

THE PUZZLES OF THE SUN

G. E. KOCHAROV

Two puzzles of the Sun: the solar neutrino deficit and ^3He rich solar flares are discussed. It is shown that both puzzles can be solved in the frame of nonstandard behaviour of ^3He in hot and dense plasma.

Обсуждаются две загадки Солнца: дефицит солнечных нейтрино и солнечные вспышки, богатые ^3He . Показано, что обе загадки могут быть разрешены нестандартным поведением изотопа ^3He в условиях горячей и плотной плазмы.

О ЗАГАДКАХ СОЛНЦА

Г. Е. КОЧАРОВ

Санкт-Петербургский государственный
технический университет

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованию Солнца непрерывно растет, и это особенно примечательно на фоне важнейших достижений в астрофизике в целом. Возрастающий интерес к физике Солнца и гелиосферы обусловлен следующими обстоятельствами. Во-первых, стало ясно, что процессы, протекающие в различных областях солнечного вещества и около-солнечном пространстве, характерны для других космических объектов. Явления типа солнечных открыты и на других звездах: звездные осцилляции, пятна, вспышки, короны, ветры и глубокие и длительные минимумы. Солнце является ближайшей звездой. Всего около восьми минут требуется, чтобы солнечные лучи достигли Земли, тогда как от самой близкой к нам звезды Проксима Центавра свет идет 4,3 года. Такая близость Солнца к Земле приводит к тому, что она является единственной звездой, которую мы видим не как точку, а как диск. Поэтому именно эту (нашу) звезду можно изучить наиболее детально. Солнце и гелиосфера представляют собой уникальную гигантскую лабораторию, где можно осуществить целенаправленные эксперименты по проверке сценариев и моделей эволюции звезд, изучению основополагающих проблем магнитогидродинамики, физики плазмы, атомной физики и даже космологии и физики элементарных частиц.

Во-вторых, результаты десятилетних экспериментов по регистрации солнечных нейтрино показали, что уверенность в том, будто мы достаточно хорошо знаем, каким образом происходят термоядерные реакции в глубоких слоях Солнца, как минимум поколебалась.

В-третьих, с открытием космических лучей в 1912 году связано начало астрофизики высоких энергий. Неизбежно возник вопрос о местоположении и механизме действия ускорителя космических лучей. Эти вопросы все еще не решены. 50 лет назад было установлено местоположение ближайшего к нам ускорителя путем регистрации космических лучей во время солнечной вспышки. Комплексное изучение солнечных вспышек с использованием спутниковой техники, баллонных, наземных и подземных экспериментов позволило значительно продвинуться в понимании вспышечного процесса. Однако мы еще не в состоянии ответить на некоторые вопросы, связанные с проблемой накопления вспышечной энергии и генерации различных ускоренных частиц. При этом солнечный ускоритель

является наиболее доступным для детального изучения механизма генерации ускоренных частиц по сравнению с другими астрофизическими источниками.

В-четвертых, Солнце является единственным астрофизическим объектом, который небезразличен для обитателя Земли. Оно согревает нас своим теплом, дарует свет, именно Солнце способствовало появлению всего живого на Земле и является источником всех видов энергии, используемой человечеством. Непрерывное увеличение энергетических потребностей выдвигает проблему прямого использования солнечной энергии, которая излучается с поразительным постоянством миллиарды лет. Каждый квадратный метр поверхности Солнца в энергетическом отношении можно сравнить с электростанцией мощностью 60 тыс. кВт. Научиться преобразовывать солнечную энергию — значит навсегда отвести неумолимо нависшую над человечеством тень энергетического кризиса.

Земля погружена во внешнюю исключительно подвижную атмосферу Солнца и, следовательно, подвергается сильному влиянию “погоды” на Солнце. Оно воздействует на климат и биосферу, приводит в движение атмосферу планеты и т.д. Сейчас, когда изучение окружающей среды является одной из самых актуальных проблем, исследование солнечно-земных связей приобретает особое научное и научно-прикладное значение.

