(НЕ)ПРОЗРАЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

Сергей Троицкий
(ОТФ ИЯИ РАН,
кафедра физики частиц и космологии физфака)

Встреча с кафедрой ФЧК, 19 октября 2010 г.

(НЕ)ПРОЗРАЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ
для фотонов высокой энергии

Сергей Троицкий
(ОТФ ИЯИ РАН ,
кафедра физики частиц и космологии физфака)

Встреча с кафедрой ФЧК, 19 октября 2010 г.

(НЕ)ПРОЗРАЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

1. Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

2. Полезные выводы из непрозрачности Вселенной.

Ограничения на излучение сверхвысоких энергий.

3. Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR/TeV - кризис.

4. Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

(НЕ)ПРОЗРАЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

1. Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

2. Полезные выводы из непрозрачности Вселенной.

Ограничения на излучение сверхвысоких энергий.

3. Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR/TeV - кризис.

4. Как сделать Вселенную попрозрачнее?

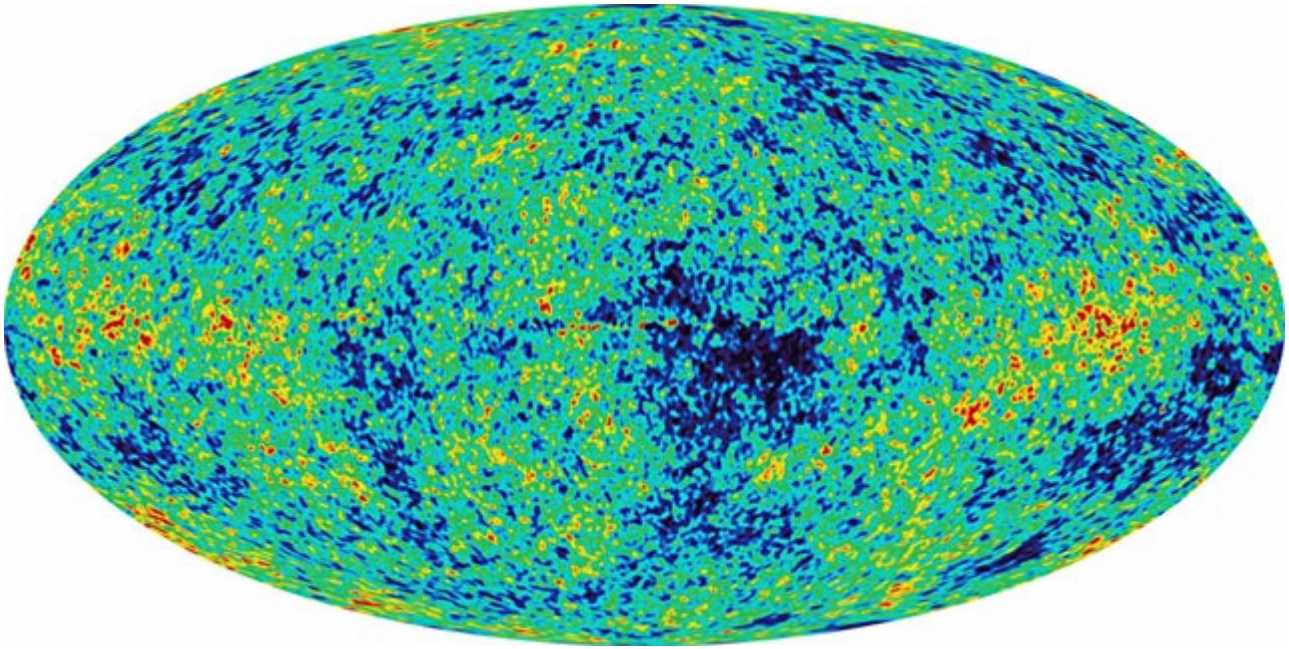
Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

Вселенная заполнена излучением:

микроволновое реликтовое излучение



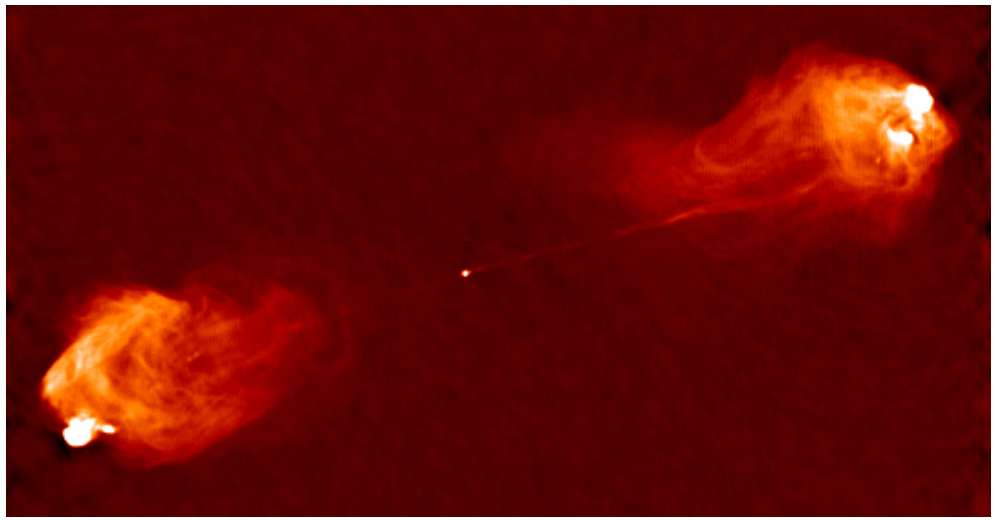
Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

Вселенная заполнена излучением:

фоновое радиоизлучение

(радиогалактики, скопления галактик)



Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

Вселенная заполнена излучением:

инфракрасный и оптический фон

(звезды, особенно молодые; пыль)

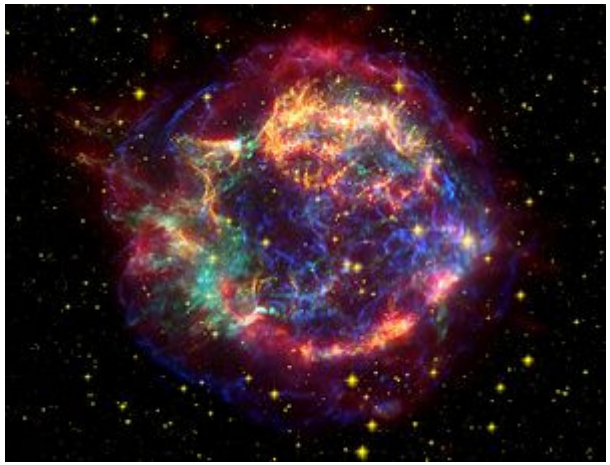
Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

Вселенная заполнена излучением:

ультрафиолетовый и рентгеновский фон

(многочисленные источники)



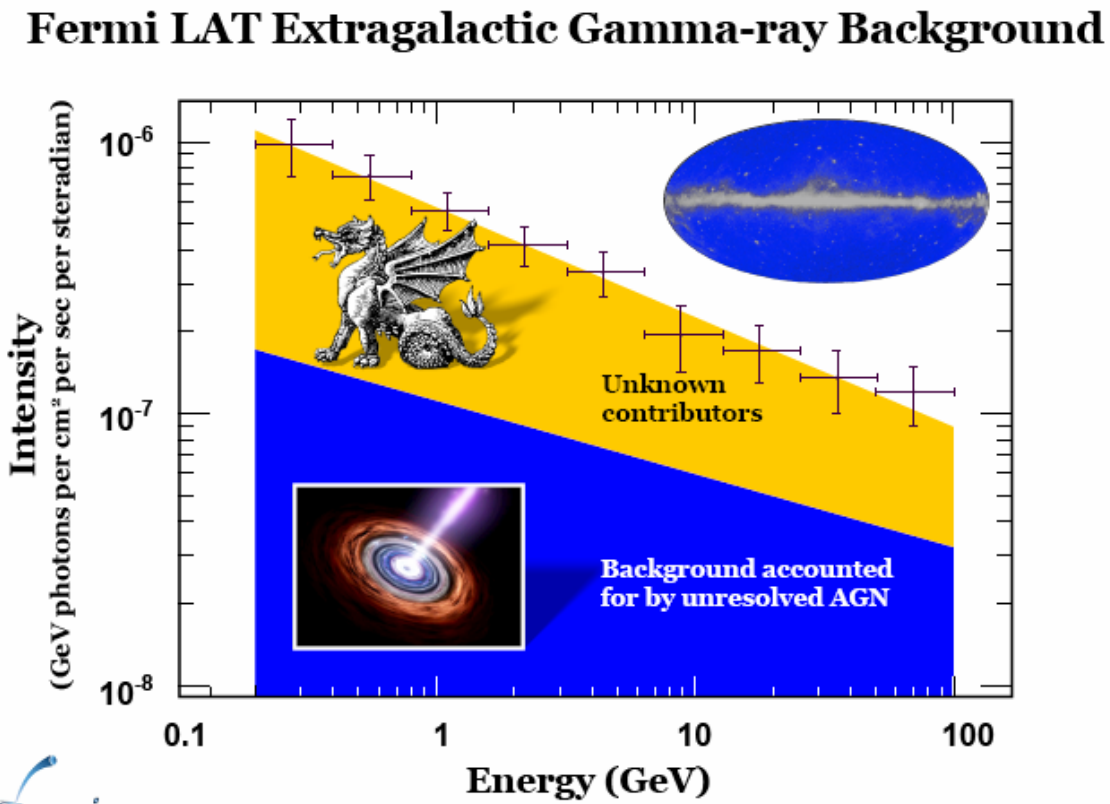
Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

Вселенная заполнена излучением:

диффузное гамма-излучение

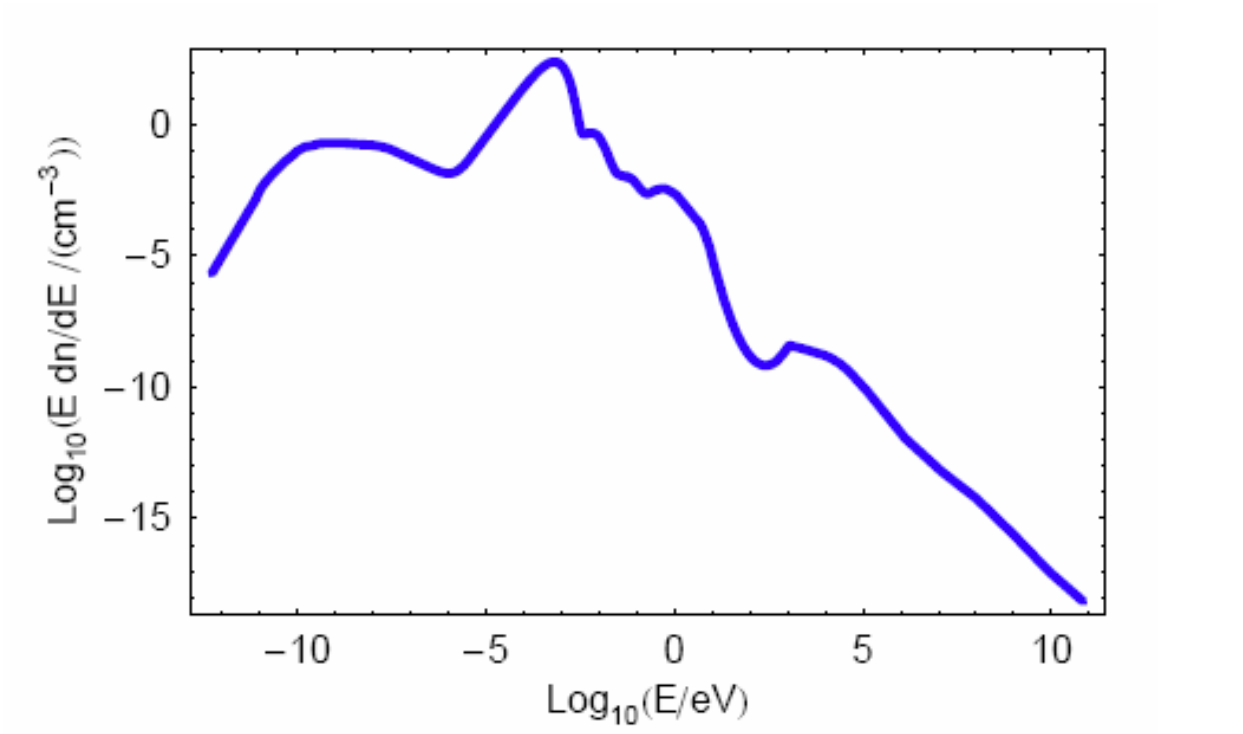
(активные ядра галактик, аннигиляция темной материи(?) и т.д.)



Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

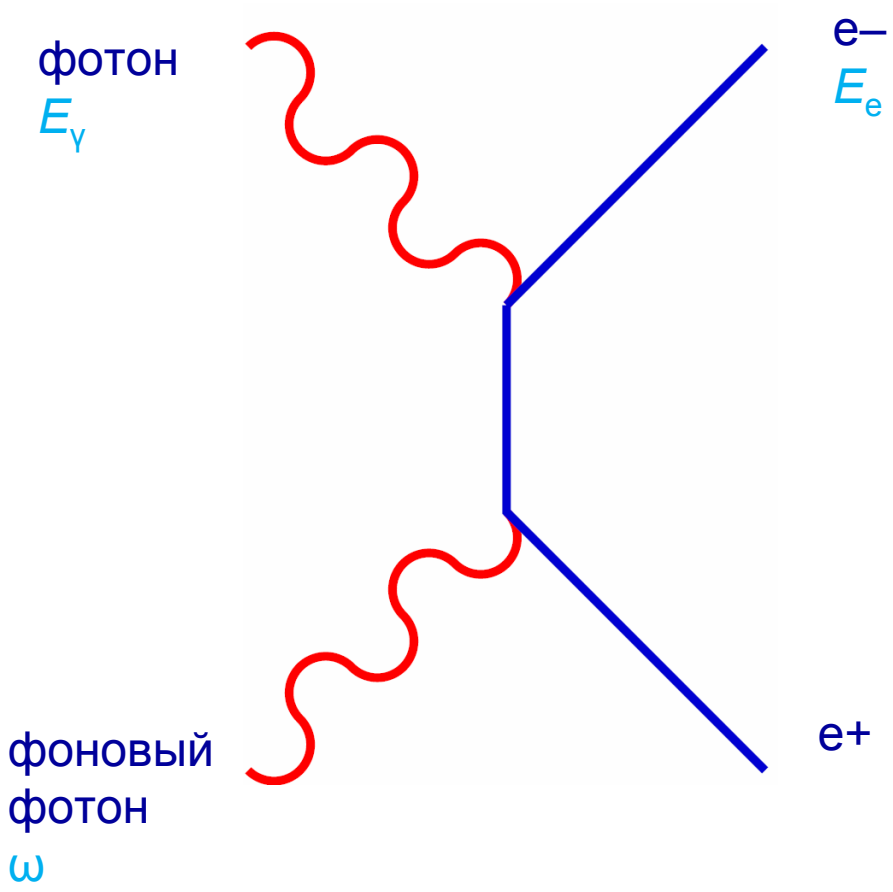
Вселенная заполнена излучением:



Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

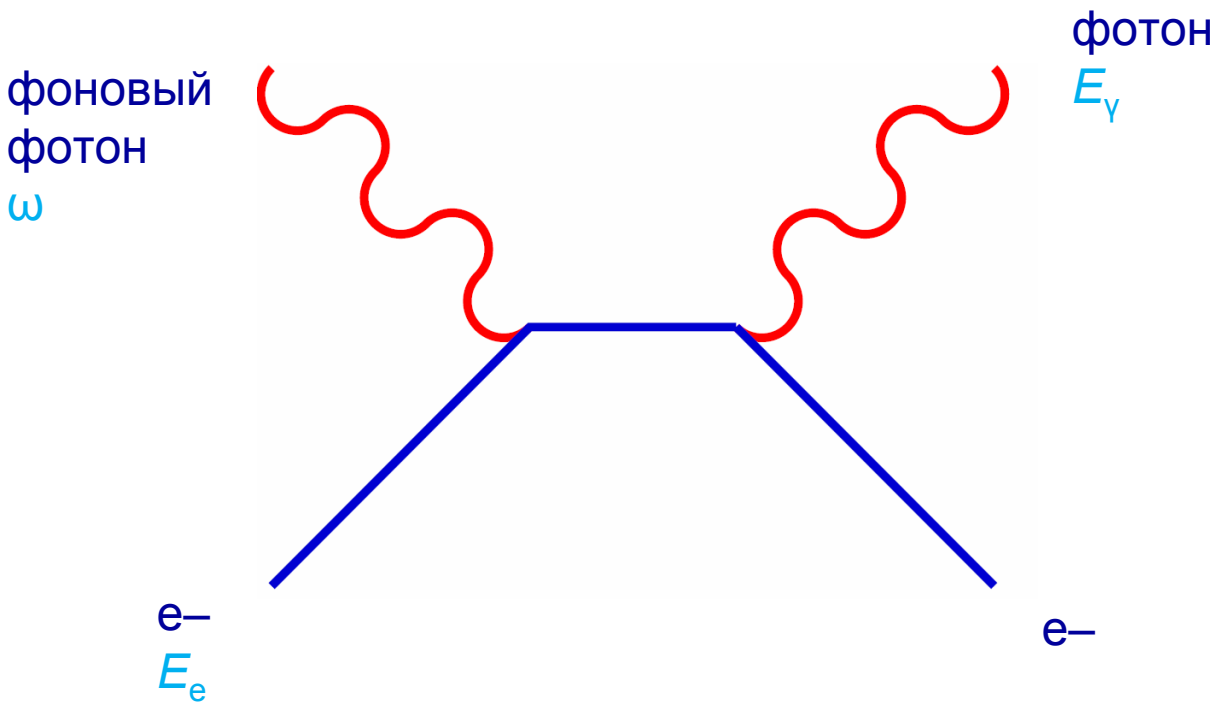
Рождение пар



Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

Обратный эффект Комптона

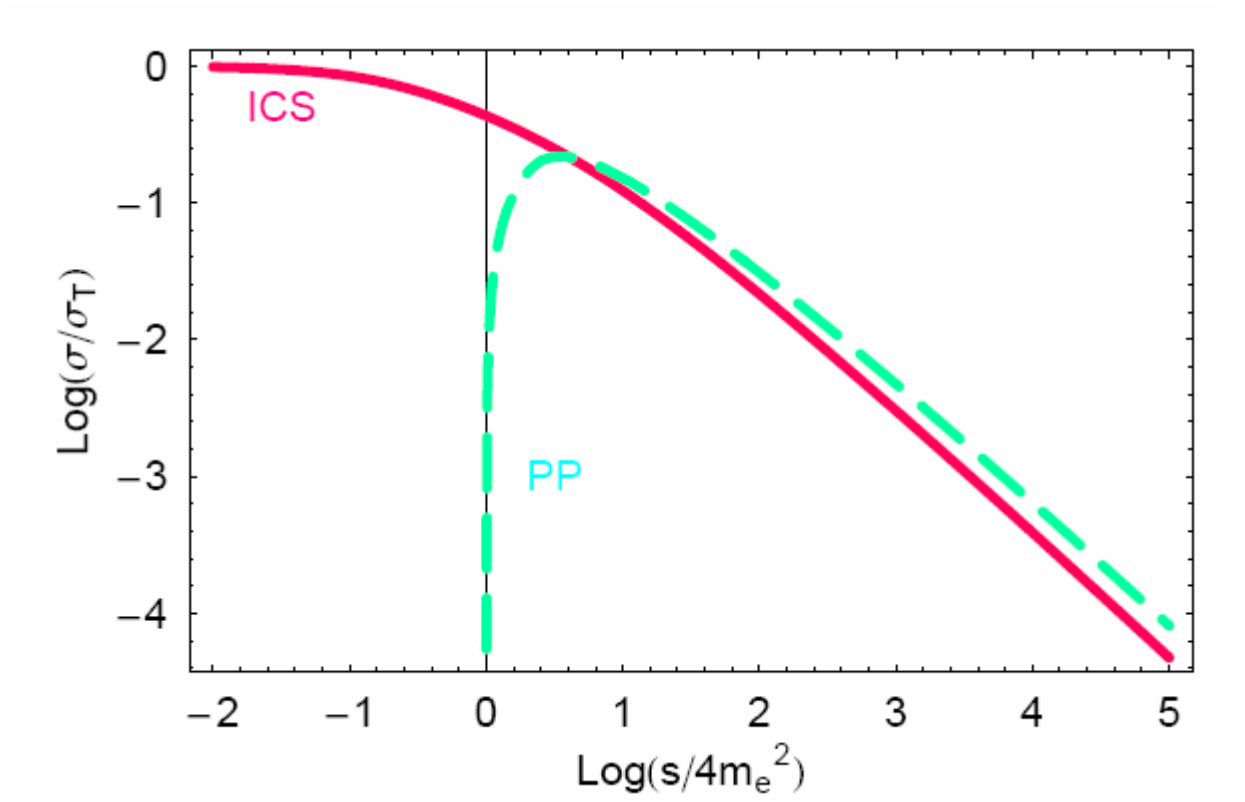


(+ кроссинг-симметричная диаграмма)

Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

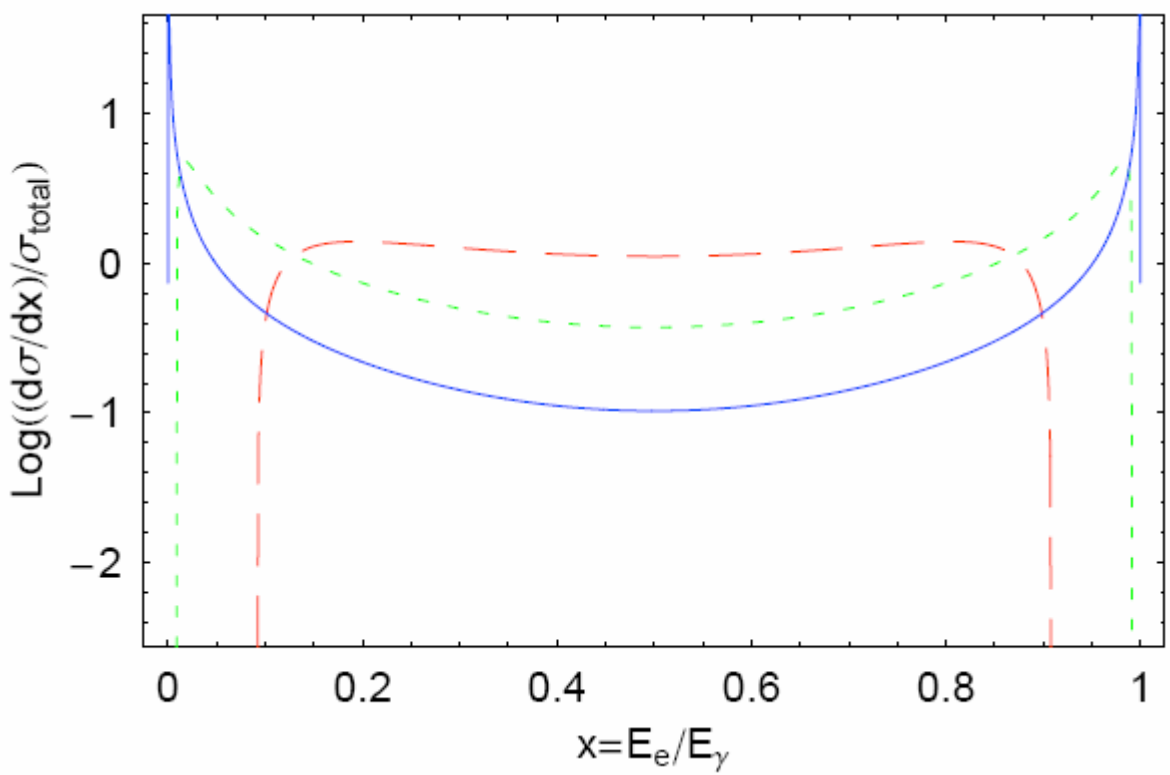
полное сечение рождения пар (PP) и обратного комптоновского рассеяния (ICS)



Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

рождение пар: энергия, уносимая электроном

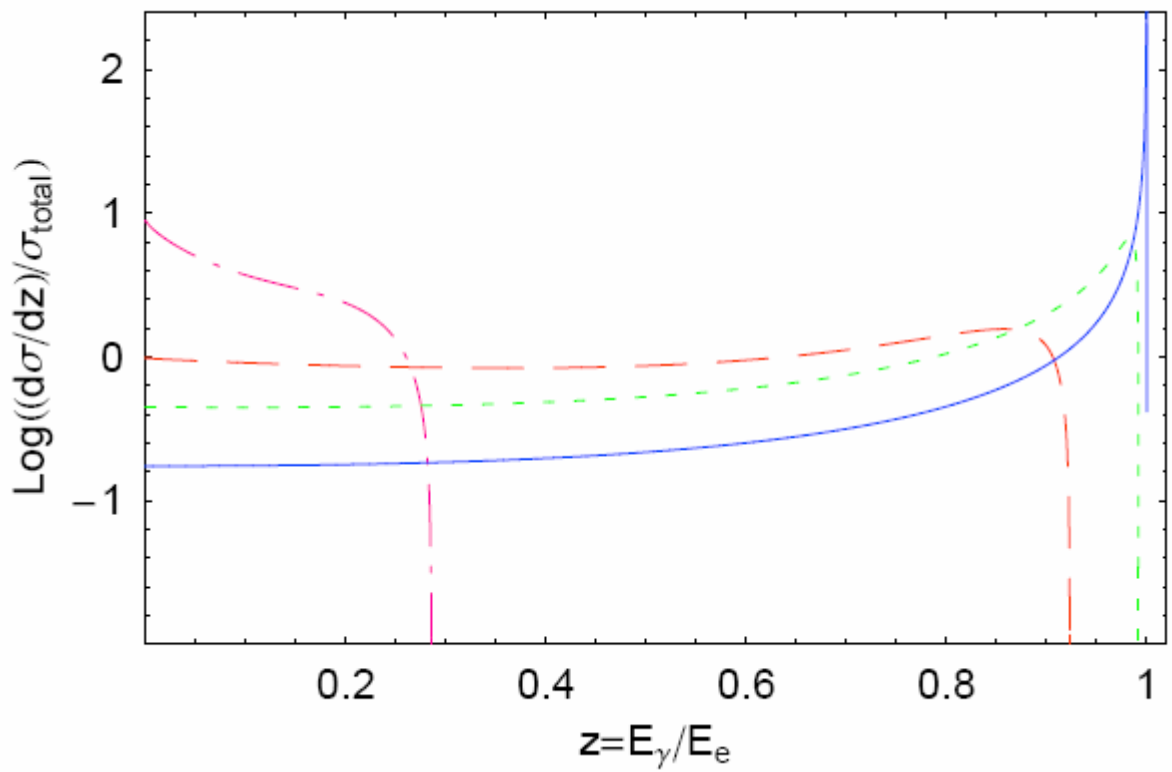


$s/4m^2$ = 3, 30, 30000

Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

ICS: энергия, уносимая фотоном

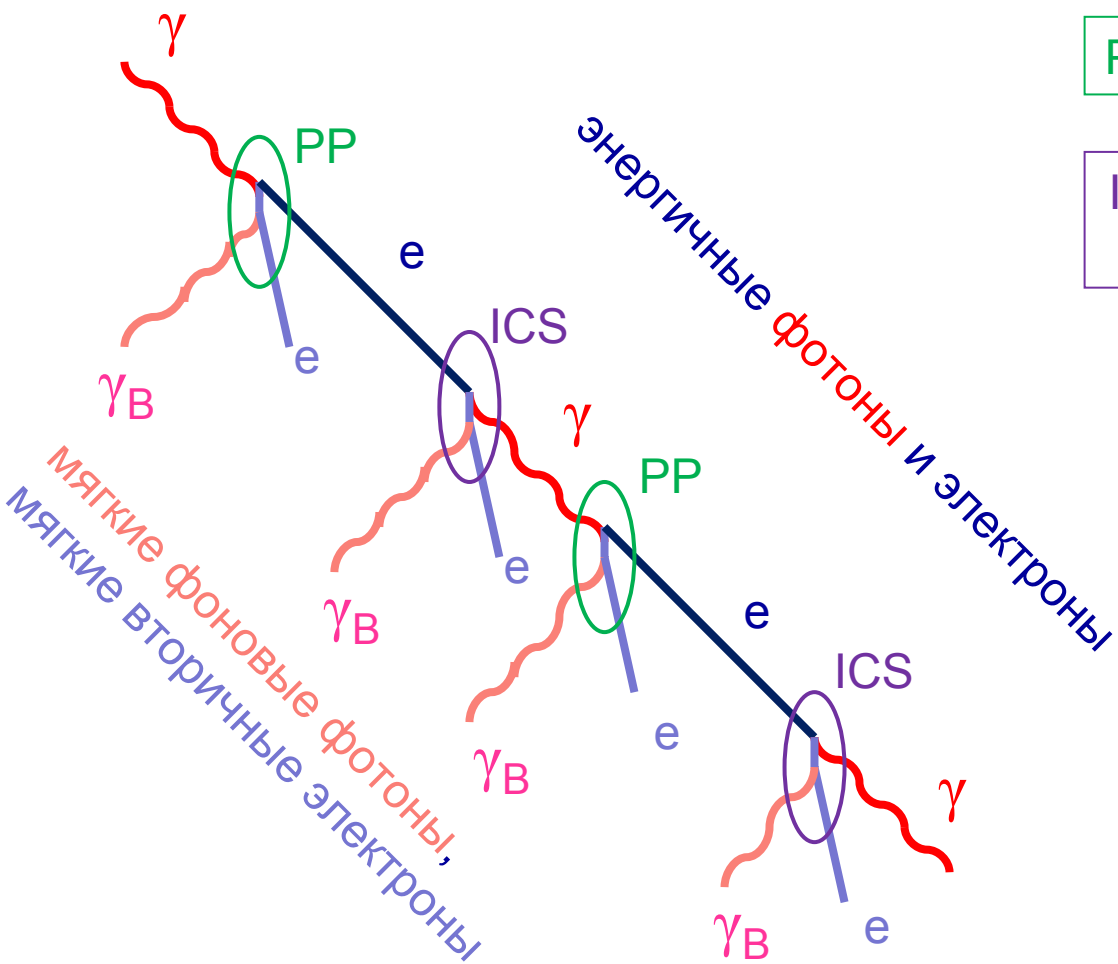


$s/4m^2$ = 0.1, 3, 30, 30000

Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

развитие электромагнитного каскада:



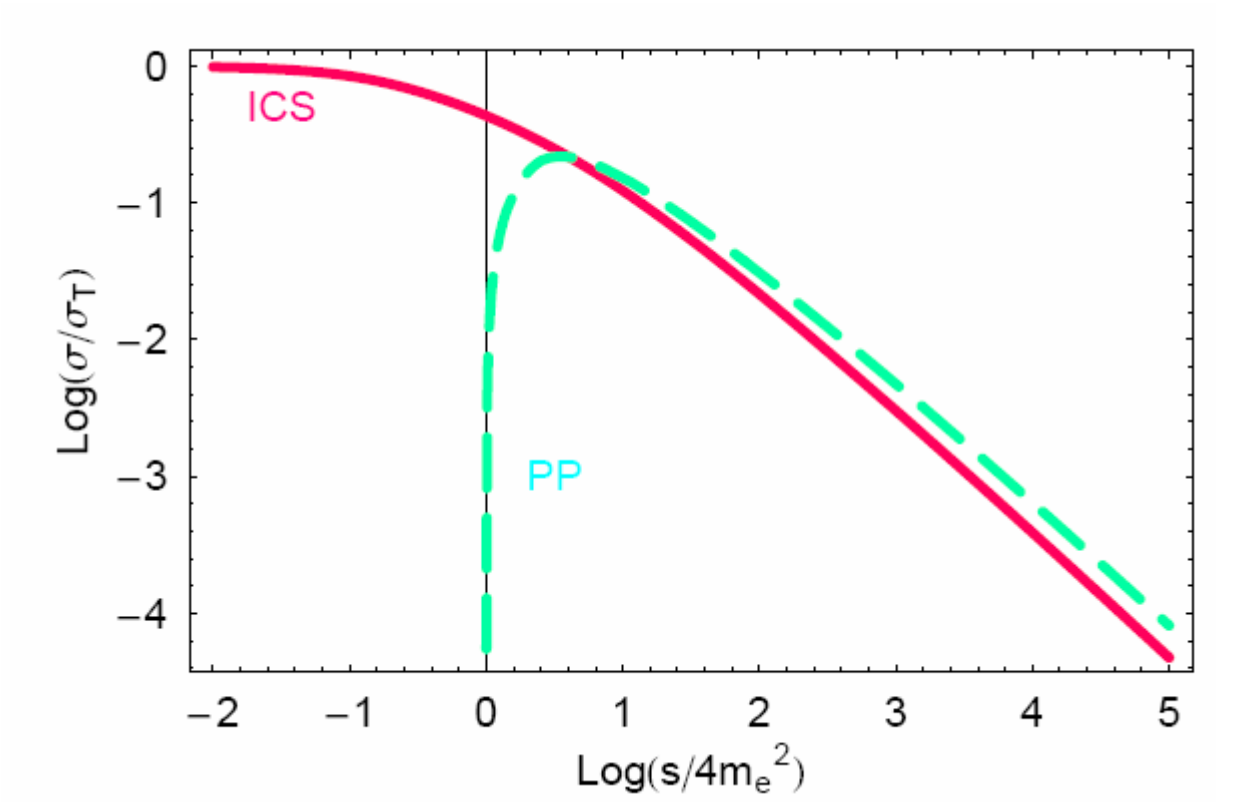
PP = рождение пар

ICS = обратное комптоновское рассеяние

Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

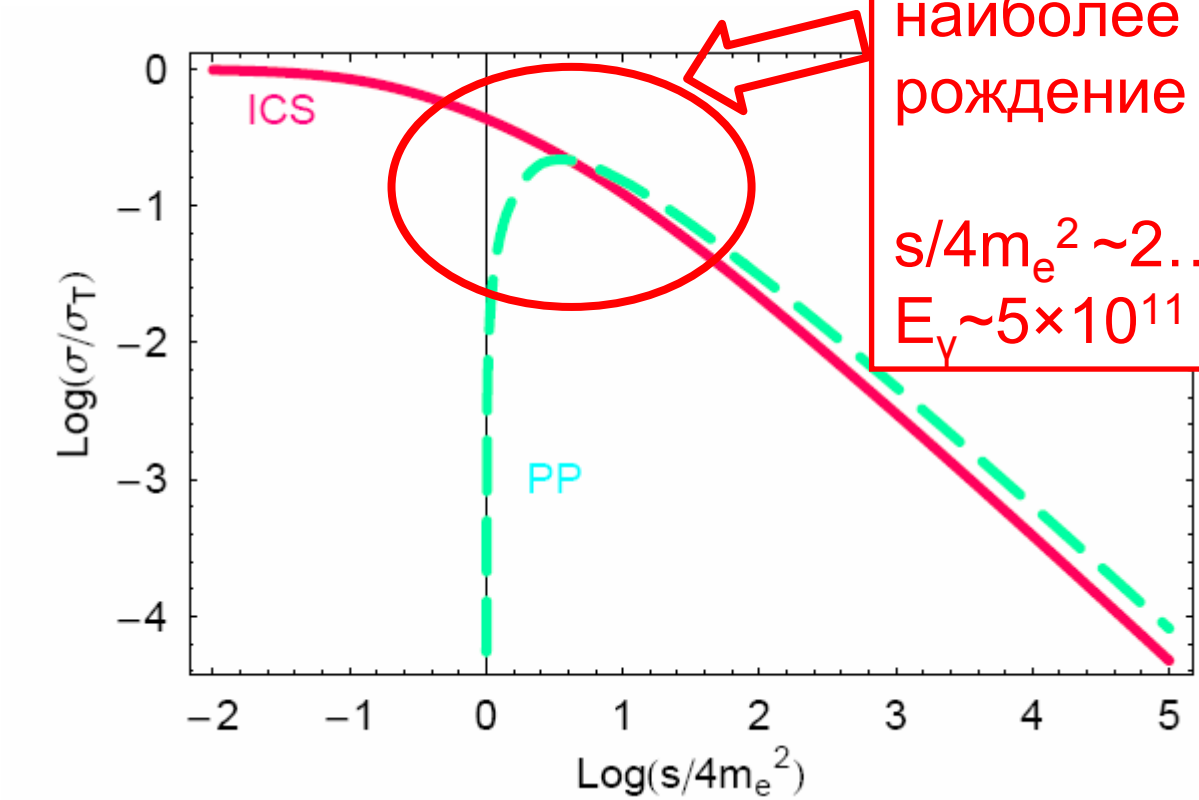
полное сечение рождения пар (PP) и обратного комптоновского рассеяния (ICS)



Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

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



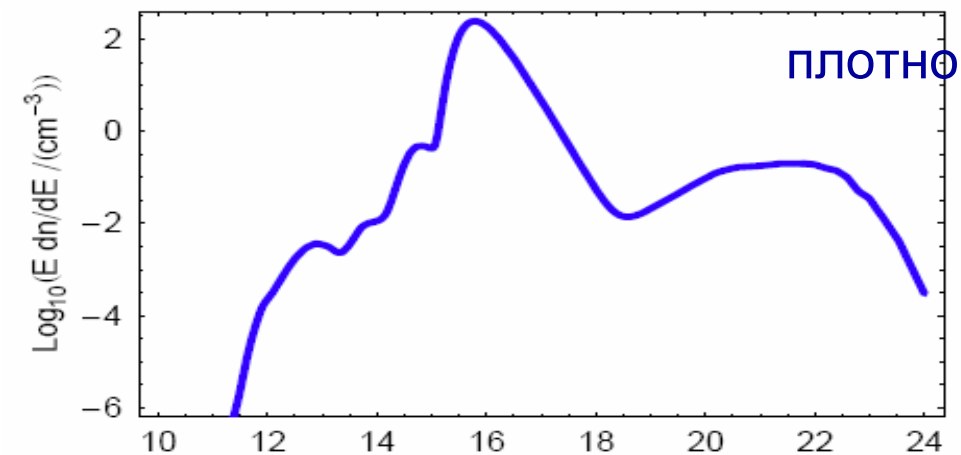
наиболее интенсивное рождение пар:

$s/4m_e^2 \sim 2\ldots4$

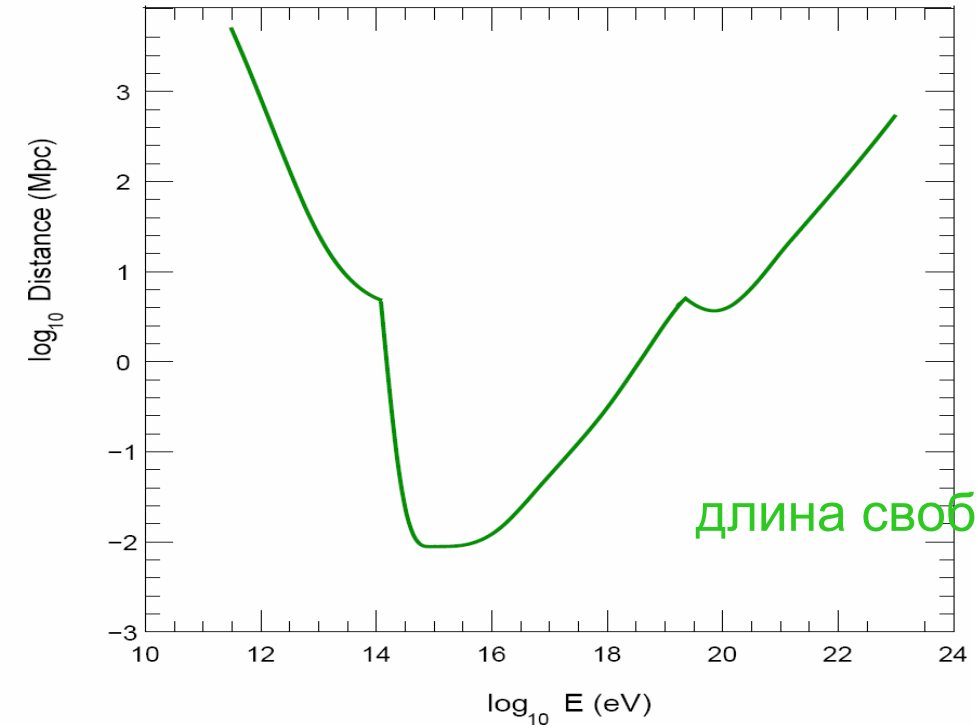
$E_\gamma \sim 5\times10^{11}\ (\omega/\mathrm{eV})^{-1}$ eV

Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.



плотность фоновых фотонов



длина свободного пробега фотонов

$E_\gamma \sim 5\times10^{11}\ (\omega/\mathrm{eV})^{-1}\ \mathrm{eV}$

(НЕ)ПРОЗРАЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

1. Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

2. Полезные выводы из непрозрачности Вселенной.

Ограничения на излучение сверхвысоких энергий.

3. Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR/TeV - кризис.

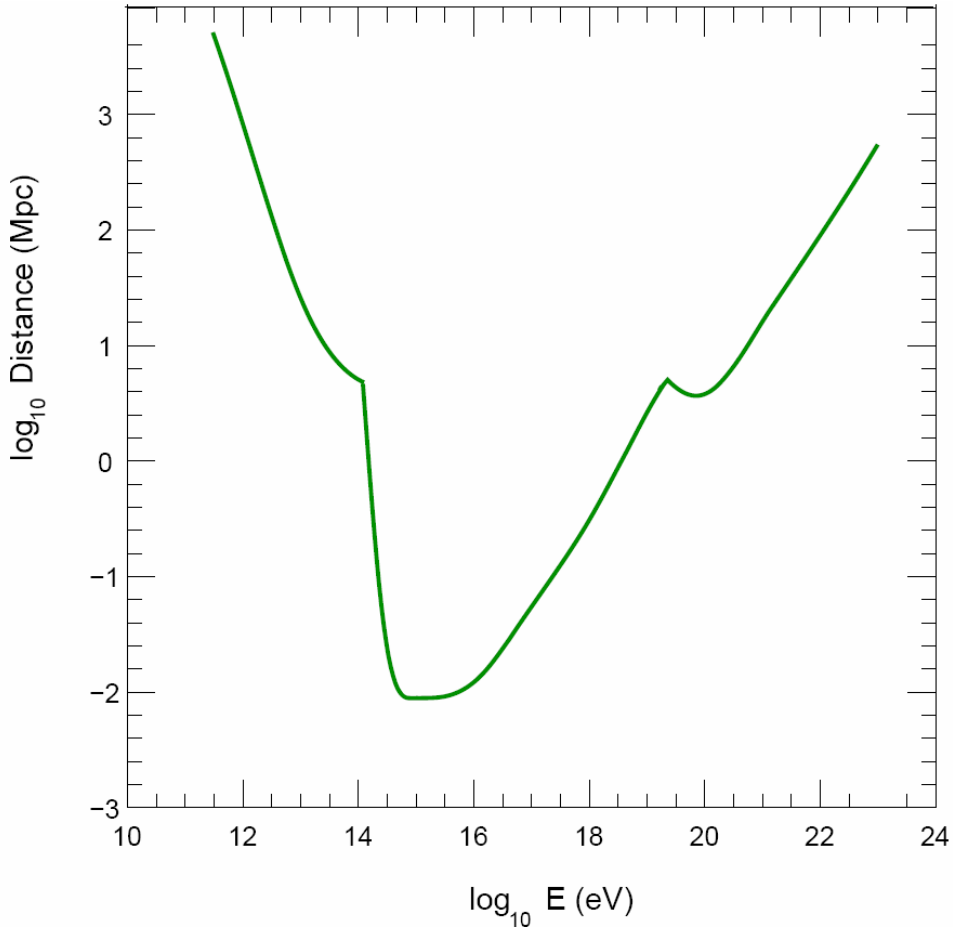
4. Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

Полезные выводы из непрозрачности Вселенной.

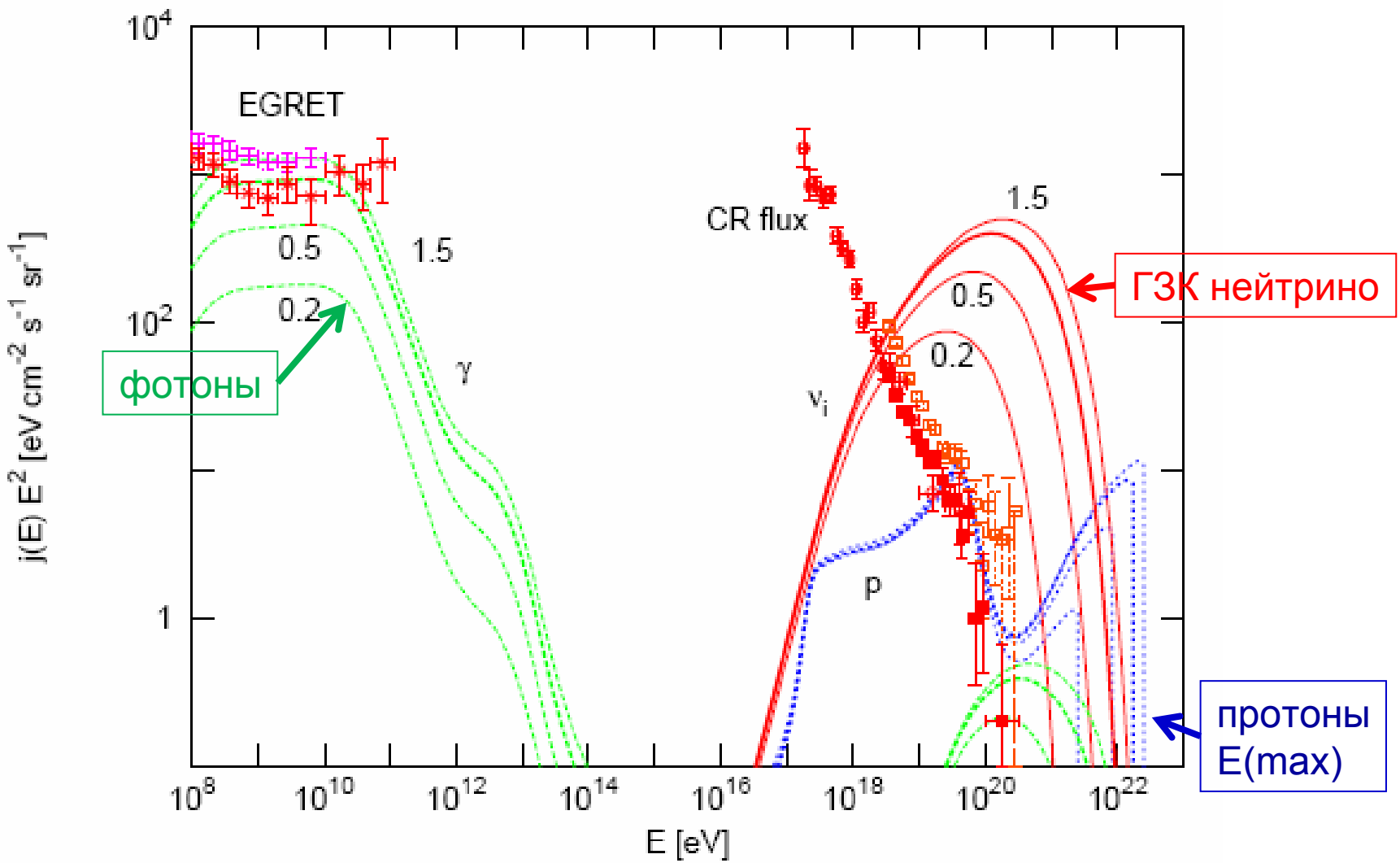
Ограничения на излучение сверхвысоких энергий.

длина свободного пробега фотонов



Полезные выводы из непрозрачности Вселенной.

Ограничения на излучение сверхвысоких энергий.



астрофизические ускорители протонов >10^{20} эВ

Полезные выводы из непрозрачности Вселенной.

Ограничения на излучение сверхвысоких энергий.

что можно ограничить?

- сценарии происхождения космических лучей сверхвысоких энергий (стандартные и с новой физикой)
- распады и аннигиляцию частиц темной материи, в т.ч. сверхтяжелой
- распады и аннигиляцию топологических дефектов
- аномальные концентрации реликтовых нейтрино
- нестандартные объяснения зависимости «красное смещение – блеск» для сверхновых типа Ia

……..

(НЕ)ПРОЗРАЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

1. Почему Вселенная непрозрачна?
Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

2. Полезные выводы из непрозрачности Вселенной.
Ограничения на излучение сверхвысоких энергий.

