

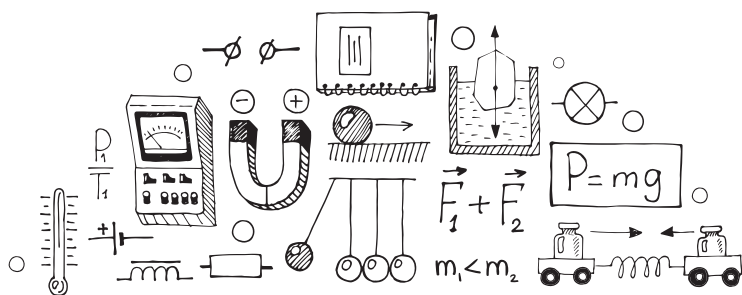


ФИЗИКА

для каждого

образованного

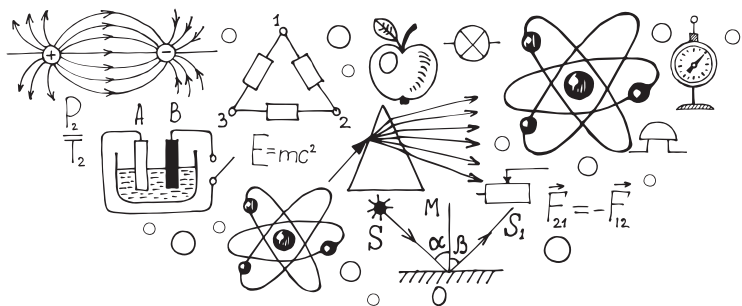
человека



ФИЗИКА

для каждого

образованного
человека



Издательство АСТ,
Москва



УДК 53
ББК 22.3
С71

Спектор, Анна Артуровна.

С71 Физика для каждого образованного человека /
А. А. Спектор. — Москва : Издательство АСТ, 2019. —
208 с.: илл. — (Всё для каждого образованного чело-
века).

ISBN 978-5-17-118144-4

Физика — это основа основ всех наук, законы, по которым существует весь наш мир и его составляющие. Названная в глубокой древности Аристотелем «наукой о движении», на протяжении столетий она смогла открыть многие законы мироздания, и исследования ученых продолжаются до сих пор. Законы гравитации и параллельные вселенные, темная материя и теория струн, лазеры и ультразвук, эффект Доплера и законы Ньютона — весь спектр достижений ученых подробно и доступно представлен на страницах данного издания.

УДК 53
ББК 22.3

© Оформление, иллюстрации
ООО «Интеджер», 2019

© ООО «Издательство АСТ», 2019

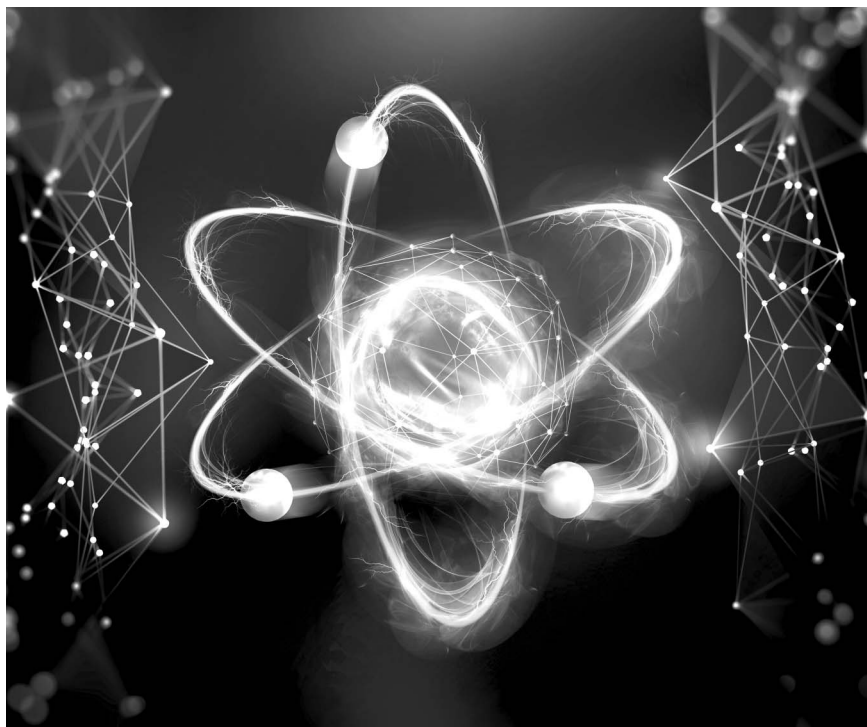
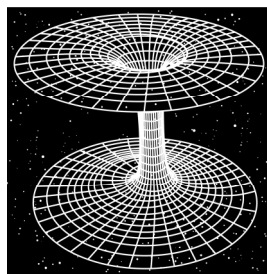
© В оформлении использованы материалы,
предоставленные Фотобанком Shutterstock,
Inc., Shutterstock.com

© В оформлении использованы материалы,
предоставленные Фотобанком Dreamstime,
Inc., Dreamstime.com

ISBN 978-5-17-118144-4

Предисловие

Физика изучает материю, ее движение и законы. Еще в глубокой древности появились первые представления об атомах и идеи о законах движения. Но настоящая классическая физика возникла только в XVII в, когда был разработан научный метод, лежащий в основе современной науки. В XX в. появилась теория относительности и были открыты законы микромира. На примере физики ясно видно, как необходимо совместное использование разных областей знаний. Физика помогла химии разобраться в природе химической связи и химических элементов. Физика больше всех других наук пронизана математикой, о которой Галилей сказал, что именно на ее языке написана книга природы. Само развитие физики послужило развитию математики, а ее успехи стали основой техники и технологий. Физические идеи и теории позволили построить паровую машину, железные дороги, автомобили, самолеты и космические корабли, телескопы, микроскопы, радио, телефоны и компьютеры. И потому образованным людям нужно разбираться в физике. Не зря Эйнштейн сказал: «Каждый интеллигентный человек, даже неспециалист, может глубоко вникнуть в современные физические проблемы. Эта драма вызывает у жаждущего понимания читателя не менее напряженное внимание, чем увлекательный роман».



КОГДА ВОЗНИКЛА НАУКА ФИЗИКА

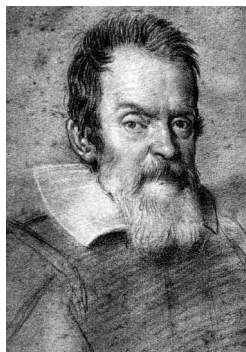
Физика исследует материальный мир, изучает фундаментальные, то есть самые общие, свойства и законы движения его объектов. Ее предмет — это пространство и время, вещество и поле, движение и силы, скорость и масса, строение атома и свойства элементарных частиц. По законам физики движутся планеты вокруг Солнца и летают космические корабли, дует ветер и идет дождь, извергаются вулканы и происходят землетрясения, а мы ходим по земле. Физика лежит в основе всего естествознания. Но вопрос, когда возникла эта наука, не так прост.

Само это слово происходит от древнегреческого φύσις — «природа». Аристотель (384—322 до н. э.) дал название «Физика» своему трактату, где исследовал движение и его причины, материю и ее формы. Он же создал логику и утверждал, что всякое знание «должно быть приобретено из опыта». Выводы Аристотеля касательно движения оказались неверными и позже были опровергнуты. Архимед (287—212 до н. э.) открыл свой знаменитый закон и многого достиг в области механики. Выдающийся инженер Герон Александрийский (вторая половина I в. н. э.) сделал несколько выдающихся изобретений и открытий. Однако долгие века физика, как и другие области естествознания, оста-

валась частью натурфилософии, в которой знания о природных явлениях сочетались с различными умозрительными рассуждениями и ошибочными выводами. Так, учение Аристотеля о движении было принято за аксиому и не оспаривалось долгие века. Поэтому считается, что физика как наука появилась чуть более четырех веков назад, в начале XVII в., когда начала воплощаться величайшая идея научного метода и создаваться новая научная картина мира. Этот период называется научной революцией. И основоположником ее признан Галилео Галилей. Это он заявил, что математика необходима для изучения природы, и предложил два принципа механики: принцип



Аристотель, впервые назвавший физикой изучение природы движения.



Галилео Галилей (1564—1642) стоит у основ современной экспериментальной физики. Во многом благодаря ему наука перешла от умозрительных рассуждений к непосредственному наблюдению природы и опытам над ней. Однако ученый постоянно обращался и к мысленному эксперименту.

СОЛНЦЕ В ЦЕНТРЕ МИРА

Первой ласточкой научной революции была книга Николая Коперника «Об обращении небесных сфер», опубликованная в 1543 г. и утверждавшая гелиоцентрическую систему мира. Поэтому многие относят начало научной революции к этому году, хотя современная физика все же появилась позже — уже при Галилее.

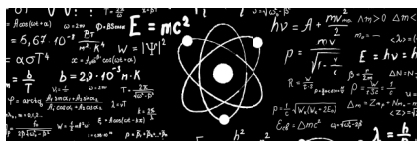


Николай Коперник (1473—1543) создал гелиоцентрическую систему мира, которую позднее защитил Галилей.

относительности и принцип постоянства ускорения силы тяжести. Галилей, опровергнув утверждение Аристотеля о перводвигателе, необходимом для всякого движения, доказал, что при отсутствии внешних сил тело будет либо покоиться, либо равномерно двигаться. Этот закон позднее был сформулирован как первый закон Ньютона. На работах Галилея, а также Кеплера основана механика Ньютона. Именно отсюда началась классическая физика, которая ныне не опровергнута, а только расширена.

ЯЗЫК, НА КОТОРОМ НАПИСАНА КНИГА ВСЕЛЕННОЙ

Галилей утверждал, что книга Вселенной открыта для нас, но понять ее можно, только постигнув ее язык и научившись толковать символы, которые она использует. Написана эта книга на языке математики, а символами ее являются геометрические фигуры, без которых человек «был бы обречен блуждать в потемках по лабиринту». Эта великая идея лежит в основе современного естествознания, и особенно физики, которая проникнута математикой больше, чем какая-либо другая наука.



ВОПРОС, ЗАДАННЫЙ ПРИРОДЕ

Научный метод — совокупность способов получения новых знаний и решения задач. Его путь идет от фактов и гипотез к теории. Факты получают с помощью наблюдений и опытов, гипотезы тоже подвергаются экспериментальной проверке. Галилей утверждал, что опыт — это не простое наблюдение, а осмысленный вопрос, который задается природе. Причем эксперимент может быть и мысленным, если его результаты несомненны. Однако опыт сам по себе не ведет к обретению достоверного знания. Ответ, который мы получили от природы, следует подвергнуть анализу, и в результате исходная модель может быть пересмотрена. Таким образом, познание включает и синтез, и анализ. Этот метод стал основой современной физики, как и всей науки.



Экспериментальная физика неразрывно связана с физической теорией и достижениями техники.

ГАЛИЛЕЙ И ПИЗАНСКАЯ БАШНЯ

Аристотель утверждал, что скорость падения зависит от веса тела. Галилей же, проведя ряд экспериментов, сделал вывод, что это не так. Он доказал, что скорость падающего тела нарастает пропорционально времени, а путь — пропорционально квадрату времени. Ученик Галилея Винченцо Вивiani написал биографию своего учителя, где рассказал, что Галилей для проверки своей теории сбросил с Пизанской башни два шара разной массы. Он обнаружил, что шары упали с одинаковым ускорением. Правда, сегодня многие ученые считают, что эксперимент Галилея был мысленным.

Независимо от того, был ли эксперимент Галилея по бросанию предметов с Пизанской башни реальным или мысленным, утверждение Аристотеля он опроверг.



ИЗМЕРЕНИЕ И ЭТАЛОНЫ, ИЛИ НЕ НАДО МЕРИТЬ НА СВОЙ АРШИН

Галилео Галилей говорил: «Тот, кто хочет решать вопросы естественных наук без помощи математики, ставит неразрешимую задачу. Следует измерять то, что измеримо, и делать измеримым то, что таковым не является». Дмитрий Иванович Менделеев также писал, что «наука начинается там, где начинают измерять. Точная наука немыслима без меры». Поэтому роль измерения чрезвычайно велика и в физике, и в технике, и, конечно, в обыденной жизни.

Существовало и существует множество единиц измерения физических величин. Они были различными в разных государствах и даже в одной стране, а преобразования между ними — сложными. Недаром возникла поговорка: «Всяк на свой аршин меряет». Постепенно созрела идея упорядочивания единиц измерения. Во время Великой французской революции во Франции начали разрабатывать новую систему мер — метрическую, основанную на десятичной системе исчисления. Для этого были введены новые меры длины, массы и объема — соответственно метр, грамм (потом килограмм), литр. Метрическая система совершеннее традиционных, потому что использует упорядоченный набор единиц измерения. Чтобы преобразовать, например, метры в сантиметры, достаточно умножить число на 100, то есть переставить запятую в десятичной дроби. Перевести же ярды в футы или дюймы гораздо сложнее.

Национальным собранием Франции в 1795 г. метр был определен как одна десятимиллионная одной четверти длины земного меридиана от Северного полюса до экватора. При этом измерялась длина Парижского меридиана, проходившего через Парижскую обсерваторию. Был также определен грамм как масса кубического сантиметра воды при температуре плавления льда. Таким образом, килограмм — это масса кубического дециметра воды. В 1799 г. эталоны метра и килограмма были изготовлены из платины и переданы в парижский архив, потому и названы архивными метром и килограммом.

Метрическая система была окончательно утверждена во Франции в 1837 г., а в 1875 г. 17 стран, в том числе и Россия, подписали Метрическую конвенцию, целью которой стала координация метрологических эталонов

для мирового научного сообщества. Для этого были созданы Международное бюро мер и весов и Генеральная конференция по мерам и весам, которая созывается раз в четыре года. К тому времени оказалось, что металлические эталоны метра можно сравнивать друг с другом с меньшей погрешностью,

100 РАЗНЫХ ФУНТОВ

Фунт — единица измерения массы, которая была принята во многих странах Европы. В Средние века каждый феодал мог устанавливать свою систему мер у себя на землях, и даже в XVIII в. в Европе имелось более 100 различных фунтов. Различия сохранялись и позже. Например, английский фунт равен 0,45359237 кг, французский — 0,489505 кг, русский — 0,40951241 кг. Метрическая система мер и Международная система единиц смогли внести в измерения упорядоченность. Сегодня существует также метрический фунт, который равен 0,5 кг.



Парижская обсерватория. Меридиан, проходящий через нее, наряду с меридианом Ферро использовался как нулевой до 1884 г. Сегодня же Западное и Восточное полушария разделяет Гринвичский меридиан, проходящий через Гринвичскую обсерваторию в Лондоне.

Эталоны мер существовали задолго до появления метрической системы. Так, в Великом Новгороде начиная с 1136 г. в церкви Ивана на Опоках хранились такие контрольные эталоны, как гривенка рублевая для взвешивания драгоценных металлов, локоть иванский для измерения длины сукна, медовый пуд для измерения массы. Медовым пуд назывался потому, что эта церковь принадлежала купеческой общине (гильдии), торговавшей воском и медом. Все купцы Новгорода должны были ежегодно сверять с эталонами свои гири и мерила.



Эталоны мер и весов в Новгородской республике контролировал архиепископ. Его избирало вече.

чем сопоставляя каждый из них с меридианом. Металлические эталоны килограмма также сравниваются между собой с большей точностью, чем с кубическим дециметром воды. К 1889 г. были изготовлены новые эталоны из платиново-иридиевого сплава, которые с тех пор хранятся в Международном бюро мер и весов в Севре. Но Международная система единиц (СИ) продолжала и продолжает подвергаться ревизии. Сегодня она основывается на следующем принципе: основные единицы должны основываться не на артефактах, созданных человеком, а на свойствах атомов или фундаментальных физических постоянных. Поэтому находящийся в Севре эталон метра имеет сегодня лишь историческое значение. Еще с 1961 г. метр определяется как длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ с. Эталон

килограмма действует до сих пор, но его хотя бы привязать к одной из физических констант — постоянной Планка.

ТОЧНОСТЬ, БЕЗ КОТОРОЙ НЕ БЫЛО БЫ ОТКРЫТИЙ

Средства измерения — это и измерительные приборы, и меры, и измерительные преобразователи. Измерительные приборы необходимо калибровать по эталону, чтобы они давали минимальную погрешность. Чем точнее средство измерения, тем больше открытий можно сделать с его помощью. Например, увеличив точность измерения плотности воды, в 1932 г. оказалось возможным открыть дейтерий — тяжелый изотоп водорода.

СИСТЕМА СИ

Сегодня практически во всем мире, кроме США, Либерии и Мьянмы, действует Международная система единиц (СИ — Le Système International d'Unités, SI). Она основана на международной системе физических величин, в которой одни величины являются независимыми, а другие — их функциями. Основных физических величин и соответствующих им единиц семь: длина (единица — метр), масса (килограмм), время (секунда), электрический ток (ампер), термодинамическая температура (кельвин), сила света (кандела), количество вещества (моль).

Единицы физических величин.



Секунда



Метр



Кельвин



Килограмм



Ампер



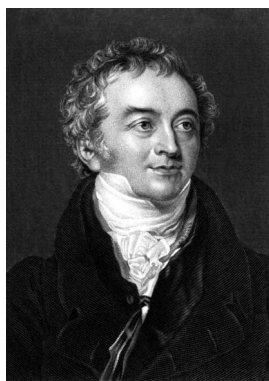
Кандела



Моль



Годфрид Вильгельм Лейбниц (1646—1716) ввел понятие «живая сила». Сегодня, после важного уточнения, внесенного Кориолисом в формулу Лейбница, так называют кинетическую энергию.



Томас Юнг (1773—1829), английский ученый, который впервые ввел понятие механической энергии в современном понимании. Гравюра Генри Адларда с картины Томаса Лоуренса.

ЭНЕРГИЯ — ОСНОВА ВСЕЛЕННОЙ

Одно из фундаментальных понятий физики — это энергия, мера движения и взаимодействия всех видов материи. Идея энергии включена во множество физических законов и теорий. А как природное явление энергия является основой существования самой Вселенной. Один из главных законов физики — это закон сохранения энергии, который, в свою очередь, является одним из фундаментальных законов сохранения.

Впервые термин «энергия» использовал Аристотель, он понимал под энергией еще не заверщенное движение. Лейбниц в XVII в. предложил понятие «живая сила». Он определил ее как произведение массы на квадрат скорости. Теперь под ней понимают удвоенную кинетическую энергию. Лейбниц верил, что живая сила сохраняется.

ОДИН ЗАКОН — РАЗНЫЕ ФОРМУЛИРОВКИ

В различных областях физики закон сохранения энергии формулируется по-разному. Например, в термодинамике он звучит так: «Изменение внутренней энергии термодинамической системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил над системой и количества теплоты, переданного системе». При этом оно не зависит от способа, посредством которого осуществляется этот переход. Этот закон называется также первым началом термодинамики. Однако в любой формулировке этот закон отражает главное — однородность времени. Это означает, что физические законы в одних и тех же условиях, но в разное время наблюдения проявляются одинаково.

НЕКОТОРЫЕ ВИДЫ ЭНЕРГИИ

Ядерная энергия (атомная энергия) — это энергия, содержащаяся в атомных ядрах и выделяемая при ядерных реакциях.

Гравитационная энергия — потенциальная энергия системы тел (частиц), обусловленная их взаимным тяготением.

Электромагнитная энергия — энергия, характеризующая взаимодействие электрических зарядов, магнитных полей и фотонов.

Химическая энергия — вид потенциальной энергии, которая запасена в химических связях.

ЭНЕРГИЯ ВОЗМОЖНОСТИ



В качестве примера взаимодействия частей одного тела можно привести пружину. Сжата она или же растянута, в ней возникает сила упругости. В результате пружина возвращается в исходное состояние. Но до возвращения она обладает потенциальной энергией, или возможностью совершить движение. Пружина имеет одну, и взаимодействуют между собой ее части, которые перемещаются относительно друг друга.

В современном смысле термин «энергия» впервые использовал Томас Юнг в 1807 г. Дело в том, что, как ни странно, долгое время живая сила считалась абстракцией, математическим термином, не важным для практики. И это несмотря на то, что существовало множество механизмов, работавших с ее использованием. Однако распространение паровых двигателей потребовало разработки новых понятий и формул для описания работы этих механизмов. И инженеры, и физики, и математики высказывались в том смысле, что способность совершать определенные действия, то есть работа, связана с живой силой системы. Связь между работой и живой силой раскрыл Гаспар-Гюстав Кориолис в 1829 г. Он предложил считать живой силой величину, равную половине произведения массы на квадрат скорости. Он говорил, что «если ранее наименование «живая сила» давалось произведению массы на квадрат скорости, то это было потому, что не уделялось внимания работе».

Сам термин «кинетическая энергия» ввел Уильям Томпсон, будущий лорд Кельвин, именем которого потом называли абсолют-

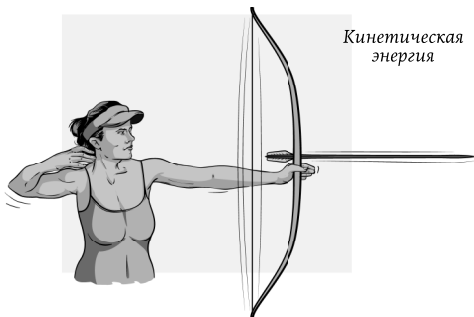
ную шкалу температур. Произошло это не позднее 1851 г. А понятие потенциальной энергии ввел Уильям Ренкин в 1853 г.

Итак, энергия — это физическая величина, определяющая способность тела (или системы тел) совершить работу. Иными словами, чем большая энергия имеется у тела, тем большую работу оно способно совершить. В механике принято различать два вида энергии — кинетическую и потенциальную. Кинетическая энергия обусловлена движением тел и обозначается формулой $E = mv^2/2$, где m — масса, v — скорость. Потенциальная энергия обусловлена взаимодействием тел, их взаимным расположением и выражается формулой $E = mgh$, где m — масса, g — ускорение силы тяжести, h — высота над поверхностью Земли. Проще говоря, потенциальная энергия — это возможность совершить работу, кинетическая же — энергия, которой обладают тела вследствие совершения работы (своего движения). Чтобы найти энергию тела, нужно определить работу, которая необходима для перевода тела в данное состояние из такого, в котором энергия равна нулю.

Потенциальная энергия



Кинетическая энергия



При натягивании лука стрела обладает потенциальной энергией, у летящей стрелы энергия переходит в кинетическую.

Приведем простой пример. Когда мы подбрасываем мяч, мы придаем ему энергию. При полете вверх его кинетическая энергия (энергия движения) расходуется и уменьшается. Потенциальная же энергия увеличивается и достигает максимума в самой верхней точке. Используя эту потенциальную энергию, мяч падает вниз. При этом потенциальная энергия уменьшается, а кинетическая по мере приближения к земле растет.

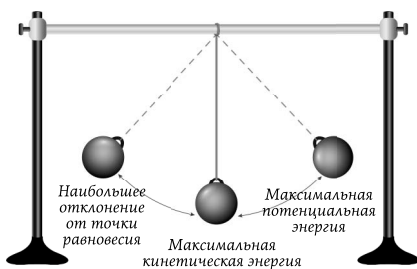
Таким образом, потенциальная и кинетическая энергии переходят одна в другую, но их сумма, которая называется полной механической энергией системы, остается неизменной. Это и есть закон сохранения энергии, принятый в классической механике.



Чем больше скорость тела в данный момент и его масса, тем большей кинетической энергией оно обладает.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИКЕ

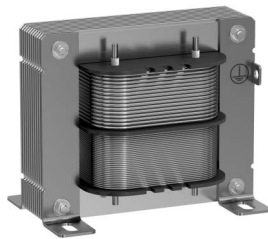
Классический пример справедливости закона сохранения энергии — это действие пружинного или математического маятника, чье затухание пренебрежимо мало. Когда пружинный маятник имеет груз, в крайних его положениях потенциальная энергия деформированной пружины достигает максимума. Затем она переходит в кинетическую энергию груза и достигает максимального значения, когда груз проходит положение равновесия.



Полная механическая энергия замкнутой системы тел, между которыми действуют только консервативные силы, работа которых не зависит от формы траектории, остается постоянной.

КПД

Энергетические характеристики движения вводятся на основе понятий работы и мощности. Работой, совершаемой постоянной силой F , называется физическая величина, равная произведению модулей силы и перемещения, умноженному на косинус угла между векторами силы F и перемещения S . Мощность — это работа силы, совершаемая в единицу времени. Очень важен КПД (коэффициент полезного действия), который равен отношению полезной работы к затраченной либо же полезной мощности к затраченной. В принципе, КПД характеризует, насколько эффективно работает машина или механизм в отношении преобразования либо передачи энергии. Поскольку энергия постоянно уходит на трение, нагревание окружающих тел и другое, КПД всегда меньше единицы. Его выражают в долях затрачиваемой энергии. Так, КПД тепловых электростанций достигает примерно 35—40%, двигателей внутреннего сгорания с наддувом и предварительным охлаждением — 40—50%, динамомашин и генераторов большой мощности — 95%.



КПД трансформаторов может достигать 98%.

КАК ПРЕОБРАЗУЕТСЯ ЭНЕРГИЯ

И в природе, и в технике постоянно осуществляется переход из одного вида энергии в другой. Энергия солнечного света в результате фотосинтеза превращается в химическую энергию органических веществ, запасаемых растением. Та же солнечная энергия, согревая Землю и всех живущих на ней, переходит во внутреннюю энергию тел, находящихся на поверхности земли. На гидроэлектростанциях механическая энергия водного потока преобразуется в электрическую, а в тепловых электростанциях химическая энергия топлива становится механической энергией вращения вала электрогенератора, а затем электрической энергией. Это говорит о том, что энергия, несмотря на столь различные источники и определения, обладает единым свойством — способностью совершать работу и неразрывно связана с важнейшим свойством нашего мира — движением.

ЛОШАДИ ПОД КАПОТОМ

Долгие тысячелетия источником механической энергии служила мускульная сила людей и животных, главным образом лошадей. Поэтому изобретатель универсальной паровой машины Джеймс Уатт решил показать, что его устройство способно заменить много лошадей. Он вычислил, на что способна одна лошадь, и ввел единицу мощности — лошадиную силу. В современных единицах измерения одна лошадиная сила требуется, чтобы поднять груз в 75 кг на высоту 1 м за 1 с. Лошадиные силы очень долго использовались в технике, пока их не заменили метрическими единицами — ваттами, названными в честь изобретателя.



ПОЧЕМУ НЕВОЗМОЖЕН ВЕЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Изобретатели в течение многих веков не раз пытались осуществить идею вечного двигателя. Вечный двигатель первого рода — это машина, которая должна постоянно совершать работу без поступления энергии из дополнительных источников. Но закон сохранения энергии в применении к машинам и механизмам говорит о том, что энергия не может ни возникать, ни исчезать, а может быть только преобразована в другие виды энергии или работу. А поскольку работа превращается в энергию, и наоборот, для машин и механизмов закон сохранения энергии может быть записан следующим образом: Работа на входе = Работа на выходе + Потери на трение. Ведь в реальных (а не идеальных) машинах часть энергии теряется из-за трения и потерь тепла. Поэтому вечный двигатель невозможен.



Вечный двигатель первого рода — это воображаемое устройство, которое вырабатывает полезную работу в большем количестве, чем количество сообщенной этому устройству энергии. Согласно закону сохранения энергии, точнее первому началу термодинамики, подобное невозможно.

ВЕЗДЕСУЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

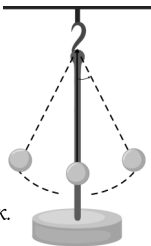
Теория колебаний создавалась многими учеными. Что неудивительно — эти процессы присущи всем явлениям природы и постоянно используются на практике. Это и движение маятника, и колебания частиц, составляющих жидкости и газы, и колебания электромагнитных волн — все процессы, при которых движения части системы или ее состояния регулярно повторяются во времени. Ученые различают колебания и волны: при колебаниях передается вещество, при волнах — энергия. Максимальное значение, которое принимает колебательная система, называется амплитудой колебаний.

Колебания, которые протекают из-за внешнего периодического воздействия, называются вынужденными. Это и колышущаяся под ветром листва, и движение наших рук и ног при физических упражнениях. Свободными, или собственными, колебаниями называются такие, которые происходят под воздействием внутренних сил уже после того, как система выведена из равновесия. В реальных условиях свободные колебания всегда затухающие. Это, например, колебания груза, прикрепленного к пружине или нити. Колебания, при которых у системы имеется запас потенциальной энергии, расходу-

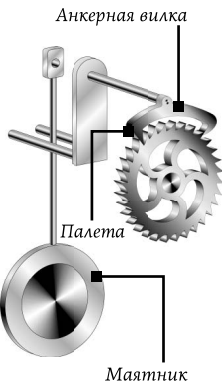
ющийся на их совершение, называются автоколебаниями. Такие автоколебания происходят в механических часах. В кварцевых часах колебательная система основана на кристалле кварца, что дает намного большую точность хода, чем в механических. Если частота вынуждающей силы оказывается равна или кратна частоте собственных колебаний системы, то амплитуда колебаний резко возрастает — и возникает резонанс. Это явление впервые описал в 1602 г. Галилей при исследовании маятников и музыкальных струн. С помощью резонанса можно выделить и усилить самые

МАЯТНИК

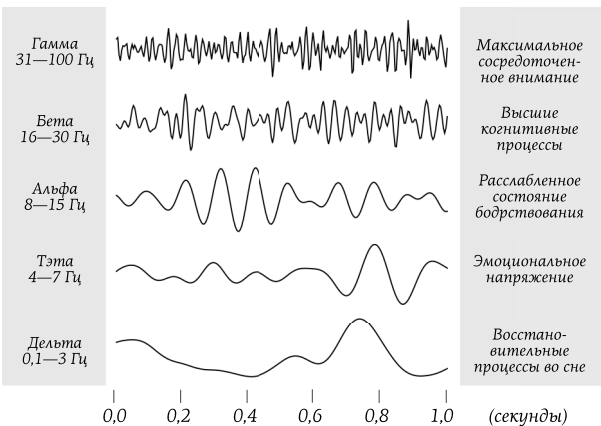
Маятник — это система, которая подвешена в поле тяжести и совершает механические колебания под действием сил тяжести, упругости и трения. Однако силами трения можно во многих случаях пренебречь, а от сил упругости или тяжести абстрагироваться.



Маятник.



Часовой механизм с маятником.



Электрические колебания мозга человека.

слабые периодические колебания, что и обуславливает его широкое применение в различного рода резонаторах. Но, с другой стороны, резонанс способен привести к необратимым разрушениям в самых разных системах. Поэтому его изучение так важно.



Чтобы предотвратить механический резонанс в подвеске вагонной тележки, в ней устанавливают две параллельные пружины с разной жесткостью.

РЕЗОНАНС ДЛЯ РАЗВЛЕЧЕНИЯ

Самая наглядная и известная механическая резонансная система — качели. Раскачивая качели согласно их резонансной частоте, можно увеличить размах движения. В противном случае движения начнут затухать.



ТАЙНЫ ГИТАРНЫХ СТРУН

Струны музыкальных инструментов — скрипки, гитары, фортепьяно — обладают основной резонансной частотой, которая напрямую зависит от силы натяжения струны, ее длины и массы. Усиливая натяжение струны, уменьшая ее толщину и длину, можно увеличить ее резонансную частоту. Если придать струне колебание кратким воздействием — ударом молоточка или щипком пальцев, то она начнет колебание на всех частотах, которые присутствуют в приданном ей импульсе. Но частоты, которые не совпадают с резонансными, очень быстро затухнут, и услышим мы лишь гармонические колебания, то есть музыкальные ноты.



Струны издадут гармонические колебания — такие, которые происходят по закону синуса или косинуса, так называемому гармоническому закону.

ПОЧЕМУ НЕЛЬЗЯ ХОДИТЬ ПО МОСТУ В НОГУ

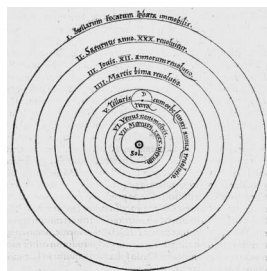
В середине XIX в. близ французского города Анжур произошла трагедия. По мосту проходил отряд солдат. Вдруг мост стал раскачиваться и обвалился. Двести двадцать шесть человек погибли на месте. Виной всему оказался резонанс. Солдаты шли в ногу, и частота их шага совпала с собственной частотой колебания моста. Они раскачали мост, как дети раскачивают качели. Размах колебаний моста оказался выше допустимых пределов прочности, и мост развалился. С этих пор солдатам всякий раз приказывают «сбить ногу» при входе на мост.



Известно несколько достоверных сообщений о разрушении мостов в результате резонанса.

СОЛНЦЕ И ПЛАНЕТЫ: ВЕЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Идеям о том, как устроен мир, многие тысячи лет. Уже в Древней Греции существовали геоцентрические системы, которые помещали в центр мира Землю, и гелиоцентрические системы, где в центре мира было Солнце. В Средневековье господствовал геоцентризм, но в 1543 г. Коперник создал гелиоцентрическую систему. Иоганн Кеплер открыл законы движения планет, доказав правоту Коперника, в то же время уточнив и исправив некоторые его положения. Позднее Ньютон доказал правильность этих законов, дополнив их и открыв закон всемирного тяготения.



*Изображение
гелиоцентрической
системы в книге
Коперника.*

Полтора тысячелетия в Европе господствовала геоцентрическая система в варианте Клавдия Птолемея. Чтобы объяснить движение планет, он ввел сложную систему эпициклов. Он считал, что вокруг Земли движется некоторая воображаемая точка, описывая окружность, — деферент. Вокруг этой точки вращается планета, описывая свою окружность — эпицикл. Причем эпициклов приходилось вводить несколько, иначе невозможно было объяснить различные явления природы. Об этой системе король Кастилии Альфонсо X Мудрый, живший в XIII в., заметил, что он предложил бы Богу придумать что-нибудь попроще.

Такой теорией оказалась система Коперника. Коперник поставил в центр мира светило, точнее центр земной орбиты. Планеты, в том числе и Земля, вращались вокруг него по окружностям. За ними находилась сфера неподвижных звезд. Коперник не отказался от эпициклов, но сумел вычислить периоды обращений планет, расстояния от них до

СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

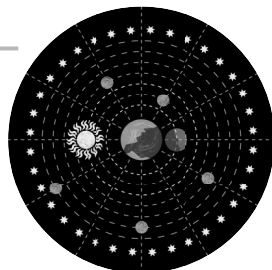
Система отсчета — это совокупность системы координат и системы отсчета времени, связанных с телом отсчета, относительно которого совершается движение. Геоцентрическая и гелиоцентрическая картины мира (точнее, Солнечной системы) отличаются системой отсчета. Геоцентрическая система рассматривается в системе отсчета, связанной с Землей, а гелиоцентрическая — в системе отсчета, связанной с Солнцем. Последняя гораздо проще и удобнее объясняет окружающий мир.

Солнца и объяснил так называемые попятные движения.

Математический аппарат, который использовал Коперник, оценили сразу: это был прекрасный инструмент для расчета движений планет, реформы календаря. А система

СПАСЕНИЕ ЯВЛЕНИЙ

Спасение явлений — термин, возникший еще в Древней Греции. Это фиксация наблюдаемых данных. То есть теория должна хотя бы частично воспроизводить наблюдаемые данные, быть эмпирически адекватной. Геоцентрическая система Птолемея эту задачу некоторое время выполняла, и с ее помощью можно было предсказывать сложные движения планет.

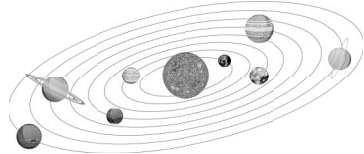


Геоцентрическая система была для своего времени выдающимся достижением человеческой мысли и применялась на практике.

мироздания вызвала споры и возражения, потому что она явно противоречила церковному учению и принятой системе Птолемея. Многие старались найти компромисс между двумя системами. Так, датский астроном Тихо Браге (1546—1601) был сторонником геогелиоцентрической системы мира, согласно которой Земля находится в центре мира, вокруг нее обращаются Солнце и Луна, а известные тогда планеты — Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн — вращаются вокруг Солнца. Но именно многолетние астрономические наблюдения Тихо Браге позволили Иоганну Кеплеру вывести три закона движения планет, которые внесли важнейший вклад в развитие гелиоцентрических идей. Особенно помогли Кеплеру многолетние наблюдения Тихо Браге за планетой Марс. Он пришел к выводу, что планеты движутся не по круговым орбитам, а по эллиптическим, что вносило уточнение в гелиоцентрическую систему. Кеплер не делал точных расчетов, его выводы были чисто эмпирическими, но оказались верными. Теоретическое обо-

ТРИ ЗАКОНА КЕПЛЕРА

1. Каждая планета Солнечной системы обращается по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.
2. Каждая планета движется в плоскости, проходящей через центр Солнца, при этом радиус-вектор (то есть направленный отрезок, соединяющий Солнце и планету) за равные промежутки времени описывает равные площади. Чем ближе планета к солнцу, тем быстрее она вращается, чем дальше она от светила, тем меньше ее скорость.
3. Квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей орбит планет. Этот закон также называют законом гармонии.



И планеты, и Солнце, строго говоря, обращаются вокруг общего центра масс, который находится внутри Солнца.

снование им дал Исаак Ньютон, открывший закон всемирного тяготения и обобщивший законы Кеплера. Они справедливы не только для движения планет, но и для любых тел, в том числе искусственных спутников Земли.



Памятник Тихо Браге и Иоганну Кеплеру в Праге.

НЕБЕСНЫЙ ЗАМОК

Тихо Браге прославился своими высокоточными астрономическими наблюдениями. На датском острове Вен он построил обсерваторию, которую назвал Ураниборг, в честь музы астрономии. Двадцать лет ученый работал в Ураниборге, потом переехал в Прагу, где стал придворным астрологом и математиком при дворе императора Священной Римской империи Рудольфа II. Браге пригласил в Прагу Кеплера, так как ему нужен был математик для обработки данных. После смерти датского астронома в 1601 г. Кеплер получил его инструменты и данные наблюдений.

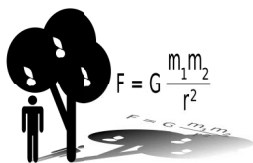


На острове Вен, сейчас принадлежащем Швеции, располагалась обсерватория Ураниборг, которая была разрушена после того, как король изгнал Тихо Браге с острова.

РАЗНАЯ СКОРОСТЬ ЗЕМЛИ

Перигелием называется ближайшая к Солнцу точка орбиты планеты. Афелием называется самая дальняя от него точка. В перигелии скорость Земли больше, чем в афелии, в 1,00339 раза, примерно на 1 км/с.

ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ: ПРИЛИВЫ И РАКЕТЫ



Существует легенда, что мысль о законе всемирного тяготения пришла Ньютону в голову, когда он увидел падающие яблоки.



Исаак Ньютон (1642—1727), великий английский ученый, создавший основы классической механики.

Закон всемирного тяготения Ньютона описывает гравитационное взаимодействие в рамках классической механики. Ньютон открыл этот закон примерно в 1666 г., работал над ним много лет и опубликовал только в 1687 г. Позднее он был обобщен и уточнен в общей теории относительности Эйнштейна.

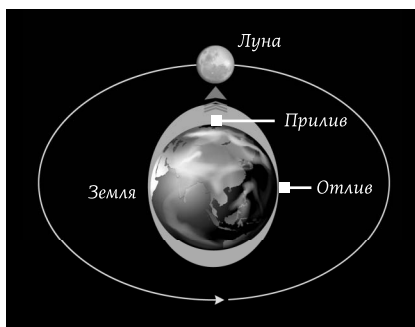
Закон всемирного тяготения говорит, что сила гравитационного притяжения между двумя материальными точками прямо пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. В формулу вводится гравитационная постоянная G , она характеризует гравитационное поле — силовое поле тяготения. Численно она равна модулю силы тяготения, действующей между двумя точечными телами, которые находятся друг от друга на расстоянии 1 м, если масса каждого равна 1 кг. Закон всемирного тяготения фундаментален: он

ОТКУДА ЛУЧШЕ ЗАПУСКАТЬ РАКЕТЫ

Сила притяжения тел к Земле называется силой тяжести. Одно из ее обозначений — $F = mg$, где g — ускорение силы тяжести. Эта величина зависит от массы планеты, ее радиуса, высоты над ее поверхностью, залежей полезных ископаемых и географической широты. Поэтому на полюсах $g = 9,83 \text{ м/с}^2$, а на экваторе — $9,79 \text{ м/с}^2$ (среднее значение — $9,81 \text{ м/с}^2$). И с экватора легче запускать ракеты в космос — топливо экономится на 10% по сравнению со средней полосой. К тому же, на экваторе можно выгоднее использовать энергию вращения Земли.

ПРИЛИВЫ И КАРАНДАШИ

Между Землей и Луной существует взаимное притяжение. Земля удерживает Луну на своей орбите, а притяжение Луны проявляется в приливах и отливах. Но закон всемирного тяготения верен для всех тел. Два карандаша тоже притягивают друг друга. Однако массы их настолько малы, что при подстановке в формулу всемирного тяготения получится очень маленькая величина. Отклонений от закона всемирного тяготения не обнаружено и на очень малых расстояниях, от 55 мкм до 9,53 мм.



Ньютон, исходя из закона всемирного тяготения, объяснил приливы и отливы притяжением Луны.

ЧЕЛОВЕК, ВЗВЕСИВШИЙ ЗЕМЛЮ

Генри Кавендиш в 1797—1798 гг. экспериментально доказал справедливость закона всемирного тяготения. На нити из посеребренной меди он подвешивал коромысло с двумя свинцовыми шарами и подводил к ним два других шара, более крупных. Гравитационное взаимодействие малых и больших шаров отклоняло коромысло на небольшой угол. Благодаря этому Кавендиш сумел определить плотность Земли, а затем ее массу. Она оказалась $5,97219 \times 10^{24}$ кг. Позднее опыты Кавендиша помогли численно определить значение гравитационной постоянной. Она, по современным данным, составляет $6,67408(31) \times 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$.



Кавендиш справедливо утверждал, что сумел взвесить Землю.

проявляется, когда планеты движутся вокруг Солнца, когда мы ходим по Земле, когда космические аппараты летят по своим орбитам. Поэтому он постоянно применяется и в космонавтике, и в других областях. Идею всеобщей силы тяготения не раз высказывали до Ньютона, однако именно он создал целостную модель, которая включает закон всемирного тяготения, закон движения, или второй закон Ньютона, и математический аппарат (дифференциальное и интегральное исчисления). Исаак Ньютон показал, что движение планет говорит о существовании центральной силы. Благодаря ей небесные тела движутся по эллипсам, параболам или гиперболам. Таким образом, законы Кеплера в уточненном и обобщенном виде выводятся из закона всемирного тяготения.

Однако эта блестящая модель не позволяет объяснить некоторые противоречия, связанные с тяготением. Впоследствии оказалось, что закон всемирного тяготения выполняется при скоростях, гораздо меньших скорости света, и в таких системах, где гравитационный потенциал не очень велик, например

в Солнечной системе. Вообще же теория Ньютона — частный случай или приближение общей теории относительности.

СИЛА ТЯЖЕСТИ И ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

Для измерения силы тяжести создали особые приборы — гравиметры. Они широко используются при поиске полезных ископаемых. К примеру, над залежами мрамора сила тяжести ниже, а над плотными рудными породами, например свинцовыми, выше. Зная это, можно обойтись без дорогостоящего бурения.

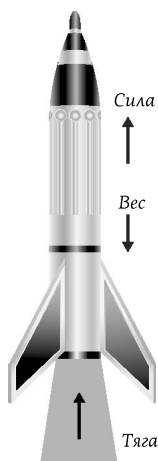


Минералы обладают разной плотностью, что приводит к изменению показаний гравиметра.

ПРЕОДОЛЕНИЕ ТЯГОТЕНИЯ

Преодолевая силу тяготения Земли и других небесных тел, космический корабль развивает определенную скорость. Для выхода на орбиту планеты требуется первая космическая скорость. Для Земли она равна 7,9 км/с. Чтобы покинуть ее орбиту, нужна вторая космическая скорость. Для Земли $V_2 = 11,2$ км/с. Чтобы улечь из Солнечной системы, необходима третья космическая скорость — 16,6 км/с. При неблагоприятных условиях придется разогнаться до 72,8 км/с. Четвертая космическая скорость понадобится, чтобы покинуть пределы Галактики. Она не меньше 217 км/с — скорости движения Солнца вокруг центра Галактики. Точнее сказать невозможно: мы не знаем, как в Галактике распределяется вещество.

ИНЕРЦИЯ: ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА



Первый закон
Ньютона.

Движение тел подчиняется законам динамики, отнесенным к отделу механики. Эти фундаментальные законы природы вывел Ньютон на основе работ своих великих предшественников, создав основы классической механики. Всего их три, причем первый закон сегодня, в современной формулировке, постулирует очень важный принцип — существование инерциальных систем отсчета и называется также законом инерции.

В своей книге «Математические начала натуральной философии» Исаак Ньютон сформулировал первый закон механики в следующем виде: всякое тело продолжает удерживаться в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно

не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

Ньютон имел в виду абсолютно неподвижную систему отсчета, то есть абсолютные пространство и время. Абсолютное про-

странство, по Ньютону, — это чистое и неподвижное вместилище тел, а абсолютное время — чистая длительность и абсолютная равномерность событий. Современная физика эти концепции не признает. И закон инерции выполняется только в определенных условиях, которые необходимо специально оговорить. Поэтому современная формулировка звучит так: существуют такие системы отсчета, называемые инерциальными, относительно которых материальные точки, когда на них не действуют никакие силы (или действуют силы взаимно уравновешенные), находятся в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения.

Понятие инерциальных систем отсчета ввели специально, чтобы определить условия,

ИНЕРЦИЯ И ИНЕРТНОСТЬ

Инерция — это свойство, благодаря которому тело сохраняет скорость своего движения неизменной, когда на него не действуют никакие силы. Но одинаковые по величине силы влияют на различные тела с разными результатами, то есть тела обладают различной инертностью. Инертность — свойство тел сопротивляться изменению их скорости, своего рода лень. Инертность характеризуется массой. Чем больше масса тела, тем больше инертность. Яблоко, лежащее в поезде на столе, после резкой остановки поезда покажется по инерции. Эти термины, такие как масса и сила, необходимо упомянуть уже в связи с первым законом Ньютона, по-настоящему они вводятся при объяснении второго закона Ньютона.

МАССА И ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ

Машина не сразу остановится после выключения двигателя или после торможения, так как действует сила инерции. Однако инертность, то есть масса машины, не влияет на тормозной путь. Да, чем тяжелее машина, тем, кажется, труднее снизить скорость. Но у тяжелой машины шины сильнее прижимаются к дороге, лучше с ней сцепляются, тем самым тормозные возможности увеличиваются. Эти эффекты компенсируют друг друга, и в итоге масса не оказывает влияния на длину тормозного пути.

*На тормозной путь
влияют многие
факторы,
но не масса.*



КОГДА СИЛЫ КОМПЕНСИРУЮТСЯ

Движение парашютиста после раскрытия парашюта может служить примером выполнения первого закона Ньютона. Когда он приближается к Земле, сила натяжения строп, обусловленная сопротивлением воздуха, компенсирует действие силы тяжести. Спуск оказывается равномерным. В действительности тут возможны и другие воздействия, например сила ветра.



Идеально равномерный спуск парашюта в реальности невозможен, но иногда дополнительными воздействиями можно пренебречь.

где выполняется первый закон Ньютона. Таким системам свойственно равномерное движение. Все другие системы отсчета (которые вращаются или движутся с ускорением) называют неинерциальными. Но и в них движение можно описывать с помощью тех же уравнений, что и в инерциальных, только с учетом сил инерции.

Инерциальная система отсчета идеальна, в реальности на тело всегда действуют какие-то неуравновешенные внешние силы, даже в глубоком космосе всегда обнаруживаются слабые воздействия небесных тел. Но гелиоцентрическую систему, началом координат в которой является Солнце, можно считать инерциальной. Система отсчета, которая связана с Землей, строго говоря, является неинерциальной, поскольку Земля вращается вокруг своей оси и вокруг Солнца. Но при

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Система, связанная с Землей, инерциальна только в приближении. Ее неинерциальность проявляется в поведении маятника Фуко. Это массивный шар, который подвешен на длинной нити и совершает около положения равновесия малые колебания. Если бы связанная с Землей система была инерциальной, то плоскость качаний маятника Фуко относительно Земли никогда не изменялась бы. Однако вследствие вращения Земли плоскость качания поворачивается и проекция траектории этого маятника на поверхности Земли напоминает розетку.



Маятник Фуко доказывает, что Земля вращается вокруг своей оси, и, значит, система, связанная с ней, неинерциальна.

решении множества задач этими неинерциальными эффектами можно пренебречь, и поэтому ее можно принять за инерциальную. Также инерциальной в приближении можно считать систему, в которой поезд движется с постоянной скоростью по прямому участку пути. Таким образом, первый закон Ньютона в реальном мире всегда действует с оговорками, самой важной из которых, входящей в определение, является инерциальность систем отсчета.

МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА

Материальная точка, или частица, — это тело, которое обладает массой. Однако его размерами, формой, вращением и внутренней структурой можно пренебречь в условиях конкретной задачи.

УСКОРЕНИЕ: ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

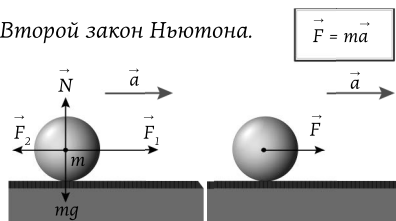
Второй закон Ньютона связывает силу, массу и ускорение, то есть изменение скорости. Эту идею высказывал еще Галилей в 1632 г. Ньютон обобщил выводы Галилея, подверг их математическому доказательству и включил в число основных законов движения. Масса, как известно, количественная характеристика инертности, она показывает, каким образом тело реагирует на внешние воздействия. Сила же представляет собой количественную меру воздействия одного тела на другое.

В классической формулировке второй закон Ньютона выглядит следующим образом: изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

Современная формулировка, использующая понятия материальной точки и инерциальной системы отсчета, звучит так: в инерци-

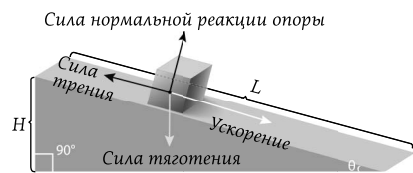
альной системе отсчета ускорение, которое получает материальная точка с постоянной массой, прямо пропорционально равнодействующей всех приложенных к ней сил и обратно пропорционально ее массе.

Второй закон Ньютона.



ДВА ЗАКОНА В ОДНОМ

Когда на тело действует несколько сил, то ускорение его оказывается таким, как если бы на него действовала одна сила, которая равна их геометрической сумме. Эту сумму называют равнодействующей. Если же она оказывается равной нулю, то тело останется в покое или будет продолжать равномерное движение. Таким образом, мы приходим к первому закону Ньютона, который оказывается частным случаем второго закона. Однако физическое содержание первого закона более глубокое, потому что он говорит об инерциальных системах отсчета. А их наличие — условие выполнения всех законов Ньютона.



На тело, движущееся с ускорением по наклонной плоскости, действует несколько сил, и при использовании формулы второго закона Ньютона необходимо учитывать их геометрическую сумму.

ПРИДАЕМ УСКОРЕНИЕ

Из формулы, демонстрирующей второй закон Ньютона, видно, что ускорение обратно пропорционально массе. Чем меньше масса, тем больше ускорение. Если мы с одинаковой силой оттолкнем от берега пустую и нагруженную лодки, то первая, легкая, будет двигаться с большим ускорением, вторая, тяжелая, — с меньшим. Чем больше масса поезда, тем с меньшим ускорением ее разгонит электровоз. А с приложенной силой все наоборот. Чем больше сила, тем больше ускорение. Зная эти закономерности, можно решить немало задач о движении.



Чем сильнее вы ударяете ракеткой по мячу, тем большее ускорение ему придаете и тем большую скорость позволяете ему развить.

Чем больше приложенная к телу сила (точнее, сумма сил), тем большее ускорение оно приобретает, а чем массивнее это тело, тем меньше ускорение. В виде формулы второй закон записывается так:

$$F = ma,$$

где F — сила, m — масса, a — ускорение. Отсюда видно, что ускорение обратно пропорционально массе, то есть чем больше масса, тем меньше получается ускорение при приложении определенной силы.

И если знать направление и интенсивность всех действующих на точку (тело) сил, а также ее координаты и скорость, можно предсказать ее будущее состояние. Закон позволяет вычислить ускорение тела, если известна его масса m и действующая на тело сила.

Такая концепция существовала в науке более двухсот лет, пока не появилась квантовая механика.

ДТП И СТРЕЛЬБА

После дорожно-транспортных происшествий необходимо знать, какой была скорость автомобиля перед аварией. Это можно определить при помощи второго закона Ньютона. Его же можно применить для определения давления пороховых газов при выстреле и для решения других подобных практических задач.



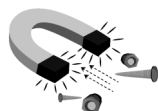
Сила трения
лыж о снег



Сила тяготения,
воздействующая
на парашютиста
в свободном падении



Сила упругости
пружины



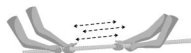
Магнитная сила



Сила, приложенная
человеком
к тележке



Сила тяги
парашютных строп



Сила натяжения нити



Подъемная сила

Некоторые силы,
воздействующие на тела.

ВЕС ИЛИ МАССА?

Обычно мы говорим, что какой-то предмет весит столько-то килограммов. Но килограмм — единица массы, значит, мы имеем в виду не вес, а массу. Вес же — сила, действующая на опору. С массой он связывается по формуле $F = mg$, что является частным случаем второго закона Ньютона, и единицей его является ньютон (Н). А ускорение силы тяжести g на разных планетах разное:

- на Земле — $9,81 \text{ м/с}^2$;
- на Луне — $1,62 \text{ м/с}^2$;
- на Венере — $8,88 \text{ м/с}^2$;
- на Юпитере — $23,95 \text{ м/с}^2$.

И поэтому наш вес на разных планетах тоже будет отличаться. Например, при массе 73 кг на Земле мы будем весить около 716 ньютонов, на Луне около 118 , на Венере около 648 , на Юпитере — 1748 ньютонов. А масса всегда будет одинаковой.



Вес на Земле —
 716 Н



Вес на Луне —
 118 Н



Масса —
всегда и везде
 73 кг

Разный вес — одинаковая масса.

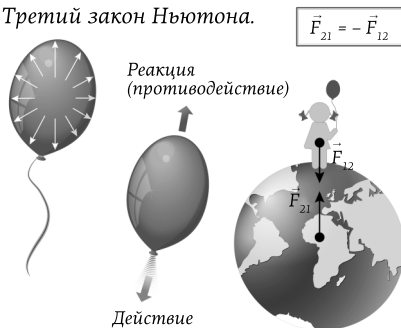
ДЕЙСТВИЕ РАВНО ПРОТИВОДЕЙСТВИЮ: ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Третий закон Ньютона рассказывает о взаимодействии между телами (материальными точками). Силы в природе неизбежно возникают парами. Если возникает одна сила, то непременно возникнет вторая, противоположно направленная. Причем обе эти силы — одной природы.

ЖЕЛЕЗО И МАГНИТ

К третьему закону Ньютон пришел благодаря любопытному эксперименту. Он вырезал две деревянные лодочки, в одну положил намагниченный железный брусок, в другую — брусок из простого железа такой же массы, пустил их в таз с водой и развел в стороны. При этом лодочку с железом он отпустил, а лодочку с магнитом придержал на месте. Железный брусок под действием магнита заставил свою лодочку приплыть к «магнитной». Это было понятно: магнит притянул железо. Однако ученый продолжил эксперимент. Он опять развел свои кораблики в стороны и на этот раз придержал тот, в котором был железный брусок. Но лодочка с магнитом, пущенная в свободное плавание, поплыла к «железной». Получилось, что не только железо притягивалось к магниту, но и магнит притягивался к железу. Ньютон снова разместил лодочки по сторонам таза и на этот раз отпустил обе. Они двинулись навстречу друг другу, столкнулись посередине «водоема» и остановились. Это подтвердило, что магнит и железо притягивают друг друга с одинаковой силой. Действие магнита сталкивается с противоположно направленным и равным противодействием железа. Таким образом, здесь имеет место взаимодействие тел. И потому третий закон Ньютона можно справедливо назвать законом взаимодействия.

Третий закон Ньютона.



Ньютон в своем фундаментальном труде сформулировал третий закон следующим образом: действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны.

Сегодня он звучит так: материальные точки взаимодействуют друг с другом силами, имеющими одинаковую природу, направленными вдоль прямой, соединяющей эти точки, равными по модулю и противоположными по направлению.

Иными словами, согласно этому закону, любая сила является результатом взаимодействия сил.

Однако массы взаимодействующих тел могут сильно отличаться по величине. Когда с дерева падает яблоко, не только Земля притягивает его, но и оно притягивает Землю, и ее центр смещается вверх, ему навстречу. Но ничтожно мало — всего лишь на расстояние меньше атомного ядра. Ведь масса Земли, а значит, и ее инертность, несопоставимо больше массы яблока.

Поезд, идущий по рельсам, отталкивает Землю, а она отталкивает его. Но, опять же, массы поезда и Земли настолько различны, что воздействие его просто незаметно. Если же массы двух тел одинаковы, то проявление третьего закона будет впол-

КАК ПРАВИЛЬНО ВЫПРЫГИВАТЬ ИЗ ЛОДКИ

Если вы хотите выпрыгнуть на берег из лодки, вспомните про третий закон Ньютона. Стоит вам оттолкнуться и прыгнуть, лодка «ответит» — тут же отойдет назад, и вы окажетесь в воде. Чтобы этого избежать, попросите сидящего в лодке товарища упереться веслом в дно.

Чтобы безопасно выбраться из лодки, ее надо «зафиксировать» и не дать выполнить третий закон динамики.



СИЛЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФУНДАМЕНТ

Грунт, в который уложен фундамент здания, не находится в движении, однако на него действуют определенные силы. Прежде всего на него давит само здание. Грунт может противодействовать тяжести здания около $2\text{--}3\text{ кг/см}^2$. Сопротивление грунта оказывает противодействие. Таким образом действие и противодействие сжимают фундамент сверху и снизу. Он остается неподвижным, но если запас прочности окажется недостаточным, то фундамент разрушится. Поэтому при проектировке и строительстве необходимо его учитывать.



Фундамент должен быть настолько прочен, чтобы выдерживать давление сверху и снизу.

не наглядным. Представим себе легкую и длинную тележку, движущуюся по рельсам с очень небольшим трением. Если на тележку встанет человек той же массы и побежит по ней вперед, тележка под его воздействием откатится назад.

СЕКРЕТЫ БЕГОВЫХ ДОРОЖЕК

Беговые дорожки на стадионах покрывают материалами, дающими наилучшее сцепление с обувью спортсмена. Издавна для этого использовали кирпичную крошку или гарь — отходы от сгорания угля в паровых котлах. Гарь не позволяет ногам скользить, уплотняется, пропускает воду и почти ее не впитывает. Вдавливаясь в поверхность дорожки, шипы обуви обеспечивают трение и возможность твердо поставить ногу. Такие дорожки называются гаревыми. Подобный же эффект дают современные покрытия из тартана — резиновой крошки.



Главное в беговой дорожке — хорошее сцепление со спортивной обувью.

Этот закон проявляется повсеместно. Когда мы идем, то действуем на дорогу, а дорога — на нас. Мы толкаем землю, а она толкает нас. Если бы между нами и землей не было взаимодействия, то мы не могли бы тронуться с места, а только безрезультатно перебирали



При проектировании опор моста необходимо учитывать, в какой степени они могут оказывать противодействие возможной нагрузке, и рассчитать ее. Опоры действуют на мост снизу, а нагрузка оказывает на них давление сверху согласно третьему закону Ньютона.

КАК ПОДНЯТЬСЯ ПО СТОЛБУ

Телеграфные столбы и опоры линий электропередач иногда служат наглядным свидетельством выполнения третьего закона Ньютона. Происходит это тогда, когда линии требуется ремонт, и по столбу необходимо взобраться. Способ сделать это был найден уже давно: связисты и электромонтеры используют так называемые кошки. Каждая кошка представляет собой железную дугу с острыми зубцами и маленькой площадкой для ноги. Эти приспособления напоминают два серпа.

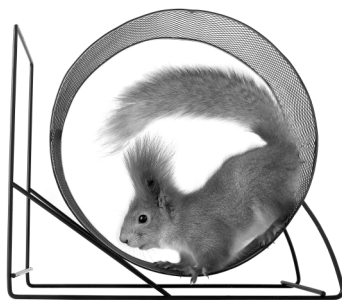
Монтер, прикрепив к ботинкам кошки, вонзает одну из них в столб. Ее шипы плотно врезаются в бетон или дерево. Монтер переносит тяжесть своего тела на кошку, а сам при этом крепко держится руками за столб. Одновременно он вонзает в столб вторую кошку, причем так, чтобы она оказалась выше первой. Затем переносит тяжесть своего тела на вторую кошку и вонзает первую выше нее. Таким образом монтер поднимается по столбу, как по лестнице. Острые зубцы дают его ногам хороший упор, обеспечивая прекрасное взаимодействие со столбом. А это соответствует третьему закону Ньютона. Если бы не было взаимодействия, то подняться по столбу не могли бы ни кошки, ни какие-либо другие приспособления.

бы ногами. Поэтому чем лучше взаимодействие, тем удобнее нам идти. Иначе говоря, нога должна иметь хороший упор. Слабый упор у глины, песка, льда. Хороший — у кирпичной и резиновой крошки. Для наилучшего взаимодействия с дорогой на подошве спортивной, да и повседневной обуви делают толстые кожаные рубцы или шипы. Это помогает быстро бежать либо спокойно идти по скользкой поверхности.

С машинами поступают так же: чтобы обеспечить хорошее сцепление с дорогой, гусеницы тракторов снабжают шипами, а протекторы автомобильных шин делают узорчатыми. Но это не всегда помогает. Шины нередко теряют сцепление с грязной или скользкой дорогой, и автомобиль пробуксовывает. Чтобы избежать этого, водители обматывают колеса цепями. У современных грузовых автомобилей имеются две ведущие оси, и они всеми четырьмя колесами цепляются за дорогу, обладая хорошей проходимостью. Таким образом, взаимодействие между дорогой и колесами наглядно демонстрирует выполнение третьего закона Ньютона.

Этот закон, как и все законы Ньютона, проявляется также в водной и воздушной среде. Все существа и машины, которые движутся в воде: рыбы, водоплавающие птицы, киты и дельфины, гигантские лайнеры и маленькие лодки и, конечно, люди-пловцы — гребными винтами, ластами, плавниками, руками и ногами отталкивают назад воду, а сами плывут вперед. Все, что летает: самолеты, птицы, летучие мыши, насекомые — точно так же отталкивают воздух, чтобы лететь вперед. Разумеется,

Третий закон Ньютона прекрасно иллюстрируют... белки. Как же это происходит? В природе, на воле, эти зверьки постоянно двигаются, прыгая с ветки на ветку, а порой и с дерева на дерево. В доме другое дело, тут зверек может заболеть, если будет мало двигаться. И уже очень давно была придумана игрушка — беличье колесо. Оно сделано наподобие барабана на оси. Внутрь запускают белку (или другого мелкого зверька), она бежит вперед, а колесо, реагируя на ее движение, поворачивается в противоположном направлении. Чем быстрее бежит белка, тем быстрее вертится колесо. Белка занимается физкультурой, люди наблюдают за забавной зверушкой, а вся конструкция явно показывает, что действие равно противодействию.



Бег белки приводит к движению колеса в противоположном направлении.

на них действуют и другие силы, но без ньютоновского взаимодействия полет был бы невозможен.

Вообще, тела при своем движении нередко наглядно демонстрируют действия всех трех законов. Например, при запуске ракеты на нее действует сила реактивной тяги и она поднимается (согласно третьему закону Ньютона), причем с ускорением (согласно второму закону Ньютона), а выйдя на орбиту, начинает двигаться по ней согласно первому закону Ньютона.

Итак, при расчетах необходимо помнить все три закона динамики. Они представ-

ляют собой прекрасное воплощение идеи движения и взаимодействия всех тел, составляющих нашу Вселенную. И хотя теория относительности и квантовая механика позволили, пожалуй, глубже проникнуть в тайны материи, классическая механика, чьи законы выполняются в очень широком диапазоне, позволяет объяснить и предсказать закономерности движения планет, их естественных и искусственных спутников. На Земле она используется для объяснения течения воды, расчета движения транспортных средств, играет огромную роль в технике и просто обычной жизни.

ДВА ВИНТА ВЕРТОЛЕТА

Вертолет, в отличие от самолета, способен подниматься вертикально вверх. Подъемную силу ему дает несущий винт. Однако вращение такого винта, согласно третьему закону Ньютона, должно приводить к вращению корпуса в противоположную сторону, что превратит машину в настоящую карусель. Чтобы избежать этого, либо ставят над первым винтом второй, вращающийся в противоположную сторону, либо устанавливают рулевой винт на хвосте. Он, кроме собственно маневрирования, не дает корпусу раскручиваться, нейтрализуя движение несущего винта.

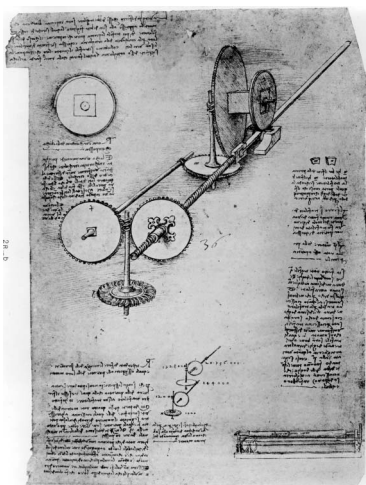


Винты вертолета, вращаясь, должны препятствовать движению фюзеляжа. Тогда вертолет будет хорошо держаться в воздухе.

ТРЕНИЕ В ДВИЖЕНИИ И ПОКОЕ

Силами трения мы сталкиваемся постоянно. Трение, или фрикционное взаимодействие, имеет место тогда, когда тела взаимодействуют друг с другом при относительном кручении или смещении, а также когда тело тормозится в жидкой среде. Процессы трения, а также изнашивания и смазки изучает очень молодая наука — трибология, основанная в 1964 г. Она описывает контактное взаимодействие деформируемых тел при их относительном перемещении. Однако законы трения и их практическим применением физика занималась гораздо раньше. И, конечно, их учитывали на практике уже много веков.

Уже в 2400 г. до н. э. в Древнем Египте перевозили каменные скульптуры на деревянных салазках с применением смазки. Об этом свидетельствует изображение, найденное египтологами, а также расчеты, проведенные современными специалистами-трибологами. Смазочный материал, вероятно, делали из нильского ила с добавлением оливкового масла. В Китае в III в. до н. э. в одном из первых навигационных приборов — «колеснице, указывающей на юг» — применялись железные втулки в деревянных рамах, чтобы избавиться от трения железного вала по дереву. Римляне использовали для снижения трения роликовые подшипники. В Средние века применяли зубчатые передачи и подшипники, которые также снижали трение. Например, такие механизмы использовались при строительстве мельницы в Бокеле около 1200 г. и при конструировании часов на одном из соборов Уэльса в 1392 г.



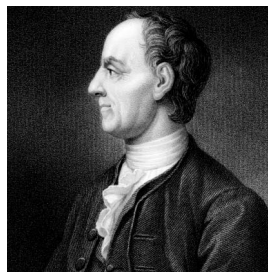
Один из эскизов Леонардо да Винчи.

В эпоху Возрождения огромный вклад в появление новых идей, касающихся трения, внес Леонардо да Винчи. Он утверждал, что сила трения, которая возникает при контакте тела с поверхностью другого тела, не зависит от площади контакта, направлена против движения и пропорциональна нагрузке, то есть силе, с которой предметы прижимаются друг к другу. Он также установил, что качение выгоднее скольжения, а точечный, или линейный, контакт важнее контакта по площади. Среди его рисунков можно найти эскизы различных подшипников и зубчатой передачи, предназначенной для преобразования вертикального движения во вращательное и для поднятия грузов. Шарикоподшипники, которые, как выяснил Леонардо, позволяют снижать трение, очень широко используются в настоящее время. На заре классической науки идеи трения, смазки и износа занимали умы все большего



Трение возникает благодаря шероховатости поверхностей и взаимодействию их молекул, оно связано также с силами электрического взаимодействия.

Леонард Эйлер (1707—1783), швейцарский, немецкий и российский математик и механик. Внес существенный вклад в науку. В числе прочего, предложил форму эвольвенты как наиболее совершенную для производства зубчатых колес. Это усовершенствование позволило снизить силы трения и повысить КПД в зубчатой передаче.



ЗУБЧАТАЯ ПЕРЕДАЧА И ТРЕНИЕ

Зубчатая передача — механизм, в состав которого входят зубчатые колеса. Точнее, ведущее колесо называют шестерней, а ведомое — зубчатым колесом. Этот механизм предназначен для передачи вращательного движения между валами, а также для преобразования вращательного движения в поступательное, и наоборот. Усилия от одного элемента к другому передаются посредством зубьев. Число зубьев в сопряженных зубчатых колесах стараются делать взаимно простым. Взаимно простыми называются числа, не имеющие общих делителей, например 14 и 25. В таком случае каждый зуб одного колеса поочередно работает со всеми зубьями сопряженного колеса. Это обеспечивает равномерность износа всех зубьев. Чтобы уменьшить трение скольжения, зубчатые колеса изготавливают с эвольвентным зацеплением. (Эвольвента — траектория движения точки, которая принадлежит прямой, перекатывающейся без скольжения по окружности.) При этом преобладает трение качения, а трение скольжения оказывается низким. Это увеличивает КПД механизма.



Зубчатые передачи.

числа ученых. Так, Роберт Гук в 1680 г. изучил закономерности трения качения, Исаак Ньютон в 1687 г. определил вязкость как меру внутреннего трения жидкостей, а Гийом Амонтон в 1699 г. переоткрыл и подтвердил законы, о которых говорил да Винчи.

Почти век спустя, в 1781 г., Шарль Кулон дал этому закону окончательную формулировку. Амонтон и Кулон ввели такое понятие, как коэффициент трения, то есть отношение силы трения к нагрузке. Этот коэффициент превратился в физическую константу, которая полностью определяет силу трения для любой пары вступивших в контакт материалов. Закон Амонтона—Кулона устанавливает линейную связь между поверхностной силой трения, которая возникает при относительном скольжении тел, и силой нормальной реакции, которая действует на тело со стороны поверхности.

Этот закон описывается следующей формулой:

$F = \mu N$, где F — сила трения скольжения, μ — коэффициент трения, N — сила нормальной реакции опоры.

Она фигурирует во всех учебниках физики, а значения коэффициента трения для разных материалов включены в технические справочники и являются основой для инженерных расчетов. Тем не менее коэффициенты трения зависят не только от самих материалов, но и от того, насколько гладко они обработаны. Кроме того, следует учитывать, что Кулон исследовал силу трения, возникающую, когда контактирующие тела медленно перемещаются друг относительно друга либо неподвижны. Впоследствии выяснилось, что сила статического трения (трения покоя) отличается от силы трения при движении. Для подтверждения этого можно описать простой эксперимент. Если прикрепить к какому-либо телу трос

ВНЕШНЕЕ И ВНУТРЕННЕЕ, СУХОЕ И ЖИДКОСТНОЕ — РАЗНООБРАЗИЕ ТРЕНИЯ

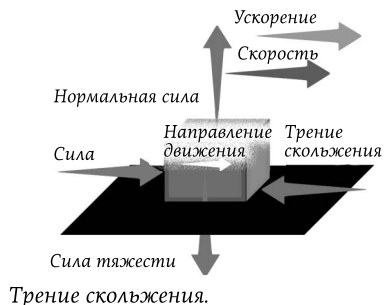
Внешнее трение возникает при относительном перемещении двух твердых тел. К нему относятся трение скольжения и трение покоя.

Внутреннее трение имеет место при относительном перемещении частей одного и того же тела, в частности жидкости или газа.

Сухое трение наблюдается при полном отсутствии смазки между взаимодействующими телами, но такие случаи на практике встречаются очень редко. Существует также сухое трение с сухой смазкой, например с графитовым порошком. Жидкостное трение встречается, когда твердое тело погружено в жидкость, а граничное возникает, когда в области контакта имеются слои различной природы. От вязкости среды, куда погружено тело, зависит вязкое трение. Если же относительные скорости перемещения двух тел, разделенных смазкой, возрастают, появляется сила вязкоупругого трения.

ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

Сила трения скольжения возникает, когда одно из тел совершает поступательное движение относительно другого. Она действует на перемещающееся тело в направлении, противоположном скольжению. Трение скольжения может быть и сухим, и жидкостным, но наиболее частый его случай — граничное трение.



с пружинным динамометром и немного потянуть этот трос, тело останется на месте, так как сила, которую развивает пружина динамометра, окажется недостаточной, чтобы преодолеть силу трения, возникающую между телом и поверхностью, на которой оно лежит. Однако если потянуть за трос сильнее, то тело тронется с места. Показание динамометра, зарегистрированное в этот момент, как раз и отражает силу статического трения. Сила трения, которая действует в дальнейшем, при медленном движении тела обычно будет меньше силы статического трения.

Таким образом, законы трения достаточно сложны. Не менее важны для теории трения идеи, связанные со смазочными материалами. Конечно, масло и даже вода использовались для снижения трения уже давно. Так, в XVII в. в Китае говорили, что одна капля масла в подшипник делает готовый к использованию повозку, тысяча капель — корабль.

Тем не менее наука о смазках получила бурное развитие только в конце XIX в. Первую теорию смазки предложил в 1886 г. английский ученый Осборн Рейнольдс.

Если слой смазки достаточно велик, чтобы исключить непосредственный контакт между трущимися поверхностями, то силу трения определяет только гидродинамика этого слоя. Когда смазки мало, то действуют также и другие силы, в том числе сила, определяемая формулой Амонтона — Кулона. Значение смазочных материалов

ТРИБОМЕТРИЯ В ДЕЙСТВИИ

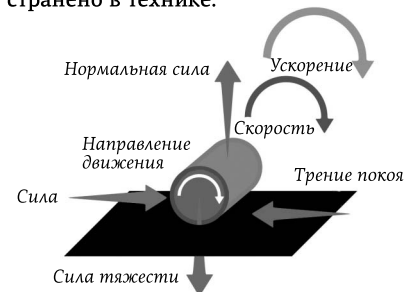
Поскольку трение приводит к снижению КПД у большинства механизмов, а для его уменьшения применяют различные смазки и тонкие пленки, важное значение приобретают методы измерения сил трения, несущей способности взаимодействующих тел и износа механизмов. Этим занимается трибометрия. Измерения при тестировании сил трения производятся непосредственно во время фрикционного взаимодействия. Благодаря этому можно рассчитать интенсивность изнашивания, допустимые нагрузки, температуру, скорость, коэффициент трения.

