

Космические лучи

Сергей Троицкий
(Институт ядерных исследований РАН)

Сибирский федеральный университет,

1-3 декабря 2015 г.

в рамках программы сотрудничества СФУ и компании «En+ Group»

Космические лучи

краткое повторение первых двух дней

0. Введение

1. Прямая регистрация:

солнечные

и галактические

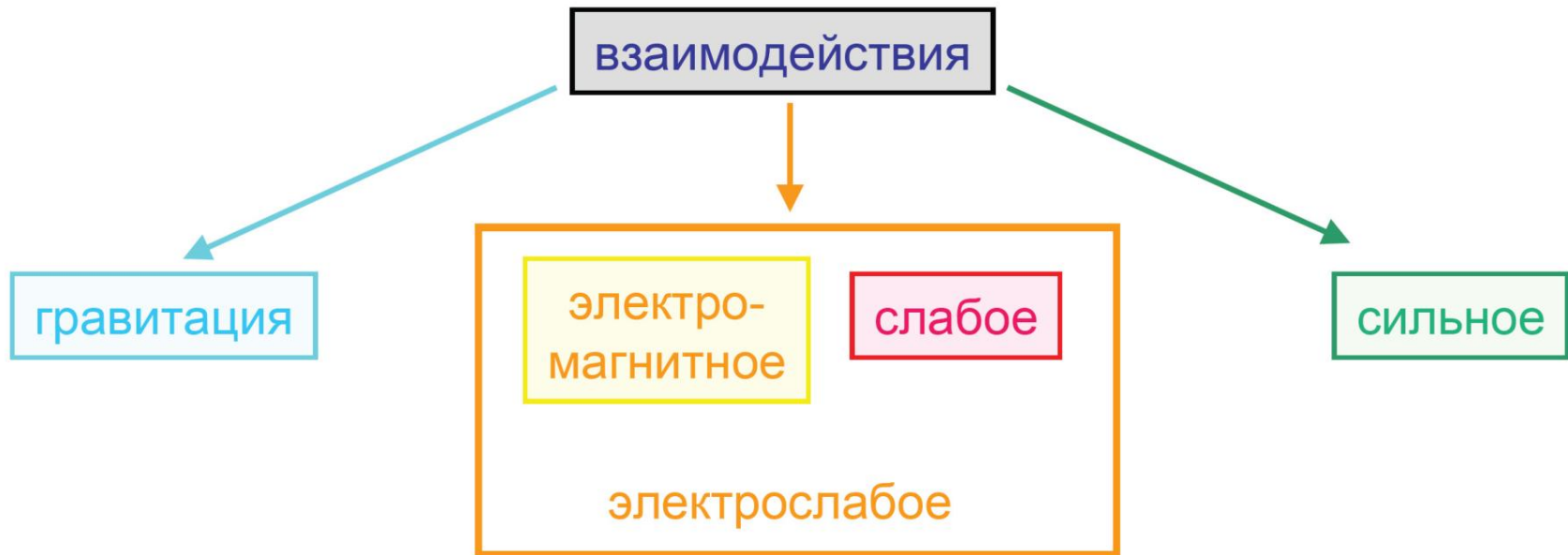
2. Косвенная регистрация:

широкие атмосферные ливни

Космические лучи

3. Нейтрино

Мир частиц и взаимодействий: силы между частицами



Мир частиц и взаимодействий: силы между частицами

слабое

$$\sim e^{-A R}$$

сильное

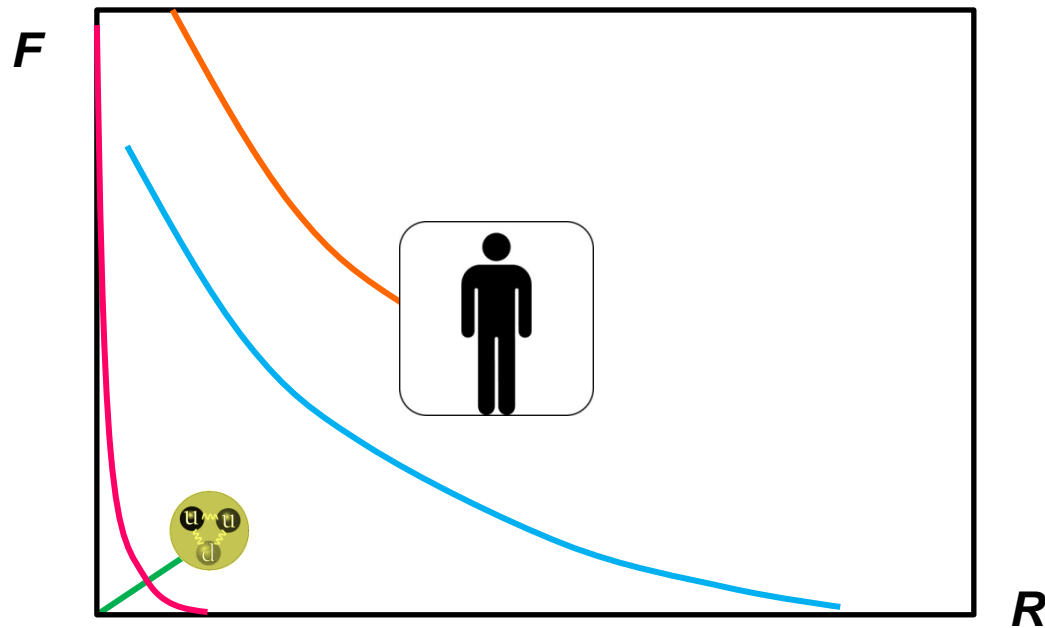
$$\sim R$$

электро-
магнетизм

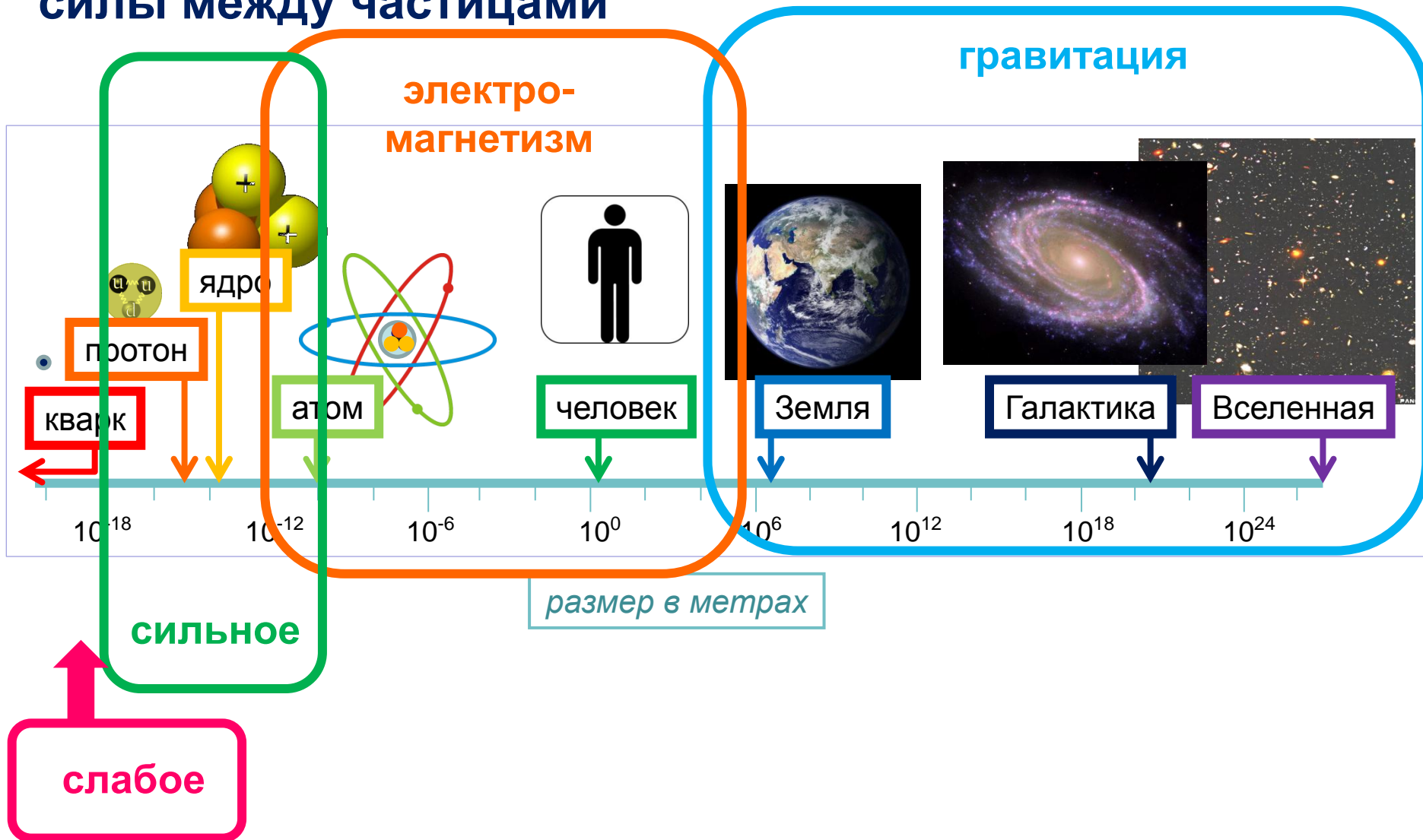
$$\sim 1/R^2$$

гравитация

$$\sim 1/R^2$$



Мир частиц и взаимодействий: силы между частицами



Мир частиц и взаимодействий: элементарные частицы

ν_T ν_μ ν_e

нейтрино

τ μ электрон

заряженные лептоны

ЛЕПТОНЫ

t c u

«верхние» кварки

b s d

«нижние» кварки

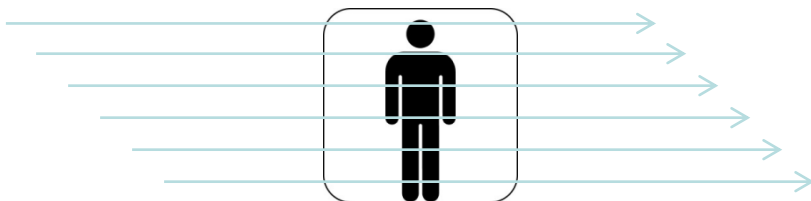
кварки

частицы – переносчики взаимодействий:
электрослабого: фотон, W^+ , W^- , Z
сильного: глюоны

бозон Хиггса

Нейтрино среди частиц

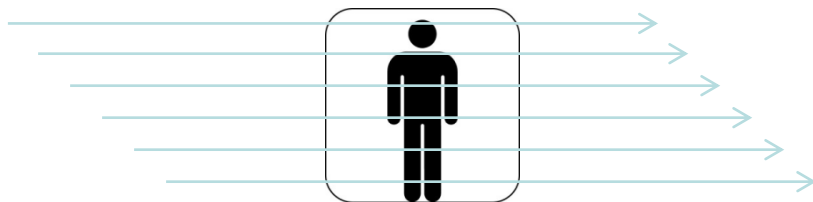
□ слабое взаимодействие



*каждую секунду через меня
пролетают незамеченными
~ 10^{14} штук нейтрино...*

Нейтрино среди частиц

□ слабое взаимодействие



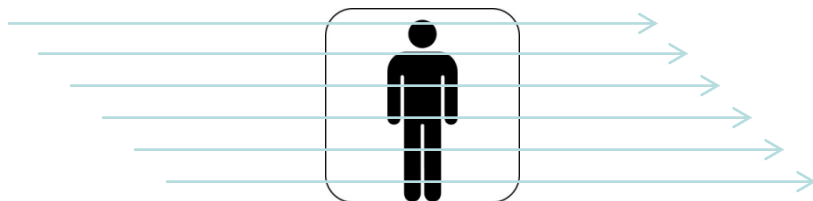
*каждую секунду через меня
пролетают незамеченными
~ 10^{14} штук нейтрино...*



1000000000000000
сто триллионов
каждую секунду
через каждого из нас

Нейтрино среди частиц

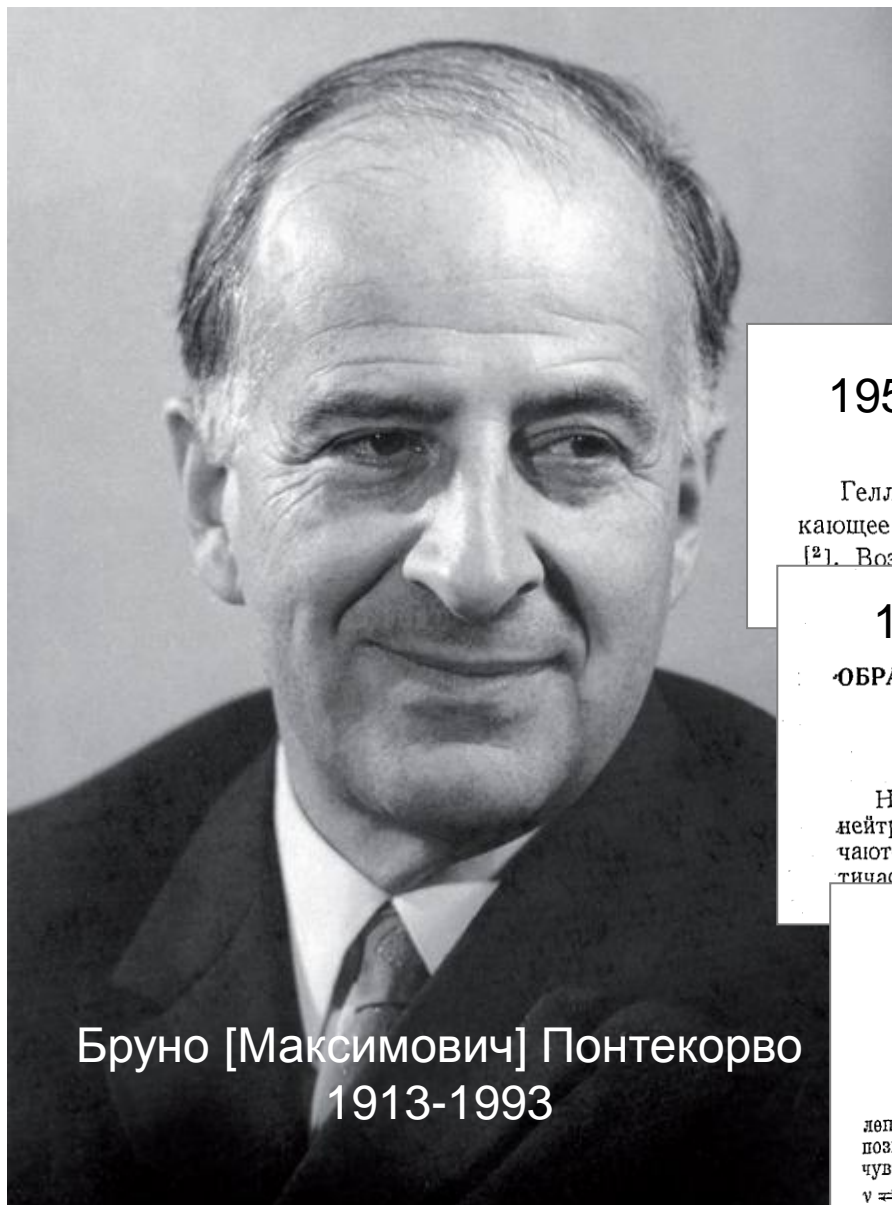
□ слабое взаимодействие



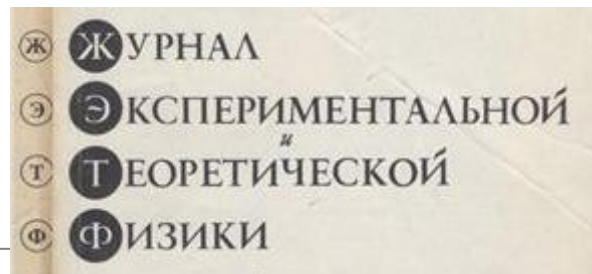
*каждую секунду через меня
пролетают незамеченными
~**10¹⁴** штук нейтрино...*

*“Пусть не поймаешь нейтрино за бороду и не посадишь в пробирку.
Было бы здорово, чтоб Понтекорво взял его крепче за шкурку!”*

[В.С. Высоцкий, 1964]



Бруно [Максимович] Понтекорво
1913-1993



1957 МЕЗОНИЙ И АНТИМЕЗОНИЙ

Б. Понтекорво

Гелл-Манн и Пайс [1] впервые указали на интересное следствие, вытекающее из того факта, что K^0 и \bar{K}^0 не являются тождественными частицами [2]. Возможность превращения $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$, вызываемого слабыми взаимодей-

1958

ОБРАТНЫЕ β -ПРОЦЕССЫ И НЕСОХРАНЕНИЕ ЛЕПТОННОГО ЗАРЯДА

Б. Понтекорво

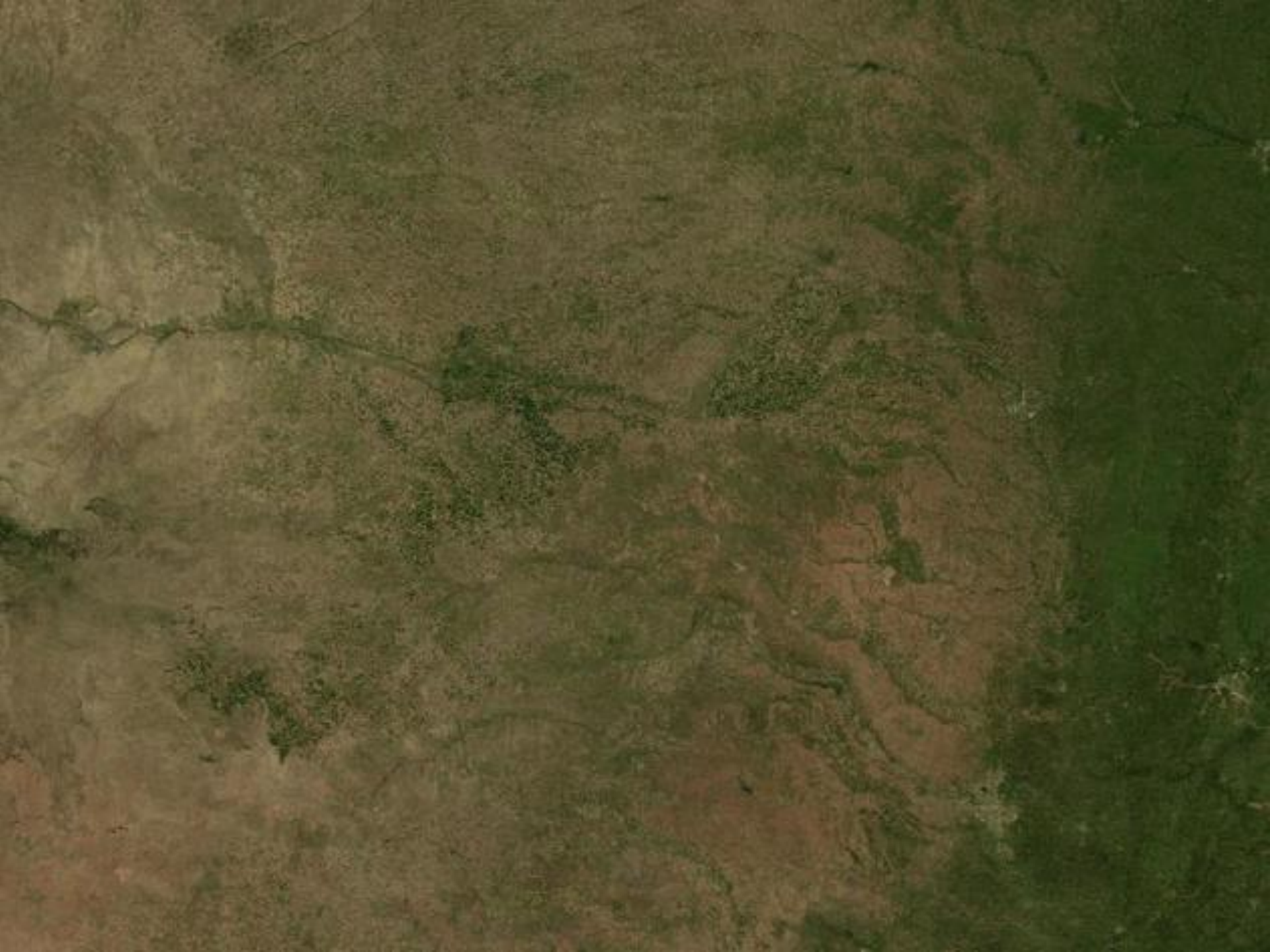
Недавно обсуждался вопрос [1] о том, существуют ли другие «смешанные» нейтральные частицы, помимо K^0 -мезонов [2], т. е. частицы, которые отличаются от соответствующих античастиц, причем переходы частица — античастица не являются строго запрещенными. Отмечалось, что нейтрино

НЕЙТРИННЫЕ ОПЫТЫ И ВОПРОС О СОХРАНЕНИИ ЛЕПТОННОГО ЗАРЯДА

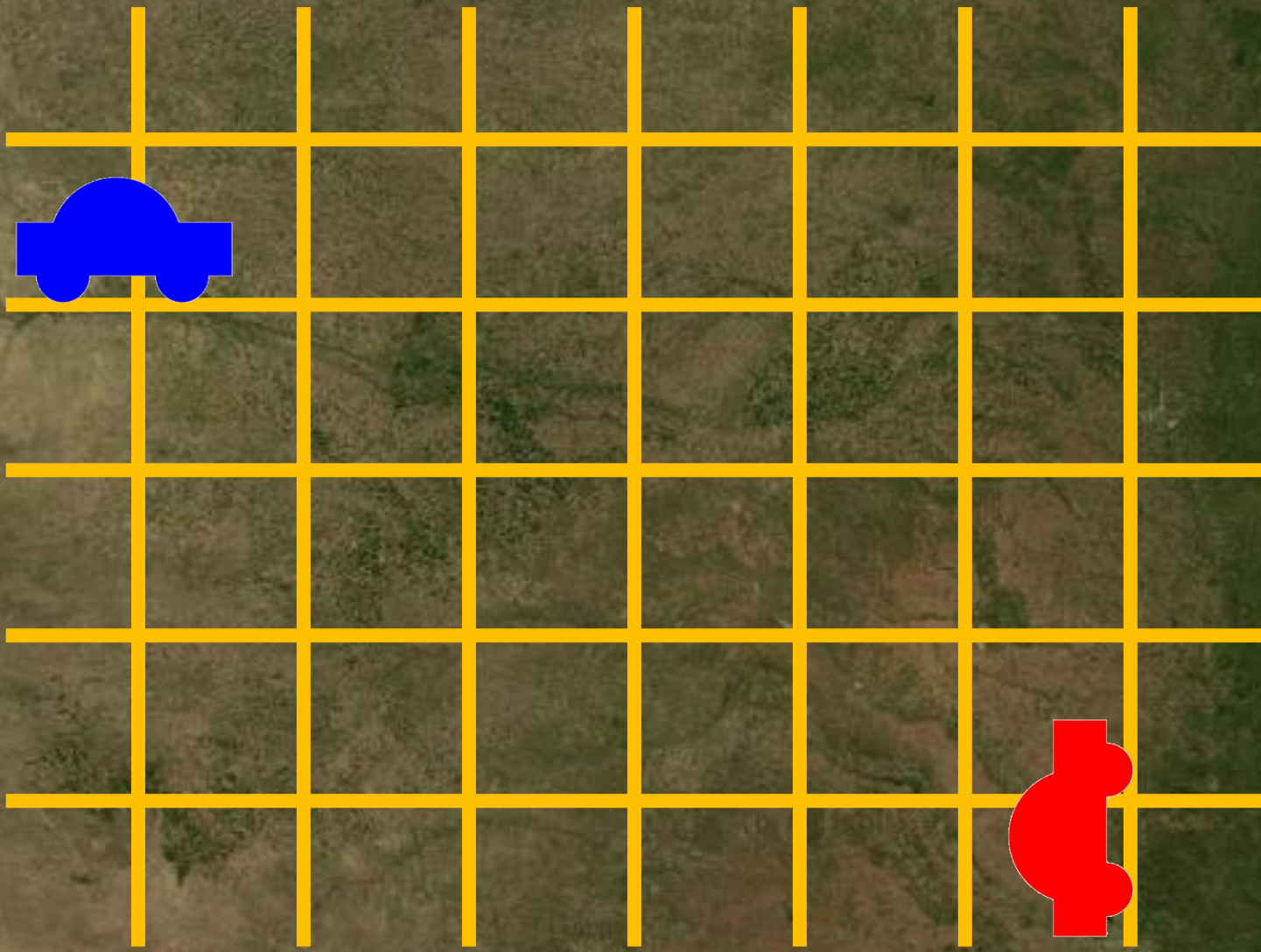
1967

Б. Понтекорво

Совместимые с экспериментальными данными возможные нарушения сохранения лептонного заряда — большие. В работе обсуждаются разные постановки опытов, позволяющие обнаруживать такие гипотетические нарушения. Показано, что самые чувствительные опыты — поиски процесса $\mu \rightarrow e + \gamma$ и особенно поиски осцилляций $\nu \rightleftharpoons \bar{\nu}$, $\nu_e \rightleftharpoons \nu_\mu$. Отличная от нуля масса нейтрино могла бы быть связана с нарушением PC и с электрическим (и магнитным) дипольным моментом нейтрино. Обсуждаются астрономические применения осцилляций $\nu \rightleftharpoons \bar{\nu}$.





