

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. 10th 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

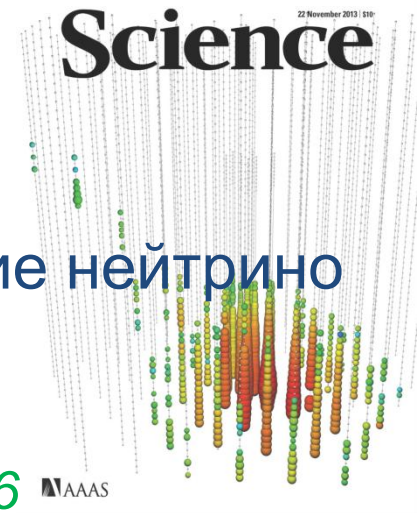
- сопутствующие фотоны
- результат ШАЛ-МГУ
- поглощение

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- σ » указание на астрофизические нейтрино
(622 дня)
28 событий с $E > 60$ ТэВ при фоне 10.6
Science 342 (2013) 1242856
- 2014 – «5.7- σ » 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- σ » указание на астрофизические нейтрино
(622 дня)
28 событий с $E > 60$ ТэВ при фоне 10.6
Science 342 (2013) 1242856 AAAS

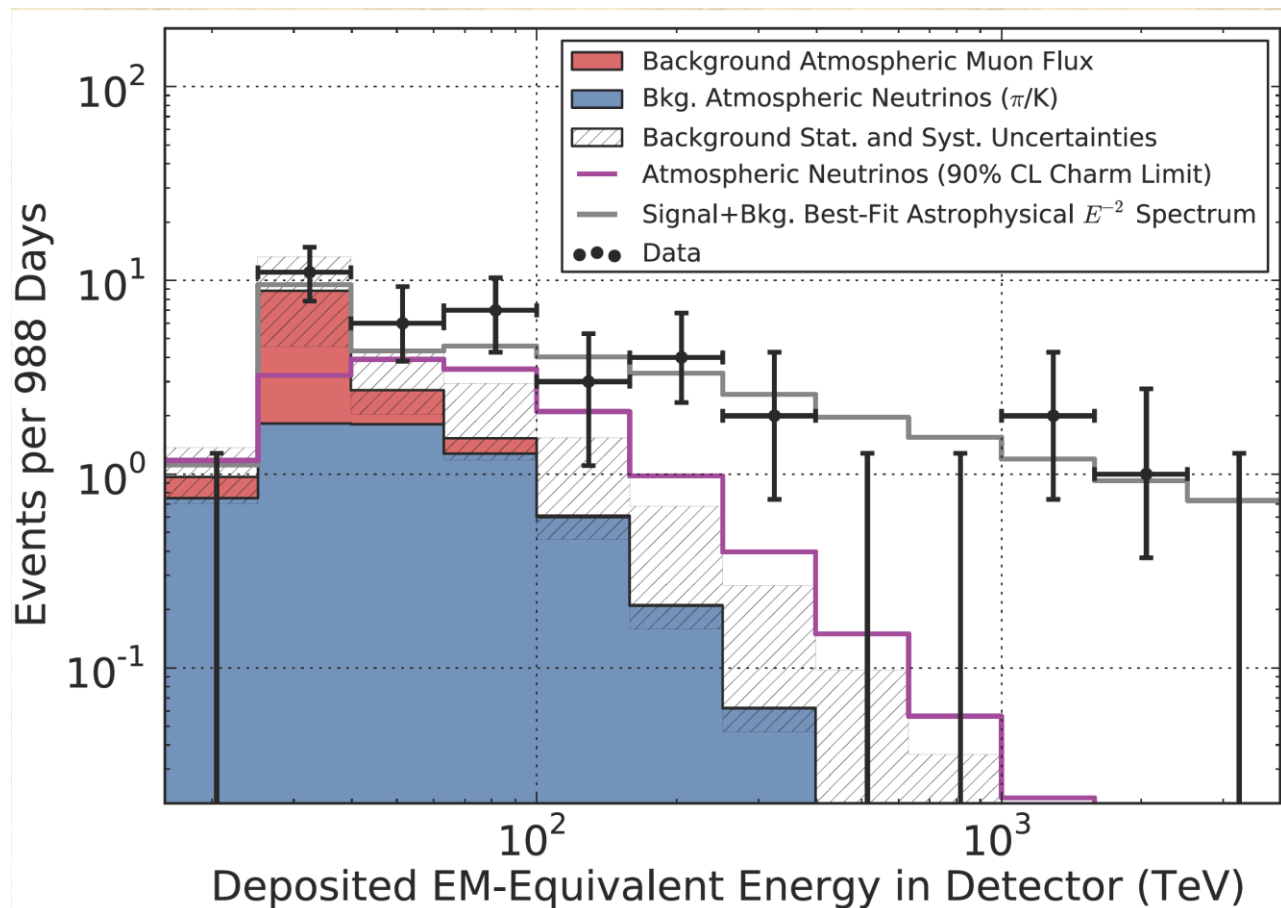


- 2014 – «5.7- σ » указание на астрофизические нейтрино
(988 дней)
37 событий с $E > 60$ ТэВ при фоне 15.0
3 события с $E > 1$ ПэВ

Talk at Neutrinos Beyond IceCube, 24 April 2014

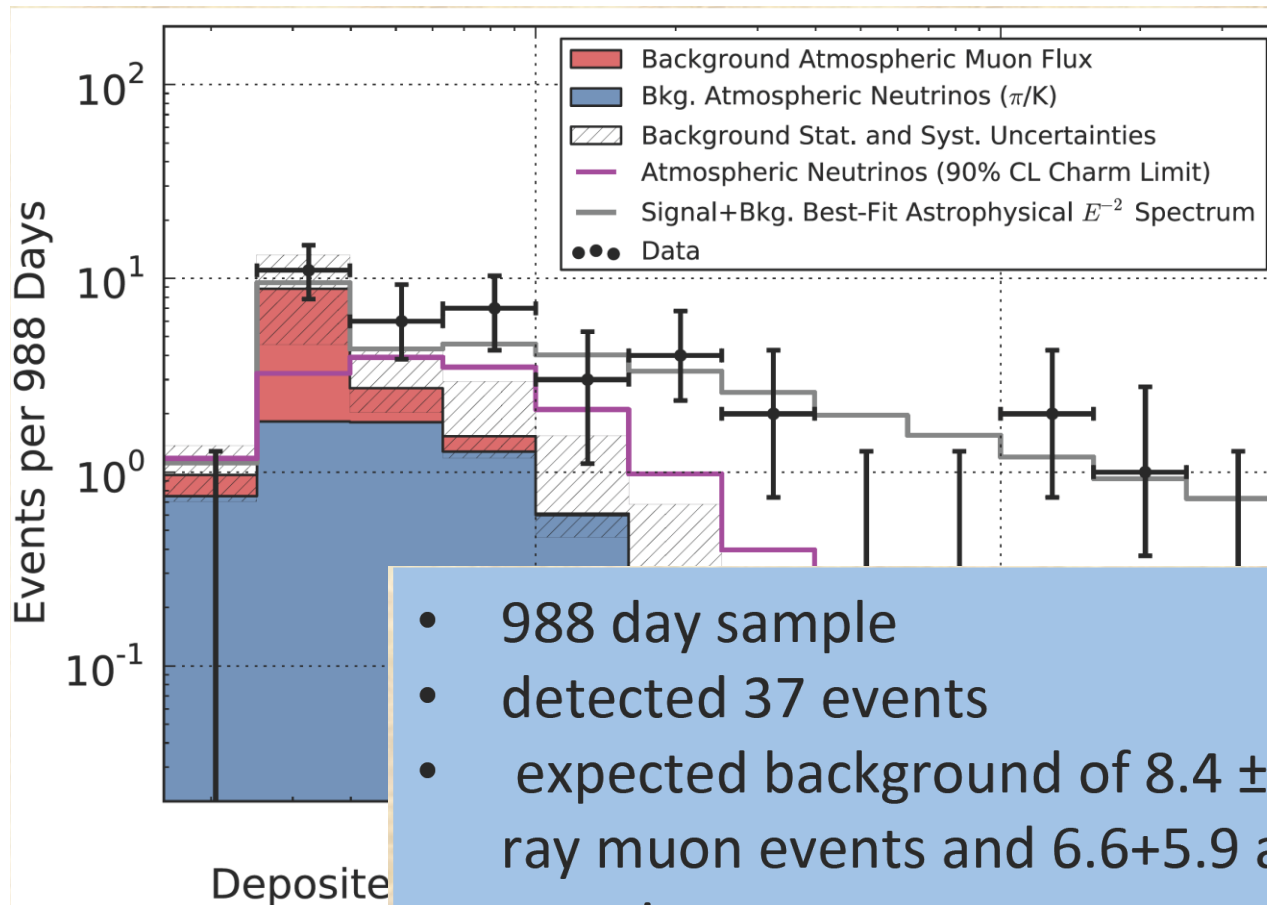
Результат IceCube

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 ± 4.2 cosmic ray muon events and $6.6+5.9$ atmospheric neutrinos.

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

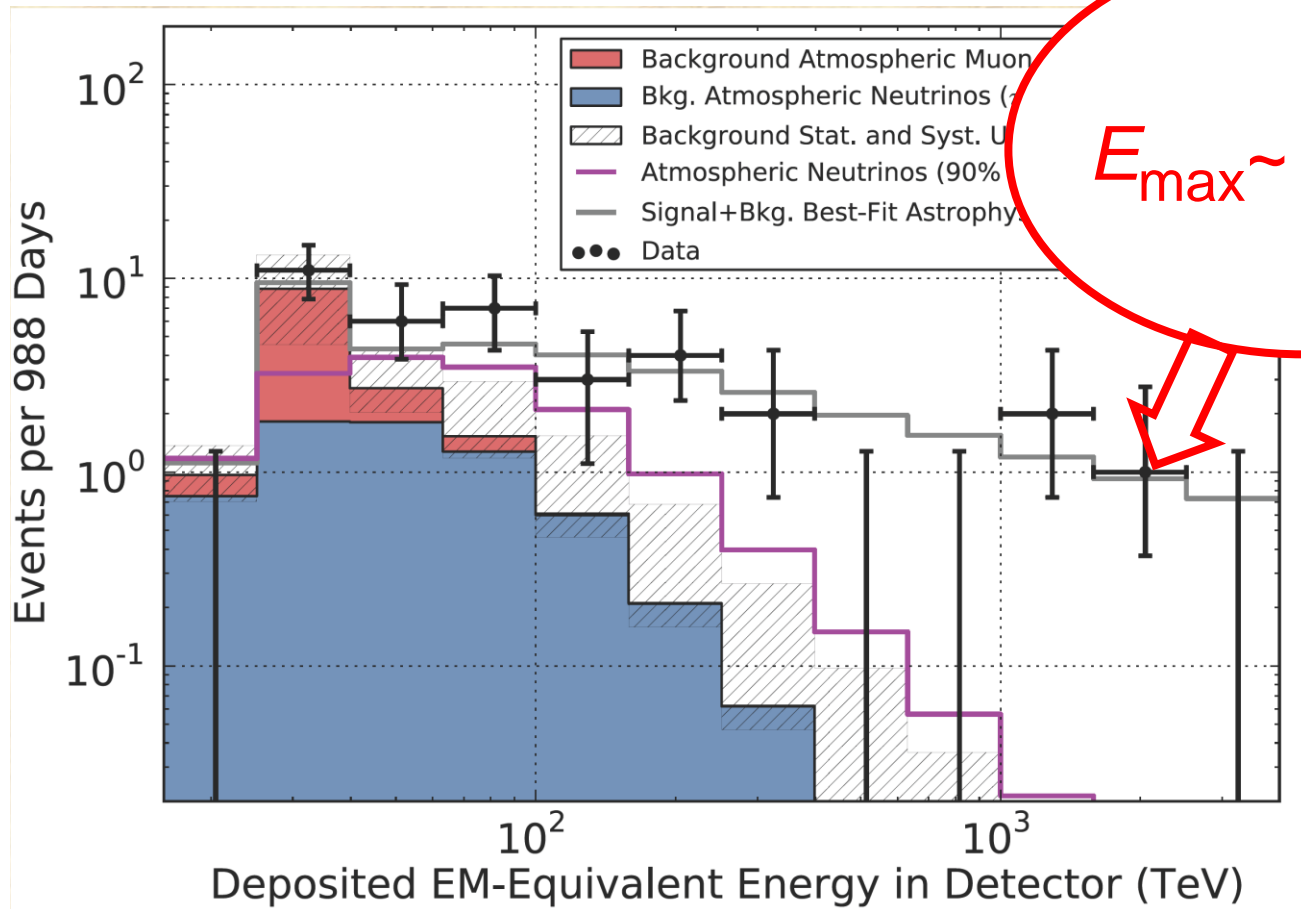
- галактическое происхождение
- внегалактическое происхождение
- «экзотическое» происхождение

