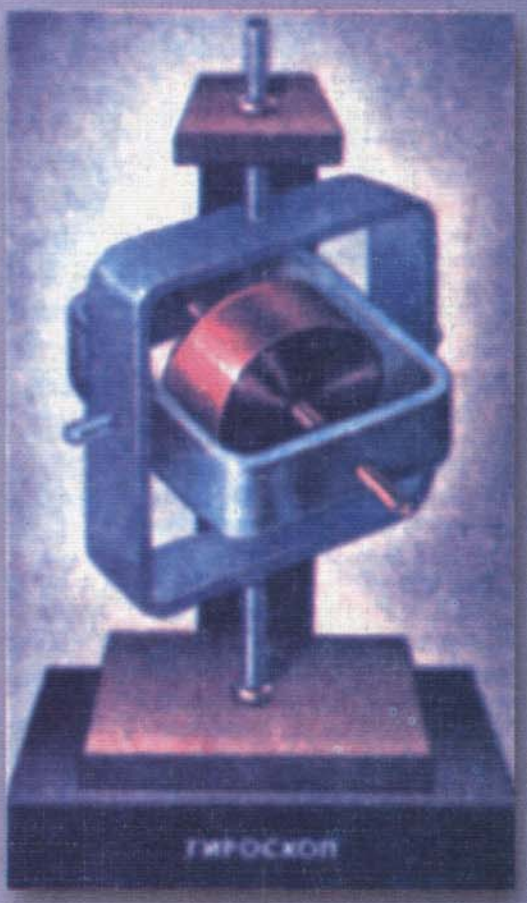
Дж. Перри

ВРАЩАЮЩИЙСЯ ВОЛЧОК



R&C Dynamics

Дж. Перри

ВРАЩАЮЩИЙСЯ ВОЛЧОК

ПУБЛИЧНАЯ ЛЕКЦИЯ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО

Издание четвертое с дополнением

Проф. Б. ДОНАТ

ВОЛЧОК и его будущее в технике

R&C Dynamics

РХД

Москва • Ижевск

2001

УДК 530

Интернет-магазин

MATHESIS

http://shop.rcd.ru

- физика
- математика
- биология
- техника

Внимание!

Новые проекты издательства РХД

- Электронная библиотека на компакт-дисках
  http://shop.rcd.ru/cdbooks
- Эксклюзивные книги — специально для Вас любая книга может быть отпечатана в одном экземпляре
  http://shop.rcd.ru/exclusive

Перри Дж.

Вращающийся волчок. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 112 стр.

Эта небольшая книга представляет собой переработанный вариант лекции, в которой увлекательно изложен целый ряд замечательных опытов и научных наблюдений. Материал представлен на доступном уровне и снабжен многочисленными иллюстрациями и любопытными примерами. Особо стоит отметить ту легкую и веселую манеру, с которой здесь трактуются важнейшие научные проблемы, что делает книгу понятной и интересной для самого широкого круга читателей.

Предыдущее издание этой книги было выпущено в Одессе в 1912 году (издательство Mathesis), тем не менее она до сих пор представляет большой интерес для читателей.

ISBN 5-93972-071-4

© НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001

http://rcd.ru

Оглавление

Предисловие автора 4

Из предисловия к немецкому изданию 5

Введение 7

Кажущаяся твердость, которую быстрое движение придает даже гибким и жидким телам 10

Сущность этой кажущейся твердости вращающихся тел состоит в сопротивлении, которое они оказывают изменению направления оси вращения 16

Изучение свойств вращающегося тела 21

Доказательство или объяснение нашего простого общего правила 33

Предостережение относительно того, что в конце концов наше правило не так просто 36

Почему гиростат падает 44

Почему волчок поднимается 45

Прецессионное движение Земли 50

Влияние предполагаемой жидкости внутри Земли на ее прецессионное движение 61

Извинение за остановку на астрономических вопросах и непочтительные замечания об астрономах 66

Каким образом гиростат может позволить лицу, живущему в подземной стране, знать 1° что земля вращается; 2° величину вращения; 3° истинное направление на север; 4° широту 68

Как лектор приводит во вращение свои волчки при помощи электромоторов 75

Свет, магнетизм и молекулярные вращающиеся волчки 78

Заключение 87

Проф. Б. Донат. **Волчок и его будущее в технике** 91

Предисловие автора

Книга эта не представляет собою моей лекции в том виде, в каком она была прочитана в действительности. На самом деле, как читатель может себе легко представить, вместо того, что здесь сказано на нескольких печатных страницах и разъяснено многочисленными рисунками, лектор демонстрировал в течение какой-нибудь полминуты волчки и гиростаты, присоединяя мимоходом некоторые руководящие и пояснительные замечания. Дословное повторение лекции сделало бы книгу совсем не интересной. Но я постарался с помощью более обстоятельных разъяснений вознаградить читателя за то, что он лишен возможности видеть приборы. Наконец, в сочинении, предназначенном для более широкого круга читателей, было необходимо упростить доказательства, между тем, как лекция была прочитана перед публикой, состоявшей из лиц, которых жизнь поставила в особенно благоприятные условия для приобретения опытности, необходимой для понимания всего того, что относится к области науки.

Проф. **Джон Перри**

Из предисловия к немецкому изданию

Когда мне попалось в руки английское издание этой небольшой книжки, я не мог устоять перед искушением — перевести, с целью возможно более широкого распространения, лекцию, в которой увлекательно и понятно изложен целый ряд прекрасных опытов и научных наблюдений. Я полагаю, что оказал таким образом услугу не только образованным людям вообще, но и специалистам, которым известны трудности строго научной обработки излагаемого здесь предмета. Особенно же меня увлекла та легкая и веселая манера, с которой здесь трактуются в удобопонятной форме научные проблемы величайшей важности. Поэтому, насколько это было возможно, я придерживался оригинала и старался передать его веселый тон.

Не мешает еще упомянуть, что оригинал посвящен знаменитому лорду Кельвину (сэру Вильяму Томсону).

Выражая пожелание, чтобы эта книжечка доставила каждому читателю столько же удовольствия, сколько мне доставил оригинал, я предоставляю ее собственной ее судьбе.

Проф. **Augist Walzel**

На днях в одной из школ города Лидса учитель сказал ученикам своего класса: «В Лидсе скоро состоится заседание Британской Ассоциации*. Что вы знаете по этому поводу? Кто такие члены Британской Ассоциации? Что они там делают?» В ответ на это последовала продолжительная пауза. Наконец, она была прервана одним способным, шустрым мальчиком. «Позвольте, господин учитель! Я знаю, они вертят волчки!»† — гласит ответ. К сожалению, я должен сознаться, что этот ответ расходился с истиной. Члены и докладчики Британской Ассоциации забросили верчение волчка уже с десятого года своей жизни. Но если бы подробному исследованию особенностей вертящегося волчка было уделено больше внимания, то успехи человечества в области прикладной механики и во многих отраслях промышленности были бы гораздо значительны. Общие астрономические сведения были бы лучше. Геологи не делали бы ошибок в миллионы лет, и наши знания о свете, о лучистой теплоте и о других электромагнитных явлениях развивались бы много скорее, чем сейчас.

В конце моего доклада я покажу, как сам собою сделался бы знаменитым тот факт, что Земля есть тело, вращающееся вокруг оси, если бы мы жили в подземном пространстве, подобно грядущему поколению одного остроумного писателя‡. Этот факт есть самая главная и самая деятельная причина многих явлений, которые происходят вокруг нас и под нами, и возможно даже, что и земной магнетизм принадлежит также к числу этих явлений.

В самом деле, возможно лишь одно объяснение того, что Vril-ya не знали о вращении Земли вокруг оси. Их сведения в области механики и динамики были прямо необыкновенны. Ни один член собрания

---

*«Британская Ассоциация для развития науки» устраивает ежегодные съезды, на которых читается масса докладов и лекций по всем отраслям естественных наук.

†О публичных докладах оповещают большими афишами.

‡Bulwer Lytton, «Грядущее поколение». Фантастический рассказ о народе, названном автором «Vril'ya».

Британской Ассоциации не имеет даже приблизительно таких больших познаний, я не хочу сказать о Vril, но хотя бы только о совершенно обыкновенном электричестве и магнетизме; и однако этот великий народ, который так горячо выражает презрение к англосаксонскому Koom-Poschery*, действительно не знал, что бесчисленные его поколения жили внутри тела, которое вращается вокруг своей оси.

Можем ли мы себе представить хотя бы на одно мгновение, что дети этого народа никогда не играли волчком или никогда не катали обруча и, таким образом, не имели ни одного удобного случая, который побудил бы их к настойчивому изучению природы? Нет, единственное объяснение заключается в том, что сам великий рассказчик никогда этого не делал.

Может быть, еще мальчиком он проявлял недостаточное внимание к изучению природы, — *он сам был маленьким Pelham'ом*†, *а потому в* зрелом возрасте ему пришлось остаться в неведении даже относительно тех сил, которыми распоряжался народ, созданный его воображением.

Неведение народа Vril-уа относительно свойств вращающихся тел наряду с его глубокими познаниями в области магнетизма станет еще более удивительным, *когда мы узнаем, что явления магнетизма и света*, несомненно, тесно связаны со свойствами вращающихся тел, и что, без сомнения, точное знание свойств вращающихся тел, безусловно, необходимо для правильного понимания большинства явлений, совершающихся в природе.

Инстинктивное стремление исследовать эти явления проявляется, по-видимому, уже с того момента, как мы получаем дар слова, и кто знает, насколько меньшие умственные способности женщины зависят от небрежного отношения к упражнениям в верчении волчка; но, к сожалению, юношеский ум и мускулы мальчиков в их стремлении к усовершенствованию в деле запускания волчков предоставлены единственно и всецело тому руководству, которое дает опыт товарищей, тоже молодых и недостаточно ученых. Я ясно помню, что я ежедневно наталкивался на множество задач, приводивших меня в смущение. То попадались волчки, которых никто не мог заставить вертеться, то попадались, наоборот, другие, весьма высоко ценившиеся, особенности которых неоднократно подвергались изучению, и которые, благодаря

*Житейская суета (на языке Vril'уа).

†Герой романа Бульвера.

своим особенно выдающимся качествам, становились предметом домогательства, так как они, несмотря на грубую обработку, кружились очень хорошо. И все-таки никто, даже и само лицо, делавшее волчок, не знал, почему одни волчки выходили хорошими, а другие — плохими.

Я не скрываю от себя того обстоятельства, что довольно трудная задача — говорить о верчении волчков людям, уже давно утратившим ту ловкость, которой они удивляются в своих детях, — ловкость, выражающуюся в близком знакомстве с делом запускания и верчения волчка, — искусство, дававшее им столь большую мощь над предметом, который я не решаюсь отнести к неодушевленной природе.

К задаче, от решения которой безнадежно отказываются в детстве, редко опять возвращаются в более поздние годы. Взрослый человек загоняет свое стремление к знанию в темные чуланы своего сознания, и там лежит оно под накопившейся пылью жизни в виде почти позабытого инстинкта. Некоторые из вас, может быть, подумают, что этот инстинкт остается только у того, кто не выходит из детства до конца жизни; и, может быть, никто из вас не имел случая подмечать, как иногда с обыкновенного человека слетает старая пыль жизни и как все-таки не раз пробуждается у него снова сильное стремление познать тайны, его окружающие. Но я чувствовал это стремление не только сам, я имел случай подметить его в жадных взорах толпы людей, которая по целым часам стояла под вишневым деревом в полном цвету у храма Азакузы, с его красными колоннами, в восточной столице Японии и созерцала tedzumashi*, который управлял вращением своего Koma с тяжелым ободом. Сначала он бросает наискось от себя в воздух свой большой волчок и подхватывает его во время вращения концом палки, острием меча или другого подходящего предмета; он заставляет его бежать по краю перил лестницы через двери в дом и снова выкатываться к окну и в заключение странствовать вверх по большому пробочнику. Потом он задерживает его своими руками и несколькими ловкими закручиваниями сообщает ему новый запас вращательной силы, он заставляет его бегать вдоль по вытянутому шнуру или по лезвию меча; он проделывает со своим волчком всевозможные удивительные вещи, но потом сразу выходит из роли повелителя и, в конце своего представления, нищенски вымаливает несколько медных монет.

*Японский жонглер.

Как ничтожно должно показаться вам все это теперь, когда вы уже забыли более, чем наполовину, свое детское стремление проникнуть в тайны природы; но будьте уверены, если бы я был в состоянии сделать так, чтобы старый вращатель волчка показал вам все свои волшебные фокусы на этом месте, к вам вернулась бы способность восхищаться и наслаждаться этим прекрасным движением. Может быть, представление такого рода возможно только в Японии, в стране, где с нежностью взирают и на качающийся бамбук, и на кружащегося ястреба, и на волнующееся летнее море, и на всякое прекрасное движение в природе, и, может быть, наблюдая японцев, мы научимся понимать причину нашего детского воодушевления.

Жрецы искусства изящного движения и меняющейся игры цветов, — искусства, возвышавшего душу человека с древнейших времен, — в большинстве случаев нищие, подобно Гомеру, и живут они на чердаках, подобно Джонсону и Савэджу*; но уже провозглашается рассвет новой эры, или, скорее, этот рассвет уже наступил с того момента, как человечество приобрело учение Вильяма Томсона (лорда Кельвина) о вращающихся телах, — учение, которое принадлежит к числу немаловажных среди его замечательных трудов.

Если только вы пожелаете хорошо обдумать этот вопрос, то вы признаете, что поведение обыкновенного волчка в высшей степени удивительно. Если он не вертится, то, как вы видите, он сразу опрокидывается, и я не в состоянии удержать его в равновесии на его кончике. Но это совершенно другой предмет, когда он кружится: вы видите, что он не только не падает, но, наоборот, когда я его толкаю, он проявляет удивительное сопротивление и даже принимает все более и более вертикальное положение. Раз мы пробудим в себе интерес к научному наблюдению, мы заметим, что природа преподносит нам явления такого рода в большом числе.

Те из вас, кому приходилось быстро вращать пояс или канат, знают, что быстрое движение сообщает своего рода одеревенелость гибким и даже жидким телам.

---

*Samuel Johnson — знаменитый прозаик и поэт XVIII века. Savage — английский поэт первой половины того же века и друг Джонсона, описание жизни которого, полной треволнений и превратностей, является одним из лучших произведений Джонсона. — *Прим. перев.*

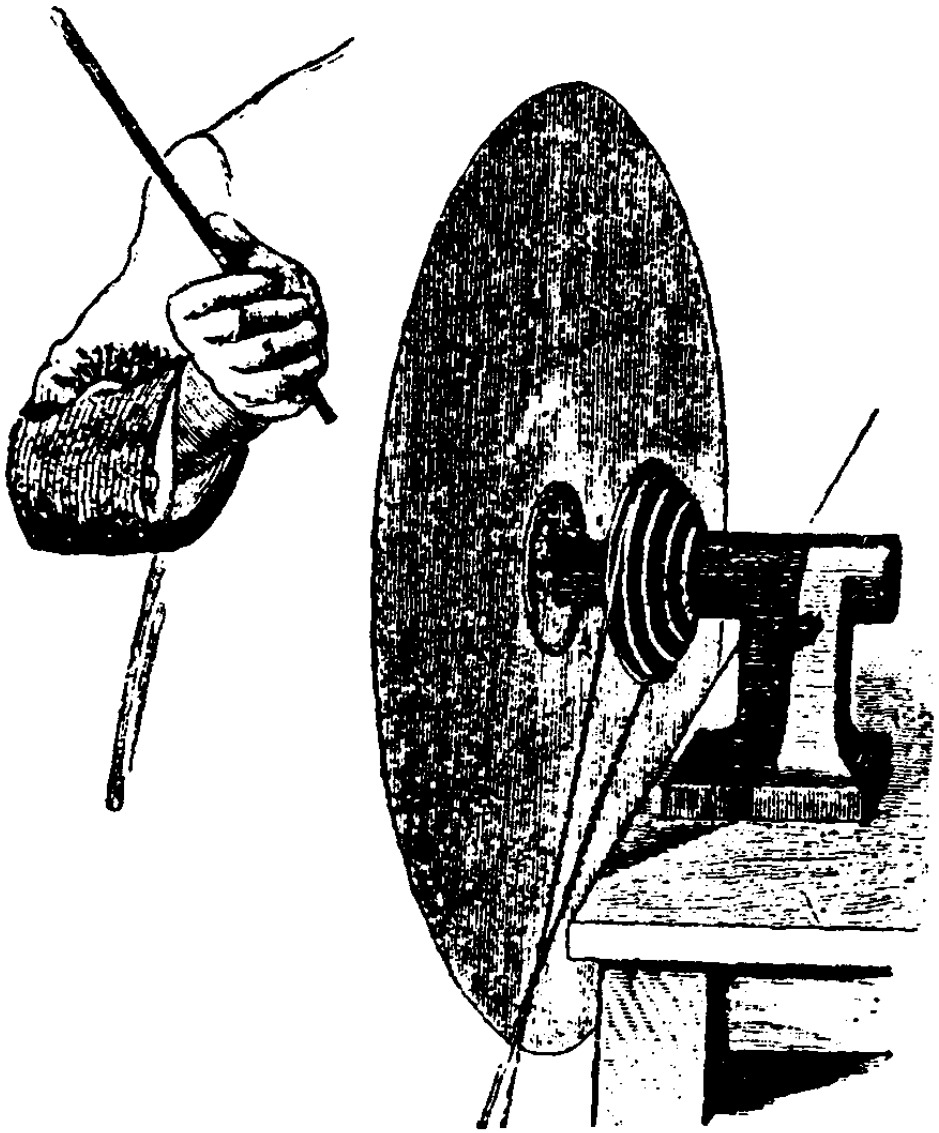


Рис. 1

Вот, например, круг из совсем тонкой бумаги (рис. 1); если я приведу его в быстрое вращение, то вы замечаете, что он оказывает сопротивление силе моей руки или удару кулака, как если бы это был круг из стали. Вы слышите, как он звучит, когда я его ударяю палкой. Куда девалась его гибкость? Вот еще кольцеобразная цепь, совсем гибкая (рис. 2). Кажется смешным, что ее можно заставить стоять, как твердый обруч, а между тем, если я сообщу ей на этом барабане быстрое вращательное движение и дам ей соскользнуть на пол, то она побежит через весь стол совершенно так, как если бы это было твердое кольцо, и когда эта цепь падает на пол, то она подскакивает вверх, как игрушечный обруч мальчика.

Вот еще очень мягкая шляпа, нарочно сделанная для этого опыта. Вы видите, что эта шляпа, если я кладу ее на стол, сама мнется в

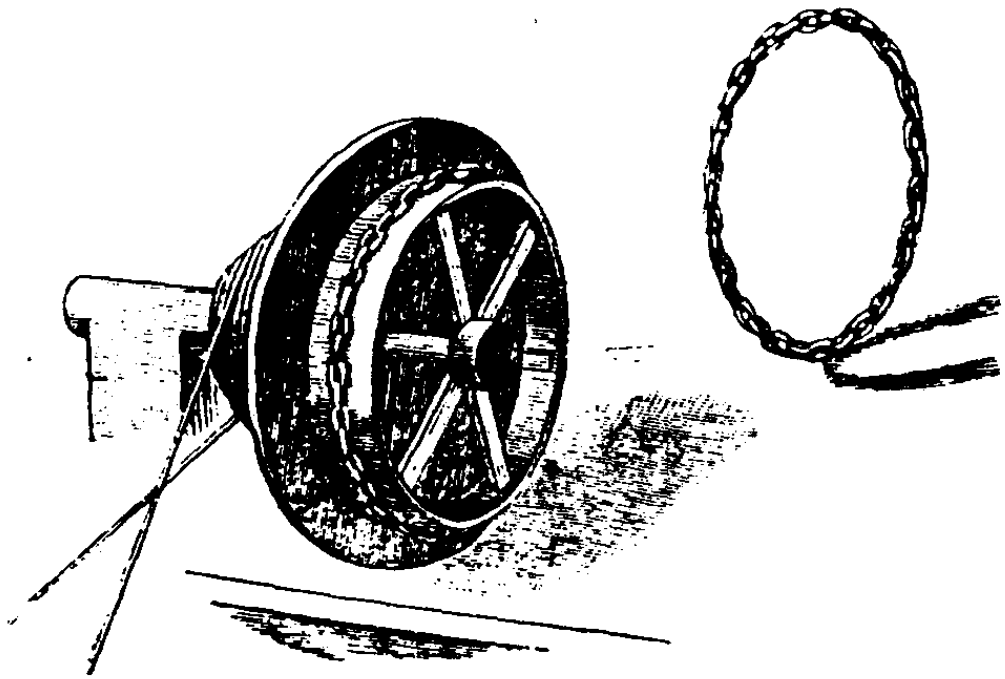


Рис. 2

бесформенную массу и, кажется, совершенно неспособна оказать сопротивление силам, стремящимся изменить ее форму. Полное отсутствие твердости здесь, в самом деле, в высшей степени очевидно; но, если закрутить эту шляпу на конце палки, то вы видите, что она, во-первых, принимает отчетливую форму, во-вторых, бежит вдоль по всему столу, как если бы она была изготовлена из стали, в-третьих, как только прекращается быстрое движение, она снова опадает в виде бесформенной массы материи.

Точно так же вы можете заметить, что подвыпивший человек, если он не стоит, прислонившись к стене или к фонарному столбу, чувствует, что единственное его спасение от позорного падения заключается в достижении известной скорости движения, и что, таким образом, быстротой своего движения он получает возможность придать больше твердости своей походке.

Вода внутри этого стеклянного сосуда (рис. 3) находится в состоянии быстрого движения, вращаясь вместе с сосудом. Смотрите теперь на этот погруженный в воду кусок парафина A и вы заметите, что он дрожит, если я толкну его палкой, совершенно так, как если бы он был окружен густым студнем. Теперь применим к этому опыту Вильяма Томсона улучшение, предложенное профессором Фицджеральдом. Здесь, на конце этой палки, прикреплен кружок B, вы видите, что

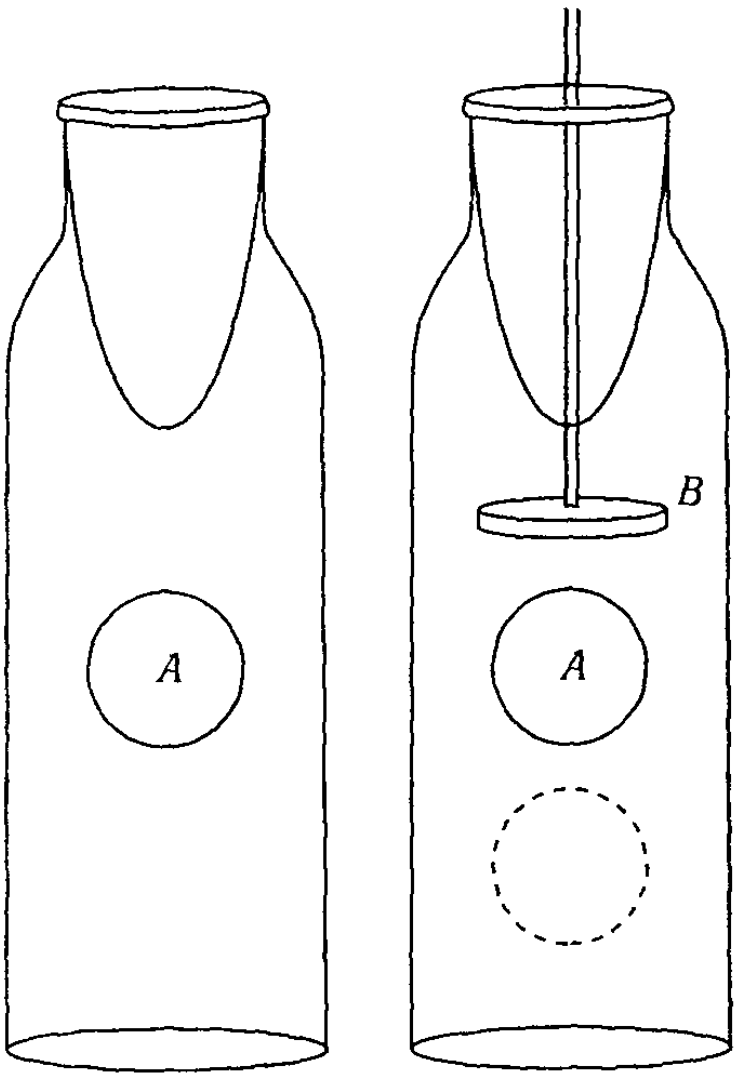


Рис. 3*

он, хотя и не касается куска A, все-таки отталкивает его. И далее вы можете заметить, что, если я быстро вращаю кружок B, он как бы притягивает кусок парафина A.

Ударом об эластичную поверхность задней стенки этого ящика (рис. 4) можно привести в быстрое вращательное движение небольшое количество воздуха возле круглого отверстия с передней стороны; чтобы сделать этот воздух видимым для глаза, его смешивают с дымом, и таким образом получается кольцо дыма. Это кольцо движется на значительное расстояние, не изменяясь, почти как твердое тело, и я точно не знаю, нельзя ли было послать большое кольцо отравленного дыма так далеко, чтобы оно истребило или оглушило армию, отстоящую на несколько верст. Не забывайте того, что за все время существования кольца частицы воздуха, его составляющие, остаются одни и те же.

* Стеклянный сосуд должен был бы быть шире по сравнению со своей вышиной.

Вы можете далее заметить, что два кольца дыма, выходящие из двух ящичков, оказывают замечательное действие друг на друга; изучение этих взаимодействий дало начало Томсоновой теории дымовых колец или теории вихревого строения материи.

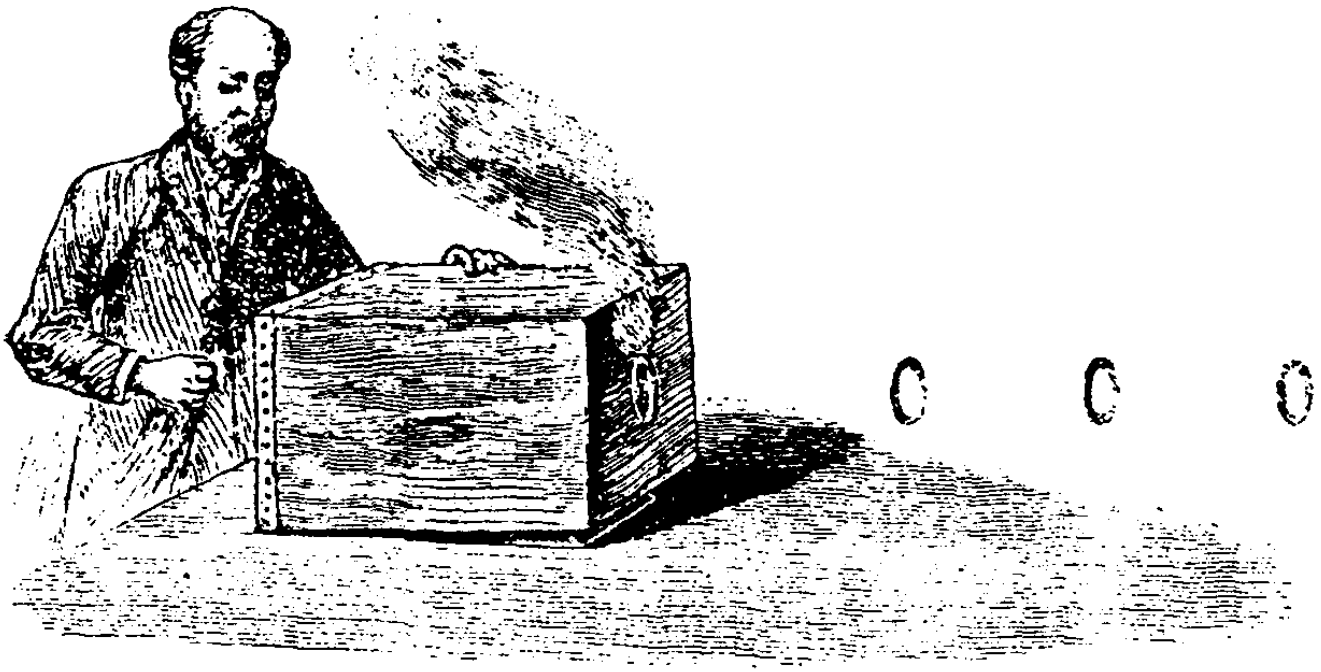


Рис. 4

Идею молекулярных вихрей высказал впервые при разъяснении тепловых и электрических явлений Ранкин, великий вождь всех инженеров. Идея эта заключается в том, что всякая частица материи есть маленький волчок. Однако теперь я хочу говорить только о теории Томсона.

Допущение, что атом материи есть не что иное, как удивительное, замечательно стройно сформированное кольцо дыма, которое находится в совершенной жидкости и которое никогда не может подлежать стационарному изменению, кажется весьма странной и искусственной гипотезой. Но эта гипотеза, несмотря на некоторого рода трудности, является основанием теории, которая лучше всего может объяснить бóльшую часть подмеченных исследователями молекулярных явлений. Во всяком случае, какова бы ни была ценность этой теории, вы видите уже из показанных вам опытов, что движение сообщает малым количествам жидкости удивительные свойства упругости, притяжения и отталкивания; что каждая из этих целых частей вещества оказывает сопротивление разделению на две части; что нельзя даже приблизить

к дымовому кольцу нож; и что столкновение двух колец такого рода не так уж сильно отличается от столкновения двух кулачковых колец.

Другой пример отвердения, которое приобретает жидкость, от быстрого движения, представляет ощущение полной беспомощности, которое овладевает даже самыми сильными пловцами, если их охватывает под водою водоворот.

Я мог бы, если бы захотел, привести еще много примеров кажущейся твердости, которую сообщает движение всем гибким или жидким телам. В Неваде применяют при горных работах струю воды, подобную струе, выходящей из наконечника пожарного шланга, только гораздо бóльшей силы и которая может быть также легко пущена в любом направлении; и громадные массы Земли и камня быстро дробятся текущей водой, которая по своей твердости скорее напоминает стальной стержень, чем струю воды.

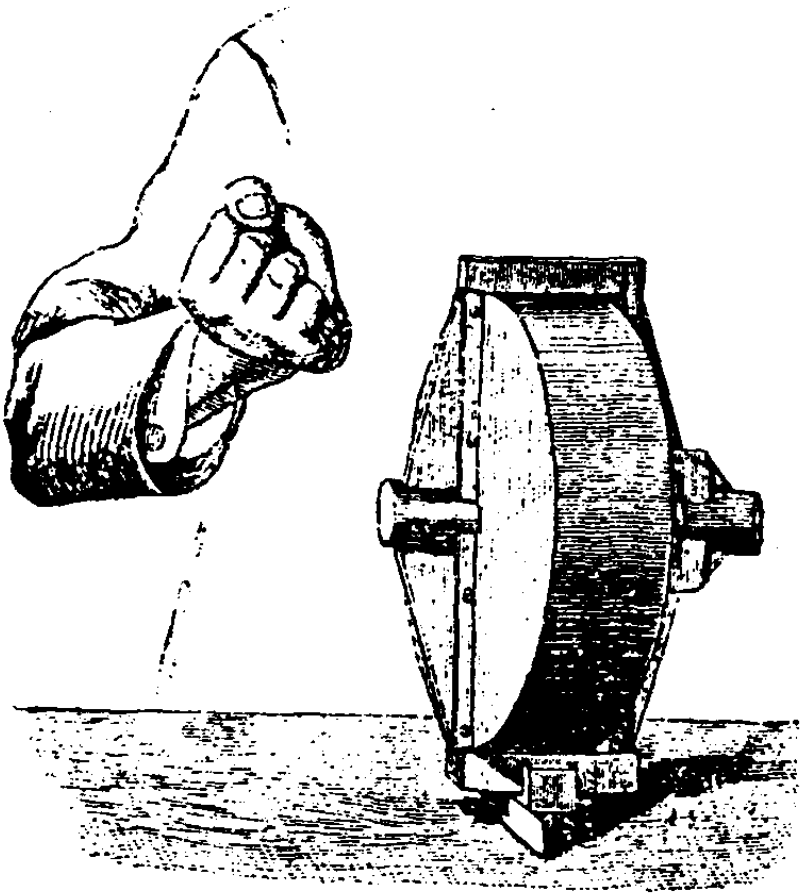


Рис. 5

Может быть, вы больше заинтересуетесь этой латунной коробкой, которую я держу у себя в руках (рис. 5). Вы не замечаете в ней ни-

чего, находящегося в движении, но в действительности внутри этого барабана находится маховое колесо, которое приведено в быстрое вращение. Посмотрите теперь, как я ставлю этот барабан на стол его узкой ножкой, похожей на конек, и между тем он не опрокидывается, что непременно случилось бы с обыкновенным барабаном и что произойдет через некоторое время и с этим барабаном, когда внутри его установится покой. Затем вы видите, что я могу подвергнуть этот барабан сильным ударам без того, чтобы он заметно наклонился, выйдя из вертикального положения; он только немного поворачивается, но не наклоняется, как бы сильно я ни ударил. Заметьте, что если я приведу барабан в несколько наклонное положение, то он не опрокидывается, но медленно поворачивается, приходя в так называемое прецессионное* движение.

Позвольте мне в течение всей лекции обозначать названием прецессионного всякое движение такого рода. Может быть, вы имеете еще более веские возражения против выражения, что барабан «прецессирует», когда он приходит в движение такого рода; но у меня нет выбора, так как я должен иметь в распоряжении какой-нибудь глагол, а изобрести менее варварское слово у меня нет времени.

Если я, держа этот барабан у себя в руках, стану передвигать его параллельно самому себе в любом направлении (рис. 6), то я не замечаю ничего особенного, т. е. я ощущаю как раз то же самое, как если бы его внутренний механизм оставался в покое; но как только я пытаюсь наклонить его в бок, я испытываю в высшей степени удивительное и значительное сопротивление его такому движению. Эта готовность барабана повиноваться, — если держать его в руках, — всем движениям, при которых его наклон остается неизменным, и, наоборот, его сопротивление движениям, которые стараются изменить этот наклон, точно так же, как и неожиданное стремление двигаться в последнем случае в ином направлении, — все это вызывает одно из самых странных ощущений. Пожалуй, может показаться, будто в барабане сидит какое-то невидимое и капризное существо. И действительно, внутри его находится своего рода одухотворенное существо, которое образованные алгебраисты называют мнимой величиной, а другие математики — оператором.

*Название это взято по аналогии с вращением земной оси, см. ниже. — *Прим. перев.*

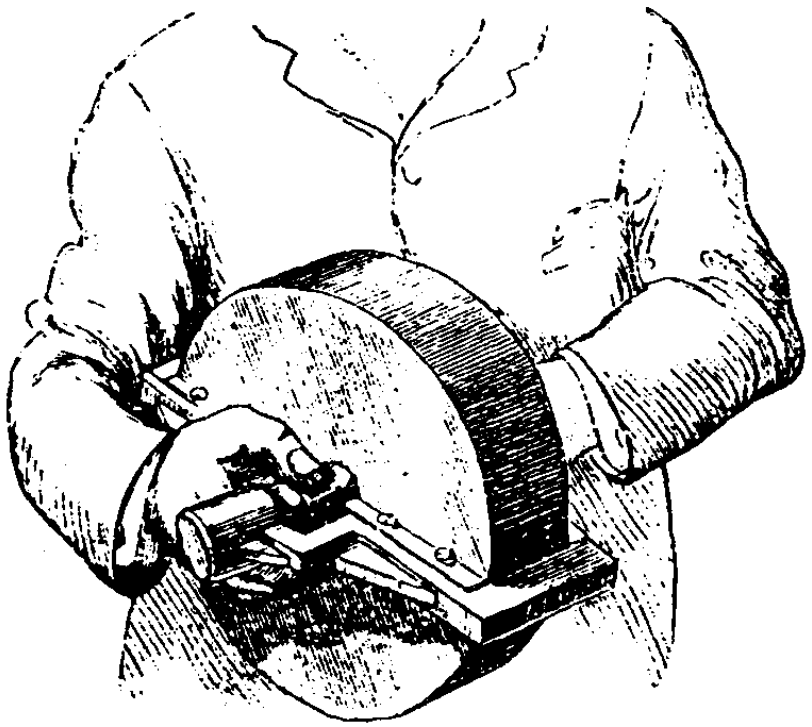


Рис. 6

Установка почти всех опытов, точно так же, как и приготовление волчков и других приборов, которые вы видели сегодня вечером, — дело рук моего даровитого ассистента, г. Шепгерда. Но в следующем опыте ему не только принадлежит установка, но также и сама идея опыта. Он сказал мне: «Вы себе можете, сколько Вам угодно, вертеть и нагибать ваше туловище с большим гиростатом в руках, но многие среди ваших слушателей просто скажут, что Вы только *притворяетесь*, будто Вы встречаете затруднение, когда стараетесь наклонить гиростат». И вот он установил на колесах стол, на котором я могу стоять. Теперь, как вы видите, если я стараюсь повернуть гиростат, то он не поворачивается; как я ни напрягаюсь, он сохраняет свое положение, оставаясь постоянно направленным вон к тому концу зала, и все мои усилия могут заставить повернуться лишь мое тело и стол, но не гиростат.

