

# Столкновения, рассеяние и небесные знамения

**А. СТАСЕНКО**

*В эпоху войн и мятежей «видения» и «небесные знамения» всегда пристально фиксируются и наблюдаются современниками. Спустя пять лет после избрания Михаила Романа в Европе началась Тридцатилетняя война. Явилась и комета, которая, по общему мнению, эту войну предвещала. Видения и пророчества заполнили и католические, и протестантские страны. Им верили короли, полководцы и монахи, безграмотные простолюдины и просвещенные мужи.*

История русской литературы X–XVII веков

**Р**ОВНО СТО ЛЕТ ТОМУ НАЗАД АНГЛИЙСКИЙ ФИЗИК ЭРНЕСТ Резерфорд объявил потрясенному миру: атом – пустой, в его центре находится массивное ядро с размером в десять тысяч раз меньше размера самого атома; вокруг ядра вращаются легкие электроны. Все это было очень похоже на Солнечную систему, поэтому модель атома Резерфорда была названа планетарной моделью. Она явилась фундаментальным прорывом в понимании строения вещества.

Однако начнем с самого простого – со столкновения двух абсолютно упругих шариков. Их «абсолютная упругость» означает полное отсутствие потерь механической энергии. Пусть шарики летят навстречу друг другу с одинаковыми (по модулю) скоростями, но с не равным нулю прицельным расстоянием  $h$ . На рисунке 1, *a* они изображены за мгновение до столкновения. Но если шарики совершенно одинаковы (и по массе, и по размеру) и их скорости тоже одинаковы (в «лабораторной» системе координат, связанной с неподвижным листом бумаги, на котором изображен рисунок), то их

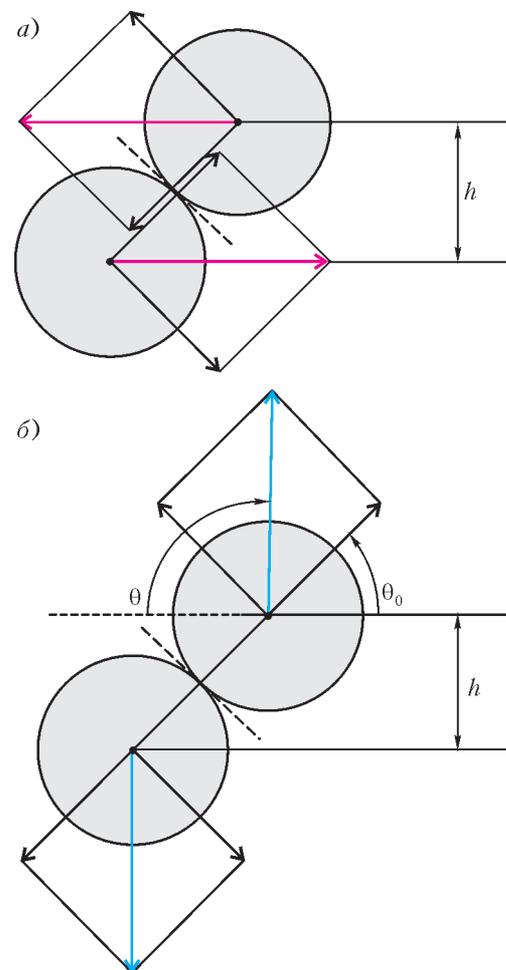


Рис. 1

центр масс неподвижен (в этой системе координат). Разложим скорость каждого шарика на две составляющие – вдоль линии их центров и вдоль касательной к поверхностям обоих шариков в точке соприкосновения (штриховая линия). Ясно, что через мгновение после упругого столкновения радиальные составляющие скоростей обоих шариков изменятся на противоположные, а касательные останутся прежними (рис.1,б). Результат столкновения полностью аналогичен

случаю, при котором каждый шарик зеркально отражается от тяжелой плиты, поверхность которой изображена штриховой линией. Складывая снова обе составляющие скорости каждого шарика, видим, что первоначальный вектор каждой скорости повернулся на угол

$$\theta = \pi - 2\theta_0 = \pi - 2 \arcsin \frac{h}{2R}, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус шариков. (Физики говорят, что произошло рассеяние шариков друг на друге.)

Полученная зависимость качественно показана на рисунке 2 (читатель при желании может точно рассчитать эту кривую). Видно, например, что если прицельное расстояние равно нулю ( $h = 0$ ), то происходит лобовое столкновение (так называемое центральное соударение) и шарики разлетаются строго «назад», т.е.  $\theta = \pi$ . А при  $h = 2R$  они, едва коснувшись друг друга, летят в прежнем направлении, т.е.  $\theta = 0$ .

