

Окончание. См. № 17–23/05

Проф. **Б.И.ЛУЧКОВ**, МИФИ, г. Москва

# Элементарная астрофизика и космология

ДЛЯ ШКОЛЬНОГО КУРСА ФИЗИКИ

Учебный план курса

№ газеты	Лекция
17	<b>Лекция 1.</b> Наш космический дом: Солнце, планеты, Земля
18	<b>Лекция 2.</b> Энергетика звёзд. Галактики, скопления галактик
19	<b>Лекция 3.</b> Эволюция звёзд – от протозвёзд до Сверхновых. <b>Контрольная работа № 1</b> (срок выполнения – до 15 ноября 2005 г.)
20	<b>Лекция 4.</b> Образование элементов (таблица Менделеева)
21	<b>Лекция 5.</b> Иные миры (экзопланеты, проблема <i>SETI</i> )
22	<b>Лекция 6.</b> Космологические модели. Вселенная Большого Взрыва. <b>Контрольная работа № 2</b> (срок выполнения – до 15 декабря 2005 г.)
23	<b>Лекция 7.</b> Эхо из прошлого – реликтовое излучение. Стандартная модель Вселенной
24	<b>Лекция 8.</b> Нерешённые проблемы: чёрные дыры, тёмная материя, тёмная энергия, антропный принцип, барионная асимметрия мира

**Итоговая работа.** В качестве итоговой работы засчитывается разработка занятий по одной из тем, рассматриваемых в рамках данного курса. На основе этой разработки слушателем должен быть проведён урок (уроки). Краткий отчёт о его (их) проведении в виде конспекта мероприятия на трёх листах А4, фотографий с места событий и справка из учебного заведения (акт о внедрении) должны быть отправлены в Педагогический университет не позднее 28 февраля 2006 г.

## ЛЕКЦИЯ 8. НЕРЕШЁННЫЕ ПРОБЛЕМЫ: ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ, ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ, ТЁМНАЯ ЭНЕРГИЯ, АНТРОПНЫЙ ПРИНЦИП, БАРИОННАЯ АСИММЕТРИЯ МИРА

Ты притупи, о время, когти льва...

*В.Шекспир*

### 1. Чёрные дыры

Чёрные дыры (*ВН* – *black holes*), предсказанные 200 лет назад Лапласом, в современном представлении являются неизбежным следствием ОТО. Искривление пространства вблизи любого тела (сгустка энергии, импульса) приводит к тому, что, оказавшись внутри своего гравитационного радиуса  $r_g = 2GM/c^2$ , тело пропадает для внешнего наблюдателя. Ни один сигнал не может выйти за пределы  $r_g$ , т.к. в этом случае скорость, необходимая для преодоления гравитации, превысила бы скорость света в вакууме.

Имеется несколько путей «ухода под  $r_g$ ». Один из них – коллапс массивной звезды на последней стадии эволюции, когда, исчерпав запас ядерного горючего, она не может газовым давлением противостоять сжатию. За счёт внешних слоёв, где «горючее» ещё сохранилось (лёгкие ядра), катастрофически сжимающаяся звезда взрывается как Сверхновая,

видимая даже в далёких галактиках. Центральная часть сжимающейся звезды уходит под  $r_g$ , становясь пространственно-временной сингулярностью с бесконечной плотностью.

Большинство астрофизиков верит в реальное существование чёрных дыр. Но есть упрямая группа оппонентов ОТО, которые напрочь отвергают *ВН*, «яблоко раздора» теорий гравитации. Как доказать реальность этих творений научной мысли?

**Эволюционные чёрные дыры.** Звёзды не вечны, как и всё в этом мире. Они проходят долгий, но ограниченный по времени жизненный путь, переходя из одного типа в другой (см. лекцию 3, № 19/05). Красные гиганты большой массы ( $M > 3M_\odot$ ), исчерпав горючее, не могут противостоять коллапсу и неупорно сжимаются, уходя под  $r_g$ .

Одиночную *ВН* нельзя ни увидеть, ни взвесить. Зато *ВН* в двойной звёздной системе можно почувствовать, наблюдая за поведением её видимой соседки. Звезда-компаньон будет вращаться вокруг общего центра тяжести, что проявится в периодических смещениях спектральных линий. Измерив эти смещения, определяют период вращения двойной системы и массы звёзд – компаньона и *ВН*. Метод поиска чёрных дыр был предложен 40 лет назад *Я.Б.Зельдовичем* и американским физиком *Е.Е.Солтнером*.

