

Продолжение. См. № 17–22/05

Проф. **Б.И.ЛУЧКОВ**, МИФИ, г. Москва

Элементарная астрофизика и космология

ДЛЯ ШКОЛЬНОГО КУРСА ФИЗИКИ

Учебный план курса

№ газеты	Лекция
17	Лекция 1. Наш космический дом: Солнце, планеты, Земля
18	Лекция 2. Энергетика звёзд. Галактики, скопления галактик
19	Лекция 3. Эволюция звёзд – от протозвёзд до Сверхновых. Контрольная работа № 1 (срок выполнения – до 15 ноября 2005 г.)
20	Лекция 4. Образование элементов (таблица Менделеева)
21	Лекция 5. Иные миры (экзопланеты, проблема <i>SETI</i>)
22	Лекция 6. Космологические модели. Вселенная Большого Взрыва. Контрольная работа № 2 (срок выполнения – до 30 декабря 2005 г.)
23	Лекция 7. Эхо из прошлого – реликтовое излучение. Стандартная модель Вселенной
24	Лекция 8. 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 7. ЭХО ИЗ ПРОШЛОГО – РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ ВСЕЛЕННОЙ

И страшным, страшным креном
К другим каким-нибудь
Неведомым вселенным
Повёрнут Млечный Путь.

Б.Пастернак

Небывалый взлёт переживает космология – наука о мире в целом: как он возник, какая судьба его ожидает. Успехи космологии и в понимании путей развития Вселенной, от мельчайших долей секунды до «наших дней», и в прецизионных измерениях, приносящих удивительные результаты. На глазах происходит переход от иллюзорного мира, удовлетворяющего многим космологическим моделям, к единственно возможному, подчинённому только одной. Прогресс наблюдательных средств непрерывен. Увеличиваются размеры телескопов – зеркала уже достигли 15 м в диаметре. Совершенствуются приёмники света. Теперь это не фотопластинки, а ПЗС-матрицы, обладающие высокой чувствительностью и точностью изображения. Улучшается разрешение спектрометров – главных поставщиков астрофизической информации. Компьютеры управляют из-

мерениями, накапливают и обрабатывают данные, повышают эффективность работы телескопов. Центр исследований определённо смещается в область внегалактической астрономии, к устройству мира – космологии.

1. Ячеистая структура Вселенной

Сейчас известно, что Вселенная заполнена не равномерной смесью скоплений галактик, а их «пенной», местами очень плотной, местами редкой. Вселенная состоит из отдельных ячеек размером 50–150 Мпк, в пересечениях стенок которых галактик много, а в центральных областях – почти пустота, воиды (от англ. *void – пустой*). Ячеистая структура – не результат статистических флуктуаций, а реальный факт, отражающий условия возникновения первичных неоднородностей вещества. Результаты наблюдений стимулируют поиск новых моделей развития, в которых ячеистая структура Вселенной была бы так же естественна, как шарообразная форма небесных тел в ньютоновской теории тяготения.

Нестационарная космология. К нашей великой гордости у истоков современной космологии стояли российские учёные – *Александр Фридман* и *Георгий Гамов*. Фридман первый вступил на этот путь, получив

нестационарные решения уравнений ОТО, согласно которым Вселенная в определённый момент «вышла из небытия» и находится сейчас в стадии расширения. Спустя несколько лет американский астроном *Эдвин Хаббл* открыл закон разлёта галактик, доказавший расширение Вселенной. *Альберт Эйнштейн*, горячий сторонник «неизменного во времени мира», должен был признать свою неправоту в споре с *Фридманом*.

Были предложены три варианта решений, отличающиеся силой первичного «толчка», создавшего Вселенную: открытая, плоская и замкнутая модели (см. лекцию 6). В открытой модели энергия «толчка» превышает энергию тяготения вещества, в результате чего Вселенная безгранично расширяется. Плоская модель отвечает тому редкому случаю, когда энергии «толчка» и тяготения в точности равны, – Вселенная расширяется так, что в пределе (на бесконечном радиусе) скорость стремится к нулю. Совсем другая судьба ожидает её в замкнутой модели, где энергия разлёта меньше энергии тяготения. Расширение Вселенной продолжится до определённого радиуса, на котором она остановится, после чего начнётся сжатие и возвращение в исходное сверхплотное состояние.

