

Взаимодействие космических лучей и частиц скрытой массы

Коваленко А.И.

Научный руководитель, проф., д.ф.-м.н.
Научный консультант, проф., д.ф.-м.н.,

М.Ю. Хлопов
М.Г. Рыскин

31 мая 2021 г.

- Ряд астрофизических наблюдений, в частности исследование скоплений галактик и кривых вращения галактик, свидетельствуют о существовании скрытой массы как одного из компонентов вещества Вселенной.
- Актуальной проблемой как астрофизики, так и физики элементарных частиц, является построение теории взаимодействия частиц скрытой массы с барионным веществом и излучением, а также нахождение способов прямого или косвенного детектирования таких частиц.
- Цель работы заключается в расчете сечения процесса выбивания тяжелой компоненты составной частицы скрытой массы протонами космических лучей высоких энергий и получение оценки возможных потоков новой компоненты в составе космических лучей.

- В работе рассматриваются две модели частиц скрытой массы. Первый вариант представляет собой нейтральный стабильный тяжелый адрон, в составе которого находится тяжелый кварк. Вторая модель — «темный» атом OHe , включающий в себя гипотетический стабильный тяжелый лептон O^{--} , который связан кулоновским взаимодействием с ядром первичного гелия.
- Пространственное распределение плотности частиц скрытой массы в гало описывается с помощью профиля Наварро-Френка-Уайта:

$$\rho = \frac{M_{\text{halo}}}{4\pi R(R + a_{\text{halo}})^2}, \quad (1)$$

где $a_{\text{halo}} = 1.41 \cdot 10^{21}$ м - константа, R - радиус гало. $M_{\text{halo}} = 3341.7 \cdot 10^9 M_{\odot}$, масса Солнца $M_{\odot} = 1.989 \cdot 10^{30}$ кг.

Модель взаимодействия

- В качестве основной составляющей космических лучей высоких энергий рассмотрим протоны. Модель взаимодействия включает в себя передачу импульса от протона тяжелой составляющей частицы скрытой массы путем рассеяния.
- Дифференциальное сечение рассеяния выражается через квадрат модуля амплитуды рассеяния:

$$d\sigma = \frac{1}{j} |M|^2 d\phi, \quad (2)$$

где лоренц-инвариантный фазовый объем и плотность потока начальных частиц вычисляются следующим образом:

$$d\phi = (2\pi)^4 \delta^4(p_1 + p_2 - p'_1 - p'_2) \prod_{i=1,2} \frac{d^3 p_i}{(2\pi)^3 2E_i}, \quad (3)$$

$$j = 4 ((p_1 p_2)^2 - (m_1 m_2)^2)^{1/2}. \quad (4)$$

- Поток космических лучей через единичную площадку в единичном элементе телесного угла зависит от энергии следующим образом:

$$\frac{dl(e')}{de' dF} = (e')^{-2.7}. \quad (5)$$

- Число тяжелых адронов или лептонов с энергией e после взаимодействия частиц скрытой массы с протонами космических лучей на пути $l = c\tau$ (τ - время жизни протона):

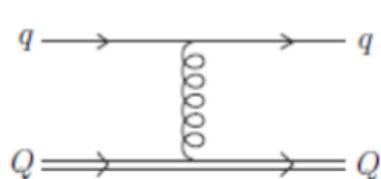
$$\frac{dn}{dedF} = \frac{\rho}{m_0} l \left(\frac{d\sigma}{de} \right) \int_e^{\infty} \frac{dl(e')}{de' dF} de', \quad (6)$$

где ρ - плотность, m_0 - масса частицы скрытой массы. Тогда получаем:

$$\frac{\rho}{m_0} = 5.8 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{см}^3}.$$

Тяжелый стабильный адрон

- Проанализируем рассеяние кварка из состава протона на тяжелом кварке частицы скрытой массы в приближении одноглюонного обмена.



- Формула для кварк-кваркового рассеяния:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{2}{9} \left(\frac{4\pi\alpha_s^2}{t^2} \right), \quad (7)$$

$$t = 2m_Q e, \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{4\pi\alpha_s^2}{3m_Q} \int_{1\text{ТэВ}}^{\infty} \frac{de}{e^2} = 17 \cdot 10^{-36}, \quad (9)$$

$$F_q = 1.4 \cdot 10^{-19} \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стр}}. \quad (10)$$

Рис.: Одноглюонный обмен в кварк-кварковом рассеянии

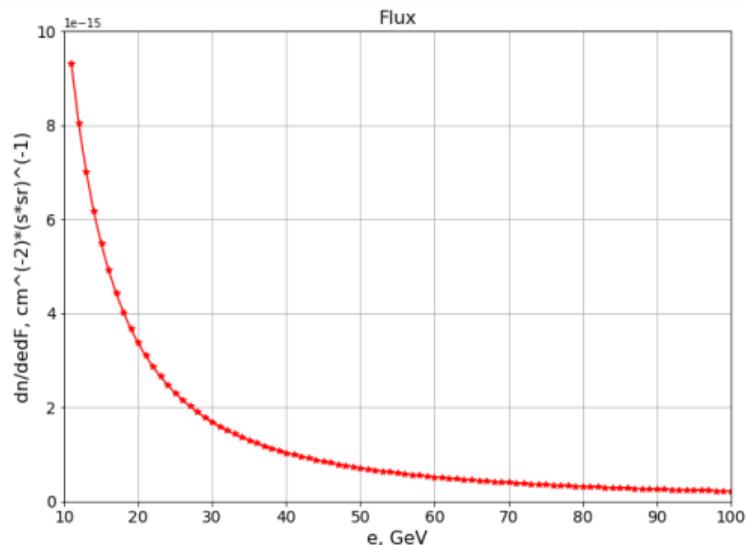


Рис.: Поток тяжелых лептонов

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\sigma}{2M_L de}, \quad (11)$$

