

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
<<Национальный исследовательский ядерный университет <<МИФИ>>

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ НА ТЕМУ:

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕКТОРОВ НА ЖИДКОМ АРГОНЕ К
РАССЕЯНИЮ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ В РАМКАХ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ

Научный руководитель
к.ф.-м.н., ст. преподаватель
Гробов А.В.

Выполнил
студент группы М19-115
Левашко Н.М.



Москва 2019

План презентации

Что такое эффективная теория поля?

Какие взаимодействия мы изучаем?

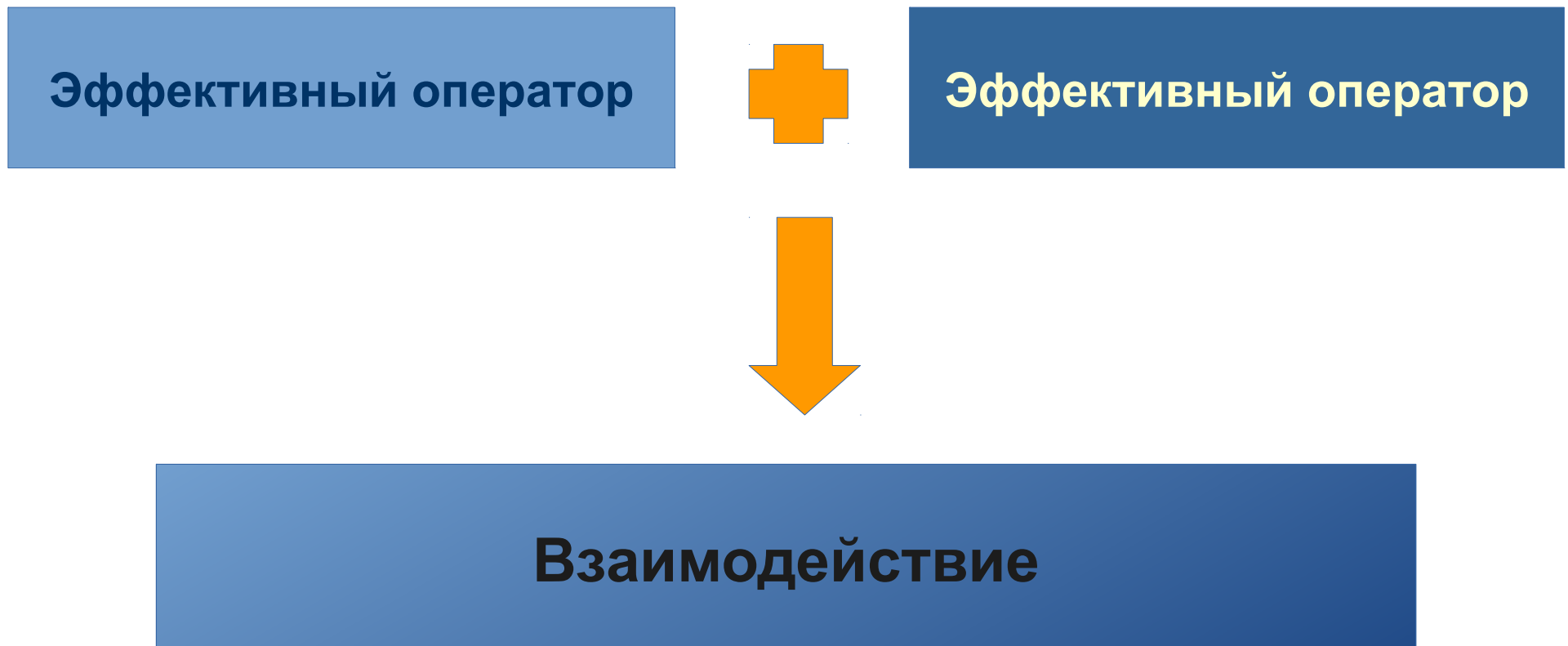
Распределение частиц ТМ по скоростям

Предварительные результаты

Заключение

Эффективная теория поля

EFT является отличным инструментом для изучения новой неизвестной физики. Суть этой теории заключается в простом перечислении всех возможных типов взаимодействия. С помощью эффективных операторов и их комбинаций можно описать практически все.



