

ЭТЮДЫ ОБ УЧЁНЫХ

DOI: 10.7868/S0869587315070075

“ЭФФЕКТЫ” ЗЕЛЬДОВИЧА, ЗАПЕЧАТЛЁННЫЕ НА НАШЕМ НЕБЕ

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АКАДЕМИКА Я.Б. ЗЕЛЬДОВИЧА



Яков Борисович Зельдович (1914–1987) — один из наиболее результативных физиков, физикохимиков, астрофизиков, космологов XX столетия, академик АН СССР, трижды Герой Социалистического Труда, один из создателей ракетно-ядерного щита СССР и России. Он родился 8 марта 1914 г. в Минске. Закончил аспирантуру Института химической физики АН СССР в Ленинграде, в 1931 г. стал сотрудником этого института. С 1941 по 1943 г. вместе с институтом был в эвакуации в Казани, с 1946 г. стал заведующим его теоретическим отделом и одновременно профессором Московского механического института (впоследствии — Московский инженерно-физический институт). В 1946 г. (в 32 года) избран членом-корреспондентом АН СССР. С 1948 по 1964 г. работал в Арзамасе-16 (Саров) над созданием ядерного и термоядерного оружия. С 1964 по 1983 г. он — заведующий отде-

лом теоретической астрофизики в Институте прикладной математики АН СССР, в 1974–1987 гг. — заведующий отделом теоретической астрофизики, затем — консультант дирекции в Институте космических исследований АН СССР, с 1966 г. — профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. С 1983 г. — заведующий теоретическим отделом Института физических проблем АН СССР и отделом релятивистской астрофизики Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга при МГУ. Автор более 500 научных статей и 29 учебников и монографий. Награждён Ленинской и четырьмя Государственными (Сталинскими) премиями за работы по оборонной тематике, международными медалями им. Н. Мансона и Б. Льюиса — за работы по газодинамике взрыва и ударным волнам, Золотой медалью АН СССР им. И.В. Курчатова — за предсказание свойств ультрахолодных нейтронов и их обнаружение. За работы в области космологии и релятивистской астрофизики он награждён Золотой медалью им. К. Брюс Тихоокеанского астрономического общества, Золотой медалью Королевского астрономического общества, медалью им. П. Дирака Международного центра теоретической физики им. А. Салама, премией им. А.А. Фридмана РАН по гравитации и космологии. Был избран иностранным членом Лондонского королевского общества, Национальной академии наук США, Германской академии естествоиспытателей “Леопольдина” и многих других академий наук и научных обществ. К числу важнейших достижений Я.Б. Зельдовича следует отнести созданную им замечательную школу теоретической релятивистской астрофизики и космологии, в которую входят по меньшей мере полтора десятка ныне всемирно известных учёных, продолживших его дело в этой быстро развивающейся области науки.

Яков Борисович Зельдович, столетие со дня рождения которого недавно отметили по всему миру, внёс основополагающий вклад не только в создание ядерного щита нашей страны, что хорошо известно, — он оставил яркий след во многих областях фундаментальной физики. Начинать как специалист в области химической физики (адсорбция и катализ на неоднородных поверхностях). Предложенный им высокотемпературный механизм окисления азота носит его имя и широко известен экологами, в частности, он важен для объяснения природы кислотных дождей. Затем ЯБ (как звали его друзья и ученики) перешёл к гидродинамике и физике ударных волн (ударные волны разрежения, структура фронта ударной волны, быстрый удар по поверхности), теории горения и взрыва (предел детонации, поджог накаливаемой поверхности, тепловое распространение пламени) и в итоге заложил основы внутренней баллистики ракетных пороховых двигателей. По возвращении из Арзамаса-16 в 1964 г. ЯБ занялся ядерной физикой низких энергий (удержание ультрахолодных нейтронов, образование и распад сверхтяжёлого гелия ^8He) и теорией элементарных частиц (понятие лептонного заряда, бета-распад заряженных пионов и — совместно с С.С. Герштейном — сохранение векторного тока при слабых взаимодействиях), он внёс весомый вклад во все эти области исследований.

Последнюю четверть века своей жизни ЯБ посвятил релятивистской астрофизике и космологии, получив замечательные результаты. Удивительно, прошло уже 27 лет, как его нет с нами, но практически на каждой конференции по космологии звучат известные всем словосочетания: “приближение Зельдовича”, “спектр Зельдовича—Гаррисона”, “эффект Сюняева—Зельдовича”. Эффекты, связанные с именем Зельдовича, будут наблюдаться на небе в течение многих миллиардов лет. Здесь мы хотели бы рассказать о некоторых наиболее известных таких эффектах, проявления которых сейчас интенсивно изучаются. Предсказания и методы, предложенные ЯБ, позволяют открывать на небе с помощью специализированных радиотелескопов, установленных по всему миру, новые интереснейшие объекты, эффективно моделировать (воспроизводить) эволюцию Вселенной, используя мощные суперкомпьютеры, изучать и познавать свойства Вселенной как целого.

К столетию выдающегося учёного были приурочены несколько знаменательных событий. В Москве между Ленинским проспектом и улицей Косыгина, на которой он жил, появилась улица академика Я.Б. Зельдовича. Российская академия наук утвердила Золотую медаль им. Я.Б. Зельдовича, присуждаемую за выдающиеся работы в области физики и астрономии. В Москве и Таллине в его честь прошли две круп-

ные международные конференции по астрофизике высоких энергий и космологии, на которых широко обсуждались описанные ниже эффекты.

КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ. ПРИБЛИЖЕНИЕ И “БЛИНЫ ЗЕЛЬДОВИЧА”

Вычислительная космология превратилась в важнейший метод научных исследований лишь в последние 20–25 лет. Этому способствовало появление суперкомпьютеров с большим объёмом памяти быстрого доступа, современных методов отображения данных, новых методов компьютерного моделирования. Стало реальным просчитать траектории и запомнить положение огромного числа гравитационно взаимодействующих частиц.

В 1970 г. ЯБ ввёл так называемое *приближение Зельдовича*, учитывающее в простой и элегантной математической форме основные детали динамики невзаимодействующих частиц в ходе роста возмущений плотности и скорости вещества в расширяющейся Вселенной [1, 2]. Эти фактически математические статьи набрали более 1500 ссылок в астрофизической литературе. Полученное в них решение предсказывало существование на небе плоских структур (“блинов Зельдовича”) и филаментов, оно впервые продемонстрировало, какой является структура Вселенной. Впоследствии эта ныне наблюдаемая структура была названа *космической паутиной*. Астрофизические аспекты процесса образования структуры Вселенной в приближении Зельдовича — образование ударных волн, охлаждение сжатого вещества и его конденсация — рассмотрены в статье [3]. В конце прошлого — начале нынешнего века гигантские пустые области во Вселенной, окружённые сгущениями галактик, были обнаружены при выполнении глубоких обзоров неба (рис. 1).

Бурно развивающиеся вычислительные методы позволяют всё дальше уходить в область нелинейности, вплоть до образования галактик, скоплений и сверхскоплений галактик, а также громадных пустых областей между ними. Казалось бы, время приближения Зельдовича кануло в Лету, но неожиданно выяснилось, что детальные расчёты на квазилинейной стадии роста возмущений при больших красных смещениях приводят к картине, практически идентичной той, которую предсказывало приближение Зельдовича. Сегодня во всём мире специалисты начинают расчёты на суперкомпьютерах со структуры ранней Вселенной, полученной в приближении Зельдовича, и затем продолжают их в глубоко нелинейную область. Такой подход позволяет заметно сократить требуемое вычислительное время на крупнейших в мире суперкомпьютерах, используемых для рас-

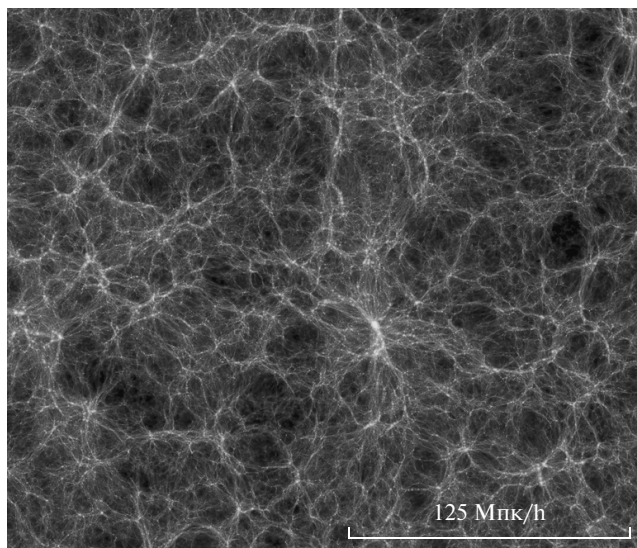


Рис. 1. Результат моделирования крупномасштабной структуры Вселенной в рамках стандартной космологии, более 10^{10} частиц (Millennium Simulation, Институт астрофизики Общества им. Макса Планка). Рисунок демонстрирует тонкий срез (толщиной 16 Мпк) рассчитанной “Вселенной”. Отчётливо видна “космическая паутина”, возникшая в результате роста адиабатических возмущений плотности. В узлах “паутины” находятся массивные скопления галактик. Бар задаёт масштаб 125 Мпк

чёта эволюции крупномасштабной структуры Вселенной при доминирующей роли тёмного вещества. На недавнем симпозиуме Международного астрономического союза в Таллине “Вселенная Зельдовича: генезис и рост космической паутины” профессор Ади Нуссер из Техниона (Хайфа) нашёл замечательно точные слова, выразившие отношение 180 участников симпозиума из многих ведущих стран мира к вкладу ЯБ в численную и наблюдательную космологию: “Удивительно простое приближение Зельдовича является основой для значительной части нашего понимания динамики образования структуры Вселенной, а также для развития методов анализа данных”.

