

Термализация неупругой тёмной материи в Солнце

Товстун А.А.

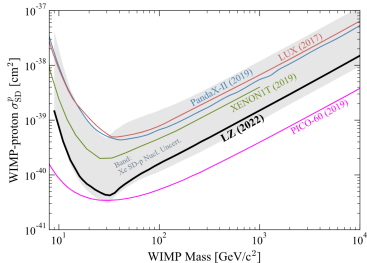
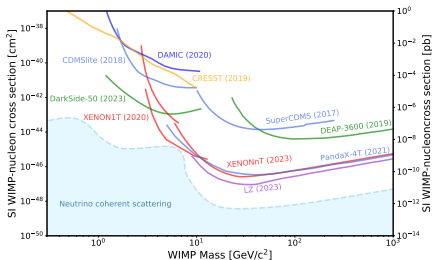
ИЯИ РАН

4 июля 2025 г.

QFTHEP-270

Термальная темная материя (WIMP)

- Поиски тёмной материи сильно ограничивают сечение рассеяния на нуклоне.



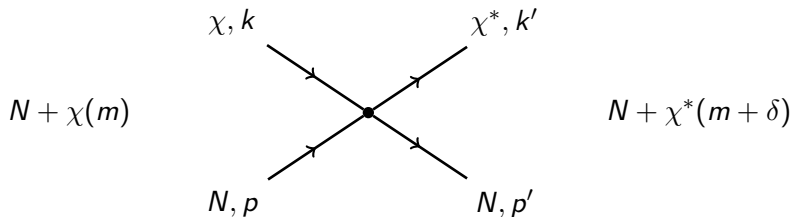
Ограничения на спин-независимое сечение ТМ на нуклоне $\sigma_{\chi P}^{SI}$ ¹ и спин-зависимое $\sigma_{\chi P}^{SD}$ ²

¹PDG, DarkMatter

²arXiv:2410.23454

Неупругая тёмная материя

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



Пример модели неупругой тёмной материи

Неупругая тёмная материя может естественно возникать в различных теориях.

- Простейший пример — дираковский фермион с малой майорановской массой

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

Массовыми состояниями являются

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

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

Пример модели неупругой тёмной материи

- В простейшем случае рассмотрим векторное взаимодействие, которое приводит к неупругому рассеянию.

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

- Данный механизм может возникать в секторе хиггсина в SUSY расширениях или в моделях с тёмным фотоном³.
- Похожий механизм со скалярными комплексными полями встречается в секторе снейтрино⁴.

³arXiv:1410.4549,arXiv:1701.03168

⁴arXiv:hep-ph/0101138

Тёмная материя в Солнце

- Тёмная материя с $m_\chi \sim \text{GeV} - \text{TeV}$ может захватываться и аннигилировать в Солнце. Эти процессы описывают уравнением баланса (если пренебречь испарением)

$$\frac{dN(t)}{dt} = C - C_A N^2$$

решение которого имеет вид:

$$N = \sqrt{\frac{C}{C_A}} \text{th} [\sqrt{C_A t^2 C}] \quad \Gamma(t) = \frac{1}{2} C \text{th}^2 [\sqrt{C_A t^2 C}]$$

Тёмная материя в Солнце

- Зная зависимость темпа аннигиляции в конечный момент эволюции T_{\odot} (время жизни Солнца) от скорости захвата :

$$\Gamma = \frac{1}{2C_A T_{\odot}^2} F(C_A T_{\odot}^2 C) \quad F(x) = x \operatorname{th}^2 \sqrt{x}$$

можно получить ограничения на $\sigma_{\chi p}$:

$$\sigma_{\chi p} < \sigma_{\chi p,0} \frac{1}{C_A T_{\odot}^2 \cdot C(\sigma_{\chi p,0})} F^{-1}(2\Gamma_{max} \cdot C_A T_{\odot}^2)$$

- В упругом случае, как правило, $C_A T_{\odot}^2 C \gg 1$ и $\Gamma = \frac{C}{2}$.

$$\sigma_{\chi p} < \sigma_{\chi p,0} \frac{2\Gamma_{max}}{C(\sigma_{\chi p,0})}$$

Тёмная материя в Солнце

- В термальном равновесии:

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

- В неупругом сценарии C_A зависит от сечения рассеяния $\sigma_{\chi p}$, модели и времени и величина C_A находится с помощью численного расчета линейного уравнения Больцмана.
- Учитывая изотропность задачи, уравнение эволюции на плотность ТМ $f(E, L)$ в пространстве $E - L$ следующее:

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

где C — скорость захвата, S — матрица столкновений.

