

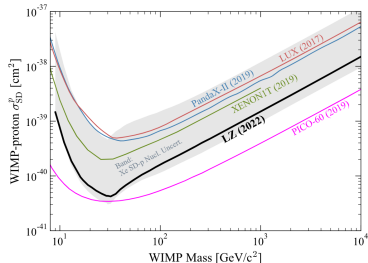
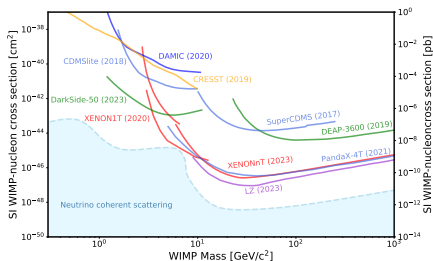
Термализация неупругой тёмной материи в Солнце

Товстун А.А.

1 июля 2025 г.

WIMP

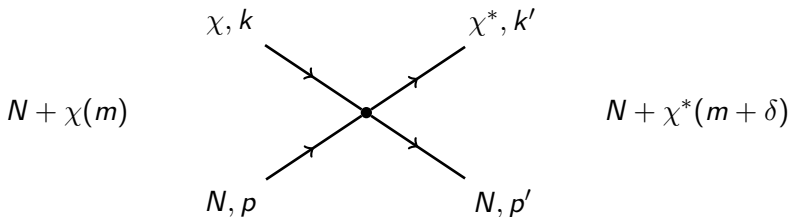
- Поиски тёмной материи в модели WIMP сильно ограничивают сечение рассеяние на нуклоне.



Ограничения на спин-независимое сечение ТМ на нуклоне $\sigma_{\chi p}^{\text{SI}}$ и спин-зависимое $\sigma_{\chi p}^{\text{SD}}$

Неупругая тёмная материя

- Неупругая тёмная материя позволяет ослабить ограничения благодаря кинематике.
- 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 фермиона малой майорановской массой

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

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 $m_2 = m + \frac{\delta}{2}$

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 встречается в секторе хиггсина 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 нерелятивистских операторов, 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

- 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.

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:

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

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

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:

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

Тёмная материя в Солнце

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

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

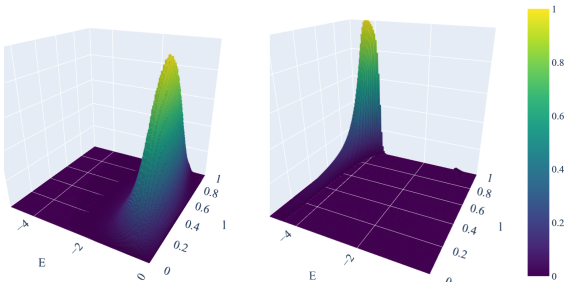
$$L = \frac{|\vec{r} \times \vec{v}|}{R_\odot v_{esc}}, l = \frac{L}{L_{max}(E)}$$

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

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

Распределение тёмной материи

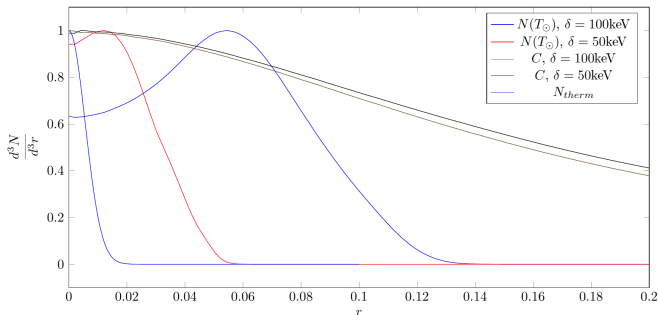
- Мы решаем однородное уравнение на величину $C_i(t) = \frac{\partial N}{\partial t}$, которое описывает эволюцию частиц, захватившихся за единицу времени в момент $t = 0$.



