

УДК 524.1-62

ВЛИЯНИЕ САМОМОДУЛЯЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ДИФФУЗНОЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ ГАЛАКТИКИ

© 2023 г. Д. О. Чернышов^{1, *}, А. В. Ивлев², Е. А. Кулик¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук”,
Отдел теоретической физики имени И.Е. Тамма, Москва, Россия

²Институт внеземной физики Общества Макса Планка, Гархинг, Германия

*E-mail: chernyshov@td.lpi.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Изучено влияние взаимодействия космических лучей с возбужденной ими турбулентностью (эффект самомодуляции) в оболочках молекулярных облаков на полное гамма-излучение Галактики. Исследован эффект самомодуляции для каждого отдельного молекулярного облака и полученный результат проинтегрирован по лучу зрения вдоль всех молекулярных облаков, попадающих в интересующую нас область на небе. Показано, что самомодуляция космических лучей уменьшает интенсивность гамма-излучения в диапазоне ниже 1 ГэВ примерно на 10–30%. Несмотря на то, что данный результат незначителен по величине, его, тем не менее, стоит учитывать при выделении фонового гамма-излучения на низких энергиях.

DOI: 10.31857/S036767652370165X, EDN: ONQRGE

ВВЕДЕНИЕ

Гамма-излучение является одним из наиболее важных источников информации о спектре космических лучей в удаленном от нас в межзвездном пространстве Галактики [1]. При этом около 30% гамма-излучения формируется в молекулярном газе. Плотность молекулярного газа достаточно велика, и как следствие, заряженные частицы космических лучей могут эффективно терять энергию, что, в свою очередь приводит к возникновению потоковой неустойчивости на границах молекулярных облаков. Данное явление аналогично возбуждению турбулентности космическими лучами, покидающими Галактику [2]. Турбулентность, которая генерируется этой неустойчивостью, препятствует проникновению космических лучей внутрь облака — иными словами, возникает самомодуляция космических лучей в этих объектах [3–5]. Самомодуляция должна влиять на спектр гамма-излучения, однако обнаружить этот эффект при наблюдении одиночных молекулярных облаков затруднительно из-за низкого углового и энергетического разрешения современных гамма-телескопов на энергиях ниже 1–10 ГэВ [6]. Возможно, новое поколение гамма-телескопов будет обладать достаточно хорошими параметрами, чтобы зарегистрировать данный эффект [7]. Однако на данный момент вместо выделения спектра излучения отдельного молекулярного облака и сравне-

ния его с наблюдениями, эффективнее вычислить ожидаемый спектр излучения большого числа облаков, попадающих в широкий конус наблюдения, и оценить величину эффекта самомодуляции. Таким образом, влияние углового разрешения гамма-телескопа на результат наблюдений будет сведено к минимуму.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ОБЛАКОВ

Для вычисления спектра диффузного гамма-излучения, мы воспользовались каталогом SEDIGISM [8], который содержит около 10000 облаков, находящихся между -40 и $+20$ градусов галактической долготы и -1 и $+1$ градусом галактической широты.

Спектры протонов космических лучей были вычислены с использованием кода GALPROP WebRun [9, 10]. Параметры задачи были взяты из модели SS_Z8_R20_T100000_C2 статьи [11], которая достаточно хорошо описывает диффузный фон Галактики.

