

СВЕТОВОЕ ДАВЛЕНИЕ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

(К столетию со дня рождения П. Н. Лебедева)

В. В. РАДЗИЕВСКИЙ,
профессор

ЗАКОН НЬЮТОНА — ЛЕБЕДЕВА

Смутная догадка о возможности существования светового давления закрадывалась в головы людей уже несколько столетий назад. И. Кеплер в 1619 г. впервые высказал вполне определенное суждение о том, что необычная форма кометных хвостов может быть объяснена отталкивающим действием солнечных лучей. Заслуга теоретического обоснования явления светового давления принадлежит английскому физику К. Максвеллу, предсказавшему в 1873 г., на основе разработанной им теории электромагнитного поля, динамическое действие световых лучей. Тремя годами позже к таким же результатам, но уже исходя из термодинамических соображений, пришел итальянец А. Бартоли. В превосходном согласии с выводами этих авторов относительно ожидаемой величины светового давления солнечных лучей оказалась разработанная выдающимся русским астрономом Ф. А. Бредихиным механическая теория кометных форм. Эта теория позволила хорошо интерпретировать фактически наблюдаемые типы хвостов комет.

Однако многочисленные попытки ряда крупнейших экспериментаторов различных стран мира обнаружить и измерить силу светового давления непосредственно в лаборатории неиз-

менно терпели неудачу. Слишком уж мала эта сила: даже при перпендикулярном падении солнечных лучей их давление на зеркальную поверхность составляет всего лишь одну десятиллионную атмосферы.

Только в конце XIX в. замечательному русскому физику Петру Николаевичу Лебедеву, столетие со дня рождения которого отметила в этом году научная общественность нашей страны, удалось впервые осуществ-



П. Н. Лебедев
(1866—1912)

вить блестящий эксперимент, подтвердивший существование светового давления и позволивший измерить его величину.

Открытие П. Н. Лебедева, принесшее ему мировую славу, послужило важным вкладом в дело торжества материалистической концепции в философии. Отныне уже не могло оставаться сомнений в том, что любое излучение не приводит к исчезновению материи. При переходе вещества в поле сохраняются все атрибуты материи: ее масса, энергия, количество движения. Ничтожно малая часть всякого горячего тела постепенно переходит в поле. При этом излучается не только тепловая или световая энергия, как думали раньше, но и неизбежно сопутствующая ей масса, которая, разлетаясь с огромной скоростью в разные стороны от горячего тела, ударяется в другие тела, попадающиеся на ее пути, и оказывает на них отталкивающее действие.

В настоящее время известно, что наше Солнце каждую секунду излучает 4 млн. т световой материи, которая мчится от него со скоростью 300 000 км/сек. От Солнца как бы «дует» ураганный «световой ветер», и не удивительно, что он наводит людей на мысль о возможности использования солнечных парусов для космической навигации.

Земля «перехватывает» лишь небольшую долю световой материи, летящей от Солнца,— 2 кг в секунду. Эти 2 кг приносят Земле энергию, которая в 100 000 раз превосходит ее промышленное производство во всех странах за то же время. Однако отталкивающее действие падающей на нашу планету световой материи ничтожно мало по сравнению с ньютоновским притяжением Земли к Солнцу. Только для очень небольших или больших, но легких (например, полых) тел све-

товое отталкивание может соперничать с силой ньютоновского притяжения или даже превосходить его.

