



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Введение в физику нейтрино



JINR-ISU Baikol
Summer School 2023

Devoted to the 110th anniversary
of Bruno Pontecorvo



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Что и откуда мы знаем про нейтрино?

Естественная система единиц



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Квантовая механика

Специальная теория относительности

$$E = \hbar\omega$$

$$E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$$

$$\hbar = c = 1$$

$$[\text{энергия}] = [\text{импульс}] = [\text{масса}]$$

$$[\text{время}] = [\text{координата}] = [\text{масса}^{-1}]$$

$$[\text{орбитальный момент}] = [\text{спин}] = [\text{масса}^0]$$

Естественная система единиц

$$\hbar = c = 1$$



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

$$[\text{энергия}] = [\text{импульс}] = [\text{масса}]$$

$$[\text{время}] = [\text{координата}] = [\text{масса}^{-1}]$$

$$[\text{орбитальный момент}] = [\text{спин}] = [\text{масса}^0]$$

Энергию измеряем в единицах электронвольт (эВ).

Перевод в см^{-1}

$$\hbar c = 1 = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \text{эВ} \cdot \text{см}$$

Перевод в сек^{-1}

$$\hbar = 1 = \frac{2}{3} \cdot 10^{-15} \cdot \text{эВ} \cdot \text{сек}$$

$$\text{кэВ} = 10^3 \text{ эВ}$$

$$\text{МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$$

$$\text{ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$$

Вопрос: какова размеренность **E, V**?

Свойства нейтрино

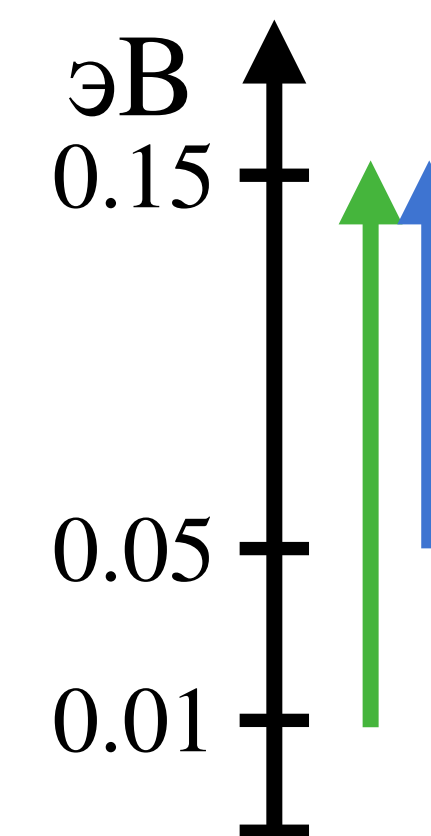
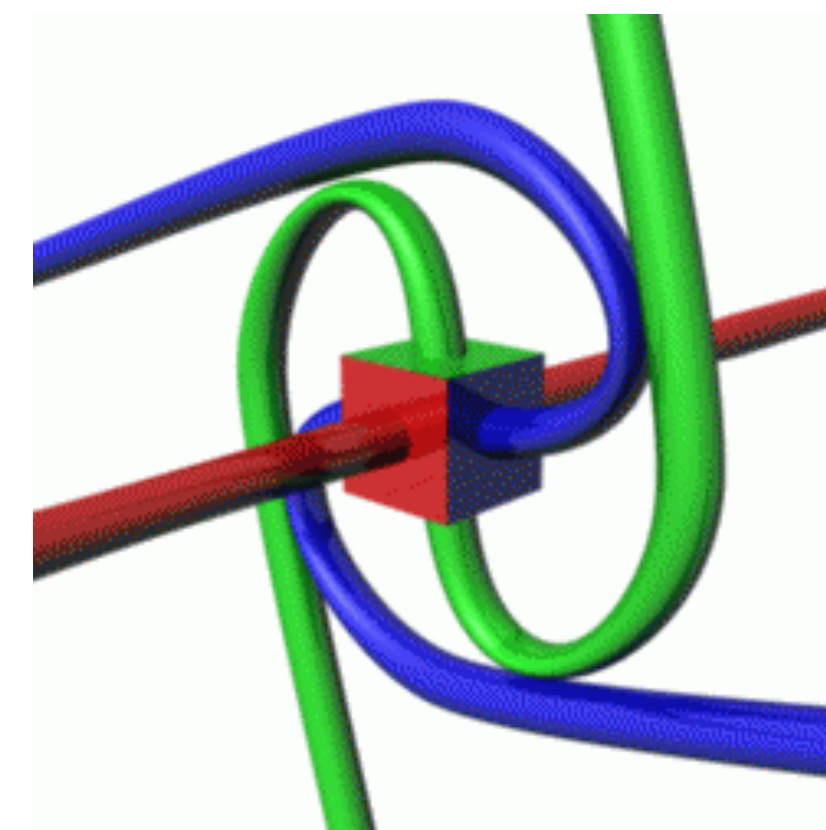


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

- Электрический заряд нейтрино равен нулю
- Фермион. Спин = $1/2$ ($\cdot \hbar = 1$)
- Известны три типа нейтрино ν_1, ν_2, ν_3 и антинейтрино $\bar{\nu}_1, \bar{\nu}_2, \bar{\nu}_3$ с определенными массами. И их флэйворные комбинации ν_e, ν_μ, ν_τ



- Нейтрино участвует в слабых и гравитационных взаимодействиях

- В слабых взаимодействиях нарушается пространственная четность

- Нейтрино «смешивается» во взаимодействиях $\mathcal{A}(\nu_i \rightarrow W^+ + \ell_\alpha) \propto V_{\alpha i}^* g/2\sqrt{2}$

Электрический заряд нейтрино



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзюбелова



Объединенный
институт ядерных
исследований

- В теории электрический заряд нейтрино равен нулю:

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

$$0 = e - e + 0$$

- Экспериментальные ограничения

- Отсутствие ЭМ рассеяния

$$|e_\nu| \lesssim 1.1 \cdot 10^{-12} |e|$$

A. Studenikin, Europhys. Lett. 107, 21001 (2014), arXiv:1302.1168 [hep-ph].

- Электронейтральность атомов

$$|e_\nu| \lesssim 3 \cdot 10^{-21} |e|$$

G. G. Raffelt, Phys. Rep. 320, 319 (1999).

калибровочная инвариантность

отсутствие киральной
аномалии в СМ

Сохранение электрического
заряда

Спин нейтрино



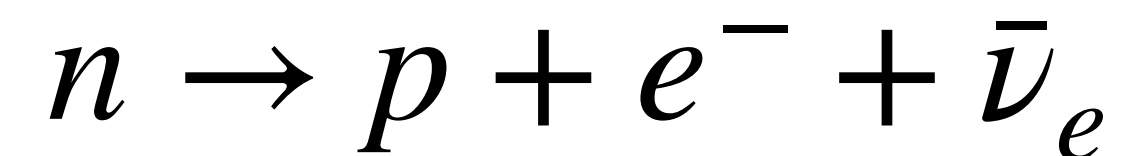
Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

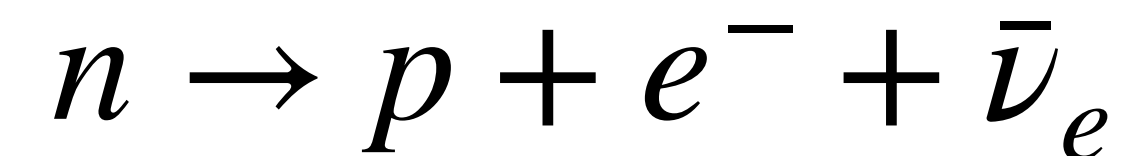
○ Спин. Только две возможности:

1) целый



$$\frac{1}{2} \neq \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + n$$

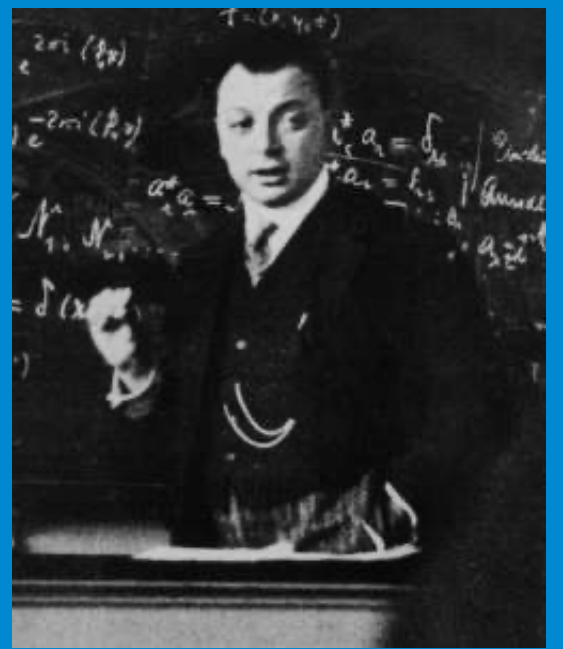
2) полуцелый



$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}$$

Вопрос: откуда мы знаем, что спин нейтрино $\frac{3}{2}$ не возможен?

Три типа нейтрино



Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Дзелепова



Объединенный институт ядерных исследований

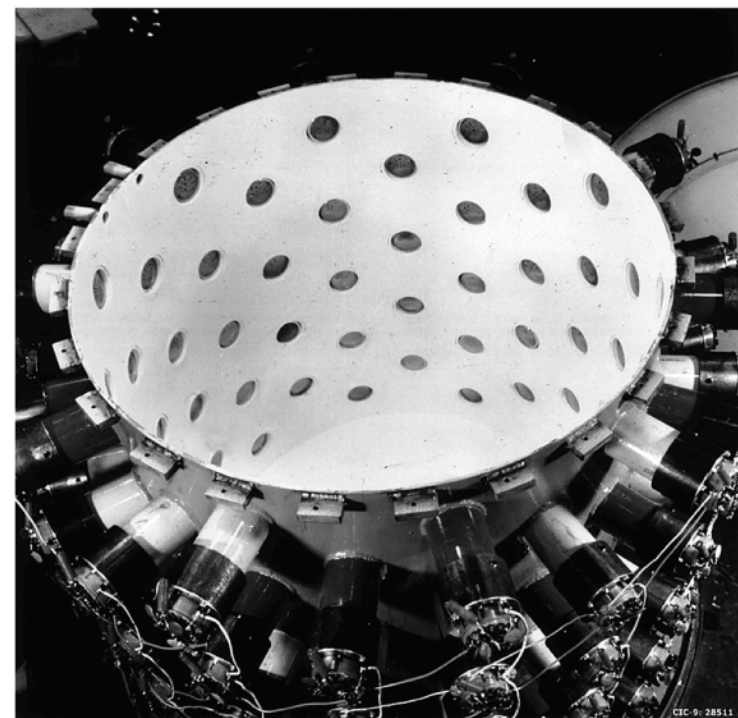
$\bar{\nu}_e$

ν_μ

ν_τ

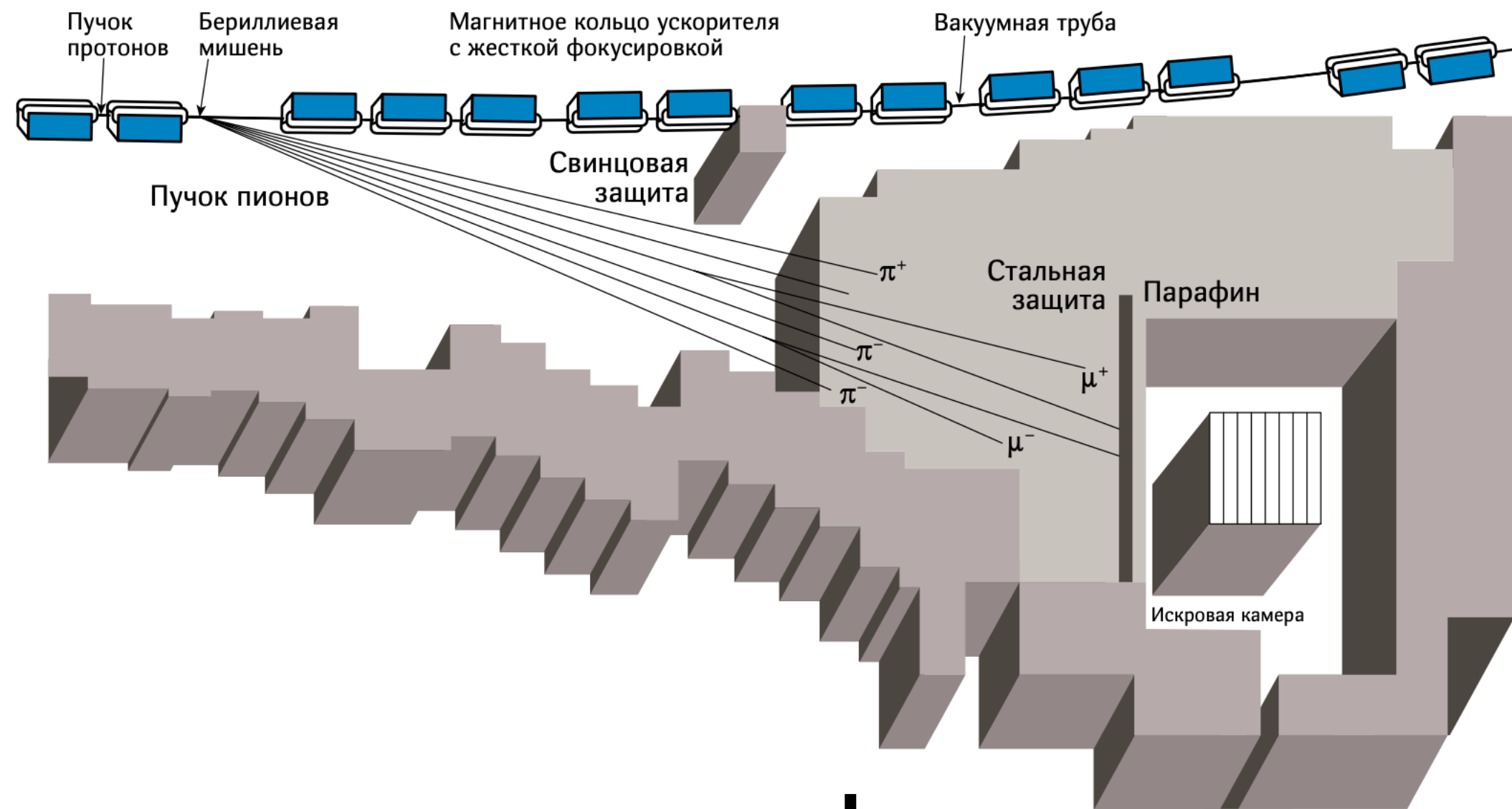
Райнс

Козн



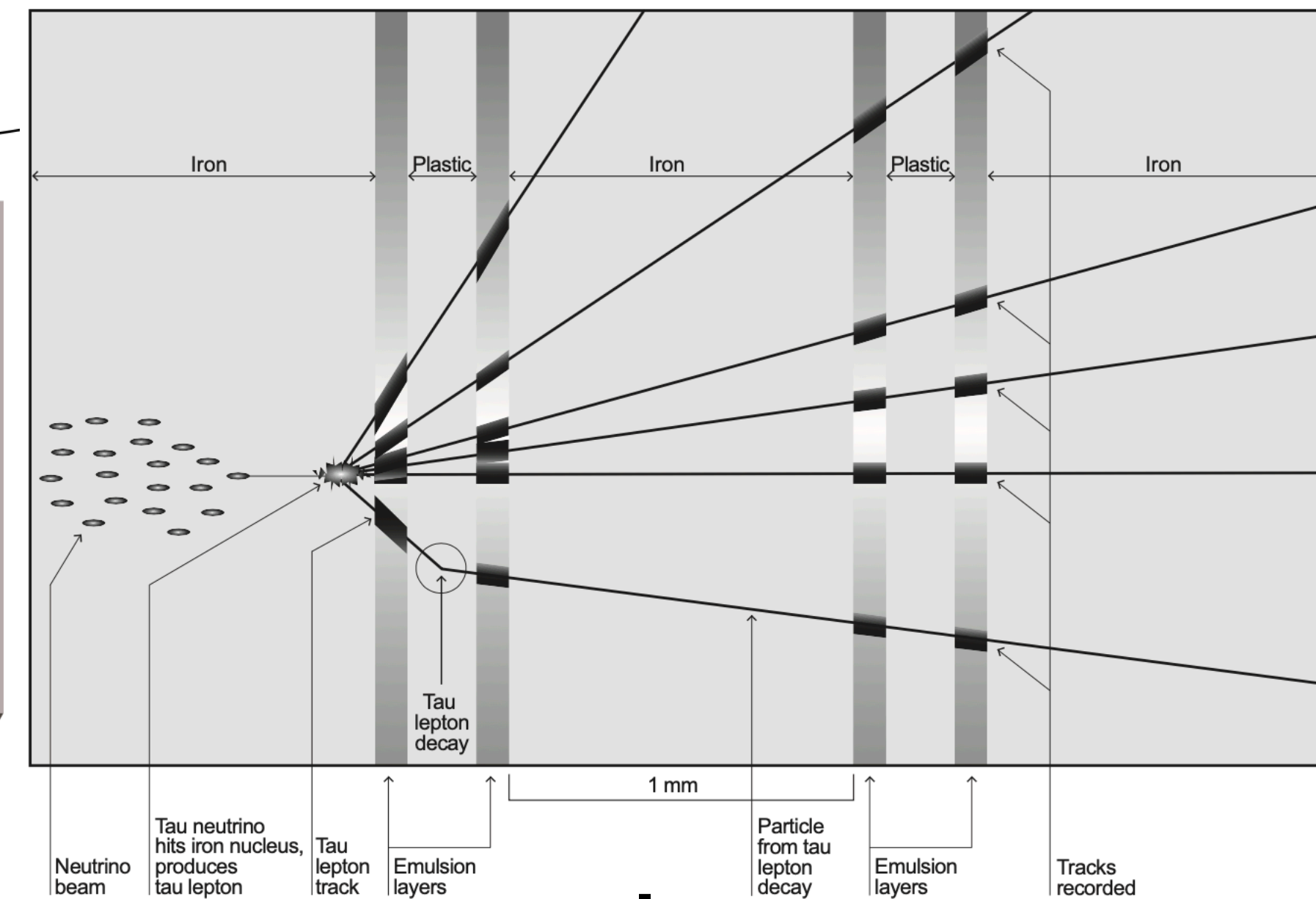
1956

Шварц, Ледерман, Стейнбергер



1962

Коллаборация DONUT



2000

Три типа нейтрино

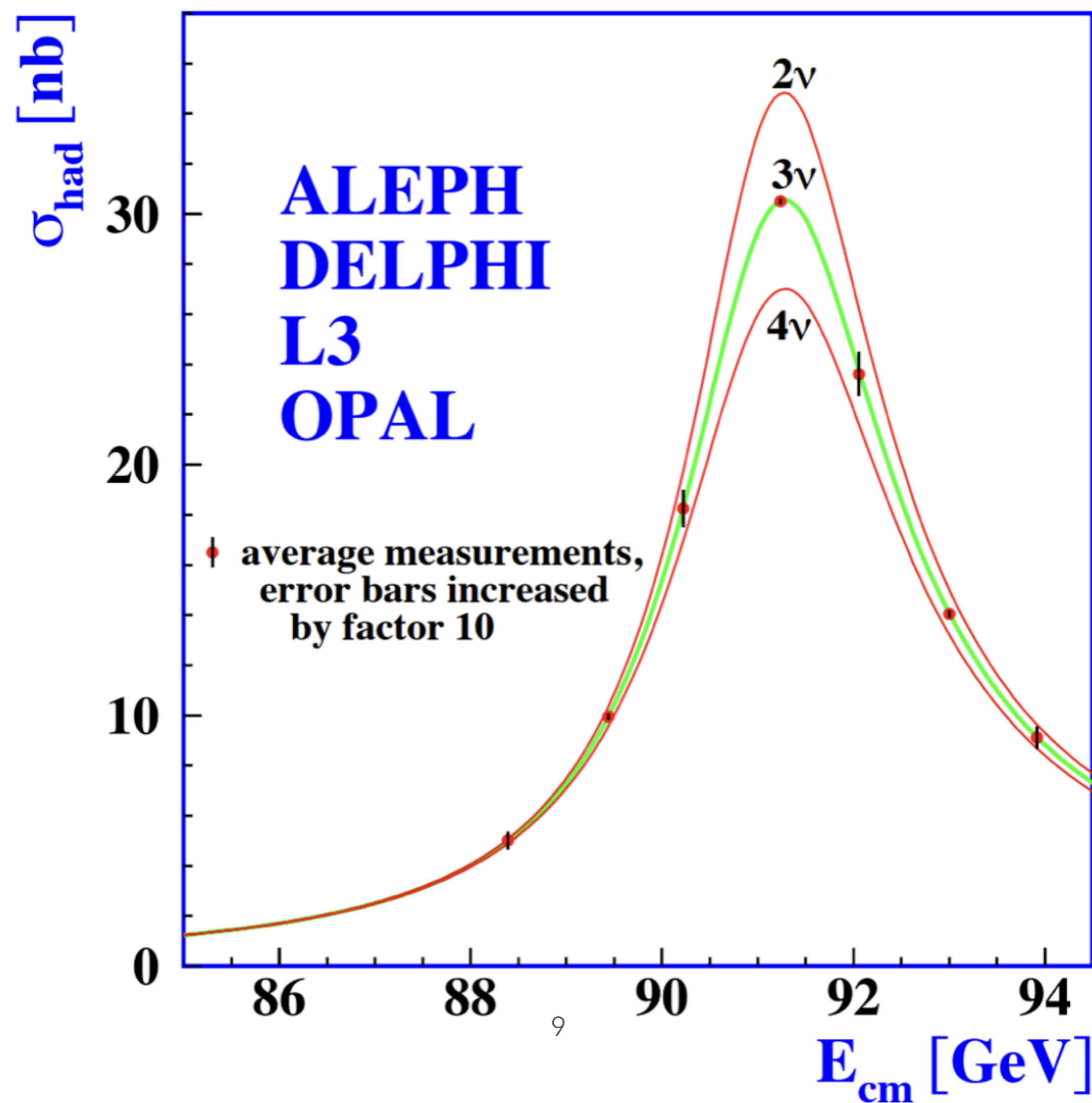
$$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \ell^+\ell^-, \nu\bar{\nu}, q\bar{q}$$



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований



Нейтрино участвует в слабых взаимодействиях

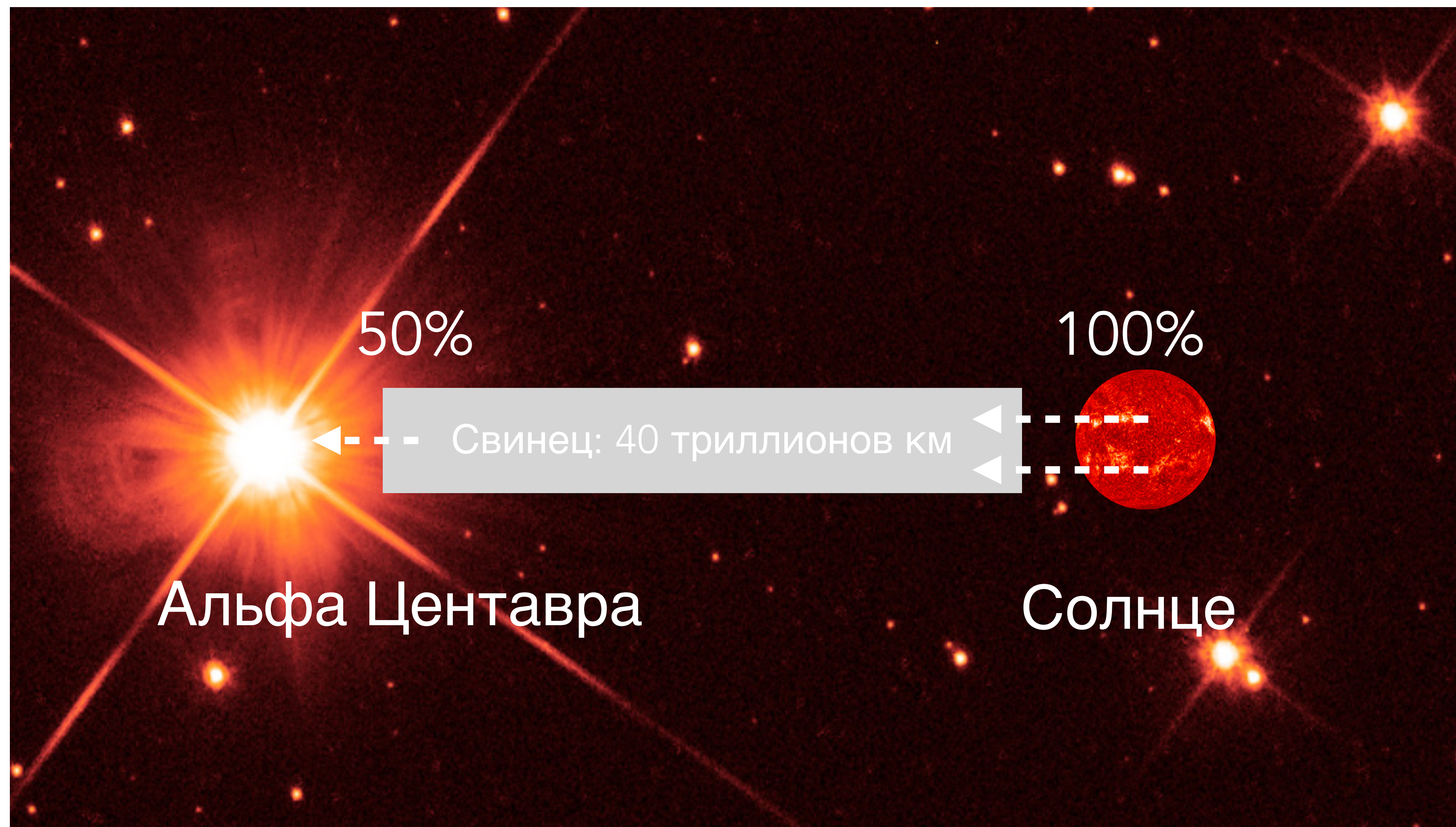
Насколько слабых?



