

раздо легче по *Доплера эффекту* — смещению линий в их спектрах в красную сторону (см. *Красное смещение*). Относит. изменение длины волны линий в спектре обозначают  $z$ :

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0. \quad (7)$$

Здесь  $\lambda_0$  — лаб. длина волны линии спектра,  $\lambda$  — длина волны смещённой линии. Наибольшее измеренное значение  $z$  у *квазаров* составляет 4,75 (на 1989). При небольших значениях  $z$  ( $z \ll 0,5$ ) для определения космологич. расстояний  $l$  пользуются простой ф-лой  $l = cz/H_0$  (Мпк) (см. *Хаббла закон*). Значение  $H_0$  известно с неопределённостью в два раза:  $H_0 = (50-100)$  км/(с·Мпк). Соответствующее значение критич. плотности  $\rho_c = (5-20) \cdot 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>. Величина  $1/H_0$  соответствует времени  $t_0$  (с точностью до порядка величины), прошедшему с момента сингулярности. Эта величина, наз. *в о з р а с т о м В с е л е н н о й*, составляет  $(10-20) \times 10^9$  лет. Сигнал, идущий со скоростью света  $c$  и вышедший в момент сингулярности, успеваеет за время  $t$  пройти конечное расстояние  $\sim ct$  (в моделях Фридмана с обычным ур-нием состояния вещества и  $\Lambda=0$ ). Сфера с радиусом  $ct$  и центром в точке наблюдения наз. *горизонтом частицы*. Она ограничивает область, доступную в принципе наблюдению в момент  $t$ .

Ещё большие трудности имеются в определении плотности  $\rho_0$ . Достаточно хорошо известна усреднённая по всему пространству плотность вещества, входящего в галактики:  $\rho_{\text{гал}} \approx 3 \cdot 10^{-31}$  г/см<sup>3</sup>,  $\Omega_{\text{гал}} \approx (1,5-6) \cdot 10^{-2}$ . Газ, пыль и др. вещество между галактиками вносит малый вклад в ср. плотность вещества. Галактики собраны в группы и скопления разных масштабов, образуя ячеисто-сетчатую крупномасштабную структуру с характерным размером практически пустых областей порядка 30—35 Мпк. Характерное расстояние (корреляц. масштаб) между скоплениями галактик составляет 25—50 Мпк, а между крупнейшими сверхскоплениями 100—300 Мпк.

Астрофизич. наблюдения определённо показывают, что помимо светящегося вещества во Вселенной имеется большое кол-во трудно наблюдаемой несветящейся материи. Её наз. *скрытой массой*. Проявляется она только своим тяготением. Скрытая масса, сосредоточенная в скоплениях галактик, оказывается часто в десятки раз больше массы светящегося вещества звёзд этих скоплений. Оценки усреднённой плотности скрытой массы дают значение  $\Omega_{\text{с.м.}}^{\text{ст}} \approx 0,2-0,7$ . Возможно, есть скрытая масса и между скоплениями галактик. Тогда не исключено, что полная плотность скрытой массы Вселенной  $\Omega_{\text{с.м.}}^{\text{вс}}$  близка к единице. Т. о., пока нельзя сказать с уверенностью, является ли наша Вселенная открытой ( $\Omega < 1$ ) или замкнутой ( $\Omega > 1$ ). Физ. природа скрытой массы неясна. Частично эта масса может быть обусловлена слабосветящимися звёздами или др. трудно наблюдаемыми небесными телами. Однако вероятнее, что скрытая масса является совокупностью большого числа элементарных частиц, обладающих массой покоя и слабо взаимодействующих с обычным веществом.

Наблюдательная  $K$ , помимо определения  $H_0$ ,  $\rho_0$  и характера распределения материи в пространстве, призвана решать и мн. др. задачи, в первую очередь выявление таких свойств современной Вселенной, к-рые непосредственно отражают физику процессов, происходивших в начале космологич. расширения.

