

СОЛНЦЕ КАК ФИЗИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ДЛЯ ПОИСКА ЧАСТИЦ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

© 2005 г. Ю. Н. Гнедин, доктор физ.-мат. наук

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория, Санкт-Петербург

В статье рассматривается одна из основных проблем современной астрономии – проблема темной материи во Вселенной. Анализируются возможные кандидаты в объекты темной материи. Излагается история поиска частиц – аксионов и слабо взаимодействующих массивных частиц – с помощью астрономических методов, основанных на анализе интенсивности, спектрального распределения и вариаций оптического и ионизирующего излучений Солнца и звезд. Особенно выделена роль Солнца как физической лаборатории для поиска слабо взаимодействующих частиц (аксионов), которые генерируют оптические и рентгеновские фотоны в результате распада и конверсии в магнитном поле. Показаны перспективные возможности Постоянного космического солнечного патруля для поиска аксионов, которые генерируются в центре Солнца.

Коды OCIS: 350.1270, 350.5400.

*Поступила в редакцию 19.01.2005.***Введение**

Двадцатый век можно назвать золотым веком квантовой физики и физики элементарных частиц. Можно с уверенностью сказать, что 21-й век будет золотым веком для астрономии и особенно для космологии. Всеволновый характер современной астрономии позволяет осуществлять наблюдения, используя весь спектр электромагнитного излучения, включая радио-, оптическое, рентгеновское, гамма- и нейтринное излучения, излучение фотонов сверхвысокой энергии и космические лучи. Именно это обстоятельство привело к стремительному росту наших знаний как о конкретных астрономических объектах, так и всей Вселенной в целом и в особенности о ее структуре. Астрономы открыли новые необычные формы материи и энергии. Оказалось, что состав Вселенной совсем не похож на состав окружающего непосредственно нас мира. Если рассматривать среднюю плотность вещества или энергии, то для Вселенной в целом обычное барионное вещество составляет только 4%, на 23% Вселенная состоит из невидимой, так называемой “темной материи”, а 73% средней плотности энергии составляет “темная энергия”, т. е. новый вид поля (по-видимому, скалярного), который обеспечивает ускоренное хаббловское расширение Вселенной.

Основная часть данной статьи посвящена одной из наиболее интересных проблем современной астрономии – проблеме темной материи в приложении к исследованию Солнца. Иногда также используется термин “скрытая масса”. Речь пойдет о той части вещества во Вселенной, которое проявляет себя единственным способом – через гравитационное взаимодействие. Истоки этого открытия относятся еще к 40-м годам прошлого столетия. Впервые проблему темной материи сформулировал Цвики в 1933 г., хотя первым астрономом, кто соприкоснулся

с этой проблемой, можно считать известного эстонского астронома Эпика. Именно Эпик первым обратил внимание на тот факт, что количество светящейся материи в космических структурах (галактиках, скоплениях галактик) не всегда соответствует картине гравитационного взаимодействия звезд в этих структурах в соответствии с законом Ньютона.

Рассмотрим в качестве примера спиральную галактику, которая представляет собой образование из сотни миллиардов звезд, образующих вращающийся диск с шарообразным утолщением (баром) в центре. Если предположить, что эти звезды вращаются по круговым орбитам вокруг галактического центра, то скорость вращения отдельной звезды может быть получена из условия равенства гравитационной $F_{\text{грав}}$ и центробежной сил:

$$F_{\text{грав}} = \frac{GmM(r)}{r^2} = \frac{mV^2}{r}, \quad (1)$$

где G – гравитационная постоянная, m – масса отдельной звезды, $M(r)$ – масса всей Галактики, r – радиус галактик, V – скорость вращения звезды.

Отсюда следует, что скорость

$$V = \sqrt{GM(r)/r}. \quad (2)$$

При этом в силу сферической симметрии происходит полная взаимная компенсация воздействия на данную звезду вещества, находящегося вне орбиты этой звезды. Формула (2) показывает, что вращательная скорость газа в галактике, измеряемая внешним по отношению к самой галактике наблюдателем по доплеровскому смещению, должна убывать с расстоянием от центра галактики пропорционально $r^{-1/2}$. Между тем результаты таких наблюдений, выполненных для огромного числа галактик, показывают, что зависимость вращательной скорости от радиуса для этих галактик имеет вид $V = \text{const}$ (см. рис. 1). Этот результат указывает на существование

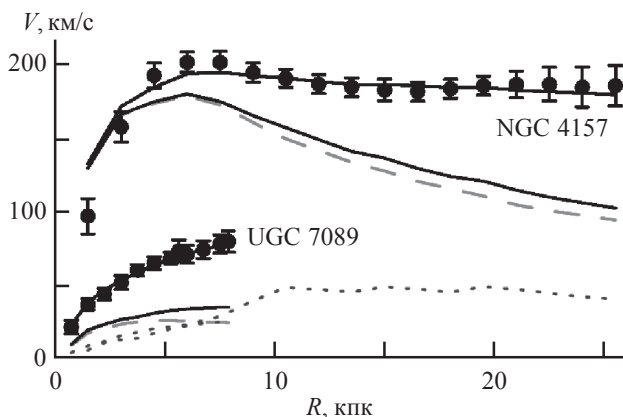


Рис. 1. Кривые вращательных скоростей двух галактик (красный цвет) NGC 4157 и UGC 7089.

огромной невидимой массы вещества, расположенной далеко за пределами галактического диска в галактическом гало.

Определенную по формуле (1) массу галактики можно сравнить с количеством светящегося вещества в этой галактике. Поскольку в галактиках преобладающую часть звезд составляют звезды типа нашего Солнца, отношение массы типичной галактики M к ее светимости L должно равняться солнечному значению, т. е. $M/L = 0,5$. Однако для многих галактик это отношение во много раз больше, в особенности если рассматривать именно гало галактики. Наблюдения последних лет показали, что отношение M/L особенно велико для так называемых карликовых галактик. Наиболее простым объяснением такого расхождения является вывод о существовании невидимого “темного” вещества, которое проявляет себя только в гравитационном взаимодействии.

Основные кандидаты в темную материю

Принципиальный вопрос состоит в том, имеет ли темная материя барионную природу или она состоит из элементарных частиц небарионной природы. Естественно, что барионную темную материю могли бы составлять объекты с малой светимостью. К таким объектам можно отнести нейтронные звезды, черные дыры, коричневые карлики, которые по существу являются субзвездными объектами. Многие астрономы относят к небарионной материи большие планеты типа Юпитера, а также астероиды или огромные куски вещества, которые астрономы называли скалами. Что касается элементарных частиц – кандидатов в темную материю, то их список довольно велик (см. табл. 1).

Главная проблема состоит в том, как отличить барионную темную материю от небарионной. Астрономы Южной Европейской обсерватории решили использовать для наблюдений барионной темной материи тот факт, что лучи света, проходящие вбли-

Таблица 1. Кандидаты в темную материю

Барионная материя	Небарионная материя (элементарные частицы)
Нейтронные звезды	Нейтрино
Черные дыры	Аксионы
Коричневые карлики	Слабо взаимодействующие массивные частицы (WIMP)
Юпитеры	Нейтралино
Астероиды	Суперсимметричные (SUSY) частицы
Холодные белые карлики	

зи массивного тела, будут испытывать гравитационное отклонение вследствие эффекта общей теории относительности. Эффект искривления пути лучей света далекой звезды в гравитационном поле Солнца хорошо известен и на самом краю Солнца составляет приблизительно $1,75''$. Это означает, что гравитационное поле объекта может действовать как линза, вызывая усиление блеска далекой звезды. Выдающийся астрофизик польского происхождения Б. Пачинский, работающий сейчас в Принстонском университете США, предложил использовать для выявления природы объектов темной материи именно этот эффект гравитационного микролинзирования (т. е. линзирования точечной массой, а не протяженной структурой) звезд ближайших галактик объектами темной материи в гало нашей Галактики. В качестве таких галактик были выбраны Большое Магеллановое Облако (БМО) и Туманность Андромеды, а также область в окрестности ядра нашей Галактики с целью поиска темной материи в этой области. Идея Б. Пачинского состояла в том, что сферическая подсистема нашей Галактики – Гало – может быть заполнена объектами барионной темной материи, которые упомянуты выше. В настоящее время им присвоено общепринятое название – MACHO (MAcroscopic Compact Halo Objects). Значения их масс могли бы лежать в интервале от 10^{-8} до 100 масс Солнца.

