

Астрофизика элементарных частиц

Сергей Троицкий

*(отдел теоретической физики
Института ядерных исследований РАН,
кафедра физики частиц и космологии)*

st@ms2.inr.ac.ru

Как устроен мир?

*экспериментальная физика элементарных частиц
ускорители...*

*внеземные элементарные частицы
внеземные нейтрино,
космические лучи,
фотоны с $E > 100$ ТэВ*

*астрономия
внеземные фотоны с
 $E < 100$ ТэВ*

экспериментальная база
(данные)

*теоретическая физика
элементарных частиц
свойства частиц и
взаимодействий*

*космология
устройство Вселенной в
целом*

*астрофизика
свойства небесных тел*

моделестроительство

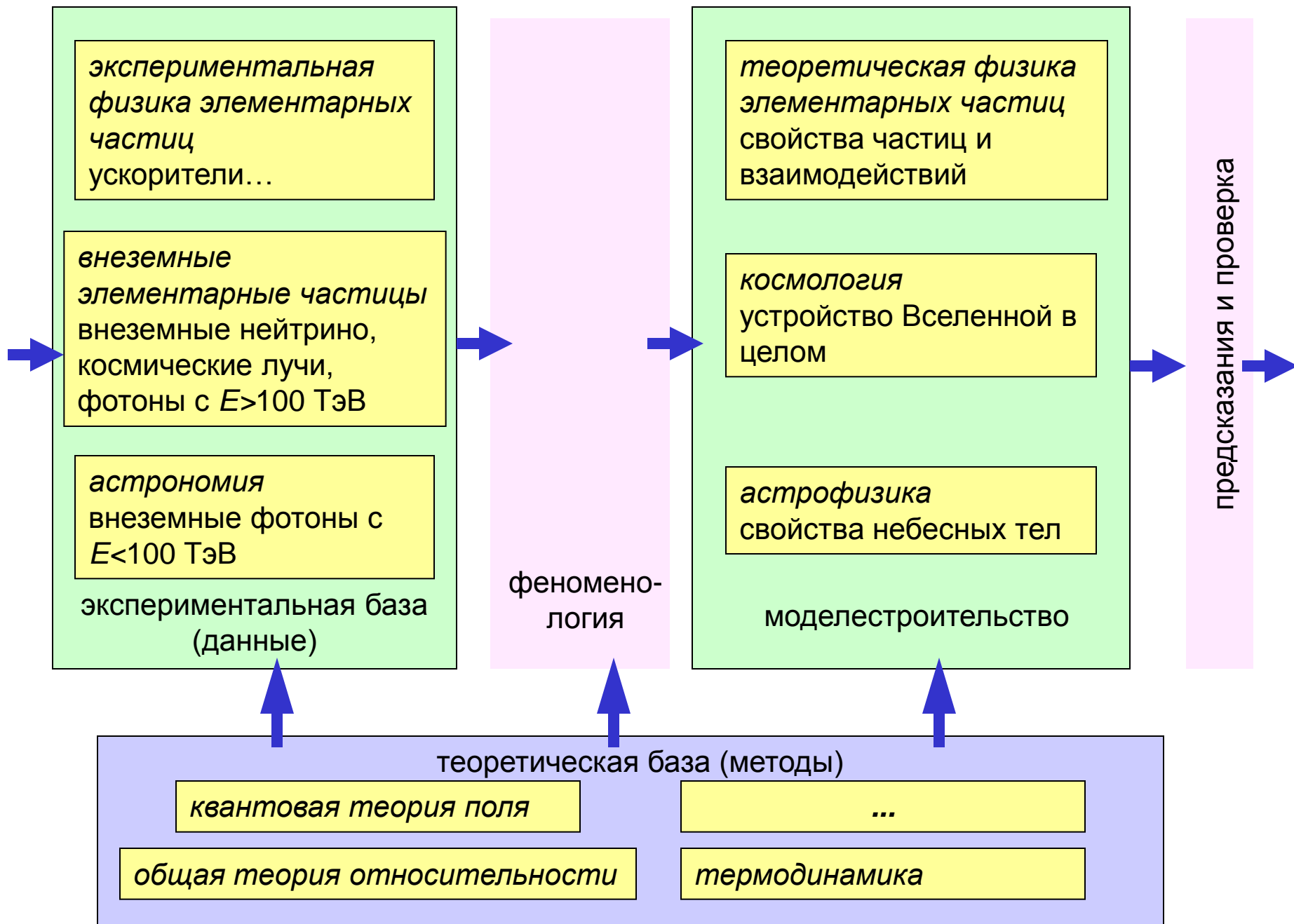
теоретическая база (методы)