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований



Нейтрино участвует в слабых взаимодействиях

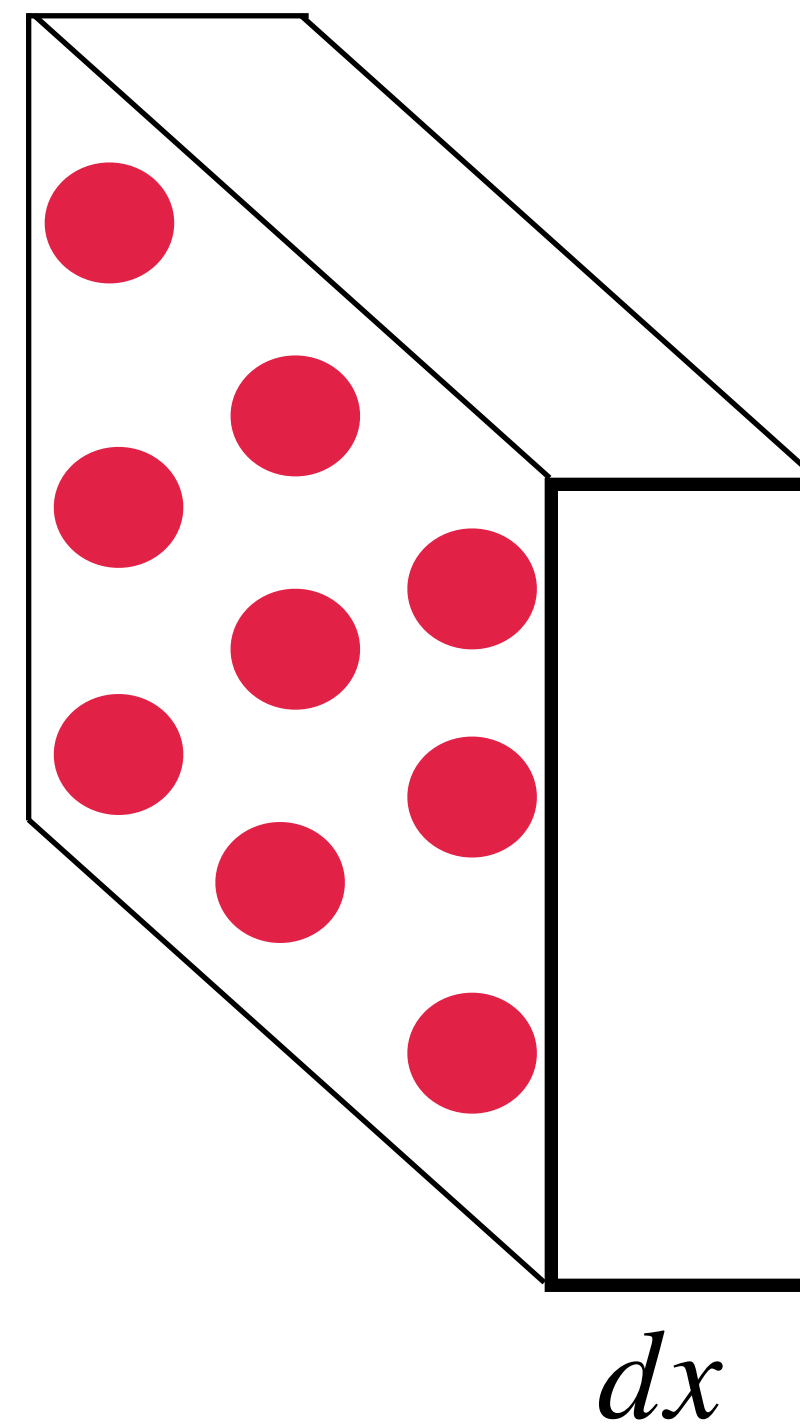
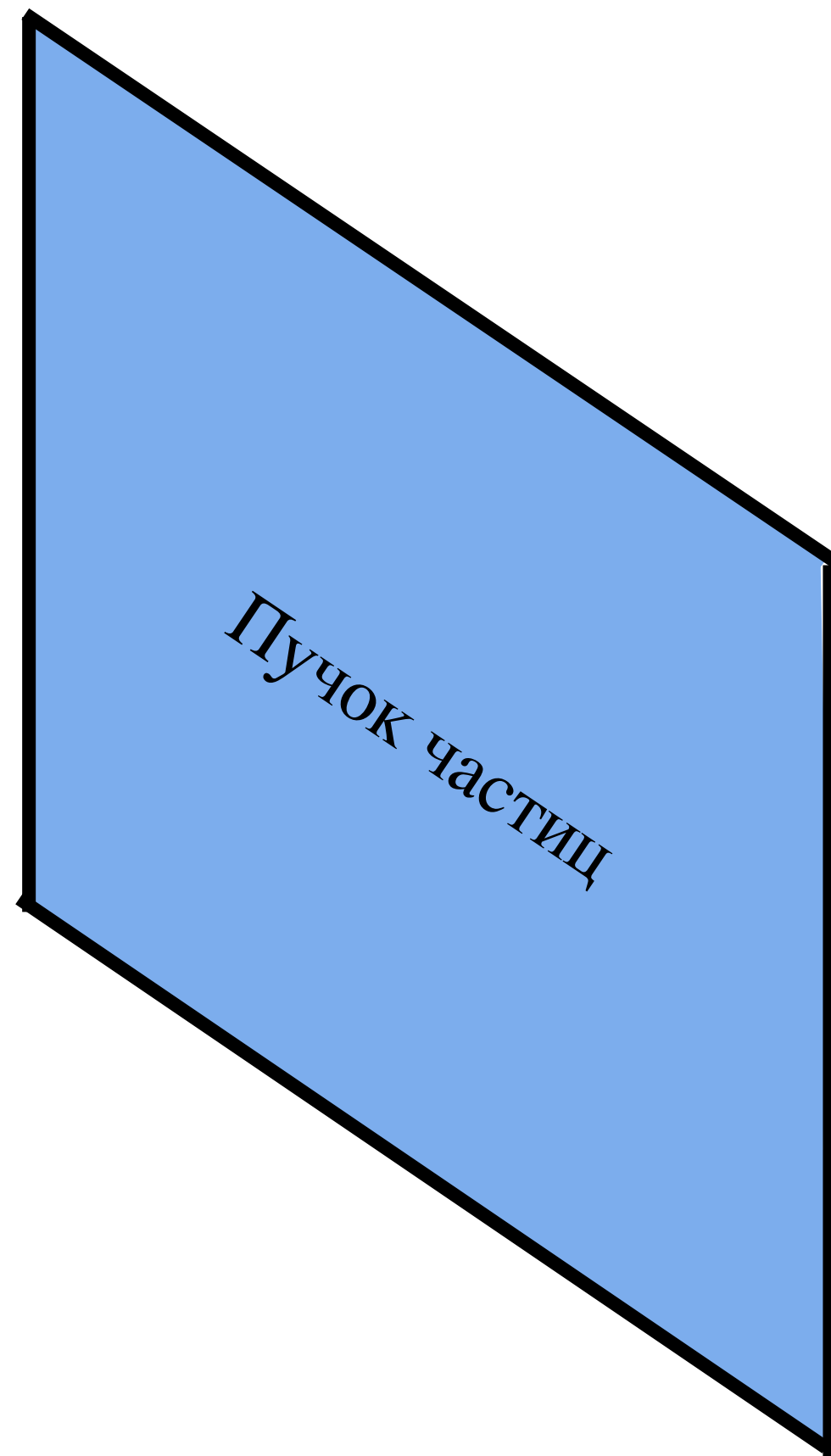
Насколько слабых?



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований



$$\text{вероятность взаимодействия} = \frac{\text{площадь мишеней}}{\text{площадь бруска}} = \frac{\sigma n L^2 dx}{L^2} = \sigma n dx$$

Нейтрино участвует в слабых взаимодействиях

Насколько слабых?



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

$$\text{вероятность взаимодействия} = \frac{\text{площадь мишеней}}{\text{площадь бруска}} = \frac{\sigma n L^2 dx}{L^2} = \sigma n dx$$

$$dN = -N \cdot \sigma n \cdot dx$$

$$N(x) = N(0) \cdot e^{-x/\lambda}, \quad \lambda = \frac{1}{\sigma n}$$

λ = длина взаимодействия

n = плотность числа частиц

Нейтрино участвует в слабых взаимодействиях

Насколько слабых?



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



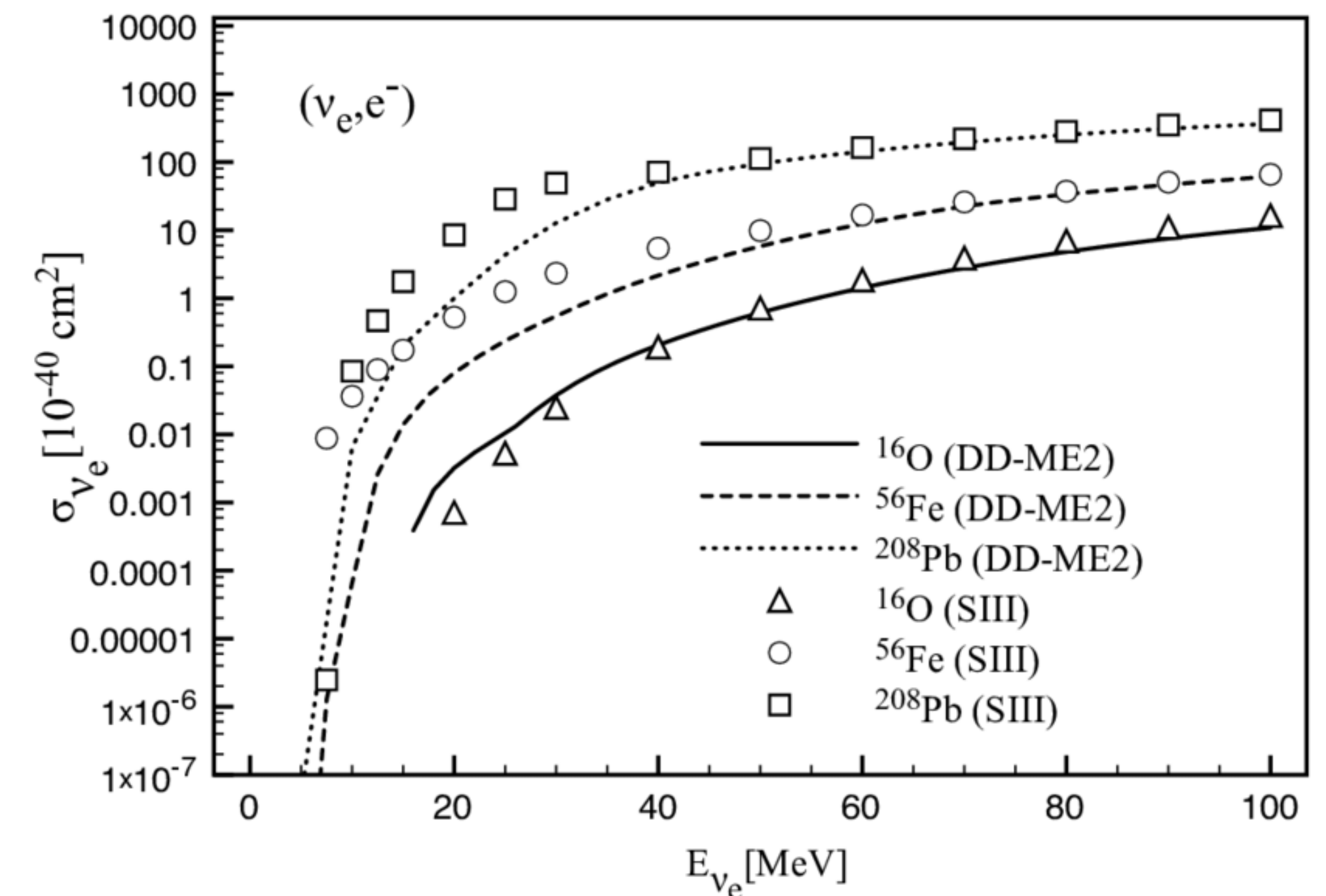
Объединенный
институт ядерных
исследований

$$n_{\text{свинец}} = \frac{\rho_{\text{свинец}} \cdot N_A}{\mu_{\text{свинец}}} = \frac{11.34 \text{ г/см}^3 \cdot 6.02 \cdot 10^{23} / \text{мол}}{207 \text{ г/мол}} = \frac{3.3 \cdot 10^{22}}{\text{см}^3}$$

$$\sigma(\nu_e + \text{Pb} \rightarrow \text{Bi} + e) \approx 10^{-41} \text{ см}^2$$

$$\lambda = \frac{1}{3.3 \cdot 10^{22} \cdot \frac{1}{\text{см}^3} \cdot 10^{-41} \text{ см}^2} \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}$$

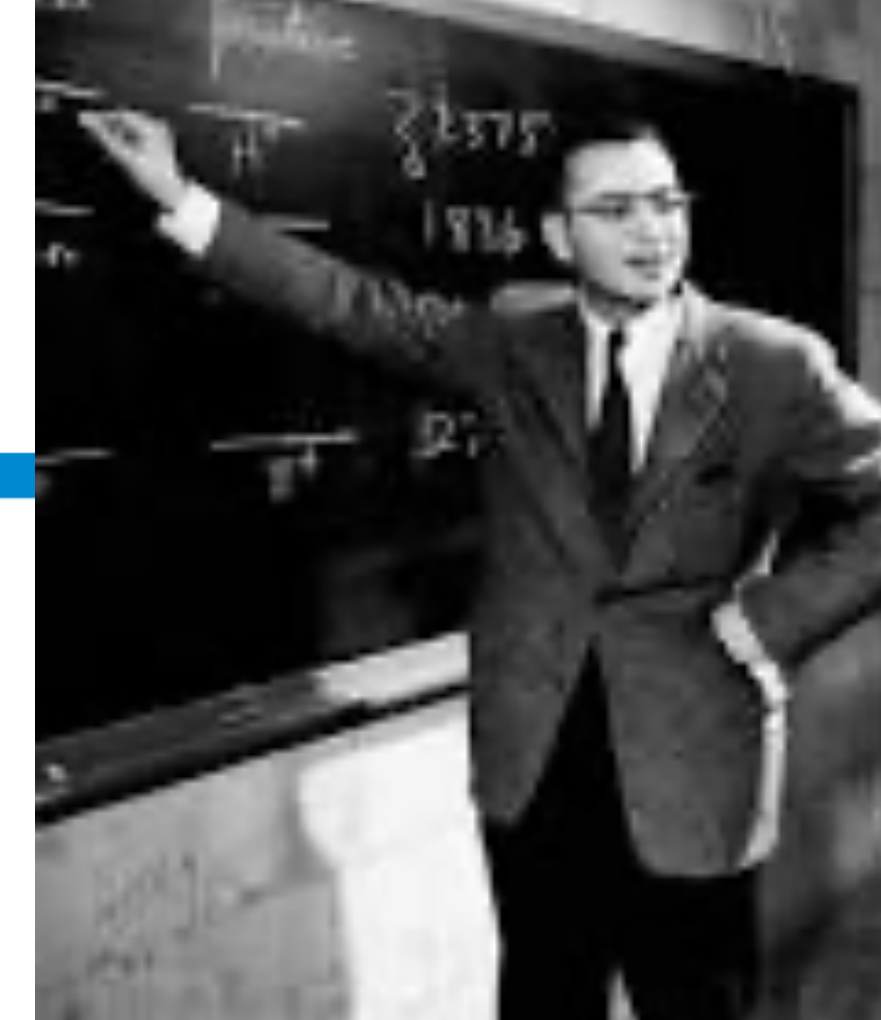
$$R = 4.37 \text{ световых года} = 4.37 \cdot 9.461 \cdot 10^{17} \approx 4.13 \cdot 10^{18} \text{ см}$$



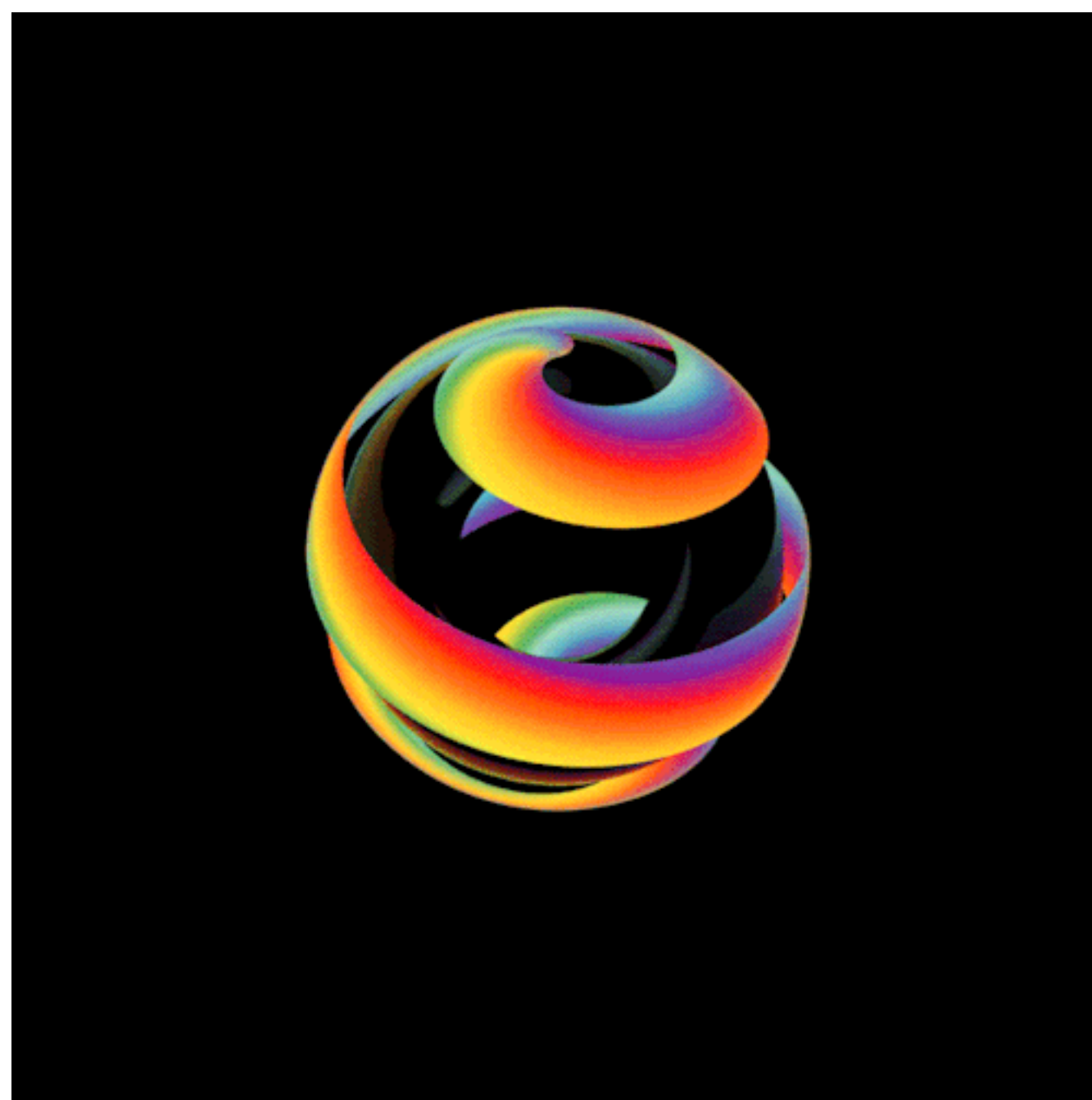
В слабых взаимодействиях нарушается Р-четность



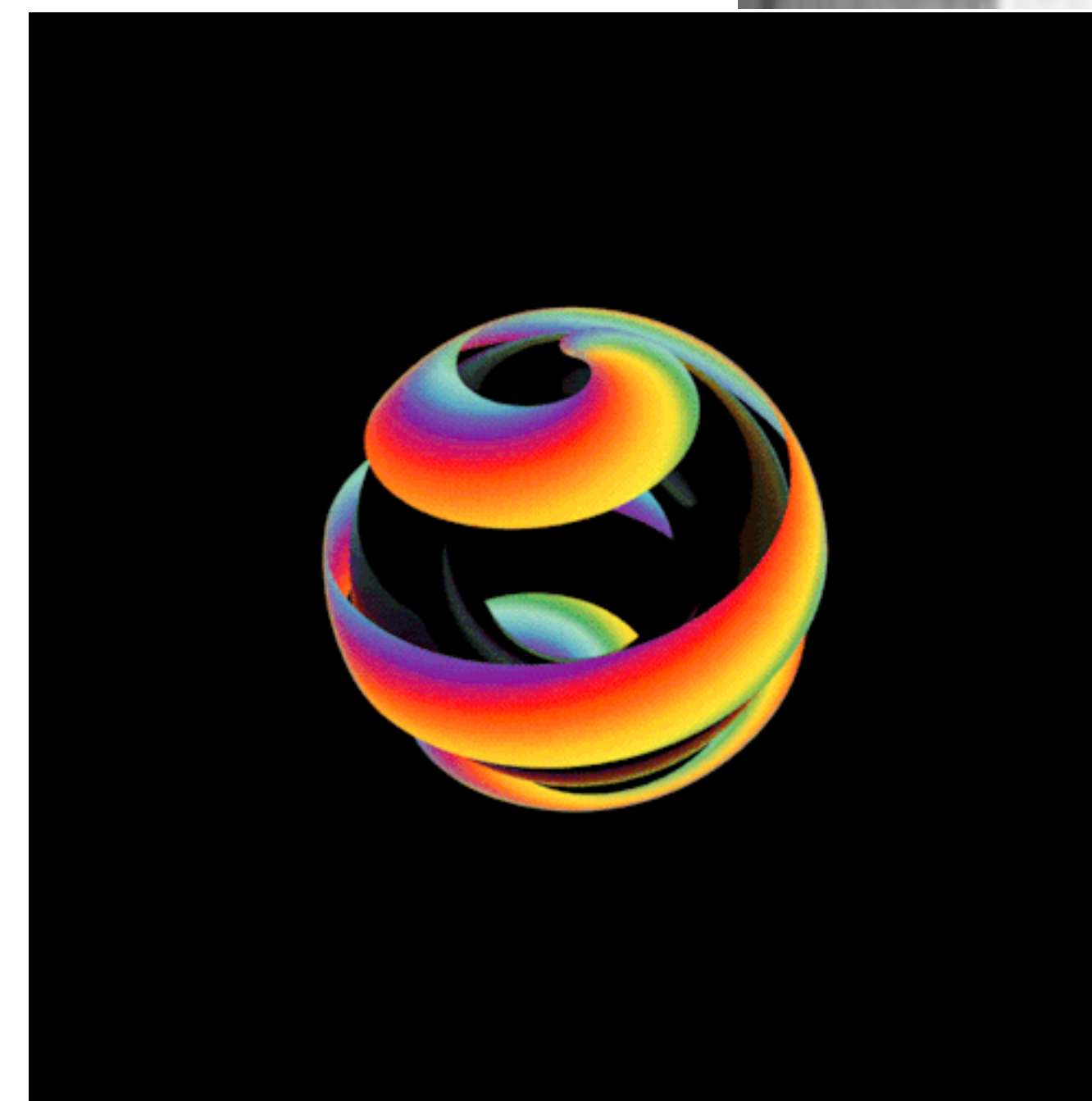
Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Зеркало



Левое нейтрино



Правое нейтрино

Если нейтрино левое или правое в нашем мире, то в зазеркалье наоборот. Значит, Р-четность нарушается

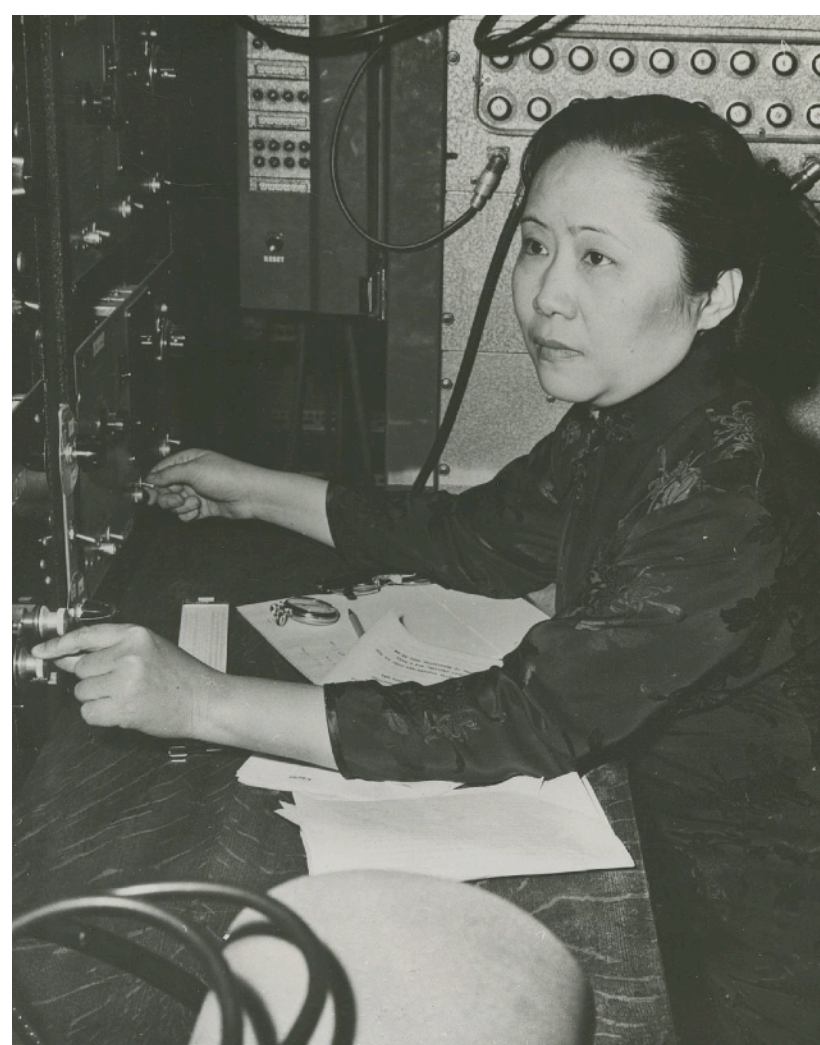
В слабых взаимодействиях нарушается P-четность



