

НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ¹⁾.

В. Ф. Г. Сван.

Я слышал, что когда к Роуланду обратился за советом студент, аппарат которого не дал ожидаемого результата, Роуланд ответил: «Делайте с ним что-нибудь, пока чего-нибудь не добьетесь». Каждый экспериментатор признает мудрость этого совета; но, увы, человек, изучающий космическую физику, не способен воспользоваться им в сколько-нибудь значительной степени. Очень мало он может

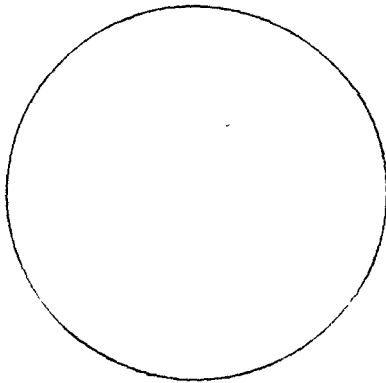


Рис. 1.

сделать со многими из тех аппаратов, с которыми ему приходится иметь дело, — с Солнцем, звездами и планетами. Он может только смотреть и ждать, что случится. Как хотелось бы ему заключить наш земной шар со всей его атмосферой в свинцовый ящик в несколько метров толщиной и посмотреть, какие перемены при этом произойдут в явлениях атмосферного электричества, или изменить в обратную сторону направление вращения Земли и изучить перемены в магнитном поле Земли на протяжении нескольких миллионов лет! Однако он скоро убеждается, что весьма трудно найти человека, который захотел бы финансировать подобные проекты, а потому для него не остается ничего иного, как ждать, наблюдать, что возможно, воспроизводить явления природы, насколько это ему удастся в малом масштабе в своей лаборатории, а прежде всего — упорно думать.

АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

Рис. 1 изображает круг. Толщина линии невелика, однако же по отношению к размерам Земли, изображаемым кругом, она представляет собой слой, по толщине превышающий в 7 раз тот, каким практически огра-

¹⁾ W. F. G. Swan. Journ. of the Franklin Institute. 195, p. 433, 1923.

ничиваются все наши наблюдения над атмосферным электричеством. Мы знаем, что внутри этой области существует электрическое поле, перпендикулярное к поверхности земли и создаваемое отрицательным зарядом на поверхности и положительным зарядом — в атмосфере. Поле это достигает приблизительно 150 вольт на метр на поверхности и подвергается чрезвычайно правильным изменениям в течение дня и года, — изменениям, достигающим 50 и более процентов его величины. Оно уменьшается вместе с высотой и на высоте около 10 км достигает ничтожной величины сравнительно с той, какую имеет у поверхности.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ АТМОСФЕРЫ.

Атмосфера есть проводник электричества, хотя и очень слабый, так что положительный заряд в атмосфере имеет тенденцию к нейтрализации отрицательным зарядом поверхности земли. Электропроводность атмосферы происходит от присутствия в ней заряженных молекул азота и кислорода, называемых ионами. Последние, в силу своего заряда, движутся в электрическом поле и отдают свои заряды окружающим телам, которые они таким образом разряжают. При обычных условиях в каждом кубическом сантиметре воздуха содержится около 1000 ионов каждого знака, — цифра, весьма малая сравнительно с 30-ю миллионами миллионов молекул, содержащихся в этом кубическом сантиметре воздуха. Положительный ион образуется вследствие отделения от нейтральной молекулы одного из тех электронов, на которые современная физика учит нас смотреть, как на одну из основных составных частей всякой материи. Отрицательный электрон рано или поздно сам присоединяется к какой-нибудь нейтральной молекуле и, зарядив ее таким образом, образует отрицательный ион. Выбрасывание электрона из атома происходит под влиянием какой-нибудь внешней причины. Существует три главных категории таких причин, соответствующих излучениям, испускаемым веществами подобными радио, который находится в состоянии непрерывного самопроизвольного распада.

Первою из этих причин является альфа-частица, — положительно заряженный атом гелия, движущийся со скоростью 20 000 километров в секунду. Вторую является бета-лучи, которые представляют собою просто отрицательные электроны, движущиеся со скоростью, близкой к скорости света. Наконец, третью представляют гамма-лучи, являющиеся некоторым видом волнообразного движения в эфире. Когда альфа-луч приближается к атому, он старается сорвать с места электрон, совершенно подобно тому, как комета, прилетевшая в нашу солнечную систему, могла бы иметь тенденцию сорвать с места луну. Бета-луч стремится отбросить электрон силой отталкивания, совершенно подобно тому, как комета с чудовищным атмосферным вихрем на своей поверхности могла бы иметь тенденцию увлечь воздушным током луну. Наконец, гамма-лучи действуют тем, что вызывают некоторого рода вол-

нение в эфире, в силу которого электрон приобретает достаточно большую скорость, чтобы быть в состоянии покинуть атом.

Значительная доля ионизации, а следовательно, и электропроводности атмосферы обуславливается присутствием в ней эманации радия. На кубический сантиметр атмосферы в среднем приходится лишь около одной с половиной молекулы эманации, тогда как в нем содержится около 30 миллионов миллионов молекул воздуха; тем не менее и такого количества эманации достаточно для того, чтобы дать весьма заметный эффект ионизации. Альфа-бета-и гамма-лучи, испускаемые радиоактивными эманациями в воздухе, гамма-лучи, испускаемые радием почвы, а может быть, и проникающее излучение космического происхождения составляют главные источники ионизации в атмосфере. То обстоятельство, что ионизация над поверхностью больших океанов, где нет радиоактивных веществ, одного порядка с ионизацией над поверхностью суши, наводит на мысль, что космическое излучение может играть важную роль, хотя недавние эксперименты породили некоторые сомнения относительно реальности этого излучения, по крайней мере, относительно присутствия его на небольших высотах. Суммируя изложенное, можно сказать, что определенные лучи, а именно α - β и γ -лучи, а возможно и некоторое космическое излучение, являются причиной испускания электронов небольшим числом молекул воздуха, вызывая таким путем образование положительных и отрицательных ионов, сообщающих электропроводность атмосфере.

Проводимость атмосферы у земной поверхности совершенно ничтожна по сравнению с проводимостью такого вещества, как медь. Так, воздушный цилиндр длиной в 1 дюйм оказывает электрическому току такое же сопротивление, какое оказывал бы медный кабель такого же поперечного сечения, протянутый 20 раз от земли к звезде Арктуру и обратно. Тем не менее и такая электропроводность была бы достаточно для того, чтобы 90% заряда земли исчезло в течение 10 минут, если бы эти потери не пополнялись. Объяснение факта сохранения заряда земли составляет важную проблему в учении об атмосферном электричестве. Количественно это пополнение заряда, нуждающееся в объяснении, невелико. Ток, исходящий от всей земной поверхности, достигает лишь около 1 000 ампер, т.-е. величины, потребляемой тремя тысячами лампочек накаливания; но наши сведения относительно природы электрических явлений настолько определены, что мы обязаны внести существенные критические ограничения в возможные процессы, которыми можно было бы объяснить такое пополнение.

СОХРАНЕНИЕ ЗАРЯДА ЗЕМЛИ.

Очевидно, что если отрицательное электричество уходит из земли или положительное входит в нее благодаря градиенту потенциала, существующему в проводящей атмосфере, то должен существовать некото-

рый компенсирующий электрический ток, возникающий вследствие процессов, действующих в направлении обратном электрическим силам поля. Предложенные теории распадаются в большей своей части на два класса, а именно такие, в которых основным действующим агентом, заставляющим заряды двигаться против поля, является сила тяжести, и такие, в которых возвращение отрицательных частиц в землю происходит, несмотря на обратное поле, благодаря весьма большой скорости, приобретаемой ими тем или иным путем.

Теории, основанные на тяготении. Примером теории первого рода может служить теория К. Т. Р. Вильсона, утверждающая, что пополнение происходит благодаря дождям. Теоретические соображения показывают, что дождевые капли должны образовываться на атмосферных ионах — притом, на отрицательных ионах — в большем количестве, нежели на положительных, так что можно ожидать, что дождь в общем будет иметь отрицательный заряд. Заряженные капли, падая на землю под влиянием силы тяжести, будут действовать противно электрическому полю, и будут давать пополнение заряда земли. Эта теория вызывает два основных возражения. Прежде всего, дождь действительно заряжен, притом, быть может, в достаточной степени для объяснения необходимого пополнения заряда; однако, установлено, что 90% выпадающего дождя имеет положительный заряд. Кроме того, по видимому, весьма затруднительно теоретически допустить возможность конденсации воды на атмосферных ионах в форме капель заметной величины, так что эта теория в настоящее время всеми оставлена.

Близко подходит к разрешению задачи и, несомненно, отчасти объясняет происхождение заряда земли теория Эберта. Теория эта, представляющая собою видоизменение более старой теории Эльстера и Гейтеля, исходит из того факта, что если ионизированный воздух проходит через тонкую трубку, то отрицательные ионы диффундируют к стенкам трубки быстрее, чем положительные, так что выходящий из трубки воздух имеет положительный заряд. Эберт прилагает это явление к объяснению проблемы атмосферного электричества, высказывая предположение, что воздух, находящийся в скважинах почвы и ионизированный действием почвенных радиоактивных веществ, выходит из этих скважин в течение периодов падения барометрического давления, оставляя избыточный отрицательный заряд на стенках скважин. Положительный заряд, выходящий наружу, должен был бы держаться в непосредственной близости к почве под влиянием отрицательного заряда, но здесь Эберт привлекает на помощь воздушные потоки, направленные вверх, которые переносят этот заряд, против поля, в более высокие области атмосферы. Эта теория вызвала критику на том основании, что испускание ионов почвой недостаточно, а течения, направленные вверх, слишком слабы. Я ду-

маю, однако, что одно из наиболее серьезных возражений надо искать в том выводе, который сравнительно просто вытекает из теоретических соображений: а именно, из такого рода теории следовало бы, что прежде чем восходящий положительный заряд поднялся бы до высоты, примерно, в 1 км, он исчез бы почти совершенно, поглощаясь отрицательным зарядом, непрерывно доставляемым снизу, от земли, через посредство проводящей атмосферы ¹⁾. Мы получили бы в таком случае положительный заряд в атмосфере, отрицательный заряд — на поверхности земли, ток проводимости и градиент потенциала; но все эти явления были бы ограничены слоем атмосферы толщиной, приблизительно, в 1 км. Весь положительный заряд атмосферы заключался бы в этом слое, и, будучи равен отрицательному заряду поверхности земли, как бывший его спутник в нейтральном веществе, он уничтожил бы поле на всякой более значительной высоте.

