

# Установление пределов на поток частиц скрытой массы при помощи детектора Борексино

---

ВЫПОЛНИЛ: СТУДЕНТ ГРУППЫ Б19-102

КИСЕЛЕВ КИРИЛЛ КЛАУДИОВИЧ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: МЛАДШИЙ НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК

НУГМАНОВ РАДИК РАФАЭЛЬЕВИЧ

# Цель работы

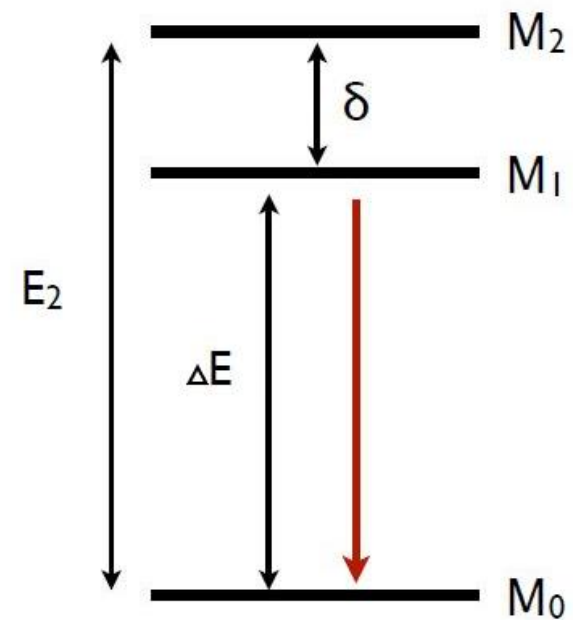
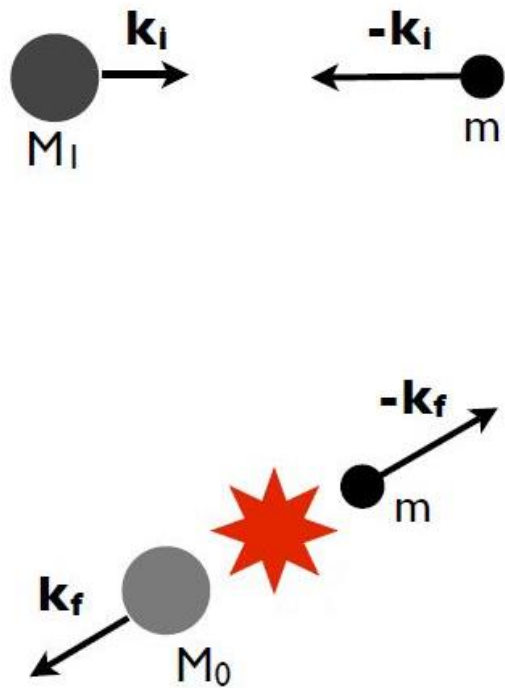
---

Расчёт теоретического спектра энергии событий-кандидатов от взаимодействия частиц скрытой массы с протонами.

Оценка ожидаемой скорости счёта на детекторе Борексино.

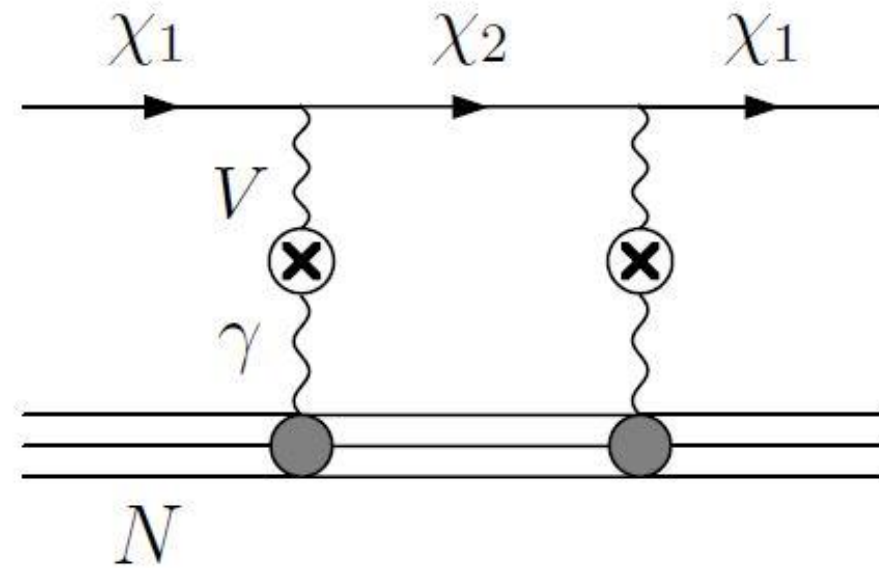
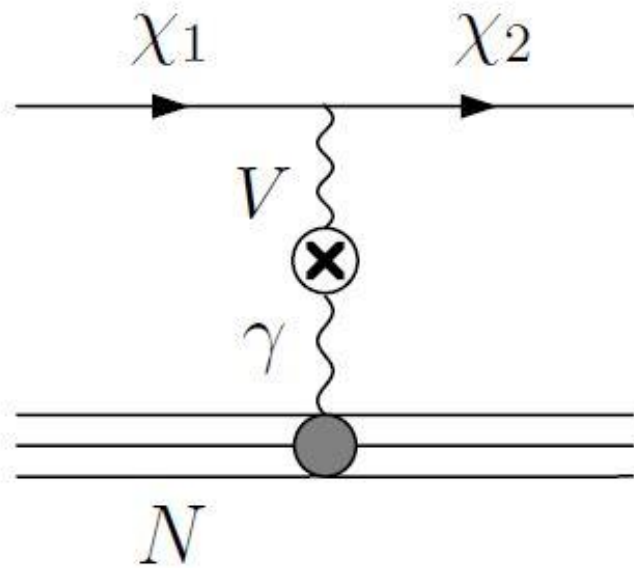
Отбор событий-кандидатов от взаимодействия частиц скрытой массы с протонами.

