

В. С. КЕССЕЛЬМАН

ФИЗИКА

ОТ ГНОМОНА ДО КВАНТА

Искра
статического электричества
может достигать
3000 вольт

В. Петров, при описании явления
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ДУГИ
срезал верхний слой кожи
на пальцах,
чтобы лучше чувствовать
слабые токи

При попадании в человека
РАЗРЯДА МОЛНИИ
на его теле появляется
особый рисунок, носящий название
«Фигуры Лихтенберга»

в инфографике

ФИЗИКА

ОТ ГНОМОНА ДО КВАНТА

в инфографике

МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО АСТ



УДК 53(03)
ББК 22.3я2
К36

Охраняется законом об авторском праве. Воспроизведение всей книги или любой ее части запрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона будут преследоваться в судебном порядке.

К36 Физика в инфографике. От гномона до кванта / В.С. Кессельман – Москва: Издательство АСТ, 2016. – 208 с.: ил. – (Все знания мира в инфографике).

Во все века человек никогда не переставал быть любознательным. Интерес к природе, жизненные потребности людей привели к появлению такой науки как физика – одной из самых важных наук о природе, возникшей в глубокой древности. Для познания окружающего мира человечеству пришлось пройти увлекательный, но мучительно длинный и трудный путь познания природы. Книга «Физика в инфографике» даст читателю возможность подняться по «ступеням» классической физики – от изобретения гномона до открытия кванта действия – с помощью инфографики.

УДК 53(03)
ББК 22.3я2

Мир — лестница, по ступеням которой
Шел человек
И каждая ступень
Была восстанием творческого духа

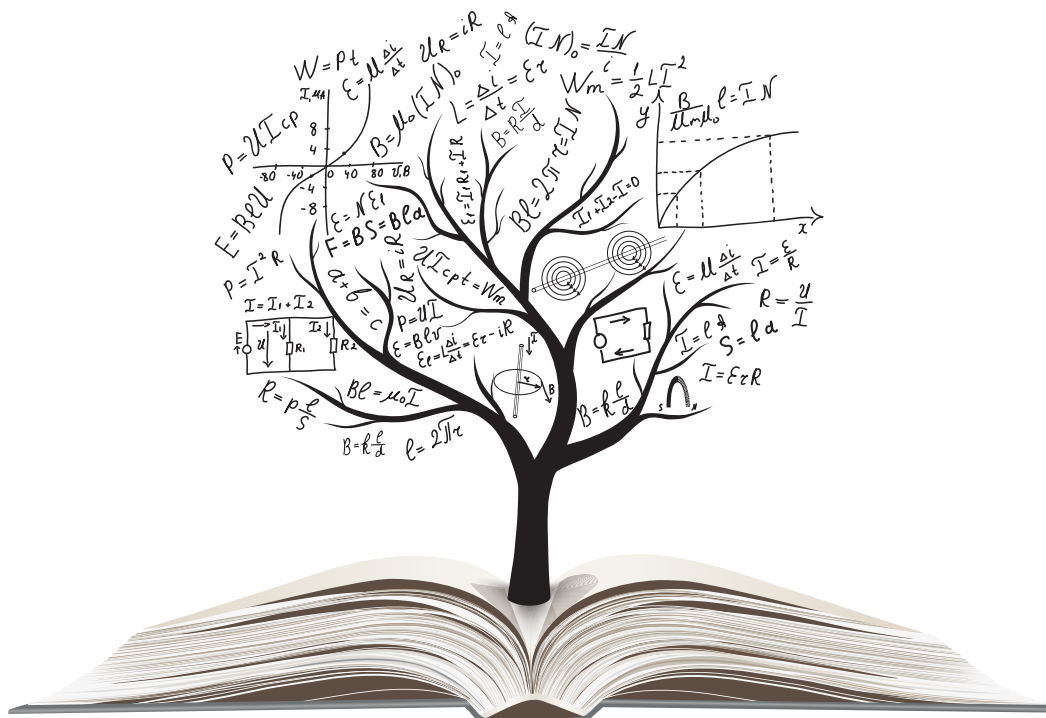
М. Волошин

ПРЕДИСЛОВИЕ

Физика — наука о природе, изучающая наиболее общие свойства материального мира, важнейший источник знаний об окружающем мире. Будучи самыми базовыми и универсальными, законы физики лежат в основе всего естествознания. Практически любая естественная наука так или иначе связана с физикой. Физику считают теоретической основой современной техники, многие отрасли которой возникли на базе физических открытий.

Потребность в изучении окружающего мира на протяжении всей истории физики привлекала выдающихся ученых. Этими учеными было открыто и изучено огромное число явлений, которые не только интересны с точки зрения познания окружающего мира, но и нашли безмерно разнообразные применения в технике, технологии и повседневной жизни.





Об истории открытий, биографиях ученых нами написан ряд книг*. В этой книге рассказано полно, последовательно и неспешно, с использованием математического аппарата, не выходящего за рамки школьного курса, о результатах, полученных учеными на разных этапах развития физики, а также о сопутствующих им исторических обстоятельствах. В книге приведены описания реальных явлений, конкретных опытов, приведших к известным открытиям, теориям. Чтобы у читателя не сложилось представление, что принятые в этих теориях многими исследователями представления есть истина в последней инстанции, рассмотрены возражения, критика, которой подвергаются основные положения, легшие в основу современной физической картины мира. Как отмечал один из создателей квантовой физики Луи де Бройль: «Каждый успех наших знаний ставит больше проблем, чем решает».

Мы определяем эту книгу как книгу для чтения по физике, полезную как для любознательных школьников, желающих глубже изучить предмет, преподавателей физики и руководителей физических кружков, студентов, так и для всех тех, кто хочет пополнить свои знания в одной из самых увлекательных и важных наук в процессе интересного и познавательного чтения.

* Кессельман В. С. Удивительная история физики. М.: ЭНАС-КНИГА, 2013. 376 с.

Кессельман В. С. На кого упало яблоко. М.: Ломоносовъ, 2014. 240 с.

Кессельман В. С. Жизнеописания знаменитых физиков и астрономов. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. 544 с.

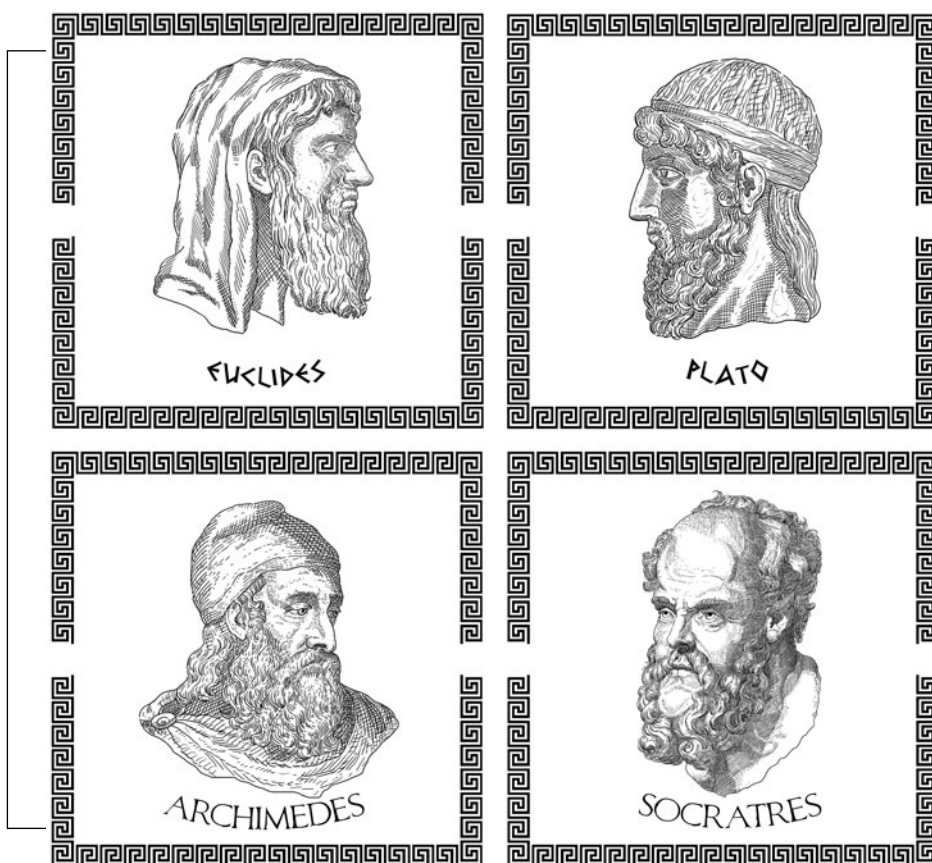
ВВЕДЕНИЕ

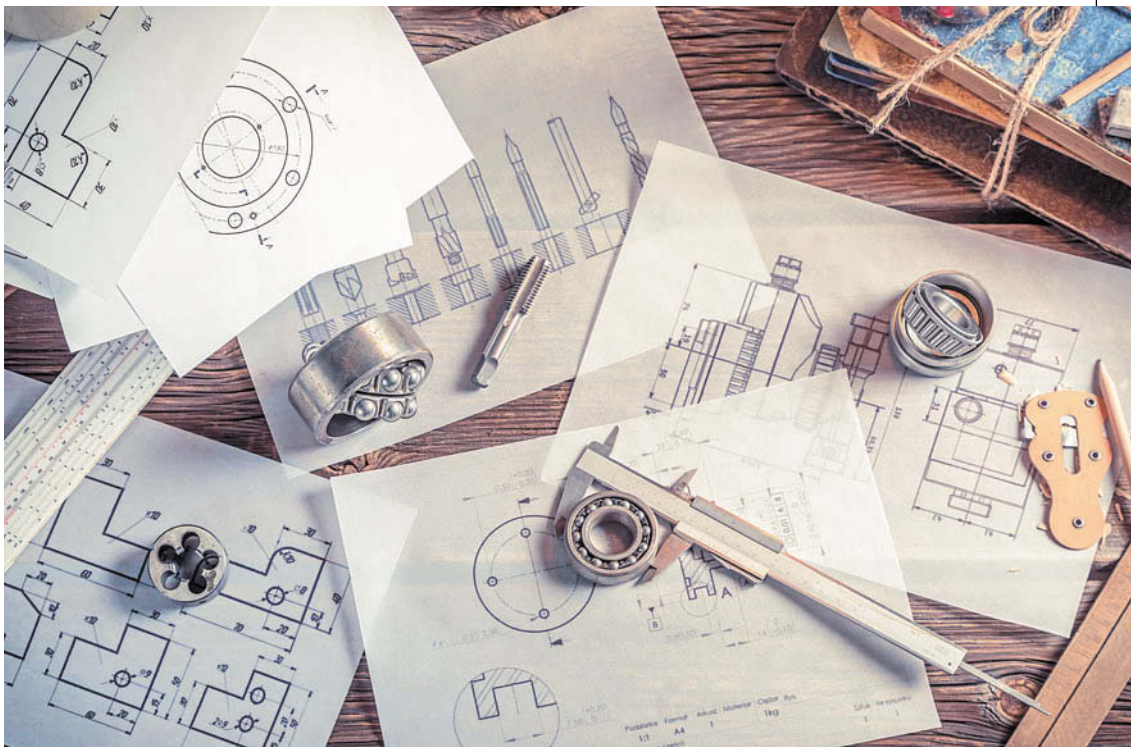
Ничто не дается даром в этом мире, и приобретение знания — труднейшая из всех задач, с какими человек может столкнуться. Человек идет к знанию так же, как он идет на войну — полностью пробужденный, полный страха, благоговения и безусловной решимости. Любое отступление от этого правила — роковая ошибка Карлос Кастанеда, американский антрополог и писатель (1925–1998).

Во все века человек никогда не переставал быть любознательным. Интерес человека к природе, жизненные потребности людей привели к появлению такой науки как физика. Физика, одна из самых важных наук о природе, возникла в глубокой древности. Огромное ветвистое древо физики медленно произрастало из первых попыток истолкования явлений природы. Для познания окружающего мира человечеству пришлось пройти увлекательный, но мучительно длинный и трудный путь познания природы. На протяжении жизни примерно сотни поколений человечество создало каркас физической науки.

Всю историю физики можно условно разделить на четыре основных периода:

- ✓ древний;
- ✓ средневековый;
- ✓ классической физики;
- ✓ современной физики.





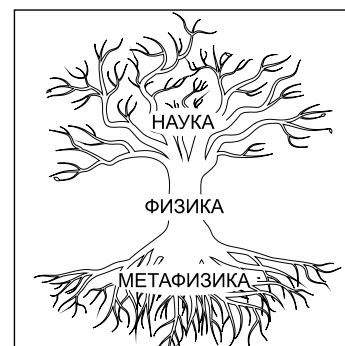
Первый период развития физики иногда называют донаучным, но нам стоит быть благодарными предыдущим поколениям за многие открытия и достижения, сделанные ими. Однако именно тогда были посеяны первые зерна естествознания. Уже у шумеров, вавилонян и египтян по отдельным вопросам физики были ценные знания, которые, однако, производят впечатление чего-то случайного, несистематического.

Затем начался длительный этап, охватывающий период от времен Аристотеля до начала XVII века, то есть Античность и Средние века.

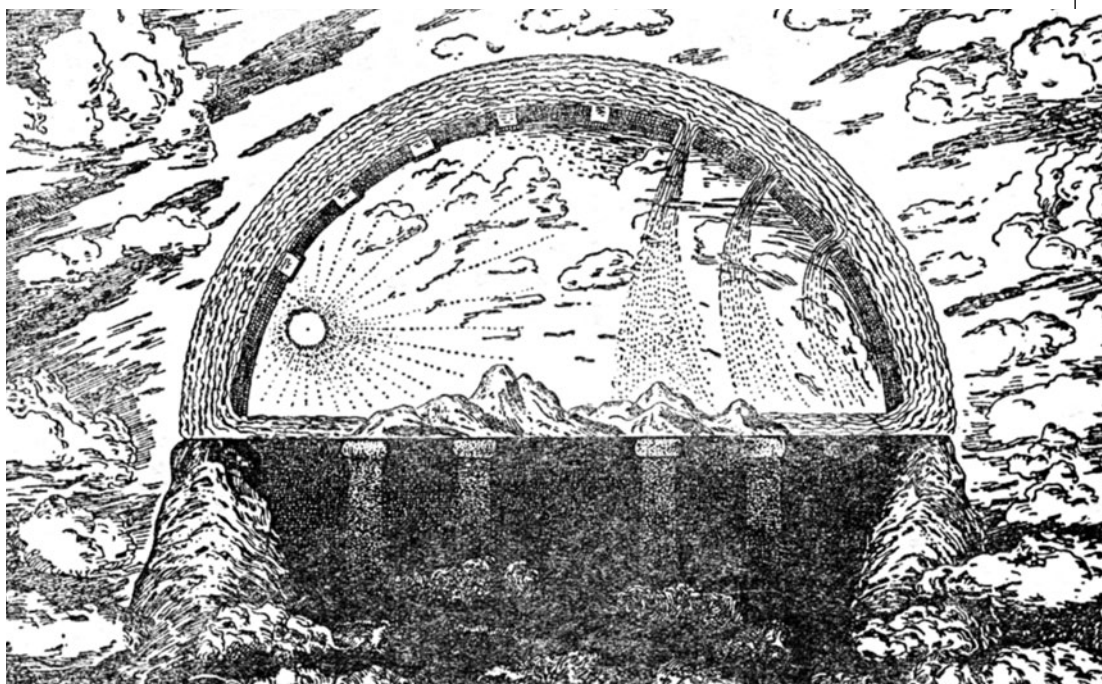
Назовем этот период метафизическим (метафизика — *учение о причинах и началах бытия и знания*).

Начало третьего этапа, этапа классической физики, связывают с одним из основателей точного естествознания, итальянским ученым Галилео Галилеем и основоположником классической физики, английским математиком, механиком и астрономом Исааком Ньютоном. Этот этап продолжался до конца XIX века. Именно трудами этих и других ученых были заложены основы той классической физики, которую изучают в школах и используют в большинстве практических расчетов в технике. Этот период составляет основу могучего дерева физики.

К началу XX столетия появились экспериментальные результаты, которые трудно было объяснить в рамках классических представлений, эти представления подверглись коренному пересмотру.







В итоге открылся новый этап в развитии физики — этап современной физики, включающий не только, классические но и квантовые представления.

Физика всегда имела тесный контакт с соседними науками: астрономией, химией, минералогией. Еще теснее связь между физикой и математикой. Математика стала оружием физика, только она дает возможность точного научного выражения законов природы и их применения к сложным процессам. Все эти области знания образуют крону древа современного естествознания.

Учебники физики содержат множество разных законов, описывающих разнообразные явления, пестрят огромным количеством формул. При этом нельзя забывать, что каждый закон, каждая формула не возникают в готовом виде. За ними огромное число наблюдений, постановка экспериментов, разочарование и радость постижения нового. Наука, как и искусство, немыслима без имени творца. Как справедливо заметил известный писатель и популяризатор науки Ярослав Голованов: «...Мы обязательно должны знать не только, как рождались труды великих корифеев науки, но и что это были за люди, сколько сил, энергии, здоровья, нервов отдали они, чтобы мы сегодня узнали эти законы и прочли формулы в учебниках. Как порой отказывались они от богатства, почестей, радостей жизни ради торжества истины, как умирали, до последнего дыхания утверждая ее. И эти знания помогут нам лучше понять суть сделанного этими людьми, ибо работа талантливого человека неотделима от его личности». На страницах книги будут упомянуты и такие сведения об ученых. А теперь можно отправляться в путешествие в физику, поднимаясь по ступеням знания на пути к поставленной цели — познанию окружающего мира.



В НАЧАЛЕ ПУТИ. Физики как науки еще нет, но люди накапливают знания о природе. Они задают природе «детские» вопросы, которые касаются принципиальных основ мироздания. Идет время, появляются ученые, сделавшие открытия, заложившие фундамент будущих исследований, без которого не могла бы появиться современная физика.

1 *Природа глазами древних людей. Пробуждение любознательности. Вселенная древних. Как измеряли время, расстояния и вес наши далекие предки? Наука «плоской Земли». Есть ли предел делению вещества? Система мира Аристотеля. Архимед. Простые механизмы не такие простые. «Золотое правило» механики. «Эврика!» Взгляды древних греков на Вселенную и Землю. Смелое предположение. Как грек Эратосфен Землю измерил.*

Обычно, когда рассказывают о путешествии, всегда указывают место и время его начала. Но в нашем случае путешествия в физику ни о месте зарождения этой науки, ни о времени ее появления ничего определенного сказать нельзя. Однако определенно можно утверждать, что люди всегда были любознательны. Они стремились объяснить окружающий мир таким, каким они его видели, то есть найти для всех явлений естественные, материальные причины. Но научных знаний у людей не было, законы природы были им неизвестны. Не зная природы многих явлений и событий, древний человек мог воспринимать их по большей части эмоционально, нежели разумно. Поэтому объяснение действительности неизбежно принимало фантастический характер.

Потребности повседневной жизни, развитие хозяйства, торгового обмена и наблюдения над природой приводили к постепенному накоплению первых научных знаний. Человек накапливал разнообразные знания не только о географической местности, в которой проживал, но и о животных, о растениях, о самом себе. Он обогащался реальными знаниями о небесных светилах, об их движении, метеорологических явлениях и т. д. Накопленные знания и практические навыки, передаваясь от поколения к поколению, образовывали первоначальный фон будущей науки.



ЗЕМЛЯ КАЗАЛАСЬ ДРЕВНЕМУ ЧЕЛОВЕКУ ПЛОСКОЙ, ПОСКОЛЬКУ КРИВИЗНА ЗЕМНОГО ШАРА НЕЗНАЧИТЕЛЬНА НА ДИСТАНЦИИ, КОТОРУЮ ЧЕЛОВЕК СПОСОБЕН ОБОЗРЕТЬ С ВЫСОТЫ СОБСТВЕННОГО РОСТА.







1808 г.

Атом

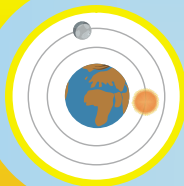
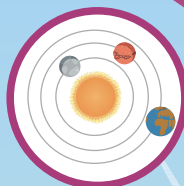
Неделимая частица вещества, обладающая истинным бытием, не разрушающаяся и не возникающая



IV век н. э.

Гелиоцентрическая система

Солнце является центральным небесным телом, вокруг которого вращаются Земля и другие планеты



II век н. э.

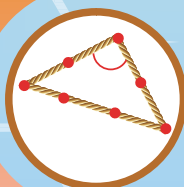
Геоцентрическая система

Центральное положение во Вселенной занимает неподвижная Земля, вокруг которой вращаются Солнце, Луна, планеты и звезды

1250 г.
до н. э.

Весы

Устройства, в которых сравнивалось количество вещества с эталоном (гирями)



650–400 гг.
до н. э.

Египетский треугольник

Прямоугольный треугольник с соотношением сторон 3:4:5

1306–290 гг.
до н. э.

Гномон

Вертикальный предмет (шест, стела, колонна), позволял по наименьшей длине его тени (в полдень) определить угловую высоту солнца и время

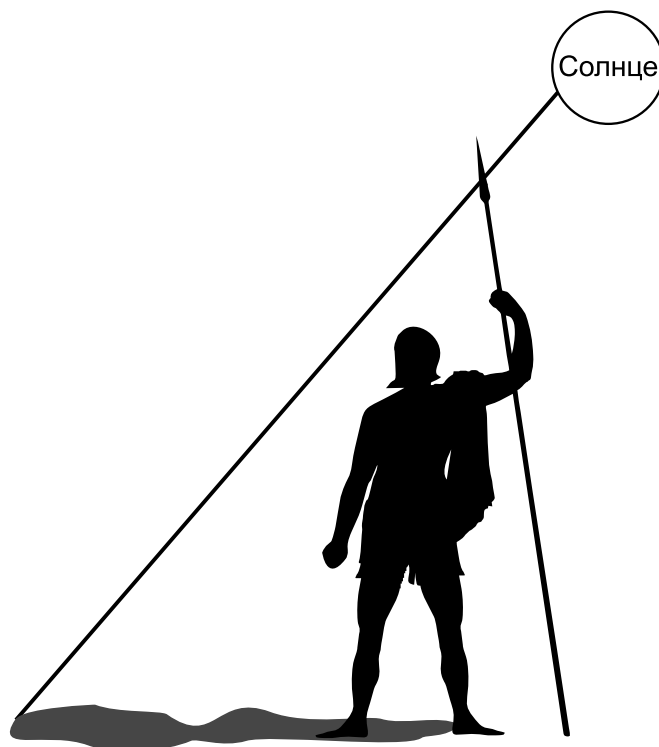




Вселенная древних была очень маленькой и тесной. И это не удивительно: ведь люди, создавая свои представления о ней, не имели другого масштаба, кроме земного. Простые люди, обитавшие в пределах своих царств, имели лишь весьма смутное представление об их размерах и всю свою жизнь, от рождения до смерти, проводили в родной деревне, изредка посещая соседние селения. Какой же они представляли себе Землю? Земля казалась древнему человеку плоской, поскольку кривизна земного шара незначительна на дистанции, которую человек способен обозреть с высоты собственного роста. Сдвиг линии горизонта замечен наблюдателю только с большой высоты, поэтому древний человек представлял Землю плоской равниной в силу объективных причин. Такие представления были у людей во времена древних цивилизаций Месопотамии, Древнего Египта и, позднее, Греции.

Для человека тех времен шарообразная форма Земли стояла в резком противоречии с наличием силы тяжести, поскольку по их представлениям все тела должны были бы скатиться с круглой Земли «вниз». Людям казалось это совершенно очевидным.

Древний человек видел, что мир, в котором он живет, очень изменчив. Ничего не остается вокруг постоянным. Он замечал, что некоторые явления природы регулярно повторяются вновь и вновь восход, и заход Солнца, появление и исчезновение Луны, приливы и отливы, смена дня и ночи, времен года и т. п. Это давало возможность древнему человеку ориентироваться во времени. Так уже в древности люди вели счет времени. Об этом говорят археологические данные. Желание человека соотнести течение собственной жизни с вечным движением небесных тел с незапамятных времен находило свое воплощение в различных средствах измерения времени.





Первым его помощником в этом было Солнце. После того, как узнали, что направление тени удобно для определения времени, стали устанавливать «солнечные часы», которые указывали время по передвигающейся с запада на восток тени.

Затем появился прибор для определения времени по изменению длины тени от вертикального стержня — гномон. Вертикальный предмет (шест, стела, колонна), позволял по наименьшей длине его тени (в полдень) определить угловую высоту солнца и время. На рисунке показан гномон с небольшим вертикальным стержнем, укрепленном на плоской доске (или полушарии), разграфленной линиями. Это и был циферблат солнечных часов, а тень от стержня служила часовой стрелкой.

В Древнем Египте гномоном служил вертикальный обелиск со шкалой, нанесенной на земле, а время измерялось по длине отбрасываемой тени. Этот обелиск, как говорят записи Аристофана (444–380 гг. до н. э.), служил для почитания культа бога Солнца.

**Не задумывались ли вы, ПОЧЕМУ НА ОБЫЧНЫХ
ЧАСАХ СТРЕЛКИ ИДУТ, ЧТО НАЗЫВАЕТСЯ,
«ПО ЧАСОВОЙ СТРЕЛКЕ»?**



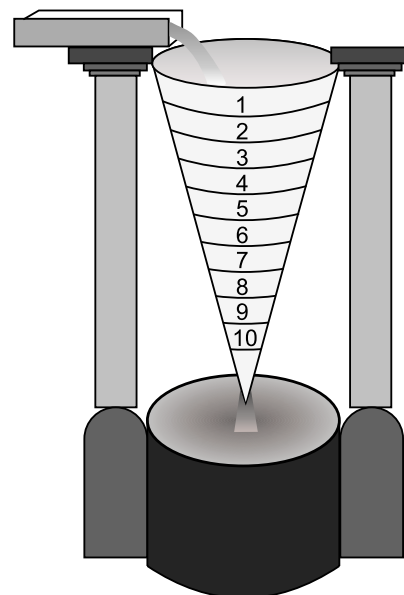
Роль гномонов выполняли и прямые пилоны на общественных площадях и рынках. Первые обелиски и пилоны, предназначавшиеся в Египте для измерения времени, были построены, по всей вероятности, уже в XIV веке до н. э.

Не задумывались ли вы, почему на обычных часах стрелки идут, что называется, «по часовой стрелке»? А потому, что солнечная тень от гномона на солнечных часах в Северном полушарии идет именно в этом направлении. Поэтому современные часы и переняли это движение от своих предков. Но вот если бы солнечные часы были бы изобретены в Южном полушарии, все было бы наоборот.

Природа поделила сутки на день и ночь, а человек стал отмечать «особые точки» дня и ночи уже по своему усмотрению. Устройство солнечных часов является относительно простым и для того периода достаточно точно отмеряло время. Однако великое изобретение, солнечные часы, было встречено без той радости, какую оно бы заслуживало. На это есть указание в сохранившемся отрывке комедии римского поэта Плавта. Поэт заставляет одного кутилу произнести следующие слова: «Да погубят боги того, кто первый придумал час и воздвигнул солнечные часы, мне, бедному, по кускам сокращающие день. Прежде желудок был моими солнечными часами, из всех часов самыми лучшими и самыми верными. Везде эти часы приглашали к еде, кроме того случая, когда нечего было есть; теперь же и то, что имеется, не едят, если это не нравится солнцу».

Солнечные часы имеют один очевидный недостаток — они хорошо работают только днем и в более-менее солнечную погоду. А как быть, если небо покрыто тучами, или ночью? Выход был найден в изобретении водяных часов. Ночью солнечные часы заменяла клепсидра — «воровка воды» — так в Греции называли водяные часы, заимствованные из Вавилона или Египта. А в Китае они были еще раньше. Вначале водяные часы — это простой металлический или глиняный, а затем стеклянный сосуд, который наполняли водой. Медленно, капля за каплей вытекала вода, уровень ее понижался, и деления на сосуде указывали, который час. Промежуток времени измерялся количеством воды, вытекавшей из малого отверстия, сделанного на дне сосуда. Таковы были водяные часы египтян, вавилонян, древних греков. Сохранилась клепсидра, отмерявшая время для прений в афинском суде.

Но не только часы были необходимы людям в их повседневной жизни. Постоянное сравнение окружающих объектов по их характерным свойствам требовало введения некоторых эталонов. И в первую очередь это относится к процедуре взвешивания, основанной на сравнении масс объектов, имеющей многотысячелетнюю историю. Весы — один из древнейших приборов, изобретенных человеком. История весов уходит вглубь веков, и не случайно на многих языках слова «взвешивать» и «платить» — синонимы. Первые найденные археологами образцы весов относятся к V тысячелетию до н. э.



Водяные часы

Согласно древнеегипетской «Книге мертвых» Анубис, бог с головой шакала, на входе в подземное царство взвешивает сердце всякого умершего на особых весах, где в качестве гири выступает богиня правосудия Маат. Этот инструмент хорошо виден на папирусе XIX династии (около 1250 года до н. э.). А каменная стела из восточной Турции начала I тысячелетия до н. э. изображает хетта, использующего вместо поперечной планки балансовых весов собственный палец. Из Вавилона весы перешли к древним евреям. Ветхий Завет буквально пронизан проклятиями в адрес обманщиков, пользующихся неверными весами.

Весы — полезное, более того, необходимое изобретение — были весьма быстро освоены всеми народами Старого Света.

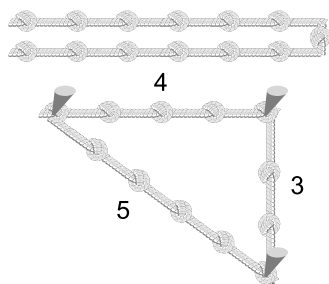
Ну а там, где весы, — там и гири. Исторически весы и гири появились с развитием торговли в странах Древней Месопотамии (Двуречья) и Египте. Именно в жарких болотах Месопотамии (что в переводе с греческого означает «между реками») более пяти тысяч лет назад зародилась история нашей собственной цивилизации. В основе самой первой в истории системы весовых единиц, древневавилонской, лежал вес одного хлебного зерна — грана. Эти зерна имеют одинаковый размер, и самой природой они уготованы для использования в качестве эталона для взвешивания. (До последнего времени еди-



Равноплечные весы, Древний Египет.



ница аптекарского веса называлась граном). Позже люди начали сами изготавливать гири, вид которых зависел от местных условий: в Месопотамии гири изготавливались из камня или бронзы в виде груши, утки или льва; они имели вид фигур и голов священных животных в Древнем Египте, греки применяли квадратные или прямоугольные пластины, круглые, конусообразные, трех- или многогранные куски свинца или бронзы. Римляне использовали шары, кубики, круглые шайбы или призмы из бронзы, камня или свинца.



Человек столкнулся с необходимостью измерений в глубокой древности, на раннем этапе своего развития, когда возникала необходимость изготавливать простейшие орудия труда, строить жилища. Но при строительстве жилища необходимо было устанавливать длины и углы, и в первую очередь прямой угол. И древние нашли выход в так называемом «египетском треугольнике». Название треугольнику с отношением сторон 3: 4: 5 дали эллины: в VII–V веках до н. э. греческие философы и общественные деятели активно посещали Египет. Строился угол так: для построения прямого угла использовался шнур

или веревка, разделенная отметками (узлами) на 12 ($3 + 4 + 5$) частей: треугольник, построенный натяжением такого шнура, с весьма высокой точностью оказывался прямоугольным и сами шнуры-катеты являлись направляющими для кладки прямого угла сооружения.

Но измерять приходилось не только угол и длину. Со временем возникла необходимость в измерении площади, объема, емкости, массы, времени. Без измерений в практической жизни человеку было не обойтись. Первые единицы длины были весьма приблизительными. Они были связаны с размерами частей тела человека. Наш предок располагал только собственным ростом, длиной рук и ног. Если при счете человек пользовался пальцами рук и ног, то и при измерении длин и расстояний использовались руки и ноги. Например, строители египетских пирамид эталоном длины считали локоть — расстояние от локтя до конца среднего пальца. Почти у всех народов расстояние измерялось шагами, но для измерения полей и других больших расстояний шаг был слишком малой мерой. В Риме вводится большая мера, равная тысяче двойных шагов, получившая название «миля» (на латыни «тысяча шагов» — это *milia passum*). Постепенно это словосочетание сократилось до одного слова — миля. В программе Олимпийских игр Эл-

ПЕРВЫЕ ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ БЫЛИ ВЕСЬМА ПРИБЛИЗИТЕЛЬНЫМИ. ОНИ БЫЛИ СВЯЗАНЫ С РАЗМЕРАМИ ЧАСТЕЙ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА.

лады был бег на стадию. Эта мера длины была введена в Вавилоне, а затем перешла к грекам. За стадий принимали расстояние, которое человек проходит спокойным шагом за промежуток времени от появления первого луча солнца при его восходе, до момента, когда солнечный диск целиком окажется над горизонтом (то время приблизительно равно двум минутам). Установлено, что греческая стадия (или стадий) — это длина стадиона в Олимпии — 192,27 м.



Так с древности человек осваивал различные способы измерений. С измерений началась, в частности, будущая физика. В древности люди предприняли первую попытку упорядочения взглядов на окружающий мир. При этом некоторые ученые сделали поразительные открытия: измерили Землю, «перенесли» Землю из центра мира во вращающуюся вокруг Солнца планету; сделали удивительные изобретения, некоторыми из которых мы пользуемся до сих пор. Все это происходило во времена Античности.

Античность охватывает достаточно продолжительный отрезок времени (примерно от X в. до н. э. и до V в. н. э., т. е. до первых веков христианства) и относится к странам Передней Азии, Древней Греции и Древнему Риму. Наибольших успехов достигли науки в Древней Греции. Эта страна располагалась на небольшом пространстве, ограниченном в основном побережьем и островами Эгейского и Ионического морей. Именно Греция оказала определяющее влияние на развитие мирового естествознания. Само слово «фи-

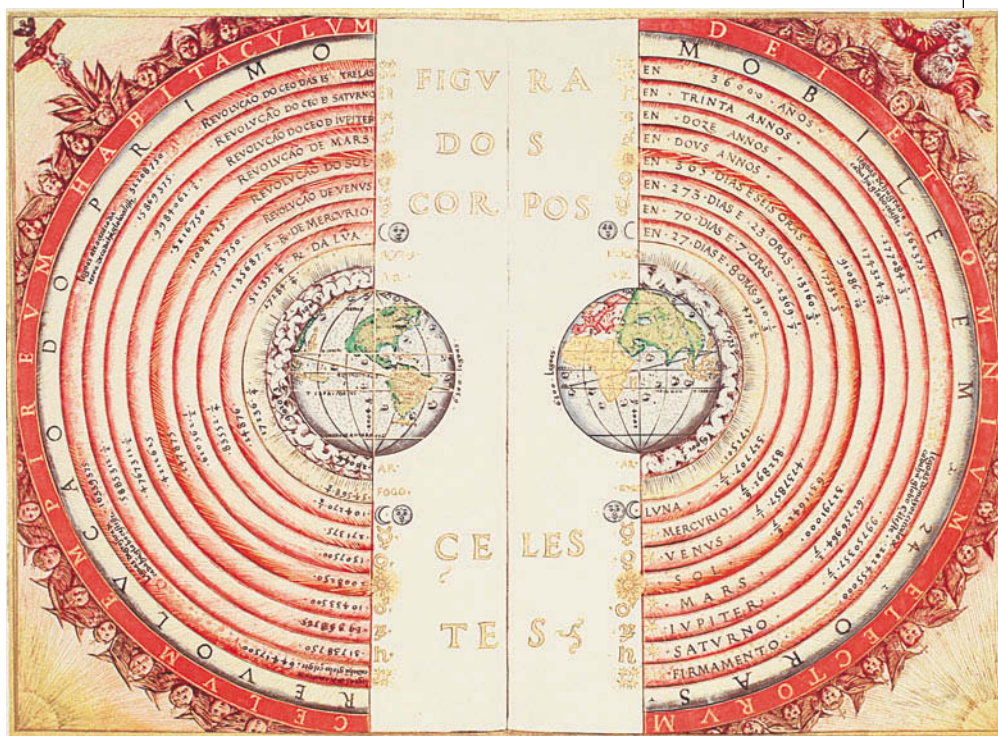


зика» греческого происхождения: *ta physika* (от *physics*) — природа. Множество научных открытий было совершено в Древней Греции, хотя родиной многих открытий и изобретений были также Китай и арабские страны. Особенно больших успехов греки достигли в математике и астрономии. Именно греки ввели понятие доказательства. Греческим мыслителям мы обязаны и другой важной идеей — о возможности объективного познания природы. Обладая интуицией и наблюдательностью, которые компенсировали отсутствие приборов (их тогда просто не было), греки получили много важных сведений о природе. Правда, были и подмены фактов различного рода вымыслами и догадками, что и неудивительно, учитывая время, когда все это происходило. Эти первые этапы научного мышления, развития естествознания получили название натуральной философии. Но и тогда античные ученые стремились дать цельную картину мира, объясняя все явления на основе небольшого числа «начал».

Некоторые древние мыслители свели все многообразие веществ к четырем: земле, воде, воздуху и огню (сейчас мы бы сказали, что все вещества бывают четырех видов: твердые тела, жидкости, газообразные и плазма).

Хотя деление на четыре элемента было известно грекам еще до Фалеса однако лишь Фалес (624–547 гг. до н. э.), первым подумал, что их можно свести к одному первоэлементу, в качестве которого он назвал воду. Фалес полагал, что все рождается из воды; все возникает из воды и в нее превращается. Начало элементов, сущих вещей — вода; начало и конец Вселенной — вода. Все образуется из воды путем ее затвердевания/замерзания, а также испарения; при сгущении вода становится землей, при испарении становится воздухом. Причина образования/движения — дух, «гнездящийся» в воде. Свои





географические, астрономические и физические познания Фалес связал в стройное философское представление о мире, материалистическое в основе, несмотря на ясные следы мифологических представлений. Он полагал, что сама Земля держится на воде и окружена со всех сторон океаном. Она пребывает на воде, как диск или доска, плавающая на поверхности водоема. Пример и доказательство всеобщей одушевленности Фалес видел в свойствах магнита и янтаря; так как магнит и янтарь способны приводить тела в движение, то, следовательно, они имеют душу. Все это кажется очень наивным, но только на первый взгляд. На самом деле Фалес, высказавший мысль о том, что все вещи произошли из воды, по сути, произвел революционный переворот в мировоззрении, означавший отказ от мифологического объяснения явлений действительности в пользу представлений о них как превращении веществ. Поэтому Фалеса Милетского можно считать родоначальником греческой науки. Имя Фалеса уже в V веке до н. э. стало нарицательным для мудреца. «Отцом философии» Фалеса называли уже в древности. Картина мира, построенная на основе этих воззрений, не нуждалась в божественном вмешательстве, и в некотором смысле послужила основой современного учения о разных состояниях вещества и о его атомно-молекулярной структуре (конечно, на совершенно ином уровне). Данная картина была дополнена Пифагором, внесшим идею объяснения явлений реальности на основе математической закономерности. Пифагор основал школу — пифагорейский союз, просуществовавший больше двух веков. В Школе Пифагора впервые высказана догадка о шарообразности Земли.



В эпоху Античности, с ее попытками объяснить мир с помощью общих умозрительных гипотез и теорий, предвосхищалось немало позднейших научных открытий. Именно в эту эпоху зародилась идея об атомарном, дискретном строении материи. На эту идею натолкнула естественная мысль о возможности бесконечного дробления вещества на все более мелкие части. Можно предполагать, что использование в процессах измерения гирь различных масс также подразумевало равенство общей массы системы сумме составляющих масс ее отдельных компонентов. Это общее свойство массы мы определяем как аддитивность (то есть целое получаемое путем сложения частей, его составляющих). А до каких пор можно разделять массу на отдельные части? На этот вопрос попытался ответить Демокрит (ок. 460–370 гг. до н. э.), известный как создатель атомистической теории. Главным достижением философии Демокрита считается развитие им учения об «атоме» — неделимой частице вещества, обладающей истинным бытием, не разрушающейся и не возникающей. Он описал мир как систему атомов в пустоте, постулируя бесконечность их числа во Вселенной. Атомы, согласно этой теории, движутся в пустом пространстве (Великой Пустоте, как говорил Демокрит) хаотично, сталкиваются и вследствие соответствия форм, размеров, положений и порядков либо сцепляются, либо разлетаются. Образовавшиеся соединения держатся вместе и таким образом производят возникновение сложных тел. Само же движение — свойство, естественно присущее атомам. Тела — это комбинации атомов.

Теория Демокрита — это великая идея, которая должна была еще 2000 лет дожидаться своего научного воплощения. И хотя современность иначе представляет себе сами мельчайшие частицы, идея микроструктуры мира, позволяющая объяснить множество вещей, впервые была высказана Демокритом и его последователями — атомистами.

**ТЕОРИЯ ДЕМОКРИТА – ЭТО ВЕЛИКАЯ ИДЕЯ,
КОТОРАЯ ДОЛЖНА БЫЛА ЕЩЕ 2000 ЛЕТ
ДОЖИДАТЬСЯ СВОЕГО НАУЧНОГО
ВОПЛОЩЕНИЯ.**

Период Античности — детство цивилизации. Перед взором древних людей мир представлялся как огромное скопление различных стихий, находящихся в непрерывных изменениях. Поиск устойчивого первоначала в изменчивом круговороте явлений необъятного космоса был главной целью великого Аристотеля (384–322 гг. до н. э). Ему было четырнадцать лет, когда умер Демокрит. В это время в Древней Греции существовала удивительная школа, где собирались лучшие умы того времени. Там обсуждались различные вопросы — от устройства природы до управления государством.







Эту школу создал знаменитый греческий философ Платон. Платоновская Академия была основана как религиозно-философский союз приблизительно в 387 г. до н. э. близ Афин в садах, посвященных мифическому герою Академу. В 366 г. до н. э. в Академии появился новый ученик, и звали его Аристотель. Тогда ему было 18 лет. Аристотель провел в обществе Платона семнадцать лет. Есть основание думать, что Платон любил своего гениального и непокорного ученика и не только передал ему все свои познания, но перелил в него всю свою душу. Между учителем и учеником образовалась самая тесная связь, хотя и с временными размолвками и примирениями. После смерти Платона Аристотель жил в столице Македонии Пелле. Вернувшись в Грецию, в 343–335 г. до н. э. был воспитателем Александра Македонского. Последний очень ценил Аристотеля: «Я чту Аристотеля наравне со своим отцом, т. к. если отцу я обязан жизнью, то Аристотелю обязан всем, что дает ей цену». Аристотель вернулся в Афины и основал там при всесторонней поддержке венценосного покровителя школу «Ликий», которой руководил в течение 12 лет. Школа получила свое название от храма Аполлона Ликейского. Аристотель был первым мыслителем, создавшим всестороннюю систему философии, охватившую все сферы че-



ловческого развития — социологию, философию, политику, логику, физику. Он так много сделал, что его объяснение мира держалось незыблемым восемнадцать веков. Фигура Аристотеля оказала огромное влияние на развитие науки, на многие века его имя стало непревзойденным авторитетом в науке. В основе мира по Аристотелю лежала геоцентрическая система (от «гео» — Земля). Его исследования относятся к области механики, акустики, оптики. Особый интерес представляет учение о движении, которое по Аристотелю есть любое количественное и качественное изменение, благодаря которому явление реализуется.

Учение Аристотеля о движении господствовало в физике до эпохи Возрождения, и, несмотря на выявленные существенные ошибки и заблуждения, ряд принципиальных представлений остался до сегодняшнего дня.

Бурные события IV – начала III в. до н. э., связанные с завоеваниями Александра Македонского, сильно изменили тогдашний мир. Изменились и судьбы людей, населявших эллинистический мир. Основанные Александром города и колонизация греками новых территорий в Азии содействовали распространению греческой культуры на Востоке. Мир новых государств в масштабах земного шара, правда, был по-прежнему небольшим. Он занимал весьма маленькую полосу земли: от Северного моря до Сахары, от Атлантического океана до Индии. Это «обитаемая земля» по-гречески называлась «ойкумена». Много важных открытий было сделано в Египте и Древней Греции.

Египет в рассматриваемое время почти не изменился со времен фараонов, все так же стояли храмы на берегах великой реки, и крестьяне трудились на своих наделах, караваны барок с зерном, льном, кожами спускались вниз по Нилу к великому городу — Александрии. Все силы Египта уходили на то, чтобы обеспечить благоденствие обитателей этого огромного города. Славу Александрии составляла знаменитая Александрийская



Скульптура головы Аристотеля — копия работы Лисиппа (ок. 390 – ок. 300 до н. э.), Лувр

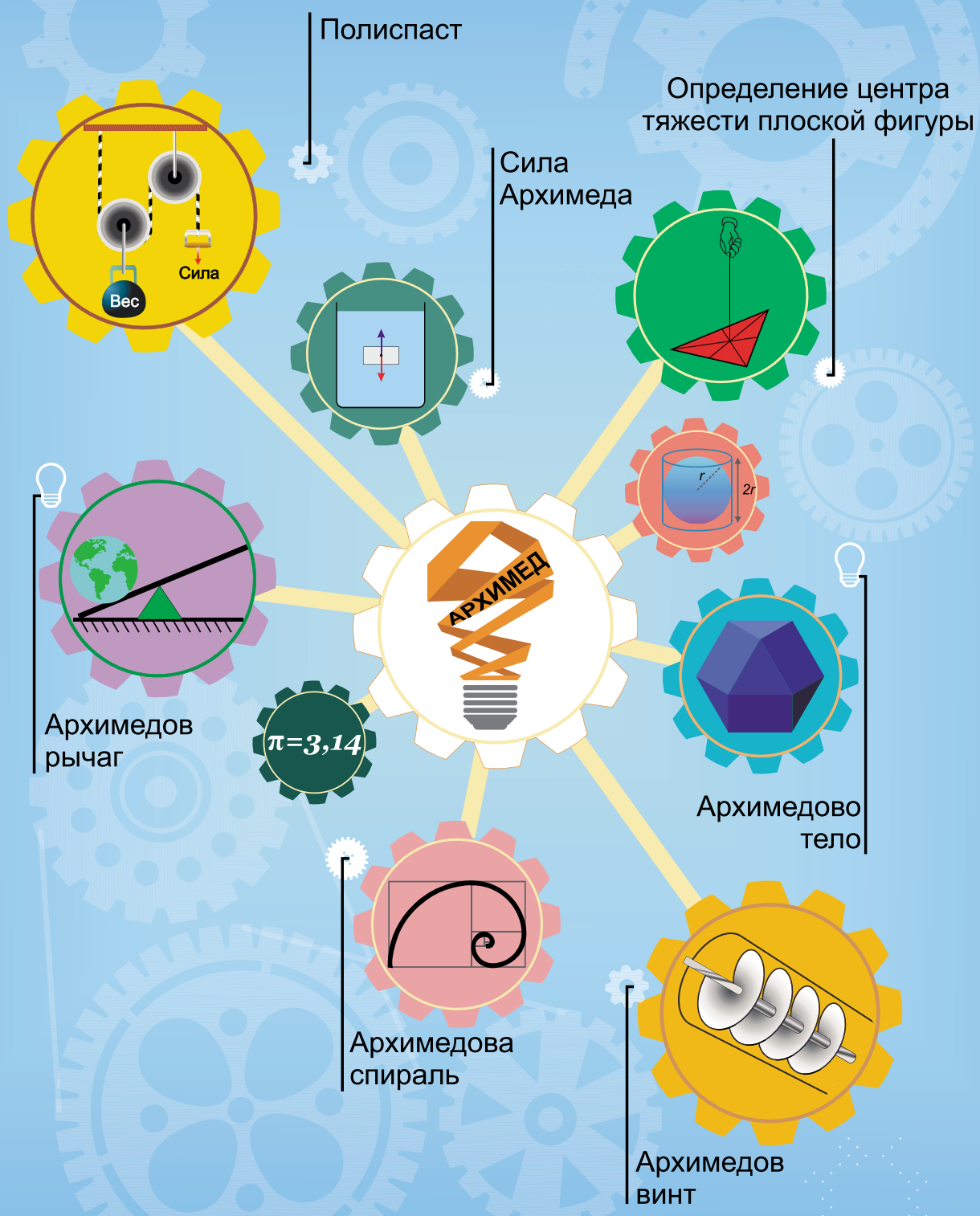
**«Я ЧТУ АРИСТОТЕЛЯ НАРАВНЕ СО СВОИМ ОТЦОМ,
Т.К. ЕСЛИ ОТЦУ Я ОБЯЗАН ЖИЗНЬЮ,
ТО АРИСТОТЕЛЮ ОБЯЗАН ВСЕМ,
ЧТО ДАЕТ ЕЙ ЦЕНУ».**

библиотека, входящая в состав Мусейона (дословно «храм муз»), откуда впоследствии и произошло современное слово «музей». В основу библиотеки легли книги, собранные, в частности, Аристотелем. А прообразом Александрийского Мусейона и Библиотеки послужило устройство афинского Ликейя. В библиотеке имелись, по некоторым данным, сотни тысяч свитков пергамента, содержавших сведения по различным наукам на многих языках того времени. Александрийская библиотека представляла собой более академию, чем обычное собрание книг: здесь жили и работали ученые, занимавшиеся как исследованиями, так и преподаванием. Отовсюду съезжались к Александрийскому дворцу знаменитые писатели и ученые, особенно из Греции: из Афин в Александрию (километров триста) на корабле того времени можно было добраться менее чем за трое суток. Они получали бесплатную квартиру в музее, были освобождены от всех налогов и повинностей, их обязанностью было только прославлять царя. Поэт Тимон с насмешкой писал о деятелях музея: «В многоплеменном Египте многочисленные кропотели книг откармливаются в клетке муз».

Знаменитые ученые, собранные с различных концов мира, жили при храме муз на полном иждивении царя; они обедали совместно, и эти обеды сопровождались научными беседами на самые различные темы. Античный мир породил фигуры, внесшие важный вклад в формирование основ современной физики. Одной из первых следует назвать Архимеда (ок. 287–212 до н. э.). Архимед — великий предтеча современной физики, один из самых замечательных ученых Древней Греции. Память о нем обросла вымыслами и легендами. Архимед родился в 287 г. до н. э. в Сиракузах, на острове Сицилия, которая в те времена была дальним западным форпостом греческой культуры. В годы детства Архимеда эпирский царь Пирр вел здесь войну с римлянами и кар-



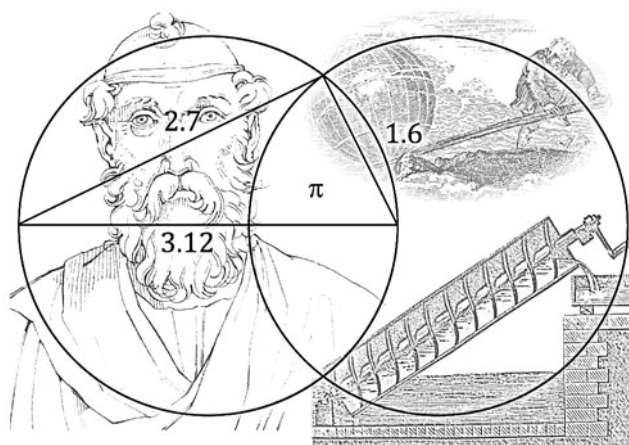
Древний свиток из пергамента



фагениями, пытаясь создать новое греческое государство. В этой войне отличился один из родственников Архимеда — Гиерон, ставший в 270 г. до н. э. правителем Сиракуз. Отец Архимеда, астроном Фидий, был одним из приближенных Гиерона, и это открыло ему возможность дать сыну хорошее образование.

Уже при жизни Архимеда вокруг его имени создавались легенды, поводом для которых служили его поразительные изобретения. Работы Архимеда относились почти ко всем областям математики того времени. В труде «Об измерении круга» Архимед вычислил число «пи» — отношение длины окружности к диаметру — и доказал, что оно одинаково для любого круга. Лучшим своим достижением он считал определение поверхности и объема шара — задача, которую до него никто решить не мог. Возможно, поэтому Архимед просил выбить на своей могиле шар, вписанный в цилиндр.

Занимаясь практическими вопросами, Архимед исследовал принципы, лежащие в основе так называемых «простых механизмов». И в первую очередь — рычага. Человек стал использовать рычаг еще в доисторические времена, интуитивно понимая его принцип. Такие инструменты, как мотыга или весло, применялись, чтобы уменьшить силу,



Древний колодец с журавлем. Фивы



которую необходимо было прикладывать человеку. Рычаг позволяет достигнуть многократного выигрыша в силе самыми простыми и доступными средствами. Положив длинный и крепкий шест на обрубок полена (опору) и подсунув второй конец его под камень, человек превращал шест в простейший рычаг.

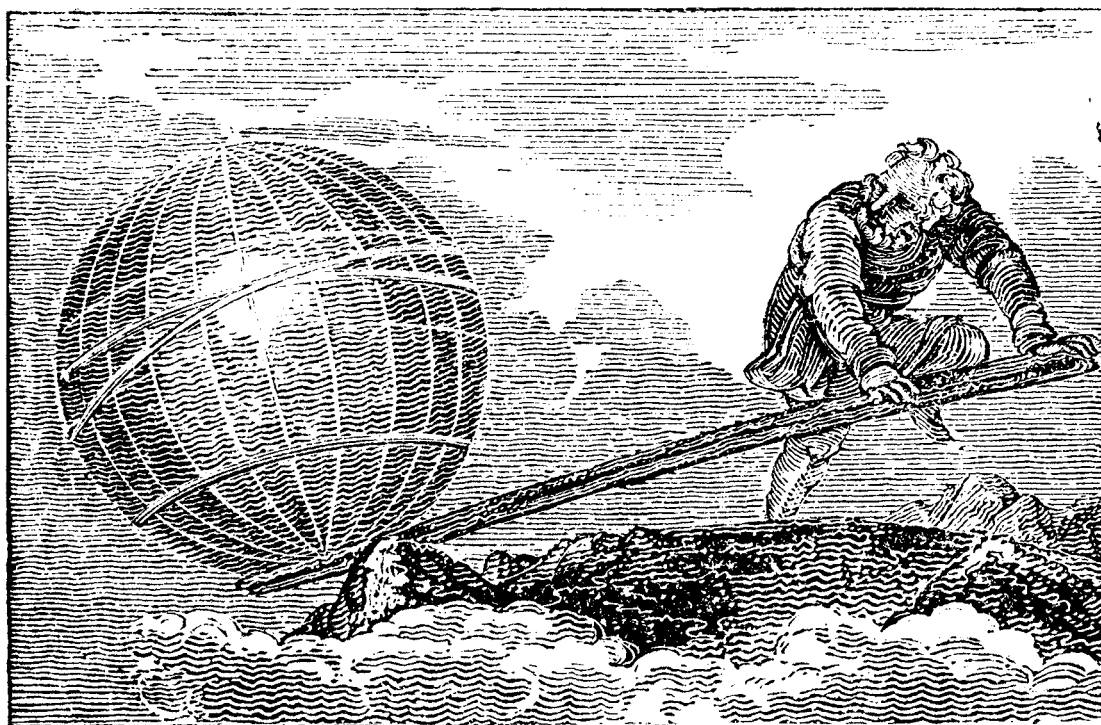
Около 1500 г. до н. э. в Египте и Индии появляется шадуф (колодец с «журавлем»), прародитель современных кранов, устройство для поднимания сосудов с водой.

Первое письменное объяснение принципа действия рычага дал Архимед, связав понятия силы, груза и плеча. Закон равновесия, сформулированный им, используется до сих пор и звучит так: «Усилие, умноженное на плечо приложения силы, равно нагрузке, умноженной на плечо приложения нагрузки, где плечо приложения силы — это расстояние от точки приложения силы до опоры, а плечо приложения нагрузки — это расстояние от точки приложения нагрузки до опоры». По легенде, осознав значение своего открытия, Архимед воскликнул: «Дайте мне точку опоры, и я переверну Землю!».

В течение многих веков фундаментом механики была теория рычага, изложенная Архимедом в сочинении «О равновесии плоских фигур».

Фактически Архимед является создателем механики как науки, изучающей законы движения, покоя и равновесия тел.

Не обошел проблему равновесия тел и талантливый энциклопедист Герон Александрийский. Великий изобретатель древности родился в Александрии, поэтому его «фамилия» так и звучит — Александрийский. О временном периоде, в который он жил и работал, спорят и по сей день. Точно, что после Архимеда, поскольку в своих работах он ссылаялся



«Архимед рычагом поднимает Землю». Гравюра из книги Вариньона (1787) о механике.

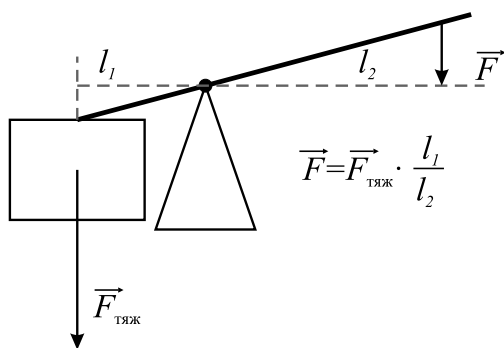


Схема рычага

на его труды. Слава Герона была настолько велика, что книги с его именем имелись даже в византийскую эпоху. Основной закон работы машины Герон формулирует так: если при пользовании машиной требуется увеличение силы, то в результате происходит замедление, ибо, чем меньше движущая сила по отношению к движимой тяжести, тем больше потребуется и времени; таким образом, сила к силе и время ко времени находятся в том же самом обратном отно-

шении. Это и есть знаменитое «золотое правило» античной механики: что выигрывается в силе, то теряется в скорости. Со времен последователей Архимеда механику стали считать наукой о простых машинах: воротах, рычагах, блоках, клине и винте. Два последних основаны на свойствах наклонной плоскости, закон действия которой, правда, самому Архимеду известен не был.

Наиболее понятно золотое правило механики демонстрирует рычаг. Объяснение действия рычага, данное Архимедом, связано с понятием силы, груза и плеча. В равновесии $F_{тяж} \cdot l_1 = F \cdot l_2$. Отсюда видно, что можно получить выигрыш в силе F за счет длины плеча. Если $l_2 > l_1$ в несколько раз, то выигрыш в затраченном усилии будет значительным — приложенная сила окажется много меньше силы тяжести, обусловленной весом поднимаемого груза.

**«КАЖДЫЙ ШКОЛЬНИК ЗНАЕТ ТЕПЕРЬ ИСТИНЫ,
ЗА КОТОРЫЕ АРХИМЕД ОТДАЛ БЫ
ЖИЗНЬ».**

Известно, что при необходимости втащить груз на определенную высоту всегда легче воспользоваться пологим подъемом, чем крутым. Причем чем положе уклон, тем легче выполнить эту работу. Правда, все, что выигрывается в силе, теряется в расстоянии, ибо во сколько раз уменьшается наше усилие, во столько же раз возрастает расстояние, на которое придется тащить груз. Однако в тех случаях, когда время и расстояние не играют большой роли, а важна сама цель — поднять груз с наименьшим усилием, наклонная плоскость оказывается незаменимым помощником. Наклонные плоскости — неотъемлемая часть и сегодняшней нашей жизни. Нельзя обойтись без знаний о наклонных плоскостях при строительстве автомобильных и железных дорог, в особен-



ности на пересеченной или горной местности, при проектировании фуникулеров и эскалаторов, при прокладке горнолыжных спусков и возведении трамплинов, при организации аттракционов или оборудовании пандусов для инвалидов, при исследовании сползания ледников и схода лавин... Еще одним механизмом, получившим распространение в древности, является неподвижный блок. Он представляет собой колесо с желобом, ось которого жестко прикреплена к стене или потолочной балке. Перекинув через колесо веревку и прикрепив ее противоположный конец к грузу, можно поднять его на высоту крепления блока.

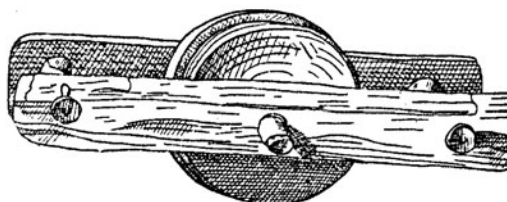
Блоки по устройству бывают двух видов. *Неподвижным блоком* называют такой блок, ось которого закреплена и при подъеме грузов не поднимается и не опускается. Неподвижный блок можно рассматривать как равноплечный рычаг, у которого плечи равны радиусу колеса. Такой блок не дает выигрыш в силе, но позволяет менять направление действия силы. Это зачастую при подъеме тяжестей тоже играет большую роль.

Подвижный блок — блок, ось которого поднимается и опускается вместе с грузом. Подвижный блок дает выигрыш в силе в два раза.

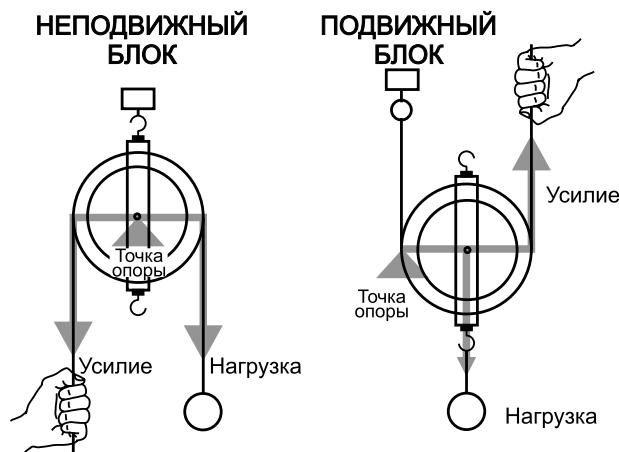
Существует легенда, будто построенный Гиероном в подарок египетскому царю Птолемею тяжелый многопалубный корабль «Сиракузия» никак не удавалось спустить на воду. Архимед соорудил систему блоков, с помощью которой он смог проделать эту работу одним движением руки.

При всей своей примитивности простые механизмы многократно расширяли возможности человека. Для того чтобы убедиться в этом, достаточно вспомнить о гигантских постройках древних египтян — пирамидах, огромных обелисках и статуях.

