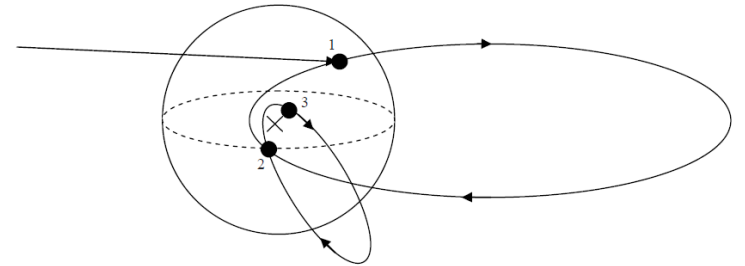


# **Рассеяние и захват темной материи**

# Введение

- Темная материя (ТМ) – один из основных компонентов Вселенной. Ее природа и состав не известны
- Существуют различные кандидаты из различных расширений СМ.
- Методы поиска
  - Прямые методы (регистрация отдачи)
  - Косвенные
    - На ускорителях (нарушение видимого ЗСЭИ)
    - Поиск сигналов от аннигиляции или распада
- В данной работе рассматривается влияние неупругого рассеяния на захват частиц ТМ небесными телами (Солнце, Земля).



# Сечение процесса

- Лагранжиан взаимодействия с нуклоном (Дираковский фермион)

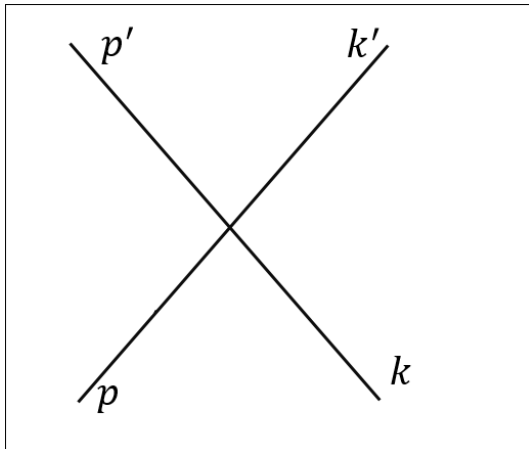
$$\mathcal{L}_{INT} = -\bar{\psi}\Delta_1^a\psi\bar{\chi}\Delta_{2a}\chi, \quad \Delta_1^a = a_i + i\gamma^5 b_i$$

- Квадрат матричного элемента упругого рассеяния

$$4 \left( (a_2^2 + b_2^2)k'k + (a_2^2 - b_2^2)m_\chi^2 \right) \left( (a_1^2 + b_1^2)p'p + (a_1^2 - b_1^2)m_N^2 \right)$$

- Нерелятивистский случай:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto (\vec{p}' - \vec{p})^{2n}$$



# Сечение упругого процесса

Вид взаимодействия	Потенциал $V(\vec{q} = \vec{k} - \vec{k}')$
$G_{00}\bar{\psi}(p')\psi(p)\bar{\chi}(k')\chi(k)$	$G_{00}$
$iG_{01}\bar{\psi}(p')\psi(p)\bar{\chi}(k')\gamma^5\chi(k)$	$G_{01}\hat{\vec{S}}_k\frac{-i\vec{q}}{m_k}$
$iG_{01}\bar{\psi}(p')\gamma^5\psi(p)\bar{\chi}(k')\chi(k)$	$G_{01}\hat{\vec{S}}_p\frac{i\vec{q}}{m_N}$
$G_{11}\bar{\psi}(p')\gamma^5\psi(p)\bar{\chi}(k')\gamma^5\chi(k)$	$-G_{11}\hat{\vec{S}}_p\frac{\vec{q}}{m_N}\hat{\vec{S}}_k\frac{\vec{q}}{m_k}$

$$V_{\text{яд}}(\vec{x}-\vec{x}_{\text{яд}})=\sum_{\text{нук}}V_N(\vec{x}-\vec{x}_N)$$

