

ветер «сдул» атмосферу, что и превратило планету в холодную пустыню.

Наблюдения недавно запущенного инфракрасного космического телескопа «Джеймс Уэбб» уже привели к революции в физике и химии экзопланет (рис. 7), поскольку с его помощью удалось впервые обнаружить метан и углекислый газ в атмосферах планет, вращающихся вокруг других звезд. Например, в атмосфере планеты K2-18b найдены органические молекулы, в частности диметилсульфид CH_3SCH_3 , производимый фитопланктоном на Земле, причем это у планеты, расположенной в так называемой зоне обитаемости, то есть имеющей такую орбиту, для которой возможно существование воды в жидком виде. Будущие наблюдения наверняка позволят найти экзопланеты, условия на которых очень близки к тем, что имеются на Земле.

Значение астрономии для современной цивилизации трудно переоценить. Она не только оказывает прямое влияние на повседневную жизнь (уже упоминавшийся календарь, системы глобального позиционирования), но и изменяет наше восприятие окружающего мира, а вместе с ним и наше философское его осмысление (переход от геоцентрической к гелиоцентрической системе; понятие динамической Вселенной, связь микро- и макромира). Призвание ученых состоит не только в выполнении исследований, но и в распространении знаний, популяризации науки и борьбе с невежеством. Эта миссия, как показала история, особенно актуальна для астрономов. Ведь именно таким великим людям, как Копернику и Галилею, пришлось отстаивать свои выводы, полученные в результате наблюдений за небом, и доказывать их истинность в противовес бытовавшим в то время представлениям, опирающимся на религиозную догму. Научная революция позволила заменить религиозно-мифическую космогонию окружающего нас мира, существовавшую с зарождения цивилизации, на физическую космологию, основанную на научных фактах. Все началось с необходимости уточнения календаря, а со временем привело к осознанию глобальной структуры и динамики Вселенной, сложности и утонченности разнообразных физических процессов, протекающих в ней. Но эти знания еще недостаточно распространены. Беларусь, имея высокий индекс человеческого развития, способна принимать активное участие в международной научной деятельности на равных с другими высокоразвитыми государствами и вносить свой вклад в научный прогресс. Как в свое время Европа стояла на пороге эпохи географических открытий, сегодня мы стоим на пороге великих открытий во Вселенной. ■

Темная материя и темная энергия:

ранняя и поздняя
Вселенная, проблема
параметра Хаббла



Геннадий Бисноватый-Коган, главный научный сотрудник Института космических исследований РАН, профессор Московского инженерно-физического института (МИФИ), доктор физико-математических наук, профессор

Со времен Коперника, и особенно Джордано Бруно, Вселенная рассматривалась учеными как бесконечная, покоящаяся субстанция, в которой действуют законы физики. В рамках ньютоновской гравитации построить ее статическую модель не удавалось, поэтому Эйнштейн пересмотрел ньютоновскую модель и заменил ее теорией, получившей название





«общая теория относительности» (ОТО). В нашей окрестности, вплоть до размеров скопления галактик, эта теория сводилась к ньютоновской, но в применении к сколь угодно большим расстояниям, включая бесконечные, ньютоновская теория приводила к абсурду. В частности, вступала в противоречие с уже признанной специальной теорией относительности и ее постулатом ограничения величины скорости – скоростью света. Главной целью Эйнштейна при создании ОТО было построение на основе своих уравнений непротиворечивой модели бесконечной статической Вселенной. В первом варианте теории этого сделать ему не удалось. Тогда он дополнил ее космологической постоянной Λ , которая не нарушала стройности всей концепции и давала надежду на достижение цели. Эйнштейн получил в статической модели решение для бесконечной Вселенной, но оно оказалось неустойчивым, так как малейшее возмущение в ней приводило либо к неограниченному сжатию, либо к постоянному ее расширению. Статическое решение существовало только при одном выделенном значении

плотности материи, гравитация которой везде компенсирует действие Λ , создающей антигравитацию. Ввиду постоянства этой величины случайное увеличение плотности приведет к преобладанию гравитации, что влечет неограниченное сжатие, а уменьшение – к антигравитации и переходу к состоянию неограниченного расширения.