На самом деле, мы используем нерелятивистскую теорию. Причина в том, что ожидаемая скорость падающих частиц темной материи намного ниже, чем скорость света. Поэтому вместо использования механизма квантовой теории поля мы обратились к аппарату обычной квантовой механики.

$$v \sim 10^{-3}$$

Все возможные эффективные операторы могут быть построены всего из 4 операторов физических величин

$$i \frac{\vec{q}}{m_N}, \quad \vec{v}^\perp = \vec{v} + \frac{\vec{q}}{2\mu_N}, \quad \vec{S}_\chi, \quad \vec{S}_N$$

Где \vec{q} переданный импульс

\vec{v}^\perp поперечная скорость

\vec{S}_χ спин темной материи

\vec{S}_N спин ядра

Операторы

Так как мы изучаем рассеяние на Аргоне (спин которого равен нулю), то мы можем ограничить себя меньшим набором операторов. Однако мы все же оставили несколько операторов, содержащих спин, с целью также изучить и их.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{O}_1 & 1_X 1_N \\
 \mathcal{O}_2 & (\vec{v}^\perp)^2 \\
 \mathcal{O}_3 & i\vec{S}_N \cdot \left(\frac{\vec{q}}{m_N} \times \vec{v}^\perp\right) \\
 \mathcal{O}_4 & \vec{S}_X \cdot \vec{S}_N \\
 \mathcal{O}_5 & i\vec{S}_X \cdot \left(\frac{\vec{q}}{m_N} \times \vec{v}^\perp\right) \\
 \mathcal{O}_6 & \left(\frac{\vec{q}}{m_N} \cdot \vec{S}_N\right) \left(\frac{\vec{q}}{m_N} \cdot \vec{S}_X\right) \\
 \mathcal{O}_7 & \vec{S}_N \cdot \vec{v}^\perp \\
 \mathcal{O}_8 & \vec{S}_X \cdot \vec{v}^\perp \\
 \mathcal{O}_9 & i\vec{S}_X \cdot (\vec{S}_N \times \frac{\vec{q}}{m_N}) \\
 \mathcal{O}_{10} & i\frac{\vec{q}}{m_N} \cdot \vec{S}_N \\
 \mathcal{O}_{11} & i\frac{\vec{q}}{m_N} \cdot \vec{S}_X \\
 \mathcal{O}_{12} & \vec{S}_X \cdot (\vec{S}_N \times \vec{v}^\perp) \\
 \mathcal{O}_{13} & i(\vec{S}_X \cdot \vec{v}^\perp) \left(\frac{\vec{q}}{m_N} \cdot \vec{S}_N\right) \\
 \mathcal{O}_{14} & i(\vec{S}_N \cdot \vec{v}^\perp) \left(\frac{\vec{q}}{m_N} \cdot \vec{S}_X\right) \\
 \mathcal{O}_{15} & -(\vec{S}_X \cdot \frac{\vec{q}}{m_N}) \left((\vec{S}_N \times \vec{v}^\perp) \cdot \frac{\vec{q}}{m_N} \right)
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \mathcal{O}_1 & = 1_X 1_N \\
 \mathcal{O}_5 & = i\vec{S}_X \cdot \left(\frac{\vec{q}}{m_N} \times \vec{v}^\perp\right) \\
 \mathcal{O}_8 & = \vec{S}_X \cdot \vec{v}^\perp \\
 \mathcal{O}_{11} & = i\vec{S}_X \cdot \frac{\vec{q}}{m_N} \\
 \mathcal{O}_{12} & = \vec{S}_X \cdot (\vec{S}_N \times \vec{v}^\perp) \\
 \mathcal{O}_{15} & = -\left(\vec{S}_X \cdot \frac{\vec{q}}{m_N}\right) \left[\vec{S}_N \times (\vec{v}^\perp) \cdot \frac{\vec{q}}{m_N}\right]
 \end{aligned}$$

