

УДК 523.11

НАБЛЮДЕНИЯ МЕЖГАЛАКТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КАСКАДОВ ОТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРОТОНОВ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С РЕЛИКТОВЫМИ ФОТОНАМИ

А. В. Урысон

Заново проанализированы данные о гамма-излучении сверхвысокой энергии, которое было зарегистрировано на Тянь-Шаньской высокогорной установке в начале 80-х гг. Показано, что четыре гамма-кванта из восьми зарегистрированных были рождены в фотопионных реакциях протонов сверхвысоких энергий ($E_p \geq 3 \cdot 10^{20}$ эВ) с реликтовыми фотонами и последующих электромагнитных каскадах в межгалактическом пространстве. Протоны были ускорены в галактике М51. Обсуждается возможность регистрации малоэнергичных остатков электромагнитных каскадов в области энергий ~ 10 кэВ – 10 МэВ.

Сообщения о регистрации диффузного гамма-излучения с энергией $E \geq 10^{14}$ эВ появились в 80-х годах [1 – 4]. Излучение регистрировалось по широким атмосферным ливням, обедненным мюонами и адронами. Координаты зарегистрированных гамма-квантов не совпадали с координатами каких-либо известных источников гамма-излучения, а измеренные потоки в десятки раз превосходили теоретические оценки диффузного гамма-излучения, образующегося во взаимодействиях космических лучей с межзвездным газом [7, 8]. Поэтому авторы работ [1 – 4] интерпретировали полученные результаты как регистрацию гамма-излучения от неразрешенных галактических источников (см. также [5, 6]). Однако излучение большого числа точечных галактических источников, сосредоточенных на небольшой части небесной сферы, было бы

зарегистрировано в рентгеновском диапазоне [8]. Таким образом, это предположение осталось неподтвержденным.

С целью выяснения природы зарегистрированных гамма-квантов в настоящей работе заново проанализированы результаты, полученные в [1]. На основании этого анализа обсуждается возможность регистрации гамма-излучения с энергией $E \approx 10$ кэВ – 10 МэВ на спутниках.