Начатые в Европейской Южной обсерватории программы наблюдений эффектов микролинзирования звезд БМО получили название MACHO и EROS. Используя кривую лучевых скоростей газа в нашей Галактике, можно оценить количество объектов темной материи в гало и, следовательно, оценить вероятность эффекта микролинзирования. Такая оценка показывает, что одно такое событие приходится на миллион наблюдений звезд. На первый взгляд, кажется, что эта вероятность ничтожно мала. К счастью, современная астрономическая техника позволяет наблюдать одновременно миллионы звезд БМО с помощью панорамных приемников излучения. В результате наблюдений астрономы Европейской Южной обсерватории обнаружили огромное

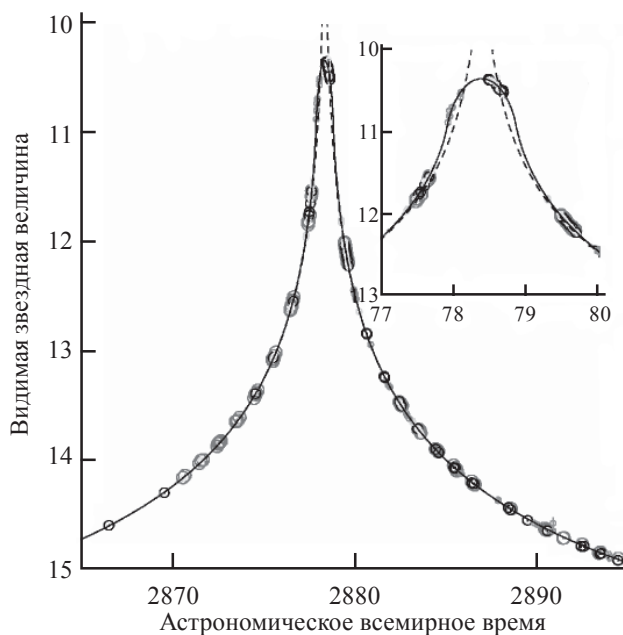


Рис. 2. Фотометрическая кривая эффекта микролинзирования события эксперимента OGLE (Jiang et al. *ApJ*, v. 617, p. 1307, 2004).

количество звезд, которые изменяли свой блеск. Но почти все они оказались обычными вспыхивающими звездами. Критериями, с помощью которых можно было выделить из этого огромного количества данных именно эффекты микролинзирования, являются временная длительность таких событий и их специфическая зависимость от длины волны (так называемый ахроматизм). Характерная временная длительность означает, что временной профиль события должен быть абсолютно симметричен по отношению к началу события и его концу (см. рис. 2). Обычные звездные вспышки имеют несимметричный профиль. Ахроматичность означает, что форма временного профиля акта микролинзирования совершенно не зависит от длины волны. Именно поэтому астрономы осуществляли эти наблюдения в нескольких спектральных полосах, по крайней мере в двух. Длительность t явления гравитационного микролинзирования напрямую зависит от массы объекта – гравитационной линзы:

$$t = d(M_{\text{об}}/M_{\odot})^{1/2}, \quad (3)$$

где $M_{\text{об}}$ – масса объекта, $M_{\odot}$ – масса Солнца; d – коэффициент, зависящий от соотношения масс $M_{\text{об}}$ и $M_{\odot}$. При $M_{\text{об}} = M_{\odot}$ $d = 70$ и, следовательно, длительность явления гравитационного микролинзирования составляет 70 дней.

В результате анализа данных наблюдений по обоим программам (MACRO и EROS) было выделено 13 событий с длительностью усиления яркости звезды-мишени меньше 75 дней. Сравнение со

стандартной моделью гало ($4 \times 10^{11} M_{\odot}$ внутри сферы радиуса 50 кпк) показало, что только примерно 20% всей массы гало нашей Галактики состоит из объектов с массой примерно $0,5 M_{\odot}$. Такими объектами, скорее всего, являются очень холодные белые карлики. Данные наблюдений исключают существование объектов темной материи со значениями масс, лежащими в интервале $(10^{-7} - 0,1) M_{\odot}$.

Таким образом, данные этих наблюдений исключили существование в гало нашей Галактики барионной темной материи в виде коричневых карликов и планет типа Юпитера. Другой вывод состоит в том, что барионные объекты составляют не более 20% всей темной материи внутри гало нашей Галактики. Это позволяет считать, что большая часть темной материи в нашей Галактике состоит из объектов небарионной природы, т. е. элементарных частиц.

Кандидаты в небарионную темную материю

Список возможных претендентов на роль небарионной темной материи исключительно широк и включает большое количество элементарных частиц, открытых и предсказанных современной физикой (см. табл. 2). Стандартные нейтрино уже не могут претендовать на роль кандидатов в темную материю, поскольку эксперименты с солнечными и атмосферными нейтрино свидетельствуют о сравнительно малой их массе, величина которой определена из факта нейтринных осцилляций. Наиболее вероятными кандидатами в темную материю в настоящее время считаются такие элементарные частицы, как аксионы и вимпы (WIMP – Weakly Interacting Massive Particle). Главным критерием отбора таких кандидатов является их слабое взаимодействие с электромагнитным полем и обычной материей. В противном случае они легко были бы обнаружены как астрономическими методами, так

Таблица 2. Частицы стандартной и суперсимметричной теорий элементарных частиц (претенденты на роль небарионной темной материи)

Частицы стандартной модели	Частицы суперсимметричной теории
Кварк	с-кварк
Лептон	с-лептон
Нейтрино	с-нейтрино (стерильное нейтрино)
Глюон	глюино
W-бозон	вино
Бозон Хиггса	хиггсино
W-3-поле	вино-3
B-поле	бино

и в физических экспериментах в земных лабораториях. Эти частицы, которые пока являются гипотетическими, были предложены физиками, исходя из соображения минимального изменения (расширения) стандартной теории элементарных частиц.

Идея существования аксиона базируется на следующих основаниях. В течение прошлого столетия физики накопили множество экспериментальных данных, свидетельствующих, что все огромное количество взаимодействий между разными физическими телами можно свести всего лишь к четырем, расположенным по мере возрастания силы взаимодействия в таком порядке: гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное. Последнее представляет ядерные силы. Каждое из этих взаимодействий характеризуется своими компонентами. Для электромагнитного взаимодействия – это фотон, для слабого – так называемые слабые калибровочные бозоны, сильное взаимодействие характеризуется глюоном, а для гравитационного взаимодействия таким компонентом является гравитон, который еще не обнаружен прямыми экспериментами. Эксперименты показали, что сильное взаимодействие примерно в тысячу раз сильнее электромагнитного и в сто тысяч раз сильнее слабого. Однако физические эксперименты последних лет показали, что с увеличением относительной энергии взаимодействующих частиц константы всех видов взаимодействия сближаются друг с другом. Это привело физиков к созданию новой теории, которая получила название Теории великого объединения (GUT – Grand Unification Theory). Примесь электромагнитного и слабого взаимодействия к сильному подразумевает существование новой частицы, которая и получила название аксион. По своим свойствам аксион – это маломассивная частица, похожая на хорошо известный в ядерной физике π -мезон. К сожалению, новая теория не предсказывает точного значения массы аксиона, и поэтому также неизвестными остаются константы связи аксиона с другими полями и видами материи. Физики сразу же начали экспериментальные поиски этой частицы и предложили рассматривать аксионы как перспективные кандидаты в темную материю. Эти экспериментальные поиски базировались на предсказываемой теорией взаимодействии аксионного и электромагнитного полей. Теория дает следующее выражение для константы связи между этими полями:

$$g_a = \alpha C_\gamma / 2\pi F_a, \quad (4)$$

где α – постоянная тонкой структуры, F_a – шкала энергий, характерная для аксионного поля, является свободным параметром и может достигать значительной величины, приближаясь к планковскому

значению $M_p = 10^{19}$ ГэВ; C_γ – постоянная величина, зависящая от используемой модели (для стандартных аксионов $C_\gamma \approx 2/3$).