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

Распределение тёмной материи

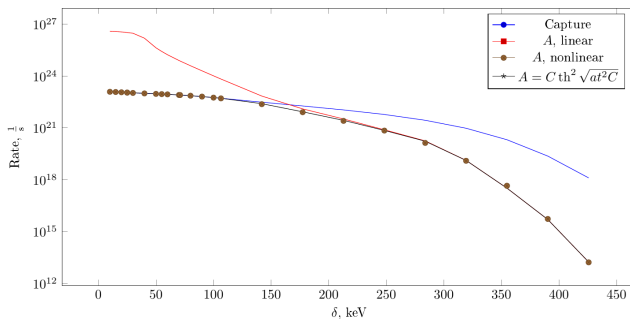
При ненулевом δ распределение тёмной материи является нетермальным.



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

Захват и аннигиляция

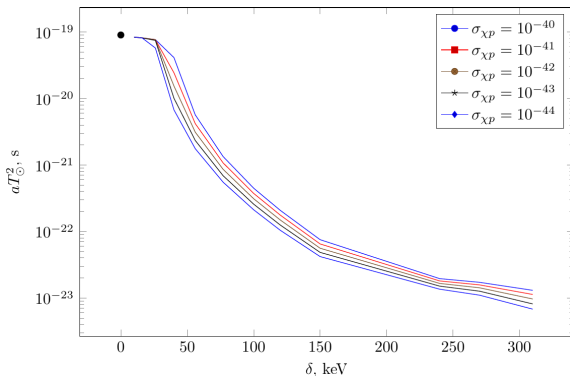
- Решая численно уравнение эволюции, мы получаем в момент T_{\odot} конечное распределение, откуда находится темп аннигиляции.



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

Коэффициент аннигиляции

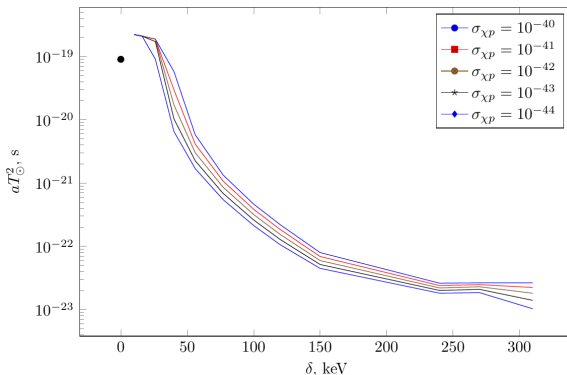
- Коэффициент аннигиляции $aT_{\odot}^2 = A(t = T_{\odot})/C^2$ находится из решения линейного уравнения.



Коэффициент аннигиляции для нераспадающейся ТМ $m_{\chi} = 100\text{GeV}$

Коэффициент аннигиляции

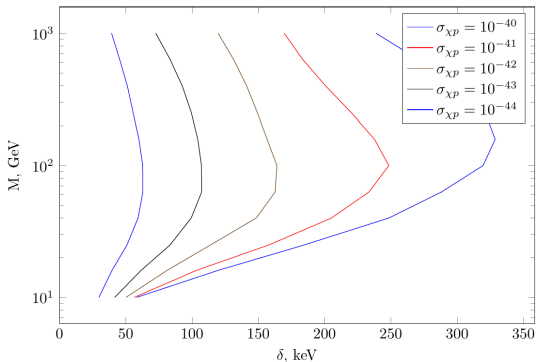
- Коэффициент аннигиляции $aT_{\odot}^2 = A(t = T_{\odot})/C^2$ находится из решения линейного уравнения.



Коэффициент аннигиляции для распадающейся ТМ $m_{\chi} = 100\text{GeV}$

Условие равновесия

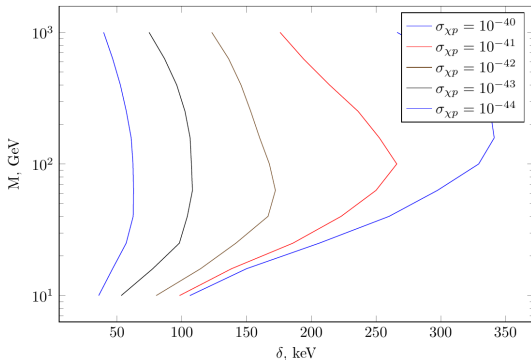
- Нам нужно знать при каких m и δ наступает равновесие между аннигиляцией и захватом а при каких нет.



