

## МЕДАЛЬ ПОЛЯ ДИРАКА ЗА “РУССКУЮ КОСМОЛОГИЮ”

Б.Е. ШТЕРН,

доктор физико-математических наук

Институт ядерных исследований РАН, Астрокосмический центр ФИАН

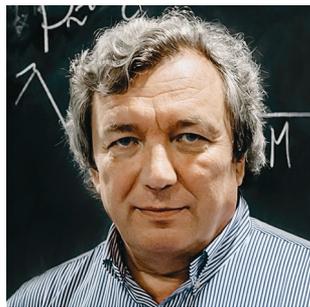
DOI: 10.7868/50044394819060045

**В** текущем году медаль и премия имени Дирака, учрежденная Международным центром теоретической физики в Триесте, присуждена профессору Вячеславу Федоровичу Муханову, академику Алексею Александровичу Старобинскому и академику Рашиду Алиевичу Сюняеву. Официальная формулировка такова: “За выдающийся вклад в физику реликтового микроволнового излучения, экспериментальные исследования которого помогли превратить космологию в точную научную дисциплину путем сочетания физики микромира с исследованиями крупномасштабной структуры Вселенной”. Вообще говоря, очередная премия этим лауреатам – довольно обычная вещь, каждый из них получил по несколько престижных наград. И все же именно за этой стоит интереснейшая история, которую стоит еще раз рассказать. Попробуем объяснить, что

это за “выдающийся вклад”. У каждого из них он свой, но все трое связаны общей темой и исторической логикой.

Хронологически первой была работа Р.А. Сюняева и Якова Борисовича Зельдовича по акустическим осцилляциям – она дала мощный инструмент исследования ранней Вселенной: анизотропию реликтового излучения. Этот инструмент впоследствии подтвердил теоретические выводы Старобинского и Муханова, относящиеся к теории космологической инфляции.

История начинается с прорывной работы Андрея Дмитриевича Сахарова про акустические осцилляции в ранней Вселенной. В свои первые мгновения Вселенная не могла быть однородной: этому препятствовали квантовые флуктуации пространства – чем выше плотность энергии, тем сильнее эти флуктуации. Неоднородности в любой среде, где давление играет существен-



Лауреаты медали и премии Дирака 2019 года: профессор В.Ф. Муханов, академик А.А. Старобинский, академик Р.А. Сюняев. Фото: Википедия

ную роль, приводят к звуковым (акустическим) колебаниям среды. Ранняя Вселенная представляла собой смесь фотонов и барионов, выступающих как единая упругая среда. Давление обеспечивали фотоны – именно в них “сидела” основная плотность энергии Вселенной. Это называется “радиационно-доминированной стадией”, при которой скорость звука равнялась трети скорости света. Потом, когда Вселенная остыла из-за своего расширения, фотоны уступили первенство барионам, давление упало, скорость звука упала и волны фактически застыли.

Ключевой момент в работе Сахарова: все акустические колебания стартовали с общей фазы – это одновременно размороженные стоячие волны. В самые первые мгновения флуктуации плотности не могли колебаться, они были заторможены так называемым “хаббловским трением”. Уравнения колебаний упругой среды в расширяющемся пространстве аналогичны уравнению маятника с трением, причем “трение” пропорционально темпу расширения Вселенной. У всех была фаза 0: максимальная амплитуда и нулевая скорость изменения. Очень быстро темп расширения замедлился, хаббловское трение упало, и волны побежали: их фаза стала меняться. При этом те, у которых в любой данный момент фаза составляла  $\pi$ ,  $2\pi$ ,  $3\pi$  и т.п. имели максимальную амплитуду, а волны с фазой  $\pi/2$ ,  $3\pi/2$ ,  $5\pi/2$  – минимальную. Потом, когда основной энергетический бюджет переходит от излучения к веществу, скорость звука падает на порядки величины, волны снова застывают и “записываются” в виде неоднородностей Вселенной. Причем ампли-

туда неоднородностей в зависимости от их размера должна описываться осциллирующей функцией (одной из функций Бесселя) – бугры, соответствующие фазам с целым значением  $\pi$ , и провалы – с полусцелым. Этот эффект был назван сахаровскими осцилляциями, сейчас его чаще называют акустическими осцилляциями.