Аксионы легко вписываются в Теорию большого взрыва (Big Bang). Образовавшись на ранних стадиях Вселенной, аксионы, как реликтовые частицы, легко захватывались гравитационными полями галактик и скоплениями галактик и накапливались там как в гравитационной яме, образуя таким образом темную материю.

Возможность существования “вимпов” основана на другом подходе в физике элементарных частиц. Успех Теории великого объединения коснулся только трех видов взаимодействий: слабого, электромагнитного и сильного. Гравитационное поле выпадало из этого взаимодействия, поскольку его безразмерная константа G_N оказалась на много порядков величины слабее безразмерных констант других видов взаимодействий: $G_N = 5,9 \times 10^{-39}$. Более полное объединение всех видов взаимодействий, включая гравитационное, потребовало создания новой теории, которая получила название суперсимметрии. По существу эта новая теория представляет собой расширение стандартной модели GUT за счет введения совершенно нового вида симметрии. Суперсимметрия подразумевает полную симметрию между фермионами и бозонами. Поскольку в этой теории каждый фермион ассоциирован с суперсимметричным бозоном и наоборот, то число частиц в этой теории удваивается. Частицы и их суперпартнеры объединяются в суперполя, которые существуют в суперпространстве. В большинстве моделей этой теории предполагается сохранение так называемой R -четности, которая определяется следующим образом: $R = +1$ для обычных частиц и $R = -1$ для суперсимметричных партнеров. В результате теория предсказывает существование сохраняющей R -четность стабильной самой легкой суперсимметричной частицы. Поэтому ее сразу же предложили на роль частицы темной материи, которую стали называть нейтралино* и рассматривать в качестве вимпа.

Ускорители являются самым эффективным инструментом для поиска аксионов и нейтралино. Однако пока не удалось обнаружить суперсимметричные частицы, в том числе аксионы и нейтралино, на ускорителях. Отрицательные результаты экспериментов тем не менее позволили установить нижнюю границу массы нейтралино (вимпа): $M > 18,4$ ГэВ. Именно поэтому возрос интерес к астрономическим методам поиска таких частиц в качестве частиц темной материи. Перейдем теперь к описанию астрономических методов поиска аксионов и вимпов и к последним результатам их наблюдений.

* Нейтралино = бино + вино + хиггсино (см. табл. 2).

Астрономические методы поиска аксионов. Некоторые результаты

Методы поиска частиц темной материи можно разделить на прямые и косвенные.

Прямые методы опираются на попытки детектировать темную материю путем ее взаимодействия непосредственно с объектом лабораторного эксперимента на Земле.

Косвенное детектирование основано главным образом на попытках регистрации вторичных частиц, возникающих в космических условиях вне Земли в результате либо распада самих частиц темной материи, либо процесса аннигиляции частица–античастица. Кроме того, можно оценить основные физические характеристики аксионов с помощью традиционных астрономических методов наблюдений многих небесных объектов.

Астрономия имеет дело с наблюдениями электромагнитного излучения, поэтому можно организовать поиски аксионов, используя их хотя бы и слабую связь с электромагнитным полем. Для аксионов существуют два вида такой связи (см. рис. 3). Первый из них (рис. 3а) представляет собой процесс распада аксиона на два фотона аналогично хорошо известному распаду на два фотона π -мезона. Время жизни аксиона τ_a (в секундах) по отношению к этому процессу определяется выражением:

$$\tau_a = 6,8 \times 10^{24} \xi^{-2} m_a^{-5}, \quad (5)$$

где параметр $\xi = 1$ для большинства физических моделей, описывающих теорию великого объединения; m_a – масса аксиона (в электронвольтах).

Наиболее интересным, с точки зрения астрономии, является второй процесс (рис. 3б). Он представляет собой так называемый процесс конверсии (превращения) аксиона в фотон во внешнем магнитном поле при условии, что направление этого магнитного поля не совпадает с направлением фотона. Имеет место и обратный процесс – превращение фотона в аксион в магнитном поле. Поскольку в этом случае фотон исчезает, такой процесс представляет по существу новый процесс поглощения фотона. Самое любопытное состоит в том, что этот процесс зависит от состояния поляризации фотона, то есть от направления колебаний электрического вектора фотона по отношению к выделенной плоскости, которую составляют два направления распространения фотона и магнитного поля. Следует помнить, что электрический вектор фотона всегда колеблется перпендикулярно направлению его распространения (это знаменитое условие поперечности, которое характерно именно для электромагнитных волн). Оказывается, что в аксион превращается (поглощается) только тот фотон, у которого направление колебаний элект-

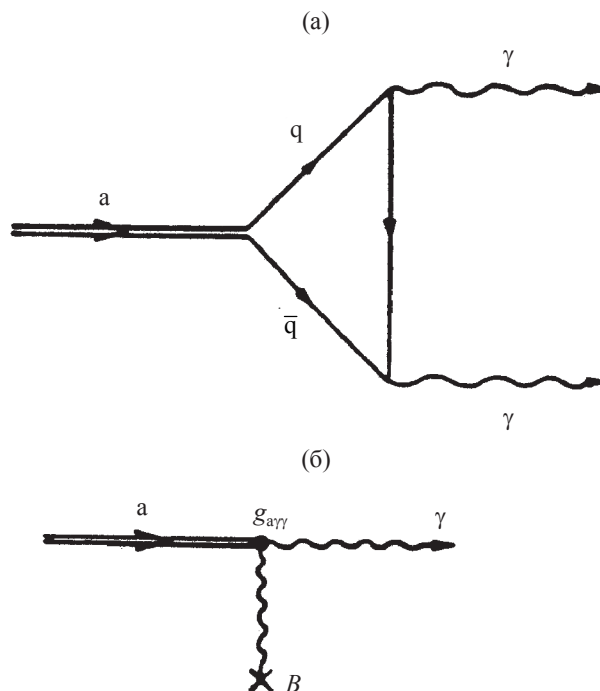


Рис. 3. Основные процессы взаимодействия аксиона с фотоном: а – распад аксиона на два фотона, б – конверсия аксиона в фотон и обратный процесс в магнитном поле.

рического вектора лежит в этой выделенной плоскости. Фотон, у которого электрический вектор колеблется перпендикулярно выделенной плоскости, распространяется совершенно спокойно, не чувствуя магнитного поля. Таким образом, астрономия столкнулась с совершенно новым механизмом возникновения поляризованного излучения астрофизических объектов. Вероятность такой конверсии определяется следующим выражением:

$$P = A \sin^2 \left(\frac{1}{2} g_a B L \right), \quad (6)$$

где A – амплитуда процесса конверсии, B – напряженность магнитного поля, L – его характерный масштаб, а g_a – так называемая константа связи аксионного поля с электромагнитным, имеющая размерность, обратную размерности энергии. Выражение (6) написано в определенной системе единиц, часто используемой физиками, в которой постоянная Планка и скорость света считаются равными единице. Если измерять константу g в обратных электронвольтах, магнитное поле в эрстедах, а длину L в сантиметрах, выражение под знаком синуса необходимо умножить на 3000.