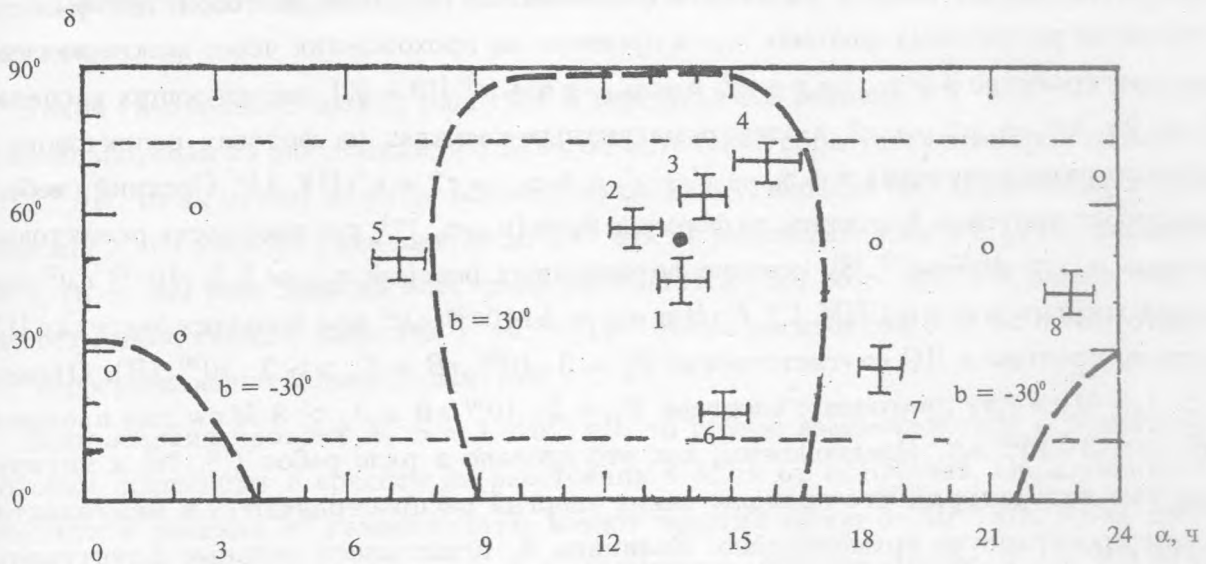


Рис. 1. Распределение по видимой части неба зарегистрированных Тянь-Шаньской установкой гамма-квантов. Размеры крестов соответствуют точности определения координат. Штриховой линией выделены области галактических широт $|b| \geq 30^\circ$ и $-30^\circ \leq b \leq 30^\circ$. Пунктирные линии ограничивают область, в пределах которой Тянь-Шаньская установка регистрирует ливни. Белые кружки — координаты предполагаемых источников гамма-квантов с энергией $\geq 10^{15}$ эВ из [9]. Черный кружок — галактика M51.

Чернотельное обрезание протонов сверхвысоких энергий. На рис. 1, взятом из [1], показано распределение зарегистрированных гамма-квантов по видимой части неба (гамма-кванты пронумерованы нами). Ни один из них не совпадает с положением предполагаемых источников гамма-излучения, о которых сообщалось в работе [9]. На этом

рисунке примечательно то, что координаты гамма-квантов 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4 совпадают в пределах ошибок. Это указывает на то, что они пришли из одной области. Ее координаты определим как центр области, образованной наиболее близкими квантами 1, 2, 3: прямое восхождение $\alpha \approx 13$ ч, склонение $\delta \approx 50^\circ$. Расстояние до этой области оценим следующим образом. Поскольку энергия зарегистрированных гамма-квантов лежит в пределах $(5 - 8,5) \cdot 10^{14}$ эВ, то их свободные пробеги в поле реликтовых фотонов ($T \approx 2,7$ К) составляют $\lambda \approx 10 - 20$ кпк [10]. Это означает, что зарегистрированные гамма-кванты образовались непосредственно вблизи Галактики. Мы предположили, что они родились в фотопионных реакциях протонов сверхвысоких энергий на реликтовых фотонах γ_{rel} в процессе их прохождения через межгалактическое пространство $p + \gamma_{rel} \rightarrow p + \pi^0$, $p + \gamma_{rel} \rightarrow n + \pi^+$ [10 - 12], последующих распадах $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ и электромагнитных каскадах на фотонах реликтового и фонового радиоизлучения $e + \gamma_b \rightarrow e' + \gamma'$, $\gamma + \gamma_b \rightarrow e^+ + e^-$ [13, 14]. Средний свободный пробег протонов λ_p оценим по формуле $\lambda_p \approx (n_{rel}\sigma_{p\gamma})^{-1}$, где плотность реликтовых фотонов $n_{rel} \simeq 400$ см⁻³ [8], сечение фотопионных реакций $\sigma_{p\gamma} \approx 5,5 \cdot 10^{-28}$ см² при полной энергии p и γ в СЦМ 1,2 ГэВ и $\sigma_{p\gamma} \approx 1 \cdot 10^{-28}$ см² при больших энергиях [15] (энергии протона в ЛС соответственно $E_p = 3 \cdot 10^{20}$ эВ и $E_p \gg 3 \cdot 10^{20}$ эВ). Отсюда $\lambda_p \simeq 1,5$ Мпк для протонов с энергией $E_p = 3 \cdot 10^{20}$ эВ и $\lambda_p \simeq 8$ Мпк для протонов с $E_p \gg 3 \cdot 10^{20}$ эВ. Предположим, как это сделано в ряде работ ([8, 16] и цитируемая там литература), что протоны таких энергий распространяются в межгалактическом пространстве прямолинейно. Величина λ_p испытывает сильные флуктуации, подобные флуктуациям пробегов частиц при развитии ливней в атмосфере. Для того, чтобы каскад не успел затухнуть, расстояние до предполагаемого источника R должно быть порядка λ_p , т.е. $R \simeq 1,5 - 8$ Мпк.

Полученные координаты источника совпадают с координатами спиральной галактики М51, имеющей сейфертовское ядро, со звездной величиной -8^m : $\alpha = 13^h 30^m$, $\delta = 47^\circ 12^m$. Совпадают и оценки расстояния – по литературным данным $R \simeq 7,5 - 9,6$ Мпк [17].

