

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

Лекция 10

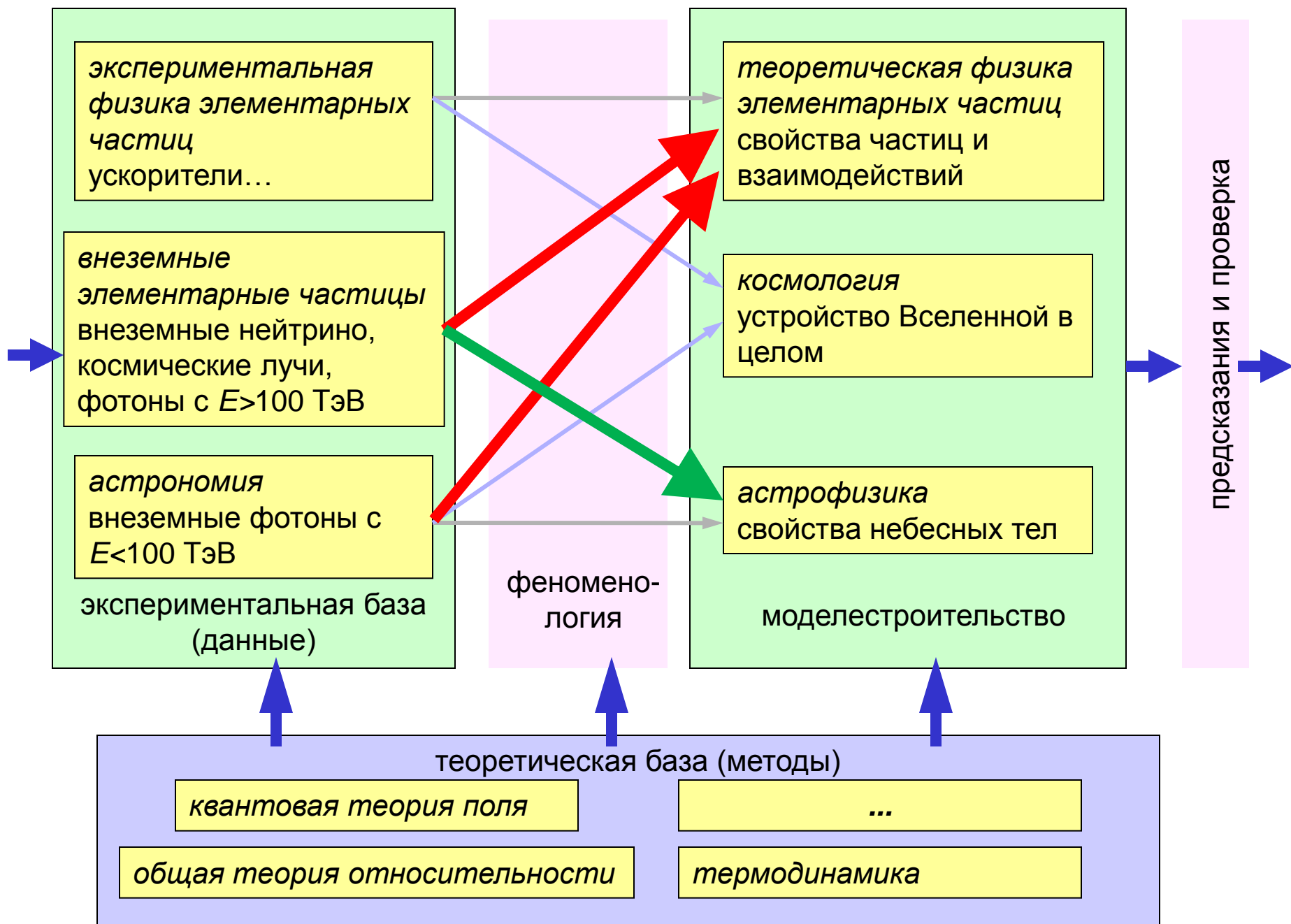
# Основные разделы курса:

- 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
  - феноменология
  - моделестроительство
  - 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
  - феноменология
  - моделестроительство
  - работа с данными
- *актуально:* дешевизна и доступность данных
- *интересно:* возможность проверки нестандартных сценариев  
(короткий путь от данных к интерпретации)