Антигравитационное действие Λ было обнаружено голландским астрономом и физиком В. де Ситтером, который построил экспоненциально расширяющуюся модель пустой Вселенной с космологической постоянной, названной его именем. Эта модель послужила, видимо, отправной точкой для создания А.А. Фридманом расширяющихся моделей. Его космологические решения были опубликованы в 1922–1924 гг. и поначалу были отрицательно восприняты Эйнштейном, который продолжал верить в стационарность Вселенной, хотя потом он признал правоту Фридмана. После открытия Хабблом закона расширения в однородной Вселенной с линейной зависимостью скорости разбегания галактик от расстояния ($v=Hr$), Эйнштейн окончательно поверил в ее нестационарность, закон расширения которой следовал из решений Фридмана, подтвержденных через несколько лет в Европе бельгийским космологом, аббатом Ж. Леметром. Его работы получили популярность и на время оставили в тени пионерные работы А.А. Фридмана. Космологические решения Фридмана включали в себя большой круг моделей, в том числе открытые, плоские (бесконечные) и закрытые (конечные) модели Вселенной, а также однородные модели с веществом и космологической постоянной. Физиче-

скими параметрами, их разделяющими, являются параметр Хаббла H , определяющий скорость разбегания галактик, и усредненная плотность вещества в нашей окрестности однородной Вселенной ρ_0 . Оба они зависят от космологического времени, но на протяжении отрезков времени, измеряемых годами, веками, тысячами, меняются так мало, что их можно считать постоянными. В связи с этим параметр Хаббла H в современную эпоху принято называть постоянной Хаббла H_0 . В течение почти 50 лет работа над определением этих двух параметров была основной задачей физической космологии, так как от их соотношения зависит структура Вселенной и ее дальнейшая судьба. Определение постоянной Хаббла H_0 требует независимых измерений скоростей как можно более далеких галактик и расстояний до них. Скорости разбегания вычисляются довольно просто, по красному смещению линий, наблюдаемых в спектрах улетающих галактик. Намного более трудной задачей является оценка расстояний, чем многие годы занимаются различные научные группы. При этом используется метод «лестницы расстояний», в котором задействованы все более яркие стандартные свечи – объекты с известной светимостью. Этот метод позволяет вычислить расстояния до относительно близких объектов (в пределах тысяч парсек) и не свободен от систематических ошибок, связанных с неизбежным разбросом светимостей стандартных свечей. Применение разных ступеней в этой лестнице разными группами привело в 1972–1974 гг. к существенному расхождению значений H_0 у разных групп исследователей: от ~50 км/с/Мпс – Сэндеджа-Таммана, до ~100 км/с/Мпс – Вокулера.

Со временем измерения H_0 на красных смещениях вплоть до десятков мегапарсек были существенно улучшены благодаря созданию больших телескопов, включая измерения на аппарате миссии Хаббла, что позволило сузить интервал значений до $H_0 \approx 72-75$ км/с/Мпс.

Наблюдательное определение средней плотности Вселенной представляет собой еще более сложную задачу. Это связано с сильной неоднородностью видимого распределения плотности, температуры вещества, которое, наряду с неоднородным газообразным состоянием, представлено в виде звезд, галактик различного типа, скоплений и сверхскоплений галактик. Открытия, благодаря которым было установлено, что наша Вселенная горячая, и теоретические расчеты нуклеосинтеза химических элементов на ранних стадиях расширения помогли сделать определенный вывод о том, что современная плотность барионного вещества составляет примерно 4% от критической плотности ρ_c , при которой Вселенная является плоской.

Этот вывод основывался на наблюдательных определениях содержания дейтерия в различных звездах и газовых туманностях. Считается, что со времени Большого взрыва данное значение может только уменьшаться, поэтому максимальная измеренная величина соответствует нижнему пределу плотности первичного дейтерия. Его содержание растет с уменьшением плотности барионов, поэтому величина в 4% считается ее верхней границей, принимаемой сейчас за истинную.