К сожалению, Сахаров делал свои расчеты для неправильной модели Вселенной – холодной и плотной. Эта модель была популярна у нас в начале 60-х гг., за нее активно ратовал Зельдович. Там тоже работал вышеописанный механизм: в холодной Вселенной скорость звука сначала равна трети скорости света, затем резко падает.

Сахаров рассмотрел и другой важнейший вопрос – о начальных флуктуациях плотности Вселенной. Начальные неоднородности нужны для образования структур – галактик и их скоплений. В изначально однородном расширяющемся пространстве никакие структуры не успевают образоваться. Сахаров не получил вдохновляющих результатов: у него неоднородности по размеру дорастали лишь до таких, которые могут сгуститься в карликовые звезды: ни о каких галактиках там речи идти не могло. Идея была провидческой, но до ее триумфа оставались десятилетия.



Академик Я.Б. Зельдович

После открытия реликтового излучения “холодная модель” отправилась в архив, уступив концепции горячей Вселенной. Там сценарий акустических волн прекрасно работал, но выглядел по-другому, надо было все пересчитывать. Первыми это сделали Р.А. Сюняев с Я.Б. Зельдовичем, опубликовав соответствующую статью в 1970 г. Получилась намного более впечатляющая картина: эффект акустических осцилляций не просто отражается в флуктуациях плотности, но еще должен быть записан в неоднородностях карты реликтового излучения, которые чувствительны к параметрам ранней Вселенной и, в принципе, могут наблюдаться. Правда, в статье отмечалось, что эффект мал, тем не менее, это сработало через много лет: с конца 1990-х гг. акустические осцилляции стали самым мощным инструментом в космологии. Через 40 лет после работы Сюняева и Зельдовича с помощью именно этого инструмента подтвердились выводы Старобинского и Муханова.

Этот же авторский коллектив подарил миру еще один полезный инструмент исследования в космологии: эффект Сюняева–Зельдовича. Скопления галактик заполнены горячим газом (температура порядка  $10^8$  К), который прекрасно виден в рентгене: частицы сталкиваются друг с другом, излучая рентгеновские фотоны (тормозное излучение). Но там есть и другой процесс: горячие электроны<sup>1</sup> рассеиваются на

фотонах реликтового излучения, пересекающих скопление и “подпикивают” их, передавая небольшую часть своей энергии. Тепловой спектр реликтового излучения немного деформируется: его низкоэнергетическое плечо (так называемая область Релея–Джинса) обедняется, а высокоэнергетическая часть (область Вина) – обогащается. Поэтому, если смотреть на небо в сантиметровых волнах, скопления галактик будут

выглядеть чуть холодней (тусклее) среднего фона, а если на волнах меньше миллиметра – теплей (ярче). С одной стороны, эффект вносит коррективы в карту реликтового излучения, которые необходимо учитывать. С другой стороны, он дает способ измерения и подсчета скоплений галактик в современной Вселенной. Этот инструмент в конечном счете дал дополнительную точку опоры в прецизионном измерении параметров Вселенной.

В 60-х и 70-х годах прошлого века в космологии сложилась противоречивая ситуация: с одной стороны – триумфальное подтверждение концепции Большого взрыва и модели горячей Вселенной, с другой – целый ряд парадоксов. Начальные условия Большого взрыва должны были быть настроены фантастически точно, чтобы получилась наша Вселенная – огромная, однородная, пригодная для жизни. Кто установил такие начальные условия? Местоимение “кто” здесь не случайно – духовенство приветствовало теорию Большого взрыва, видя в ней научно обоснованный акт творения.

средняя энергия окружающих фотонов, поэтому и может часть ее отдать фотону при рассеянии. — Прим.ред.

*В 60-х и 70-х годах прошлого века в космологии сложилась противоречивая ситуация: с одной стороны – триумфальное подтверждение концепции Большого взрыва и модели горячей Вселенной, с другой – целый ряд парадоксов. Начальные условия Большого взрыва должны были быть настроены фантастически точно, чтобы получилась наша Вселенная*

<sup>1</sup> Термин “горячие” следует понимать в том смысле, что такие частицы обладают очень высокими энергиями. В данном случае, “горячий” электрон имеет энергию на много порядков выше, чем

Первые идеи по поводу механизма, который мог сыграть роль “божественного творения” безо всякого Творца, появились в 1970-х. Одним из первых, кто высказал правильные догадки, был наш соотечественник Эраст Борисович Глинер, работавший в Ленинградском Физико-техническом институте.