Математическое сравнение сил ньютоновского притяжения и светового отталкивания Солнца или другого излучающего тела (под «световым» давлением мы подразумеваем давление электромагнитного излучения любых длин волн, хотя человеческий глаз воспринимает как свет лишь небольшой диапазон длин волн электромагнитного поля) впервые было сделано также П. Н. Лебедевым еще в 1891 г., и в этом состоит его заслуга, несколько не уступающая по своему значению заслуге открытия светового давления. Обе силы — ньютоновская гравитация (тяготение) и лебедевская репульсия (отталкивание) обладают рядом замечательных, как бы роднящих их свойств. Любое тело, коль скоро его абсолютная температура отлична от нуля, излучает электромагнитное (в частном случае, световое) поле и, следовательно, отталкивает все тела, попадающие в это поле. Таким образом, свойство отталкивать является таким же неотъемлемым атрибутом любого тела, как и его свойство притягивать. Обе силы по величине обратно пропорциональны квадрату расстояния от излучающего и гравитирующего тела и направлены приблизительно по одной и той же прямой. Таким образом, роль репульсии сводится как бы к уменьшению (редукции) тяжелой массы излучающего тела. Эти соображения позволили П. Н. Лебедеву описать обе силы одной формулой, получившей впоследствии название закона Ньютона — Лебедева

$$F_{12} = \frac{\gamma M_1' M_2}{R^2}.$$

В этой формуле F_{12} — сила, с которой тело массы M_1 действует на тело массы M_2 , R — расстояние

между ними, γ — коэффициент пропорциональности (гравитационная постоянная), M_1' — редуцированная масса первого тела, как бы ослабленная его световым отталкиванием; она всегда меньше M_1 и зависит от температуры первого тела, а также от размеров и плотности каждого из двух взаимодействующих тел. При определенных условиях «масса» M_1' может принимать нулевое и даже отрицательное значение.

По мнению ряда философов, учет светового отталкивания между телами имеет большое методологическое значение, так как он устраняет существенный недостаток классической теории тяготения — ее однополярность, которая еще у Энгельса вызывала чувство большой неудовлетворенности. «Все учение о тяготении — писал Энгельс — покоится на утверждении, что притяжение есть сущность материи. Это, конечно, неверно. Там, где имеется притяжение, оно должно дополняться отталкиванием... Но притяжение и отталкивание столь же неотделимы друг от друга, как положительное и отрицательное, и поэтому уже на основании самой диалектики можно предсказать, что истинная теория материи должна отвести отталкиванию такое же важное место, как и притяжению, и что теория материи, основывающаяся только на притяжении, ложна, недостаточна, половинчата».

По утверждению Энгельса, явление кометных хвостов, обнаруживающих огромное отталкивание, убедительно свидетельствует в пользу важной роли последнего во всемирном взаимодействии материи. Можно не сомневаться, что и сам П. Н. Лебедев хорошо понимал значение найденного им закона. Вот что он писал в одном из своих писем: «Я, кажется, сделал очень важное открытие в теории движения светил, специально комет... найденный закон рас-

пространяется на все небесные тела. Сообщил Винеру; сперва он объявил, что я с ума сошел, а на другой день, поняв в чем дело, очень поздравлял. Сперва я был в сильном нервном напряжении, но теперь, когда закон доказан, я ничуть не волнуюсь, частью может быть от того,—этого я не скрою,—что озадачен, даже ошеломлен его общностью, которую сначала не предвидел.

СВЕТОВОЕ ДАВЛЕНИЕ ВНОСИТ КОРРЕКТИВЫ В КЛАССИЧЕСКУЮ НЕБЕСНУЮ МЕХАНИКУ

Первое удивительное следствие, вытекающее из закона Ньютона — Лебедева, состоит в том, что действие одного тела на другое оказывается не равным противодействию последнего. Представим себе, например, два сферических тела *A* и *B*, одинаковых по размерам и массе, но различных по температуре настолько, что при их взаимодействии у горячего тела (*A*) преобладает отталкивание, а у холодного (*B*) — притяжение. Центр тяжести этих двух тел, предоставленных самим себе, не будет оставаться в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, как это должно бы быть в рамках классической динамики. Оба тела и их центр масс будут двигаться ускоренно в направлении от горячего тела к холодному: тело *B* будет двигаться, набирая скорость за счет преобладающего отталкивания со стороны тела *A*; вдогонку за телом *B*, тоже ускоренно, будет двигаться тело *A*, подтягиваемое преобладающим притяжением со стороны тела *B*.

