

# ЛЕКЦИЯ №1 ВВЕДЕНИЕ В АСТРОФИЗИКУ

## ПЛАН

1. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ В АСТРОФИЗИКЕ.
  - 1.1 РАССТОЯНИЯ.
  - 1.2 ХАРАКТЕРНЫЕ ВРЕМЕНА.
  - 1.3 ХАРАКТЕРНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ МАСС.
  - 1.4 СОЛНЕЧНЫЕ ЕДИНИЦЫ.
2. СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА ВО ВСЕЛЕННОЙ.

# 1. Пространственно-временные масштабы в астрофизике.

## 1.1 Расстояния.

Расстояние до объекта является одной из основных характеристик, которые определяются из астрономических наблюдений. Для измерения расстояний в зависимости от рассматриваемой ситуации или задачи в современной астрофизике используется ряд внесистемных единиц. Это связано с тем, что рассматриваемый диапазон величин различается на десятки порядков. Кратко перечислим основные единицы для измерения расстояний.

Естественной мерой расстояний в Солнечной системе служит *астрономическая единица* (а. е.);  $1 \text{ а. е.} \simeq 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см} \approx 500 \text{ световых секунд}$  — это большая полуось земной орбиты. Она была измерена по суточному параллаксу *планет*. Можно предложить другой способ определения расстояния до Солнца, основанный только на астрономических измерениях — по наблюдению годичной абберрации звезд: из-за конечности скорости света положение любого источника (звезды), измеряемого наблюдателем движущимся со скоростью  $v$ , смещается на угол  $\text{tg } \theta \simeq v/c$  в направлении движения.

(Этот эффект был открыт астрономом Дж. Брэдли в 1729 г.). Следовательно, за время одного оборота Земли вокруг Солнца (год) любая звезда на небе описывает эллипс, большая полуось которого, выраженная в радианах, есть  $\theta = v/c$ . Наблюдения дают  $\theta = 20.5''$ . Отсюда, зная скорость света, находим  $v \approx 30$  км/с и, полагая орбиту Земли круговой (на самом деле ее эксцентриситет  $e \approx 0.017$ ), определяем астрономическую единицу. Ввиду малости  $v/c$  релятивистские поправки несущественны. Весь вопрос в том, с какой точностью мы измеряем астрономическую единицу. Современный способ оценки а. е. основан на радиолокации астероидов с известными орбитами, близко подходящими к Солнцу, или на точном измерении траекторий космических аппаратов, с последующим использованием закона всемирного тяготения, связывающего ускорение тел с расстояниями до Солнца.

Характерный размер планетной системы — около 40 а. е. Это расстояние примерно соответствует большой полуоси орбиты Плутона. Мелкие ледяные тела существуют и на значительно больших расстояниях от Солнца — вплоть до десятков тысяч а. е. Современная проникающая способность крупных телескопов (например, косми-

ческого телескопа «Хаббл» или 10-метрового телескопа им. У. Кека) позволяет регистрировать на расстоянии Плутона свет Солнца, отраженный от тел с размерами в несколько десятков километров.

При определении расстояний до звезд Галактики, становится удобнее пользоваться другой единицей — парсеком (пк). *Парсек — это такое расстояние, с которого отрезок, равный большой полуоси земной орбиты, расположенный перпендикулярно лучу зрения, виден под углом 1".* Из-за годичного движения Земли положение светила на небе, находящегося на расстоянии 1 парсек, будет описывать параллактический эллипс с большой полуосью, равной 1 угловой секунде; например, для светила, расположенного в направлении, нормальном плоскости земной орбиты, т. е. в полюсе эклиптики, это будет окружность с радиусом в 1 секунду дуги. В астрономии это явление называют *годовым параллаксом*, отсюда и название единицы расстояния — *парсек*, т. е. параллакс-в-секунду. Поскольку в радианной мере  $1'' \approx 1/206265$ , находим: 1 парсек = 206265 а. е.  $\simeq 3 \cdot 10^{18}$  см.