# Возбуждённая скрытая масса



# Возбуждённая скрытая масса

---



# 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

$$\frac{d\sigma}{dE_R} = \frac{\sigma_n}{2mv^2} \quad v_{min} = \frac{|E_R - \Delta E|}{\sqrt{2mv^2}}$$

# 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: 370 км/с

# 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 разрешения детектора

---

Вид функции отклика детектора Борексино:

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

где  $\sigma_0 = 0.06 \sqrt{E_{det}}$



# Учёт разрешения детектора

---

Спектр событий с учётом разрешения детектора даётся формулой

$$\frac{dR}{dE_{det}} = \int_{E_{Rmin}}^{E_{Rmax}} \frac{dR}{dE_R} G(E_{det}, E_R) dE_R = \int_0^{\infty} \frac{dR}{dE_R} G(E_{det}, E_R) dE_R$$

Взятие интеграла приведёт к выражению

$$\frac{dR}{dE_{det}} = A \frac{\sigma}{\sigma_0} \left( 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{\tilde{E}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right) e^{-\frac{(E_{det} - \Delta E)^2}{2(\sigma_1^2 + \sigma_0^2)}}$$

Обозначения:  $\sigma^2 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_0^2}{\sigma_1^2 + \sigma_0^2}$ ,  $\tilde{E} = \frac{E_{det} \sigma_1^2 + \Delta E \sigma_0^2}{\sigma_1^2 + \sigma_0^2}$ .

