

ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫЕ ЧАСТИЦЫ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ В АСТРОФИЗИКЕ

Секретов Михаил, 443 группа

Научный руководитель - Троицкий Сергей Вадимович

Кафедра физики частиц и космологии, физический факультет
МГУ имени М.В. Ломоносова

14 мая 2025 г.

Содержание

1. Оценка сечения взаимодействия тёмной материи с нуклонами
2. Поиск среди WIMP
3. Диапазон низких масс (субГэВная область)
4. Модели с тёмным сектором
5. Расчёт вероятности первого столкновения
6. Расчёт вероятности повторного столкновения

Оценка сечения

$$\sigma = \frac{1}{n\lambda} = \frac{1}{\frac{\rho}{m_{DM}} \lambda} = \frac{m_{DM}}{\rho\lambda} \quad (1)$$

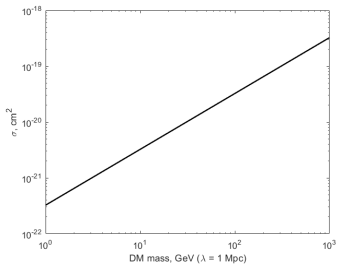
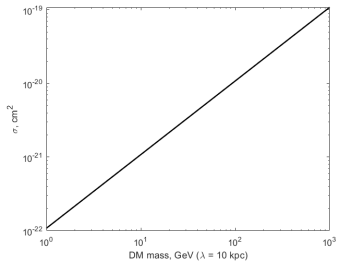
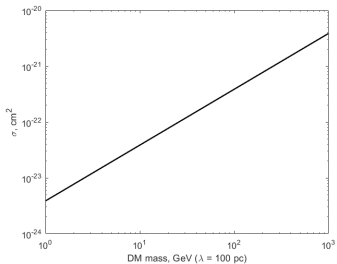
где n , ρ , m_{DM} - концентрация, плотность и масса тёмной материи соответственно, а λ - длина свободного пробега или же масштаб локализации.

Масштабы

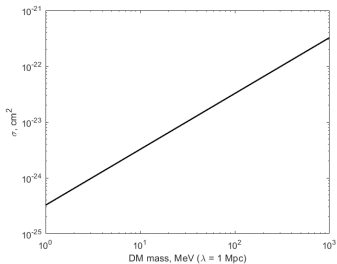
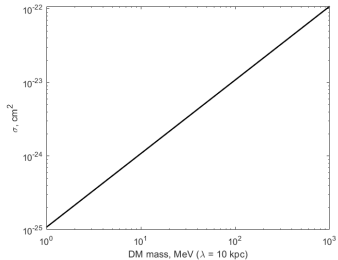
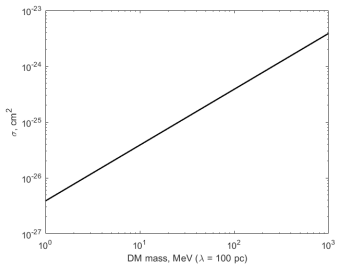
Таблица 1. Различные масштабы

Масштаб	λ , кпк	Плотность ρ , Гэв/см ³
Ядро	0.1	840
Галактика	10	0.3
Скопление галактик	10 ³	10 ⁻³

Оценка сечения



Оценка сечения



Асимптотика при высоких энергиях

$$\sigma \approx \sigma_0 \left(\frac{E}{1 \text{ GeV}} \right)^{0.4} \quad (2)$$

$$E \sim 10^{19} \text{ eV} \quad (3)$$

Ограничения на сечения

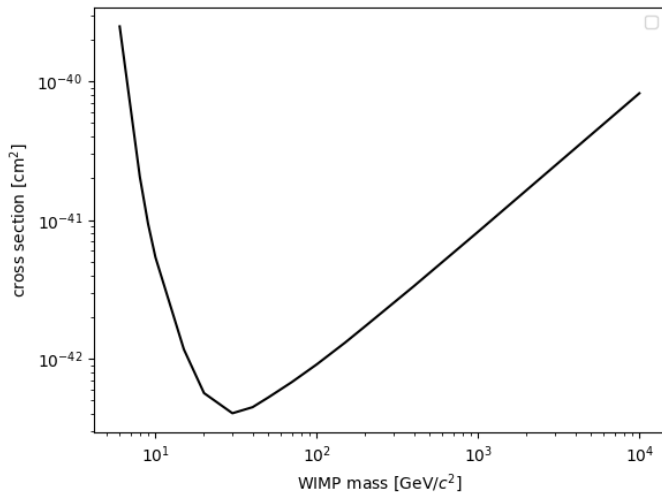


Рис. 2: Ограничения из эксперимента XENONnT с учетом асимптотики

Ограничения на сечения

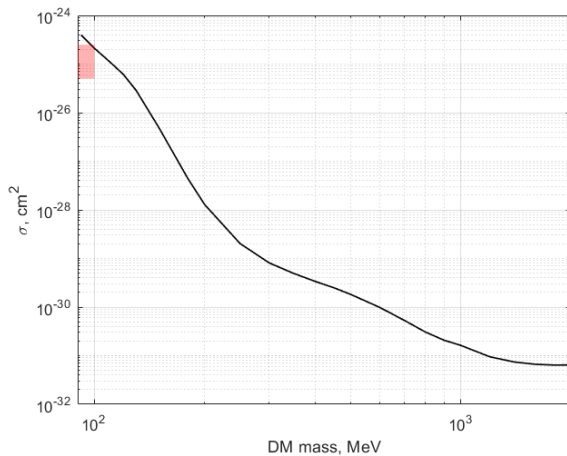


Рис. 3: Ограничения из эксперимента Super-CDMS с учетом асимптотики. Красным выделен интересующий нас диапазон