Чёрная дыра, сама по себе невидимая, «проявится» ещё в том, что будет (за счёт большого гравитационного потенциала) стягивать на себя вещество соседки, которое, двигаясь по орбитам за пределами  $r_g$ , образует газовый диск. Процесс перетекания называется *аккрецией*, а скапливаемое вещество – *аккреционным диском*, который нагрет до высокой температуры и испускает рентгеновские лучи (рис. 1). Рентгеновские источники в Галактике стали первыми объектами поиска *ВН*, а их оптические исследования дали надёжный метод определения масс «невидимок» – нейтронных звёзд и чёрных дыр. Известны 15 кандидатов в *ВН* массами от  $4M_C$  до  $30M_C$ . Между группами нейтронных звёзд ( $M < 3M_C$ ) и *ВН* виден «зазор», что можно считать указанием (пока не очень точным) на различие физической природы двух типов «тёмных звёзд». Дополнительными критериями *ВН* служат высокая рентгеновская светимость аккреционного диска  $L_x = 10^{36} \div 10^{39}$  эрг/с, отсутствие пульсаций и вспышек (*ВН* не имеют твёрдой поверхности).

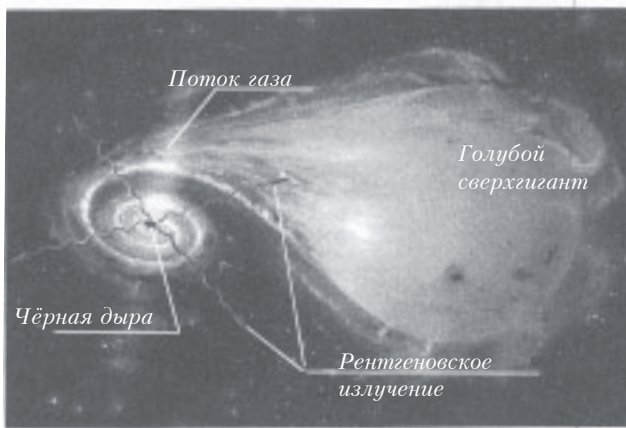


Рис. 1. Двойная звёздная система с чёрной дырой и аккреционным диском, куда перетекает вещество от звезды-компаньона (голубого сверхгиганта), в представлении художника

Чёрные дыры формально не открыты. Пока не будут получены свидетельства отсутствия их наблюдаемой активности в пределах  $r_g$ , они могут считаться только кандидатами в *ВН*. Большинство астрофизиков уверены, что найденные кандидаты действительно чёрные дыры.

**Чёрные дыры в ядрах галактик.** Ещё более «убедительны» сверхмассивные *ВН*, скрывающиеся в ядрах галактик. Их происхождение, однако, не столь ясно и модельно просчитано, как звёздных *ВН*. Они образованы на ранних этапах в результате столкновений и слияний звёзд в центре галактик.

Сейчас благодаря вводу в строй больших оптических телескопов (диаметр 8–12 м) и орбитального *HST*, достигших разрешения  $0,1''$ , стало возможным исследовать движение газа и звёзд в центрах галак-

тик, где возможно существование галактических ядер. Техника наблюдений – та же, что при исследовании двойных звёзд: измерение доплеровского смещения спектральных линий с разных сторон галактического ядра и определение его массы по движению звёзд и потоков газа. На рис. 2 приведён результат наблюдений ядра галактики М87 (расстояние 50 млн св.лет): масса ядра  $3 \cdot 10^9 M_C$ , размер не превышает  $100r_g$ . Такая гигантская масса, заключённая в столь малом объёме, – почти наверняка *ВН*. Однако и в этом случае нет окончательной уверенности. И сверхмассивные чёрные дыры оставляют место для сомнений: возможно, при детальном анализе они окажутся плотными скоплениями звёзд.

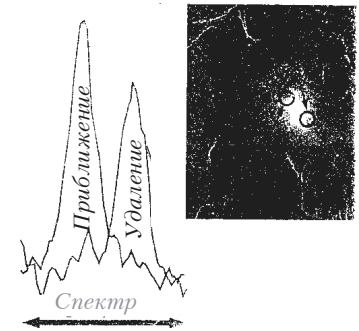


Рис. 2. Спектры оптического излучения областей около ядра галактики М87, показывающие вращение газа со скоростями, близкими к скорости света: движение к наблюдателю (синее смещение) и от наблюдателя (красное смещение). В верхнем углу – вид галактики с областями (кружки) измерения спектров

эллиптических и спиральных галактик (~ 90% от всех) – сверхмассивные *ВН*. Не обошли наблюдения и нашу Галактику, в центре которой открыто ядро массой  $2 \cdot 10^6 M_C$ . Рентгеновская обсерватория *CHANDRA* зафиксировала быструю переменность источника, что свидетельствует о его малых размерах ( $\leq 20r_g$ ).