Теперь вам ясно, что барабан только тогда оказывает сопротивление, когда мы стараемся сообщить другое направление оси вращения скрытого внутри его махового колеса; и если вы, интересуясь этим предметом, сделаете некоторые дальнейшие наблюдения, то вы сейчас же увидите, что всякое вращающееся тело, как и помещенное внутри барабана колесо, более или менее сопротивляется изменению направ-

ления его оси вращения. Если маховые колеса паровой машины, динамо-машины или других быстро движущихся машин вращаются на судне, то вы можете быть вполне уверены, что они оказывают гораздо бóльшее сопротивление продольной и боковой качке, поворотам и вообще всякому другому движению судна, которое стремится изменить направление оси вращения, чем в состоянии покоя.

Вот волчок, который лежит на плоской дощечке и который я подбрасываю в воздух (рис. 7). Вы видите, что проследить его движение трудно, и никто не мог бы предсказать заранее, пока он не упадет, в каком положении он вернется обратно на дощечку: он может упасть острым концом вперед, назад или в сторону. Но, если я заверчу его и теперь подброшу в воздух, то не может быть совершенно никакого сомнения относительно того, в каком положении он вернется назад. Ось вращения остается параллельной сама себе, и я могу подбрасывать волчок вверх несколько раз подряд, не изменяя заметно его вращательного движения.

Рис. 7

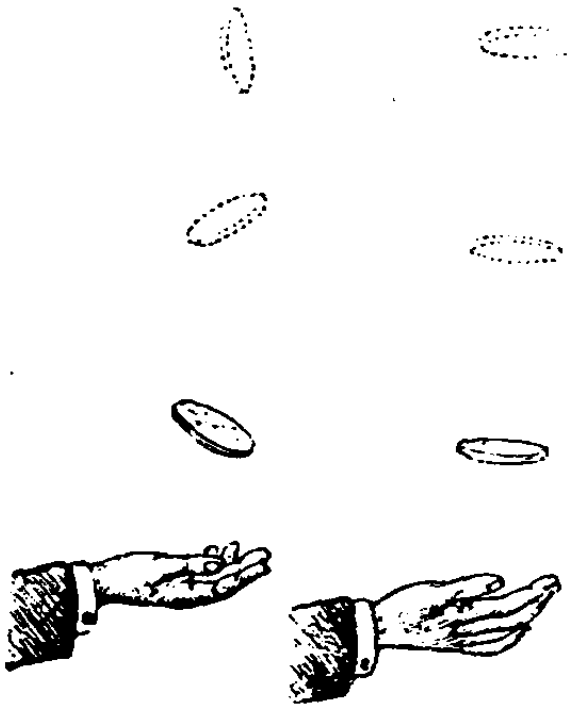


Рис. 8

Если я подброшу вверх этот бисквит (рис. 8), то вы видите, что я не могу знать заранее, как он упадет обратно; но, если я перед тем,

как выпустить его из рук, приведу его во вращение, то на этот счет не останется никакого сомнения. Вот шляпа; я подбрасываю ее вверх и не знаю, в каком положении она упадет обратно (рис. 9); но если я сообщу ей вращение, то вы видите, что ось, вокруг которой происходит вращение, как и волчка и бисквита, остается параллельной сама себе, и вы можете быть уверены, что в данном случае шляпа упадет на землю полями вниз.

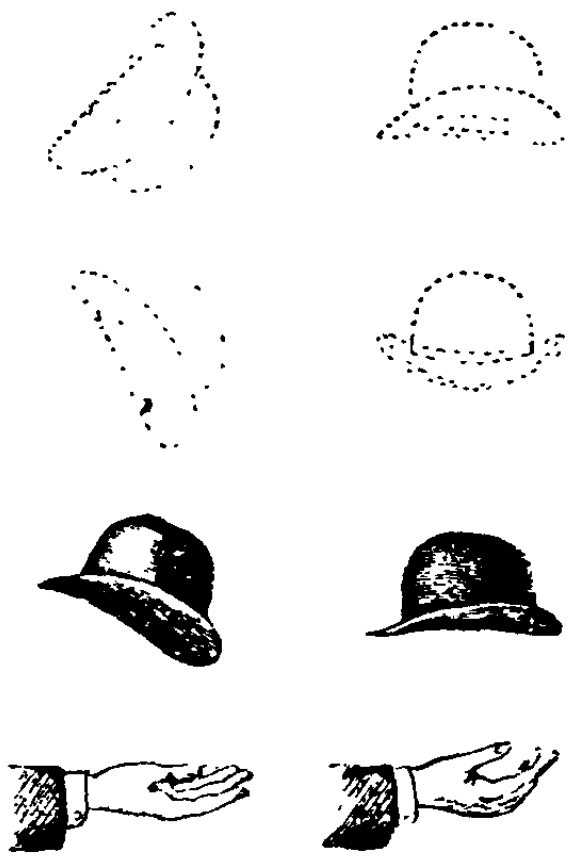


Рис. 9

Я считаю лишним приводить в виде примера еще раз очень мягкую шляпу, которой мы несколько минут тому назад сообщали некоторую твердость; но вспомните, что мой ассистент бросал ее в воздух наподобие бомбы после того, как она была приведена во вращение, и что ее ось вращения оставалась параллельной сама себе точно так же, как и ось этой твердой шляпы и бисквита.

Однажды я показывал некоторые из моих опытов перед публикой, пившей кофе и курившей табак, в великолепном помещении концертного зала «Виктории» в Лондоне. Я старался заинтересовать моих слушателей, насколько мог, вышеописанными явлениями и рассказывал о том, что плоскому кольцу надо сообщить вращение, если его желают бросить так, чтобы можно было точно узнать наперед, как оно упадет; точно так же поступают, если желают кому-нибудь бросить обруч или шляпу так, чтобы он мог поймать эти предметы палкой. Всегда можно рассчитывать на сопротивление, которое оказывает вращающееся тело, когда изменяют направление его оси. Далее я объяснял моим слушателям, что, отполировав гладко дуло пушки, никогда нельзя рассчитывать на точность прицела*; что вращение, в которое приходит

*В 1746 году Веньямин Робинс установил основы ружейного дела в том виде, в каком мы пользуемся ими сейчас. Он показал, что *вращение* круглого снаряда надо считать важнее всего остального; даже изгиб пушечного дула не ведет к отклонению снаряда в той мере, в какой может привести отклонение от прицела вращение снаряда в противоположном направлении.

обыкновенное ядро, зависит прежде всего от того, каким образом ядро коснется отверстия пушки в тот момент, когда оно из нее вылетает; вследствие этого теперь делают нарезные дула, т. е. теперь вырезают на внутренней стороне дула пушек спиралеобразные желобы, в которые приходятся выступы ядра или снаряда, так что последний должен получить определенное вращательное движение, когда сила взрыва пороха заставляет его двигаться по дулу пушки. Благодаря этому, снаряд покидает пушку с точно определенным вращательным движением, относительно которого не может возникнуть никакого сомнения;

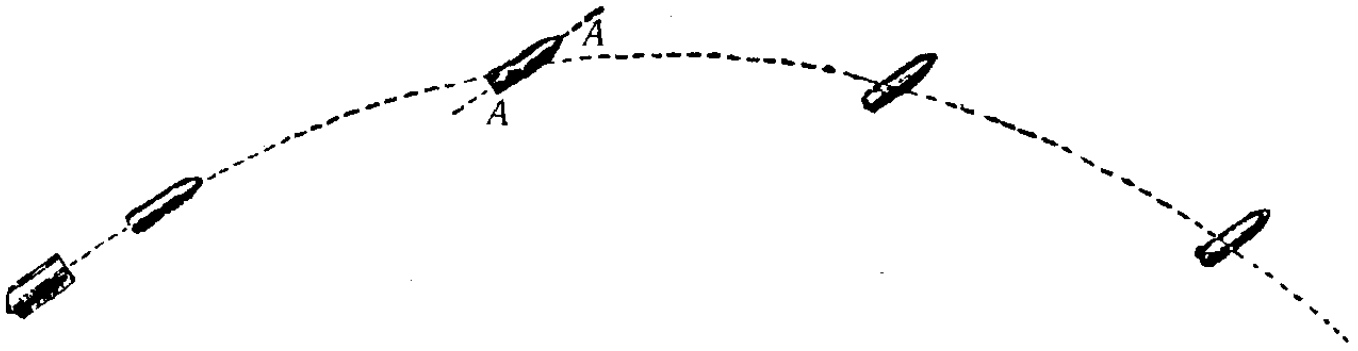


Рис. 10

рис. 10 указывает на вид движения, которое затем совершает снаряд; совершенно так же, как и у шляпы или бисквита, его ось вращения остается почти параллельной сама себе. Это было все, что я мог сделать во время этой лекции, так как я не обладаю ловкостью в бросании шляп или дисков. Но после того, как я закончил свою лекцию и затем молодая дама пропела комическую песню, на подмостки выступили два жонглера, господин и дама, и я не мог пожелать лучшей иллюстрации упомянутых выше законов, нежели та, которую давал каждый отдельный фокус, показанный этими двумя артистами. Они бросали друг другу вращающиеся шляпы, обручи, тарелки, зонтики. Один из жонглеров бросал в воздух целый ряд ножей, ловил их опять и снова подбрасывал их с большой точностью вверх; моя аудитория, только что прослушав объяснение этих явлений, ликовала от удовольствия и обнаруживала самым явным образом, что она замечала вращение, которое жонглер сообщал каждому ножу, выпуская его из рук, так что он мог, наверное, знать, в каком положении нож снова вернется к нему (рис. 11). Я был тогда поражен, что почти без исключения все жонглерские фокусы, показанные в тот вечер, представляли иллюстрацию изложенного выше

принципа. И если вы все еще сомневаетесь в моих словах, то спросите только ребенка, когда его обруч легче опрокидывается, тогда ли, когда он быстро катится, или когда он *двигается медленно*; спросите велосипедиста, когда ему легче удержать равновесие, при медленной или при скорой езде; спросите балетную танцовщицу, долго ли она могла бы устоять на носке, не поддерживая равновесия при помощи рук или палки, если бы она не кружилась; спросите астронома, сколько месяцев земная ось сохраняла бы то же самое направление относительно Полярной звезды, если бы Земля не вращалась; и прежде всего спросите какого-нибудь подростка, когда его волчок легче стоит на своем остром конце: когда он вращается, или когда он не вращается?

Рис. 11

Исследуем теперь внимательнее свойства обыкновенного волчка (рис. 12). Он не вращается, и вы видите, что он сразу опрокидывается; если я ставлю его вертикально на его острие, то он оказывается совершенно неустойчивым. Но теперь обратите внимание, что когда он кружится, то он не только остается вертикально на своем острие, но даже, если я его ударю и таким образом изменю его состояние, начинает кружиться в прецессионном движении, которое постепенно делается все меньше и меньше, пока волчок не приходит опять в свое вертикальное положение. Я на-

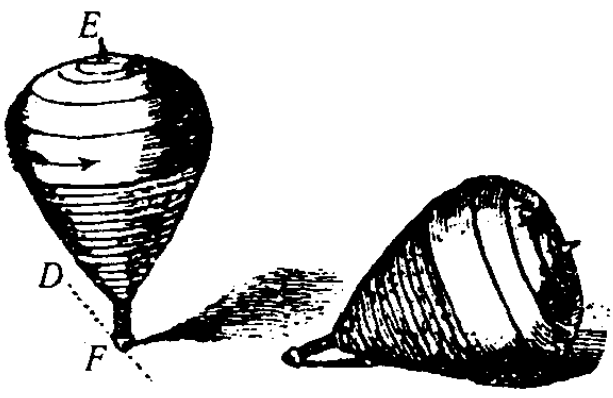


Рис. 12

деюсь, вы никоим образом не подумаете, что время, употребленное на внимательное наблюдение явлений такого рода, потрачено непроизводительно. Научное наблюдение самых обыкновенных явлений, которые встречаются в нашей повседневной жизни, никогда не пропадает даром, и часто я чувствую, что если бы рабочие, т. е. те лица, которые наиболее освоились с неорганической природой, умели наблюдать и применять простые научные законы к своим наблюдениям, то вместо одного великого открытия в столетие мы имели бы по великому открытию каждый год. Но возвратимся к нашему волчку; тут следует сделать прежде всего два важных наблюдения. На короткое время оставим без внимания легкие колебательные движения, которые имеют место при вращении волчка. Первое наблюдение, которое мы делаем, состоит в том, что волчок наклоняется в первый момент не по направлению удара. Если я направляю удар к югу, то волчок наклоняется к западу, если же к западу, то волчок наклоняется к северу. Причина этих явлений известна всем научно-образованным людям, и закон, лежащий в основе поведения волчка, во многих отношениях в высшей степени важен; я надеюсь сделать его понятным для вас. Второй факт, что волчок опять достигает постепенно своего вертикального положения, известен каждому; но нельзя сказать того же самого о причине этого факта; однако я думаю, что понять эту причину не представит для вас большой трудности.

Первое явление можно наблюдать на том барабане, который я вам уже показывал. Этот барабан (рис. 5) с маховым колесом внутри называется *гиростатом*. Если я толкаю барабан, то он не наклоняется, но медленно поворачивается кругом. Второго явления на этом гиростате нельзя увидеть; если я заставлю его выйти из вертикального положения, то он не выпрямится снова, но, наоборот, будет прецессировать по все бóльшим и бóльшим кругам, все дальше и дальше удаляясь от своего вертикального положения.

Первое явление легче всего изучить на уравновешенном (рис. 13) гиростате. Вы видите здесь маховое колесо G в прочной латунной раме F, которая так укреплена, что может свободно двигаться как вокруг вертикальной оси AB, так и вокруг горизонтальной — CD. Гиростат уравновешен противовесом W. Заметьте, что я могу увеличить или уменьшить плечо рычага, на которое действует груз W, меняя его положение во втулке A; этим путем можно достигнуть того, что противо-

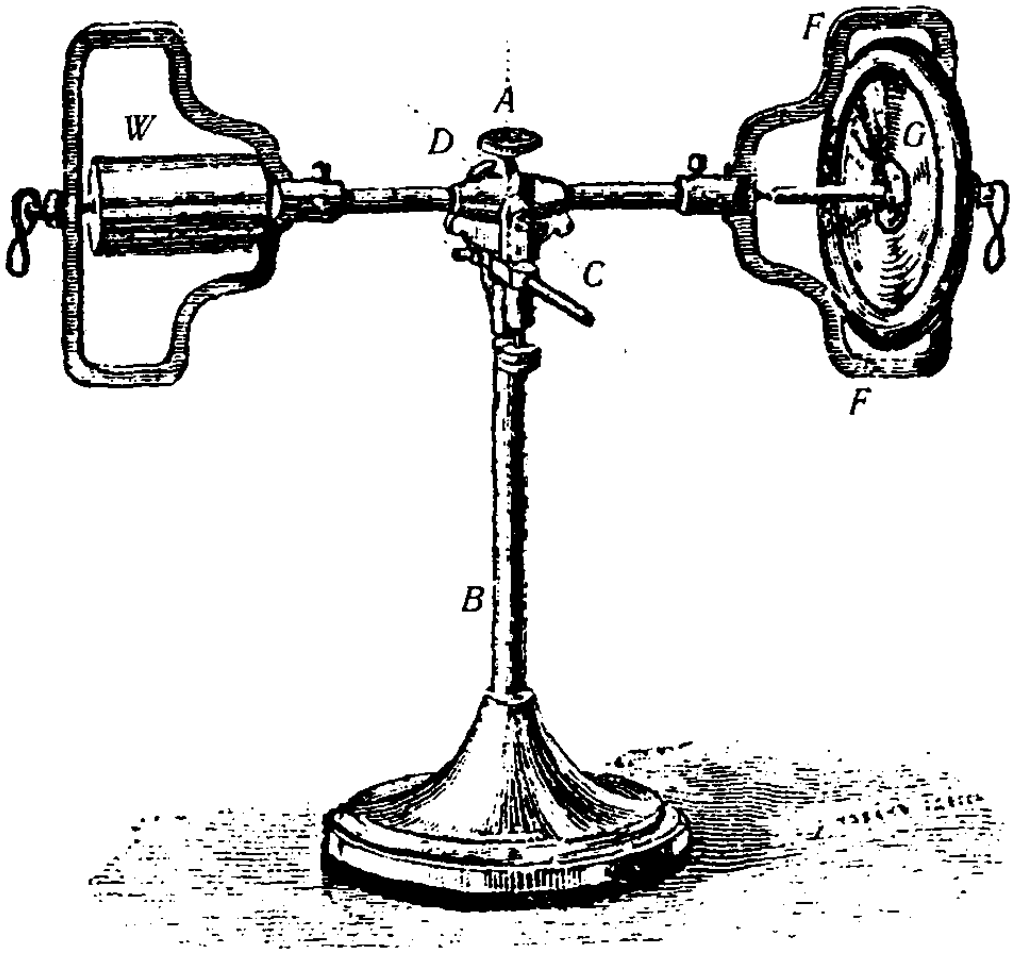


Рис. 13

вес заставит гиростат либо подняться, либо опуститься, либо остаться в равновесии, как это сейчас и имеет место. Теперь вы должны внимательно наблюдать то, что мы желаем изучить. Когда я стараюсь толкнуть этой палочкой раму F вниз (рис. 14), она на самом деле двигается горизонтально направо; теперь я толкаю раму F вправо, и она только поднимается (рис. 15); теперь я толкаю ее вверх, и она, как вы видите, двигается влево; если же я толкаю ее налево, то она только поворачивается вниз. Далее, вы можете заметить, что если я закреплю инструмент таким образом, чтобы он не мог двигаться вертикально, то он сейчас после удара приходит в движение в горизонтальном направлении; напротив, он движется вертикально, если я помешаю горизонтальному движению. Теперь, предоставив инструменту прежнюю свободу, я так перемещу положение груза W, чтобы он постоянно стремился поднять гиростат; и вы видите теперь, что инструмент не поднимается, но начинает медленно двигаться прецессионным движением. Теперь я опять

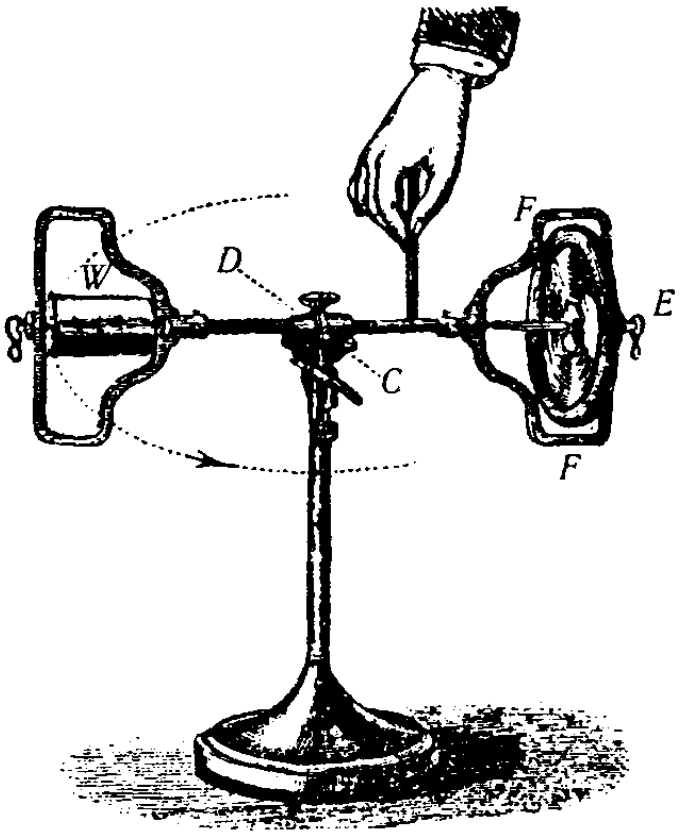


Рис. 14

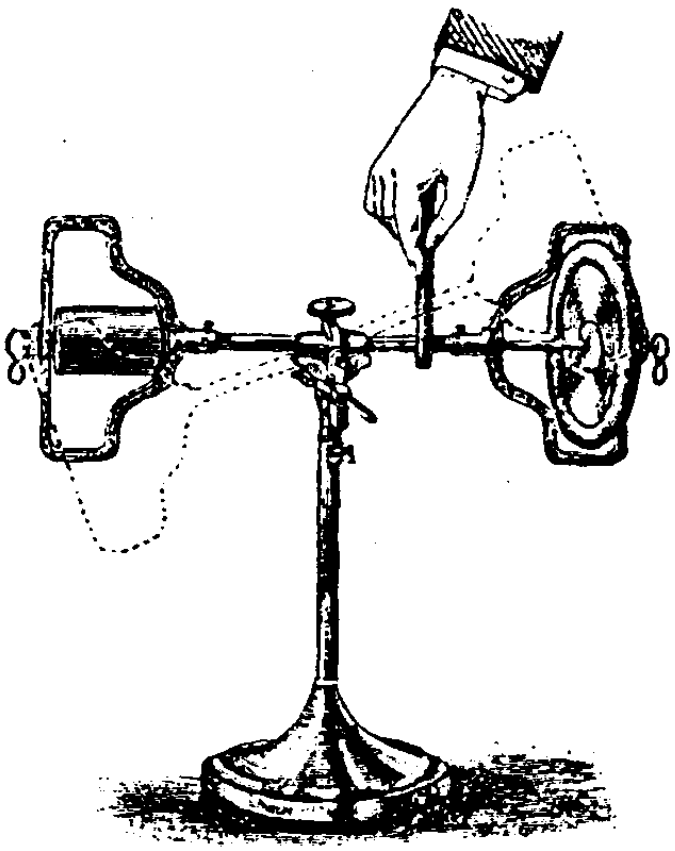


Рис. 15

передвигаю груз W так, что гиростат должен был бы упасть, если бы он не вращался (рис. 16), и теперь он медленно движется горизонтальным прецессионным движением, которое противоположно прежнему. Эти явления объясняются легко, но, как я упоминал раньше, они должны быть точно наблюдены. Все вы теперь приблизительно знаете основной факт, а именно: если я пытаюсь изменить направление оси быстро вращающегося тела, то эта ось, хотя и изменяет свое направление, но не в ту сторону, в какую действовал я. Это, пожалуй, еще удивительнее, чем история со свиньей крестьянина, который тем только и мог заставить ее идти в город, что убедил ее, будто она идет домой. Его правило было весьма просто, и мы должны найти подобное же правило также и для нашего вращающегося тела, подобно раку, который только тогда идет прямо по дороге, если толкать его в сторону.

Для примера рассмотрим вращающийся снаряд, изображенный на рис. 17. Вращение стремится удержать его ось всегда в одном и том же направлении. Однако здесь явление происходит в несколько измененном виде, как вы это теперь легко поймете. Вы видите, что в точке A воздух должен оказывать давление на нижнюю часть поверхности AA;

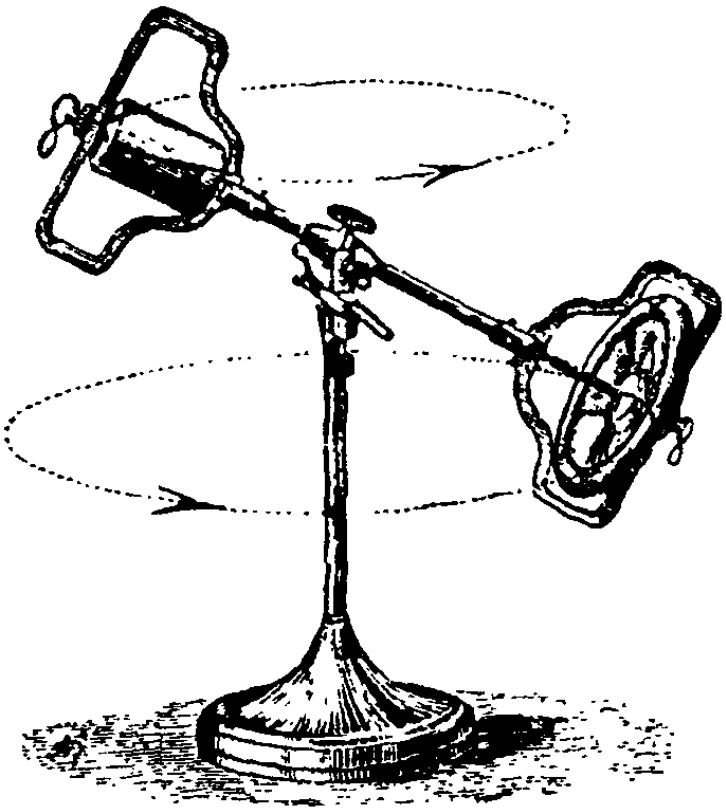


Рис. 16*

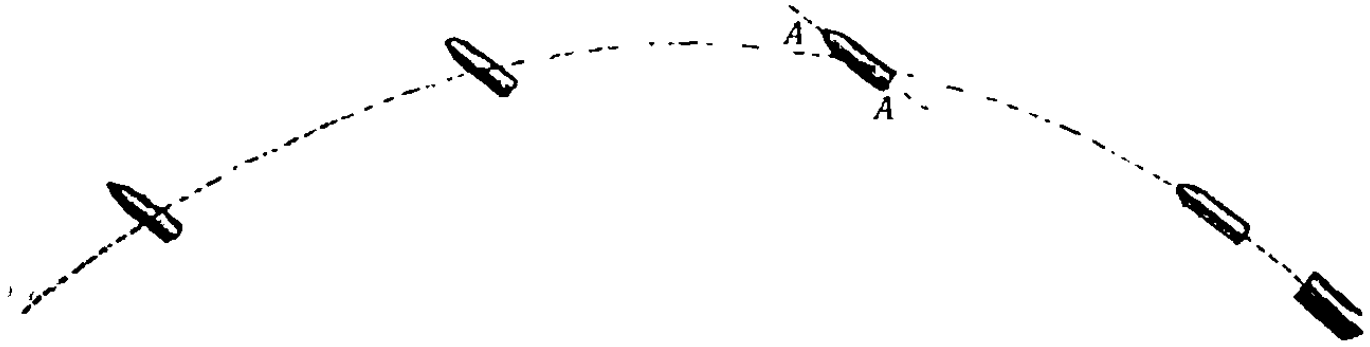


Рис. 17

это давление действует таким образом, что снаряд стремится обратить навстречу потоку воздуха свою широкую сторону; нужно это еще выяснить. Если лодка на реке не может свободно двигаться, а именно, привязана в средней части и ничем больше в своих движениях не стеснена, то она стремится повернуться широкой стороной поперек течения. Посмотрите на этот картонный круг, который я бросаю в воздух ребром,

*На рис. 16 ось показана наклонной, но я предпочел бы, если бы не было труднее изобразить это, показать прецессию, имеющую место при горизонтальной оси.

и заметьте, что он сейчас же оборачивается к земле широкой стороной и медленно падает вниз. Точно также некоторые из вас бросали в Адене* мелкую серебряную монету в воду ныряющим мальчикам; и вы можете быть уверены, что если бы монета не приходила в колебательное движение, медленно погружаясь в воду своей широкой стороной, то, наверное, ни одному из ныряющих мальчиков не удалось бы овладеть ею. Но все это в скобках. Давление воздуха стремится повернуть снаряд широкой стороной вперед, но так как он вращается вокруг своей продольной оси, то последняя не принимает перпендикулярного к его пути положения так же, как мне не повинуется гиростат, если я пытаюсь направить его ось вертикально; ось вращения снаряда выходит из плоскости чертежа, из плоскости его полета; только артиллеристы точно знают, что происходит в этом случае с осью; это отклонение снаряда причиняет им много хлопот.

Вы можете заметить, что ребенок, наученный опытом, желая переменить направление своего обруча, производит палкой давление, стремящееся его наклонить. Велосипедист меняет направление, наклоняясь таким образом, как будто он теряет равновесие. Будет хорошо, если вы при этом заметите, что движение велосипеда и велосипедиста не представляет собой вращения в полном смысле этого слова; оно не вполне сходно поэтому с движением волчка или гиростата. Объяснение того обстоятельства, почему всадник отклоняется от прямого пути, если он наклоняет свое туловище, сводится в конце концов к тому же простому принципу, а именно, ко второму закону Ньютона. По той же причине, а именно, короче говоря, вследствие действия центростремительной силы, всадник может, если только он не придает значения своей фигуре во время езды, значительно облегчить своей лошади крутой и быстрый поворот, наклоняя свое туловище в сторону поворота; и, чем медленнее бежит лошадь, тем бóльшее действие окажет такое наклонение всадника. Цирковые наездники, галопируя по кругу, много помогают своим лошадям, придавая своему телу надлежащее положение; и, вероятно, поэтому они при езде принимают такую посадку, подражать которой не позволил бы своим ученикам ни один учитель верховой езды; они делают это не для того, чтобы предохранить себя от падения вследствие центробежной силы. Почтенные наездники нашей страны охотно помогали бы таким образом своим лошадям при быстрых поворотах,

*То же можно видеть у нас в Севастополе. — *Прим. перев.*

если бы им приходилось гоняться за пасущимся скотом, чтобы собрать его, как это приходится делать американским ковбоям.

Очень хорошие примеры изменения, происходящего в направлении катящегося тела, можно наблюдать при игре в кегли. Вы знаете, что шар, не будь внутри его некоторой неправильности распределения груза, которая стремится повернуть его ось вращения, катился бы по поверхности кегельного катка в прямом направлении, и его скорость все время убывала бы, пока он, наконец, не остановился бы. Но вам известен, вероятно, тот факт, что вначале, когда шар движется быстро, путь его движения остается в достаточной мере прямым. А так как шар имеет внутри, вообще говоря, эксцентрично помещенный груз, то путь его никогда не бывает совершенно прямым, и с уменьшением скорости он искривляется все больше и больше. Чем медленнее вращение, тем больше во всех наших примерах прецессионное движение вследствие сил, вызывающих наклонение оси.

Точное наблюдение приведет вас к простому правилу относительно свойств гиростата. Все, что до сих пор казалось непонятным или удивительным, делается сразу понятным, если я стану выражаться несколько иначе; именно, вместо того, чтобы говорить, что гиростат движется вверх, вниз, налево или направо, буду говорить о движении вокруг различных осей. Простому поступательному перемещению гиростат не оказывает никакого сопротивления. Когда же я говорил о горизонтальном перемещении, то я должен был бы говорить, что гиростат поворачивается вокруг вертикальной оси AB (рис. 13). И то, что я обозначал, как движение вверх или вниз, есть в действительности лишь вращение в вертикальной плоскости вокруг горизонтальной оси CD. Если я впредь буду сообщать раме F движение, то думайте только о том, вокруг какой оси я стараюсь ее повернуть, и тогда вы при помощи простых соображений найдете причину упомянутых выше явлений.

Вот гиростат (рис. 18), который тщательно подвешен на кольцах* таким образом, что на него не действуют ни сила тяжести, ни сила трения на цапфах (концах осей); и что бы я ни делал с этой рамой, которую держу в руке — ничто не влияет на направление оси. Вы видите, что я, держа аппарат в руке, поворачиваюсь на своих носках, как балетный

*Здесь речь идет о так называемом Кардановом или Боненбергеровом подвесе, который находит себе применение, главным образом, в пароходных компасах.

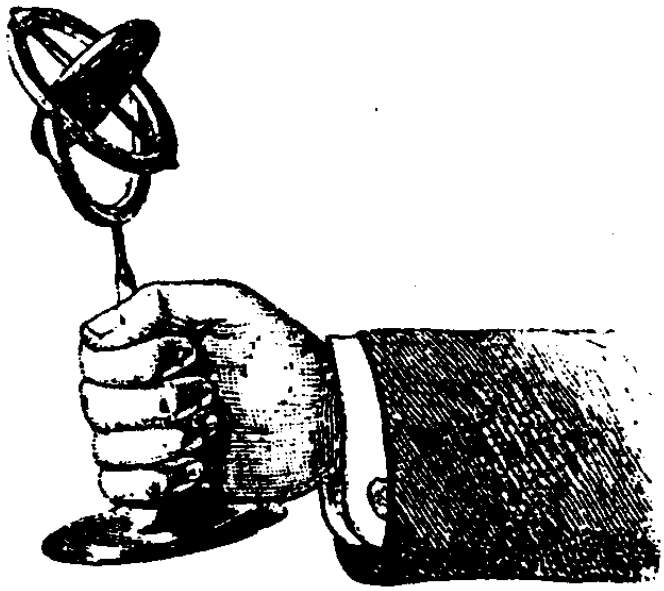


Рис. 18

танцор. Я двигаю его всеми возможными способами, но если ось вначале показывала на Полярную звезду, то она всегда будет указывать на эту звезду; если же она вначале показывала на Луну, то она и сейчас показывает на Луну. Отсюда надо заключить, что, кроме трения на цапфах, нет почти никаких сил, которые стремились бы повернуть ось гиростата, и потому я могу сообщать ей только поступательные перемещения. Но теперь я зажму вертикальную ось винтом и снова начну свой балетный танец. Теперь вы замечаете, что мне не нужно даже делать полного поворота — уже небольшой части полного оборота достаточно, чтобы под влиянием его ось вращения гиростата (рис. 19) установилась вертикально, т. е. параллельно вертикальной оси, вокруг которой вращаюсь я сам. Теперь я поворачиваюсь в противоположном направлении, и гиростат, сделав вдруг сальтомортале, совершенно переворачивается, и его ось вращения опять становится вертикально; и если вы внимательно проследите за осью вращения гиростата, то вы убедитесь в справедливости следующего правила: не обращайте вовсе внимания на чисто поступательное движение, думайте только о вращениях вокруг осей и помните лишь, что если вы заставляете ось вертящегося тела вращаться, то оно стремится поставить свою ось параллельно той оси, вокруг которой происходит его поворачивание; мало того, оно стремится поместить ось своего верчения в том же направлении, в котором лежит ось его нового поворачивания. Я поворачиваюсь еще раз кругом на носках, держа в руках эту раму; если бы теперь кто-нибудь

Рис. 19

посмотрел вниз с потолка на гиростат и на меня, то он заметил бы, что я поворачиваюсь в направлении часовой стрелки, т. е. в том же самом направлении, в каком гиростат вращается в данном случае вокруг своей оси; но как только я повернусь в противоположном направлении, а именно, против часовой стрелки (рис. 20), гиростат перекидывается для того, чтобы опять иметь возможность поворачиваться в том же самом направлении, в котором поворачиваюсь я.

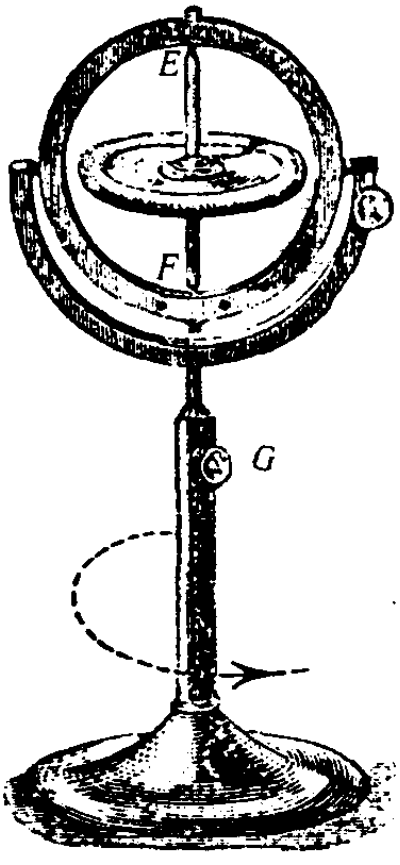


Рис. 20

Вот то простое правило, которое даст вам возможность предсказать, как гиростат будет двигаться, если его стараются переместить в какое-нибудь определенное положение. Вы должны лишь помнить, что если продолжать наши усилия достаточно долго, то ось вращения тела установится параллельно новой оси вращения, и направление первоначального вращения

должно сделаться таким же, как и направление нового отклоняющего вращения.

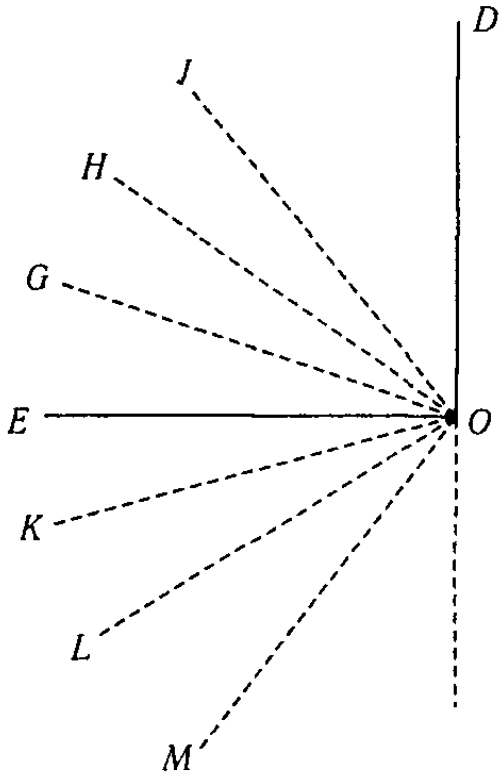


Рис. 21

Применим теперь это правило к этому уравновешенному гиростату (рис. 13). Я его толкаю или сообщаю ему импульс по направлению вниз; но заметьте, что это собственно обозначает вращение вокруг горизонтальной оси CD, и гиростат поворачивает теперь свою ось так, как если бы она старалась стать параллельной оси CD. Если смотреть сверху (как показывает рис. 21), то OE было направление оси вращения, OD была ось, вокруг которой я старался повернуть гиростат, и мгновенное действие этого поворота выразилось в том, что OE перешло в положение OG. Более сильный импульс того же рода подействовал бы так, что ось вращения сейчас же перешла бы в OH или в OJ, между тем как прямо противоположный импульс, направленный вверх, заставил бы ось вращения принять направление OK, OL или OM, смотря по величине импульса и по скорости вращения. Подметив это явление в первый раз, можно было бы сказать: «Я толкал гиростат вниз, а он двигался направо; я толкал его вверх, а он двигался налево», но если бы направление вращения гиростата было прямо противоположно его теперешнему вращению, то нужно было бы сказать: «Я толкал его вниз, а он двигался налево, я поднимал его вверх, а он двигался направо». Правильное выражение во всех этих случаях должно быть: «Я пытался повернуть гиростат вокруг новой оси вращения, и следствием этого было то, что он старался повернуть свою первоначальную ось вращения в направлении новой оси». И если бы вы теперь позабавились с этим уравновешенным гиростатом, как это делаю я, толкая его по всевозможным направлениям, то вы нашли бы, что это правило верно и что без малейшего затруднения можно заранее предсказать, что произойдет в том или ином случае.