$$V_{\text{яд}}(\vec{x}-\vec{x}_{\text{яд}})=NV_N(\vec{x}-\vec{x}_{\text{яд}})$$

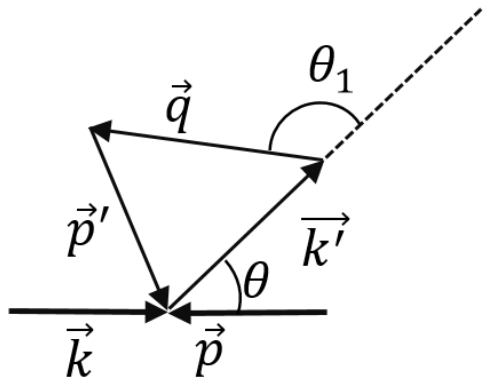
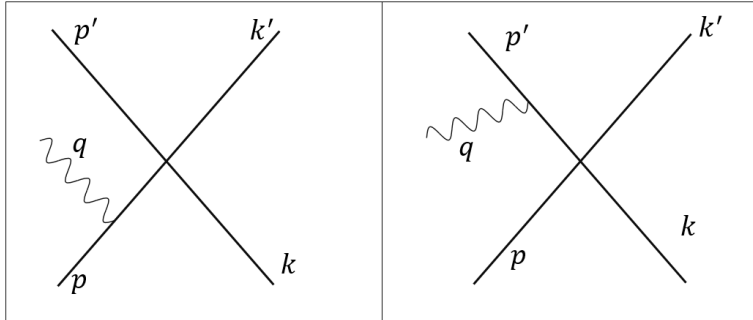
$$V_{\text{яд}}(\vec{q})=NV_N(\vec{q})$$

$$|\mathcal{M}_0^{\text{яд}}|^2=N^2|\mathcal{M}_0^N|^2$$

$$\sigma_{0\text{яд}}=\sigma_{0N}\cdot\frac{N^2(1+\mu_k)^2}{(N+\mu_k)^2}$$

# Сечение неупругого процесса

- Кинематика процесса

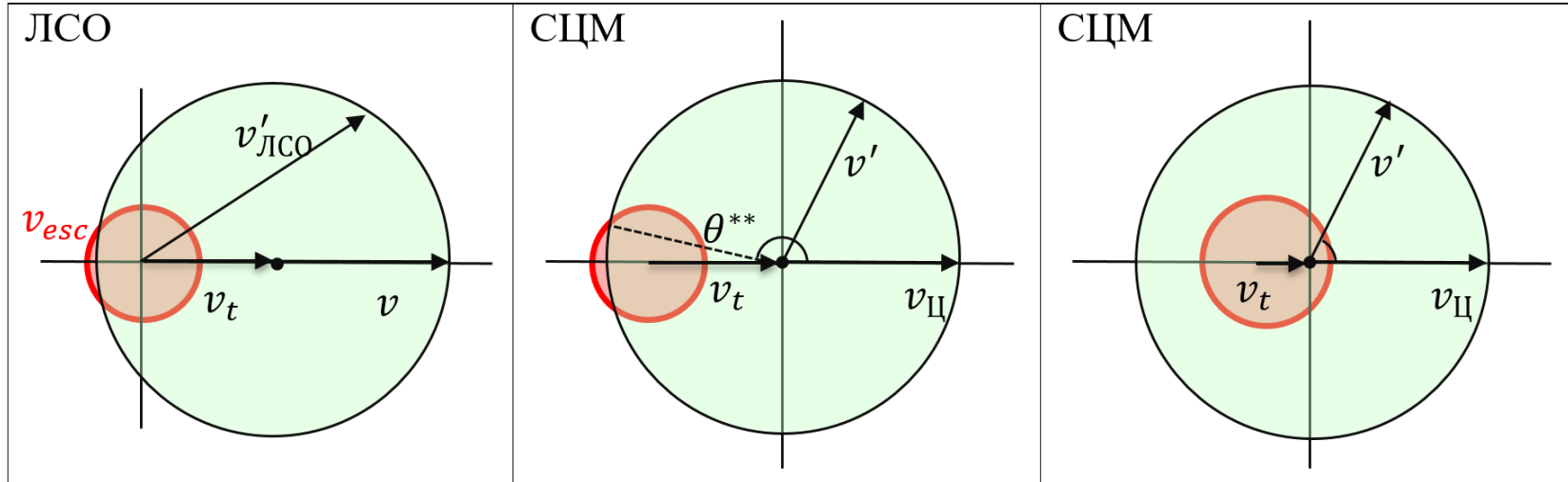


$$q(\cos \theta_1) = \frac{E_{\text{цн}}(E_k - E_{k'})}{(E_k - E_{k'}) + E_p + k' \cos \theta_1}$$

$$|\mathcal{M}_{in}|^2 = -Z^2 e^2 \left( \frac{v_N'^{\mu}}{v_N' q} - \frac{v_N^{\mu}}{v_N q} \right)^2 |\mathcal{M}_{el}|^2$$

$$\frac{d\sigma}{d^3\vec{k}'} = \frac{|\mathcal{M}_0|^2}{64E_{\text{цн}}^2 \cdot \pi^3} \cdot \frac{Z^2 \alpha \frac{2}{3} (\vec{v}' - \vec{v})^2}{k E_{k'} (E_k - E_{k'})}$$

