**О загадках Солнца**

Г. Е. Кочаров, Санкт-Петербургский государственный технический университет

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.

**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 околосолнечном 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**

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

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 Н , 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 1033 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]](http://www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm#[1]#[1]), [[2]](http://www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm#[2]#[2]). Здесь мы вкратце обсудим основные характеристики 3He-богатых вспышек, природа которых все еще загадочна.

В настоящее время имеется каталог [[1]](http://www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm#[1]#[1]), [[2]](http://www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm#[2]#[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:



где I3 и I4 - измеренные значения интенсивности потоков 3He и 4He в солнечных космических лучах, n3 и n4 - концентрации рассматриваемых изотопов в солнечной атмосфере.

Аномально высокое отношение потоков 3He и 4He, достигающее 10 (в солнечной атмосфере n3/n4 = 410-4), 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 2Н и трития 3Н. Этот факт и экспериментальные данные по ядерным вспышечным -линиям исключают возможность обогащения солнечных космических лучей 3He за счет ядерных реакций в атмосфере Солнца под действием ускоренных во вспышке протонов и -частиц, так как одновременно с 3He должны неизбежно генерироваться дейтерий, тритий и ядерные -линии.



К настоящему времени предложены следующие возможности интерпретации экспериментальных данных:

за счет плазменных эффектов происходит обогащение изотопом 3He на стадии преднагрева вспышечной плазмы;

непосредственно перед вспышкой или на начальной стадии вспышки вспышечная область обогащается 3He за счет поступлений ионов 3Не 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 3Не или 4Не. Поскольку у 3Не и 4Не при равенстве зарядов имеется разница в массе, эффективность взаимодействия с плазменными турбулентностями плазмы у изотопа 3Не оказывается выше. В результате этого начальная энергия ионов 3He в предвспышечной плазме оказывается больше, чем у изотопа 4He, и соответственно ускорение 3He оказывается более эффективным.

Идея преимущественного ускорения 3He за счет плазменных эффектов была сформулирована автором настоящей статьи 20 лет назад и получила дальнейшее развитие в других работах. Создана конкретная теория, в рамках которой удается объяснить все основные свойства нового класса солнечных вспышек - вспышек, богатых 3He [[1]](http://www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm#[1]#[1]), [[2]](http://www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm#[2]#[2]).