Астрономам приходится наблюдать, как крошечные частицы, отделившись от ядра кометы, ускоренно мчатся от Солнца, подгоняемые его преобладающим отталкиванием. В то же время, каждая из этих частиц, будучи достаточно холодной, с какой-то, хотя и нич-

тожной, силой несомненно подтягивает за собой и само Солнце. Если бы таких частиц было достаточно много, они могли бы заметным образом изменить скорость движения нашего светила. Не по этой ли причине наиболее горячие звезды спектрального класса *B* имеют повышенную дисперсию скоростей по сравнению с более холодными звездами Галактики?

Известный советский астроном Т. А. Агеякин математическим расчетом подтвердил возможность «фотогравитационного» ускорения *B*-звезд: встречаясь с огромным облаком холодной космической пыли, такая звезда движется ускоренно к центру его тяготения, в то же время мощным потоком светового излучения она толкает перед собой пылинки, образующие это облако. В результате и звезда, и облако движутся ускоренно в одну и ту же сторону.

Аналогичное нарушение аксиомы Ньютона мы сможем наблюдать, когда будет построена фотонная ракета. Фотонный корабль будет двигаться ускоренно при отсутствии каких-либо внешних сил только за счет излучения электромагнитного поля с кормы ракеты.

Все эти «нарушения» лишней раз свидетельствуют о «механистичности» классической механики Ньютона, законы которой сформулированы только для движения и взаимодействия тел, т. е. вещественной материи. Между тем взаимодействие тел осуществляется через посредство физических полей, которые отнюдь не обязаны «выходить из игры» с нулевым балансом. Когда последнее имеет место, законы механики Ньютона выполняются достаточно точно. Однако в ряде случаев поле «оттягивает» на себя значительную порцию массы, энергии или количества движения, и тогда мы наблюдаем нарушение законов сохранения для системы тел, рас-

сматриваемых без учета поля. В то же время необходимо подчеркнуть, что все законы сохранения являются абсолютно неизменными, когда их применяют к определенной материальной системе, независимо от того, какие преобразования испытывает материя этой системы. Таким образом, учет светового давления существенно «офизичивает» классическую механику Ньютона.

Закон Ньютона — Лебедева замечательно расширяет класс возможных движений в задаче двух тел. Решение этой задачи при учете только ньютоновской гравитации приводит к заключению, что тела могут двигаться по одному из следующих конических сечений: эллипс, парабола, вогнутая ветвь гиперболы. Остаются незаполненными еще три конических сечения: выпуклая ветвь гиперболы, прямая с фокусом вне ее и точка. Однако стоит нам воспроизвести решение задачи двух тел на базе закона Ньютона — Лебедева, как оказывается, что возможной траекторией каждого из двух тел становится любое из существующих конических сечений. Так, если редуцированная масса тела *A* отрицательна (отталкивание преобладает над притяжением), тело *B* будет двигаться по выпуклой ветви гиперболы, если редуцированная масса *A* равна нулю, тело *B* будет либо покоиться («траектория» — точка), либо двигаться равномерно и прямолинейно.

Лебедевская репульсия хорошо вписывается в ньютоновский закон гравитации лишь до тех пор, пока оба тела имеют сферическую форму, постоянные размеры и равномерно нагретую поверхность. Если при этих условиях повторить вывод всех результатов классической небесной механики, положив в основу не закон Ньютона, а закон Ньютона—Лебедева, то мы получим по форме те же самые соотношения, только вместо тяжелых масс тел везде

будут фигурировать массы редуцированные.

Однако картина совершенно меняется, если хотя бы одно из тел имеет несферическую форму или переменные размеры. Рассмотрим этот случай на примере закона сохранения энергии. Известно, что полная механическая энергия (сумма энергии кинетической и потенциальной) у малого тела, находящегося в поле тяготения большого тела, остается неизменной, если ее измерять по отношению к центру массы большого тела, практически совпадающему с центром масс системы.