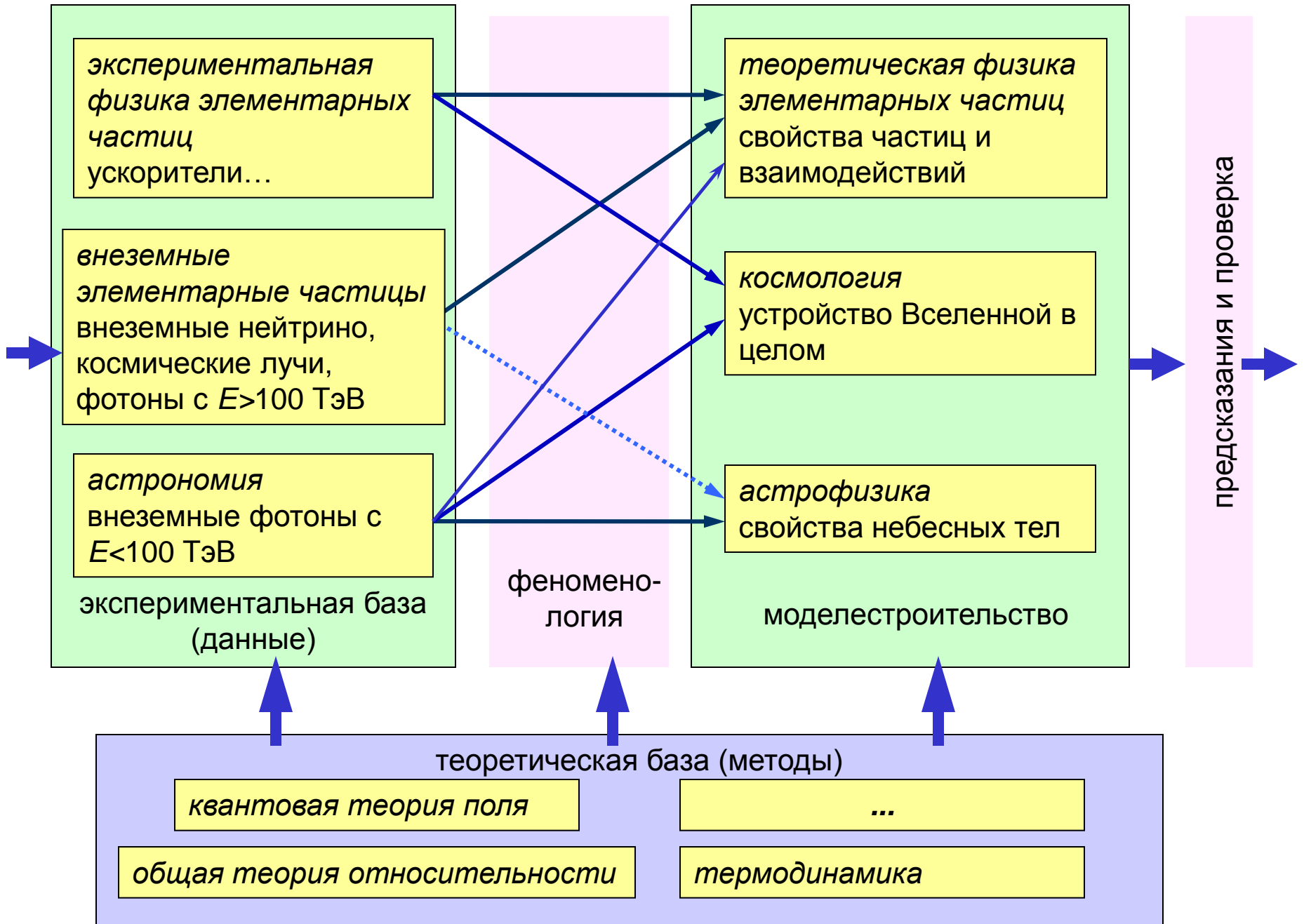
квантовая теория поля

...