# Процесс захвата



$$v_{Ц} = \frac{m_p}{m_p + m_k} v$$

$$v_t = v - v_{Ц} = \frac{m_k}{m_p + m_k} v$$

- 1) При  $v_t + v_{esc} \leq v_{Ц}$  – красная сфера внутри зеленой. Происходит неупругий процесс.
- 2) При  $v_t + v_{esc} \geq v_{Ц}$ ,  $v_{Ц} + v_{esc} \geq v_t$  – упругое столкновение. Неупругий вклад не учитывается.
- 3) При  $v_t \geq v_{esc} + v_{Ц}$  – частица ТМ не замечает ядро и не захватывается.

# Процесс захвата

- Условие неупругости захвата (упругий захват кинематически запрещен)

$$\frac{v_{esc}}{v_{ЛСО}} \lesssim \left| \frac{m_k - m_p}{m_p + m_k} \right|$$

- Для Солнца не выполняется

$$\left( \frac{u_0}{v_{esc}} \right)^2 \geq 4 \frac{m_k}{m_p + m_k}, \quad 0.1 \gtrsim \frac{m_k}{m_p + m_k}$$

- Для Земли  $v_{esc} \ll v_{ЛСО}$  – выполняется, если массы различаются значительно

# Формула для захвата

- Фазовая плотность ТМ

$$\rho(r, v, L) = \rho_V \cdot f\left(\sqrt{v^2 - 2\phi}\right) = \rho_V \cdot f(u)$$

- Эффективная функция распределения по скоростям из-за движения небесного тела со скоростью  $u_0 = 230$  км/с

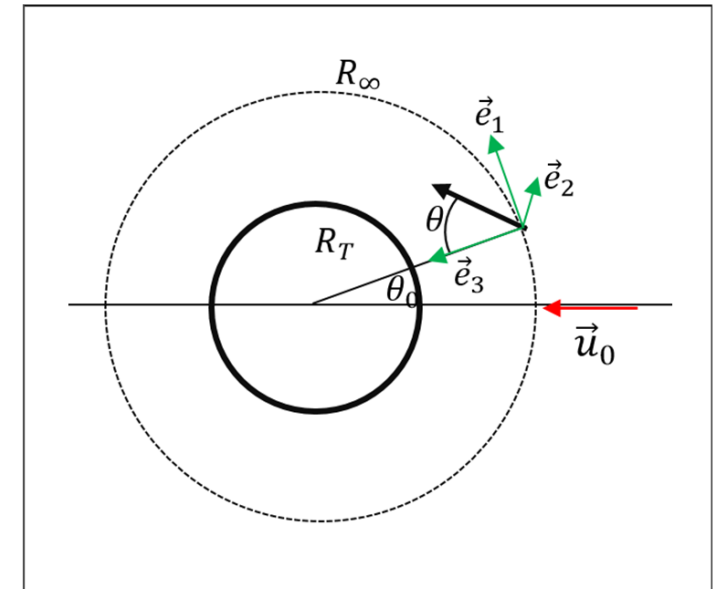
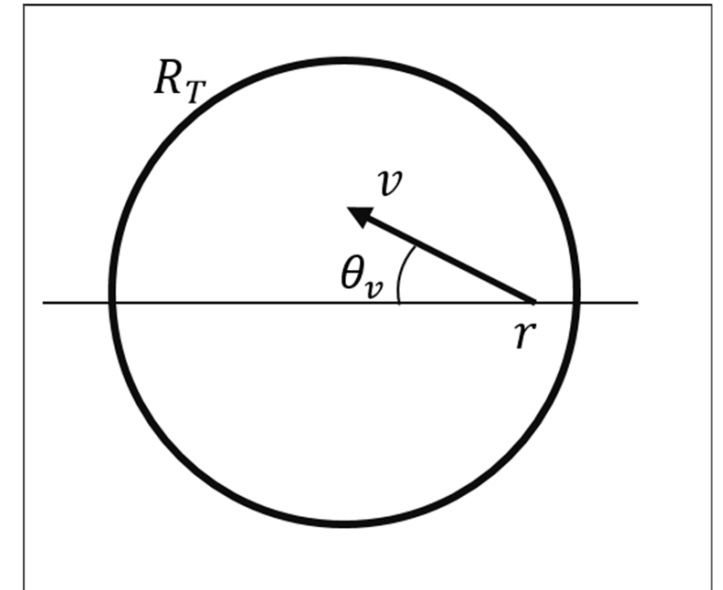
$$f_{\text{эфф}}(u) = \int_{-1}^1 f(u^2 + u_0^2 - 2u_0 u \cdot x) \cdot \frac{dx}{2}$$

