



# **Астрофизические нейтрино высоких энергий: новые данные, интерпретации, перспективы**

**Сергей Троицкий**  
(Институт ядерных исследований РАН)

*Марковские чтения, 14 мая 2014 г.*

...to install detectors deep in a lake or a sea to determine the direction of charged particles with the help of Cherenkov radiation.

Markov M.A., 1960, On high energy neutrino physics.  
In: Proc. 10<sup>th</sup> ICHEP, Rochester, p. 578.

**8.B:9.A**

*Nuclear Physics* **27** (1961) 385—394; © North-Holland Publishing Co., Amsterdam

Not to be reproduced by photoprint or microfilm without written permission from the publisher

## **ON HIGH ENERGY NEUTRINO PHYSICS IN COSMIC RAYS**

**M. A. MARKOV and I. M. ZHELEZNYKH**

*P. N. Lebedev Physical Institute, Academy of Sciences, Moscow, USSR*

**Received 3 January 1961**

# ПЛАН

## 1. Экспериментальный результат

- Ice Cube 2013-2014
- комментарии

## 2. Обзор возможных интерпретаций

- галактическое происхождение
- внегалактическое происхождение
- «экзотическое» происхождение

## 3. Ограничения из потоков фотонов

- сопутствующие фотоны
- результат ШАЛ-МГУ
- поглощение

## 4. Выводы и перспективы

# ПЛАН

## 1. Экспериментальный результат

- Ice Cube 2013-2014
- комментарии

## 2. Обзор возможных интерпретаций

- галактическое происхождение
- внегалактическое происхождение
- «экзотическое» происхождение

## 3. Ограничения из потоков фотонов

- сопутствующие фотоны
- результат ШАЛ-МГУ
- поглощение

## 4. Выводы и перспективы

# Результат IceCube

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

- 2012 – конференция Neutrino-2012,  
показаны 2 события с  $E \sim 1$  ПэВ =  $10^{15}$  эВ  
*Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 021103*
- 2013 – «4.1- $\sigma$ » указание на астрофизические нейтрино  
(622 дня)  
28 событий с  $E > 60$  ТэВ при фоне 10.6  
*Science 342 (2013) 1242856*
- 2014 – «5.7- $\sigma$ » указание на астрофизические нейтрино  
(988 дней)  
37 событий с  $E > 60$  ТэВ при фоне 15.0  
3 события с  $E > 1$  ПэВ



*Talk at Neutrinos Beyond IceCube, 24 April 2014*

# Результат IceCube

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

- 2012 – конференция Neutrino-2012,  
показаны 2 события с  $E \sim 1$  ПэВ =  $10^{15}$  эВ  
*Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 021103*
- 2013 – «4.1- $\sigma$ » указание на астрофизические нейтрино  
(622 дня)  
28 событий с  $E > 60$  ТэВ при фоне 10.6  
*Science 342 (2013) 1242856*

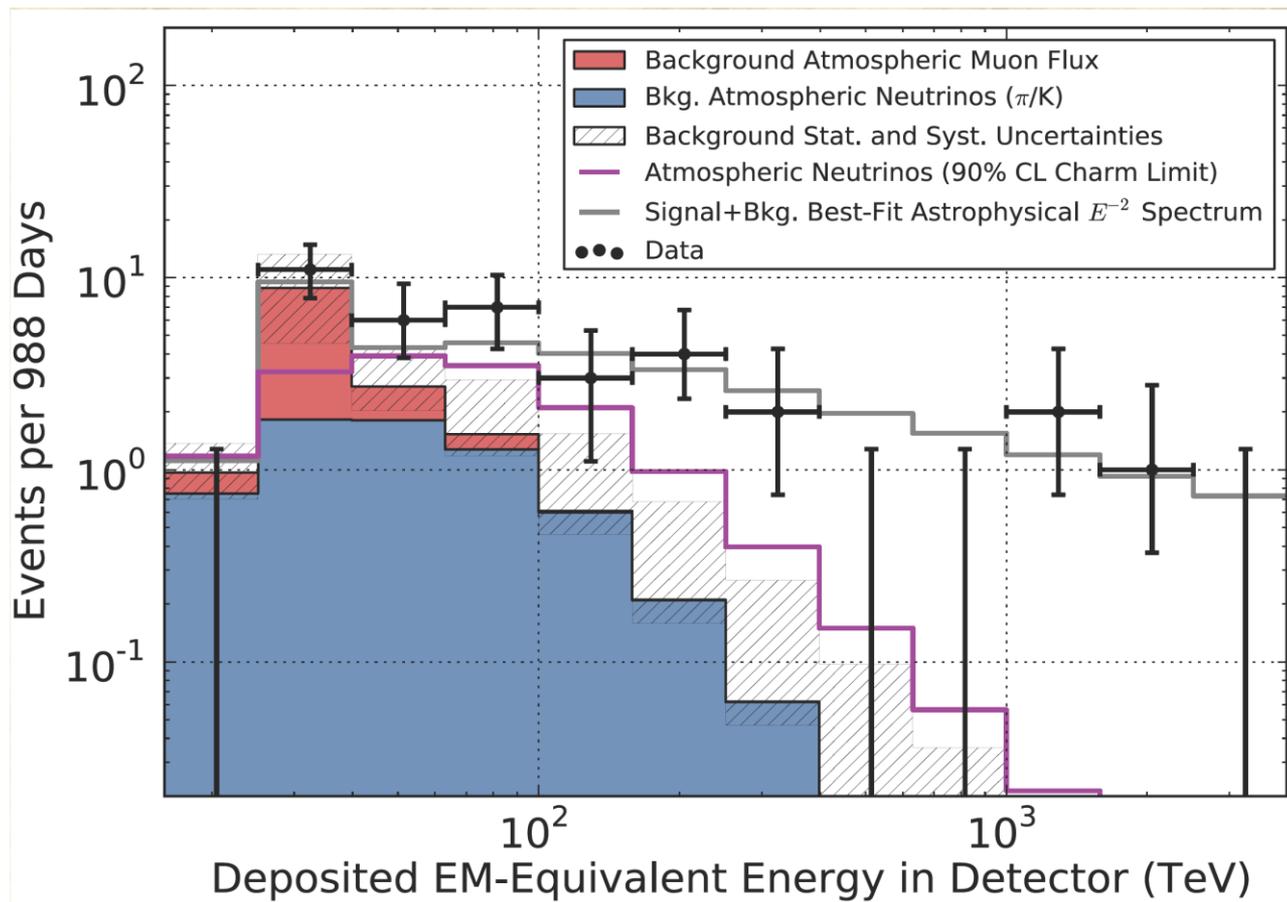


- 2014 – «5.7- $\sigma$ » указание на астрофизические нейтрино  
(988 дней)  
37 событий с  $E > 60$  ТэВ при фоне 15.0  
3 события с  $E > 1$  ПэВ

*Talk at Neutrinos Beyond IceCube, 24 April 2014*

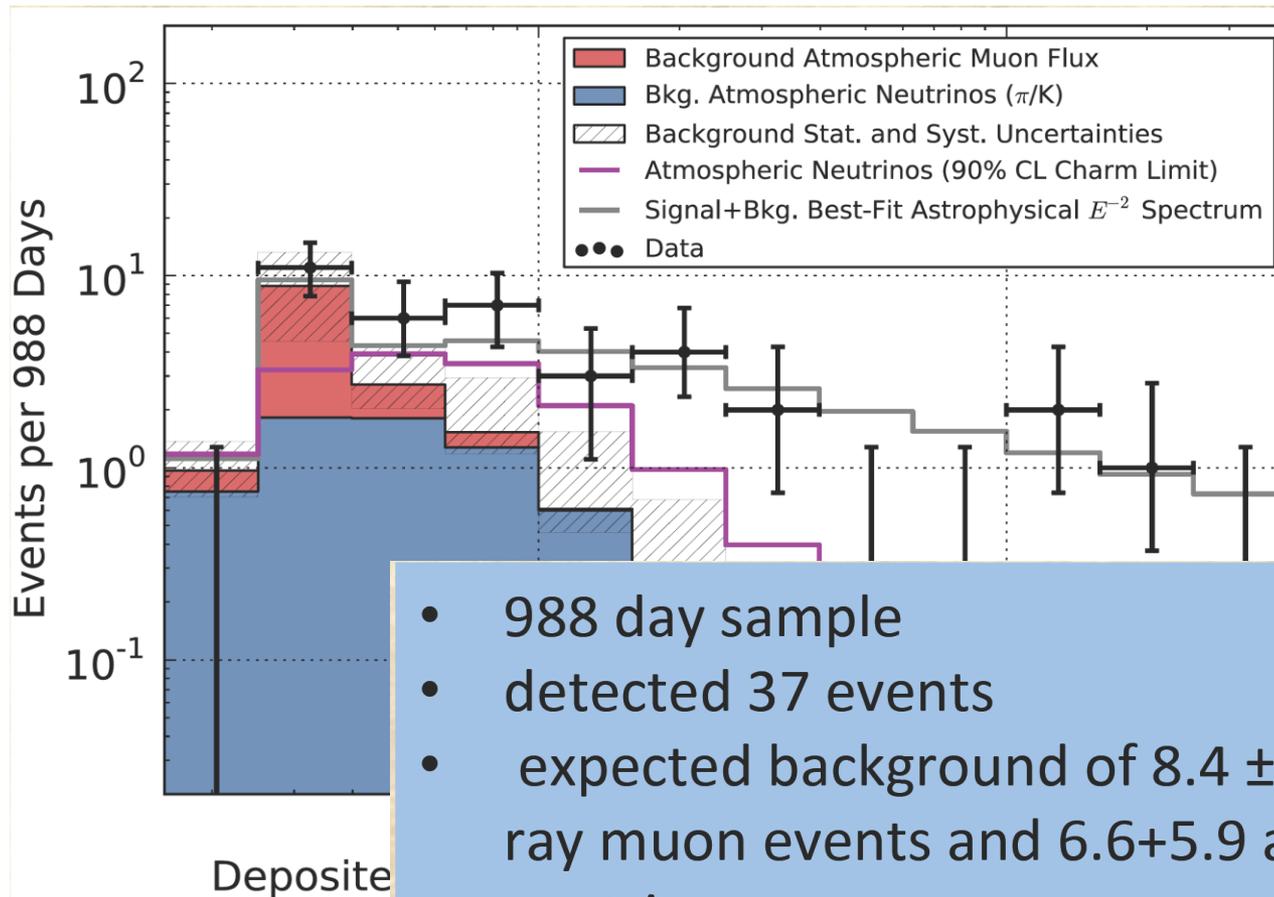
# Результат IceCube

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



# Результат IceCube

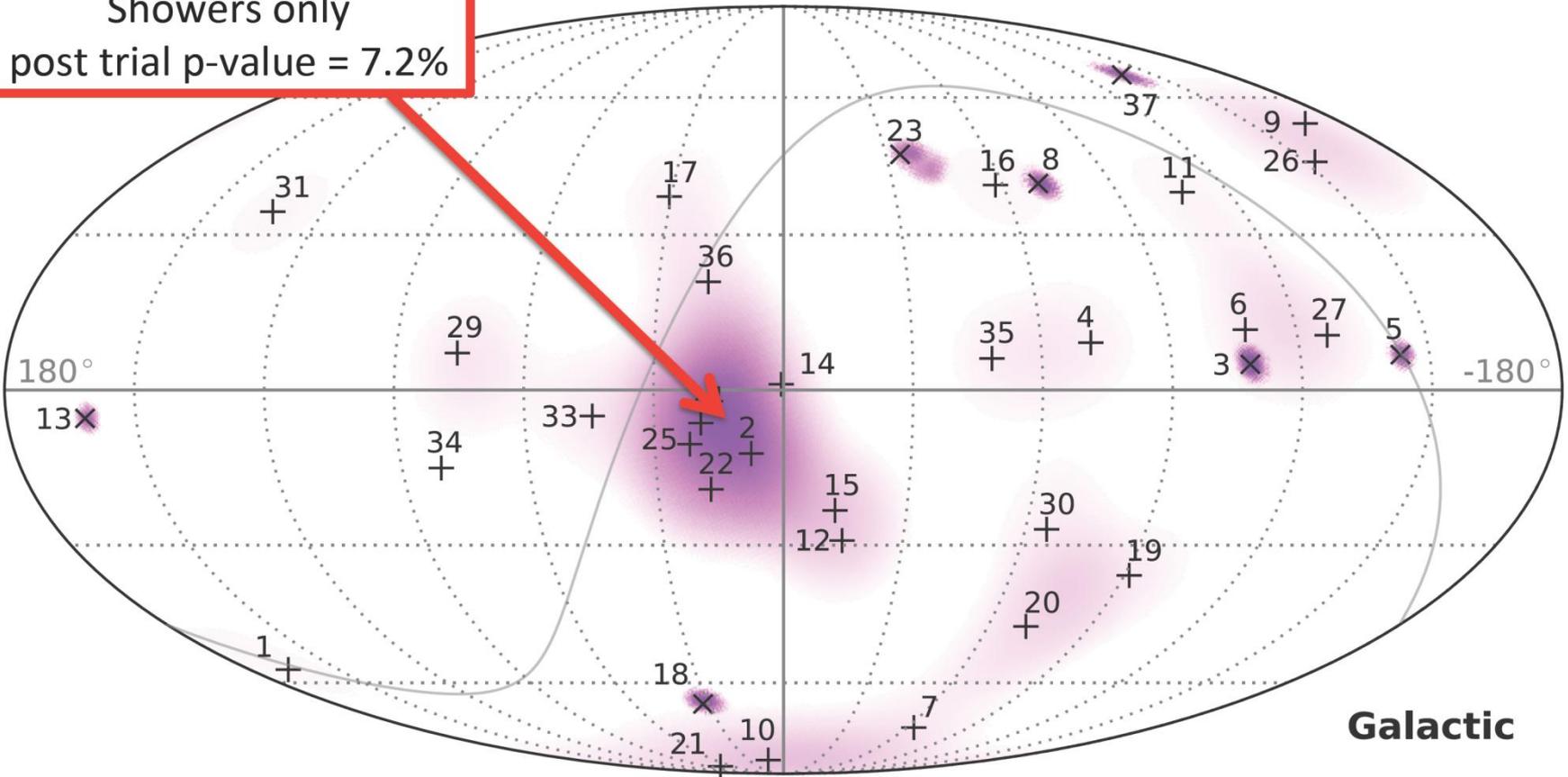
избыток нейтрино с  $E > 60$  ТэВ над атмосферным фоном



- 988 day sample
- detected 37 events
- expected background of  $8.4 \pm 4.2$  cosmic ray muon events and  $6.6+5.9$  atmospheric neutrinos.