3. Ограничения из потоков фотонов

- сопутствующие фотоны
- результат ШАЛ-МГУ
- поглощение

4. Выводы и перспективы

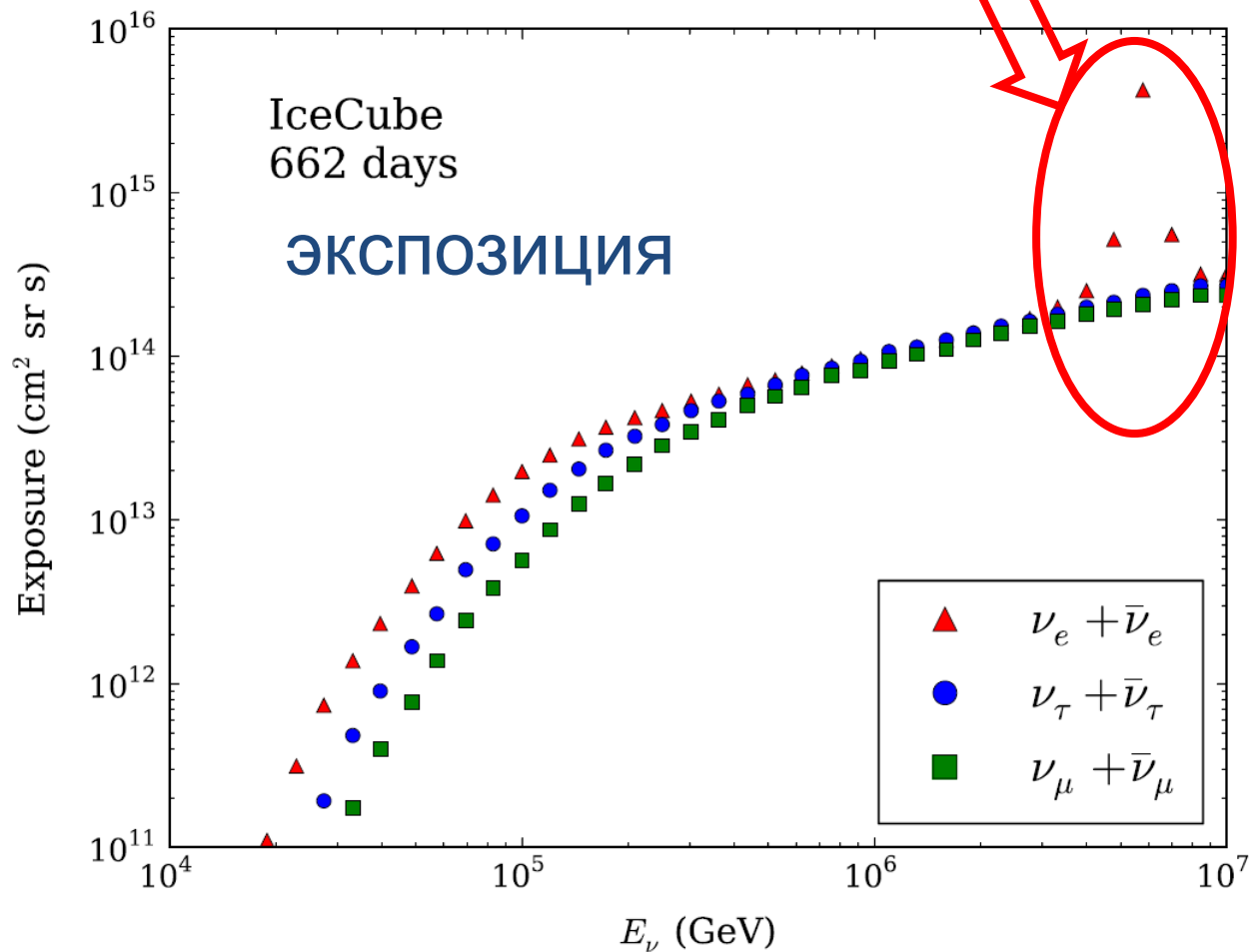
Комментарии



Комментарии

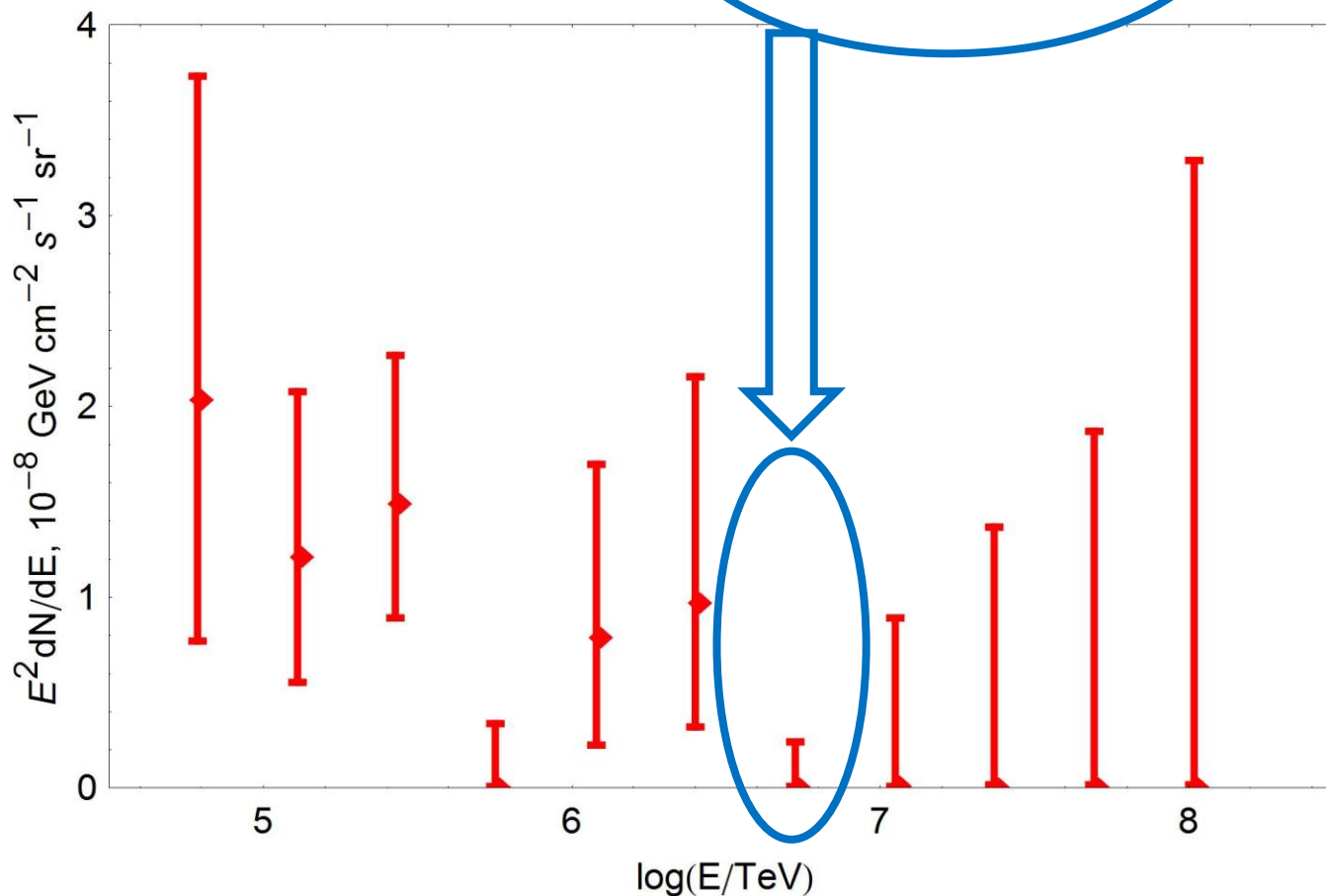
резонанс Глэшоу

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



Комментарии

спектр



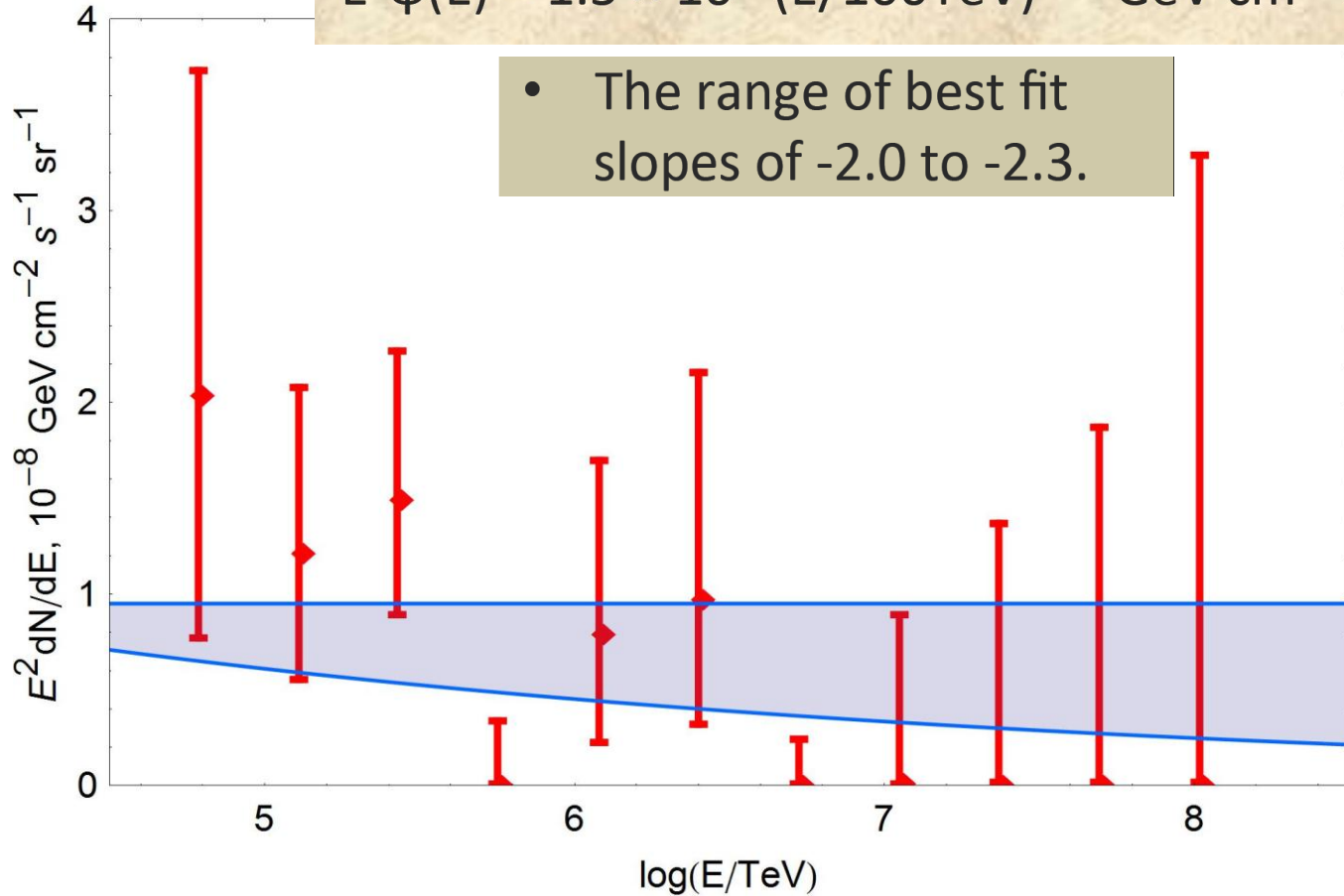
возможное обрезание спектра около 2 ПэВ

Комментарии

спектр

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

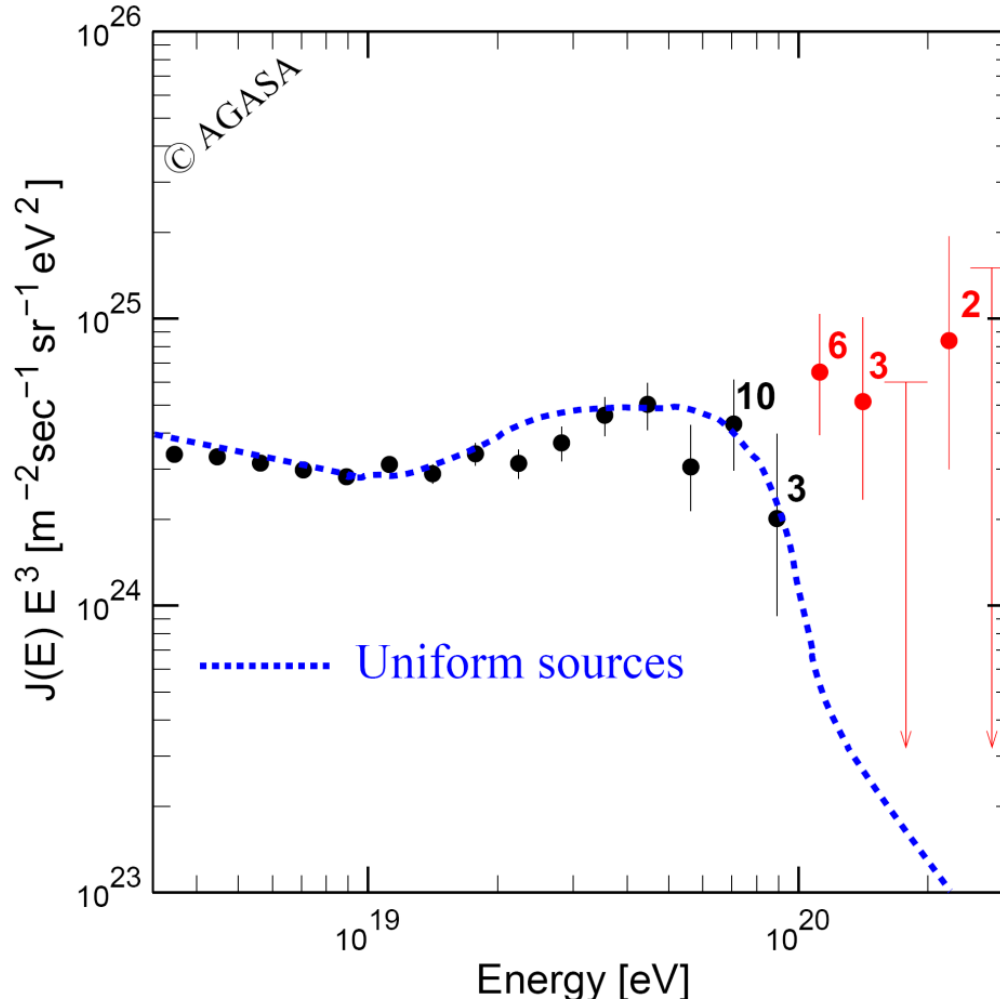
$$E^2\phi(E) = 1.5 \times 10^{-8} (E/100\text{TeV})^{-0.3} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$



возможное продолжение спектра за 2 ПэВ

Комментарии

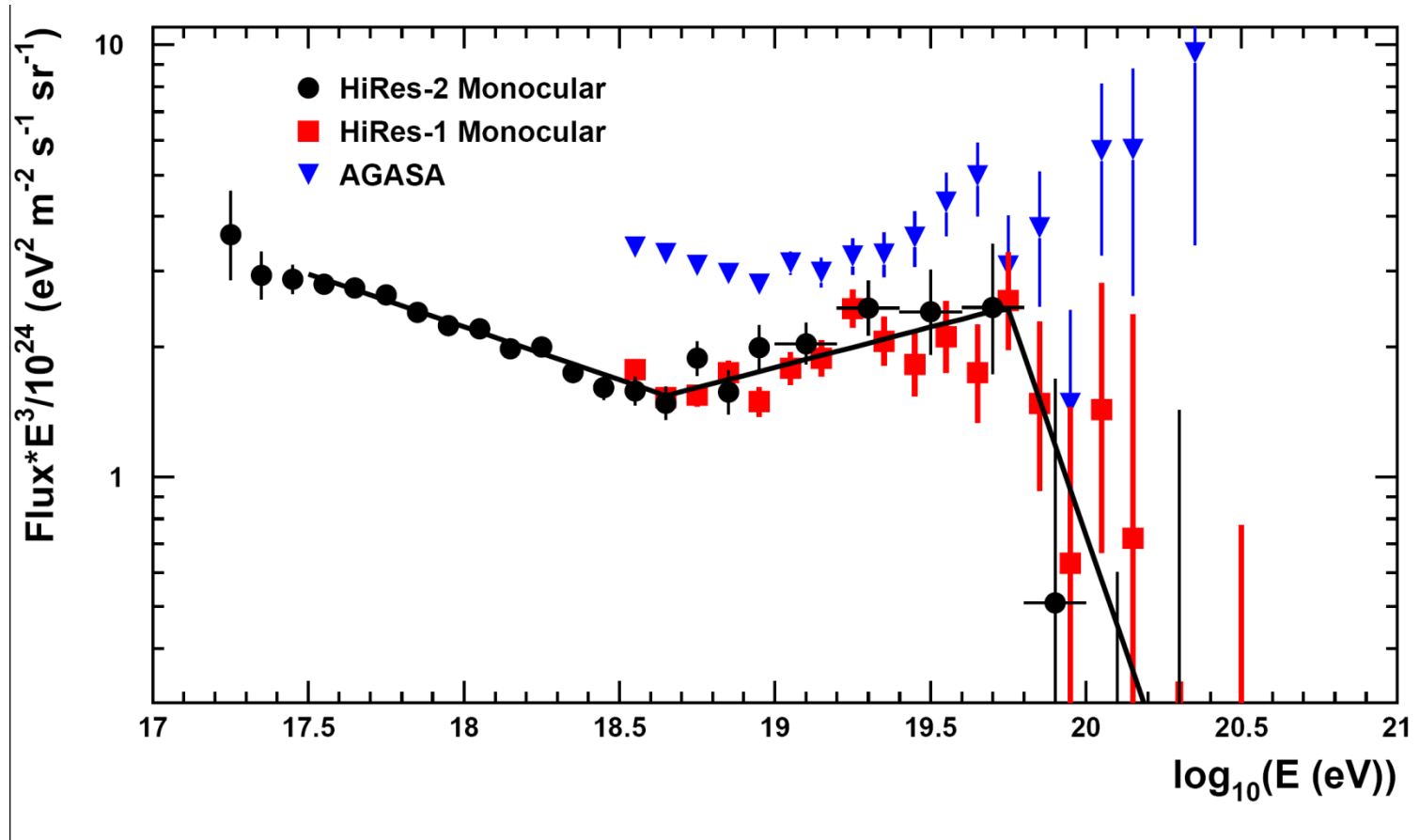
спектр



единичные события на хвосте падающего спектра...