Для иллюстрации рассмотрим возможные варианты развития электромагнитного каскада по [18] (соответствующие формулы и вероятности поглощения см. также в [8]). Будем использовать средние значения величин, характеризующих каскад, и пренебрегать их флуктуациями. Пусть энергия первичного протона $E_p \simeq 3 \cdot 10^{20}$ эВ. Потери энергии при взаимодействии с реликтовыми фотонами составляют $\langle \Delta E_p \rangle / E_p \simeq 0,2$ [19], и он взаимодействует с ними до тех пор, пока его энергия не уменьшится до вели-

чины $E_p = 3 \cdot 10^{19}$ эВ. Если в третьем или четвертом столкновении протона родится π^0 -мезон, то его энергия составит соответственно $3,8 \cdot 10^{19}$ или $3 \cdot 10^{19}$ эВ, и это произойдет на расстоянии от источника 4,5 или 6 Мпк. π^0 -мезон практически сразу распадется на два гамма-кванта одинаковой энергии $E_\gamma \approx 1,9 \cdot 10^{19}$ или $1,5 \cdot 10^{19}$ эВ. Пройдя в среднем 3 Мпк, гамма-кванты образуют e^+e^- -пары с энергией одной частицы $E_e \simeq E_\gamma$, а другой — $E_e \simeq m_e^2/\epsilon_{rel} \approx 4 \cdot 10^{14}$ эВ. Здесь масса электрона $m_e = 0,5$ МэВ, энергия реликтовых фотонов $\epsilon_{rel} \simeq 6,7 \cdot 10^{-4}$ эВ. Низкоэнергичный электрон на пути 1 кпк рассеет гамма-квант с энергией $E_e \simeq E_\gamma \simeq 4 \cdot 10^{14}$ эВ. Это гамма-квант интересующей нас энергии, и он рожден на расстоянии 7,5 – 9 Мпк от источника, т.е. на границе Галактики.

Такой гамма-квант может родиться и в результате распада $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$. Действительно, если на расстоянии ~ 6 Мпк от источника образуется позитрон с энергией $\sim 10^{18}$ эВ, то на пути 1 Мпк он рассеет гамма-квант, передав ему значительную долю энергии, а его энергия уменьшится до 10^{17} эВ. В результате еще 2-3 актов рассеяния на пути ~ 300 кпк энергия электрона уменьшится уже до $\sim 10^{15}$ эВ, после чего он рассеет гамма-квант с энергией $5 \cdot 10^{14} - 10^{15}$ эВ на расстоянии 8 Мпк от источника, т.е. непосредственно вблизи Галактики.

Если энергия протона $E_p \gg 3 \cdot 10^{20}$ эВ, то первое взаимодействие с реликтовым фотоном произойдет в среднем на расстоянии 8 Мпк от источника. Образующиеся в результате распада π^0 гамма-кванты имеют энергии около $5 \cdot 10^{20}$ эВ. Из-за поглощения гамма-квантов на фотонах радиоизлучения (средний пробег $\lambda_\gamma \sim 0,3$ Мпк) будут рождаться e^+e^- -пары, в которых энергия низкоэнергичных частиц составит $E_e \simeq m_e^2/\epsilon_r \simeq 2,5 \cdot 10^{17} - 8 \cdot 10^{19}$ эВ (энергия радиопотонов $\epsilon_r = 3 \cdot 10^{-9} - 10^{-6}$ эВ [18]). Эти электроны, рассеиваясь на реликтовых и радиопотонах, на пути около 1 Мпк уменьшат свою энергию до $10^{15} - 10^{16}$ эВ. В результате вблизи Галактики они смогут рассеять гамма-кванты в диапазоне энергий $10^{14} - 10^{15}$ эВ.

Мы приходим к заключению, что четыре из восьми гамма-квантов, о которых сообщалось в [1], генетически связаны с протонами, ускоренными в галактике М51 до $E_p \geq 3 \cdot 10^{20}$ эВ. Для выяснения природы остальных гамма-квантов, зарегистрированных в [1], нужны дальнейшие исследования. Ни один из источников [9] не удалось отождествить описанным способом с каким-либо внегалактическим объектом.