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



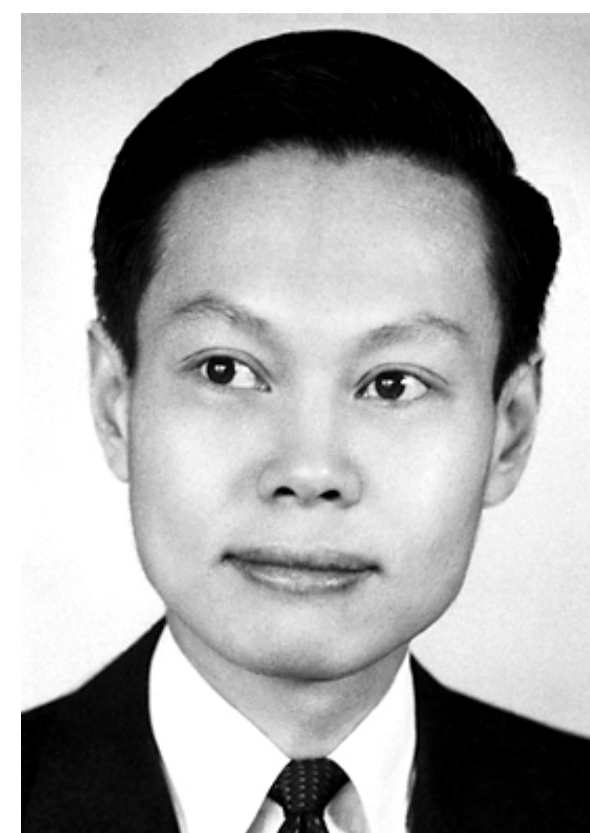
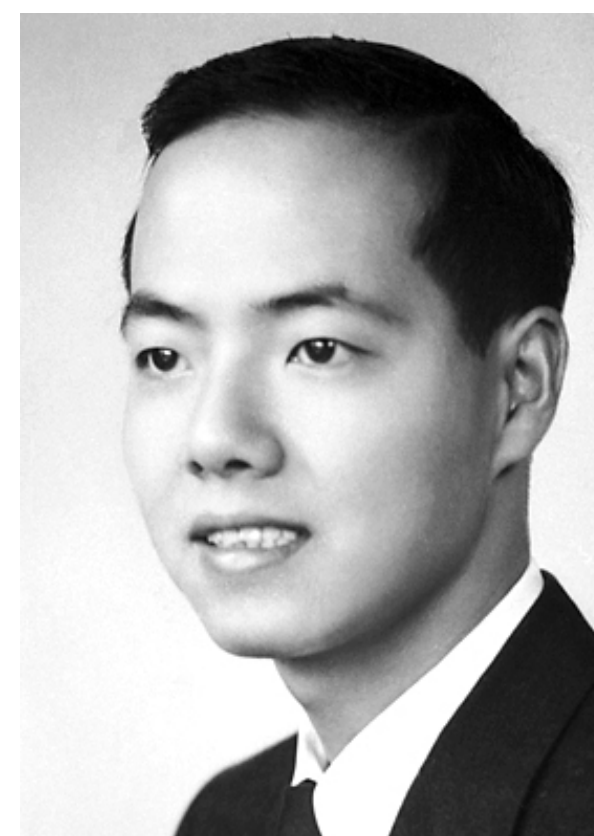
Объединенный
институт ядерных
исследований



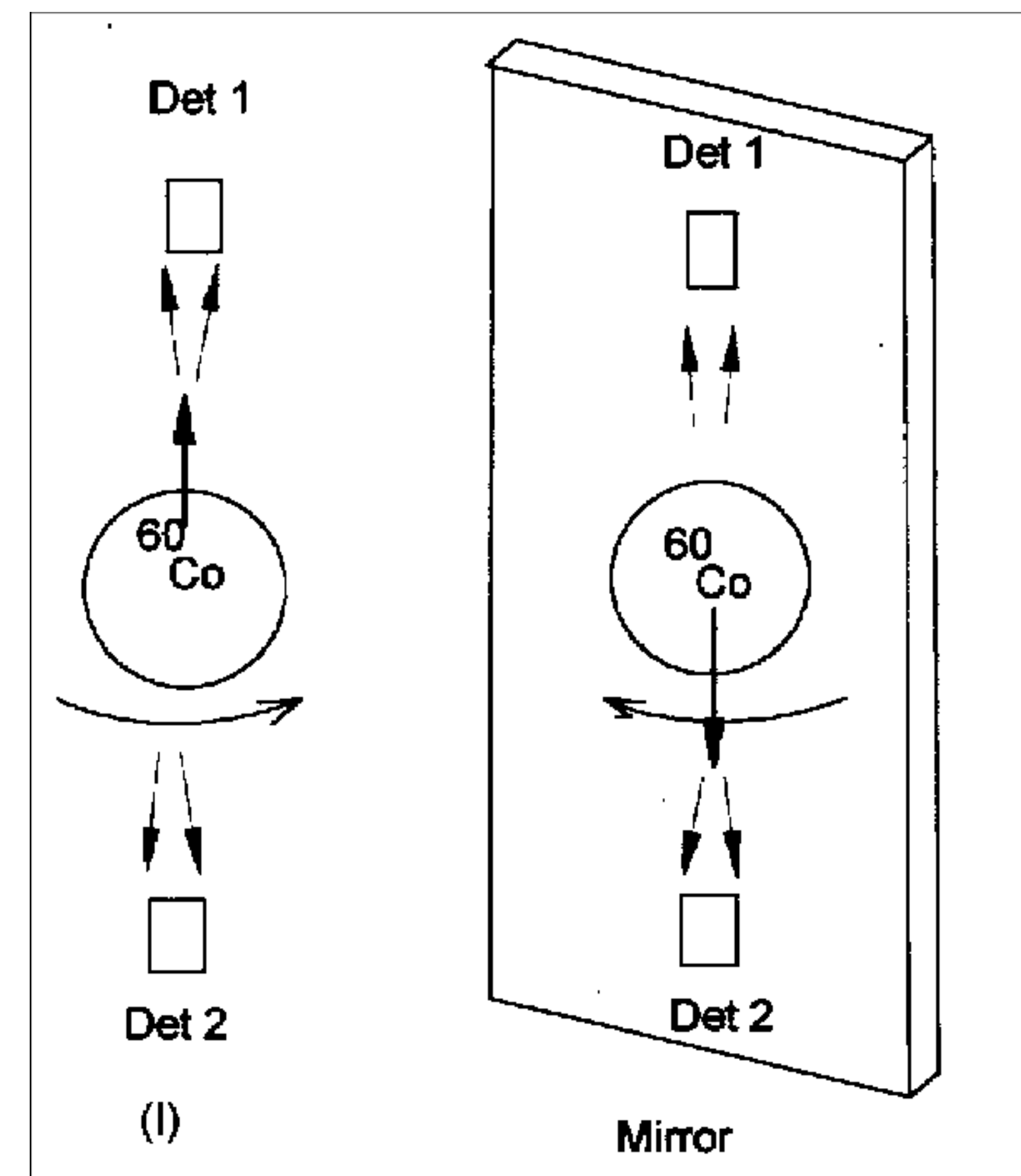
Ву

1956: доказано нарушение P-четности

1957: НП Ли и Янгу за предсказание эффекта



1978: Премия Вольфа Ву за измерение эффекта



Нейтрино или левое или правое. Какое же?

Спиральность нейтрино

Эксперимент — шедевр от Голдхабера

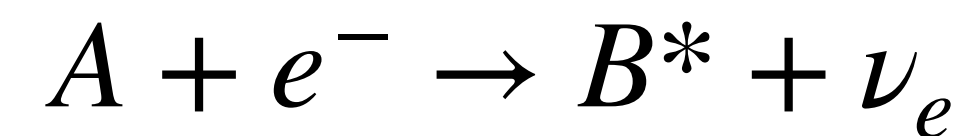


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

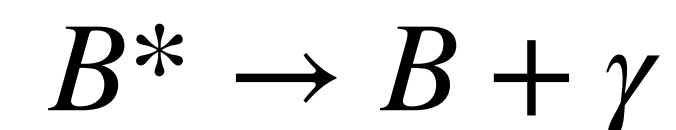
○ Рассмотрим пару ядер A, B:



○ Спиновые состояния ядер

$$0 \rightarrow 1^* \rightarrow 0$$

○ Проекцию спина B^* определим, измеряя поляризацию фотона



○ Возможные проекции спинов

B^*	e^-	ν_e	γ
+1	+1/2	-1/2	+1
-1	-1/2	+1/2	-1

Проекция спинов нейтрино и фотона противоположны!

Спиральность нейтрино

Эксперимент — шедевр от Голдхабера

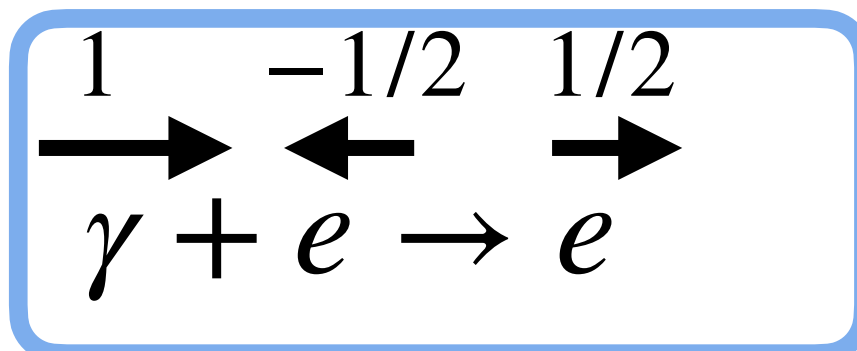


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



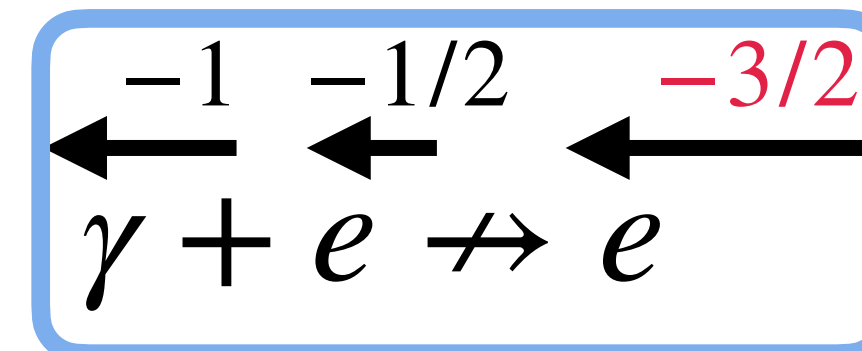
Объединенный
институт ядерных
исследований

- Требуется определить проекцию спина фотона
- Необходимо, чтобы проекция спина ядра B^* не исчезла вследствие взаимодействия с окружающими атомами
- Как измерить проекцию спина фотона? (Оптические методы не годятся, фотон — не оптический)

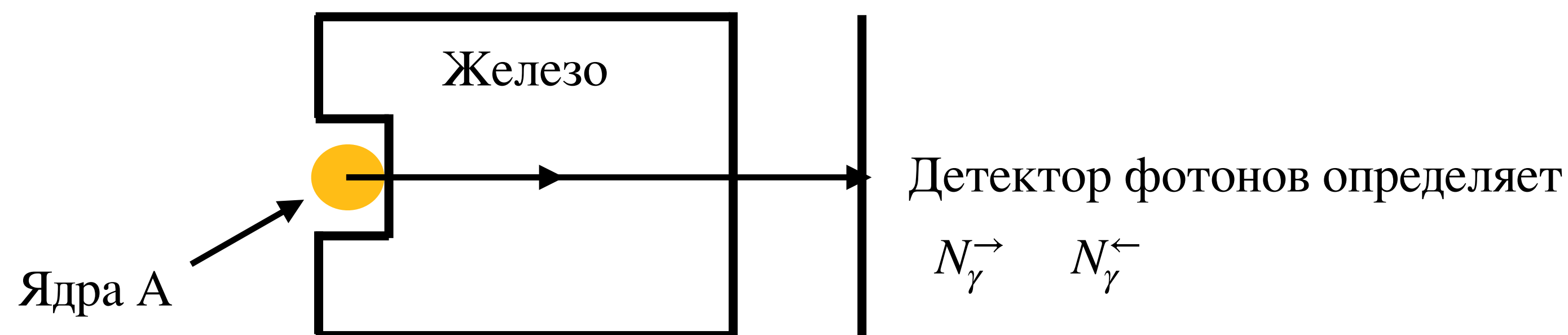


Фотон поглотится, спин
электрона перевернется

Спин электрона направляем
магнитным полем



Фотон не поглотится



Спиральность нейтрино

Эксперимент — шедевр от Голдхабера



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова

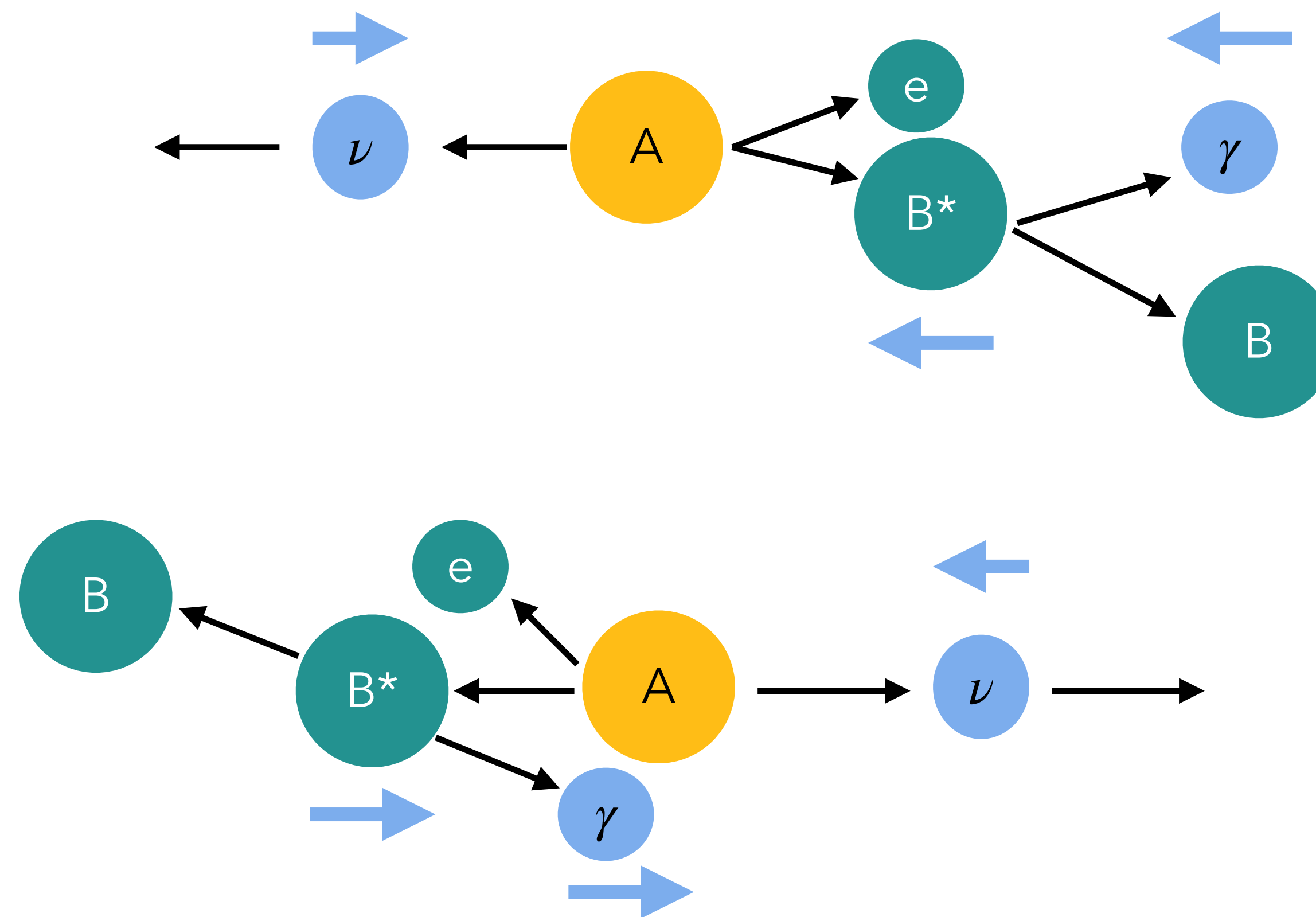


Объединенный
институт ядерных
исследований

○ Можно измерить проекцию спина фотона. Но есть проблема: спиральность нейтрино не определяется.

○ Предположим, что нейтрино —
лево-спиральная частица

$$N_{\gamma}^{\rightarrow} = N_{\gamma}^{\leftarrow}$$



Спиральность нейтрино

Эксперимент — шедевр от Голдхабера



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова

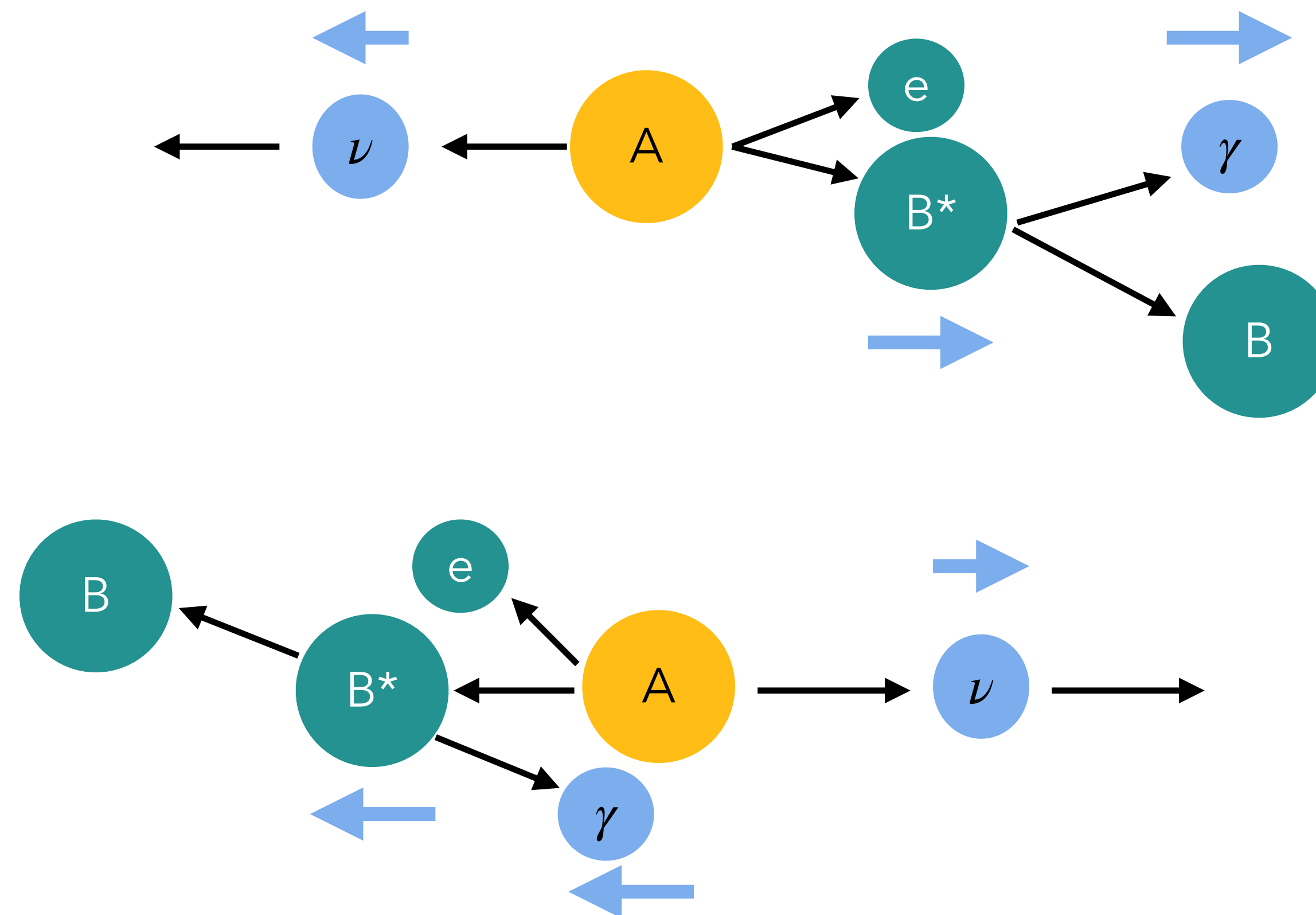


Объединенный
институт ядерных
исследований

○ Можно измерить проекцию спина фотона. Но есть проблема: спиральность нейтрино не определяется...

○ Предположим, что нейтрино —
право-спиральная частица

$$N_{\gamma}^{\rightarrow} = N_{\gamma}^{\leftarrow}$$



спиральность нейтрино не определяется

Спиральность нейтрино

Эксперимент — шедевр от Голдхабера

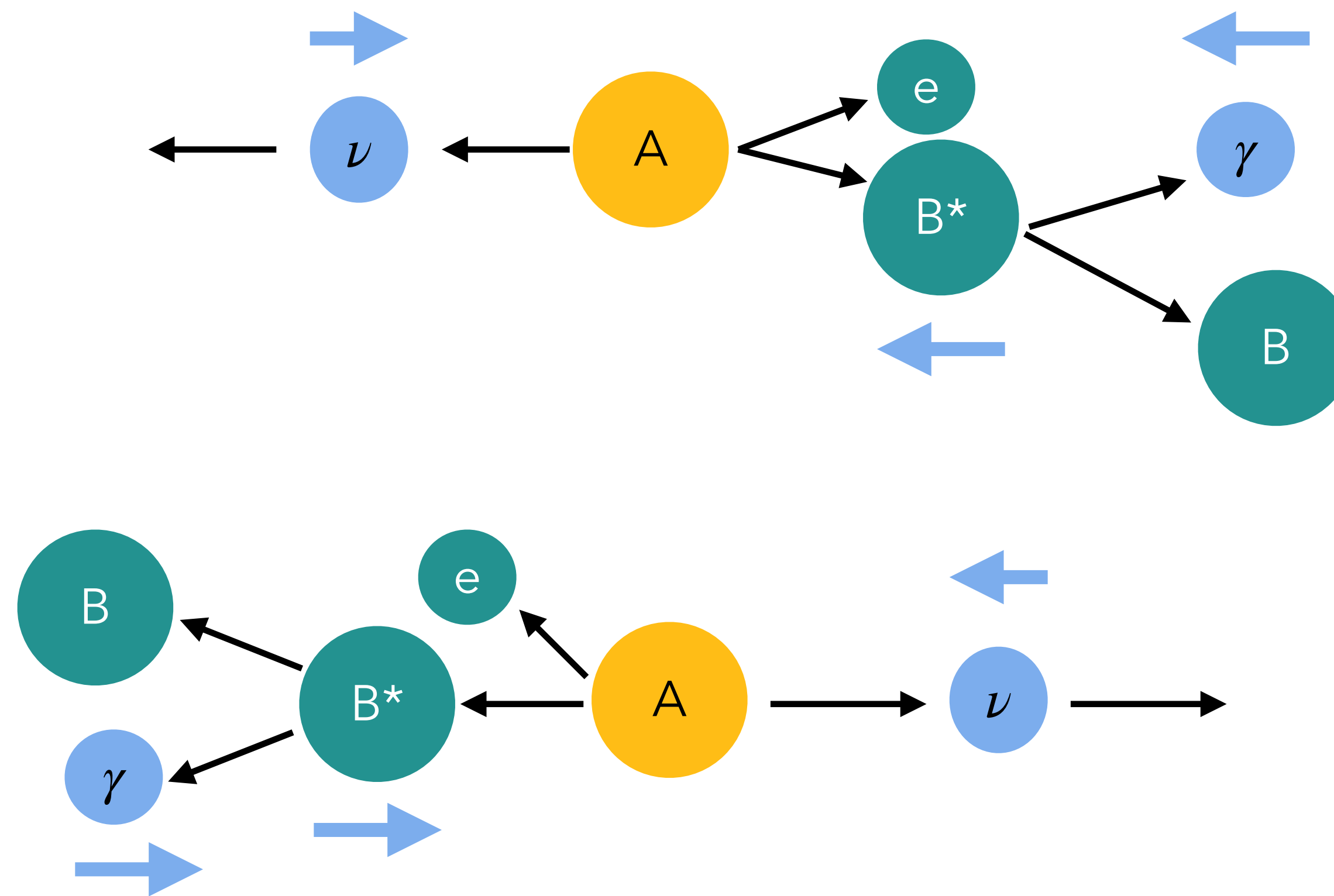


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

○ Надо заставить нейтрино и фотон разлетаться в противоположные стороны



○ Спиральности нейтрино и фотона равны. Нужно измерить **спиральность** фотона

Спиральность нейтрино

Эксперимент — шедевр от Голдхабера

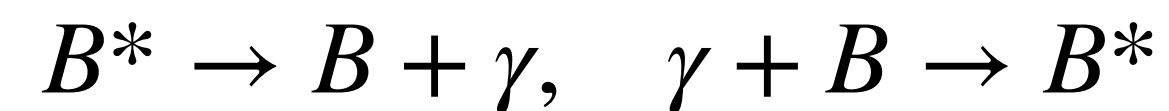


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова

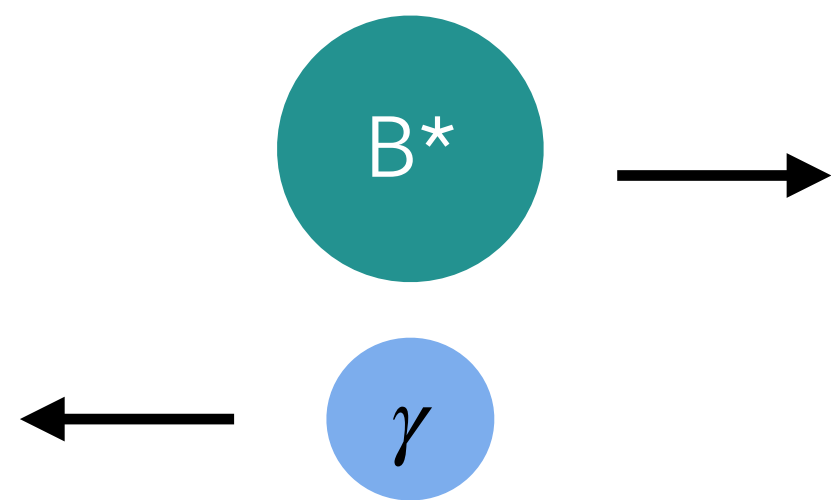


Объединенный
институт ядерных
исследований

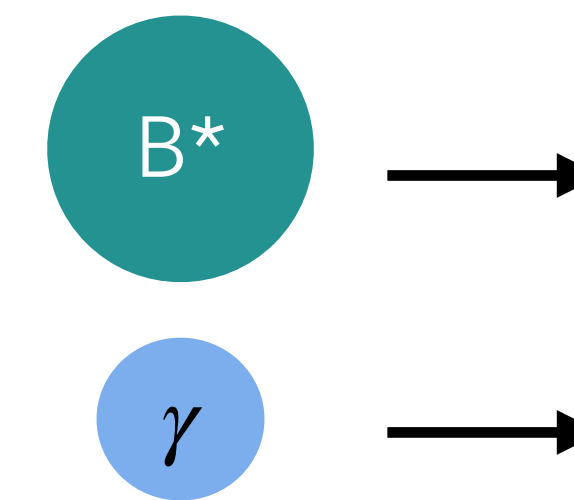
- Надо выбирать только такие события, в которых нейтрино и фотон разлетаются в противоположные стороны. Как это сделать?
- Регистрировать поглощение фотона ядром B :



- Если B^* покоится или B^* и фотон движутся в разные стороны, энергия фотона меньше разницы энергий B^* и B и фотон НЕ МОЖЕТ поглотиться B .



- Если B^* и фотон движутся в одну сторону, энергия фотона увеличивается и фотон МОЖЕТ поглотиться B .