растет постоянно с совершенствованием техники. Одновременно развиваются идеи изучения трения и износа. Надо отметить, что процессы трения включают сложные физико-химические механизмы и полностью законами классической механики их описать невозможно. Поэтому ими и занимается специальная наука — трибология.

ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ

Трение качения — это момент сил, возникающий, когда одно тело перекатывается относительно другого. Оно относится к внешнему трению. Можно сказать, что это сопротивление качения одного катка по опорной поверхности. Появляется оно потому, что каток и опорная поверхность подвергаются деформации. Трение имеет место между элементами подшипников качения. Оно возникает всякий раз между колесом, точнее, шиной, и дорожным полотном при движении автомобиля. Сила трения качения в основном имеет место при жидкостном трении, когда взаимодействующие тела разделяет твердый, жидкий или газообразный слой. Если твердое тело погружено в жидкость, то величину вязкого трения характеризует вязкость среды. Когда относительные скорости перемещения возрастают, наибольшим значением обладает внутреннее трение в материале смазки, и возникает сила вязкоупругого трения.

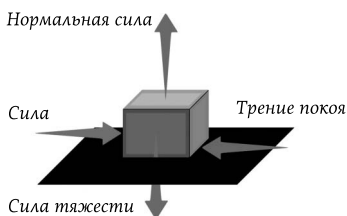
При прочих равных величина трения качения намного меньше, чем величина трения скольжения. Именно поэтому качение чрезвычайно распространено в технике.



Трение качения.

ТРЕНИЕ ПОКОЯ

Трение покоя — сила, которая возникает между двумя вступившими в контакт телами, она препятствует появлению относительного движения и, соответственно, действует в противоположном направлении. Ее называют также силой сцепления. Эту силу необходимо преодолеть для того, чтобы привести два контактирующих тела в движение относительно друг друга. Именно сила трения покоя имеет место при деформации контактирующих тел. Существует она между гвоздем и стенкой, в которую он забит, между подошвами обуви и ступенью эскалатора. Чтобы начать движение, эту силу необходимо превозмочь.



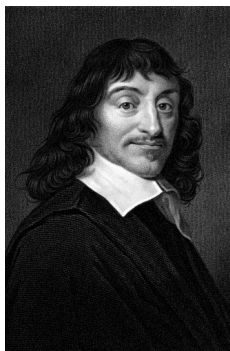
Трение покоя.

ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ В ПОДШИПНИКАХ

Трение качения присутствует в подшипниках. Подшипник представляет собой сборочный узел, который поддерживает ось, вал или другую подвижную конструкцию. Он фиксирует расположение в пространстве, а также обеспечивает линейное перемещение, качение или вращение. Механизм состоит из двух колец и тел качения. На кольцах имеются дорожки, по которым тела качения и движутся. Чаще всего эти тела разделяются сепаратором. Подшипники хороши тем, что потери на трение скольжения в них очень малы.



КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ



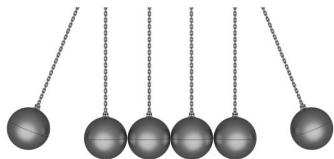
Идее движения несколько тысяч лет, но само понятие «количество движения» ввел Рене Декарт в 1644 г. Он предположил, что количество движения сохраняется не только для одного тела, которое изолировано от внешних воздействий, но и для всякой системы тел, которые взаимодействуют только друг с другом. В то время еще не устоялось современное понятие массы, и, согласно Декарту, количество движения — это произведение величины тела на скорость. Однако он учитывал только величину скорости, но не ее направление.

Рене Декарт (1596—1650), французский математик, физик, философ и физиолог, впервые высказавший идею о количестве движения.

Импульс, или количество движения, — это векторная физическая величина, которая представляет собой меру механического движения тела. В классической механике импульс тела равен произведению массы этого тела на его скорость, направление импульса совпадает с направлением вектора скорости. В релятивистской механике в формулу добавляется скорость света.

КОЛЫБЕЛЬ НЬЮТОНА

Импульс одного тела может передаваться другому при их взаимодействии. Так, если подвесить на тонких нитях несколько одинаковых шариков и отвести один из них в сторону, то после столкновения первый шар остановится, а последний придет в движение. При этом высота подъема последнего шара будет равна высоте, на которую отклонили первый шар. Следовательно, первый шар отдаст последнему весь свой импульс через средние шары, которые останутся неподвижными.



Устройство, которое носит название колыбель Ньютона, демонстрирует сохранение импульса и закон сохранения энергии.

СВОЙСТВА ИМПУЛЬСА

Аддитивность. Импульс механической системы, которая состоит из материальных точек, равен сумме импульсов всех материальных точек, входящих в систему.

Инвариантность. Импульс неизменен по отношению к повороту системы отсчета.

Сохранение. Импульс остается неизменным при взаимодействиях, изменяющих лишь механические характеристики системы.

В 1668 г. Джон Валлис впервые предложил считать скорость направленной, то есть векторной, величиной и в 1670 г. окончательно сформулировал закон количества движения и привел экспериментальное доказательство. Оказалось, что благодаря новому закону можно рассчитывать неупругие удары и вообще удары в любых системах отсчета. Теоретическое доказательство этого закона привел Исаак Ньютон через свои третий и второй законы.

Закон сохранения импульса, или закон сохранения количества движения, звучит следующим образом: векторная сумма импульсов всех тел есть величина постоянная в том случае, когда векторная сумма внешних сил, действующих на систему тел, равна нулю. Если же применяется внешнее воздействие, то скорость изменения импульса определяется суммой приложенных сил.

СИЛА ОТДАЧИ

Отдача оружия — это движение орудия в сторону, обратную выстрелу. Но скорость его, конечно, не равна скорости пули. В момент выстрела пуля приобретает скорость и импульс одного направления, в то время как ружье — противоположного. И, согласно закону сохранения импульса, скорость ружья оказывается во столько раз меньше скорости пули, во сколько раз масса ружья больше массы пули. Оружие не убьет стрелка, но удар он все же ощутит. Поэтому для борьбы с отдачей используют, например, дульный тормоз, который поглощает импульс пороховых газов, вырывающихся из ствола вслед за пулей, либо направляет его назад или в сторону.

В классической механике закон сохранения импульса считается следствием законов Ньютона и выводится как их следствие. Его применяют при расчетах действия реактивных аппаратов, взрывов, скоростей тел при соударениях, при проектировании вооружения, ковке металлов и забивании свай. Однако он справедлив и для квантовой механики, и для теории относительности. Это фундаментальный закон природы, связанный с одной из фундаментальных симметрий физики — однородностью пространства.

ПРИРОДНЫЕ РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Реактивное движение, при котором действует закон сохранения импульса, используется многими моллюсками — осьминогами, кальмарами, каракатицами. Кальмар может с помощью реактивной тяги (выпуская воду из мантии) развивать скорость до 60 км/ч. Есть это движение и у растений. Так, если прикоснуться к созревшему плоду «бешеного огурца», то он отскакивает от плодоножки и семена с силой выбрасываются из образовавшегося отверстия на расстояние от 6 м. Огурец же отлетает в противоположном направлении.



Головоногие моллюски являются живым подтверждением закона сохранения импульса, который был выведен из идеи о количестве движения.

РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ: ОТ ВОЗДУШНОГО ШАРИКА ДО РАКЕТЫ

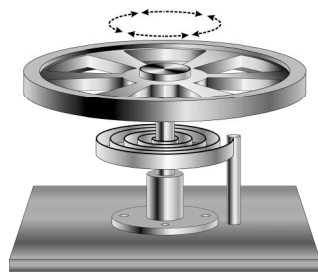
На законе сохранения импульса основано реактивное движение. Оно возникает, когда от тела с некоторой скоростью отделяется его часть. Так, если надуть резиновый шарик, то и его скорость, и скорость воздуха будут равны нулю, и импульс тоже будет равен нулю. Если отпустить шарик, не завязывая его, то воздух начнет выходить из него в одном направлении, а сам шарик полетит в другую сторону. По этому же принципу устроены и ракеты, и огнестрельное оружие.

Реактивный двигатель преобразует внутреннюю энергию топлива в кинетическую энергию реактивной струи рабочего тела. Рабочее тело истекает из двигателя с большой скоростью, и, согласно закону сохранения импульса, создается реактивная сила, которая толкает двигатель в противоположном направлении.



ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

В физике скорость вращения задает угловая частота, частота или период. Угловая частота равняется модулю вектора угловой скорости. Изменение во времени угловой частоты — угловое ускорение. Оно вызывается моментом силы. Отношение момента силы к угловому ускорению — это момент инерции.



Вращательное движение широко используется в различных механизмах.

Таким же фундаментальным законом природы является закон сохранения момента импульса. Момент импульса (который называют также угловым, кинетическим, орбитальным моментом или моментом количества движения) характеризует количество вращательного движения.

Тело, которое вращается вокруг своей оси, при отсутствии тормозящих сил будет про-

ПРЕИМУЩЕСТВА НАРЕЗНОГО ОРУЖИЯ

Нарезное оружие дает лучшую прицельность и большую дальность, чем гладкоствольное, поскольку уже в стволе пуле или снаряду придается вращательное движение. Выпущенный из орудия артиллерийский снаряд вращается вокруг своей продольной оси, и полет его является устойчивым согласно закону сохранения момента импульса. Нарезы могут иметь как правое, так и левое вращение. При правом направлении нарезов пуля будет отклоняться вправо, а при левом — влево. Это так называемое отклонение на деривацию. Но его легко учесть и скомпенсировать. Так, тяжелые пули меньше отклоняются деривацией, в остальном же на качество боя направление нарезов не влияет.



Нарезное оружие позволяет стрелять с большей точностью, чем гладкоствольное.

должать вращение. Его момент импульса прямо пропорционален массе тела и его линейной протяженности. Тело может также вращаться не вокруг собственного центра массы, а вокруг удаленного от него некоего центра вращения. В этом случае у него также имеется вращательный момент импульса.

Закон сохранения момента импульса формулируется так: в том случае, если результирующий момент внешних сил относительно неподвижной точки тождественно равен нулю, момент импульса тела относительно этой точки не изменяется с течением времени.

Во всех случаях, чем дальше от оси вращения основная масса тела, тем выше будет момент инерции, который здесь представляет собой аналог инерционной массы в законе сохранения импульса.

Примеров сохранения импульса можно найти немало. Например, это фигуристка, которая выполняет фигуру вращения, ускоряясь. Она начинает вращаться медленно, раскинув руки и ноги широко, а затем прижимает их ближе к туловищу, «собирая» массу тела ближе к оси вращения. При этом момент инерции уменьшается, угловая скорость возрастает, а момент количества движения, которого она достигла при первоначальном разгоне, сохраняется.

Чтобы изменить момент импульса, нужно приложить силу извне, однако с некоторыми условиями. Например, если поставить велосипед колесами вверх и раскрутить одно из них, можно снизить угловую скорость его вращения, но только если сила будет приложена к его окружности, а не к оси вращения. Таким образом, для изменения момента импульса необходим момент силы. Это сила, приложенная по направлению, которое отличается от направления

НЕИЗБЕЖНАЯ ПРЕЦЕССИЯ

Прецессия возникает тогда, когда момент импульса изменяет свое направление в пространстве. Ее можно наблюдать, запустив волчок. Сначала его ось вращения вертикальна, но при замедлении постепенно отклоняется от вертикали и описывает конус. Это называется прецессией. Интересно, что она безинерционна. Если вызвавшая ее сила исчезнет, прекратится прецессия и волчок вновь встанет вертикально. Но на Земле это невозможно, ведь прецессию здесь вызывает сила тяготения.



ЦИРК И МЕХАНИКА

Сохранение момента импульса используется в цирковом искусстве. Когда жонглер подбрасывает вверх свои булавы, мячи, тарелки, он придает им вращение. Только тогда эти предметы вернутся ему в руки в первоначальном положении.

Жонглер постоянно использует закон сохранения момента импульса.



ВОЛЧОК И НАВИГАЦИЯ

Пример гироскопа — обычный волчок. В технике же это массивное, быстро вращающееся вокруг вертикальной оси колесо. Оно закреплено на раме, которая поворачивается вокруг горизонтальной оси, закрепленной в другой раме, которая способна двигаться вокруг третьей оси. Специальные датчики снимают сигнал, как гироскоп ориентирован относительно этих рам. Благодаря этому прибор постоянно указывает заданное направление, независимо от того, на какой угол повернулись подводная лодка, самолет или спутник.



Искусственные спутники Земли оснащены несколькими независимыми гироскопами, которые вращаются в разных плоскостях. Бортовая электроника, сопоставляя данные нескольких гироскопических компасов, точно определяет координаты и ориентацию спутника в околоземном пространстве.

оси вращения, и на некотором удалении от нее. Если момент силы приложен в плоскости, отличающейся от плоскости, в которой вращается тело, то в результате воздействия направление оси вращения изменится. Если же внешних воздействий нет, то направление оси вращения не изменится. На этом принципе основаны навигационные гироскопические приборы.

ОПОРА ДЛЯ ГИРОСКОПА

Карданов подвес — это шарнирная опора, позволяющая закрепленному в ней объекту вращаться одновременно в нескольких плоскостях. Вращающееся тело, закрепленное в карданов подвес, сохраняет направление оси вращения независимо от ориентации самого подвеса.

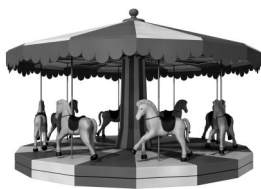
СИЛА, ЗАКРУЧИВАЮЩАЯ ВИХРИ

Использовать законы классической механики относительно неинерциальных систем отсчета можно, учитывая силы инерции. Одной из них является сила Кориолиса. Идею этой силы предложили, чтобы объяснить движение материальной точки относительно вращающейся системы отсчета. Добавив силу Кориолиса к другим физическим силам, действующим на такую точку, можно учесть, насколько вращение системы влияет на подобное движение.



Гаспар-Гюстав де Кориолис (1792—1843), французский математик, физик и инженер.

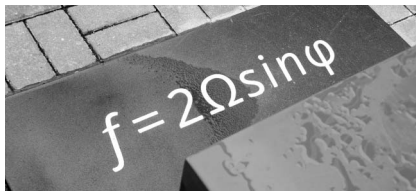
Впервые эту силу описал французский ученый Гаспар-Гюстав Кориолис в 1835 г. Если в инерциальной системе отсчета материальная точка в равномерном движении вдоль радиуса равномерно же вращается вокруг перпендикулярной к нему оси, вектор ее скорости направлен от центра вращения. С увеличением расстояния компонента скорость, направленная перпендикулярно радиусу, увеличивается. Это и есть ускорение Кориолиса. В неинерциальной системе отсчета скорость материальной точки изменяется и ускорение Кориолиса равно нулю. Следовательно, имеется сила, компенсирующая его и направленная противоположно ему. Это и есть сила Кориолиса, внешняя относительно любого движения системы материальных тел и не подчиняющаяся третьему закону Ньютона. Ее называют фиктивной силой, однако ее проявления обнаружить можно. Например, если человек идет к центру вращающейся карусели, то, с его собственной точки зрения, он совершает работу против центробежной силы. Его будет сносить вбок, а это есть воздействие силы Кориолиса. Противодействуя этой силе, он раскручивает карусель. При движении от центра центробежная сила совершает работу над человеком, а он будет противодействовать силе Кориолиса и тормозить карусель.



Действие силы Кориолиса можно проиллюстрировать, рассматривая движение человека по карусели.

КАК ИЗНАШИВАЮТСЯ РЕЛЬСЫ

В разных полушариях направление силы Кориолиса отличается. Это можно видеть на железных дорогах. Так, в Северном полушарии она по ходу движения смещает поезд вправо, и реборды колес на правой стороне поезда сильнее прижимаются к правым рельсам, чем к левым. На однокорейках, где поезда ходят в двух направлениях, влияние силы Кориолиса одинаково скажется на состоянии рельсов. Однако на двухкорейных дорогах, где движение по каждой колее всегда однонаправленно, правые по ходу движения рельсы изнашиваются всегда больше, чем левые. В Южном полушарии все наоборот. На экваторе же сила Кориолиса при движении вдоль меридиана отсутствует, а в других случаях направлена вертикально вверх, так что подобного эффекта там нет.



Параметр Кориолиса учитывает угловую скорость вращения Земли вокруг собственной оси ω и географическую широту места φ . Направление силы Кориолиса меняется на противоположное при переходе через экватор.

Существенна сила Кориолиса при движении воздуха и океанических вод. Она воздействует на возникновение инерционных волн масштабом до десятков километров, что влияет

на формирование климата. А значит, сила Кориолиса, которая была введена лишь для удобства расчетов, является реально существующей.

СПРАВЕДЛИВ ЛИ ЗАКОН БЭРА?

Силе Кориолиса подчиняется течение рек. В Северном полушарии сильнее подмываются правые берега, в Южном — левые. Это утверждение, по имени первооткрывателя, называют законом Бэра, хотя вернее было бы называть его правилом Бэра. Подтверждается оно только для крупных рек, которые текут с юга на север и с севера на юг.



Карл Эрнст Бэр (Карл Максимович Бэр, 1792—1876), выдающийся российский эмбриолог, натуралист, путешественник, географ. О законе образования речных русел он рассуждает в книге «Каспийские исследования».



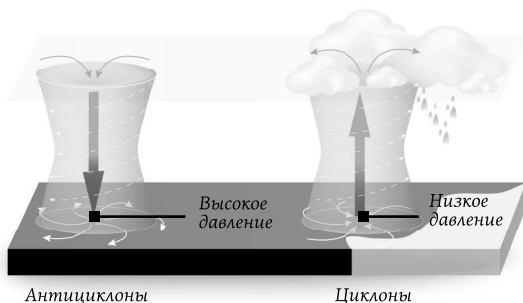
СИЛА КОРИОЛИСА В ВАННОЙ

Утверждают, что можно определить, в каком полушарии вы находитесь, глядя, как закручивается вода, уходящая в сливное отверстие ванной или раковины, — против или по часовой стрелке. Но масштабы здесь малы, сила Кориолиса будет слишком незначительна. Кроме того, вода долго течет по трубам, где возникают свои незаметные течения, сказывающиеся при сливе.

Поэтому, чтобы увидеть проявление силы Кориолиса, нужно создать идеальные условия: долго отстаивать воду, применять сосуды правильной формы, создать стабильную температуру.

РЕВУЩИЕ СОРОКОВЫЕ

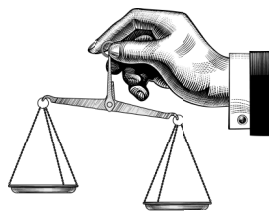
Сила Кориолиса отвечает за вращение циклонов (вихрей с пониженным давлением в центре) и антициклонов (вихрей с повышенным давлением в центре). В Северном полушарии вращение воздушных масс в циклонах происходит против часовой стрелки, в антициклонах — по часовой, в Южном полушарии все наоборот. Сила Кориолиса также влияет на появление пассатов и западных ветров умеренного пояса. Западные ветра особенно сильны к югу от экватора, где суши меньше. Поэтому полоса ветров между 40-й и 50-й южными параллелями называется ревущими сороковыми.



Циклоны и антициклоны отличаются в Северном и Южном полушариях.

РЫЧАГ, ИЛИ МОЖНО ЛИ ПЕРЕВЕРНУТЬ ЗЕМЛЮ

Идея рычага появилась в глубокой древности. Сам рычаг — это балка либо любой предмет, способный вращаться вокруг точки опоры или подвеса. Части предмета от точки опоры до точки приложения сил называются плечами рычага. Он позволяет уравновесить меньшей силой большую: нужно обеспечить такие условия, чтобы плечо меньшей силы превышало плечо большей силы. Отношением плеч приложенных сил определяют выигрыш в силе, полученный посредством рычага.



Простейшие весы, использующие принцип рычага.

Мотыга и весло действуют по принципу рычага, их издавна применяли, чтобы уменьшить силу, которую человек должен был прикладывать. Но затем появились более сложные инструменты. Так, уже в V тысячелетии до н. э. в Междуречье сделали весы, которые использовали для достижения равновесия принцип рычага.

Позднее, уже в Древней Греции, изобрели безмен, в котором можно изменять длину плеча приложения силы. Безмен уравнове-

шивают, перемещая вдоль стержня второй крючок обоймы или петли, которые служат опорой для стержня всего устройства. Это позволяет измерять вес более удобным способом.

Примерно в 1500 г. до н. э. в Египте и Индии появился колодец с «журавлем», или шадуф, предшественник современных подъемных кранов. Это было устройство, поднимавшее сосуды с водой, которые предназначались, прежде всего, для орошения полей.

Много позже, в III в. до н. э., великий древнегреческий инженер и физик Архимед сформулировал закон, согласно которому усилие, умноженное на плечо приложения силы, равно нагрузке, умноженной на плечо приложения нагрузки. Плечо приложения

РЫЧАГ НА ДЕТСКОЙ ПЛОЩАДКЕ

Рычаги первого рода характерны тем, что точка опоры у них располагается между двумя точками приложения сил. Например, детские качели. Плечи у таких устройств равны. У качелей имеется неподвижная ось вращения. Качаются они под силой тяжести детей. Однако каждый, чтобы перевесить товарища и вынудить качели качаться, должен сидеть на краю. Если кто-то сядет поближе к точке опоры, то этим он уменьшит длину плеча рычага и не сможет перевесить своего товарища.



БЕЗМЕН ПОД ЗАПРЕТОМ

Безмен, который на Руси называли еще контарь или кантарь, попал под запрет во времена СССР. Его нельзя использовать в торговле из-за несовершенства устройства и высокой возможности злоупотреблений. Современные ручные весы, которые также называют безменом, работают по другому принципу, у них пружинный механизм.



Старинный безмен отличается от привычного, используемого в быту.

силы — это расстояние от точки приложения силы до опоры, а плечо приложения нагрузки представляет собой расстояние от точки приложения нагрузки до опоры. Принцип действия рычага сегодня, как и в прошлом, используется повсеместно.

Практически во всех механизмах, которые преобразуют механическое движение, — от ножниц и плоскогубцев до подъемных кранов — имеются рычаги. Здесь нет ничего удивительного, КПД рычага весьма высок — 80%.

ЭТО ИЗВЕСТНО ДАЖЕ КОШКЕ

У рычагов второго (как и третьего) рода точки приложения сил располагаются по одну сторону от опоры. Например, это тачка, где точка опоры — колесо, и обычная дверь. Очевидно, чтобы открыть дверь, нужно толкнуть ее подальше от петель, на которых она крепится, чтобы плечо рычага оказалось длиннее. Это инстинктивно понимают животные. Нередко можно наблюдать, как кошка, пытаясь проникнуть в закрытую комнату, хватается за ручку двери или толкает саму дверь поближе к ручке.

Кошке не обязательно хвататься за ручку, чтобы открыть дверь. Если дверь открывается внутрь, животное просто толкает ее на удалении от петель, хотя и не знает законов физики.



РЫЧАГ НА СТРОЙКЕ

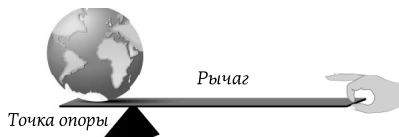
Рычаг третьего рода, по сути, частный случай рычага второго рода. В таком рычаге точка приложения силы находится ближе к точке опоры, чем к точке нагрузки. Благодаря этому можно выиграть в скорости и пути. Подобные рычаги — это, например, задняя дверь багажника или капот легкового автомобиля на гидравлических телескопических опорах, кузов самосвала, где в центре расположен гидроцилиндр. В природе на этом принципе основано движение конечностей у животных и человека.

Работа подъемного крана является одним из примеров рычага третьего рода.



МОГ ЛИ АРХИМЕД ПЕРЕВЕРНУТЬ ЗЕМЛЮ

Теоретически, подобрав рычаг нужной длины, можно развить любое усилие и поднять любой груз. Рассказывают, что однажды царь Сиракуз Гиерон решил подарить египетскому царю Птолемею корабль. Его никак не могли спустить на воду. Обратились к Архимеду. Он сконструировал систему блоков и спустил корабль на воду одним движением руки. По этому поводу ученый сказал: «Дайте мне точку опоры, и я переверну Землю!» Но на практике он не смог бы это сделать. Ведь масса Земли — $5,97 \times 10^{24}$ кг, и, чтобы приподнять ее хотя бы на 1 см, понадобился бы рычаг с длиной плеча в 10^{18} км и 30 трлн лет — время, намного превышающее возраст Вселенной.

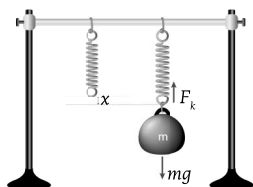


Дословно высказывание Архимеда звучит так: «Дайте мне достаточно длинный рычаг и достаточно мощную точку опоры, и я переверну Землю».

ЗАКОН ГУКА, УПРУГОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

Многочисленные напряжения и деформации, которым подвергаются твердые тела под воздействием внешних сил, издавна служили предметом внимания ученых-физиков, инженеров, ремесленников. Силу, возникающую при деформации тела и направленную в сторону, противоположную перемещениям тел при деформации, назвали силой упругости. Ее исследование привело к интересным результатам.

Деформации происходят потому, что разные части тела движутся по-разному. Благодаря этому природные и искусственные материалы можно обрабатывать. От величины деформации какого-либо тела зависит величина силы упругости. Английский физик Роберт Гук (1635—1703) открыл закон, согласно которому сила упругости прямо пропорциональна удлинению тела. Она направлена противоположно направлению, в котором перемещаются при деформации одни частицы тела относительно других. Однако этот закон работает только для упругих или малых деформаций. Таким образом, чем больше деформация, тем больше сила упругости. Закон Гука



Наглядное представление закона Гука.

ПРУЖИННЫЕ ВЕСЫ

Действие закона Гука наиболее наглядно проявляется в работе бытовых пружинных весов. Этот прибор имеет пружину, стрелку, градуированную шкалу и два крюка. За один подвешиваются весы, за другой — тело, которое надо взвесить.

Пружинные весы называют также безменом, но их следует отличать от старинного прибора с тем же названием, действующего по принципу рычага.



необходим для того, чтобы подсчитать наибольшую силу, которую способна выдержать пружина и не разорваться. Благодаря ему можно предотвращать несчастные случаи на производстве.

Но что же понимают под упругостью? Материал, обладающий этим свойством, под нагрузкой подвергается деформации, а после снятия нагрузки приобретает первоначальные размеры и форму. Наибольшее напряжение, при котором пластическая деформация еще не видна, называется пределом упругости. Упругими могут быть и резина (что вполне очевидно), и дерево, и сталь.

Если материал, который изменяет форму и размеры под воздействием нагрузки, после снятия ее сохраняет их измененными, то есть сохраняет остаточную деформацию, то это значит, что он пластичен. Таким образом, пластичность как свойство противоположна упругости, которой присуща упругая деформация.

Упругие свойства стали сделали возможным производство качественных пружин.



ДЕФОРМАЦИЯ И КРЕПЛЕНИЕ КОЛЕС

На деформации основан принцип действия резьбовых соединений. При затяжке винты, болты и шпильки упруго деформируются, прижимают детали друг к другу и надежно их фиксируют. Так, у болтов крепления автомобильных колес с обратной стороны не имеется фиксирующих гаек. Крепить колесо помогают упругая деформация стержня болта и силы трения.

Пластичность и упругость материала в большой степени определяются внешними условиями. Так, упругая сталь становится пластичной при высоких температуре и давлении, а свинец, который при нормальных условиях пластичен, при низких температурах обретает упругость. От пластичности материалов зависит решающим образом успех таких операций, как штамповка, волочение, изгиб, вытяжка и другие. Очень большую роль в технике играют упругие деформации. Их учитывают при расчете на прочность самолетов и космических кораблей, морских лайнеров и подводных лодок, мостов и туннелей. И прежде всего анализу подвергают малые и упругие деформации, возникающие при эксплуатации этих объектов под воздействием нагрузок. Ведь именно для малых деформаций справедлив закон, открытый Робертом Гуком.

УПРУГОСТЬ, ОТ КОТОРОЙ ЗАВИСИТ ЖИЗНЬ

Сила упругости помогает выдерживать атмосферное давление всем телам, находящимся на нашей планете. Обитатели глубоких водоемов могут выдерживать еще большую нагрузку, чем обитатели суши. Значит, благодаря силе упругости сохраняется в целости их форма.



*Рыба-удильщик
обитает на глубине
3500 м.*

ПЛАСТИЧНОСТЬ ПО ЗАКАЗУ

Пластичностью обладает не только пластилин, глиняное тесто, горячий битум. Подобное свойство присуще также алюминию, золоту и сплаву цинка и меди — латуни. А вот бронза — сплав олова с медью — гораздо менее пластична. Также и дюралюминий — сплав алюминия с медью, марганцем и магнием — менее пластичен, чем чистый алюминий. Пластичной является низкоуглеродистая сталь, а у легированных сталей, в составе которых присутствуют различные примеси, пластичность гораздо ниже. Таким образом создают материалы с разной пластичностью в зависимости от целей.

ПАМЯТЬ ФОРМЫ

Некоторые материалы обладают эффектом памяти формы — после деформации они, если их нагреть, возвращают свою первоначальную форму. Такое свойство обусловлено сверхупругостью. Это качество имеется, к примеру, у никелида титана. Подобные материалы очень практичны и используются в самых разных областях — от космоса до медицины. Так, из них монтируются самораскрывающиеся антенны, делаются специальные фильтры для введения в кровеносную систему и даже оправы для очков, из которых не выскальзывают линзы.

ЧТО ТАКОЕ ХРУПКОСТЬ

Существуют материалы, которым не свойственна заметная пластическая деформация, и они под воздействием внешних сил мгновенно разрушаются. Такое их свойство называется хрупкостью. Хрупкими являются чугун, керамика, облицовочный камень, стекло, бетон.

ЗАЧЕМ ВОИНУ МУЗЫКАЛЬНЫЙ СЛУХ

Сила упругости, которая действует на тело со стороны, называется силой реакции опоры либо подвеса или же силой натяжения подвеса. Говорят также, что сила натяжения пружины или нити численно равна ее же силе упругости, хотя они, согласно третьему закону Ньютона, разнонаправленны. От силы натяжения струны зависит высота звука музыкального инструмента или другого подобного механизма. Поэтому в Древнем Риме командир боевой катапульты должен был обладать хорошим музыкальным слухом, чтобы определять по звуку, насколько сильно натянуты канаты из сухожилий на орудии.



*Канаты
катапульты
должны быть
упругими и растяжимыми.*

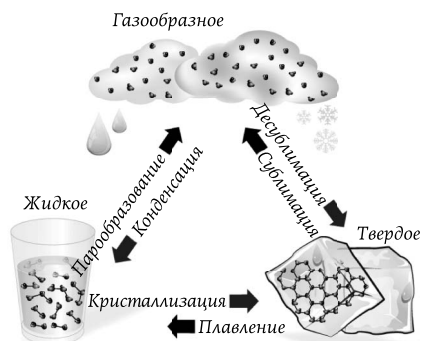
ЧЕТЫРЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Агрегатные состояния вещества — это состояния одного и того же вещества, при переходах между которыми его физические свойства изменяются скачкообразно. Выделяются четыре агрегатных состояния — твердое, жидкое, газообразное и плазма, хотя чаще говорят именно о трех. Резких границ между агрегатными состояниями нет, поэтому разделение их в определенной мере условно. Тем не менее такая идея оказалась чрезвычайно полезной и для обыденной жизни, и для техники.

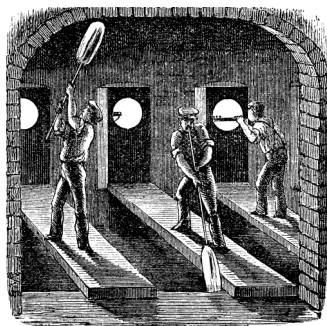
В твердом состоянии вещество сохраняет и форму, и объем. Оно бывает аморфным или кристаллическим. Положения атомов и молекул в кристаллах строго упорядочены, им присуща кристаллическая решетка, то есть пространственная периодичность в расположении равновесных положений атомов. В естественной форме кристаллы являются правильными многогранниками.

В жидком состоянии вещество сохраняет объем, но не форму. Жидкость может течь под собственной неподвижной поверхностью, что также является изменением формы. В жидком состоянии вещество существует в определенном интервале температур, выше которого переходит в газообразное состояние, то есть испаряется, а ниже — в твердое, то есть кристаллизуется или становится аморфным. Диапазон этих температур зависит от давления.

В аморфных телах атомы колеблются вокруг хаотически расположенных точек. Аморфное тело можно считать либо твердым телом, либо жидкостью с очень большой (иногда бесконечно большой) вязкостью. В аморфном состоянии вещество сохраняет форму.



Три состояния воды.



Стекло — аморфное тело, потому способно принимать различную форму при нагревании.

БЛИЖНИЙ И ДАЛЬНИЙ ПОРЯДОК

Ближний порядок — упорядоченность во взаимном расположении атомов или молекул в веществе, повторяющаяся только на очень малых расстояниях, сравнимых с их размерами. Присущ кристаллам. Дальний порядок — та же системность размещения атомов или молекул в веществе (в жидком или твердом состоянии), которая повторяется на неограниченно больших расстояниях. Также присущ кристаллам, а еще жидкостям и аморфным веществам.

СУЩЕСТВУЕТ ЛИ ЖИДКИЙ ЙОД

У йода (I_2) при нормальных условиях не существует жидкой фазы. Его кристаллы сразу подвергаются сублимации и превращаются в газообразный молекулярный йод. А привычный всем жидкий йод в бутылочках — это его спиртовой раствор.

ПОЧЕМУ НЕ ТОНЕТ ЛЕД

Сегодня для льда — воды в твердом агрегатном состоянии — известны 3 аморфных разновидности и 17 кристаллических модификаций. Тем не менее в природных условиях нашей планеты у кристаллов воды имеется одна модификация — так называемая гексагональная сингония. Благодаря такой структуре плотность льда оказывается меньше плотности жидкой воды, и поэтому он не тонет.

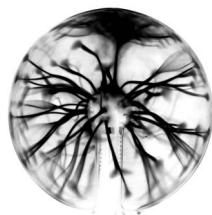


Лед на поверхности воды не дает промерзнуть ей на всю глубину.

МНОГОГРАННЫЙ АЛМАЗ

Алмаз исключительно твердый, и поэтому из него делают алмазные пилы. Этот инструмент представляет собой вращающийся стальной диск до 3 м в диаметре с зарубками или надрезами по краям. В эти зарубки втирают алмазный порошок, смешанный с клейким веществом. С помощью такого диска можно распилить любой камень. Алмазные острия применяют во множестве инструментов, которые используются, например, в авиастроении и автомобилестроении. Сам алмаз можно резать только алмазом.

Алмазная пила предназначена для обработки твердых камней.



Плазменная лампа — одно из практических применений четвертого состояния вещества.

Газообразное состояние не сохраняет ни объем, ни форму. Газ обладает малой плотностью и заполняет все пространство, доступное ему.

Переход из жидкого состояния в газообразное называется испарением, обратный процесс — конденсацией. Изменение твердого состояния на газообразное, минуя жидкое, — сублимация, или возгонка, а обратный переход — десублимация. Эти переходы широко используются на практике. Плазма — четвертое агрегатное состояние вещества — представляет собой ионизированный газ и образуется при чрезвычайно высоких температурах. На Земле она появляется в газовых разрядах, в космосе — это вещество звезд. Она также заполняет межзвездное пространство. Таким образом, это агрегатное состояние — самое распространенное во Вселенной.

ЛИОФИЛЬНАЯ СУШКА

Лиофильная сушка — это способ удаления затвердевшего растворителя с помощью сублимации, при этом жидкая фаза почти не образуется. Сублимированные продукты, обработанные таким методом, лучше по своим пищевым качествам, чем сушеные, потому что при сублимации удаляется только вода, а при термическом испарении — и другие вещества.



Фрукты, подвергшиеся лиофильной сушке, содержат больше полезных веществ, чем обработанные другими способами.

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ: ПРЕДСКАЗАНИЕ ПОГОДЫ

Физические характеристики атмосферы Земли и других планет, явления, в них происходящие, проблемы и идеи, порожденные ими, составляют предмет физики атмосферы. Эта наука обладает высочайшей практической значимостью, так как связана с метеорологическими явлениями, изучением изменений климата и прогнозами погоды. Во многих странах термины «физика атмосферы» и «метеорология» — синонимы.

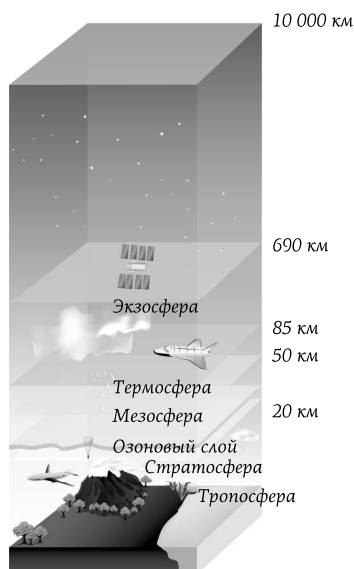
Атмосфера Земли состоит из слоев, которые отличаются температурой, плотностью, а также имеют разный химический состав. Атмосфера формирует погоду и климат, регулирует круговорот воды в природе, защищает нашу планету от космического излучения и является одним из условий существования жизни на Земле.

Атмосферные явления и их предсказания занимали умы и чувства людей с глубокой древности. Слово «метеорология» впервые появилось в одноименном трактате Аристотеля, посвященном небесным явлениям. Он придумал этот термин на основе выражения «та метеора» — «предметы в воздухе». Так он обозначил метеоры и кометы, дождь и град, полярные сияния и радуго.

Наука метеорология стала формироваться в XVII в. с изобретением термометра, барометра, гигрометра, дождемера, флюгера и анемометра.

В 1654 г. герцог Тосканский Леопольдо Медичи и его секретарь иезуит Антинори организовали сбор информации о погоде. Сведения представляли девять метеостанций, большинство из которых находились в Италии (самая дальняя была в Польше, в Варшаве). Работу этой сети, просуществовавшей до 1667 г., обеспечивала основанная во Флоренции Академия дель Чименто.

В 1723—1735 гг. в Европе действовала вторая сеть метеостанций. Ее организовал секретарь Лондонского королевского общества Джеймс Джулин. Он создал инструкцию по наблюдению за погодой и разослал ее более чем ста ученым разных стран Европы. В этой инструкции имелся



Строение атмосферы.



Синоптическая карта Европы 1887 г.

перечень необходимых приборов, предлагалась форма стандартной таблицы замеров, описывались методы измерения давления воздуха, силы и направления ветра.

Первая в мире государственная метеослужба появилась только в 1853 г. в Великобритании вместе с учреждением должности метеоролога-статистика при Комитете по торговле.

Первый международный метеорологический конгресс состоялся в Вене в 1873 г. Его участники выработали единые сроки измерений и единый телеграфный код для передачи сообщений.

С 1930 г. в метеорологии началось применение радиозондов. После Второй мировой войны была создана сеть метеостанций с

их использованием. Прогнозы погоды стали намного более точными. В 1960-е гг. для их составления стали привлекать электронно-вычислительные машины, появились метеоспутники. В наше время широко применяются численные методы, использующие компьютерную математическую модель, основанную на данных со спутников, зондов и наземных метеостанций.



Метеостанции работают сегодня по всему миру.

ФИЗИКА ОБЛАКОВ

Облака — взвешенные в атмосфере продукты конденсации водяного пара. Облачные элементы — мельчайшие капли воды и кристаллы льда — обладают собственной скоростью падения. Конденсируясь, они становятся крупнее, и скорость их падения возрастает. Когда она превышает скорость восходящего потока, облачные элементы устремляются к Земле и выпадают в виде осадков, если, конечно, не испарятся по дороге.

Для облаков принята своя классификация. Кучевые и кучево-дождевые — облака вертикального развития или конвекции. Кучевые облака образуются на высотах от 400 м до 4,5 км, а кучево-дождевые — от 300 м до 5 км. Слоисто-дождевые, слоисто-кучевые и слоистые облака находятся на нижнем ярусе, на высотах до 2 км. Высококучевые и высослоистые — это облака среднего яруса, они наблюдаются на высоте от 2 до 6 км. Перистые, перисто-кучевые и перисто-слоистые облака относятся к облакам верхнего яруса и находятся на высоте от 6 до 13 км. Самые высокие облака — серебристые. Они располагаются на высоте 76—85 км.

АТМОСФЕРА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Атмосфера по-разному пропускает различные электромагнитные волны. Она блокирует гамма-лучи, рентгеновские лучи и частично ультрафиолет, искажает видимый свет, поглощает большую часть инфракрасного излучения, блокирует низкочастотные радиоволны, но остальной радиодиапазон пропускает беспрепятственно. На этих свойствах основана работа систем спутниковой навигации, радиолокации, телевидения и множества образцов современной техники, в том числе военной.

ЦИРКУЛЯЦИЯ АТМОСФЕРЫ

Воздушные течения над земной поверхностью создают планетарную атмосферную циркуляцию. К ним, например, относятся пассаты, муссоны, а также течения, которые связаны с циклонами и антициклонами. Таким образом, благодаря циркуляции атмосферы образуются ветры. Причиной является то, что земная поверхность на разных широтах, а также над морем и сушей нагревается неравномерно. Это приводит к неоднородному распределению атмосферного давления, и, следовательно, к воздушным течениям. Кроме того, на движение воздуха оказывает влияние вращение Земли, а в нижних слоях атмосферы также и трение. В целом же система атмосферной циркуляции очень сложна, и ее изучение требует точных и сложных математических и физических методов с привлечением компьютерных технологий.



АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Удивительно, но долгое время люди думали, что воздух ничего не весит. И только открытие атмосферного давления позволило прийти к правильному выводу и начать разрабатывать модели и идеи, связанные с атмосферным давлением. Атмосферное давление — это давление атмосферы, которое действует на все предметы, которые находятся в ней, и на земную поверхность. В покоящейся стационарной атмосфере давление равняется весу вышележащего столба воздуха на единицу площади.

Изучение атмосферного давления началось с того, что герцог Тосканский решил украсить сады Флоренции фонтанами. Однако вода в них не поднималась выше 10,3 м. Чтобы найти причины этого и доказать существование атмосферного давления, физик Эванджелиста Торричелли в 1644 г. провел опыт с ртутью. Он наполнил ртутью запаянную с одного конца трубку длиной 1 м, закрыл ее пальцем, перевернул и опустил в широкую чашу с ртутью. При этом трубка, естественно, открылась, часть ртути из нее вылилась, и наверху оказалось безвоздушное пространство — так называемая торричеллиева пустота. Высота столбика ртути оказалась около 760 мм, если взять современные меры. Так и появился первый ртутный барометр. Это и была тарелка (или чаша) с налитой в нее ртутью, куда отверстием вниз ставилась пробирка (трубка). При повышении атмосферного давления ртуть поднималась, при



Первый ртутный барометр. Ртуть была выбрана потому, что она обладает очень высокой плотностью и низким давлением насыщенного пара при комнатной температуре.

ГДЕ БЫСТРЕЕ КИПИТ ВОДА

Температура кипения жидкости зависит от давления. Чем выше давление, тем она выше. Известная всем температура кипения воды 100 °С такова лишь на уровне моря при нормальном атмосферном давлении, равном 101 325 Па, что округленно можно считать за 100 кПа. (Таково давление столбика ртути высотой 760 мм при температуре 0 °С на уровне моря.) На высоте 4000 м над уровнем моря давление снижается до 60 кПа, и вода будет закипать при 85 °С. Поэтому для приготовления пищи в горах требуется больше времени, чем на равнине. А в кастрюле-скороварке все наоборот — там специально создается повышенное давление, благодаря чему температура кипения воды повышается.



В скороварке используется идея повышения давления для ускорения приготовления пищи.

снижении — опускалась. Отсюда впоследствии пошли миллиметры ртутного столба. В 1646 г. опыты Торричелли повторил французский ученый Блез Паскаль. Затем он и его зять Флорен Перье провели серию других опытов, показав, что атмосферное давление отличается на разных высотах — у подножия горы Пюи-сен-Дом в Клермоне и на ее вершине, а также на башне Сен-Жак в Париже. Паскаль сделал вывод, что измерения атмосферного давления позволяют определять сравнительную высоту различных мест. Он предложил идею, которую называют либо принципом Паскаля, либо основным законом гидростатики. Согласно этому принципу, давление, которое производится на жидкость или газ, передается в любую точку во всех направлениях без изменений. В память о заслуге

гах ученого единица давления в системе СИ сегодня называется паскалем, хотя широко используются и миллиметры ртутного столба. Атмосферное давление зависит от высоты столба воздуха, его плотности и ускорения силы тяжести. Высота, на которую необходимо подняться или опуститься, чтобы давление изменилось на 1 гПа, принято называть барической или барометрической ступенью. При нормальных условиях она равна 8 м и возрастает при повышении высоты над уровнем моря и росте температуры.



Блез Паскаль (1622—1661), знаменитый французский физик, механик, математик, философ.

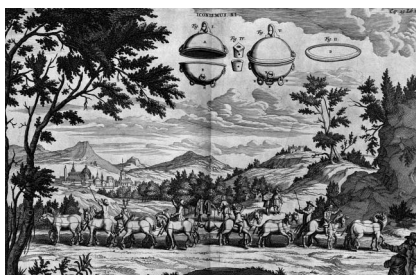
БЕЗ РТУТИ

Несмотря на то что ртутные барометры точны и годятся для серьезных исследований, в быту применяется другой вид прибора для измерения давления — барометр-анероид. «Анероид» в переводе с греческого означает «без воды». Он показывает атмосферное давление, которое действует на тонкостенную гофрированную металлическую коробку. В ней создается разрежение. Когда атмосферное давление повышается, коробка сжимается, когда оно понижается, — расширяется и действует на пружину, которая к ней прикреплена.



МАГДЕБУРГСКИЕ ПОЛУШАРИЯ

Опыт по демонстрации силы давления воздуха и воздушного насоса впервые был проведен в Регенсбурге в 1654 г., затем повторялся в Магдебурге и Берлине. Немецкий физик Отто фон Герике, который был к тому же бургомистром Магдебурга, использовал два медных полушария диаметром 14 дюймов (35,5 см), сложенные вместе. Из них он выкачал воздух. После этого, хотя полушария не были соединены никакими креплениями, их не смогли разорвать ни 16, ни даже 24 лошади.



Эксперимент с магдебургскими полушариями проводился неоднократно, и однажды в 2012 г. 16 лошадей (по 8 с каждой стороны) все-таки смогли приложить достаточно усилий, чтобы разорвать полушария.

ДАВЛЕНИЕ, УКАЗАННОЕ В МЕТЕОСВОДКАХ

Метеостанции указывают разное давление. Так, для сравнения давления на станциях, которые находятся на разных высотах, и для нужд авиации говорится о давлении, приведенном к уровню моря. Но в обычных метеосводках, которые распространяются среди населения, указывается давление на уровне данной местности, неприведенное.

Метеорологическое оборудование.



ЗАКОН АРХИМЕДА: ВЫТАЛКИВАЮЩАЯ СИЛА

Согласно закону Архимеда, на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, которая направлена вверх и равна весу вытесненной телом жидкости. Архимедова сила, таким образом, всегда противоположна силе тяжести. Если погруженное в жидкость тело всем основанием прижато ко дну, эта сила будет равна нулю. В невесомости же закон Архимеда не работает вообще.

Архимед был выдающимся инженером, математиком и физиком. Жил он в Сиракузах, греческой колонии на Сицилии. Греческих поселений по всему Средиземноморью было много, Южную Италию вместе с

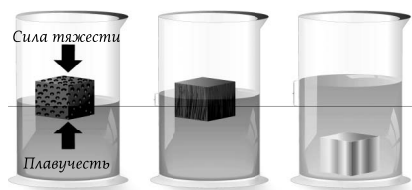
Архимед Сиракузский (287—212 до н. э.), знаменитый древнегреческий математик, физик и инженер. Сделал несколько важных открытий в механике. Погиб во время взятия города римлянами.



РЕКОРДЫ ДЛЯ СОЛЕНОЙ ВОДЫ

Для плавучести очень важен удельный вес — вес вещества в единице объема. Плотность, в отличие от удельного веса, — масса вещества в единице объема. В системе СИ выражается в ньютонах на метр кубический. Удельный вес дистиллированной воды — 1000 Н/м^3 , пресной — примерно столько же, морской — от 1150 до 1300 Н/м^3 .

Удельный вес тела человека при полном вдохе равняется в среднем 920 Н/м^3 , при выдохе — 1200 Н/м^3 . Понятно, что в морской воде у человека плавучесть больше. Поэтому Международная федерация плавания не признает рекордами результаты, показанные в морской воде. При этом плавучесть у мужчин меньше, чем у женщин, у спринтеров меньше, чем у стайеров.



Различные виды плавучести у погруженных в жидкость тел.

Сицилией даже называли Великой Грецией. Существует легенда о том, как Архимед открыл свой знаменитый закон.

Сиракузский царь Гиерон засомневался, сделана ли его корона из чистого золота, и поручил Архимеду выяснить это. Удельный вес золота был к тому времени известен, и оставалось определить объем короны, чтобы проверить ее состав. Однако корона была неправильной формы и возникли затруднения. Но однажды, принимая ванну, Архимед нашел решение. Он понял, что нужно просто погрузить корону в воду, затем измерить объем вытесненной ею воды и таким образом определить объем короны. Обрадованный ученый выскочил на улицу голый с криком «Эврика!», то есть «Нашел!». В итоге корона оказалась не из чистого золота.

С законом Архимеда связана плавучесть тел. Так, тело обладает отрицательной плавучестью, если его вес больше веса

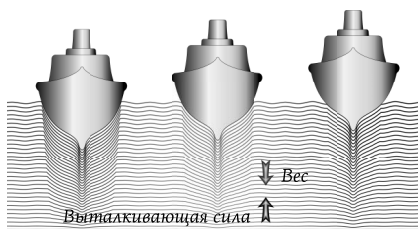
ВЕЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ АКУЛ

Костные рыбы способны регулировать глубину погружения благодаря плавательному пузырю. Они меняют его объем, сокращая или расслабляя мышцы. Средняя плотность тела рыбы меняется, как и плавучесть. У хрящевых рыб, таких как акулы, нет плавательного пузыря, и поэтому они должны постоянно двигаться. Правда, акулы-няньки время от времени отдыхают на дне, а песчаные акулы сами создают плавательный пузырь, набирая воздух в желудок.

вытесненной им воды, и оно погружается на дно. Если же вес тела меньше, чем вес вытесненной воды, то у него положительная плавучесть и оно будет плавать на поверхности. Когда вес вытесненной воды и вес тела равны, у тела нулевая плавучесть, и оно может оставаться на любой глубине неподвижно. Но в реальных условиях такое невозможно.

МЕРТВАЯ ВОДА

У океанских вод на юге плотность и соленость выше, чем в Арктике. Поэтому на севере теплые течения опускаются под более холодные и менее плотные северные воды. Это иногда может быть опасным. Явление, когда верхний слой воды менее плотный, чем нижний, носит название «мертвая вода». В таком случае при гребле образуются так называемые внутренние волны, которые движутся навстречу веслам и замедляют движение, а иногда и останавливают его. С этим явлением сталкиваются даже такие большие суда, как, например, корабль Фритьофа Нансена «Фрам» при экспедиции к Северному полюсу.



Плавучесть корабля в зависимости от плотности воды.

ВЕС БУРОВОЙ КОЛОННЫ

Буровая колонна, предназначенная для бурения глубоких скважин, имела бы вес 226 т на глубине 5 км, если бы находилась в воздухе. Но в используемой в буровом деле промывочной жидкости плотностью 2 г/см^3 ее вес может сильно уменьшиться. Для алюминиевых труб выгибрыш составляет до 50%.

СУБМАРИНЫ И ЗАКОН АРХИМЕДА

Постоянно применяют закон Архимеда моряки-подводники. Если подводная лодка движется между слоями воды, температура которых отличается, то балласт подбирают так, чтобы для холодного слоя была обеспечена небольшая недогрузка, а для теплого — перегрузка. В таком случае лодка не нуждается в специальных мерах для поддержания равновесия и лежит на холодном слое, как на жидком грунте. А батискаф, имеющий небольшую отрицательную плавучесть, в качестве жидкого грунта использует теплый и более плотный слой.



СКАЗКА НА СУШЕ, РЕАЛЬНОСТЬ ПОД ВОДОЙ

Святогор-богатырь из русских былин был «выше леса стоячего», и Мать Сыра Земля не могла его вынести, да и сам он не сумел превозмочь силу тяжести — ушел ногами в землю, пытаясь поднять суму с «тягой земной». Но в действительности подобные великаны вообще не могли бы существовать на суше, потому что были бы раздавлены собственным весом. Однако в воде закон Архимеда позволяет им оставаться в целости. Поэтому самое крупное животное на планете живет как раз в океане. Это синий кит, масса которого достигает 150 т, а длина — 30 м.



Такие размеры животных, как у синего кита, возможны только в воде.

НЬЮТОНОВСКИЕ И НЕНЬЮТОНОВСКИЕ ЖИДКОСТИ

Изучение свойств жидкости приводит к разным идеям и их воплощениям. Самые характерные ее свойства — это текучесть и вязкость. Текучесть — это свойство пластичных металлов и тел уступать действию сдвигающих сил при постепенном увеличении давления, вязкость — способность оказывать сопротивление сдвигу. Текучесть жидкости зависит от скорости ее движения, давления и плотности. Вязкость также проявляется у жидкостей по-разному.



Неньютоновскую жидкость можно получить, смешав немного воды с крахмалом.

В отношении вязкости принято разделять ньютоновские и неньютоновские жидкости. Для ньютоновской жидкости справедлив закон вязкого трения Ньютона, согласно которому имеет место линейная зависимость между напряжением и градиентом скорости. Вязкость такой жидкости зависит от давления и температуры (и, если в жидкости есть примеси, от химического состава). Типичной ньютоновской жидкостью является вода.

ЖИДКАЯ ИГРУШКА

Слайм, или «лизун», — это игрушка, обладающая свойствами неньютоновской жидкости. Обычно слайм изготавливают из буры и какого-либо полисахарида, например, из гуаровой камеди. Если к слайму не прикасаться, он будет растекаться по поверхности. Резкое воздействие заставляет его уплотняться, менять форму и даже рваться.



Слайм, он же «лизун».

Неньютоновскими называют такие жидкости, вязкость которых зависит от скорости тока самой жидкости. Примерами их являются полимер, твердые суспензии, пищевые продукты наподобие кефира или простокваши.

Подобные жидкости обычно являются неоднородными. Их составляют крупные молекулы, которые образуют сложные пространственные структуры. И чем быстрее воздействие на эти макромолекулы, тем сильнее повышается вязкость неньютоновской жидкости.

Дело в том, что частицы крахмала, которые содержатся в неньютоновской жидкости, набухают в воде и образуют зацепления —

НЕНЬЮТОНОВСКАЯ ЖИДКОСТЬ НА НАШЕЙ КОЖЕ

Кремы, используемые в косметике, тоже являются неньютоновскими жидкостями. Это вполне очевидно: их легко наносят на кожу тонким слоем, где их вязкость возрастает и позволяет им держаться. Недаром в косметической промышленности массово применяют модификаторы вязкости, которые улучшают качества неньютоновских жидкостей.



МОЖНО ЛИ ХОДИТЬ ПО ВОДЕ

Чтобы ходить по воде, обычной ньютоновской жидкости, требуется очень сильно увеличить давление на нее. Тогда ее вязкость и сила сопротивления вырастут так сильно, что бегущий человек сможет теоретически на ней удержаться. Но для этого он должен развить скорость до 150 км/ч. Так что на практике бегать по воде невозможно. Тем не менее, если это жидкость неньютоновская, возникают варианты. Например, специальные болотные лыжи позволяют снизить давление на такую жидкость — болото — и двигаться в относительной безопасности.

ВЯЗКОСТЬ В НУЖНОЕ ВРЕМЯ

Поскольку вязкость неньютоновской жидкости изменяется в зависимости от скорости ее тока, с уменьшением толщины ее слоя скорость также меняется и происходит скачок в увеличении вязкости. Так происходит со многими красками. Во время печати, когда краску наносят на клише и выжимают через очень тонкое нейлоновое сито, она проявляет себя как жидкость с небольшой вязкостью. Однако на бумаге, когда ее слой становится тонким, вязкость ее резко увеличивается и она затвердевает. Будь краска ньютоновской жидкостью, печать была бы невозможна. Это же справедливо для окраски любых поверхностей.



Краской можно красить только потому, что она является неньютоновской жидкостью.

достаточно прочные связи. Если действовать на этот материал быстро и резко, то зацепления не дадут молекулам сдвинуться и жидкость будет вести себя подобно упругой пружине. Если же воздействие будет медленным, то за это время зацепления растянутся и разорвутся.

ПОЧЕМУ ТРЯСИНА ЗАСАСЫВАЕТ

Если попасть в воду, то, начав плыть и барахтаться, из нее можно выбраться. Если попасть в трясину, то чем больше вы двигаетесь, тем сильнее вас засасывает. Дело в том, что вода — это ньютоновская жидкость, а трясина — неньютоновская, или бингамовская. Если на ее поверхность попадает достаточно легкий предмет, она начинает вести себя как твердое тело, и предмет не тонет. Поэтому на поверхности болота растут кувшинки и ряска. Но если тело обладает значительным весом и к тому же оказывает сопротивление, то оно станет погружаться. Это погружение будет происходить, пока архимедова сила не сравняется с весом тела. Такое состояние называется нормальным погружением. Может произойти и недопогружение, то есть тело перестанет тонуть, когда архимедова сила еще будет меньше веса. Однако так же возможно и перепогружение, когда архимедова сила больше веса, и тело опускается ниже уровня нормального погружения. И в неньютоновской жидкости такая сила не вытолкнет тело обратно. Это и есть засасывание. Так происходит с живыми, подвижными объектами, ведь даже дыхание — это движение. Движение — это давление на опору, то есть на неньютоновскую жидкость, и чем активнее это движение, тем более вязкой она становится. Неживые объекты неподвижны, поэтому полностью не погружаются.



Попад в трясину, лучше не совершать лишних движений.

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Поверхностное натяжение характеризует состояние поверхности раздела двух фаз при неизменной температуре. Это сила, которая действует на единицу длин границы раздела двух фаз и приводит к сокращению поверхности жидкости, поэтому капли воды принимают форму шара. Она обусловлена силами притяжения между молекулами и их подвижностью. Таким образом, все молекулы на поверхности находятся в натяжении. Это явление важно и для жизни, и для техники.

Идеи, связанные с поверхностным натяжением, появились в XVIII в. и получили активное развитие в следующем столетии. Само понятие ввел Иоганн Зегнер в 1752 г. Джозайя Гиббс в 1873 г. разработал термодинамическую теорию поверхностных явлений, в которой поверхностное натяжение играет решающую роль.

Характер сил поверхностного натяжения легче всего уловить, если неплотно закрыть кран и наблюдать, как из него появляется капля. Капля постепенно растет, у нее образуется шейка (сужение) и, наконец, она отрывается. Таким образом, поверхностный слой воды ведет себя подобно эластичной растянутой пленке.

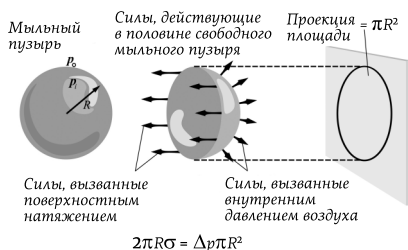
Что же происходит с жидкостью на границе фаз? Чтобы молекула переместилась изнутри жидкости на ее поверхность, необходимо совершение работы. Когда при определенном объеме поверхность жидкости увеличивается, возрастает и



Иоганн Андреас фон Зегнер, известный также как Янош Андраш Сегнер (1704—1777), немецкий физик, математик и врач.

РЯБЬ НА ВОДЕ

Рябь, которую можно видеть на поверхности морей и озер, связана как с силой внутреннего давления воды, действующей вверх, так и с силой поверхностного натяжения. Обе силы чередуются, и на воде образуется множество мелких волн. Это напоминает звуковую волну, возникающую в струне музыкального инструмента при ее попеременном растяжении и сжатии.



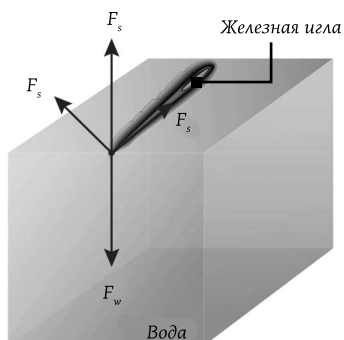
Поверхностная сила = Изменение давления
Поверхностное натяжение в мыльном пузыре.



ее внутренняя энергия. Составляющая внутренней энергии, за счет которой она возрастает, носит название поверхностной энергии. Ее величина обусловлена силами молекулярного взаимодействия и количеством соседних молекул и принимает разные значения для разных жидкостей. Энергия поверхностного слоя жидкости прямо пропорциональна его площади: $E = \sigma \times S$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м. Поверхностное натяжение определяется отношением силы F , действующей на единицу длины границы поверхности к этой длине: $\sigma = F/L$. Надо добавить также, что

ПОЧЕМУ НЕ ТОНЕТ ИГЛА

Если очень осторожно положить на поверхность воды иглу или скрепку, они могут удержаться там. Обычно, чтобы предмет не утонул, его плотность должна быть меньше плотности воды или равна ей. Плотность металла, конечно, больше плотности воды, но игла не тонет только благодаря силам поверхностного натяжения, которые оказываются сильнее силы тяжести. Из-за них жидкость ведет себя как покрытая пленкой. Силы сцепления в этой пленке противостоят силам разрыва, и металлическая иголка остается на поверхности. Рано или поздно она намокнет и утонет, но можно этого избежать, если смазать ее жиром.



F_w — вес

F_s — сила поверхностного натяжения

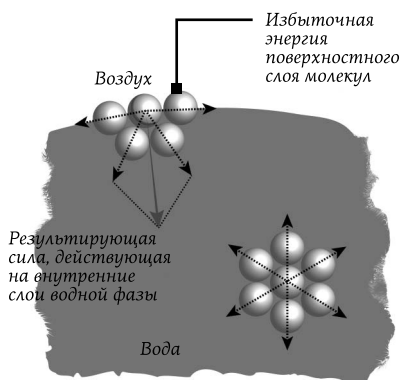
Сила, удерживающая металл на воде.

сила поверхностного натяжения зависит от температуры: нагревая жидкость, можно уменьшить эту силу.

Можно заключить, что коэффициент поверхностного натяжения зависит от свойств жидкости и температуры, а сила — от длины свободной поверхности жидкости. Сегодня многое делается для развития молекулярной теории поверхностного натяжения различных жидкостей, в том числе и расплавленных металлов. Это важно, поскольку значение сил поверхностного натяжения в природе, функционировании живых организмов, технике и обыденной жизни чрезвычайно велико. Без этих сил

ПОВЕДЕНИЕ МОЛЕКУЛ В ЖИДКОСТИ

В глубине воды каждую молекулу притягивают соседние до такой степени, что более тесное взаимодействие просто невозможно. На поверхности картина иная. Здесь имеет место притяжение только к нижним и боковым молекулам. Поэтому на поверхности возникает направленная вниз суммарная сила, и в результате верхний слой воды оказывается несколько продавленным. Эта суммарная сила дает равнодействующую, которая направлена внутрь жидкости. И у любой молекулы, находящейся на поверхности, имеется избыток потенциальной энергии по сравнению с теми молекулами, которые находятся внутри.



Силы, действующие на молекулы жидкости.

невозможно было бы писать чернилами: перо бы не зачерпнуло их из чернильницы, а автоматическая ручка сразу исчерпала бы свой резервуар, поставив огромную кляксу. Без поверхностного натяжения не смогла бы образоваться пена. Этот эффект

ФИЗИКА ВОДОМЕРОК

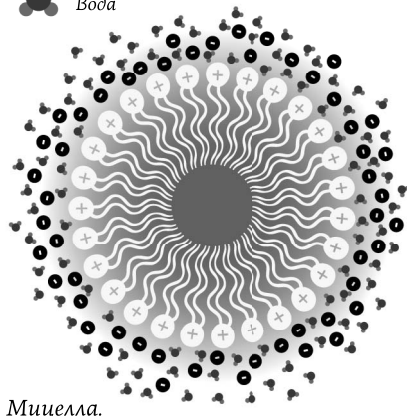
Поверхностное натяжение позволяет удержаться на воде не только иглам, но и живым существам: различным мелким насекомым, лапки которых прилипают к тонкой поверхностной пленке воды, а вес меньше, чем сила поверхностного натяжения. Водомерка, способная быстро и легко скользить по поверхности воды, использует более хитрый механизм. Она движется, широко расставив среднюю и заднюю пары ног. Передние, более короткие ноги обеспечивают изменение скорости. Ноги ее покрыты тысячами крошечных пушистых волосков. На каждом волоске, в свою очередь, имеются нанобороздки — микроскопические каналы. Они задерживают пузырьки воздуха и образуют воздушную подушку. Эта подушка представляет собой водонепроницаемый (гидрофобный) барьер. Используя поверхностное натяжение воды, водомерка остается сухой. Китайские ученые выяснили, при каком весе водомерка способна оставаться на воде. Для этого они создали модель ее лапки, погрузили в воду и надавили. Лапка выдержала силу, в 15 раз превышавшую ее вес.



Водомерка использует силы поверхностного натяжения для движения по воде.

МЫЛО, СНИЖАЮЩЕЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

В состав моющих средств входят поверхностно-активные вещества (ПАВ). Концентрируясь на границе двух фаз, они уменьшают силу поверхностного натяжения. Из-за этого вода не собирается в капли, и на поверхности ткани или посуды не возникают грязные капли. Способность снижать поверхностное натяжение на границе раздела фаз определяет основную количественную характеристику ПАВ — поверхностную активность. Однако у них имеется предел растворимости, или критическая концентрация мицеллообразования. С достижением этого предела концентрация ПАВ остается постоянной, но одновременно его молекулы самоорганизуются, образуя так называемые мицеллы. Они преломляют свет, и водные растворы ПАВ, содержащие мицеллы, приобретают голубоватый студенистый оттенок. По своей сути ПАВ — органические соединения, имеющие в своем составе полярную (гидрофильный компонент) и неполярную (гидрофобный компонент) части.

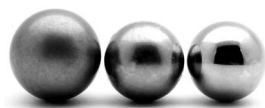


также необходим для существования всех живых организмов. Благодаря ему клетки животных и бактерий сохраняют свою фор-

му, а также могут осуществлять важные функции, например всасывать питательные вещества.

ШАР, ОБРАЗУЮЩИЙСЯ САМ СОВОЙ

В промышленности силы поверхностного натяжения применяют достаточно широко. Например, они незаменимы, если нужно отлить металлические детали правильной сферической формы. Расплавленный металл выливают с достаточной высоты и при этом его каплям дают самим застыть на лету. Такие шарики успевают принять правильную форму и затем падают в приемный контейнер.



Силы поверхностного натяжения используются при отливке сферических деталей.

ЗАМОК ИЗ ПЕСКА

Многие из нас строили в детстве замки из песка. И, наверно, все мы помним, что попытки взять для этого сухой песок ни к чему не приводили — он рассыпался под действием силы тяжести. Другое дело — песок мокрый. Сила поверхностного натяжения воды удерживала песчинки вместе, и строительство шло успешно.



ИЗ СФЕРЫ В БЛИН И ОБРАТНО

Меняя поверхностное натяжение металла, можно менять его форму. Так, капля сплава из 75% галлия и 25% индия с температурой плавления в 15,5 °С, помещенная в раствор электролита, приобретает сферическую форму, как и положено материалу с высоким поверхностным натяжением (в данном случае оно около 500 мДж/м²). Но если подать на металл напряжение около 1 В, на нем образуется оксидная пленка, и поверхностное натяжение изменится почти в 250 раз. Капля под действием силы тяжести быстро растечется в плоский блин. Но если подать отрицательное напряжение, оксидная пленка исчезает, и шаровидная форма восстанавливается.

КАК ИЗМЕРЯЮТ ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Поверхностное натяжение измеряют разными методами. Метод вращающейся капли основан на измерении диаметра капли жидкости, которая вращается в более тяжелой жидкости. С его помощью измеряют низкие или сверхнизкие значения межфазного натяжения. Этот метод применяется в нефтедобыче, при исследовании эмульсий, ПАВ и определении абсорбционных свойств материала. Другой способ — метод дю Нуи, или метод отрыва кольца, — использует платиновое кольцо, которое поднимают из смачивающей его жидкости. Усилие, необходимое для отрыва, и является силой поверхностного натяжения. Его применяют для определения свойств ПАВ, а также трансформаторных масел и других веществ.

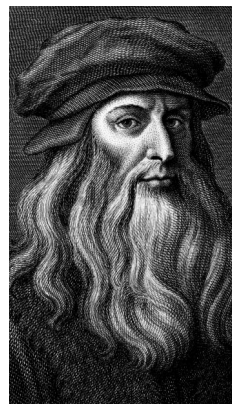


Тензиометр, один из приборов, используемых для определения поверхностного натяжения.

СМАЧИВАНИЕ И КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Многие тела, встречающиеся в природе, а также изготовленные людьми, пронизаны мелкими каналами. Это почва, дерево, кожа, бумага, различные строительные материалы. Жидкость, попав на такие тела, проникает в них и поднимается по этим узким трубкам — капиллярам. Подобные явления называются капиллярными. Они обусловлены действием межфазного поверхностного натяжения на границе раздела двух сред и представляют собой частный случай поверхностных явлений. Капиллярные явления играют важнейшую роль в природе и технике.

Леонардо да Винчи (1452—1519), итальянский художник, инженер и ученый, сделавший немало великих предвидений и предложивший множество выдающихся идей в науке и технике.



Принято считать, что капиллярные явления открыл Леонардо да Винчи. Но все же первые научные наблюдения за ними провел в 1709 г. Фрэнсис Хоксби, используя в своих опытах трубки и стеклянные пластинки. В XIX в. была создана теория капиллярных явлений. В ее развитие внесли вклад Пьер-Симон Лаплас, Симеон Дени Пуассон, Карл Гаусс, Август Юльевич Давидов.

Капиллярные явления связаны с такими эффектами, как смачивание и несмачивание. Они, в свою очередь, обусловлены силами взаимодействия между молекулами жидкости и между молекулами жидкости и твердого тела. Если последние оказыва-

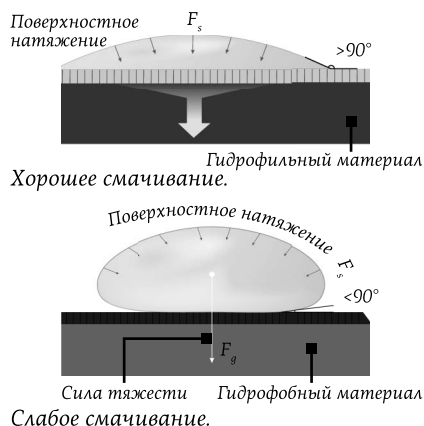
ются больше, то жидкость растекается по поверхности тела, смачивая его. Если же большими оказываются силы между молекулами самой жидкости, то она объединяется в капли. Такие жидкости называются несмачивающими. Кроме того, многое зависит от самого материала — гидрофильный он или гидрофобный.

КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

При строительстве постоянно приходится учитывать, что вода из почвы поднимается по порам строительных материалов. Так здание может сильно отсыреть. Чтобы избавиться от этого неприятного явления и защитить фундамент и стены, применяют гидроизоляцию.

КАПИЛЛЯРНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

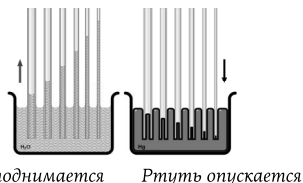
Под действием капиллярного давления некоторые вещества проникают в трещины и другие повреждения поверхности изделий. На этом основан метод капиллярной дефектоскопии. На поверхность наносят люминесцентное вещество. Капилляры засасывают его внутрь. Благодаря люминесценции дефекты легко обнаруживаются.



Смачивающие и несмачивающие жидкости дают разную картину, поднимаясь по капилляру. Обычно под действием поверхностного натяжения жидкость принимает сферическую форму, так как ее поверхность в этом случае оказывается минимальной. Поэтому поверхность налитой в сосуд жидкости тоже должна быть искривленной. Но под действием силы тяжести она становится плоской, потому что земное притяжение сильнее поверхностного натяжения. В узком капилляре, однако, картина меняется. Смачивающая жидкость поднимается вверх, и ее поверхность (мениск) становится вогнутой. Дополнительное давление, возникшее под вогнутой поверхностью, направлено вверх, и уровень жидкости в капилляре из-за этого оказывается выше уровня свободной

ВОДА И РТУТЬ — РАЗНОЕ ПОВЕДЕНИЕ

Смачивающие жидкости поднимаются по капиллярам, а несмачивающие — опускаются. В стеклянном капилляре вода как смачивающая жидкость будет находиться выше уровня ее поверхности в сосуде. Ртуть как несмачивающая жидкость в капилляре будет опускаться ниже уровня ее поверхности. Поэтому уровень ртути в стеклянном капилляре опускается ниже уровня в сосуде.



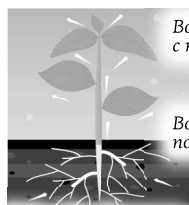
Вода поднимается Ртуть опускается

Различное поведение воды и ртути в капиллярах.

поверхности. Несмачивающая жидкость, поднимаясь вверх, образует выпуклую поверхность. Дополнительное давление, возникшее под ней, направлено вниз, и потому уровень жидкости с выпуклым мениском оказывается ниже, чем уровень свободной поверхности. Капиллярные явления мы наблюдаем несколько раз в день, когда вытираемся полотенцем или бумажной салфеткой. Вода поднимается по тонким волокнам, из которых они состоят, и таким образом уходит с рук. Вообще же капиллярные явления встречаются повсеместно — это и движение воды по стеблям растений, и движение крови по капиллярам нашего организма. Неудивительно, что их изучение и правильное использование столь необходимы.