Вскоре после создания общей теории относительности Эйнштейн предложил ее модификацию: ввел в свои уравнения так называемый “лямбда-член”. Оригинальные уравнения связывали свойства пространства (метрику) с материей (тензор энергии-импульса). Эйнштейн добавил некую константу, действующую во всем пространстве, — она приводила к “саморасталкиванию” пространства. Так Эйнштейн пытался “спасти” стационарную Вселенную. В результате появилось космологическое решение де Ситтера: пустая Вселенная экспоненциально расширяется за счет расталкивающего действия лямбда-члена.

Э.Б. Глинер обратил внимание на то, что аналог лямбда-члена в ранней Вселенной можно получить из физики: если подставить в правую часть уравнений Эйнштейна скалярное поле (простейшее физическое поле с одной компонентой), заполняющее всю Вселенную, то оно абсолютно точно имитирует тот самый эйнштейновский лямбда-член. Тот самый, который Эйнштейн ввел для противодействия самотяготению Вселенной. Эйнштейн отказался от лямбда-члена, а он вернулся “через окно” — через теорию поля. Скалярное поле в отсутствие вещества дает точно такое же решение де Ситтера, как и лямбда-член Эйнштейна.

Сама по себе догадка Глинера была неудачно применена — использована в сце-



*Э.Б. Глинер, фотография начала 1970-х гг.*

нарии “отскока”, популярного в то время: Вселенная сжимается и, благодаря переходу на режим де Ситтера, переходит к расширению без сингулярности. Именно из-за этого Зельдович встретил идею Глинера в штыхи: при сжатии Вселенной не может быть вакуума, хоть и со скалярным полем: там будет огромная энтропия, неустойчивости и огромное давление. Но вместе с водой, как оказалось, выплеснули и ребенка.

Следующий шаг сделал А.А. Старобинский. Он понял, что при очень быстром расширении Вселенной вакуум меняется: у него появляется ненулевая плотность энергии. Это похоже на динамический эффект Казимира: расширение пространства влияет на нулевые колебания вакуума. Он рассчитал эффект и показал, что даже без всяких скалярных полей в быстро расширяющейся Вселенной появляются силы, заставляющие ее расширяться по экспоненте — в режиме де Ситтера. Вдобавок он показал, как этот механизм приводит к большому взрыву: как экспоненциально расширяющаяся пустая Вселенная превращается в горячую плазму, продолжающую расширяться по инерции.

И опять этот замечательный механизм был вставлен в неправильный сценарий! В работе Старобинского то ли мир де Ситтера существовал изначально неопределенное время, то ли образовался в результате сжатия предшествующей Вселенной. Работа натолкнулась на критику, но ее уже восприняли куда серьезней, чем статью Глинера, поскольку здесь, независимо от сценария, был предложен новый красивый механизм. Я.Б. Зельдович высказался в том духе, что механизм Старобинского может описывать возникновение Вселенной из ничего. Главное то, что с помощью данного механизма все парадоксы решаются автоматически: Вселенная оказывается огромной и в среднем однородной – она за мгновения раздувается на много порядков величины, а трехмерное пространство с высокой точностью оказывается плоским, евклидовым.

Впоследствии этот механизм был назван космологической инфляцией (от слова *inflation* – раздувание). Модель Старобинского была признана не сразу, но сейчас она дает наилучшее согласие с данными, выглядит самой естественной и не требует введения новых сущностей. По своей природе “мотором”, раздувающим Вселенную в модели Старобинского, служит динамический эффект Казимира. Никаких дополнительных полей-инфлатонов не требуется. Ключевая работа Алексея Александровича об этом опубликована в 1980 г.

В.Ф. Муханов примерно в то же время сделал еще один важнейший шаг. Они вместе с Геннадием Васильевичем Чибисовым задались тем же вопросом, что и Сахаров в первой половине 60-х: как из квантовых эффектов получить неоднородности больших масштабов, достаточных для того, чтобы из них образовались галактики. Изначаль-

но неоднородности за счет квантовых эффектов рождаются микроскопическими, могут ли они из-за расширения Вселенной дорости до мегапарсеков, чтобы потом сгуститься из-за самогравитации и превратиться в галактики?

