

В необычных астрофизических явлениях законы физики предстают перед исследователями в ином ракурсе, более глубоко раскрывая свое содержание.

С. Б. Пикельнер

Астрофизика — наука, занимающаяся исследованием далеких космических объектов и явлений физическими методами. Астрофизика нацелена на создание физической картины окружающего мира, объясняющей наблюдаемые явления, на изучение происхождения и эволюции как отдельных классов астрономических объектов, так и Вселенной как единого целого в рамках известных физических законов.

Поскольку прямые контакты научных приборов с изучаемыми объектами практически исключены, основу астрофизики, как и астрономии в целом, составляют наблюдения, то есть прием (детектирование) и анализ излучения далеких источников. Непосредственные результаты наблюдений, как правило, сводятся к относительным или абсолютным измерениям энергии, приходящей от источника или его отдельных частей, в определенных интервалах спектра. Интерпретация результатов наблюдений базируется на знании механизмов излучения электромагнитных волн и их взаимодействия с веществом.

Исторически астрофизика выделилась в самостоятельное научное направление с появлением в конце XIX в. спектрального ана-

лиза, который открыл возможность дистанционного исследования химического состава и физического состояния не только лабораторных, но и астрономических источников света. Наблюдения спектров звезд окончательно доказали, что астрономические тела состоят из атомов известных на Земле элементов, подчиняющихся тем же физическим законам. Химическое «единство» природы особенно наглядно было подтверждено открытием гелия — сначала (по спектру) в атмосфере Солнца, а только затем — в некоторых минералах на Земле. Современные методы исследования позволяют по спектральным особенностям излучения не только узнать состав, температуру и плотность среды, но и измерить лучевые скорости источников и скорости внутренних движений в них, оценить расстояние до них, выяснить механизм излучения, определить индукцию магнитных полей и многие другие характеристики на базе физических теорий.

Бурное развитие астрофизики за более чем столетний период ее существования было связано как с быстрым развитием различных направлений классической, квантовой и релятивистской физики — с одной стороны, так и со строительством крупных телескопов, появлением принципиально новых приемников излучения и компьютерных методов обработки наблюдений — с другой. Очень важный, революционный скачок в астрофизических исследованиях произошел с началом изучения объектов за пределами оптического диапазона спектра, сначала в радио (конец 30-х годов XX в.), а затем, уже с помощью космической техники (60–80-е годы XX в.), в далеком инфракрасном, далеком УФ, рентгеновском и гамма-диапазонах. «Многокрасочность» Вселенной обернулась более глубоким пониманием природы давно известных космических тел, а также открытием новых типов астрономических объектов, природа некоторых из них до сих пор остается малопонятной. Позднее началось развитие и нейтринной астрономии, основанной на регистрации и анализе нейтринного излучения из космоса. На очереди стоит астрономия гравитационных волн.

Важной особенностью астрофизики является то, что она исследует процессы, как правило, не воспроизводимые в физических лабораториях. К примеру, термоядерные реакции в плазме, удерживаемой от расширения собственным гравитационным полем, — это не экзотический, а самый распространенный источник энергии наблюдаемых звезд. Только в астрофизике исследуются среды с экстре-

мально низкой плотностью — менее 10^{-27} г/см³ (разреженный межгалактический газ), излучение которых, тем не менее, может приниматься благодаря большим объемам, занимаемым ими. Можно отметить также экстремально высокие плотности вещества (от нескольких тысяч г/см³ в звездах из вырожденного газа до 10^{14} — 10^{15} г/см³ в нейтронных звездах), температуры в миллиарды градусов (внутренние области аккреционных дисков), едва обнаружимые и, наоборот, предельно сильные гравитационные поля, наблюдаемые ультравысокие энергии элементарных частиц, не достижимые даже для строящихся коллайдеров, и даже не излучающую электромагнитных волн и потому невидимую «темную» материю. Все это делает астрофизические исследования неочевидными для решения фундаментальных физических проблем. Не удивительно, что почти все фундаментальные физические теории — от классической механики и ньютоновской гравитации до теории относительности и физики элементарных частиц — прошли или проходят астрономическую (астрофизическую) проверку.

Очевидно, что астрофизика неотделима от физики, так что резкой границы между ними не существует. Однако она обладает важной особенностью, заключающейся не столько в специфичности космических объектов или в необычных пространственных масштабах изучаемых явлений, сколько в исследовании формирования и эволюции астрономических тел и систем. По словам крупнейшего отечественного астрофизика И. С. Шкловского, «едва ли не основным результатом многолетних исследований астрономических объектов является утверждение о том, что все они эволюционируют».

Основной силой, определяющей характер эволюции астрономических объектов, является гравитация (что связано с их большими массами), которая в физике «земных» явлений, как правило, не имеет решающего значения или воспринимается только как наличие веса у тел. Поэтому в астрофизике очень большое внимание уделяется изучению гравитационного взаимодействия и самогравитации космических тел и сред и той роли, которую они играют в их формировании и происходящих изменениях.

Таким образом, физические свойства космических объектов, определяемые по характеру излучения, а также их происхождение и эволюция, связанная прежде всего с гравитацией, — это два основных и взаимосвязанных аспекта современной астрофизики. Именно на их изучение в первую очередь нацелен настоящий курс.

1.1. Пространственно-временные масштабы в астрофизике

1.1.1. 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.); $1 \text{ а. е.} \simeq 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см} \approx 500$ 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 аберрации 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 $v \approx 30 \text{ км/с}$ 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. $\approx 3 \cdot 10^{18}$ см. При измерении годового 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 α Центавра $\pi = 0.745''$, т. е. $d = 1/0.745 \approx 1.34$ ПК). Поскольку 1 ПК ≈ 3.26 светового года, свет от α Центавра идет к нам около 4 лет. Прямое определение расстояний до звезд, основанное на измерении их годового 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, излу-

емой 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 λ_e — длина волны света, испущенного далеким космическим источником, λ_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 скоро-

стей ($v \ll c$) $z \approx v/c$. 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 ΔL означает, что средняя плотность вещества в ячейках с размером ΔL (в объеме ΔL^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 ≈ 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.

1.1.2. 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.

1.1.3. Характерные значения масс

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

Массы основных элементарных частиц:

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

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

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

Массы звезд: $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{33}$ г — масса Солнца (типичной звезды). Массы стационарных звезд лежат в пределах от ~ 0.1 до $\sim 100 M_{\odot}$. 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).

1.1.4. Солнечные единицы

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

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

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

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

Эти единицы удобны, однако, только когда мы рассматриваем нормальные (невырожденные) 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 $R_{NS} \sim 10\text{--}20 \text{ км}$, что составляет в гравитационных радиусах $\simeq 3\text{--}4 R_g$. Другой пример: радиус последней устойчивой¹ круговой орбиты пробной частицы вокруг невращающейся (шварцшильдовской) черной дыры, от которого зависит эффективность энерговыделения при падении (аккреции) газа на черную дыру, равен $3R_g$.

1.2. 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 расстояни-

¹ В том смысле, что бесконечно малое возмущение приводит к падению частицы в черную дыру.