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ ВОДОРОДА, ПОВЕРХНОСТЬ ПОСЛЕДНЕГО РАССЕЯНИЯ, ЧЕРНОТЕЛЬНАЯ ФОТОСФЕРА ВСЕЛЕННОЙ

Все астрофизики, занимающиеся историей расширения Вселенной, признают в качестве важнейших следующие этапы её развития: инфляционная стадия, стадия аннигиляции электронов и позитронов, стадия ухода нейтрино из термодинамического равновесия с другими частицами, стадии ядерного синтеза гелия, дейтерия, гелия-3, лития. В последние 15 лет популярным стал термин “поверхность последнего рассеяния”, связанный со стадией рекомбинации

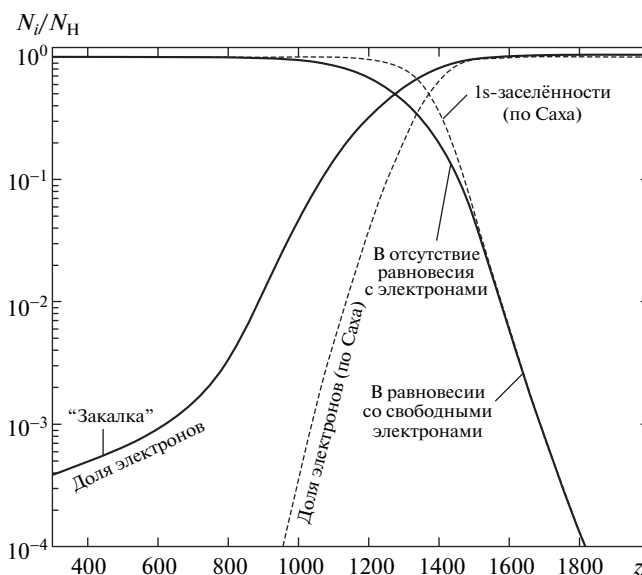


Рис. 2. Отличие реальной истории рекомбинации водорода от описываемой классической формулой Саха [6]. Рекомбинация сильно задержана из-за “узкого горлышка”, связанного с трудностью выхода фотонов из резонанса L_α и низкой эффективностью двухфотонного перехода $2s-1s$ в атоме водорода

водорода во Вселенной. Местоположение этой поверхности и её “размытость” (эффективная толщина) были впервые найдены в работе Зельдовича [4]. Общепринятое сейчас название поверхности, столь удачно отражающее её смысл, было введено в обиход заметно позднее.

В 1968 г. ЯБ с соавторами показали, что ход рекомбинации во Вселенной отнюдь не описывается простой формулой Саха [5]. Рекомбинация оказывается сильно затянута из-за трудности с выходом L_α -фотонов из резонанса. В работе [5] была выявлена важная роль двухфотонного распада уровня $2s$ в атоме водорода в уменьшении населённости возбуждённых уровней водорода и определении темпа космологической рекомбинации. Напомним, что вероятность распада уровня $2p$ в атоме водорода на 8 порядков величины превышает вероятность распада уровня $2s$ (соответственно 8.22 с^{-1} и 10^9 с^{-1}). Именно точный расчёт процесса рекомбинации позволил авторам статьи [4] в 1970 г. найти положение поверхности последнего рассеяния — соответствующее ей красное смещение $z_r \sim 1100$, возраст Вселенной в то время составлял всего 380 000 лет (рис. 2).

До рекомбинации, при красных смещениях $z > z_r$, свободный пробег фотонов был много меньше текущего горизонта Вселенной. Так как основным процессом, определяющим пробег, было томсоновское рассеяние на свободных электронах, фотоны не могли двигаться прямо, а испытывали

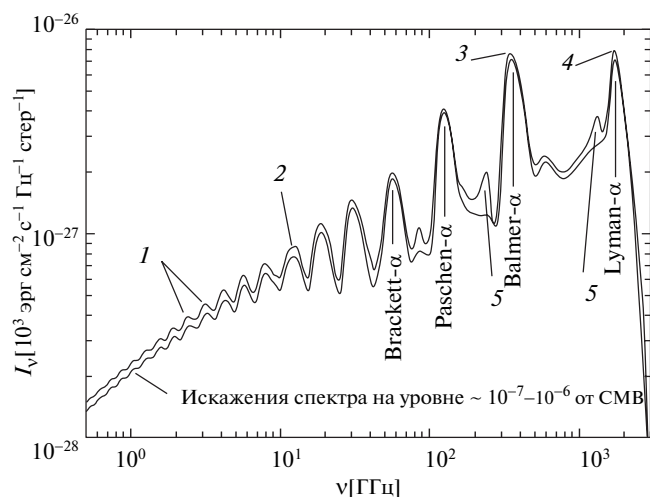


Рис. 3. Искажения в спектре реликтового излучения (СМВ), связанные с рекомбинацией водорода и гелия в ранней Вселенной [7]. Линии водорода, гелия и однократно ионизованного гелия смещены космологическим красным смещением в ~ 1400 раз в миллиметровый и радиодиапазон. Нижняя кривая показывает излучение водорода, верхняя — суммарное излучение водорода и гелия (обе рекомбинации). Стрелками показаны

1 — переходы между высоковозбуждёнными уровнями; 2 и 3 — изменения в форме линий и их положении из-за присутствия гелия во Вселенной; 4 — фотоны, испущенные при $z \sim 1400$; 5 — особенности, связанные с присутствием гелия

многократные рассеяния — диффундировали. После рекомбинации водорода плазма стала электронейтральной, плотность электронов резко упала, фотоны начали распространяться по всё более просветляющейся Вселенной, не встречая на своём пути свободных электронов. Подавляющее большинство наблюдаемых фотонов приходит к нам без единого рассеяния с момента рекомбинации, при этом они несут информацию о малых неоднородностях в распределении плотности и скорости электронов в зоне поверхности последнего рассеяния. Данные спутников WMAP и Planck подтвердили, что красное смещение z_r , на котором находится поверхность последнего рассеяния, и её размытость (эффективная толщина) согласуются с предсказаниями статьи [4] с точностью до нескольких процентов.

Одним из важных выводов теории космологической рекомбинации является предсказание присутствия в спектре реликтового излучения эмиссионных линий атомов водорода и гелия, сдвинутых космологическим красным смещением в ~ 1000 раз в диапазон радио- и миллиметровых длин волн [7] (рис. 3).

Наряду с поверхностью последнего рассеяния другой замечательной поверхностью является «чернотельная фотосфера Вселенной». Наша Вселенная удивительна — средняя плотность привычного нам барионного вещества в ней очень

мала. Средняя плотность электронов и протонов до образования звёзд и галактик была близка к $\sim 2 \times 10^{-7} (1+z)^3 \text{ см}^{-3}$, тогда как плотность фотонов реликтового излучения во Вселенной составляет $\sim 400 (1+z)^3 \text{ см}^{-3}$. Отношение числа фотонов к числу электронов составляет $\sim 2 \times 10^9$, не зависит от красного смещения z и характеризует удельную энтропию Вселенной, то есть наша Вселенная радиационно-доминированная. При красных смещениях до рекомбинации $z > z_r \sim 10^3$ плотность энергии излучения превышает плотность энергии $\rho_B c^2$ в массе покоя для барионов, а при $z > 10^4$ плотность энергии излучения превышает и плотность энергии в массе покоя $\rho_D c^2$ тёмного вещества.

После открытия реликтового излучения, а это произошло 50 лет назад, потребовалось ещё 20 лет, чтобы показать, что оно действительно изотропно (отклонения от изотропии не превышают 10^{-4}), а его спектр удивительно близок к спектру чернотельного излучения. Достаточно долго в литературе муссировался вопрос о возможных отклонениях спектра на малых ($h\nu \ll 3kT_r$) и больших ($h\nu \gg 3kT_r$) частотах (здесь T_r — температура реликтового излучения). Спутник COBE продемонстрировал, что эти отклонения не превышают 10^{-4} от амплитуды спектра.

ЯБ воспринял как нечто само собой разумеющееся, когда один из авторов данной статьи продемонстрировал ему, что наша Вселенная прозрачна по тормозному поглощению вплоть до красного смещения $z \sim 10^8$, то есть почти до времени синтеза гелия во Вселенной и аннигиляции электрон-позитронных пар. В то время оптическая толща Вселенной по томсоновскому рассеянию превышала 10^7 . Возникает естественный вопрос: когда и где был сформирован почти идеальный чернотельный спектр, который сейчас наблюдается? Чернотельное излучение замечательно тем, что его яркостная температура однозначно определяет как полную энергию излучения в единице объёма, так и плотность числа фотонов. В статье [8] было впервые показано, что многократные рассеяния фотонов на тепловых электронах приводят к формированию бозе-эйнштейновского спектра с химическим потенциалом, учитывающим недостаток фотонов. Комptonизация — красивейший физический процесс, связанный с изменением частоты фотона при его рассеянии на движущихся электронах. Изменение частоты фотонов на низких $h\nu < 4kT_r$ энергиях происходит за счёт доплер-эффекта. При многократных рассеяниях на движущихся в разных направлениях электронах он во втором порядке величины приводит к медленному сдвигу фотонов вверх по оси частот. На частотах же $h\nu > 4kT_r$ доминирует эффект отдачи, и фотоны сдвигаются в

результате рассеяний уже вниз по оси частот. Так формируется бозе-эйнштейновский равновесный спектр излучения.

