ЧАСТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ КОЛЛЕДЖ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

ЛЕКЦИЯ 8. ТЕМА 7. ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Строение и развитие Вселенной

Современная космология рассматривает Вселенную как единое целое, описываемое общей теорией относительности А. Эйнштейна (1915) и уравнениями Фридмана (1922). Наблюдаемая Вселенная — это область радиусом порядка 46,5 млрд световых лет (с учётом космологического расширения), содержащая около двух триллионов галактик. Материя в ней распределена в виде иерархической структуры: галактики входят в группы и скопления, скопления — в сверхскопления, а те образуют филаменты (галактические «стены») и войды — гигантские пустоты, разделённые тонкими перемычками материи.

Согласно актуальным данным космологической модели ΛCDM, параметры которой определены миссией Planck (2018), энергетический состав Вселенной выглядит следующим образом: тёмная энергия — около 68–69%, тёмная материя — около 27%, обычное (барионное) вещество — около 5%. Возраст Вселенной оценивается в 13,8 млрд лет. Момент начала расширения принято обозначать термином «Большой взрыв»; следует подчеркнуть, что это не взрыв в заранее существующем пространстве, а стартовое состояние самого пространства-времени, в котором все расстояния между точками росли одновременно.

Расширяющаяся Вселенная и закон Хаббла

Ключевым эмпирическим фактом является закон Хаббла — Леметра: скорость удаления галактики пропорциональна расстоянию до неё:

$$v = H_0 \cdot D,$$

где H_0 — постоянная Хаббла. Важный нюанс: расширяется не пространство «внутри» галактик (связанное гравитацией), а само метрическое пространство между sufficiently удалёнными объектами. Открытию расширения предшествовали наблюдения В. Слайфера (красное смещение галактик, 1910-е) и работы Э. Хаббла с М. Хьюмасон (1929).

Современное значение H_0 остаётся предметом так называемого «космологического напряжения»: измерения по реликтовому излучению дают $H_0 \approx 67{,}4$ км/с/Мпк, а наблюдения цефеид и сверхновых в близких галактиках — около 73 км/с/Мпк. Это расхождение в несколько стандартных отклонений пока не объяснено окончательно и рассматривается как возможный признак неполноты стандартной модели.

Модель горячей Вселенной

Теория горячей Вселенной, восходящая к работам Г. А. Гамова (1948), описывает раннюю Вселенную как состояние с очень высокой плотностью и температурой. Основные этапы:

1. **Планковская эпоха** (t~10−43*t*~10−43 с): описывается квантовой гравитацией; современная физика не имеет полного аппарата для этого периода.
2. **Инфляция** (t~10−36–10−32*t*~10−36–10−32 с): сверхбыстрое экспоненциальное расширение, объясняющее крупномасштабную однородность и плоскостность Вселенной (модель А. Гуса, 1981).
3. **Адронная и лептонная эры**: формирование протонов и нейтронов; при аннигиляции барионов и антибарионов сохраняется небольшой барионный избыток (асимметрия вещества и антивещества).
4. **Первичный нуклеосинтез** (первые ~3–20 минут): синтез ядер водорода, гелия-4 (около 25% по массе), дейтерия и лития-7. Рассчитанные abundances согласуются с наблюдениями — это одно из трёх классических подтверждений модели.

5. **Рекомбинация** (~380 000 лет): объединение электронов и ядер в нейтральные атомы; Вселенная становится прозрачной, образуется реликтовое (космическое микроволновое) излучение с температурой 2,725 К — второе классическое подтверждение (открыто А. Пензиасом и Р. Вильсоном в 1965 году).

6. **Тёмные века и реионизация** (~100–400 млн лет): формирование первых звёзд и галактик.

7. **Ускоренное расширение** (последние ~6 млрд лет): вызвано тёмной энергией; обнаружено по далёким сверхновым типа Ia (1998, группы Райсса и Перлмуттера), за что была присуждена Нобелевская премия 2011 года.

Понятие о космологии и проблема бесконечности

Космология — раздел астрономии и физики, изучающий происхождение, структуру и эволюцию Вселенной как целого. Она опирается на космологический принцип: Вселенная однородна и изотропна в больших масштабах. Вопрос о бесконечности Вселенной остаётся открытым: наблюдения подтверждают пространственную плоскостность (кривизна близка к нулю), что совместимо как с бесконечной, так и с конечной, но неограниченной топологией. Наука оперирует понятием наблюдаемой Вселенной; за её горизонтом, согласно современным данным, расширение продолжается — это не опровергнуто и не может быть проверено наблюдениями. «Вечная» инфляционная модель допускает существование множества областей (мультиверс), однако эта гипотеза пока не имеет эмпирических подтверждений.