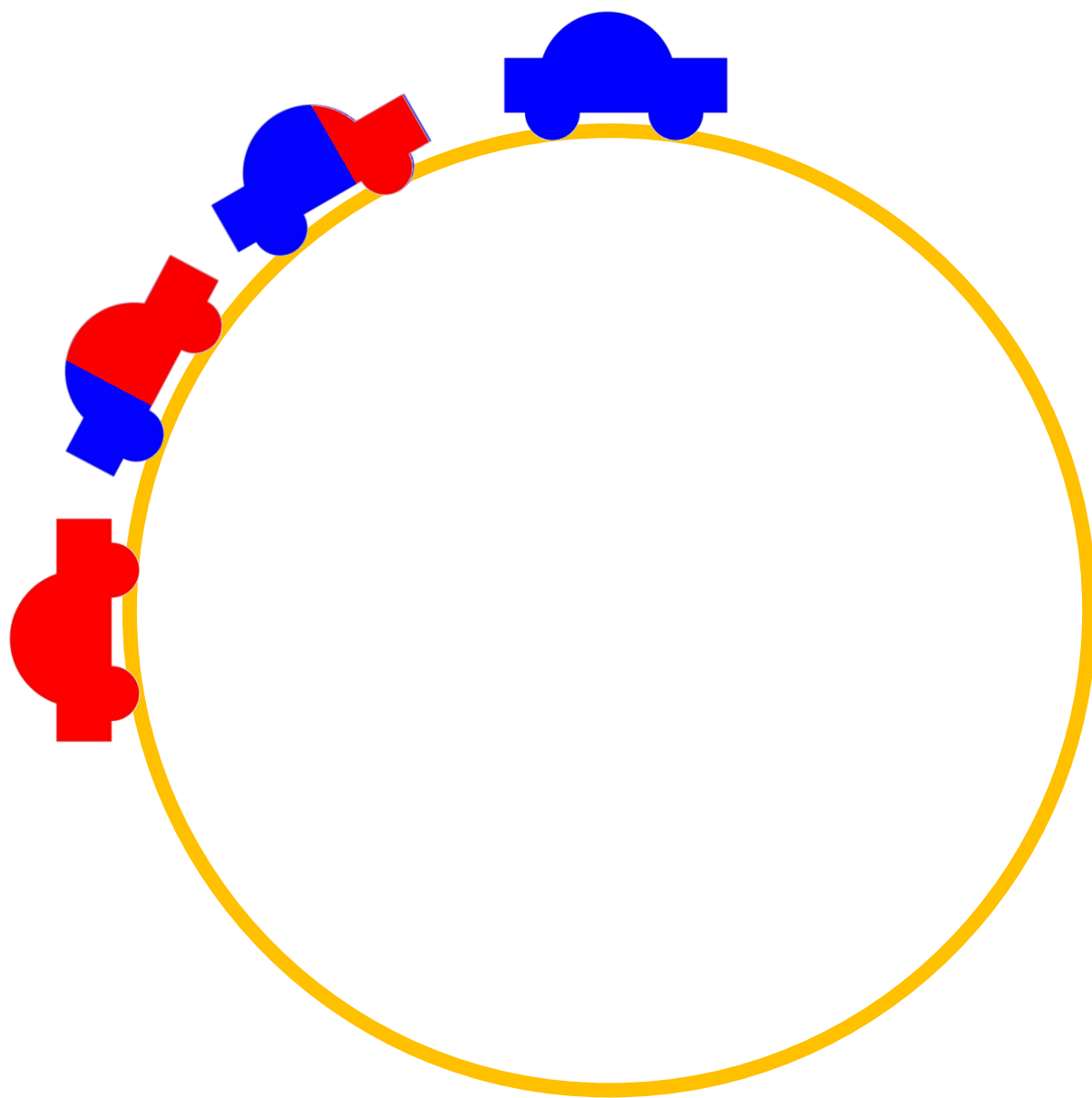


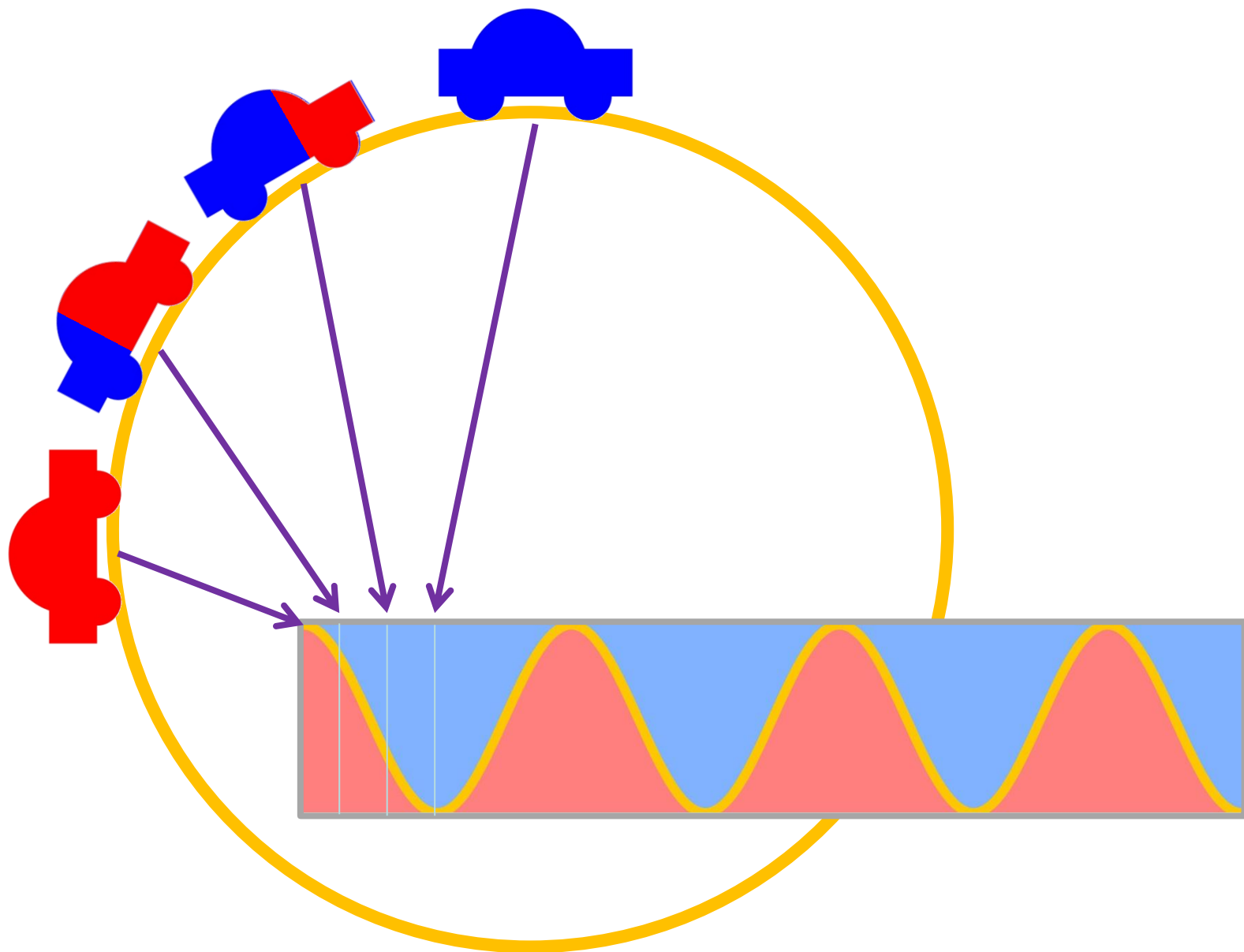


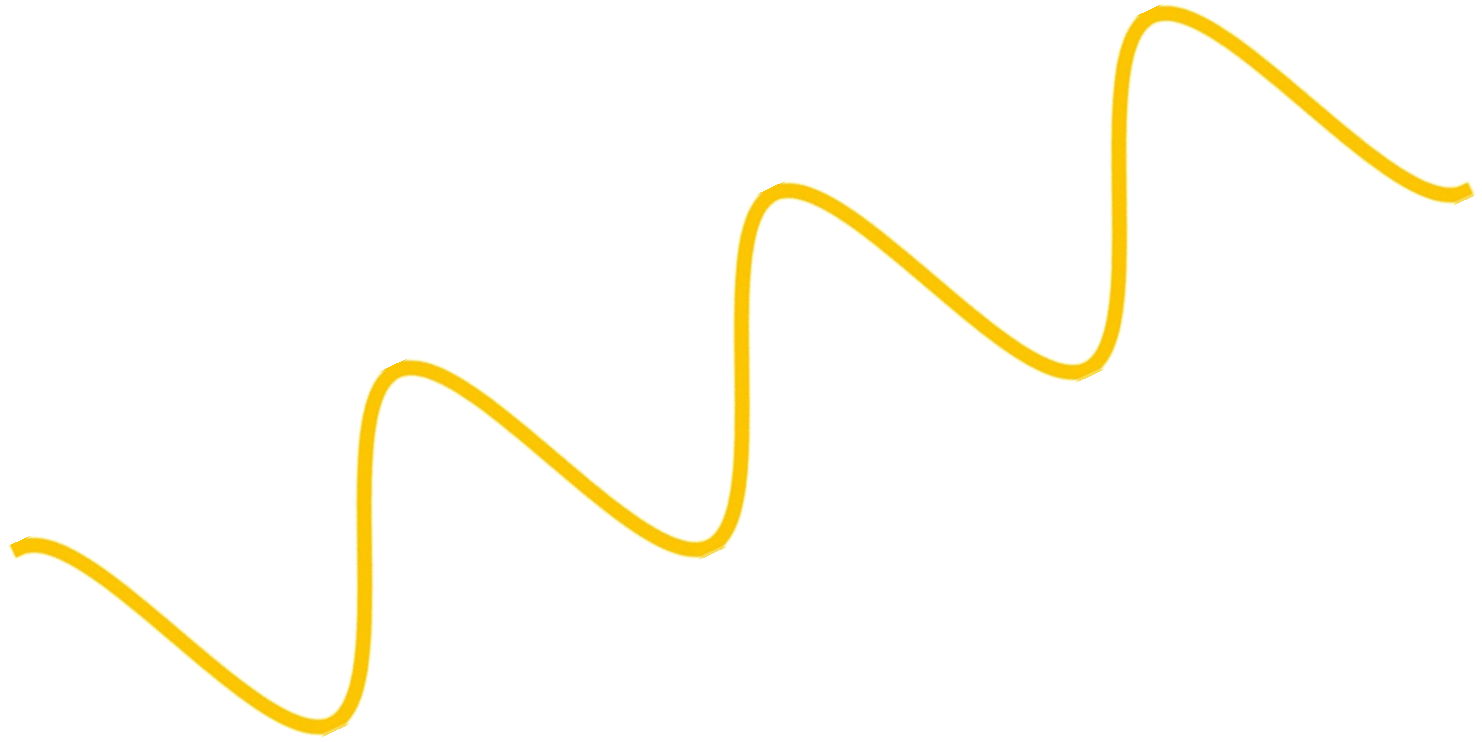




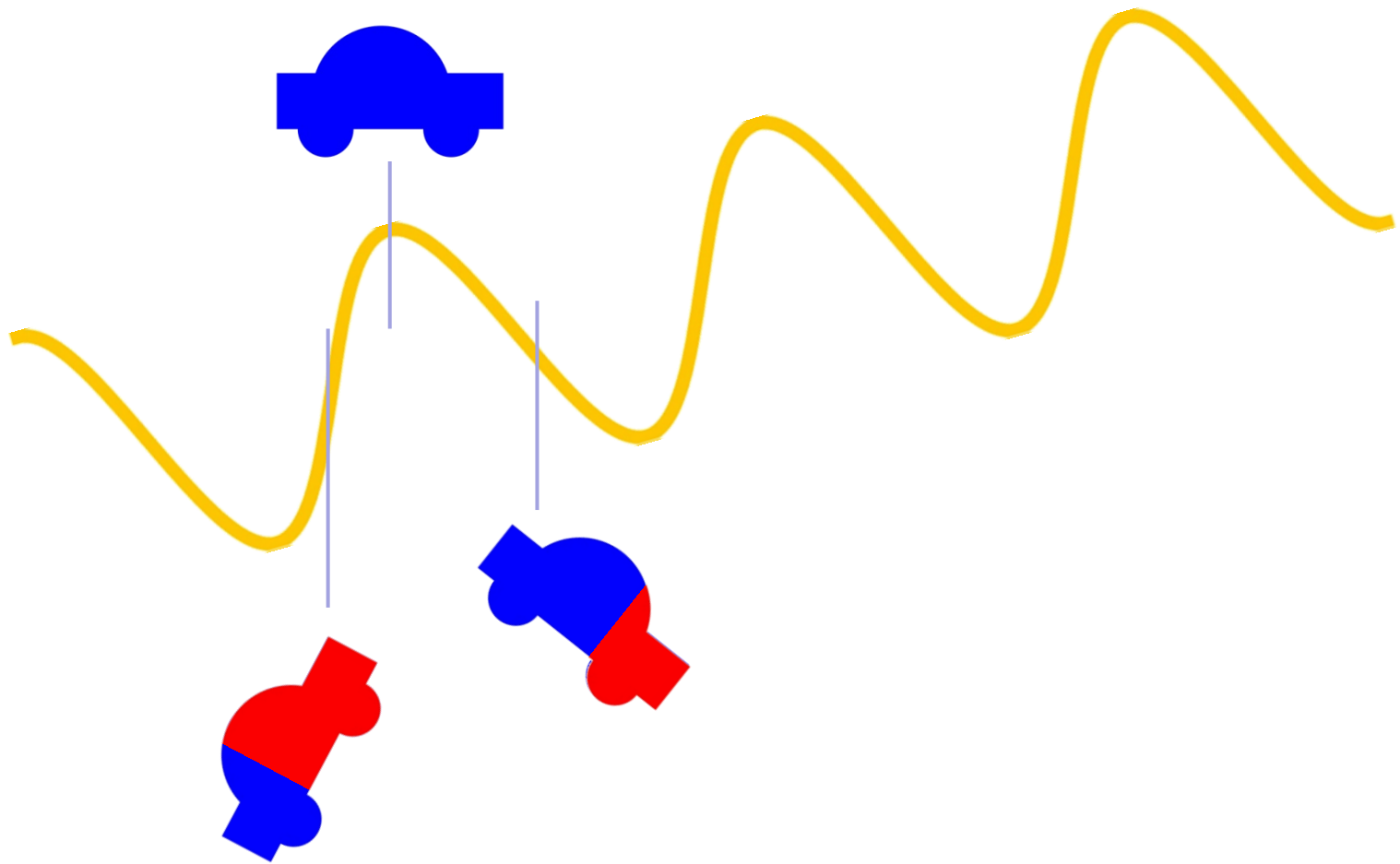


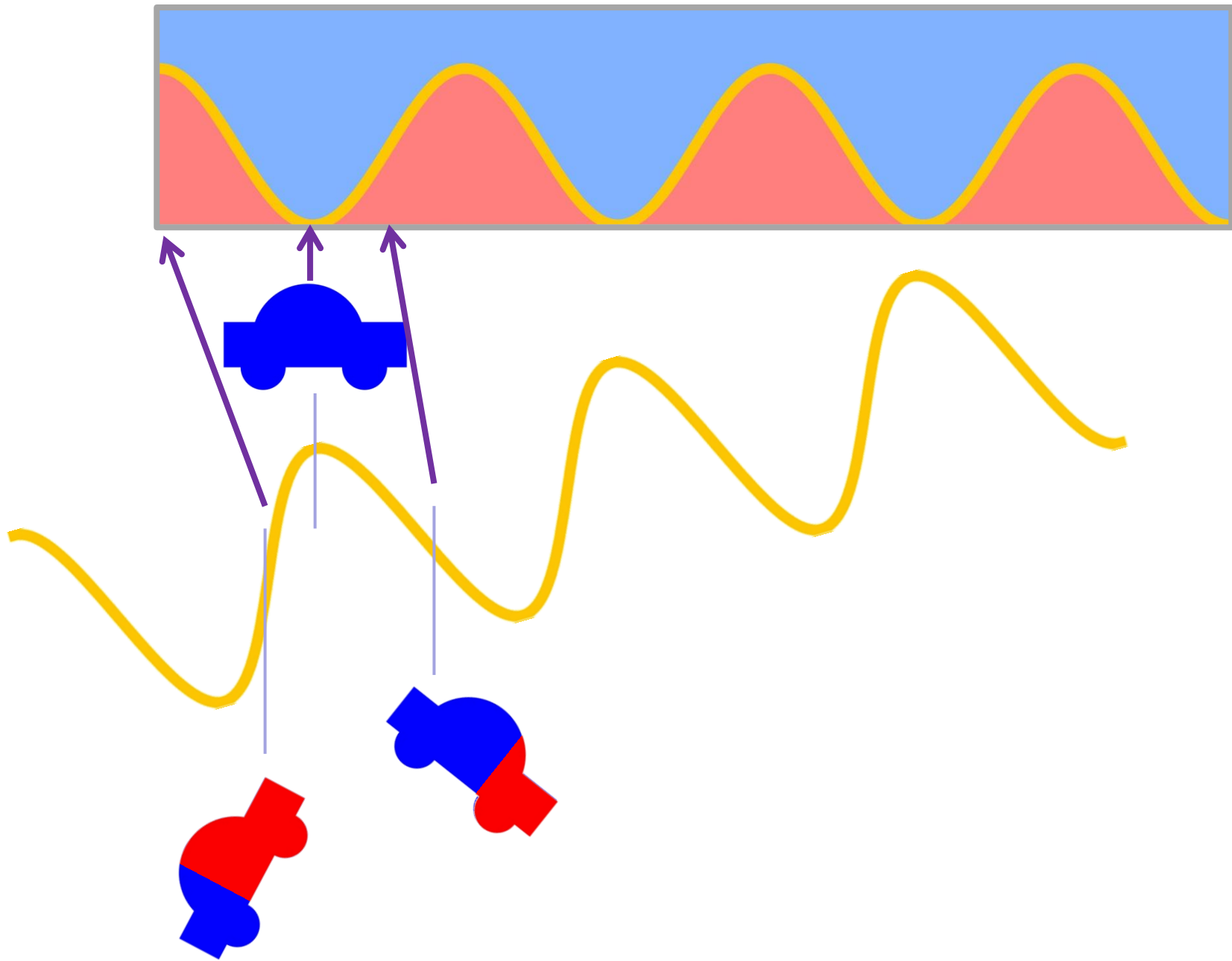


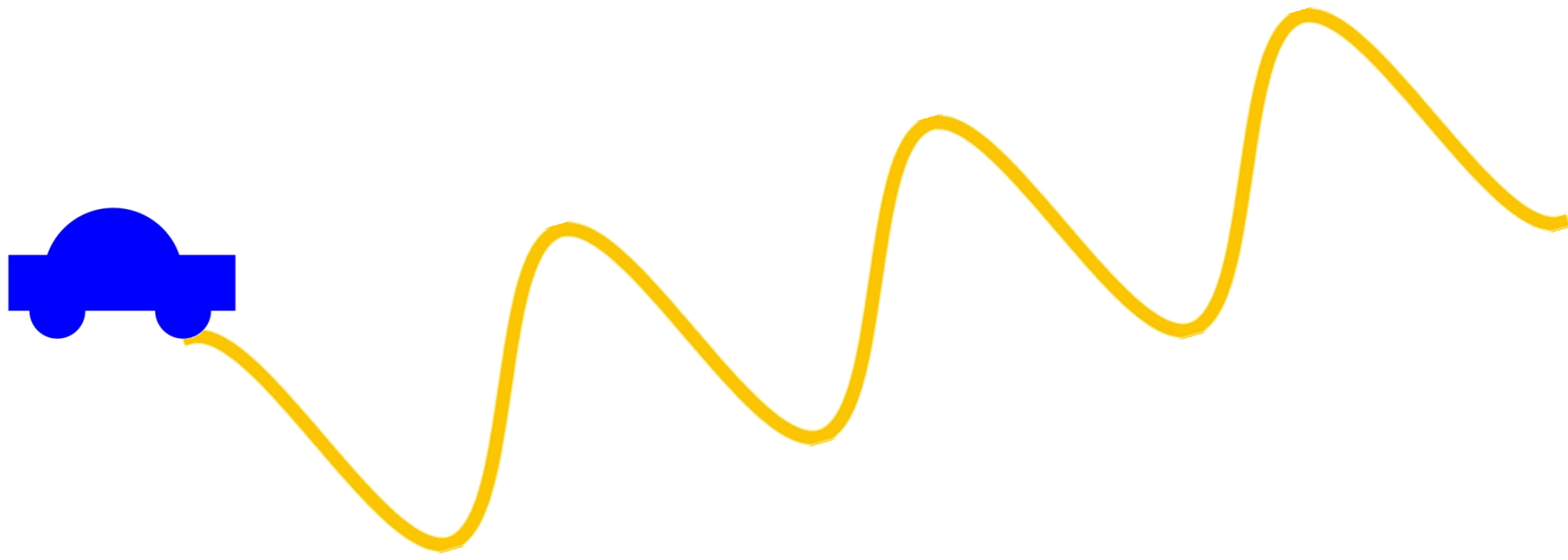
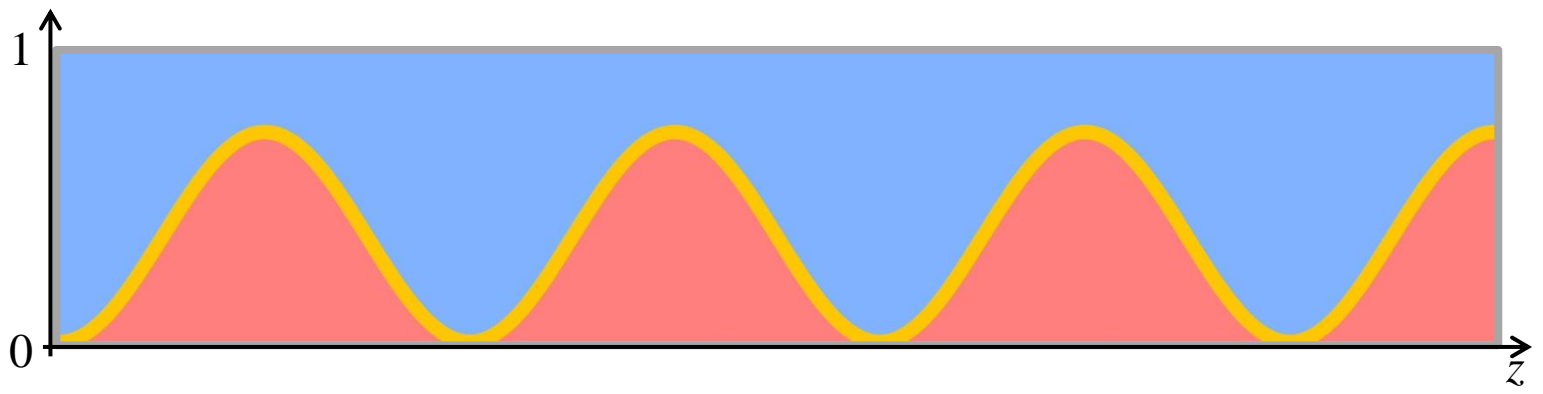