- Скорость захвата следующая

$$C = \rho_V \int dV f(u) \cdot \sigma_c^i n_i v^2 \cdot 4\pi u du$$

- Ответ выразим через полное упругое сечение на нуклоне  $\sigma_{0N}$  при скорости ТМ в СЦМ  $u_0$  и безразмерный фактор  $P$

$$C = \sigma_{0N} \cdot \left[ \rho_{0.4\text{ГэВ}} \cdot \frac{M}{m_N} \cdot u_0 \right] \cdot P$$





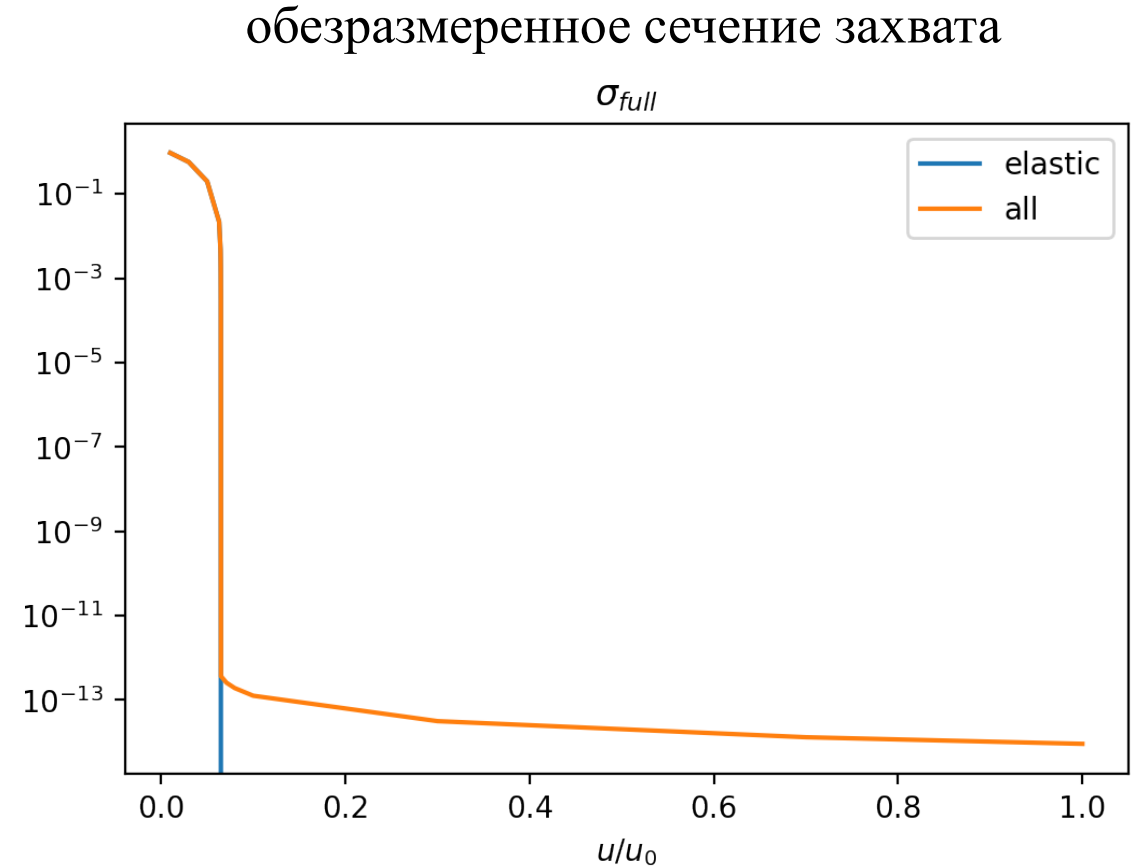
# Инфракрасная расходимость

- При малых импульсах фотона выражение для сечения имеет вид

$$d\sigma_{\gamma}^{\text{упругое}} = d\sigma_0 \cdot \left( 1 + \frac{Z^2\alpha}{\pi} \ln\left(\frac{\mu}{m}\right) \cdot W(x) \right)$$