А раз это правило верно, то и возникновение прецессионного движения будет для нас сейчас же ясно. Я вывожу этот гиростат (рис. 13)

из равновесия, и если бы он не находился в состоянии быстрого вращения, то упал бы вниз; но сила, действующая вниз, на самом деле производит иной эффект: гиростат движется направо, и вы видите таким образом, что он постоянно подвигается в этом направлении, так как сила постоянно действует вниз, и ось вращения постоянно приближается к новой оси, именно к той, вокруг которой стремится повернуть его сила тяжести. Вы видите также, что если бы равновесие было нарушено противоположным образом, т. е. если бы сила тяжести стремилась поднять гиростат, то прецессия происходила бы в противоположном направлении. Если я теперь приведу гиростат в движение, толкая его всевозможными способами, то дальнейшее наблюдение даст новые правила и выяснит, что данное выше правило упрощает все остальные. Если я воспользуюсь, например, этой палкой, чтобы ускорить прецессионное движение, то гиростат двигается против той силы, которая вызывает эту прецессию. Я придаю особое значение тому, чтобы вы и после не упускали этого из виду. Теперь противовес установлен так, что гиростат, если бы он не вращался, упал бы. Но так как он вращается, то он прецессирует. Если бы сила тяжести была больше, то он прецессировал бы быстрее, и нам становится ясным, что именно это прецессионное движение мешает силе тяжести двигать прибор прямо вниз. Вы замечаете, что если ускорить прецессию, то она становится более чем достаточной для уравновешения силы тяжести, и гиростат поднимается. Если я замедлю прецессию, то она не в состоянии уравновесить силу тяжести, и гиростат опускается. Если я зажму вертикальную ось, так что прецессия сделается невозможной, то вы заметите, что гиростат упадет в этом случае точно так же, как если бы он не вращался. Если же закреплю прибор так, чтобы он не мог двигаться вертикально, то, наоборот, вы видите, как легко я могу сделать его подвижным в горизонтальном направлении, и я могу ему сообщить горизонтальное вращение, как обыкновенному телу.

Применяя наше правило к этому волчку, заметьте, что его ось EF есть ось его вращения (рис. 12). Как это видно из чертежа, сила тяжести стремится повернуть волчок вокруг оси FD, и его собственная ось вращения описывает при прецессии конус, стремясь к совпадению с осью FD. Этот гиростат, имеющий приблизительно такой же вес, как волчок, вращается и прецессирует так же, как и волчок, а именно: если вы примените наше правило или же воспользуетесь вашими

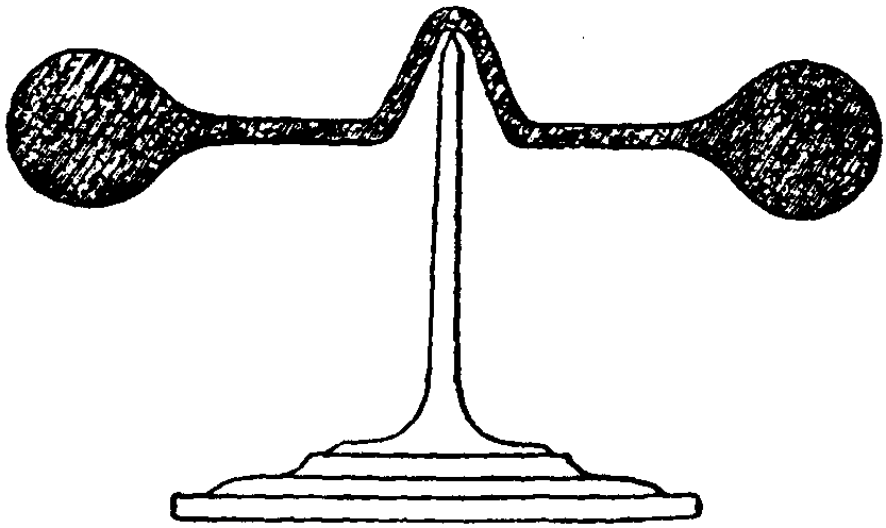


Рис. 22

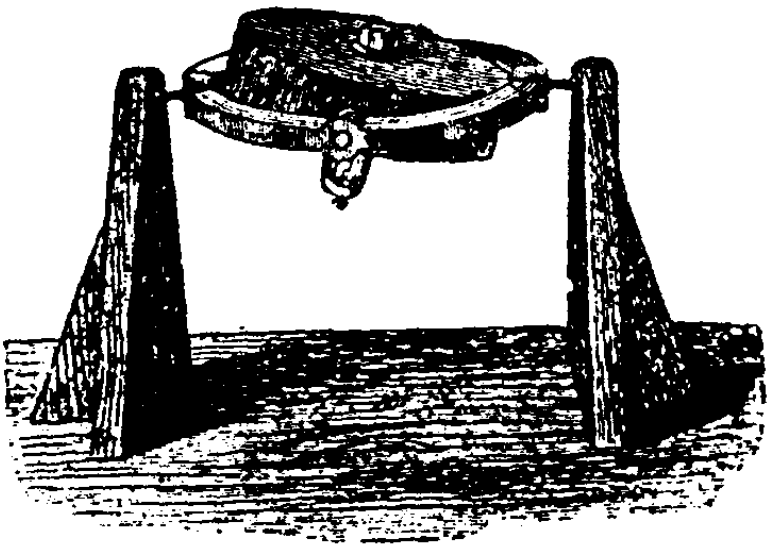


Рис. 23

собственными наблюдениями, то вы найдете, что для наблюдателя, находящегося над поверхностью стола, как вращение, так и прецессия происходят в одном и том же направлении, т. е. либо оба эти движения происходят в направлении часовой стрелки, либо оба в противоположном направлении. Наоборот, у такого волчка, как вот на этом рисунке (рис. 22), подпертого выше его центра тяжести, или у такого гиростата, как изображенный на рисунке 23, который подобным же образом закреплен выше его центра тяжести, или у всякого другого гиростата, который подперт таким образом, что он, не вращаясь, находится в устойчивом равновесии, — во всех этих случаях для наблюдателя,

смотрящего на стол сверху вниз, прецессия происходит в направлении, противоположном вращению.

Если волчку или гиростату дать толчок в направлении его прецессии, то он поднимается в направлении, противоположном действию силы тяжести, и вообще, если в некоторый момент скорость его прецессии сделалась бы больше той, какою она должна быть, чтобы уравновесить силу тяжести, то волчок или гиростат поднимется, а его прецессионная скорость уменьшится. Если же его прецессионная скорость слишком мала, то волчок наклонится вниз, и во время этого наклонения его прецессионная скорость будет увеличиваться.

Я утверждаю, что все эти явления, которые обнаружены исключительно путем наблюдений, согласуются с моими правилами.

Я хотел бы, чтобы вы всегда помнили об этих правилах. Как вы видите, на этой стенной таблице я собрал эти различные правила. При этом я говорю о силе тяжести, как о причине прецессии, но здесь можно иметь в виду и какие бы то ни было другие силы, отличные от тех, которые вызваны тяжестью.

Правила стенной таблицы. 1. Если силы, действуя на вращающееся тело, стремятся вызвать вращение вокруг некоторой оси, отличной от оси его вращения, то первоначальная ось вращения перемещается, приближаясь к совпадению с новой осью. Полное совпадение может иметь место лишь при полной параллельности осей и при том, если вращения направлены в одну и ту же сторону.

2. Если ускорить прецессию, то тело приподнимается в направлении, противоположном действию силы тяжести.

3. Если замедлить прецессию, то тело падает точно так же, как оно упало бы под влиянием силы тяжести, если бы не вращалось.

4. Прецессия обыкновенного волчка происходит в том же направлении, в каком он вращается.

5. Волчок, подпертый выше центра тяжести, и вообще всякое другое тело, которое находилось бы в устойчивом равновесии, если бы оно не вращалось, прецессирует в направлении, противоположном тому, в котором происходит вращение.

6. Последние два закона можно выразить так: если действующие на вращающееся тело силы стремятся увеличить *угол* прецессии, то прецессия происходит в том же направлении, как и вращение, и наоборот.

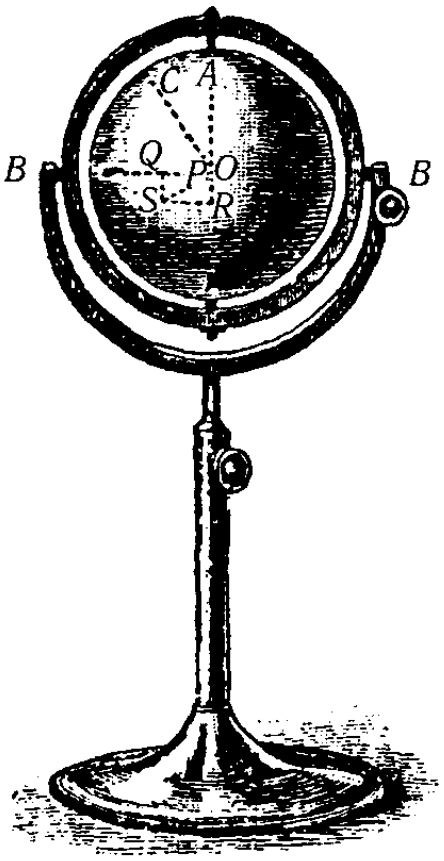


Рис. 24

Найдя из наблюдений какое-нибудь правило, всякий естествоиспытатель стремится сделать это правило рациональным, пытается объяснить его. Я надеюсь, вы знаете, что мы разумеем, когда говорим, что мы желаем объяснить явление; мы не имеем при этом в виду ничего другого, как желание найти связь этого явления с другими, нам лучше известными явлениями. Если вы уличаете спирита и доказываете, что произведенные им удивительные явления имеют своим источником только ловкость рук и намеренный обман, то вы объясняете эти явления. Если вы показываете, что данные явления согласуются с хорошо наблюденными и ясно доказанными влияниями месмеризма, то вы тоже разъясняете эти явления. Если вы показываете, что данные явления можно произвести при помощи телеграфных приспособлений или благодаря отражению света в зеркалах, то и здесь вы объясните явления, хотя во всех этих случаях вы в действительности не знаете сущности ни месмеризма, ни электричества, ни света, ни некоторой *нравственной нечистоплотности*.

Надо считать худшим родом критики стремление заменить научные объяснения заявлением, что простейших *явлений природы нельзя* разъяснить. Человек, стоящий на такой точке зрения, предпочитает хаотическую и сбивчивую веру дикаря в чудесное разъяснениям такого ученого, как Исаак Ньютон.

Объяснение нашего правила очень просто. Вот гиростат (рис. 24), который по форме похож на глобус; сейчас он находится в покое. Мне очень жаль, что я принужден подвесить этот глобус весьма странным образом на кольцах, образующих универсальный подвес. Если бы этот глобус висел в воздухе и не имел *никакой склонности к падению*, то было бы легче понять мои объяснения, и я лучше мог бы подтвердить их с помощью опыта. Рассмотрим точку P на поверхности глобуса. Если я слегка поверну глобус вокруг оси A, то точка P двигается по направлению к Q. Но предположите, что я вместо этого повернул глобус и

внутреннее кольцо вокруг оси B, тогда точка P придет в R. Допустим далее, что оба эти движения проходят одновременно; тогда, как все вы знаете, точка P не переместится ни по направлению к Q, ни к R, но передвинется по направлению к S, где PS будет диагональю небольшого параллелограмма. Итак, результирующее движение не происходит ни вокруг оси AO, ни вокруг OB, но вокруг некоторой оси OC.

Вот я сообщил этому глобусу одновременно два вращения; вообразите себе при этом, что на поверхности глобуса находится небольшое существо, которое не может видеть колец, но которое в состоянии замечать другие предметы, находящиеся в этой комнате; это существо сказало бы, что направление оси, вокруг которой действительно произошло вращение, не совпадает ни с OA, ни с OB; действительная ось вращения для воображаемого существа есть некоторая прямая, лежащая между этими двумя прямыми, а именно, прямая OC.

Если шар в одно и то же мгновение получает вращательный импульс в двух различных направлениях, то, чтобы определить, как он будет вращаться, мы должны раньше узнать, какую скорость вращения сообщает ему каждый импульс, действуя отдельно, и вокруг какой оси произошло бы каждое отдельное вращение. Вращение со скоростью трех оборотов в секунду вокруг оси OA (рис. 25) и другое вращение со скоростью двух оборотов в секунду вокруг оси OB производят вместе такое действие, что на самом деле шар вращается вокруг оси OC со скоростью трех с половиной оборотов в секунду. Чтобы получить этот результат, я отложил OA длиною в 30 сантиметров (можно было бы взять для этой цели и всякий другой масштаб) и OB длиною в 20 сантиметров, и затем нашел диагональ OC этого параллелограмма, которая представлена на этом рисунке отрезком длиною в 35 сантиметров.

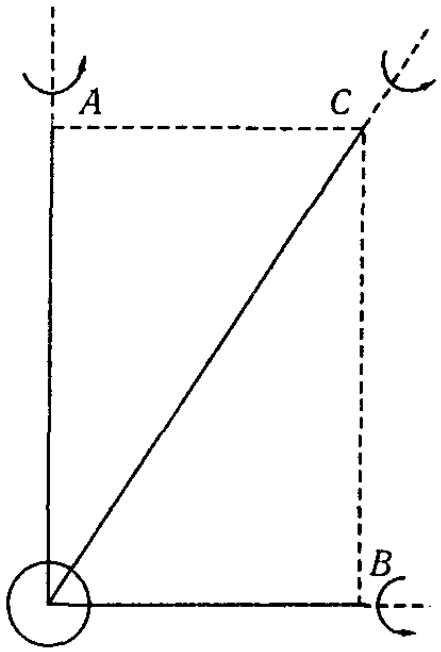


Рис. 25

Теперь заметьте, что вращение вокруг оси OA, если смотреть из O в A, происходит *в сторону* движения часовой стрелки; вращение вокруг оси OB, если смотреть из O в B, равным образом совершается в сторону движения часовой стрелки, и, наконец, результирующее вращение,

если смотреть из O в C, также происходит в сторону движения часовой стрелки*. На двух диаграммах (рис. 26) показано, что вращения должны происходить непременно в одну и ту же сторону по отношению к движению часовой стрелки, если из O смотреть по направлению OA или OB. Эти построения хорошо известны всем изучавшим основные законы механики. Очевидно, что если вращение вокруг оси OA гораздо значительнее, чем вокруг оси OB, то новая ось OC будет расположена значительно ближе к OA, чем к OB.

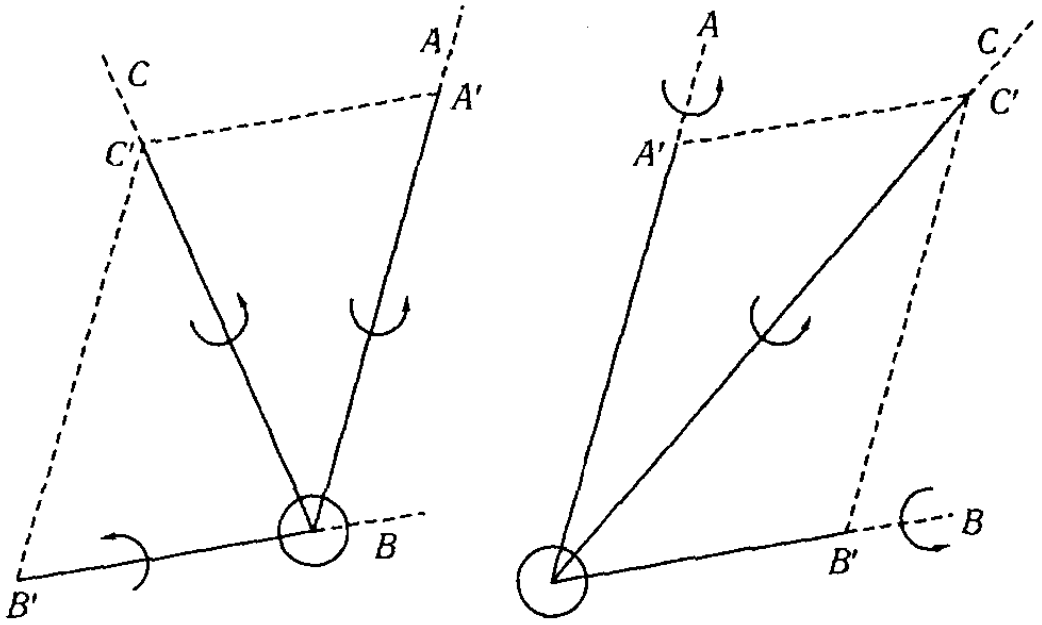


Рис. 26

Вы видите, таким образом, что если тело вращается вокруг оси OA и мы прилагаем силы, которые заставили бы его, если бы оно находилось в покое, вращаться вокруг оси OB, то в результате ось тела переместится в OC, так что первоначальная ось вращения приблизится к совпадению с новой осью вращения. Это и есть первое правило на нашей стенной таблице, из которого выводятся все остальные правила; впрочем, они могут быть получены также и непосредственно путем опыта. Я не утверждаю, однако, что я дал доказательство, исчерпывающее все случаи, так как маховые колеса этих гиростатов двигаются во втулках, препятствующих осям свободно перемещаться, и они поэтому принимают несколько иные положения; между тем волчок не

*Отрезок OA' нужно откладывать на прямой OA, выбирая его направление таким образом, чтобы вращение происходило в сторону движения часовой стрелки. — *Прим. перев.*

подвержен никаким препятствиям этого рода. Но в течение ограниченного промежутка времени, предназначенного для чтения популярной лекции, невозможно дать, как это ни желательно, вполне точного доказательства столь общего правила, как наше. Насколько я не исчерпал еще всего, что можно сказать по этому предмету, можно уяснить себе из следующего.

Что случится, если мы сообщим вращающемуся шару новое вращение? Допустим, например, что Земля — однородный шар и что этому шару внезапно сообщено новое вращательное движение, которое имеет стремление переместить Африку к югу; ось этого вращения проходила бы через Яву; это вращение в связи со старым вращением произвело бы такое действие, что истинный полюс Земли находился бы где-нибудь между нынешним полюсом и Явой, и Земля уже не вращалась бы вокруг своей нынешней оси. Ось вращения необходимо должна была бы измениться, но не было бы повода ни для каких дальнейших осложнений, так как однородный шар также легко вращается вокруг одной оси, как и вокруг другой. Но если бы нечто подобное случилось с нашей действительной Землей, представляющей из себя не шар, а сплюснутый сфероид, у которого полярный диаметр на треть процента короче, чем экваториальный, то ось симметрии Земли, как только возникло бы вращение вокруг новой оси, сейчас же взбунтовалась бы, пытаясь снова сделаться осью вращения; следствием этого явилось бы огромное колебательное движение.

Говоря, что ось «взбунтовалась бы», я выражаюсь житейским языком, и, может быть, будет лучше обозначить точнее, что я подразумеваю под этими словами. Мне при этом придется пользоваться выражением «центробежная сила». Правда, есть придирчивые критики, недовольные этим выражением; но все наши инженеры его употребляют, а потому и я охотно им пользуюсь, хотя наши придирчивые критики хватаются за всевозможные коверкания речи, чтобы избежать этого выражения. Центробежной силой называется сила, с которой тело, принужденное описывать криволинейный путь, действует на то, что удерживает его на этом криволинейном пути. Если прикрепленный к нити шар вращать кругом, то центробежная сила стремится разорвать нить. Если какое-нибудь неразрывно связанное со стержнем тело вращается вместе с этим стержнем, то может случиться, что центробежные силы различных его частей как раз взаимно уравновешиваются;

но иногда это бывает иначе, и тогда мы говорим, что тело не уравновешено на стержне. Вот, например, вращающийся деревянный круг, который уравновешен на стержне. Я останавливаю движение круга и прикрепляю к нему кусок свинца A; теперь вы видите, что при вращении круг в такой мере выходит из равновесия, что дрожат втулки рамы, поддерживающей ось, и даже сам стол. Теперь я опять хочу уравновесить круг и для этого укрепляю кусок свинца B со стороны, противоположной A. Если я приведу кружок (рис. 27) во вращение, то дрожания рамы теперь уже нет. Если шатуны локомотива не уравновешены надлежащим образом противовесами на ведущих (главных) колесах, то, наверное, во всем поезде не найдется ни одного человека, который не ощутил бы этого. Это обнаруживает и подсчет израсходованного угля, так как неуравновешенная машина везет поезд толчками вместо того, чтобы сообщать ему надлежащее равномерное движение. Мой друг, профессор Мильн (Milne) в Японии, помещал приборы для измерения землетрясений на машины и поезда, чтобы определить этот и другие недостатки в уравновешивании машин; и он установил с определенностью, не допускающей сомнения, тот факт, что две машины, почти одинакового типа, из которых одна совершенно уравновешена, а другая нет, потребляют весьма различные количества угля, совершая один и тот же путь с одной и той же скоростью.

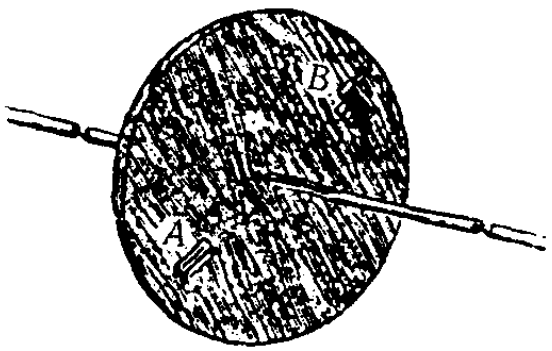


Рис. 27

Если вращающееся тело уравновешено, то ось вращения не только проходит через центр тяжести (или, точнее, через центр инерции) тела, но это должна быть, кроме того, одна из трех главных осей, проходящих через центр инерции тела. Вот, например, деревянный эллипсоид; AA, BB и CC (рис. 28) суть три главные его оси; вращаясь вокруг одной из трех главных осей, он был бы уравновешен; наоборот, вращаясь

вокруг какой-нибудь другой оси, он не был бы уравновешен. Исключение представляет лишь тот случай, когда мы имеем дело с однородным шаром, у которого всякий диаметр можно принять за главную ось.

Всякое тело имеет три таких оси, проходящих через его центр инерции, и у этого тела (рис. 28) также есть эти три оси; но я заставил его вращаться вокруг оси DD, и вы можете наблюдать действие не уравновешивающихся взаимно центробежных сил, которое чуть не разламывает раму в куски. Чем больше скорость, тем бóльшее значение имеет эта неуравновешенность. Если скорость удваивается, то центробежные силы становятся вчетверо больше; поэтому современные инженеры с их быстро движущимися машинами, из которых иные, как, например, паровые турбины миноносцев, совершают до 1700 оборотов в минуту, должны обращать на это обстоятельство большое внимание; в прежние времена инженерам не приходилось ломать голову над подобными вещами. При этом не надо забывать, что если на самом деле рама машины и не разламывается, то все-таки все части ее в такой мере раскачиваются и расшатываются, что заклепки, винты и прочие скрепления, без всякого сомнения, ослабляются.

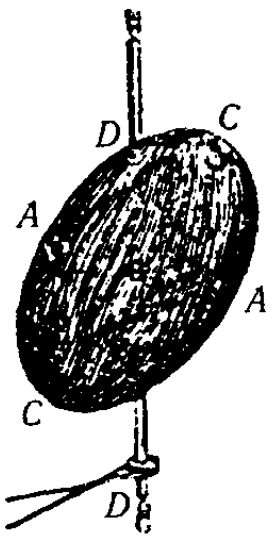


Рис. 28

На одной дурно уравновешенной машине я видел парочку прочно укрепленных гаек, из которых одна должна была придерживать другую; и вот эти гайки начали в одно и то же время медленно вращаться на своем болте и понемногу, но все-таки с достаточно большой скоростью, раскручивались, пока с конца своего болта не угодили мне в руку. Если бы там не случилась моя рука, то гайки упали бы в бочку с таким веществом, что вызвали бы там очень интересное, но в то же время и весьма разрушительное явление; а если бы это случилось, то сегодня вечером здесь делал бы доклад кто-нибудь другой, а не я.

Итак, допустим, что наша Земля вращается вокруг какой-нибудь другой оси, отличной от ее нынешней — оси симметрии. Если бы она, например, вращалась вокруг одного из своих экваториальных диаметров, то центробежные силы как раз удерживали бы всю Землю в состоянии неустойчивого равновесия, и в этом состоянии не произошло бы значительного изменения до тех пор, пока какое-нибудь случайное обстоятельство не вызвало хотя бы ничтожного изменения в положении

оси вращения; но вслед за этим Земля начала бы сильно раскачиваться. Как долго и как сильно качалась бы Земля, это зависело бы от целого ряда обстоятельств, относительно которых я не буду пускаться в догадки. Если вы мне поручитесь, что форма Земли в общем не изменится в значительной степени под влиянием сильных качаний, то я скажу, что вследствие трения, вызываемого явлением приливов и другими причинами, она, наверное, скоро опять возвратится к спокойному вращению вокруг своей нынешней оси.

Итак, вы видите, что, хотя у всякого тела есть три оси, вокруг которых оно может вращаться в уравновешенном состоянии, не обнаруживая тенденции раскачивания в разные стороны, но в двух из этих трех случаев это равновесие центробежных сил все же неустойчиво, и есть только одна ось, вокруг которой может иметь место совершенно устойчивое и уравновешенное вращение. Кроме того, вращающееся тело, предоставленное самому себе, по истечении более или менее продолжительного времени в конце концов начинает вращаться вокруг этой оси, если только имеется трение, успокаивающее его качания.

Чтобы сделать сказанное выше наглядным, я имею здесь возможность приводить тело во вращение таким способом, который позволяет ему принять за ось вращения ту главную ось, вокруг которой вращение оказывается наиболее устойчивым. Различные тела могут быть подвешены на этой нити, и я могу сообщить вращение колесу, к которому прикреплена это нить. Вы видите, что кружок (рис. 29 a) сначала вращается совершенно спокойно вокруг оси AA; но вскоре вы замечаете, как он начинает понемногу раскачиваться. Теперь качания усиливаются, и вот кружок вращается спокойно и устойчиво вокруг оси BB, так как это есть важнейшая из главных осей.

Этот конус (рис. 29 b) тоже вращается сначала спокойно вокруг оси AA; но вот начинается качание, которое становится все сильнее, и, наконец, конус точно также вращается спокойно вокруг оси BB, которая есть важнейшая из трех главных осей.

Вот еще палка, привешенная на конце нити (рис. 29 d). Посмотрите также на это твердое кольцо; но, может быть, вас больше заинтересует эта гибкая кольцеобразная цепь (рис. 29 c). Вы видите, как она вначале висит на нити вертикально и как ее качания и колебания кончаются тем, что она превращается в совершенно правильное круговое кольцо, лежащее целиком в горизонтальной плоскости. Этот опыт дает также

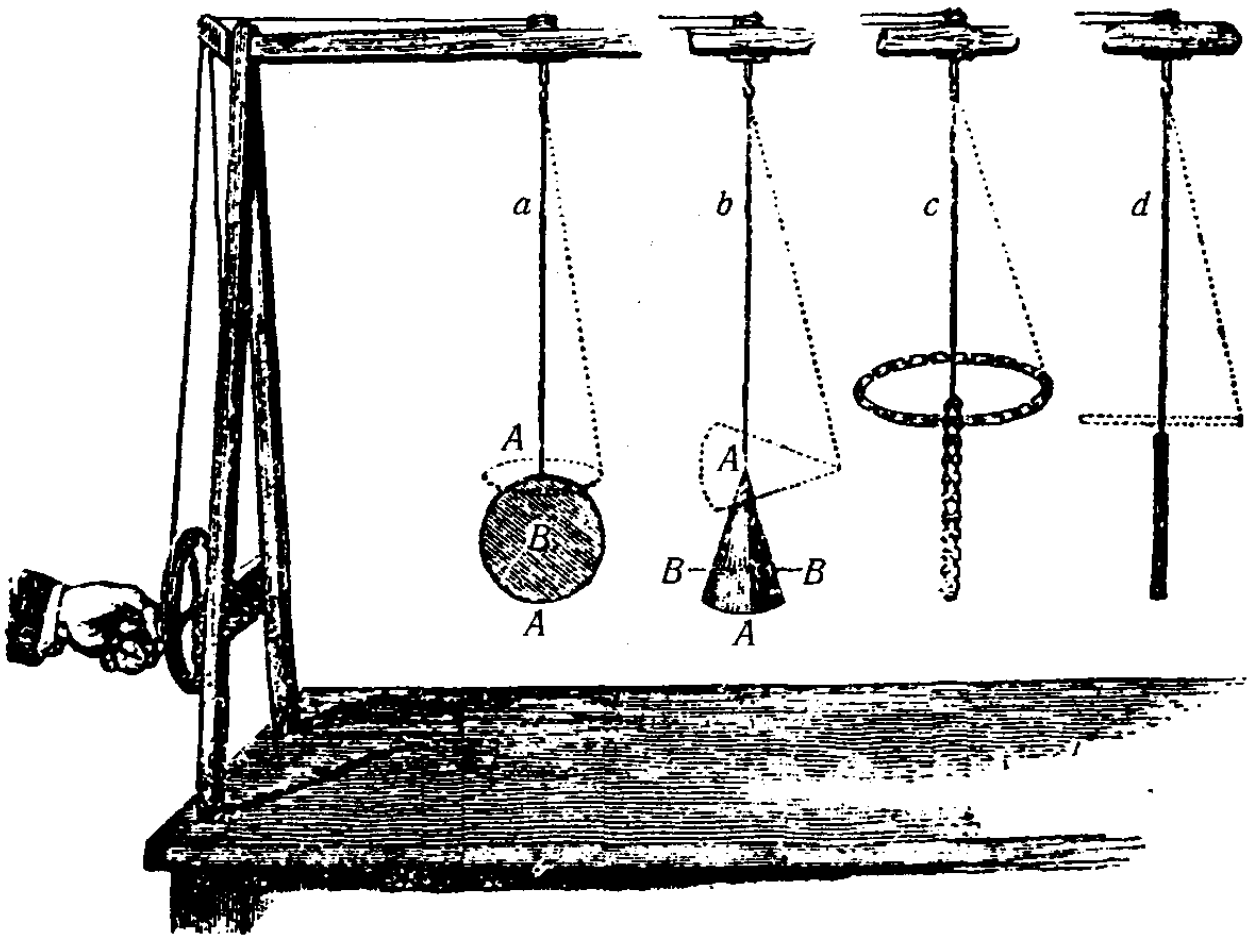


Рис. 29

наглядный пример кажущейся твердости, которую сообщает гибкому телу быстрое движение.

Возвратимся теперь к нашему уравновешенному гиростату (рис. 13). Так как он не прецессирует, то вы отсюда заключаете, что противовес W как раз уравновешивает вес гиростата F. Если я теперь, дав раме F толчок вниз и не производя давления на нее, предоставлю инструмент самому себе, то вы видите, что гиростат отклоняется, согласно сказанному раньше, вправо; но он отклоняется слишком сильно и далеко, совершенно также, как и всякое другое колеблющееся тело. Основываясь на том, что я уже изложил, легко предсказать, что в результате получится качательное движение (рис. 30); это движение будет продолжаться до тех пор, пока его не остановит трение. Новое устойчивое положение гиростат F принимает только по истечении некоторого промежутка времени.

Вы видите, что я могу сообщить гиростату это качательное или же колебательное движение независимо от того, будет ли это движение

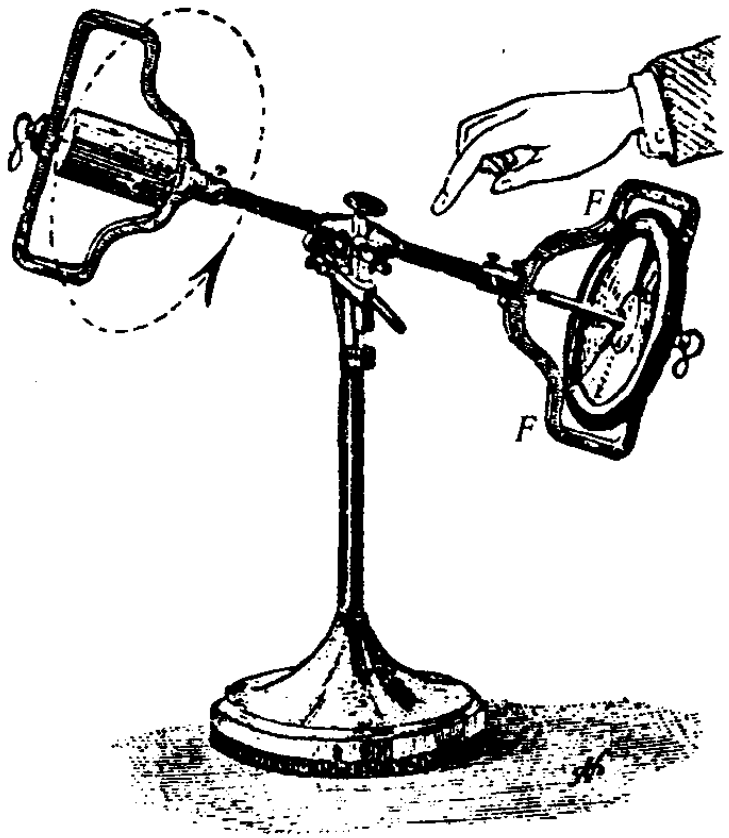


Рис. 30

сопровождаться прецессией, или нет. Вот он качается и в то же время прецессирует кругом, т. е. одновременно с прецессией он то опускается, то опять поднимается.

Может быть, хорошо будет еще несколько больше разъяснить этот предмет. Вы замечаете подобное же явление на этом волчке. Если волчок прецессирует по сравнению с действием силы тяжести слишком быстро, то он поднимается, и поэтому прецессия уменьшается; теперь прецессия слишком медленна, чтобы уравновесить силу тяжести, — волчок несколько наклоняется, и прецессия ускоряется. Такого рода колебание около некоторого среднего положения происходит совершенно так, как качание маятника, пока его не прекращает трение; в этом среднем положении волчок прецессирует более правильно. В гиростате, почти уравновешенном горизонтально, это качание обнаруживается заметнее, чем у волчка, так как стремление силы тяжести повернуть волчок уменьшается при более отвесном положении его.

Часто люди науки, пытаясь популяризировать свои открытия, допускают некоторые неправильности с целью сделать ясным какой-нибудь факт и делают такие утверждения, которые могут сбить с толку

учеников, достигших более высоких ступеней знания. Так, астрономы рассказывают публике, что Земля движется вокруг Солнца по эллиптическому пути, между тем как планеты под действием взаимных притягательных сил описывают пути приблизительно эллиптической формы; специалисты в области электричества говорят публике, что электрическая энергия распространяется по проволокам, между тем как на самом деле она перемещается по всякому другому пространству, но только не по тому, которое занято проволокой. В этой лекции я также пользовался до некоторой степени таким искусственным приемом; так, например, вспомните, что сначала я оставил без внимания колебания или же качания, которые возникают в гиростате или волчке вследствие толчка; затем я обошел молчанием то обстоятельство, что мгновенная ось вращения совпадает лишь *приблизительно* с геометрической осью прецессирующего гиростата или волчка. Но вообще вы можете быть уверены, что если бы все наши утверждения приходилось выражать совершенно точно, то было бы необходимо употреблять сотни технических выражений и оговорок, как в страховом полисе; и даже ученый не был бы в состоянии выслушать много таких рассуждений. Вы, однако, едва ли ожидаете, что даже такой великий ученый, как покойный профессор Ранкин (Rankine), в момент поэтического вдохновения мог заблуждаться и заблуждаться даже больше, чем популярный лектор, подчиняя точность выражения требованиям стихотворного размера и необходимым упрощениям. В его стихотворении «Влюбленный математик» заключаются следующие строки:

Эта женщина любила танцы; он поэтому
Находит уравнение для вальса и польки.
Но когда он начинает кружиться вокруг своей оси,
Его центр тяжести уклоняется в сторону,
И он падает вследствие силы земного притяжения.