Поскольку каталог молекулярных облаков может быть неполным, мы сравнили толщину молекулярного газа на луче зрения, полученную при интегрировании распределения газа по каталогу SEDIGISM, и взятую из GALPROP (файл rbands_col10mm_v3_2001_hdeg.fits). Мы устано-

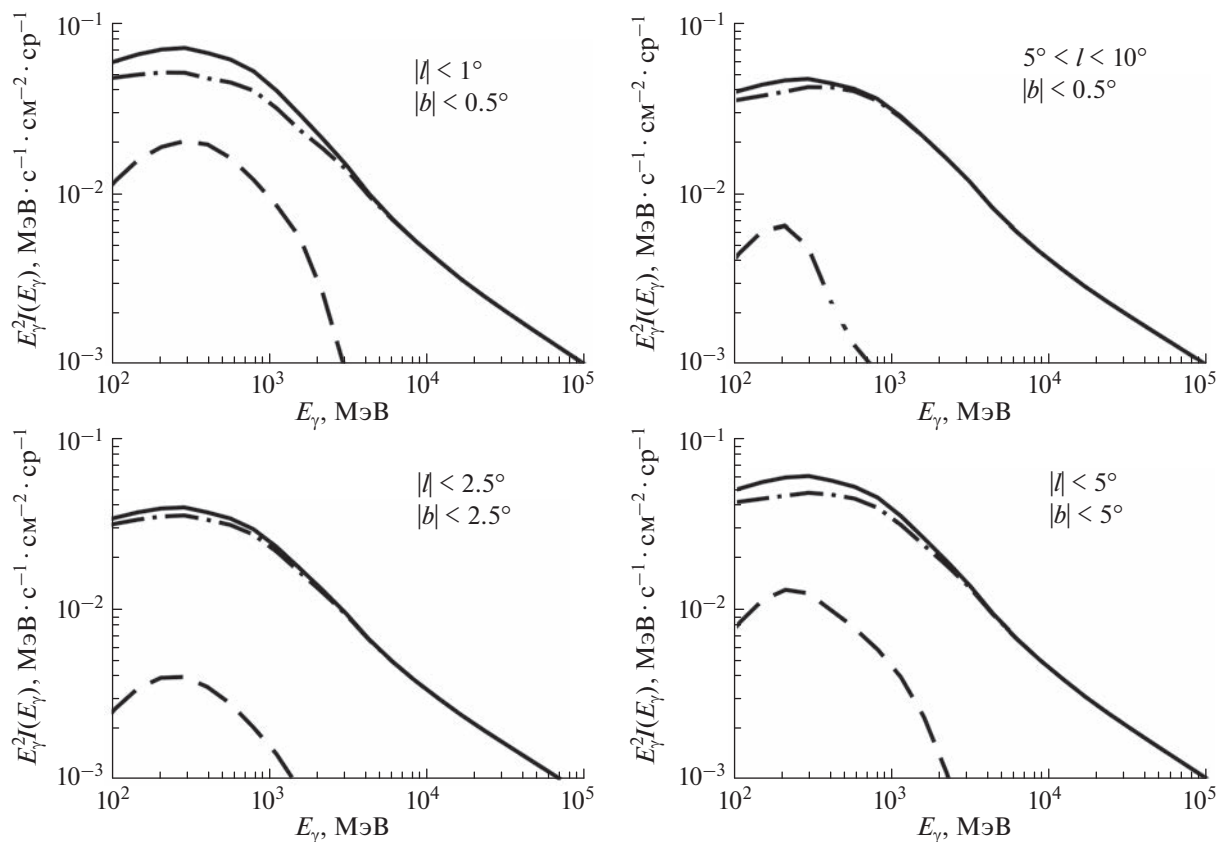


Рис. 1. Спектр диффузного гамма-излучения Галактики для разных областей вблизи центра. Сплошная линия — спектр без учета самомодуляции, штриховая линия — величина эффекта самомодуляции, штрихпунктирная линия — спектр с учетом самомодуляции.

вили, что между этими данными наблюдается систематическая разница в 2 раза. Поэтому спектры гамма-излучения, вычисленные по каталогу молекулярных облаков, были пропорционально увеличены, чтобы обеспечить соответствие данным GALPROP по молекулярному газу.

Спектр гамма-излучения моделировался следующим образом. Сначала, мы выбрали интересные нас координаты на небе и угловой размер области обзора. В каталоге молекулярных облаков мы отметили все облака, попадающие в указанную область, их координаты в Галактике, массу и толщину водорода.