Существуют и другие трудности в теории Эберта и в теории «осаждения ионов», принадлежащей К. Т. Р. Вильсону. Так, согласно обеим этим теориям, соответственные плотности положительного и отрицательного заряда явно должны были бы оставаться в областях своего возникновения, вследствие чего в других частях земли

¹⁾ Основание этого таково: пусть ρ будет плотность, v — скорость восходящего положительного электричества. Пусть X будет градиент потенциала, а λ — электропроводность в некотором пункте атмосферы; пусть, наконец, ось x будет направлена вертикально вверх от земной поверхности.

Равновесие между током проводимости и конвекционным током на всех высотах требует, чтобы

$$\rho v + X\lambda = 0 \dots \dots \dots (1)$$

Уравнение Пуассона дает

$$\frac{\partial X}{\partial x} - 4\pi\rho \dots \dots \dots (2)$$

таким образом из (1) и (2) следует, что

$$r \frac{\partial X}{\partial x} + X\lambda = 0,$$

откуда

$$X = X_0 e^{-4\pi \int_0^h \frac{\lambda}{v} dx} \dots \dots \dots (3)$$

где X — градиент потенциала на высоте h .

Но так как λ возрастает вместе с высотой, а v — уменьшается, то значение X , даваемое уравнением (3), несомненно, меньше, чем значение, полученное подстановкой в него значения λ/v или соответственно λ_0/v_0 для поверхности.

Таким образом,

$$\frac{X}{X_0} < e^{-4\pi \frac{\lambda_0}{v_0} h}.$$

Если $\lambda_0 = 3 \times 10^4$ — электростат. единицы, а $v_0 = 100$ см сек. и если мы примем $h = 1.000$ метров, то найдем, что значение $\frac{X}{X_0}$ на такой высоте меньше 0, 02.

вовсе не было бы электрического поля. Бесполезно обращаться к ветру для переноса положительного заряда атмосферы в отдаленные области, ибо 90% его исчезло бы в течение 10 минут пути вследствие электропроводности атмосферы. На трудности такого же рода наталкивается всякая теория, согласно которой пополнение заряда происходит посредством разделения зарядов на изолированных местах таким путем, что положительные и отрицательные заряды остаются на сравнительно близком расстоянии друг от друга. Трудности становятся менее серьезными, если мы примем правдоподобную гипотезу, что нижний слой атмосферы окружен некоторым проводящим слоем. Существование такого слоя представляется необходимым для объяснения факта отражения волн беспроводного телеграфа в слоях, окружающих землю; серьезные основания предполагать существование такого слоя дают также наши сведения о механизме колебаний земного магнетизма, которые рассматриваются ниже.

В присутствии такого слоя под влиянием заряженного облака должна устанавливаться разность потенциалов между слоем и землей, передающаяся вокруг во все стороны ввиду того, что разность потенциалов между землей и слоем должна быть во всех местах одинакова. Подробное рассмотрение действия такого слоя показывает, что если заряженное облако C (рис. 2) находится на высоте h над поверхностью земли и если H — высота проводящего слоя, а R — радиус земли, то полушарие земли, симметрически удаленное от заряженного облака (заштрихованный полукруг на рис. 2) получило бы число силовых трубок в $\frac{R}{H}$ раз большее, чем то, какое оно получило бы при от-

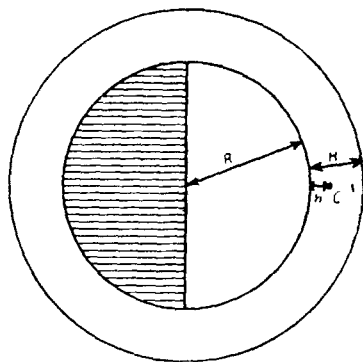


Рис. 2.

сутствии слоя, или долю $\frac{h}{H}$ того числа, какое оно получило бы, если бы заряд земли и заряд облака были распределены равномерно, первый — по земле, а второй — в атмосфере. Таким образом, если бы дождь шел с облака, находящегося на высоте 5 км, и если бы эффективная высота проводящего слоя равнялась 50 км, то среднее значение градиента потенциала на заштрихованном полушарии было бы равно 0.1 той величины, какую он имел бы, если бы заряды были равномерно распределены по земле и в атмосфере, и более чем в сто раз превосходит ту величину какую он имел бы при отсутствии проводящего слоя. Мы видим, таким образом, что при существовании проводящего слоя всякий центр обособления заряда, каков, например, дождевой поток, может оказывать влияние. — положительное или отрица-

тельное, в зависимости от обстоятельств — на общий градиент потенциала в каждой части земли ¹⁾).

Однако, хотя трудности, связанные с допущением локализации градиента потенциала, устраняются предположением существования проводящего слоя, остаются все же другие достаточно серьезные затруднения, о которых мы говорили и которые делают маловероятным, чтобы теория Эберта учитывала главную причину земного заряда.

Корпускулярные теории. Мы обращаемся теперь к теориям, в которых пополнение заряда приписывается действию наэлектризованных частиц («корпускул») большой скорости, попадающих на землю. Первая из таких теорий предложена Г. К. Симпсоном (G. C. Simpson). Эта теория предполагает, что солнце испускает отрицательные и положительные частицы с большой проникающей способностью. Предполагается, что первые (отрицательные) проходят прямо насквозь через нашу атмосферу и заряжают землю, тогда как последние обладают меньшей проникающей способностью и застревают в атмосфере. Таким образом земля будет непрерывно получать отрицательный, а атмосфера — положительный заряд. При этом обычный процесс атмосферной электропроводности будет создавать постоянный ток электричества между атмосферой и землей, так что стационарное состояние будет достигаться в том случае, когда нейтрализация заряда под влиянием этого последнего процесса будет в количественном отношении в точности уравновешиваться заряжающим действием притока частиц. Эта теория требует существования частиц с таким значительным пробегом, что они могут проходить через всю толщину земной атмосферы, которая по поглощающей силе эквивалентна столбу ртути высотой приблизительно в 76 см. Наибольший пробег, наблюдавшийся в воздухе для β -лучей радия, равен приблизительно 7 или 8 метрам. Электроны, имеющие скорость в 99% скорости света, могут пройти только через слой алюминия, толщиной в 1.3 см, что по поглощающей силе эквивалентно приблизительно 10 метрам воздуха при атмосферном давлении.

Хотя, согласно электромагнитной теории, скорость света представляет максимальную скорость, какой может достичь частица, однако, было бы неосторожно предполагать на основании того, что частицы со скоростью, равной 99% скорости света, имеют пробег в воздухе только в 10 метр., что никакие частицы не могут иметь большего пробега. В самом деле, электромагнитная теория показывает, что частицы со скоростью даже в 99% скорости света весьма далеки по своим свойствам от частиц, которые приближаются к этому пределу в гораздо большей степени. Как известно, масса частицы возрастает вместе со

¹⁾ Заметим, кроме того, что указанное действие проводящего слоя легко сводит к минимуму то возражение против теории Эберта, которое основывается на невозможности для положительного заряда достигать высот, превышающих приблизительно 1 км.

скоростью последней, так что частица должна обладать бесконечно большой энергией, чтобы достичь скорости света. Теория поглощения электронов в материи для больших скоростей была разработана Н. Бором, и таблица I дает для различных скоростей, приближающихся к скорости света, величины пробега, вычисленные на основании формулы Бора, в связи с экспериментальными величинами, полученными Р. В. Вардером (R. Varder) для меньших скоростей, доходящих до 0,99 скорости света. Согласно теории Бора, при скорости, равной скорости света, пробег теоретически достигает бесконечной величины.

ТАБЛИЦА I.

ИЗМЕНЕНИЕ СРЕДНЕГО ПРОБЕГА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СКОРОСТИ.

$\frac{\text{Скорость частицы.}}{\text{Скорость света.}}$	Средний пробег в метрах.
0,80	0,7
0,85	1,1
0,90	1,9
0,95	3,5
0,99	10,5
0,996	18,0
0,998	26,0

Обыкновенно для скоростей, еще более близких к скорости света, чем приведенные в таблице I, принимаются в расчет дополнительные соображения; характер этих соображений таков, что они дают в результате еще большие пробеги, чем вытекающие из формулы Бора.

Теория Симпсона и ей подобные приводят к интересным выводам в отношении изменения плотности атмосферного тока в зависимости от высоты. Вытекающие отсюда идеи можно изучить всего проще, если рассмотреть такой случай, когда весь корпускулярный поток через тропосферу состоит из отрицательных частиц, так как носители положительного электричества застревают в верхних слоях атмосферы.

Само собою очевидно, что при стационарном состоянии плотность корпускулярного тока, направленного вниз, должна быть равна во

всяком пункте атмосферы плотности тока проводимости, направленного вверх. Но если частицы сплошь поглощаются при своем опускании вниз, то плотность нисходящего корпускулярного тока будет уменьшаться по мере приближения к земной поверхности, так что плотность восходящего тока проводимости будет возрастать вместе с высотой. Если бы, например, плотность корпускулярного тока при нисхождении с высоты 10 км до 5 км уменьшалась вдвое по сравнению со своей первоначальной величиной, то плотность тока проводимости возрастала бы на 100% при его восхождении с высоты 5 км до 10 км. Имеющиеся у нас данные относительно изменения плотности вертикального тока проводимости в зависимости от высоты не очень богаты. Однако же, поскольку они имеются, они не обнаруживают больших изменений в зависимости от высоты. Мы видим, таким образом, что пробег, требуемый теорией Симпсона и ей подобными, превышает то значение этого пробега, которое необходимо для простого объяснения факта достижения частицами земли. Необходимо также объяснить этот факт при условии отсутствия поглощения, как это вытекает из постоянства плотности тока проводимости на разных высотах¹⁾.

Мы чувствовали бы себя более удовлетворенными, если бы могли придумать такую теорию, которая не требовала бы столь высокого предела проникания, как теория Симпсона. Имеется один или два способа, какими мы можем этого достичь. Вообразим себе, что в силу радиоактивности или какой-либо другой причины некоторое количество молекул воздуха будет разрушаться каждую секунду с испусканием отрицательной частицы высокой скорости.

В таком случае, хотя эти частицы могут быть испускаемы в общем во всех направлениях, но некоторые частицы будут попадать из атмосферы в землю, и последняя таким образом будет приобретать заряд, пока ток проводимости, направленный обратно в атмосферу, не уравновесит корпускулярного тока. Практически все частицы, попадающие в землю, будут притекать туда с расстояния, сравнимого со средним пробегом частицы. Как бы ни был короток этот пробег, мы можем обеспечить необходимое пополнение заряда земли, если допустим достаточно обильное испускание этих частиц каждым кубическим сантиметром. Однако, если только мы не допустим очень большой величины пробега, мы натолкнемся на трудности, связанные с изменением тока проводимости в зависимости от высоты. Предположим, например, что средний пробег равен 10 метрам, так что практически все частицы,

¹⁾ Поскольку положительные частицы поглощаются легче отрицательных.—включение первых в анализ, вообще говоря, понизит скорость уменьшения плотности чистого корпускулярного тока по мере его нисхождении в атмосфере. Во всяком случае только при весьма специфических условиях законы поглощения двух родов частиц могут быть таковы, чтобы плотность чистого корпускулярного тока оказалась независимой от высоты.