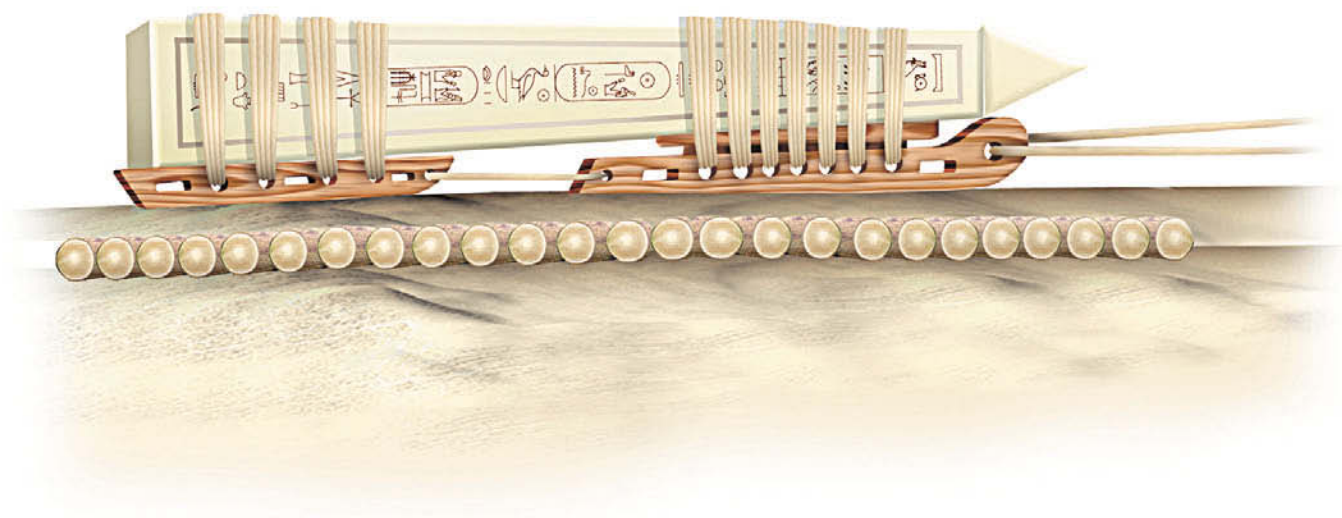
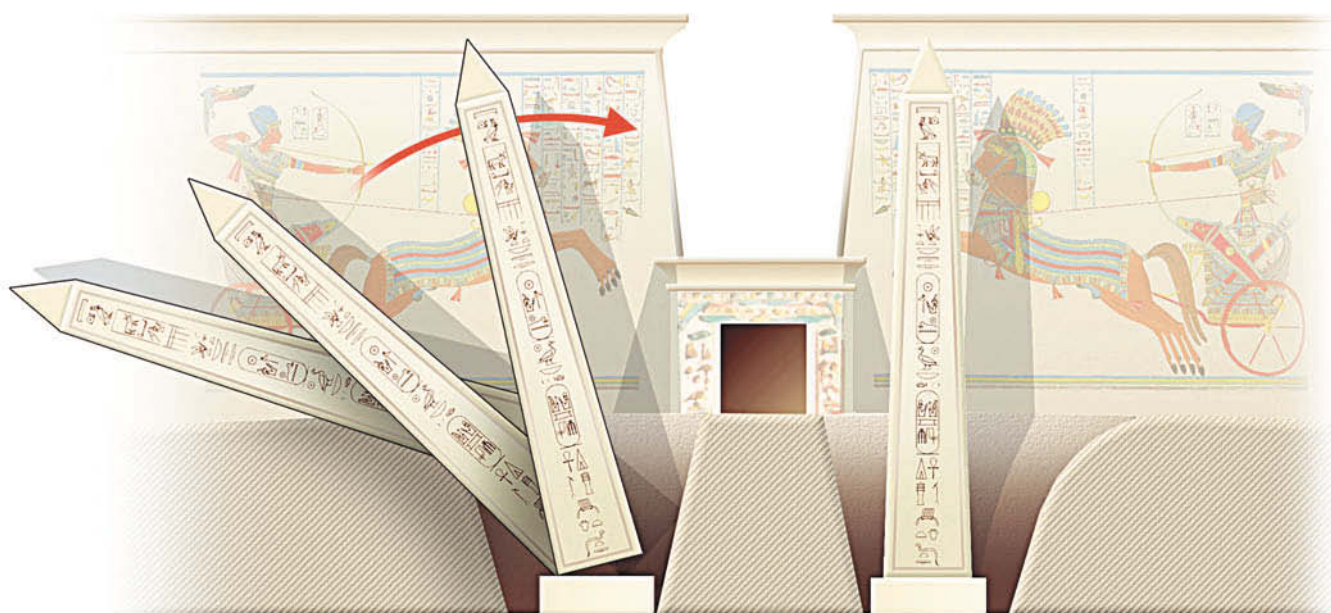
А теперь вернемся к трудам Архимеда. Многие работы Архимеда касались гидростатики и плавания тел. Появление этих работ было непосредственно связано с решением технических задач. Великий сиракузец изучал силы, действующие на тела, и среди них — силу тяжести. Он открыл закон, согласно которому на тело, погруженное в жидкость,



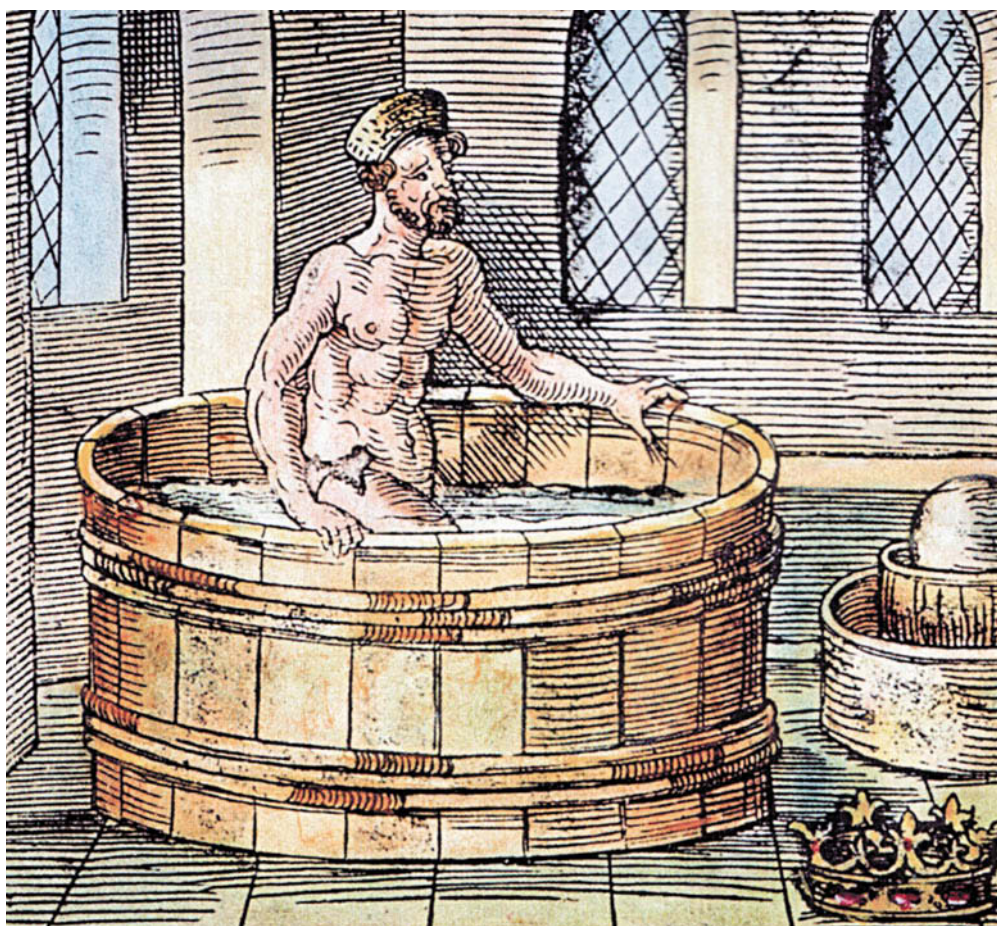
Деревянный блок древних египтян
(Лейденский музей).



Блоки



**СО ВРЕМЕН ПОСЛЕДОВАТЕЛЕЙ АРХИМЕДА МЕХАНИКУ
СТАЛИ СЧИТАТЬ НАУКОЙ О ПРОСТЫХ МАШИНАХ:
ВОРОТЕ, РЫЧАГЕ, БЛОКЕ, КЛИНЕ
И ВИНТЕ. ДВА ПОСЛЕДНИХ ОСНОВАНЫ
НА СВОЙСТВАХ НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ,
ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ КОТОРОЙ, ПРАВДА, САМОМУ
АРХИМЕДУ ИЗВЕСТЕН НЕ БЫЛ.**



Архимед («Эврика!»). Иллюстрация к базельскому изданию 1575 года
«Десяти книг об архитектуре» Витрувия

действует сила, равная весу вытесненной им жидкости. Это открытие связано с легендой, передаваемой многими историками. Согласно легенде, упомянутый выше Гиерон, тиран Сиракуз, поручил ему выяснить, сделана ли его корона целиком из золота или же в нее подмешано серебро. Эта задача занимала Архимеда довольно долго, пока не помог случай. Однажды приподнявши ногу в воде, Архимед констатировал с удивлением, что в воде нога стала легче. Он понял, что это явление даст ему ключ к разгадке задачи. С криком «Эврика!» (нашел!) он выскочил из ванны, забыв обо всем на свете. настолько поразила его мысль, пришедшая в ванне.

Часто этот рассказ связывают с открытием закона Архимеда, хотя он касается способа определения объема тел неправильной формы.

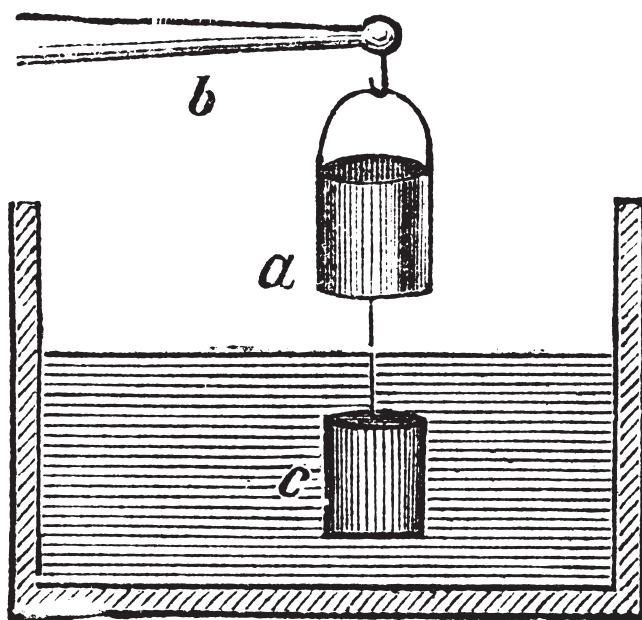
Если верить описанию Витрувия, то следует признать, что, по сути дела, Архимед является автором методики определения удельного веса тел путем измерения их объема погружением в жидкость. Каждому школьнику известно, что удельный вес металлов есть в любом справочнике, определить долю металла в сплаве совсем не трудно: взял образец, взвесил его, потом опустил в воду и определил объем вытесненной им

жидкости, поделил первое число на второе и по соотношению удельных весов нашел долю каждого металла. Вот и вся премудрость. Сейчас все кажется очень простым. Но тогда Архимеду понадобились долгие мучительные размышления, чтобы найти решение поставленной перед ним задачи и воскликнуть в конце: «Эврика!» Стоит процитировать Эрнеста Ренана: «Каждый школьник знает теперь истины, за которые Архимед отдал бы жизнь».

Первое сочинение по гидростатике принадлежит Архимеду, выходит, оно написано ранее 212 г. до н. э. Дошло до нас оно не в подлиннике, но в переводе на латинский язык, под заглавием *De lis quae vehuntur io aqua* («О телах, плавающих в воде») и притом в неполном виде. В эпоху Возрождения сочинение это было восстановлено и снабжено необходимыми комментариями математиками Гвидо Убальди-дель-Монте (1545–1607), верным другом и покровителем Галилея, и Федерико Коммандином (1509–1575).

Архимедом не ограничиваются достижения древнегреческих ученых. Еще ранее Архимеда появился ученый, высказавший смелые предположения о Земле и ее положении в космосе.

В III в. до н. э. Аристарх Самосский (320 — около 250 до н. э.), как принято считать, впервые (во всяком случае, публично) высказал гипотезу, что все планеты вращаются вокруг Солнца, причем Земля является одной из них, совершая оборот вокруг дневного светила за один год, вращаясь при этом вокруг оси с периодом в одни сутки. По сути, впервые была сформулирована гелиоцентрическая система мира. Возможно, на столь крамольную идею его подвигла уверенность, что малые объекты должны вращаться вокруг больших, то есть планеты должны вращаться вокруг Солнца. Подавляющее большинство астрономов и философов, однако, не сомневались в неподвижности Земли. Это навлекло на него обвинение в неблагочестии со стороны поэта и философа Клеанфа.





По свидетельству Плутарха, «Клеанф полагал, что греки должны привлечь [Аристарха Самосского] к суду за то, что он будто двигает с места Очаг мира», имея в виду Землю. Ученый вынужден был бежать из Афин. Гелиоцентрическая система получила развитие лишь по прошествии почти 1800 лет в трудах Коперника и его последователей. А от Аристарха Самосского до нас дошло единственное произведение — трактат «О размерах Солнца и Луны и расстояниях до них». В нем изложен геометрический метод оценки относительных расстояний до Солнца и Луны. Чтобы оценить деяния этого ученого, надо учесть уровень знаний, господствовавший в те времена. А во времена Аристарха Самосского одни древнегреческие ученые считали, что Солнце имеет размер ступни, другие — что Солнце по размерам больше Пелопоннеса. Аристарх использовал научный метод, основанный на наблюдении лунных фаз и солнечных и лунных затмений. Его построения основаны на предположении, что Луна имеет форму шара и заимствует свет от Солнца. Следовательно, если Луна находится в квадратуре, то есть выглядит рассеченной пополам, то угол Земля-Луна-Солнце является прямым.

Следовательно, треугольник получается прямоугольным. Аристарх измерил угол между направлениями на Луну и на Солнце. Угол у Солнца α составил 3° . Ранее Аристарх измерил размер Луны, используя для этого лунное затмение. Проведя соответствующие измерения, Аристарх получил, что диаметры Земли и Луны относятся друг к другу как 2,5 к 1. Эти знания позволили Аристарху вычислить расстояние Луны до Земли в земных радиусах.

По измерениям ученого получаем, что Солнце примерно в 19 раз дальше от Земли, чем Луна. По современным данным ошибка значительная. Но во времена Аристарха еще не было тригонометрических функций (собственно, он сам в сочинении «О размерах Солнца и Луны и расстояниях до них» закладывал основы тригонометрии). Поэтому для вычисления этого расстояния ему приходилось использовать довольно сложные выкладки, подробно описанные в упомянутом трактате. Расстояние до Солнца Аристарх недооценил примерно в 20 раз. Причина ошибки заключалась в том, что момент лунной квадратуры мог быть установлен только с очень большой неопределенностью, которая ведет к неопределенности значения угла α и, следовательно, к неопределенности расстояния до Солнца. Таким образом, метод Аристарха был достаточно несовершенным, неустойчивым к ошибкам. Но это был единственный метод, доступный в древности.

Однако вернемся к Земле. Пока люди не совершали путешествий на далекие расстояния, Земля представлялась им плоской. Так, Гомер утверждал, что Земля представляет собой плоский диск, окруженный постоянно движущимися потоками океана. Он сделал вывод, что именно такую форму имеет Земля, основываясь на том, что существует горизонт, и видах, которые открываются с вершин гор или на берегу моря. Не-

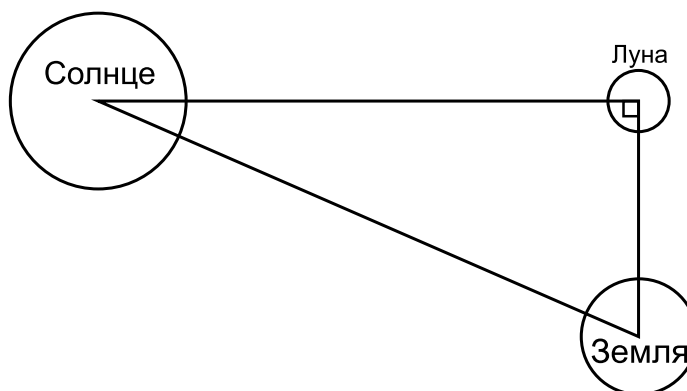


Схема взаимного расположения Солнца, Луны и Земли во время квадратуры

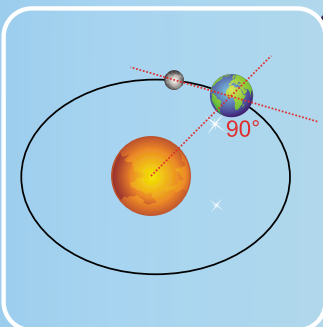
ФАЗЫ ЛУНЫ

Фазы Луны – последовательные изменения вида Луны, наблюдаемой с земной поверхности, вызванные периодически меняющимся ее освещением со стороны Солнца. Луна проходит полный цикл (один лунный месяц) от одного новолуния до следующего за 29,5 дней



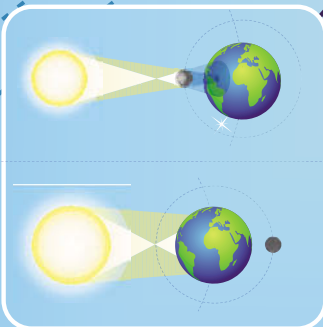
КВАДРАТУРА

Конфигурация Луны или верхней планеты (то есть планеты, более удаленной от Солнца, чем Земля) относительно Земли, когда угол Луна-Земля-Солнце равен 90°



ЛУННОЕ ЗАТМЕНИЕ

Затмение, которое наступает, когда Луна входит в конус тени, отбрасываемой Землей

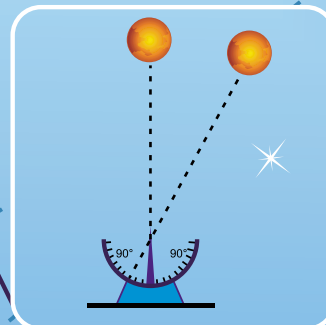


РАВНОДЕНСТИЕ И СОЛНЦЕСТОЯНИЕ



СКАФИС

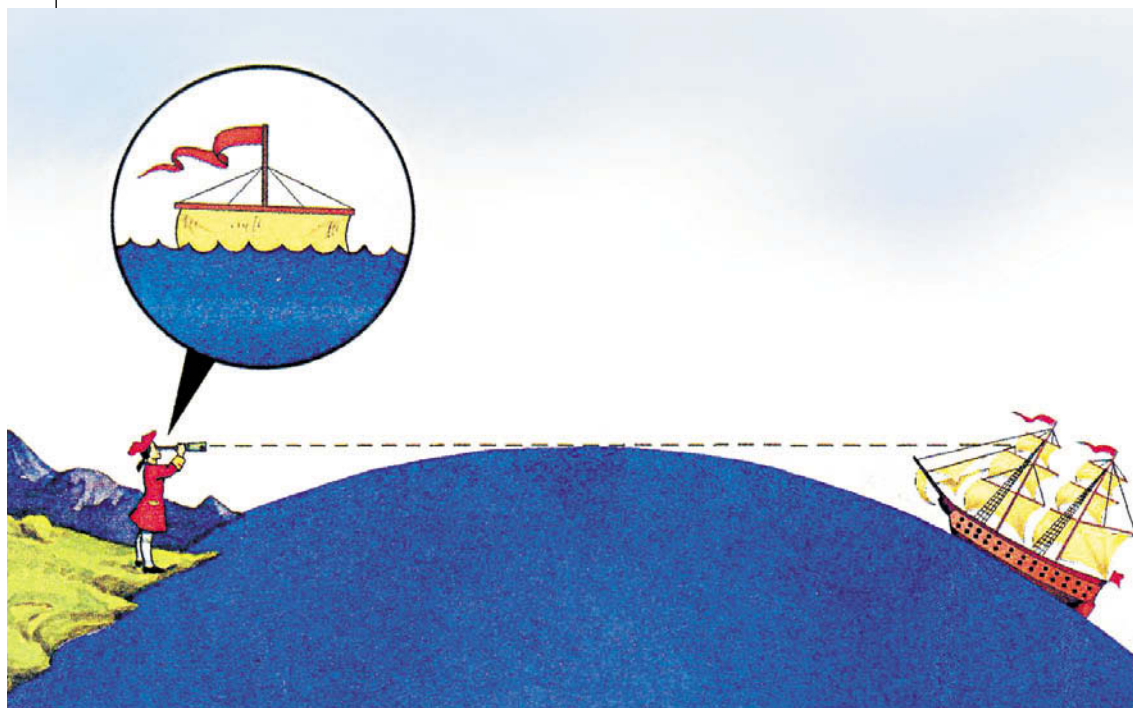
Скафис – одна из древнейших конструкций солнечных часов

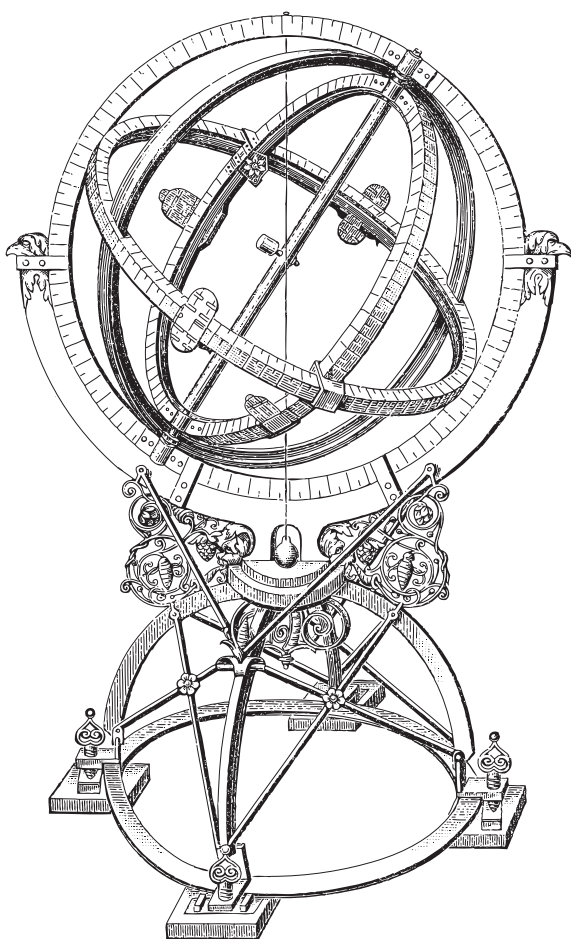




велики, скудны были познания Гомера о Земле. Но, как уже отмечалось, древние люди были весьма наблюдательны и о том, что Земля — шар, догадывались. Идея шарообразности Земли была известна египтянам задолго до греков. На чем были основаны их догадки? Одно из первых явлений, подмеченных людьми в древности и заставивших их заподозрить, что Земля шарообразна, состоит в следующем. Если плыть по морю или идти по совершенно ровной местности, приближаясь к берегу моря или к какому-нибудь городу, то сперва на горизонте становятся видны только верхушки самых высоких мачт или зданий и лишь по мере движения взору открываются весь корабль и дома пониже. Или вот такое явление природы, как лунное затмение. Древние поняли, что оно свидетельствует о том, что Земля — шар. Действительно, в самом начале затмения Луна видна в виде полного круга, затем левый ее край начинает темнеть, а спустя немного времени Луна перестает быть видна. Затем на правой стороне Луны появляется дугообразная область света и через некоторое время Луна «рождается» заново.

Для наблюдений небесного свода у древних уже был некоторый инструментарий. Он появился из потребностей практической деятельности людей — с началом освоения земледелия, когда нужно было планировать сельскохозяйственные работы. Для этого нужно было определять моменты равноденствий и солнцестояний. Одновременно и нужды кочевого животноводства требовали освоения методов ориентирования, а для этого изучались звезды, их движение. С освоением мореплавания возникает потребность изучать и само небо. Так, уже во времена древних восточных деспотий (Шумер, Ассирия, Вави-





**САМОЕ ЗНАМЕНИТОЕ ДЕЯНИЕ ЭРАТОСФЕНА –
ИЗМЕРЕНИЕ (И ПРИТОМ ПОРАЗИТЕЛЬНО
ТОЧНОЕ ДЛЯ ТЕХ ВРЕМЕН)
РАДИУСА ЗЕМЛИ. КАК ОН ЭТО СДЕЛАЛ?**

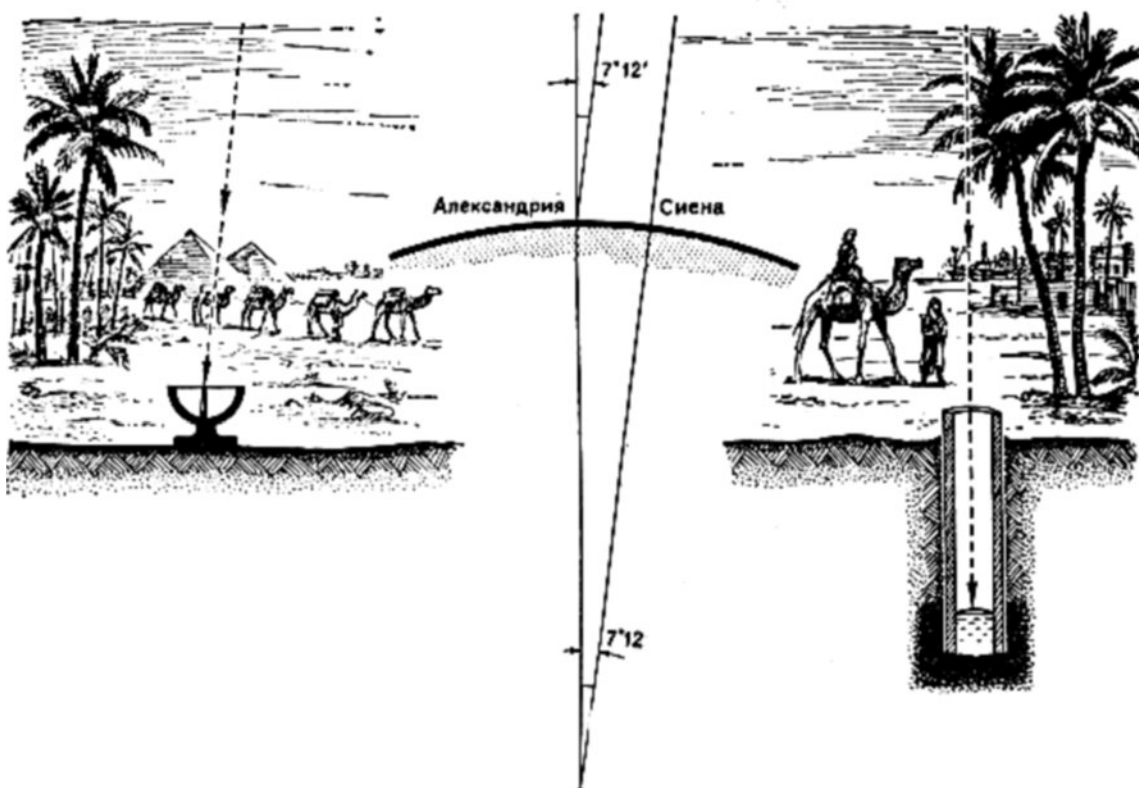
лон, Египет) возникают принципы систематизации небесных объектов. Так что измерению самой Земли предшествовал длительный период накопления первоначальных астрономических знаний.

Первое измерение дуги меридиана и вычисление радиуса Земли произвел Эратосфен (ок. 275–194 до н. э.), современник Архимеда. С раннего возраста Эратосфен жил в Александрии, здесь он и получил образование под руководством своего ученого земляка Каллимаха, стоявшего во главе александрийской библиотеки. Неудовлетворенный познаниями, приобретенными в Александрии, Эратосфен отправился в Афины, где так тесно сблизился со школой Платона, что обыкновенно называл себя платоником. Резуль-



татом изучения наук в этих обоих центрах древнегреческого просвещения явилось то, что его познания были очень разносторонними, а эрудиция — почти энциклопедической. Самое знаменитое деяние Эратосфена — измерение (и притом поразительно точное для тех времен) радиуса Земли. Как он это сделал?

Эратосфен сравнивал направление вертикали, проведенной к данному участку поверхности земного шара, с направлением параллельного пучка солнечных лучей в двух пунктах, отстоящих друг от друга на известном расстоянии. Вот как он описывает эту процедуру (краткое изложение этой работы известно нам по трактату Клеомена «О круговращении небесного свода»): «Далее, вообразим две прямые, опускающиеся под Землю от каждого гномона и встречающиеся в центре Земли. Солнечные часы в Сиене находятся отвесно под Солнцем, и воображаемая прямая проходит от Солнца через вершину гномона солнечных часов, производя одну прямую от Солнца до центра Земли. Вообразим еще одну прямую, проведенную от конца тени гномона через вершину гномона к Солнцу на чаше в Александрии; и она будет параллельна уже названной прямой, поскольку уже сказано, что прямые от разных частей Солнца к разным частям Земли параллельны. Прямая, проведенная от центра Земли к гномону в Александрии, образует с этими параллельными равные накрест лежащие углы. Один из них — с вершиной в центре Земли, при встрече прямых, проведенных от солнечных часов к центру Земли,

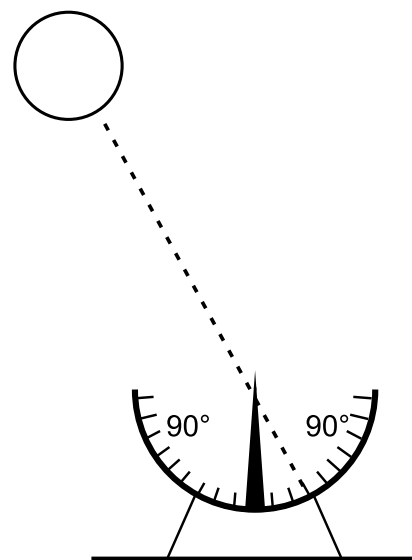


Определение размеров Земли по наблюдениям Солнца из двух точек на земной поверхности





а другой — с вершиной на конце гномона в Александрии, при встрече с прямой, идущей от этого конца к концу его же тени от Солнца, там где эти прямые встречаются наверху». Но надежных часов, которые можно было бы сравнивать и переносить с места на место, у него не было, поэтому он обеспечивал одновременность наблюдений, выбирая полдень (когда Солнце находится в самом высоком положении) одного и того же дня в пунктах, расположенных на одной и той же долготе. Он проводил наблюдения в Александрии, где работал, и сравнивал их с наблюдениями, проводившимися некогда в Сиене, в 800 км южнее (в действительности это расстояние в древности измерялось в стадиях). От купцов и погонщиков верблюдов он знал, что на юге Египта в городе Сиена (ныне Асуан) Солнце в полдень 22 июня освещает дно глубоких колодцев и, следовательно, находится в зените (зенит — наивысшая точка на небосводе, небесной сфере), то есть сияет прямо над головой. Угол между лучом, направленным из глаза наблюдателя на светило, и вертикальным направлением называется зенитным расстоянием светила. Для измерения зенитного расстояния Солнца Эратосфен изобрел специальный прибор — скафис.



Скафис — древний прибор для определения высоты солнца над горизонтом (в разрезе)





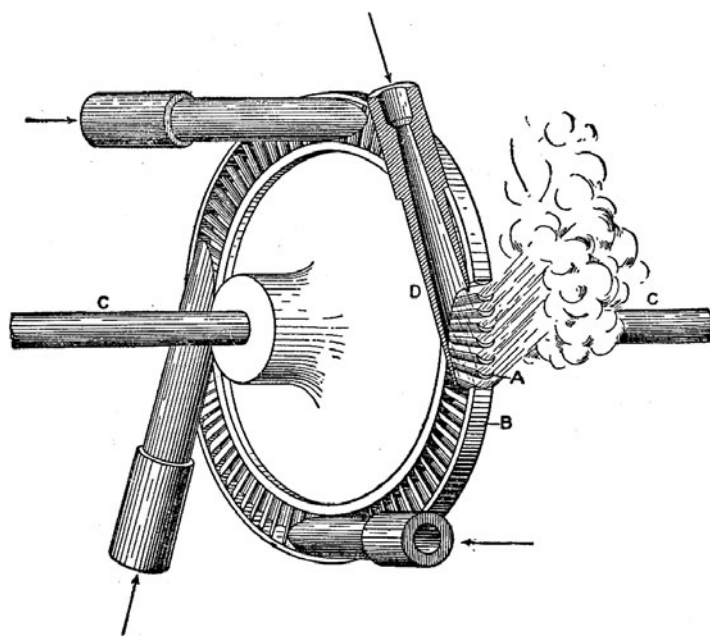
Скафис представляет собой чашу в виде полусферы, на дне которой закреплен металлический стержень. На внутреннюю полость скафиса наносятся деления в градусах. Скафис устанавливают по отвесу так, чтобы стержень, направленный по радиусу сферы, занимал строго вертикальное положение, т. е. был направлен на зенит. На освещенной Солнцем внутренней полости скафиса должна быть тень, которую отбрасывает стержень. Дуга, измеряемая в градусах от основания стержня до конца тени, равна зенитному расстоянию Солнца.

Итак, полуденное Солнце находилось в Сиене в этот день вертикально над головой наблюдателя. Эратосфен измерил в полдень того же дня длину тени, отбрасываемой обелиском в Александрии, и нашел, что направление солнечных лучей составляет около $7,5^\circ$ с вертикалью. В этих опытах вертикали (радиус Земли) имели различные направления. Отсюда следовало, что радиусы Земли в Александрии и в Сиене пересекаются в центре Земли под углом в $7,5^\circ$. Если этот угол соответствует 800 километрам, то скольким милям будет соответствовать полная окружность, то есть 360° , рассчитать несложно. Таким образом, Эратосфен рассчитал радиус Земли. Так как измеренный угол равен $1/50$ окружности, стало быть Сиена отстоит от Александрии на $1/50$ окружности Земли, то есть — в 5000 стадиях (в мерах того времени), следовательно окружность Земли равнялась 250000 стадиям, а радиус тогда 39790 стадиев. Эти цифры зависят от величины стадия, которым пользовался Эратосфен. Если гре-



**«НАСТАНЕТ ВРЕМЯ, КОГДА ПОТОМКИ НАШИ БУДУТ
УДИВЛЯТЬСЯ, ЧТО МЫ НЕ ЗНАЛИ ТАКИХ
ОЧЕВИДНЫХ ВЕЩЕЙ».**

Паровая турбина Герона (Эолипил)



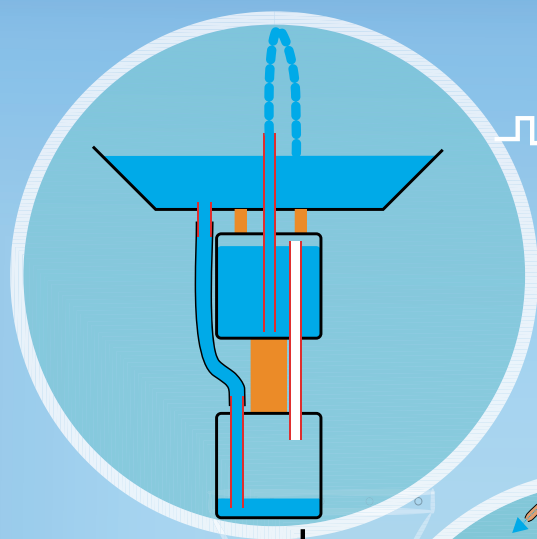
ческим (178 м), то его радиус Земли равнялся 7082 км, если египетским (172,5 м), то 6287 км. (современные измерения дают для усредненного радиуса Земли величину 6371 км). Замечательная точность, учитывая средства измерения, которыми пользовался Эратосфен. Заметим, что первое измерение длины градуса меридиана в Европе было произведено Ж. Фернелем в 1528 году, т.е. примерно 1800 лет спустя после измерений Эратосфена. Им была получена величина — 110,6 км (современное среднее значение — 111,1 км), что соответствует радиусу Земли около 6340 км.

Были и другие замечательные греческие ученые и изобретатели. Уже упоминавшийся в связи с «золотым правилом» механики Герон считается величайшим инженером за всю историю человечества. Лишь почти через 2000 лет были найдены и переведены на современные языки арабские списки его трудов.

Герон занимался геометрией, механикой, гидростатикой, оптикой.

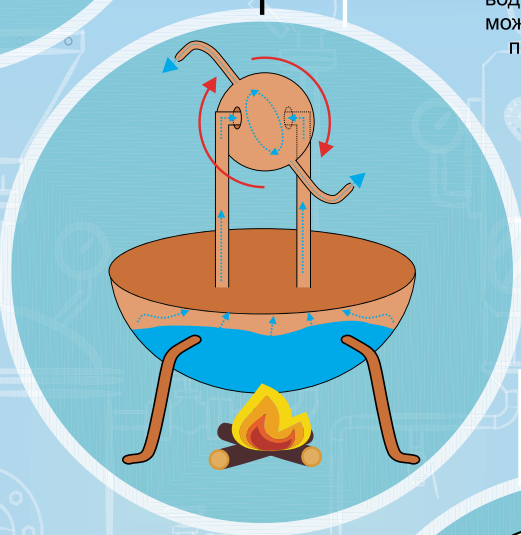
Герон дал точные и приближенные формулы расчета различных фигур (вспомните формулу Герона для определения площади треугольника по трем сторонам). Он изобрел ряд приборов и автоматов, в частности, прибор для измерения протяженности дорог, действовавший по тому же принципу, что и современные таксометры, автомат для продажи «священной» воды, различные водяные часы и другое. Герон создал первую модель паровой машины (эолипил, см. рисунок на с. 47). Более того, в этой модели он продемонстрировал принцип реактивного движения, тот самый, который позволяет сегодня запускать на орбиту Земли искусственные спутники, исследовать космос. Эолипил (в переводе с греческого «шар бога ветров Эола») представлял собой наглухо запаянный котел с двумя трубками на крышке. На трубках устанавливался вращающийся полый шар, на поверхности которого были установлены два Г-образных патрубка — сопла. В котел через отверстие заливалась вода, отверстие закрывалось пробкой, и котел устанавливался над огнем. Вода вскипала, образовывался пар, который по трубкам

ГЕРОН АЛЕКСАНДРИЙСКИЙ



ФОНТАН

Прибор, служащий одним из образчиков знаний древних (за 200 лет до н. э.) в области гидростатики и аэростатики. Чудо фонтана заключается в остроумном использовании давления воздуха, создаваемого внутри прибора содержащейся в нем водой

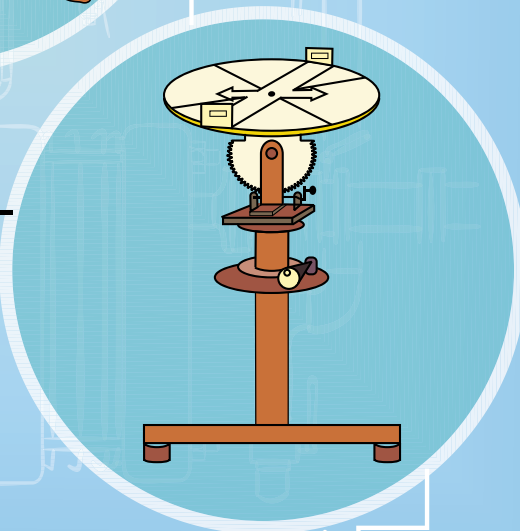


ЭОЛИПИЛ

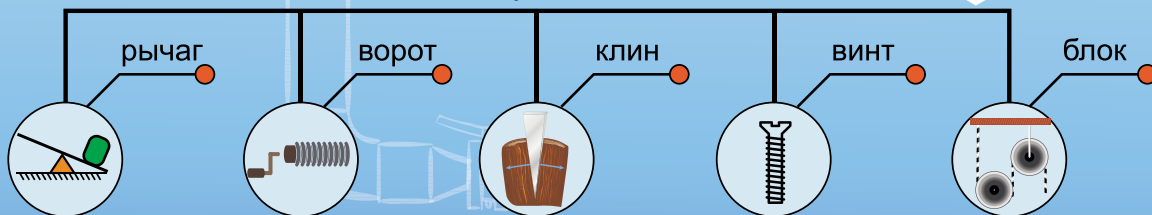
Представлял собой первую паровую турбину — шар, вращаемый силой струй водяного пара. Эолипил можно считать одним из первых реактивных двигателей

ДИОПТР

Применялся для геодезических работ, прообраз современного теодолита. Этот прибор представляет собой линейку с двумя смотровыми отверстиями, которую можно поворачивать в горизонтальной плоскости и при помощи которой можно визировать углы



МЕХАНИКА: простые механизмы





поступал в шар и в Г-образные патрубки. При достаточном давлении струи пара, вырываясь из сопел, быстро вращали шар. Построенный современными учеными по чертежам Герона эолипил совершал до 3500 оборотов в минуту! Эолипил не производил никакой полезной работы и поэтому так и остался забавной игрушкой. В 1884 году английский инженер Чарльз Парсонс изобрел первую применимую на практике паровую турбину. Ее конструкция была столь эффективна, что турбинами вскоре стали заменять паровые двигатели на электростанциях. Фактически прообразом будущих паровых турбин было изобретение Герона.

Две тысячи лет назад древние греки знали, умели делать многое из того, что — пусть в измененном, усовершенствованном виде — служит и сегодня. Некоторые современные технологии, предметы и знания были открыты и изобретены в далекие античные времена (турбина лишь один из множества примеров). Чтобы в этом убедиться, достаточно взглянуть в содержание школьных учебников — простые механизмы, «золотое правило «механики», закон Архимеда, законы статики (о чем будем еще рассказывать) и много дру-

гое — все это было сделано тогда, в Античности. Некоторые взгляды того времени кажутся нам весьма наивными. Не об этом ли говорил римский философ Луций Анней Сенека: «настанет время, когда потомки наши будут удивляться, что мы не знали таких очевидных вещей». Но не забудем, в какое время происходили описываемые нами события и будем благодарны ученым, изобретателям древности за полученное наследие. Кончилась Античность, ушел огромный пласт истории, оставив потомкам много вопросов об окружающем мире, но обогатив здравый смысл людей опытом предыдущих поколений. Начиналась своеобразная, не понятая еще до конца, эпоха Средневековья, в которой продолжится наше путешествие.

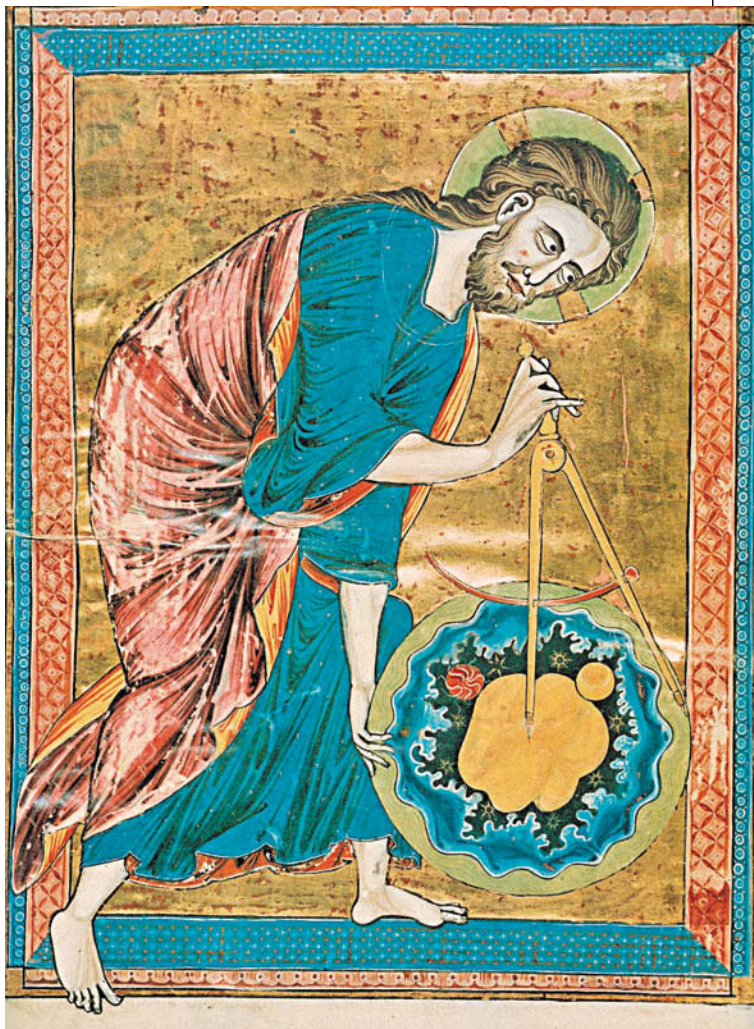


ВРЕМЯ ВЕЛИКОГО ПРОРЫВА. Наука «круглой Земли». Открыты законы движения планет. Галилей объясняет наблюдаемые факты, борясь с вековыми заблуждениями. Астрономические открытия Галилея поражают воображение людей. Наука на пороге создания классической физики.

2. *Космология Средних веков. Система мира Птолемея. «Сдвинувший» Землю: гелиоцентрическая система Коперника. Законы Кеплера.*

Средневековье начинается в Западной Европе с V века и продолжается до рубежа XVI–XVII вв. Раннее европейское Средневековье (VI–VIII века) — время и вправду очень тяжелое. Континент, потрясенный и разоренный нашествиями варваров во время так называемого «великого переселения народов», оскудел и зарос густым лесом. Города захирели. Пришла в упадок торговля... Это хорошо разглядел еще Вольтер (1694–1778). В «Опыте о нравах и духе народов» (книга вышла в 1769 г.) он пишет: «Вместо прекрасного латинского языка — 20 варварских наречий, вместо культуры и законов — только варварские обычаи. Цирки и амфитеатры, возвышавшиеся во всех провинциях, сменились хижинами, крытыми соломой. Большие дороги, такие красивые и прочные, проведенные от подножия Капитолия до гор Тавра, покрылись стоячими водами. Такой же переворот произошел в умах; Григорий Турский и монах Фредегар из Сен-Галлена —





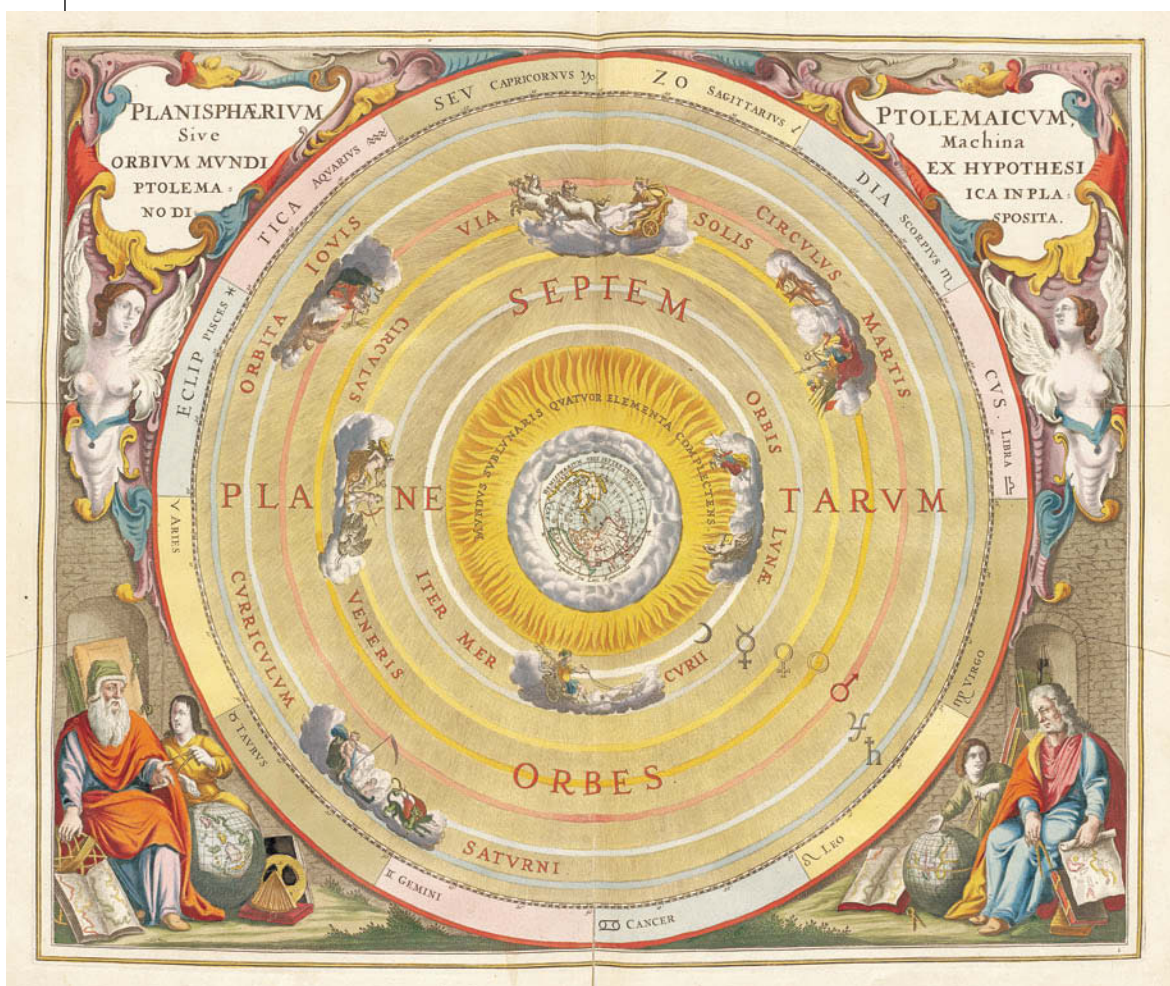
В СРЕДНИЕ ВЕКА ПОД ВЛИЯНИЕМ КАТОЛИЧЕСКОЙ ЦЕРКВИ ПРОИЗОШЕЛ ВОЗВРАТ К ПРИМИТИВНЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЯМ ДРЕВНОСТИ О ПЛОСКОЙ ЗЕМЛЕ И ОПИРАЮЩЕМСЯ НА НЕЕ ПОЛУШАРИИ НЕБА. ВСЯ ДУХОВНАЯ ЖИЗНЬ СРЕДНЕВЕКОВЬЯ, ПРОСВЕЩЕНИЕ, ИСКУССТВО, НАУКА — БЫЛА ПОДЧИНЕНА ЦЕРКВИ.



это наши Полибии и Титы Ливии. Человеческий разум огрубел среди самых подлых и бессмысленных суеверий... Вся Европа коснеет в этом унижении до XVI века и освобождается от него лишь путем ужасных судорог».

Христианский средневековый мир был окружен неизвестными землями, знание о которых приобретало все более смутный характер по мере удаления от центра ойкумены. Мир средневекового человека ограничивался узкими рамками его деревушки. В Средние века под влиянием католической церкви произошел возврат к примитивным представлениям древности о плоской земле и опирающемся на нее полушарии неба. Вся духовная жизнь Средневековья, просвещение, искусство, наука — все было подчинено церкви.

В этот период люди разделяли те же предрассудки, которыми была полна предшествующая история. «Здравый смысл» человека Средних веков сопротивлялся факту вращения Земли, движению ее вокруг Солнца! По-прежнему весь повседневный опыт



Геоцентрическая модель мира по Птолемею

убеждал средневекового человека с непреложной достоверностью, что Земля покоится, а Солнце движется вокруг нее. Каждый материальный объект рассматривался как символ сокровенного и идеального мира, а задача науки — раскрыть эти символы. Отсюда проистекал отказ от изучения подлинных связей вещей при помощи опыта. Символизм наложил отпечаток на всю средневековую культуру. Считалось, что слова объясняют природу вещей. Непосредственное реалистическое восприятие мира в искусстве и литературе часто облекалось в форму символов и аллегорий. Так формировалась средневековая схоластика (от греч. *Schole* — «школа») — тип религиозной философии, характеризующийся принципиальным подчинением мысли авторитету догмата веры. В основу схоластики были положены основные положения учения Аристотеля. Типичными для Средних веков были философы, которые, занятые, как писал Стендаль «вздорными спорами о преимуществах химер Аристотеля или Платона, время от времени меняли одни нелепости на другие, не приближаясь нисколько к истине».

На этой теологической основе Средневековье без труда приняло аристотелевскую космологию. Согласно Аристотелю, Земля представляет собой сферу в центре Вселенной, расположенную ниже Луны, то есть подлунную сферу несовершенных материальных тел. Выше находятся концентрические небесные сферы Луны, Солнца и звезд, состоящие из более чистой, неземной материи; они вращаются вокруг Земли. Каждая часть мироздания имеет назначенное ей место, стремится занять его и обрести покой. Это была логически согласованная система устройства Вселенной и действующих в нем законов физики, и, казалось, она соответствовала обычным представлениям и здравому смыслу.

Но жизнь не стояла на месте. В истории науки и техники случается, что многие годы, столетия, как кажется, она практически не развивается. И вдруг темп значительно ускоряется. Так случилось в период с XII–XIII начала века, когда в Европе произошел резкий подъем развития технологий и увеличилось число нововведений в средствах производства. Менее чем за столетие было сделано больше изобретений, чем за предыдущую тысячу лет.

Средневековый образ мира и обусловленный им настрой человека и культуры начинают разрушаться в XIV веке. Продолжается развитие техники, от Парижа до Москвы появляются башенные колесные часы. В 1440 году Иоганн Гуттенберг (1400–1468) изобретает книгопечатание отдельными вырезными буквами. Изобретение бумаги можно считать основополагающим двигателем цивилизации. Развивающемуся обществу нужны были образованные администраторы, юристы, нотариусы, медики и священники. Пришел черед образования высших школ.

Начав разрушаться в XIV веке, средневековый образ мира продолжает разрушаться, и в следующем столетии произошел закат Средневековья. Неслучайно этот период называют временем великого прорыва. В 1440 году Николай Ку-





Изобретение книгопечатания

занский в книге «Об ученом невежестве» утверждал, что все познания о природе следует записывать в цифрах, а все опыты над нею производить с весами в руках. XVI век стал переломным для европейской математики. Полностью усвоив достижения предшественников, она несколькими мощными рывками вырвалась далеко вперед. Леонардо да Винчи очень точно изложил основы метода нового естествознания: опыт и математический анализ. «Мне кажется, — пишет он, — что пусты и полны заблуждений те науки, которые не порождены опытом — отцом всякой достоверности — и не завершаются в наглядном опыте...» «Все наше познание начинается с ощущений. «Мудрость есть дочь опыта». «Никакой достоверности нет в науках там, где нельзя приложить ни одной из математических наук, и в том, что не имеет связи с математикой».

Растет престиж математики, в изобилии появляется множество практических задач, требующих решения — в артиллерии, мореплавании, строительстве, промышленности, гидравлике, астрономии, картографии, оптике и др. В новых торговых государствах, особенно во Франции, Голландии, был большой спрос на инженеров и «арифметиков».

Неоспоримая эффективность применения математики в естествознании подталкивала ученых к мысли, что математика, так ска-



Математики XVI века, средневековая миниатюра

зять, встроена в мироздание, является его идеальной основой. Другими словами, познание в математике есть часть познания реального мира. Многие ученые XVII–XVIII веков в этом и не сомневались. И эта мысль в последующие века только укреплялась.

В XIII–XV вв. в кругах образованных философов шарообразность Земли была общепринятым взглядом. И в популярной (конечно, не похожей на современную) литературе этот взгляд также распространялся (см. рисунок).

Великие географические открытия на практике утвердили мнение о шарообразности Земли. Оказалось, что вокруг Земли можно объехать — совершить кругосветное путешествие. И первое такое путешествие в конце XV века совершил Ф. Магеллан.

Окружающий мир начинает расширяться, разрывая свои границы. Астрономия обнаруживает, что Земля вращается вокруг Солнца; тем самым Земля перестает быть центром мира. Но такое представление завоевывает умы людей далеко не сразу. В тогдaшнем мире господствовала геоцентрическая система мира древнегреческого астронома Птолемея (II в. н. э.).

Птолемею удалось создать математически стройную систему движения планет, которые объясняли и, надо заметить, весьма точно, видимое петлеобразное движение планет сложной системой эпициклов и деферентов: каждая из планет равномерно движется по небольшому кругу — эпициклу, центр эпицикла равномерно обращается вокруг Земли по большому кругу — деференту (см. рисунок). Эти эпициклы и деференты были идеальными окружностями. А могло ли быть иначе? Никким образом. Ведь, по мнению пифагорейцев, движения небесных светил должны быть совершенными, т. е. круговыми. И такое представление оказало решающее влияние как на Аристотеля, так и на Клавдия Птолемея. Да и оказывало влияние много веков спустя. Система Птолемея полностью укладывалась в здравый смысл людей, и с ее помощью удалось построить стройную модель мироздания, не только объяснявшую с единой точки зрения характер наблюдаемых перемещений небесных светил, но и позволявшую с точностью, вполне достаточной для того времени, вычислять будущие положения планет среди звезд.

Эта система была весьма сложной, и для объяснения отклонений от вычисленных движений планет приходилось вводить все новые окружности. Альфонс Мудрый, правивший Кастилией в XIII веке, глубоко уважал астрономию. На то имелись совершенно прагматические причины: знание точного



Страница из средневековой книги «L'Image du monde» («Образ мира») с иллюстрацией, изображающей круглую Землю. Книга написана Готье де Мецем ок. 1245 г., была очень популярна и переводилась на многие языки.

Иллюстрация принадлежит копии XIV века

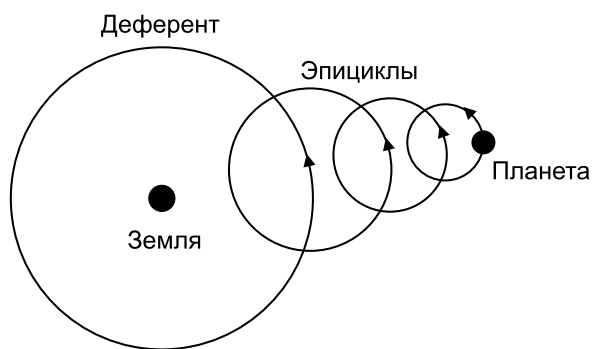
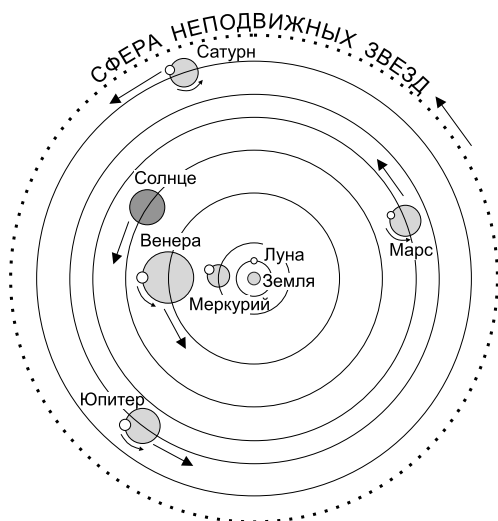


Рисунок XVI века, изображает Магеллана во время его знаменитого кругосветного путешествия.

Магеллан сидит на корме своего корабля, вокруг него астрономические инструменты, с помощью которых он определяет положение судна в море

положения планет на небе было жизненно необходимо для составления точных гороскопов. Для повышения их качества Альфонс заказал новые астрономические таблицы, основанные на теории Птолемея — последнем слове тогдашней космологии. Но когда ему объяснили тонкости птолемеевой системы, он отреагировал весьма скептически: «Если бы Всемогущий Бог посоветовался со мной перед творением, я бы порекомендовал что-нибудь попроще». Но в «Великом математическом построении астрономии» Клавдий Птолемей столь искусно и математически строго представил движение Солнца, Луны и других небесных светил вокруг неподвижной Земли, что впервые стали возможны сами вычисления движения. Астрономические таблицы на основе труда Птолемея играли огромную роль в практической астрономии на протяжении многих веков.

Около 1400 лет использовалась система Птолемея, но на протяжении всех этих лет она постоянно дополнялась новыми элементами (например, экванты — еще один дополнительный элемент птолемеевой системы). Происходило так потому, что, сделав вполне правильное предположение о равномерном движении по окружностям, Птолемей все же не смог отказаться от неподвижности Земли. Вот эта ошибка и привела к тому, что в итоге его система рухнула, так как не могла объяснить новых наблюдений. Геоцентрическая система мира Птолемея была принципиально неверной, а также безмасштабной,



Система мира по Птолемею

потому что для объяснений видимых движений планет определялись не абсолютные размеры эпициклов и деферентов, а лишь их отношения. И это обнаружил Коперник. В обращении к папе Павлу III Коперник критикует теорию эпициклов, не согласующуюся достаточно хорошо с наблюдениями и не дающую целостной картины мироздания: «...они (т. е. авторы геоцентрических теорий) не смогли определить форму мира и точную соразмерность его частей. Таким образом, с ними получилось то же самое, как если бы



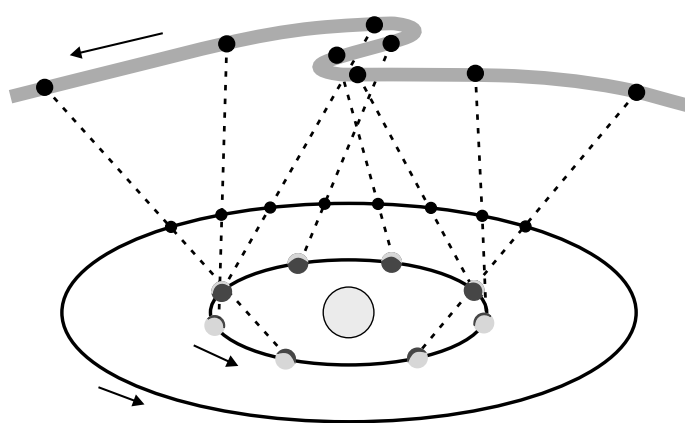


кто-нибудь набрал из различных мест руки, ноги, голову и другие члены, нарисованные хотя и отлично, но не в масштабе одного и того же тела; ввиду полного несоответствия друг с другом из них, конечно, скорее составилось бы чудовище, а не человек». Коперник пишет, что он «стал досадовать, что у философов не существует никакой более надежной теории движений мирового механизма...»

Коперник отказался от принципа геоцентризма, то есть от неподвижной Земли как центра мира, и построил гелиоцентрическую систему мира, в которой неподвижным является Солнце, а все планеты, в том числе Земля, движутся вокруг Солнца. Коперник показал, что суточное движение всех светил можно объяснить вращением Земли вокруг оси, а видимое петлеобразное движение планет — тем, что все они, включая Землю, обращаются вокруг Солнца. На рисунке показано движение Земли и Марса в тот период, когда, как нам кажется, планета описывает на небе петлю. Планеты были поставлены, как говорится, на свои истинные места в Солнечной системе.

Коперник проводил наблюдения неподвижных звезд, желая сравнить состояние неба в его эпоху с данными Птолемея. Делал он это для проверки своих выводов.

Коперник, выдвинув правильный принцип, оказал решающее влияние на все последующее развитие естествознания и заслужил признание как один из величайших реформаторов науки. Понятно, что теория Коперника полностью противоречила по-



Видимое петлеобразное движение планет

КОПЕРНИК НЕ ТОЛЬКО УБРАЛ ЗЕМЛЮ ИЗ «ЦЕНТРА МИРА», ОН ТАКЖЕ ОБЪЯСНИЛ, ПОЧЕМУ ВОЗМОЖНО ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ, ПРОТИВ КОТОРОГО ТАК ВОССТАВАЛ ЗДРАВЫЙ СМЫСЛ НЕ ТОЛЬКО РЯДОВОГО ЧЕЛОВЕКА, НО И ВЕЛИКОГО АСТРОНОМА ПТОЛЕМЕЯ.



