

**Фундаментальные
представления современной
физики:
от взаимодействий
элементарных частиц до
структурь и эволюции
Вселенной**

Лекция 10

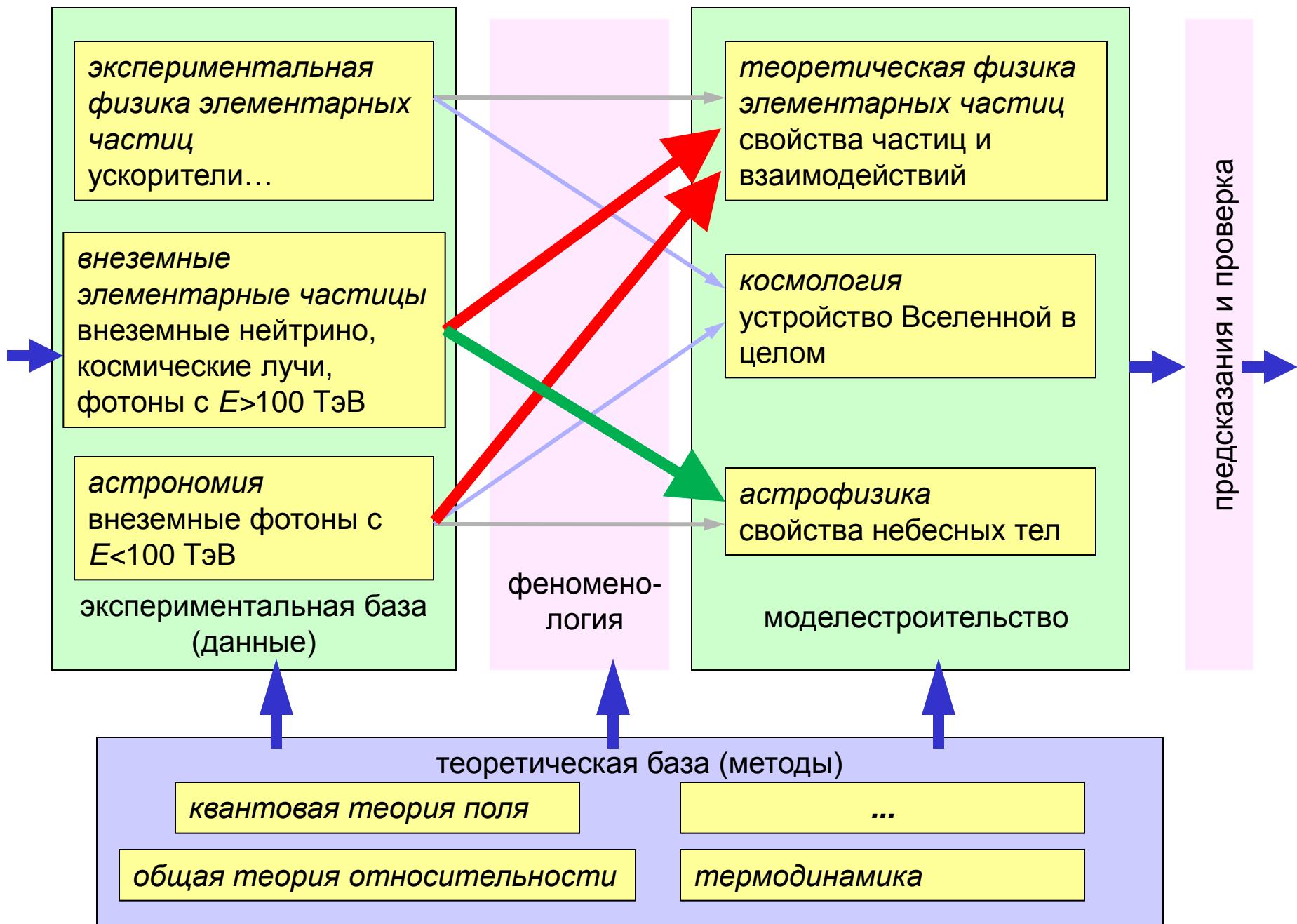
Основные разделы курса:

- понятия и принципы квантовой физики;
- квантовые физические системы в макро- и микромире;
- квантовая логика, квантовые вычисления, квантовая телепортация;
- релятивистские квантовые поля как универсальная форма существования материи;
- элементарные частицы и типы их взаимодействий;
- свойства современной Вселенной;
- асимметрия между веществом и антивеществом во Вселенной;
- тёмная материя и тёмная энергия;
- основные этапы космологической эволюции;
- инфляционная космология;
- астрофизика высоких и сверхвысоких энергий

Астрофизика элементарных частиц:

- 1) изучение астрофизических объектов методами физики частиц**
- 2) изучение свойств частиц методами астрофизики**

Как устроен мир?



Астрофизика элементарных частиц:



почему?

- *полезно*: «многое можно узнать»...
недостижимые в экспериментах условия
- *интересно*: объединяет все области
 - теория
 - моделестроительство
 - феноменология
 - работа с данными
- *актуально*: дешевизна и доступность данных

Приблизительная стоимость экспериментов:

Ускоритель **LHC**

$\$ 9 \times 10^9$

*физика элементарных
частиц*

Спутник **FERMI**

$\$ 6.9 \times 10^8$

астрономия

Обсерватория **Auger**

$\$ 5.3 \times 10^7$

космические лучи

Эксперимент **ICECUBE**

$\$ 2.7 \times 10^8$

космические нейтрино

Астрофизика элементарных частиц:



почему?

- *полезно*: «многое можно узнать»...
недостижимые в экспериментах условия
- *интересно*: объединяет все области
 - теория
 - моделестроительство
 - феноменология
 - работа с данными
- *актуально*: дешевизна и доступность данных
- *интересно*: возможность проверки нестандартных сценариев
(короткий путь от данных к интерпретации)

Астрофизика элементарных частиц:



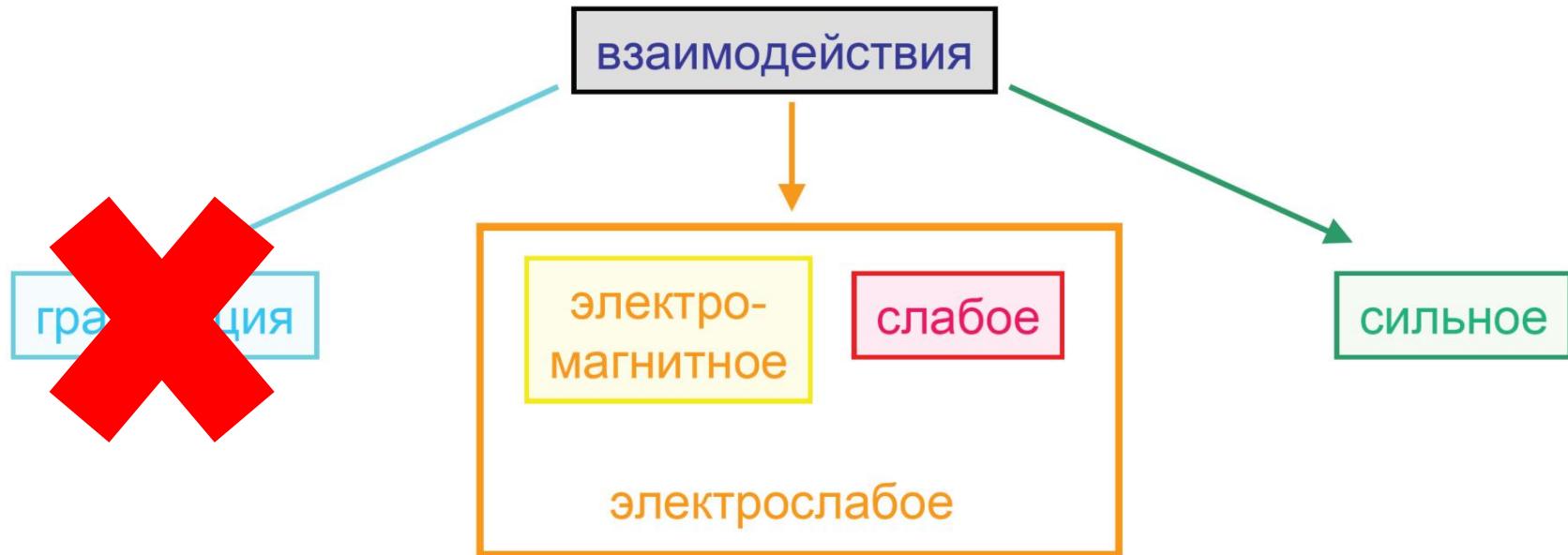
как это работает?