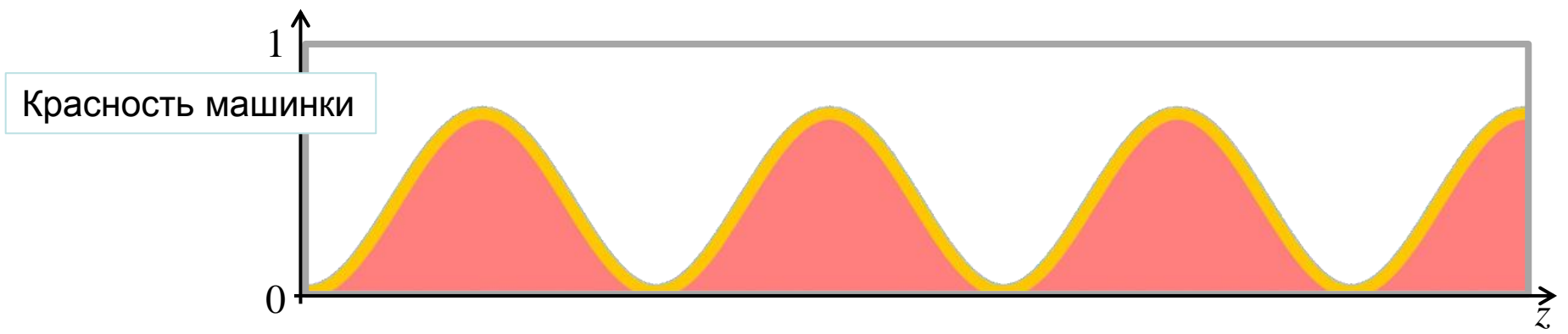




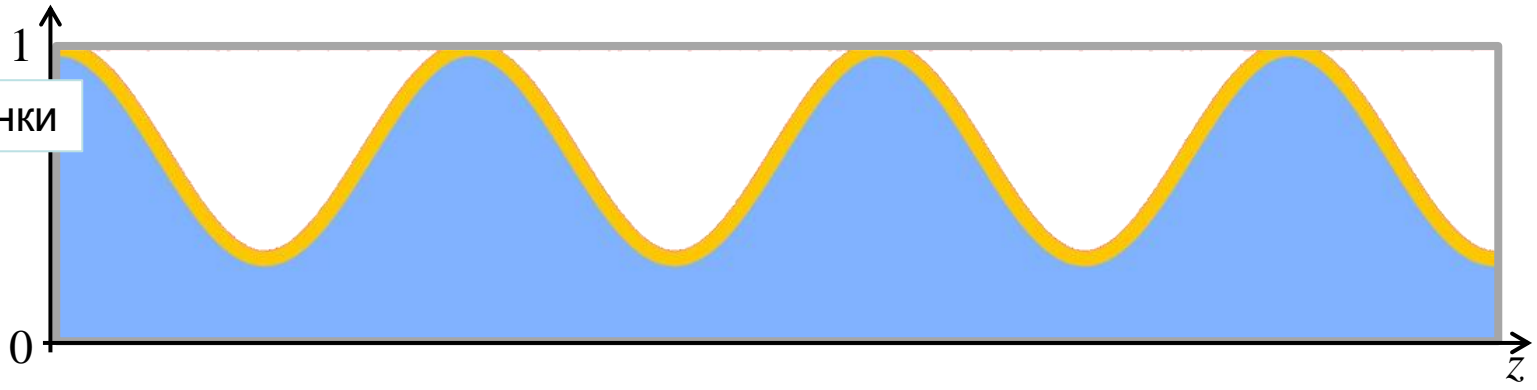


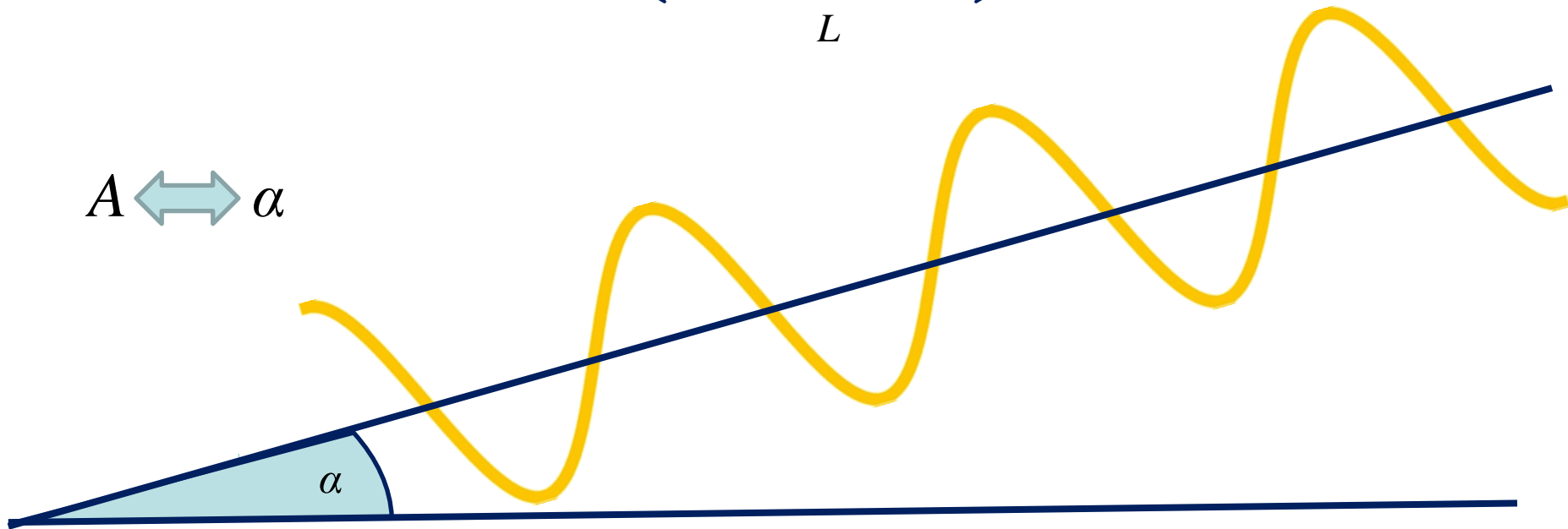
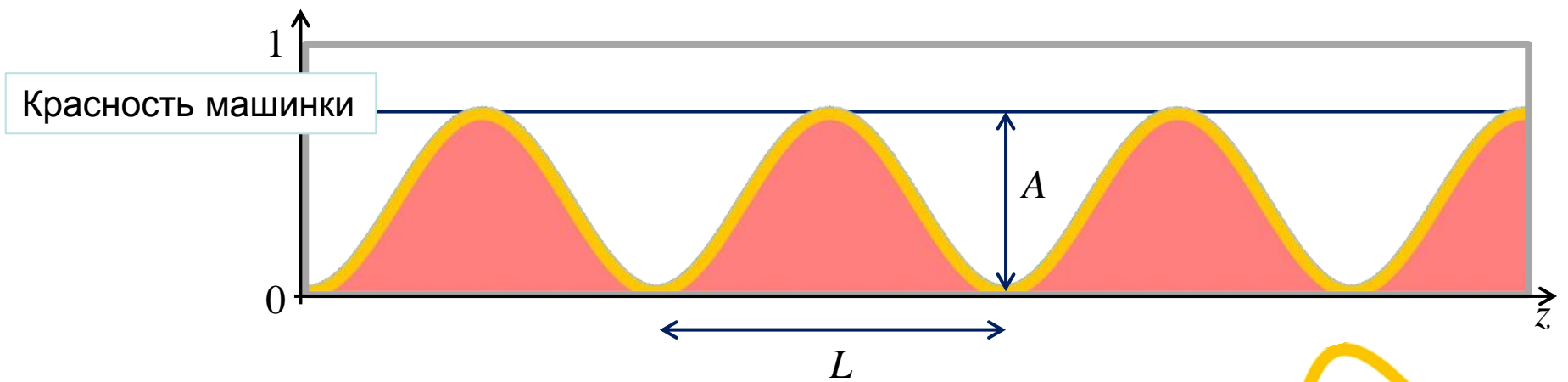




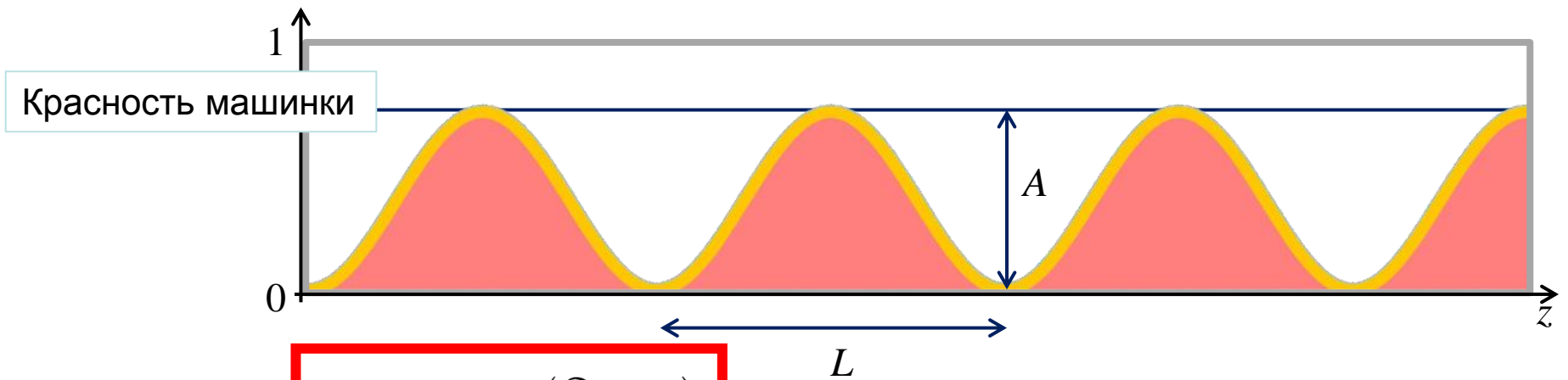


Синева машинки



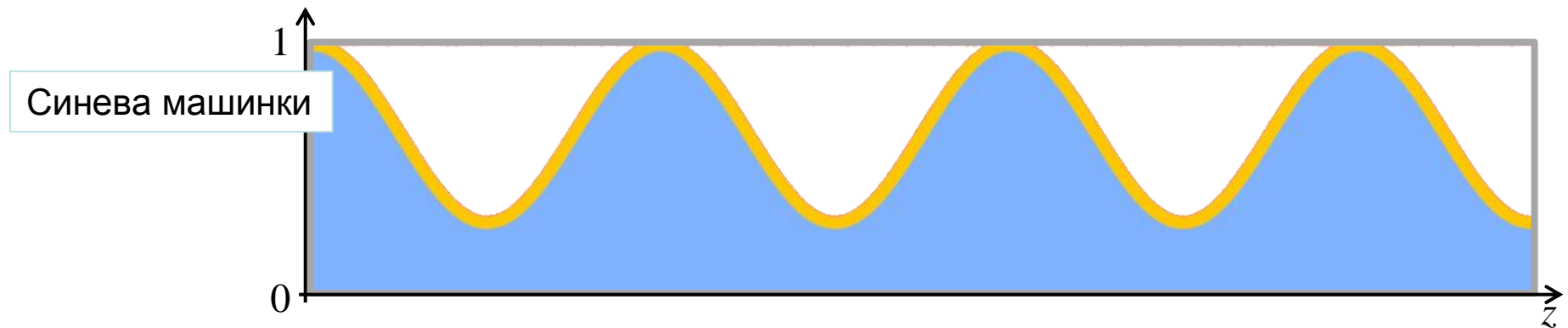
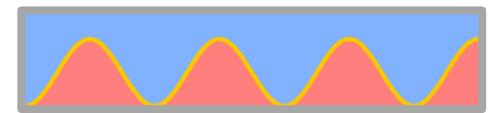


$$A \sin^2 \left(\frac{2\pi}{L} z \right)$$



$$A \sin^2 \left(\frac{2\pi}{L} z \right)$$

$$1 - A \sin^2 \left(\frac{2\pi}{L} z \right)$$



Осцилляции нейтрино: объяснение

состояние
взаимодействия

ν_e, ν_μ, ν_τ

\neq

состояние
распространения

ν_1, ν_2, ν_3

- Рождаем: чистое состояние электронного нейтрино
- Для этого состояния не определена масса
- Распространяется массовое состояние – смесь мюонного и электронного нейтрино
- Детектируем: чистое состояние электронного нейтрино

Осцилляции нейтрино: формулы

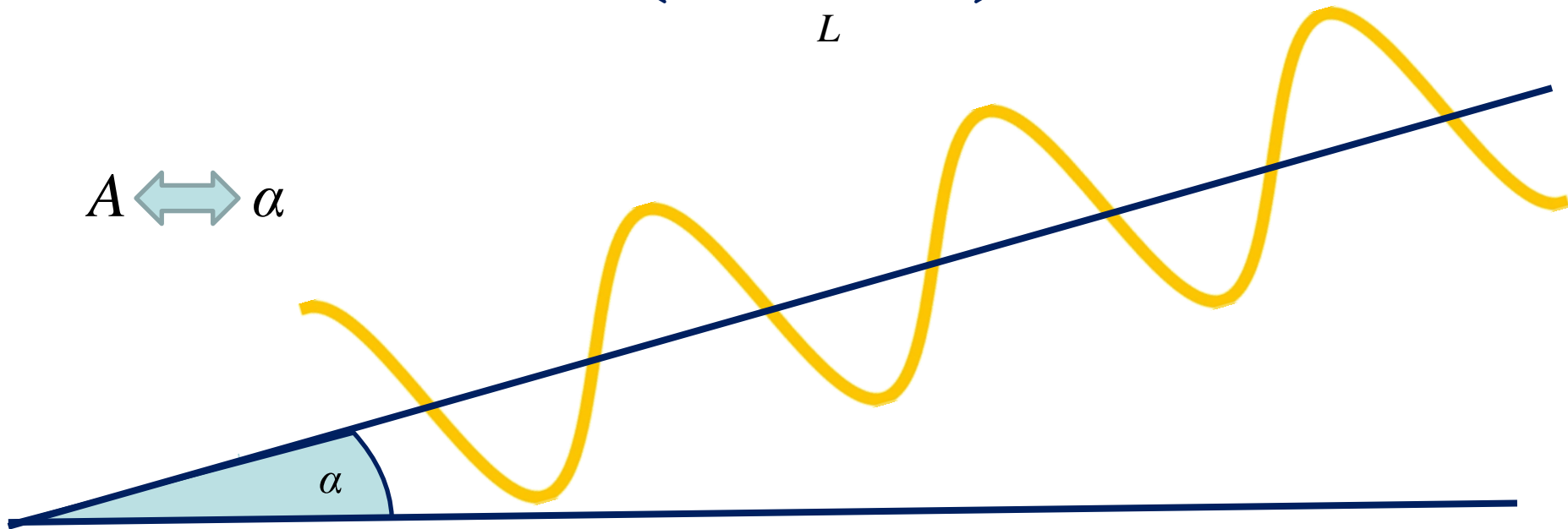
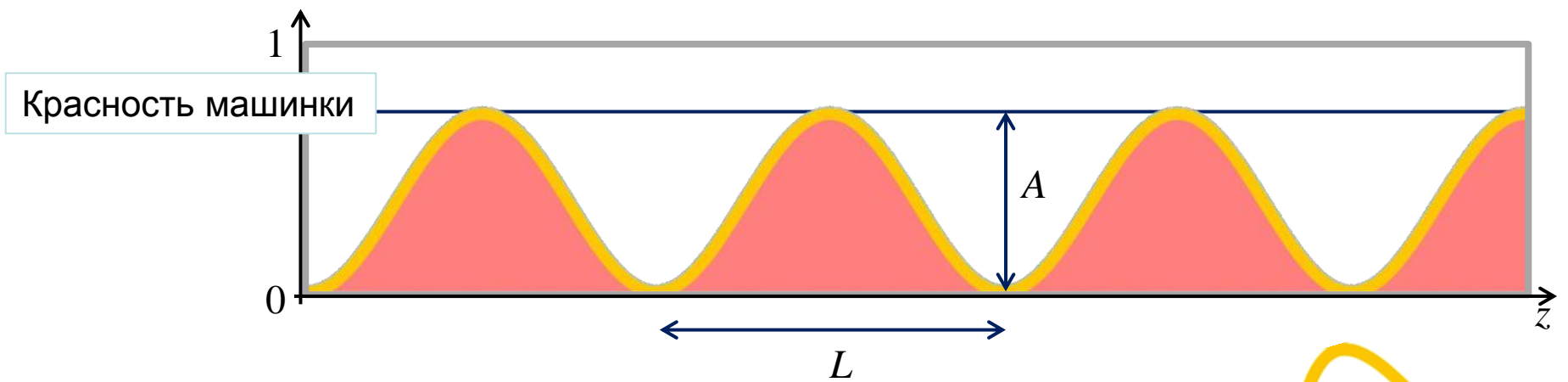
$$\begin{aligned} \nu_1 &= \cos \theta_{12} \nu_e + \sin \theta_{12} \nu_\mu, \\ \nu_2 &= -\sin \theta_{12} \nu_e + \cos \theta_{12} \nu_\mu, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nu_e &= \cos \theta_{12} \nu_1 - \sin \theta_{12} \nu_2, \\ \nu_\mu &= \sin \theta_{12} \nu_1 + \cos \theta_{12} \nu_2. \end{aligned}$$