КАПИЛЛЯРЫ В ПРИРОДЕ

Растения получают питание из почвы благодаря капиллярным явлениям. Влага поднимается по капиллярам в корнях и стеблях. Капилляры имеются также в самой почве — это промежутки между ее частицами. Вода в процессе может сильно испаряться. Чтобы уменьшить испарение, почву разрыхляют, при этом капилляры разрушаются и влага сохраняется. Движение воды в почве чрезвычайно важно для жизни растений и вообще для жизни на нашей планете.



Вода абсорбируется корневыми волосками

Транспирация — движение воды через растение.

ФЛОТАЦИЯ

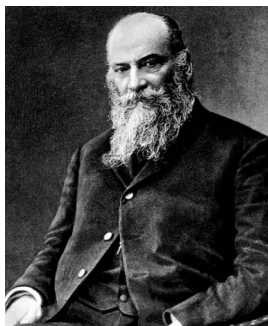
При обогащении руд применяют явление смачивания. Этот метод называют флотацией — всплыванием. Руду дробят в мелкий порошок и добавляют жидкость, смачивающую полезный компонент, который необходимо выделить. Кусочки нужного вещества покрываются пленкой, прилипают к воздушным пузырькам и всплывают, а остальная порода оседает на дно.



Перед флотацией руду дробят в мелкий порошок.

ПОЛЕТ: ТЫСЯЧЕЛЕТНЯЯ МЕЧТА

Люди издавна мечтали о полете, наблюдая за птицами в небе. Идея о возможности претворения полета в реальность не оставляла их. Сначала в воздух поднялись воздушные шары, потом самолеты и вертолеты, затем космические корабли. Что же такое полет? Это самостоятельное перемещение объекта в газообразной среде или вакууме. Его можно осуществлять с применением реактивной тяги или других двигательных средств либо без этого — по инерции.



Николай Егорович Жуковский (1847—1921) сделал ряд основополагающих открытий в аэродинамике и аэромеханике.

Выдающиеся открытия в области аэродинамики и аэромеханики принадлежат Николаю Егоровичу Жуковскому. Он проводил глубокие исследования динамики полета птиц, а также составил основные уравнения динамики для центра тяжести планирующего тела, нашел траектории полета при различных условиях движения воздуха. На основе его трудов построена авиационная наука.

Чтобы контролировать высоту полета в силе тяготения при скорости ниже орбитальной, нужно не только изначально придать телу поступательное движение, но также использовать другие средства: статические, такие как архимедова сила или магнитное поле, или динамические, такие как реактивная тяга, электромагнитная сила, подъемная сила газового потока. Принцип полета определяет подъемная сила — то, каким образом и за счет чего она создается. Сегодня на практике используются такие принципы полета, как аэродинамический, аэростатический, ракетодинамический, инерционный.

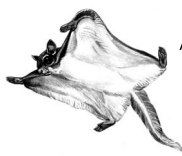
СИЛА ПРОТИВ СИЛЫ

Согласно аэродинамическому принципу, подъемная сила для полета создается благодаря силовому взаимодействию летательного аппарата с воздушной средой. Таким образом, сила тяжести преодолевается благодаря аэродинамической силе, то есть силе реакции на отбрасывание назад части воздуха, который обтекает несущие поверхности летательного аппарата.



ЖИВОТНЫЕ В НЕБЕ

В природе аэродинамический принцип полета используют современные летающие птицы, насекомые, рукокрылые млекопитающие. В древности его также применяли птерозавры — вымершие ныне рептилии. Все они применяют несущие свойства крыла. Птицы и некоторые млекопитающие, а также летучие рыбы способны к планирующему полету. Например, белка-летяга использует для планирования кожистые перепонки, расположенные между передними и задними лапами.



Летяга может маневрировать, изменяя натяжение перепонки. Она способна даже изменять направление полета на 90°.

РЕКОРДЫ ПОЛЕТА

Самую большую скорость при пикировании — свыше 370 км/ч — развивает хищная птица сокол-сапсан. А самый быстрый горизонтальный полет был зафиксирован у одного из видов летучих мышей — бразильского складчатогуба. Это крохотное существо весом не более 9 г и длиной 15 см — действительно мировой рекордсмен, потому что может лететь со скоростью больше 160 км/ч.



*Сокол-сапсан,
мировой
рекордсмен
по скорости
пикирования.*

АРХИМЕДОВА СИЛА ДЛЯ АЭРОСТАТА

В основе аэростатического принципа полета лежит архимедова сила, равная силе тяжести воздуха, вытесненного телом. Именно благодаря ей в небо поднялись первые воздушные шары, действуют современные аэростаты и дирижабли, хотя последние также используют двигатель. Первый воздушный шар поднялся в небо в 1783 г. и был наполнен горячим воздухом. Такие шары называют монгольфьерами. Шары с гелием или водородом — шарльеры, а шары с двумя емкостями для нагретого воздуха и легкого газа — розьеры. Все эти названия даны в честь их изобретателей.

ВИНТОКРЫЛЫЕ МАШИНЫ

Вертолет — это винтокрылый летательный аппарат, в котором подъемную и движущую силы создают несущие винты, получающие энергию от двигателей. Автожир отличается от вертолета тем, что его несущий винт создает только подъемную силу на основе авторотации, то есть от встречных потоков воздуха.



*Межпланетные зонды
долгое время находятся
в свободном полете.*

В безвоздушном пространстве кроме полета по инерции применяются и другие физические идеи и принципы. Так, используется солнечный парус, на который оказывает давление звездный ветер. Ускорение космический аппарат может приобрести, выполнив гравитационный маневр благодаря воздействию крупных планет. Существуют также аппараты свободного полета, которые не испытывают значительного влияния гравитационных полей планет. К ним можно отнести межпланетные зонды.

ПАРЯЩИЕ ПЛАНЕРЫ

Что объединяет бумажный самолетик и многотонный космический челнок, возвращающийся на Землю? Оба они планируют в атмосфере. Но чаще всего под планером понимают спортивный летательный аппарат из легкого металла, дерева и пластика. В воздухе его поддерживает подъемная сила, которую создает набегающий воздушный поток. В подавляющем большинстве случаев планеры не имеют двигателей и на место взлета их или приносят, или привозят.



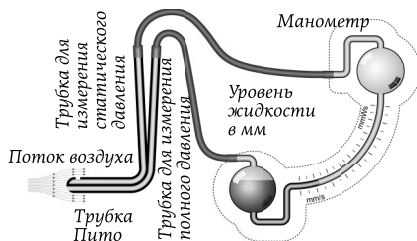
ЗАКОН БЕРНУЛЛИ: ОТ ТЕННИСА ДО АВИАЦИИ

Закон, или принцип, Бернулли, названный по имени первооткрывателя, гласит, что для стабильно текущего потока жидкости или газа сумма давления, кинетической энергии и потенциальной энергии на единицу объема постоянна в любой точке потока. Таким образом, измерив давление жидкости в двух точках, можно определить ее скорость.

Даниил Бернулли, принадлежавший к семье талантливых ученых, сформулировал свой принцип в 1726 г. Из него следует, что если скорость потока возрастает, то давление его падает, и наоборот. Движение жидкостей и газов происходит в соответ-

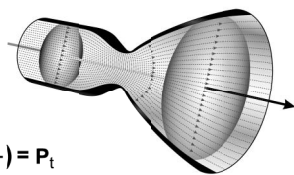
ТРУБКА ПИТО И ТРУБКА ПРАНДТЛЯ

Прибор для измерения полного напора текущей жидкости или газа изобрел французский инженер-гидравлик Анри Пито в 1732 г. Трубка Пито, как ее назвали, используется для определения относительной скорости и объемного расхода в газоходах и вентиляционных системах, в комплект с ней обязательно входит манометр. Также она находит применение в авиации как составная часть трубки Прандтля. Трубка Прандтля получила название в честь изобретателя — немецкого гидроинженера Людвига Прандтля — и предназначена для измерения динамического давления. Для этого сначала производится измерение полного и статического давления, разница между ними (то есть собственно динамическое давление) определяется с помощью манометра. Это позволяет определить одновременно скорость и высоту полета.



Измерение давления с помощью трубки Пито.

Даниил Бернулли
(1700—1782),
швейцарский
физик
и математик.
Считается одним
из основателей
гидродинамики,
математической
физики
и кинетической
теории газов.



$$(P_s + \frac{\rho V^2}{2}) = P_t$$

$$(P_s + \frac{\rho V^2}{2})_1 = (P_s + \frac{\rho V^2}{2})_2$$

P — давление
 V — скорость
 ρ — плотность

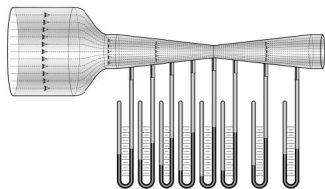
Статическое давление + Динамическое
давление = Общее давление

Уравнения, отражающие закон Бернулли.

ствии с законом сохранения механической энергии. Принцип Бернулли проявляется, если пренебречь вязкостью и если поток движется по прямой. Согласно этому принципу, газ, выходящий из дымовой трубы, будет засасываться быстрым потоком другого газа, обтекающего его.

Таким образом, чем выше скорость потока идеальной жидкости или газа, тем ниже ее давление. Полное давление включает статическое и динамическое давление.

Из закона Бернулли следует, что, если возрастает динамическое давление, то есть скоростной напор жидкости, статическое давление будет падать. Благодаря закону Бернулли можно в основном объяснить эффект Вентури, который заключается в сле-



Измерение давления в потоке жидкости согласно закону Бернулли и эффекту Вентури.

дующем. Поскольку в узкой части трубы скорость течения выше, а давление на той же высоте меньше, чем в более широкой трубе, столбы жидкости оказываются на разных высотах. Подобный перепад давления можно вычислить по уравнению Бернулли.

Данный эффект получил свое название в честь итальянского физика Джованни Вентури (1746—1822). На нем основана работа всевозможных расходомеров, в том

ЭФФЕКТ МАГНУСА, ЗАКОН БЕРНУЛЛИ И СПОРТ

Брошенный спортсменом мяч, вращаясь, создает вокруг себя вихри. На одной его стороне направление вихря совпадает с направлением обтекающего потока и увеличивает его (потока) скорость. На другой стороне направление вихря противоположно потоку, что снижает его скорость. Вращающийся объект создает в среде вокруг себя вихревое движение. Отсюда, согласно закону Бернулли, возникает разность давлений. Из-за этой разности возникает «поперечная» сила, направленная перпендикулярно движению потока и смещающая мяч к той стороне, где скорость потока выше. Это явление получило название эффекта Магнуса в честь открывшего его в 1852 г. немецкого физика Генриха Магнуса. Эффект этот часто применяют спортсмены. В теннисе он используется в так называемом ударе топ-спин. По мячу наносят удар снизу вверх, придавая ему сильное вращение. Эффект Магнуса сообщает ему определенную траекторию. Он совершает нырок вниз, оставаясь в пределах корта или же падая на половину стола соперника, усложняя тому задачу нанести ответный удар.

числе трубы Вентури, а также пароструйных и водоструйных насосов. Применение закона Бернулли привело к появлению такой важной дисциплины, как гидравлика.

ЗАТЯГИВАЮЩАЯ СИЛА

На железнодорожных станциях при приближении поезда обычно объявляют: «Отойдите от края платформы». Это предупреждение, можно сказать, написано кровью. Если человек стоит близко к несущемуся мимо скоростному поезду, его может затянуть под колеса. Такая же затягивающая сила возникает, когда рядом проходят два корабля. В пространстве между ними получается узкий поток, где скорость выше, а давление ниже, чем по обе их стороны. Более высокое давление снаружи может притянуть суда друг другу и привести к столкновению. Эта опасность хорошо знакома всем морякам. Знают о ней и водители. Многотонные грузовики с прицепами, идущие на большой скорости, также притягивает к машинам, стоящим у обочины. Именно поэтому водителям запрещено останавливаться на обочинах скоростных автострад.

*Находиться
рядом
с быстро
несущимся
поездом очень
опасно.*



ЗАКОН БЕРНУЛЛИ И САМОЛЕТЫ

Крыло самолета в разрезе — это сочетание двух выпуклых линий, где кривизна нижнего контура меньше, чем кривизна верхнего. Поэтому воздух обтекает нижнюю кромку медленнее, чем верхнюю. А раз скорость меньше, то и давление больше. Так создается подъемная сила. Разность давлений растет с увеличением скорости, растет и подъемная сила. Она позволяет самолету оторваться от земли и взлететь, а потом держаться в воздухе при горизонтальном полете.

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ИЛИ ПОЧЕМУ ТРЯСЕТ САМОЛЕТ

Турбулентность — весьма распространенное явление, которое играет важную роль в природе, науке и технике. Обычно, когда скорость течения в жидкости или газе возрастает, в этой среде начинается самопроизвольное образование множества волн — нелинейных, фрактальных. Эти волны возникают случайно и хаотически изменяют свою амплитуду. Появляются они чаще всего у стенки, на границе течения или тогда, когда волна разрушается или опрокидывается. Для их объяснения и изучения были созданы и создаются различные модели.

Течения по своему характеру принято делить на ламинарные и турбулентные. Ламинарное движение характеризуется тем, что все частицы тонкого слоя движутся с одной скоростью. При переходе от одного слоя к другому, сменному, скорость меняется постепенно. Однако именно турбулентные течения преобладают в природе, да и в технике. Турбулентность возникает при движении воздушных масс, при движении воды в океанах и реках, плазмы в звездах и газов в межзвездных туманностях. Турбулентность обнаруживается в трубах, каналах, струях. Возникает она самопроизвольно, когда различные области среды проникают одна в другую или следуют слишком близко друг к другу, при внезапных перепадах давления, при случайной внешней силе или без нее. Так, движение снега в лавине всегда турбулентно. Скорость, давление, температура совершают хаотические колебания вокруг средних значений.

Как это часто бывает в физике, к идеям турбулентности привело изучение законов, характерных для ламинарных течений в ньютоновских жидкостях. Именно для ламинарных течений возможны точные решения уравнений движения жидкости, то есть уравнений Навье—Стокса.

Британский физик Джордж Габриэль Стокс в 1845 г. вывел дифференциальные уравнения, которые описывают течение вязких (в общем случае сжимаемых) жидкостей. В 1821 г.

ВЕЗДЕСУЩАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Турбулентность связана не только с течениями жидкостей в трубах, ее анализ можно применить к онкологии, радиоактивному распаду и даже к колебаниям биржевых курсов. Турбулентными являются также процессы, происходящие в легких и сердце человека. В авиации же турбулентность проявляется как «болтанка». Самолет внезапно начинает трясти под воздействием вихревых потоков воздуха. Обычно она неопасна, просто неприятна, но иногда может приводить к катастрофам.



Самолет, попавший в зону турбулентности, может столкнуться с серьезными проблемами.

такие же уравнения для несжимаемой жидкости получил Анри Навье. Подобных результатов еще до 1845 г. добились Огюст Коши, Симеон Дени Пуассон и Адемар Сен-Венан. Но вариант Стокса оказался более удачным, формулировка наиболее исчерпывающей, и в истории утвердилось название «уравнения Навье—Стокса».

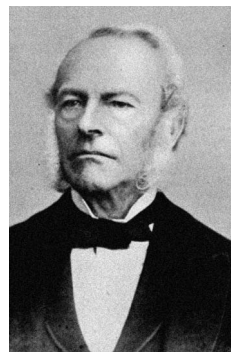
Уравнения эти Стокс вывел для движения жидкости в круглой трубе. По сути, это второй закон Ньютона с учетом давления и вязкости. Несколько лет спустя Стокс вывел также формулу сопротивления при равномерном движении шара в неограниченной жидкости. Уравнения Навье—Стокса — одни из самых важных в гидродинамике, они находят применение при решении множества технических проблем и при математическом моделировании природных процессов. Но довольно быстро выяснилось, что их решения совпадают с опытом, только когда скорость движе-

ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА

Число Рейнольдса — безразмерная величина, от значения которой зависит, каким является поток жидкости: ламинарным или турбулентным. Оно определяется по формуле $Re = vL\rho/\eta$, где ρ — плотность жидкости, v — скорость потока, L — характерная длина элемента потока, η — коэффициент вязкости. При значениях этого числа до нескольких сот единиц поток полностью ламинарен, то есть не содержит никаких завихрений. Потом небольшие вихри все же начинают появляться. Такой поток называется промежуточным. При значениях 2000—3000 поток становится полностью турбулентным. Число Рейнольдса очень удобно при проектировании различных объектов — от самолетов до гоночных яхт и высотных зданий. Уменьшенную модель самолета или яхты помещают в аэродинамическую трубу и подбирают безопасное с точки зрения турбулентности число Рейнольдса. Правда, в наши дни подобные расчеты нередко проводят только на компьютерах.



Вертикальная аэродинамическая труба.



*Джордж
Габриель
Осборн Рейнольдс.
Именно он после ряда
экспериментов в 1883 г. показал, что суще-
ствуют два режима движения жидкости —
ламинарный и турбулентный.*

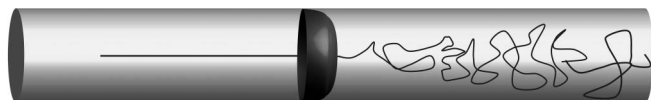
ния потока, а также диаметр трубы или шара невелики. Дальнейшие исследования провел Осборн Рейнольдс. Именно он после ряда экспериментов в 1883 г. показал, что существуют два режима движения жидкости — ламинарный и турбулентный.

Он нашел новый параметр, позднее названный числом Рейнольдса, который позволяет предсказывать появление турбулентности для конкретного течения в трубе определенного диаметра.

Для турбулентности, как уже говорилось выше, характерны и линейные, и нелинейные волны. Последним не свойственны ни дифракция, ни интерференция, ни поляризация. Однако характерны нелинейные процессы, такие как самофокусировка. При этом резко возрастают силы трения на поверхности, перенос энергии и импульса и другие параметры. Поэтому в трубе с абсолютно гладкими стенками при скорости, превышающей критическую, под воздействием одной силы тяжести самопроизвольно образуются нелинейные волны и турбулентность. Она появится и при дополнительной случайной внешней силе. В турбулентном течении мгновенные параметры среды распределяются по случайному закону. Из этого следует, что турбу-



*Ламинарное
течение*



*Турбулентное
течение*

Ламинарное и турбулентное течения в трубах.

лентностью можно управлять, регулируя средние параметры. Например, это можно делать, изменяя диаметр трубы.

В 1941 г. А. Н. Колмогоров и А. М. Обухова разработали теорию однородной турбулентности для несжимаемых течений при больших числах Re . Изучение турбулентности активно продолжается в наши дни. Но, несмотря на множество действующих моделей этого явления, точного аналитического решения системы уравнений Навье—Стокса со всеми возможными поправками еще не получено.

ПОГОНЯ ЗА ВОЛНОЙ

Солитон — это структурно устойчивая одиночная волна, действующая как поток частиц. Она распространяется в нелинейной среде и может долго сохранять свою структуру неизменной. Это можно использовать для передачи данных без помех на большие расстояния. Впервые термин «солитон» ввел Джон Скотт Рассел. В 1834 г. 26-летний инженер-кораблестроитель занимался исследованиями движения речных судов на канале близ Эдинбурга, изучая вопрос замены использовавшейся тогда для барж конной тяги на паровую. Однажды он следил за такой баржей, которую тянула пара лошадей. Вдруг баржа остановилась. Но масса воды, которую она привела в движение, собралась у носа судна и быстро показилась вперед, приняв форму одиночной, огруглой и гладкой волны. Эта волна неслась вдоль канала, не снижая скорости и не меняя формы. Рассел вскочил на лошадь и помчался за волной. Через одну или две мили волна уменьшилась и затерялась. Однако он продолжил исследования и в 1845 г. опубликовал результаты, назвав эту волну уединенной (солитоном), или волной переноса. В дальнейшем выяснилось, что турбулентность во многих случаях — это цепочка солитонов. В природе же солитоны встречаются нередко — это и смерчи, и цунами, и даже знаменитый девятый вал, изображенный И. К. Айвазовским.

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ФРАКТАЛЫ

Турбулентные потоки трудно смоделировать точно, но в этом помогает идея фракталов, ведь именно фрактальные волны образуются при переходе к турбулентному течению. Понятие «фрактал» впервые ввел французский математик Бенуа Мандельброт в 1975 г. Это слово происходит от латинского *fractus*, одно из значений которого «сломанный, разбитый». Многим структурам присуща так называемая геометрическая регулярность, она же инвариантность по отношению к масштабу, или самоподобие. Рассматривая эти объекты в разных масштабах, можно обнаружить одни и те же фундаментальные элементы. Эти закономерности повторяются и определяют дробную, или фрактальную, размерность структуры. Итак, фрактал — это бесконечно самоподобная геометрическая фигура, каждый фрагмент которой повторяется при уменьшении масштаба. Природные формы описываются фрактальной геометрией, вероятно, более изящно и точно, чем евклидовой геометрией. Так, от ствола дерева отходят толстые ветки, от них — ветки потоньше и т. д. Фрагмент облака похож на большое облако, а от артерий отходят артериолы, от них, в свою очередь, капилляры. То есть ветка подобна всему дереву, а артериолы и капилляры — всей кровеносной системе. То же самое происходит и с морской береговой. Неровная береговая линия при увеличении масштаба остается неровной, похожей сама на себя.



Ветка дерева подобна самому дереву, значит, оно самоподобно и имеет фрактальную структуру.

ЧТО ЖЕ ТАКОЕ НЕЛИНЕЙНОСТЬ

Для турбулентности важно понятие нелинейности. Свойства нелинейных систем зависят от интенсивности протекающих в них процессов и описываются нелинейными уравнениями, где не выполняется принцип суперпозиции. Это означает, что отклик подобных систем на сумму различных воздействий не равняется сумме откликов на каждое отдельное воздействие. Собственно говоря, нелинейность присуща всем физическим процессам — от микромира до масштабов Вселенной.

СКОБЫ НА КРЫЛЬЯХ

Турбулентность приносит не только вред, но и пользу. Так, при обтекании тела, в том числе корпуса самолета, движение воздуха замедляется, создавая так называемый пограничный слой. А его надо ускорить. Кроме того, при переходе от ламинарного движения к турбулентному возникают колебания давления и, соответственно, подъемной силы. Параметры потока надо стабилизировать. И для этих целей на самолетном крыле устанавливают вихрегенераторы, которые выглядят как изогнутые скобы. Они, согласно со своим названием, создают вихри, турбулентность, отклоняя поток немного в сторону, а на это место устремляется свободный воздух. В результате пограничный слой ускоряется, но быстрый поток оказывается удаленным от поверхности на некоторое расстояние.



Вихрегенераторы на крыле самолета.

ПРИСПОСОБЛЕНИЕ К ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Животные благодаря эволюции прекрасно приспособлены к турбулентности. Они умеют подавлять ее, управлять ее структурой, извлекать из набегающего турбулентного потока необходимую энергию. Этому способствуют плотно прилегающая шерсть, перья, гладкая кожа, как у морских животных. У китов вдоль тела проходят особые канавки, которые придают турбулентному течению специфическую структуру. А острые кончики крыльев птиц, плавников рыб и китообразных позволяют уменьшить размер волны, образующейся на их краях.



Птица способна двигаться в турбулентных потоках и даже управлять ими.

БОРЬБА С ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ — ВИНГЛЕТЫ

У самолетов на концах крыльев имеют загнутые вверх законцовки — так называемые винглеты. Их делают, чтобы избежать турбулентности и сэкономить горючее. Благодаря винглетам уменьшается размер и количество вихрей, образующихся за крылом. Такие вихри отнимают полезную для полета кинетическую энергию, создавая так называемые волновые потери. Частичное избавление от них дает экономию топлива до 4%.



Винглет на конце крыла.

АТОМНАЯ ТЕОРИЯ: СТРОЕНИЕ МАТЕРИИ

Согласно атомной теории, все в мире состоит из мельчайших частиц, соединенных ядерными и электромагнитными силами. Разрабатывать эту идею начали еще в древности, но атомы очень долго считали неделимыми. Только на грани XIX—XX вв. ученые выяснили, что атом делится на субатомные, элементарные, частицы. Знание строения атома помогло объяснить Периодический закон, создать атомное оружие и атомные электростанции.



Демокрит (ок. 460 — ок. 370 до н. э.), древнегреческий философ, один из основателей атомизма.

Атом, согласно современному определению, представляет собой наименьшую часть химического элемента, являющуюся носителем его свойств, которая входит в состав сложных и простых веществ. Название «атом», что по-гречески значит «неделимый», появилось еще в Древней Греции. Древнегреческие философы Левкипп, Демокрит и другие считали, что вещество состоит из неделимых, вечных и неразрушимых корпускул — атомов — и пустоты между ними. Так и считали долгие века. Однако в 1897 г. Джозеф Джон Томсон открыл электрон. В 1919 г. был открыт протон, а в 1932 г. — нейтрон.

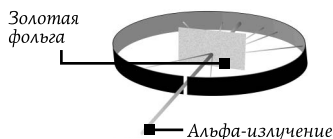
Томсон предложил модель атома, согласно которой он представляет собой облако положительного заряда, равного его размеру, и отрицательно заряженные маленькие корпускулы (то есть электроны). Положительные и отрицательные заряды равны. Корпускулы в этой модели распределялись внутри положительно заряженного облака, подобно изюминкам в тесте. Поэтому ее прозвали пудинговой моделью атома. Однако она была опровергнута Резерфордом.

В 1911 г. британский физик Эрнест Резерфорд предложил планетарную модель, согласно которой атом состоит из ядра, вокруг которого вращаются электроны, как плане-

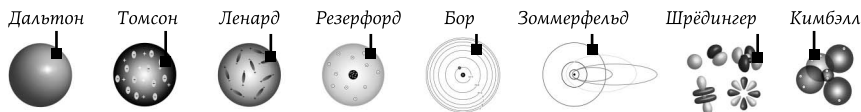
ты вокруг Солнца. Однако такое описание имеет противоречие с электродинамикой. Электрон, вращаясь, должен излучать элек-

ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА

В 1906 г. Эрнест Резерфорд провел любопытный опыт. Он обстреливал тонкий золотой лист альфа-частицами (ядрами гелия). Оказалось, что большинство частиц через него проходят, но одна из 10 000 отклоняется от начального направления движения более чем на 10° . А значит, атом не является сплошным образованием. Но что же ее отталкивает? Альфа-частица больше электрона в 8000 раз, и электрон не может заметно изменить ее траекторию. Значит, в атоме имеется более крупное образование, отталкивающее альфа-частицы, и это ядро.



Опыт Резерфорда показал, что атомы золота отклоняют некоторые альфа-частицы.



Различные модели атомов.

ромагнитные волны, а значит, постоянно терять энергию. И в таком случае он должен очень быстро упасть на ядро.

Чтобы снять эти противоречия, датский физик Нильс Бор ввел постулаты, на основе которых впоследствии развилась квантовая механика. Но сегодняшняя модель атома не утверждает, что у электронов есть определенные орбиты. Электроны в одной из позднейших моделей образуют так называемые электронные конфигурации разных форм.

Согласно квантово-механической модели, атомы классифицируются по количеству протонов и нейтронов в ядре: число протонов Z отвечает порядковому номеру атома в периодической системе Менделеева. Оно соответствует заряду атома и определяет его принадлежность к определенному химическому элементу. Число Z также определяет суммарный положительный электрический заряд (Ze) атомного ядра и число электронов в атоме. Дело в том, что атом нейтрален. И потому количество положительно заряженных протонов должно соответствовать количеству отрицательно заряженных электронов. Если атом теряет или приобретает

ПОСТУЛАТЫ БОРА

Первый постулат Бора, который называют также постулатом стационарных состояний, говорит следующее: в атоме существуют стационарные состояния, находясь в которых, он не излучает энергии. Стационарным состояниям соответствуют стационарные орбиты.

Второй постулат Бора, который называется также правилом частот, гласит: когда электрон переходит с одной стационарной орбиты на другую, излучается (поглощается) один фотон.

Благодаря этим постулатам развилась квантовая механика.

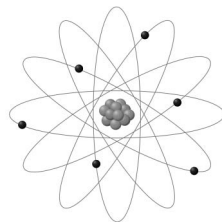


Институт Нильса Бора в Копенгагене, основанный великим ученым в 1920 г.

СТРОЕНИЕ АТОМА

Атомное ядро состоит из положительно заряженных протонов и нейтронов, которые заряда не имеют. Протоны и нейтроны называются нуклонами, от латинского слова *nucleus* — ядро. Ядро окружают отрицательно заряженные электроны. Собственно говоря, нельзя утверждать, что у электронов есть какая-либо определенная траектория. Электроны в атоме образуют оболочки.

Упрощенная модель атома, где вокруг ядра по разным орбитам вращаются электроны.



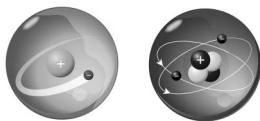
электрон, он становится положительно или отрицательно заряженным ионом.

Например:

- Cl^- — атом хлора. Cl^- — отрицательно заряженный ион хлора с дополнительным электроном;
- Mg^{2+} — атом магния. Mg^{2+} — положительно заряженный ион магния, потерявший два электрона.

Более 99% массы атома — это ядро. Электроны составляют очень незначительную его часть. Массу атома измеряют в атомных единицах массы, равных $1/12$ массы атома стабильного изотопа углерода ^{12}C .

Атомы образуют межатомные связи и формируют молекулы. Молекулы могут состоять как из одного вида атомов, так и из нескольких.



Слева — атом водорода H , состоящий из одного протона и одного электрона. Справа — атом гелия, ядро которого состоит из двух протонов и двух нейтронов и окружено двумя электронами.

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Молекулярно-кинетическая теория возникла в XIX в. Она рассматривает строение вещества, главным образом газов, на основе следующих принципов: все тела состоят из частиц (атомов, молекул и ионов), которые находятся в непрерывном хаотичном тепловом движении и взаимодействуют путем абсолютно упругих столкновений. Молекулярно-кинетическая теория газов связывает измеримые макроскопические показатели состояния газа, то есть температуру, давление и объем, с его микроскопическими характеристиками — числом, массой и скоростью движения молекул, которые обладают кинетической энергией.

Зная скорость движения молекул, мы получаем возможность рассчитать давление, температуру, объем. Чем больше температура, тем выше средняя скорость частиц, составляющих газ. Эту взаимосвязь описывает следующее уравнение:

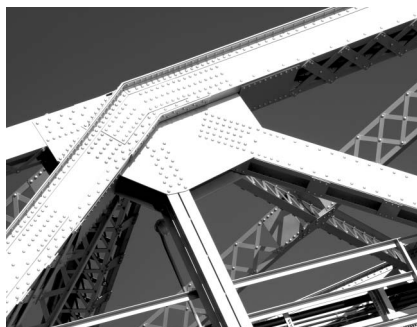
$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

где m — масса одной молекулы газа, v — средняя скорость теплового движения молекул, T — температура газа, k — постоянная Больцмана. Видно, что в правой части уравнения находятся микроскопические характеристики, а в левой — макроскопические. Таким образом, молекулярно-кинетическая теория связывает свойства молекул с измеримыми свойствами видимого мира.

Одним из доказательств справедливости молекулярно-кинетической теории стала диффузия. Это процесс, при котором материя или энергия переносится из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией молекул либо других частиц. Так, частицы духов смешиваются с воздухом и дают аромат, так, вода, если в нее капнуть чернила, со временем обретает равномер-

КАК РАЗДЕЛИТЬ ИЗОТОПЫ

Доказано, что тяжелые молекулы диффундируют медленнее, чем легкие. Эта разница находит применение в разделении субстанций, частицы которых имеют разный молекулярный вес. Например, разделяют изотопы. Газ, который содержит разные изотопы, пропускают через пористую мембрану, и легкие изотопы проникают через нее быстрее тяжелых.



Чтобы придать твердость железным и стальным деталям, их подвергают диффузному насыщению углеродом. Этот процесс называется цементацией.

ДИФфуЗИЯ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Утечку газа дома и на производстве всегда можно почувствовать по резкому неприятному запаху. Однако у природного газа, который используется в наших домах, нет ни запаха, ни цвета. И чтобы можно было вовремя избежать беды, на распределительных станциях к газу добавляют особые резко пахнущие вещества. Чаще всего это меркаптаны, которые содержат серу. Они, благодаря диффузии, смешиваются с газом, а их запах ощущается даже при самых малых концентрациях.

Запах бытового газа обусловлен специально введенными в него примесями.



КОНЕЦ ТЕОРИИ ТЕПЛОРОДА

В 1798 г. физик Бенджамин Томсон (граф Румфорд) обратил внимание на то, как много тепла выделяется при сверлении каналов в орудийных стволах. Это противоречило принятой в те годы теории теплорода — субстанции, которая перетекает от одного тела к другому. Считалось, что тела нагреваются, когда теплорода в них становится больше, а охлаждаются, когда его количество уменьшается. Румфорд засомневался в существовании теплорода и провел ряд опытов. В одном из экспериментов он помещал под воду металлическую болванку, в которой высверливалось отверстие. При этом выделялось достаточно тепла, чтобы через два часа вода закипела. Румфорд пришел к выводу, что тепло выделяется в результате движения частиц вещества, а теплородом это не объяснить. Постепенно от теории теплорода отказались.

СКОРОСТЬ ДИФфуЗИИ

Диффузия молекул протекает медленно. Сахар в стакане с водой, если его не перемешивать, растворится только через несколько недель. Если медь покрыть золотом, то оно будет диффундировать в медь, но толщины в несколько микронметров золотосодержащий слой достигнет лишь через несколько тысяч лет. Однако скорость можно увеличить, воздействуя на процесс. Так, в некоторых типах электронно-лучевых трубок используется металлический торий, который продиффундировал через металлический вольфрам при 2000°C .

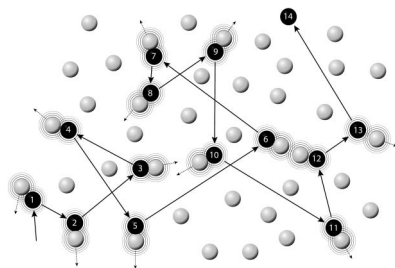
Процессы
диффузии
идут
медленно,
но верно.



ный цвет. Без диффузии не было бы жизни на Земле — именно она поддерживает равномерный состав атмосферы у поверхности Земли, благодаря ей растения поглощают углекислый газ и выделяют кислород. Да что там говорить, наше дыхание и даже пищеварение тоже основаны на диффузии. Кроме диффузии существуют и другие доказательства молекулярно-кинетической теории. Это броуновское движение и изменения агрегатных состояний вещества. Диффузия легла в основу целого ряда разделов современной физики, в том числе физической кинетики и статистической механики.

БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

В 1827 г. английский ботаник Роберт Броун изучал под микроскопом пыльцу растений. Он обнаружил, что пыльцевые зернышки хаотически движутся во все стороны, резко меняя направление. Это явление, которое назвали броуновским движением, присуще не только пыльце, но и любым взвешенным в жидкости или газе частицам. Позднее Альберт Эйнштейн и Жан-Батист Перрен показали, что броуновские частицы движутся благодаря тому, что их постоянно толкают молекулы вещества, которые к тому же сталкиваются между собой. Броуновское движение представляет собой следствие и свидетельство существования теплового движения. Его изучение позволило точно вычислить число Авогадро — одну из физических постоянных.

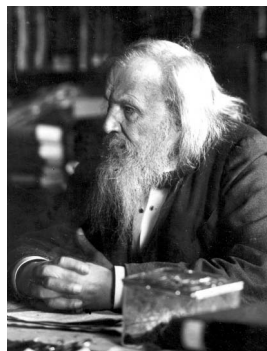


Броуновское движение названо так по имени Роберта Броуна, который в 1817 г. наблюдал хаотичное движение пыльцевых зерен в растительном соке.

РЕАЛЬНЫЕ И ИДЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

Положения молекулярно-кинетической теории приводят нас к модели идеального газа, для которого пренебрегают размерами его частиц и силами взаимодействия между ними. Однако в природных условиях большинство реальных газов ведут себя почти как идеальные, с разницей не более 1%. Поэтому уравнение идеального газа хорошо применимо к теоретическим расчетам.

Дмитрий Иванович Менделеев (1834—1907), выдающийся русский ученый. Он внес в уравнение Клапейрона некоторые уточнения и ввел понятие универсальной газовой постоянной.



Уравнение состояния идеального газа также называют уравнением Клапейрона—Менделеева.

Оно выглядит следующим образом:

$$PV = nRT,$$

где n — число молей газа; P — давление газа, Па; V — объем газа, м³; T — абсолютная температура газа, К; R — универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/моль×К.

Уравнение состояния идеального газа позволяет исследовать процессы, в которых остается неизменной масса, а также один из трех параметров — объем, температура, давление. Такие процессы называются изопроцессами, но возможны они только в лабораторных условиях, потому что в реальности всегда что-то будет отклонять значение параметра.

Количественные зависимости между двумя параметрами газа при неизменном третьем называют газовыми законами.

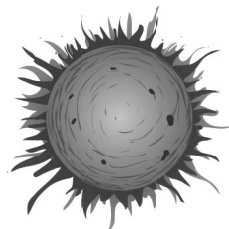
Процесс, идущий при постоянной температуре, называется изотермическим, и на графике изображается в виде изотермы. Для его воспроизведения необходимо, чтобы газ обменивался теплотой с термоста-

том. Этому процессу соответствует закон Бойля—Мариотта, согласно которому при постоянной температуре для газа данной массы произведение давления на его объем постоянно. Закон этот независимо

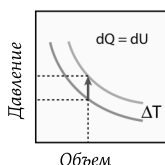
ЗВЕЗДА — ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

Внутреннее вещество звезды очень плотное, но ведет себя как идеальный газ. Это вещество составляют полностью ионизированные ядра водорода и гелия. Их размеры намного меньше, чем у атомов и молекул земных газов. Поэтому с помощью уравнения идеального газа можно рассчитать давление и температуру внутри звезды достаточно точно.

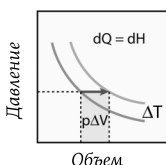
Внутренность звезды — плазма, ионизированный газ. И этот газ можно рассматривать как идеальный.



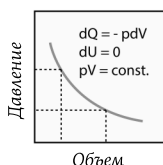
Изохорный процесс



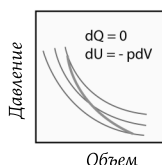
Изобарный процесс



Изотермический процесс



Адиабатический процесс



Различные термодинамические процессы.

друг от друга открыли английский ученый Роберт Бойль (1627—1691) и французский ученый Эдм Мариотт (1620—1684).

Процесс, идущий при постоянном давлении, называется изобарным, и на графике изображается изобарой. В лабораторных условиях его достигают, нагревая газ в цилиндре с подвижным поршнем. Газ при этом расширяется, а постоянство давления внутри цилиндра обеспечивает атмосферное давление, действующее на поверхность поршня. Этому процессу соответствует закон Гей-Люссака, согласно которому при постоянном давлении для газа данной массы отношение объема к температуре постоянно. Объем здесь прямо пропорционален температуре.

Процесс, который идет при постоянном объеме, называют изохорным и обозначают на графике изохорой. Ему соответствует закон, согласно которому при неизменном объеме для газа данной массы отношение давления к температуре постоянно, причем давление прямо пропорционально температуре. Этот закон установил в 1787 г. французский физик Жак Александр Сезар Шарль (1746—1823), поэтому он называется законом Шарля. Но в 1802 г. Гей-Люссак внес в этот закон некоторые уточнения, поэтому его называют также вторым законом Гей-Люссака.

Модель идеального газа прекрасно подходит для описания поведения реальных газов при высоких температурах и низких давлениях, но в других условиях наблюда-

Жозеф Луи
Гей-Люссак (1778—
1850), французский
физик и химик.
Один из газовых
законов
он установил
экспериментально
в 1802 г.



ИЗОХОРНЫЙ ПРОЦЕСС НА ПРАКТИКЕ

Изохорный процесс, конечно, в приближении, можно встретить и в обыденной жизни. Он наблюдается, когда при нагревании увеличивается давление газа в любом сосуде или в электрической лампочке. Используют его в газовых термометрах постоянного объема.

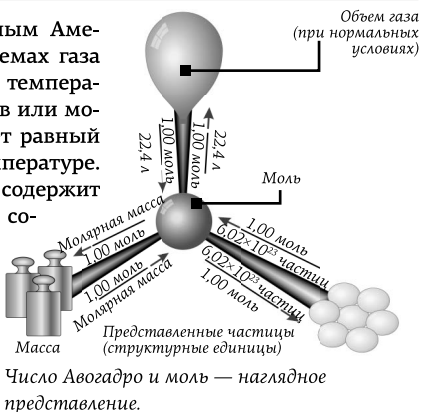


Скисание молока
в закрытой бутылке
также является
изохорным процессом.

ются существенные отклонения от газовых законов. Поэтому существуют уравнения, описывающие поведение реальных газов с учетом межмолекулярного взаимодействия и размеров молекул.

ФИЗИКА И ХИМИЯ В ЕДИНОМ ЗАКОНЕ

Закон, установленный итальянский ученым Амедео Авогадро, говорит, что в равных объемах газа при одинаковом давлении и одинаковой температуре содержится равное количество атомов или молекул, или же моль любого газа занимает равный объем при одинаковых давлении и температуре. Моль — это количество вещества, которое содержит столько же структурных единиц, сколько содержится в 12 г изотопа углерода ^{12}C . Количество структурных единиц в 1 моле вещества называется числом Авогадро — $N_A = 6,022140857(74) \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$. С его помощью можно определить заряд электрона, массу атома или молекулы и другие величины.



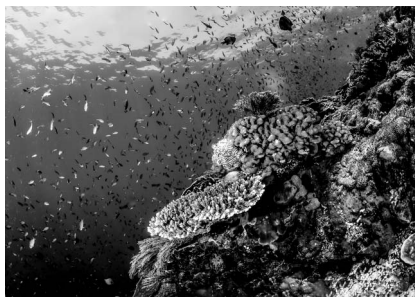
РАСТВОРЫ: ФИЗИКА ВМЕСТЕ С ХИМИЕЙ

Известно, что физические процессы не сопровождаются изменением состава вещества, а химические — сопровождаются. Однако любая химическая реакция проходит вместе с физическими явлениями — выделением или поглощением тепла, изменением цвета и другими. В природе все взаимосвязано, и существуют процессы, которые можно назвать физико-химическими. Одним из таких процессов является растворение, которое физика не может не рассматривать.

Физическую теорию растворов предложили Якоб Вант-Гофф и Сванте Аррениус. Согласно этой теории, частицы растворенного вещества распределены равномерно между частицами растворителя, не взаимодействуя друг с другом. Растворение происходит при помощи диффузии, которую мы уже рассматривали в рамках молекулярно-кинетической теории. Физическая теория успешно применялась для разбавленных растворов: к примеру, объясняла свойства электролитов и электрическую проводимость растворов. Однако для концентрированных растворов она не работала.

Химическую теорию растворов предложил Д. И. Менделеев. Согласно этой теории, частицы растворенного вещества и растворителя вступают друг с другом в химическую реакцию, образуя гидраты — нестойкие соединения переменного состава. Но Менделеев признавал роль и физического фактора при образовании растворов. Он говорил, что будет создана общая физико-химическая теория растворов, потому что «одни общие законы управляют как физическими, так и химическими явлениями». Он оказался прав, и сейчас растворение считается физико-химическим процессом.

Раствор — это однородная, то есть однородная, смесь переменного состава, которая состоит из растворителя, растворенного вещества и продуктов, получившихся в результате их взаимодействия.



Самый распространенный раствор на Земле — это морская вода.

ЧТО МЕНЯЕТСЯ ПРИ РАСТВОРЕНИИ

Растворитель отличается от растворенного вещества тем, что его агрегатное состояние при образовании раствора не изменяется. Растворение представляет собой переход молекул вещества из одной фазы в другую. К нему приводит взаимодействие частиц (атомов, ионов, молекул) растворителя с частицами растворенного вещества. Граница между фазами (например, твердой и жидкой) исчезает, меняются многие физические параметры — вязкость, плотность, могут измениться цвет, вкус. Например, вода, куда добавлены кристаллы соли или сахара, становится соленой или сладкой; если добавить в воду кристаллы марганцовки (перманганата калия), она приобретает малиновый цвет.

Перманганат калия (KMnO_4), привычная всем марганцовка, в твердом виде темно-фиолетовый, почти черный.

Растворяясь в воде, он придает ей фиолетовый цвет, а в разбавленных растворах — малиновый.

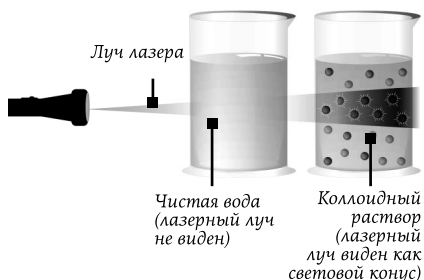
Разбавленный раствор быстро разлагается, оставляя бурый осадок диоксида марганца. Недаром марганцовку прозвали хамелеоном.



Существуют также дисперсные системы, образованные из двух или более фаз, которые практически не смешиваются и не реагируют друг с другом химически. При двухфазной системе первое вещество — дисперсная фаза — распределено в другой — дисперсионной среде. Система, где дисперсной фазой является жидкость, — это аэрозоль: облако или туман. Если дисперсная фаза газообразная, а дисперсионная среда жидкая, мы имеем дело с пеной. Когда обе дисперсные фазы жидкие — это эмульсии. Золи называют также коллоидными растворами. Коллоидные растворы — это высокодисперсные двухфазные системы, состоящие из дисперсионной среды и дисперсной фазы, причем линейные размеры частиц последней лежат в пределах от 1 до 100 нм.

КАК РАСПОЗНАТЬ КОЛЛОИДНЫЙ РАСТВОР ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В коллоидном растворе имеются мельчайшие крупинки или капельки жидкости, состоящие из большого количества молекул, а в истинных растворах в растворителе имеются лишь отдельные молекулы или ионы. Для коллоидных растворов характерен эффект Тиндаля, при котором коллоидные частицы рассеивают свет. Если пропустить через золь пучок света, то появится светлый конус, который можно видеть в затемненном помещении. Так можно распознать, является данный раствор коллоидным или истинным.



Эффект Тиндаля связан с тем, что коллоидные частицы поглощают световую энергию и затем выделяют ее во всех направлениях.

Многие вещества в человеческом организме находятся в коллоидном состоянии. Коллоидные растворы — это нервные и мышечные клетки, кровь и другие биологические жидкости. Таким образом, коллоидные системы имеют огромное значение и в биологии, и в жизни человека.

МОЛОКО КАК СЛОЖНАЯ СИСТЕМА

Оказывается, молоко, которое мы пьем, — сложная дисперсная система. Оно состоит из воды, молочного жира, белка казеина и молочного сахара. Жир в воде представляет собой эмульсию и постепенно поднимается вверх, образуя сливки. Казеин присутствует в виде коллоидного раствора. Когда молоко скисает, он выделяется. Его можно выделить и в виде творога, слегка подкислив молоко. Молочный сахар в молоке представляет собой молекулярный, или истинный, раствор, выделяется он только при испарении воды.

*Молоко
включает
и эмульсию,
и коллоидный
раствор,
и истинный,
молекулярный,
раствор.*



ЗОЛЬ И ГЕЛЬ — В ЧЕМ РАЗНИЦА

Золь — это дисперсная система «твердое в жидком», когда твердая дисперсная фаза, то есть частицы коллоидных размеров, распределяется в жидкой дисперсионной среде.

Гель — дисперсная система «жидкость в твердом», жидкость является дисперсной фазой, и она распределена в твердой дисперсионной среде. Гель можно получить с помощью коагуляции золя. Гели широко используются в медицине и косметологии.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Для объяснения строения Вселенной современная физика предлагает ряд теорий. Согласно этим теориям, наша Вселенная является такой, какая она есть, благодаря четырем видам фундаментальных сил, или, как говорят, фундаментальных взаимодействий — гравитационному, слабому ядерному, сильному ядерному и электромагнитному. Одной из задач науки в настоящее время является объединение их в единую модель.

Самое слабое из универсальных взаимодействий — гравитационное, или сила тяготения. Однако оно действует на любых расстояниях и между всеми материальными телами. Благодаря гравитации расширяется Вселенная, образуются черные дыры, существуют планеты и звезды, Земля вращается вокруг Солнца, а все, что находится на ней, не улетает в космическое пространство. Считается, что переносчиками гравитационного взаимодействия должны быть элементарные частицы, не имеющие массы, — гравитоны. Но их до сих пор не открыли. Описывается гравитационное взаимодействие общей теорией относительности. Слабое ядерное взаимодействие называется так потому, что оно слабее электромагнитного и сильного, но в 10^{25} раз сильнее гравитационного. Оно отвечает за процессы ядерного распада и действует только в пределах атомного ядра (10^{-18} м). В нем участвуют все частицы, кроме фотонов. Кроме того, есть частицы, которые принимают участие только в слабом взаимодействии, — это некоторые виды нейтрино. Переносчиками слабого ядерного взаимодействия являются определенные виды элементарных частиц — бозоны. Описывается оно теорией электрослабого взаимодействия. Сильное ядерное взаимодействие отвечает за связь между кварками и за притяжение между нуклонами (то есть протонами и нейтронами) в атомных ядрах. Без него не существовало бы ни протонов, ни нейтронов, ни атомных ядер, а значит, молекул, звезд,

НАСКОЛЬКО СИЛЬНА СЛАБАЯ ГРАВИТАЦИЯ

Чтобы заменить силу притяжения Солнца и Земли, пришлось бы привязать Землю к Солнцу тросами диаметром 5 м каждый, которые выдерживали бы по 2×10^{10} Н натяжения каждый. Таких тросов понадобился бы миллион миллионов, и они бы усеяли всю обращенную к Солнцу половину Земного шара. И эта колоссальная сила расходуется только на то, чтобы каждую секунду сворачивать Землю с прямолинейного инерционного движения всего лишь на 3 мм. Вот насколько сильным является самое слабое из фундаментальных взаимодействий.



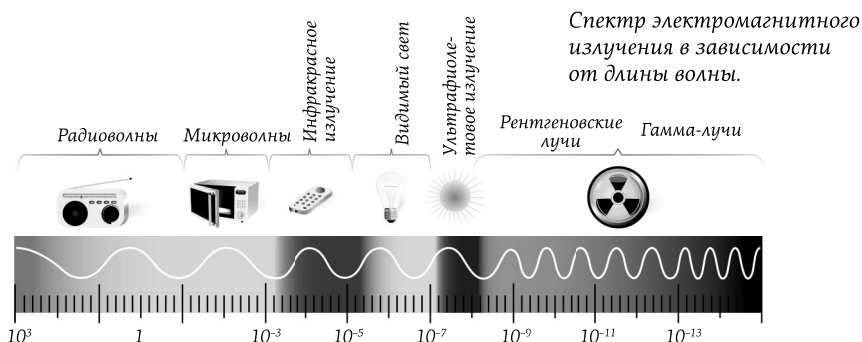
Сравнение
Солнца
и Земли.

*Нуклоны в атомных
ядрах удерживаются
вместе благодаря
сильному
взаимодействию.*



*Слабое взаимодействие отвечает
за распад атомного ядра.*

планет и самой жизни. Оно сильнее гравитационного в 10^{38} раз и действует на том же расстоянии, что и слабое (10^{-18} м), в пределах ядра. Переносчиками сильного ядерного взаимодействия являются глюоны — именно они помогают кваркам удерживаться вместе и составлять протоны. Описывается сильное взаимодействие квантовой хромодинамикой.



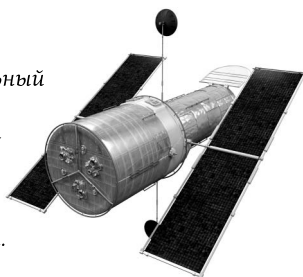
Электромагнитное взаимодействие присутствует между частицами, обладающими электромагнитным зарядом. Оно вызывает притяжение между электронами и атомными ядрами и приводит к существованию атомов. Это взаимодействие — причина появления магнитного поля Земли, которое защищает нас от космического излучения. Благодаря ему существует электрический ток, и созданы всевозможные полезные приборы, без которых не было бы нашей цивилизации. Оно сильнее гравитационного в 10^{56} раз. В отличие от сильного и слабого взаимодействий, электромагнитное — дальнodelствующее. Переносчиками электромагнитного взаимодействия являются фотоны. Описывается оно классической электродинамикой.

Давно прилагаются усилия, чтобы описать все четыре взаимодействия в одной теории. Три вида — электромагнитное, сильное и слабое — объединили в Стандартной модели, но для гравитационного используется отдельно теория относительности. Однако все еще впереди, и, вероятно, в обозримом будущем единая теория будет создана.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ БЕЗ ПОМЕХ

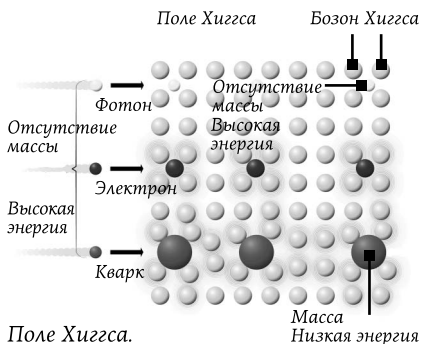
Один из примеров применения электромагнитного взаимодействия — орбитальный телескоп. В космосе он способен регистрировать электромагнитное излучение в диапазонах, в которых земная атмосфера является непрозрачной. Без помех, вызванных влиянием атмосферы, разрешающая способность такого телескопа в 7–10 раз больше, чем у подобного прибора, установленного на Земле.

Орбитальный телескоп позволяет открыть многие тайны Вселенной.



СУЩЕСТВУЕТ ЛИ ПЯТОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Других видов фундаментальных взаимодействий пока не обнаружено, хотя, после того как был открыт бозон Хиггса, поле Хиггса называют пятым взаимодействием. Переносчиком этого поля как раз и является бозон Хиггса, придающий массу элементарным частицам. Но пока трудно сказать, идет ли речь о пятом взаимодействии или о какой-то вариации уже известных.



ЭЛЕКТРИЧЕСТВО: ОТ ЯНТАРЯ ДО ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

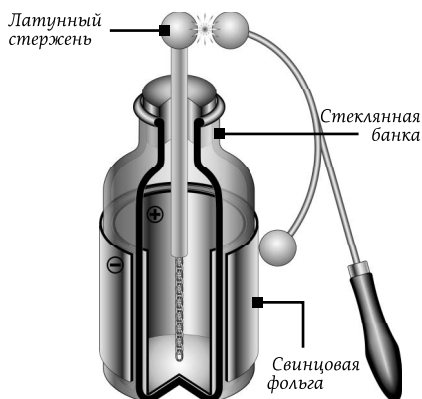
Электричеством называется совокупность явлений, в основе которых лежат существование, движение и взаимодействие электрических зарядов. Исследование электричества привело к возникновению множества идей, теорий и изобретений. И сегодня без воплощения этих идей невозможно представить нашу жизнь.

Еще греческий философ Фалес Милетский в VII в. до н. э. обнаружил, что потертый о шерсть янтарь (по-гречески — электрон) начинает притягивать легкие предметы. Это явление оказалось проявлением электричества.

Однако сам термин «электричество» ввел в 1600 г. Уильям Гилберт. В дальнейшем этой проблемой занимались Отто фон Герике, Стивен Грей, Питер ван Мушенбрук и другие.

ЛЕЙДЕНСКАЯ БАНКА — ПЕРВЫЙ КОНДЕНСАТОР

Конденсатор — это устройство для накопления заряда и энергии электрического поля. Первый электрический конденсатор сделал в 1745 г. Питер ван Мушенбрук в городе Лейден. Тогда новое изобретение называли лейденской банкой. Благодаря ей оказалось возможным накапливать сравнительно большие заряды, порядка микрокулона в современном измерении, а также впервые искусственно получить электрическую искру.



Лейденская банка стала стимулом к дальнейшему изучению электричества.



Янтарь послужил ученым для начала изучения электричества.

В 1785 г. французский физик Шарль Кулон открыл закон о взаимодействии электрических зарядов, напоминающий закон всемирного тяготения.

В первоначальной формулировке закон Кулона звучит так: модуль силы взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме

ПЕРВЫЙ ГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ

В 1791 г. итальянский физиолог Луиджи Гальвани наблюдал сокращение мышц у препарированной лягушки при электрическом разряде. А в 1800 г. его соотечественник, физик Алессандро Вольта, изобрел первый источник постоянного тока — гальванический элемент. Это был столб из серебряных и цинковых кружочков, которые разделялись бумагой, смоченной в подсоленной воде.



Алессандро Вольта (1745—1827), итальянский ученый, считается одним из основоположников учения об электричестве.

САМЫЙ БОЛЬШОЙ КОНДЕНСАТОР

Самый большой конденсатор на нашей планете — это земная атмосфера. Земная поверхность — это его нижняя обкладка, имеющая отрицательный заряд. Верхние слои атмосферы — верхняя обкладка, имеющая положительный заряд. Разность потенциалов между верхними слоями атмосферы и поверхностью Земли составляет 400 кВ, а у самой поверхности имеется постоянное электрическое поле, напряженность которого — 100 В/м. В атмосфере часто происходят грозы, во время которых возникают электрические искровые разряды, то есть молнии. Считается, что молнии поддерживают отрицательный заряд земной поверхности. Одновременно во время грозы с поверхности земли от острых предметов отходят токи, которые отводят от нее положительный заряд.



По одной из версий, молнии вызвали первоначальный синтез аминокислот и привели к появлению жизни на Земле.

прямо пропорционален произведению модулей этих зарядов и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними. В современной формулировке он выглядит следующим образом: сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме направлена вдоль прямой, которая соединяет эти заряды, пропорциональна их величинам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Если знаки зарядов разные, она пред-



ставляет собой силу притяжения, если одинаковые — силу отталкивания. Закон Кулона — это первый сформулированный на математическом языке фундаментальный количественный закон,

МОЛНИЕОТВОД

Правильное название громоотвода — молниеотвод, ведь гром — это только звуковое явление, сопровождающее молнию. Когда идет гроза, у земной поверхности возникает сильное электрическое поле, причем его напряженность особенно велика около острых проводников, которыми и являются молниеотводы. На конце молниеотвода образуется коронный разряд, и воздух вокруг подвергается сильной ионизации. Это приводит к уменьшению напряженности электрического поля около острия, благодаря чему индуцированные заряды не накапливаются на здании. Но если молния все же возникает, она бьет в молниеотвод и уходит в землю, не причинив никому вреда.

Молниеотвод состоит из молниеприемника (металлического штыря или сетки), заземляющего проводника токоотвода и заземлителя.



описывающий электромагнитные явления. Он послужил началом современной науки об электромагнетизме.

В науке об электричестве очень важен электрический заряд. Это свойство тел, которые могут создавать вокруг себя электрическое поле и с его помощью воздействовать на другие заряженные тела. Заряды бывают отрицательные и положительные, причем заряды одного знака отталкиваются, а заряды разных знаков

ВОЗДУШНЫЙ ЗМЕЙ БЕНДЖАМИНА ФРАНКЛИНА

Считается, что первый молниеотвод изобрел американский ученый и политический деятель Бенджамин Франклин в 1752 г., хотя на практике подобные опыты проводились и раньше. Однако именно Франклин доказал электрическую природу молнии. 10 мая 1752 г. он запустил в грозовое облако воздушного змея. Змей представлял собой шелковый платок на деревянных распорках. К нему был прикреплен медный штырь. К змею была привязана бечевка, на конце которой Франклин прикрепил металлический ключ. Молния ударила в змея и прошла по мокрой от дождя веревке до ключа, на котором образовался электрический разряд. Так Франклин доказал, что молния представляет собой мощный электрический заряд.



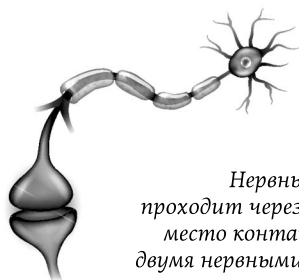
Электрическую природу молний доказал Бенджамин Франклин. Правда, в действительности он запускал змея из окна, ради собственной безопасности.

ЕСЛИ ВАС ЗАСТАЛА ГРОЗА

Чтобы избежать удара молнии во время грозы, надо соблюдать некоторые правила. Не стоит находиться на открытой местности, потому что молния всегда бьет в самую высокую точку. Если вы все же оказались в поле во время грозы, постарайтесь спрятаться в любом углублении или просто в самом низком месте, сядьте на корточки, пригните голову. Избегайте воды и отойдите подальше от берега — вода прекрасно проводит ток, и удар молнии может распространиться от водоема на 100 м. Выключите мобильный телефон, потому что бывали случаи, когда даже входящий звонок вызывал попадание молнии. Избавьтесь также от металлических предметов — иногда молния ударяла даже по связке ключей в кармане.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ВНУТРИ НАС

В нашем организме постоянно происходят электрические процессы. Это нервные импульсы, то есть волны возбуждения, распространяющиеся по нервному волокну и передающие информацию от периферических рецепторов к нервным центрам и, наоборот, от центральной нервной системы к мышцам и внутренним органам. В основе нервного импульса лежит потенциал действия — резкое изменение напряжения, которое вызвано быстрым перемещением ионов натрия и калия через мембрану клетки.



Нервный импульс проходит через синапс — место контакта между двумя нервными клетками или нервной и эффекторной клетками.

притягиваются. При движении заряженных тел создается также магнитное поле, что говорит о родстве магнетизма и электричества.

Само же электричество стало неотъемлемой частью современной цивилизации. Для его получения строят электростанции, для хранения производят батареи и аккумуляторы. Однако и в начале XXI в. больше миллиарда жителей нашей планеты все еще обходятся в быту без электричества.

САМЫЕ МОЩНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

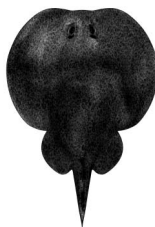
Во время строительства гидроэлектростанции «Три ущелья» на реке Янцзы близ китайского города Саньдоупин пришлось переселить на новые места более 1 300 000 человек, а под воду ушли два города. В истории мирового строительства это стало самым крупным переселением. И станция, которую построили к 2012 г., оказалась первой в мире по мощности — 22 500 МВт. По выработке электроэнергии в год (98,1 млрд кВт/ч) она находится на втором месте после бразильско-парагвайской ГЭС «Итайпу» (98,6 млрд кВт/ч). Бразилия получает от этой ГЭС четверть всей энергии. Обе эти станции — крупнейшие гидротехнические и вообще искусственные сооружения в мире. Так, длина плотины ГЭС «Три ущелья» составляет 2309 м, а высота — 185 м, в то время как комбинированная плотина «Итайпу» имеет длину 7235 м, ширину — 400 м и высоту — 196 м.



Самая мощная в мире ГЭС «Три ущелья».

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ПОД ВОДОЙ

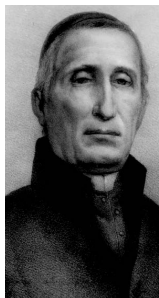
Электричество широко используется в живой природе. Многие рыбы применяют его для охоты и защиты. У них есть электрические органы, состоящие из мышечных, нервных или железистых клеток. Между мембранами таких клеток генерируется разность потенциалов. У электрического угря, живущего в водах Амазонки и ее притоков, она составляет до 1200 В, а мощность разряда — 1,5 кВт. Электрический скат, обитающий в океане, способен генерировать разряды от 1 до 6 кВт. К тому же соленая вода обладает большей электропроводностью, чем пресная, что делает ската еще более опасным.



При защите скат производит 10—12 разрядов подряд, а при нападении — от 14 до 562.

НЕПРЕРЫВНЫЙ ЗВОН

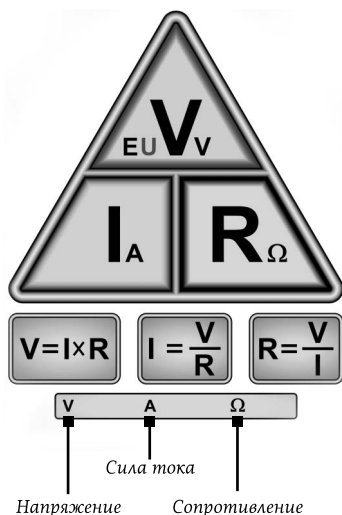
В одной из лабораторий Оксфордского университета в 1840 г. был установлен электрический звонок. Он работает на двух сухих гальванических батареях, так называемых замбониевых столбах, и использует электростатические силы притяжения. Этот звонок продолжает непрерывно звонить до сих пор. Разумеется, это вовсе не вечный двигатель, ведь он зависит от емкости батарей и прекратит работать, когда износятся его элементы.



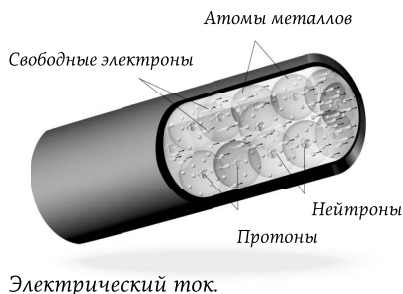
Джузеппе Дзамбони (1776—1846), известный также как Замбони, итальянский физик и священник, изобретатель сухого гальванического элемента, получившего название замбониев столб.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ: ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Электропроводность — это способность тела или среды проводить электрический ток, а также свойство, которое под воздействием электрического поля приводит к возникновению электрического тока, и физическая величина, обратная электрическому сопротивлению. В системе СИ единица электропроводности — сименс, единица сопротивления — ом. Идеи электропроводности оказались весьма плодотворными.



Закон Ома можно запомнить по этой диаграмме. Искомую величину на треугольнике нужно закрыть, и расположение двух других символов даст формулу для вычисления.



Электропроводность обусловлена способностью носителей заряда перемещаться на большие расстояния. Зависит эта способность от состава, строения, агрегатного состояния вещества, вязкости раствора, температуры, межмолекулярного взаимодействия и напряженности электрического поля. Согласно закону Ома, сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению, приложенному к этому участку, и обратно пропорциональна его сопротивлению.

Природу электрического тока в металлах открыли в начале XX в. В 1913 г. русские физики Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси обнаружили, что в металлическом проводнике инерционными методами можно получить кратковременный электрический ток. В 1916 г. американский физик Р. Толмен и шотландский физик Б. Стюарт усовершенствовали метод и выполнили количественные измерения. В их опыте использовалась катушка с большим количеством витков тонкой проволоки. Ее концы присоединялись гибкими проводами к баллистическому гальванометру. Катушку сильно раскручивали, затем резко тормозили, и в цепи возникал электрический ток. Он был обусловлен инерцией носителей заряда. Так было выяснено, что ток в металлах проводят именно электроны.

Важным было также изучение сопротивления, которое возникает, когда электрический

СЕРЕБРО ИЛИ МЕДЬ?

Наибольшей электропроводностью обладает серебро. Но изготавливать проводку из серебра очень дорого. Из так называемых благородных металлов выше всего электропроводность у меди, которая широко используется в технике. Кроме того, у нее высокая температура плавления, что позволяет долго работать в нагретом состоянии.



ток проходит через проводник. Благодаря этому удалось провести классификацию различных веществ по уровню проводимости, что необходимо для производства.

По проводимости, а значит, и по удельному сопротивлению среди материалов и веществ различают проводники, диэлектрики и полупроводники.

Проводники хорошо проводят электрический ток. У проводников первого рода (металлов, угля) проводимость обеспечивают электроны, у проводников второго рода (электролитов) — ионы. У металлов электропроводность с повышением температуры уменьшается, у электролитов — увеличивается.

Полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Их проводимость сильно зависит от примесей, кристаллической структуры, различных видов излучения. Проводимость полупроводников с ростом температуры возрастает. К ним относится множество химических элементов, в том числе кремний, сплавы и химические соединения. Они находят широкое применение в электронных приборах. Электронные микросхемы производят именно на полупроводниковых подложках.

Диэлектрики проводят электрический ток плохо. Однако во внешнем электрическом поле они способны к поляризации — смещению электрических зарядов в направлении, противоположном внешнему полю. Нейтральные молекулы превращаются в диполи и создают свое электрическое поле, противоположное внешнему и ослабляющее его. При высоком напряжении внешнего электрического поля происходит такое явление, как пробой — диэлектрик становится проводником.

Диэлектриками являются воздух и другие газы, стекло, пластмассы, смолы.

Диэлектрики, не допускающие утечки электрических зарядов, используют как электроизоляционные материалы.

Четкой границы между материалами по удельному сопротивлению нет. Полупроводники могут вести себя как диэлектрики, а диэлектрики — как полупроводники. Однако у проводников проводящее состояние основное, а у полупроводников и диэлектриков — возбужденное.

ПЕРЕМЕННЫЙ И ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Электрический ток — это направленное движение частиц — носителей заряда (электронов или ионов). Переменный ток изменяется по величине и направлению или только по величине. Постоянный ток не изменяется по величине и направлению. Электропроводность имеет отношение именно к постоянному току.

ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Вентильные разрядники для линии электропередачи защищают ее от перенапряжения. В них имеются диски, изготовленные из полупроводника — карбида кремния. При возникновении перенапряжения они пропускают ток в землю, и нормальная работа линии восстанавливается. При рабочем же напряжении линии сопротивление этих дисков увеличивается, и утечки в землю не происходит.



Карбид кремния — полупроводник, используемый в линиях электропередачи.

НЕОБЫЧНЫЙ ТРОФЕЙ

В 1945 г. американцы, изучая трофейную японскую технику, обнаружили, что телефоны и микрофоны не имеют источников напряжения. Внутри у приборов оказался воск. Это был электрет, то есть диэлектрик, в котором сохраняется поляризация после снятия внешнего электрического поля. Сегодня электреты делают из полимеров — тончайшие пленки используются в аудиотехнике.



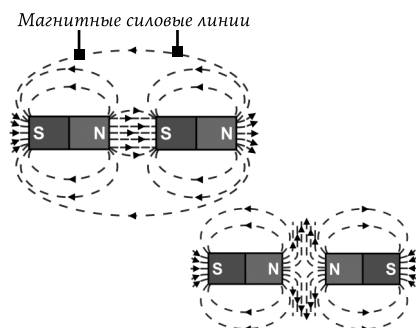
МАГНЕТИЗМ: ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯДОВ

Исследования магнитных свойств вещества велись давно. Сегодня известно, что магнетизм — одно из проявлений электромагнитного взаимодействия. Отдельных магнитных зарядов нет, в основе магнетизма лежит особая форма взаимодействия движущихся электрических зарядов, точнее, взаимодействие между электрическими токами и магнитами (то есть телами с магнитным моментом и магнитным полем) и между самими магнитами.

Магнитными моментами обладают все элементарные частицы, и значит, в принципе, все тела могут быть источниками магнетизма. Однако для того, чтобы тело было намагничено, магнитные моменты должны быть ориентированы определенным образом. Самый маленький магнит — это электрон.

Само слово «магнит», вероятно, происходит от древнего города Магнесия, который находился в Малой Азии. Там были открыты залежи магнетита — соединения железа, обладающего магнитными свойствами.

Фалес Милетский и Анаксагор объясняли свойства магнита тем, что он якобы имеет душу, которая тянется к железу. Диоген из Аполлонии полагал, что в железе имеется некая влажность, которую магнит и погло-



Силовые линии магнита выходят из северного полюса и входят в южный полюс. Полюса одного знака притягиваются, полюса разных знаков отталкиваются.

МАГНЕТИТ, ИЛИ МАГНИТНЫЙ ЖЕЛЕЗНЯК

Магнетит способен изменять показания компаса, и обнаружить его можно в первую очередь по этому признаку. Уже древние греки прекрасно знали магнетит: Фалес Милетский впервые указал на то, что этот «камень» притягивает железные предметы. Сократ также наблюдал, как к магнетиту притягивались железные кольца.



$\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ —
минерал черного
цвета, широко
распространенный
в природе.

щает. Согласно другим теориям, причина притяжения — собственные испарения магнита. Эмпедокл считал, что для проявления магнетизма между магнитом и железом необходим прямой контакт. Тит Лукреций Кар в своей поэме «О природе вещей» впервые указал на такое явление, как отталкивание магнитов друг от друга.

Первая детально разработанная материалистическая теория магнетизма появилась в XVII в. и принадлежит Рене Декарту. В основе современной теории магнетизма лежат работы Фарадея, Ампера, Лоренца и других ученых.

По реакции на внешнее магнитное поле и по тому, как в их структуре распределяются магнитные моменты, все вещества подразделяются на диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики. Диамагнетики — вода, нефть, медь. Парамагнетики — кислород, оксид азота, соли железа и никеля. Ферромагнетики — железо, никель, кобальт, различные сплавы. Антиферромагнетики — множество химических соединений, в том числе сульфаты и карбонаты различных металлов.

Магниты широко используют в технике. У постоянного магнита остаточная намаг-

ниченность сохраняется после выключения магнитного поля. Первым искусственным магнитным материалом стала сталь, содержащая 1,2—1,5% углерода, закаленная на структуру мартенсита. Сегодня постоянные магниты производят на основе железа, никеля, кобальта, самария, алюминия. В электромагнитах магнитное поле создается при протекании электрического тока. Обычно электромагнит — катушка-соленоид, в которую помещен ферромагнитный



Простейший электромагнит можно изготовить самостоятельно.

ПЕРВОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА МАГНИТ

В 1820 г. профессор Копенгагенского университета Ханс Кристиан Эрстед продемонстрировал студентам опыт. Он помещал над магнитной стрелкой и параллельно ей прямолинейный металлический проводник. Когда через проводник пропускали электрический ток, стрелка поворачивалась почти перпендикулярно ему. При изменении направления тока стрелка разворачивалась на 180° . Если проводник переносили под стрелку, она совершала такой же разворот. Позднее говорили, что открытие было сделано случайно, во время другого опыта, но Эрстед это отрицал.

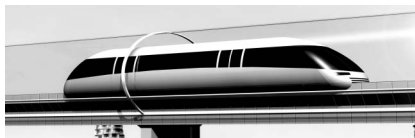


На основе опыта Эрстеда впоследствии были построены первые гальванометры, а сам опыт простимулировал развитие теории электромагнетизма.

(чаще всего железный) сердечник, обладающий большой магнитной проницаемостью. Электромагниты используются в промышленности, медицине, науке.

ЛЕТАЮЩИЙ ПОЕЗД

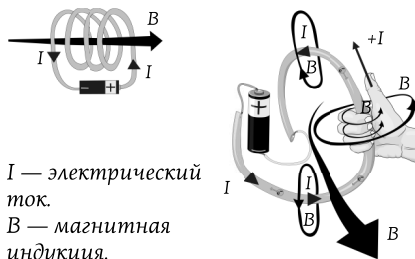
Магнитные материалы и системы способны притягивать или отталкивать друг друга с силой, которая зависит от магнитного поля и поверхности магнита. На этом основано явление магнитной левитации. Она используется в магнитных подшипниках и поездах-маглевах. В маглевах используются либо сверхпроводящие магниты, либо электромагниты, либо постоянные магниты.