**Невидимые кудесники.** *ВН* – настоящие дыры в пространстве-времени. Само название *чёрная дыра* появилось недавно, в 1968 г., благодаря *Дж.Уиллеру*. До этого их обзывали *гравитационными ловушками* или *могилами*, но столь мрачные имена не прижились. Описали *ВН* впервые *Р.Оппенгеймер* и *Х.Снайдер* в 1930-х гг.

Физика чёрных дыр – кладёшь парадоксов и удивительных явлений. Можно понять упорство оппонентов ОТО, которые отказываются верить этим «чёрным фокусам». Что увидит далёкий наблюдатель, следя за коллапсом звезды? Гравитационный потенциал и время вблизи  $r_g$  можно записать так:

$$U = G \frac{Mm}{r\sqrt{1-r/r_g}}; \quad \tau = \frac{t}{\sqrt{1-r/r_g}}, \quad (1)$$

где  $M$ ,  $m$  – масса чёрной дыры и падающего в неё тела.  $U$  и  $\tau$  обращаются в бесконечность при  $r = r_g$ , что указывает на недостаток теории. Однако в системе координат наблюдателя, движущегося вместе с веществом звезды, уходящей под горизонт, бесконечности не возникают. Он даже не заметит, как окажется за границей  $VH$ : притяжение будет вполне нормальным, а время перехода через  $r_g$  даже очень небольшим. Замедление времени вблизи чёрной дыры для внешнего наблюдателя означает, что он никогда не увидит перехода звезды через  $r_g$ , – оно будет бесконечно долгим.

Чёрные дыры могут действовать как энергетические машины, в особенности те из них, которые имеют вращение (*керровские*, в отличие от *шварцшильдовских* – без вращения). Угловой момент и электрический заряд – ещё две характеристики, кроме массы, сохраняющиеся у  $VH$ . Все остальные особенности «втягиваются» под  $r_g$  и пропадают для внешнего наблюдателя.  $VH$  – бесструктурное сферическое образование, лишённое каких-либо излишеств. Яркие детали, украшавшие звезду прежде – магнитные поля, пятна, вспышки, – уносятся во время коллапса гравитационными волнами. Чёрная дыра не «помнит» своего предшественника.

Энергетика  $VH$  так интересна, что ею не перестают заниматься до сих пор, выискивая всё новые способы извлечения энергии. Можно, например, опустить на  $VH$  тело массой  $m$  из любого подручного материала, привязав другой конец троса к вращающемуся барабану, который будет совершать полезную работу. Тогда по достижении  $r_g$  выделится энергия, равная  $mc^2$ , т.е. КПД превращения массы в энергию составит 100% (в ядерных реакциях он не превышает 1%). Можно (что проще) обстреливать керровскую  $VH$  пучком частиц под таким углом, чтобы он не уходил под горизонт. Отражённый «дырой» пучок будет обладать большей энергией, чем падающий, получая её за счёт вращения  $VH$ . Удивительна электродинамика чёрных дыр: они могут служить и ротором электромотора, и генератором тока, закручиваться при подаче напряжения и совершать много других полезных деяний.

Сверхмассивные  $VH$  в центрах галактик давно рассматриваются как центральные двигатели, снабжающие энергией квазары (самые мощные объекты, видимые до границ Вселенной) и вызывающие взрывы галактических ядер – самые большие выделения энергии ( $\sim 10^{60}$  эрг), эквивалентные взрыву миллионов Сверхновых. Что касается  $VH$  умеренных масс, то и они когда-нибудь (когда научатся отыскивать и перемещать их) будут использоваться в хозяйстве так же естественно, как сейчас сила ветра и рек.  $VH$  заставят крутить турбины, двигать поезда, производить тяжёлые работы. Появится реклама: «Каждой хозяйке – свою  $VH$ !» Мощность  $VH$  размером меньше атомного ядра (не займёт много места!) и массой всего-то 1000 т равна 10 кВт – достаточно в домаш-

нем хозяйстве.

**Другие чёрные дыры.** Чёрные дыры, не будучи строго доказаны, прочно вошли в научный обиход. Кроме упомянутых, есть ещё первичные  $VH$  (или мини- $VH$ ) и  $VH$  промежуточной массы. Их исследования пока в самом начале.

Мини- $VH$  – микроскопические «дыры», которые могли возникнуть при рождении Вселенной как топологические дефекты. Согласно гипотезе английского физика *С.Хокинга* о квантовом испарении чёрных дыр, большая часть «дырочек» ( $M \leq 10^{15}$  г) уже испарилась, пополнив спектр фоновых излучений. В настоящее время заканчивают взрывом жизни мини- $VH$  массой чуть больше, а продукты взрывов (космические лучи, гамма-излучение) учёные пытаются уловить. Получены верхние пределы плотности мини- $VH$  ( $\leq 10^3$  пк $^{-3}$ ).