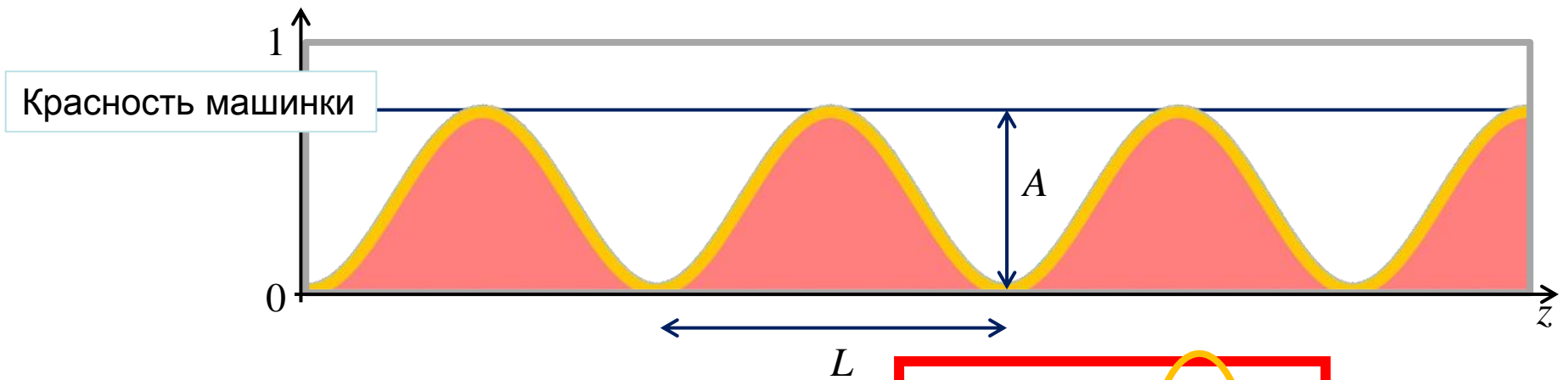
$$\begin{aligned} \nu_1(0) &= \cos \theta_{12} \nu_e(0), \\ \nu_2(0) &= -\sin \theta_{12} \nu_e(0). \end{aligned}$$

$$\nu_i(z, t) = \exp\left(-i\omega t + i\sqrt{\omega^2 - m_i^2} z\right) \nu_i(0), \quad i = 1, 2,$$

$$P(\nu_\mu; z, t) = |\nu_\mu(z, t)|^2 = \sin^2 2\theta_{12} \sin^2\left(\frac{m_2^2 - m_1^2}{4\omega} z\right).$$



$$A \sin^2 \left(\frac{2\pi}{L} z \right)$$



$$A \sin^2 \left(\frac{2\pi}{L} z \right)$$

Вероятность зарегистрировать ν_μ при испущенном ν_e

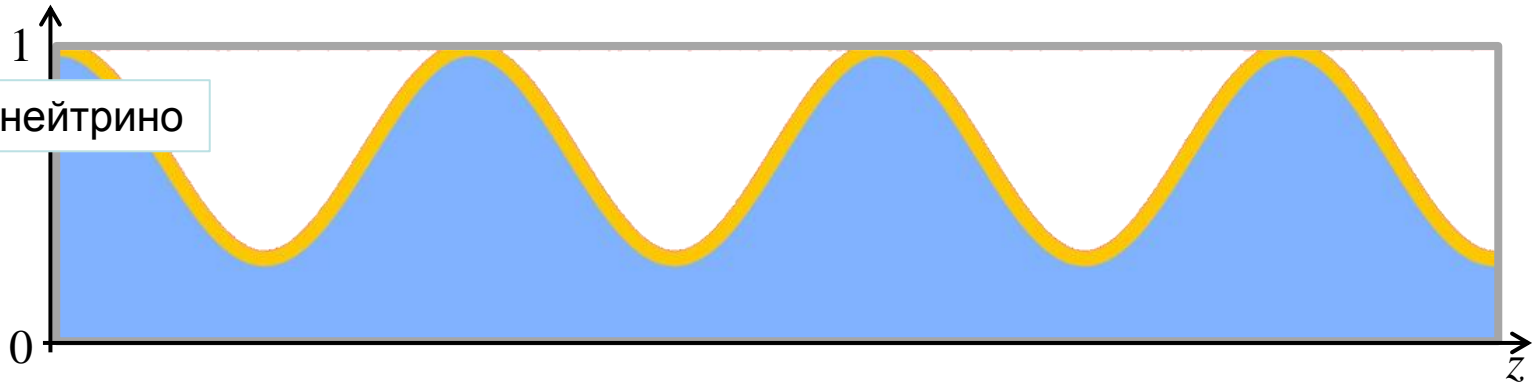
угол
смешивания

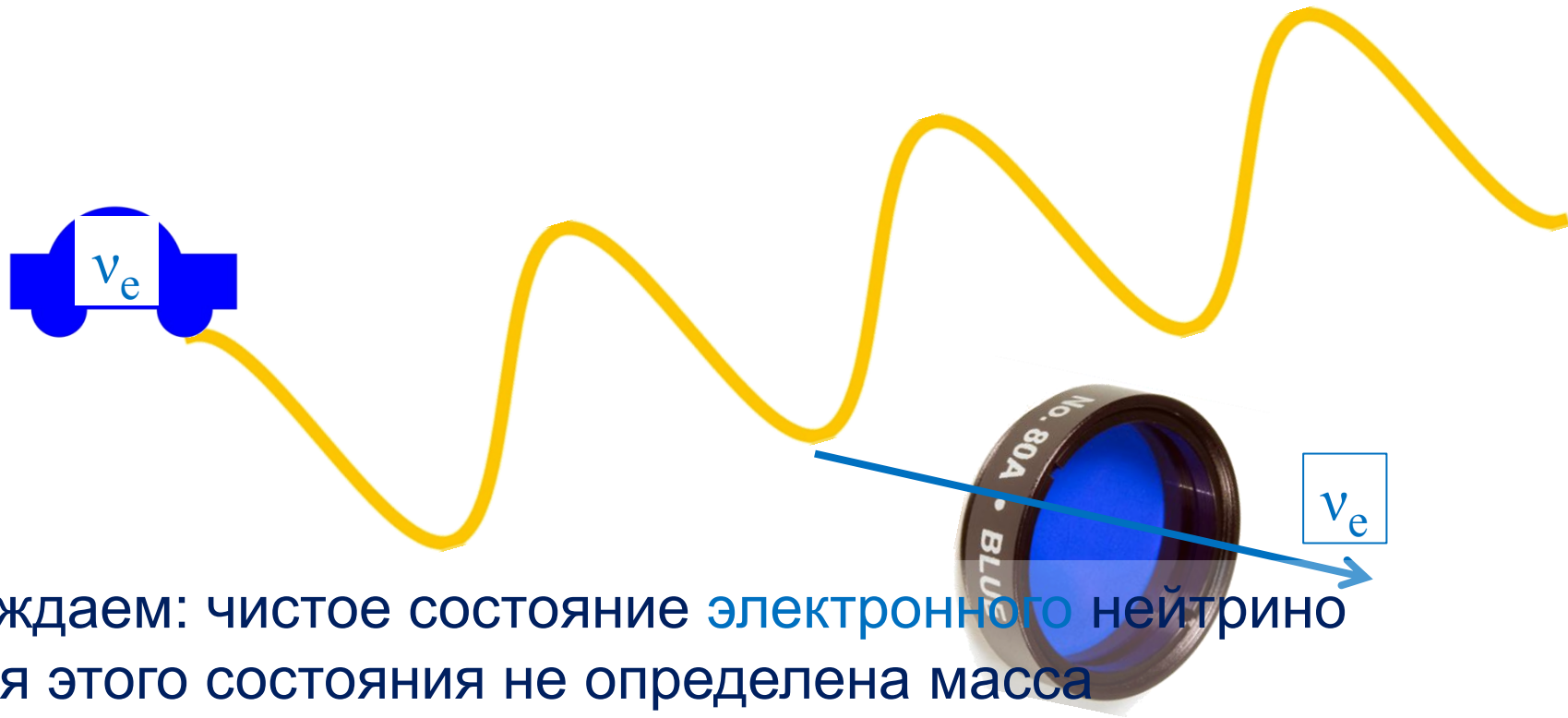
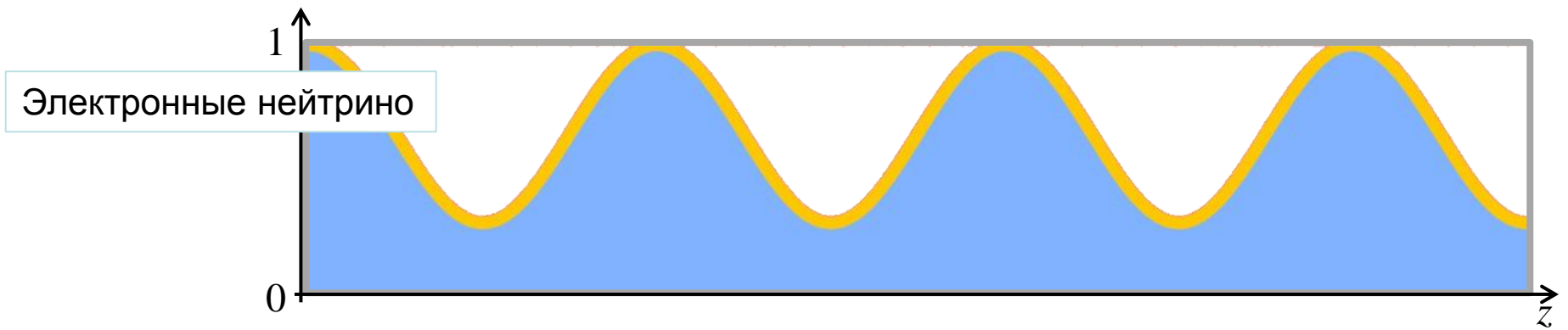
разность
квадратов
масс

$$P(\nu_\mu; z, t) = |\nu_\mu(z, t)|^2 = \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(\frac{m_2^2 - m_1^2}{4\omega} z \right).$$

энергия

Электронные нейтрино





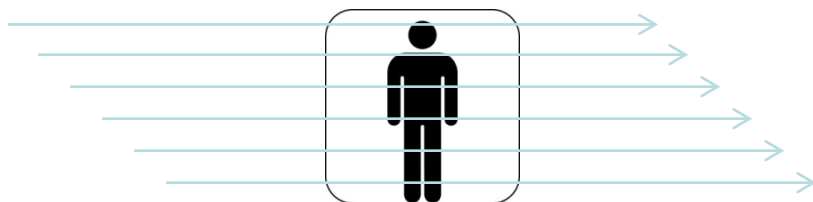
- ❑ Рожаем: чистое состояние электронного нейтрино
- ❑ Для этого состояния не определена масса
- ❑ Распространяется массовое состояние – смесь
МЮОННОГО и электронного нейтрино
- ❑ Детектируем: чистое состояние электронного нейтрино

Осцилляции нейтрино: эксперимент

- серьезные трудности в детектировании:
слабое взаимодействие

Осцилляции нейтрино: эксперимент

- серьезные трудности в детектировании:
слабое взаимодействие



*каждую секунду через меня
пролетают незамеченными
 $\sim 10^{14}$ штук нейтрино...*

“не поймаешь нейтрино за бороду и не посадишь в пробирку”

[В.С. Высоцкий, 1964]

Осцилляции нейтрино: эксперимент

- ❑ серьезные трудности в детектировании:
слабое взаимодействие

- ❑ источники:
 - Солнце
 - взаимодействия КЛ в атмосфере
(*атмосферные нейтрино*)
 - ядерные реакторы
 - ускорители (*взаимодействия пучка с мишенью*)

солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино

солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино



основной источник энергии Солнца:

термоядерные реакции

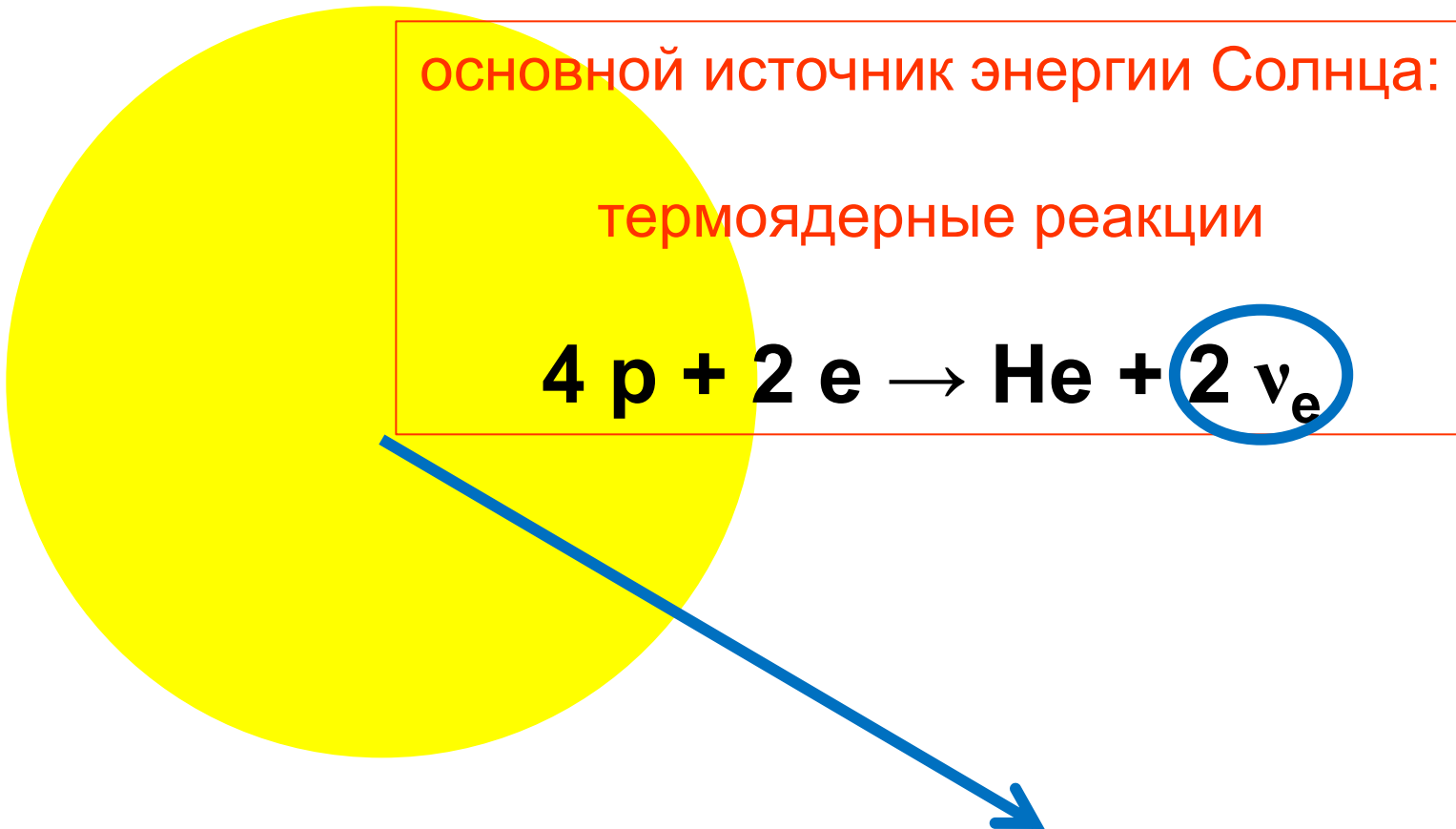


солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино

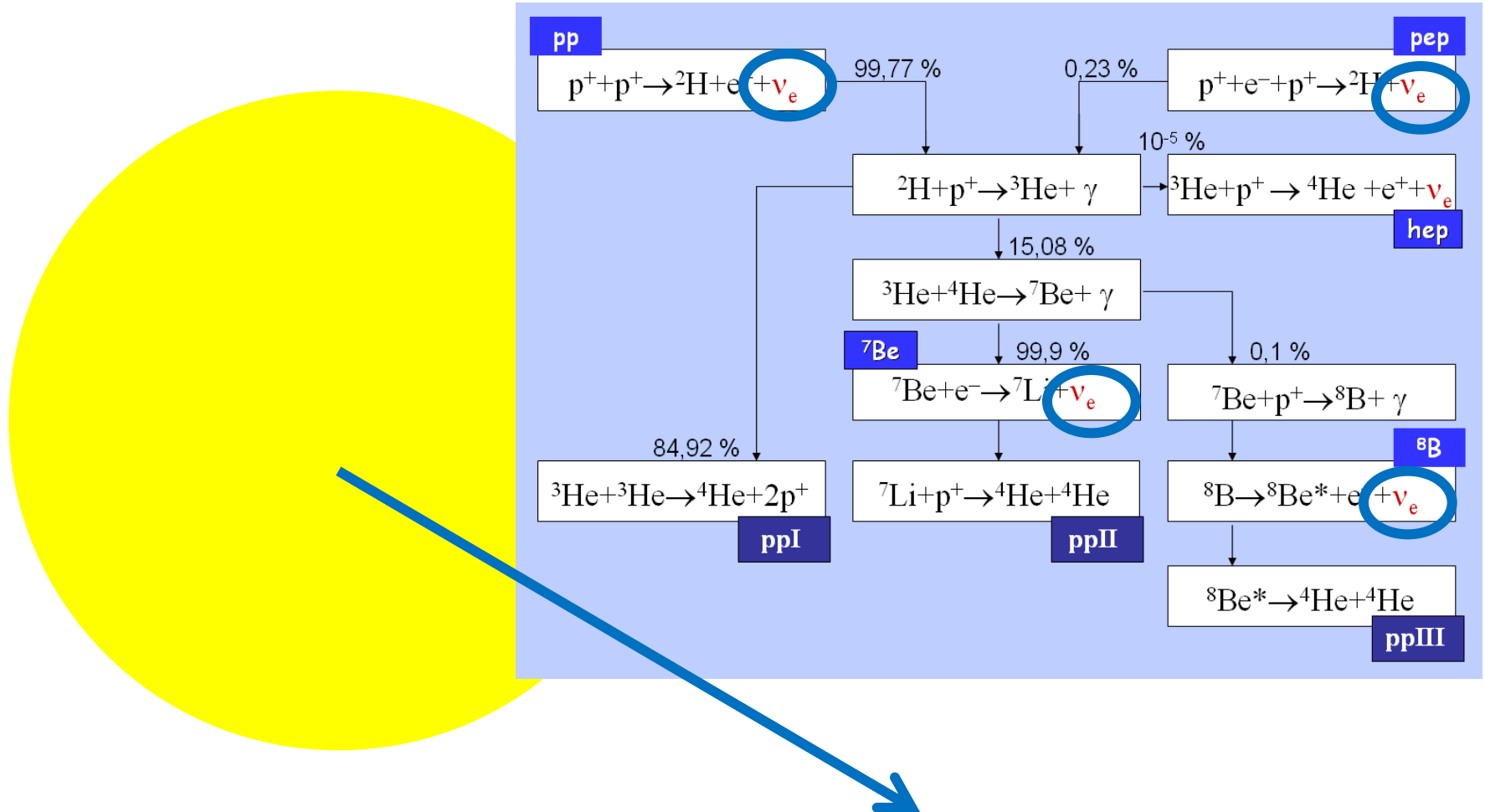
основной источник энергии Солнца:

термоядерные реакции



солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино



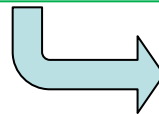
солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино

солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино

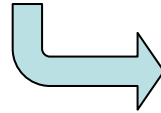
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино

СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО

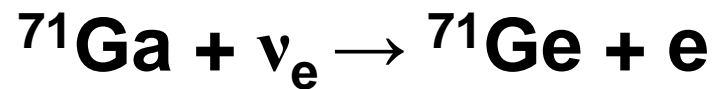
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино

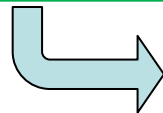
Пример: галлий-германиевый детектор
(чувствителен к нейтрино основного pp-канала)

*Баксанская нейтринная обсерватория
ИЯИ РАН, Приэльбрусье*



солнечные нейтрино

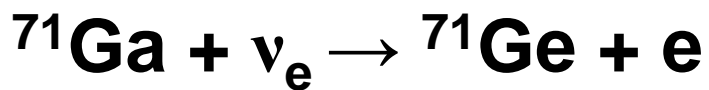
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино

Пример: галлий-германиевый детектор
(чувствителен к нейтрино основного pp-канала)

*Баксанская нейтринная обсерватория
ИЯИ РАН, Приэльбрусье*

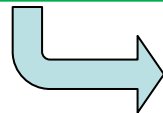


60 ТОНН



СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО

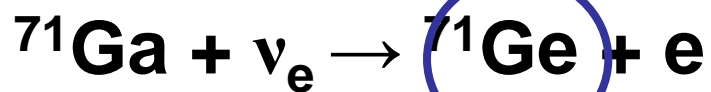
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино

Пример: галлий-германиевый детектор
(чувствителен к нейтрино основного pp-канала)

*Баксанская нейтринная обсерватория
ИЯИ РАН, Приэльбрусье*



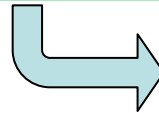
60 ТОНН

15 атомов

солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → **предсказания** потока нейтрино

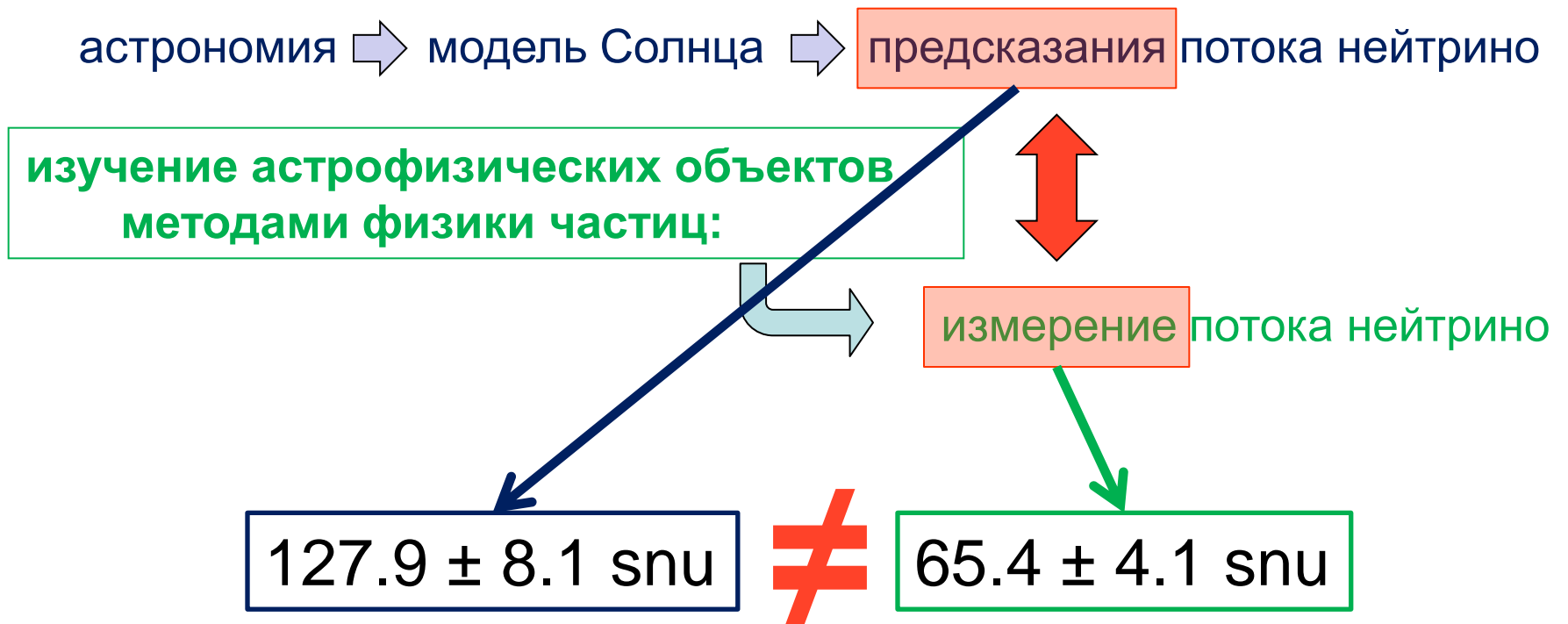
**изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:**



измерение потока нейтрино



солнечные нейтрино



[для галлий-германиего эксперимента]

солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → **предсказания** потока нейтрино

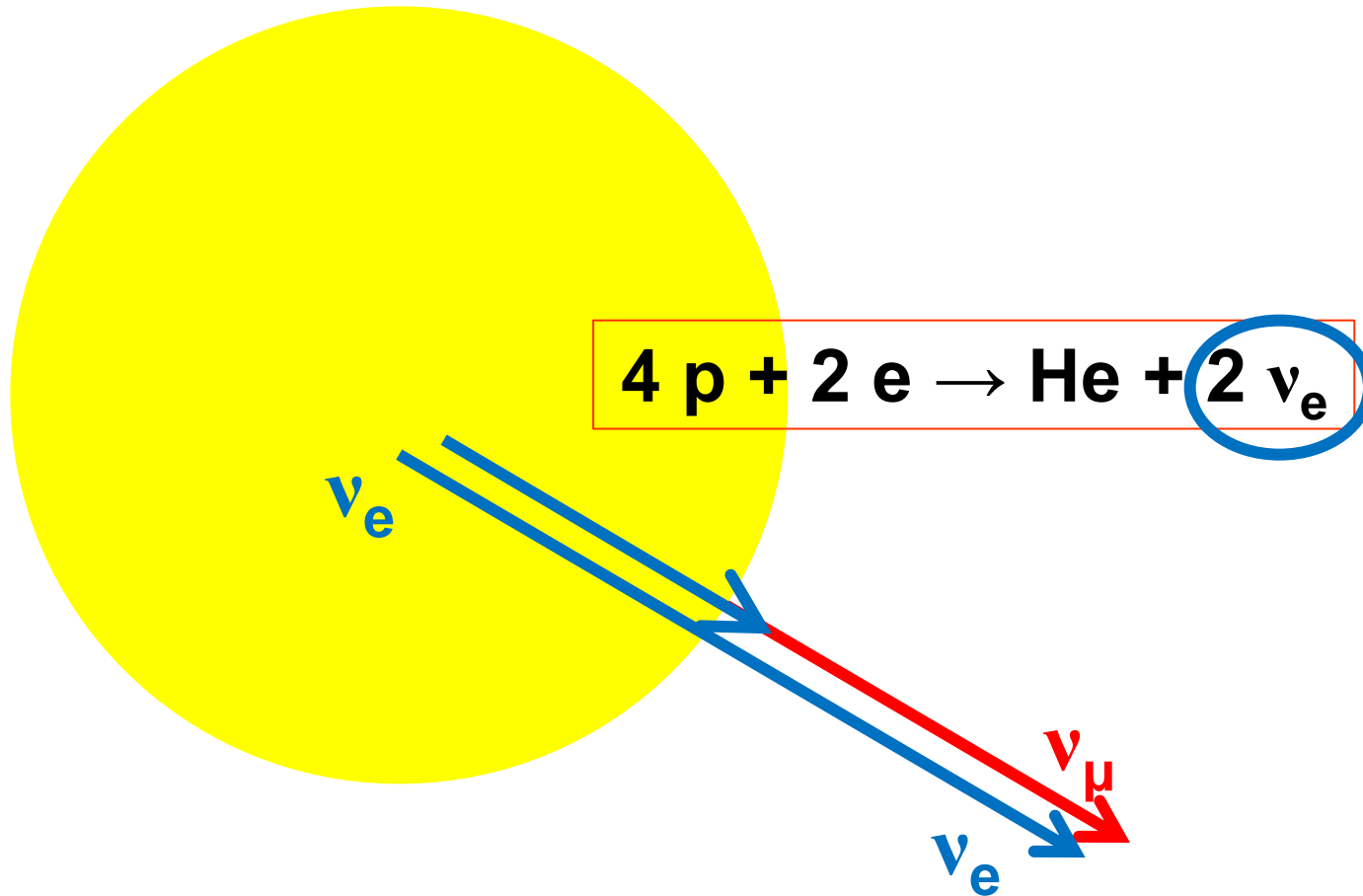
**изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:**