# Результат IceCube

Showers only  
post trial p-value = 7.2%



# Результат IceCube

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

- и другие тесты астрофизического происхождения событий
- отсутствие статистически значимой анизотропии
- намек на избыток со стороны центра, но не плоскости Галактики
- согласуется со стандартным составом

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

# ПЛАН

## 1. Экспериментальный результат

- Ice Cube 2013-2014
- комментарии

## 2. Обзор возможных интерпретаций

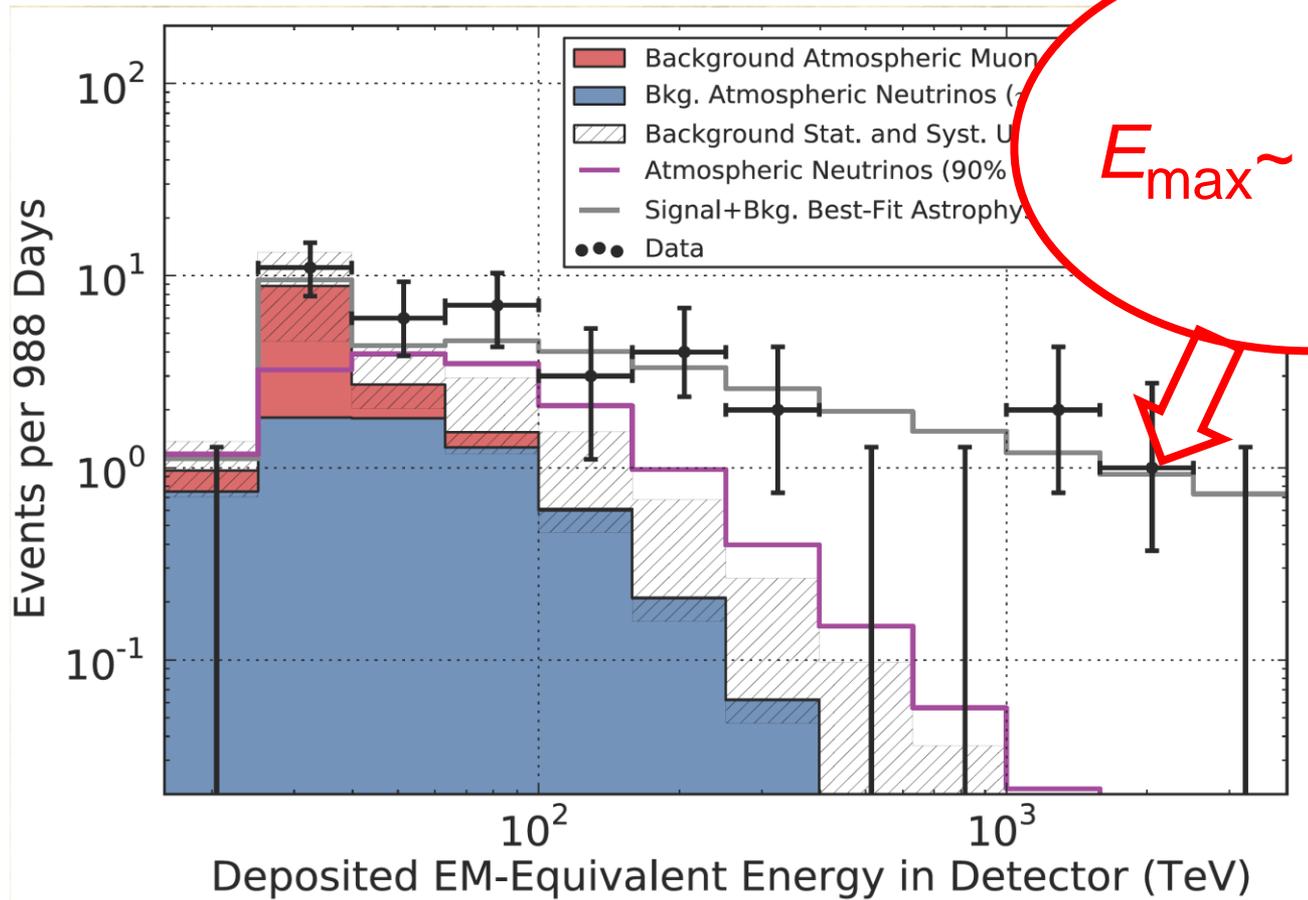
- галактическое происхождение
- внегалактическое происхождение
- «экзотическое» происхождение

## 3. Ограничения из потоков фотонов

- сопутствующие фотоны
- результат ШАЛ-МГУ
- поглощение

## 4. Выводы и перспективы

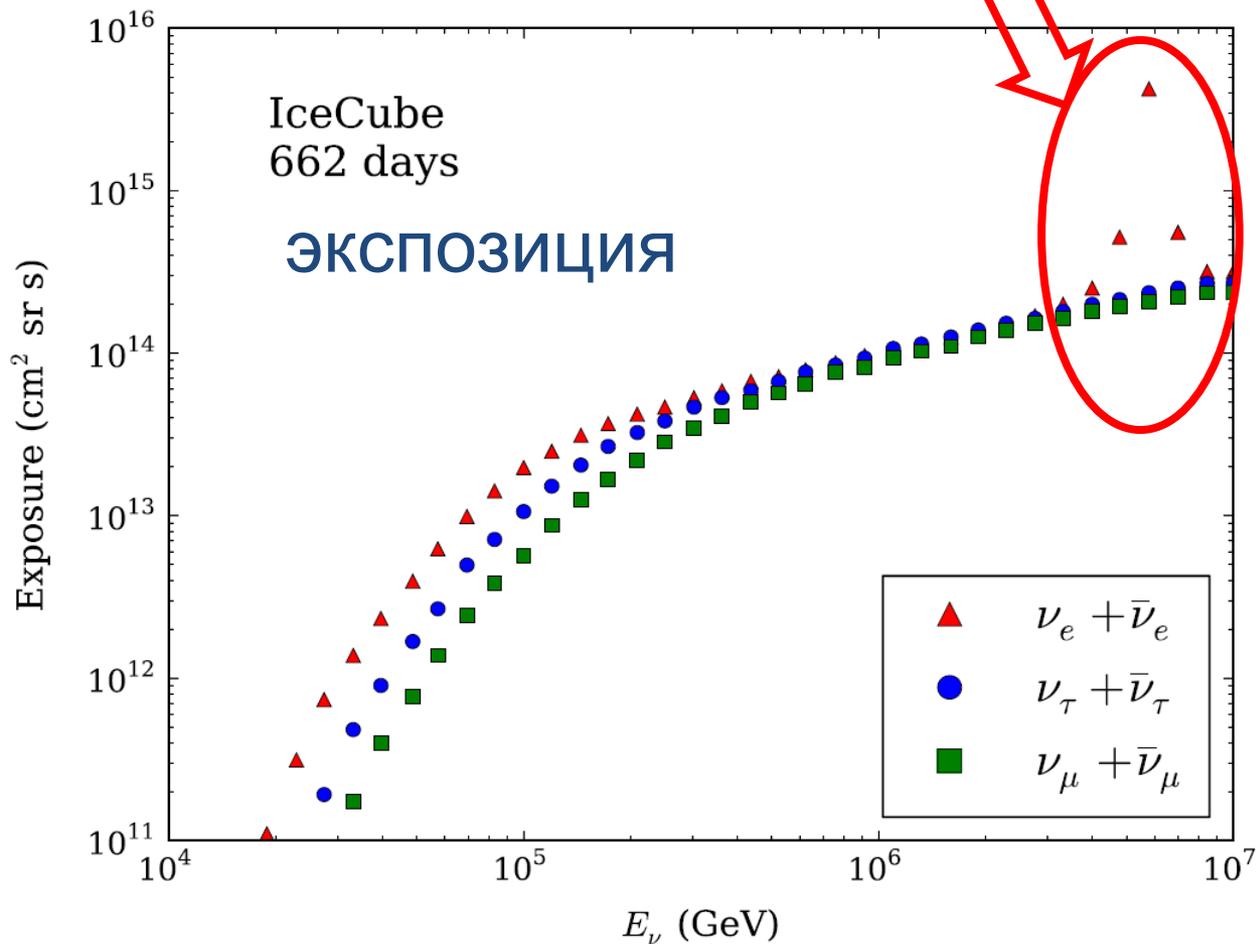
# Комментарии



# Комментарии

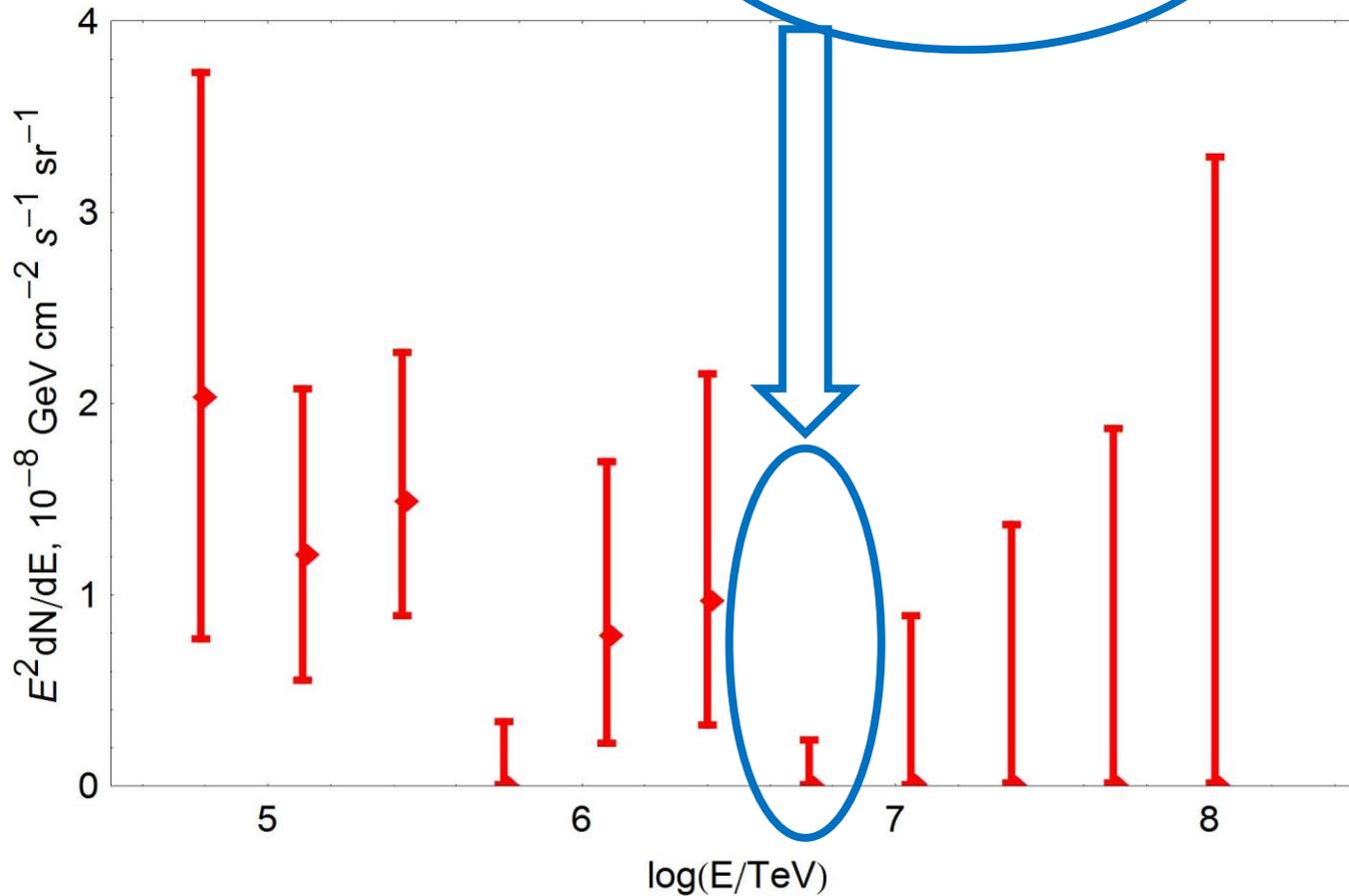
## резонанс Глэшоу

$$E_{\text{res}} \sim 6.3 \text{ ПэВ}$$



# Комментарии

спектр



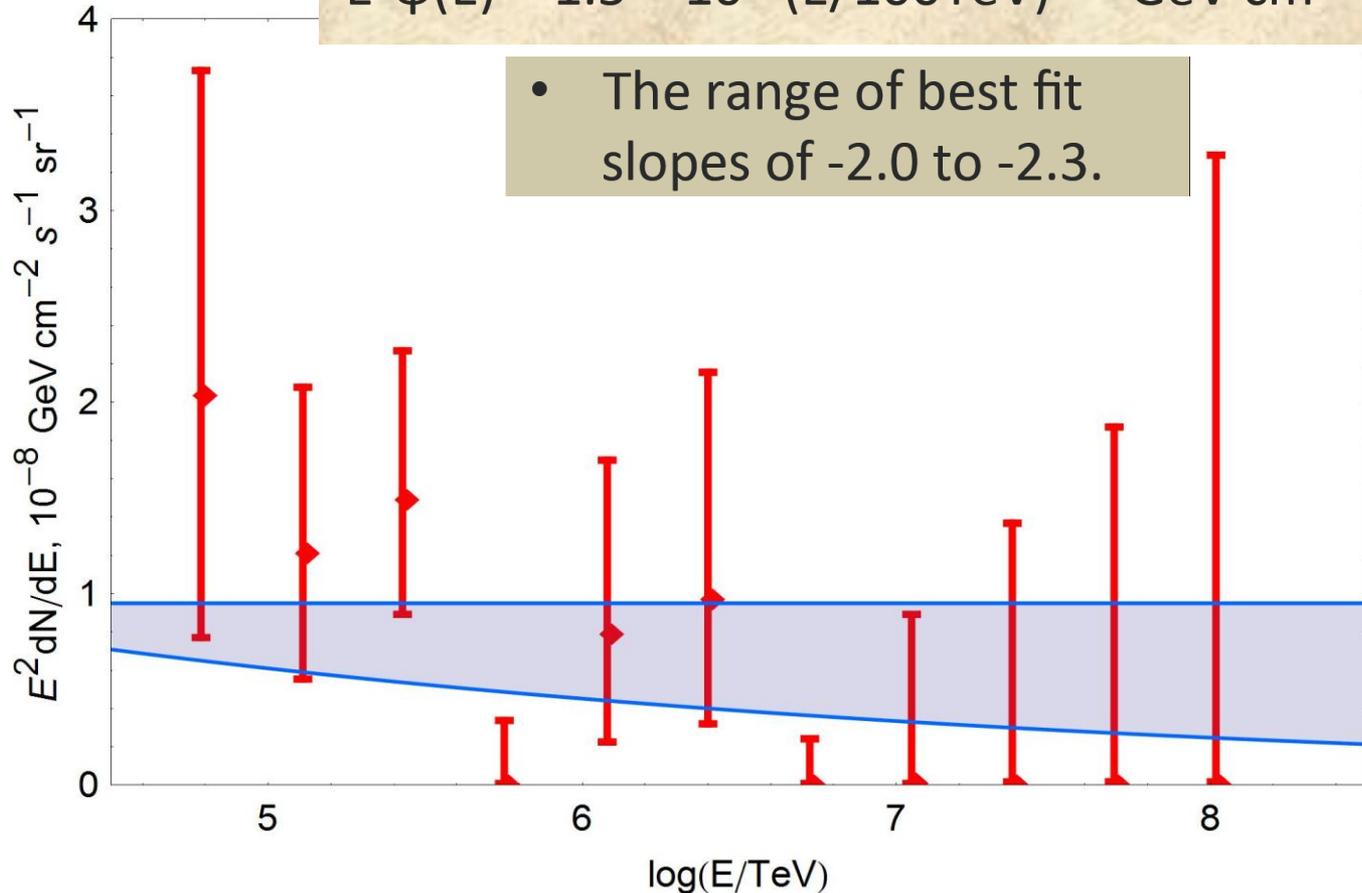
возможное обрезание спектра около 2 ПэВ

# Комментарии

спектр

$$E^2\phi(E) = 0.95 \pm 0.3 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