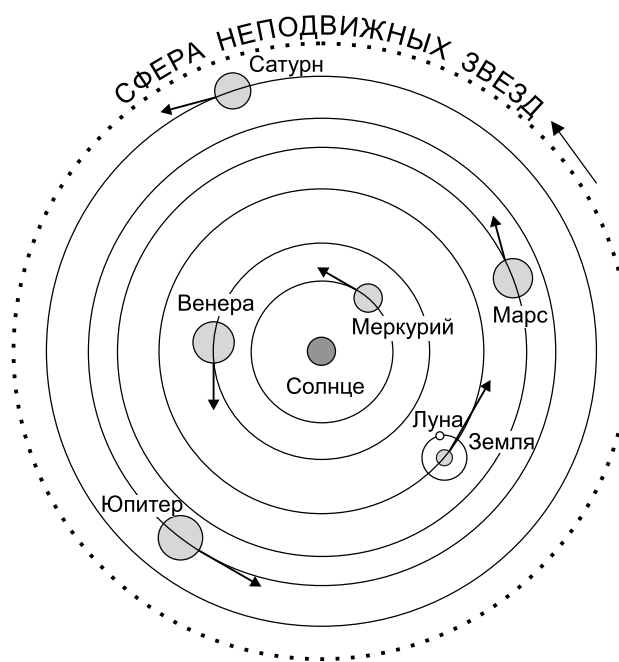
Коперник за астрономическими наблюдениями.
Картина польского художника Яна Матейко (1873)

вседневному опыту людей, здравому смыслу. Осознать, поверить в такое было невозможно! Коперник не только убрал Землю из «центра мира», он также объяснил, почему возможно вращение Земли, против которого так восставал здравый смысл не только рядового человека, но и великого астронома Птолемея. Вот что можно прочесть в его сочинениях. Птолемей вступает в полемику со сторонниками вращательного движения Земли (не называя их по именам), считавших, что суточное вращение совершает Земля, а не небо. Птолемей признает, что среди небесных явлений нет ничего, противоречащего гипотезе о вращении Земли, но совсем иначе обстоит дело с явлениями на земле и в воздухе. «Они должны допустить, — пишет Птолемей, — что вращательное движение Земли должно быть самым быстрым из всех движений, связанных с ней, учитывая, что Земля должна совершать одно обращение за столь короткое время; в результате все предметы, не опирающиеся на Землю, должны казаться совершающими такое же движение в обратном направлении; ни облака, ни другие летающие или парящие объекты никогда не будут видимы движущимися на восток, поскольку движение Земли к востоку будет всегда отбрасывать их, так что эти объекты



будут казаться движущимися на запад, в обратном направлении». Даже если предположить, рассуждает далее Птолемей, что и воздух движется в том же направлении и с той же скоростью, что и Земля, плавающие и парящие в воздухе тела не должны следовать его движению. Если же они связаны с воздухом так, что следуют его движению, то нам они казались бы неподвижными, чего на самом деле нет. Так Птолемей «опровергает» взгляды сторонников вращения Земли. Некоторые его доводы сейчас могут показаться наивными, но и полтора тысячелетия спустя именно к таким доводам прибегали противники Коперника и Галилея.

В приведенных выше рассуждениях Птолемея, кроме тех наивных аргументов, о которых мы говорили, есть и здравые мысли. Это мысль Птолемея о том, что ход небесных явлений не противоречит гипотезе о вращении Земли. Птолемей прав и в том, что вращательное движение Земли быстрее всех прочих известных в ту эпоху движений. Если бы он попробовал вычислить ее скорость (а у него были для этого все необходимые данные: окружность Земли по Эратосфену и широта Александрии), он нашел бы эту



Система мира по Копернику

**М. ЛЮТЕР ГОВОРИЛ: «ЭТОТ ДУРАК
ХОЧЕТ ПЕРЕВЕРНУТЬ ВСЕ
АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ИСКУССТВО».**



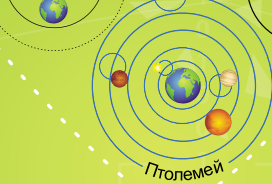
Система Птолемея

ДЕФЕРЕНТ

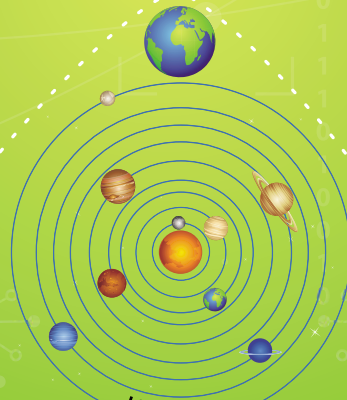
Согласно этой модели, всякая планета равномерно движется по кругу (эпициклу), центр которого, в свою очередь, движется по другому кругу

ЭКВАНТ
Согласно этой модели, точка, из которой движение планеты выглядит равномерным, не совпадает с геометрическим центром траектории планеты

ЭПИЦИКЛ
Согласно этой модели, планета равномерно движется по малому кругу



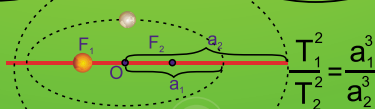
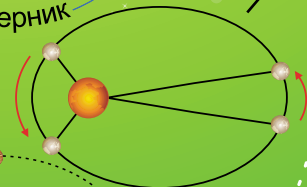
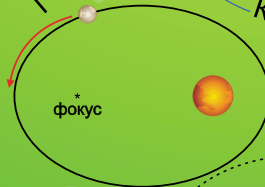
Птолемей



Коперник

ПЕРВЫЙ закон КЕПЛЕРА

ВТОРОЙ закон КЕПЛЕРА

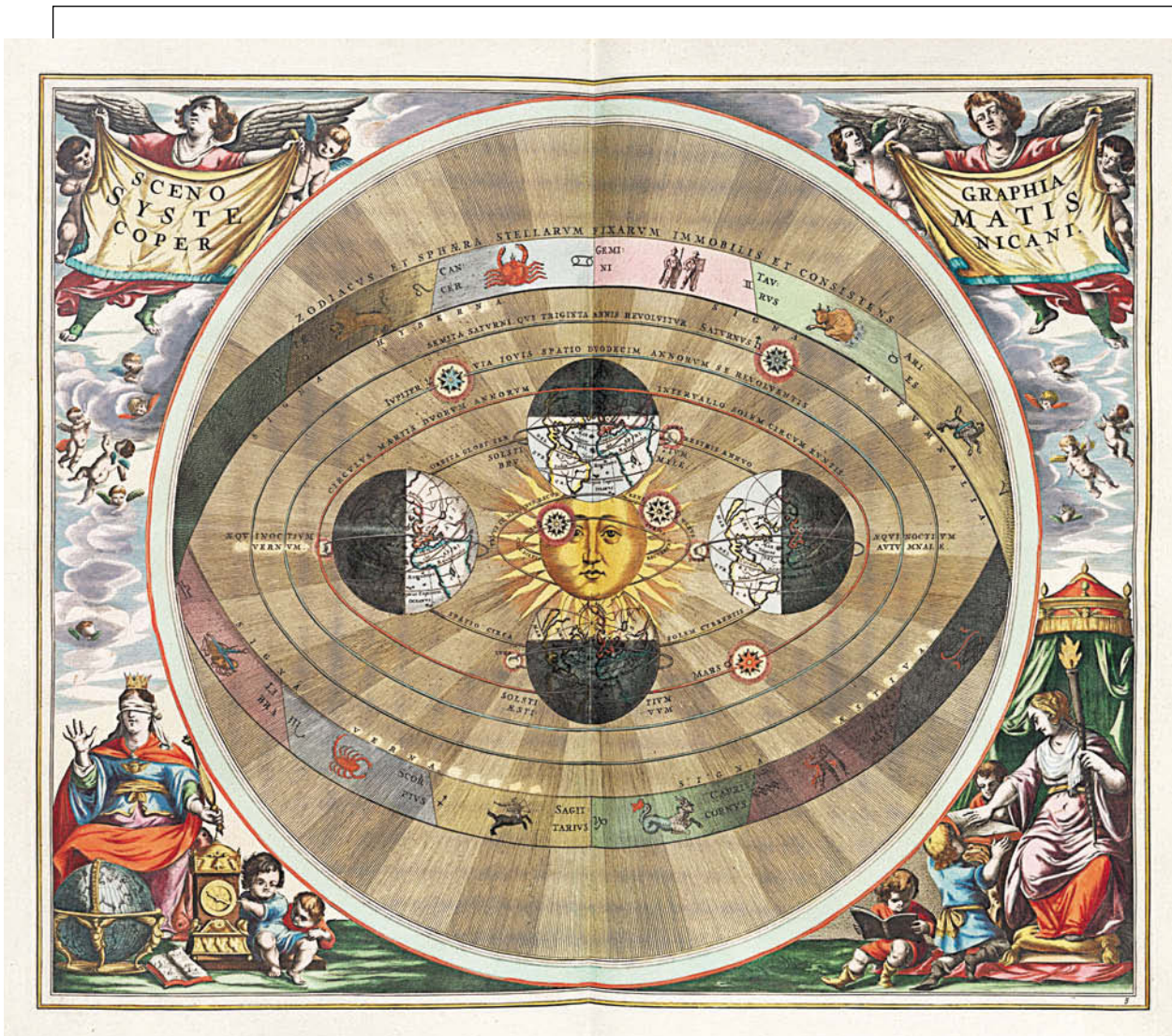


ТРЕТИЙ закон КЕПЛЕРА

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$



величину равной 385 м/с, что в десять раз быстрее ураганного ветра. Но он не мог понять, что воздух увлекается вращением Земли, а все плавающие или летающие в воздухе тела тоже участвуют во вращении Земли. Итак, здравый смысл подвел. Оказалось, что то, что было очевидным, не является правильным. В основном труде Николая Коперника «О вращениях небесных сфер», гипотеза суточного вращения Земли стала частью гелиоцентрической системы мира, как у Аристарха Самосского. Отвечая на вопрос о ненаблюдаемости эффектов суточного вращения в земных экспериментах, Коперник писал: «Вращается не только Земля с соединенной с ней водной стихией, но также и немалая часть воздуха и все, что каким-либо образом сродно с Землей, или уже ближайший к Земле воздух, пропитанный земной и водной материей, следует тем же самым законам



Система мира по Копернику. Изображение Солнечной системы из книги Андреаса Целлариуса *Harmonia Macrocosmica* (1708)



природы, что и Земля, или имеет приобретенное движение, которое сообщается ему прилегающей Землей в постоянном вращении и без всякого сопротивления». Таким образом, главную роль в ненаблюдаемости вращения Земли играет увлечение воздуха ее вращением. Такого же мнения придерживались и большинство коперниканцев в XVI веке.

Но и для враждебно настроенных ученых, и для простых людей самым нелепым аспектом новой теории было приписываемое Земле движение, каждому собственные чувства подсказывали, что она стоит на месте. Ведь на стороне нападавших был здравый смысл. Доводы — те же, что и у Птолемея: если бы Земля двигалась, то птицы и снаряды остались бы позади, а падающий камень никогда не достиг бы земли. Сам воздух слетел бы прочь с земного шара. Словом, вся эта теория — сплошная чушь. Теория Коперника была революционной, поэтому не могла быть принята сразу. Это понимал и сам ее создатель. В предисловии к книге Коперник пишет: «Принимая в соображение, какой нелепостью должно показаться это учение, я долго не решался напечатать мою книгу и думал, не лучше ли будет последовать примеру пифагорейцев и других, передававших свое уче-



ние лишь друзьям, распространяя его только путем предания». И он был прав. Вот как отзывались о книге его великие современники. М. Лютер говорил: «Этот дурак хочет перевернуть все астрономическое искусство». И Ф. Бэкон: «спекуляции человека, который не заботится о том, какие фикции он вносит в природу. Ему важно лишь, чтобы это отвечало его вычислениям». И, что удивительно, Галилей тоже не принял систему Коперника: «Я был убежден, что новая система — чистейшая глупость». Некоторое время его труд свободно распространялся среди ученых. Только тогда, когда у Коперника появились последователи, инквизиция спохватилась. Его учение было объявлено ересью, а книга внесена в «Индекс запрещенных книг» (с 1616 до 1833 г.).

Вот почему Коперник не спешил обнародовать свой труд. Считается, что первый отпечатанный экземпляр его книги «Об вращениях небесных сфер» вложили ему в руки в день смерти в 1543 году.

Однако планеты в системе мира Коперника по-прежнему вращались по идеальным кругам. В посвящении к своей книге он ссылается на учение о движении сфер вокруг центрального огня, изложенное пифагорейцем Филолаем. Этот ложный принцип — равномерных круговых движений — Коперник преодолеть не сумел. Движение каждой планеты вокруг Солнца он представлял как комбинацию таких движений (примерно как у Птолемея). Сведения об учении Коперника распространялись крайне медленно. Первое издание его



Портрет Коперника, гравированный
в Лейпциге Геданом

ПУТЕМ НЕИМОВЕРНО ТЯЖЕЛОГО ТРУДА, МЕТОДОМ ПРОБ И ОШИБОК КЕПЛЕР ПРИХОДИТ К ВЫВОДУ, ЧТО ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ МАРСА ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ НЕ КРУГ, А ЭЛЛИПС, В ОДНОМ ИЗ ФОКУСОВ КОТОРОГО НАХОДИТСЯ СОЛНЦЕ — ПОЛОЖЕНИЕ, ИЗВЕСТНОЕ СЕГОДНЯ КАК ПЕРВЫЙ ЗАКОН КЕПЛера.



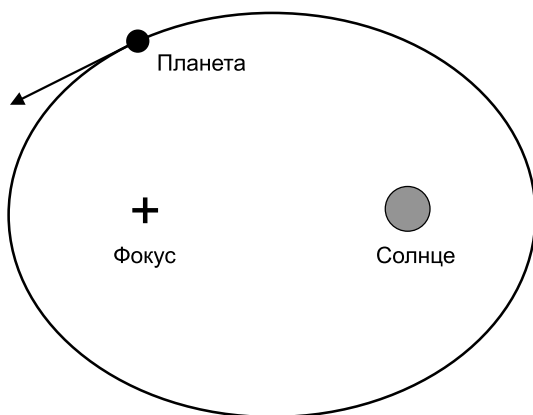
Иоганн Кеплер (1571–1630)

проблему движения планет. Кеплер определил и доказал, что планеты движутся по эллиптическим орбитам вокруг Солнца. Три закона Кеплера в математической форме представили истинное движение планет. Эти законы Кеплер нашел, исследуя хаотическую груду наблюдений, независимых друг от друга, не объединенных ни общей идеей, ни единым принципом. А происходило это так. В 1600 году Кеплер занялся исследованием движения Марса, работая у знаменитого датского астронома Тихо Браге. Он перебрал всевозможные комбинации эпициклов, деферентов, эксцентров и эк-

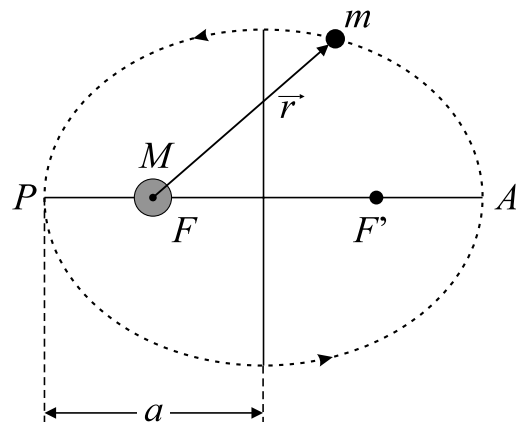
книги «О вращениях небесных сфер» имело тираж всего 1000 экземпляров. Не без участия Ретика в Базеле в 1566 году вышло второе издание. Определенный интерес к теории Коперника появляется в эти годы и в Англии, где Томас Диггес в 1576 году переводит на английский язык небольшую часть сочинения Коперника. Позже отдельные университетские профессора полулегально знакомят студентов с основными положениями теории Коперника — так было, например, в Тюбингенском университете, где Кеплер узнал о новом учении от своего учителя Местлина.

Эпициклы, деференты и экванты теории Птолемея в соединении с гелиоцентрической системой Коперника проложили путь к законам Кеплера. Проложили, чтобы навсегда уйти в историю.

Вот она — та цепочка, лишь усвоив которую, совершил свое открытие Кеплер. Ему полностью удалось разрешить



Движение планеты по Кеплеру



Эллиптическая орбита планеты массой m (m — масса Солнца), a — длина большой полуоси, F и F' — фокусы орбиты

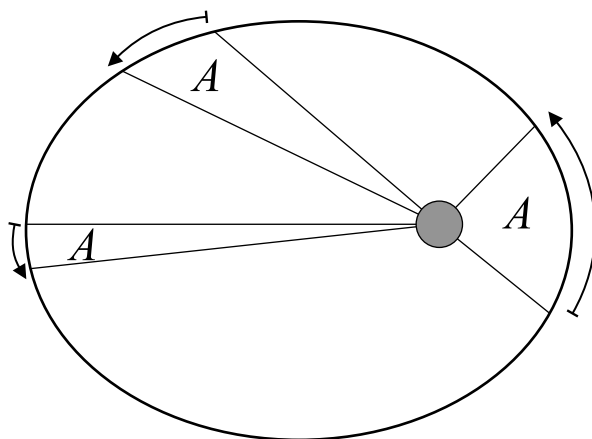


вантов, чтобы добиться лучшего совпадения расчетных результатов с наблюдаемым перемещением планеты, но добился точности в совпадении угловых координат планет лишь в 8 угловых минут, то есть всего около видимого диаметра лунного диска. Даже по тем временам это было очень низкой точностью. Естественно, такой результат не удовлетворил Кеплера. Часто приводят его слова: «эти 8 минут привели к пересмотру всей астрономии». Перебрав около семидесяти различных комбинаций, Кеплер пришел к выводу, что орбита Марса должна быть *эллипсом*. Чтобы согласиться с собственным выводом, Кеплеру нужно было переломить себя. В его ранних работах использовались пифагорейские идеи: число планет и расстояния от них до Солнца были связаны с числом и расположением правильных геометрических (евклидовых) тел, при этом движение планет вокруг Солнца он объяснял действием своеобразных интеллектуальных сил, или душ. Как и большинство его современников, он был убежденным сторонником концепции идеального кругового движения. Но своим открытием Кеплер порвал с греками! «Кеплер, — писал Эйнштейн, — жил в эпоху, когда власть закона в природе отнюдь не была общепризнанной. А его вера в единообразный закон была столь велика, что дала ему сил на десять лет терпеливого труда — эмпирически исследовать движения планет, чтобы найти их математические законы».

Путем неимоверно тяжелого труда, методом проб и ошибок Кеплер приходит к выводу, что траектория движения Марса представляет собой не круг, а эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце — положение, известное сегодня как *первый закон Кеплера*.

Второй закон Кеплера (закон площадей) гласит: каждая планета движется в плоскости, проходящей через центр Солнца, причем за равные промежутки времени радиус — вектор, соединяющий Солнце и планету, — описывает равные площади.

Из второго закона следует, что чем дальше планета от Солнца, тем медленнее она движется. Применительно к нашей Солнечной системе с этим законом связаны два понятия: перигелий — ближайшая к Солнцу точка орбиты, и афелий — наиболее удаленная точка орбиты.



Второй закон Кеплера



Таким образом, из второго закона Кеплера следует, что планета движется вокруг Солнца неравномерно, имея в перигелии большую линейную скорость, чем в афелии. Оба закона были сформулированы Кеплером в 1609 году в книге «Новая астрономия», причем, осторожности ради, он относил их только к Марсу. Новая модель движения вызвала огромный интерес среди ученых-коперниканцев, хотя не все они ее приняли.

Тем временем Кеплер продолжает астрономические исследования и в 1618 году открывает *третий закон: отношение куба среднего удаления планеты от Солнца к квадрату периода обращения ее вокруг Солнца есть величина постоянная для всех планет: $a^3/T^2 = const$* . Этот результат Кеплер публикует в завершающей книге «Гармония мира», причем применяет его уже не только к Марсу, но и ко всем прочим планетам (включая, естественно, и Землю), а также к галилеевым спутникам (о них далее). Этот закон можно записать и так: квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся друг к другу так же, как кубы больших полуосей орбит планет. Справедливо не только для планет, но и для их спутников. $T_1^2/T_2^2 = a_1^3/a_2^3$, где T_1 и T_2 — периоды обращения двух планет вокруг Солнца, а a_1 и a_2 — длины больших полуосей их орбит.

Законы Кеплера дали вполне ясное представление о геометрическом характере планетных движений, но не объясняли физических свойств явления, не вскрыли причины



этих движений. А движение планет по эллипсам совсем не укладывались в многовековые представления людей, в их здравый смысл. Для ученых, живших до Кеплера и Ньютона, этого вопроса не существовало, потому что для них круговые движения небесных тел представлялись понятными сами по себе и не требовали дальнейшего обоснования. Даже Галилей игнорировал законы Кеплера, не видя их роли в деле обоснования новой системы мира. По всей вероятности, это вызвано главным образом тем, что в тех механических построениях Галилея, которые изложены в «Диалоге», равномерные круговые движения играли столь значительную роль, что отказаться от них он не мог. Еще в 1612 году он сделал следующее замечание: «Не только есть много примеров движения по эпициклам, но и не существует иного рода движения». В связи с этим он совершенно не обратил внимания на то, что на основе равномерного обращения по круговым орбитам невозможно создать теорию планетных движений и построить планетные таблицы. В эпоху Галилея влияние пифагорейской школы было весьма значительным, а учение о движении Земли именовалось «пифагорейским учением».



В нашем путешествии мы подошли к такому периоду в истории интересующей нас науки, который связан собственно с рождением физики — той классической физики, которую учат в наших школах.

3 ГАЛИЛЕЙ — «ОТЕЦ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ». *Астрономические открытия Галилея. Физика колебаний маятника. «Гениальнейший часовой мастер всех времен».*



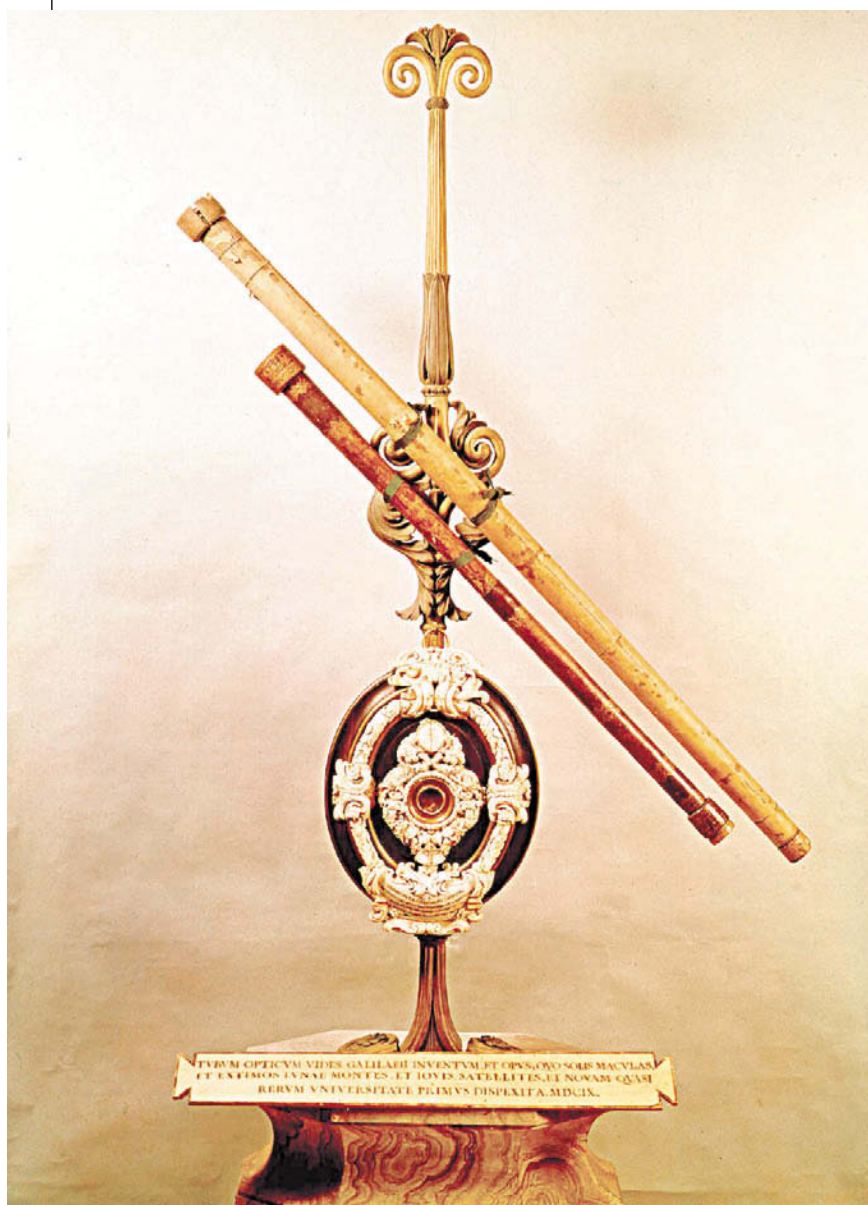
Портрет Галилео Галилея работы
Оттавио Леони (1564–1642)

В то время, когда Кеплер работал над законами движения планет, его современник Галилео Галилей совершил ряд великих открытий. Благодаря этим открытиям Галилея называют основателем экспериментальной физики. «Отцом современной физики» назвал Галилея А. Эйнштейн. Своими экспериментами Галилей убедительно опроверг умозрительную метафизику Аристотеля, заложил фундамент классической механики. Он собрал и систематизировал те факты и идеи, на основе которых впоследствии Ньютон вывел законы движения. В своих работах Галилей заложил основы более общего научного метода выявления законов природы вообще. Он ввел в механику точный количественный эксперимент и математическое описание явлений, утверждая, что «книга природы написана языком математики». Галилей жил во время, известное в истории как эпоха Возрождения. Именно в эту эпоху Н. Коперник совершил переворот в мировоззрении своей геоцентрической системой.

Галилео Винченцо Боннайотти ди Галилей, а именно так звучит его полное имя, родился 15 февраля 1564 года в Пизе в знатной, но обедневшей флорентийской семье. Большую часть жизни он провел в бедности, в долгах, потому что, как подобает истинному итальянцу, держал на своей шее в дальнейшем немалую толпу родни. В Пизанском университете Галилео впервые познакомился с физикой Аристотеля, с работами древних математиков — Евклида и Архимеда, сочинения которого прилежно изучал. В 1608 году до Галилея дошли вести о новых инструментах для наблюдения за отдаленными объектами — «голландских трубах». Используя свои познания в геометрической оптике, Галилей посвятил «все свои труды изысканию научных начал и средств, которые делали бы возможным устройство инструментов подобного рода, и скоро нашел желаемое, основываясь на законах преломления света». Галилей не изобрел телескоп, но усовершен-



ствовал зрительную трубу для наблюдения внеземных объектов (см. книгу «На кого упало яблоко»). Ему удалось построить телескоп (тогда, правда, такого названия еще не было) с 30-кратным увеличением, и с помощью этого инструмента он предпринял первый телескопический обзор небесных тел, сделав головокружительные открытия. Были открыты горы на Луне, фазы Венеры, четыре главных спутника Юпитера, пятна на Солнце, обнаружена звездная природа нашей галактики — Млечного Пути.



Телескопы Галилея, изобретенные за год до него И. Липпершеем

Сатурн впервые наблюдался Галилеем в 1610 году. Его первое сообщение об этом событии (июнь 1610 г.) гласит: «Отдаленнейшую из планет наблюдал тройную». По разным сторонам от диска планеты ученый увидел два одинаковых симметрично расположенных «придатка», которые в отличие от спутников Юпитера, не двигались вокруг центрального тела, а сохраняли свое положение. В действительности же это были «ушки» знаменитых колец, но качество оптики было недостаточно высоким, чтобы различить их явно.

Свои первые открытия с телескопом Галилей описал в сочинении «Звездный вестник», изданном во Флоренции в 1610 году. Книга имела сенсационный успех по всей Европе, даже коронованные особы спешили заказать себе телескоп. Несколько телескопов Галилей подарил венецианскому сенату, который в знак благодарности назначил его пожизненным профессором с окладом 1000 скудо. В сентябре 1610 года телескопом обзавелся Кеплер, а в декабре открытия Галилея подтвердил влиятельный римский астроном Клавиус.

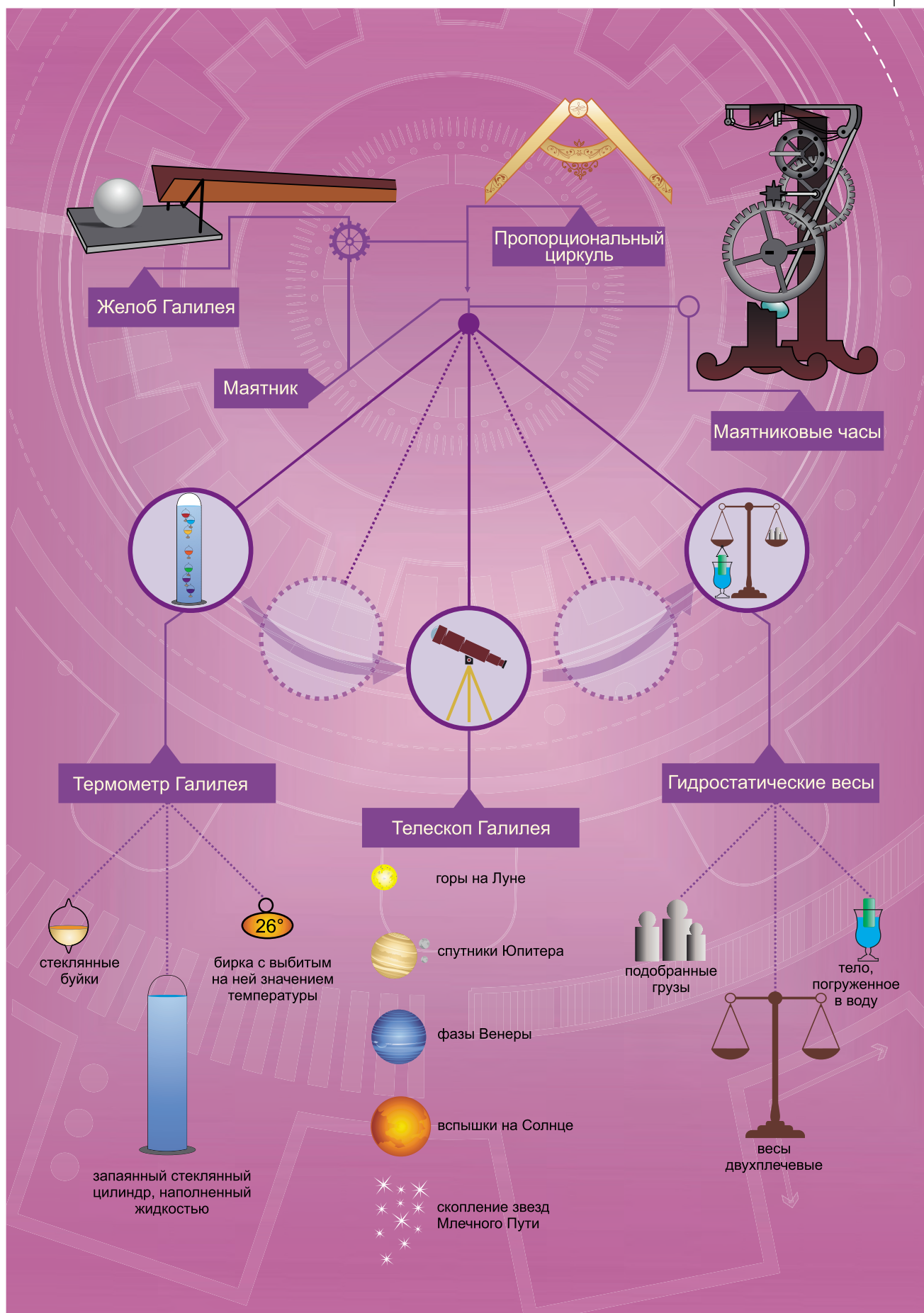
Полученные Галилеем данные подтверждали теорию Коперника и третий закон Кеплера. Рост влияния Галилея, независимость его мышления и резкая оппозиционность по отношению к учению Аристотеля способствовали формированию агрессивного кружка его противников. Особенно возмущали недоброжелателей Галилея его пропаганда гелиоцентрической системы мира, поскольку, по их мнению, вращение Земли противоречило библейским текстам. Наконец, в феврале 1615 года инквизиция получила формальный донос. Было начато дело, разбиравшееся келейно, закрытым порядком, в течение года. По средневековой иерархии грехов прегрешение Галилея не принадлежало к числу смертных. На основные догмы веры он не покушался. Но он покушался на авторитет церкви и тем самым впадал в ересь. Несмотря, на блистательную защиту, ни на ходатайство авторитетных лиц, в том числе и герцога Тосканского, его признали «сильно подозреваемым в ереси» приговорили к отречению и пожизненному заключению. Ему предписано было не рассуждать более письменно или устно каким-либо об-

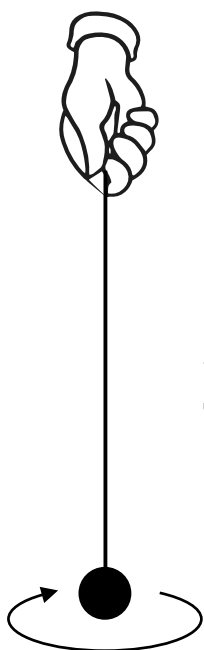
**СВОИМИ ЭКСПЕРИМЕНТАМИ ГАЛИЛЕЙ УБЕДИТЕЛЬНО
ОПРОВЕРГ УМОЗРИТЕЛЬНУЮ МЕТАФИЗИКУ АРИСТОТЕЛЯ,
ЗАЛОЖИЛ ФУНДАМЕНТ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ.
ОН СОБРАЛ И СИСТЕМАТИЗИРОВАЛ ТЕ
ФАКТЫ И ИДЕИ, НА ОСНОВЕ КОТОРЫХ
ВПОСЛЕДСТВИИ НЬЮТОН ВЫВЕЛ
ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ.**



Галилей показывает телескоп венецианскому дожу (фреска Дж. Бертини)

разом о движении Земли и о неподвижности Солнца... под страхом наказания как неисправимого. 69-летнему ученому пришлось, стоя на коленях и держа руку на Евангелии, признать ложность учения Коперника, а также свое непристойное тщеславие, что вращение Земли излагается в книге так, будто оно есть истина. Свое заключение он отбывал вначале во дворце сиенского архиепископа Пикколомини, затем на своей вилле в Арчетри вблизи Флоренции. Там Галилей скончался, будучи почти совершенно слепым.





МАЯТНИК. Галилей, работая в университетах Пизы и Падуи, обобщил и привел в систему свои идеи в области движения.

Одно из первых его открытий связано с замечательными свойствами маятника.

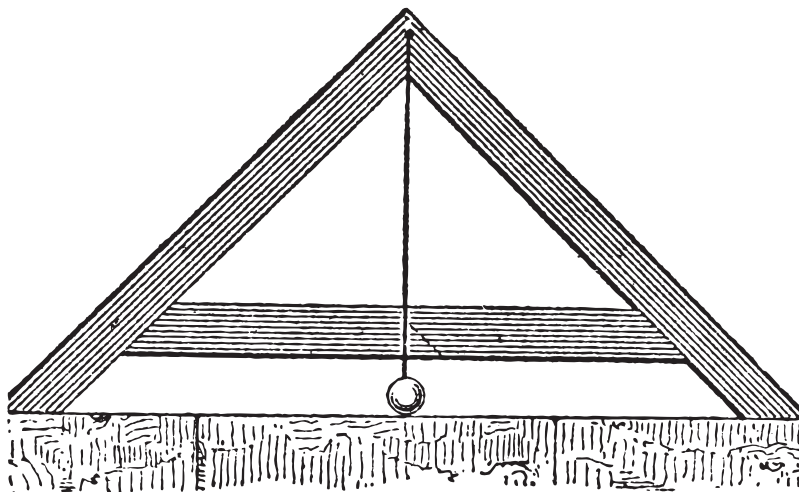
История маятника уходит в глубину веков. Им пользовались и в древних странах — Месопотамии, Вавилоне, Ассирии, Урарту, Халдее, и позже в Риме и Греции.

Предшественником маятника можно считать лозу, с ее помощью в далекой древности люди находили воду. Можно подолгу зачарованно наблюдать за монотонным непрерывным движением маятника:

О, маятник душ строг —
Качается глух, прям,
И страстно звучит рок
В запретную дверь к нам...

О. Мандельштам

Его сразу же взяли на вооружение прорицатели, гадалки, колдуны, маги разного уровня. Маятником служили отвесы для получения неизвестных сведений из настоящего, прошлого и будущего. Их удерживали за подвеску между указательным и большим пальцами (см. рисунок), отвесы делали прямолинейные, эллиптические или кругообразные движения, значения которых предварительно устанавливалось владельцем отвеса. Но маятником также интересовались практически все ученые-естествоиспытатели от Аристотеля до наших дней. А для нас наибольший интерес представляют исследования этого предмета Галилеем.







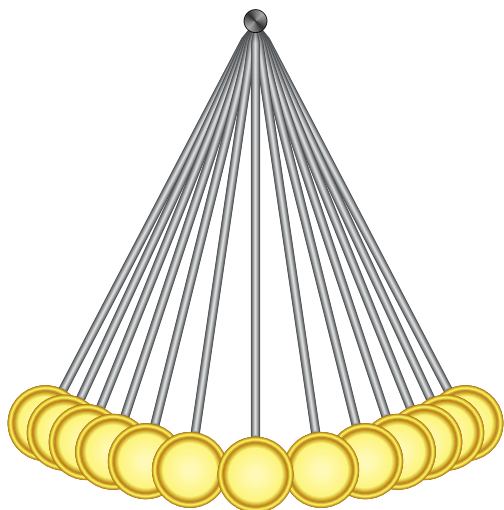
Широко цитируемая легенда приписывает Галилею такой случай, побудивший его к глубоким исследованиям маятника. Как-то в одно воскресное утро 1583 года Галилео, слушая в соборе в Пизе долгую церковную службу, обратил внимание на то, как раскачивалась вперед и назад свисавшая с потолка люстра. Галилео по ударам своего пульса стал отсчитывать время, за которое люстра делала качания.

(Использование пульса для измерения времени было распространено в средневековой Европе. Как свидетельство тому можно рассматривать строки из «Бури» Шекспира:

Перед собой, летя, я выпью воздух,
И ворочусь я прежде, чем твой пульс
Не более двух раз успеет стукнуть).

Люди хотят верить легендам. Туристам, которые посещают привлекающий своими архитектурными формами и внушительными размерами беломраморный главный собор XI века в Пизе, рассказывают легенду о «лампе Галилея». Эта бронзовая лампа, представляющая собой огромную люстру на 49-метровом жестком подвесе, была создана прославленным Бенвенутто Челлини. Но далека от действительности легенда о том, что Галилей открыл закономерность маятниковых движений, наблюдая за люстрой, висящей на длинном шнуре в Пизанском соборе. Дело в том, что он объявил о своем открытии в 1581 году, тогда как люстра была повешена шестью годами позже.

Он сравнил длительность отдельных качаний и обнаружил, что большое колебание люстры длится столько же, сколько малое. С этого начались его исследования маятника, а маятник — это любой груз, висящий на нити. Галилей наблюдал за колебаниями маятника, меняя грузы, длину нити и начальное отклонение. В дальнейшем Галилей произвел следующий эксперимент: подвесил два свинцовых шара на нитях одинаковой длины и, отклоняя их от вертикали на разные углы, одновременно отпускал. Из этих опытов Галилей сделал вывод о том, что за равные промежутки времени маятник совершает одинаковое число колебаний, поэтому решил использовать маятник для создания часов. Он начал эту работу, однако не успел ее закончить.



В ЧАСАХ ГЮЙГЕНСА МАЯТНИК СОВЕРШАЛ СВОИ КОЛЕБАНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЙ СИЛЫ, ЗАВИСЯЩЕЙ ТОЛЬКО ОТ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ, ДЛЯ ЖИТЕЛЕЙ ЗЕМЛИ ВЕЛИЧИНЫ ПОСТОЯННОЙ.

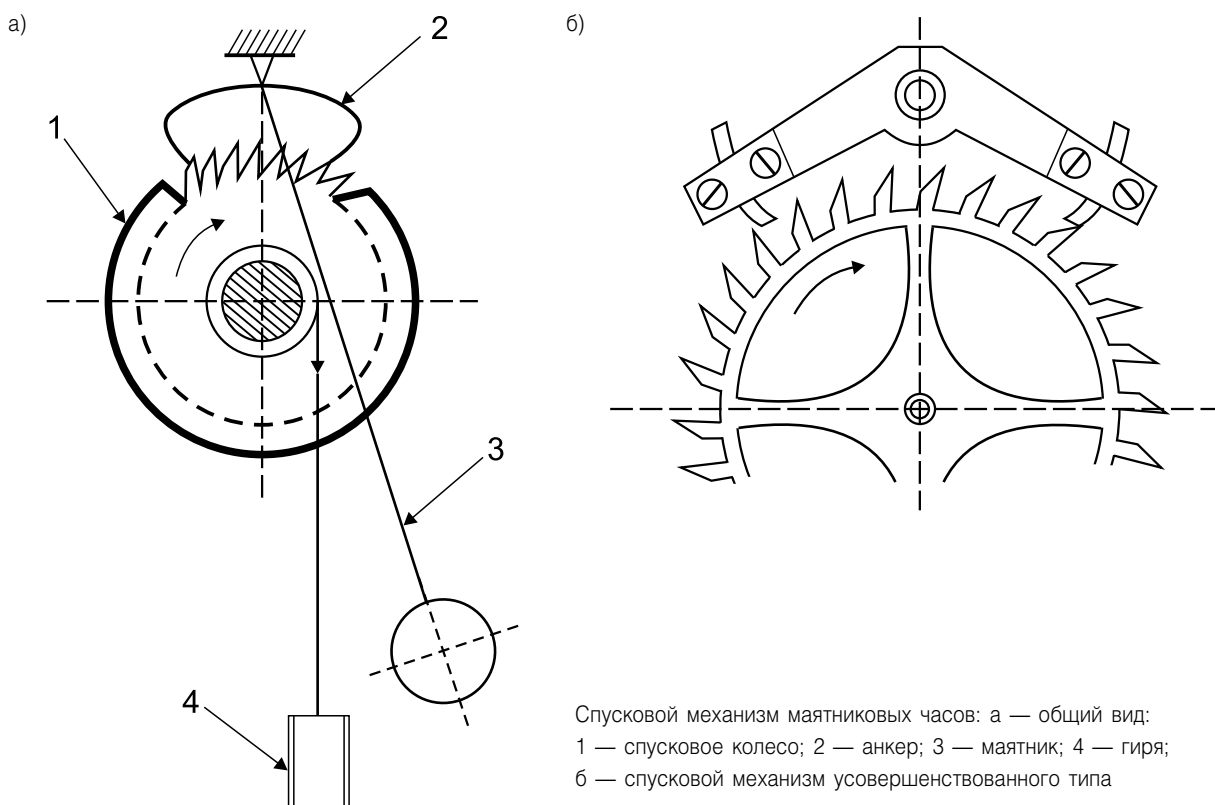


Христиан Гюйгенс, портрет работы Каспара Нечера (1671)

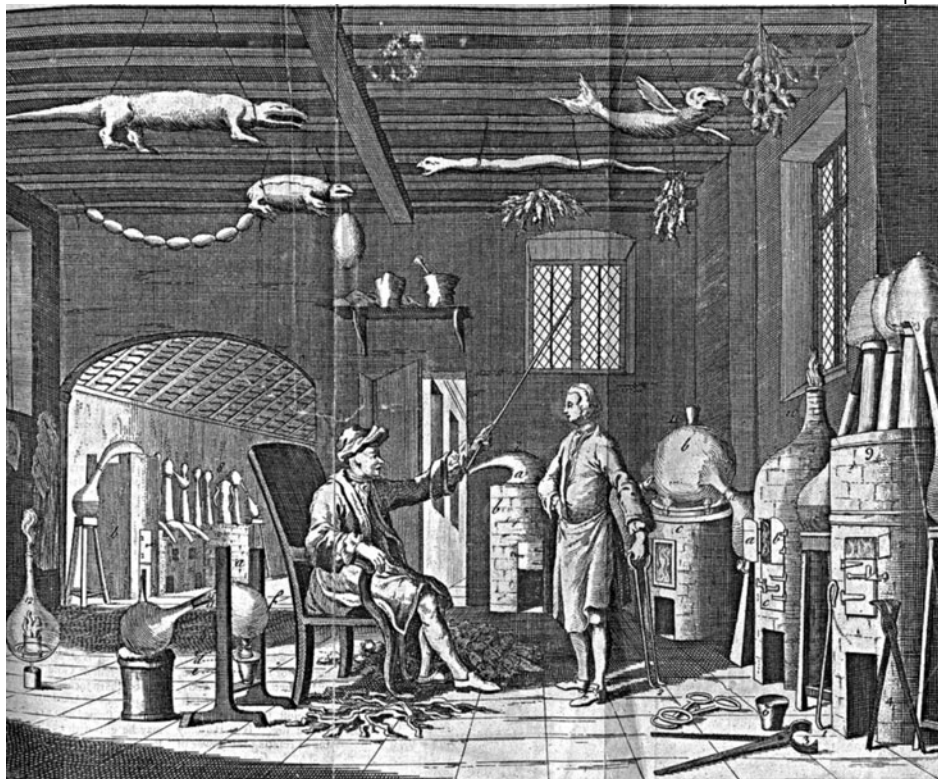
В дальнейшем началась борьба за приоритет в создании маятниковых часов, в которой принимал участие ученик Галилея Вивиани и Христиан Гюйгенс. (Но это уже другая история, о ней можно прочитать в нашей книге «На кого упало яблоко».) Seriously заинтересовался проблемой колебаний маятника Христиан Гюйгенс. Его можно считать непосредственным преемником Галилея в науке. По словам Лагранжа, Гюйгенсу «было суждено усовершенствовать и развить важнейшие открытия Галилея». В своем сочинении *Horologium oscillatorium* (1673) Гюйгенс обосновал математическую теорию колебания маятника. Он получил формулу, описывающую период колебаний так называемого математического маятника (см. далее). Он первым установил зависимость периода колебаний от длины маятника. Если груз на подвесе считать маленькой тяжелой точкой, то период колебаний T прямо пропорционален корню квадратному из длины маятника L . Формулу Гюйгенса записывают во всех учебниках физики в таком виде: $T = 2\pi\sqrt{L/g}$.



Однако сам автор для практических целей пользовался более простой формулой. Из-за того, что величина g — *свободного падения* — близка к 10, формула упрощается и приобретает вид $T = 2\sqrt{L}$. Так как в формуле переменной величиной является длина маятника, то и период колебания будет зависеть только от длины маятника и не будет зависеть от амплитуды колебаний. Независимость периода колебаний от амплитуды называется *изохронностью*. Маятник лучше всего подходит для измерения времени, поэтому он нашел применение в часах. Маятник совершает колебания за правильные отрезки времени и, если его закрепить на часах таким образом, чтобы он управлял движением колес, то движение механизма станет таким же правильным, как и движение маятника.



Маятник — самая важная деталь часов. Изобретением настоящих, точных и надежных маятниковых часов мы обязаны Христиану Гюйгенсу, который создал их в 1656 году. А. Зоммерфельд назвал Гюйгенса «гениальнейшим часовым мастером всех времен». В часах Гюйгенса маятник совершал свои колебания под действием восстанавливающей силы, зависящей только от силы тяжести, для жителей Земли величины постоянной. Основным элементом, помимо маятника, в таких часах является спусковой механизм, который преобразует непрерывное вращательное движение в колебательное или возвратно-поступательное. Это устройство обеспечивает равномерное расходование энергии, запасенной в пружине или гире.

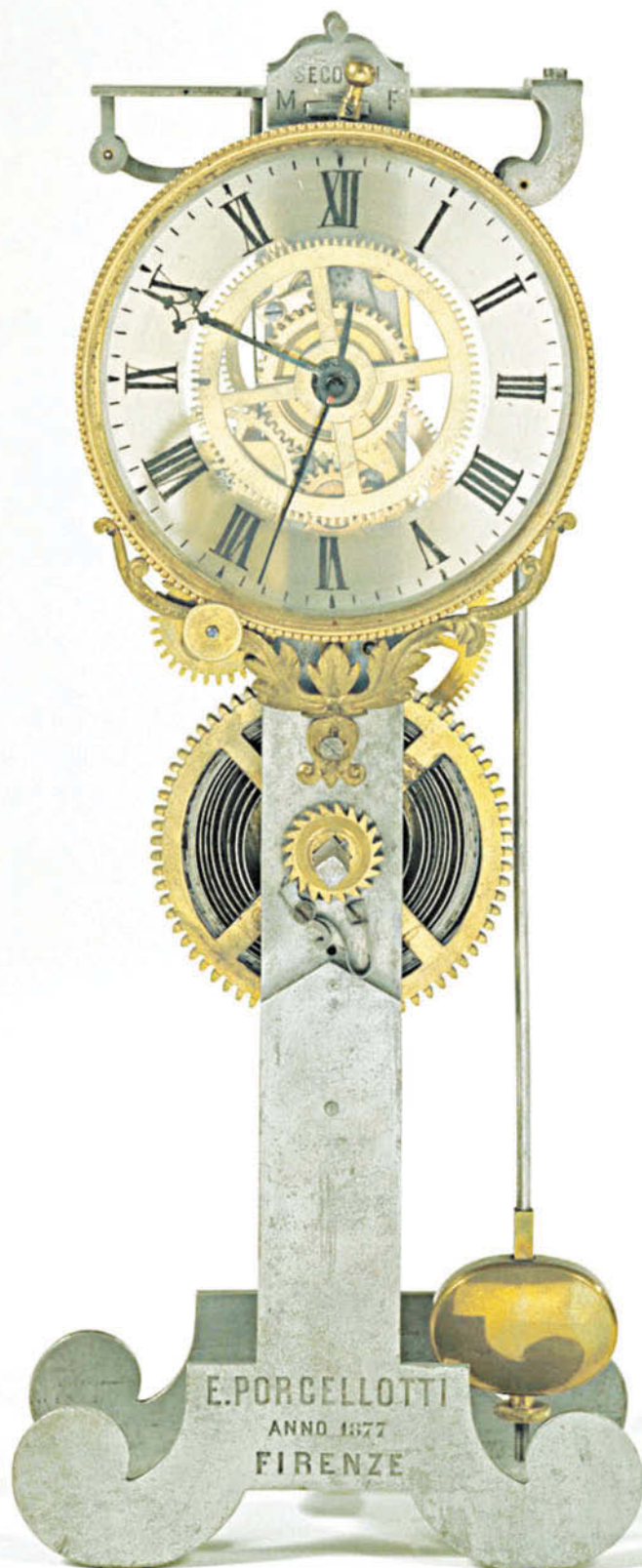


Лаборатория XVIII века. Ученый инструктирует своего ассистента

Создание подобных часов было действительно революционным, так как впервые была достигнута большая точность в измерении времени, что имело огромное научное и практическое значение. Маятниковые часы со спусковым механизмом стали основой экспериментальной техники, так необходимой для развития физики.

Завершив описание некоторых работ Гюйгенса в области колебаний, опять возвращаемся к трудам Галилея в механике. Но прежде остановимся на таком интересном вопросе: как ученые в описываемое время общались, каким образом в век карет, отсутствия привычных нам средств коммуникации узнавали о работах друг друга?

ОБЩЕНИЕ УЧЕНЫХ ВО ВРЕМЕНА ГАЛИЛЕЯ И ГЮЙГЕНСА. В дальнейшем, рассказывая о результатах, полученных Галилеем, Ньютоном и другими учеными того периода, мы будем ссылаться на опубликованные ими труды, описывать их отношения друг с другом, часто непростые... Нам трудно сейчас представить себе, как медленно осуществлялась связь между учеными в описываемое время. Жизнь характеризовалась неспешным, как и в предыдущие эпохи, развитием техники. Особенно отчетливо это видно при взгляде на архаичность транспортных средств в это время. Кареты в своем зачаточном виде появились только во второй половине или в конце XVI века (а стекло в них — лишь в XVII в.). На плохих дорогах — ничтожные скорости. Усыпанные щебнем или мощенные

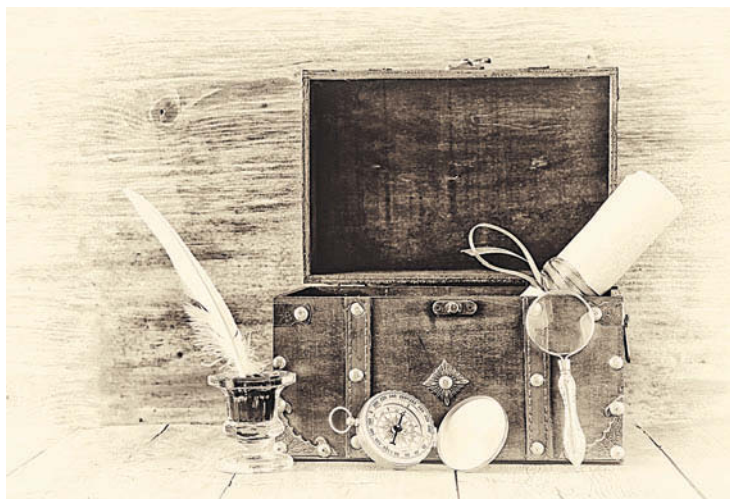






камнем дороги надолго останутся исключением. Использовали ли лошадей, экипажи, суда или скороходов, в среднем скорость передвижения не превышала 100 км. в сутки. (см.: Бродель Ф. Структуры повседневности: возможное и невозможное. Т. 1. М. : Прогресс, 1986). В XVII веке значительно оживляется обмен информацией между учеными. Преобладающей формой научного обмена продолжает оставаться переписка. Однако объем и разнообразие информации, идущей по этому каналу, резко возрастает. Еще в начале XVII века роль неформальных «информационных центров» часто играли частные лица (такие как Мерсенн в Париже, а немного позже Генри Ольденбург и Джон Коллинз в Лондоне); поддерживая активную переписку с учеными в своих странах и за границей, они могли держать группу заинтересованных лиц в курсе текущих интеллектуальных достижений. Особенно стоит отметить известного физика и математика М. Мерсенна (1586–1648), который был «главным почтамтом для всех ученых Европы, начиная с Галилея и кончая Гоббсом». В переписке сообщались доказательства важнейших теорем, описания научных опытов, философские концепции, политические проекты и т. д.; письма ученых размножались, становились широко известными, а иногда прямо предназначались самими авторами для публикации. Все эти люди были беззаветно преданы науке, которой они отдавали все свое время, весь свой энтузиазм, а нередко (как, например, Коллинз) и все свои средства.

Уже в 60-е годы XVII века в Европе создаются условия для крупных коллективных исследований в различных областях науки, возникают стабильные интернациональные центры научной ориентации — академии (см. подробнее «На кого упало яблоко»). В конце XVII века неофициальные сети научной коммуникации стали замещаться первыми научными журналами, возникает и приобретает всеобщее признание неизвестная ранее форма обмена информацией — научная периодика. Первый европейский журнал («Журнал ученых», 1665–1828) был создан по инициативе французского министра финансов Жана-Батиста Кольбера, которого часто сравнивают с кардиналом Ришелье. Кольбер задумал периодическое издание, которое бы освещало научные, критические и литературные проблемы, стоящие перед интеллектуальной элитой Европы. В этом же году





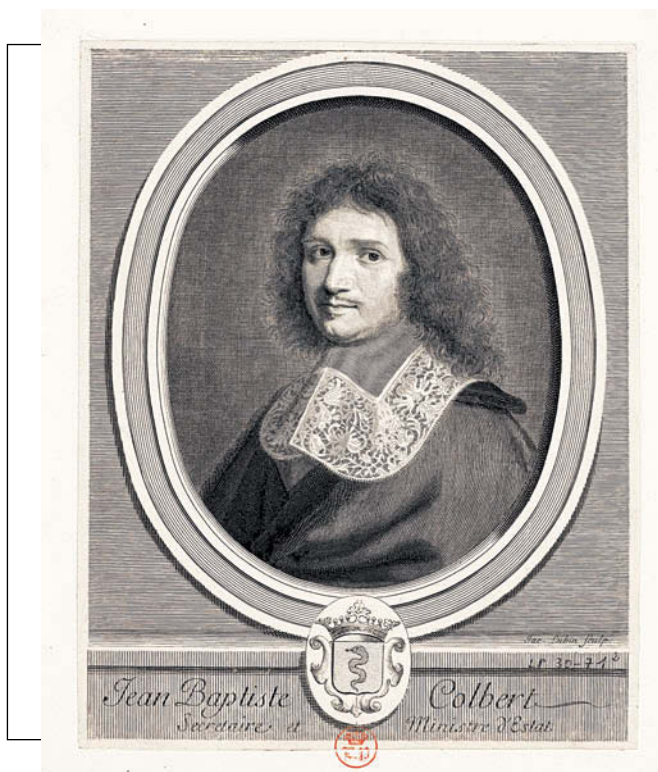
начинает издаваться (сначала Ольденбургом, затем Робертом Гуком) научный периодический журнал Королевского общества «Philosophical Transactions» («Journal des Savants»). Несколько позже, в 1682 году, в Лейпциге появился первый номер журнала «Acta Eruditorum». С возникновением физических научных обществ, физических отделений академий наук и университетов начали издаваться физические журналы. Но это произошло уже в XIX веке, когда происходило разделение общезначимых журналов на периодические издания по различным областям физики.

С самого момента появления упомянутые журналы стали местом великих научных баталий, в которых участвовали крупнейшие умы. В этот период наблюдается важное организационное изменение: развивается книгоиздательская индустрия. Если в XVI веке было опубликовано незначительное количество книг, то в XVII веке количество книг резко возрастает.

Таким образом, к концу XVII века уже имеются места встреч ученых между собой, а также возможности изложения результатов своих исследований не только в частной переписке, но и в научных журналах и книгах. Обратившись к их содержанию, мы можем увидеть многое из того, что теперь входит в обычные школьные учебники по физике.



Марен Мерсенн (1588–1648)



Жан-Батист Кольбер (1619–1683)



4. Свободное падение тел и здравый смысл. Эксперименты Галилея с наклонной плоскостью. Движение тела, брошенного под углом к горизонту. «Диалоги». Принцип инерции Галилея.

Из опытов с падающими телами люди установили, что маленький и большой камни, выпущенные из рук одновременно, падают с одинаковой скоростью. Это для тяжелых предметов. Но вот очень легкие (как, например, перья птиц, листья деревьев и т. п.) падали с заметно меньшей скоростью. Отсюда делался вывод, что чем тело тяжелее, тем быстрее оно падает. Некоторые древние ученые, по-видимому, проводили вполне разумные опыты с падающими телами, но использование в Средние века античных представлений, предложенных Аристотелем, скорее запутало вопрос. Великий греческий философ и ученый, по-видимому, придерживался распространенного представления о том, что тяжелые тела падают быстрее, чем легкие. Действительно, наблюдения, которые каждый из нас может проделать в повседневной жизни, казалось бы, подтверждают это.

Окончательно парадокс, явно противоречащий здравому смыслу, — время падения тел с одной и той же высоты не зависит от величины массы — был разрешен в опытах Галилея. Пожалуй, это был первый в истории научный результат, так явно противореча-



щий всей исторической практике людей! Галилей не только проверил опытом и отстаивал это утверждение, но и установил вид движения тела, падающего по вертикали: «...говорят, что естественное движение падающего тела непрерывно ускоряется. Однако в каком отношении происходит, до сих пор не было указано; насколько я знаю, никто еще не доказал, что пространства, проходимые падающим телом в одинаковые промежутки времени, относятся между собою, как последовательные нечетные числа».

Эксперимент Галилея прочно ассоциируется с бросанием шаров с Пизанской башни. Об этом писал его ученик и биограф Винченцо Вивiani. Однако подобный опыт не фигурирует в произведениях самого Галилея. Ученые XX века склонны были считать эксперимент с Пизанской башней вымыслом биографа. Это было связано с тем, что для проверки этого закона в эксперименте было необходимо отмечать положения падающих тел в последовательные моменты времени. Но тела падают слишком быстро, и в XVI веке еще не было приборов, позволяющих точно фиксировать положение падающих тел в определенные моменты времени. Так что эксперимент с башней, видимо, из разряда устойчивых мифов. Известно только, что Галилей проводил опыты с телами,

«НАУКА СПУСТИЛАСЬ С НЕБЕС НА ЗЕМЛЮ ПО НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ ГАЛИЛЕЯ».



Наклонный желоб. Музей Галилея. Флоренция

скатывающимися по наклонной плоскости. Галилей придумал предельно простой способ, позволяющий как бы замедлить скорость падения тела: для своего эксперимента он использовал узкую доску длиной 12 локтей (примерно 5 метров) с желобом, выстав этот желоб пергаментом для уменьшения силы трения. По желобу в доске, установленной под углом к горизонту, скатывался бронзовый шар. Ставился этот эксперимент, наверное, в 1604 году.

Следует заметить, что и шары, и желобы в опытах Галилея были достаточно внушительных размеров, а сами опыты выполнялись не в помещении, а на улице.

Эксперименты повторялись при разных углах наклона доски, и всего было проведено сто измерений, при этом использовалось простое устройство — водяные часы, которые похожи на песочные, только вместо песка в них вода. Галилей использовал большой сосуд, в дне которого было небольшое отверстие. Из него вытекала тонкая струйка воды, которая заполняла другой сосуд, который предварительно взвешивался. Промежуток времени измерялся по увеличению (приращению) веса сосуда. Вот так ставились эксперименты во времена Галилея! Галилей установил, что время скатывания шаров не зависит от угла наклона, а зависит лишь от высоты поднятия одного ее конца. При этом, несмотря на несовершенство физических приборов, разница во времени оказалась достаточно заметной. Галилей писал: «Пустив шар по длине, равной четверти длины желоба, я нашел, что время пробега в точности равнялось половине времени, какое употреблялось для прохождения целого желоба...» Оказалось, что расстояния, пройденные шариком за последовательные одинаковые промежутки времени (за первую, вторую, третью и т. д. секунды), соотносятся как 1:3:5:7:9 и т. д. То есть, расстояние, пройденное шариком за вторую секунду, в три раза, а за третью — в пять раз больше, чем за первую. Суммы последовательных чисел этого ряда образуют квадраты:

$$1 = 1;$$

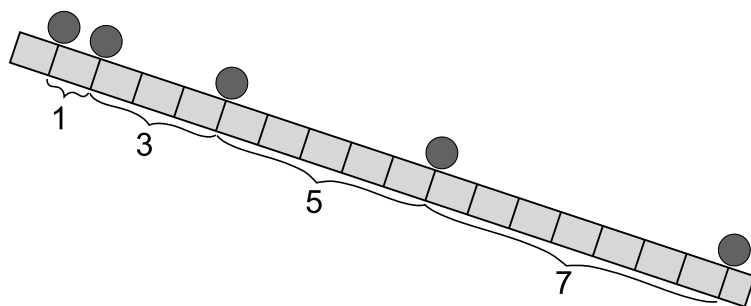
$$1 + 3 = 4 \text{ — за две секунды};$$

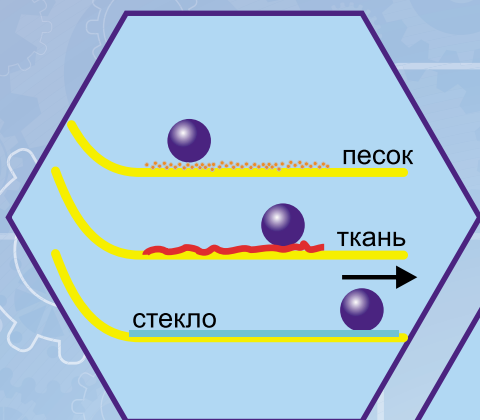
$$1 + 3 + 5 = 9 \text{ — за три секунды};$$

$$1 + 3 + 5 + 7 = 16 \text{ за четыре секунды и т. д.}$$

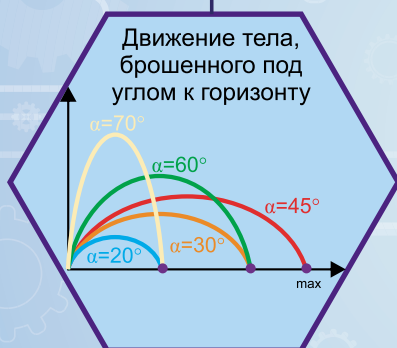
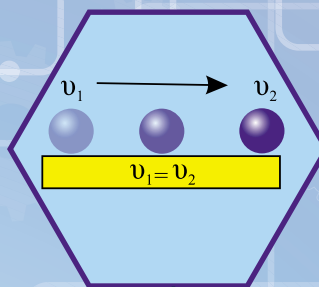
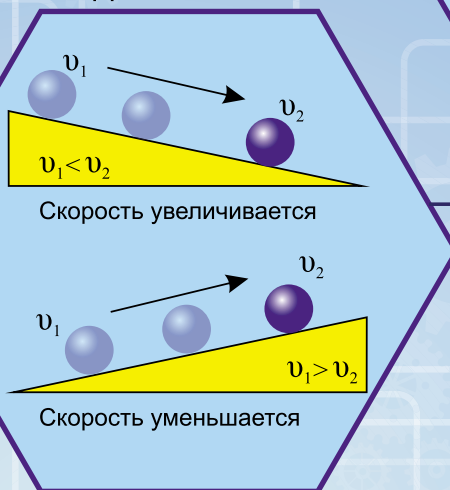
«Из опытов, сто раз повторенных, я всегда находил, что проходимые пути относятся между собою, как квадраты времен», — писал Галилей.