падающие в землю, происходят из слоя, толщина которого сравнима с указанной цифрой. На высоте, порядка 10 метров, результирующий корпускулярный ток будет равен нулю, так как нижним слоем воздуха будет испускаться вверх столько же частиц, сколько будет испускаться вниз верхним слоем. Фактически корпускулярный ток будет изменяться в силе, начиная с максимума у поверхности земли до нуля — на названной высоте, и так же будет изменяться как ток проводимости, так и градиент потенциала.

Мы видим, таким образом, что если предположить равное испускание частиц каждым кубическим сантиметром атмосферы и равномерное уменьшение величины пробега с каждым сантиметром пути, то практически необходимо будет предположить, что средний общий пробег равен той высоте, до которой мы желаем объяснить градиент потенциала. Таков же будет результат, если мы предположим определенное испускание частиц каждым граммом атмосферы, ибо хотя в этом случае давление и плотность будут уменьшаться вместе с высотой, однако же в той же мере будет увеличиваться величина пробега. Мы можем избавиться от этого нежелательного заключения, предположив возрастание испускания на каждый грамм вместе с высотой; подобный случай мы имели бы, если бы вообразили, что испускание вызывается некоторого рода внешним излучением, постепенно поглощаемым по мере своего нисхождения. Чтобы получить на самом деле постоянную плотность тока проводимости, необходимо было бы предположить возрастание испускания в зависимости от высоты, сравнимое с двойной величиной требуемого корпускулярного тока, при массе воздуха, соответствующей среднему пробегу частиц.

Небезынтересно рассмотреть порядок величин, требуемых такого рода теорией. Оказывается, что если предположить пробег равным 5 км, то необходимо лишь допустить, что каждые 200 куб. см испускают приблизительно одну частицу в секунду. Но мы знаем, что на каждый куб. см образуется около 6 ионов в секунду; таким образом, необходимо лишь предположить, что только один из 1200 таких ионов образуется с испусканием частицы с большим пробегом.

Мы можем избежать гипотезы самопроизвольного испускания и получить некоторые другие выгоды, приняв гипотезу, до некоторой степени сходную с предыдущей. Стало обычным предположение, что через нашу атмосферу проходит сильно проникающее излучение, происходящее либо из наружных областей атмосферы, либо от некоторого космического источника, например, от солнца. Это предположение выдвинуто для объяснения образования ионов, происходящего, как известно, в закрытом сосуде, освобожденном, насколько это возможно, от радиоактивного воздуха, — явление, которого нельзя объяснить иначе, даже если принять во внимание исходящие от почвы γ лучи, которые могут проникать сквозь стенки сосуда. В силу основа-

ний, в детали которых я здесь не имею надобности входить, было предположено, что это излучение представляет собой некоторый род γ -лучей, но более проникающего типа, чем обычно наблюдаемое излучение радия. Но γ -лучи обладают способностью производить ионизацию, г.-е. заставлять газ, через который они проходят, испускать электроны, при чем природа их действия такова, что направление движения испускаемого электрона почти совершенно совпадает с направлением γ -лучей.

Мы можем, таким образом, ожидать, что такого рода излучение, приходящее сверху, будет вызывать испускание электронов воздухом, при чем последние будут направляться вниз и пройдут некоторое расстояние, прежде чем остановиться. Электроны, испускаемые в пределах соответствующего расстояния от земли, будут достигать ее и заряжать. Их места займут другие электроны, возникающие в верхних слоях, которые будут поглощены, прежде чем успеют достичь земли. Одно из преимуществ этого типа корпускулярной теории состоит в том, что для объяснения образования частиц она обращается к фактору, существование которого уже признано по другим основаниям; другое ее преимущество заключается в том, что она не требует искусственного приспособления теории для объяснения тока проводимости, практически независимого от высоты. По мере увеличения высоты, испускание частиц на кубический сантиметр будет уменьшаться, но расстояния, проходимые частицами, будут соответственно возрастать, так что если интенсивность проникающего излучения сама по себе не зависит от высоты, то и корпускулярный ток также будет оставаться независимым от высоты.

Далее, подвергая теорию математической обработке, мы приходим к величинам, отнюдь не представляющим немислимых. Так, если мы допустим, что на каждый кубический сантиметр испускается в секунду только 3 частицы с большой скоростью, — количество, сравнимое с тем, которое, как предполагается, испускается под влиянием проникающего излучения, — то необходимо лишь допустить, что эти частицы имеют пробег в 9 метров в воздухе, — и мы получим объяснение пополнения заряда земли¹⁾. Мы увидим сейчас, что для объяснения ионизации желательнее приписать частицам большую величину пробега, чем 9 метров; но, чтобы объяснить одно только пополнение заряда земли, достаточно пробега и в 9 метров.

Возражения против корпускулярных теорий. — Обращаясь теперь к двум главным возражениям, которые могут быть выдвинуты против корпускулярных теорий всякого рода. Первое из них проистекает от неудачи попыток открыть какой-либо эффект в

¹⁾ Теория, родственная с приводимой здесь, была развита совершенно независимо Швейдлером (E. v. Schweidler) несколько времени спустя после появления оригинального сообщения автора.

смысле приобретения заряда изолированным телом, подвергнутым действию частиц. Если частицы притекают на землю сверху, то изолированная масса металла должна была бы постепенно приобретать заряд от попадающих в нее частиц, если только, впрочем, частицы эти не обладают столь сильной проникающей способностью, что проходят прямо насквозь через массу. Для того, чтобы соответствующий опыт был ценен, необходимо взять очень толстый кусок металла, так как частицы, прошедшие через земную атмосферу, эквивалентную 76 см ртути, не обнаружат большого поглощения при прохождении через добавочные несколько сантиметров металла. Я произвел такого рода эксперимент в 1915 г., но не мог обнаружить какой-либо электризации искомого типа. В более недавнее время такого же эффекта искал Швейдлер, но безуспешно. Однако я уже тогда чувствовал, что мои собственные опыты, которые были произведены с бруском меди длиной около 25 см и диаметром 5 см, помещенным вертикально, должны быть повторены с большей массой металла, тогда как эксперименты Швейдлера были произведены с еще меньшей массой. Во всяком случае, если мы найдем, что металлический шар, скажем, в один метр диаметром, не испытывает никакой электризации, то теории, приписывающие пополнение заряда притоку частиц, встретились бы с серьезным затруднением. Затруднение это, однако, не непреодолимо, если мы примем последний из взглядов, изложенных мною, а именно тот, согласно которому испускание частиц молекулами воздуха производится под влиянием чрезвычайно жестких γ -лучей, падающих сверху. В самом деле, если, согласно этому взгляду, γ -лучи будут достаточно проникающими, чтобы пройти прямо сквозь металл, то они будут с одной стороны выталкивать частицы из нижней части массы, а с другой вталкивать их в верхнюю часть. Простое вычисление показывает, что, предполагая интенсивность γ -лучей не изменяющейся при прохождении через металл, легко прийти к заключению, что из нижней части массы будет выталкиваться столько же электронов, сколько будет вталкиваться в верхнюю часть: для этого необходимо лишь сделать предположение, что отношение числа испускаемых частиц на куб. см воздуха и металла равно отношению плотностей этих веществ и что средний пробег частицы в воздухе и металле обратно пропорционален плотностям. Оба эти предположения вполне согласуются с тем, что нам известно о законах, относящихся к действию γ -лучей и к прохождению частиц через материю.

Второе крупное и, быть может, на первый взгляд наиболее серьезное возражение против всякой корпускулярной теории состоит в том, что при прохождении частиц с большой скоростью на их пути к земле через атмосферу можно было бы ожидать более сильной ионизации, чем та какая наблюдается на самом деле. Положение таково: корпускулярный ток, необходимый для уравновешения атмосферного эле-

трического тока, равняется притоку 1500 частиц на квадратный сантиметр в секунду. Но мы знаем, что электрон со скоростью, приближающейся к скорости света, производит на сантиметре своего пути около 40 ионов; поэтому мы можем ожидать, что на каждый куб. см будет возникать приблизительно 60000 ионов в секунду, между тем как опыт показывает, что они образуются лишь в количестве, равном одной десяти тысячной приведенной цифры. Для того, чтобы понять, каким образом мы можем избежать этой трудности, интересно рассмотреть несколько ближе механизм ионизации.

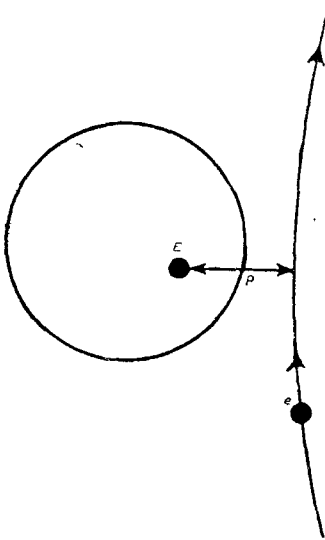


Рис. 3.

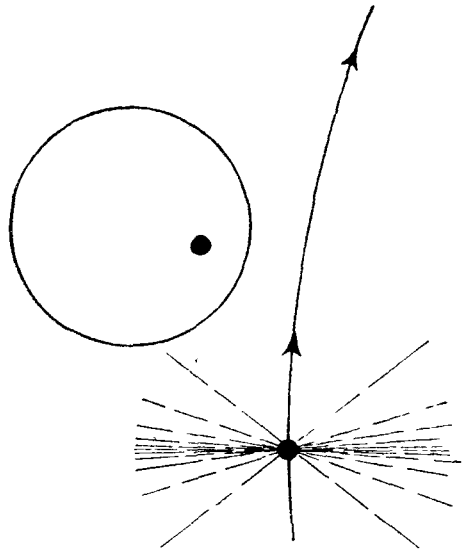


Рис. 4.

Отсутствие ионизирующего действия у корпускул, скорость которых приближается к скорости света. — Предположим, что на рис. 3 E — электрон в атоме и что другой электрон — e , который я для отличия буду называть частицей, приближается к атому. Частица при приближении к электрону начнет его отталкивать и будет продолжать оказывать такое же действие при своем удалении; в результате этого электрон будет получать энергию, при чем приобретаемый им момент будет находиться в более или менее перпендикулярном направлении к линии полета частицы. Чем больше скорость частицы, тем короче тот промежуток времени, в течение которого электрон имеет возможность получать от нее импульс. Таким образом сила действия частицы в смысле способности ее вытолкнуть электрон из атома уменьшается вместе с увеличением ее скорости и свелась бы, можно сказать, к нулю, если бы частица могла достичь бесконечной скорости. Но частица не может достичь скорости большей

чем скорость света, и, поскольку речь идет о вышеуказанном эффекте, не обнаруживается очень значительного ослабления ионизирующей силы при возрастании скорости, начиная, скажем, от 95% скорости света, при которой ионизация была измерена, и вплоть до скорости самого света.