Почему мы говорим о недостатке фотонов? Представим себе, что во Вселенной, в которой излучение имеет чернотельный спектр, впрыскивается энергия, например, в результате распада каких-либо экзотических частиц типа тёмного вещества или затухания акустических волн, возникших на ранней стадии эволюции Вселенной. Эти процессы могут приводить к заметному энерговыделению, но не способны родить большое число фотонов. Поэтому электронная температура начнёт превышать температуру излучения, а последующие рассеяния и комптонизация приведут к формированию бозе-эйнштейновского спектра с дефицитом фотонов относительно чернотельного спектра с той же температурой (рис. 4). В работах [4, 8] указан путь превращения бозе-эйнштейновского спектра в чернотельный спектр реликтового излучения. Было отмечено, что, при всей неэффективности тормозных процессов, они способны эффективно производить фотоны на очень низких частотах $h\nu \ll kT$, и поддерживать там яркостную температуру излучения, равную температуре электронов. И вот тут в игру вновь вступает комптонизация. В ходе этого процесса часть фотонов подхватывается и переносится в сторону максимума спектра реликтового излучения — в зону $h\nu \sim 3kT_*$. Таким образом может быть произведено достаточное число фотонов, чтобы превратить бозе-эйнштейновский спектр в чернотельный (планковский). В работе [8] было найдено аналитическое решение, описывающее этот процесс, и красное смещение z_ϕ соответствующей чернотельной фотосферы нашей Вселенной. Любое энерговыделение при $z > z_\phi$ не оставляет никаких следов на спектре реликтового излучения, любое энерговыделение при $z < z_\phi$ обязательно изменит спектр.

Наша Вселенная имеет очень маленькую плотность электронов и протонов, и в этих условиях рождение низкочастотных фотонов в результате двойного комптон-эффекта оказывается даже более эффективным, чем тормозное излучение [9]. Подставляя темп рождения фотонов в результате двойного комптон-эффекта в формулу статьи [8], можно найти красное смещение для соответствующего положения чернотельной фотосферы $z_\phi = 2 \times 10^6$. Любое энерговыделение после этого момента (при меньших z) приведёт к искажению спектра. Предлагаемые в настоящее время космические эксперименты PIXIE, COrE, PRISM смогут обнаружить такие искажения даже на уровне 10^{-9} от интенсивности реликтового излучения.

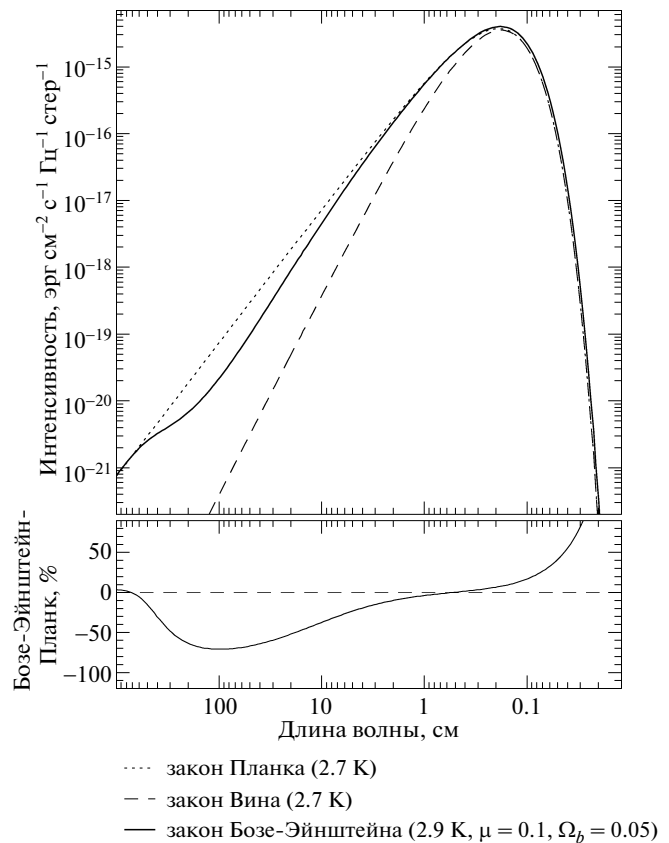


Рис. 4. Искажение спектра реликтового излучения, связанное с комптонизацией [8], — формирование бозе-эйнштейновского спектра с дефицитом фотонов. Температура бозе-эйнштейновского спектра принята равной 2.9 К, чтобы по возможности приблизить его к неискажённому планковскому спектру с наблюдаемой температурой 2.7 К. Химический потенциал μ в области коротких длин волн принят равным 0.1

МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. АКУСТИЧЕСКИЕ ПИКИ И БАРИОННЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ

В 1970 г. в работе [10] было отмечено, что стоячие звуковые волны, существовавшие в ранней Вселенной, подходят к моменту рекомбинации водорода с разными фазами, зависящими от длины волны возмущения λ (рис. 5). В результате формируется своеобразная зависимость амплитуды возмущений от λ (рис. 6) вплоть до размера, соответствующего звуковому горизонту Вселенной на стадии рекомбинации $\sim v_s t_c$, где v_s — скорость звука, t_c — космологическое время. Мы уже отметили, что на стадии расширения Вселенной до рекомбинации водорода плотность энергии излучения превышала плотность покоя барионного вещества $\rho_B c^2$, скорость звука была при этом лишь в несколько раз меньше скорости света.

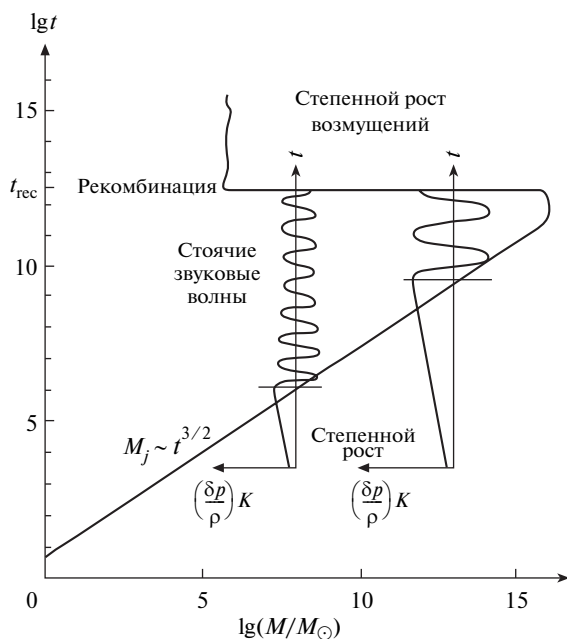


Рис. 5. Эволюция адиабатических возмущений плотности в расширяющейся Вселенной [10]. На радиационно-доминированной стадии расширения растущие возмущения плотности превращаются в стоячие звуковые волны, как только их характерные размеры становятся меньше горизонта. На момент генерации волн (а он зависит от размера возмущения — длины волны) они имеют одинаковую фазу. До рекомбинации водорода из-за рассеяния фотонов на свободных электронах барионное вещество и излучение были тесно связаны и двигались в звуковых волнах совместно. В ходе рекомбинации за сравнительно короткое время Вселенная стала прозрачной для излучения, и фотоны перестали взаимодействовать с электронами. Вследствие разной длины волны (определяемой размером возмущения) звуковые волны подходят к моменту рекомбинации с разными фазами, что приводит к характерной зависимости амплитуды возмущения от массы. Эта картина имеет два важнейших следствия: 1) распределение галактик в окружающей нас Вселенной хранит память о зависимости амплитуды возмущений от масштаба, что наблюдается в данных Слоановского обзора неба в видимом диапазоне спектра и носит название “барионные акустические осцилляции”; 2) в ходе экспериментов на высотных баллонах Boomerang и Maxima-II, спутниках WMAP и Planck с высочайшей точностью измерены положение и амплитуда “акустических пиков” в угловых флуктуациях реликтового излучения, возникших при взаимодействии излучения с веществом на поверхности последнего рассеяния фотонов

В простейшем приближении, как следует из уравнения неразрывности, рост возмущений на стадии рекомбинации сопровождался ростом гидродинамической скорости газа из электронов и барионов и тесно связанного с ними газа фотонов. В результате рассеяния фотонов на движущихся электронах вследствие доплер-эффекта происходит изменение яркости реликтового излучения. Это один из основных механизмов фор-