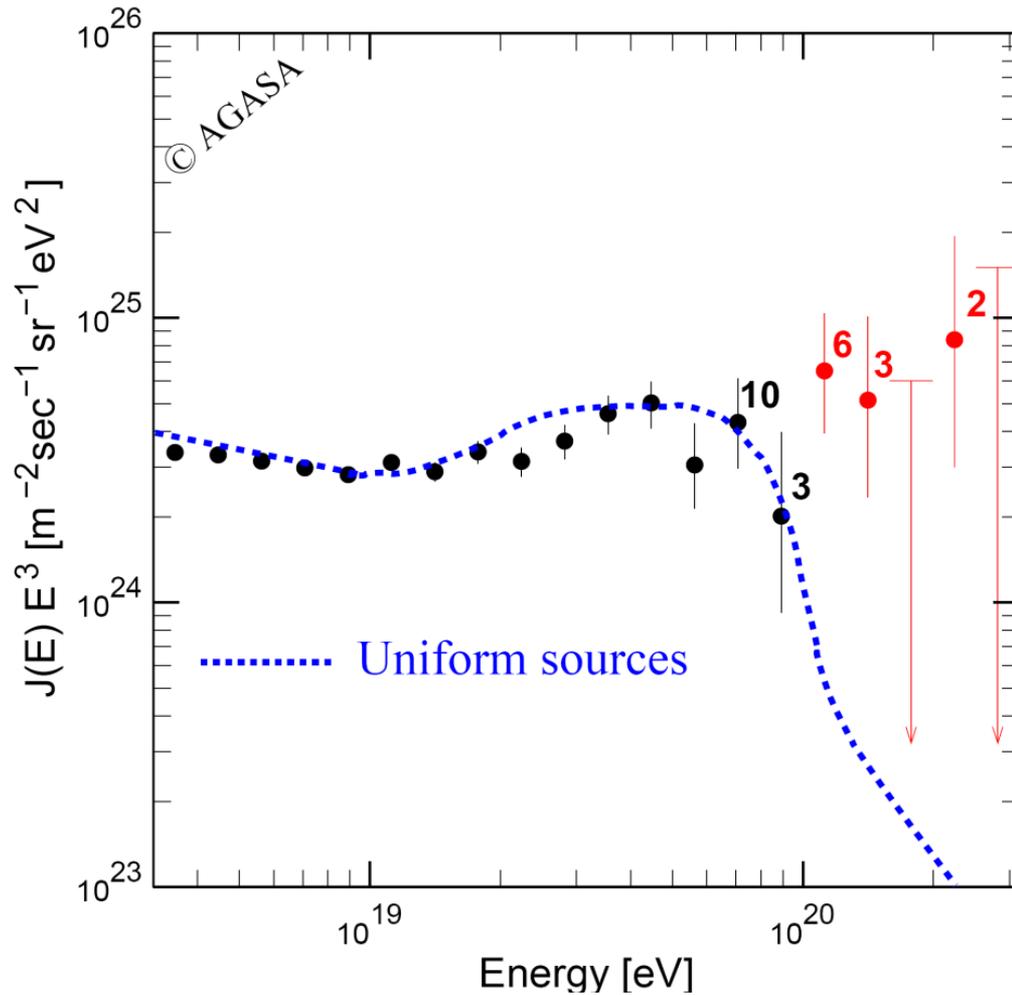
$$E^2\phi(E) = 1.5 \times 10^{-8} (E/100\text{TeV})^{-0.3} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$



возможное продолжение спектра за 2 ПэВ

# Комментарии

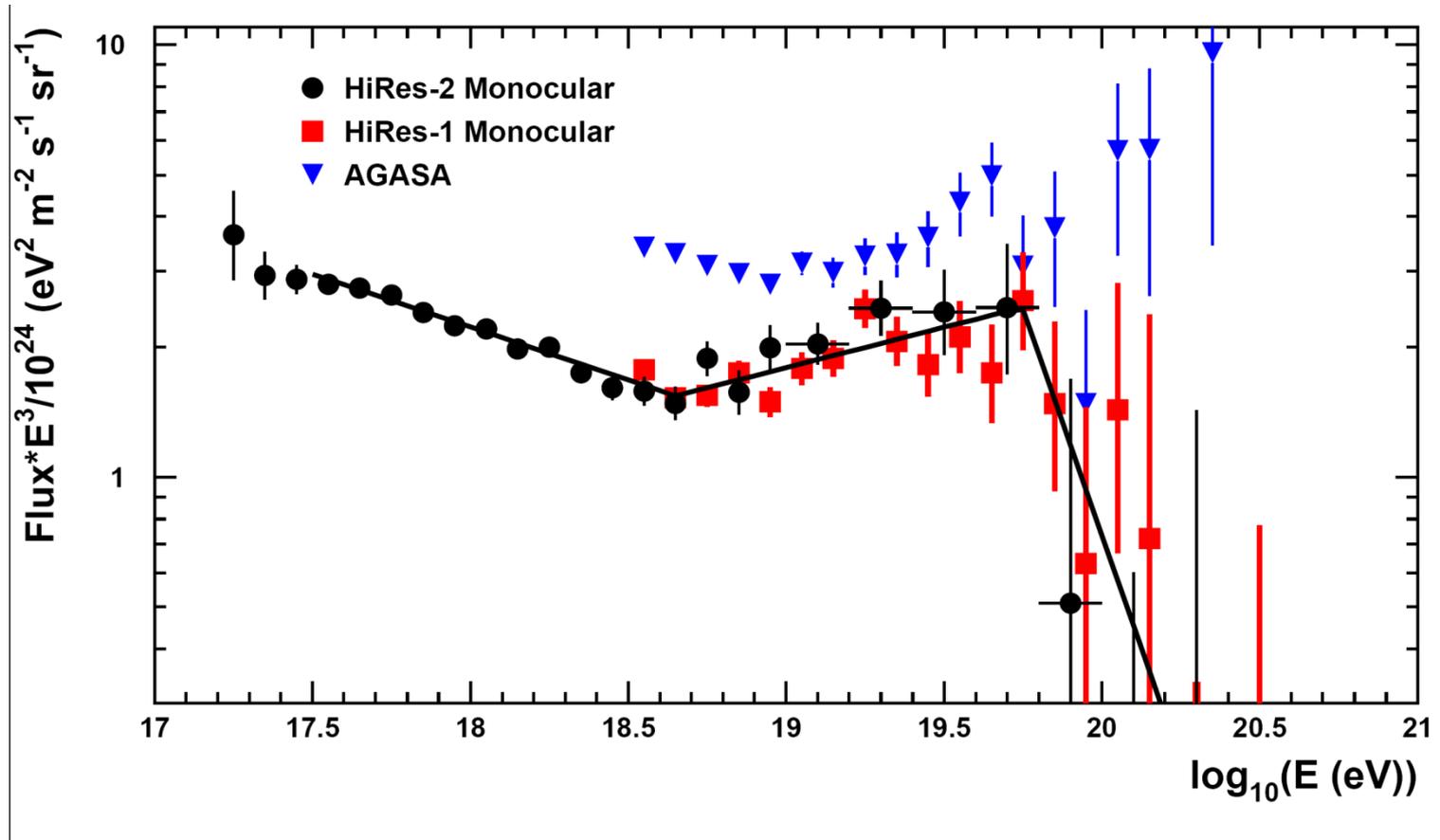
спектр



единичные события на хвосте падающего спектра...

# Комментарии

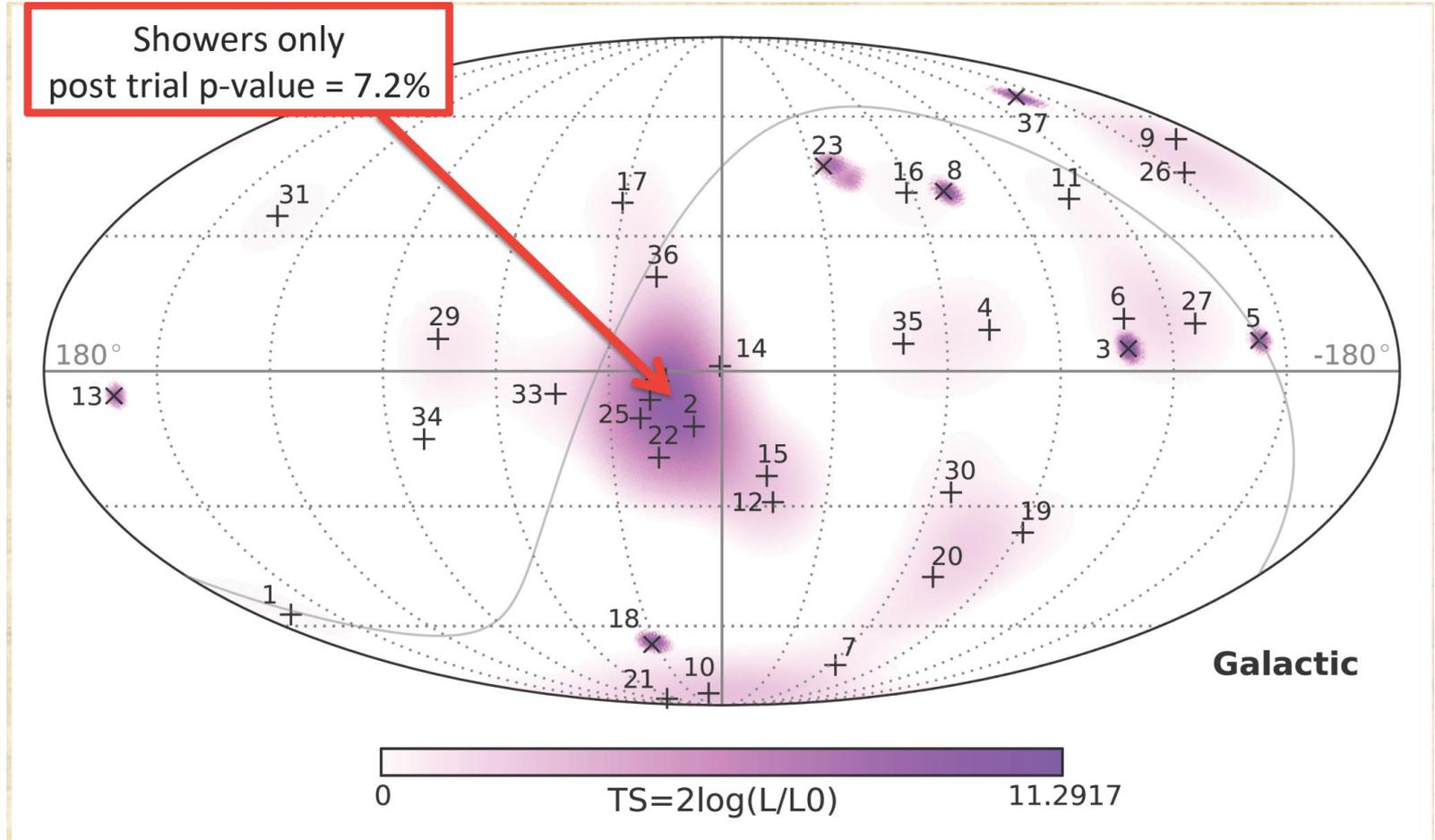
## спектр



единичные события на хвосте падающего спектра...

# Комментарии

## анизотропия



угловое разрешение...

# ПЛАН

## 1. Экспериментальный результат

- Ice Cube 2013-2014
- комментарии

## 2. Обзор возможных интерпретаций

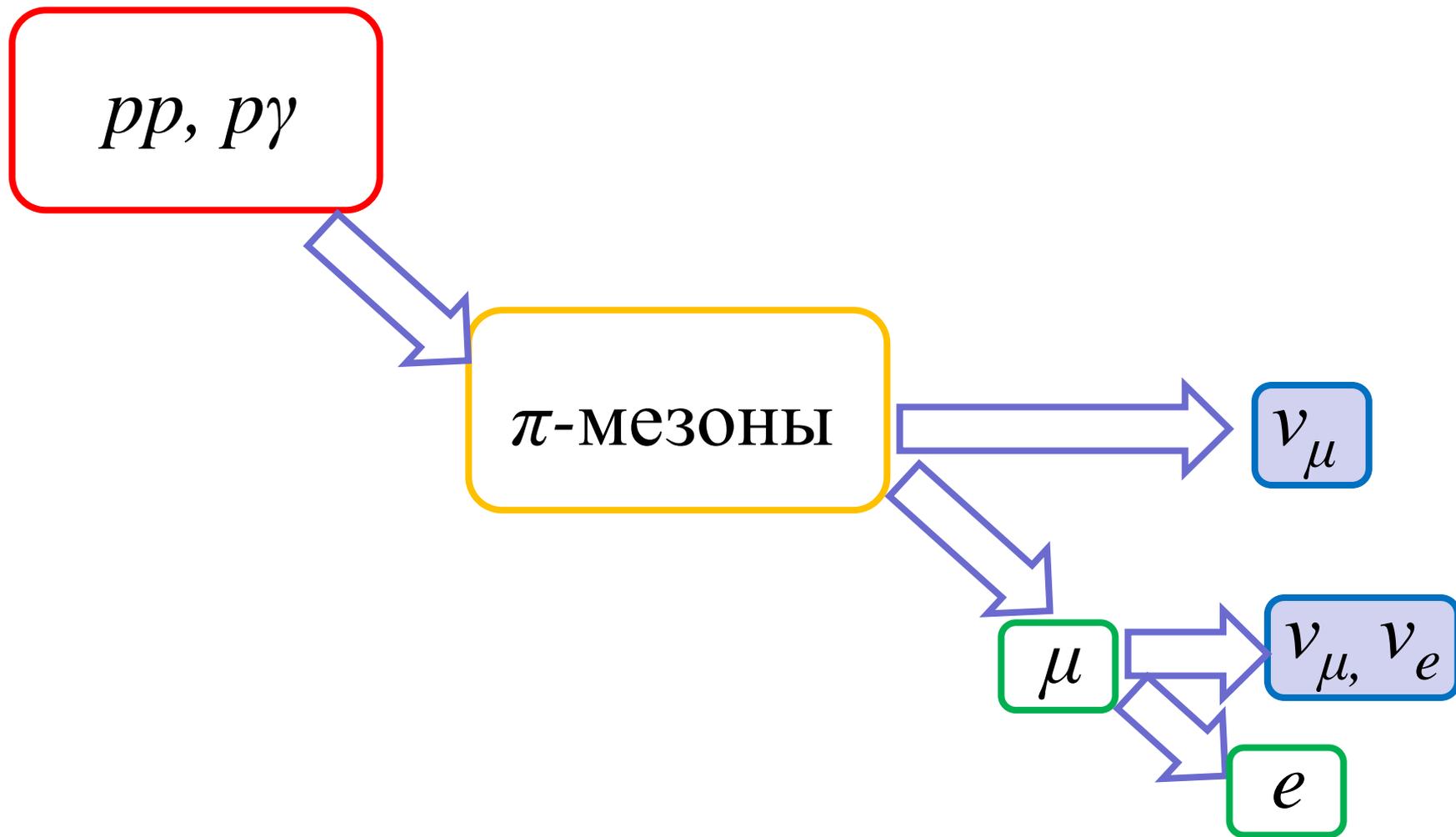
- галактическое происхождение
- внегалактическое происхождение
- «экзотическое» происхождение

## 3. Ограничения из потоков фотонов

- сопутствующие фотоны
- результат ШАЛ-МГУ
- поглощение

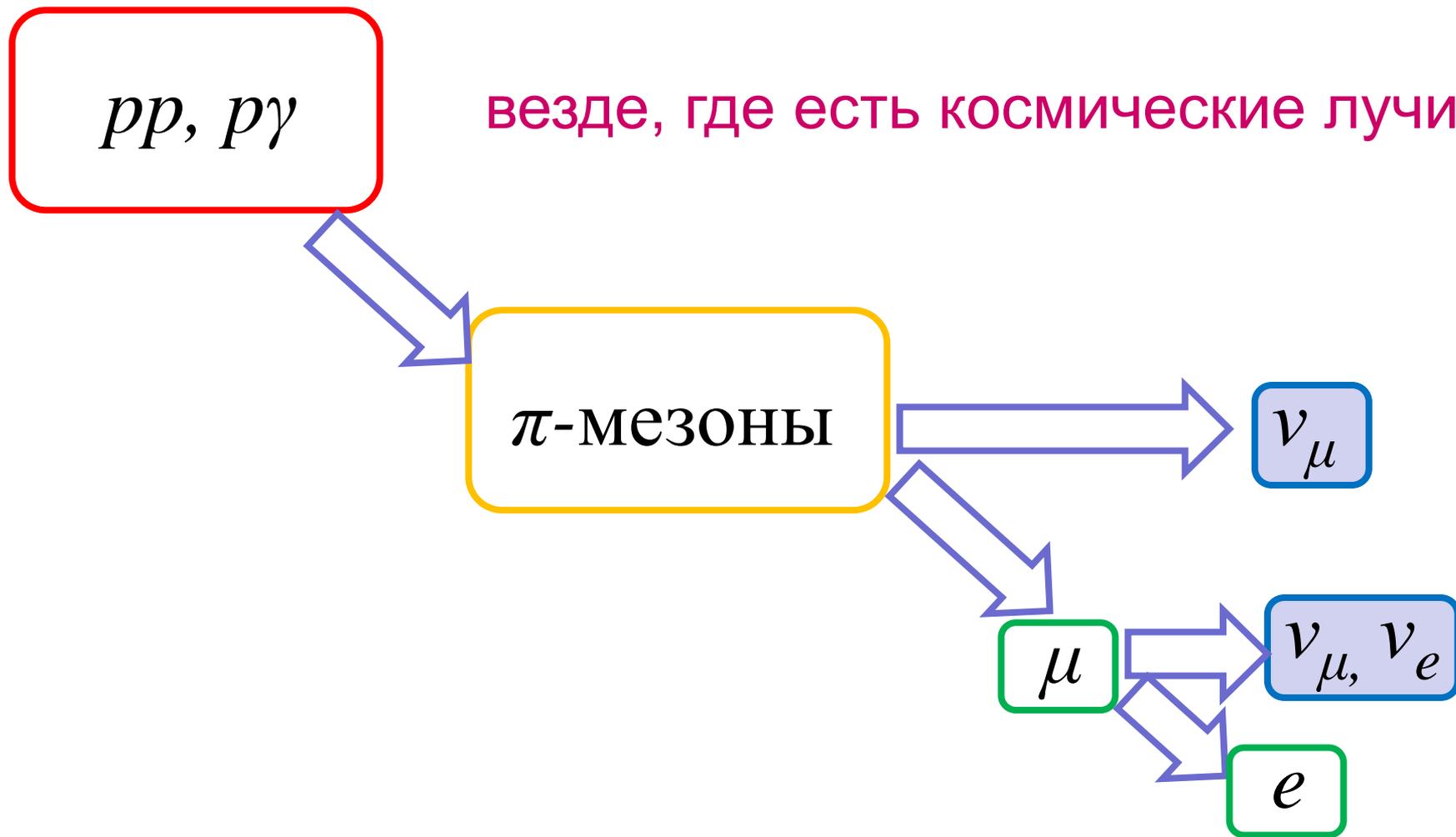
## 4. Выводы и перспективы

# Происхождение нейтрино



# Происхождение нейтрино

везде, где есть космические лучи!



