

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

Выпускная квалификационная работа бакалавра на тему  
«Установление пределов на поток частиц возбуждённой  
скрытой массы при помощи детектораorexino»

---

ВЫПОЛНИЛ: СТУДЕНТ ГРУППЫ Б19-102 К. К. КИСЕЛЕВ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: К.Ф.-М.Н. Е. А. ЛИТВИНОВИЧ

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ: М.Н.С. Р. Р. НУГМАНОВ

# Цели и задачи работы

---

**Цель работы:** изучение механизмов проявления возбуждённой скрытой массы Вселенной в детекторе Борексино

**Задачи работы:**

- рассмотреть модель возбуждённой скрытой массы и рассчитать ожидаемый сигнал в детекторе Борексино;
- определить основные источники фона и оценить их вклад;
- на основе экспериментальных данных Борексино произвести поиск событий взаимодействия возбуждённой скрытой массы с протонами и оценить параметры модели.

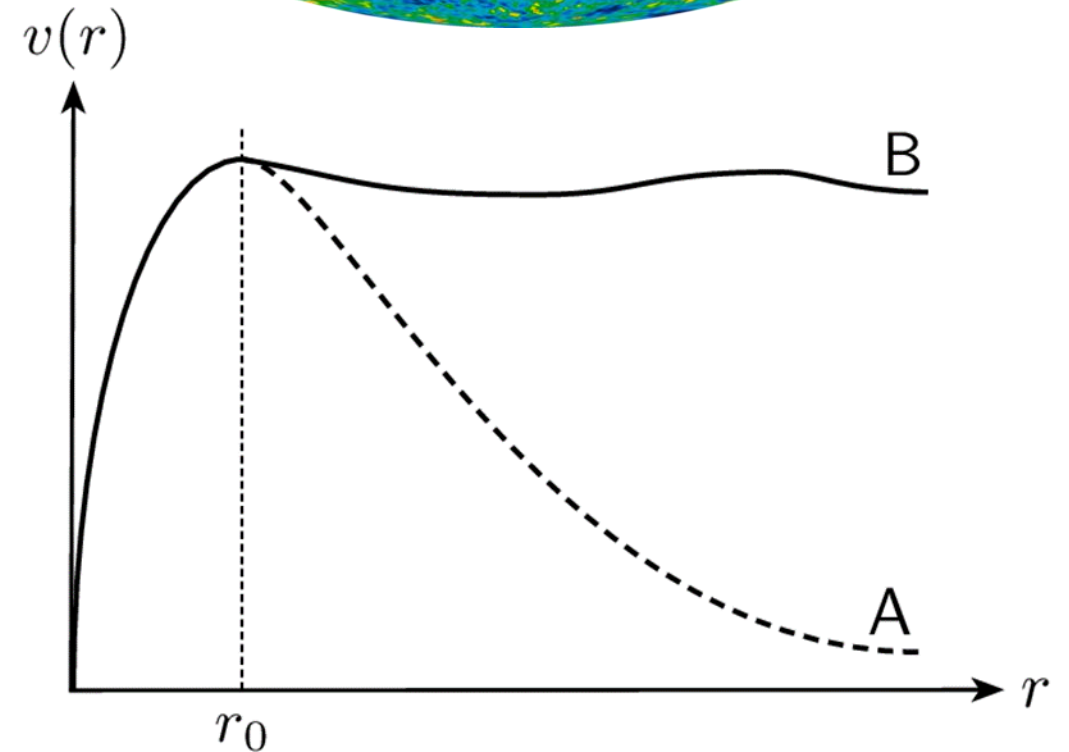
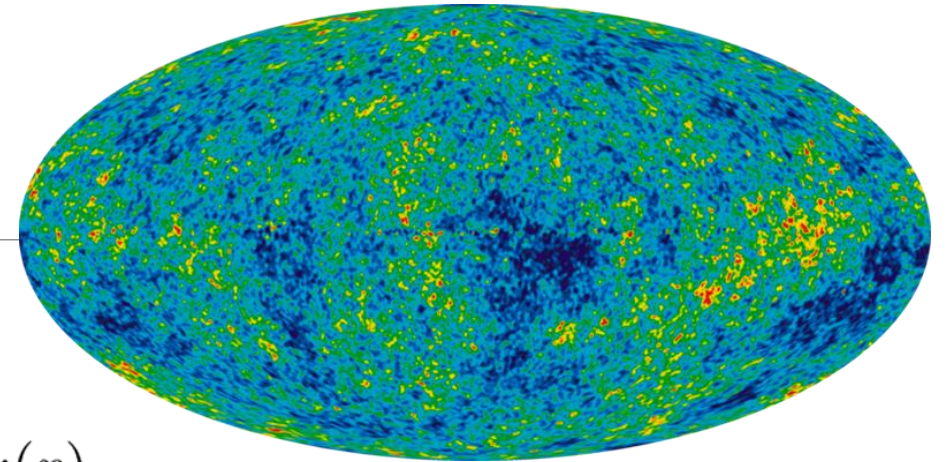
# Скрытая масса

## Свидетельства существования:

- Анизотропия реликтового излучения
- Кривые вращения галактик
- Гравитационное линзирование

## Кандидаты на роль скрытой массы:

- Нейтрино
- Аксионы
- WIMP
- МАСНО
- Частицы из теории суперсимметрии



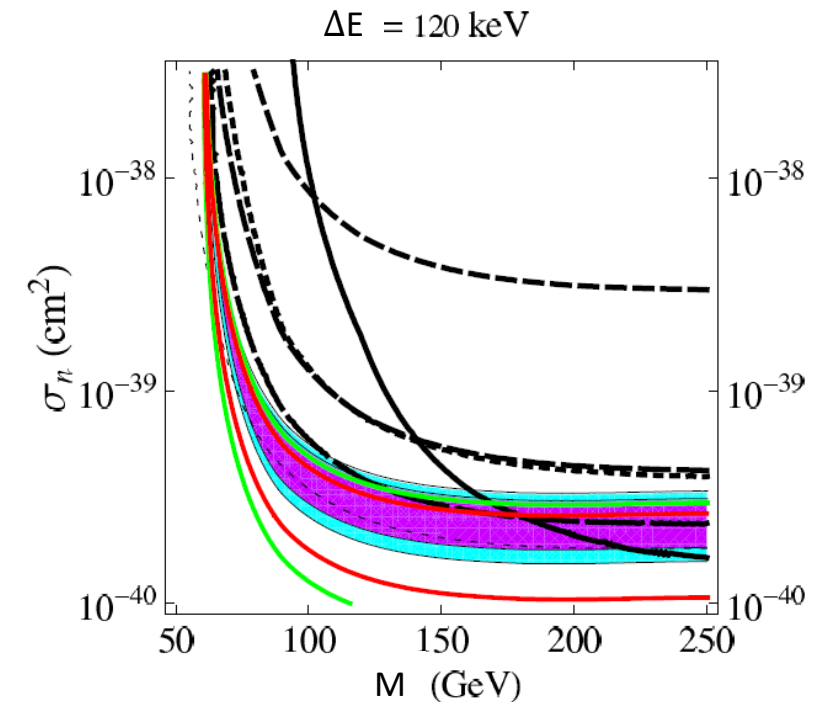
# Возбуждённая скрытая масса

Масса частицы скрытой массы (WIMP)  $M \approx 100$  ГэВ

Энергия возбуждения  $\Delta E \in (0.1; 1.0)$  МэВ

Мотивация:

- сигнал гамма-излучения из центра Млечного Пути с энергией 511 МэВ, зарегистрированный экспериментом INTEGRAL/SPI;
- аномально большое число позитронов в космических лучах, обнаруженное в эксперименте PAMELA;
- годовичная модуляция сигнала в эксперименте DAMA/LIBRA.



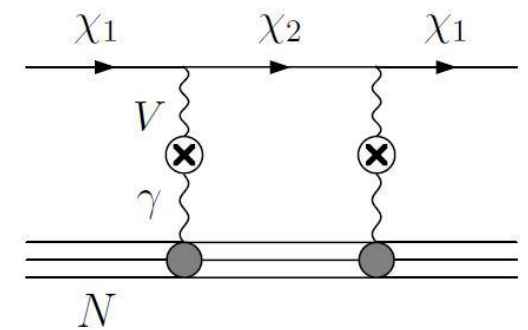
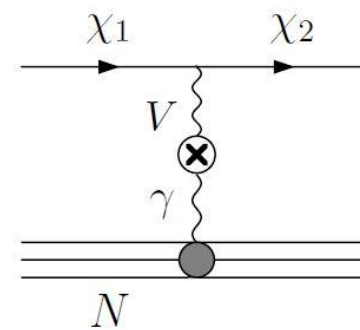
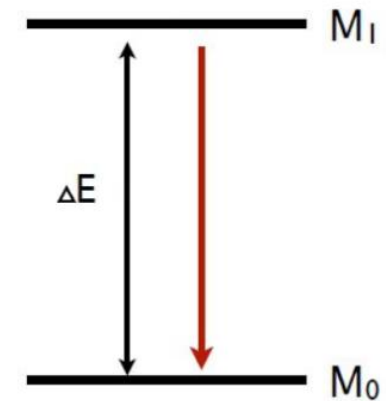
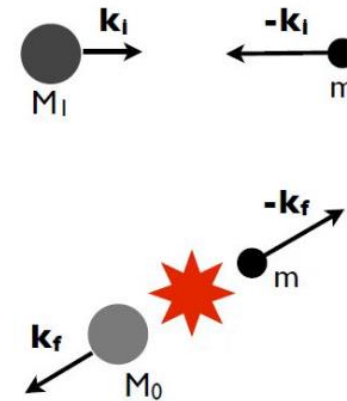
Результаты эксперимента DAMA/LIBRA [1] по поиску возбуждённой скрытой массы (зелёным и красным цветами)

# Кинематика реакции

Сигнатура события в Борексине: одиночный протон отдачи

При рассмотрении кинематики процесса используются следующие условия:

- дифференциальное сечение реакции получено в первом борновском приближении;
- масса переносчика взаимодействия  $m_V \sim 1$  ГэВ;
- масса частицы скрытой массы много больше массы протона  $M \gg m$ ;
- начальная кинетическая энергия протона в лабораторной системе отсчёта и в СЦИ много меньше энергии перехода частицы скрытой массы между состояниями.



