

Доплеровское смещение длины волны в спектре источника, движущегося с лучевой скоростью  $v_r$  и полной скоростью  $v$ , равно

$$z_D = \frac{1+v_r/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}} - 1.$$

Для чисто радиального движения красному смещению ( $z_D > 0$ ) отвечает увеличение расстояния до источника ( $v_r > 0$ ), однако при отличной от нуля тангенциальной составляющей скорости значения  $z_D > 0$  могут наблюдаться и при  $v_r < 0$ .

Гравитац. К. с. было предсказано А. Эйнштейном (А. Einstein, 1911) при разработке общей теории относительности (ОТО). В линейном относительно ньютоновского потенциала  $\phi$  приближении (см. *Всемирного тяготения закон*)  $z_g \approx (\phi_0 - \phi_e)/c^2$ , где  $\phi_e$  и  $\phi_0$  соответственно значения гравитац. потенциала в точках испускания и регистрации излучения ( $z_g > 0$  в том случае, когда в точке испускания потенциал по модулю больше). Для массивных компактных объектов с сильным полем тяготения (напр., *нейтронных звезд* и *чёрных дыр*) следует пользоваться точными  $\phi$ -лами. В частности, гравитац. К. с. в спектре сферич. тела массой  $M$  и радиусом  $r > r_g = 2GM/c^2$  ( $r_g$  — гравитационный радиус,  $G$  — гравитационная постоянная) определяется выражением

$$z_g = (1 - r_g/r)^{-1/2} - 1.$$

Первоначально для эксперим. проверки эффекта Эйнштейна исследовались спектры Солнца и других астр. объектов. Для Солнца  $z_g \approx 2 \cdot 10^{-6}$ , что слишком мало для надёжного измерения эффекта, однако в спектрах *белых карликов* ( $r \sim 10^3 - 10^4$  км,  $r_g \approx 1 - 3$  км,  $z_g \sim 10^{-4} - 10^{-5}$ ) эффект был обнаружен. В 1960 Р. Паунд (R. Pound) и Г. Ребка (G. Rebka), используя *Мессбауэра эффект*, измерили гравитац. К. с. при распространении гамма-излучения в земных условиях ( $z_g \sim 10^{-15}$ ).

Представление о космологич. К. с. возникло в результате работ (1910—29) В. Слайфера (V. Slipher), К. Вирца (K. Wirtz), К. Лундмарка (K. Lundmark) и Э. Хаббла (E. Hubble). Последний в 1929 установил т. н. *Хаббла закон* — приблизительно линейную зависимость  $z_c$  от расстояния  $D$  до далёких *галактик* и их скоплений:  $z_c \approx (H_0/c)D$ , где  $H_0$  — т. н. параметр Хаббла [совр. оценка  $H_0 \approx 75$  км/(с·Мпк) с неопределённостью до множителя 1,5].

Космологич. К. с. связано с общим расширением Вселенной и обусловлено совместным действием эффектов Доплера и Эйнштейна (для относительно близких галактик, при  $D < 10^3$  Мпк, осн. роль играет эффект Доплера). В спектрах галактик зарегистрировано макс. значение  $z_c \approx 3$ , в спектрах квазаров  $z_c \approx 4,5$  (1988). В 1965 А. Пензиас (A. Penzias) и Р. Вильсон (R. Wilson) обнаружили *микроволновое фоновое излучение* с темп-рой 2,7 К, интерпретируемое как реликт ранней стадии расширения Вселенной. Для реликтового излучения  $z_c \approx 1500$ .

Эффект К. с. в спектрах далёких галактик (эффект «разбегания» галактик) получил объяснение в рамках *нестационарной космологической модели*, основанной на ОТО (А. А. Фридман, 1922). Для нестационарной изотропной и однородной Вселенной (см. *Космология*) величина  $z_c$  связана с *масштабным фактором*  $R(t)$  в моменты испускания  $t_e$  и регистрации  $t_0$  света соотношением

$$z_c = \frac{R(t_0)}{R(t_e)} - 1.$$

Расширению Вселенной отвечает здесь  $z_c > 0$ . Закон Хаббла рассматривается как линейное приближение к последнему соотношению с  $H_0 = \dot{R}(t_0)/R(t_0)$ . Конкретный вид  $f$ -ции  $R(t)$  определяется ур-ниями гравитац. поля ОТО.