В статье будут обсуждаться две проблемы-загадки: дефицит солнечных нейтрино и изотоп ^3He ; солнечные вспышки, богатые ^3He .

СОЛНЕЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, БОГАТЫЕ ИЗОТОПОМ ^3He

Солнечной активностью называют комплекс различных явлений, происходящих в атмосфере Солнца и характеризующихся значительными изменениями со временем физических характеристик соответствующих областей солнечной атмосферы. Исторически получилось так, что, говоря о солнечной активности, прежде всего имеют в виду солнечные пятна. Это справедливо и сегодня, так как среди явлений солнечной активности трудно найти более сложное и непонятное образование, чем солнечное пятно. Солнечные пятна имеют размеры от тысячи до десятков тысяч километров и представляют собой относительно холодные места фотосферы Солнца. Температура их на 1500–2000° ниже температуры окружающей среды. Пятна имеют тарелкообразную форму с дном на глубине 700–1000 км. Солнечные пятна обладают сильным магнитным полем (2000–3000 Гс, иногда даже 5000 Гс). Такое поле в состоянии уменьшить или даже подавить конвективный перенос энергии в подфотосферных слоях, тем самым создавая дефицит выходящей лучистой энергии. Поэтому и считается, что виновником низкой температуры солнечных пятен является

именно магнитное поле, не позволяющее перенести энергию из более низких слоев в более высокие.

Группы солнечных пятен появляются не по всему диску Солнца, а только в так называемых королевских зонах, расположенных примерно до 40° по обе стороны от солнечного экватора. Группы солнечных пятен вблизи края видимого диска Солнца всегда наблюдаются на уровне фотосферы в окружении светлых волокнистых образований, называемых фотосферными факелами. Это крайне неоднородные образования, которые характеризуются широким диапазоном изменения яркости, температуры, скорости движения вещества, напряженности поля в разных местах. Размеры их весьма внушительны — от десятков до сотен тысяч километров. Они существуют от нескольких дней до нескольких месяцев. Развитие факельных площадок начинается с увеличения их яркости и компактности. Площадь факельных площадок постепенно увеличивается. После исчезновения пятен они становятся более рыхлыми и менее контрастными, но размер их растет. Затем площадь их начинает уменьшаться, и факельная площадь теряется в окружающей среде. Иногда в факельных площадках, наблюдаемых в линии водорода H_α , внезапно происходит значительное увеличение яркости в отдельных местах, чаще вблизи солнечных пятен. Это одна из особенностей самого впечатляющего явления активности Солнца — солнечной вспышки, которую легче всего наблюдать. Энергия крупной вспышки достигает 10^{33} эрг, что в несколько сот раз больше, чем можно получить при сжигании всех разведанных запасов нефти и угля. Подавляющее большинство солнечных вспышек происходит в районах групп солнечных пятен со сложным строением магнитного поля.

Одним из ярких проявлений солнечных вспышек является ускорение частиц до высоких энергий в верхней части атмосферы Солнца. Солнечные космические лучи (СКЛ) регистрируются у Земли в виде внезапных резких повышений интенсивности космических лучей на фоне галактических космических лучей. Полученный из наблюдений верхний предел энергии СКЛ составляет около 200 ГэВ. Основную долю СКЛ составляют протоны, имеются также ядра гелия и тяжелых элементов. Обнаружен уникальный класс вспышек — вспышки, богатые изотопом ^3He . Установленное на опыте аномальное обогащение солнечных космических лучей редким изотопом ^3He — очень интересное явление. Состояние и перспективы исследований этого класса солнечных вспышек подробно обсуждаются в работах автора [1, 2]. Здесь мы вкратце обсудим основные характеристики ^3He -богатых вспышек, природа которых все еще загадочна.