Теперь мы можем записать лагранжиан взаимодействия в следующем виде

$$\mathcal{L}_{NR} = \sum_{\alpha=n,p} \sum_{i=1}^{15} c_i^\alpha \mathcal{O}_i^\alpha \longrightarrow L_{int} = \sum_{i=1}^{15} c_i \mathcal{O}_i$$

Список эффективных операторов

Предполагается что константы взаимодействия одинаковы для протонов и нейтронов

Получив лагранжиан взаимодействия, можно пойти дальше и записать квадрат матричного элемента, используя функции отклика – специальные функции, которые позволяют отдельно описывать частицы темной материи и ядро аргона.

$$\overline{|M|^2} = \sum_k R_k(v_T^2, q^2, c_i c_j) W_k^{00}(q^2 b^2)$$

Функции отклика ТМ

Функции отклика ядра

M Nucleon density inside the nucleus, standard (SI) response.

Φ'' Nucleon spin and angular-momentum dependent response.

Σ', Σ'' Nucleon spin inside the nucleus (SD). Favor elements with unpaired nucleons.

Δ Nucleon orbital angular momentum.

$k=M, \Phi'', \Phi''M, \tilde{\Phi}', \Sigma'', \Sigma', \Delta, \Delta\Sigma'$

Index represents different effective nuclear operators

b — размер ядра

$$b = \sqrt{41.467 / (45A^{-1/3} - 25A^{-2/3})} \text{ fm}$$

Список моделей

Operator coupling	DM response	Nuclear response
c_1^2	1	W_M^{00}
c_3^2	q^4	W_Φ^{00}
c_5^2	$v^2 q^2$	W_M^{00}
c_8^2	v^2	W_M^{00}
c_{11}^2	q^2	W_M^{00}
c_{12}^2	q^2	W_Φ^{00}
$c_1 c_3$	q^2	$W_{M\Phi}^{00}$
$c_{11} c_{15}$	q^4	$W_{M\Phi}^{00}$

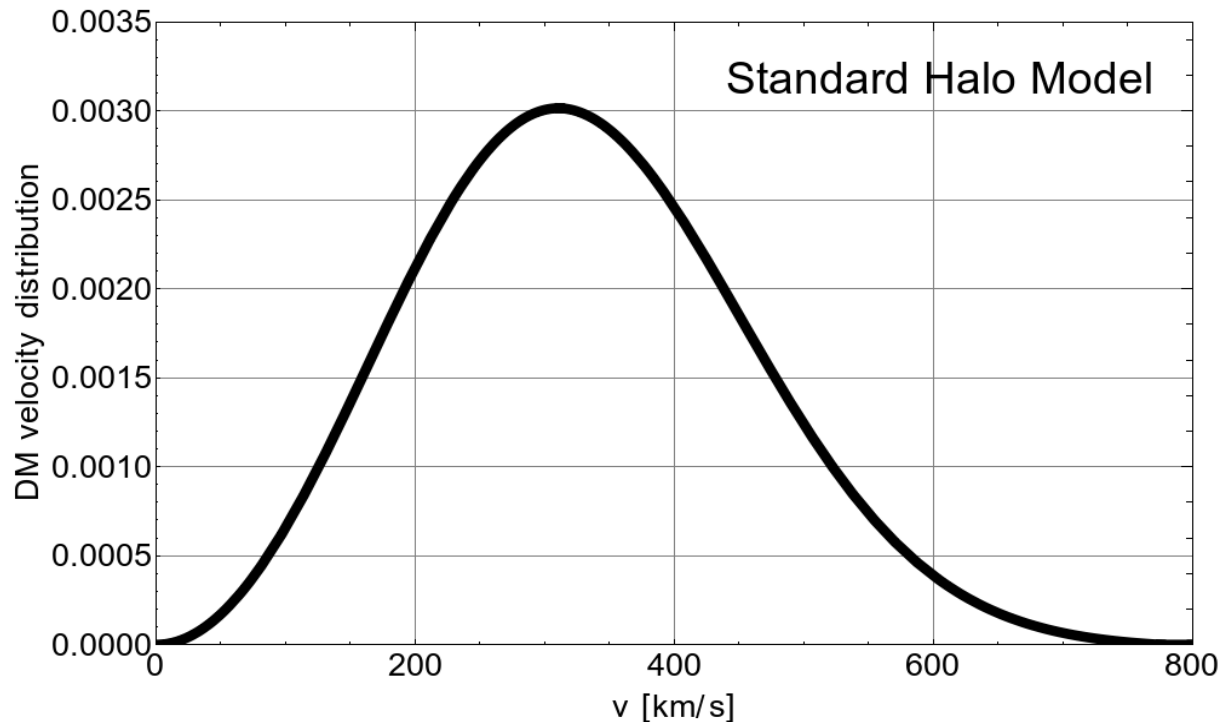
Были изучены следующие различные комбинации эффективных операторов