В. Ю. Терезиж, **КРАСНЫЕ ГИГАНТЫ И СВЕРХГИГАНТЫ** — относительно холодные звёзды высокой светимости с протя-

жёнными оболочками. Из-за низкой *эффективной температуры* этих звёзд ( $T_s \approx 3000 - 5000$  К) поток энергии с единицы площади их поверхности мал — в 2—10 раз меньше, чем у Солнца. Однако светимости таких звёзд может достигать  $10^5 L_\odot$ , т. е. красные гиганты (к. г.) и красные сверхгиганты (к. с.) имеют очень большие радиусы (до  $\sim 1000 R_\odot$ ) и соответственно огромные излучающие поверхности. Максимум излучения этих звёзд приходится на красную и ИК-области спектра. К. г. и к. с. относятся к звёздам *спектральных классов* K и M, III и I *светимости классов* соответственно. Абс. звёздные величины к. г. заключены в пределах  $0^m \geq M_V \geq -3^m$ , у к. с.  $M_V < -3^m$ . Характерная особенность спектров к. г. и к. с. — наличие молекулярных полос поглощения. Типичные к. г. — Арктур (ок.  $130 L_\odot$ ,  $26 R_\odot$ ) и Альдебаран ( $190 L_\odot$ ,  $25 R_\odot$ ), к. с. — Бетельгейзе ( $7 \cdot 10^4 L_\odot$ ,  $600 R_\odot$ ) и Антарес ( $5 \cdot 10^4 L_\odot$ ,  $700 R_\odot$ ).

Традиционное деление звёзд на к. г. и к. с. условно, поскольку оно отражает только различие в радиусах и светимостях звёзд при сходном внутр. строении: все они имеют горячее плотное ядро и очень разреженную протяжённую оболочку. Согласно совр. теории *эволюции звёзд*, звезда попадает в область *Герцишпрунга — Расселла диаграммы*, занимаемую к. г. и к. с., дважды. Первый раз — на время от  $\sim 10^3$  лет (для звёзд с массой  $M \approx 10 M_\odot$ ) до  $\sim 10^8$  лет (для звёзд с  $M \approx 0,5 M_\odot$ ) на стадии гравитац. сжатия, когда в звезде ещё не идут ядерные реакции (см. *Звездообразование*). Второй раз — после термоядерного сгорания в её ядре водорода, на время, к-рое составляет  $\sim 10\%$  времени жизни звезды. Звёзды с массами  $M \leq 10 M_\odot$  превращаются сначала в к. г., а затем в к. с.; звёзды с  $M > 10 M_\odot$  — непосредственно в к. с.

К. г. или к. с. имеют гелиевое ядро, окружённое тонким слоевым источником энерговыделения, в к-ром горит водород, или углеродно-кислородное ядро, окружённое двумя слоями горения — водородным и гелиевым. Ядро почти изотермично. К. с. с  $M > 8 - 10 M_\odot$  могут иметь ядра из более тяжёлых, чем кислород, элементов, вплоть до железа, но время жизни таких звёзд крайне мало — всего  $\sim 10^3$  лет. Плотность вещества в ядрах к. г. и к. с. может достигать  $10^8 - 10^9$  г/см<sup>3</sup>, темп-ра  $10^8 - 10^9$  К. Радиусы ядер при этом составляют сотые доли  $R_\odot$ . Перехос энергии в протяжённых холодных оболочках к. г. и к. с. осуществляется *конвекцией*. Конвекция может выносить в атмосферу звёзды продукты ядерного горения из неустойчивых тонких слоевых источников. Поэтому у многих к. г. и к. с. наблюдаются аномалии хим. состава, в частности повышенной содержания углерода. Для к. г. и к. с. характерна заметная потеря вещества за счёт истечения его в межзвёздное пространство (см. *Звёздный ветер*). Потери достигают  $10^{-8} - 10^{-6} M_\odot$  в год. Причиной истечения вещества может быть: давление излучения на пыль и (или) молекулы, к-рые образуются в холодных атмосферах (см. *Давление света*); пульсационная неустойчивость (см. *Пульсации звёзд*), ударные волны в звёздных коронах. Пыль, образующаяся в атмосферах к. г. и к. с., выносится в межзвёздную среду (см. *Межзвёздная пыль*). Если скорость потери вещества очень велика, то пыль в истекающем веществе может полностью экранировать звезду (не пропускать видимое излучение). Такую звезду можно наблюдать в ИК-диапазоне. Потеря вещества у звёзд с  $M < (6 - 8) M_\odot$  приводит к тому, что массы их ядер оказываются недостаточными, чтобы в них начались термоядерные реакции горения углерода. Такие звёзды превращаются в *белые карлики*, проходя перед этим стадию *планетарных туманностей*. Более массивные звёзды взрываются как *сверхновые звёзды*. В ядрах звёзд с  $M < M_\odot$  за время жизни Галактики водород не выгорел, и они ещё не превратились в к. г.

Протяжённые истекающие оболочки, подобные оболочкам к. с., могут иметь звёзды с двойными ядрами,