

В качестве возможных источников КЛ рассматриваются разл. галактич. и внегалактич. объекты: пульсары и их магнитосферы, оболочки сверхновых звёзд, нейтронные звёзды, входящие в двойные системы, ядра галактик, радиогалактики, чёрные дыры, вспышки на звёздах (в частности, *вспышки на Солнце*) и т. д. По-видимому, более предпочтительным является предположение о галактич. происхождении КЛ (по крайней мере, до энергий $\sim 10^{17}$ эВ) по следующим соображениям: 1) в Галактике имеются источники, способные обеспечить необходимую мощность генерации КЛ. Таковыми прежде всего являются вспышки *сверхновых звёзд*, при взрыве к-рых выделяется энергия до $3 \cdot 10^{50}$ эрг. Поскольку частота вспышек сверхновых в Галактике равна одной вспышке в $10-100$ лет, то ср. мощность этих процессов $\sim 10^{41}-10^{42}$ эрг/с. Если порядка 10% энергии, выделяемой при взрыве сверхновой, трансформируется в энергию ускоренных частиц, то этого достаточно, чтобы обеспечить мощность генерации КЛ $\sim 10^{40}-10^{41}$ эрг/с; 2) есть указания на то, что в Галактике существуют объекты, такие, как Лебедь X-3 и Перкулес X-1 (двойные рентг. источники), испускающие частицы с энергиями порядка 10^{15} эВ и даже 10^{18} эВ, а мощность генерации этих частиц может достигать $10^{35}-10^{38}$ эрг/с. Если, как обычно предполагается, указанные частицы являются гамма-квантами, то есть основания считать, что в указанных объектах генерируются протоны (см. *Гамма-астрономия*) с энергией, на порядок большей указанной, а мощность генерации протонов может достигать 10^{40} эрг/с; 3) ряд компонент КЛ, в частности электроны, заведомо имеют галактич. происхождение. Электроны, испущенные даже ближайшими радиогалактиками, не могут достигать Галактики из-за рассеяния на фотонах *микроволнового фоновое излучения*.

Относительно происхождения КЛ с энергиями $> 10^{17}$ эВ существуют разл. точки зрения. Наиб. распространённым является предположение о том, что эти частицы ускоряются в активных ядрах галактик. Однако не исключена возможность их галактич. происхождения.

Вопрос о конкретных механизмах ускорения КЛ остаётся до сих пор открытым. Ускорение частиц может осуществляться либо регулярными, либо флуктуационными эл.-магн. полями.

В условиях высокопроводящей космич. плазмы регулярное поле создаётся регулярными движениями, напр. такими, как орбитальные движения в двойной звёздной системе или вращение *пульсара*. В последнем случае ускорение частиц может быть обусловлено разностью потенциалов между поверхностью пульсара и «бесконечностью». Рождение электрон-позитронных пар в магнитосфере пульсара может приводить к экранированию ускоряющего эл. поля. Однако даже в этих условиях в магнитосфере имеются области, где разность потенциалов не скомпенсирована, — это т. н. внутренний и внешний зазоры, в к-рых, по-видимому, и осуществляется ускорение частиц.

Флуктуационные эл.-магн. поля могут возбуждаться в турбулентной среде. Турбулентные движения довольно часто встречаются в разл. космич. объектах, включая межзвёздную среду. В таких условиях может эффективно работать механизм, предложенный Э. Ферми (ускорение Ферми). Он реализуется при столкновении лёгкой частицы с «тяжёлыми» магн. облаками массой M , движущимися со случайными скоростями u . Предполагаются выполненные неравенства

$$v \gg u, m \ll M, mc^2 \gamma \ll Mu^2/2,$$

где $\gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$; v и m — скорость и масса частицы. При столкновении частицы с облаком она меняет свою энергию. Энергия частицы увеличивается при «встречных» столкновениях и уменьшается в случае «догоняющих» столкновений. Однако поскольку вероятность столкновений зависит от относит. скорости, то частота «встречных» столкновений (относит. скорость в одномерном случае равна $v+u$) выше частоты «догоняющих» столкновений (относит. скорость равна $v-u$). В результате энергия час-