Рис. 2

В рассмотренном случае предполагалось, что шарики взаимодействуют только в момент соприкосновения. Однако в реальности тела «чувствуют» друг друга и при любом удалении. Конечно, речь идет прежде всего об электростатическом (кулоновском) и гравитационном (ньютоновском) взаимодействиях. Как известно, в обоих случаях силы взаимодействия изменяются обратно пропорционально квадрату расстояния между то-

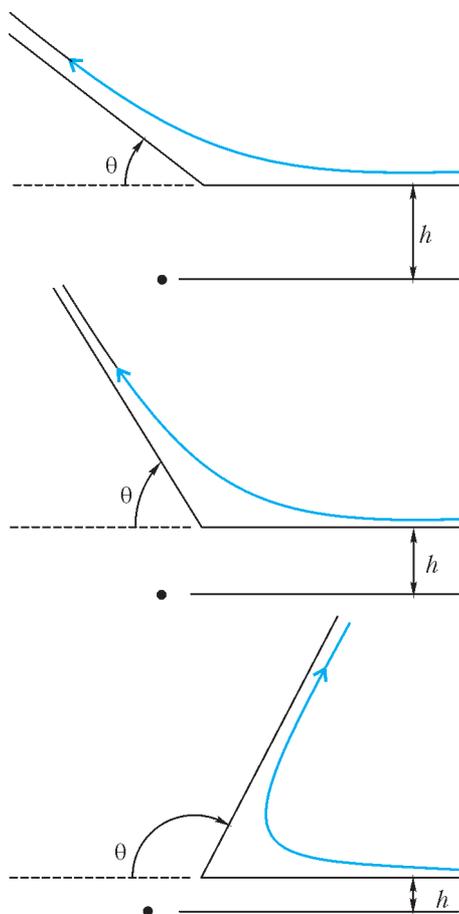


Рис. 3

чечными объектами (размеры которых много меньше этого самого расстояния). Только при кулоновском взаимодействии возможно как притяжение (разные знаки зарядов тел), так и отталкивание (одинаковые знаки), а при гравитационном – только притяжение.

И вот, сотню лет назад Резерфорд, а затем Гейгер, Марсден и Чадвик стали «обстреливать»  $\alpha$ -частицами (ядрами гелия), вылетающими из радиоактивного источника, листки тонкой фольги из разных тяжелых металлов (золота, платины, серебра, меди). Рассеивающее ядро металла намного массивнее  $\alpha$ -частицы, к тому же оно «вморожено» в кристаллическую решетку. Было установлено, что большинство  $\alpha$ -частиц проходят через фольгу почти без отклонений, но встречались редкие случаи их отброса «почти назад» ( $\theta \approx \pi$ ). Это было похоже на лобовое столкновение  $\alpha$ -частицы с ядром, соответствующее нулевому прицельному расстоянию. Результаты экспериментов говорили о том, что заряды  $\alpha$ -частиц и ядер имеют одинаковые знаки и что ядра очень маленькие. Исходя из планетарной модели атома, Резерфорд построил картину рассеяния  $\alpha$ -частиц на ядрах металлов. На рисунке 3 изображены траектории  $\alpha$ -частицы для трех значений прицельного расстояния  $h$  (черная точка – это массивное ядро). Записав привычные для механики законы сохранения энергии и момента импульса (взаимодействие упругое), можно получить выражение для угла  $\theta$  (в системе единиц СГС):

$$\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = \frac{mv_{\infty}^2 h}{2Ze^2},$$

где  $2e$  и  $Ze$  – заряды  $\alpha$ -частицы и рассеивающего ядра,  $m$  – масса  $\alpha$ -частицы,  $v_{\infty}$  – ее скорость «на бесконечности»,  $e$  – элементарный заряд.

Планетарная модель атома оказалась весьма плодотворной, а фундаментальные опыты описаны во многих книгах. В частности, в классической монографии Арнольда Зоммерфельда «Строение атома и спектры»  $\alpha$ -частицы рассматриваются как ...кометы в поле тяготения Солнца!