# Учёт сцинтилляционного дефекта

---

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

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

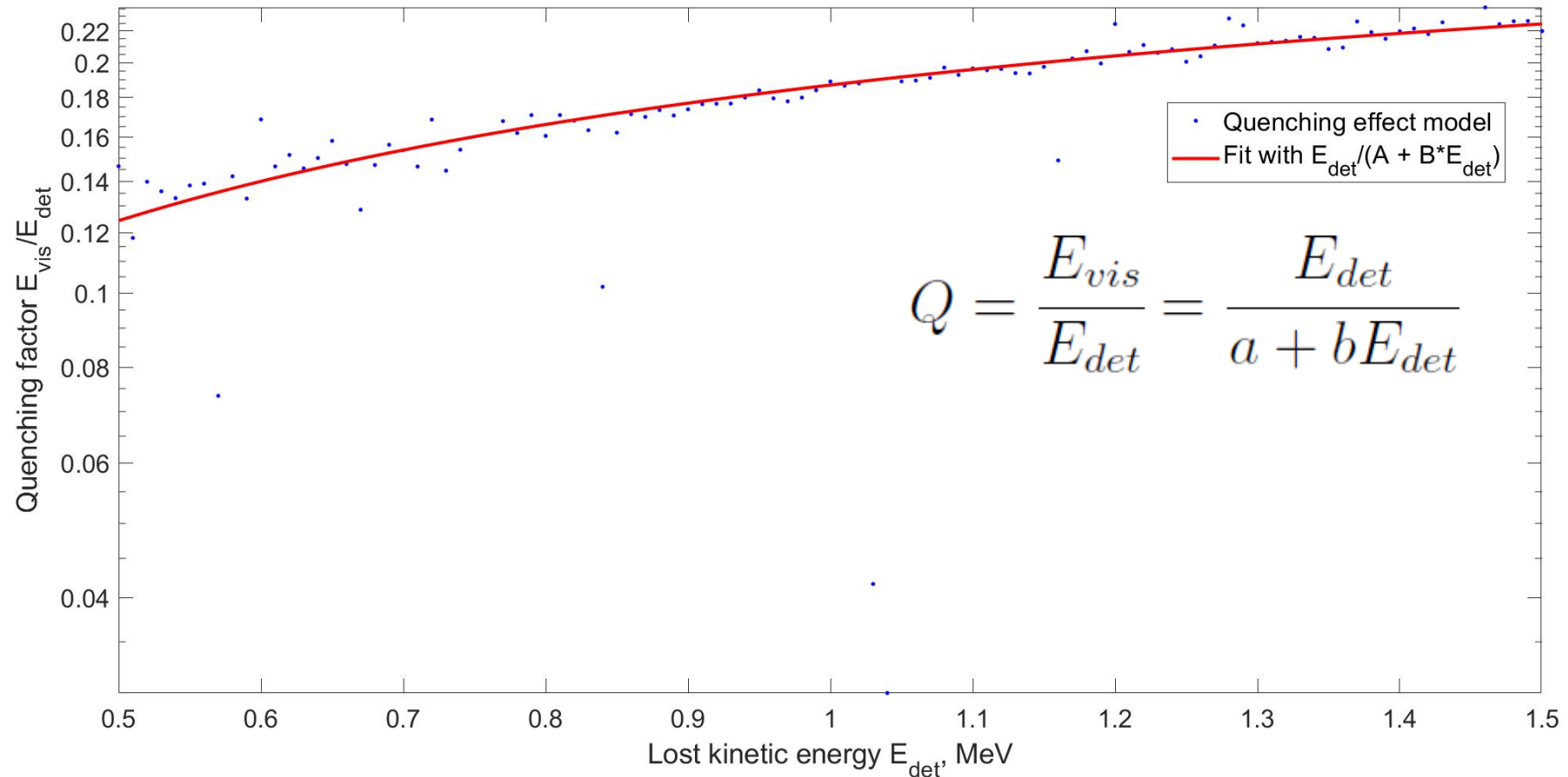
Формула для полной энергии световой вспышки при данной кинетической энергии протона:

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

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 сцинтилляционного дефекта



# Учёт сцинтилляционного дефекта

---

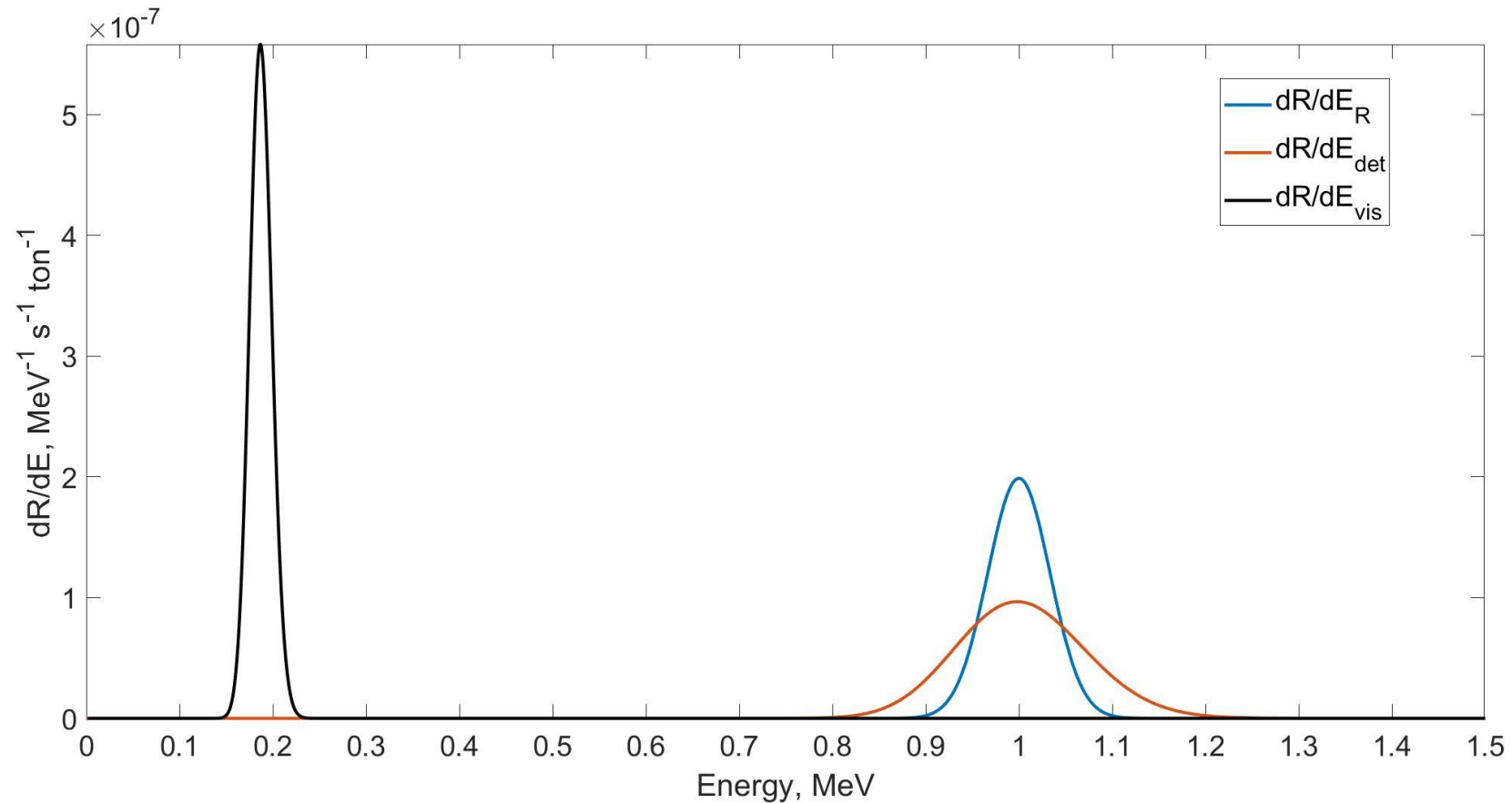
Переход к спектру по энергии с учётом эффекта квенчинга:

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

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

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

# Сравнение полученных энергетических спектров

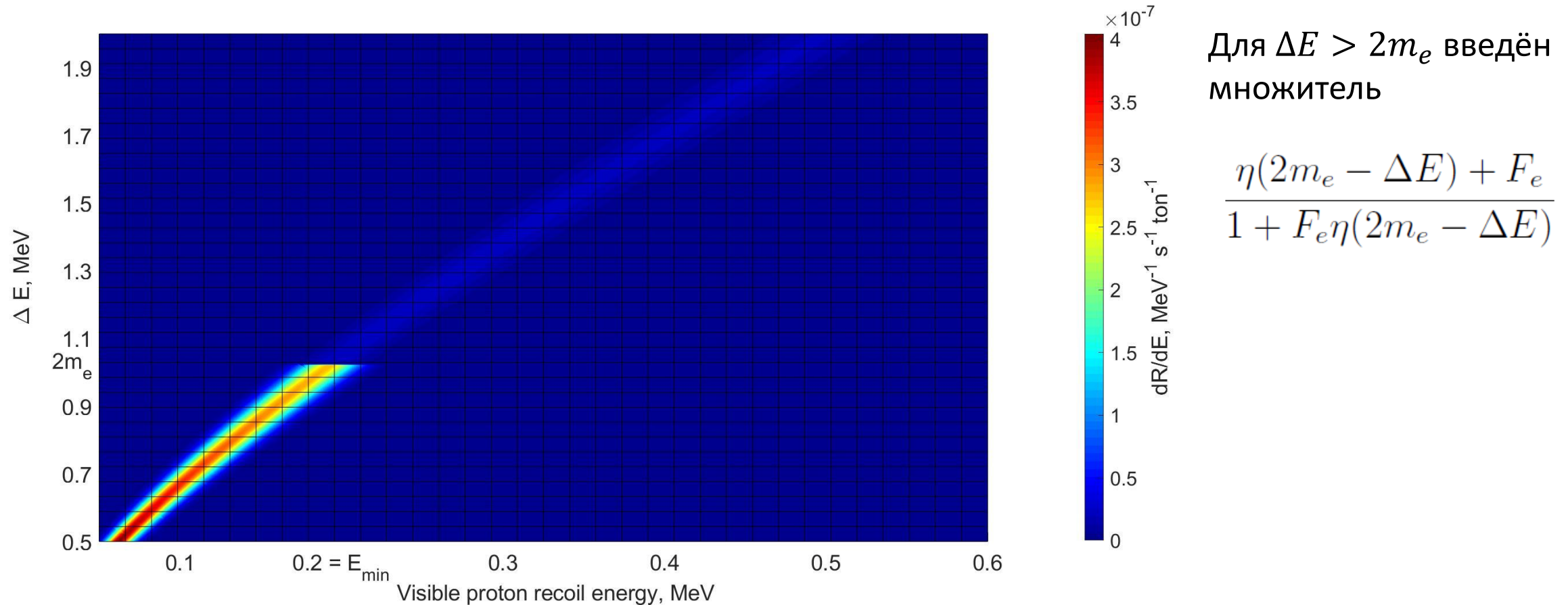


# Итоговая скорость счёта событий

---

$$R = 1.70 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1} = 5.35 \text{ год}^{-1} \times \left( \frac{\rho_D}{0.4 \text{ ГэВ/см}^3} \right) \left( \frac{F}{0.5} \right) \left( \frac{\sigma_n}{10^{-43} \text{ см}^2} \right) \left( \frac{M}{100 \text{ ГэВ}} \right)^{-1}$$