Комментарии

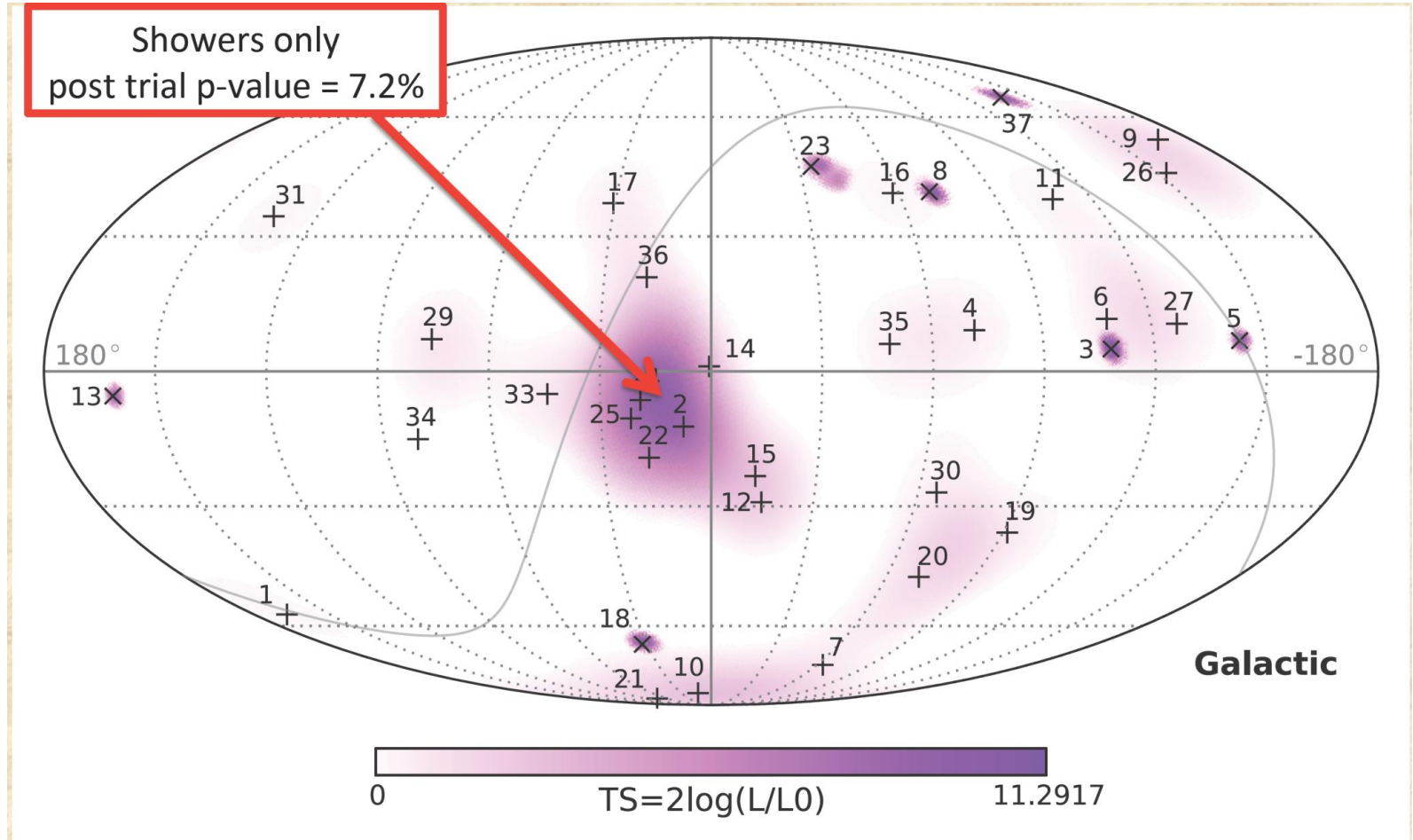
спектр



единичные события на хвосте падающего спектра...

Комментарии

анизотропия



угловое разрешение...

ПЛАН

1. Экспериментальный результат

- Ice Cube 2013-2014
- комментарии

2. Обзор возможных интерпретаций

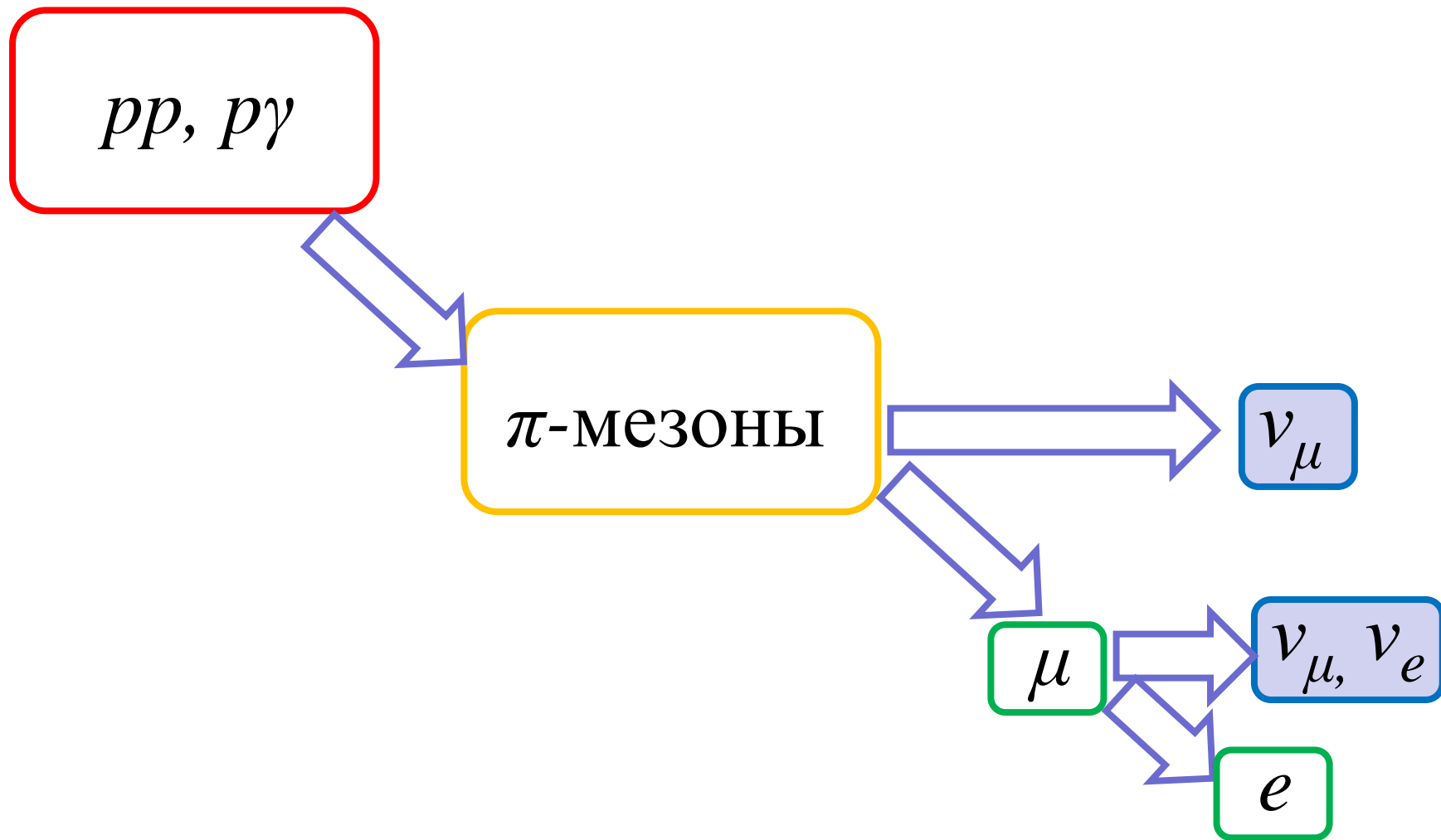
- галактическое происхождение
- внегалактическое происхождение
- «экзотическое» происхождение