Между рельсом и поездом-маглевом имеется зазор, благодаря чему отсутствует сила трения. Это позволяет развить скорость до 600 км/ч.

ПРАВИЛО ПРАВОЙ РУКИ

Магнитная индукция определяет, с какой силой магнитное поле действует на заряд, находящийся в магнитном поле. Ее вектор можно определить с помощью правила правой руки (правила винта, правила буравчика). Если обхватить проводник правой рукой таким образом, чтобы большой палец указывал направление тока, остальные пальцы покажут направление линий и, соответственно, вектора магнитной индукции.



I — электрический ток.

B — магнитная индукция.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

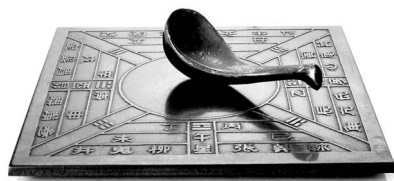
Физика уделяет собственному магнитному полю Земли огромное внимание. Оно появилось 4,2 млрд лет назад и образовало магнитосферу — обширную область пространства вокруг планеты. Его изучение и применение на практике породило множество идей.

Использование на практике магнитного поля Земли началось тогда, когда о нем ничего не знали. Еще у античных авторов встречаются упоминания о стрелке, указывающей путь. Однако достоверное сообщение о магнитном устройстве для определения сторон света впервые появляется в Китае в 1044 г. Усовершенствованный компас описал выдающийся китайский ученый Шэнь Ко в 1088 г. В Европе компас появился в XII—XIII вв.: на пробке укрепляли магнитную стрелку и опускали ее в сосуд с водой. Позднее стрелку надели на вертикальную шпильку и прикрепили к ней круг — картушку, разделенную сначала на 16 румбов, потом на 32. Коробочку со стрелкой стали укреплять в кардановом подвесе, чтобы на компас не влияла качка, а в XVII в. прибор снабдили пеленгатором.

КАК ДЕЙСТВУЕТ КОМПАС

Магнитный компас указывает на магнитные полюса Земли и таким образом позволяет ориентироваться по сторонам света. Неверные показания он дает вблизи магнитов, в том числе другого компаса, и ферромагнетиков, например стальных или железных предметов. Электромагнитный компас представляет собой электрогенератор, где статором является магнитное поле Земли, а ротором — одна или несколько рамок с обмотками.

Свободно вращающаяся магнитная стрелка поворачивается вокруг оси и располагается вдоль силовых линий магнитного поля.



Старинный китайский компас.

До 1492 г. в Европе считали, что стрелку компаса притягивает Полярная звезда. Однако во время первой экспедиции Колумба выяснилось, что на полпути стрелка компаса отклоняется к западу почти

Йоганн Карл Фридрих Гаусс (1777—1855), выдающийся немецкий ученый, прозванный королем математиков.



САМЫЙ БОЛЬШОЙ МАГНИТ

В 1600 г. в Англии вышла книга Уильяма Гильберта «О магните, магнитных телах и большом магните — Земле». Он утверждал, что Земля — это гигантский магнит. Чтобы доказать это, Гильберт изготовил из магнетита большой шар, который назвал тереллой, то есть маленькой Землей. Когда он приближал к нему магнитную стрелку, то она всякий раз устанавливалась так же, как стрелка компаса на Земле. У шара оказалось два полюса. Значит, и Земля — магнит с двумя полюсами. Сами же магнитные полюса, и северный, и южный, были открыты уже в XIX в.

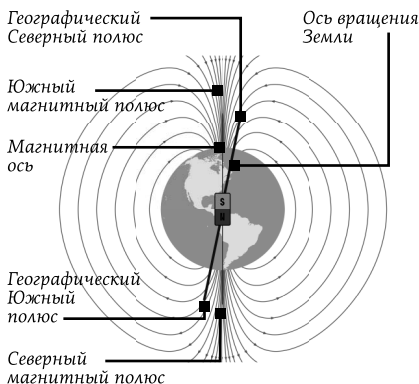
на 12°. Это наблюдение показало, что Полярная звезда тут ни при чем, а причина кроется в самой Земле. Ученые поняли, что Земля сама является магнитом. Уже в XIX в. немецкий математик, физик и астроном Карл Гаусс разработал теорию земного магнетизма.

Геоманнитное поле, точнее, магнитосфера, защищает Землю от космического излучения, задерживая потоки космических частиц, в том числе и так называемый солнечный ветер.

Когда солнечная активность растет и солнечный ветер усиливается, некоторые частицы попадают в верхние слои атмосферы, и начинается возмущение ее магнитного поля — магнитная буря. Излучение атомов атмосферы под воздействием частиц наблюдается как полярное сияние. Цвет его зависит от состава атмосферы. Таким же образом под воздействием электронного луча возникает сияние атомов на экране телевизора.

Раньше магнитные бури не влияли на экономику, хотя существуют теории, соединяющие периоды солнечной активности с различными катаклизмами.

Сегодня же возбуждение магнитного поля Земли вызывает сильные токи в линиях



Магнитное поле Земли. Формально магнитный полюс, расположенный в Северном полушарии, является южным, потому что на него указывает южный кончик стрелки компаса. И, соответственно, наоборот.

электропередач, от чего сгорают мощные трансформаторы. Так, 13 марта 1989 г. из-за магнитной бури 6 млн человек в Канаде на 9 ч остались без электричества. Кроме того, магнитные бури приводят к искажениям результатов измерительных приборов. Такова плата за цивилизацию.

КОГДА ПОМЕНЯЮТСЯ ПОЛЮСА

Магнитные полюса не совпадают с географическими. Они находятся в постоянном движении, причем скорость эта растет. Так, в 1970-х гг. скорость северного магнитного полюса была 10 км/год, а в 2004 г. — 60 км/год. Очень редко происходит инверсия, когда полюса меняются местами и стрелка компаса показывает противоположное направление. Последний раз это случилось около 700 тыс. лет назад. Встречаются предположения, что в очередной раз это может произойти через несколько тысяч лет.

БИОМАГНЕТИЗМ

Множество птиц, рыб, млекопитающих, насекомых, рептилий и даже бактерий используют магнитное поле Земли для ориентирования. Предполагают, что внутренний компас животных связан с присутствием в организме частиц магнетита, причем у магнитотактических бактерий он содержится в особых органеллах — магнетосомах. А человеческий мозг содержит около 5 млн кристаллов магнетита на грамм.



Птицы ориентируются по магнитному полю, но также и по звездам, и по Солнцу.

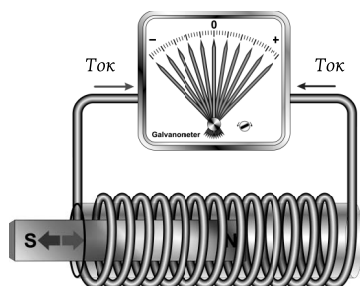
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Не только электрический ток влияет на магнит. Имеет место и обратное явление — электромагнитная индукция, то есть возникновение электрического тока в замкнутом контуре при изменении проходящего через него магнитного потока. Закон электромагнитной индукции открыл Майкл Фарадей. Это основной закон электродинамики, на нем основана работа трансформаторов, дросселей, электродвигателей и генераторов.



Майкл Фарадей (1791—1867), выдающийся английский физик и химик, первооткрыватель электромагнитной индукции.

Электромагнитную индукцию Фарадей впервые наблюдал в августе 1831 г. Две стороны железного тора, то есть предмета в форме баранки, он обмотал проводами, один провод подключил к гальванометру, а второй — к батарее. Когда он подключал провод к батарее и отключал от нее, гальванометр регистрировал кратковременный всплеск тока. Подобные всплески появлялись также, когда он быстро вставлял магнит в катушку



Электромагнитная индукция.

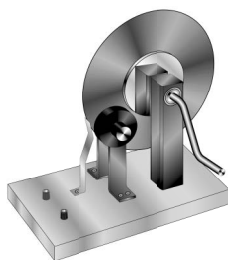
О ЧЕМ ГОВОРЯТ УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

Уравнения Максвелла обобщают следующие законы и теорему, открытые Гауссом, Фарадеем и Ампером: электрический заряд является источником электрической индукции, магнитных зарядов не существует, изменение магнитной индукции приводит к появлению вихревого электрического поля, изменение электрической индукции и электрический ток приводят к появлению вихревого магнитного поля.

и вытаскивал его. Также в медном диске со скользящим электропроводом, вращающимся вблизи магнита, возникал постоянный ток. Для электромагнитной индукции Фарадей вывел закон, согласно которому для любого контура индуцированная электродвижущая сила (ЭДС) равняется скорости изменения магнитного потока, который проходит через этот контур, взятой со знаком минус. По другой формулировке генерируемая

ПОЛЬЗА ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

В 1831 г. Майкл Фарадей также построил первый электромагнитный генератор, названный диском Фарадея. В нем использовался медный диск, который вращался между полюсами подковообразного магнита. Этот генератор вырабатывал небольшое постоянное напряжение и сильный ток. Рассказывают, что канцлер казначейства Великобритании Уильям Гладстон, посетив лабораторию Фарадея, спросил, какая польза от его электрических устройств. Ученый ответил: «Сэр, вы будете получать с этого налоги!»



Диск Фарадея — первый униполярный генератор, электрическая машина постоянного тока.

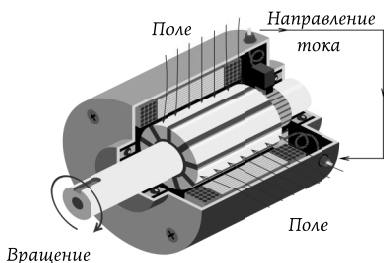
ЭДС пропорциональна скорости изменения магнитного потока. ЭДС равна отношению работы, которую совершили сторонние силы при перемещении электрического заряда по замкнутой цепи, к этому заряду.

Согласно правилу, сформулированному Э. Х. Ленцем в 1833 г., индукционный ток направлен так, что он ослабляет действие возбуждающей его причины, то есть препятствует изменению магнитного потока.

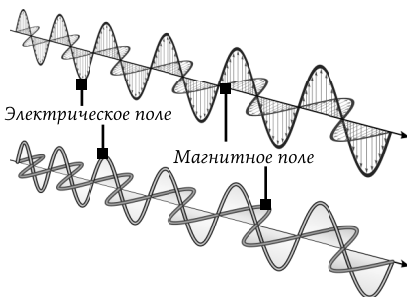
По мнению некоторых физиков, в законе Фарадея описываются два различных явления: двигательная ЭДС, которая генерируется воздействием магнитной силы на движущийся провод, и трансформаторная ЭДС, которая генерируется воздействием электрической силы вследствие изменения магнитного поля. Это одна из идей, которые привели Эйнштейна к разработке специальной теории относительности.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР

Электрический генератор — устройство, в котором неэлектрическая (механическая, химическая, тепловая) энергия превращается в электрическую. В основе его работы лежит закон электромагнитной индукции. Электродвижущая сила возникает, когда постоянный магнит перемещается около проводника или же наоборот. Если проводник подключить к электрической нагрузке, через нее потечет ток, и механическая энергия станет превращаться в электрическую. Современный магнитодинамический генератор вырабатывает энергию напрямую из жидкого электролита или плазмы, движущейся через магнитное поле, и не использует вращающиеся части.



Работа генератора, основанная на электромагнитной индукции.



Электромагнитная волна.

Фарадей ввел понятия электрического и магнитного полей. Позднее Максвелл использовал идеи Фарадея как основу для электромагнитной теории.

МЕТАЛЛЫ В ПОЛЕТЕ

В XIX в. американский изобретатель Элиу Томпсон продемонстрировал опыт, надев на цилиндрический соленоид с сердечником из железных проволок алюминиевое кольцо и подключив к обмотке переменный ток. Кольцо взмыло вверх. Дело в том, что в этом кольце под воздействием электромагнита возникли вихревые индукционные токи. Они были направлены в сторону, противоположную току в обмотке соленоида, согласно правилу Ленца. И тут сработал закон Ампера, из которого следует, что параллельные проводники с электрическими токами, текущими в противоположных направлениях, будут отталкиваться. Это и заставило кольцо взлететь. Если же кольцо удерживали силой, оно разогревалось. Этот и подобные опыты впоследствии привели к идее левитационной плавки металлов.

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Электродвигатель — это машина, которая преобразует электрическую энергию в механическую. Он состоит из двух частей. Неподвижная часть — это статор для асинхронных и синхронных машин переменного тока, или индуктор для машин постоянного тока. В роли индукторов нередко используются постоянные магниты.

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ: ДАРЫ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР



В природе и в технике существуют некоторые материалы, чье электрическое сопротивление становится нулевым, когда температура опускается ниже критической и принимает определенное значение для каждого материала. Такое явление называется сверхпроводимостью. Его изучают и широко используют.

*Жидкий гелий обладает сверхпроводимостью.
Он закипает при температуре 4,2 К.*

Сверхпроводимость была открыта благодаря появлению технологии охлаждения различных материалов до сверхнизких температур. Так были получены жидкие кислород, азот, водород, гелий. Жидкий гелий получил голландский физик Хейке Камерлинг-Оннес 10 июля 1908 г. Он использовал его, чтобы изучать зависимость сопротивления металлов от температуры, в том числе и ртути. В 1911 г. он обнаружил, что электрическое сопротивление ртути становится нулевым при температуре 3 К (около -270°C). Позднее эта температура была уточнена и оказалась равной 4,15 К, что тоже чрезвычайно низко.

ДВЕ РАЗНОВИДНОСТИ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Магнитное поле по-разному влияет на различные сверхпроводники. У сверхпроводников первого рода при достижении критического значения магнитного поля (которое до этого выталкивалось согласно эффекту Мейснера) происходит резкий переход в нормальное состояние. У сверхпроводников второго рода имеются два критических значения магнитного поля. В интервале между ними магнитный поток постепенно проникает в сверхпроводник в виде так называемых вихрей Абрикосова. После достижения второго критического значения сверхпроводимость исчезает. К сверхпроводникам первого рода относятся чистые вещества, кроме ниобия, технеция и ванадия, к сверхпроводникам второго рода — химические соединения и сплавы.

Позднее было обнаружено, что при сверхнизких температурах сверхпроводимость приобретают и другие металлы: олово, свинец, таллий, уран. В 1914 г. выяснилось, что сильное магнитное поле разрушает сверхпроводимость, а в 1933 г. немецкие физики Вальтер Мейснер и Роберт Оксенфельд обнаружили, что из объема сверхпроводника полностью вытесняется магнитное поле. Это явление получило название эффект Мейснера. В 1950—1960-х гг. были открыты сверхпроводники, способные пропускать боль-



Обычная ртуть приобретает сверхпроводимость при температуре, близкой к абсолютному нулю.

КОГДА СОПРОТИВЛЕНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКА НЕ РАВНО НУЛЮ

В постоянном электрическом поле сопротивление сверхпроводника равно нулю, в противном случае сверхпроводящие электроны ускорились бы в нем до бесконечности, а это невозможно. В переменном электрическом поле сопротивление проводника отличается от нуля. Собственное поле проводника в таком случае ускоряет и нормальные электроны, которые в небольшом количестве там имеются.

шие плотности тока и выдерживать сильные магнитные поля. Один из таких материалов — соединение ниобия с оловом. Сверхпроводящий электромагнит помещают в сосуд с жидким гелием, который затем помещают в другой — с жидким азотом. Однако в настоящее время открыты высокотемпературные сверхпроводники, что позволило использовать для охлаждения этих материалов не только жидкий

ОБЫЧНЫЙ МЕТАЛЛ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ

Сверхпроводимость применяют, чтобы получить сильные магнитные поля. Обычно используют сверхпроводники второго рода, в которых могут сосуществовать сверхпроводимость и магнитное поле. В подобных сверхпроводниках под воздействием магнитного поля появляются тонкие нити обычного металла, которые пронизывают материал, остающийся сверхпроводящим.



Сверхпроводники широко используют в циклотронах, в том числе в медицине.

НАЗАД В БУДУЩЕЕ

В фильме «Назад в будущее», снятом в 1989 г., один из главных героев — Марти Макфлай — попадает в 2015 г., где пользуется летающим скейтбордом — ховебордом с антигравитационными двигателями. Когда 2015 г. наступил, компания Lexus попыталась воспроизвести этот эффект на другой основе. Был изготовлен скейтборд со сверхпроводниковым материалом, который охлаждали жидким азотом. Благодаря сверхпроводимости удалось совсем немного приподнять новый ховеборд над металлической поверхностью. В общем, до настоящих летающих скейтов еще далеко.

гелий, кипящий при температуре 4,2 К, но и жидкий азот, кипящий при температуре 77 К, намного более дешевый. В начале XXI в. было создано соединение, включающее ртуть, барий, кальций, медь, кислород, которое сохраняет сверхпроводимость до 137 К. Обнаружены также гидраты серы, чьи сверхпроводящие свойства сохраняются до 180—190 К. Эти достижения открывают большие перспективы.

ЭФФЕКТ МЕЙСНЕРА И ЛЕВИТАЦИЯ МАГНИТА

Обычный магнит можно заставить взлететь и парить в воздухе с помощью сверхпроводимости. Для этого сверхпроводящий материал охлаждают при помощи жидкого азота. Потом на поверхность сверхпроводника кладут магнит. Поскольку, согласно эффекту Мейснера, магнитное поле вытесняется из объема сверхпроводника, магнит поднимается вверх и парит, пока сверхпроводник не будет выведен из сверхпроводящей фазы.



Парение магнита над сверхпроводником.

ЖИДКИЙ АЗОТ И ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Сверхпроводники, не дающие тепловых потерь, полезно использовать для проводов, так как один тонкий сверхпроводящий кабель способен передавать мощность, для которой требуется несколько обычных кабелей большей толщины. Однако сверхпроводящие кабели дороже и через них нужно постоянно прокачивать жидкий азот. Тем не менее их коммерческое использование началось в 2008 г. Чаще всего материалом для них служат соединения ниобия.

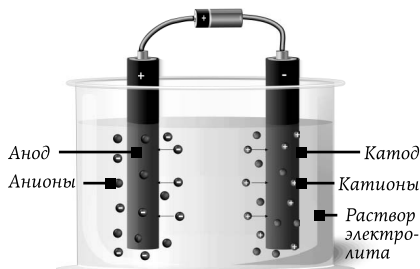
ЭЛЕКТРОЛИЗ: ЭЛЕКТРОДЫ И ЭЛЕКТРОЛИТЫ

Электролиз представляет собой физико-химический процесс, при котором на электродах выделяются составные части растворенных или других веществ, возникающих в результате вторичных реакций. Этот процесс происходит во время прохождения электрического тока через раствор или расплав электролита. Законы электролиза открыл Майкл Фарадей.

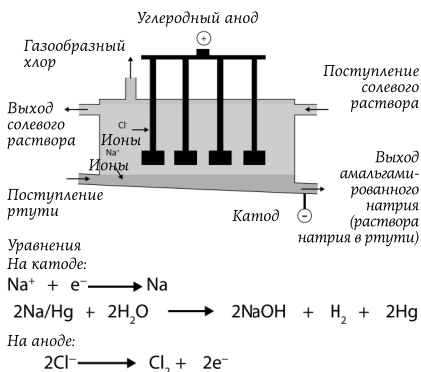
Электролиз — прекрасный способ покрытия металла слоем другого металла, например медью или золотом. Реакции диссоциации, которые происходят в электролите, называются первичными. Реакции, происходящие на электродах, называются вторичными. Учитывая это разделение, Майкл Фарадей

КАК ПРОИСХОДИТ ЭЛЕКТРОЛИЗ

Электрическое поле в проводящих жидкостях создают электроды — проводники, которые соединены с полюсами источника электрической энергии. Отрицательный электрод называется катодом, положительный — анодом. К катоду движутся положительные ионы (катионы). Это ионы металлов, водорода, аммония и другие. К аноду движутся отрицательные ионы — анионы. Это ионы кислотных остатков и гидроксильной группы.

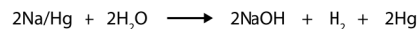
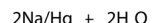


Процесс электролиза в растворе электролита под воздействием электрического тока.

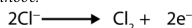


Уравнения

На катоде:



На аноде:



Производство гидроксида натрия с помощью электролиза.

САМЫЕ ПРЕСТИЖНЫЕ ВИЛКИ

Однажды на торжественном приеме у французского императора Наполеона III самым знатным и уважаемым гостям, а также императору с супругой подали алюминиевые ложки и вилки. Остальные довольствовались золотыми и серебряными приборами. Алюминий тогда был крайне дорог, сегодня же его весьма эффективно производят с помощью электролиза, и алюминиевые вилки ценятся невысоко.



открыл два закона. Согласно первому закону Фарадея, масса вещества, которое выделилось на электроде, прямо пропорциональна электрическому заряду q , который прошел через электролит. Второй закон Фарадея говорит о том, что электрохимические эквиваленты разных веществ прямо

КАК ЗАПОМНИТЬ ЭЛЕКТРОДЫ

Чтобы запомнить процессы на аноде и катоде, существуют мнемонические правила.

Анод — это плюс (по четыре буквы в каждом слове).

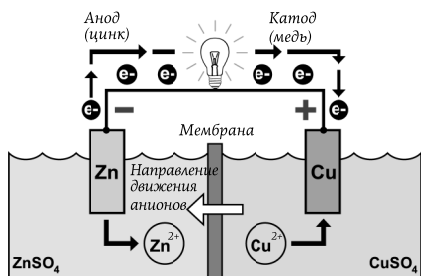
Катод — это минус (по пять букв в каждом слове).

У анода анионы окисляются (все слова начинаются с гласной буквы).

На катоде катионы восстанавливаются (все слова начинаются с согласной буквы).

ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА

Химические источники тока — это привычные всем батарейки, то есть гальванические элементы, которые обычно не перезаряжаются, и электрические аккумуляторы, которые работают после перезарядки. Электроды делают из металла, который обладает электронной проводимостью, а электролит производят из жидкого или твердого вещества, обладающего ионной проводимостью. Между электродами устанавливается разность потенциалов и образуются свободные электроны, то есть электрический ток, текущий к катоду.



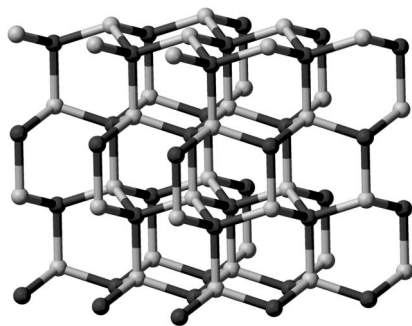
Гальванический элемент.

пропорциональны их молярным массам и обратно пропорциональны числам, выражающим их валентность, то есть способность образовывать определенное количество химических связей.

Электролиз широко применяется в современной промышленности. С помощью этой технологии получают алюминий и другие металлы, водород, пероксид водорода, диоксид марганца. В частности, для получения алюминия проводят электролиз оксида алюминия (глинозема) в расплавленном криолите (гексафтороалюминате натрия). Он необходим при нанесении металлических покрытий (гальваностегия), воспроизведении формы предметов (гальванопластика). Благодаря электролизу функционирует химический источник тока.

ЭЛЕКТРОЛИТЫ

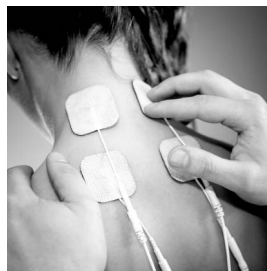
Электролит — это вещество, проводящее электрический ток в результате диссоциации на ионы в растворах и расплавах или вследствие движения ионов в кристаллических решетках твердых электролитов. Электролитами бывают водные растворы солей, оснований и кислот и некоторые кристаллы (диоксид циркония, иодид серебра). Электролиты — это проводники второго рода, то есть их электропроводность — результат подвижности положительных или отрицательных ионов.



Иодид серебра — твердый электролит, проводник второго рода.

ЭЛЕКТРОФОРЕЗ, ИЛИ КАК ТОК ДВИГАЕТ МОЛЕКУЛЫ

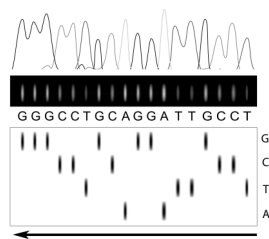
Электрофорез, использующийся в химии, биологии и медицине, — это процесс, который основан на физическом электрокинетическом явлении переноса частиц дисперсной фазы белковых или коллоидных растворов в жидкой или газообразной среде под воздействием внешнего электрического поля. Благодаря электрофорезу можно обеспечивать глубокое проникновение в поры и углубления и покрывать поверхность мелкими частицами нужного вещества.



Врач-физиотерапевт определяет силу тока, полярность, продолжительность процедур, их количество и интервалы между ними.

Электрофорез как электрокинетическое явление открыли в 1809 г. профессора Московского университета Ф. Ф. Рейсс и П. И. Страхов. Сегодня различают две разновидности электрофореза. При катафорезе заряд обрабатываемой поверхности отрицательный, при анафорезе — положительный. Электрофорез как физико-химический процесс представляет собой один из важнейших методов в химии, молекулярной биологии и биохимии. С его помощью вещество разделяют на компоненты и анализируют их распределение и другие параметры. Его также используют для осаждения тумана и дыма и очень широко — в медицине, для введения лекарств.

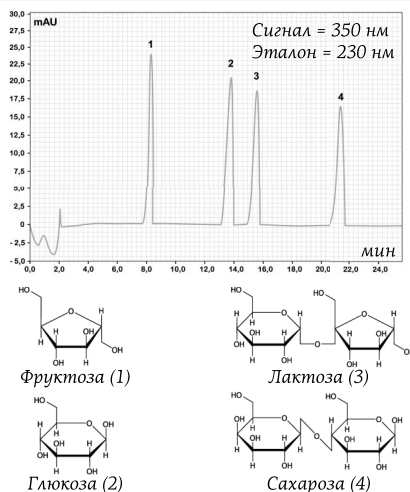
Электрофорез — один из этапов в секвенировании ДНК, то есть определении последовательности нуклеотидов в генах, которые и являются участками ДНК, отвечающими за тот или иной признак.



КАПИЛЛЯРНЫЙ ЭЛЕКТРОФОРЕЗ

В обычном электрофорезе заряженные молекулы переносятся в проводящей жидкости под воздействием электрического поля и разделяются по заряду и размеру. В капиллярном электрофорезе это разделение происходит не просто в жидкости, а в тонком капилляре. Капиллярный электрофорез используется для анализа лекарственных средств, в том числе содержащих металлы, разделения аминокислот, сахаров и других соединений и смесей.

Разделение различных сахаров и анализ их содержания осуществляются методом капиллярного электрофореза.



Лекарство наносят на прокладки электродов, и оно под воздействием электрического тока проникает через кожные покровы или слизистую оболочку и оказывает влияние на патологический очаг прямо в месте введения, иногда в достаточно высокой концентрации, но в малых дозах. Весь организм, таким образом, не насыщается лекарством, что, безусловно, хорошо. Кроме того, полезное действие, как гуморальное, так и нервно-рефлекторное, оказывает также сам электрический ток. Введенные с помощью постоянного

НЕОБХОДИМАЯ ПОДГОТОВКА

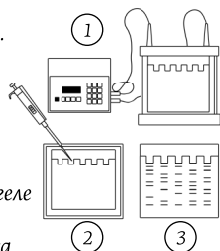
Чтобы разделенные электрофорезом фрагменты ДНК можно было увидеть, этих фрагментов должно быть много. Для этого проводят амплификацию (получение большого количества копий) ДНК посредством полимеразной цепной реакции. Это реакцию проводят в специальных приборах — амплификаторах, или термоциклерах.

ПОИСК МУТАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОФОРЕЗА

Электрофорез широко используется в биохимии и молекулярной биологии для разделения белков, нуклеиновых кислот и их фрагментов. Так, для определения нуклеотидных последовательностей вообще и поиска различных мутаций используется электрофорез в полиакриламидном или агарозном геле. Фрагменты разных размеров и конформации перемещаются в геле с разной скоростью под воздействием электрического тока. Размер может зависеть от наличия или отсутствия мутации.

Гель-электрофорез.

1. Прибор для электрофореза.
2. Внесение проб в лунки.
3. Распределение фрагментов ДНК в геле под воздействием электрического тока.



тока вещества побочных реакций практически не вызывают, потому что дозы их невелики, из кожи в кровь они поступают медленно, а ток сам оказывает противоаллергическое действие. При этом кожные и слизистые покровы не повреждаются.

Но, конечно, к электрофорезу есть и противопоказания: острые воспалительные процессы, нарушение целостности кожи, опухоли, лихорадка, тяжелая форма астмы. Поэтому любые электрофоретические процедуры должен контролировать врач.

ГАЛЬВАНОФОРЕЗ НА ХОДУ

При гальванофорезе ионы лекарств или других веществ вводят в электропроводную среду с помощью электродвижущей силы. В стоматологии он используется для того, чтобы осуществить долговременную дезинфекцию системы корневых каналов зубов. От обычного электрофореза он отличается тем, что использует маленькие мобильные устройства, которые можно установить в зуб пациенту на несколько дней или даже недель.

В канал зуба устанавливается специальное устройство, выполненное либо как штифт, либо как другая металлическая конструкция. Это устройство с гальваническим элементом, которое создает электродвижущую силу и слабый электрический ток, проходящий через ткани, куда необходимо доставить определенные вещества. Под воздействием электрических полей эти вещества проникают в микроканалы и уничтожают там микробные тела и мертвые клетки, кроме того, укрепляют эти каналы.



При гальванофорезе крохотный источник тока помещается прямо в больной зуб.

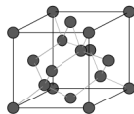
КРИСТАЛЛЫ: ФОРМЫ И СВОЙСТВА

Роль кристаллов в физике невозможно переоценить. Их исследование привело ко многим выдающимся идеям, открытиям и изобретениям. Они применяются во множестве устройств и способствуют развитию науки и техники. Структуру кристаллов, их возникновение и свойства изучает кристаллография. Эта наука теснейшим образом связана с минералогией, физикой и химией. О кристаллах и их свойствах рассказывается уже после знакомства с электричеством, поскольку их электрические свойства очень важны.

Кристаллография возникла как наука, которая описывает идеальные кристаллы. Она изучает как их физические свойства — теплопроводность, электропроводность, способность к деформациям, пропусканию световых и других электромагнитных волн, так и геометрическую форму, рост, связь между составом вещества и его характеристиками. Одной из важных характеристик кристаллов является кристаллическая решетка, то есть пространственное периодическое расположение в объекте атомов или ионов. Точки, в которых они расположены, называются узлами кристаллической решетки. Образования могут состоять либо из отдельных атомов, либо из отдельных ионов, либо из молекул. Симметрией кристаллов называют закономерную повторяемость в пространстве одинаковых граней, ребер и углов фигуры, которая способна совмещаться сама с собой в результате одного или нескольких отражений. Попытки описания кристаллов имели место еще в глубокой древности. Греки зафиксировали пять так называемых платоновых тел и множество других многогранников, которые позволяют описывать формы кристаллов. Много веков спустя, в 1611 г., Иоганн Кеплер опубликовал трактат «О шестиугольных снежинках». Этот знаменитый физик, астроном и математик, открывший законы движения планет, благодаря данной работе считается предшественником структурной кристаллографии.

Однако изучение симметрии кристаллов наталкивалось на немалые сложности. Дело в том, что одинаковые по строению грани кри-

Атомная кристаллическая решетка

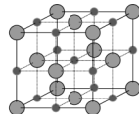


● Атом С
Алмаз С
Металлическая кристаллическая решетка

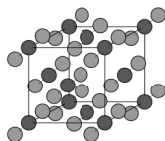


● Положительно заряженный ион (катион) металла
• Делокализованный электрон
Na, K, Cs, Fe

Ионная кристаллическая решетка



● Ион Na⁺ ● Ион Cl⁻
Соль NaCl
Молекулярная кристаллическая решетка



● Молекула CO₂
Дисульфид углерода CO₂

Виды кристаллических решеток в зависимости от элементов, их составляющих.

сталлов часто различаются. Ведь кристалл в реальных условиях растет неравномерно, что зависит от среды и его положения. Из-за этого трудно было выявить закономерности формы кристаллических многогранников и уловить их симметрию. Однако уже 1669 г. датский ученый Нильс Стенсен сформулировал так называемый закон постоянства углов кристаллов. Согласно этому закону, при одинаковых условиях (давлении и температуре) углы между соответствующими гранями кристаллов одинаковы для всех экземпляров одного минерала. Выводы свои он сделал, изучая образцы железного блеска (гематита) и горного хрусталя. Наблюдения Стенсена в 1783 г. подтвердил французский кристаллограф Жан-Батист Ромэ де Лиль, проделавший множество

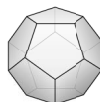
Тетраэдр
(четырегранник)



Октаэдр
(восемьгранник)



Куб
(шестигранник)



Додекаэдр
(двенадцатигранник)



Икосаэдр
(двадцатигранник)

Платоновы тела.

измерений кристаллов. Он впервые представил общую формулировку закона. Она выглядит следующим образом: двугранные углы между соответствующими гранями и ребрами во всех кристаллах одного и того же вещества и одной полиморфной модификации постоянны при данных условиях. Де Лиль обобщил свои наблюдения в книге «Кристаллография, или Описание форм, присущих всем телам минерального царства» и по праву считается основателем кристаллографии как самостоятельной дисциплины.

Уже в XIX в. Иоганн Гессель и Аксель Гадолин независимо друг от друга доказали, что в кристаллах возможны 32 вида симметрии, которые объединяются в группы, называемые системами или сингониями. Огюст Браве характеризовал кристаллические решетки относительно сдвигов. Они получили название решеток Браве, всего их насчитывается 14.

Одновременно с геометрической кристаллографией развивалась физическая кристаллография. Различные физические свойства кристаллов, как природных, так и выращенных искусственно, широко используются в науке — это и проводящие, и оптические характеристики.

Для исследования самой структуры кристаллов нередко используется дифракционная рентгенография. В основе этого метода лежит закон, открытый отцом и сыном Брэггами. Когда на

КЛАССИФИКАЦИИ КРИСТАЛЛОВ

В описании кристаллов применяются различные классификации и характеристики, которые следует различать. Так, сингонией называют классификацию кристаллографических групп симметрии, кристаллов и кристаллических решеток в зависимости от системы координат. У кристаллов, которые принадлежат к одной и той же сингонии, ребра и углы элементарных ячеек подобны. Кристаллической системой считают классификацию кристаллов, которая основана на наборе элементов симметрии, принадлежащих кристаллографической группе. Системой решетки именуют классификацию кристаллических решеток в зависимости от их симметрии.



Нильс Стенсен (1638—1586), известный также как Николас Стенон или Николай Стено, датский анатом, палеонтолог и геолог.

Гематит, он же железный блеск (Fe_2O_3). Кристалл этого вещества послужил развитию кристаллографии.



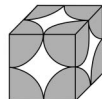
кристалл падает рентгеновский луч, каждый атом испускает вторичную волну Гойгенса. Кристалл при этом можно разбить на набор параллельных плоскостей, которые определяются атомной структурой кристаллической решетки. Обычно вторичные дифракционные волны не усиливаются взаимно. Исключением являются те случаи, когда эти волны попадают в точку наблюдения со сдвигом по фазе, который равен целому числу длин волн. Это условие отображается следующей формулой:

$$2d \sin \theta = n\lambda,$$

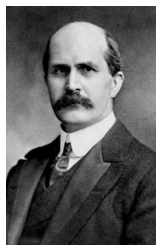
где d — расстояние между параллельными плоскостями кристаллической решетки,

ВИДЫ СИММЕТРИИ

В современной кристаллографии за основу описания симметрии берутся так называемые трансляции кристаллической решетки. В связи с этим выделяют шесть сингоний, объединенных в три категории. К низшей категории относятся триклинная, моноклинная и ромбическая сингонии, у которых все трансляции не равны друг другу. К средней категории относятся тетрагональная и гексагональная сингонии, у которых равны между собой две из трех трансляций. К высшей категории относится кубическая сингония, у которой равны все трансляции.



Элементарная ячейка кубической структуры.



Сэр Уильям
Генри Брэгг
(1862—1942),
британский
и австралийский
физик, лауреат
Нобелевской
премии (вместе
с сыном).



Сэр Уильям Лоренс
Брэгг (1890—1971),
австралийский
и британский физик,
лауреат Нобелевской
премии по физике 1915 г.
(совместно со своим отцом).
Самый молодой нобелевский
лауреат в истории.

ОБЪЕМНОЦЕНТРИРОВАННАЯ КУБИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА

В объемноцентрированной кубической решетке атомы располагаются в центрах ячеек и вершинах простой кубической решетки. Область пространства, которая лежит ближе к данному атому, чем к остальным, в данном случае является ромбододекаэдром. Подобную решетку можно встретить у железа при не очень высокой температуре, у вольфрама, молибдена, хрома и щелочных металлов.



Объемноцентрированная структура

ГРАНЕЦЕНТРИРОВАННАЯ КУБИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА

В этой структуре атомы располагаются в центрах граней и вершинах простой кубической решетки. Наиболее близкие атомы образуют тетраэдры и октаэдры, которые полностью заполняют пространство. Такой структуре соответствует одна из самых плотных упаковок сферических тел в пространстве. Подобная решетка встречается у многих металлов, таких как золото, серебро, платина, никель, алюминий и другие, а также при конденсации инертных газов.

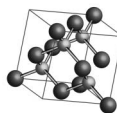


Гранецентрированная кубическая структура.

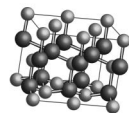
θ — угол рассеяния рентгеновских лучей,
 λ — длина волны рентгеновских лучей, n —
целое число (порядок дифракции). При $n = 1$
наблюдается пик взаимного усиления волн
дифракции на атомах, удаленных друг от дру-
га на одну длину волны, при $n = 2$ — разность
хода составляет две длины волны и так далее.
Это и есть закон Брэгга. Он заключается в
том, что при отдельных длинах волн под опре-
деленными углами рассеяния усиливается
излучение. Зная эти углы отклонения, мож-
но определить, на каком расстоянии друг от
друга находятся плоскости кристаллической
решетки. Каждой из плоскостей при этом со-

ОДНА ФОРМУЛА — РАЗНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

В природе существует множество при-
меров, когда вещества с одинаковым
составом обладают разной кристалли-
ческой структурой. Одним из таких
веществ является сульфид цинка. Его
минерал с планальной, или гексате-
траэдрической, структурой — это сфе-
лерит, или цинковая обманка. Назван
он так из-за того, что его трудно выя-
вить. Янтарно-желтый сфалерит назы-
вают еще медовой обманкой, а оран-
жево-красный — рубиновой. А вот
лучистая цинковая обманка, или вюр-
цит, — это другая кристаллическая
модификация сульфида цинка. У вюр-
цита гексагональная структура. С уве-
ренностью отличить друг от друга обе
модификации можно только с помо-
щью рентгеноструктурного анализа.



Сфалерит



Вюрцит

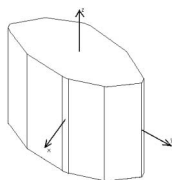
ответствует свой пик яркости рентгеновских лучей на дифракционной картине.

Таким образом, можно вычислить расстояние между атомами кристаллической решетки, и при помощи рентгеноструктурного анализа определить структуру кристалла. За открытие закона, который позволил разработать этот весьма полезный метод, отец и сын Брэгги были удостоены Нобелевской премии 1915 г.

СЕКРЕТЫ СЕГНЕТОВОЙ СОЛИ

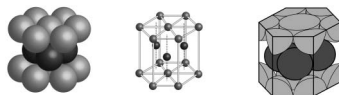
Сегнетова соль, или двойная соль винной кислоты $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, формирует ромбовидные двенадцатигранные кристаллы. У этих кристаллов были впервые открыты свойства, которые нашли широкое применение в технике. Они оказались подвержены самопроизвольной поляризации, причем под воздействием внешнего электрического поля характеристики этой поляризации изменяются. Позднее эти свойства были обнаружены и у других веществ. Их назвали сегнетоэлектриками в честь сегнетовой соли. Фактически сегнетоэлектрики — это диэлектрики с особыми свойствами. Сегнетоэлектрикам свойственны высокие значения диэлектрической проницаемости, пьезоэлектрический и пьезоэлектрический эффекты, а их показатель преломления зависит от величины приложенного электрического поля. Поэтому сегнетоэлектрики используются в конденсаторах, электрооптических системах пьезоэлектрических устройств, температурных датчиках, нелинейной оптике. Сама же сегнетова соль после открытия ее свойства стала применяться в звукозаписывающих устройствах, телефонных трубках, микрофонах, слуховых аппаратах. По сравнению с другими подобными преобразователями ее выходное напряжение очень велико, но устройства, содержащие ее, следует беречь от влаги, потому что соль эта весьма гигроскопична и под действием влаги расплывается.

Кристалл сегнетовой соли с осями симметрии.



ГЕКСАГОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

В гексагональной сингонии из трех элементарных ячеек формируется правильная призма на шестигранном основании. В гексагональной плотноупакованной решетке семь атомов располагаются в вершинах и центре шестигранных оснований призмы, а еще три атома — в средней плоскости призмы. Примером гексагонального кристалла является графит.



Гексагональная структура

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТУРМАЛИНА

Пьезоэлектричество — это возникновение электрического поля в кристаллах при изменении температуры, то есть при нагревании, трении, облучении. Фалес Милетский, в VI в. до н. э. обнаруживший, как янтарь после натирания притягивает птичий пух или соломинки, открыл именно пьезоэлектрический эффект.

Много позднее подобные свойства были обнаружены у кристаллов турмалина. Оказалось, что при изменении температуры на 1 К в них возникает электрическое поле напряженностью ~ 400 В/см.

В 1884 г. немецкий ученый Август Кундт продемонстрировал следующий опыт с турмалином. Он разогрел кристалл турмалина и опылил его смесью двух порошков — красно-оранжевого сурика и ярко-желтой серы, пропустив их через шелковое сито. Трение о шелк привело к тому, что частицы сурика приобрели положительный заряд, а частицы серы — отрицательный. При этом турмалин, сам ставший в результате нагревания диполем, окрасился в разные цвета. Положительно заряженная часть стала желтой, притянув серу, а отрицательная — красной, притянув сурик. Но при охлаждении полюса у кристалла поменялись и, соответственно, изменились их цвета.

ЭНТРОПИЯ, ИЛИ МЕРА БЕСПОРЯДКА

Энтропию часто рассматривают как меру беспорядка. Идея энтропии весьма распространена в естественных и точных науках. Сам термин введен в рамках термодинамики как функция состояния термодинамической системы, которая определяет меру необратимого рассеивания энергии. Понятие энтропии выведено из второго начала термодинамики. Однако термин «энтропия» и ее идея используются также и в других областях.

Понятие энтропии впервые ввел немецкий физик и математик Рудольф Клаузиус в 1865 г. с целью определить меру необратимого рассеивания энергии, меру, в которой реальный процесс отклоняется от идеального. Энтропия была определена как сумма приведенных теплот. Она представляет со-

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ И МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Макроскопическая система состоит из большого числа частиц, рассматривается как единое целое и описывается с помощью макроскопических параметров, таких как температура, объем и давление. Микроскопические параметры, которые определяют движение отдельных молекул, то есть массу, скорость, импульс и кинетическую энергию, в термодинамике не учитываются. Законы термодинамики не зависят от конкретного строения вещества на атомном уровне. Они применяются в энергетике, теплотехнике и множестве научных теорий.

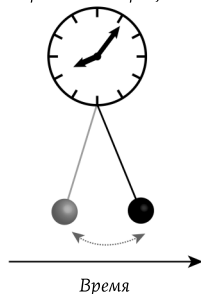
бой функцию состояния. В замкнутых обратимых процессах она остается постоянной, а в необратимых — всегда возрастает.

Понятие термодинамической энтропии выводится из физической науки термодинамики. Термодинамика изучает наиболее общие свойства макроскопических систем и способы передачи и превращения энергии в таких системах. В термодинамике изучаются такие состояния и процессы, для описания которых вводят понятие температуры.

У термодинамики есть несколько принципов, или начал. Согласно нулевому началу термодинамики, изолированная термодинамическая система с течением времени самопроизвольно переходит в состояние термодинамического равновесия и остается в нем сколь угодно долго, при сохранении неизменными внешних условий. Первое начало термодинамики представляет собой одну из формулировок закона сохранения энергии. Второе начало термодинамики устанавливает существование энтропии и вводит понятие абсолютной термодинамической температуры.

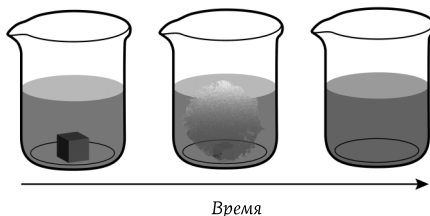
В основе второго начала термодинамики лежит идея французского физика Сади Карно, согласно которой теплота не может быть

Обратимый процесс



Примеры обратимого и необратимого процессов.

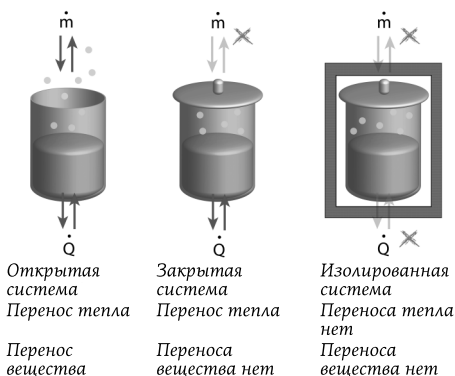
Необратимый процесс



ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Макроскопическая система, рассматриваемая методами термодинамики, называется термодинамической. Открытая термодинамическая система обменивается с окружающей средой и теплом, и веществом. Пример такой системы — человеческий организм. Закрытая термодинамическая система обменивается с внешней средой только теплом. Пример такой системы — любой сосуд с водой или баллон с газом. Изолированная термодинамическая система не обменивается с внешней средой ни теплом, ни веществом. Чтобы получить изолированную систему, нужно использовать сосуд Дьюара, то есть термос. Если у изолированной макроскопической системы не изменяются объем, температура и давление, то говорят, что она находится в состоянии термодинамического равновесия. Но на деле полностью изолированная система — это идеальная модель.

Открытая, закрытая и изолированная термодинамические системы.

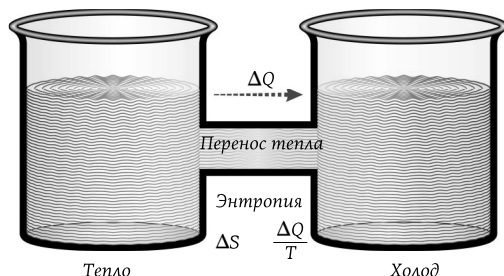


преобразована в работу при отсутствии разницы температур. В формулировке Уильяма Томсона (лорда Кельвина) оно звучит так: невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара. В формулировке Рудольфа Клаузиуса, который и предложил термин «второе начало термодинамики», оно выглядит следующим образом: теплота не может

самопроизвольно переходить от тела, менее нагретого, к телу, более нагретому. Об энтропии говорит и третье начало термодинамики, или теорема Нернста: энтропия любой равновесной системы по мере приближения температуры к абсолютному нулю перестает зависеть от каких-либо параметров состояния и стремится к определенному пределу, который принято приравливать к нулю.

ОТ ТЕПЛОГО К ХОЛОДНОМУ

Чтобы описать, как действует второе начало термодинамики, представим себе два сообщающихся сосуда: в одном будет горячий газ, в другом — холодный. Так как со-



Графическое отображение второго начала термодинамики.

суды сообщаются, тепло будет постепенно передаваться от более нагретого сосуда к менее нагретому. Хотя теоретически возможно, чтобы горячее тело нагревалось еще сильнее, а холодное — охлаждалось, в действительности этого не происходит. Процесс теплопередачи от более горячего тела к более холодному необратим. Со временем температура в обоих сосудах становится равной — наступает термодинамическое равновесие.

ВОЗМОЖЕН ЛИ ВЕЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ВТОРОГО РОДА

Кроме идеи вечного двигателя первого рода есть идея и о вечном двигателе второго рода. Это такая тепловая машина, которая превращает в работу все тепло, которое она извлекает из окружающих тел, имеющих постоянную температуру. Однако, исходя из второго начала термодинамики, вечный двигатель второго рода невозможен. Этот постулат ввел в 1892 г. немецкий физик Вильгельм Оствальд.

Идею возрастания энтропии рассматривали многие. Джозайя Уиллард Гиббс сформулировал принцип максимума энтропии в состоянии термодинамического равновесия. Больцман же утверждал, что самопроизвольно протекают только те процессы, в которых система из менее вероятного состояния переходит в более вероятное. Именно он истолковал энтропию как меру неупорядоченности.

Однако справедливо ли это? Если считать упорядоченными системы с малой возможностью конфигурирования, а беспорядочными — системы с очень большим количеством состояний, то да. Тепловая энергия — это энергия хаотичного движения молекул, все другие виды связаны с более упорядоченным движением. Превращение механической энергии в тепловую гораздо легче, чем обратное. И, как известно, для наведения порядка требуются усилия — беспорядок возникает

РАЗНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭНТРОПИИ

Термодинамическая энтропия — термодинамическая функция, характеризующая меру необратимого рассеяния энергии в ней.

Информационная энтропия — мера неопределенности источника сообщений, которая определяется вероятностями появления тех или иных символов при их передаче.

Энтропия динамической системы — мера хаотичности в поведении траекторий системы.

Энтропия в теории управления — мера неопределенности состояния или поведения системы в данных условиях.

сам, то есть сами собой идущие процессы сопровождаются ростом беспорядка. Например, если разложить по порядку кубики с буквами, а потом просто встряхнуть, то порядок нарушится и восстановить его многократным встряхиванием не удастся, так как упорядоченное по алфавиту состояние вовсе не является самым вероятным. Тем не менее, если рассматривать рост энтропии как движение к наиболее вероятному состоянию, возникают вопросы. Например, когда из переохлажденной жидкости образуются кристаллы, этим система переходит в более вероятное состояние, температура растет, энтропия возрастает, но при этом возникают упорядоченные структуры. Таким образом, понятие энтропии чрезвычайно сложное и должно рассматриваться также в зависимости от терминологии.



Чтобы привести хаотично расположенные кубики в упорядоченное состояние, требуются усилия.

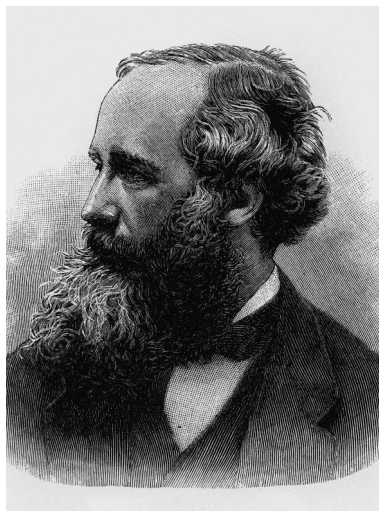


Рудольф Клаузиус (1822—1888), немецкий физик и математик, предложивший термин «энтропия» и гипотезу о тепловой смерти Вселенной.

Клаузиус перенес закономерности земного макроскопического опыта на Вселенную в целом и посчитал, что энтропия мира стремится к максимуму и вся энергия рассеивается в виде тепла. Значит, со временем состояние Вселенной приблизится к равновесному и в ней останется равномерно нагретая и равномерно распределенная в пространстве материя. То есть наступит «тепловая смерть Вселенной». Но сегодня, учитывая теорию гравитации, ученые пришли к выводу, что однородное изотермическое распределение вещества во Вселенной не является наиболее вероятным и не соответствует наибольшей энтропии. Метагалактика (то есть наблюдаемая Вселенная) расширяется, и ее вещество под действием сил тяготения группируется в самоорганизующиеся структуры — скопления галактик, галактики, звезды, планеты. Все эти процессы сопровождаются ростом энтропии, не требуют модификации законов термодинамики, и поэтому тепловая смерть Вселенную не ожидает.

ДЕМОН МАКСВЕЛЛА

Джеймс Клерк Максвелл, выдающийся британский физик, захотел проиллюстрировать кажущийся парадокс первого начала термодинамики и предложил любопытный мысленный эксперимент. Возьмем сосуд с газом и разделим его на правую и левую части непроницаемой перегородкой. Сделаем в перегородке дверцу и запустим туда крохотное разумное существо — демона Максвелла. Демон будет пропускать в левую часть только медленные, холодные, молекулы, а в правую часть — только быстрые, горячие, молекулы. И через некоторое время все холодные молекулы окажутся в левом сосуде, а все горячие — в правом. При этом энтропия уменьшится, но дополнительной энергии демон не получит, а это противоречит второму началу термодинамики. Но на самом деле демону, чтобы различать и просеивать молекулы, все-таки нужна дополнительная энергия. Кроме того, демон и дверца, вступая во взаимодействие с молекулами, будут получать от них тепло и наращивать энтропию.



Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879), британский физик и математик. Основатель теории электромагнетизма, один из основоположников кинетической теории газов, автор других выдающихся работ.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, ИЛИ РАЗНООБРАЗИЕ ТЕРМОМЕТРОВ

Температура — это физическая величина, которая характеризует термодинамическую систему и количественно выражает интуитивное понятие о различной степени нагретости тел. В рамках молекулярно-кинетической теории температура — средняя кинетическая энергия частиц системы, и ее могли бы измерять в единицах энергии — джоулях. Но измерять температуру начали намного раньше, чем появилась молекулярно-кинетическая теория, и поэтому для нее используются условные единицы — градусы. Однако в физике имеется так называемая энергетическая шкала, где температуру все-таки измеряют в джоулях.

Андерс Цельсий (1701—1744), шведский астроном, метеоролог и геолог. Профессор Упсальского университета, изобретатель температурной шкалы, названной его именем.



Температуру нельзя измерить напрямую. Вывод о ее изменениях делают, анализируя изменения других свойств тел. Например, это могут быть давление, объем, электрическое сопротивление. Вот почему измерение температуры представляет собой измерение данных термометрических свойств. Для этого необходимо выбрать термометрическое тело, для которого подобное свойство воспроизводится хорошо, а с температурой изменяется существенно и монотонно. Нужно также выбрать единицу измерения и определить шкалу, по которой температурные значения будут отсчитываться от избранного уровня. Для шкалы необходимо определить две так называемые реперные точки, припи-

сать им произвольные значения и разделить диапазон на одинаковое число частей.

Так были созданы разнообразные эмпирические шкалы температуры, и температура, которая ими измеряется, называется эмпирической.

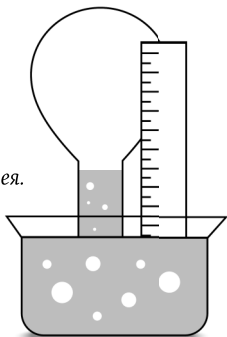
Считается, что изобретение первого термометра принадлежит Галилею. Он создал прибор-термоскоп, который представлял собой заполненный воздухом стеклянный баллончик, тонкой трубкой соединенный с заполненным окрашенной жидкостью сосудом. При изменении температуры в баллончике изменялся и уровень окрашенной жидкости.

Термоскоп Галилея использовал Санторио Санторио, врач из Падуи. Именно он впервые ввел реперные точки. Одна соответствовала температуре в жаркий день, другая — температуре во время снегопада. Он же впервые стал измерять температуру человеческого тела.

Эванджелиста Торричелли создал жидкостный (спиртовой) термометр. Конструкция оказалась очень удачной, и флорентийские термометры распространились по Европе.

Ртуть применена в качестве термометрического тела в 1724 г. немцем ученым Габриэлем Фаренгейтом. Первой реперной точкой он сделал температуру смеси снега с нашатырем, которую принял за нуль. Второй

Термоскоп Галилея.



реперной точкой в его шкале в качестве термометрического тела стала температура тела здорового человека. При нормальном атмосферном давлении температура замерзания воды по шкале Фаренгейта равна $+32^{\circ}\text{F}$, а температура кипения воды — $+212^{\circ}\text{F}$. Французский ученый Рене Антуан Реомюр в 1730 г. взял 80%-ный этиловый спирт как термометрическое тело, за ноль он принял точку таяния льда. По Реомюру температура кипения воды равна 80 градусов. Шведский ученый Андерс Цельсий в 1742 г. разбил диапазон между точками кипения воды и таяния льда в ртутном термометре на 100 частей. При этом точка кипения воды была принята им за 0°C , а точка плавления

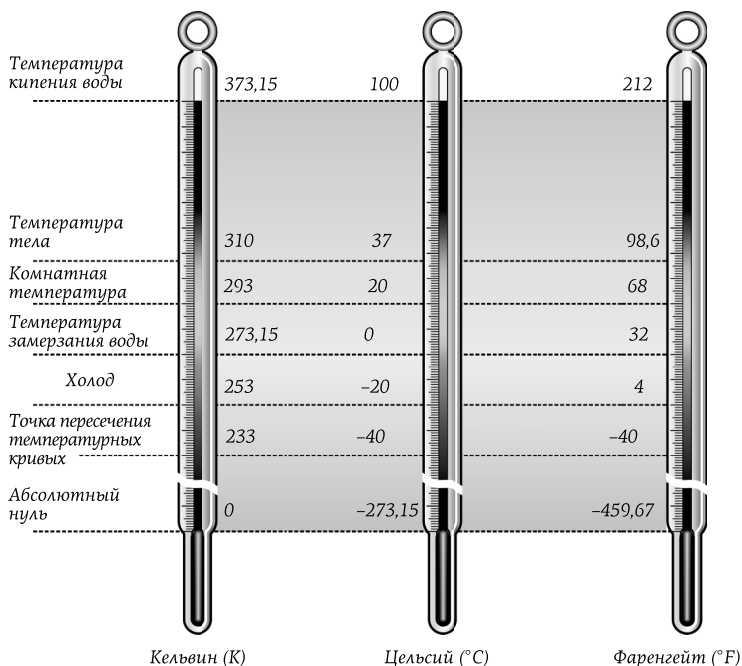
льда — за 100°C . Но уже в 1750 г. ученик Цельсия Мартин Стреммер перевернул шкалу, и она приняла привычный для нас вид. Шкала Цельсия очень удобна и используется повсеместно.

ТРОЙНАЯ ТОЧКА ВОДЫ

В тройной точке вода может одновременно и равновесно существовать в трех агрегатных состояниях — твердом, жидком и газообразном. Ее температура — $273,16\text{ K}$, то есть $0,01^{\circ}\text{C}$, (при этом температура плавления льда равняется $-0,0001^{\circ}\text{C}$.).

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ШКАЛ

Появление абсолютной шкалы температур вызвало изменения в шкале Цельсия. До этого была установлена зависимость градуса Цельсия от нормального атмосферного давления, а реперными были точки таяния льда и кипения воды. С 1954 г. для этой шкалы была принята одна реперная точка — тройная точка воды, которая обладает лучшей воспроизводимостью. Один градус Цельсия приравнен к одному кельвину (K). (Позднее «градусы Кельвина» переименовали просто в «кельвины».) Таким образом, шкалы Цельсия и Кельвина сдвинуты на 273,15. Фаренгейт же сдвинут относительно Кельвина на 459,67 градуса.



ТЕРМОПАРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Сегодня в промышленности широко применяются термоэлектрические термометры. Дело в том, что если нагреть место соединения двух разнородных проводников — спай, то они создадут термоэлектродвижущую силу, которую можно измерить. Такие проводники носят название термоэлектродов, а все устройство называется термопарой. Величина термоэлектродвижущей силы термопары зависит от разности температур горячего спаев и холодных спаев и от материала термоэлектродов. Поэтому перед измерением температуры горячего спаев температуру холодных спаев надо стабилизировать или заранее ввести на нее поправку.



Уильям Томсон, лорд Кельвин (1824—1907), выдающийся британский физик, известный своими работами в области термодинамики, электродинамики, механики. Титул он получил от королевы Великобритании за научные заслуги.

Эмпирические шкалы приносят огромную практическую пользу, но у них имеются определенные недостатки. Ведь в природе не существует идеального термометрического вещества, чьи физические свойства строго линейно зависели бы от температуры и которое сохраняло бы во всем возможном диапазоне температур собственные свойства. В 1848 г. Уильям Томсон, позднее получивший титул лорда Кельвина,

ТЕРМОМЕТР

Термометры бывают неконтактными или контактными. С помощью неконтактных термометров дистанционно определяют интенсивность оптического или интегрального теплового излучения объекта. Они довольно сложны, поэтому чаще используют контактные термометры. Их приводят в тепловой контакт с телом, чья температура измеряется, и когда между телом и термометром устанавливается термодинамическое равновесие, то есть их температуры выравниваются, отмечают температуру тела согласно изменению определенного физического параметра термометра. Причем чем ниже теплоемкость термометра и чем больше тепловой контакт, тем быстрее наступает выравнивание. У идеального термометра теплоемкость нулевая.



В обычном ртутном термометре используется принцип, примененный Эванджелистой Торричелли при изобретении первого ртутного барометра.

предложил выбрать градус температурной шкалы так, чтобы в ее диапазоне не изменялась эффективность тепловой машины. Таким образом, он ввел понятие абсолютной температуры. Она не зависит от термодинамического тела, отсчитывается от абсолютного нуля и является характеристикой системы в состоянии термодинамического равновесия. Измеряется абсолютная температура в градусах Кельвина.

САМЫЕ ТОЧНЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

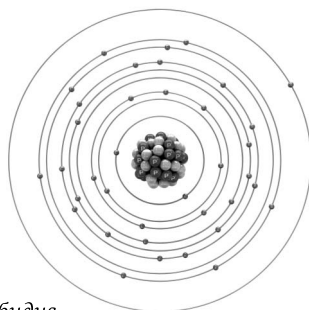
Самые точные термометры — это термометры сопротивления с платиновым напылением на керамику или с платиновой проволокой. Принцип их действия заключается в том, что электрическое сопротивление металлов, сплавов и полупроводниковых материалов зависит от температуры.

НЕ ПЕРЕПУТАЙТЕ ЦЕЛЬСИЙ С ФАРЕНГЕЙТОМ

Герой рассказа Эрнеста Хемингуэя «Ожидание», девятилетний мальчик, недавно вернулся из Франции домой в США. Он простудился. Пришедший врач померил температуру и сказал: «102 градуса». После этого ребенок стал очень печальным и замкнутым. Только к концу дня выяснилось, что мальчик все это время ждал смерти, потому что во Франции школьные друзья говорили, что человек умирает, если температура поднимается до 44 градусов. Отец объяснил ему, что в Европе температуру меряют по шкале Цельсия, а в Америке — по шкале Фаренгейта, и ничего с ним не случится: «...Бедный мой малыш. Это все равно как мили и километры. Ты не умрешь. Это просто другой термометр. На том термометре нормальная температура тридцать семь градусов. На этом девятно восемь». Чтобы соотнести обе шкалы, надо воспользоваться следующими формулами: $t^{\circ}\text{C} = 5/9 (t^{\circ}\text{F} - 32)$; $t^{\circ}\text{F} = 9/5 (t^{\circ}\text{C} + 32)$. Таким образом, температура у мальчика была 38,9 °C, конечно, высокая, но отнюдь не смертельная.

АБСОЛЮТНЫЙ НУЛЬ

Абсолютный нуль — это самая низкая температура из возможных для физического тела в нашей Вселенной. Молекулы в таком теле полностью прекращают движение, и энергия их теплового движения достигает нуля. Абсолютный нуль по Цельсию равен $-273,15^{\circ}\text{C}$, абсолютный нуль по Фаренгейту составляет $-459,67^{\circ}\text{F}$. Считается, что абсолютного нуля достичь невозможно, но к нему подошлись очень близко. Самую низкую температуру в лабораторных условиях получили американские ученые Эрик Корнелл и Карл Виман в 1995 г., охлаждая атомы рубидия. Она превышала абсолютный нуль меньше чем на одну стомиллиардную кельвина (или градуса Цельсия, ведь цена деления у обеих шкал одинакова).



Атом рубидия.

САМАЯ ВЫСОКАЯ ТЕМПЕРАТУРА

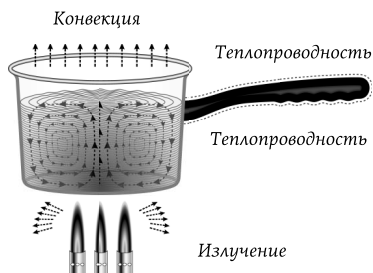
Самой высокой температуры в лабораторных условиях удалось добиться в 2010 г. на Большом адронном коллайдере, где сталкивались ионы свинца, разогнанные до околосветовых скоростей. Это была температура ~ 10 трлн К (подобная температура была в первые секунды жизни Вселенной). Теоретически самая высокая температура во Вселенной была после Большого Взрыва и достигала $1,416808(33) \times 10^{32}$ К. Это так называемая планковская температура, и считается, что на практике достичь ее нельзя.

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА: ОТ КАСТРЮЛИ ДО МОРЯ

Множество ученых занимались и занимаются процессами теплопередачи. Теплопередача — это физический процесс передачи тепловой энергии от более горячего тела к менее горячему. Самопроизвольная передача тепла происходит именно в этом направлении согласно второму закону термодинамики. У физических тел, принадлежащих к одной системе, теплопередача происходит до тех пор, пока не наступит термодинамическое равновесие. Эти идеи оформлены в законы и широко применяются на практике.

Раньше считали, что тепло передается с помощью особого вещества — теплорода. На деле оно связано с движением частиц вещества и передачей энергии. Существует три основных вида теплопередачи. Теплопроводность имеет место у твердых тел, при этом тепло, то есть энергия атомов и молекул, передается от более нагретых участков тела к менее нагретым или же к другому телу. Конвекция представляет собой передачу теплоты струями газов или жидкостей. Нижние слои вещества нагреваются, становятся легче и всплывают, а верхние слои остывают, становятся тяжелее и опускаются вниз, и все повторяется снова и снова. Под излучением понимается передача теплоты электромагнитными волнами.

Имеет место также сложный перенос тепла, когда сочетаются элементарные его виды. Это, например, конвективный обмен между потоками газа или жидкости и твердыми телами, теплообмен от твердого тела, жидкости или газа через перегородку, совместный



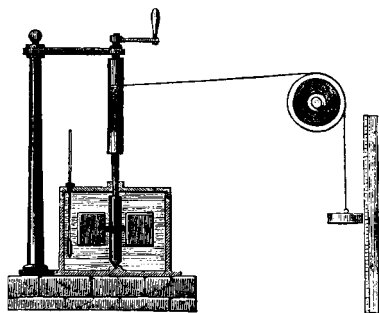
Нередко на практике можно наблюдать несколько видов теплопередачи.

перенос тепла конвекцией и излучением, или конвективно-лучистый перенос, термомагнитная конвекция.

Тепловыделение свойственно многим процессам, например химическим реакциям, ядерным реакциям, электрическим процессам. Способность вещества переносить тепловую энергию, а также количественная оценка этой способности называются

ЗАСЛУГИ ДЖОУЛЯ

Джоуль — единица измерения не только энергии и работы, но и количества теплоты. Эта единица измерения названа в честь английского ученого Джеймса Прескотта Джоуля (1818—1889), который обнаружил, что тепло и его передача связаны с механической работой, что впоследствии привело к созданию закона сохранения энергии и обеспечило возможность формулирования второго закона термодинамики. Кроме этого, он установил, что скорость движения молекул газа связана с температурой, и сделал ряд других открытий.



Установка, которую Джоуль создал в 1847 г., чтобы измерить механический эквивалент тепла. Расположенный справа груз заставлял вращаться погруженные в воду лопасти, и вода нагревалась.

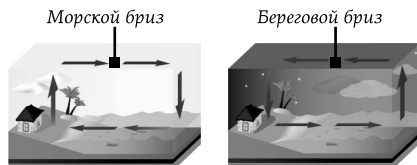
теплопроводностью. Единицей измерения теплопроводности является $\text{Вт}/(\text{м}\times\text{К})$, где Вт — ватт, единица мощности, м — метр, К — кельвин. Количество теплоты, которое необходимо передать телу, чтобы его температура возросла на один кельвин, называется теплоемкостью. Она измеряется в джоулях на кельвин ($\text{Дж}/\text{К}$).

ПОЧЕМУ У ТЕРМОСА ДВОЙНЫЕ СТЕНКИ

В вакууме нет никаких частиц, способных переносить тепло. Поэтому коэффициент теплопроводности вакуума равен нулю. Тепло он все-таки передает, но только излучением. Поэтому для уменьшения теплопотерь стенки термоса делают двойными, а воздух между ними откачивают.

ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

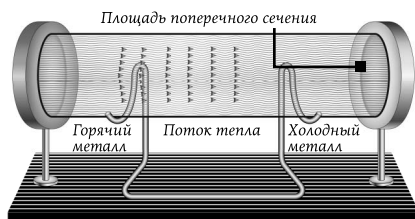
Конвекция бывает естественной или искусственной. Например, естественная конвекция при кипении воды в обычной кастрюле может усиливаться искусственно при перемешивании. При помощи конвекции нагревают воздух отопительные батареи. Естественная конвекция в природе появляется повсюду. Благодаря ей движутся тектонические плиты, образуются облака, появляются гранулы на Солнце и образуются ночные и дневные бризы. Днем суша нагрета больше, чем вода, и теплый воздух с суши поднимается вверх, уступая место холодному воздуху с моря. Ночью все происходит наоборот, так как в это время суток воздух над водой теплее, чем воздух над сушей.



Дневной, или морской, бриз — прохладный ветер, дующий с моря на сушу. Ночной, или береговой, бриз направлен с суши в сторону моря. Происходит это благодаря конвекции.

ЗАКОН ФУРЬЕ

Поток энергии, который в установившемся режиме передается посредством теплопроводности, пропорционален градиенту температуры. Этот закон называется законом Фурье по имени французского математика и физика Жана Батиста Жозефа Фурье (1768—1830), человека интересной судьбы, который едва не погиб на гильотине во время революции, а позднее был одним из тех ученых, которые принимали участие в египетском походе Наполеона.



Наглядное выражение закона Фурье.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК КАК ИСТОЧНИК ТЕПЛА

Согласно закону Джоуля—Ленца мощность тепла, которое выделяется в единице объема среды при протекании постоянного электрического тока, равняется произведению плотности электрического тока на величину напряженности электрического поля. Благодаря этому электричеством можно обогревать помещения. Но для такого способа требуется немало ресурсов. И поэтому в некоторых странах, в том числе в Дании, существуют законодательные нормы, которые ограничивают или запрещают полностью использовать в новых домах электрические средства обогрева.

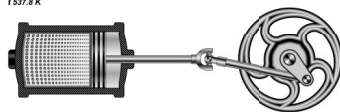
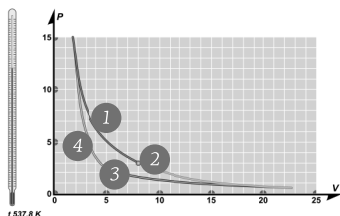


Электро-
обогреватель
забирает
много
энергии.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ: ИДЕАЛЬНЫЕ И РЕАЛЬНЫЕ

Термодинамика возникла из практических нужд. В XVIII в. появились паровые машины, которые стали использоваться в промышленности. Ученые и инженеры начали искать способы увеличения их эффективности, то есть способы преобразования внутренней энергии тел для совершения механической работы. Французский физик Сади Карно в 1824 г. опубликовал труд «О движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», в котором был установлен максимальный коэффициент полезного действия тепловых машин. Считается, что именно эта работа положила начало науке термодинамике.

Согласно второму началу термодинамики в формулировке Уильяма Томсона (лорда Кельвина), прямое преобразование тепловой энергии в работу невозможно. Поэтому для получения работы используют термодинамические циклы. Это круговые процессы: в них совпадают начальные и конечные параметры, которые определяют состояние рабочего тела. Это объем, давление, температура и энтропия. Термодинамические циклы — это, по сути, модели процессов, происходящих в реальных тепловых машинах, которые превращают тепло в механическую работу.



1. Изотермическое расширение
2. Адиабатическое расширение
3. Изотермическое сжатие
4. Адиабатическое сжатие

Цикл Карно и его этапы.

Цикл, который может проходить в замкнутой системе и в прямом, и в обратном направлениях, называют обратимым, и он обладает наибольшей эффективностью. В обратимом цикле не изменяется суммарная энтропия системы. В других циклах обратимости добиваются благодаря введению регенератора — дополнительного теплового резервуара.

Единственный обратимый цикл в машине, где тепло передается только между рабочим телом, нагревателем и холодильником.

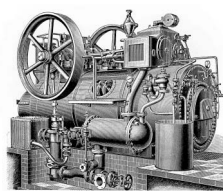
КОМПОНЕНТЫ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ

Компоненты любой тепловой машины — рабочее тело, а также меняющие его состояние нагреватель и холодильник. Рабочим телом в тепловом двигателе могут быть продукты сгорания бензина или дизельного топлива, водяной пар, в холодильнике — фреоны, водород или аммиак, в ракете — отбрасываемое от нее вещество.

ДВИГАТЕЛИ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В двигателях внешнего сгорания рабочее тело отделено от источника тепла или процесса сгорания топлива. Это, например, паровые машины, паровые турбины, двигатели Стирлинга, газовые турбины внешнего сгорания и другие. В двигателях внутреннего сгорания топливо сгорает прямо в рабочей камере, находящейся внутри двигателя. Это тепловые и бензиновые двигатели.

Паровая машина — двигатель внешнего сгорания.



ном, — это идеальный цикл, предложенный Сади Карно. Его последовательность следующая: изотермическое расширение, адиабатическое расширение, изотермическое сжатие, адиабатическое сжатие.

ЦИКЛ БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цикл Отто получил название по имени немецкого инженера Николауса Отто. Он описывает цикл бензинового двигателя, то есть такого двигателя внутреннего сгорания, в котором происходит воспламенение сжатой смеси от постороннего источника энергии. Это цикл с подводом теплоты при постоянном объеме. Подводимая теплота повышает давление газа, который потом адиабатически расширяется, совершая полезную работу. После достижения заданного объема теплота отводится. Часть работы уходит на адиабатическое сжатие газа, а затем цикл повторяется заново.

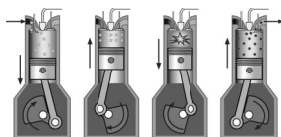
Бензиновый
двигатель, во время
работы которого
действует цикл
Отто.



ЦИКЛ ДИЗЕЛЯ

Цикл Дизеля назван в честь изобретателя — немецкого инженера Рудольфа Дизеля. Он описывает рабочий процесс такого двигателя внутреннего сгорания, в котором впрыскиваемое топливо воспламеняется от разогретого рабочего тела. Это цикл с подводом теплоты при постоянном давлении. Точнее, теплота отдается при постоянном объеме, но подводится при постоянном давлении. Надо отметить, что современные дизельные двигатели работают по циклу Тринклера (циклу Сабатэ), где подвод теплоты смешанный.