# Астрофизика элементарных частиц:



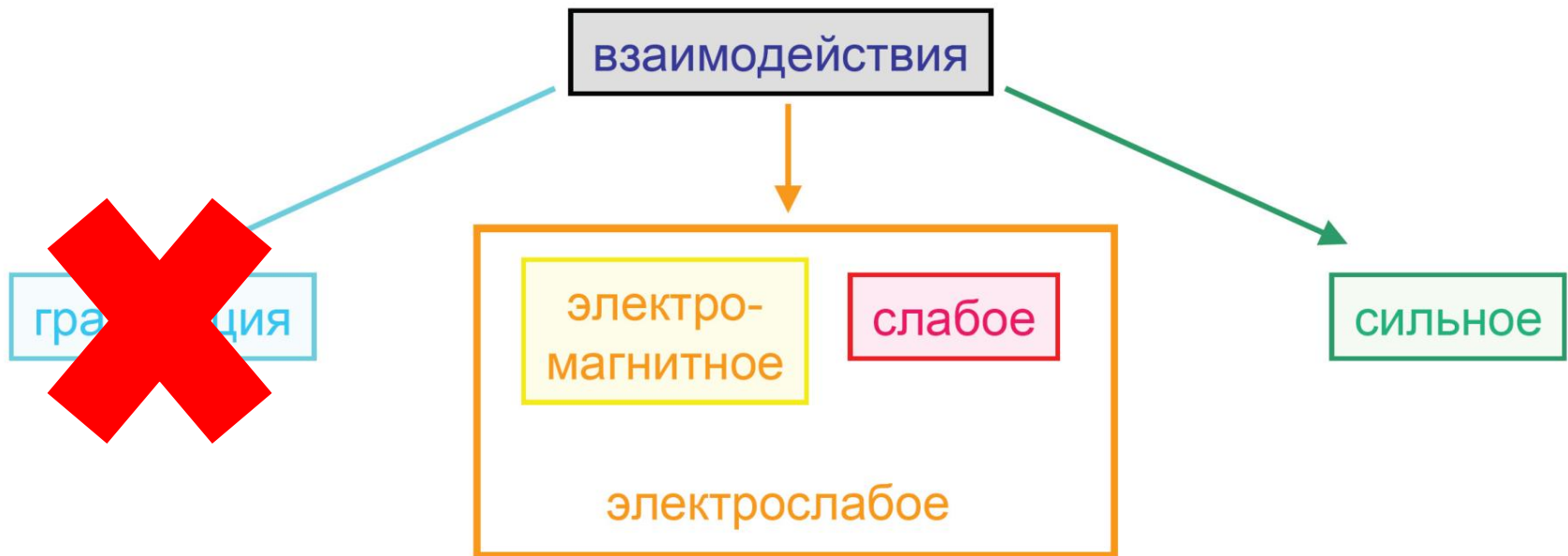
*как это работает?*

Два примера:

- **солнечные нейтрино**
- **нейтрино от сверхновой 1987А**

# солнечные нейтрино

# Стандартная модель физики частиц: взаимодействия частиц



# Стандартная модель физики частиц :

## элементарные частицы

$\nu_T$     $\nu_\mu$     $\nu_e$

нейтрино

$\tau$     $\mu$     $e$

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

# Стандартная модель физики частиц: нейтрино

$\nu_T$   $\nu_\mu$   $\nu_e$

нейтрино

$\tau$   $\mu$   $e$

заряженные лептоны

лептоны

$t$   $c$   $u$

«верхние» кварки

$b$   $s$   $d$

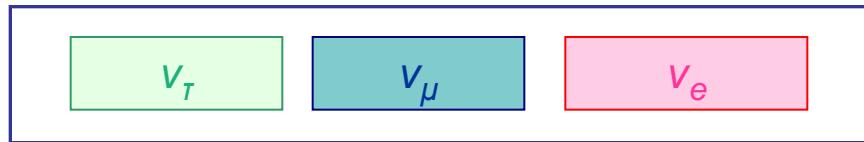
«нижние» кварки

кварки

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

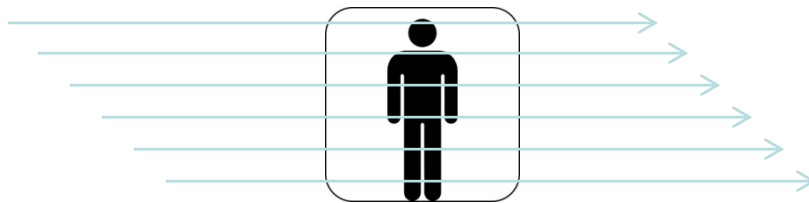
бозон Хиггса

# Стандартная модель физики частиц: нейтрино



## нейтрино

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



***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]

# солнечные нейтрино

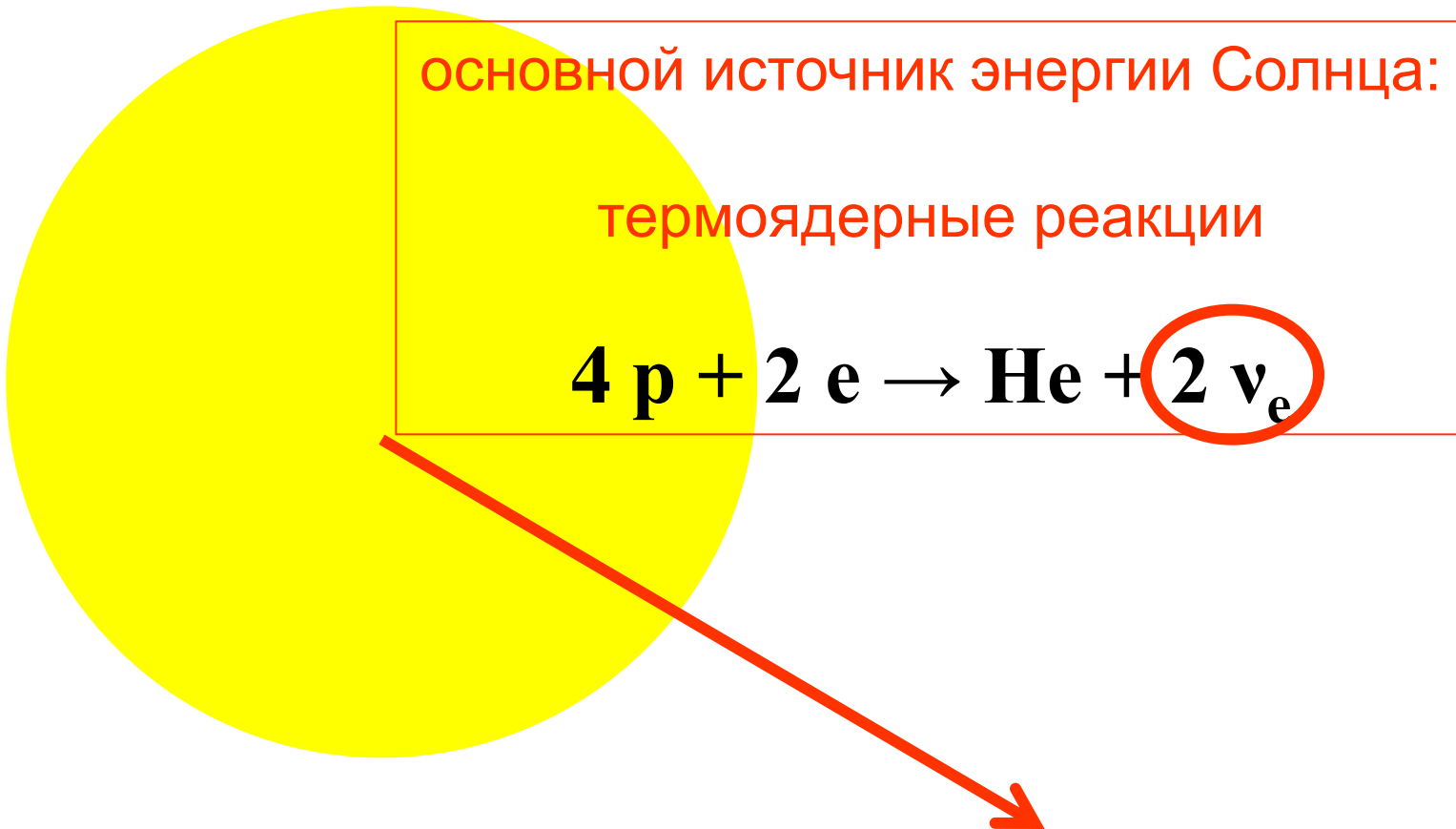
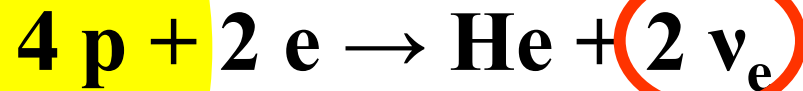
астрономия ➡ модель Солнца ➡ предсказания потока нейтрино