Амплитуду A можно считать равной единице, если рассматривать превращение фотона в аксион и обратный процесс в вакууме и иметь в виду аксионы с массой, близкой к нулю. Присутствие плазмы, как правило, сильно уменьшает величину амплитуды A . Для физической модели стандартного

аксиона существует прямая связь между массой аксиона и константой взаимодействия g , так что определив величину константы g с помощью (5), легко найти и массу аксиона. Детали всей этой теории можно прочесть в обзоре [1], а также в известной книге Г.В. Клапдор-Клайнротхаус и К. Цюбера [2].

В соответствии с вышеизложенным астрономы с воодушевлением приступили к поиску фотонов, возникающих в результате распада аксионов, которые, как частицы темной материи, должны накапливаться под воздействием гравитационного притяжения вокруг массивных тел (ядер галактик), а также в самих галактиках и в скоплениях галактик как в гравитационных ямах. Если бы удалось обнаружить такой фотон и измерить его длину волны $\lambda(z)$ (в ангстремах), это позволило бы непосредственно определить массу аксиона m_a (в обратных электронвольтах):

$$\lambda(z) = 24800 \left(\frac{1}{m_a} \right) (1+z), \quad (7)$$

где z – космологическое красное смещение. Если бы аксионы имели массу порядка нескольких электронвольт, то эти фотоны попадали бы в оптический диапазон спектра электромагнитного излучения и, следовательно, могли бы регистрироваться традиционными астрономическими методами с помощью оптических телескопов.

Астрономы выбрали в качестве объектов таких наблюдений гало нашей Галактики и скопления галактик. С точки зрения наблюдателя, задача представлялась довольно простой. Нужно было наблюдать свечение ночного неба, получить его спектр, а затем попытаться найти в этом спектре такие эмиссионные линии, которые не могли бы быть отождествлены с известными линиями, возникающими в земной атмосфере в результате возбуждения атмосферных атомов и молекул. Эти наблюдения выполнялись во многих обсерваториях мира, в том числе в Специальной астрофизической обсерватории РАН с помощью большого азимутального 6-метрового телескопа БТА-6 [3]. Наблюдаемые значения интенсивности излучения ночного неба лежат значительно ниже ожидаемых пределов. Другой эксперимент был связан со спектроскопическими наблюдениями скоплений галактик. Теоретические значения интенсивности, вычисленные в рамках стандартной модели, сильно расходятся с результатами наблюдений. Эти результаты полностью исключают область значений аксионных масс, приходящихся на оптический диапазон линий распада аксиона, т. е. $m_a \geq 3$ эВ/ c^2 .

Последние результаты поиска эмиссионных линий, возникающих в результате распада аксионов как частиц темной энергии, представлены сравнительно недавно Блаутом и его сотрудниками [4]. Они решили искать такие линии в радиоизлучении кар-

ликовых галактик, входящих в состав Местной группы галактик. Именно для этих галактик характерно высокое значение отношения $M/L \approx 100$, что по современным представлениям является доказательством существования большого количества темной материи в этих объектах. Искались аксионы, массы которых m_a лежат в интервале 298–363 мкэВ/ c^2 . Это соответствует поиску радиоизлучения в области частот 35,92–44,08 ГГц. Наблюдения выполнялись в обсерватории Хейстак (Haystack) в США и на том уровне чувствительности дали отрицательные результаты. Поэтому можно говорить об отсутствии аксионов с массами, лежащими в интервале от 298 до 363 мкэВ/ c^2 , что для стандартного аксиона соответствует верхнему пределу константы связи аксионного и электромагнитного полей на уровне $g_a < 10^{-9}$ 1/ГэВ.

Американский ученый Сикиви, работающий в университете штата Флорида, предложил использовать для регистрации аксионов из гало нашей Галактики специальную установку, состоящую из вакуумной камеры, окруженной сверхпроводящим магнитом с напряженностью магнитного поля $B \approx 10\,000$ Э. Для повышения чувствительности использовался метод резонансной конверсии, и с этой целью в камеру направлялось квазимонохроматическое микроволновое излучение, частота которого регулировалась таким образом, чтобы можно было регистрировать конверсию аксионов в некотором интервале масс, соответствующем именно радиодиапазону. Если считать, что большая часть массы гало нашей Галактики состоит из аксионов, то можно оценить их максимальную плотность в гало как $7,5 \times 10^{-25}$ г/ $см^3$ или в энергетических единицах как 450 МэВ/ $см^3$. Эксперимент по поиску реликтовых аксионов, захваченных в гало, дает следующее предельное значение мощности радиофотонов, образующихся с энергией, равной $m_a c^2$, в результате процесса конверсии [5]:

$$P_a = 8 \times 10^{-22} \frac{\nu}{10^5} \left(\frac{B}{10^4} \right)^2 \frac{Q}{10^5} \frac{\rho_a}{\rho_h} \frac{m_a}{1,2 \times 10^{-5}}, \quad (8)$$

где ν – объем камеры, ρ_a – реальная плотность аксионов, ρ_h – максимальная плотность аксионов в гало как частиц темной материи, Q – коэффициент эффективности (добротность) экспериментальной установки. Тогда соответствующая яркостная температура равна:

$$T_b = 0,75 \left(\frac{B}{10^4} \right)^2 \frac{\nu}{10^6} \frac{Q}{10^6}, \quad (9)$$

где T_b выражается в кельвинах, B – в эрстедах, ν – в кубических сантиметрах.

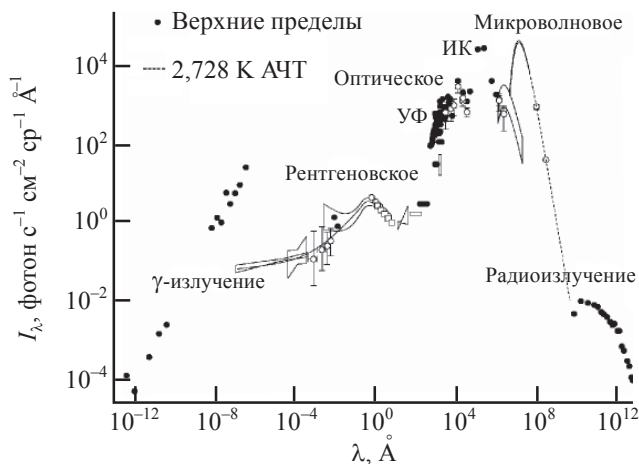


Рис. 4. Результаты наблюдений космического фонового излучения в широком спектральном диапазоне. I_λ — интенсивность фонового излучения Вселенной.

Выполненный сравнительно недавно под руководством проф. Сикиви его коллегами из университета штата Флорида эксперимент не дал положительного результата. Правда, в их экспериментах мощность сверхпроводящего объекта была несколько меньше, всего 8500 Э, а объем камеры составлял $0,22 \text{ м}^3$. Использовался радиодиапазон 550–810 МГц, что соответствовало аксионным массам в диапазоне энергий 2,3–3,4 мкэВ. Результаты данного эксперимента позволяют исключить наличие в гало нашей Галактики аксионов с массами в интервале $(2,3\text{--}3,4) \times 10^{-6} \text{ эВ}$ с плотностью, превышающей 450 МэВ/см^3 . Тем не менее, работа в этом направлении продолжается. Наиболее перспективными представляются работы японских ученых, которые создали оригинальные высокочувствительные детекторы аксионного излучения, основанные на использовании в качестве детектора пучка атомов, находящихся в высоковозбужденных состояниях (такие состояния принято называть ридберговскими). В самом ближайшем будущем следует ожидать прорыва в этом направлении. В одном из будущих экспериментов, носящих широкий международный характер, принимают участие и российские ученые из Института ядерных исследований (Москва).