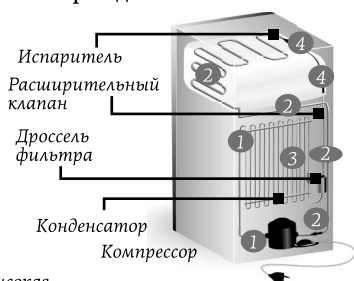
Четыре
цикла
дизельного
двигателя.



Цикл Карно представляет собой обратимый круговой процесс, в который входят два адиабатических и два изотермических процесса. Термодинамическая система при этом выполняет механическую работу, обмениваясь теплотой с двумя резервуарами — нагревателем и холодильником. Температуры в них постоянны, но отличаются друг от друга. Коэффициент полезного действия при этом максимальный. Такие требования не может выполнять ни один из известных циклов, так что цикл Карно является идеальным. Он имеет большое значение для развития термодинамики и теплотехники. С его помощью удалось доказать, что формулировки второго начала термодинамики Клаузиуса и Томсона (Кельвина) эквивалентны. Кроме того, его применили при установлении абсолютной температурной шкалы и для вывода различных соотношений в термодинамике. И, конечно, КПД цикла Карно используется в качестве меры эффективности реальных рабочих циклов.

ОБРАТНЫЙ ЦИКЛ КАРНО

Холодильник использует второе начало термодинамики. Холодильная камера переносит тепло из рабочей камеры во внешнюю среду. Работу холодильника (как и тепловых насосов) можно описать с помощью обратного цикла Карно. Однако основной вклад в теплопередачу вносит не цикл Карно, а испарение и конденсация хладагента (рабочего тела), то есть фазовые переходы.



1. Высокая температура
Высокое давление
Парообразное состояние
 2. Низкая температура
Низкое давление
Парообразное состояние
 3. Низкая температура
Высокое давление
Жидкое состояние
 4. Низкая температура
Низкое давление
Жидкое состояние
- Цикл работы холодильника.

ПРИРОДА И СКОРОСТЬ СВЕТА

Оптика — раздел физики, который рассматривает явления, связанные с распространением электромагнитных волн видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов. Именно в оптике особенно ярко проявилась идея корпускулярно-волнового дуализма, точнее, двойственной природы света и любого другого объекта. А измерение скорости света продолжалось несколько веков.

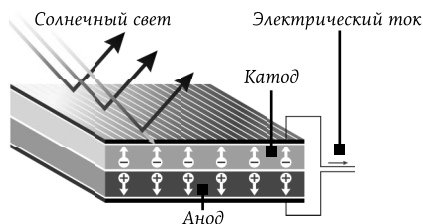


Христиан Гюйгенс (1629—1695), выдающийся нидерландский физик, основоположник волновой теории света.

В оптике свет — это электромагнитное излучение, которое воспринимается человеческим глазом. Коротковолновая граница спектрального диапазона видимого излучения — участок с длинами волн 380—400 нм,

ФОТОЭФФЕКТ

При взаимодействии света с веществом возникает ряд явлений, которые называют фотоэффектом, или фотоэлектрическим эффектом. Электрон, поглощающий квант света, приобретает энергию. Затем либо он вырывается из вещества (это внешний фотоэффект), либо электроны перераспределяются внутри вещества по энергетическим уровням, причем возникает электродвижущая сила (это внутренний фотоэффект). Именно за теорию внешнего фотоэффекта Эйнштейн получил Нобелевскую премию. На фотоэффекте основано действие фотоэлементов, электронных приборов, преобразующих энергию излучения в электрическую энергию. Они используются повсеместно — и в механизмах открывания дверей, и в солнечных батареях.



Солнечная батарея, основанная на фотоэлементах.

а длинноволновая граница — участок 760—780 нм. В более широком смысле свет включает также ультрафиолетовое и инфракрасное излучения.

Свет может рассматриваться и как волна, и как частица. Основоположником волновой теории света был Христиан Гюйгенс, развивал ее Огюстен-Жан Френель, а Джеймс Клерк Максвелл описал электромагнитное поле и электромагнитное излучение в своих знаменитых уравнениях. На основе волновой теории света можно объяснить интерференцию и дифракцию, строить голограммы.

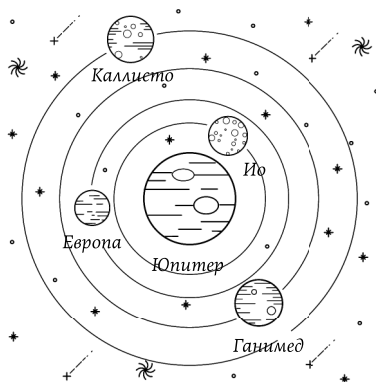
Свет можно также рассматривать как поток частиц — фотонов, или квантов света. В основе корпускулярной теории света лежат идеи Ньютона, изложенные в книге «Оптика». В XX в. эти положения развил Макс Планк. Используя представление о свете как о потоке частиц, можно объяснить фотоэффект и теорию излучения. В настоящее время считается, что свет имеет двойственную природу и может проявлять себя и как поток частиц, и как волна.

Не менее, чем природа света, физиков интересовала его скорость. Правда, до XVII в. бытовало мнение, что свет распространяется мгновенно, так как во время лунных затмений между положением Земли относительно Луны и расположением земной тени на поверхности Луны нет задержки. На самом деле скорость света слишком велика, чтобы заметить задержку, но тогда этого еще не знали. Однако уже Галилей усомнился в этом.

Поскольку Земля вращается вокруг Солнца, видимое положение звезд на небе меняется. Это явление называется абберацией. На основе абберации звезд и знания скорости движения Земли вокруг Солнца английский

ДОЛГОТА, ЮПИТЕР И СКОРОСТЬ СВЕТА

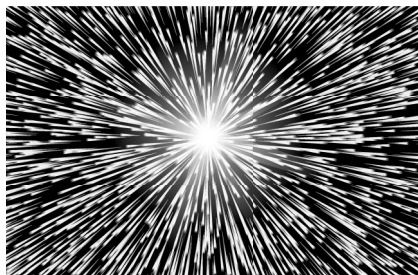
Первым доказал конечность скорости света датский астроном Олаф Ремер. Многие ученые занимались наблюдением за затмениями известных в то время спутников Юпитера. Это было нужно для определения географической долготы. В 1676 г. Ремер отметил, что время между затмениями спутников Юпитера меньше, когда расстояние от Земли до Юпитера уменьшается, и больше, когда это расстояние увеличивается. Он понял, что это получается из-за изменения времени, которое нужно свету, чтобы пройти от Юпитера до Земли. Ремер посчитал, что время, нужное свету для преодоления расстояния в диаметр орбиты Земли, — 22 мин (на самом деле около 16 мин 40 с). Он не знал точного значения диаметра орбиты Земли и потому не дал конкретного значения скорости света.



Исследования Ремера доказали, что скорость света конечна.

МЕНЯЕТСЯ ЛИ СКОРОСТЬ СВЕТА

Скорость света в различных прозрачных средах меньше его скорости в вакууме. Например, в воде она составляет три четверти от максимальной скорости. Считается, что это происходит потому, что фотоны поглощаются и переизлучаются частицами среды.



ученый Джеймс Брэдли в 1728 г. получил значение скорости света в 301 000 км/с. В 1849 г. французский ученый Арман Физо для определения скорости света провел следующий эксперимент. Свет отражался от зеркала, которое было удалено от источника на 8 км. Луч проходил через зазор между зубчиками вращающегося колеса. Скорость вращения увеличивали, пока отраженный луч не появлялся в следующем зазоре. Удалось рассчитать скорость света в 315 000 км/с. В 1850 г. Леон Фуко с помощью вращающегося зеркала рассчитал скорость света как 298 000 км/с. После появления теории электромагнетизма Максвелла определять скорость света стали косвенно, подставляя значения электрической и магнитной проницаемости. Позднее стали учитывать коэффициент преломления света в воздухе, затем начали использовать лазер и цезиевые часы. С 1975 г. скорость света в вакууме определяется как 299 792 458 м/с. Сегодня она считается фундаментальной физической постоянной.

СВЕТ ДЛЯ ЗВУКА

Фотоэлементы сделали возможным звуковое кино. На киноплентку стали наносить звуковую дорожку — прозрачные окошки различной площади. Свет через них достигал фотоэлемента, затем преобразовывался в электрический сигнал и подавался на громкоговоритель.



ПРИРОДА ЦВЕТА: ОТКРЫТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ

Природа цвета занимала людей давно, но по-настоящему его смогли изучить благодаря оптическим исследованиям. Цвет представляет собой одну из субъективных характеристик электромагнитного излучения оптического диапазона и воспринимается как осознанное зрительное ощущение. Это восприятие зависит от частоты света, его спектрального состава, индивидуальности, контраста с окружающими источниками света и предметами, которые не светятся.

*Эксперимент Ньютона с разложением
белого света призмой.*



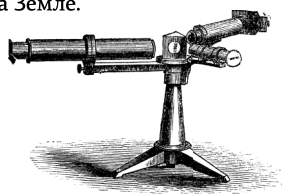
В оптике, как и в физике вообще, важное значение имеет спектр. Это распределение значений физической величины — частоты, массы, энергии. Так, интенсивность электромагнитного излучения распределяется по частотам и длинам волн. Первым использовал слово «спектр» Ньютон. Он проводил опыты со стеклянной призмой и увидел, что, когда белый луч света падает на нее под углом к поверхности, свет частично отражается, а частично проходит через стекло, при этом образуются разноцветные полосы на экране. Если это изображение затем пропускать через собирающую линзу, то цвета вновь соединялись в белый цвет. Именно это явление привело Ньютона к корпускулярной теории света. Он подумал, что частицы света разных цветов имеют различные скорости: красный движется быстрее фиолетового и потому отклоняется не так сильно. Но главное, он понял, что разложение цвета в спектр обусловлено не свойствами света, а свойствами призмы.



*Теодолит, прибор
для измерения углов,
оказался полезен для
изучения длин волн
видимого излучения.*

КАК УЗНАТЬ СОСТАВ СОЛНЦА

Французский философ XIX в. Огюст Конт утверждал, что мы никогда ничего не узнаем о звездах, кроме того, что они существуют. Однако в том же столетии Солнце стало открывать свои тайны. И помог этому спектральный анализ. Атомы каждого химического элемента излучают или поглощают свет на своей определенной частоте, линии спектра распределяются определенным образом — так можно определить состав вещества и открыть новые элементы. Начало этому методу положили в 1854 г. Густав Кирхгоф и Роберт Бунзен, приступив к изучению спектров пламени, которое было окрашено парами солей различных металлов. Позднее благодаря спектральному анализу были открыты рубидий, цезий и гелий, причем гелий сначала открыли на Солнце, и только потом на Земле.



*Старинный спектроскоп. Это оптический
прибор, с помощью которого наблюдают
спектр излучения того или иного
вещества. Разложение излучения в спектр
может осуществлять призма.*

ТРИ ОСНОВНЫХ ЦВЕТА НА МОНИТОРЕ

Основные цвета — это цвета, при смешении которых можно получить все остальные. Это система трех линейно независимых цветов, каждый из которых нельзя представить как сумму двух других цветов. Таких систем может быть бесконечно много. Наиболее известная представлена в аддитивной модели RGB (red, green, blue — красный, зеленый, синий), которая описывает способ кодирования цвета для цветовосприятия. Эти цвета выбрали из-за природы человеческого зрения. Смешивая красный и синий, получаем пурпурный, зеленый и красный дают желтый, зеленый и синий — циановый.



В телевизорах и мониторах имеются три электронные пушки (светофильтры) для каждого из трех основных цветов.

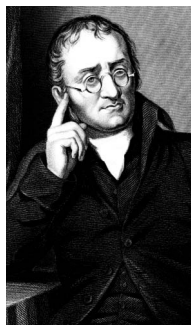
Сначала Ньютон выделил в непрерывном спектре пять цветов: красный, желтый, зеленый, голубой и фиолетовый, потом добавил еще два — оранжевый и индиго (который в русской традиции соответствует синему). Получилось семь цветов. Число семь еще в древности считалось магическим, к тому же тогда было известно семь небесных тел и семь металлов. По этим же причинам неделю разделили на семь дней, а позже выделили семь нот. Ньютон же считал, что между цветами, музыкальными нотами и днями недели существует связь.

ДАЛЬТНИЗМ

За восприятие цвета в глазу отвечают специальные клетки — колбочки. Их три вида, один чувствителен к красному цвету, другой — к зеленому, третий — к синему. Иногда в их работе случаются нарушения. И тогда человек может не различать красный и зеленый цвета, либо воспринимает зеленый как голубой, а желтый — как розовый, либо, что бывает очень редко, вообще видит все в сером цвете. Порой цветовосприятие изменяется с возрастом, например, при помутнении хрусталика или при повреждении сетчатки или зрительного нерва. Однако люди, не различающие зеленый и красный, видят множество оттенков цвета хаки, которые при нормальном зрении различить невозможно. Нарушение цветовосприятия называется дальтонизмом, в честь Джона Дальтона, который впервые описал это явление на собственном опыте.

*Джон Дальтон
(1766—1844),
британский
естество-
испытатель,
физик, химик,
метеоролог.*

*Успехов достиг
благодаря
самообразованию.*



Йоганн Вольфганг Гёте также изучал природу цвета и, в отличие от Ньютона, полагал, что спектр образуется, когда разные составные части света накладываются друг на друга. В 1801 г. Томас Юнг показал, что различным цветам видимого спектра соответствуют определенные длины волн. В 1821 г. Йозеф Фраунгофер впервые получил спектральные линии видимого солнечного излучения, используя дифракционную решетку. Углы дифракции он измерил с помощью теодолита и перевел их в длины волн.

Свет разных длин волн распространяется в среде с различной скоростью, и поэтому немонахроматический свет можно разложить в спектр. Итак, волны с различными длинами преломляются под разными углами и дают разные цвета. Цвета, которые входят в спектр, то есть такие, которые можно получить посредством света одной

КРАСКИ ДЛЯ СОБАК

Собаки видят мир в цвете, но все же не так, как человек. У человека в сетчатке глаза имеется три типа колбочек — цветовосприимчивых клеток, а у собак — только два. Поэтому они, скорее, дальтоники — не различают красный цвет, а синий и зеленый воспринимают одинаково. Зато они способны различать до 40 оттенков серого цвета.



Собаки видят мир не так, как люди.

ЭТОТ РАЗНОЦВЕТНЫЙ СЕРЫЙ ЦВЕТ

Серый цвет — промежуточный между белым и черным. Он образуется, если в равных количествах смешать красный, зеленый и синий цвета и понизить яркость источников излучения на 50%. При этом насыщенность и яркость непропорциональны друг другу. Иными словами, если насыщенность снижена до минимума, то это не означает, что яркость источника уменьшена до 50%. Но при дальнейшем снижении насыщенности серый цвет будет темнеть, пока не превратится в черный.

СКОЛЬКО ЦВЕТОВ У РАДУГИ

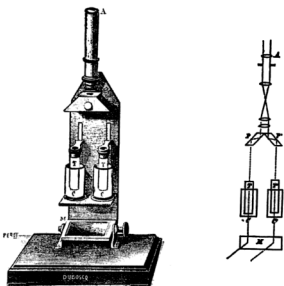
Радуга образуется обычно после дождя или тумана, когда солнечный свет освещает множество водяных капель в атмосфере. Ее порождают сразу три оптических явления — преломление, дисперсия и внутреннее отражение. Благодаря дисперсии капли отражают и отклоняют волны разных длин по-разному, при этом лучи с наибольшей длиной волны отражаются слабее всего, а лучи с наименьшей длиной волны — сильнее всего. Так возникает окрашенная в разные цвета дуга. В русской традиции их семь. Однако спектр непрерывен, и не везде насчитывают в радуге семь цветов. Так, в Японии не выделяют как отдельный зеленый цвет, его видят, но считают оттенком голубого. В арабских странах у радуги четыре цвета — красный, желтый, зеленый и синий. В Англии и США синий и голубой считают одним цветом.

ПОЧЕМУ НЕБО ГОЛУБОЕ

Небо голубое благодаря оптическому явлению — Рэлеевскому рассеянию. Это рассеяние света на объектах, размеры которых сравнимы с его длиной волны. Воздух рассеивает свет с короткой длиной волны сильнее, чем с длинной. Так, рассеяние фиолетового участка спектра в 16 раз сильнее красного. Дневное небо, однако, голубое или синее, но не фиолетовое, потому что спектр солнечного излучения неравномерен, и фиолетовый участок менее интенсивен, чем синий. Кроме того, человеческий глаз более чувствителен к синему, чем к фиолетовому. На закате и на рассвете картина другая. Солнечный свет проходит по касательной к поверхности, его путь оказывается длиннее, чем днем. Поэтому большая часть синего и зеленого света успевает рассеяться, и прямой цвет Солнца, а также освещаемых им облаков и неба приобретает красные оттенки.

ЦВЕТ И КОНЦЕНТРАЦИЯ ВЕЩЕСТВА

Для того чтобы измерить интенсивность цвета в некой цветовой модели или сравнить окраску какого-либо раствора со стандартной, используют колориметры (которые не следует путать с калориметрами, приборами для определения количества теплоты). Они позволяют определить концентрацию вещества по поглощению света раствором. На этом основана колориметрия — физический метод, используемый в химии, биохимии и медицине. По тому, как раствор поглощает свет с определенной длиной волны, то есть определенный цвет, вычисляют концентрацию растворенного вещества, например того или иного белка крови.



Один из первых колориметров работы Жюля Дюбоска.

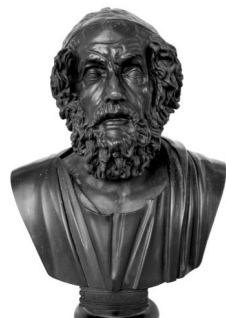
длины волны (монохроматического излучения), называются спектральными. Кроме известных цветов радуги к ним относятся еще желто-зеленый и сине-зеленый. Многие известные цвета, в том числе пурпурный, бежевый и розовый, образуются в результате смешения разных длин волн и спектральными не являются. Пурпурный получают, смешав синий или фиолетовый с красным, а розовый — смешав красный с белым. К несpectralным цветам относятся также коричневый и серый.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЦВЕТА

Если разделить спектр на две части, допустим на красно-оранжево-желтую и зелено-сине-фиолетовую, и каждую из них собрать особой линзой, то в результате получится два смешанных цвета. Соединив их, опять получим белый цвет. Два цвета, которые при объединении дают белый, — это дополнительные цвета. Например, если удалить из спектра зеленый цвет и собрать линзой оставшиеся цвета, то полученный смешанный цвет будет красным. То есть красный цвет — дополнительный к зеленому. Таким же образом фиолетовый является дополнительным к желтому. Каждый цвет — дополнительный по отношению к смеси остальных.

СТРАННОСТИ СИНЕГО ЦВЕТА

В XIX в. английский ученый Уильям Гладстон заметил, что в поэмах Гомера море называется винноцветным, а не синим или же зеленым. Он тщательно проштудировал «Одиссею» и подсчитал, что черный цвет упоминается там около 200 раз, белый — примерно 100, красный — 15, желтый и зеленый — меньше 10, а синий — ни разу. Ученый стал изучать другие древнегреческие источники и, к своему удивлению, также не обнаружил там упоминаний синего цвета. Сначала Гладстон решил, что греки обладали какой-то особенностью зрения, но потом отсутствие синего обнаружилось и у некоторых других древних народов. Разгадка кроется либо в переводе, либо в особенностях языка. Синий и голубой цвета встречаются в росписях Кносского дворца на Крите, на фресках Помпей, в образцах египетского искусства. Безусловно, синий цвет народы древности видели, просто называли его по-другому.

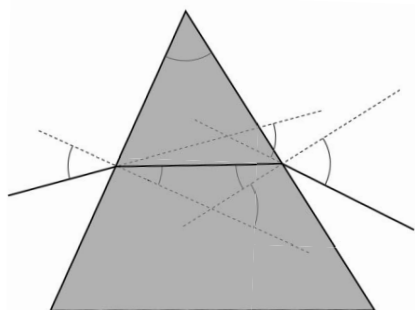


Гомер (около VIII в. до н. э.) ни разу не упоминает синий цвет в своих произведениях.

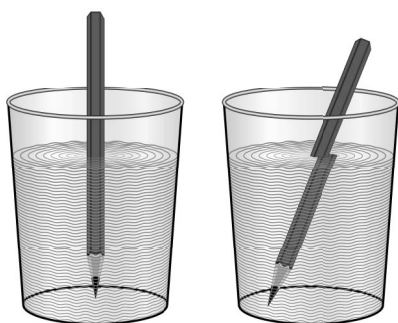
ПРЕЛОМЛЕНИЕ, ИЛИ ЛУЧ, МЕНЯЮЩИЙ СВОЙ ПУТЬ

Исследование феномена преломления позволяет изучить не только цвет, но и другие явления. Преломление, или рефракция, — это изменение направление луча (волны), которое возникает на границе двух сред, через которые проходит этот луч, или же в одной среде, там, где меняется скорость распространения волны. На основе этого явления существуют различные идеи и теории, применяемые на практике.

Известно, что скорость света в прозрачных средах меньше, чем скорость света в вакууме. Отношение скорости света в вакууме к скорости света в конкретной среде называют показателем (коэффициентом) преломления. Эта величина характеризует преломляющую силу прозрачной среды.



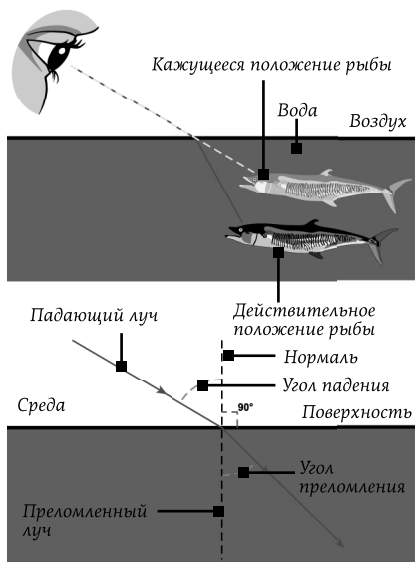
Преломление света в треугольной призме.



Карандаш, опущенный в воду под углом, отличным от нормали, кажется сломанным благодаря рефракции, так как коэффициенты преломления воды и воздуха отличаются.

НЕ ОШИБИТЕСЬ С ГЛУБИНОЙ!

Когда лучи света отражаются от морского дна или какого-либо предмета в воде и переходят в воздух, они в этой менее плотной среде преломляются так, что нам кажется, будто дно или рыба находятся ближе к нам, чем на самом деле. Поэтому при определении глубины водоема или расстояния до рыбы легко ошибиться. Луч света при переходе из воды в воздух преломляется в другую сторону. Поэтому из-под воды внешний мир тоже выглядит искаженным.



Предметы под водой кажутся ближе, чем есть, из-за разницы в показателях преломления двух сред.

В начале XVII в. голландский математик Виллеброрд Снеллиус (Снелль) открыл закон преломления, который позже опубликовал Рене Декарт (а может быть, он и заново открыл его). Этот закон работает не только для световых, но и для любых волн. Согласно ему угол преломления луча при прохождении границы между двумя средами будет зависеть от соотношения коэффициентов преломления этих сред.

Если скорость света во второй среде оказывается ниже, чем в первой, то луч при пересечении их границы будет отклоняться в сторону нормали, то есть линии, которая перпендикулярна границе. Если же скорость распространения света во второй среде выше, то луч света отклонится от нормали. Следовательно, зная угол падения луча и коэффициенты преломления света в обеих средах, можно рассчитать, на какой угол отклонится луч после пересечения границы сред.

Явление преломления лежит в основе работы различных оптических приборов, в

ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Действительное изображение создается в месте пересечения сходящихся лучей. Его можно наблюдать на экране или зарегистрировать на фотоматрице. Создают такое изображение собирающие линзы и вогнутые зеркала. Таким образом, его можно получить с помощью фотообъектива и зарегистрировать на светочувствительной поверхности.



Фотообъектив дает действительное изображение.

ПОЧЕМУ ЗВЕЗДЫ МЕРЦАЮТ

В космосе звезды светят ровно, а при наблюдении с Земли мерцают. Это происходит потому, что их свет, проходя через атмосферу, переходит через слои с разной плотностью. Преломление при этом получается разное, причем слои воздуха постоянно перемещаются относительно друг друга. Когда свет от звезды переходит из слоя с меньшей плотностью в слой с большей плотностью, он начинает мерцать.

том числе микроскопов, телескопов, очков и спектрометров, которые содержат линзы и призмы. Линза — это прозрачная деталь из однородного материала, которая ограничена двумя преломляющими полированными поверхностями вращения. Обе поверхности могут быть сферическими, либо одна из них — плоской. Ось симметрии линзы, которая проходит перпендикулярно

МНИМОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

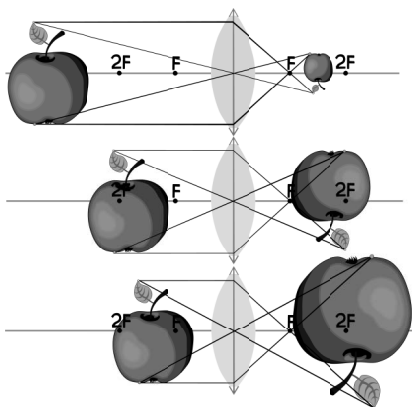
Мнимое изображение создается с помощью расходящихся лучей. Будучи продолженными в противоположную сторону, они пересекаются в одной точке, и такое изображение является мнимым, потому что создается пересечением не самих лучей, а их продолжений. Его нельзя наблюдать на экране и зарегистрировать на светочувствительной поверхности, но посредством другой оптической системы возможно преобразовать в действительное. Мнимое изображение создают микроскоп, бинокль, плоское зеркало, отрицательная или положительная линза.



Бинокль дает мнимое изображение.

КАК СТРОИТСЯ ИЗОБРАЖЕНИЕ В ВЫПУКЛОЙ ЛИНЗЕ

Когда предмет располагается за точкой двойного фокуса, то есть удвоенного фокусного расстояния, как, например, для фотоаппарата или глаза, то изображение окажется действительным, обратным и уменьшенным. Когда предмет располагается непосредственно в точке двойного фокуса, то изображение будет действительным, обратным, равным предмету по размерам. Когда предмет располагается между фокусом и точкой двойного фокуса, как, например, для фотоувеличителя или киноаппарата, то изображение станет действительным, обратным и увеличенным.



F — фокусное расстояние
 $2F$ — двойное фокусное расстояние

От расположения предмета по отношению к фокусному расстоянию линзы зависит его изображение.

к ней через центры ее поверхностей, называется главной оптической осью. В центре главной оптической оси находится оптический центр линзы.

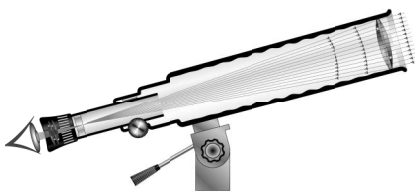
Линзы бывают выпуклыми (когда середина толще краев) и вогнутыми (когда края толще середины), собирающими (положительными) и рассеивающими (отрицательными). Точка, где собираются лучи, называется главным фокусом линзы. Для собирающей линзы пучок параллельных световых лучей преобразуется в сходящийся, а для рассе-

ОГОНЬ И ЛЕД

Известно, что с помощью выпуклой линзы, например увеличительного стекла, можно добыть огонь. Лучи света преломляются в линзе и фокусируются в узком угле рассеяния, можно сказать, в одной точке. Однако для этого подойдет не только стеклянная линза, но и лед. Эпизод, где герои получают огонь с помощью самостоятельно изготовленной ледяной линзы-чечевицы, можно найти в романе Жюль Верна «Путешествие и приключения капитана Гаттераса». И такой способ действительно реален. Главное, чтобы лед оказался достаточно прозрачным и обладал соответствующей формой.

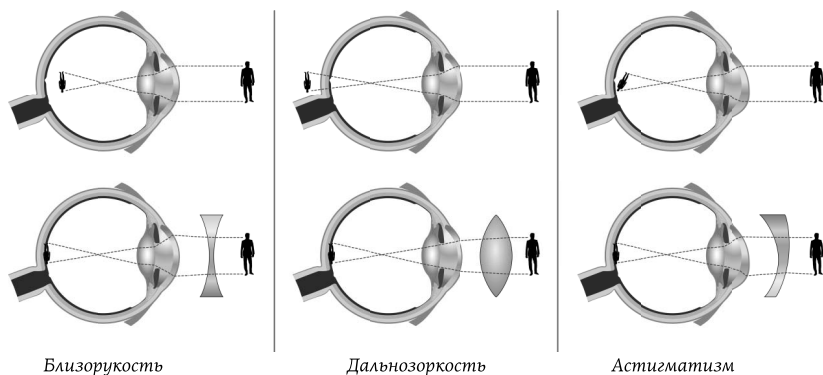
ТРУБЫ ГАЛИЛЕЯ И КЕПЛЕРА

Оптический телескоп — установленная на опорно-поворотном устройстве труба с осями для наведения на объект, а также объективом и окуляром, то есть системой линз. Иногда в телескоп вставляют фотопленку или иной приемник излучения. Такой телескоп основан на рефракции и потому называется рефрактором. Объектив — это положительная, собирающая линза, которая дает действительное изображение, а линза окуляра бывает или отрицательной, рассеивающей, или положительной, собирающей. Первый вариант называется трубой Галилея, второй — трубой Кеплера. Во втором случае изображение получается перевернутым, но поле зрения увеличивается.



Телескоп-рефрактор, чья работа основана на преломлении света линзами.

Глаз — живой оптический прибор, состоящий из системы линз и апертурной системы (зрачка и фиксирующей изображение сетчатки). Систему линз образуют четыре преломляющие среды: роговица, водяная камера, хрусталик и стекловидное тело. При нормальном зрении световые лучи после преломления в этой системе линз фокусируются на сетчатке. При астигматизме, вызванном неправильной формой роговицы или хрусталика, преломляющая сила оказывается разной, и одни участки изображения фокусируются за сетчаткой, другие — перед ней, третьи — на ней. Коррекцию близорукости обеспечивают очки с рассеивающими линзами, коррекцию дальнозоркости — очки с собирающими линзами, коррекцию астигматизма — в основном очки с особыми цилиндрическими линзами.



Разные виды нарушения зрения и их коррекция.

ИСТОРИЯ ОЧКОВ

Линзы для коррекции зрения использовались еще в глубокой древности. Известно, что император Нерон был близорук и наблюдал за гладиаторскими боями через выпуклый изумруд. Очки же впервые появились в средневековой Италии. Вероятно, их изобрел Сальвино д'Армати в 1284 г. Примерно в то же время очки изготовил Алессандро Спина. Первое упоминание о них, зафиксированное документально, датируется 1289 г. Этот простой, но эффективный прибор быстро распространился по Европе. Однако долгое время с помощью очков корректировали только дальнозоркость, и лишь в XVI в. стали использовать в них вогнутые линзы для коррекции близорукости. Сегодня же линзы для очков бывают самые различные. Делают их из разных материалов — как стекла, так и пластика.



Изображение очков на картине «Мадонна каноника ван дер Пале». Фрагмент работы Яна Ван Эйка, 1436 г.

ивающей — в расходящийся. У рассеивающей линзы главный фокус — мнимый. Если показатель преломления линзы больше показателя преломления среды (например, воздуха), то собирающей линзой будет

выпуклая, а рассеивающей — вогнутая. Если показатель преломления среды больше, чем у линзы, то все оказывается наоборот. Так, пузырек воздуха в воде — это двояковыпуклая рассеивающая линза.

ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА, ИЛИ ЗЕРКАЛА И МИРАЖИ

Отражение — возвращение падающего на границу двух сред светового луча или любой электромагнитной волны обратно в первую среду. Обычно одновременно с отражением света происходит и его преломление. Отражение — это физический процесс, который присущ не только видимому свету, поэтому оно исследуется и применяется повсюду — и в оптике, и в акустике, и в радиофизике.

Отраженный и падающий лучи находятся в плоскости, которая содержит нормаль (перпендикуляр) к отражающей поверхности в точке падения. При этом угол падения равен углу отражения. Точнее, согласно закону отражения, устанавливается изменение направления хода светового (или любого другого) луча при встрече с отражающей поверхностью. Этот закон можно вывести из принципа Ферма, в соответствии с которым луч света при движении из начальной точки в конечную выбирает такой путь, который требует меньше всего времени.

Частота отраженной волны зависит от молекулярной структуры вещества. Так возникает цвет, хотя он зависит не только от этого.

При зеркальном отражении проявляется закон отражения. Поэтому зеркала делают плоскими и сферическими. Плоские зеркала дают мнимое изображение. Сферические, в свою очередь, подразделяются на вогнутые (собирающие) и выпуклые (рассеивающие). У сферического зеркала, как и у линзы, есть фокус, расположенный в середине отрезка, соединяющего центр кривизны зеркала и его вершину. Если предмет находится от вогнутого зеркала на расстоянии, превышающем фокусное, то изображение будет действительным и перевернутым. Если расстояние между предметом и вогнутым зеркалом меньше фокусного, изображение станет мнимым, прямым и увеличенным. Выпуклое зеркало всегда дает мнимое, уменьшенное и прямое изображение, независимо от того, на каком расстоянии находится предмет.

Отражение света от шероховатых поверхно-



Пьер Ферма
(1601—1665),
выдающийся
французский
математик.

ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ

Если, налив воду в стакан, посмотреть на ее поверхность снизу под определенным углом, то она будет казаться посеребренной. А предметы, погруженные в воду, будут отражаться ее поверхностью. Происходит это в результате полного внутреннего отражения. Внутреннее отражение возникает тогда, когда волна падает из среды, где ее скорость меньше и показатель преломления больше, в оптически менее плотную. В данном случае мы смотрим как бы из-под воды в воздух. При неполном внутреннем отражении луч разделяется на преломленный и отраженный. При полном внутреннем отражении угол падения превосходит некоторое критическое значение и падающий луч отражается весь. Это явление используется при производстве оптоволоконных кабелей. Сердцевина волокна имеет более высокое преломление, чем его оболочка.



Наблюдая
за рыбой
из-под воды,
можно видеть
ее отражение
на внутренней
части
поверхности
воды.

стей является диффузным. Причем неровность может быть незаметной на глаз, достаточно, если она будет порядка длины волны или превышать ее. В таком случае лучи отражаются от неровностей и расходятся в разные стороны. Но, поскольку отражающая способность связана с длиной падающей на нее волны, одна и та же поверхность для видимого и ультрафиолетового излучений окажется матовой, а для инфракрасного — зеркальной. Естественно, все эти явления широко используются в технике и в быту.

ГДЕ ПРИМЕНЯЮТСЯ ЗЕРКАЛА

В плоские зеркала мы смотримся каждый день. Вогнутые зеркала концентрируют солнечную энергию в гелионагревательных установках. Они применяются как рефлекторы, то есть отражатели, в нагревателях, прожекторах, фарах, телескопах. Выпуклые зеркала интересны тем, что их всегда мнимое изображение наблюдатель увидит с любого места, независимо от того, где находится объект. Поэтому боковые зеркала на машинах выпуклые: водителю с его места всегда видно все, что находится с данной стороны.



ЗАЙЧИК НА ПОЛЕ БОЯ

Зайчик — это пятнышко света, которое получается при отражении луча от зеркала. Его можно увидеть с огромного расстояния. Например, луч, который отразился от зеркала диаметром 5 см, виден на расстоянии 10—30 км. Поэтому луч, отраженный, например, от оптического прицела или бинокля, может раскрыть расположение наблюдателя. И в боевых условиях оптические приборы защищают с помощью черных трубок длиной 15—20 см из металла или картона.

ЛЕТУЧИЙ ГОЛЛАНДЕЦ

Миражи образуются в результате полного внутреннего отражения. Так, при высоком атмосферном давлении и ясной погоде плотность нижних слоев воздуха изменяется скачкообразно. И на границе слоев с разными плотностями лучи света, которые отражаются от предметов на суше или на воде, претерпевают полное внутреннее отражение. В этом случае можно видеть отражение объекта в атмосфере. Иногда лучи света, уходя вниз от такого отражения, оказываются очень далеко от объекта. Поэтому порой с берега Крыма можно наблюдать турецкий берег — на самом деле мираж, а в морях иногда встречаются корабли-призраки, такие как легендарный «Летучий голландец».

ЗЕРКАЛО ВРАЧА

Офтальмолог изучает глаза с помощью глазного зеркала — офтальмоскопа. Это сферическое вогнутое зеркало, в центре которого находится небольшое отверстие. Когда свет от расположенной сбоку лампы направляют в глаз пациента, лучи, дойдя до сетчатки, частично отражаются от нее и через отверстие в зеркале попадают в глаз врача. Так он видит изображение глазного дна пациента. Нередко для увеличения изображения офтальмолог использует лупу — собирающую линзу. Отоларингологи также используют вогнутое зеркало в своей работе.



Современный офтальмоскоп.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ: ЧУДЕСА ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН



Свет, как и любая другая поперечная электромагнитная волна, может быть поляризованным. При поляризации вектор амплитуды волны ориентирован в поперечной плоскости определенным образом. Фактически это проходимость волны в определенной плоскости. В зависимости от формы кривой, описываемой вектором амплитуды, различаются линейная, круговая и эллиптическая поляризация. Эффект поляризации ученые обнаружили в XVII в. и сразу же выдвинули ряд идей о ее природе.

Расмус Бартолин (1625—1698), датский ученый, открывший двойное лучепреломление.

В 1670 г. датский ученый Расмус (Эразм) Бартолин обнаружил, что лучи света, прошедшие через кристалл исландского шпата, раздваиваются. Это явление стало называться двойным лучепреломлением.

Двадцать лет спустя Христиан Гюйгенс объяснил его тем, что подобные кристаллы являются анизотропными, то есть свойства среды внутри них отличаются в разных направлениях. Позднее выяснилось, что два луча (обыкновенный и необыкновенный, как их называли), поляризованы в разных

плоскостях. Но Гюйгенс считал свет продольной волной и потому теорию поляризации не создал.

Сам термин «поляризованный свет» предложил Этьен Малюс уже в XIX в. Он исходил из корпускулярной природы света. Малюс сделал предположение, что в солнечном свете его корпускулы ориентированы беспорядочно, но, пройдя через анизотропный кристалл или отразившись от какой-либо поверхности, они приобретают определенную ориентацию, то есть свет становится поляризованным. В 1809 г. он провел опыт, пропуская последовательно свет через две пластинки турмалина, поворачивая их относительно друг друга на угол φ . Оказалось, что интен-



Исландский шпат (кристаллическая разновидность карбоната кальция CaCO_3) обладает поляризующими свойствами. С его помощью было впервые обнаружено двойное лучепреломление.

КАКИЕ ВОЛНЫ ДАЮТ ПОЛЯРИЗАЦИЮ

Поляризацию может дать только поперечная волна, распространяющаяся в направлении, перпендикулярном к плоскости, в которой происходят колебания частиц среды. У продольных волн колебания всегда осуществляются вдоль направления распространения, поэтому поляризация таких волн невозможна. Но раньше думали, что свет распространяется в особой среде — эфире, а если световые волны поперечные, то эфир пришлось бы считать твердой средой.

сивность света, прошедшего через поляризатор (турмалин), пропорциональна $\cos^2 \varphi$. Так был сформулирован закон, названный именем Малюса:

$$I = k\alpha I_0 \cos^2 \varphi,$$

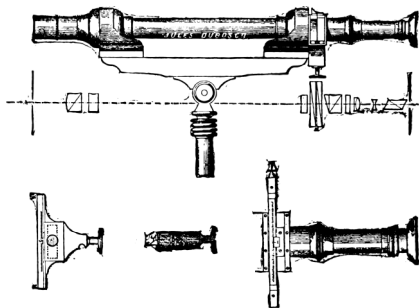
где I_0 — интенсивность прошедшего через поляризатор и анализатор луча; I — интенсивность света, выходящего из поляризатора; $k\alpha$ — коэффициент пропускания поляризатора.

Малюс объяснил многие связанные с поляризацией явления на основе корпускулярной природы света. Объяснить их с точки зрения волновой теории смогли, когда признали, что свет может быть и поперечной волной, а не только продольной, как полагали раньше.

Фотон, то есть квант света, поляризован всегда. Но обычный свет представляет собой смесь световых волн, обладающих различными направлениями поляризации,

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ САХАРА

Оптически активными называют вещества, точнее, среды, способные вращать плоскость поляризации проходящего света. Одни, как сахар, сохраняют оптическую активность в любом агрегатном состоянии, другие, как кварц, — только в кристаллическом. Угол поворота плоскости поляризации зависит от толщины слоя вещества и от концентрации этого вещества, длины волны и температуры. Эти закономерности лежат в основе поляриметрии — исследования оптической активности и расчета на ее основе концентрации вещества. Таким образом издавна определяют содержание сахара в крови.



Старинный сахариметр.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДЛЯ СТЕРЕОКИНО

Явление поляризации породило множество интересных идей. Его применяют, чтобы получить различные оптические эффекты. Хорошо известно его использование в технологии IMAX для 3D-кинематографа. Поляризацию в специальных очках применяют здесь, чтобы разделить изображения, которые предназначены для правого и левого глаз.



Очки для просмотра 3D-фильмов.

ЗАЩИТА ОТ БЛИКОВ И ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ

Поляроидные фильтры на ветровом стекле, фотоаппаратах, противосолнечных очках убирают слепящие блики от влажного дорожного покрытия или водной поверхности. В камерах такой фильтр поворачивают, пока не найдут положение, когда блик будет подавляться. С помощью фильтра можно увидеть поляризацию света, исходящего от неба. Для этого нужно посмотреть через него на чистое небо так, чтобы Солнце оказалось сбоку (в направлении, перпендикулярном взгляду). Поворачивая фильтр, можно наблюдать темную полосу — свидетельство поляризации.



Поляроидные пленки используются в видео- и фототехнике.

и потому неполяризован. Чтобы выделить из неполяризованного света обладающую желаемой поляризацией часть, используют либо природные материалы вроде турмалина и исландского шпата, либо особые устройства — поляризаторы. На этой основе созданы светофильтры, которые пропускают только ту часть света, чьи волны ориентированы определенным образом. Яркость пропускаемого света будет меняться, если поворачивать фильтр.

Наибольшей она станет, когда направление пропускания фильтра совпадет с поляризацией света, а наименьшей, когда эти направления станут взаимно перпендикулярны. Фильтр позволяет обнаружить поляризацию больше 10%, а специальная аппаратура — порядка 0,1%. Так что явление поляризации и порожденные им идеи и теории нашли самое широкое практическое применение.

ДИХРОИЗМ, ТУРМАЛИН И ПОЛЯРОИД

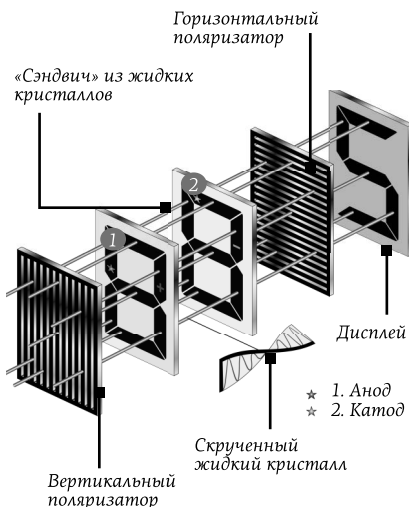
У многих кристаллов поглощение света в значительной степени зависит от направления электрического вектора в световой волне. Подобное свойство называется дихроизмом. Дихроизм присущ, например, турмалину. Его пластинка частично пропускает одну из двух взаимно поляризованных волн и почти полностью поглощает вторую. Турмалин можно применять и как поляризатор, и как анализатор. Сегодня используются искусственные пленки, обладающие дихроизмом, — поляроиды, идеальные поляризационные фильтры. В состав самого первого поляроидного материала, созданного в 1929—1932 гг., входят определенным образом упорядоченные кристаллы йодохинина сульфата, внедренные в прозрачную полимерную пленку из нитроцеллюлозы.

Турмалин, природный дихроичный материал.



ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭКРАНЫ

Работа жидкокристаллических мониторов основана на явлении поляризации электромагнитного излучения. Жидкие кристаллы могут менять ориентацию молекул под воздействием электромагнитного поля и таким образом изменять направление плоскости поляризации. Если использовать систему из двух поляризаторов, жидких кристаллов и электродов, создающих разные электрические поля в отдельных местах экрана (ячейки), то, управляя потенциалами этих электродов, можно получать на экране различные элементы изображения.



Поляризация в жидкокристаллическом дисплее.

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ

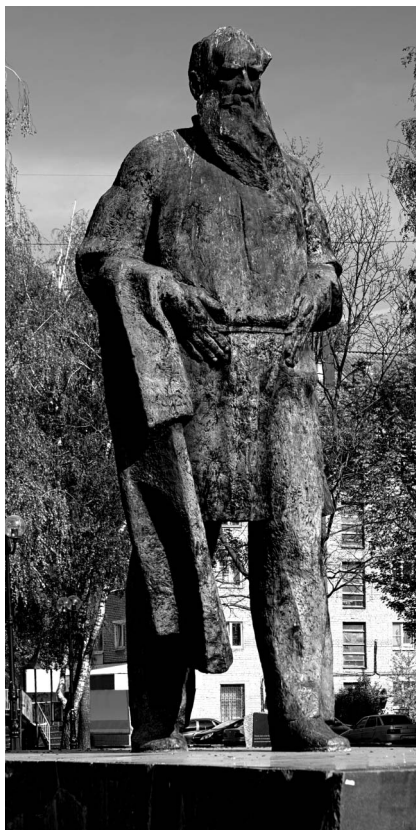
Принцип поляризации можно объяснить на примере обычной веревки, пропущенной через щель. В вертикальной щели будут распространяться только вертикальные колебания, в горизонтальной — только горизонтальные. Это же справедливо для электромагнитной волны. Поэтому положение передающей антенны определяет поляризацию волны, которую она передает. Производят антенны вертикальной поляризации, расположенные вертикально, и горизонтальной поляризации, расположенные горизонтально. В городских условиях удобнее горизонтальные антенны и чаще всего используют именно их. Однако выделенных частот не хватает, поэтому сейчас применяют и антенны с вертикальной поляризацией. Но такая антенна не должна находиться рядом с вертикальными проводящими предметами. Поэтому мачту, на которой устанавливают такую антенну, делают из диэлектрика, в то время как мачта антенны горизонтальной поляризации может быть металлической.



Телевизионная
антенна
горизонтальной
поляризации.

ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ НЕВООРУЖЕННЫМ ВЗГЛЯДОМ

Свет, исходящий от дневного неба, все же обладает частичной поляризацией, и ее могут различать пчелы и некоторые люди. Поляризованный свет невооруженным взглядом выглядит как желтоватая полоска с закругленными концами. Такую поляризацию видел Лев Толстой, описавший ее в повести «Юность»: «...Я невольно оставляю книгу и вглядываюсь в растворенную дверь балкона, в кудрявые висячие ветви высоких берез, на которых уже заходит вечерняя тень, и в чистое небо, на котором, как смотришь пристально, вдруг показывается как будто пыльное желтоватое пятнышко и снова исчезает...»



Памятник Льву Николаевичу Толстому
(1828—1910) в Туле.

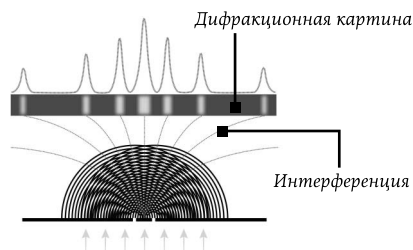
ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ДИФРАКЦИЯ: КОЛЬЦА НЬЮТОНА И КОМПАКТ-ДИСКИ

Интерференция представляет собой перераспределение интенсивности света (и любой волны), которое происходит при наложении (суперпозиции) двух или нескольких когерентных волн. Подобное распределение — это интерференционная картина, то есть чередование максимумов и минимумов интенсивности. С интерференцией тесно связано такое явление, как дифракция, то есть отклонение от прямолинейного распространения при прохождении вблизи препятствий. На основе этого феномена были разработаны различные методы исследований и установлен ряд закономерностей.

Разноцветную окраску тонких пленок, подобную масляным пятнам на поверхности воды, еще в XVII в. наблюдали Роберт Бойль и Роберт Гук. Объяснил это явление и ввел понятие «интерференция» в 1801 г. Томас Юнг. Он продемонстрировал опыт, в котором интерференция получалась от двух щелевых источников света.

Дальнейшее изучение интерференции и дифракции связано с дополнением принципа Гюйгенса, согласно которому каждая точка волнового фронта (то есть поверхности, которой достигает волна) представляет собой вторичный источник сферических волн. В следующий момент фронтом волны становится огибающая фронтов волн всех вторичных источников.

С помощью принципа Гюйгенса нельзя объяснить дифракцию. Чтобы сделать это, в 1815 г. Огюстен-Жан Френель ввел представления о когерентности и интерференции элементарных волн. Так был сформулирован принцип Гюйгенса—Френеля, согласно которому каждый элемент волнового фрон-



Интерференция волн, проходящих через дифракционную решетку.

ЛИНЕЙНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Согласно принципу Рэлея, если центральное световое пятно дифракционной картины находится на расстоянии от другого светового пятна не меньше радиуса темной дифракционной полосы, то оба источника света воспринимаются раздельно. Это расстояние называется линейным разрешением оптического прибора.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

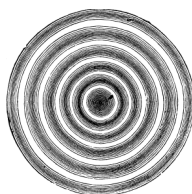
В интерферометре пучок электромагнитного излучения разделяется на несколько когерентных пучков, которые проходят свои оптические пути и отражаются на экране, где создается интерференционная картина, по которой судят о разности фаз интерферирующих пучков. Благодаря этому методу можно точно определять, например, толщину воздушного слоя между двумя поверхностями, а также выявлять самые маленькие изменения показателя преломления среды, поскольку они влияют на интерференционную картину.



С помощью интерферометров оценивают качество оптических поверхностей, что позволяет калибровать поверхности линз в различных устройствах, а также делают другие измерения.

КОЛЬЦА НЬЮТОНА В ТЕХНИКЕ И МЕДИЦИНЕ

Кольца Ньютона появляются вокруг точки касания плоской пластины и выпуклой линзы. Описал их впервые Исаак Ньютон в 1675 г. Подобная интерференционная картина появляется, когда на такую систему под прямым углом падает монохроматический свет. Световые волны отражаются от обеих поверхностей и интерферируют. Это используют при измерении радиусов кривизны поверхностей, а также при анализе крови. Образец крови помещают в так называемую камеру Горяева и притирают сверху покровное стекло до тех пор, пока не появляются кольца Ньютона. После этого начинают подсчет различных клеток крови.



Так выглядят
кольца
Ньютона.

та рассматривается как центр вторичного возмущения, которое порождает вторичные сферические волны, а результирующее световое поле в каждой точке пространства определяется интерференцией этих волн. Когда световые и другие волны огибают препятствия, возникает дифракция, хотя сегодня это явление рассматривают шире. Ее нередко считают интерференцией волн, ограниченных в пространстве. От дифракции зависит разрешающая способность оптических приборов.

Явление интерференции в природе можно обнаружить в тонком слое несмешивающихся жидкостей, например бензина на поверхности воды, на крыльях бабочек, в мыльных пузырях. В технике его используют для калибровки линз, точного измерения углов в стеклянных призмах. Стекланный угольник прикладывают к призме и судят о правильности угла по появившейся интерференционной картине. С помощью интерференции также вычисляют угловые размеры звезд.

КОМПАКТ-ДИСК КАК ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Дифракционную решетку получают, расположив на некоторой поверхности в регулярном порядке штрихи, щели или выступы. Штрихи разбивают фронт световой волны на отдельные пучки когерентного света, которые претерпевают дифракцию и соответственно интерферируют. Белый цвет при этом разлагается в спектр. Первой дифракционной решеткой послужили птичьи перья, сегодня решетки делают из различных материалов. Дифракционные решетки применяют в точных спектрометрах (вместо призм, где разложение света происходит в результате дисперсии), интерферометрах, антибликовых очках. Дифракционной решеткой является и компакт-диск. На его поверхности имеется спиральная дорожка с шагом между витками в 1,6 мкм. Треть этой дорожки — углубление, то есть записанные данные, две трети — подложка. Углубление рассеивает свет, подложка отражает. Неровности и создают отражательную дифракционную решетку.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА БЕЗ ТЕРМОМЕТРА

На поверхности металлов или гладких минералов зачастую образуются радужные оттенки — так называемые цвета побежалости. Происходит это при окислении и термической обработке. Если металл быстро нагреть, то можно наблюдать быструю смену различных цветов, последовательность которых всегда одинакова. Это светло-соломенный, золотистый, пурпурный, фиолетовый, синий цвета. До появления приборов для бесконтактного измерения температуры — пирометров — по цветам побежалости судили о том, до какой температуры нагреваются стальная стружка и сам инструмент при сверлении, точении и других операциях, а также о температуре нагрева металла при его термической обработке.

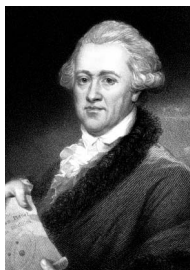
ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ИЛИ ГОРЯЧИЙ НЕВИДИМЫЙ СВЕТ

Инфракрасное излучение занимает область спектра между красным концом видимого света (с длиной волны 0,74 мкм) и микроволновым радиоизлучением (1—2 мм). ИК-диапазон принято делить на ближний (0,76—2,5 мкм), средний (2,5—50 мкм) и дальний (50—2000 мкм). Поскольку человек воспринимает инфракрасное излучение как тепло, его также называют тепловым излучением. Идея невидимого инфракрасного света, отражающая реальное явление природы, оказалась очень плодотворной.

Открыть инфракрасное излучение помогла астрономия. Английский астроном Уильям Гершель, изучая Солнце, обнаружил, что инструмент для наблюдений сильно нагревается. Он стал с помощью термометра определять, как на инструмент воздействуют разные участки видимого спектра, и выяснил, что наибольший нагрев лежит за насыщенным красным цветом. Произошло это в 1800 г.

С этого исследования началось изучение инфракрасного излучения. Сначала в качестве его источников использовали раскаленные тела, потом газоразрядные приборы. Сегодня для этих целей используют приборы на основе лазеров, частота излучения при этом либо фиксируется, либо регулируется.

Особый интерес инфракрасный диапазон излучения представляет для астрономии. Дело в том, что инфракрасное излучение проходит через облака космической пыли. С его помощью можно наблюдать объекты, которые в других участках спектра недоступны. Однако на Земле такие телескопы использовать не очень удобно — мешает тепловое излучение различных предметов, да



Уильям Гершель (1738—1822), английский астроном немецкого происхождения. Наиболее известен как первооткрыватель планеты Уран. Открыл также два спутника Урана, два спутника Сатурна и инфракрасное излучение. Является автором 24 симфоний.

УПРАВЛЕНИЕ НА РАССТОЯНИИ

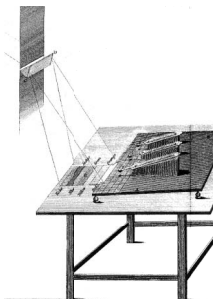
Инфракрасные порты имеются в некоторых телефонах и современных компьютерах. В пультах дистанционного управления и охранных системах используются инфракрасные диоды и фотодиоды. При этом обычный цифровой фотоаппарат способен зафиксировать инфракрасное излучение от пульта дистанционного управления.



Инфракрасный излучатель и приемник.

ОТКРЫТИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Уильям Гершель в своем эксперименте использовал несколько термометров для измерения различных участков видимого спектра. Солнечный свет он разделил призмой, а один из термометров разместил за полосой красного цвета. И результат показал, что этот термометр нагревается от невидимого излучения больше других.



Эксперимент Гершеля по открытию инфракрасных лучей. Рисунок опубликован в «Философских трудах Лондонского королевского общества» в 1800 г.

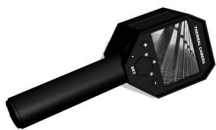
НЕВИДАННАЯ ЗОРКОСТЬ

Человек не видит инфракрасное излучение, однако для многих животных оно доступно. Чувствительны к нему комары. Это позволяет им находить на теле добычи наиболее теплые участки, богатые располагающимися близко к коже кровеносными сосудами. Хищная пиранья способна видеть в инфракрасном диапазоне, благодаря чему успешно охотится на теплокровных животных. Способна к этому и золотая рыбка, обитательница наших аквариумов. Инфракрасное зрение змей помогает им ночью находить на фоне остывшей местности теплокровную добычу.



КАК УВИДЕТЬ ТЕПЛО

У всех твердых тел нашего мира с температурой от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$ имеется инфракрасное излучение диапазона $7\text{--}15\text{ мкм}$. Для выявления этого излучения применяются тепловизоры, которые показывают разницу температур в виде цветной картинки, отражающей распределение температурных полей. Подсветка для них не нужна. Если требуется обнаружить более высокие температуры с диапазоном излучения $3\text{--}7\text{ мкм}$, применяют другие приборы, с подсветкой. А вот температуры выше 1000°C дают тепловое свечение, которое можно увидеть невооруженным глазом.



Тепловизор позволяет увидеть распределение теплых и холодных участков любого предмета.

и часть космического ИК-излучения поглощается атмосферой. Поэтому телескопы, воспринимающие инфракрасное излучение в среднем и дальнем диапазонах, находятся в космосе, где они ко всему прочему охлаждены до температуры жидкого азота или гелия.

Инфракрасные спектры поглощения позволяют определить структуры различных молекул. Это излучение также используется в технике и военном деле.

ИНФРАКРАСНЫЙ ОБОГРЕВАТЕЛЬ

Инфракрасный обогреватель отдает тепло в основном излучением, а не конвекцией. Его иногда называют рефлектором. Окружающие поверхности поглощают лучистую энергию, нагреваются и отдают тепло воздуху. Тепло ощущается сразу же после включения прибора.

НЕВИДИМАЯ ОПАСНОСТЬ

Горячие предметы вредны для зрения, потому что инфракрасное излучение приводит к высыханию слизистой оболочки глаза. Наибольшую опасность это представляет, если излучение не сопровождается видимым светом. Поэтому при работе с такими разогретыми поверхностями следует использовать специальные защитные очки.

ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ

Поверхность Земли, даже лед и облака поглощают видимое и невидимое излучение от Солнца и переизлучают большую часть энергии в виде инфракрасного излучения обратно в атмосферу. За счет этого Земля не перегревается солнечным теплом. Но при этом она и не остывает, потому что в атмосфере инфракрасное излучение (в том числе и то, которое не дошло до поверхности) поглощается парниковыми газами — водяным паром, углекислым газом, метаном и другими. Они создают парниковый эффект.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ: ЕГО ПОЛЬЗА И ВРЕД

Открытие и исследование ультрафиолетового излучения привели к интересным находкам в науке и достижениям в технике. Диапазон ультрафиолетового (УФ) излучения составляет 10—400 нм и лежит между областью видимого света и рентгеновским излучением. Основным источником ультрафиолетового излучения на нашей планете является Солнце.

*Иоганн Вильгельм Риттер (1776—1810),
немецкий физик, химик и философ.*



Первооткрывателем ультрафиолетового излучения стал немецкий физик Иоганн Вильгельм Риттер. В 1801 г., экспериментируя с хлоридом серебра, темнеющим на свету, он выяснил, что разложение этого соединения идет быстрее, когда на него действует невидимое излучение, которое находится за пределами фиолетовой области. Риттер и другие ученые пришли тогда к выводу, что свет подразделяется на три отдельных компонента: окислительный, или тепловой (инфракрасный), осветительный (видимый свет) и восстановительный (ультрафиолетовый). Идея о том, что эти три части спектра едины, появилась только в 1842 г. Сегодня на многие документы наносят метки, видимые в ультрафиолетовом или инфракрасном свете.

Ультрафиолетовый диапазон принято делить на ближний (400—300 нм), средний (300—200 нм), дальний (200—122 нм) и экстремальный (121—10 нм). Существует

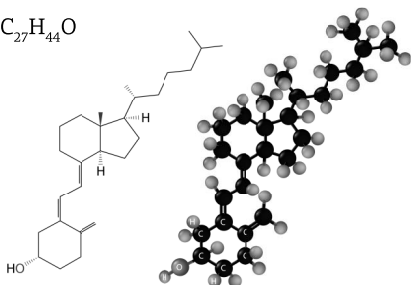
также другое деление: ультрафиолет А, длинноволновой диапазон (400—315 нм), ультрафиолет В, средневолновой диапазон (315—280 нм), ультрафиолет С, коротковолновой диапазон (280—100 нм).

От длины волны зависит воздействие ультрафиолетового излучения на организм. Чем меньше длина волны, тем оно сильнее. Так, ультрафиолет А действует сравнительно слабо, но проникает через оконное стекло, ультрафиолет В сильно воздействует на кожу и активно борется с рахитом, но через обычное стекло не проникает. Еще большая активность у ультрафиолета С. Он оказывает бактерицидное действие, но при этом влияет

ЛАМПЫ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ

Чтобы восполнить недостаток ультрафиолетового излучения, используют эритемные лампы, которые излучают в диапазоне 400—320 нм. Такие лампы применяются и в соляриях, и в медицинских учреждениях. В материал колбы такой лампы добавлены особые вещества, которые не пропускают коротковолновую часть УФ-диапазона, опасную для здоровья.

*В солярии
используются
специальные лампы
для УФ-излучения.*



*Витамин D3 (холекальциферол),
необходимый для жизни
и здоровья, синтезируется в коже
под воздействием УФ-лучей.*

ЛОВУШКА ДЛЯ НАСЕКОМЫХ

Насекомые летят не только на обычный свет, они различают ультрафиолетовый диапазон. Эту их способность успешно применяют в светоловушках, которые производят ультрафиолетовое излучение. Такие ловушки устанавливают, например, на складах одежды, предприятиях пищевой промышленности, в кафе и ресторанах.



на белки и липиды человеческого организма, может даже вызывать разрушение эритроцитов и мутации. Тем не менее коротковолновое УФ-излучение используют при лечении острых воспалительных процессов.

Таким образом, ультрафиолет может быть и полезен, и вреден. На его основе создано множество приборов.

УФ-СТАРЕНИЕ

Многие полимеры, такие как полиэтилен, полипропилен и оргстекло, под воздействием ультрафиолетового излучения деградируют и могут полностью разрушиться. Такое явление называется ультрафиолетовым старением. Чтобы избежать его, в полимеры при их производстве добавляют вещества, поглощающие УФ-лучи. Список фотостабилизаторов довольно велик, к ним относятся, например, производные циннамонирила и другие органические соединения.

ВОЙНА С МИКРОБАМИ

Ультрафиолетовое излучение приводит к тому, что некоторые микроорганизмы и грибы теряют способность к размножению. Такое воздействие называется обеспоживанием, и его успешно применяют для очистки воды, воздуха и разнообразных поверхностей.

КАК СПАСТИСЬ ОТ УФ-ЛУЧЕЙ

Чтобы защититься от ультрафиолетового излучения, достаточно одежды. А любителям загара помогут специальные кремы, у которых так называемое число SPF превышает 10. Это число означает коэффициент ослабления экспозиции. То есть число 30 означает, что можно пробыть под солнцем в совокупности 30 ч и получить такое же воздействие, как за 1 ч, но без защиты.

УЛЬТРАФИОЛЕТ В ИСКУССТВЕ

В ультрафиолетовых лучах свежий лак выглядит более темным, чем старый. Облучая таким образом картину, можно определить места, которые подвергались реставрации или какой-либо переделке.

ЗАЩИТА ЗРЕНИЯ

Искусственный хрусталик избавил от слепоты миллионы людей. Однако ранние модели хрусталиков давали необычный эффект: пациенты начинали видеть в ультрафиолетовом диапазоне, а коротковолновой ультрафиолет вредит сетчатке. Современные хрусталики ультрафиолет не пропускают, и сетчатка глаза не страдает. Для защиты глаз от вредного воздействия УФ-излучения используются специальные защитные очки, задерживающие до 100% ультрафиолетового излучения и прозрачные в видимом спектре.



Фотохромные линзы, они же «хамелеоны», темнеют под воздействием ультрафиолетового излучения.

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ: ХОЛОДНЫЙ СВЕТ

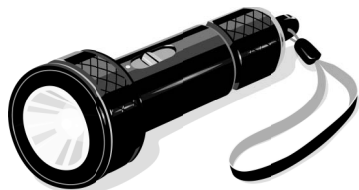
Люминесценция — это нетепловое свечение вещества, которое возникает после поглощения этим веществом энергии возбуждения. Люминесценция бывает различной природы. Ее изучение привело к ряду открытий и изобретений, самое известное из которых — люминесцентные лампы, или лампы дневного света. Сегодня она применяется во многих областях науки и техники.

Явление люминесценции известно людям очень давно. Это и полярное сияние, и свечение светлячков. В наши дни научились создавать люминесценцию искусственно, используя при этом вещества, способные люминесцировать под воздействием различных источников энергии. Подобные вещества носят название люминофоров. Люминесценция возникает тогда, когда электроны переходят из возбужденного состояния в основное. Такой переход может вызывать излучение.

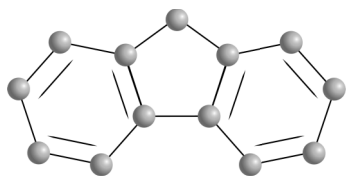
Сначала люминесценцией называли только видимый свет. Сегодня к ней относят излучение и в других диапазонах: инфракрасном, ультрафиолетовом, рентгеновском. Спектр люминесценции всегда остается неизменным при данной температуре, кроме того, поскольку она не использует тепловую энергию, то может проявляться при низких

КОГДА МЕТАЛЛЫ НЕ ДАЮТ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Не всякое вещество способно люминесцировать. Для этого его спектры должны быть дискретными, то есть между энергетическими уровнями должны располагаться зоны запрещенных энергий. Твердые и жидкие металлы имеют непрерывный спектр, поэтому не дают люминесценции. Есть только одно исключение: металлы способны испускать вторичные X-лучи под действием рентгеновского излучения. Пары металлов при низком давлении дают люминесценцию и в других диапазонах.



Люминесцентный фонарик.



Флуорен — полициклический ароматический углеводород. Представляет собой бесцветные кристаллы, способные к флуоресценции при действии ультрафиолетового облучения. Используется при производстве красителей, а также в сцинтилляционных счетчиках.

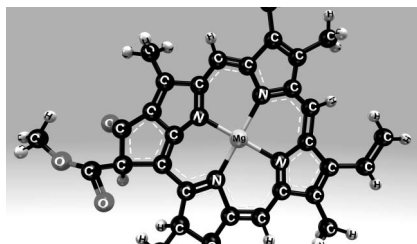
температурах, за что ее называют холодным свечением.

Одной из важнейших характеристик люминесценции является так называемый выход. Квантовый выход — это отношение среднего числа излученных квантов к числу поглощенных, в растворах он не зависит от длины волны возбуждающего света. Энергетический выход — это отношение энергии излученных квантов к энергии поглощенных. Он сначала растет пропорционально длине волны возбуждающего света, потом какое-то время не меняется и после достижения определенной длины волны резко падает. Эти закономерности были открыты советским ученым Сергеем Ивановичем Вавиловым.

Люминесцентное свечение тел имеет различную природу. Фотолюминесценция — это свечение под действием видимых и ультрафиолетовых лучей. Она подразделяется на флуоресценцию и фосфоресценцию (время жизни последней дольше).

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ВЕЩЕСТВА

Самой сильной люминесценцией обладают вещества, имеющие делокализованные электроны: нафталин, белки, содержащие ароматические аминокислоты, многие пигменты растений и, в частности, хлорофилл.



Хлорофилл, необходимый для фотосинтеза, способен к люминесценции.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА

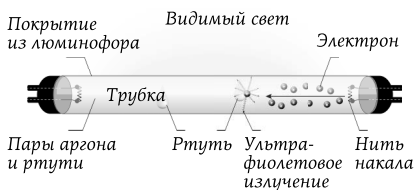
Кинескоп, или электронно-лучевая трубка, — прибор, который преобразует электрические сигналы в световые. Началась его история в 1859 г., когда Юлиус Плюккер открыл катодные лучи, представляющие собой поток электронов. Позднее Уильям Крукс обнаружил, что катодные лучи распространяются линейно, но их можно отклонять магнитным полем, а также, что некоторые вещества светятся под их воздействием. В 1879 г. Крукс сконструировал прообраз электронно-лучевой трубки. Она состояла из электронной пушки, посылавшей луч, покрытого люминофором экрана и отклоняющей системы, посредством которой луч создавал на экране изображение.



Электронно-лучевая трубка широко применялась в телевизорах вплоть до 1990-х гг.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ЛАМПА

Люминесцентная лампа — это газоразрядный источник света. Ее заполняют инертный газ и пары ртути. Ток, проходящий через эту среду, вызывает ультрафиолетовое излучение. Изнутри лампа покрыта люминофором. Он поглощает ультрафиолетовые волны и излучает видимый свет. Изменив состав люминофора, можно изменить оттенок свечения. Дуговой разряд в лампе поддерживает термоэлектронная эмиссия электронов с поверхности катода. Катод же разогревается с помощью электрического тока.



Работа люминесцентной лампы.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ МИКРОСКОПИЯ

Люминесцентная микроскопия сегодня используется в биологии и медицине. Люминесценцию в микроскопах вызывают сине-фиолетовые и ультрафиолетовые лучи с длиной волны до 360 нм. Источником энергии служит ртутная лампа, а все наблюдения проводятся в неполяризованном свете.

Хемилюминесценция использует энергию химических реакций, катодная проявляется при облучении быстрыми электронами, то есть катодными лучами, радиолуминесценция возникает под ионизирующим излучением. Сонолюминесценция возникает под воздействием звуков высокой частоты, электролюминесценция — при пропускании тока через люминофор. Биолуминесценция — это способность светиться, которой обладают живые организмы самостоятельно или с помощью симбионтов. Наиболее изученной сегодня является фотолуминесценция.

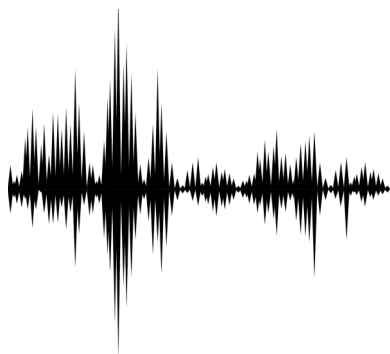
ЗВУК И ЕГО СКОРОСТЬ В РАЗНЫХ СРЕДАХ

Звук возникает в результате упругих колебаний и волн. Физическую природу звука, вопросы, которые возникают при его появлении, распространении, восприятии и воздействии, изучает акустика. В круг интересов этой науки входят не только собственно физика и математика, но и биология, медицина, химия, архитектура, теория музыки и другие дисциплины.

Впервые термин «акустика» появился в 1701 г. Ввел его французский ученый Жозеф Совёр (1653—1716), который сам был глухим, а до семи лет не говорил. Чрезвычайная одаренность помогла ему добиться успехов в науке, стать профессором и академиком. Он объяснил появление обертонов и разработал метод определения числа колебаний звука с помощью биений.

Распространяется звук в результате механических колебаний упругих волн. Под звуком также понимают само восприятие этих волн органами чувств. Кроме обычного звука, воспринимаемого человеческим ухом, имеются также инфразвук, ультразвук и гиперзвук, различающиеся по диапазону частот.

Звук распространяется в разных средах по-разному. В жидкостях и газах имеют место только продольные упругие волны, в твердых телах касательные механические напряжения приводят к более сложным

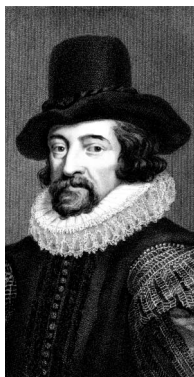


Звуковая волна на эквалайзере.

СКОРОСТЬ ЗВУКА В РАЗНЫХ ГАЗАХ

С понижением температуры газа скорость звука снижается. Поэтому при 20 °C скорость звука в воздухе равна 342 м/с, а при 0 °C — 331 м/с. Она также зависит от массы молекул, из которых состоит газ. Так, в водороде при 0 °C скорость звука — 1284 м/с, в гелии — 965 м/с, а в кислороде — 316 м/с.

*Фрэнсис Бэкон
(1561—1626),
английский
философ
и политический
деятель, является
основоположником
английского
эмпиризма
и материализма,
разрабатывал
индуктивный
метод в научных
исследованиях.*



траекториям, так что волны бывают поперечными или сдвиговыми. Сейсмические волны также представляют собой упругие волны, которые распространяются в земной коре.

Колебания звука в упругой среде со временем затухают, так как их энергия частично затрачивается на излучение и работу против сил трения. Всякой среде свойственна определенная способность проводить звуковые волны, характеристикой которой является акустическое сопротивление. Его находят, умножая плотность среды на скорость звука в ней. Скорость звука зависит также от упругости среды, в кристаллах — от направления, в газах — от температуры. Как правило, самая большая скорость звука в твердых телах, в жидкости она ниже, и самая низкая в газах, а значит, и в воздухе. С повышением температуры скорость звука в газах растет, в жидкостях обычно

уменьшается. Вода же представляет исключение: скорость звука в ней растет до температуры 74 °C и только потом начинает уменьшаться.

Уже античные ученые интересовались звуком и его природой. Аристотель говорил, что скорость его конечна, а в трудах Птолемея и Евклида можно найти утверждения, что звук вызывается колебаниями тела.

В «Новом органоне» Фрэнсиса Бэкона говорится о том, что скорость звука можно определить, сравнивая промежутки времени между вспышкой света и звуком выстрела.

Используя этот метод при стрельбе из мушкета, Марен Мерсенн в 1636 г. определил значение скорости звука в 448 м/с (в современной системе измерений). Сегодня же скорость звука в воздухе при 20 °C считается равной 443 м/с, так что Мерсенн был не так уж далек от истины. Теоретические расчеты для скорости звука предложили Ньютон и Лаплас, причем данные Лапласа были более точны.

Скорость звука в воде впервые измерили Жан-Даниэль Колладон и Шарль-Франсуа Штурм в 1826 г., проведя ряд экспериментов на Женевском озере. Они спустили на воду две лодки, находившиеся на расстоянии 10 миль (14 км) друг от друга. На одной лодке они одновременно зажгли порох и ударили в подводный колокол. С другой же лодки опустили в воду особый

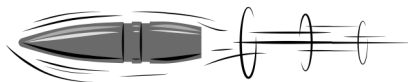
ЗВУКИ ЗЕМЛИ

Земля, как и другие твердые среды, прекрасно проводит звук. Поэтому в старину приближение конницы противника можно было услышать издали, приложив ухо к земле, до того, как эти звуки дойдут по воздуху. Во время осады крепостей тоже пользовались этим явлением, определяя по звукам в земле, ведется ли под стены подкоп.