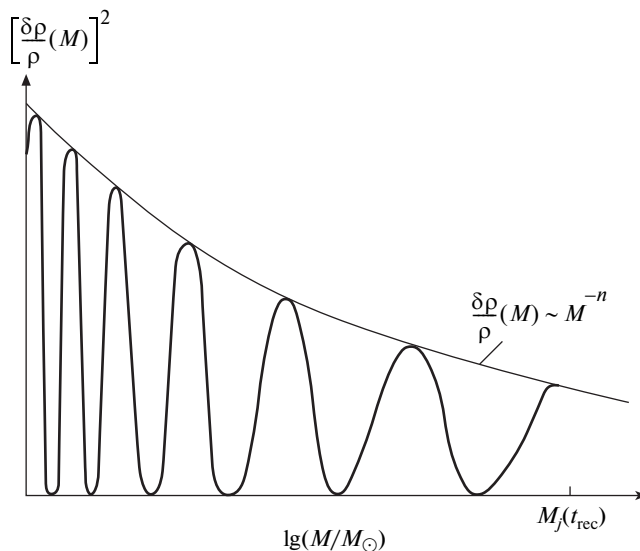


Рис. 6. Зависимость квадрата амплитуды возмущений плотности вещества от масштаба, иллюстрирующая происхождение квазипериодических осцилляций в распределении барионов (и реликтового излучения) [10]. Звуковые волны данной длины волны образуются во Вселенной из возмущений соответствующего масштаба в тот момент, когда он оказывается меньше горизонта ct . Этот переход происходит в разное время для возмущений разных масштабов, поэтому, хотя сначала звуковые волны разной длины волны имеют одинаковые фазы, к моменту рекомбинации они приходят с разными фазами. Помимо масштаба (массы сгущения), распределение фаз зависит от космологических параметров и момента рекомбинации. Огибающей кривой показана степенная зависимость роста возмущений от их масштаба, игнорирующая период существования звуковых волн во Вселенной

мирования *акустических пиков*, которые сегодня наблюдаются в спектре мощности углового распределения реликтового излучения.

ЯБ не очень-то верил, что этот предсказанный эффект будет когда-нибудь найден, и своей рукой внёс в аннотацию статьи следующую фразу: “Детальное исследование спектра флуктуаций, в принципе, может позволить выяснить природу первичных возмущений плотности, так как адиабатическим возмущениям свойственна своеобразная периодическая зависимость спектральной плотности возмущений от длины волны (массы). Практические наблюдения весьма трудны из-за малости эффекта и из-за наличия флуктуаций, связанных с дискретными источниками излучения” [10]. Однако сначала эксперименты на баллонах Boomerang и Maxima в 1998 г., а потом на наблюдения со спутников WMAP и Planck позволили не просто обнаружить такие пики в спектре мощности угловых флуктуаций реликтового излучения, но и использовать их для определения основных параметров Вселенной. Ошибки в определении амплитуды акустических пиков

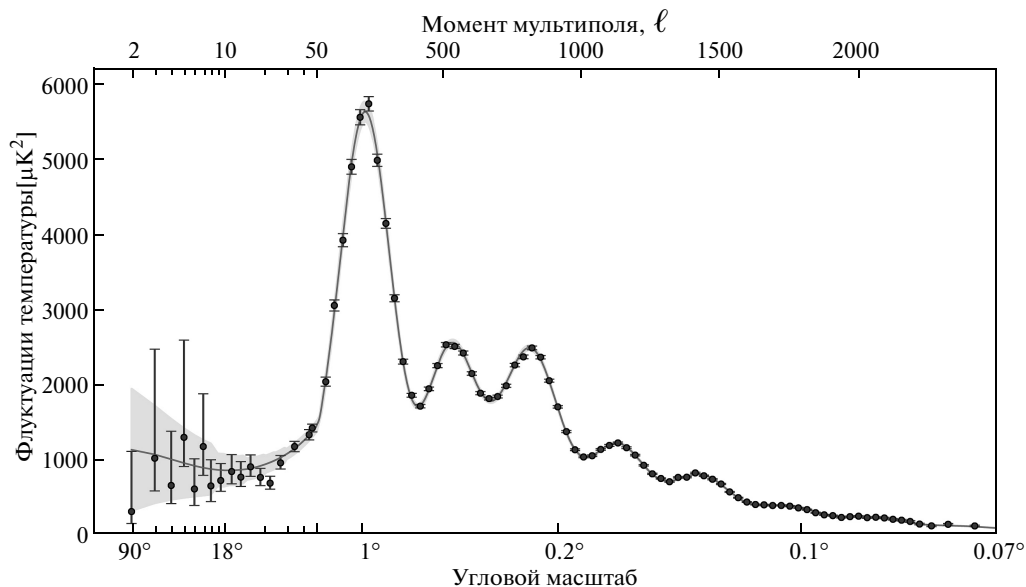


Рис. 7. Спектр мощности угловых флуктуаций реликтового излучения по данным обсерватории Planck [11]

столь малы, что в спектре мощности уверенно прослеживаются семь пиков осцилляций (рис. 7).

Теория предсказывает положение первого пика (близкое к акустическому горизонту) и более высоких пиков как функцию важнейших космологических параметров Вселенной: её кривизны, плотности энергии излучения и релятивистских нейтрино, плотности тёмного и барионного вещества, постоянной Хаббла. Наблюдаемая на небе картина угловых флуктуаций реликтового излучения даёт характерный угловой масштаб для каждого пика вблизи “поверхности последнего рассеяния”. Сравнивая эти масштабы, мы получаем возможность определения расстояния до поверхности последнего рассеяния, а значит, и возраста Вселенной и её важнейших параметров, перечисленных выше. Это чисто геометрический метод. Следы существования звукового горизонта вблизи “поверхности последнего рассеяния” проявляются и в наблюдаемом пространственном распределении галактик при малых красных смещениях $z < 1$. И вновь простое геометрическое сравнение наблюдаемого углового масштаба барионных акустических осцилляций с предсказаниями теории позволяет получить уникальную космологическую информацию об основных параметрах уже современной Вселенной.

СПЕКТР МОЩНОСТИ ФЛУКТУАЦИЙ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕЛЬДОВИЧА–ГАРРИСОНА

На рисунках 6 и 7 помимо акустических пиков хорошо видна компонента с непрерывным спектром, непосредственно связанная с возникнове-

нием крупномасштабной структуры Вселенной. ЯБ одним из первых отметил, что в однородно и изотропно расширяющейся Вселенной вплоть до красных смещений $z > 10$ малые начальные возмущения нарастают линейно. Считается, что корреляции таких возмущений в разных масштабах независимы и носят гауссовый характер. ЯБ предположил [1, 2], что спектр первичных флуктуаций должен быть степенным с показателем $n_s = 1$, то есть не должен зависеть от масштаба. Почти одновременно с Зельдовичем предположение о таком масштабно-инвариантном спектре возмущений выдвинул Гаррисон [12], поэтому этот спектр в космологии называется спектром Зельдовича–Гаррисона. Сравнение спектра мощности возмущений, наблюдаемого спутниками WMAP и Planck, с результатами моделирования позволило определить показатель исходного спектра возмущений с высочайшей точностью $n_s = 0.9677 \pm \pm 0.0060$ [11]. Слабое отличие показателя спектра от 1, хотя и определённое пока лишь с точностью $\sim 7\sigma$, является отголоском инфляционной стадии развития Вселенной. Это важнейшее уточнение было предсказано Мухановым и Чибисовым в 1981 г. [13]. Planck подтвердил и отсутствие заметных отклонений первичных флуктуаций плотности от гауссовых.

СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК, “СЛАБОЕ” ГРАВЛИНЗИРОВАНИЕ

Скопления галактик являются самыми массивными гравитационно-связанными объектами во Вселенной. Эти объекты содержат до нескольких тысяч галактик, погружённых в горячий меж-

галактический газ с температурой от 1 до 10 кэВ (от 12 до 120 млн. К). Гигантский гравитационный потенциал, удерживающий галактики и газ от разлёта, определяется концентрацией тёмной материи, масса которой в десятки раз превышает массу видимого (светящегося в оптических лучах) вещества, сосредоточенного в звёздах галактик скопления, и в 5–6 раз — массу горячего межгалактического газа в скоплении, наблюдаемого в рентгеновских лучах. Находясь в столь сильном гравитационном поле, галактики скопления движутся со скоростями ~ 1000 км/с, которые близки к скорости звука в горячем газе скопления. Гравитационный потенциал скоплений столь велик, что они оказываются сильными гравитационными линзами, способными усиливать яркость и искажать изображение фоновых галактик, находящихся далеко за скоплением. Гравитационное линзирование открыло уникальную возможность исследовать с помощью крупных наземных и космических телескопов экстремально далёкие галактики и квазары, яркость которых из-за линзирования усиливается и которые в отсутствие линзирования были бы абсолютно недоступны для наблюдений даже с помощью самых больших телескопов. С другой стороны, гравитационное линзирование объектов, расположенных далеко за скоплением, позволяет восстанавливать распределение тёмной материи в скоплении и определять его массу.

В 1964 г. ЯБ поставил и решил задачу о наблюдениях (точнее, о распространении света) во Вселенной, однородной в среднем, то есть в локально неоднородной космологической среде [14]. В этой его ставшей пионерской статье впервые описаны эффекты, определяющие “слабое” гравитационное линзирование. Сегодня “слабое” линзирование является одним из важнейших методов изучения неоднородности распределения вещества на различных масштабах. Исследования идут не только в оптическом диапазоне. В частности, космологический спутник Planck “видит” сдвиг угловых флуктуаций реликтового излучения вблизи концентраций тёмного вещества с колоссальной достоверностью (~ 40 стандартных отклонений). Не меньшей чувствительностью к “слабому” линзированию обладают наземные телескопы миллиметрового диапазона длин волн SPT и АСТ (см. ниже). Линзирование меняет карту измеряемого распределения яркости первичных флуктуаций реликтового излучения и его поляризации. Но главное — оно приводит к частичному преобразованию Е-поляризации (электрической или градиентной) света в В-поляризацию (магнитную или спиральную), которая ожидается (и активно ищется) от первичных гравитационных волн. Астрономы надеются изучать сдвиги в распределении на небе миллионов ядер активных галактик и квазаров, которые должен открыть и картографировать в рентгеновских лучах россий-

ский спутник Спектр-Рентген-Гамма (СРГ), готовящийся к запуску в 2016 г. В Европе в 2020 г. предполагается запустить спутник Euclid, одной из важнейших задач которого будет исследование “слабого” гравитационного линзирования во Вселенной в оптических лучах.