Область параметров m, δ при которых наступает равновесие между A и C (нераспадающаяся ТМ)

Условие равновесия

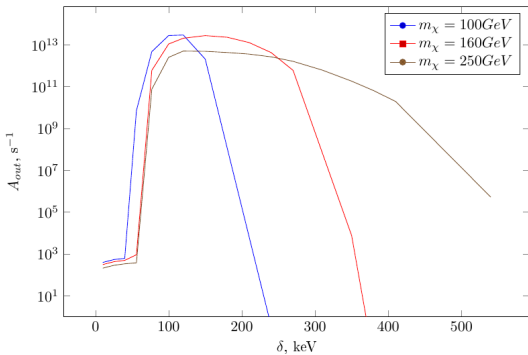
- Нам нужно знать при каких m и δ наступает равновесие между аннигиляцией и захватом а при каких нет.



Область параметров m, δ при которых наступает равновесие между A и C (распадающаяся ТМ)

Внешняя аннигиляция

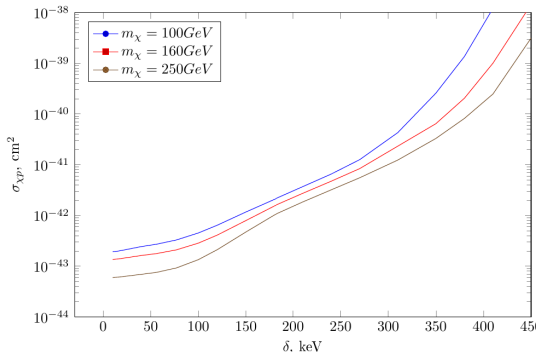
- Часть тёмной материи может аннигилировать снаружи, однако сигнал очень слабый.



Темп внешней аннигиляции.

Ограничения

- ограничить сечение рассеяния можно зная: конечное распределение (aT_{\odot}^2), ограничение на тема аннигиляции в нейтрино A .



Пример ограничений из IC. Канал $\chi + \chi \rightarrow W^+ + W^-$

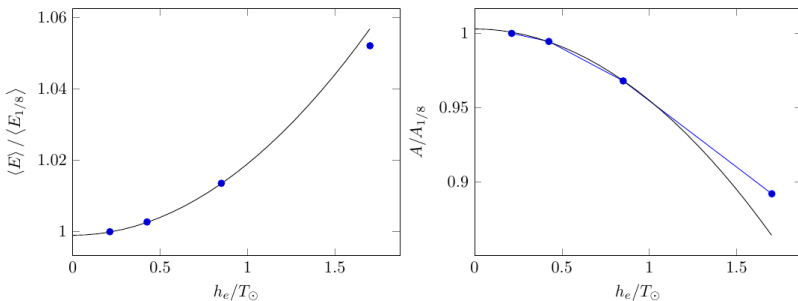
Заключение.

- Неупругая тёмная материя может иметь нетермальное распределение внутри Солнца
- Для того, чтобы делать корректные ограничения на сечения нужно находить распределение тёмной материи в Солнце
- В дальнейшем нужно включить в уравнения малое упругое взаимодействие.
- Также интерес представляет случай, когда есть саморассеяние $\chi + \chi \rightarrow \chi + \chi$?

Спасибо за внимание!

Сходимость численных схем

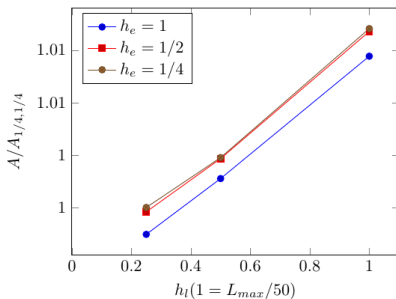
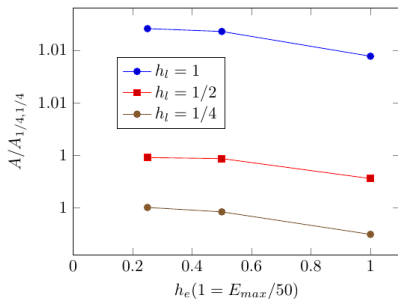
Упругий случай



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 $m_\chi = 100\text{GeV}$