# ПЛАН

- 1. Экспериментальный результат**
  - Ice Cube 2013-2014
  - комментарии
- 2. Обзор возможных интерпретаций**
  - галактическое происхождение
  - внегалактическое происхождение
  - «экзотическое» происхождение
- 3. Ограничения из потоков фотонов**
  - сопутствующие фотоны
  - результат ШАЛ-МГУ
  - поглощение
- 4. Выводы и перспективы**

# Галактические источники

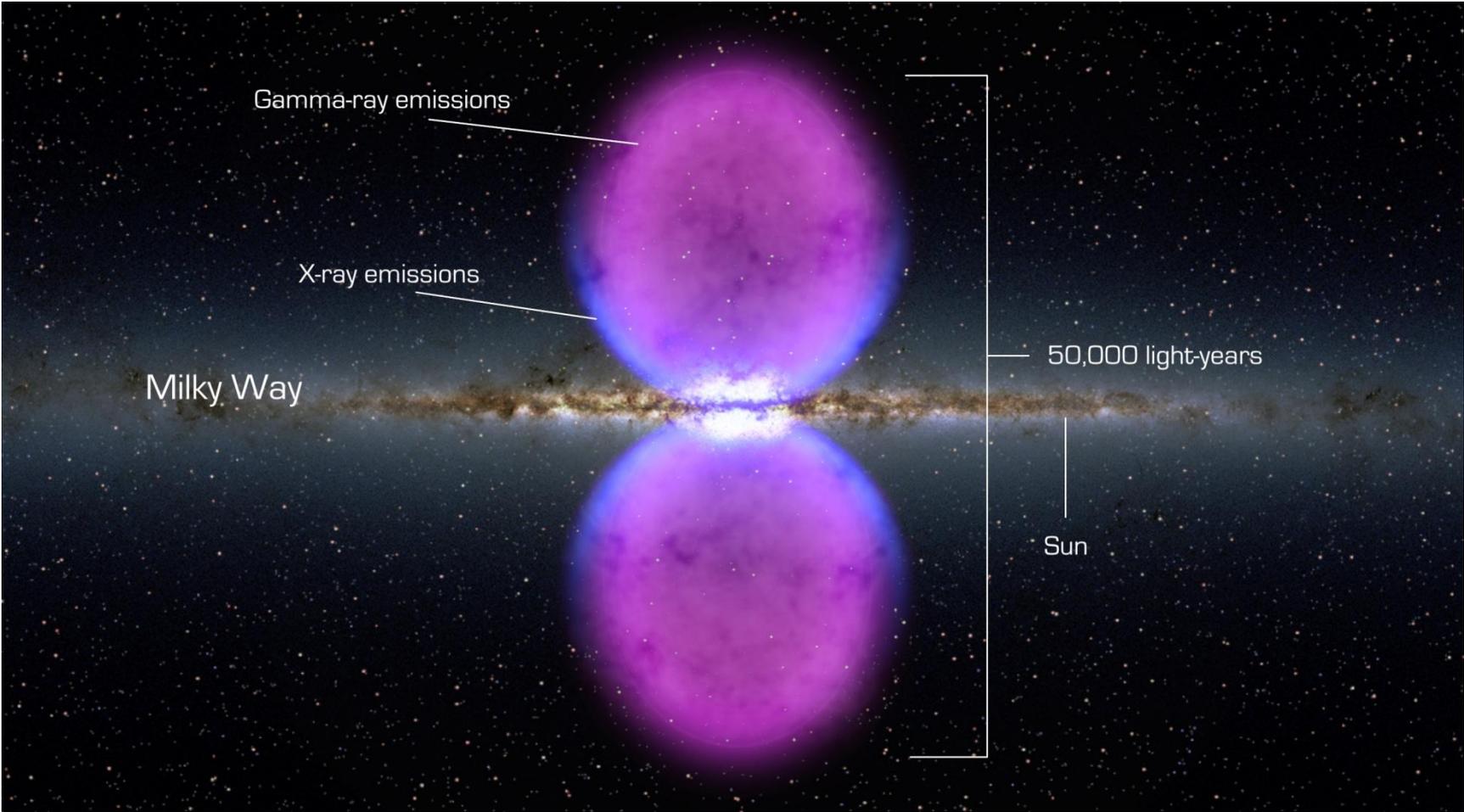
- источники галактических космических лучей  
(остатки сверхновых?)



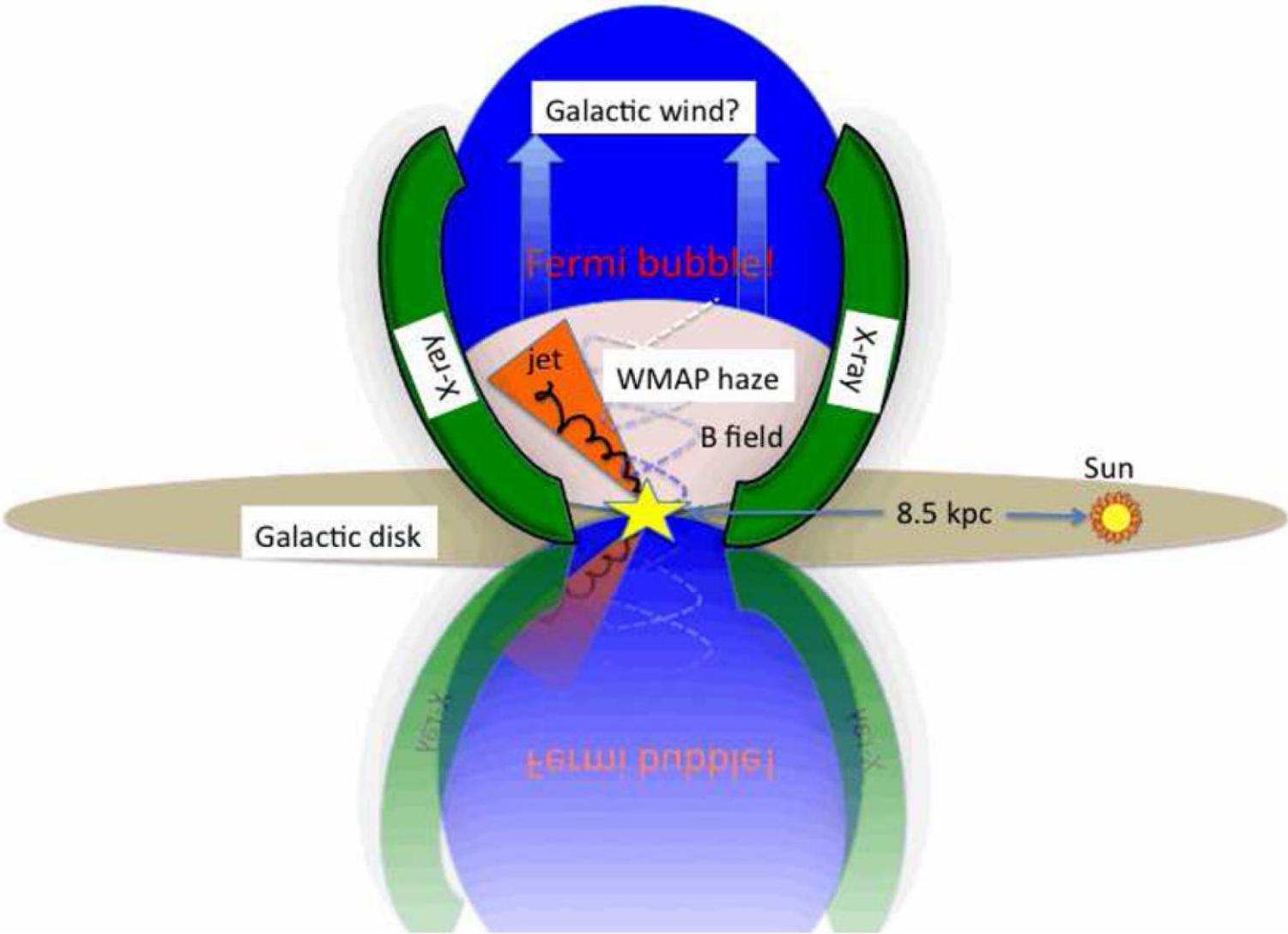
# Галактические источники

- источники галактических космических лучей  
(остатки сверхновых?)
- протяженные области, заполненные веществом
  - FERMI bubbles
  - горячий газ в гало

# FERMI bubbles = WMAP haze



# FERMI bubbles = WMAP haze



# ПЛАН

## 1. Экспериментальный результат

- Ice Cube 2013-2014
- комментарии

## 2. Обзор возможных интерпретаций

- галактическое происхождение
- внегалактическое происхождение
- «экзотическое» происхождение

## 3. Ограничения из потоков фотонов

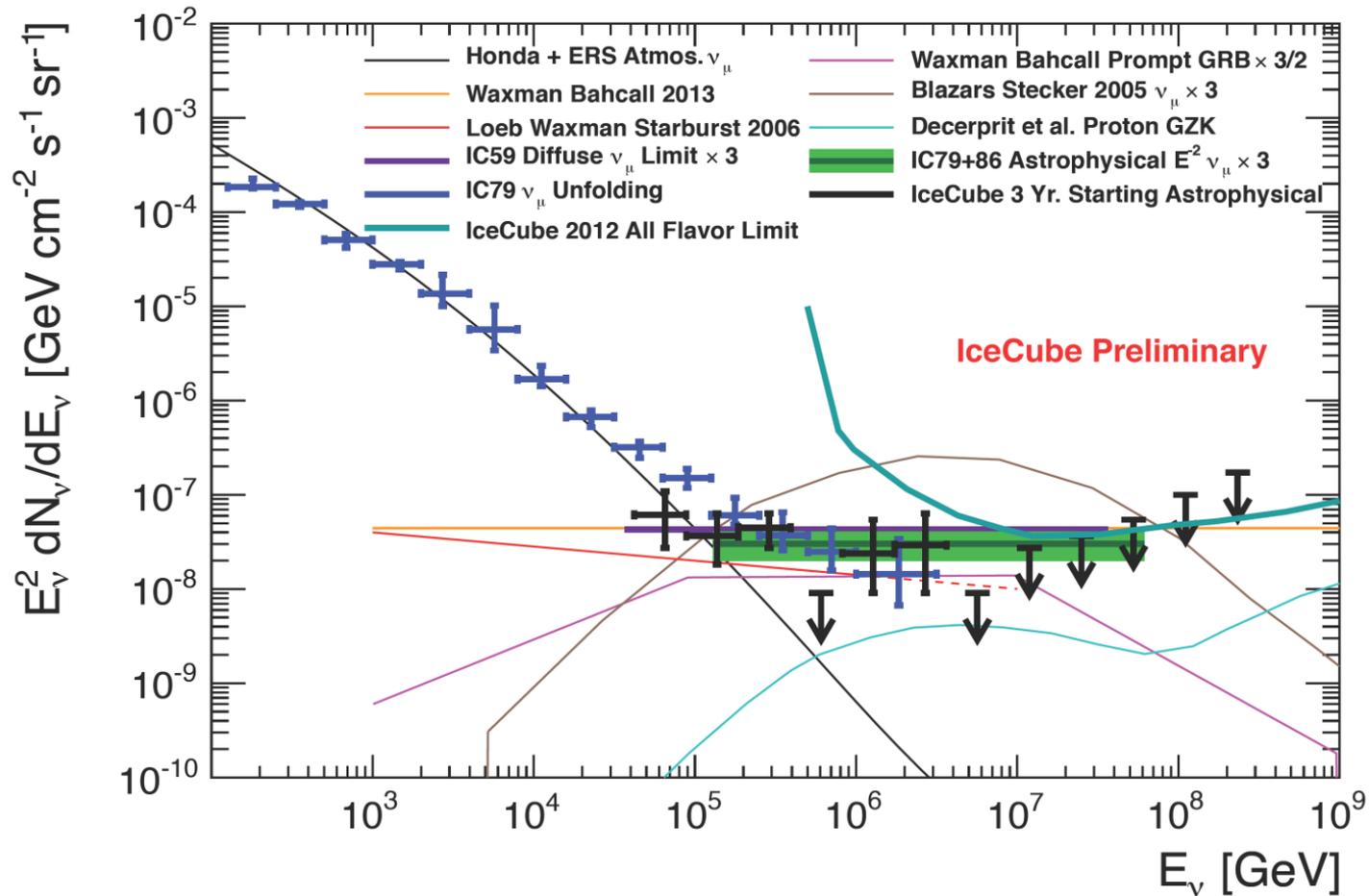
- сопутствующие фотоны
- результат ШАЛ-МГУ
- поглощение

## 4. Выводы и перспективы

# Внегалактические источники

- источники внегалактических космических лучей
  - активные галактики?
  - гамма-всплески?
  - starburst galaxies
- ГЗК-нейтрино (“cosmogenic”)