ПОНИЖЕНИЕ ЯРКОСТИ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НАПРАВЛЕНИИ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

В работе [10] и более детально в работе [15] было предсказано понижение яркости в угловом распределении реликтового излучения в направлении на скопления горячего межгалактического газа в скоплениях галактик (тепловой SZ-эффект). Удалось показать, что рассеяние фотонов на электронах горячего газа, движущихся при температурах 5–10 кэВ с тепловыми скоростями ~ 10 –15% от скорости света, приводит к характерным искажениям спектра реликтового излучения: в рэлей-джинсовской (низкочастотной) области спектра яркость его понижается из-за сдвига фотонов вверх по оси частот, соответственно, в виновской (высокочастотной) области она повышается. В результате скопление галактик предстаёт для наблюдателя как “отрицательный” источник в сантиметровой и миллиметровой областях спектра, а в субмиллиметровой области представляет собой яркий положительный источник излучения. Теория предсказывает ряд замечательных свойств этого источника. Прежде всего его спектр не зависит от красного смещения z , на котором находится скопление галактик. Яркость источника тоже не зависит от красного смещения, что было крайне непривычно для астрономов. Замечательным предсказанием стал тот факт, что на частоте 217 ГГц (длина волны 1.38 мм) эффект оказывается нулевым, то есть вблизи этой частоты можно обнаружить яркость реликтового излучения, не искажённую процессами, связанными с наличием горячего газа.

Наблюдения радиоинтерферометра CARMA полностью подтвердили эти гипотезы (рис. 8). В настоящее время эффект, предсказанный в 1970–1972 гг., обнаружен уже в направлениях на две тысячи скоплений галактик, причём около 1000 скоплений, находящихся на заметных красных смещениях $0.4 < z < 2$, были впервые обнаружены именно по этому эффекту. Массивные (богатые) скопления галактик, о существовании которых никто не подозревал, оказались интереснейшими объектами, а также сильными гравитационными линзами. Наибольших успехов в исследовании этого эффекта, в поиске и открытии новых скоплений галактик удалось достичь благодаря специально созданному 10-метровому телескопу SPT, расположенному на Южном полюсе Земли, на высоте 2700 м, и 6-метровому Атакамскому кос-

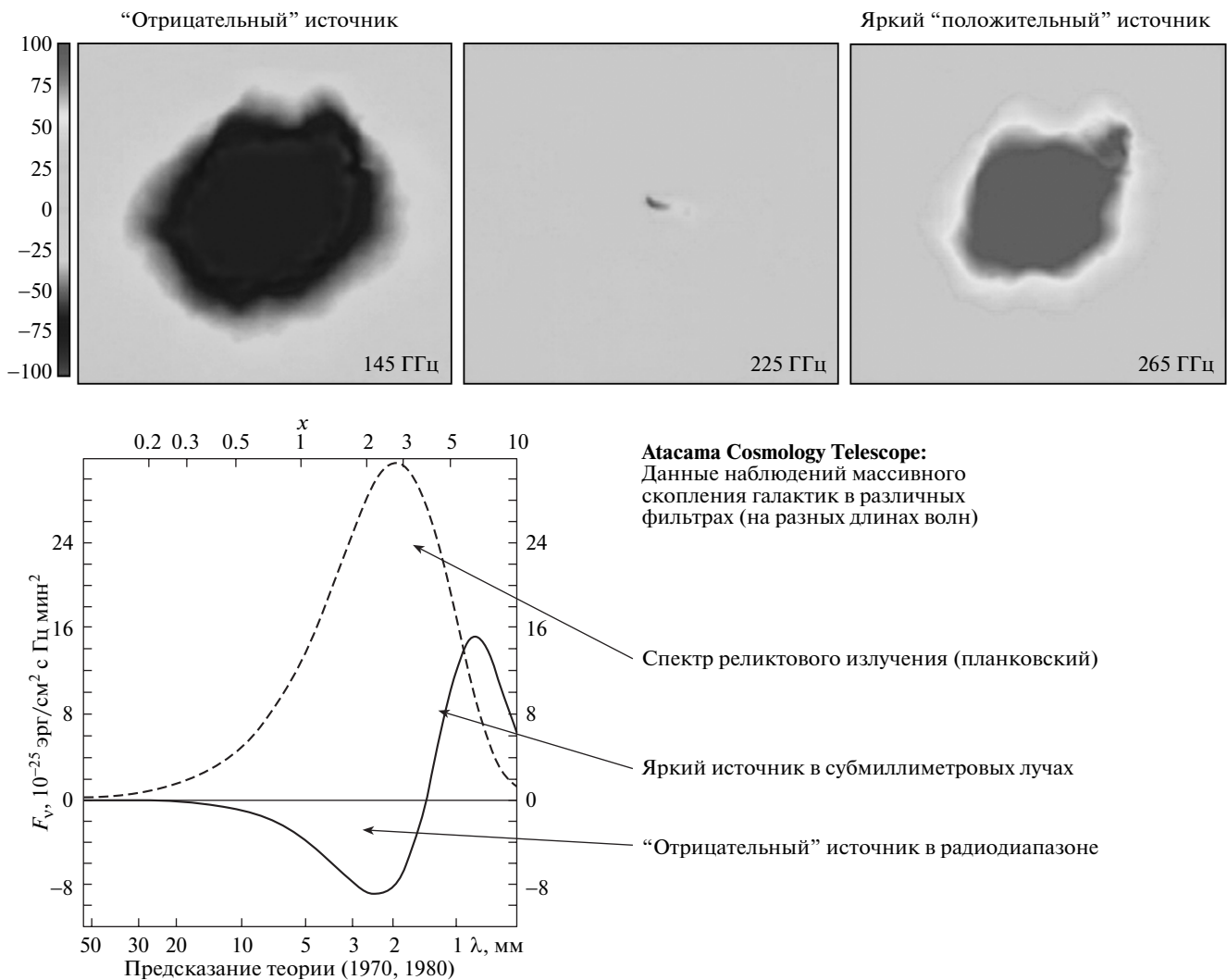


Рис. 8. В работах Я.Б. Зельдовича [10, 15] было предсказано, что взаимодействие горячего газа в скоплениях галактик с фотонами реликтового излучения приводит к появлению “отрицательных” источников излучения на сантиметровых и миллиметровых длинах волн, к избытку излучения на субмиллиметровых длинах волн и отсутствию сигнала на частоте 217 ГГц в направлениях на скопления ($x = hv/kTr$). Телескопы SPT и АСТ, а также спутник Planck успешно используют это предсказание для обнаружения далёких скоплений галактик

мологическому телескопу (АСТ), расположенному на высоте 5000 м в пустыне Атакама в чилийских Андах. Эти места (пустыня Атакама и особенно Южный полюс Земли) замечательны устойчивой погодой, низкой турбулентностью и необычайно низкой влажностью атмосферы. Одно из изображений, полученных SPT, показано на рисунке 9. Хорошо видна россыпь скоплений галактик (отрицательные источники) и ярких субмиллиметровых (положительные) источников, представляющих собой богатые межзвёздной пылью звездообразующие галактики или ядра активных галактик на красных смещениях 2.5–4. Их оптическое и ультрафиолетовое излучение поглощается пылью и переизлучается ею в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Замечательный интерферометр ALMA, имеющий рекордное

угловое разрешение, продемонстрировал, что все эти объекты гравитационно усилены в потенциале далёких, массивных, но невидимых в этом эксперименте фоновых галактик, расположенных между источником и наблюдателем.