# Ожидаемый вид энергетического спектра событий рассеяния возбуждённой скрытой массы на протонах детектора

---

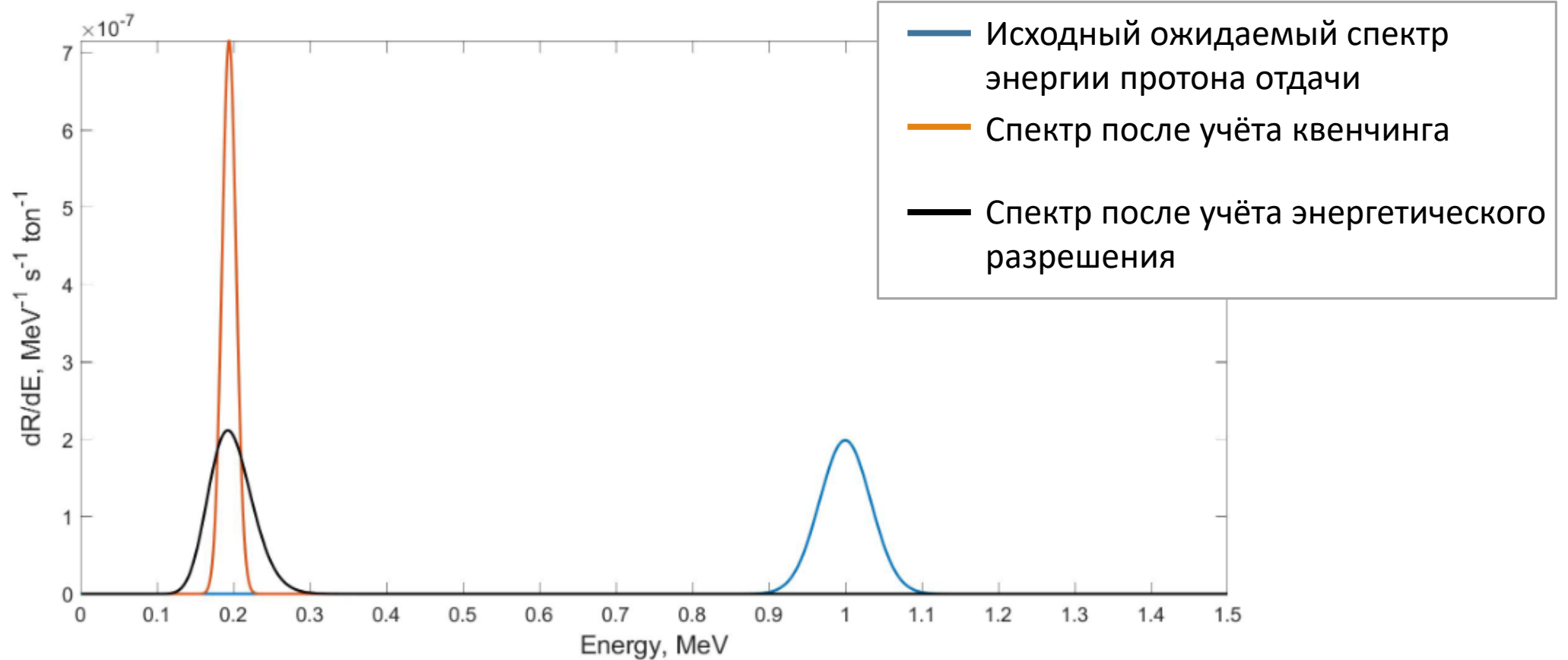
Спектр энергии протонов отдачи: 
$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{N_T F \rho_D}{M} \int_{v_{min}}^{v_{esc}} v f(v, v_E, v_{esc}) dv \frac{d\sigma}{dE_R} = A e^{-\frac{(E_R - \Delta E)^2}{2\sigma_1^2}}$$

Параметры модели:  $N_T = 6 \cdot 10^{28}$  протонов на тонну сцинтиллятора, плотность скрытой массы  $\rho_D = 0.4$  ГэВ/см<sup>3</sup>, доля WIMP в возбуждённом состоянии  $F = 0.5$ , энергия возбуждения  $\Delta E = 1$  МэВ, масса WIMP  $M = 100$  ГэВ, эффективное сечение взаимодействия WIMP с нуклоном  $\sigma_n = 10^{-43}$  см<sup>2</sup>

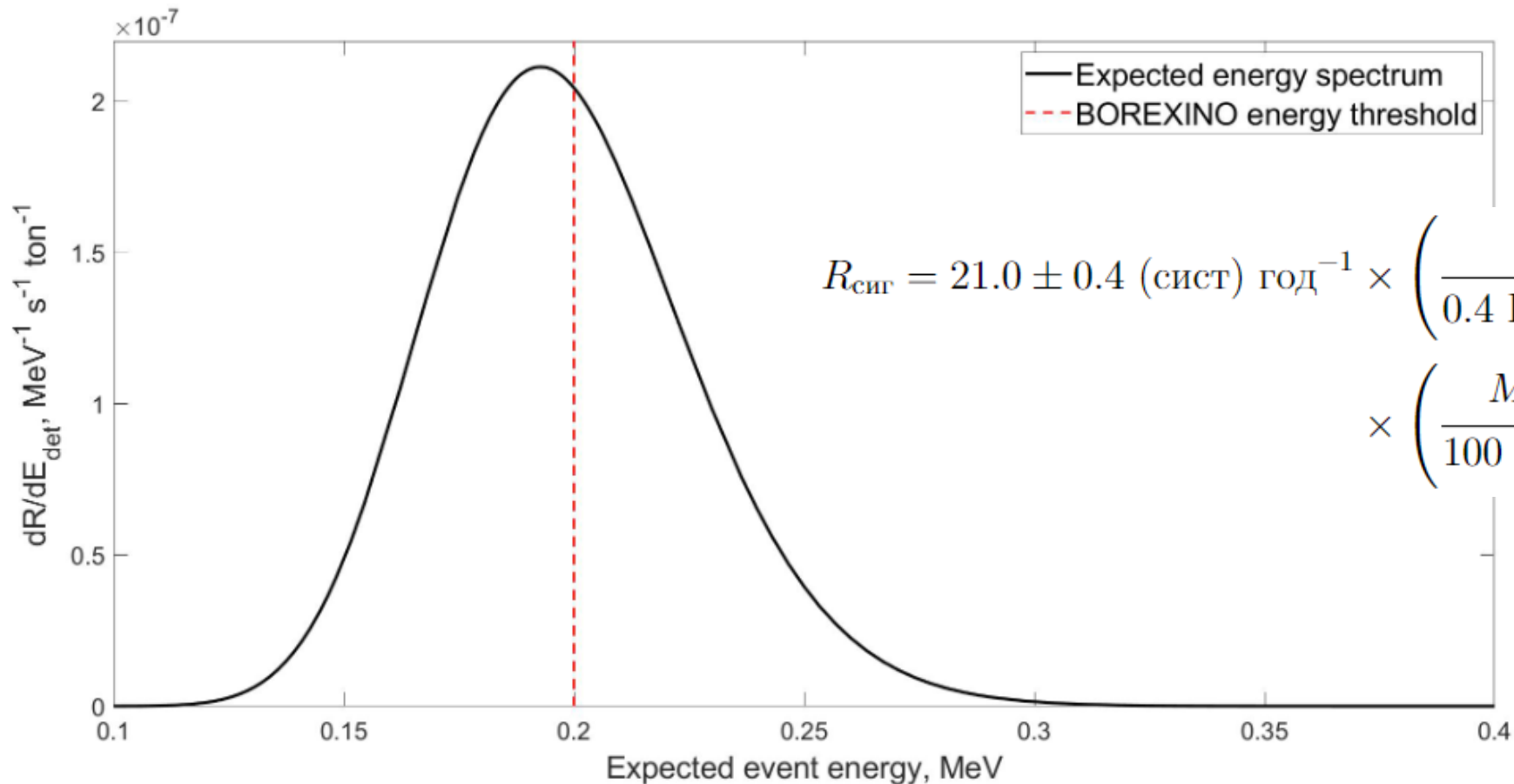
Учёт квенчинга: 
$$\frac{dR}{dE_{vis}}(E_{vis}) = \frac{dR}{dE_R}(E_R(E_{vis})) \times \frac{\partial E_R}{\partial E_{vis}}(E_{vis})$$