Чёрные дыры массой  $M = 10^2 \div 10^4 M_{\odot}$  могут образовываться в звёздных скоплениях путём слияния звёзд. Уже известно несколько кандидатов. Одиночные «дыры» регистрируют методом гравитационного микролинзирования, при котором в качестве гравитационной линзы выступает  $VH$ , оказавшаяся на одном луче зрения с далёкой «фоновой» звездой (например, в Магеллановых Облаках или туманности Андромеды), свет которой фокусируется «линзой», вызывая усиление блеска. При этом наблюдается звёздная вспышка длительностью несколько дней (в зависимости от массы гравлинзы). Получены первые данные, и уже есть список найденных  $VH$ . Отметим, что этот новый метод опровергает утверждение о невозможности «взвешивания» одиночной  $VH$ . Оказывается, вполне можно – с помощью гравитационной астрономии.

**Окончательное решение.** Чёрные дыры разнообразны. Их главное отличие – большие массы. Но является ли большая масса надёжным критерием? К сожалению, нет. Чтобы окончательно доказать, что объект –  $VH$ , надо увидеть его поверхность и убедиться, что она абсолютно пуста. Все  $VH$  должны быть непроницаемо тёмными, отрешёнными от какой-либо активности, т.к. никакой поверхности у них нет. Для утверждения найденных «кандидатов» нужны новые методы наблюдений, требующие уникальной аппаратуры. Один из них – метод орбитального рентгеновского интерферометра, угловое разрешение которого  $\sigma \approx 10^{-7}$  угл. с (!), что в миллион раз лучше, чем у оптических телескопов. Эксперимент готовится NASA к 2010 г. Будет наблюдаться ядро Галактики в пределах гравитационного радиуса, который виден под углом  $10^{-5}$  угл. с, что в 100 раз больше  $\sigma$ .

## 2. Тёмная материя

Астрофизика владеет мощным арсеналом средств наблюдения. Казалось, ничто не укроется от её зор-

ких глаз. Но всё больше поступает сведений, что «зоркие глаза» позволяют видеть лишь малую часть материи, заполняющей мир, а основная масса заключена в объектах, ускользающих от наблюдений. На первый взгляд, причина ясна: эти объекты не светят ни в каком диапазоне, они – невидимки. За ними, даже не зная, что они собой представляют, утвердилось название *тёмная материя* (ТМ). Её, оказывается, очень много, почти в сто раз больше обычной, «видимой материи» (ВМ), из которой состоят звёзды, горячий газ, планеты. Мы видим только одну сотую всего, что нас окружает, и эту 0,01 подробно изучаем, в то время как 0,99 мира остаётся неизвестным. Очень тревожная ситуация.

Сказанное, однако, некоторое преувеличение. Уже из того, что известно соотношение ВМ и ТМ, следует, что тёмную материю научились как-то распознавать. Ей находят объяснения, её раскладывают по полочкам и признакам. Но в целом ТМ – пока неразрешённая загадка.

**Тёмная материя в галактиках и их скоплениях.** Первые свидетельства о ТМ появились ещё в 1940-х гг. По мере накопления данных они переросли в твёрдую уверенность. Галактики состоят из звёзд, и каждая звезда движется по орбите вокруг центра, находясь под действием двух уравновешивающих сил: тяготения со стороны всего, что находится внутри её орбиты, и центробежной силы, вызванной движением звезды. Можно записать:  $mv^2/r = GM(r)m/r^2$ , где  $M(r)$  – масса галактики внутри  $r$ ;  $m$ ,  $v$  – соответственно масса и скорость звезды. Получим зависимость скорости звезды от  $r$ :

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}. \quad (2)$$

Солнечная система – прекрасный пример закона (2) для одного центрального тела  $M_C$  (рис. 3). Для галактики зависимость несколько иная: с ростом радиуса  $v$  сначала увеличивается из-за возрастания  $M(r)$ , а потом, на краю галактики, должна уменьшаться. Наблюдения показывают, что это далеко не так: скорости звёзд, находящихся за пределами галактики, практически не изменяются, как будто на них продолжает влиять невидимая масса. Так проявляет себя ТМ, которая, согласно (2), в несколько раз превышает по массе ВМ.

Проявилась ТМ и в скоплениях галактик. Для связанного скопления справедлива теорема вириала:  $2E_k + E_p = 0$ , где  $E_k$ ,  $E_p$  – кинетическая и потенциальная энергии галактик скопления.  $E_k$  вычисляется по скоростям всех членов скопления,  $E_p = GM^2/R$  определяется общей массой  $M$  (ВМ и ТМ) и размером скопления  $R$ . Принимая за  $R$  видимый радиус скопления, можно оценить «вириальную»

массу  $M$ , которая оказалась в несколько раз больше ВМ скопления.