Пока Муханов с Чибисовым пробовали варианты Вселенной с обычным веществом, ничего не получалось. Конечно размеры возмущений оказывались маленькими, как и у Сахарова. Наконец, они прикинули, что происходит, если Вселенная стартовала с режима де Ситтера, и все получилось. Квантовые возмущения, растягиваясь экспоненциально, успевали дорости до любых размеров. И это был новый мощный аргумент: де ситтеровская стадия не толь-

ко решала парадоксы большой плоской однородной Вселенной, но и объясняла возникновение первичных неоднородностей больших масштабов, которые были нужны, как воздух, для понимания мира, в котором оказалась возможна жизнь.

То есть галактики, без которых невозможны звезды и жизнь, происходят от микроскопических квантовых флуктуаций вакуума. Эта идея вначале вызвала бурное противостояние части коллег, но вскоре стала общепринятой.

Муханов с Чибисовым быстро написали статью и отправили ее в международный журнал, но из-за проблем с английским у авторов и проблем с международными коммуникациями в стране, статья была опубликована только через два года (в 1982 г.). К тому времени теория инфляции (этот термин уже вошел в обиход) уже стала признанной, и статья потеряла приоритет.

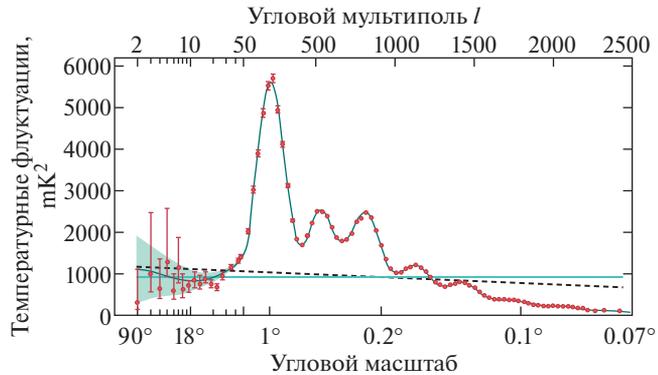
Но размер первичных неоднородностей – далеко не вся история. Еще важен их спектр: как меняется амплитуда неоднородностей с их размером. Естественным предположением был так называе-

*Галактики, без которых невозможны звезды и жизнь, происходят от микроскопических квантовых флуктуаций вакуума*

мый плоский спектр: амплитуда всех флуктуаций одинакова вне зависимости от размера. Так ли это? Здесь требовались аккуратные расчеты возмущений и конкретная модель космологической инфляции.

Тут надо упомянуть еще Владимира Николаевича Лукаша, который чуть раньше опубликовал работу по рождению неоднородностей метрики из нулевых флуктуаций вакуума, решив задачу в общем виде. Муханов, независимо решивший ту же задачу, пошел дальше и посчитал спектр возмущений в рамках конкретной модели. Это была именно модель Старобинского. Оказалось, что спектр близок к плоскому, но не совсем плоский: большие по размеру возмущения немного контрастнее, чем мелкие. Если говорить в терминах степенного показателя спектра, то одинаковый контраст на разных масштабах будет выражаться значением показателя, равным 1. Муханов вычислил, что в случае инфляции по сценарию Старобинского он должен быть равен 0,96. Грубо говоря, это отклонение происходит из-за того, что в тот момент, когда возникли квантовые флуктуации, давшие наблюдаемые неоднородности Вселенной, инфляция уже немного притормаживала, из-за чего возмущения, родившиеся раньше, оказались сильнее. Несмотря на свою малость, это очень важный эффект в смысле диагностики процессов, происходивших в первые мгновения. Единственный способ увидеть этот эффект – провести тонкие измерения неоднородностей реликтового излучения.

Статья В.Ф. Муханова и Г.В. Чибисова по спектру первичных возмущений плотности Вселенной была опубликована в “Журнале экспериментальной и теоретической физики” в 1981 г. и практи-



*Угловой спектр анизотропии реликтового излучения (разложение карты реликтового излучения по мультиполям). Кривая с провалами и максимумами – как раз и есть то, что называется “акустическими осцилляциями”. Точки – результаты измерений телескопом “Планк”, кривая – результат подгонки шестью параметрами в рамках модели  $\Lambda$ CDM. Горизонтальная прямая – плоский спектр первичных возмущений, чуть наклоненная пунктирная прямая – схематичное изображение спектра, вычисленного В.Ф. Мухановым*

чески сразу была признана научной общественностью. Трудно сказать, верили ли авторы тогда, в начале 1980-х, в то, что их выводы могут быть в обозримое время проверены наблюдениями. Тогда вообще не видели никаких неоднородностей реликтового излучения, никакой анизотропии. До открытия самого факта анизотропии оставалось больше 10 лет, до ее точных измерений – четверть века.

