

# 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  $n$ ,  $\rho$ ,  $m_{DM}$  - концетрация, плотность и масса тёмной материи соответственно, а  $\lambda$  - длина свободного пробега или же масштаб локализации.

# Масштабы

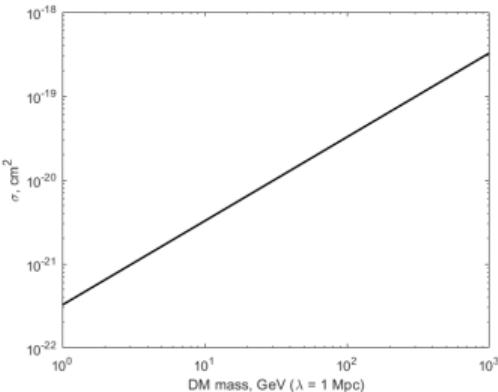
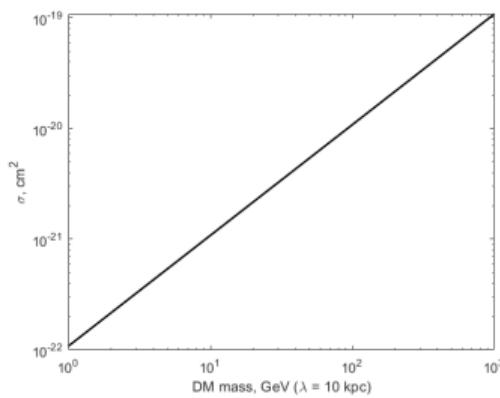
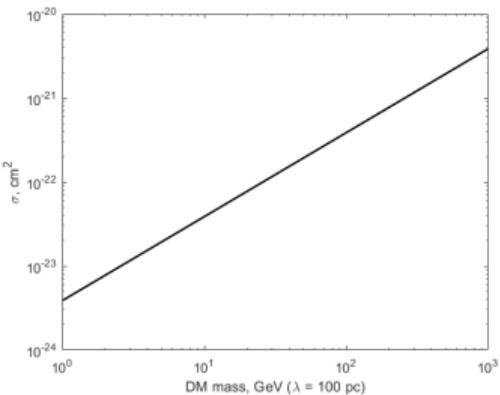
---

Таблица 1. Различные масштабы

Масштаб	$\lambda$ , кпк	Плотность $\rho$ , Гэв/см <sup>3</sup>
Ядро	0.1	840
Галактика	10	0.3
Скопление галактик	$10^3$	$10^{-3}$

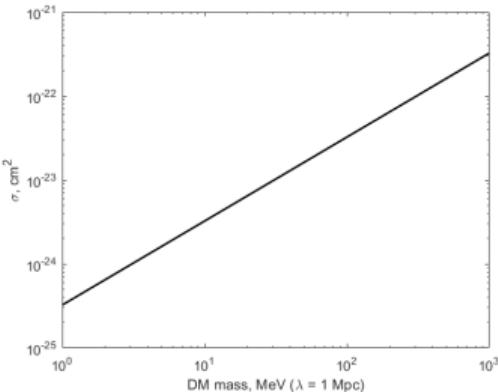
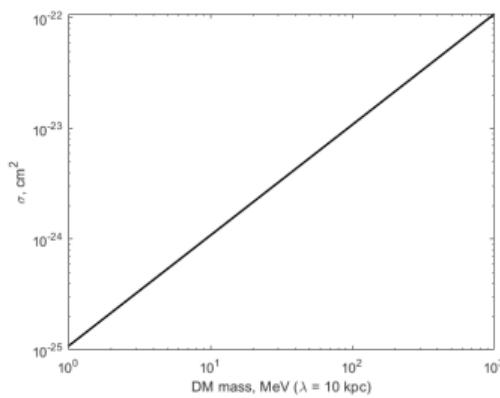
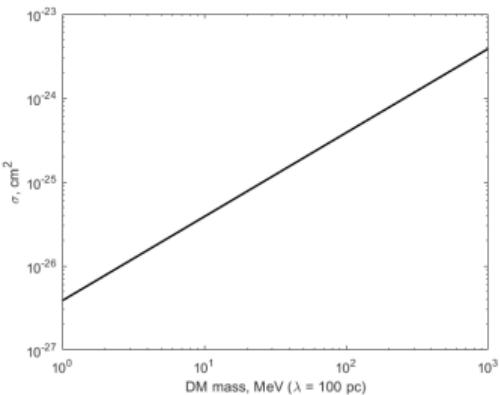
# Оценка сечения