Распределение ТМ по скоростям

В наших вычислениях мы использовали модель стандартного гало.

$$f(v) dv = \frac{1}{N_{\text{esc}}} \frac{v}{\sqrt{\pi} v_E v_0} \left[e^{-(\min(v-v_E, v_{\text{esc}}))^2/v_0^2} - e^{-(\min(v+v_E, v_{\text{esc}}))^2/v_0^2} \right] dv$$

$$|\vec{v} + \vec{v}_e| \leq v_{\text{esc}}$$

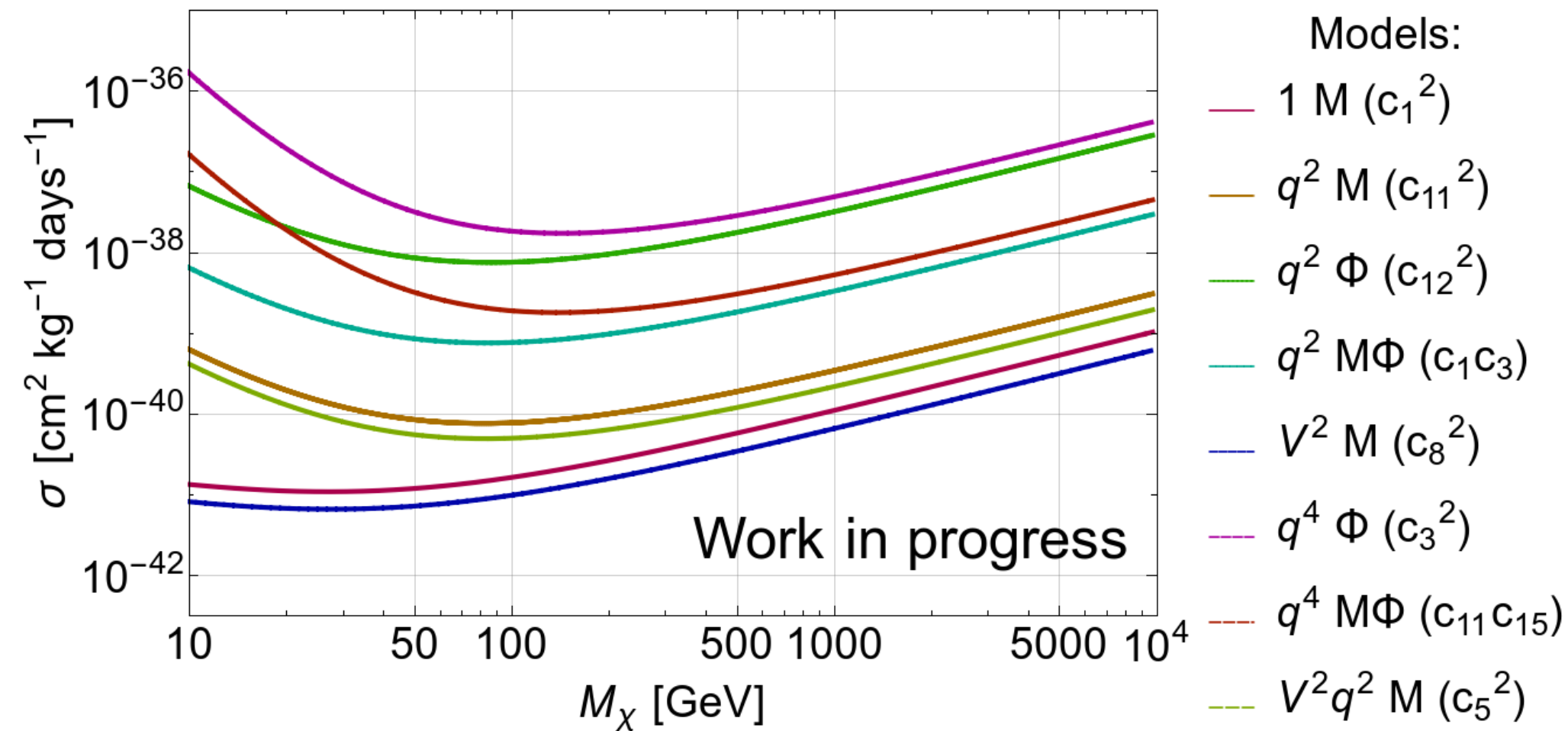


$$\rho_0 \quad 0.3 \text{ GeV cm}^{-3}$$

$$v_0 \quad 220 \text{ km s}^{-1}$$

$$v_{\text{esc}} \quad 544 \text{ km s}^{-1}$$

Предварительные результаты



Заключение

Были получены кривые чувствительности для жидких аргоновых детекторов. В зависимости от параметров и вида детектора эти кривые могут понижаться или даже слегка изменять свой минимум.

В будущем планируется применить эти результаты к последним данным некоторых экспериментов по прямому поиску темной материи и получить ограничения на сечение рассеяния темной материи на ядре.

Спасибо за внимание

Additional slides

DM response functions

$$R_M^{\tau\tau'} \left(v_T^{\perp 2}, \frac{q^2}{m_N^2} \right) = c_1^\tau c_1^{\tau'} + \frac{j_\chi(j_\chi + 1)}{3} \left[\frac{q^2}{m_N^2} v_T^{\perp 2} c_5^\tau c_5^{\tau'} + v_T^{\perp 2} c_8^\tau c_8^{\tau'} + \frac{q^2}{m_N^2} c_{11}^\tau c_{11}^{\tau'} \right]$$