Я не сомневаюсь, что эта небольшая экскурсия в область поэзии настолько хороша, насколько этого можно ожидать от человека науки; но и научная его сторона настолько хороша, насколько можно ожидать этого от человека, который выдает себя за поэта. В обоих случаях мы имеем доказательство несовместимости науки и стихотворного искусства.

Движение этого гиростата можно сделать еще более сложным, присоединяя к нему нутацию (колебание, качание), но при этом не про-

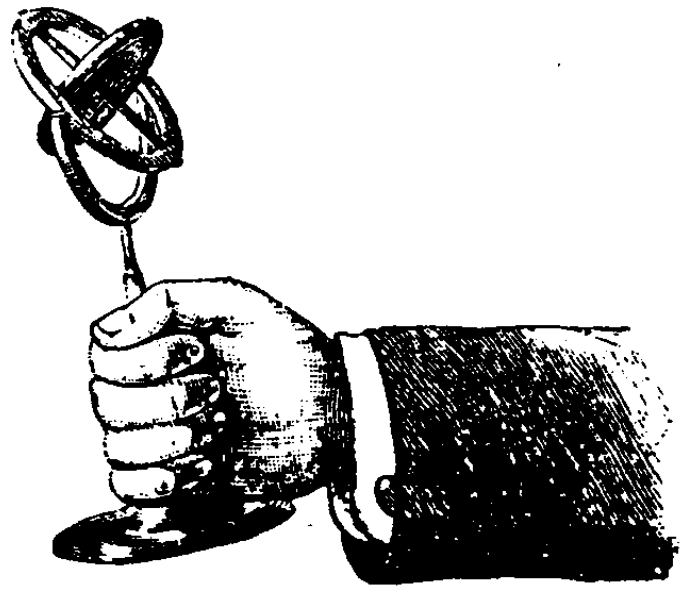


Рис. 31

исходит ничего такого, чего нельзя было бы объяснить при помощи простых правил, которые я привел выше. Рассмотрим, например, этот хорошо уравновешенный гиростат (рис. 31). Если я ударю каким бы то ни было способом по внутреннему кольцу, то вы видите, что гиростат начинает дрожать, подобно куску студня; его быстрые колебания останавливаются точно так же, как и быстрые колебания какого бы то ни было другого гибкого, упругого тела. Эта удивительная упругость представляет величайший интерес, если мы рассмотрим ее в связи с молекулярными свойствами материи. А вот (рис. 32) еще один пример, даже еще интереснее. Я поставил гиростат, помещенный внутри барабана, который изображен на рис. 5 и 6, на пару палочек, и вы можете наблюдать, что он движется совершенно устойчиво; но это движение сопровождается в высшей степени удивительными пошатываниями и вибрациями. Однако в этом движении, как оно ни своеобразно, нет ничего такого, чего нельзя было бы легко разъяснить, если вы до сих пор следили за мной. Более наблюдательные из вас заметят, что все гиростаты, прецессируя, мало-помалу все больше и больше наклоняются совершенно так же, как случилось бы (только несколько скорее), если бы они не вращались. И если вы обратите внимание на третье правило нашей стенной таблицы, то вы легко поймете, почему это так.

«Если замедлить прецессию, то тело падает также, как оно упало бы под влиянием силы тяжести, если бы не вращалось». Но ведь

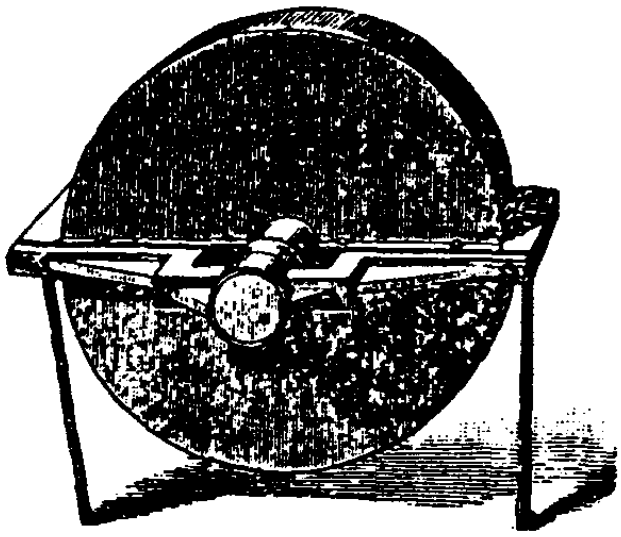


Рис. 32

прецессия всех этих гиростатов замедляется трением, а поэтому они постоянно наклоняются все больше и больше.

Любопытно было бы мне знать, *следил ли* за мной кто-нибудь настолько, что он уже теперь понимает, почему вращающийся волчок *поднимается. Может быть, вы* еще не имели времени подумать над этим, но я уже несколько раз подчеркивал те особенные причины, которые разъясняют это явление. Трение причиняет падение гиростата; что же заставляет волчок подниматься? Быстрый переход в вертикальное положение есть несомненный признак его быстрого вращения; и я вспоминаю по этому поводу, как мы некогда говорили: «он спит», когда волчок становился совершенно вертикально. Так трогательно выражался юный экспериментатор о прекрасном объекте своих нежных чувств.

Хотя стремление волчка принять вертикальное положение стало хорошо известно с тех пор, как его запустили в первый раз, я все-таки спрашиваю всех присутствующих в этой зале, знают *ли они* объяснение этого явления, и даже сомневаюсь, чтобы где-нибудь было много людей, которым оно известно. Всякий серьезный математик скажет вам, что объяснение, наверное, можно найти напечатанным у Routh'a* или что он во всяком случае знает в Кембридже людей, которым, без сомнения, известно это объяснение; может быть, он думает также, что он сам когда-то знал его, но что теперь он позабыл те трудные математические

*Автор очень известного английского учебника механики. — *Прим. перев.*

доказательства, на которых он прежде изощрял свой ум. Я думаю, что все эти заявления ошибочны, хотя не вполне в этом уверен*. Теорию этого явления дал отчасти А. Смит (Archidald Smith) много лет тому назад в Кембриджском математическом журнале, но задача эта была, действительно, разрешена сэром Вильямом Томсоном и профессором Блекбёрном (Blackburn), когда они провели целый год на морском побережье, готовясь к математическому экзамену. Вероятно, тот, кто интересуется работами Томсона, придет в недоумение, узнавши, что этот ученый со своим другом проводили каникулы на морском побережье в том, что заставляли вертеться всевозможного рода круглые камни, которые они собирали на берегу.

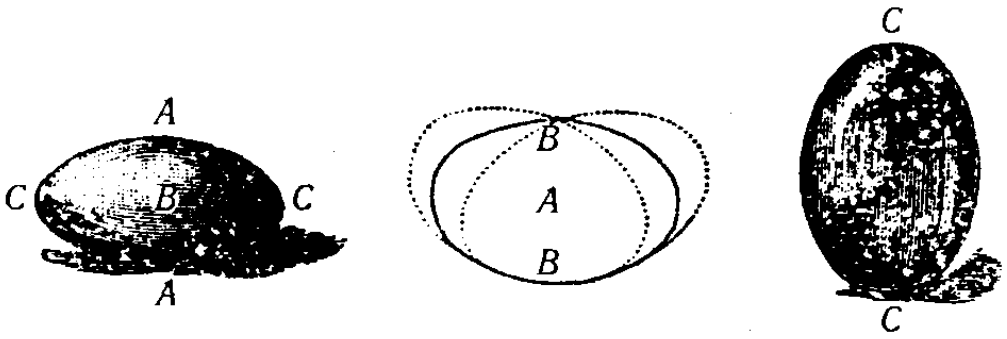


Рис. 33

Теперь я покажу вам удивительное явление, над которым в то время ломал голову Томсон. Пусть этот эллипсоид (рис. 33) представляет собой камень, отшлифованный водой. Он лежит на столе в весьма устойчивом положении. Я привожу его в быстрое вращательное движение. Вы видите, что в течение одной или двух секунд он обнаруживает склонность вращаться вокруг оси AA, но потом начинает сильно раскачиваться; когда эти качания по истечении некоторого времени прекращаются, то, как вы видите, он спокойно вращается вокруг оси BB, принявшей теперь вертикальное положение; но затем снова начинается ряд усиливающих качаний; когда же они прекращаются, вы замечаете, что эллипсоид окончательно приходит в состояние устойчивого вращения, становясь вертикально на самую длинную из своих осей.

*Когда эта книжка с вышеупомянутым утверждением как раз находилась в печати, проф. Fitzgerald указал мне на «Рассуждение о теории трения» покойного проф. Jellet, изданное в 1872 г., и там я нашел на странице 18 математическое разъяснение поднятия волчка.

Для всякого, кто думает, что тело должно вращаться именно в таком направлении, в каком я его завертел с самого начала, это явление покажется необыкновенным. А между тем вы легко убедитесь, что почти всякий округленный камень, будучи приведен во вращение, подымается таким образом вертикально вдоль самой длинной своей оси, если только вращение достаточно быстро; совершенно таким же образом и вертящийся волчок стремится подняться как можно больше.

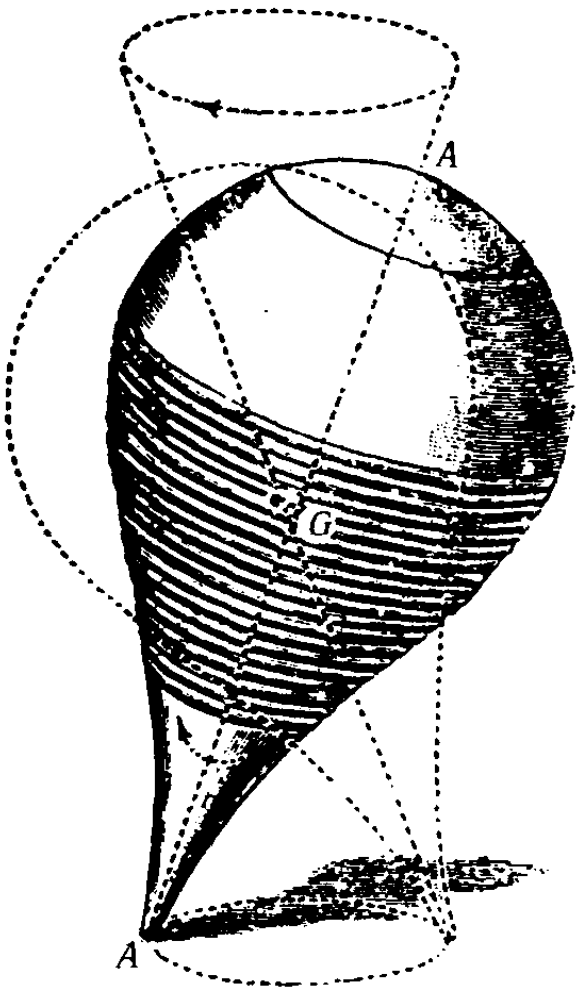


Рис. 34

Я думаю, что найдется весьма немного математических объяснений, которых нельзя изложить совершенно обыкновенным языком и сделать понятным людям с обыкновенным запасом знаний. В большинстве случаев объяснение должно быть сначала найдено кем-нибудь в символической алгебраической форме, а потом уже настает время для перевода его на язык повседневной жизни. В этом и заключается основа нового так называемого технического обучения, имеющего своей зада-

чей возможно проще обучить рабочего законам, на которых покоится его ремесло; с этой целью мы опираемся при наших разъяснениях на опыты, с которыми данное лицо уже хорошо освоилось, не утруждая его четырехлетним изучением элементарных предметов; последнее целесообразно лишь по отношению к неопытным детям и к юношам в средних школах и в университетах.

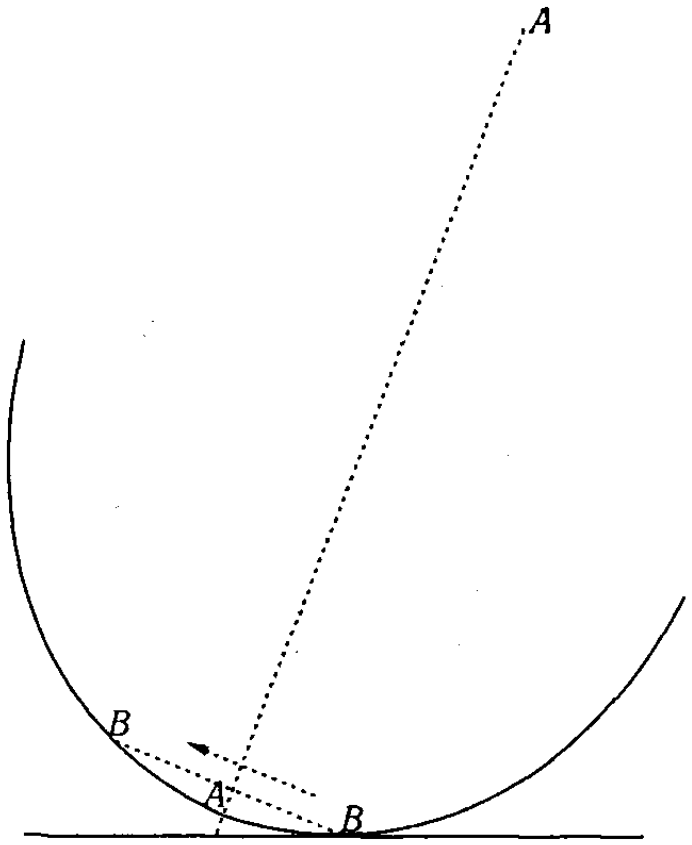


Рис. 35

На основании произведенных нами опытов объяснение подымания волчка становится до смешного простым. Если вы прочтете второй закон нашей стенной таблицы и минутку подумаете, то многие из вас будут в состоянии, не вдаваясь в длинные математические соображения, усмотреть простую причину этого явления в том, что Томсон говорил мне 16 лет тому назад: «Если ускорить прецессию, то тело приподнимается в направлении, противоположном силе тяжести». Так как я не прикасаюсь к волчку, а между тем это тело стремится приподняться, то постараемся найти, что ускоряет его прецессию; мы, естественно, посмотрим на тот путь, который описывает на столе нижнее острие волчка, так как за исключением воздуха этот волчок не прикасается

ни к чему, кроме поверхности стола. Рассмотрим же внимательно, как каждый из этих предметов прецессирует. Рис. 34 указывает, как вращается волчок. Если смотреть сверху, то волчок вращается в направлении часовой стрелки; мы знаем, как на основании четвертого правила нашей стенной таблицы, так и просто на основании наблюдения, что прецессию он также совершает в направлении часовой стрелки, т. е. что прецессия происходит так, как будто острие волчка стремится прокатиться в точке B сквозь бумагу. Ведь вы замечаете, что острие описывает на столе кругообразный путь; точка G остается почти недвижимой, и ось AGA описывает приблизительно конус, вершина которого находится в G, над столом. На рис. 35 изображен нижний острый конец волчка в увеличенном виде; ясно, что точка B, в которой волчок касается стола, представляет как бы нижнюю часть некоторого колеса BB. А так как это колесо вращается, то оно стремится вследствие этого вращения укатиться от нас, как бы сквозь бумагу. Далее, обратите теперь внимание на то, что колесо BB стремится катиться как бы сквозь бумагу уже только под влиянием прецессии и что достаточно быстрое вращение волчка вокруг оси заставляет это колесо катиться быстрее, чем это делает прецессия волчка; поэтому прецессия волчка ускоряется, вследствие чего волчок приподнимается. Таково это простое объяснение; пока вращение вокруг оси достаточно быстро, оно постоянно ускоряет прецессию. Освежите свои воспоминания о днях юности, когда вы запускали волчок на поверхности руки подобно тому, как я это делаю сейчас с моим волчком (рис. 36); когда вращение становилось совсем медленным, так что было невозможно удержать волчок в вертикальном положении, вы ловко помогали прецессии волчка, сообщая своей рукой кругообразное движение и заставляя его тем кружиться в вертикальном положении несколько дольше.

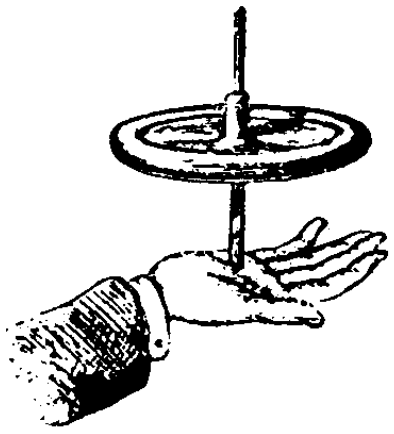


Рис. 36

Теперь вы можете разъяснить себе, основываясь на наблюдении и на только что изложенном рассуждении, ту борьбу, которую ведет круглый вращающийся на столе камень за то, чтобы стать вертикально вдоль самой длинной своей оси. Могу сообщить вам, что некоторые из этих больших круглых предметов, которые я ради бóльшей наглядности верчу перед вами, сделаны

либо из цинка, либо из дерева и имеют внутри пустые полости, так как я не обладаю надлежащей ловкостью, чтобы привести во вращение такие большие тела, а между тем мне нужны тела, которые вам были бы хорошо видны. Этот маленький предмет (рис. 33) представляет собой наибольшее, совершенно сплошное тело, которому мои пальцы могут еще сообщить достаточно быстрое вращение. А вот очень интересный *шарообразный предмет (рис. 37), у которого* центр тяжести не совпадает, однако, с геометрическим центром, так что он всегда приходит в положение устойчивого равновесия, когда я кладу его на стол, причем белое пятно (рис. 37А) касается поверхности стола. Некоторые из вас, наверное, знают, что этот шар двигается весьма своеобразно, если его подбросить в воздух; обыкновенно забывают, что простой путь описывает только центр тяжести тела, а в данном случае наружная поверхность расположена эксцентрично *по отношению к центру тяжести.* Точно также покажется своеобразным движение этого шара, если его покатить по ковру.

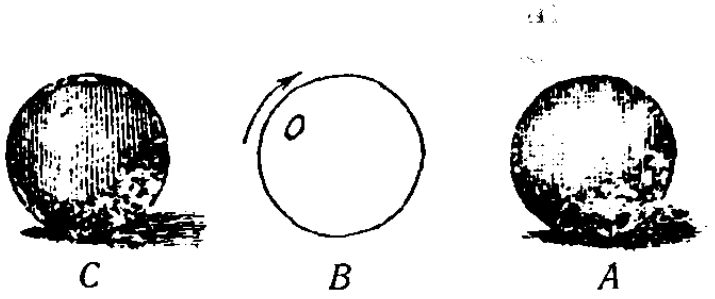


Рис. 37

Если привести этот шар во вращение, то он все время стремится стать белым пятном вверх (рис. 37 С), т. е. занять такое положение, которое оказалось бы неустойчивым, если бы он не вращался; это происходит по той самой причине, о которой я говорил выше.

Прецессия волчка или гиростат направляет наши мысли сейчас же к прецессии того большого вращающегося тела, на котором мы живем. Вы знаете, что Земля за промежуток времени, немного меньший 24 часов, оборачивается один раз вокруг своей оси точно так же, как этот апельсин, и что в течение года она один раз обегает вокруг Солнца точно так же, как этот апельсин движется вокруг воображаемого Солнца этой модели или как это показано на рис. 38. Направление оси вращения определяется довольно точно по так называемой Полярной звезде, которая находится почти в бесконечном отдалении. На рисун-

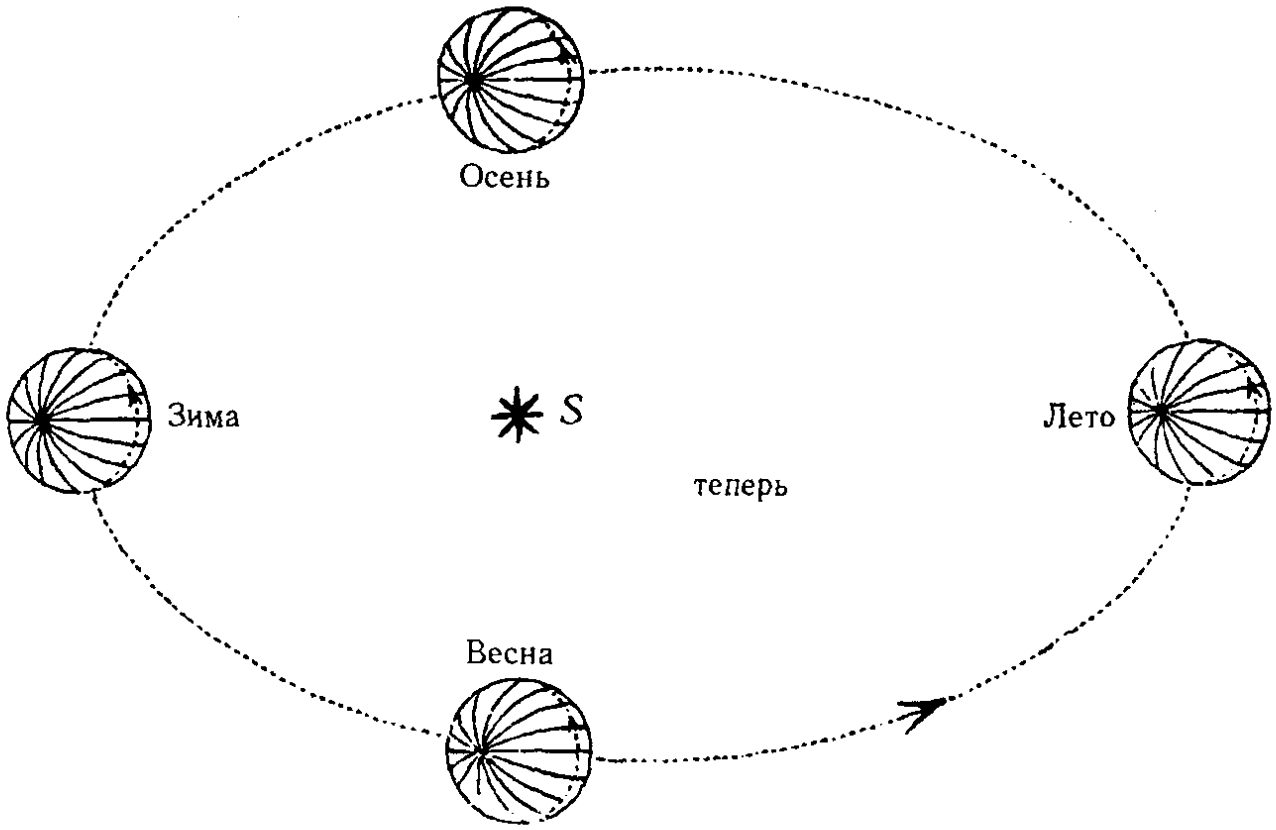


Рис. 38

ке, как и на модели, я значительно преувеличил эксцентриситет земного пути, как это обыкновенно делается, хотя это может несколько ввести в заблуждение, так как земная орбита по своей форме гораздо больше приближается к кругу, чем обыкновенно думают. На самом деле зимой Солнце на 5 миллионов километров ближе к Земле, чем летом. На первый взгляд это кажется парадоксальным; но дело становится понятным, если принять во внимание, что мы, в северном полушарии, вследствие наклона земной оси к эклиптике, получаем зимой более косые лучи Солнца и имеем более который день; таким образом, на каждый квадратный метр нашей земной поверхности приходится в течение дня гораздо меньше тепла и потому у нас холоднее. Но через 13 000 лет Земля, вследствие прецессии, повернется как раз наполовину своего полного оборота (см. рис. 40); тогда ось Земли в то время, когда Земля будет ближе всего к Солнцу, будет уже не отклонена от него, а обращена к нему; поэтому у нас будет тогда летом гораздо теплее, а зимой гораздо холоднее, чем теперь. Наверное, нам тогда будет много хуже, чем теперь обитателям южного полушария, так как их окружает

в изобилии морская вода, которая смягчает их климат. Характер этой перемены легко разобрать на рис. 38, 39 и 40 или же на модели, если я обведу апельсин на вязальной спице, символически изображающей ось, вокруг Солнца. Вообразите себе наблюдателя, который находится над этой моделью высоко над северным полюсом Земли. Этот наблюдатель видит, что Земля вращается в направлении навстречу часовой стрелке, и замечаете, что прецессия происходит по часовой стрелке, так что вращение и прецессия имеют противоположные направления. Отсюда происходит слово «прецессия», которое мы теперь применяем также к движению волчка, хотя прецессия волчка совершается в том же направлении, как и его вращение.

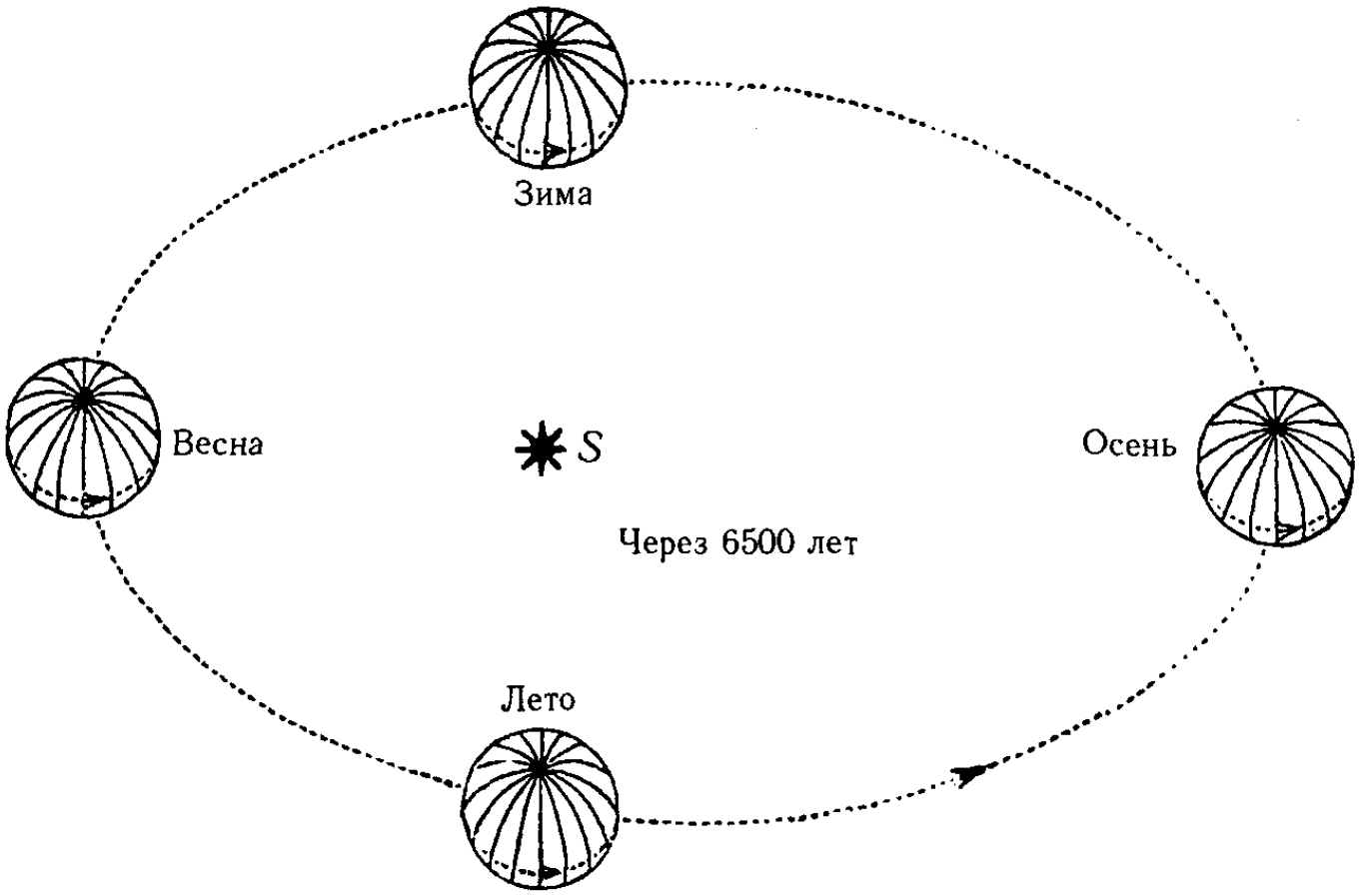


Рис. 39

Если специалист по практической астрономии станет вам разъяснять лунно-солнечное предварение равноденствий, то он, конечно, не будет ссылаться на гиростаты и волчки. Он скажет, что долгота и прямое восхождение светил видимо изменяется; или, вернее, что та точка эклиптики, от которой он ведет счет в своих измерениях, а именно,

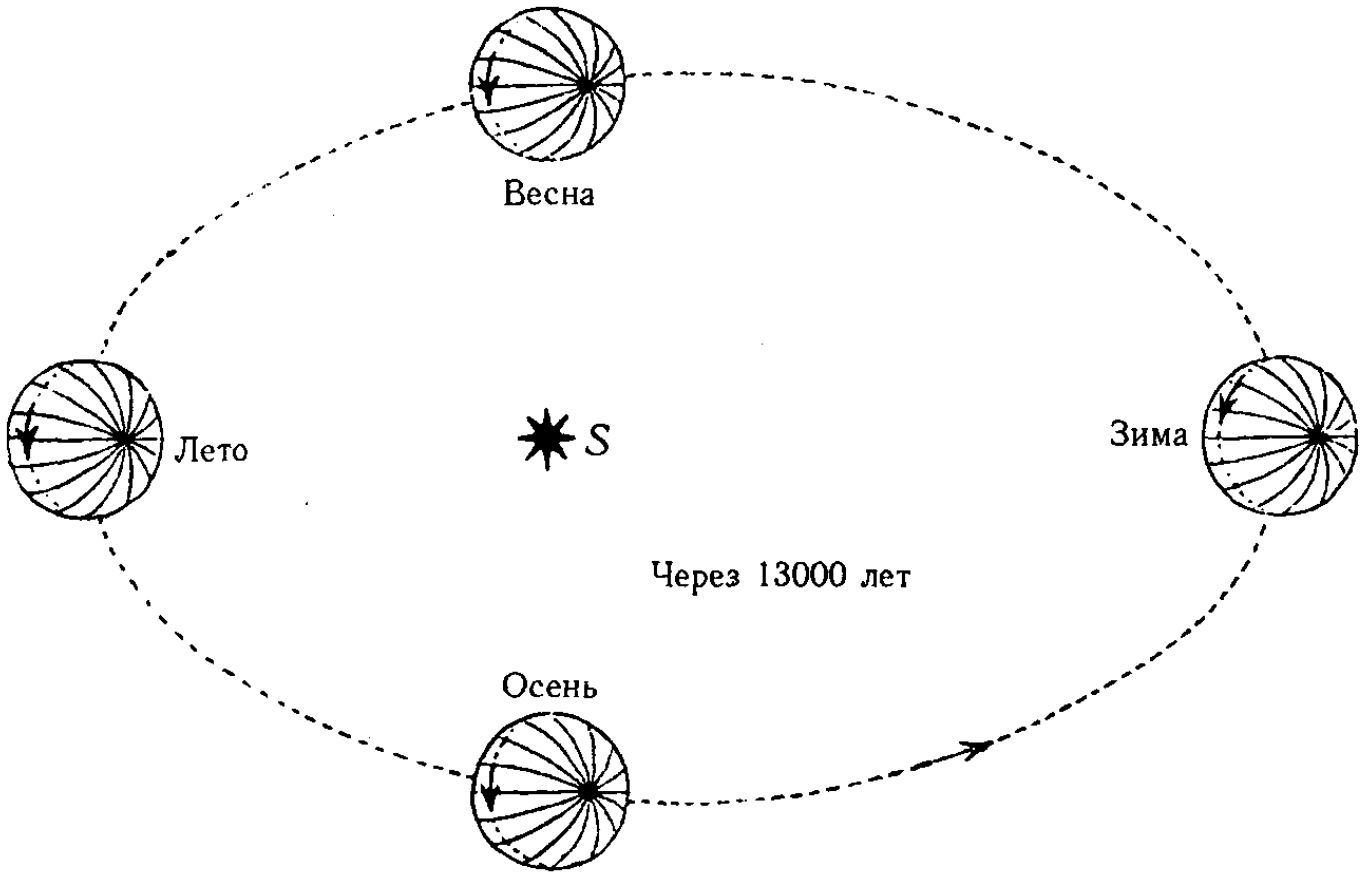


Рис. 40

точка весеннего равноденствия, медленно перемещается по эклиптике; перемещение это происходит в направлении, обратном тому, в котором движется Земля по своей орбите или же Солнце в своем видимом движении. Точка весеннего равноденствия при измерениях на небесном своде играет для астронома ту же роль, какую меридиан Гринвича для мореплавателя. Астроном скажет вам, что аберрация света и параллакс звезд, а в особенности прецессия точки весеннего равноденствия суть три важнейшие обстоятельства, которые мешают нам, при помощи наблюдений в обсерватории происхождения светил, констатировать, что Земля движется вокруг своей оси совершенно равномерно. Но если астроном описывает прецессию иначе, то это не должно скрывать от вас того физического факта, что здесь речь идет о том же явлении, которое мы исследовали выше; хорошо освоившись с особенностями волчков, мы легче поймем медленное коническое движение оси вращения, чем тонкости небесных измерений, в области которых вращается мысль астронома; эти измерения часто принуждают человека, одаренного высшими духовными способностями, вести жизнь, обреме-

ненную будничной кропотливой работой, какую мы связываем обыкновенно с представлением о канцеляристе, получающем двадцать рублей в месяц.

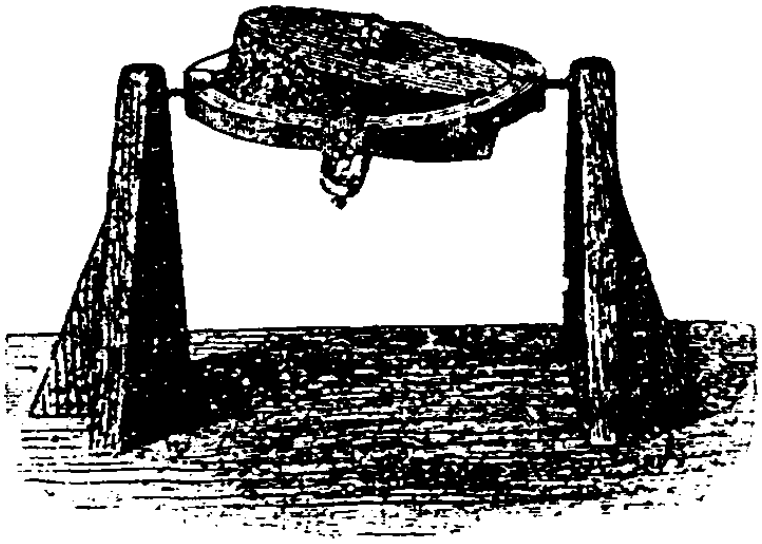


Рис. 41

Таким образом, прецессия Земли принадлежит к тому же типу, как и прецессия гиростата, подвешенного выше своего центра тяжести, т. е. тела, которое при отсутствии вращения остается в устойчивом равновесии. Фактически прецессия Земли сходна с прецессией этого большого гиростата (рис. 41), который подвешен на кольцах так, что при отсутствии вращения он качается наподобие маятника. Теперь я приведу его во вращение, а именно, если смотреть сверху, в направлении, обратном движению часовой стрелки; тогда вы можете видеть, как он прецессирует в одном направлении с часовой стрелкой. А вот здесь у меня небольшое деревянное суденышко, имеющее форму полушария; на нем находится гиростат, ось которого вертикальна. Судно находится в состоянии устойчивого равновесия; если гиростат не вращается, то судно, будучи выведено из равновесия, медленно качается то в одну, то в другую сторону; если же привести гиростат во вращение, то оно движется прецессионным движением в направлении, обратном вращению гиростата. Астрономы со времен Гиппарха производили для нас множество наблюдений над движениями Земли; с другой стороны, мы исследовали особенности движения гиростатов, а потому, естественно, мы ищем здесь объяснения для прецессионного движения Земли. Экватор Земли образует с плоскостью эклиптики, т. е. с плоскостью земной орбиты,

угол в $23\frac{1}{2}°$. Угол между осью вращения Земли и перпендикуляром к плоскости эклиптики, таким образом, всегда остается равным $23\frac{1}{2}°$, и земная ось совершает полный оборот в 26 000 лет. Пусть поверхность воды, на которой плавает этот деревянный кораблик, представляет эклиптику. Ось вращения гиростата наклонена к вертикали под углом в $23\frac{1}{2}°$; только полный цикл прецессии завершается в данном случае в две минуты вместо 26 000 лет; и если бы кораблик описывал весьма большую кругообразную орбиту, то его прецессия давала бы точное представление о прецессии Земли.