# солнечные нейтрино

астрономия ➡ модель Солнца ➡ предсказания потока нейтрино

основной источник энергии Солнца:

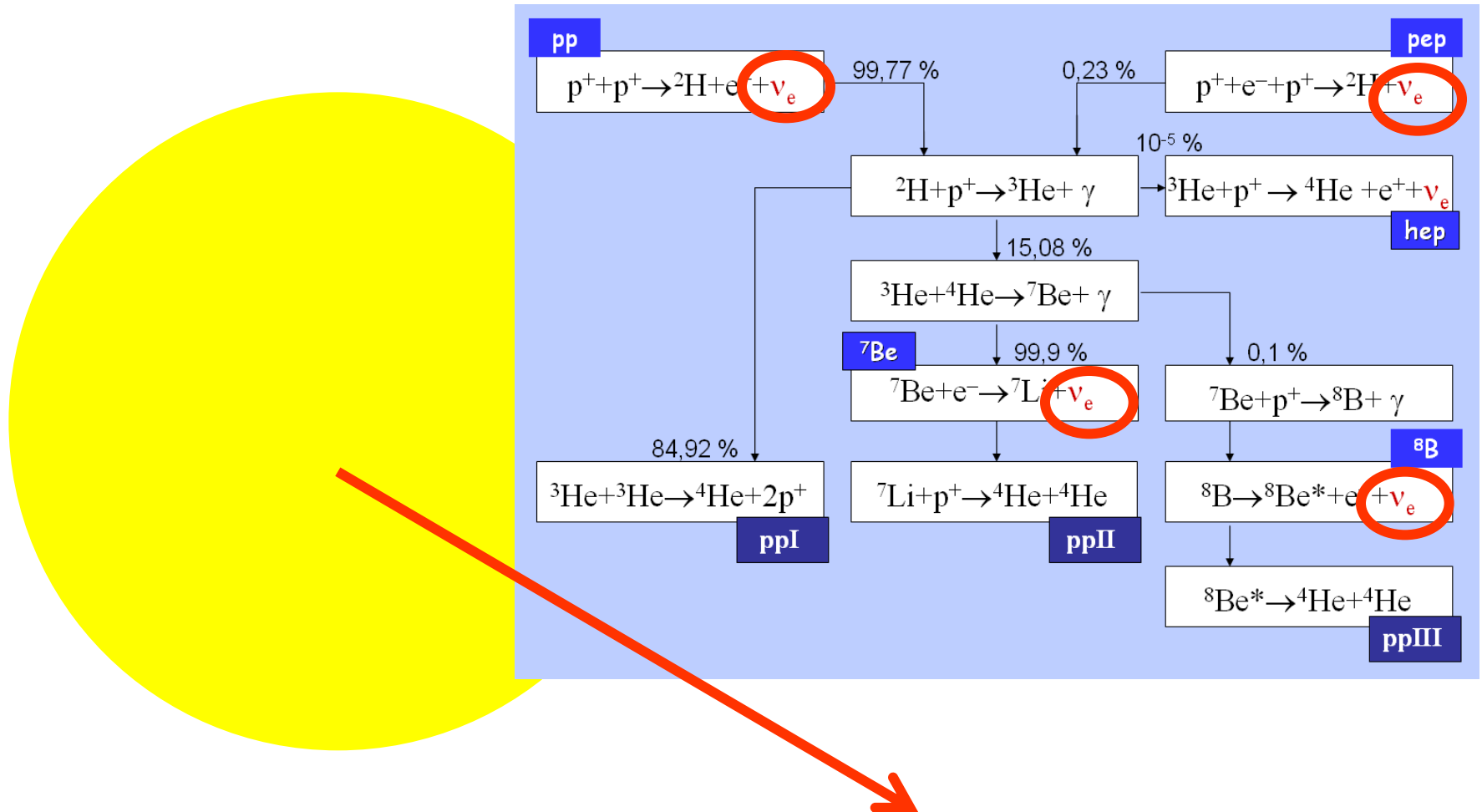
термоядерные реакции





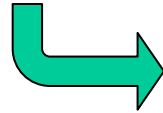
# солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино



# солнечные нейтрино

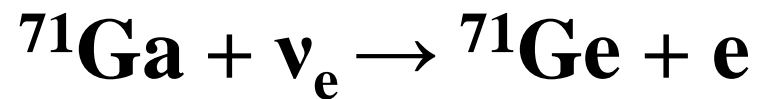
изучение астрофизических объектов  
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино

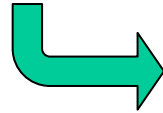
Пример: галлий-германиевый детектор  
(чувствителен к нейтрино основного pp-канала)

*Баксанская нейтринная обсерватория  
ИЯИ РАН, Приэльбрусье*



# солнечные нейтрино

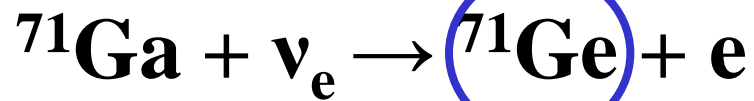
изучение астрофизических объектов  
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино

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

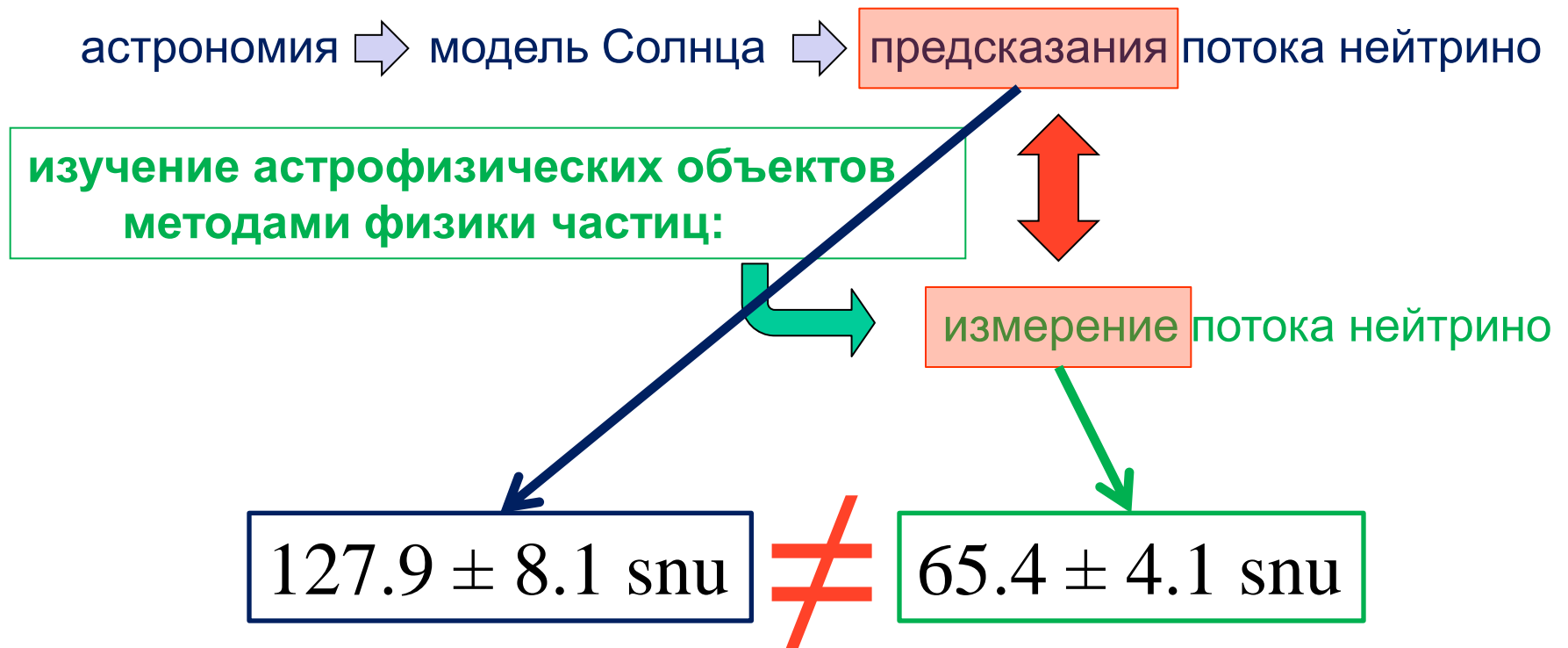
*Баксанская нейтринная обсерватория  
ИЯИ РАН, Приэльбрусье*



**60 тонн**

15 атомов

# солнечные нейтрино



*[для галлий-германиего 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

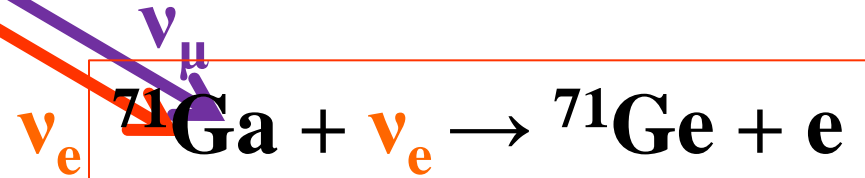
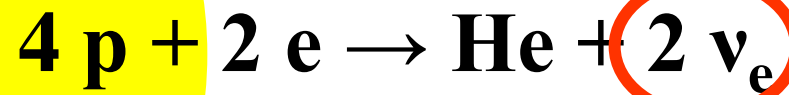
## осцилляции нейтрино!!!

