

К вопросу об определении физических характеристик космических радиоисточников, в которых наблюдается реабсорбция

А.В. Мень, С.Я. Брауде

Радиоастрономический институт Национальной Академии наук Украины
Украина, 310002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4

Статья поступила в редакцию 5 ноября 1996 г.

В компактных космических радиоисточниках, в которых наблюдается самопоглощение излучения (реабсорбция), путем измерений спектра и углового размера можно экспериментально определить величину космических магнитных полей. В статье на примере квазара 3С196, для которого это удалось сделать, приводятся результаты определения таких важных физических характеристик радиоисточника, как общая энергия магнитного поля и релятивистских электронов, общее число электронов с энергиями больше E_{\min} , а также оценка соотношения энергий космических лучей и релятивистских электронов при условии равномерного распределения энергий магнитного поля и космических лучей.

В компактных космічних радіоджерелах, в яких спостерігається самопоглинання випромінювання (реабсорбція), шляхом вимірів спектру і кутового розміру можна експериментально визначити величину космічних магнітних полів. В статті на прикладі квазара 3С196, для якого це вдалось зробити, наводяться результати визначення таких важливих фізичних характеристик радіоджерела як загальна енергія магнітного поля та релятивістських електронів, загальне число електронів з енергіями більше E_{\min} , а також оцінка співвідношення енергій космічних променів та релятивістських електронів при умові рівного розподілення енергій магнітного поля та космічних променів.

Как показано в [1] спектральная характеристика компактного космического радиоисточника с отрицательной кривизной может быть связана с явлением самопоглощения его излучения – реабсорбцией. В этом случае, если известен угловой размер объекта, его частотный спектр, включая интервал с максимальной интенсивностью излучения, а также красное смещение, не прибегая к условию равномерного распределения энергий (магнитной и космических лучей), можно определить компоненту космического магнитного поля, перпендикулярную направлению движения релятивистских электронов [2]

$$H_{\perp} = \frac{\theta^4 \nu_0^3 (1 - e^{-\tau_0})^2}{S_0^2 (1 + z)} \quad (1)$$

Здесь H_{\perp} – поперечная компонента магнитного поля в микроэрстедах, θ – угловой размер источника в секундах дуги, ν_0 – частота максимума излучения в МГц, S_0 – максимальный поток излучения в Янских, τ_0 – оптическая толщина на частоте ν_0 , z – красное смещение.

Согласно [3]

$$e^{\tau_0} = 1 + \tau_0 \frac{2\alpha + 5}{5}, \quad (2)$$

где α – спектральный индекс источника ($S(\nu) \approx \nu^{-\alpha}$ при $\nu \gg \nu_0$).

Полагая направление космического магнитного поля H равновероятным относительно направления движения релятивистских электронов, по величине H_{\perp} можно определить H [2]

$$H_{\perp} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} H \sin^2 \beta d\beta = \frac{\pi}{4} H. \quad (3)$$

Зная магнитное поле, можно определить общую энергию магнитного поля W_H и релятивистских электронов W_e радиоисточника, коэффициент \varkappa , связывающий эти величины при условии равномерного распределения энергий [4]

$$H = \varkappa_e, \quad (4)$$

а также энергетический коэффициент K_e , определяющий количество электронов N_e в зависимости от их энергии E при степенном законе распределения

$$N_e = K_e E^{-\gamma}, \quad \gamma = 2\alpha + 1. \quad (5)$$

Данная работа посвящена определению этих физических характеристик квазара 3С196. Как известно, в диапазоне СВЧ этот радиоисточник состоит из двух компонент – юго-западной и северо-восточной, причем в северо-восточной компоненте имеет место реабсорбция, из-за чего ее излучение в декаметровом диапазоне не наблюдается [1, 5]. Эффект реабсорбции связан с очень компактной деталью с размерами $0'',065 \times 0'',045$, обнаруженной в северо-восточной компоненте, обеспечивающей большую часть ее радиоизлучения [6].