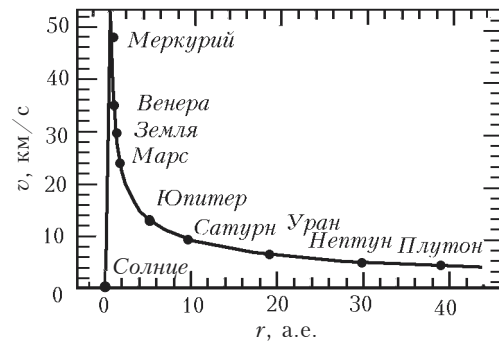


Рис. 3. Зависимость орбитальной скорости для планет Солнечной системы (влияет только масса Солнца, никакой тёмной материи)

**Тёмная материя и реликтовое излучение.** Есть и другие свидетельства ТМ. Одно из них связано с реликтовым излучением ( $T_0 = 2,7$  К). «Реликт» несёт на себе, как родимые пятна, следы первичных флуктуаций вещества в виде отклонений температуры от среднего значения (см. лекцию 7, № 23/05). Ожидаемую «сеть» температурных вариаций долго не могли найти, хотя предпосылки были очевидны: они связаны с наблюдаемой структурой вещества (звёзды, галактики). Все эти «структуры» возникли из флуктуаций плотности, а значит, должны были существовать и начальные флуктуации температуры. Если вещество представлено только в форме ВМ, температурные вариации излучения были бы очень заметными – не меньше 0,1% от  $T_0$ . А их не находили на уровне, в 100 раз меньшем. Тут снова «помогла» ТМ. Если в мире много ТМ, то первичные флуктуации плотности вещества начинали расти именно на ней, а ВМ было только малым «довеском», не определявшим динамику роста. Но ТМ не взаимодействует, как указывалось, с излучением, её связь с окружающим миром – только через гравитацию. Вот почему температурные флуктуации так малы или, лучше сказать, вот почему так быстро выросли пространственные структуры. Когда наконец в эксперименте тончайшая «сеть» реликтового излучения была найдена, её относительная величина оказалась 0,001%, т.е. и по этим данным ТМ в 100 раз больше, чем ВМ.

**Барионная тёмная материя.** Самое простое – предположить, что ТМ, как и ВМ, состоит из обычного вещества (ядер, протонов, нейтронов), которое называют барионным. Только «скрыта» она в слабо светящихся объектах: газовых облаках, телах типа планет ( $M < 0,001M_C$ ), звёздах массой меньше  $0,1M_C$  (коричневые карлики), недра которых слишком холодны для зажигания термоядерных реакций. Надо

добавить ещё белые карлики, нейтронные звёзды – угасшие светила, истощившие всё ядерное горючее. Эти массивные компактные тела (МКТ) могут находиться в коронах галактик. Для их поиска нужны очень зоркие телескопы, способные различать столь слабые объекты, но таковых пока нет. На помощь пришёл новый метод – микролинзирование, – в котором МКТ в гало Галактики проявляют себя как гравитационные линзы, усиливающие яркость далеких звёзд. Чтобы эффект гравлинзы проявился, нужно точное выстраивание на одной линии далёкой звезды, земного наблюдателя и находящегося между ними невидимого МКТ. Такое случается очень редко и длится (из-за движения объектов) короткое время (часы, дни). Пример временного возрастания яркости звезды в результате микролинзирования показан на рис. 4. Приходится непрерывно держать под наблюдением миллионы звёзд, ловить кратковременные усиления яркости и отличать их от колебаний блеска переменных звёзд. Проведены эксперименты (*MACHO*, *EROS* и др.) с применением ПЗС-матриц, регистрирующих одновременно миллионы звёзд. Длительность звёздной вспышки зависит от массы и скорости МКТ:  $t \sim \sqrt{m}/v$ , так что из наблюдений можно найти массу невидимого тела. Наблюдения показали, что невидимые объекты в гало Галактики действительно присутствуют, но их число сравнительно невелико и «закрывать» собой проблему всей ТМ они не могут.

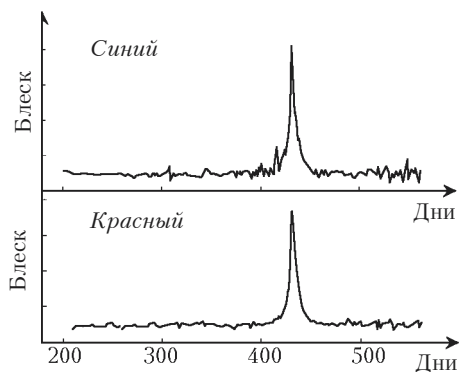


Рис. 4. Возрастание блеска звезды Большого Магелланова Облака в красном и синем диапазонах в результате микролинзирования на массивном компактном объекте в гало Галактики

Проведены эксперименты (*MACHO*, *EROS* и др.) с применением ПЗС-матриц, регистрирующих одновременно миллионы звёзд. Длительность звёздной вспышки зависит от массы и скорости МКТ:  $t \sim \sqrt{m}/v$ , так что из наблюдений можно найти массу невидимого тела. Наблюдения показали, что невидимые объекты в гало Галактики действительно присутствуют, но их число сравнительно невелико и «закрывать» собой проблему всей ТМ они не могут.