Наблюдениям, численному моделированию проявлений этого эффекта, релятивистским поправкам к нему посвящено более тысячи статей. Во многих публикациях уже не приводятся ссылки на оригинальные статьи ЯБ, авторы просто выносят слово “SZ-эффект” в заглавие статьи или упоминают его в тексте. Громадный вклад в изучение SZ-эффекта внёс космологический спутник Planck. На рисунке 10 показано распределение на небе более 1000 скоплений, открытых этим спутником по SZ-эффекту [11]. Сравнение

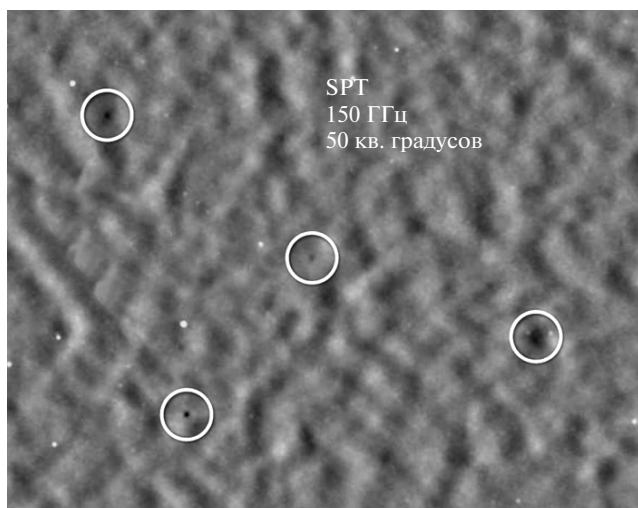


Рис. 9. Изображение участка неба площадью 50 кв. градусов, полученное телескопом SPT. Хорошо видны: а) первичные (то есть возникшие вблизи поверхности последнего рассеяния) угловые флуктуации реликтового излучения, б) усиленные гравитационным линзированием звездообразующие галактики, в которых излучает в субмиллиметровом диапазоне пыль, разогретая горячими массивными звёздами, в) понижение яркости реликтового излучения в направлениях на скопления галактик с горячим газом (тепловой SZ-эффект), на рисунке показано кружками

скопления галактик, открытых спутником Planck (861 скопление на всём небе) и телескопами SPT (522 на 2500 кв. градусах) и ACT (91 на 950 кв. градусах) по SZ-эффекту, со скоплениями, открытыми спутником ROSAT в ходе рентгеновского обзора неба, показало, что с помощью SZ-эффекта открываются наиболее массивные скопления, расположенные на больших z .

Среди скоплений, открытых телескопами SPT и ACT по SZ-эффекту, встречаются удивительные объекты, такие как скопление Феникс на красном смещении $z = 0.597$, в котором впервые обнаружено мощное течение охлаждения с выпадени-

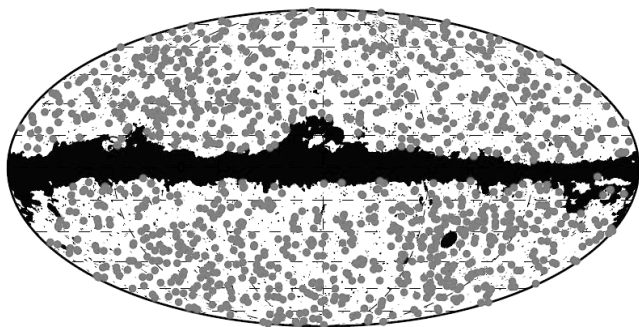


Рис. 10. Распределение по небу более 1000 далёких скоплений галактик, обнаруженных спутником Planck по SZ-эффекту [11] (см. также www.sciops.esa.int/index.php?project=PLANCK)

ем в центре скопления до $\sim 3800 M_{\odot}$ в год быстро остывающего холодного молекулярного газа. Это течение, связанное с остыванием газа из-за его излучения, сопровождается невероятно высоким темпом звездообразования. Около $740 M_{\odot}$ в год превращается в этом скоплении в молодые звёзды, наблюдаемые по их сверхвысоким оптическим и инфракрасным светимостям, $\sim 60 M_{\odot}$ в год “проглатывается” сверхмассивной чёрной дырой в центре скопления. Астрономы предполагали, что такие объекты должны существовать, но открыты они были благодаря SZ-эффекту. В ещё более далёком скоплении Эль-Гордо (“Толстяк”) на $z = 0.87$ мы наблюдаем, как одно компактное скопление галактик проходит с огромной скоростью сквозь другое, более массивное скопление. В результате в нём формируется мощная ударная волна, разогревающая газ в скоплении до температур, превышающих 20 кэВ, в то время как температура в компактной части скопления не превышает 5 кэВ. Во многих открытых примерах слияния скоплений галактик наблюдаются движения газа со скоростями порядка 3000 км/с.

Кинематический SZ-эффект [9, 16] позволяет измерять такие скорости относительно системы координат, в которой реликтовое излучение изотропно. Хорошо известно, что реликтовое излучение изотропно лишь в одной системе координат. Наблюдатель, движущийся относительно него, видит более высокую температуру излучения в направлении движения и пониженную температуру — в противоположном. Для любого околоземного космологического спутника изменение яркости неба в противоположных направлениях вследствие доплер-эффекта позволяет измерять нашу скорость относительно реликтового излучения (складывающуюся из скорости нашего вращения в Галактике вокруг её центра и скорости движения Галактики как целого). Более того, спутники WMAP и Planck, сканируя небо в миллиметровых и сантиметровых лучах, с высочайшей точностью улавливают движение точки либрации L2, в которой они находятся, вокруг Солнца со скоростью 30 км/с. В работах 1970–1982 гг., посвящённых кинематическому SZ-эффекту [9, 15, 16], показано, что точно так же астрономы смогут измерять скорость удалённого скопления галактик относительно реликтового излучения, находящегося на красном смещении скопления. Изменение температуры в направлении скопления галактик составляет $\tau_T v_r/c$, где v_r — скорость скопления вдоль луча зрения, а τ_T — томсоновская оптическая толщина скопления. Эти скорости сейчас измерены в нескольких работах.

Впечатляют простые следствия этого эффекта. Сам факт наблюдения теплового эффекта в направлении скопления с красным смещением $z \sim 1$, означающий, что температура газа в скоплении

$T = T_0 (1 + z) = 2T_0$ была в 2 раза выше, чем сегодня, позволяет утверждать, что реликтовое излучение действительно существовало за скоплением галактик. Иначе мы не видели бы понижения его яркости. Скопление с красным смещением $z \sim 1$ удаляется от нас в силу расширения Вселенной со скоростью, близкой к скорости света $v_r \sim 0.6 c$. Уже сегодня наблюдения кинематического SZ-эффекта в направлении на такие скопления достаточно точны и дают верхние пределы для peculiar скоростей на уровне 1.5–2 тыс. км/с. Это означает, что гигантские скопления, масса которых определяется в основном тёмным веществом, движутся относительно реликтового излучения в том месте, где они находятся, со скоростями по крайней мере в сто раз меньшими скорости их удаления в соответствии с законом Хаббла. Это удивительно, что мы исследуем реликтовое излучение, которое “видело” электроны газа в скоплении, практически покоящимися. Поражает, с какой точностью Вселенная следует предсказаниям теоретической модели её расширения, не допуская значительных отклонений в распределении peculiar скоростей.

Как только астрономы узнают об открытии ранее неизвестных скоплений галактик по тепловому SZ-эффекту, они наводят на них самые чувствительные телескопы рентгеновских спутников Chandra или XMM и находят там диффузный рентгеновский источник излучения. Это излучение является тормозным, его поверхностная яркость при температурах, превышающих 5 кэВ, пропорциональна $N_e^2 L T_r^{-1/2} \exp(-E/kT_r)$. Температура излучения также измеряется рентгеновскими спутниками по экспоненциальному завалу в спектре, так что в результате субмиллиметровые и рентгеновские наблюдения дают нам два уравнения для N_e и L , позволяющие найти характерный размер скопления галактик L . Зная его угловой размер, можно определить расстояние до любого скопления галактик. Такие измерения были проведены по данным радиоинтерферометра CARMA и рентгеновского спутника Chandra для 35 скоплений галактик. Полученные результаты хорошо согласуются со стандартной космологической моделью. Зная красное смещение z скопления, то есть скорость его удаления и расстояние до нас d , мы можем найти постоянную Хаббла для любого выбранного скопления галактик (с учётом достаточно хорошо известной сегодня модели Вселенной). Отметим, что в ближайшие годы эксперименты на телескопе на Южном полюсе (SPT) и Атакамском космологическом телескопе (ACT) позволят обнаружить уже десятки (а может быть, и сотни) тысяч новых скоплений галактик на разных z . Новые детекторы этих телескопов уже в 2016 г. будут состоять из 15 тыс. криогенных болометров, расположенных в фокальной плоскости.

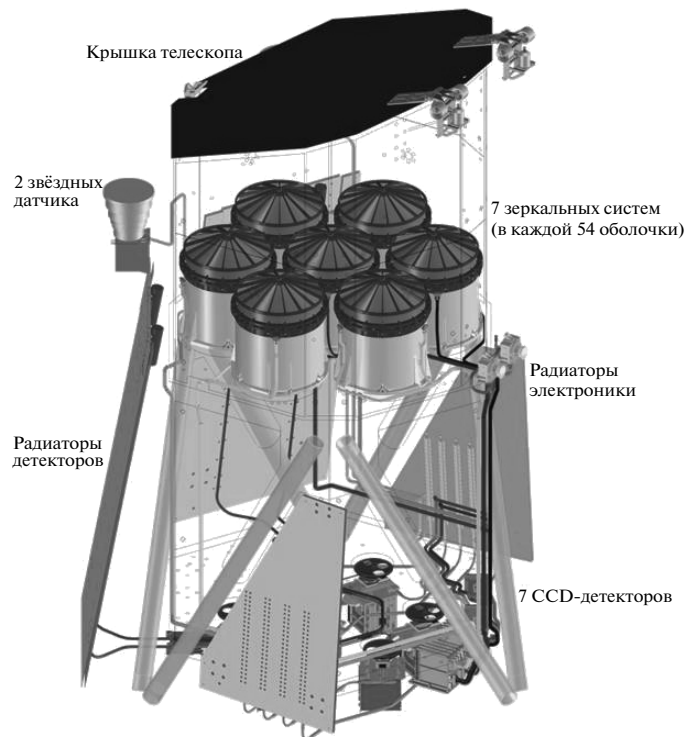


Рис. 11. Рентгеновский телескоп eROSITA с оптикой косого падения, подготавливаемый к работе на орбите в составе астрофизической обсерватории Спектр-Рентген-Гамма. Ожидается, что за первые четыре года (с 2016 по 2020 г.) сканирования неба в рентгеновских лучах этот телескоп откроет все (более 100 тысяч!) массивные скопления галактик в наблюдаемой Вселенной и около трёх миллионов аккрецирующих сверхмассивных чёрных дыр — активных ядер галактик. Телескоп содержит 7 идентичных зеркальных систем и 7 позиционно-чувствительных рентгеновских ПЗС-детекторов (каждый со своим блоком электроники). Каждая зеркальная система включает 54 концентрических оболочки гиперболоид-параболоид с фокусным расстоянием 1.6 м, угол отражения увеличивается с удалением от оси, поэтому наиболее жёсткие рентгеновские фотоны ~ 10 кэВ фокусируются внутренними оболочками, а наиболее мягкие ~ 0.5 кэВ — внешними оболочками (диаметром 30 см)

Обсуждается возможность увеличения их числа ещё в 10 раз к 2020 г. Такое громадное число детекторов позволит резко ускорить темп сканирования неба, увеличить чувствительность обзоров и вероятность обнаружения далёких скоплений галактик.