общая теория относительности

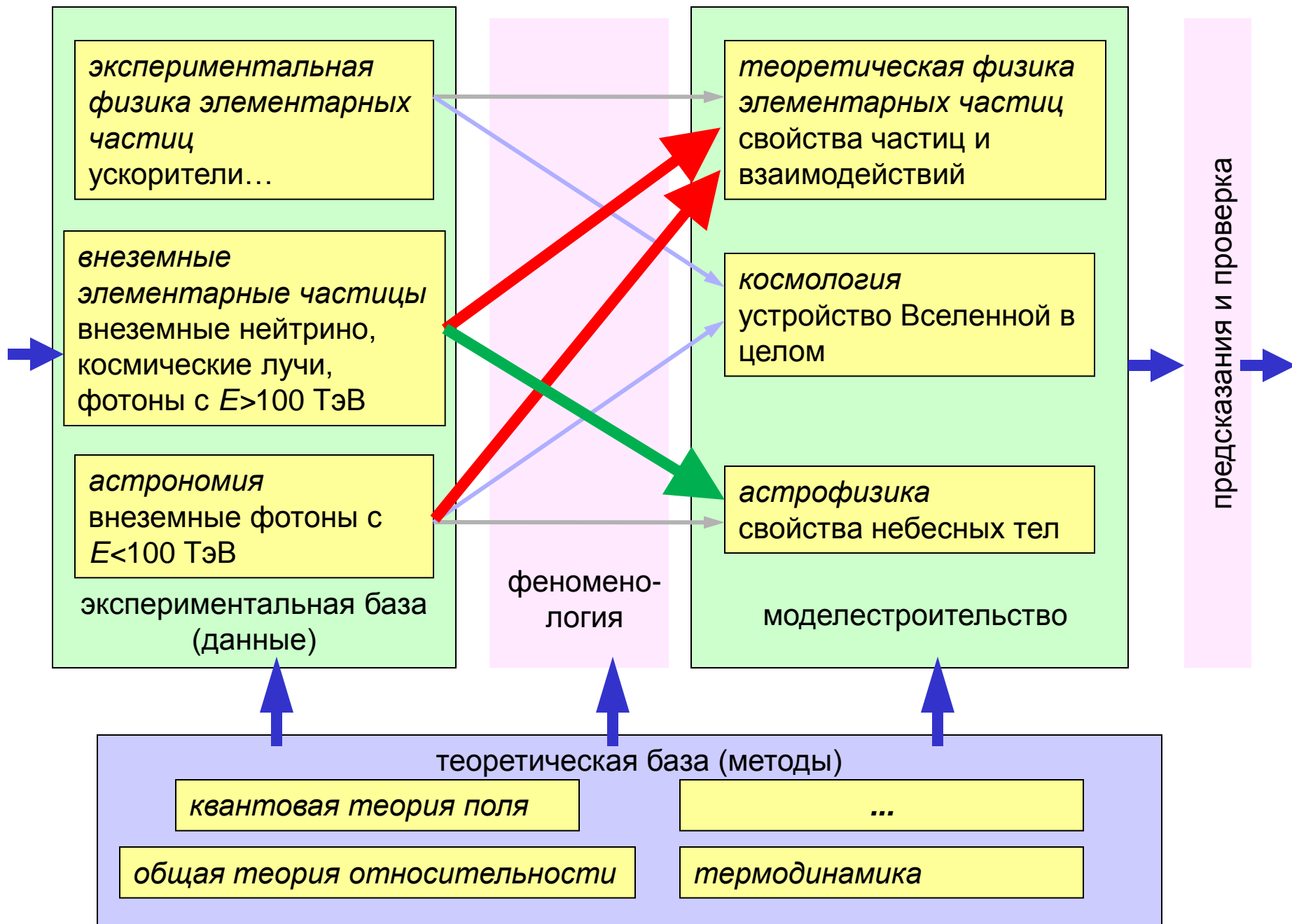
термодинамика





Астрофизика элементарных частиц:

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



Астрофизика элементарных частиц:



почему?

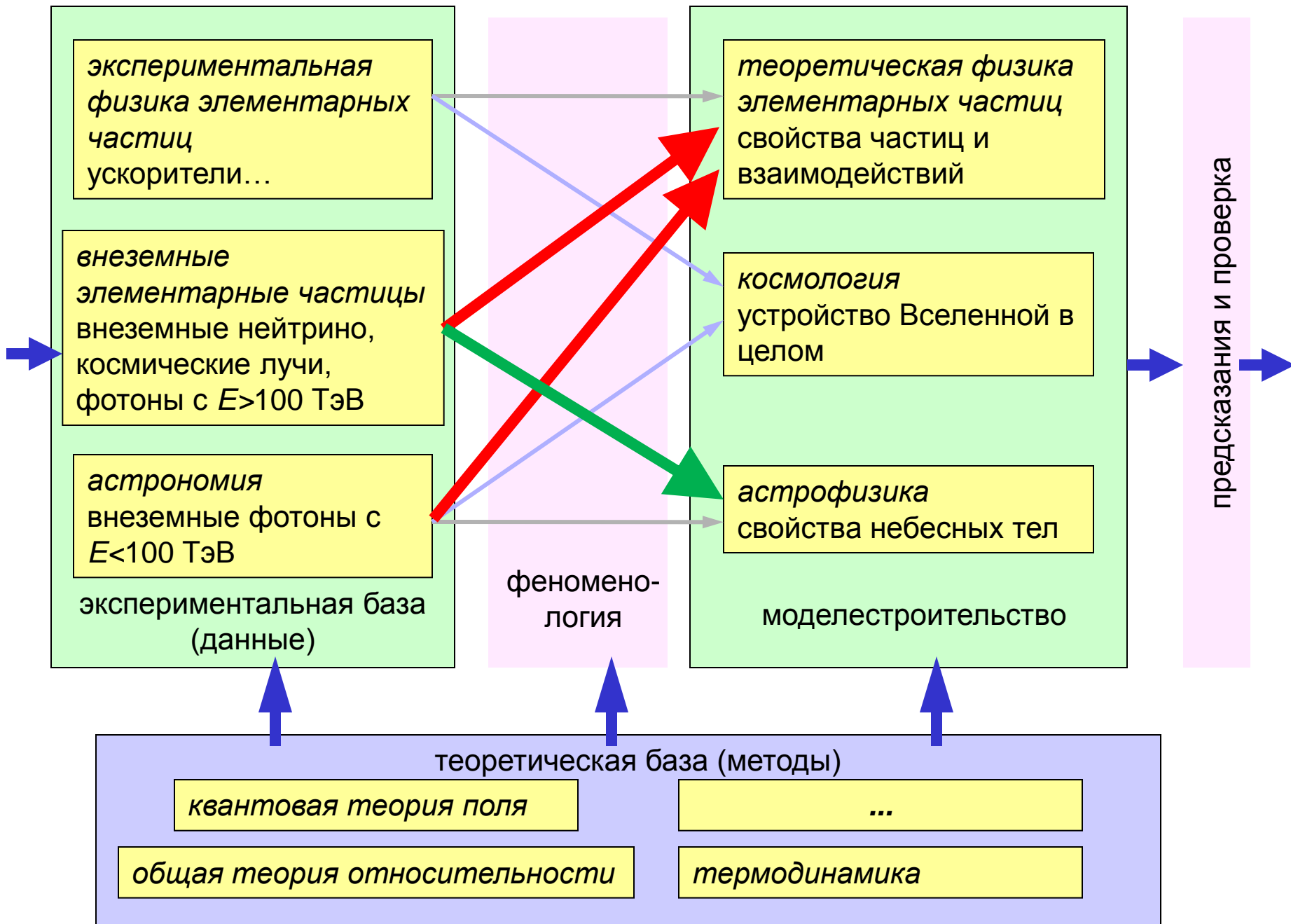
- *ПОЛЕЗНО:* «многое можно узнать»...
недостижимые в экспериментах условия

Астрофизика элементарных частиц:



почему?

