

# Термализация неупругой тёмной материи в Солнце

Товстун А.А.

27 июня 2025 г.

# WIMP

- WIMP — частицы тёмной материи с возможной массой МэВ — ТэВ
- для термального рождения Тёмная Материя должна иметь сечение аннигиляции

$$\langle \sigma_{ann} v \rangle \sim 10^{26} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$$

- Методы поиска: прямые (подземные эксперименты по поиску отдачи ядер), косвенные (измерение продуктов аннигиляции), коллайдерные.

# WIMP

Наиболее сильные ограничения на сечение столкновения с нуклоном  $\sigma_{\chi p}$  дают прямые эксперименты.

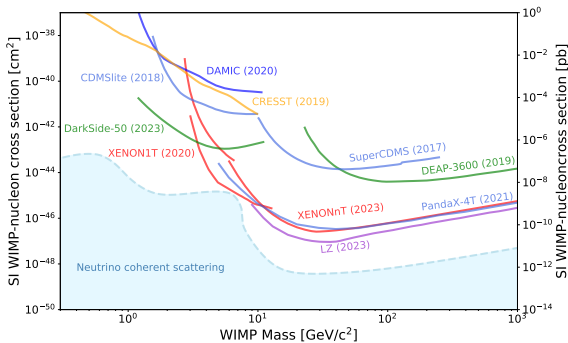
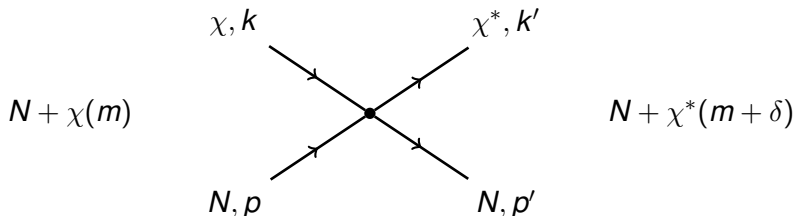


Рис.: Ограничения на  $\sigma_{\chi p}^{SI}$  (PDG)

# Неупругая тёмная материя

- Неупругая тёмная материя позволяет ослабить ограничения благодаря кинематике.
- Состоит из 2 компонент:  $\chi$  с массой  $m_\chi$  и  $\chi^*$  с массой  $m_\chi + \delta$
- Столкновения с ядрами происходят преимущественно неупругим образом.



# Неупругая тёмная материя

Неупругая тёмная материя может естественно возникать в различных теориях.

- Простейший пример — дираковский фермиона малой майорановской массой

$$\mathcal{L} \subset \bar{\chi}(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\chi + \frac{\delta}{4}\bar{\chi}\chi^C + \frac{\delta}{4}\bar{\chi}^C\chi$$

Массовыми состояниями являются

$$\chi_1 = \frac{\chi - \chi^C}{\sqrt{2}i}, \chi_2 = \frac{\chi + \chi^C}{\sqrt{2}}$$

с массами  $m_1 = m - \frac{\delta}{2}$  и  $m_2 = m + \frac{\delta}{2}$

# Неупругая тёмная материя

- Взаимодействие векторного типа приводит к неупругому рассеянию.

$$g\bar{\chi}\gamma^{\mu}\chi\bar{q}\gamma^{\mu}q = i\frac{g}{2}[\bar{\chi}_2\gamma^{\mu}\chi_1 - \bar{\chi}_1\gamma^{\mu}\chi_2]\bar{q}\gamma^{\mu}q$$

- Данный механизм встречается в секторе хиггсино в SUSY расширениях и в некоторых моделях с тёмными фотонами.
- Похожий механизм со скалярными комплексными полями встречается в секторе sneutrino.