Какая модель реализуется на самом деле, было неясно все последующие годы. Более того, число возможных моделей стало расти за счёт дополнительных предположений о влиянии пространства (физического вакуума) на помещённые в него тела. Сказалась введённая Эйнштейном космологическая постоянная Λ (антигравитация вакуума), вроде бы лишняя в нестационарном мире. Как ни искали, не было найдено надёжного теста, который помог бы выбрать правильную модель.

Одессит *Гамов* добавил в этот запутанный клубок с избытком огня и юмора. В статье, датированной 1 апреля 1948 г., он утвердил за первичным веществом не только право быть сверхплотным, но и нагретым до сверхвысокой температуры. С природной лёгкостью окрестил он рождение мира *Большим Хлопком (Big Bang)*, что, впрочем, люди серьёзные перевели как *Большой Взрыв* (Вселенная всё-таки, а не бойкий одесский базар «Привоз»). *Гамову* не поверили, но в 1965 г. два американских инженера фирмы «Bell», *А. Пензиас* и *Р. Вильсон*, отрабатывая сигнал слежения за спутником, неожиданно открыли космический микроволновый фон – реальный остаток Большого Взрыва – или, как его стали называть с лёгкой руки *И. С. Шкловского* (в душе тоже одессита), реликтовое излучение (РИ). Модель Горячей Вселенной (ГВ) стала признанным лидером космологии. Однако число возможных вариантов осталось прежним.

Возникновение структуры. Наблюдаемые в наше время структурные единицы – звёзды, галактики, их скопления – каким-то образом возникли в первично однородном веществе. Время образования и вид структур качественно объясняется моделью ГВ. Когда излучение доминирует, вещество представляет собой плазму, состоящую из протон-антипротонных пар в

первые микросекунды, электрон-позитронных пар через секунду и из электронов и протонов (с примесью ядер дейтерия и гелия) в течение миллионов лет. Излучение, активно взаимодействуя с заряженными частицами, ведёт себя как вязкая среда, в которой гасятся все движения частиц, в том числе вызванные взаимным притяжением. Структурных образований в плазме не возникает.

Через миллион лет излучение остывает до 3000 К, что ниже потенциала ионизации водорода. Ничто не мешает теперь протонам и электронам объединиться, образуя нейтральный газ (рекомбинация), к которому остывшее излучение «теряет всякий интерес», проходя сквозь него без заметного взаимодействия. Вот тут-то гравитация напоминает о себе, заставляя газ сжиматься. Гравитационная неустойчивость вещества – следствие «однобокой» силы притяжения – приводит к формированию всех видимых структур: от астероидов до скоплений галактик. С чего начинался этот процесс в однородном газе? Какие структуры возникли первыми? Как они развивались миллиарды лет? Прямых ответов теория пока не даёт. В соответствии с предложенными моделями «центрами конденсации» вещества служили случайные уплотнения (флуктуации) среды. Раз возникнув, они продолжали расти за счёт новых порций притягиваемого вещества, становясь большими газовыми облаками. При этом возможны флуктуации двух типов: изотермические и адиабатические. Первые, затрагивающие только газ, порождали облака умеренных размеров (~кпк), сравнимые с наблюдаемыми сейчас шаровыми звёздными скоплениями. Чтобы образовать галактики, таким облакам надо укрупняться, соединяясь при столкновениях. Как это происходило, не очень понятно. Второй тип флуктуаций происходит одновременно в газе и в излучении и должен приводить к облакам гигантских размеров и масс. Сталкиваясь, они сжимали газ в тонких слоях контакта, образно называемых *блинами*, где и возникали условия для образования будущих структур. Модель *блинов* развила группа академика *Я. Б. Зельдовича* в 1970-х гг. Открытие ячеистой структуры Вселенной во многих чертах подтверждает эту модель: стенки ячеек – это места первичных *блинов*, рёбра ячеек – их пересечения, воиды – *межблинное* пространство, где не возникло требуемых условий роста структур. Данное описание, конечно, весьма приближённое и условное. Скорее всего природа использовала флуктуации обоих типов, создавая разномасштабные структуры. Но даже качественное совпадение теории и наблюдений вселяет уверенность, что ячеистая структура Вселенной – не только наблюдательный, но и вполне познавательный факт.

