ния КЛ с энергией выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ остается одной из нерешенных в современной астрофизике космических лучей. Не исключено, что редкие частицы таких энергий не являются протонами.

4.10. Другие методы диагностики космической плазмы

Мера дисперсии. Плотность электронной компоненты ионизованной межзвездной среды может быть определена по запаздыванию импульсов радиоизлучения пульсаров на разных частотах (мера дисперсии), которое возникает из-за конечного показателя преломления межзвездной среды, содержащей заряженные частицы. Показатель преломления для радиоволн с частотой ω в плазме с концентрацией электронов n_e

$$n = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} < 1\,, \tag{4.19}$$

где плазменная (ленгмюровская) частота свободных колебаний электронов в поле ионов

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \approx 5.64 \cdot 10^4 \sqrt{n_e}\,. \tag{4.20}$$

Фазовая скорость распространения электромагнитной волны с частотой ω есть $v_\phi = c/n$, где c — скорость света, а групповая скорость — $v_g = cn$. Излучение пульсаров немонохроматическое, значит на разных частотах время прихода импульсов с расстояния l будет различным. При $\omega_p^2 \ll \omega^2$ имеем: $t = \frac{l}{v_g} = \frac{l}{cn} \simeq \frac{l}{c}\left(1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2\right)$, откуда время запаздывания низкочастотного сигнала в однородной среде

$$\Delta t(\omega) = \frac{1}{2}\frac{l}{c}\frac{\omega_p^2}{\omega^2} = \frac{2\pi e^2}{m_e c}\frac{n_e l}{\omega^2}, \tag{4.21}$$

т. е. при данном значении ω запаздывание пропорционально величине меры дисперсии — интегралу от электронной концентрации вдоль луча зрения:

$$\mathrm{DM} = \int n_e dl\,. \tag{4.22}$$

Обычно для пульсаров $10 < \mathrm{DM} < 500$ пк/см^3. В общем случае

$$\Delta t_{1,2} = \int \left(\frac{dl}{v_g(\omega_1)} - \frac{dl}{v_g(\omega_2)}\right) \approx 4.6(\text{мкс})(\lambda_1^2 - \lambda_2^2) \cdot \mathrm{DM}\,, \tag{4.23}$$

где длина волны выражена в сантиметрах. Усредненная по лучу зрения плотность электронного компонента межзвездного газа сильно зависит от направления на небе. Ее среднее значение в плоскости Галактики оказалось около 0.03 частиц в 1 см^3.

Мера вращения. Если в плазме есть магнитное поле, то при распространении плоской монохроматической волны наблюдается поворот ее плоскости поляризации (фарадеевское вращение). Эффект быстро увеличивается с длиной волны. Напомним, что линейную поляризацию можно представить как сумму двух противоположных круговых поляризаций. Показатель преломления для замагниченной среды зависит от знака круговой поляризации и для волн, распространяющихся почти вдоль поля, есть

$$n_{\pm} = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega \pm \omega_H \cos\theta)}}, \tag{4.24}$$

где ω_p — ленгмюровская частота плазмы (4.20), $\omega_H = eB/m_e c$ — ларморовская частота вращения электрона в магнитном поле B, знак «+» соответствует обыкновенной волне (электрический вектор вращается против вращения электронов), а знак «−» необыкновенной волне (вращение электрического вектора по вращению электронов), θ — угол между вектором напряженности поля B и волновым вектором. Фазовая скорость $v_{\phi\pm} = c/n_{\pm}$, а угол поворота вектора поляризации волны при прохождении расстояния l равен $\phi_{\pm} = l\omega/v_{\phi\pm} = l\omega n_{\pm}/c$, откуда угол поворота плоскости линейной поляризации $\psi = \Delta\phi/2$. Подставляя $n_{\pm}$ из (4.24) с учетом малости ω_H/ω и ω_p/ω, находим:

$$\psi = \frac{1}{2}\frac{\omega_p^2 \omega_H l \cos\theta}{c\omega^2} = \lambda^2 \mathrm{RM}, \tag{4.25}$$

где мера вращения

$$\begin{aligned} \mathrm{RM} &= \frac{e^3}{2\pi(m_e c)^2}\int_O^L n_e B_{\parallel}\, dl \approx \\ &\approx 0.81(\text{рад/м}^2) \cdot \left(\frac{n_e}{\text{см}^{-3}}\right)\left(\frac{B_{\parallel}}{10^{-6}\text{Гс}}\right)\left(\frac{L}{\text{пк}}\right). \end{aligned} \tag{4.26}$$

По измерениям меры вращения делаются оценки компоненты магнитного поля, параллельной лучу зрения. Меру вращения находят, измеряя изменение угла линейной поляризации принимаемого радиоизлучения с длиной волны. При известном распределении n_e

(например, найденного по мере дисперсии пульсаров) оценивают величину магнитного поля Галактики. Величина RM для внегалактических источников лежит в пределах ± 150 рад/м^2. Метод определения $B_{\parallel}$, использующий меру вращения, позволяет оценивать не только величину, но и направление магнитного поля (от наблюдателя или по направлению к нему).

Галактическое магнитное поле проявляется также при наблюдениях межзвездной поляризации света.

Измерения показали, что в нашей и других галактиках магнитное поле имеет две компоненты, сопоставимые по величине (несколько микрогаусс): регулярную (поле направлено преимущественно вдоль спиральных рукавов) и хаотическую, с характерным масштабом изменения направления поля в несколько сотен парсек.

4.11. Задачи

1. Получить формулу, описывающую форму спектра синхротронного излучения (4.18), считая, что спектр излучения электрона с энергией E имеет узкий пик вблизи частоты $\nu \sim \gamma^2\nu_g$, где $\nu_g = eB/(2\pi m_e c)$ — гирочастота в магнитном поле B, а распределение электронов по энергиям степенное: $N(E)dE \sim E^{-p}dE$.

Решение. Мощность излучения J_ν в интервале частот $\nu, \nu + d\nu$: $J_\nu d\nu = -(dE/dt)N(E)dE$, где потери энергии одного электрона на синхротронное излучение $-dE/dt \sim \gamma^2 B^2$, $E = \gamma m_e c^2$. Лоренц-фактор записываем через частоту излучения: $\gamma \sim (\nu/\nu_g)^{1/2} \sim (\nu/B)^{1/2}$, тогда $dE \sim (\nu B)^{-1/2}d\nu$. Опуская константы, имеем: $J_\nu d\nu \sim (\nu B)\left(\frac{\nu}{B}\right)^{-p/2}(\nu B)^{-1/2}d\nu$, и окончательно

$$J_\nu \sim B^{(p+1)/2}\nu^{-(p-1)/2},$$

что и требовалось доказать.

2. Пусть в результате столкновения (рассеяния) частица с энергией E_0 с вероятностью p приобретает энергию $E = \beta E_0$. Показать, что при этом в результате многих рассеяний сформируется степенное (а не максвелловское) распределение частиц по энергиям.

Решение. После k столкновений будем иметь $N_k = p^k N_0$ частиц с энергией $E = \beta^k E_0$. Исключая k, получаем $\ln(N/N_0)/\ln(E/E_0) = \ln p/\ln\beta$, откуда

$$N/N_0 = (E/E_0)^{\ln p/\ln\beta}$$