Теперь мы говорим: путь, пройденный телом при движении с постоянным ускорением, пропорционален квадрату времени.

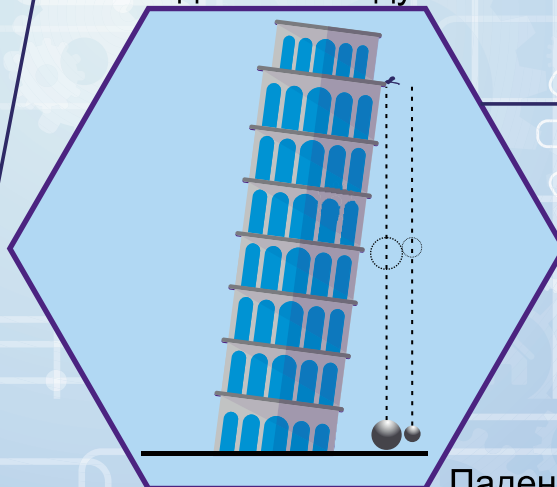




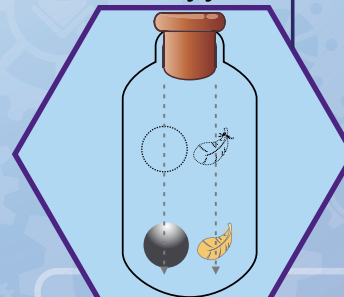
Изучение законов движения



Свободное падение в воздухе



Падение тел в вакууме



GALILEO
GALILEI

В результате этих опытов Галилей сделал следующие выводы:

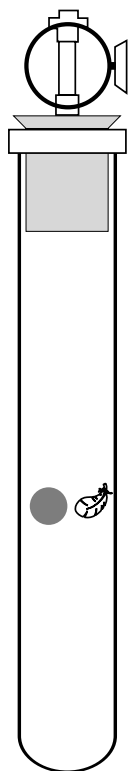
1. все тела при падении движутся одинаково: начав падать одновременно, они движутся с одинаковой скоростью
2. движение происходит с постоянным ускорением; темп увеличения скорости тела не меняется, то есть за каждую последующую секунду скорость тела возрастает на одну и ту же величину.

Известный историк науки Александр Койре (1892–1964) заметил, что «мысль заменить свободное падение тел движением по наклонной плоскости является в самом деле признаком гениальности». Галилеева наклонная плоскость — это, по сути, первая экспериментальная установка. Недаром бытует изречение: «Наука спустилась с небес на землю по наклонной плоскости Галилея».

Галилей понимал, что последователей Аристотеля сбивало с толку сопротивление воздуха. Он указал, что плотные предметы, для которых сопротивление воздуха несущественно, падают почти с одинаковой скоростью. Галилей писал: «...различие в скорости движения в воздухе шаров из золота, свинца, меди, порфира и других тяжелых материалов настолько незначительно, что шар из золота при свободном падении на расстояние в одну сотню локтей наверняка опередил бы шар из меди не более чем на четыре пальца. Сделав это наблюдение, я пришел к заключению, что в среде, полностью лишенной всякого сопротивления, все тела падали бы с одинаковой скоростью».

В условиях Земли падение тел считается условно свободным, так как при падении тела в воздушной среде всегда возникает еще и сила сопротивления воздуха. Идеальное свободное падение возможно лишь в вакууме, где нет силы сопротивления воздуха, и независимо от массы, плотности и формы все тела падают одинаково быстро, то есть в любой момент времени тела имеют одинаковые мгновенные скорости и ускорения.

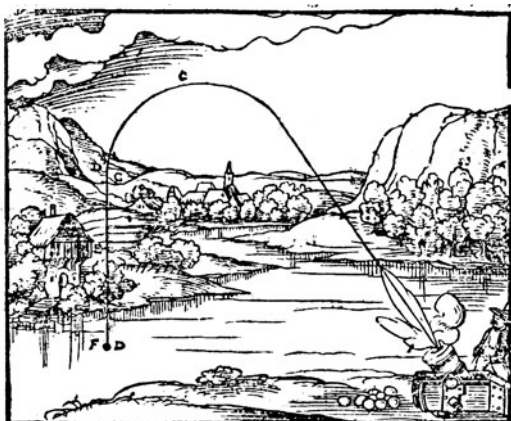
Наблюдать идеальное свободное падение тел можно в трубке Ньютона, если с помощью насоса выкачать из нее воздух (см. рисунок). В стеклянную трубку помещают различные предметы: дробинки, кусочки проб-



Трубка Ньютона

ГАЛИЛЕЙ ДАЛ МЕТОД РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА ДЛЯ ЛЮБЫХ УГЛОВ ВЫЛЕТА И ДЛЯ ЛЮБЫХ НАЧАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ.

ОН ВПЕРВЫЕ ИСПОЛЬЗОВАЛ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ СЛОЖЕНИЕ СКОРОСТЕЙ, ТО ЕСТЬ ПРИБЛИЗИЛСЯ К ВЕКТОРНОМУ ПРЕДСТАВЛЕНИЮ О СКОРОСТИ.



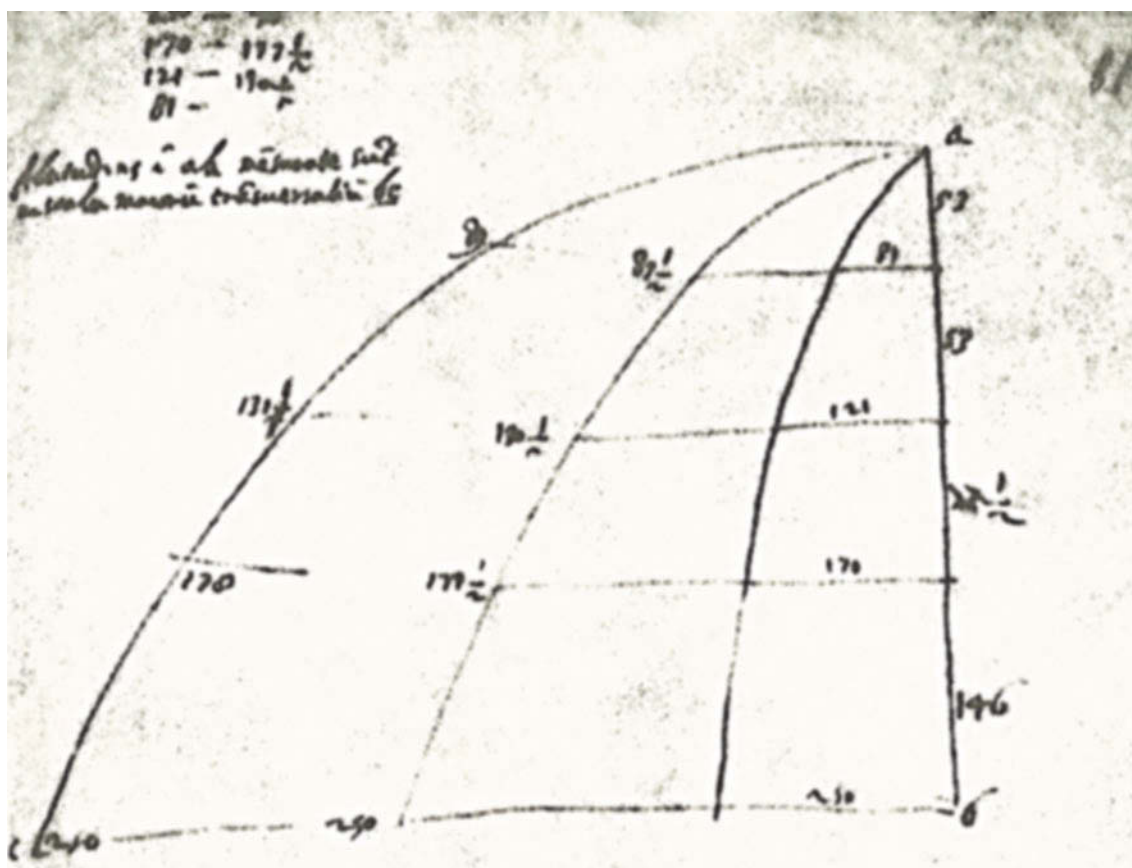
Так в средневековье представляли себе траекторию пушечного ядра

ки, пушинки и т. д. Если перевернуть трубку так, чтобы эти предметы могли падать, то быстрее всего упадет дробинка, за ней — кусочек пробки и, наконец, плавно опустится пушинка. Но если выкачать из трубки воздух, то мы увидим, что все три тела упадут одновременно. Значит, движение пушинки задерживалось ранее сопротивлением воздуха, которое в меньшей степени сказывалось на движении, например, пробки. Когда же на эти тела действует только притяжение к Земле, то все они падают с одним и тем же ускорением.

Галилей, естественно, не мог точно определить ускорение свободного падения (g), поскольку не имел секундомера. Песочные, водяные часы не способствовали точному отсчету времени. Галилей определил ускорение свободного падения с большой ошибкой. В «Диалогах» он утверждает, что шар падал с высоты 60 м в течение 5 с. Это соответствует значению g , почти в два раза меньшему истинного. Ускорение свободного падения было достаточно точно определено лишь Гюйгенсом в 1660 году.

ПАДЕНИЕ ТЕЛ, БРОШЕННЫХ ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ. Закончив изучение падения тел по вертикали, Галилей занялся исследованием важного с точки зрения практики во-





Фрагменты рукописи Галилея — расчеты движения по параболе

проса о падении тела, брошенного под углом к горизонту. Изучение особенностей такого движения началось довольно давно, еще в XVI веке, и было связано с появлением и совершенствованием артиллерийских орудий.

Законы полета метательных снарядов не привлекали особого внимания ученых до тех пор, пока не были изобретены дальнбойные орудия, которые посылали снаряд через холмы или деревья — так, что стреляющий не видел их полета. Значительно возросшая с развитием техники скорость и дальность полета снарядов и пуль сделали возможным дистанционные сражения. Однако лишь навыка войны, разрешающей способности глаза было недостаточно для точного попадания в цель артиллерийской дуэли первым. Знание законов движения снаряда позволяло бы при соответствующей тренировке повторять свой успех в следующем сражении. Близко к правильному решению о полете пушечных ядер подошли Леонардо да Винчи и итальянский математик Тарталья (1499–1557). Последний сумел показать, что наибольшей дальности полета снарядов можно достичь при направлении выстрела под углом 45° к горизонту. В его книге «Новая наука» были сформулированы правила стрельбы, которыми артиллеристы руководствовались до середины XVII века. Леонардо да Винчи и Тарталья отрицали старую, неправильную качественную картину движения брошенного тела и противопоставили ей другую, более правильную,



но тоже качественную картину. Галилей существенно развил теорию этого вопроса. Пожалуй, ни по одному из вопросов механики Галилей не сделал большего, не проник так глубоко в сущность процесса, как в области изучения законов движения тела, брошенного под углом к горизонту.

Галилей дал метод расчета траекторий движения тела для любых углов вылета и для любых начальных скоростей. Он впервые использовал геометрическое сложение скоростей, то есть приблизился к векторному представлению о скорости. По сути он использовал принцип независимости движений, известный в других областях физики как принцип суперпозиции (наложения). Согласно принципу суперпозиции результирующий эффект нескольких воздействий представляет собой сумму эффектов от каждого воздействия в отдельности. Он является следствием линейности уравнений движения.

Историю динамики открывают «Беседы» Галилея. «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящиеся к механике и местному движению» — одна из двух фундаментальных книг Галилео Галилея, изданная



Титульный лист к первому изданию
«Бесед и математических доказательств,
касающихся двух новых отраслей науки...»
(Лейден, 1638)

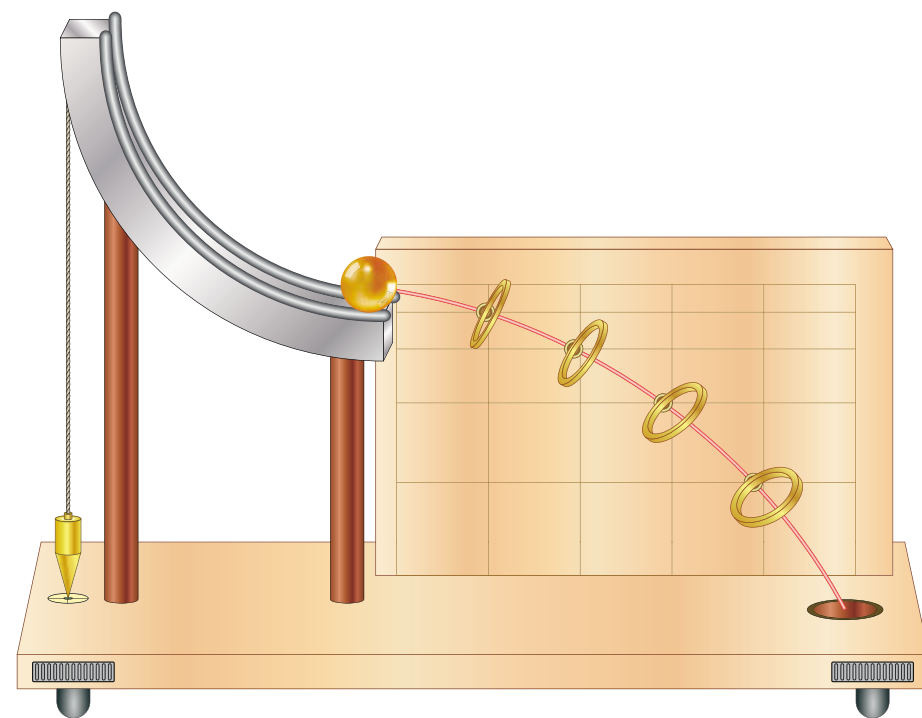


Титульный лист «Диалогов» Галилея

в 1638 году, шесть лет спустя после его «Диалогов о двух главнейших системах мира — птолемеевской и коперниковой», о которых поговорим ниже. Изложенные в них законы сыграли огромную роль в становлении механики. Беседа происходит между знакомыми героями «Диалога». На этот раз они обсуждают свободное падение тел, качание маятника, прочность механизмов, вычисляют площади, объемы тел. Затем собеседники ведут речь о применении закона рычага в различных механизмах, о равноускоренном движении, о движении тела, брошенного под углом к горизонту, и убеждаются, что максимальная дальность полета достигается, если угол равен 45° .

В 1604–1632 гг. Галилей пишет «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой» — итог почти 30-летней работы. Книга в основном была завершена марте 1630 года, и после долгих мытарств вышла во Флоренции в 1632 году.

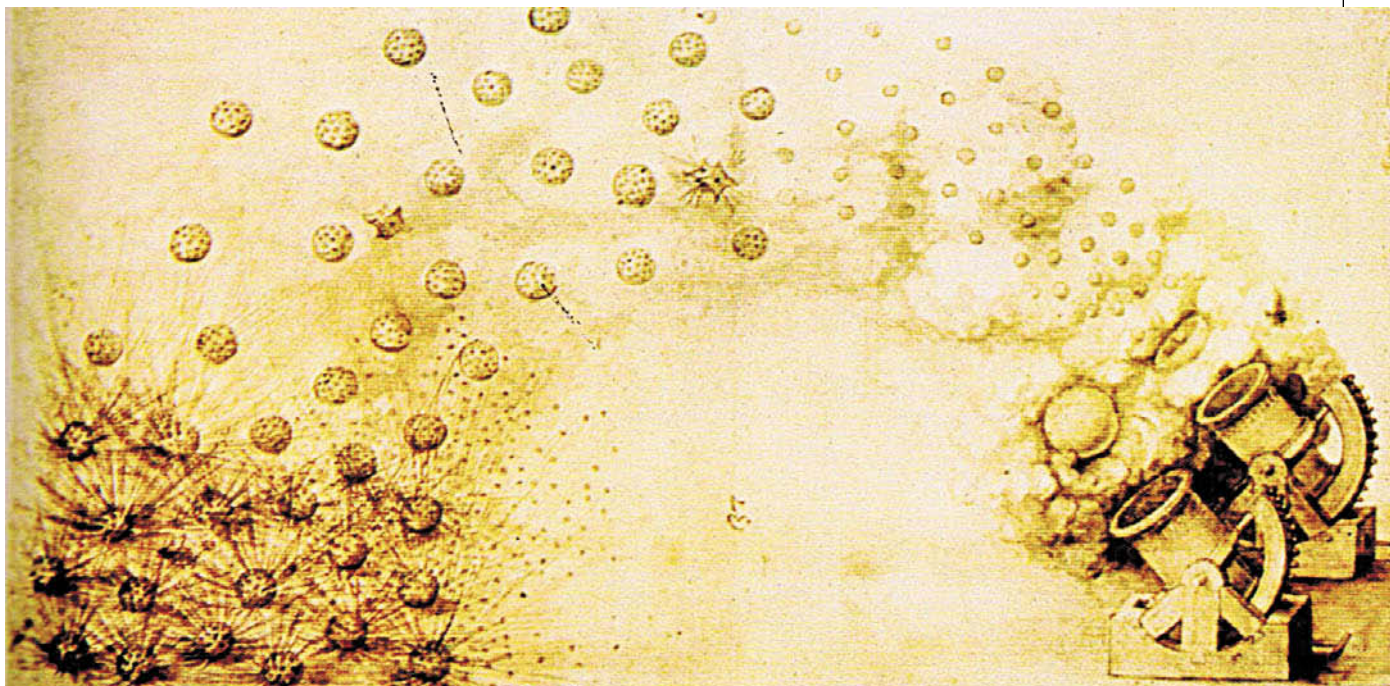
Галилей избрал для изложения своих взглядов форму диалога (дискуссии двух собеседников). Диалог идет между тремя любителями науки: коперниканцем Филиппо Сальвиати (1582–1614), близким другом Галилея, нейтральным — венецианцем Джованни Франческо Сагредо (1571–1620), тоже другом Галилея и Симпличио (персонаж вымышленный), приверженцем Аристотеля и Птолемея. Сальвиати представляет самого Галилея. Хотя в книге нет авторских выводов, сила аргументов в пользу системы Коперника говорит сама за себя. Книга написана не на ученой латыни, а на «народном» итальянском языке, что значительно расширяло число читателей. Выбор формы изложения в виде диалога был более эффективным средством сравнения разных точек зрения, чем монолог, используемый в научных статьях и выражавший только одну точку зрения. Это произведение состоит из четырех диалогов, каждый из которых считается происходившим в течение одного дня.





«День первый» начинается с дискуссии о скорости света. Фактически опыт, описанный в этой работе, повторил Физо через 250 лет (см. далее). Галилей в то время не сумел провести этот сложный эксперимент, но его заслуга в постановке этой экспериментальной и теоретической задачи бесспорна. Далее рассматриваются проблемы движения, изучаются колебания маятников, обсуждаются акустические явления: получение звука с помощью колебаний, частота которых определяет высоту тона звука, волновое распространение в воздухе, явление резонанса, акустические интервалы. Таким образом, Галилей заложил основы современной акустики. Нас же сейчас интересует важный вопрос для всей физики — вопрос об инерции. Этот вопрос рассматривается в «Дня втором».

«День второй» посвящен в основном обсуждению вопроса о движении Земли. Здесь Галилей, чтобы ответить на возражения, которые, начиная с Птолемея, выдвигались против движения Земли, закладывает два краеугольных камня современной динамики: принцип инерции и классический принцип относительности. То, что мы называем инерцией, Галилей поэтически назвал «неистребимо запечатленное движение». Принцип инерции устанавливается Галилеем с помощью рассуждения, напоминающего доказательство «от



противного» в математике: наклон плоскости по отношению к горизонту является причиной ускоренного движения тела, движущегося вниз, и замедленного движения тела, движущегося вверх; если же тело движется по неограниченной горизонтальной плоскости, то, не имея причины ускориться или замедляться, оно совершает равномерное движение. Принцип инерции имеет длинную историю (см. УИФ), однако никто раньше не формулировал его с такой ясностью.

По Аристотелю естественным состоянием тела был покой, сила нужна для того, чтобы поддерживать движение тела по горизонтальной плоскости. Спустя 2000 лет Галилей подверг сомнению это утверждение. Он считал, что для тела естественно как совершать движение по горизонтальной плоскости с постоянной скоростью, так и пребывать в состоянии покоя. Галилей обратил внимание, что при движении по горизонтальной поверхности требуется все меньшая сила, когда просходит переход от шероховатой поверхности к гладкой. А если между телом и поверхностью будет слой масла, для перемещения предмета почти не потребуется усилий и, двинувшись, он долго будет сохранять движение без приложения внешней силы. Теоретически можно представить себе, что если трение свести к нулю, тело будет двигаться без приложения силы бесконечно долго. Рассуждения Галилея являются примером мысленного эксперимента, которыми так богата физика. «...Закон инерции, — писали А. Эйнштейн и Л. Инфельд, — нельзя вывести непосредственно из эксперимента, его можно вывести умозрительно — мышлением, связанным с наблюдением. Этот эксперимент никогда нельзя выполнить в действительности, хотя он ведет к глубокому пониманию действительных экспериментов».



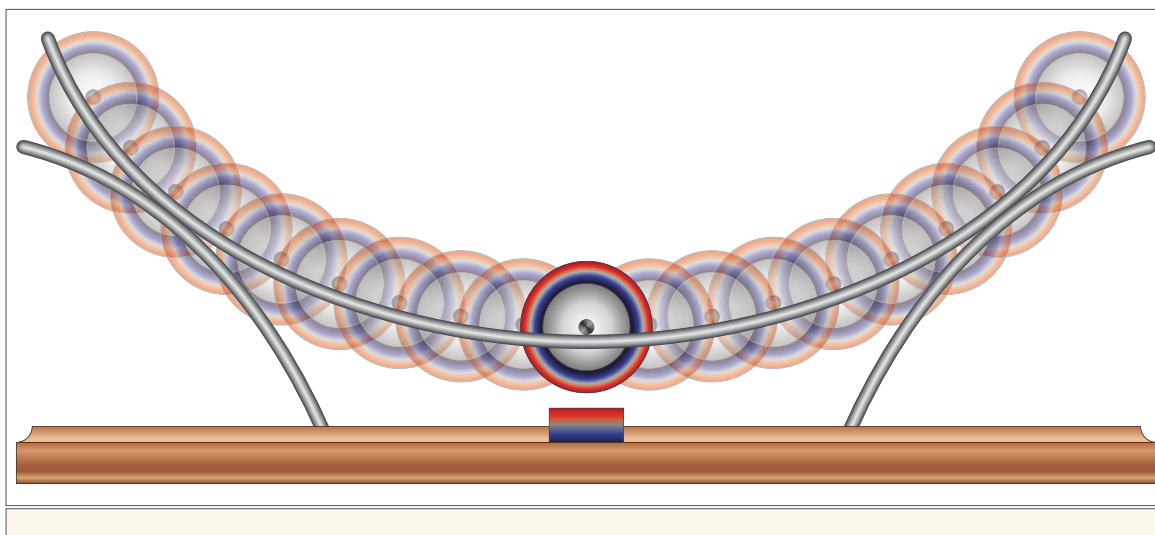
Определение инерции Галилеем было сформулировано следующим образом: «Тело может совершать прямолинейное и равномерное движение, а не только покоиться, если на само тело ничего не действует». В случае свободного падения на тело постоянно действует сила притяжения, и результаты этого действия непрерывно суммируются, ибо, согласно закону инерции, вызванное раз действие сохраняется. Это представление является основой его логического построения, приведшего к законам свободного падения. Проявление инерции мы постоянно встречаем в окружающем мире, например при резком торможении автобуса пассажиров «бросает» вперед — они продолжают двигаться с прежней скоростью (а во времена Галилея такой эффект наблюдали пассажиры при резком торможении кареты). И подобных примеров можно привести множество.

Верно, как замечают многие критики, что Галилей не дал общей формулировки этого принципа, но тот факт, что Галилей всегда точно применял его, показывает, что он понимал его во всей его общности. Галилей устранил многовековое заблуждение о движении тел: ранее считалось, что если движение не поддерживается какой-либо силой, то такое движение должно прекратиться, даже если отсутствуют причины для его остановки.

Все сказанное важно для понимания того факта, что великие достижения Ньютона, о которых речь впереди, возникли отнюдь не на пустом месте. Запомним это.

8 января 1642 года Галилео Галилей умер на руках сына и ближайших учеников, Вивiani и Торичелли. Папа Урбан VIII велел похоронить Галилея в монашеском приделе собора Санта Кроче во Флоренции без почестей и надгробия. И когда 85 лет спустя Лондон торжественно похоронил сэра Исаака, Флоренция перенесла прах Галилея в усыпальницу собора Санта Кроче, и он упокоился рядом с Микеланджело Буонаротти. Через 340 лет уже Римский Папа Иоанн Павел II думал о строении Вселенной так же, как Галилей. Он признал преследования Галилея несправедливыми и снял обвинения с великого ученого.

Но эстафету разума не было возможности остановить — в год смерти Галилея миру явился Ньютон...



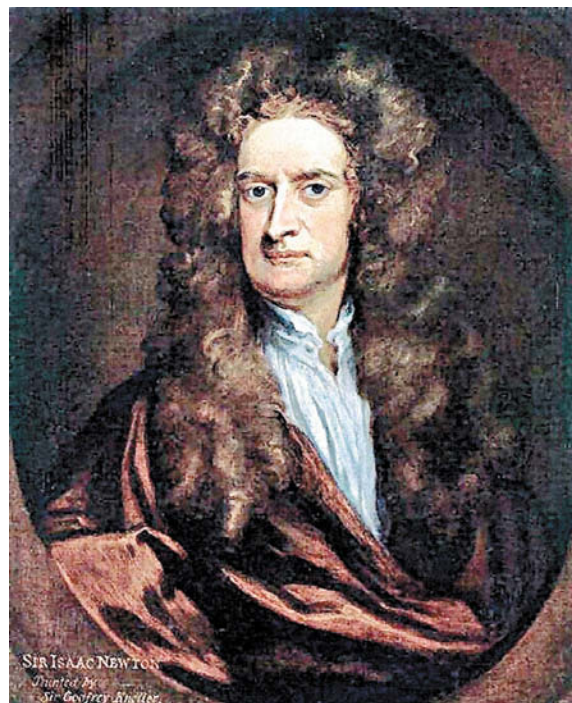
ПО ДОРОГАМ КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ. Факел, зажженный Галилеем, в руках Ньютона. Ученый закладывает фундамент механики и объясняет законы движения планет. Наконец получен ответ на вопрос: «Почему Луна не падает на Землю?» Формируется математический аппарат классической физики и на его основе создается описание разнообразных механических движений. Принципы динамики, маятник, тяготение — вот стержневые вопросы физики XVII века, к которым присоединилась еще проблема взаимодействия тел и, в первую очередь, теория удара.

5. «...И вот явился Ньютон». Механика Ньютона. Математический инструмент классической физики. Равномерное движение по окружности.

После Галилея в работы физиков все больше включались формулы. Математической формулой в физике была формула для периода качания маятника, полученная Гюйгенсом на основе наблюдений Галилея. Выводил формулы и Декарт, но лишь Ньютон смог обобщить наблюдения предшественников в математическую форму, создав для этого соответствующий математический аппарат.

Во второй половине XVII века, точнее, в 1665 году, Исаак Ньютон окончил Кембриджский университет и собирался начать работу там же, в его родном Тринити-колледже. Однако чума, бушевавшая в Англии, заставила Ньютона уединиться на своей ферме в Вулсторпе. «Чумные каникулы» затянулись почти на два года. «Я в то время был в расцвете моих изобретательских сил и думал о математике и философии больше, чем когда-либо позже», — писал Ньютон. Тогда и сделал молодой ученый почти все свои открытия в физике и математике. Заняться математикой его заставляла необходимость исследовать и выражать законы, создавшие первую научную картину мира, объединившие механику с астрономией. Законы Ньютона — это поворотный момент в истории физической науки. Можно сказать, что с законов движения Ньютона пошел отсчет истории современной физики.

Первый закон Ньютона. Галилей выявил свойство тел сохранять свою скорость, хотя еще не нашел полной и точной формулировки закона инерции. Это предстояло сделать Ньютону, который обобщил все накопленные к тому времени знания о движении физических тел и смог сформулировать законы, легшие в основу созданной им механики. Ньютон сформулировал закон инерции в 1687 году так: «Всякое тело продолжает удерживаться в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние». То есть, если тело неподвижно, то оно так и останется в таком состоянии до тех пор, пока на



Исаак Ньютон. 1702 год.
Портрет работы Готфрида Кнеллера



Вулсторп. Дом, где родился Ньютон

него не начнет действовать какая-то внешняя сила. И, соответственно, если тело движется равномерно и прямолинейно, то оно будет продолжать свое движение до момента начала воздействия внешней силы. Это первый закон Ньютона, называемый еще законом инерции. Латинское слово «inertia» переводится на русский язык как «бездействие» и даже... «лень»! Тело, к которому не приложены силы, само по себе свою скорость не изменяет — ему как бы лень это делать. Поэтому закон Галилея-Ньютона (первый закон Ньютона) и получил название закона инерции.

Очевидные факты повседневной жизни указывают, что механическое движение относительно, то есть имеет смысл говорить только о движении одного тела относительно другого. В формулировке закона инерции Галилея упущена существенная деталь — относительно какой системы отсчета рассматривается движение. Нетрудно привести пример системы отсчета, в которой закон инерции не выполняется. Пусть поезд начинает отходить ускоренно от вокзала. Так вот в системе отсчета, связанной с поездом, — вок-

**МОЖНО СКАЗАТЬ, ЧТО С ЗАКОНОВ ДВИЖЕНИЯ
НЬЮТОНА ПОШЕЛ ОТСЧЕТ ИСТОРИИ
СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ.**



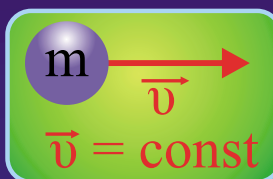
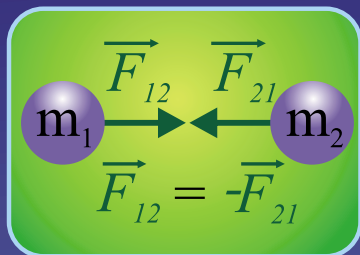
Первый закон Ньютона

Всякое тело продолжает удерживаться в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние (*после выхода на орбиту движется по инерции*)



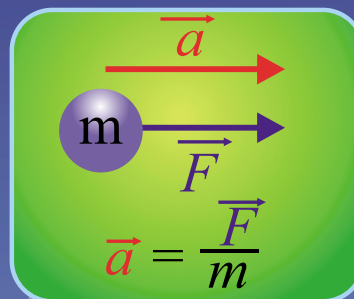
Третий закон Ньютона

Силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю и противоположны по направлению (*выбрасывая с огромной скоростью продукты сгорания топлива назад, ракета действует на них с огромной силой. С такой же по модулю, но направленной вперед силой продукты сгорания действуют на ракету*)



Второй закон Ньютона

В инерциальных системах отсчета ускорение, приобретаемое материальной точкой, прямо пропорционально вызывающей его силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки

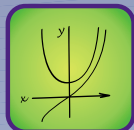


Научная деятельность

Философия



Математика



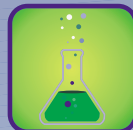
Механика



Оптика



Химия



Алхимия



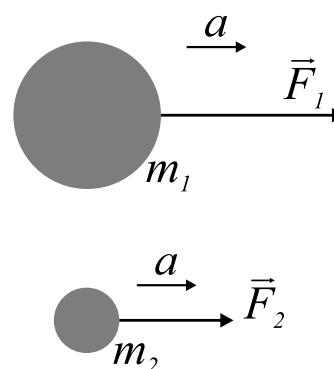


зал движется с ускорением, хотя явных взаимодействий, приводящих к изменению скорости вокзала, незаметно. Поэтому закону инерции Галилея следует дать иную интерпретацию: существуют такие системы отсчета, в которых тело движется равномерно при отсутствии взаимодействия с другими телами. Такие системы отсчета называются инерциальными. Пусть некоторое тело движется равномерно и прямолинейно относительно некоторой системы отсчета $ХОУ$. В любой другой системе отсчета, которая движется относительно $ХОУ$ равномерно, движение этого тела будет равномерным (но, конечно, с другой скоростью). Следовательно, любая система отсчета, которая движется равномерно относительно какой-нибудь инерциальной системы отсчета, сама является инерциальной. Есть несколько определений этого понятия. Вот два из них: *инерциальной системой отсчета считается система отсчета, которая либо движется прямолинейно и равномерно, либо сама находится в покое*. Или: *инерциальной системой отсчета называется такая система, тела в которой либо движутся равномерно и прямолинейно, либо покоятся*.

Прямолинейное и равномерное движение свободной материальной точки в инерциальной системе отсчета называется движением по инерции. При таком движении вектор скорости материальной точки остается постоянным ($v = const$). Покой точки является частным случаем движения по инерции ($v = 0$). Вопрос о существовании инерциальных

В ФОРМУЛИРОВКЕ ЗАКОНА ИНЕРЦИИ ГАЛИЛЕЯ УПУЩЕНА СУЩЕСТВЕННАЯ ДЕТАЛЬ – ОТНОСИТЕЛЬНО КАКОЙ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА РАССМАТРИВАЕТСЯ ДВИЖЕНИЕ.

систем отсчета на самом деле не такой простой. Во многих случаях в качестве инерциальной системы отсчета рассматривают систему отсчета, связанную с поверхностью Земли. Строго говоря, эта система не является инерциальной, так как Земля вращается вокруг собственной оси, то есть движется с ускорением. Эта неинерциальность проявляется в целом ряде экспериментов — в движении известного маятника Фуко, отклонении в полете снарядов, подмыве одного из берегов рек и т. д. Безусловно, эти эффекты малы, и при решении многих задач ими можно пренебречь, то есть считать



Для сообщения двум телам разной массы одного и того же ускорения требуются разные силы

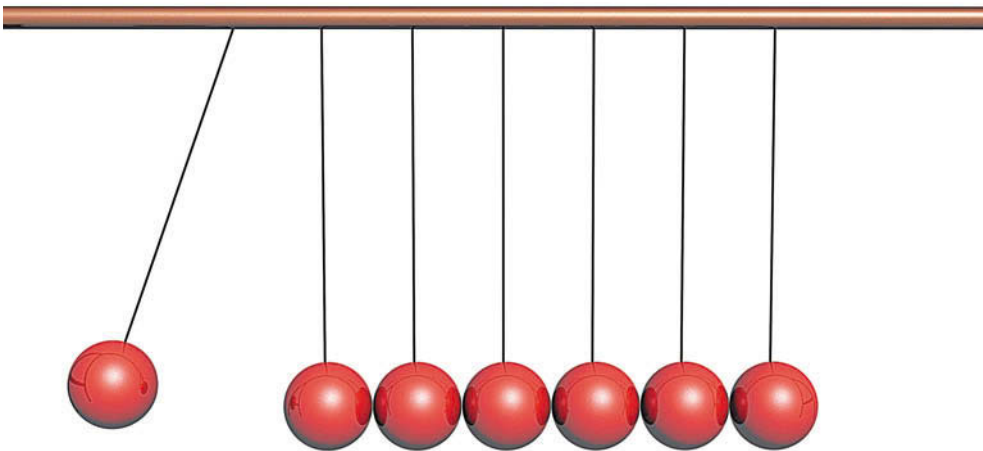
Землю инерциальной системой. Аналогичные рассуждения можно применить и к другим более грандиозным системам, например, связанным с Солнцем или другими звездами.

В современной трактовке первый закон Ньютона формулируется так:

«Существуют такие (а именно, инерциальные) системы отсчета, относительно которых движущееся поступательно тело сохраняет скорость постоянной, если на само тело ничего не действует (либо сумма всех сил, которые действуют на определенное тело, равна нулю)». Первый закон Ньютона дает нам ответ на вопрос: «А в каком случае тело будет двигаться прямолинейно и равномерно?».

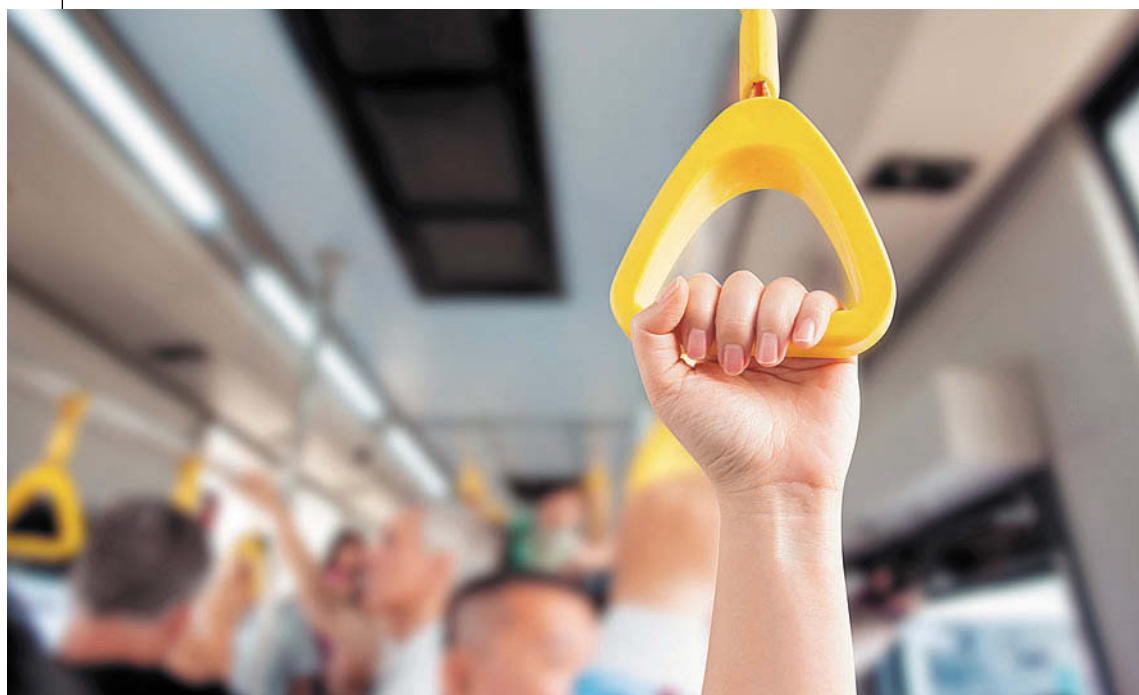
Второй закон Ньютона. Второй закон механики призван ответить на вопрос: «В каком случае тело приобретет ускорение и будет двигаться с ним?».

Первый закон Ньютона утверждает, что для изменения скорости движения необходимо приложение силы. Это касается увеличения скорости, уменьшения ее или остановки движущегося объекта. Любая механическая система, обладающая массой, является инерционной, то есть препятствующей изменениям, «сопротивляющейся» им.



Итак, для того чтобы тело находилось в состоянии покоя или двигалось равномерно, не нужно делать ничего. Напротив, заставить изменить скорость может лишь сила — «сила есть причина ускорения». Изменить скорость не означает обязательно изменить ее величину. Можно изменить лишь направление скорости, оставляя ее величину неизменной. Поэтому здесь мы рассматриваем скорость, ускорение, силу как величины векторные, хотя сам векторный анализ Ньютону был неизвестен. Этот раздел математики возник гораздо позже, а его применение в физике началось примерно в середине XIX века. Инертность — это свойство тела, а масса тела — физическая величина, являющаяся мерой инертности тела. Человеческий опыт свидетельствует — чем она больше, тем инертнее тело, тем большую силу нужно приложить, чтобы оно начало двигаться. А, если тело движется, то для изменения его скорости или остановки потребуется тем большая сила, чем тело массивнее (см. рисунок).

$$\overline{a} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \overline{F}_i = \frac{\overline{F}}{m}$$



Итак, ускорение тела a прямо пропорционально действующей силе F и обратно пропорционально массе тела m : $a \sim F/m$. Это как раз утверждает второй закон Ньютона. Поскольку ускорение — векторная величина, то и сила — величина векторная. Обычно на тело действует несколько сил, тогда под силой F понимают равнодействующую силу, то есть геометрическую сумму сил.

Из приведенного соотношения следует, что тело будет совершать равномерное прямолинейное движение не только тогда, когда на него не действуют никакие силы (первый закон Ньютона, движение по инерции), но и тогда, когда векторная сумма приложенных к телу сил равна нулю. Второй закон Ньютона можно сформулировать по-другому: произведение массы тела на его ускорение равно векторной сумме всех действующих на тело сил: $F = ma$.

Здесь в левой части равенства стоит равнодействующая сила (векторная сумма всех приложенных к телу сил). Отметим важное обстоятельство. В этом законе ничего не говорится о характере самих сил. Эти силы могут быть разными — механическими, электрическими и т. п. Поэтому закон Ньютона описывает широчайший круг физических явлений.

Проявление сил инерции при поступательном движении, как мы уже отмечали, можно видеть в повседневных явлениях. Если поезд набирает скорость, то пассажир, сидящий при этом по ходу поезда, прижимается к спинке сиденья под действием силы инерции. И наоборот, при торможении поезда пассажир отклоняется от спинки сиденья, т. к. сила инерции направлена в противоположную сторону. Особенно в этом случае внезапного торможения силы инерции явно заметны. Эти силы проявляются в перегрузках, возникаю-

щих при запуске и торможении космических кораблей. Уверенность в справедливости второго закона Ньютона основывается не только на результатах отдельных опытов, которые позволяют подойти к формулировке этого закона, а главным образом на том, что все вытекающие из него следствия, проверяемые как специальными опытами, так и всей человеческой практикой, оказываются правильными.

Второй закон Ньютона описывает количественное действие сил на тело. Понятно, что Ньютон не мог ограничиться двумя этими законами. Надо было охарактеризовать случай взаимодействия тел. Он описывается третьим законом.

Третий закон Ньютона. Но откуда появляются сами силы? Наблюдения людей наводят на мысль, что силы появляются в результате действия одного тела на другое. Ньютон понял, что такое взаимодействие не является односторонним. Классический пример: лошадь, везущая телегу действует на телегу, но и телега не остается в стороне. Она в свою очередь действует на лошадь. Всякий раз, когда одно тело действует с некоторой силой на другое, со стороны второго тела на первое действует сила противодействия, равная по величине и противоположная по направлению силе действия. Иногда этот закон формулируют сокращенно так: «Сила действия равна по величине и противоположна силе противодействия».

Возьмем два динамометра, зацепим друг за друга их крючки и, взявшись за кольца, будем растягивать их, следя за показаниями, обоих динамометров (см. рисунок). Мы увидим, что при любых растяжениях показания обоих динамометров будут совпадать; значит, сила, с которой первый динамометр действует на второй, равна силе, с которой второй динамометр действует на первый.

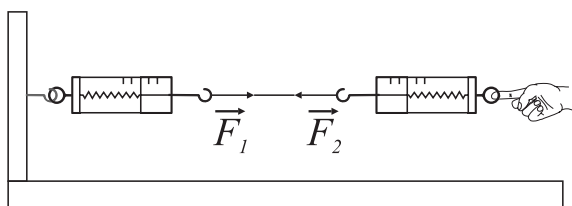
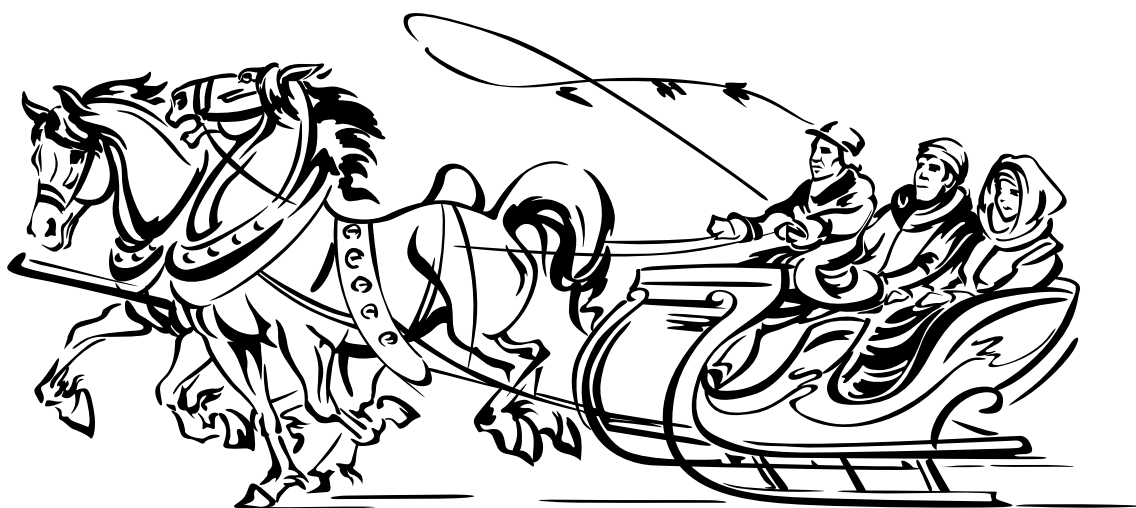
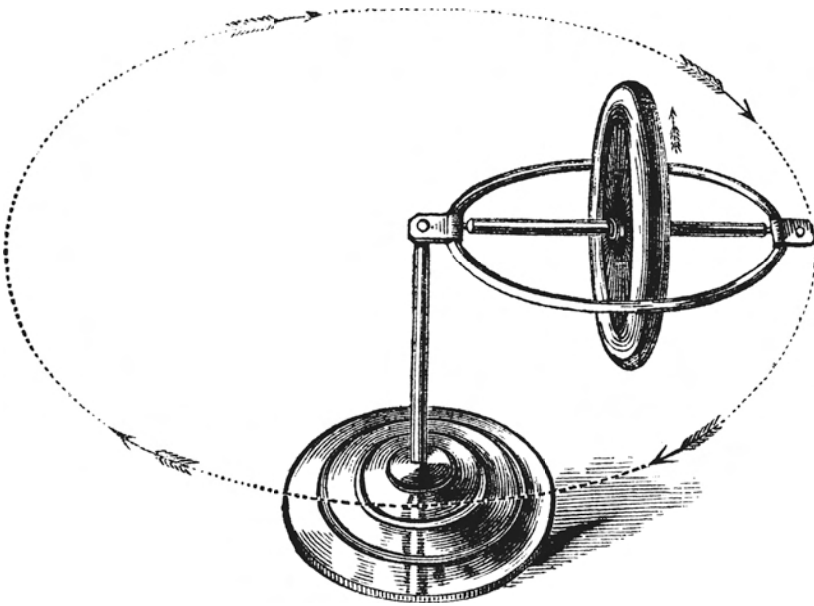


Иллюстрация третьего закона Ньютона



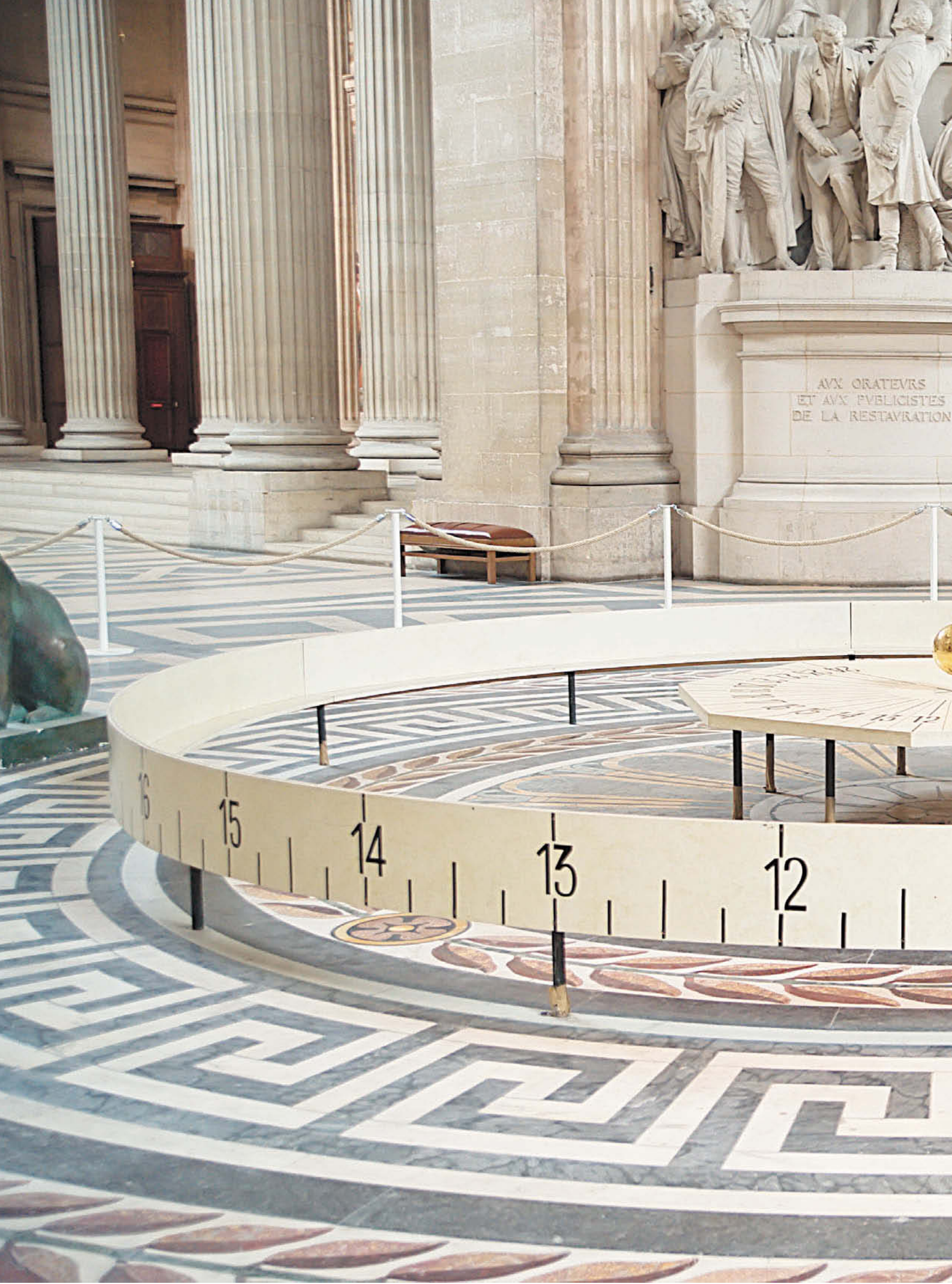


**ИТАК, ДЛЯ ТОГО ЧТОБЫ ТЕЛО НАХОДИЛОСЬ
В СОСТОЯНИИ ПОКОЯ ИЛИ ДВИГАЛОСЬ РАВНОМЕРНО,
НЕ НУЖНО ДЕЛАТЬ НИЧЕГО.**

НАПРОТИВ, ЗАСТАВИТЬ ИЗМЕНИТЬ
СКОРОСТЬ МОЖЕТ ЛИШЬ СИЛА —
«СИЛА ЕСТЬ ПРИЧИНА УСКОРЕНИЯ».

Третий закон Ньютона выполняется только в инерциальных системах отсчета.

Вернемся к классическому примеру с лошадью, приведенному выше. Но, если третий закон справедлив, то как может возникнуть движение? Как объяснить, что лошадь везет сани, если, как это следует из закона действия и противодействия, сани тянут лошадь назад с такой же силой F_1 с какой лошадь тянет сани вперед (сила F_2)? Почему эти равные и противоположные силы не уравниваются? Дело в том, что, во-первых, хотя эти силы равны и прямо противоположны, они приложены к разным телам, а во-вторых, и на сани, и на лошадь действуют еще и силы со стороны грунта. Сила со стороны лошади приложена к саням, испытывающим кроме нее лишь небольшое трение F_4 полозьев о снег; поэтому сани начинают двигаться вперед. К лошади же, помимо силы со стороны саней F_1 , направленной назад, приложены со стороны дороги, в которую она упирается ногами, силы F_3 , направленные вперед и большие, чем сила со стороны



AVX ORATEVRS
ET AVX PVBLCISTES
DE LA RESTAVRATION

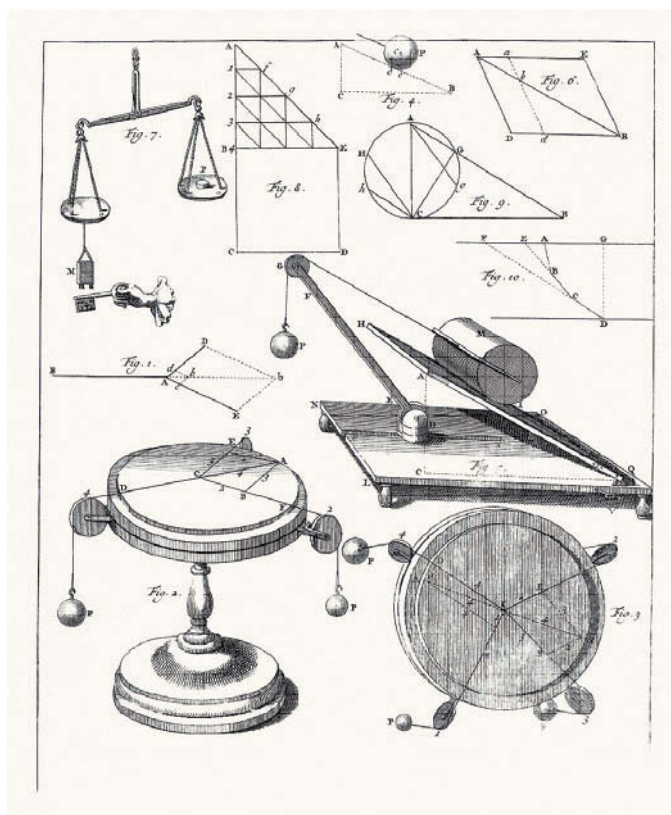


саней. Поэтому лошадь тоже начинает двигаться вперед. Если поставить лошадь на лед, то сила со стороны скользкого льда будет недостаточна, и лошадь не сдвинет сани. То же будет и с очень тяжело нагруженным возом, когда лошадь, даже упираясь ногами, не сможет создать достаточную силу, чтобы сдвинуть воз с места. После того как лошадь сдвинула сани и установилось равномерное движение саней, сила F_4 будет равна сумме сил F_3 (первый закон Ньютона).

Подобный же вопрос возникает и при разборе движения поезда под действием локомотива. Здесь, как и в предыдущем случае, движение возможно лишь благодаря тому, что, кроме сил взаимодействия между тянущим телом (локомотив) и «прицепом» (поезд), на тянущее тело действуют со стороны грунта или рельсов силы, направленные вперед. На идеальной скользкой поверхности, от которой нельзя «оттолкнуться», ни сани с лошадью, ни поезд, ни автомобиль не могли бы сдвинуться с места. О трении мы поговорим далее.

Применяя третий закон Ньютона, всегда следует помнить, что равные по модулю и противоположно направленные силы действия и противодействия приложены к разным телам и поэтому не могут уравнивать друг друга.

Ньютон не только сформулировал три закона механики, он разработал математический аппарат, ставший главным инструментом классической физики. Без математики были невозможны достижения науки XVII века. Правда, законы, открытые этими учеными, не были записаны в привычном для нас виде. Надо сказать, что все физические законы Галилея, Декарта, Гюйгенса, Ньютона — и вообще всех первых физиков — имеют вид пропорций или ее частных случаев. Если для математика или физика XX века



Старинные иллюстрации к законам физики.
Законы Ньютона. XVII в.



пропорция выступает лишь частным случаем функциональной зависимости, то к моменту формулировки первых законов физики понятие пропорции рассматривалось в качестве канона, но никак не функции, само понятие которой утвердилось в науке лишь после работ Г. Лейбница и И. Ньютона. Связь величин называется пропорцией, связь отношений содержится в понятии функции.

А заняться математикой Ньютона заставляла необходимость исследовать и выражать законы, полученные в результате обобщения человеческого опыта. Ньютоном были заложены основы математического анализа: он первым построил дифференциальное исчисление и дал возможность решать самые разнообразные математические и физические задачи. Без математического понятия производной функции нет физического понятия скорости. Без дифференциальных уравнений нет законов классической механики и т. д.

Ньютон, по-видимому, никому не рассказывал о своих открытиях, не публиковал их. Об этих открытиях мир узнал лишь через тридцать с лишним лет. Это привело к конфликту с Лейбницем за приоритет в создании основ дифференциального исчисления, а в результате — к прерыванию контактов между английскими и европейскими учеными.

Основные задачи Ньютон формулировал в терминах механики:

Первая задача — определение мгновенной скорости движения по известной зависимости пути от времени; в этом случае вектор скорости определяется через первую производную от пути: $v = dS/dt$, а ускорение — через первую производную от скорости: $a = dv/dt$.

Вторая задача — определение пройденного за данное время пути по известной скорости. В этом случае необходимо использовать интеграл, и задача становится неоднозначной. Чтобы получить единственное решение, используют начальные условия. Так для скорости имеем $v = \int a dt + const$. Если ускорение постоянно, а скорость в началь-



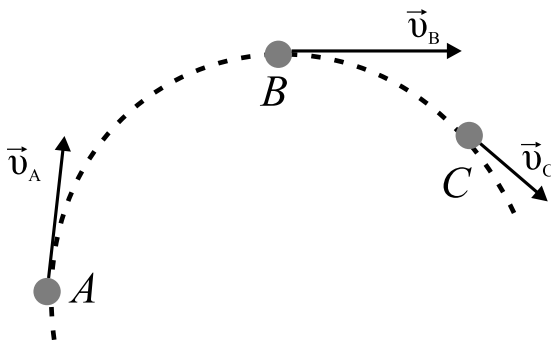
Г. Лейбниц, И. Вентцель (около 1700)

НЬЮТОН НЕ ТОЛЬКО СФОРМУЛИРОВАЛ ТРИ ЗАКОНА МЕХАНИКИ, ОН РАЗРАБОТАЛ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ, СТАВШИЙ ГЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ.

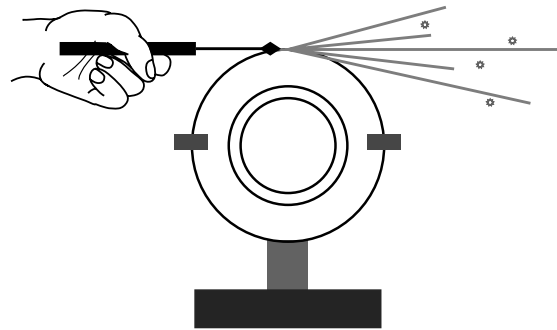
ный момент равна некоторому значению v_0 , то в итоге получим, $v = v_0 + at$. Зависимость пути от времени $S(t)$ для рассматриваемого случая находим через интегрирование полученного выражения для скорости. Если в начальный момент $S = 0$, тогда имеем $S(t) = v_0 t + at^2/2$. Получили знакомое выражение зависимости пути от времени для равноускоренного движения, т. е. для случая, когда величина ускорения постоянна, а движение происходит по прямой линии.

А теперь расшифруем написанные выше соотношения.

Нетрудно увидеть, что центральное понятие дифференциального исчисления — производная — возникла при рассмотрении задачи об определении скорости неравномерного движения. Скорость — это быстрота перемещения объекта в заданном направлении. В общем, нахождение скорости объекта (v) — простая задача: нужно разделить перемещение (s) в течение определенного времени (s) на это время (t), то есть воспользоваться формулой $v = s/t$. Однако таким способом получают среднюю скорость тела. Используя некоторые вычисления, можно найти скорость тела в любой точке пути. Такая скорость называется мгновенной скоростью. Вот для решения второй задачи и потребовалось создать специальный математический аппарат.



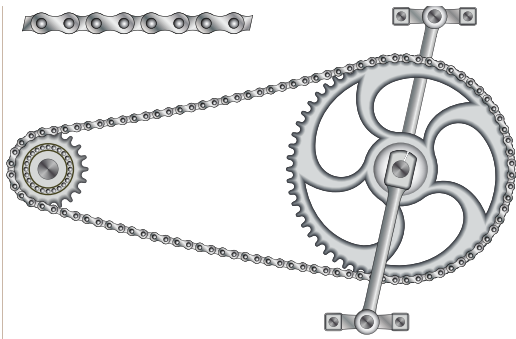
Мгновенная скорость в каждой точке направлена по касательной к траектории в этой точке



Направление искр совпадает с направлением мгновенной скорости точки

Итак, средняя скорость есть отношение перемещения ко времени, за которое это перемещение произошло: $V_{cp} = \Delta S / \Delta t$. Направление вектора средней скорости совпадает с направлением ΔS . Мгновенная скорость есть предел средней скорости, когда промежуток времени движения стремится к нулю. Другими словами, мгновенная скорость есть первая производная пути по времени. Вектор мгновенной скорости всегда направлен по касательной к траектории тела в сторону движения тела (см. рисунок).

Производная — одно из фундаментальных понятий математики возникшее, как мы видим, аналогично в первую очередь для скорости движения и построения касательной к кривой. Открытие Ньютона стало поворотным пунктом в истории естествознания. Оказалось, что связь между количественными характеристиками самых различных процессов, исследуемых физикой, химией, биологией, техническими науками, аналогична связи между путем и скоростью. Понятно, что в физике производная нашла самый радушный прием.