Возможность регистрации малоэнергичных остатков электромагнитных каскадов. Прослдим за дальнейшим развитием электромагнитного каскада, используя оценки из работы [18]. (Вероятности поглощения фотона в межгалактическом пространстве

приведены также в [8]. Формулы для обратного комптоновского рассеяния приведены в [8, 20] и Приложении.) Проходя межгалактическое пространство, протон с первичной энергией $E_p \gg 3 \cdot 10^{20}$ эВ будет терять энергию в реакциях $p + \gamma_{rel} \rightarrow p + \pi^0$, $p + \gamma_{rel} \rightarrow n + \pi^+$. (Образование пар $p + \gamma_{rel} \rightarrow p + e^+ + e^-$ имеет значительно меньшее сечение.) Лидирующий протон и образующиеся нуклоны с энергией $E_h \geq 3 \cdot 10^{20}$ эВ будут порождать новые пионы, гамма-кванты от распада π^0 будут порождать электрон-позитронные пары в реакции $\gamma + \gamma_{rel} \rightarrow e^+ + e^-$, а они и позитроны от распадов $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ будут рассеиваться на реликтовых фотонах: $e + \gamma_{rel} \rightarrow e' + \gamma'$ (сечения процессов $\gamma + \gamma_{rel} \rightarrow \gamma' + \gamma''$, $\gamma + \gamma_{rel} \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ значительно меньше). После того, как энергия образующихся частиц упадет до 10^{17} эВ, их пробеги уменьшатся с 1–5 Мпк до 100 кпк и каскадное размножение станет наиболее эффективным. Образование пар будет происходить до тех пор, пока энергия гамма-квантов $E_\gamma \geq 10^{14}$ эВ. Для гамма-квантов меньших энергий межгалактическое пространство станет практически прозрачным. В процессе обратного комптоновского рассеяния электроны будут терять энергию большими порциями ($E_\gamma \sim E_e$), пока их энергии достаточно велики ($E_e \gg 10^{14}$ эВ). Интенсивное размножение пар в каскаде будет происходить на длине 300 кпк. В результате в каскаде останутся электроны с $E_e \leq 10^{14}$ эВ и гамма-кванты с $E_\gamma < 10^{14}$ эВ, и в нем будет увеличиваться число гамма-квантов со средней энергией $E_\gamma \approx 3,6 \cdot 10^{-16} E_e^2$ от обратного комптоновского рассеяния. Такие электроны будут медленно терять энергию (потери электрона в каждом рассеянии $< \Delta E_e > / E_e \approx 10^{-4}$ при $E_e \approx 10^{12}$ эВ и $< \Delta E_e > / E_e \approx 10^{-6}$ при $E_e \approx 10^{10}$ эВ), а их средний пробег составит $\lambda_e \approx (\sigma_T n_r)^{-1} \approx 1$ кпк (томсоновское сечение $\sigma_T \approx 6,65 \cdot 10^{-25}$ см²). Гамма-кванты будут лететь впереди породивших их частиц, т.к. скорости частиц меньше скорости света. Достигнув границы Галактики или неоднородности магнитного поля, каскад перестанет развиваться. Электроны рассеются в магнитных полях, а гамма-кванты продолжат прямолинейное распространение.

Расстояния, на которых развивается каскад, таковы. Свободный пробег протона с $E_p \gg 3 \cdot 10^{20}$ эВ составляет около 10 Мпк. Гамма-кванты от распада высокоэнергичных π^0 имеют значительно большие пробеги: $\lambda_\gamma \approx 60$ Мпк при $E_\gamma \approx 10^{20}$ эВ. Пробег позитрона с энергией $E_e \approx 10^{20}$ эВ от распада π^+ составляет также около 60 Мпк. Поэтому малоэнергичный остаток каскада, дошедший до границ Галактики, может быть инициирован протоном, который родился на расстояниях 70 Мпк от Галактики. Возможно, что величина R меньше из-за существования в межгалактическом пространстве магнитных полей [18]. Оценим грубо, какие расстояния R проходит каскад до того,

как в нем начнется образование гамма-квантов с энергией $E_\gamma \simeq 10 \text{ МэВ}$. Поскольку электрон, проходя путь 1 кпк , рассеивает приблизительно один гамма-квант, теряя энергию $\langle \Delta E_e \rangle \simeq 3,6 \cdot 10^{-16} E_e^2$, то $dE/dR = 3,6 \cdot 10^{-16} E_e^2$. Гамма-кванты с энергией $E_\gamma \simeq 10 \text{ МэВ}$ рассеиваются электронами с $E_e \approx 5 \cdot 10^{10} \text{ эВ}$. Отсюда $R \simeq 30 \text{ Мпк}$.