$$R_{\Phi''}^{\tau\tau'} \left(v_T^{\perp 2}, \frac{q^2}{m_N^2} \right) = \frac{q^2}{4m_N^2} c_3^\tau c_3^{\tau'} + \frac{j_\chi(j_\chi + 1)}{12} \left(c_{12}^\tau - \frac{q^2}{m_N^2} c_{15}^\tau \right) \left(c_{12}^{\tau'} - \frac{q^2}{m_N^2} c_{15}^{\tau'} \right)$$

$$R_{\Phi''M}^{\tau\tau'} \left(v_T^{\perp 2}, \frac{q^2}{m_N^2} \right) = c_3^\tau c_1^{\tau'} + \frac{j_\chi(j_\chi + 1)}{3} \left(c_{12}^\tau - \frac{q^2}{m_N^2} c_{15}^\tau \right) c_{11}^{\tau'}$$

Matrix element's expansion for Argon 40

$$\frac{1}{2j_\chi + 1} \frac{1}{2J + 1} \sum_{\text{spins}} |\mathcal{M}_{NR}|^2 = \frac{4\pi}{2J + 1} \sum_{\tau=0,1} \sum_{\tau'=0,1} \left\{ \left[R_M^{\tau\tau'} \left(v_T^{\perp 2}, \frac{q^2}{m_N^2} \right) W_M^{\tau\tau'}(y) \right] + \right. \\ \left. + \frac{q^2}{m_N^2} \left[R_{\Phi''}^{\tau\tau'} \left(v_T^{\perp 2}, \frac{q^2}{m_N^2} \right) W_{\Phi''}^{\tau\tau'}(y) + R_{\Phi''M}^{\tau\tau'} \left(v_T^{\perp 2}, \frac{q^2}{m_N^2} \right) W_{\Phi''M}^{\tau\tau'}(y) \right] \right\}$$