Учёт разрешения детектора: 
$$\frac{dR}{dE_{det}} = \int_0^{\infty} \frac{dR}{dE_{vis}} G(E_{det}, E_{vis}) dE_{vis}$$

# Сравнение полученных энергетических спектров



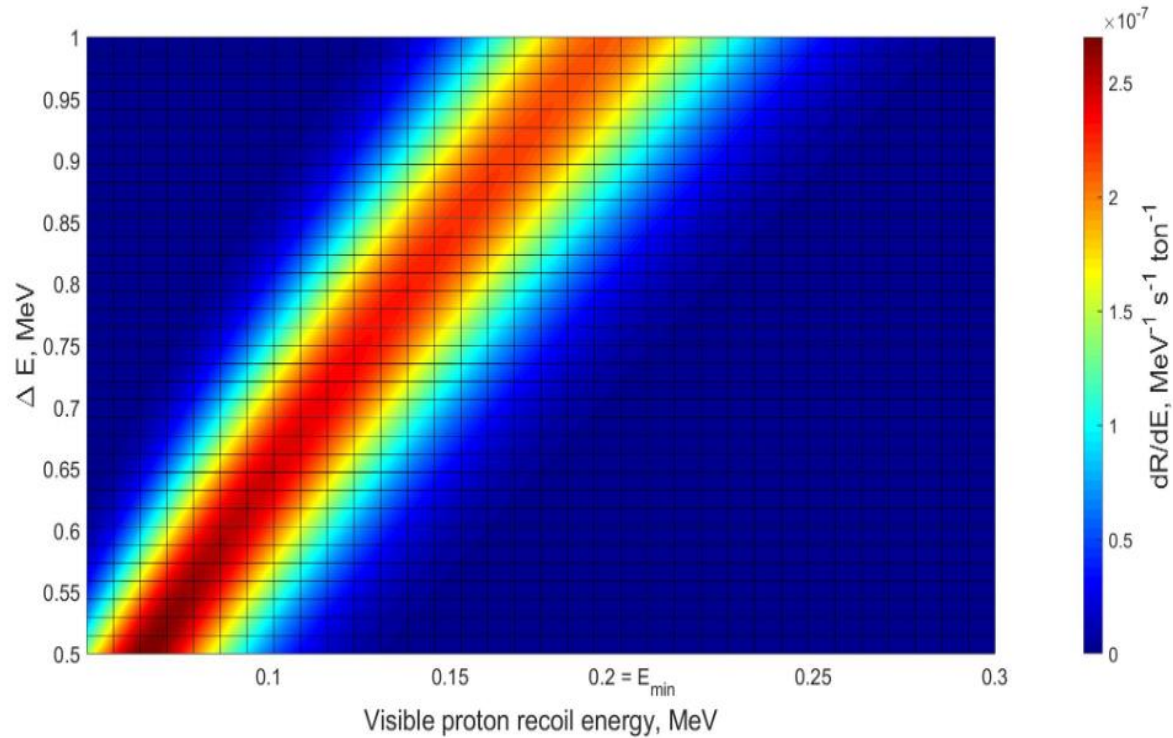
# Ожидаемый в Борексино энергетический спектр. Расчётная скорость счёта ( $\Delta E = 1$ МэВ)



$$R_{\text{сиг}} = 21.0 \pm 0.4 \text{ (сист)} \text{ год}^{-1} \times \left( \frac{\rho_D}{0.4 \text{ ГэВ/см}^3} \right) \times \left( \frac{F}{0.5} \right) \times \left( \frac{\sigma_n}{10^{-43} \text{ см}^2} \right) \times \left( \frac{M_{sc}}{100 \text{ тонн}} \right) \times \left( \frac{M}{100 \text{ ГэВ}} \right)^{-1}$$



# Исследование зависимости спектра от параметра $\Delta E$



Значение параметра $\Delta E$ , МэВ	Скорость счёта в интервале энергий (0.2; 0.3) МэВ, год <sup>-1</sup>	Доля от полной скорости счёта, %
0.70	$(5.6 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	0.1
0.75	$(2.39 \pm 0.05) \times 10^{-1}$	0.6
0.80	$(8.5 \pm 0.2) \times 10^{-1}$	2.0
0.85	$2.49 \pm 0.05$	5.7
0.90	$6.1 \pm 0.1$	14
0.95	$12.3 \pm 0.2$	27
1.00	$21.0 \pm 0.4$	45

# Детектор Борексино

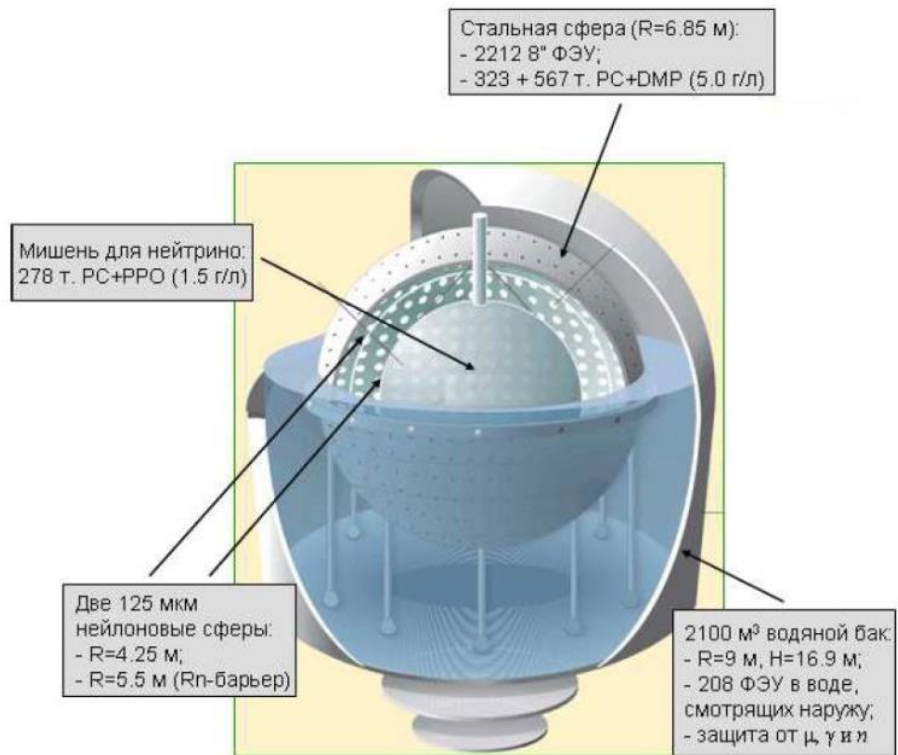
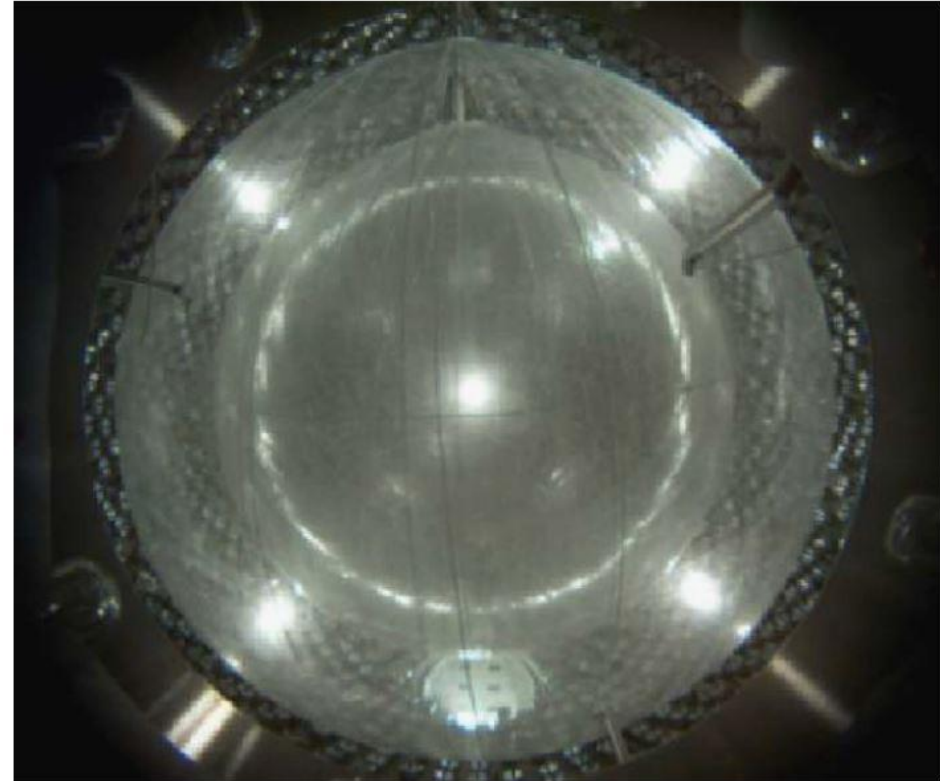