единственное  
экспериментальное  
подтверждение  
неполноты  
Стандартной модели  
элементарных частиц

# солнечные нейтрино

## осцилляции нейтрино!!!

единственное  
экспериментальное  
подтверждение  
неполноты  
Стандартной модели  
элементарных частиц

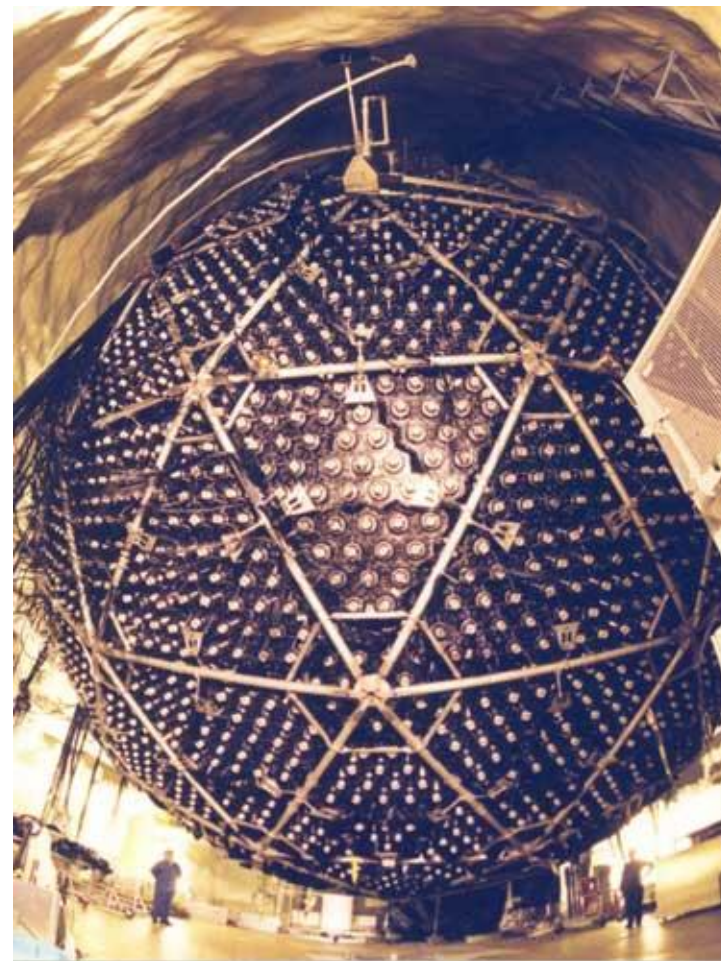
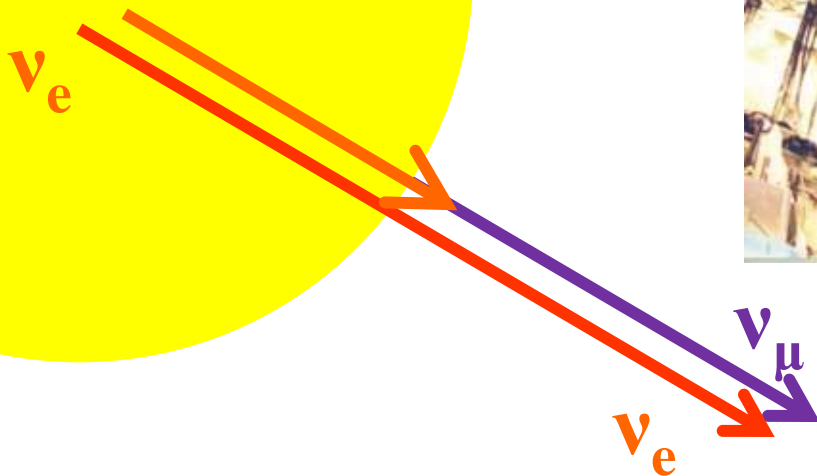




# солнечные нейтрино

## осцилляции нейтрино!!!

единственное  
экспериментальное  
подтверждение  
неполноты  
Стандартной модели  
элементарных частиц



SNO  
Sudbury, Canada

# солнечные нейтрино

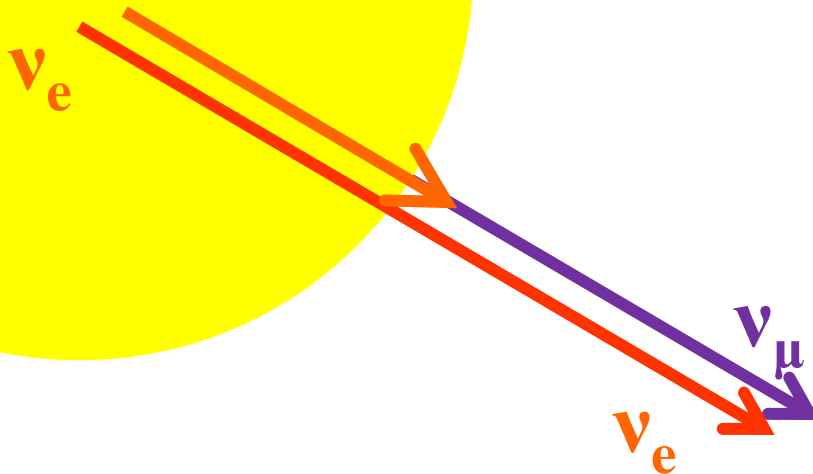
## осцилляции нейтрино!!!

единственное  
экспериментальное  
подтверждение  
неполноты  
Стандартной модели  
элементарных частиц

независимое измерение

потока  $\nu_e$

и полного потока  $\nu$  всех типов

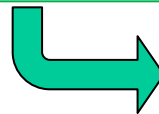


SNO  
Sudbury, Canada

# солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино

изучение астрофизических объектов  
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино



изучение свойств частиц  
методами астрофизики

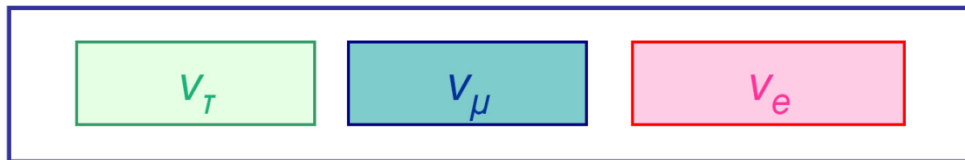


**ОСЦИЛЛЯЦИИ  
нейтрино!!!**

единственное  
экспериментальное  
подтверждение  
неполноты  
Стандартной модели  
элементарных частиц