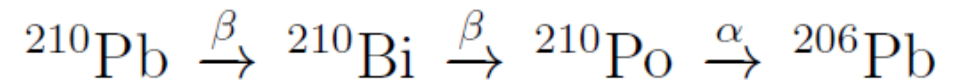
# Исследование зависимости спектра от параметра $\Delta E$



# Фоновые процессы. Распад $^{210}\text{Po}$

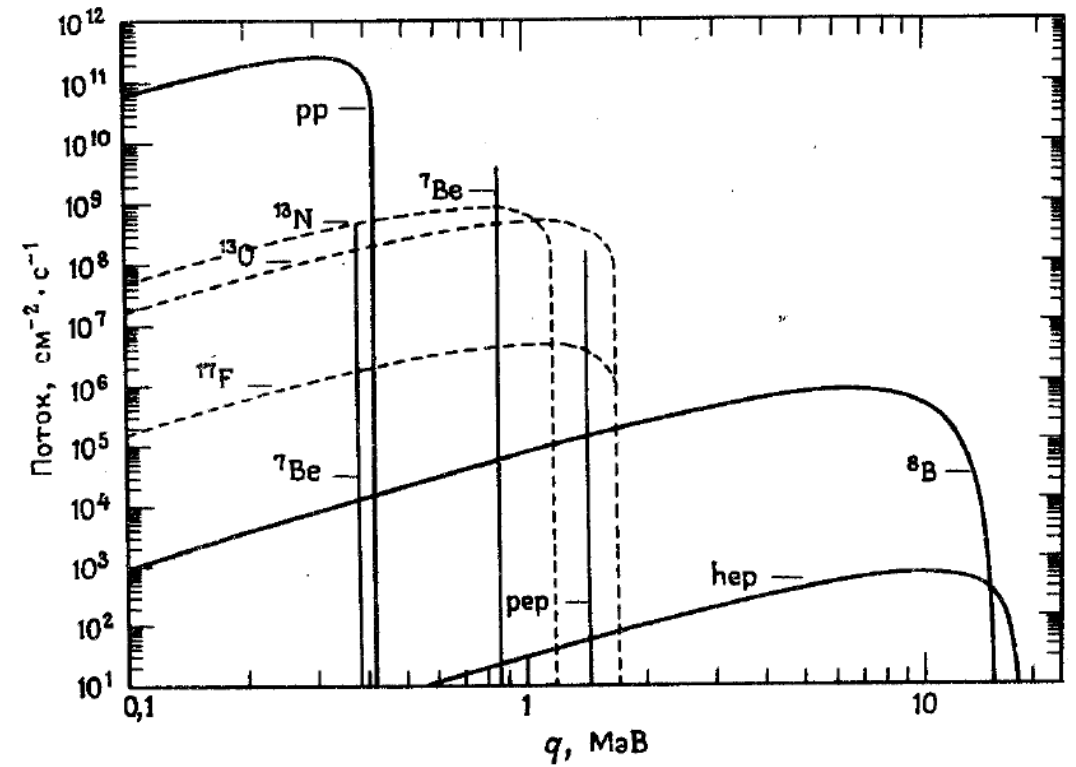
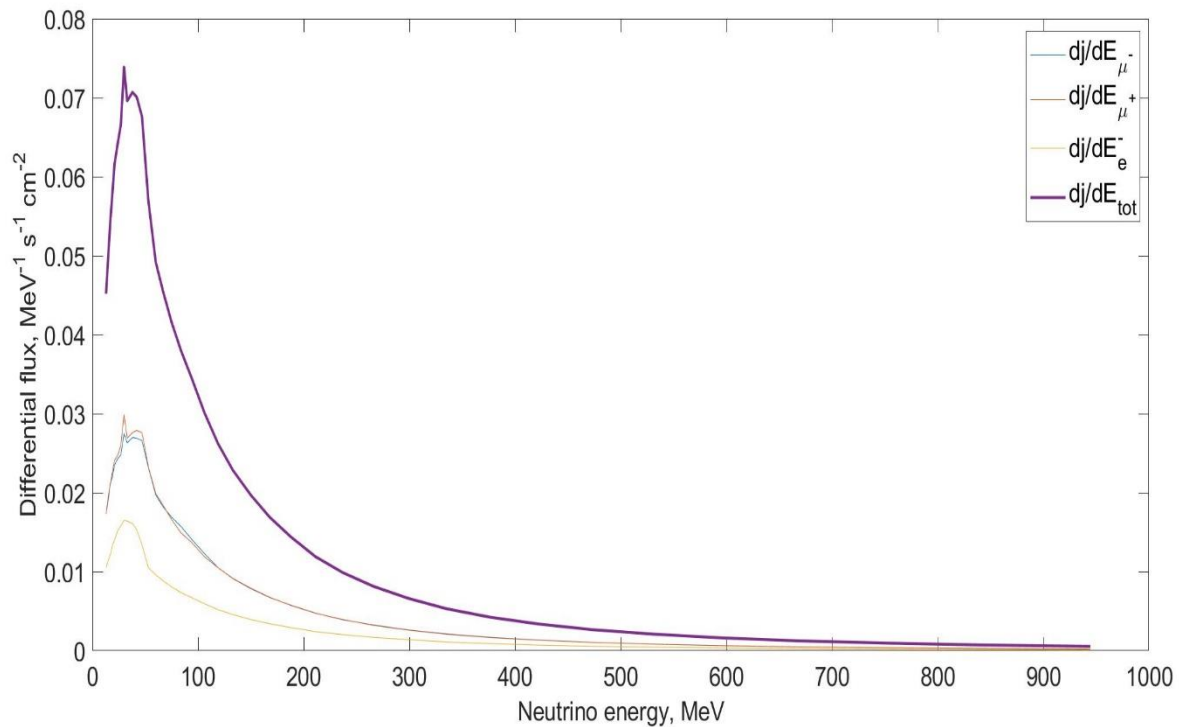