Схема детектора Борексино



Центральная часть детектора Борексино

# Анализ фоновых процессов

---

Фоновые процессы:

- распад  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ :  $R_U = 4.6 \text{ год}^{-1}$ ,  $R_{Th} = 9.7 \text{ год}^{-1}$ ;
- распад  $^{210}\text{Po}$ :  $R_{Po} = 4.3 \text{ год}^{-1}$ ;
- рассеяние атмосферных нейтрино на протонах мишени:  $R_\nu = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ ;
- рассеяние быстрых нейтронов на протонах мишени:  $R_n \leq 5.1 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ .

$$R_\Phi = R_{Po} + R_U + R_{Th} = 18.5 \pm 0.2 \text{ (сист)} \text{ год}^{-1} \times \left( \frac{M_{sc}}{100 \text{ тонн}} \right)$$

# Анализ экспериментальных данных Борексино. Общие критерии отбора. Результат отбора

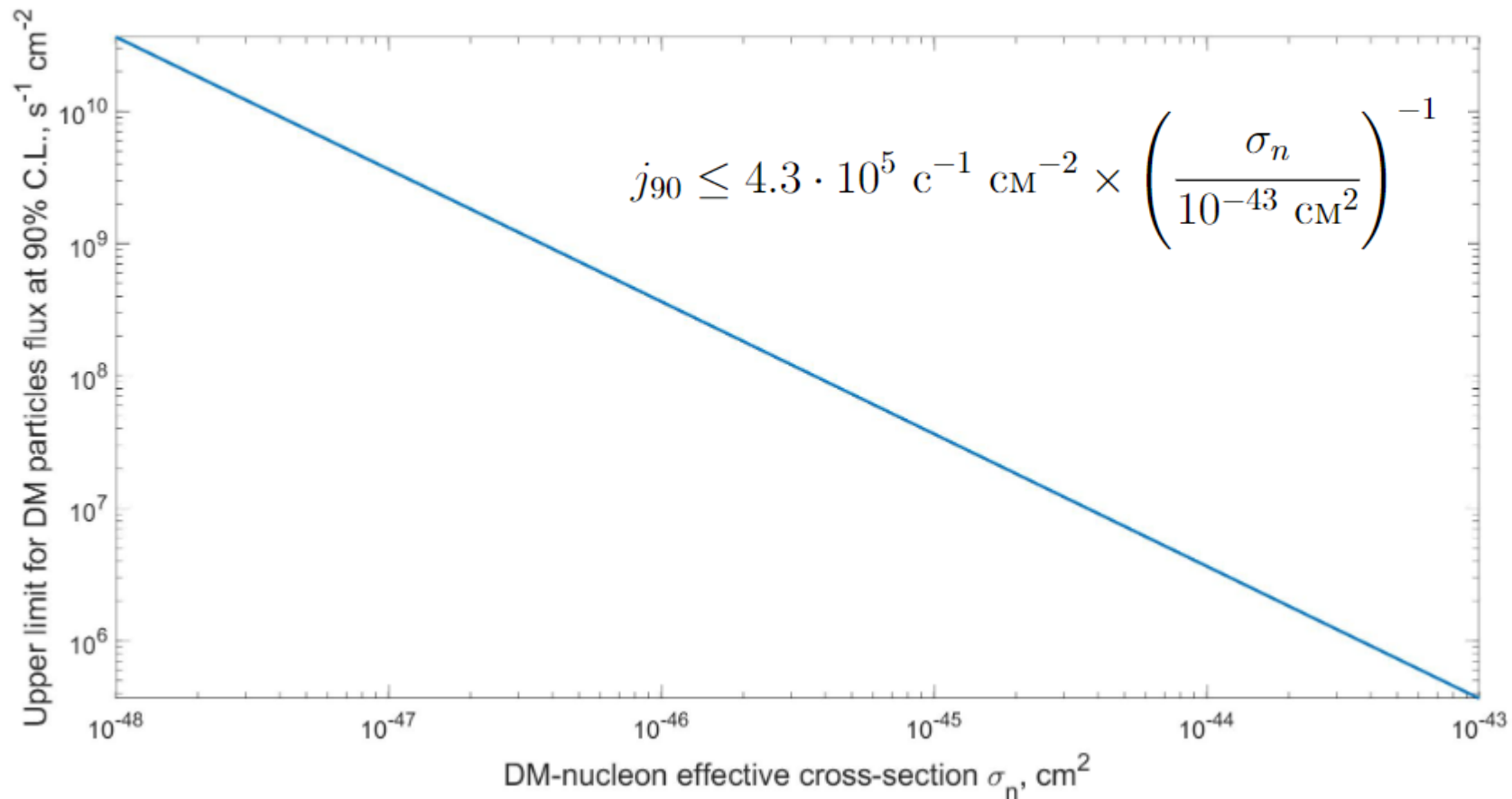
---

- Форма импульса события соответствует протону;
- Событие-кандидат находится в чувствительном объёме (сфера радиусом 1 метр в центре детектора, масса сцинтиллятора  $M_{SC} = 3.7$  тонн);
- мюонное вето 2 с (отбрасывание событий, находящихся во временном окне длительностью 2 с после регистрации мюона);
- событие-кандидат не должно быть шумом электроники;
- энергия события-кандидата лежит в интервале (0.2; 0.3) МэВ.

**Результат отбора:** 1 событие-кандидат за 970 дней живого времени сбора данных.

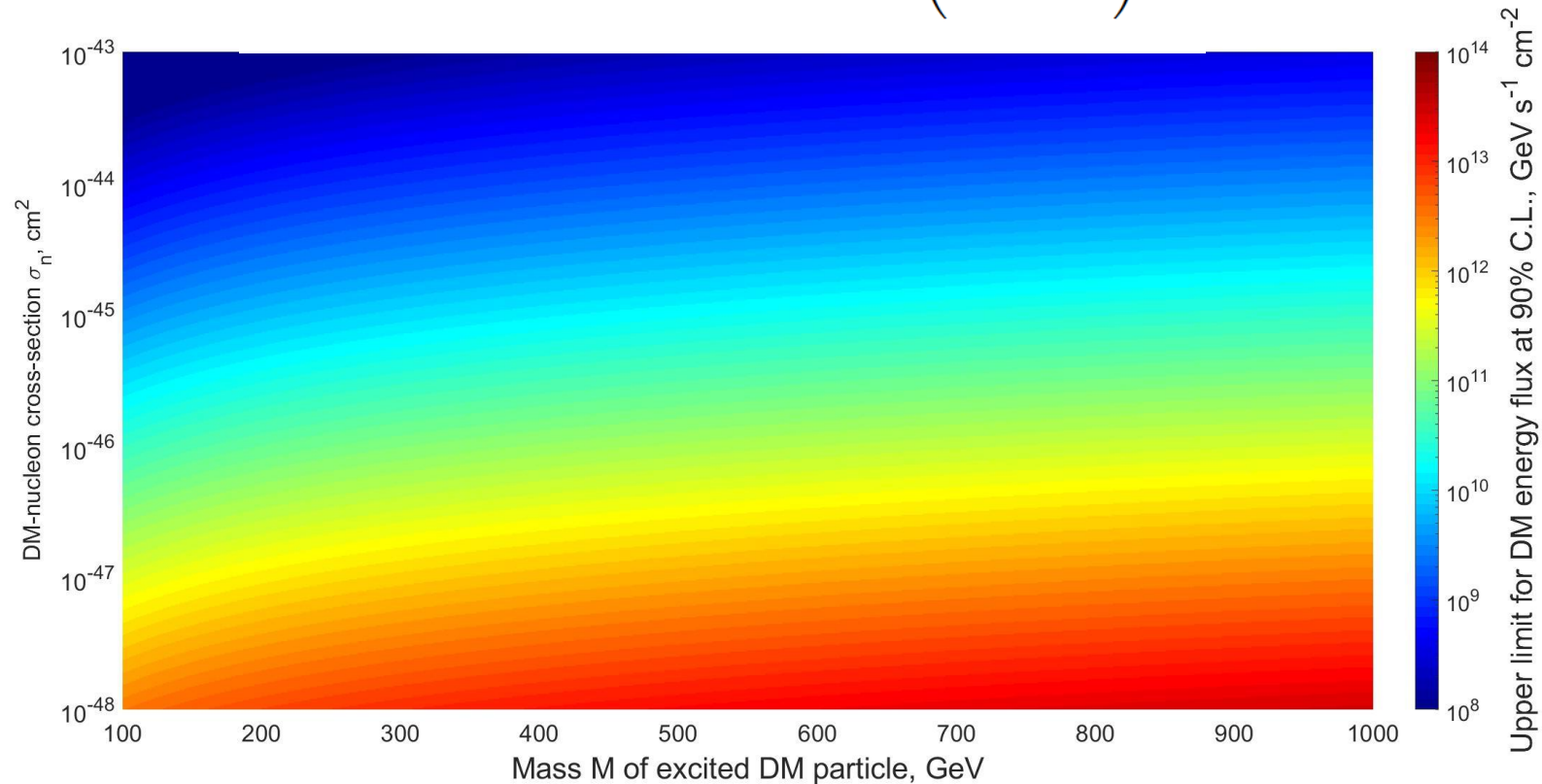
$$\begin{array}{l} N_{\text{эксп}} = 1 \text{ событие-кандидат} \\ N_{\text{ф}} = 1.20 \pm 0.02 \text{ (сист) событий} \end{array} \xrightarrow{\text{Feldman-Cousins [2]}} N_{90} = 3.17 \pm 0.02 \text{ (сист) событий}$$

