

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УДК 539.12

ОТЧЕТ ПО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
СТУДЕНТА:

ВОЗМОЖНЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОСМИЧЕСКОМ
ГАММА-ИЗЛУЧЕНИИ ОТ РАСПАДА ИЛИ АННИГИЛЯЦИИ
ЧАСТИЦ СКРЫТОЙ МАССЫ

Научный руководитель
к.ф.-м.н.,

_____ К. М. Белоцкий

Выполнила:

_____ Е. С. Шлепкина

Москва 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Поток гамма-излучения за счет обратного комптоновского рассеяния	5
1.1 Вывод формулы для спектра гамма-излучения за счет ICS .	5
2 Результаты расчетов	7
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	9
Список использованных источников	9

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных и современных проблем в космологии и физике частиц является проблема скрытой массы (СМ (dark matter)) во Вселенной. По нынешним оценкам скрытая масса составляет 25-27% от общей плотности Метагалактики. Попытки решения данной проблемы часто связывают с другими космологическими и астрофизическими проблемами. К числу этих проблем принадлежит, например, происхождение аномального избытка высокоэнергетичных (порядка 100 ГэВ и выше) позитронов в космических лучах («эффект «ПАМЕЛЫ» [1]). Предпринималось множество попыток обоснования данного эффекта. Одной из гипотез происхождения данной аномалии является распад или аннигиляция частиц скрытой массы в заряженные лептоны ($e^\pm$) в конечном состоянии.

Если действительно аннигиляция скрытой массы лежит в основе происхождения избытка позитронов, то всюду в галактическом гало создается обильное количество $e^\pm$ с высокой энергией. В таком случае неизбежно сигнал состоит из высокоэнергетического гамма-излучения (от десятков МэВ до нескольких ТэВ (в зависимости от массы частицы СМ), создаваемых Обратным Комптоновским Рассеянием [2; 3]. Электроны и позитроны высоких энергий из такой распадающейся или аннигилирующей скрытой массы могут указать на уникальную угловую анизотропию потока гамма-излучения за счет Обратного Комптоновского Излучения (далее: ICS и ICS фотоны) на фотонах реликтового и инфракрасного излучения и света звезд. В качестве объекта изучения в данной работе используется галактика Андромеда (М31), так как данная галактика расположена под углом ($\approx 15^\circ$) к плоскости и анизотропия от такого объекта могла бы быть заметной, за счет анизотропного вылета фотонов за счет ICS.

Целью данной работы является рассмотрение потоков гамма-излучения высоких энергий, создаваемых обратным комптоновских рассеянием межзвездных фотонов на таких $e^\pm$. Рассматривается несколько значений масс частицы скрытой массы и профилей плотности СМ.

1 Поток гамма-излучения за счет обратного комптоновского рассеяния

Процесс ICS представляет собой рассеяние низкоэнергетических фотонов на позитронах и электронах высокой энергии [4]. В данном случае высокие энергии $e^\pm$ создаются аннигиляцией или распадом СМ в любой заданной точке галактики М31 с плотностью, определяемой профилем распределения СМ. Все низкоэнергетические рассматриваемые фотоны состоят из трех основных вкладов : звездный свет, исходящий от звезд галактического диска (на оптических длинах волн), инфракрасное излучение, создаваемое поглощением и переизлучением звездного света межзвездной пылью и фотоны СМВ.

1.1 Вывод формулы для спектра гамма-излучения за счет ICS

На первом шаге рассматривается методика расчета потока фотонов в случае изотропного рассеяния его на электроне [5; 6], которая впоследствии должна быть адаптирована на более реалистичный анизотропный случай .

Необходимо посчитать дифференциальный поток $d\Phi/d\epsilon_1$ высокоэнергетичных фотонов образованных процессом обратного комптоновского рассеяния, приходящих из углового региона неба $\Delta\Omega$. Здесь и далее ϵ_1 – энергия рассеянного фотона и ϵ – энергия начального фотона в системе фотонного газа. Такой поток определяется как:

$$\frac{d\Phi}{d\epsilon_1} = \frac{1}{\epsilon_1} \frac{\langle \sigma_{ann} v \rangle}{4\pi} r_\odot \frac{\rho_0^2}{M_{DM}^2} \int_{\Delta\Omega} d\Omega \int_{l.o.s.} \frac{dr}{r_\odot} \left(\frac{\rho(r)}{\rho_0} \right)^2 \int_{m_e}^{M_{DM}} dE \frac{\mathcal{P}(\epsilon_1, E, r)}{\dot{\mathcal{E}}(E, r)}. \quad (1)$$