Прецессию корабля или гиростата (рис. 41) мы можем объяснить, и таким же самым образом сейчас объяснится и прецессия Земли, коль скоро мы найдем силы, которые исходят от тел, лежащих вне Земли, и которые стремятся повернуть ось Земли перпендикулярно к эклиптике. Земля представляет собою почти шарообразное тело. Если бы она была совершенно шарообразна и однородна, то равнодействующая притягательных сил, исходящих от далекого тела, проходила бы прямо через ее центр. Совершенно также обстояло бы дело и в том случае, если бы Земля была шарообразна, но не однородна, а массы одинаковой плотности были бы расположены шаровыми слоями, подобно шелухе луковицы. Но Земля не шарообразна, и чтобы составить понятие о притягательном действии на нее далекого тела, необходимо было произвести наблюдения над маятником на всей поверхности Земли. Как вы знаете, помещая маятник одной и той же длины в различных местах и определяя продолжительность его колебания, можно определить силу тяжести в любом месте. С другой стороны, Грин (Green) доказал, что если бы мы могли знать величину силы тяжести во всех местах земной поверхности, то, хотя бы и не зная ничего о внутренности Земли, мы все же могли бы совершенно точно вычислить силу, с которой Земля притягивает любое внешнее тело; так, например, мы могли бы вычислить эту силу для всякой точки лунной орбиты или для Солнца. Вместе с тем мы определили бы таким образом силу, равную и противоположную той, с которой такого рода тело действует на Землю. Наблюдения над маятником были произведены на Земле в весьма многих местах; поэтому мы знаем, хотя и не с абсолютной точностью, ту притягательную силу, с которой действуют на Землю тела, находящиеся вне ее. Так, например, мы знаем, что равнодействующая сил, притягивающих Землю к Солнцу, не проходит через центр земной массы. Вы поймете это го-

раздо лучше, если я сошлюсь на этот рисунок, изображающий Землю в середине зимы (рис. 42), и постараюсь общепонятно изложить суть дела. Назовем через A и B выступающие части Земли, т. е. выдающийся пояс Земли, который придает ей вид апельсина вместо шара. Равнодействующая сил, притягивающих внутреннюю шарообразную часть, которую мы условимся считать однородной, проходит через центр.

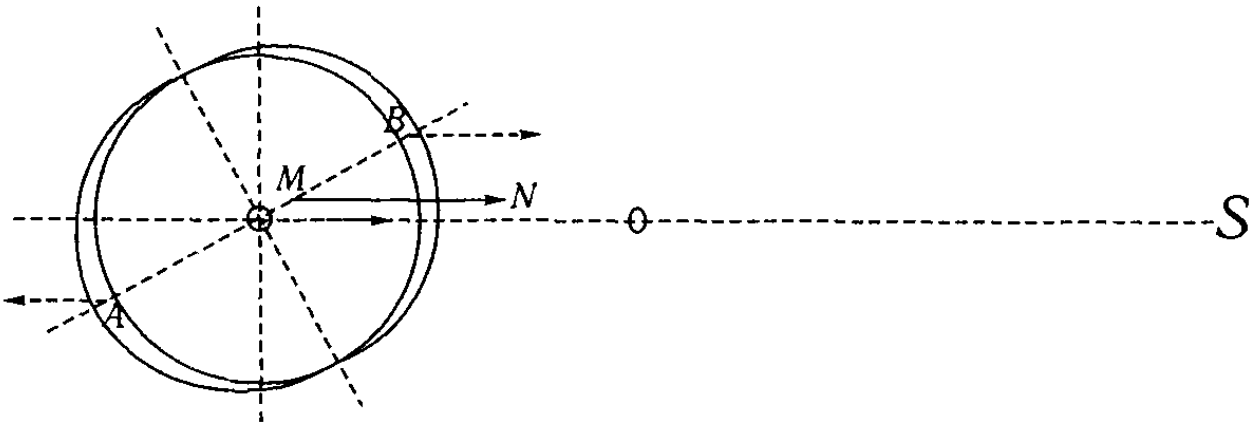


Рис. 42

Теперь я буду исследовать притяжение выступающего пояса, обозначенного AB. Солнце притягивает один килограмм массы Земли в B сильнее, чем в A, так как B лежит к нему ближе, а потому общая равнодействующая всех сил, притягивающих Землю, имеет направление MN, не совпадающее с прямой OO, проходящей через центр. Но мы знаем, что сила, действующая в направлении MN, может быть заменена параллельной ей силой OO и парой сил A и B, которая стремится повернуть конец экватора B к Солнцу. Мы получим верное представление о вращательном действии этой пары сил, если представим себе, что Земля неподвижна, а вся масса Солнца распределена в виде кругообразного материального кольца, диаметр которого равен 292 миллионам километров и которое наклонено к земному экватору под углом $23\frac{1}{2}^\circ$. Под влиянием притяжения этого кольца Земля должна была бы качаться, подобно большому кораблю в спокойном море, который колеблется очень медленно, совершая в три года только одно полное колебание. Но Земля вращается вокруг своей оси, и вращательная пара сил действует на нее совершенно так же, как те силы, которые все время стремятся привести вот эту модель корабля в вертикальное положение; поэтому Земля обладает прецессионным движением, полный период которого

составляет 26 000 лет. Если на этом кораблике нет никакого тела, вращающегося вокруг оси, то полное колебание этого корабля совершается в течение 3 секунд; если же я приведу во вращение находящийся на кораблике гиростат, то время полного периода прецессии составляет две минуты. В обоих случаях действие вращения выражается в преобразовании качания в гораздо более медленную прецессию.

Между гиростатом и Землей есть, однако, большая разница. Силы, действующие на волчок, всегда одни и те же, между тем как силы, действующие на Землю, постоянно изменяются. В середине зимы и лета вращательная пара сил достигает наибольшего значения, а во время весеннего и осеннего равноденствий нет совсем никакой пары сил, так что прецессия меняет свою скорость каждую четверть года от максимума до нуля и от нуля до максимума. Но она совершается всегда в одну и ту же сторону, а именно — в направлении, обратном вращению Земли вокруг ее оси. Поэтому, говоря о прецессионном движении Земли, мы подразумеваем всегда некоторое среднее движение, между тем как на самом деле это движение бывает в разных четвертях года то скорее, то снова медленнее.

Но и Луна точно так же, как и Солнце, оказывает свое действие: она стремится повернуть земной экватор в плоскость лунной орбиты. Последняя почти совпадает с плоскостью эклиптики, а потому средняя прецессия Земли есть движение совершенно такого же рода, какое имело бы место, если бы действовало только одно из двух небесных тел — либо Луна, либо Солнце. Таким образом, наблюдаемое в действительности явление прецессии земной оси по конусообразной поверхности, период которого равен 26 000 лет, есть результат совместного действия отклоняющих сил Солнца и Луны.

Здесь вы можете видеть пример трех неточностей, которые вкрадываются в научные объяснения явлений природы с почти неизбежной необходимостью. До сих пор я говорил, что прецессия Земли происходит вследствие действия Солнца. Это было позволительно, так как плоскость эклиптики всегда образует с земным экватором угол, который почти точно равен $23\frac{1}{2}°$; хотя в общем действие Луны почти сходно с действием Солнца и приблизительно в два раза сильнее его, однако, оно в значительно бóльшей мере подвержено изменениям. Более сильное влияние Луны на наклон земной оси точно так же, как и возникновение под влиянием Луны приливов и отливов, нужно припи-

сать тому обстоятельству, что она находится гораздо ближе к нам, чем Солнце; и это бóльшее влияние Луны обнаруживается, несмотря на то, что масса ее гораздо меньше массы Солнца.

Так как угол между эклиптикой и земным экватором равен $23\frac{1}{2}°$, а лунная орбита наклонена к эклиптике под углом $5\frac{1}{2}°$, то иногда лунная орбита образует с земным экватором угол в 29°, а иногда только в 18°; говоря точнее, этот угол медленно изменяется от 29° до 18°, а затем снова от 18° до 29° в течение промежутка времени, приблизительно равного 19 годам. Это обстоятельство вызывает явление, известное под именем «нутации» или качания оси; это явление весьма заметно отражается на влиянии Солнца на наклон земной оси и существенно видоизменяет его. Под влиянием того непостоянства, которым отличается действие Луны, земная ось описывает поверхность эллиптического конуса вокруг прямой, называемой средним положением оси. При этом мы не должны также забывать, что в течение каждого лунного месяца влияние Луны на наклон земной оси два раза усиливается и два раза становится равным нулю; таким образом, действие Луны постоянно изменяет свою величину.

В общем Луна и Солнце, а также в незначительной степени и планеты, действуя вместе, вызывают прецессию, которая повторяется в той же последовательности по истечении 25 695 лет. Она не вполне равномерна, а именно — ее скорость достигает наибольшего значения зимой и летом; таким образом происходит изменение скорости, период которого составляет полгода. Но есть еще одно изменение скорости, период которого составляет половину лунного месяца; сегодня вечером скорость прецессии больше той, какую она будет иметь в ближайшую субботу; затем она снова будет возрастать в течение еще одной недели, а в течение следующей затем недели снова будет убывать. Вместе с тем, вследствие того, что орбиты Земли и Луны наклонены друг к другу под углом $5\frac{1}{2}°$, происходит еще одно явление, которое можно сравнить с качанием нашего прецессирующего гиростата; явление это состоит в том, что наклон земной оси к эклиптике не остается постоянно равным $23\frac{1}{2}°$, но меняется в течение двадцатилетнего периода. Допустим, что центр Земли остается неподвижным в точке O; тогда мы видим на этой модели и на рис. 43, что земная ось описывает, в 25 866 лет, почти совершенно правильный круг на небесном своде, причем ее скорость колеблется, изменяясь периодически через каждые полгода и

через каждые полмесяца. Однако линия, описываемая земной осью на небесном своде, не есть абсолютно правильный круг; на самом деле это есть волнистая линия с более крупными волнами, соответствующими периоду в 19 лет, и с более мелкими выпуклостями, которые отвечают полугодовым и четырнадцатилетним периодам. Главная же причина нутации, а именно, девятнадцатилетнее отступающее движение лунных узлов* на самом деле возникает совершенно таким же образом, как и прецессия гиростата, а именно — оно совершается под влиянием пары сил, которая действует на тело, вращающееся вокруг своей оси.

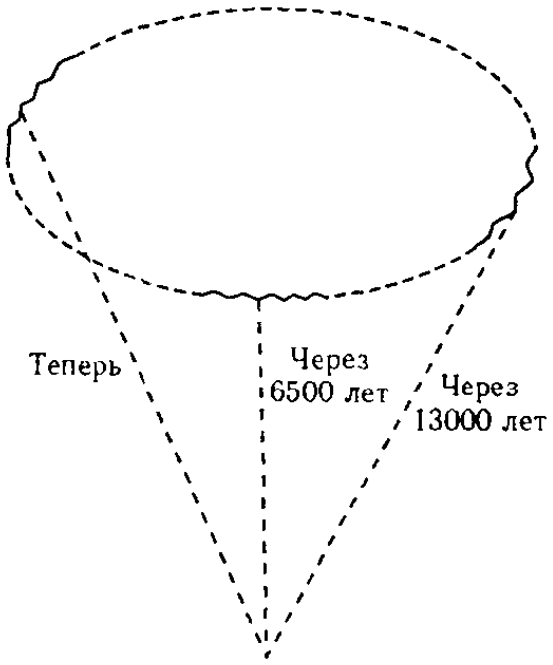


Рис. 43

Представьте себе, что Земля остается неподвижной и что Солнце и Луна движутся вокруг нее. Гаусс показал, что в таком случае массы Солнца и Луны должны действовать на Землю таким же образом, как это имело бы место, если бы массы их были распределены на всем протяжении соответствующих орбит.

Представьте же себе теперь, что масса Луны распределена вдоль всей ее орбиты в виде твердого кольца, диаметр которого равен 780 000 километров, и при том так, что там, где теперь скорость больше, расположено меньше вещества, так как кольцо толще в апогее и тоньше в перигее Луны. Такого рода кольцо, окружающее Землю, было бы

*Узлами в астрономии называются точки пересечения орбиты светила с плоскостью эклиптики. — *Прим. перев.*

подобно кольцам Сатурна, узлы которых также обнаруживают прецессию; но только кольца Сатурна не твердые тела, так как в противном случае они никоим образом не могли бы оставаться в равновесии. Предположим далее, что Земли нет и что существует только одно вышеупомянутое кольцо, центр которого совершает годовое движение вокруг Солнца; тогда это кольцо, образуя с плоскостью эклиптики угол в $5\frac{1}{2}°$, придет в колебательное движение: оно будет качаться, пока не отклонится по другую сторону плоскости эклиптики на такой же самый угол, а потом опять возвратится в прежнее положение. Но это кольцо совершает один полный оборот вокруг своего центра в 27 солнечных суток 8 часов; поэтому оно уже не будет качаться из одной стороны в другую подобно кораблю, сидящему на мели, но начнет прецессировать в направлении, противоположном его собственному вращению. Так как движение кольца, если смотреть на эклиптику с севера, противоположно движению часовой стрелки, то это отступающее движение лунных узлов совершается в направлении часовой стрелки. Это совершенно то же самое явление, как и предварение равноденствий (прецессия), только с гораздо более коротким периодом — в 6 798 суток вместо 25 866 лет.

Я вам сказал, что если бы нам была известна масса Солнца или Луны, то мы могли бы определить величину сил или, вернее говоря, вращательного момента, величиной которого измеряется их стремление наклонить земную ось. Мы знаем скорость, с которой вращается Земля; мы произвели также наблюдения над ее прецессией. Следуя методу, который я только что набросал в общих чертах, мы найдем, что прецессионная скорость тела, вращающегося вокруг своей оси, должна равняться вращательному моменту пары сил, деленному на скорость вращения вокруг оси и на момент инерции тела, вычисленный относительно его оси вращения. Поэтому прецессионная скорость тем больше, чем больше вращательный момент и чем меньше скорость вращения вокруг оси и момент инерции* тела. Если даны значения всех этих величин за исключением одной, то легко вычислить значение и этой последней величины. Обыкновенно при вычислениях такого рода мы имеем в виду определение массы Луны, так как явление прецессии,

* *Инерция* тела (или *масса*) обозначает, приблизительно то сопротивление, которое оказывает тело изменению скорости при простом поступательном перемещении, а *момент инерции* обозначает сопротивление изменению скорости вращательного движения.

а также явление приливов и отливов суть единственные, которые дают нам возможность вычислить массу Луны.

Я не хочу просить о снисхождении, что позволил себе ввести термин «момент инерции» и не хочу его разъяснять. В этой лекции я избегал, насколько мог, введения математических выражений и пользовался техническими терминами. Я желал бы только выяснить вам, почему я все же не боюсь пользоваться техническими терминами в популярном докладе. Если в подобном намерении есть какое-либо недопустимое неудобство, то, по моему мнению, оно должно еще более увеличиться, если войти в подробное разъяснение точного смысла такого термина. Наоборот, пользование подходящим техническим термином способствует достижению нескольких полезных целей.

Во-первых, пользование техническими терминами доставляет докладчику известное удовольствие, давая ему возможность изложить кое-что точно; таким образом достигается его цель — сделать вполне ясным ход своих мыслей; а утомлять своих слушателей обстоятельными разъяснениями он, к счастью, совсем не имеет времени. Во-вторых, пользование такими терминами отнимает у слушателей популярной лекции широко распространенную уверенность, будто теперь они узнали все, что можно сказать по поводу излагаемого предмета. В-третьих, при помощи этого приема всякий, не исключая и докладчика, убеждается, что при изложении нового предмета можно допустить местами известного рода скачки; применяя такой метод изложения, мы часто ничего не теряем, а наоборот, иногда много выигрываем.

Несколько лет тому назад утверждали, что если бы Земля представляла собой оболочку, наполненную жидкостью, и если бы эта жидкость не испытывала никакого трения, то мы при изучении ее прецессии должны были бы принять во внимание лишь момент инерции оболочки; а если бы эта оболочка была вязкой, то прецессия скоро должна была бы совершенно прекратиться. Чтобы показать наглядно значение момента инерции, я подвесил здесь несколько стаканов — один (a), наполненный песком, другой (b) — сиропом, третий (c) — маслом, четвертый (d) — водой, а пятый пустой (рис. 44). Как вы видите, если я закручу проволоки, на которых подвешены стаканы, и затем предоставлю их самим себе, начинается колебательное движение, похожее на качание маятника карманных часов. Заметьте теперь, что стакан с водой движется очень быстро; в данном случае оказывает действие мо-

мент инерции только самого стакана, и продолжительность колебания почти одинакова для этого стакана и для пустого, т. е. по-видимому, не движется вместе со стаканом. Вы замечаете также, что колебания этого стакана продолжаются в течение значительного промежутка времени.

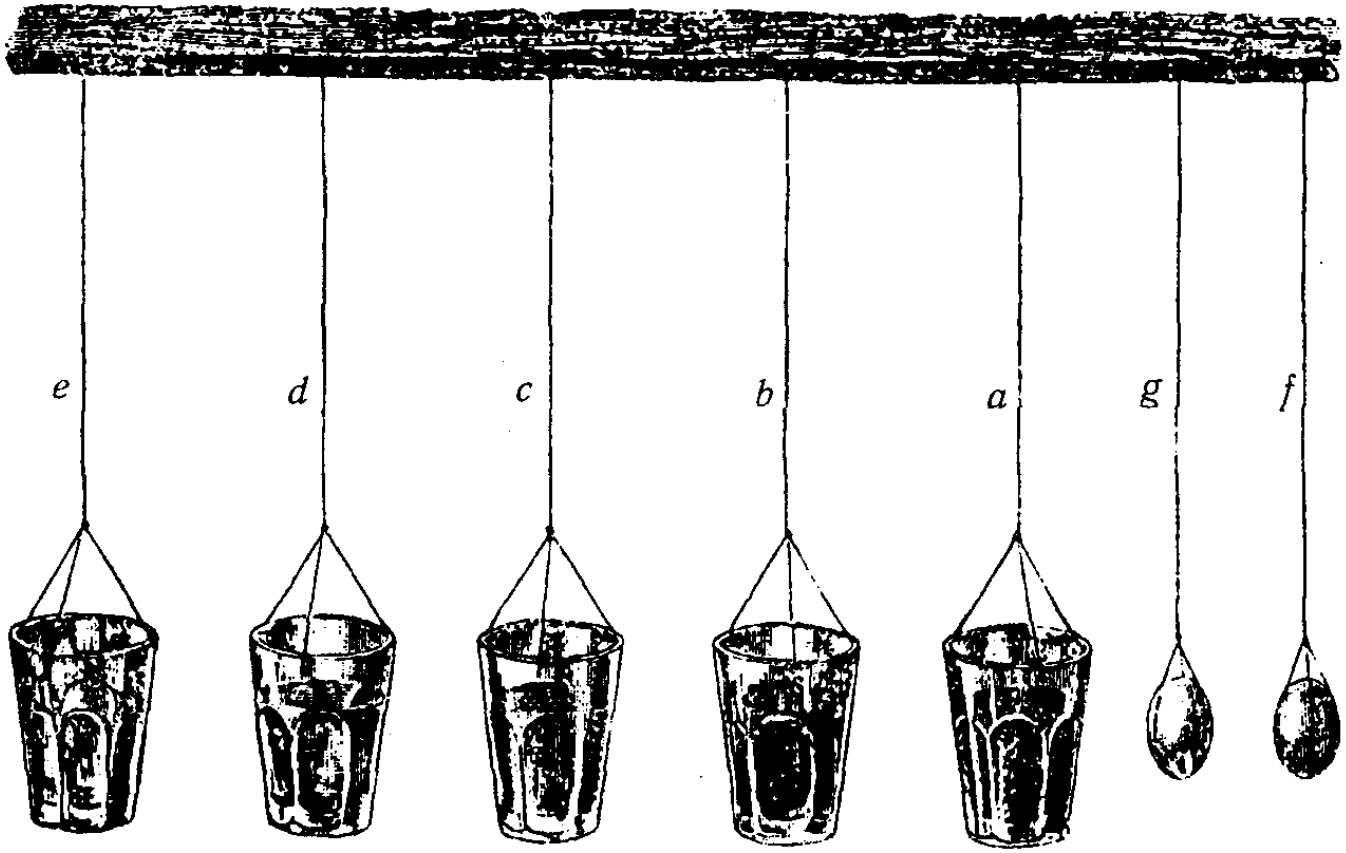


Рис. 44

Наоборот, стакан, наполненный песком, колеблется медленно; в этом случае момент инерции велик, так как песок и стакан представляют из себя вместе как бы твердое тело, и колебание продолжается долго.

У стаканов, наполненных маслом и сиропом, периоды колебания продолжительны, чем у стакана с водой или у пустого, но более коротки, чем это имело бы место, если бы колеблющиеся тела были совершенно твердыми, так как вследствие внутреннего трения колебания прекращаются все-таки скорее.

Вареное (f) яйцо и невареное (g), которые одинаковым образом на проволоке обнаружат ту же самую разницу в свойствах колебательного движения, как и два тела, из которых одно внутри твердое, а другое жидкое; вы видите, насколько колебания вареного яйца медленнее, чем невареного.

Даже здесь, на этом столе, можно легко обнаружить разницу между вареным и невареным яйцом. Если закрутить оба яйца, то вы видите, что невареное яйцо останавливается гораздо раньше, чем вареное, так как первое раньше приходит в состояние покоя вследствие внутреннего трения.

Следите теперь внимательно и уясните себе вполне отчетливо следующий весьма убедительный признак, по которому можно узнать, сварено яйцо или нет. Я закручиваю яйцо или вращаю его вокруг вертикальной оси, а затем придерживаю его пальцем только на одно мгновение, как раз в течение такого промежутка времени, чтобы остановить движение скорлупы. Вы видите, что вареное яйцо совсем прекратило свое движение, между тем как у невареного остановилось только движение скорлупы, а жидкое содержимое не только продолжает двигаться, но даже возобновляет своим движением движение скорлупы, как только я удаляю от нее свой палец.

И вот отсюда заключили, что если бы Земля была внутри жидкой, то ее прецессия должна была бы быть гораздо быстрее, чем это наблюдается в действительности, так как момент инерции оболочки, единственно имеющий значение в данном случае, оказался бы сравнительно незначительным и, как мы видели это из предыдущих примеров, совершенно не зависел бы от момента инерции жидкости. Это и приводилось как довод против предположения, что внутреннее содержание Земли находится в жидком состоянии.

Мы знаем, что наблюдаемые нами полугодовые и полумесячные изменения земной прецессии были бы гораздо значительнее, если бы Земля представляла из себя оболочку, содержащую внутри много жидкости, и тогда, если бы только эта оболочка не была почти бесконечно тверда, не могло бы происходить явление прилива и отлива; но не подлежит никакому сомнению, что по отношению к общей прецессии прежняя цепь доказательств ошибочна. Если бы даже Земля была внутри жидкой, то все-таки она вращается настолько быстро, что по отношению к такому медленно совершающемуся явлению, как предварение равноденствий, ее нужно рассматривать, как твердое тело. Действительно, в ряде прежних доказательств было упущено из вида то важное обстоятельство, что быстрое вращение вокруг оси может сообщить даже жидким телам кажущуюся твердость. Вот полый медный волчок, наполненный водой (рис. 45 а). Внешняя оболочка очень легка, и на-

ходящаяся внутри него вода имеет гораздо бóльшую массу, чем эта оболочка. Если внимательно исследовать этот волчок, то оказывается, что он вращается совершенно так же, как если бы находящаяся внутри него вода была твердым телом, т. е. как если бы весь волчок был твердым телом. И вот вы видите, что он вращается и прецессирует совершенно так же, как и твердый волчок. Я знаю, что этот волчок не вполне, а только отчасти наполнен водою; но будет ли он ею наполнен вполне или отчасти, он вращается почти так, как твердый волчок.

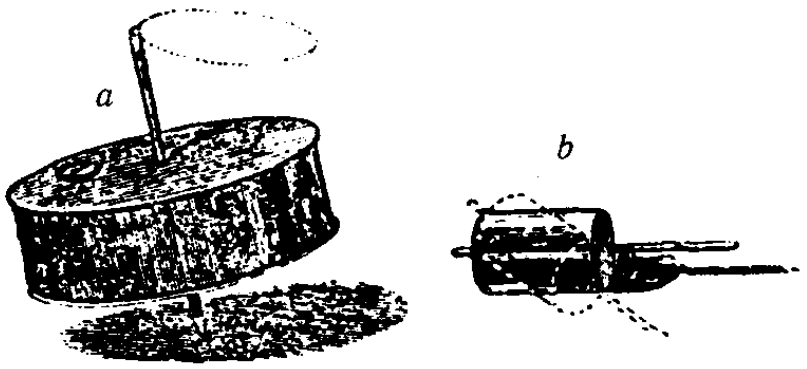


Рис. 45

Но нельзя сказать того же, если мы возьмем длинный, полый, наполненный водою волчок. Как я уже вам говорил, у всякого тела есть ось, вокруг которой оно может вращаться особенно легко. Внешняя металлическая часть этого волчка проявляет уже хорошо известные вам особенности: трение ее нижнего острого конца о поверхность стола заставляет ее ставить отвесно самую длинную свою ось. Однако находящуюся внутри волчка жидкость ничто не принуждает вращаться вокруг самой длинной оси; а так как она, подобно всем телам такого рода, которые я вам показывал, предпочитает более короткую ось, то она вращается по-своему; своим трением и давлением на футляр она заставляет его вращаться вокруг более короткой оси, постоянно парализуя таким образом стремление внешней части поднять свою длинную ось вертикально. Поэтому оказывается, что длинный, полый и наполненный водою волчок совсем нельзя заставить кружиться.

Вот, например, волчок (рис. 45 b), который отличается от показанного вам раньше только тем, что он длиннее. Он полностью или частично наполнен водой; вы видите, что, вставив в этот станок, я могу постепенно привести его в быстрое вращение; но как только я вы-

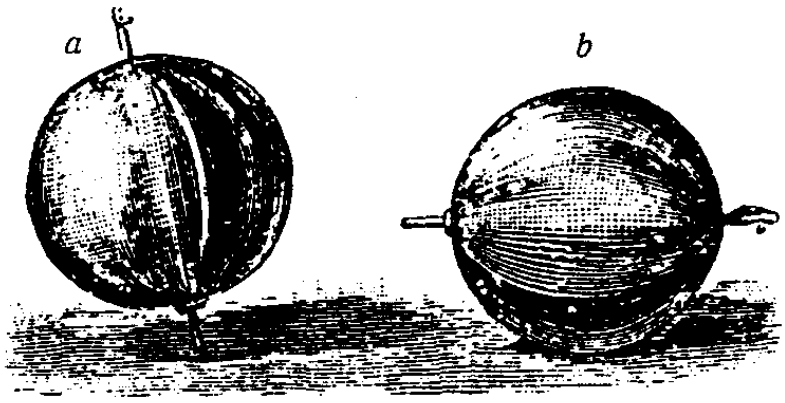


Рис. 46

пускаю его на поверхность стола подобно волчку, демонстрированному ранее, он сразу же опрокидывается и решительно отказывается вращаться на своем острие. Это различие свойств особенно замечательно у двух полых волчков, которые вы видите перед собой на рис. 46. Оба они почти шарообразны и оба наполнены водой. Они до того схожи, что немного лиц в этом собрании взялись бы указать, какую разницу они замечают в их внешнем виде. На самом деле один из них (a) немного приплюснут, как апельсин, а другой (b), наоборот, немного вытянут в длину, как лимон. Оба эти волчка я приведу при помощи этого станка (рис. 47) в постепенно ускоряющееся вращательное движение; притом я буду делать это так долго, чтобы можно было быть уверенным, что вода внутри волчка тоже стала вращаться. Выпущенные на свободу и получившие возможность двигаться по столу, как обыкновенные волчки, эти вода и бронза в самом начале двигаются, как части одного твердого тела. Вы видите, что волчок, имеющий форму апельсина, продолжает вращаться и прецессировать, а если его толкнуть, он выпрямляется, как обыкновенный твердый волчок — я даже редко видел более удачный волчок; наоборот, волчок, имеющий форму лимона, сразу падает на бок и сейчас же перестает двигаться совершенно.

Теперь вы будете в состоянии усвоить себе четвертый способ, с помощью которого можно узнать, сварено ли яйцо или нет; этот способ легче показать перед многочисленным собранием, чем последний из изложенных. Вот невареное яйцо (рис. 48 b). Я изо всех сил стараюсь привести его во вращение на поверхности стола, но вы видите, что я не в состоянии сообщить ему быстрое вращение; при

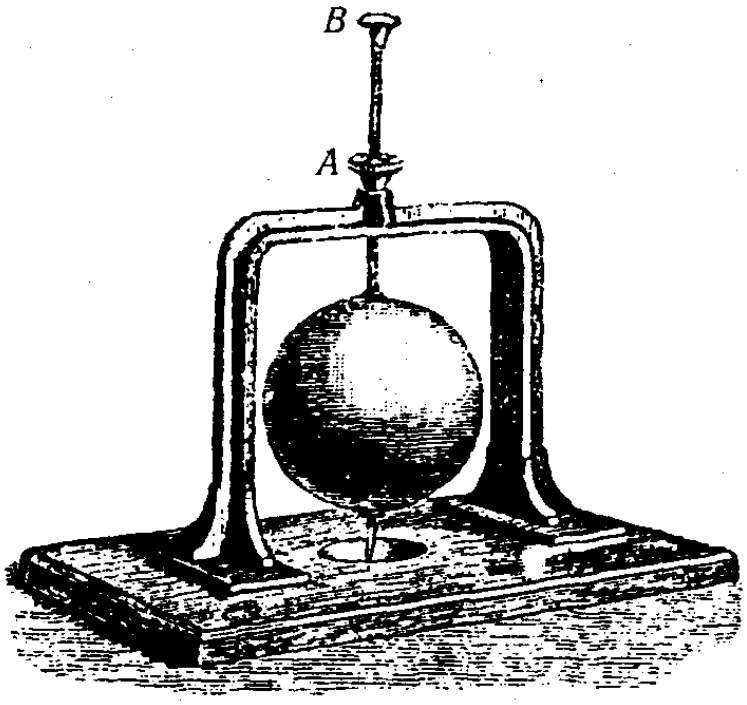


Рис. 47

этом не наблюдается никакого особенно замечательного явления. Наоборот, вы замечаете, что вареное яйцо привести во вращение совсем легко, причем по причинам, теперь уже хорошо вам известным, это яйцо ведет себя так же, как и те камни, которые закручивал Томсон на взморье; оно сейчас же поднимается вдоль своей более длинной оси, доставляя приятное зрелище для нашего теперь просвещенного глаза (рис. 48 а). Все вы знаете также, по поведению волчка, имеющего форму лимона, что если бы я мог при помощи быстро вращающегося и внезапно остановленного стола или каким-либо другим способом привести невареное яйцо во вращение вокруг оси, то все-таки оно никогда не обнаружило бы ни малейшего стремления стать на острый конец и вращаться вокруг более длинной оси.

Надеюсь, вы не находите, что я уже слишком много времени посвятил астрономическим вопросам, так как есть еще одно важное обстоятельство, которое тесно связано с астрономией и о котором я должен поговорить. Вы видите, что мне собственно нет никакого дела до астрономии, и потому я питаю к этому предмету живой интерес. Это весьма замечательный и в то же время несомненный факт, что люди, занятые практической деятельностью определенного рода, редко

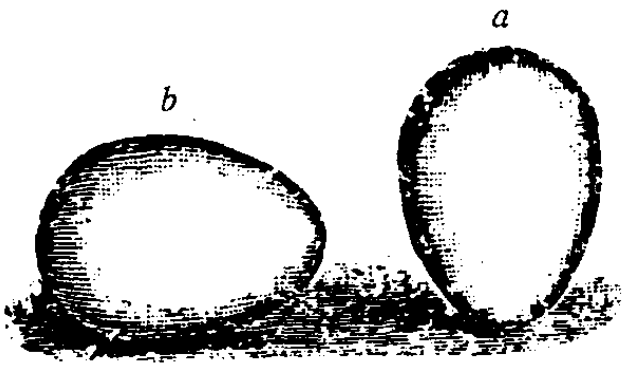


Рис. 48

замечают ее привлекательные стороны; это легче увидит обладающий живым воображением посторонний человек. Заработавшийся астроном имеет другую точку зрения. Как только какая-нибудь деятельность становится обязательной, как только она делается ежедневной работой, она теряет значительную долю своей привлекательности. Один известный американский философ говорил, что единственными кучерами, понимающими всю поэзию управления экипажем, являются те титулованные любители, которым это удовольствие обходится теперь в такие крупные суммы. Обратите внимание на то обстоятельство, что изобретения во всякой почти отрасли инженерного дела делаются лицами, посторонними этой отрасли, — людьми, которые приступают к изучению предмета со свежей головой. Кто слышал когда-нибудь, чтобы лицо, прожившее в Японии или в Перу много лет, написало об этой стране интересную книгу? Всякий, кто прожил там два года, замечает во время прогулки большей частью только самые общеизвестные вещи; он ощущает неудержимое презрение к находчивому туристу, который после месячного путешествия по самым избитым дорогам страны пишет о ней книгу. И опытный, ученый астроном забыл теперь о затруднениях, которые испытывали его предшественники, и о недоумениях профана. Уже много времени прошло с тех пор, как он ощущал тот священный ужас, который овладевает нами, профанами, когда мы созерцаем звездное небо и узнаем объем и удаленность отдельных членов небесного воинства. Этот астроном совершенно хладнокровно говорит о миллионах лет, и упоминая о древнейших эпохах человеческой истории, он почти так же равнодушен, как и обветренный непогодами геолог. Причина этого очевидна. Многие из вас, вероятно, знают, что Nautical Almanac (Морской

Альманах, английский астрономический календарь) в качестве литературного произведения представляет собою одно из самых интересных справочных изданий, какое только существует. Он даже бессвязнее словаря, и я думаю, что составление окладных и избирательных списков есть занятие гораздо более поэтическое, чем вычисление таблиц Nautical Almanac'a. И все-таки одна единственная цифра из миллиона тех цифр, которые записывает в эти таблицы переутомленный вычислитель, может решить роковым образом вопрос о жизни и смерти команды и пассажиров судна, которое на основании этой одной единственной цифры найдет приют в гавани или гибель на подводных камнях.

Может быть, этот взгляд преувеличен. Я ведь так редко имею дело с вопросами астрономии и так мало знаком с мелочами и однообразием будничной жизни астронома, что не поручусь, справедливы ли указанные факты именно по отношению к астроному. Я думаю только, что они должны быть очень близки к истине, так как они оказываются верны по отношению к представителям других профессий.

С чувством удовлетворения я могу сказать, что я прихожу в соприкосновение с разного рода людьми всевозможных профессий и, между прочим, с лицами, отрицающими множество вещей, которые излагаются в наших самых первоначальных учебниках, например, что Земля кругла, или что она вращается вокруг своей оси, или что француз говорит на языке, который отличается от нашего языка. Но ни один человек, который бывал в море, не будет оспаривать того факта, что Земля кругла; и никто из людей, бывших во Франции, не станет отрицать того, что французский язык отличается от нашего; есть, однако, много людей, которые слышали во время своего обучения в школе о вращении Земли и имели множество случаев наблюдать небесные тела и которые, несмотря на это, все-таки отрицают вращение Земли вокруг ее оси. Они говорят, что, наоборот, Луна и звезды движутся вокруг Земли, так как они видят, что эти светила из ночи в ночь описывают свои круглые пути; они говорят, что Солнце движется вокруг Земли, так как они видят это каждый день. И если над этим подумать, то, действительно, нелегко доказать вращение Земли вокруг ее оси. С помощью хорошего телескопа и электрического телеграфа или хорошего хронометра легко показать, основываясь на отсутствии параллакса, что звезды должны отстоять от нас очень далеко; но из всего этого мы узнаем только то,

что вращается либо Земля, либо небесный свод*. Разумеется, кажется бесконечно более вероятным, что вращается маленькая Земля, чем, что все звездное небо вращается вокруг Земли как центра; а бесконечная вероятность почти равносильна полной достоверности. Но нет, наверное, ни одного человека, которому не было бы желательно получить непосредственное, прямое доказательство этого. Явление приливов и отливов и почти всякое астрономическое открытие можно рассматривать как косвенное доказательство этого вращения. Но все-таки всегда остается еще недостаток полной уверенности, и если нам скажут, что явление вращения волчка дает нам возможность, не выходя из комнаты, получить действительное доказательство вращения Земли, то, конечно, мы будем приветствовать эту возможность; а между тем, изучивши это доказательство, мы будем над ним смеяться как над совершенно лишним.

Вы знаете, что гиростат, который подвешен так, что может вращаться совершенно свободно вокруг всякой оси, проходящей через его центр тяжести, принимает в пространстве определенное направление, остающееся неизменным, как бы ни поворачивать и ни передвигать подставку, на которой он подвешен. Его нельзя заставить переменить свое направление каким бы то ни было образом. Но оси этого гиростата (рис. 49) не вполне свободны от трения, о котором я говорил, а даже и малейшее трение оказывает на гиростат известное действие, влияющее неблагоприятно на опыт, который я хочу описать. Мы должны помнить, что если бы совсем не было никакого трения, то ось гиростата, даже при присутствии вращения, сохранила бы в пространстве неизменное направление. Однако вращающийся гиростат имеет то преимущество, что действие трения не так сильно влияет на положение его оси. Чем быстрее вращение, тем бóльшее право мы имеем пренебречь влиянием трения. Вы сами видели действие, которое производит перемещение этого гиростата всевозможными способами: сначала в том случае, когда гиростат вращается и трение вызывает очень большое отклонение в направлении оси, и во-вторых, когда, наоборот, гиростат вращается; хотя в последнем случае трение по-прежнему имеет место,

*Гипотеза, что звезды не что иное, как только изображения нашего Солнца, отражающегося от внешних границ эфира, разумеется очень неправдоподобна и даже нелепа, но ей не противоречит, по-видимому, ни один факт спектрального анализа и даже ни одна из вероятных теорий о строении междузвездного эфира.