Около 100 тыс. скоплений галактик обещает обнаружить на разных z в рентгеновских лучах российский спутник Спектр-Рентген-Гамма, изготавливаемый в НПО им. С.А. Лавочкина и планируемый к запуску в 2016 г. На этом спутнике должны быть установлены семь германских телескопов eROSITA с оптикой косого падения (рис. 11), предназначенных для проведения сверхглубоких обзоров всего неба в рентгеновских лучах. Имея огромную статистику объектов, космологи смо-

гут следить за темпом образования массивных скоплений галактик на разных z . Этот темп сильно зависит от космологической модели Вселенной, поэтому подобные наблюдения позволяют с очень высокой точностью определить, с каким темпом рождаются во Вселенной самые массивные объекты, проверить принятую космологическую модель и уточнить её основные параметры. Надо сказать, что уже осуществлённая попытка определить космологические параметры по данным наблюдений галактик со спутника Planck привела к значениям, заметно (до двух стандартных отклонений) отличающимся от параметров Вселенной, определённых по наблюдению амплитуды акустических пиков в спектре мощности угловых флуктуаций реликтового излучения. Отметим, что как данные о скоплениях, так и данные об амплитудах пиков осцилляций приходят с одного и того же спутника. Астрофизики детально исследуют причины этих разногласий, которые, возможно, связаны со сравнительно низкой точностью определения массы каждого из скоплений галактик или конечной массой нейтрино, составляющей в целом заметную долю в плотности материи во Вселенной в эпоху рекомбинации водорода.

В заключение этого раздела надо сказать, что сам ЯБ относился к описанным эффектам явно неоднозначно: был убеждён, что одни эффекты вполне наблюдаемы, другие рассматривал, скорее, как теоретические изыскания, которые никогда не будут экспериментально подтверждены, и соглашался публиковать их описание, лишь учитывая их красивое физическое содержание. Удивительно, но спустя 40 лет после предсказания, все эти эффекты не просто зарегистрированы — они кардинально изменили содержание современной наблюдательной космологии, для их изучения по всему миру строятся гигантские телескопы, запускаются самые современные спутники с охлаждаемыми до гелиевых температур детекторами, их обсчитывают самые мощные на Земле суперкомпьютеры. Очень жаль, что ЯБ не дождался до этих дней и не смог увидеть триумф предсказанных им теорий, революционных изменений, произошедших и происходящих в настоящее время в наблюдательной космологии. Этот прогресс стал возможен лишь благодаря бурному развитию технологий создания современных криогенных детекторов субмиллиметрового излучения в результате многолетних усилий сотен астрономов, физиков, инженеров и техников.

ЕЩЕ ОДИН “ЭФФЕКТ”— НАУЧНАЯ ШКОЛА ЗЕЛЬДОВИЧА В АСТРОФИЗИКЕ И КОСМОЛОГИИ

Когда говоришь о сотрудничестве с ЯБ, невольно вспоминаешь плеяду замечательных физиков, выбравших астрофизику и космологию в

качестве поля своей деятельности после завершения работы над ядерным оружием и радиолокаторами и возвращения в фундаментальную науку. В голову сразу приходят имена нобелевских лауреатов Г. Бёте (термоядерные источники энергии звёзд), В.Л. Гинзбурга (космические лучи), М. Райла (апертурный синтез в радиоастрономии и космология), А.Д. Сахарова (космология), В. Фаулера (образование химических элементов), Э. Ферми (ускорение космических лучей и космология), Э. Хьюиша (радиопульсары), С. Чандрасекара (строение и эволюция звёзд). Важно, что Бёте, Райл, Фаулер, Хьюиш, Чандрасекар получили нобелевские премии за свои достижения в астрофизике.

ЯБ начал подготовку к переходу в астрофизику и космологию в самом начале 1960-х годов. Как писали в своих воспоминаниях В.С. Пинаев и Ю.Н. Смирнов [17] и рассказывали М.А. Подурец и С.А. Холин, Зельдович организовал в Сарове (тогда Арзамас-16) семинар в своей группе по изучению теории относительности, и все участники поочерёдно пересказывали параграфы из нового тогда издания “Теории поля” Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица. По приезду в Москву он написал несколько обзоров, посвящённых сравнению моделей холодной и горячей Вселенной, теоретические основы которой были заложены Г.А. Гамовым. Одной из целей было показать, что холодная модель Вселенной имеет свои преимущества. Именно поэтому он инициировал работы Ю.Н. Смирнова и В.Б. Якубова по расчётам ядерных реакций в горячей Вселенной и А.Г. Дорошкевича и И.Д. Новикова по анализу данных радионаблюдений, свидетельствовавших в то время о трудностях горячей модели Вселенной. Открытие реликтового излучения А. Пензиасом и Р. Вильсоном в 1965 г. полностью изменило ситуацию: многочисленные участники семинара в Астрономическом институте им. П.К. Штернберга при МГУ были свидетелями того, как ЯБ сразу же признал торжество горячей модели.

Новая физическая космология была молодой наукой, и работать над ней в свою группу ЯБ пригласил совсем молодых людей, недавних выпускников и дипломников МГУ и МФТИ. Именно эти люди составили ядро школы ЯБ. Сегодня в мире есть огромный интерес к инфляции (стадии очень быстрого расширения Вселенной на самых начальных этапах). ЯБ сам написал несколько замечательных статей и обзоров на эту тему и проявлял искренний интерес к работам ныне знаменитого А.Д. Линде и Э.Б. Глинера, работавшего над собственным вариантом теории инфляции в то время уже более 10 лет. Много разговаривал с А.Д. Сахаровым на тему холодной Вселенной и природы квантовых флуктуаций как источника первичных возмущений плотности во Вселенной.

В известной статье А.Д. Сахарова 1965 г. [18] почти половина абзацев во введении начинается словами “как мне сказал Я.Б. Зельдович...”. Автор знаменитой статьи с Г.В. Чибисовым о спектре первичных возмущений плотности во Вселенной и их зарождении из квантовых флуктуаций В.Ф. Муханов (студент МФТИ в то время) часто рассказывает о встречах с ЯБ, глубоком обсуждении результатов и его влиянии на окружающих. Необходимо упомянуть одного из ближайших и наиболее талантливых учеников ЯБ академика А.А. Старобинского, автора очень востребованной сегодня конкретной модели инфляции и соавтора ЯБ по работам о рождении частиц в сильных гравитационных полях, о первичных чёрных дырах и о возможности отбора энергии у вращающихся чёрных дыр малой массы.

Другим важным направлением работы в космологии в последние 10 лет жизни ЯБ было построение приближённой теории “космической паутины”. Здесь он тесно работал с С.Ф. Шандариным. Они много взаимодействовали с замечательным математиком В.И. Арнольдом и знаменитыми эстонскими астрофизиками Я.Э. Эйнасто и Э. Сааром. Лишь один человек в Москве в группе ЯБ работал с ним ранее в Сарове. Это был А.Г. Дорошкевич. В группе он выделялся глубиной понимания физики и тем, что рано осознал важность вычислительных методов и проявил большие способности и интерес к вычислениям и моделированию. Отметим, что в 1960–1970-е годы ЯБ писал не только новые оригинальные статьи. Он и его соавторы опубликовали много обзоров в “Успехах физических наук” и других ведущих обзорных журналах. Часть обзоров и замечательные книги по релятивистской астрофизике и космологии были написаны в соавторстве с известным специалистом в области теории относительности, ныне членом-корреспондентом РАН И.Д. Новиковым. С.И. Блинников, Н.И. Шакура и М.И. Сажин записали и опубликовали лекции ЯБ по строению и эволюции звёзд и космологии ранней Вселенной, которые он читал на физфаке МГУ. В области ОТО он много работал и с Л.П. Гришуком.