В последнее время благодаря эффективной работе американского ученого из Стенфорда Дж. Овердюна и канадского ученого Вессона [6] детально проанализированы данные наблюдений космического фонового излучения Вселенной в широком спектральном интервале: радио-, инфракрасном, оптическом, ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма-диапазонах. В результате удалось установить надежные верхние пределы энергии излучения, возникающего в результате распада разнообразных частиц — кандидатов в темную материю: маломас-

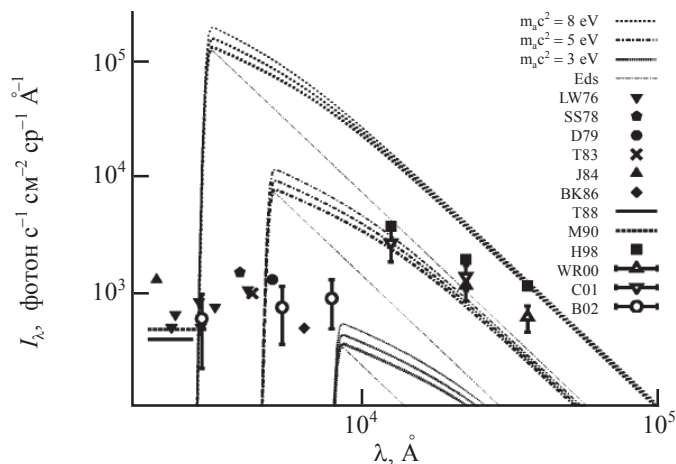


Рис. 5. Спектральное распределение фонового излучения, возникающего в результате распада аксионов.

сивных аксионов, нестандартных нейтрино, нестабильных слабо взаимодействующих массивных частиц (нейтралино) и испаряющихся реликтовых черных дыр. Экспериментально измеренный всеволновый спектр фонового излучения Вселенной представлен на рис. 4. Результат сравнения наблюдаемого спектра фонового излучения со спектром, ожидаемым от распада аксионов, представлен на рис. 5. Видно, что в большинстве случаев стандартная модель аксионной темной материи предсказывает больший поток излучения, чем это следует из наблюдений. Распад стандартных аксионов с массой 8 эВ превосходит наблюдаемую интенсивность на длине волны $\lambda \approx 3000 \text{ Å}$ примерно в сотни раз. С другой стороны, интенсивность излучения распадающихся аксионов с $m_a \approx 5 \text{ эВ}$ превышает наблюдаемый уровень интенсивности на длине волны $\lambda \approx 5000 \text{ Å}$ примерно в 10 раз. Только излучение аксионов с $m_a \leq 3 \text{ эВ}$ более или менее согласуется с фоновой интенсивностью в этом диапазоне. Таким образом, проблема расхождения экспериментальных и теоретических данных представляет значительную трудность для современной стандартной теории физики элементарных частиц.

Рождение аксионов в недрах звезд: поиск аксионного излучения звезд и Солнца

Если аксионы и не могут разрешить полностью проблему темной энергии, они все же остаются привлекательными для физиков, поскольку легко снимают ряд трудностей теории великого объединения. Поэтому в их обнаружении физики заинтересованы не меньше астрономов. Замечательно, что звезды являются мощными источниками слабо взаимодействующих частиц, включая нейтрино, гравитоны и, конечно, аксионы. Эти частицы могут возникать в

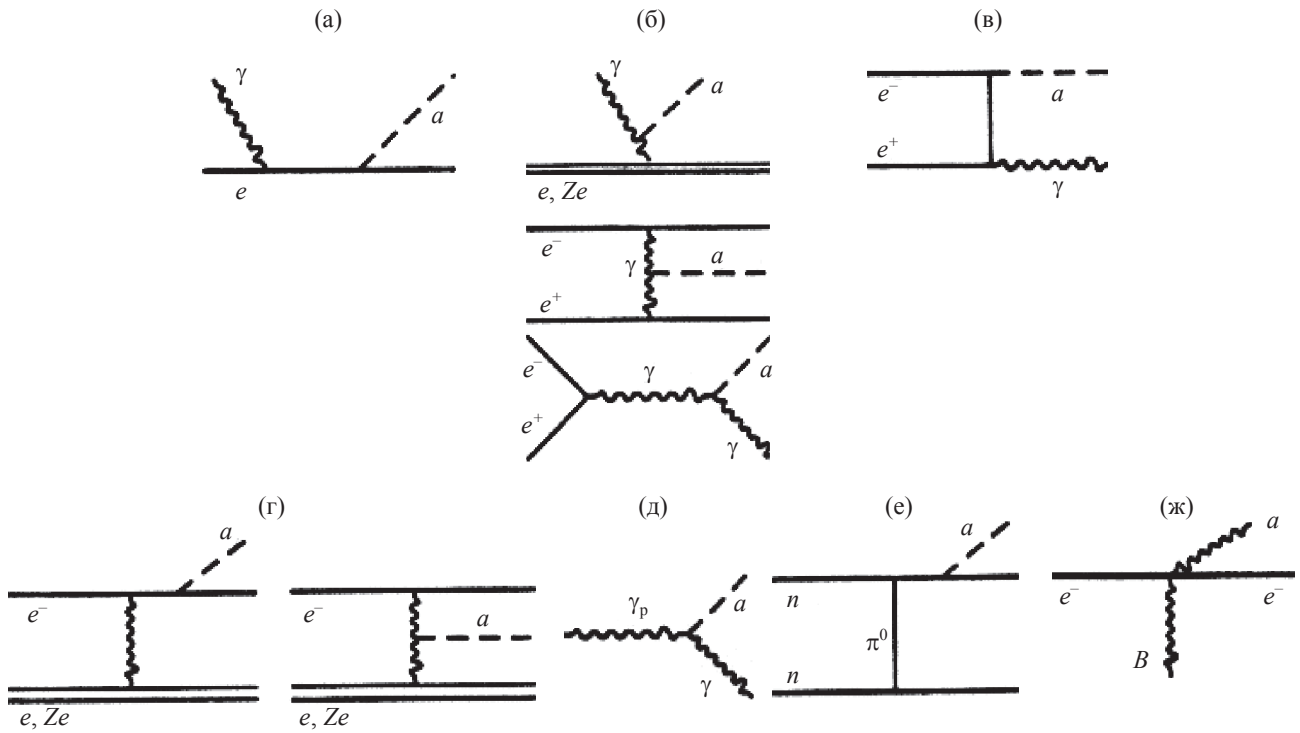


Рис. 6. Основные физические процессы рождения аксионов в центре Солнца: а – комптоновское рассеяние, б – фоторождение аксионов в кулоновском поле ядер (процесс Примакова), в – аннигиляция пары электрон–позитрон, г – тормозное излучение электрона в кулоновском поле ядра, д – плазменные процессы, е – рассеяние нуклона на нуклоне, ж – циклотронное излучение аксионов.

результате ядерных реакций и различных нетепловых процессов во внутренних областях звезд. Потенциальный эффект процесса аксионной эмиссии на эволюцию звезд очевиден: он влияет на эволюцию звезд, ускоряя ее и сокращая время жизни звезд. Многие физики занялись расчетами именно этих процессов с целью планирования будущих экспериментов поиска новых слабо взаимодействующих частиц, включая аксионы. Сами эти процессы представлены на рис. 6.