В 2015-2016 годах на детекторе Борексино была установлена система теплоизоляции и активного контроля температуры для устранения фона от цепочки распада





# Фоновые процессы. Атмосферные нейтрино



# Фоновые процессы. Атмосферные нейтрино

---

$$\frac{d\sigma_{\nu p}}{dE_R} = \frac{G_F^2 m_p}{2\pi E_\nu^2} ((c_V + c_A)^2 E_\nu^2 + (c_V - c_A)^2 (E_\nu - E_R)^2 - (c_V^2 - c_A^2) m_p E_R)$$

$$E_\nu^{min} = \frac{E_R + \sqrt{E_R(E_R + 2m_p)}}{2} \simeq \sqrt{\frac{E_R m_p}{2}}$$

# Фоновые процессы. Атмосферные нейтрино

---

$$\frac{dR}{dE_R}(E_R) = N_p \int_{E_\nu^{min}(E_R)}^{+\infty} \frac{dj}{dE_\nu}(E_\nu) \frac{d\sigma_{\nu p}}{dE_R}(E_R, E_\nu) dE_\nu$$

$$R_\nu = 0.3 \times 10^{-3} \text{ год}^{-1}$$

# Отбор событий.

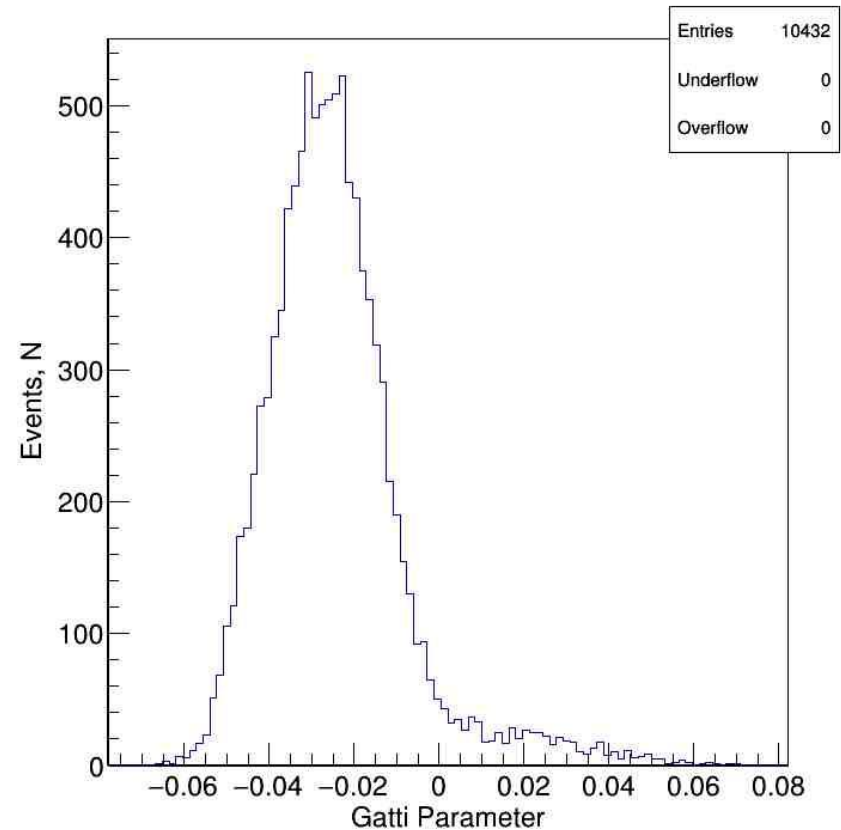
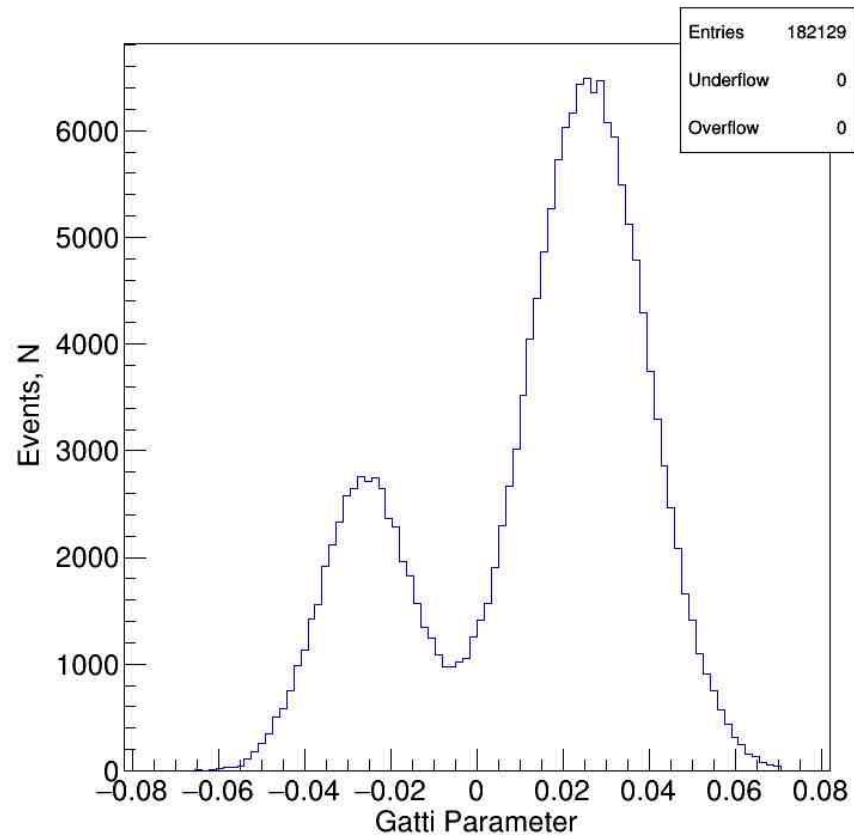
## Первичные критерии отбора событий

---

- Мюонное вето
- Событие-кандидат не должно быть шумом электроники
- Тип триггера 1
- Событие-кандидат должно иметь один кластер
- Энергия события меньше 1 МэВ
- Пространственные координаты события (в метрах):  $Z \in (-1.8; 2.2)$ ,  $\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \leq 2.8$

