

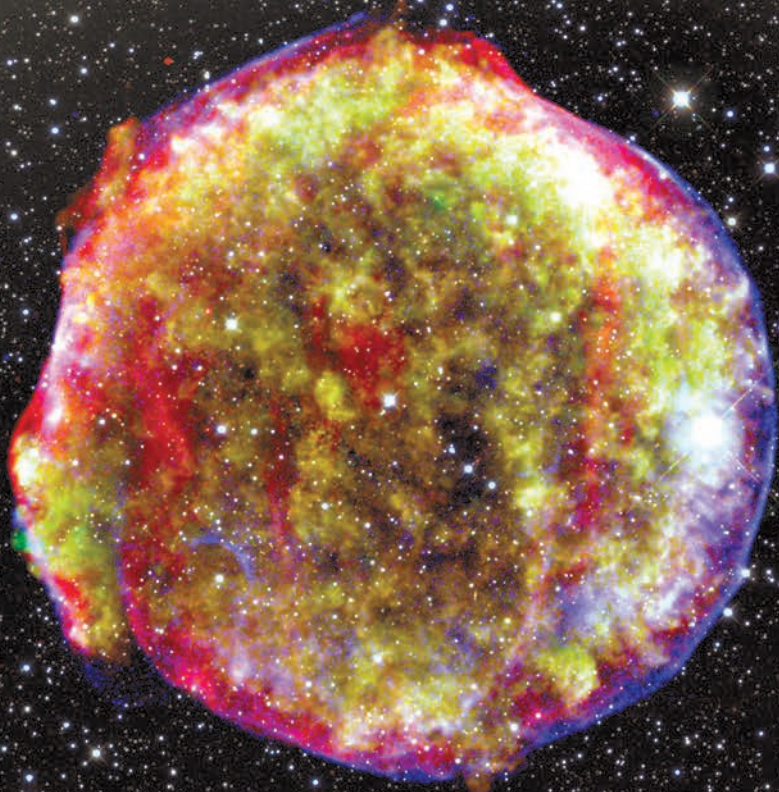
ЯНВАРЬ

ISSN 0130-2221

2018 · № 1

КВАНТ

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЙ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



УЧРЕДИТЕЛИ

Российская академия наук
Математический институт
им. В.А.Стеклова РАН
Физический институт
им. П.Н.Лебедева РАН

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

А.Л.Семенов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Н.Н.Андреев, А.Я.Белов,
Ю.М.Брук, А.А.Варламов, С.Д.Варламов,
А.Н.Виленин, В.И.Голубев,
Н.П.Долбилин, С.А.Дориченко,
В.Н.Дубровский, А.А.Заславский,
П.А.Кожевников (*заместитель главного редактора*),
С.П.Коновалов, А.А.Леонovich,
Ю.П.Лысов, В.В.Произволов, В.Ю.Протасов,
А.М.Райгородский, Н.Х.Розов, А.Б.Сосинский,
А.Л.Стасенко, В.Г.Сурдин, В.М.Тихомиров,
В.А.Тихомирова, А.И.Черноуцан (*заместитель главного редактора*)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

А.В.Анджанс, М.И.Башмаков, В.И.Берник,
В.Г.Болтянский, А.А.Боровой,
Н.Н.Константинов, Г.Л.Коткин, С.П.Новиков

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ 1970 ГОДА

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

И.К.Кикоин

ПЕРВЫЙ ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

А.Н.Колмогоров

Л.А.Арцимович, М.И.Башмаков,
В.Г.Болтянский, И.Н.Бронштейн, Н.Б.Васильев,
И.Ф.Гинзбург, В.Г.Зубов, П.Л.Капица,
В.А.Кириллин, Г.И.Косоуров, В.А.Лешковцев,
В.П.Лишевский,
А.И. Маркушевич, М.Д.Миллиончиков,
Н.А.Патрикеева, Н.Х.Розов, А.П.Савин,
И.Ш.Слободецкий, М.Л.Смолянский,
Я.А.Сморodinский, В.А.Фабрикант,
Я.Е.Шнайдер