Ближайшей к нам звездой является Солнце. Именно поэтому в современной астрономии сложилось целое экспериментальное направление поиска солнечных аксионов. Наиболее прямой метод решения этой задачи состоит в реализации на Земле непосредственной конверсии солнечных аксионов в магнитном поле экспериментальной установки. Мощность генерации аксионов со средней энергией $E = 4,2$ кэВ в центре Солнца определяется уравнением:

$$\frac{dE}{dt} = \left(\frac{T}{10^6} \right)^6 m_a^2. \quad (10)$$

В настоящее время в мире спроектированы и начали работать несколько установок с целью поиска аксионов от Солнца. Одна из таких установок расположена в глубокой шахте местечка Сьерра Гранде в Аргентине. Оригинальная идея, лежащая в основе этого эксперимента, заключается в использовании

большого кристалла из германия в качестве детектора процесса самой конверсии аксионов в рентгеновские фотоны.

Оригинальный проект аксионного солнечного телескопа разработан в Международном центре ядерных исследований в Женеве (CERN). Этот проект получил название CAST (CERN Axion Solar Telescope) [7]. В основе проекта лежит использование большого (длиной 10 м) специального сверхпроводящего магнита с напряженностью тороидального магнитного поля 9000 Э. Аксионы, генерируемые в центре Солнца, попадают в специальную камеру с этим магнитом в тот момент, когда камера направлена на Солнце. Под действием такого сильного поля аксионы, проходящие 10-метровую длину в поперечном магнитном поле, превращаются в рентгеновские фотоны (в соответствии с температурой в миллионы градусов в центре Солнца). Вероятность такой конверсии пропорциональна $B^2 L^2$ и достигает значения примерно 10^{-17} при $B = 10^{12}$ Э, $L = 10$ м и $g_a \approx 10^{-10}$ 1/ГэВ. Превратившийся в фотон аксион передает фотону энергию и импульс. По своей чувствительности, пропорциональной квадрату произведения BL , эксперимент в CERN примерно в 100 раз превышает чувствительность всех действующих аксионных телескопов. Изображение аксионного солнечного телескопа представлено на рис. 7.

В заключение отметим, что, хотя действующие аксионные телескопы пока не дали положительных

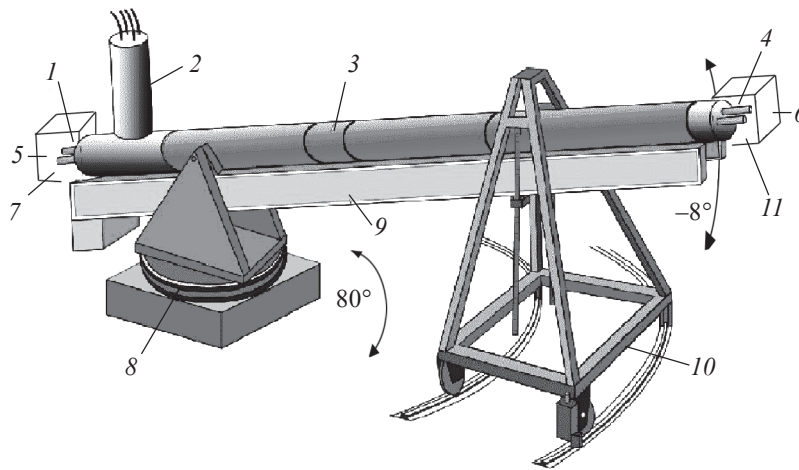


Рис. 7. Изображение солнечного аксионного телескопа в CERN. 1, 4 – детекторы фотонов; 2 – магнитная камера, 3 – сверхпроводящий магнит; 5, 6 – солнечные аксионы; 7, 11 – экраны фонового излучения; 8 – вращающаяся башня телескопа, 9 – установка для магнита, 10 – установка по азимуту.

результатов, все же имеется один интересный результат, который может быть интерпретирован как положительный сигнал. Ведущий специалист в этой области исследований из CERN К. Зиотас со своими сотрудниками внимательно проанализировал данные о рентгеновском излучении спокойного Солнца, полученные с помощью японского специализированного космического спутника Йокко (Yohkoh) [8]. Его команда обнаружила, что распределение рентгеновского излучения по радиусу за лимбом Солнца существенно отличается от того, которое предсказывается стандартной моделью спокойного Солнца. Кроме того, данные Йокко свидетельствуют о существовании значительного компонента жесткого рентгеновского излучения с энергией от 3 до 15 кэВ, что не характерно для общепринятого представления о спокойном Солнце. Оказалось, что эти данные неплохо согласуются с результатами расчета аксионного излучения Солнца, правда, в предпо-

ложении генерации в центре Солнца довольно массивных и в этом случае нестандартных аксионов, энергия массы покоя которых приходится именно на рентгеновский диапазон. Такие аксионы легко захватываются гравитационным полем Солнца и, распадаясь в дальнейшем, обеспечивают наблюдаемое распределение рентгеновских фотонов в зависимости от расстояния от Солнца (рис. 8). Авторы призывают обратить внимание на эту ситуацию и указывают на перспективность использования рентгеновских спутников для регистрации фотонов, возникающих от распада аксионов, захваченных в гравитационных полях Солнца и звезд. Это особенно интересно именно для Солнца, поскольку ожидается, что в ближайшее время оно вступит в длительный период пониженной активности.

Таким образом, для будущего Постоянного космического солнечного патруля перспективной задачей, имеющей фундаментальное значение, являет-

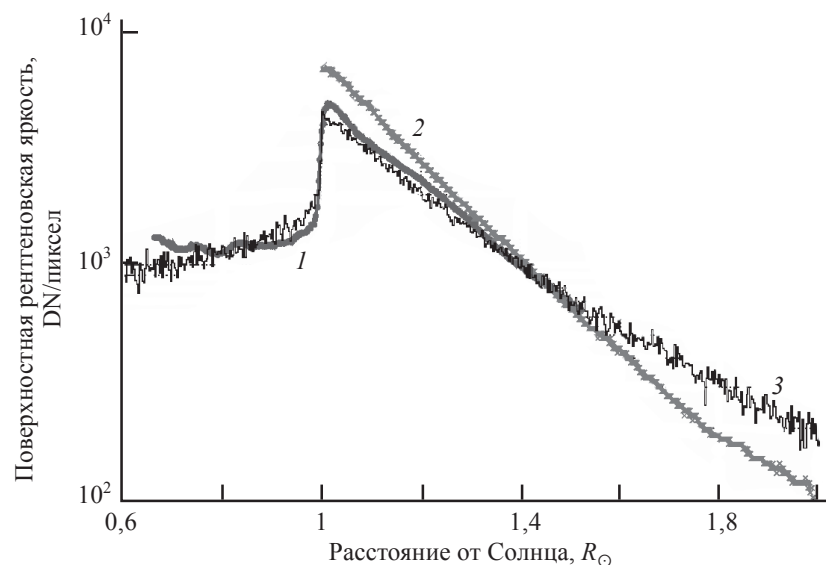


Рис. 8. Распределение мягкого рентгеновского излучения в зависимости от расстояния от Солнца: 1 – экспериментальные данные Yohkoh SXT 8.05.92, 2 – то же 26.08.92, 3 – теоретические расчеты [8].

ся детальный непрерывный мониторинг Солнца в жестком ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах и сравнение его результатов с соответствующими данными спокойного Солнца. Обнаружение избытка наблюдаемого излучения от спокойного Солнца по сравнению с ожидаемым позволит, по крайней мере, получить более строгие ограничения на параметры аксионного поля (масса аксиона и константа его связи с фотонами), что имеет значение для современной фундаментальной физики и, в частности, для физики элементарных частиц.