Nuclear response functions

$$W_M^{00}(y) = e^{-2y}(31.8294 - 65.9618y + 48.5834y^2 - 15.194y^3 + 1.9036y^4 - 0.0595886y^5 + 0.000544329y^6)$$

$$W_M^{11}(y) = e^{-2y}(0.318304 - 1.06524y + 1.24846y^2 - 0.62249y^3 + 0.141618y^4 - 0.0138797y^5 + 0.000480513y^6)$$

$$W_M^{10}(y) = e^{-2y}(-3.18299 + 8.62425y - 8.02539y^2 + 3.19316y^3 - 0.554467y^4 + 0.0353797y^5 - 0.000511426y^6)$$

$$W_M^{01}(y) = e^{-2y}(-3.18299 + 8.62425y - 8.02539y^2 + 3.19316y^3 - 0.554467y^4 + 0.0353797y^5 - 0.000511426y^6)$$

$$W_{\Phi''}^{00}(y) = e^{-2y}(0.299629 - 0.373798y + 0.154895y^2 - 0.0238983y^3 + 0.00122474y^4)$$

$$W_{\Phi''}^{11}(y) = e^{-2y}(0.00414999 - 0.0181474y + 0.0240755y^2 - 0.00926264y^3 + 0.00108115y^4)$$

$$W_{\Phi''}^{10}(y) = e^{-2y}(-0.0352627 + 0.0990955y - 0.0683453y^2 + 0.0161561y^3 - 0.00115071y^4)$$