Спиральность нейтрино

Эксперимент — шедевр от Голдхабера

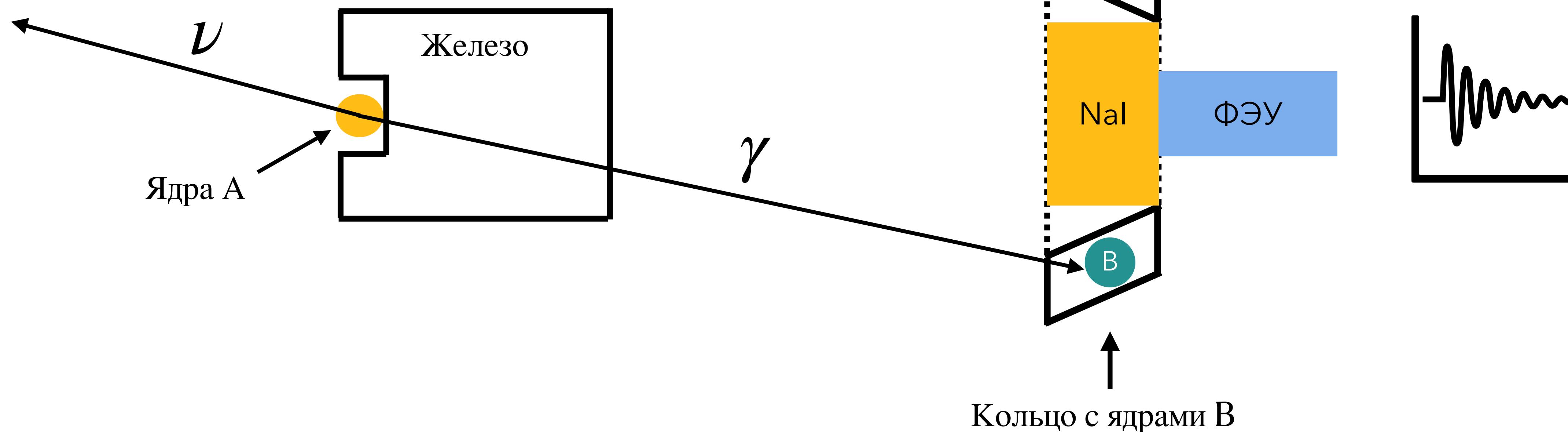
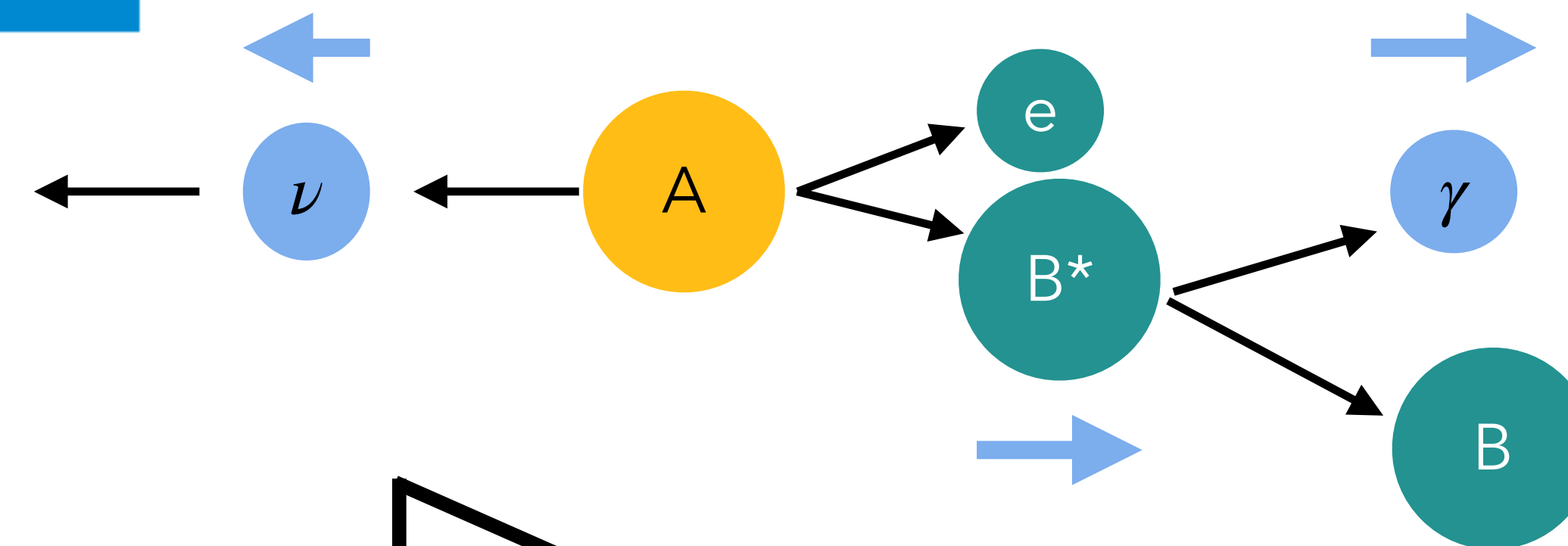


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

○ Соберем все ключевые идеи в одной установке



Спиральность нейтрино

Эксперимент — шедевр от Голдхабера

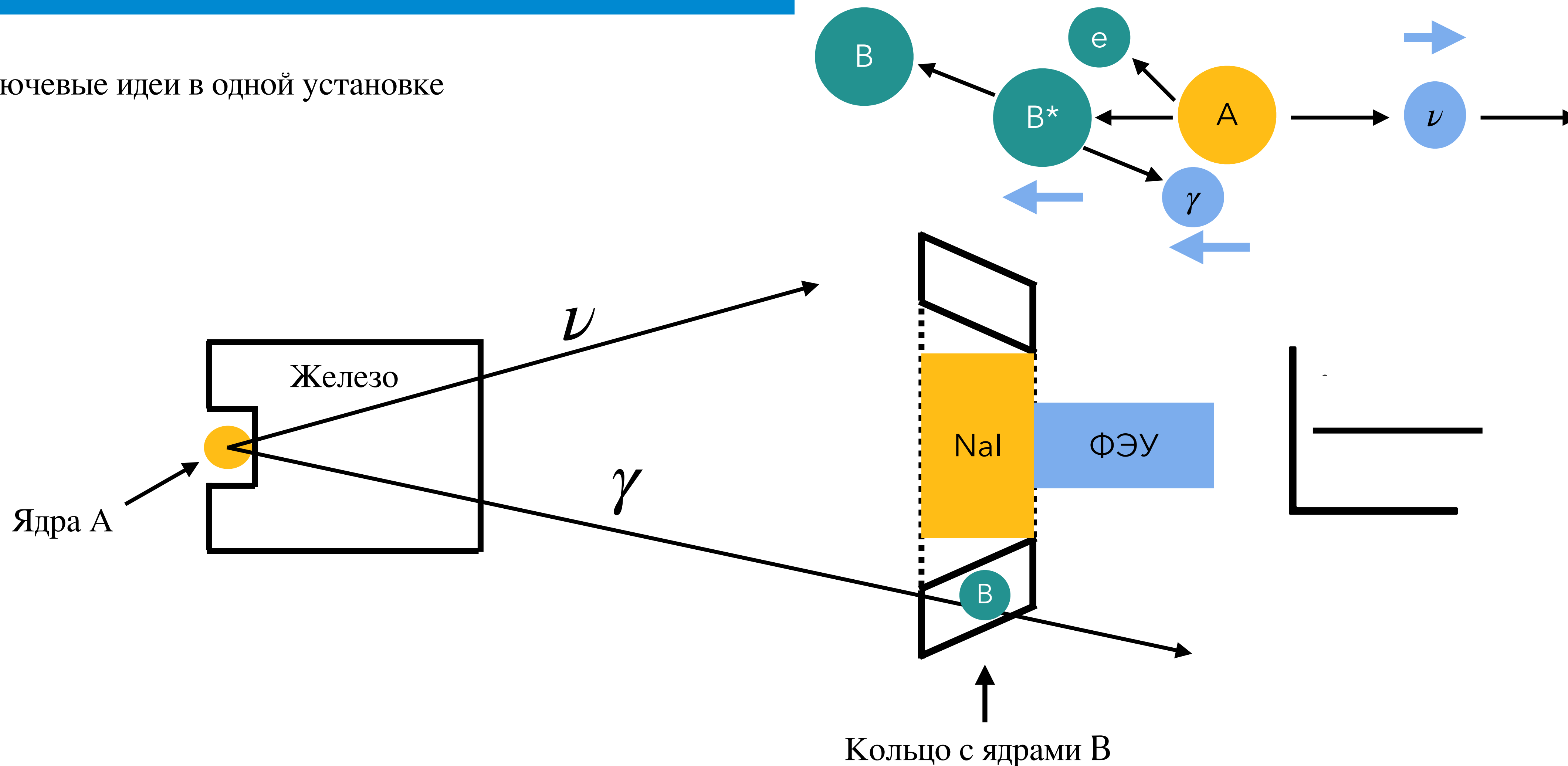


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

○ Соберем все ключевые идеи в одной установке



Спиральность нейтрино

Эксперимент — шедевр от Голдхабера

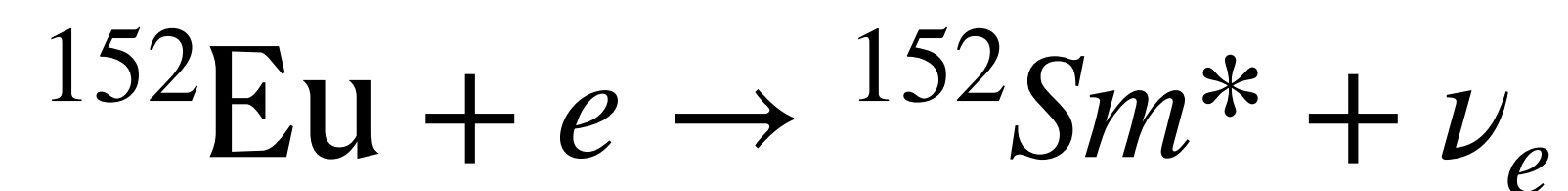


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

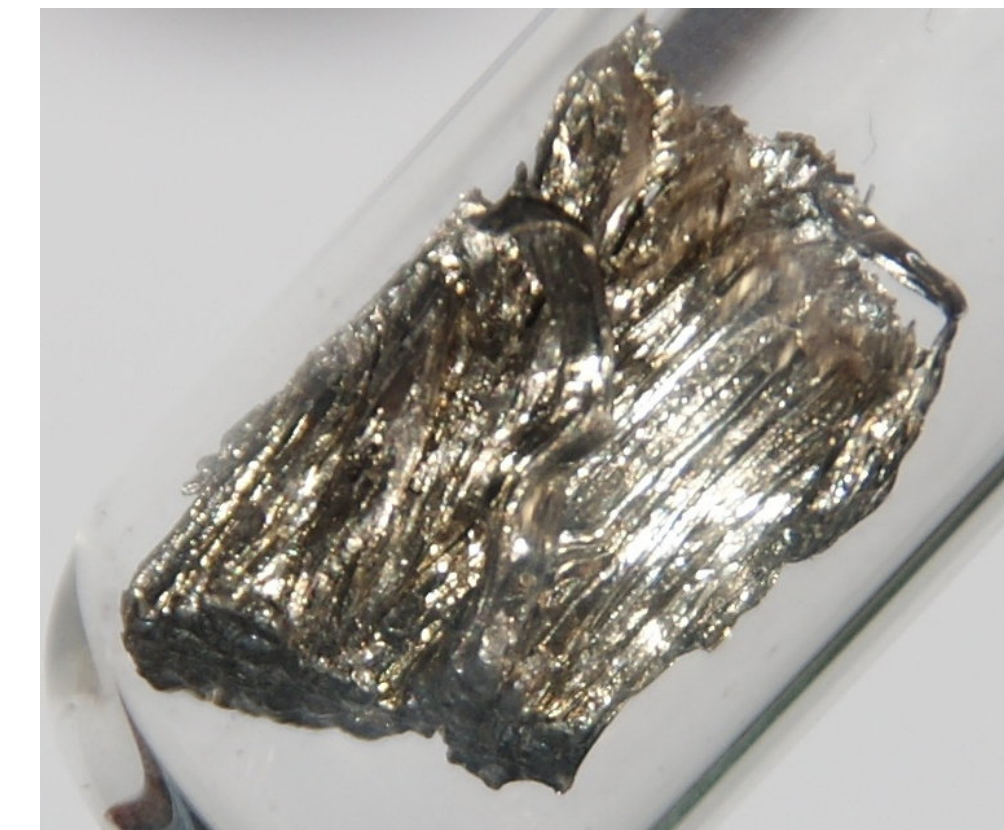
- Ядро $A=152\text{Eu}$. Орбитальный момент = 0.
- Ядро 152Eu захватывает электрон с орбиты и превращается в самарий (ядро B^*) в возбужденном состоянии и с полным орбитальным моментом = 1



- Ядро $^{152}\text{Sm}^*$ распадается через 0.07 пикосекунды и не успевает термализоваться, сохраняя направление своего спина



Европий



Самарий

Спиральность нейтрино

Эксперимент — шедевр от Голдхабера



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

○ Результат измерения Голдхабера и ко:

$$\text{спиральность нейтрино} = -1 \pm 0.3$$

M. Goldhaber, L. Grodzins, and A. W. Sunyar

Phys. Rev. **109**, 1015 – Published 1 February 1958

○ Результат измерения спиральности мюонного нейтрино (1982)

$$\text{спиральность нейтрино} = -1.06 \pm 0.11$$

Am.J.Phys. 50 (1982) 931-935

○ Самый точный результат -0.095 ± 0.035

ЯФ 12 (1970) 323



Морис Гольдхабер (1937)

Источник: [wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/Mordechai_Goldhaber)

Нейтрино в Стандартной Модели



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

- Три дублета лептонов взаимодействуют с W-бозоном

$$\begin{pmatrix} \nu_1 \\ e \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \mu \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \nu_3 \\ \tau \end{pmatrix}_L$$

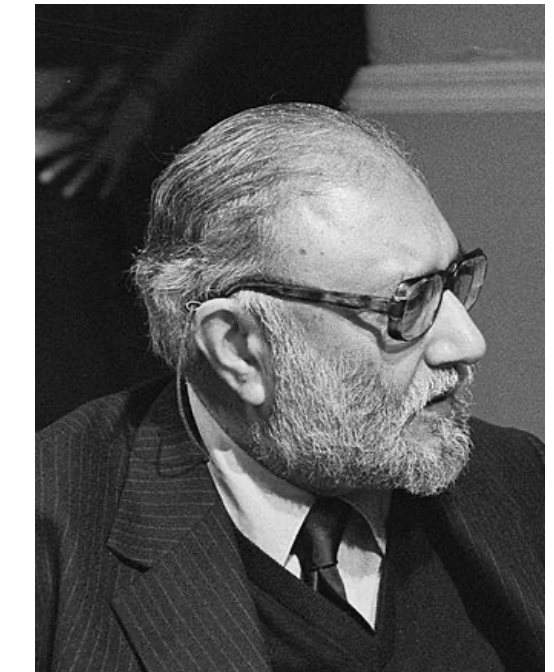
- Амплитуда взаимодействия пропорциональна $\frac{g}{2\sqrt{2}} V_{\alpha i}^*$ для ν_i и ℓ_α

- Возможны процессы вида

$$e + W^- \rightarrow \nu_i \propto V_{ei}^*$$

$$\mu + W^- \rightarrow \nu_i \propto V_{\mu i}^*$$

$$\tau + W^- \rightarrow \nu_i \propto V_{\tau i}^*$$



Нейтрино в Стандартной Модели



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



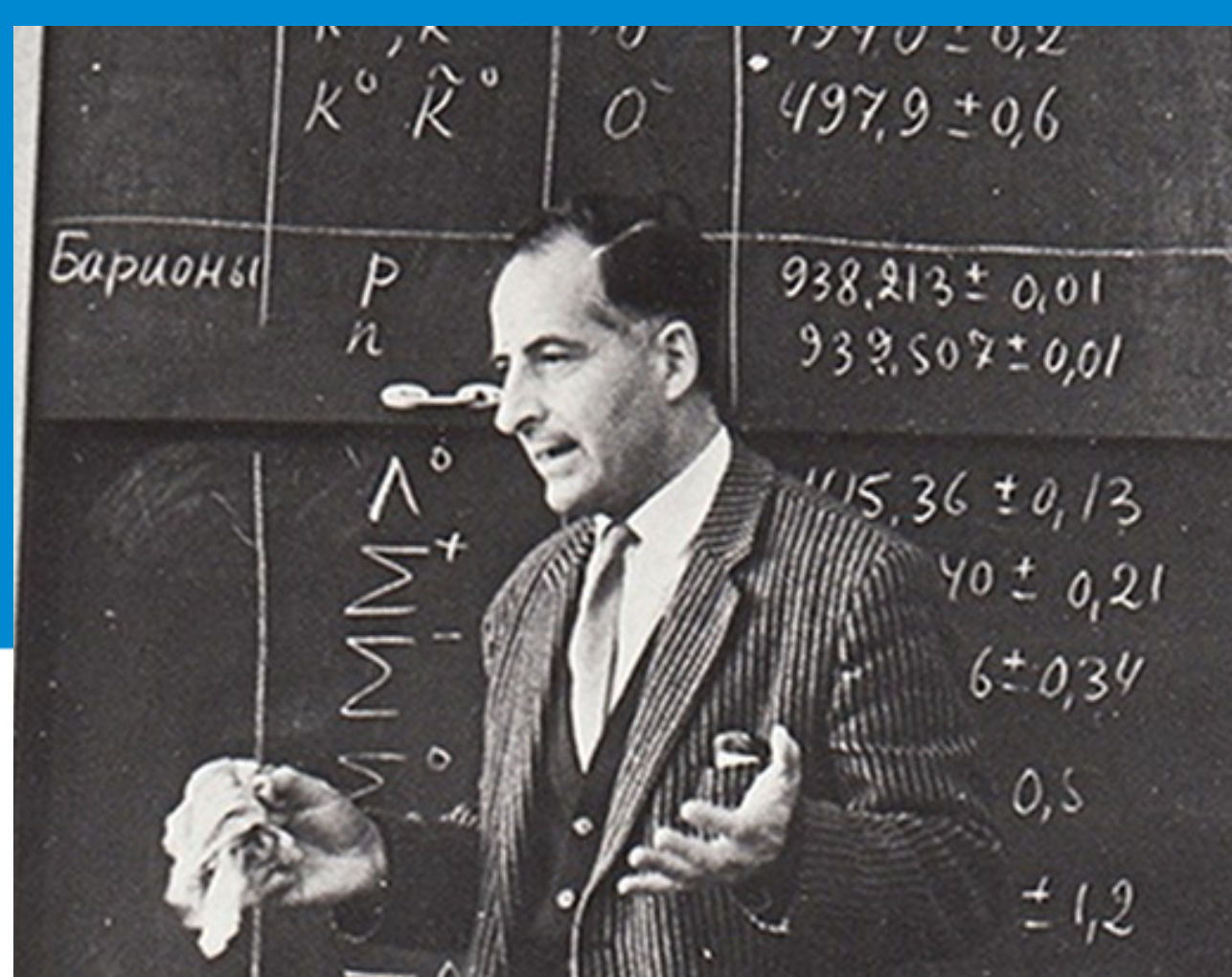
Объединенный
институт ядерных
исследований

○ Амплитуда взаимодействия пропорциональна $\frac{g}{2\sqrt{2}} V_{\alpha i}^*$ для ν_i и ℓ_α

○ Девять чисел $V_{\alpha i}^*$ образуют унитарную лептонную матрицу смешивания Понтекорво-Маки-Накагава-Саката

$$\begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu 1}^* & V_{\mu 2}^* & V_{\mu 3}^* \\ V_{\tau 1}^* & V_{\tau 2}^* & V_{\tau 3}^* \end{pmatrix}$$

○ Недиагональная форма матрицы V и отличающиеся массы m_i приводят к осцилляциям нейтрино



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Осцилляции нейтрино в вакууме

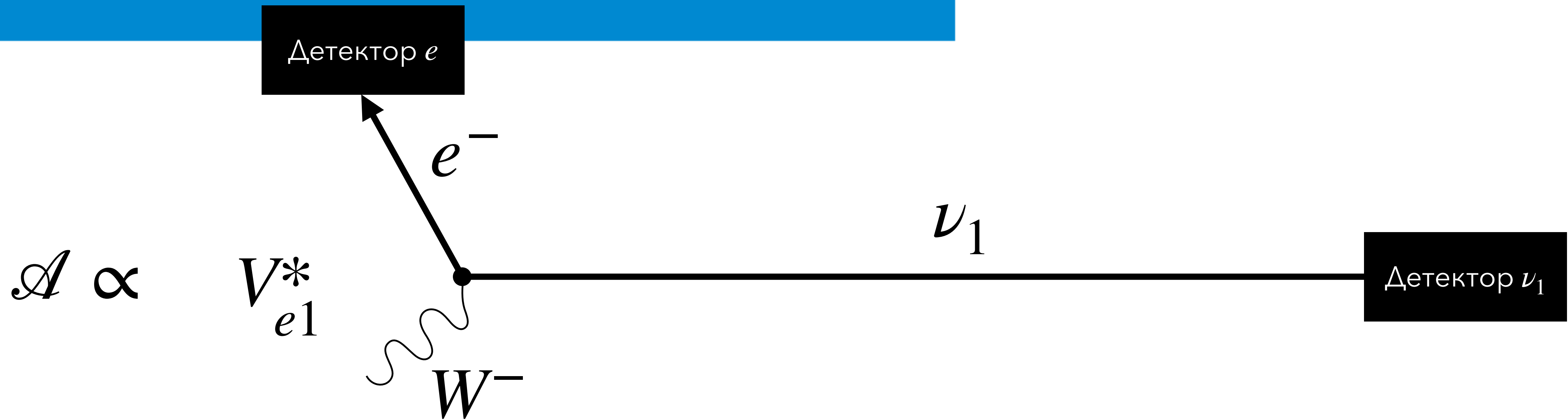
Осцилляции нейтрино в вакууме



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований



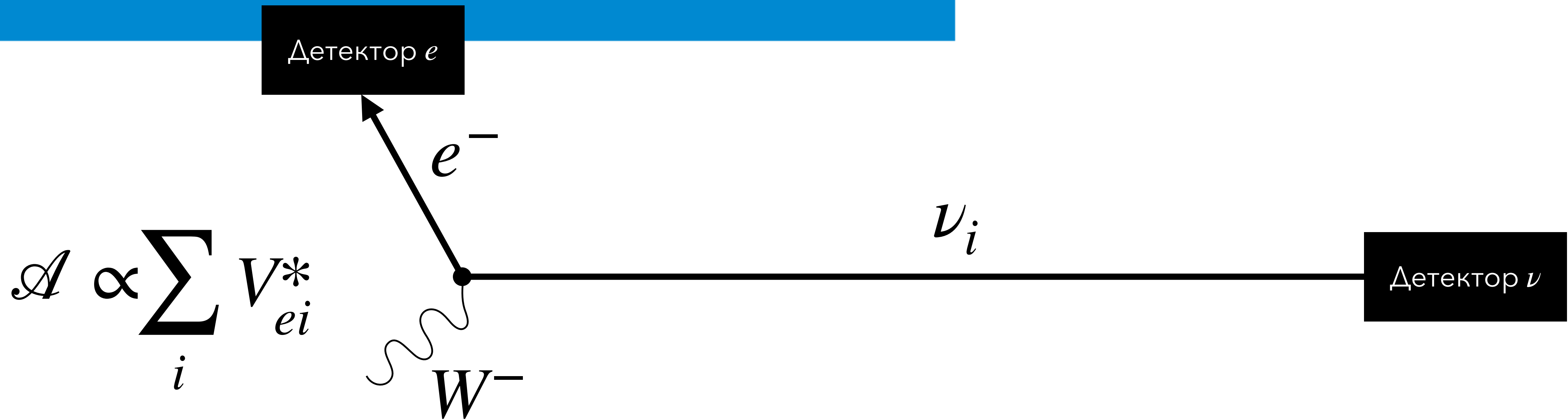
Осцилляции нейтрино в вакууме



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований



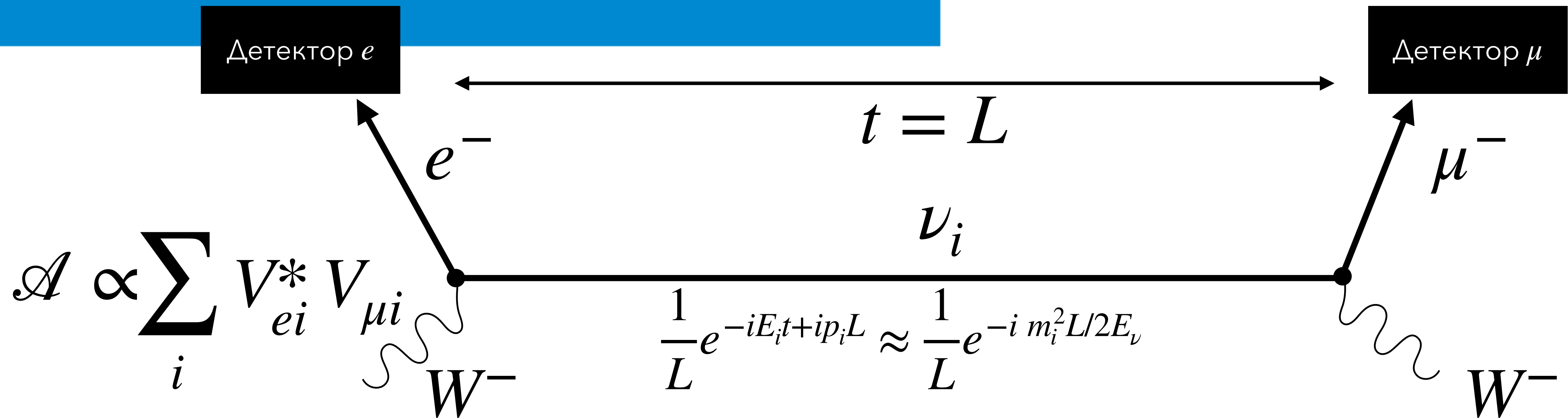
Осцилляции нейтрино в вакууме



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований



$$|\mathcal{A}|^2 \propto \frac{1}{L^2} \left| \sum_i V_{ei}^* V_{\mu i} e^{-i L m_i^2 / 2 E_\nu} \right|^2$$

Осцилляции нейтрино в вакууме



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзюбелова



Объединенный
институт ядерных
исследований

$$|\mathcal{A}|^2 \propto \frac{1}{L^2} \left| \sum_i V_{ei}^* V_{\mu i} e^{-iLm_i^2/2E_\nu} \right|^2$$

$$P_{e\mu}(L/E_\nu) = \sum_{i,j} V_{ei}^* V_{\mu j}^* V_{\mu i} V_{ej} e^{-iL \Delta m_{ij}^2/2E_\nu}$$

- (Квази)периодическая зависимость («осцилляции») вероятности процесса
- Необходимы ненулевые недиагональные элементы $V_{\alpha i}$ и $\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2 \neq 0$
- Что осциллирует? Лептонный «флэйвор» или «аромат» $L_e \leftrightarrow L_\mu$