Проблема скрытой массы. Эту и без того непростую картину мира ещё больше усложнили две «горячие» темы. Первая – проблема *скрытой массы* (или *тёмной материи*, ТМ), занимающая учёных уже более 40 лет. Суть её в том, что не всё вещество заключено в звёздах, галактиках и их скоплениях, т.е. в объектах светящихся и потому легко наблюдаемых. Намного бóльшая масса (по оценкам, в 5–10 раз) ока-

зывается невидимой. Вещество-невидимку не разглядеть в телескопы, оно не «засвечивает» себя в разных диапазонах длин волн, но достаточно надёжно обнаруживается через гравитационное взаимодействие с окружающим обычным веществом (см. далее лекцию 8). Наблюдения показали, что ТМ существует во всех подструктурах – галактиках, скоплениях и сверхскоплениях.

Что скрывается за маской ТМ, до сих пор не известно. ТМ может быть как обычным веществом, находящимся в объектах слабой светимости (звёзды малых масс, нейтронные звёзды, холодные газовые облака, планеты), – барионная ТМ, – так и совершенно новым видом материи, не участвующим ни в каких взаимодействиях кроме гравитационного и слабого – небарионная ТМ. Кандидатов в небарионную ТМ в современной физике достаточно много: массивные нейтрино, новые частицы и другие «диковинки», вышедшие из-под пера физиков-теоретиков. Раскрытие тайны ТМ – одна из самых захватывающих задач современности, от решения которой зависит прогресс физики элементарных частиц, астрофизики, космологии. Чем бы ни была ТМ, её влияние на структуру и динамику Вселенной чрезвычайно велико. Ведь именно гравитация определяет лицо мира, его сегодняшнее поведение и будущее устройство. Воздействие ТМ, в 10 раз более сильное, чем видимого вещества, необходимо учитывать в космологических моделях.

Инфляционная эра. Вторая проблема – короткий, но чрезвычайно важный этап жизни Вселенной, получивший название *инфляционной эры*. Он самый начальный и настолько мимолётный (всего 10^{-32} с), что, казалось бы, мог пройти незамеченным. Как бы не так! В это время только что возникшая Вселенная – крохотный пузырь, меньше атома – стремительно раздувается (*inflation* и есть *раздувание*), вырастая до астрономических размеров. Необходимость введения инфляционной эры возникла у космологов, когда они осознали невозможность объяснить некоторые парадоксальные свойства «реликта», например, одинаковую температуру далёких друг от друга и потому причинно не связанных частей (расстояние между которыми больше пути, проходимого светом за время жизни Вселенной $t_b \approx c\tau = c/H$). Разгадка оказалась простой: в начале инфляционной эры они были близкими, причинно связанными и могли, обмениваясь сигналами, уравнивать температуру, а разошлись так далеко в результате стремительного раздувания.

Инфляционная эра – настоящий клондайк астрофизики. За это крохотное время возникла вся масса Вселенной – как пена на потенциальной энергии вакуума. Выделилась огромная энергия, нагревшая вещество до высокой температуры (и сделав Вселенную горячей), произошли распады тяжёлых частиц, создавшие избыток вещества над антивеществом (протонов, нейтронов, электронов против антипротонов, антиней-

тронов и позитронов), в результате чего Вселенная сейчас состоит только из вещества (после того, как равные количества частиц и античастиц взаимно уничтожились – аннигилировали). Понятен тот огромный интерес, который проявляют к этой «золотой жиле» теоретики. Надо отметить также, что инфляционная эра – самая близкая к Большому Взрыву, когда температура РИ была очень высока. Несомненно, она наложила отпечаток на свойства «реликта», ставшего главным познавательным инструментом в космологии.

2. Микроволновый фон Вселенной

За открытием А. Пензиаса и Р. Вильсона, отмеченного Нобелевской премией, последовали десятки экспериментов по наблюдению РИ в области радиоволн. Спектр – строго чернотельный, как и положено тепловому излучению, температура $T_0 = 2,73$ К. Эксперименты определили свойства РИ в наше время:

- плотность энергии

$$\epsilon_{\text{рел}} = \frac{4\pi}{c} \int W(\nu) d\nu = 0,25 \text{ эВ/см}^3 \quad (1)$$

(интегрирование производится по частотам от 0 до ∞);

$$W(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} (e^{h\nu/kT} - 1) - \quad (2)$$

частотный (планковский) спектр;