При измерении годичного параллакса светила в секундах дуги, расстояние в парсеках до него определяется по очевидной формуле

$$d(\text{пк}) = \frac{1}{\pi''}. \quad (1.1)$$

Расстояния до ближайших звезд — несколько парсек (например, параллакс  $\alpha$  Центавра  $\pi = 0.745''$ , т. е.  $d = 1/0.745 \approx 1.34$  пк). Поскольку  $1$  пк  $\simeq 3.26$  светового года, свет от  $\alpha$  Центавра идет к нам около 4 лет. Прямое определение расстояний до звезд, основанное на измерении их годичного параллакса, ограничивается астрометрической точностью определения положения звезд на небесной сфере. Максимальная абсолютная точность определения положений звезд, достигнутая в космическом эксперименте ГИППАРКОС, составляет  $0.001''$  для звезд до 9-й звездной величины, и, таким образом, максимальное расстояние, измеряемое по параллаксам, не превышает 1 кпк.

Для определения расстояний до более далеких звезд используются различные косвенные методы, получившие совокупное название методов установления *шкалы расстояний* во Вселенной. В основе многих методов лежит определение фотометрического расстояния от светящегося объекта (например, звезды) по принимаемому потоку излучения  $F$ , если светимость (количество энергии, излучаемой за секунду) объекта  $L$  известна из других соображений. Предполагая сферическую симметрию поля излучения, получаем

$$d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}. \quad (1.2)$$

Не вдаваясь в детали, отметим один из важнейших методов определения расстояний — по цефеидам. Цефеиды — переменные звезды старого населения Галактики с массами 3–12  $M_{\odot}$ , переменность блеска которых связана с их радиальными пульсациями, возникающими на определенных этапах эволюции (см. подробнее в главе 6). Для цефеид эмпирически установлена и теоретически обоснована зависимость период–светимость, из которой по наблюдаемому периоду переменности блеска можно определить их абсолютную светимость, и по измеряемому потоку — расстояние в соответствии с формулой (1.2). Цефеиды — довольно яркие звезды, поэтому с их помощью определяют расстояния вплоть до 10–15 миллионов парсек (Мпк), до ближайших галактик.

Расстояние от Солнца до центра Галактики оценивается разными методами в 7.5 – 8 тысяч парсек (кпк). Размер типичной галактики (точнее, той области галактики, в которой наблюдается светящееся вещество — звезды, газ) — 10–20 кпк.

Расстояния до ближайших галактик определяются из наблюдений находящихся в них цефеид и ярчайших звезд некоторых других типов, светимости которых считаются известными. Спутники нашей Галактики — Большое и Малое Магеллановы Облака — расположены на расстоянии 55 кпк; туманность Андромеды (М31) — 640 кпк. Расстояние до центра скопления галактик в Деве, на краю которого располагается наша Галактика, около 15 Мпк. Другое близкое скопление галактик в созвездии Волосы Вероники расположено на расстоянии около 80 Мпк.

Расстояния  $l$  до далеких галактик определяются по красному смещению линий в их спектрах  $z = (\lambda_e - \lambda_o)/\lambda_e$  (здесь  $\lambda_e$  – длина волны света, испущенного далеким космическим источником,  $\lambda_o$  – длина волны света, зарегистрированного земным наблюдателем) с использованием закона Хаббла

$$v = H_0 l, \quad (1.3)$$

где  $H_0 = 72 \pm 5$  км/(с·Мпк) – современное значение постоянной Хаббла,  $v$  – скорость удаления галактики. В пределе малых скоростей ( $v \ll c$ )  $z \approx v/c$ . Для близких галактик метод калибруется по цефеидам. Для  $\Delta\lambda/\lambda \gtrsim 1$  понятие расстояния теряет свою однозначность и зависит от предполагаемой модели расширения Вселенной.