Однако с приближением к скорости света обнаруживается новое явление. Поле частицы не остается распределенным равномерно. Согласно известным законам электромагнетизма, ее линии сил будут все больше и больше сдвигаться в экваториальную плоскость, как указывают штриховые линии на рис. 4. В виду этого время, в течение которого частица оказывает действие на электрон, уменьшается в еще большей степени; однако интенсивность действия в течение этого времени возрастает; в результате, как показал Бор, если мы не будем принимать во внимание других соображений, то энергия, сообщаемая электрону прохождением частицы, не потерпит никаких изменений вследствие указанной концентрации силовых линий.

Однако же мы должны принять в расчет еще одно весьма важное соображение.

Если электрон получит даже небольшую скорость в течение очень короткого промежутка времени, то, как известно, он будет излучать большое количество энергии. Его внезапное движение даст сильный толчок эфиру. Соответствующий математический расчет показывает, что если бы даже мы захотели сообщить электрону лишь небольшое количество энергии, но в течение бесконечно малого промежутка времени, то нам необходимо было бы уплатить род налога в виде бесконечно большого количества энергии в форме излучения. Но чем ближе подходит скорость частицы к скорости света, тем быстрее сообщает она электрону энергию. Не входя в слишком большие подробности, мы можем изобразить такое положение следующим образом. Если частица движется со скоростью, приближающейся к скорости света (например, достигая 95% скорости света), но не столь близкой к ней, как та, при которой вступают в силу изложенные соображения относительно излучения, то, как оказывается, частица должна приблизиться к электрону кислородного атома на расстояние, не превышающее $0,7 \times 10^{-10}$ см, чтобы быть в состоянии вытолкнуть этот электрон из атома. Но возможно приписать частице скорость, столь близкую к скорости света, что если бы она подошла к электрону на расстояние $0,7 \times 10^{-10}$ см, то один уже «налог» в виде излучения, сопровождающего выталкивание электрона, превышал бы то количество энергии, которое может ему сообщить частица, и условия таковы, что положение еще более неблагоприятно для выталкивания электрона, если частица подойдет к нему ближе чем на расстояние $0,7 \times 10^{-10}$ см. Не подлежит сомнению, что при отсутствии излучения электрон получит тем больше энергии, чем ближе подойдет к нему

частица, но если принять во внимание излучение, то электрон, к которому частица с достаточно большой скоростью приблизилась бы на расстояние, не превышающее $0,7 \times 10^{-10}$ см, находится в положении человека, заработок которого столь высок, что если он его получит, то падающий на него подоходный налог превысит весь его заработок ввиду очень сильного обложения высоких доходов, так что он больше выиграет, имея меньший заработок. Однако электро-магнитные уравнения милостивы к электрону и позволяют ему при таких условиях отказаться от своего заработка. Прямым результатом всего этого является то, что если скорость частицы достаточно высока, то она будет не в состоянии вытолкнуть электрон, если пройдет от него на расстоянии $0,7 \times 10^{-10}$ см. Она также будет не в состоянии вытолкнуть его, если подойдет к нему на более близкое расстояние, в силу реакции излучения. Но она была бы не в состоянии вытолкнуть его, проходя и на большем расстоянии, чем указанное, если бы соображения, относящиеся к излучению, отсутствовали. В результате она оказывается вообще во всех случаях неспособной вытолкнуть электрон. Произведи соответствующий математический расчет, мы найдем, что частица со скоростью на 200 метров в секунду меньшей, чем скорость света, будет безусловно не в состоянии вытолкнуть электрон из атома азота или кислорода¹⁾.

Интересно следующее замечание: если мы сделаем предположение, что частицы приносятся на землю из пространства вне атмосферы, то,

¹⁾ Не прибегая к этим соображениям и пользуясь лишь более старыми воззрениями, Швейдлер (*Akad. Wiss. Wien Ber. 1918, 127, 2a, стр. 515—533*) пришел к заключению, что ионизация на сантиметр пути будет бесконечно уменьшаться при приближении скорости частицы к скорости света. Как кажется, однако, его аргументация не выдерживает критики. В основании ее лежит то обстоятельство, что, согласно старым теориям, ионизация на сантиметр обратно пропорциональна mV^2 , где m —масса, а V —скорость частицы. Для малых скоростей $\frac{1}{2} mV^2$ есть кинетическая энергия; поэтому говорят, что ионизация на сантиметр пути обратно пропорциональна кинетической энергии. Принимая это положение, Швейдлер ставит на место $\frac{1}{2} mV^2$ выражение, принятое в теории относительности для кинетической энергии, которая становится бесконечной, когда V приближается к скорости света, и, таким образом, приходит к заключению, что ионизация на сантиметр пути должна бесконечно уменьшаться по мере приближения к этому пределу. Однако необходимо заметить, что в первоначальное выражение для ионизации на сантиметр пути формула $\frac{1}{2} mV^2$ входит не потому, что она выражает кинетическую энергию. Включение V^2 в знаменатель этого выражения тесно связано с тем обстоятельством, что время, в течение которого частица находится в эффективной близости к атому, уменьшается с возрастанием скорости. На самом деле это количество V^2 не представляет какой-либо величины, которая действительно стала бы бесконечной, когда V достигла бы скорости света, как это ясно показывает детальное исследование элементов, включенных в печисление ионизации на сантиметр пути.

совершенно независимо от какого бы то ни было поглощения в атмосфере, необходимо допустить некоторую минимальную скорость, чтобы объяснить достижение ими земли, по крайней мере, по соседству с экватором. В самом деле, путь движущейся частицы получает изгиб под влиянием магнитного поля, и этот изгиб может оказаться настолько сильным, чтобы повернуть частицу назад в пространстве. Чем больше скорость частицы приближается к скорости света, тем меньше изгибается ее путь. Уменьшение изгиба есть не столько прямой результат увеличения скорости, сколько возрастания массы, порождаемой увеличенной скоростью. Как оказывается, для того, чтобы частица, вошедшая в нашу атмосферу по соседству с экватором, оказалась в силах достичь поверхности земли, не будучи обращена назад действием земного магнитного поля, она должна обладать скоростью, слишком большой для того, чтобы она могла ионизовать воздух, через который проходит.

Биркеланд (Birkeland) старался объяснить главные свойства зари, предполагая, что она производится внедрением в нашу атмосферу частиц с большой скоростью, испускаемых солнцем. Чтобы объяснить факты в связи с искривлением, которое претерпевают пути частиц в земном магнитном поле, он вынужден допустить, что скорости колеблются в пределах величины, от 400 до 4 м в секунду меньшей, чем скорость света. Таким образом скорость, при которой ионизация должна прекращаться, хорошо укладывается в границы, указанные Биркеландом. Как вытекает из ныне принятой теории, частицы Биркеланда вовсе не будут иметь ионизирующего действия, так что они не могут дать хорошего объяснения зари; но в настоящее время общепринято, что заря не есть результат ионизации, производимой отрицательными электронами, и я напоминаю об этих вычислениях Биркеланда лишь для того, чтобы показать, что, прибегая к скоростям, только на 200 метров в секунду меньшим, чем скорость света, мы отнюдь не прибегаем к еще более «сильно действующим» средствам, чем какие уже применялись в других областях нашей науки.

Заметим, кроме того, что, если мы экстраполируем теорию Бора о поглощении на скорости, сравнимые с величиной, на 200 метров в секунду меньшей, чем скорость света, то мы найдем, что частицы, обладающие такой скоростью, могут проходить в атмосфере расстояния, сравнимые с одним километром. Если мы вспомним, что передача энергии электронам в атомах есть процесс, посредством которого частицы, согласно теории Бора, теряют энергию, то мы увидим, что уменьшение такой передачи, выражающееся в отсутствии ионизации, будет иметь результатом еще большее возрастание величины возможного пробега. Таким образом природа всех относящихся сюда соображений такова, что все они сходятся в следующем взгляде: если ча-

стицы должны вступать в нашу атмосферу со скоростями, достаточно близкими к скорости света, чтобы быть в состоянии достичь земной поверхности по соседству с экватором, не испытав поворота в обратную сторону под влиянием земного магнетизма, то они при этом должны проходить прямо через атмосферу при ограниченном поглощении и не будут ионизовать воздух, через который они проходят.

Таким образом трудности, заключающиеся в том, что всякая корпускулярная теория земного заряда, как могло бы казаться на первый взгляд, должна приводить к ионизации воздуха, не представляются непреодолимыми. Но мы наталкиваемся на новые затруднения: правда, при объяснении одного только факта пополнения земного заряда мы можем избежать гипотезы о больших пробегах, необходимой для теории, согласно которой воздух испускает частицы под влиянием проникающего излучения: однако с другой, стороны, мы должны предполагать для частиц скорости, весьма близкие к скорости света, чтобы объяснить отсутствие ионизации, а это уже само собой приводит, как к следствию, к большим пробегам.

Были сделаны попытки преодолеть предполагаемые трудности, к которым должно привести отсутствие электризующего эффекта в случае изолированного тела, сделав предположение, что приток частиц происходит в поясе северного сияния. Быть может, полезно будет указать, что если даже мы сделаем такое предположение, то не избежим трудностей, к которым приводит факт ионизирующего действия таких частиц, если мы не примем какой-нибудь теории, вроде набросанной мною; в самом деле, если мы примем обычную ионизацию на сантиметр пути, то необходимо будет допустить воссоединение ионов, чтобы уменьшить плотность ионов, притом в такой степени, что мы должны были бы предполагать площадь падения частиц, составляющей менее одной тысячной площади земли: с другой стороны, сообщаемая при этом воздуху электропроводность будет настолько велика, что при градиенте потенциала в 150 вольт на метр весь ток проводимости для одной этой области будет иметь, как показывает вычисление, большую величину, чем корпускулярный ток.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА.

То обстоятельство, что земля обладает способностью определять направление магнитной стрелки, было известно еще древним. Действительно, земля ведет себя приблизительно так, как если бы она представляла собой исполинский магнит с двумя полюсами, из которых один лежит недалеко от северного географического полюса, а другой — недалеко от южного. Проблема объяснения этого факта была одной из наиболее увлекательных областей в космической физике.

Конечно, мы можем сказать, что внутренность земли содержит большое количество вещества, обладающего магнитными свойствами, вроде железа, которое приобрело магнетизм тем или иным путем и в то или иное время. Однако мы не можем так уж легко избавиться от ответственности за это объяснение; в самом деле, мы знаем, что если нагреть стальной магнит до температуры в 785 градусов по Цельсию, то он теряет свой магнетизм, а мы имеем основания думать, что внутри земли температура гораздо выше указанной. Мы можем избавиться от этого вывода, если предположим, что большие давления, господствующие внутри земли, повышают температуру, при которой утрачивается магнетизм. Но пока не добыты дальнейшие и действительные данные относительно влияния давления в этом направлении, мы можем пытаться поискать более основательную причину для объяснения магнитного состояния земли.