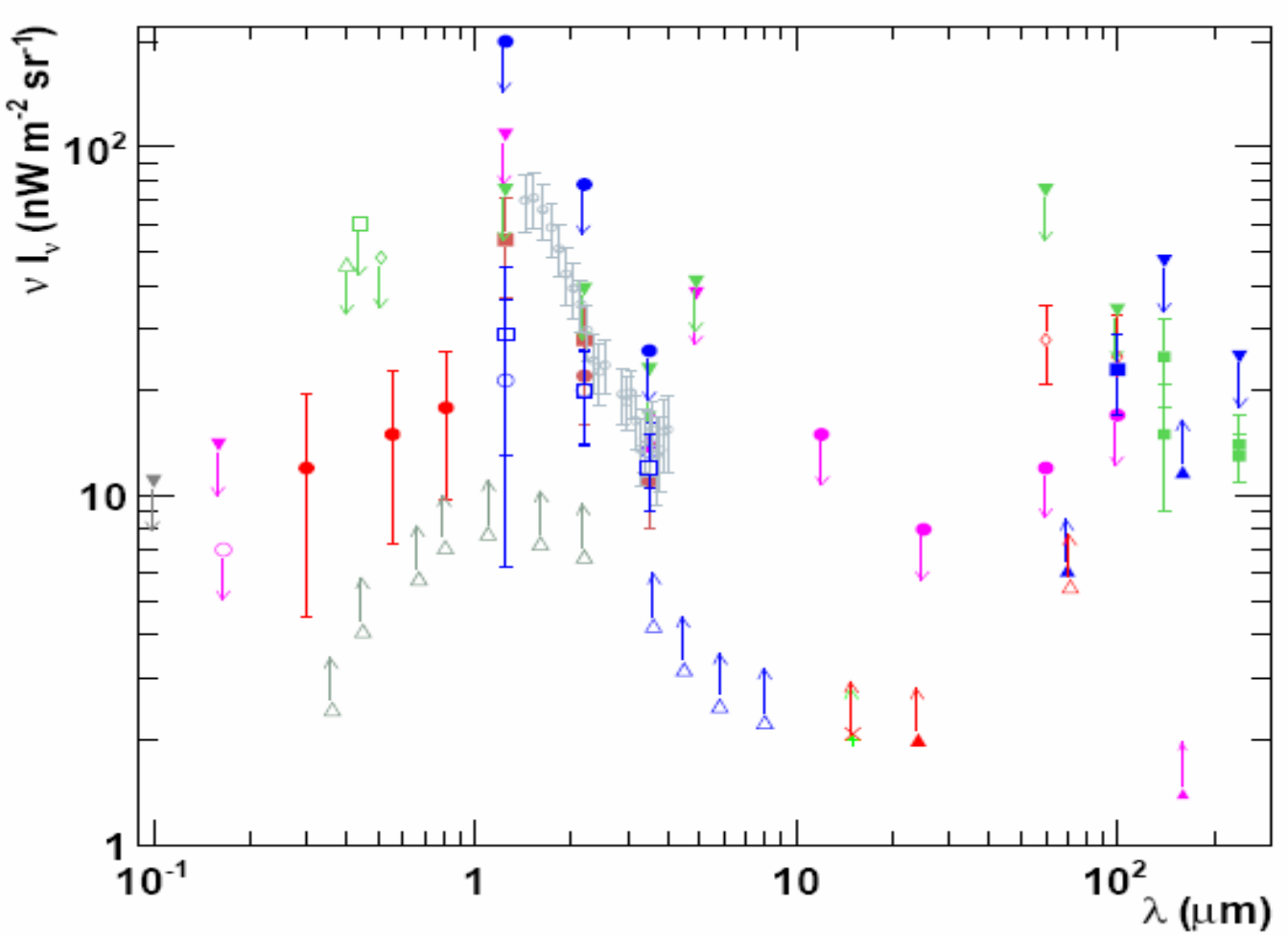
3. Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!
IR/TeV - кризис.

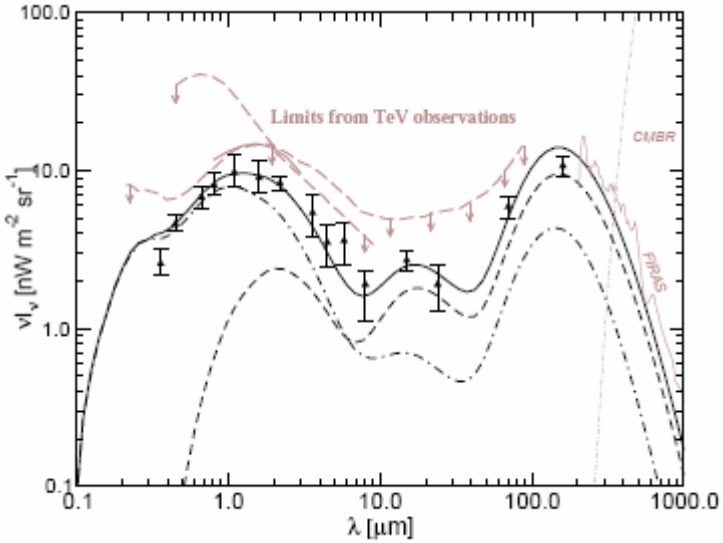
4. Как сделать Вселенную попрозрачнее?
Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

инфракрасный фон: измерения и модели

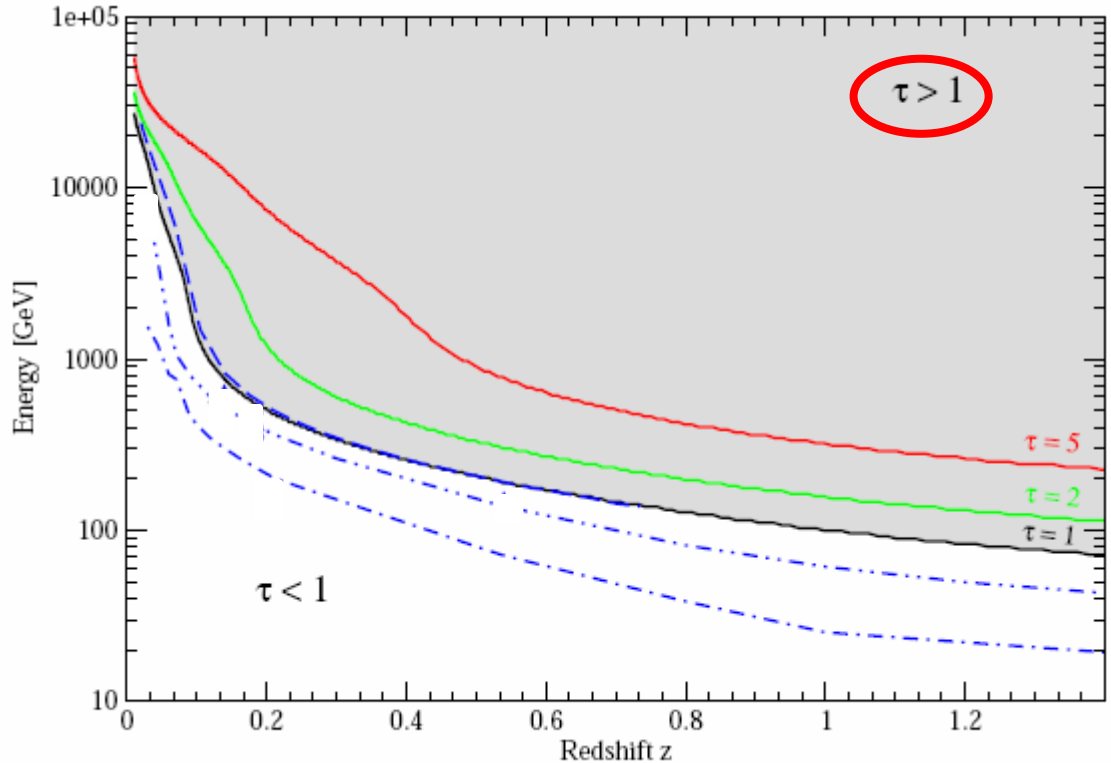



Limits from TeV observations
CMBR
FIRAS
νI_ν [nW m^{-2} sr^{-1}]
λ [μm]
100.0
10.0
1.0
0.1
0.1
1.0
10.0
100.0
1000.0

Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

энергия фотонов



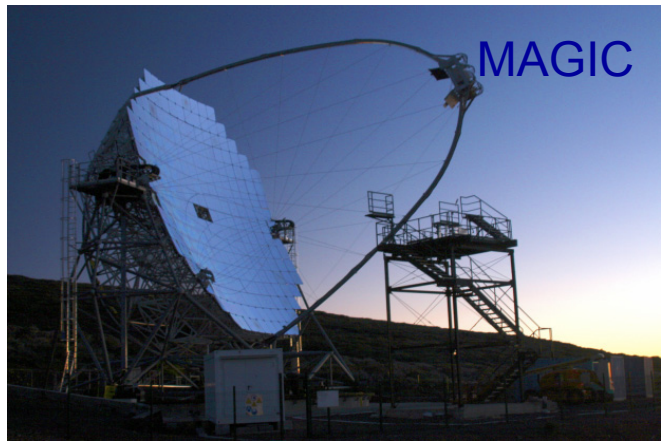
расстояние

оптическая толща Вселенной

Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

наблюдения удаленных источников в ТэВ-диапазоне (точнее, >100 ГэВ)