Два примера:

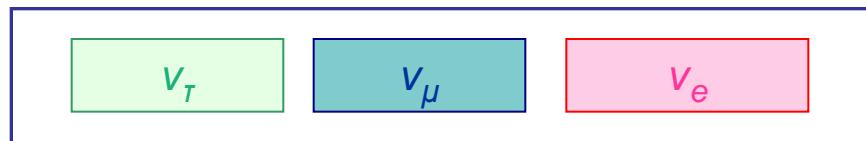
- солнечные нейтрино
- нейтрино от сверхновой 1987A

солнечные нейтрино

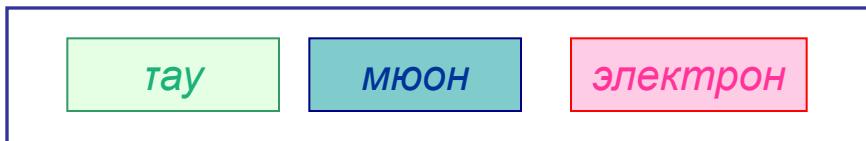
Стандартная модель физики частиц: взаимодействия частиц



Стандартная модель физики частиц : элементарные частицы

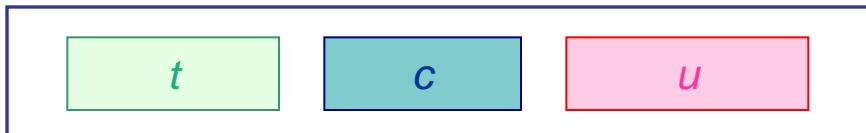


нейтрино

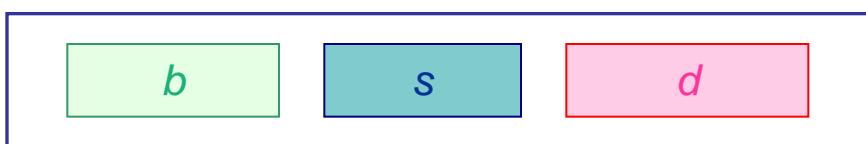


заряженные лептоны

лептоны



«верхние» кварки



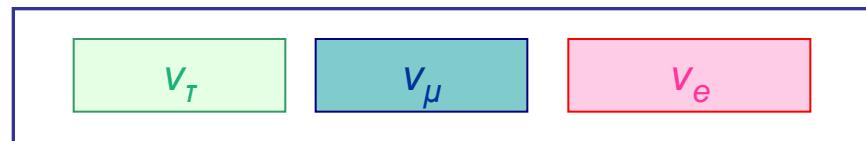
«нижние» кварки

кварки

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

бозон Хиггса

Стандартная модель физики частиц: нейтрино



нейтрино



заряженные лептоны

лептоны



«верхние» кварки



«нижние» кварки

кварки

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

бозон Хиггса

Стандартная модель физики частиц: нейтрино

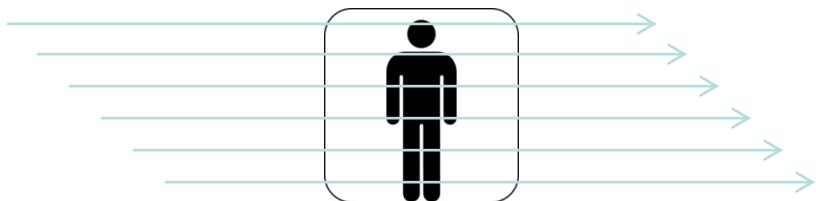
ν_T

ν_μ

ν_e

нейтрино

- испытывают только слабое взаимодействие, поэтому практически не регистрируются
- масса близка к нулю (не измерена)



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

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

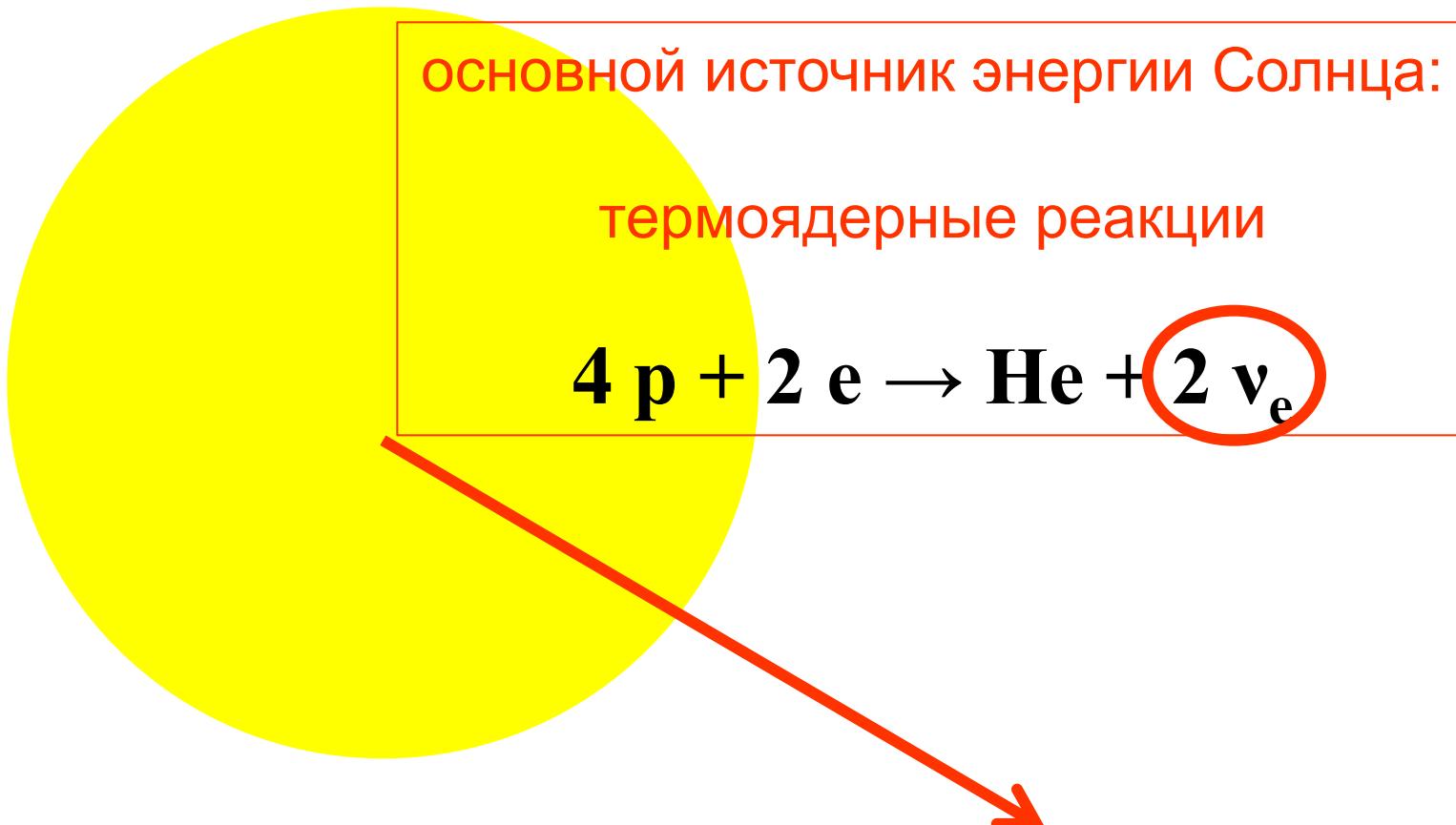
[В.С. Высоцкий, 1964]