- 2 Астрономия вернулась в школу (окончание).
В.Сурдин
- 8 Выход в пространство-2 (продолжение).
В.Протасов

ИЗ ИСТОРИИ НАУКИ

- 15 Андрей Анатольевич Зализняк. *А.Пиперски*

ЗАДАЧНИК «КВАНТА»

- 20 Задачи М2494–М2497, Ф2501–Ф2504
- 21 Решения задач М2482–М2485, Ф2489–Ф2492

«КВАНТ» ДЛЯ МЛАДШИХ ШКОЛЬНИКОВ

- 29 Задачи

КОНКУРС ИМЕНИ А.П.САВИНА

- 30 Задачи 17–20

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТАТИВ

- 31 Нахождение центра масс проволоочного
треугольника. *И.Даценко, Ю.Минаев,
О.Орлянский*

КАЛЕЙДОСКОП «КВАНТА»

- 32 Геофизика

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ КРУЖОК

- 37 Длинные пути в графах. *П.Кожевников*

ПРАКТИКУМ АБИТУРИЕНТА

- 42 Астрофизика в ЕГЭ по физике. *Н.Гомулина*

ОЛИМПИАДЫ

- 51 XXXIX Турнир городов

ИНФОРМАЦИЯ

- 53 Очередной набор в ВЗМШ
- 59 Ответы, указания, решения
Вниманию наших читателей! (28)
«Квант» улыбается (30)

НА ОБЛОЖКЕ

- I *Иллюстрация к статье В.Сурдина*
- II *Коллекция головоломок*
- III *Шахматная страничка*
- IV *Прогулки с физикой*

Астрономия вернулась в школу

В. СУРДИН

Химия

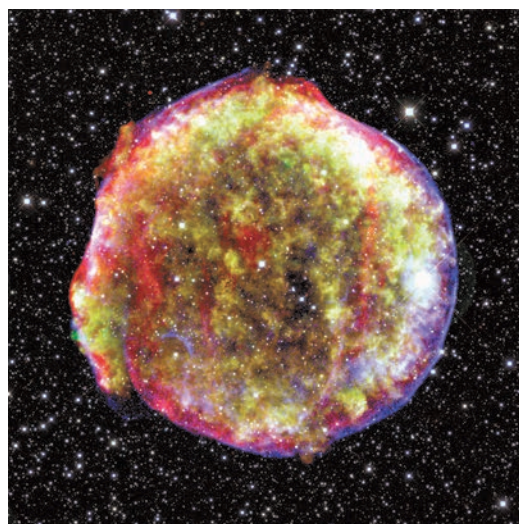
Изучение химии начинается с демонстрации Таблицы Менделеева со словами: «Из этих элементов построен мир. Давайте узнает, какими свойствами они обладают и как взаимодействуют между собой». Но астрофизика смотрит глубже и старается выяснить, каково происхождение самих химических элементов, как и когда они возникли в природе. И на этом пути уже многое прояснилось. Мы знаем, что в течение первой секунды жизни Вселенной при огромной температуре и плотности вещества рождались протоны, нейтроны, антипротоны и антинейтроны в почти равном количестве (знать бы еще, почему «почти»). По мере расширения Вселенной снижалась температура вещества и прекратилось рождение частиц и античастиц, но продолжалась их аннигиляция. Из тех, что остались, построен наш мир.

Первые несколько минут жизни Вселенной, пока свободные нейтроны еще не распались, а температура была еще достаточно высокой, происходили термоядерные реакции, заполнившие несколько первых клеточек Таблицы Менделеева. Кроме свободных протонов – будущих ядер водорода – возник его тяжелый изотоп дейтерий, возникли также гелий и литий. Впрочем, дейтерия и лития было очень мало, а юный мир почти целиком состоял из водорода (на $3/4$ по массе) и гелия (на $1/4$). Трудно представить себе нынешнее разнообразие природы, будь она построена лишь из водорода и гелия. К счастью, по прошествии сотен миллионов лет за дело взялись звезды. Именно в их недрах в ходе спокойной эволюции и при взрывах сформировалось все разнообразие хими-

ческих элементов, ставших планетами и живыми существами на них.

