

“Эволюцию мира можно сравнить со зрелищем фейерверка, который мы застали в момент, когда он уже заканчивается: несколько красных угольков, пепел и дым. Стоя на остывшем пепле, мы видим медленно угасающие Солнца и пытаемся воскресить исчезнувшее величие начала Миров...”

Аббат Жорж Леметр

ПРЕДИСЛОВИЕ

Монография, предлагаемая вниманию читателя, написана нами в 2001–2002 годах – годах запуска и начала работы американского спутника MAP (Microwave Anisotropy Probe), открывающего новый этап изучения реликтового электромагнитного излучения Вселенной. Этот этап связан с качественным изменением статуса современной космологии, которая по образному выражению Малкольма Лонгейра вступила в фазу “precision cosmology”, когда уровень развития теории и эксперимента оказался столь высоким, что интерпретация наблюдательных данных уже уступает место задачам измерения важнейших параметров, характеризующих состояние гравитации и материи задолго до современного этапа космологического расширения.

Парадоксально, что весь период “взрывного” развития космологии уместается буквально в последние 30 лет, аккумулируя в себе тысячелетние попытки человечества понять основные законы строения и эволюции Вселенной. Этот период формально совпал, а фактически был генетически связан с проникновением в тайны строения материи на микроуровне, с одной стороны, а с другой – с выходом человека в космос и развитием космических технологий, изменивших экспериментальную базу наблюдательной астрофизики. Один из авторов этой книги (И. Новиков) стоял у истоков создания современной физической космологии и хорошо помнит горячие дискуссии “эпохи 70-х” о природе начальных флуктуаций, породивших галактики и скопления, обсуждения возможного анизотропного “старта” расширения Вселенной и проблемы “скрытой массы”, статус которой долгое время недооценивался большинством космологов. Гро-

мадный интерес приковывала к себе и проблема догалактического химического состава вещества, самым тесным образом связанная с “горячим” прошлым космологической плазмы и впервые выявившая важнейшую роль нейтрино и других гипотетических слабовзаимодействующих частиц в тепловой истории Вселенной, а в более широком смысле, и возникновения жизни в космосе. Наконец, бегло перечисляя “горячие точки” астрофизики и космологии последнего тридцатилетия, нельзя не упомянуть и вечный вопрос: как и почему “взорвалась” Вселенная, что послужило “первотолчком” расширения материи, и что было (если было?) до этого момента и как будет расширяться Вселенная дальше?

Добавим, что в процессе ответа на одни вопросы неизбежно возникали новые – такие как, например: всегда ли размерность пространства–времени была равна 4? Не сталкиваемся ли мы с проявлениями более сложной топологии пространственно-временного континуума и, в частности, с существованием новых реликтов ранней Вселенной – например, в форме первичных чёрных дыр или других частиц и т.п.? Эти и целый ряд других проблем нашли своё отражение в пионерских монографиях П.Дж.Е. Пиблса [Peebles, 1971], С. Вайнберга [Weinberg, 1972, 1977], Я.Б. Зельдовича и Н.Д. Новикова [1975, 1983] и более поздних (см., например, [Smoot, Davidson, 1993; Kolb, Turner, 1990; Padmanabhan, 1996; Melchiori B., Melchiori F., 1994; Partridge, 1995]). Часть проблем перешла в новое качество, заняв почётное место в ряду так называемых “вечных проблем” естествознания, которые будут волновать ещё не одно поколение космологов и дожидаться появления новых Ньютонов, Эйнштейнов и Хабблов. Часть гипотез, что вполне закономерно, не выдержала испытаний временем и сместилась в сферу истории науки, оставаясь своеобразным памятником человеческой мысли. Меньшая доля, получив экспериментальное подтверждение, вошла в золотой фонд науки, изменив наши представления о Вселенной, свойствах пространства–времени и материи.