измерение потока нейтрино

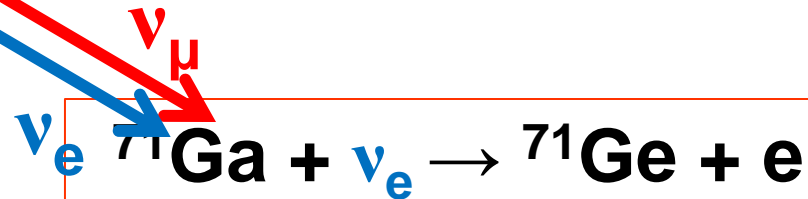
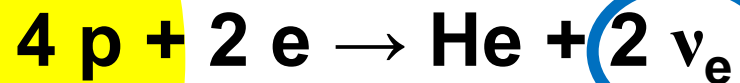
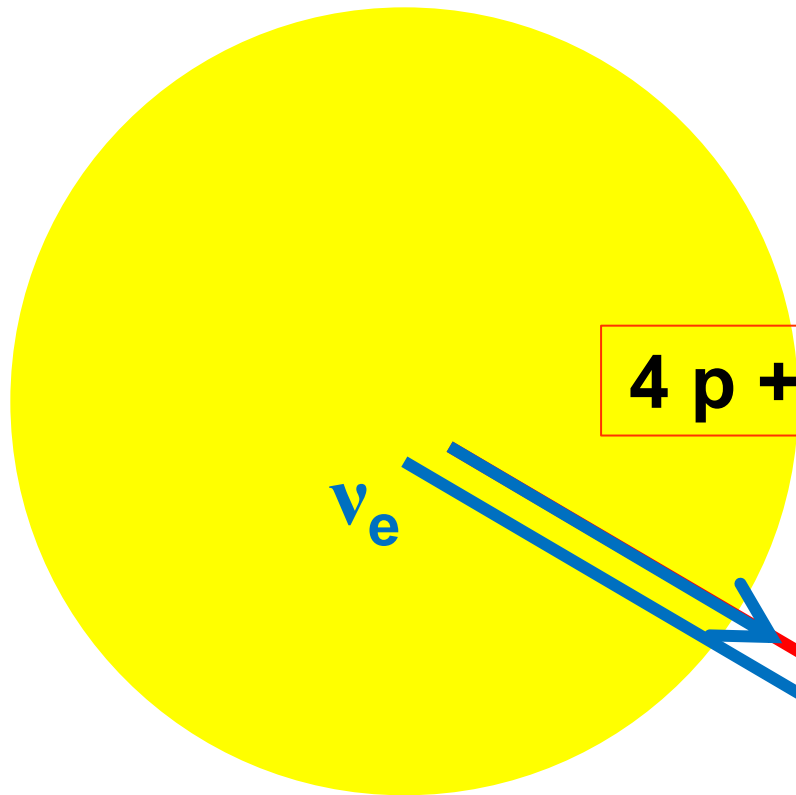
солнечные нейтрино

осцилляции
нейтрино!!!



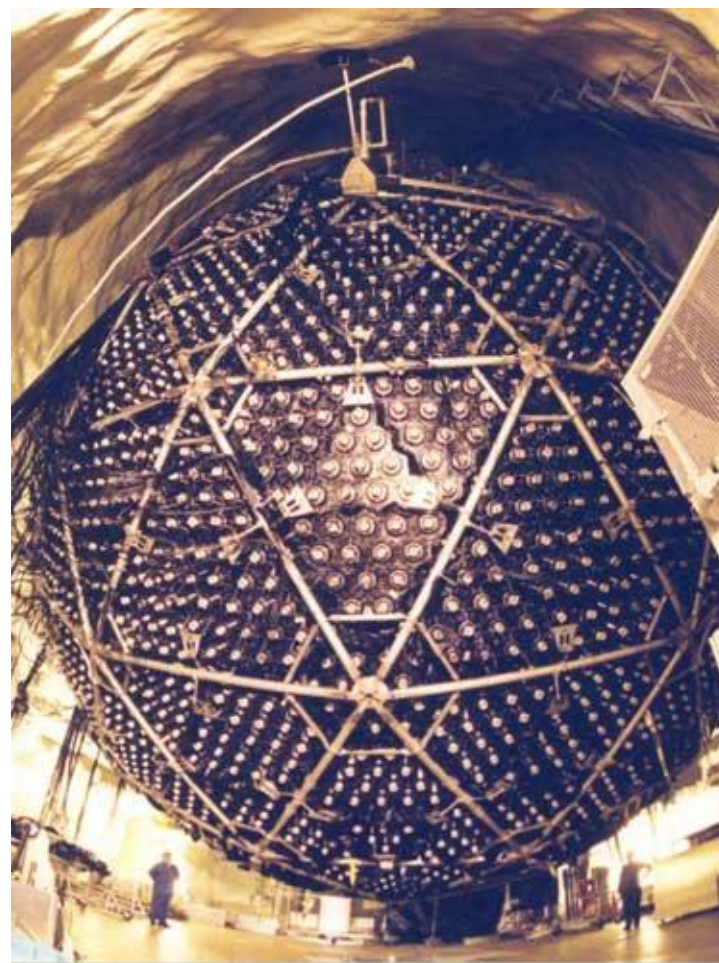
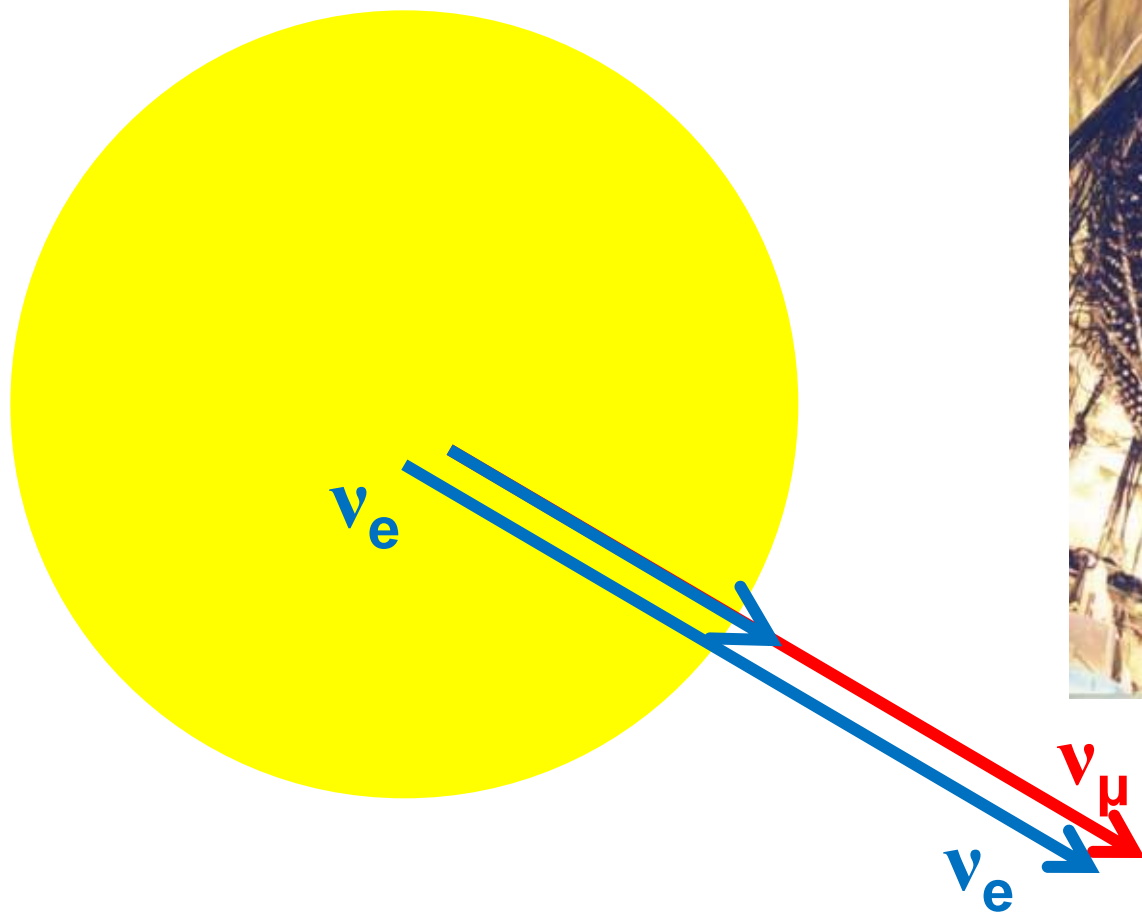
солнечные нейтрино

осцилляции
нейтрино!!!



солнечные нейтрино

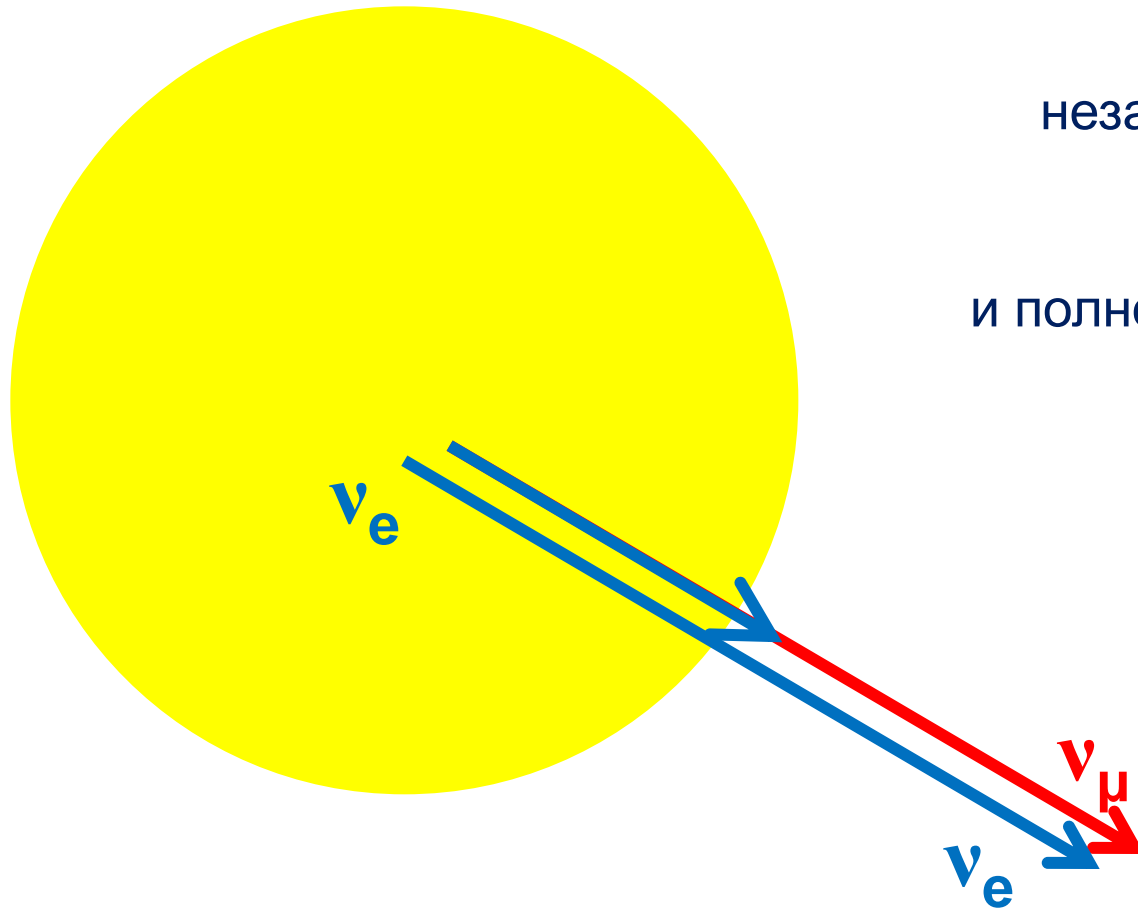
осцилляции
нейтрино!!!



SNO
Sudbury, Canada

солнечные нейтрино

осцилляции
нейтрино!!!



независимое измерение
потока ν_e
и полного потока ν всех типов

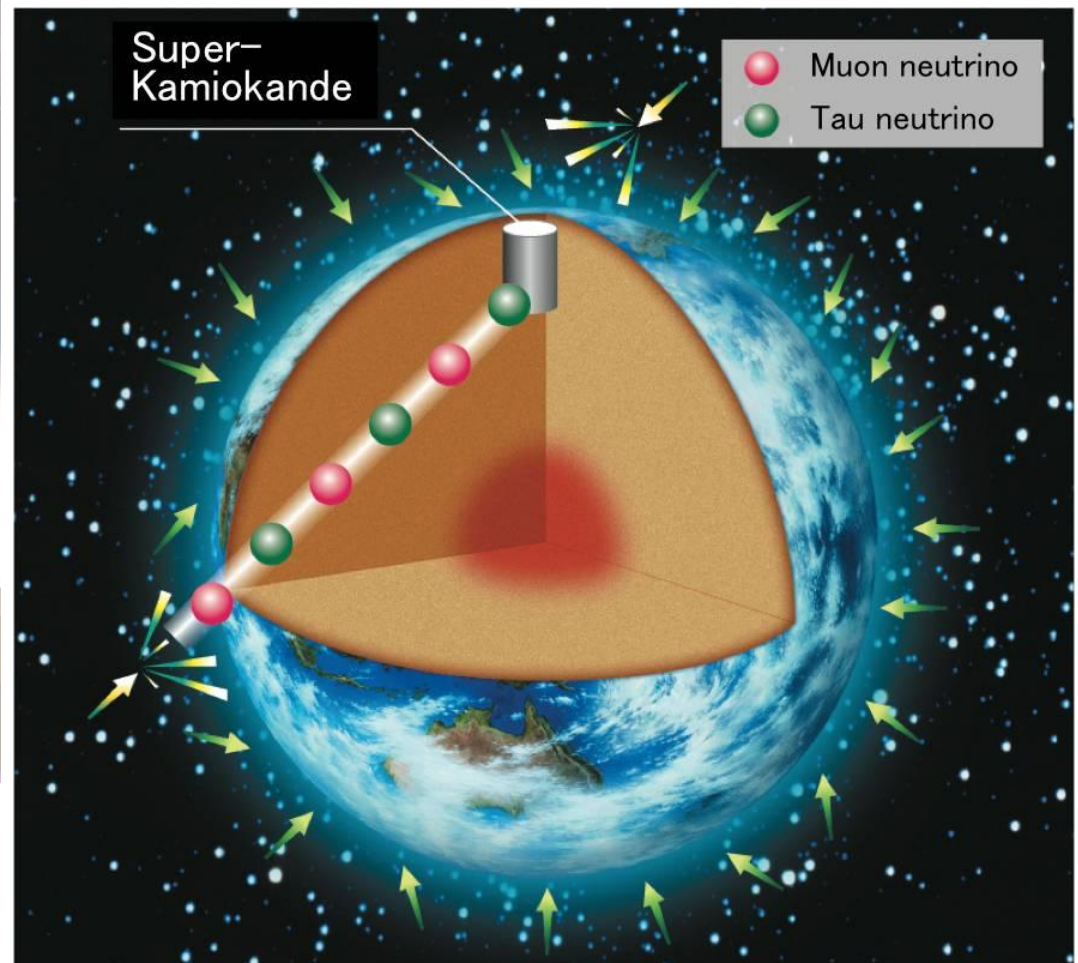
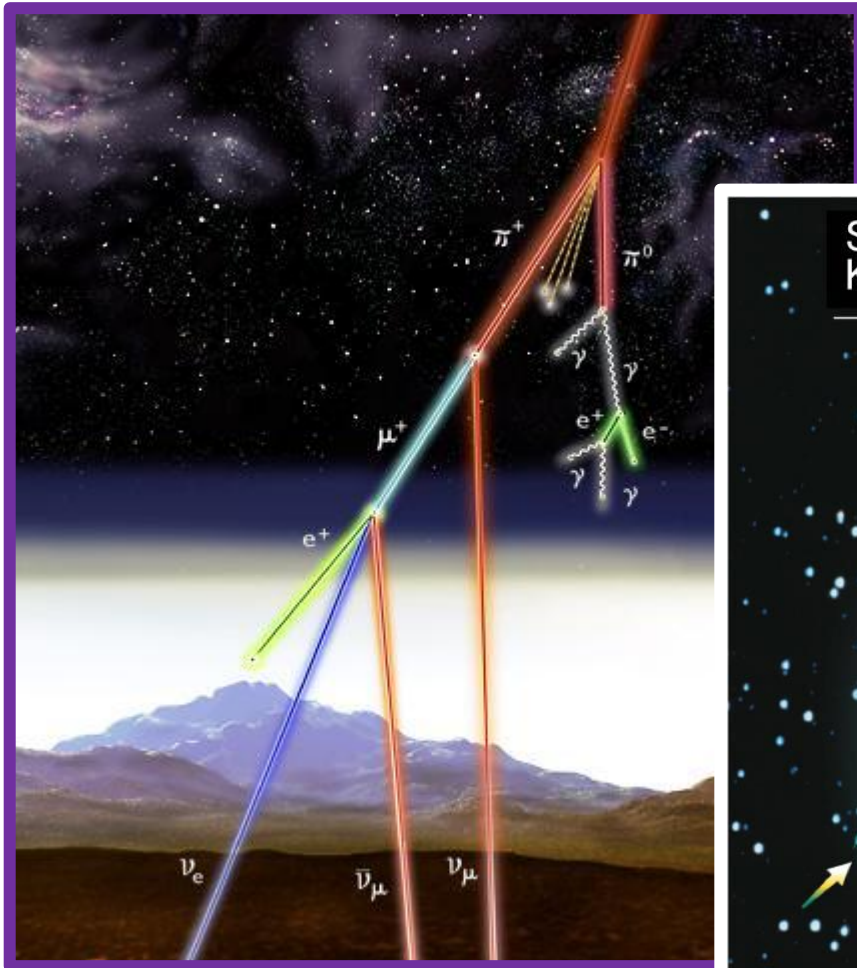
SNO
Sudbury, Canada

Осцилляции нейтрино: эксперимент

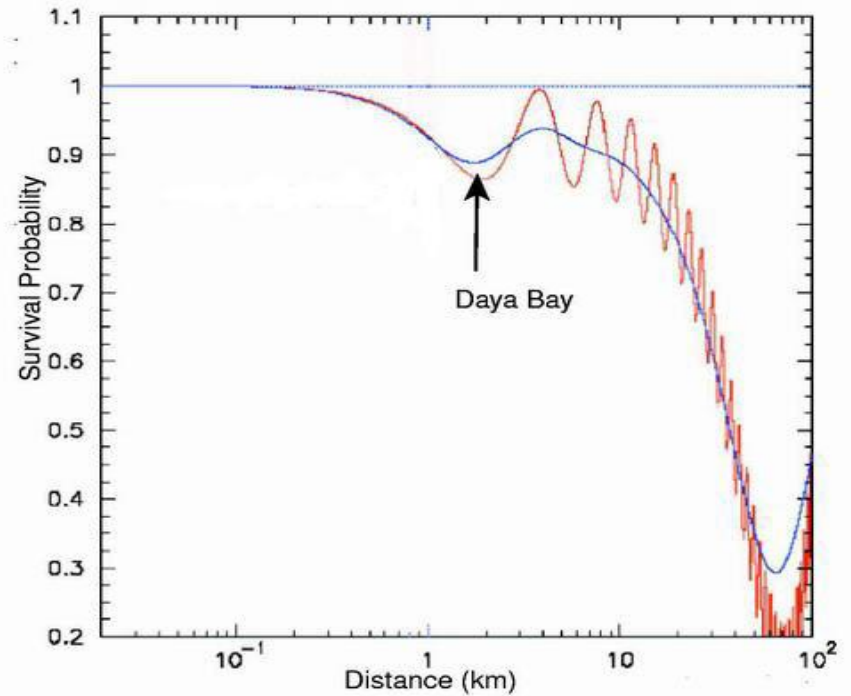
- ❑ серьезные трудности в детектировании:
слабое взаимодействие

- ❑ источники:
 - Солнце
 - взаимодействия КЛ в атмосфере
(*атмосферные нейтрино*)
 - ядерные реакторы
 - ускорители (*взаимодействия пучка с мишенью*)