Осцилляции нейтрино в вакууме



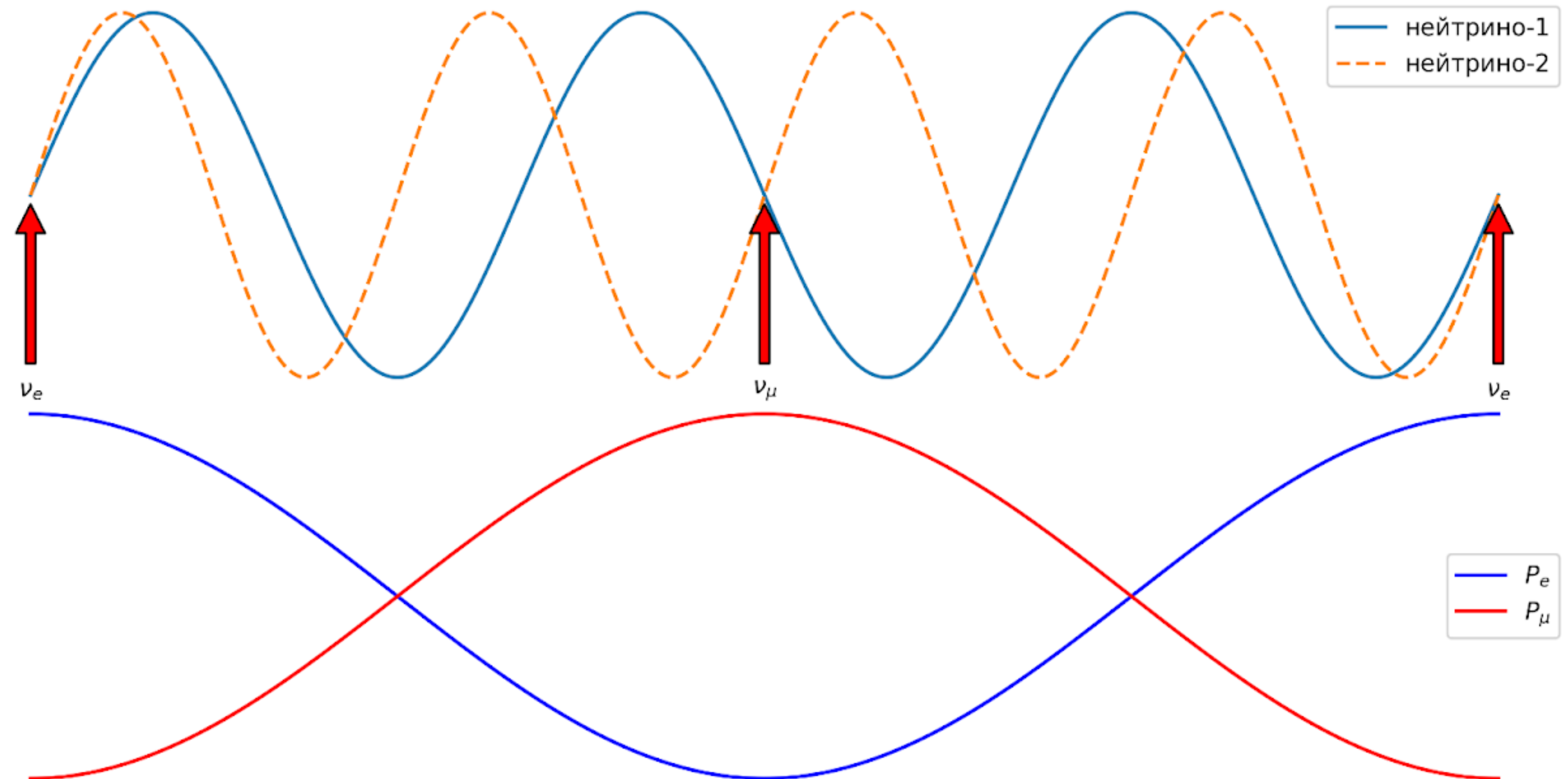
Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

○ Для двух типов нейтрино

$$V = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$



○ Вероятность осцилляции

$$P_{e\mu}(L/E) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \Delta m_{21}^2 L/4E_\nu$$

Осцилляции для пешеходов

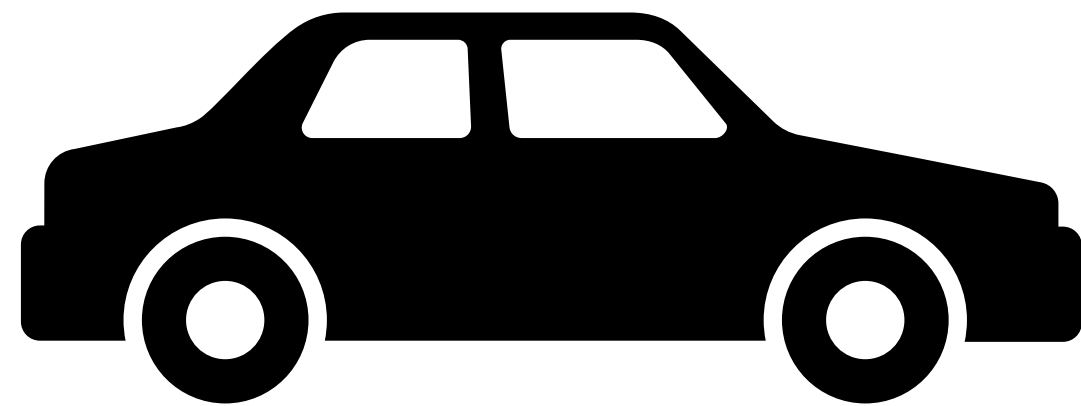


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова

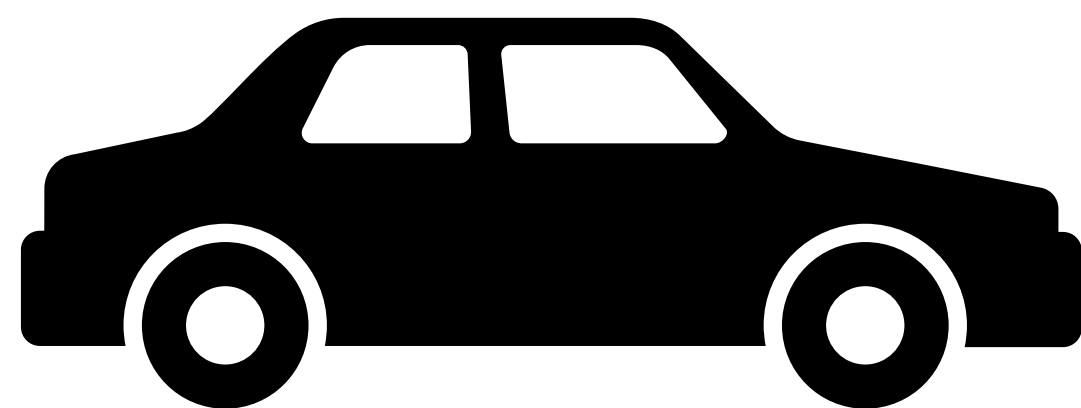


Объединенный
институт ядерных
исследований

Обычная частица



Нейтрино



Осцилляции для пешеходов

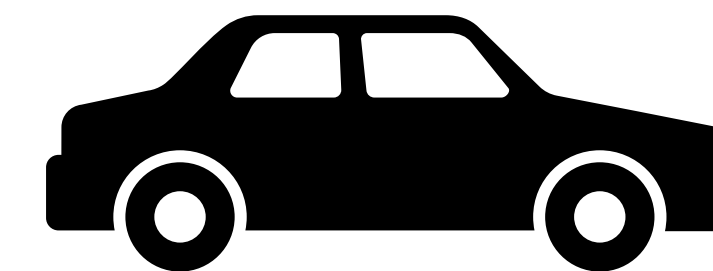
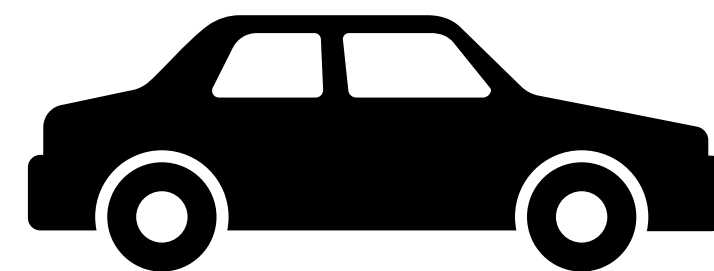
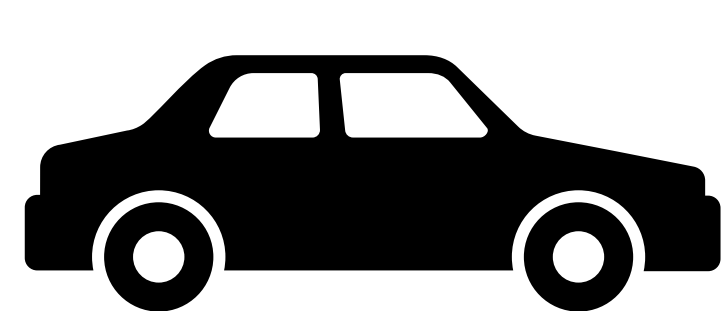


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова

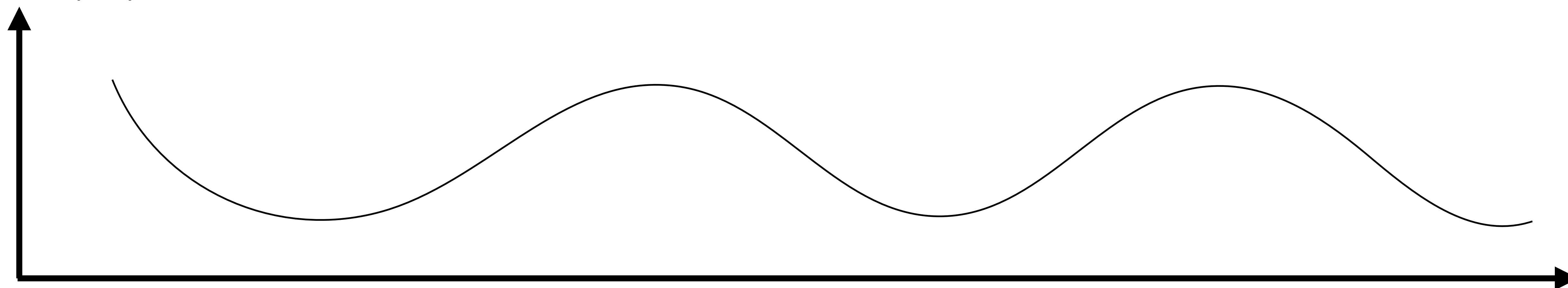


Объединенный
институт ядерных
исследований

Нейтрино



Вероятность обнаружить
легковушку



Осцилляции для пешеходов

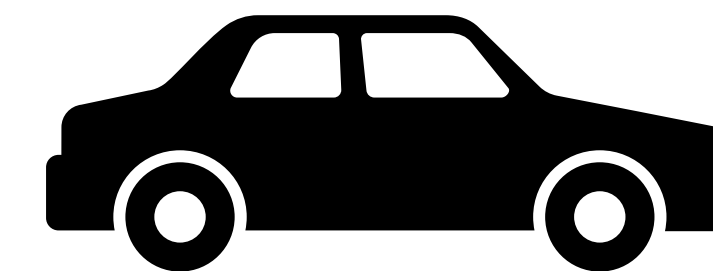
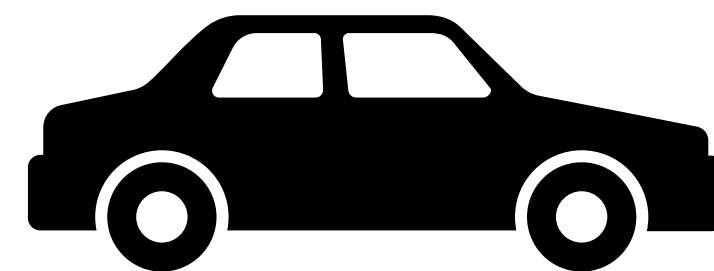
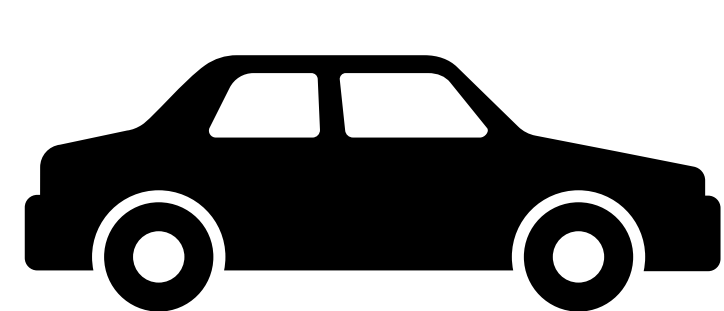


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова

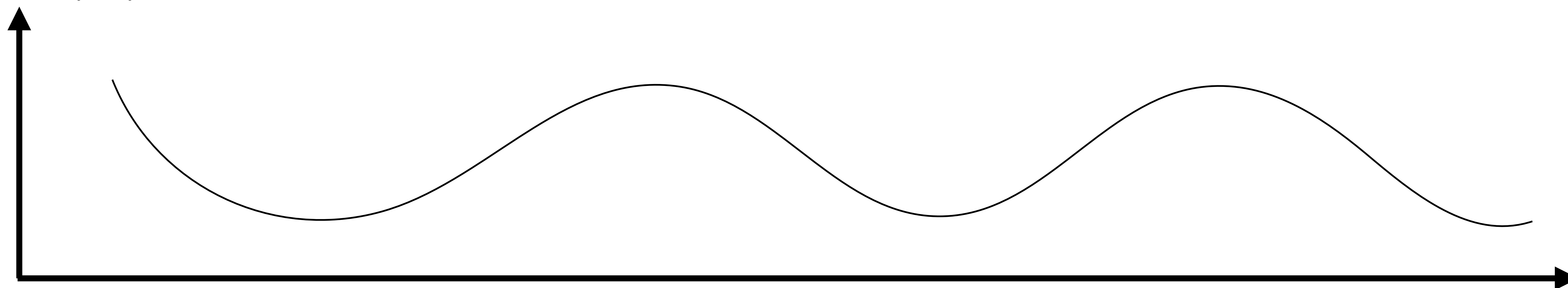


Объединенный
институт ядерных
исследований

Нейтрино



Вероятность обнаружить
легковушку



Осцилляции для пешеходов

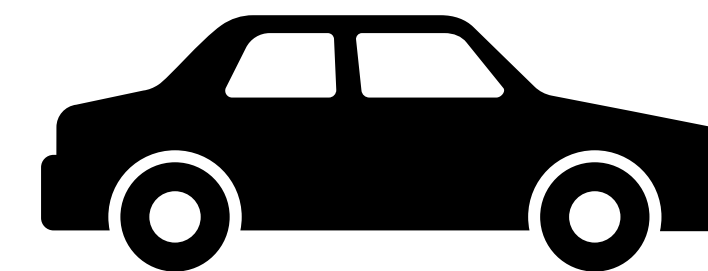
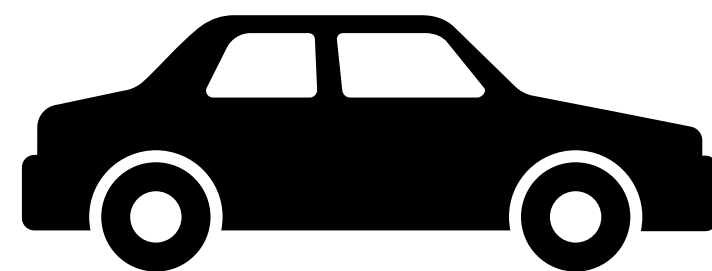
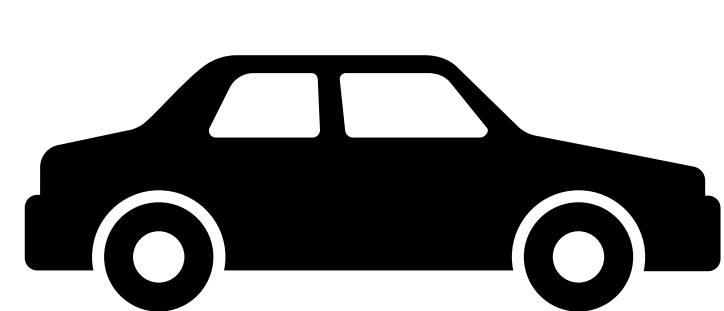


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова

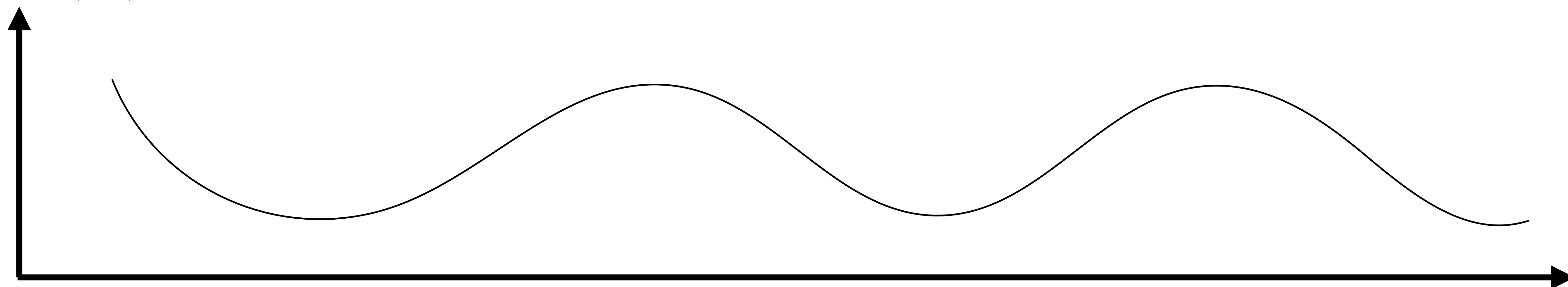


Объединенный
институт ядерных
исследований

Нейтрино



Вероятность обнаружить
легковушку



Осцилляции нейтрино в вакууме

Классическая аналогия



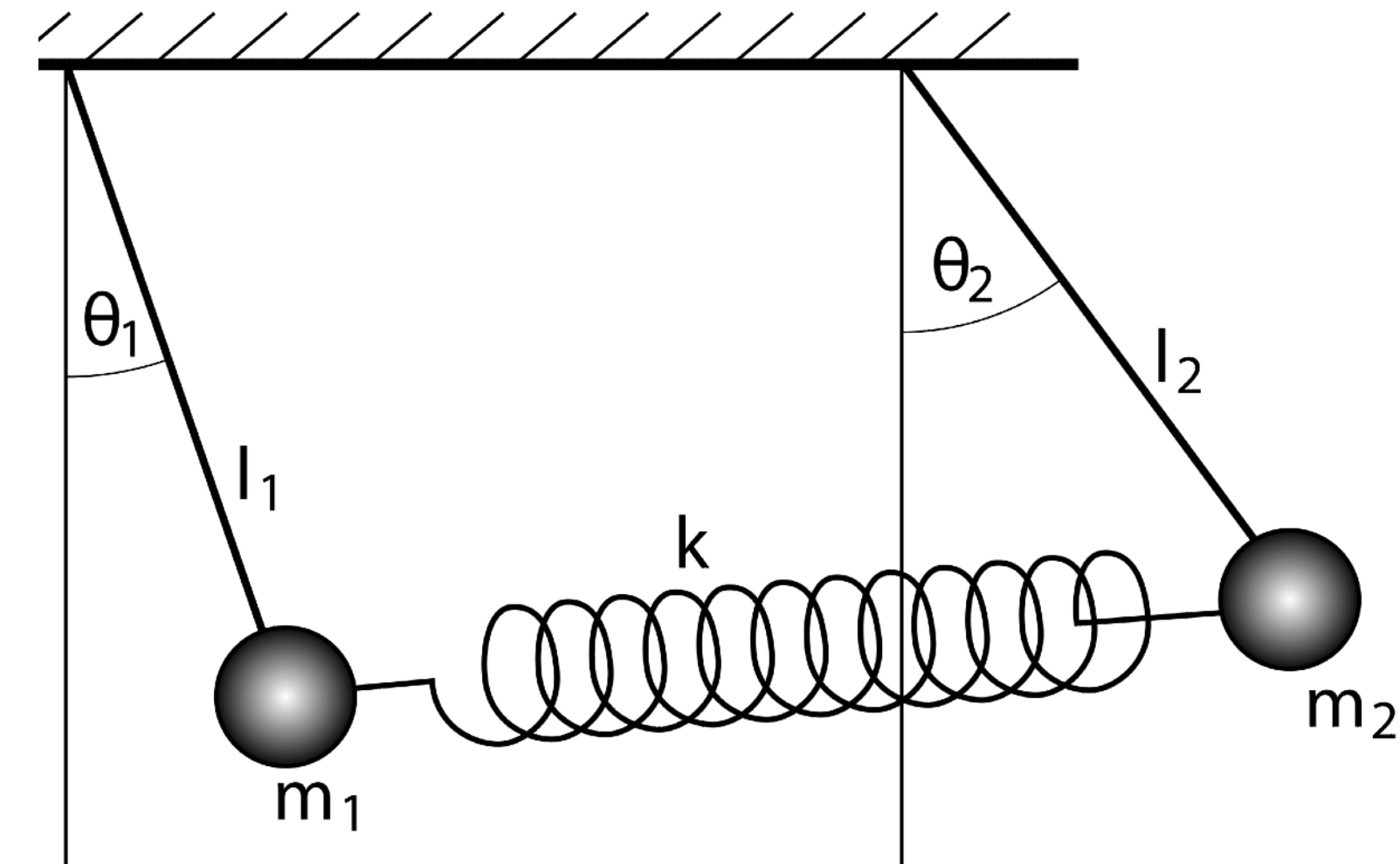
○ Потенциальная энергия

$$V = \frac{m}{2} \left(\frac{g}{l_1} x_1^2 + \frac{g}{l_2} x_2^2 + \frac{k}{m} (x_1 - x_2)^2 \right) = \frac{m}{2} (x_1, x_2) \begin{pmatrix} \frac{g}{l_1} + \frac{k}{m} & -\frac{k}{m} \\ -\frac{k}{m} & \frac{g}{l_2} + \frac{k}{m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

○ Диагонализация V

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \end{pmatrix}$$

$$V = \frac{m}{2} (x'_1, x'_2) \begin{pmatrix} \omega_1^2 & 0 \\ 0 & \omega_2^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \end{pmatrix}$$



Осцилляции нейтрино в вакууме

Классическая аналогия

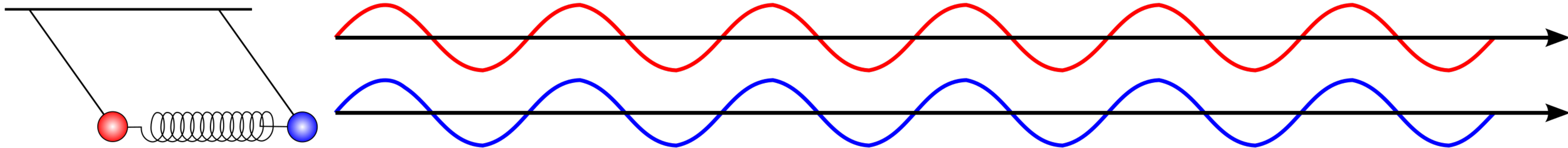


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова

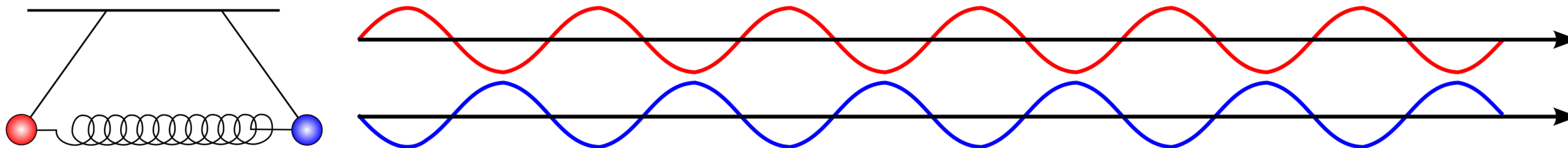


Объединенный
институт ядерных
исследований

○ Нормальная мода. Меньшая частота



○ Нормальная мода. Большая частота



Осцилляции нейтрино в вакууме

Классическая аналогия

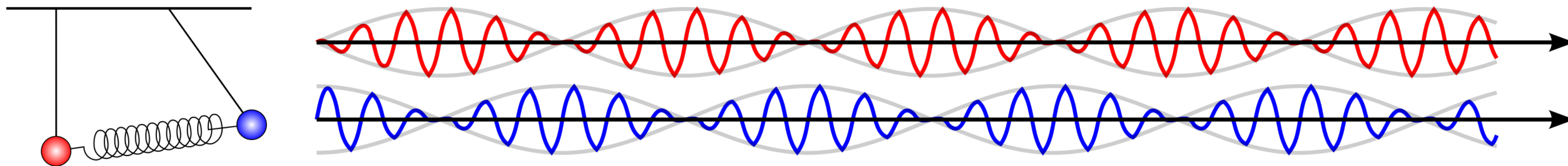


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

- Суперпозиция нормальных колебаний — аналог осцилляции нейтрино



- Что же осциллирует? Осциллирует полная энергия E_0 между маятниками (ДН, Аллахвердян)

$$\frac{E_1}{E_0} = 1 - \underbrace{\frac{4r}{(1+r)^2}}_{\sin^2 2\theta} \sin^2 \frac{\Delta\omega t}{2}$$

$$P_{e\mu}(L/E) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \Delta E_{21} L/2$$

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$$

$$r = m_2/m_1$$

Осцилляции трех типов нейтрино в вакууме



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзельепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

$$\begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu 1}^* & V_{\mu 2}^* & V_{\mu 3}^* \\ V_{\tau 1}^* & V_{\tau 2}^* & V_{\tau 3}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Три угла смешивания $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$
- Одна фаза δ . Если $\delta \neq 0, \pi \rightarrow$ нарушение CP-четности

Осцилляции трех типов нейтрино в вакууме



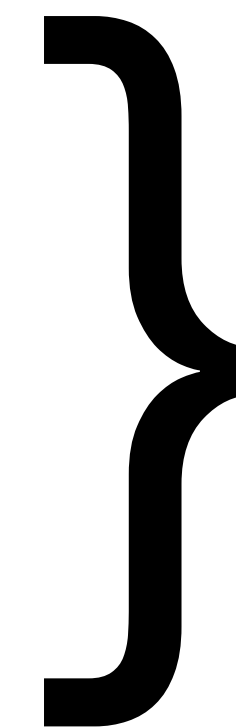
Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

$$\begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu 1}^* & V_{\mu 2}^* & V_{\mu 3}^* \\ V_{\tau 1}^* & V_{\tau 2}^* & V_{\tau 3}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Эксперименты с нейтрино от Солнца, реакторов θ_{12} , Δm_{21}^2
- Эксперименты с атмосферными и «ускорительными» θ_{23} , Δm_{32}^2
- Эксперименты с реакторами на 2 км (Daya Bay, RENO, DC) θ_{13} , Δm_{32}^2



$$\Delta m_{21}^2 \approx 7.5 \cdot 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$|\Delta m_{32}^2| \approx 2.4 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2$$

○ Теперь можно понять эти ограничения:

$$\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2, m_2^2 = m_1^2 + \Delta m_{21}^2$$

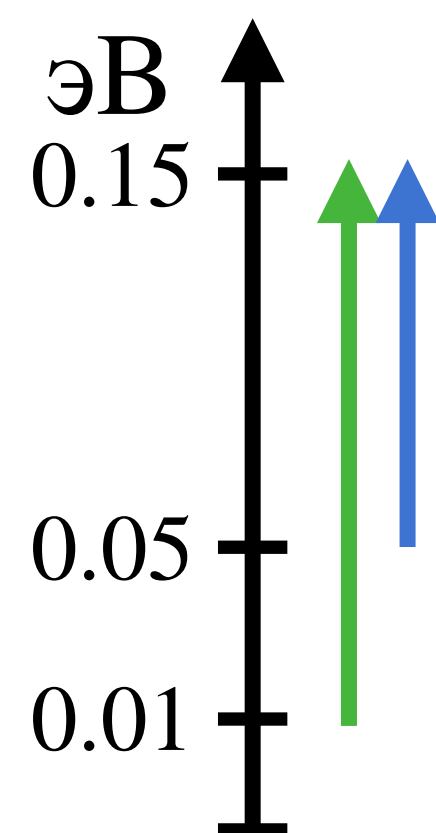
$$m_2 = \sqrt{m_1^2 + \Delta m_{21}^2} \geq \sqrt{\Delta m_{21}^2} \approx 0.01 \text{ эВ}$$

Нормальное упорядочивание

$$m_3 = \sqrt{m_2^2 + |\Delta m_{32}^2|} \geq 0.05 \text{ эВ}, m_3 > m_2$$

Обратное упорядочивание

$$m_2 = \sqrt{m_3^2 + |\Delta m_{32}^2|} \geq 0.05 \text{ эВ}, m_2 > m_3$$



Матрица смешивания



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

○ Унитарность $VV^\dagger = V^\dagger V = I$

$$\begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu1}^* & V_{\mu2}^* & V_{\mu3}^* \\ V_{\tau1}^* & V_{\tau2}^* & V_{\tau3}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{e1} & V_{\mu1} & V_{\tau1} \\ V_{e2} & V_{\mu2} & V_{\tau2} \\ V_{e3} & V_{\mu3} & V_{\tau3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{e1} & V_{\mu1} & V_{\tau1} \\ V_{e2} & V_{\mu2} & V_{\tau2} \\ V_{e3} & V_{\mu3} & V_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu1}^* & V_{\mu2}^* & V_{\mu3}^* \\ V_{\tau1}^* & V_{\tau2}^* & V_{\tau3}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

○ 6 единичек на диагонали

$$|V_{e1}|^2 + |V_{e2}|^2 + |V_{e3}|^2 = 1$$

$$|V_{\mu1}|^2 + |V_{\mu2}|^2 + |V_{\mu3}|^2 = 1$$

$$|V_{\tau1}|^2 + |V_{\tau2}|^2 + |V_{\tau3}|^2 = 1$$

$$|V_{e1}|^2 + |V_{\mu1}|^2 + |V_{\tau1}|^2 = 1$$

$$|V_{e2}|^2 + |V_{\mu2}|^2 + |V_{\tau2}|^2 = 1$$

$$|V_{e3}|^2 + |V_{\mu3}|^2 + |V_{\tau3}|^2 = 1$$

○ 12 нулей вне диагонали

$$V_{e1}^* V_{\mu1} + V_{e2}^* V_{\mu2} + V_{e3}^* V_{\mu3} = 0$$

$$V_{e1}^* V_{\tau1} + V_{e2}^* V_{\tau2} + V_{e3}^* V_{\tau3} = 0$$

$$V_{\mu1}^* V_{\tau1} + V_{\mu2}^* V_{\tau2} + V_{\mu3}^* V_{\tau3} = 0$$

...