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



Астрофизика элементарных частиц:



почему?

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

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**

\$ 9×10^9

*физика элементарных
частиц*

Спутник **FERMI**

\$ 6.9×10^8

астрономия

Обсерватория **Auger**

\$ 5.3×10^7

космические лучи

Эксперимент **ICECUBE**

\$ 2.7×10^8

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:

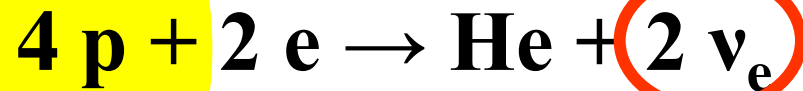
- **солнечные нейтрино**
- **нейтрино от сверхновой 1987А**

солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино

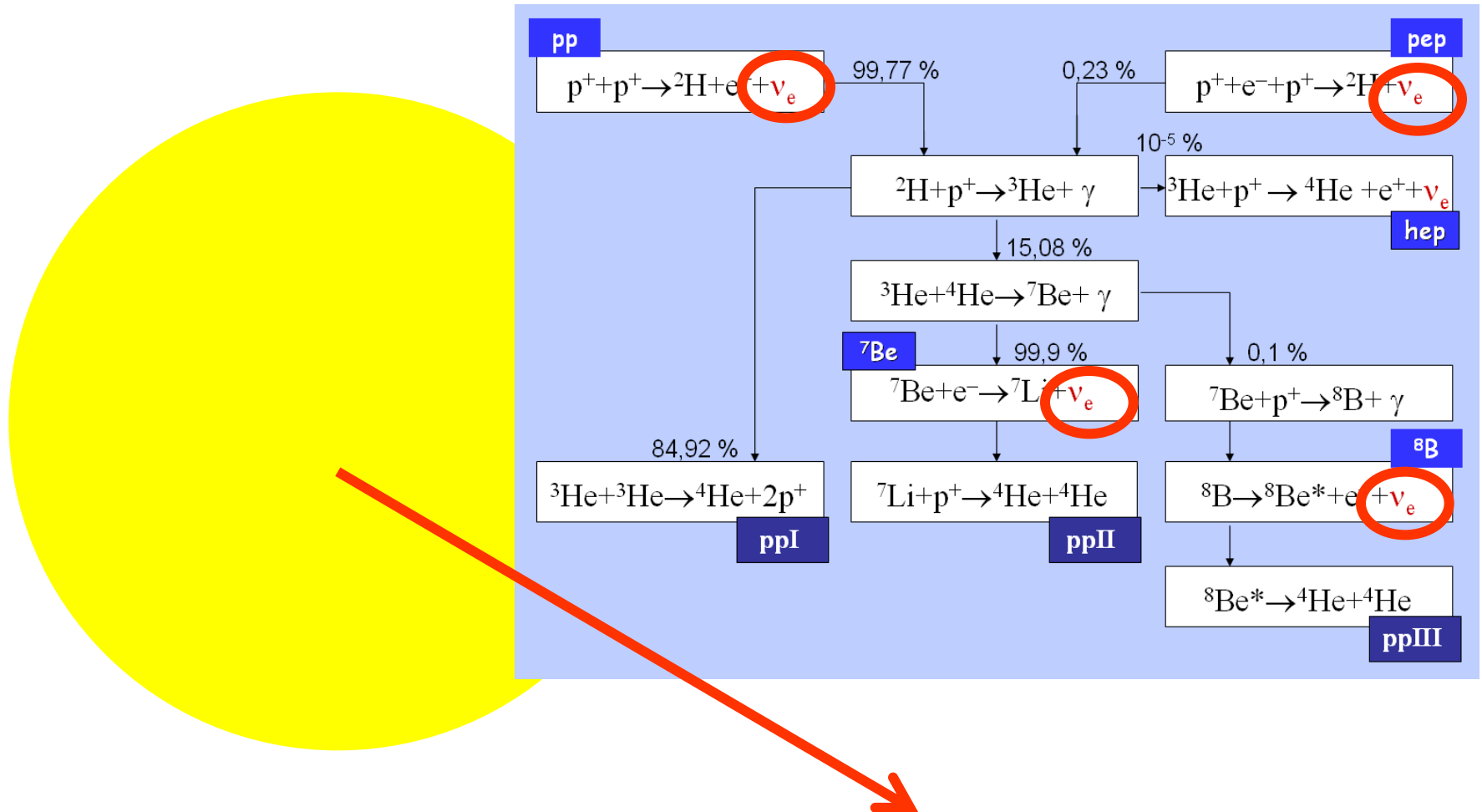
основной источник энергии Солнца:

термоядерные реакции



солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино



солнечные нейтрино

астрономия → модель Солнца → предсказания потока нейтрино

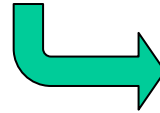
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино

СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО

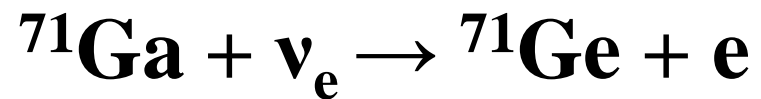
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино

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

*Баксанская нейтринная обсерватория
ИЯИ РАН, Приэльбрусье*

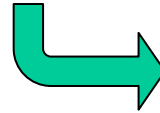


60 ТОНН



СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО

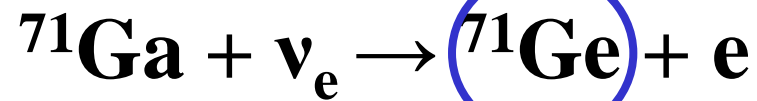
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:



измерение потока нейтрино

Пример: галлий-германиевый детектор
(чувствителен к нейтрино основного рр-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

$127.9 \pm 8.1 \text{ snu}$

\neq

$65.4 \pm 4.1 \text{ snu}$

[для галлий-германиего эксперимента]

солнечные нейтрино

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

**изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:**



измерение потока нейтрино

**изучение свойств частиц
методами астрофизики**

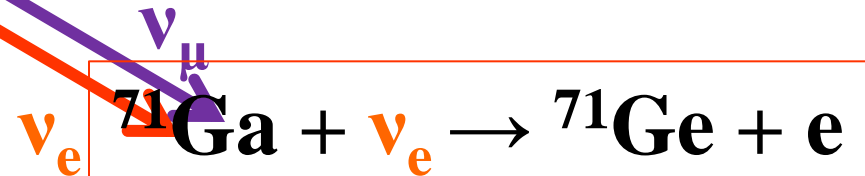
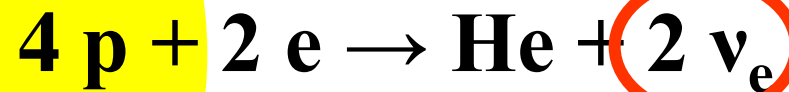
**ОСЦИЛЛЯЦИИ
нейтрино!!!**

**единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц**

солнечные нейтрино

ОСЦИЛЛЯЦИИ нейтрино!!!

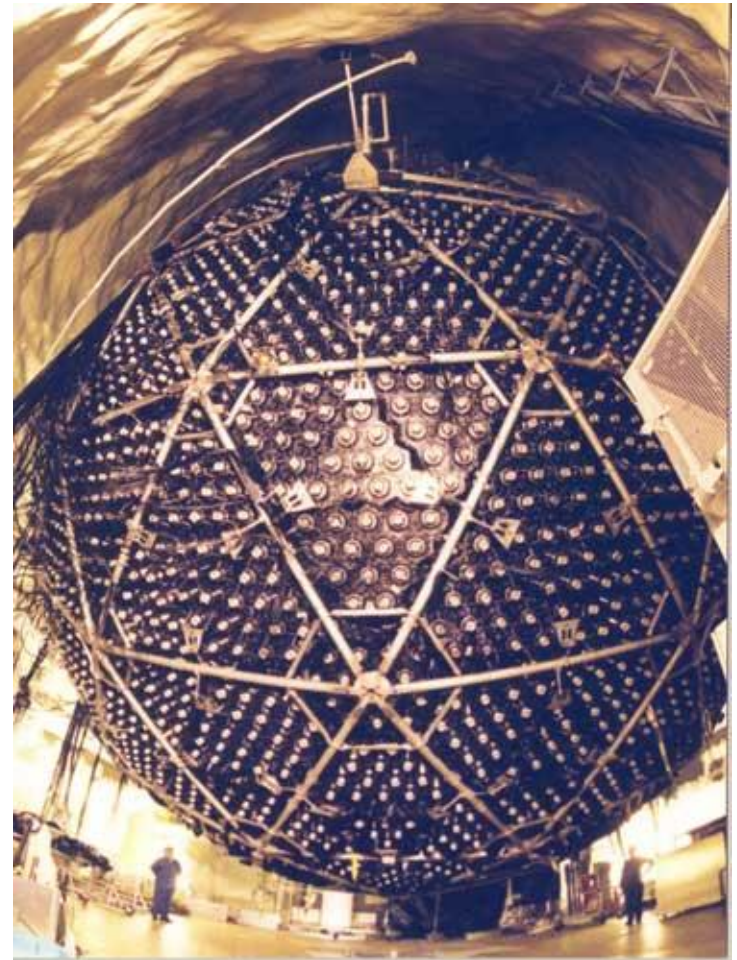
единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц



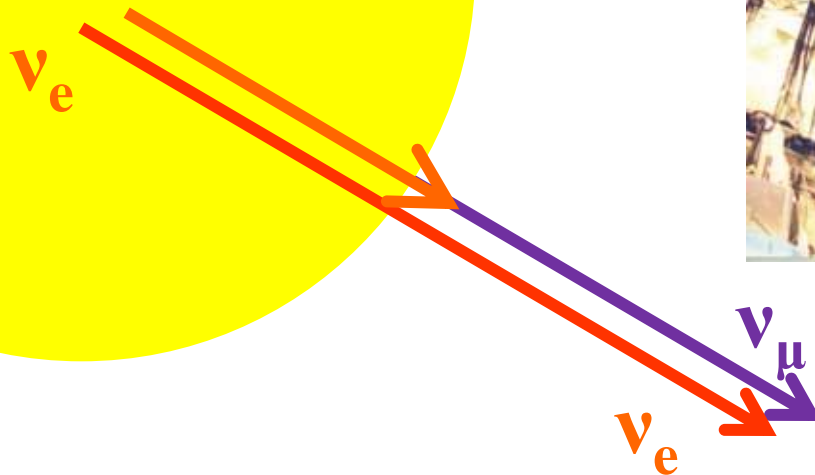
солнечные нейтрино

осцилляции нейтрино!!!