3. Ограничения из потоков фотонов

- сопутствующие фотоны
- результат ШАЛ-МГУ
- поглощение

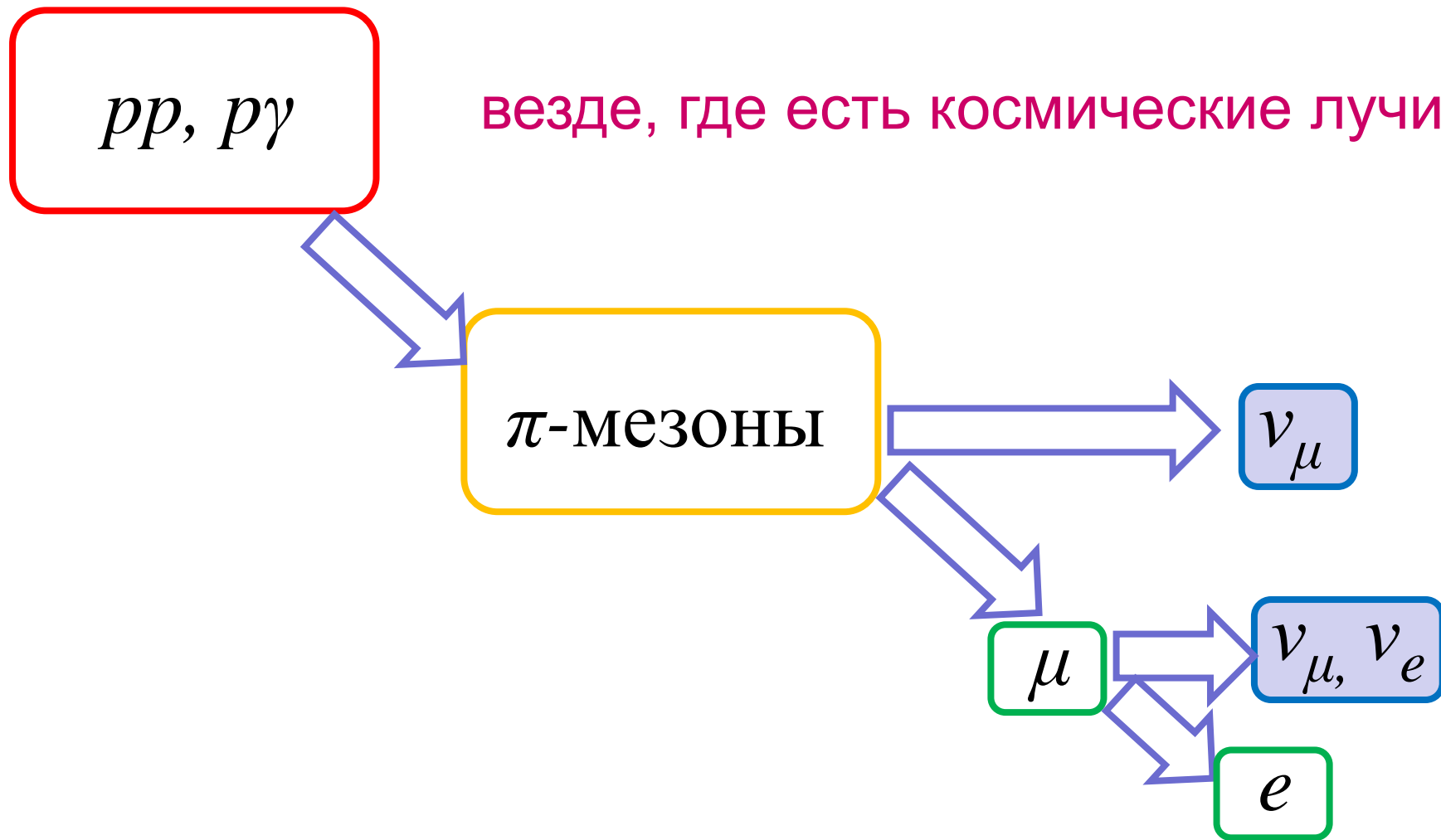
4. Выводы и перспективы

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

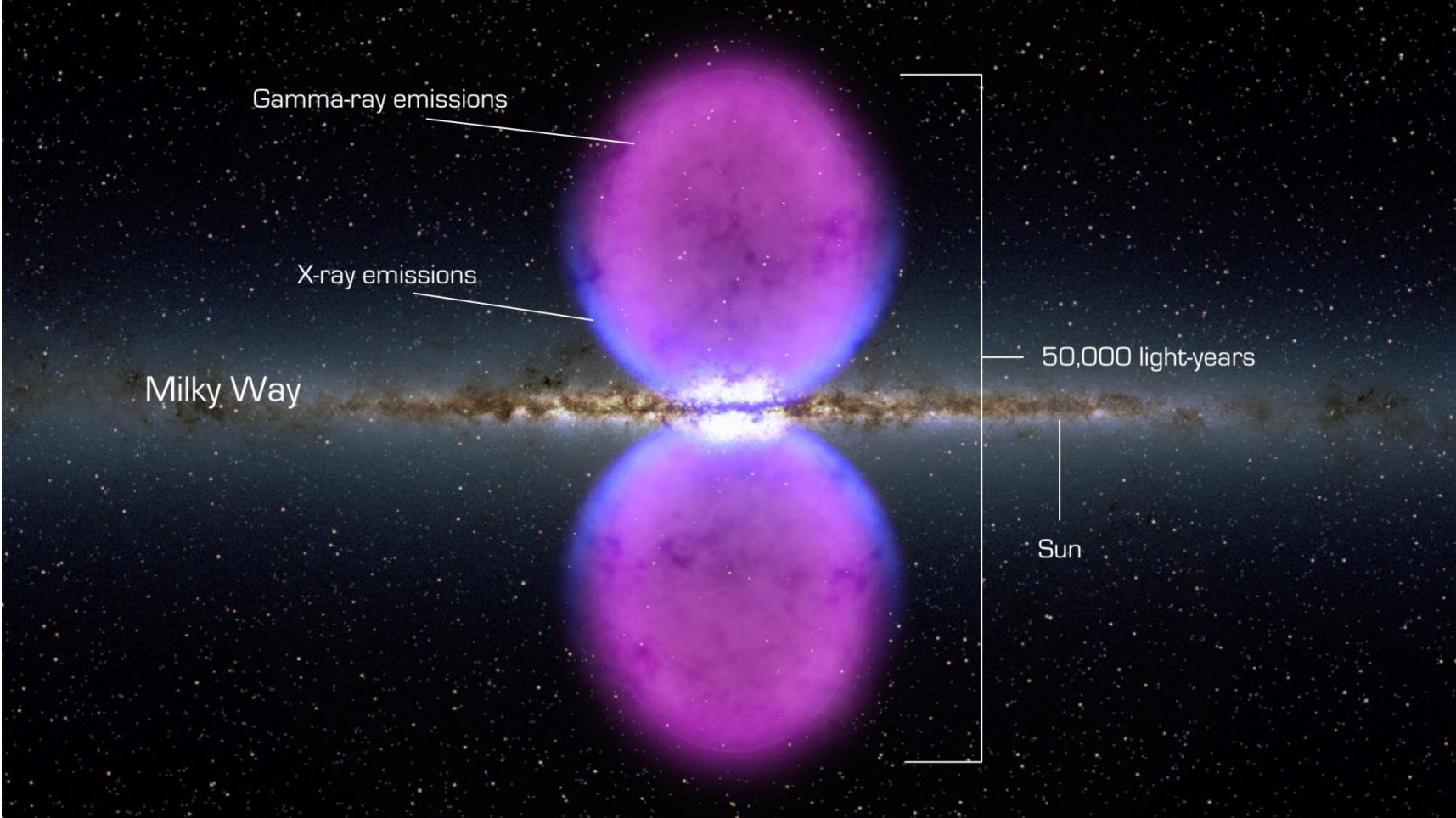
- источники галактических космических лучей
(остатки сверхновых?)



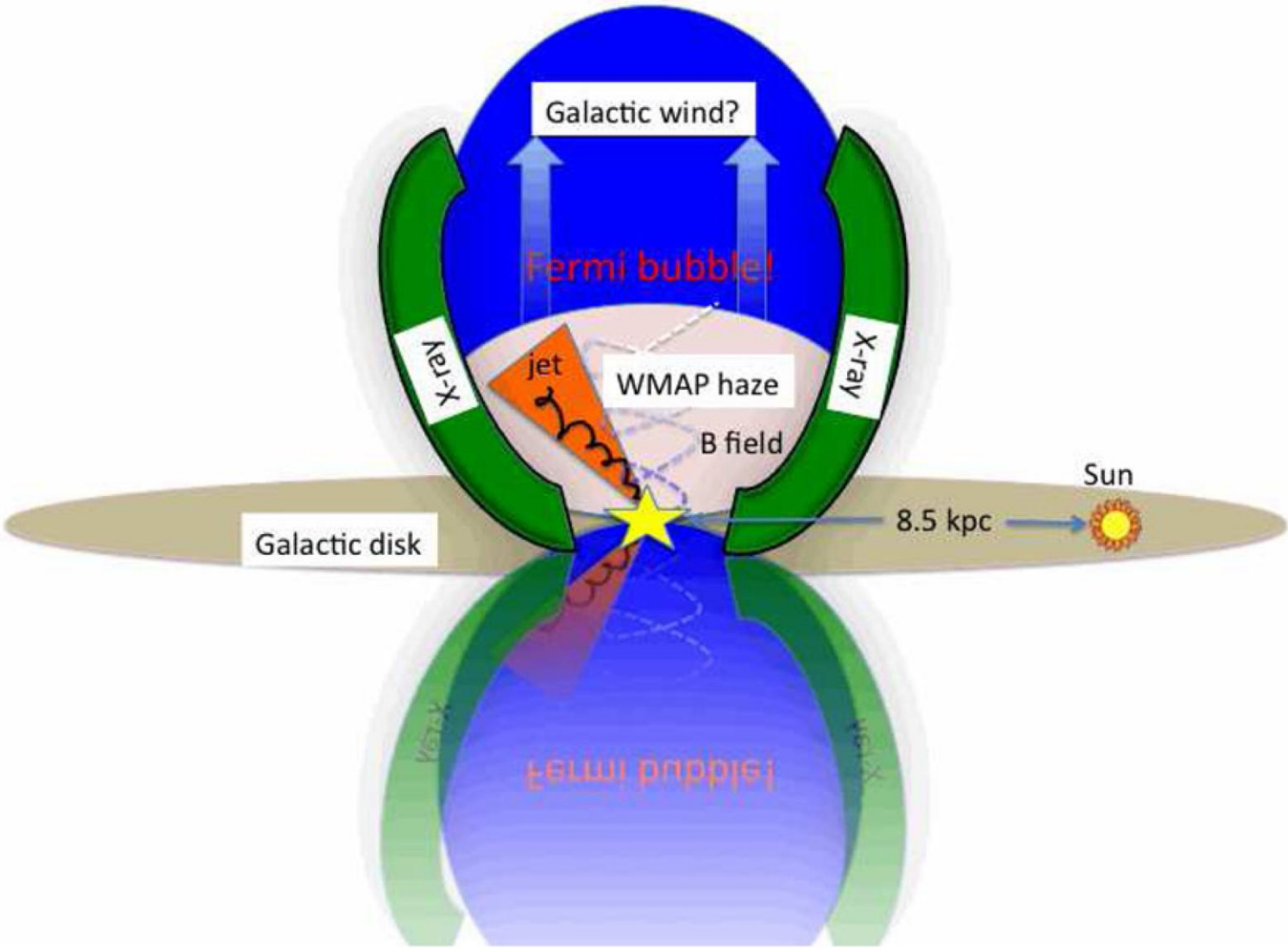
Галактические источники

- 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

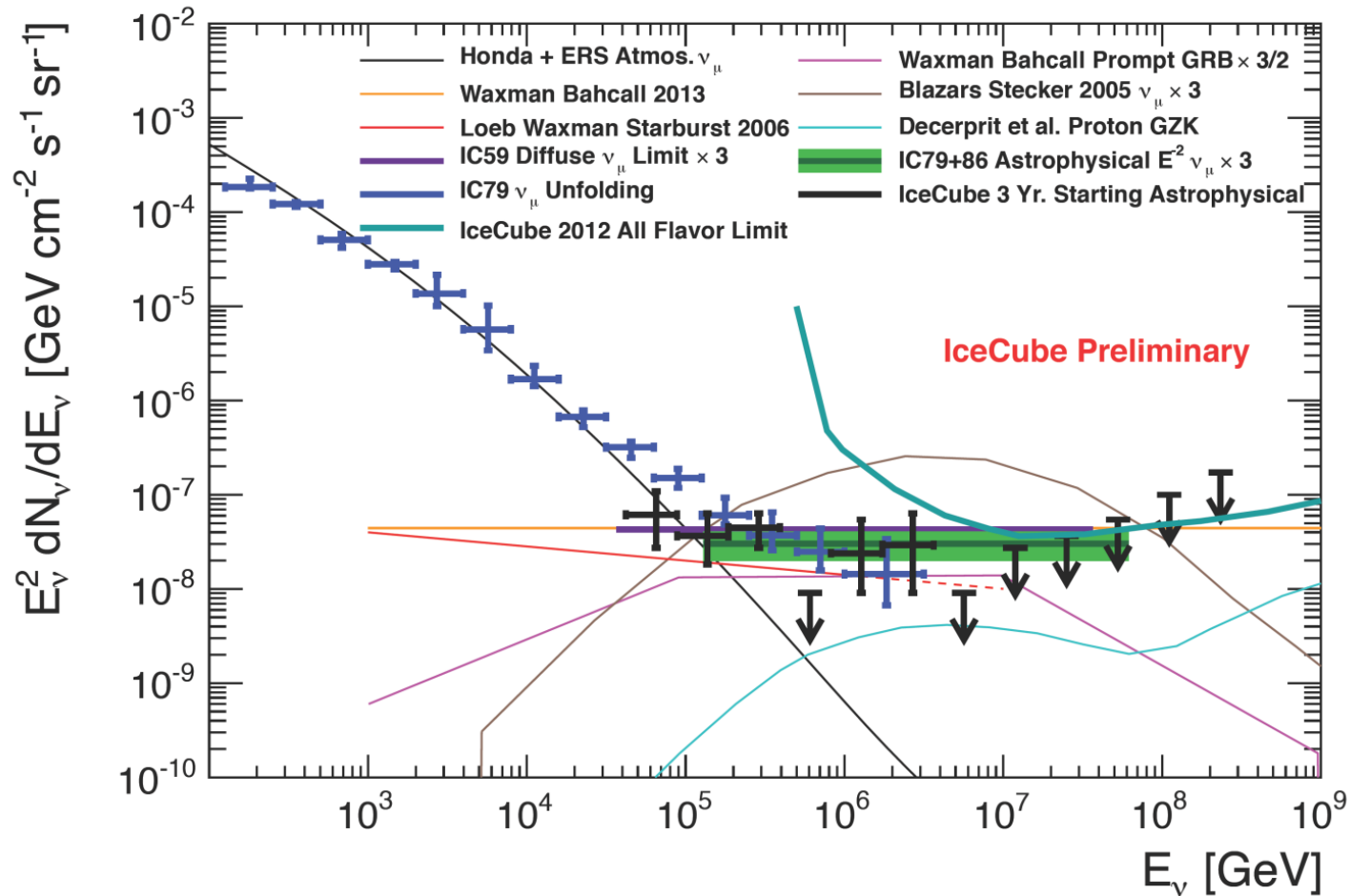
- сопутствующие фотоны
- результат ШАЛ-МГУ
- поглощение

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

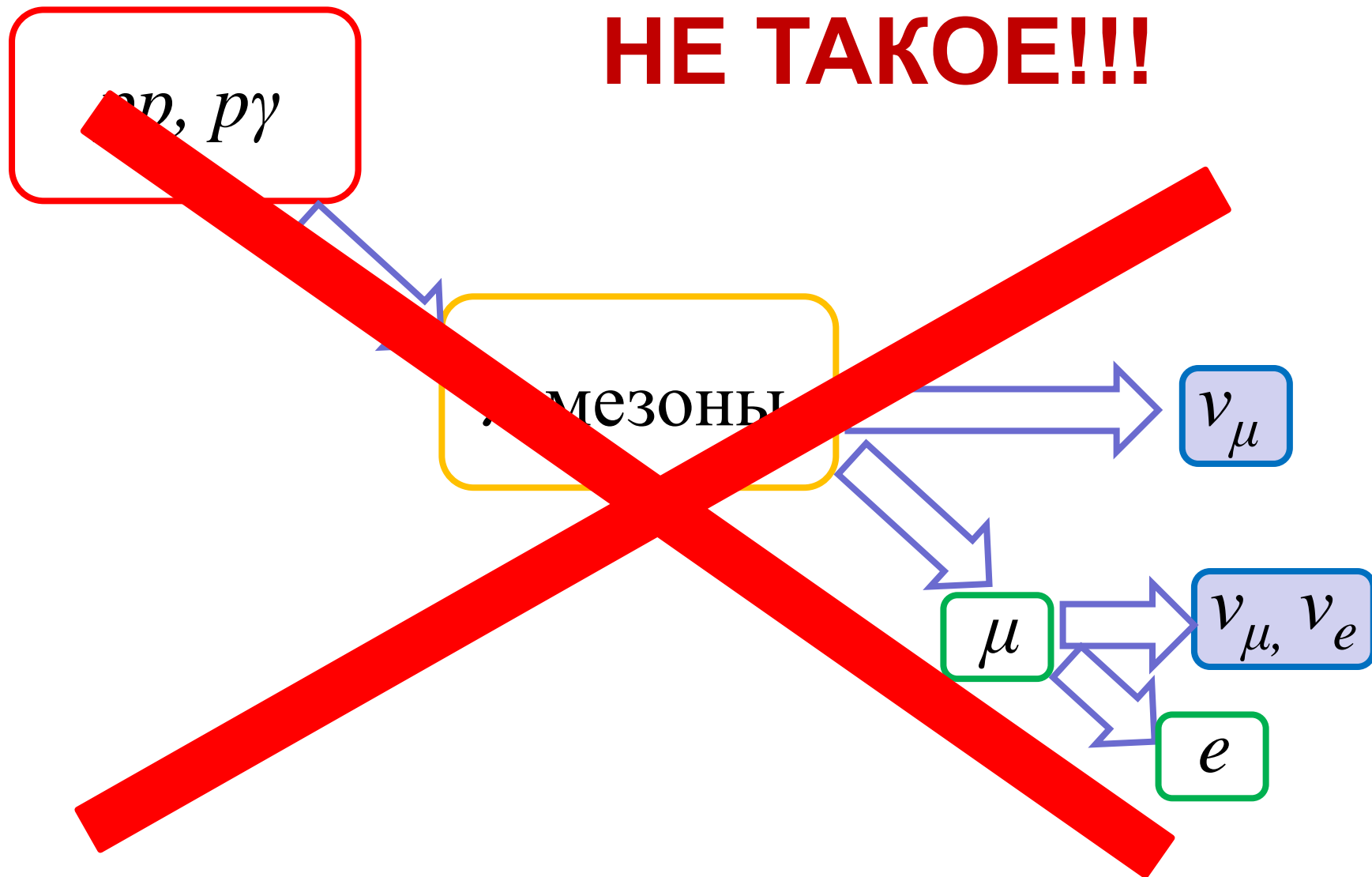
3. Ограничения из потоков фотонов

- сопутствующие фотоны
- результат ШАЛ-МГУ
- поглощение

4. Выводы и перспективы

Экзотическое происхождение:

НЕ ТАКОЕ!!!