# Стандартная модель элементарных частиц

**массы нейтрино запрещены  
симметриями Стандартной модели**



нейтрино

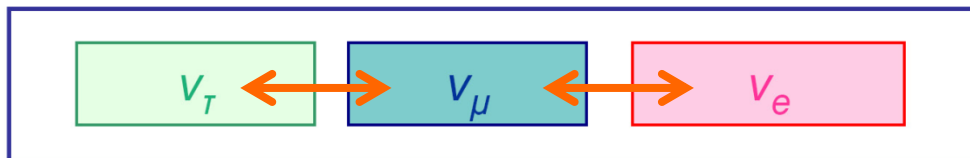
**тип нейтрино сохраняется  
при нулевой массе**

# Осцилляции нейтрино

**массы нейтрино запрещены  
симметриями Стандартной модели**

**тип нейтрино сохраняется  
при нулевой массе**

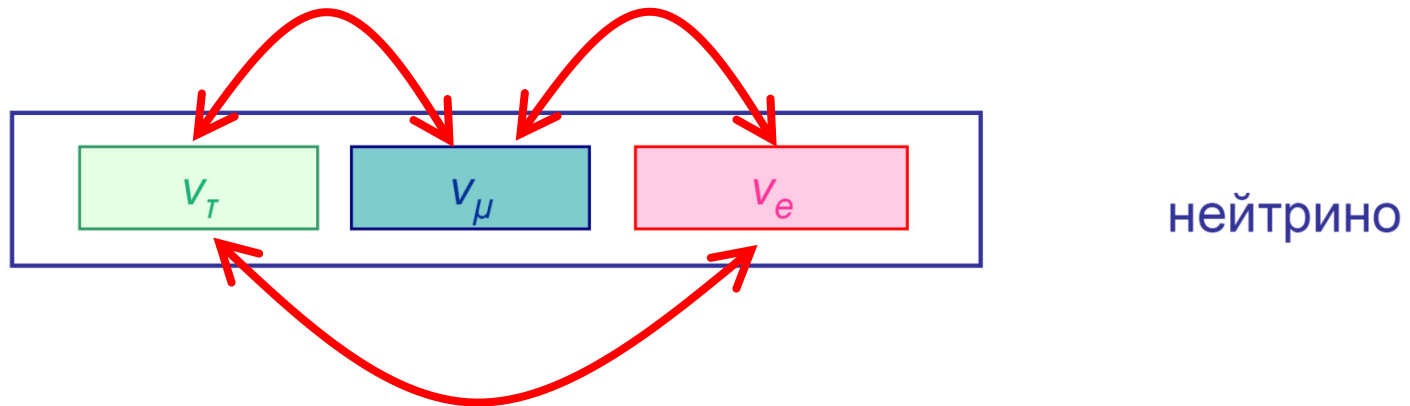
**изменения типа нейтрино  
достоверно  
зарегистрированы экспериментально**



нейтрино

## Осцилляции нейтрино:

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

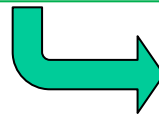


**«стандартная» картина осцилляций 3-х типов нейтрино  
(расширение Стандартной модели физики частиц!)**

# 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

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

изучение свойств частиц  
методами астрофизики

**ОСЦИЛЛЯЦИИ  
нейтрино!!!**

единственное  
экспериментальное  
подтверждение  
неполноты  
Стандартной модели  
элементарных частиц

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

# солнечные нейтрино

гелиосейсмология:

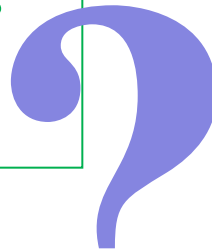
моды собственных колебаний Солнца (3500 мод!)

⇒ 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 1987А**

# нейтрино от сверхновой 1987А

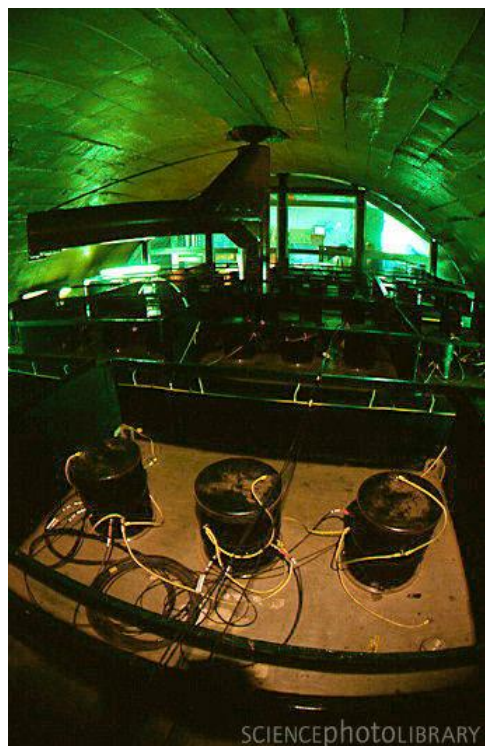
# нейтрино от сверхновой 1987А

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
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.

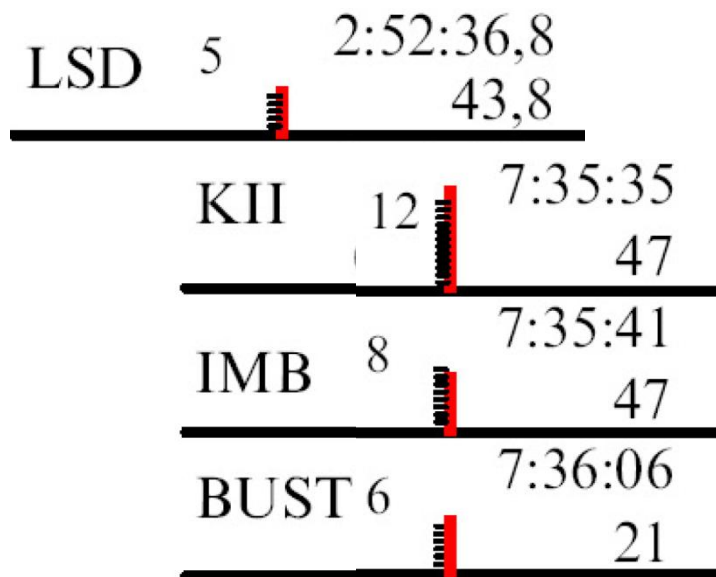
LSD	5	2:52:36,8
		43,8
KII	12	7:35:35
		47
IMB	8	7:35:41
		47
BUST	6	7:36:06
		21