# Верхний предел потока частиц возбуждённой скрытой массы ( $\Delta E = 1$ МэВ)

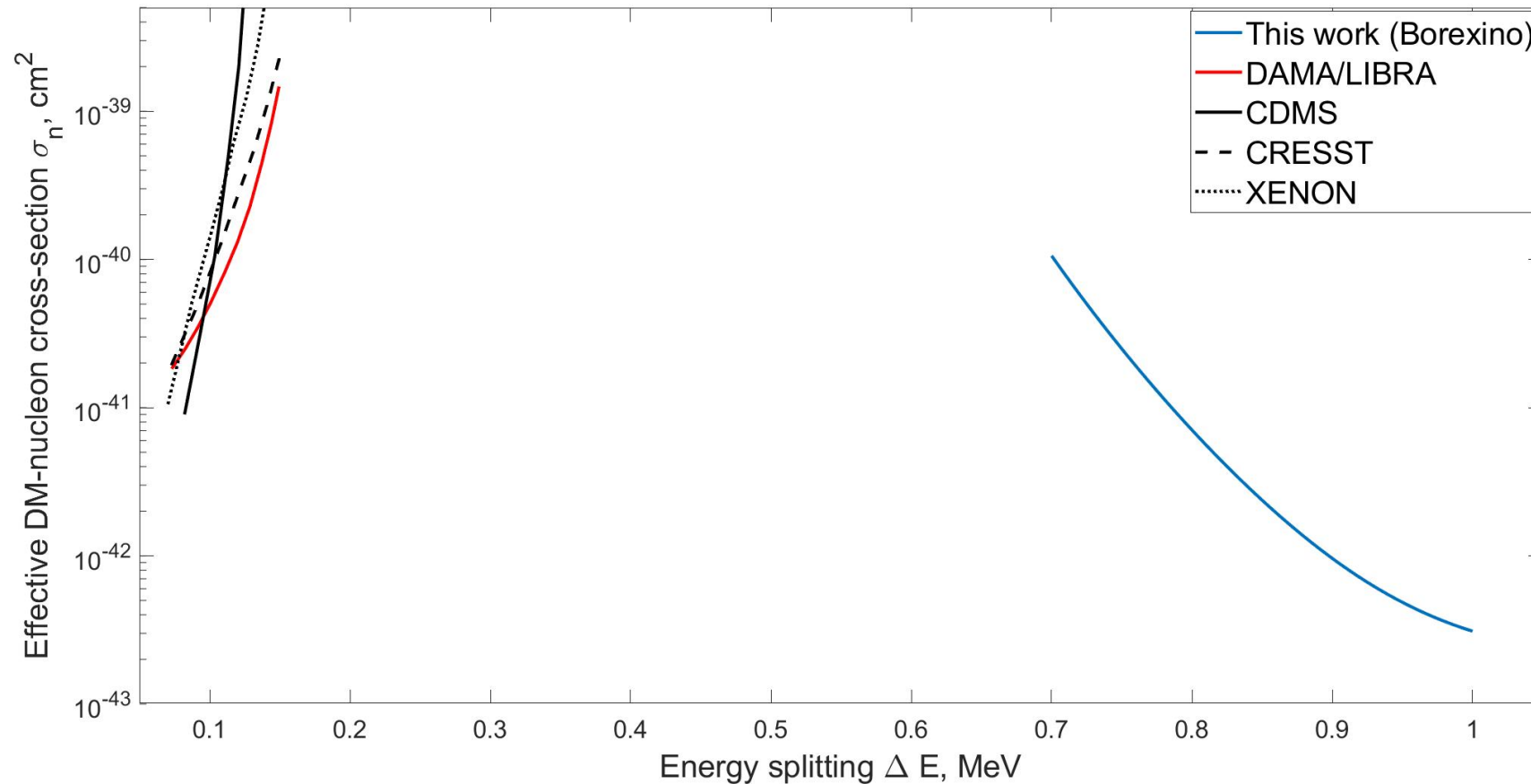


# Верхний предел энергетического потока возбуждённой скрытой массы ( $\Delta E = 1$ МэВ)

$$\mathcal{J}_{90} \leq 4.3 \cdot 10^5 \text{ ГэВ с}^{-1} \text{ см}^{-2} \times M \times \left( \frac{\sigma_n}{10^{-43} \text{ см}^2} \right)^{-1}$$

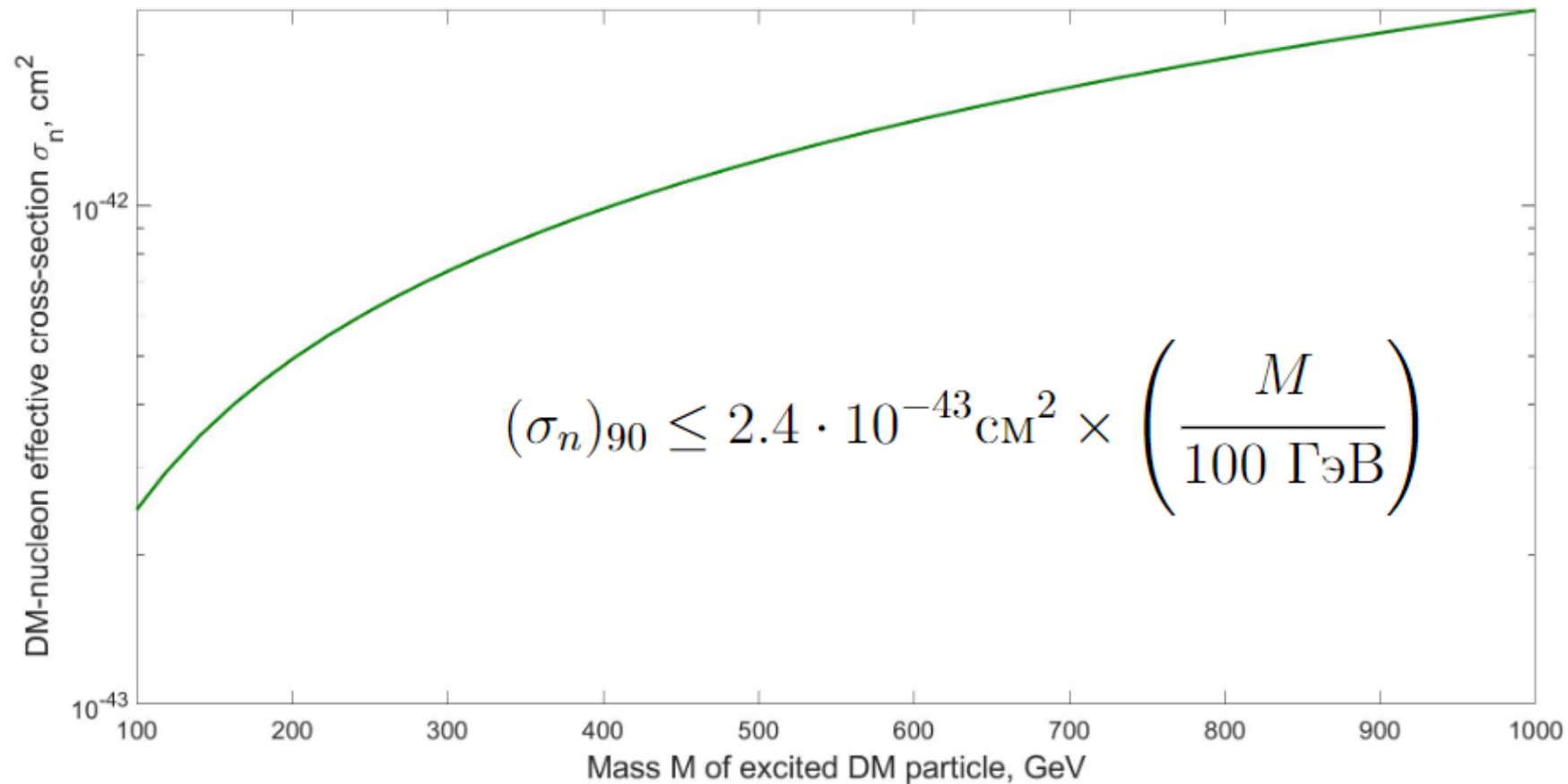


# Верхний предел эффективного сечения взаимодействия частиц возбуждённой скрытой массы с нуклонами ( $M = 120$ ГэВ)





Верхний предел эффективного сечения взаимодействия частиц возбуждённой скрытой массы с нуклонами ( $\Delta E = 1$  МэВ)





# Заключение

---

В ходе проведённых исследований получены следующие основные результаты:

- рассмотрена модель возбуждённой скрытой массы с набором свободных параметров, основные из которых: масса WIMP  $M$ , эффективное сечение взаимодействия WIMP с нуклоном  $\sigma_n$ , доля WIMP в возбуждённом состоянии, энергия возбуждения  $\Delta E$ ;
- произведён расчёт ожидаемого спектра событий и сигнала от взаимодействия частиц возбуждённой скрытой массы с протонами мишени детектора Борексино;
- для уровня достоверности 90% получен верхний предел эффективного сечения  $\sigma_n$  взаимодействия частиц возбуждённой скрытой массы с нуклонами при фиксированном значении массы частицы  $M = 120$  ГэВ для интервала значений  $\Delta E \in (0.7; 1.0)$  МэВ;
- для уровня достоверности 90% получен верхний предел эффективного сечения  $\sigma_n$  взаимодействия частиц возбуждённой скрытой массы с нуклонами при фиксированном значении  $\Delta E = 1$  МэВ для интервала значений массы  $M \in (100; 1000)$  ГэВ.