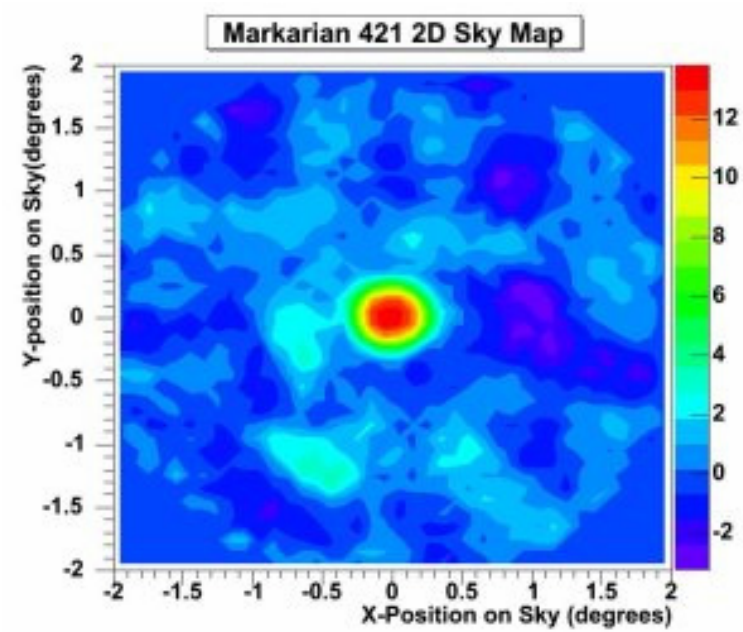


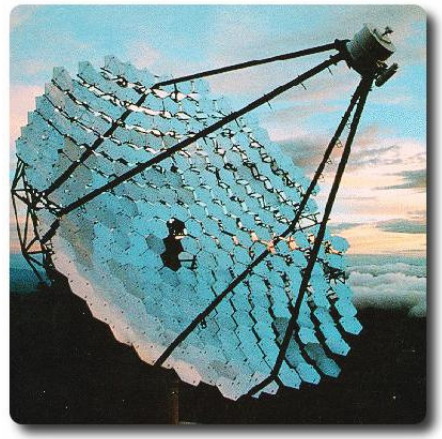
Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

наблюдения удаленных источников в ТэВ-диапазоне (точнее, >100 ГэВ)

самый первый – Mrk 421 (z=0.031)





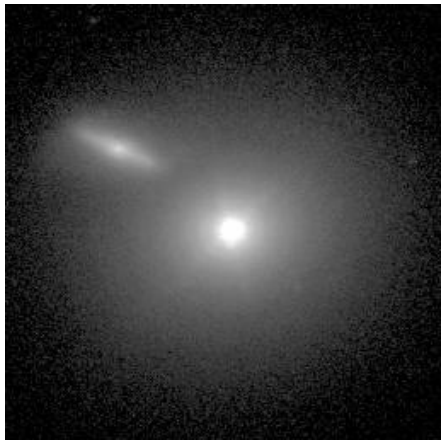
WHIPPLE 1992

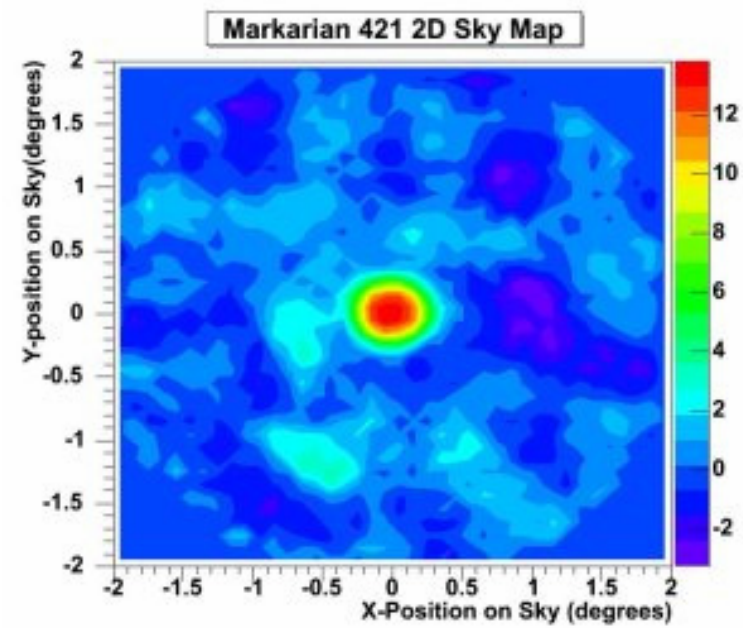
Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

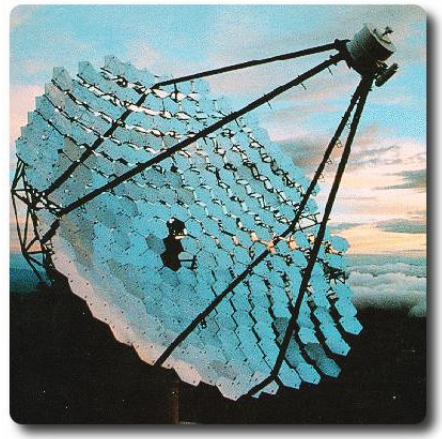
IR-TeV кризис.

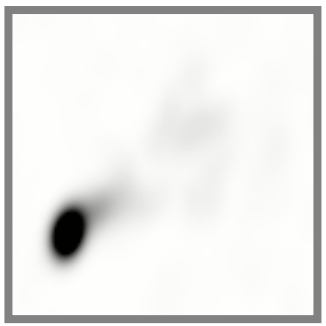
наблюдения удаленных источников в ТэВ-диапазоне (точнее, >100 ГэВ)

самый первый – Mrk 421 (z=0.031)









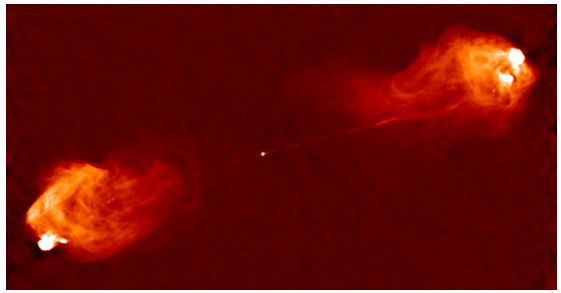
WHIPPLE 1992

Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

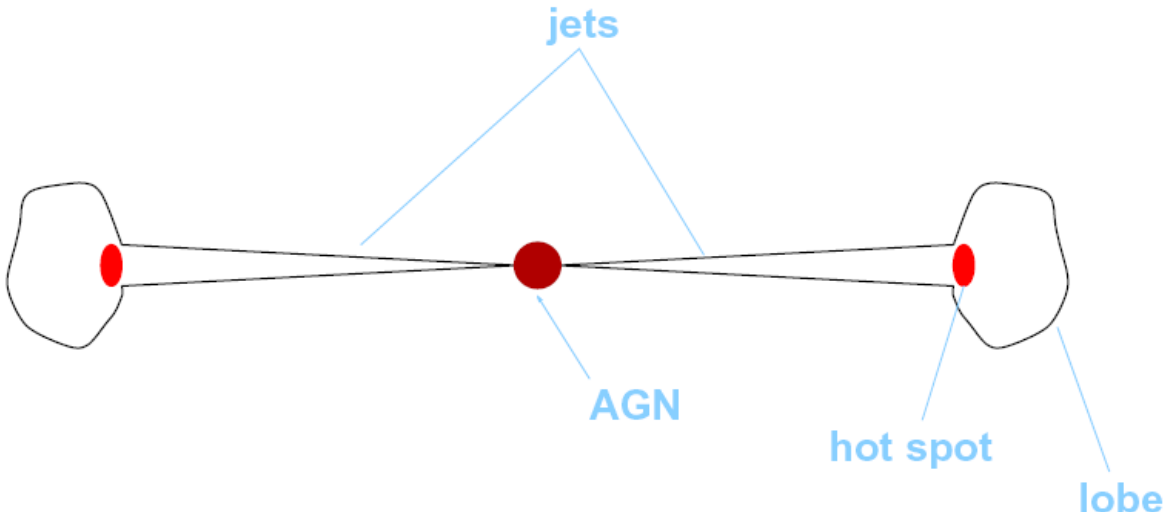
IR-TeV кризис.

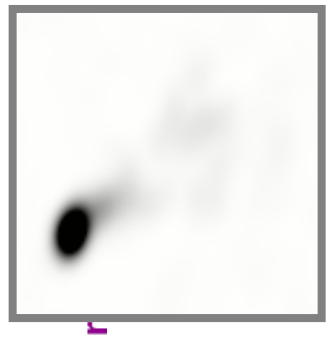
наблюдения удаленных источников в ТэВ-диапазоне (точнее, >100 ГэВ)

ТИП ИСТОЧНИКОВ: БЛАЗАРЫ



Radio Galaxy





Blazar

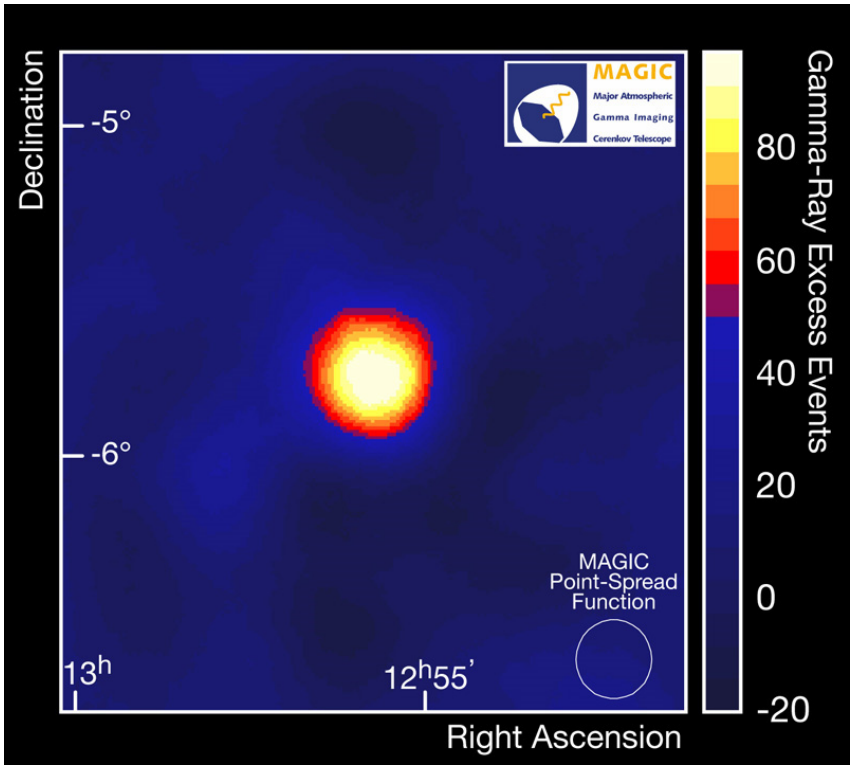
Блазары – активные галактики, струи которых направлены на наблюдателя