Если малое тело имеет скорость движения, достаточную для того, чтобы преодолеть силы тяготения центрального тела и улететь в бесконечность, то мы говорим, что его энергия положительна. В противном случае считается, что энергия малого тела отрицательна. Все это остается в силе и для фотогравитационной задачи двух тел при соблюдении указанных выше условий.

Но представим себе движущийся по окружности, в центре которой расположено Солнце, полый непрозрачный шар таких размеров и массы, что его притяжение к Солнцу всего лишь в два раза превышает световое отталкивание. Полная энергия такого шара будет отрицательной, в бесконечность он улететь не может. Пусть, далее, внутри шара открывают баллон со сжатым воздухом, в результате чего шар быстро надувается так, что его радиус возрастает вдвое, а площадь поперечного сечения — в четыре раза. От этой манипуляции сила притяжения к Солнцу не изменится, а световое отталкивание возрастет вчетверо. Теперь уже репульсия будет в два раза превосходить гравитацию. Надутый шар практически в одно мгновение перейдет на орбиту, имеющую форму выпуклой ветви гиперболы и начнет удаляться в бесконечность. Про-

изойдет как бы мгновенное увеличение энергии шара. В то же время полная энергия материальной системы Солнце — шар — поле останется неизменной. Увеличение энергии шара произойдет за счет уменьшения механической энергии поля: ведь за надутым шаром образуется более широкая область тени с пониженной плотностью полевой энергии.

Аналогичного эффекта можно достигнуть, если на космическом корабле, летящем в межпланетном пространстве, внезапно раскрыть или просто повернуть перпендикулярно к солнечным лучам парус, который до этого располагался ребром к Солнцу. В результате произойдет мгновенное увеличение энергии корабля, причем, как показывает элементарный расчет, приращение энергии, отнесенное к одному грамму достаточно тонкого паруса, в сотни раз превосходит энергию, выделяемую при сжигании одного грамма метана.

При современном уровне развития техники создание космических кораблей с гигантскими солнечными парусами, способными обеспечить всю необходимую силу тяги, считается практически невозможным. Однако уже в наше время становится целесообразным применение небольших солнечных парусов в качестве вспомогательного движущего средства, ибо каждый грамм паруса способен заменить сотни граммов термического топлива.

Преимущество паруса состоит еще и в том, что он обладает способностью к обратимости процесса перекачки энергии от поля к кораблю и обратно. В самом деле, если для возвращения корабля на более низкую орбиту требуется уменьшить его энергию, то для этого достаточно свернуть парус до следующего рейса на внешнюю орбиту.