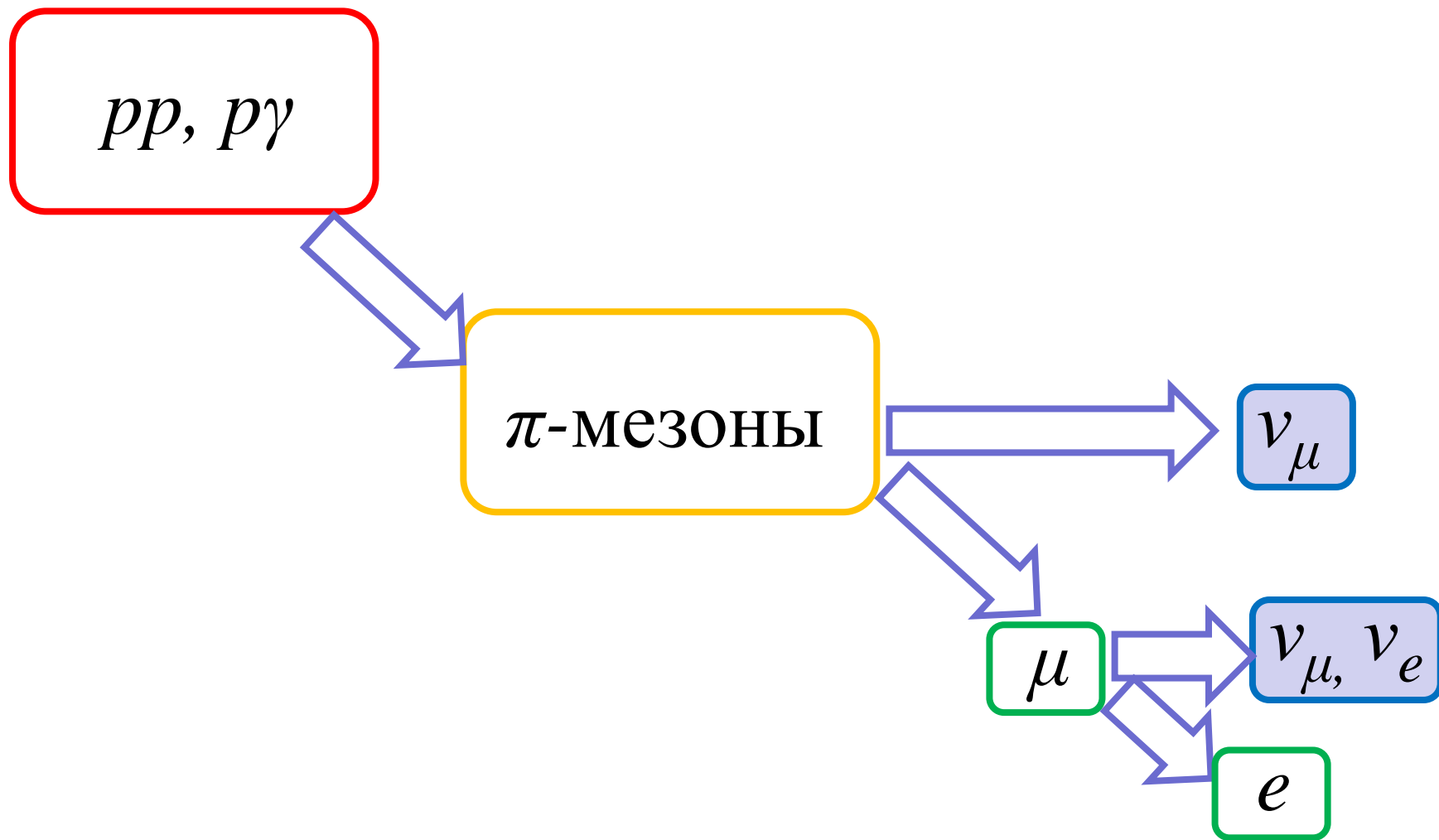
Экзотическое происхождение:

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

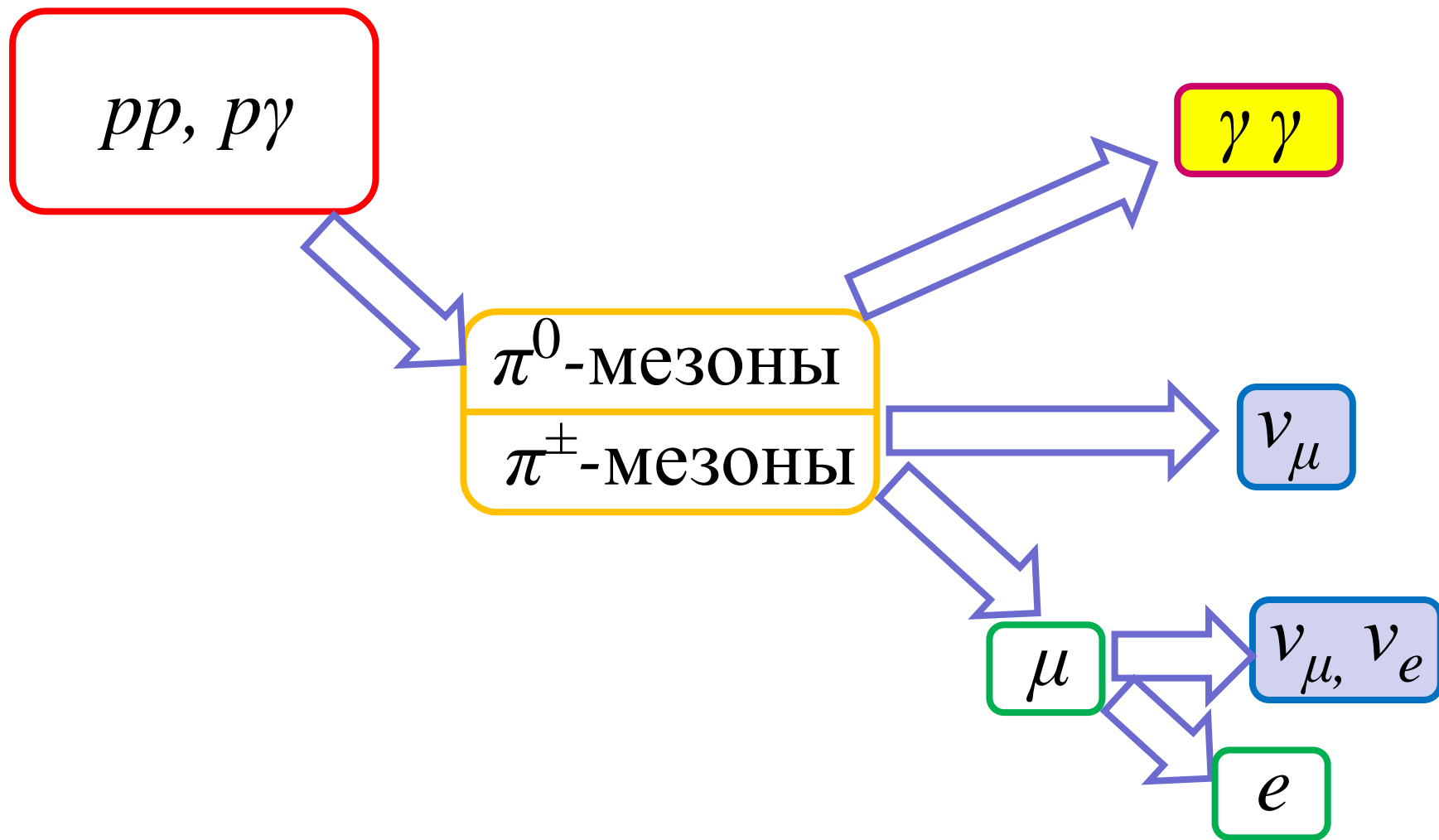
ПЛАН

- 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

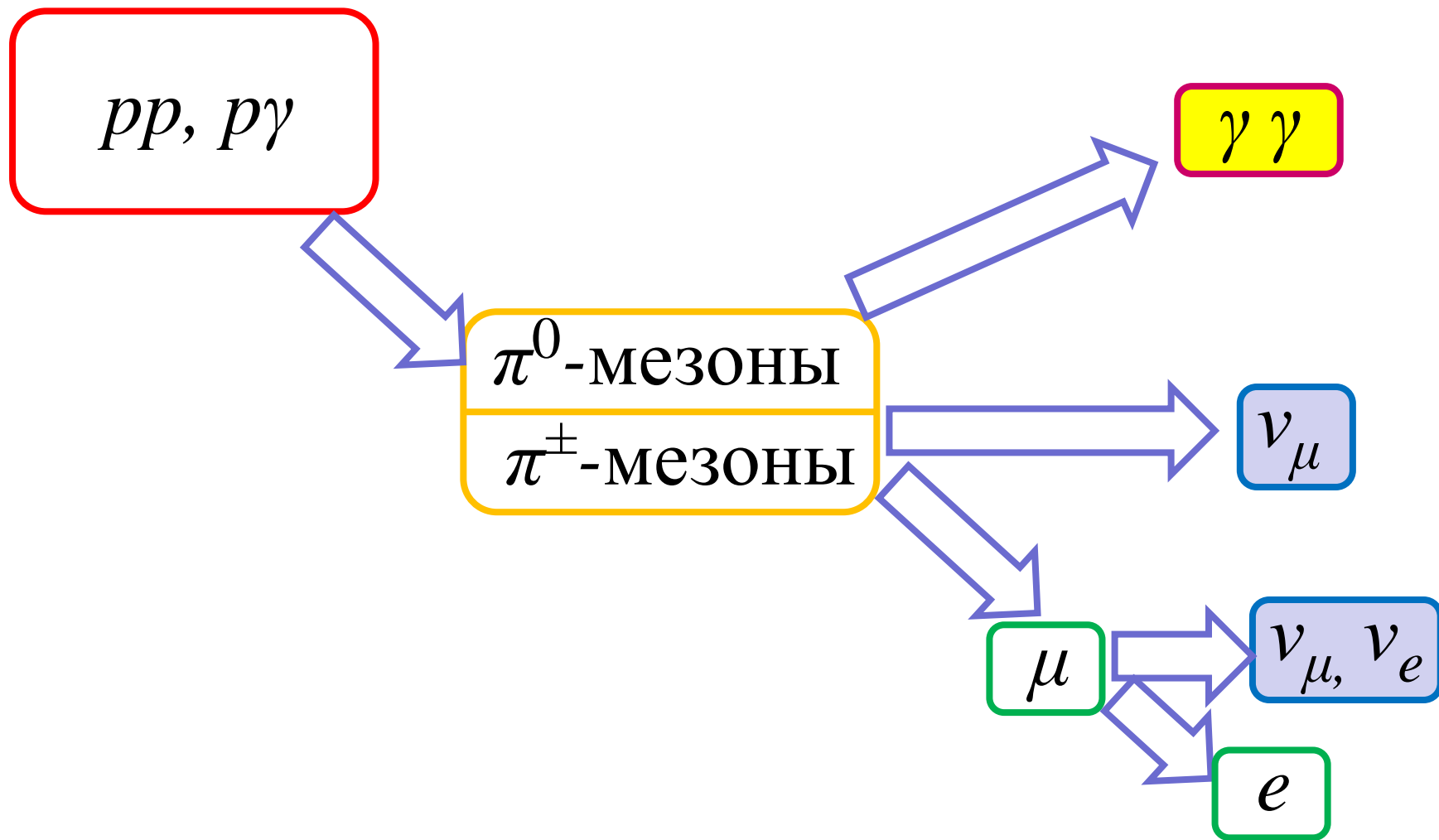
M. A. MARKOV and I. M. ZHELEZNYKH

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

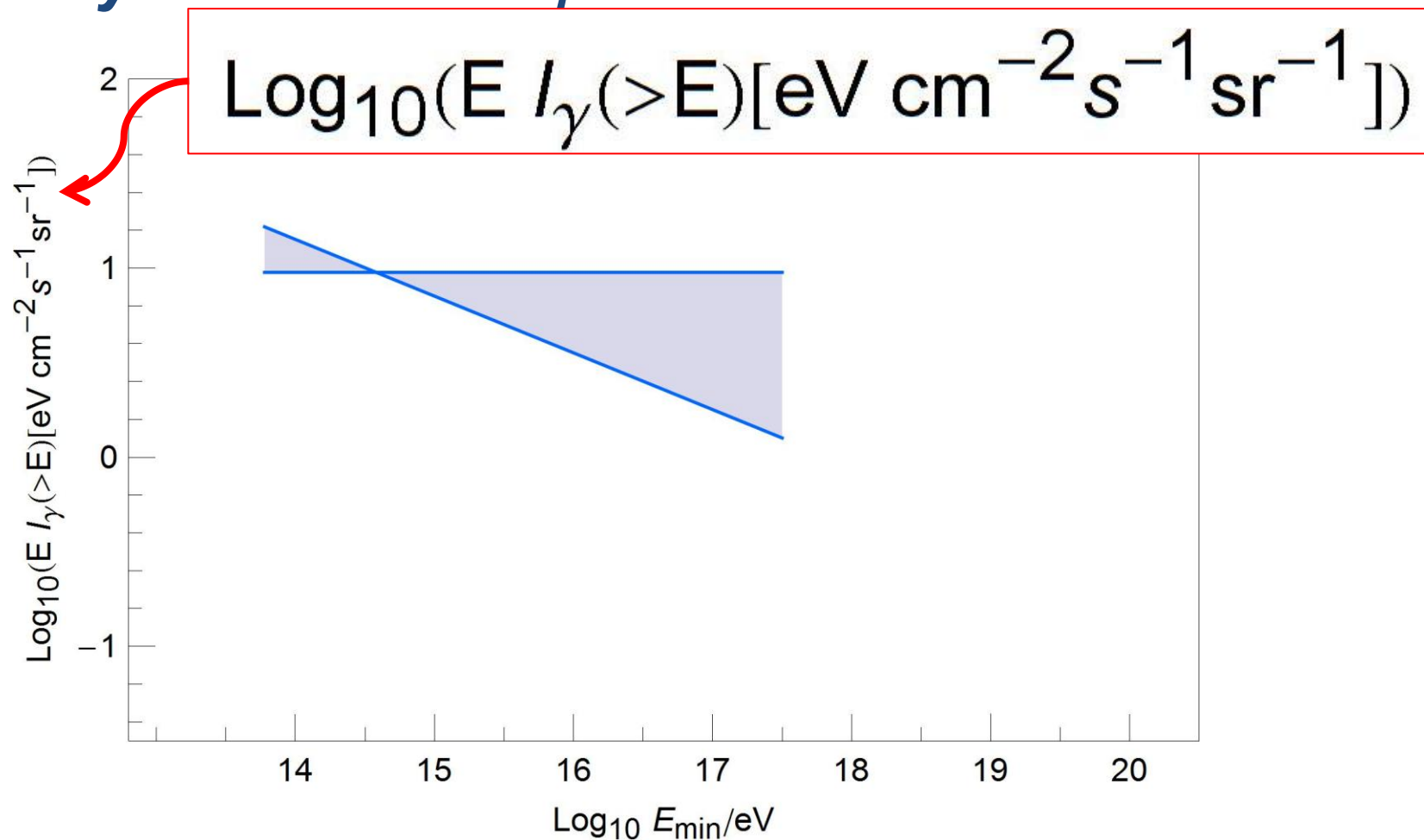
Received 3 January 1961

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



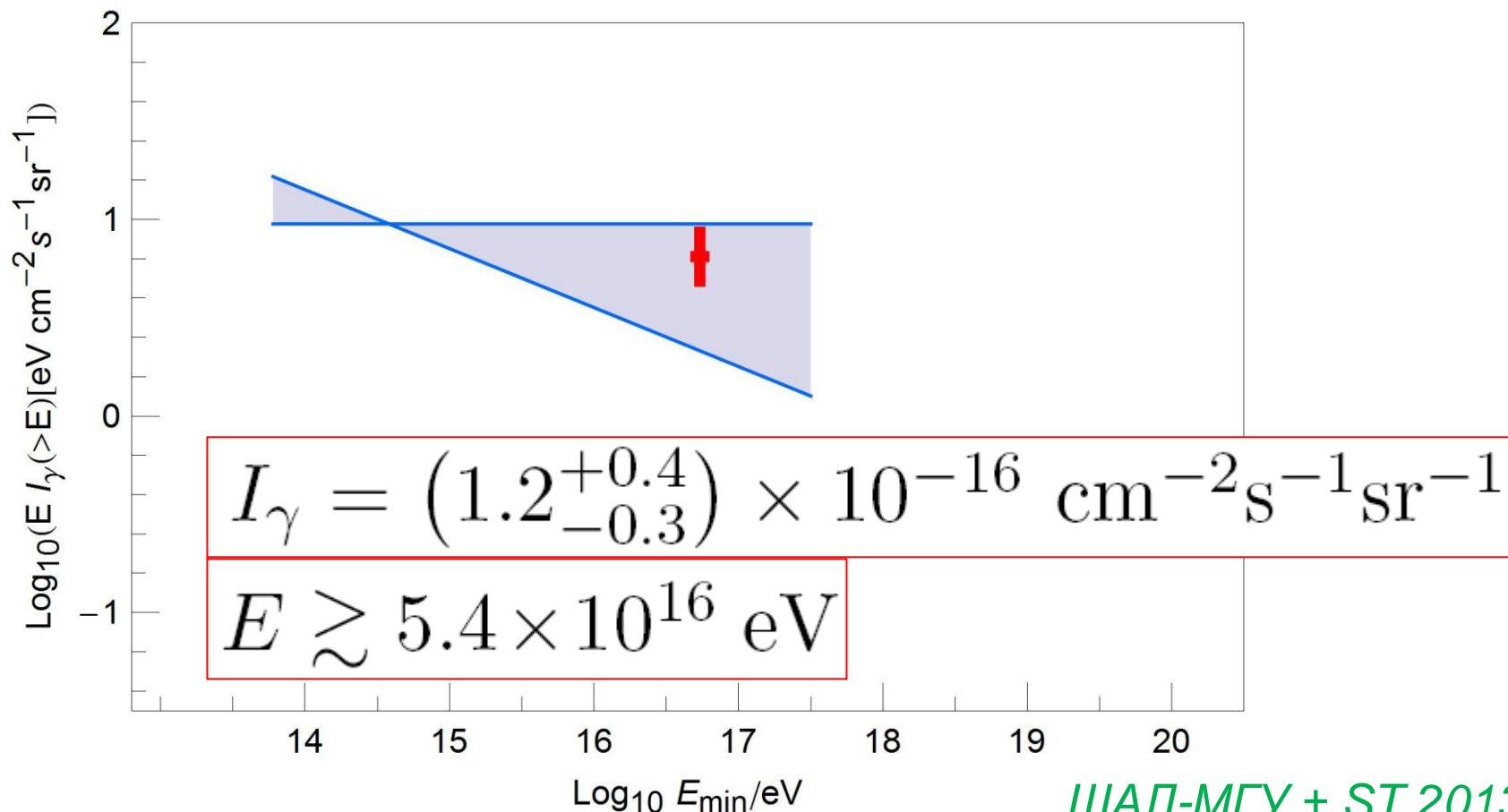
Распространение фотонов интегральный поток фотонов без учета поглощения



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**

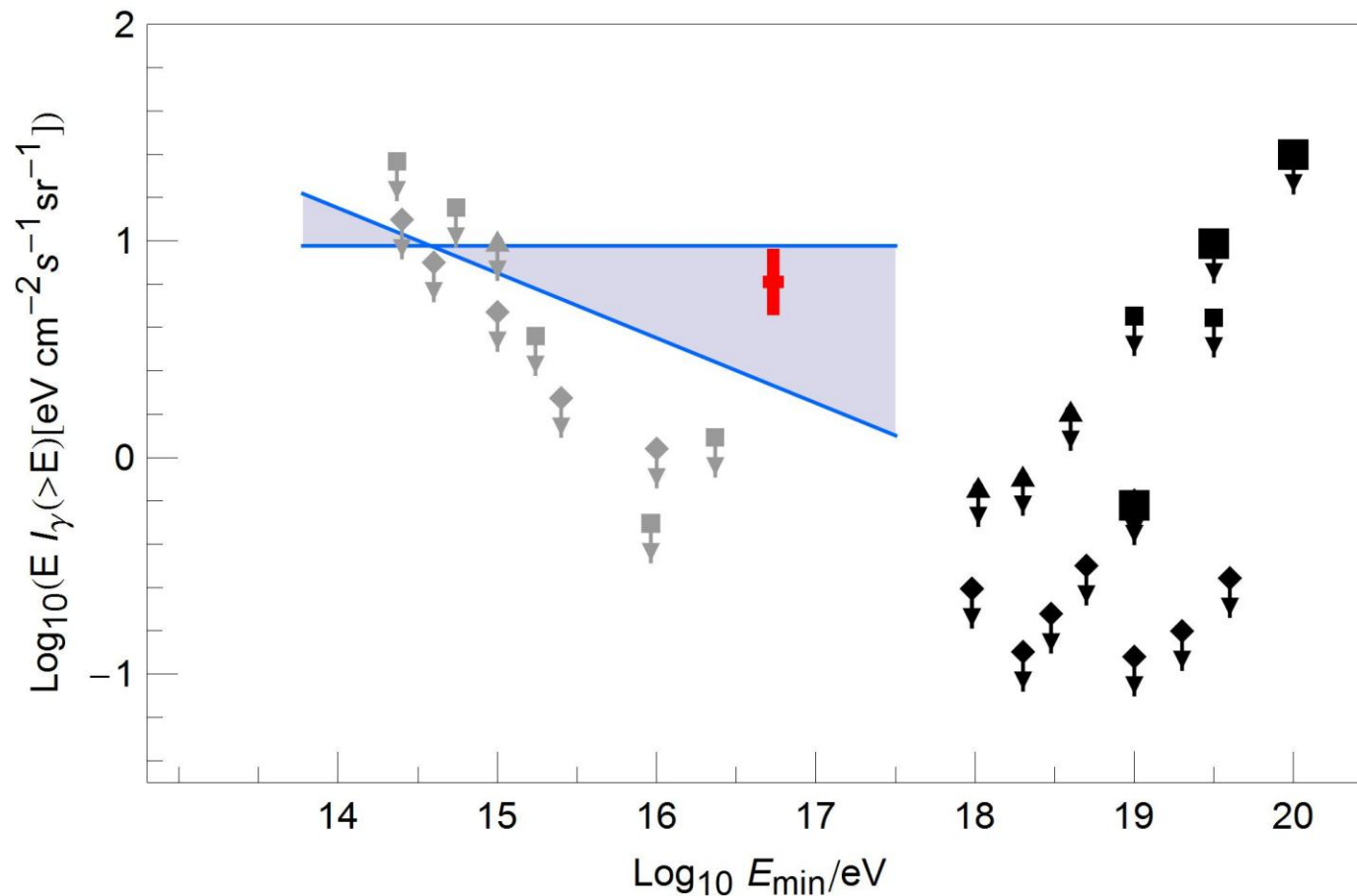
Распространение фотонов интегральный поток фотонов – измерение ШАЛ-МГУ