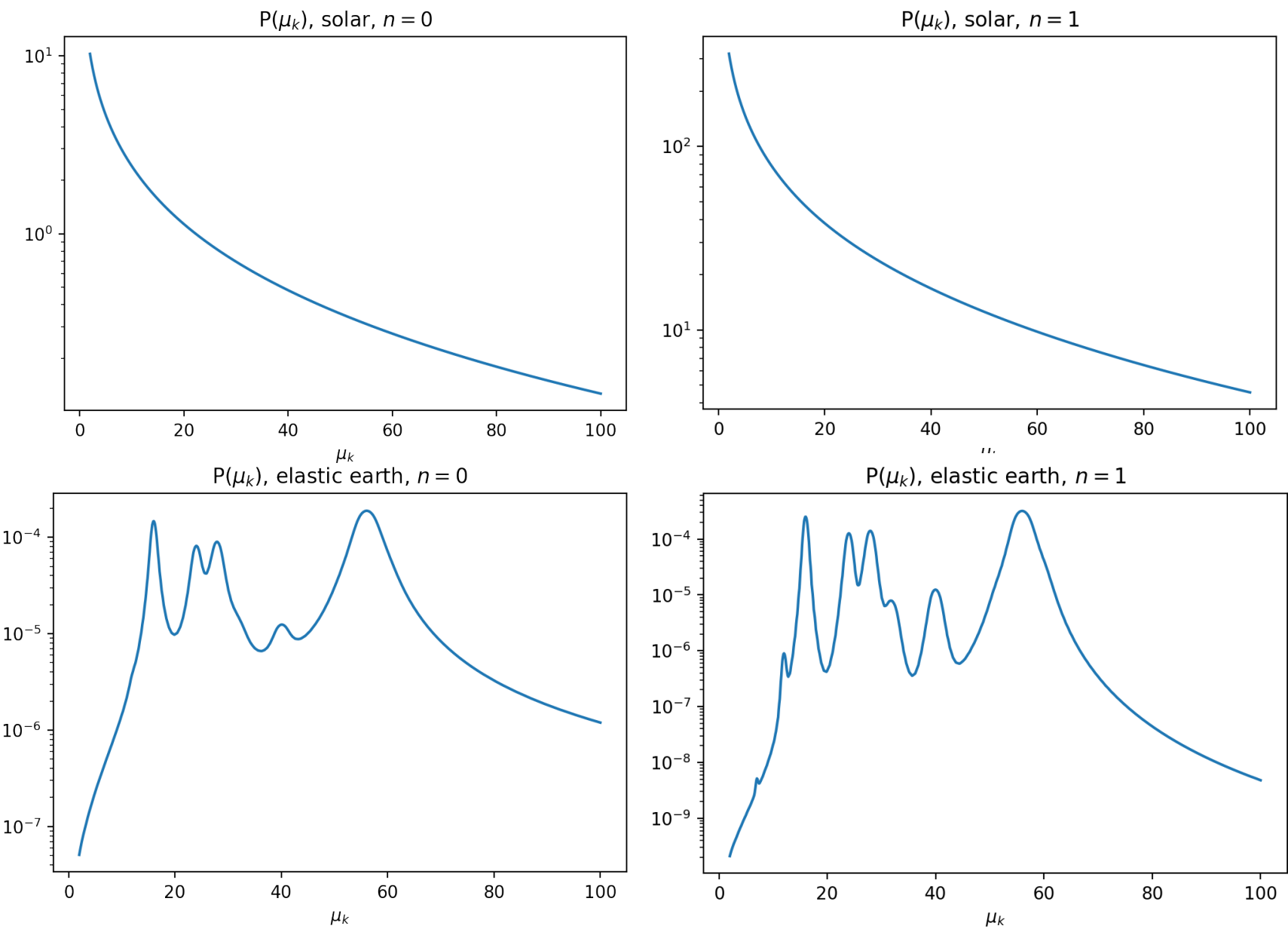
$$d\sigma_{\gamma}^{\text{неупругое}} = d\sigma_0 \cdot \frac{Z^2\alpha}{\pi} \ln\left(\frac{\epsilon}{\mu}\right) \cdot W(x)$$