Современная астрофизика не только теоретически объясняет, но и прямо демонстрирует те космические явления, в которых рождаются новые химические элементы. С помощью нейтринных телескопов мы заглянули в ядро Солнца, где протекают термоядерные реакции. А оптические и рентгеновские телескопы демонстрируют нам процессы нуклеосинтеза, происходящие при взрывах звезд. Так химия обрела верное представление о происхождении элементов.

Совсем недавно появилось новое направление в науке – астрохимия. Условия в космосе столь своеобразны, что порой ставят земную химию в тупик. Например, изучать свободные радикалы в земной лаборатории очень сложно, поскольку эти соединения очень активны и моментально превращаются в более стабильные молекулы. А в межзвездной среде они представлены широко, поскольку там им почти не



Остаток взрыва сверхновой

с чем взаимодействовать. Большой интерес представляют и каталитические реакции на межзвездных пылинках, ведь это те же наночастицы, которые можно было бы использовать для химического катализа на Земле. Как видим, химия все больше заинтересована в астрономии.

Биология

Астробиология, биоастрономия, экзобиология... Десятки лет существуют эти дисциплины, хотя объекта практического изучения у них как не было, так и нет. Жизнь за пределом Земли пока не обнаружена. Ее искали и на Луне, и на Марсе; в форме разумной жизни ее искали на просторах Галактики и даже за ее пределами. Но жизни и разума в космосе не найдено, и это заставляет о многом задуматься. Впрочем, пессимизм здесь неуместен. Астрономы регулярно открывают в космосе благоприятные для жизни места, следовательно, рано или поздно обнаружится и сама внеземная жизнь.

Для биологии это означало бы колоссальный прорыв в понимании самого феномена жизни и ее происхождения. Поэтому биологи крайне заинтересованы в находках астрономов. Среди планет у других звезд астрономы уже обнаружили десятки землеподобных, причем у некоторых из них, по-видимому, климат близок к земному. В ближайшее время закончится сооружение нескольких гигантских телескопов диаметром 25–40 метров, которые позволят получить спектры этих планет и поискать в них следы жизни. Но все же изучать чужую жизнь издалека – занятие неблагодарное. Много бы мы узнали о строении белков и ДНК, если бы изучали земную жизнь, глядя на нашу планету с Луны в телескоп?

Поэтому сейчас самое пристальное внимание обращено к объектам Солнечной системы, где обнаружены условия для жизни. К сожалению, на поверхности ни одного из них, кроме Земли, благоприятных условий нет. Но под поверхностью они могут быть. Тут следует напомнить, что и на Земле основная биомасса находится под твердой поверхностью. А поиски

внеземной жизни сейчас сосредоточились на трех объектах: это Марс, Европа (спутник Юпитера) и Энцелад (спутник Сатурна), где под поверхностью есть жидкая вода. Вместе с биологами астрономы изучают эти тела, не забывая при этом прослушивать Вселенную в поисках сигналов внеземных цивилизаций. Ведь разумная жизнь – это еще интереснее!

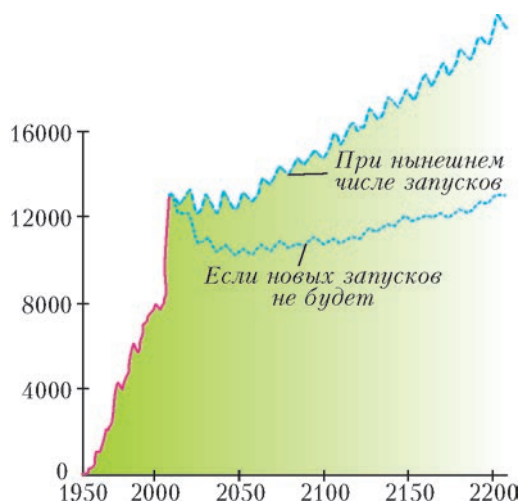
Экология

Состояние окружающей среды прямо влияет на нашу жизнь. Обычно заботой экологов является качество воздуха, воды, еды, уровень шума и прочие локальные параметры в пределах Земли. Но наша планета – частица большого космоса, который время от времени напоминает о себе.