Моделирование эволюции темной материи

- Для численного решения фазовое пространство разбивается на интервалы по безразмерным переменным E (энергия) и l (момент импульса)

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

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

где v_{esc} — вторая космическая скорость Солнца, R_{\odot} — радиус Солнца, $L_{max}(E)$ — максимальный момент импульса при энергии E .

Нерелятивистское взаимодействие с веществом

- Взаимодействие тёмной материи представляется описывается линейной комбинацией нерелятивистских операторов, возникающих из релятивистских операторов. Например:

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

- Взаимодействия с ядром определяется как сумма потенциалов на отдельных нуклонах

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

- Для нахождения сечения рассеяния на ядре мы используем рассчитанные форм-факторы (arXiv:1501.03729).

Нерелятивистское взаимодействие с веществом

- Сечение рассеяния может быть независимым от спина ядра (*SI*) и зависимым (*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 случае *SD* сечение растёт только как A^2 , из-за чего ограничения на сечение рассеяния слабее.

Моделирование эволюции темной материи

- Линейное уравнение на количество частиц в i -м промежутке имеет вид:

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

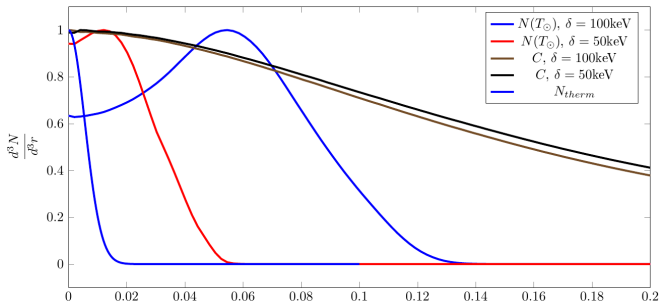
$$T_{\text{хр}}^{-1} = \sigma_{\text{хр}} \langle n_{\text{nuc}} \rangle v_{\text{esc}}.$$

- Скорость захвата в i -м интервале c_i , вероятности перехода/испарения s_{ij}/e_i определяются интегралом столкновений по всем ядрам, учитывая модель Солнца (AGS09met)⁵.

⁵arXiv:1611.09867

Распределение тёмной материи

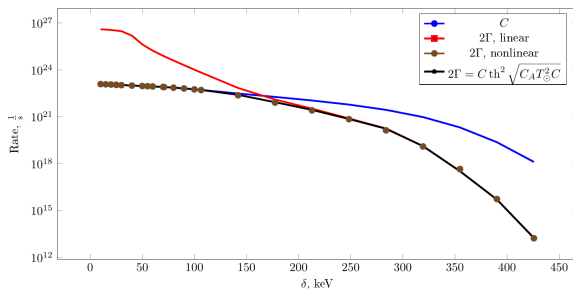
- При ненулевом δ распределение тёмной материи является нетермальным.



Начальное и конечное радиальные распределения частиц тёмной материи в Солнце для $m_\chi = 100\text{ GeV}$ (предполагается $\sigma_{\chi p} = 10^{-42}\text{ cm}^2$, а компонента χ^* долгоживущая)

Захват и аннигиляция

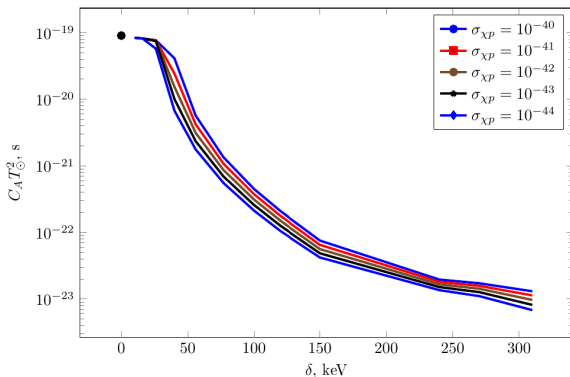
- Решая численно линейное уравнение эволюции, мы получаем в момент T_{\odot} конечное распределение, откуда находится темп аннигиляции, что эквивалентно решению с нелинейной добавкой от аннигиляции.