Далее используя координаты каждого облака, мы взяли спектры протонов и электронов межзвездной среды из данных GALPROP и вычислили их модулированные спектры внутри облака по формулам, описанным в статье [12]. По модулированным спектрам мы вычислили спектр гамма-излучения из данного облака за счет протон-протонных столкновений и тормозного излучения электронов.

Проделав данную операцию для всех отмеченных облаков, мы сложили их спектры и сделали поправку на распределение молекулярного газа

по GALPROP. В результате мы получили угловое распределение спектров $I_{mod}(E_\gamma)$ диффузного гамма-излучения молекулярного газа Галактики.

GALPROP не разделяет излучение молекулярного и атомарного газа. Поэтому, для сравнения наших результатов со спектрами гамма-излучения, полученными GALPROP, мы проделали те же самые операции без учета эффекта самомодуляции и получили соответствующий спектр молекулярного газа $I_0(E_\gamma)$. Разница $\Delta I(E_\gamma) = I_0(E_\gamma) - I_{mod}(E_\gamma)$ между немодулированным и модулированным спектрами и является интересующей нас величиной.

Спектр полного диффузного излучения Галактики с учетом эффекта самомодуляции был получен путем уменьшения спектра полного диффузного излучения, вычисленного с помощью GALPROP, на величину $\Delta I(E_\gamma)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 показаны результаты наших расчетов для различных областей на небе. Мы рассмотрели три области вокруг центра Галактики, а также одну

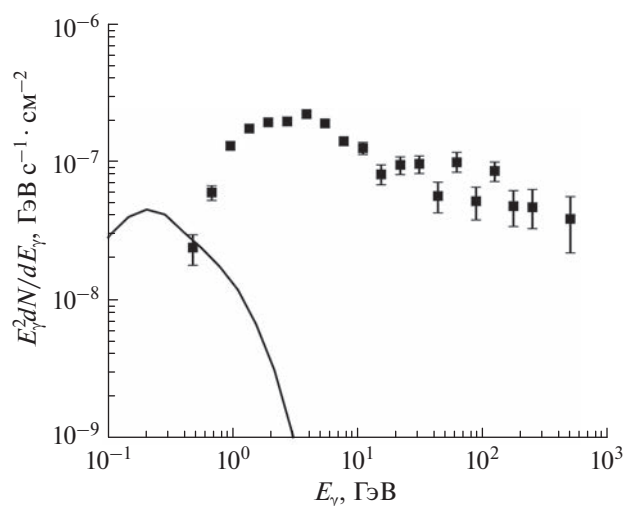


Рис. 2. Сравнение спектра “ГэВного избытка” из галактического центра (экспериментальные точки) и эффекта само модуляции (сплошная кривая).

область, сдвинутую от центра. Сплошной линией показаны результаты GALPROP для соответствующей области, штриховой линией — величина эффекта само модуляции $\Delta I(E_\gamma)$, а штрихпунктирной линией — ожидаемый нами спектр излучения Галактики с учетом эффекта само модуляции.

Как видно, эффект само модуляции достигает наибольшего относительного значения в узкой области вблизи центра Галактики, где сосредоточено большое количество массивных молекулярных облаков. Относительная величина эффекта падает по мере увеличения углового размера области наблюдения, а также при смещении центра области от центра Галактики. Это связано с тем, что вклад излучения молекулярного газа уменьшается, а доля излучения атомарного газа и обратного комптоновского рассеяния электронов растет. Усиление эффекта для области размером 10° в сравнении с областью размером 5° вызвано особенностями распределения молекулярного газа.