Трудно противостоять искушению (ему поддавались многие), предположить, что земной магнетизм связан тем или иным путем с вращением земли. Несомненно, что наиболее простые теории, основанные на этом взгляде, приводят к состоянию магнетизации, симметричной по отношению географической оси, и, кроме того, из них не вытекает сама собой замечательная черта земного магнетизма, выражающаяся в его вековых изменениях. Тем не менее, мы могли бы чувствовать большое удовлетворение своими успехами, если бы нам удалось указать какой-либо путь, с помощью которого такое тело, как земля, могло бы приобрести магнетизацию, сравнимую по величине с наблюдающимся в действительности земным магнетизмом.

Теории, прибегающие к вращению электростатически заряженных систем. — Мы знаем, что электрический ток, протекающий по круговому проводу, создает магнитное поле, и если бы мы обмотали поверхность шара одним слоем колец и затем пропустили через кольца ток, то мы получили бы магнитное поле приблизительно аналогичное полю земли. Но так как земля электрически заряжена, то первая мысль, которая может нам прийти в голову, — это мысль о том, не даст ли заметного поля ток, образуемый вращением этого заряда вместе с землей. Плотность заряда известна, известна также и скорость вращения земли, так что сравнительно легко вычислить результат. Пренебрегая действием положительного заряда атмосферы, мы найдем, что создающееся таким путем магнитное поле достигает величины лишь одной стомиллионной доли земного поля. Поскольку заряд земли создает весьма значительное электрическое поле на ее поверхности, мы видим, что плотность заряда, необходимая для образования магнитного поля, сравнимого с земным полем, должна создать электрическое поле огромной величины. Кроме того, хорошо известно, что вследствие движения наблюдателя вместе с земной поверхностью, поле будет ему казаться отличным от того, какое наблю-

дал бы покоящийся наблюдатель, и характер этого эффекта таков, что вертикальная составляющая поля получает неправильный знак, если мы выберем знак заряда так, чтобы получить правильный знак для горизонтальной составляющей.

Если мы примем во внимание движение атмосферного заряда, то получим еще более любопытный результат. Для покоящегося наблюдателя вертикальная составляющая будет теперь всюду равна нулю¹⁾, тогда как для наблюдателя, участвующего в движении земли, как вертикальная, так и горизонтальная составляющая будут равны нулю.

Однако существует и иной путь, с помощью которого мы можем получить магнитное поле вращением зарядов, не пользуясь внешним электрическим полем. Если мы вообразим сферу положительного электричества и приведем ее во вращение, то она породит магнитное поле: но для данного общего заряда сила эквивалентного магнита будет тем больше, чем больше диаметр сферы. Таким образом, если мы наложим одну на другую две сферы нескольких различных объемов, из которых одна состоит из положительного, а другая — из отрицательного электричества, но величина заряда у обеих одна и та же, то они будут действовать, как противоположно направленные магниты различной силы, при чем получится остаточный магнитный эффект. Однако, что касается электрического поля, то вне сферы не будет никакого остаточного эффекта. Но современная физика приходит ко взгляду, что материя состоит исключительно из положительного и отрицательного электричества и, повидимому, в то время, как кубический сантиметр, скажем, железа, как целое, нейтрален, содержащиеся в нем количества положительного и отрицательного электричества, тем не менее, столь велики, что если бы мы могли разделить их и концентрировать в двух точках на расстоянии одного сантиметра друг от друга, то они стали бы притягивать друг друга с силой, эквивалентной 10^{20} тонн. В виду наличия столь большого количества электричества каждого знака, мы можем, как оказывается, объяснить магнитное поле, сравнимое с полем земли, если согла-

¹⁾ На первый взгляд такое положение представляется несовместимым с тем фактом, что трубки магнитной индукции образуют замкнутые кривые, так как, очевидно, отсутствие вертикального компонента препятствует им ускользнуть через положительный слой или в землю. Но дело в том, что, ввиду тонкости положительного слоя, объем пространства между поверхностью земли и сферой, внутри которой практически сосредоточен весь положительный заряд, сравнительно мал. Весь магнитный поток через любое поперечное сечение этого пространства незначителен, так что практически необходим лишь бесконечно малый вертикальный компонент, чтобы дать свободный вход и выход линиям магнитной индукции в это пространство, потому что площадь, пригодная для такого входа и выхода, есть вся площадь земной поверхности. В природе такого поля по существу нет ничего мистического, это — просто поле, полученное путем наложения на поле, окружающее равномерно намагниченную сферу равномерного поля, параллельного оси намагничения.

сится предположить, что положительное электричество в земле распределено по сфере, радиус которой меньше радиуса сферы отрицательного электричества только на 2×10^{-8} см, иными словами, мы должны только предположить, что диаметры двух сфер различаются между собою на величину, равную диаметру одной единственной молекулы.

Однако, несмотря на весьма сильное искушение присоединиться к этому взгляду, который был впервые выдвинут Сэзерлендом (Sutherland), мы наталкиваемся на весьма серьезную трудность, когда начинаем искать объяснения, почему положительное и отрицательное электричества остаются разделенными, хотя бы и на столь ничтожную величину; в самом деле, вычисление показывает, что на поверхности перехода будет электрическое поле в тысячу миллионов вольт на сантиметр, протестующее против такого разделения зарядов.

Существует немало причин, которые могли бы действовать до некоторой степени в том направлении, чтобы вызвать такое разделение зарядов, которое в результате вращения земли создало бы магнитное поле. Так, обычно делается предположение, что в твердом теле значительная доля электронов не связана с атомами, но может свободно блуждать в промежутках между молекулами, напоминая движение молекул воздуха между листьями дерева. Вследствие центробежной силы вращения земли эти электроны будут стремиться к поверхности земли. Это стремление будет встречать себе сопротивление в виде притяжения положительного электричества, которое они будут оставлять позади себя. Все же некоторая тенденция в этом направлении будет существовать, а в результате вращения такой системы, в которой заряды будут смещены, мы получим магнитное поле. Однако математический расчет показывает, что получаемое таким путем поле достигает величины лишь 10^{-23} земного магнитного поля и, кроме того, по своему типу сильно отлично от него.

С другой стороны, в силу земного тяготения электроны будут стремиться двигаться по направлению к центру. Если оставить в стороне знак, то это приводит к типу смещения, предполагаемого в теории Сэзерленда; но при анализе магнитного поля мы находим, что оно по величине достигает лишь 10^{-21} земного поля и, кроме того, имеет неправильное направление.¹⁾

1) П. Н. Лебедев, в последние годы своей жизни интересовавшийся проблемой происхождения земного магнетизма, пытался подвергнуть теории Сэзерленда экспериментальной проверке на моделях. Подсчет показал, что, пользуясь массами и скоростями, с которыми еще удобно оперировать в лаборатории, следует ожидать появления магнитных сил, без труда доступных измерению, если исследуемые вещества возбуждают при вращении магнитные силы приблизительно в той же степени, как и вещество земли. Опыты дали, однако, отрицательные результаты, что привело П. Н. Лебедева к убеждению о несостоятельности гипотезы Сэзерленда. *Ред.*

Укажу еще на одну возможность. Мы знаем, что внутри земли господствует более высокая температура, чем на поверхности. При температурном градиенте в газе последний становится там, где температура высока, менее плотным, чем там, где она низка, так что плотность электронов будет иметь тенденцию стать меньшей в областях с более высокой, чем с более низкой, температурой, при чем этой тенденции противодействует электростатическое притяжение, появляющееся в результате разделения зарядов. При разработке этого случая мы найдем, что образующееся в результате магнитное поле достигает величины лишь 10^{-17} земного поля, хотя ему посчастливилось получить правильное направление.

Имеется немало других возможностей, до некоторой степени аналогичных указанным; но, как показывают вычисления, все они дают поля порядка величины, бесконечно малой по сравнению с земным полем. Я думаю, мы можем вывести, как общее правило, что практически безнадежно искать объяснения земного магнетизма на основе вращения зарядов, разделенных вопреки электростатическому притяжению, так как механические силы, необходимые для того, чтобы вызвать требуемое разделение, должны быть во всех случаях непомерно велики.

Теории, основанные на свойствах гироскопа. Позвольте мне обратиться теперь к иной возможности. Мы знаем, что молекулы железа ведут себя подобно маленьким магнитам, и намагничение стального бруска заключается в

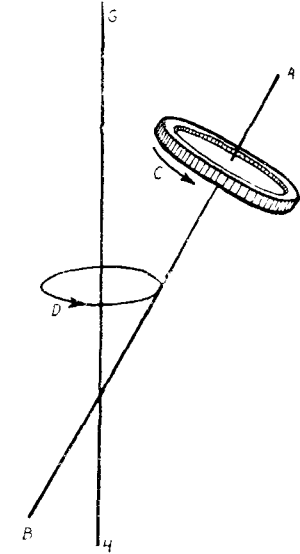


Рис. 5.

явлении частичной ориентировки этих маленьких магнитов, располагающихся в более или менее одинаковом направлении. Круговое проводочное кольцо, несущее ток, действует подобно магниту с осью, перпендикулярной к плоскости кольца; при этом вообще предполагается, что атом приобретает магнитные свойства вследствие циркуляции внутри него электронов. Эта циркуляция электронов заставляет атом вести себя подобно гироскопу. Но хорошо известно, что если гироскоп приведен во вращение вокруг своей оси AB (см. рис. 5), напр., в направлении, указываемом стрелкой C , и если эта ось будет приведена во вращение вокруг другой оси GH в направлении, указываемом стрелкой D , то гироскоп будет стремиться повернуться параллельно GH . Поэтому, если земля в значительной доле состоит из железа, то ее молекулярные магниты будут иметь тенденцию поворачивать свои оси параллельно оси вращения. Что кусок железа может быть намагничен путем вращения, это было экспериментально доказано С. Дж. Барнеттом (S. J. Barnett); но если мы применим эти выводы к земле, то найдем, что таким

путем невозможно объяснить магнитное поле, превышающее по своей величине 2×10^{-10} поля земли.

Известно, что различные вещества могут быть намагничены в различной степени действием одной и той же намагничивающей силы. О легко намагничиваемых веществах говорят, что они обладают большой проницаемостью. Было высказано предположение, что вследствие высокого давления или какой-либо иной причины внутренность земли может обладать необыкновенно высокой проницаемостью и что, следовательно, очень слабая намагничивающая сила, например, создаваемая гироскопическим эффектом, может быть достаточна для того, чтобы сообщить ей заметную магнетизацию. Однако такой взгляд встречает весьма серьезное возражение, которое я могу иллюстрировать, обращая ваше внимание на хорошо известный эксперимент. Если подковообразный электромагнит возбудить действием электрического тока и заставить его поддерживать, скажем, стофунтовую гирю, привязанную к его якорю, то оказывается, что гиря продолжает висеть по прекращении тока, если только поверхности полюсов и якоря представляют собой правильные плоскости. Замкнутое железное кольцо, составленное из подковы и якоря, однажды намагниченное, остается таковым и по прекращении тока.

