

## ГРАВИТАЦИЯ

---

Был этот мир глубокой тьмой окутан,  
Да будет свет! И вот явился Ньютон.

Но сатана недолго ждал реванша,  
Пришел Эйнштейн — и стало все, как раньше,  
А. Поп, А. Эддингтон. (Переводы С. Маршака)

### Гравитационное поле. Факты

До сих пор мы не касались всемирного тяготения или, как принято говорить, *гравитации* \*). Тем самым был грубо (но сознательно) нарушен принцип исторически последовательного изложения.

Закон всемирного тяготения был четко сформулирован Ньютоном

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r_{12}^2}.$$

Здесь  $F$  — сила, с которой действует на первое тело с массой  $m_1$  второе тело с массой  $m_2$ , находящееся на расстоянии  $r_{12}$  от первого тела. Далее,  $G$  есть так называемая *гравитационная постоянная*. Ее размерность есть  $l^3/mt^2$  ( $l$  — длина,  $m$  — масса,  $t$  — время). В единицах системы СГС  $G = 6,7 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$ , в единицах СИ  $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ .

Закон тяготения, по-видимому, был известен и до Ньютона. Пропорциональность силы величине  $m_1$  естественно следует из мысленного опыта с разбиванием первого тела на много ( $n$ ) кусков с массой  $m_1/n$ ; сила, действующая на все первое тело, равна сумме сил, действующих на его части. Аналогично получается и пропорциональность силы и массы  $m_2$ . Зависимость от расстояния считалась естественной — данная сила действует одинаково на единицу массы «любого» тела, находящегося на данном расстоянии, т. е. на поверхности шара радиуса  $r_{12}$  с центром во втором теле.

---

\*) От латинского слова *gravitatio*. Во французском и в английском языках значение корня слова раздваивается. С одной стороны, *gravitation* — тяготение, а другой стороны, *grave* — серьезный, важный.

Вполне естественно в таком случае, что величина силы обратно пропорциональна площади поверхности. Бесспорен приоритет Ньютона применительно к *следствиям* из закона тяготения. Ньютон рассчитал орбиты планет, на которые действует сила тяготения Солнца. Он показал, что законы Кеплера (и, в частности, движение планеты по эллипсу, в одном фокусе которого находится Солнце), являются следствием написанного выше закона тяготения. Сопоставление движения планет, находящихся на различном расстоянии от Солнца, с огромной точностью подтвердило зависимость силы тяготения от расстояния (множитель  $1/r^2$  в формуле).

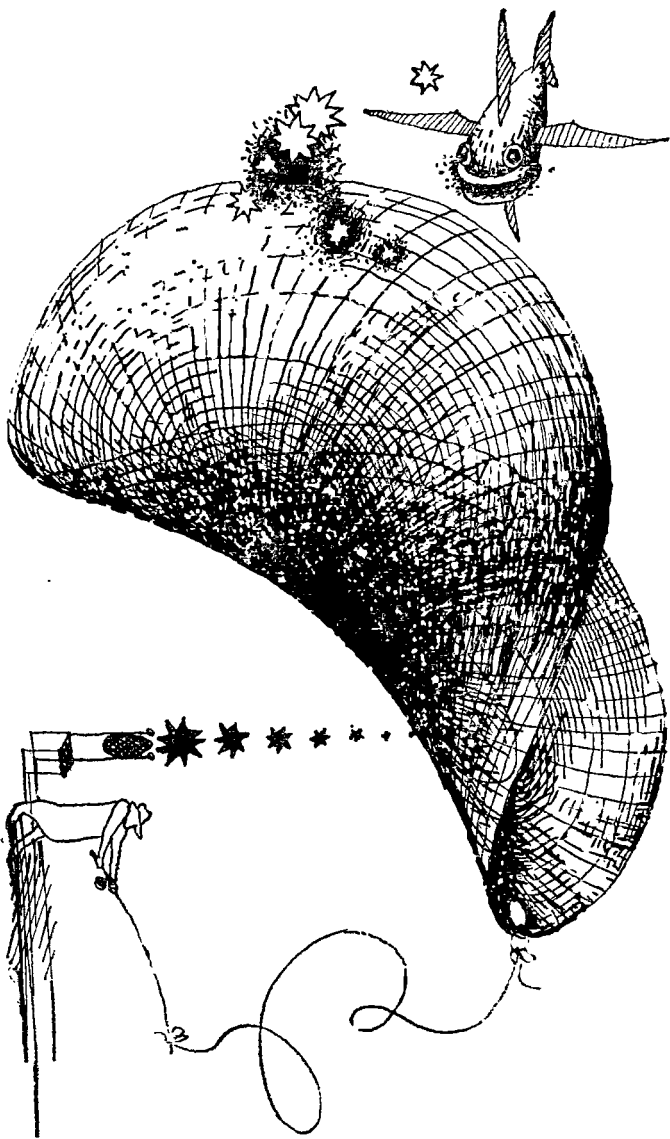
Однако в вычислениях входит только произведение  $GM_{\odot}$ , где  $M_{\odot}$  — масса Солнца. Движение Луны вокруг Земли зависит от  $GM$ , где  $M$  — масса Земли. Определить каждую из трех величин,  $G$ ,  $M_{\odot}$ ,  $M$ , в отдельности удалось лишь значительно позже. Только в 1798 г. Кавендиш сумел осуществить лабораторное измерение силы притяжения двух тел известной массы. Таким образом он определил значение постоянной  $G$ . Выше дано современное значение, мало отличающееся, впрочем, от результата Кавендиша. Поскольку произведение  $GM_{\odot}$  и  $GM$  были уже известны, стало возможным определение  $M_{\odot} = 1,98 \cdot 10^{33}$  г и  $M = 5,98 \cdot 10^{27}$  г. Современники говорили, что, наконец, взвешены Солнце, Земля и другие планеты.