Важный наблюдательный факт, лежащий в основе современной космологии, состоит в *однородности* Вселенной на больших масштабах. Вселенная становится в среднем однородной и изотропной на характерных расстояниях  $\Delta L \gtrsim 100$  Мпк. Однородность на масштабах порядка  $\Delta L$  означает, что средняя плотность вещества в ячейках с размером  $\Delta L$  (в объеме  $\Delta L^3$ ) одинакова с точностью до случайных флуктуаций для любой выбранной наугад области. Изотропия означает отсутствие выделенных направлений во Вселенной.

Если выражать расстояние через промежуток времени, потребовавшийся свету для его преодоления, то объекты с максимальным известным красным смещением ( $\Delta\lambda/\lambda \approx 5-10$ ) удалены на расстояние 12–13 миллиардов световых лет. Степень удаленности от нас очень далеких объектов принято характеризовать их красными смещениями без перевода в единицы расстояний, поскольку перевод в парсеки или св. года зависит от принимаемой модели расширения Вселенной. Но до достаточно больших расстояний порядка миллиарда св. лет можно считать выполняющимся условие  $z \ll 1$ , и проблем с неоднозначностью определения физического расстояния не возникает. В расширяющейся Вселенной расстояние до объектов, доступных наблюдениям, часто характеризуют величиной, называемой хаббловский радиус. Он определяется как произведение современного возраста Вселенной на скорость света и равен  $\approx 3500$  Мпк.

В астрофизике приходится иметь дело и с весьма малыми расстояниями. Это связано с тем, что основная информация об астрофизических источниках получается из измерения потока электромагнитного излучения от различных объектов (кроме электромагнитного излучения в современной астрофизике изучается также излучение нейтрино и гравитационных волн). Электромагнитное излучение рождается на микроскопическом уровне при квантовых переходах в атомах (связанно–связанные переходы и свободно–связанные переходы), при ускоренном движении заряженных частиц в вакууме (тормозное, или свободно–свободное излучение) или в магнитном поле (циклотронное или, в случае релятивистских частиц, синхротронное излучение). Некоторые характерные размеры микрообъектов, известные из курса атомной физики, к которым мы иногда будем в дальнейшем обращаться, приведены в Приложении.

## 1.2 Характерные времена.

Приведем примеры некоторых характерных времен, возникающих в различных астрофизических задачах.

Время жизни атома в возбужденном состоянии  $\sim 10^{-8}$  с.

Сутки (период обращения Земли вокруг оси) — 24 ч  $\sim 9 \cdot 10^4$  с.

Период обращения Земли вокруг Солнца — 1 год  $\simeq 3.16 \cdot 10^7$  с.

Период обращения Солнца вокруг центра Галактики  $\simeq 230$  млн. лет.

Время жизни звезды типа Солнца порядка  $\eta \Delta M c^2 / L_{\odot} \sim 10^{10}$  лет. В этой оценке  $\eta \approx 0.007$  — эффективность ядерных реакций превращения водорода в гелий в центре Солнца,  $\Delta M \approx 0.4 M_{\odot}$  — доля массы Солнца, перерабатываемой из водорода в гелий,  $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$  г и  $L_{\odot} \approx 4 \cdot 10^{33}$  эрг/с — масса и светимость (количество излучаемой энергии) Солнца.

Современный возраст Вселенной (хаббловский возраст), по порядку величины равный обратному значению постоянной Хаббла,  $t_H \simeq 1/H_0 \approx 1.4 \cdot 10^{10}$  лет.

### 1.3 Характерные значения масс.

Массы, с которыми имеют дело в астрофизике, также различаются на много порядков.

Массы основных элементарных частиц:

$m_e \approx 10^{-27} \text{ г} \approx 511 \text{ кэВ}$  — масса электрона,

$m_p \approx 5/3 \cdot 10^{-24} \text{ г} \approx 1 \text{ ГэВ}$  — масса протона.