Из приведенных грубых оценок следует, что к границам Галактики могут приходить каскады с расстояний R порядка нескольких десятков Мпк .

Поперечные размеры каскада таковы. Энергичные ($E \gtrsim 10^{14} \text{ эВ}$) частицы в каскаде распространяются в основном в конусе, определяемом углом разлета π^0 -мезонов $\nu_\pi \sim m_{\pi^0}/E_{\pi^0}$ ($m_{\pi^0} \approx 140 \text{ МэВ}$; для $E_{\pi^0} \sim 10^{20} \text{ эВ}$ $\nu_\pi \sim 1,4 \cdot 10^{-12}$), поэтому по прохождении пути L его поперечник достигнет величины $d \simeq \nu_\pi L \sim 2 \cdot 10^{13} \text{ см}$ при $E_{\pi^0} \sim 10^{20} \text{ эВ}$, $L \sim 5 \text{ Мпк}$. Плотность высокоэнергичных частиц в каскаде неоднородна. Аналогично ливням в атмосфере, каскад, развиваясь, образует несколько стволов по направлениям движения каскадировавших частиц высоких энергий и большое число ветвей по направлениям движения электронов и позитронов, рассеивающих реликтовые фотоны. Стволы и ветви расходятся под углами разлета частиц пары $\nu_e \simeq m_e/E_e$ ($m_e = 0,5 \text{ МэВ}$; для $E_e \sim 10^{19} \text{ эВ}$ $\nu_e \simeq 5 \cdot 10^{-14}$), в каждой из ветвей гамма-кванты летят в конусе ν_{IC} , и их плотность увеличивается с приближением к оси, т.к. сечение комптоновского рассеяния максимально, когда угол рассеяния $\nu_{IC} \rightarrow 0$ (см. [20] и Приложение).

Число ветвей N в каскаде оценим так. Энергия первичного протона $E_p \approx 10^{21} \text{ эВ}$ в процессе развития каскада переходит в излучающие ветви с энергией $E \simeq 10^{14} \text{ эВ}$ каждая, и поэтому грубо $N \simeq 10^{21} \text{ эВ}/10^{14} \text{ эВ} = 10^7$.

В системе покоя электрона гамма-кванты с $E_\gamma < 10^{14} \text{ эВ}$ рассеиваются практически изотропно. Вследствие этого их плотность мала: поперечное расстояние между квантами, рассеянными на пути 1 кпк , составляет $\sim 0,3 \text{ кпк}$. Поэтому регистрация каскадных гамма-квантов в этой области энергий представляется затруднительной.

Проведенный анализ показал следующее.

1. В галактике М51 были ускорены протоны до энергий $E_p \geq 3 \cdot 10^{20} \text{ эВ}$.
2. В процессе прохождения межгалактического пространства протоны взаимодействовали с реликтовыми фотонами, образуя электромагнитные каскады, в соответствии с [11 – 14]. Четыре гамма-кванта из этих каскадов, родившиеся непосредственно вблизи Галактики, и были зарегистрированы на Тянь-Шаньской высокогорной установке [1].

3. В области энергий $10 \text{ кэВ} - 10 \text{ МэВ}$ регистрация электромагнитных каскадов представляется затруднительной.

Автор благодарит Г. Т. Зацепина, поддержавшего эту работу. Автор признательна В. А. Догелю, А. В. Засову, И. Г. Митрофанову, А. И. Никишову и И. Л. Розенталю за обсуждения и Ю. Г. Балашко за критические замечания по рукописи.

Приложение

Обратное комптоновское рассеяние $e + \gamma_{rel} \rightarrow e' + \gamma'$.

а) Энергия электрона $E_e \gg m_e^2/\epsilon_{rel} = 4 \cdot 10^{14} \text{ эВ}$.