- средняя энергия реликтовых фотонов

$$E_{\text{рел}} = 3kT_0/2 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ эВ}. \quad (3)$$

Эта малая величина отражает тот большой путь, который прошла Вселенная, нагретая в момент «творения» до бесконечной температуры, в которой излучение остывало по мере расширения;

- концентрация реликтовых фотонов

$$n_{\text{рел}} = \epsilon_{\text{рел}}/E_{\text{рел}} = 400 \text{ см}^{-3}. \quad (4)$$

Концентрация «реликта» намного больше концентрации вещества $n_{\text{вещ}} = 10^{-7} + 10^{-5} \text{ см}^{-3}$, так что на каждую частицу (нуклон) приходится $4 \cdot 10^7 + 4 \cdot 10^9$ реликтовых фотонов. Откуда такое изобилие? Считается, что они – продукт фазовых переходов вещества во время той же инфляционной эры.

Вклад «реликта» в среднюю плотность вещества ничтожен: $\rho_{\text{рел}} = \epsilon_{\text{рел}}/c^2 = 5 \cdot 10^{-34} \text{ г/см}^3$, что неудивительно, т.к. мы живем в эру вещества ($\epsilon_{\text{вещ}} \gg \epsilon_{\text{изл}}$). Сегодняшний «реликт» – слабое эхо огненного Большого Взрыва. Но к нему, долетевшему издалека, стоит прислушаться. Оно несёт в себе отзвуки молодой Вселенной.

Взаимодействуя с веществом в далёкую эпоху, когда оно было горячим, а материальный мир состоял из водородно-гелиевой плазмы, РИ должно было сохранить отпечатки пространственных неоднородностей вещества. Вещество и излучение в плазме тесно связаны друг с другом. Там, где плотность вещества больше, выше температура излучения, а где вещество разрежено, понижена и его температура. Вариации плотности вещества, за-

печатлённые в изменениях температуры РИ, очень важны. Их амплитуды и пространственные размеры могут указать на то, как возникли и росли неоднородности вещества, ставшие к нашему времени наблюдаемыми объектами – звёздами, галактиками, кластерами галактик.

Долгое время измерения температурных вариаций «реликта» не давали конечного результата. Мешали всевозможные шумы: атмосферные при наблюдениях наземными телескопами, космических радиоисточников – при измерениях со спутников, окружающих предметов и даже самих измерительных приборов. Лишь дважды за 30 лет удалось пробиться сквозь шумовую завесу и получить конечные результаты. Первый успех выпал на долю американской команды *NASA*, проводившей в 70-х гг. измерения на высотном самолёте «Локхид У-2» (известном у нас как «самолёт-шпион»). На высоте, где он летал, толщина атмосферы меньше в 100 раз, и атмосферный шум сильно ослаблен. От другой помехи – радиос шума Галактики – исследователи ушли, используя высокую частоту принимаемого сигнала. За несколько лет измерения покрыли всю небесную сферу. Была измерена главная неоднородность «реликта» – дипольный компонент, обусловленный собственным движением наблюдателя относительно поля реликтовых фотонов. Это хорошо известный «эффект гудка поезда»: там, где фотоны летят навстречу нашему движению, их энергия (а следовательно, и температура) возрастает, там, где они догоняют нас, температура соответственно меньше. Из полученной зависимости имеем:

$$T_{max} = T_0 v/c = 3,5 \text{ мК} \quad (5)$$

была определена скорость Земли v в координатной системе «реликт» (c – скорость света). Оказывается, Земля несётся в космическом пространстве (вместе с Солнцем и Галактикой) со скоростью $v \approx 370$ км/с, что, для сравнения, в 10 раз превышает скорость её вращения вокруг Солнца. Когда ошибки измерений стали меньше, околосолнечное вращение Земли проявилось как модуляция вектора v с периодом, в точности равным земному году. «Реликт» подтвердил правоту Коперника: Земля-таки вращается вокруг Солнца! Но для поиска других, высоких, мультиполей найденный «диполь» очень мешал. Его надо было исключать из результатов.

Прошли ещё годы, заполненные упорными поисками и улучшением аппаратуры, прежде чем произошёл второй «прорыв к свету». Его совершила команда спутникового эксперимента *COBE* (*Cosmic Background Explorer*).