Удивительно, но в те же годы ЯБ активно исследовал заключительные стадии эволюции звёзд и коллапса — превращения их ядер в чёрные дыры и нейтронные звёзды. В этой области он тесно взаимодействовал с группой В.С. Имшенника и Д.К. Надёжина и работал с молодыми тогда аспирантами Г.С. Бисноватым-Коганом и В.М. Чечёткиным. С О.Х. Гусейновым он первым поставил вопрос о необходимости и возможности поиска чёрных дыр в тесных двойных звёздных системах. ЯБ интересовал вопрос о генерации магнитного поля во Вселенной и в астрофизических объектах. Широко известны его статьи, обзоры и книги, написанные в соавторстве с А.А. Румзайкиным, Д.Д. Соколовым и С.И. Вайнштейном. Его очень

привлекала область науки, которая сейчас в мире называется “физика астрочастиц” (astroparticle physics). Первые важнейшие работы на эту тему были написаны им в соавторстве с ныне академиком С.С. Герштейном и В.Ф. Шварцманом, одним из ближайших учеников ЯБ. Широко известны его статьи и обзоры, подготовленные совместно с А.Д. Долговым и М.Ю. Хлоповым. Выше было много сказано о вкладе ЯБ в наблюдательную космологию. У него были статьи в этой области в соавторстве с аспирантами, а затем молодыми сотрудниками В.М. Дашевским, А.Ф. Илларионовым, В.Н. Лукашем. Важно отметить, что именно в его группе М.М. Баско и А.Г. Полнарёвым были выполнены первые расчёты поляризации реликтового излучения, возникающей вблизи поверхности последнего рассеяния. ЯБ активно поддерживал первый советский космологический проект спутника Реликт-1, разрабатывавшийся под руководством И.А. Струкова и Д.П. Скулачёва.

Замечательная черта ЯБ — он не стеснялся учиться. Звонил специалистам, приглашал к себе для разговоров, писал обзоры по физике элементарных частиц в ранней Вселенной и их влиянию на её эволюцию, привлекая как специалистов в области астрономии (С.Б. Пикельнер), так и в области элементарных частиц (Л.Б. Окунь). Его интересовала возможность детектирования гравитационных волн (обзоры с В.Б. Брагинским). Он пригласил совсем ещё молодого Р.З. Сагдеева прочитать в его группе краткий курс лекций по бесстолкновительным ударным волнам применительно к космической плазме, сам в ходе лекций задавал множество вопросов и время от времени делал пространственные комментарии, извиняясь перед докладчиком. Его ученикам было удивительно видеть, как учится и впитывает новые идеи автор широко известной книги по теории ударных волн, написанной с Ю.П. Райзером. ЯБ поддерживал интерес у своих учеников к взаимодействию со специалистами в узких областях науки. Так, он направлял одного из авторов этой статьи (ещё совсем молодого) поучиться у специалистов по электрон-атомным столкновениям Л.А. Вайнштейна и И.Л. Бейгмана (ФИАН), у эксперта в области ультрафиолетовой астрономии В.Г. Курта (ГАИШ при МГУ), у блестящих теоретиков Д.А. Варшаловича и Ю.Н. Гнедина (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), у крупного специалиста в области моделирования методом Монте-Карло И.М. Соболя и специалистов в области нелинейных расчётов В.Я. Гольдина и Б.Н. Четверушкина (ИПМ им. М.В. Келдыша). Его очень заинтересовали результаты расчётов приливного взаимодействия галактик и образования галактических спиральных ветвей, выполненные выдающимися специалистами в области космической динамики академиком Т.М. Энеевым и Н.Н. Козловым совместно с Р.А. Сюняевым. Его радовали рассказы о новостях замечательной экспериментальной группы Е.П. Мазеца (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), выпол-

нившей революционные наблюдения космических гамма-всплесков и магнитаров. Такую школу проходил почти каждый из его ближайших учеников. ЯБ очень интересовала теория аккреции на чёрные дыры и нейтронные звёзды, и здесь лучшим собеседником для него был дипломник, потом аспирант и сотрудник Н.И. Шакура.

В одной статье трудно перечислить всех его научных детей, внуков и правнуков, как бы известны они сейчас ни были. Здесь упомянуты лишь те, кто тесно с ним работал, писал совместные статьи, обзоры, монографии в области космологии и релятивистской астрофизики. Влияние ЯБ на развитие астрономии и космологии в Москве трудно переоценить. Громадную роль в становлении научной молодёжи играл семинар в ГАИШ при МГУ, который он вёл вместе с В.Л. Гинзбургом и И.С. Шкловским и на который пару десятков лет каждый четверг собирались от одной до трёх сотен астрономов, физиков и математиков. На нём выступали и приходили на наиболее интересные доклады Е.М. Лифшиц, Б.М. Понтекорво, А.Д. Сахаров, И.М. Халатников. Запомнились доклады (на русском языке!) совсем молодых Малькольма Лонгейра из Кембриджа (затем директора Кавендишской лаборатории и члена Королевского общества) и Кипа Торна (профессора Калтеха, ныне члена Национальной академии наук США). До сих пор перед глазами стоит переполненный зал и опоздавшие, занимающие проходы и выглядывающие из проёмов дверей.

В этой небольшой статье рассказано лишь о нескольких космологических эффектах, носящих имя Зельдовича. В действительности число полученных им блестящих результатов, новых эффектов и открытий во многих областях физики, химии и релятивистской астрофизики столь велико, что даже перечислить их непросто. Приблизённое представление о результативности ЯБ, масштабе его вклада в науку можно получить, ознакомившись с его избранными трудами [19, 20] (в 2014 г. они были переизданы). Почти ничего мы не сказали и о чисто человеческих качествах ЯБ, масштабе его личности, способности зажечь в учениках искренний интерес к исследованиям, в какой бы области науки они ни работали. Представление об этой стороне ЯБ можно получить непосредственно из воспоминаний о нём людей, близко его знавших — его коллег, родных, друзей, учеников [17].

Р.А. СЮНЯЕВ

академик,

Институт космических исследований РАН,
sunyaev@iki.rssi.ru

С.А. ГРЕБЕНЕВ,

доктор физико-математических наук,
Институт космических исследований РАН,
grebenev@iki.rssi.ru

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зельдович Я.Б.* Распад однородного вещества на части под действием тяготения // *Астрофизика*. 1970. Т. 6. № 2. С. 319–335.
2. *Zel'dovich Ya.B.* Gravitational instability: An approximate theory for large density perturbations // *Astron. Astrophys.* 1970. V. 5. P. 84–89.
3. *Sunyaev R.A., Zel'dovich Ya.B.* Formation of clusters of galaxies: protocluster fragmentation and intergalactic gas heating // *Astron. Astrophys.* 1972. V. 20. P. 189–200.
4. *Zel'dovich Ya.B., Sunyaev R.A.* The interaction of matter and radiation in a hot-model Universe // *Astrophys. Space Sci.* 1969. V. 4. № 2. P. 285–300.
5. *Зельдович Я.Б., Курт В.Г., Сюняев Р.А.* Рекомбинация водорода в горячей модели Вселенной // *ЖЭТФ*. 1968. Т. 55. С. 278–286.
6. *Sunyaev R.A., Chluba J.* Signals from the epoch of cosmological recombination // *Astron. Nachr.* 2009. V. 330. № 7. P. 657–674.
7. *Chluba J., Sunyaev R.A.* Is there a need and another way to measure the cosmic microwave background temperature more accurately? // *Astron. Astrophys.* 2008. V. 478. P. L27–L30.
8. *Zel'dovich Ya.B., Sunyaev R.A.* The interaction of matter and radiation in a hot-model Universe. II // *Astrophys. Space Sci.* 1970. V. 7. P. 20–29.
9. *Sunyaev R.A., Zel'dovich Ya.B.* Microwave background radiation as a probe of the contemporary structure and history of the Universe // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* 1980. V. 18. P. 537–560.
10. *Sunyaev R.A., Zel'dovich Ya.B.* Small-scale fluctuations of relict radiation // *Astrophys. Space Sci.* 1970. V. 7. P. 3–19.
11. *Adam R., Ade P.A.R., Aghanim N., et al.* Planck 2015 results. I. Overview of products and scientific results // *Astron. Astrophys.* 2015. in press (arXiv:1502.01582).
12. *Harrison E.R.* Fluctuations at the Threshold of Classical Cosmology // *Phys. Rev.* 1970. D 1. 2726.
13. *Муханов В.Ф., Чибисов Г.В.* Квантовые флуктуации и “несингулярная Вселенная” // *Письма в ЖЭТФ*. 1981. Т. 33. С. 549–553.
14. *Зельдович Я.Б.* Наблюдения во Вселенной, однородной в среднем // *Астрономический журнал*. 1964. Т. 41. С. 19–24.
15. *Sunyaev R.A., Zel'dovich Ya.B.* The observations of relict radiation as a test of the nature of X-ray radiation from the clusters of galaxies // *Comments on Astrophys. Space Phys.* 1972. V. 4. P. 173–178.
16. *Sunyaev R.A., Zel'dovich Ia.B.* The velocity of clusters of galaxies relative to the microwave background — the possibility of its measurement // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1980. V. 190. P. 413–420.
17. *Яков Борисович Зельдович (воспоминания, письма, документы).* Изд. 2-е, доп. / Под ред. Герштейна С.С. и Сюняева Р.А. М.: Физматлит, 2008.
18. *Сахаров А.Д.* Начальная стадия расширения Вселенной и возникновение неоднородности распределения вещества // *ЖЭТФ*. 1965. Т. 49. Вып. 1(7). С. 345–357.
19. *Зельдович Я.Б.* Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. М.: Наука, 1984.
20. *Зельдович Я.Б.* Избранные труды. Частицы, ядра, Вселенная. М.: Наука, 1985.