$m_{Pl} = \sqrt{ch/G} \simeq 10^{-5} \text{ г} \approx 10^{19} \text{ ГэВ}$  — планковская масса — максимально возможная масса элементарной частицы в рамках стандартной теории частиц.

Массы звезд:  $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$  — масса Солнца (типичной звезды).

Массы стационарных звезд лежат в пределах от  $\sim 0.1$  до  $\sim 100M_{\odot}$ .

Массы самых больших планет-гигантов типа Юпитера не превышают несколько тысячных долей  $M_{\odot}$ .

Массы галактик:  $M_{MW} \approx 10^{11} M_{\odot}$  — совокупная масса звезд и газа Млечного Пути (типичной галактики). Массы барионного вещества других галактик (включая звезды, пыль и газ) лежат в широких пределах от  $\sim 10^6 - 10^7 M_{\odot}$  до  $10^{12} M_{\odot}$ . Кроме барионной составляющей в полную массу галактик входит темная материя неизвестной природы, масса которой может в несколько раз превышать массу видимого барионного вещества.

Важным астрофизическим методом оценки массы гравитационно-связанных систем является использование теоремы вириала (см. Приложение), которая устанавливает зависимость между усредненной по времени полной кинетической энергией и потенциальной энергией системы. Например, по наблюдениям скоростей движений отдельных звезд (или галактик) в скоплении звезд (галактик) и наблюдаемым размерам скопления можно сделать вывод о полной массе (включая невидимую) этого скопления. Этот прием широко используется также при оценке масс сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик и квазаров (см. главу 11).

## 1.4 Солнечные единицы.

Обычно при изучении звезд пользуются солнечными единицами массы, радиуса и светимости:

масса Солнца  $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{33}$  г;

видимый радиус Солнца  $R_{\odot} \approx 7 \cdot 10^{10}$  см;

болометрическая светимость Солнца (мощность излучения во всем диапазоне электромагнитного спектра)  $L_{\odot} \approx 4 \cdot 10^{33}$  эрг/с.

Эти единицы удобны, однако, только когда мы рассматриваем нормальные (невыврожденные) звезды, источником энергии которых являются ядерные реакции синтеза тяжелых элементов. Когда речь заходит о компактных остатках звездной эволюции (белых карликах, нейтронных звездах или, особенно, черных дырах) для оценки характерных размеров часто используют *гравитационный радиус* тела, который зависит только от его полной массы,  $R_g = 2GM/c^2$ .

Например, радиус нейтронной звезды  $R_{NS} \sim 10\text{--}20$  км, что составляет в гравитационных радиусах  $\simeq 3\text{--}4 R_g$ . Другой пример: радиус последней устойчивой<sup>1</sup> круговой орбиты пробной частицы вокруг невращающейся (шварцшильдовской) черной дыры, от которого зависит эффективность энерговыделения при падении (аккреции) газа на черную дыру, равен  $3R_g$ .

## 2. Состояние вещества во вселенной.

Основная форма существования вещества в природе — это газ с самыми различными значениями концентрации частиц и температуры. Газ при любой плотности и температуре, на любых расстояниях от нас (за исключением планетных атмосфер) состоит из водорода и гелия с небольшим включением более тяжелых элементов. Различают плотный горячий газ, непрозрачный для излучения, с температурой от нескольких тысяч до нескольких сотен миллионов градусов, и диффузную разреженную среду. Плотный газ составляет звезды. Именно в них заключено основное количество вещества, наблюдаемого по его электромагнитному излучению, и именно звезды являются основными источниками энергии в современной Вселенной. Благодаря наличию термоядерной плазмы в центральной области звезд, энергия, образующаяся при синтезе атомных ядер, поддерживает температуру звезд и их устойчивость в течение миллионов (для наиболее массивных звезд) и миллиардов (для большинства звезд) лет. Доля вещества, приходящегося на планеты, рождающиеся вместе со звездами, ничтожно мала. Планеты состоят из плотного холодного газа или твердого вещества и его расплавов, и только на них при определенных условиях возможно зарождение и существование сложных органических соединений и жизни.