Брюссельские кружева «реликта». В эксперименте *COBE*, как и в проведённом несколькими годами ранее российском РЕЛИКТе, использовался метод измерения разности температур сравниваемых участков неба. Два идентичных телескопа одновременно ведут наблюдения двух участков, их сигналы поступают в

микроволновый дифференциальный радиометр, который проводит сравнение и выдаёт разность температур. При сканировании неба получается карта относительных температур регистрируемого излучения. За годы работы (1990–1994 гг.) *COBE* четыре раза просмотрел весь небосвод и построил карты-мозаики на трёх частотах (31, 53 и 90 ГГц). Ячейка мозаики, равная угловому раствору телескопов, составляла 6° . Карты содержат полную информацию о температурных вариациях «реликта», но для их извлечения нужно вычлест дипольный компонент и все посторонние шумы. Оказалось, что РИ покрывает небо не равномерно, а похоже на замысловатые кружева. Это и есть сумма искомым компонентом «реликта». Были выделены квадрупольный, октупольный и другие гармоники (вплоть до $l = 15$, где l – номер мультиполя) с амплитудами $\delta T \approx 20 \pm 40$ мК. По амплитуде высокие гармоники в 100 раз меньше «диполя» (5). Неудивительно, что их так долго не могли найти. Потребовалось повысить чувствительность аппаратуры, чтобы заметить столь тонкую кружевную сеть.

Теперь можно было приступить к расшифровке реликтового эха.

Спектр температурных вариаций. *COBE* стал первым разведчиком, обнаружившим температурные вариации «реликта». Недостаток эксперимента – малое число найденных гармоник, что обусловлено большим углом раствора телескопов. Была получена карта неба «в крупную мозаику» – как взгляд близорукого прибора. Но и такое размытое изображение было огромным успехом!

Как только «цель» обозначилась, следующие «охотники» за «реликтом» – аэростатные эксперименты *BOOMERANG*, *MAXIMA* и ряд других – за сравнительно короткое время восполнили недостаток, найдя большое число мелких «кружев» ($l > 15$). Точность этих измерений была намного хуже (ввиду меньшего массива данных), зато они позволили быстро достроить спектр температурных вариаций «реликта», рис. 1. Это был подарок для космологов, которые, наконец, смогли увидеть возмущения плотности в ранней Вселенной. Несмотря на большие статистические ошибки (особенно для $l > 100$), форма спектра видна – рост амплитуды вариаций с l и максимум в районе $l \approx 200$.

Можно сравнить измеренный спектр с предсказаниями, сделанными в рамках инфляционной модели и модели топологических дефектов. Инфляционная модель предполагает очень быстрое расширение Вселенной в интервале 10^{-35} – 10^{-32} с после Большого Взрыва, в результате чего в веществе возникали ударные волны, создавшие ряд «акустических пиков» на расчётном спектре. Модель топологических дефектов исходит из идеи, что в момент рождения Вселенной могли возникать отклонения от равномерного пространства-времени в виде точечных, линейных и объёмных дефектов, которые и создали первичные вариации плот-

ности.

Даже при больших неточностях измерений спектр определённо «выбирает» инфляционную модель (некоторое влияние топологических дефектов всё же не исключено). Феноменальный результат! Эксперименты наглядно подтвердили существование кратчайшей эры инфляции, за которую Вселенная выросла до астрономических размеров. Ещё несколько лет назад такое и не снилось. Максимум в измеренном спектре есть первый выделенный «акустический пик», предсказанный теорией.

Анализ показал также, что вещество юной Вселенной было разительно непохоже на то, что мы видим сейчас. Оно в основном состояло из ТМ, которая проявляла себя только через гравитацию, практически не взаимодействуя с излучением.

Космологические бури. «Акустические пики» на расчётном спектре (рис. 1) температурных вариаций «реликта» – это отголоски бушевавших в веществе новорождённой Вселенной бурь. Они заслуживают особого внимания, т.к. могут стать ненайденным ранее экспериментальным тестом для выбора модели Вселенной. Данные *COBE* и аэростатных наблюдений выделили самый большой «акустический пик», указав приблизительно, к какой *l*-гармонике он относится. Это самая большая буря, встряхнувшая мир и создавшая первые возмущения плотности вещества. На расчётной кривой есть ещё пики, но их амплитуды заметно меньше. Чтобы «увидеть» их в эксперименте, нужно повышать чувствительность и разрешающую способность аппаратуры. Началась «погоня за пиками».