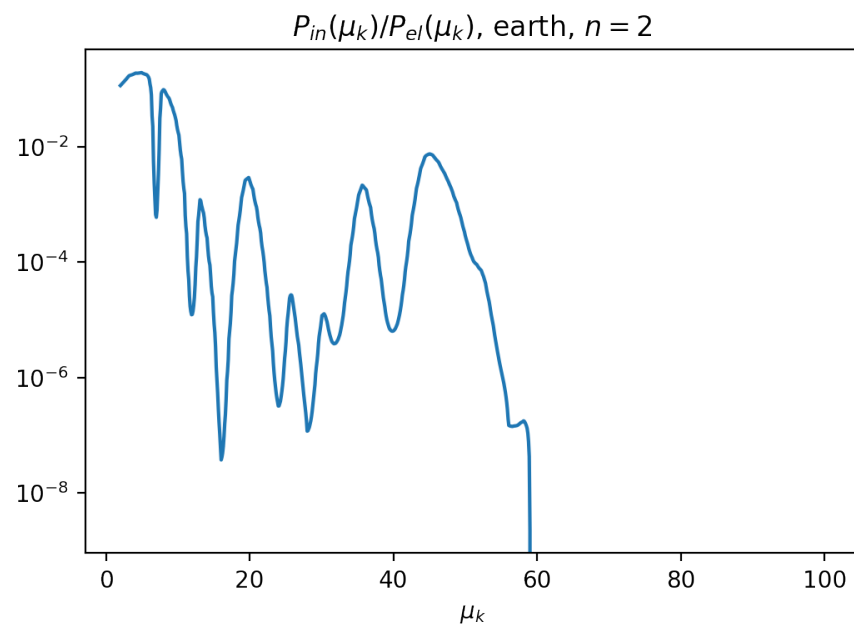
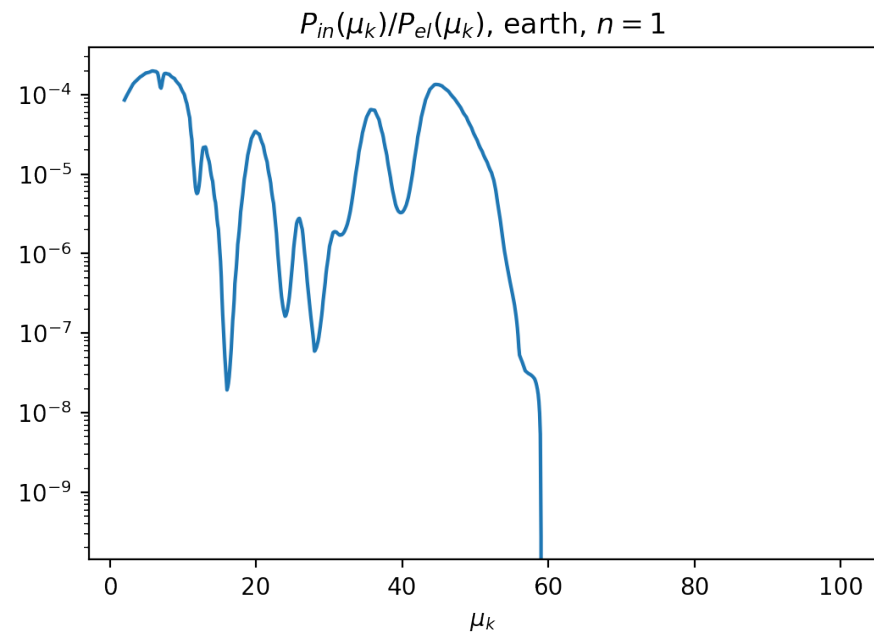
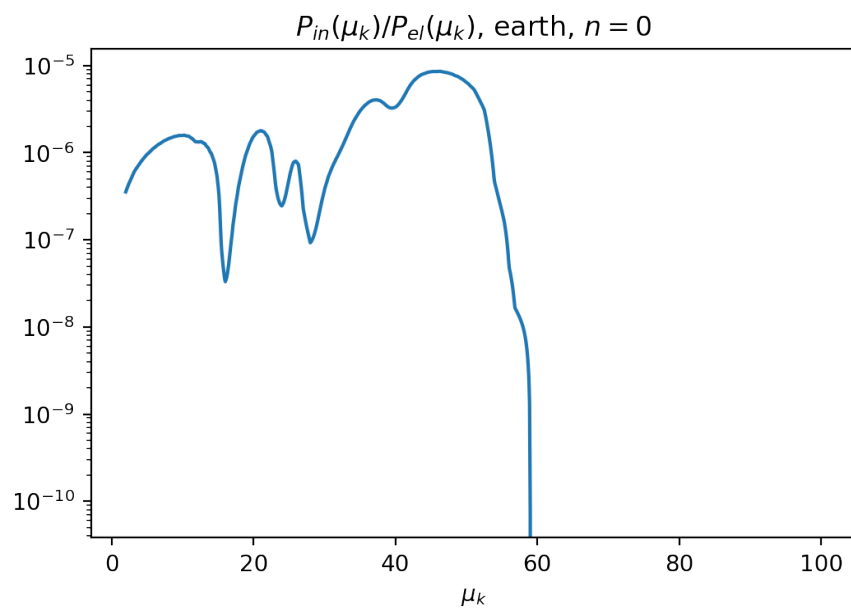
- При разных значениях параметра регуляризации будет разный вклад неупругой части если захват затрагивает упругую часть.
- Решение – засчитывать такие процессы только в упругий вклад.