Рассмотрим возможность обогащения вспышечной области 3He за счет термоядерного источника. Согласно теоретической модели, по мере удаления от центра Солнца концентрация 3He монотонно увеличивается. На расстоянии 30%-ного радиуса концентрация 3He достигает максимального значения ~1% и затем постепенно уменьшается. Поэтому приход 3He термоядерной природы во вспышечную область значительно увеличил бы концентрацию 3He. Однако таким образом полностью решить проблему богатых 3He вспышек не представляется возможным. Вполне вероятно, что работают одновременно два механизма: преимущественное ускорение 3He и обогащение вспышечной области 3He 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]](http://www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm#[3]#[3]). Здесь основное внимание уделяется роли изотопа 3He 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]](http://www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm#[3]#[3])). В течение 30 лет ведутся радиохимические эксперименты на основе реакции 37Cl + 37Ar + e-. Согласно теории, основной вклад в эту реакцию должны внести нейтрино от распада 8В ([табл. 1](http://www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm#table1#table1)) в редкой ветви протон-протонного цикла. Исследования по прямой регистрации нейтрино от распада 8В с измерением энергии и направления движения нейтрино выполняются в эксперименте KAMIOKANDE с 1987 года. Радиохимические эксперименты по реакции 71Ga + 71Ge + 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 2D + e+ + . 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 2H + e+ + | 99,75 | 0,420 | p-p |
| p + e- + p 2H + | 0,25 | 1,442 | pep |
| 2H + p 3He + | 100 |  |  |
| 3He + 3He 4He + p + p | 85 |  |  |
| или | | | |
| 3He + 4He 7Be + | 15 |  | 7Be |
| 7Be + e- 7Li + | 15 | 0,861 (90%) |  |
| 0,383 (10%) |  |
| или | | | |
| 7Be + p 8B + | 0,02 |  |  |
| 8B 8Be + e+ + | 0,02 | < 15 | 8B |
| 8Be 4He + 4He | 0,02 |  |  |
| или | | | |
| 3He + p 4He + e+ + |  | 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 8В (8В-нейтрино). Измеренный поток нейтрино составляет (2,7 0,5) 106 см-2 с-1. Сравнение этой величины с предсказаниями ССМ показывает, что на опыте имеется двукратный дефицит потока нейтрино. Используя полученную величину потока 8В-нейтрино можно вычислить скорость реакции для радиохимического эксперимента 37Cl(, e-) 37Ar. Она оказывается в пределах от 4 до 5 СЕН. В хлорном эксперименте за время функционирования эксперимента KAMIOKANDE для скорости той же реакции было получено значение 4,2 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 (р-р-нейтрино). Согласно теории, вклад р-р-нейтрино составляет 71 СЕН. С учетом всех групп нейтрино полная скорость равна 127 СЕН. По экспериментальным данным, скорость реакции 71Ga + 71Ge + 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 8В-нейтрино - 14 СЕН. Вклад нейтрино от углеродно-азотного цикла составляет 10 СЕН. Дефицит 8В нейтрино может иметь температурную природу (поток очень сильно зависит от температуры в центре Солнца: пропорционально Т18) или вызывается пониженной концентрацией 7Ве (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 8В- и 7Ве-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]](http://www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm#[4]#[4]), [[5]](http://www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm#[5]#[5]) о повышенном содержании 3Не в недрах Солнца по сравнению с предсказаниями стандартных моделей Солнца. Были построены модели для различных значений концентрации 3Не и вычислены потоки различных групп нейтрино. На [рис. 1](http://www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm#fig1#fig1) представлены зависимости потоков различных групп нейтрино от содержания 3Не в недрах Солнца. По оси абсцисс указаны также концентрации 3Не в недрах Солнца и по ССМ и содержание 3Не в солнечном ветре. Экспериментальные данные по потоку 8В-нейтрино соответствуют весовой концентрации 3Не в области горения водорода 3 10-5. Эта величина всего в несколько раз больше предсказания ССМ для центра Солнца - 7,7 10-6 и значительно меньше концентрации 3Не в солнечном ветре - 10-4.



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

Принципиально важно, что указанное значение существенно меньше, чем концентрация 3Не, генерированного за счет реакций водородного горения за время функционирования ядерного котла в недрах Солнца. Весовая концентрация накопленного 3He в центре Солнца составляет 7,7 10- 6 и по мере удаления от центра растет, достигнув величины 3,3 x 10-3 на расстоянии 0,28 радиуса Солнца. Видно, что приведенное выше значение 3 10-5 может быть обеспечено, даже если первичное Солнце вообще не содержало 3Не. Это может быть как в результате диффузии 3Не, так и скачкообразного изменения структуры Солнца. Ясно, что непрерывный рост градиента концентрации 3Не в недрах Солнца не может быть перманентным. Отметим также, что в процессе горения водорода генерируется очень эффективное горючее 3Не, которое должно быть использовано впоследствии. К сожалению, теория не в состоянии предсказать величину градиента, выше которой неизбежно должен быть приток 3Не в центральную область.



Во время подготовки статьи в научной печати [[6]](http://www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm#[6]#[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 8В и несколько меньший дефицит потока р-р-нейтрино. Поток 7Ве нейтрино почти не меняется по сравнению с предсказаниями теории ССМ, а поток hер-нейтрино (3He + p 4He + e+ + ne) несколько возрастает. Все это реально проверяемо экспериментально. Предстоящие эксперименты BOREXINO - регистрация 7Ве-нейтрино и SUPERKAMIOKANDE (8B- и hep-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.

**Список литературы**

Кочаров Г.Е. Ядерные реакции на Солнце. М.: Знание, 1976. 64 с.

Кочаров Г.Е. // Итоги науки и техники. Астрономия. 1987. Т. 32. С. 43-141.

Кочаров Г.Е. Термоядерный котел в недрах Солнца и проблема солнечных нейтрино // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. No 10. С. 99-105.

Кочаров Г.Е., Старбунов Ю.Н. // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. С. 132-135.

Кочаров Г.Е. // Изв. АН России. 1996. Т. 6. С. 112-120.

Hellemans A. // Science. 1996. Vol. 272. P. 813.