солнечные нейтрино

астрономия  модель Солнца  предсказания потока нейтрино

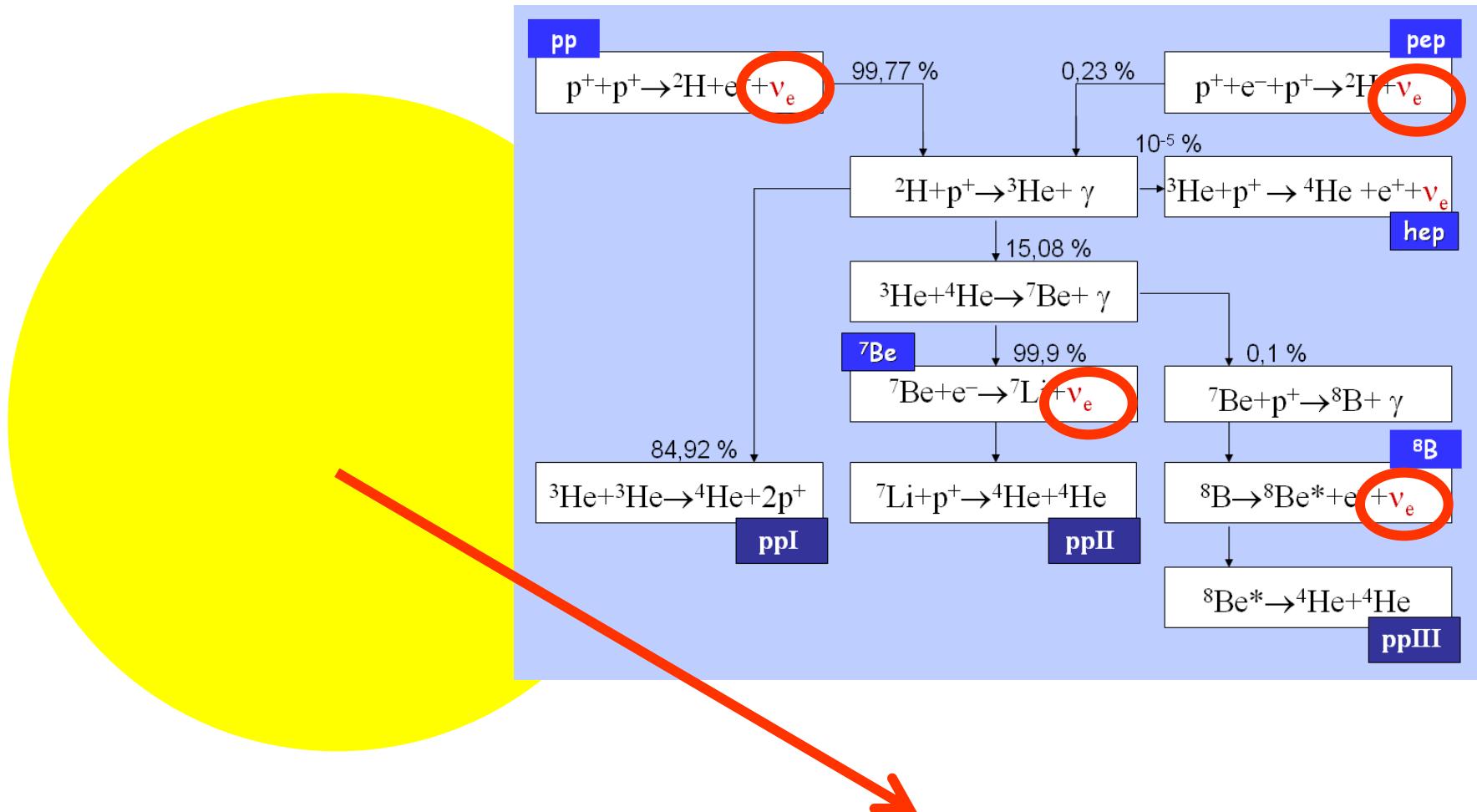
солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино



солнечные нейтрино

астрономия \rightarrow модель Солнца \rightarrow предсказания потока нейтрино



солнечные нейтрино

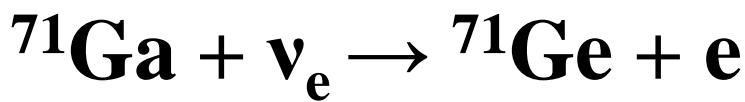
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино

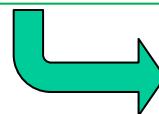
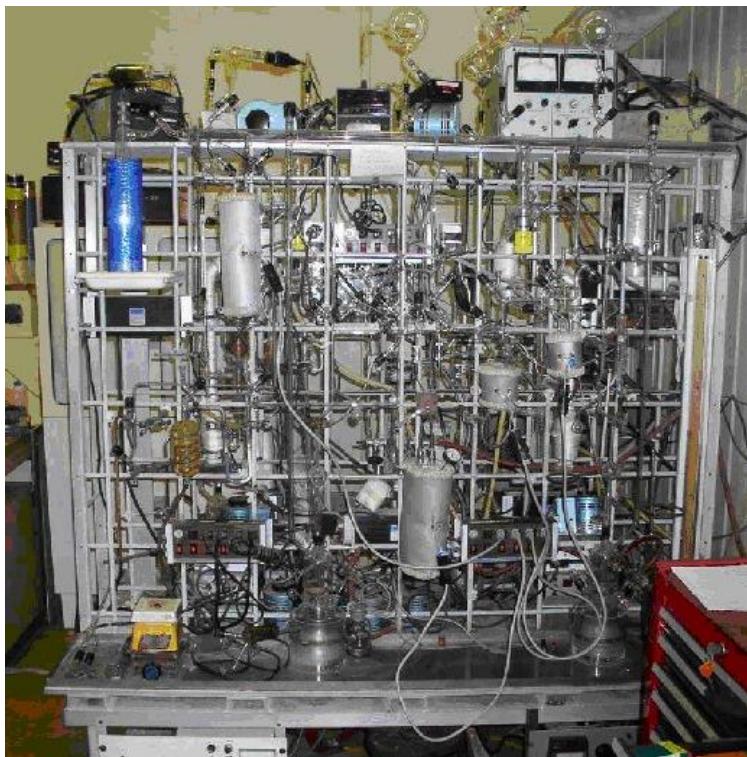
Пример: галлий-германиевый детектор
(чувствителен к нейтрино основного pp-канала)