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

Коэффициент аннигиляции

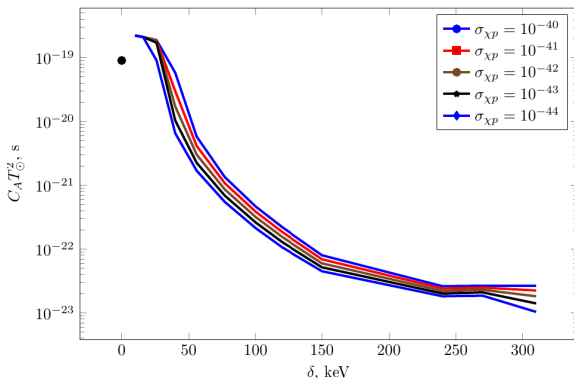
- Коэффициент аннигиляции $C_A T_\odot^2 = 2\Gamma(t = T_\odot)/C^2$ находится из решения линейного уравнения.



Коэффициент аннигиляции ТМ $m_\chi = 100 \text{ GeV}$ (χ^* — долгоживущая)

Коэффициент аннигиляции

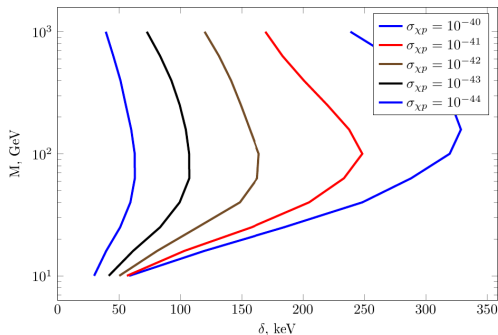
- Коэффициент аннигиляции $C_A T_\odot^2 = 2\Gamma(t = T_\odot)/C^2$ находится из решения линейного уравнения.



Коэффициент аннигиляции $m_\chi = 100 \text{ GeV}$ (χ^* — короткоживущая)

Условие равновесия

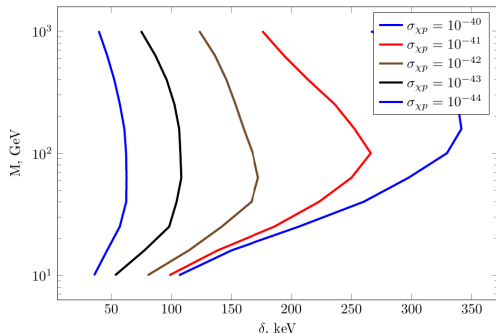
- Также находятся параметры m_χ и δ , при которых предположение о равновесии между аннигиляцией и захватом ($\Gamma = \frac{1}{2}C$) перестаёт быть верным.



Область параметров m, δ при которых наступает равновесие между Γ и C (χ^* — долгоживущая)

Условие равновесия

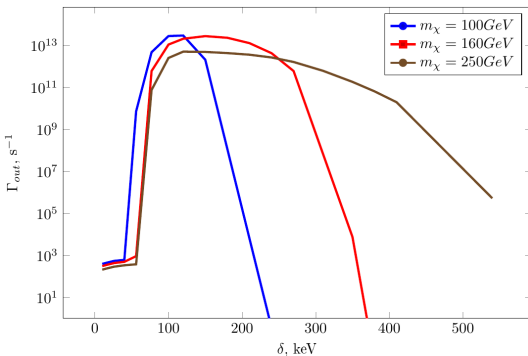
- Также находятся параметры m_χ и δ , при которых предположение о равновесии между аннигиляцией и захватом ($\Gamma = \frac{1}{2}C$) перестаёт быть верным.