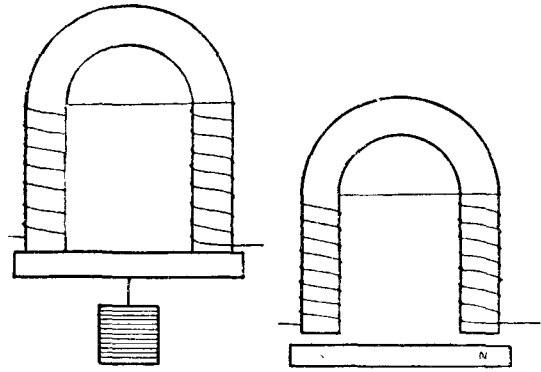


Рис. 6.

однажды намагниченное, остается таковым и по прекращении тока. Если теперь якорь насильно оторвать от подковы, то в точках отделения появляются магнитные полюсы, как показано на рис. 6. Действие этих магнитных полюсов таково, что оно уничтожает намагничение в подкове и якоре, и в результате оказывается, что теперь подкова не может поддерживать не только якорь со 100-фунтовой гирей, но даже один только якорь («саморазмагничивающая сила»). Короткий кусок железа намагнитить гораздо труднее, чем длинный, ввиду близости полюсов к главной массе железа в первом случае. Действительно, эти полюсы создают внутри железа магнитное поле такого направления, которое стремится размагнитить его. В случае намагниченного шара действие полюсов состоит в том, что внутри железной массы образуется размагничивающее поле, равное полю, которое сама сфера образует на внешних точках своего экватора. Поэтому некоторая первичная намагничивающая сила, обуславливающая в конечном счете образование земного поля посредством ориентировки молекулярных магнитов, должна иметь настолько высокую интенсив-

ность, чтобы действовать на молекулярные магниты с силой, по меньшей мере равной той, с какой действует на них магнитное поле, равное по интенсивности земному магнитному полю на экваторе.

Теории, основанные на действии земных токов.— Земное поле может быть объяснено, если мы докажем существование соответствующей циркуляции токов внутри земли. Однако такая попытка объяснения тотчас же вызывает необходимость в объяснении электродвижущих сил, поддерживающих токи. В связи с этим небезынтересно напомнить расчет, сделанный много лет тому назад Г. Лэ м б о м (H. Lamb), значение которого я постараюсь объяснить.

Если мы возбудим ток в проволоке и затем предоставим его самому себе, то он упадет до нуля почти в тот же момент вследствие сопротивления, оказываемого проволокой. Положение аналогично тому, как если бы мы взяли пустой кольцеобразный якорь, наполнили его водой и внезапно сообщили бы ему вращательное движение. Если бы не существовало трения, то вода пришла бы в вихревое кругообразное движение навсегда, но вследствие трения она скоро остановится. Если бы вода была менее плотна и обладала бы поэтому меньшей инерцией, то она остановилась бы скорее. Аналогия между движением воды и движением электричества не слишком близка, но электрический ток обладает свойством инерции, и, как оказывается, инерция тока больше в большом кольце, нежели в малом. Когда же мы имеем дело с телом объема земли, то эта инерция приобретает столь важное значение, что, как показал Лэ м б, если бы система токов была возбуждена в теле объема земли, при чем его электропроводность была бы равна электропроводности меди, и если бы электродвижущие силы, вызвавшие это возбуждение, прекратили свое действие, то потребовалось бы около десяти миллионов лет для того, чтобы сила тока понизилась до одной трети своей первоначальной величины. Попытки объяснить таким путем земное поле вызвали критику, ввиду того, что в этом случае пришлось бы допустить существование исполинских токов, которые можно найти экстраполированием для прошлого времени вплоть до эпох, удаленных не более, чем эпоха отвердения земной коры; так что, если мы не найдем какого-либо основания предполагать, что проводимость земли в настоящее время или в прошлом больше, чем проводимость меди, то мы столкнемся лицом к лицу с необходимостью дать объяснение огромных запасов энергии, потребовавшихся первоначально для создания магнитного поля.

Действительная плотность тока внутри земли, необходимая для объяснения земного поля, очень мала, будучи равной, напр., лишь одной стомиллионной доле ампера на квадратный сантиметр поверхности у экватора, если плотность тока пропорциональна расстоянию от оси вращения. Я уже сообщал о громадном количестве запасов положительного и отрицательного электричества в одном кубическом

сантиметре земли. Если мы вообразим железный шар объема земли и примем, что в нем содержится 10^{23} свободных электронов на кубический сантиметр, — цифра, не лишенная оснований, — то необходимо лишь предположить, что электроны на земной поверхности отличаются по скорости от материи, в которой они расположены, на $\frac{1}{7 \times 10^{16}}$ скорости материи, чтобы объяснить ток в одну стомиллионную долю ампера. Быть может, не слишком преувеличена надежда на то, что более полное знакомство с механизмом проводимости электричества в твердых телах, может повести к объяснению этой малой разницы, как прямого результата вращения земли. При этом задача состояла бы не в том, чтобы объяснить электродвижущую силу, с помощью которой могло бы быть преодолено электрическое сопротивление вещества земли: скорее мы должны были бы показать, что непрерывно совершающееся во вращающемся теле движение электронов, которое должно существовать во избежание дальнейшей деградации энергии в теплоту, — что это движение таково, что при нем должна существовать определенная относительная скорость между свободными электронами и веществом вращающегося тела.

Небольшая относительная скорость между свободными электронами и веществом земли может быть объяснена довольно просто, если мы допустим, что скорость земли уменьшается вследствие действия приливов и отливов. Если бы замедляющие силы оказывали влияние на землю, а не на свободные электроны, то последние стремились бы сохранить свою угловую скорость не уменьшенной. Разумеется, они, действительно, отстали бы от оставленной ими материи на такое расстояние, что сила, которая стала бы на них действовать вследствие этого отставания и которую можно вычислить на основании удельного электрического сопротивления, была бы как раз достаточна для того, чтобы заставить их следовать за землей в ее замедленном движении. Однако, если произвести соответствующие вычисления, то оказывается, что для того, чтобы вызвать таким путем образование тока достаточной силы для объяснения земного поля, замедление в движении земли должно происходить в такой степени, что она потеряла бы всю свою скорость меньше чем за сутки.

Малое магнитное поле мы можем объяснить, если предположим, что отрицательные электроны, участвуя в перемещении вещества, в котором они содержатся, не вращаются по отношению к осям, неподвижным в пространстве. В этом случае мы на самом деле получим в результате магнитное поле, вполне эквивалентное полю, какое мы имели бы, если бы вся система находилась в покое, за исключением электронов, которые все вращались бы вокруг собственной оси в направлении, противоположном вращению земли, совершая один оборот в сутки. Образующееся в этом случае магнитное поле равняется всего

$1,6 \times 10^{-25}$ земного поля и имеет, кроме того, обратное направление. Любопытно, однако, следующее замечание, имеющее лишь чисто математический интерес и не претендующее на объяснение земного магнетизма: если бы мы разделили все положительное электричество, содержащееся в земле, на группы с радиусом в среднем приблизительно в 1 см и заставили бы затем каким-нибудь образом эти небольшие группы перемещаться вместе с землей, не участвуя в ее вращении, тогда как все отрицательное электричество участвовало бы как во вращении, так и в перемещении земли, то мы получили бы возможность объяснить магнитное поле порядка величины земного поля.

Возможности, связанные с небольшим изменением основных законов электродинамики. — Всегда существует возможность, что происхождение земного поля кроется в некотором принципиальном, но небольшом отступлении от обычных законов электродинамики. В этой связи я напому вам о несколько аналогичной модификации, которую предложил Г. А. Лоренц для объяснения тяготения. Как показал Лоренц, если мы вообразим, что притяжение между положительным и отрицательным электроном превосходит отталкивание между двумя положительными или двумя отрицательными электронами только на $\frac{1}{3 \times 10^{33}}$ долю, то избыточное притяжение будет достаточно для объяснения тяготения. Отметив крайнюю осторожность, необходимую в связи с этим при определении понятия нейтрального тела, укажем, что теория Лоренца приводит к такому заключению: для равновесия электронов в теле, последнее должно обладать плотностью заряда, не вполне определяемой весом электронов. Шустер разбирал этот вопрос; повидимому, однако, при самых благоприятных предположениях эта добавочная плотность недостаточна для того, чтобы при вращении возникло магнитное поле, сравнимое с полем земли.

Большой успех достигнут с помощью до некоторой степени аналогичного предположения относительно магнитного поля, образуемого движущимся зарядом. Я напому вам о том, что когда заряд движется в магнитном поле, то на него действует сила в направлении, перпендикулярном к плоскости, заключающей в себе направление его скорости и направление магнитного поля. Это и есть та сила, которая приводит в действие электрический мотор. Даже тогда, когда мы измеряем магнитное поле действием его на магнит, эта же сила лежит в основании его действия, так как магнит получает свои свойства от вращающихся внутри него электронов. По аналогии с тем, что наблюдается в электростатике, где мы имеем дело с действием положительного заряда на положительный, отрицательного — на отрицательный и положительного — на отрицательный, мы наблюдаем и в отношении движущихся электронов добавочную силу действия движения положительного электрона на движущийся положительный

электрон, движения отрицательного электрона на движущийся отрицательный электрон, движения отрицательного электрона на движущийся положительный электрон и движения положительного электрона на движущийся отрицательный электрон ¹⁾).

Если для сходных движений все эти четыре силы будут равны, то на движущийся электрон или магнит не будет оказывать никакого влияния вращение земли как целого. Но если силы, возникающие между движущимися неодинаковыми зарядами, достаточно отличны от таких же сил между одинаковыми зарядами в тех же состояниях движения, то отсюда непосредственно следует, что электрически нейтральная земля будет своим вращением действовать на магниты и движущиеся электроны с такими силами, которые мы приписываем магнитам в обычном их определении. Если принять, что силы между электронами с одинаковыми знаками равны для обоих знаков, но сила, с которой действует движение отрицательного электрона на движущийся положительный электрон,—больше, а сила действия движения положительного электрона на движущийся отрицательный электрон—меньше, чем силы между одинаковыми электронами приблизительно на величину $2 \cdot 10^{-16}$, то мы можем таким путем объяснить поле, эквивалентное магнитному полю земли ²⁾. Если скомбинировать эти изменения с соответствующими изменениями электростатических сил, то мы можем включить в полную схему также и тяготение.