Матрица смешивания

- Daya Bay измерил $|V_{e3}|^2 \approx 0.02$. Приблизненно запишем как ноль



$$V = \begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu 1}^* & V_{\mu 2}^* & V_{\mu 3}^* \\ V_{\tau 1}^* & V_{\tau 2}^* & V_{\tau 3}^* \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu 1}^* & V_{\mu 2}^* & V_{\mu 3}^* \\ V_{\tau 1}^* & V_{\tau 2}^* & V_{\tau 3}^* \end{pmatrix}$$

Матрица смешивания

- Daya Bay измерил $|V_{e3}|^2 \approx 0.02$. Приблизненно запишем как ноль
- Солнечные нейтрино: дефицит почти 70% $\rightarrow P_{ee} = |V_{e2}|^2 = \frac{1}{3}$



$$V = \begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu 1}^* & V_{\mu 2}^* & V_{\mu 3}^* \\ V_{\tau 1}^* & V_{\tau 2}^* & V_{\tau 3}^* \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & 0 \\ V_{\mu 1}^* & V_{\mu 2}^* & V_{\mu 3}^* \\ V_{\tau 1}^* & V_{\tau 2}^* & V_{\tau 3}^* \end{pmatrix}$$

Матрица смешивания

- Daya Bay измерил $|V_{e3}|^2 \approx 0.02$. Приближенно запишем как ноль
- Солнечные нейтрино: дефицит почти 70% $\rightarrow P_{ee} = |V_{e2}|^2 = \frac{1}{3}$
- Атмосферные и ускорительные нейтрино: $P_{\mu\mu} = |V_{\mu3}|^2 = \frac{1}{2}$



$$V = \begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu1}^* & V_{\mu2}^* & V_{\mu3}^* \\ V_{\tau1}^* & V_{\tau2}^* & V_{\tau3}^* \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_{e1}^* & \sqrt{\frac{1}{3}} & 0 \\ V_{\mu1}^* & V_{\mu2}^* & V_{\mu3}^* \\ V_{\tau1}^* & V_{\tau2}^* & V_{\tau3}^* \end{pmatrix}$$

Матрица смешивания

- Daya Bay измерил $|V_{e3}|^2 \approx 0.02$. Приближенно запишем как ноль
- Солнечные нейтрино: дефицит почти 70% $\rightarrow P_{ee} = |V_{e2}|^2 = \frac{1}{3}$
- Атмосферные и ускорительные нейтрино: $P_{\mu\mu} = |V_{\mu3}|^2 = \frac{1}{2}$

$$|V_{e1}|^2 + |V_{e2}|^2 + |V_{e3}|^2 = 1$$



$$V = \begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu1}^* & V_{\mu2}^* & V_{\mu3}^* \\ V_{\tau1}^* & V_{\tau2}^* & V_{\tau3}^* \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_{e1}^* & \sqrt{\frac{1}{3}} & 0 \\ V_{\mu1}^* & V_{\mu2}^* & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ V_{\tau1}^* & V_{\tau2}^* & V_{\tau3}^* \end{pmatrix}$$

Матрица смешивания

- Daya Bay измерил $|V_{e3}|^2 \approx 0.02$. Приближенно запишем как ноль
- Солнечные нейтрино: дефицит почти 70% $\rightarrow P_{ee} = |V_{e2}|^2 = \frac{1}{3}$
- Атмосферные и ускорительные нейтрино: $P_{\mu\mu} = |V_{\mu3}|^2 = \frac{1}{2}$

$$|V_{e1}|^2 + |V_{e2}|^2 + |V_{e3}|^2 = 1$$

$$|V_{e3}|^2 + |V_{\mu3}|^2 + |V_{\tau3}|^2 = 1$$



$$V = \begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu1}^* & V_{\mu2}^* & V_{\mu3}^* \\ V_{\tau1}^* & V_{\tau2}^* & V_{\tau3}^* \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & \sqrt{\frac{1}{3}} & 0 \\ V_{\mu1}^* & V_{\mu2}^* & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ V_{\tau1}^* & V_{\tau2}^* & V_{\tau3}^* \end{pmatrix}$$

Матрица смешивания



- Daya Bay измерил $|V_{e3}|^2 \approx 0.02$. Приблизительно запишем как ноль
- Солнечные нейтрино: дефицит почти 70% $\rightarrow P_{ee} = |V_{e2}|^2 = \frac{1}{3}$
- Атмосферные и ускорительные нейтрино: $P_{\mu\mu} = |V_{\mu3}|^2 = \frac{1}{2}$

$$|V_{e1}|^2 + |V_{e2}|^2 + |V_{e3}|^2 = 1$$

$$V_{e1}^* V_{\tau1} + V_{e2}^* V_{\tau2} + V_{e3}^* V_{\tau3} = 0$$

$$|V_{e3}|^2 + |V_{\mu3}|^2 + |V_{\tau3}|^2 = 1$$

$$V_{\mu1}^* V_{\tau1} + V_{\mu2}^* V_{\tau2} + V_{\mu3}^* V_{\tau3} = 0$$

$$|V_{e1}|^2 + |V_{\mu1}|^2 + |V_{\tau1}|^2 = 1$$

$$|V_{e2}|^2 + |V_{\mu2}|^2 + |V_{\tau2}|^2 = 1$$

$$V = \begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu1}^* & V_{\mu2}^* & V_{\mu3}^* \\ V_{\tau1}^* & V_{\tau2}^* & V_{\tau3}^* \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & \sqrt{\frac{1}{3}} & 0 \\ V_{\mu1}^* & V_{\mu2}^* & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ V_{\tau1}^* & V_{\tau2}^* & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix}$$

Матрица смешивания



- Daya Bay измерил $|V_{e3}|^2 \approx 0.02$. Приблизительно запишем как ноль
- Солнечные нейтрино: дефицит почти 70% $\rightarrow P_{ee} = |V_{e2}|^2 = \frac{1}{3}$
- Атмосферные и ускорительные нейтрино: $P_{\mu\mu} = |V_{\mu3}|^2 = \frac{1}{2}$

$$|V_{e1}|^2 + |V_{e2}|^2 + |V_{e3}|^2 = 1$$

$$V_{e1}^* V_{\tau1} + V_{e2}^* V_{\tau2} + V_{e3}^* V_{\tau3} = 0$$

$$|V_{e3}|^2 + |V_{\mu3}|^2 + |V_{\tau3}|^2 = 1$$

$$V_{\mu1}^* V_{\tau1} + V_{\mu2}^* V_{\tau2} + V_{\mu3}^* V_{\tau3} = 0$$

$$|V_{e1}|^2 + |V_{\mu1}|^2 + |V_{\tau1}|^2 = 1$$

$$|V_{e2}|^2 + |V_{\mu2}|^2 + |V_{\tau2}|^2 = 1$$

Д/з Попробуйте
получить элементы V

$$V = \begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu1}^* & V_{\mu2}^* & V_{\mu3}^* \\ V_{\tau1}^* & V_{\tau2}^* & V_{\tau3}^* \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & \sqrt{\frac{1}{3}} & 0 \\ -\sqrt{\frac{1}{6}} & \sqrt{\frac{1}{3}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \sqrt{\frac{1}{6}} & -\sqrt{\frac{1}{3}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix}$$

Матрица смешивания



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

- Теория взаимодействий опирается на идею калибровочной симметрии.
- Как найти правильную симметрию? Никто не знает!
- Симметрия $SU(2)_L \times U(1)$ СМ была подсказана нарушением четности в слабых взаимодействиях

$$V = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & \sqrt{\frac{1}{3}} & 0 \\ -\sqrt{\frac{1}{6}} & \sqrt{\frac{1}{3}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \sqrt{\frac{1}{6}} & -\sqrt{\frac{1}{3}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix}$$

- Особая структура матрицы смешивания возможно связана с некоторой новой симметрией. Теоретики пытаются ее найти



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзержинского



Объединенный
институт ядерных
исследований

Осцилляции нейтрино в веществе

Осцилляции нейтрино в веществе



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

- ν_μ не чувствует электроны (за счет обмена W)
- ν_e тоже может пройти без взаимодействия с электроном
- ν_e может взаимодействовать с электроном $\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e$

Преломление

ν_e

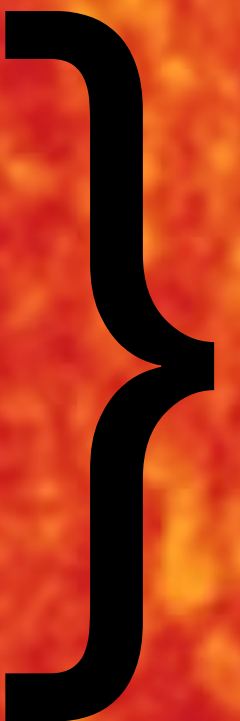
ν_e

ν_μ

W^-

e^-

e^-



Осцилляции нейтрино в веществе



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

- Благодаря $\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e$ реакции ν_e находятся в потенциале

$$V = \sqrt{2}G_F n_e \approx 10^{-10} - 10^{-11} \text{ эВ}$$

- Потенциал ничтожно мал по сравнению с энергией нейтрино:

$$V \ll E_\nu \simeq 0.1 - 10 \text{ МэВ}$$

- Однако он сравним с разницей энергией $\Delta E_{ij} \approx \Delta m_{ij}^2 / 2E_\nu$ для $\Delta m_{ij}^2 \simeq 10^{-5} \text{ эВ}^2$ и $E_\nu \simeq \text{МэВ}$

- Поэтому вещество влияет на осцилляции нейтрино

- Солнце преломляет нейтрино, как стеклянный прозрачный шар преломляет свет



Осцилляции нейтрино в веществе



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

○ Солнце преломляет нейтрино, как стеклянный прозрачный шар преломляет свет



Осцилляции нейтрино в веществе



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

- Солнце преломляет нейтрино, как стеклянный прозрачный шар преломляет свет
- Коэффициент преломления для ν_e

$$n_{\nu_e} = 1 - \sqrt{2}G_F n_e / E_\nu$$

- Коэффициент преломления для ν_μ

$$n_{\nu_\mu} = 1$$

- Разница в коэффициентах преломления для ν_e и ν_μ меняет картину осцилляций

$$n_{\nu_e} - n_{\nu_\mu} = -\sqrt{2}G_F n_e / E_\nu$$



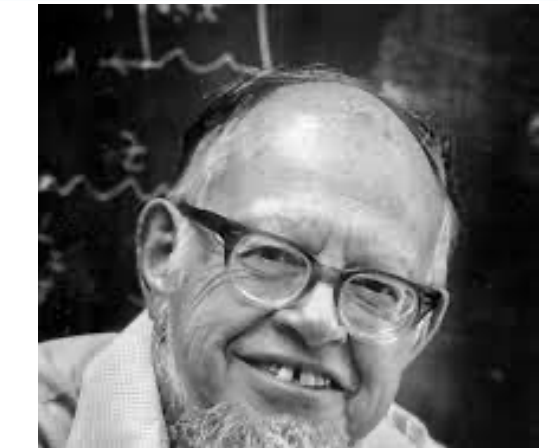
Осцилляции нейтрино в веществе



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



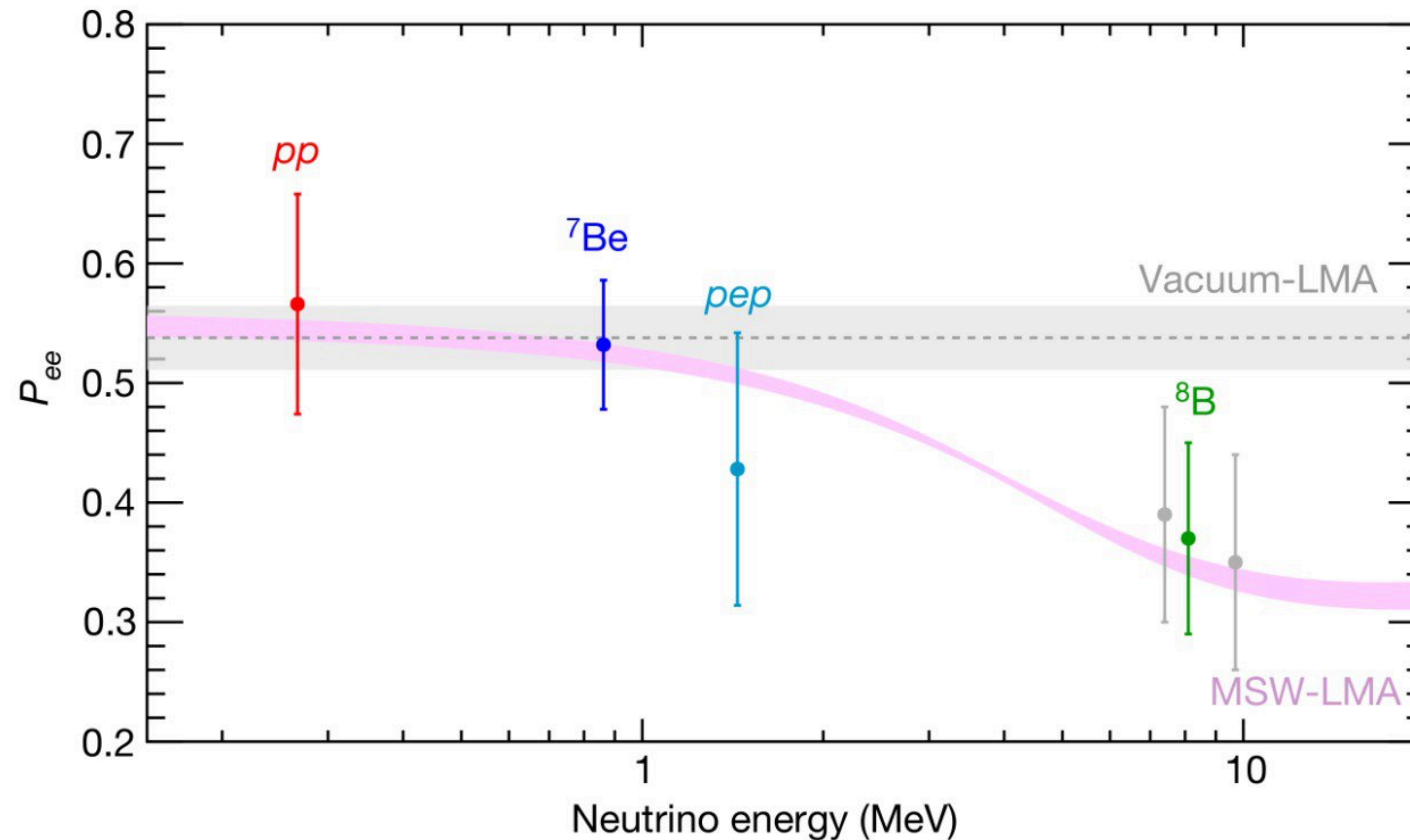
Объединенный
институт ядерных
исследований



вакуум

MSW резонанс

адиабатическое решение





Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Осцилляции нейтрино в модели волнового пакета

Добавим глубины

(Неявные) гипотезы

Модели с плоской волной



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

- Взаимодействует когерентная суперпозиция $\nu_\alpha = \sum_i V_{\alpha i}^* \nu_i$
- Состояния ν_i обладают строго определенным импульсом $\delta p_i = 0$
- Все импульсы $p_1 = p_2 = p_3 = p$ одинаковы
- Нейтрино ультрарелятивистские $|p_i| \gg m_i$
- Время t равно расстоянию L : $t = L$



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзержинского



Объединенный
институт ядерных
исследований

Критический анализ ГИПОТЕЗ

(Неявные) гипотезы

Модели с плоской волной



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Взаимодействует когерентная суперпозиция $\nu_\alpha = \sum_i V_{\alpha i}^* \nu_i$

- Почему массивные нейтрино ν_i рождаются когерентно, а заряженные лептоны, видимо, нет? Осциллируют ли заряженные лептоны?
- Поля лептонов и нейтрино симметричны в СМ

$$\mathcal{L} = -\frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_{\alpha=e,\mu,\tau} \sum_{i=1}^3 V_{\alpha i} \bar{\ell}_\alpha O^\mu \nu_i W_\mu + \text{эс}$$

(Неявные) гипотезы

Модели с плоской волной



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзержинского



Объединенный
институт ядерных
исследований

Состояния ν_i обладают строго определенным импульсом $\delta p_\nu = 0$

- Согласно принципу неопределенности $\delta x_\nu = \frac{1}{\delta p_\nu} = \infty$
- Как тогда определить расстояние L , которое проходит нейтрино?

(Неявные) гипотезы

Модели с плоской волной

Все импульсы $p_1 = p_2 = p_3 = p$ одинаковы

- Противоречит Лоренц-инвариантности
- Противоречит кинематике распада

Д/з докажете эти утверждения



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзержинского



Объединенный
институт ядерных
исследований

(Неявные) гипотезы

Модели с плоской волной

Нейтрино ультрарелятивистские $|p_i| \gg m_i$

- Справедливо для всех земных экспериментов
- Не справедливо для реликтовых нейтрино



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

(Неявные) гипотезы

Модели с плоской волной



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Время t равно расстоянию L :

$$t = L$$

○ Попробуем улучшить расчет безобидной заменой $L = vt = \frac{p_i}{E_\nu} t$

$$\varphi = E_i t - p_i L = E_i t - \frac{p_i^2}{E_i} t = \frac{E_i^2 - p_i^2}{E_i} t = \frac{m_i^2}{E_i} t$$

○ Разность фаз

$$\varphi_{ij} = \varphi_i - \varphi_j = \frac{m_i^2 - m_j^2}{E_i} t = 2 \frac{m_i^2 - m_j^2}{2E_i} t$$

○ Разность фаз получилась в два раза больше!



- Взаимодействует когерентная суперпозиция $\nu_\alpha = \sum_i V_{\alpha i}^* \nu_i$
- Состояния ν_i обладают строго определенным импульсом $\delta p_i = 0$
- Все импульсы $p_1 = p_2 = p_3 = p$ одинаковы
- Нейтрино ультрарелятивистские $|p_i| \gg m_i$
- Время t равно расстоянию L : $t = L$





Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Модель волнового пакета

Модель волнового пакета

Модели с плоской волной



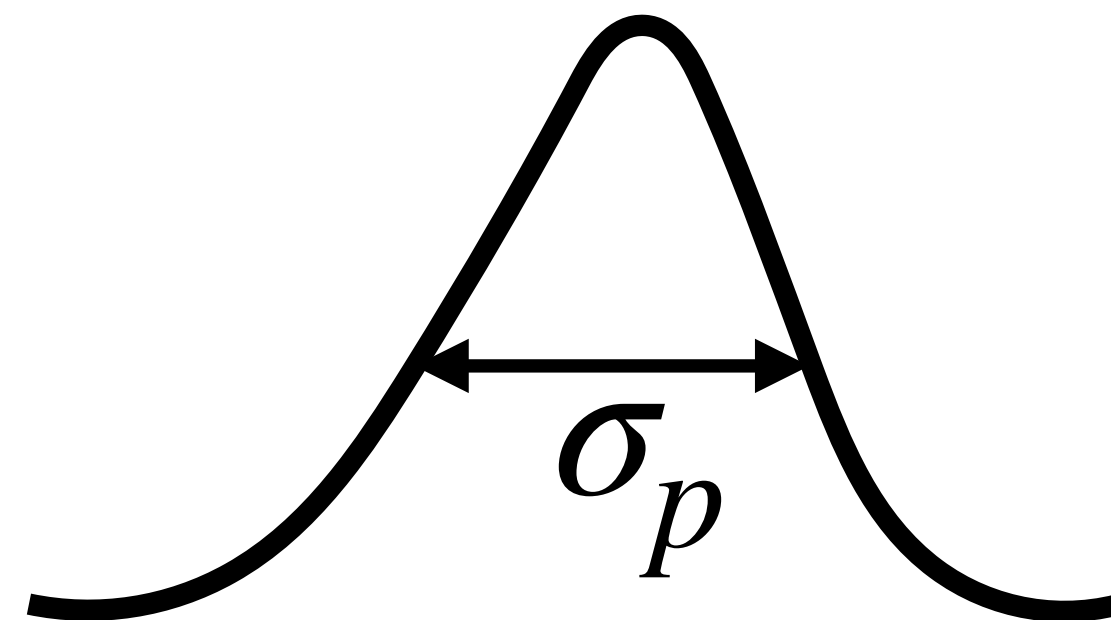
Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

$$|p\rangle \rightarrow \int \frac{dp}{2\pi} g(p, P; \sigma_p) |p\rangle$$

$g(p, P; \sigma_p)$



p

Импульсное представление

Модель волнового пакета

Модели с плоской волной



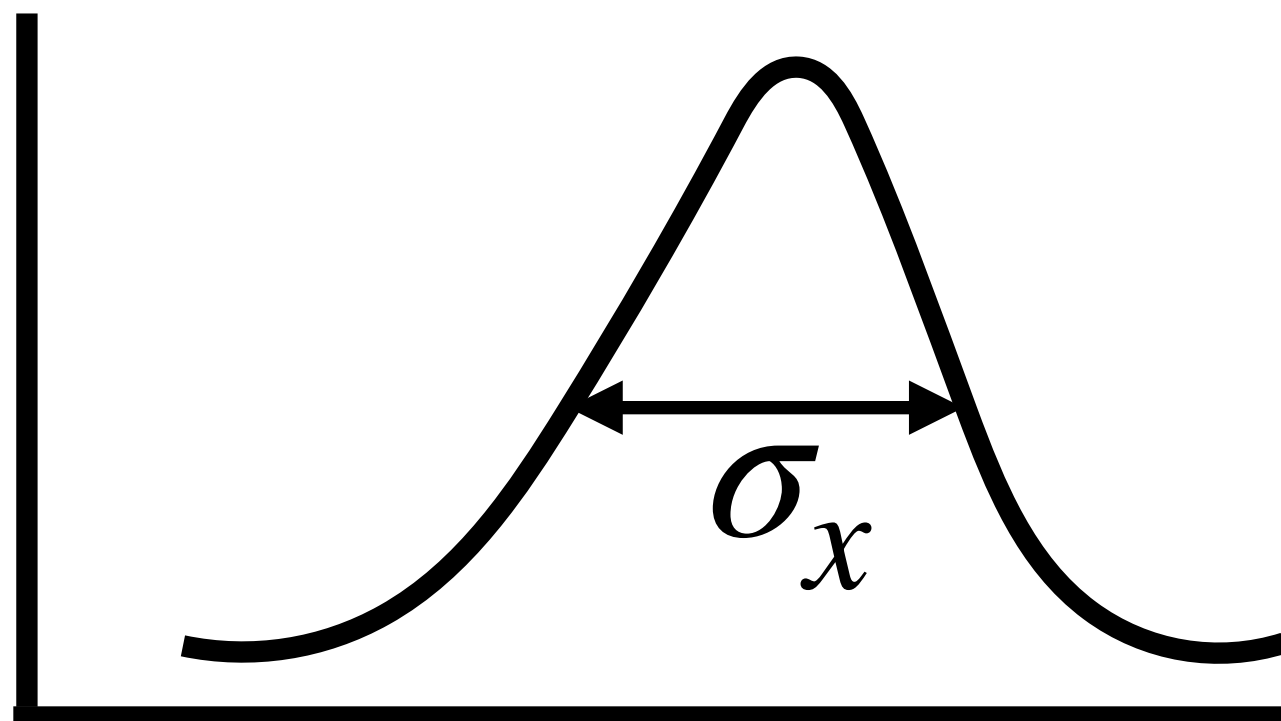
Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

$$|p\rangle \rightarrow \int \frac{dp}{2\pi} g(p, P; \sigma_p) |p\rangle$$

$g(x, X; \sigma_x)$



x

Координатное представление

Модель волнового пакета

Модели с плоской волной



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

$$|p\rangle \rightarrow \int \frac{dp}{2\pi} g(p, P; \sigma_p) |p\rangle$$

$g(x, X; \sigma_x)$



Координатное представление

Модель волнового пакета

Модели с плоской волной



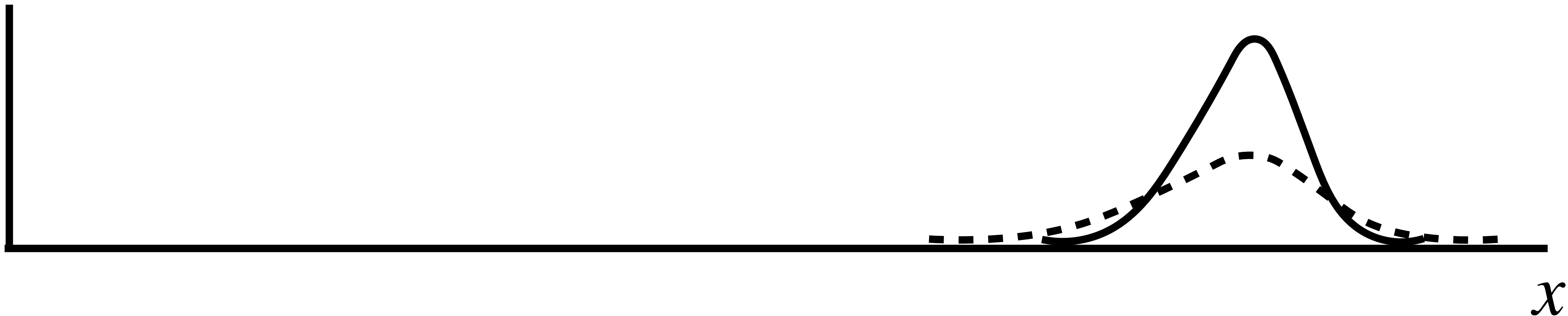
Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

$$|p\rangle \rightarrow \int \frac{dp}{2\pi} g(p, P; \sigma_p) |p\rangle$$

$g(x, X; \sigma_x)$



Координатное представление

Расплывание волнового пакета



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Вакуумные осцилляции В модели волнового пакета