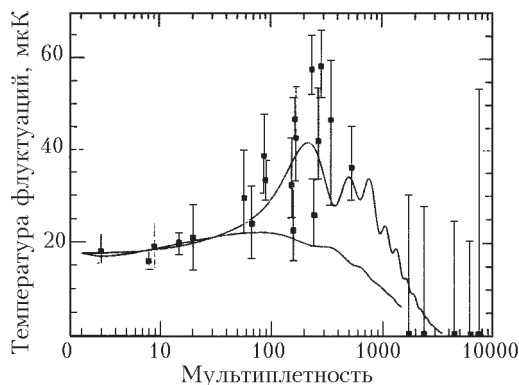


Рис. 1. Спектр температурных вариаций реликтового излучения, по данным *COBE* и аэростатных экспериментов. Сплошные кривые – результаты расчёта по инфляционной модели (верхняя кривая) и модели топологических дефектов (нижняя кривая)

Эксперименты оказались очень сложными, т.к. речь идёт об измерении тонких деталей спектра вариаций, а сами вариации только-только научились выделять. Но так велик был интерес к реликтовому эху у экспериментаторов, в связи с успехом *COBE* появилась такая

вера, что «пики» стали сдаваться один за другим. 2002 г. стал рекордным. Сначала весной эксперименты на аэростатах и новом *DASI (Degree Angular Scale Interferometer)*, проводимые в Антарктиде, смогли выделить второй пик. Затем более совершенная установка *CBI (Cosmic Background Imager)*, развёрнутая в пустыне Атакама (Чили) на высоте 5000 м, где крайне низок шум водяного пара, зарегистрировала уже четвёртый пик. Апофеозом стали результаты большого спутникового эксперимента *MAP (Microwave Anisotropy Probe)*, преемника *COBE*, выполненного на более высоком техническом уровне. Подготовка эксперимента велась 10 лет. Сейчас он носит название *WMAP* в честь руководителя программ *COBE* и *MAP* профессора Принстонского университета Д.Уилкинсона.

Эксперимент века. Век в самом начале, но, несомненно, результаты работы на орбите станции *WMAP* – величайшее научное достижение. Спутник массой 840 кг был запущен в июне 2001 г. на околосолнечную орбиту, в лагранжеву точку L_2 (1,5 млн км от Земли), где гравитационные силы Земли и Солнца равны друг другу и условия прецизионных наблюдений неба наиболее благоприятны.

На рис. 2 показана станция *WMAP* в «рабочих условиях» космического полёта. От Солнца, Земли и Луны (близких источников тепловых шумов) приёмная аппаратура защищена большим круглым экраном, на освещённой стороне которого размещены солнечные батареи. Такая ориентация сохраняется в течение всего полёта. Два приёмных зеркала площадью 1,4 м × 1,6 м, поставленные «спина к спине», осуществляют просмотр неба в стороне от оси ориентации. В результате вращения станции вокруг собственной оси за сутки просматривается 30% небесной сферы. Разрешающая способность *WMAP* в 30 раз выше, чем у *COBE*. Размер измеряемой ячейки на небе $0,2^\circ \times 0,2^\circ$, что сразу сказалось на точности небесных карт, рис. 3. На небо наконец взглянул детектор с острым зрением. Во много раз повысилась и чувствительность приёмной аппаратуры: новый эксперимент в течение 10 дней набирает такой же массив данных, как *COBE* за 4 года. Наблюдения ведутся в пяти частотных полосах (от 22,8 ГГц до 93,5 ГГц) с помощью 10 дифференциальных

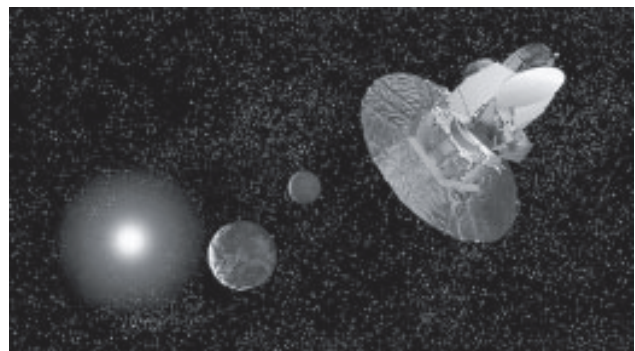


Рис. 2. Станция *WMAP* в космосе (рисунок художника)