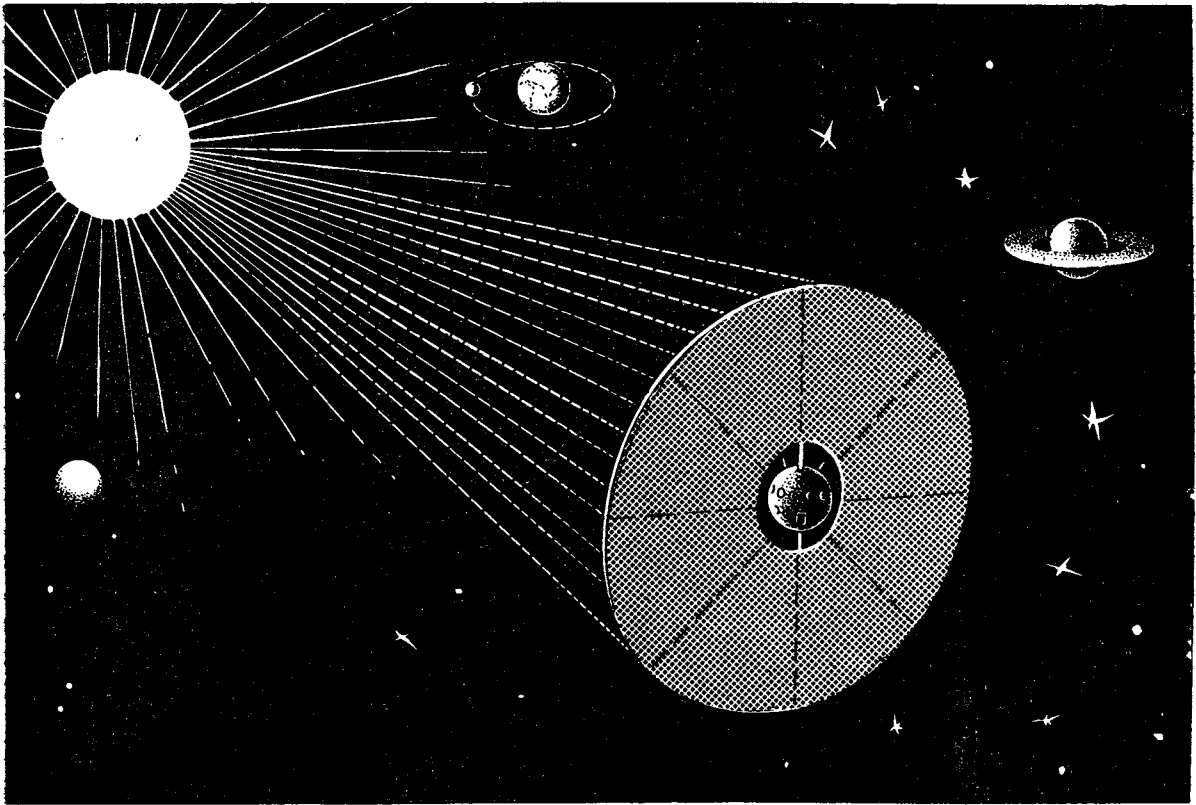
Оценивая все возможности и перспективы, открываемые приме-

нением солнечных парусов в космической навигации, и сравнивая предполагаемые пути ее развития с историей мореплавания, невольно приходишь к вопросу: не предстоит ли космической навигации повторить, но только в обратном порядке, основные этапы развития морской навигации, которая, как известно, шла от парусных кораблей к смешанным, а от них к кораблям с тепловыми двигателями?

Другие интересные проблемы, резко отличающиеся от проблем классической механики Ньютона, возникают в случае движения малого тела в фотогравитационном поле, гравитация и репульсия которого порождаются разными телами. Примером может служить движение в поле земного тяготения достаточно легкого искусственного спутника Земли, возмущаемого давлением солнечного света.

Известный интерес в этом отношении представляют собой американские спутники-баллоны «Эхо», обладающие большими размерами, но очень малой массой. Как показали теоретические расчеты Р. Паркинсона, Г. Джонеса и И. Шапиро, только за счет светового давления высота перигея спутника «Эхо-1» должна меняться со скоростью до 2—3 км в сутки, испытывая периодические колебания с амплитудой 250 км и периодом около 300 суток. Эти расчеты были подтверждены данными наблюдений.

Не менее любопытный расчет был сделан Г. Джонесом и И. Шапиро в связи с американским проектом «Вест Форд». Как известно, вопреки протестам мировой общественности, американцы задумали вывести на орбиту несколько сот миллионов мельчайших медных иголок для образования постоянного пояса вокруг Земли. Однако, как показал расчет упомянутых авторов, давление солнечных лучей сравнительно быстро



Космический корабль, приводимый в движение лучами солнечного света (схематический рисунок)

рассеяло бы иголки или сбросило их на Землю. Этот запуск иголок, против которого протестовали и Международный астрономический союз и АН СССР и который часто называют «диверсией в космосе», создавал не постоянную, а временную, хотя и длительно существующую помеху и опасность.