Значение вековых колебаний. — Существуют некоторые доказательства в пользу того мнения, что земная магнитная ось вращается вокруг географической оси, совершая один оборот приблизительно в 500 лет. Но мы знаем, что если изменить каким-нибудь путем число линий магнитной индукции, проходящих через некоторую площадь проводника, то в проводнике возникнут индукционные токи. Это есть лишь результат присущей электромагнитным явлениям инерции, о которой я уже говорил. Поэтому перемещение земной магнитной оси внутри самой земли будет возбуждать индукционные токи, и наблюдаемое нами магнитное поле будет, с одной стороны, создано этими индукционными токами (вторичное поле), а с другой стороны,—первичными причинами (первичное поле). Если мы возьмем для иллюстрации железный шар объема земли, то оказывается, что поток магнитных линий индукции вторичного поля через шар достигает такой величины, что почти совершенно приводит к нулю компонент первичного потока, перпендикулярный к оси вращения. В результате остается лишь небольшой избыток не

¹⁾ Первые два действия могут служить для определения магнитных полей, образуемых, соответственно, движениями положительного и отрицательного электричества, так как в данном случае каждое из них должно быть определено независимо.

²⁾ Заметим мимоходом, что можно дать видоизменение этого закона в форме, согласующейся со специальной теорией относительности.

осевого компонента. Таким образом для того, чтобы результирующий поток имел заметное склонение к географической оси, необходимо, чтобы первичная ось находилась очень близко к плоскости экватора, и чтобы в то же время первичный поток был настолько велик, чтобы его осевой компонент, малый сравнительно с ним, представлял собою наблюдаемый нами осевой компонент. Это практическое совпадение первичной оси намагничения с экваториальной плоскостью было бы, конечно, весьма замечательно, если бы оно действительно существовало. Соображения, с помощью которых оно выведено, основаны на предположении электропроводности, сравнимой с электропроводностью железа; и хотя мы не утверждаем, что главная масса земли обладает электропроводностью такого порядка величины, тем не менее, интересно обратить внимание на любопытные результаты, которые вытекали бы из вековых колебаний, если бы эта электропроводность была такова.

Дневные колебания. — Величины магнитных элементов земли подвергаются чрезвычайно правильным колебаниям в течение дня и года; и мы находимся в гораздо лучшем положении при объяснении этих колебаний, чем при объяснении земного поля, как целого.

Когда проводник движется, пересекая линии сил магнитного поля, то в нем возбуждаются индуцированные токи; как известно, это явление лежит в основе работы динамо-машины. Но воздух находится в постоянном движении под влиянием приливов и отливов, совершенно так же, как море, и при своем движении он пересекает магнитные силовые линии земли. В атмосфере образуются вследствие этого электродвижущие силы; последние же вызывают образование токов в размерах, обусловленных проводимостью атмосферы. Токи создают магнитные поля, и эти магнитные поля, будучи, таким образом, связаны с атмосферными приливами и отливами, будут, как можно ожидать, испытывать дневные и сезонные колебания. Таково предположение, первоначально высказанное Бальфуром Стьюартом, а впоследствии детально разработанное Шустером.

Заметим, что величина ожидаемых эффектов зависит от проводимости, которую мы припишем атмосфере. Низший слой атмосферы представляет собою столь слабый проводник, что его участие в указанном явлении ничтожно мало. Однако существуют основания полагать, что проводимость верхнего слоя атмосферы значительно больше; и по некоторым основаниям, входить в которые мне нет надобности, Шустер высказал предположение, что заметную проводимость можно считать свойственной слою атмосферы в 300 км толщиной, находящемуся на такой высоте, где среднее давление равно одной миллионной доле атмосферы. Однако проводимость, существование которой он считает необходимым для объяснения явлений, в 300.000 миллионов раз больше проводимости атмосферы у земной поверхности.

Чтобы представить себе, что это означает, можно указать на то, что при такой проводимости столб воздуха, простирающийся вокруг всей земли, в верхнем слое атмосферы должен иметь не большее сопротивление, чем столб такого же поперечного сечения, но длиною только в $\frac{1}{30}$ см, на поверхности земли. Иными словами, такое предположение в сущности означает, что землю можно считать окруженной проводящей оболочкой. Как ни неожиданно такое предположение, оно хорошо согласуется с тем, чего требует объяснение других явлений. Так, при обсуждении происхождения земного заряда мы имели случай рассмотреть возможность существования такого слоя. С другой стороны, долго был предметом спора вопрос, почему волны беспроболочного телеграфа проходят такие большие расстояния над земной поверхностью. На основании элементарных соображений мы должны были бы предполагать, что их энергия будет рассеиваться в пространстве и что только очень немногим удастся пройти на большое расстояние вокруг земли. С другой стороны, проводящая оболочка дает нам возможность устранить это затруднение. В самом деле, такая оболочка будет отражать волны, аналогично тому, как это бывает с звуковыми волнами, передаваемыми по трубке или через рупор. Такие же соображения, разумеется, можно было бы применить, чтобы показать, что беспроболочные волны, приходящие извне, не смогут войти внутрь проходящего слоя, так как они будут отражаться от его поверхности. Мы не должны, однако, придавать этому аргументу слишком общего значения, так как и свет представляет собою в действительности электромагнитное возмущение с очень короткой длиной волны, — род очень коротких беспроболочных волн, — и было бы несчастием для теории, если бы она доказала, что свет не может пройти через описанный слой.

Представляется вероятным, что ультра-фиолетовый свет не играет важной роли, потому что с его помощью можно объяснить лишь проводимость, не составляющую и одной миллионной доли требуемой величины. Другие факторы, на которые часто ссылаются при объяснении электропроводности, представляют собою корпускулярные излучения солнца. Некоторое излучение такого рода представляется необходимым для объяснения зари.

Полярное сияние. — Полярное сияние принимает разнообразные формы и имеет различные цвета и оттенки, но явление это ограничивается главным образом высокими широтами. Характерной чертой полярного сияния является резкая граница его нижнего края. Высота этой границы была измерена различными наблюдателями и, как кажется, колеблется между 70 и 300 км с максимумом, приблизительно, при 115 км. Активность сияний в большинстве случаев ограничивается двумя зонами атмосферы, расположенными под углом, приблизительно, в 20° к земной оси. Одна из наиболее известных теорий полярных сияний объясняет их светом, происходящим вслед-

ствие ионизации нашей атмосферы отрицательными электронами, испускаемыми солнцем. Как показывают лабораторные опыты, пучки быстро движущихся заряженных частиц отклоняются магнитным полем: Биркеланд—в области эксперимента—и Штермер—в области математического анализа—положили не мало труда, с целью выяснить, в какой мере характерные черты полярного сияния могут быть объяснены с той точки зрения, что причиной его является поток отрицательно заряженных частиц, исходящих от солнца и устремляющихся в нашу атмосферу, подвергаясь отклоняющему действию земного магнитного поля. Две зоны активного осаждения электронов этим удовлетворительно объясняются, если не считать того, что они оказываются в более высоких широтах, чем это соответствует наблюдению. Причиной трудности является малая масса электрона, что приводит к слишком большому отклонению его пути действием земного магнитного поля. Но, как я заметил выше в этой статье, масса частицы возрастает вместе с ее скоростью и становится теоретически бесконечной, когда частица достигает скорости света. Для приведения теории в соответствие с фактами Биркеланд должен был предположить, что частицы, вызывающие образование полярных сияний, обладают скоростями, меньшими скорости света только на величину от 400 до 4 метров в секунду.

Чтобы преодолеть трудность, вытекающую из малой массы электрона, Фегард и другие предположили, что частицами, вызывающими образование полярных сияний, являются не электроны, но альфа-частицы, испускаемые солнцем. Альфа-частицы обладают надлежащей скоростью и массой, чтобы дать требующееся отклонение. Сверх того, характерными чертами альфа-частиц является прямолинейность их путей и очень резкая граница протяжения их действия. Обе эти черты ясно выражены в явлении полярных сияний: прямолинейность пути—прямолинейностью лучей сияния, а резкая граница пробега—резкостью нижней границы сияния. То обстоятельство, что α -частицы проходят лишь расстояние в несколько метров в воздухе при атмосферном давлении, не представляет затруднения, потому что давление в областях полярных сияний очень мало. Пробег альфа-частицы совершенно достаточен для объяснения глубины проникания; и поскольку в этом вопросе существует вообще некоторая трудность, она происходит от того, что, судя по внушающим доверие представлениям о составе верхних слоев атмосферы, пробег обыкновенных альфа-частиц является скорее слишком большим для объяснения фактов.

Испускаемые солнцем альфа-частицы были привлечены к объяснению не только полярных сияний, но и тех внезапных возмущений в земном магнитном поле, которые известны под именем магнитных бурь. Эти возмущения наиболее часты в периоды максимума солнечных пятен, так что их естественно отнести на счет некоторого вещества, испускаемого солнечными пятнами.

Для иллюстрации трудностей, с которыми сталкивается всякое объяснение этих бурь с помощью альфа-частиц, приведу некоторые из возражений, сделанных Линдеманом. Для объяснения фактов необходимо предполагать, что частицы испускаются в виде некоторого рода конуса. Но Линдеман указывает на то, что прежде всего размеры явления таковы, что делают необходимым невероятно большой запас радиоактивного материала в солнце; далее, вследствие взаимного отталкивания альфа-частицы не могут оставаться вместе в виде пучка при своем путешествии от солнца к земле. Пучок необходимой интенсивности должен обнаружить боковое рассеяние, соответствующее ускорению порядка 10^{13} см/сек² на своих краях. Наконец, даже если бы альфа-частицы могли достичь земной атмосферы в виде пучка, они заряжали бы ее в такой степени, что по истечении нескольких секунд уже ни одна не могла бы больше попасть в атмосферу вследствие отталкивания со стороны тех частиц, которые пришли туда раньше.

Сам Линдеман выдвигает тот взгляд, что частицы, приходящие в атмосферу от солнца и обуславливающие магнитные бури, а также северное сияние, на самом деле представляют собой газовые ионы, испускаемые солнечными протуберанцами. Эти протуберанцы, как мы вспомним, состоят из раскаленных масс газа, и некоторые из них достигают невероятной высоты в 300.000 миль; формы же их меняются с такой быстротой, что газы, составляющие их, должны двигаться с исполинскими скоростями. Скорости порядка 80 миллионов см в секунду не являются редкостью.