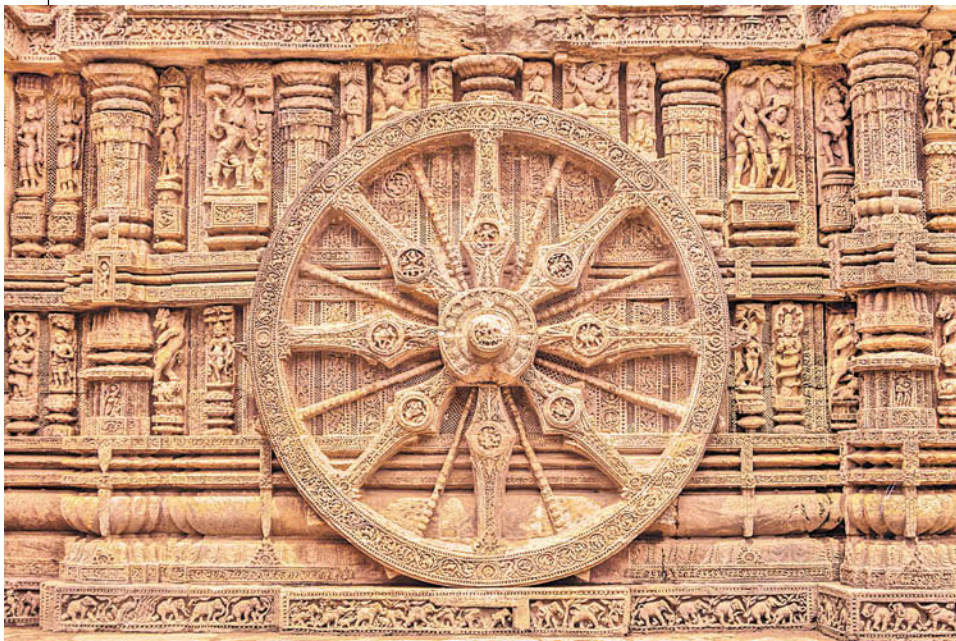


ПРОИЗВОДНАЯ – ОДНО ИЗ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПОНЯТИЙ МАТЕМАТИКИ И, КАК МЫ ВИДИМ, ВОЗНИКЛО В ПЕРВУЮ ОЧЕРЕДЬ ДЛЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ И ПОСТРОЕНИЯ КАСАТЕЛЬНОЙ К КРИВОЙ.

Получив в руки аппарат дифференциального исчисления, физики поспешили его использовать для описания не только поступательного движения. И весьма в этом преуспели, что будет видно из рассмотрения весьма распространенного в природе вращательного движения. Узнав о нем подробнее, мы сможем рассмотреть великий закон всемирного тяготения, открытый Ньютоном, и следствия из этого закона.

Сначала небольшой экскурс в историю. Вначале люди пользовались различными приспособлениями, простыми механизмами, а одной из проблем, стоявших перед ними, была проблема преобразования вращательного движения в поступательное.

Собственно история вращательного движения по окружности не намного «моложе» прямолинейного движения. Археологические находки, в числе которых были и первые колеса, которые находили вместе со скелетами вьючных животных, относятся к бронзо-





вому веку — 3500–4000 гг. до н. э. Вращательное движение — это движение не по прямой линии. Такие движения называются криволинейными, то есть траектории их представляют собой не прямые, а кривые линии. В природе по криволинейным траекториям движутся планеты, воды рек...

Среди различных видов криволинейного движения особый интерес представляет равномерное движение тела по окружности. Нашим далеким предкам наблюдаемое круговое движение светил казалось универсальным, а окружность считалась идеальной фигурой. И хотя, как оказалось, планеты движутся по эллипсам, а не по окружностям, это не поколебало отношения людей к ней.

Движение по окружности — самый простой с точки зрения описания вид криволинейного движения. Движение по окружности используется в неисчислимых количествах в технике, на транспорте и т. п. И кроме всего, окружность как нельзя кстати подходит на роль простой, но охватывающей разные ситуации модели. Часто любое сложное криволинейное движение тела на достаточно малом участке его траектории можно приближенно рассматривать как равномерное движение по окружности. *Равномерное движение*

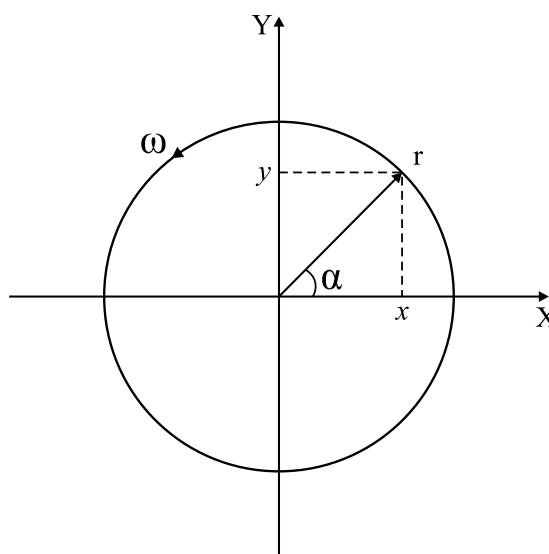


по окружности — это движение, во время которого модуль скорости движения не изменяется, изменяется только ее направление: направление вектора скорости меняется от точки к точке. А значит, криволинейное движение — это всегда движение с ускорением, даже если по модулю скорость постоянна.

Поэтому, когда говорят о скорости такого движения, подразумевают мгновенную скорость.

Рассмотрим случай равномерного движения по окружности на плоскости. Выберем в качестве этой плоскости — плоскость XY . Начало координат выберем в центре окружности (см. рисунок).

Координаты частицы выразим через величину радиуса окружности r и угол поворота α : $x = r \cos \alpha$, $y = r \sin \alpha$. Поскольку движение происходит по окружности, r от времени не зависит. Функцией времени является только угол поворота $\alpha(t)$. Производная от угла по времени называется угловой скоростью вращения (ω): $\omega = d\alpha/dt$. При равномерном вращении по окружности ($\omega = \text{const}$) написанное выражение можно проинтегрировать. В результате получим $\alpha = \omega t + \text{const}$. Постоянную интегрирования можно выбрать из условия $\alpha(0) = 0$. Тогда получим $x(t) = r \cos \omega t$, $y(t) = r \sin \omega t$. Полученные соотношения полностью определяют движение. Из этих уравнений дифференцированием по времени можно найти скорость материальной точки по осям координат:



Равномерное движение по окружности

$$v_x = dx/dt = -\omega r \sin \omega t, \quad v_y = dy/dt = \omega r \cos \omega t.$$

Скалярное произведение векторов r и v можно записать через их проекции: $xv_x + yv_y = r \cos \omega t (-\omega r \sin \omega t) + r \sin \omega t (\omega r \cos \omega t) = 0$, что означает перпендикулярность векторов r и v , то есть скорость действительно направлена по касательной к окружности:

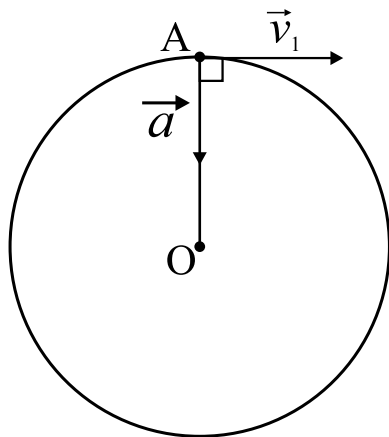
$$v = |v| = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)} = \sqrt{(\omega^2 r^2 \sin^2 \omega t + \omega^2 r^2 \cos^2 \omega t)} = \omega r = \text{const},$$

и она не зависит от времени. Движение действительно равномерное (но по окружности). Дифференцируя по времени скорость, мы можем определить ускорение: $a_x = dv_x/dt = -\omega^2 r \cos \omega t$, $a_y = dv_y/dt = \omega^2 r \sin \omega t$. Отсюда следует, что ускорение зависит от времени, то есть движение не является равноускоренным. Абсолютная величина ускорения (модуль), тем не менее, остается величиной постоянной: $a = |a| = \sqrt{(a_x^2 + a_y^2)} = \omega^2 r$.

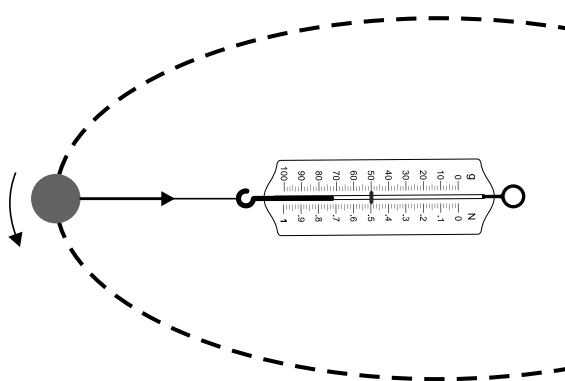
Так как $\omega r = v$, то $|a| = v^2/r$ и мы получили формулу для центростремительного ускорения, известную нам из школьного курса физики. Это ускорение направлено к центру (потому и называется центростремительным). В этом легко убедиться, рассчитав скалярное произведение векторов a и r (как это было сделано выше). Опуская промежу-

точные преобразования, в итоге получим, что скалярное произведение $\vec{a} \cdot \vec{r} = \omega^2 r^2 \cos(a \cdot r)$ и равно с другой стороны — $\omega^2 r^2$. Сравнивая эти два выражения для скалярного произведения, видим, что вектор ускорения антипараллелен вектору \vec{r} ; то есть направлен к центру. Там, где есть ускорения, есть и силы. В самом деле, во всех случаях равномерного движения тела по окружности мы можем обнаружить такую силу, действующую со стороны какого-либо другого тела. При вращении шарика на нити — это сила натяжения, действующая со стороны растянутой нити на шарик; ее легко обнаружить, привязав нить другим концом к динамометру (см. рисунок).

При движении шарика по круговому желобу или при движении поезда по закруглению пути — это сила реакции, действующая со стороны деформированного желоба на шарик или деформированного рельса на колеса поезда, направленная к центру дуги окружности, по которой движется шарик или поезд; в случае движения планет вокруг Солнца — это сила притяжения к Солнцу.



Радиус-вектор, скорость и ускорение при равномерном движении по окружности



Динамометр показывает силу, с которой нить действует на шарик, движущийся по окружности.

Если действие силы прекращается (например, обрывается нить, к которой привязан шарик), то исчезает и центростремительное ускорение: дальше шарик полетит по касательной к окружности (то есть по направлению скорости, которой обладает шарик в момент исчезновения силы). Это мы замечаем, наблюдая летящий снаряд, когда затачивают какой-либо предмет на точильном камне (см. рисунок).

Сила, необходимая для того, чтобы тело массы m равномерно двигалось со скоростью v по окружности радиуса r , может быть найдена на основании второго закона Ньютона. Так как ускорение тела $a = v^2/r$, то требуемая сила: $F = mv^2/r$.

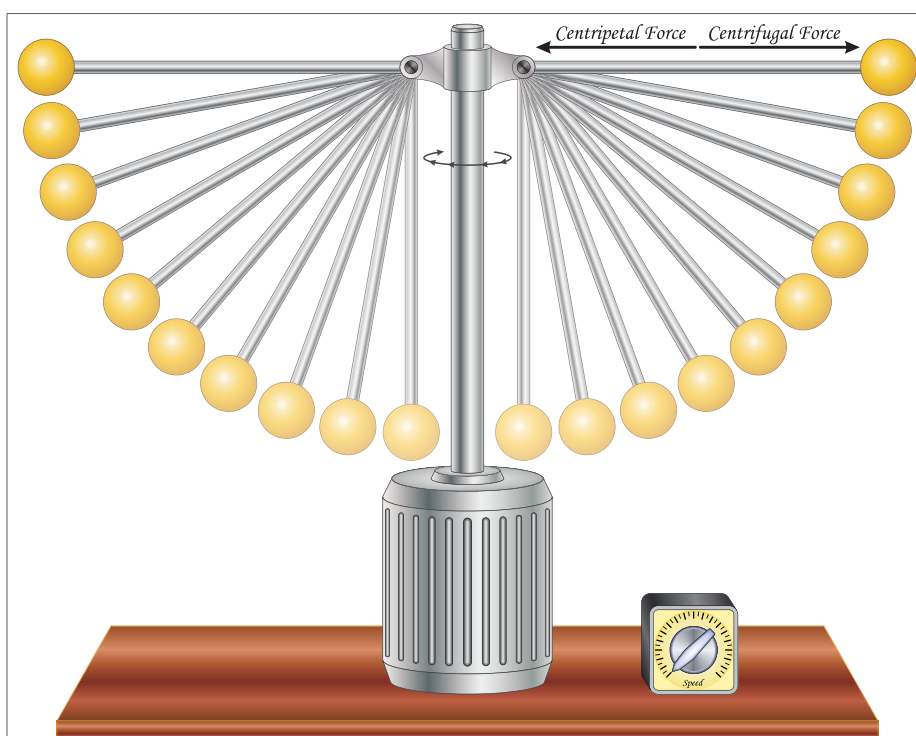
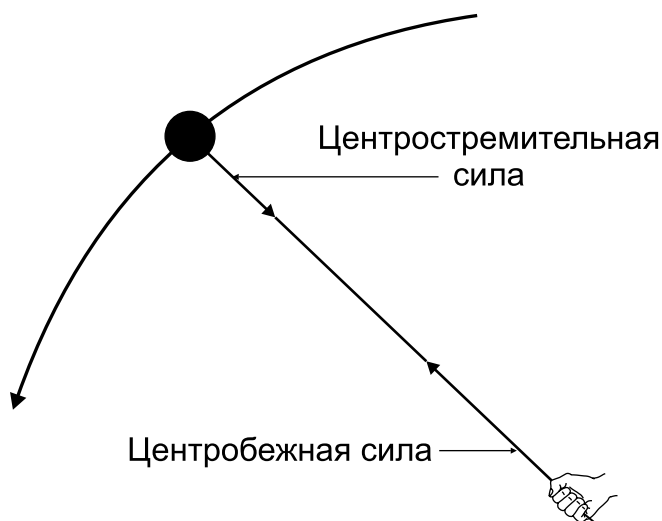
Существует неправильное представление о том, что тело, движущееся по окружности, испытывает действие так называемой центробежной силы. В действительности это не так, что с очевидностью следует из простого опыта с вращающимся шариком, удерживаемым на нити. Ощущение силы натяжения, действующей на руку, говорит



нам о существовании центростремительной силы (связанной с центростремительным ускорением). Если бы на шарик действовала центробежная сила, то при обрыве нити он полетел бы по радиусу в сторону от центра. Однако этого не происходит, шарик начинает двигаться по касательной в направлении скорости, которую он имел в момент времени обрыва нити, как отмечено выше. В этот момент прекратила действовать сила, направленная внутрь.

Центробежная сила — составляющая фиктивных сил инерции, о которых говорилось выше. Эту силу вводят при переходе из инерциальной системы отсчета в соответствующим образом вращающуюся неинерциальную, что позволяет в полученной неинерциальной системе отсчета продолжать применять законы Ньютона для расчета ускорения тел через баланс сил.

Центробежные или просто направленные от центра силы все-таки бывают, но действуют они вовсе не на то тело, которое вращается, а на связь, удерживающую это тело (см. рисунок). То есть не на автомобиль, а на дорогу, не на Луну, а на Землю, не на камень в праще (см. далее), а на веревку и руку человека и т. д.









Этим обстоятельством воспользовались в глубокой древности изобретатели пращи — простейшего приспособления для метания камней. Пращу использовали на войне в Европе и на Ближнем Востоке по крайней мере с бронзового века и до XVII века н. э. Самая древняя праща была найдена в гробнице Тутанхамона (XIV в. до н. э.). Камень, выпущенный из пращи, летит по касательной к окружности раскрутки пращи. То есть если представить траекторию раскрутки как циферблат с метателем в центре, для того, чтобы метнуть снаряд точно вперед, необходимо отпустить пращу в районе 3-х часов (при вращении пращи против часовой стрелки).



Сделав остановку, чтобы разобраться в движении тела по окружности, мы вполне готовы к изучению открытого Ньютоном закона Всемирного тяготения и следствий из него.

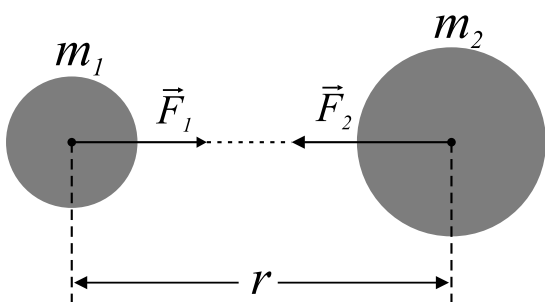
6. Невидимая рука гравитации. Закон всемирного тяготения. Ускорение силы тяжести: теория подтвердила опыт. Два лика силы тяжести. Законы Кеплера и закон всемирного тяготения. Наведение порядка «на небесах».

Когда великие предшественники Ньютона, в частности Галилей, изучали равноускоренное движение тел, падающих на поверхность Земли, они были уверены, что наблюдают явление чисто земной природы — существующее только недалеко от поверхности нашей планеты. Кеплер и другие ученые полагали, что в законах, определяющих движение небесных тел, действуют совсем иные законы движения, нежели законы, управляющие движением на Земле. В 1686–1687 гг. Ньютон опубликовал свои знаменитые «Математические начала натуральной философии», ознаменовавшие рождение современной механики.

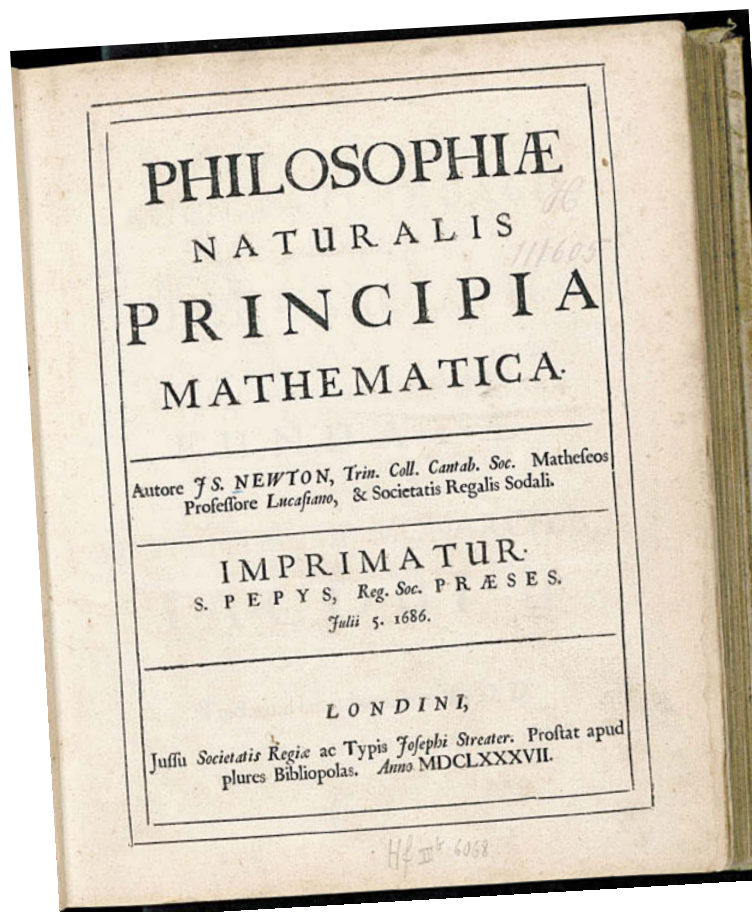
В этой работе Ньютон сформулировал свой знаменитый закон всемирного тяготения: сила гравитационного притяжения между двумя материальными точками массы m_1 и m_2 , разделенными расстоянием r , пропорциональна обоим массам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Гениальное прозрение Ньютона заключалось в том, что он объединил два типа гравитации (земной и небесных сфер) в своем сознании и отбросил искусственное и ложное разделение Земли и остальной Вселенной. Закон поэтому и называется Всемирным.

В рамках классической механики формула, выражающая этот закон, проста:

$$F = Gm_1m_2/r^2.$$



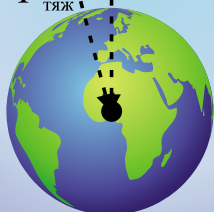
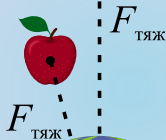
Здесь F — сила притяжения между двумя материальными телами с массами m_1 и m_2 . Коэффициент G называется гравитационной постоянной. Следует отметить, что в приведенной форме закон всемирного тяготения стали записывать лишь в XIX веке.



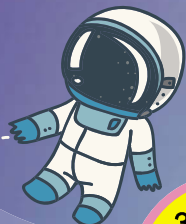
Сила тяжести

$$F = mg$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

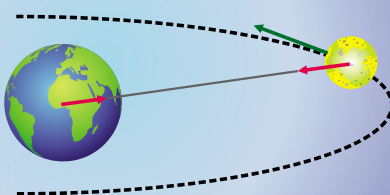


Невесомость
исчезновение веса
при движении опоры
с ускорением
свободного
падения

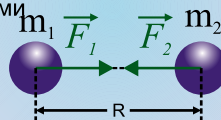


**ЗВТ был
открыт
Ньютоном
в 1682 г.**

Ньютон высказал предположение, что силы, удерживающие Луну на ее орбите, той же природы, что и силы, заставляющие яблоко



Все тела взаимодействуют друг с другом с силой, прямо пропорциональной произведению масс этих тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними

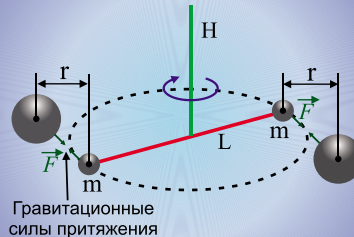


$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

G

$$6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}$$

гравитационная
постоянная



**Эксперимент
Кавендиша**



Чудесным образом оказалось, что силу притяжения между ньютоновскими телами можно определить, зная только их массы и расстояния между ними. Величина G определялась экспериментально и оказалась очень малой величиной. Малостью гравитационной постоянной объясняется то, что гравитационные эффекты в реальной жизни незаметны. Они становятся заметны, лишь когда мы имеем дело с огромными количествами материи. Вот хороший пример (Ф. Уиппл «Земля, Луна, планеты», 1948): представим себе шар, сделанный из золота, добытого во всем мире, скажем, 30000 т; такой шар имел бы 14 м в диаметре. Если бы этот шар находился в пространстве, вдали от всех притягивающих сил, то человек весом 80 кг, сидящий на нем, весил бы столько же, сколько 0,3 г на Земле. Сверчок легко мог бы поднять этого человека, а лягушка могла бы вообще сбросить его с золотого шара.

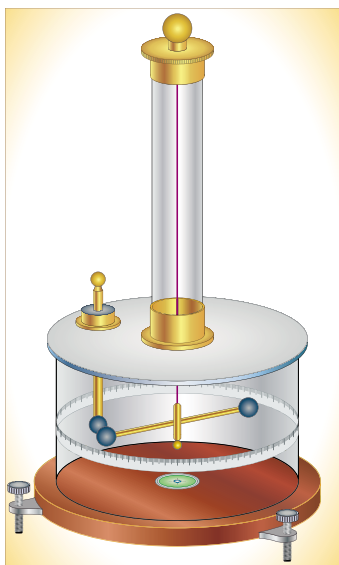
Гравитационная постоянная фигурирует в современном законе всемирного тяготения, однако отсутствовала у Ньютона и в работах других ученых вплоть до начала XIX века. Она впервые была введена в закон всемирного тяготения, по-видимому, только после перехода к единой метрической системе мер. Дискуссия о точности, с которой выполняется закон всемирного тяготения, шла на протяжении всего XVIII века. Не зная гравитационную постоянную, ученые были вынуждены пользоваться в расчетах относительными величинами. Поскольку нахождение G имело значение главным образом для астрономии, эта задача была сформулирована как определение средней плотности Земли. Очевидно, что при известных значениях плотности ρ и радиуса R Земли (легко найти массу Земли), а также ускорения свобод-

ного падения g на ее поверхности можно найти G . Первым ученым, определившим плотность земли (а следовательно, и G) с удовлетворительной точностью, был замечательный ученый Генри Кавендиш. Для этого он использовал крутильные весы.

Первоначально эксперимент был предложен Джоном Мичеллом. Именно он сконструировал главную деталь в экспериментальной установке — торсионный подвес, однако он умер в 1793 году, так и не поставив опыт. После его смерти экспериментальная установка перешла к Генри Кавендишу. Кавендиш модифицировал установку, провел опыты и описал их в *Philosophical Transactions* в 1798 году. Установка представляла собой деревянное коромысло с прикрепленными к ее концам свинцовыми шарами весом 159 кг каждый (крутильные весы).

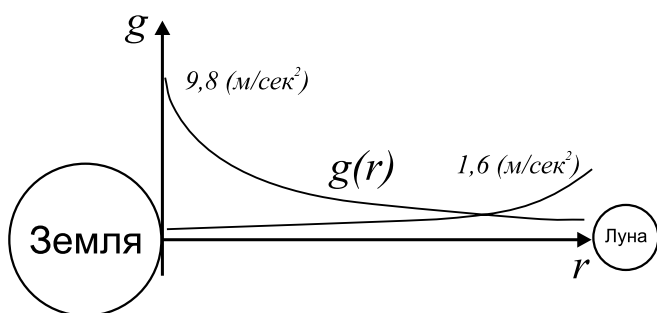


Один из последних портретов Ньютона работы Торнхилла, 1712 г.





Методами математического анализа Ньютон показал, что сферическое тело, например Луна, Солнце или планета, создает тяготение так же, как и материальная точка, которая находится в центре сферы и имеет эквивалентную ей массу (то есть как будто вся реальная масса тела сосредоточена в точке). На доказательство этого факта Ньютон потратил много времени и сил. Доказательство можно значительно упростить, если воспользоваться известной теоремой Гаусса (1777–1855) для электрического заряда, всякий раз заменяя слово «заряд» словом «масса», а слова «электрическое поле» словами «поле тяготения». Но Гаусс в то время, когда выводил свои формулы Ньютон, еще не родился.

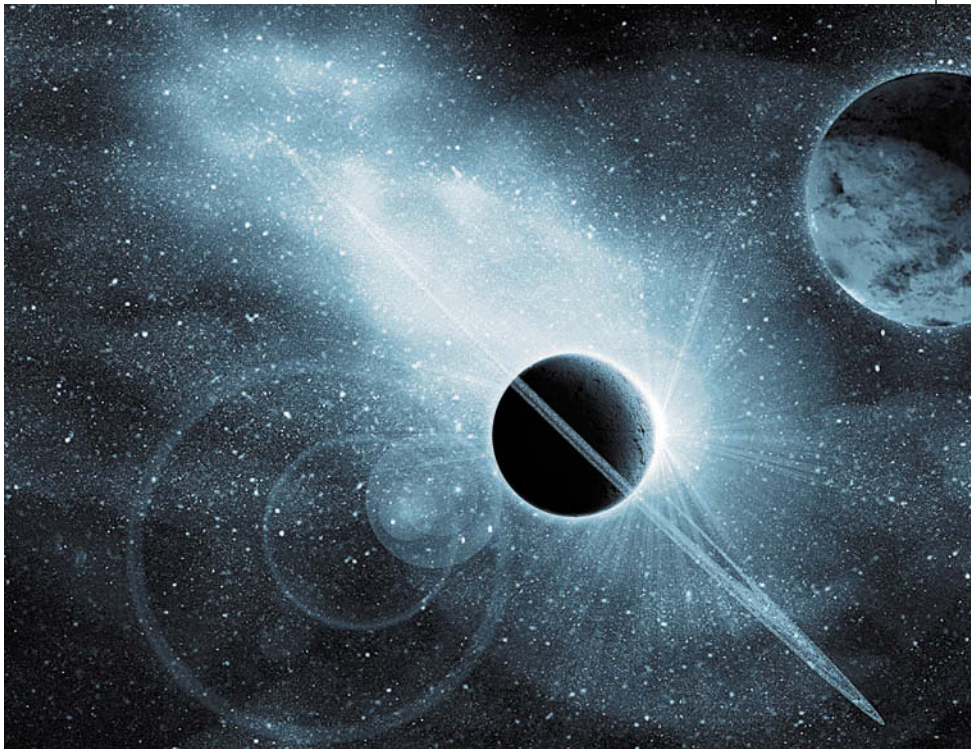


Из графика функции $g = g(r)$ наглядно видно, что напряженность гравитационного поля g стремится к нулю, когда расстояние r стремится к бесконечности

Забегая вперед, отметим, что лет через сто после работ Ньютона другой англичанин — Фарадей ввел понятие поля, окружающего магниты и электрические заряды. Это понятие оказалось для физики очень плодотворным, оно применимо и в случае тел, обладающих массой. Каждое тело (например, Земля) создает вокруг себя силовое поле — поле тяготения. В каждой точке такое поле можно характеризовать силой, действующей на некую пробную массу (m_G), в точке пространства r , окружающего массу. При этом отношение силы, действующей на пробную массу, к этой массе



**ПЕРВЫМ УЧЕНЫМ, ОПРЕДЕЛИВШИМ ПЛОТНОСТЬ
ЗЕМЛИ (А СЛЕДОВАТЕЛЬНО, И G)
С УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЙ ТОЧНОСТЬЮ,
БЫЛ ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЙ УЧЕНЫЙ
ГЕНРИ КАВЕНДИШ.**



**ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ХАРАКТЕРНО
ДЛЯ ВСЕХ МАТЕРИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ВНЕ
ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ПРИРОДЫ. ОНО ЗАКЛЮЧАЕТСЯ
ВО ВЗАИМНОМ ПРИТЯЖЕНИИ ТЕЛ
И ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ
ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ.**

называется напряженностью гравитационного поля (g) в данной точке: $g = F/m_G$. Напряженность поля представляет собой векторную величину, направление которой определяется направлением гравитационной силы F , а численное значение — формулой ускорения свободного падения. Но по своему физическому смыслу это совершенно разные физические величины. В то время как напряженность поля характеризует состояние пространства в данной точке, сила и ускорение появляются только тогда, когда в данной точке находится пробное тело.



Гравитационное взаимодействие характерно для всех материальных объектов вне зависимости от их природы. Оно заключается во взаимном притяжении тел и определяется фундаментальным законом всемирного тяготения. Гравитационным взаимодействием определяется падение тел в поле сил тяготения Земли, описывается движение планет Солнечной системы, а также других макрообъектов.

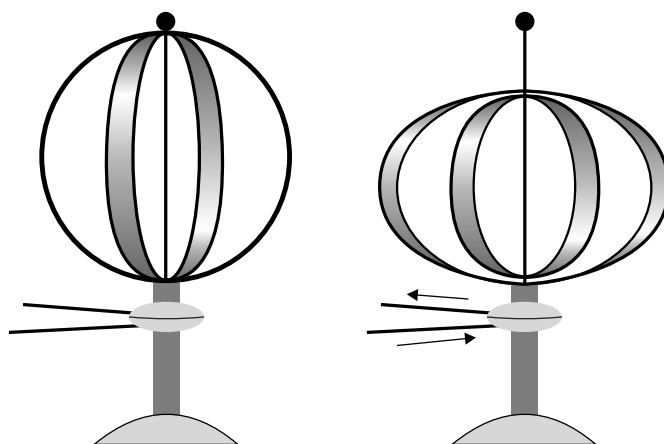
УСКОРЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ. После открытия закона всемирного тяготения сразу же возникла возможность получить результаты, обнаруженные в экспериментах и наблюдениях. Для Галилея g было просто экспериментально измеряемой константой. По Ньютону же ускорение свободного падения можно вычислить, подставив в формулу закона всемирного тяготения массу Земли M и радиус Земли R , помня при этом, что, согласно второму закону Ньютона, сила, действующая на тело, равняется его массе, умноженной на ускорение. Действительно, сила тяжести для массы m на поверхности Земли равна mg . Приравняв эту силу гравитационной, получим: $mg = GmM/R^2$. Сокращая на m , получим выражение для земного ускорения, не зависящего от массы падающего тела. Вот так на «кончике пера», получен результат, который так противоречил наблюдениям и подтвердил замечательные опыты Галилея. Эксперименты показывают, что ускорение свободного падения зависит от географической широты: чем ближе к полюсу, тем оно больше. Это объясняется действием центробежной силы. Ведь точки земной поверхности, расположенные на более высоких широтах, ближе к оси вращения и, следовательно, при приближении к полюсу расстояние от оси вращения уменьшается, доходя до нуля на полюсе. Это явление было открыто в 1672 году, когда французский астроном Жан Рише (1630–1696), находясь в экспедиции в Африке, обнаружил, что у экватора маятниковые часы идут медленнее, чем в Париже. Ньютон вскоре объяснил это тем, что период колебаний маятника обратно пропорционален квадратному корню из ускорения свободного падения, которое уменьшается на экваторе из-за действия центробежной силы. Математика начинала демонстрировать свою силу, и со временем ее сила в физике только возрастала.

Влияние центробежной силы приводит еще к одному эффекту, который легко наблюдать в таком эксперименте. Возьмите железный стержень и несколько гибких металлических полосок. Согните их, придав системе форму шара. Если нижний конец полосок закрепить на оси неподвижно, а верхнему концу оставить возможность скользить вдоль оси, то при вращении системы полоски начнут смещаться вниз и тем больше, чем выше скорость вращения. Подобное явление, предсказанное для Земли Гюйгенсом и Ньютоном в конце XVII века, было впервые обнаружено в конце 1730-х годов в результате обработки данных





Пьер Луи Моро де Мопертюи,
Робер де Турньер, 1740 г.



Опыт, доказывающий, что Земля сплюснута у полюсов.
При вращении обручей вокруг оси они сплюсчиваются,
как показано на рисунке

двух французских экспедиций, специально снаряженных для решения этой проблемы в Перу и Лапландию. Знаменитый астроном и геодезист Пьер Луи Моро де Мопертюи (1698–1759) в середине XVIII века возглавлял экспедицию в Лапландию (расположенный в Северной Европе культурный регион) для измерения по меридиану дуги в один градус. Ведь Ньютон, исходя из закона всемирного тяготения, показал, что Земля должна быть несколько сплюснута у полюсов, а значит, длина дуги меридиана в один градус должна быть различной во Франции и Лапландии. Экспедиция подтвердила и этот блестящий вывод Ньютона, а Мопертюи за свое достижение получил почетный титул «сплюснувший

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПОКАЗЫВАЮТ, ЧТО УСКОРЕНИЕ
СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ЗАВИСИТ ОТ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ
ШИРОТЫ: ЧЕМ БЛИЖЕ К ПОЛЮСУ, ТЕМ
ОНО БОЛЬШЕ.**

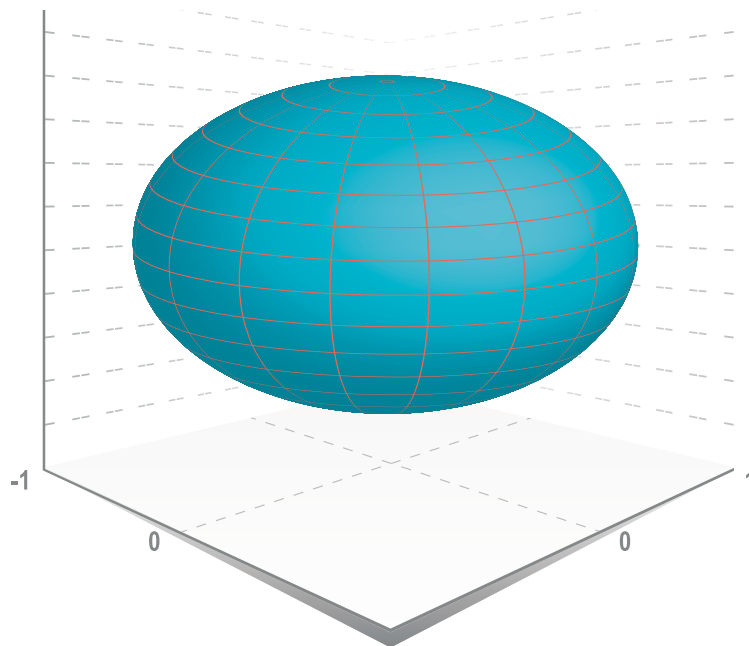


Землю». Вольтер же присвоил Мопертюи титул «сплющивателя обоих Кассини». Дело было в том, что Жан (Джованни) и Жак Кассини* возражали против выводов Ньютона из закона всемирного тяготения. Так что Мопертюи «сплющил» не только Землю, но и отца и сына Кассини. Ученого даже изобразили на специально отчеканенной медали — в меховой одежде, в одной руке держит палицу Геракла, а в другой — сплюснутую Землю.

Впрочем, вскоре, поссорившись с Мопертюи, тот же остро слов Вольтер не преминул кольнуть его язвительной эпиграммой:

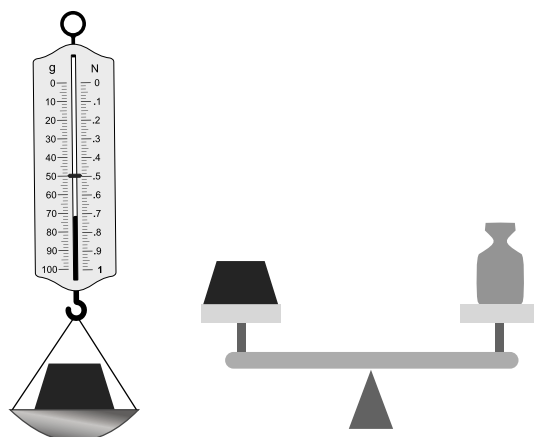
Посланец физики, отважный мореход,
Преодолев и горы, и моря,
Влача квадрант средь снега и болот,
Почти что превратившись в лопаря,
Узнал ты после множества потерь,
Что знал Ньютон, не выходя за дверь!

Земля «лишилась» идеальной сферической фигуры. В 1873 году немецкий математик и физик Иоганн Листинг предложил название для фигуры Земли — «геоид» (от «гео» — Земля и греч. Eidos — вид). Термин этот в науке прижился. Правда, отличие формы Земли от сферы весьма мало: ее полярный радиус лишь на 21 км короче экваториального. Однако такое отличие необходимо учитывать, например при расчете движения спутников.



* (Жан Кассини (1625–1712) итальянский и французский астроном, основатель астрономической династии).

СИЛА ТЯЖЕСТИ. Итак, сила тяготения существует между всеми телами. В жизни мы употребляем словосочетание «сила тяжести». Силой тяжести принято называть силу, с которой нас к себе притягивает Земля. Она существует на поверхности любой планеты или другого небесного тела. Значение силы тяжести зависит от географической широты и определяется как геометрическая сумма силы притяжения Земли и центробежной силы инерции, учитывающей эффект суточного вращения Земли. На Земле сила тяжести на полюсе и на экваторе отличаются менее чем на 0,5 %. Направление силы тяжести — вертикаль в данной точке земной поверхности. Мы также часто употребляем слова — «вес», «масса». Вес и масса — разные понятия. Вес — сила, с которой тело действует на горизонтальную опору или вертикальный подвес. Масса же, о чем мы рассказывали выше, есть мера инертности тела. Она же определяется количеством вещества, из которого состоит тело. Вес можно измерять с помощью пружинных весов, которые могут служить и для косвенного измерения массы, если их соответствующим образом проградуировать; рычажные весы в такой градуировке не нуждаются, так как в этом случае сравниваются массы, на которые действует одинаковое ускорение свободного падения (см. рисунок). Масса измеряется в килограммах, а вес — в единицах силы (ньютонах). Так как значение веса (при неизменной массе тела) пропорционально ускорению свободного падения, тогда, например, в условиях невесомости у всех тел вес равен нулю, а масса у каждого тела своя. И все же строгое различие понятий веса и массы принято в основном в физике, а во многих повседневных ситуациях слово «вес» продолжает использоваться, когда фактически речь идет о «массе». Конечно, термин «вес» уже прижился как синоним



Пружинные и рычажные весы



ЗНАЧЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ЗАВИСИТ ОТ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ШИРОТЫ И ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ КАК ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ СУММА СИЛЫ ПРИТЯЖЕНИЯ ЗЕМЛИ И ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СИЛЫ ИНЕРЦИИ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ЭФФЕКТ СУТОЧНОГО ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ.



термина «масса», но это не избавляет от необходимости понимать, что это вовсе не одно и то же. Вес тела, то есть сила, с которой тело действует на опору, и сила упругости, с которой опора действует на тело, в соответствии с третьим законом Ньютона равны по модулю и противоположны по направлению: $mg = F_y$. Это имеет место, если тело находится в покое на горизонтальной поверхности или равномерно движется и на него действует только сила тяжести. При ускоренном движении тела и опоры вес P будет отличаться от силы тяжести F_m . Рассмотрим в качестве примера движение лифта, когда его ускорение a направлено вертикально вниз. Если координатную ось Y направить вертикально вниз, то векторы P , g и a оказываются параллельными оси Y , а их проекции положительными; тогда уравнение второго закона Ньютона в нашем случае имеет вид: $P = m(g - a)$. Из приведенного соотношения следует, что вес тела, направление ускорения которого совпадает с направлением ускорения свободного падения, меньше веса покоящегося тела. Если тело вместе с опорой свободно падает, то из приведенного соотношения следует, что $P = 0$. Исчезновение веса при движении опоры с ускорением свободного падения называется невесомостью. Естественно, что масса космонавтов никуда не девается, так как помимо того, что она является мерой инертности, она же служит мерой количества вещества. Итог: без опоры и подвеса тело не имеет веса, тяжесть есть, а веса нет. Состояние невесомости наблюдается в самолете или космическом корабле при движении с ускорением свободного падения независимо от направления и значения модуля скорости их движения. При ускоренном движении тела и опоры









с ускорением, направленным вертикально вверх, вес тела оказывается больше действующей на него силы тяжести. В этом случае P и g совпадают по направлению и, следовательно, $P = m(a + g)$. Это чувствует человек, поднимающийся в лифте. Увеличение веса тела, вызванное ускоренным движением опоры или подвеса, называют перегрузкой. Действие перегрузки испытывают на себе космонавты как при взлете космической ракеты, так и на участке торможения космического корабля при входе в плотные слои атмосферы. Испытывают перегрузки и летчики при выполнении фигур высшего пилотажа, и водители автомобилей при движении с большими ускорениями.

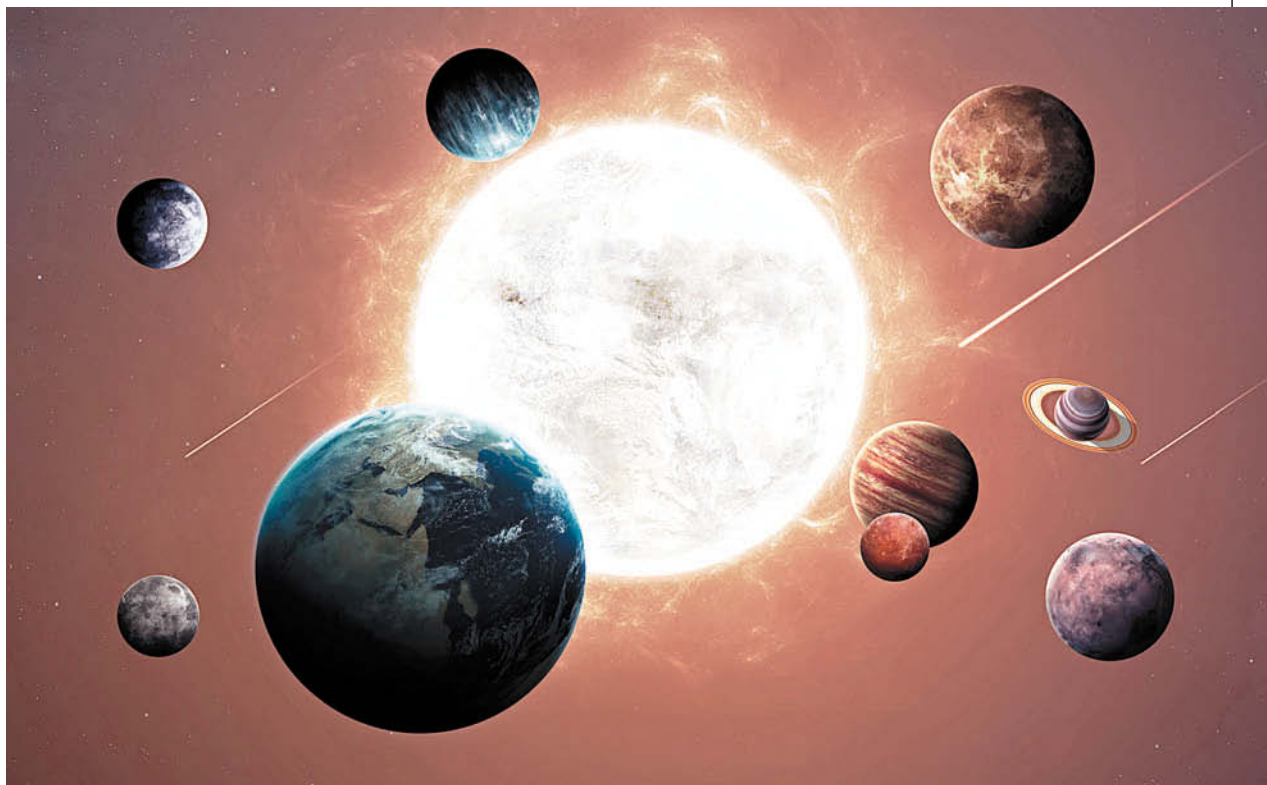
ПЕРВЫЕ ВПЕЧАТЛЯЮЩИЕ УСПЕХИ ТЕОРИИ ТЯГОТЕНИЯ НЬЮТОНА. Первым аргументом в пользу ньютоновской модели послужил строгий вывод на ее основе эмпирических законов Кеплера. Следующим шагом стала теория движения комет и Луны, изложенная в «Началах». Вскоре истинность закона подтвердилась убедительными фактами. Близкий друг Ньютона — Галлей — в 1682 году, пользуясь формулами «Начал», высчитал орбиту яркой кометы и предсказал, что она вернется в 1759 году. И комета (ей было присвоено имя Галлея) явилась в назначенный ей срок. Вездесущий Вольтер откликнулся на возвращение кометы восторженными стихами. Но еще более поразительным триумфом идей Ньютона считают открытие планеты Нептун. Астрономы того времени никак не могли втиснуть в «небесное расписание» движение Урана, хотя Ньютон разработал тонкий математический метод для вычисления планетных путей. Уран же выходил из назначенного курса. На некоторых участках своего пути вокруг Солнца он — без всяких видимых причин — то замедляет свой бег, то ускоряет движение. Раздумы-



вая над этим явлением, русский астроном А. И. Лексель (1740–1784) пришел к убеждению, что за Ураном находится еще планета, влияющая на движение Урана. Тогда же француз У. Леверье (1811–1877) и англичанин Дж. Адамс (1819–1892) пришли к аналогичному выводу. Они одновременно и независимо друг от друга вычислили, где следует искать «виновника» отклонений. В указанном месте астрономы обнаружили маленькую планету — Нептун. Так впоследствии удалось установить, что закон, полученный Ньютоном, действует и за пределами Солнечной системы, в мире далеких звезд и отдаленных галактик.



**МАССА ИЗМЕРЯЕТСЯ В КИЛОГРАММАХ,
А ВЕС – В ЕДИНИЦАХ СИЛЫ (НЬЮТОНАХ).
ТАК КАК ЗНАЧЕНИЕ ВЕСА (ПРИ НЕИЗМЕННОЙ МАССЕ
ТЕЛА) ПРОПОРЦИОНАЛЬНО УСКОРЕНИЮ СВОБОДНОГО
ПАДЕНИЯ, ТОГДА, НАПРИМЕР, В УСЛОВИЯХ
НЕВЕСОМОСТИ У ВСЕХ ТЕЛ ВЕС
РАВЕН НУЛЮ, А МАССА У КАЖДОГО
ТЕЛА СВОЯ.**



А теперь вернемся к законам Кеплера и посмотрим, как из теории тяготения Ньютона можно получить результаты, добытые с таким трудом Кеплером. Как отмечалось выше, свои законы движения планет Кеплер нашел, исследуя хаотическую груду наблюдений, независимых друг от друга, не объединенных ни общей идеей, ни единым принципом. Законы Кеплера дали вполне ясное представление о геометрическом характере планетных движений, но не объясняли физических причин, по которым планеты движутся по эллиптическим орбитам вокруг Солнца. Открытие Кеплером законов движения планет поставило перед людьми много новых вопросов, главным из которых был вопрос о причинах их движения. Что заставляет планеты двигаться? Этот вопрос занимал многие умы того времени. Под влиянием этой мысли Ньютон вслед за Кеплером сделал вывод, что сила, которая удерживает планеты на их орбитах, «исходит» от Солнца и убывает с расстоянием. Ньютон учел, что согласно закону инерции Галилея всякое движущееся тело, представленное самому себе, движется прямолинейно и равномерно, — оно только тогда изменяет скорость и направление своего движения, когда на него действует внешняя причина, определенная сила. Это указывало на то, что по отношению к движению планет следует искать не причину, производящую движение, а причину, изменяющую их прямолинейный путь в криволинейный, то есть силу, удерживающую планету на ее орбите. Поэтому Ньютон решил, что если планеты движутся не по прямым, а по кривым линиям, по эллипсам, то это должно вызываться причиной, внеш-



ним воздействием, которое «исходит» от Солнца. Что же это за причина или сила? На этот важный вопрос прежде всего и ответил Ньютон, который строго математически показал, что такой причиной является сила солнечного притяжения. Огромным достижением Ньютона была не только идея о законе, но и математический формализм. Теория Ньютона оказалась настолько могучей, что ее автора еще при жизни вознесли на пьедестал. Поэт Александр Поп (1688–1744) откликнулся таким стихотворением:

Закон природы скрыт во тьме
 Был много тысяч лет.
 «Да будет Ньютон!» — Бог сказал.
 И появился свет.

В великой системе мироустройства по Ньютону законы Кеплера становятся прямым следствием универсальных законов механики и закона всемирного тяготения.

Покажем это на примере вывода третьего закона Кеплера. Третий закон Кеплера проще вывести для круговой орбиты (большинство орбит планет весьма близки к круговым).

Запишем второй закон Ньютона для тела (планеты) массы m_I , вращающегося по круговой орбите радиуса r_I вокруг центрального тела (Солнца) массы M и удерживаемого на своей орбите гравитационной силой, описываемой законом всемирного тяготения:

$$Gm_1M/r_1^2 = m_1v_1^2/r_1.$$

Здесь в качестве ускорения планеты взято центростремительное ускорение v_l^2/r_j .

Поскольку период T_I — это время, за которое планета совершает полный оборот вокруг Солнца, скорость v_I запишем в виде $v_I = 2\pi r_I/T_I$. Подставляя выражение для v_I в соотношение, написанное выше и выполняя ряд преобразований, окончательно получим

$$T_j^2/r_j^2 = 4\pi^2/GM.$$

Аналогичный результат может быть получен для любой планеты. Так как правая часть соотношения не зависит от параметров конкретной планеты, то отсюда получим третий закон Кеплера:

$$T_1^2/T_2^2 = r_1^2/r_2^2$$

(Отметим, что вывод 2-го закона Кеплера можно посмотреть в книге Джанколи «Физика», т. 1, с. 316.)



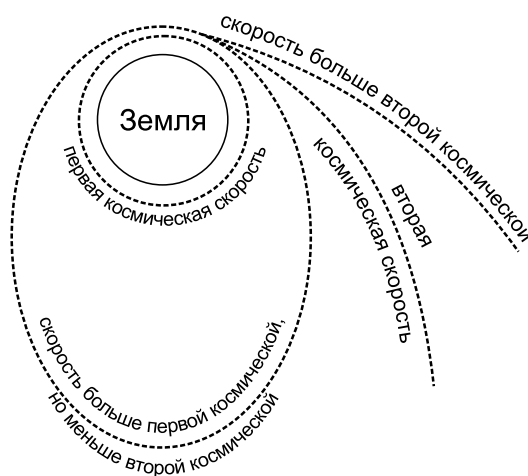
Теория Ньютона стала завоевывать не только умы ученых, но стала модной и при королевских дворах во времена «галантного века». Объяснение принципов теории дал сам вольтер!

Эта теория оказалась важной не только потому, что навела порядок на «небесах» и на Земле. Становилось ясно, что эта теория — предвестник будущих великих открытий. У всех интересующихся освоением космического пространства на слуху слова: «первая космическая скорость», «вторая...» Эти понятия и сами их величины напрямую связаны с законом всемирного тяготения.

КОСМИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ. Скорость, с которой происходит движение тела по круговой орбите под действием силы всемирного тяготения, называется *первой космической скоростью* (v_1). Если тело под действием силы тяжести движется вокруг Земли равномерно по окружности радиусом R , то ускорение свободного падения является его центростремительным ускорением: $v^2/R = g$. Отсюда первая космическая скорость равна $v_1 = \sqrt{Rg}$. Подставив в выражение значение радиуса Земли и ускорения свободного падения у ее поверхности, получим, что первая космическая скорость для Земли $v_1 \approx 7,9$ км/с. Эта скорость примерно в 8 раз больше скорости пули. Первая космическая скорость для любого небесного тела также определяется этим выражением (естественно, для своих значений радиуса и ускорения свободного падения). Если космическому аппарату сообщается скорость меньше первой космической, то он движется по траектории, которая пересекается с поверхностью земного шара, то есть аппарат падает на Землю. При начальной скорости больше 7,9 км/с, но меньше 11,2 км/с космический аппарат движется вокруг Земли по криволинейной траектории — эллипсу. Чем больше начальная скорость, тем более вытянут эллипс. При достижении некоторого значения скорости, называемого второй космической скоростью (v_2), эллипс превращается в параболу и космический корабль уходит от Земли безвозвратно. У поверхности Земли вторая космическая скорость равна 11,2 км/с. При скорости более второй космической тело движется по гиперболической траектории.



Титульный лист амстердамского издания 1738 года книги Вольтера «Элементы физики Ньютона»



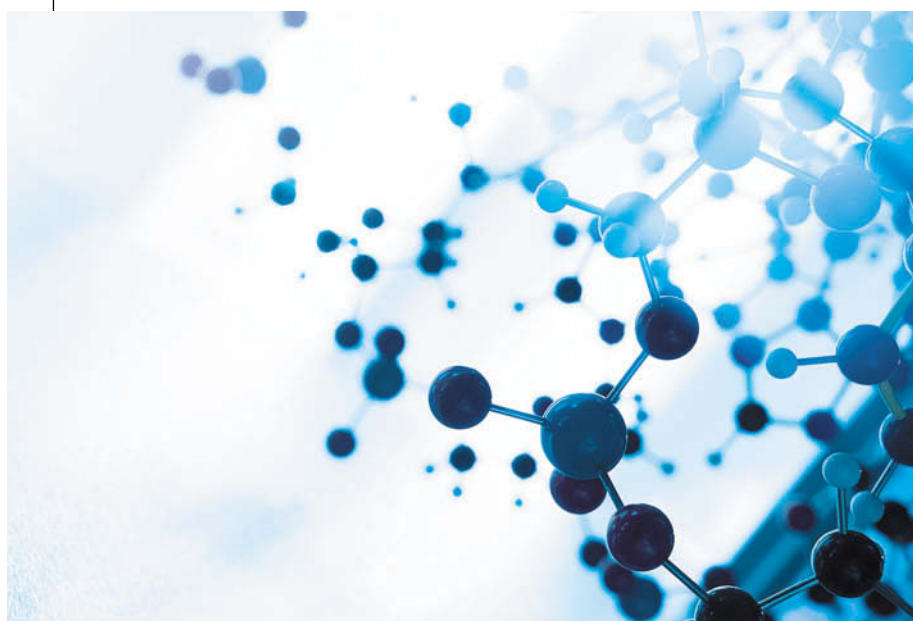
Космические скорости



МЕЖДУ ДВУХ МИРОВ. Работами Исаака Ньютона, сформулировавшего в наиболее общей форме законы механики и открывшего закон всемирного тяготения, завершилось создание фундамента классической науки. Ньютон открыл законы, управляющие движением всех тел во Вселенной. Классическая механика Ньютона превосходно объясняет весьма широкий круг явлений макроскопического масштаба. Но и для описания поведения невидимых частиц — молекул газа законы Ньютона нашли применение в молекулярно-кинетической теории Максвелла.

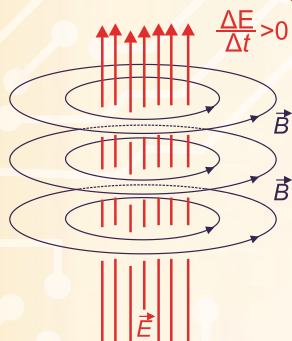
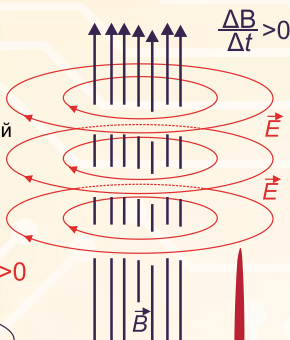
Теоретическое осмысление результатов достижений в технологической области в XVIII–XIX веках привело к выявлению коренных физических понятий (масса, энергия, импульс и т. д.) и открытию фундаментальных законов (таких, например, как закон сохранения энергии) их взаимосвязи, хорошо проверенных в экспериментах. Были установлены опытные газовые законы, предприняты первые попытки проникнуть в невидимый мир природы.

**МОЛЬ – ОДНО ИЗ ВАЖНЕЙШИХ ПОНЯТИЙ
В ХИМИИ, – ЭТО СВОЕГО РОДА ЗВЕНО
ДЛЯ ПЕРЕХОДА ИЗ МИКРОМИРА АТОМОВ
И МОЛЕКУЛ В ОБЫЧНЫЙ МАКРОМИР
ГРАММОВ И КИЛОГРАММОВ.**



МЕЖДУ ДВУХ МИРОВ: ОТ ЗАКОНОВ НЬЮТОНА К СТРОЕНИЮ АТОМА

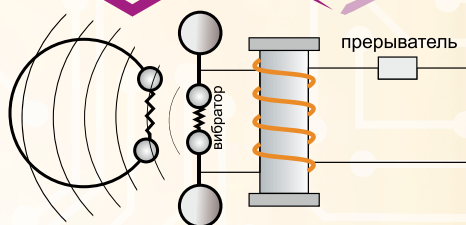
Закон электромагнитной индукции в трактовке Максвелла



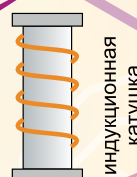
Гипотеза Максвелла.
Изменяющееся электрическое поле порождает магнитное поле, а переменное магнитное поле порождает электрическое

теория Максвелла, 1864 год

опыт Герца, 1887 год



резонатор

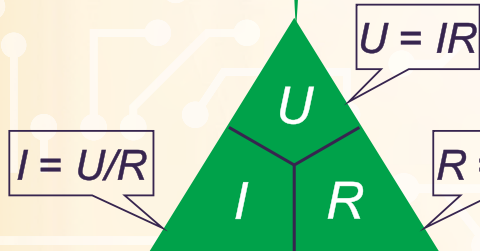


индукционная катушка

прерыватель

вибратор

закон Ома, 1826 год



$$U = IR$$

$$I = U/R$$

$$R = U/I$$

Моль — определяется как количество вещества, которое содержит столько атомов или молекул, сколько их содержится в 0,012 кг углерода

Обозначается N_A

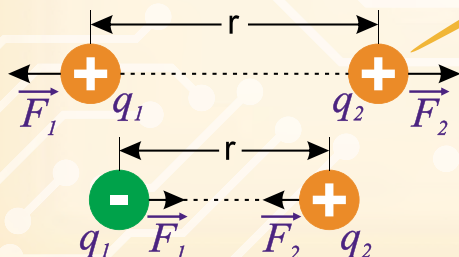
число Авогадро, 1811 год

Имеет числовое значение $6,02 \cdot 10^{23}$

Измеряется в моль⁻¹

закон Кулона, 1785 год

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$



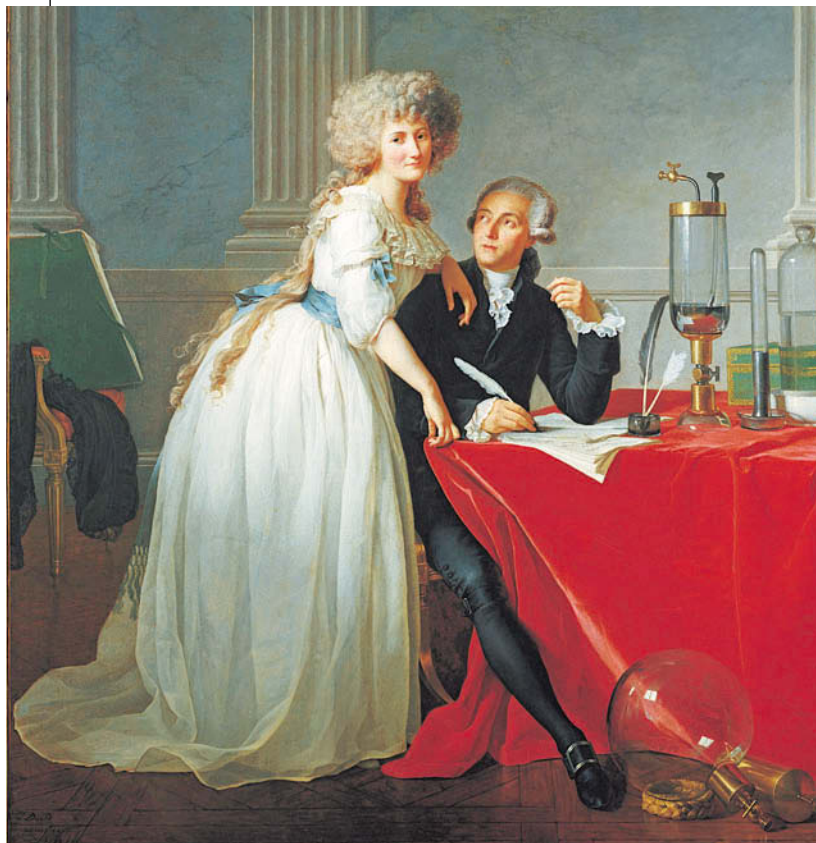
r — расстояние между точечными зарядами (м)
 k — коэффициент пропорциональности, $9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$
 q — электрический заряд (Кл)
 F — модуль силы электростатического взаимодействия (Н)



Амедео Авогадро (1776–1856)

К середине XIX века представление о молекулах и атомах все шире внедрялось в умы ученых. Физика выходила за пределы доступных человеку непосредственных восприятий. Этому предшествовали открытия, сделанные ранее. Огромное значение для развития молекулярной гипотезы строения вещества имел открытый еще в 1811 году Амедео Авогадро (1776–1856) закон, названный его именем.