ВОТ ПУЛЯ ПРОСВИСТЕЛА...

Пуля обычно летит быстрее звука. Начальная ее скорость зависит от длины ствола: для пистолета она равна 300—500 м/с, а для автомата Калашникова — уже 825 м/с. Только на расстоянии 800 м скорость такой пули уменьшается до скорости звука. Поэтому звук выстрела или свист пули можно услышать только тогда, когда она пролетела мимо или же нашла свою жертву.



Сверхзвуковой полет пули.

КАЖУЩЕЕСЯ МОЛЧАНИЕ ПОДВОДНОГО МИРА

Звуковая волна на границе двух сред частично отражается, частично проходит дальше. Звук почти полностью отражается от поверхности воды, но давление звуковой волны, прошедшей в воду, увеличивается почти вдвое. Рыбы реагируют на это, и потому на рыбалке нельзя шуметь. У ныряльщика же в ушах остаются воздушные пробки, поэтому он звука с поверхности не услышит. Когда звук переходит из воды в воздух, он тоже почти весь отражается от ее внутренней поверхности. А звуковое давление прошедшей в воздух волны сильно уменьшается. Поэтому мы не слышим подводных звуков. Но, если опустить в воду весло и приложить к нему ухо, окажется, что подводный мир вовсе не является миром молчания, звуков там много.

рупор, приемник звука. Определив промежуток времени между вспышкой света от зажженного пороха и приемом звукового сигнала, они высчитали скорость звука в воде — примерно 1440 м/с при 8 °C. По современным расчетам скорость звука в воде при 15 °C равна 1500 м/с.

Скорость звука в твердых телах еще выше. Например, в стали она равна 5000—6100 м/с. На громкость звука влияет множество факторов, например звуковое давление, частота звуковых колебаний, амплитуда, пространственная локализация, тембр, длительность воздействия, индивидуальная восприимчивость. Согласно закону Вебера—Фехнера, мы ощущаем любые изменения различных величин (веса, яркости, громкости), если они носят логарифмический характер. Чувствительность человеческого уха уменьшается с увеличением громкости. Громкость непосредственно связана с уровнем звукового давления, которое измеряют с помощью относительной логарифмической единицы — децибела.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ЗВУКУ

Атмосфера неоднородна, и потому звуковые волны в ней искривляются, подвергаясь рефракции. С высотой температура уменьшается, звуковые лучи загibaются кверху, образуя зону молчания, или зону акустической тени, — область, где звук от удаленных мощных источников не слышен. Но затем она снова начинает расти, лучи загibaются книзу и создают очень далеко от источника зону аномальной слышимости. Измеряя радиусы зон молчания и аномальной слышимости и время их появления, можно определять температуру в средних слоях атмосферы.

КАКОЙ ЗВУК МОЖНО ВЫДЕРЖАТЬ

Допустимый уровень шума — 55 децибел (дБ) в дневное время и 40 дБ ночью. Длительный шум в 70—90 дБ способен вызвать заболевания центральной нервной системы. От уровня в 100 дБ слух существенно снижается, можно даже оглохнуть. А уровень в 180—200 дБ способен убить.

Защита от шума во время выполнения множества работ — жизненная необходимость.



| Уровень шума, дБ | |
|--|-------|
| Шепот | 20 |
| Шум леса | 10—24 |
| Тиканье часов | 30 |
| Тихая комната, приготовление пищи на плите | 40 |
| Тихая улица | 50 |
| Разговор | 45—60 |
| Шумная улица | 70—80 |
| Детский плач, шум пылесоса | 80 |
| Опасный для здоровья уровень | 75 |

| Уровень шума, дБ | |
|--|--------|
| Пневматический молоток, шум мотоцикла или поезда | 90—100 |
| Шум ремонтных работ | До 100 |
| Громкая музыка | 110 |
| Болевой порог | 120 |
| Автомобильный гудок | 120 |
| Сирена | 130 |
| Шум пролетающего самолета | 140 |
| Старт ракеты | 150 |
| Смертельный уровень | 180 |
| Шумовое оружие | 200 |

ЗВУКОГАСЯЩИЕ ЭКРАНЫ

Для звукоизоляции и гашения эха используют различные материалы, особенно ребристые или с пористыми поверхностями в виде пирамид. Звуковые волны затухают внутри из-за вязкого трения, переизлучаются вглубь впадин между пирамидами, отражаются там многократно, всякий раз ослабляясь.

Ребристая или пирамидальная поверхность хорошо поглощает звук.



ШЕПЧУЩИЕ СТЕНЫ

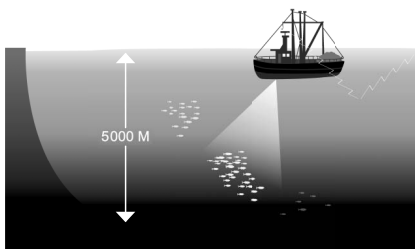
В круглых или эллиптических помещениях можно наблюдать так называемый эффект шепчущей галереи. Шепот в них прекрасно распространяется вдоль стен на очень большие расстояния, тогда как в других частях помещения его не слышно. Подобный эффект наблюдается также на 137-метровой изогнутой плотине близ Аделаиды в Австралии. Находясь на одном ее краю, можно услышать слова, произнесенные на другом. Плотина получила название «Шепчущая стена». Эффект вызван тем, что вдоль изогнутой или круглой стены распространяется акустическая волна, которая дает многократное полное внутреннее отражение. Так звук передается на большие расстояния.



«Шепчущая стена» — плотина на юге Австралии.

ЭХО

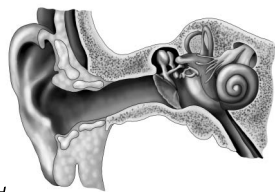
Эхо присуще всем видам волн. Звуковое эхо — это отраженный звук, причем отразиться он может много раз от разных поверхностей. Поэтому эхо бывает многократным. Пример такого эха — гром. Зная скорость звука в воздухе и воде, по времени образования эха можно определить удаленность предмета, от которого звук отразился. Этот принцип лежит в основе эхолокации.



Поиск рыбы с помощью гидролокатора.

НАШ НАСТОЯЩИЙ ГОЛОС

Вы, конечно, обращали внимание, что ваш голос в записи звучит не так, как вы его слышите при разговоре, — он воспринимается как более высокий. Дело в том, что звуки извне передаются в наш слуховой аппарат только по воздуху. Звуки собственного голоса поступают в наше внутреннее ухо не только вышеупомянутым путем, но и через кости черепа, у которых совсем иная проводимость — ведь скорость звука в сплошной среде больше, чем в воздухе. Кроме того, уши расположены позади рта, и это тоже играет роль: звуковые волны сначала отражаются от препятствий, затем попадают в слуховой аппарат.



Звук нашего голоса приходит к нам в ухо с двух сторон.

ЗВУКОВОЙ БАРЬЕР: ПРЕОДОЛЕНИЕ

Звуковым барьером в аэродинамике называют целый ряд явлений, происходящих при полете со сверхзвуковой скоростью или со скоростью, которая приближается к скорости звука. Эти явления вызвали многочисленные проблемы и привели к идеям по их разрешению.

Скорость истребителей приблизилась к скорости звука уже во время Второй мировой войны, и при этом иногда возникали опасные явления, которые тогда не могли объяснить. Когда война закончилась, попытки приблизиться к скорости звука и превысить этот психологически значимый барьер стали систематическими, участвовали и связанные с ними проблемы, с которыми сталкивались и авиаконструкторы, и летчики-испытатели. Множество таких попыток заканчивалось гибелью пилотов.

Дело в том, что при переходе от дозвуковой скорости к сверхзвуковой всегда образуется ударная волна. Пока самолет еще не достиг скорости звука, в воздушном потоке, который обтекает фюзеляж, крыло и оперение, образуются зоны местного ускорения. При приближении самого самолета к звуковой скорости местная скорость в этих зонах ускорения может уже стать сверхзвуковой. Поток, миновав зону ускорения, затем замедляется. Именно тогда

возникают ударные волны. Они невелики по интенсивности, но их появляется много в разных точках поверхности. Это приводит к изменению характера обтекания аппарата и ухудшению его летных качеств. Снижается подъемная сила крыла, воздушные рули и элероны начинают работать неэффективно, появляется сильная вибрация. Все это в совокупности называется волновым кризисом. Если не происходит катастрофы, то с превышением скорости



Первый в мире сверхзвуковой самолет Bell X-1.

КОГДА СЛЫШНО САМОЛЕТ

Хлопок, похожий на взрыв, сопровождающий сверхзвуковой самолет, многие ошибочно принимают за преодоление сверхзвукового барьера. Ударная волна, звук которой достигает наших ушей, сопровождает сверхзвуковую крылатую машину постоянно. После этого хлопка обычно можно услышать гул двигателей, потому что самолет обгоняет звуки, которые сам издает.

Интересно, что дозвуковой самолет, который летит на высоте более 1 км, тоже слышен с запозданием, но по другой причине. Направление внимания на крылатую машину для наблюдателя на земле не совпадает с направлением на источник звука.

ПЕРВЫЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ АВТОМОБИЛЬ

Сверхзвуковые самолеты уже давно покорили небо, а сверхзвуковые автомобили появились только в конце XX в. Первым сверхзвуковым барьер на колесном наземном средстве превысил Энди Грин 15 октября 1997 г. Он управлял автомобилем Thrust SSC и достиг скорости 1228 км/ч. Сконструировали этот автомобиль Ричард Нобль, Гленн Боуше, Рон Айерс и Джереми Блисс. Однако рекорд скорости на земле принадлежит другому аппарату — ракетным саням, которые в 2003 г. удалось разогнать до скорости 10 430 км/ч.

звука к обтеканию возвращается стабильность. Но при этом его характеристики существенно изменяются.

Чтобы избежать неприятных последствий волнового кризиса, применяется ряд мер. Так, у современных дозвуковых самолетов, чья скорость превышает 800 км/ч и близка к звуковой, делают стреловидные крылья и тонкий профиль оперения. При такой конструкции волновой кризис начинается при более высоких скоростях, конечно, не достигших еще скорости звука.

Конструктивные особенности сверхзвуковых самолетов имеют существенные отличия от дозвуковых. Крыло у таких самолетов треугольное в плане, а профиль

ИСКУССТВЕННОЕ ОБЛАКО

Облако, образующееся сразу за сверхзвуковым самолетом, многие принимают за визуальный эффект преодоления звукового барьера. На самом деле это происходит еще на околосзвуковых скоростях, а иногда и более низких. У самолета впереди образуется область высокого давления, а позади — область низкого давления. Инерция движения воздушных масс приводит к тому, что область пониженного давления заполняет воздух. Объем, занимаемый воздухом, возрастает, а температура падает. В какой-то момент она может оказаться ниже так называемой точки росы. В этом случае происходит конденсация водяного пара и образование облака. Подобный эффект, который получил название по именам немецкого ученого Людвиг Прандтля и английского ученого Германа Глоерта, встречается не только у летательных аппаратов. При высокой влажности, например, в дождь, его иногда можно наблюдать и во время гонок Формулы-1, когда до скорости звука еще далеко.

*Эффект
Прандтля—
Глоерта отнюдь
не свидетельствует
о преодолении
звукового барьера.*



ПЕРВЫЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОЛЕТ

Впервые в истории скорость звука в управляемом полете при пологом пикировании была преодолена 14 октября 1947 г. Это сделал американский летчик-испытатель Чарльз (Чак) Йегер, управлявший экспериментальным самолетом Bell X-1.

*Чарльз Элвуд (Чак)
Йегер (род. в 1923) —
американский
летчик-
испытатель,
первым в мире
преодолевший
на самолете
звуковой барьер.*



его также треугольный или ромбовидный. Это позволяет благополучно преодолевать волновой кризис и выдерживать нагрузки, сопровождающие сверхзвуковой полет. Впервые в мире сверхзвуковой барьер был преодолен в 1947 г. в испытательном полете, в СССР — в 1948 г. на истребителе Ла-176. Первый гражданский самолет Douglas DC-8 превысил звуковой барьер в 1961 г., достигнув скорости 1262 км/ч.

ПОЧЕМУ ПОГИБЛА «КОЛУМБИЯ»

1 февраля 2003 г. произошла катастрофа шаттла «Колумбия». Он разрушился во время возвращения на Землю при вхождении в плотные слои атмосферы. Дело в том, что когда твердое тело обтекает сверхзвуковой воздушный поток, на его передней кромке возникает ударная волна, которую называют также скачком уплотнения. Скорость потока снижается до дозвуковой, а давление и температура в результате высвободившейся энергии резко возрастают, при гиперзвуковых скоростях достигая нескольких тысяч кельвинов. А у «Колумбии», движущейся с такой скоростью, еще в начале полета оказалась повреждена термозащитная оболочка. Это и привело к трагедии, унесшей жизни семи человек.

ЗВУКИ МУЗЫКИ: НАУКА И ИСКУССТВО

Звуки окружают нас повсюду, но музыкальные звуки занимают особое положение. Для их генерации, передачи и усиления созданы различные приборы и инструменты. Динамики, камертон, музыкальные инструменты (кроме духовых) вызывают колебания воздуха и таким образом производят звук. В духовых инструментах генерация звука происходит по-другому: там имеются неоднородности, с которыми взаимодействует поток воздуха. Изучением музыкальных звуков занимаются музыкальная акустика и гармония.

Различные параметры звука в музыке имеют свою специфику. Музыкальный звук — это звук определенной высоты, который используется в качестве материала для создания музыкальных произведений. Высота — глав-



Генерация звука в духовых музыкальных инструментах имеет свои особенности.

МОЖНО ЛИ ПОВЕРИТЬ АЛГЕБРОЙ ГАРМОНИЮ

Обертоны (верхние тона) — призвуки, включенные в спектр музыкального звука. Их частоты согласованы с колебаниями частей звучащего тела — струны, голосовых связок, столба воздуха. Частоты гармонических обертонов, в отличие от негармонических, кратны частоте основного фона. Анализ обертонов и звукового спектра музыкального произведения лежит в основе тембральной (спектральной) музыки. Обычно ее создают на электронных устройствах с помощью компьютерных программ.

ная его характеристика, которая понимается не как результат восприятия человеческим ухом, а по месту и значению в звукоряде, созвучиях и ладу. Еще одной важной (хотя и не специфической) характеристикой музыкального звука является длительность, которую определяют в относительных величинах музыкального ритма. Для силы музыкального звука также существуют условные обозначе-

ТЕРМЕНВОКС

Электронные музыкальные инструменты используют для генерации звука всевозможные электронные схемы. В 1920 г. советский изобретатель Лев Сергеевич Термен сконструировал инструмент, которому дал название терменвокс. Исполнитель управляет звуком на этом инструменте, перемещая руки в электромагнитном поле рядом с двумя металлическими антеннами — вертикальной и горизонтальной. При этом происходит изменение емкости колебательного контура и, следовательно, частоты звука. Приближая руку к вертикальной антенне, он подбирает высоту звука, а поднося к горизонтальной — меняет громкость.



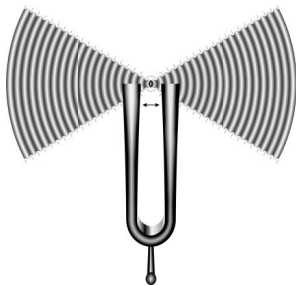
ния — piano, forte и другие. Тембр, в физическом смысле являющийся спектром звука, в музыке также описывается на специфическом языке. Точно так же и ноты не фиксируют конкретные физические величины.

Однако музыкальные звуки описываются и в физических терминах, в рамках музыкальной акустики, которая изучает физические свойства музыкальных звуков. Она является междисциплинарной и использует данные и понятия таких наук, как тео-

рия музыки, математика и психология. Как раз высота, динамика, тембр, музыкальные строи и температуры являются предметом ее изучения. На основе данных музыкальной акустики созданы электромузыкальные инструменты, естественнонаучные концепции музыки и музыкального восприятия. Она используется для конструирования традиционных музыкальных инструментов, организации звукозаписи, при строительстве концертных залов.

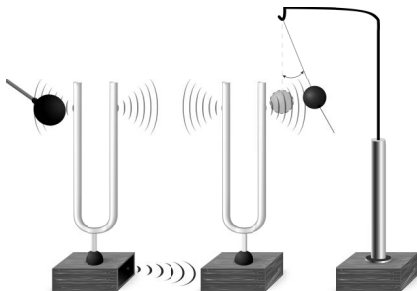
КАМЕРТОН

В 1711 г. английский музыкант, придворный трубач Джон Шор изобрел инструмент, который поныне используют для настройки музыкальных инструментов и при пении. Это был камертон, похожий на двузубую вилку. Если по камертону ударить, то раздастся звук, служащий эталоном высоты. Камертон Шора был настроен на ноту ля и давал 419 колебаний в секунду. Современный камертон настроен на звук ля первой октавы и дает частоту в 440 Гц. Особенно важен он для настройки струнных инструментов, у которых натяжение струн меняется с изменением температуры, и их приходится часто подтягивать. Правда, в симфонических оркестрах сегодня в качестве камертона используется гобой, потому что музыкальный строй, в том числе и звучание ноты ля этого духового музыкального инструмента, не зависит от температуры. Однако если оркестр сопровождает рояль, то инструменты настраивают уже по нему, а сам рояль — по камертону.



РЕЗОНАНС ДЛЯ КАМЕРТОНА

Два камертона, у которых собственная частота колебаний одинакова, вступают друг с другом в резонанс. Если ударить по первому камертону, а потом заглушить звук, то его звуковые волны заставят звучать второй. Завибрировав, второй камертон заставит отскочить шарик, висящий рядом с ним. В XIX в. подобные вещи демонстрировал некий Джон Кили, уверявший, что его камертоны резонируют с мировым эфиром, и обещавший на этой основе построить вечный двигатель. На самом деле, если изменить частоту колебаний второго камертона, например, прикрепив к нему кусочек пластилина, то он не зазвучит. А чтобы усилить звук камертона, его помещают в открытую с одного конца коробку — резонатор. Подобные резонаторы — труба духового инструмента, корпус скрипки и полость рта. Разные их участки резонируют на разные частоты, в результате чего возникают сложные сочетания звуков.

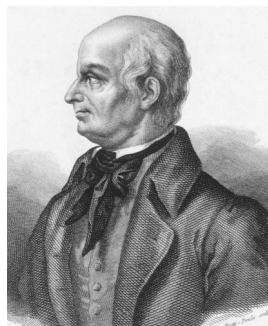


Резонанс двух камертонов, настроенных на одинаковую частоту.

УЛЬТРАЗВУК, ИЛИ ВЫСОКАЯ ЧАСТОТА

Ультразвук — это звуковые волны, чья частота выше частот, которые воспринимает человеческое ухо. Как правило, ультразвук имеет частоты выше 20 кГц. На практике используются ультразвуковые колебания, лежащие в диапазоне от нескольких десятков кГц до единиц МГц. Область применения ультразвука широка, она охватывает и научные исследования, и медицину, и промышленность.

Ладзаро Спалланцани (1729—1799), выдающийся итальянский натуралист, первооткрыватель явления ультразвуковой эхолокации у летучих мышей.



СЕКРЕТЫ ДРЕССИРОВКИ

В цирковых номерах собаки иногда демонстрируют чудеса интеллекта, правильно указывая буквы и цифры. Чаще всего секрет кроется в ультразвуковых сигналах, которые в нужное время подает дрессировщик с помощью свистка Гальтона. Английский ученый Фрэнсис Гальтон был весьма разносторонним исследователем. В круг его интересов входила психология. Именно в рамках психологических, точнее, психометрических опытов, он изобрел свисток, позже получивший его имя. Это устройство состоит из сопла с узкой кольцеобразной щелью и цилиндрического резонатора (трубы) с подвижным дном. Газ выходит из щели под небольшим давлением и попадает на острый край резонатора. В результате в резонаторе возбуждаются периодические вихри. Частота звуковых колебаний, которые при этом генерируются, составляет примерно 170 кГц. Собаки такую частоту воспринимают, в отличие от человека.



Для дрессировки собак используют свистки, издающие звуки высокой частоты.

В 1793 г. итальянский естествоиспытатель Ладзаро Спалланцани решил выяснить, почему летучие мыши свободно ориентируются в темноте, не натываясь на предметы. Сначала он предположил, что у этих зверьков чрезвычайно острое зрение. Он ослепил нескольких животных, но они и после этого спокойно летали и охотились. Тогда ученый сделал вывод, что у летучих мышей есть какое-то неизвестное до этого чувство. Однако швейцарский исследователь Шарль Жюрин пошел дальше: он залепил мышам уши воском, и они стали натываться на предметы.

Жюрин пришел к выводу, что ориентируются зверьки по слуху. Ему не поверили и даже высмеяли: ведь эксперимент проводился в

СИРЕНА — И ОБЫЧНЫЙ ЗВУК, И УЛЬТРАЗВУК

Звуки сирен слышны очень хорошо — для этого их изобрели. Однако сирена, то есть механический источник упругих колебаний, способна также генерировать ультразвук. Они могут работать на частотах, достигающих 100 кГц и даже 600 кГц. Современные ультразвуковые сирены представляют собой электромеханические приборы. Ультразвуковой диапазон сирен предоставляет широкие возможности: эти устройства используются не только для подачи сигналов, но и для осаждения туманов, и для отпугивания грызунов.

полной тишине. Однако со временем появились идеи о другом звуковом диапазоне. В 1912 г. Хайрем Максим, изобретатель знаменитого пулемета, высказал предположение, что летучие мыши производят сигналы низкой частоты с помощью крыльев.

В 1920 г. английский ученый Гамильтон Хартридж воспроизвел эксперименты Спалланцани и догадался, что мыши издают ультразвук. Это подтвердили в 1938 г. Дональд Гриффин и Джордж Пирс. Именно Гриффину принадлежит термин «эхолокация».

Ультразвуковые колебания искусственно вызывали и прежде, например, при помощи свистка Гальтона. Использовались для этого также сирены и камертоны. Сегодня применяют и механические приборы, и пьезокерамические преобразователи, в зависимости от того, какие мощность и частота требуются.

Излучатели ультразвука подразделяются на две группы: излучатели-генераторы и электроакустические преобразователи. С их помощью успешно изучают свойства различных сред и осуществляют множество процессов, от обработки металлов до диагностических и лечебных процедур.

ЧУДЕСА КАВИТАЦИИ

Ультразвук вызывает в жидкости появление пузырьков пара, то есть кавитацию. Пузырьки схлопываются вблизи загрязнений и разрушают их. Поэтому ультразвуковую кавитацию используют для очистки, приготовления аэрозолей, а также в медицине и косметологии, разрушая как опухолевые, так и жировые клетки или же позволяя лекарственным веществам поступать в кожу.



Обработка кожи лица с помощью ультразвуковой кавитации.

ЛЕТУЧИЕ МЫШИ ПРОТИВ БАБОЧЕК — НАПАДЕНИЕ И ЗАЩИТА

Летучие мыши — живые эхолокаторы — испускают ультразвуковые сигналы либо ртом, либо носовым отверстием, которое имеет форму параболического зеркала. Давление ультразвуковой волны уже на расстоянии 1—5 см от головы зверька составляет 60 мбар. Если бы мы могли его слышать, то воспринимали бы как звук отбойного молотка, которому соответствует такая же частота. Мыши с помощью ультразвуковой эхолокации не только обходят препятствия, но и охотятся на насекомых. Однако ночные бабочки-медведицы в результате эволюции научились создавать ультразвуковые помехи, которые нередко сбивают крылатых охотников со следа.

УЗИ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКИ

Ультразвук хорошо распространяется в мягких тканях, по сравнению с рентгеновскими лучами он относительно безвреден и потому широко используется для изучения состояния внутренних органов. Ультразвуковое исследование (УЗИ) плода сегодня делают всем будущим матерям, чтобы проследить, как развивается ребенок. Аппараты УЗИ (и другие подобные приборы) содержат кристаллы, в которых проявляется пьезоэлектрический эффект, открытый в 1881—1882 гг. братьями Жаном и Пьером Кюри. При деформации таких кристаллов (пьезоэлементов) на их поверхности образуются электрические заряды. Воздействуя на них переменным током, можно вызывать механические колебания, сопровождающиеся ультразвуковой волной.

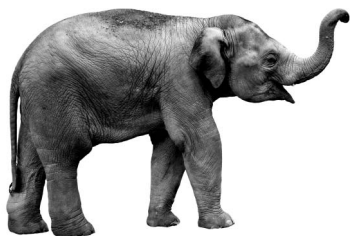


Ультразвуковой аппарат.

ИНФРАЗВУК, ИЛИ НЕСЛЫШНЫЙ РОКОТ

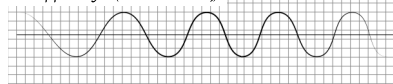
Инфразвук — это звуковые волны, чья частота ниже, чем может воспринять человеческое ухо. Диапазон частот, воспринимаемый нами, — 16—20 000 Гц. Поэтому 16 Гц считается верхней границей инфразвука, а нижней — 0,01 Гц. На практике используются колебания, начинающиеся от сотых и десятых долей герца. С инфразвуком связано немало идей как в области его использования, так и в плане защиты.

Инфразвук наносит вред здоровью, плохо влияя на нервную и эндокринную системы и внутренние органы, однако бороться с ним трудно. Амплитуды колебаний инфразвуковых волн намного больше, чем волн слышимого диапазона. Атмосфера поглощает инфразвук незначительно, и потому он распространяется на огромные расстояния. Большая длина волны приводит к сильной дифракции, то есть инфразвук легко огибает различные преграды, не пропускающие слышимые звуки. Входя в резонанс с крупными объектами, он вызывает их вибрацию. Поэтому обычные противошумовые методы здесь малоэффективны. В природе инфразвук возникает при землетрясениях, штормах, ударах молний, его издают некоторые животные, например киты и слоны. Колебания в инфразвуковом диапазоне зарегистрированы во время взрыва Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г.

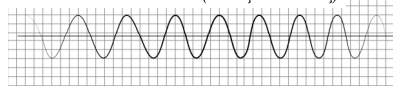


Слоны способны издавать звуки в инфразвуковом диапазоне и улавливать инфразвук. Считается, что это помогло им спастись от катастрофического цунами в 2004 г.

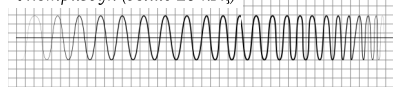
Инфразвук (ниже 16 Гц)



Слышимые частоты (16 Гц — 20 кГц)



Ультразвук (выше 20 кГц)



Инфразвук в сравнении с другими диапазонами звуковых волн.

КАК ИЗБЕЖАТЬ БЕДЫ

Поскольку инфразвук является предвестником бури, специальные инфразвуковые регистраторы позволяют предсказать разгул стихии. Животные, покидающие район будущего землетрясения или заблаговременно уходящие вглубь суши перед цунами, также ощущают инфразвуковые колебания, и потому следует обращать самое пристальное внимание на такое их поведение.

ИНФРАЗВУКОВОЕ ОРУЖИЕ

Инфразвук смертелен уже при 180—190 дБ, потому что разрывает легкие альвеолы, и он тем более опасен, что неслышим. Воздействие от 145 до 150 дБ в диапазоне частот от 1 до 100 Гц приводит к головным болям, тошноте, головокружению, удушью. Однако компактное инфразвуковое оружие, которое иногда показывают в кино, не даст достаточно мощного сигнала, а если и даст, то повредит самому носителю, так как инфразвуковые волны распространяются во всех направлениях. Но подобным оружием может быть мощный авиационный двигатель с резонатором.

С развитием техники число источников инфразвука резко возросло. Это и ветрогенераторы, и вентиляторы, и тяжелые станки, и поршневые компрессоры, и реактивные двигатели, и, конечно, всевозможные взрывы. Таким образом, выявляя инфразвук, можно определять место сильного взрыва, исследовать атмосферу, водную среду, земную кору. Для этого сконструированы

компактные датчики, которые преобразуют акустические инфразвуковые колебания в электрические сигналы. Затем эти сигналы усиливаются и обрабатываются электронными средствами. Датчики ультразвука используются в анализаторах шума, системах мониторинга за ядерными взрывами, а также для оповещения о приближении природных катаклизмов.

ГОЛОС МОРЯ

В начале 1930-х гг. метеорологи, работавшие на морских гидрометеорологических станциях, обратили внимание ученых на неприятный эффект. Поднося к уху метеозонд, то есть наполненный водородом шар, они испытывали боль. «Виновником» оказался инфразвук в диапазоне 0,1—6 Гц. Дело в том, что, когда сильный ветер нагоняет волны, прямо за их гребнями возникают вихри. Они-то и вызывают механические упругие колебания в инфразвуковом диапазоне. Голос моря может вызвать не только боль или чувство давления, но и страх, и панику. Из-за такой паники моряки даже способны покинуть корабль в открытом море. Такова одна из версий появления кораблей-призраков, например знаменитой «Марии Целесты», обнаруженной в море в 400 км от Гибралтара 4 декабря 1872 г.



Корабли-призраки не всегда бывают миражами. Бригантина «Мария Целеста», совершая рейс из Америки в Европу, была найдена в океане без экипажа. Одной из причин мог быть инфразвук — голос моря.



Сабвуфер.

ИНФРАЗВУК И ИСКУССТВО

В 1929 г. в одном лондонском театре ставилась пьеса, по ходу которой действие переносилось из XX в XVIII в. Режиссер искал выразительное средство, чтобы обозначить этот переход. Американский физик Роберт Вуд, оказавшийся в это время в Лондоне, предложил использовать очень низкие звуки. Он сконструировал трубу и присоединил ее к органу, который, кстати, при некоторых условиях звучит в инфразвуке. Труба Вуда слышимых звуков не издавала, но оконные стекла и подвески люстр дрожали, и люди в зале и даже в соседних домах чувствовали страх. Разумеется, режиссер приказал немедленно убрать трубу, которая, как оказалось, издавала инфразвук. Однако в наши дни в некоторых музыкальных системах, а также для создания спецэффектов в кино используют сабвуферы, воспроизводящие низкие частоты и даже инфразвук.

ТРЕВОЖНЫЙ СИГНАЛ

Работающие механизмы подвержены износу. Он может выражаться в изменении зазоров между сопряженными деталями. Это приводит к появлению дополнительных вибраций с инфразвуковой частотой. Приборы, снабженные инфразвуковыми датчиками, регистрируют эти вибрации, что позволяет вовремя произвести ремонт или же внести изменения в конструкцию, если речь идет об испытании новых механизмов.

РЕВЕРБЕРАЦИЯ, ИЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ПОМЕЩЕНИЯХ

Законами распространения звуковых волн в закрытых, а также полукрытых и открытых помещениях занимается архитектурная акустика. Она исследует, как звуки поглощаются поверхностями, как отраженные волны влияют на слышимость и восприятие, изучает шумовые характеристики интерьеров, разрабатывает методы управления звуковым полем. Достижения этой науки используются при проектировании концертных залов и других помещений.

Основателем архитектурной акустики по праву считается американский ученый Уоллес Сэбин (1868—1919). В 1895 г. в Гарвардском университете был построен Fogg Museum — одно из учреждений, составляющих ныне Гарвардский художественный музей. Уже после постройки потребовалось улучшить акустику лекционного зала. Руководство физи-

СЕКРЕТЫ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Из-за длительной реверберации речь становится неразборчивой, а музыкальный ритм утрачивает определенность. Короткая реверберация приводит к тому, что речь звучит глухо, а звучание музыкальных инструментов теряет выразительность и слитность. Даже если время реверберации подобрано хорошо, акустические свойства зала могут отличаться в разных местах из-за различия в путях, которые проходят отражения от источника звука до слушателя. Кроме того, оптимальное время реверберации отличается при исполнении симфонической, камерной и эстрадной музыки. Поэтому при проектировании залов приходится искать компромиссные решения. В больших залах используют электронные системы звукоусиления с применением искусственной реверберации, что позволяет регулировать акустические параметры помещения.

АКУСТИКА КАК ремесло и искусство

Научной акустики в античном мире не существовало, как не было и физики в современном понимании. Однако строители уже в те далекие времена знали, как обеспечить хорошую слышимость в помещениях или на открытых площадках, где собиралось множество слушателей. Эти результаты хорошо видны в строениях Древней Греции и Рима.



Открытый древнегреческий театр.

ческого факультета поручило эту, казалось, неразрешимую задачу молодому преподавателю Уоллесу Сэбину.

Тот подобрал себе команду и взялся за дело. Прежде всего исследователи стали сравнивать лекционный зал с залом театра Сандерса, где была прекрасная акустика. Работа продолжалась несколько лет, были сделаны тысячи измерений с помощью секундомера и трубы органа.

Сэбин ввел понятие «время реверберации», то есть время затухания звука при многократном отражении от различных поверхностей. Это понятие и сегодня является важнейшей акустической характеристикой помещения.

Он измерял время реверберации для звуков различной частоты, для залов с разными ковровыми покрытиями. Сэбин установил, например, что шесть мягких кресел сокращают время реверберации так же, как тело среднего человека.

Он выявил зависимость между размерами зала, типом и площадью звукопоглощающих

поверхностей и акустическими условиями. Оказалось, что время реверберации в хороших концертных залах — 2—2,25 с. Если оно меньше, то слушатели воспринимают звук как слишком сухой. В хорошем зале для лекций время реверберации чуть ниже 1 с. В лекционном зале Fogg Museum оно составило около 5,5 с, то есть именно столько времени продолжало слышаться каждое сказанное слово. За это время лектор произносил еще около 12—15 слов, которые тоже продолжали звучать, и речь его было трудно разобрать. Чтобы избавиться от этих помех, Сэбин разместил по всему залу звукопоглощающие материалы, и время реверберации уменьшилось. Он получил признание, а затем и приглашение в качестве консультанта при проектировании Симфонического

ПАРУСА НА КРЫШЕ И ЖЕЛОБА В ЗАЛЕ

Оперный театр в Сиднее известен на весь мир благодаря своей необычной крыше, которая выполнена в виде ряда расположенных друг за другом парусов (или ракушек) различных размеров. Это здание считается выдающимся достижением современной архитектуры и внесено в Список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО. Но уже во время строительства выяснилось, что подобная неравномерная высота крыши ухудшает акустику внутри. Чтобы справиться с проблемой, в зале установили особые желоба, самый большой из которых достигает 42 м в длину. Эти желоба отражают звук и привлекают внимание к аркам, которые располагаются над передней частью сцены.



Сиднейский оперный театр, построенный в 1973 г., по праву считается одним из новых семи чудес света.



Fogg Museum, часть Гарвардского художественного музея.

зала Бостона. Этот зал стал первым, при строительстве которого была применена теория архитектурной акустики. Его поныне считают одним из лучших в мире. А в честь основателя архитектурной акустики получила название единица поглощения диффузного звукового поля — сэбин.

ТОЧНОСТЬ ИЛИ УДОБСТВО?

Архитектурная акустика использует две теории распространения звука. Более строгой и точной является волновая теория, однако связанные с ней расчеты иногда бывают очень громоздкими. Геометрическая теория более упрощена, однако технические расчеты в прикладных областях здесь гораздо удобнее. Следует, однако, помнить, что чем меньше длина звуковой волны по сравнению с размерами препятствия, тем более точными оказываются геометрические модели. А это значит, что в области средних и верхних частот геометрическая теория обеспечивает большую точность.

СОЛОВЬИНЫЙ ПОЛ

В японских замках и храмах нередко можно встретить так называемый соловьиный пол. Пройти по нему тихо невозможно — возникает звук, похожий на соловьиный свист или просто птичий щебет. Такой эффект добивались, выполняя крепление досок к полу в виде перевернутой буквы V. Давление на пол и вызывает «соловьиный» эффект. Причем он усиливается при хождении на цыпочках, потому что давление при этом оказывается больше, чем от полной стопы.

ФИЗИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ — УСПЕХИ СЕЙСМОЛОГИИ

Упругие сейсмические волны в земной коре, подобные звуковым, сопровождают землетрясения. Сейсмические волны, землетрясения и связанные с ними явления представляют собой предмет сейсмологии. Это наука междисциплинарная, она находится на стыке физики, геофизики, геологии, химии, биологии и даже истории. Однако физические идеи и гипотезы здесь, пожалуй, преобладают.

Сейсмология занимается природой землетрясений, исследует их причины, механизм и географическое расположение. Она применяет знания о землетрясениях, чтобы защищать от них и давать прогнозы и рекомендации по строительству в сейсмоопасных зонах.

Землетрясения — это специфические колебательные движения земной коры, возникающие при смещении литосферных плит. Они могут возникать также при смятии пород в складки. Механизм землетрясения состоит в следующем. Вначале скольжению пород мешает трение. Энергия, которая вызывает движение, накапливается в форме упругих напряжений пород. Однако наступает момент, когда напряжение превышает силу трения. Это приводит к резкому разрыву пластов и их взаимному смещению. Поверхность земли начинает колебаться. Для периодов этих колебаний характерна небольшая длительность — от нескольких десятков минут до долей секунд.

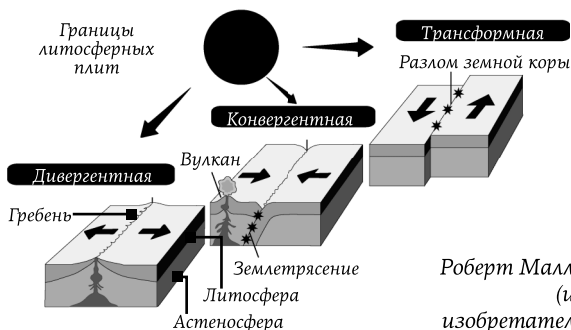
Землетрясения характеризуются сейсмичностью, то есть географическим положением, связью со строением земной поверхности, распределением по магнитудам (или энергиям).

Их отличает также глубина возникновения. В связи с этим фактором землетрясения подразделяются на три группы: нормальные — 33—70 км, промежуточные — до 300 км, глубокофокусные — свыше 300 км. Глубокофокусные землетрясения могут ощущаться на расстоянии тысяч километров.

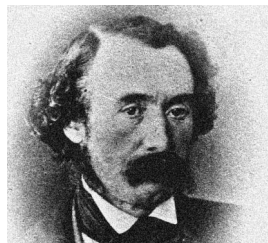
Существуют и другие деления, основанные на направлении смещения литосферных плит.

К пониманию природы землетрясений и их регистрации пришли далеко не сразу.

Так, в IV в. до н. э. Аристотель думал, что землетрясения вызываются атмосферными вихрями, внедряющимися в землю. Эти вихри усиливаются огнем и ищут выход. Аристотель также попытался классифицировать землетрясения по направлениям движения почвы и выделил шесть их типов. Во II в. н. э. китайский астроном и философ Чжан Хэн создал первый прибор, предсказывающий и фиксирующий землетрясения. Это неудивительно, потому что именно Китай страдает от них очень сильно. Устройство, изобретенное Чжан Хэном в 132 г., получило название хоуфэн, то есть «флюгер землетрясений». Оно фиксировало колебания земной поверхности и направления их распространения. Это был первый в мире сейсмограф, точнее сейсмоскоп, так как его показания



Типы землетрясений.

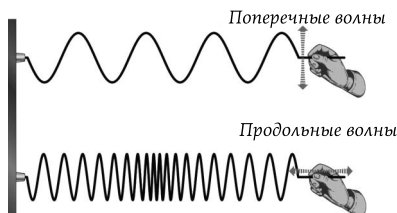


Роберт Маллет (1810—1881), британский (ирландский) ученый, инженер, изобретатель. Один из основоположников сейсмологии как точной науки.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Сейсмические волны — это волны, которые переносят энергию упругих (механических) колебаний в горных породах. Сейсмическая волна может быть вызвана как землетрясением, так и взрывом или ударом. Скорость распространения такой волны определяется плотностью и упругостью среды. Кроме того, чем глубже очаг, тем больше скорость. В верхней части земной коры — 2—8 км/с, на уровне мантии — 13 км/с.

Среди сейсмических волн выделяют следующие. Волны сжатия, или продольные (Р-волны), распространяются со скоростью звука в данной породе, воспринимаются как грохот и регистрируются первыми, потому их называют первичными волнами. Волны сдвига, или поперечные (S-волны), называются также первичными. Существуют и длинные, или поверхностные, упругие волны (L-волны), которые приводят к самым большим разрушениям.



записывались не автоматически, а вручную. Он представлял собой медный тонкостенный сосуд диаметром 180 см. Снаружи крепились восемь драконов, указывающих на север, юг, запад, восток, северо-восток, юго-восток, северо-запад и юго-запад. У каждого дракона во рту был медный шарик, перед ним располагалась жаба с открытым ртом. Вероятно, внутри сосуда находился маятник с тягами, прикрепленными к головам драконов. Когда происходил подземный толчок, маятник приходил в движение. Тяга, которая была соединена с драконом, смотревшим в этом направлении, заставляла его раскрывать пасть. Шар из пасти выкатывался в рот жабы. Если землетрясение было сильным, выкатывались

шары из пасть двух драконов, а если прибор оказывался в эпицентре, то выкатывались все шары. Чувствительность прибора была весьма высока, он мог уловить подземные толчки за 600 км.

В Европе серьезно изучать землетрясения начали значительно позже. Собственно, своим появлением наука сейсмология обязана мощнейшему Лиссабонскому землетрясению 1755 г. Английский естествоиспытатель Джон Мичелл подробно опросил очевидцев этой катастрофы. В 1760 г. он выпустил книгу «Предположения о причинах возникновения землетрясений и наблюдения за этим феноменом». Он первым высказал предположение, что землетрясения вызываются дви-



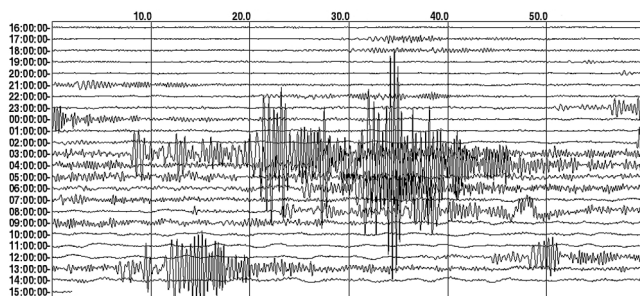
Руины церкви ду Карму, оставленные в современном Лиссабоне специально в память о землетрясении 1755 г. До этой катастрофы она считалась самой большой церковью в столице и принадлежала монастырю ду Карму.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И ЗЕМНОЕ ЯДРО

Немецкий ученый Эмиль Вихерт в 1899 г. сделал предположение о глубинном происхождении регистрируемых на сейсмограмме поперечных и продольных сейсмических волн. В 1906 г. он выяснил природу так называемых промежуточных групп волн — оказалось, что они отражаются от земной поверхности. А английский ученый Диксон Олдхэм выдвинул гипотезу, согласно которой у Земли имеется внутреннее ядро.



Эмиль Вихерт (1861—1928), немецкий физик.



Сейсмические волны, порождаемые землетрясениями, распространяются во все стороны от очага подобно звуковым волнам. Скорости сейсмических волн могут достигать 8 км/с.

жением пород, которые находятся глубоко под землей, и эти движения приводят к образованию упругих волн. Он также указывал, что, сопоставив данные о времени прибытия колебаний в определенные места, можно определить эпицентр землетрясения (хотя этого термина тогда еще не существовало). На этом методе основаны современные способы определения эпицентра.

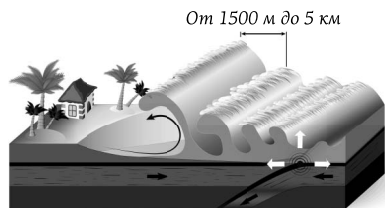
Огромный вклад в развитие сейсмологии внес Роберт Маллет уже в XIX в. Двадцать лет он собирал материалы и ставил опыты, используя новейшую фотографическую технику. Результатом был каталог мировой сейсмичности, где описывалось 6831 зем-

СЕЙСМОЛОГИЯ, СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ И ГОРНЫЕ РАБОТЫ

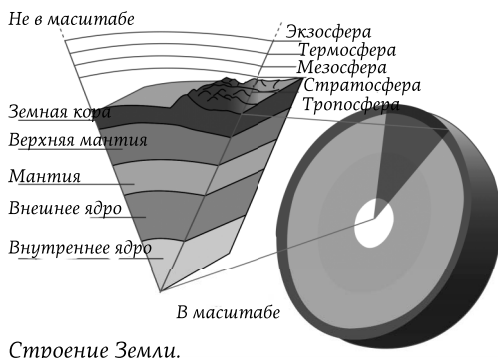
Сейсмология помогла открыть не только ядро, но и вообще разобраться в строении Земли, ведь сейсмические волны также дают информацию о среде, через которую проходят. Можно смело утверждать, что все прямые данные о строении нашей планеты наука получила благодаря наблюдениям за упругими волнами, которые распространяются при землетрясениях. Кроме того, сейсмология также осуществляет мониторинг сейсмичности при горных работах и добыче полезных ископаемых, обеспечивая их безопасность. Существует и шахтная сейсмология, которая занимается мониторингом сейсмичности в районе разрабатываемого рудного тела, прогнозированием и предупреждением горных ударов для обеспечения безопасности работ.

РАЗРУШИТЕЛЬНАЯ ВОЛНА

Цунами — гигантские волны, причиной которых чаще всего являются подводные землетрясения. При этом происходит резкое смещение морского дна, что и вызывает несколько волн. К цунами приводят землетрясения любой силы, но опасность вызывают те, чья магнитуда превышает 7 баллов. Скорость распространения цунами в открытом океане вычисляют, беря квадратный корень из произведения $g \times H$, где g — ускорение свободного падения, H — глубина океана. При глубине 4 км скорость волны цунами достигает 200 м/с (720 км/ч).



Цунами, вызванное землетрясением.



летрясение: дата, местоположение, число толчков, направление, продолжительность, последствия. Маллет представил двухтомный доклад о своей работе Королевскому обществу. В 1862 г. вышла также его статья под названием «Великое Неаполитанское землетрясение 1857 г.: основные законы наблюдательной сейсмологии».

Одновременно шла работа над сейсмографами. Так, прибор, изобретенный в 1855 г. итальянским ученым Луиджи Пальмиери, содержал ртуть в сферическом сосуде. Когда происходил толчок, ртуть, в зависимости от его направления, проливалась в тот или иной контейнер. Это сразу же фиксировал особый индикатор, который останавливал соединенные с прибором часы и запускал запись колебаний на специальном барабане. В сейсмографе, изобретенном в 1875 г. Филиппо Секи, была возможность для записи самого первого колебания. Именно на этом приборе в 1887 г. была сделана первая

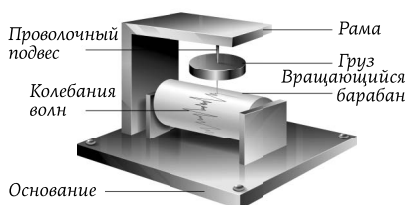
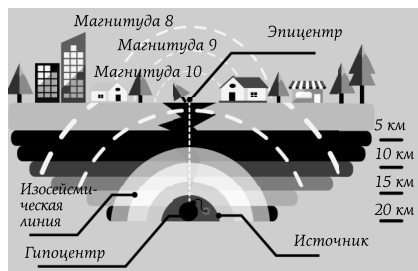
УСТРОЙСТВО СЕЙСМОГРАФА

Сейсмограф (сейсмометр) — это измерительный прибор, с помощью которого обнаруживаются и регистрируются все типы сейсмических волн. Однако есть сейсмографы, которые чувствительны к конкретным видам волн — вертикальным или горизонтальным. Обычно в сейсмографе имеется груз, установленный на пружинной подвеске. При землетрясении он остается неподвижным, а остальная часть прибора, то есть корпус и опора, смещается относительно груза. Волны регистрируются пером на бумажной ленте. Разумеется, в настоящее время существуют электронные сейсмографы, а также сейсмографы, где вместо твердой инерционной среды имеется жидкий электролит.

И, конечно, в современных сейсмографах широко используются компьютерные технологии.

ЭПИЦЕНТР И ГИПОЦЕНТР

Эпицентр — это перпендикулярная проекция центральной точки очага землетрясения (или ядерного взрыва) на поверхность Земли. Иными словами, эпицентр — это точка на земной поверхности над очагом землетрясения. Очаг, или гипоцентр, или фокус, — это точка под землей, где начинается подвижка пород и откуда распространяются сейсмические волны. Поэтому нередко встречающиеся утверждения, что эпицентр землетрясения находится на такой-то глубине, являются терминологической путаницей. Эпицентр не может находиться на глубине согласно определению, и речь, конечно, может идти только о гипоцентре.



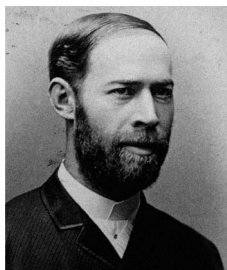
Сейсмограф.

из сохранившихся сейсмограмм. В 1892 г. работавшие в Японии английские ученые изобрели новый сейсмограф, получивший имя Джона Милна. В 1900 г. в мире работала сеть из 40 сейсмостанций, которые были оборудованы сейсмографами Милна. Начало XX в. ознаменовалось несколькими разрушительными землетрясениями в разных странах. В Западной Европе, России, США и Японии начались систематические наблюдения за этими стихийными бедствиями. Появились первые каталоги землетрясений, зарегистрированных сейсмографами, а также карты их очагов. Благодаря этому была установлена связь между трансформацией вещества в недрах нашей планеты и землетрясениями на ее поверхности. Были разработаны научные основы строительства зданий в сейсмоопасных зонах.

РАДИОВОЛНЫ НА СЛУЖБЕ ЧЕЛОВЕКА

Электромагнитные волны радиодиапазона служат предметом радиофизики, хотя ее область гораздо шире и охватывает проблемы колебательно-волновых процессов различной природы. Радиоволнами считаются электромагнитные волны с частотами от 0,03 Гц до 3 ТГц (с длинами от 10 млн км до 0,1 мм). Радиофизика сегодня охватывает оптику, СВЧ-электронику, полупроводниковую электронику. Но первым достижением радиофизики было все же появление радио.

В теории радиоволны открыл Джеймс Клерк Максвелл, однако экспериментально обнаружил их Генрих Герц. Свои знаменитые опыты Герц провел в 1885—1888 гг. Излучатель электромагнитных волн (вибрато Герца), который он сконструировал, состоял из двух медных стержней, на концы которых были насажены латунные шарики, и конденсатора — цинковой сферы или же пластины. Между шариками имелся зазор — так называемый искровой промежуток. К стержням крепились концы вторичной обмотки катушки Румкорфа, которая преобразовывала постоянный ток низкого напряжения в переменный ток высокого напряжения. Импульсы переменного тока генерировали электромагнитные волны. Принимались они резонатором, который находился на некотором расстоянии от генератора и никак не был с ним связан. Герц измерил скорость распространения этих волн, установил, что им свойственны преломление, отражение и поляризация, и доказал, что они аналогичны световым, отличаясь от них по длине и частоте. В декабре 1888 г. он опубликовал резуль-



*Генрих
Рудольф Герц
(1857—1894),
выдающийся
немецкий
физик.*

таты в статье «О лучах электрической силы». Так были открыты радиоволны и был сделан вывод, что энергию электромагнитного поля можно передавать без проводов.

Патенты на беспроводную связь выдавались еще до открытия радиоволн, но тогда это были только идеи. Собственно говоря, первым радиоприемником была экспериментальная установка Герца. Работали над этим также Никола Тесла, Оливер Лодж, Эдуар Бранли, Томас Эдисон, однако наиболее известны Александр Степанович Попов и Гульельмо Маркони. Свои изобретения они сделали в 1895 г.

ЗАЧЕМ НУЖНЫ РАДИОВОЛНЫ

Генрих Герц считал свое открытие чисто фундаментальным и не видел в нем практической пользы. Он говорил, что это только эксперимент, доказывающий правоту теории Максвелла. Ученый тогда работал профессором в университете Карлсруэ, и, когда один студент спросил его, что же дальше, преподаватель спокойно ответил: «Я предполагаю — ничего». Но еще не успел закончиться XIX в., как было изобретено радио. Герц, к сожалению, до этого не дожил.

КАК УСТРОЕНО РАДИО

Радио устроено следующим образом. В радиопередатчике формируется несущий сигнал определенной частоты. На него накладывается звук или изображение — информационный сигнал. Он осуществляет модуляцию несущих волн. Передающая антенна излучает их в пространство. Радиоволны улавливаются приемной антенной и поступают в радиоприемник. Благодаря системе фильтров и детектору выделяется сначала сигнал с определенной частотой, затем модулирующий полезный сигнал.



Ледокол «Ермак», первый в мире ледокол арктического класса, на котором была установлена одна из первых судовых радиостанций. Ходил в море в 1898—1963 гг.



Александр Степанович Попов (1859—1906), выдающийся русский ученый, инженер и изобретатель. Основатель радиодела в России.

25 апреля (7 мая) А. С. Попов продемонстрировал на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге прибор, предназначавшийся для того, чтобы показывать быстрые колебания в атмосферном электричестве. Поэтому в СССР, а потом в России 7 мая отмечается как День радио. 12 (24) марта 1896 г. он передал первую радиограмму на расстояние 250 м. Это были слова «Генрих Герц». Попов в дальнейшем совершенствовал прибор, получал патенты на свои изобретения, широко использовал его на практике. По инициативе и при активном участии Попова радио стало применяться на флоте России. В 1900 г. благодаря радиосвязи с береговой радиостанцией ледокол «Ермак» сумел

РАДИОЧАСТОТЫ

Радиочастоты — частоты или полосы частот с условными наименованиями в диапазоне 3 кГц — 300 ГГц. Данному диапазону соответствует частота переменного тока электрических сигналов, посредством которых вырабатываются и обнаруживаются радиоволны. Радиочастоты главным образом относятся к электромагнитным волнам, потому что большая часть диапазона находится за границами волн, получаемых посредством механической вибрации.

ТРУБКА БРАНЛИ И ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО

В 1890 г. французский ученый Эдуар Бранли изобрел прибор для детекции сигналов высокой частоты. В основе работы этого прибора лежит следующий принцип: электромагнитная волна проходит через механические соединения и замыкает или размыкает цепь. Подобный прибор, таким образом, представляет собой ключ. Бранли изготовил стеклянную трубку, которую заполнил металлическими опилками. Эти опилки могли менять проводимость в несколько сот раз. Чтобы вернуть трубку в прежнее состояние, ее надо было встряхнуть. Изобретатель назвал ее «радиоиндуктор», позднее ее называли трубкой Бранли. Оливер Лодж, внесший в нее усовершенствования в 1894 г., дал ей название когерер (от латинского *cohaerere* — «сцепляться»), поскольку опилки под воздействием электромагнитных волн сцеплялись. Когерер применялся в радиоприемниках несколько десятков лет.



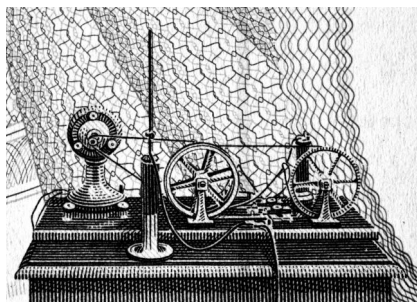
Трубка Бранли, первое устройство для детекции радиоволн, применявшееся в первых радиоприемниках. Его использовали и Попов, и Маркони, и другие инженеры.



Гульельмо Маркони (1874—1937), итальянский изобретатель, радиотехник и предприниматель.

ЗАМЕНА ДЛЯ ТЕЛЕГРАФА

В январе 1898 г. тяжело заболел знаменитый британский политический деятель Уильям Гладстон, четыре раза занимавший пост премьер-министра Великобритании. Он находился в это время в Уэльсе. Снежная буря оборвала провода, и сообщение в Лондон о болезни Гладстона передал именно Маркони по своему аппарату.



Радиотелеграфный аппарат Маркони.

ЭФФЕКТ АНТИПОДОВ

Радиоволны, как и любое электромагнитное излучение, распространяются со скоростью света. Земля и вода не являются для них прозрачными. Но такие явления, как дифракция и отражение, позволяют осуществить связь между точками земной поверхности, которые находятся на больших расстояниях. В частности, с этим связан так называемый эффект антиподов, когда радиосигнал хорошо воспринимается в противоположной передатчику точке земного шара. Так, 12 января 1930 г. стала возможна радиосвязь между Землей Франца-Иосифа и Антарктидой.

спасти рыбаков, оказавшихся в Финском заливе на оторвавшейся льдине.

Итальянский инженер Гульельмо Маркони также испытал свой радиоприбор весной 1895 г. Он смог передать сигнал на несколько сот метров, в 1896 г. — на 3 км. 2 июля 1897 г. он получил британский патент на свое изобретение. Маркони внес усовершенствования в приемник Попова, изобретя вакуумный когерер, а в качестве передатчика использовал усовершенствованный вибратор Герца. Но, главное, он присоединил приемник к телеграфному аппарату, а передатчики соединил с ключом Морзе, таким образом изобретя радиотелеграф. В 1897 г. Маркони построил первую в мире стационарную радиостанцию на острове Уайт, а в 1900 г. открыл в Великобритании первый радиозавод. Получил он признание и в родной Италии. Таким образом, из всех ученых и инженеров, участвовавших в изобретении радио, Маркони оказался самым «пробивным». Так радио пришло в мир.

МИКРОВОЛНОВКА И РАДИОВОЛНЫ

Микроволновое сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение включает дециметровый, сантиметровый и миллиметровый диапазоны радиоволн (длина волны от 1 м, частота 300 МГц, до 1 мм — 300 ГГц). Оно используется и для радиолокации, и для обработки металлов, и при лечении варикозного воспаления вен. Самое обыденное его применение — в бытовых микроволновых печах. В СВЧ-печи используется магнетрон — прибор, в котором поток электронов, взаимодействуя с электрической составляющей поля СВЧ, генерирует микроволны, которые прогревают продукт. Впервые запатентовал микроволновую печь для прогрева продуктов американский инженер Перси Спенсер. Он проектировал оборудование для радаров, экспериментировал с магнетроном и обнаружил, что у него в кармане расплавился кусок шоколадки. Другая версия гласит, что он положил на магнетрон бутерброд и тот нагрелся. Так привычка обедать на рабочем месте привела к новому изобретению.

РАДИОТЕЛЕФОН

Радиотелефон — общее название средств передачи речевого сигнала через радиосвязь. У первых, аналоговых, радиотелефонов несущая частота была несколько десятков мегагерц. В результате возникали помехи: в своей трубке можно было иногда услышать разговоры по подобному же телефону в соседней квартире. Затем появились цифровые аппараты с несущей частотой 900 МГц, разговор по которым было невозможно случайно подслушать, но дальность их была ниже аналоговых. Сегодня существуют телефоны с несущей частотой 5,8 ГГц, которые могут работать в пределах квартала. Очень популярен также протокол DECT (англ. Digital Enhanced Cordless Telecommunication) — технология беспроводной связи на частотах 1880—1900 МГц. Радиус его действия — 50—300 м.



Радиотелефон.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Выделяются следующие радиодиапазоны:

- сверхдлинные волны (СДВ) — метрические волны;
- длинные волны (ДВ) — километровые волны, поглощающиеся атмосферой;
- средние волны (СВ) — гектометровые волны;
- короткие волны (КВ) — декаметровые волны;
- ультракороткие волны (УКВ) — высокочастотные волны, длина волны которых меньше 10 м.

Волны разных диапазонов по-разному отражаются и поглощаются различными слоями атмосферы.

СОТОВАЯ СВЯЗЬ

Сотовые телефоны также работают в диапазоне радиоволн. Это самая распространенная сегодня телефонная связь в повседневной жизни. Сотовая сеть представляет собой базовые станции, то есть многочастотные УКВ-приемопередатчики, которые распределены по всей зоне покрытия сети. Сотовый телефон прослушивает эфир, находит сигнал от базовой станции и посылает ей собственные уникальные сигналы.



Антенны на вышке сотовой связи.

МИРОВОЕ ЭХО

В радиифизике существует необычный феномен — мировое эхо. Это вид эха в микроволновом диапазоне, которое возвращается после радиопередачи. Время возвращения — от 1 до 40 и более секунд. Обнаружил его в 1927 г. инженер Йорген Хальс и примерно год скрывал, не зная, как это объяснить. Позднее с этим явлением столкнулись и другие инженеры, ученые и радиолюбители. Для объяснения эффекта организовывались многочисленные лаборатории. Согласно самой популярной теории, радиоволны попадают в ловушку между двумя слоями ионосферы, отражаются там многократно, несколько раз огибают Землю и затем снова оказываются «на свободе». Есть также предположение, что радиоволны несколько раз поочередно отражаются от Луны и от Земли или же от облаков плазмы, находящихся в космосе.

ФИЗИКА ДЛЯ АСТРОНОМИИ: РАДИОТЕЛЕСКОПЫ

Первыми телескопами были оптические, работающие в видимом диапазоне. Сейчас для исследования Солнечной системы, Галактики и Метагалактики широко используются радиотелескопы — астрономические инструменты, принимающие собственное радиоизлучение различных небесных объектов. С помощью радиотелескопов исследуются различные характеристики излучения, что помогает выяснить структуру самих объектов. Радиотелескопы принимают волны в диапазоне от 0,1 мм до 1000 м. Существуют также телескопы, работающие в гамма-, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах.

Радиотелескоп не похож на обычный оптический телескоп. Он не строит изображение непосредственно, а только измеряет энергию излучения в зависимости от направления. Промеряя яркость в каждой точке протяженного источника, можно получить изображение объекта. Сам радиотелескоп либо наводят на определенную точку небесной сферы, через которую искомый объект будет проходить, либо настраивают так, чтобы он следил за объектом.

Первый радиотелескоп был создан в фирме Bell Telephone Labs при изучении грозовых помех для радиосвязи в 1931 г. Американский радиоинженер Карл Янский установил на полигоне фирмы однонаправленную вертикаль-

САМЫЙ БОЛЬШОЙ РАДИОАНТЕННЫЙ ТЕЛЕСКОП

Крупнейшим радиоантенным телескопом в мире является РАТАН-600, расположенный в России, в Карачаево-Черкессии, близ станицы Зеленчукской, на высоте 970 м от уровня моря. РАТАН расшифровывает как «радиоастрономический телескоп Академии наук». Диаметр его главного зеркала составляет 576 м. Он является высокочувствительным и многочастотным.



Одна из приемных кабин РАТАН-600, движущаяся по железнодорожным рельсам.



Первая запись радиоизлучения Млечного Пути.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ДЛЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ — ДАЛЕКИЕ И БЛИЗКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ

Существует один интересный способ, позволяющий увеличить разрешающую способность радиотелескопа. Он основан на интерференции, ведь это свойство присуще всем электромагнитным волнам. Берутся две или более антенны, расположенные на некотором расстоянии (базе) друг от друга. Естественно, что сигнал от источника будет приходить на них с некоторым временным интервалом. Сигналы для каждой антенны интерферируют, а затем проводится математическая обработка — так называемый апертурный синтез. Это позволяет получить информацию об объекте с наибольшим разрешением. Причем расстояние между антеннами может быть и близким, и чрезвычайно большим. Для радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами используются антенны, расположенные на разных континентах.



Антенны для радиоинтерферометров.



*Копия первого
в мире
радиотелескопа,
сконструированного
Карлом Янским.*

но поляризованную антенну длиной 30,5 м и высотой 3,7 м. Антенну он соединил с чувствительным приемником и самописцем.

24 февраля 1932 г. он обнаружил неизвестный радиосум и после ряда наблюдений понял, что этот шум исходит от Млечного Пути.

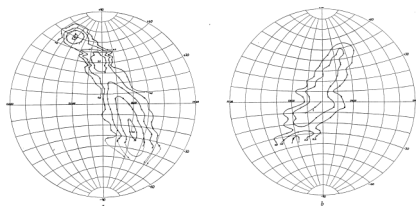
Как ни странно, публикации Янского мало кого заинтересовали, однако нашелся человек, который обратил на них внимание. Радиоинженер Гроут Ребер в 1937 г. соорудил на заднем дворе родительского дома в штате Иллинойс параболическую антенну с рефлектором 9,5 м.

Два года спустя он обнаружил радиоизлучение на волне 1,87 м (160 МГц). Это излучение концентрировалось в плоскости Галактики. Ребер продолжал совершенствовать аппаратуру, систематически ведя наблюдения за небом. В 1944 г. появились его публикации с радиокартами небосвода, полученными на волне 1,87 м. На этих картах можно различить яркие источники радиоизлучения в созвездиях Кормы, Большого Пса, Стрельца, Лебеда А, Кассиопеи А.

Так было положено начало радиоастрономии, которая в последующие годы получила самое широкое развитие.

РЕЛЬЕФ КАК ЗЕРКАЛО

Чтобы уменьшить радиопомехи, радиотелескопы обычно устанавливают вдалеке от крупных населенных пунктов. Хорошую защиту дает расположение в долине или низине. Более того, рельеф зачастую используется как зеркало телескопа. Так, 300-метровый радиотелескоп Аресибо расположили в карстовой воронке. Ее дно вымостили алюминиевыми листами, точнее, подвесили их на тросах так, что под поверхность рефлектора свободно въезжает автомобиль. Над этим громадным зеркалом также разместили на специальных опорах приемник.



*Радиокарты звездного неба,
полученные Гроутом Ребером в 1944 г.*

РАБОТА РАДИОТЕЛЕСКОПА

Двумя основными элементами радиотелескопа являются антенна и радиометр. Антенны достаточно разнообразны, поскольку диапазон воспринимаемых волн широк. Чаще всего для приема волн миллиметрового, сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов используются параболические отражатели, похожие на зеркала оптических телескопов-рефлекторов. Устройство, которое собирает радиоизлучение, направляемое зеркалом, то есть излучатель, устанавливается в фокусе параболоида. Принятую энергию облучатель передает на вход радиометра, который усиливает излучение, принятое антенной, и преобразует его в удобный для регистрации и обработки формат. Раньше сигнал передавался самописцу, сейчас он переводится в цифровой формат и записывается на жесткий диск.



Параболическая антенна радиотелескопа.

РАДИОЛОКАЦИЯ, ИЛИ ВСЕВИДЯЩИЕ РАДАРЫ

Важное применение радиофизика нашла в радиолокации. Радиолокаторы с помощью радиоволн обнаруживают различные объекты, измеряют их координаты и определяют свойства. Задачи, которые необходимо решать в радиолокации, вызвали подъем и бурное развитие радиофизики в СССР и во всем мире. В настоящее время радиолокация, как и методы защиты от нее, продолжает весьма успешно развиваться. Сфера ее применения очень велика — это и наука, и военное дело, и техника.

Радиоволны проходят через атмосферу, но отражаются от твердых тел. Генрих Герц, обнаруживший радиоволны, открыл и этот их эффект уже в 1886 г. Однако использовать это свойство на практике долго не могли, потому что радиоволны сильно рассеивались и на объект попадала очень малая их часть — меньше одной миллиардной. Но развитие авиации потребовало создания средств

ФОЛЬГА ПРОТИВ РАДАРОВ

С появлением радаров начали развиваться способы защиты от них. Например, в воздухе распыляли кусочки фольги, которая отражала радиоволны и мешала обнаружить самолет или вертолет. В ответ на это для радиолокаторов были сконструированы системы селекции движущихся целей. Такие системы позволяют отличать быстро движущийся самолет от фольги, которая просто висит в воздухе или движется гораздо медленнее.



Фольга использовалась как средство борьбы с радиолокаторами.



Современная радиолокационная станция.

ПАССИВНАЯ И АКТИВНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ

Различают пассивную и активную радиолокацию. При пассивной принимается собственное излучение объекта. Радар, основанный на активной радиолокации, излучает зондирующий сигнал и осуществляет его прием, когда тот отражается от цели. В свою очередь, существует два вида активной радиолокации. Радиолокация с активным ответом предполагает, что на искомом объекте имеется собственный передатчик, излучающий радиоволны в ответ на принятый сигнал. Активный ответ используется в системах дистанционного управления, для опознавания объекта как своего или чужого, а также для получения дополнительной информации о нем. Пассивный ответ — это просто отражение запросного сигнала от объекта и последующий его прием.



Радар в аэропорту.

противовоздушной обороны, и в 1930-е гг. за радиолокацию взялись всерьез.

Изобретателем радара считается британский физик Роберт Уотсон-Уотт. В 1935 г. он продемонстрировал устройство для радиобнаружения воздушных объектов. В СССР в 1936 г. была построена радиолокационная станция (РЛС) «Буря», работавшая в сантиметровом диапазоне. Она могла засечь самолет на расстоянии 10 км. В 1939 г. стала серийно выпускаться и была принята на вооружение РЛС РУС-1, в 1940 г. — РУС-2.

При конструировании радиолокаторов старались разрешить ряд проблем. Так, принимаемый сигнал имеет небольшую мощность. При этом убывает она как четвертая степень дальности. Таким образом, желая увеличить в 10 раз дальность действия радиолокатора, следует повысить мощность передатчика в 10 000 раз. Но уже очень давно стало ясно, что принимаемый сигнал должен быть не столько мощным, сколько заметным на фоне различных шумов. Снижение шумов также было проблемой. Однако заметность удалось обеспечить, усложнив методы обработки принимаемых сигналов и саму их форму. Одновременно развивались такие науки, как кибернетика и теория информации, сыгравшие важную роль в решении радиолокационных проблем. В частности, было введено понятие сигнала, что позволило абстрагироваться от физических характеристик и решать задачу чисто математическими методами.

ЗА ГОРИЗОНТОМ

Радиоволны коротковолновых диапазонов, которые используются для обычной радиолокации, не могут огибать кривизну земной поверхности из-за дифракции. Их дальность ограничена так называемым радиогоризонтом. Для радара, установленного на десятиметровой высоте, радиогоризонт для обнаружения цели на поверхности земли составляет 13 км. Если цель находится достаточно высоко, радар обнаружит ее на расстоянии 26 км. Такие радары называют надгоризонтными. Однако существуют и так называемые загоризонтные радары, способные обнаружить цель, находящуюся в тысячах километрах. Они используют такое явление как отражение радиоволн от ионосферы. Загоризонтные радиолокационные станции были созданы как часть системы оповещения о ракетном нападении и играют важнейшую роль в обороне.



СТЕЛС

Борьба с радиобнаружением объектов привела к развитию технологий, посредством которых уменьшают мощность сигнала, отраженного от объекта. Они получили название стелс-технологий. Они борются не только с радиоволнами, но и с другими видами излучений. Защита включает и особые поглощающие покрытия, и придание летающей машине такой формы, благодаря которой падающая волна отражается в другом направлении и не попадает обратно к радару. Однако можно вызвать значительное поглощение только сантиметровых радиоволн, с дециметровыми дело обстоит гораздо хуже. Полностью поглотить любое радиозлучение, падающее на объект под произвольным углом, не позволяют современные технологии. А сделать объект невидимым или хотя бы малозаметным для метровых волн, чья длина сравнима с его размерами, изменив его форму, невозможно в принципе. Тем не менее работа над самолетами-невидимками продолжается, а системы ПВО находят новые способы для их обнаружения.



СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ, ИЛИ САМАЯ ЗНАМЕНИТАЯ ФОРМУЛА ФИЗИКИ

Специальная теория относительности, или СТО, описывает четырехмерное пространство-время и законы движения при скоростях, меньших скорости света в вакууме, в том числе близких к ней. Поэтому классическая механика Ньютона является частным случаем и приближением СТО для низких скоростей. Отклонения протекания физических процессов от законов классической механики — это релятивистские эффекты, а скорости, при которых они становятся существенными, — релятивистские скорости.

Предпосылкой к созданию теории относительности явилось развитие электродинамики. В электродинамике Максвелла скорость распространения электромагнитных волн в вакууме не зависит от скоростей движения как источника этих волн, так и наблюдателя, и равна скорости света. А это противоречит классической механике. Она выполняется лишь для скоростей, далеких от скорости света (около 300 000 км/с), для размеров, которые значительно превышают размеры атомов и молекул, и тогда, когда скорость распространения гравитации является бесконечной.

Центральное место в СТО занимают так называемые преобразования Лоренца. Их разработал голландский физик Хендрик Антон Лоренц. С их помощью можно преобразовывать пространственно-временные

координаты событий при переходе между инерциальными системами отсчета, которые движутся относительно друг друга прямолинейно и равномерно. Однако к полной и правильной форме эти уравнения привел французский математик Анри Пуанкаре. Он и назвал их преобразованиями Лоренца. Произошло это в 1904 г.

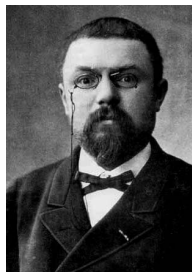
В 1905 г. Альберт Эйнштейн опубликовал статью «К электродинамике движущихся тел».



Мемориал Альберту Эйнштейну в Вашингтоне.

ДВА ОБЛАКА НА ГОРИЗОНТЕ ФИЗИКИ

В 1900 г. Уильям Томпсон, лорд Кельвин, сказал, что здание физики уже построено, но его омрачают два облака. Первое заключается в том, что скорость света постоянна и не зависит от движения его источника. Второе же — это расхождение между теоретическими и экспериментальными данными при изучении теплового равновесия между нагретым телом и окружающей средой. Из первого облака выросла теория относительности, из второго — квантовая механика. Часто пишут, что Кельвин говорил о маленьких облачках, но в оригинальном тексте упоминаются именно облака или тучи. Так что Кельвин относился к этим проблемам серьезно, хотя пытался разрешить их с помощью классической науки.



Анри Пуанкаре (1854—1912), французский математик и физик, создатель математических основ для СТО.

Он предположил, что физические процессы, в том числе и скорость света, не зависят от скорости наблюдателя. В СТО не предполагается, что время является общим для различных систем. В этом состоит основное отличие аксиоматики СТО от классической механики, в которой постулируется существование единого (абсолютного) времени для всех систем отсчета. Система отсчета представляет собой некоторое материальное тело, выбираемое в качестве начала этой системы, способ определения положения объектов относительно начала системы отсчета и способ измерения времени. Обычно различают системы отсчета и системы координат. Добавление процедуры измерения времени к системе координат «превращает» ее в систему отсчета.

Эйнштейн объяснил, как следует интерпретировать движения между различными инерциальными системами отсчета, то есть объектами, которые движутся относительно друг друга с постоянной скоростью. При этом ни один из них не принимается как абсолютная система отсчета.

Возьмем, например, два корабля. Один из них движется, другой неподвижен относительно первого. Человек в движущемся корабле направляет луч света вертикально в потолок. Для человека, который находится в неподвижном корабле, свет будет направлен по диагонали и пройдет большее расстояние, пока не отразится от потолка. Следовательно, и время для него окажется другим.

