

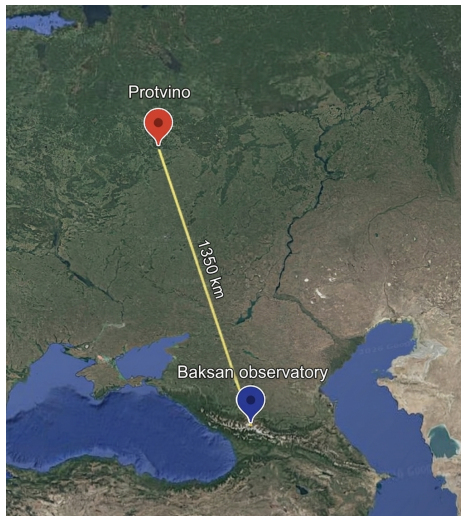
# Оценка чувствительности ускорительного нейтринного эксперимента с длинной базой Протвино-Баксан (PtB) для измерения иерархии нейтринных масс

Серга Сергей Сергеевич

Кафедра физики элементарных частиц, физический факультет  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
Научный руководитель: Л.Д. Колупаева

22 мая 2026 г.

- **Актуальность:** Развитие сектора ускорительных нейтринных экспериментов.
- **Цель:** Моделирование эксперимента с длинной базой ( $L \approx 1350$  км) в России.
- **Связка:** Протонный ускоритель У-70 (Протвино) → Детектор БПСТ (Баксан).



# Ускорительный комплекс У-70 (Протвино)

- **Тип:** Протонный синхротрон с максимальной энергией 70 ГэВ.
- **Мощность протонного пучка:**  $\sim 25$  кВт, в перспективе до  $\sim 90$  кВт.
- **Интенсивность:**  $N_p \approx 10^{20}$  протонов на мишень в год.

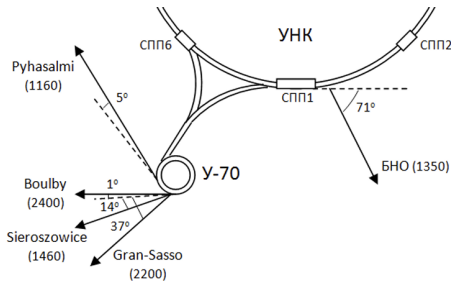


Рис. 1: Схема ускорительного комплекса.

# Вывод пучка и фокусирующие горны

- **Мишень:** Графитовый стержень (длина 90 см, радиус 2 см).
- **Фокусировка:** Система квадрупольных магнитов (горнов) собирает вторичные  $\pi^\pm$  и  $K^\pm$ .

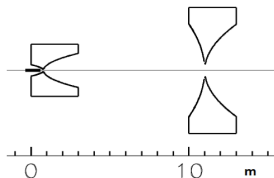


Рис. 2: Система горнов

- **Распадный канал:** Газонаполненная труба, где происходят распады:



- **Спектр:** Широкий спектр с максимумом в диапазоне 2–4 ГэВ.
- **Состав пучка:** Преимущественно мюонные нейтрино ( $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu > 99\%$ ), примесь электронных нейтрино незначительна ( $\nu_e + \bar{\nu}_e < 1\%$ ).
- **Направленность:** Угол расхождения пучка  $\theta \approx 0.05$  рад.

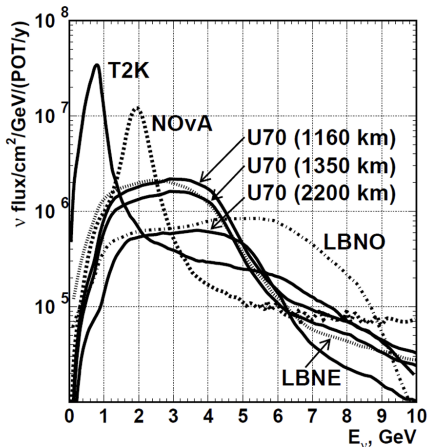


Рис. 3: Сравнение потоков У-70 для баз 1160, 1350 и 2200 км с похожими экспериментами.