но вы видите, что все-таки его ось остается все время параллельной самой себе несмотря на то, что прибор подвергается при опыте еще более резким перемещениям, чем раньше. Я ставлю этот прибор на стол; он, конечно, принимает участие в суточном движении Земли, вращаясь вместе с нею вокруг земной оси. Если бы ось совершенно неизменно сохраняла свое направление и если бы она сейчас указывала своим концом в горизонтальном направлении как раз на восток, то 6 часами позже она была бы направлена к северу и притом была бы наклонена вниз; еще через шесть часов она была бы направлена на запад и в горизонтальном положении, а после полного оборота Земли она указывала бы на ту же самую точку. Теперь представьте себе, что я привожу опыт и вижу, что ось прибора сейчас указывает в этой комнате как раз на восток, а по истечении некоторого промежутка времени она оказывается направленной на запад; так как я знаю, что гиростат сохраняет все время одно и то же направление в пространстве, то отсюда вытекает с совершенной ясностью, что комната изменила свое положение в пространстве. Допустите далее, что ось направлена теперь к Полярной звезде; тогда она и через 6, 12, 18 или 24 часа всегда будет указывать на Полярную звезду.

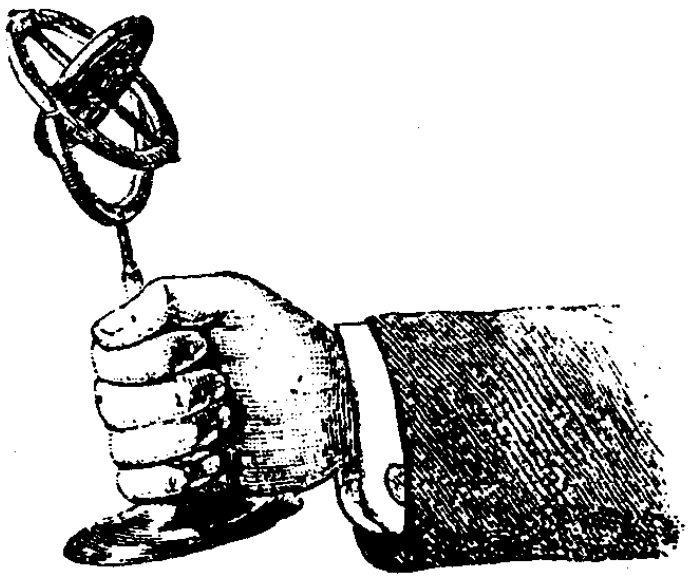


Рис. 49

Однако не легко устроить себе такого рода гиростат, лишенный трения и способный сохранить быстрое вращение в течение промежутка времени, достаточного для того, чтобы сделать вращение комнаты

заметным для многочисленного собрания. Вместо этого я вам расскажу, как сорок лет тому назад было доказано в одной лаборатории, что Земля вращается вокруг своей оси. Этот опыт связан с именем Фуко (Foucault), с именем того естествоиспытателя, который вместе с Физо (Fizeau) показал, как можно измерить в лаборатории скорость света, а отсюда и расстояние Земли от Солнца. Этот опыт был указан в Эдинбурге Лангом (Lang) еще в 1836 году, но был произведен в первый раз Фуко в 1852 году. При помощи этого опыта, если бы вы находились на теле, с которого вы не имели бы возможности видеть ни звезд, ни каких-либо других внешних предметов — например, если бы жили в подземных странах, — вы могли бы, во-первых, узнать, имеет ли место вращательное движение, и если оно имеет место, то определить его скорость; во-вторых, вы могли бы определить меридиан, т. е. точно указать направление к северу; в-третьих, вы могли бы узнать географическую широту места. Возьмем гиростат вроде этого (рис. 50), но гораздо больший, и подвесим его так, чтобы трение было ослаблено в значительно бóльшей степени, тогда он будет иметь возможность свободно двигаться в горизонтальном* и в вертикальном направлении. Цапфами колец для вертикального движения служат лезвия ножей из закаленной стали. Далее, пусть на внешнем круге его нанесена точная шкала. Теперь мы при помощи микроскопа, снабженного перекрестными нитями, попробуем узнать, движется ли гиростат в горизонтальном направлении. Если тщательно произвести наблюдения, то оказывается, что такое движение имеет место; но это не движение гиростата, а движение микроскопа. В действительности микроскоп, как и все другие находящиеся в комнате предметы, движется кругом рамы гиростата.

Рассмотрим теперь, что произошло. Комната вращается вокруг земной оси, и мы знаем скорость этого вращения; для нашей теперешней цели нам нужно узнать, какая часть вращения совершается вокруг вертикальной линии†. Если бы наша комната находилась на северном полюсе, то вращение Земли вокруг своей оси целиком происходило бы вокруг этой вертикали. Если бы комната находилась на экваторе, то во-

*Чтобы получить свободное горизонтальное движение, Фуко пользовался стальной проволокой.

†На стр. 35 и след. указано, как различные вращения слагаются в одно. Здесь автор делает обратное: вращательное движение вокруг земной оси он разлагает на два, из которых одно имеет осью вертикальную, а другое — какую-нибудь горизонтальную линию. — *Прим. перев.*

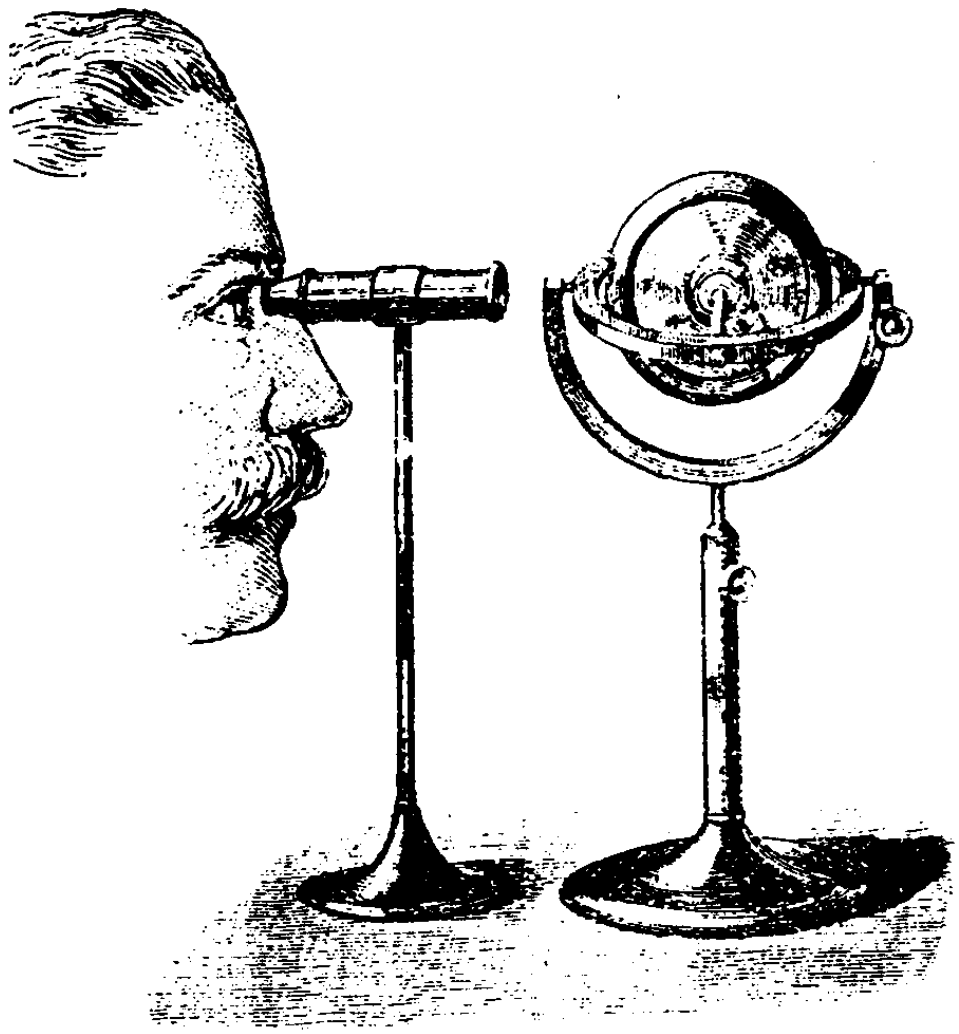


Рис. 50

круг ее вертикали не происходило бы никакого вращения. Под нашей же широтой горизонтальная скорость вращения вокруг вертикальной оси составляет около четырех пятых всей скорости вращения Земли вокруг ее оси; эту величину мы и можем измерить при помощи микроскопа. Следовательно, в каком-либо месте на экваторе этот опыт не дал бы никакого результата; наоборот, под нашей широтой мы можем с его помощью получить лабораторное доказательство вращения Земли. Фуко произвел измерения такого рода с большой точностью.

Если теперь закрепить раму гиростата таким образом, чтобы его ось могла двигаться только в горизонтальной плоскости, то тогда не может обнаружиться то движение вокруг вертикальной оси, которое Земля стремится сообщить гиростату; однако, в этом случае вращение Земли заставляет гиростат вращаться вокруг оси, которая направлена с севера на юг, вследствие чего его ось стремится расположиться в

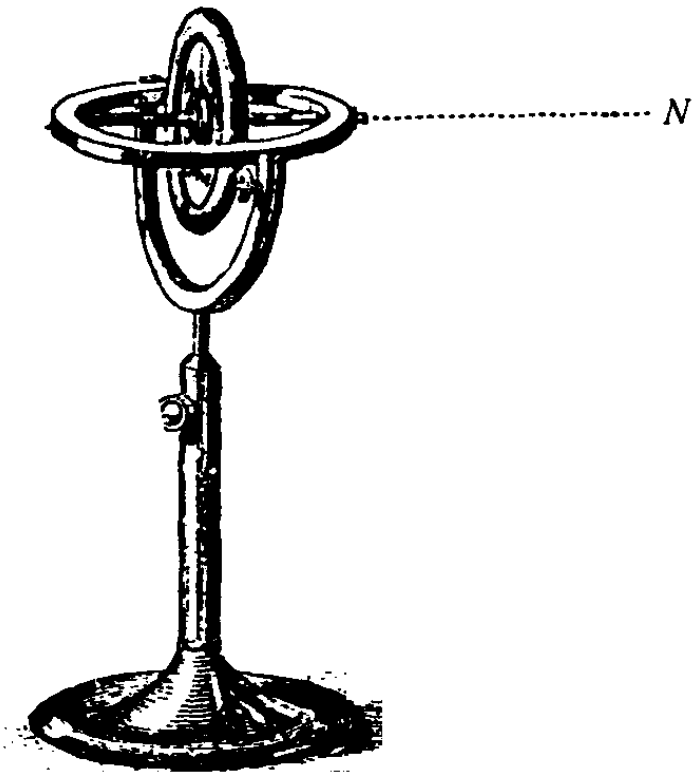


Рис. 51

направлении с юга на север (рис. 51). Поэтому с помощью инструмента такого рода легко определить истинный меридиан данного места. Если бы не было никакого трения, то инструмент колебался бы около истинного меридиана, подобно стрелке компаса (рис. 54), но только чрезвычайно медленно.

С чувством смущения и удивления обыкновенно узнают в первый раз о том, что все вращающиеся вокруг своей оси тела, как, например, маховые колеса паровых машин и т. п., в течение всего времени, пока они находятся в движении, постоянно стремятся свернуть свою ось по направлению к Полярной звезде; это непрерывное стремление вращающихся тел остается тщетным, хотя они и рвутся со своих подставок к объекту своих стремлений.

Определив меридиан (рис. 51), мы можем теперь приступить к третьему опыту. Поставим препятствие горизонтальному движению, т. е. движению вокруг вертикальной оси, но предоставим инструменту возможность двигаться вертикально в плоскости меридиана вокруг горизонтальной оси, т. е. установим подобно пассажному инструменту в обсерватории. Его движение вместе с Землею будет стремиться из-

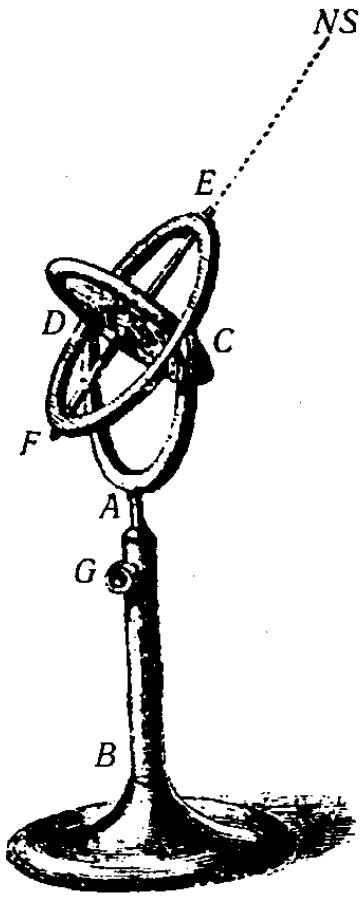


Рис. 52

менить его наклонное положение по отношению к земной оси; поэтому инструмент располагается параллельно последней. Тогда суточное вращение Земли не производит уже никакого дальнейшего изменения положения инструмента в пространстве, а потому он остается постоянно направленным к Полярной звезде (рис. 52). Можно было бы произвести очень интересный опыт, измеряя при помощи точных химических весов ту силу, с которой подымается ось гиростата, и, таким образом, в известном смысле слова, взвесить вращательное движение Земли*.

Повернем теперь подставку GB прибора на 90°, после чего ось гиростата получит возможность двигаться только в плоскости, образующей с плоскостью меридиана прямой угол; тогда прибор будет находиться, очевидно, под влиянием только одной вертикальной слагающей вращательного движения Земли, а потому ось прибора направится вертикально вниз.

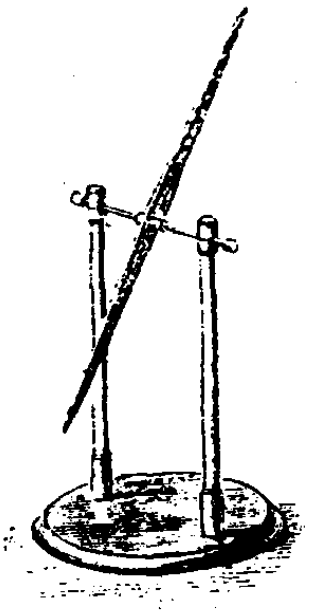


Рис. 53

Последнее явление, как и предыдущее, о котором я говорил выше, имеет глубокий смысл. Вот магнитная стрелка (рис. 53), так называемая стрелка наклонения†. Если я поверну подставку так, что стрелка будет иметь возможность двигаться только перпендикулярно к меридиану, то вы видите, что она устанавливается вертикально.

Нельзя не остановиться на сходстве свойств магнитной стрелки (рис. 54) и гиростата (рис. 51): оба прибора показывают на север, коль скоро им предоставлена возможность совершать только горизонтальное движение, и вы видите, гиростатом, в котором трение в значительной мере ослаблено, можно

*Сэр Вильям Томсон произвел это измерение.

†Т. е. стрелка, подвешенная на горизонтальной оси и могущая колебаться только в вертикальной плоскости. — *Прим. перев.*

было бы пользоваться как компасом или, во всяком случае, как средством для определения поправки компаса*.

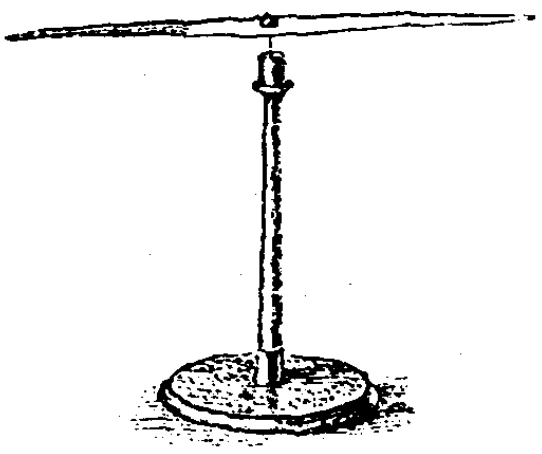


Рис. 54

Я сейчас обратил ваше внимание на некоторые аналогии, но необходимо подчеркнуть, что хотя это и аналогии, но они вовсе *не случайные*, так как несомненно есть динамическая связь между магнетизмом и явлениями, наблюдаемыми в гиростате. Основой магнетизма является вращательное движение. Молекулы материи, действительно, находятся в состоянии вращения, и известного рода согласие в направлении их осей вращения вызывает то, что мы называем магнетизмом. В ненамагниченном стальном стержне все эти микроскопические оси имеют различные направления. Процесс намагничивания состоит попросту в достижении того, что все эти вращения происходят вокруг более или менее параллельных осей, т. е. он состоит в приведении осей вращения к совпадению. Масса, подобная сотовому меду, с вращающимися гиростатами в каждой ячейке, все оси которых параллельны и которые вращаются в одну сторону — это, хотел было я сказать, и будет магнит; но в действительности это, конечно, вовсе не будет магнит со всеми его свойствами, а только нечто во многих отношениях похожее на магнит†.

Некоторые из вас, видя около стола электромотор и другие электрические приспособления, подумают, что последние имеют какое-либо отношение к теории, разъясняющей магнитные явления. Но я должен сознаться, что я пользуюсь электромотором, который я держу в руке (рис. 55), исключительно, как наиболее подходящим средством, какое

---

*Я должен заметить, что, говоря о гиростате, я имею в виду истинный меридиан, а говоря о стрелке, — магнитный меридиан.

†Если большой кусок железа заставить быстро вращаться сначала в одну, а потом в другую сторону вблизи свободно подвешенной магнитной стрелки, которая хорошо защищена от действия воздушных течений, то, я думаю, должны произойти явления, представляющие величайший интерес для теории магнетизма. До сих пор мне не удалось при этих исследованиях обнаружить какой-либо след магнитного действия, но я приписываю этот неуспех относительной медленности вращения, которое я применял, а также недостаточной чувствительности моего магнитометра.

я мог подыскать для того, чтобы приводить во вращение мои волчки и гиростаты. На оси этого мотора укреплен круглый кусок дерева; работая особым ключом, я могу сообщить мотору электрическую энергию, и тогда деревянный круг приходит в очень быстрое вращение. Достаточно мне только прикоснуться краем его к этим волчкам или гиростатам, чтобы сообщить им вращение. Вы видите, что я в несколько секунд могу привести во вращение полдюжины волчков и гиростатов, например, эту цепь гиростатов. Наоборот, этот мотор больших размеров (рис. 56), слишком тяжелый для того, чтобы я мог сдвинуть его своими руками, прикреплен к столу; я применяю его для приведения во вращение более тяжелых приборов. Теперь вы, наверно, понимаете, что я пользуюсь этими аппаратами, как мог бы ими воспользоваться парикмахер, чтобы с их помощью причесать волосы, или же прислуга, чтобы с их помощью почистить ножи, или, наконец, я пользуюсь ими совершенно так же, как я мог бы пользоваться и небольшой паровой машиной, если бы она более соответствовала моим целям. Но для меня было проще взять с собою из Лондона эту батарею аккумуляторов и эти моторы, чем мешки с углем, котлы и паровые машины. Однако при желании мы можем усмотреть более глубокий смысл в этой роли электричества. Любовь стара, как горы, между тем как весточки любви разносятся ежедневно далеко по всей Земле с помощью телеграфа, этого самого молодого из всех покорных слуг человечества. А эти волчки были известны, быть может, еще первобытному человеку, и все-таки мы извлекли из них лишь небольшую частицу той мудрости, которую волчки непрерывно предлагают вниманию тупоумного мира. Игрушки вроде этих волчков запускали, быть может, первые строители пирамид, когда они были мальчиками; а здесь вы видите волчки в непосредственном соседстве с самыми последними изобретениями человечества. Я испытываю почти то же самое ощущение, которое должен был испытывать Стэнли, когда он с помощью электрического света и волшебного фонаря воспроизводил перед цивилизованным обществом в салонах Лондона свои приключения в страшных первобытных африканских лесах.

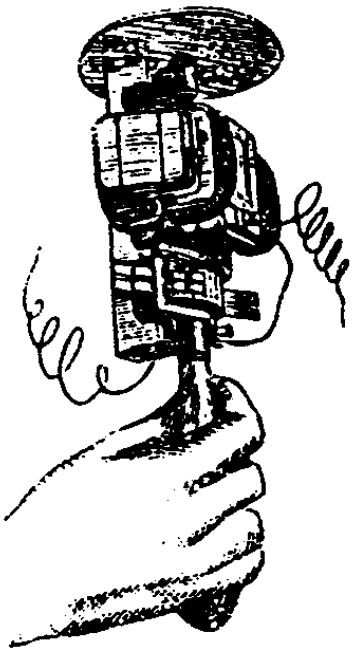


Рис. 55

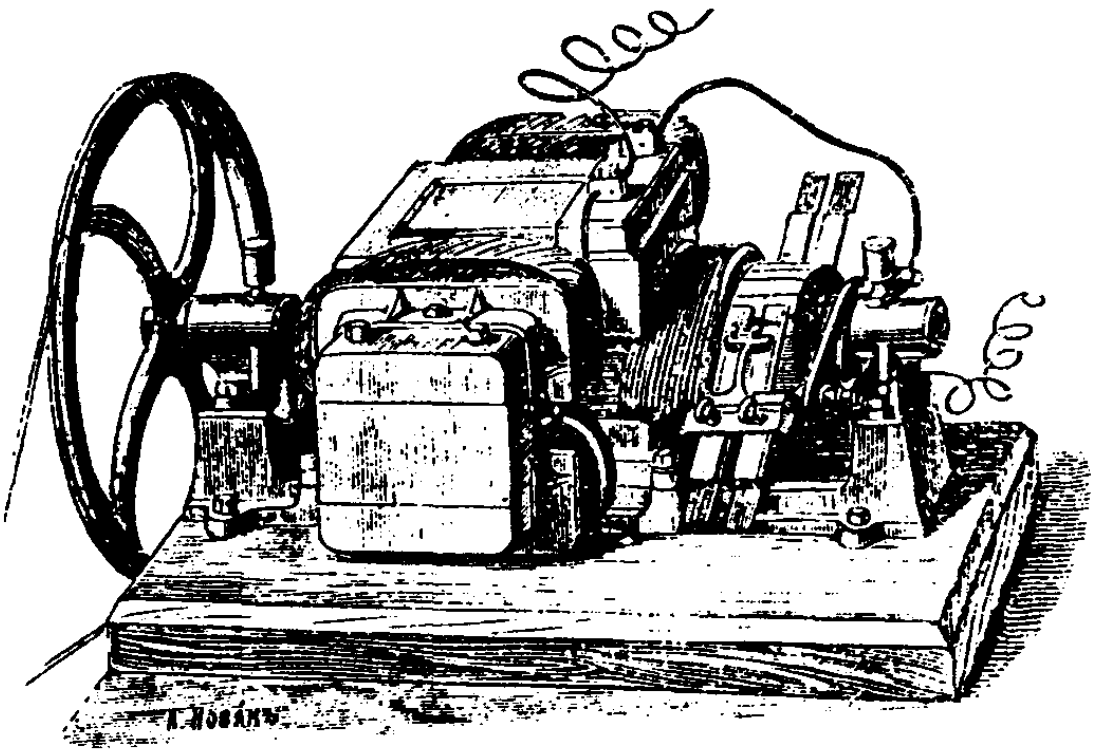


Рис. 56

Явление, которое я вам описал, играет в природе такую важную роль, что если бы позволяло время, то я мог бы продолжать мои опыты и разъяснения, не чувствуя никакой потребности остановиться на том или другом месте. Но время, уделенное моему докладу, позволяет мне коснуться еще только одного вопроса, а именно, связи между светом и электричеством с одной стороны, и свойствами волчков с другой.

Все вы знаете, что звук требует времени для своего распространения. Это положение есть вывод из обыденных наблюдений. Например, мы видим, как находящийся вдали дровосек уже второй раз поднимает свой топор, прежде чем мы успеваем воспринять звук от первого удара. Опустошительная морская волна достигает берегов Японии многими часами позже того, как землетрясение всколыхнуло далекие берега Америки, так как нужно время для того, чтобы волны совершили путь через Тихий океан. Хотя свет распространяется быстрее, чем звук или чем движение волны по поверхности моря, но все-таки он распространяется не с бесконечной скоростью, и момент наступления затмения какого-нибудь спутника Юпитера замедляется на заметное число минут, так как и свет нуждается во времени для своего распространения. При помощи наблюдений такого рода скорость света была измерена, и мы знаем, что свет распространяется со скоростью 30 000 миллионов

сантиметров в секунду. Нет сомнения, что это число почти вполне точно, так как скорость света была измерена в лаборатории при помощи совершенно независимого метода.

Самое интересное приобретение физики со времен Ньютона — это результат опытов Фарадея и теоретические выводы Томсона и Максвелля. Эти результаты состоят в том, что свет и лучистая теплота суть не что иное, как распространяющиеся в пространстве электромагнитные возмущения. Я должен ограничиться простым указанием на основную идею, хотя это предмет величайшей важности, и могу только сказать, что из всех явлений при исследовании света, электричества и магнетизма, ни одно не противоречит теории Максвелла и что, наоборот, мы знаем много явлений, которые ее подтверждают. Самое значительное и первое по времени подтверждение, которое нашла эта теория, состояло в следующем. Если эта теория верна, то в результате некоторых электромагнитных измерений должна получиться величина, которая совершенно совпадает со скоростью света. Между прочим я должен заметить, что эти электрические измерения касаются величин, которые, по-видимому, не имеют никакого отношения к свету, если только не принимать в расчет необходимости пользоваться зрением для производства измерений; для этой цели достаточно иметь в своем распоряжении линейку в 65 сантиметров длиною, магнитную стрелку, катушки, обмотанные проволокой, и электрический ток. Произвести точно вышеупомянутое измерение очень трудно. Целый ряд искусных экспериментаторов, работавших совершенно независимо друг от друга и применявших совершенно различные методы, все-таки пришли к результатам, из которых только один разнился на 5% от наблюденной скорости света, между тем как некоторые из них, и притом те, к которым можно отнестись с наибольшим доверием, совершенно совпадают со средним значением скорости света.

Итак, наблюдается удивительное совпадение между этими двумя измерениями; но, не имея более подробного разъяснения, чем то, которое я вам дал, вы не можете оценить всей важности этого совпадения между двумя, по-видимому, независимыми величинами. Во всяком случае мы знаем теперь, благодаря работам профессора Герца (Hertz), что теория Максвелла правильна и что свет есть не что иное, как электромагнитное возмущение; кроме того, мы знаем, что электромагнитные возмущения, которые распространяются, правда, несравненно медлен-

нее, чем свет и теплота, проходят теперь через наши тела; что этот самый новый по времени открытия род излучения может отражаться и преломляться, а также может проникать через кирпич стены и через туманный воздух, т. е. через такие вещи, через которые свет не может распространяться; теоретически представляется даже возможным, что в будущем все военные и морские сигналы маятников будут передаваться с помощью лучистой энергии, по отношению к которой свет является лишь особой ее формой. Таким образом, теперь, например, два жителя Лидса могли бы сноситься друг с другом при помощи условных знаков на расстоянии километра через целую массу домов, одним из которых является и эта зала, в которой мы собрались*.

Я упоминаю об этом величайшем открытии современной физики, так как зародыш его мы находим уже в работе, опубликованной тем же самым Томсоном еще в 1856 году; в этой работе сделано прямое указание на аналогию между свойствами наших волчков и магнитными и электрическими явлениями. Однако для нас будет легче воспроизвести то механическое наглядное пояснение вращения плоскости поляризации света посредством магнетизма, которое дал Томсон в 1874 году. На это явление, по моему мнению, надо смотреть, как на самое значительное из открытий Фарадея. Открытие это имело для науки огромную важность, так как оно повело науку в таком направлении, где даже не подозревали о существовании новых явлений. Относительно своего открытия индуктивных токов, которому все общества электрического освещения и передачи электрической энергии обязаны своим существованием, сам Фарадей говорит, что оно было естественным следствием открытий его предшественника, а именно, естествоиспытателя Эрстеда. Это же оптически-магнитное открытие явилось совершенно неожиданным. Теперь я опишу это явление.

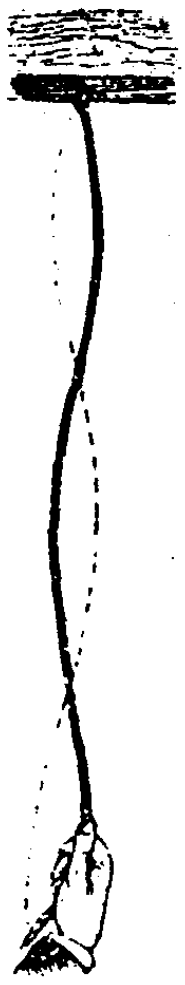


Рис. 57

Некоторые из вас, может быть, знают, что если через прибор, носящий название Николевой призмы, пропустить световой луч, то он поляризуется, т. е. становится, так сказать, односто-

*Настоящая лекция была прочитана за несколько лет до изобретения Поповым и Маркони беспроволочного телеграфирования, при помощи которого в настоящее время сигналы передаются не на один километр, как мечтал Перри, а через Атлантический океан. — *Прим. перев.*

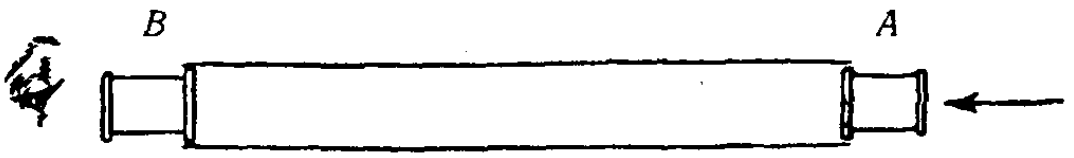


Рис. 58

ронним; другими словами, всякий свет, прошедший через эту призму, распространяется далее в виде колебаний, которые совершаются только в одной определенной плоскости. Этот канат (рис. 57), свешивающийся с потолка, дает наглядное представление о плоскополяризованном свете, так как все точки каната совершают колебания в одной и той же плоскости. Призма A (рис. 58) пропускает лишь свет, поляризованный в вертикальной плоскости. В B я имею второй прибор такого же рода, который я располагаю так, что сквозь него таким же образом может пройти лишь свет, поляризованный в вертикальной плоскости. Поэтому, бóльшая часть света, который проходит через поляризатор, как называют первую призму, пройдет также без препятствий через анализатор, как называется вторая призма; и таким образом я даю возможность свету проникнуть в мой глаз. Но как только я поверну анализатор на прямой угол, я перестаю видеть свет; и уже во время поворачивания анализатора мало-помалу наступает потемнение. Теперь анализатор может пропускать только тот свет, который поляризован в горизонтальной плоскости, а такого света он не получает.

Эта модель (рис. 59) хорошо иллюстрирует наше представление о поляризованном свете. Эта белая, ярко освещенная нить MN натянута при помощи груза, прикрепленного к ней по ту сторона блока M, а конец е N прикреплен к одной из ветвей камертона. Несколько мотков пряжи, которые приделаны вокруг части нити NA, не дают ей колебаться в каком-либо определенном направлении; наоборот, от A до M нить свободна от всякого препятствия, задерживающего колебания. Прямоугольный прорез в A, сквозь который проходит нить, определяет характер ее колебаний в промежутке AB: каждая часть нити от A до B может колебаться только вверх и вниз. Далее, вертикальный прорез в B дает возможность распространяться вертикальным колебаниям сквозь него, а потому вы видите, что часть нити BM колеблется таким же образом, как и AB. Я мог бы указать целый ряд случаев, в которых эта наглядная модель не исчер-

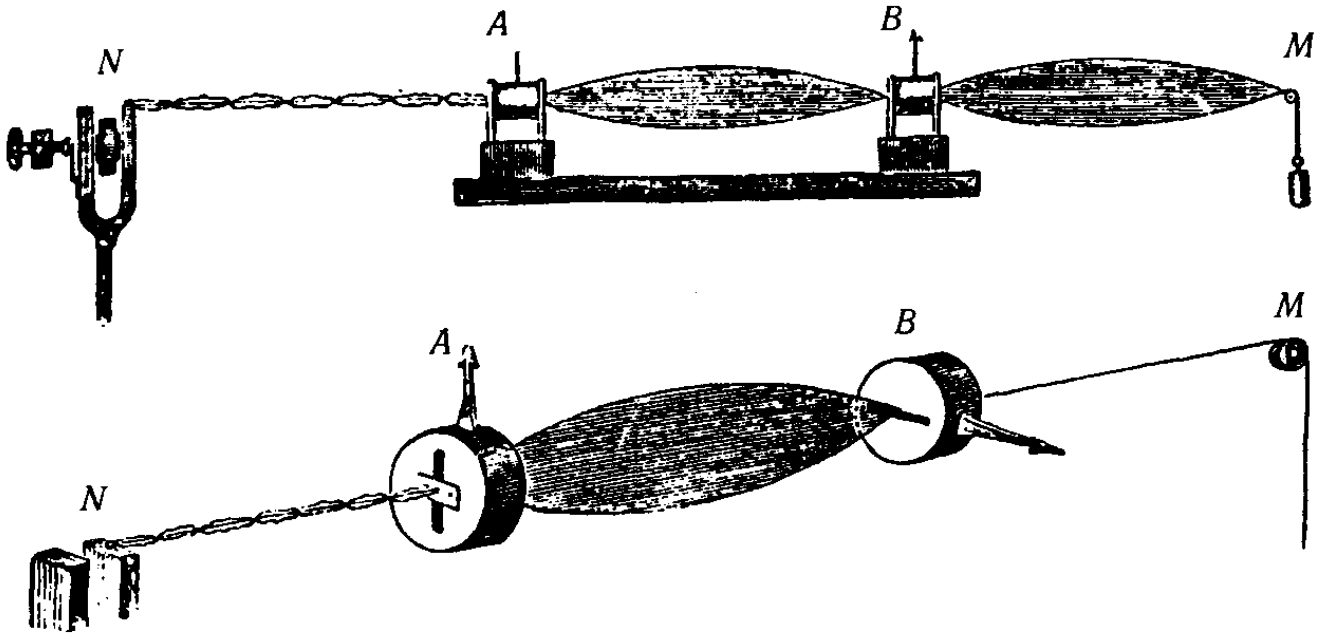


Рис. 59

пывает, хотя бы даже приблизительно, всех особенностей светового явления, указанного на рис. 58; но для той цели, которую я теперь имею в виду, достаточно и такой модели. Прорез A представляет поляризатор колебаний: он дает возможность пройти движениям, происходящим только вверх и вниз; точно так же и прорез B пропускает только движения вверх и вниз. Если же начать поворачивать прорез B, то он все меньше и меньше пропускает движения вверх и вниз, пока, придя во второе положение, изображенное на нижней части рисунка, он не перестает совершенно пропускать какое бы то ни было движение вверх и вниз; тогда прекращается всякое видимое движение между B и M. Вы легко поймете, что если бы мы не знали, в какой плоскости (в данном случае эта плоскость вертикальна) происходят колебания нити между A и B, то нам достаточно было бы повернуть прорез B, пока не прекратились бы какие бы то ни было колебания, чтобы отсюда сделать заключение о направлении этой плоскости. Поэтому, как и в том случае, когда мы имели дело со светом, мы можем назвать A поляризатором, а B анализатором колебаний.

Положим теперь, что поляризованный свет проходит, скажем, через воздух от A к B, и мы расположили анализатор так, что он дает полную темноту. Но если мы поместим на пути лучей некоторое количество раствора сахара, то в B уже не будет полной темноты; для того

же, чтобы восстановить темноту, нам нужно повернуть анализатор на некоторый угол; ясно, что сахарный раствор повернул плоскость поляризации света. Я предполагаю теперь, что Вы имеете кое-какие сведения о так называемом поворачивании плоскости поляризации света. вы знаете, что сахарный раствор производит такое вращение плоскости поляризации и что производимый им поворот тем больше, чем больше путь, который лучи проходят в растворе. Этим явлением пользуются в сахарной промышленности для определения крепости сахарного раствора. Произведенным выше опытом с нитью я обязан профессору Сильванусу Томсону; ему же принадлежит и тот прибор, к которому я обращаюсь теперь.

Рис. 60

Вот здесь у меня сильная катушка или электромагнит (рис. 60). В середине его находится отверстие, сквозь которое может проходить

луч света от электрической лампочки; кроме того, вот кусок Фарадеева флинтгласа*, который заполняет почти все отверстие.

На одном конце прибора находится поляризатор, на другом — анализатор. Вы видите, что теперь поляризованный свет через флинтглас и через анализатор доходит до глаза наблюдателя. Но вот я поворачиваю анализатор B, пока свет совсем не перестает проходить. До сих пор в приборе вовсе не было магнетизма; но устройство прибора дает мне возможность вызвать весьма интенсивное магнитное поле в том направлении, в котором распространяются лучи, и если бы вы приставили сюда свой глаз, то вы бы заметили, что теперь свет проходит через анализатор. Следовательно, магнетизм повлиял известным образом на свет: он сделал его способным проходить там, где он раньше не мог пройти. Если я теперь поверну немного анализатор, то я опять задержу свет. Итак, я замечаю, что магнетизм преобразовал стекло призмы в такую же среду, какую представляет собою сахар, а именно в среду, которая вращает плоскость поляризации.