# Внегалактические источники

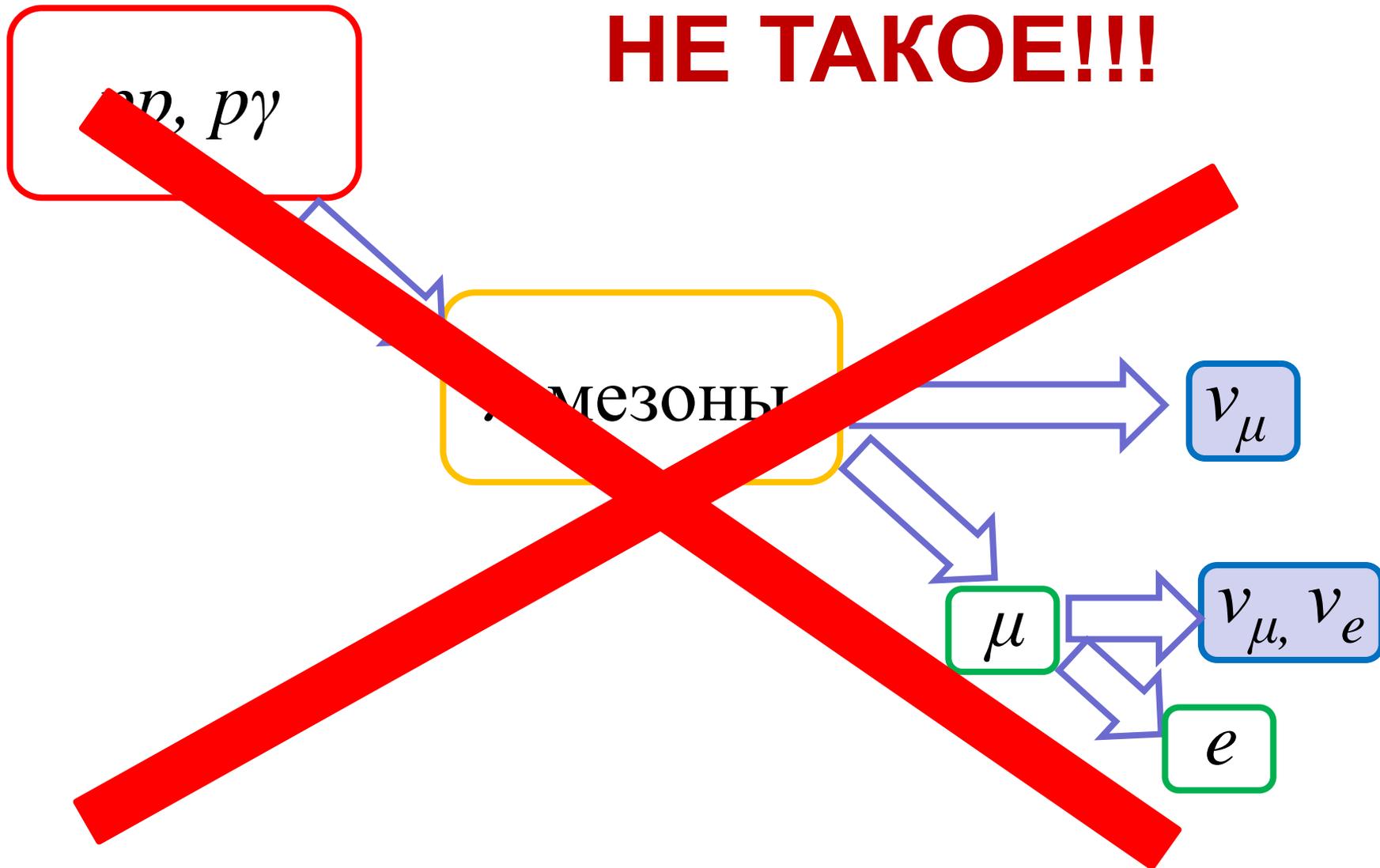


# ПЛАН

- 1. Экспериментальный результат**
  - Ice Cube 2013-2014
  - комментарии
- 2. Обзор возможных интерпретаций**
  - галактическое происхождение
  - внегалактическое происхождение
  - «экзотическое» происхождение
- 3. Ограничения из потоков фотонов**
  - сопутствующие фотоны
  - результат ШАЛ-МГУ
  - поглощение
- 4. Выводы и перспективы**

# Экзотическое происхождение:

**НЕ ТАКОЕ!!!**



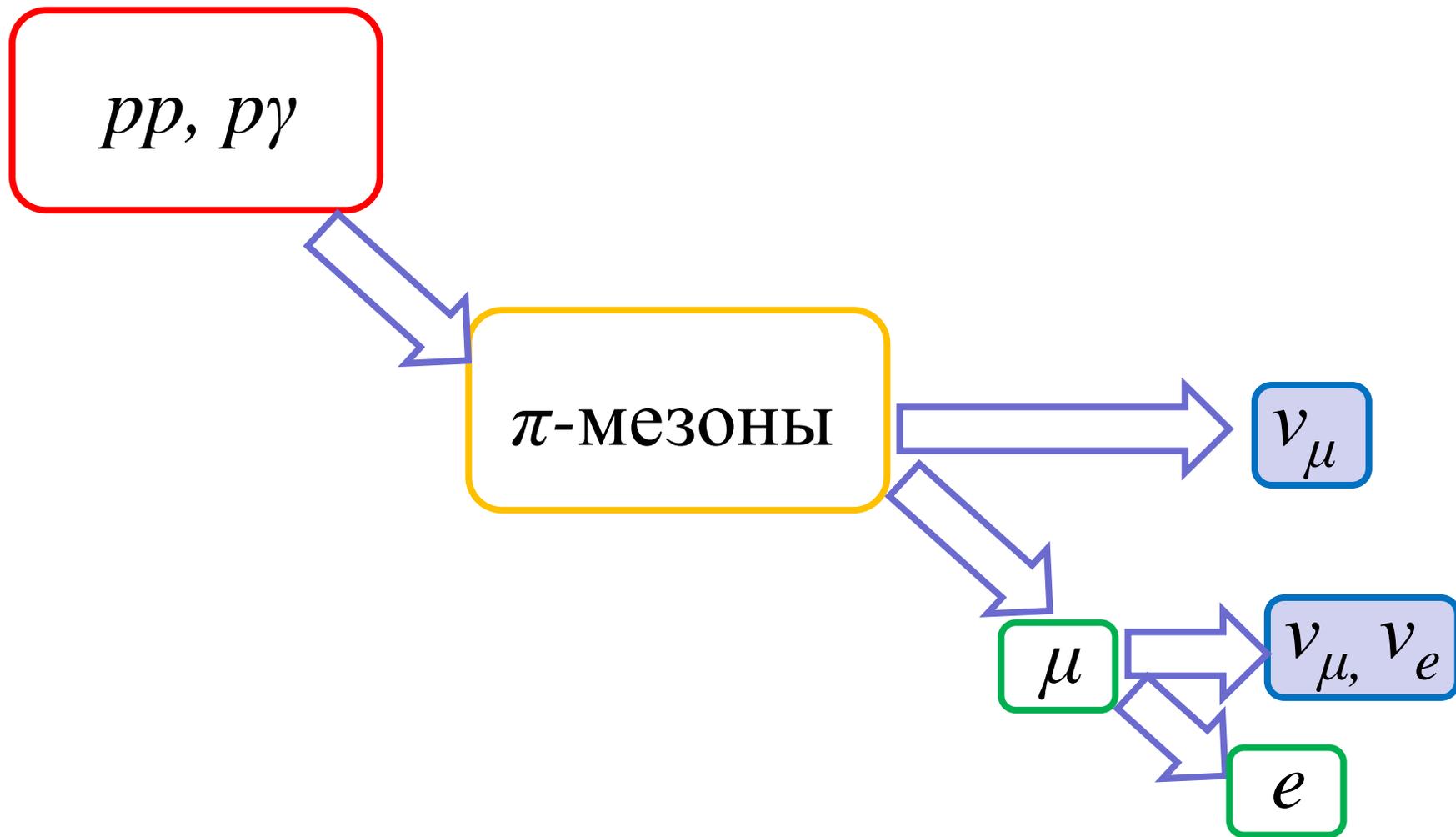
# Экзотическое происхождение:

- аннигиляция или распады частиц темной материи
- распады, разрешенные при нарушении  
Лоренц-инвариантности
- рождение в реакциях, связанных с новыми  
взаимодействиями

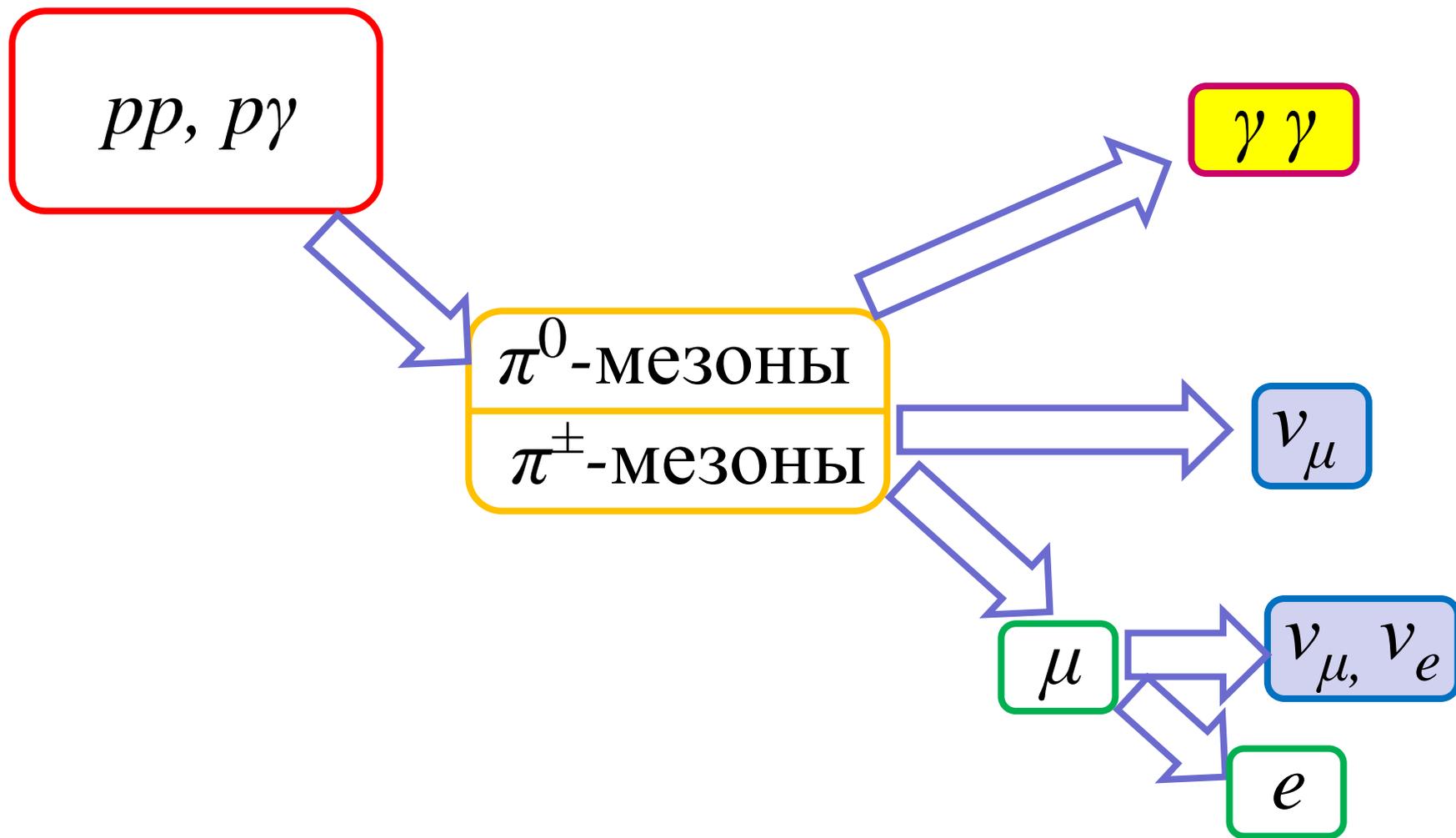
# ПЛАН

- 1. Экспериментальный результат**
  - Ice Cube 2013-2014
  - комментарии
- 2. Обзор возможных интерпретаций**
  - галактическое происхождение
  - внегалактическое происхождение
  - «экзотическое» происхождение
- 3. Ограничения из потоков фотонов**
  - сопутствующие фотоны
  - результат ШАЛ-МГУ
  - поглощение
- 4. Выводы и перспективы**

# Сопутствующие фотоны



# Сопутствующие фотоны



8.B:9.A

*Nuclear Physics* 27 (1961) 385—394; © North-Holland Publishing Co., Amsterdam

Not to be reproduced by photoprint or microfilm without written permission from the publisher