## Взаимодействие с веществом

- Взаимодействие тёмной материи представляется в виде линейной комбинации операторов  $\hat{O}_1 \dots \hat{O}_{15}$ , возникающие из релятивистских операторов.  
Например:

$$\begin{aligned}\bar{\chi}\gamma^\mu\chi\bar{n}\gamma_\mu n &\rightarrow \hat{O}_1 = 1 \\ \bar{\chi}\gamma^\mu\gamma^5\chi\bar{n}\gamma_\mu\gamma^5 n &\rightarrow -4\hat{O}_4 = -4\vec{S}_\chi \cdot \vec{S}_n\end{aligned}$$

- Для нахождения сечения рассеяния на ядре находят в оболочечной модели ядра матричные элементы потенциала взаимодействия.

$$iV = \langle \chi k', Np' | \sum_i \hat{V}(r_\chi - r_i) | \chi k, Np \rangle$$

## Взаимодействие с веществом

- Рассеяние бывает спин-независимое  $SI$  и спин-зависимое  $SD$ .
- В первом случае когерентное рассеяние на  $A$  нуклонах в ядре приводит росту сечения на  $A^4$

$$\sigma_{\chi N}(\hat{O}_1) = \sigma_{\chi p} \cdot A^4 \left( \frac{m_\chi + m_p}{m_\chi + m_N} \right)^2 (q^2 \rightarrow 0)$$

- В  $SD$  случае сечение растёт только как  $A^2$ , из-за чего ограничения на сечение рассеяния слабее.



# Тёмная материя в Солнце

- Тёмная материя захватывается и аннигилирует в Солнце. Этим процессы описывают уравнением баланса

$$\frac{dN}{dt} = C - aN^2$$

решение которого имеет вид:

$$N = \sqrt{\frac{C}{a}} \operatorname{th} [\sqrt{at^2 C}], \quad A = C \operatorname{th}^2 [\sqrt{at^2 C}]$$

$$aT_{\odot}^2 = 9 \cdot 10^{-23} \text{ s} \left( \frac{\langle \sigma_a v \rangle}{3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}} \right) \left( \frac{m_{\chi}}{\text{GeV}} \right)^{3/2}$$

# Тёмная материя в Солнце

- В упругом случае как правило  $aT_{\odot}^2 C \gg 1$  и  $A = C$ .
- В неупругом сценарии  $a$  зависит от сечения рассеяния  $\sigma_{\chi p}$ , модели и времени.
- Величина  $a$  находится с помощью численного расчета линейного уравнения Больцмана.
- Учитывая изотропность задачи, фазовое пространство — плоскость  $E - L$  и уравнение эволюции выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial f(E, L)}{\partial t} = C(E, L) + \int dE' dL' [S(E, L, E', L') f(E', L') - S(E', L', E, L) f(E, L)]$$

# Тёмная материя в Солнце

- Для численного решения фазовое пространство разбивается на интервалы по переменным  $E$  и  $l$

$$E = \left( \frac{1}{2} v_{\chi}^2 + \phi(r) \right) \cdot \left( \frac{1}{2} v_{esc}^2 \right)^{-1}$$

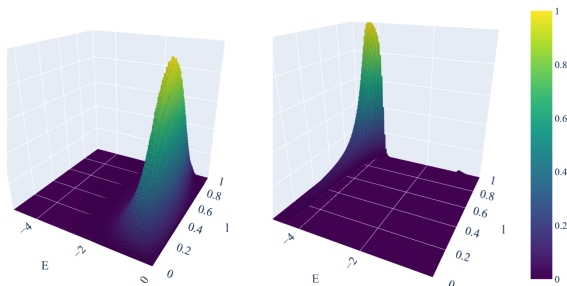
$$L = \frac{|\vec{r} \times \vec{v}|}{R_{\odot} v_{esc}}, l = \frac{L}{L_{max}(E)}$$

- Решается уравнение на количество частиц в  $i$ -том интервале:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \frac{1}{T_{\chi p}} \left( N_{\odot} c_i + \sum_j [s_{ij} N_j - s_{ji} N_i] - e_i N_i \right)$$