При этом опыте вы вынуждены были положиться на мое наблюдение происшедшего вращения плоскости поляризации, так как вам оно не было видно. Но если я помещу между поляризатором и анализатором вот этот кружок, предложенный профессором Сильванусом Томсоном и состоящий из 24 радиально расположенных кусков слюды, то я буду иметь возможность сделать вращение поляризации света доступным наблюдению всего собрания. Вы видите на экране свет, вышедший через анализатор в виде креста. Если теперь этот крест повернется, то это будет служить доказательством вращения плоскости поляризации света. С помощью этого электрического коммутатора я могу вызвать в стекле магнитное поле, или прекратить его, или же переменить его в поле противоположного направления. Как только я вызываю магнетизм, вы замечаете, что крест поворачивается; когда я прекращаю действие магнетизма, крест возвращается в свое прежнее положение; теперь я произвожу магнетизм противоположного направления, и вы видите, что крест поворачивается в противоположную сторону. Теперь я надеюсь, вы видите, что магнетизм вращает плоскость поляризации света точно так же, как и сахарный раствор.

---

*Тяжелое стекло, удельного веса $5\frac{1}{2}$, из силиката и борного свинца. — *Прим. перев.*

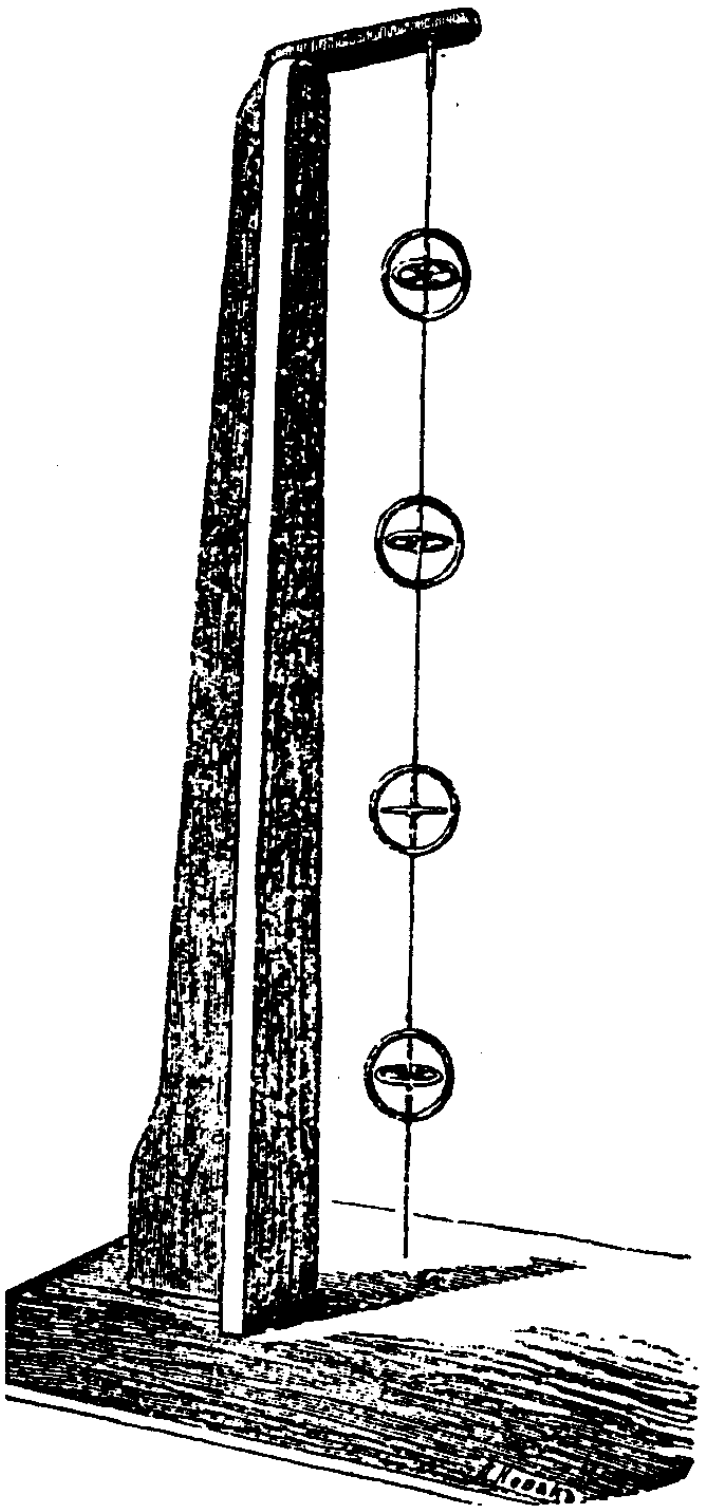


Рис. 61

Как на иллюстрацию того, что происходит на пути между поляризатором и анализатором, посмотрите опять на эту веревку (рис. 57), прикрепленную к потолку. Если я сообщу нижнему ее концу быстрые колебания в направлении с востока на запад, то вы видите, что каждая ее часть начинает колебаться с востока на запад. Можете ли вы

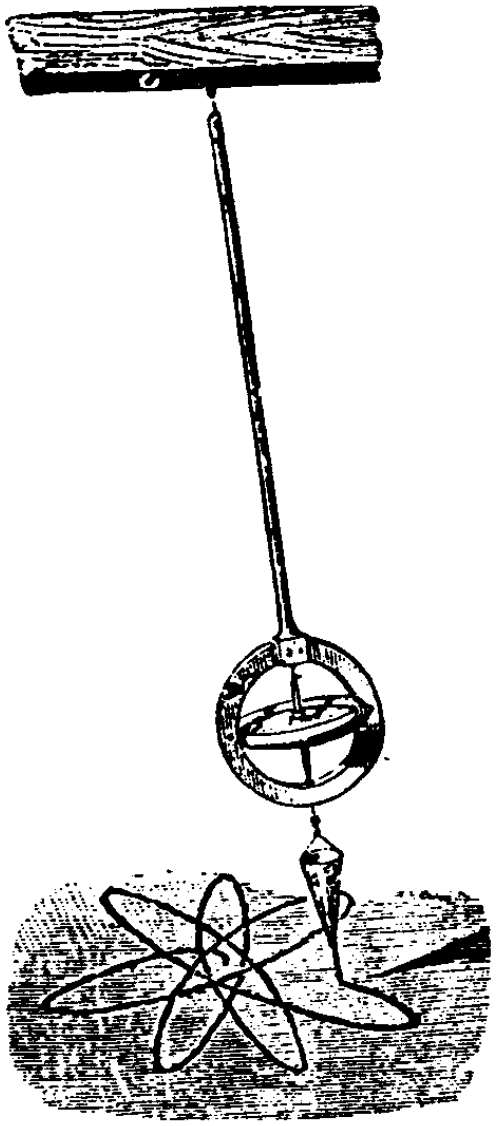


Рис. 62

теперь представить себе веревку, у которой нижний конец колеблется в направлении с востока на запад, — точка, расположенная несколькими метрами выше, колеблется в направлении с востоко-северо-востока на западо-юго-запад, а точка, расположенная еще немного выше — в направлении с северо-востока на юго-запад и т. д., так что направления колебаний с изменением высоты постепенно изменяются. Некоторые из вас, наверное, могут это себе хорошо представить. Мы имели бы то, что нам нужно, если бы эта веревка представляла собою цепь гиростатов, подобную той, которую вы можете видеть на рис. 61. Рассматривая их сверху, мы замечаем, что все они вращаются в одном направлении, будучи связаны скреплениями с незначительным трением. Эта цепь — одна из многих, которыми я пользуюсь с этой целью уже несколько лет. И хотя мне часто казалось, что в цепи такого рода

удается подметить ожидаемое мною явление, однако, к сожалению, я принужден сознаться, что я неизменно терпел неудачу. Затруднения, с которыми я встретился при производстве этого опыта, почти все относятся к области механики. Вы видите, что, прикасаясь последовательно к гиростатам вот этим кружком, приводимым в движение небольшим электромотором, я могу одновременно привести во вращение их все; но вы сейчас же увидите, что вследствие плохого механизма, плохого расчета с моей стороны и вследствие недостатка ловкости ожидаемое нами явление совершенно искажается беспорядочными прыжками гиростатов; и легче уяснить себе причины этих беспорядочных движений, чем избежать их. Наоборот, принцип рассматриваемого явления ясно виден на этом гиростате, который подвешен к маятнику вместо линзы (рис. 62). Вообразите себе, что этот прибор — частица вещества, видоизменяющего свет в магнитном поле; тогда по следам, оставляемым тонкой струей песка, который сыплется из гиростата на бумагу, вы увидите, что его плоскость поляризации непрерывно изменяется. Но, к моей великой радости, я могу сказать, что сегодня вечером я в состоянии показать вам действительно удачную иллюстрацию принципа Томсона; сейчас этот весьма поучительный опыт в первый раз производится перед многочисленным собранием. Вот здесь несколько двойных гиростатов (рис. 63), расположенных в одну линию; концы их соединены короткими кусочками резины. Каждый из этих приборов подперт в своем центре тяжести и может двигаться как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости.

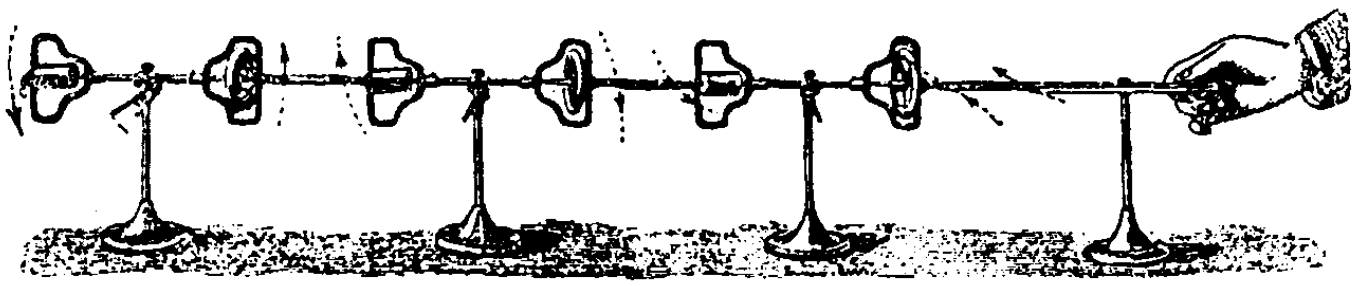


Рис. 63

Конец рычага A может быть приведен в колебательное движение моей рукой только в горизонтальной плоскости; это колебательное движение рычага передается от одного гиростата к другому, вплоть до последнего из них. Обратите теперь внимание на то, что если гироста-

ты не вращаются, то движение во всех частях прибора совершается в горизонтальной плоскости. Здесь весьма важно избежать явления, подобного отраженному световому лучу; поэтому я позаботился о том, чтобы все подставки обладали достаточным трением. Теперь я приведу во вращение все гиростаты; тогда вы видите, что в то время, как точка A движется почти прямо горизонтально, ближайший к ней гиростат движется тоже почти прямо, но уже в несколько иной плоскости, второй гиростат движется опять в другой плоскости и т. д.; каждый гиростат несколько поворачивает плоскость, в которой происходит колебательное движение, и вы видите, что гиростату, находящемуся в конце цепи, передаются из точки A вовсе не горизонтальные колебания; наоборот, он совершает почти вертикальные колебания. Это — впервые удавшаяся после многих попыток механическая демонстрация действия магнетизма на свет. Причина явления, которое происходит на этой модели, должна быть ясна всякому, кто старался следить за мною с начала доклада.

Как вы все можете теперь видеть, нам достаточно себе представить, что большое число частиц стекла вращается, подобно этим гиростатам, и что магнетизм сообщает группам этих частиц одинаковое направление осей вращения, чтобы получить динамическую теорию открытия Фарадея. Магнит точно так же вращает плоскость поляризации, как и сахарный раствор; но путем опыта установлено, что магнит производит такое действие независимо от направления, которое имеют лучи, вступая в прибор и выходя из него, между тем как действие сахара наводит на мысль о спиральной структуре его молекул. Как вы видите, в этом отношении, составляющем весьма важную особенность явления, действие нашего прибора, составленного из гиростатов, аналогично действию магнита, а не сахарного раствора. Поэтому вам ясно, что эта модель, являясь подобием опыта Фарадея, дает сильное подтверждение идее, согласно которой сущность магнетизма сводится к вращению.

Без сомнения, я уже перешел границы того времени, которое обыкновенно предназначается для популярной лекции; однако вы видите, что я далеко еще не исчерпал рассматриваемого нами предмета. Я не совсем уверен, что достиг цели, которую себе наметил. А именно: моя цель заключалась в том, чтобы исходя из различия между свойствами вращающегося и покоящегося волчка, показать вам, что внимательно

ное наблюдение этого совершенно обыденного явления с настойчивым желанием отчетливо его себе уяснить может привести к пониманию значительно более сложных вещей. Нет более важной истины, чем та, которая гласит, что в изучении обыденных явлений заложены семена всех великих открытий будущего. Три тысячи лет тому назад волчки уже представляли из себя нечто вполне обыкновенное, но никто их не изучал. Уже три тысячи лет тому назад люди кипятили воду и получали пар, и все-таки паровая машина была им неизвестна. Они имели уголь, селитру и серу, но ничего не знали о порохе. Они видели окаменелости в скалах, но чудеса геологии оставались неизученными. У них были куски листового железа и медной проволоки, но никому из них не приходил в голову ни один из пятидесяти известных теперь простых способов соединить эти вещи так, чтобы вышел телефон. Наконец, наши предки не знали даже простейшего рода сигнализации при помощи флагов и фонарей, между тем как знание такой сигнализации могло бы изменить судьбу мира в день одного из тех больших сражений, о которых мы теперь читаем. В наше время мы исследуем природу совершенно с другой точки зрения; обладая неимоверно бóльшим запасом знаний, мы испытываем по отношению к ней гораздо больше благоговения и гораздо меньше бессмысленного и суеверного страха. Но в том самом отношении, в каком мы находимся к тем, кто жил 3 000 лет тому назад, окажутся по отношению к нам люди, которые будут населять мир через 100 лет после нас. Это будет так, потому что ускорение в скорости научного прогресса в действительности само увеличивается. Армия научных работников увеличивается со дня на день, и я убежден, что в недалеком будущем каждая отдельная единица из населения будет научным работником. Таким образом мы постепенно достигнем господства над пространством и временем и сделаем их подвластными себе. Подумайте только о всей массе открытий ближайшего столетия; о вещах, которые нам известны, но которые нашим потомкам будут так хорошо известны, что они будут смеяться над нами, как над величайшими невеждами, считая эти вещи за нечто само собою понятное; я разумею при этом вещи, которые каждому из нас создали бы славу великого изобретателя, если бы он их открыл завтра. А через сто лет все эти вещи будут знать дети; они будут иметь с ними дело каждый день и каждый час и дома, и на улицах.

Подумайте только о следующем вопросе, который будут предлагать ученикам на экзамене в школе в 2090 г. после Р.Х.: «Что вы можете сказать о грубом невежестве наших предков, которые не могли видеть из Англии, что делали их друзья в Австралии?»*, или о таком вопросе: «Известия от наших друзей с планеты Марс получаются каждую минуту, и теперь им шлют ответ. Как вы объясняете себе, почему наши предки, до которых тоже достигали при случае эти известия, ничего не знали об этом?» А вот еще вопрос: «Какой металл во столько же раз тверже стали, во сколько раз сталь, в свою очередь, тверже свинца? Объясните также, почему это открытие было сделано не в Шеффильде?».

Однако есть еще один вопрос, которого наши потомки никогда не будут предлагать в шутливом тоне, так как к глубокому их огорчению ответ на него будет известен каждому мужчине, каждой женщине и каждому ребенку; вот этот вопрос: «Если бы наши предки в смысле недостатка бережливости по отношению к углю не были так неразумны, как ребенок, который считает пятак равноценным с рублем, то зачем они стали бы так мотать наш уголь? Зачем они стали бы разрушать то, чего никогда нельзя восстановить?».

Позвольте мне, друзья мои, в заключение моего доклада подчеркнуть высокое достоинство науки и указать вам на то, как важно воспользоваться каждому из вас сообразно с его деятельностью всякой возможностью увеличить свой запас научных знаний. Есть много блестящих вещей, которые успешно соперничают с наукой и которые производят более чарующее действие на сердца людей. Богатство, положение, изящество, роскошь, могущество и слава подстрекают честолюбие людей и создают себе тысячи ревностных поклонников; но поверьте мне, что все это ничтожно в сравнении с наукой и что они не могут доставить такого чистого удовлетворения, как наука. Под Солнцем нет ничего столь дурного, чего не могло бы очистить и победить знание, ру-

*Уже достоверно известно, каким образом можно видеть при помощи электричества; но ни один богатый человек не изъявляет, по-видимому, охоты пожертвовать двадцать тысяч рублей на устройство такого рода прибора. Если бы я сумел сберегать деньги и время, то я воспользовался бы ими для того, чтобы устроить такой прибор; т. е. это мне теперь так кажется. Но возможно, пожалуй, и то, что если бы я был в состоянии выбросить тридцать тысяч рублей, то я находил бы больше удовольствия в приращении своего богатства, чем в заботах о преуспевании естественных наук.

ководимое серьезной и твердой волей; и нет ни женщины, ни мужчины, родившихся на этой земле, которым не была бы уделена способность не только усваивать знания для своего собственного усовершенствования и для своего собственного удовольствия, но также и прибавить нечто новое, хотя бы и в самой малой степени, к общему запасу научных сведений, которые являются лучшим богатством мира.

Проф. Б. ДОНАТ

ВОЛЧОК

и его будущее в технике

Проблема волчка при настоящем состоянии математики, по-видимому, не может быть решена исчерпывающим образом. Установлены лишь главные моменты этого сложного явления, но и этого было достаточно, чтобы волчок, представлявшийся до того только забавной игрушкой, стал предметом всестороннего и серьезного исследования. Действительно, представители машинной техники убедились, что в волчке они проглядели принцип и конструктивный элемент огромного значения. Таким образом, теперь оживился интерес к волчку, выдвинувший его на передний план не только для специалиста, но и для всякого образованного человека; в однорельсовой железной дороге мы уже видим первые плоды новых успехов знания.

Явления вращения волчка вообще известны всем, но только относительно причин и следствий этого вращения еще очень многое остается тайной. Прежде всего в волчке поражает, можно сказать, капризный характер, или, лучше, удивительное своеобразие его движения. Замечательно уже то, что вращающемуся волчку, по-видимому, совершенно чуждо неустойчивое равновесие и, вопреки всякому нашему ожиданию, он балансирует на своем острие, как палка. Он находится в «неустойчивом» равновесии, которое практически не может долго сохраняться; он необходимо должен опрокинуться. Таким образом, в волчке, очевидно, только с вращением появляется жизнь и устойчивость, или, другими словами, только тогда выступают силы, противодействующие земному притяжению, которое стремится опрокинуть волчок. Откуда берутся эти силы и чем они объясняются?

Всякое объяснение, построенное элементарными средствами, в конце концов, неудовлетворительно. Если мы все-таки делаем попытку в этом направлении, то мы прекрасно знаем, что ею мы можем удовлетворить лишь первую потребность пути уяснения этого явления. Волчок представляет собою систему материальных точек, симметрически вращающихся вокруг оси; все эти материальные точки подчинены Ньютонову закону инерции, т. е. стремятся сохранить направление

своего пути. Очевидно, что этот путь (рис. 1, слева) под влиянием центробежной силы, действующей наружу, и сил упругости, действующих внутрь, должен в нашем случае быть горизонтальным и круговым. Когда волчок вращается влево, — если смотреть на него сверху, — то все материальные точки у A движутся по направлению к наблюдателю, у точки B — удаляются от него; у точки C — проходят мимо него слева направо и т. д. Рассмотрим сначала только места A и B и представим себе в то же время, что мы опрокидываем волчок назад. Тогда массы у точки A внезапно оказываются вынужденными двигаться наискось вверх, а у точки B — ниаскось вниз; но так как они по инерции стремятся оставаться на своем горизонтальном пути, то понятно, почему волчок сопротивляется всякой попытке опрокинуть его ось и противопоставляет последнему свою инерцию, которая — заметим мимоходом — растет пропорционально числу частиц массы (т. е. весу волчка) и квадрату числа оборотов, которое он делает в минуту. Беспрепятственно удаются только параллельные перемещения оси, которые можно получить, например, если тянуть в сторону волчок на листе бумаги. В этом смысле можно вообще говорить о *постоянном стремлении волчка сохранять направление своей оси в пространстве.*

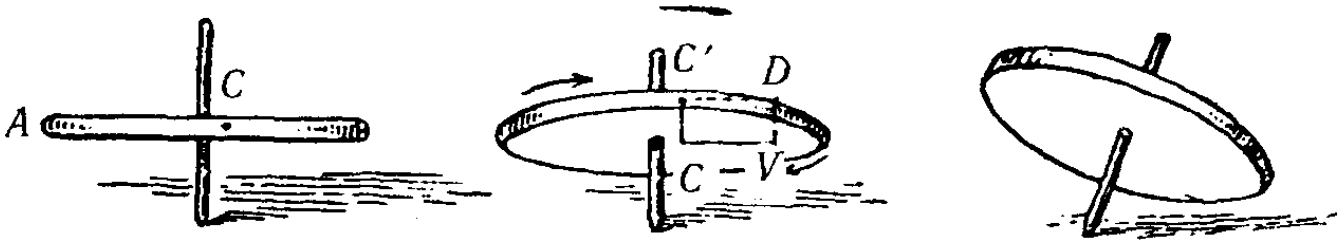


Рис. 1. К объяснению устойчивости и прецессии волчка.

Все сказанное до сих пор, пожалуй, известно. Но волчок совершает еще одно особенное, самостоятельное движение, которое, собственно, и придает интерес всей проблеме. Именно, когда волчок, сопротивляясь нашему воздействию, подается и наклоняется также в сторону, перпендикулярную к направлению толчка (в нашем случае вправо), так что в следующий момент он наклонен назад и в то же время вправо. Это уклонение волчка под прямым углом в плоскости, в которой его старались опрокинуть, называется его «прецессией». Она обязана своим происхождением тем частицам его массы, которые при толчке не толь-

ко получают изменение в направлении движения, но в то же время при этом поднимаются или опускаются, — например, материальным частицам, находящимся у точки C (рис. 1, средний чертеж). В то самое время, как такая частица стремится повернуться от C к V, она одновременно поднимается в положение C' и таким образом внезапно принуждена двигаться по диагонали CD. Но так как она стремится держаться старого направления CV, то она вместе с другими частицами наклоняет волчок вправо, как это указано стрелкой вверху у оси.

Если бы мы сами еще нажали волчок вправо, то последовала бы прецессия в плоскости, направленной к нам, т. е. тогда ось, как это легко себе уяснить, наклонилась бы верхушкой вперед (так как теперь точка A поднимается). Другими словами, *если в направлении, в котором произошла прецессия, стала действовать опрокидывающая сила, то последняя вызывает новую прецессию, направление которой противоположно той опрокидывающей силе, которая вызывает первую прецессию.* Мы видим, что дело усложняется. Но нам и незачем идти дальше: мы можем обещать читателю, спокойно уяснившему себе эти своеобразные отношения и, может быть, изучившему их практически на маленькой модели, что все дальнейшее будет ему понятно.

Имея игрушечный волчок, вращающийся в кольце*, можно легко убедиться в существовании прецессионного движения, если держать вращающийся волчок между пальцами в таком положении, как показано на рис. 2. Если тогда быстро повернуть кольцо вправо, — следовательно, и ось наклонить также вправо, — то ясно получается ощущение сопротивления и в то же время чувствуется, что волчок хочет выскользнуть из пальцев по направлению длинной стрелки. Само собою понятно, что направление прецессии зависит от характера вращения волчка и от направления, в котором наклоняют ось волчка.

Уже эти краткие замечания и соображения могут дать интересное освещение многим явлениям повседневной жизни. Всякое колесо, всякий обруч, ружейная пуля из нарезного ствола, вращающийся двойной конус игрушки диаболо, наш земной шар и т. д. — все это волчки, часто обладающие значительной быстротой вращения и массой. Во всех этих случаях сохранение направления оси до очевидности ясно. Обруч не падает до тех пор, пока он катится, так же, как и двухколесный велосипед

*См. статью *А. Васильева* «Некоторые свойства вращающегося твердого тела». «Вестник Опытн. Физ. и Элемент. Мат.», №519.

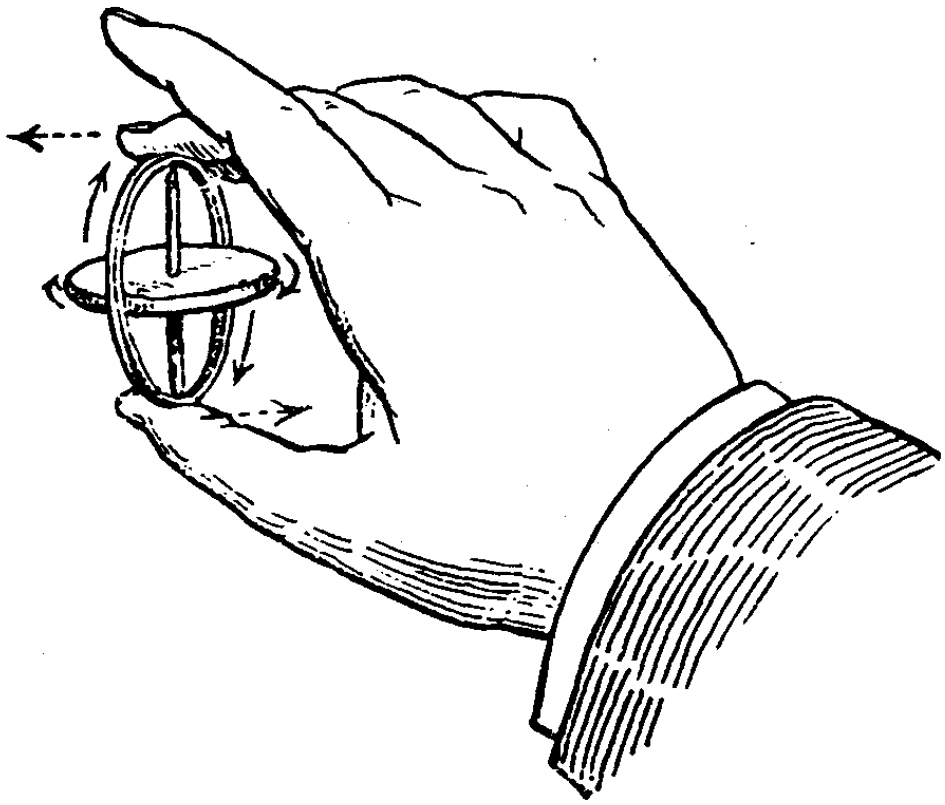


Рис. 2. Опыт прецессии с игрушечным волчком.

(оба с горизонтальными осями); точно так же и диаболо возвращается в то же положение, из которого его бросили. Прецессию же можно заметить здесь в некоторой степени только тогда, когда появляются осеопрокидывающие силы, — например, если обруч или велосипед попадает под действие боковых ударов ветра. Большею частью, однако, здесь размер прецессии незначителен. В противном случае железнодорожный поезд, — который вследствие своей прямолинейно мчащейся массы уже сам по себе обнаруживает стремление при поворотах соскочить с рельс, — вследствие прецессии своих наклоненных в сторону колес стремился бы также и опрокинуться. Но если масса велика или рассматриваемая система очень чувствительна, то и прецессия может стать заметной и часто может обнаружиться в очень неприятной форме. Приведем поразительный пример. Сидит на велосипеде новичок*. Хотя еще неуверенно управляемый рулем, велосипед послушно несется по прямому пути. Неожиданно слева впереди показывается препятствие, — скажем, куча камней. И вот ездок инстинктивно наклоняется

*См. статью *А. Васильева* «Об устойчивости велосипеда в движении». «Вестник Опытн. Физ. и Элемент. Мат.», № 531.

вправо. Но это ему нисколько не помогает. Как будто притянутый магнитом и «вопреки всякому здравому смыслу», велосипед катится прямо на это препятствие. Это классический пример действия прецессии. Произведенное отклонение горизонтальной передней оси вправо имело следствием поворот именно этой оси вперед и вследствие этого — поворот руля влево.

Лишь с недавнего времени волчок из рук физика перешел в руки техника. Последний, как уже сказано, с целью использовать известные вращения волчка, сделал из него машину или, по крайней мере, часть машины. Все теперь предстало в увеличенном размере. Вращающийся кружок стал громадным, весит несколько центнеров; оси вращаются уже не на остриях, а в хорошо смазанных шариковых подшипниках; приводится теперь в движение волчок уже не разматыванием шнурка, а паром или сильным электромотором, которые сообщили ему непрерывное бешеное вращение. Что устроенный таким образом волчок должен получить огромную способность сопротивления по отношению к внешним силам, ясно без дальнейших рассуждений. Но какое употребление делает из него техника?

Первым техником, заинтересовавшимся волчком или, правильнее, попытавшимся воспользоваться им на пользу страждущему человечеству, был корабельный инженер Консуль Шлик (Schlik), который пытался бороться с муками морской болезни с помощью интересного физического принципа. Как известно, под действием ветра и морского волнения судно совершает колебания двоякого рода. Во-первых, оно имеет боковую качку, т. е. колеблется в боковом направлении с правого борта на левый и обратно; во-вторых, оно имеет килевую качку, т. е. колеблется в продольном направлении сзади наперед и обратно. Из этих двух слагающих составляется иногда то печальной известности сложное движение, против которого недолго могут устоять самые неподатливые против морской болезни желудки.

И вот напрашивается мысль прочно установить на судне волчок, который несомненно обеспечил бы судну значительную устойчивость против морских волн. Такая мысль напрашивается, но, к сожалению, в этой форме она неосуществима. Подобный волчок был бы настоящим бедствием для судна. Допустим, что ось волчка стояла бы вертикально. Тогда мы имели бы сопротивление, например, против боковой качки, но в то же время, смотря по направлению вращения волчка, произо-

шла бы прецессия вперед или назад, и таким образом волчок погрузил бы в воду нос или корму. При килевой качке дело шло бы в обратном порядке. Парализуя это движение, волчок в то же время опрокидывает судно, нанося ему боковой удар в правый или левый борт. Следовательно, этим способом ничего не выигрывается. Судовой волчок, имеющий в своем вращении одну степень свободы (под каковым разумеется вращение его вокруг своей оси), невозможен.

Поэтому Шлик устроил две степени свободы: кроме вращения вокруг своей оси, его волчок допускает еще одно движение, перпендикулярное к нему. Отношения обеих осей между собой, равно как и их положение на судне, может пояснить рисунок 3, конечно, исполненный совершенно схематически. Представим себе, что волчок заключен в раму, а концы горизонтальной оси этой рамы в борты, в которых они легко вращаются. Очевидно, что вся килевая качка нисколько не влияет на волчок, но при бортовой качке он увлекается судном и вместе с ним опрокидывается на бок. Ясно, что произойдет теперь, если волчок пущен в ход. Допустим, что катится волна со стороны правого борта; тогда она будет стремится опрокинуть судно вместе с волчком на левый борт. Естественно, что этому опрокидыванию волчок окажет сопротивление, и в то же время у него произойдет прецессия по направлению вперед; волчок может произвести эту прецессию беспрепятственно, не увлекая за собой судна в этом направлении. Если волна прикатила с левого борта, то и здесь момент опрокидывания был бы значительно ослаблен; в то же время должна была бы произойти прецессия по направлению назад.

Мы видим таким образом, что волчок предохраняет судно только от чрезмерной боковой качки. Если желательно уменьшить килевую качку, то следует установить второй волчок или, лучше, два волчка с осью в продольном направлении, способных свободно двигаться в поперечном направлении. Во всяком случае, волчки должны быть снабжены системой буферов и тормозов, которые восприняли бы излишнюю прецессию и плавно свели бы ее к нулю. Эти тормоза, действительно, имеют огромное значение для судового волчка Шлика и представляют важную составную часть всей конструкции. Если бы существовало полное соответствие всех факторов, т. е. одинаковое число колебаний морских волн, суда и рам волчков (рассматриваемых в качестве маятника), то можно было бы обойтись без тормоза. Таким образом, часть

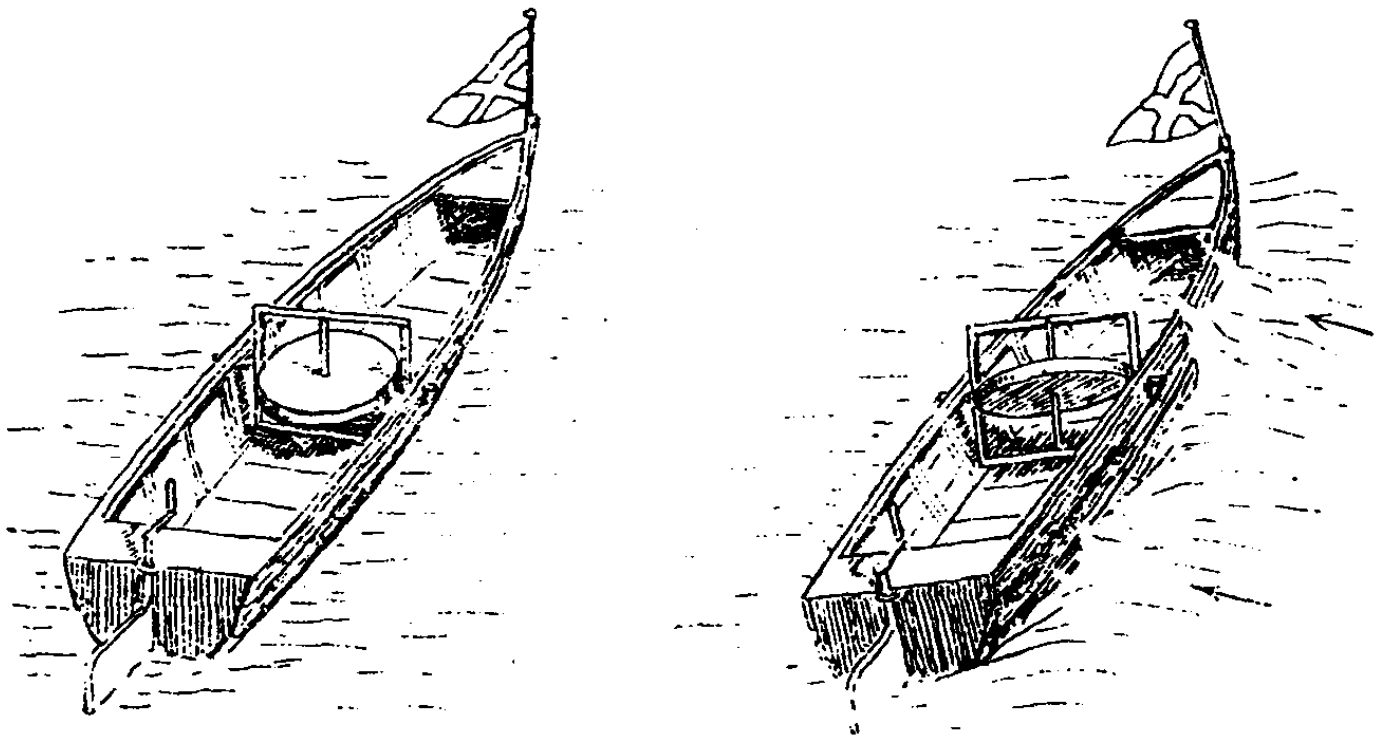


Рис. 3. Схематическое изображение судового волчка Шлика.

энергии прецессии должна постоянно уничтожаться, — конечно, не вся, так как тогда наступил бы описанный выше случай волчка, установленного неподвижно по всем направлениям. Мы не можем здесь войти в детали этой довольно сложной теории.

Подобные судовые волчки не раз вводились в употребление с техническим успехом, например, на «Сильване», пароходе, обслуживающем курорты Северного моря. Волчок на «Сильване» находится приблизительно посредине корпуса, приводится в движение паром, при диаметре в 1,6 м, делает до 2 000 оборотов в минуту и весит 6 000 кг. Отсюда можно составить себе представление об инерции его массы. Экономической стороны вопроса мы здесь не станем касаться; во всяком случае, техникам придется в каждом отдельном случае решать, до каких пределов могут идти размеры этого сооружения. Не последнее место должно занять соображение, что крепость конструкции судна, снабженного волчком, — которое не приноравливается к движению морских волн, а представляет собою как бы мол в морском прибое, — должна быть очень значительной вследствие напора водяных масс. Как здесь установить наиболее благоприятные условия действия волчка, решить нелегко.

Гораздо острее еще стоит вопрос об устойчивости для летательных аппаратов. Все до сих пор введенные в конструкцию их детали, как известно, не привели к автоматической устойчивости против опрокидывающих моментов. Естественно, что подумывали также о волчке: но присоединить к летательному аппарату тяжелый волчок — это значит идти на дальнейшее увеличение несоответствия между требуемой силой и полезной нагрузкой, уже без того достаточно вредного; на это конечно, трудно решиться. Следовательно, пока еще речь идет о теоретической проблеме. Во всяком случае, правильнее было бы прежде всего изучить влияние того волчка, который несет с собой всякий летательный аппарат в своем пропеллере и моторе, — тем более, что последним служит так называемый мотор с вращательным движением, в котором цилиндры звездчатой формы вращаются вокруг оси. Вообще, следует признать, что подобные машины, при внезапных изменениях курса в сторону или в высоту, должны оказать влияние на положение летательного аппарата.