В настоящее время имеется каталог [1, 2], содержащий более 150 солнечных вспышек, богатых ^3He . Для 15 из них коэффициент обогащения ^3He относительно ^4He больше 5000 и для 70 — более 1000. Под

коэффициентом обогащения понимается следующее соотношение:

$$Q_{3,4} = \frac{I_3/I_4}{n_3/n_4},$$

где I_3 и I_4 — измеренные значения интенсивности потоков ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ в солнечных космических лучах, n_3 и n_4 — концентрации рассматриваемых изотопов в солнечной атмосфере.

Аномально высокое отношение потоков ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$, достигающее ≥ 10 (в солнечной атмосфере $n_3/n_4 = 4 \cdot 10^{-4}$), является главной характеристикой соответствующих вспышек. Вопросы о том, где и каким образом происходит столь сильное разделение изотопов, являются предметом интенсивных обсуждений и дискуссий.

Важным свойством исследуемых событий является отсутствие измеримых потоков дейтерия ${}^2\text{H}$ и трития ${}^3\text{H}$. Этот факт и экспериментальные данные по ядерным вспышечным γ -линиям исключают возможность обогащения солнечных космических лучей ${}^3\text{He}$ за счет ядерных реакций в атмосфере Солнца под действием ускоренных во вспышке протонов и α -частиц, так как одновременно с ${}^3\text{He}$ должны неизбежно генерироваться дейтерий, тритий и ядерные γ -линии.

К настоящему времени предложены следующие возможности интерпретации экспериментальных данных:

1) за счет плазменных эффектов происходит обогащение изотопом ${}^3\text{He}$ на стадии преднагрева вспышечной плазмы;

2) непосредственно перед вспышкой или на начальной стадии вспышки вспышечная область обогащается ${}^3\text{He}$ за счет поступлений ионов ${}^3\text{He}$ из глубинных слоев солнечной плазмы.

Рассмотрим обе возможности.

Поскольку ускорение частиц происходит не в вакууме, а в достаточно плотной плазме, любой процесс ускорения сопровождается потерями энергии за счет взаимодействия частиц с окружающими ионами. Поэтому эффективность ускорения определяется соотношением темпа ускорения и темпа потерь энергии. Для ускорения очень важной является начальная энергия ускоряемого иона ${}^3\text{He}$ или ${}^4\text{He}$. Поскольку у ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ при равенстве зарядов имеется разница в массе, эффективность взаимодействия с плазменными турбулентностями плазмы у изотопа ${}^3\text{He}$ оказывается выше. В результате этого начальная энергия ионов ${}^3\text{He}$ в предвспышечной плазме оказывается больше, чем у изотопа ${}^4\text{He}$, и соответственно ускорение ${}^3\text{He}$ оказывается более эффективным.

Идея преимущественного ускорения ${}^3\text{He}$ за счет плазменных эффектов была сформулирована автором настоящей статьи 20 лет назад и получила дальнейшее развитие в других работах. Создана конкрет-

ная теория, в рамках которой удается объяснить все основные свойства нового класса солнечных вспышек — вспышек, богатых ${}^3\text{He}$ [1, 2].

Рассмотрим возможность обогащения вспышечной области ${}^3\text{He}$ за счет термоядерного источника. Согласно теоретической модели, по мере удаления от центра Солнца концентрация ${}^3\text{He}$ монотонно увеличивается. На расстоянии 30%-ного радиуса концентрация ${}^3\text{He}$ достигает максимального значения $\sim 1\%$ и затем постепенно уменьшается. Поэтому приход ${}^3\text{He}$ термоядерной природы во вспышечную область значительно увеличил бы концентрацию ${}^3\text{He}$. Однако таким образом полностью решить проблему богатых ${}^3\text{He}$ вспышек не представляется возможным. Вполне вероятно, что работают одновременно два механизма: преимущественное ускорение ${}^3\text{He}$ и обогащение вспышечной области ${}^3\text{He}$ термоядерной природы.