# Тёмная материя в Солнце

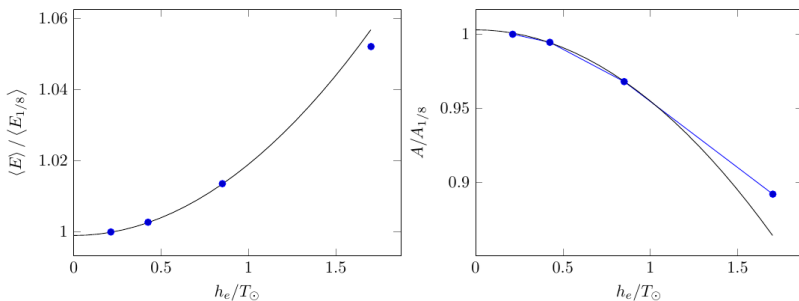
Мы решаем однородное уравнение на величину  $C_i(t) = \frac{\partial N}{\partial t}$ , которое описывает эволюцию частиц, захватившихся за единицу времени в момент  $t = 0$ .



**Рис.:** Распределение захваченных частиц для  $m_\chi = 100 \text{ GeV}$ ,  $\delta = 100 \text{ keV}$ .

# Сходимость численных схем

## Упругий случай



**Рис.:** Зависимость физических величин (средняя энергия, и темп аннигиляции) от шага решетки  $m_\chi = 100\text{GeV}$

# Сходимость численных схем

## Неупругий случай

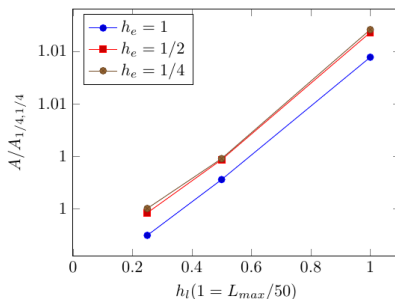
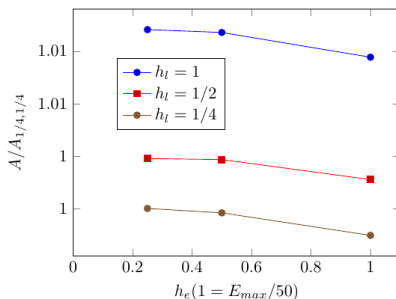


Рис.: Зависимость темпа аннигиляции от шага решетки по  $E$  и  $l$  при  $m_\chi = 100\text{GeV}$

# Тёмная материя в Солнце

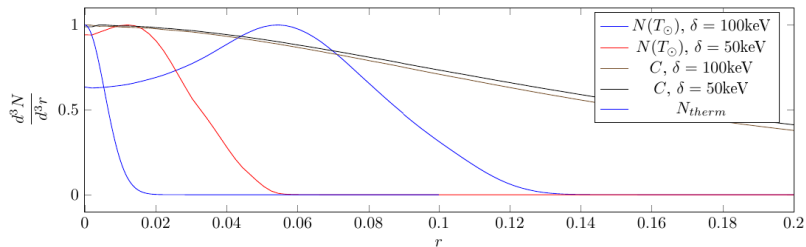


Рис.: Начальное и конечное распределение частиц тёмной материи в Солнце  $m_\chi = 100\text{GeV}$

# Тёмная материя в Солнце

Можно ли найти  $aT_{\odot}^2$  решая лишь линейное уравнение?