тицы в ср. увеличивается. Изменение энергии

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} = 4M \frac{u^2}{v^2} \mathcal{E} = \alpha \mathcal{E},$$

где $1/\alpha$ — характерное время ускорения. В однородном и стационарном случаях ф-ция распределения частиц $f = dN/d\mathcal{E}$ описывается ур-нием

$$\frac{\partial}{\partial \mathcal{E}} (\alpha \mathcal{E} f) + \frac{f}{\tau} = 0, \quad (2)$$

где τ — характерное время жизни частиц в области ускорения. Из ур-ния (2) следует, что ускорение Ферми формирует степенной спектр (частиц) вида

$$f \propto \mathcal{E}^{-(1+1/\alpha)}.$$

Однако в применении к межзвёздной среде данный механизм, по-видимому, малоэффективен (по крайней мере, для частиц с энергиями, большими $1-3$ ГэВ/нуклон), поскольку характерное время ускорения намного больше времени жизни КЛ в Галактике. Возможно, этот механизм эффективен в радиогалактиках.

Скорее всего, данный механизм может реализоваться в областях с сильно развитой турбулентностью. В этой связи представляет интерес механизм ускорения частиц на фронтах *ударных волн*, к-рый близок к рассмотренному выше механизму Ферми. Ускорение реализуется в том случае, если в окрестности ударного фронта имеются к.-л. рассеивающие центры. Тогда частица, пересёкшая ударный фронт, может снова возвратиться на него за счёт рассеивания на этих центрах. При каждом пересечении ударного фронта частица набирает энергию в сжимающихся потоках. Изменение энергии релятивистской частицы описывается ур-нием

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} = -\frac{\mathcal{E}}{3} \nabla u,$$

где u — скорость среды (на ударном фронте $\nabla u < 0$). Ф-ция распределения ускоренных частиц описывается в этом случае ур-нием

$$\nabla (uf - D \nabla f) - \frac{d}{d\mathcal{E}} \left(\frac{\nabla u}{3} \mathcal{E} f \right) = 0,$$

где D — коэф. диффузии частиц, обусловленный их рассеянием. Для сильной ударной волны спектр ускоренных частиц имеет универсальный вид:

$$f \sim \mathcal{E}^{-2}. \quad (3)$$

Механизм У. з. ч. на ударных волнах представляется привлекательным ввиду трёх обстоятельств: 1) ударные волны достаточно распространены в Галактике. Они образуются, напр., у звёзд с сильным *звёздным ветром*, в результате взрыва сверхновых и т. д.; 2) при ускорении на разл. ударных волнах генерируется универсальный спектр частиц, к-рый не зависит от таких характеристик, как скачок скорости на ударном фронте (величина коэф. диффузии); 3) спектральный индекс частиц, ускоренных на фронтах [ур-ние (3)], близок к спектральному индексу КЛ у Земли (1).

Помимо представленных моделей существует ряд других, получивших, правда, меньшее признание, в к-рых делаются попытки объяснить наблюдаемые характеристики КЛ. При этом рассматриваются как процессы, протекающие в межзвёздной среде, так и в разл. космич. объектах.

Лит.: Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И., Происхождение космических лучей, М., 1963; Астрофизика космических лучей, под ред. В. Л. Гинзбурга, 2 изд., М., 1990; Генерация космических лучей ударными волнами, Новосибир., 1988. В. А. Догель.

УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ (ускорение силы тяжести) — ускорение, к-рое приобретает свободная материальная точка под действием *силы тяжести*. Такое ускорение имел бы центр тяжести любого тела при падении тела на Землю с небольшой высоты в безвоздушном пространстве. Как и сила тяжести, У. с. п. зависит от