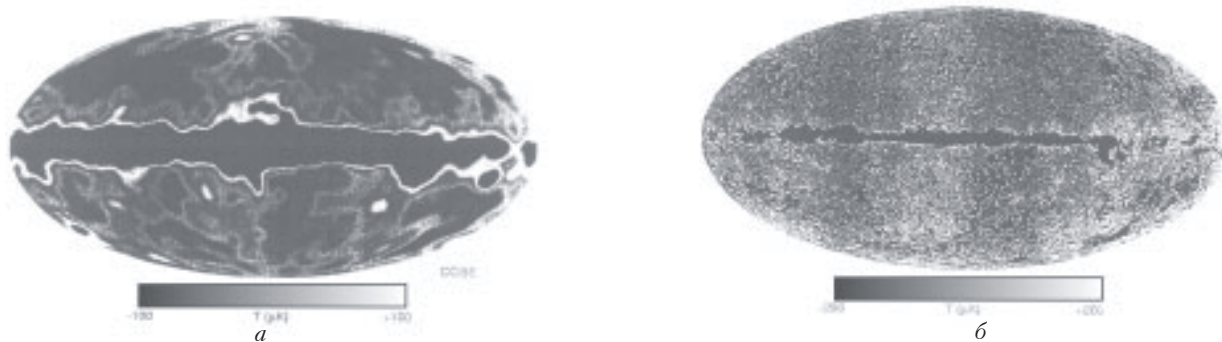
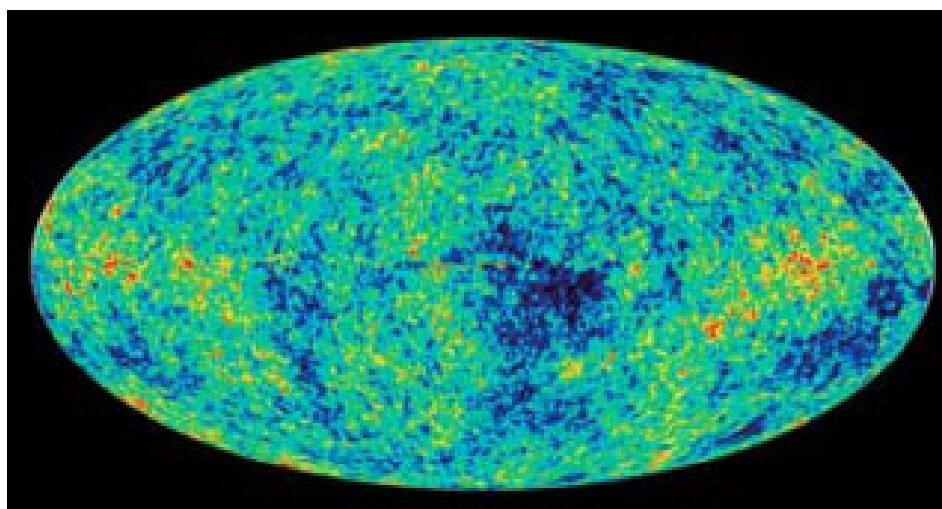


Рис. 3. Радиокарты неба в галактической системе координат (частота 90 ГГц), по данным *COBE* (а) и *WMAP* (б). Чёрная полоса вдоль экватора – радиоизлучение Галактики



измерительных ансамблей, что обеспечивает более глубокий анализ данных и в конечном счёте позволяет получить чёткую, очищенную от шумов картину «реликта». За год L_2 делает оборот вокруг Солнца, а детектор дважды покрывает всю небесную сферу.

Карты реликтового излучения получались по наблюдениям в трёх высокочастотных полосах, где вклад Галактики наименьший. Было получено 8 независимых карт, которые совмещались кросс-корреляционным методом, полностью исключавшим шумы. По этим данным построены карта температурных вариаций РИ (рис. 4) и спектр мощности его температурных вариаций (рис. 5). Сплошная линия – расчётный спектр по инфляционной модели, скорректированный на положение «акустических пиков». Три первых «пика» отлично видны и точно «привязаны» к шкале l -гармоник. Четвёртый и пятый заметны, но требуют для надёжного выделения ещё измерений, которые продолжаются. Точное положение «акустических пиков» позволяет определить параметры Вселенной и уточнить расчётный спектр. Произошёл новый решительный прорыв в изучении «реликта», да такой, который прояснил всю картину Вселенной.