**Небарионная тёмная материя.** Что представляет собой остальная (небарионная) ТМ? Она совсем непохожа на окружающее нас вещество и состоит, как полагают, из совершенно новых форм материи, с которыми земные физики ещё не знакомы (кроме сильно продвинутых теоретиков). А последние утверждают, что этих «форм» достаточно много.

Свидетельство небарионной ТМ было получено из анализа синтеза лёгких ядер (дейтерия, гелия). Самые распространённые элементы в мире – водород (73% по массе) и гелий (25%). На долю осталь-

ных приходится около 2%. В таком составе вещество вышло из горячего «термоядерного котла» в первые минуты Большого Взрыва. Реакции синтеза прекратились, когда температура упала (из-за расширения Вселенной) ниже  $10^6$  К. Темп остывания вещества определялся скоростью его разлёта, которая, тормозясь гравитационным взаимодействием, зависела от количества барионной и небарионной ТМ. Полученные относительные количества водорода и гелия хорошо согласуются с наблюдаемыми значениями, что подтверждает теорию Большого Взрыва. Более точным «индикатором» первых минут расширения служит дейтерий – очень чувствительный к условиям первичного синтеза изотоп. Только вот наблюдать его надо не вблизи, а в объектах за миллиарды световых лет от нас, где он сохранился в первозданном виде, не «загрязнённом» деятельностью звёзд. Такие наблюдения провели на телескопе *Keck-1* (10 м, Гавайи, США), измерив количество дейтерия в водородном облаке вблизи далёкой галактики. Согласно этим измерениям, небарионная ТМ миллиарды лет назад составляла ~25% всей материи и состояла из медленно движущихся тяжёлых частиц («холодная ТМ»).

Физика ранней Вселенной «смыкается» с физикой элементарных частиц. При высоких температурах, царивших в первые мгновения Большого Взрыва, рождалось большое число частиц, в том числе не известных нам (которые пока не получены на ускорителях). Однако эти частицы уже используются в теоретических моделях, их свойства постулируются, и именно из них «подбираются» кандидаты для небарионной ТМ. Главная «необычность» в том, что они не участвуют в сильном (ядерном) и электромагнитном взаимодействиях, которые присущи обычной материи и делают её видимой. Гипотетические частицы введены в физический обиход «на кончике пера» и нуждаются в подтверждении. С вводом в строй новых ускорителей ставятся всё новые эксперименты по их обнаружению. Пока поиски не дали результата. Сейчас все надежды возлагаются на коллайдер *LHC* (*CERN*, Женева), энергия которого будет на порядок выше.

Ситуация непростая. Частицы, из которых может состоять небарионная ТМ, названы. В качестве кандидатов чаще всего рассматриваются «суперсимметричные» частицы – фотино, нейтралино, глюблино – порождения теории *SUSY*, объединяющей все типы взаимодействий. Современные теоретические модели настолько разнообразны, что недостатка в кандидатах нет. Но нет и уверенности в их реальном существовании.

Не дожидаясь фронтального решения проблемы на *LHC*, уже сейчас ведутся поиски частиц-кандидатов. Они, взаимодействуя между собой, могут породить высокоэнергичное гамма-излучение энергией  $E = M_s c^2$ , где  $M_s$  – масса «суперсимметричной»

частицы. Гамма-излучение должно приходиться из мест концентрации тяжёлых частиц – центра Галактики, где находится галактическое ядро ( $\sim 10^6 M_{\odot}$ ), со стороны ближайших звёзд, может быть, от Солнца. Другой метод поиска «небарионных» тяжёлых частиц – через генерируемые ими потоки нейтрино большой энергии (свыше 1 ГэВ), регистрируемые подземными и глубоководными установками (Баксанская нейтринная обсерватория, Байкальский нейтринный телескоп, детектор *Kamio-kande* и другие). В настоящее время идёт накопление экспериментального материала, пока рано делать какие-либо выводы.

Наряду с косвенными проводятся и прямые наблюдения за ожидаемыми потоками частиц небарионной ТМ. Не обладая сильным и электромагнитным взаимодействием, они могут влиять на детектор только «слабым» образом, что затрудняет их обнаружение. Поиск сигналов, вызванных такими частицами, проводится в низкофоновых подземных лабораториях.