Французский химик Антуан-Лоран Лавуазье (1743–1794) подметил, что для того, чтобы кислород, соединяясь с водородом, образовал воду, необходимо взять на один его объем двойной объем водорода. В дальнейшем Гей-Люссак нашел, «что, соединения газообразных тел друг с другом всегда происходят в очень простых

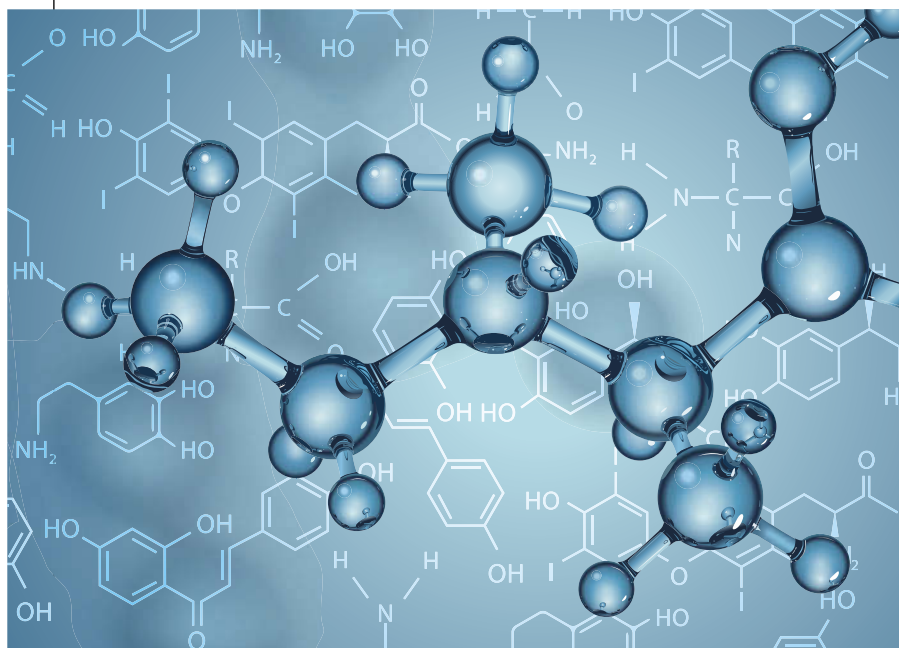


Портрет Антуан-Лорана и Мари-Анн Лавуазье — Жан Луи Давид

отношениях, так что с одним объемом одного газа соединяется 1, 2 и, самое большое, 3 объема другого». В 1808 году Гей-Люссак (совместно с немецким естествоиспытателем Александром Гумбольдтом) сформулировал так называемый закон объемных отношений, согласно которому соотношение между объемами реагирующих газов выражается простыми целыми числами: например, 1 объем хлора соединяется с 1 объемом водорода, давая 2 объема хлороводорода и т. д. Этот закон в то время мало что давал ученым, поскольку не было единого мнения о том, из чего состоят частицы разных газов. Не существовало и четкого различия между такими понятиями, как атом, молекула, корпускула. В 1811 году Авогадро, тщательно проанализировав результаты экспериментов Гей-Люссака и других ученых, пришел к выводу, что закон объемных отношений позволяет понять, как же «устроены» молекулы газов.



«Первая гипотеза, — писал он, — которая возникает в связи с этим и которая представляется единственно приемлемой, состоит в предположении, что число составных молекул любого газа всегда одно и то же в одном и том же объеме...» А «составные молекулы» (сейчас мы их называем просто молекулами), по мысли Авогадро, состоят из более мелких частиц — атомов. Тремя годами позже Авогадро изложил свою гипотезу еще более четко и сформулировал ее в виде закона, который носит его имя: *Равные*



**МОЛЬ – ЭТО МАССА ВЕЩЕСТВА, ВЫРАЖЕННАЯ
В ГРАММАХ, ЧИСЛО КОТОРЫХ РАВНО
ЕГО МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЕ.**

объемы газообразных веществ при одинаковом давлении и температуре содержат одно и то же число молекул, так что плотность различных газов служит мерой массы их молекул... Это добавление было очень важным: оно означало, что можно, измеряя плотность разных газов, определять относительные массы молекул, из которых эти газы состоят. Действительно, если в 1 л водорода содержится столько же молекул, что и в 1 л кислорода, то отношение плотностей этих газов равно отношению масс молекул. Во времена Авогадро его гипотезу невозможно было доказать теоретически. Но эта гипотеза давала простую возможность экспериментально устанавливать состав молекул газообразных соединений и определять их относительную массу.

Если следовать современной терминологии, то химия оперирует в Международной системе единиц (СИ) понятием моля. Моль — одно из важнейших понятий в химии, — это своего рода звено для перехода из микромира атомов и молекул в обычный макромир граммов и килограммов. Латинское слово *moles* означает массу, а суффикс «куля» (*-cula*) имеет уменьшительное значение, т. е. слово молекула можно перевести

как «маленькая масса». Этот термин первоначально использовался для обозначения любой небольшой частички материи.

Моль — это масса вещества, выраженная в граммах, число которых равно его молекулярной массе. Например, 1 моль воды — это 18 г воды, так как ее молекулярная масса равна 18. Химикам удобнее оперировать в силу закона действующих масс именно молями, так как вещества реагируют между собой в количествах, пропорциональных молям.

При этом молярный объем — объем одного моля вещества, величина, получающаяся от деления молярной массы на плотность.

Так как моль любого вещества содержит вполне определенное, постоянное для всех веществ количество молекул, то, как следствие из закона Авогадро, один моль любого газа (точнее, идеального газа, см. далее) при одинаковых условиях занимает одинаковый объем, равный при нормальных условиях 22,4 л. Например, экспериментально установлено, что масса 1 л кислорода при нормальных условиях равна 1,43 г. Следовательно, объем, занимаемый при тех же условиях одним молем кислорода (32 г), составит $32 : 1,43 = 22,4$ литра.

Сам Авогадро не делал оценок числа молекул в заданном объеме, но понимал, что это очень большая величина. К середине XIX века значение числа Авогадро, определенное из измерений коэффициента диффузии и вязкости газов, оценивалось как $5 \cdot 10^{22}$ моль⁻¹. С тех пор было разработано большое число независимых методов определения числа Авогадро. Превосходное совпадение полученных значений является убедительным свидетельством реального существования молекул. Современные данные ($6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹) были получены лишь в начале прошлого века.

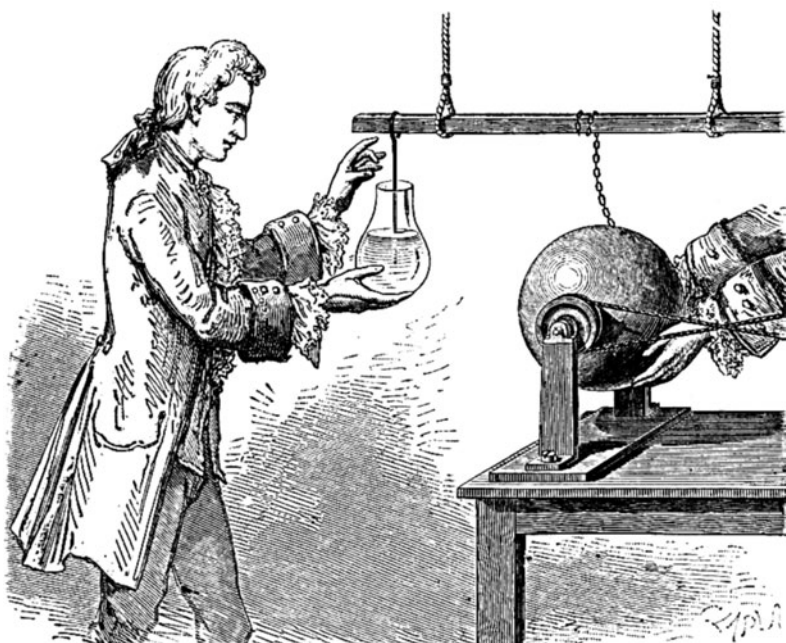
После того, как гипотеза Авогадро стала общепризнанной, ученые получили возможность не только правильно определять состав молекул газообразных соединений, но и рассчитывать атомные и молекулярные массы.

В 1865 году австрийский физик Иоганн Йозеф Лошмидт (1821–1895) определил число молекул в 1 см³ газа при нормальных условиях (нормальные условия: температура 0°C и давление 1 атм. (или 760 мм рт. ст.)).

Оно получило название постоянная (или число) Лошмидта. Обозначается постоянная Лошмидта N_L или $n_0 \cdot N_L = N_A / V_m \approx 2,69 \cdot 10^{25} / \text{м}^3$. Здесь V_m — молярный объем идеального газа при нормальных условиях, равный 22,4 дм³, N_A — число Авогадро. Как видно, число Лошмидта легко переводится в более привычное число Авогадро.



КАКОЙ ВЕЛИЧИНЫ МОЛЕКУЛА? Интригующий вопрос о размерах молекул пытался разрешить опытным путем Джон Уильям Стретт (лорд Рэлей) (1842–1919). Он произвел следующий опыт. На поверхность воды поместили каплю масла. В его опытах использовалась капля оливкового масла, растекавшаяся по поверхности воды. Масло стало рас-



Опыт в Лейдене

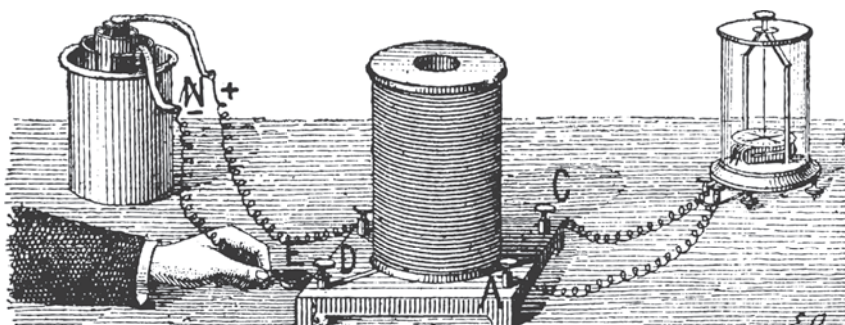
текаться, образуя пленку. По мере растекания масла пленка становилась все тоньше и тоньше. Через некоторое время растекание прекратилось. Растекание продолжается до тех пор, пока поверхность воды не останется покрытой всего лишь одним слоем молекул масла. В этом случае линейный размер молекул можно оценить как отношение объема исходной капли V к предельной площади масляной пленки S . Рэлей предположил, что это произошло, когда все молекулы масла образовали мономолекулярный слой, то есть пленку толщиной в одну молекулу. Здесь, конечно, неявно использовано предположение о том, что каждая молекула в жидкости занимает определенный удельный объем, равный V/N (N — число молекул), не зависящий от формы, которую приняла жидкость. Разделив объем капли на площадь образовавшегося пятна, физик нашел диаметр одной молекулы масла $d \sim 1,6 \cdot 10^{-7}$ см.

Можно оценить размер молекулы, используя число Авогадро. Так как один моль идеального газа при нормальных условиях занимает объем 22,4 л, а число Авогадро — это полное число молекул в одном моле вещества или в 22,4 л газа при нормальных условиях. Например, поскольку масса 22,4 л газообразного H_2 составляет $2,016 \cdot 10^{-3}$ кг, масса одного атома водорода равна $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Если считать, что в твердом теле атомы расположены вплотную друг к другу, то число Авогадро позволит приблизительно оценить радиус r , скажем, атомов алюминия. Для алюминия 1 моль равен 0,027 кг, а плотность — $2,7 \cdot 10^3$ кг/м³. Откуда имеем для радиуса атома алюминия $r \sim 1,6 \cdot 10^{-10}$ м. Так первые оценки показали, что размеры атомов порядка 10^{-8} см, а их масса порядка от 10^{-24} до 10^{-22} г. Физики и химики начали оперировать с дотоле непредставимыми размерами!

В рассматриваемое время было совершено множество важных открытий в различных областях физики. Открыты законы Кулона, Ома. Явления интерференции, дифракции

и поляризации света получили волновое истолкование. Установлены законы поглощения и рассеивания света. Можно было бы назвать и другие не менее важные достижения, однако особое место занимает электромагнитная теория, разработанная Джеймсом Клерком Максвеллом. В первой половине XVIII века единственным источником электричества служила электризация трением. Перелом наступил в 1745 году, когда был изобретен более мощный источник электричества — лейденская банка. Итальянский физик Алессандро Вольта сконструировал в 1800 году мощный источник постоянного тока — «вольтов столб», первую электрическую батарею. С его помощью были сделаны решающие открытия электромагнитных свойств в следующем, XIX веке.

Главные события начались в 1820 году, когда Эрстед обнаружил на опыте отклоняющее действие тока на магнитную стрелку. Сообщение Эрстеда вызвало всеобщий взрыв интереса. Уже через два месяца Ампер сообщил об открытом им явлении взаимодействия двух проводников с током. Майкл Фарадей в 1831 году открыл явление электромагнитной индукции, тем самым доказав, что связь электричества и магнетизма взаимна. Опыты Фарадея по электромагнитной индукции отчетливо показали, что электродвижущая сила индукции (ЭДС индукции) пропорциональна скорости изменения магнитного поля. Фарадей также пришел к фундаментальному выводу в сформулированной им идее магнитного поля. По мнению Альберта Эйнштейна, идея поля была самой оригинальной идеей Фарадея и самым важным открытием со времен Ньютона: «Надо иметь могучий дар научного предвидения, — писал Эйнштейн, — чтобы распознать в описании электрических явлений не заряды и частицы..., а скорее пространство между зарядами и частицами».



**СОГЛАСНО ЗАКОНУ ФАРАДЕЯ ПЕРЕМЕННЫЕ
МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПОРОЖДАЮТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ПОЛЯ. НО НЕ БЫЛО ИЗВЕСТНО, ПОРОЖДАЮТ
ЛИ ПЕРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ПОЛЯ — МАГНИТНЫЕ.**



Генрих Рудольф Герц (1857–1894)

Согласно закону Фарадея переменные магнитные поля порождают электрические поля. Но не было известно, порождают ли переменные электрические поля — магнитные. Избавиться от противоречия и восстановить симметрию электрического и магнитного полей Максвеллу удалось путем введения источника магнитного поля, который можно было представить как некий воображаемый электрический ток. Идея Максвелла заключалась в том, что изменяющееся во времени электрическое поле с определенной точки зрения можно рассматривать как электрический ток, и этот ток способен возбуждать в окружающем пространстве магнитное поле. Максвелл допустил, что такого рода процесс реально происходит в природе. Переменное электрическое поле в пустоте или внутри диэлектрика было названо им током смещения. «Током» названо потому, что это поле порождает магнитное поле точно так же, как и обычный ток.

Часть физиков выступила против теории Максвелла (особенно много возражений вызвала концепция тока смещения).

Международное научное мнение изменилось в результате опытов Генриха Герца, который через 20 лет в серии экспериментов продемонстрировал генерацию и прием электромагнитных волн. Герц поставил перед собой широкую задачу: он хотел выяснить, существуют ли в действительности электромагнитные волны, предсказанные теорией Максвелла. Проведя многочисленные опыты при различных взаимных положениях генератора и приемника, Герц приходит к выводу о существовании электромагнитных волн, распространяющихся с конечной скоростью. Будут ли они вести себя как свет? Герц проводит тщательную проверку этого предположения. В конечном итоге ему удалось произвести и показать на прямолинейных проводах и в свободном пространстве постоянные электрические волны. Эти нередко крохотные искорки, которые он должен был с лупой отыскивать в затемненной аудитории, убедительно показывали узлы и выпуклости электрических волн. Герц так объяснял свои наблюдения: «Волнообразно распространяющееся индукционное действие отражается от стен, причем отраженные волны в некоторых местах усиливают падающие, в других — ослабляют, в результате чего, благодаря интерференции обеих волн, в воздухе образуются стоячие волны». «Я считаю, — писал Герц Гельмгольцу в марте 1888 года, — что волновую природу звука в свободном пространстве нельзя представить так же ясно и наглядно, как волновую природу электродинамического распространения».

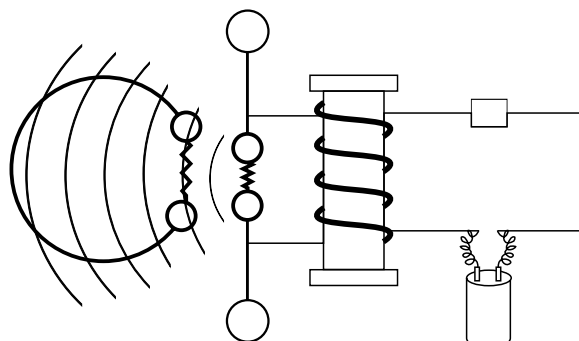


Схема опыта Герца (Герц придумал простейший резонатор — проволочное незамкнутое кольцо или прямоугольную незамкнутую рамку с такими же, как у «передатчика», латунными шариками на концах и регулируемым искровым промежутком)

Несмотря на использование электрического тока, о природе электричества было известно немного. И именно здесь, в исследовании микроскопических явлений при прохождении тока через вещество, физиков ожидали удивительные открытия, имевшие далеко идущие последствия. Исследование прохождения тока через газы в новом свете представило старую идею о строении атома.

К концу XIX столетия набралось много доказательств того, что атомы имеют более или менее сложное строение. К ним относятся результаты исследования электролиза, открытие электрона, наличие химического сродства — все они имели под собой какую-то глубокую основу. Настоящий прорыв в изучении атомов пришел со стороны изучения электрических явлений в газах.

На протяжении всей второй половины XIX века физики активно изучали феномен так называемых катодных лучей. К концу 1880-х годов дискуссия о природе катодных лучей приняла острый полемический характер.

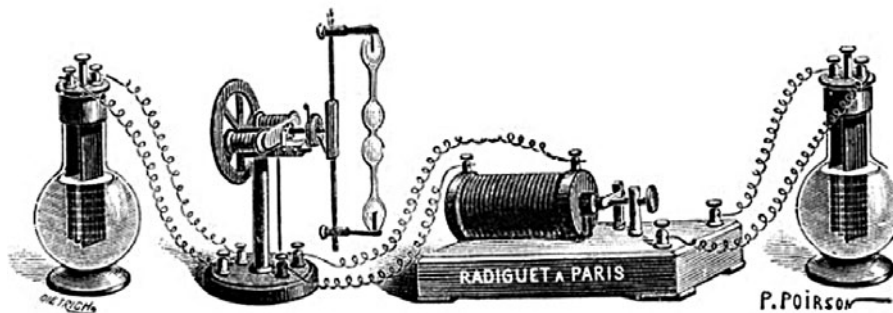
7. *Электрические явления в газах: катодные лучи. Элементарный электрический заряд. опыты Фарадея. Открытие электрона. опыты Дж. Дж. Томсона. Открытие рентгеновских лучей. Радиоактивность. Первые модели атома. опыты Резерфорда. Планетарная модель атома.*



Юлиус Плюккер (1801–1868)

Примерно в середине XIX века Юлиус Плюккер (1801–1868), математик, работавший в области аналитической геометрии, неожиданно начинает с увлечением заниматься опытной физикой. Именно Плюккеру мы обязаны зрелищем игры цвета световых реклам. Это он изобрел в 1858 году светящиеся трубки, которые называли гейслеровыми, по имени знаменитого стеклодува Генриха Гейслера, который был техническим ассистентом Плюккера и научился особенно искусно их изготавливать.

Гейслеровы трубки — стеклянные трубки разнообразной формы, содержащие разреженные газы и служащие для изучения световых явлений, сопровождающих электрические разряды в разре-





женных средах. В противоположные концы трубок впаяны короткие платиновые проволоки, между внутренними концами которых и происходит разряд; наружные концы соединяются обычно с индукционной катушкой. Трубки бывают расширенные по концам и волосные посредине или имеют несколько широких и узких частей, перемежающихся между собой или же широких по всей длине, смотря по назначению.

Затем, полвека спустя, их повсеместно называли трубками Крукса. Но не этим интересен Плюккер для физики. Плюккеру принадлежит открытие лучей, названных в дальнейшем катодными. Эти лучи исследователь обнаружил по зеленоватому свечению стекла части трубки, расположенной напротив катода (электрод некоторого прибора, присоединенный к отрицательному полюсу источника тока). На самом деле Плюккер только заметил это свечение и обнаружил, что светящаяся область перемещается под влиянием магнитного поля. Дальнейшие успехи в исследовании обнаруженного свечения принадлежат Иоганну Вильгельму Гитторфу (1824–1914). Он в 1869 году, получив в разрядной трубке вакуум со степенью разрежения ниже одного миллиметра, заметил, что темное катодное пространство быстро распространяется по всей поверхности трубки,





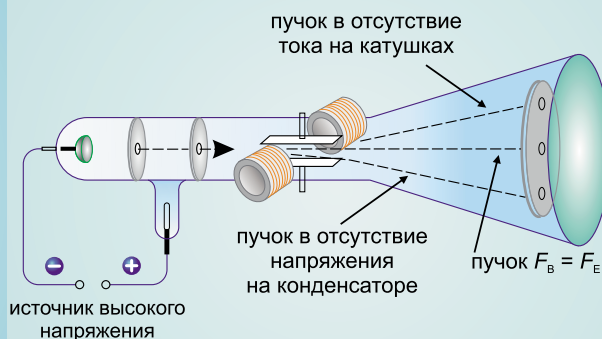
ЗАРЯД ЭЛЕКТРОНА

Трубка Крукса



- 1 Катод $-$
- 2 Анод $+$
- 3 Металлический предмет
- 4 Тень от предмета

Опыт Томсона: определение отношения заряда электрона к массе (e/m)

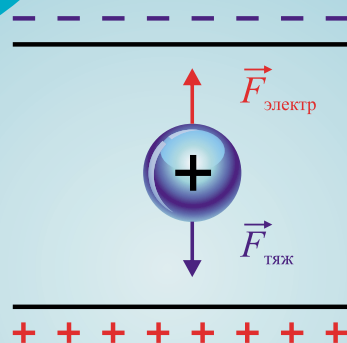
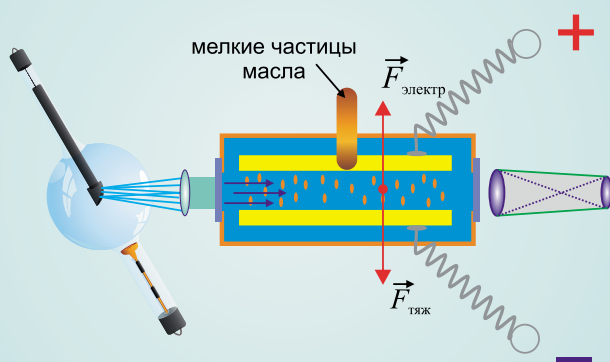


ЭЛЕКТРОН



частица, имеющая
наименьший
электрический
заряд

Опыт Милликена

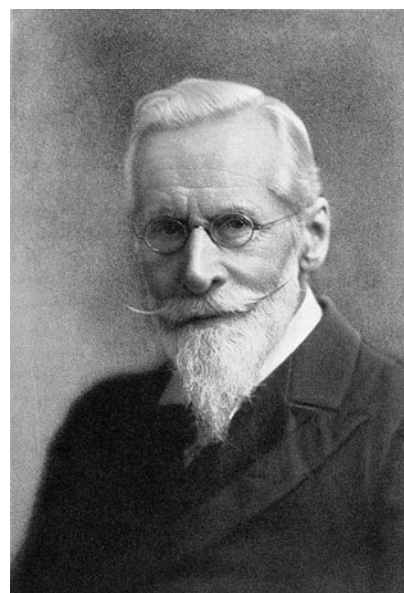


$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

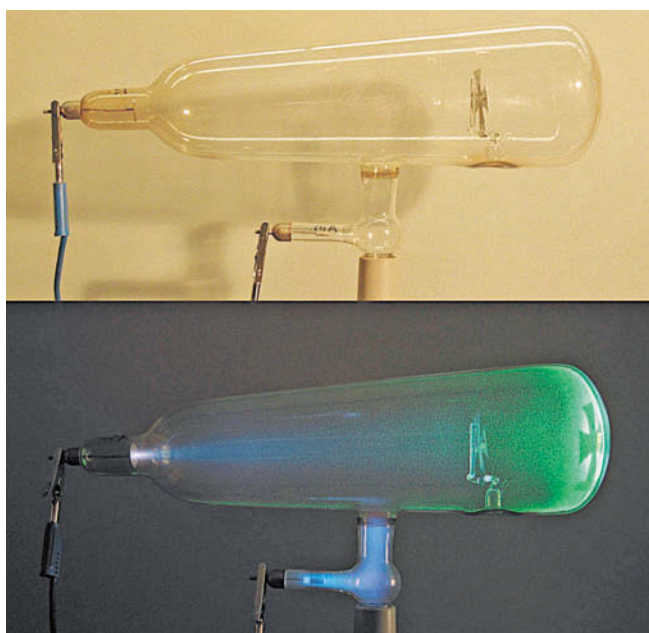
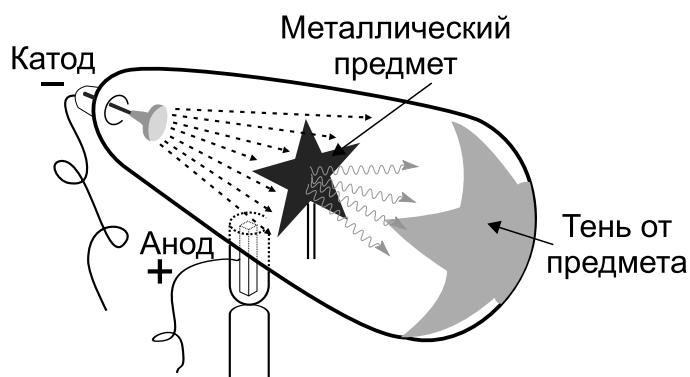
Элементарный
электрический заряд



вследствие чего стенки трубки начинают сильно флуоресцировать (светиться). Он также подметил, что свечения трубки смещаются под действием магнита. От катода к противоположному торцу трубки как будто шли какие-то лучи. Гитторф в 1876 году дал название открытому явлению — *катодные лучи* (возможно, название принадлежит ученику Плюккера Евгению (Ойгену) Гольдштейну (1850–1930)). Природа катодных лучей вызвала много споров. Английский физик и химик Уильям Крукс (1832–1919) с помощью усовершенствованного вакуумного насоса достиг еще большего разрежения и обнаружил, что свечение исчезло, а стенки стеклянной трубки флуоресцируют зеленоватым светом. Крукс показал, что лучи испускает отрицательный электрод — катод (помещенный внутри трубки крестообразный предмет отбрасывал тень на противоположную стенку) и что лучи состоят из некоторой субстанции и несут отрицательный электрический заряд (ударяясь о лопасти легкого



Уильям Крукс (1832–1919)



колесика, лучи приводили его во вращение, а пучок лучей отклонялся магнитом в сторону, соответствующую отрицательному заряду).

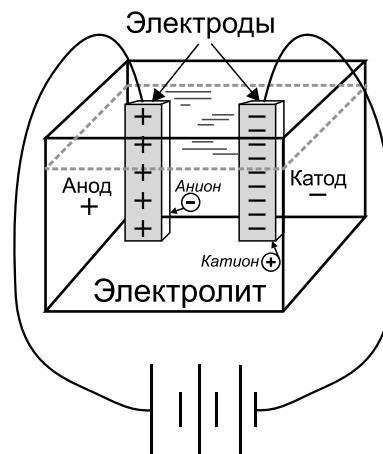
В 1878 году Крукс высказал гипотезу о том, что флуоресценцию вызывают лучи, когда ударяются о стеклянные стенки. Превосходный экспериментатор, он сконструировал несколько типов разрядных трубок. Это в значительной степени способствовало дальнейшему изучению свойств катодных лучей. Крукс ошибочно полагал, что наблюдаемые лучи могут быть «потокм молекул» и даже предпочитал говорить о них как о «четвертом состоянии вещества». Несмотря на ошибочность таких взглядов, исследования Крукса послужили основой для всей последующей работы по изучению плазмы.

Подавляющее большинство видных ученых немецкой школы придерживалось мнения, что катодные лучи представляют собой, подобно свету, волновые возмущения невидимого эфира. В Англии же придерживались мнения, что катодные лучи состоят из ионизированных молекул или атомов самого газа. У каждой из сторон имелись веские доказательства в пользу своей гипотезы. Сторонники молекулярной гипотезы справедливо указывали на тот факт, что катодные лучи отклоняются под воздействием магнитного поля, в то время как на световые лучи магнитное поле никак не воздействует. Следовательно, они состоят из заряженных частиц. С другой стороны, сторонники корпускулярной гипотезы никак не могли объяснить ряда явлений, в частности, обнаруженного в 1892 году эффекта практически беспрепятственного прохождения катодных лучей через тонкую алюминиевую фольгу. Наконец, в 1897 году молодой английский физик Дж. Дж. Томсон положил конец этим спорам раз и навсегда, а заодно прославился в веках как первооткрыватель электрона. Но здесь нам придется вернуться немного назад во времени.

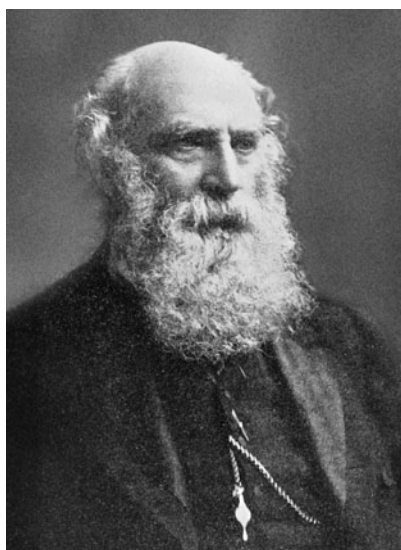
ГИПОТЕЗА О СУЩЕСТВОВАНИИ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА.

Еще на заре изучения электрических явлений ученые заметили, что ток могут проводить не только металлы, но и растворы. Но не всякие. Так, водные растворы поваренной соли и других солей, растворы сильных кислот и щелочей хорошо проводят ток. Растворы уксусной кислоты, углекислого и сернистого газа проводят его намного хуже. А вот растворы спирта, сахара и большинства других органических соединений вовсе не проводят электрический ток. Майкл Фарадей в 30-е годы XIX века, изучая закономерности прохождения электрического тока через растворы, ввел термины «электролит», «электролиз», «ион», «катион», «анион». Электролит — вещество, раствор которого проводит электрический ток. Происходит это в результате движения в растворе заряженных частиц — ионов.

Опыты Фарадея показали, что для разных электролитов электрохимический эквивалент k вещества — количества вещества, которое должно выделиться на электроде при прохождении через электролит единицы количества электричества, — оказывается различным,



Электролитический процесс
Фарадей объяснял с помощью
следующей схемы



Джордж Джонстон Стони
(1826–1911)

но, чтобы выделить на электроде один моль любого одновалентного вещества, требуется пропустить один и тот же заряд F , равный примерно $9,6 \cdot 10^4$ Кл. Более точное значение этой величины, называемой постоянной Фарадея, равно $F = 96485$ Кл·моль⁻¹. Если 1 моль ионов при пропускании электрического тока через раствор электролита переносит электрический заряд, равный постоянной Фарадея F , то на долю каждого иона приходится электрический заряд, равный $e = F/N_A = 96000$ Кл·моль⁻¹/ $6 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ $\approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

На основании такого расчета ирландский физик Дж. Стоней (иногда пишут Стони) (1826–1911) высказал предположение о существовании внутри атомов элементарных электрических зарядов. В 1874 году на заседании Британской ассоциации он обратил внимание на существование в природе трех «естественных единиц»: скорости света, постоянной тяготения и заряда «электрического атома». По поводу этой последней единицы Стоней сказал: «наконец природа одарила нас в явлениях электролиза вполне определенным количеством электричества, не зависимым от тел, с которыми оно связано».

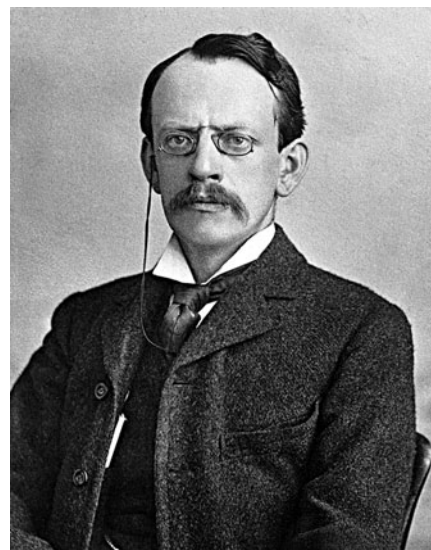


Стоней дал оценку этого заряда, разделив количество электричества, выделяемого при разложении кубического сантиметра водорода, на число его атомов по тогдашним данным, и получил значение порядка 10 в минус двадцатой степени электромагнитных единиц (в настоящее время величина заряда электрона принимается равной $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Этот электрический атом Стоней в 1891 году предложил назвать «электроном».

Еще в годы работы с электролитами (в 1834 году) Фарадей сделал первый шаг к абсолютным измерениям. В седьмой серии «Экспериментальных исследований по электричеству» он описывает «новый прибор для измерения гальванического электричества». Он называет его вольт-электрометром (название это сохранилось до наших дней в сокращении — вольтметр). Это стеклянная трубка с электродами, наполненная подкисленной водой. При прохождении тока на электродах выделяются водород и кислород. Множеством опытов Фарадей установил, что «одно и то же количество электричества во всех растворах разлагает в точности одно и то же количество воды». Отсюда идея абсолютных измерений: заряд, прошедший по цепи, определяется массой выделившихся газов. Прибор легко проградуйровать. Фарадей предложил абсолютную единицу измерения — «градус электричества». Это количество электричества, при прохождении которого через вольтметр выделяется $0,164 \text{ см}^3$ водорода (это около $0,7$ Кл). Интересна причина введения термина: «Я, не колеблясь, ввел термин градус по аналогии с применением его по отношению к другому, весьма важному невесомому агенту, а именно — к теплу; и подобно тому как там использовано определение расширения воздуха, воды, ртути, т. п. для измерения тепла, так и здесь столь же деление газов служит для той же цели в отношении электричества».

Установление закона электролиза еще не доказало строго, что в природе существуют элементарные электрические заряды. Можно, например, предположить, что все одновалентные ионы имеют различные электрические заряды, но их среднее значение равно элементарному заряду e . На огромную важность понимания природы электрона указывал



Уильям Томсон (1824–1907)

**«НАКОНЕЦ ПРИРОДА ОДАРИЛА НАС В ЯВЛЕНИЯХ
ЭЛЕКТРОЛИЗА ВПОЛНЕ ОПРЕДЕЛЕННЫМ
КОЛИЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА,
НЕ ЗАВИСИМЫМ ОТ ТЕЛ,
С КОТОРЫМИ ОНО СВЯЗАНО».**



Уильям Томсон: «Скажите мне, что такое электричество, и я объясню Вам все остальное». Для того чтобы выяснить, существует ли в природе элементарный заряд, необходимо было измерить не суммарное количество электричества, переносимое большим числом ионов, а заряды отдельных ионов. Неясным был и вопрос о том, обязательно ли заряд связан с частицами вещества и, если связан, то с какими именно.

ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА. Электрон своим открытием обязан исследованию катодных лучей. Простейший аппарат, в котором они наблюдались, представлял собой герметичную стеклянную трубку, заполненную разреженным газом, в которую с двух сторон было впаено по электроду: с одной стороны катод, подключающийся к отрицательному полюсу электрической батареи; с другой — анод, подключающийся к положительному полюсу. В 1895 году французский физик Жан Перрен экспериментально доказал: заряд катодных лучей отрицателен, они движутся прямолинейно, но могут отклоняться магнитным полем. С 1895 года Джозеф Джон Томсон (1856–1940) в Кавендишской лаборатории начинает методическое количественное изучение отклонения катодных лучей в электрических и магнитных полях. 29 апреля 1897 года он сделал свое знаменитое сообщение на заседании Лондонского королевского общества. Итоги своей работы были опубликованы им в октябре того же года в октябрьском номере журнала *Philosophical Magazine*. Опыт Томсона заключался в изучении пучков катодных лучей, проходящих через систему параллельных металлических пластин, создававших электрическое поле, и систем катушек, создававших магнитное поле. В своем опыте Томсон использовал усовершенствованную катодно-лучевую трубку, конструкция которой была дополнена электрическими катушками, создававшими (согласно закону Ампера) внутри трубки магнитное поле, и набором параллельных электрических конденсаторных пластин, создававших внутри трубки электрическое поле (см. рисунок).

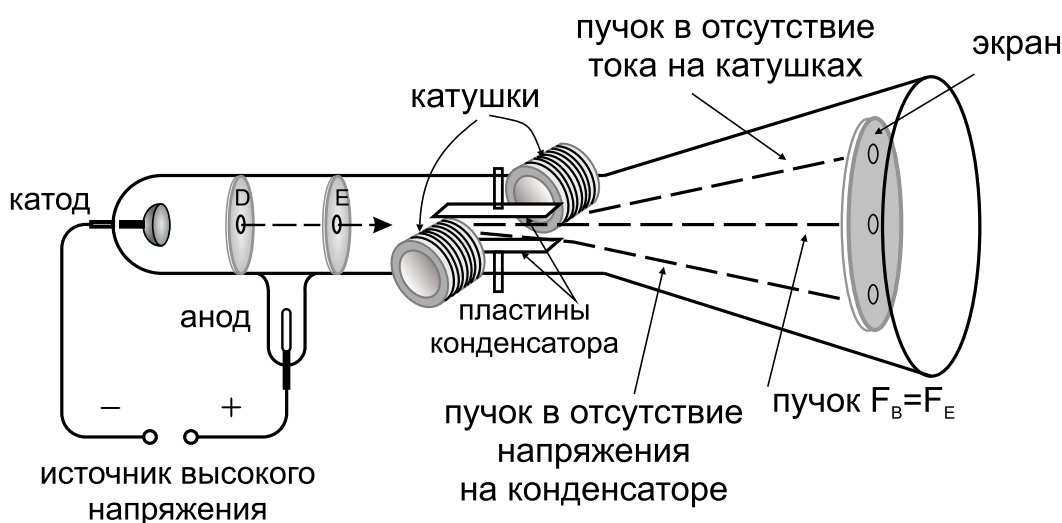
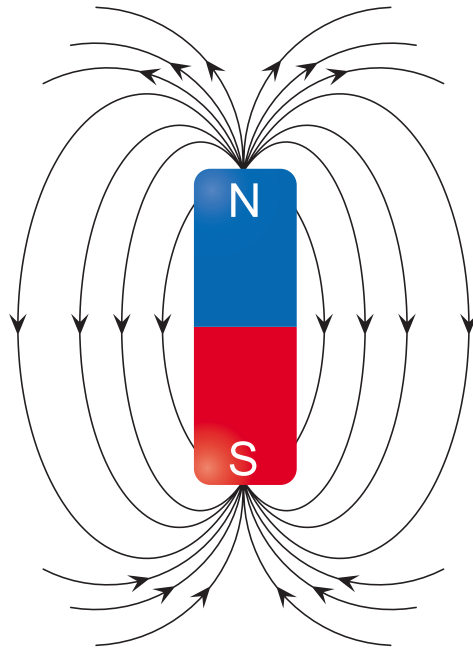


Схема экспериментальной установки



Благодаря этому появилась возможность исследовать поведение катодных лучей под воздействием и магнитного, и электрического полей. Эти лучи отклонялись при действии отдельно обоих полей, а при определенном соотношении между ними пучки не изменяли прямой траектории. Это соотношение полей зависело от скорости частиц. Проведя ряд измерений, Томсон выяснил, что скорость движения частиц гораздо ниже скорости света — таким образом, было показано, что частицы должны обладать массой. Томсон измерил удельный заряд e/m (т. е. отношение заряда к массе) катодно-лучевых частиц — «корпускул», как он их называл, по отклонению катодных лучей в электрическом и магнитном полях.

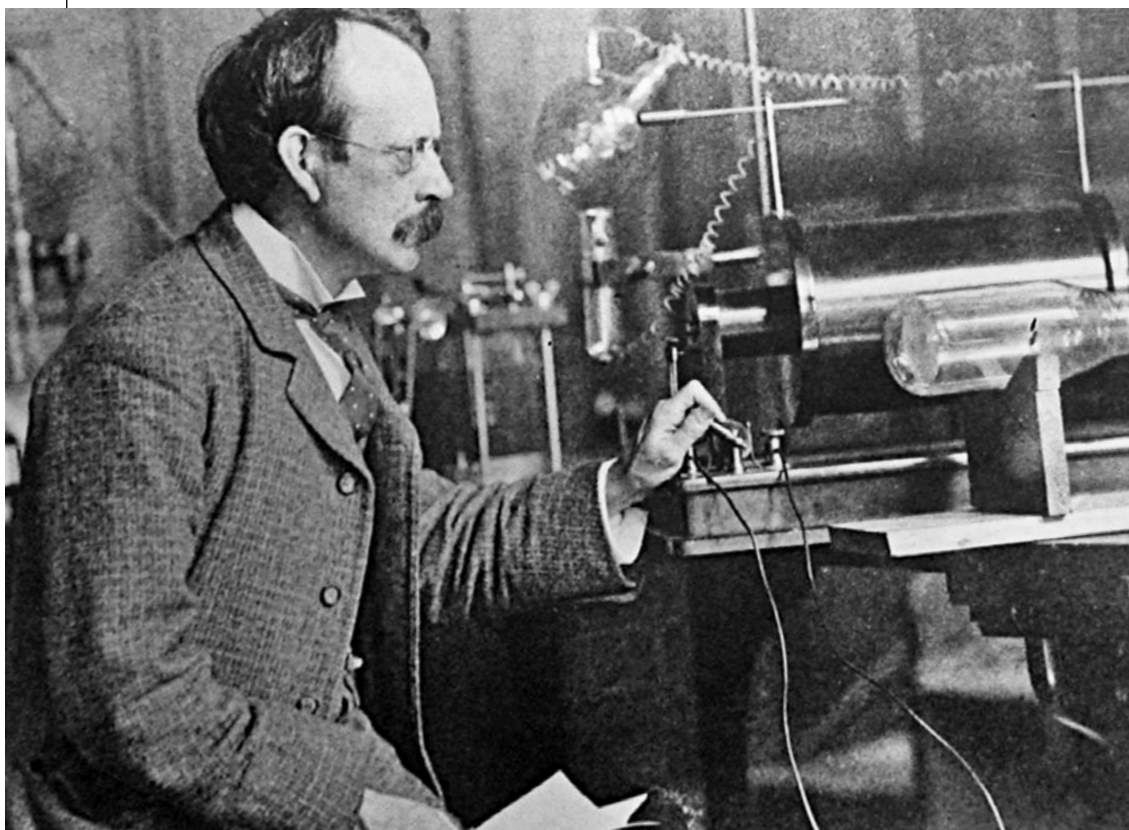
Метод, предложенный Томсоном, был весьма прост. Сначала пучок катодных лучей отклонялся с помощью электрического поля, а затем с помощью магнитного поля он отклонялся на равную величину в противоположную сторону, так что в итоге пучок вновь выпрямлялся. Используя такую экспериментальную методику, стало возможным вывести простые уравнения, из которых, зная напряженности двух полей, легко определить как скорость v , так и отношение e/m . Электроны вылетали из катода под действием высоковольтного разряда в трубке. Через диафрагмы D и E проходили только те из них, что летели вдоль оси трубки. Электрическая сила F_E , действующая на заряд e со стороны электрического поля E , дается выражением $F_E = eE$.

Сила F_H , действующая со стороны магнитного поля H , пропорциональна напряженности поля, скорости частицы v , ее заряду e и скорости частицы v ($F_H = Hev$). Томсон установил, что эта скорость зависит от напряжения на трубке V и что кинетическая энергия электронов $mv^2/2$ прямо пропорциональна этому напряжению, т. е. $mv^2/2 = eV$. (Отсюда термин «электрон-вольт» для энергии, приобретаемой частицей с зарядом, рав-

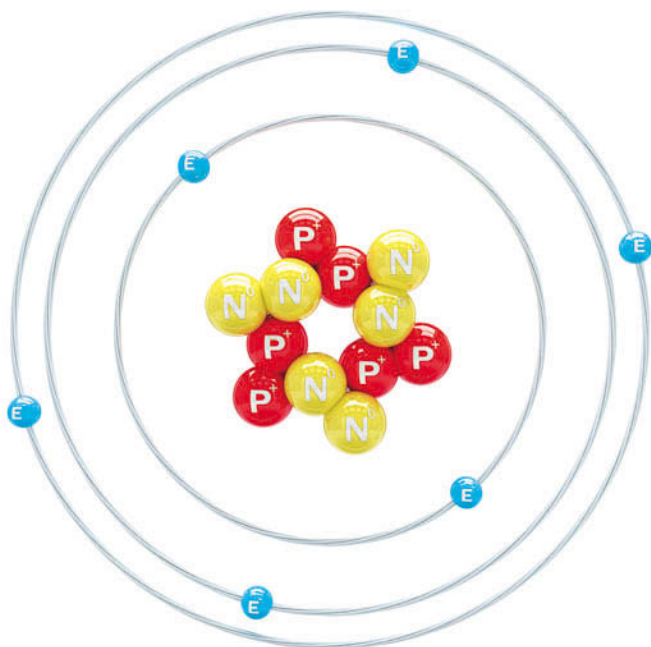


ным заряду электрона при ускорении с разностью потенциалов 1 В.) Комбинируя это уравнение с выражением для скорости электрона, он нашел отношение заряда к массе $e/m = 1/2(E/H)^2(1/v)$.

Из сопоставления полученного числа с известным в то время удельным зарядом одновалентного иона водорода, путем косвенных рассуждений он пришел к выводу, что масса этих частиц значительно меньше (более чем в тысячу раз) массы самого легкого иона водорода. В том же 1897 году он выдвинул гипотезу, что электроны являются составной частью атомов, а катодные лучи — не атомы или не электромагнитное излучение, как считали некоторые исследователи свойств лучей. Результатом опытов Томсона явилась гипотеза о существовании материи в состоянии еще более тонкого дробления, чем атомы. Мысль Томсона о катодно-лучевых корpusкулах как об основных компонентах атома не была встречена с большим энтузиазмом. Истинная роль томсоновских корpusкул в структуре атома могла быть понята в сочетании с результатами других исследований, в частности, с результатами анализа спектров и изучения радиоактивности (об этом будет рассказано далее).



Дж. Дж. Томсон в 1890 году в своей лаборатории (фотография из архива Кавендишской лаборатории, опубликованная в *European Journal of Physics* v. 18, p. 131)



В течение последующих двух лет выяснили: скорость корпускул Томсона равна примерно одной десятой скорости света, то есть примерно в 10000 раз больше скорости ружейной пули и скорости теплового движения атомов. Кроме того, это и все остальные свойства лучей не зависят от состава газа в трубке. А это означало, что катодные частицы — неперенная составная часть всех атомов. В итоге физики пришли к выводу: *катодные лучи — поток электронов, излучаемых катодом*. Первые оценки заряда частиц в катодных лучах были сделаны позже Дж. Дж. Томсоном.

Эксперименты Томсона показали, что электроны в электрических разрядах могут возникать из любого вещества. Поскольку все электроны одинаковы, элементы должны различаться лишь числом электронов. Кроме того, малая величина массы электронов указывала на то, что масса атома сосредоточена не в них. Стало ясно, что электроны

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ ТОМСОНА ПОКАЗАЛИ, ЧТО
ЭЛЕКТРОНЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ МОГУТ
ВОЗНИКАТЬ ИЗ ЛЮБОГО ВЕЩЕСТВА.**

ПОСКОЛЬКУ ВСЕ ЭЛЕКТРОНЫ
ОДИНАКОВЫ, ЭЛЕМЕНТЫ ДОЛЖНЫ
РАЗЛИЧАТЬСЯ ЛИШЬ ЧИСЛОМ
ЭЛЕКТРОНОВ.



Роберт Милликен (1868–1953)

обязаны существовать в составе атомов — иначе откуда бы они взялись? Томсон полагал, что все частицы, образующие катодные лучи, тождественны друг другу и входят в состав вещества.

30 апреля 1897 года — дата доклада Томсона полученных им результатах на заседании Лондонского Королевского общества — считается днем рождения электрона. И в этот день отошло в прошлое представление о «неделимости» атомов: открытие электрона заложило основу современной модели атома.

После открытия электрона ученые прекрасно осознали, что эта частица является фундаментальной составляющей всего материального мира.

Итак, существование электрона было установлено. Однако не было ни одного опыта, в котором участвовали бы отдельные электроны. А некоторые ученые вообще относились к существованию электрона весьма скептически. Так, В. Рентген до 1906–1907 гг. требовал, чтобы слово «электрон» не произносилось в Физическом институте Мюнхенского университета. Рентген считал его недоказанной гипотезой, применяемой часто без достаточных оснований и без нужды (из воспоминаний А. Ф. Иоффе). Соответственно, встал вопрос об изучении и измерении свойств отдельного электрона. Первое прецизионное измерение



Установка Милликена для измерения заряда электрона
(Митчел Уилсон «Американские ученые и изобретатели»)

электрического заряда электрона — заслуга Роберта Милликена (1868–1953). В опыте Милликена крошечные капли масла, несущие электрический заряд, опускались под действием силы тяжести в пространстве между двумя параллельными горизонтальными пластинами, подключенными к мощной электрической батарее. Напряженность электрического поля E между пластинами подбиралась такой, чтобы капля зависала в воздухе; сила тяжести mg , направленная вниз, компенсируется направленной вверх силой со стороны электрического поля. Масса капли определялась путем измерения установившейся скорости падения капли V в воздухе в отсутствие поля с помощью формулы Стокса: $F_{cm} = -bv$, где b — подвижность изменяется с радиусом капли линейно: $b = 6\pi \cdot \eta \cdot r$, и определяется вязкостью воздуха (η) и радиусом капли r .

После этого он распылил аэрозоль в присутствии электростатического поля, то есть при подключенной батарее. В этом случае масляные капли электризовались и оставались в подвешенном состоянии достаточно долго, поскольку силы гравитационного притяжения Земли уравнивались силами электростатического отталкивания между каплями

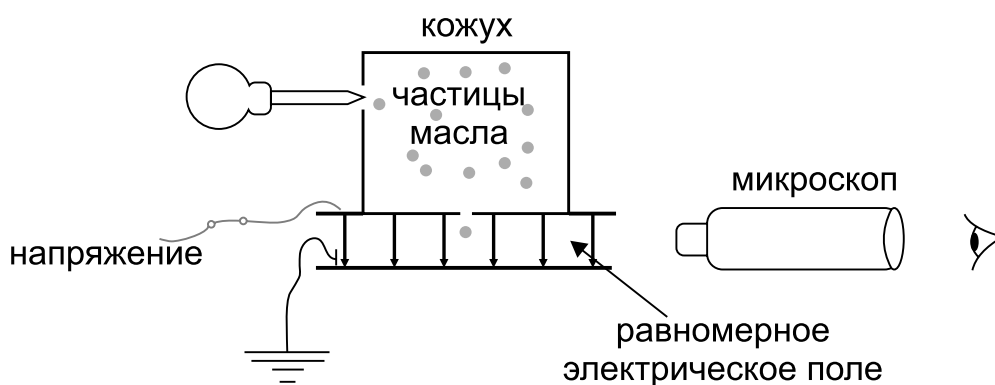


Схема опыта Р. Милликена

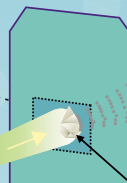
аэрозоля. Из-за микроскопического размера масляных капель в камере они не могут получить большого заряда, а величина заряда капель будет кратна единичному заряду электрона. Значит, постепенно понижая внешнее напряжение, мы будем наблюдать, как капли масла периодически «выпадают в осадок», и по градациям шкалы напряжения, при которых осаждается очередная порция аэрозоля, мы можем судить об абсолютной величине единичного заряда, поскольку дробного заряда наэлектризованные капли нести на себе не могут. Кроме того, Милликен облучал масляную взвесь рентгеновскими лучами и дополнительно ионизировал ее органические молекулы, чтобы повысить их электризацию и продлить время экспериментального наблюдения, одновременно повышая напряжение в камере, и делал так многократно для уточнения полученных данных. «Я наблюдал при помощи моего короткофокусного телескопа за поведением этих находящихся в равновесии капелек в электрическом поле. Некоторые из них начинали медленно двигаться вниз, а затем, постепенно теряя вес в результате испарения, останавлива-

Дифракция рентгеновских лучей

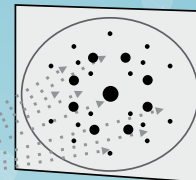
1912 г.



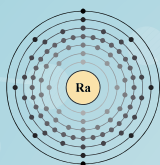
сфокусированное
рентгеновское
излучение



исследуемый образец
на подложке (кристалл)

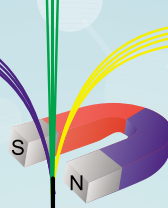


Открытие радиоактивности



лучи первого типа α
отклоняются так же, как
поток положительно
заряженных частиц

γ лучи третьего типа не
отклонялись магнитным полем

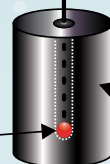


β лучи второго типа
отклоняются так же, как
поток отрицательно
заряженных частиц

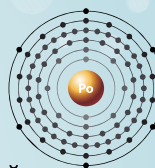
1898 г.

Радиоактивность –
самопроизвольные превращения
атомных ядер, сопровождающиеся
испусканием излучения
и (или) элементарных частиц

радиоактивное
вещество

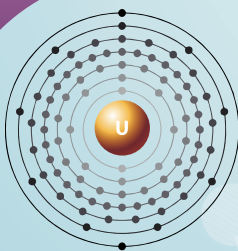


свинцовый
контейнер

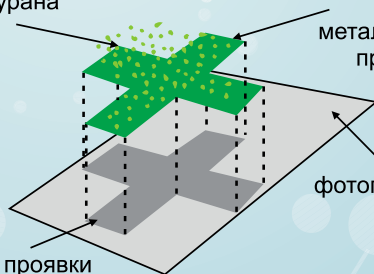


Открытия А. Беккереля

1896 г.



соль урана



металлический
предмет

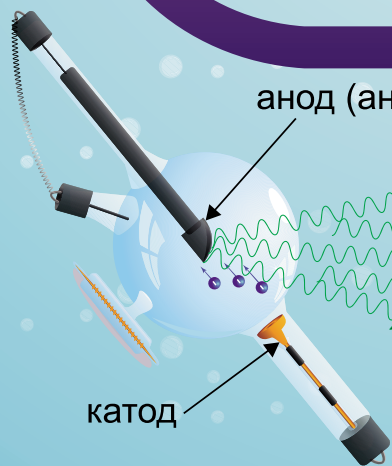
фотопластина

след после проявки
фотопластины

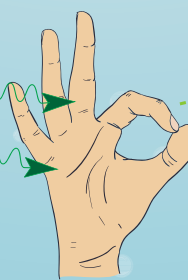
1895 г.

Рентгеновские лучи

анод (антикатод)



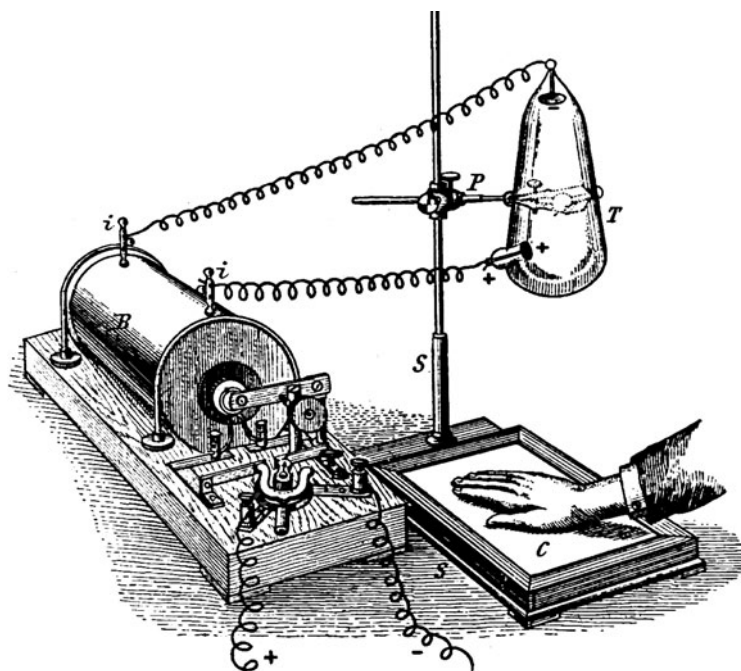
катод



лись... поворачивались... и медленно начинали двигаться вверх, так как сила тяжести все уменьшалась вследствие испарения... Если электрическое поле внезапно исчезало, все находящиеся в равновесии капельки, похожие на звездочки на темном поле, начинали падать — одни медленно, другие гораздо быстрее. Эти последние капельки оказались во взвешенном состоянии потому, что они несли на себе два, три, четыре, пять и больше электронов вместо одного... Это было, наконец, первое отчетливое, ясное и недвусмысленное доказательство того, что электричество определено едино по структуре».

Наконец, накопив достаточно экспериментальных данных для статистической обработки, Милликен вычислил величину единичного заряда и опубликовал полученные результаты, которые содержали максимально точно для тех лет рассчитанный заряд электрона. Им была получена величина единичного электрического заряда $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ К. Опыт Милликена был крайне трудоемок, потому что необходимо было учитывать различные дополнительные факторы, в частности, постоянно измерять и учитывать влажность воздуха и атмосферное давление, — и так на протяжении всех пяти лет непрерывного наблюдения за своей установкой. Наградой за титанический труд стала Нобелевская премия по физике за 1923 год, присужденная Милликену за публикацию 1913 года. Но в нашем путешествии мы зашли немного вперед, опередив события. Но сделали это для того, чтобы завершить тему электрона в одном месте.

РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ. Конец девятнадцатого века был богат на открытия разного рода излучений. Для понимания строения атома большое значение имело открытие Рентгеном так называемых X-лучей. Открытие В. Рентгеном лучей, названных впоследствии



Аппаратура В. К. Рентгена, с помощью которой он в 1895 году сделал первый снимок руки в икс-лучах (из статьи В. З. Азерникова «Физика. Великие открытия»)

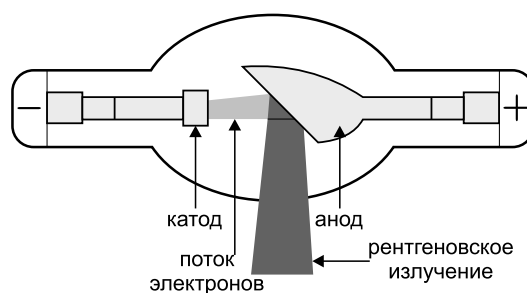


Вильгельм Конрад Рентген (1845–1923)

его именем, произошло в 1895 году. Он был первым, кто опубликовал статью о рентгеновских лучах, которые он назвал икс-лучами (*x-ray*). Статья Рентгена под названием «О новом роде лучей» была опубликована 28 декабря 1895 года в журнале Вюрцбургского физико-медицинского общества. В ней, в частности, говорилось: «Вскоре мы обнаружили, что все тела прозрачны для этих лучей, хотя и в весьма различной степени». Для своего эксперимента Рентген использовал приборы, которыми пользовались физики того времени в своих лабораториях: искровой индуктор с прерывателем, газоразрядную трубку и флуоресцирующий экран. Вечером 8 ноября 1895 года физик обернул вакуумную трубку светонепроницаемой черной бумагой, которая задерживала все видимые и ультрафиолетовые лучи. Когда он включил ток высокого напряжения в затемненном помещении, то заметил странную вспышку маленьких

флуоресцирующих кристаллов, лежавших на лабораторном столе. Бумажная ширма, которая была покрыта платиносинеродистым барием, также засияла бледно-зеленым светом. Когда Рентген поместил между трубкой и ширмой несколько предметов, оказавшихся под рукой — книгу, кусок листового алюминия, разновесы в деревянном ящике и другие вещи он с удивлением установил, что все эти вещества пронизываются лучами более или менее сильно. Теневые изображения различных вещей обозначались на экране. Но самые волнующие минуты этой памятной ноябрьской ночи, возможно, наступили тогда, когда физик увидел скелет своей руки, которую он держал между разрядным аппаратом и световым экраном.

Брошюра с сообщением в Вюрцбургском физико-медицинском обществе под заголовком «О новом роде лу-



Схематическое изображение рентгеновской трубки

**«ВСКОРЕ МЫ ОБНАРУЖИЛИ, ЧТО ВСЕ ТЕЛА
ПРОЗРАЧНЫ ДЛЯ ЭТИХ ЛУЧЕЙ, ХОТЯ
И В ВЕСЬМА РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ».**

чей» за несколько недель была издана пять раз. Она была переведена также на английский, французский, итальянский и русский языки.

Катодная трубка, благодаря которой Рентген открыл свои X-лучи, в сущности была достаточно простым устройством. Это стеклянный (или металлический с окошком) баллон, из которого откачан воздух. Катод служит источником электронов, а анод (его часто называют антикатодом) является источником рентгеновских лучей (см. рисунок). Внутри откачанного объема расположены два электрода (анод и катод), на которые подается высокое напряжение.

Антикатод срезается под углом примерно в 45° к оси трубки, поэтому рентгеновское излучение распространяется в направлении нормали к оси трубки. Электрическое поле, создаваемое высоким напряжением, разгоняет электроны. Для получения электронов столь высоких энергий в трубке создается вакуум на уровне 10^{-6} мм рт. ст. Физика газового разряда тогда не была еще разработана, и природа новых лучей по-прежнему оставалась загадочной. Но природа X-лучей, открытых Рентгеном, была объяснена еще при его жизни. Это произошло в 1912 году, когда Лауэ, Фридрих и Книппинг раскрыли тайну их природы. Лучи оказались электромагнитными колебаниями, как и видимый свет, но с частотой колебаний во много тысяч раз большей и с соответственно меньшей длиной волны: от $3 \cdot 10^{16}$ до $6 \cdot 10^{19}$ Гц и длиной волны 0,005–10 нм (общепризнанного определения нижней границы диапазона рентгеновских лучей в шкале длин волн не существует). Рентгеновские лучи образуются путем преобразования энергии при столкновении катодных лучей со стенкой трубки, причем безразлично, состоит ли она из стекла или металла, и распространяются во все стороны со скоростью света.

Распространение публикации Рентгена и его фотографий вызвало огромную сенсацию, которой не случалось в истории естествознания со времени сообщения Галилея об открытии спутников Юпитера. Опыты Рентгена проверялись во многих лабораториях мира, а сам открыватель лучей приобрел небывалую популярность. В 1896 году вышло более 50 книг и 1000 статей, посвященных открытию Рентгена. Повсюду говорили о новых лучах. При этом было и много курьезов: газеты сообщали о чудесах превращения с помощью таинственных лучей свинца в золото, о возможности узнать чужие мысли, подсмотреть, что скрывается за стенами, в сейфах и под платьем ничего не подозревающей собеседницы, о вложении в мозг студентов без особого труда знаний, если страницу учебника спроецировать на голову учащегося и т. д. и т. п.

Весной 1896 года Джеймс, играя со старшим братом, сломал руку. Его лечили врачи, но полное





выздоровление не наступало. Незадолго до этого Джеймс узнал из газет, что вюрцбургский профессор Вильгельм Конрад Рентген открыл в 1895 году лучи, позволяющие просвечивать человеческое тело и делать снимки, на которых видны кости. Ничего не сказав своим родителям, тринадцатилетний Джеймс пошел в Государственную физическую лабораторию, в которой, как он слышал, проводятся разные научные эксперименты. В это время физик Б. Вальтер как раз собрал установку, чтобы повторить классический опыт профессора Рентгена. Все было готово, и Джеймсу оставалось только положить руку на толстую фотопластинку и на секунду задержать дыхание. На снимке отчетливо видно, что кость предплечья срослась неправильно, врачи должны были снова ее сломать, после чего лечение закончилось без осложнений. В этой истории поражает не только скорость внедрения научного открытия в медицинскую практику — от научного эксперимента Рентгена до рентгеновского снимка в медицинских целях прошел всего год, — но и решительность мальчика, готового на себе испытать достижения научно-технического прогресса. Этим мальчиком был будущий физик Джеймс Франк, ровесник Макса Борна. (Журнал «Семь искусств». № 12 (48). Декабрь. 2013.) Новые лучи не просто ознаменовали еще один новый этап в развитии физики — они существенным образом повлияли на психологию людей: стало доступным то, что извечно было недостижимо — возможность видеть человека насквозь.