Впервые получены результаты в неисследованной другими экспериментами области параметров ( $\Delta E; \sigma_n$ ). Результат даёт указание к исследованию возбуждённой скрытой массы с энергией возбуждения в интервале (0.15; 0.70) МэВ.

Спасибо за внимание!

---

# Дополнительные слайды

---

# Расчёт спектра по энергии отдачи протона

---

Спектр по энергии отдачи протона:

$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{N_T F \rho_D}{M} \int_{v_{min}}^{\infty} v f(v, v_E, v_{esc}) dv \frac{d\sigma}{dE_R}$$

Из кинематики реакции можно получить

$$\frac{d\sigma}{dE_R} = \frac{\sigma_n}{2mv^2}$$

$$v_{min} = \frac{|E_R - \Delta E|}{\sqrt{2m\Delta E}}$$

# Расчёт спектра по энергии отдачи протона

---

Максвелловское распределение частиц скрытой массы по скоростям:

$$f(v, v_{esc}) = \begin{cases} \left(\frac{3-\frac{8}{\pi}}{\pi v_c^2}\right)^{\frac{3}{2}} 4\pi v^2 e^{-\frac{(3-\frac{8}{\pi})v^2}{v_c^2}}, & \text{при } v < v_{esc} \\ 0, & \text{при } v > v_{esc} \end{cases}$$

$v_c = 220$  км/с – скорость движения по круговой орбите вокруг центра Галактики на расстоянии Земли

Средняя скорость частицы: 370 км/с, средняя энергия частицы: 60 кэВ

# Расчёт спектра по энергии отдачи протона

---

После взятия интеграла и отбрасывания второго слагаемого получим:

$$\frac{dR}{dE_R} \approx \frac{N_T F \rho_D \sigma_n}{2mM} \sqrt{\frac{\left(3 - \frac{8}{\pi}\right)}{\pi v_c^2}} e^{-\frac{(E_R - \Delta E)^2 \left(3 - \frac{8}{\pi}\right)}{2v_c^2 m \Delta E}} = A e^{-\frac{(E_R - \Delta E)^2}{2\sigma_1^2}}$$

где введены обозначения

$$A = \frac{N_T F \rho_D \sigma_n}{2mM v_c} \sqrt{\frac{\left(3 - \frac{8}{\pi}\right)}{\pi}}, \quad \sigma_1^2 = \frac{\Delta E m v_c^2}{3 - \frac{8}{\pi}}$$

# Учёт квенчинга

---

Зависимость световыхода на единицу длины от удельных потерь энергии заряженной частицы даётся формулой:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{\frac{dE}{dx}}{1 + k_B \frac{dE}{dx}}$$

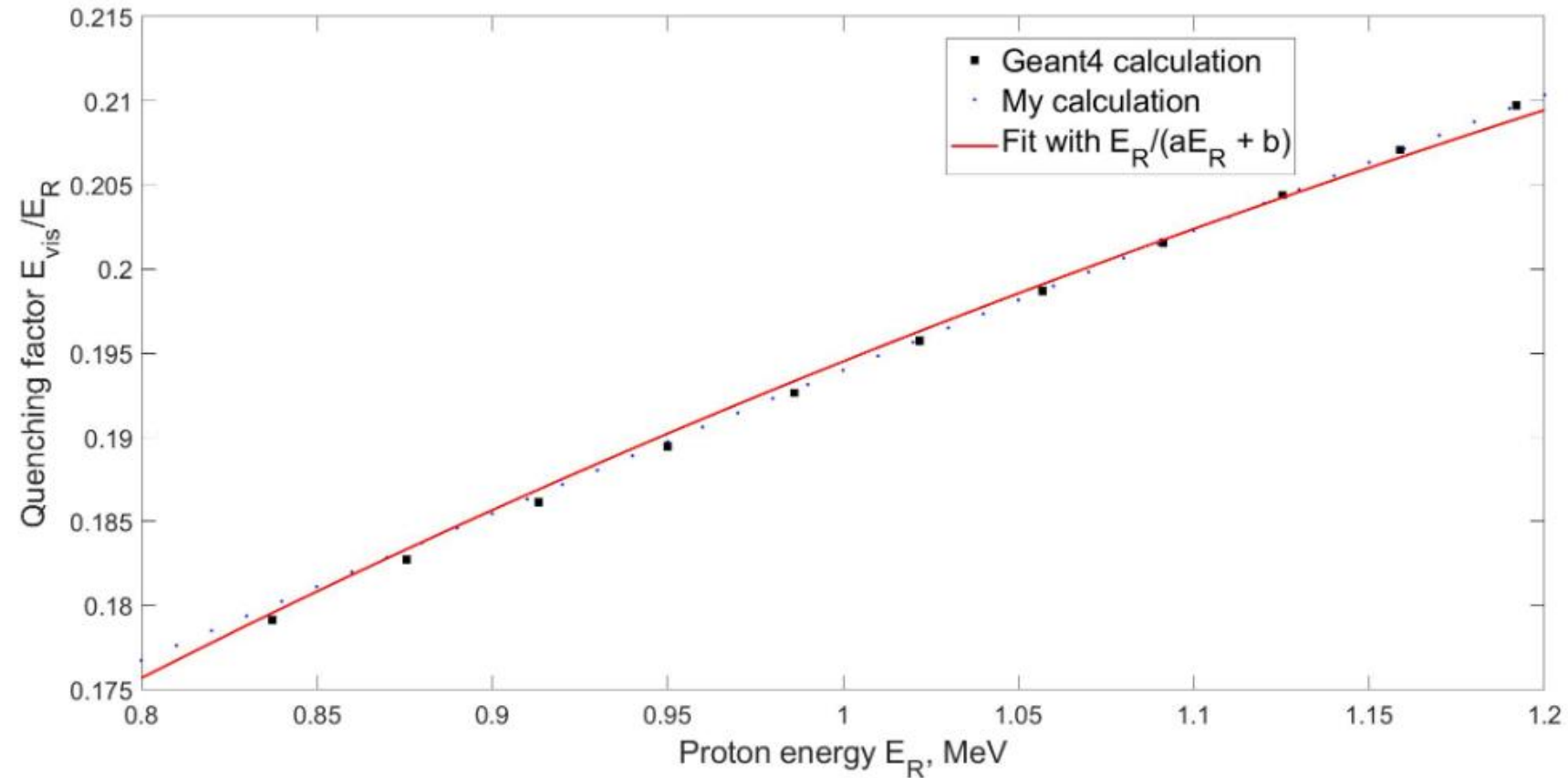
Формула для полной энергии световой вспышки при данной кинетической энергии протона:

$$E_{vis} = \int_0^{E_R} \frac{dE}{1 + k_B \frac{dE}{dx}}$$

Формула Бете-Блоха:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{4\pi e^4 Z^2}{m_e v^2} \sum_A n_A Z_A \ln \left( \frac{2m_e v^2}{\bar{I}_A} \right)$$

# Учёт квенчинга для протонов





# Учёт квенчинга для протонов

---

Переход к спектру по энергии с учётом эффекта квенчинга:

$$\frac{dR}{dE_{vis}}(E_{vis}) = \frac{dR}{dE_R}(E_R(E_{vis})) \times \frac{\partial E_R}{\partial E_{vis}}(E_{vis})$$

$$E_R(E_{vis}) = \frac{1}{2} \left( aE_{vis} + \sqrt{a^2 E_{vis}^2 + 4bE_{vis}} \right)$$

$$\frac{\partial E_R}{\partial E_{vis}}(E_{vis}) = \frac{a}{2} + \frac{a^2 E_{vis} + 2b}{2\sqrt{a^2 E_{vis}^2 + 4bE_{vis}}}$$

# Учёт разрешения детектора

---

Вид функции отклика детектора Борексино:

$$G(E_{det}, E_{vis}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{(E_{det}-E_{vis})^2}{2\sigma_0^2}}$$