Ярким примером такого рода достижений современной космологии является проблема происхождения реликтового электромагнитного излучения (РИ), включающая вопросы его спектрального распределения, анизотропии и поляризации. Обсуждению этого круга проблем, главным образом, посвящена наша книга, написанная сразу после завершения серии удачных наземных и баллонных экспериментов CBI, DASI, BOOMERANG, MAXIMA-1, тесно связанных с успешно завершённым в сере-

дине 90-х годов спутниковым проектом COBE. Этому проекту предшествовал российский проект РЕЛИКТ, явившийся первым космическим проектом по исследованию анизотропии реликтового излучения. Проект COBE вошел в историю космологии не только как первый эксперимент, измеривший анизотропию реликтового излучения (РИ)¹ на небесной сфере с максимально достижимым для своего времени угловым разрешением (примерно 7 градусов дуги), но и как эксперимент, “закрывший” многочисленные дискуссии о возможной неравновесности спектра РИ, его отклонениях от предсказываемого теорией “горячей Вселенной” чернотельного планковского закона распределения квантов по частоте².

Образно говоря, после COBE космология вступила в новую фазу развития, перейдя от поиска, если так можно сказать, наиболее вероятных “эволюционных треков” к детальному выяснению причин реализации одного, надёжно установленного (естественно, в определённых временных рамках) режима космологической эволюции материи.

Эстафета создания реалистической картины эволюции Вселенной посредством измерений анизотропии РИ после COBE была продолжена последующими экспериментами (CBI, DASI, BOOMERANG, MAXIMA-1 и целым рядом других), убедительно доказавшими факт существования анизотропии РИ на малых угловых масштабах, составляющих примерно 10 минут дуги. На первый взгляд, продвижение эксперимента в малые угловые масштабы выглядит более чем скромно. Ведь до типичных размеров скоплений галактик, пересчитанных на момент рекомбинации водорода, когда Вселенная стала прозрачной для излучения (~300 000 лет после начала расширения Вселенной) нам не хватает ещё полутора-двух порядков! А ведь исторически именно с анизотропией и поляризацией реликтового излучения связывалась возможность “заглянуть” в далёкое прошлое Вселенной и “увидеть” проявления будущих скоплений, как сейчас

¹ В тексте монографии мы, наряду с сокращением РИ, будем использовать международное сокращение CMB (Cosmic Microwave Background).

² Строго говоря, данные COBE ограничивают степень неравновесности реликтового излучения на уровне $10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-5}$, что практически эквивалентно полному отсутствию искажений. Тем не менее, даже эта малая возможная неравновесность оказывается весьма информативной для ограничения энерговыделения в ранней Вселенной, особенно в период неравновесной ионизации водорода и гелия. Подробнее этот аспект проблемы рассматривается нами в нескольких последующих разделах книги.

бы сказали, в картах распределения флуктуаций температуры РИ на небесной сфере. К сожалению, эта задача оказалась вне рамок возможностей радиоастрономии и не столько потому, что нам не хватает чувствительности современных приемников реликтового излучения, сколько из-за воздействия различного рода помех, связанных с активностью, в первую очередь, нашей Галактики, с горячим газом в скоплениях галактик, излучением межгалактической пыли и целым рядом других факторов, надёжным щитом экранирующих анизотропию РИ. Однако отрицательный результат с позиции физики реликтового излучения – это выдающийся позитивный результат для смежных областей космологии и астрофизики, продвинувшихся в изучении проявлений активности различных структурных форм материи во Вселенной. Именно симбиоз смежных областей астрофизики позволил в самом начале XXI в. вплотную приблизиться к решению одной из ключевых задач космологии: определению таких важнейших параметров, характеризующих её эволюцию в прошлом, настоящем и будущем, как постоянная Хаббла H_0 , современная плотность барионной фракции материи, плотность невидимого холодного компонента (так называемая “холодная скрытая масса”), величина космологической постоянной Λ , тип и характеристики спектра первичных флуктуаций плотности, скорости и гравитационного потенциала материи, и целый ряд других важнейших параметров, о которых пойдет речь в нашей книге. Этот симбиоз, применительно к физике РИ, позволил наметить не только контуры, но и приступить к практической реализации уникального по степени предстартовой проработки ожидаемых эффектов и помех спутникового проекта PLANCK, способного картографировать анизотропию и поляризацию РИ с уникальным угловым разрешением (порядка 6 мин. дуги) при рекордно низком уровне собственных шумов приёмной аппаратуры, примерно на порядок меньших, чем во всех реализованных в настоящее время наземных, баллонных и спутниковых экспериментах.

