

О ПОГЛОЩЕНИИ ФОТОНОВ СВЕРХВЫСОКИХ
ЭНЕРГИЙ ВО ВСЕЛЕННОЙ

С. Г. МАТИНЯН

Поступила 11 июля 1972

Вычислены вероятности адронного поглощения γ -квантов в газе фотонов реликтового излучения, фотонов внегалактического радиоизлучения, на оптических фотонах излучения галактик и на рентгеновских фотонах.

Для $E_\gamma > 10^{23}$ эв вклад в поглощение фотонов от адронных каналов превалирует над вкладом от лептонных каналов и не зависит от энергии.

Из полученных результатов следует, что Вселенная непрозрачна для γ -квантов с $E_\gamma > 10^{14}$ эв.

Наиболее эффективным источником поглощения фотонов высоких энергий ($E = 10^{13} + 10^{24}$ эв) в „фотонном газе“ является [1—4] процесс образования электронно-позитронных пар

$$\gamma(E) + \gamma(\epsilon) \rightarrow e^- + e^+ \quad (1)$$

(E, ϵ — энергии налетающего фотона и фотона из газа в лабораторной системе).

Особенно существен этот процесс для поглощения фотонов в изотропном тепловом (реликтовом) излучении с $T = 3^\circ\text{K}$ [5], а также во внегалактическом радиоизлучении [2—4].

В 1968 году К. А. Испирианом и автором [6] было замечено, что для $\gamma\gamma$ -столкновений с образованием сильновзаимодействующих частиц (адронов) характерно наличие постоянных полных сечений, что приводит в конечном счете к их преобладанию над лептонными электромагнитными процессами и, в частности, над процессом (1).

Впоследствии процесс $\gamma\gamma \rightarrow$ адроны изучался теоретически неоднократно и разными способами, и в настоящее время несомненно, что

полное сечение $\sigma_{\gamma\gamma}^h$ $\gamma\gamma$ -взаимодействия, дающего адроны, не зависит от энергии и порядка $0.3 \div 0.4$ микробарна.

Эта величина намного превышает значение, приведенное (на основе грубых оценок) в работе [6], и поэтому имеет смысл снова и более детально вернуться к вопросу о прозрачности Вселенной относительно фотонов высоких и сверхвысоких энергий (если таковые могут существовать в природе).

Значение $\sigma_{\gamma\gamma}^h$, о котором шла речь выше, соответствует тому, что процесс $\gamma\gamma \rightarrow$ адроны начинает преобладать над процессом (1) (сечение которого равно $\sigma_{\gamma\gamma \rightarrow e^-e^+} = 0.12/k^2 (\ln k + 7.8)$ мкбн; здесь k -импульс фотонов в S -системе в миллиардах эв (Γ эв)) для $k > 1.8$.

Иными словами, при $k > 1.8$ Γ эв лептонные каналы $\gamma\gamma$ -столкновений вносят малый (и быстро убывающий с k) вклад в поглощение фотонов, тогда как адронное полное $\gamma\gamma$ -сечение постоянно для сколь угодно больших энергий E .

Легко рассчитать вероятности поглощения γ -квантов P_T, P_R на единицу пути, связанные со столкновениями энергичных γ -квантов с фотонами „реликтового“ излучения (имеющих планковское распределение с $T = 3^\circ\text{K}$ и плотностью ~ 0.7 эв/см³) и с фотонами внегалактического радиоизлучения [4], соответственно.

Имеем

$$P_{T,R} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_0^\pi d\epsilon d\theta \sigma_{\gamma\gamma}^h (1 - \cos \theta) \sin \theta d\epsilon d\theta n_{T,R}(\epsilon), \quad (2)$$

где $n_{T,R}(\epsilon)$ — число тепловых (радио) фотонов в единице объема на единичный энергетический интервал, θ — угол между направлениями сталкивающихся фотонов.

Для плотности фотонов реликтового излучения берем распределение Планка с $T = 3^\circ\text{K}$:

$$n_T(\epsilon) = \frac{1}{(hc)^3} \left(\frac{\epsilon}{\pi} \right)^2 (e^{\epsilon/kT} - 1)^{-1}, \quad (3)$$

откуда

$$P_T = 2.5 \cdot 10^{-28} \text{ см}^{-1}.$$

В спектре фотонов внегалактического радиоизлучения определенности гораздо меньше. Следуя [4], мы возьмем его в форме

$$n_R(\epsilon) = K\epsilon^{-2} \quad (4)$$

где $K = 1.09 \cdot 10^{-20}$ эрг/см³, ε измеряется в эргах. (4) взято для частот, больших 100 кГц. Ниже этой частоты возьмем значение (4) при $\nu = 100$ кГц.