Сечение $\sigma_{IC} = (3/8)\sigma_T(m_e/\epsilon)[\ln(2\epsilon/m_e) + 0,5]$. Здесь $\epsilon = (E_e/m_e)\epsilon_{rel} \gg m_e$; средняя энергия рассеянного фотона $\langle E_\gamma \rangle \sim E_e$.

б) Энергия электрона $E_e \ll 0,25m_e^2/\epsilon_{rel} \simeq 10^{14} \text{ эВ}$. $\sigma_{IC} = \sigma_T$; $\langle E_\gamma \rangle = (4/3)\epsilon_{rel}(E_e/m_e)^2 \approx 3,6 \cdot 10^{-16} E_e^2$; энергия электрона, рассеивающего γ -кванты энергии E_γ , $E_e = (m_e/2)\sqrt{(3E_\gamma/\epsilon_{rel})} \approx 1,7 \cdot 10^7 \sqrt{E_\gamma}$.

в) Углы рассеяния. В системе покоя электрона σ_{IC} имеет резкий максимум в конусе $\nu_{IC}^* \leq \sqrt{(m_e/\epsilon_{rel}^*)}$, $\sigma_{IC} \rightarrow \sigma_T$ при $\nu_{IC}^* \rightarrow 0$. В системе наблюдателя $\text{tg} \nu_{IC} = (1/\gamma_b) \sin \nu_{IC}^* / (\cos \nu_{IC}^* + \beta^*/\beta) \approx \nu_{IC}^*/2\gamma$, $\gamma = E_e/m_e$, $\beta^* \approx 1$ – скорость электрона в лабораторной системе (ЛС), $\beta \approx 1$ – скорость системы электрона относительно ЛС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Никольский С. И., Стаменов Й. Н., Ушев С. З. ЖЭТФ, **60**, 10 (1984).
- [2] Nikolsky S. I., Stamenov J. N., Ushnev S. Z. J. Phys. G: Nucl. Phys., **13**, 883 (1987).
- [3] Kakimoto F. et al. Proc. 20th ICRC, Moscow, 1987, v. 1, p. 307.
- [4] Suga K. et al. Proc. 20th ICRC, Moscow, **1**, 310 (1987).
- [5] Karakula S., Stamenov J. N., Tkaszuk W. Proc. 19th ICRC, La Jolla, 1985, v. 1, p. 268.
- [6] Агаронян Ф. А., Мамиджаниян Э. А., Никольский С. И., Тукиш Е. И. Астрофизика, **23**, 55 (1985).
- [7] Урысон А. В. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 10, 56 (1988).

- [8] Березинский В. С., Буланов С. В., Гинзбург В. Л., Догель В. А., Птускин В. С. *Астрофизика космических лучей*, М., Наука, 1990.
- [9] Samorsky M., Stamm W. *Ap. J.*, **268**, 17 (1983).
- [10] Jelle J. V. *Phys. Rev. Lett.*, **16**, 749 (1966).
- [11] Greisen K. *Phys. Rev. Lett.*, **16**, 748 (1966).
- [12] Зацепин Г. Т., Кузьмин В. А. *Письма ЖЭТФ*, **4**, 114 (1966).
- [13] Hayakawa S. *Progr. Theor. Phys.*, **37**, 594 (1966).
- [14] Prilutsky O., Rozental I. L. *Acta Phys. Hungar. Suppl. 1*, **29**, 51 (1970).
- [15] Particle Group Data. Review of particle properties. *Phys. Rev.*, **D50**, 11 (1994).
- [16] Berezhinsky V. S., Grigor'eva S. I. *Proc. 16th ICRC, Kyoto, 1979*, v. 2, p. 81.
- [17] Засов А. В. Частное сообщение, 1995. Липовецкий В. А., Неизвестный С. Н., Неизвестная О. М. Каталог сейфертовских галактик. *Сообщ. САО АН СССР*, вып. 55, 1987.
- [18] Озерной Л. М., Прилуцкий О. Ф., Розенталь И. Л. *Астрофизика высоких энергий*, М., Атомиздат, 1973.
- [19] Hayakawa S., Yamamoto Y. *Progr. Theor. Phys.*, **30**, 71 (1963).
- [20] Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. *Квантовая электродинамика. (Теоретическая физика, т. 4)* М., Наука, 1995.

Поступила в редакцию 28 декабря 1995 г.