Дополнительная ценность эксперимента *WMAP* – в измерении поляризации «реликта». Тепловое излучение не поляризовано, но поток реликтовых фотонов, испытывая

последнее рассеяние в плазме «эпохи рекомбинации», приобретал небольшую поляризацию, регистрация которой может точно указать это время. Эффект приобретённой поляризации был увиден. Удалось даже выделить более тонкий эффект – ещё меньшую поляризацию, возникающую при повторной ионизации вещества в «эпоху загорания звёзд». Первые в мире звёзды, продукты гравитационной конденсации вещества, были очень массивными и яркими, и их УФ-излучение снова ионизовало нейтральный газ. Полученные результаты

легли в основу стандартной космологической модели – первого эскиза реальной Вселенной.

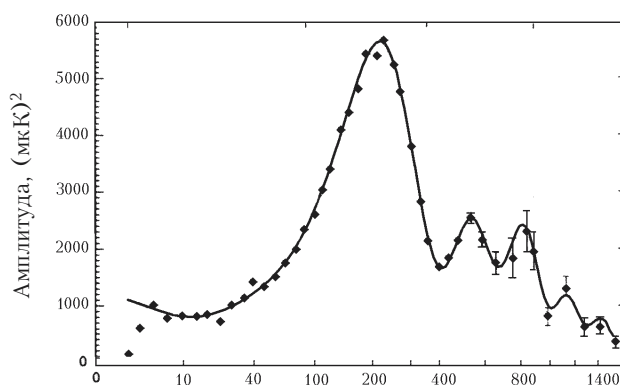


Рис. 5. Спектр мощности температурных вариаций реликтового излучения, полученный за первый год измерений *WMAP*

3. Стандартная космологическая модель

Вселенная, которая удовлетворяет проведённым наблюдениям температурных вариаций РИ, а также другим полученным в последние годы важным результа-

там (измерение постоянной Хаббла космическим телескопом *HST*, наблюдение ускорения далёких галактик по вспышкам Сверхновых типа SNIa, статистика скоплений галактик), описывается «плоской моделью» с инвариантным по шкалам спектром первичных вариаций плотности (*спектр Зельдовича*). Её главные параметры таковы:

Возраст	13,7 ± 0,2 млрд. лет
Полная плотность материи*	1,02 ± 0,02
Плотность барионной материи*	0,044
Плотность тёмной материи*	0,23
Плотность тёмной энергии*	0,73
Постоянная Хаббла	71 ± 3 км/(с · Мпк)
Температура «реликта»	2,725 К
Время эпохи рекомбинации	380 тыс. лет
Время повторной ионизации	≈ 200 млн лет

Параметры мира, ещё вчера на 50% неточные, стали похожи на признанные мировые константы. Вселенная из сущности с неопределённым местом жительства и непонятными наклонностями перешла в разряд вполне добропорядочных образований, чьё поведение предсказуемо. Вселенная получила паспорт и прописку. При этом «эксперимент века» не окончен, паспортные данные уточняются. А не за горами – новый избирательный и зоркий детектор *PLANCK* (по имени М.Планка) Европейского космического агентства (пла-

новый запуск в 2005 г.), разрешающей способностью в два раза большей, чем у *WMAP*. С большой вероятностью можно считать, что наш мир описывается «плоским вариантом» фридмановской модели, возникшим в гамовском Большом Взрыве. Вселенная будет бесконечно расширяться, температура реликта уменьшаться, стадия сжатия никогда не наступит.

Вопросы для самоконтроля

1. Как из однородной первичной плазмы возникли все видимые структуры – звёзды, галактики, скопления галактик?
2. Как расширялась Вселенная в инфляционную эру (10^{-36} – 10^{-32} с)? Какие важные процессы произошли в то время?
3. Каковы основные свойства реликтового излучения (температура, спектр, средняя энергия и концентрация фотонов)?
4. Что показали эксперименты по измерению тепловых флуктуаций реликтового излучения?
5. В какой Вселенной мы живём?

Литература

Вайнберг С. Первые три минуты. – М.: Энергоиздат, 1981.

Сажин М.В. Космология ранней Вселенной. – М.: Энциклопедия «Современное естествознание», Т. 4.