10:38



# нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



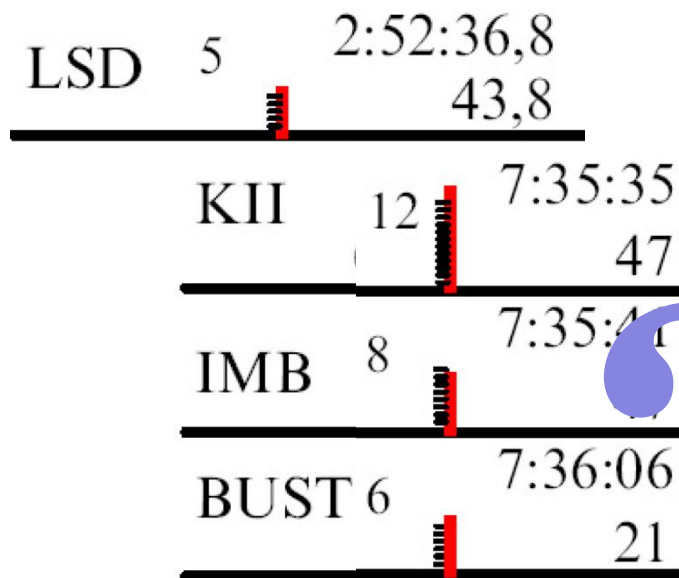
изучение астрофизических объектов  
методами физики частиц:

- 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.



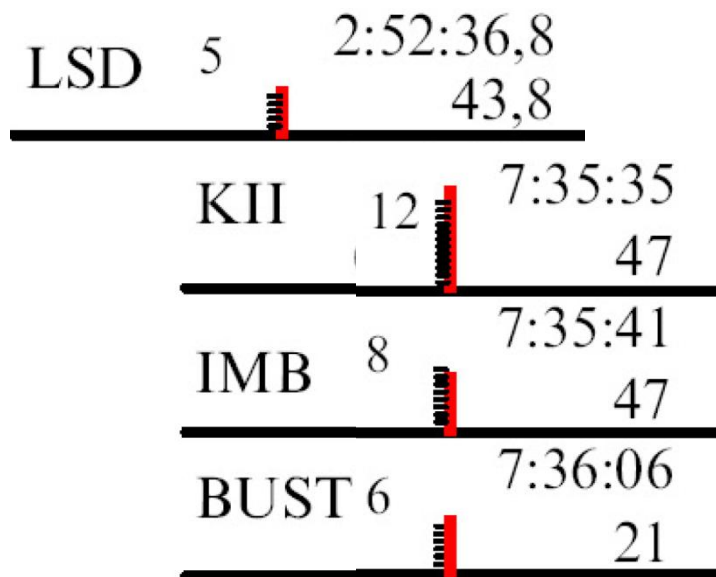
изучение астрофизических объектов  
методами физики частиц?

двойной нейтринный сигнал  
не объяснен!

изучение свойств частиц  
методами астрофизики?

# нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



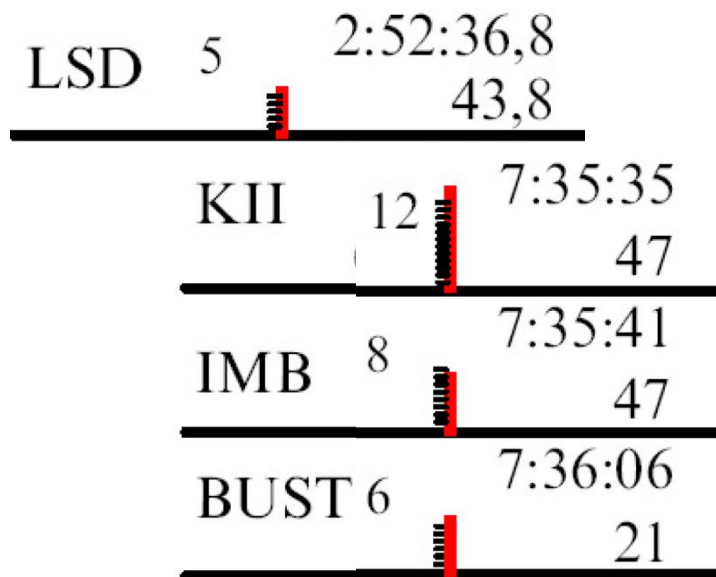
## изучение свойств частиц методами астрофизики:

- 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.



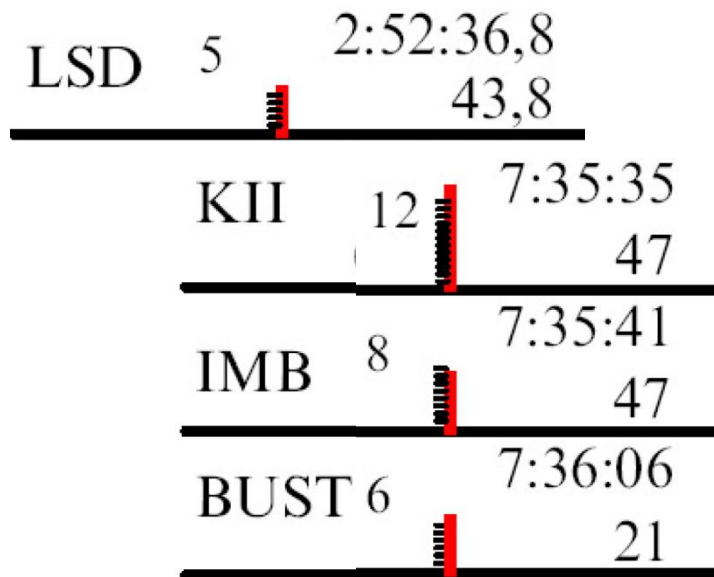
**изучение свойств частиц  
методами астрофизики:**