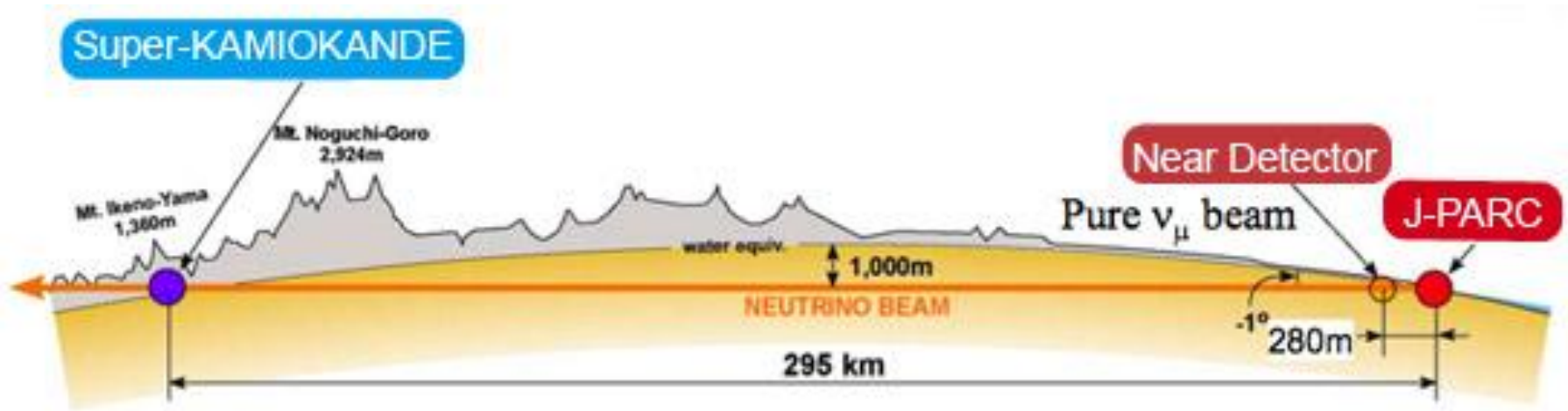
атмосферные нейтрино



реакторные нейтрино



ускорительные нейтрино



солнечные нейтрино

атмосферные нейтрино

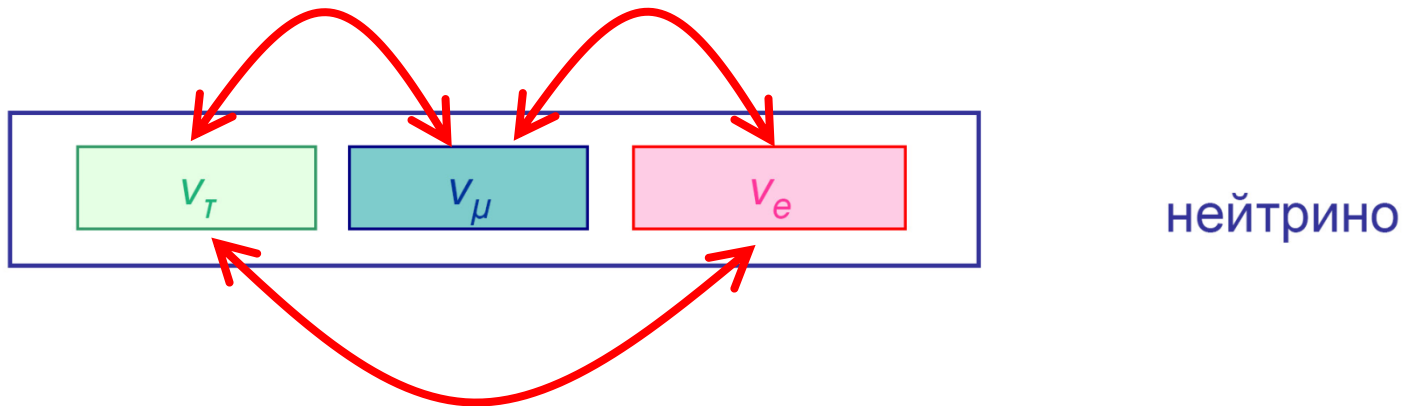
реакторные нейтрино

ускорительные нейтрино

Source	Type of ν	\bar{E} [MeV]	L [km]	$\min(\Delta m^2)$ [eV ²]
Reactor	$\bar{\nu}_e$	~ 1	1	$\sim 10^{-3}$
Reactor	$\bar{\nu}_e$	~ 1	100	$\sim 10^{-5}$
Accelerator	$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	$\sim 10^3$	1	~ 1
Accelerator	$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	$\sim 10^3$	1000	$\sim 10^{-3}$
Atmospheric ν 's	$\nu_{\mu,e}, \bar{\nu}_{\mu,e}$	$\sim 10^3$	10^4	$\sim 10^{-4}$
Sun	ν_e	~ 1	1.5×10^8	$\sim 10^{-11}$

Осцилляции нейтрино:

- **солнечные нейтрино**
- **атмосферные нейтрино**
- **реакторные нейтрино**
- **ускорительные нейтрино**



«стандартная» картина осцилляций 3-х типов нейтрино

Осцилляции нейтрино: экспериментальные результаты – параметры осцилляций 3 ароматов

Parameter	best-fit ($\pm 1\sigma$)	3σ
Δm_{21}^2 [10^{-5} eV ²]	$7.54^{+0.26}_{-0.22}$	6.99 – 8.18
$ \Delta m^2 $ [10^{-3} eV ²]	2.43 ± 0.06 (2.38 ± 0.06)	2.23 – 2.61 (2.19 – 2.56)
$\sin^2 \theta_{12}$	0.308 ± 0.017	0.259 – 0.359
$\sin^2 \theta_{23}, \Delta m^2 > 0$	$0.437^{+0.033}_{-0.023}$	0.374 – 0.628
$\sin^2 \theta_{23}, \Delta m^2 < 0$	$0.455^{+0.039}_{-0.031}$,	0.380 – 0.641
$\sin^2 \theta_{13}, \Delta m^2 > 0$	$0.0234^{+0.0020}_{-0.0019}$	0.0176 – 0.0295
$\sin^2 \theta_{13}, \Delta m^2 < 0$	$0.0240^{+0.0019}_{-0.0022}$	0.0178 – 0.0298
δ/π (2σ range quoted)	$1.39^{+0.38}_{-0.27}$ ($1.31^{+0.29}_{-0.33}$)	(0.00 – 0.16) \oplus (0.86 – 2.00) ((0.00 – 0.02) \oplus (0.70 – 2.00))

Осцилляции нейтрино и масса нейтрино

$$P(\nu_\mu; z, t) = |\nu_\mu(z, t)|^2 = \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(\frac{m_2^2 - m_1^2}{4\omega} z \right).$$

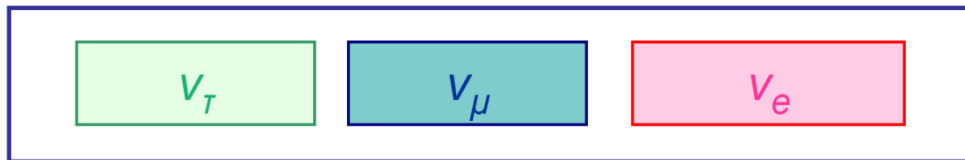
- по крайней мере 2 из трех нейтрино имеют ненулевую массу
- значение массы не измерено, только разности
- наиболее строгое ограничение: $m < 2.2$ eV (Троицк-ну-mass)

Осцилляции нейтрино и масса нейтрино

- по крайней мере 2 из трех нейтрино имеют ненулевую массу

Стандартная модель элементарных частиц

**массы нейтрино запрещены
симметриями Стандартной модели**



нейтрино

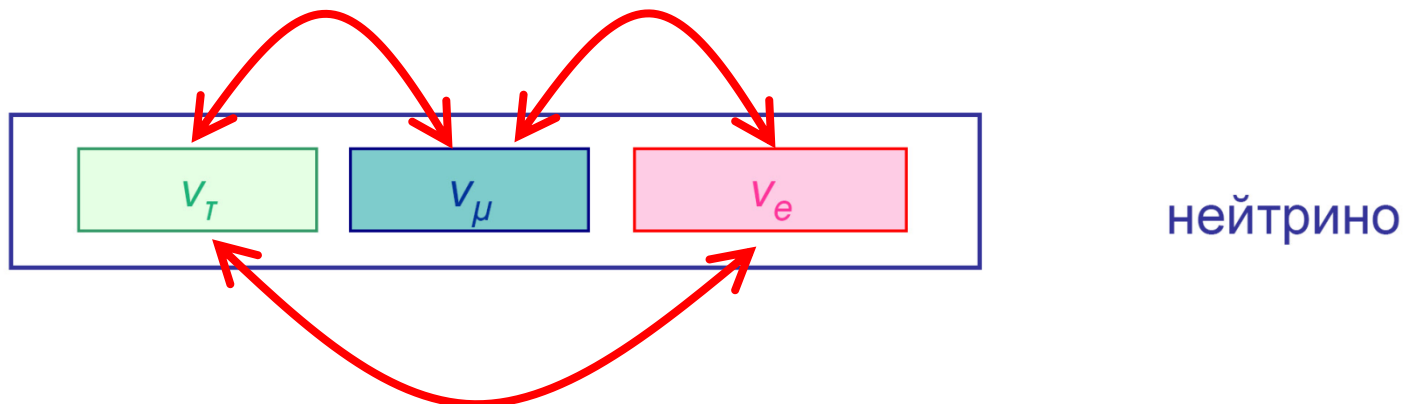
**тип нейтрино сохраняется
при нулевой массе**

Осцилляции нейтрино

**массы нейтрино запрещены
симметриями Стандартной модели**

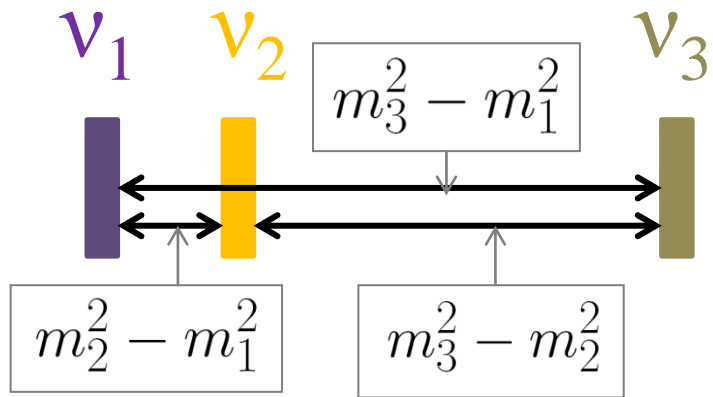
**тип нейтрино сохраняется
при нулевой массе**

**изменения типа нейтрино
достоверно
зарегистрированы экспериментально**



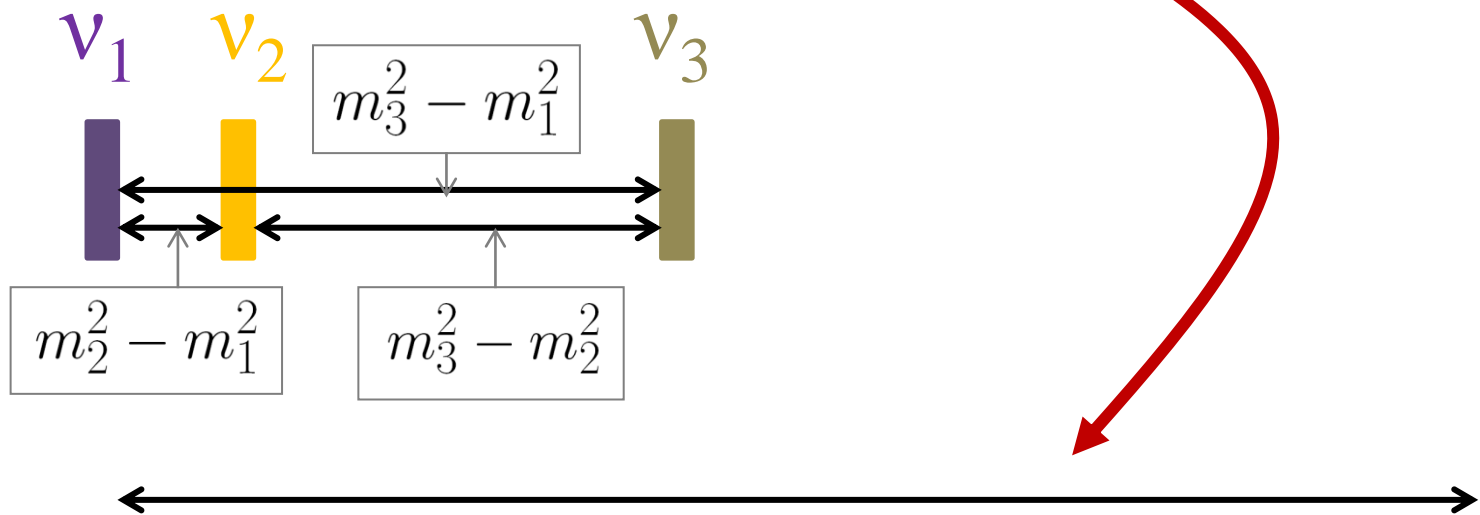
**Осцилляции нейтрино
– экспериментальное
доказательство
неполноты
Стандартной модели
физики элементарных
частиц**

Четвёртое нейтрино?!



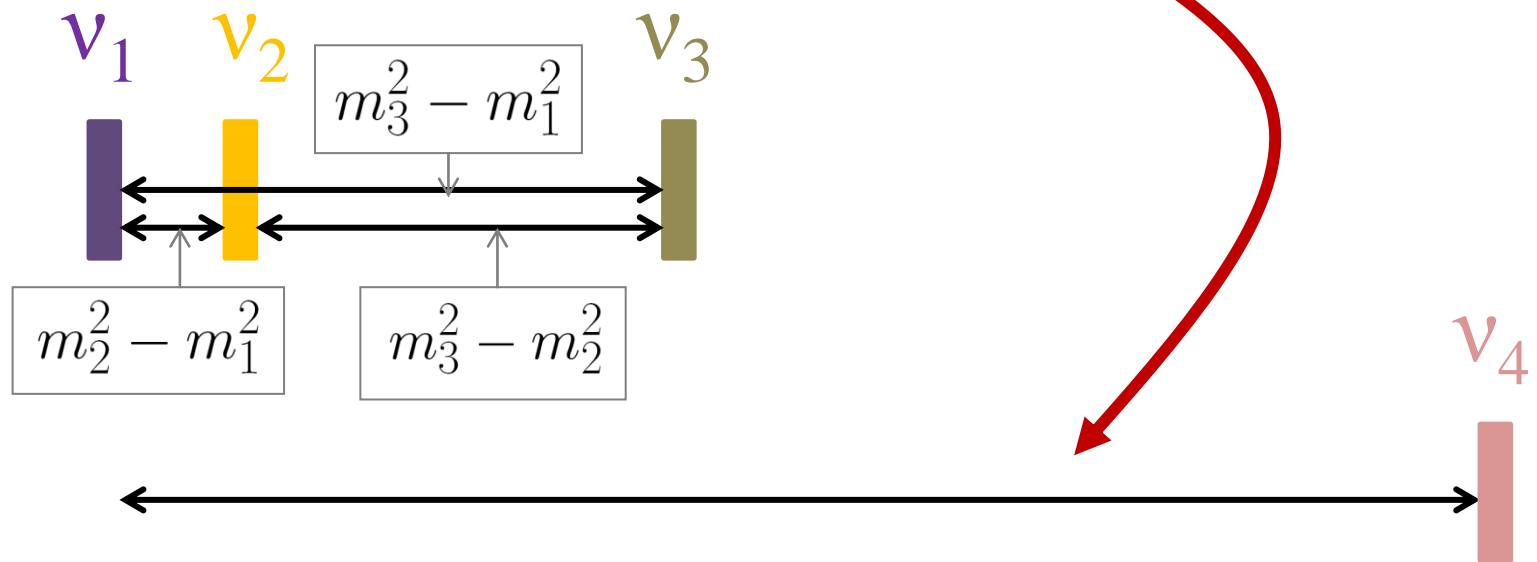
Четвёртое нейтрино?!

- галлиевая аномалия (очень короткие расстояния)
- реакторная аномалия (короткие расстояния)
- LSND/MiniBOONE – ускорительные (довольно короткие расстояния)



Четвёртое нейтрино?!

- галлиевая аномалия (очень короткие расстояния)
- реакторная аномалия (короткие расстояния)
- LSND/MiniBOONE – ускорительные (довольно короткие расстояния)



требуется четвертое нейтрино?!

- **стерильное** (не взаимодействует даже слабым взаимодействием)
- ещё один шаг за пределы Стандартной модели...

солнечные нейтрино

гелиосейсмология:

моды собственных колебаний Солнца (3500 мод!)

⇒ Фурье-анализ ⇒ внутренняя структура

солнечные нейтрино

гелиосейсмология:

моды собственных колебаний Солнца (3500 мод!)

⇒ Фурье-анализ ⇒ внутренняя структура

существенные отличия от стандартной солнечной модели
(которая подтверждена нейтринными экспериментами)

солнечные нейтрино

гелиосейсмология:

моды собственных колебаний Солнца (3500 мод!)

⇒ Фурье-анализ ⇒ внутренняя структура

существенные отличия от стандартной солнечной модели
(которая подтверждена нейтринными экспериментами)

**изучение астрофизических объектов
методами физики частиц?**
мы чего-то не понимаем в Солнце?

солнечные нейтрино

гелиосейсмология:

моды собственных колебаний Солнца (3500 мод!)

⇒ Фурье-анализ ⇒ **внутренняя структура**

существенные отличия от стандартной солнечной модели
(которая подтверждена нейтринными экспериментами)

**изучение астрофизических объектов
методами физики частиц?**
мы чего-то не понимаем в Солнце?

**изучение свойств частиц
методами астрофизики?**
мы чего-то не понимаем про нейтрино?

солнечные нейтрино

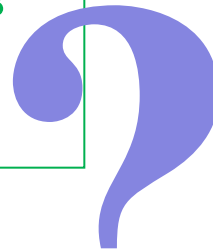
гелиосейсмология:

моды собственных колебаний Солнца (3500 мод!)

⇒ Фурье-анализ ⇒ внутренняя структура

существенные отличия от стандартной солнечной модели
(которая подтверждена нейтринными экспериментами)

**изучение астрофизических объектов
методами физики частиц?**
мы чего-то не понимаем в Солнце?



**изучение свойств частиц
методами астрофизики?**
мы чего-то не понимаем про нейтрино?

нейтрино от сверхновой 1987А

нейтрино от сверхновой 1987А

Сверхновые звезды типа II:

коллапс ядра старой звезды,

большая часть энергии уносится нейтрино
(за несколько часов до видимой вспышки)

Детекторы «в режиме ожидания»



*Liquid Scintillator Detector (LSD)
под горой Монблан*

нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.

LSD 5 2:52:36,8
43,8



нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.

LSD 5 2:52:36,8
43,8



нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.

LSD	5	2:52:36,8	43,8
KII	12	7:35:35	47
IMB	8	7:35:41	47
BUST	6	7:36:06	21



нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.

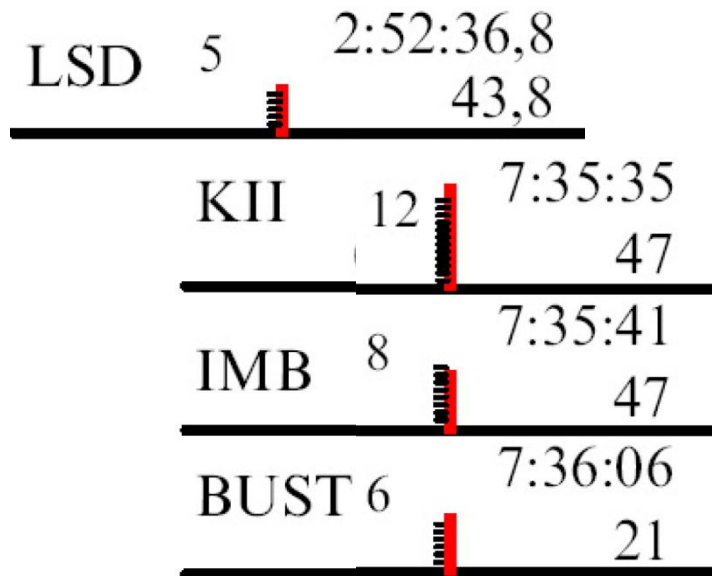
LSD	5	2:52:36,8	43,8
KII	12	7:35:35	47
IMB	8	7:35:41	47
BUST	6	7:36:06	21

10:38



нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



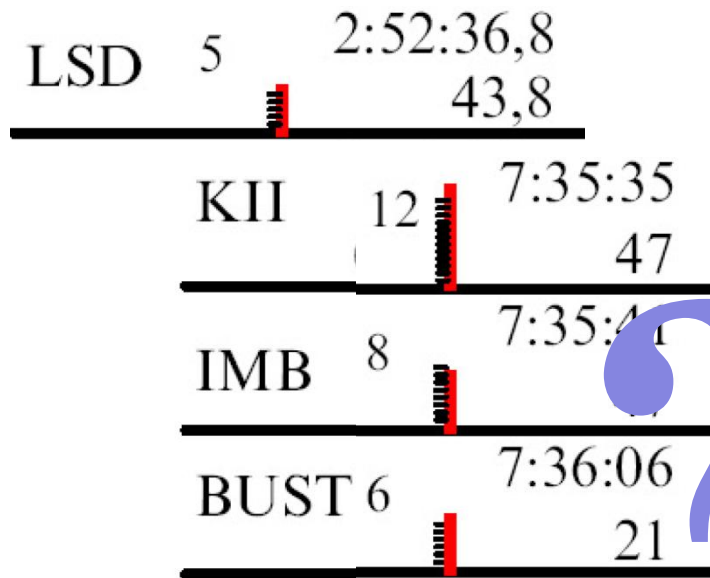
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:

- поток нейтрино
- энергии нейтрино
- продолжительность сигнала
- интервал до видимой вспышки

качественно подтверждают модели
взрыва сверхновой типа II

нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



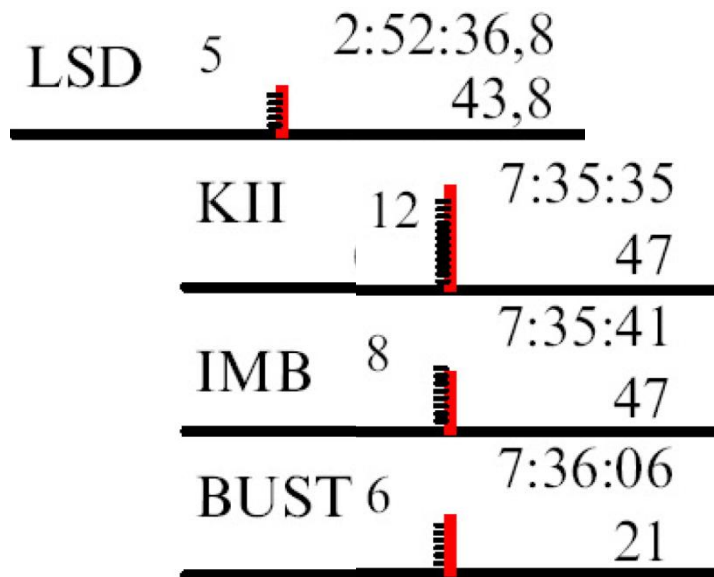
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц?

двойной нейтринный сигнал
не объяснен!

изучение свойств частиц
методами астрофизики?

нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



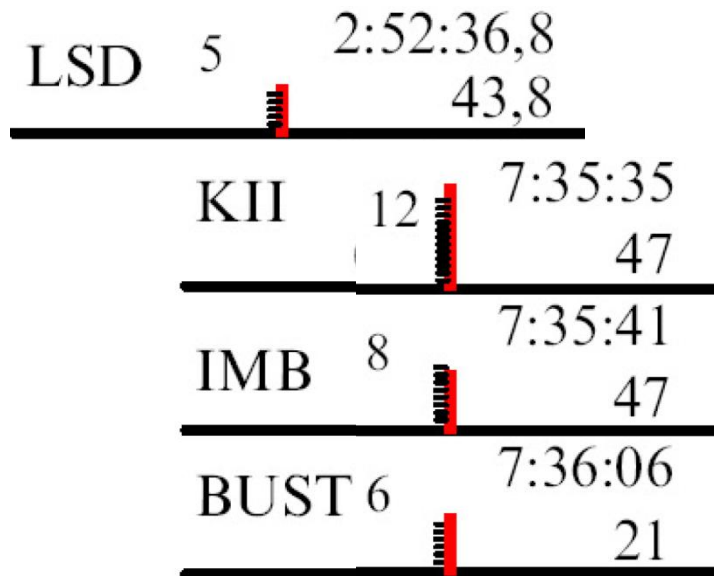
изучение свойств частиц методами астрофизики:

- поток нейтрино
- энергии нейтрино
- продолжительность сигнала
- интервал до видимой вспышки

ограничения на ряд свойств нейтрино
и на параметры гипотетических
легких частиц

нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



**изучение свойств частиц
методами астрофизики:**

ограничения на параметры
гипотетических легких частиц

- аксионы
- зеркальная материя
- многомерные миры
- ...

нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.

LSD	5	2:52:36,8	43,8
KII	12	7:35:35	47
IMB	8	7:35:41	47
BUST	6	7:36:06	21

**изучение свойств частиц
методами астрофизики:**

ограничения на ряд свойств нейтрино

- масса
- заряд
- параметры осцилляций
- магнитный момент
- скорость движения
- ...

нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.

LSD	5	2:52:36,8	43,8
KII	12	7:35:35	47
IMB	8	7:35:41	47
BUST	6	7:36:06	21

изучение свойств частиц
методами астрофизики:

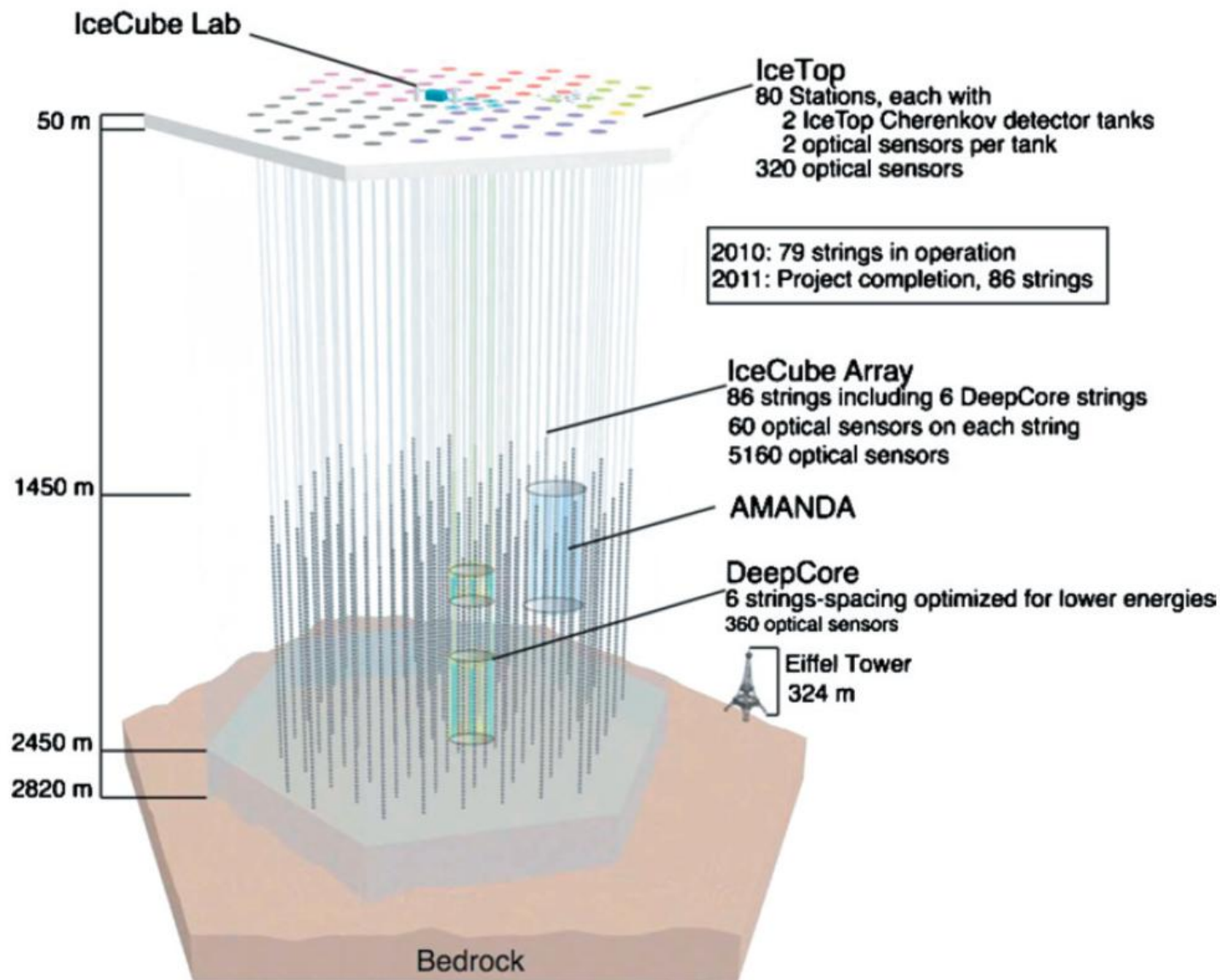
ограничения на ряд свойств нейтрино

- масса
- заряд
- параметры осцилляций
- магнитный момент
- скорость движения
- ...

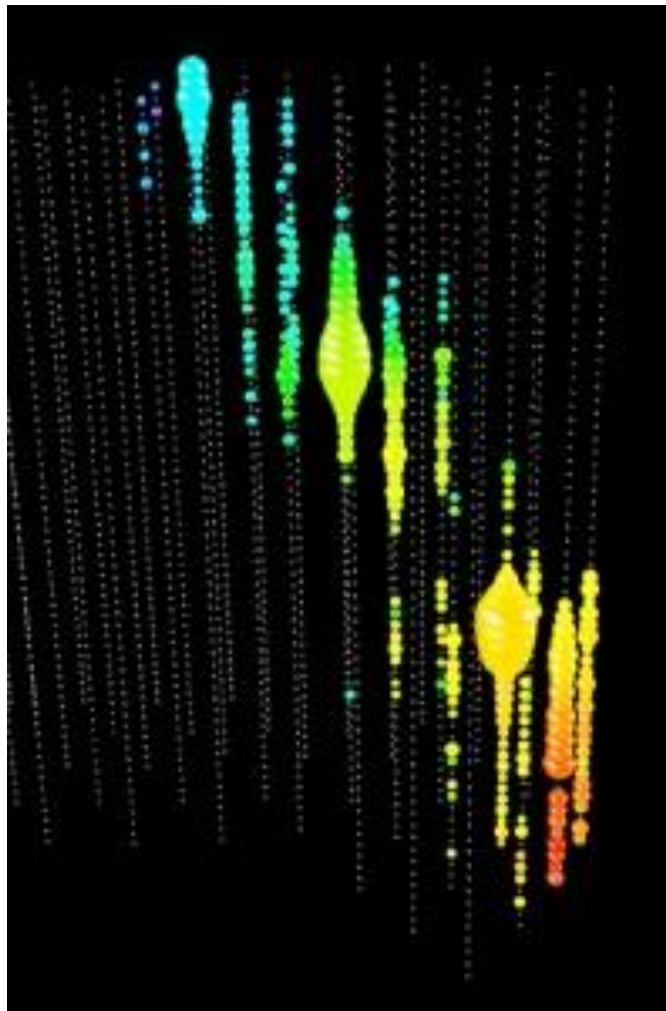
OPERA 2011 : $(v - c)/c \sim 10^{-5}$

SN 1987A : $(v - c)/c < 10^{-9}$

Астрофизика нейтрино высоких энергий

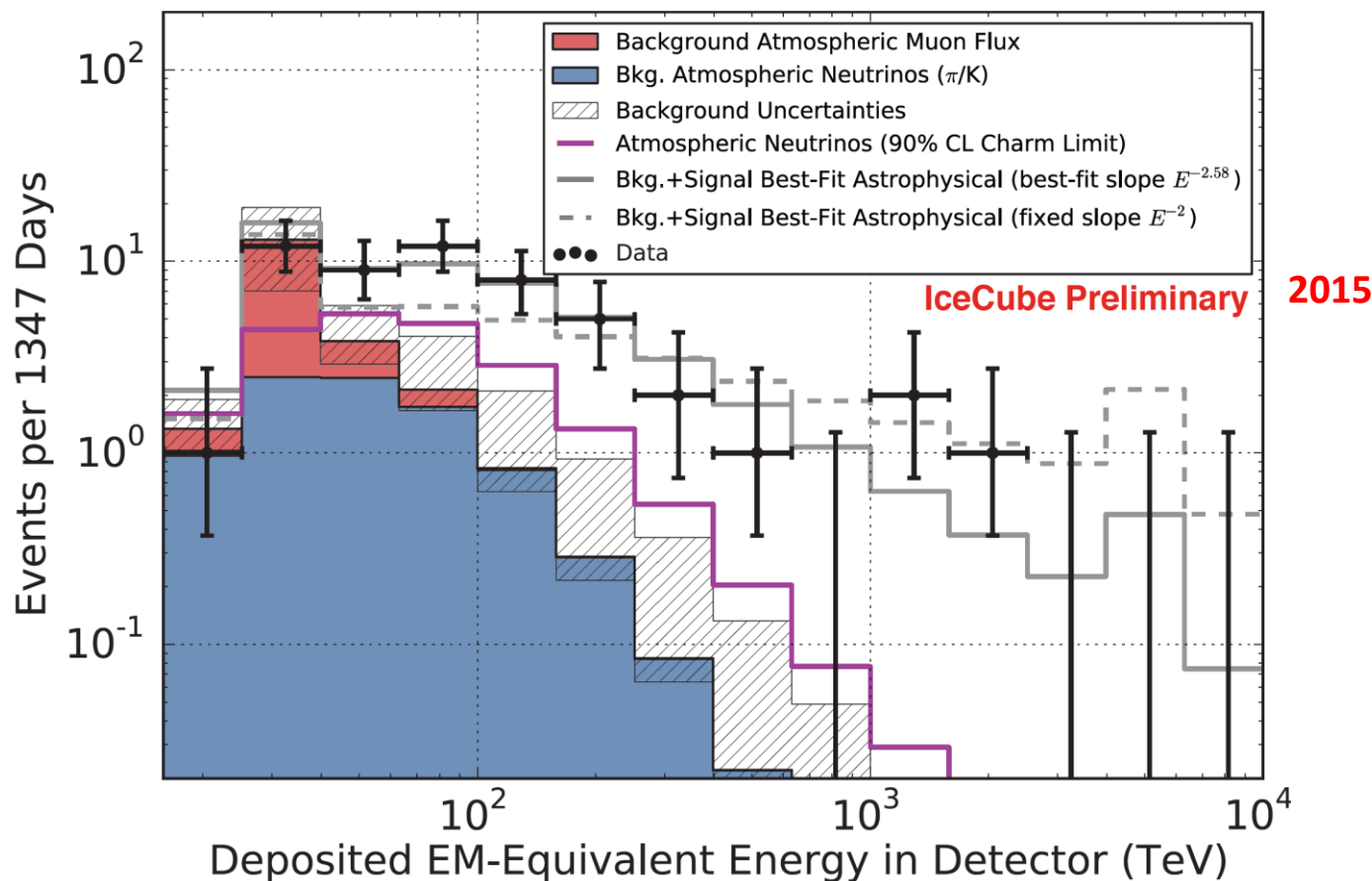


Астрофизика нейтрино высоких энергий

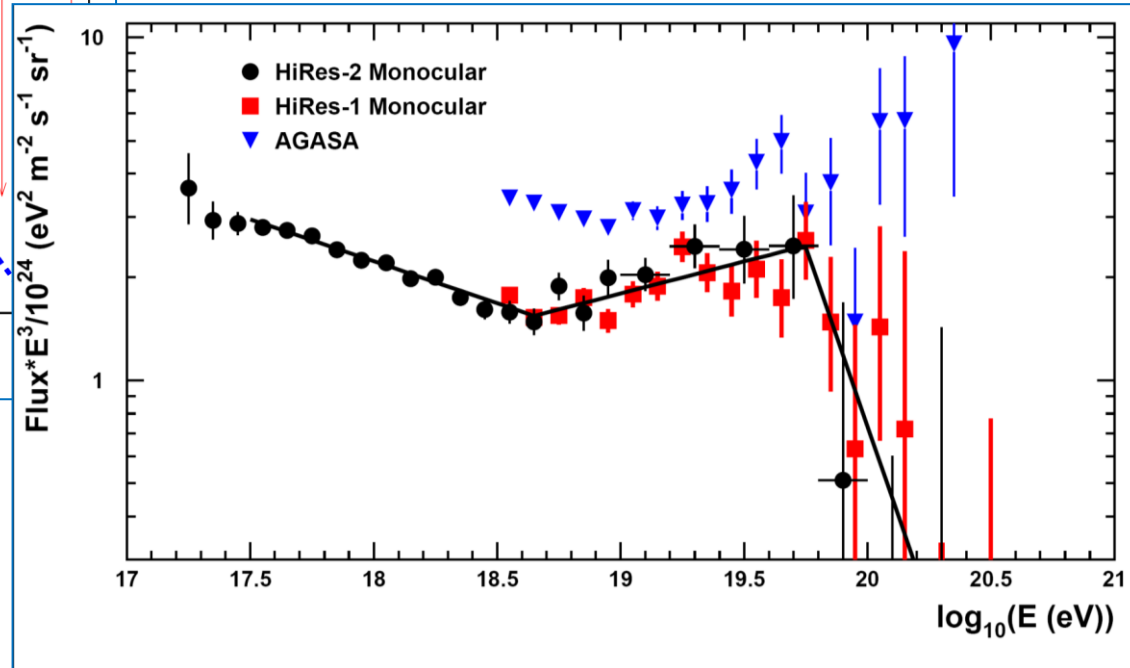
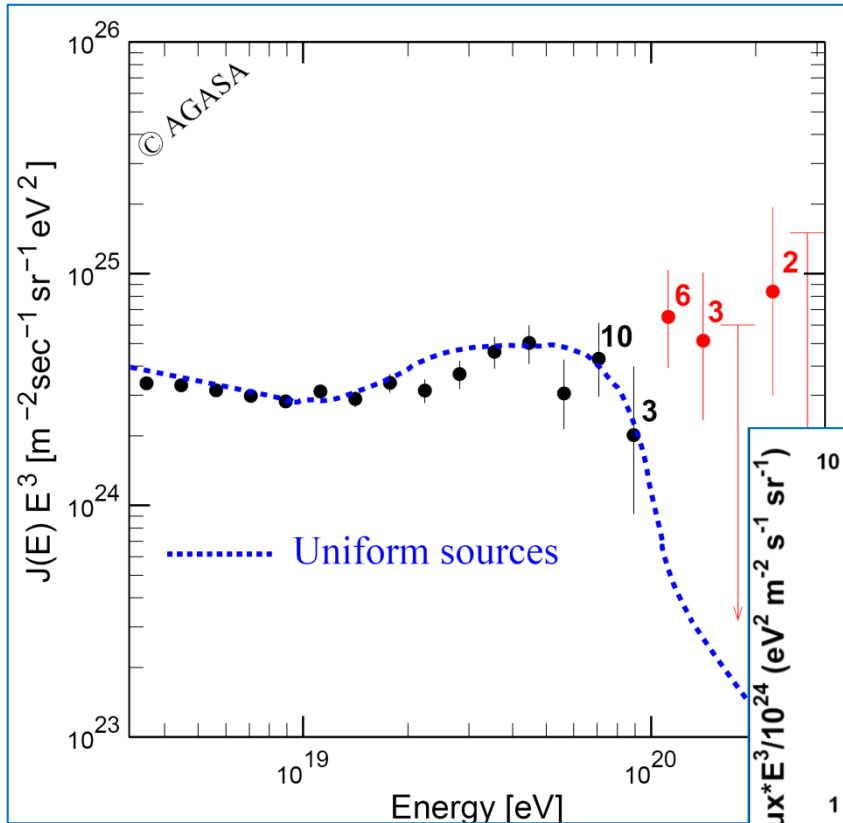


Результат IceCube

избыток нейтрино с $E > 60$ ТэВ над атмосферным фоном

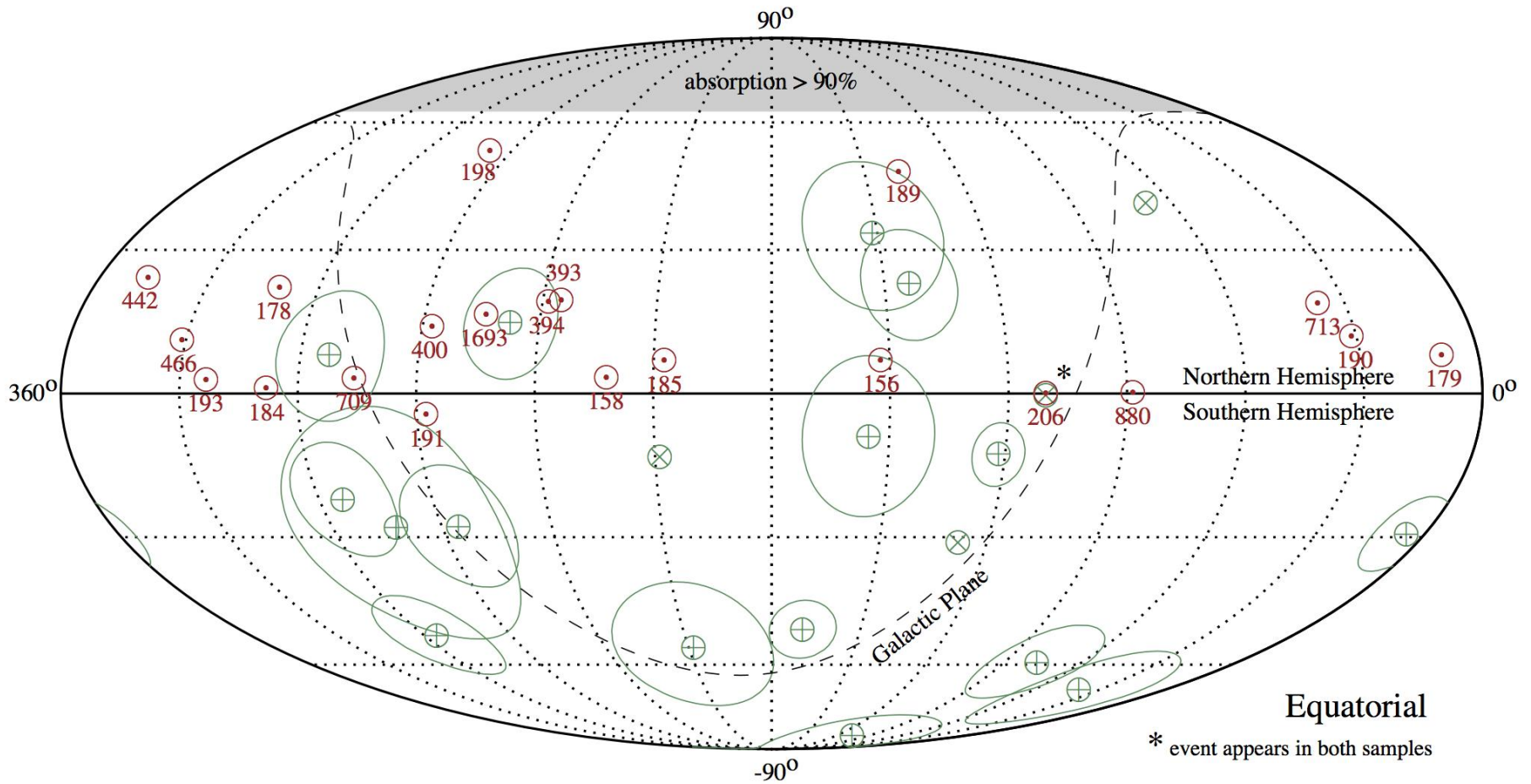


Был ли мальчик?



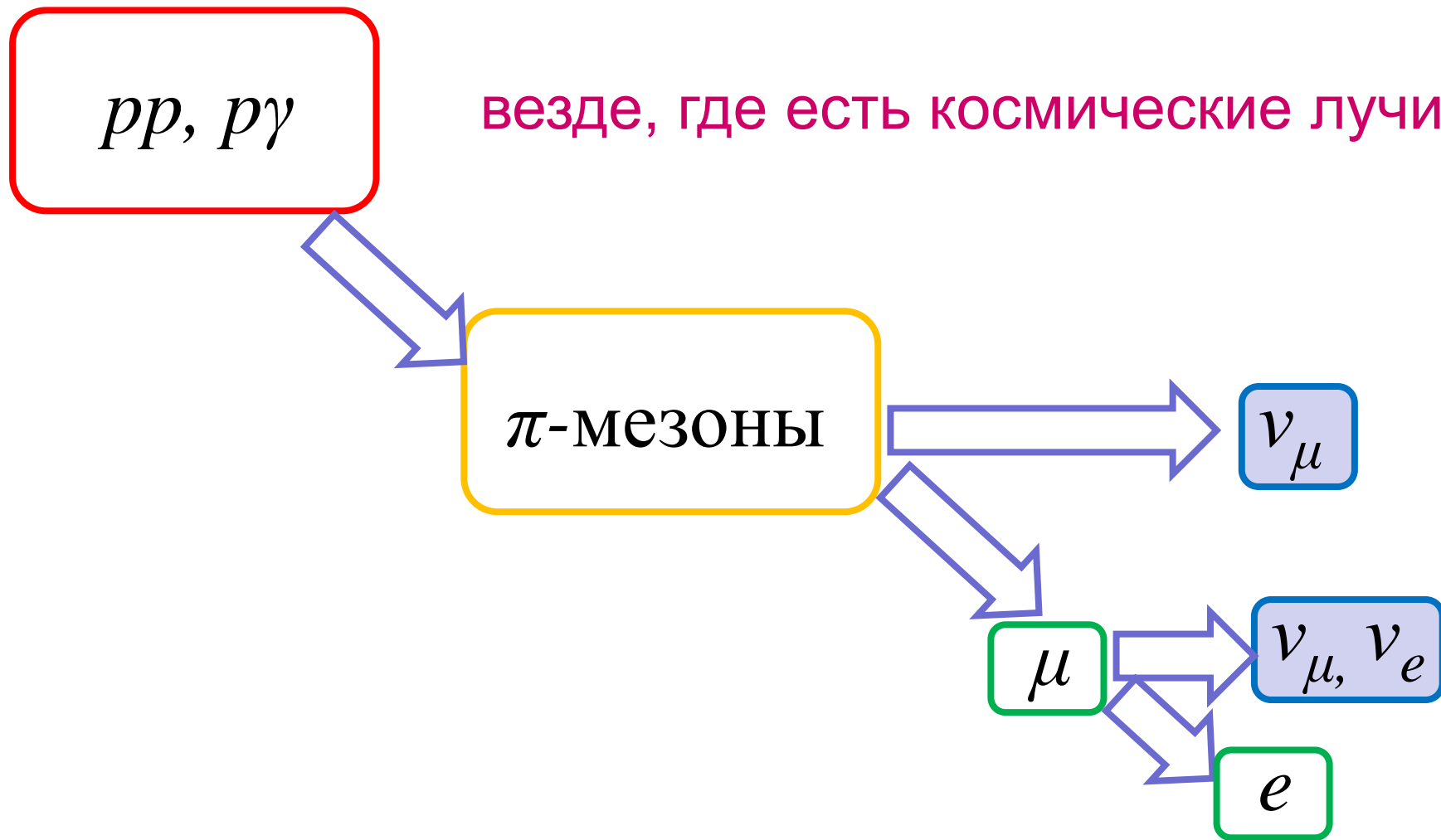
единичные события на хвосте падающего спектра...