где $\langle \sigma_{ann} v \rangle$ – сечение аннигиляции частицы скрытой массы. В данной работе мы принимаем его равным $\langle \sigma_{ann} v \rangle \approx 3 \cdot 10^{-26}$ см³/сек, $r_\odot = 785$ кпс – расстояние от Солнца до Галактики Андромеды, $\rho_0 = 0.3$ ГэВ/см³ – плотность СМ в галактическом гало М31, M_{DM} – масса частицы скрытой массы, $\Delta\Omega = 3^\circ \times 5^\circ$ – телесный угол охватывающий Галактику Андромеды и ее темного гало. Выражение (1) можно переписать:

$$\frac{d\Phi}{d\epsilon_1} = \frac{1}{\epsilon_1} \frac{\langle \sigma_{ann} v \rangle}{4\pi} r_\odot \frac{\rho_0^2}{M_{DM}^2} \bar{J} \Delta\Omega \int_{m_e}^{M_{DM}} dE \frac{\mathcal{P}(\epsilon_1, E, r)}{\dot{\mathcal{E}}(E, r)}. \quad (2)$$

и

$$\bar{J}\Delta\Omega = \int_{\Delta\Omega} d\Omega \int_{\text{line-of-sight}} \frac{ds}{r_{\odot}} \left(\frac{\rho(r)}{\rho_0} \right)^2 \quad (3)$$

где $\bar{J}$ – так называемый геометрически фактор[7] (или J - фактор) для ICS фотонов. И телесный угол задается выражением:

$$\Delta\Omega = \iint \sin\theta d\phi d\theta \quad (4)$$

$\dot{\mathcal{E}}(E, r)$ – полная скорость потери энергии электроном на счет ICS.

$$\begin{aligned} \dot{\mathcal{E}}(E, r) = & 3\sigma_T \int_0^\infty d\epsilon \epsilon \int_{1/4\gamma^2}^1 dq n(\epsilon, r) \frac{(4\gamma^2 - \Gamma_\epsilon)q - 1}{(1 + \Gamma_\epsilon q)^3} \times \\ & \times \left[2q \ln q + q + 1 - 2q^2 + \frac{1}{2} \frac{(\Gamma_\epsilon q)^2}{1 + \Gamma_\epsilon q} (1 - q) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$\mathcal{P}(\epsilon_1, E, r)$ – дифференциальная мощность излучения электронов в фотоны

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(\epsilon_1, E, r) = & \frac{3\sigma_T}{4\gamma^2} \epsilon_1 \int_{1/4\gamma^2}^1 dq \left(1 - \frac{1}{4q\gamma^2(1 - \tilde{\epsilon}_1)} \right) \frac{n(\epsilon(q), r)}{q} \\ & \times \left[2q \ln q + q + 1 - 2q^2 + \frac{1}{2} \frac{\tilde{\epsilon}_1^2}{1 - \tilde{\epsilon}_1} (1 - q) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

В уравнениях (5) и (6) $\gamma^2 = E/m_e$ где E - энергия электрона. Для расчета – полная плотность излучения $n(\epsilon)$ берется как сумма трех спектров подобных спектрам для абсолютно черного тела ($i = 1, 2, 3$) [8].

$$n_i = \frac{\epsilon^2}{\pi^2} \frac{1}{\exp(\epsilon/T_i) - 1} \quad (7)$$

с различными температурами: для СМВ с $T_{СМВ} = 2.725$ К, для инфракрасного излучения с $T_{IR} = 3.5 \cdot 10^{-3}$ эВ и для звездного света с $T_{SL} = 0.3$ эВ.

2 Результаты расчетов

В результате моделирования и численного анализа были получены наборы дифференциальных потоков для нескольких значений масс частицы скрытой массы и профилей распределения СМ.

Были рассмотрены три различных профиля распределения СМ в галактике: профиль Эинасто [9], профиль Наварро – Фрэнка – Уайта [10] и изотермический профиль [11].

$$\rho_{Ein}(r) = \rho_s \exp \left[-\frac{2}{\alpha} \left(\left(\frac{r}{r_s} \right)^\alpha - 1 \right) \right], \quad \alpha = 0.17 \quad (8)$$

$$\rho_{NFW}(r) = \rho_s \frac{r_s}{r} \left(1 + \frac{r}{r_s} \right)^{-2} \quad (9)$$

$$\rho_{Iso}(r) = \frac{\rho_s}{1 + \left(\frac{r}{r_s} \right)^2} \quad (10)$$

Величины параметров ρ_s и r_s для этих трех моделей даны в Таблице 1.