Ближнее космическое пространство мы сами уже заполнили тысячами искусственных тел, которые иногда сталкиваются друг с другом, взрываются и таким образом размножаются как космический мусор. Немалая часть астрономических наблюдений (и заработка астрономов) связана с отслеживанием космического мусора для предупреждения землян и работников Международной космической станции. Уже десятки раз МКС уклонялась от опасных обломков, благодаря точному астрономическому прогнозу их движения.

На приведенном на следующей странице графике показано, как быстро растет количество космического мусора с момента запуска первого искусственного спутника Земли. Это вышедшие из строя спутники, последние ступени ракет-носителей, переходные отсеки, части взорвавшихся ракет или разрушившихся при взаимных соударениях спутников. Здесь учтены только крупные объекты, размером более 10 см, которые удается отслеживать методами радиолокации и которые представляют фатальную угрозу для «живых» спутников и космических кораблей и станций. Красная сплошная кривая – результат прямого подсчета, синие пунктирные кривые – теоретический прогноз.

В первые десятилетия космической эры спутники запускали очень часто, поскольку



Количество космического мусора на низких околоземных орбитах (200–2000 км)

ку были они недолговечны. Несколько резких подъемов количества мусора связаны со столкновениями спутников, взрывами ракет и преднамеренным разрушением «мертвых» спутников при испытании противоспутникового оружия.

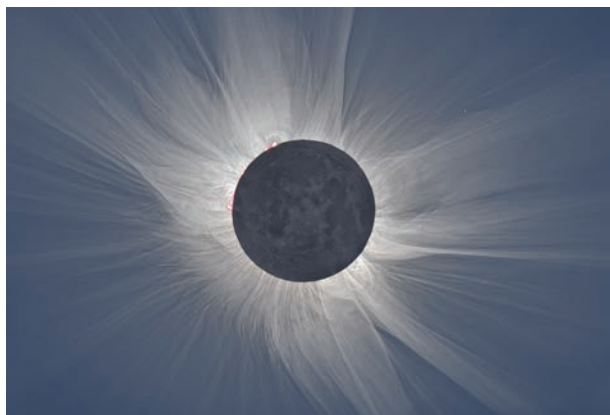
Две теоретические кривые различаются начальными предположениями. При расчете верхней из них предполагалось, что снизившаяся к первому десятилетию частота запуска спутников останется таковой надолго. Это приведет, как мы видим, к быстрому накоплению космического мусора. Нижняя кривая показывает прогноз при совершенно фантастическом предположении: что будет, если мы полностью прекратим космические запуски. Понятно, что на практике этого не случится, но рассмотреть такую теоретическую возможность интересно, и результат оказывается совершенно неожиданным — даже при полном запрете космических запусков количество мусора на орбите будет возрастать! Это произойдет за счет взаимных столкновений и деления крупных обломков на более мелкие, но тем не менее — опасные.

Если мы не хотим потерять возможность использовать околоземное пространство (т. е. пользоваться спутниковым телевидением, глобальной навигацией, прогнозом погоды и пр.), то необходимо внимательно следить за космическим мусором, чем и

занимались астрономы, а также разрабатывать методы очистки ближнего космоса. Тут у астрономов тоже есть идеи, возникшие при наблюдении за движением комет и астероидов.

Кстати — о них. Кометы и астероиды — это, в некотором смысле, тоже космический мусор естественного происхождения. И если мы не хотим, чтобы он неожиданно падал на нас, за ним надо следить. Астрономы стараются это делать, ежедневно обнаруживая в Солнечной системе сотни новых объектов, в основном — небольших астероидов. Всего их уже зафиксировано порядка миллиона, и за всеми ведется слежка и рассчитывается их движение в будущем. Но тотального контроля за всеми опасными телами мы пока наладить не можем. Для этого нужны специальные телескопы — наземные и космические — с большим полем зрения. Сейчас они в стадии проектирования, а некоторые уже и в стадии строительства. С их помощью астрономы хотя и не смогут защитить Землю, но смогут предупредить о грозящей опасности.