Важнейшее значение имеет открытие и исследование реликтового излучения (РИ), оставшегося от первонач. этапа расширения Вселенной. РИ имеет одинаковую интенсивность от всех участков неба и равновесный планковский спектр (в исследованном интервале длин волн 0,1—21 см), соответствующий темп-ре  $T \approx 3$  К. Интенсивность РИ в разных направлениях практически одинакова (флуктуации темп-ры РИ  $\delta T/T$  для участков небесной сферы с размерами от неск. угл. минут до десятков градусов не превышают  $10^{-4}$ ). Отсутствие

заметных флуктуаций интенсивности РИ в больших угл. масштабах свидетельствует о высокой степени однородности Вселенной во всём доступном наблюдению объёме. Обнаружена слабая дипольная анизотропия РИ, вызванная доплеровским эффектом из-за движения Солнечной системы по отношению к РИ со скоростью ок. 400 км/с в направлении созвездия Льва.

Др. важной для  $K$ . наблюдательной информацией является космич. распространённость хим. элементов. Наиб. распространён во Вселенной водород <sup>1</sup>H, на долю к-рого приходится примерно 75% общей массы вещества, доля гелия <sup>4</sup>He составляет 25%, примесь др. элементов незначительна.

Хим. элементы тяжелее гелия образуются, по совр. представлениям, на разных этапах *эволюции звёзд*. Гелий также образуется в звёздах, однако установлено, что столь большое кол-во гелия заведомо не могло быть произведено в звёздах за всё время существования Галактики. Т. о., водород и гелий должны иметь космологич. происхождение (см. *Нуклеосинтез*). Они являются результатом ядерных реакций, происходивших в начале расширения Вселенной. Важное значение для  $K$ . имеет распространённость дейтерия <sup>2</sup>H, несмотря на малую долю в веществе Вселенной ( $\approx 3 \cdot 10^{-5}$  по массе). Дело в том, что дейтерий не может в заметных кол-вах синтезироваться в звёздах (он быстро выгорает) и, следовательно, имеет космологич. происхождение.

#### 4. Физика процессов в расширяющейся Вселенной

Наличие РИ прямо свидетельствует о том, что в далёком прошлом, в начале расширения Вселенной, темп-ра была весьма велика. Действительно, в ходе адиабатич. расширения темп-ра РИ уменьшается по закону  $T \sim R^{-1}$ . Поэтому при  $R \rightarrow 0$   $T \rightarrow \infty$ . Физику процессов в этих условиях описывает *горячей Вселенной теория*. Согласно этой теории, при  $T \sim 10^{13}$  К в термодинамич. равновесии с фотонами находились барионы, мезоны, мюоны, электроны, нейтрино и античастицы всех этих частиц. С понижением темп-ры в ходе расширения Вселенной аннигилировали тяжёлые частицы и античастицы, передавая свою энергию более лёгким частицам (см. *Аннигиляция*). По прошествии неск. десятков секунд во Вселенной остались *фотоны*, примерно такое же кол-во *нейтрино* всех сортов и, возможно, какие-то другие слабо взаимодействующие с веществом частицы, существование к-рых предполагает теория. Помимо этого во Вселенной имелась небольшая примесь *барионов* (протонов и нейтронов), для к-рых, как предполагают, не нашлось партнёров-античастиц, чтобы проаннигилировать. Это объясняется тем, что в очень горячей Вселенной имелся небольшой избыток барионов над антибарионами. Число барионов в единице объёма составляет  $\sim 10^{-9}$  от числа фотонов. Присутствуют также электроны в кол-ве, равном числу протонов (они обеспечивают электронейтральность вещества). Для нейтрино Вселенная в это время уже прозрачна. Имевшиеся на этот момент нейтрино остаются во Вселенной навечно. Эти, т. н. реликтовые, нейтрино, подобно реликтовым фотонам, из-за космологич. расширения постепенно теряют энергию («нейтринное море» охлаждается).

Важные физ. процессы происходят при расширении Вселенной с барионами. При временах  $t < 1$  с с момента сингулярности протоны и нейтроны быстро превращаются друг в друга из-за взаимодействия с электронами, позитронами, электронными нейтрино и антинейтрино. При  $t$  порядка неск. секунд эти реакции прекращаются из-за понижения темп-ры. В это время доля нейтронов составляет ок. 0,15 от всего вещества. Наконец, по прошествии неск. минут становится возможным образование сложных атомных ядер. Нейтроны, объединяясь с протонами, образуют гл. обр. ядра <sup>4</sup>He. В результате гелий составляет ок. 25% по массе, ок. 75% по массе — протоны (H), примесь др.