Рентгеновский снимок руки Джеймса Франка с пометками лечащего врача, 7 апреля 1896 г.

НО САМЫЕ ВОЛНУЮЩИЕ МИНУТЫ ЭТОЙ ПАМЯТНОЙ НОЯБРЬСКОЙ НОЧИ, ВОЗМОЖНО, НАСТУПИЛИ ТОГДА, КОГДА ФИЗИК УВИДЕЛ СКЕЛЕТ СВОЕЙ РУКИ, КОТОРУЮ ОН ДЕРЖАЛ МЕЖДУ РАЗРЯДНЫМ АППАРАТОМ И СВЕТОВЫМ ЭКРАНОМ.

Открытие Рентгена произвело переворот в физической науке. Правда, печальны были последние годы открывателя X-лучей. В конце жизни самым близким другом семьи Рентгена был его ученик, русский физик А. Иоффе, который, не взирая ни на какую смуту вокруг имени Рентгена, всячески помогал своему учителю. В это время Рентгену было уже 74 года. А. Ф. Иоффе, работавший с Рентгеном, вспоминает, что Рентген сильно похудел. Именно Иоффе нашел деньги на визит к врачу. Был обнаружен рак толстой кишки. Больного можно было спасти, но по иронии судьбы он ожидал две недели в очереди на... рентгеновское исследование в одной из поликлиник. Когда он, наконец, добрался до кабинета, врач, проводивший исследование, решил проявить осве-



РЕНТГЕНОВСКИЙ СНИМОК ПАЦИЕНТКИ, 1940 г.

домленность и спросил: «А вы знаете, что вы однофамилец того самого человека, который изобрел этот чудесный прибор?». На что Рентген пожал плечами: «Быть однофамильцем самому себе? Это что-то новенькое...». Врач был просто ошарашен. Денег за снимок он, естественно, не взял. Он просто не узнал больного, хотя и посещал когда-то его лекции. И не мудрено — только за две недели из-за рака толстой кишки знаменитый Рентген потерял в весе порядка 20 кг!

Умер Рентген 10 февраля 1923 года в Мюнхене.

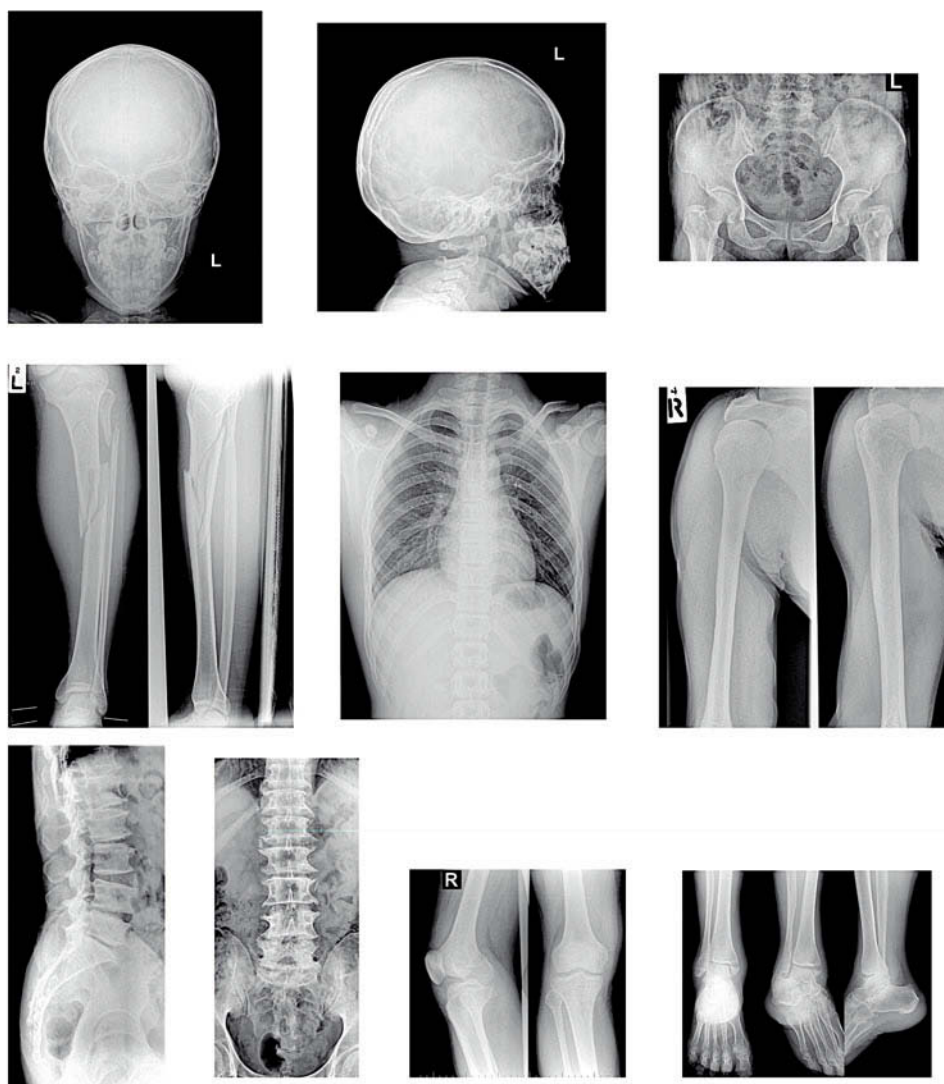
Наряду со своим воздействием на технику и медицину открытие Рентгена имело глубочайшие теоретические последствия. Несмотря на огромный интерес к нему, прошло почти десять лет, чтобы в знаниях об X-лучах добавилось что-то новое. Только в 1906 году английский физик Чарльз Гловер Баркла (1877–1944), работавший вместе с Дж. Дж. Томсоном в Кавендишской лаборатории, осуществивший поляризацию рентгеновских лучей (1906 г.), обнаружил, что при воздействии потока рентгеновского излучения высокой энергии на вещество возникает вторичное флуоресцентное рентгеновское излучение. Это излучение, характерное для исследуемого элемента, получило название характеристического излучения. После открытия характеристического излучения Г. Мозли в серии своих экспериментов (1913 г.) измерил длины волн первичного характеристического излучения, полученных электронной бомбардировкой различных элементов, и вывел соотношение между длиной волны и атомным номером. В 1912 году М. Лауэ, П. Книппинг и В. Фридрих открыли явление дифракции рентгеновских лучей при прохождении через кристаллы, что окончательно подтвердило их электромагнитную при-

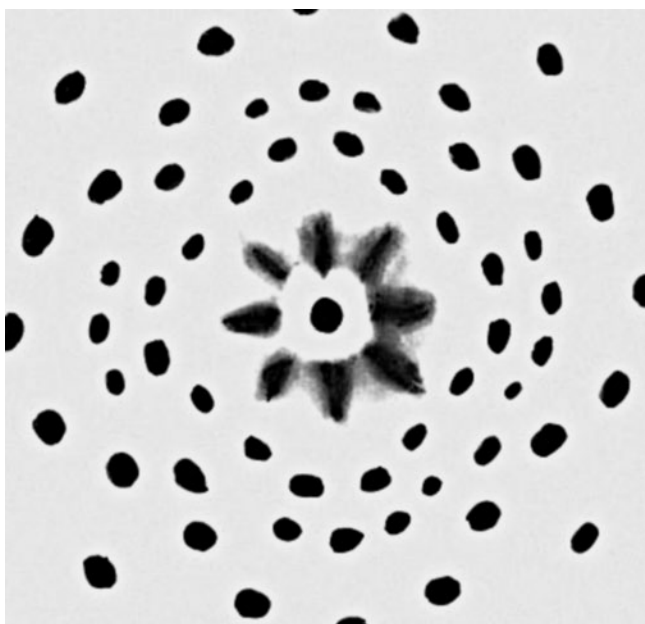


роду. Эти эксперименты, а также изобретение в 1913 году Г. Брэггом рентгеновского спектрометра заложили основу для спектрохимического рентгеновского анализа: рентгеновская спектроскопия оказалась весьма важным инструментом для понимания структуры атома. Эйнштейн писал: «Лауэ прислал мне фотографию его явления дифракции рентгеновских лучей. Это самое удивительное, что я когда-либо видел. Дифракция на отдельных молекулах, позволяющая обнаружить их расположение».

Каждое пятно представляет собой след рентгеновского дифракционного отражения. Диффузные радиальные пятна в центре вызваны рассеянием рентгеновских лучей на тепловых колебаниях кристаллической решетки.

Вскоре началось интенсивное изучение разнообразных кристаллических структур. На основе дифракционных картин, снятых под различными углами и дополненных расчетом,





Лауэграмма монокристалла NaCl

удалось установить форму элементарных ячеек, которые заполняют пространство кристалла. Накопленные результаты позволили создать общую картину, описывающую строение кристаллов.

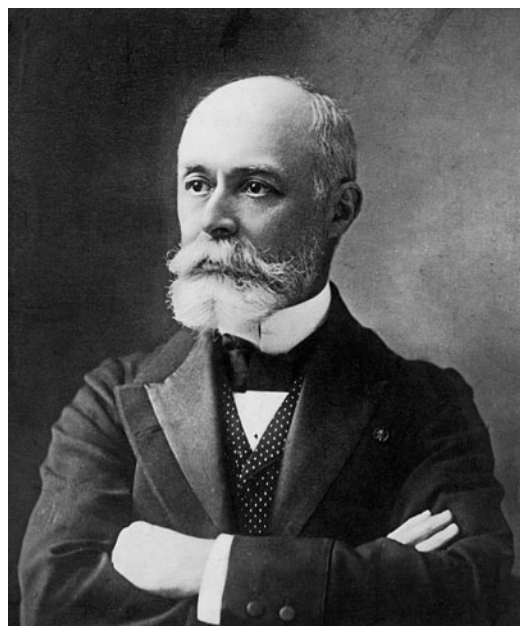
РАДИОАКТИВНОСТЬ. После открытия Рентгеном X-лучей началась повальная лихорадка «открывательства» лучей. Большинство этих «открытий» оказались самообманом, а то и преднамеренным обманом (см. книгу «На кого упало яблоко»). Еще в январе 1896 года известный математик и физик Анри Пуанкаре на заседании Парижской Академии наук сообщил о рентгеновских лучах. При этом он показал фотографии, полученные от Рентгена. В своем докладе Пуанкаре поставил вопрос, который занимал и других физиков: не испускают ли почти все флуоресцирующие (нетепловое свечение вещества, происхо-

**ПОСЛЕ ОТКРЫТИЯ РЕНТГЕНОМ X-ЛУЧЕЙ НАЧАЛАСЬ
ПОВАЛЬНАЯ ЛИХОРАДКА «ОТКРЫВАТЕЛЬСТВА» ЛУЧЕЙ.
БОЛЬШИНСТВО ЭТИХ «ОТКРЫТИЙ» ОКАЗАЛИСЬ
САМООБМАНОМ, А ТО И ПРЕДНАМЕРЕННЫМ
ОБМАНОМ**

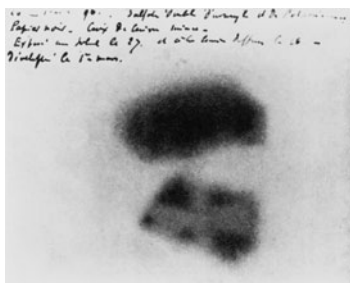


дящее после поглощения им энергии возбуждения) вещества под воздействием солнечного света определенные лучи, подобные рентгеновским. Среди участников заседания был Антуан Беккерель, профессор Высшей технической школы в Париже, который взялся за проверку высказанной А. Пуанкаре гипотезы. И уже 1 марта 1896 года Антуан Анри Беккерель (1852–1908) сделал важное открытие. В Музее естественной истории, где работал Беккерель, были все условия для проверки этого предположения. Среди ряда фосфоресцирующих веществ (фосфоресценция — один из видов фотолюминесценции) он использовал гидратированный сульфат уранила и калия $K_2UO_2(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$. При облучении этой соли солнечным светом А. А. Беккерель ожидал появления Х-лучей. Для их регистрации он размещал кристаллы урановой соли на фотопластинках, завернутых для защиты от света в плотную черную бумагу. Было установлено, что пластинки подвергались засвечиванию. Казалось, что подтверждается гипотеза о том, что фосфоресценция, вызванная солнечным светом, сопровождается Х-излучением. Однако, проявив пластинки, на которых лежали кристаллы урановой соли, не подвергавшиеся действию света, он получил тот же самый результат. Исследователь не сразу понял, что проникающая радиация связана с природой урана, однако вскоре укрепился в этом мнении. Беккерель установил, что интенсивность излучения определяется только количеством урана в препарате и совершенно не зависит от того, в какие соединения он входит. То есть это свойство присуще не соединениям, а химическому элементу — урану.

Открытие первоначально, как это нередко бывает, не произвело на физиков должного впечатления. Но благодаря исследованиям супругов Кюри, с которыми Беккерель сотрудничал, и вниманию к его работам Э. Резерфорда интерес к этому открытию значительно вырос. Так, открытием Беккереля заинтересовался ряд выдающихся ученых, в том числе Анри Пуанкаре, а Д. И. Менделеев специально при-



Антуан Анри Беккерель (1852–1908)



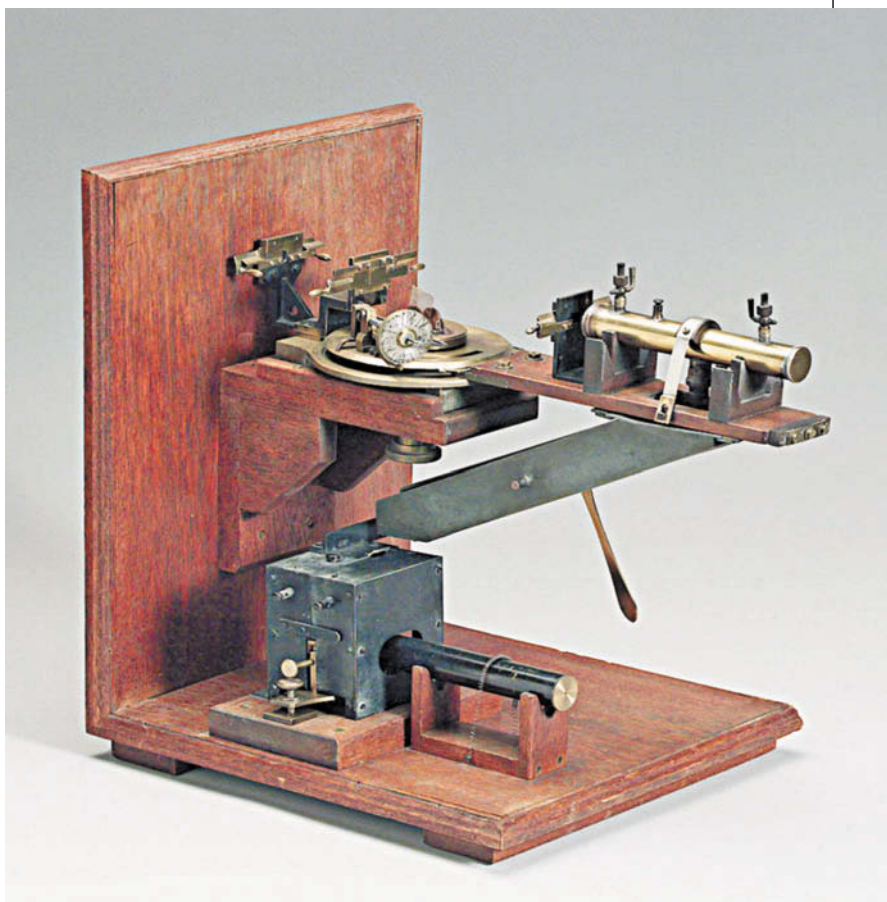
Фотопластинка Беккереля, засвеченная солями урана. Светлая тень в нижней части фото — от мальтийского креста, расположенного между солью урана и фотопластинкой

**ОТКРЫТИЕМ ПОЛОНИЯ И РАДИЯ НАЧИНАЕТСЯ
НОВЫЙ ЭТАП В ИСТОРИИ РАДИОАКТИВНОСТИ.
ПРАВДА, БЕККЕРЕЛЮ ПРИШЛОСЬ
«ПОПЛАТИТЬСЯ» ЗА СВОЕ
ОТКРЫТИЕ.**



Мария Склодовская-Кюри (1867–1934)

ехал в Париж, чтобы познакомиться с работами и автором этого открытия. В 1898 году Мари и Пьер Кюри обнаружили радиоактивность тория, позднее ими были открыты радиоактивные элементы полоний и радий. Новое явление по предложению супругов Кюри получило название радиоактивность (что означает способность испускать лучи), а вещества, обладающие этим свойством — радиоактивными. Активность нового элемента — полония — оказалась в 400 раз выше активности урана. Открытием полония и радия начинается новый этап в истории радиоактивности. Правда, Беккерелю пришлось «поплатиться» за свое открытие. Как-то для публичной лекции ему понадобилось радиоактивное вещество, он взял его у супругов Кюри,



Рентгеновский спектрометр У. Брэгга



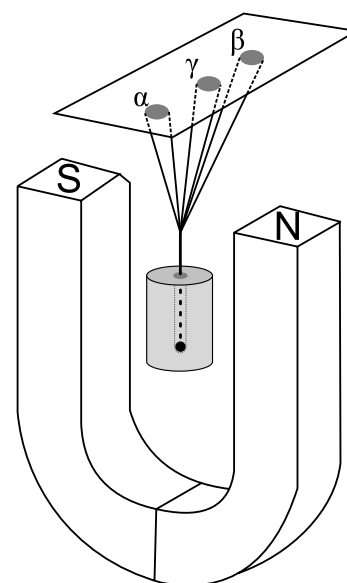
и пробирку положил в жилетный карман. Прочтя лекцию, он вернул владельцам радиоактивный препарат, а на следующий день обнаружил на теле под жилетным карманом покраснение кожи в форме пробирки. Беккерель рассказывает об этом Пьеру Кюри, тот ставит на себе опыт: в течение десяти часов носит привязанную к предплечью пробирку с радием. Через несколько дней у него тоже наблюдается покраснение, перешедшее затем в тяжелейшую язву, от которой он страдал в течение двух месяцев. Так впервые было открыто биологическое действие радиоактивности. Но больше всех пострадала от радиоактивности Мария Склодовская-Кюри. Вся ее жизнь — это подвиг, беззаветный труд во имя науки. Не имея никакой лаборатории и работая в сарае во дворе школы на улице Ломон в Париже, с 1898 по 1902 годы Мария и Пьер Кюри переработали восемь тонн руды урана и выделили одну сотую грамма нового вещества — радия.

Позже был открыт упомянутый выше полоний — элемент, названный в честь родины Марии Кюри. Научный мир с нетерпением ожидал каждую новую статью о радиоактивности, подписанную М. и П. Кюри, каждая из них несла крупицу новой истины.

Анализируя проникающую способность радиоактивного излучения урана, Э. Резерфорд в 1899 году экспериментально установил, что соли урана испускают лучи двух типов, которые по-разному отклоняются в магнитном поле: менее проникающие, названные α -излучением, и более проникающие, названные β -излучением. Лучи первого типа отклоняются так же, как поток положительно заряженных частиц; лучи второго типа обычно отклоняются в магнитном поле так же, как поток отрицательно заряженных частиц.

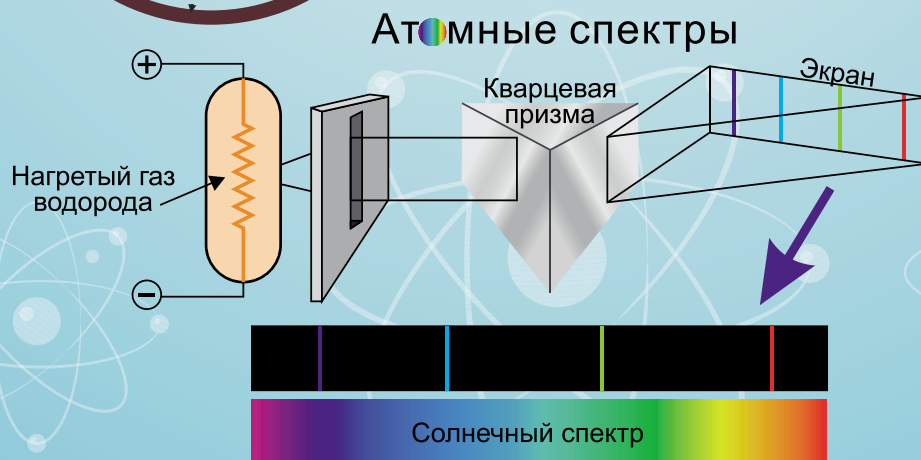
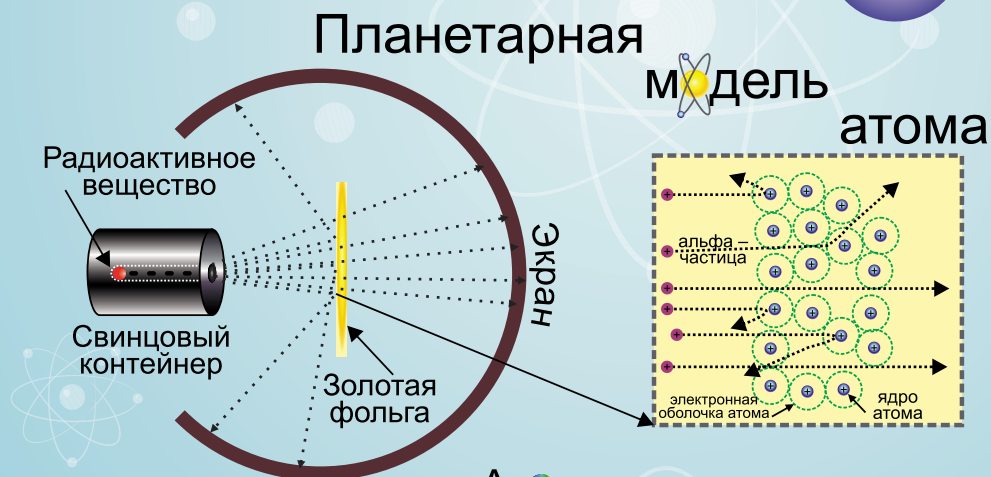
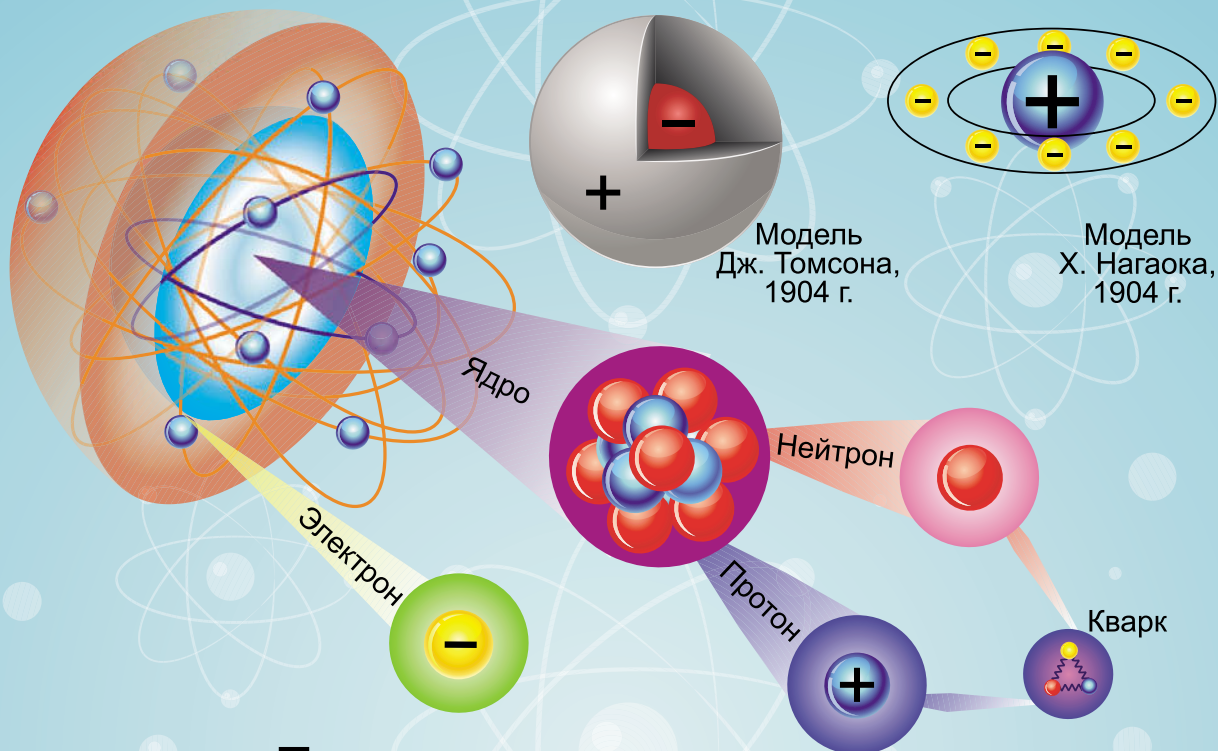
Третья составляющая урановой радиации, самая проникающая из всех (не отклонялась магнитным полем), была открыта позже, в 1900 году, Полем Виллардом (1860–1934) и названа по аналогии с резерфордовским рядом γ -излучением. Резерфорд и его сотрудники показали, что радиоактивность связана с распадом атомов (значительно позже стало ясно, что речь идет о распаде атомных ядер), сопровождающимся выбросом из них определенного типа излучений. Этот вывод нанес сокрушительный удар по господствовавшей в физике и химии концепции неделимости атомов.

В 1903 году английских ученых, У. Рамзай и Ф. Содди доказывают, что радий непрерывно выделяет небольшое количество газа — гелия. Это был первый пример ядерного превращения. Немного позже — и опять в Англии — Резерфорд и Содди, исходя из гипотезы, высказанной Склодовской-Кюри, публикуют замечательную статью «Теория» радиоактивных превращений». Они утверждают, что радиоактивные элементы, даже когда они кажутся неизменными, находятся в состоянии самопроизвольного распада: чем быстрее процесс их превращения, тем больше их активность. В своих работах исследователи пришли к выводу о возможности превращения одних химических элементов в другие. Открытие эманации радия окончательно подтверждало теорию радиоактивного распада. Подробнее об этом мы поговорим в дальнейшем.



Три составляющие радиоактивного распада

МОДЕЛИ И СТРОЕНИЕ АТОМА





МОДЕЛИ АТОМА. То, что атом имеет сложное строение и в его составе есть частицы, имеющие положительный и отрицательный заряд, к концу XIX века было уже известно. Но внутреннее строение атома по-прежнему оставалось загадкой.

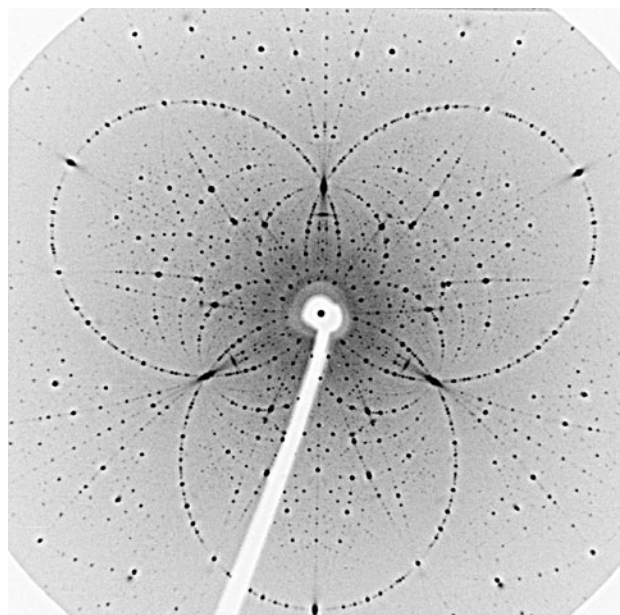
Вначале загадку пытались разгадать путем построения моделей на основе представлений классической электродинамики и механики. В 1904 году появились публикации о строении атома, одна из которых принадлежала одному английскому физика Дж. Томсону, другая — японскому физика Хантаро Нагаока.

Дж. Томсон стремился найти модель атома, которая позволила бы объяснить все его известные свойства. В атоме Томсона положительное электричество «размазано» по сфере, в которую вкраплены, как изюм в пудинг, электроны. Так, в простейшем атоме водорода электрон находится в центре положительно заряженной сферы. При смещении из центра на электрон действует квазиупругая сила электростатического притяжения, под действием которой электрон совершает колебания (как и в аналоге — гармоническом осцилляторе). Частота этих колебаний определяется радиусом сферы, зарядом и массой электрона, и если радиус сферы имеет порядок радиуса атома, частота этих колебаний совпадает с частотой колебания спектральной линии атома. Согласно максвелловской электродинамике ускоренно движущийся заряд излучает энергию. В многоэлектронных атомах электроны располагаются по устойчивым конфигурациям, рассчитанным Томсоном.

Электроны удерживаются внутри положительно заряженной сферы упругими силами. Те из них, которые находятся на поверхности, могут довольно легко «выбиваться», оставляя ионизованный атом. Как видим, все в рамках ньютоновской механики плюс максвелловская электродинамика.

Томсон считал каждую такую конфигурацию определяющей химические свойства атомов. *«Мы предполагаем, что атом состоит из некоторого числа [отрицательных] корпускул, движущихся внутри сферы с однородной положительной электризацией... Корпускулы располагаются по ряду концентрических оболочек. Постепенное изменение свойств, которое имеет место при перемещении вдоль горизонтальных рядов [периодической] системы элементов, иллюстрируется свойствами, которыми обладают эти группы корпускул».*

Он предпринял попытку теоретически объяснить периодическую систему элементов Д. И. Менделеева. Эту попытку Бор позднее назвал «знаменитой» и указал, что со времени этой попытки «идея о разделении электронов в атоме на группы сделалась исходным пунктом и более новых воззрений». И хотя теория Томсона оказалась несовместимой с опытными фактами, Бор тем не менее считал, что эта теория «содержит много оригинальных мыслей и оказала большое влияние на развитие атомной теории». В мо-

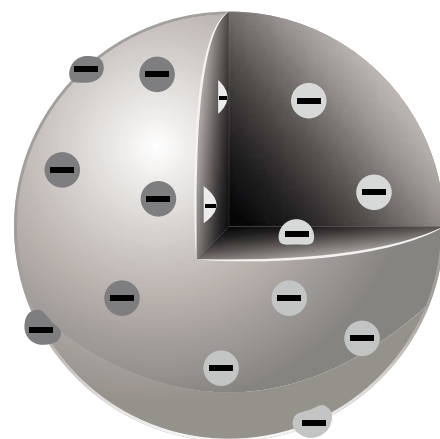


Лауэграмма квазикристалла ZnMgHo

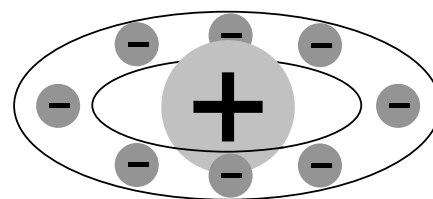
дели Томсона используется сфера, так что мировоззрения пифагорейцев по-прежнему, может быть и неосознанно, но продолжало оказывать влияние на умы ученых.

Японский физик Хентаро Нагаока (1865–1950) в 1904 году выдвинул гипотезу о том, что атом состоит из тяжелого положительно заряженного ядра, окруженного кольцами из большого числа электронов, колебания которых и являются причиной испускания атомных спектров. Нагаока исходил из исследований Максвелла об устойчивости колец Сатурна и представил строение атома аналогичным строению Солнечной системы: роль Солнца играет положительно заряженная центральная часть атома, вокруг которой по установленным кольцеобразным орбитам движутся «планеты»-электроны. При незначительных смещениях электроны возбуждают электромагнитные волны, периоды которых, по расчетам Нагаоки, того же порядка, что и частоты спектральных линий некоторых элементов. Отчетливо видно, как эта модель созвучна картине мироздания, восходящей еще ко временам Античности (ср. с моделью Солнечной системы Аристарха Самосского).

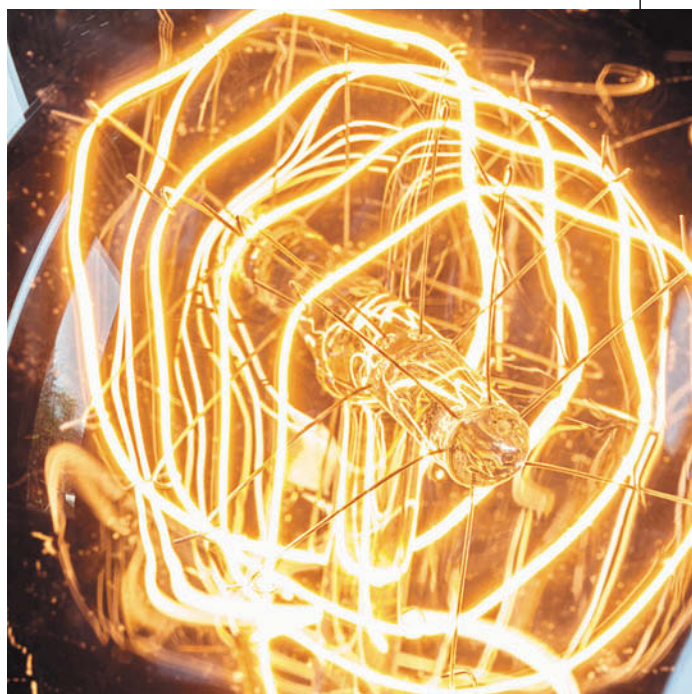
Однако новые опытные факты опровергли модели Нагаоки и Томсона.



Атом согласно модели Томсона
(«пудинговая» модель)

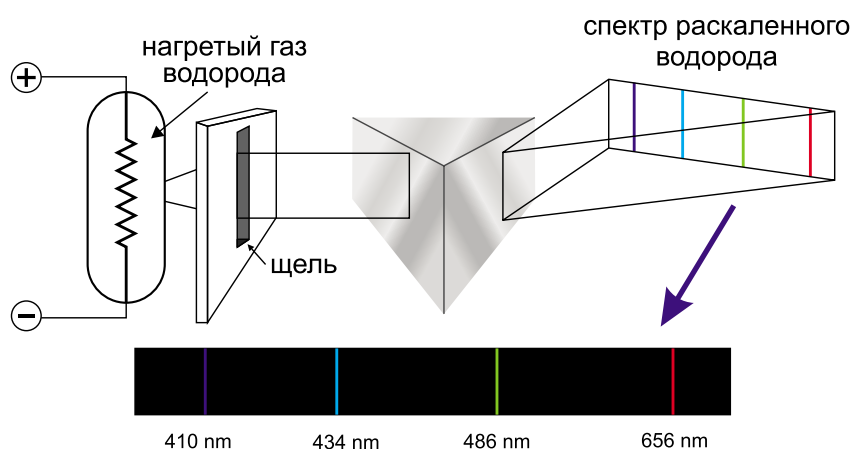


Модель атома Х. Нагаоки





АТОМНЫЕ СПЕКТРЫ. Нагретые тела испускают свет, потому что это позволяет им избавиться от избытка энергии. Привычный нам дневной свет испускается поверхностью Солнца, разогретой до $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Точно так же другие элементы в сильно разогретом состоянии могут испускать свет, который можно разложить на составляющие его волны с помощью спектрометра. Изолированные атомы в виде разреженного газа или паров металлов испускают спектр, состоящий из отдельных спектральных линий. Атомные спектры — это оптические спектры, получающиеся при испускании или поглощении света (электромагнитных волн) свободными или слабо связанными атомами; такими спектрами обладают, в частности, одноатомные газы и пары. Атомные спектры являются линейчатыми, они состоят из отдельных спектральных линий, которые характеризуются определенной длиной волны и для простых атомов группируются в спектральные серии. Атомные спектры наблюдаются в виде ярких цветных линий при свечении газов или паров в электрической дуге или разряде (спектры испускания) и в виде темных линий (спектров поглощения). Изучение атомных спектров послужило ключом к познанию строения атомов. Подробное изучение атомных спектров началось с водорода.



Спектр испускания раскаленного атомарного водорода

Водород в так называемой водородной лампе разогревается сильным электрическим разрядом. Свет лампы, пройдя через призму, дает спектр, состоящий из отдельных линий. На рисунке показана только видимая область спектра с низким разрешением (отдельные тонкие линии слились). Спектр испускания водорода оказался *не сплошным*, как у солнечного света, а *линейчатым*. Прежде всего в экспериментах было замечено, что линии в спектрах расположены не беспорядочно, а сериями. Расстояние между линиями в серии закономерно уменьшается по мере перехода от длинных волн к коротким.

Швейцарский физик Й. Бальмер был отцом многодетного семейства, посвятившим всю свою жизнь одному и тому же базельскому пансиону для девиц, где преподавал математику. Однако это не помешало ему сделать важное открытие в спектроскопии —

в 1885 году установил, что длины волн серии в видимой части спектра водорода могут быть представлены формулой: $\lambda = \lambda_0(n^2/(n^2 - 4))$, где $\lambda_0 = const$, $n = 3, 4, 5, \dots$ $\lambda_0 = 3645,6 \cdot 10^{-8}$ см. Возможно, на открытие Бальмера натолкнула его вера в то, что тайну всех наблюдаемых явлений следует искать в различных комбинациях целых чисел. Он с юношеских лет находился под влиянием пифагорейцев с их учением о гармонии и мистической роли целых чисел в природе. Поэтому когда его внимание привлек набор четко ограниченных спектральных линий, он подошел к объяснению их последовательности с точки зрения своих представлений. Так он и получил простое соотношение между спектральными линиями, приведенное выше. Стало ясно, что атом — сложная система, имеющая сложные атомные спектры (см. рисунок).

Позже, с совершенствованием спектрометров, были открыты серии линий в ультрафиолетовой и в инфракрасной области. Обнаруженное явление требовало объяснения, которое долгое время не могли найти. Предполагалось, что свет возникает в результате колебаний групп атомов и частота этих колебаний как-то связана с частотой волны испускаемого света. Но как устроен атом и почему его колебания приводят к излучению? Эти и другие вопросы заставляли исследователей предлагать различные гипотезы строения атома. О двух из них рассказано ранее.

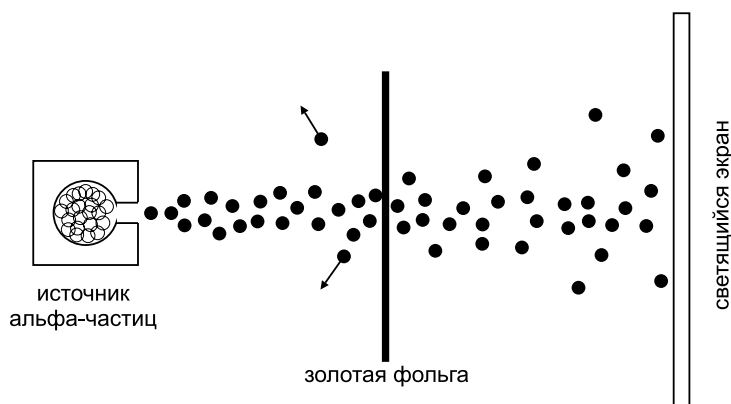


ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА. Однако новые опытные факты опровергли модели Нагаоки и Томсона. Эти новые факты появились в знаменитых опытах Резерфорда по рассеянию альфа-частиц, начатых все в том же 1904 году. При условии, что модель атома Томсона правильна, а тогда не было никаких причин сомневаться в этом, опыт должен был показать, что α -частицы свободно проходят через металлические преграды. Э. Резерфорд решил проверить это экспериментально.

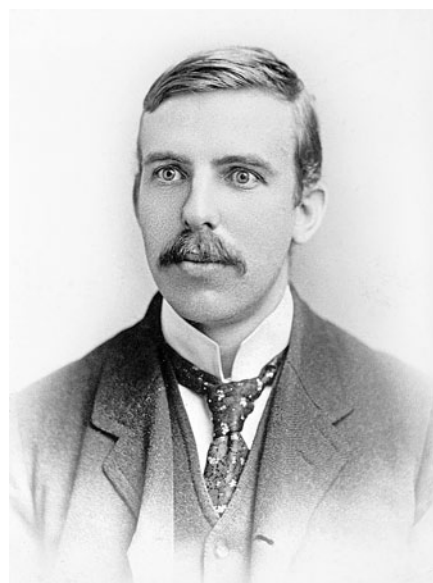


Урановая руда

ПОЗЖЕ, С СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ СПЕКТРОМЕТРОВ, БЫЛИ ОТКРЫТЫ СЕРИИ ЛИНИЙ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ И В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ.



Эксперимент Резерфорда



Эрнест Резерфорд (1871–1937)

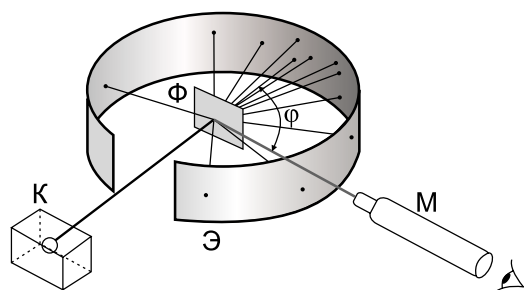


Схема опыта Резерфорда по рассеянию α -частиц:

К — свинцовый контейнер с радиоактивным веществом;

Э — экран, покрытый сернистым цинком;

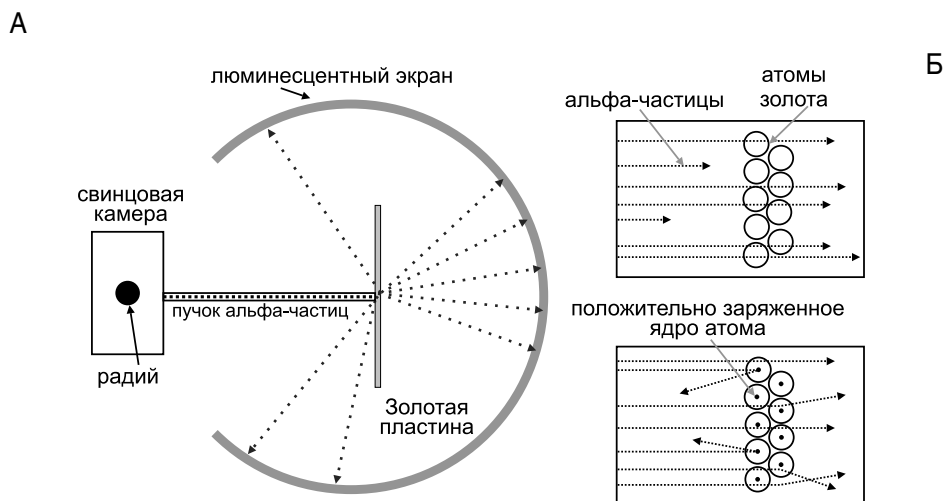
Ф — золотая фольга; М — микроскоп

Э. Резерфорд и Дж. Ройдс в лаборатории в Манчестере доказали, что альфа-частицы являются дважды ионизованными (т. е. потерявшими по два электрона) атомами гелия. Резерфорд получил этот результат еще ранее, работая в Канаде. Но физики поверили в существовании

этих частиц именно после опытов в Манчестере. В 1909–1910 гг. физики Гейгер и Марсден по заданию Резерфорда проводили опыты, бомбардируя альфа-частицами тонкую золотую фольгу. Марсден спроектировал экспериментальную установку и сам же ее изготовил. Это была герметичная свинцовая камера, внутри которой лежал кусочек радия. Испускаемые радием альфа-частицы проходили через узкое отверстие в свинцовой пластине, вырезавшее из них хорошо коллимированный пучок, который падал на мишень из тончайшей золотой фольги. Перед началом очередной серии наблюдений из камеры выкачивали воздух. В ней имелся покрытый сернистым цинком передвижной экран, испускавший под ударами альфа-частиц очень слабые вспышки света. Изменяя положения экрана, можно было регистрировать частицы, отразившиеся от мишени под любым углом. Вспышки наблюдали через окошко в стенке камеры с помощью 50-кратного микроскопа.

Резерфорд писал тогда, что наблюдение сцинтилляций (вспышек) на экране из сернистого цинка представляет собой очень удобный способ счета частиц, если каждая частица вызывает вспышку. Следовательно, если каждая вспышка вызвана одной альфа-частицей, то перед физиками открывается возможность наблюдать за поведением отдельных атомов.

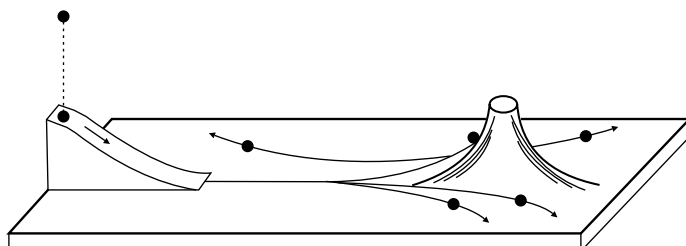
Резерфорд и Гейгер визуально подсчитали, что в продолжение секунды из излучателя в одну тысячную грамма радия вылетает 130 тысяч альфа-частиц. Точность подсчета была безукоризненна. Оба ученых, к которым присоединился позднее Марсден, по многу часов проводили в затемненной лаборатории за утомительным счетом сцинтилляций. Гейгер рассказывал, что ему одному пришлось подсчитать в общей сложности миллион вспышек.



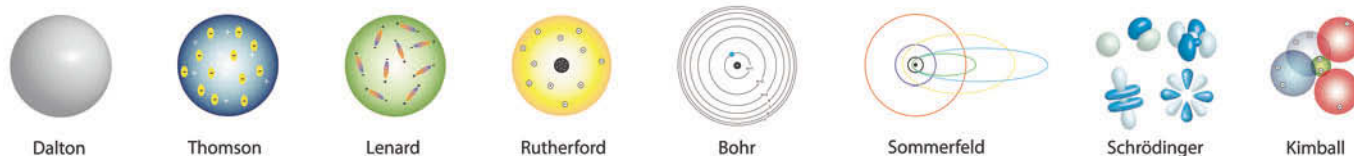
А. То, что ожидается, если модель атома Томсона правильная;
Б. То, что наблюдаем в действительности.

Фольга отражала альфа-частицы, и они отклонялись в среднем на $2-3^\circ$. Но некоторые частицы вели себя странно. Они отклонялись на 90° , а иногда и больше, даже отскакивали назад (в среднем 1 из 50000), словно атомы тонкой фольги служили для них преградой.

Как образно выразился один из сотрудников Резерфорда, принимавший участие в экспериментах, — это напоминало рикошет снаряда, выпущенного из пушки, от листа бумаги. Шарики, летящие точно в направлении на горку, отклоняются на большие углы. Остальные шарики почти не изменяют своего направления: атом практически пуст!



Механическая модель рассеяния α -частиц атомным ядром



Однако не считаться с такими экспериментальными фактами было нельзя — их надо было как-то объяснить, что и было сделано в предложенной модели атома.

Резерфорд уже высказал мысль о том, что рассеяние альфа-частиц на большие углы можно объяснить существованием в атомах массивной части: «...Основная масса атома сосредоточена в маленьком и очень тяжелом ядре». Он назвал ее ядром (*nucleus*), используя по аналогии термин, принятый в биологии и обозначающий центральную часть живой клетки. Отныне модель атома Томсона должна была уйти в историю. Резерфорд предложил более достоверную и принципиально новую ядерную модель. Поскольку атом электрически нейтрален, то отрицательно заряженные электроны по такой модели должны были вращаться вокруг положительно заряженного ядра в объеме с радиусом порядка 10^{-10} м. Модель атома, предложенная Резерфордом, получила название планетарной из-за своего сходства со строением планетных систем.

Опыты Резерфорда, о которых подробно было рассказано, произвели сильное впечатление на физиков того времени. Но если модель Томсона отвергалась в пользу модели Резерфорда, то возникал неразрешимый вопрос: «Почему электроны не падают на ядро?» Если допустить, что в электронном облаке их удерживает центробежная сила, возникающая при быстром вращении вокруг ядра, то тогда возникает другое затруднение: электрический заряд, движущийся в магнитном поле ядра, неизбежно должен излучать энергию. Это следовало из уже проверенной теории Максвелла. Если бы атом постоянно излучал энергию, он бы не мог существовать. Классическая физика оказалась бессильна перед этой проблемой.

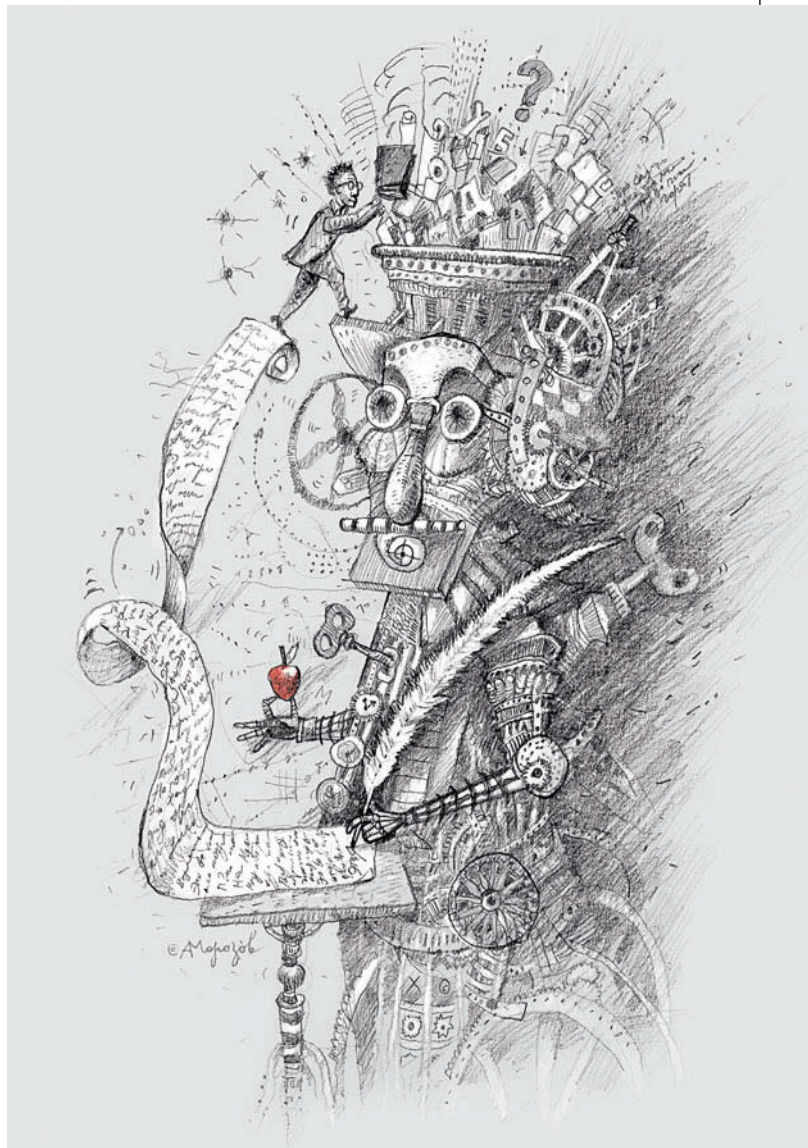
Об этом, в частности, говорил Вильгельм Вин (1864–1928). Указывая на трудность объяснения линейчатых спектров атомов с точки зрения электронной теории, он отмечал: «Проще всего было бы понимать каждый атом как планетную систему, которая состоит из положительно заряженного центра, вокруг которого обращаются электроны как планеты. Но такая система не может быть устойчивой вследствие излучаемой электронами энергии. Поэтому мы вынуждены обратиться к системе, в которой электроны находятся в относительном покое или обладают ничтожными скоростями, хотя такое представление содержит много сомнительного». Единственным, кто задумался о планетарной модели всерьез, был Нильс Бор (1885–1962), тогда еще молодой и ничем не знаменитый. В 1912 году Бор несколько месяцев работал в лаборатории Резерфорда. Но прежде чем рассказывать о работах Бора, необходимо остановиться на одном экспериментальном факте, не получившем объяснения и не дававшем покоя некоторым физикам в конце XIX века. Таким фактом был спектр излучения нагретого тела.

НОВЫЕ ПУТИ ФИЗИКИ

Истину нельзя объяснить так, чтобы ее поняли; надо, чтобы в нее поверили.

Уильям Блейк

8 ■ Факт, не дававший покоя физикам. Спектр излучения абсолютно черного тела. «Ультрафиолетовая катастрофа». Угаданный закон. Атом Бора. Эксперименты Франка — Герца. «Сумасшедшая теория». Квантовые числа. Фотоэффект. Эффект Комптона. Фотонная теория света.

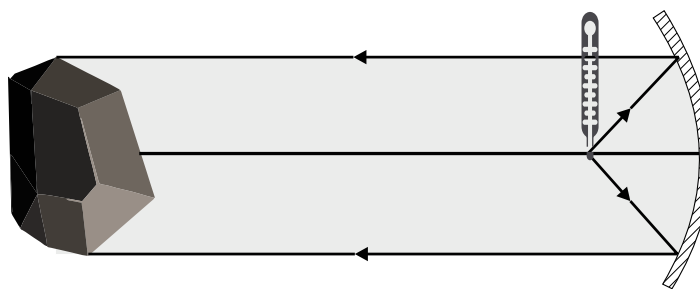




Но еще ранее того времени, когда ученые стали разбираться в спектрах, немецкий ученый Ламберт (1728–1777) проделал следующий эксперимент. Он установил два вогнутых зеркала одно против другого на расстоянии 20 футов (5,1 м). В фокусе одного из них он поместил раскаленные угли, а в фокусе другого — легко воспламеняющиеся тела. И они зажигались. «Лучи огня, — писал он в своем сочинении «Пирометрия, или измерение огня и теплоты» (1779 г.), — подчиняются тем же законам, что и световые лучи». Пикте (1752–1825) и Соссюр (1709–1791) проделали такой же опыт, но воспламеняющееся тело заменили термометром. «Два зеркала были поставлены одно против другого на расстоянии 12 футов ($\approx 3,65$ м) — в фокусе одного мы поместили ядро, в фокусе другого — термометр. Тотчас же температура начала повышаться и в 6 минут поднялась на 10,5 градусов, тогда как другой, поставленный на таком же расстоянии, показывал повышение лишь на 2 градуса».

Чтобы устранить всякое подозрение на то, что термометр нагревается световыми лучами, Пикте взял вместо нагретого ядра сосуд, наполненный кипящей водой; повторив опыт, он обнаружил, что температура в фокусе второго зеркала повысилась больше чем на градус. В течение нескольких десятилетий после этих опытов в физике господствовало убеждение, что от нагретого тела распространяются невидимые лучи теплоты, подчиняющиеся тем же законам распространения и отражения, что и лучи света. Говорят же люди, что лучи солнца осветили комнату (т. е. свет — это излучение), но также говорят — греться в лучах солнца (т. е. и тепло может распространяться в виде лучей). Много позже ученые поняли, что тепловое излучение — это электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет энергии теплового движения атомов и молекул (т. е. внутренней энергии).

Физики долго пытались найти формулу, которая точно и в полном согласии с экспериментом описывала бы спектр излучения черного тела. Чтобы понять первую и, пожалуй, самую серьезную из этих проблем, представьте себе большой черный ящик с зеркальной внутренней поверхностью, в одной из стенок которого проделана маленькая дырочка. Луч света, проникающий в ящик через микроскопическое отверстие, навсегда остается внутри, бесконечно отражаясь от стенок. Объект, не отражающий свет, а полностью поглощающий его, выглядит черным, поэтому его и принято называть черным телом. Термин был введен Г. Кирхгофом в 1862 году. Наиболее черные реальные вещества, например сажа, поглощают до 99 % падающего излучения в видимом диапазоне длин волн, однако инфракрасное излучение поглощается ими значительно хуже. Среди тел Солнечной системы свойствами абсолютно черного тела в наибольшей степени обладает Солнце. Абсолютно черное тело — подобно многим другим — объект чисто



СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА (АЧТ)

АЧТ – физическое тело, которое при любой температуре поглощает все падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах длин волн

Среди тел Солнечной системы свойствами АЧТ в наибольшей степени обладает Солнце

Мощность излучения АЧТ прямо пропорциональна площади поверхности и четвертой степени температуры тела

закон
Стефана-Больцмана

$$R_T = \sigma T^4$$

формула
Релея-Джинса

Формула справедлива только в области малых частот и не описывает результаты эксперимента в области больших частот, где работает закон Вина

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$



Попытка получить с помощью формулы Рэлея-Джинса полную мощность теплового излучения нагретого тела привела к так называемой «ультрафиолетовой катастрофе»

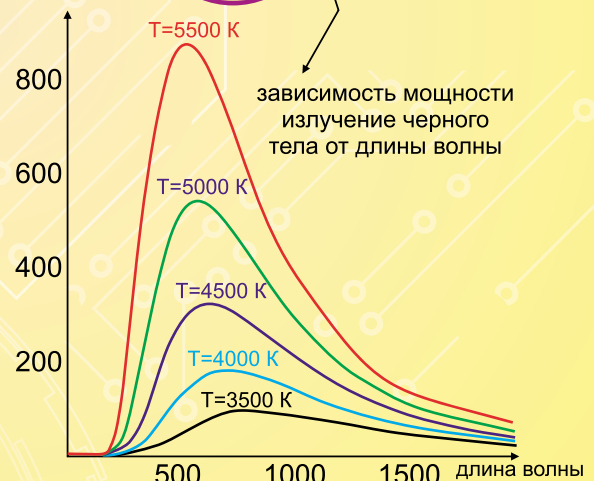
$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

Длина волны, соответствующая пику излучения, умноженная на абсолютную температуру, остается величиной постоянной

закон
смещения Вина

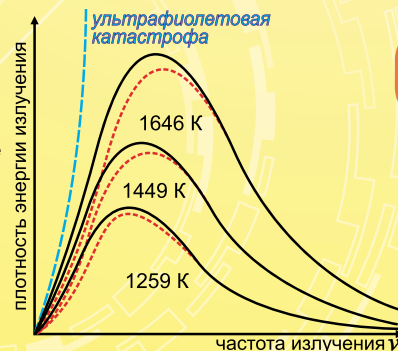
$$b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ мК}$$

постоянная
Вина



ФОРМУЛА ПЛАНКА

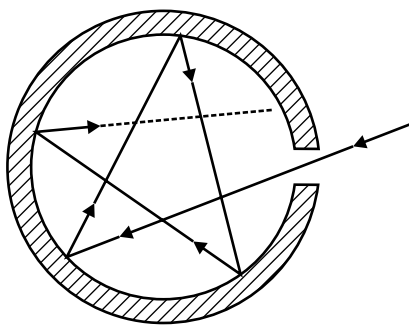
— закон
Релея-Джинса
- - - закон Вина
— распределение
Планка



$$E = h\nu$$

$$h = 6,55 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

E – энергия кванта электромагнитного излучения
 ν – частота излучения
 h – постоянная Планка



Модель абсолютно черного тела

гипотетический, хотя, например, полая, равномерно разогреваемая зеркальная изнутри сфера, свет в которую проникает через единственное крохотное отверстие, является хорошим приближением.

Модель такого черного ящика помогает нам понять, как ведет себя поглощенный черным телом свет, взаимодействуя с атомами его вещества. Изначально к решению проблемы были применены чисто классические методы, которые дали ряд важных и верных результатов, однако полностью решить проблему не позволили, приведя в конечном итоге к резкому расхождению с экспериментом.

СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ НАГРЕТЫХ ТЕЛ. В 1879 году австрийский физик Йозеф Стефан (1835–1893) на основе экспериментальных данных установил закон пропорциональности энергии излучения абсолютно черного тела четвертой степени абсолютной температуры: *мощность излучения абсолютно черного тела прямо пропорциональна площади поверхности и четвертой степени температуры тела*. В 1884 году эту зависимость теоретически на основе классической электродинамики установил Л. Больцман. Отсюда название — закон Стефана — Больцмана.

Экспериментаторы ранее установили, что спектр черного тела напоминает остроконечный холм или горб верблюда. Вершина горба, где излучение максимально, находится при определенной длине волны, значение которой зависит от температуры, причем влево — в направлении коротких длин волн — интенсивность излучения резко убывает (см. рисунок). Нетрудно видеть, что спектр, изображенный на рисунке, содержит непрерывный диапазон частот. Такой непрерывный спектр частот испускают нагретые твердые тела или жидкости и даже плотные газы.

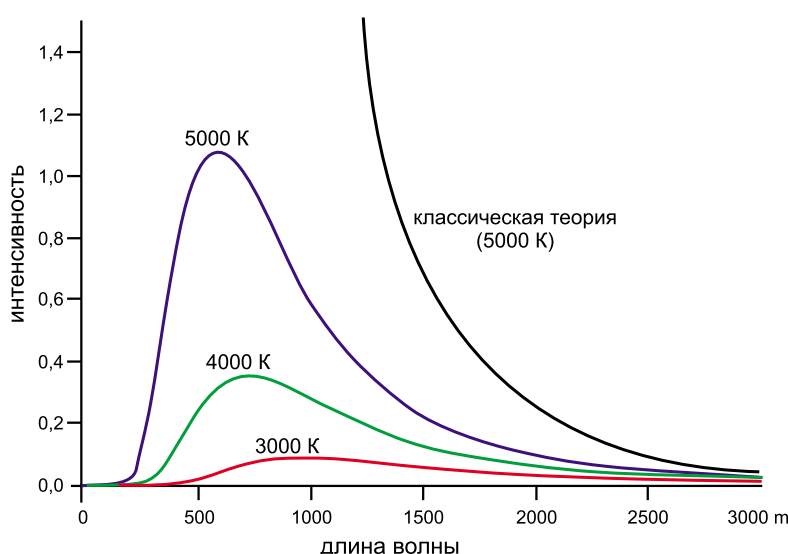


ПЕРВУЮ ПОПЫТКУ ОПИСАТЬ МАТЕМАТИЧЕСКИ СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА ПРЕДПРИНЯЛ РЭЛЕЙ.

Первую попытку описать математически спектр излучения абсолютно черного тела предпринял Рэлей. Попытка состояла в том, чтобы уподобить атомы в стенках сосуда набору колеблющихся зарядов — осцилляторов, каждый из которых, как это положено по теореме Максвелла, имеет в среднем энергию kT (половина этой величины приходится на кинетическую энергию, половина — на потенциальную). После этого можно было, пользуясь методами термодинамики, рассчитать и плотность энергии излучения. Рэлей получил для плотности энергии, находящейся в равновесии со стенками, формулу, носящую название формулы Рэля—Джинса после того, как Дж. Джинс несколько переработал теорию Рэля. Из этого закона получалось, что спектральная плотность мощности излучения должна была неограниченно расти по мере сокращения длины волны. Но это никогда не наблюдалось! Как выглядят результаты расчета по теории Рэля—Джинса и наблюдаемые данные, можно видеть на рисунке.