единственное
экспериментальное
подтверждение
неполноты
Стандартной модели
элементарных частиц



SNO
Sudbury, Canada

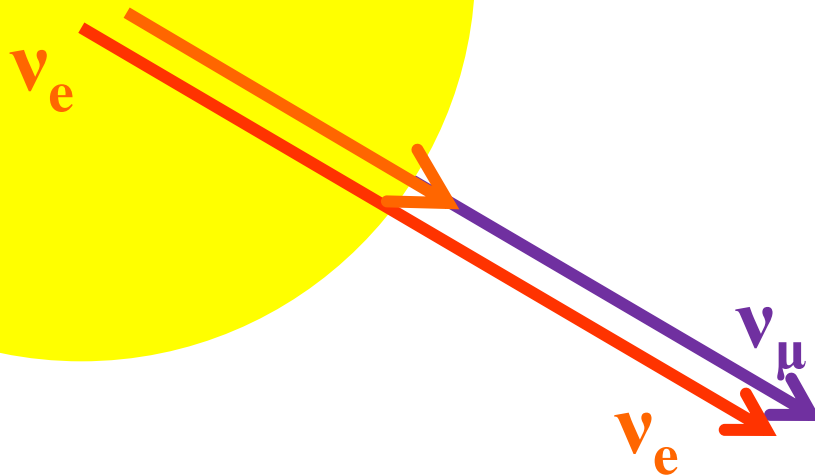


солнечные нейтрино

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:



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

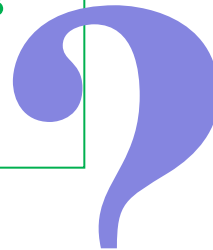
гелиосейсмология:

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 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

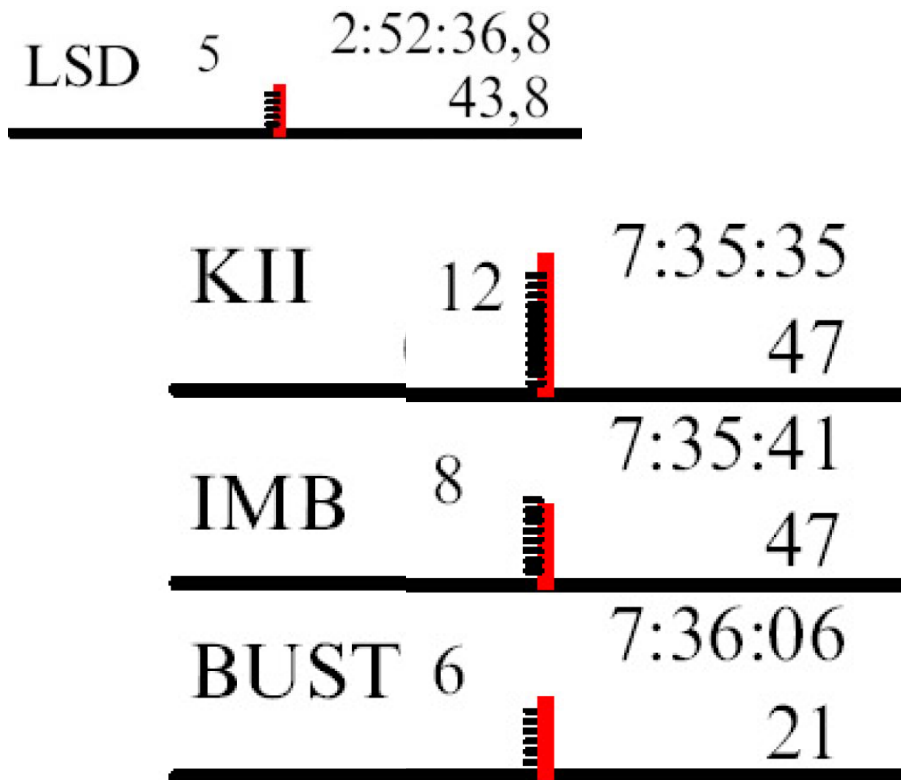
23 февраля 1987 г.

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



нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.