Продолжение этой истории, которое можно назвать триумфом, состоялось в 2000-х. В 2001 г. был запущен космический микроволновый телескоп WMAP (NASA), проработавший до 2009 г. Он получил великолепные карты реликтового излучения, где прекрасно были видны неоднородности разных масштабов – от 90 градусов до десятых долей градуса. Это “детский снимок” Вселенной, на которой ей всего 380 тысяч лет – тогда произошла рекомбинация водорода, и про-

странство стало прозрачным. На разложении этой карты по угловым мультиполям были прекрасно видны те самые акустические осцилляции, которые были предсказаны Сахаровым и более реалистичная теория которых разработана Сюняевым и другими авторами.

Но какой первичный спектр возмущений надо заложить, чтобы он с момента Большого взрыва до рекомбинации водорода переработался именно в такую картину? Вначале для описания результатов успешно использовался плоский спектр. Но еще до окончания работы WMAP все уверенней выявлялось отклонение – именно такое, как предсказано в статье Муханова и Чибисова: спектральный индекс 0.96 вместо тривиальной единицы.

В 2011 г. был запущен новый микроволновый телескоп “Планк” (ЕКА), превосходящий WMAP по чувствительности и угловому разрешению. Угловой спектр неоднородностей реликтового излучения показан на рисунке. Обратите внимание на фантастическое согласие теории (зеленая кривая) и экспериментальных точек. Подгонка точек сделана в рамках современной модели Вселенной, так называемой  $\Lambda$ CDM – с темной энергией ( $\Lambda$ ) и “холодной” темной материей. Для подгонки использовано всего 6 параметров (подогнать столь сложную кривую шестью параметрами – все равно, что убить шестью выстрелами 30 зайцев), причем полученные параметры совпали с предсказанными или полученными из других данных значениями.

Расчеты Муханова, сделанные в рамках модели Старобинского, подтвердились с еще большей точностью. Кстати, и сама модель Старобинского стала сильно выигрывать в достоверности по сравнению с более тривиальными моделями космологической инфляции.

Итак, измерения космических микроволновых телескопов WMAP и “Планк” в точности подтвердили предсказания

В.М. Муханова и А.А. Старобинского, сделанные за три десятка лет до того. Подтверждение было проведено с помощью эффекта, вычисленного Р.А. Сюняевым с Я.Б. Зельдовичем и другими космологами почти за 40 лет до этих измерений. Так что термин “триумф” применим к этой истории без всяких натяжек.

У теории космологической инфляции, кроме Муханова и Старобинского, есть и другие отцы. Прежде всего это Алан Гут и Андрей Дмитриевич Линде. Первый больше всех способствовал смене космологической парадигмы, написав настолько ясную хорошо аргументированную статью, что научная общественность поверила: нечто подобное должно работать. Он же ввел термин “инфляция”. Но сам сценарий, предложенный А. Гуттом, оказался неправильным. А.Д. Линде как раз разработал реалистичный сценарий под названием “хаотическая инфляция” – достаточно простой и естественный (1983 г.). Далее, Линде выдвинул сценарий “вечной инфляции” – мощнейшую концепцию в мировоззренческом плане.

Конечно, все пятеро упомянутых выше ныне здравствующих космологов (А. Гут, А.Д. Линде, В.Ф. Муханов, А.А. Старобинский, Р.А. Сюняев) получили уже много разных премий, причем большинство сравнительно недавно – после измерений угловой анизотропии реликтового излучения (впрочем, у Р.А. Сюняева немало премий за другие работы). Премии российским космологам за прорывные работы последней четверти прошлого века по-прежнему исправно присуждаются. С этими работами связана целая эпоха – период “бури и натиска” в космологии, в которой российские ученые сыграли чуть ли не ключевую роль. В “иконостасе” всех перечисленных не хватает лишь одной премии – Нобелевской. Пока не хватает. Я уверен, что наша космологическая школа ее заслужила.