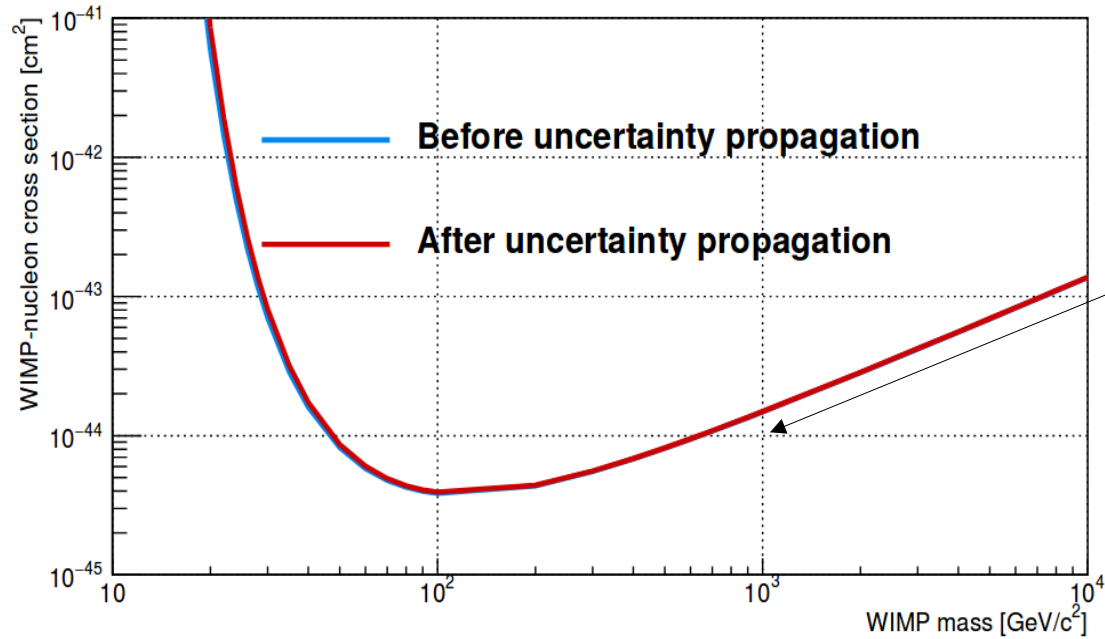
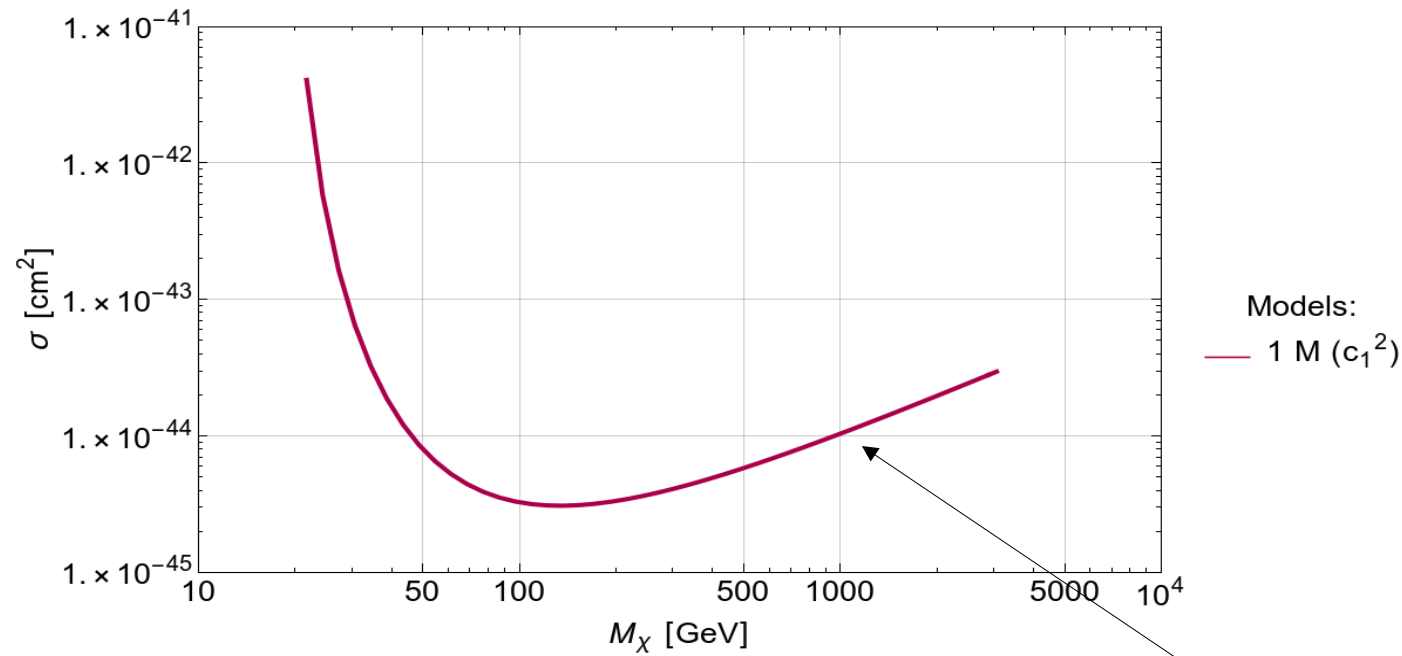
$$W_{\Phi''}^{01}(y) = e^{-2y}(-0.0352627 + 0.0990955y - 0.0683453y^2 + 0.0161561y^3 - 0.00115071y^4)$$

$$W_{M\Phi''}^{00}(y) = e^{-2y}(-3.08821 + 5.12625y - 2.89248y^2 + 0.653386y^3 - 0.0526576y^4 + 0.000816493y^5)$$

$$W_{M\Phi''}^{11}(y) = e^{-2y}(-0.036345 + 0.140282y - 0.171917y^2 + 0.0770456y^3 - 0.0134973y^4 + 0.000720769y^5)$$

$$W_{M\Phi''}^{10}(y) = e^{-2y}(0.308826 - 0.709394y + 0.515378y^2 - 0.153134y^3 + 0.0185641y^4 - 0.000767139y^5)$$

$$W_{M\Phi''}^{01}(y) = e^{-2y}(0.363444 - 1.17124y + 1.09117y^2 - 0.373592y^3 + 0.0452762y^4 - 0.000767139y^5)$$



There is a small difference between these curves. Perhaps, improving DM velocity distribution will make some changes