## ON HIGH ENERGY NEUTRINO PHYSICS IN COSMIC RAYS

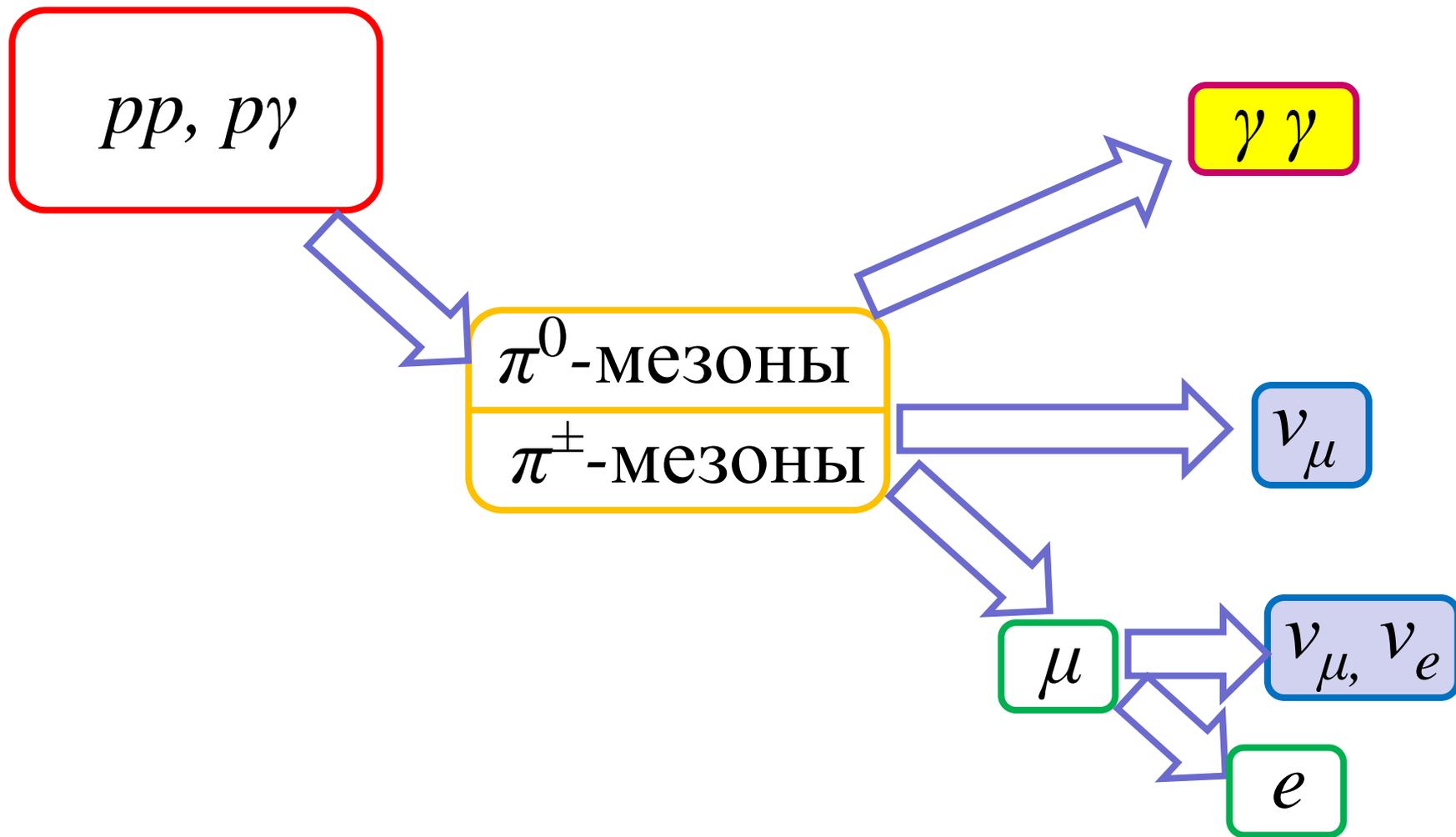
M. A. MARKOV and I. M. ZHELEZNYKH

*P. N. Lebedev Physical Institute, Academy of Sciences, Moscow, USSR*

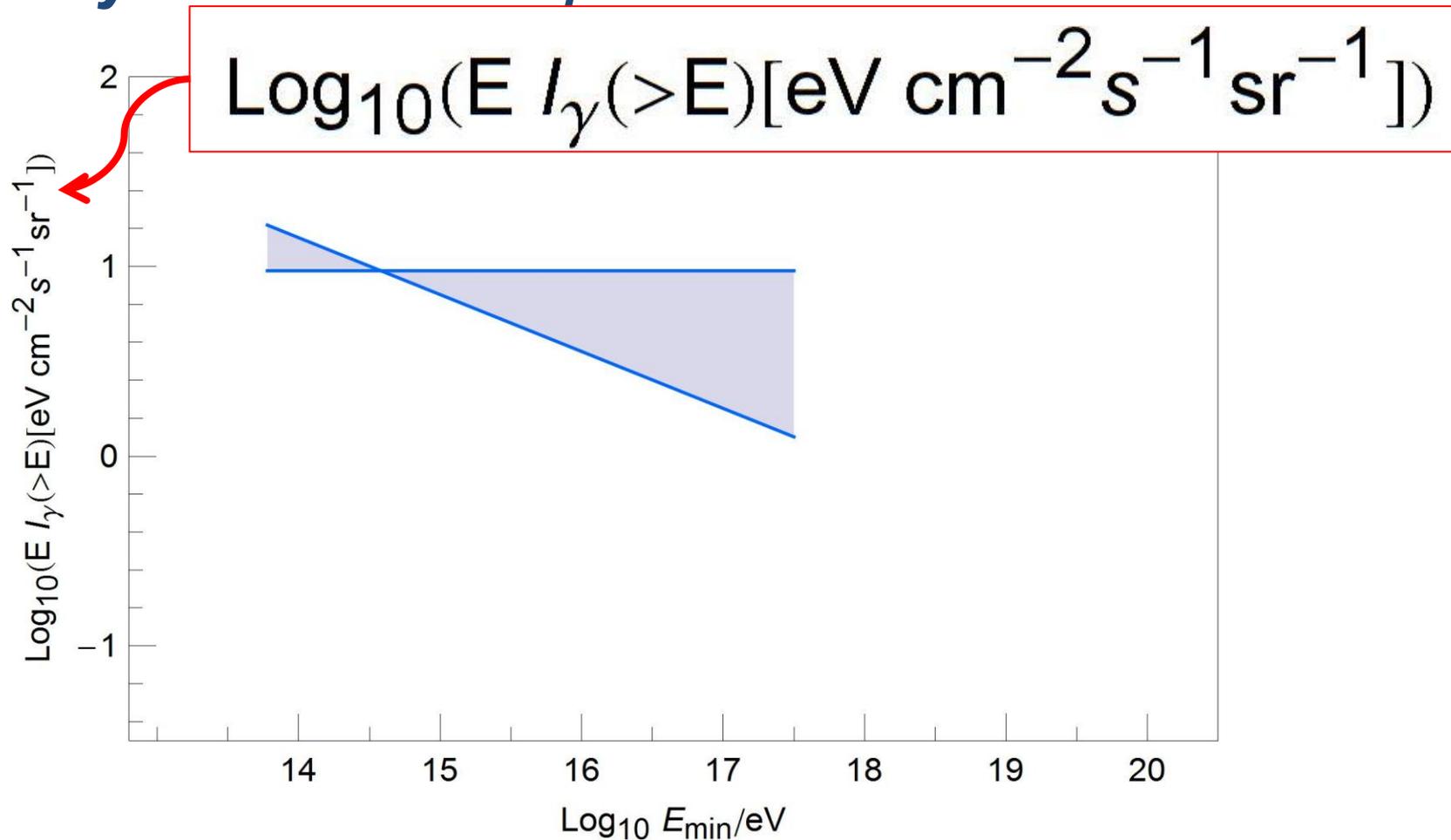
Received 3 January 1961

In any case the presence of high-energy photons beyond the atmosphere could be an argument in favour of the existence of, at least, the same fluxes of true cosmic high-energy neutrinos.

# Сопутствующие фотоны



# Распространение фотонов интегральный поток фотонов без учета поглощения



# ПЛАН

## 1. Экспериментальный результат

- Ice Cube 2013-2014
- комментарии

## 2. Обзор возможных интерпретаций

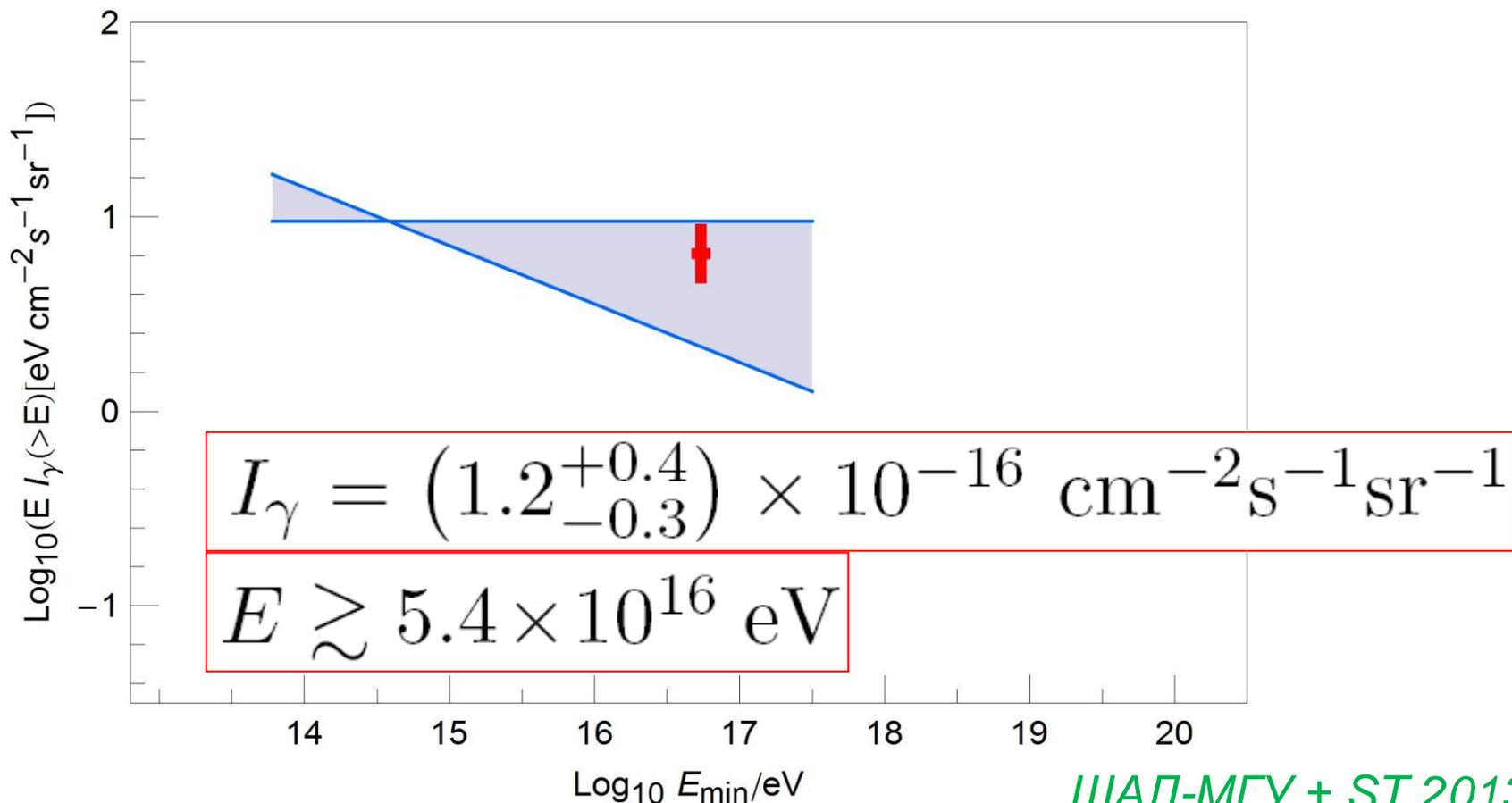
- галактическое происхождение
- внегалактическое происхождение
- «экзотическое» происхождение

## 3. Ограничения из потоков фотонов

- сопутствующие фотоны
- результат ШАЛ-МГУ
- поглощение

## 4. Выводы и перспективы

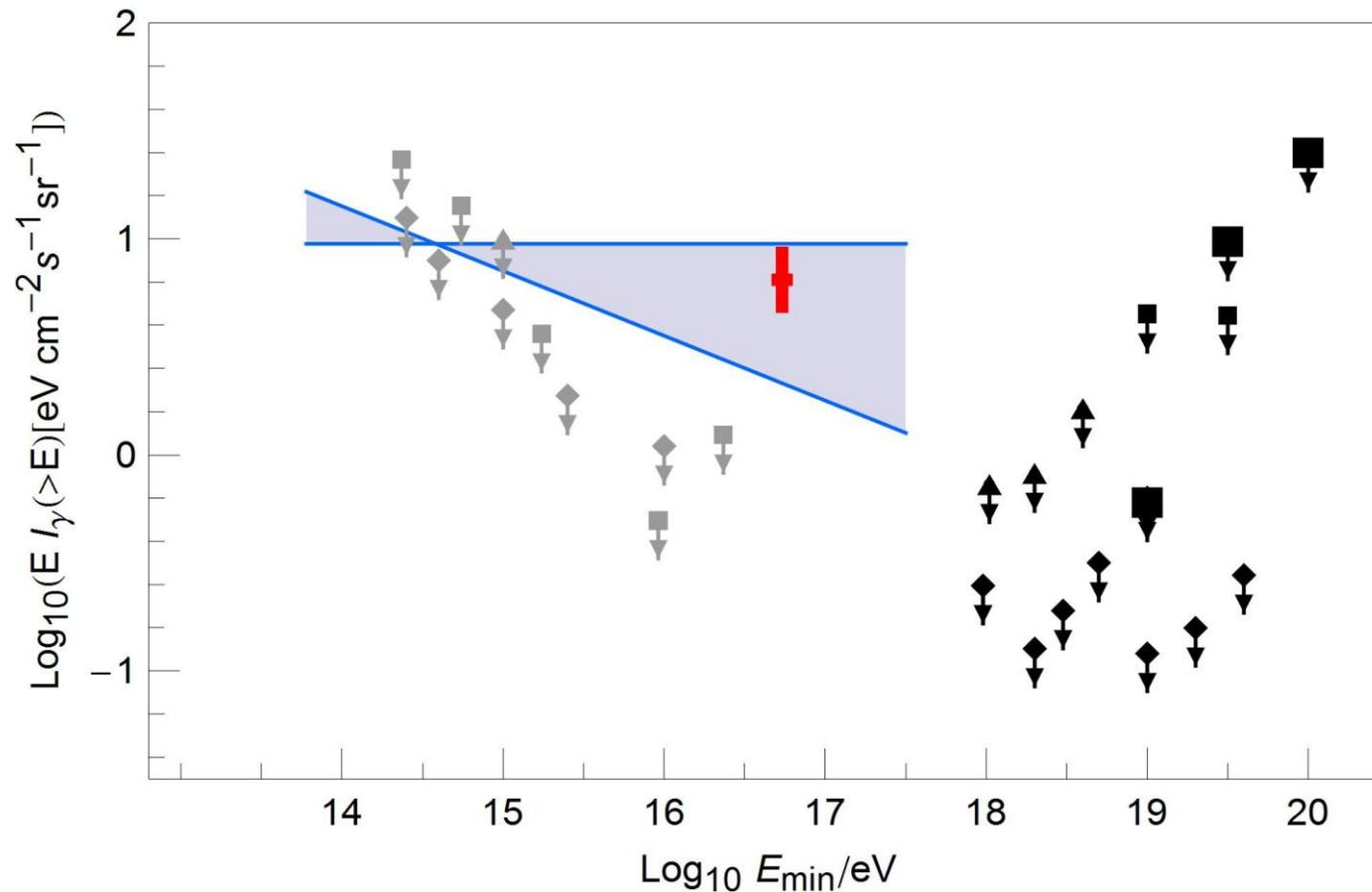
# Распространение фотонов интегральный поток фотонов – измерение ШАЛ-МГУ



ШАЛ-МГУ + ST 2013

Fomin et al. ЖЭТФ 144, 1153 = arXiv:1307.4988

# Распространение фотонов *интегральный поток фотонов без учета поглощения*

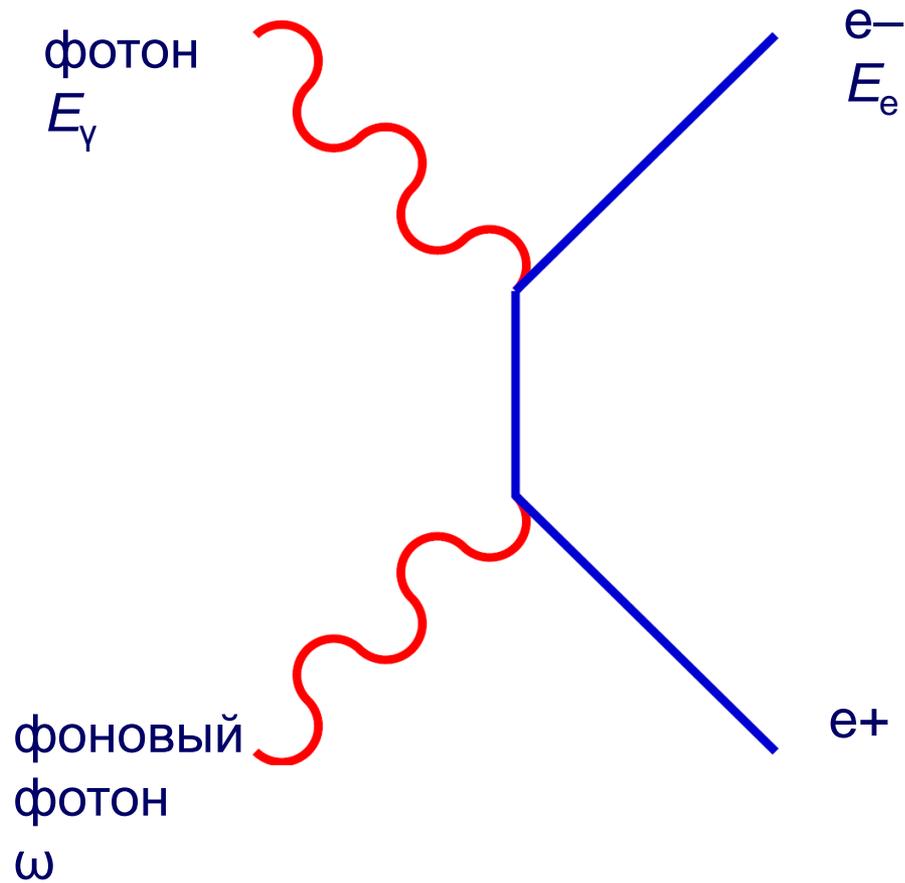


# ПЛАН

- 1. Экспериментальный результат**
  - Ice Cube 2013-2014
  - комментарии
- 2. Обзор возможных интерпретаций**
  - галактическое происхождение
  - внегалактическое происхождение
  - «экзотическое» происхождение
- 3. Ограничения из потоков фотонов**
  - сопутствующие фотоны
  - результат ШАЛ-МГУ
  - поглощение
- 4. Выводы и перспективы**