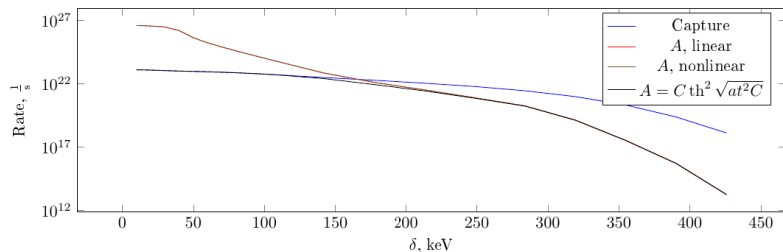
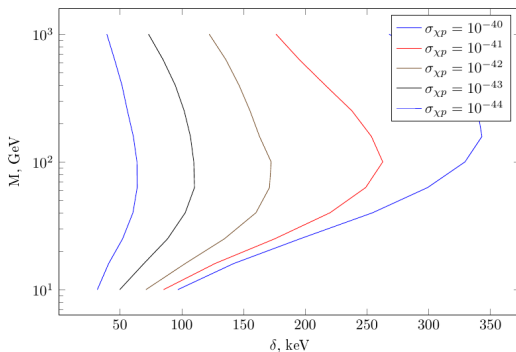


Рис.: Зависимость от  $\delta$  захвата и аннигиляции при линейной и нелинейной эволюции для  $m_{\chi} = 100\text{GeV}$



# Условие равновесия

Нам нужно знать при каких  $m$  и  $\delta$  наступает равновесие между аннигиляцией и захватом а при каких нет.



**Рис.:** Область параметров при которых наступает равновесие между  $A$  и  $C$

## Внешняя аннигиляция

Интерес представляет также та часть частиц, которая остается снаружи Солнца и может давать большой аннигиляционный сигнал.

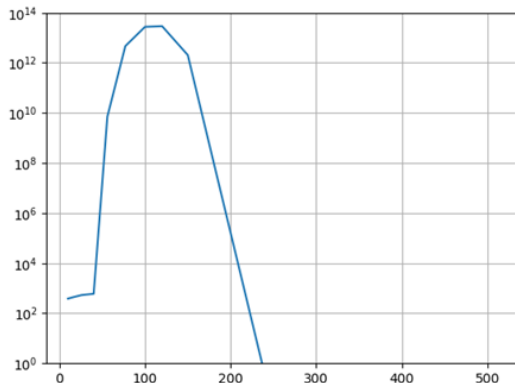


Рис. : Темп внешней аннигиляции

# Коэффициент аннигиляции

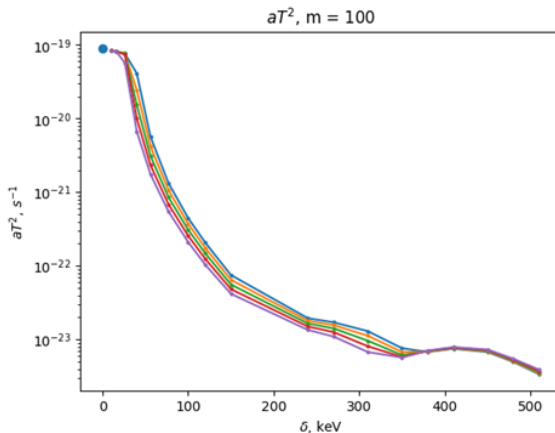


Рис.: Коэффициент аннигиляции для  $m_\chi = 100\text{GeV}$

# Ограничения

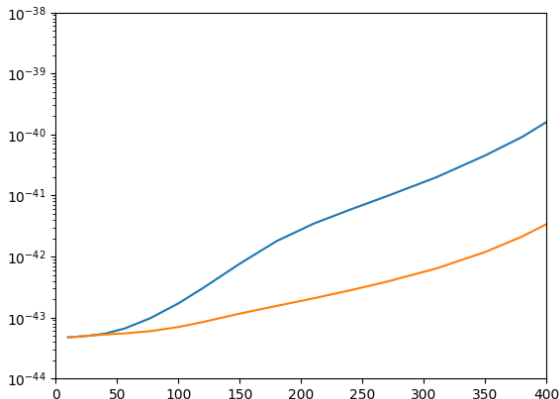


Рис.: Пример ограничений для  $m_\chi = 100 \text{ GeV}$

## Что еще

- Что если включить малое упругое взаимодействие?
- Что если включить саморассеяние тёмной материи  
 $\chi + \chi \rightarrow \chi + \chi$ ?