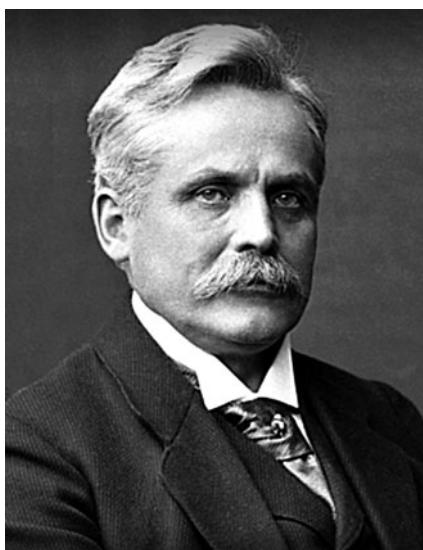
Йозеф Стефан (1835–1893)



Зависимость испускательной способности абсолютно черного тела от длины волны для разных температур (выделены цветом) и ее вид, исходя из классических рассуждений Рэля и Джинса (черный цвет)

В соответствии с формулой Рэля — Джинса с уменьшением частоты излучения число осцилляторов растет беспредельно, так что энергия излучения окажется бесконечной. Термодинамическое равновесие между стенкой и электромагнитным полем в рамках классической физики оказывалось невозможным.

Попытку исправить дело предпринял Вильгельм Карл Вин (1864–1928). Он заинтересовался формулой распределения энергии для ультрафиолетового участка спектра



Макс Планк (1858–1947)

(т. е. областью высоких частот) и нашел формулу, которая хорошо работала в этой области спектра. Кроме того, Вин обнаружил, что кривая излучения перемещается в область более коротких или более длинных волн по мере того, как температура соответственно повышается или понижается, согласно простому соотношению, ныне известному как закон смещения Вина. Длина волны, соответствующая пику излучения, умноженная на абсолютную температуру, остается величиной постоянной (закон смещения Вина). Математически закон смещения Вина записывается так: длина волны, при которой энергия излучения абсолютно черного тела максимальна, определяется соотношением: $\lambda_{max} = 0,0029/T$, где T — температура, λ_{max} — длина волны с максимальной интенсивностью (в метрах). Так, если считать в первом

приближении, что кожа человека близка по свойствам к абсолютно черному телу, то максимум спектра излучения при температуре 36 °C (309 K) лежит на длине волны 9400 нм (в инфракрасной области спектра). Поскольку форма кривой, изображающей зависимость излучаемой энергии от температуры, в основном не меняется, то, зная кривую при одной температуре, можно построить аналогичную кривую и при любой другой температуре, пользуясь законом Вина. Изменения длины волны очевидны в электронагревательном элементе по мере возрастания температуры. Когда элемент становится достаточно горячим, он светится тусклым красным свечением (длинные волны). Если температура повышается, он меняет свечение на ярко-красное, затем оранжевое, далее желтое и, наконец, белое, поскольку длина волны становится все короче и короче. Белый цвет — это смесь многих длин волн. Здесь присутствуют короткие волны в соответствии с законом Вина (длины волн по мере возрастания температуры становятся короче) и все волны, включая и менее длинные, которые обладают достаточной энергией, чтобы присутствовать в видимой компоненте в согласии с законом Стефана—Больцмана (общее количество излучаемой энергии возрастает с увеличением температуры). Закон смещения Вина получил экспериментальное подтверждение при измерениях излучения, испускаемого маленьким отверстием в полости черного тела.

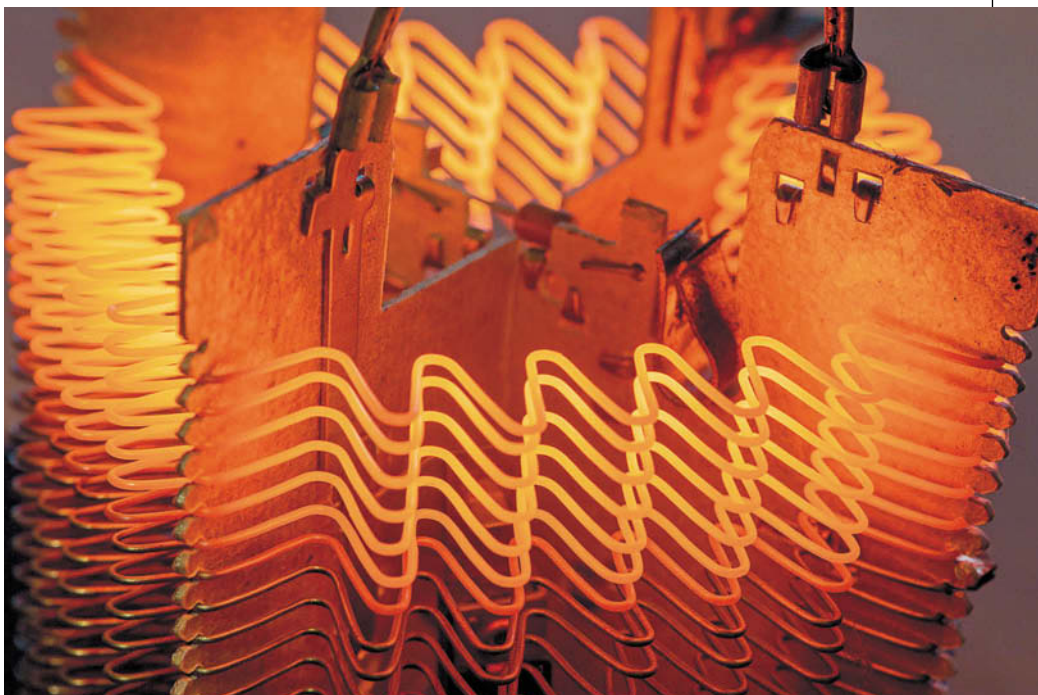
Однако смысл этой формулы был неясным. Никакого отношения к кинетической теории она не имела и для малых частот была непригодна. Возникла парадоксальная ситуация, получившая название «ультрафиолетовая катастрофа» (название было придумано Эренфестом), — расхождение, которое никак не удавалось устранить. Логичные и обоснованные математические расчеты неизменно приводили к формулам, выводы из которых



совершенно расходились с экспериментом. Из этих формул следовало, что раскаленная печь должна с течением времени отдавать все больше тепла в окружающее пространство и яркость ее свечения должна все больше возрастать! Современник «ультрафиолетовой катастрофы», физик Лоренц грустно заметил: «Уравнения классической физики оказались неспособными объяснить, почему угасающая печь не испускает желтых лучей наряду с излучением больших длин волн...»

Необходимо было выяснить причину такого разительного несоответствия физики и опыта! Сложилось странная ситуация. Одна формула была хороша с теоретической точки зрения, но приводила к абсурду; вторая справлялась с катастрофой при высоких частотах, но была, очевидно, неверна при низких. В рассуждениях был где-то порок. Порок лежал в основах теории. Выход из этой ситуации нашел Макс Планк.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ МЕЖДУ СТЕНКОЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В РАМКАХ КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ОКАЗЫВАЛОСЬ НЕВОЗМОЖНЫМ





Макс Планк (1858–1947)

ФОРМУЛА ПЛАНКА. Найти формулу, описывающую спектр излучения абсолютно черного тела, удалось Планку, который получил правильную формулу для спектральной плотности излучения абсолютно черного тела, нагретого до температуры T , которая, как он считал, помогла устранить выявившиеся несоответствия. Замечания Планка были опубликованы в «Сообщениях Немецкого физического общества» под заголовком «Об улучшении спектрального уравнения Вина». Это была маленькая, всего на три страницы, статья. В ней была приведена формула излучения при длинноволновом излучении и высоких температурах, справедливая для опытных данных, полученных ранее в экспериментах Ф. Курлбаума (1857–1927) и Г. Рубенса (1865–1922); при коротких волнах и низких температурах она переходила в закон Вина. Проверка уравнения Планка под-

твердила полное совпадение его с данными опытов. Формула Планка точно согласуется с экспериментальными данными во всем интервале частот от 0 до бесконечности. «Ультрафиолетовая катастрофа» не привела к катастрофе физики!

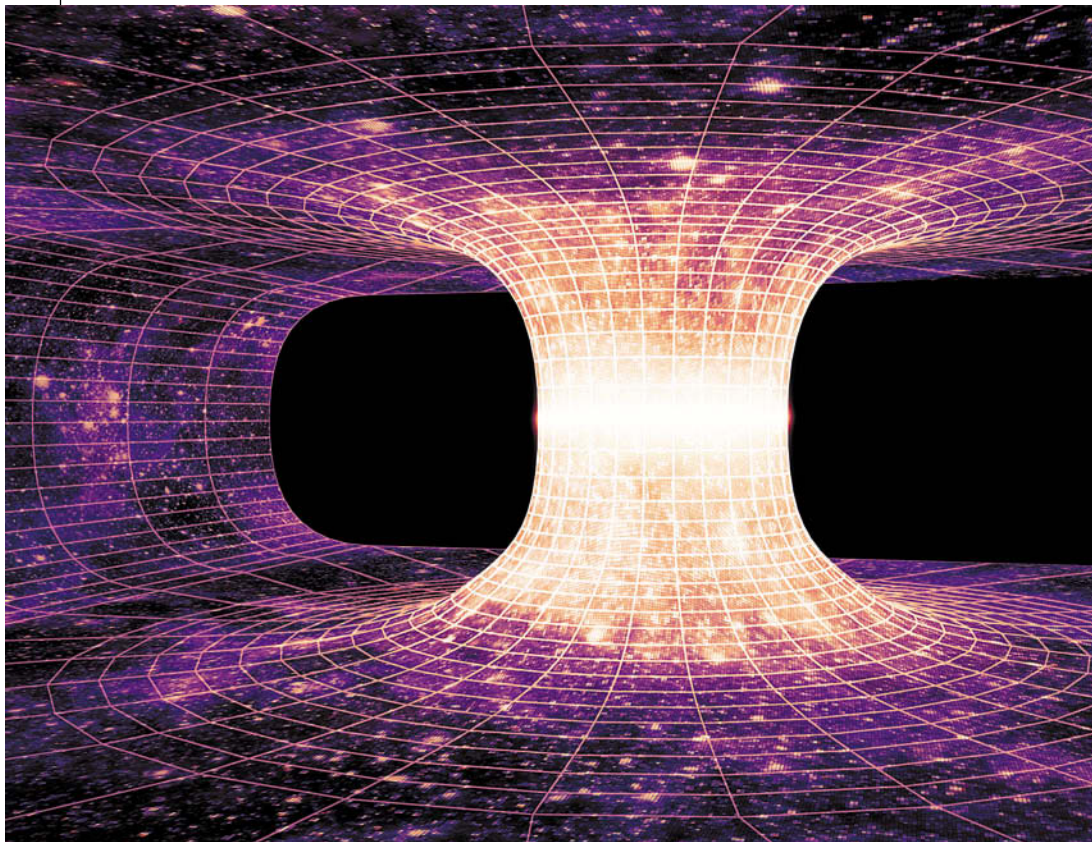
Получив естественное удовлетворение от ее экспериментального подтверждения, Макс Планк задумался об ее теоретическом обосновании. Месяца через два пришел к заключению, что мог бы вывести формулу на основе нового, весьма радикального предположения: в процессах излучения энергия может быть отдана или поглощена не непрерывно и не в любых количествах, а лишь в известных неделимых порциях. Каждая такая порция-квант имеет энергию E , пропорциональную частоте излучения ν : $E = h \cdot \nu$. Сумма энергий этих мельчайших порций определяется через число колебаний соответствующего вида излучения и универсальную естественную константу, которую Планк ввел в науку позднее ставшим знаменитым символом h . Он назвал эту постоянную величину «элементарным квантом действия». Сегодня ее чаще всего называют постоянной Планка.

При выводе своей формулы Планк исходил из того, что свет испускается группами колеблющихся атомов (впоследствии оказалось, что это не так, но не помешало сделать

**Сам планк скромно называл свою гипотезу
«математическим приемом» И «РАБОЧИМ
ПРЕДПОЛОЖЕНИЕМ».**

правильный вывод о «порциях» световой энергии). При этом, по мнению Планка, в нагретом веществе группы атомов, колеблющихся с очень высокими (и очень низкими) частотами не могут составлять большинство, и основная масса порций энергии выделяется в области каких-то промежуточных, «средних» частот. Поэтому нагретый в горне металл (или раскаленная поверхность Солнца) при высоких температурах светятся белым (в белом есть кванты всех длин волн), но не фиолетовым светом. Далее Планк применил формальный прием. Он разделил некоторую суммарную энергию E , принадлежащую N осцилляторам, на определенное целое число P равных





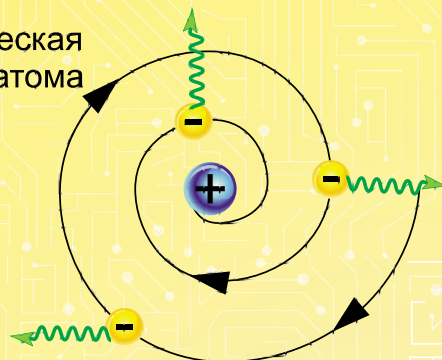
частей $\varepsilon = h\nu$ и распределил эти части между осцилляторами по комбинаторному принципу: $W = (N + P - 1)! / (N - 1)! P!$. Числовое значение h Планк определил еще за полгода до этого в другой связи, на основании измерений Луммера и Прингсхайма.

Постоянная Планка h — одна из универсальных числовых констант природы, входящая во многие формулы и физические законы, описывающие поведение материи и энергии в масштабах микромира. Принятое в настоящее время значение постоянной Планка равно $(6,6260755 \pm 0,00023) \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Вычисленное Планком значение составило $6,55 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, что всего лишь примерно на 1 % отличается от современного значения.

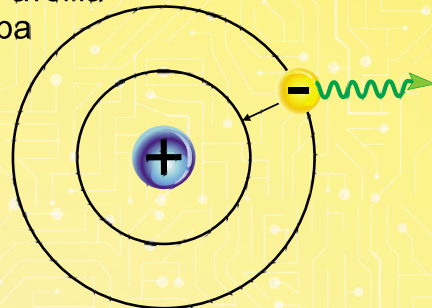
14 декабря 1900 года на заседании Немецкого физического общества в Институте им. Гельмгольца на Рейхстагуфер Макс Планк сообщил о своем революционном (как стало ясно позднее) открытии. Его выводы на девяти страницах вскоре появились в печати под заголовком «К теории закона распределения энергии в нормальном спектре». «После нескольких недель самого напряженного труда в моей жизни темнота спала, и начала вырисовываться невиданная перспектива», — писал он впоследствии. 14 декабря 1900 года был заложен фундамент великой квантовой теории. Сам Планк скромно называл свою гипотезу «математическим приемом» и «рабочим предположением».

КВАНТОВЫЕ ПОСТУЛАТЫ БОРА

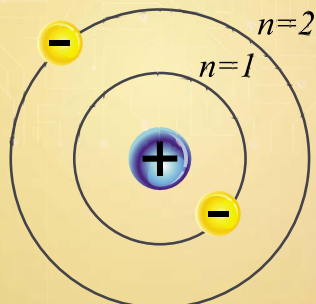
Классическая модель атома



Модель атома Бора

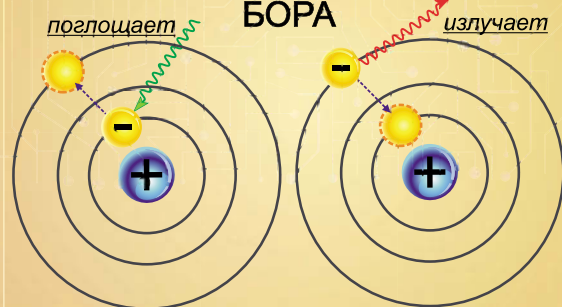


ПЕРВЫЙ ПОСТУЛАТ БОРА



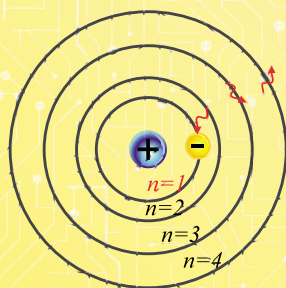
Атом может находиться в особых стационарных состояниях. Находясь в этих состояниях, он не излучает и не поглощает электромагнитные волны

ВТОРОЙ ПОСТУЛАТ БОРА



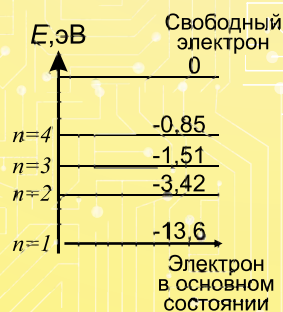
При переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое стационарное состояние с энергией E_k испускается или поглощается один квант энергии

Строение атома водорода по Бору

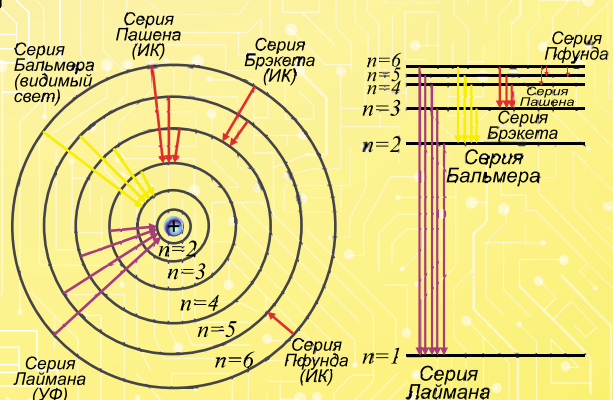


- а) если $n=1$ – основное состояние
- б) если $n>1$ – возбужденное состояние

Вывод: для того чтобы атом мог излучать свет (э-м волны), его нужно возбудить – передать энергию



Спектральные линии





Он не скрывал, что был вынужден выдвинуть такую «странную» формальную гипотезу ради одного — чтобы любой ценой получился положительный результат. Свою идею Планк докладывал коллегам с ощущением, что совершает «акт отчаяния» — настолько она противоречила всем принципам классической физики. Идею кванта он рассматривал только как математический прием. Он так и писал известному американскому физiku Роберту Вуду: «Это была чисто формальная гипотеза... чтобы любой ценой получился положительный результат». Он вспоминал: «Мои тщетные попытки включить тем или иным образом квант действия в классическую теорию продолжались несколько лет и стоили мне больших трудов. Многие мои коллеги видели в этом нечто трагическое. Я держусь другого взгляда. Тем ценнее было для меня то, что я приобрел путем такого основательного уяснения вопроса. Теперь я мог сказать с уверенностью, что квант действия играет в физике гораздо более значительную роль, чем я был склонен считать сначала...».

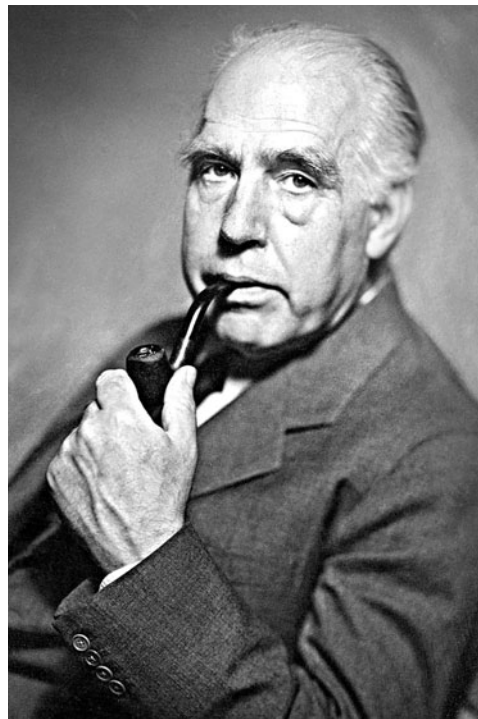
Он назвал эту постоянную величину «элементарным квантом действия».

**СЕГОДНЯ ЕЕ ЧАЩЕ ВСЕГО
НАЗЫВАЮТ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА.**

ПЕРВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТА ДЕЙСТВИЯ: АТОМ БОРА.

В 1912 году на квантовую гипотезу обратил внимание датский физик Нильс Бор. В модели Резерфорда электроны тоже двигались по орбитам, но эти орбиты могли быть «спиралевидными» и электрон падал на ядро атома. Двигаясь по спирали ближе к ядру или дальше от него, атом мог излучать или поглощать энергию. В этом случае спектры испускания атомов должны были быть похожими на непрерывный солнечный спектр, а спектр испускания водорода оказался прерывистым, линейчатым. Большую роль в построении модели атома сыграли сведения, которые Бор почерпнул в беседах со спектроскопистом из Копенгагена Хансеном. Спектроскопия дает много информации о внутреннем строении атома. Эту информацию использовал Бор. Атомные спектры стали эмпирическим основанием для его модели атома.

Бор решил «спасти» модель Резерфорда, предположив, что строением роя электронов в атоме управляет квант действия, который Планк использовал с успехом для



Нильс Бор (1885–1962)

объяснения кривой излучения абсолютно черного тела. Бор предложил считать аксиомой тот факт, что только на постоянных, стационарных орбитах электрон может существовать устойчиво, не падая на ядро. Объяснение этого феномена Бор откладывал до лучших времен, предлагая посмотреть, как новая модель объясняет экспериментальные факты. Бор предположил, что электроны в атомах также не могут терять энергию непрерывно, а должны совершать при этом квантовые переходы с одной орбиты на другую. Иными словами, линейчатые спектры испускаются атомами вещества, когда электроны в атоме переходят из одного состояния в другое. В связи с этим он выдвинул два предположения, которые названы постулатами.

Первый постулат (постулат стационарных состояний).

Атом может находиться в особых стационарных состояниях (слово «стационарный» образовано от латинского слова *stationarius* — неподвижный). Находясь в этих состояниях, он не излучает и не поглощает электромагнитные волны. Каждому стационарному состоянию соответствует определенное значение энергии — энергетический уровень.

Разрешенными стационарными орбитами являются только те, для которых угловой момент импульса L электрона равен целому кратному величине постоянной Планка h . Поэтому для n -ой стационарной орбиты выполняется условие квантования $L = mvr = nh/2\pi$, $n = 1, 2, \dots$ орбит и их энергии.

Второй постулат (правило частот). При переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое стационарное состояние с энергией E_k испускается или поглощается один квант энергии. (см. рисунок). При этом частота f излучения атома определяется разностью энергий атома в двух стационарных состояниях, так что $hf = E_k - E_n$.

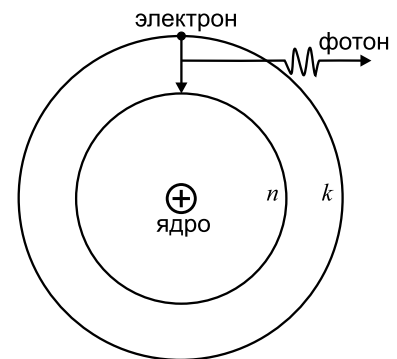
Итак, электрон может обращаться вокруг ядра только в соответствии с дискретной (прерывистой) последовательностью возможных частот колебаний, каждая из которых соответствует в общем одной классической орбите старой планетарной модели. Этим Бор избежал противоречия с классической механикой, согласно которой электрон при вращении по орбите должен излучать энергию (см. выше).

Найдем радиусы стационарных орбит электрона в атоме Бора.

Запишем условие вращения электрона массы m_0 по круговой орбите радиуса r под действием кулоновской силы со стороны ядра и формулу Бора квантования момента импульса электрона $m_0 v^2/r = 1/4\pi\epsilon_0 \cdot Ze^2/r^2$ и $m_0 vr = nh/2\pi$. Здесь Ze — заряд ядра (Z — число положительных элементарных зарядов).

Решая эту систему уравнений, находим для радиусов допустимых (стационарных) орбит электрона в атоме водорода следующее выражение: $r_n = n^2 h^2 \epsilon_0 / (\pi m_0 Z e^2)$, $n = 1, 2, \dots$

Введем в качестве универсальной константы теории боровский радиус $r_1 = a_0 = \epsilon_0 h^2 / (\pi m_0 e^2) = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ как радиус первой стационарной орбиты электрона в атоме водорода. Тогда радиусы более далеких орбит будут кратны n^2 : $r_2 = 4r_1$; $r_3 = 9r_1$ и т. д.



Возможные орбиты
в модели атома водорода



Джеймс Франк (1882–1964)

Из приведенных соотношений следует, что на каждой из допустимых орбит электрон обладают определенной энергией. Полная энергия электрона равна сумме кинетической и потенциальной энергий. Потенциальная энергия равна $U = -eV$, где V — потенциал точечного заряда: $U = -1/4\pi\epsilon_0(Ze^2/r_n)$.

Полная энергия $E_n = 1/2m_0v^2 - 1/4\pi\epsilon_0(Ze^2/r_n)$. Подставляя в правую часть E_n выражение для v из соотношения для L и выражение для r_n , получим

$$E_n = -(Z^2e^4m_0/8\epsilon_0^2h^2)(1/n^2), \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Для водорода низший энергетический уровень соответствует $n = 1$. Подставляя в формулу значения констант, получим $E_1 = -2,17 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = -13,6 \text{ эВ}$.

Энергия более высоких орбит уменьшается обратно пропорционально n^2 : $E_n = -13,6/n^2 \text{ (эВ)}$. Как мы видим, в модели Бора квантуются не только радиусы орбит, но и энергии. Заметим, что энергии удаленных орбит уменьшаются по абсолютной величине. Но так как они отрицательны, то ближайшая к ядру орбита имеет самую низкую энергию.

Электронам, не связанным в атоме, отвечает бесконечное значение n , и соответственно $E = 0$. Электронам, связанным в атоме, отвечает энергия $E < 0$. Чтобы оторвать электрон от атома, требуется затратить энергию, называемую энергией ионизации. Энергия ионизации водорода согласно измерениям равна 13,6 эВ. Эта энергия соответствует вырыванию электрона из низшего состояния с $E_1 = -13,6 \text{ эВ}$ при переходе в состояние с $E = 0$, когда электрон свободен.

Низший энергетический уровень (или состояние) соответствует энергии E_1 и называется основным состоянием. Более высокие состояния (с E_2, E_3, \dots) называются возбужденными состояниями.

Так как $hf = hc/\lambda$, то $1/\lambda = 1/hc(E_n - E_m)$ или $1/\lambda = -(Z^2e^4m_0/8\epsilon_0^2h^2)(1/n^2 - 1/k^2)$, где квантовое число n относится к верхнему, а k — к нижнему состоянию. Приведенная формула имеет такой же вид, как и эмпирическая формула Бальмера при $n=2$. Таким образом, серия Бальмера соответствует в боровской модели переходам электронов на второй энергетический уровень (рис.).

Постоянную $Z^2e^4m_0/8\epsilon_0^2h^2$ в приведенной формуле, вычисленную для $Z = 1$, называют постоянной Ридберга. Ее значение $R = 1,0974 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$.

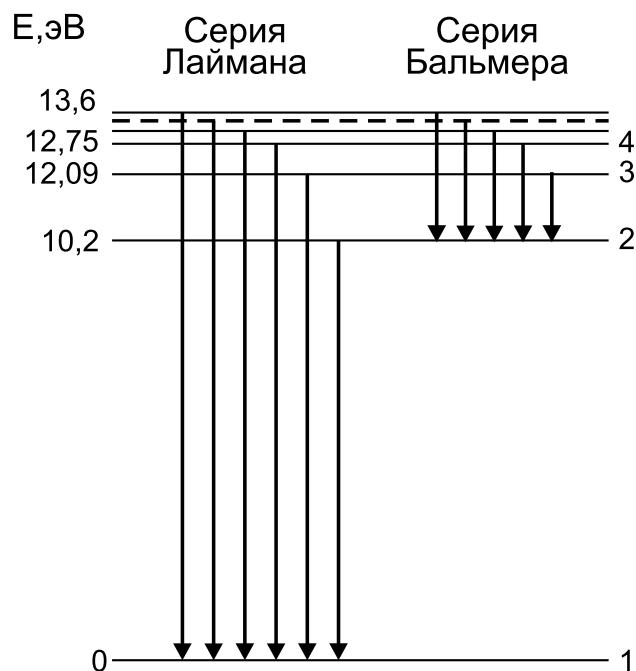
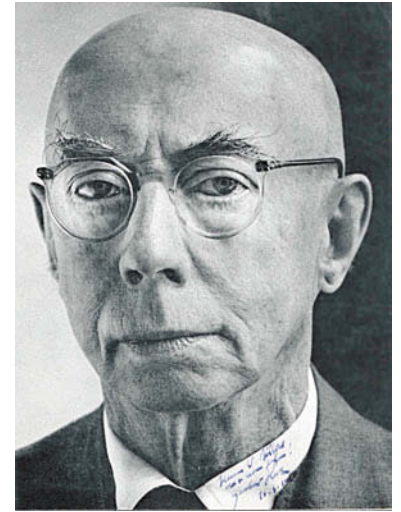


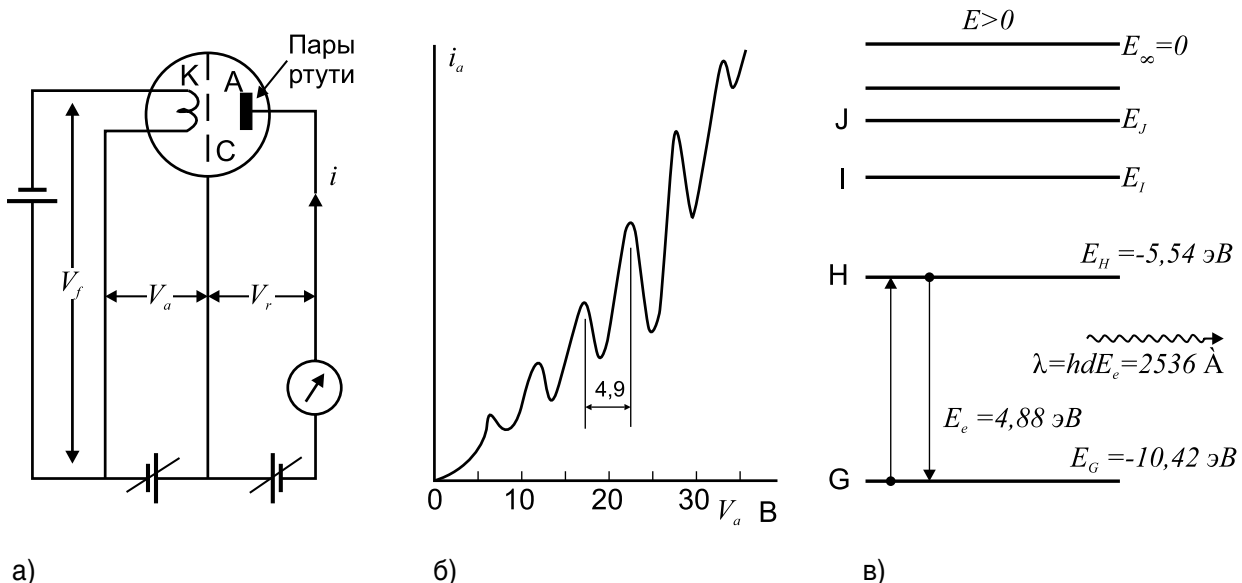
Схема уровней энергии в атоме водорода в сериях Лаймана и Бальмера

Теория Бора, опубликованная в 1913 году, принесла ему известность, а его модель стала известна как атом Бора. Опыты Джеймса Франка и Густава Герца (племянника Г. Герца), выполненные в 1913 году, показали существование у изолированных атомов дискретных уровней энергии и явились прямым подтверждением квантовых постулатов Бора.

Эксперименты Франка — Герца. Эксперименты Франка — Герца подтвердили предположение Бора о том, что спектры атомов объясняются наличием дискретных энергетических уровней, которые могут возбуждаться в результате рассеяния электронов на атоме. Энергии связи внешних электронов в тяжелых атомах составляют несколько эВ. На рисунке показаны уровни энергии валентных электронов атома ртути. Энергия электронов основного состояния $E_0 = -10 \cdot 42$ эВ. Энергия первого возбужденного состояния $E_h = -5 \cdot 54$ эВ. Энергия перехода между этими состояниями $E = E_h - E_0 = -5 \cdot 54 - (-10 \cdot 42) = 4 \cdot 88$ эВ. Если энергия пучка медленных электронов, проходящего через пары ртути, меньше $4 \cdot 88$ эВ, то столкновения электронов пучка с атомами ртути будут упругими, т. е. без передачи энергии. Если энергия пучка электронов превышает $4 \cdot 88$ эВ, то происходят неупругие столкновения с передачей части энергии электрону атома ртути, сопровождающиеся переходами



Густав Герц (1887–1975)

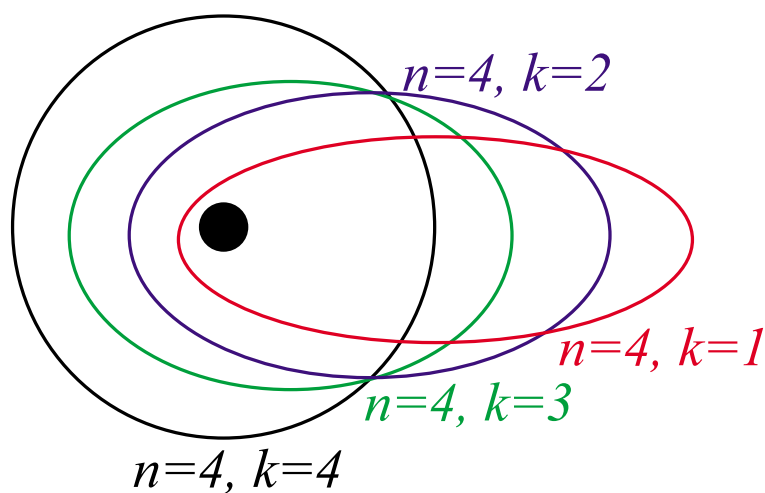


Опыт Франка — Герца: а) схема экспериментальной установки. В баллоне с парами ртути имелись три электрода: К — катод, А — анод и С — сетка. Ускоряющая разность потенциалов V_a прикладывалась между катодом и сеткой, между сеткой и анодом создавалось тормозящее поле с $V_r = 0 \cdot 5$ В; б) полученная зависимость анодного тока от V_a . Интервал между максимумами составляет 4,9 В; в) схема энергетических уровней ртути.



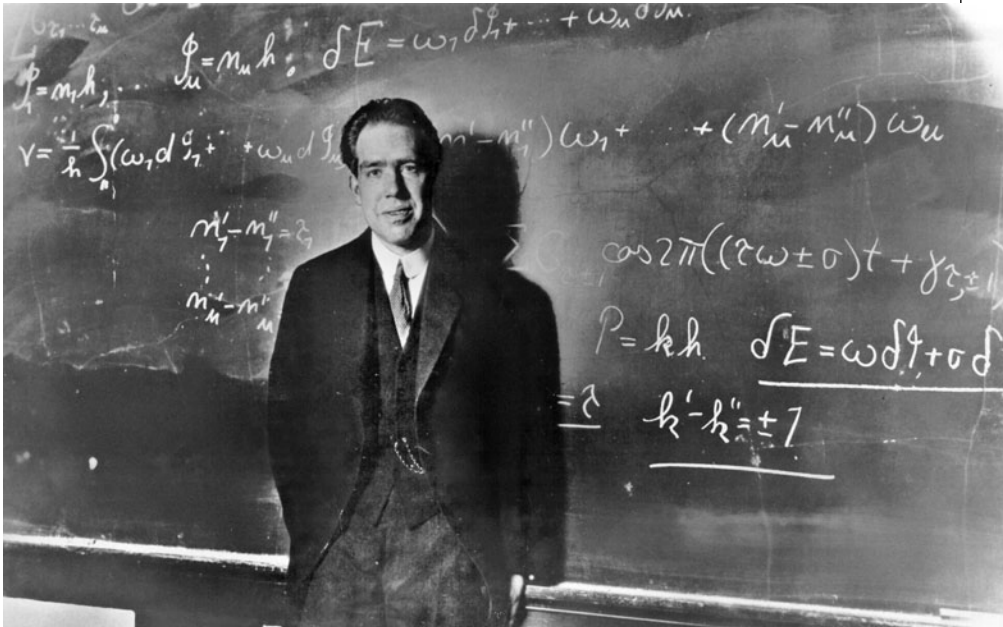
электронов атома ртути в первое возбужденное состояние. Поэтому в зависимости анодного тока от ускоряющего потенциала будут наблюдаться характерные максимумы и минимумы, соответствующие дискретным уровням энергии, на которых находятся внешние электроны атома ртути.

Лишь после Бора удалось объяснить характер линейчатых спектров. Теоретический и экспериментальные результаты хорошо согласуются, но... теория Бора правильно объясняет линейчатый спектр лишь атома водорода. Однако уже при попытке объяснить строение атома гелия теория Бора терпит неудачу. А дальше сценарий внешне очень напоминает историю с моделью Птолемея, теорией Кеплера... Пришлось подправить боровскую модель атома. В 1916–1918 гг. Арнольд Зоммерфельд (1868–1951) добавляет к круговым орбитам электронов эллиптические стационарные орбиты. Появляются новые квантовые числа. Используя координаты в плоскости орбиты: радиус-вектор r и азимутальный угол φ , Зоммерфельд получил два квантовых числа: азимутальное n_φ (k — на рисунке) и радиальное n_r . Их сумма равна главному квантовому числу n теории Бора. Возможные значения азимутального квантового числа Зоммерфельда n_φ определяются для стационарных орбит условием: $n_\varphi = 1, 2, 3, \dots, n$.



Эллиптические орбиты электрона в атоме водорода согласно модели Бора—Зоммерфельда

А ДАЛЬШЕ СЦЕНАРИЙ ВНЕШНЕ ОЧЕНЬ НАПОМИНАЕТ ИСТОРИЮ С МОДЕЛЬЮ ПТОЛЕМЕЯ, ТЕОРИЕЙ КЕПЛЕРА... ПРИШЛОСЬ ПОДПРАВИТЬ БОРОВСКУЮ МОДЕЛЬ АТОМА.



Нильс Бор на конференции в 1919 г.

Зоммерфельд уточнил выражение орбитального момента электрона для стационарных эллиптических (и круговых) орбит. Теперь, в отличие от теории Бора, он равен $n_\phi \hbar/2\pi$. Но, как было и в случае с моделью Птолемея, дополнительные построения (там всякие эпициклы, деференты, эктанты и др., здесь — модификация орбит, связанная с введением дополнительных квантовых чисел) не смогли объяснить экспериментальные факты.

С моделью Бора физикам трудно было примириться. Теория Бора являлась недостаточно последовательной и общей. Она не смогла объяснить интенсивность спектральных линий и фактически была справедлива только для водородоподобных атомов и не работает для атомов, следующих за ним в таблице Менделеева. И, наконец, теория Бора логически противоречива: не является ни классической, ни квантовой. В системе двух уравнений, лежащих в ее основе, одно — уравнение движения электрона — классическое, другое — уравнение квантования орбит — квантовое. Вот как отреагировал П Эренфест: «Работа Бора... приводит меня в отчаяние: если формулу Бальмера можно получить таким образом, то я должен выбросить всю физику на свалку и сам отправиться туда же»

Поль Дирак, лауреат Нобелевской премии, говорил: «Мы просто замучились с теорией Бора. Теория Бора давала хорошие результаты, пока речь шла об одном электро-не. Но на этом пути нельзя было далеко продвинуться. В спектроскопии исследовались по большей части атомы с несколькими электронами, и было совершенно непонятно, как учесть взаимодействие между электронами в рамках теории Бора. Была проделана большая работа, но положение оказалось совершенно безнадежным: сложные вычисления не давали полезных результатов». Квантовая модель была совершенно необычной. Так,



Первый постулат Бора полностью противоречит классической электродинамике. «Чем больших успехов добивается квантовая теория, тем бестолковее она выглядит», — писал А. Эйнштейн в 1912 году. А воспитанный в традициях классической теории и сделавший весьма многое для ее углубления и развития Лоренц не мог легко и быстро принять все те грандиозные перемены, которые пришли в физику с началом нового века. А. Ф. Иоффе в книге «Встречи с физиками» приводит слова Лоренца: «Сегодня, излагая электромагнитную теорию, я утверждаю, что движущийся по криволинейной орбите электрон излучает энергию, а завтра я в той же аудитории говорю, что электрон, вращаясь вокруг ядра, не теряет энергии. Где же истина, если о ней можно делать взаимно исключаящие друг друга утверждения? Способны ли мы вообще узнать истину и имеет ли смысл заниматься наукой?»

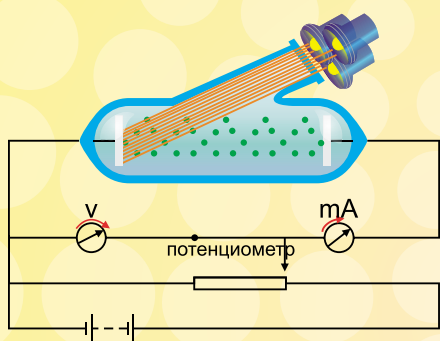
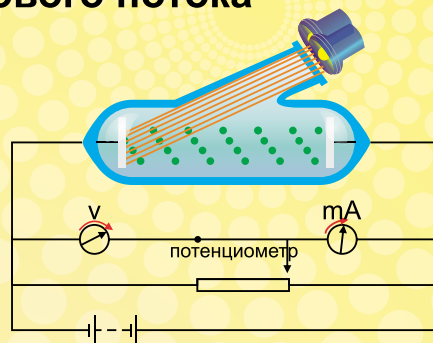
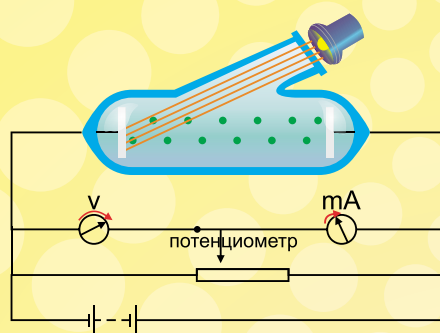
Трудности и противоречия накопились, и надо было искать выход.



ФОТОЭФФЕКТ

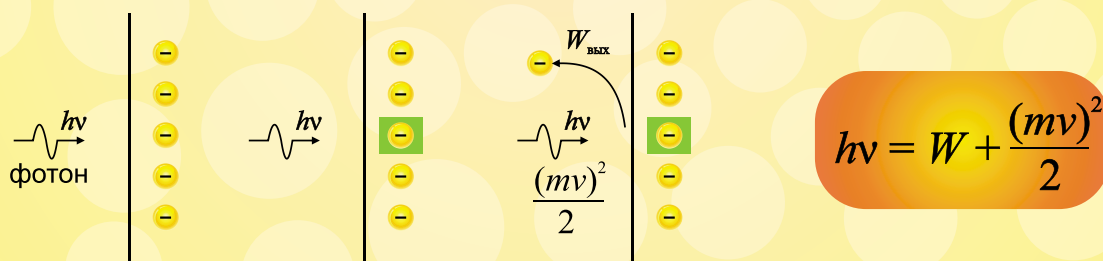
это испускание электронов металлами под действием света

Зависимость фототока от интенсивности светового потока

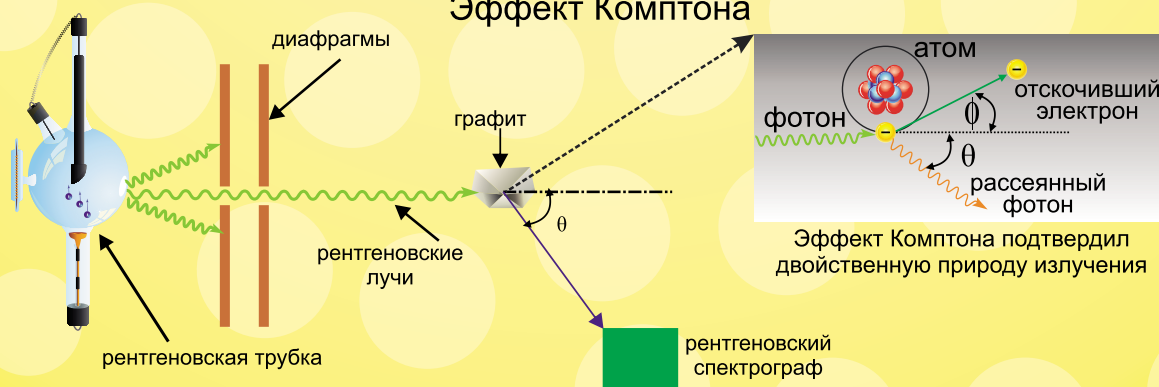


Теоретическое объяснение явлений, сопровождающих фотоэффект, было дано А. Эйнштейном в 1905 г. на основе квантовых представлений (Нобелевская премия)

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта



Эффект Комптона





ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТЕОРИИ КВАНТОВ: ФОТОЭФФЕКТ, ЭФФЕКТ КОМПТОНА. Электроны проявились в важном для физики явлении, получившем название фотоэффект. Фотоэффект — это испускание электронов телами под действием света. Эффект был открыт в 1887 году Г. Герцем. Он обнаружил, что разряд между двумя металлическими шариками (прохождение искры) заметно облегчается, то есть происходит при меньшем напряжении, если их осветить ультрафиолетовым светом. Факт вызвал интерес среди физиков. В 1888 году немецкий физик Вильгельм Гальвакс (1859–1922) исследовал описанное Герцем явление. Он освещал металлический диск, соединенный с электро-скопом или электрометром. Рядом с диском был помещен соединенный с другим электро-скопом экран с отверстием для пропускания света на диск. Гальвакс обнаружил, что если диск был заряжен отрицательно, то под действием света он терял этот заряд,

**ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА БЫЛИ УСТАНОВЛЕНЫ
ФИЛИППОМ ЛЕНАРДОМ
И АЛЕКСАНДРОМ ГРИГОРЬЕВИЧЕМ СТОЛЕТОВЫМ
НА РУБЕЖЕ XX ВЕКА.**

а экран приобретал отрицательный заряд. Если же диск был заряжен положительно, то свет не оказывал влияния. Он также убедился в том, что тело, на которое действовали ультрафиолетовые лучи, приобретало положительный заряд. Почему существовала такая разница?

Законы фотоэффекта были установлены Филиппом Ленардом и Александром Григорьевичем Столетовым на рубеже XX века. Эти ученые измеряли число выбитых электронов и их скорость в зависимости от интенсивности падающего излучения. Ф. Ленардом в 1900 году облучался отрицательный электрод через кварцевое окошко в вакуумной колбе. Было обнаружено, что ток вызван только ультрафиолетовой частью спектра облучения, а эксперименты с выбором материала показали зависимость возникновения тока от материала, точнее от спектра его поглощения, что сегодня называется красной границей фотоэффекта.

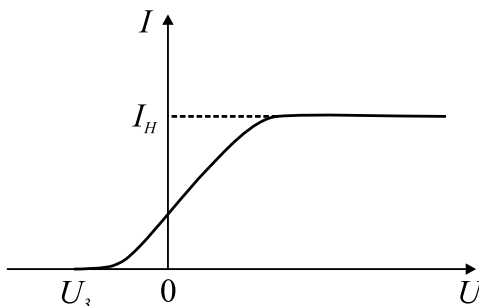
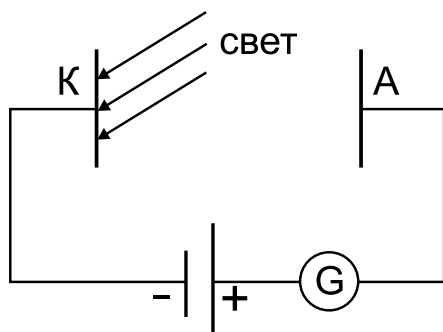
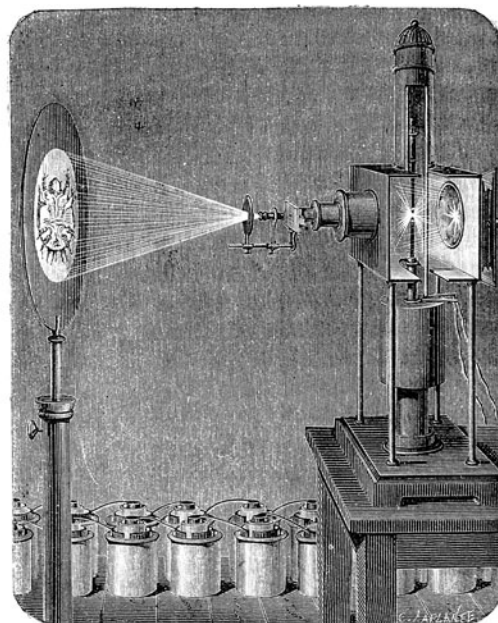


Схема наблюдения фотоэффекта и зависимость тока фотоэлектронов от приложенного напряжения

Многочисленными экспериментаторами были установлены следующие основные закономерности фотоэффекта.

Фототок насыщения I_n (максимальное число электронов, высвобождающихся светом за 1 с) прямо пропорционален световому потоку, падающему на катод.

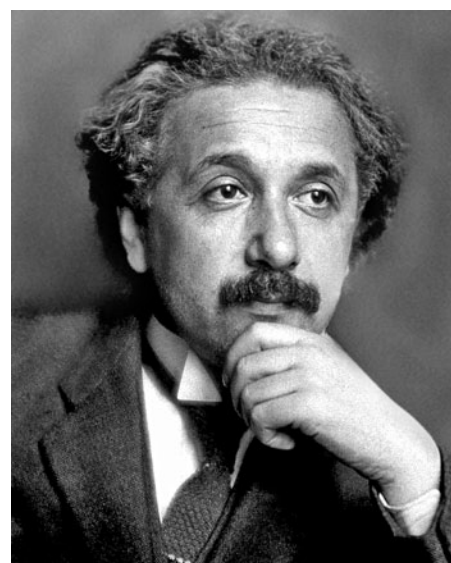
Для каждого вещества существует граница фотоэффекта, т. е. наименьшая частота ν_{min} , при которой еще возможен фотоэффект. Иными словами, если направить на мишень пучок красных лучей, то электроны не вылетят вообще.

Если излучение — волновой процесс, такого не может быть.

Эйнштейн предложил свое объяснение на основе гипотезы М. Планка о том, что свет излучается и поглощается определенными порциями, причем энергия каждой такой пор-



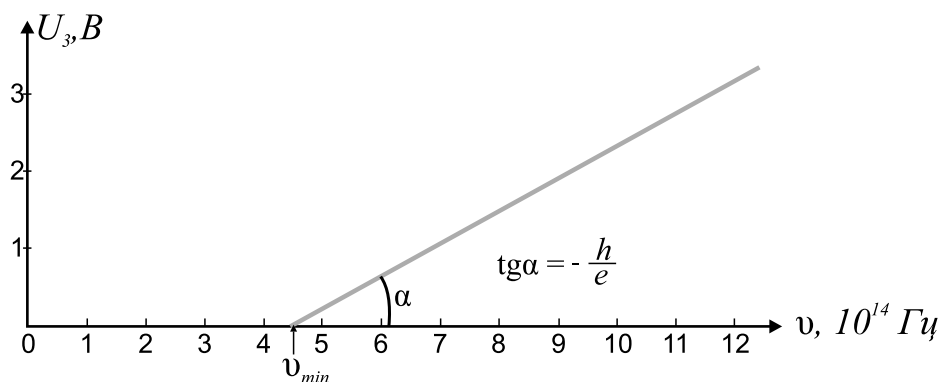
ции определяется формулой $E = h\nu$, где h — постоянная Планка. Эйнштейн сделал следующий шаг в развитии квантовых представлений. Он пришел к выводу, что и свет имеет прерывистую дискретную структуру. Эйнштейн утверждал: свет не только испускается квантами, как того требовала гипотеза Планка, но и распространяется также квантами: электромагнитная волна состоит из отдельных порций — квантов, впоследствии названных фотонами*. При взаимодействии с веществом фотон целиком передает всю свою энергию $h\nu$ одному электрону. Часть этой энергии электрон может рассеять при столкновениях с атомами вещества. Кроме того, часть энергии электрона затрачивается на преодоление потенциального барьера на границе металл — вакуум. По мысли Эйнштейна, какая-то часть ее, назовем ее W , расходуется на то, чтобы вырвать электрон из атома, а остальная часть — на то, чтобы разогнать его до скорости v , то есть сообщить ему кинетическую энергию $(mv^2)/2$. Оба эти утверждения можно коротко записать в виде простого уравнения: $h\nu = W + (mv^2)/2$. Эту формулу принято называть уравнением Эйнштейна для фотоэффекта. Эта простая формула сразу проясняет всю картину. С помощью уравнения Эйнштейна можно объяснить все закономерности внешнего фотоэффекта (внутренним фотоэффектом называется перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием излучений). Так как электроны удерживаются в металле силами притяжения, для их выбивания с поверхности металла требуется минимальная энергия W_0 , называемая работой выхода, зависящая от свойств материала катода. Для большинства металлов она состав-



Альберт Эйнштейн (1879–1955)

Эйнштейн сделал следующий шаг в развитии квантовых представлений. Он пришел к выводу, что и свет имеет прерывистую дискретную структуру.

* Эйнштейн ввел понятие «светового кванта». А современное название, «фотон», получено от греческого слова «ph s» (означает свет), было введено в 1926 году химиком Гилбертом Ньютоном Льюисом, опубликовавшим теорию, в которой фотоны считались «несоздаваемыми» и «неразрушимыми». Хотя теория Льюиса никогда не использовалась, так как находилась в противоречии с экспериментами, термин «фотон» начал использоваться большинством физиков (постулированный Эйнштейном фотон был открыт в 1922 году А. Комптоном).



Зависимость запирающего потенциала U_s от частоты ν падающего света

ляет несколько элетрон-вольт. Если частота падающего света недостаточна для выбивания электрона с поверхности металла, то фототок равен нулю. Эффект фотоэлектронной эмиссии наблюдается, когда энергия падающих квантов электромагнитного излучения больше работы выхода электронов W_0 из материала катода. Пороговая энергия фотоэлектронной эмиссии определяется из выражения $h\nu_{кр} = A$, где $\nu_{кр}$ — пороговая частота фотоэлектронной эмиссии (известная, как красная граница фотоэффекта).

Из уравнения Эйнштейна следуют линейная зависимость максимальной кинетической энергии от частоты и независимость ее от интенсивности света, существование красной границы (действительно, пока энегия квантов мала (красный свет), они не могут выбить электрон из атома $h\nu < W$), безынерционность фотоэффекта. Общее число фотоэлектронов, покидающих за 1 с поверхность катода, должно быть пропорционально числу фотонов, падающих за то же время на поверхность.

Если теперь на анод подать некоторое отрицательное напряжение, то вовсе не у всех электронов хватит энергии, чтоб преодолеть отталкивание от анода. И вполне очевидно, что чем больше это напряжение, тем труднее будет электронам его преодолеть. При некоторой величине этого напряжения (когда eU будет в точности равно кинетической энергии электронов E_k) фототок полностью прекратится. Это напряжение называется запирающим (U_s). Оно зависит от длины волны света (см.рисунок). Тщательные измерения показали, что запирающий потенциал линейно возрастает с увеличением частоты ν света.



Артур Холли Комптон (1892–1962)



Петер Джозеф Уильям Дебай
(1884–1966)

Как следует из уравнения Эйнштейна, тангенс угла наклона прямой, выражающей зависимость запирающего потенциала U_z от частоты ν , равен отношению постоянной Планка h к заряду электрона e :

$$\operatorname{tg} \alpha = h/e.$$

Это позволяет экспериментально определить значение постоянной Планка. Такие измерения были выполнены Р. Милликеном (1914 г.) и дали хорошее согласие со значением, найденным Планком.

Важную роль в подтверждении теории квантов сыграл эффект Комптона, названный в честь его открывателя А. Г. Комптона (1892–1962). Комптон начал свои опыты в 1922 году. А годом позднее он и нидерландско-американский физик Петер Джозеф Уильям Дебай (1884–1966) дали теоретическую интерпретацию результатам опытов.

Комптон изучал рассеяние рентгеновского излучения различными веществами и обнаружил, что частота рассеянного света меньше частоты падающего света.

Объяснить эффект Комптона в рамках классической электродинамики невозможно. С точки зрения классической физики электромагнитная волна является непрерывным объектом и в результате рассеяния на свободных электронах изменять свою длину вол-

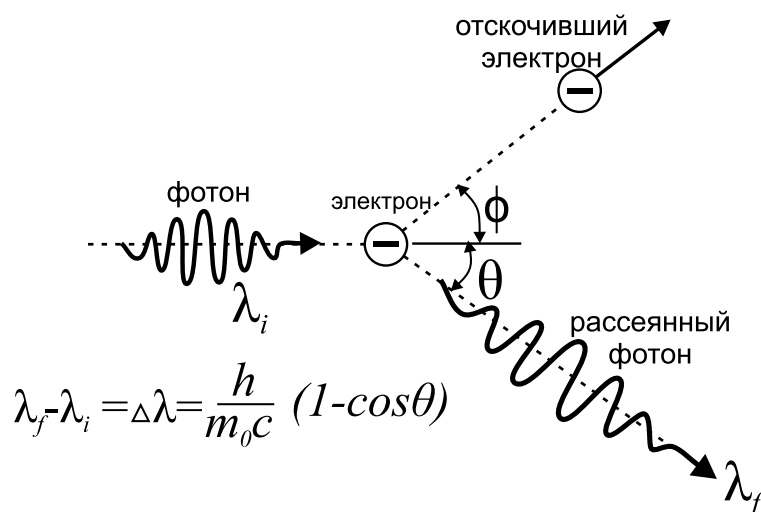


Иллюстрация эффекта Комптона





ны не должна. Иное дело, если фотоны действительно можно уподобить частицам, то они, кроме энергии, должны иметь и импульс. Более того, импульс фотонов, если он у них существует, должен быть связан с энергией той же формулой, которая имеет место в механике. Так ли это и можно ли фотону приписать импульс, и было экспериментально решено Комптоном. Комптон исследовал процесс столкновения фотонов с электронами. Если фотон имеет импульс, то при столкновении с электроном суммарный импульс должен сохраняться, что в опыте так или иначе должно проявляться. Все как

**РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СНАЧАЛА ВЕДЕТ СЕБЯ
КАК ВОЛНА, ЗАТЕМ ВЗАИМОДЕЙСТВУЕТ
С ЭЛЕКТРОНОМ КАК ЧАСТИЦА (ФОТОН) И ПОСЛЕ
СТОЛКНОВЕНИЯ ВНОВЬ ПОДОБНО
ВОЛНЕ.**





при столкновении бильярдных шаров (см. ранее). Эффект становится объяснимым, если полагать, что электромагнитное излучение представляет собой поток фотонов, каждый из которых обладает энергией $h\nu$ и импульсом. Т. е. фотон ведет себя, грубо говоря, как движущийся шарик. В легких веществах, с которыми проводил опыты А. Комптон, энергия связи электронов мала по сравнению с энергией, передаваемой ему квантами рентгеновского излучения, и электроны можно считать свободными. При комптоновском рассеянии происходит упругое столкновение фотона со свободным электроном. По образному выражению М. Борна эффект Комптона — это игра в бильярд фотонами и электронами.

Комптон поставил опыт по рассеянию рентгеновских лучей на графите. Рентгеновские лучи, как свет очень короткой длины волны, должны рассеиваться на атомах и отдельных электронах. Суть опыта Комптона заключалась в следующем. Узкий направленный пучок монохроматических рентгеновских лучей подается на небольшой образец из графита. Рентгеновские лучи, как известно, обладают хорошей проникающей способностью: они проходят через графит, и одновременно часть их рассеивается во все стороны на атомах графита. Рассеянные лучи улавливались под различными углами рассеяния, и с помощью рентгеновского спектрографа измерялась длина волны рассеянного света. Математически решить задачу не составляло труда (опять же как в случае задачи о столкновении упру-

гих шаров). Энергия рассеянных фотонов, предсказанная фотонной теорией, полностью совпала с экспериментальными данными. Уменьшение энергии фотона после комптоновского рассеяния называется комптоновским сдвигом (см. рисунок). В классической электродинамике рассеяние электромагнитной волны на заряде (томсоновское рассеяние) не сопровождается уменьшением ее частоты.

Опыты Комптона блестяще подтверждают фотонную теорию света: свет можно рассматривать как поток корпускул-фотонов, энергия и импульс которых определяются частотой света. Открытие эффекта Комптона еще раз подтвердило двойственную природу излучения — дуализм волна — частица (см. ниже). Рентгеновское излучение сначала ведет себя как волна, затем взаимодействует с электроном как частица (фотон) и после столкновения вновь подобно волне.

Подведем итог. Казалось, физики смогли обойти все подводные рифы и справиться с возникшими трудностями. Но действительность оказалась сложнее. Теория Бора, рассмотренная в предыдущей главе, хотя и смогла объяснить удовлетворительным образом строение атома водорода, оказалась бессильной в случае более сложных атомов. Эта теория представляла собой странную смесь классических и квантовых представлений. Примерно с 1920 года в атомной физике начинает утрачиваться представление о строении даже простейшего атома водорода. Считается, что к этому времени старая квантовая теория «...представляла собой... скопление гипотез, принципов, теорем и вычислительных рецептов...», не могла объяснить наблюдаемые в опытах явления, относящиеся к атомам.

В целом, такое состояние было названо кризисом в физике.

Было обнаружено существенное противоречие между классическим описанием движения электрона в атоме и результатами наблюдений. А это явный признак того, что теория неверна.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	5
Введение.....	7
1. Природа глазами древних людей	11
2. Космология средних веков. Система мира Птолемея	49
3. Астрономические открытия Галилея. Физика колебаний маятника	68
4. Свободное падение тел и здравый смысл	84
5. Механика Ньютона. Математический инструмент классической физики	96
6. Невидимая рука гравитации. Закон всемирного тяготения ..	117
7. Электрические явления в газах: катодные лучи. Элементарный электрический заряд. Опыты Фарадея	144
8. Факт, не дававший покоя физикам. Спектр излучения абсолютно черного тела	178

Владимир Самуилович Кессельман
Физика в инфографике.
От гомона до кванта

Все знания мира в инфографике

Автор инфографики:
Корчагина Д.А.

В оформлении использованы материалы агентства Shutterstock.

Зав. редакцией *Ю.В. Данник*
Ответственный редактор *О.М. Зубкова*
Оформление обложки *А.М. Якунина*
Технический редактор *Т.П. Тимошина*
Корректор *В.Я. Суркова*
Компьютерная верстка *Ю.Б. Анищенко*

Общероссийский классификатор продукции
ОК-005-93, том 2; 953000 – книги и брошюры

Подписано в печать 03.08.2016
Формат 60х84/8. Усл. печ. л. 24,18. Бумага офсетная, печать офсетная.
Тираж 2500 экз. Заказ № .

ООО «Издательство АСТ»
129085, РФ, г. Москва, Звездный бульвар, дом 21, стр. 3, комната 5
Адрес нашего сайта: www.ast.ru
E-mail: ogiz@ast.ru

«Баспа Аста» деген ООО
129085 г. Мәскеу, жұлдызды гүлзар, д. 21, 3 құрылым, 5 бөлме
Біздің электрондық мекенжайымыз: www.ast.ru

Қазақстан Республикасында дистрибьютор және өнім бойынша арыз-талаптарды қабылдаушының өкілі
«РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Домбровский көш., 3«а», литер Б, офис 1.
Тел.: 8(727) 2 51 59 89,90,91,92, факс: 8 (727) 251 58 12 вн. 107;
E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz
Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген.

Физика – царица наук!

История развития этой науки полна интереснейших открытий, снова и снова бросающих вызов представлениям человека о природе и о нем самом!

Космология Средних веков, «рождение» атома, спектр излучения абсолютно черного тела, невидимая рука гравитации, факты, не дававшие покоя физикам – все это на страницах книги, которую вы держите в руках!

Физика, какой вы не знали раньше!

Просто и наглядно о сложном – в инфографике!