Выводы о том, что средняя плотность барионов во Вселенной столь мала, приводили в смущение некоторых теоретиков-кос-

мологов. Это может свидетельствовать о том, что мы живем в открытой Вселенной, и ее полная энергия положительна. Полуфилософские рассуждения о возможном рождении в результате огромной квантовой флуктуации Вселенной из вакуума имели какой-то смысл в том случае, если она появилась плоской. Обладая нулевой полной энергией, ее рождение не нарушало бы законов сохранения.

После открытия реликтового излучения появилась возможность исследований флуктуаций плотности, приводящих к образованию окружающей нас неоднородной Вселенной. Их рост происходит в результате гравитационной неустойчивости, определяющей увеличение амплитуды малых возмущений, существующих в однородной Вселенной из-за квантовых эффектов и достигающих больших амплитуд на нелинейных стадиях развития. После рекомбинации вещества в расширяющейся Вселенной на больших $z \sim 1100$ излучение, не подверженное гравитационной неустойчивости, свободно проходит расстояние вплоть до нашего времени. При этом сохраняется относительная амплитуда возмущений реликтового излучения, которая примерно равнялась возмущениям плотности барионов на то время. Рост этих возмущений после рекомбинации приводит к образованию современной крупномасштабной структуры Вселенной. Для того чтобы это произошло, необходимо, чтобы на момент рекомбинации амплитуда возмущений была достаточной для возможности достижения наблюдаемой нелинейной стадии. В модели Фридмана с пылевым веществом необходима относительная амплитуда возмущений плот-

ности оценивалась не менее 10^{-4} . В 1973 г. на радиотелескопе РАТАН в САО были получены результаты измерений, позволившие выявить верхнюю оценку амплитуды флуктуаций температуры (плотности) реликта в $\Delta T/T \sim 4 \cdot 10^{-5}$, что противоречило теоретическим требованиям более чем в 2 раза. Кроме того, теоретические работы по росту квантовых возмущений известной начальной амплитуды показали, что к моменту рекомбинации теоретическая величина относительной амплитуды возмущений во фридмановской модели оказывалась на несколько порядков меньше необходимой.

В 1981 г. была предложена существенная модификация модели Фридмана, в рамках которой были решены основные противоречия теории с наблюдениями. В новой модели, получившей название инфляционной, предлагалось допустить, что при своем рождении Вселенная не содержит вещества, а состоит только из гипотетического скалярного поля. Его действие эквивалентно действию (Λ) и приводит к экспоненциально быстрой начальной стадии расширения, в процессе которого энергия скалярного поля превращается в вещество, и в итоге Вселенная переходит к классической фридмановской стадии. Модификация здесь касалась не космологического решения Фридмана, а состояла в использовании нового тензора энергии импульса в правой части уравнений Эйнштейна, в котором начальное скалярное поле при экспоненциальном расширении (стадия де Ситтера) превращается в вещество и продолжает расширение по модели Фридмана.

В последующие годы началось интенсивное экспериментальное изучение Вселенной с помощью наблюдений со спутников и боль-

ших земных телескопов. Основные исследования касались временности параметра Хаббла со временем, значений флуктуаций реликтового излучения, зависимости их амплитуд от размера возмущений, а также определения других параметров Вселенной, состава вещества, его плотности, плотности энергии различных ее компонент в зависимости от космологического времени. На основе теоретического анализа все эти данные, включая параметр Хаббла, были установлены при анализе наблюдений флуктуаций реликтового излучения на спутниках WMAP (2001–2009 гг.) и Planck (2009–2013 гг.). С помощью сложной процедуры, включающей пересчет характеристик, измеренных на стадии рекомбинации при $z \approx 1100$ к настоящему времени $z=0$, используя полученную модель Вселенной, на основе данных со спутника Planck были получены значения следующих параметров:

- современное значение постоянной Хаббла, измеренное по реликтовому излучению, $H_0^{Dist} \approx 67,5 \text{ км/с/Мпк}$;
- космологическая постоянная, полученная из тех же дистанционных измерений, $-\Lambda = 8\pi G\rho_\Lambda/c^2 \approx 1,4 \times 10^{-56} \text{ см}^{-2}$.