---



# 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

---

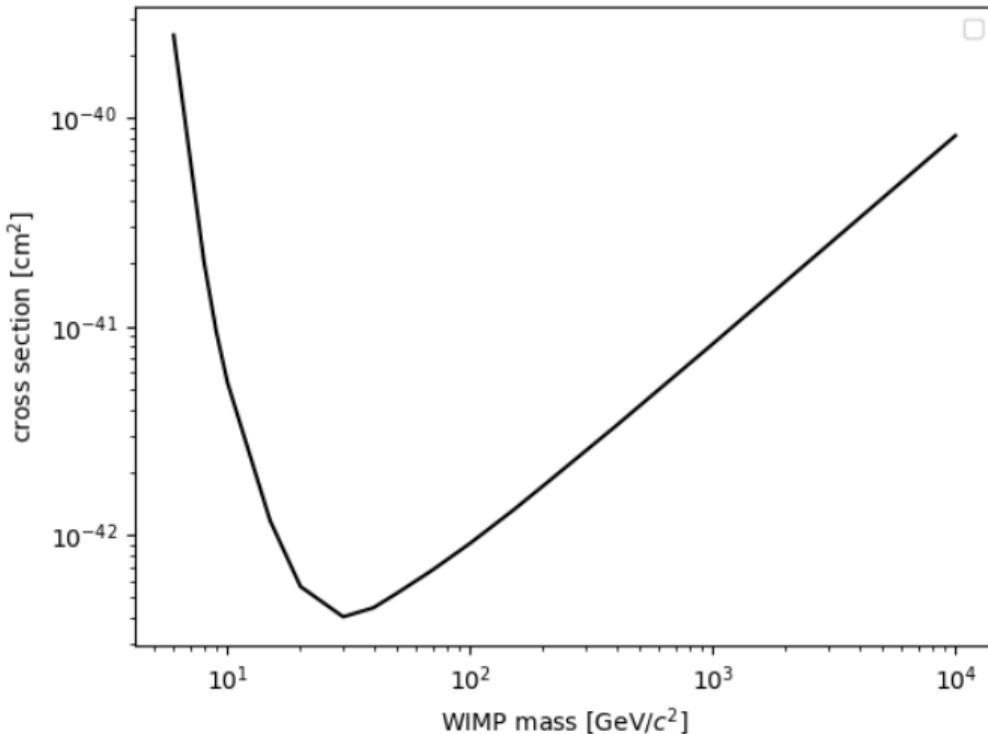


Рис. 2: Ограничения из эксперимента XENONnT с учетом асимптотики

# Ограничения на сечения

---

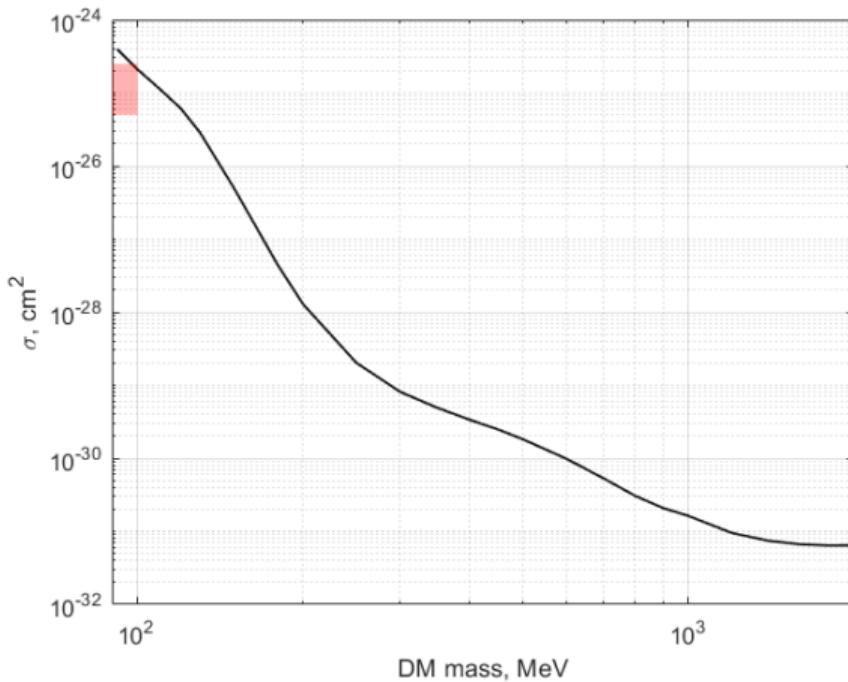


Рис. 3: Ограничения из эксперимента Super-CDMS с учетом асимптотики. Красным выделен интересующий нас диапазон

# 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,  $J_D^\mu$  - ток по  $U(1)_D$

Сечение:

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

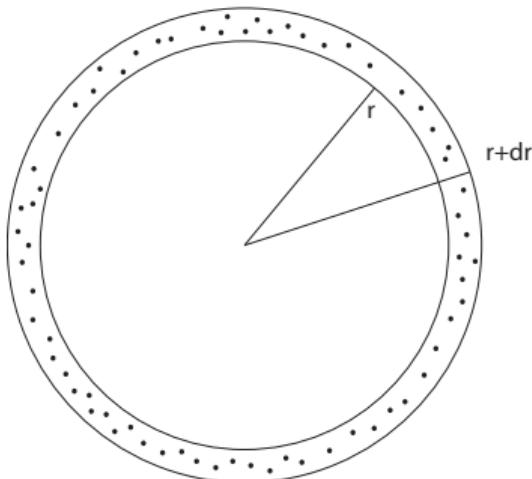
где  $\mu = \frac{m_\chi m}{m_\chi + m}$ ,  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137}$

# 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  $\rho$  - концентрация и плотность,  $\sigma$  - 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,  $\rho_b$  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

$$\rho_b = \frac{M}{4\pi r_b^3 l_1} \quad (9)$$

$$l_1 = \int_0^{R/r_b} \frac{x^2 \, dx}{(1+x)(1+x^2)} = 2.47 \quad (10)$$

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

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

Итого, для значений  $m_{DM} = 100$  МэВ и  $\sigma = 10^{-25}$  см<sup>2</sup>, 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

---

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

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

# Выводы

---

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

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

- Анизотропия
- Асимптотика?