Еще одно важное направление астроэкологии это мониторинг звезд и особенно ближайшей из них — нашего Солнца. Мы пока плохо представляем, как меняется активность Солнца на больших интервалах времени, а от прогноза этой активности зависит будущее человечества. Возможности солнечной астрономии быстро растут. Еще недавно мы наблюдали только одно полушарие Солнца, видимое в данный момент с Земли, и не знали, какие сюрпризы готовит нам другое полушарие, которое через две недели повернется в нашу сторону (Солнце вращается с периодом около месяца). Но теперь космические телескопы контролируют Солнце со всех сторон, включая обратную, и во всех диапазонах электромагнитного спектра. Так что возможности кратковременного прогноза его активности резко возросли. Но по поводу долгосрочного прогноза пока еще много проблем. Мы знаем, что время от времени на Солнце бывают супервспышки, но подготовиться к ним пока не можем. Не-



Солнечная корона во время затмения¹

обходимо понять, что происходит под видимой поверхностью Солнца, и астрофизики сейчас работают над этим.

Однако не Солнцем единым богата наша Галактика: в ней еще сотни миллиардов звезд, причем некоторые из них могут быть опасны для Земли. Речь идет о взрывах массивных звезд в конце их эволюции, т. е. о вспышках сверхновых. Астрономы учатся распознавать звезды, готовые в ближайшее время взорваться. Один из кандидатов – Бетельгейзе, ярчайшая звезда в созвездии Орион. Астрономы следят за ней, ожидая взрыва. Но точный прогноз этого события пока невозможен. Для этого нужны чувствительные нейтринные телескопы, которых пока нет. Но они обязательно будут!

* * *

Итак, возвращаясь в школу после многих лет забвения, астрономия заметно изменила свое лицо. Сегодня «небесная наука» тесно связана с другими ветвями естествознания. Космос теперь воспринимается как научная лаборатория с невероятными возможностями. Удовлетворяя свою любознательность, человек побеждал в борьбе за существование. Сегодня предметом любознательности человека стала вся Вселенная. И в этом гарантия нашего будущего.

Астрономия вернулась в школу не для развлечения, а для изучения. Простое накопление знаний не может удовлетворить любознательного человека. Знания должны работать, их нужно уметь применять. Современные средства связи заливают нас потоком информации, среди которой есть чрезвычайно важная и интересная, но нередко встречается ошибочная и даже лживая. Только *активное* знание помогает нам фильтровать эти потоки и получать из них ту информацию, которая развивает наш интеллект, а не засоряет мозг.

Не буду вас убеждать, насколько полезны при изучении любого предмета интересные задачи с подробными решениями. Ведь «знать» и «уметь» – не одно и то же. Именно задачи учат нас *уметь*. Так давайте же их решать!

Задачи

Задача 1. *Астрономы Земли обнаруживают присутствие планет у других звезд по периодическому доплеровскому смещению линий в спектрах этих звезд, вызванному движением звезды относительно центра масс планетной системы. А если наши «братья по разуму» с соседней звезды будут измерять радиальную скорость Солнца с точностью 10 м/с, то смогут ли они заметить существование у Солнца планетной системы? (Радиальная, или лучевая, скорость – это проекция вектора скорости тела на луч зрения наблюдателя.)*

Решение. Большая часть массы нашей Солнечной системы сосредоточена в Юпитере, поэтому именно он оказывает основное гравитационное влияние на Солнце, которое в 1000 раз массивнее Юпитера. Оба они обращаются вокруг общего центра масс, к которому Солнце в 1000 раз ближе, чем Юпитер. Поскольку по орбите Юпитер движется со скоростью $v_{\text{Ю}} = 13 \text{ км/с}$ (это значение можно взять из справочника или вычислить самостоятельно, зная радиус орбиты Юпитера $5,2 \text{ а.е.} = 779 \text{ млн км}$ и его орбитальный период $11,9 \text{ лет}$), скорость обращения Солнца

¹ В «Кванте» №12 за 2017 год на странице 2 подпись под рисунком должна быть такой: Солнце в ультрафиолете и рентгене.