### 3. Тёмная энергия

Ещё один материальный компонент, который заявляет о себе всё настойчивее, – тёмная энергия (ТЭ), заключённая в вакууме. Физический вакуум – достаточно сложная субстанция, состоящая из виртуальных частиц и обладающая плотностью, давлением, энергией. В ОТО это состояние материи выражается через космологическую постоянную  $\Lambda$ , первоначально введённую Эйнштейном для «противодействия» гравитации материальных тел в создаваемой им стационарной модели. Как известно, Вселенная нестационарна, она возникла в Большом Взрыве и расширяется. Постоянная  $\Lambda$ , в общем случае отличная от эйнштейновской  $\Lambda_{\text{Э}}$ , отражает антигравитацию вакуума, обладающего отрицательным давлением. Всё больше астрофизических данных (подсчёт далёких галактик, вспышки сверхновых типа СН-Ia) указывают на влияние постоянной  $\Lambda$  и её большой вклад в вещество Вселенной. В настоящее время доля ТЭ в стандартной модели Вселенной (см. лекцию 7, № 23/05) составляет  $\sim 70\%$ .

Тёмная энергия в отличие от ТМ не собирается в сгустки, а равномерно «разлита» во Вселенной. Пока не видно прямых путей её измерения как ввиду малого значения  $\Lambda$ , так и вследствие её равномерного распределения. Теоретические исследования, напротив, ведутся широким фронтом. Предложено альтернативное объяснение ТЭ как проявление сверхслабого поля (пятого фундаментального взаимодействия), получившего название *квинтэссенции*, ещё более «неощутимого». Решение загадки ТЭ – задача физики XXI в.

### 4. Антропный принцип

Давно замечено, что параметры нашего мира (ми-

ровые константы, иерархия частиц, взаимодействия) весьма гармонично подобраны для развития и успешной эволюции. Так, отмечалось (см. лекцию 4, № 20/05), что «узкое место» нуклеосинтеза в звёздах из-за отсутствия устойчивых ядер массой  $A = 5$  успешно преодолевается тройной гелиевой реакцией благодаря возбуждённому уровню ядра  $^{12}\text{C}$  и резонансному характеру реакции. Смещение этого уровня на несколько процентов (из-за изменения константы) катастрофически повлияло бы на мир – в нём не было бы элементов тяжелее гелия и не было бы никакого развития. Так же удачно происходят реакции синтеза  $^{14}\text{N}$  и  $^{16}\text{O}$  (не резонансные), в результате чего в мире приблизительно равные количества углерода, азота, кислорода, развиваются сложные органические молекулы, появляется жизнь. Подобные примеры «тонкой настройки» встречаются на всех этапах эволюции.

Ещё один «удачный выбор» – трёхмерность пространства ( $n = 3$ ), в котором сила взаимодействия  $F \sim 1/r^2$ . Можно показать, что только такое взаимодействие приводит к устойчивому движению двух тел, благодаря чему могут существовать связанные состояния атомов и планетных систем. При  $n \leq 2$  устойчивость очень ограничена, при  $n > 3$  её вовсе нет.

Параметры мира как бы «подстроены» так, чтобы за определённое время в нём образовались звёзды, произошёл синтез элементов, возникли планетные системы звёзд, на планетах с подходящими условиями появились жизнь и разумное существо – человек, наблюдатель и исследователь мира. Такой выбор нужных параметров мира, который приводит на определённой стадии к появлению наблюдателя, составляет суть *антропного принципа* (АП).

При всей загадочности АП достаточно просто объясним. Он предполагает, что нашему наблюдению открыта только очень малая часть мира. Мы живём в одной из многочисленных вселенных с разными наборами мировых констант. Вселенные с другими константами развиваются без свидетелей, и таких миров, наверное, очень много. С ними мы никогда не войдём в контакт из-за конечной скорости света и расширения нашей Вселенной.

Идея множественности вселенных получила развитие в современной теории струн, претендующей на более глубокое понимание физики частиц и космологии (см. № 5/05). В некотором смысле теория струн – это обобщение на большее число размерностей (большинство из которых свёрнуто в мельчайший узел  $\sim 10^{-33}$  см) ОТО. Ландшафт теории струн содержит множество долин со своим набором физических параметров, где возможно существование стабильного мира. Мы – в одной из них (с удачным набором параметров). Теория струн пока не вышла на «оперативный простор», но многие надеются, что она сможет объяснить массы частиц, число фунда-

ментальных взаимодействий, постоянную  $\Lambda$ , – станет «теорией всего».

### 5. Управление земной погодой (циклоны, ураганы)

Важная проблема, хотя и меньшего масштаба, – воздействие на земную погоду, часто приносящую большие бедствия. Свежи в памяти разрушительное цунами в Юго-Восточной Азии (декабрь 2004 г.), безжалостные ураганы «Катрина» и «Рита» (осень 2005 г.). Можно ли укротить ураганы или по крайней мере снизить их активность?