А как устроены кометы? Твердое ядро (рис.4) обычно имеет радиус  $r_{\text{я}}$  менее 10 км (в большинстве случаев даже

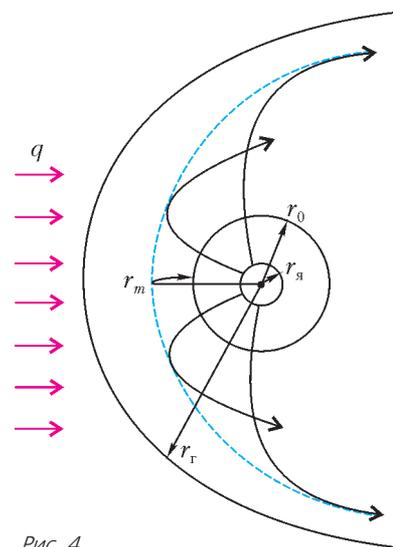


Рис. 4

менее 1 км), и его удавалось заметить с Земли только в очень сильные телескопы. Когда комета приближается к Солнцу (т.е. в перигелии ее орбиты), солнечное излучение нагревает ядро, что приводит к испарению его материала с образованием газообразной головы и хвоста, которые уже легко наблюдаемы. За один «проход» теряется всего около 1% вещества

кометы, так что ее массу можно считать почти постоянной. Тем более что она может пополняться путем захвата кометой новых порций массы на «холодных» участках сильно вытянутой орбиты кометы.

Согласно одной из моделей, комета состоит из смеси замороженных углеводородов и микрочастиц метеоритной пыли, когда-то слившихся друг с другом под действием гравитации. С приближением к Солнцу до расстояния приблизительно  $(2-4) \cdot 10^5$  км происходит нагревание этого рыхлого пористого тела, что и приводит к испарению его материала и выбросу микрочастиц, которые ускоряются испаряющимся газом. А поскольку ядро кометы вращается, это испарение и вынос микрочастиц можно считать сферически симметричными. Радиальная скорость газов для известной кометы Галлея была оценена в  $0,5$  км/с, а температура поверхности – в  $150-250$  К.

Вообще говоря, кометы бывают разных типов, и поведение любой из них может быть весьма прихотливым. Поэтому здесь изображен лишь некоторый осредненный портрет кометы.

Видимый диаметр головы кометы составляет  $r_g \sim 10^5 - 10^6$  км, что на много порядков больше ее ядра. В этой области происходит радиальный разлет газа и ускоренных им микрочастиц, причем из-за быстрого расширения газа (концентрация которого  $n \sim 1/r^2$ ) длина свободного пробега его молекул резко растет ( $\sim r^2$ ), так что они перестают сталкиваться друг с другом и с микрочастицами. В результате радиус  $r_0$  поверхности, на которой микрочастицы достигают предельной скорости, ограничен приблизительно десятком радиусов самого ядра ( $10-100$  км). И микрочастицы продолжали бы лететь в радиальном направлении, если бы не поток квантов солнечного излучения (и, конечно, корпускул солнечного ветра).

Попробуем описать движение микрочастиц, эмитируемых кометой, в поле солнечного излучения. Как известно, каждый из фотонов обладает энергией  $h\nu$  и импульсом  $h\nu/c$  ( $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\nu$  – частота). Предположим, что все фотоны, падающие на диаметрально сечение шаровой микрочастицы площадью  $\pi a^2$ , поглощаются частицей. Тогда, если плотность потока излучения (сумма фотонов всех частот) составляет  $q$  [Вт/м<sup>2</sup>], сила, действующая на частицу (или поток импульса всех поглощенных ею фотонов), равна  $q \frac{\pi a^2}{c}$ . Значит, уравнение динамики микрочастицы (второй закон Ньютона) будет иметь вид

$$m \langle g \rangle = q \frac{\pi a^2}{c}.$$

Поскольку масса микрочастицы равна  $m = \frac{4}{3} \pi \rho^0 a^3$ , где  $\rho^0$  – плотность материала частицы, искомое ускорение равно

$$\langle g \rangle = \frac{3}{4} \frac{q}{\rho^0 a c}.$$

Если комета находится от Солнца на расстоянии, равном среднему радиусу орбиты Земли, т.е. одной астрономической единице ( $1$  а.е. =  $150$  млн км =  $1,5 \cdot 10^8$  км), то  $q = 1400$  Вт/м<sup>2</sup>. Тогда для ускорения микрочастицы радиусом  $a = 1$  мкм =  $10^{-6}$  м и плотностью  $\rho^0 = 10^3$  кг/м<sup>3</sup> в поле солнечного излучения получим оценку

$$\langle g \rangle = \frac{3 \cdot 1400}{4 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8} \text{ м/с}^2 \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2.$$