Вероятность осцилляций



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Плоская волна

$$P_{e\mu}(L/E) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m^2 L}{4E_\nu}$$

Волновой пакет

$$P_{e\mu}(L/E) = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left(1 - \exp \left[- (L/L_{coh})^2 - 1/4 (\Delta m^2 / \sigma_{m^2}) \right] \cos \frac{\Delta m^2 L}{2E_\nu} \right)$$

Вероятность осцилляций

С волновым пакетом



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова

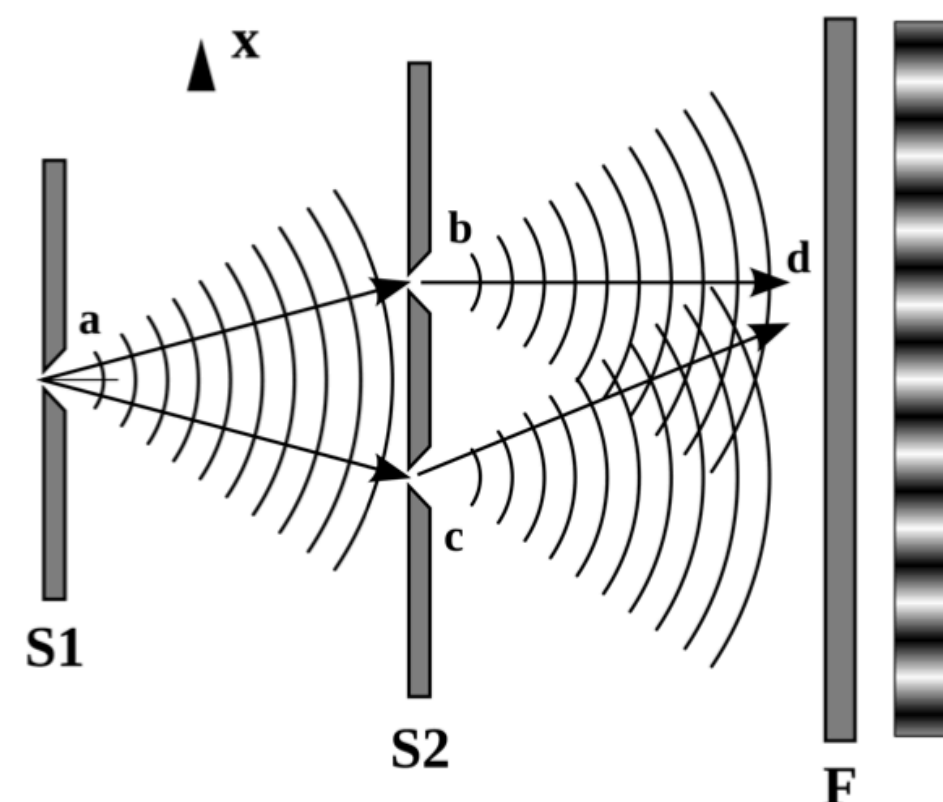
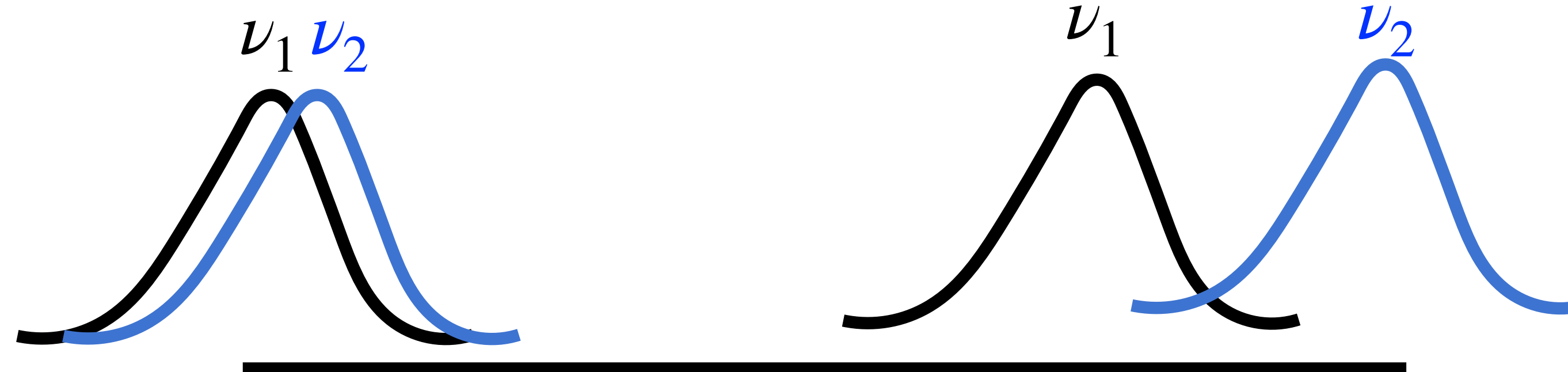


Объединенный
институт ядерных
исследований

$$P_{e\mu}(L/E) = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left(1 - \exp \left[- (L/L_{coh})^2 - 1/4 (\Delta m^2 / \sigma_{m^2}) \right] \cos \frac{\Delta m^2 L}{2E_\nu} \right)$$

$$L_{coh} = L_{osc} \frac{p}{\sqrt{2\pi}\sigma_p}$$

$$\sigma_{m^2} = 2\sqrt{2}p\sigma_p$$





Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Актуальные вопросы

В нейтринной физике

Актуальные вопросы

- Значение фазы δ , ответственной за нарушение CP-четности
- Упорядочивание масс нейтрино (иерархия масс)
- Масса легчайшего нейтрино
- Тождественно ли нейтрино своей анти-частице?
- Источники астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Лекции Л. Колупаевой

Лекции М. Гончара

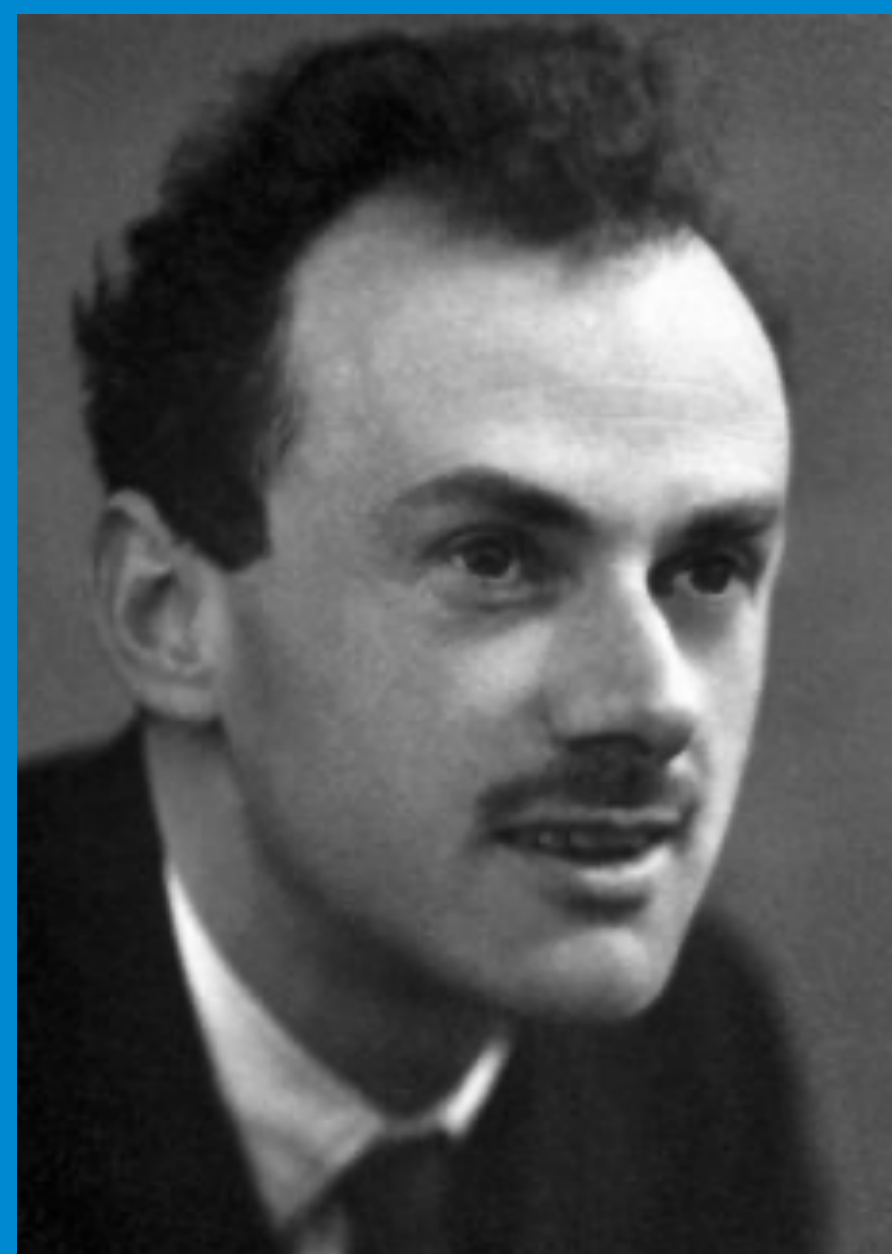
Лекции Д. Заборова



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзержинского



Объединенный
институт ядерных
исследований



VS



Дирак или Майорана?

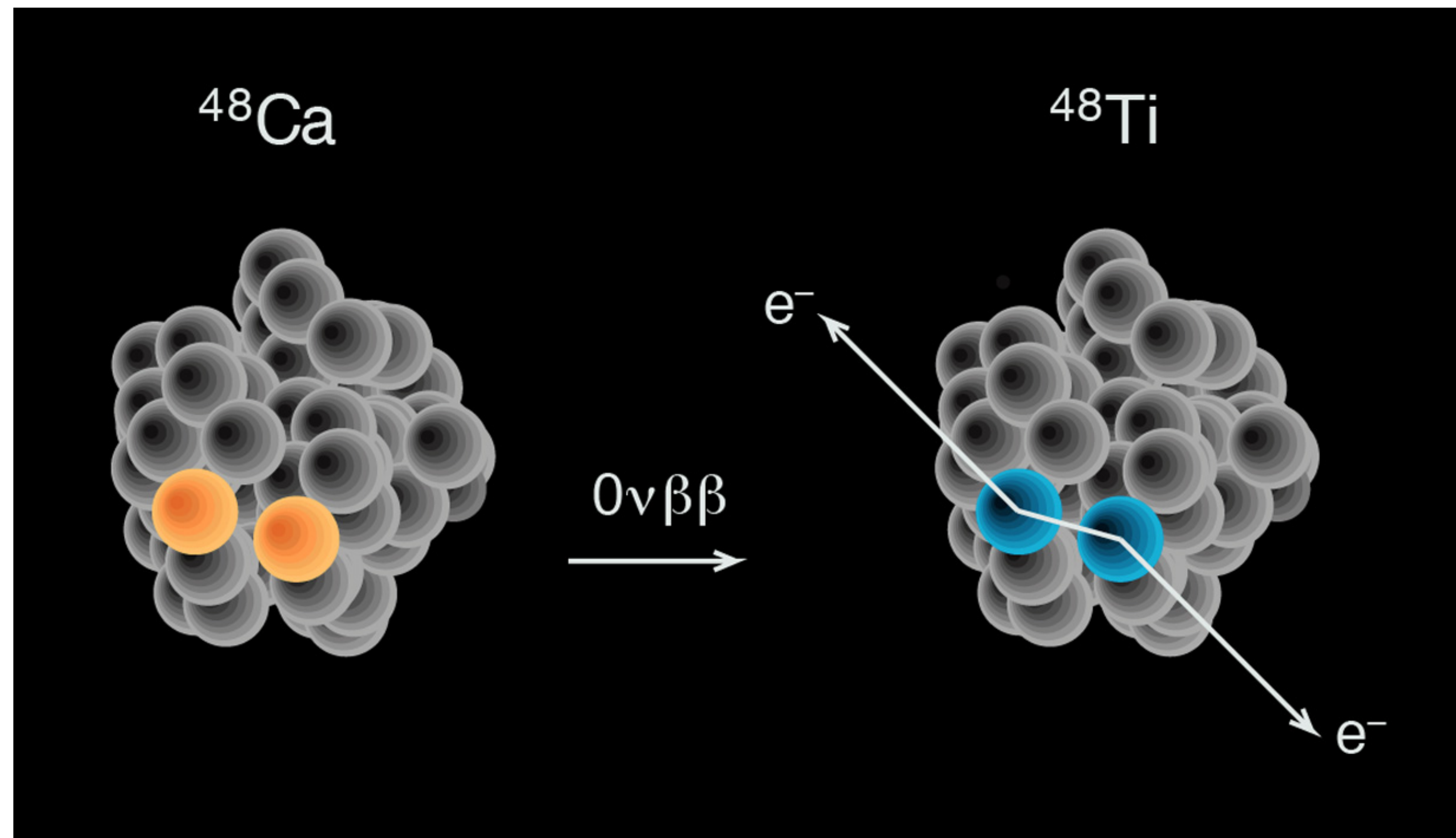


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

- Вероятность распада пропорциональна $m_{\beta\beta} = \left| \sum_i V_{ei}^2 m_i \right|$



Дирак или Майорана?

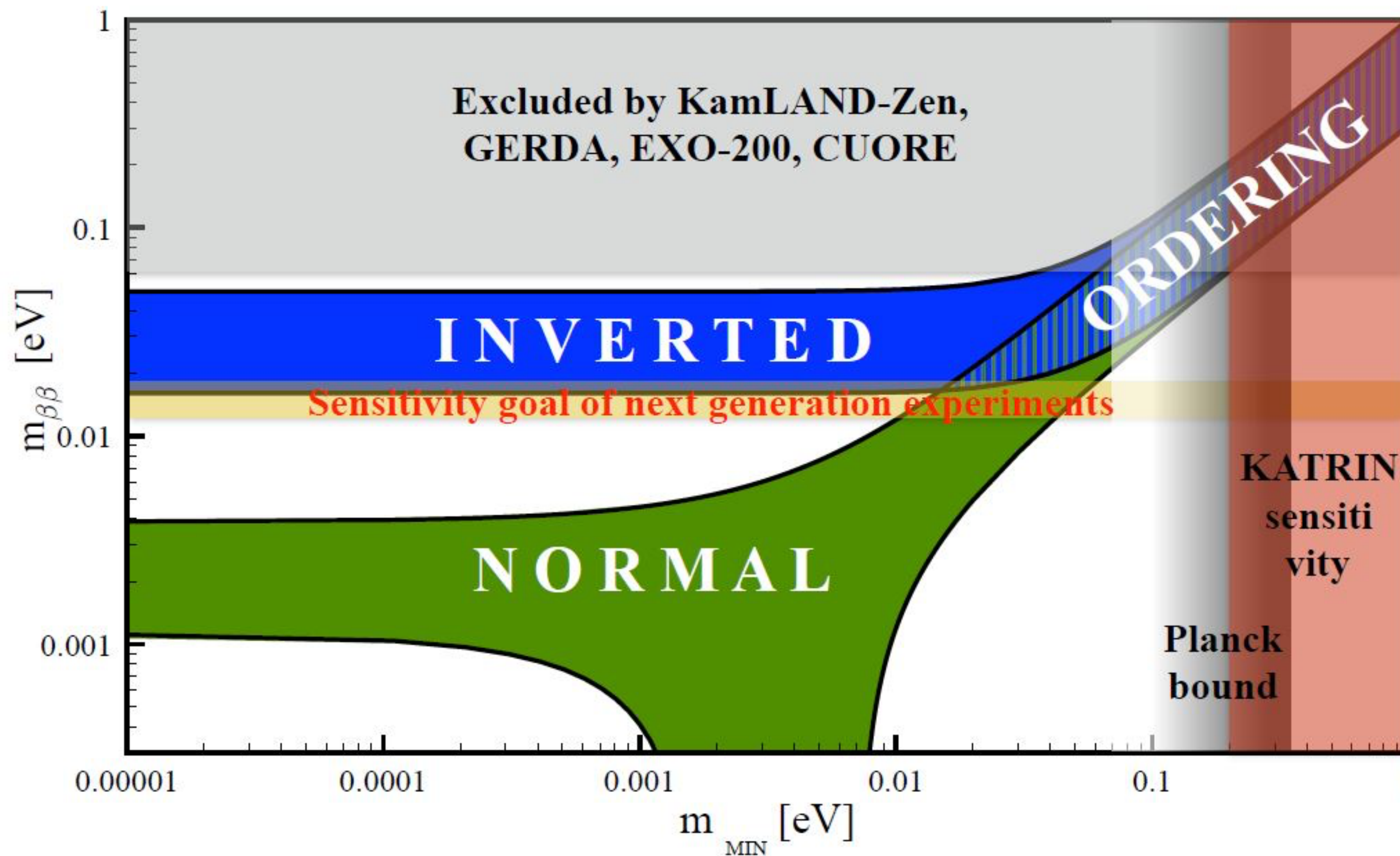
Чувствительность экспериментов



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований





Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Масса нейтрино

Эксперимент KATRIN

Масса нейтрино

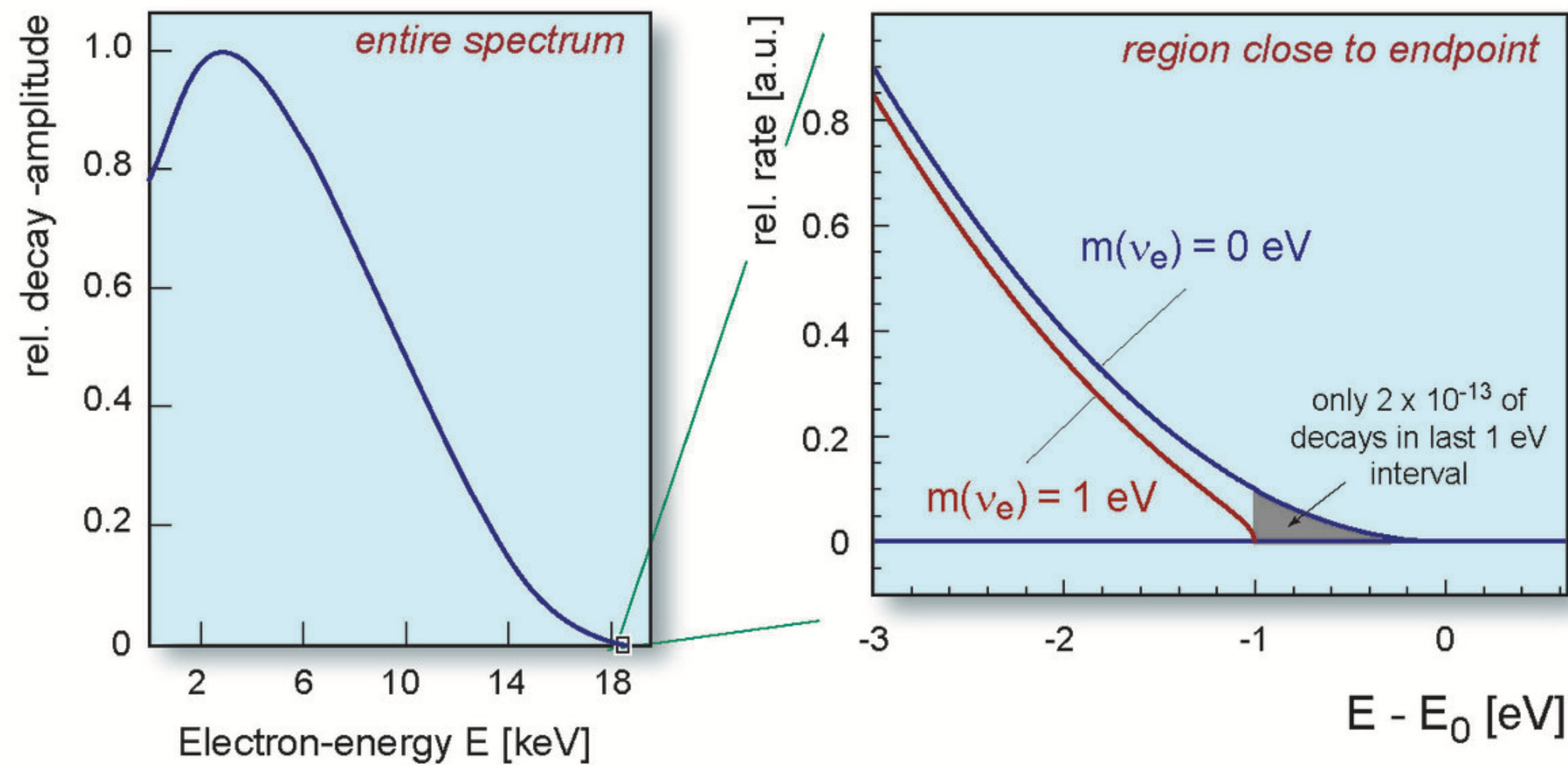
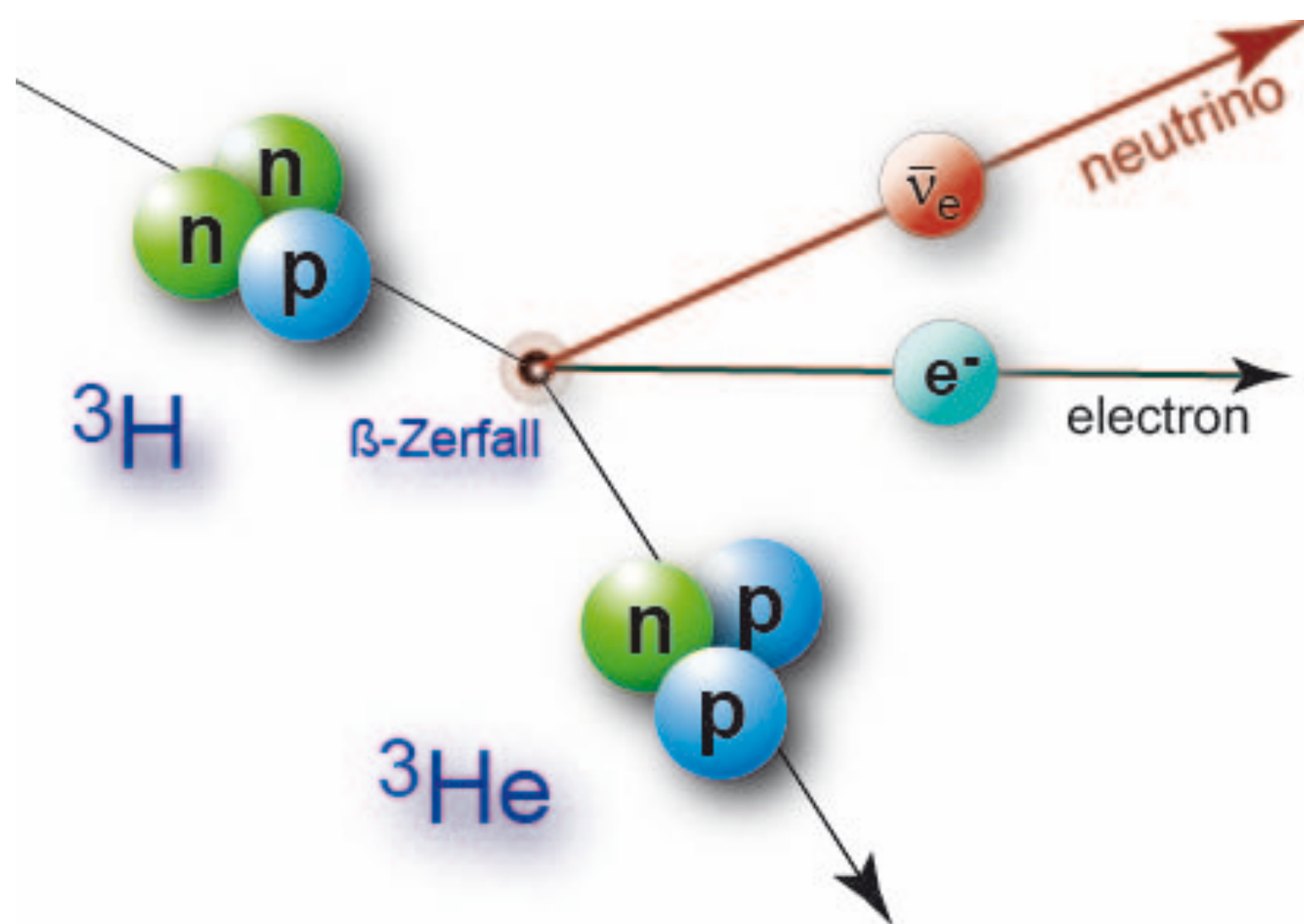