где  $\sigma_0 = 0.06 \sqrt{E_{det}}$

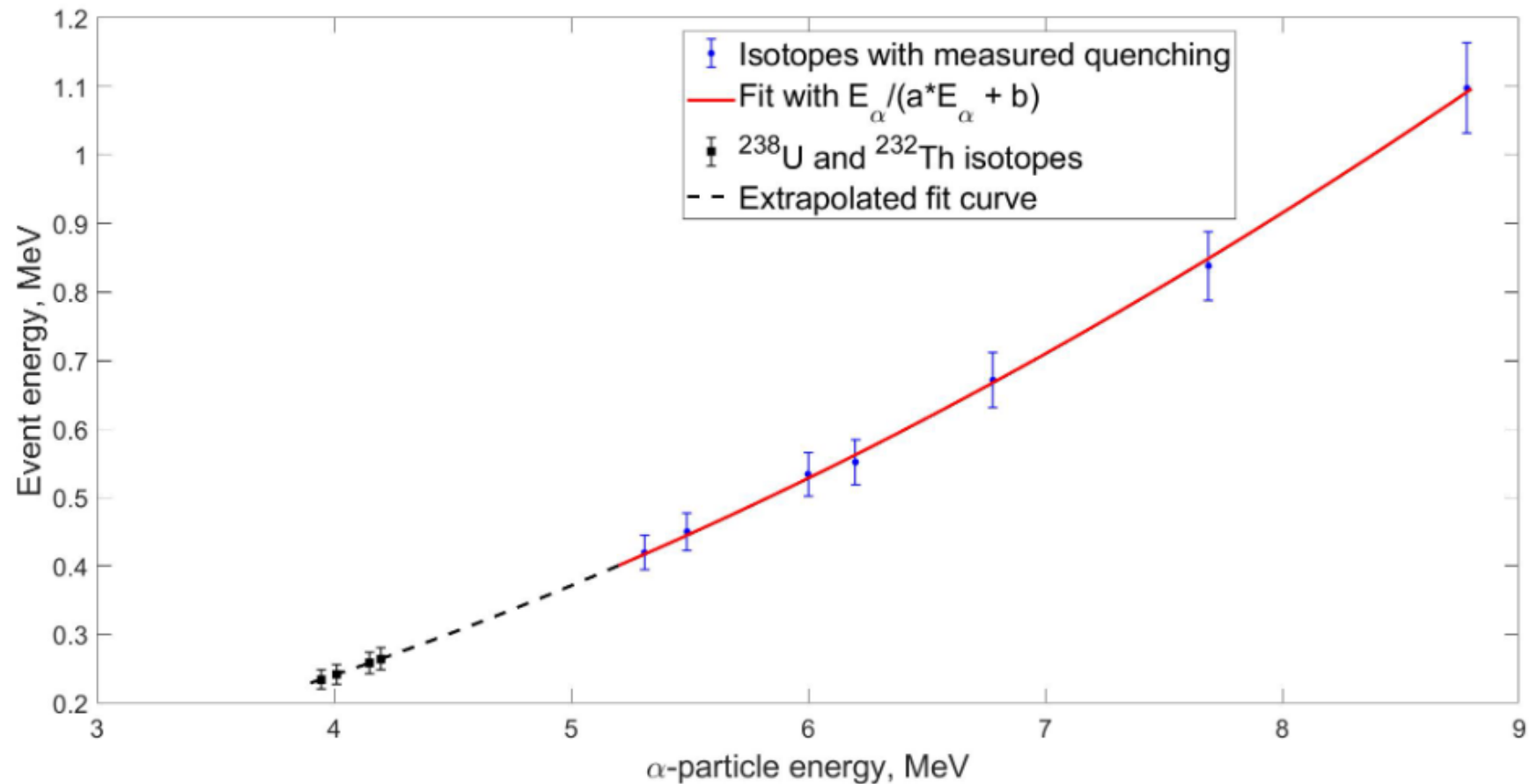
Спектр событий с учётом разрешения детектора даётся формулой

$$\frac{dR}{dE_{det}} = \int_{E_{vis\ min}}^{E_{vis\ max}} \frac{dR}{dE_{vis}} G(E_{det}, E_{vis}) dE_{vis} = \int_0^{\infty} \frac{dR}{dE_{vis}} G(E_{det}, E_{vis}) dE_{vis}$$

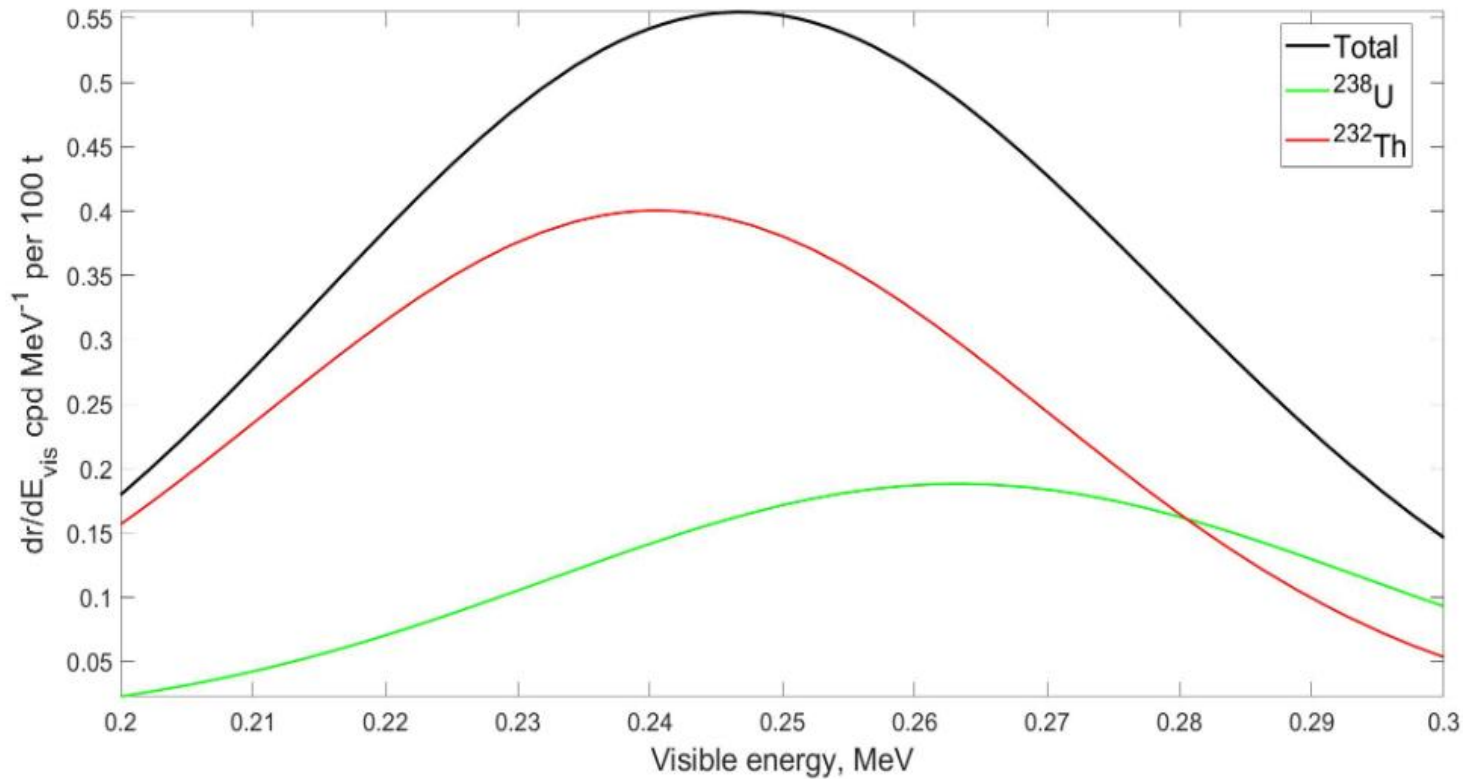
# Анализ фоновых процессов. Распад $^{238}\text{U}$ и $^{232}\text{Th}$

Изотоп	Энергия $\alpha$ -частицы, МэВ	Квенчинг-фактор	Энергия сцинтилляционной вспышки, МэВ
$^{210}\text{Po}$	5.31	0.079	0.42
$^{222}\text{Rn}$	5.49	0.082	0.45
$^{218}\text{Po}$	6.00	0.089	0.53
$^{220}\text{Rn}$	6.29	0.089	0.56
$^{216}\text{Po}$	6.78	0.099	0.67
$^{214}\text{Po}$	7.69	0.109	0.84
$^{212}\text{Po}$	8.78	0.125	1.10