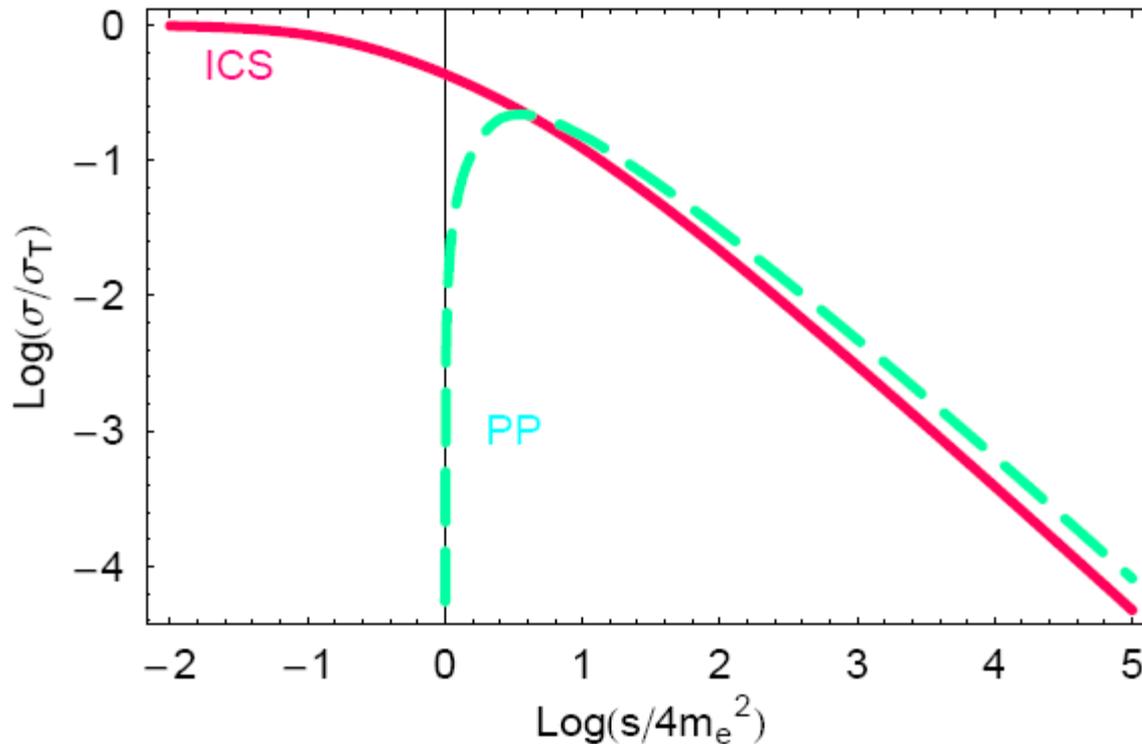
# Распространение фотонов

- рождение пар



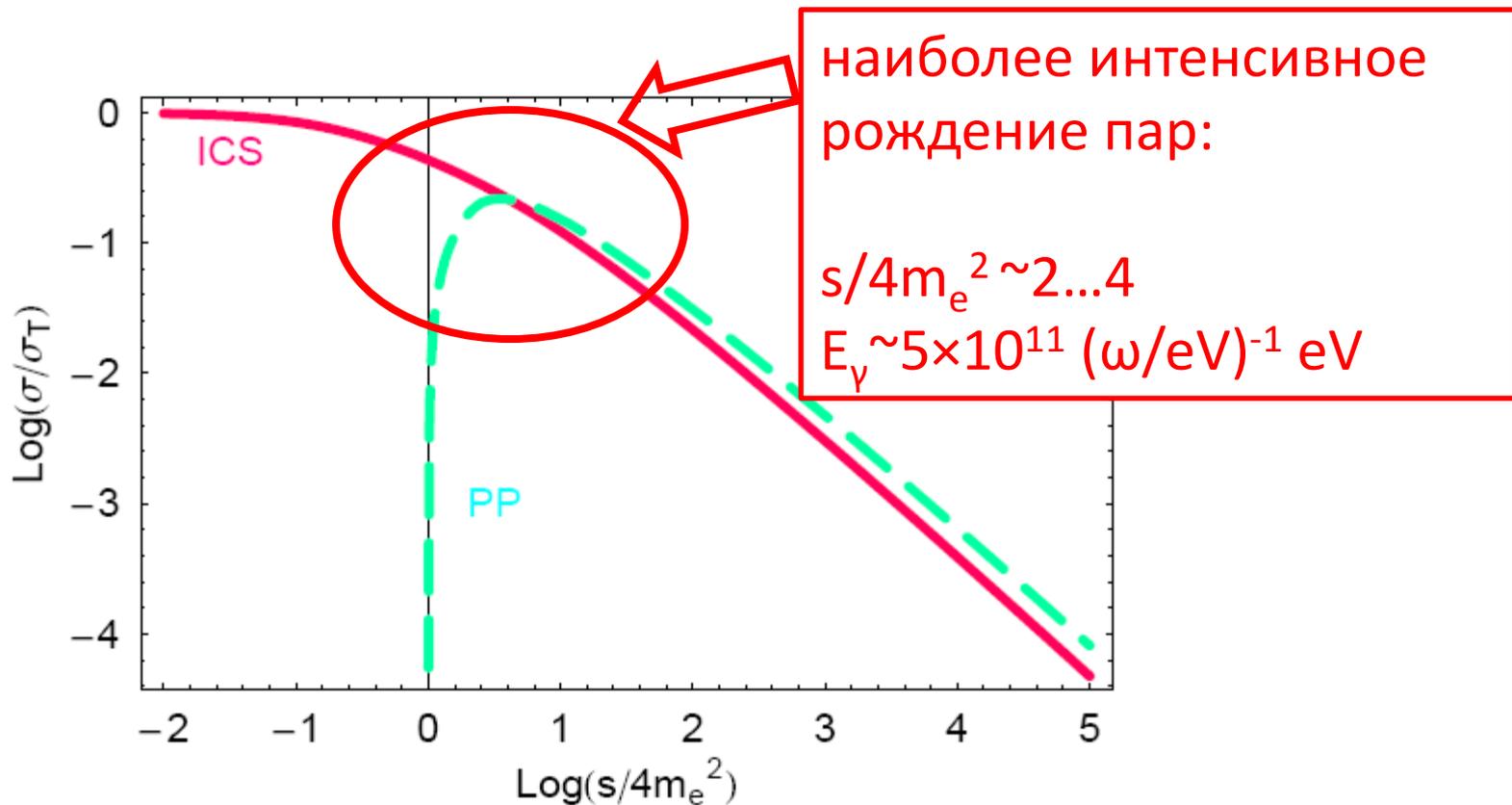
# Распространение фотонов

полное сечение рождения пар (PP) и  
обратного комптоновского рассеяния (ICS)

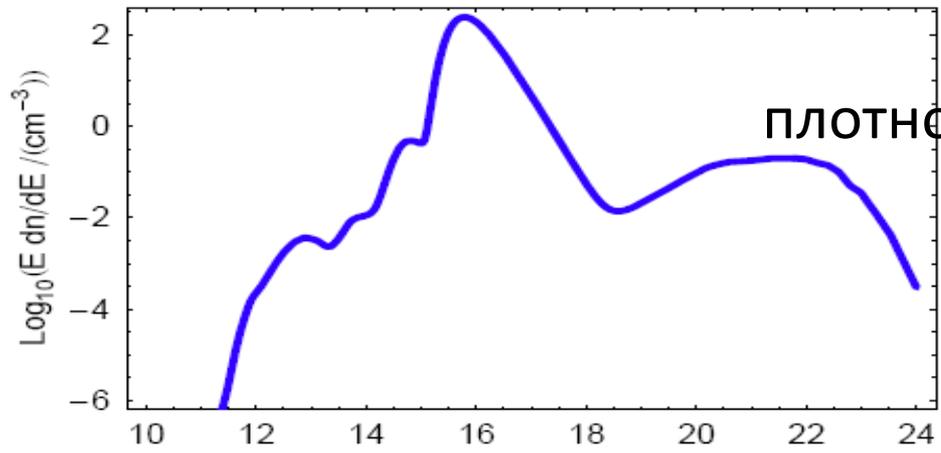


# Распространение фотонов

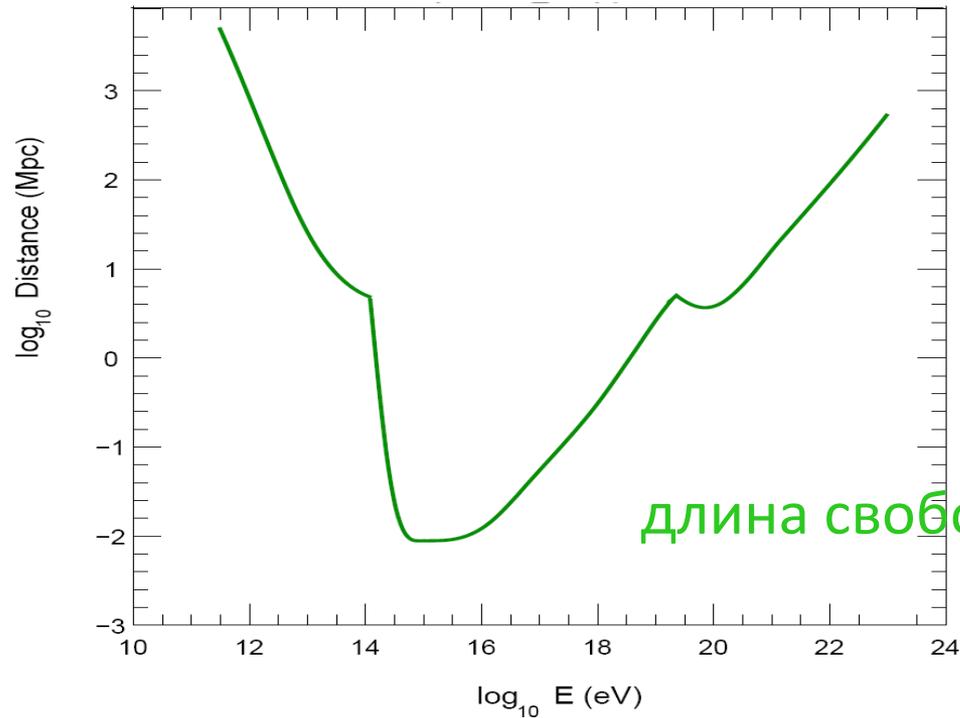
полное сечение рождения пар (PP) и  
обратного комптоновского рассеяния (ICS)



# Распространение фотонов



ПЛОТНОСТЬ ФОНОВЫХ ФОТОНОВ

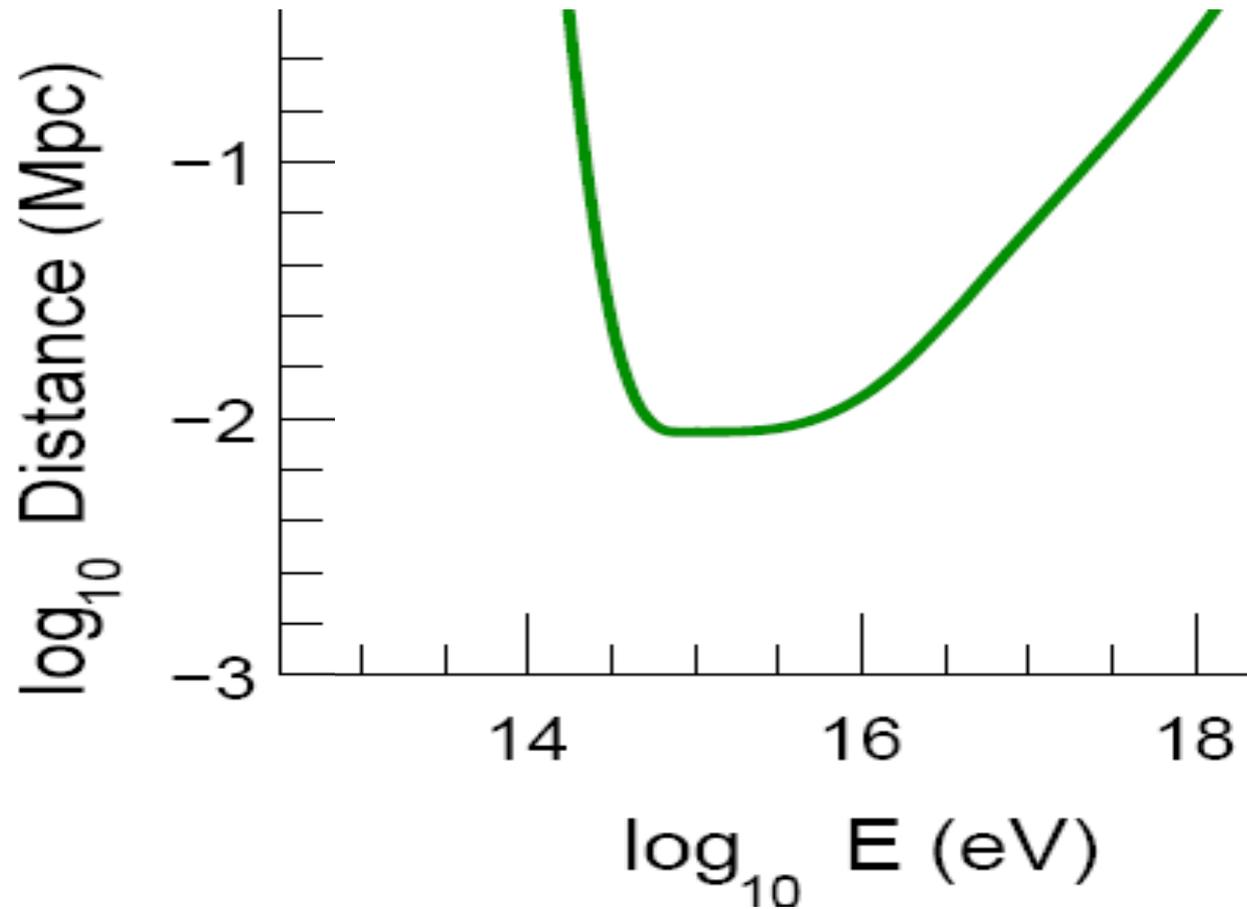


длина свободного пробега фотонов

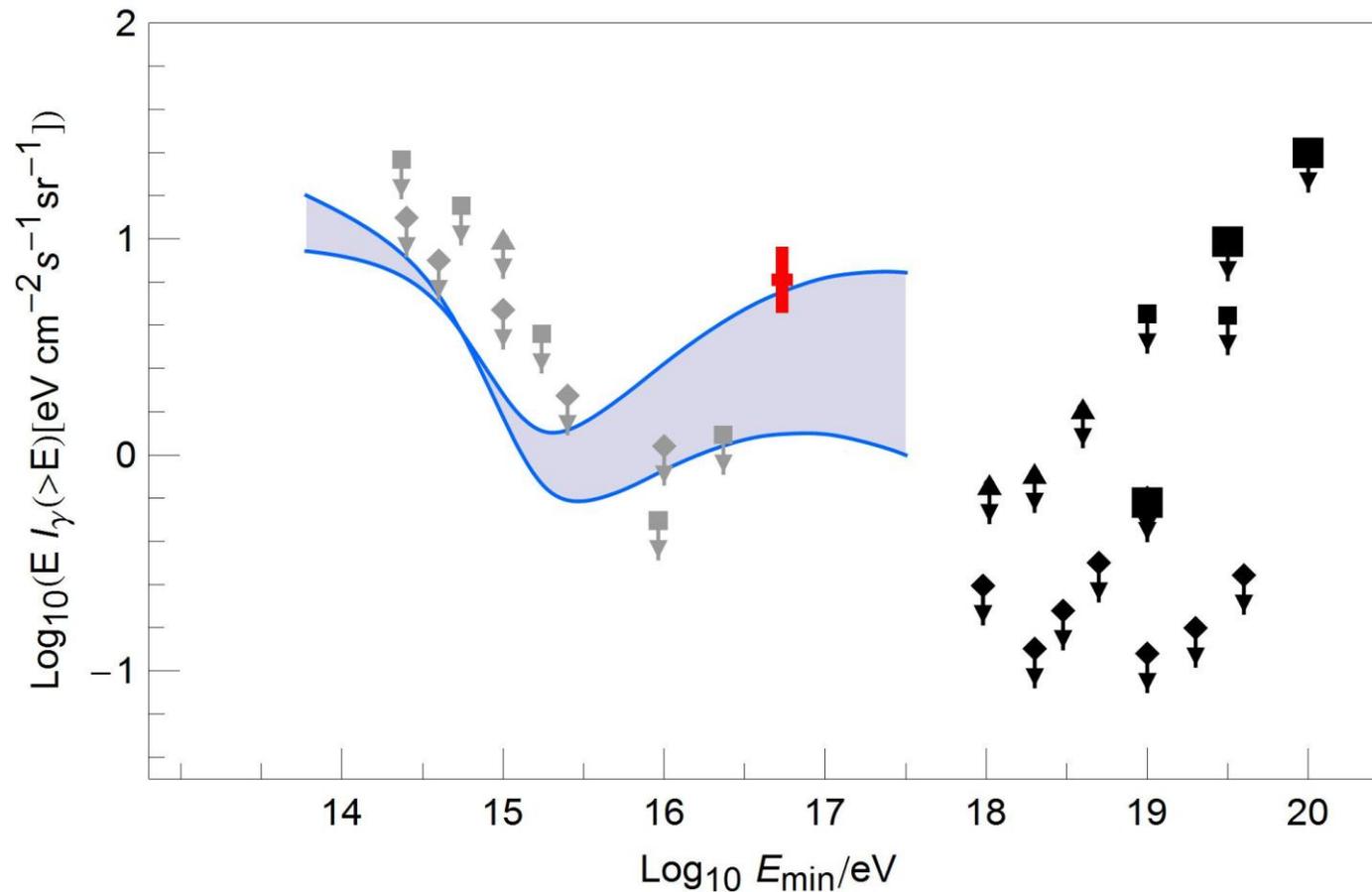
$$E_{\gamma} \sim 5 \times 10^{11} (\omega/eV)^{-1} \text{ eV}$$