Второй закон движения Ньютона состоит в том, что ускорение тела равно силе, действующей на тело, деленной на массу тела.

Отсюда следует, что ускорение первого тела  $a_1$  равно  $Gm_2/r_{12}^2$  и не зависит от его массы  $m_1$ . Этот вывод казался неправдоподобным: падение камня и падение пушинки происходит с очень различными скоростями и ускорением. Однако это различие связано с мешающим влиянием сопротивления воздуха, тормозящим пушинку и практически не действующим на камень. В вакууме ускорение камня и пушинки строго одинаково.

Вернемся к зависимости силы тяготения от массы. Если мы имеем дело с различным количеством одного и того же вещества, то пропорциональность силы и массы очевидна.

Но что будет, если сравнивать тяготение разных веществ?



Мы знаем, что масса обычного вещества приблизительно, с точностью не более 1—2 %, равна сумме масс протонов и нейтронов, из которых состоят ядра атомов, входящих в состав данного вещества. Поэтому естественно уточнить закон тяготения: действительно ли тяготение определяется именно массой тела, а не числом нуклонов. В настоящее время то, что тяготение вызывается именно *массой* тела, подтверждено с погрешностью не более  $10^{-12}$ !

В теории относительности доказано, что масса и энергия связаны соотношением  $E = mc^2$ . Из этого соотношения, в частности, следует представление о дефекте массы: когда протон и нейтрон соединяются в ядро дейтона D, происходит рождение гамма-кванта с энергией 2,2 МэВ. Энергия ядра D на соответствующую величину меньше суммы энергии протона p и энергии нейтрона n. Значит, и масса ядра D приблизительно на 0,24 % меньше суммы масс p и n. Величину  $m_p + m_n - m_D$  называют *дефектом массы*. Точные измерения массы атома гелия и атома водорода очень рано, до развития ядерной физики, позволили сделать смелый вывод об источнике звездной энергии. Тот факт, что атом гелия *приблизительно* в 4 раза тяжелее атома водорода, подсказывал возможность превращения четырех атомов водорода в один атом гелия. А то, что масса атома гелия все же на 0,6 % меньше четырех атомов водорода, позволяло найти выделение энергии при таком превращении.

Но «вернемся к нашим баранам...»

Точные опыты установили, что сила тяготения зависит именно от массы — или, что то же, от полной энергии — тела, а не от числа протонов и нейтронов.

Тем самым с огромной точностью было доказано, что под действием «ньютоновской» силы тяготения все тела приобретают одинаковое ускорение. При данной начальной скорости и при отсутствии посторонних помех все тела движутся по одинаковым траекториям. Одно из следствий этого современный читатель не раз видел на экране телевизора. Космический корабль, космонавт внутри корабля и выпущенный им из рук карандаш — все они движутся по одной и той же траектории, с одинаковым ускорением. Но это значит, что относительно стенок корабля космонавт не движется, карандаш не движется относительно космонавта.

В кабине космонавта имеет место невесомость, сила тяготения не ощущается! Подчеркнем, что это происходит не за счет зависимости  $1/r^2$  в формуле тяготения. Если космический корабль летит на высоте 300 км от поверхности Земли, значит, его расстояние от центра Земли 6700 км (радиус 6400 км), величина  $1/r^2$  уменьшилась всего на 9—10 % по сравнению с ее значением на поверхности. Между тем, невесомость в кабине полная, сила тяготения внутри космического корабля выключается на все 100 % и происходит это вследствие того, что сам корабль летит по орбите с ускорением.

Эти очень простые соображения оказались существенными при развитии теории тяготения. Не относитесь с презрением к «простым» соображениям. Высшей похвалы заслуживают именно те исследователи, которые из простых, но твердо установленных фактов извлекают глубокие выводы.

### Гравитационное поле — теория Ньютона

Подытожим сказанное выше о законе всемирного тяготения. Обратим внимание прежде всего на то, что он формулируется в терминах дальнего действия и притом мгновенного. Сила, действующая на 1-е тело в данный момент времени  $t_0$ , зависит от массы и положения 2-го тела в тот же момент  $t_0$ . Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия отрицательна в соответствии с тем, что всегда имеет место притяжение. Можно ввести *гравитационный потенциал* и *гравитационное поле* данной массы. При этом окажется, что потенциал и поле в любой точке в данный момент определяются массой и ее положением в тот же момент. Налицо резкий контраст или, даже сильнее, несовместимость между электромагнитной теорией и теорией тяготения.

Электромагнитная теория характеризуется определенной скоростью распространения поля — скоростью света  $c$ . Созданная в 1905 г. теория относительности объявляет скорость  $c$  предельной и делает вывод о том, что пространство и время связаны друг с другом не так, как думали до начала XX в.

При переходе в движущуюся систему координат меняется течение времени, меняются длины, меняется понятие одновременности.