# Баксанский подземный телескоп (БПСТ)

- **Масса:** 330 т жидкого сцинтиллятора (3180 модулей).
- **Фон:** Защищен горным массивом, эквивалентным 850 метрам воды.
- **Перспектива:** Существует проект ББНТ с массой 10 кт.

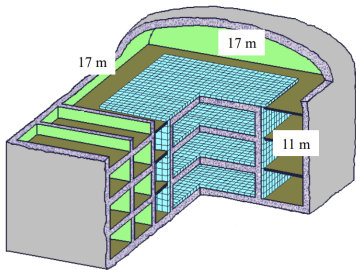


Рис. 4: Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ)

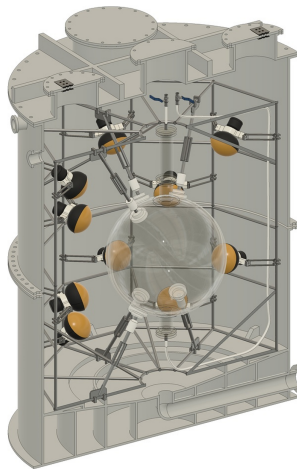


Рис. 5: Модель Большого Баксанского Нейтринного Телескопа (ББНТ)

# Сечения взаимодействия с веществом детектора

- **Материал:** Сцинтиллятор на основе уайт-спирита ( $\simeq C_{10}H_{22}$ ).
- **Моделирование:** Сечения из GENIE v3 рассчитывались для смеси сцинтиллятора и являлись входной информацией для моделирования в Global Neutrino Analysis (GNA):
  - Квазиупругое рассеяние (QEL).
  - Резонансное рождение (RES).
  - Глубокоупругое рассеяние (DIS).

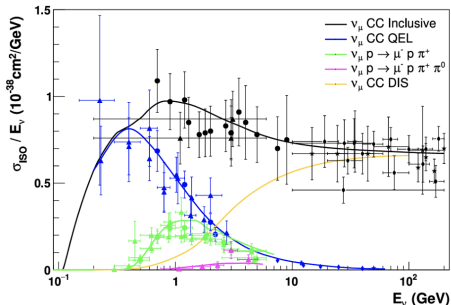


Рис. 6: Сечение GENIE v3  $\nu_\mu$  CC на изоскалярной мишени.

Серга С.С. Байков Ф.И. (МГУ)

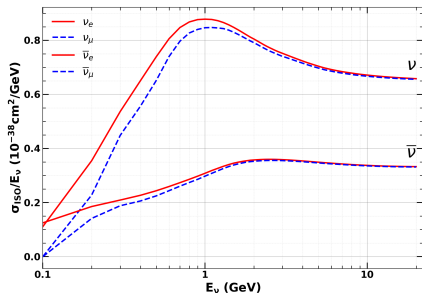


Рис. 7: Сечение GNA  $\nu_\mu$ ,  $\bar{\nu}_\mu$ ,  $\nu_e$ ,  $\bar{\nu}_e$  CC для  $C_{10}H_{22}$ .

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx 4s_{23}^2 s_{13}^2 c_{13}^2 \frac{\sin^2(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)^2} \Delta_{31}^2 + 4s_{12}^2 c_{12}^2 c_{13}^2 c_{23}^2 \frac{\sin^2(aL)}{(aL)^2} \Delta_{21}^2 + 8 \frac{J}{\sin \delta_{CP}} \frac{\sin(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)} \Delta_{31} \frac{\sin(aL)}{(aL)} \Delta_{21} \cos(\Delta_{31} + \delta_{CP}), \Delta_{j1} \equiv \Delta m_{j1}^2 L / 4E$$

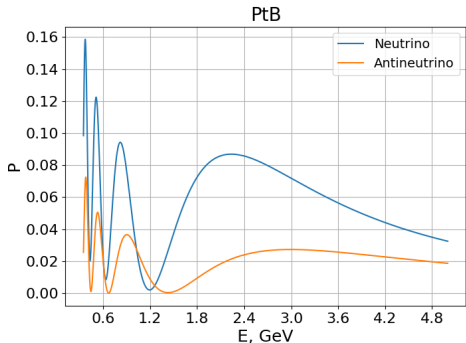


Рис. 8: Вероятность осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  ( $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ ) для  $L = 1350$  км.