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

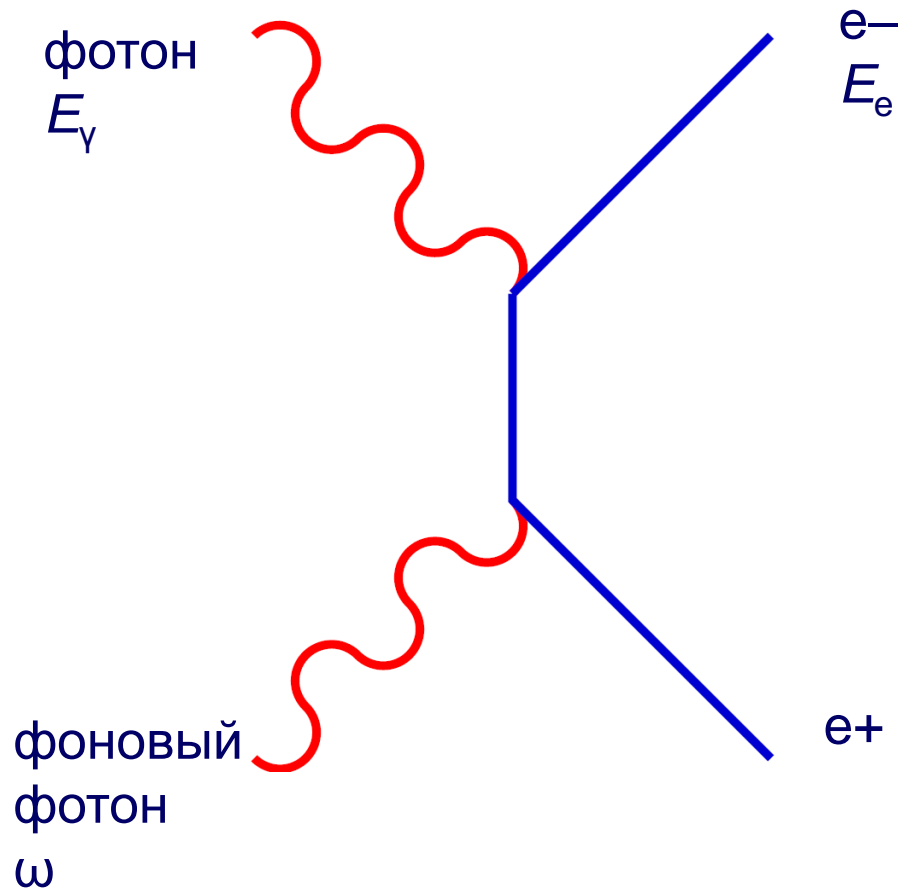
3. Ограничения из потоков фотонов

- сопутствующие фотоны
- результат ШАЛ-МГУ
- поглощение

4. Выводы и перспективы

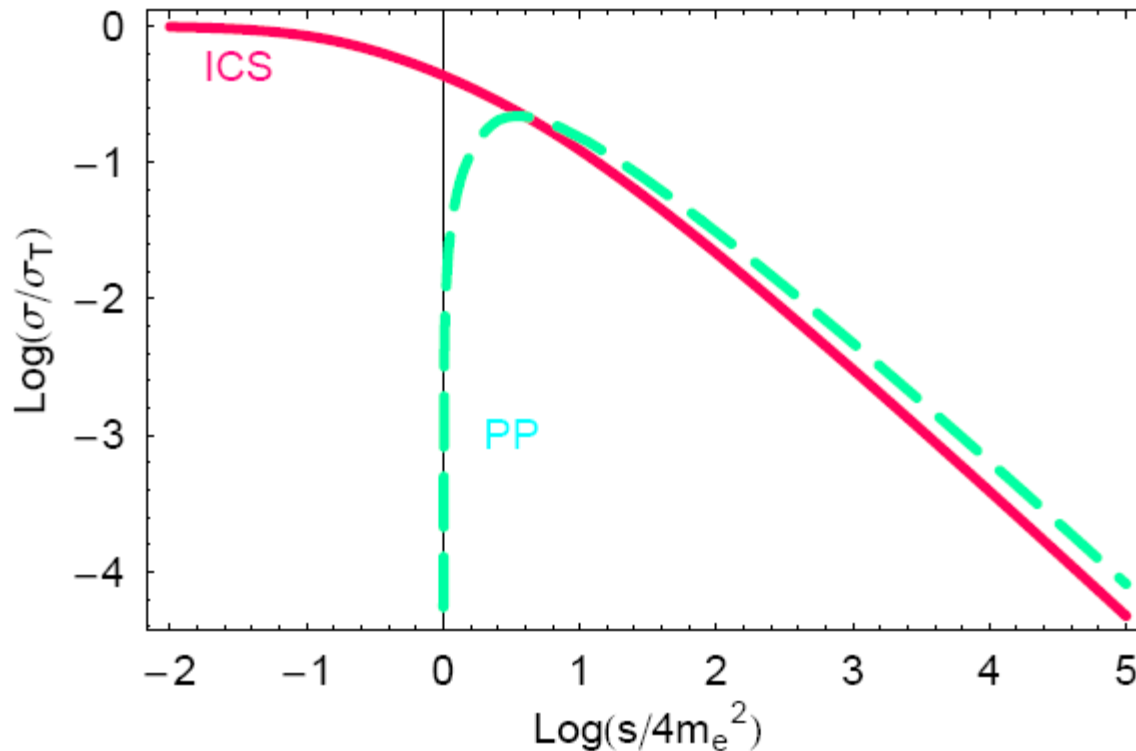
Распространение фотонов

- рождение пар



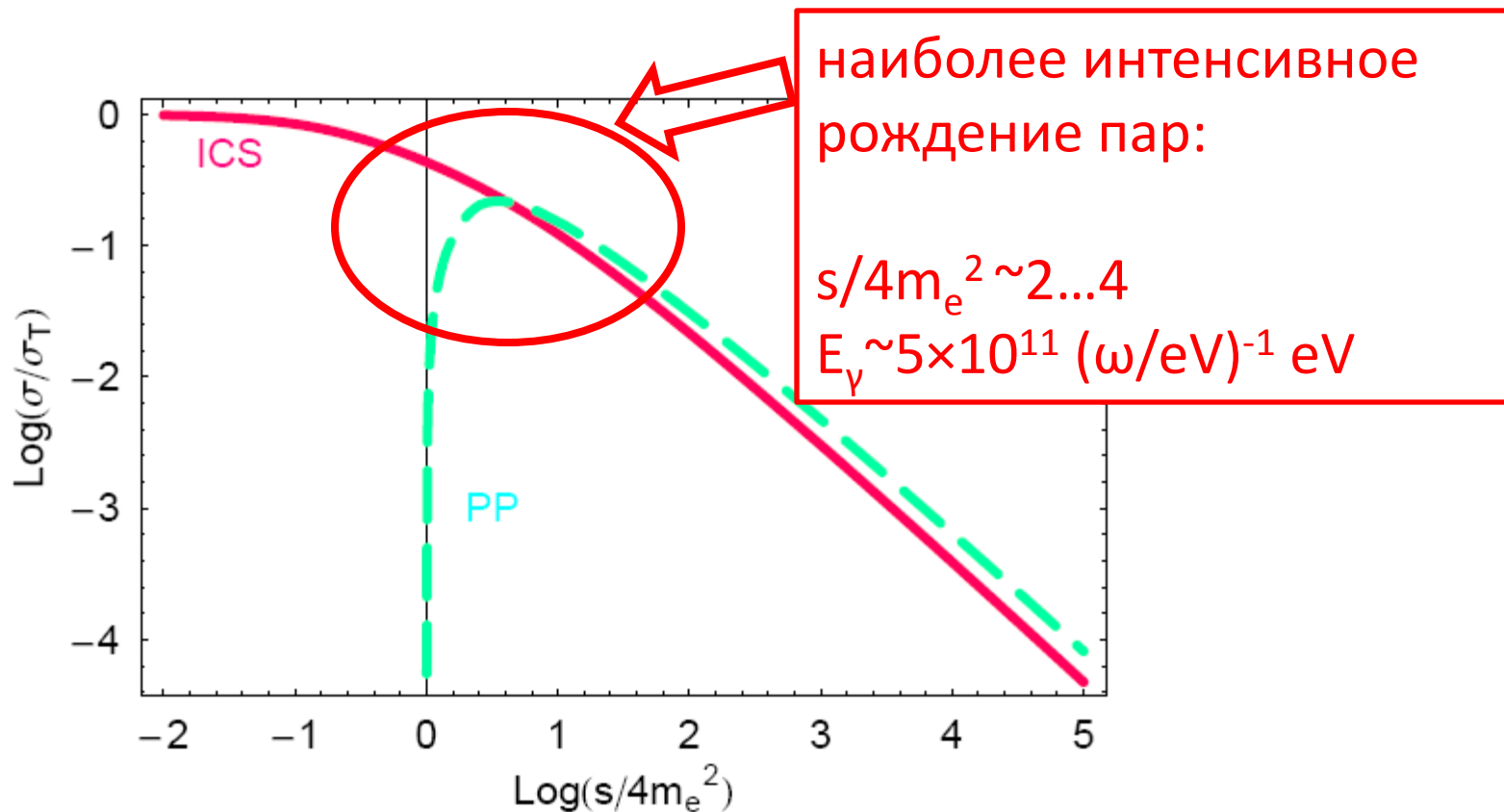
Распространение фотонов

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

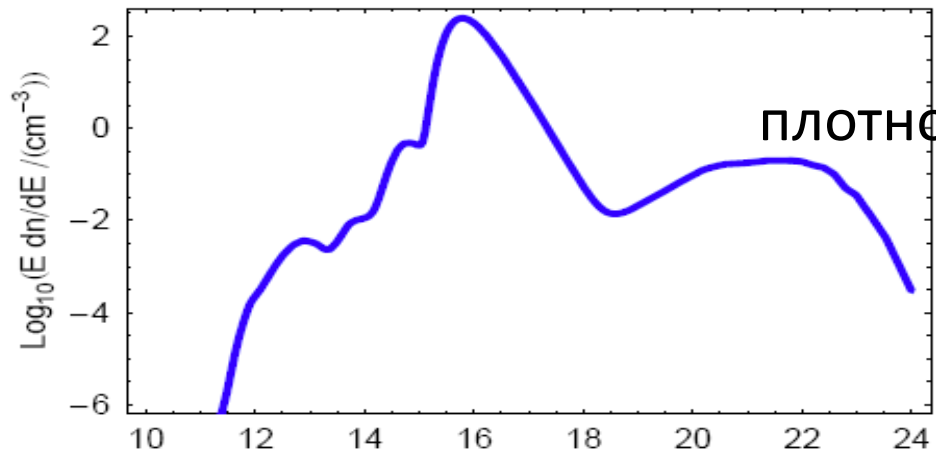


Распространение фотонов

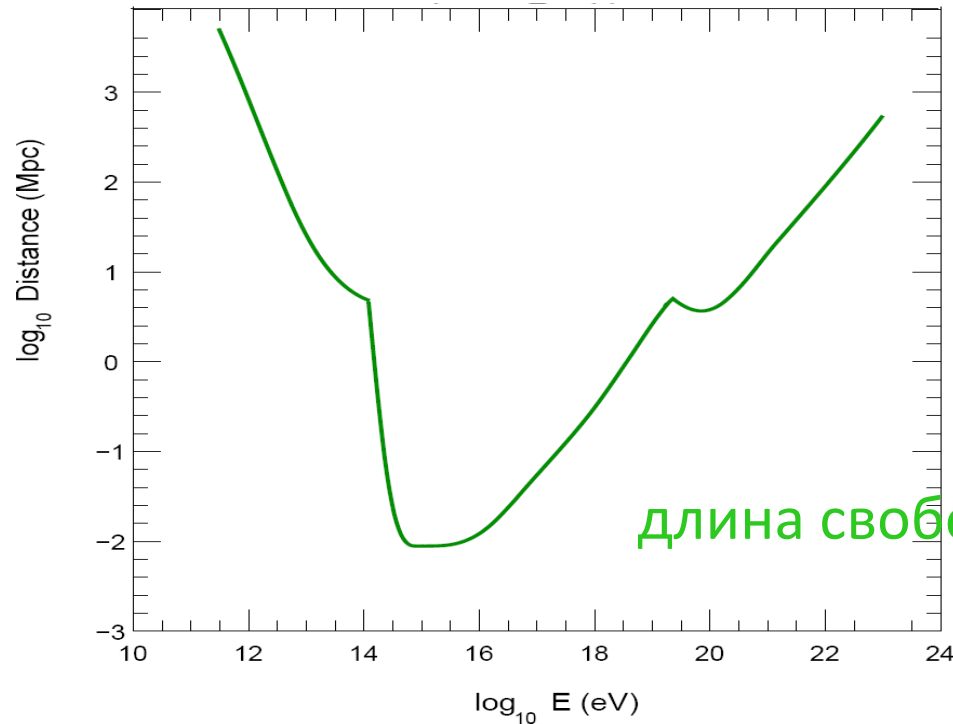
полное сечение рождения пар (PP) и
обратного комптоновского рассеяния (ICS)



Распространение фотонов



ПЛОТНОСТЬ ФОНОВЫХ ФОТОНОВ

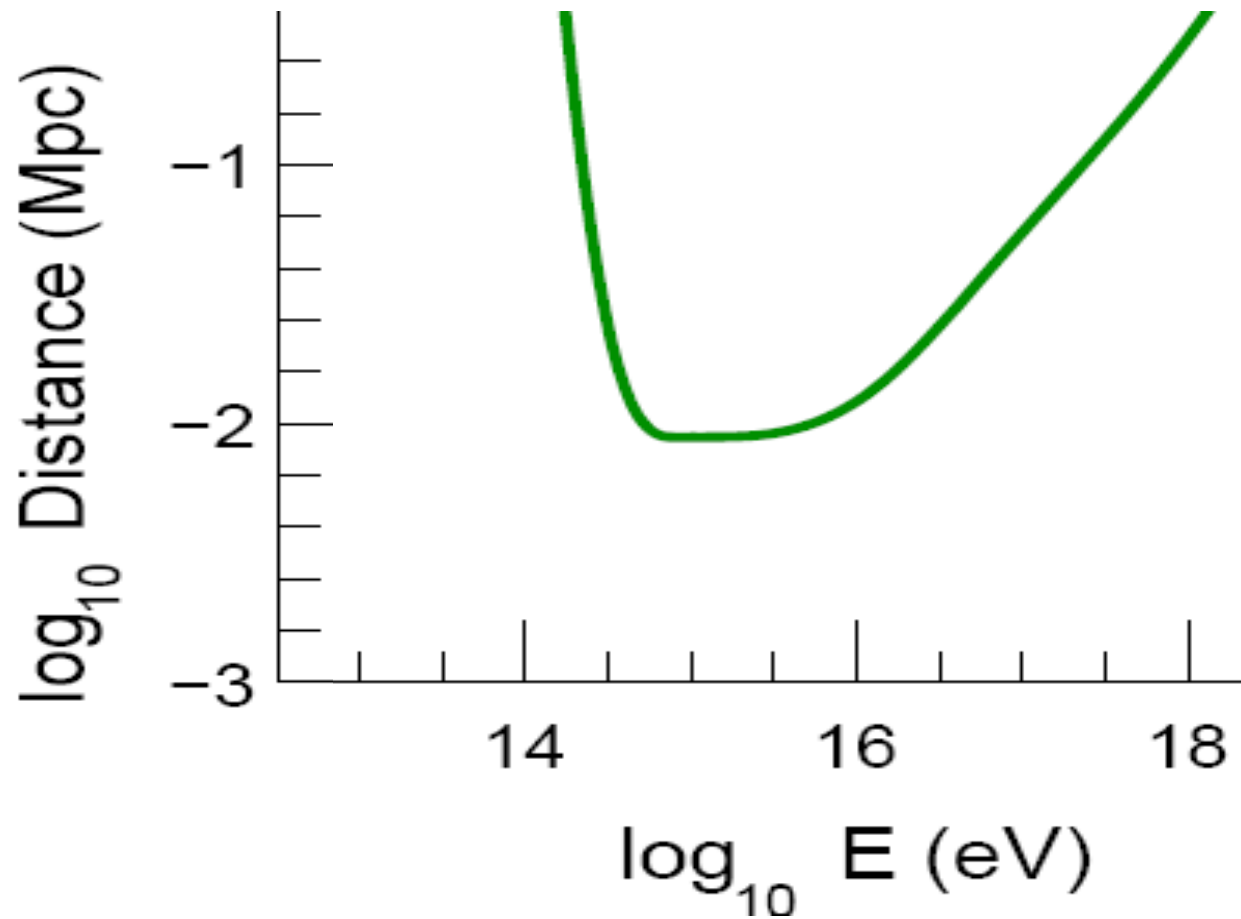


длина свободного пробега фотонов

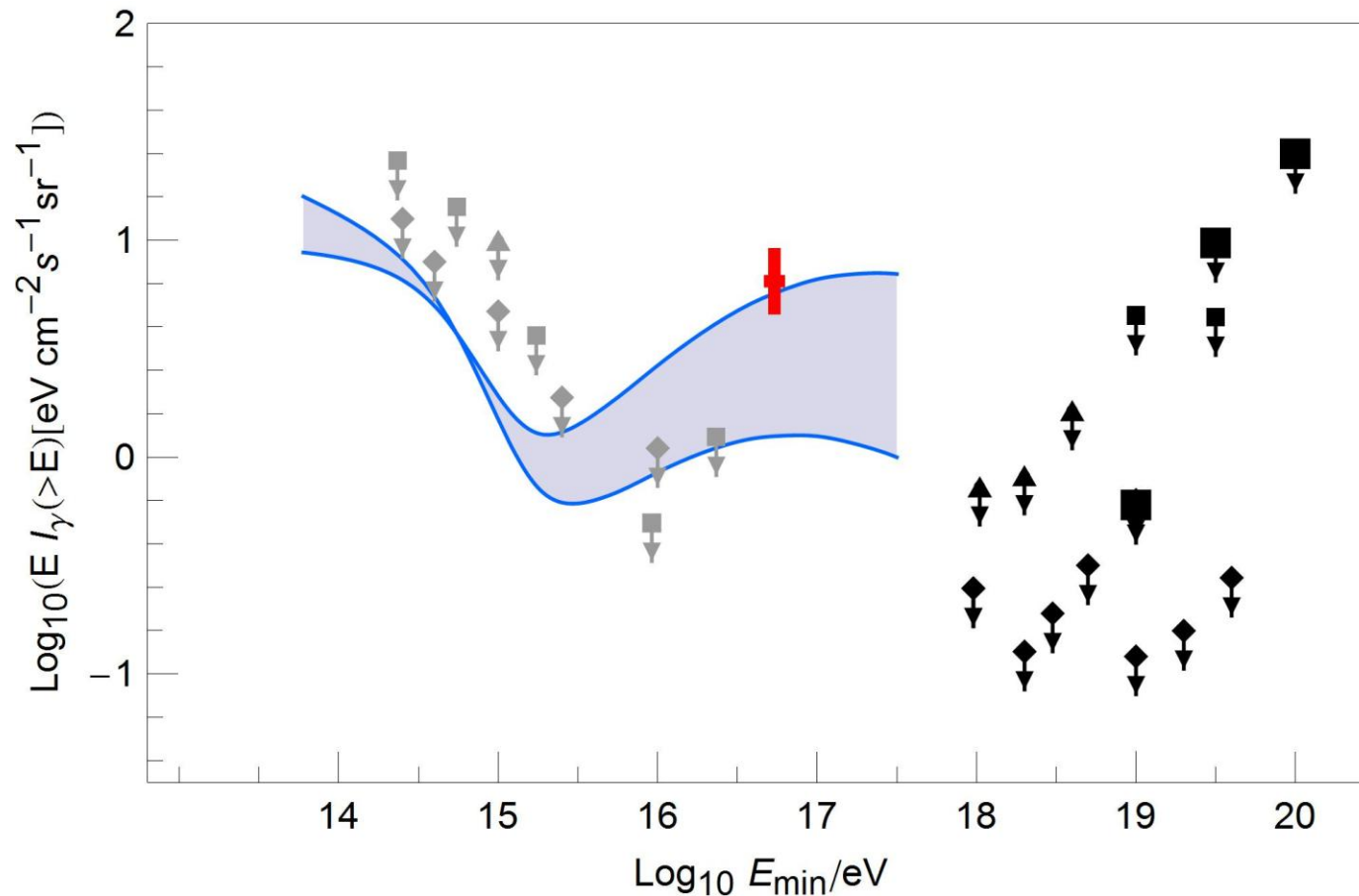
$$E_{\gamma} \sim 5 \times 10^{11} (\omega / \text{eV})^{-1} \text{ eV}$$