Результат IceCube

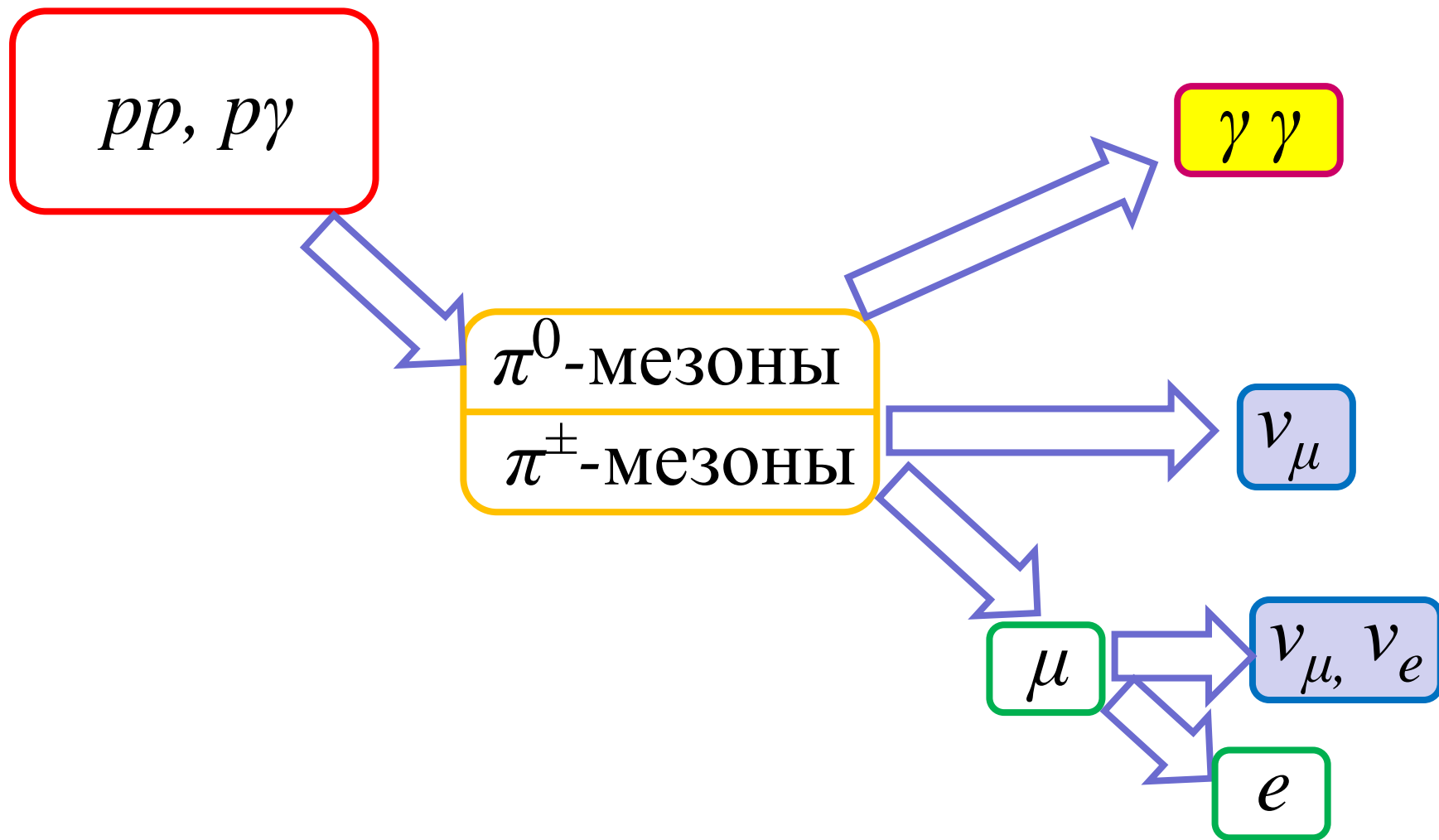


Происхождение нейтрино

везде, где есть космические лучи!



Сопутствующие фотоны



Результат IceCube

избыток нейтрино с $E > 60$ ТэВ над атмосферным фоном

- и другие тесты астрофизического происхождения событий
- отсутствие статистически значимой анизотропии (трудности Галактического объяснения)
- достаточно мягкий спектр (трудности внегалактического объяснения, трудности с FERMI LAT)
- согласуется со стандартным составом

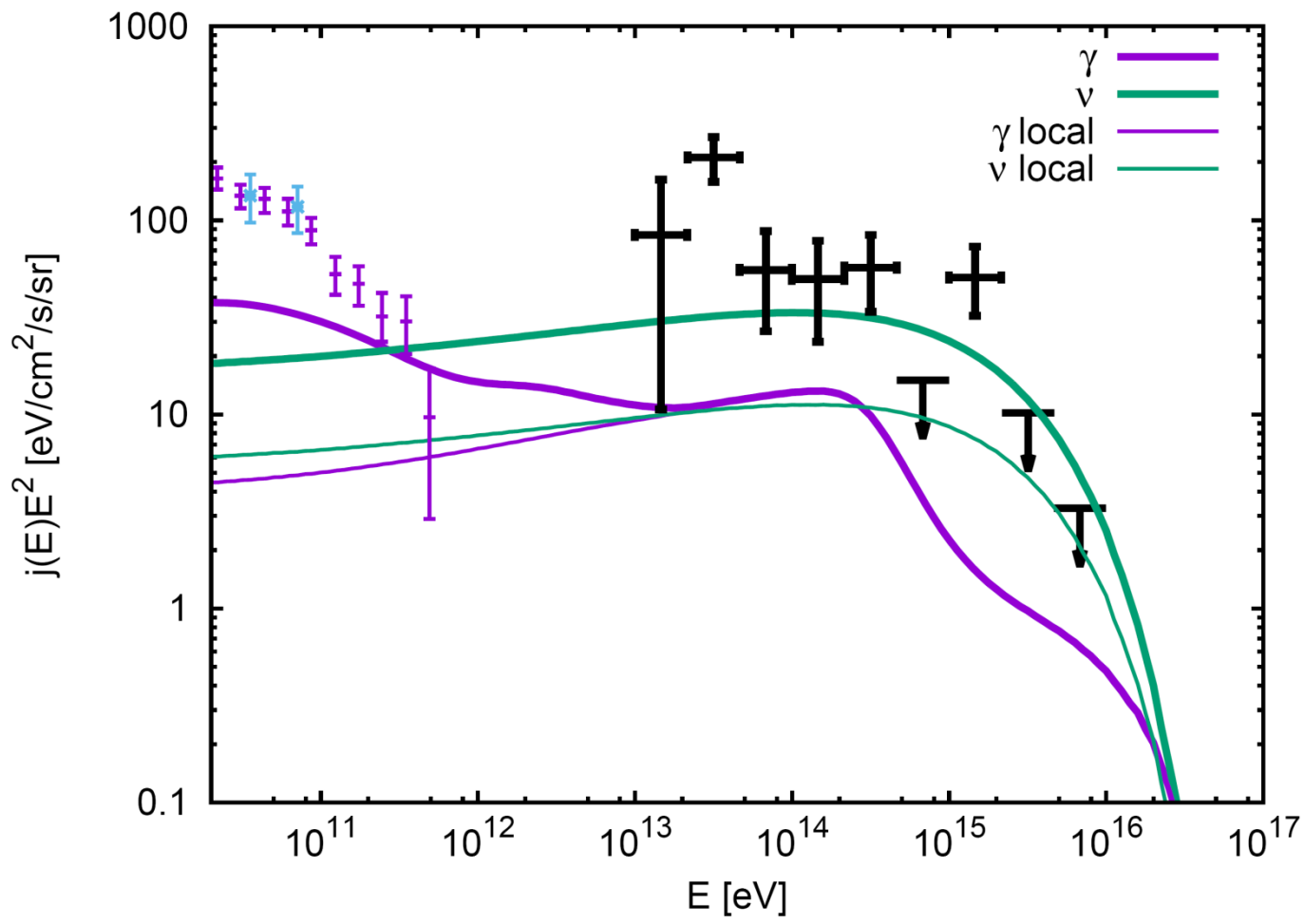
$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:1:1$$

Результат IceCube: объяснение?

взаимодействие космических лучей с внешним газовым гало

- гало до ~ 200 кпк (missing baryons)
- космические лучи, покидающие Галактику
- вклад от диска (маленький), внешнего гало (большой), чужих дисков (совсем маленький), чужих гало (большой)
- согласуется со спектром, составом, анизотропией, фотонными потоками
- тест: диффузные фотоны на 100 ТэВ

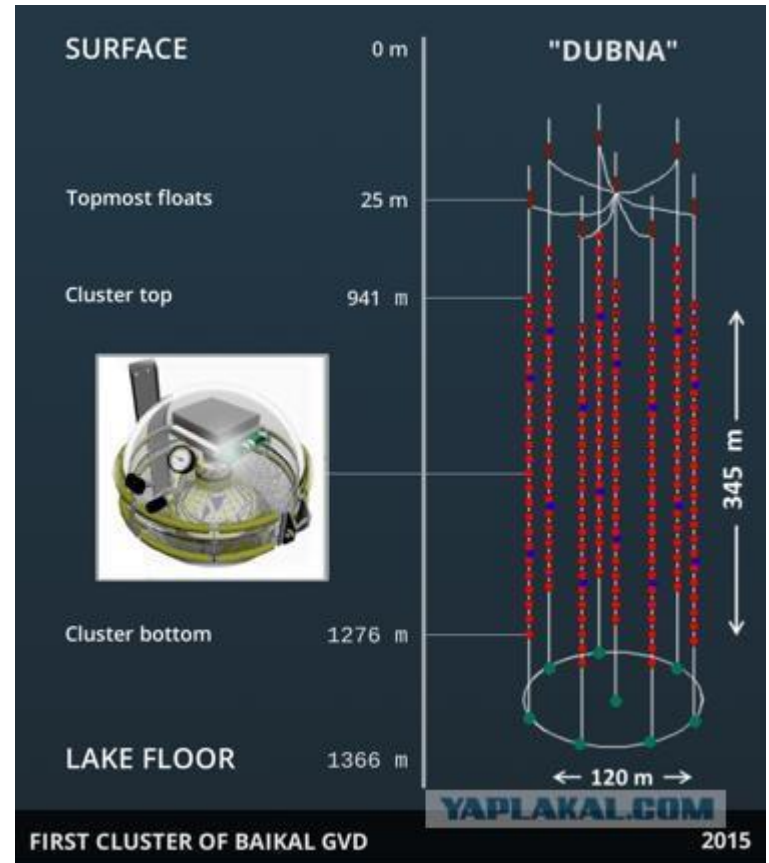
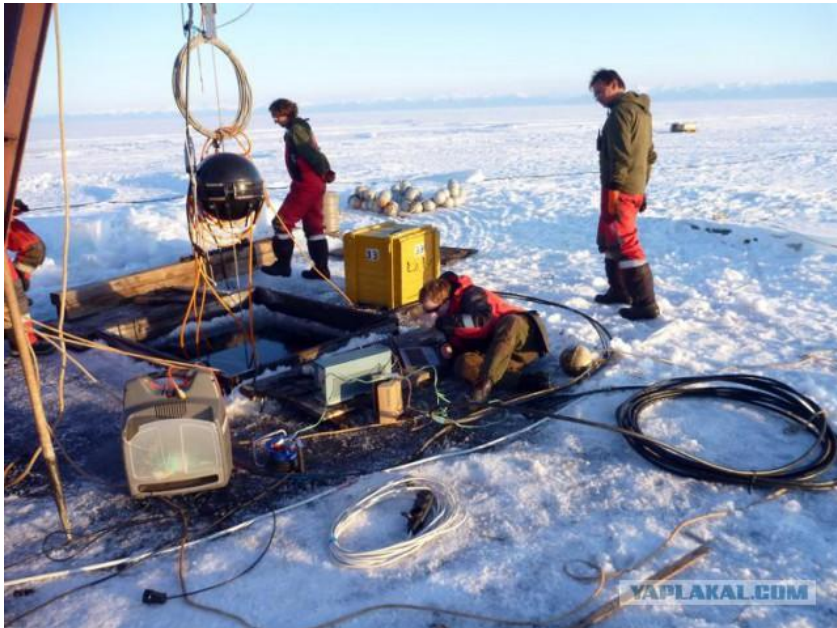
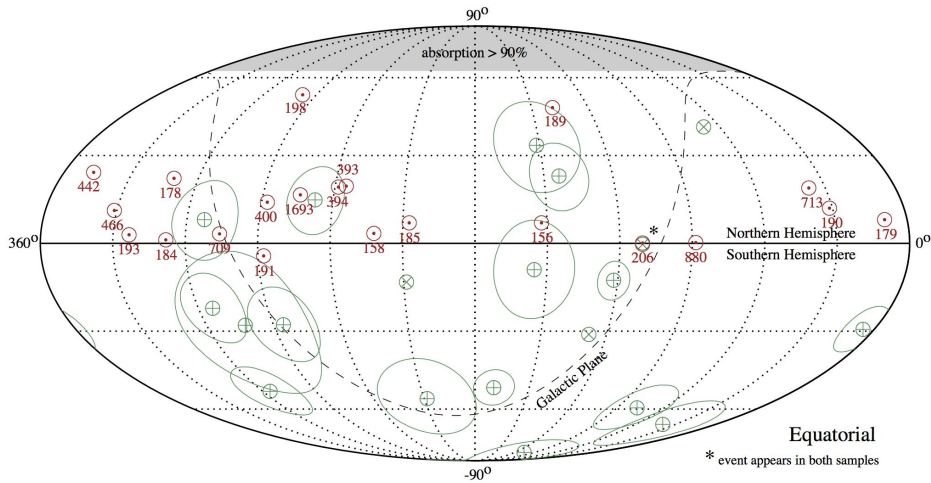
Взаимодействие космических лучей с внешним газовым гало



Диагностика

- diagnostic tool 0 : независимые измерения
 - **Baikal**, KM3NeT
- diagnostic tool 1 : спектр при высоких энергиях (cutoff?)
 - статистика (IceCube)
- diagnostic tool 2 : (ан)изотропия
 - статистика (IceCube, **Baikal**, KM3NeT)
 - угловое разрешение (**Baikal**, KM3NeT)
- diagnostic tool 3 : фотоны
 - **Ковёр**, HAWK, LHASSO, TAIGA, ЭГО
 - архивные данные мюонных детекторов

Байкальский эксперимент



- первый из 11 кластеров запущен в 2015
- аналог IceCube к 2020

Нейтринная геофизика

- исследовали внутренности Солнца, а внутренности Земли не знаем!
- использовать то, что нейтрино проходит насквозь!

Геонейтрино:

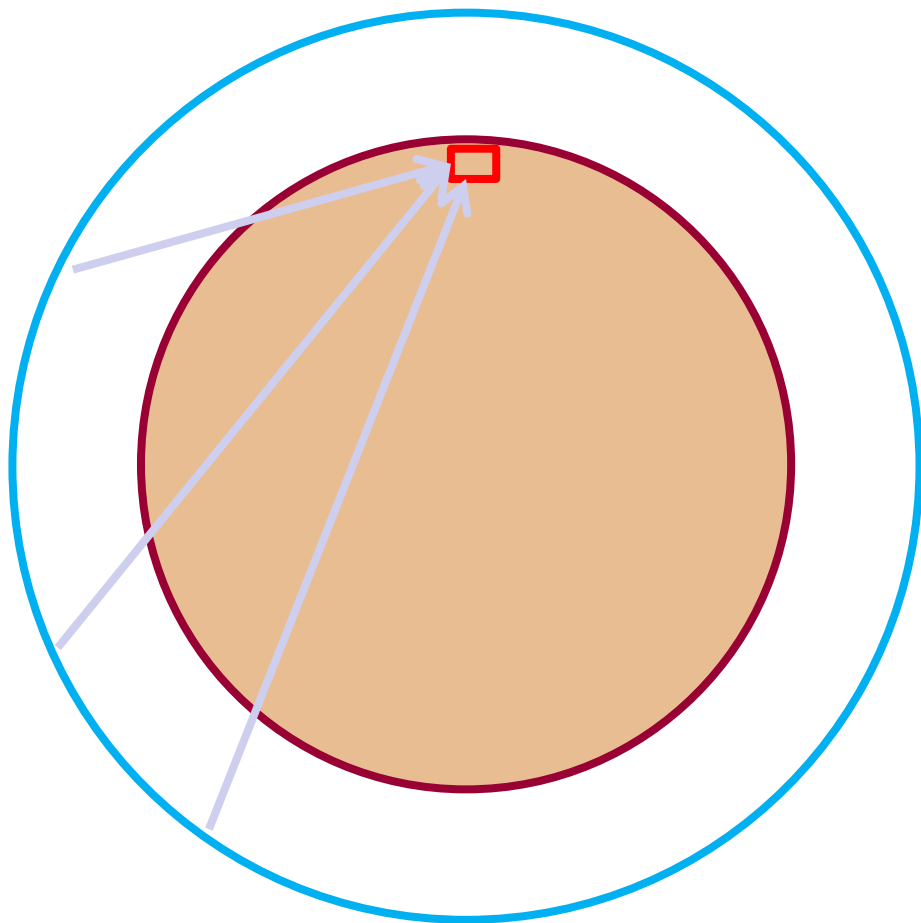
нейтрино, рожденные внутри Земли

- радиоактивные распады в земной коре и мантии

- есть ли природный ядерный реактор в центре Земли (источник разогрева...)?

⇒ нужен огромный детектор (10-20 килотонн)

Нейтриноскопия Земли

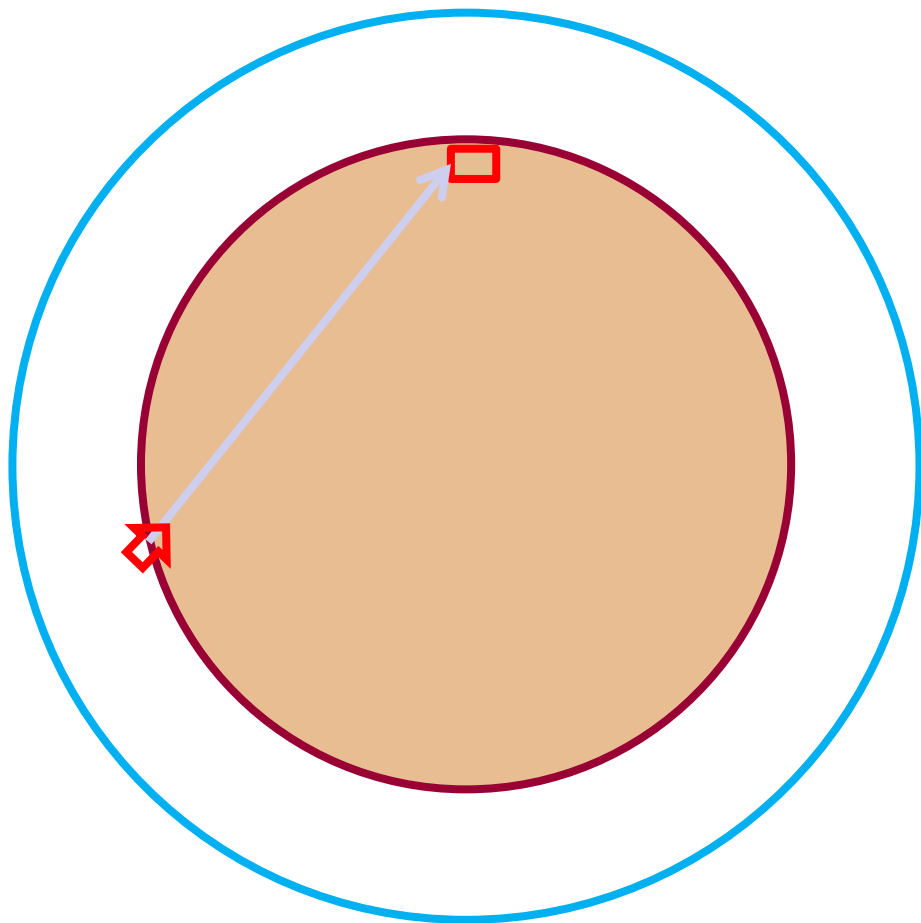


- электроны есть, а мюонов нет

- ν_e слабо взаимодействует с электронами, а ν_μ — нет

- можно изучать число электронов (химический состав)

Нейтриноскопия Земли



- электроны есть, а мюонов нет

- ν_e слабо взаимодействует с электронами, а ν_μ — нет

- можно изучать число электронов (химический состав)

- НАРИСОВАТЬ КОСИНУС
- ПОНЯТЬ ФИЗИКУ
- РАЗОБРАТЬСЯ СО СТЕРИЛЬНЫМИ НЕЙТРИНО
- ОПРЕДЕЛИТЬ ИЕРАРХИЮ МАСС
- АСТРОФИЗИКА
- ГЕОФИЗИКА

НАРИСОВАТЬ КОСИНУС

Методы:

- ускорительные нейтрино, детекторы на разных расстояниях

Задачи:

- доказательство формулы осцилляций

ПОНЯТЬ ФИЗИКУ

Методы:

- совместное обдумывание всех результатов

Задачи:

- какое именно расширение Стандартной модели нужно?

СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО

Методы:

- повторение и уточнение аномальных результатов

Задачи:

- открыть стерильное нейтрино и получить еще одну Нобелевскую премию

ИЕРАРХИЯ, ГЕОФИЗИКА, АСТРОФИЗИКА

PINGU, ORCA, НЕРПА –
высокоточные аналоги IceCube и Байкала

Методы:

- сравнение атмосферных потоков сверху и снизу
- ускорительный поток сквозь Землю

Задачи:

- исследование осцилляций: знак иерархии масс
- исследование внутреннего строения Земли (A/Z)
- исследование точечных астрофизических источников

ГЕОНЕЙТРИНО И СВЕРХНОВЫЕ

Методы:

- огромные сцинтилляционные детекторы

Задачи:

- детектирование нейтрино от земной коры, мантии и ядра (модели Земли)
- ожидание взрыва SN и детектирование фона от совокупности далеких SN (разобраться с двойным нейтринным сигналом SN1987A)

Практические приложения:

- геотермальная энергия
- происхождение и поиски углеводородов
- прогнозирование природных катаклизмов

Практические приложения:

- геотермальная энергия
- происхождение и поиски углеводородов
- прогнозирование природных катаклизмов
- **разработка уникальных технологий**, потом переходящих в массовое производство