ЭФФЕКТЫ ПОГЛОЩЕНИЯ И ПЕРЕИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОВОЙ МАТЕРИИ

Представьте себе вагонетку, катящуюся без трения по горизонтальному пути под мощным потоком вертикально падающего града. Град, попадающий в кузов вагонетки, приводит ее в движение в горизонтальном направ-

лении, в результате чего теряется часть скорости вагонетки. Она будет испытывать своеобразное торможение. Допустим теперь, что град в кузове постепенно тает, так что общее количество его поддерживается на постоянном уровне, а образующаяся вода вытекает из кузова. Будет ли последнее обстоятельство оказывать дополнительное влияние на движение вагонетки? Ответ на этот вопрос зависит от того, как именно вытекает вода из кузова: если струйки воды направлены равномерно во все стороны, то реакция истечения взаимно уравновешивается, если струя воды направлена вперед, то вагонетка будет испытывать дополнительное торможение, если же струя направлена назад, то вагонетка будет

испытывать ускорение, которое может даже превосходить (при достаточно большой скорости истечения воды) первоначальное торможение, связанное с падением града.

Аналогичная картина наблюдается при движении тел в поле световой материи. Пусть, например, маленькая черная частица обращается вокруг Солнца. Она поглощает падающий на нее свет и приводит поглощенную массу поля в движение по своей орбите. На данном этапе частица испытывает торможение. Далее, если размеры частицы настолько малы, что она равномерно прогревается насквозь и переизлучает поглощенное поле равномерно во все стороны, никакой дополнительной реакции наша частица испытывать

не будет. Следовательно, в этом случае остается только торможение, благодаря которому частица станет постепенно падать на Солнце, т. е. двигаться вокруг него по скручивающейся спирали.

Чтобы лучше понять причину падения частицы к Солнцу, представьте себе, что вы вращаете в вертикальной плоскости ведро с водой. Вода не выливается, пока центробежная сила уравновешивает ее вес. Но, если ведро внезапно затормозить в верхнем положении, вода начнет падать на землю, и вам, конечно, придется принять душ.

Одно из отличий светового торможения частицы от рассмотренного примера с ведром состоит в том, что вследствие крайней малости силы светового торможения сближение частицы с Солнцем будет происходить очень медленно.

Идея светового торможения частиц, сопровождаемая ошибочным количественным расчетом, впервые была высказана английским ученым Д. Пойнтингом в 1903 г. Строгая релятивистская теория этого феномена была разработана в 1937 г. американцем Г. Робертсоном. По имени этих ученых описанное явление и получило название эффекта Пойнтинга — Робертсона.

По формуле, полученной Робертсоном, легко рассчитать время, в течение которого частица, «спиралящая» к Солнцу, переходит с одной орбиты на другую или даже выпадает на Солнце. Так, частица, имеющая плотность 3 г/см^3 и радиус 10^{-4} см , начав свое движение на орбите Марса, через 23 000 лет переместится в район орбиты Земли, а еще через 18 000 лет упадет на Солнце. Астероид с радиусом в 1 км будет сближаться с Солнцем в 1 млрд раз медленнее (при условии равномерного прогретой поверхности).

Известный советский ученый академик В. Г. Фесенков показал, что имеющееся вокруг Солнца

облако пылевой материи, которое наблюдается в виде так называемого зодиакального света, должно обновляться через каждые 100 000 лет. За указанное время все пылинки, образующие зодиакальное облако, должны выпасть на Солнце вследствие эффекта Пойнтинга — Робертсона. В связи с этим результатом В. Г. Фесенкова возникает законный вопрос: откуда же берется материя, поддерживающая существование зодиакального облака? По-видимому, основным источником, пополняющим его убыль, является захват Солнцем межзвездных пылинок, осуществляемый за счет взаимодействия последних с планетами Юпитер и Сатурн.

В начале 50-х годов автором этих строк были рассмотрены еще два эффекта, связанных с поглощением и последующим переизлучением солнечной световой материи.