В результате находим, что

$$P_R = 1.0 \cdot 10^{-28} \text{ см}^{-1}.$$

Что касается рассматриваемого механизма поглощения γ -квантов высоких энергий на оптических фотонах излучения галактик, то его вклад можно грубо оценить в модели однородной расширяющейся Вселенной, в которой фотоны испускаются источниками, удаляющимися от нас со скоростью, близкой к скорости света. Следуя [4], разделим оптический спектр на две части: 1) часть O_1 от холодных звезд ядер галактик, 2) часть O_2 от горячих молодых звезд в спиральных рукавах галактик.

Для O_1 среднюю светимость на галактику возьмем $L_1 = 10^{44}$ эрг/сек, плотность галактик $n_S = 10^{-75}$ см⁻³, спектральный интервал от $\varepsilon_a = 0.3$ эв до $\varepsilon_b = 3$ эв.

Спектр фотонов типа O_1 будет [4]

$$n_{O_1} = \frac{R_c n_S L_1}{c(\varepsilon_a - \varepsilon_b)} \begin{cases} \varepsilon \left(\frac{1}{\varepsilon_a^2} - \frac{1}{\varepsilon_b^2} \right), & \varepsilon < \varepsilon_a \\ \frac{1}{\varepsilon} - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_b^2}, & \varepsilon_a < \varepsilon < \varepsilon_b, \\ 0, & \varepsilon > \varepsilon_b \end{cases} \quad (5)$$

Для спектра „внешних“ фотонов типа O_2 берем аналогичное выражение со спектральным интервалом от 1 эв до 13.6 эв (= ионизационному потенциалу атома водорода) и $L_2 = 1.8 \cdot 10^{43}$ эрг/сек.

Расчеты показывают, что рассматриваемый механизм дает ничтожный вклад в P_{O_1} и P_{O_2} :

$$P_{O_1} = 0.5 \cdot 10^{-32} \text{ см}^{-1}, \quad P_{O_2} = 0.2 \cdot 10^{-33} \text{ см}^{-1}.$$

Еще более ничтожен вклад $\sigma_{\gamma\gamma}$ в поглощение γ -квантов на рентгеновском участке спектра.

Сравнение полученных результатов с вычислениями в работах [3, 4] показывает, что вклад адронных каналов $\gamma\gamma$ -столкновений в P_{γ} начинает превалировать над вкладом от лептонного канала (e^+e^-) при $E > 10^{22}$ эв и остается дальше постоянным.

Вклад в $P_{\gamma} + P_R$ от адронных каналов начинает преобладать над вкладом от e^+e^- -процесса при гораздо больших энергиях γ -кван-

тов. Если таковые могли бы испускаться удаленными внегалактическими объектами (с $d > 10^9$ парсек), то они не дошли бы до нас.

Подчеркнем, что на основании работ [3, 4] можно утверждать, что Вселенная ($R \sim 10^{28}$ см) непрозрачна для фотонов с энергией в интервале $10^{14} - 10^{19}$ эв [3, 4].

На основании проведенного рассмотрения, благодаря факту постоянства σ_{π}^t , надо считать, что она непрозрачна и для любых фотонов с энергией большей 10^{14} эв.

В этом свете практически возможное экспериментальное наблюдение фотонов в космическом пространстве с $E = 10^{13} - 10^{15}$ эв, поглощение которых сравнительно мало и, как мы видим, в основном идет за счет $\gamma\gamma \rightarrow e^-e^+$ -столкновений их с оптическими фотонами излучения галактик, приобретает особый интерес с точки зрения возможности определения плотности оптических фотонов и проверки космологических моделей.

Автор признателен академику В. А. Амбарцумяну за стимулирующие обсуждения.

Ереванский физический
институт

ON THE ABSORPTION OF SUPER-HIGH ENERGY PHOTONS IN THE UNIVERSE

S. G. MATINIAN

Probabilities of the γ -quanta hadronic absorption in the photonic gas from universal thermal radiation, extragalactic radiation, optical radiation of galaxies and X-ray photons are calculated.

For $E_{\gamma} > 10^{22}$ ev the contribution to the photon absorption from hadronic channels is dominated over that of the leptonic channels and is energy independent.

It follows from the obtained results that the Universe is opaque for γ -quanta with $E_{\gamma} \geq 10^{14}$ ev.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А. И. Никишов, ЖЭТФ, 41, 549, 1961.
2. Г. Гольдрейх, П. Моррисон, ЖЭТФ, 45, 344, 1963.
3. J. Jelly, Phys. Rev. Lett., 16, 479, 1966.
4. R. J. Gould, G. P. Schreuder, Phys. Rev., 155, 1408, 1967.
5. А. А. Пензиас, R. Wilson, Ap. J., 142, 419, 1965.
6. К. А. Испирян, С. Г. Матинян, Письма ЖЭТФ, 7, 232, 1968.