Как видно, величина эффекта само модуляции не очень мала, и в отдельных случаях может достигать 30%. Однако энергии, на которых он проявляется, достаточно низкие — меньше 1 ГэВ, что делает его наблюдение затруднительным. Тем не менее, при оценке фонового излучения Галактики (необходимого для вычисления спектров крупномасштабных источников на низких энергиях) этот эффект необходимо принимать во внимание. Для демонстрации, на рис. 2 сравнивается спектр “ГэВного избытка” в центре Галактики [13] с величиной эффекта само модуляции. Видно, что спектр “избытка” на низких энергиях, который был получен без учета данного эффекта, может существенно измениться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы вычислили изменение спектра диффузного гамма-излучения Галактики за счет эффекта само модуляции космических лучей, возникающем при их проникновении в плотные молекулярные облака. Мы выяснили, что для центральных областей Галактики, ограниченных угловым размером от 1° до 10° , данный эффект может привести к уменьшению полного потока гамма-излучения на 10–30% на энергиях порядка сотен МэВ. На текущий момент обнаружение эффекта само модуляции затруднительно из-за низкого разрешения имеющихся гамма-телескопов на этих энергиях. Однако он может оказывать существенное влияние на точность определения спектра диффузных источников на энергиях ниже 1 ГэВ, таких как, например, “ГэВный избыток” в центре Галактики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-12-00047).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Issa M.R., Wolfendale A.W. // Nature. 1981. V. 292. P. 430.
2. Птускин В.С., Зиракашвили В.Н., Георгиева А.А., Кленач Е.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 4. С. 480; Ptuskin V.S., Zirakashvili V.N., Georgieva A.A., Klepach E.G. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2007. V. 71. No. 4. P. 461.
3. Skilling J., Strong A.W. // Astron. Astrophys. 1976. V. 53. P. 253.
4. Cesarsky C.J., Volk H.J. // Astron. Astrophys. 1978. V. 70. P. 367.
5. Ivlev A.V., Dogiel V.A., Chernyshov D.O. et al. // Astrophys. J. 2018 V. 855. Art. No. 23.
6. Dogiel V.A., Chernyshov D.O., Ivlev A.V. et al. // Astrophys. J. 2018 V. 868. Art. No. 114.
7. Топчиев Н.П., Гальпер А.М., Архангельская И.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 688; Topchiev N.P., Galper A.M., Arkhangelskaja A.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 5. P. 629.
8. Duarte-Cabral A., Colombo D., Urquhart J.S. et al. // MNRAS. 2021. V. 400. P. 3027.
9. Strong A.W., Moskalenko I.V. // Astrophys. J. 1998. V. 509. Art. No. 212.
10. Vladimirov A.E., Digel S.W., Johannesson G. et al. // Comp. Phys. Commun. 2011. V. 182. No. 5. P. 1156.
11. Ackermann M., Ajello M., Atwood W.B. et al. // Astrophys. J. 2012. V. 750. No. 1. Art. No. 3.
12. Dogiel V.A., Chernyshov D.O., Ivlev A.V. et al. // Astrophys. J. 2021. V. 921. No. 1. Art. No. 43.
13. Ackermann M., Ajello M., Albert A. // Astrophys. J. 2017. V. 840. No. 1. Art. No. 43.

Effects of cosmic rays' self-modulation on the galactic diffuse gamma-ray emission

D. O. Chernyshov^{a,*}, A. V. Ivlev^b, E. A. Kulik^a

^a*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Tamm Theoretical Physics Division, Moscow, 119991 Russia*

^b*Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, Garching, D-85748 Germany*

**e-mail: chernyshov@td.lpi.ru*

We studied how the process of self-modulation of cosmic rays, occurring upon their penetration into dense molecular clouds, affects the total gamma-ray emission of the Galaxy. We estimated how the self-modulation modifies the emission from each individual cloud and integrate the results along the line of sight for a given area in the sky. Our calculations show that the self-modulation reduces the total intensity of gamma-ray emission below 1 GeV by about 10–30%. Even though the magnitude of the effect is not large, it still can substantially affect the background gamma-ray emission at low energies.