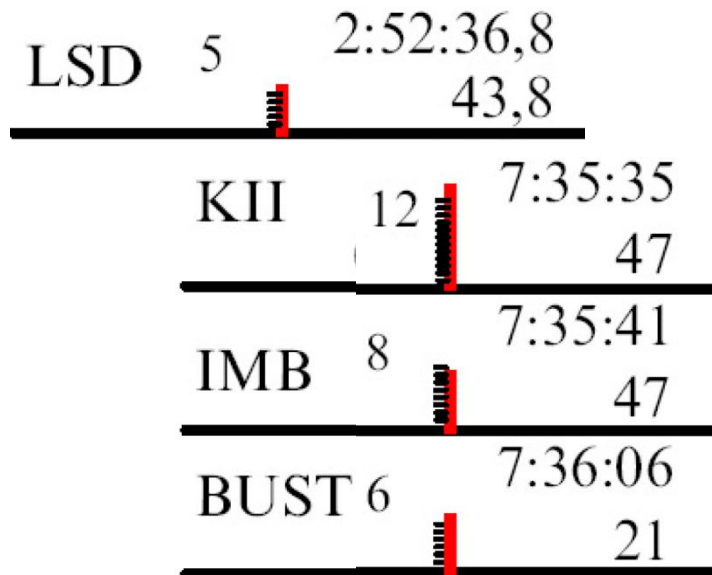
LSD	5	2:52:36,8	43,8
KII	12	7:35:35	47
IMB	8	7:35:41	47
BUST	6	7:36:06	21

10:38



нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



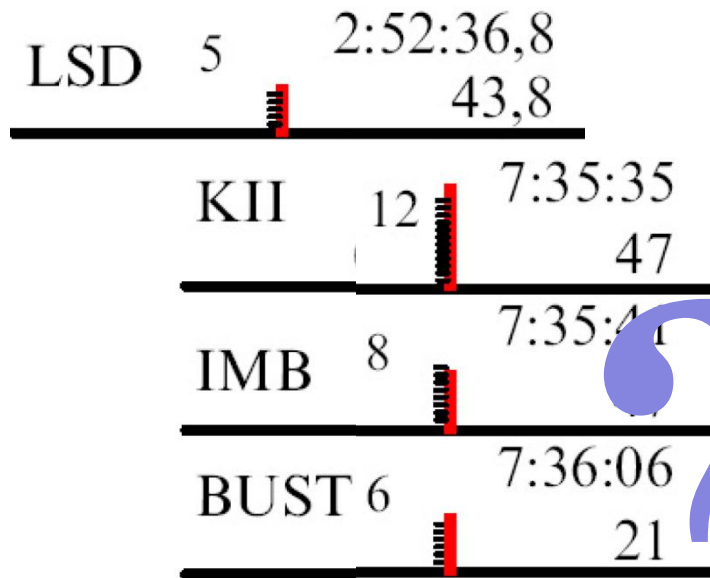
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц:

- 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.



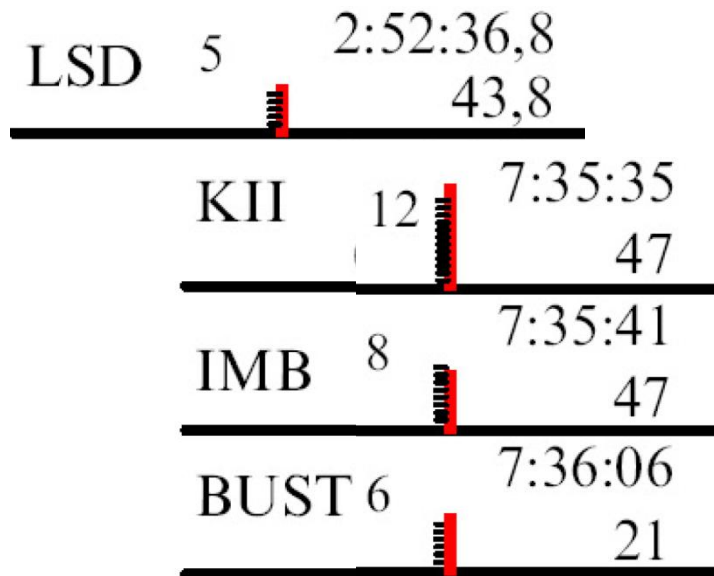
изучение астрофизических объектов
методами физики частиц?

двойной нейтринный сигнал
не объяснен!

изучение свойств частиц
методами астрофизики?

нейтрино от сверхновой 1987А

23 февраля 1987 г.



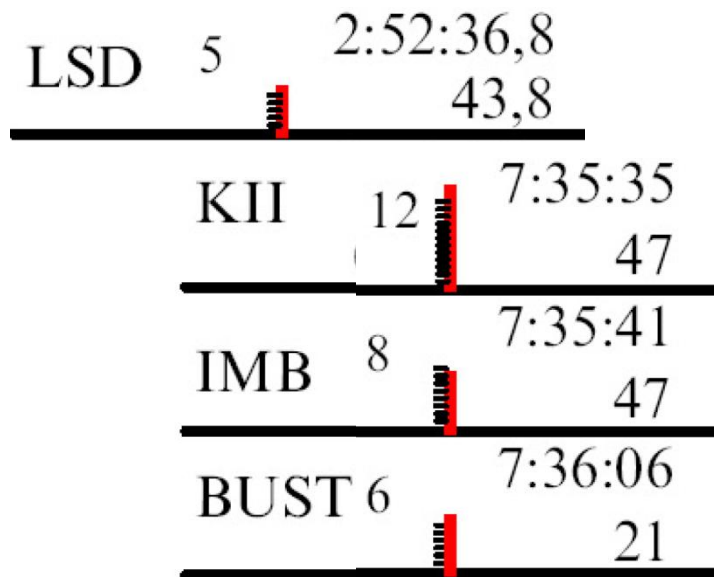
изучение свойств частиц методами астрофизики:

- 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.