# Анализ фоновых процессов. Распад $^{238}\text{U}$ и $^{232}\text{Th}$



# Анализ фоновых процессов. Распад $^{238}\text{U}$ и $^{232}\text{Th}$



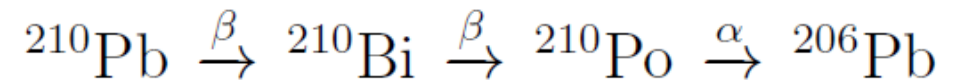
$$R_U = 4.6 \pm 0.1 \text{ (сист) год}^{-1} \times \left( \frac{M_{sc}}{100 \text{ тонн}} \right)$$
$$R_{Th} = 9.7 \pm 0.1 \text{ (сист) год}^{-1} \times \left( \frac{M_{sc}}{100 \text{ тонн}} \right)$$

# Анализ фоновых процессов. Распад $^{210}\text{Po}$

---

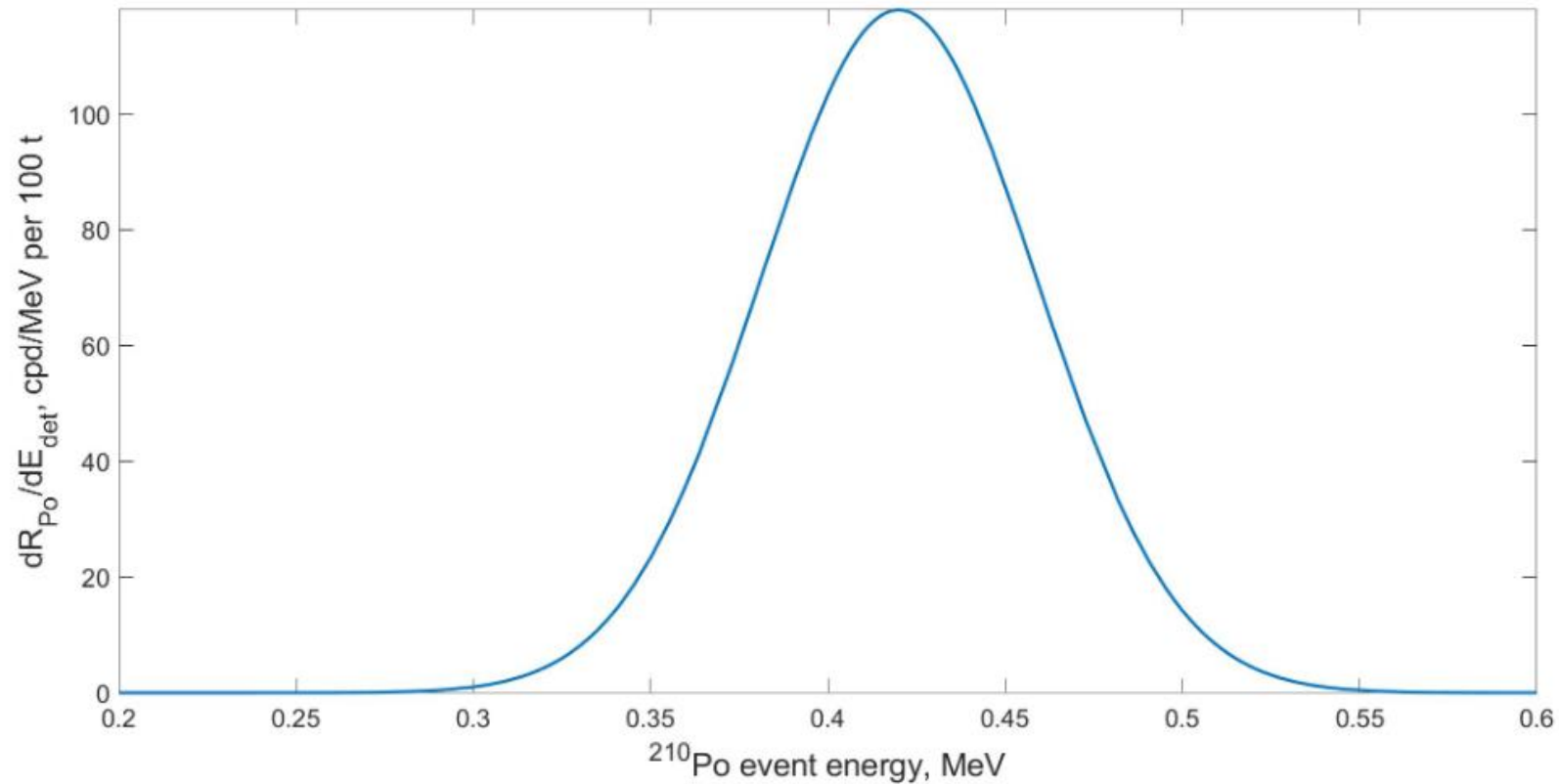


В 2015-2016 годах на детекторе Борексино была установлена система теплоизоляции и активного контроля температуры для устранения фона от цепочки распада



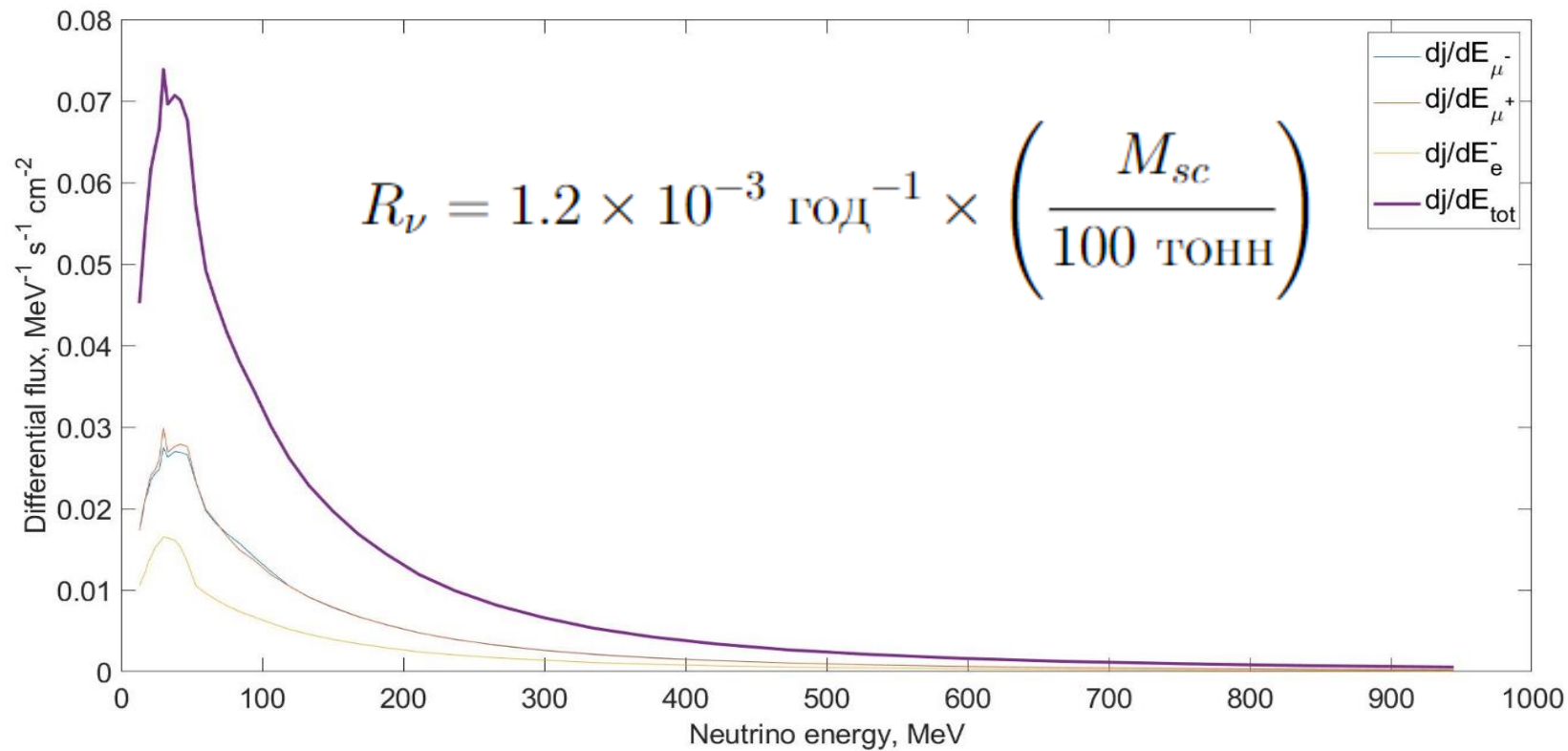
# Анализ фоновых процессов. Распад $^{210}\text{Po}$

---



$$R_{\text{Po}} = 4.3 \text{ год}^{-1} \times \left( \frac{M_{sc}}{100 \text{ тонн}} \right)$$

# Анализ фоновых процессов. Атмосферные нейтрино



Энергетический спектр атмосферных нейтрино



# Анализ фоновых процессов. Быстрые нейтроны

---

Как показывают исследования, проведённые на детекторе Борексино, наложение временного вето длительностью 2 секунды после регистрации мюона оставляет 0.05% от всего фона быстрых нейтронов.

$$R_n \leq 5.1 \cdot 10^{-2} \text{ событий} \times \frac{M_{sc}}{100 \text{ тонн}}$$

# Анализ экспериментальных данных Борексино. Параметр Гатти