$$\frac{d\sigma}{de} = \frac{Z_L^2 \pi \alpha^2}{M_L} \frac{1}{e^2}, \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{Z_L^2 \pi \alpha^2}{M_L} \int_{50 \text{ МэВ}}^{\infty} \frac{de}{e^2} = 5.4 \cdot 10^{-33} \text{ см}^2. \quad (13)$$

$$I = \int_{10 \text{ ГэВ}}^{\infty} (e'/\text{ГэВ})^{-2.7} de' = 12 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стр}} \quad (14)$$

$$F_L = \frac{\rho}{m_0} \sigma \tau \beta c l = 1.1 \cdot 10^{-14} \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стр}}. \quad (15)$$

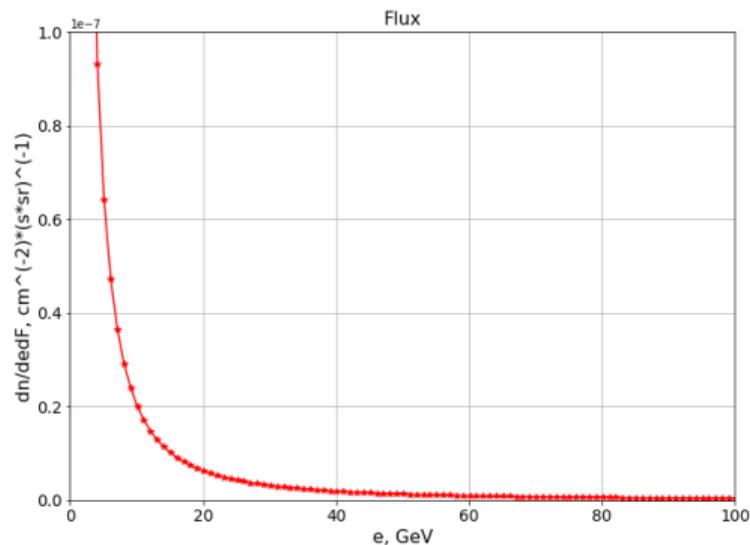


Рис.: Поток тяжелых лептонов

Поток космических лучей:

$$I = \int_{100}^{\infty} (e'/\text{ГэВ})^{-2.7} de' \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стр}} = 29.5 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{стр} \cdot \text{с}} \quad (16)$$

Поток лептонов:

$$F_L = \frac{\rho}{m_0} \sigma \tau \beta c l \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стр}} \quad (17)$$

где $M_L = 1\text{TeV}$ - масса лептона, $\beta = 0.001$.

$$F_L = 5.13 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стр}} \quad (18)$$

- Вероятность того, что частица скрытой массы будет ускорена протоном космических лучей высоких энергий:

$$P_a = \sigma(\text{He} - p) F_p \tau F^2 = 0.4 \cdot 10^{-24} \quad (19)$$

Соответствующий ожидаемый поток ускоренных атомов равен:

$$F_a = \rho P_a \beta c = 2.4 \cdot 10^{-20} \text{1}/(\text{см}^2 \text{с стр}) \quad (20)$$

Данный поток слишком мал для обнаружения.

- Сечение рекомбинации $O \rightarrow O + p$ определяется следующим образом:

$$\sigma_r = 2^2 \alpha^2 / (m_p T_p) = 1.5 \cdot 10^{24} \text{см}^2. \quad (21)$$

Тогда вероятность рекомбинации:

$$P_r = \sigma_r v \tau \rho_p = 1.5 \cdot 10^{24} \cdot 10^7 \cdot 10^{15} = 0.01. \quad (22)$$

Поток свободных лептонов:

$$F_a = \rho P_a \beta c = 2.4 \cdot 10^{-20} \text{1}/(\text{см}^2 \text{с стр}) \quad (23)$$

Заключение

- В данной работе были рассмотрены возможные процессы взаимодействия частиц скрытой массы и космических лучей высоких энергий.
- В качестве основного компонента космических лучей взяты протоны. Модель составной скрытой массы была рассмотрена в двух вариантах: стабильный тяжелый адрон и «темный» атом. Был рассмотрен процес выбивания протоном космических лучей тяжелой составляющей частицы скрытой массы, проведен расчет сечений взаимодействия для каждого варианта.
- Оценка потоков новых компонент КЛ показывает, что в случае тяжелого адрона поток слишком мал для обнаружения его в составе потока космических лучей.
- Поток свободных лептонов, получаемых при разрушении атома протонами космических лучей, для сечения взаимодействия $\sigma \sim 10^{-25} \text{ см}^2$ оставляет возможность для возможного обнаружения.