# Результаты

$$\sigma_{0N} \sim (\vec{k}' - \vec{k})^{2n}$$



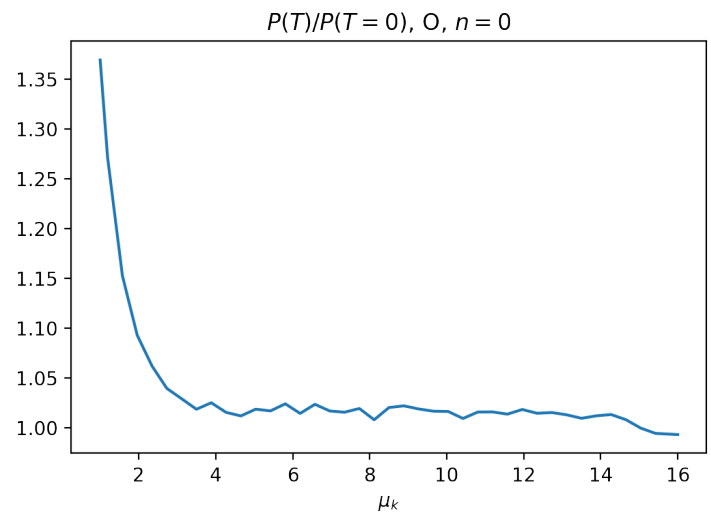
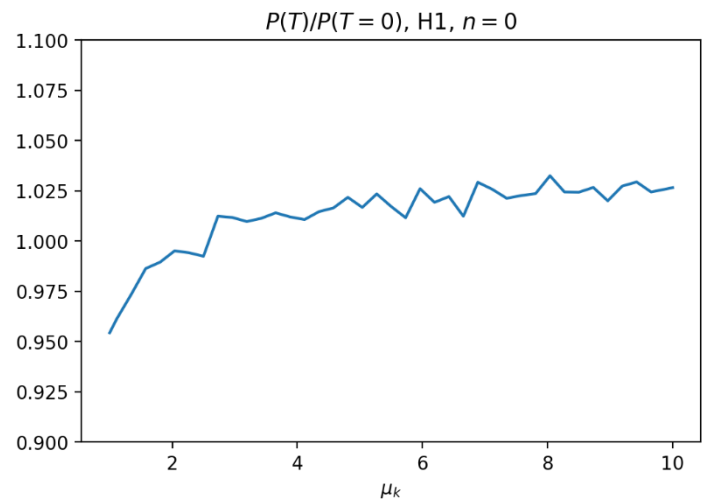
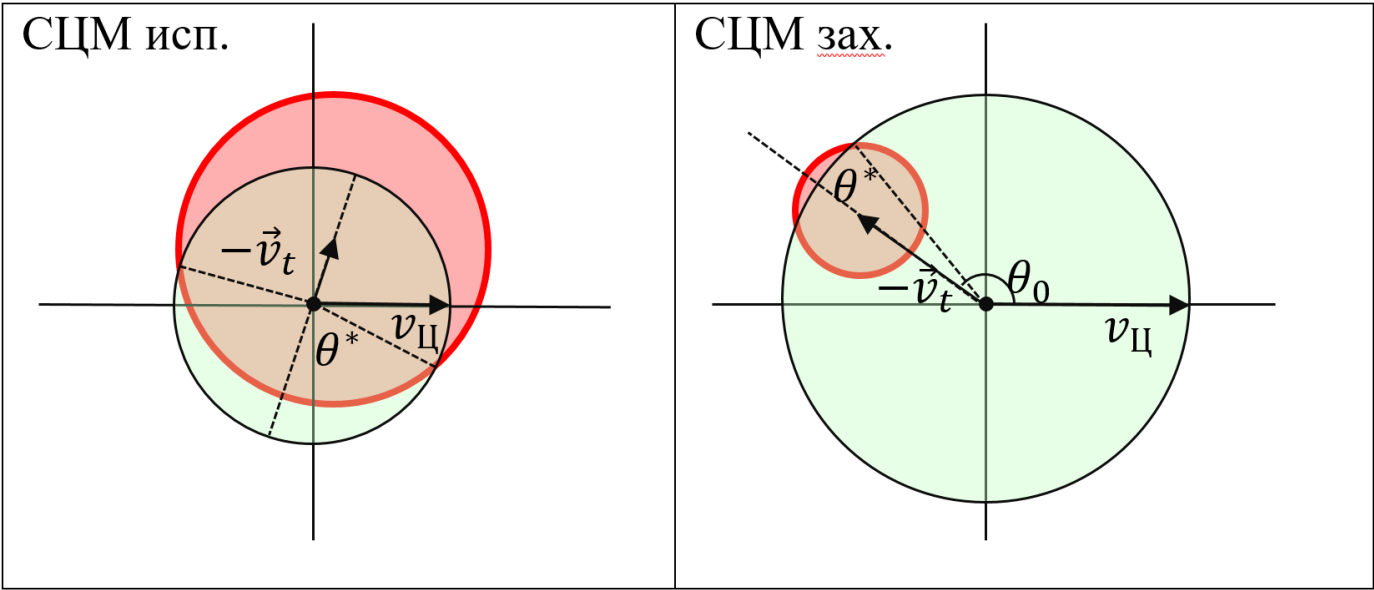