О ПРОБЛЕМЕ ДЕФИЦИТА ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

Нейтрино являются единственными частицами, которые генерируются в термоядерной печи Солнца и беспрепятственно его покидают. Через две секунды после их рождения в глубоких недрах нашего светила нейтрино уже “на свободе” и имеют в своей памяти детальную информацию о глубоких недрах. Проблема термоядерных реакций в недрах Солнца подробно рассмотрена в работе автора [3]. Здесь основное внимание уделяется роли изотопа ${}^3\text{He}$ в решении нейтринной загадки.

В последние 30 лет экспериментальная нейтринная астрофизика непрерывно преподносит новые загадки и вопросы. Постоянный дефицит потока солнечных нейтрино по сравнению с предсказаниями теории стал нормой и инициировал разработку новых идей и предложений.

В настоящее время имеются четыре серии экспериментальных данных по регистрации различных групп солнечных нейтрино (подробности см. в [3]). В течение 30 лет ведутся радиохимические эксперименты на основе реакции ${}^{37}\text{Cl} + \nu \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$. Согласно теории, основной вклад в эту реакцию должны внести нейтрино от распада ${}^8\text{B}$ (табл. 1) в редкой ветви протон-протонного цикла. Исследования по прямой регистрации нейтрино от распада ${}^8\text{B}$ с измерением энергии и направления движения нейтрино выполняются в эксперименте KAMIOKANDE с 1987 года. Радиохимические эксперименты по реакции ${}^{71}\text{Ga} + \nu \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$ ведутся последние пять лет двумя группами ученых ряда стран. Важной особенностью этой реакции является ее чувствительность в основном к первой реакции протон-протонного цикла $p + p \rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu$. Темп этой реакции определяет скорость энерговыделения в термоядерной печи Солнца в реальном масштабе времени.

Таблица 1. Последовательность реакций протон-протонного цикла

Реакция	Вероятность, %	Энергия нейтрино, МэВ	Тип нейтрино
$p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$ или $p + e^- + p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$	99,75 0,25	$\leq 0,420$ 1,442	p–p пер
${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	100		
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + p$ или ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$	85 15		${}^7\text{Be}$
${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	15	0,861 (90%) 0,383 (10%)	
${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$ или ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$	0,02 0,02	< 15	${}^8\text{B}$
${}^8\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ или ${}^3\text{He} + p \rightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$	0,02	$\leq 18,77$	hep

Во всех экспериментах наблюдается дефицит в потоках солнечных нейтрино по сравнению с предсказаниями Стандартной солнечной модели (ССМ).

В эксперименте KAMIOKANDE установлено, что зарегистрированные нейтрино идут от направления на Солнце и что их энергетический спектр согласуется с предсказаниями теории по спектру нейтрино от распада ${}^8\text{B}$ (${}^8\text{B}$ -нейтрино). Измеренный поток нейтрино составляет $(2,7 \pm 0,5) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Сравнение этой величины с предсказаниями ССМ показывает, что на опыте имеется двукратный дефицит потока нейтрино. Используя полученную величину потока ${}^8\text{B}$ -нейтрино можно вычислить скорость реакции для радиохимического эксперимента ${}^{37}\text{Cl}(\nu, e^-){}^{37}\text{Ar}$. Она оказывается в пределах от 4 до 5 СЕН¹. В хлорном эксперименте за время функционирования эксперимента KAMIOKANDE для скорости той же реакции было получено значение $4,2 \pm 0,12$ СЕН. Таким образом, можно заключить, что результаты двух различных по принципу работы экспериментов хорошо согласуются. В “галлиевом” радиохимическом эксперименте основной вклад в скорость реакции должны внести нейтрино от первой реакции протон-протонного цикла (p–p-нейтрино). Согласно теории, вклад p–p-нейтрино составляет 71 СЕН. С учетом всех групп нейтрино полная скорость равна 127 СЕН. По экспериментальным данным, скорость реакции ${}^{71}\text{Ga} + \nu \rightarrow$

¹ Солнечная единица нейтрино, определяемая как 10^{-36} актов реакции в 1 секунду с одним ядром мишени.