Специальная теория относительности показывает также, что масса тела увеличи-

вается с приближением к скорости света. А чем больше масса, тем большее ускорение требуется придать телу, чтобы оно продолжало двигаться. Если достигается скорость света, то масса тела становится бесконечной, как и его энергия.

Отсюда Альберт Эйнштейн вывел свою знаменитую формулу:

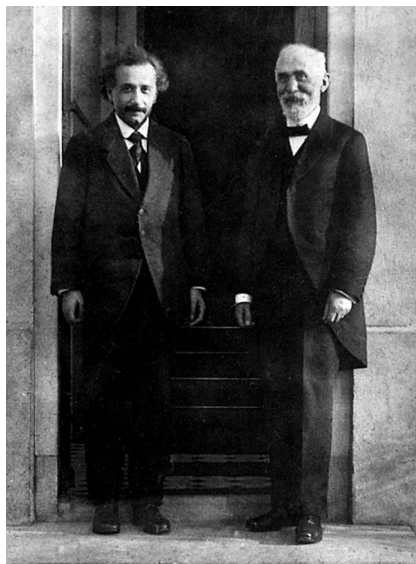
$$E = mc^2,$$

где E — энергия, m — масса, c — скорость света.

Специальная теория относительности, объединив энергию и массу, расширила современную физику, в частности физику элементарных частиц, и дала многое для развития науки.

ЭЙНШТЕЙН И ЛОРЕНЦ

Лоренц, осознавая свои и Пуанкаре заслуги, признавал приоритет Эйнштейна. Заслуга Эйнштейна, по его словам, заключалась в том, что именно он впервые высказал принцип относительности в виде строго и точно действующего закона. При этом Лоренц признавал существование эфира и говорил, что отказ или принятие теории эфира — дело личного вкуса.



Альберт Эйнштейн (1879—1955)
и Хендрик Антон Лоренц (1853—1928).

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СТО

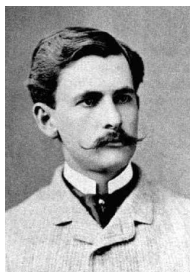
1. Принцип относительности: физические процессы протекают одинаково в инерциальных системах отсчета, независимо от того, неподвижны ли системы или находятся в состоянии прямолинейного и равномерного движения относительно друг друга.

2. Принцип скорости света: скорость света в вакууме, измеренная в любой инерциальной системе отсчета, остается неизменной для всех наблюдателей, независимо от их скорости по отношению к источнику света.

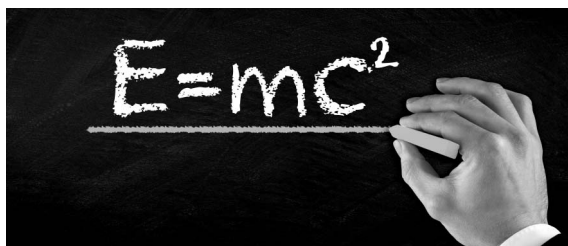
Из второго принципа следует, что движение быстрее скорости света невозможно.

КОНЕЦ ТЕОРИИ ЭФИРА

В прошлом думали, что мировое пространство заполнено эфиром — невидимой и неосязаемой субстанцией. Даже Максвелл предполагал, что электромагнитные волны распространяются в эфирной среде. Альберт Майкельсон в 1881 г., а потом в 1887 г. вместе с Эдвардом Морли провел эксперименты с целью определения смещения Земли относительно эфирного ветра. Предполагалось, что Земля, вращаясь вокруг Солнца, полгода движется относительно эфира в одном направлении, а полгода — в другом. Если это так, то эфирный ветер должен смещать показания интерферометра сначала в одну сторону, потом в другую. Однако никаких смещений обнаружено не было. Эйнштейн впоследствии писал, что «неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно световой среды» посодействовали тому, что принцип относительности был распространен на оптику и электродинамику.



Альберт Майкельсон (1852—1931), американский физик-экспериментатор.



Формула специальной теории относительности, объединяющая энергию, массу и ускорение.

ПАРАДОКС БЛИЗНЕЦОВ

Иногда парадоксом близнецов называется следующая ситуация. Существуют два брата-близнеца. Первый остается на Земле, второй улетает к далекой звезде со скоростью, близкой к скорости света. Из-за этого его часы должны сильно отстать и он постареет меньше. Но это так и есть, и никакого парадокса на самом деле здесь нет. Настоящий парадокс в другом. Оставшийся брат тоже движется вместе с Землей, следовательно, часы должны отстать у него, и сильнее постареть должен космонавт. Так, по-разному течет время или нет? И где оно течет быстрее? Однако это противоречие можно разрешить. Брат-космонавт, который возвращается, должен изменить свою скорость, двигаясь с ускорением. Значит, его система отсчета окажется неинерциальной. А согласно специальной теории относительности, только инерциальные системы оказываются равноправными. Следовательно, системы космонавта и оставшегося на Земле неравноправны, несимметричны, и время у них будет течь по-разному, причем сильнее постареет оставшийся на Земле близнец.

Парадокс близнецов легко разрешается, если подумать о системах отсчета.



ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ, ИЛИ ГРАВИТАЦИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Общая теория относительности, или ОТО, — это геометрическая теория тяготения. Она представляет собой развитие специальной теории относительности. В ней постулируется единая природа гравитационных и инерциальных сил. Гравитационные эффекты, согласно этой теории, обусловлены деформацией самого пространства-времени, связанной с присутствием энергии-массы.

Общую теорию относительности выдвинул Альберт Эйнштейн в 1915—1916 гг. Она помогла разрешить проблемы, возникшие в ньютоновской теории тяготения. Правда, уже в первой половине XIX в. астрономические расчеты движения небесных тел, основанные на классической механике, приводили к очень точным результатам. Слова «астрономическая точность» стали крылатыми. Триумфом классической механики стало открытие Нептуна «на кончике пера» в 1846 г. Дело в том, что орбита планеты Уран давала несовпадение с расчетами. Объяснить это было можно только влиянием другого крупного небесного тела, которым и оказался Нептун. Но сделавший это открытие французский астроном Урбен Леверье в те же годы столкнулся с другой проблемой, для которой объяснения в рамках классической механики не находилось.

Леверье, трудившийся в Парижской обсерватории, разработал теорию движения Меркурия. Дело в том, что планеты Солнечной системы испытывают взаимное притяжение, и потому параметры их орбит со временем меняются. Так, ось орбиты Меркурия постепенно поворачивается в сторону орбитального движения. Это приводит к смещению самой близкой к Солнцу точки орбиты — перигелия. Такое смещение называется прецессией. И Леверье обнаружил, что перигелий орбиты Меркурия смещается быстрее, чем предсказывала



Урбен Леверье (1811—1877), французский астроном, один из первооткрывателей Нептуна. Обнаружил смещение перигелия Меркурия.



Меркурий стал первой планетой, прецессия перигелия которой не объясняется с точки зрения классической теории тяготения, а лишь в рамках теории относительности. Позднее подобные «аномальные» смещения были найдены и для других небесных тел.

теория. Расчеты давали 526,7" за столетие, а наблюдения показали 565" (сегодня показано, что смещение составляет 570"). Разница невелика, но требует объяснений. Это смог сделать Эйнштейн, используя свои уравнения ОТО.

ОТО продолжает СТО, при этом расширяя принцип относительности на любые системы отсчета, в том числе неинерциальные, и вводит так называемый принцип эквивалентности. Этот принцип говорит о том,

СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ И ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ОТО

Эйнштейн рассчитал, что, согласно принципу эквивалентности, луч звезды, который проходит по касательной к периметру Солнца, должен под воздействием гравитационных сил отклоняться примерно на 1,75 угловой секунды (около одной двухтысячной градуса). Согласно законам классической механики, отклонение должно составить около 0,9 угловой секунды. Справедливость расчетов Альберта Эйнштейна, и, значит, ОТО, показал английский астроном Артур Эддингтон, который одним из первых оценил практическую важность нового открытия. В 1919 г. он возглавил экспедицию на остров Принсипи, где можно было наблюдать полное солнечное затмение. Получив множество снимков и обработав их, Эддингтон выявил отклонение луча в 1,6 угловой секунды. Так теория относительности была подтверждена экспериментально всего через несколько лет после опубликования.

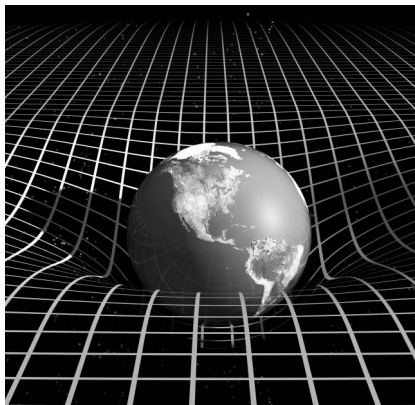


Наблюдая за солнечным затмением, физики и астрономы получают важные для науки данные.



Гравитационные волны непосредственно связаны с искривлением пространства-времени.

что силы тяготения невозможно локально отличить от возникающих при ускорении системы отсчета сил инерции. Это означает также, что тела любой массы и физической природы движутся одинаково при одинаковых начальных условиях в заданном поле тяготения. Тяготение в рамках ОТО представляет собой воздействие физической материи на геометрические свойства пространства-времени. Эти свойства, в свою очередь, оказывают влияние на различные физические процессы, в том числе на движение материальных тел. Пространство-время искривлено. Движение тел в присутствии только одних гравитационных сил осуществляется по так называемым искривленным геодезическим линиям, а не по прямым, как в обычном трехмерном пространстве классической механики. В сильном гравитацион-



Любое тело, обладающее массой, искривляет и деформирует пространство-время.

ном поле геометрия трехмерного пространства оказывается неевклидовой, а время течет медленнее, чем вне поля.

Общая теория относительности связывает с помощью выведенных Эйнштейном уравнений кривизну пространства-времени с материей, присутствующей в нем. Справедливость этой теории подтверждена многими экспериментами и явлениями, например, существованием черных дыр, красным смещением, гравитационным замедлением времени и задержкой сигналов в гравитационном поле. Разумеется, сегодня существуют и альтернативные теории тяготения, но ОТО наиболее успешная.

Она находит применение в такой практической области, как системы спутниковой навигации, и, конечно, в различных областях физики и астрономии.

КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ КАК ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ОТО

Когда электромагнитные волны исходят из областей, где имеется мощное гравитационное поле, вызванное, например, звездами или черными дырами, частота их излучения меняется. Это проявляется как сдвиг спектральных линий в красную (длинноволновую) область спектра и поэтому называется красным смещением. Если же свет приходит из областей, где гравитационное поле более слабое, наблюдается гравитационное фиолетовое смещение. Эффект красного смещения представляет собой одно из проявлений гравитационного замедления времени и служит доказательством ОТО.

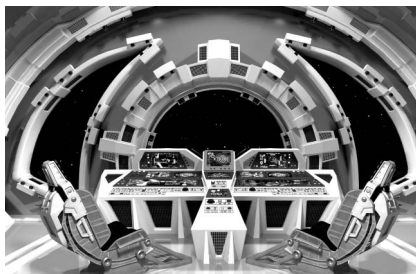
ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ В СКОРОСТНОМ ЛИФТЕ

Действие принципа эквивалентности можно ощутить, находясь в скоростном лифте. Когда он начинает трогаться вверх или тормозить при движении вниз, человека придавливает к полу, потом эффект пропадает. Это происходит потому, что лифт движется с ускорением, которое добавляется к ускорению свободного падения в неинерциальной системе отсчета. Ускорение лифта производит гравитационный эффект, увеличивая вес. Но, набрав скорость, лифт движется равномерно, без ускорения, и вес возвращается к привычному значению.



ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ДЛЯ ПОПАДАНЦА

Представьте, что вы, как это водится в фантастической литературе, внезапно перенеслись в неизвестное помещение и пытаетесь разобраться, где находитесь. У вас есть весы, небольшой шар и прибор для измерения ускорения свободного падения. Встав на весы, вы увидите, что ваш вес не изменился. Значит, сила тяжести здесь такая же, как на Земле. Уронив шар, вы обнаружите, что он достиг пола с обычным для нашей планеты ускорением свободного падения $9,81 \text{ м/с}^2$. Но не спешите делать вывод, что вы на Земле. Вы с тем же успехом можете находиться внутри космического корабля, несущегося в открытом космосе с «земным» ускорением $9,81 \text{ м/с}^2$ вдалеке от заметных гравитационных полей. То есть, находясь в замкнутой системе, вы не можете отличить силу тяготения от силы инерции, возникающей в летящем с ускорением корабле. Это и есть принцип эквивалентности ОТО.



Силы инерции в летящем корабле не отличимы от сил гравитации, если у нас нет дополнительной информации.

ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА: ЗВУК И СВЕТ В ДВИЖЕНИИ

Эффект Доплера имеет место, когда наблюдатель (или приемник) неподвижен, а источник излучения движется, либо наоборот. При этом частота и, соответственно, длина волны воспринимаемого излучения изменяются. Этот эффект назван в честь первооткрывателя — Кристиана Доплера.

ДУХОВОЙ ОРКЕСТР В ДВИЖЕНИИ: ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА

В 1845 г. эффект Доплера для звуковых волн был подтвержден в любопытных экспериментах. Первый из них провел голландский метеоролог Христофор Хенрик Дидерик Бейс-Баллот на железной дороге, соединяющей Утрехт и Амстердам. В опыте согласились участвовать музыканты-трубачи. Они погрузились в открытый вагон и начали играть. Поезд тем временем набрал огромную для того времени скорость 40 миль/ч (64 км/ч). Баллот же слушал, как меняется тон при приближении поезда к нему и удалении от него. В том же году подобный опыт провел сам Доплер. Он пригласил для участия в эксперименте уже две группы трубачей. Один оркестр находился в движущемся поезде, другой оставался на станции. И когда оркестры играли одну ноту, был слышен диссонанс. Так музыка помогла физике.



Подтвердить эффект Доплера помогли музыканты.

СПАСИТЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

Пассажиры и команды многих морских судов и самолетов, потерпевших аварии, обязаны своим спасением эффекту Доплера, точнее, международной спутниковой поисково-спасательной системе Коспас-Сарсат, где он применяется. Эта система включает шесть спутников, находящихся на низкой околополярной орбите, девять геостационарных спутников, локальную земную станцию связи, центр управления и координационно-спасательные станции. На судах и самолетах установлены аварийные радиобуи (маяки), на сигнал которых и ориентируется система. А эффект Доплера помогает определить их местоположение.



Действие системы Коспас-Сарсат.

Низкая частота

Высокая частота



Эффект Доплера проявляется при звуке сирены на движущемся автомобиле.

Австрийский физик Кристиан Доплер пришел к своему открытию, наблюдая за движением волн на воде, за звездами на небе, а также изучая распространение звука в воздухе. В 1842 г. он опубликовал статью под названием «О цветном свете двойных звезд и некоторых других звезд на небесах». Вывод ученого был таков: наблюдаемая частота волны при приближении источника к наблюдателю увеличивается, а при удалении — уменьшается. В 1846 г. он привел новые результаты, подтверждавшие теорию и учитывающие движение наблюдателя. Таким образом, ученый обосновал теоретически, что частота звуковых и световых волн, которые воспринимаются наблюдателем, зависит от скорости и направления движения источника этих волн и наблюдателя относительно друг друга.

В 1848 г. французский физик Арман Физо рассчитал смещение линий в спектрах звезд и нашел еще одно подтверждение эффекта Доплера. Новое подтверждение этого эффекта для световых волн получил Герман

ПОМОЩЬ В ПУТИ

В 1957 г., когда в СССР был запущен первый в мире искусственный спутник Земли, выяснилось, что согласно эффекту Доплера частота принимаемого сигнала увеличивается при приближении спутника и уменьшается при его удалении. Поэтому, зная положение и скорость спутника, можно определить собственные координаты и скорость. Так родилась идея спутниковой навигации. Сегодня системы глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС, чья работа основана на эффекте Доплера, помогают ориентироваться в дороге, определять удобный маршрут и выяснять, где находится тот или иной объект, подключенный к любой из этих систем.



Фогель в 1871 г., наблюдая за спектральными линиями Солнца.

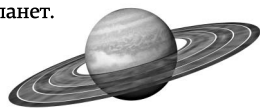
Эффект Доплера имеет место при включенных сиренах машин. Допустим, тон сирены не меняется. Если машина и наблюдатель неподвижны относительно друг друга, то он будет слышать тон, издаваемый сиреной, без изменений. Однако если машина приближается к наблюдателю, то тон, который он услышит, будет более высоким. Это произойдет из-за увеличения частоты волны. В момент, когда машина поравняется с наблюдателем, он услышит «собственный» тон сирены. Когда машина начнет удаляться, он услышит более низкий тон, так как частота волн в его восприятии уменьшится.

Эффект Доплера находит самое широкое применение в науке и технике. На доплеровских радарах вычисляется изменение частоты отраженного от объекта сигнала. Его используют при прогнозе погоды (для определения скорости движения облаков), в навигации, на дорогах, чтобы выявить водителей, превышающих скорость. В медицине эффект Доплера применяется в ультразвуковой диагностике, и часто можно услышать, как кому-то делали «доплер сосудов».

В астрономии по спектру небесных тел посредством эффекта Доплера определяют скорость и объясняют красное и фиолетовое смещения. Поэтому его применение поистине всеобъемлющее.

ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА В КОСМОСЕ

В современных теориях о возникновении и эволюции Вселенной эффект Доплера занимает очень важное место. С его помощью изучают, как изменяется скорость движения звезд относительно луча зрения, измеряют их температуру, исследуют турбулентные потоки в фотосфере, скорость вращения, траектории движения спутников, различные параметры вращения планет.

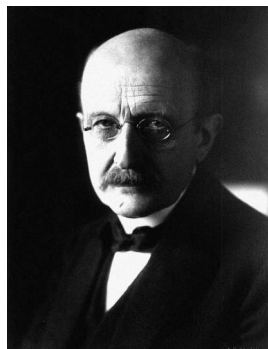


С помощью эффекта Доплера удалось изучить движение тел, составляющих кольца Сатурна, и уточнить структуру этих колец.

ПОСТОЯННАЯ ПЛАНКА И НАЧАЛО КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

Квантовая физика изучает квантово-механические и квантово-полевые системы и законы их движения. Квантовая механика устанавливает способ описания и законы движения микрочастиц. Квантовая теория поля изучает поведение квантовых систем с бесконечно большим числом степеней свободы — квантовых (или квантованных) полей. Согласно квантовой теории при движении элементарных частиц всякая энергия испускается и поглощается только определенными порциями — квантами. Ввел понятие кванта Макс Планк.

Макс Карл Эрнст Людвиг Планк (1858—1947), немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики.



Одним из двух облаков, омрачавших горизонт физики на исходе XIX в., по словам лорда Кельвина, была проблема, связанная с излучением абсолютно черного тела. Это тело поглощает любое электромагнитное тело полностью, при нагревании же оно излучает энергию — волны, которые равно распределены по всему спектру. Однако чем выше частота, тем больше накапливается волн внутри тела, а их энергия при этом растет. И тогда энергия внутри абсолютно черного тела должна накапливаться до бесконечности. Эта проблема получила название ультрафиолетовой катастрофы, поскольку спектральная плотность излучения должна возрастать

по мере того, как длина волны уменьшается и, наконец, переходит в ультрафиолетовый диапазон. Разрешить проблему сумел Макс Планк.

Изучая ее, он стремился выяснить, как взаимодействуют электромагнитные волны. Ученый сделал вывод, что излучение и поглощение энергии атомами происходит отдельными порциями — квантами, причем на отдельных волновых частотах. Один квант переносит энергию, которая вычисляется по формуле:

$$E = h\nu,$$

где ν — частота излучения, h — элементарный квант действия. Это новая универсальная физическая постоянная, позднее получившая название постоянной Планка. По расчетам Планка она составила $h = 6,548 \times 10^{-34}$ Дж \times с, современные данные дают число $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Дж \times с. Из этого

ОТ МОДЕЛИ К РЕАЛЬНОСТИ

Результаты своих исследований Планк опубликовал в 1900 г. Он вначале не придавал своим квантам физический смысл, утверждая, что это просто математическая модель. Однако пять лет спустя Альберт Эйнштейн применил модель квантования энергии излучения к созданию теории фотоэффекта. Тогда стало ясно, что кванты представляют собой физическую реальность, отражающую квантовую природу энергии. Так нередко бывает в науке, когда математические модели в дальнейшем находят свое подтверждение в природных явлениях.



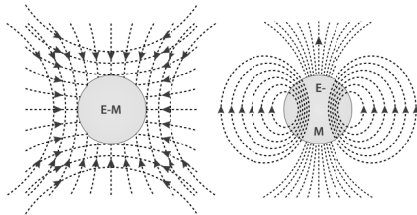
Вернер Гейзенберг (1901—1976), немецкий физик, один из основоположников квантовой механики.

следует, что любой атом способен излучать энергию в широком спектре частот, диапазон которого определяется орбитами электронов. На основе работ Планка Нильс Бор затем создал свою модель строения атома. Постоянная Планка проводит границу между макромиром, где действуют законы классической механики, и микромиром, где необходимо учитывать законы квантовой механики. Она указывает нижний предел величин, за которыми квантовые эффекты чрезвычайно важны для расчетов. Например, для песчинок они не имеют значения, так как песчинки слишком велики, чтобы квантовые эффекты играли какую-то роль при расчетах их дви-

жения. В масштабах атомов картина совсем другая. Таким образом, постоянная Планка, фигурирующая во всех уравнениях квантовой физики, определяет масштабы, для которых принцип неопределенности Гейзенберга. Принцип неопределенности сформулировал Вернер Гейзенберг. Поскольку частица является в то же время волной, то измерить с одинаковой точностью ее скорость и координаты нельзя. Чем с большей точностью определяют координаты, тем с меньшей определяется скорость, и наоборот. Этот принцип — один из основных в квантовой физике.

БЕСКОНЕЧНАЯ СВОБОДА

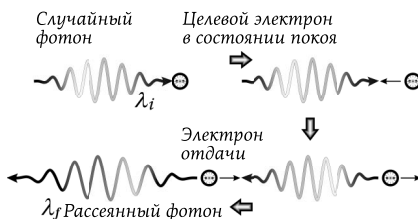
Квантовая теория поля лежит в основе таких научных дисциплин, как физика высоких энергий, физика элементарных частиц и физика конденсированного состояния. Именно на квантовой теории поля построена Стандартная модель — единственная подтвержденная экспериментами теория, которая описывает и предсказывает поведение элементарных частиц при высоких энергиях (существенно превышающих энергию покоя).



Квантовые поля — системы с бесконечным числом степеней свободы.

МЕНЯЕТСЯ ЛИ СОБЫТИЕ, КОГДА ЗА НИМ НАБЛЮДАЮТ?

Иногда принцип неопределенности формулируют так: наблюдение за событием меняет само событие. Действительно, когда измеряют электрон, запуская в него фотон, координаты электрона смещаются. А когда в макромире узнают, к примеру, расстояние между двумя домами, то воздействием измерительного прибора можно пренебречь. Однако принцип неопределенности говорит все же о другом — о параллельном измерении двух параметров и о том, как измерение одного параметра влияет на измерение другого.



Взаимодействие фотона и электрона.

КВАНТОВЫЙ МИКРОМИР

Объекты квантового микромира описываются по-другому, чем объекты обычного ньютоновского макромира. Частицы при этом становятся подобны отдельным приливным волнам, которые распространяются в пространстве. И для их описания используются не скорость и координаты, а так называемая волновая функция.



УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА И РАЗВИТИЕ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Уравнение Шрёдингера — это волновое уравнение, в дифференциальной форме описывающее корпускулярно-волновую природу квантовых частиц. Оно имеет в квантовой механике такое же значение, как в классической — уравнение второго закона Ньютона или в электродинамике — уравнения Максвелла. Сформулировал его Эрвин Шрёдингер в 1925 г.

Шрёдингер не вывел свое уравнение математически, а постулировал его, проводя аналогию с классической оптикой и обобщив экспериментальные данные. Это открытие он смог сделать после того, как французский физик Луи де Бройль предположил, что волновые свойства присущи не только свету, но и всем материальным телам — и клетке, и камню, и столу, и человеку. Но в макромире, нашем привычном мире, эти свойства не видны явно. А вот в микромире они проявляются очень ярко.

Электроны и другие элементарные частицы ведут себя как волны на морской поверхности. Пик волны — это место, где частица находится с наибольшей вероятностью. Именно эти пики и позволяют определить уравнение Шрёдингера.

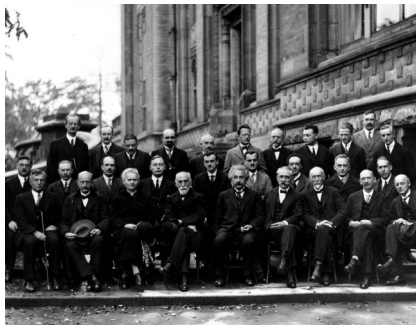
Таким образом, волновая функция распределения вероятности, которая обозначается греческой буквой ψ (пси) представляет собой решение предложенного ученым дифференциального уравнения, которое может быть описано следующей формулой:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hat{H} \psi,$$

где \hbar — редуцированная постоянная Планка, i — мнимая единица, t — время, \hat{H} — гамильтониан — оператор полной энергии системы, то есть линейное отображение, которое действует на волновую функцию.

ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ

Луи де Бройлю (1892—1987) принадлежит гипотеза о волновых свойствах материальных частиц. От него пошло понятие «волны де Бройля», или «волны материи». Это волны, которые определяют плотность вероятности обнаружения объекта в заданной точке. Так было положено начало волновой механике.



С 1911 г. в Брюсселе проводятся Сольвеевские конгрессы — международные конференции по обсуждению фундаментальных проблем физики и химии.

На Сольвеевском конгрессе 1927 г. присутствовали Альберт Эйнштейн, Макс Планк, Мария Кюри, Луи де Бройль (третий слева во втором ряду).



Эрвин Шрёдингер (1887—1961), австрийский физик-теоретик. Является одним из основоположников квантовой механики.

Теорию Шрёдингера, основанную на этом уравнении, называют волновой теорией, и она сегодня повсеместно применяется в теоретической физике. Кроме того, на основе его уравнения созданы другие, позволяющие описывать более широкий спектр явлений, касающихся движения микрочастиц.

МАТРИЧНАЯ И ВОЛНОВАЯ МЕХАНИКА

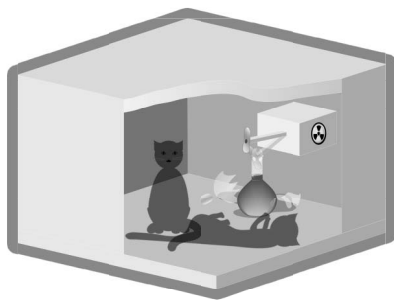
В 1923 г. Нильс Бор ввел так называемый принцип соответствия. Он гласит, что поведение квантовомеханической системы стремится к классической физике в пределе больших квантовых чисел. Квантовое число — это значение какой-либо квантованной переменной микроскопического объекта, которое характеризует его состояние. Таким образом, сложилась так называемая старая квантовая теория. Но тогда же немецкий физик Макс Борн заявил, что квантовые явления должны описывать не классическая, а квантовая механика. Макс Борн, Вернер Гейзенберг и Паскуаль Йордан в 1925 г. создали матричную механику. В ней характеризующие частицу физические величины описываются изменяющимися во времени матрицами. Матричная механика полностью эквивалентна волновой механике Шрёдингера. Однако сегодня в основном применяется версия Шрёдингера, потому что его уравнение менее громоздкое и более удобное для преподавания.



Макс Борн
(1882—1970),
немецкий
физик.
Является одним
из осново-
положников
квантовой
механики.

КОТ ШРЁДИНГЕРА

Эрвин Шрёдингер поставил мысленный эксперимент с котом, чтобы доказать неполноту квантовой теории при переходе к макроскопическим системам. Эксперимент состоит в следующем. Кота помещают в ящик, где имеются атомное ядро и емкость с ядовитым газом. Если ядро распадается, емкость открывается и кот погибает. Вероятность распада ядра — 50%. Согласно квантовой механике имеет место суперпозиция состояний. И ядро (и кот) находится в двух состояниях одновременно. Ядро и распалось, и не распалось, кот и жив, и мертв. Но для макроскопического объекта — кота — такая суперпозиция невозможна. Определенность наступает при наблюдении за событием.



Кот одновременно и живой, и мертвый.

ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ

Принцип дополнительности сформулировал Нильс Бор в 1927 г. В соответствии с ним полное описание квантовомеханических явлений требует применения двух взаимоисключающих, то есть дополнительных наборов классических понятий. Так, в квантовой механике дополнительными являются энергетически-импульсная и пространственно-временная картины. Физик Вольфганг Паули предлагал называть квантовую механику теорией дополнительности, настолько важным оказался этот принцип для нее.

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ: ВСЕ ЧАСТИЦЫ В ОДНОЙ ТАБЛИЦЕ

Микрообъекты, меньшие, чем ядро атома, называют элементарными частицами. У некоторых элементарных частиц есть внутренняя структура — это, например, протоны и нейтроны. Они называются составными, однако разделить их на части невозможно. Говорят даже, что в таких масштабах частицы не состоят из других частиц, а превращаются в них. Другие элементарные частицы (электрон, нейтрино, кварки и т. д.) на данный момент считаются бесструктурными первичными фундаментальными частицами. Элементарным частицам посвящены целые теории.

Существуют различные классификации элементарных частиц. Одна из них основана на спинах. Спин — это собственный момент импульса частицы. Момент импульса характеризует количество вращательного движения. Он задает направление частицы, как бы делает ее ориентированной так же, как ось волчка задает для волчка выделенное направление. Спин бывает целым и полуцелым. Упрощенно говоря, чтобы

ЛЕПТОНЫ

К классу лептонов (от слова *leptos*, то есть «маленький») относятся электрон и другие частицы, которые не принимают участия во внутриядерных взаимодействиях. К настоящему времени известно шесть таких частиц. Это родственные электрону мюон и тау-частицы, которые массивнее его, а также парные каждой из вышеназванных частиц три разновидности нейтрино — электрически нейтральные частицы с нулевой или близкой к нулю массой.

ЧАСТИЦЫ: ИЗ ЧЕГО СОСТОИТ ЯДРО

Адроны (от слова *hadros*, то есть «большой») — это частицы, которые существуют внутри атомного ядра. Протон и нейтрон — наиболее известные из них, но существуют сотни других, нестабильных и быстро распадающихся. Впрочем, нейтрон тоже нестабилен. Все эти частицы подразделяются, в свою очередь, на барионы и мезоны. Если среди продуктов распада частицы есть протон, то она называется барионом (от слова *barus* — «тяжелый»), если протона нет, то она называется мезоном (от слова *mesos* — «средний»).

частица с целым спином вернула свое первоначальное состояние, ей надо обернуться вокруг своей оси один раз. Для частицы с полуцелым спином для возвращения в первоначальное состояние нужно обернуться вокруг своей оси дважды. Частицы с целым спином называются бозонами. К ним относятся, например, фотон, глюон, мезоны и бозон Хиггса. Частицы с полуцелым спином называются фермионами. К ним относятся электрон, протон, нейтрон и нейтрино. Отличают также античастицы. У античастицы та же масса и тот же спин, что у частицы-двойника, но другие параметры, в том числе и электрический заряд, отличаются.

Всего на сегодня известно больше 350 элементарных частиц. Стабильными из них являются фотон, электронное и мюонное нейтрино, протон, электрон и их античастицы. Остальным присущ самопроизвольный распад за время от долей секунды до 1000 секунд. Однако этого мизерного времени хватает частицам для перемещения в пределах границ ядра.

Поскольку адронов очень много, для упрощения картины возникла так называемая кварковая модель, согласно которой адроны состоят из «еще более элементарных частиц». Эти частицы — кварки. Они имеют дробный электрический заряд: $1/3$ или $2/3$ заряда электрона или протона. В свободном состоянии их вооб-

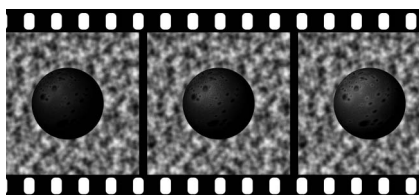
КАК ИЗУЧАЮТ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Главные методы изучения элементарных частиц заключаются в следующем: ядро-мишень бомбардируют мощным пучком протонов или электронов. В результате столкновений образуются осколки ядра, разлетающиеся в разные стороны. За ними и ведется наблюдение.

ще обнаружить невозможно, их свойства и сам факт существования определяются адронами, в чей состав они входят.

И адроны, и лептоны представляют собой строительный материал атомов. Есть еще так называемые калибровочные бозоны, к числу которых относится и глюоны. Они удерживают элементарные частицы вместе.

Современная теория строения и взаимодействия элементарных частиц называется стандартной моделью. Согласно ей, элементарные кирпичики материи — шесть видов лептонов и шесть сортов (как говорят, аро-



Считается, что кварки бывают цветными, но на самом деле эти цвета условные и не имеют никакого отношения к обычным краскам. Тем более что кроме синих, зеленых и красных кварков существуют еще антисиние, антизеленые и антикрасные. Кварки меняют цвет, когда обмениваются другими элементарными частицами — глюонами.

матов) кварков. Все эти частицы являются фермионами. Многочисленные адроны — составные частицы, участвующие в сильном взаимодействии, — составлены из кварков в разных комбинациях. Каждый сорт кварка состоит из трех типов. Кроме того, есть еще и антикварки, как и другие античастицы. Поэтому стандартная модель может быть расширена до 61 частицы.

Три типа сил действуют между фундаментальными фермионами — электромагнитные, слабые и сильные. Сильное взаимодействие связывает кварки в адроны.

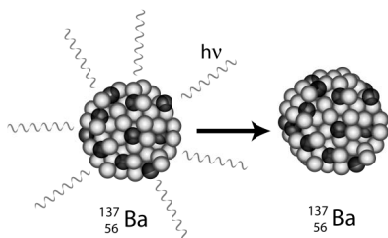
«ТРИ КВАРКА ДЛЯ МАСТЕРА МАРКА!»

Слово «кварк» физик Марри Гелл-Манн взял из романа Джеймса Джойса «Поминки по Финнегану», где чайки кричат: «Три кварка для мастера Марка!» Считается, что слово «кварк» здесь просто звукоподражание птичьему крику. Но quark по-немецки означает «творог» или «чепуха». И поэтому, по другой версии, Джойс, будучи в Австрии, услышал рекламный слоган «Drei Mark für Musterquark» («Три марки за образцовый творог»), перефразировал его и вставил в роман. А сами частицы в физике потом тоже получили необычные имена. Например, есть странный, прелестный и очарованный кварки.

| | | | | | |
|---------------------------------|--|--|--|--|---|
| К в а р к и | <div>Верхний Масса 2,3 MeV/c² Заряд ⅔ Спин ½ u</div> | <div>Очарованный 1,275 GeV/c² ⅔ ½ c</div> | <div>Истинный 173,07 GeV/c² ⅔ ½ t</div> | <div>Глюон 0 0 1 g</div> | <div>Бозон Хиггса 126 GeV/c² 0 0 0 H</div> |
| | <div>Нижний 4,8 MeV/c² -⅓ ½ d</div> | <div>Странный 95 MeV/c² -⅓ ½ s</div> | <div>Прелестный 4,18 GeV/c² -⅓ ½ b</div> | <div>Фотон 0 0 1 γ</div> | Калибровочные бозоны |
| | | | | | |
| Л е п т о н ы | <div>Электрон 0,511 MeV/c² -1 ½ e</div> | <div>Мюон 105,7 MeV/c² -1 ½ μ</div> | <div>Тау 1,777 GeV/c² -1 ½ τ</div> | <div>X-бозон 91,2 GeV/c² 0 1 Z</div> | |
| | <div>Электронное нейтрино <2,2 eV/c² 0 ½ ν_e</div> | <div>Мюонное нейтрино <0,17 MeV/c² 0 ½ ν_μ</div> | <div>Тау-нейтрино <15,5 MeV/c² 0 ½ ν_τ</div> | <div>W-бозон 80,4 GeV/c² ±1 1 W</div> | Стандартная модель элементарных частиц. |
| | | | | | |

ЭФФЕКТ ВАВИЛОВА—ЧЕРЕНКОВА

Излучение Вавилова—Черенкова, или черенковское излучение, вызывается заряженной частицей, которая движется в прозрачной среде. Скорость этой частицы должна превышать фазовую скорость распространения света в данной среде. Этот эффект применяют для регистрации релятивистских частиц и определения их скоростей в физике высоких энергий.



Гамма-излучение, исследование которого привело к открытию черенковского света.

В 1934 г. молодой советский физик Павел Алексеевич Черенков работал в лаборатории, которую возглавлял известный ученый Сергей Иванович Вавилов. Черенков исследовал, как гамма-излучение влияет на люминесценцию жидкостей. Во время одного из экспериментов он обнаружил свет неизвестной природы.

Вавилов и Черенков взялись за его изучение. Вскоре удалось выяснить, что свечение это можно наблюдать у прозрачных чистых жидкостей и оно во всех случаях имеет го-



Физический институт Российской академии наук (ФИАН), в стенах которого было сделано немало выдающихся открытий.

лубоватый цвет. Причем и цвет, и яркость мало зависят от химического состава жидкости. Этот свет не являлся люминесценцией, потому что, в отличие от нее, он не ослаблялся ни при изменении температуры, ни при внесении в состав жидкости каких-либо примесей. Кроме того, у него имела поляризация и он был направлен по ходу движения частицы. Вавилов пришел к выводу, что этот свет излучают быстрые электроны. Действительно, оказалось, что эти электроны выбиваются из среды гамма-излучением и движутся со скоростью большей, чем фазовая скорость света в среде.

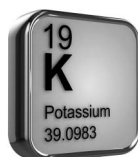
Теоретическое объяснение этому эффекту дали в 1937 г. Игорь Евгеньевич Тамм и Илья Михайлович Франк.

В 1958 г. Черенков, Тамм и Франк получили Нобелевскую премию по физике «за открытие и истолкование эффекта Черенкова» (Вавилов к тому времени уже умер, а Нобелевскую премию посмертно не дают).

Действительно, хотя скорость света в вакууме преодолеть, согласно теории относительности, невозможно, в среде его скорость

СВЕТ В ГЛУБИНЕ

Считается, что в океане на большой глубине совершенно темно, потому что туда не доходит свет с поверхности. Но это не так. В океанской воде имеются радиоактивные изотопы, в том числе калий-40. Эти изотопы постепенно распадаются, и их распад приводит к появлению излучения Вавилова—Черенкова. Поэтому на морском дне все-таки есть свет. У некоторых глубоководных видов животных очень большие глаза и острое зрение, которое, по одной из версий, помогает им различать черенковский свет, а также люминесценцию некоторых организмов.

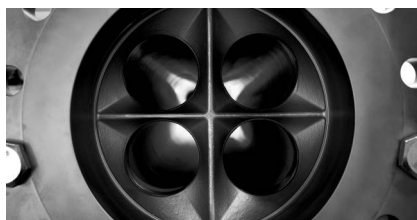


Один из изотопов калия способствует подводному свечению.

ниже. В воде она составляет примерно 60—70% от скорости света в вакууме. И электрон,двигающийся в воде, вполне может такую скорость превысить. Это явление аналогично волнам Гюйгенса. Они движутся со скоростью света концентрическими кругами, и каждая новая волна испускается из следующей точки на пути движения частицы. Располагающиеся вдоль траектории движения частицы атомы среды поляризуются.

КАК УВИДЕТЬ ЧЕРЕНКОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Эффект Вавилова—Черенкова можно наблюдать невооруженным взглядом на небольших ядерных реакторах. В результате ядерной реакции выделяются быстрые частицы, которые создают черенковское излучение и окружают сердечник установки голубоватым свечением.



Часть ядерного реактора.

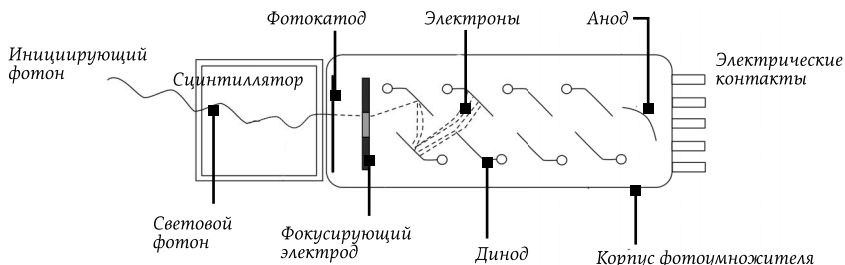
Таким образом, частица, которая проходит через вещество со скоростью, большей, чем скорость света в среде, создает черенковский свет, что напоминает звуковой удар при сверхзвуковом полете, когда самолет обгоняет шум собственных двигателей. Волновой фронт излучения частицы образует конус. Частица является его вершиной, а ее траектория — его осью. Нечто подобное получается при движении катера по воде. При этом образуется волновой фронт в виде конуса с катером в его вершине. Угол, образуемый вершиной конуса, обусловлен скоростью движения частицы и скоростью света в среде. Следовательно, определив этот угол, можно рассчитать скорость частицы. Поэтому в физике элементарных частиц черенковское излучение используется достаточно широко.

ЧТО ТАКОЕ ФАЗОВАЯ СКОРОСТЬ

Полная фаза колебаний — это аргумент периодической функции, которая описывает колебательный или волновой процесс. Фазовая скорость — это скорость перемещения точки, которая движется вдоль заданного направления и обладает постоянной фазой колебательного движения в пространстве.

ФОТОУМНОЖИТЕЛЬ ДЛЯ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА

Для исследования элементарных частиц используют черенковский детектор. Энергия частицы, которая преобразуется в черенковское излучение, невелика по сравнению с энергией, затраченной на ионизацию и возбуждение атомов среды. При этом на один сантиметр выделяется от нескольких единиц до нескольких сотен фотонов. Поэтому черенковское излучение регистрируют с помощью фотоумножителей, то есть приборов, которые преобразуют энергию излучения в электрический сигнал.



Фотоумножитель с осциллятором.

РАДИОАКТИВНОСТЬ, ИЛИ ЯДРА, РОЖДАЮЩИЕ ЧАСТИЦЫ

Радиоактивным распадом называется спонтанное изменение строения нестабильных атомных ядер. Происходит это, когда ядра испускают элементарные частицы, гамма-кванты или собственные фрагменты.

Антуан Анри Беккерель (1852—1908), французский физик, первооткрыватель радиоактивности.



Изображение фотопластинки Беккереля, засвеченной излучением солей урана. На ней можно различить тень металлического мальтийского креста, который был помещен между пластинкой и солью урана.



ПЬЕР И МАРИЯ КЮРИ

Мария Склодовская-Кюри — французский физик и химик польского происхождения. В возрасте 24 лет приехала учиться во Францию, где достигла выдающихся успехов в науке. Проявила себя не только как ученый экспериментатор, но и как общественный деятель и педагог. Основала в Париже и Варшаве институты Кюри. Первый ученый, дважды удостоенный Нобелевской премии (по физике — в 1903 г., по химии — в 1911 г.). Ее супруг Пьер Кюри в молодости прославился открытием пьезоэлектрического эффекта, затем вместе с женой сделал уникальные открытия в области изучения радиоактивности. Их старшая дочь Ирен Жолио-Кюри также стала физиком и нобелевским лауреатом. Младшая дочь Ева Кюри Лабуисс, журналистка, пианистка, музыкальный критик и общественный деятель, автор биографии матери, прожила более 100 лет.



Пьер Кюри (1859—1906) и Мария Кюри (1867—1934).

Сегодня известно, что радиоактивными являются все химические элементы, чей порядковый номер больше 82, то есть начиная с висмута. Также у некоторых более легких элементов нет стабильных изотопов, а у некоторых одни природные изотопы стабильны, а другие нет.

Радиоактивность бывает естественной и искусственной. При естественной радиоактивности распадаются атомные ядра, существующие в природе, а при искусственной — ядра, которые получены искусственным путем посредством соответствующих ядерных реакций.

Радиоактивность в 1896 г. открыл французский физик Анри Беккерель. Он вы-

яснил, что соли урана, который широко использовали для изготовления цветных стекол, дают излучение, не являющееся рентгеновским, и засвечиваются на фотопластинке, даже не будучи предварительно освещенными солнечными лучами.

Своим открытием Беккерель поделился с физиками Пьером и Марией Кюри. В 1898 г. супруги Кюри обнаружили радиоактивность тория, позднее открыли радиоактивные элементы полоний, названный в честь родины Марии, а также радий, который получил большую известность, чем полоний. Вместе с Беккерелем они были удостоены Нобелевской премии по физике в 1903 г. Ученые не жалели себя, изучая радиоактив-

ность. Впоследствии Мария Кюри умерла от апластической анемии, которая представляет собой хроническую лучевую болезнь.

Существует несколько видов радиоактивного распада. Они неодинаково влияют на человека и по-разному опасны.

Альфа-распад — это самопроизвольный распад ядра атома на дочернее ядро и альфа-частицу. Альфа-частица (α -частица) — положительно заряженная частица, которую образует ядро атома гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов.

Бета-минус-распад (β^- -распад) — это радиоактивный распад, сопровождающийся испусканием из ядра электрона и электронного антинейтрино.

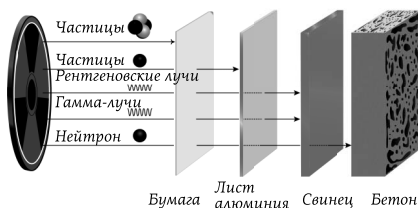
Бета-плюс-распад (β^+ -распад) — это радиоактивный распад, при котором из ядра испускаются позитрон (античастица электрона) и электронное нейтрино.

Гамма-излучение (γ -лучи) — это разновидность электромагнитного излучения с очень малой длиной волны, у которого волновые свойства поэтому выражены слабо, а корпускулярные хорошо. Оно относится к ионизирующим излучениям, то есть при взаимодействии с веществом может приводить к образованию ионов. Гамма-квантами являются фотоны с высокой энергией.

Рентгеновское излучение возникает при торможении быстрых заряженных частиц (электронов, протонов и пр.), а также в результате процессов, происходящих внутри электронных оболочек атомов. Его составляют электромагнитные волны с длиной от 10^{-7} до 10^{-12} м, что соответствует энергии квантов от 20 эВ до 1 МэВ.

РАДИАЦИЯ МОЖЕТ БЫТЬ ЦЕЛЕБНОЙ

Радиация бывает и целительной. Так, при помощи лучевой терапии врачи успешно борются со злокачественными опухолями. Поскольку ионизирующее излучение поражает в первую очередь активно делящиеся клетки, а опухолевые клетки относятся к такому, они под действием лучей погибают первыми. Современные методы лучевой терапии позволяют осуществлять фокусировку излучения на опухолях и щадить здоровые ткани.



Типы радиоактивного излучения и проникаемость для них различных материалов.

В настоящее время кроме альфа-, бета- и гамма-распадов обнаружены распады с испусканием нейтрона, протона (а также двух протонов), кластерная радиоактивность, спонтанное деление.

В воздействии радиации на организм человека следует различать поглощенную дозу, эффективную дозу и эквивалентную дозу.

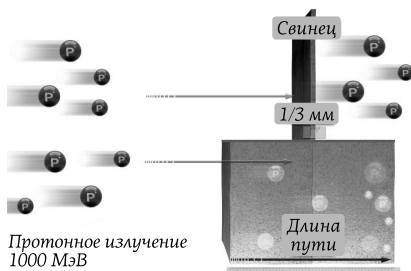
Поглощенная доза — это энергия излучения, которая поглощена единицей массы. Она выражается в джоулях на кг (Дж/кг), но имеет при этом название грей (Гр).

Эффективная и эквивалентная дозы выражаются в зивертах (Зв).

Эквивалентная доза характеризует биологический эффект облучения организма.

ИЗЛУЧЕНИЕ ПРОТОНОВ

Протонное излучение — поток положительно заряженных ядерных частиц — протонов. Его источники — ускорители заряженных частиц. Способность протонов проникать через слои вещества зависит от энергии пучка протонов и свойств вещества. Так, в свинце протоны с энергией 10 МэВ проходят около 1/3 мм, а с энергией 1000 МэВ — немного меньше 60 см.



Протоны и их путь.



Исследователь со счетчиком Гейгера определяет уровень радиации в зараженной зоне.

Чтобы получить эквивалентную дозу, надо умножить поглощенную дозу на взвешивающий коэффициент данного вида излучения. Дело в том, что степень поражения органа или ткани зависит от типа излучения. Так, 1 Гр альфа-излучения в 20 раз опаснее, чем 1 Гр бета- или гамма-излучения. Взвешивающий коэффициент для гамма-излучения принимают равным единице, по-

ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ КАТАСТРОФА

26 апреля 1986 г. на Чернобыльской АЭС, расположенной в 83 км от Киева, случилась крупнейшая в мире ядерная авария, разрушившая четвертый энергоблок. Произошел взрыв реактора, в результате которого в окружающую среду было выброшено множество радиоактивных веществ. Заражению подверглись огромные территории, радиация распространилась по всей Европе и была зарегистрирована во всем мире. Во время самой катастрофы погибли 2 человека, за первые месяцы от лучевой болезни умерли 31 человек, среди которых были пожарные, предотвратившие катастрофу еще больших масштабов. Множество спасателей, участвовавших в ликвидации последствий произошедшей катастрофы, в дальнейшем перенесли лучевую болезнь, и многие умерли от ее осложнений.



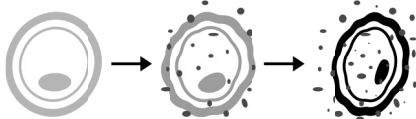
Саркофаг — изоляционное укрытие над четвертым реактором Чернобыльской АЭС, где произошла катастрофа 26 апреля 1986 г. После этого значительные территории оказались заражены.

этому 1 Зв при таком виде излучения равен 1 Гр. А для альфа-излучения он уже в 20 раз больше.

Эффективная доза учитывает различную чувствительность органов и тканей к излучению. Так, костный мозг гораздо более чувствителен, чем мышечная ткань. И чтобы получить эффективную дозу, берут эквивалентную дозу и умножают на взвешивающий тканевый коэффициент, зависящий

ВРЕД ОТ РАДИАЦИИ

Ионизирующее излучение — это совокупность различных видов микрочастиц и физических полей, обладающих способностью ионизировать вещество, то есть образовывать в нем электрически заряженные частицы — ионы. Поскольку живая клетка на 60–70% состоит из воды, когда поток ионизирующего излучения проникает в организм, он прежде всего взаимодействует с водой, подвергая ее радиационному разложению — радиолizu, выбивая из нее электроны. Образуются свободные радикалы — соединения, которые имеют высокую химическую активность. Продукты радиолizu воздействуют на белки и нуклеиновые кислоты. Клетки могут погибнуть или переродиться. При постепенных сильных превышениях нормы могут развиваться онкологические заболевания. Было показано также, что хроническое облучение при дозе 1 Гр, полученной в течение 30 лет, вызывает появление около 2000 случаев генетических заболеваний на каждый миллион новорожденных среди детей тех, кто был подвергнут облучению.



Нормальная клетка Клетка, атакованная свободными радикалами Клетка, подвергшаяся окислительному стрессу

Радиоактивное излучение вызывает повреждения в молекуле ДНК, отвечающей за синтез белка, наследственность и нормальное функционирование организма.

СЧЕТЧИК ГЕЙГЕРА

Счетчик Гейгера, или счетчик Гейгера—Мюллера, представляет собой газоразрядный прибор, с помощью которого производится автоматический подсчет ионизирующих частиц, попавших в него.

Принцип работы подобного прибора впервые предложил Ханс Гейгер в 1908 г. Вальтер Мюллер, работая под руководством Гейгера, уже в 1928 г. изобрел несколько версий счетчика, которые регистрировали различные типы излучений и в зависимости от этого имели конструктивные отличия.

Цилиндрический счетчик Гейгера—Мюллера включает металлическую или покрытую изнутри металлом стеклянную трубку (катод) и натянутую по оси цилиндра тонкую металлическую нить (анод). Трубку заполняют разреженным газом, чаще всего аргоном или неоном. Между катодом и анодом создается напряжение от сотен до тысяч вольт. Оно обусловлено геометрическими характеристиками материала электродов и свойствами газовой среды. В большинстве счетчиков Гейгера напряжение — 400 В. Электроны, которые двигаются в газе и сталкиваются с его атомами, создают положительные ионы и свободные электроны. Электрическое поле между катодом и анодом ускоряет электроны до высоких энергий и вызывает ударную ионизацию. Если напряжение достаточно велико, возникают вторичные лавины, поддерживающие самостоятельный разряд, и сила тока, проходящего через счетчик, резко увеличивается.



Счетчик Гейгера служит для измерения радиоактивности.

от вклада, который составляют повреждения того или иного органа в общий ущерб, наносимый организму радиацией.

Зиверт — это очень много, поэтому эквивалентную и эффективную дозы принято измерять в миллизивертах (мЗв).

Нормальный радиационный фон — 1—10 мЗв в год.

При флюорографии мы получаем около 0,5 мЗв.

Час полета на самолете дает нам 0,1 мЗв.

При дозе 50 мЗв в год появляется не-

малый риск заболевания раком, а однократная доза в 300 мЗв может вызвать лучевую болезнь. Максимальный уровень радиации, который был зафиксирован у реактора атомной станции «Фукусима-1», составлял 1000 мЗв/ч. Таким образом, достаточно было провести 18 мин рядом с реактором, чтобы заболеть лучевой болезнью.

Радиоактивные свойства элементов, тем не менее, нашли широкое применение в науке, технике и медицине.

ЖИЗНЬ С РАДИАЦИЕЙ

Люди постоянно подвергаются воздействию естественной радиоактивности. В некоторых странах и регионах радиационный фон превышает средние значения в разы и даже десятки раз. Это Финляндия, Швеция, некоторые районы Франции, Индии, Бразилии, Алтайский край. Поэтому в отдельных местах различается допустимый радиационный фон. Во Франции, например, годовая доза естественного облучения составляет 5 мЗв, в Швеции — 6,3 мЗв, а в российском Красноярске — всего 2,3 мЗв. В Бразилии, на пляжах Гуарапари, которые ежегодно посещают десятки тысяч туристов, высокое содержание тория в песке приводит к тому, что годовая доза радиации достигает 175 мЗв. Однако это не очень опасно. Следует помнить, что различные источники радиации воздействуют на организм по-разному.

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ИЛИ «ПРОНИЗЫВАЮЩИЙ ВЗГЛЯД»

Рентгеновское излучение представляет собой одну из разновидностей ионизирующей радиации. Это электромагнитные волны, лежащие в диапазоне между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением, что соответствует длинам волн от $\sim 10^{-2}$ до $\sim 10^3$ Å (от $\sim 10^{-12}$ до $\sim 10^{-7}$ м). Радиоактивное воздействие рентгеновских волн — самое частое, с которым мы сталкиваемся и которое используется наиболее широко.

Рентгеновское излучение было открыто 8 сентября 1895 г. Сделал это Вильгельм Конрад Рентген во время исследования катодных лучей, которые излучал катод вакуумной трубки. Трубка закрывалась плотным черным картоном, покрытым платиноцианистым барием. В этот вечер, включив трубку и отложив картон в сторону, ученый обнаружил, что он светится в темноте зеленоватым цветом. Свечение прекратилось, когда Рентген выключил ток, и возобновилось, когда он снова его включил. Рентген продолжил исследования, в результате которых сделал вывод, что трубка порождает неизвестное излучение. Ученый дал ему название икс-лучей. Эксперименты позволили обнаружить, что эти лучи возникают, когда катодное излучение внутри катодной

ОТКУДА БЕРЕТСЯ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В природе электромагнитное излучение в рентгеновском диапазоне возникает в результате радиоактивного распада, который, в свою очередь, приводит к ионизации атомов. Его также вызывает так называемый Комптон-эффект, имеющий место при ядерных реакциях. Причиной его может быть также космическое излучение. Рентгеновское излучение, которое возникает на других небесных телах, не достигает поверхности Земли, так как полностью поглощается атмосферой.

Вильгельм
Конрад Рентген
(1845—1923),
немецкий ученый,
первооткрыватель
Х-лучей, которые
также называются
рентгеновскими.
В 1901 г. стал
первым в истории
лауреатом
Нобелевской

премии по физике, при этом особо подчеркивалась практическая важность открытия.



Снимок руки
швейцарского
физиолога
и анатома
Альберта фон
Кёликера,
который Рентген
сделал 23 января
1896 г.

трубки сталкивается с преградой. Это так называемое тормозное излучение ускоренных электронов. Ученый внес в трубку конструктивные изменения, позволившие интенсифицировать поток обнаруженных им лучей. За несколько недель он добился выдающихся результатов, описав основные свойства нового излучения, которое позднее было названо рентгеновским.

Эти лучи, как выяснилось, могут проникать через различные непрозрачные материалы, не отражаясь и не подвергаясь преломлению. Прозрачность вещества для рентгеновских лучей обусловлена толщиной слоя и составом данного вещества.

Рентгеновские лучи возникают при сильном ускорении заряженных частиц либо при высокоэнергетических переходах в электронных оболочках атомов или молекул.

В результате рентгеновского излучения воздух ионизируется, а многие материалы флюоресцируют, то есть светятся. Рентген установил, что подобным свойством обладает не только платиноцианистый барий, но и каменная соль, а также обычное и урановое стекло. Рентгеновским лучам присуща большая проникаемость, чем катодным. В отличие от катодных лучей, рентгеновские не отклоняются магнитным полем. Они засвечивают фотопластинки — так Рентген получил первые снимки при помощи этих лучей. Ученый тогда предположил, что рентгеновские лучи представляют собой упругие колебания эфи-

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И РЕВОЛЮЦИОННОЕ ОТКРЫТИЕ В МОЛЕКУЛЯРНОЙ БИОЛОГИИ

Рентгеновские лучи широко применяются в материаловедении, кристаллографии, химии, биологии для изучения структуры вещества, которое по-разному рассеивает данное излучение. Одним из самых известных результатов рентгеноструктурного анализа стало выяснение структуры дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Это открытие совершили Джеймс Уотсон, Фрэнсис Крик, Морис Уилкинс и Розалинд Фрэнклин в 1953 г.

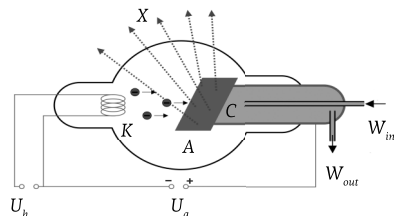
ЖЕСТКИЙ И МЯГКИЙ РЕНТГЕН

В зависимости от параметров принято различать мягкое и жесткое рентгеновские излучения. Мягкое лежит в диапазоне частот 3×10^{16} Гц — 3×10^{18} Гц, оно возникает в некоторых радиоактивных изотопах, линейных ускорителях, электронно-лучевых трубках, появляется при тепловом излучении плазмы. Жесткое рентгеновское излучение лежит в диапазоне 3×10^{18} Гц — 3×10^{19} Гц. Его также дают некоторые электронно-лучевые трубки и ядерные реакции. У мягкого рентгеновского излучения, таким образом, энергия фотона наименьшая, а длина волны наибольшая, у жесткого, соответственно, наоборот. Именно жесткое рентгеновское излучение главным образом применяется в промышленности.

РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА

Рентгеновская трубка представляет собой электровакуумный прибор, который используется для генерации рентгеновского излучения. В таких приборах рабочее пространство не содержит воздуха и окружено непроницаемой оболочкой.

В рентгеновской трубке имеются металлические катод и анод. Катод испускает электроны, и разность потенциалов между катодом и анодом приводит к их ускорению, но оно еще слишком мало, чтобы привести к образованию рентгеновских лучей. Однако когда лучи ударяются об анод, то резко тормозятся. Именно за счет тормозного излучения происходит генерация рентгеновских лучей. Из внутренних оболочек атомов выбиваются электроны, а другие электроны занимают пустые места. У рентгеновского излучения, возникающего при этом, имеется характерный для данного материала диапазон частот. Надо отметить, что на рентгеновское излучение затрачивается только 1% кинетической энергии электрона, остальное уходит на тепло.



X — рентгеновские лучи, K — катод, A — анод (иногда называемый антикатодом), C — теплоотвод, U_h — напряжение накала катода, U_a — ускоряющее напряжение, W_{in} — впуск водяного охлаждения, W_{out} — выпуск водяного охлаждения.

ра, что впоследствии не нашло подтверждения, так как от идеи эфира наука отказалась. Рентген не раз получал от различных фирм выгодные предложения о покупке прав на использование его изобретения. Однако ученый отказался оформлять подобный патент, потому

АЛМАЗ ДЛЯ Х-ЛУЧЕЙ

Длина волны рентгеновских лучей сравнима с размерами атомов, и поэтому линзу для них просто не из чего изготовить. Отражение тоже им почти не свойственно, однако все же в рентгеновской оптике нашелся материал, который хорошо их отражает. Им оказался алмаз.

ПАНОРАМНАЯ ТОМОГРАФИЯ

Обычные рентгеновские аппараты дают двумерное изображение внутренних органов, однако в настоящее время существуют компьютерные томографы, при помощи которых получается объемное трехмерное изображение. Само слово «томография» просходит от греческого «сечение», и, в соответствии со своим названием, этот метод создает послойное изображение, как бы по срезам. В панорамной томографии получают снимок криволинейного слоя, который находится на определенной глубине. Например, при исследовании лицевой части черепа, главным образом, челюстей и зубов. Рентгеновский излучатель и заряженная пленкой кассета движутся по определенным траекториям, формируя изображение в виде цилиндрической поверхности. Благодаря этому можно получить снимок всех зубов, что незаменимо при лечении пародонтоза, протезировании и после различных травм. Сегодня, конечно, по большей части рентгеновские пленки уже не используются, а применяются цифровые компьютерные технологии. В любом случае врач получает для анализа трехмерное изображение челюсти пациента.



что полагал, что его исследования не могут и не должны быть источником дохода.

Открытие Рентгена оказало сильнейшее влияние на развитие физики. Благодаря ему удалось высчитать структуру многих веществ и пришлось пересмотреть многие положения классической физики. Именно исследования рентгеновских лучей привели к открытию радиоактивности. А рентгеновские трубки стали применяться в технике и медицине. Их использование и усовершенствование привели к появлению рентгенологии, рентгенодиагностики, рентгенометрии и рентгеноструктурного анализа.

РЕНТГЕНОГРАФИЯ И ФЛЮОРОГРАФИЯ

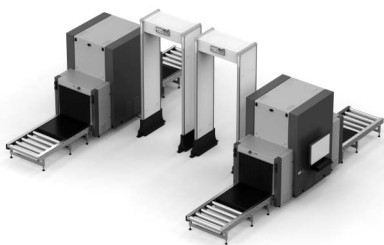
Различные материалы по-разному поглощают рентгеновские лучи. При этом возникают различные эффекты. Фотоны могут просто рассеяться на электронах, такой эффект называется комптоновским рассеянием. Может возникнуть также фотоэффект, когда фотоны выбивают электроны из оболочек атомов. Поскольку рентгеновское излучение способно давать свечение, этот эффект используется в медицинской диагностике при флюорографии, то есть наблюдении изображения на флюоресцирующем, покрытом люминофором экране и фиксации его, и рентгенографии, то есть получении снимков в рентгеновском диапазоне. При рентгенографии изображение получается в натуральную величину, при флюорографии — в уменьшенном масштабе.



Рентгенологическое и флюорографическое исследования в настоящее время включают использование компьютеров.

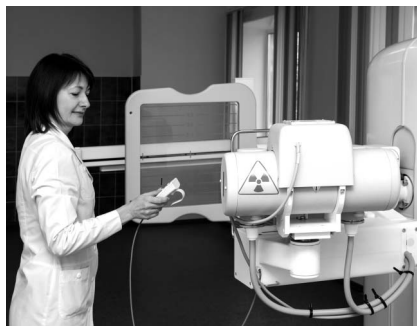
ДОСМОТР ЛЮДЕЙ В АЭРОПОРТАХ

Рентгеновские сканеры используются и для досмотра людей, отправляющихся в авиарейс. В подобных сканерах мощность рентгеновского излучения значительно уменьшена, так что за время сканирования человек получает не более 5 микрорентген. Ведь при этом нет нужды, чтобы рентгеновские лучи прошли через тело, достаточно, чтобы они обнаружили спрятанное под одеждой.



ДОЗЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

При рентгеновском обследовании органов грудной клетки мы получаем 0,150—0,400 мЗв, рентгене зубов — до 0,350 мЗв. При детальной рентгенографии желудочно-кишечного тракта в течение 2—6 мин — 2—6 мЗв.



Рентгеновский аппарат — источник излучения, и врачи, работающие с ним постоянно, должны принимать меры предосторожности.

«МАЛЕНЬКИЕ КЮРИ»

Мария Склодовская-Кюри прославилась не только фундаментальными открытиями в науке. С началом Первой мировой войны она была назначена директором Службы радиологии Красного Креста и организовала производство и использование передвижных рентгеновских аппаратов для использования в госпиталях. Она, кроме того, обучала врачей основам радиологии. Автомобили с рентгеновскими установками прозвали на фронтах «маленькие юри». А сама ученая в 1920 г. опубликовала монографию «Радиология и война».

СЕКРЕТЫ НАШИХ СУМОК

Сегодня чрезвычайно высока угроза терроризма. Именно поэтому, а также для обнаружения наркотиков, других опасных веществ и контрабанды, в аэропортах перед посадкой на самолет производится досмотр ручной клади и багажа. В настоящее время для этого используются рентгентелевизионные интроскопы, газоанализаторы, рентгенографические сканеры, которые позволяют увидеть на экране монитора представляющие опасность предметы. Рентгеновское излучение локализуется внутри корпуса рентгеновских сканеров, и поэтому они не представляют для окружающих какой-либо опасности. Подобный сканер состоит из генератора рентгеновских лучей, блока обработки данных, преобразующего полученные с детекторной линейки сигналы, и конвейера, по которому багаж проводится через сканер. Полученные изображения отображаются на компьютерном терминале.



ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ РАСПАДА: ОРУЖИЕ И ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

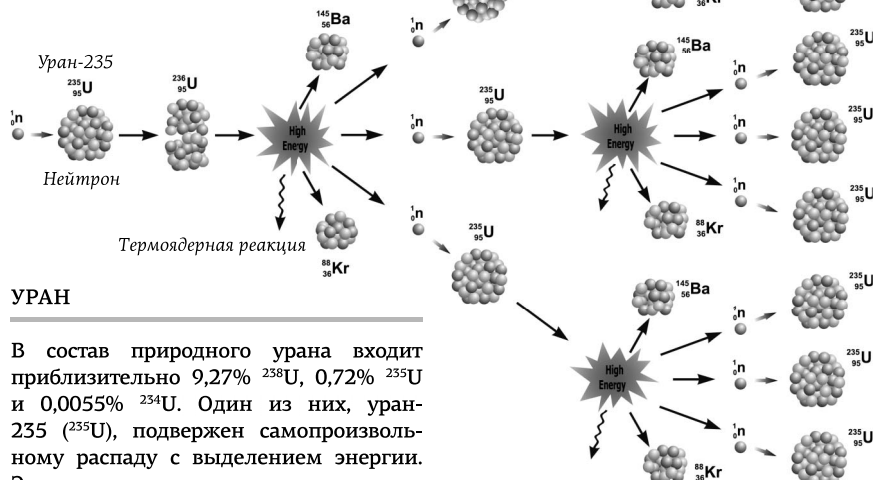
Ядерная реакция происходит при взаимодействии атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей. При этом состав и строение ядра могут изменяться. Ядро может делиться, могут испускаться элементарные частицы или кванты света — фотоны. Кинетическая энергия образовавшихся при ядерной реакции частиц предполагается на много выше первоначальной. Таким образом, при ядерной реакции выделяется энергия. Ядерная реакция с уменьшением количества нуклонов (протонов или нейтронов) в ядре называется делением ядра, или ядерным распадом.

Ядерную реакцию впервые наблюдал в 1919 г. Эрнст Резерфорд. Он бомбардировал ядра атомов азота альфа-частицами, то есть ядрами гелия. При этом образовались вторичные ионизированные частицы, чей пробег в газе оказался больше, чем у альфа-частиц. Эти вторичные частицы были определены как протоны. Позднее фотографии этого процесса — первой ядерной реакции, произведенной и обнаруженной человеком, — были получены с использованием камеры Вильсона, одного из первых в мире детекторов элементарных частиц.

Ядерная реакция основана на том положении, что масса — особая форма энергии. Это отражено в формуле Эйнштейна $E = mc^2$. Значит, масса может превращаться в энергию, а энергия — в массу. И при

реакции распада ядра, и при реакции его синтеза совокупная масса продуктов реакции меньше совокупной массы реагентов. Эта разница в массе и преобразуется в энергию.

Наиболее часто в ядерной энергетике используется уран. Пригоден для нее его изотоп ^{235}U . В урановой руде он, однако, составляет только 0,7% от общей массы всего элемента. Остальное — это в основном относительно устойчивый изотоп ^{238}U , который



УРАИ

В состав природного урана входит приблизительно 9,27% ^{238}U , 0,72% ^{235}U и 0,0055% ^{234}U . Один из них, уран-235 (^{235}U), подвержен самопроизвольному распаду с выделением энергии. Энергия, порождаемая ядерным распадом, преобразуется в тепло.

просто поглощает свободные нейтроны, но не распадается при этом. Поэтому, чтобы использовать уран как топливо, его обогащают, доводя содержание радиоактивного изотопа ^{235}U до 5% и более.

В ядерном реакторе уран-235 подвергается бомбардировке нейтронами. Из одного ядра этого изотопа в среднем выделяется 2,5 нового нейтрона. Каждый из них приводит к распаду еще 2,5 ядра. Так запускается цепная реакция. Это последовательность единичных ядерных реакций, каждую из которых вызывает частица, являющаяся продуктом реакции на предыдущем этапе. Чтобы цепная реакция не затухала, нужно, чтобы число выделяющихся распадающихся ядрами нейтронов было больше, чем число нейтронов, которые покидают урановый конгломерат. Тогда реакция продолжается с выделением энергии, что и требуется.

АТОМНАЯ БОМБА

Ядерную реакцию впервые применили на практике для создания оружия. В атомной бомбе она носит умышленно неконтролируемый характер: огромное число ядер ^{235}U распадается за считанные секунды, и выделяется колоссальная энергия, приводящая к огромным разрушениям. Сегодня наряду с ураном в оружии используют плутоний. Надо сказать, что главной целью конструкторов атомной бомбы было создать оружие, дающее гигантскую ударную волну. Радиоактивное заражение местности оказалось неизбежным, но все же побочным эффектом. Однако именно оно вызывает главные опасения. И после гибели в 1945 г. городов Хиросима и Нагасаки атомные бомбы ни разу не применялись в боевых действиях, а ядерное оружие превратилось в оружие сдерживания.



Кроме урана в ядерном оружии применяется плутоний.

В атомных реакторах, которые используются в энергетике, реакция распада подлежит строгому контролю. Энергию необходимо дозировать. Для управления цепной реакцией в АЭС обычно используется такой поглотитель нейтронов, как кадмий. Стержни из кадмия погружаются в активную зону реактора для уменьшения энергии, а если она падает ниже необходимого уровня, частично выводятся оттуда. Получившаяся энергия преобразуется в электрическую с помощью турбогенераторов.

АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

Первая в мире атомная электростанция, подключенная к общей электрической сети, была открыта в СССР в Обнинске 27 июля 1954 г. Обнинская АЭС давала мощность 5 МВт. В 1956 г. в Великобритании была введена в эксплуатацию электростанция в Колдер-Холле. Она давала мощность 46 МВт, что позволяло использовать ее в промышленных масштабах. В 1958 г. в СССР начала работу первая очередь Сибирской АЭС, которая давала мощность 100 МВт. Затем она была доведена до 600 МВт.

Атомная энергетика может представлять серьезную опасность при авариях, о чем свидетельствует крупнейшая в мире Чернобыльская катастрофа, а также авария на японской «Фукусиме», вызванная землетрясением. Однако в целом она очень выгодна и удобна, когда работает без сбоев, конечно. Сегодня действующие атомные электростанции есть в 31 стране. Всего в мире работает 411 энергетических ядерных реакторов, чья общая мощность составляет 353,4 ГВт.



На атомной электростанции.

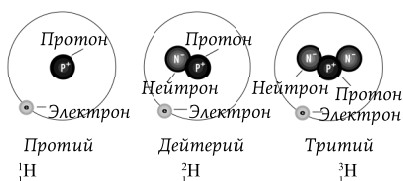
ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ: В ПОИСКАХ УНИВЕРСАЛЬНОГО ТОПЛИВА

Термоядерная реакция представляет собой реакцию нуклеосинтеза. Относительно легкие атомные ядра объединяются в более тяжелые. Происходит это за счет кинетической энергии их теплового движения. Поскольку кинетическая энергия движущихся частиц может быть представлена в виде температуры, то, нагревая вещество, можно получить реакцию нуклеосинтеза. Именно поэтому подобную реакцию и называют термоядерной.

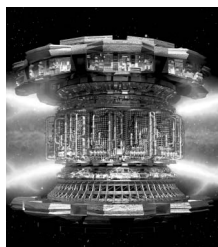
Атомные ядра, точнее протоны, заряжены положительно и потому должны отталкиваться, чему способствует электромагнитное взаимодействие. Однако протоны в ядре удерживаются вместе благодаря сильному взаимодействию. Ядрам же для слияния необходимо преодолеть силы электростатического отталкивания — так называемый кулоновский барьер. Для этого им требуется большая кинетическая энергия. Преодолев этот барьер, они сближаются на расстояние, где действует сильное взаимодействие, которое превысит кулоновское отталкивание. Чтобы объединить ядра, их нужно сначала сблизить. Для этого существует несколько способов. В звездах это силы гравитации, в ускорителях — кинетическая энергия ядер или элементарных частиц, в термоядерном оружии и термоядерных реакторах — энергия теплового движения ядер атомов. Силой гравитации современная наука пока не может управлять. Для ускорения частиц требуется слишком много энергии, что не позволяет выйти на положительный энергобаланс. И только использование теплового движения в управляемом термоядерном синтезе может оказаться пригодным для получения энергии в промышленных масштабах. В качестве топлива для управляемой реакции синтеза лучше всего подходят атомные ядра

с небольшим зарядом, потому что их легче сблизить для преодоления кулоновского барьера. И, конечно, оптимальные кандидаты для этого — тяжелые изотопы водорода. Управляемый термоядерный синтез считается сегодня естественным источником энергии будущего, потому что запасы водорода неисчерпаемы, недаром это самый распространенный элемент во Вселенной. Однако еще неясно, насколько рентабельным окажется сам термоядерный синтез и производство с его помощью энергии. Возможно, вместо реакций дейтерий—дейтерий и дейтерий—тритий будет использована реакция дейтерий—гелий.