Пусть все микрочастицы, ускоренные потоком газов вблизи ядра кометы, получают одинаковую радиальную скорость  $v_0 = 100$  м/с (порядка, но меньше тепловой скорости молекул). Если считать, что за время существенного искривления траектории микрочастицы (под действием фотонов Солнца) ускорение  $\langle g \rangle$  изменяется незначительно, то задача сводится к нахождению траекторий точечных масс в поле с постоянным ускорением «тяготения». Значит, в этом приближении все траектории будут параболами. Та микрочастица, которая вылетела строго навстречу потоку излучения, до остановки и поворота назад пройдет расстояние

$$r_m = \frac{v_0^2}{2 \langle g \rangle} = \frac{10^4}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} \text{ м} \approx 1,5 \cdot 10^6 \text{ м} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ км}.$$

Соответствующее время будет равно

$$t_m = \frac{v_0}{\langle g \rangle} = \frac{10^2}{3 \cdot 10^{-3}} \text{ с} \approx 3 \cdot 10^4 \text{ с} \approx 10 \text{ ч}.$$

За это время ядро кометы пролетит расстояние, много меньшее  $1$  а.е., что и оправдывает наше предположение о постоянстве  $\langle g \rangle$ , а заодно и о почти постоянном значении скорости самого ядра кометы в поле тяготения Солнца. (Последнее замечание позволяет считать инерциальной систему координат, связанную с ядром кометы, относительно которой и проведено рассмотрение траекторий микрочастиц.)

Полученная оценка  $r_m$  показывает, что все траектории микрочастиц будут лежать глубоко внутри головы кометы (видимой в основном благодаря рассеянию света на ее молекулах). А искривление траекторий микрочастиц вполне можно назвать их рассеянием на солнечном свете. Ситуация похожа на то, как если бы артиллерист стал стрелять во всех направлениях под всеми углами. Он получил бы множество параболических траекторий (естественно, без учета сопротивления воздуха), «накрытых» сверху поверхностью, касательной к этим траекториям, – так называемой огибающей поверхностью (рис.5).

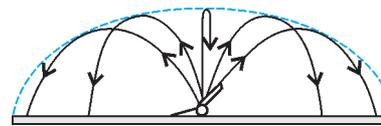


Рис. 5

Но неужели сама комета безразлична к покидающим ее частицам? Вспомним, что для каждого гравитирующего тела радиусом  $R$  и массой  $M$  существует так называемая скорость убегания, или вторая космическая скорость, равная

$$v_2 = \sqrt{2g_R R},$$

где  $g_R = GM/R^2$  – ускорение свободного падения у его поверхности. В нашем случае с кометой

$$g_R = G \cdot \frac{4}{3} \pi \rho_{\text{я}} r_{\text{я}}.$$

Здесь мы уже приготовились подставить плотность ядра кометы  $\rho_{\text{я}} \approx 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и его радиус  $r_{\text{я}} \approx 10^3$  м. Тогда получается

$$g_R \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2 \text{ и } v_2 \approx 0,75 \text{ м/с}.$$

Для Земли значения этих параметров равны  $9,8$  м/с<sup>2</sup> и  $11,2$  км/с соответственно.

Сравним еще полученное ускорение с другим – с ускорением  $w$ , которое поток несущего газа сообщает частице радиусом  $a$  и массой  $m$ . Как известно, оно пропорционально произведению площади поперечного сечения частицы  $\pi a^2$ , плотности газа  $m_r n$  и квадрата скорости  $u$  обтекания частицы газом:

$$w \approx \frac{\pi a^2 m_r n u^2}{m} \approx \frac{3 m_r n u^2}{4 \rho^0 a}$$

Здесь  $m_r = N_r m_p$  – масса молекулы газа,  $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$  кг – масса нуклона,  $N_r$  – число нуклонов в молекуле газа. (Из последнего соотношения видно, в частности, что чем меньше частица, тем больше ее ускорение – ведь с уменьшением линейного размера объем и масса падают быстрее, чем площадь поперечного сечения.) Для «стандартных» молекул, истекающих из ядра кометы – циана CN и угарного газа CO, – число нуклонов равно 26 и 28 соответственно. Примем  $N_r \approx 30$ . Тогда для микронной частицы с радиусом  $a \sim 10^{-6}$  м и начальной скоростью газа на поверхности кометы (приобретающей скорость звука на выходе из ее многочисленных пор)  $u = u_R \sim 200$  м/с при концентрации молекул у поверхности ядра  $n \approx 10^{12} - 10^{14}$  см<sup>-3</sup> (по астрономическим данным) получим  $w \approx 0,5 - 50$  м/с<sup>2</sup>. С

удалением от ядра и сила притяжения, и концентрация молекул несущего газа быстро падают (обратно пропорционально квадрату расстояния от центра ядра). Полученные оценки подтверждают, что расширяющийся газ действительно может придать захваченным частицам большую скорость за короткое время на небольшом расстоянии от поверхности ядра, после чего они в течение гораздо более продолжительного времени подвергаются воздействию только солнечного излучения.