Один из них совершенно аналогичен эффекту Пойнтинга — Робертсона и состоит в том, что частица, обращающаяся вокруг планеты, также будет испытывать торможение вследствие поглощения солнечного света с последующей передачей поглощенной массе орбитальной скорости частицы. Планетоцентрический эффект лучевого торможения приводит к тому, что орбита любой частицы, движущейся вокруг планеты, приобретает спиралевидную форму. Находящаяся на ней частица постепенно сближается с планетой вплоть до выпадения на ее поверхность. Для примера укажем, что частица с плотностью 3 г/см^3 и радиусом 10^{-4} см , начав свое движение около лунной орбиты, выпадает на Землю через 12 000 лет. На основании этого же эффекта можно прийти к выводу, что, если кольца Сатурна действительно состоят из метеорных тел с поперечником в 1 см, как это полагает советский астроном М. С. Бобров, то возраст колец не должен пре-

вышать 2 млрд. лет, так как за указанное время тела таких размеров успели бы упасть на планету. Разумеется, приведенная здесь оценка возраста колец Сатурна справедлива лишь в том случае, если образующая их материя не получает пополнения подобно тому, как это должно быть с материей зодиакального облака.

Второй из упомянутых выше эффектов связан с неодинаковым нагреванием различных участков поверхности достаточно большого тела и с последующим несимметричным (анизотропным) переизлучением поглощенной энергии. В количественном отношении этот эффект может в тысячи раз превосходить эффект Пойнтинга — Робертсона. Поясним его сущность на примере.

Всем известно, что Земля обращается вокруг Солнца против часовой стрелки и в эту же сторону вращается вокруг своей оси, благодаря чему «утренняя» сторона Земли все время остается передней, а «вечерняя» — задней по ходу орбитального движения планеты. С другой стороны, не менее хорошо известно, что средняя температура вечерней почвы или воды больше, чем утренней. Следовательно, излучение с «кормовой» части Земли превосходит ее излучение со стороны «носа». Иными словами, Земля подобно фотонной ракете, испытывает действие ускоряющей силы, под влиянием которой она удаляется от Солнца, двигаясь по раскручивающейся спирали. Если бы суточное вращение Земли было обратным, ее вечерняя сторона находилась бы на «носу» нашего естественного космического корабля, и реакция переизлучения вызывала бы его торможение и соответствующее уменьшение радиуса орбиты Земли. Необходимо однако подчеркнуть, что для такого крупного тела, каким является наша Земля, описанный «эффект анизотропности переизлучения» не

играет никакой практической роли. Простой расчет показывает, что если принять для разности средних температур вечерней и утренней полусфер нашей планеты значение 10° , то под влиянием этого эффекта Земля должна отходить от Солнца со скоростью всего 1 мм в год. В то же время для тел, имеющих размеры небольшого астероида, эффект анизотропности переизлучения может играть существенную динамическую и эволюционную роль.

Среди многих тысяч астероидов, заполняющих межпланетное пространство между орбитами Марса и Юпитера, несомненно имеются астероиды как с прямым,

так и с обратным осевым вращением. Очевидно, первые из них должны удаляться от Солнца, а вторые приближаться к нему тем быстрее, чем меньше их размеры, т. е. астероидальное кольцо должно испытывать тенденцию к непрерывному расширению.

Как следует из математической теории этого явления, за время существования солнечной системы с орбиты Цереры на орбиту Земли уже успели бы переместиться астероиды с обратным осевым вращением и с поперечником порядка нескольких сот метров. Однако в окрестностях земной орбиты таких астероидов практически не наблюдается. Следовательно, при-

ходится признать, что либо существуют какие-то причины, препятствующие развитию тенденции к расширению астероидального кольца, либо это кольцо образовалось сравнительно недавно.

Из немногих рассмотренных здесь примеров ясно, сколь велико значение открытий, сделанных нашим талантливым соотечественником Петром Николаевичем Лебедевым, имя которого будут долго вспоминать благодарные потомки, провожая ли своих друзей в далекий космический рейс с пожеланием попутного «солнечного ветра», поднимая ли солнечные паруса на реи транспланетных кораблей будущего...