На основании спектральных измерений северо-восточной компоненты 3С196 в соответствии с (1) определяется величина поперечной составляющей магнитного поля, которая оказалась равной $H_{\perp} = 1,36 \cdot 10^{-4}$ Э и в соответствии с (3) $H = 1,73 \cdot 10^{-4}$ Э. Зная H , можно найти величину K_e , которая определяется согласно [4] выражением

$$K_e = \frac{7,4 \cdot 10^{21} I(\nu_0)}{\alpha(\gamma) \cdot LH} \left(\frac{\nu_0}{6,26 \cdot 10^{18} H} \right)^{\alpha} \quad (6)$$

Здесь L – протяженность излучающей области по лучу зрения в см ($L = R\theta$), R – расстояние до объекта в см, $\alpha(\gamma)$ – коэффициент, приведенный в [4], $I(\nu_0)$ – интенсивность излучения

$$I(\nu_0) = \frac{S_0}{\theta^2}, \quad (7)$$

где S_0 – максимальная плотность потока излучения в $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{Гц} \cdot \text{с}}$ на частоте ν_0 .

Полагая магнитное поле в обеих компонентах 3С196 одинаковым, приведем параметры, входящие в (6) и результаты определения K_e в таблице 1.

Таблица 1

Деталь 3С196	α	γ	$a(\gamma)$	$H, \text{Э}$	$R, \text{см}$	$\theta, \text{рад.}$
Северо-восточная	0,83	2,66	0,08	$1,73 \cdot 10^{-4}$	$9,97 \cdot 10^{27}$	$2,63 \cdot 10^{-7}$
Юго-западная	0,83	2,66	0,08	$1,73 \cdot 10^{-4}$	$9,97 \cdot 10^{27}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$

Деталь 3С196	$\nu_0, \text{гц}$	$S_0, \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{Гц} \cdot \text{с}}$	$K_e, \frac{\text{эрг}^{\gamma-1}}{\text{см}^3}$
Северо-восточная	$1,6 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^{-22}$	$1,64 \cdot 10^{-9}$
Юго-западная	$3 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^{-21}$	$2,8 \cdot 10^{-14}$

Приведенные данные позволяют определить число частиц N_e с энергиями, заключенными между E_{\min} и E_{\max} , в см^3 и общее число частиц N_{Σ} с такими энергиями в радиоисточнике

$$N_e = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} K_e E^{-\gamma} dE, \quad (8)$$

$$N_{\Sigma} = N_e V = N_e \frac{\pi}{6} (R\theta)^3. \quad (9)$$

Полагая минимальную и максимальную энергию в эргах

$$E_{\min} = 4 \cdot 10^{-10} \left[\frac{\nu_1}{H \cdot y_1(\gamma)} \right]^{1/2},$$

$$E_{\max} = 4 \cdot 10^{-10} \left[\frac{\nu_2}{H \cdot y_2(\gamma)} \right]^{1/2}, \quad (10)$$

на основании (8) и (9) определяем

$$N_e = \frac{S(\nu_0)}{RH\theta^3} A_1(\gamma, \nu_0), \quad (11)$$

$$N_{\Sigma} = \frac{\pi}{6} \frac{S(\nu_0) \cdot R^2}{H} A_1(\gamma, \nu_0), \quad (12)$$

где

$$A_1(\gamma, \nu_0) = \frac{7,4 \cdot 10^{21}}{a(\gamma)(\gamma-1)} \left[\frac{\nu_0}{\nu_1} y_1(\gamma) \right]^{\frac{\gamma-1}{2}} \times$$

$$\times \left\{ 1 - \left[\frac{\nu_1}{\nu_2} \frac{y_2(\gamma)}{y_1(\gamma)} \right]^{\frac{\gamma-1}{2}} \right\}. \quad (13)$$

Здесь ν_1 и ν_2 – граничные частоты, генерация которых определяется электронами с энергиями E_{\min} и E_{\max} соответственно, ν_0 и $S(\nu_0)$ – час-

тока в Гц и поток в $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{Гц} \cdot \text{с}}$ максимального излучения соответствующей компоненты ЗС196*) , $y_1(\gamma)$ и $y_2(\gamma)$ – коэффициенты, приведенные в [4], при $\gamma = 2,66$ равные 2,3 и 0,12.