Наша звёздная система — Галактика

Млечный Путь — спиральная галактика с перемычкой (тип SBbc) диаметром около 100 000 световых лет (30 кпк) и массой порядка 10121012 солнечных масс, из которых большинство принадлежит тёмной материи. Структура Галактики:

• **Ядро и балдж** — центральное утолщение; в центре находится сверхмассивная чёрная дыра Стрелец A* массой около 4 млн солнечных масс (её существование подтверждено движением звёзд, за эти работы присуждена Нобелевская премия 2020 года; в 2022-м получено радиоинтерферометрическое изображение тени).

• **Диск** с спиральными рукавами, в котором расположены молодые звёзды, облака газа и пыли; толщина тонкого диска — порядка 1000 световых лет.

• **Гало** — сферическое окружение из старых звёзд и шаровых скоплений.

Солнце находится на расстоянии около 26 000 световых лет от центра, на внутреннем крае рукава Ориона, и обращается по галактической орбите со скоростью примерно 230 км/с, совершая полный оборот за 225–250 млн лет (галактический год).

Другие галактики

Галактики классифицируются по хаббловской «камертонной» схеме: эллиптические (E), линзовидные (S0), спиральные (S — нормальные, SB — с перемычкой), неправильные (Irr). Ближайшая крупная галактика — туманность Андромеды (M31), спиральная система на расстоянии около 2,5 млн световых лет, сближающаяся с нами со скоростью порядка 110 км/с: примерно через 4–4,5 млрд лет ожидается её слияние с Млечным Путём. Существуют также карликовые галактики (например, Магеллановы Облака — спутники нашей Галактики) и активные ядра: квазары, сейфертовские галактики, радиогалактики, энерговыделение которых обеспечивается аккрецией вещества на сверхмассивные чёрные дыры. Число сверхмассивных чёрных дыр в центрах галактик считается универсальным явлением — они есть и в нашей Галактике, и в Андромеде, и в большинстве крупных систем.

Происхождение и строение галактик

Галактики сформировались в ходе иерархической гравитационной агрегации: первичные возмущения плотности реликтового излучения (обнаруженные космическим телескопом COBE в 1992 году и детально картированные WMAP и Planck) стали зародышами тёмноматериальных гало, в которые затем стягивался барионный газ,

рождающий звёзды. Первые галактики наблюдаются на красных смещениях $z \sim 10$ и выше; телескоп James Webb (JWST) зафиксировал галактики, существовавшие менее чем через 300–400 млн лет после Большого взрыва. Часть обнаруженных ранних галактик оказалась массивнее, чем предсказывала стандартная модель, — это активная область современных исследований. Эволюция галактик шла преимущественно через слияния: каждое крупное слияние сопровождается вспышкой звёздообразования и ростом центральной чёрной дыры.

Эволюция звёзд

Звёзды образуются из гравитационно неустойчивых фрагментов молекулярных облаков. Сжатие протозвёздного сгустка сопровождается ростом температуры; когда в ядре достигается температура порядка 10 млн К, начинается термоядерное превращение водорода в гелий — звезда становится звездой главной последовательности. Дальнейшая эволюция определяется начальной массой:

• **Малые массы** (менее 0,8 солнечной массы): красные карлики сжигают водород сотни миллиардов и более лет; ни один красный карлик во Вселенной ещё не завершил свою эволюцию.

• **Звёзды солнечной массы**: после исчерпания водорода в ядре образуется красный гигант, затем происходит сброс оболочки — формируется планетарная туманность, а ядро становится белым карликом, поддерживаемым давлением вырожденного электронного газа (согласно диаграмме Герцшпрунга — Рессела и наблюдениям).

• **Массивные звёзды** (более 8–10 солнечных масс): последовательное горение углерода, кислорода, кремния вплоть до железа; термоядерные реакции на железе энергетически невыгодны, ядро коллапсирует, оболочка сбрасывается в результате взрыва сверхновой типа II, а остатком становится нейтронная звезда (при массах ядра 1,4–2 солнечных масс) либо чёрная дыра.

• Белые карлики в тесных двойных системах при превышении предела Чандрасекара (1,4 солнечной массы) дают вспышку сверхновой типа Ia — «стандартной свечи» космологии.

Диаграмма Герцшпрунга — Рессела (зависимость «светимость — температура») — фундаментальный инструмент звёздной астрофизики, отражающий распределение звёзд по стадиям эволюции.