Аксионы и космологическое магнитное поле

Поскольку вероятность конверсии фотона в аксион пропорциональна $(BL)^2$, то такой эффект мог бы наблюдаться и в сравнительно слабых полях при условии, что протяженность однородности магнитного поля довольно велика. Поэтому эффект конверсии может иметь место не только в компактных звездах с сильными магнитными полями (магнитные белые карлики и нейтронные звезды), но даже и в обычных звездах, если их магнитное поле составляет 1–10 кГс (обычно их называют магнитными). В этом случае излучение таких звезд может приобретать дополнительную поляризацию по сравнению с той, которая обеспечивается за счет традиционных механизмов. Расчеты такой дополнительной поляризации были выполнены в работе [9]. Любопытно, что в ряде случаев такая поляризация по величине может быть сравнима с межзвездной поляризацией, которая, как известно, возникает в результате поглощения света звезд межзвездными пылинками, ориентированными глобальным магнитным полем межзвездной среды.

Оригинальная идея была высказана физиком Цзаки с коллегами из CERN. Самым ярким астрономическим событием последнего времени явилось открытие так называемой “темной энергии”. Оказалось, что сверхновые звезды типа Ia, которые считаются стандартными свечами, на больших красных смещениях ($z \approx 1$) испытывают дополнительное поглощение по сравнению со стандартной космологической моделью. Именно этот факт послужил основанием считать, что расширение нашей Вселенной происходит с ускорением. Причиной такого ускорения является существование нового вида физического поля, природа которого пока остается неизвестной. Цзаки предложил совершенно другую оригинальную идею объяснения дополнительного поглощения, а именно в результате конверсии фотонов в аксионы в межгалактическом магнитном поле. Правда, дальнейшие исследования показали, что такое поглощение может иметь место только в

случае сверхмаломассивных аксионов с массой $m_a \leq 10^{-16}$ эВ. В этом случае требуются слишком экзотические сценарии генерации необходимого для решения проблемы темной материи количества таких аксионов. Тем не менее, идея Цзаки заслуживает внимания, так как такие аксионы и могут быть тем необходимым физическим полем, давление которого может обеспечивать ускоренное расширение Вселенной.

Другой замечательный факт, который может иметь отношение к аксионной астрономии, был установлен сравнительно недавно и сразу привлек к себе внимание. Астрономы Южной Европейской обсерватории Хатсемекерс и Лэми [10], наблюдая поляризованное излучение квазаров, обнаружили, что направления электрических векторов их поляризованного оптического излучения ориентированы одинаково (они назвали это свойство когерентной ориентацией) в довольно большой области пространства, в которой расположены данные квазары. Число таких квазаров составляет несколько десятков, причем их положение ничем не выделено; например, они не входят в одно какое-нибудь скопление. Хатсемекерс и Лэми оценили, что уровень достоверности гипотезы о случайном распределении электрических векторов составляет всего лишь 1,8%. Справедливости ради следует сказать, что еще раньше американские астрономы Ралстон и Нодланд обратили внимание на подобный эффект в радиодиапазоне для радиогалактик. Однако недостаточно высокий уровень такого эффекта в радиодиапазоне поставил их вывод под сомнение. Таким образом, существует, по-видимому, крупномасштабный космологический фактор, обеспечивающий когерентную ориентацию электрических векторов квазаров в оптическом диапазоне спектра. В качестве такого фактора можно выбрать магнитное поле. Любопытно, что в этом случае становится понятным, почему данный эффект выглядит слабее в радиодиапазоне по сравнению с оптическим. Поскольку фарадеевский поворот плоскости поляризации прямо пропорционален квадрату длины волны излучения, то он намного сильнее именно в радиодиапазоне, что приводит к эффекту разрушения когерентного состояния электрических векторов радиоизлучения.

Проблема существования однородного космологического магнитного поля привлекла особое внимание в связи с открытием в последнее время линейной поляризации космического реликтового излучения. Анализ степени анизотропии космического реликтового излучения привел астрономов к выводу о существовании космологического магнитного поля на уровне порядка 10^{-9} Гс на масштабах не менее 10 Мпс (некоторые авторы сделали вывод о суще-

ствовании однородного магнитного поля даже на большей масштабной шкале вплоть до 1000 Мпк). Предположено, что наблюдаемая ориентация поляризации возникает в результате распространения излучения на шкале расстояний вплоть до 1000 Мпк. Таким наиболее вероятным физическим механизмом, ответственным за ориентацию векторов поляризации, и является механизм конверсии фотонов в маломассивные аксионы при распространении фотонов поперек космологического магнитного поля. Используя выражение (6) для вероятности конверсии $p_1 = 1/4g(B/10^{-9})^2(L/100)^2$, можно оценить величину константы g связи аксионного и электромагнитного полей. Из величины наблюдаемой степени собственной поляризации излучения квазаров на уровне $p \approx 1\%$ следует оценка $g \approx 10^{-12} \text{ ГэВ}^{-1}$. Это наименьшая оценка константы связи, получаемая из всех известных астрономических и физических экспериментов.

Массивные частицы – кандидаты в состав темной материи

В последнее время астрономы активно занимаются поисками массивных частиц как кандидатов в темную материю. Напомним, что такие кандидаты принято называть вимпами, или нейтралино. Последний термин был предложен физиками, занимающимися теорией суперсимметрии.

Масса этих частиц неизвестна, но считается, что, скорее всего, ее величина лежит в интервале нескольких десятков или сотен гигаэлектронвольт. Так же как и аксионы, вимпы могут накапливаться в гравитационном поле Солнца, а также быть захваченными в центре Солнца.

Используются два основных метода поиска этих частиц. Первый из них основан на тех же принципах, которые используются при регистрации космических лучей. Он состоит в регистрации ядер отдачи и продуктов распада ядер детекторов под воздействием массивных частиц темной энергии, которые попадают в эти детекторы. В качестве таких детекторов используются охлаждаемые кристаллы кремния и германия. Вследствие движения Земли вокруг Солнца сигналы, регистрируемые детекторами, имеют форму синусоиды. Расчеты показывают, что амплитуда модуляции этих сигналов ожидается на уровне $\pm 6\%$. Сигнал определяется произведением числа ядер мишени на поток массивных частиц темной материи и на сечение взаимодействия массивной частицы с протоном. Расчетами сечения занимаются физики, причем результаты расчетов существенно зависят от деталей модели взаимодействия. Именно такие модели и исследуются в настоящее время в рамках теории суперсимметрии.

В настоящее время имеется довольно много экспериментальных установок указанного типа. Наиболее известны из них европейские установки "Dark Matter" (DAMA) в Гран Сассо (Италия) и установка "Эдельвейс" в Швейцарии. Естественно, что сами детекторы расположены в шахтах глубоко под землей, для того чтобы существенно уменьшить фон, создаваемый космическими лучами. Почти все эксперименты, за исключением эксперимента в лаборатории Гран Сассо, таких частиц не обнаружили. Последний показал положительный результат на уровне 4,5 стандартных отклонений. Этот результат позволил оценить массу вимпа на уровне примерно 60 ГэВ. К сожалению, другие эксперименты не подтвердили этот результат, что, возможно, связано с различными порогами чувствительности разных экспериментальных установок. Поэтому факт регистрации массивных частиц темной материи пока остается под вопросом.