Полагая v_1 и v_2 равными 10^7 Гц и 10^{10} Гц соответственно, получаем для северо-восточной компоненты ЗС196

$$N_e = 0,9 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-3}$$

$$N_\Sigma = 0,87 \cdot 10^{62}$$

и для юго-западной компоненты

$$N_e = 0,6 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-3}$$

$$N_\Sigma = 0,93 \cdot 10^{62}$$

Определим теперь энергию электронов в компонентах источника, которая равна

$$W_e = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} K_e \cdot V \cdot E^{-\gamma+1} dE = \frac{R^2 S(v_0)}{H^{3/2}} A_2(\gamma, v_0), \quad (14)$$

где $A_2(\gamma, v_0)$ при $\gamma > 2$ имеет вид

$$A_2(\gamma, v_0) = \frac{1,55 \cdot 10^{12} v_0^{1/2}}{a(\gamma)(\gamma - 2)} \left[\frac{v_0}{v_1} y_1(\gamma) \right]^{\frac{\gamma-2}{2}} \times \left\{ 1 - \left[\frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{y_2(\gamma)}{y_1(\gamma)} \right]^{\frac{\gamma-2}{2}} \right\}. \quad (15)$$

Результаты расчета при тех же данных, что и выше, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Деталь ЗС196	$A_2(\gamma, v_0)$	W_e , эрг.	W_H , эрг.
Северо-восточная	$1,17 \cdot 10^{18}$	$1,33 \cdot 10^{58}$	$1,1 \cdot 10^{55}$
Юго-западная	$2,92 \cdot 10^{17}$	$1,4 \cdot 10^{58}$	$7 \cdot 10^{59}$

В таблице имеются также результаты определения полной энергии магнитного поля W_H в компонентах квазара

$$W_H = \frac{H^2}{8\pi} V = \frac{H^2}{48} (R\theta)^3. \quad (16)$$

Сравнивая энергию релятивистских частиц и магнитного поля в северо-восточной компоненте видим, что $W_{H_{C-B}} \ll W_{e_{C-B}}$, т.е. магнитное поле не может удерживать частицы в этой компоненте и условие равнораспределения энергий не соблюдается. Иная ситуация наблюдается для юго-западной компоненты. Здесь может иметь место равнораспределение энергий магнитного поля и космических лучей (4). При этом определенная на основании экспериментальных данных величина α , обычно предполагаемая в интервале $1 < \alpha < 100$, оказалась равной 50.

Литература

1. Брауде С.Я., Мень А.В. Докл. РИ НАН Украины. 1994, № 11, с. 80-84.

*) Более точно частоту ν и поток $S(\nu)$ надо брать на высокочастотном участке спектра, где он имеет степенной вид.

2. Каплан С.А., Пикельнер С.Б. Физика межзвездной среды. Москва, Наука, 1979, с. 591.
3. Брауде С.Я. Астрон. журн. 1965, т. 42, № 6, с. 1150-1153.
4. Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. Происхождение космических лучей. Москва, АН СССР, 1963, с. 384.
5. Мень А.В., Брауде С.Я., Рашковский С.Л. и др. Письма в Астрон. журн. 1996, т. 22, № 6, с.428-432.
6. Brown R.L., Broderick J.J., Mitchell K.J. Astrophys.J. 1996, v.306, No.1, p.107-109

Several Studies of Physical Parameters Determination of Radio Sources with Reabsorbtion

A.V. Megn, S.Ya. Braude

In radio sources with reabsortion it is possible to evaluate the magnetic field if the frequency spectra of these sources have been measured. It was performed for the radio source ЗС196. The determination of the magnetic field makes possible to estimate such valuable physical parameters of the radio source as the energy of magnetic field, energy of relativistic electrons, their density and the number of electrons which energy is greater than E_{\min} . Moreover, the correlation of energy of cosmic rays and relativistic electrons under equipartitional conditions could be evaluated.