Следует отметить, что первые пионерные наблюдения флуктуаций реликтового излучения были проведены экспериментом «Реликт» на борту советского спутника «Прогноз-9» в 1983–1984 гг. Он обладал довольно ограниченными возможностями, поэтому создавался другой, гораздо более совершенный прибор, но воплотить в жизнь эти планы не удалось.

В последние годы прошлого века были выполнены два больших наземных международных проекта по оценке измене-

ний параметра Хаббла со временем. Для этого измеряли скорости разлета далеких объектов (галактик), а также независимо определяли расстояния до них. Было задействовано несколько больших оптических телескопов из различных стран, проводивших спектральные наблюдения сверхновых СН Ia для нахождения скоростей разлета v , и наблюдательные построения кривых блеска, по форме которых для СН Ia можно было найти их собственные светимости L . Все это позволяло рассчитывать расстояния до этих объектов.

Важнейший вклад в решение этой проблемы сделан российским астрофизиком Ю.П. Псковским, который решил две фундаментальные астрономические проблемы. В 1968 г. ученым отождествлены линии в спектрах сверхновых звезд этого типа, не поддававшиеся идентификации в течение 84 лет. Вторая фундаментальная работа 1977 г. устанавливала связь кривой блеска сверхновой СН Ia с ее полной светимостью, позволяя независимо определить расстояние до нее. Зависимость $L(v, z)$ и $L(z)$ различны для разных моделей Вселенной, поэтому, зная теоретически эти зависимости, можно подобрать теоретическую модель, для которой эта зависимость лучше всего совпадает с наблюдаемой. Оказалось, что модель должна содержать член, эквивалентный постоянной Эйнштейна, названный темной энергией – dark energy ($T\mathcal{E}$ – DE). Из последующих наблюдений флуктуаций реликтового излучения было получено наиболее точное к настоящему времени значение плотности DE , указанное выше. Из этого же следовало, что полная средняя плотность равна критической ρ_c , а основной вклад

в нее в настоящую эпоху вносит темная энергия, так что $\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda / \rho_c \approx 0,7$. Из независимых измерений плотности барионов получалось, что $\Omega_b = \rho_b / \rho_c \approx 0,04$, а примерно 26% плотности вещества составляет TM – DM , вещество неизвестной природы, проявляющей себя только в гравитации $\Omega_{dm} = \rho_{dm} / \rho_c \approx 0,26$. Наблюдательные указания на существование невидимой гравитирующей субстанции были впервые получены в конце 30-х гг. прошлого столетия швейцарским астрофизиком Ф. Цвикки, который обнаружил, что скорости движения галактик в скоплениях намного превышают скорости, рассчитанные по теореме вириала для равновесных скоплений при известной величине отношения светимости галактик к их массе. Это указывало на существование невидимой гравитирующей материи, которая была названа *скрытой массой*. Примерно через 30 лет были проанализированы наблюдения скоростей движения карликовых спутников вокруг больших галактик, в частности вокруг Млечного пути. Эти скорости сильно отклонялись от кеплеровских, которые ожидалось ввиду значительного превышения массы Галактики над ее спутниками. Тем не менее скорость вращения спадала значительно медленнее кеплеровской, что указывало на наличие невидимого гравитирующего вещества за ее пределами.

Проведены специальные наблюдения по выявлению зависимости от радиуса скоростей вращения вещества в дискообразных галактиках. Измерения делали там, где она предположительно полностью определялась тяготением массивного сферического гало исследуемых галактик. И здесь в большинстве объектов все скорости вращения спадали

значительно медленнее кеплеровских (вириальных), что также указывало на присутствие невидимого гравитирующего вещества, которое сейчас называется темной материей.