вокруг центра масс составляет

$$v_c = \frac{v_{Ю} M_{Ю}}{M_C} = 13 \text{ м/с}.$$

С такой амплитудой будет изменяться радиальная скорость Солнца для удаленного наблюдателя, если он расположен в плоскости орбиты Юпитера. Если же эта плоскость наклонена к его лучу зрения на угол β , то проекция лучевой скорости Солнца на луч зрения наблюдателя составит $13 \text{ м/с} \times \cos \beta$. Из условия $13 \text{ м/с} \times \cos \beta > 10 \text{ м/с}$ находим ограничение на угол: $\beta < 40^\circ$. Поскольку плоскость орбиты Юпитера практически совпадает с эклиптикой (т.е. плоскостью орбиты Земли), то угол β практически равен эклиптической широте. Следовательно, если звезда, у которой живут «братья по разуму», имеет эклиптическую широту $|\beta| < 40^\circ$, то у них есть шанс заметить периодическое движение Солнца и сделать вывод о наличии у него планетной системы (или, по крайней мере, одного Юпитера). Правда, измерение радиальной скорости Солнца придется проводить довольно долго – более одного орбитального периода Юпитера, т.е. более 12 лет.

Отметим, что когда эта задача впервые была сформулирована в начале 2000-х годов, указанная в условии точность измерений 10 м/с вполне соответствовала уровню развития земной астрономии тех лет. Однако нынешний (2018 г.) уровень существенно возрос, и уже можно ориентироваться на точность измерения лучевой скорости в 1 м/с . Если и у наших «братьев по разуму» произошел такой же прогресс, то каким будет при этом критическое значение угла β ?

Задача 2. Если жители планеты у звезды α Кентавра систематически измеряют положение Солнца с точностью $0,01''$, то смогут ли они заметить колебания в движении Солнца, вызванные обращением вокруг него планет Солнечной системы? Годичный параллакс звезды α Кентавра составляет $p = 0,751''$.

Решение. Как мы уже знаем, практически вся масса нашей планетной системы заключена в Юпитере, поэтому в подоб-

ных задачах можно рассматривать двойную систему Солнце – Юпитер, обращающуюся вокруг общего центра масс. Расстояние Солнца от центра масс равно $r_c = r_{Ю} M_{Ю} / M_C$, где $r_{Ю}$ – расстояние Юпитера от центра масс, практически совпадающее с радиусом его орбиты ($5,2 \text{ а.е.} = 779 \text{ млн км}$). Тогда амплитуда углового перемещения Солнца при наблюдении со звезды α Кентавра при расстоянии до нее D будет

$$\delta = \frac{r_c}{D} = \frac{r_{Ю} (M_{Ю} / M_C)}{D} \text{ (радиан)}$$

(поскольку угол, очевидно, очень мал, значения арксинусов и арктангенсов можно заменять значениями их аргументов, если углы выражены в радианах). В угловых секундах это будет

$$\delta = \frac{206265'' r_c}{D} = \frac{206265'' r_{Ю} (M_{Ю} / M_C)}{D}.$$

Вспомним, что годичным параллаксом объекта называют угол, под которым от него виден отрезок в 1 а.е. (радиус земной орбиты): в угловых секундах $p = 206265'' (1 \text{ а.е.} / D)$. Поэтому в формуле для δ вместо расстояния (D) можно использовать параллакс:

$$\delta = p (r_c / 1 \text{ а.е.}) = p (r_{Ю} / 1 \text{ а.е.}) \frac{M_{Ю}}{M_C}.$$

Положив $M_C / M_{Ю} = 1000$, получим

$$\delta = 0,751'' \frac{5,2}{1000} = 0,004''.$$

Это значение в 2,5 раза меньше указанной в условии задачи предельной точности измерений ($0,01''$). Значит, пользуясь этим методом, астрономы из системы α Кентавра не смогут узнать, что у Солнца есть планеты.

Задача 3. Карликовая планета Плутон находится далеко от Солнца, поэтому принято считать, что даже днем там очень темно. Сравните дневное освещение Плутона с ночным освещением Земли в полнолуние. Учтите, что для наблюдателя на Земле Солнце имеет видимую звездную величину $-26,7^m$, а полная Луна – величину $-12,7^m$. Определите, во сколь-