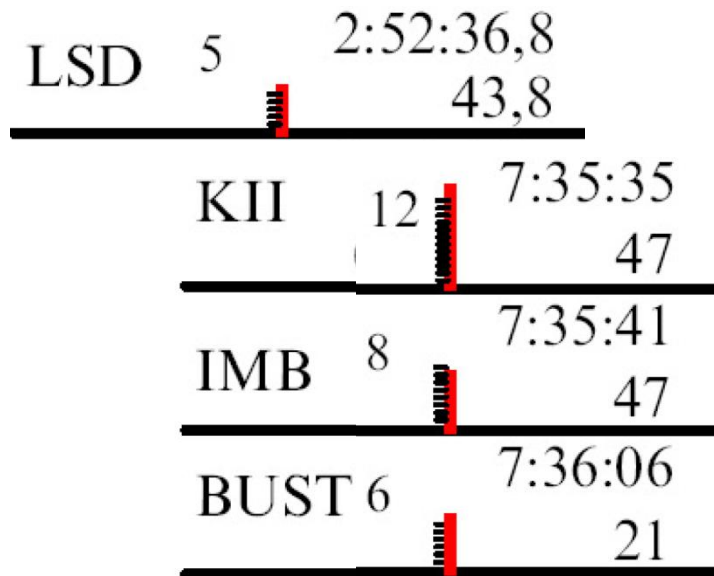
**изучение свойств частиц
методами астрофизики:**

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

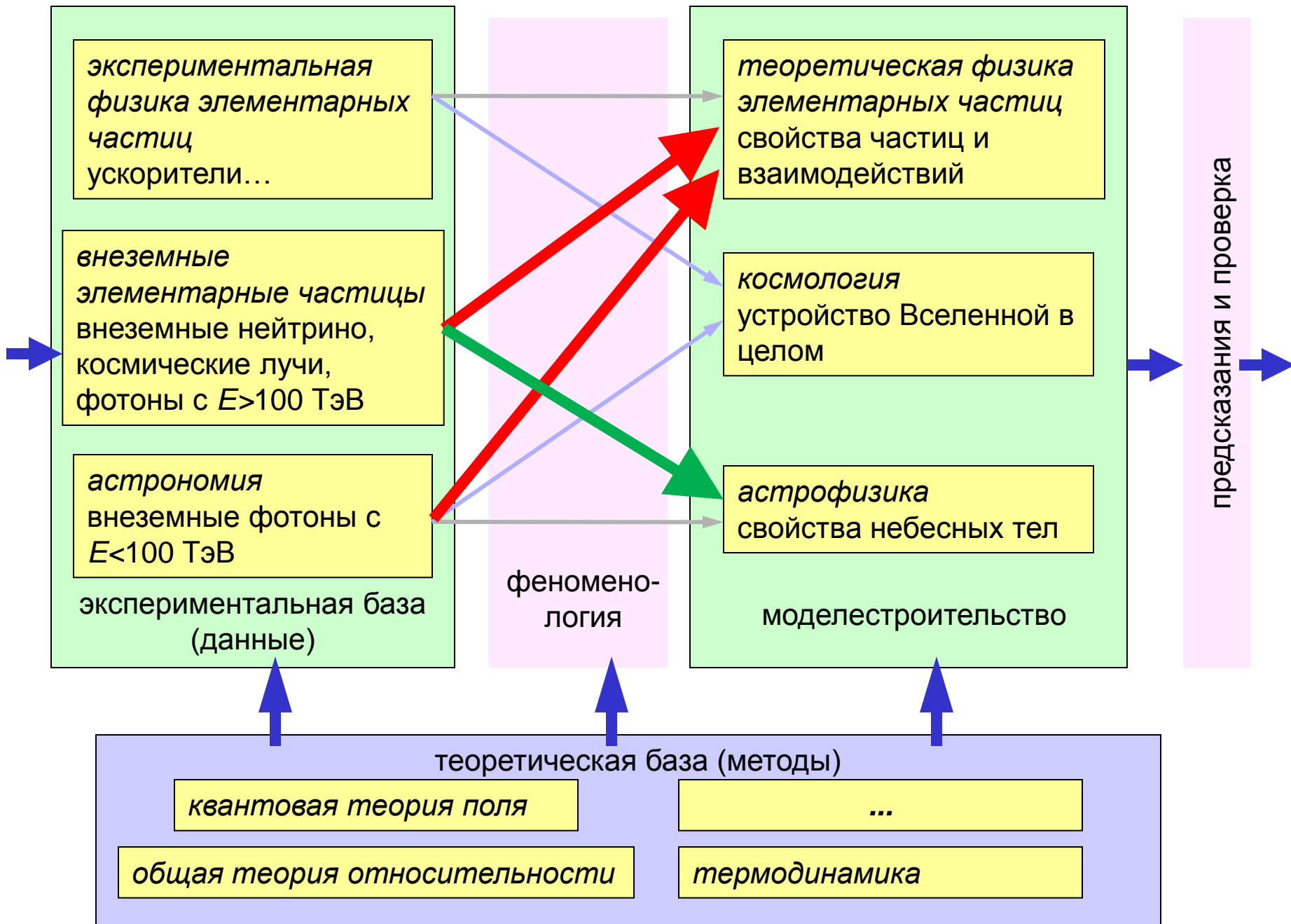
- масса
- заряд
- параметры осцилляций
- магнитный момент
- скорость движения
- ...

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)