ограничения на параметры  
гипотетических легких частиц

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

# нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



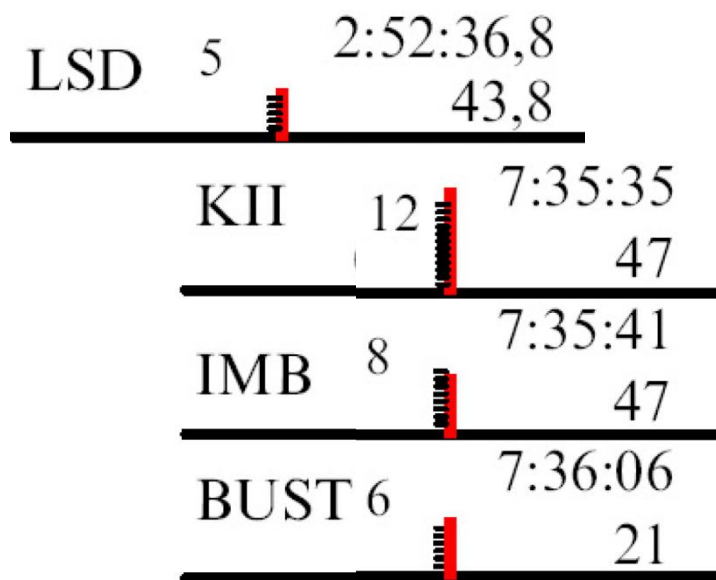
**изучение свойств частиц  
методами астрофизики:**

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
- ...

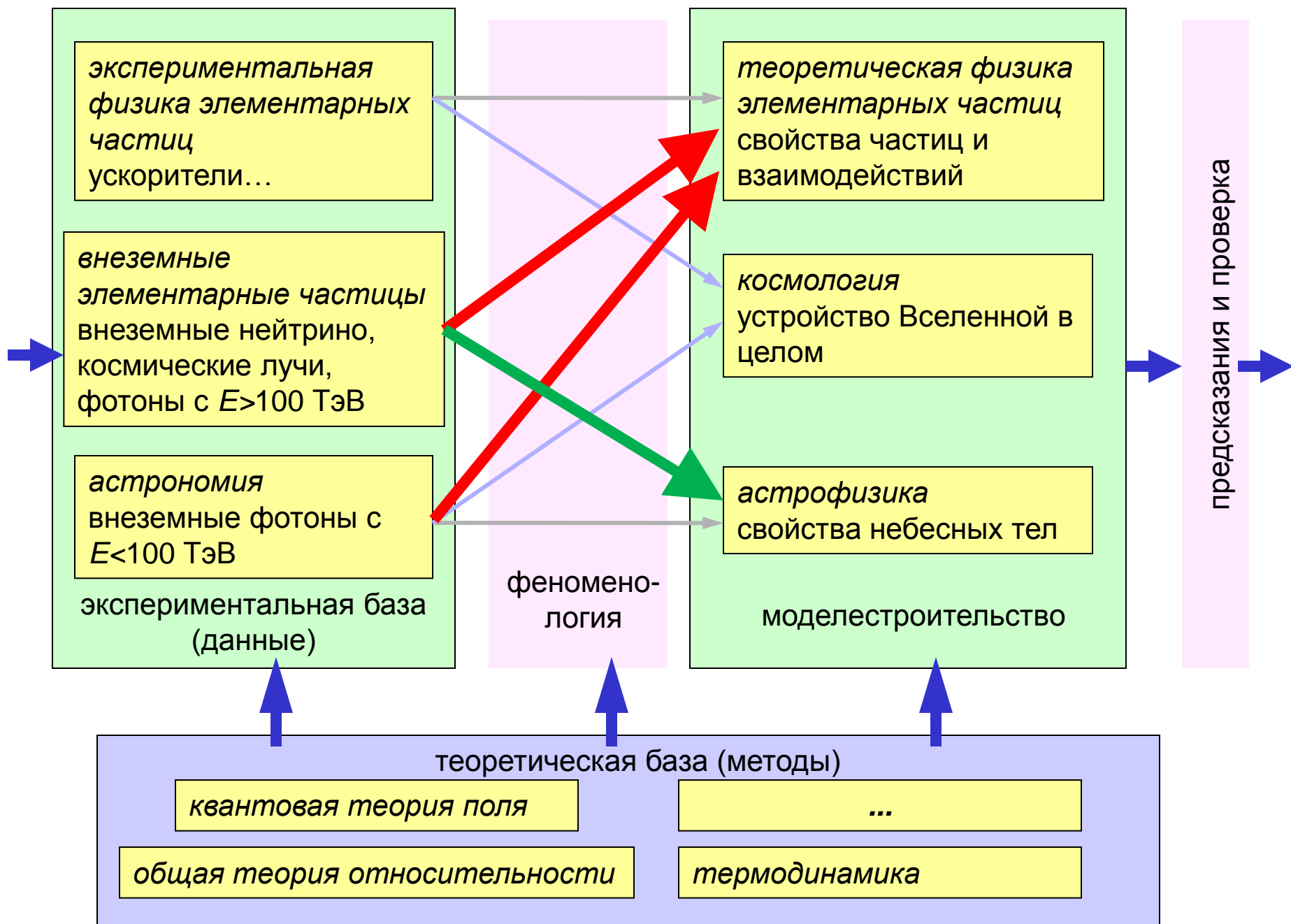
OPERA 2011 :  $(v - c)/c \sim 10^{-5}$

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
  - феноменология
  - моделестроительство
  - 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)