Область параметров m, δ при которых наступает равновесие между Γ и C (χ^* — короткоживущая)

Внешняя аннигиляция

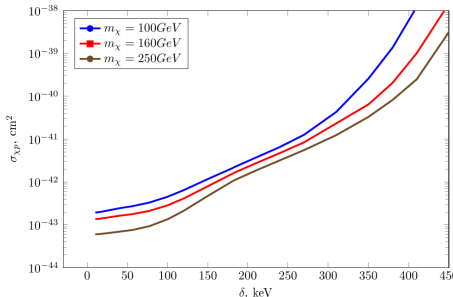
- Часть тёмной материи может аннигилировать снаружи (из-за скопления на траекториях с большим r), однако сигнал очень слабый.



Темп внешней аннигиляции. (χ^* — долгоживущая)

Ограничения

- Зная конечное распределение ($C_A T_\odot^2$) и ограничения на темп аннигиляции Γ из нейтринного сигнала, мы можем ограничить $\sigma_{\chi p}$.



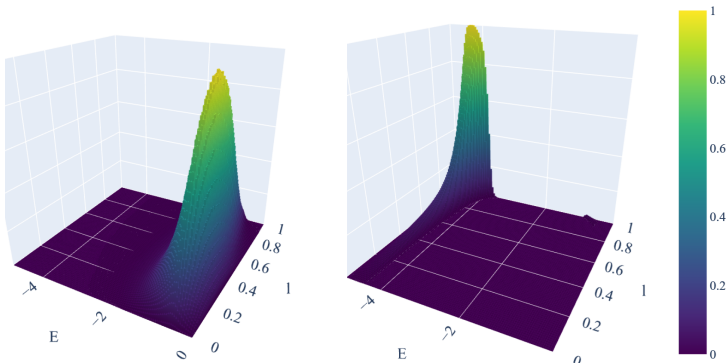
Ограничения для $m_\chi = 100$ GeV исходя из данных IceCube на Γ в канале $\chi + \chi \rightarrow W + W$ (arXiv:1612.05949)

Заключение

- Неупругая тёмная материя может иметь нетермальное распределение внутри Солнца.
- Для получения корректных ограничения на сечение $\sigma_{\chi p}$ находится распределение тёмной материи в Солнце.
- В дальнейшем следует включить в уравнения малое упругое взаимодействие.
- Также представляет интерес случай с саморассеянием $\chi + \chi \rightarrow \chi + \chi$?

Спасибо за внимание!

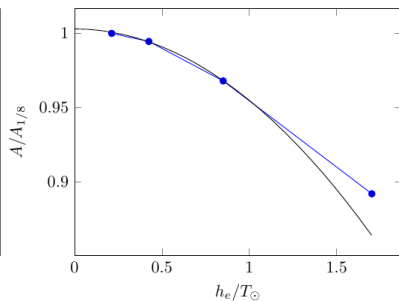
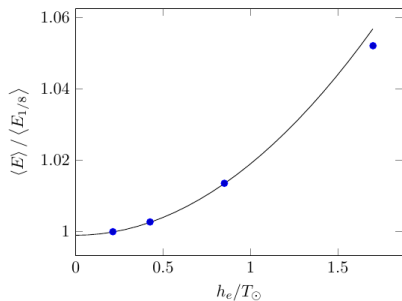
Распределение тёмной материи



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

Сходимость численных схем

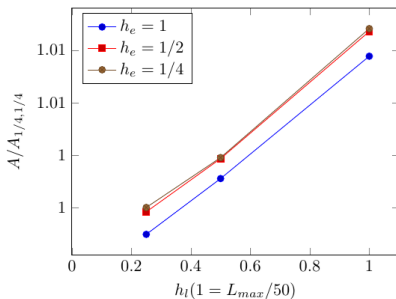
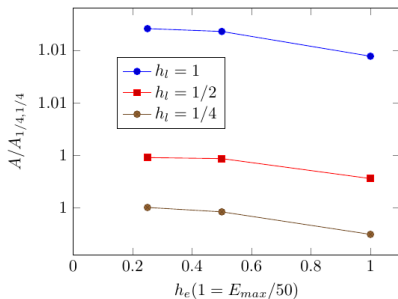
Упругий случай



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

Сходимость численных схем

Неупругий случай



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