Распространение фотонов

длина свободного пробега фотонов

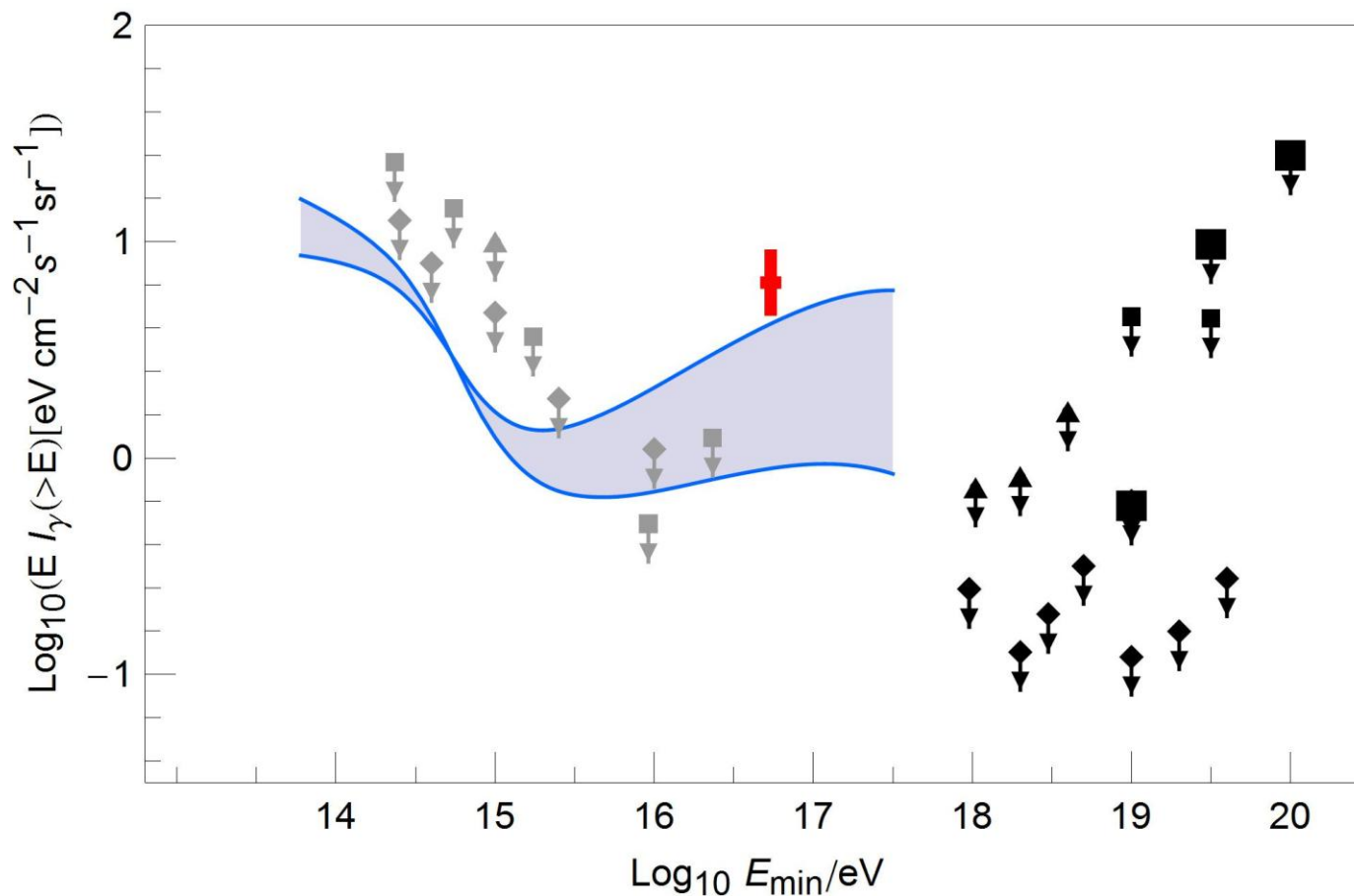


Потоки с учетом поглощения: *распределение источников – как звезды*



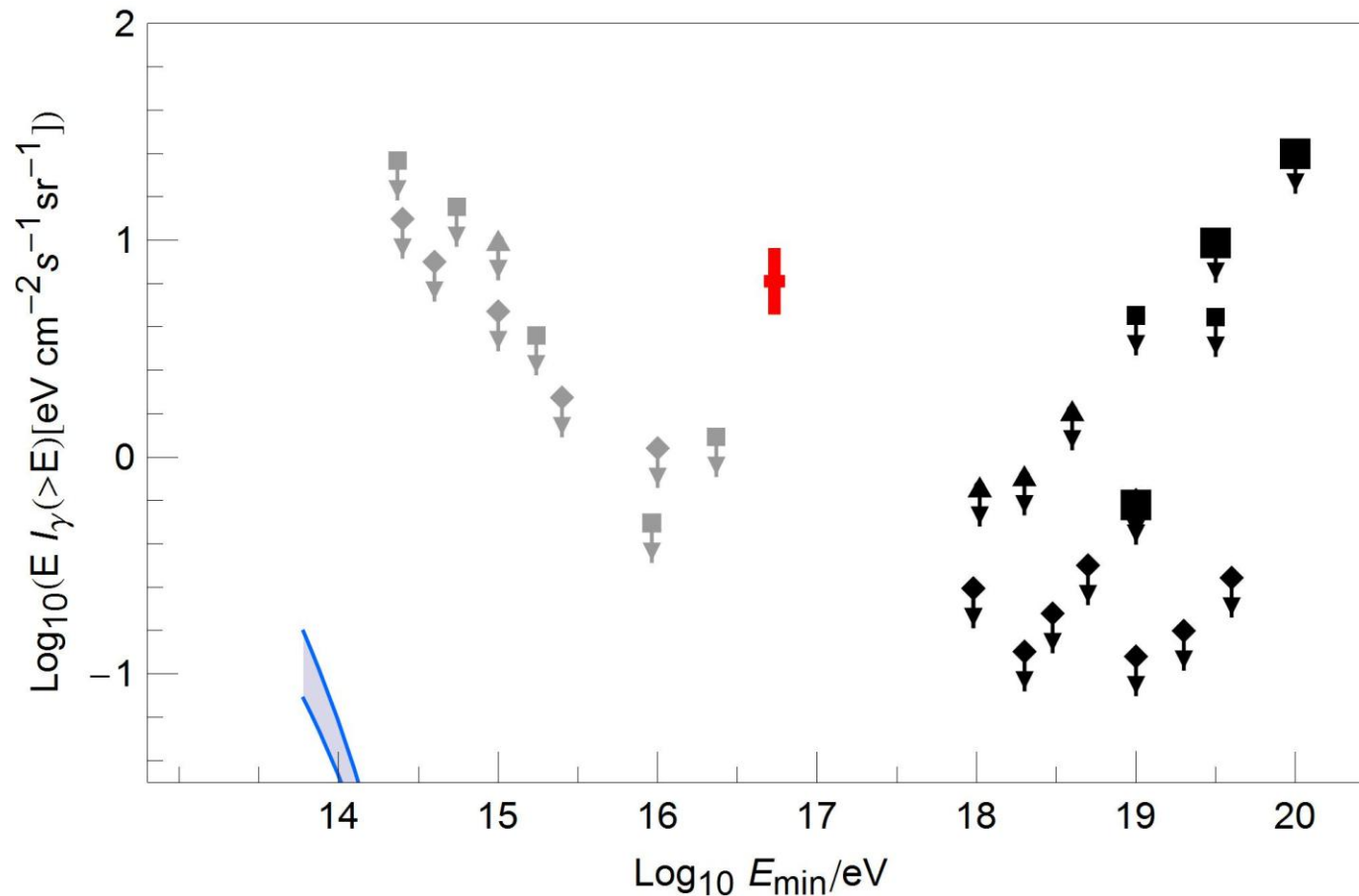
ST 2014 preliminary

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

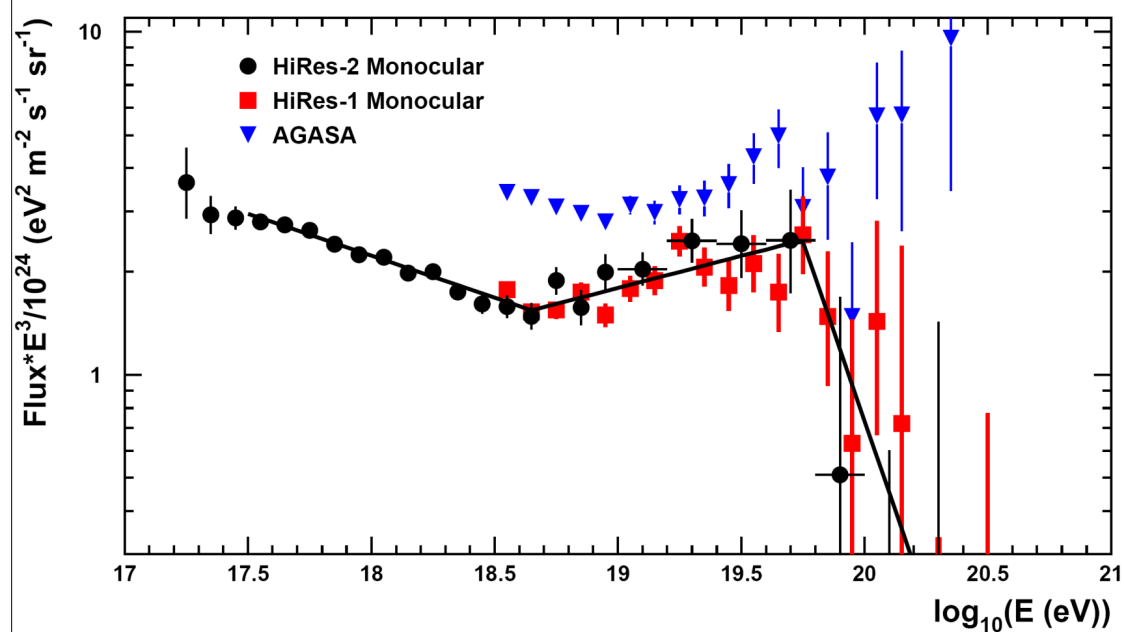
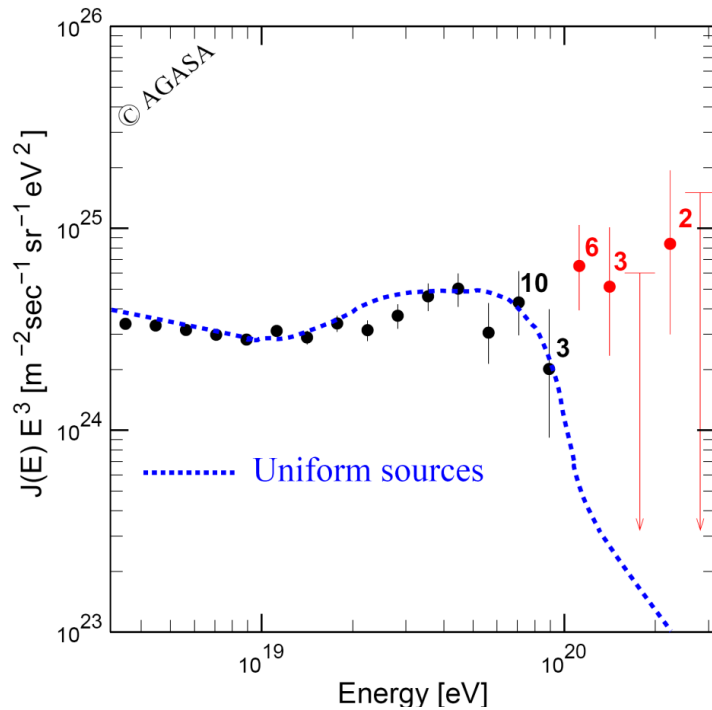
- вероятное наблюдение астрофизических нейтрино (60 ТэВ – 2000 ТэВ), «большой» поток
- карта совместна с изотропией, намек на избыток в районе центра (не плоскости!) Галактики
- похоже на 1:1:1 отношение ароматов
- диагностика:
 - анизотропия
 - фотоны

Перспективы

- увеличение статистики IceCube
- Байкал, KM3NET

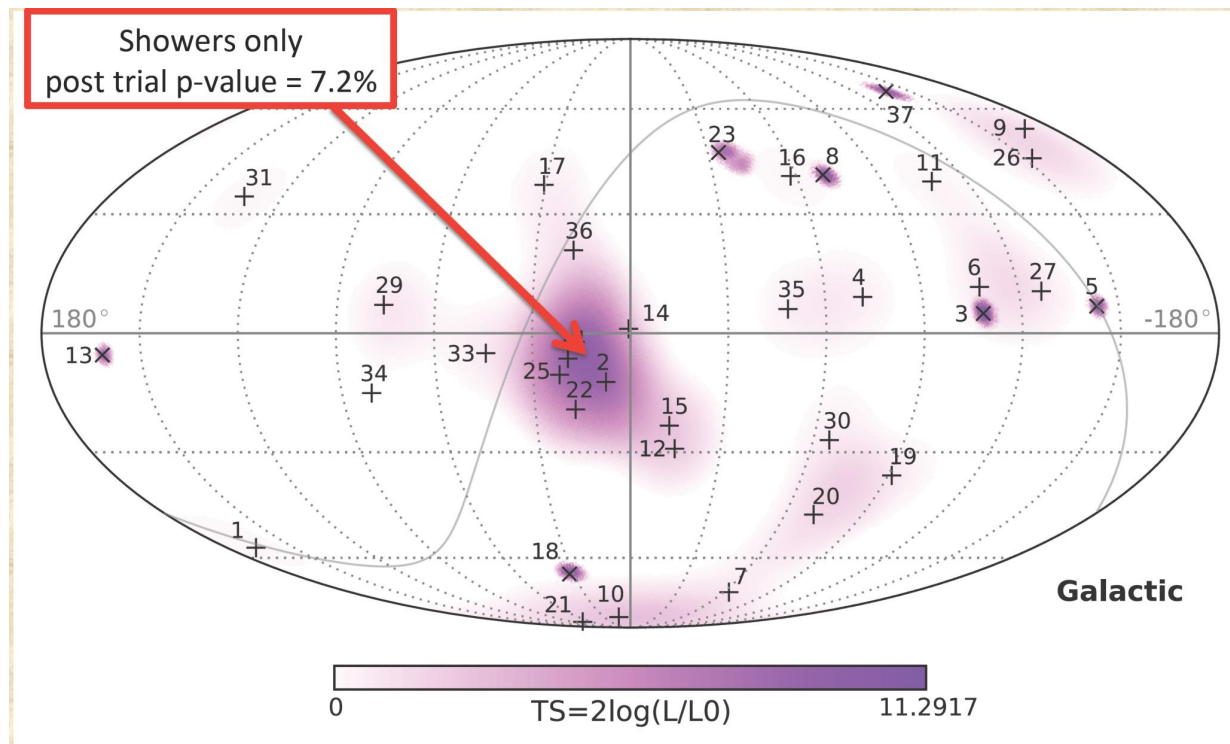
Перспективы

- 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