Модель гало СМ	r_s в кпс	ρ_s в ГэВ/см ³
NFW	20	0.26
Эинасто	20	0.06
Изотермический	5	1.16

Таблица 1 – Величины r_s и ρ_s для различных моделей гало СМ

В результат включен только сигнал от вклада ICS фотонов и не включен вклад быстрых гамма от аннигиляции СМ.

На рисунках 1,2,3 изображены примеры сигнала от различных моделей скрытой массы.

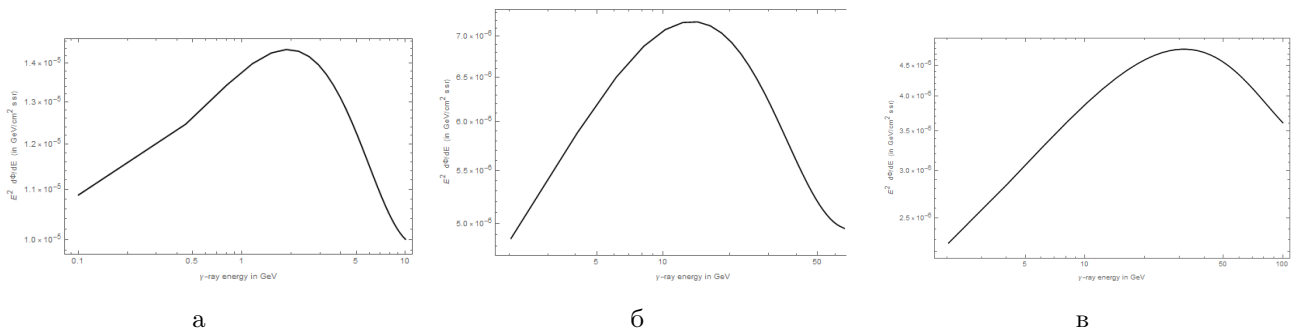


Рисунок 1 – Сигнал от скрытой массы с профилем распределения NFW для масс частицы скрытой массы 1,2 и 3 ТэВ

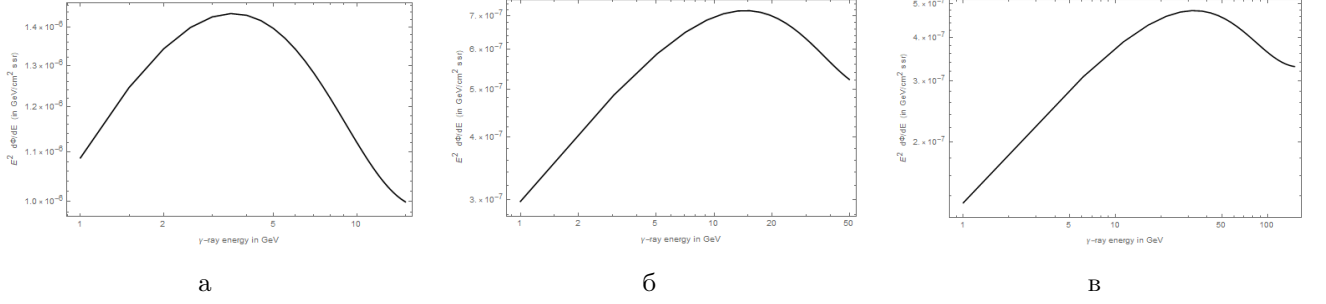


Рисунок 2 – Сигнал от скрытой массы с изотермическим профилем распределения для масс частицы скрытой массы 1,2 и 3 ТэВ