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

- Масса легчайшего нейтрино не определяется из экспериментов, исследующих осцилляции нейтрино
- Массу нейтрино можно измерить, изучая кинематические распределения в слабых распадах частиц. ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$



- Чувствительность к комбинации

$$m_e^2 \equiv \sum_i |V_{ei}|^2 m_i^2$$

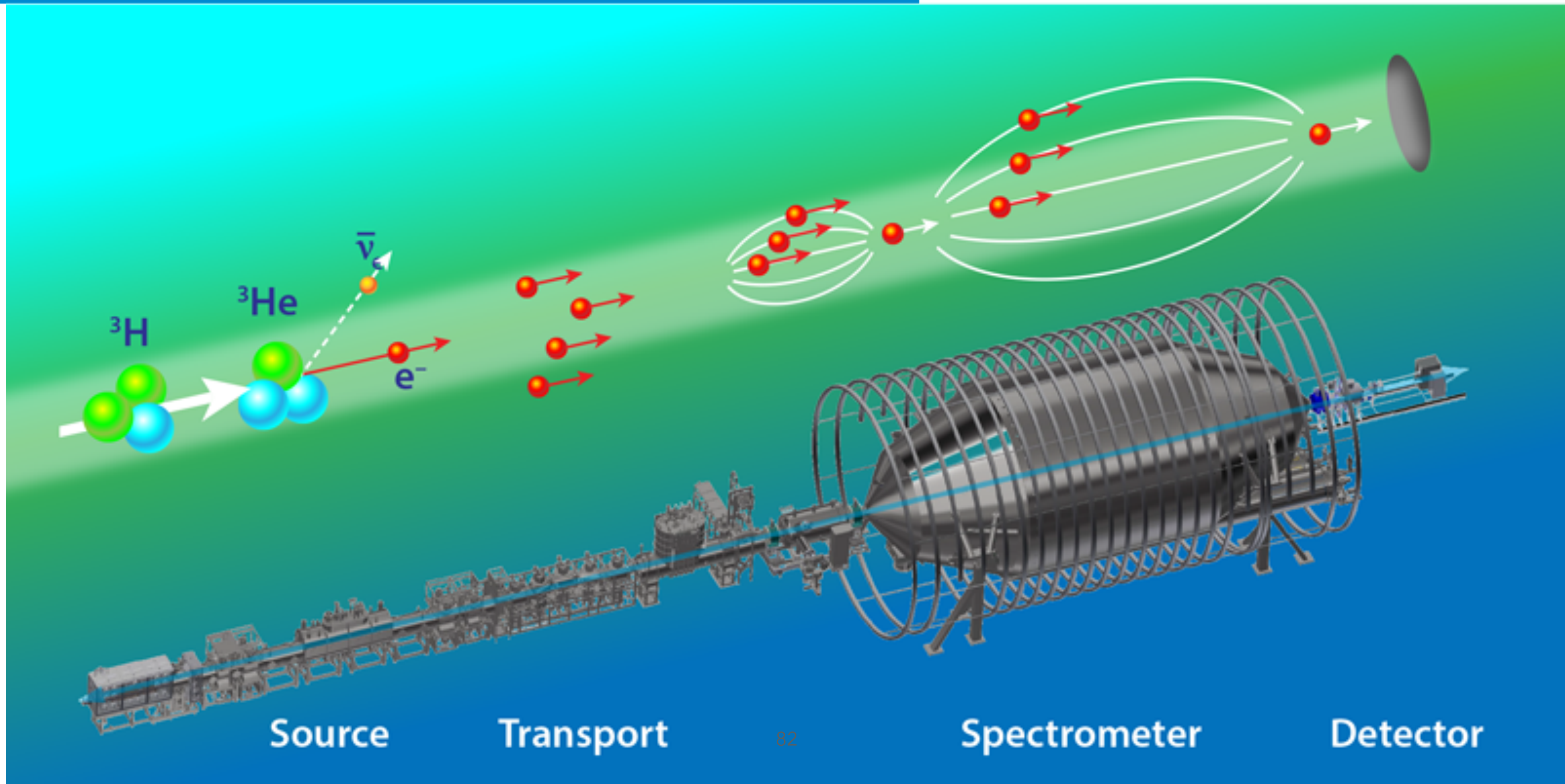
Эксперимент КАТРИН



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований



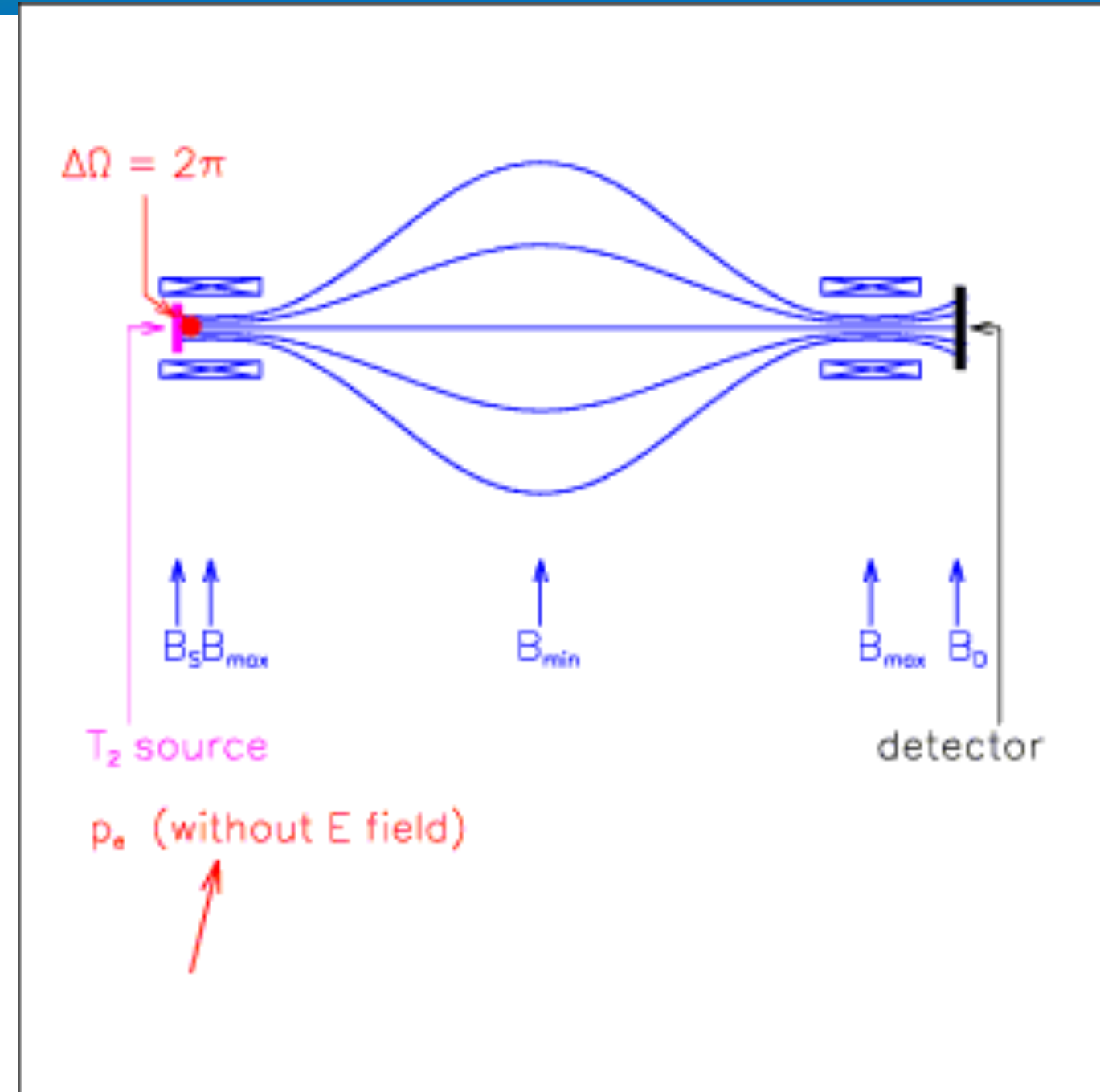
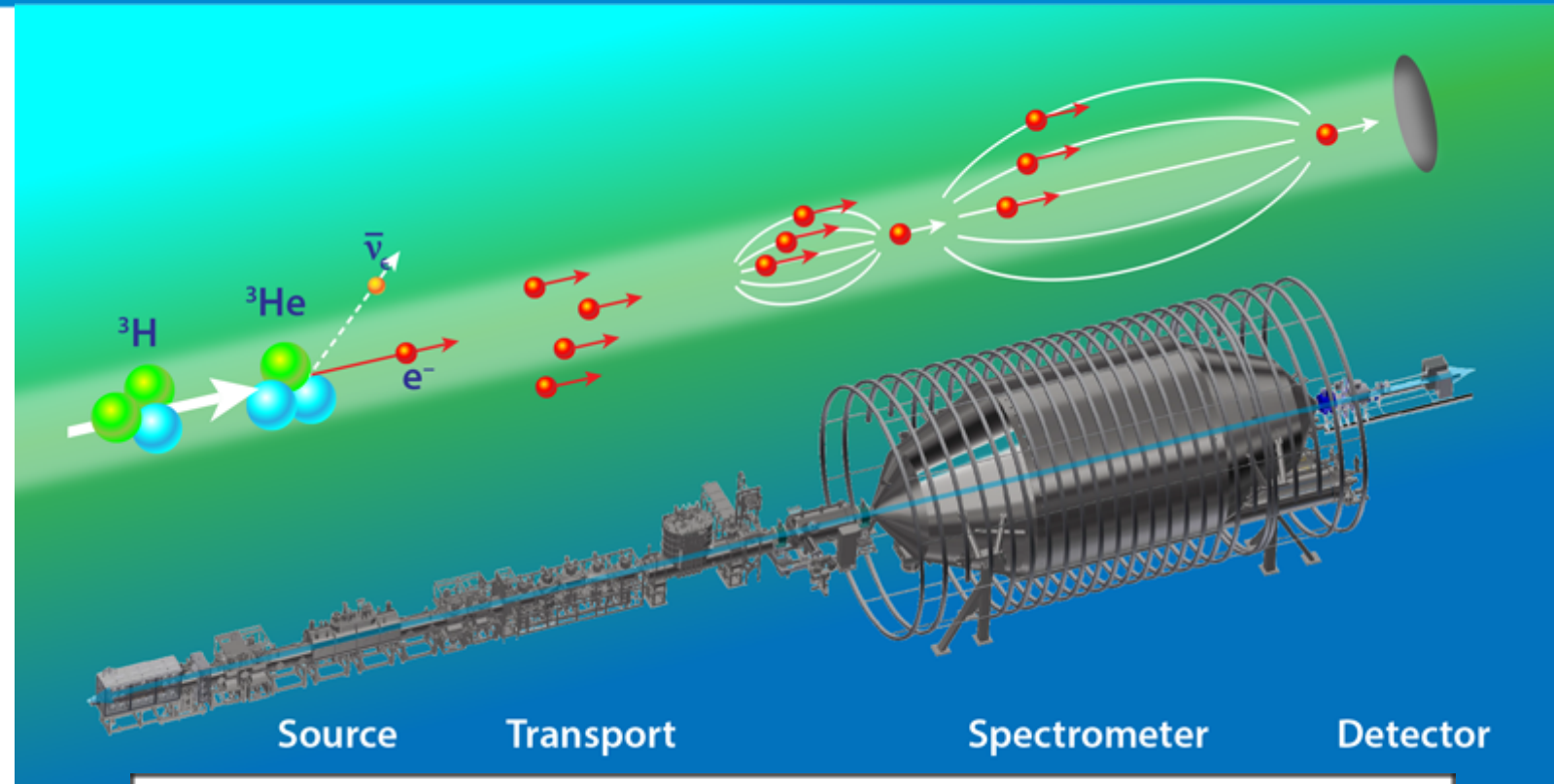
Эксперимент КАТРИН



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований



Эксперимент KATRIN



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзюбелова



Объединенный
институт ядерных
исследований

○ Чувствительность к массе нейтрино

$$m_e < 0.8 \text{ эВ}$$

сегодня

$$m_e < 0.5 \text{ эВ}$$

в конце 2023

$$m_e < 0.2 - 0.3 \text{ эВ}$$

2025





Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзержинского



Объединенный
институт ядерных
исследований

Реликтовые нейтрино

Эксперимент PTOLEMY

Реликтовые нейтрино



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзержинского



Объединенный
институт ядерных
исследований

- Реликтовые нейтрино видели самую юную Вселенную - младше 1 секунды.
- Плотность числа нейтрино для каждого массового состояния и спиновой степени свободы сегодня равна $56 / \text{см}^3$
- Энергия нейтрино порядка 10^{-4} эВ, что соответствует температуре $T_\nu = 1.945\text{K}$
- Тот, кто сможет зарегистрировать реликтовые нейтрино, получит НП.
- Хороший кандидат в нобелевские лауреаты - коллаборация PTOLEMY

Princeton Tritium Observatory for Light, Early-Universe, Massive-Neutrino Yield

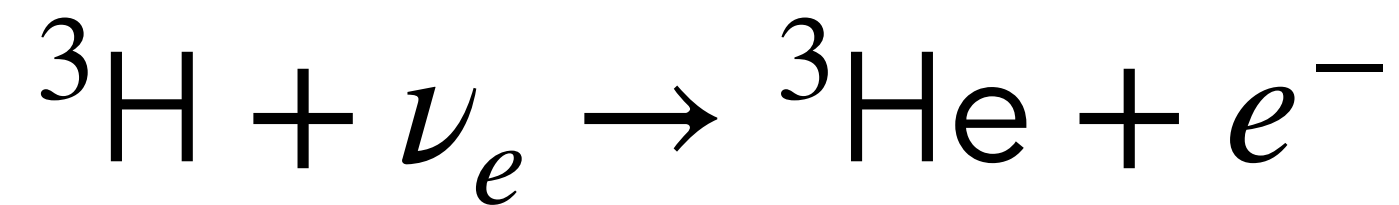


Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова

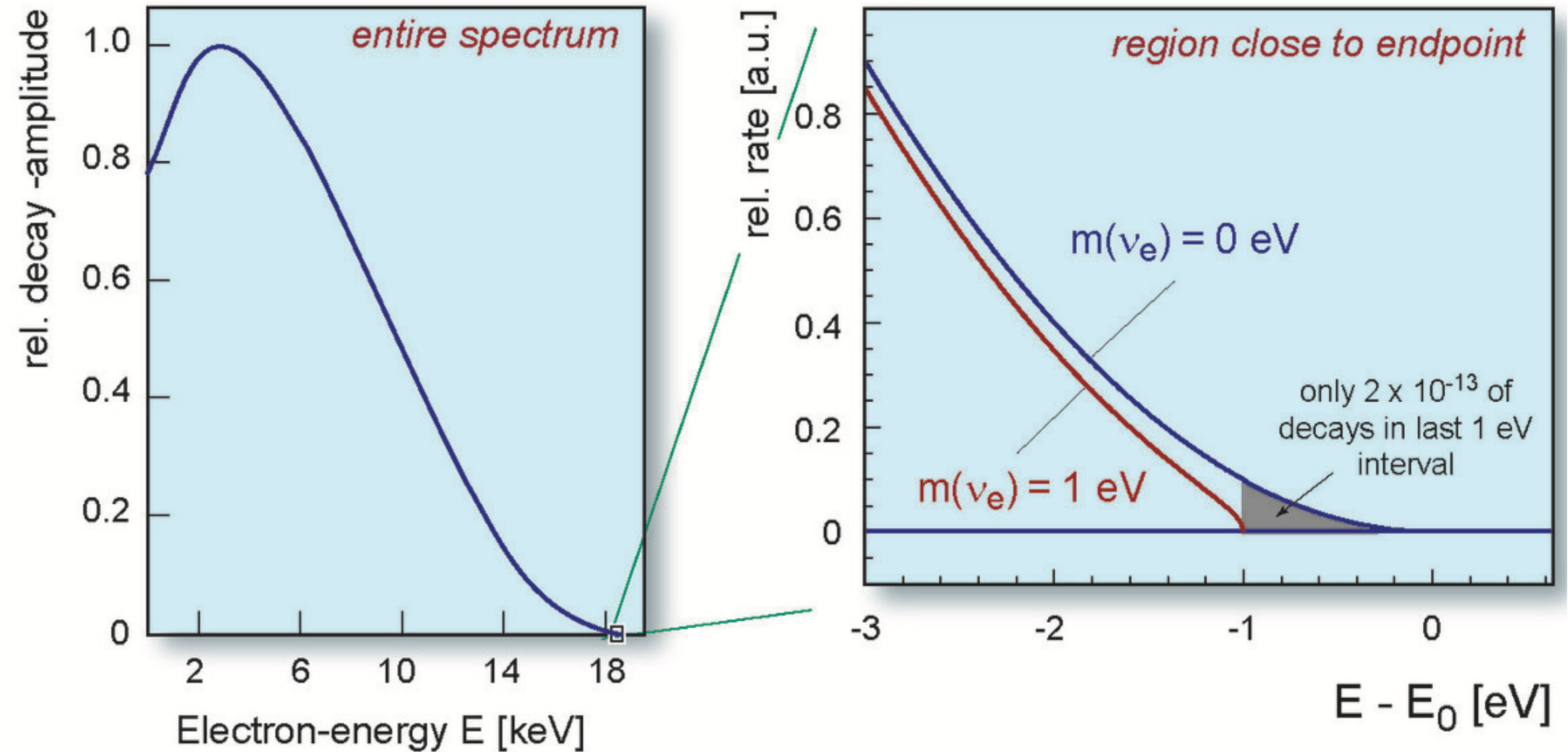
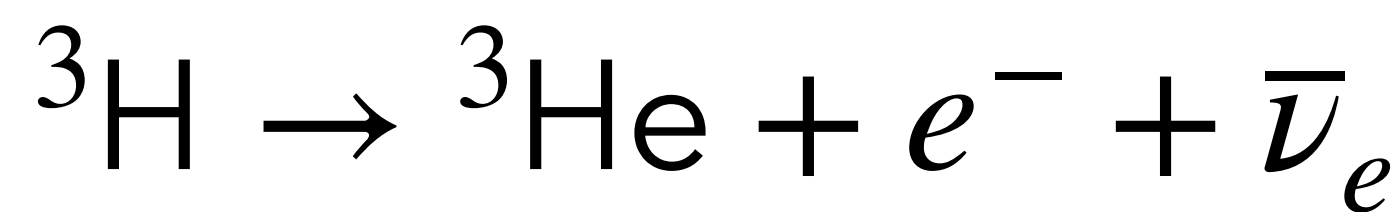


Объединенный
институт ядерных
исследований

Захват:



Распад:



Princeton Tritium Observatory for Light, Early-Universe, Massive-Neutrino Yield



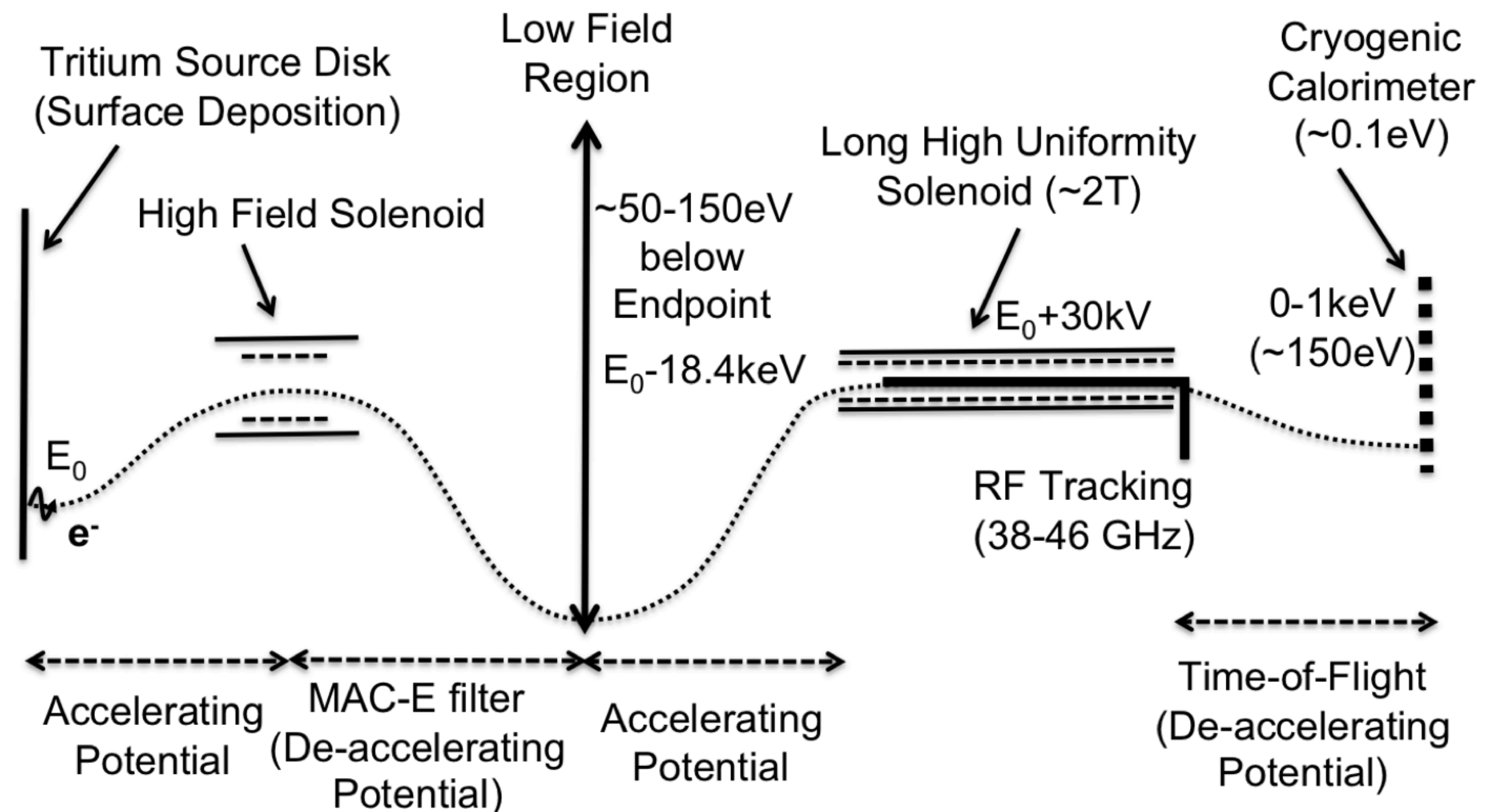
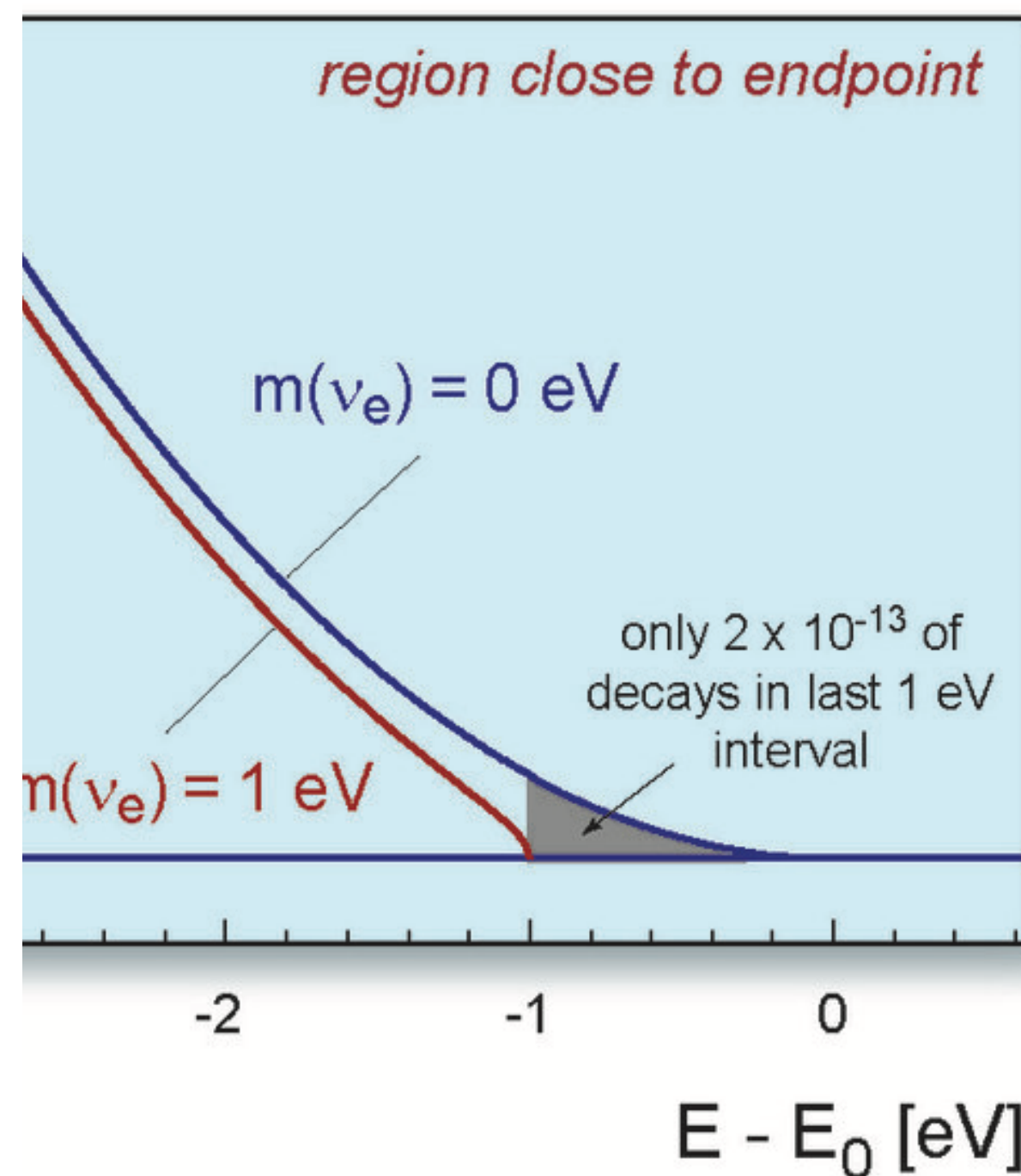
Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Главные трудности

- Энергетическое разрешение порядка 0.1 эВ
- Подавление фона от бета-распадов от трития, космики



Princeton Tritium Observatory for Light, Early-Universe, Massive-Neutrino Yield



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Главные трудности

- Энергетическое разрешение порядка 0.1 эВ
- Подавление фона от бета-распадов от трития, космики
- 100 граммов трития на площади 100 м²
- MAC-E фильтр
- Криогенная калориметрия
- RF трекинг
- Время-пролетная система