# Отбор событий.

# Отбрасывание событий распада $^{210}\text{Po}$



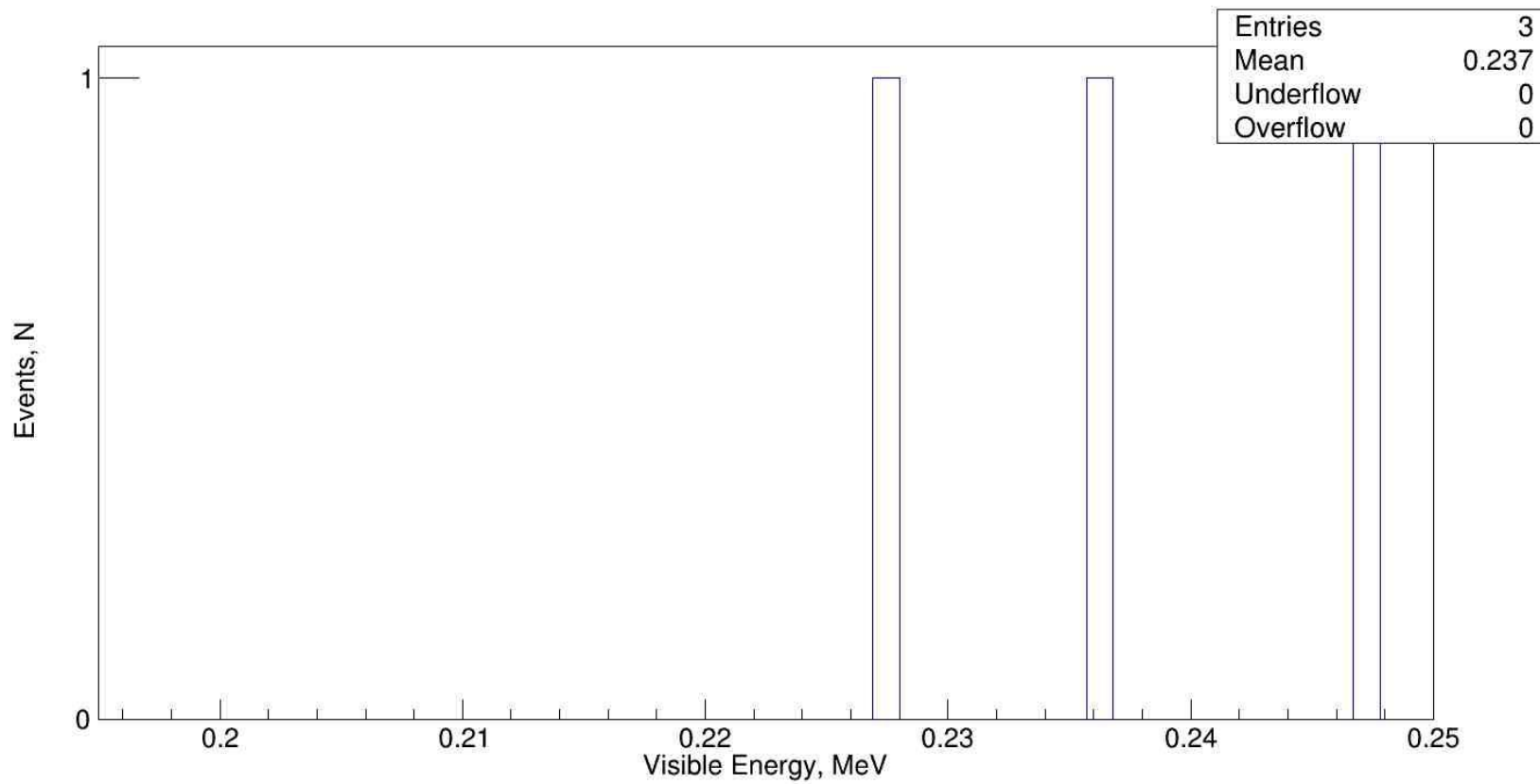
# Отбор событий.

## Отбор по параметру Гатти

---

| Параметр отбора $G_0$ | Доля отброшенных событий с параметром Гатти $< 0$ , % | Число отобранных событий |
|-----------------------|---|--------------------------|
| 0                     | 98.58   | 712                      |
| 0.01                  | 99.86   | 489                      |
| 0.02                  | 99.99   | 354                      |
| 0.03                  | 99.99978  | 215                      |

# Отбор событий. Отбор событий по энергиям



Время набора данных:  
755.7 дней

Интервал энергий:

$$E_{vis} \in (0.20; 0.23) \text{ МэВ}$$

Число событий-кандидатов: 1

# Заключение

---

- Был получен вид теоретического спектра по энергии событий от скрытой массы.
- Рассчитана ожидаемая скорость счёта событий от взаимодействия частиц возбуждённой скрытой массы с протонами мишени:  $R = 5.35 \text{ год}^{-1}$ .
- Произведена оценка фонового вклада:
  - события от распада  $^{210}\text{Po}$  были отброшены за счёт уменьшения конвективных потоков тяжёлых радиоактивных изотопов;
  - была рассчитана скорость счёта фоновых событий от упругого рассеяния атмосферных нейтрино на протоне, которая оказалась равной  $R_v = 0.3 \times 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ .
- Произведён отбор событий-кандидатов рассеяния частиц возбуждённой скрытой массы на протонах мишени. В период набора данных 2016-2019 гг. (755.7 дней) было отобрано одно событие. Экспериментальная скорость счёта таких событий оказалась равной  $R_{\text{эксп}} = 0.483 \text{ год}^{-1}$ .



Спасибо за внимание!

---