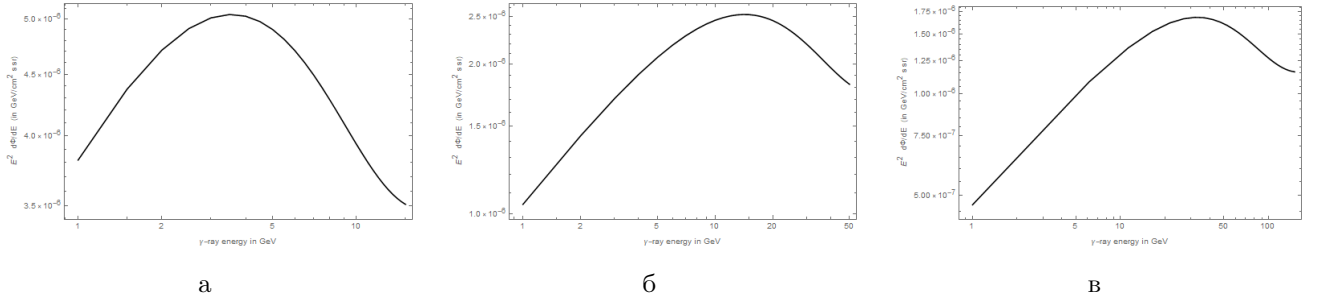


Рисунок 3 – Сигнал от скрытой массы с профилем распределения Эинасто для масс частицы скрытой массы 1,2 и 3 ТэВ

Таким образом, анализируя полученные зависимости дифференциального потока от энергии гамма-излучения, можно сравнить их с уже полученными экспериментальными данными, например, с эксперимента Fermi-LAT и EGRET[12; 13], чтобы выбрать наиболее подходящую модель скрытой массы для следующего шага.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена методика расчета дифференциального потока гамма-излучения от аннигиляции или распада частиц скрытой массы, возникающего за счет ICS на фотонах межзвездной среды в случае их изотропного рассеяния в данном процессе.

По результатам расчетов для каждой рассматриваемой модели скрытой массы, а именно, для массы частицы СМ 1-3 ТэВ и для трех различных профилей распределения плотности получены спектры фотонов, образованных за счет Обратного Эффекта Комптона.

Данный результат в сравнении с уже полученными экспериментальными данными позволит выделить область параметров моделей СМ, для которых возможен дальнейший анализ и послужит начальным этапом для дальнейшей оценки эффекта анизотропии .

На следующем шаге выполнения данной научно-исследовательской работы необходимо обобщить методику расчета спектра ICS фотонов на реалистичный анизотропный случай и получить галактическую карту потоков для галактики М31.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100 GeV / O. Adriani [et al.] // Nature. — 2009. — Vol. 458. — P. 607–609. — arXiv: [0810.4995 \[astro-ph\]](#).
2. Case for a700+ GeVWIMP: Cosmic ray spectra from PAMELA, Fermi, and ATIC / I. Cholis [и др.] // Physical Review D. — 2009.
3. Discriminating different scenarios to account for the cosmic $e^\pm$ excess by synchrotron and inverse Compton radiation / J. Zhang [и др.] // Physical Review D. — 2009. — т. 80, № 2. — с. 023007.
4. *Blumenthal G. R., Gould R. J.* Bremsstrahlung, synchrotron radiation, and compton scattering of high-energy electrons traversing dilute gases // Reviews of Modern Physics. — 1970. — т. 42, № 2. — с. 237.
5. *Cirelli M., Panci P.* Inverse Compton constraints on the Dark Matter $e^\pm$ excesses // Nuclear Physics B. — 2009. — т. 821, № 1/2. — с. 399–416.
6. PPC 4 DM ID: a poor particle physicist cookbook for dark matter indirect detection / M. Cirelli [и др.] // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2011. — т. 2011, № 03. — с. 051.
7. *Bergstrom L., Ullio P., Buckley J.* Observability of gamma rays from dark matter neutralino annihilations in the Milky Way halo // arXiv preprint astro-ph/9712318. — 1997.
8. Inverse Compton origin of the hard X-ray and soft gamma-ray emission from the galactic ridge / T. A. Porter [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2008. — т. 682, № 1. — с. 400.
9. Empirical models for dark matter halos. I. Nonparametric construction of density profiles and comparison with parametric models / D. Merritt [и др.] // The Astronomical Journal. — 2006. — т. 132, № 6. — с. 2685.

10. *Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D.* A universal density profile from hierarchical clustering // The Astrophysical Journal. — 1997. — т. 490, № 2. — с. 493.
11. *Bahcall J. N., Soneira R. M.* The universe at faint magnitudes. I-Models for the galaxy and the predicted star counts // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1980. — т. 44. — с. 73—110.
12. EGRET observations of the diffuse gamma-ray emission from the galactic plane / S. Hunter [и др.] // The Astrophysical Journal. — 1997. — т. 481, № 1. — с. 205.
13. EGRET observations of the extragalactic gamma-ray emission / P. Sreekumar [и др.] // The Astrophysical Journal. — 1998. — т. 494, № 2. — с. 523.