Баксанская нейтринная обсерватория
ИЯИ РАН, Приэльбрусье



солнечные нейтрино

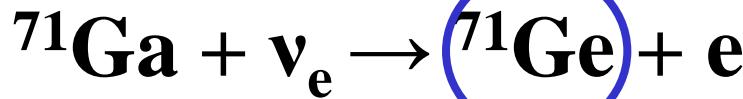
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино

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

Баксанская нейтринная обсерватория
ИЯИ РАН, Приэльбрусье



60 тонн

15 атомов

солнечные нейтрино

астрономия \rightarrow модель Солнца \rightarrow предсказания потока нейтрино

изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:

$127.9 \pm 8.1 \text{ snu}$

\neq

$65.4 \pm 4.1 \text{ snu}$

измерение потока нейтрино

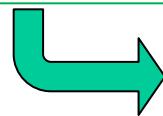


[для галлий-германиевого эксперимента]

солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино

изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:

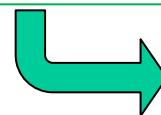


измерение потока нейтрино

солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино

изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино



изучение свойств частиц
методами астрофизики



**ОСЦИЛЛЯЦИИ
нейтрино!!!**

единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц

солнечные нейтрино

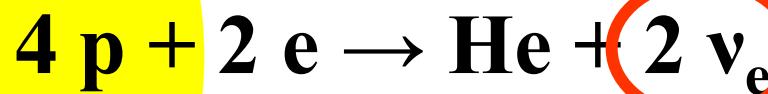
**осциляции
нейтрино!!!**

единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц

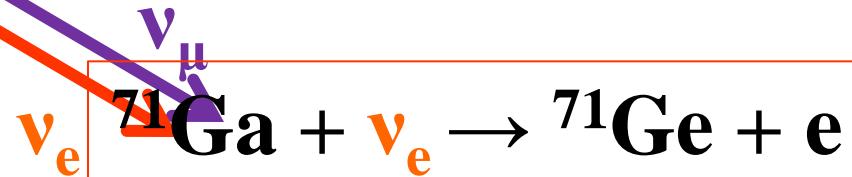
солнечные нейтрино

осцилляции нейтрино!!!

единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц



ν_e

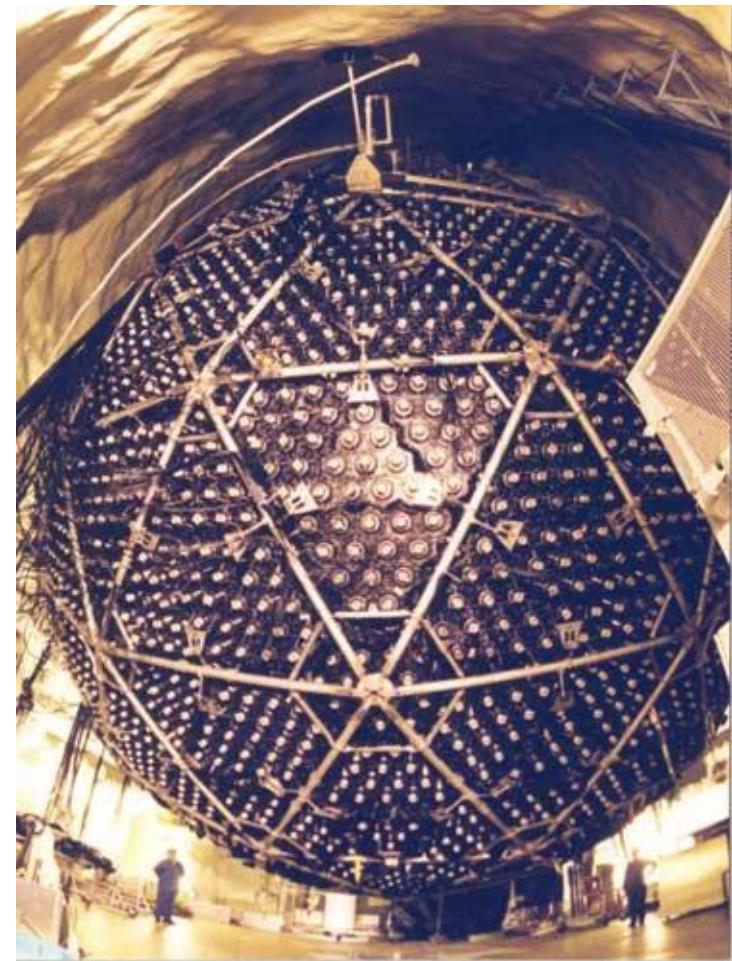
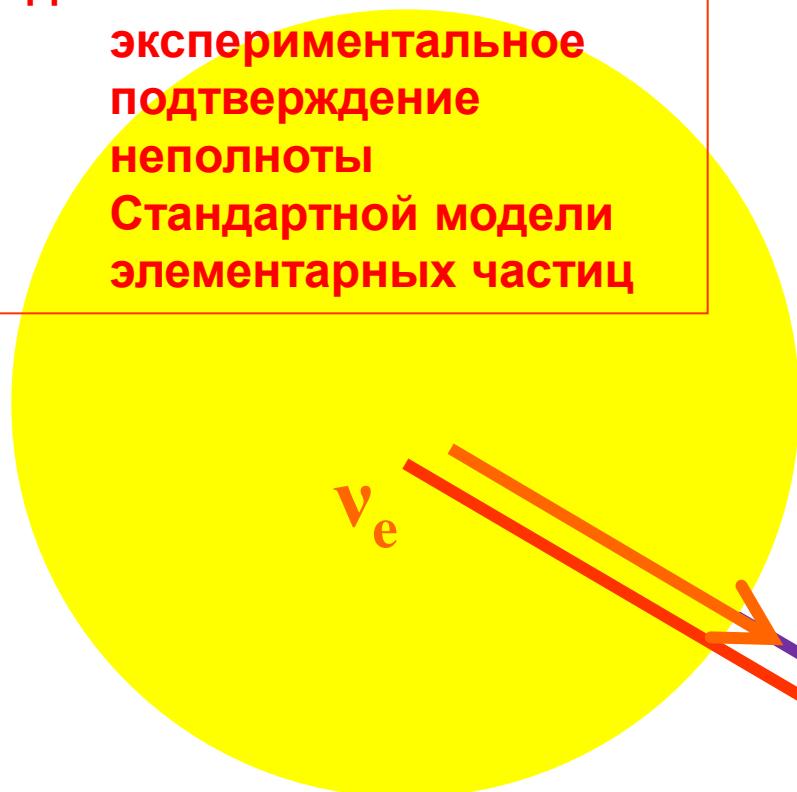


ν_μ
 ν_e

солнечные нейтрино

осцилляции нейтрино!!!

единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц

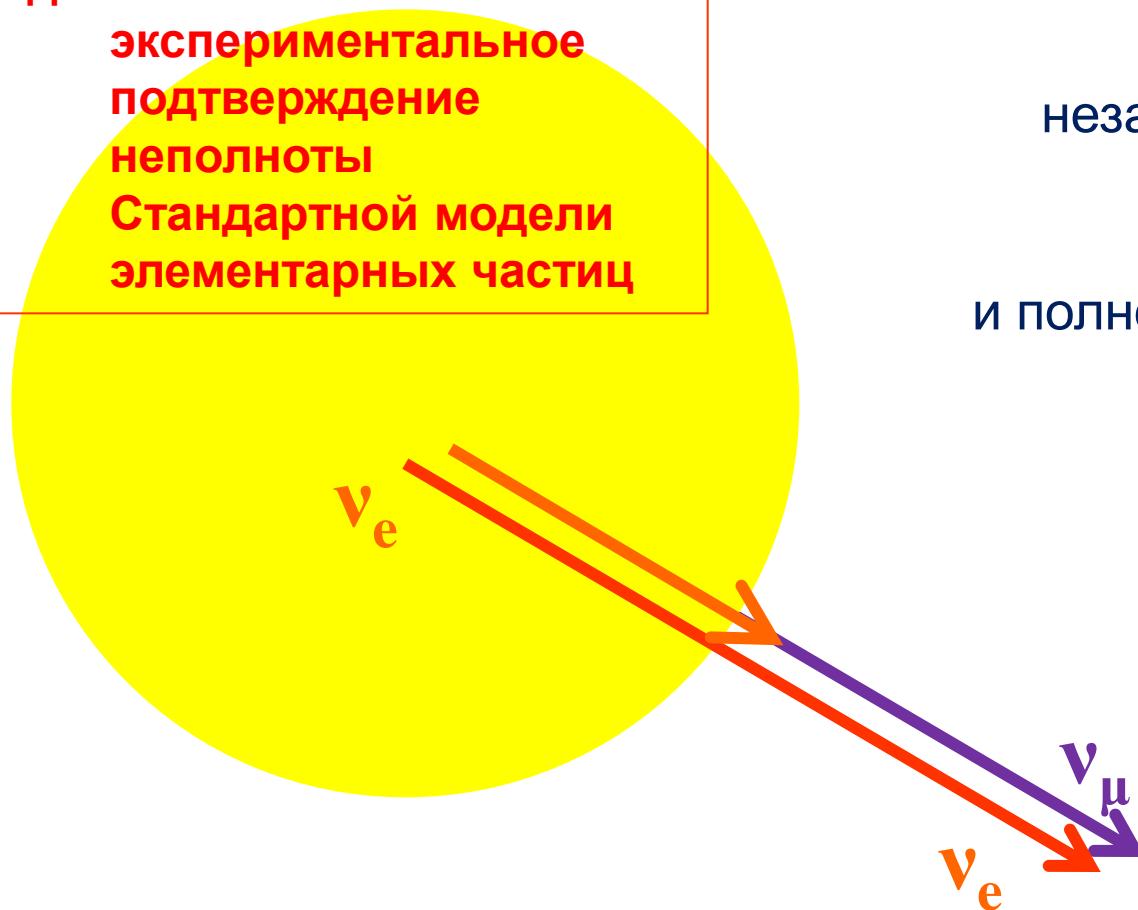


SNO
Sudbury, Canada

солнечные нейтрино

осцилляции нейтрино!!!

единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц



независимое измерение

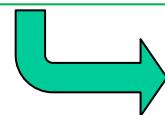
потока ν_e
и полного потока ν всех типов

SNO
Sudbury, Canada

солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино

изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино



изучение свойств частиц
методами астрофизики



**ОСЦИЛЛЯЦИИ
нейтрино!!!**

единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц

Стандартная модель элементарных частиц

массы нейтрино запрещены
симметриями Стандартной модели



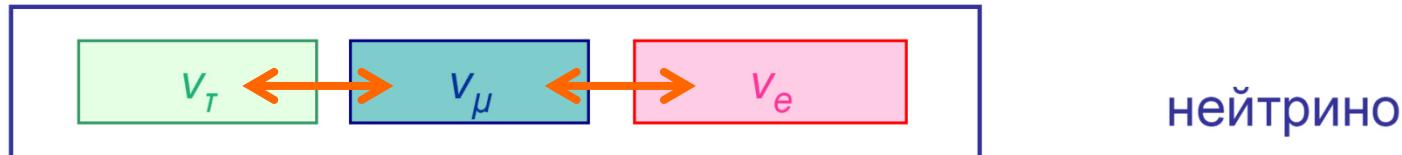
тип нейтрино сохраняется
при нулевой массе

Осцилляции нейтрино

массы нейтрино запрещены
симметриями Стандартной модели

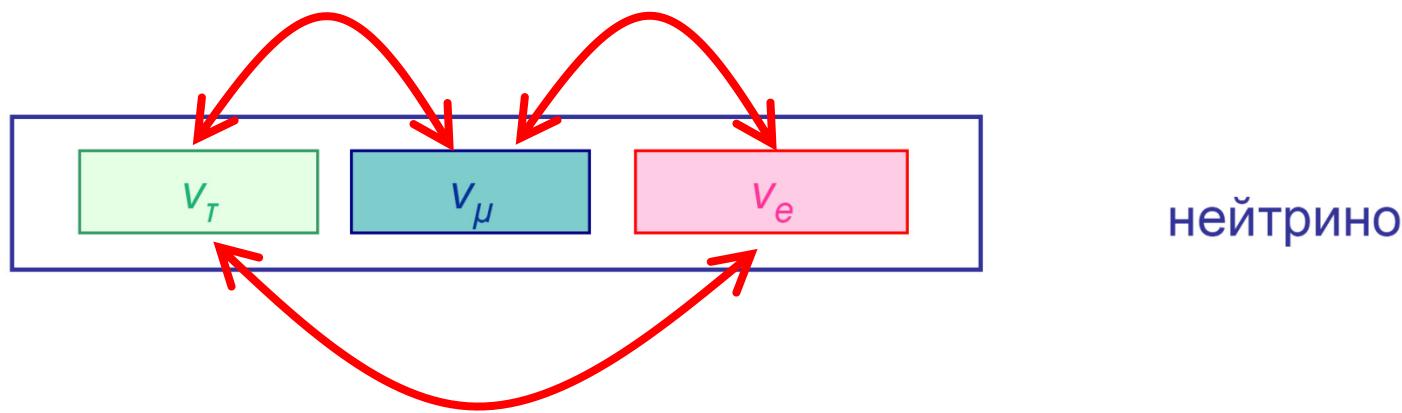
типа нейтрино сохраняется
при нулевой массе

изменения типа нейтрино
достоверно
зарегистрированы экспериментально



Осцилляции нейтрино:

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

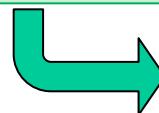


«стандартная» картина осцилляций 3-х типов нейтрино
(расширение Стандартной модели физики частиц!)

солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино

изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино

изучение свойств частиц
методами астрофизики



**ОСЦИЛЛЯЦИИ
нейтрино!!!**

единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц

солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино

изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



подтверждение
солнечной модели!



измерение потока нейтрино

**ОСЦИЛЛЯЦИИ
нейтрино!!!**

единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц



изучение свойств частиц
методами астрофизики



солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино

изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



подтверждение
солнечной модели!



измерение потока нейтрино

**ОСЦИЛЛЯЦИИ
нейтрино!!!**

единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц



изучение свойств частиц
методами астрофизики



Нобелевская премия 2002 г.
Но история на этом не закончилась...

солнечные нейтрино

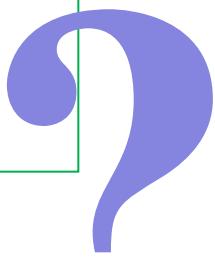
гелиосейсмология:

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?

Астрофизика элементарных частиц:



как это работает?

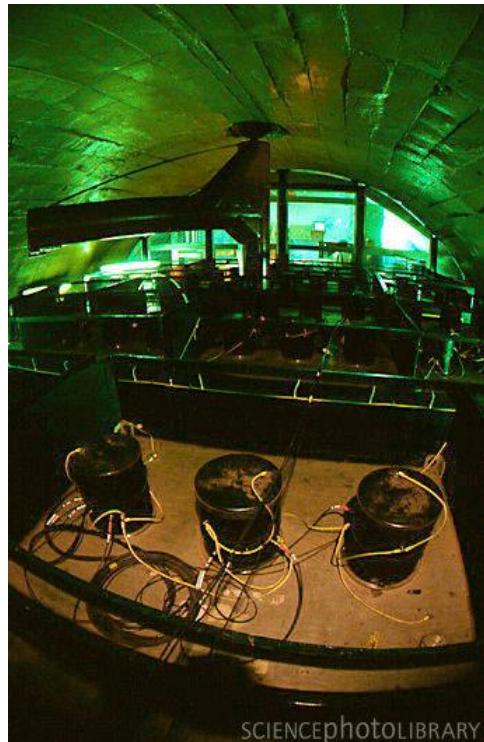
Два примера:

- солнечные нейтрино
- нейтрино от сверхновой 1987A

нейтрино от сверхновой 1987A

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

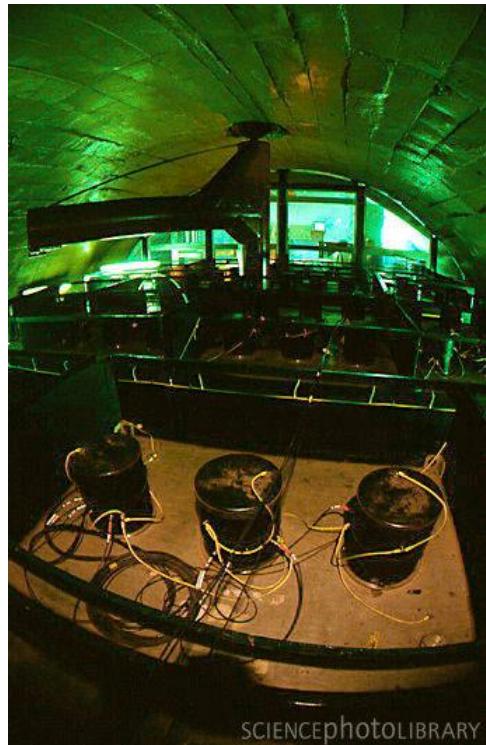
23 февраля 1987 г.



нейтрино от сверхновой 1987А

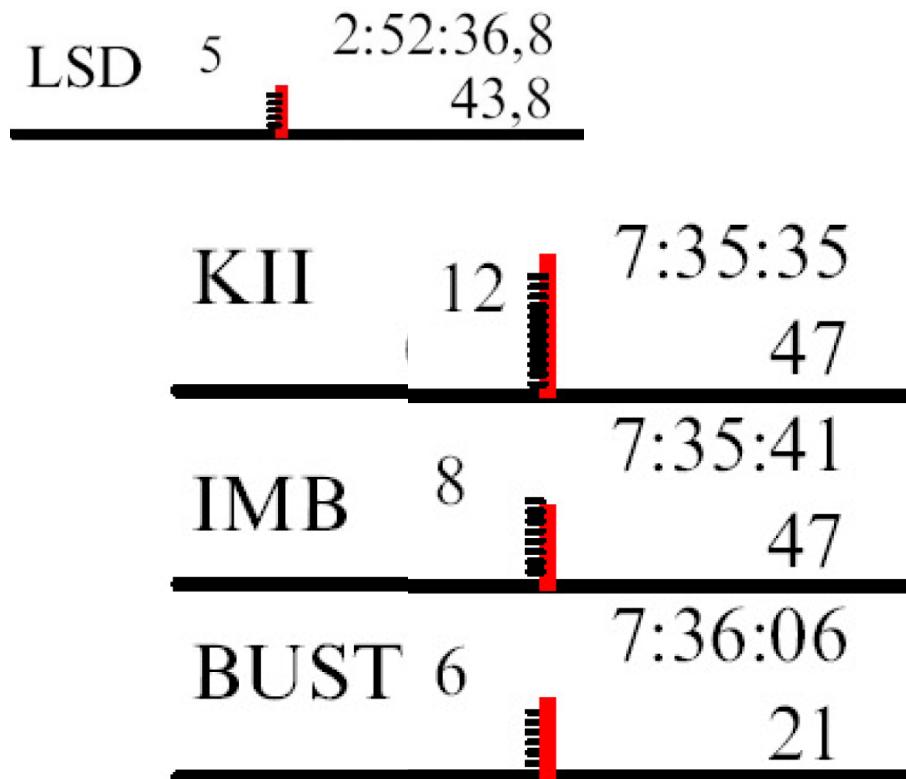
23 февраля 1987 г.