Гипотеза происхождения Солнечной системы

Господствующей является небулярная гипотеза, восходящая к идеям И. Канта и П. Лапласа и развитая современными моделями (в России — В. С. Сафронов, О. Ю. Шмидт). Солнечная система сформировалась около 4,6 млрд лет назад из вращающегося газопылевого облака (солнечной туманности), сжатие которого, вероятно, спровоцировал удар одной или нескольких сверхновых (в метеоритах обнаружены изотопы продуктов распада алюминия-26 — свидетельство вклада взрыва сверхновой). В центре образовалось Солнце; в протопланетном диске происходила конденсация пыли, агрегация в планетезимали и затем в протопланеты. Внутренняя зона (ближе к Солнцу) сформировала планеты земной группы — Меркурий, Венеру, Землю, Марс; за «снеговой линией» — газовые гиганты Юпитер и Сатурн, а также ледяные гиганты Уран и Нептун. Возраст Солнечной системы определяется радиометрическим датированием метеоритов — древнейших хондритов (4,567 млрд лет).

Отдельного внимания заслуживает Земля: она возникла путём аккреции примерно за 10–100 млн лет; Луна, по современной модели (гигантское столкновение с протопланетой Тейей, гипотеза Хартмана и Кэмерона), образовалась около 4,5 млрд лет назад в результате столкновения Земли с планетой размером с Марс.

ЧАСТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ КОЛЛЕДЖ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

Термоядерный синтез

Термоядерным синтезом называются реакции слияния лёгких ядер в более тяжёлые, сопровождающиеся выделением энергии. В звёздах основная реакция — превращение водорода в гелий:

$4\,^1\mathrm{H} \rightarrow\ ^4\mathrm{He} + 2e^+ + 2\nu_e + \gamma$ (суммарный выход энергии — 26,7 МэВ на каждый образованный атом гелия).

В звёздах главной последовательности реализуются два механизма: протон-протонный цикл (доминирует в звёздах с массой ниже ~1,5 солнечной) и CNO-цикл (углеродно-азотный, доминирует в более массивных звёздах). В красных гигантах и сверхгигантах идут «горение» гелия через тройную гелиевую реакцию $3\,^4\mathrm{He} \rightarrow\ ^{12}\mathrm{C}$ с последующим образованием кислорода, неона и более тяжёлых элементов; элементы тяжелее железа синтезируются в основном при взрывах сверхновых (r- и s-процессы нейтронного захвата) и при слияниях нейтронных звёзд (подтверждено гравитационно-волновым событием GW170817, 2017).

Энергия Солнца и звёзд

Солнце излучает мощность около 3,8×10263,8×1026 Вт; светимость обеспечивается ядерным сжиганием примерно 600 млн тонн водорода в секунду, из которых около 4 млн тонн массы переходит в энергию согласно соотношению Эйнштейна E=mc2*E*=*mc*2. Светимость и температура звезды на главной последовательности связаны с массой; время жизни пропорционально M−2,5*M*−2,5 для солнцеподобных звёзд. Энергия переносится из ядра лучистым (фотонным) путём в радиационной зоне (занимающей до 70% радиуса Солнца) и конвекцией во внешних слоях; путь фотона от ядра до поверхности занимает порядка сотен тысяч лет (оценки варьируются в диапазоне от десятков тысяч до сотен тысяч лет из-за многократных переизлучений).

Проблема термоядерной энергетики

Управляемый термоядерный синтез рассматривается как потенциальный источник практически неисчерпаемой энергии. Основные направления:

1. **Магнитное удержание** — токамаки и стеллараторы. Наиболее значимый международный проект — ИТЭР (Индия, Евросоюз, Китай, Корея, Россия, США, Япония), сооружаемый во Франции; цель — получение плазмы с десятикратным превышением подводимой энергии. Российский токамак Т-15МД вступил в строй в 2025 году. Рекорд по отношению энергий был установлен на установке JET (2021–2022, 69 МДж за импульс), а эксперимент NIF (США) в 2022–2023 годах продемонстрировал энерговыход, превышающий энергию лазерного «запала» при инерционном удержании.
2. **Инерционное удержание** — лазерный и ионный «поджим» мишени.

Ключевые технические проблемы: достижение стабильной высокотемпературной плазмы (T~100–150*T*~100–150 млн К), удержание её длительное время, подбор конструкционных материалов, устойчивых к потокам нейтронов, замкнутость топливного цикла по тритию и экономическая целесообразность. Топливом может служить дейтерий (его запасы в океане практически неограниченны) в смеси с тритием или, в перспективе, чистый дейтерий; продукты реакции не являются долгоживущими радиоактивными отходами, а реакция не приводит к неуправляемой цепной реакции, что снижает риски по сравнению с атомными станциями деления.