Энергию в термоядерном реакторе можно получать с использованием высокотемпературной плазмы. Для нагрева и удержания такой плазмы используют либо мощные лазерные лучи (это импульсные системы), либо мощные тороидальные магнитные поля (это квазистационарные системы). Именно квазистационарная система типа «Токамак» будет использована в международном экспериментальном термоядерном реакторе (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER), который планируется построить на юге Франции в исследовательском центре Кадараш. Температура плазмы в этом



Изотопы водорода.

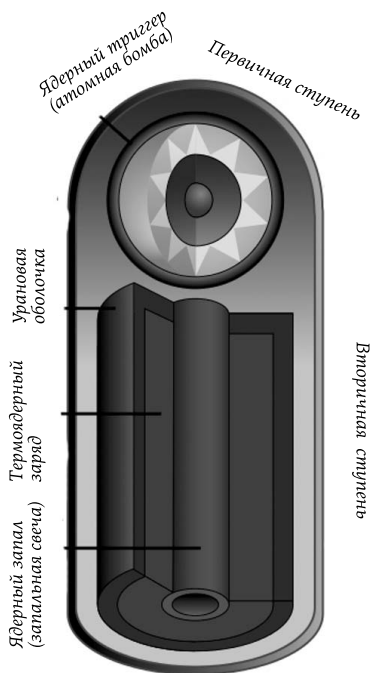


Термоядерные электростанции могут появиться во второй половине XXI в.

реакторе должна достичь 150 млн °С, что в десять раз превысит температуру ядра Солнца. Предполагается, что по завершении этого проекта будет построен прототип промышленного термоядерного реактора DEMO (DEMOstration Power Plant). И только потом можно будет начать строительство термоядерных электростанций. Произойдет это, по всем расчетам, не раньше 2045 г.

ТЕРМОЯДЕРНОЕ ОРУЖИЕ

Если управляемый термоядерный синтез представляет сегодня серьезную проблему, то неуправляемая термоядерная реакция нашла применение уже в начале 1950-х гг. в водородной бомбе. Энергия в ней образуется в результате, например, слияния двух атомов дейтерия. Водородная бомба намного мощнее, чем атомная. Термоядерное взрывное устройство впервые испытали в США в 1952 г., но именно в СССР прошло первое испытание такого устройства, выполненного в виде авиабомбы.



В основе современного термоядерного оружия лежит схема Теллера—Улама, основанная на том, что термоядерное топливо поджигают при помощи энергии атомного взрыва. Иными словами, посредством радиационной имплозии происходит сжатие термоядерного топлива и усиление его горения с помощью дополнительной ядерной реакции.

ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГИИ СВЯЗИ НУКЛОНА ОТ ЧИСЛА НУКЛОНОВ В ЯДРЕ

Энергия связи ядра равна минимальной энергии, которую необходимо затратить для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны. Энергия связи может быть определена посредством изменения его массы. Согласно современным данным, масса любого ядра $M_{\text{я}}$ будет всегда меньше суммы масс протонов и нейтронов, входящих в его состав:

$$M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n.$$

Разность этих масс носит название дефекта массы:

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}.$$

Дефект массы и формула $E = mc^2$ позволяют вычислить энергию связи ядра, то есть такую энергию, которая выделялась при образовании этого ядра:

$$E_{\text{св}} = Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2.$$

Например, энергия связи ядра гелия = 28,3 МэВ. Это очень много. При образовании 1 г выделяется энергия порядка 1012 Дж, примерно столько же, сколько при сгорании одного вагона каменного угля.

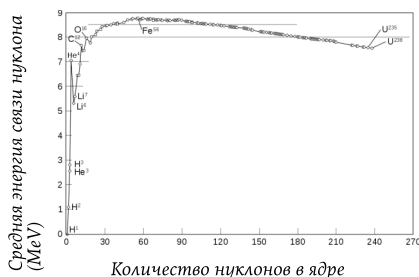


График зависимости удельной энергии связи от массового числа A . Разные атомные ядра обладают различной энергией связи.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР

Физика высоких энергий представляет собой раздел физики элементарных частиц. В ее рамках исследуются взаимодействия элементарных частиц, а также атомных ядер, когда энергия их столкновения существенно превышает массу самих этих частиц. Эксперименты по физике высоких энергий проводятся посредством ускорителей заряженных частиц и ядерных реакторов, а также при наблюдении космических лучей.

Эксперименты в физике высоких энергий требуют наличия детекторов, регистрирующих ионизирующее излучение и гамма-лучи, которые либо являются продуктами столкновений между частицами в специальных устройствах, либо имеют космические или другие источники.

К основным типам детекторов относятся полупроводниковые детекторы, калориметры, дрейфовые газовые камеры, искровые камеры, пузырьковые камеры, толстослойные фотопластинки и другие устройства. Существуют также детекторы общего назначения, собранные из отдельных детекторов элементарных частиц разных типов. Чтобы получить данные о частице, ее разгоняют в ускорителях, где на нее действуют электромагнитные поля и другие частицы.

КАМЕРА ВИЛЬСОНА

Камера Вильсона, или туманная камера, — это один из первых в мире детекторов элементарных частиц. Изобрел ее между 1910 и 1912 гг. британский физик Чарльз Вильсон. В камере происходит конденсация перенасыщенного пара. Быстрая заряженная частица вызывает появление ионов, а ионы представляют собой новые центры конденсации. На этих ионах образуются капли жидкости, достаточно крупные для того, чтобы их можно было сфотографировать.

ТРЕКОВАЯ СИСТЕМА

С помощью трековой системы регистрируют траектории прохождения заряженной частицы (иными словами — следы, или треки), углы ее вылета, координаты области взаимодействия. У большинства детекторов трековую систему помещают в магнитное поле. В результате траектории заряженных частиц искривляются, благодаря чему становится возможным определение знака их заряда и импульса.

СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ

Благодаря системе идентификации можно отличить друг от друга те или иные типы заряженных частиц, устанавливая их скорость. Для этого либо измеряют угол черенковского излучения в специально предназначенном для этого радиаторе, либо определяют время пролета частицы до точки регистрации, либо определяют плотность ионизации вещества. Вместе с данными, полученными трековой системой, это дает полную информацию о частице.

Ускорители принято делить на две основные группы — линейные и циклические. В линейных пучок частиц проходит свой путь однократно, в циклических пучки частиц постоянно движутся по эллипсам или окружностям. Можно различать также ускорители по их назначению. Например, это промышленные ускорители, источники нейтронов или коллайдеры. Слово «коллайдер» (от англ. *collider*) буквально означает «сталкиватель». Пучки частиц в нем двигаются друг другу навстречу и сталкиваются в особых точках. Большинство коллайдеров циклические, хотя существуют также проекты линейных коллайдеров.

Самым крупным коллайдером и вообще самой большой экспериментальной установкой в мире является открытый в 2008 г. Большой адронный коллайдер (БАК). Он предназначен для разгона протонов и тяжелых ионов (ионов свинца) и исследования продуктов их соударений. Этот гигантский «бублик» окружностью в 27 км пролегает на границе Франции и Швейцарии на глубине от 50 до 175 м. Построен он в ЦЕРН (Европейский центр ядерных исследований).

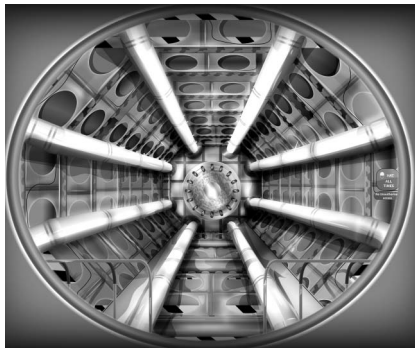
Большим его назвали из-за размеров. Ускоряет он адроны — частицы, которые состоят из кварков. К адронам относится и протон.

Стоимость БАК составила 10 млрд долларов, и он постоянно требует дополнительных денег — ведь энергии коллайдер тратит очень много. Ни одна страна не могла бы позволить себе столь дорогие оборудование и постоянные исследования. Ученые и инженеры из более чем сотни стран, в том числе и России, принимают участие в его строительстве и работе.

В чем же заключается задача БАК? Он должен найти отклонения от так называемой Стандартной модели элементарных частиц, которая описывает три из четырех видов фундаментальных взаимодействий — сильное, слабое, электромагнитное. Считается, что Стандартная модель — это всего лишь часть более глубокой теории — так называемой Новой физики. Вот эту Новую физику и пытаются создать с помощью БАК.



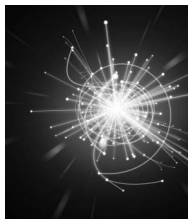
Коллайдер Теватрон, расположенный в лаборатории им. Энрико Ферми близ Чикаго. Работал в 1983—2011 гг. Второй после БАК по размеру.



Большой адронный коллайдер изнутри.

ОПАСЕН ЛИ КОЛЛАЙДЕР

В прессе немало пишут про опасность БАК. Предполагают, что при столкновении частиц в нем могут образоваться микроскопические черные дыры, которые могут вырасти в огромную черную дыру и поглотить Землю. Однако ученые утверждают, что микроскопические черные дыры, даже если они и образуются, никакой опасности не представляют, а планета постоянно подвергается бомбардировке частиц, чья энергия намного выше, чем может дать БАК. Поэтому БАК ничем не угрожает существованию нашей планеты.



Столкновение частиц в Большом адронном коллайдере.

БОЗОН ХИГГСА

Одним из важнейших вопросов является поиск бозона Хиггса — элементарной частицы, которую называют частицей Бога. Считается, что этот бозон придает массу всем остальным элементарным частицам, и, значит, благодаря ему сегодня существует Вселенная. И не так давно бозон Хиггса был обнаружен.

ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ: ЛАЗЕРЫ И МАЗЕРЫ

Вынужденное, или индуцированное, излучение представляет собой генерацию нового фотона при переходе квантовой системы с более высокого энергетического уровня на более низкий. Этот переход происходит под воздействием индуцирующего фотона, чья энергия равна разности энергий этих состояний. Вынужденное излучение лежит в основе работы квантовых генераторов, в том числе лазеров и мазеров.

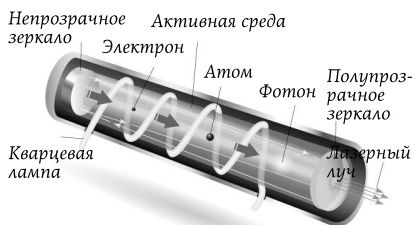
Квантовыми генераторами называются источники электромагнитного излучения, которые работают на основе принципа вынужденного излучения молекул и атомов. Они преобразуют энергию накачки, будь то световая, электрическая, тепловая или химическая энергия, в энергию монохроматического поляризованного когерентного узконаправленного потока излучения. Название квантового генератора зависит от того, в каком диапазоне он работает. Так, мазер работает в микроволновом диапазоне, лазер (light amplification by stimulated emission of radiation) — в оптическом, разер — в рентгеновском, газер (который еще не создан) должен, в теории, генерировать поток излучения в гамма-диапазоне. Идея вынужденного излучения принадлежит Эйнштейну. В 1916 г. он опубликовал работу, в которой рассказал следующее. Когда квантовая система возбуждена и в ней в то же время регистрируется излучение, чья частота соответствует квантовому переходу, вероятность того, что система перейдет на более низкий энергетический уровень, повышается пропорционально плотности тех фотонов излучения, которые уже присутствуют в системе.

Первый в мире квантовый генератор сконструировали в 1954 г. в СССР и США независимо друг от друга. Это сделали Николай Геннадиевич Басов и Александр Михайлович Прохоров в Академии наук СССР и Чарльз Таунс с сотрудниками в Колумбийском университете. Прибор, который они сконструировали, был мазером, то есть действовал в микроволновом диапазоне. За эту работу Басов, Прохоров и Таунс в 1964 г. получили Нобелевскую премию с формулировкой «Усиление микроволн с помощью вынужденного излучения».

В рабочем теле квантового генератора посредством накачки создается избыточное

количество атомов в верхнем энергетическом состоянии. Рабочее тело находится в резонаторе (обычно это пара зеркал), который обеспечивает условия для накопления фотонов, чей импульс имеет определенное направление. Чтобы создать поляризацию, в резонатор включают различные поляризаторы. Спонтанное излучение приводит к появлению первых фотонов. Затем происходит лавинообразное возрастание вынужденного излучения. Первоначальные фотоны возникают за счет спонтанного излучения. Затем, благодаря наличию положительной обратной связи, вынужденное излучение лавинообразно возрастает.

16 мая 1960 г. американский физик Теодор Мейман впервые представил работающий оптический квантовый генератор — лазер. Его активной средой был искусственно выращенный кристалл рубина. На торцы кристалла был нанесен резонатор, образованный серебряными зеркальными покрытиями, создающими нужную поляризацию. Сегодня рабочей средой лазера могут быть и плазма, и газ, и жидкость, и какое-либо твердое вещество. Накачка тоже может быть самой разной — это и газоразрядные лампы, и другие лазеры, и химические реакции, и пучки электронов. Самый употребительный вид лазеров — полупроводниковые.



Принцип работы лазера.

Лазеры применяются в науке, технике, быту. Сфера их использования — от компакт-дисков, принтеров и указок до лазерной коррекции зрения и применения в области управляемого термоядерного синтеза.

Мазеры используются как атомные часы, в космической связи, в радиотелескопах.

ЛАЗЕРЫ В МЕДИЦИНЕ

Лазеры в медицине применяются в качестве бескровных скальпелей, например, при удалении катаракты и замене хрусталика. Применяют их также при отбеливании зубов. Для этого на поверхность зуба наносят содержащий кислород гель и затем облучают зуб лазером. Лазерное излучение вызывает в геле химическую реакцию, при которой выделяется кислород.

Он проникает глубоко в зубную эмаль и отбеливает ее.



*Отбеливание
зубов
с помощью
лазера.*

ЛАЗЕРНЫЙ ДАЛЬНОМЕР

Лазерный дальномер — это прибор, предназначенный для измерения расстояний с применением лазерного луча. Измеряя время, затрачиваемое лучом на путь от отражателя и обратно, можно определить расстояние до объекта.



Лазерный дальномер.

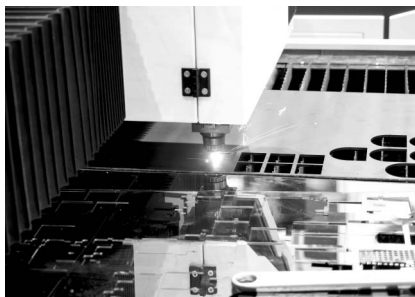
ЛАЗЕРНОЕ ОРУЖИЕ И ЛАЗЕРНОЕ ХУЛИГАНСТВО

Уже с 1970—1980-х гг. в мире ведется разработка лазерного оружия. Создать ручное лазерное оружие сложно, потому что современные технологии требуют для этого слишком громоздких элементов питания. Поэтому сегодня разрабатываются крупные мобильные и стационарные системы. Однако светоотражающие элементы на броне могут сделать лазерное оружие бесполезным. Но уже сегодня используются слепящие лазеры в качестве оружия несмертельного действия. Слепящие свойства лазера привели также к появлению лазерного хулиганства, когда злоумышленники ослепляют пилотов, не давая им совершить взлет или посадку.



ЛАЗЕР НА ПРОИЗВОДСТВЕ

Энергия излучения лазера обладает высокой плотностью, благодаря чему становится возможной локальная термическая и, соответственно, механическая обработка, в том числе пайка, сварка, гравировка, резка. Точно контролируя зону нагрева, с помощью лазера можно сваривать материалы, для которых обычная сварка невозможна.



*Высокоточный лазерный станок
с числовым программным управлением.*

НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА И КОСМОЛОГИЯ

Физика используется в небесной механике и космологии. Небесная механика применяет законы механики при изучении движения небесных тел и явлений, вызванных этим движением. Главным образом это относится к Солнечной системе. Происхождение Солнечной системы, а также эволюцию Вселенной в целом изучает космология. В основе этой дисциплины лежат физика, математика и астрономия.

Гипотезы об образовании Солнечной системы из газопылевого облака еще в XVIII в. предлагали Иммануил Кант и Пьер-Симон Лаплас. Начало космической эры в 1957 г., а также открытие первых экзопланет в 1990-х гг. и другие наблюдения позволили усовершенствовать эту модель.

Согласно современной теории, на месте Солнечной системы когда-то существовало гигантское межзвездное молекулярное облако. Плотность и размеры такого облака позволяли образовываться в нем молекулам. Главным образом это были молекулы водорода, но присутствовали также молекулы гелия и тяжелых элементов, которые остались от старых, давно погибших звезд.

Около 4,6 млрд лет назад в этом облаке спонтанно образовалось небольшое уплотнение вещества. Окружающее вещество стало к нему притягиваться. Так произошел гравитационный коллапс. У коллапсирующего облака при этом имелся собственный угловой момент вращательного движения. Уплотнение превратилось в плоский диск. Когда его температура достигла нескольких тысяч кельви-



Пьер-Симон Лаплас (1749—1827), французский физик, математик и астроном. Прославился работами по небесной механике, теории вероятностей и дифференциальным уравнениям. Автор одной из гипотез о происхождении Солнечной системы.



Иммануил Кант (1724—1804), немецкий философ. Ему принадлежит одна из гипотез о происхождении Солнечной системы.

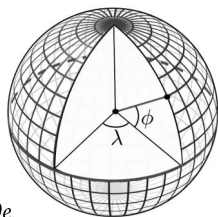
нов, в центральной области диска возникло свечение. Так появилась протозвезда. Когда ее центр разогрелся до миллионов кельвинов, в нем началась реакция термоядерного синтеза — из водорода стал образовываться гелий. Так возникло Солнце, вобравшее в себя большую часть вещества молекулярного облака. Из остального вещества, которое не попало в центр гравитационного коллапса, сформировался протопланетный диск. Он впоследствии дал начало планетам, их спутникам, астероидам, кометам и другим телам Солнечной системы.

Солнечная система.



НЕРАВЕНСТВО В ДВИЖЕНИИ ЛУНЫ И ДОЛГОТА НА ЗЕМЛЕ

Ускорение в движении Луны (так называемое вековое неравенство) долгое время не могло найти объяснений и являлось проблемой для астрономов и небесных механиков. Лаплас же выяснил, что это явление также происходит в результате притяжения крупных планет и представляет собой периодическое колебание лунной орбиты. Учитывая эти факторы, он произвел расчеты движения Луны, которые вполне согласовались с наблюдениями. Неравенства в движении Луны позволили Лапласу уточнить сжатие земного сфероида. Эти вычисления помогли решить очень важную навигационную проблему — определение долготы во время морских путешествий.



*Широта
и долгота
на земном сфероиде.*

Этой гипотезе дала развитие модель Лапласа, который, однако, уделял большее внимание движению планет и добился выдающихся результатов.

Ученый всесторонне проанализировал известные в то время данные, касающиеся движения тел Солнечной системы. С помощью математического анализа и закона всемирного тяготения Ньютона Лаплас доказал, что Солнечная система обладает устойчивостью. Иными словами, средние расстояния планет от Солнца остаются неизменными, несмотря на взаимное влияние, а элементы их орбит подвержены незначительным периодическим колебаниям. Даже Ньютон и Эйлер не были уверены в этом. Правда, впоследствии оказалось, что Лаплас не учел некоторые факторы, в частности приливное трение, которое замедляет вращение, но в целом его результаты справедливы. Лаплас также сумел опро-

УПАДЕТ ЛИ ЮПИТЕР НА СОЛНЦЕ

Английский астроном Эдмунд Галлей широко известен благодаря тому, что впервые обнаружил периодичность приближения к Земле известной кометы и предсказал ее следующее появление. Она получила название кометы Галлея. Однако ему принадлежат и другие наблюдения и гипотезы. Так, именно Галлей в 1695 г. на основе собственных наблюдений и исследований своих предшественников обнаружил, что в течение нескольких веков Сатурн постепенно замедляет движение и удаляется от Солнца. Юпитер же, наоборот, постепенно ускоряется и приближается к Солнцу. Многие ученые выдвигали предположение, что наступит время, когда Юпитер упадет на Солнце, и это будет катастрофой для всей Солнечной системы. Лаплас же выяснил, что это все периодические колебания, вызванные взаимным влиянием планет, и что через 929 лет их взаимное положение и расстояние от Солнца повторятся. Таким образом, падение на Солнце Юпитера не грозит.



*Эдмунд Галлей
(1656—1742),
английский
астроном.*

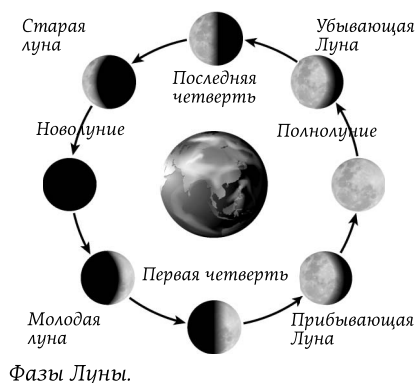
вергнуть теорию, которой придерживался и Ньютон: для поддержания состояния Солнечной системы требуются какие-то внешние сверхъестественные силы. Эту работу Лаплас проделал, когда ему было всего 24 года. Тогда же, в 1773 г., его избрали адъюнктом Парижской академии наук. Итоги своим многолетним исследованиям, а также работам своих предшественников, в том числе Ньютона, Лаплас подвел в труде «Небесная механика», впервые опубликованном в 1799 г. Кроме того, он представил

множество результатов изучения движения отдельных планет, их спутников, в том числе Галилеевых спутников Юпитера, комет, теорий приливов и других сведений.

В наше время ученые уделяют немало внимания тому, как выглядела Солнечная система в прошлом. Если раньше считалось, что

ЗЕМЛЯ И ЛУНА

Луна всегда повернута к Земле одной стороной, потому что период обращения нашего естественного спутника вокруг Земли совпадает с периодом вращения Луны вокруг своей оси. Притяжение Луны приводит к тому, что Земля как бы вытягивается в ее направлении. При этом образуется «приливный бугор», опережающий движение спутника. Земля вращается с большей скоростью, благодаря чему угловой момент ее вращения передается Луне. Эта дополнительная энергия, полученная Луной, приводит к тому, что она постепенно удаляется от Земли, а движение нашей планеты так же постепенно замедляется. Крупные луны Юпитера и Сатурна находятся со своими планетами в такой же конфигурации. Теоретически через 50 млрд лет Земля и Луна войдут в так называемый спин-орбитальный резонанс. Период обращения Луны вокруг Земли увеличится до 47 дней, периоды обращения обоих небесных тел вокруг оси сравняются, и каждое (а не только Луна) будет видно для другого только с одной стороны. Правда, чтобы это произошло, Земля и Луна должны будут пережить расширение Солнца.



орбиты планет всегда были примерно такими же, как сейчас, то сегодня, в начале XXI в., появилась совсем другая гипотеза. Считается, что в глубочайшей древности Солнечная система была компактнее. Пояс Койпера, сегодня находящийся на расстоянии 30—50 астрономических единиц (а. е.) от Солнца, был намного ближе к нашему светилу, а во внутренней Солнечной системе имелись планеты, сравнимые по размерам с Меркурием. Границей внутренней Солнечной системы служит пояс астероидов, располагающийся на расстоянии 2 и 4 а. е. от Солнца. Ранее существовала гипотеза, что на его месте,

ГИГАНТСКИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ

Когда Солнечной системе было примерно 500—600 млн лет, существовавший в ней тогда астероидный пояс стал разрушаться. Так начался период тяжелой бомбардировки, когда астероиды и протопланеты сталкивались с новообразованными планетами и их спутниками. Он продолжался несколько сотен миллионов лет. Следы этих гигантских столкновений видны и сегодня. Свидетельство тому — испещренная кратерами поверхность нашего спутника — Луны. Гигантские столкновения, хотя и очень редко, но повторялись и позже. Так, в 1994 г. с Юпитером столкнулась комета Шумейкера—Леви, а в 2009 г. на него упало еще одно небесное тело. Огромный метеоритный кратер в Аризоне тоже является примером гигантского столкновения. Значит, подобную опасность для Земли в будущем не следует исключать. Но надо при этом помнить, что, по одной из версий, именно протопланеты из пояса астероидов принесли на Землю запасы воды, без которой была бы невозможна жизнь.

Луна в глубочайшей древности подверглась тяжелой бомбардировке небесными телами, о чем говорят кратеры на ее поверхности.



между Марсом и Юпитером, находилась планета Фазтон, расколовшаяся на части. Но сегодня есть мнение, что в поясе астероидов имелось 20—30 протопланет размерами от Луны до Марса. Настоящие планеты из них не образовались: под воздействием Юпитера, Сатурна и других крупных протопланет одни из них раздробились, другие были выброшены за пределы пояса астероидов и приняли участие в формировании планет земного типа.

Согласно одной из гипотез, Уран и Нептун также сегодня находятся не на своих первоначальных орбитах. Дело в том, что они вряд ли могли образоваться в этой области, где плотность вещества первоначальной туманности была очень мала, а орбитальные периоды очень велики. Поэтому сегодня считается, что формирование Урана и Нептуна произошло вблизи Юпитера и Сатурна, где много строительного материала для планет. Должны были пройти сотни миллионов лет, прежде чем Уран и Нептун заняли в Солнечной системе свое нынешнее положение.

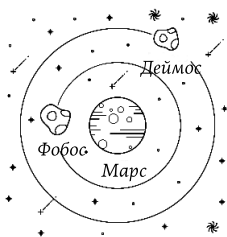
Имеется также гипотеза, что в нашей системе помимо Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна существовал еще один газовый гигант, который был вытолкнут на окраины Солнечной системы или даже за ее пределы. Все это происходило во время периода так называемых гигантских столкновений, еще до появления жизни на Земле.

КАК ВЫСЧИТЫВАЮТ РАЗМЕРЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Размеры Солнечной системы рассчитывают по-разному. Расстояние от Солнца до самой дальней точки орбиты Нептуна, последней известной крупной планеты, — 4 млрд 545 млн км. До самой дальней точки орбиты самого далекого небесного тела нашей системы, карликовой планеты Седны, — около 13 млрд км. Граница гелиосферы, пространства, где есть солнечный ветер (потoki заряженных частиц), находится в 13,5 млрд км от центрального светила. Удобнее, однако, считать в а. е., то есть в расстояниях от Земли до Солнца, — и она равна 149,6 млрд км. Значит, расстояние до границы гелиосферы — примерно 90 а. е.

СУДЬБА ФОБОСА

Если скорость движения спутника по орбите быстрее, чем скорость его вращения вокруг собственной оси, либо его движение по орбите противоположно направлению движения планеты, «приливный бугор» планеты будет постоянно отставать от положения спутника. В таком случае угловой момент будет передаваться от спутника планете. Ее вращение при этом ускорится, а орбита спутника сокращается. И со временем спутник упадет на планету. Так произойдет со спутником Марса Фобосом примерно через 30—50 млн лет.



Спутники
Марса — Фобос
и Деймос.

НЕИЗМЕННАЯ ОРБИТА

В том случае когда «приливный бугор» планеты располагается всегда точно под спутником, угловой момент не будет передаваться ни планете, ни спутнику. Орбитальный период остается неизменным. Такая конфигурация имеется у карликовой планеты Плутон и ее спутника Харона.



КАК УСТРОЕНЫ ЗВЕЗДЫ

Физические процессы в астрономических объектах, таких как звезды и галактики, изучает наука астрофизика. Физические свойства материи в самых больших масштабах и возникновение Вселенной являются предметом науки космологии, в то время как астрофизика представляет собой учение о строении небесных тел. Эти науки породили немало идей, гипотез и теорий.

Звезда представляет собой излучающий свет массивный газовый шар, который удерживается в состоянии равновесия благодаря силам собственной гравитации и внутреннего давления. В недрах звезды происходит или происходила ранее термоядерная реакция — нуклеосинтез. Ближайшая к Земле звезда — это Солнце. Ближайшая к Солнцу звезда — Проксима Центавра.

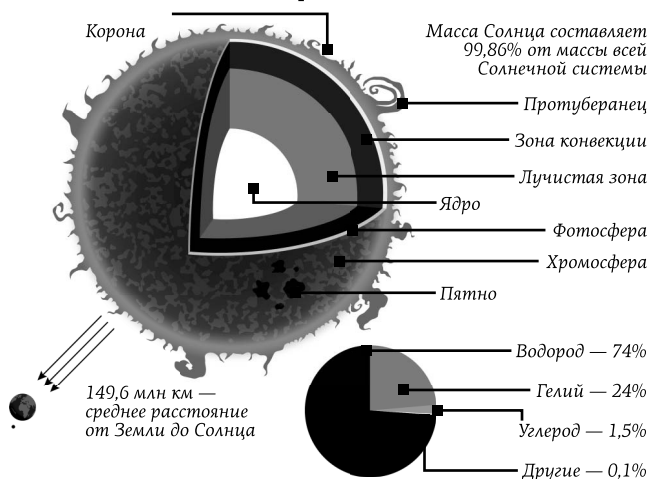
Звезда образуется в результате гравитационного сжатия из газопылевого облака, главным образом из водорода и гелия. Энергия подавляющего большинства звезд — результат превращения водорода в гелий. Звезды иногда называют главными телами Вселенной, потому что они составляют большую часть ее светящегося вещества.

Звезды классифицируют по их спектру. Кроме того, в классификацию звезды входят основная звездная величина, переменность или ее отсутствие. Класс звезд пишется так: сначала буквенное обозначение основного спектрального класса, потом арабскими цифрами спектральный подкласс, затем римскими цифрами класс светимости (номер области на диаграмме Герцшпрунга—Рассела) и, наконец, дополнительная информация. Например, звезда может быть переменной, то есть менять светимость. Наше Солнце — звезда самая обычная, ее класс — G2V.

СТРОЕНИЕ ЗВЕЗДЫ

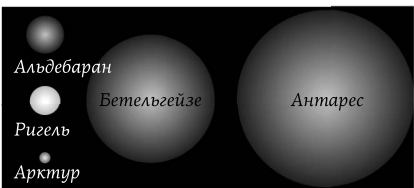
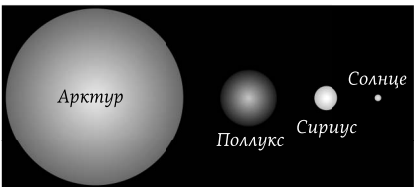
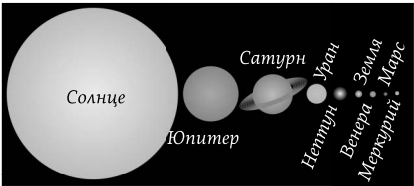
У Солнца, как и у других подобных звезд, выделяют три внутренние зоны: ядро, конвективную зону и зону лучистого переноса. В ядре происходят ядерные реакции. В конвективной зоне энергия переносится в результате конвекции. В лучистой зоне энергия движется в результате излучения фотонов. У более крупных и старых звезд внутренних слоев больше. Атмосфера звезды обычно состоит из фотосферы, хромосферы и короны. Фотосфера дает главную часть излучения звезды. Хромосфера располагается над ней, а внешнюю границу короны пока еще не удалось определить. Известно только, что наша Земля находится в ее пределах.

Возраст: 4,6 млрд лет
Тип: желтый карлик
Диаметр: 1 392 684 км
Длина окружности экватора: 4370005,6 км
Масса: $1,99 \times 10^{30}$ кг
(330 060 земных масс)
Температура ядра: 13 599 726 °C
Температура поверхности: 550 °C



Структура Солнца.

Звезда — гигантский объект. Достоверно установить ее массу можно, только если она является частью двойной звезды. Для вычисления массы используют обобщенный третий закон Кеплера. Но даже тогда по-



Сравнение размеров звезд и планет.

ПАРАЛЛАКС, ИЛИ КАК ИЗМЕРИТЬ РАССТОЯНИЕ ДО ЗВЕЗДЫ

Определить расстояние до звезды можно различными способами, например фотометрией. Очень точным является метод измерения параллаксов звезд. Под параллаксом понимают изменение видимого положения объекта относительно удаленного фона в зависимости от положения наблюдателя. Суточный параллакс — это, собственно, разница в направлениях на одно и то же светило из центра масс Земли и из определенной точки на ее поверхности. Годичный параллакс — это изменение направления на объект, которое вызвано движением Земли по околосолнечной орбите. Величина параллакса — это угол, под которым от звезды видна перпендикулярная лучу зрения большая полуось земной орбиты. Расстояние до объекта, чей годичный параллакс равен 1 угловой секунде, называется парсеком (1 парсек = $3,085678 \times 10^{16}$ м). Ближайшая к нам звезда Проксима Центавра имеет параллакс $0,7687 \pm 0,0003$, значит, расстояние до нее оставляет $1,3009 \pm 0,00015$ парсека. Это 4,2 светового года или около 39 трлн км.

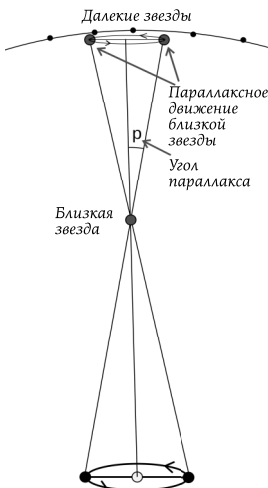
грешность может составить от 20 до 60% и во многом зависит от точности определения расстояния до звезды. В остальных случаях массу рассчитывают косвенно, например, по зависимости ее от светимости.

Масса Солнца составляет $(1,98892 \pm 0,00025) \times 10^{30}$ кг.

Эта величина представляет собой внесистемную единицу, с ней сравнивают массы остальных звезд. Рекордсменкой среди них является R136a1 массой в 265 солнечных.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ КЛАСС, ТЕМПЕРАТУРА И ЦВЕТ ЗВЕЗДЫ

| Спектральный класс | Температура | Цвет |
|--------------------|-----------------|-------------|
| O | 30 000—60 000 К | Голубой |
| B | 10 000—30 000 К | Белоголубой |
| A | 7500—10 000 К | Белый |
| F | 6000—7500 К | Желтобелый |
| G | 5000—6000 К | Желтый |
| K | 3000—5000 К | Оранжевый |
| M | 2000—3500 К | Красный |



Движение Земли вокруг Солнца. Измерение расстояния до звезды с помощью параллакса.

ГЛАВНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ, ИЛИ ЖИЗНЬ ЗВЕЗДЫ

В 1910 г. Эйнар Герцшпрунг и Генри Рассел независимо друг от друга создали диаграмму, на которую нанесли звезды. Они учли абсолютную звездную величину, спектральный класс, светимость и температуру поверхности. Оказалось, что большая часть звезд группируется вокруг неширокой кривой, так называемой главной последовательности. Это помогло изучению звезд и их эволюции.

На главной последовательности звезда находится большую часть своей жизни, пока водород в ее недрах превращается в гелий. Наше Солнце тоже находится на ней. На диаграмме есть также звезды-гиганты, в которых горят гелий и более тяжелые элементы, и белые карлики — звезды, в которых термоядерные реакции уже прекратились.

Что же происходит, когда водород в звезде выгорает? У звезды типа Солнца происходит следующее. Сначала звезда уплотняется, теряет массу и увеличивает атмосферу. При этом в ее недрах загораются углерод и кислород. Но синтез углерода дает так много энергии, что звезда начинает раздуваться. Так, оболочка Солнца в это время дойдет до орбиты Венеры. Затем звезда охлаждается и превращается в красный гигант. Внешний слой звезды остывает до красной части спектра.

Затем в звезде происходит синтез более тяжелых элементов. Когда топливо для нуклеосинтеза истощается, а температуры для его возобновления оказывается недостаточно, звезда снова начинает сжиматься.

СКОЛЬКО ЖИВУТ ЗВЕЗДЫ

Наше Солнце уже 5 млрд лет находится на Главной последовательности, и запасов водорода ему хватит еще на 5,5 млрд лет. У более крупных звезд жизнь короче. Конечно, запасов водорода в более массивной звезде больше, но ей приходится и больше его тратить для успешного противодействия силам гравитационного коллапса. И даже увеличение массы не позволяет вовремя восполнять запасы водорода. Поэтому самые крупные звезды буквально сгорают за десятки миллионов лет, а самые маленькие оказываются долгожителями и могут существовать десятки миллиардов лет, что больше возраста Вселенной.

КОГДА ВЗОРВЕТСЯ БЕТЕЛЬГЕЙЗЕ

Бетельгейзе, яркая звезда в левом плече Ориона, такая большая, что если бы она была расположена на месте нашего Солнца, то поглотила бы Землю, Марс и Юпитер. В диаметре эта звезда больше Солнца в 1000 раз. По мнению некоторых ученых, она должна взорваться в ближайшие 2000—3000 лет. На пике взрыва, который продлится не менее двух месяцев, светимость Бетельгейзе будет в 10^{50} раз превышать солнечную, благодаря чему наблюдать за ее гибелью с Земли можно будет даже невооруженным глазом.



Жизненный цикл звезды.

В итоге звезда класса Солнца превращается в белого карлика. Вообще же судьба звезды зависит от ее массы. Она может также превратиться в нейтронную звезду или

черную дыру. В двух последних перед этим происходит взрыв сверхновой. Материал закончившей свой жизненный путь звезды служит образованию молодых звезд.

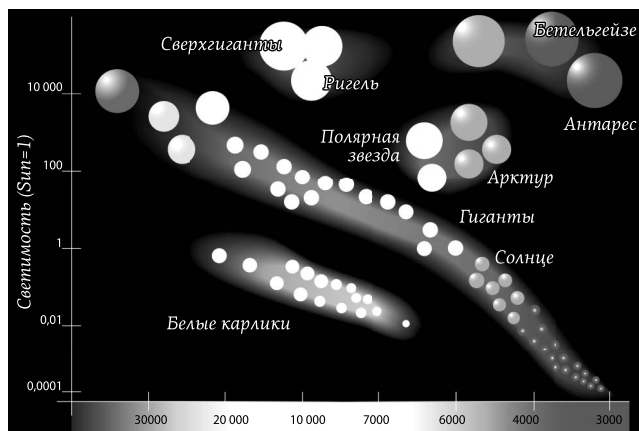
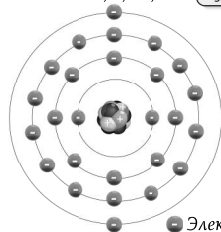


Диаграмма Герцшпрунга—Рассела, созданная для классификации звезд.

Атомный номер: 26
Атомный вес: 55,847
Электронные оболочки: 2, 8, 14, 2



● Электрон
● Протон
● Нейтрон

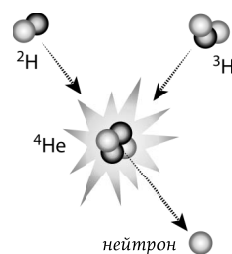
Атом железа, последнего элемента, возникающего в умирающей звезде.

СОЗДАНИЕ ИЗ ЗВЕЗД

После сгорания водорода в массивных звездах ядро снова разогревается и создаются условия для нуклеосинтеза более тяжелых элементов. Сначала синтезируется углерод, затем кремний, потом магний, и, наконец, наступает очередь железа. Внутри крупной звезды постепенно формируется железное ядро. На этом нуклеосинтез останавливается. Дело в том, что у ядра железа-56 имеется максимальный дефект массы. Образование более тяжелых ядер с выделением энергии просто невозможно. Звезда умирает. Но зато можно с полной определенностью сказать, что все химические элементы во Вселенной, вплоть до железа, возникли в недрах умирающих звезд. Значит, все живое, в том числе и человек, состоит из звездного материала, родившегося в термоядерных реакциях.

САМАЯ РАСПРОСТРАНЕННАЯ РЕАКЦИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Нуклеосинтез, происходящий в недрах звезды, представляет собой самую распространенную реакцию во Вселенной. В результате многоступенчатой реакции из четырех протонов (то есть ядер водорода) образуется ядро гелия (2 протона + 2 нейтрона) и выделяется множество других разнообразных частиц. Поскольку суммарная масса образовавшихся частиц меньше массы начальных протонов, что называют дефектом массы, происходит выделение свободной энергии. Она вызывает разогрев ядра молодой звезды, но при этом поступает и наружу. Давление в центре звезды повышается, что не дает произойти гравитационному коллапсу. Звезда приходит в состояние энергетического равновесия.



Образование ядер гелия из ядер водорода в недрах звезды.

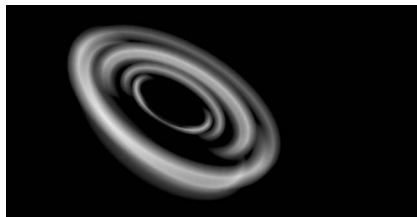
БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ, ИЛИ РОЖДЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Сегодня считается, что наша Вселенная возникла примерно 13,8 млрд лет назад. До этого она находилась в состоянии так называемой сингулярности. Тогда не было ни пространства, ни времени, ни элементарных частиц. Можно сказать, что Вселенная возникла из точки. Есть предположение, что эта точка-сингулярность была сверхмассивной черной дырой. Большим взрывом называют и сам момент начала расширения Вселенной, и ее последующие расширение и остывание.

Итак, когда Вселенная возникла, она была очень горячей, однородной, с необычайной плотности энергией и давлением. Ее дальнейшим изменениям соответствовали так называемые фазовые переходы. Самый ранний ее период называется Планковской эпохой, и длился он примерно 10^{-43} с. Именно тогда гравитационное взаимодействие отделилось от остальных фундаментальных взаимодействий. Вселенная стала расширяться дальше.

СВЕРХМАССИВНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

В центре нашего Млечного Пути находится чрезвычайно массивная черная дыра, которая в миллионы раз тяжелее Солнца. Такие сверхмассивные черные дыры были обнаружены также и в центрах других галактик. Их смогли вычислить, наблюдая за движением межзвездного газа. Предполагают, что центр каждой галактики — гигантская черная дыра.



Сверхмассивные черные дыры находятся в центрах галактик.



Следующий период ее развития называется периодом Космической инфляции. Когда он завершился, Вселенная была полна элементарных частиц — кварков и глюонов. Некоторое время спустя температура упала настолько, что кварки и глюоны смогли объединиться в барионы, то есть протоны и нейтроны. В это же время образовывались материя и антиматерия. Их столкновение вызывало аннигиляцию и появление излучения. Но материи было намного больше.

Температура продолжала падать, и это вызвало следующий фазовый переход. Так образовались современные физические силы и элементарные частицы. За этим наступил период нуклеосинтеза, то есть образования ядер атомов.

КАКОВО БУДУЩЕЕ ВСЕЛЕННОЙ

Судьба Вселенной зависит от средней плотности вещества в ней. Если плотность не больше определенного критического значения, то Вселенная будет расширяться вечно. Если же плотность выше, то когда-нибудь Вселенная перестанет расширяться и начнет сжиматься. И тогда все снова вернется к сингулярности. Но сегодняшняя наука пока не может ответить на вопрос о плотности, и будущее Вселенной остается неизвестным.

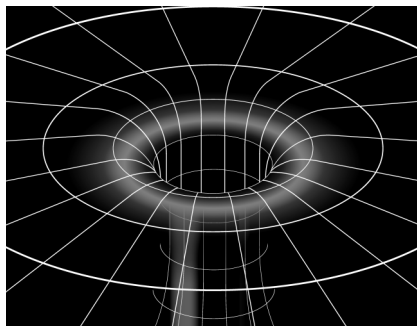
В следующий период, начавшийся после дальнейшего падения температуры и расширения Вселенной, доминирующей силой стала гравитация.

И наконец, через 380 тысяч лет после Большого взрыва начали образовываться атомы водорода.

И только после этого стал формироваться межзвездный газ. Из газопылевых облаков со временем образовались звезды и планеты.

ЧТО ТАКОЕ СИНГУЛЯРНОСТЬ

Внутри черной дыры происходит следующее: все ее вещество собирается в бесконечно малую точку с бесконечно большой плотностью и занимает нулевой объем. Такое явление называется сингулярностью. Предполагают, что из такой точки когда-то возникла наша Вселенная.



Искажение пространства-времени в черной дыре.

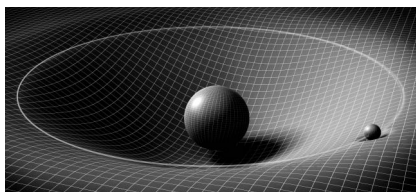
ПРЕДСКАЗАНИЕ ЛАПЛАСА

Опередив свое время, Лаплас в «Изложении системы мира» (1796) фактически предсказал черные дыры. Он писал: «Если бы диаметр светящейся звезды с той же плотностью, что и Земля, в 250 раз превосходил диаметр Солнца, то вследствие притяжения звезды ни один из испущенных ею лучей не смог бы дойти до нас; следовательно, не исключено, что самые большие из светящихся тел по этой причине являются невидимыми».

ЧЕРНАЯ ДЫРА

Черной дырой называют область пространства-времени с очень большим гравитационным притяжением, таким, что его не могут покинуть никакие объекты, даже те, которые движутся со скоростью света, даже фотоны — кванты света. Границу черной дыры называют горизонтом событий, а размер — гравитационным радиусом, который для сферической дыры называется радиусом Шварцшильда. Всякий объект, приблизившийся к этому радиусу, уже не вернется. Как же может образоваться черная дыра? Согласно закону всемирного тяготения, Земля вращается вокруг Солнца по причине гравитационного притяжения. Исходя из общей теории относительности, Солнце, будучи массивным объектом, проминает пространство-время, как мяч на батуте. Образуется что-то вроде воронки, вокруг которой «катается» Земля. Если увеличивать массу Солнца, не изменяя его размеры, то воронка пространства-времени будет углубляться, пока ее края не сойдутся над потяжелевшей звездой. И тогда звезда превратится в черную дыру и перестанет быть видимой при взгляде с поверхности. В реальной Вселенной объект, накопив достаточную массу и плотность, попадает в пространственно-временную ловушку и становится невидимым. Этим объектом может быть не только массивная звезда, но и центральная часть галактики, и облако космического газа, из которого обычно формируются галактики. Главное — рост плотности и коллапс. Так и возникает черная дыра.

Есть дыры и поменьше, которые образуются в результате коллапса массивных звезд. Изучение их продолжается.



Задолго до образования черной дыры.

ГАЛАКТИКИ — ЗВЕЗДНЫЕ ОСТРОВА

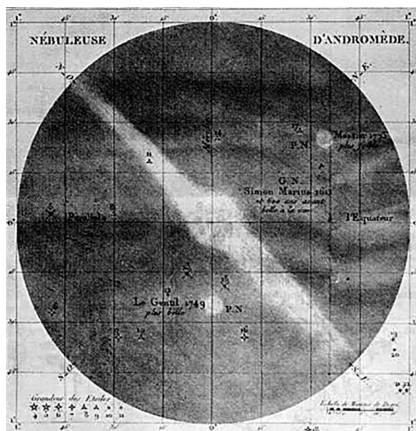
Согласно современному определению, галактика представляет собой гравитационно-связанную систему из звезд, звездных скоплений, межзвездного газа, пыли и темной материи. Все объекты галактики совершают движение относительно общего центра масс. Слово «галактика» в переводе с древнегреческого означает «Млечный Путь». Когда-то так называли только нашу Галактику, потом и другие открытые звездные системы. Однако только в XX в. другие галактики были окончательно признаны таковыми.

В 1610 г. Галилео Галилей исследовал Млечный Путь с помощью недавно построенного им телескопа. Ученый обнаружил, что Млечный Путь — это множество слабо светящихся звезд.

В 1755 г. Иммануил Кант высказал предположение, что наша Галактика, то есть Млечный Путь, — это вращающееся тело, огромный диск, состоящий из множества звезд, которые удерживают вместе гравитационные силы, такие же, как в Солнечной системе, только действуют они в больших масштабах. Для наблюдателя на Земле галактический диск должен выглядеть как

ВЕЛИКИЙ СПОР

26 апреля 1920 г. в Национальном музее естественной истории в Вашингтоне состоялась дискуссия между Харлоу Шепли и Гебером Кертисом. Шепли утверждал, что далекие туманности — это объекты, которые находятся в пределах Млечного Пути, а Кертис говорил, что это отдельные звездные системы, подобные нашей Галактике. При этом Кертис считал, что Солнце находится в центре Галактики; по мнению Шепли, оно располагается в ее внешних областях. Эта дискуссия получила название «Великий спор». Спорщики договорились, что подождут еще хотя бы одно независимое измерение. В 1924 г. результаты, полученные Эдвин Хабблом на 100-дюймовом телескопе, доказали, что Туманность Андромеды полна звезд и является настоящей галактикой. Великий спор был завершен. Однако Шепли, ошибившись по поводу галактик, оказался прав в том, что касалось положения Солнца.



Объект M31, галактика Андромеды.
Рисунок Шарля Мессье.

светлая полоса, что и происходит. Кант также предположил, что некоторые наблюдаемые на ночном небе туманности тоже являются галактиками.

Туманностей к тому времени открыли множество. В каталоге, составленном Шарлем Мессье в конце XVIII в., их насчитывалось 109. Уильям Гершель в 1795 г. наблюдал планетарную туманность NGC 1514 и отчетливо



Джон Гершель (1792—1871), английский астроном, сын Уильяма Гершеля.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ХАББЛА

В 1936 г. Эдвин Хаббл построил классификацию галактик, которая используется и сегодня. Ее называют последовательностью Хаббла. Цифры в этой классификации обозначают эксцентриситет, то есть параметр, характеризующий вытянутость эллипса. Это не форма галактики, которую трудно установить, а форма ее проекции на плоскость наблюдения.

E0—E7 — эллиптические галактики с относительно равномерным расположением звезд без явно выраженного ядра. При этом галактики почти шарообразны.

S0 — линзообразные галактики без наблюдаемых рукавов, но с ясно выраженным балджем (центральный яркий компонентом).

Sa, Sb, Sc, Sd — спиральные галактики с балджем, внешним диском и рукавами. Буквы обозначают плотность расположения рукавов.

SBa, SBb, SBc, SBd — спиральные галактики с перемычкой и отходящими от нее рукавами.

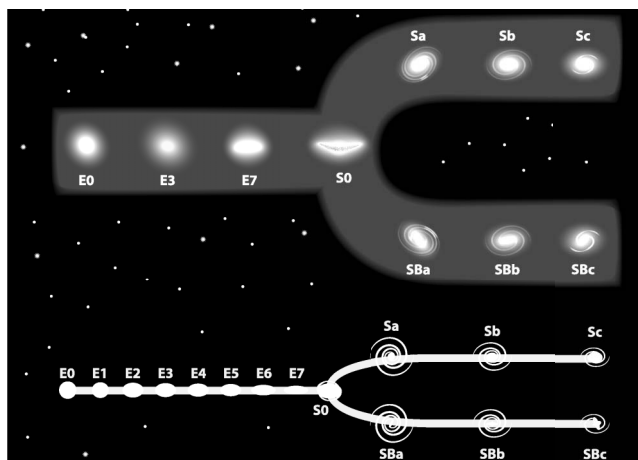
Irr — неправильные, или иррегулярные галактики.

увидел находящуюся в ее центре одиночную звезду, которую окружало туманное вещество. Он также предположил, что туманности — звездные системы, подобные Млечному Пути. Его сын Джон Гершель к середине XIX в. открыл еще 5000 таких туманностей. Однако многие ученые считали, что туманности, в которых невозможно различить отдельные звезды, связаны с Млечным Путем и представляют собой формирующиеся планетные системы.

Так продолжалось до начала XX в. Однако уже на снимках, полученных в 1910 г. Джорджем Ричи на 60-дюймовом телескопе, было видно, что спиральные ветви больших туманностей усыпаны звездообразными объектами. В 1918 г. Эрнст Эпик определил

расстояние до туманности Андромеды. Стало ясно, что она не является частью Млечного Пути. А Эдвин Хаббл в 1924 г. на основе множества наблюдений подтвердил, что туманности — это самостоятельные звездные системы. Сначала их называли звездными островами, но теперь именуют галактиками по примеру нашей.

Проблемы с признанием галактик таковыми были вызваны тем, что телескопы долго не позволяли различать в них отдельные звезды. Даже в начале 1990-х гг. отдельные звезды можно было разглядеть только в 30 галактиках. И только когда на орбиту был запущен космический телескоп «Хаббл», а на Земле установлены 10-метровые телескопы, число разрешенных галактик резко увеличилось.



Классификация
галактик
по Хабблу.

Галактики в пространстве распределяются неравномерно. Иногда в одной области располагаются целые группы, а иногда ни одной. Размеры у них тоже разные. Так, диаметр самой большой галактики IC 1101 более 600 килопарсек.

Галактики весьма разнообразны по форме, велики по массе и очень удалены от нас. Невооруженным глазом можно различить только три галактики (кроме нашей). Это Туманность Андромеды и Большое и Малое Магеллановы Облака. Уже из названий понятно, что они долго не воспринимались как галактики. И сегодня правильное научное название Туманности Андромеды — галактика Андромеды.

В настоящее время структура галактик изучена достаточно, хотя вопросов остается еще больше. У большинства галактик имеется ядро — это очень маленькая по сравнению с размерами всей галактики область в ее центре. Большинство звезд и других небесных тел сконцентрировано в относительно тонком диске. Диск разделяется на газопылевую и звездную части. Многие галактики имеют вы-

пуклую часть, так называемый сфероидальный компонент, самой яркой частью которого является балдж. Внешний сфероидальный компонент носит название «гало». Многие галактики имеют спиральные ветви, или рукава. В них концентрируются главным образом молодые звезды и межзвездный газ.

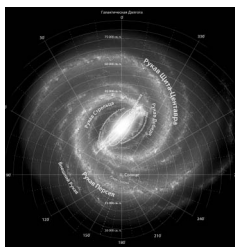
У галактики нет четких границ, и потому ее размеры зависят от способа наблюдения. Например, наблюдение в видимом диапазоне дает один результат, а если исходить из радионаблюдений межзвездного газа, то ее радиус оказывается в десятки раз больше. А ведь оценка размера позволяет определить массу. Спектр галактики получается сложением всех объектов, которые ее составляют. В галактическом спектре наблюдается два максимума. Звезды излучают в видимом диапазоне и дают первый максимум спектра. Межзвездная пыль поглощает свет и переизлучает его в инфракрасном диапазоне — так образуется второй максимум. В инфракрасном диапазоне также излучают некоторые звезды. Активные

ЯРЧАЙШИЙ СВЕТ

Одними из самых ярких объектов в видимой Вселенной являются квазары. Квазар означает «квазизвездный». В настоящее время полагают, что квазар представляет собой активное ядро галактики, в центре которой находится черная дыра. Заряженные частицы, приближаясь к черной дыре, разгоняются и сталкиваются, из-за чего возникает сильнейшее световое излучение. Если у черной дыры имеется мощное магнитное поле, то оно собирает падающие частицы, объединяя их в так называемые джеты — тонкие пучки, которые разлетаются от полюсов. Мощность излучения квазара иногда оказывается больше мощности всех звезд галактики в десятки и даже в сотни раз.

НЕМНОГО О НАШЕЙ ГАЛАКТИКЕ

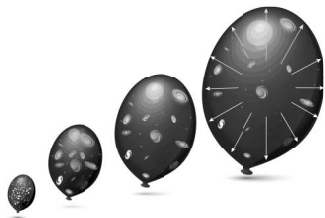
Млечный путь представляет собой спиральную галактику с перемычкой и рукавами. Ее диаметр оценивают в 100 тысяч световых лет. Толщина звездного диска составляет от 100 до 300 световых лет. Скорость звезд в окрестностях Солнца 220 км/с. Расстояние от Солнца до центра Галактики примерно 26 тысяч световых лет. А всего в нашей Галактике от 200 до 400 миллиардов звезд. Солнечная система находится внутри галактического диска, пыль которого поглощает свет. Поэтому Млечный путь и имеет такой вид, а поглощение света не позволяет изучить его полностью.



Компьютерная
модель
Млечного
Пути.



Квазар —
ярчайший
объект
во Вселенной.



Расширение Вселенной на примере воздушного шара.

ВЕЛИКИЙ АТТРАКТОР

Наша Галактика движется во Вселенной в направлении созвездия Центавра со скоростью 2,2 млн км/ч. Несколько десятилетий назад появилась гипотеза, согласно которой Галактику притягивает к себе некий Великий Аттрактор. Оказалось, что это сверхскопление Шепли, которое составляют более 8000 галактик, чья общая масса больше массы Млечного Пути в 10 000 раз. Это сверхскопление притягивает не только Млечный Путь, но и всю Местную группу.

ядра галактик, нейтронные звезды и черные дыры дают гамма-излучение.

По последним данным, в нашей Вселенной насчитываются сотни миллиардов галактик. Подавляющее их большинство (95%) формируют группы галактик. К примеру, наша Галактика входит в так называемую Местную группу. Эта группа включает больше 40 галактик. Местная группа, в свою очередь, входит в сверхскопление Девы, состоящее из группы скоплений. Сверхскопление состоит из тысяч галактик. Самое крупное сверхскопление — так называемая Великая стена Геркулес — Северная Корона. Это десятая часть всей наблюдаемой Вселенной. Размеры ее — более 10 млрд световых лет. Интересно, что открыли эту грандиозную структуру только в 2013 г. Это стало возможным благодаря наблюдениям за вспышками гамма-излучения, выполненным в 1997—2012 гг.

Часть наблюдаемой Вселенной, доступная для изучения, называется Метагалактикой. По одной из современных версий, галактики в ней связаны тончайшими нитями-перегородками, по большей части состоящими из темной материи. Такая структура называ-

ется «космической паутиной». Кроме того, между галактиками и их скоплениями существуют относительно пустые зоны, где плотность звездного вещества чрезвычайно низка. Поэтому видимую Вселенную можно представить себе в виде некой пористой или ячеистой структуры.

ЗАКОН ХАББЛА

В первой трети XX в. астрономы обнаружили, что большинство внегалактических объектов удаляется от Солнечной системы с огромной скоростью. Это привело к идеям о расширении Вселенной. Их высказывали и Артур Эддингтон, и Жорж Леметр, и Эдвин Хаббл, работавший в обсерватории Маунт-Вилсон со 100-дюймовым (254 см) телескопом. Этот телескоп позволял выделять звезды в ближайших галактиках. Среди них были так называемые цефеиды. Хаббл измерил расстояние до них и красное смещение, благодаря которому смог определить скорость.

Он определил, что чем дальше находится галактика, тем с большей скоростью она удаляется. Таким образом, имеет место центростремительное разбегание видимой Вселенной по мере удаления от локальной точки наблюдения. Так был создан закон Хаббла. Он формулируется следующим образом:

кажущаяся скорость удаления галактики от нас прямо пропорциональна расстоянию до нее:

$$V = H_0 r$$

либо

$$cz = H_0 r,$$

где V — скорость галактики, r — расстояние до нее, c — скорость света, H_0 — постоянная Хаббла (70 км/(с×Мпк)).



Обсерватория Маунт-Вилсон.

ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ И ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

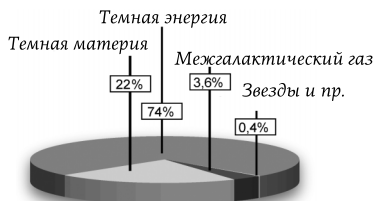
Одной из проблем строения галактик является темная материя. Она проявляется только в гравитационном взаимодействии. Темная материя может составлять до 90% от общей массы галактики, а может и полностью отсутствовать. Это стало понятно, когда выяснилось, что общая видимая масса галактик, которая состоит из массы звезд и межзвездного газа, не может объяснить скорости вращения их внешних областей, если не учитывать темную материю. Кроме темной материи существует также гипотеза о темной энергии.

Темная материя — это гипотетическая форма материи, которая не испускает электромагнитного излучения и напрямую не взаимодействует с ним. Поэтому ее нельзя наблюдать прямыми методами, только косвенными. Однако многочисленные эффекты, например, аномально высокая скорость вращения внешних областей галактик, говорят о ее существовании.

В истории науки известны случаи, когда движение небесных тел не могли объяснить согласно законам небесной механики. Обычно это приводило к открытию нового небесного тела. Так, например, произошло открытие Нептуна и звезды Сириус В. Однако в 1922 г. астрономы Джеймс Джинс и Якобус Каптейн, проанализировав движение звезд,

РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ И ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Расширение Вселенной, открытое в начале XX в., продолжает преподносить сюрпризы. Раньше думали, что оно замедляется. В конце 1990-х гг. выяснилось, что сверхновые типа Ia, называемые стандартными свечами, экспоненциально удаленные от Солнца, показывают уменьшение светимости. Был сделан вывод, что Вселенная расширяется с ускорением. Это, в свою очередь, привело к идее о существовании нового вида энергии, который получил название темной энергии.



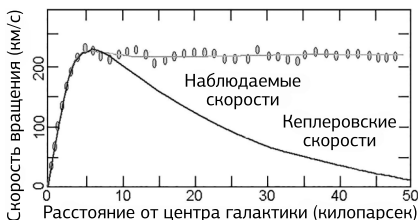
Распределение вещества и энергии во Вселенной.

сделали вывод, что большая часть вещества Галактики является невидимой. Они, скорее всего, и применили впервые термин «темная материя». Он же используется в статье Яна Оорта, опубликованной в 1932 г.

В 1933 г. Фриц Цвикки измерил скорости восьми галактик в скоплении Кома, наблюдающемся в созвездии Волосы Вероники. Он пришел к выводу, что устойчивость скопления можно объяснить, только приняв гипотезу, что его масса намного превышает массу звезд, входящих в него.

ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИК

Законы Кеплера говорят о том, что от центра галактики к ее периферии скорость вращения звезд уменьшается обратно пропорционально квадратному корню расстояния до центра. Однако на самом деле во многих галактиках эта скорость практически не изменяется даже на большом удалении от центра. Это значит, что плотность вещества в подобных галактиках не уменьшается при движении от центра, а остается почти неизменной.



Кривая вращения галактик, реальная и ожидаемая.

Численное моделирование распределения темной материи, или, как его называют, космологическая симуляция, приводит к так называемой проблеме сингулярного гало. Согласно всем расчетам, темная материя должна стремиться в центр галактики, и там ее, соответственно, будет больше, чем в других регионах. Но прямые астрономические наблюдения, которые приводят к обнаружению темной материи, говорят об обратном. Темная материя, как оказалось, не показывает никаких сингулярностей, или каспов в распределении, а, наоборот, образует вокруг галактики гало, заполняя таким образом пустоты между скоплениями галактик.

ВОЛОСЫ ВЕРНИКИ, ОТКРЫВШИЕ ТЕМНУЮ МАТЕРИЮ

Созвездие — участок, на который небесная сфера делится для удобства наблюдения, либо фигура, составленная звездами, видимыми с Земли. На самом деле они могут быть очень далеко друг от друга. Волосы Вероники — это созвездие северного полушария неба. В нем находится Северный полюс нашей Галактики. Оно включает 64 звезды, которые можно увидеть невооруженным глазом. Наблюдая это созвездие, можно видеть тысячи галактик и сотни их скоплений.

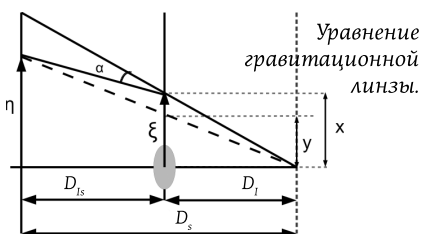


Изучение созвездия Волосы Вероники помогло Фрицу Цвикки сделать предположение о темной материи.

В космосе иногда образуются гигантские линзы. Известно, что луч света отклоняется, проходя мимо массивного тела. И это тело может собрать параллельный пучок в определенном фокусе. Так формируется изображение, а яркость источника увеличивается из-за изменения углового размера. Это явление — гравитационное линзирование — используется при поиске темной материи. Уравнение гравитационной линзы таково:

$$\eta = \xi D_s / D_d - D_{ds} \alpha (\xi),$$

где η — координата источника, ξ — расстояние от центра линзы до точки преломления (прицельный параметр) в плоскости линзы, D_s , D_d — расстояния от наблюдателя до источника и линзы соответственно, D_{ds} — расстояние между линзой и источником, α — угол отклонения.



Вскоре подобные выводы были сделаны для множества других галактик, в том числе для Туманности Андромеды. В 1960—1970-х гг. с усовершенствованием телескопов и спектрографов выяснилось, что общая масса каждой галактики в несколько раз больше суммарной массы ее звезд.

Сегодня считается, что на ранних стадиях эволюции Вселенной между частицами темной материи и частицами космической плазмы существовало термодинамическое равновесие. Но наступил момент, когда температура сильно упала, и взаимодействие частиц темной материи с обычным, так называемым барионным веществом прекратилось. Но происходило подобное, видимо, несколько раз при разных температурах. В зависимости от этого различают горячую, холодную и теплую темную материю.

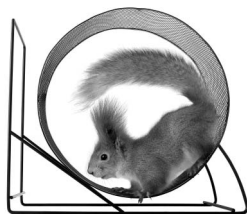
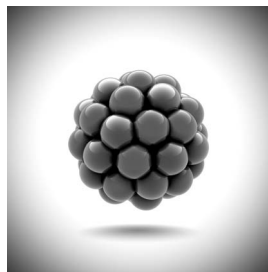
Особенно велика доля темной материи в двойных галактиках и галактических скоплениях.



СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| Предисловие..... | 3 |
| Когда возникла наука физика | 4 |
| Измерение и эталоны, или Не надо мерить на свой аршин..... | 6 |
| Энергия — основа Вселенной..... | 8 |
| Вездесущие колебания..... | 12 |
| Солнце и планеты: вечное движение | 14 |
| Всемирное тяготение: приливы и ракеты..... | 16 |
| Инерция: первый закон Ньютона..... | 18 |
| Ускорение: второй закон Ньютона..... | 20 |
| Действие равно противодействию: третий закон Ньютона | 22 |
| Трение в движении и покое | 26 |
| Количество движения..... | 30 |
| Сила, закручивающая вихри..... | 34 |
| Рычаг, или Можно ли перевернуть Землю | 36 |
| Закон Гука, упругость и пластичность | 38 |
| Четыре состояния вещества..... | 40 |
| Физика атмосферы: предсказание погоды..... | 42 |
| Атмосферное давление | 44 |
| Закон Архимеда: выталкивающая сила | 46 |
| Ньютоновские и неньютоновские жидкости..... | 48 |
| Поверхностное натяжение..... | 50 |
| Смачивание и капиллярные явления..... | 54 |
| Полет: тысячелетняя мечта | 56 |
| Закон Бернулли: от тенниса до авиации..... | 58 |
| Турбулентность, или Почему трясет самолет..... | 60 |
| Атомная теория: строение материи..... | 64 |
| Молекулярно-кинетическая теория..... | 66 |
| Реальные и идеальные газы | 68 |
| Растворы: физика вместе с химией..... | 70 |
| Фундаментальные взаимодействия во Вселенной | 72 |
| Электричество: от янтаря до электростанции..... | 74 |
| Электропроводность: движение заряженных частиц..... | 78 |
| Магнетизм: взаимодействие зарядов..... | 80 |
| Магнитное поле Земли..... | 82 |
| Электромагнитная индукция | 84 |
| Сверхпроводимость: дары низких температур | 86 |
| Электролиз: электроды и электролиты..... | 88 |
| Электрофорез, или Как ток двигает молекулы..... | 90 |
| Кристаллы: формы и свойства..... | 92 |
| Энтропия, или Мера беспорядка | 96 |
| Измерение температуры, или Разнообразие термометров | 100 |
| Теплопередача: от кастрюли до моря | 104 |
| Термодинамические циклы: идеальные и реальные..... | 106 |

| | |
|---|-----|
| Природа и скорость света..... | 108 |
| Природа цвета: открытие и применение..... | 110 |
| Преломление, или Луч, меняющий свой путь..... | 114 |
| Отражение света, или Зеркала и миражи..... | 118 |
| Поларизация: чудеса поперечных волн..... | 120 |
| Интерференция и дифракция: кольца Ньютона и компакт-диски..... | 124 |
| Инфракрасное излучение, или Горячий невидимый свет | 126 |
| Ультрафиолетовое излучение: его польза и вред..... | 128 |
| Люминесценция: холодный свет..... | 130 |
| Звук и его скорость в разных средах..... | 132 |
| Звуковой барьер: преодоление..... | 136 |
| Звуки музыки: наука и искусство..... | 138 |
| Ультразвук, или Высокая частота..... | 140 |
| Инфразвук, или Неслышимый рокот..... | 142 |
| Реверберация, или Распространение звука в помещениях..... | 144 |
| Физика землетрясений — успехи сейсмологии | 146 |
| Радиоволны на службе человека | 150 |
| Физика для астрономии: радиотелескопы..... | 154 |
| Радиолокация, или Всевидящие радары..... | 156 |
| Специальная теория относительности, или Самая знаменитая формула физики..... | 158 |
| Общая теория относительности, или Гравитация во Вселенной..... | 161 |
| Эффект Доплера: звук и свет в движении..... | 164 |
| Постоянная Планка и начало квантовой физики..... | 166 |
| Уравнение Шрёдингера и развитие квантовой механики..... | 168 |
| Стандартная модель: все частицы в одной таблице | 170 |
| Эффект Вавилова—Черенкова..... | 172 |
| Радиоактивность, или Ядра, рождающие частицы..... | 174 |
| Рентгеновское излучение, или «Пронизывающий взгляд»..... | 178 |
| Ядерная реакция распада: оружие и электростанции..... | 182 |
| Термоядерная реакция: в поисках универсального топлива | 184 |
| Исследование элементарных частиц и Большой адронный коллайдер..... | 186 |
| Вынужденное излучение: лазеры и мазеры..... | 188 |
| Небесная механика и космология | 190 |
| Как устроены звезды..... | 194 |
| Главная последовательность, или Жизнь звезды..... | 196 |
| Большой взрыв, или Рождение Вселенной..... | 198 |
| Галактики — звездные острова..... | 200 |
| Темная материя и темная энергия..... | 204 |



12+

Серия «Всё для каждого образованного человека»

Научно-популярное издание

СПЕКТОР Анна Артуровна

ФИЗИКА ДЛЯ КАЖДОГО ОБРАЗОВАННОГО ЧЕЛОВЕКА

Ответственный за выпуск *И. В. Резько*

Дизайн обложки *Д. С. Агапонов*

Общероссийский классификатор продукции ОК-034-2014 (КПЕС 2008);
58.11.1 — книги, брошюры печатные

Подписано в печать 22.07.2019

Формат 60х90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура PF Centro Sans Pro.

Усл. печ. л. 13,0. Тираж 2000 экз. Заказ №

Произведено в Российской Федерации. Изготовлено в 2019 г.

Изготовитель: ООО «Издательство АСТ»

129085, Российская Федерация, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21, стр. 1,
комн. 705, пом. I, этаж 7

Наш сайт: www.ast.ru Интернет-магазин: www.book24.ru

«Баспа Аста» деген ООО

129085, Мәскеу қ., Звёздный бульвары, 21-үй, 1-құрылыс, 705-бөлме, I жай, 7-қабат.

Біздің электрондық мекенжайымыз: www.ast.ru

E-mail: ogiz@ast.ru

Интернет-магазин: www.book24.kz

Интернет-дүкен: www.book24.kz

Импортёр в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».

Қазақстан Республикасындағы импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.

Дистрибьютор и представитель по приему претензий на продукцию в республике Казахстан:

ТОО «РДЦ-Алматы»

Қазақстан Республикасында дистрибьютор

және өнім бойынша арыз-талаптарды қабылдаушының

өкілі «РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Домбровский көш., За, литер Б, офис 1.

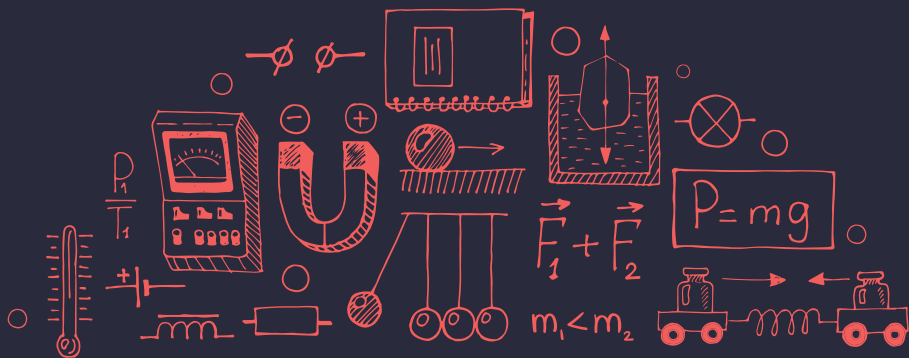
Тел.: 8(727) 251 59 89, 90, 91, 92

Факс: 8(727) 251 58 12, вн. 107; E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz

Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген.

Өндірген мемлекет: Ресей

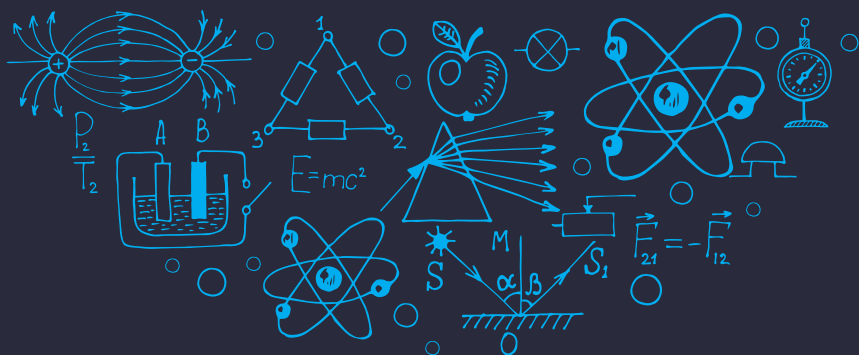
Сертификация қарастырылмаған



Физика — это основа основ всех наук, законы, по которым существует весь наш мир и его составляющие. Названная в глубокой древности Аристотелем «наукой о движении», на протяжении столетий она открывала многие законы мироздания, и исследования ученых продолжают до сих пор.

- Темная материя: тайны параллельных миров
- Сила Кориолиса и география полушарий
- Закон Авогадро: «химическая» физика
- Точные измерения и принцип неопределенности
- От колец Ньютона до компакт-дисков
- Кот Шрёдингера и предсказания состояний

Эти и множество других основополагающих теорий, которые заинтересуют каждого образованного человека, — на страницах этой книги!



книги для любого настроения здесь



ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА АСТ

www.ast.ru | www.book24.ru

vk.com/izdatelstvoast
 @ instagram.com/izdatelstvoast
 facebook.com/izdatelstvoast
 ok.ru/izdatelstvoast

ISBN 978-5-17-118144-4



ОГИЗ