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



нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



© Anglo-Australian Observatory/David Malin Images

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

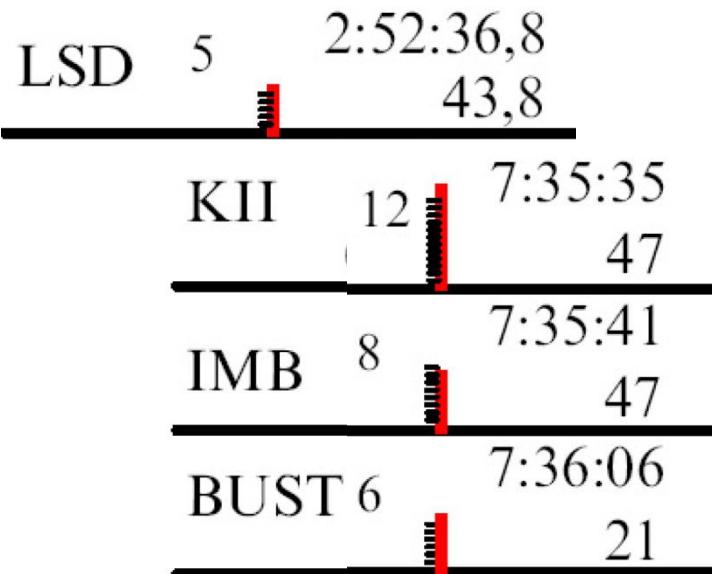
10:38



© Anglo-Australian Observatory/David Malin Images

нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



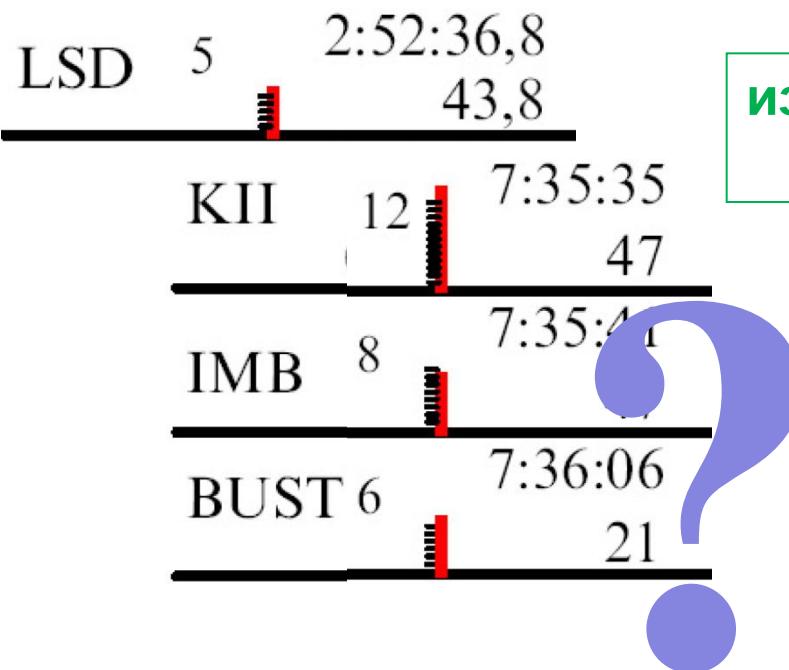
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:

- 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.



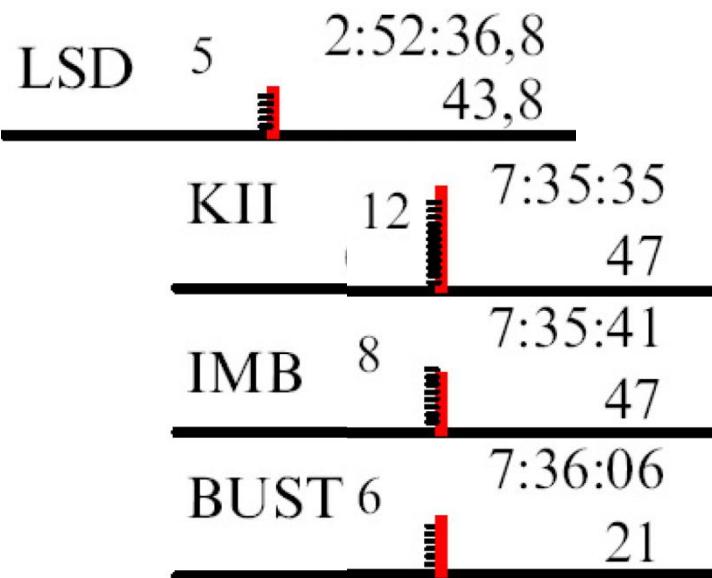
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц?

двойной нейтринный сигнал
не объяснен!

изучение свойств частиц
методами астрофизики?

нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



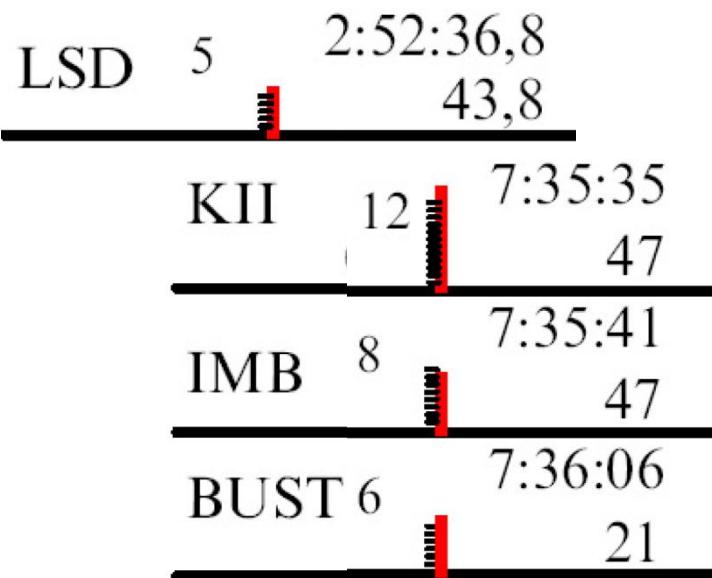
изучение свойств частиц
методами астрофизики:

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

ограничения на ряд свойств нейтрино
и на параметры гипотетических
легких частиц

нейтрино от сверхновой 1987A

23 февраля 1987 г.



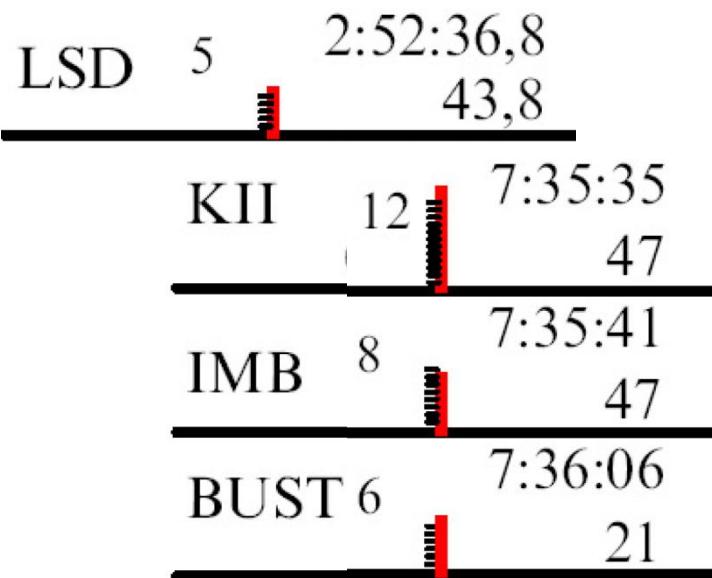
изучение свойств частиц
методами астрофизики:

ограничения на параметры
гипотетических легких частиц

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

нейтрино от сверхновой 1987A

23 февраля 1987 г.