Мы знаем, что если на частицу падает свет, то ее поверхность испытывает давление; при этом чем меньше частица, тем сильнее действует на нее свет в смысле увеличения ее скорости. Вспомним обычное мнение, что причиной наблюдаемого направления кометных хвостов, которые чаще бывают изогнуты в сторону обратную солнцу, а не к нему, как этого можно было бы ожидать в силу тяготения, является давление света; вследствие малых размеров частиц это давление отталкивает их от солнца с большей силой, чем та, с которой они притягиваются к нему силой тяготения. На этом основании Линдеман предположил, что огромные скорости, достигаемые газами в солнечных протуберанцах, приобретаются благодаря давлению света; он показал, далее, что вследствие этого некоторые из составляющих эти газы частиц, как того можно ожидать, будут выброшены в пространство с такими скоростями, что свойства соответствующих атомов окажутся сходными со свойствами альфа-частиц. Он предполагает, что газ почти в полной мере ионизован вследствие высокой температуры в протуберанцах, так что по направлению к земле выбрасываются частицы обоих знаков, — обстоятельство, обеспечивающее отсутствие рассеяния вследствие взаимного отталкивания.

Мне нет необходимости входить в подробности теории этих явлений, предложенной Линдеманом. Укажу, однако, что с разных точек зрения мы приходим к заключению, что того или иного рода частицы с огромной скоростью выбрасываются в нашу атмосферу солнцем и являются, вероятно, основными причинами магнитных бурь, высокой проводимости верхних слоев атмосферы и явлений северного сияния; к несчастью, наши знания верхних слоев атмосферы практически основываются всецело на умозаключениях, и никаких прямых экспериментальных данных относительно электрических условий на рассматриваемых высотах у нас не имеется. Если бы мы могли исследовать их с помощью каких-либо аппаратов, мы имели бы больше удачи.

ТЯГОТЕНИЕ.

Невозможно рассмотреть в полной мере большую проблему тяготения в пределах короткой статьи. Поэтому я должен ограничиться лишь немногими замечаниями по этому вопросу. В поисках объяснения такого явления, как тяготение, быть может, было бы уместно спросить, насколько мы в праве ожидать от природы указания на причину этого явления. Мы говорим, или некоторые из нас говорят, что Ньютон открыл силу тяготения, и с тех пор мы все время делаем попытки открыть причину тяготения. Однако какого рода объяснение нас могло бы удовлетворить? Картина земли, вращающейся вокруг солнца и не улетающей от него прочь, весьма близко напоминает нашему воображению картину камня, вращающегося на конце упругого шнура, и потому мы попытались представить себе некоторого рода упругое натяжение, исходящее от солнца. Но предположим, что кому-нибудь удалось объяснить тяготение упругими свойствами промежуточной среды. Насколько же это нас успокоило бы? Скажем ли мы, что теперь все ясно, что на самом деле солнце окружено не великим «ничто»; а средой с упругими свойствами, и эта среда производит натяжение. Если мы сделаем это, то какой-нибудь грядущий философ может спросить: но почему упругая среда производит натяжение? На это мы ответим, что натяжение — результат сцепления. Упругая среда состоит из множества маленьких молекул, и, когда они отделяются друг от друга, они стремятся возвратиться назад. Но почему — скажет философ — они ведут себя таким образом? Мы ответим, что хотя молекулы, как кажется, отделены друг от друга, но на самом деле между ними находится среда, которая наделена упругими свойствами и производит натяжение. Но почему — скажет философ — упругая среда производит натяжение? И такое рассуждение может продолжаться до бесконечности. В действительности, мы не можем прийти к последнему объяснению вопроса. Самое лучшее, что мы можем сделать, это заключить, что явление тяготения, объяснить которое мы не в состоянии,

во многих отношениях ведет себя аналогично другому явлению, связанному с упругостью, которую мы также не в состоянии объяснить.

Но при изложении Ньютоновского закона тяготения в действительности нет вообще основания говорить о силе. Все открытие Ньютона заключается в том, что если, например, частица движется вдалеке от других тел, то она совершает движение прямолинейно с постоянной скоростью, но если две частицы приближаются друг к другу, то они движутся с ускорением, обратно пропорциональным квадрату расстояния между ними. Вообще, он нашел, что движение частицы *A* можно описать следующим образом: соединим частицу с какой-либо другой частицей *B* во вселенной. Изобразим для частицы *A* ускорение в виде линии, соединяющей ее с частицей *B*. обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними и прямо пропорциональной массам обеих частиц. Проведем затем линию к другой частице *C* и изобразим второе ускорение в виде линии, соединяющей *A* и *C* и пропорциональной обратным квадратам расстояния и массам, которыми обладают *A* и *C*. Сделаем это для всех частиц во вселенной. Сложим ускорение по обычному способу сложения векторов, и результат представит ускорение частицы *A*. При таком изложении закона как простого эмпирического факта нам вообще нет надобности пользоваться словом «сила». Закон и без этого полон достаточен для того, чтобы дать нам возможность вычислить все движения планет. Однако, то обстоятельство,

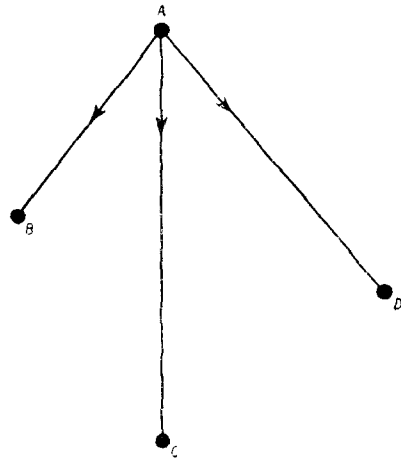


Рис. 7.

что результирующее ускорение составлено из некоторого количества неинтерферирующих частей, из которых каждая зависит от другой частицы и от линии, соединяющей *A* с этой частицей, навязывает нашему уму мысль об упругом натяжении. Ум предпочитает думать об упругости или о чем-нибудь подобном; в самом деле, для человеческого ума вообще чрезвычайно трудно думать, если у него нет определенного предмета для обдумывания. Если бы Ньютон нашел, например, что ускорение, производимое частицей *B*, не выражается линией, соединяющей его с *A*, если бы ускорение составляло с этой линией угол в 45° , то все же возможно было бы говорить о силе, создаваемой *B* и *A*; но ум наш в значительной степени избавился бы от навязчивого представления, вызываемого размышлением об упругости. Небольшое дальнейшее усложнение положения привело бы к тому, что аналогия с упругостью приносила бы нам еще меньше пользы. Мы

в верности такого объяснения и спросить меня, уверен ли я, что в этом доме действительно находится пожарная кишка. Разумеется, если вы будете очень настойчивы, то мне будет трудно доказать свою правоту. Однако, если вы будете мне очень надоедать, я рассержусь на вас и назову вас непрактичным философом; но, чувствуя необходимость что-нибудь сказать, чтобы убедить вас, я могу в конце концов повести следующую речь: — «Меня не интересует, имеется ли в доме пожарная кишка или нет. Но поскольку, сделав предположение о ее существовании и изображая движение путешественника в соответствии с ее действием, я могу предсказать результаты, которые оказываются верными, я стою на совершенно твердой почве. И я не подлежу ответственности ни перед кем за приемы моего мышления, пока мои выводы правильны». Сказав это, я почувствую, что я оправдал свою позицию и привел вас в окончательное смущение. Я сам почувствую себя маленьким философом, но втихомолку я буду продолжать забавляться картиной кишки и разнообразных деталей ее действия. Я буду думать всякого рода вещи относительно нее, но никогда не осмелюсь вам их сообщить, так как иначе вы меня высмеете. Я буду соображать, какова плотность жидкости, выпускаемой кишкой, какова может быть точка ее кипения и т. д. Предположим теперь, что в то время, когда я предаюсь таким размышлениям, вы сообщаете мне некоторые наблюдения, показывающие, что движение путешественника не вполне точно соответствует тому представлению, которое мы о нем составили. Разница может быть очень незначительна, но она может иметь такой характер, что совершенно опрокинет простоту действия, которую я считал обусловленной кишкой. Разумеется, я прежде всего опять обращаюсь к своей кишке, но должен буду несколько ее видоизменить. Я скажу: «Конечно, это кишка — не обычного типа. Возможно, что она дает толчок не вполне в том направлении, в котором идет жидкость». Но я должен буду стать лицом к лицу с таким положением, что хотя отступления могут быть невелики количественно, они могут быть в то же время столь существенны принципиально и привести к столь радикальным изменениям в моих представлениях о механизме процесса, что кишка, которую я должен буду предполагать, окажется совершенно отличной от всякой кишки, которую я когда-либо видел. Я должен буду пойти этим путем, модифицируя и приспособляя кишку, делая ее все более и более трудной для понимания; и, забыв, что первоначальным оправданием ее существования была ее мнимая способность объяснять наблюдаемое явление с помощью чего-то такого, что я считаю досконально мне известным, я вскоре буду вынужден затрачивать 99% своего остроумия на попытки понять кишку, оставив только 1% его на закон движения путешественника.

Предположим теперь, что в то время, как я занимаюсь этим делом и чувствую себя скорее смущенным своим успехом, вы приходите ко

мне и говорите: «Я сделал открытие. Я не знаю, почему человек двигается именно так, как он это делает, и думаю, что и вы этого не знаете, но я в точности установил, как он движется. Он движется от *A* к *E* путем, который представляет собою кратчайшее расстояние между двумя этими пунктами, но не подобно полету птицы, а через кратер, форму которого я могу вам описать». Предположим, что вы скажете это и прибавите затем: «Я намерен принять такую формулировку закона своим исходным пунктом. Если в этом явлении окажется замечанной какая-нибудь кишка, то именно кишка должна быть объяснена в соответствии с этим основным законом, но не основной закон — в соответствии с кишкой». Я думаю, что я должен буду признать, что ваша позиция по меньшей мере разумна.

Но эта позиция до некоторой степени аналогична той, которая заключается в эйнштейновской формулировке закона тяготения. Верно, что эта формулировка не вполне остается в пределах опыта. Ее построение снабжено многими украшениями, о которых мне нет надобности говорить. Но что касается самого закона, то язык его формулировки не очень отличается от того, какой мы дали для закона движения нашего путешественника. Он утверждает, что планета, переходя от одной точки к другой, движется по пути, который представляет собой наиболее длинное расстояние между этими точками, но, к несчастью для удобств нематематического ума, этот путь не лежит в мире трех измерений, но представляет собою путь в некотором, не-эвклидовом четырехмерном, пространстве такого типа, в котором четвертым измерением является время, и свойства которого выражены так, что находятся в согласии с некоторыми философскими требованиями теории относительности.

Философы прошлых веков говорили, что планеты движутся по кругам, потому что круг есть совершенная симметрия, и мы склонны смеяться над их мнением; но мы видим, что эйнштейновская формулировка закона тяготения, избегающая упоминания о силах и формулирующая закон в соответствии исключительно со свойствами пути, описываемого планетами, заключает в себе элемент такой же позиции. В действительности закон древних философов был бы не так плох, если бы он несколько точнее определял величину кругов и если бы они вовсе отказались от слова «потому что».

Перевел С. А. Алексеев.