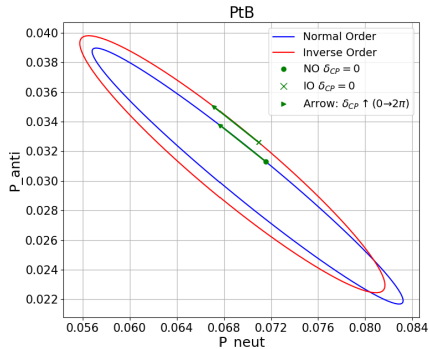


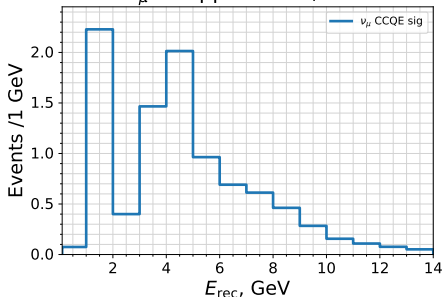
Рис. 9: Би-вероятности  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  для  $E = 3$  ГэВ

# Ожидаемые годовые спектры событий из GNA

$$\frac{dN}{dE} = \Phi(E) \times \sigma(E) \times N_{nucl} \times P_{osc}(E)$$

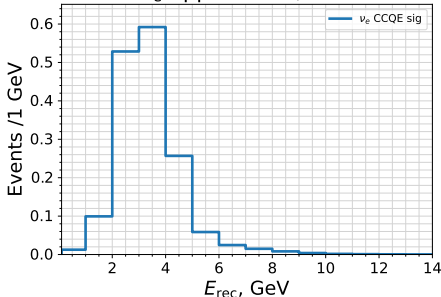
*\*Расчет для 330 т без учета эффективности регистрации в детекторе.*

$\nu_\mu$  disappearance, FHC



9,6 событий/год.

$\nu_e$  appearance, FHC



1,6 событий/год.

При модернизации детектора до 10 кт спектры масштабируются до:

**290 событий/год**

**48 событий/год**

# Чувствительность к иерархии масс

- **Задача:** Определение порядка масс нейтрино (NO/IO).
- **Статистика:** Модернизация детектора до **10 кт** значительно повышает чувствительность к иерархии масс.
- **Результат:** Проблема иерархии разрешается с точностью  $5\sigma$  за **2–3 года** работы в такой конфигурации, однако чувствительность к  $\delta_{CP}$  низкая.

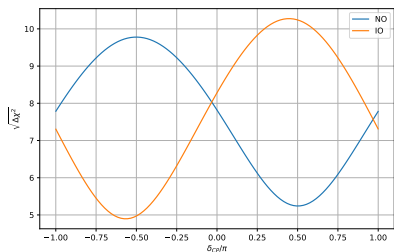


Рис. 10: Чувствительность к иерархии масс при наборе статистики **20 кт·год**.

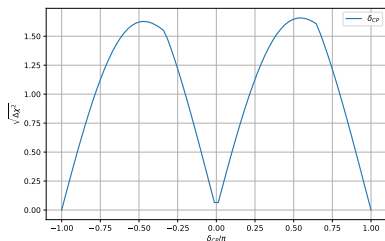


Рис. 11: Чувствительность к CP-фазе  $\delta_{CP}$  (прямой порядок масс)

- **Целесообразность:** Проект имеет смысл развивать дальше только при условии масштабных модернизаций: увеличения целевой массы детектора БПСТ и построения соответствующей инфраструктуры для ускорительного комплекса.
- **Дальнейшее моделирование:** Необходимы более детальные расчеты для конкретных аппаратных изменений, а также строгий учет источников систематических неопределенностей и эффективности регистрации событий в детекторе.
- **Научный потенциал:** Несмотря на необходимость существенных доработок, эксперимент обладает потенциалом для разрешения проблемы иерархии масс нейтрино в силу использования высокоэнергетичного пучка от ускорителя У-70 и оптимальной базы осцилляций для такого измерения. Однако в то же время эксперимент не чувствителен к измерению  $\delta_{CP}$  фазы, что ставит его в менее выгодное положение в сравнении с конкурентами.