Ввиду большого разброса в формах кривых вращения и неопределенности значений многих параметров не было возможности определить средние количественные характеристики ТМ, необходимые для построения космологической модели. Как отмечалось выше, количественные значения были получены из анализа флуктуаций реликтового излучения. После этого возникло представление о том, что картина расширяющейся Вселенной, построенная на основе этих результатов, близка к реальности. Тот факт, что природа ТМ непонятна, а природа ТЭ в виде постоянной Эйнштейна, как следует из наблюдений, допускает возможность небольших отклонений от постоянной величины, не очень тревожил космологов. Для создания модели достаточно было знать наблюдательные проявления, связанные с существованием ТМ и ТЭ вне зависимости от их физической природы.

Эта благодатная картина, на основе которой оптимисты называют наше время «эрой точной космологии» («precision cosmology era»), несколько лет назад столкнулась с противоречием, которое не объясняется на основе данной модели. Проблема, возникшая в последние годы, состоит в различии значений постоянной Хаббла в настоящую эпоху, получаемых в различных экспериментах. Анализ наблюдений миссии Planck, измеряющей флуктуации реликтового излучения в период рекомбинации, приводит к современному значению постоянной Хаббла:

$$H_0^{Dist} \approx 67,5 \text{ км/с/Мпк.}$$

В то же время наблюдательные значения H_0^{Loc} , полученные с использованием сверхновых типа CN Ia (SN Ia), с калибровкой расстояния по цефеидам и других локальных измерений, дают значение $H_0^{Loc} \approx 73 \text{ км/с/Мпк}$. Анализ данных на малых и больших красных смещениях показывает, что несоответствие между результатами Planck и любыми независимыми измерениями в поздней Вселенной, названное хаббловским несоответствием – *Hubble tension (HT)*, лежит в интервале между 4σ и 6σ, то есть является статистически значимым. Было предложено много объяснений возникновения HT, часть из которых уже опровергнута наблюдательными данными. Общепринятого и доказанного экспериментального решения данной проблемы в настоящее время нет. Имеется около сотни предложений, которые меняют процесс эволюции Вселенной до или после рекомбинации либо представляют идеи, основанные на модификациях ОТО.

В нескольких работах автор данной статьи рассматривает космологическую модель, в которой DE может иметь два компонента, один из которых – постоянная Эйнштейна (Λ), а другой – меньший переменный компонент DEV (Λ_V) – связан с остатком вызвавшего инфляцию скалярного поля после того, как основная его часть превратилась в вещество. Анализировались только стадии эволюции Вселенной после рекомбинации ($z \leq 1100$), где DM – преобладающий компонент вещества. Предполагается, что взаимные превращения скалярного поля в вещество и обратно продолжаются и в современную эпоху. Получено решение для космологической модели в предположе-

нии линейной связи между плотностями DM и DEV после рекомбинации $\rho_{DM} = \alpha \rho_{DEV}$, а также варианты с зависимостью величины α от красного смещения z коэффициента $\alpha(z)$. В данной схеме HT может быть объяснено отклонением существующей космологической модели от применяемой общепринятой Λ CDM плоской Вселенной, действием добавочного компонента темной энергии DEV на стадиях после рекомбинации. При этом истинной принимается усредненная величина H_0 , полученная в локальных измерениях.

Для того чтобы определить влияние малой добавки DEV на результат расчета современного значения H_0 из измерений на момент рекомбинации, были рассчитаны космологические модели с учетом компонента DEV на интервале $0 < z < 1100$.

Рассчитывая современную H_0^{Dist} с использованием космологической модели, находим значение постоянного параметра α_{HT} , при котором $H_0^{Dist} = H_0^{Loc}$, что решает HT-проблему. Из расчетов следует, что при сохранении постоянного отношения плотности скалярного поля к плотности вещества после рекомбинации HT-проблема устраняется при $\alpha_{HT} \approx 24$. Это соответствует современному значению $\Omega_{DEV} \approx 0,0125$, что составляет менее 2% от современного вклада DE в плотность энергии Вселенной. Было показано, что при переменной функции $\alpha(z)$ ее современное значение, устраняющее парадокс, может быть уменьшено еще в ~3 раза при соответствующем выборе $\alpha(z)$.

Подробное изложение указанного решения HT-парадокса можно найти в статье автора с А.М. Никишиным, опубликованной в «Астрономическом журнале» в 2023 г. [1]