$\rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$ всего 77 ± 10 СЕН, что значительно ниже величины, предсказанной теорией. Таким образом, и в этом эксперименте имеется дефицит нейтрино.

Какова же природа этого дефицита?

Следующим после p–p-нейтрино по вкладу в скорость реакции являются “бериллиевые” – 34 СЕН, далее ${}^8\text{B}$ -нейтрино – 14 СЕН. Вклад нейтрино от углеродно-азотного цикла составляет 10 СЕН. Дефицит ${}^8\text{B}$ нейтрино может иметь температурную природу (поток очень сильно зависит от температуры в центре Солнца: пропорционально T^{18}) или вызывается пониженной концентрацией ${}^7\text{Be}$ (в два раза). В первом случае, согласно теории, вклад в галлиевую реакцию бериллиевых нейтрино должен быть 34 СЕН, а во втором случае он будет в два раза меньше. Таким образом, если вычесть из экспериментального значения скорости реакции вклад ${}^8\text{B}$ -и ${}^7\text{Be}$ -нейтрино, получим от 35 до 55 СЕН на долю p–p-нейтрино и нейтрино от C–N-цикла. Теоретическое значение вклада p–p-нейтрино составляет 71 СЕН, то есть и в этом случае имеется дефицит. Таким образом, существует глобальный дефицит солнечных нейтрино. Такой глобальный дефицит был предсказан в 1970 году автором настоящей статьи совместно с Ю.Н. Старбуновым в рамках сформулированной гипотезы [4, 5] о повышенном содержании ${}^3\text{He}$ в недрах Солнца по сравнению с предсказаниями стандартных моделей Солнца. Были построены модели для различных значений концентрации ${}^3\text{He}$ и вычислены потоки различных групп нейтрино. На рис. 1 представлены зависимости потоков различных групп нейтрино от содержания ${}^3\text{He}$ в недрах Солнца. По оси абсцисс указаны также концентрации ${}^3\text{He}$ в недрах Солнца и по ССМ и содержание ${}^3\text{He}$ в солнечном ветре. Экспериментальные данные по потоку ${}^8\text{B}$ -нейтрино соответствуют весовой концентрации ${}^3\text{He}$ в области горения водорода $3 \cdot 10^{-5}$. Эта величина всего в несколько раз больше предсказания ССМ для центра Солнца – $7,7 \cdot 10^{-6}$ и значительно меньше концентрации ${}^3\text{He}$ в солнечном ветре – 10^{-4} .

Принципиально важно, что указанное значение существенно меньше, чем концентрация ${}^3\text{He}$, генерированного за счет реакций водородного горения за время функционирования ядерного котла в недрах Солнца. Весовая концентрация накопленного ${}^3\text{He}$ в центре Солнца составляет $7,7 \cdot 10^{-6}$ и по мере удаления от центра растет, достигнув величины $3,3 \times 10^{-3}$ на расстоянии 0,28 радиуса Солнца. Видно, что приведенное выше значение $3 \cdot 10^{-5}$ может быть обеспечено, даже если первичное Солнце вообще не содержало ${}^3\text{He}$. Это может быть как в результате диффузии ${}^3\text{He}$, так и скачкообразного изменения структуры Солнца. Ясно, что непрерывный рост градиента концентрации ${}^3\text{He}$ в недрах Солнца не может быть перманентным. Отметим также, что в процессе горения водорода генерируется очень