# Заключение

- Мы вычислили скорость захвата частиц темной материи при разных видах взаимодействия в упругом и неупругом случае
- Неупругое рассеяние происходит, когда масса ТМ меньше массы ядра, а скорость движения на бесконечности больше скорости захвата  $v_{esc}$ . Узко распределенное большое упругое сечение конкурирует с малым широко распределенным неупругим сечением. На Солнце эта конкуренция не наблюдается, а на Земле есть вдали от резонансов.
- В случае потенциалов с  $n = 0,1$  неупругий вклад значительно меньше упругого. Только при больших  $n$  и небольших массах упругий захват сильно подавлен и проявляется неупругий вклад
- Возможен неупругий захват за счет эффекта Мигдала



# Дополнительный слайд: Температура



## Дополнительный слайд: Грубые оценки

- Фактор подавления для неупругого вклада

$$P_{in} \sim Z^2 \alpha \cdot \left( \frac{m_k}{m_p + m_k} \right)^2 \frac{v_{esc}^3}{u_0}$$

- Фактор подавления упругого сечения в резонансе

$$P_{el}^{res} \sim \frac{v_{esc}^2}{u_0^2}$$

- Фактор подавления упругого сечения вдали от резонанса

$$P_{el} \sim \left( \frac{v_{esc}}{u_0} \right)^{2n+4}$$

# Дополнительный слайд: Оценка для потоков

- Уравнение для количества захваченных частиц

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

- Число аннигиляций в небесном теле

$$\Gamma_{ann} = \frac{C}{2} \operatorname{th}^2 \left( \frac{t}{\tau} \right), \quad \tau = \sqrt{CA}$$

- Отношение потоков от Земли и от Солнца

$$\frac{J_3}{J_c} \lesssim \frac{C_3}{C_c} \cdot \left( \frac{R_3}{R_{c3}} \right)^2 \sim 1.6 \cdot 10^3 \cdot \frac{P_3}{P_c}$$



## Дополнительный слайд: Другие неупругие процессы

- Переходы энергетических уровней в ядре

$$\frac{m_p}{m_p + m_k} \sqrt{v_{\text{ЛСО}}^2 - \frac{2\Delta E}{m_p} \cdot \frac{(m_k + m_p)}{m_k}} + v_{\text{esc}} \geq \frac{m_k}{m_p + m_k} v_{\text{ЛСО}}$$

- Эффект Мигдала (переход между уровнями в атоме и ионизация)