Конечно, все это лишь приблизительные оценки. С одной стороны, сечение рассеяния света шаровой частицей может превосходить геометрическое сечение  $\pi a^2$ . С другой стороны, не обязательно весь поток энергии, проходящий через это сечение, поглотится частицей – часть энергии рассеется и добавится к тому молекулярному рассеянию солнечного света, благодаря которому комета и кажется громадным «видимым ничто» (по выражению французского физика Жака Бабине), ибо сквозь ее голову (а тем более сквозь хвост) просвечивают даже слабые звезды. А еще Солнце испускает и элементарные частицы (корпускулярный ветер), которые тоже рассеиваются на потоках вещества, испускаемых кометами.

Итак, всюду столкновения, взаимодействия, рассеяние...

## Как рисовать по небу?

(Начало см. на 4-й странице обложки)

разности цвет свечения смещается в красную сторону, а при увеличении – в синюю.

Как правило, в атоме есть не один, а несколько электронов, и каждый из них при «нагреве» перескакивает на свою орбиту и потом возвращается обратно. В результате атомы нагретой металлической пудры светятся сразу несколькими цветами, образуя, таким образом, спектр излучения. На рисунке 2 показаны спектры излучения нескольких металлов. Видно, что наиболее яркая линия в спектре натрия – желтая с длиной волны 590 нм, а в спектре лития – розовая с длиной волны 670 нм. В спектре меди большинство линий

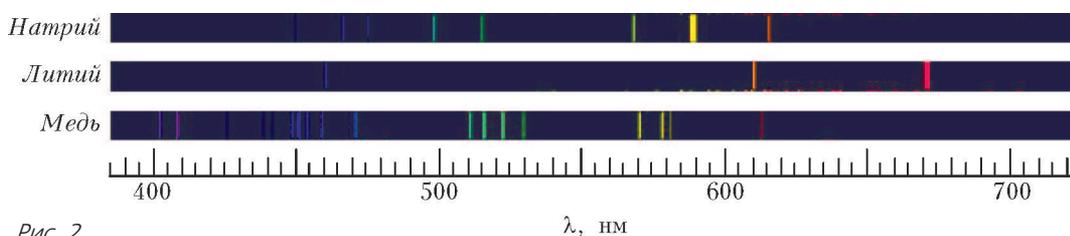


Рис. 2

находятся в сине-зеленой части спектра, что придает пламени цвет морской волны.

Чтобы заставить атомы пиротехнического изделия светиться, их надо «нагреть». Мы привыкли нагревать предметы, помещая их в место горения топлива, например в костер, где горят дрова. При этом кислород, необходимый для горения, берется из атмосферы, и костер разгорается довольно медленно – сначала сгорают внешние слои поленьев, соприкасающиеся с атмосферой, а потом и внутренние. Очевидно, что фейерверк, потребляющий кислород только из атмосферы, будет разгораться очень медленно. Поэтому любое пиротехническое изделие берет кислород с

собой – он, а также тепловая энергия выделяются при химической реакции разложения вещества, молекула которого содержит атомы кислорода. Часто в качестве такого кислородосодержащего вещества используют популярное азотное удобрение – калиевую селитру  $KNO_3$  (нитрат калия), которая при нагревании выше 600 °С разлагается с выделением кислорода:



Таким образом, две молекулы нитрата калия при нагреве дают одну молекулу кислорода  $O_2$  и количество теплоты  $Q$ , достаточное для того, чтобы вызвать аналогичные химические реакции в соседних молекулах селитры. В результате происходит быстрое образование большого количества кислорода, и если молекулы селитры окружены каким-либо

горючим веществом, то это вещество начинает гореть с выделением большого количества теплоты. В качестве горючего вещества можно использовать, например, серу и древесный уголь. Эта смесь селитры, серы и древесного угля и является порохом.

Каждая из звездочек фейерверка – это небольшой, размером с горошину или вишню, шарик, сделанный из смеси пороха, металлической пудры и клейкого вещества, например глины. Эти шарики, которые иногда называют «звездками», с помощью специального порохового заряда доставляют на высоту нескольких десятков метров и там взрываются. Взрыв разбрасывает «звездки» во все стороны, и они начинают сгорать, образуя светящиеся шары самых разных цветов и размеров – то, что мы и называем собственно фейерверком.

К. Богданов