Все эти практические применения волчка имели до сих пор интерес скорее для специалиста, чем для профана. Действительно популярным техническое применение волчка стало, несомненно, только благодаря однорельсовому вагону.

Всем еще памятно то впечатление, которое произвел около года тому назад Бреннан–Шерловский однорельсовый вагон, когда он в первый раз появился перед публикой на выставке в Берлинском зоологическом саду. Зрелище, действительно, было совершенно необычное и странное. Маленькая, открытая вагонетка на несколько мест (рис. 4) катилась на двух колесах, помещенных одно за другим, только по *одному* рельсу и с прямо поразительной устойчивостью. Она изменяла скорость движения, легко скользила по самым крутым закруглениям и даже *делала остановки*, чтобы выпустить пассажиров. И при этом она не опрокидывалась.

Для того чтобы понять принцип устройства этого замечательного однорельсового вагона, обратимся прежде всего к обыкновенному железнодорожному вагону, который твердо стоит на своих двух колесах. Если его несколько наклонить на бок, то сила притяжения Земли, имеющая приложение в его центре тяжести, снова ставит его прямо. Следовательно, его устойчивость на рельсах обеспечивается «внешними силами». У однорельсового вагона условия, очевидно, совершенно

иные. Он находится в неустойчивом равновесии, и сила тяжести стремится не поставить его прямо, а опрокинуть его. Чтобы удержать его в стоячем положении, необходимы, следовательно, «внутренние силы», и волчок дает возможность получить такие силы, хотя вопрос здесь по существу иной, чем в судовом волчке Шлика. Волчок Шлика, устроенный точно таким же образом, как на судне, дал бы следующие результаты. Когда вагон наклоняется, волчок, во всяком случае, окажет этому известное сопротивление; но в то же время его ось, вследствие прецессии, перейдет из вертикального положения также в наклонное, только по направлению вперед*. И вот вагон уже стоит немного наклонно, так как он не может, подобно судну, выпрямиться сам по себе; а все сильнее действующая сила тяжести клонит его больше набок. Этому снова сопротивляется волчок, но в то же время и его ось, вследствие прецессии, все больше переходит в горизонтальное положение. А как только это произойдет, вагон окончательно погиб потому, что ось волчка вообще уже больше не опрокидывается, а только передвигается параллельно самой себе, и он больше не оказывает уже никакого сопротивления; дело обстоит так, как будто волчка вовсе не существует. Таким образом, волчок, устроенный по способу Шлика, мог бы, правда, вначале несколько оттянуть падение вагона, но не мог бы его вовсе предотвратить.

В чем же заключается тайна устройства однорельсового вагона, которому дает устойчивость именно волчок? Если читатель заглянет в одну из предыдущих страниц, он найдет там следующее установленное нами положение: принудительное опрокидывание оси волчка в направлении наступающей прецессии вызывает действие силы, которая *противоположна* силе, вызывающей прецессию. Если мы, таким образом, к прецессии, претерпеваемой волчком при опрокидывании вагона, присоединим в том же направлении насильно *еще дальнейшую прецессию*, то вагон *снова выпрямляется*. Таково разрешение загадки. «Эта добавочная прецессия» является, конечно, технически трудно разрешимой задачей; но затруднения, по-видимому, уже преодолены. В пробном вагоне Шерловских инженеров установлены приблизительно на уровне пола два волчка с вертикальной осью, вращающиеся в противоположных направлениях. Вагон приводится в движение обычным образом, подобно электрическому трамваю, электродвигателями, так же, как и

*Или назад, смотря по вращению волчка.

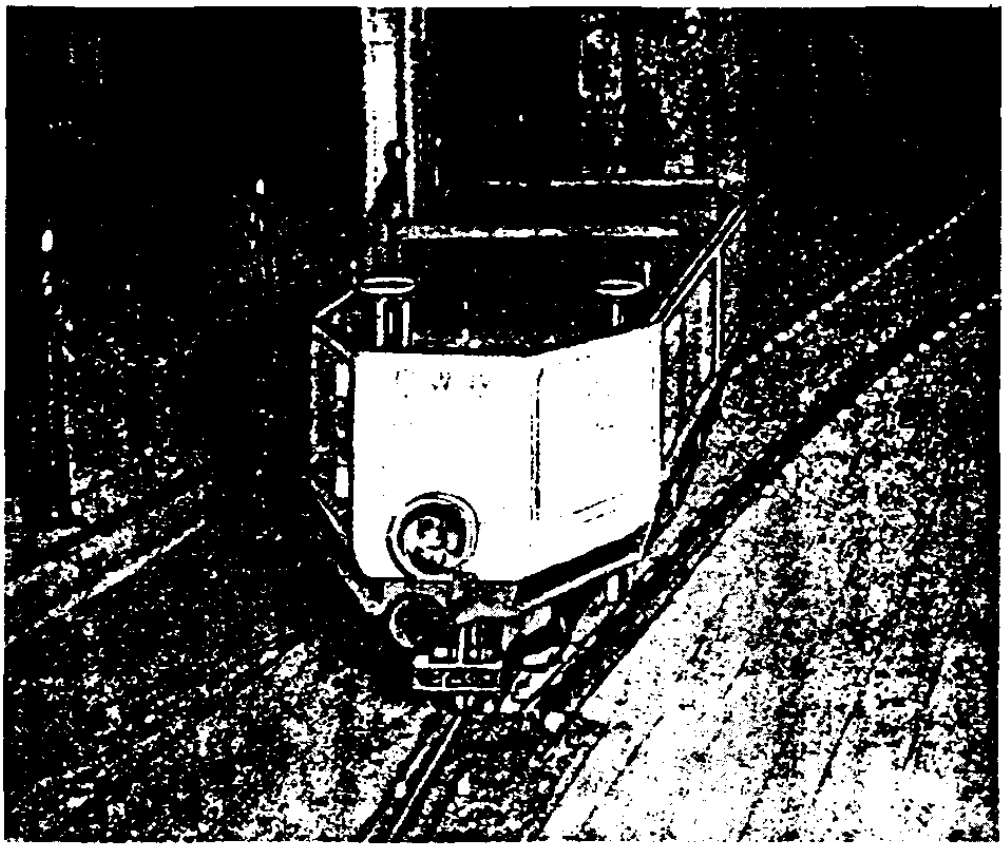


Рис. 4. Однорельсовый вагон.

волчки; число оборотов последних доходит до 8 000 в минуту, а вес — до 57 кг. Когда вагон накреняется и волчки претерпевают прецессию, то немедленно вступает в действие очень чувствительный механизм добавочной прецессии, который усиливает прецессию и выпрямляет вагон; последний тогда по инерции накреняется немного в другую сторону. Там повторяется та же история, и таким образом однорельсовый вагон, строго говоря, постоянно колеблется по обе стороны своего вертикального положения, но, конечно, так слабо, что это едва заметно.

Если центр тяжести вагона передвигается, например, оттого, что пассажиры входят сбоку, то, благодаря этому новому опрокидывающему моменту, усиливается как прецессия, так и добавочная прецессия, и вагон наклоняется в *другую* сторону, пока центр тяжести снова не будет подпираться рельсом. Это, во всяком случае, кажется довольно странным. Надо представить себе катящийся только по одному рельсу вагон, который вследствие нагрузки на правой стороне накреняется на левую сторону. Это зрелище совершенно необычно и настолько противоречит всякому опыту, что поразительный эффект его на наивного зрителя приходится назвать прямо колоссальным.

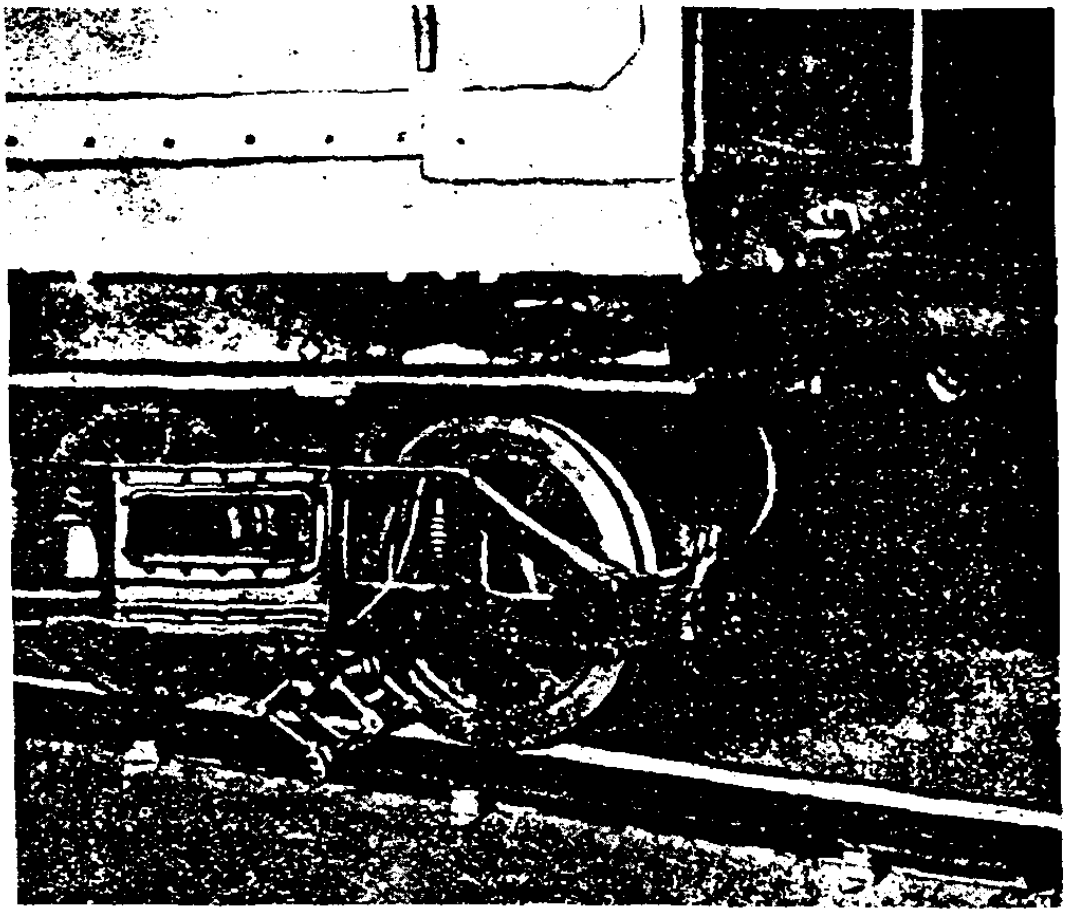


Рис. 5. Передняя пара колес и приемник тока в однорельсовом вагоне.

На закруглениях центробежная сила, действующая наружу, заменяет собой одностороннюю нагрузку. Поэтому вагон наклоняется в противоположную сторону, т. е. вовнутрь, и, следовательно, на закруглениях *автоматически* становится так, что равнодействующая из силы тяжести и центробежной силы всегда проходит через центр тяжести вагона и головку рельса. Таким образом, если предположить технически совершенное устройство, то пассажир не мог бы даже заметить, что он въехал на закругление, и что вагон наклоняется; он мог бы продолжать на этом закруглении партию на бильярде, начатую им еще на прямом пути. Во всяком случае, в физическом смысле однорельсовый вагон представляет собою самый безопасный экипаж, — безразлично, стоит ли он на месте или находится в ходу, идет ли он по крутому закруглению или, как канатный плясун, скользит по крепкому проволочному канату над глубочайшей пропастью. И даже движущий механизм волчков может приостановиться, так как волчки и после того вращаются еще около часа. Только механизм для добавочной прецессии *не должен* отказываться служить, потому что тогда, несмотря на

все подпорки, которые можно опустить с помощью ручного привода, вагон перевернулся бы.

Трудно представить себе картину будущего, которое предстоит однорельсовому вагону. Там, где земля для широкой полосы слишком дорога, или где недостаток рабочих рук или неровная поверхность сами по себе препятствуют положению дорогого стоящей двухрельсовой железной дороги, как, например, в колониальных странах, — там уже теперь однорельсовая дорога может найти полезное применение. Но может ли она когда-нибудь дать возможность осуществить мечту об ускорении сообщения во всем мире (при этом мечтают о скорости, по крайней мере, в 200 км в час, — следовательно, для расстояния Берлин-Гамбург — о времени, немногим больше одного часа) — это вопрос: с этим еще придется немало подождать. Препятствия здесь прежде всего далеко не столько технические, сколько экономические.

Наконец, пришли к мысли сделать волчок компасом и этим выдвинули в высшей степени интересную проблему. Здесь собственно идет дело о двойной проблеме: *о движении одного волчка на другом*, — в том смысле, что один движется по другому, как карусель. На это не следует смотреть как на хитроумную выдумку, годную просто лишь для математического упражнения. Ведь наш земной шар сам представляет собой волчок, и, следовательно, мы, строго говоря, не в состоянии проделать опыта с волчком без того, чтобы этот опыт фактически не происходил на другом волчке.

Если бы при этом обнаружилась взаимная зависимость обоих движений, то волчок проявил бы известное отношение к космическим величинам. Так оно и есть в действительности, когда волчок подвешен в кардановом подвесе и точка привеса совпадает с центром тяжести всей системы. Подобного рода волчок с тремя степенями свободы, сохраняя неизменным направление своей оси, постоянно будет направлен в ту сторону мирового пространства, в которую он был установлен вначале; таким образом, следуя, например, за восходящим светилом, волчок в течение 24 часов принимал бы самые различные положения относительно земной поверхности. Уже Фуко был такого мнения, что с помощью волчка мы должны быть в состоянии продемонстрировать вращение Земли в короткое время, — так сказать, на лабораторном столе. К сожалению, для выполнения такого опыта ему недоставало всех утонченных технических приспособлений.

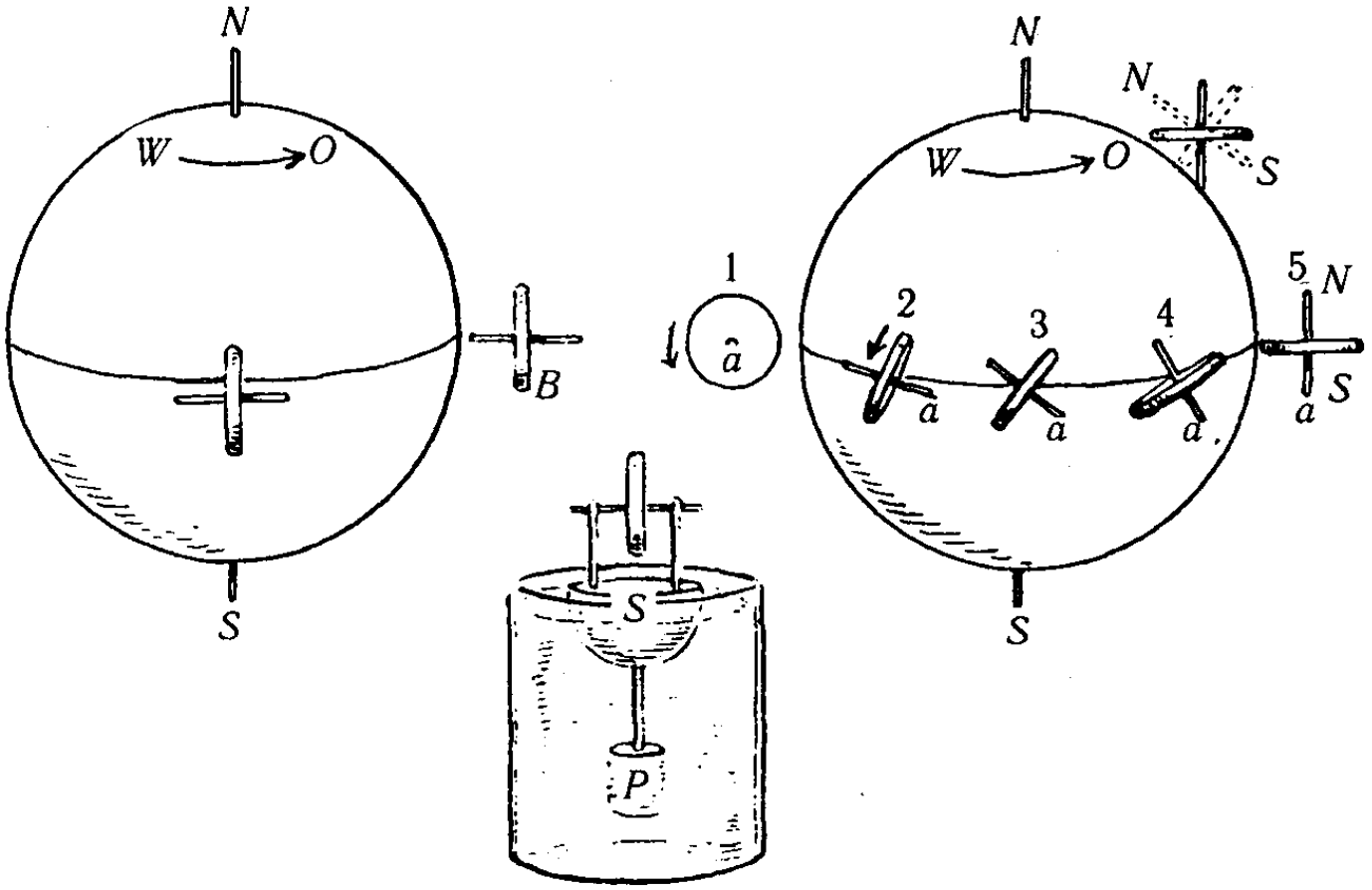


Рис. 6. Схематический набросок для объяснения компаса-волчка.

Напрашивается мысль воспользоваться волчком, уравновешенным подобным образом, для ориентирования на Земле. В самом деле, будь такой постоянно вращающийся волчок направлен на Полярную звезду, он стоял бы вертикально на земном полюсе и лежал бы горизонтально на экваторе, или, другими словами, на каждом месте земной поверхности он указывал бы не только направление меридиана, но и широту места, благодаря наклонению своей оси к горизонту, — само собой разумеется, независимо от всей магнитных влияний.

Магнитным компасом уже давно недовольны. Он показывает неточно, и неточность его меняется с каждым местом, с каждым годом: он отклоняется местными магнитными массами часто совершенно бесконтрольным образом, будь то на дне моря, на берегу или даже на самом судне; его показания на подводной лодке, заключенной со всех сторон в железную броню, становятся уже совершенно ненадежными. К сожалению, только что описанный волчок мало может помочь делу, так как до сих пор не удавалось его так подвесить, чтобы точка

привеса совпадала с центром тяжести. А всякое самое незначительное несовпадение было бы гибельно для слабых направляющих сил. Точно с того момента, когда — именно благодаря трудам д-ра Аншютца (Anschütz) — устроена была подвеска с *двумя степенями свободы*, мы имеем действительно практический компас-волчок.

В этом случае волчок так установлен, что его ось, вследствие притяжения Земли, удерживается постоянно в горизонтальном положении; в то же время он может при этом вращаться вокруг своей собственной оси и, помимо того, благодаря способу подвески, еще вокруг вертикальной оси. Это устройство следует себе представить приблизительно так. Приводимый в постоянное движение электрическими силами волчок (рис. 6, середина) укреплен горизонтальными осевыми подшипниками на полом теле S, которое плавает в сосуде, наполненном водой. Тяжелый привес P переносит центр тяжести всей системы глубоко вниз, чтобы обеспечить этому маленькому судну вертикальное положение. Если представить себе, что весь этот прибор помещен на экваторе и вместе с вращающейся земной поверхностью движется с запада на восток, то ось волчка, если она также лежит в направлении с запада на восток, будет, по-видимому, стремиться подыматься и через 6 часов должна перейти из положения A в положение B (рис. 6, левая сторона). Но плавательный аппарат и подвешенная к нему тяжесть P препятствуют этому и заставляют ось волчка оставаться постоянно в горизонтальном, т. е. параллельном земной поверхности, положении; другими словами, ось волчка, вследствие вращения Земли будет постоянно опрокидываться по направлению опять-таки с запада на восток. В результате этого опрокидывания должна, как нам известно, произойти прецессия перпендикулярно к направлению опрокидывания (рис. 6, правая сторона), т. е. ось волчка (вместе со всем прибором, на котором она плавает) должна будет постепенно поворачиваться в направлении север-юг (ср. положения $2, 3, 4, 5$). Как только это последнее направление достигнуто, дальнейшее колебание оси прекращается, так как теперь ось волчка уже больше не опрокидывается, а только передвигается параллельно самой себе. Из всякого другого положения плавающий волчок тотчас вернулся бы в направление с севера на юг; он приобретает два полюса, точно так же, как их имеет магнитная стрелка, но преимущество его перед последней заключается в том, что он показывает правильное астрономическое направление.

Бесшумно, без сотрясения несется наш земной шар уже миллионы лет по своей орбите вокруг Солнца и вращается вокруг своей оси. Спокойствие и однообразие этого величественного движения так велико, что еще ни один человек сам не ощутил этого движения на Земле. Но искусно подвешенный волчок *чувствует, что Земля вращается*; скованный с нею цепями силы тяготения, он поворачивается до тех пор, пока его *ось не примет одного и того же направления с земной осью* или же, по крайней мере, пока не попадет в *одну и ту же плоскость ориентирования в мировом пространстве.*

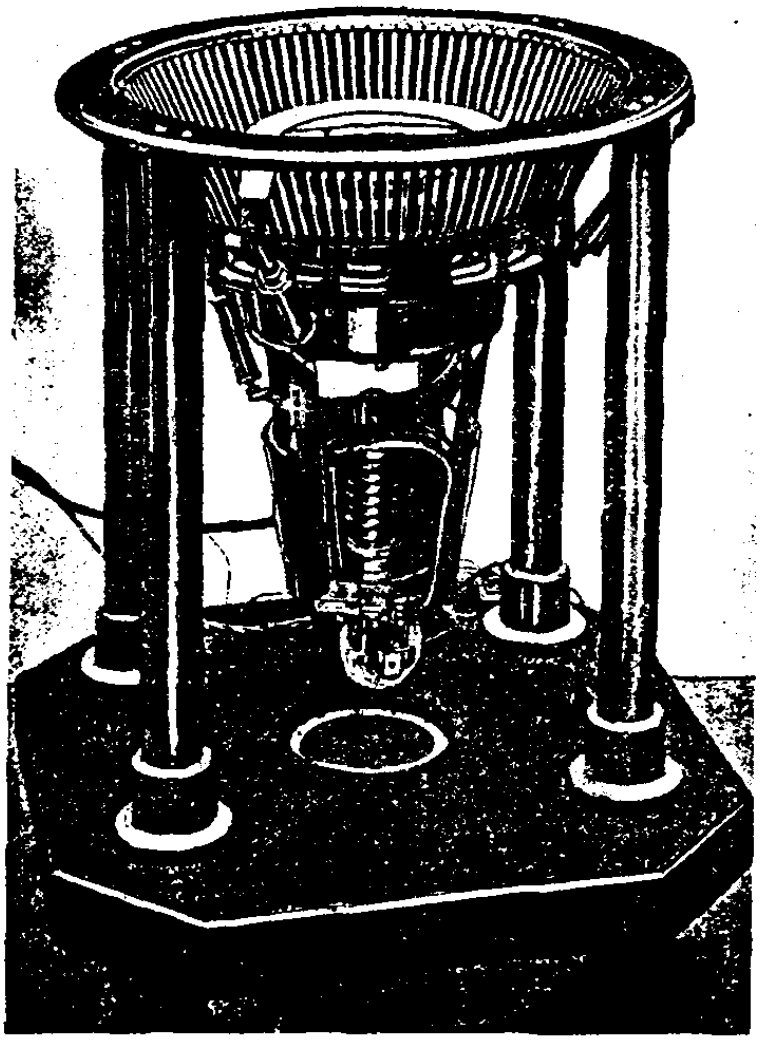


Рис. 7. Компас-волчок с электрической передачей.

Таков в общем принцип компаса-волчка. Да простят мне все те, кто, отдавшись на долгие годы тяжелой теоретической и практической работе, трудились над одной из самых сложных проблем, если я, ис-

ключительно с целью заинтересовать этим вопросом широкую публику, взялся за такое сравнительно поверхностное изложение. Профан, действительно, едва ли может представить себе, какое огромное количество чисто математической работы положено на компас-волчок, не говоря уже о представившихся технических затруднениях. Нужны были многие годы самоотверженного труда, пока удалось довести механический компас до практического применения.

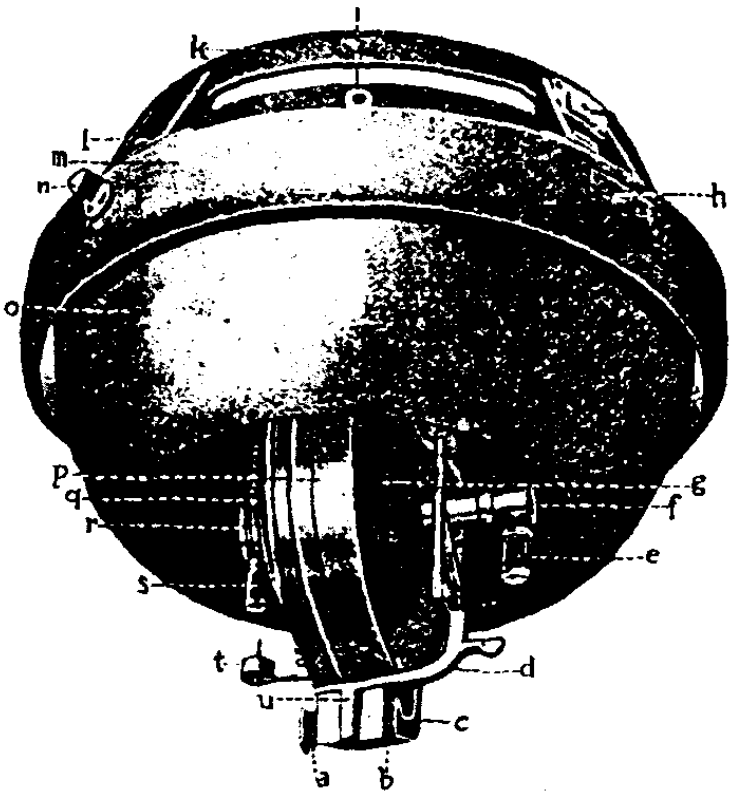


Рис. 8. Вид компаса-волчка сбоку и снизу с кожухом волчка.

Прежде всего компас-волчок имеет, конечно, другой вид, чем мы его до сих пор представляли. Его внешний вид неподготовленного зрителя приводит прямо в смущение. Рисунок 7, которым, как и следующими, мы обязаны фирме «Д-р Аншютц и К°» в Неймилен-Дитрихсдорфе возле Киля (D-r Anschütz &C° in Neumüler-Dietrichsdorf bei Kiel), преимущественно занимающейся изготовлением эти приборов, — представляет компас-волчок, именно так называемый Mutterkompass — главный компас. В кольце, поддерживаемом столбами, на венке из спиральных пружин, которые должны воспринимать толчки судового корпуса, висит собственно компасный аппарат. Он состоит из котла, наполненного ртутью, в котором находится устроенный также в форме котла попла-

вок. На последнем висит снизу волчок, играющий также роль грузила. Поплавок, который, конечно, от действия волчка вместе с ним меняет направление, снабжен вверху компасной катушкой (розой ветров), положение которой может быть обычным способом определено относительно какой-нибудь неподвижной черты. Рисунок 8 представляет еще раз отдельно компасный котел с подвешенным к нему кожухом волчка. Сам волчок представляет собой чудо технического искусства. Так как он при сравнительно небольшой массе должен делать около 300 или даже еще больше оборотов в *секунду* для того, чтобы доставить необходимую направляющую силу, то можно себе представить, какая здесь требуется абсолютная симметрия массы и прочность конструкции. Был уже случай, что, несмотря на все предосторожности, развивающиеся здесь чрезмерные центробежные силы разорвали волчок прямо на куски. А что должны выдержать подшипники! Будем считать только 20 000 оборотов в минуту. Это составит в час уже 1 200 000, а в 24 ч. — 28 800 000 оборотов или за время пути от Бремена до Нью-Йорка — около 172 800 000 оборотов. Мы должны проникнуться прямо благоговением перед техническим искусством, узнавши, что оси и подшипники даже после действия в течение месяцев не обнаруживают заметного изнашивания.

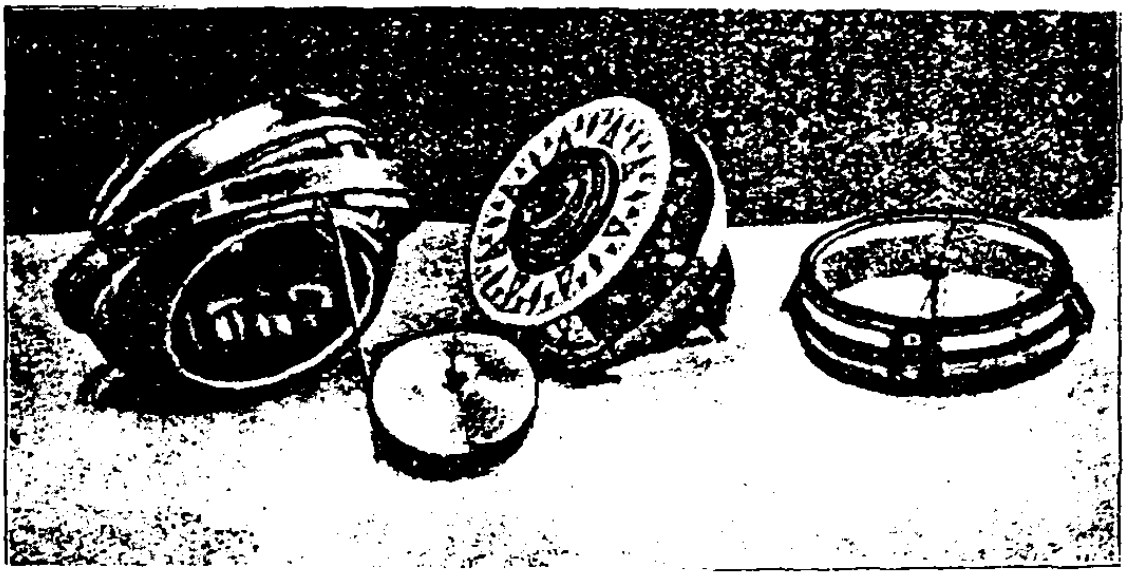


Рис. 9. Подвес, волчок и циферблат с розой ветров компаса-волчка.

В большинстве случаев можно будет по-прежнему пользоваться магнитным компасом, а механический компас пускать в ход для контроля во всех таких случаях, в которых показания магнитной стрелки

сомнительны. Впрочем, волчок не моментально дает правильное показание; он должен еще только быть направлен вращением Земли, для чего вначале требуется около 2–3-часового действия волчка. Этот промежуток можно сократить, если прямо привести компас приблизительно в надлежащее положение. Географическая широта также будет иметь свое влияние, так как направляющая сила, естественно, совершенно отсутствует на полюсе и наибольшую величину имеет на экваторе. Даже скорость движения самого судна, хотя она, в сравнении со скоростью движения какой-нибудь точки земной поверхности в низших широтах, всегда очень незначительна, все же при известных обстоятельствах может оказывать заметное влияние. Если судно движется по меридиану на север (ср. рис. 6, справа), то происходит также непрерывное опрокидывание оси (место, отмеченное черточками), а вместе с тем, вследствие прецессии, постоянное отталкивание компасной розы на восток или запад, смотря по направлению движения.

Все эти явления в совокупности должны, конечно, приниматься во внимание, что легко осуществимо, благодаря уже заранее составленным таблицам.

Двигателем вращающегося в своем кожухе волчка является электричество в виде трехфазного тока. Вращающийся диск волчка сам образует якорь трехфазного поля.

Остроумное электрическое приспособление, составляющее одно из главных преимуществ компаса-волчка, дает возможность показания главного компаса переносить на произвольное число побочных циферблатов с нанесенной на каждом розой ветров. Как выполняется эта передача и какие технические затруднения удалось при этом счастливо преодолеть, мы здесь, к сожалению, изложить не можем. И вот, главный компас будет установлен там, где его лучше всего можно будет обезопасить от колебаний в температуре, влияний погоды, толчков и качаний судна, — например, посредине судна под палубой; побочные циферблаты помещаются в соответственных местах, — например, в рулевой будке, у румпеля на корме и в капитанской каюте. Они, впрочем, не требуют горизонтального положения, а допускают всякое, в котором легко наблюдать их показания.

Много компасов-волчков уже изготовлено и, как слышно, успешно. Дешевым такой аппарат, конечно, не может быть, но этого и не нужно. Что, в самом деле, составляет какая-нибудь пара тысяч марок там, где

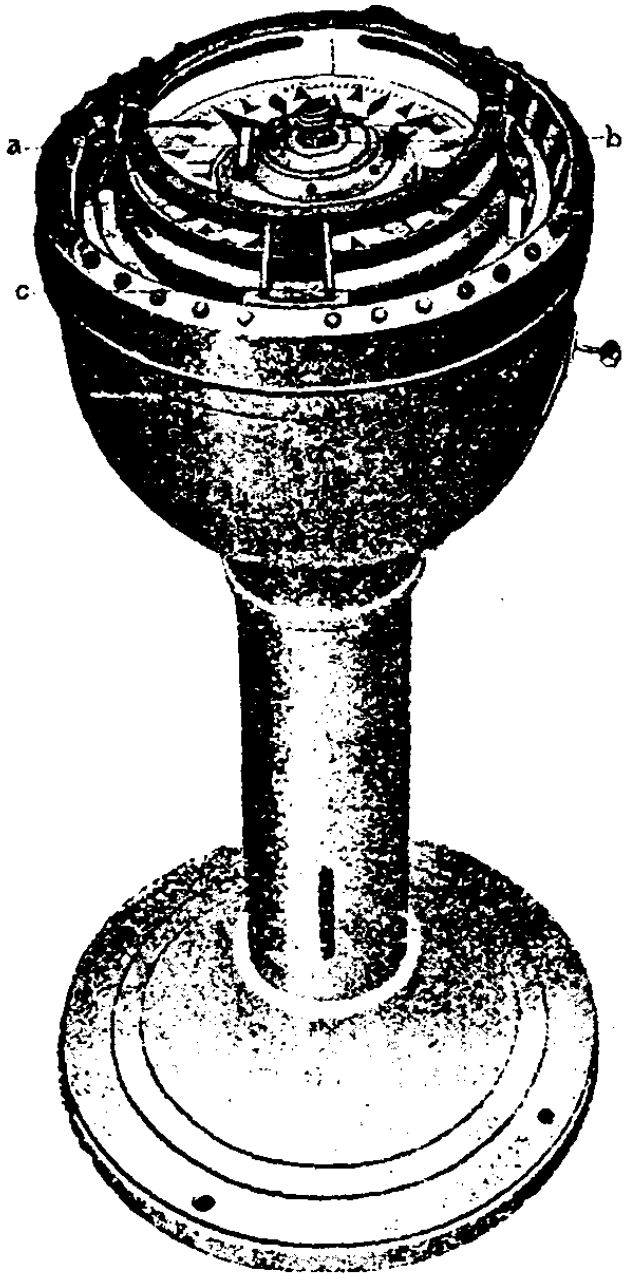


Рис. 10. Колонна с рулевым компасом (компасом-волчком).

доверяются безопасному плаванию сотни тысяч людей и ценности на бесчисленные миллионы?

Из этих немногих примеров читатель увидит, до каких технических размеров развился принцип, так мало обещавший вначале. И, может быть, найдется целый ряд таких известных, но неоцененных принципов, ожидающих своей очереди быть извлеченными из тьмы на свет дневной. Кто может сегодня сказать, с какими поразительными сюрпризами нам еще придется иметь дело?

Замечательным и многообещающим является прежде всего отношение между движением волчка и вращением Земли, которое проявв-

ляется в стремлении к параллельности осей. Во всякой вещи, вращающейся на Земле, во всякой катящейся оси, и даже — если нам будет позволено употребить этот гиперболический оборот — во всякой танцующей паре кроется эта тоска по Полярной звезде. Хорошо только, что направляющие силы так незаметно малы, и что, очевидно, здесь речь идет лишь о «скрытой» тоске.

Джон Перри

Вращающийся волчок

Дизайнер М. В. Ботя
Технический редактор А. В. Широбоков
Корректор З. Ю. Соболева

Подписано в печать 02.08.01. Формат 60 × $84^1/_{16}$.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,51. Уч. изд. л. 6,63.
Гарнитура Computer Modern Roman. Бумага газетная.
Тираж 1000 экз. Заказ № 362 т.

Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика»
426057, г. Ижевск, ул. Пастухова, 13.
Лицензия на издательскую деятельность ЛУ №084 от 03.04.00.
http://rcd.ru E-mail: borisov@uni.udm.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленных диапозитивов в ФГУП «Полиграф-ресурсы».
101429, г. Москва, ул. Петровка, 26.