Штормы и ураганы – самые сильные и разрушительные тропические циклоны (ТЦ). Шторм – это ТЦ со скоростью ветра свыше 17 м/с, главный ураган – до 50 м/с (180 км/ч). Скорость ветра в урагане «Катрина» превышала 300 км/ч, его жертвами стали более 1000 человек. Наблюдается в среднем 45 штормов в год, большая часть (30%) – в Тихом океане. Перемещаются по заведённым путям, следуя океаническим и воздушным течениям. В Атлантике их маршрут – от берегов Африки на северо-запад в полосу  $10^\circ$ – $20^\circ$  с.ш., где ТЦ набирают силу, затем в сторону Карибского моря и южных штатов США.

**Причина и динамика первичного развития урагана неизвестна.** Он разрастается за счёт тепловой энергии океана и атмосферы, неустойчивой к образованию вихрей. Это тепловая машина Карно, в которой испарение воды, образование насыщенного пара и выпадение осадков ведёт к увеличению энергии и перерастанию в ураган. **Нужен только начальный толчок, чтобы «машина» заработала.** Выйдя на берег, ураган лишается поддержки океана и за несколько дней теряет силу, успев, однако, наломать много дров.

Есть модели, учитывающие корреляции ураганов с иными погодными явлениями. Известны условия их развития: высокая температура поверхностного слоя (выше  $26^\circ$ ) и малое изменение профиля скорости с высотой (чтобы вихрь не распался на части). Способствуют развитию тепловой контраст поверхности, над которой движется воздушный поток, скопление кучевых облаков. Предсказывать, какой ТЦ станет ураганом, наука пока не умеет.

Предложена гипотеза: **начальный толчок связан с солнечной активностью (СА) и приходит из радиационного пояса Земли.** Будучи доказана, такая связь могла бы указать путь воздействия на развитие урагана. Аргументы в пользу гипотезы:

- активность ураганов переменна в масштабе десятков лет. Среднее число главных ураганов за период 1900–2004 гг. следовало за переменностью амплитуд солнечных циклов и числом корональных выбросов. В то же время нет зависимости от фазы цикла – среднее число ураганов одинаково во всех

фазах 11-летнего периода СА;

- **высыпания частиц из радиационного пояса** ( $p$ ,  $e^-$ ,  $e^+$  – по измерениям спектрометра *AMS* на высоте 380 км) **происходят по всей длине экватора и их заметно больше на западе Тихого океана**, что согласуется с наблюдениями ураганов;

- переносчиком СА могут быть корональные выбросы, которые, доходя до Земли, вызывают магнитные бури в магнитосфере. Образуется плазменный токовый слой, в котором ускоряются частицы, и их пучки «сбрасываются» в район геомагнитного экватора. Такие пучки были обнаружены ИСЗ *SAMPX* и *POLAR* (США). Это доказывает воздействие Солнца на всю толщу земной атмосферы вплоть до тропосферы.

**Возможное влияние на ураганы.** Указанный механизм воздействия частиц радиационного пояса на тропосферу в принципе позволяет управлять ураганами. По сигналу о корональном выбросе (за несколько дней до его прихода к Земле) надо истощить радиационный пояс, вызвав искусственное высыпание. В таком случае поток во время магнитной бури будет ослаблен и необходимые условия развития циклона в шторм и ураган не возникнут. Опережающее воздействие на радиационный пояс (*космический громоотвод*) кажется возможным при современных технических средствах (взрывы в стратосфере, воздействие мощными радиоимпульсами на ионосферу, распыление химикатов, поглощающих электроны).

#### Вопросы для самоконтроля

- Что такое чёрная дыра (*ВН*)? Какие методы применяются для поиска *ВН*?

- Как образуются эволюционные чёрные дыры?
- Где и в каких галактиках находятся сверхмассивные чёрные дыры:  $(10^6 \dots 10^9)M_\odot$ ?
- Какие наблюдательные данные указывают на существование больших масс тёмной материи (*ТМ*)?
- Из чего состоит барионная *ТМ*?
- В чём основная трудность наблюдения небарионной *ТМ*?

#### Литература

Новиков И.Д. Энергетика чёрных дыр. – Знание, серия «Физика», 1986, № 3.

Гинзбург В.Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными? – УФН, 1999, т. 169, № 4.

Рубаков В.А. Тёмная материя и тёмная энергия во Вселенной: Лекция, Политехнический музей. – 2005.

Лучков Б.И. Можно ли укротить ураганы? В «Сб. научных трудов». – М.: МИФИ, 2005, т. 7.