Нужно отметить, что этот проект будет осуществляться спустя три-четыре года после завершения американского проекта MAP, успешно стартовавшего в июле 2001 года. При общности задач, стоящих перед этими двумя космическими миссиями, а именно – картографирование анизотропии и поляризации РИ при максимально возможном покрытии небесной сферы, проект PLANCK призван реализовать максимально возможную чувствительность приёмной аппаратуры в сочетании с уникальным

подбором частотных диапазонов для наблюдения анизотропии и поляризации РИ. Более того, в задачи проекта входит создание каталога радио- и инфракрасных точечных источников, покрывающего частотный диапазон от 30 и до 857 ГГц в девяти частотных каналах, картографирование скоплений галактик и целый ряд других задач, решение которых стало возможным благодаря уникальным теоретическим и экспериментальным исследованиям анизотропии РИ и сопутствующих ей шумов галактической и внегалактической природы.

Правомерен вопрос: а стоит ли излагать физику РИ до завершения двух упоминавшихся выше космических миссий, которые, быть может, радикально изменят наши представления об эволюции Вселенной и формировании анизотропии и поляризации РИ, как, впрочем, и формирование её крупномасштабной структуры? Не следует ли подождать каких-нибудь семь-десять лет до окончательного прояснения ситуации с распределением анизотропии на небесной сфере и тогда уже с уверенностью подводить итоги эпохи изучения РИ, опираясь на данные, быть может, в буквальном смысле, “последних экспериментов”? Ответы на поставленные выше вопросы представляются нам, до неожиданности, простыми. Во-первых, и, быть может, в самом главном, мы абсолютно уверены, что никакие последующие эксперименты не смогут выступить в роли “потрясателей основ” современной космологии. Слишком прочен фундамент теории и достаточно хорошо разработаны её следствия, неоднократно проверенные на практике. Во-вторых, сама подготовка проектов MAP и PLANCK стимулировала небывалое развитие теории, нуждающееся в осмыслении и систематизации. Достаточно сказать, что по сравнению с началом 90-х годов прошлого века физика РИ ушла далеко вперёд, вплотную приблизившись к предсказанию эффектов с точностью лучше 3÷5%, потребовав для их моделирования использование современных компьютерных систем и разработку новых математических методов обработки данных. И наконец, в-третьих по очереди, но не по значению – будущие космические эксперименты и, в частности PLANCK, обладают одной очевидной особенностью: они подготавливаются под руководством главным образом поколения “ветеранов”, а их результаты будут использоваться поколением “учеников” И в этой эстафете поколений нам представляется чрезвычайно важным не потерять вкуса к предмету, не нарушить связь между эпохой “бури и натиска” 70–90-х годов прошлого века, когда закладывались основы физики РИ и, скажем так, “эпохой благоден-

ствия”, которую все мы ожидаем примерно в конце первого десятилетия века нынешнего, когда, мы уверены, проекты MAP и PLANCK будут успешно завершены. Именно поэтому в нашей книге мы постарались уйти от рассмотрения общих вопросов космологии, сконцентрировавшись главным образом на специальных проблемах теории формирования частотного спектра реликтового излучения, его анизотропии и поляризации и их наблюдательном аспекте, предполагая хотя бы общее знакомство читателя с основами теории “горячей Вселенной” и физической космологии, теориями вероятности и математической статистики, теорией случайных полей и атомной физикой.

В нашей книге мы попытались продемонстрировать, каким образом современный аппарат теоретической физики может быть использован для исследования свойств космической плазмы и как, используя достижения астрофизики, можно расширить пределы нашего знания о таких фундаментальных явлениях природы, как гравитация, относительность и релятивизм.

Мы благодарны нашим коллегам в Астрокосмическом центре ФИАН им. П.Н. Лебедева (Москва), в Ростовском государственном университете, в Копенгагенском университете, в Центре теоретической астрофизики (Копенгаген) и в Оксфордском университете (Англия) за поддержку нашей работы и многочисленные дискуссии.

Мы особенно благодарны Э.В. Коток, проделавшей огромную работу по подготовке рукописи книги, а также за её участие в ряде научных работ, вошедших в книгу.

Москва, Копенгаген, Оксфорд
Июнь 2002

*Павел Насельский
Дмитрий Новиков
Игорь Новиков*