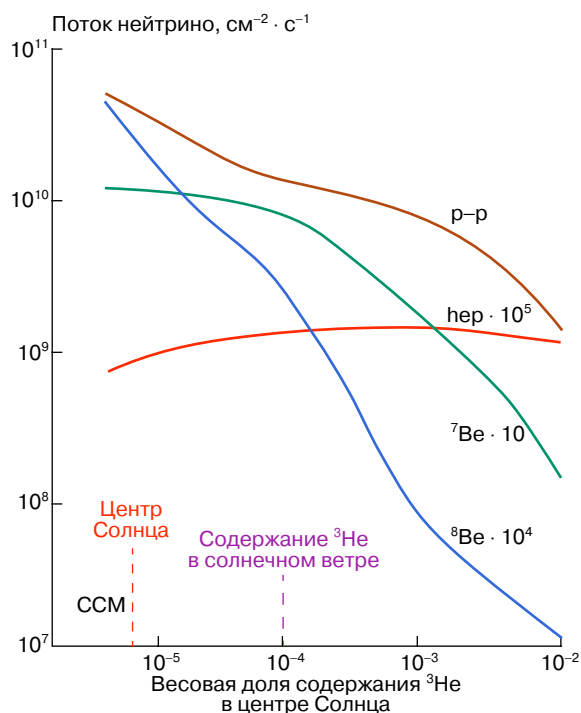


Рис. 1. Зависимость потоков различных групп нейтрино от весовой концентрации ^3He в недрах Солнца

эффективное горючее ^3He , которое должно быть использовано впоследствии. К сожалению, теория не в состоянии предсказать величину градиента, выше которой неизбежно должен быть приток ^3He в центральную область.

Во время подготовки статьи в научной печати [6] были опубликованы предварительные результаты комплексного изучения солнечной активности в экспериментах на функционирующем в настоящее время спутнике SOHO. Несмотря на то что Солнце находится в состоянии низкой активности, обнаружены значительные динамические явления в солнечной атмосфере. Принципиально важными являются результаты эксперимента по изучению осцилляций Солнца. Установлено, что распределение гелия в недрах Солнца отличается от предсказаний стандартной модели, а именно градиент по радиусу меньше, чем предсказывает теория. Этот

результат свидетельствует в пользу рассмотренной выше возможности.

Таким образом, если рассмотренный вариант отражает реальность, то должен быть наибольший дефицит нейтринного потока от распада ^8B и несколько меньший дефицит потока $p-p$ -нейтрино. Поток ^7Be нейтрино почти не меняется по сравнению с предсказаниями теории CCM, а поток ^7He -нейтрино ($^3\text{He} + p \rightarrow ^4\text{He} + e^+ + \nu_e$) несколько возрастает. Все это реально проверяемо экспериментально. Предстоящие эксперименты BOREXINO — регистрация ^7Be -нейтрино и SUPERKAMIOKANDE (^8B - и ^7He -нейтрино) в ближайшие годы должны дать ответ на вопрос, какова же природа обнаруженного глобального дефицита солнечных нейтрино.

В заключение хотелось бы отметить, что рассмотренные выше загадки связаны с удивительным и интересным изотопом ^3He . Изотопы гелия хорошо известны своими нестандартными свойствами. Может оказаться, что в условиях больших давлений и температур (недра Солнца) изотопы гелия преподнесут нам очередной сюрприз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочаров Г.Е. Ядерные реакции на Солнце. М.: Знание, 1976. 64 с.
2. Кочаров Г.Е. // Итоги науки и техники. Астрономия. 1987. Т. 32. С. 43–141.
3. Кочаров Г.Е. Термоядерный котел в недрах Солнца и проблема солнечных нейтрино // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 10. С. 99–105.
4. Кочаров Г.Е., Старбунов Ю.Н. // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. С. 132–135.
5. Кочаров Г.Е. // Изв. АН России. 1996. Т. 6. С. 112–120.
6. Hellemans A. // Science. 1996. Vol. 272. P. 813.

* * *

Грант Егорович Кочаров, доктор физико-математических наук, зав. кафедрой космических исследований Санкт-Петербургского государственного технического университета, научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской Академии наук. Область научных интересов: нейтринная астрофизика, физика Солнца, астрофизика космических лучей. Основатель новой области науки «Палеоастрофизика». Автор пяти монографий и более 400 публикаций.