И планеты, и звезды, и галактики существуют не в абсолютной пустоте, а в разреженной среде, сложным образом взаимодействуя с ней. Принято разделять эту среду на межпланетную, межзвездную и межгалактическую. Межпланетная среда в солнечной системе — это прежде всего расширяющийся ионизованный газ внешней атмосферы (короны) Солнца. Его температура порядка миллиона градусов, а концентрация протонов — несколько атомов на  $\text{см}^3$  (на расстоянии Земли). Эта среда прозрачна для света. Как и газ, образующий атмосферу Солнца и звезд, межпланетная среда хорошо проводит ток и замагничена, что рождает сложные плазменные эффекты при ее взаимодействии с ионизованным газом комет или магнитосферами планет.

Наиболее разрежен межгалактический газ. Он наблюдается в скоплениях галактик, в которых удерживается суммарным гравитационным полем галактик и так называемой темной (или «скрытой») массой, состав которой неизвестен. Температура межгалактического газа достигает  $10^7 - 10^8$  К, поэтому его излучение принимается лишь в рентгеновском диапазоне (длина волны излучения  $\lesssim 1 \text{ \AA}$ ).

При такой температуре газ представляет собой высокоионизованную плазму практически прозрачную для света, поскольку концентрация атомов в ней очень мала —  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  см<sup>-3</sup>, что позволяет видеть сквозь газ далекие галактики (теоретически — с точностью до небольшого размытия, связанного с рассеянием фотонов на свободных электронах). При этом полная масса вещества в скоплении галактик может превышать суммарную массу всех галактик скопления.

Наиболее сложная по своим свойствам среда — межзвездная. Она крайне неоднородна на самых различных масштабах и содержит газ с очень сильно различающимися плотностями и температурами — от нескольких К (молекулярные облака) до величины порядка миллиона К (горячие пузыри разреженной плазмы, связанные со взрывом сверхновых звезд). В молекулярных облаках наблюдаются (по радио и инфракрасному излучению) достаточно сложные молекулы, вплоть до простых органических соединений. В качестве небольшой примеси (порядка 1 % по массе) в межзвездном газе присутствует мелкая пыль, поглощающая и рассеивающая свет. Поэтому в некоторых направлениях межзвездное пространство оказывается непрозрачным для света. Непрозрачными являются, например, молекулярные облака.

Защищенный от воздействия нагревающего излучения, газ внутри молекулярных облаков остывает до очень низких температур, и в нем создаются условия, приводящие к гравитационной неустойчивости и сжатию газа в звезды. Межзвездная среда пронизывается потоками высокоэнергичных частиц — космическими лучами, распространяющимися по всем направлениям. Она при этом замагничена, причем плотности энергии магнитного поля, теплового и турбулентного движения газа и энергии космических лучей сопоставимы между собой. Поскольку в межзвездной среде при любой температуре всегда присутствуют свободные электроны, среда электропроводна, и магнитное поле оказывает большое влияние на характер ее движения.

Межзвездная среда находится в состоянии непрерывного изменения и движения, как упорядоченного, так и турбулентного. В зависимости от того, как происходят процессы нагрева и охлаждения газа, какую роль играет собственная гравитация межзвездной среды и ее замагниченность, отдельные участки межзвездной среды могут охлаждаться или нагреваться, сжиматься или расширяться. Анализ наблюдений позволяет изучать, как по ним прокатываются фронты ударных волн, как возникают и испаряются облака газа и пыли, как из межзвездной среды рождаются звезды, передающие ей впоследствии часть своей массы и энергии. Весь этот сложный комплекс явлений исследуется в астрофизике.

Процессы, играющие в этих явлениях ключевую роль, от которых зависит образование и эволюция звезд и галактик, свойства и поведение разреженного газа — это прежде всего взаимодействие вещества с излучением, магнитными полями и энергичными частицами, а также гравитационное взаимодействие.