Модели с тёмным сектором

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4}F'_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_A^2 A'_\mu A'^\mu - \frac{\varepsilon}{2}F_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} - g_D A'_\mu J_D^\mu \quad (4)$$

где $F'_{\mu\nu} = \partial_\mu A'_\nu - \partial_\nu A'_\mu$ - тензор напряженности для тёмных фотонов,
 $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ - обычный тензор напряженности электромагнитного поля,
 $g_D = \sqrt{4\pi\alpha_D}$ - константа связи для нового взаимодействия, J_D^μ - ток по $U(1)_D$

Сечение:

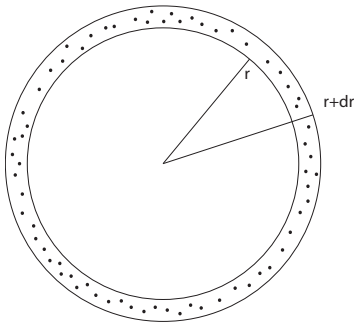
$$\sigma = \frac{16\pi\alpha\epsilon^2\alpha_D\mu^2}{m_{A'}^4} \quad (5)$$

где $\mu = \frac{m_\chi m}{m_\chi + m}$, $\alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137}$

Расчёт вероятности первого столкновения

$$dP(r) = \frac{\sigma dN}{S} = \frac{\sigma n(r) dV}{S} = \frac{\sigma n(r) 4\pi r^2 dr}{4\pi r^2} = \frac{\sigma}{m_{DM}} \rho(r) dr \quad (6)$$

так как $\rho(r) = \frac{n(r)}{m}$, m_{DM} - масса частицы тёмной материи, n и ρ - концентрация и плотность, σ - сечение взаимодействия с нуклонами, dN - количество частиц в слое, S - площадь.



$$\rho(r) \equiv \rho_{Bk}(r) = \frac{\rho_b}{(1 + r/r_b) \left(1 + (r/r_b)^2\right)} \quad (7)$$

Параметр $r_b = 8$ кпк, ρ_b определяется из нормировки:

$$\int \rho(r) r^2 \sin\theta \, dr \, d\theta \, d\phi = 4\pi \int_0^R \rho(r) r^2 \, dr = M = 10^{12} M_{\odot} \quad (8)$$

откуда

$$\rho_b = \frac{M}{4\pi r_b^3 I_1} \quad (9)$$

$$I_1 = \int_0^{R/r_b} \frac{x^2 dx}{(1+x)(1+x^2)} = 2.47 \quad (10)$$

$$P = \int_0^R \frac{\sigma}{m_{DM}} \rho(r) dr = \frac{\sigma}{m_{DM}} \frac{M}{4\pi r_b^3 l_1} l_2 r_b \quad (11)$$

$$l_2 = \int_0^{R/r_b} \frac{dx}{(1+x)(1+x^2)} = 0.78 \quad (12)$$

Итого, для значений $m_{DM} = 100$ МэВ и $\sigma = 10^{-25}$ см², получается:

$$P = \frac{\sigma}{4\pi r_b^2} \frac{M}{m_{DM}} \frac{l_2}{l_1} \sim 0.05 \quad (13)$$

Расчёт вероятности повторного столкновения

$$\rho(R, z) = \frac{\Sigma_g}{2z_{gas}} \exp(-R/R_{gas}) \operatorname{sech}^2(z/z_{gas}) \quad (14)$$

где $\Sigma_g = 71.1 M_\odot / \text{пк}^2$, $R_{gas} = 4.8 \text{ кпк}$, $z_{gas} = 130 \text{ пк}$

$$dP(r) = \frac{\sigma dN}{S} = \frac{\sigma n(z) dV}{S} = \frac{\sigma n(z) S dz}{S} = \frac{\sigma}{m} \rho(z) dz \quad (15)$$

$h \sim 100 \text{ пк}$ - полутолщина диска:

$$P = \int_0^h \frac{\sigma}{m} \rho(R = R_\odot, z) dz = \frac{\sigma}{m} \frac{\Sigma_g}{2z_{gas}} \exp(-R_\odot/R_{gas}) \int_0^h \operatorname{sech}^2(z/z_{gas}) dz \sim 5 \cdot 10^{-5} \quad (16)$$

где по-прежнему $\sigma = 10^{-25} \text{ см}^2$, а m - масса Протона.

Другой вариант

$$P = \int_0^{R_\odot} \frac{\sigma}{m} \rho(R, z=0) dR = \frac{\sigma}{m} \frac{\Sigma_g}{2z_{gas}} \int_0^{R_\odot} \exp(-R/R_{gas}) dR \sim 0.01 \quad (17)$$

Взаимодействие в галактических нитях

концентрация газа в филаменте $n \sim 1 \text{ м}^{-3}$ и размеры структур $\lambda \sim 50 \text{ Мпк}$

$$\sigma = \frac{1}{n \lambda} \sim 10^{-21} \text{ см}^2 \quad (18)$$

Выводы

- В работе были получены предполагаемые масса частицы тёмной материи $m_{DM} \sim 100$ МэВ и сечение взаимодействия с нуклонами $\sigma \sim 10^{-29} \text{ см}^2$ (10^{-25} см^2 в асимптотике). Отметим, что эти значения подходят под ограничение $\frac{\sigma}{m_{DM}} < 1 \text{ см}^2/\text{г}$

$$\frac{\sigma}{m_{DM}} = \frac{10^{-29} \text{ см}^2}{100 \text{ МэВ}} \approx 5.6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{г} \quad (19)$$

- Анизотропия
- Асимптотика?