# Распространение фотонов

длина свободного пробега фотонов

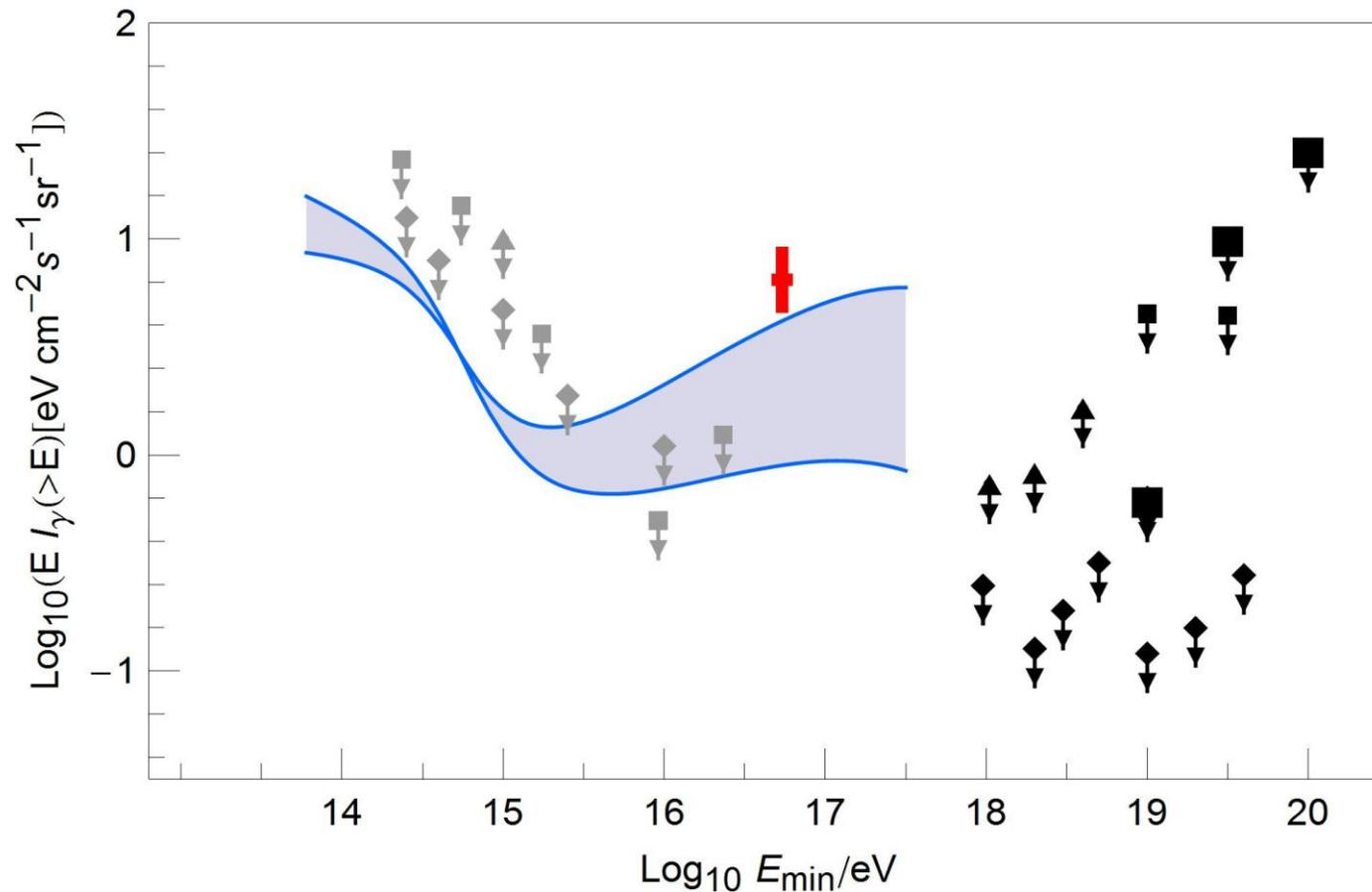


# Потоки с учетом поглощения: *распределение источников – как звезды*



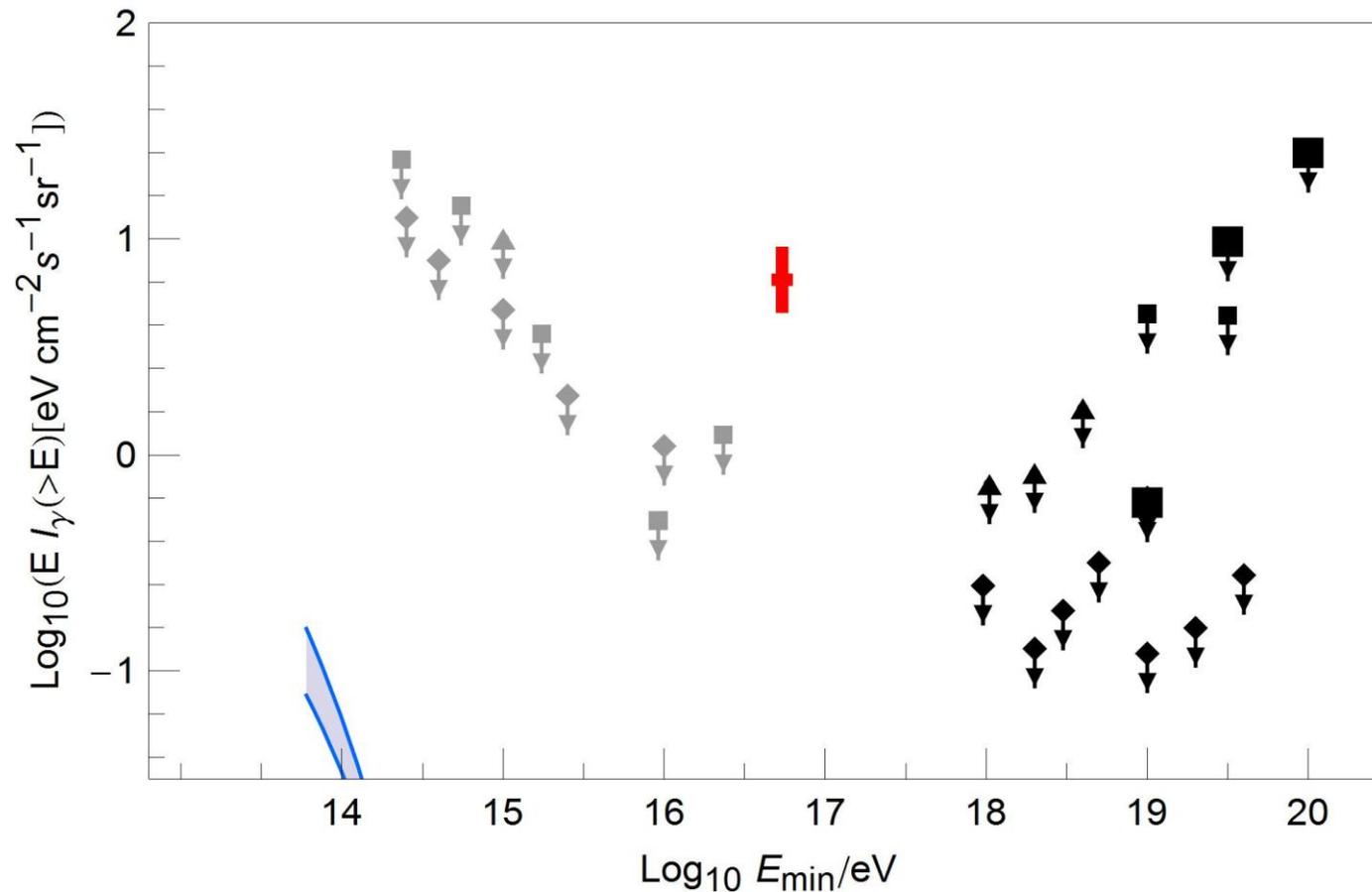
ST 2014 preliminary

# Потоки с учетом поглощения: *распределение источников – как горячий газ (100 кпк)*



ST 2014 preliminary

# Потоки с учетом поглощения: *распределение источников – внегалактическое*



ST 2014 preliminary

# ПЛАН

## 1. Экспериментальный результат

- Ice Cube 2013-2014
- комментарии

## 2. Обзор возможных интерпретаций

- галактическое происхождение
- внегалактическое происхождение
- «экзотическое» происхождение

## 3. Ограничения из потоков фотонов

- сопутствующие фотоны
- результат ШАЛ-МГУ
- поглощение

## 4. Выводы и перспективы

# Выводы

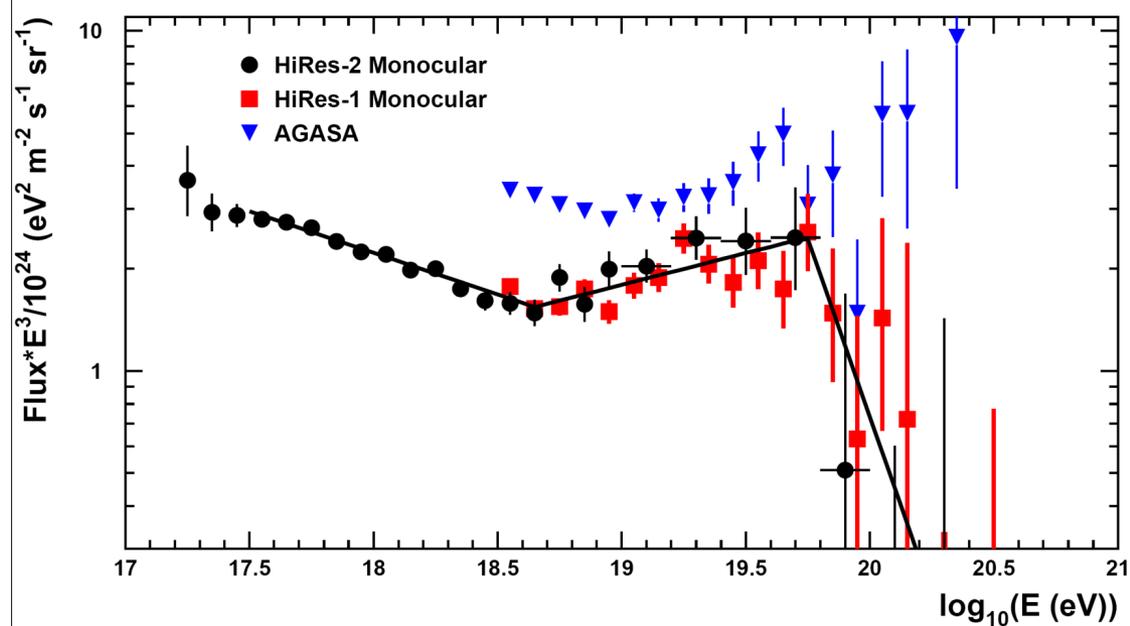
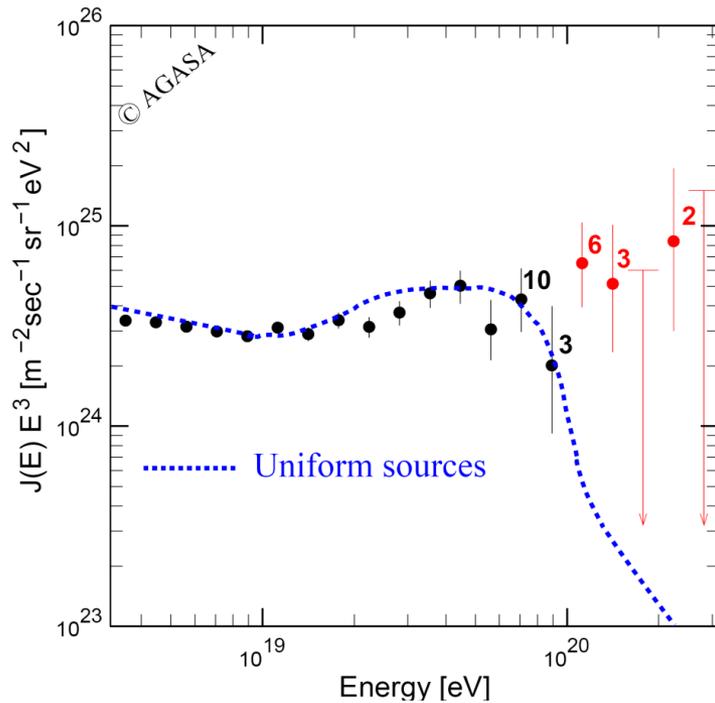
- вероятное наблюдение астрофизических нейтрино (60 ТэВ – 2000 ТэВ), «большой» поток
- карта совместна с изотропией, намек на избыток в районе центра (не плоскости!) Галактики
- похоже на 1:1:1 отношение ароматов
- диагностика:
  - анизотропия
  - фотоны

# Перспективы

- увеличение статистики IceCube
- Байкал, KM3NET

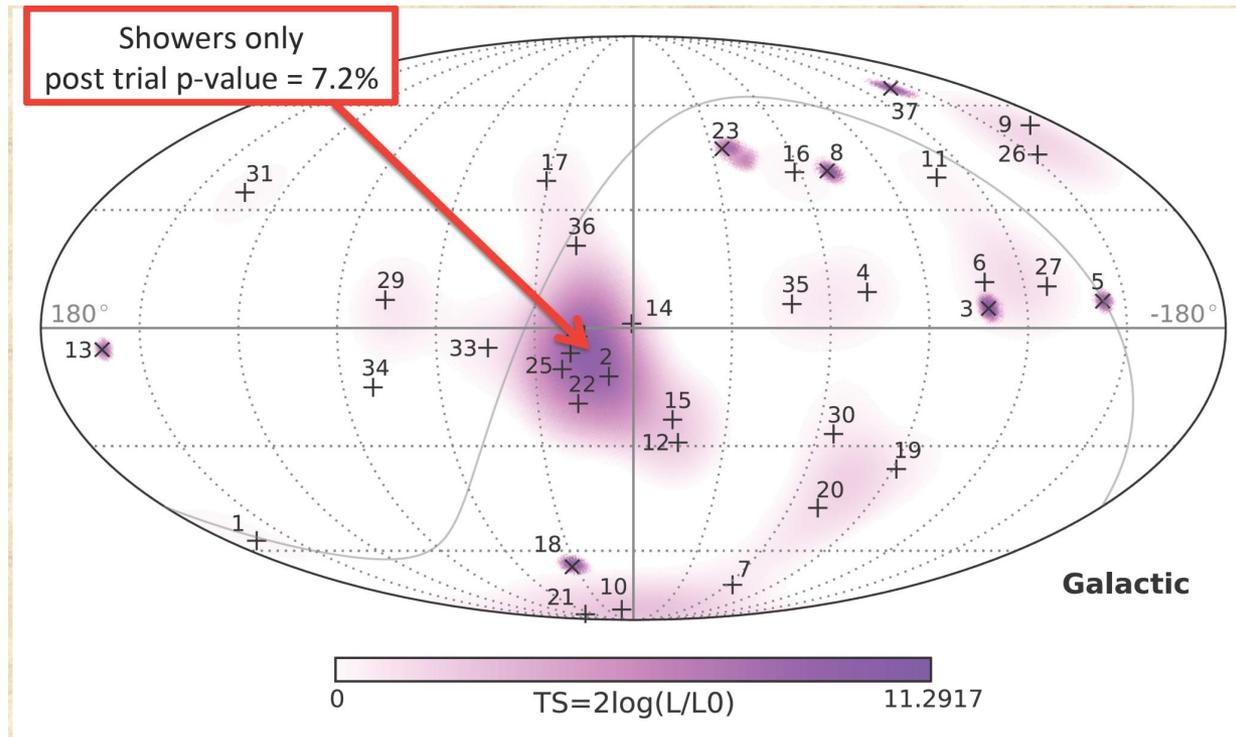
# Перспективы

- увеличение статистики IceCube
- Байкал, KM3NET



# Перспективы

- увеличение статистики IceCube
- Байкал, KM3NET



# Перспективы

- увеличение статистики IceCube
- Байкал, KM3NET
  - независимая проверка
  - угловое разрешение

# Перспективы

- увеличение статистики IceCube
- Байкал, KM3NET
  - независимая проверка
  - угловое разрешение
- фотоны
  - HAWK, LHASSO, Тунка-HiSCORE
  - ШАЛ-МГУ, Якутск