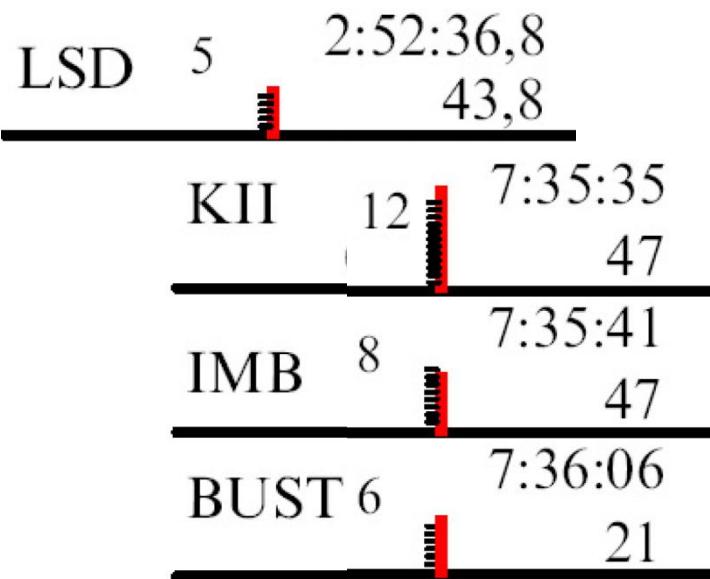
изучение свойств частиц
методами астрофизики:

ограничения на ряд свойств нейтрино

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

нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



изучение свойств частиц
методами астрофизики:

ограничения на ряд свойств нейтрино

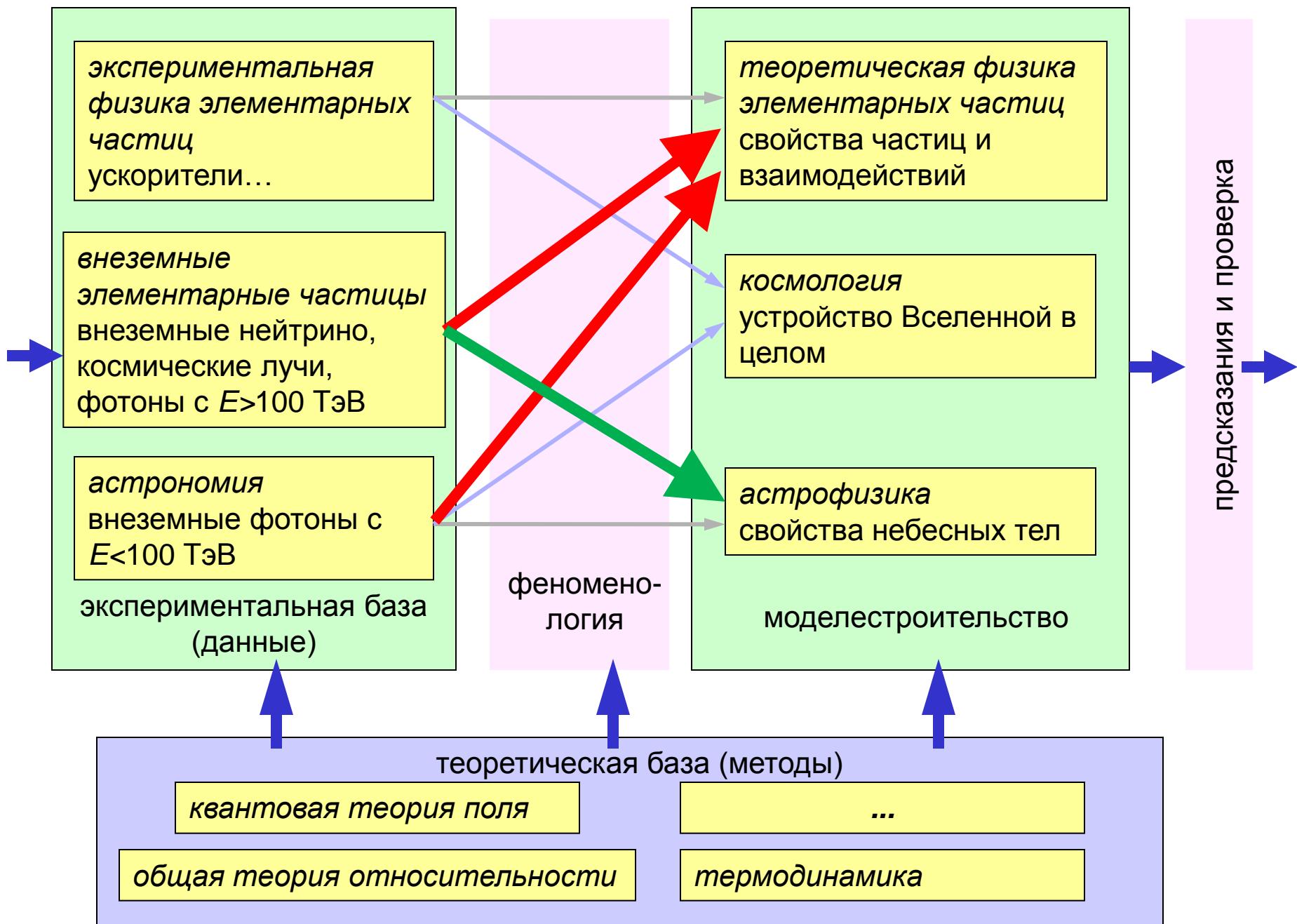
- масса
- заряд
- параметры осцилляций
- магнитный момент
- скорость движения
- ...

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

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

Астрофизика элементарных частиц:

- 1) изучение астрофизических объектов методами физики частиц**
- 2) изучение свойств частиц методами астрофизики**



Астрофизика элементарных частиц:



почему?

- *полезно*: «многое можно узнать»...
недостижимые в экспериментах условия
- *интересно*: объединяет все области
 - теория
 - моделестроительство
 - феноменология
 - работа с данными
- *актуально*: дешевизна и доступность данных
- *интересно*: возможность проверки нестандартных сценариев
(короткий путь от данных к интерпретации)

Основные разделы курса:

- понятия и принципы квантовой физики;
- квантовые физические системы в макро- и микромире;
- квантовая логика, квантовые вычисления, квантовая телепортация;
- релятивистские квантовые поля как универсальная форма существования материи;
- элементарные частицы и типы их взаимодействий;
- свойства современной Вселенной;
- асимметрия между веществом и антивеществом во Вселенной;
- тёмная материя и тёмная энергия;
- основные этапы космологической эволюции;
- инфляционная космология;
- астрофизика высоких и сверхвысоких энергий

Что мы выучили?

**мир на масштабе атомов описывается
квантовой физикой**

- вероятностное описание
- многочисленные экспериментальные проверки
- прямое практическое применение в технологиях

Что мы выучили?

**мир элементарных частиц описывается
квантовой теорией поля**

- союз квантовой физики и специальной теории относительности
(вероятностное описание, причинность, рождение и уничтожение частиц)
- многочисленные экспериментальные проверки
- косвенный эффект для развития технологий
(www!)

Что мы выучили?

Стандартная модель элементарных частиц

- применение квантовой теории поля к описанию электрослабого и сильного взаимодействий
- «зоопарк» частиц
- прекрасное согласие с экспериментом
- достоверно не полна (массы нейтрино)
- 19 параметров со странными значениями (естественность или антропный принцип?)

Что мы выучили?

**космология – наука о строении и эволюции
Вселенной в целом**

- количественная наука с многочисленными независимыми наблюдательными результатами
- стандартная модель горячей Вселенной («Большой взрыв»)
- проблема начальных условий – разные модели Вселенной до Большого взрыва (наиболее популярная – инфляция)

Что мы выучили?

междисциплинарные связи

- ранняя Вселенная = мир квантовых взаимодействующих элементарных частиц (высокие температуры = большие энергии = малые расстояния!)
- космология ставит вопросы физике частиц (тёмная материя, барионная асимметрия, ускоренное расширение...)
- астрофизика частиц (космос как лаборатория физики частиц, регистрация частиц от астрономических объектов)