Другой метод поиска массивной небарионной материи состоит в регистрации фотонного излучения и излучения других частиц (электронов, позитронов, протонов и антипротонов), возникающих в результате распада или аннигиляции частиц темной материи. Так, нейтралино, являясь частицами со спином 1/2, могут аннигилировать, образуя пары хорошо известных физикам частиц, таких как нейтрино, фотоны, протоны, антипротоны, электроны и позитроны. Вследствие спектрального распределения таких фотонов часть из них может попадать в жесткий ультрафиолетовый и мягкий рентгеновский диапазоны и, таким образом, может быть зарегистрирована Постоянным космическим солнечным патрулем. Многими астрономами предпринимались попытки зарегистрировать такое излучение в более жестком энергетическом диапазоне. К наиболее известным из них относятся регистрация аннигиляционной линии 511 кэВ от центра нашей Галактики космической обсерваторией INTEGRAL (INTErnational Gamma Ray Astrophysics Laboratory), обнаружение избытка диффузного галактического гамма-излучения с энергией выше 1 ГэВ космической гамма-обсерваторией EGRET (Energetic Gamma Ray Emission Telescope), регистрация избыточного количества позитронов и антипротонов в экспериментах AMS и HEAT, а также регистрация антипротонов в эксперименте BESS. К числу таких экспериментов относится также анализ диффузного рентгеновского и гамма-излучения, выполненный Овердьюном и Вессоном [6], с целью определить вклад, возникающий от распада и аннигиляции нейтралино как частиц темной материи. К сожалению, анализ всех этих данных является слишком модельно зависимым. Конечные выводы сильно зависят от физических параметров частиц, предсказываемых суперсимметричной теорией, и

особенно от значений сечения взаимодействия нейтралено с обычными стандартными частицами, а также от модели, описывающей процесс распространения и диффузии продуктов аннигиляции и распада нейтралено (протоны, антипротоны, электроны, позитроны) в нашей Галактике. Именно поэтому анализ диффузного излучения фотонов и космических частиц не позволил сделать однозначный вывод о существовании нейтралено как основного компонента темной материи.

Экзотические формы темной материи

В качестве кандидатов в темную материю астрономы и физики рассматривают также такие частицы, которые принято считать экзотическими и которые могли бы образоваться на ранних стадиях Вселенной. К таким частицам принято относить первичные испаряющиеся черные мини-дыры, капли неядерного (кваркового) вещества (их принято называть странглетами по аналогии с общепринятым в физике названием неядерного вещества – “странное”), зарядовые бозоны (многие из них предсказываются суперсимметричной теорией) и, наконец, так называемые частицы Клейна–Калуцы. Основанием для гипотез о существовании таких экзотических частиц и соответствующих теорий служит представление о возможной экстремальности нашей Вселенной. В центральных областях черных дыр чудовищные массы сжаты до микроскопических размеров. В момент большого взрыва вся Вселенная возникла из микроскопического ядра с чудовищной плотностью 10^{93} г/см³ и размером 10^{-33} см. Эти величины принято называть планковскими величинами.

Остановимся чуть подробнее именно на последних частицах, поскольку с Калуцы и Клейна, возможно, начинается новая эра в астрономии. В 1919 г. польский математик Теодор Калуца, который работал в то время в университете г. Кенигсберга, начал разрабатывать новую теорию Вселенной. Он предположил, что Вселенная может иметь не три пространственных измерения, а значительно больше, только они находятся в “свернутом” положении и поэтому на уровне современной науки пока не доступны экспериментальной проверке. В качестве доступного примера, иллюстрирующего эту идею, часто приводят пример садового шланга, который издали выглядит протяженным и одномерным, но по мере приближения к нему становится видно, что он является двумерным объектом. Дальнейшее развитие этой гипотезы было предпринято математиком из Швеции Оскаром Клейном, который показал, что структура пространства нашей Вселенной может содержать как протяженные, обычные в нашем представлении пространственные измерения, так и “свернутые” измерения. Последние могут

быть туго скручены в ничтожно малой области, такой малой, что она не может быть обнаружена даже с помощью самого современного экспериментального оборудования.

Эта идея оказалась настолько плодотворной, что хорошо вписывается в теорию суперсимметрии, а также дает основания считать, что и гравитацию удастся объединить с другими силами взаимодействия в рамках единой Теории великого объединения. Очевидным результатом этой новой теории явилось появление вместо планковской шкалы фундаментального взаимодействия $M_p = 1,2 \times 10^{19}$ ГэВ другой шкалы на уровне всего примерно 1000 ГэВ. В результате появился спектр новых частиц, который получил название спектра возбуждений Калуца–Клейна (в англоязычной литературе его называют “башней возбуждений” – tower of KK excitations). Самые нижние состояния возбуждения по своим свойствам совпадают с рассмотренными выше массивными (на уровне порядка 1 кэВ) аксионами, о проявлении которых в рентгеновском излучении спокойного Солнца и сообщили К. Зиотас и его коллеги. В последнее время эта группа публикует новые работы на эту тему. Научная программа солнечного аксионного телескопа в CERN также нацелена на решение этой задачи. Детекторам Постоянного космического солнечного патруля вполне доступна задача регистрации дополнительного излучения, возникающего в результате распада самых нижних состояний возбуждения массивных частиц Калуцы–Клейна, захваченных гравитационным полем Солнца.

Заключение

В настоящее время проблема темной материи остается открытой. Вместе с тем анализ данных всех имеющихся наблюдений, включая данные о фоновом излучении Вселенной в широком спектральном диапазоне, позволяет исключить ряд кандидатов. Так, темная материя не может состоять из аксионов или массивных нейтрино, энергия массы покоя которых лежит в диапазоне нескольких электронвольт, поскольку в этом случае возникающий в результате процессов распада и аннигиляции этих частиц поток фотонов заметно бы превышал измеренное фоновое излучение. Также исключаются в качестве темной материи первичные черные дыры, для которых процесс испарения Хоукинга привел бы к слишком большому потоку гамма-фотонов, заметно превышающему измеренный фоновый поток. Пока наиболее вероятными кандидатами кажутся массивные слабо взаимодействующие частицы – вимпы, или нейтралено, – в силу их относительной стабильности. Легкие частицы, предсказываемые современной теорией Вселенной с дополнительными пространственными

ми измерениями (теория Калуцы–Клейна), также считаются перспективными кандидатами. Именно излучение, возникающее в результате распада таких частиц или их конверсии в фотоны в магнитном поле Солнца, и может быть зарегистрировано детекторами Постоянного космического солнечного патруля.

Данная работа выполнена в рамках проекта РФФИ 03-02-17223-а при поддержке программ Президиума РАН “Нестационарные явления в астрономии” и программы ОФН “Протяженные объекты во Вселенной”.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gnedin Yu.N.* Current Status of Modern Dark Matter Problem // Intern. J. of Modern Physics A. 2002. V. 17. № 29. P. 4251.
2. *Кландор-Клайнгротхаус Г.В., Цюбер К.* Астрофизика элементарных частиц. М., 2002.
3. *Gnedin Yu.N., Dodonov S.N., Vlasyuk V.V., Spiridonova O.I., Shakhverdov A.V.* Astronomical Searches for Axions: Observations at the SAO 6-m Telescope // MNRAS. 1999. V. 306. P. 117.
4. *Blout B.D., Daw E.J., Decowski M.P. et al.* A Radio Telescope Search for Axions // Astro-ph/0006310. 2000.
5. *Sikivie P.* Detection rates for “invisible” – axion searches // Phys. Rev. D. 1985. V. 32. № 11. P. 2988.
6. *Overduin J.M., Wesson P.S.* Dark Matter and Background Light // Astro-ph/0407207. 2004.
7. *Aalseth C.E., Arik E., Autiero D. et al.* CERN Axion Solar Telescope. Preprint CERN 99-21, 1999.
8. *Ziogas K., Dennerl K., DiLella L. et al.* Quiet Sun X-rays as Signature for New Particles // Astro-ph/0403176. 2004.
9. *Гнедин Ю.Н., Красников С.В.* Поляриметрические эффекты, связанные с обнаружением голдстоуновских бозонов в звездах и галактиках // ЖЭТФ. 1992. Т. 102. № 6. С. 1721.
10. *Hutsemekers D., Lamy H.* Confirmation of the existence of coherent orientations of quasar polarization vectors on cosmological scales // Astron. Astrophys. 2001. V. 367. P. 381.