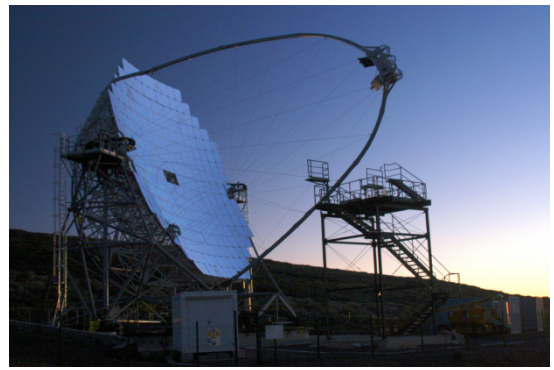
Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

наблюдения удаленных источников в ТэВ-диапазоне (точнее, >100 ГэВ)

самый далекий – 3C 279 (z=0.536)





MAGIC 2007

Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

наблюдения удаленных источников в ТэВ-диапазоне (точнее, >100 ГэВ)

3C 66A (z=0.444)

Astronomy Reports, Vol. 46, No. 8, 2002, pp. 684–698. Translated from Astronomicheskiĭ Zhurnal, Vol. 7

Observations of the Flux of Very-High-Energy Gamma Rays from the Blazar 3C 66A

A. A. Stepanyan, Yu. I. Neshpor, N. A. Andreeva, O. R. Kalekin, N. A. Zhogolev, V. P. Fomin, and V. G. Shitov

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchnyĭ, Crimea, Ukraine

Received November 15, 2001; in final form December 27, 2001

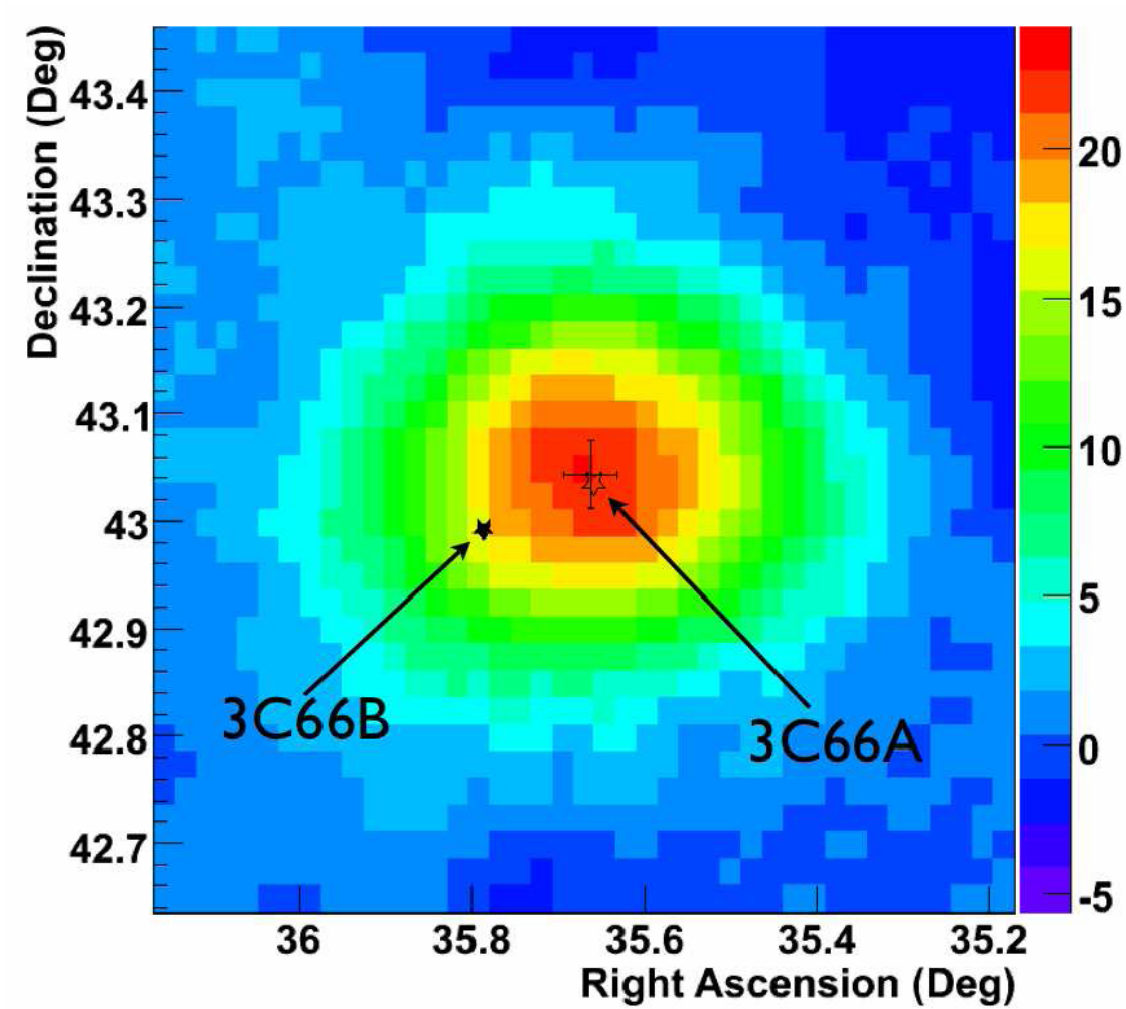
Abstract—Measurements of the flux of very-high-energy (>1 TeV) gamma rays from the blazar 3C 66A obtained over four years are presented. The mean flux over the four-year period was $(2.8 \pm 0.4) \times 10^{-11}$ cm^{-2} s^{-1}. There is a correlation between the season-averaged flux of very-high-energy gamma rays and the observed optical radiation. © *2002 MAIK "Nauka/Interperiodica"*.

КРАО 2001

Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

3C 66A (z=0.444)



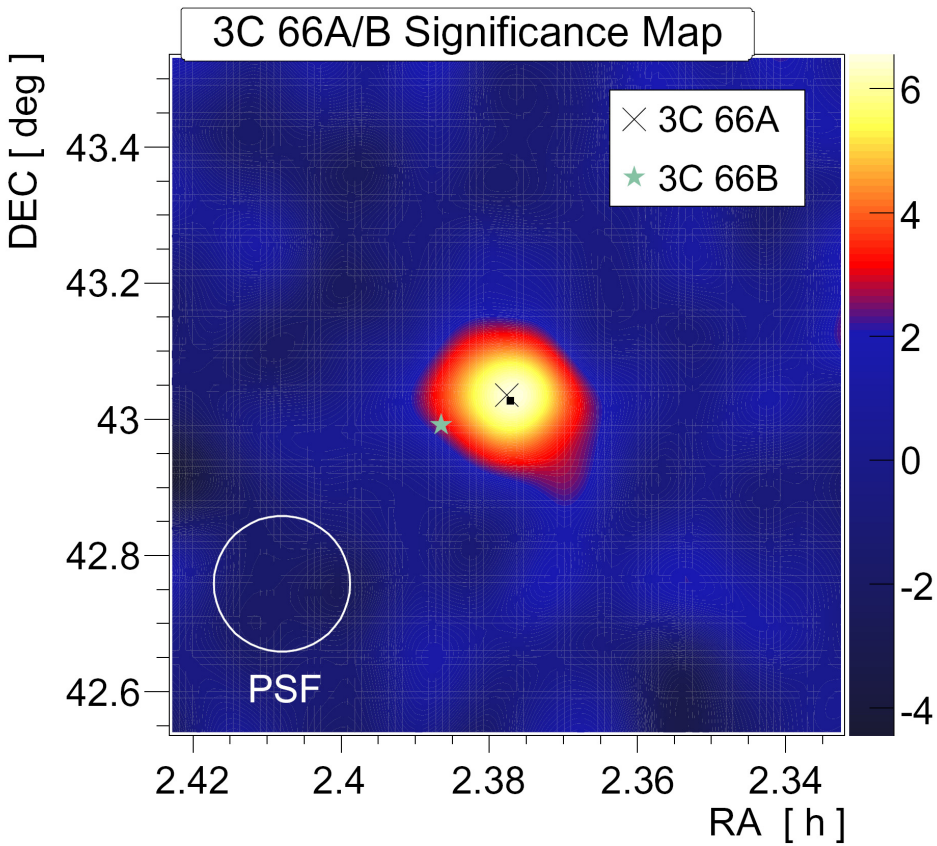
VERITAS 2009

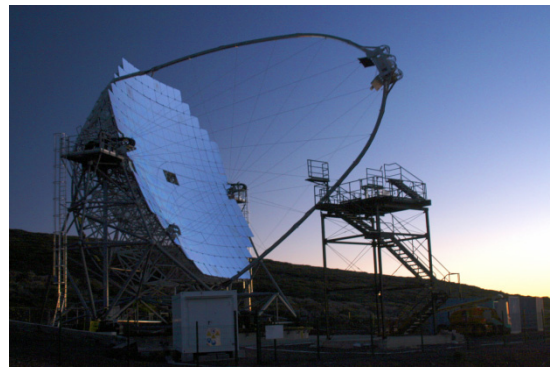
Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

наблюдения удаленных источников в ТэВ-диапазоне (точнее, >100 ГэВ)

3C 66A (z=0.444)





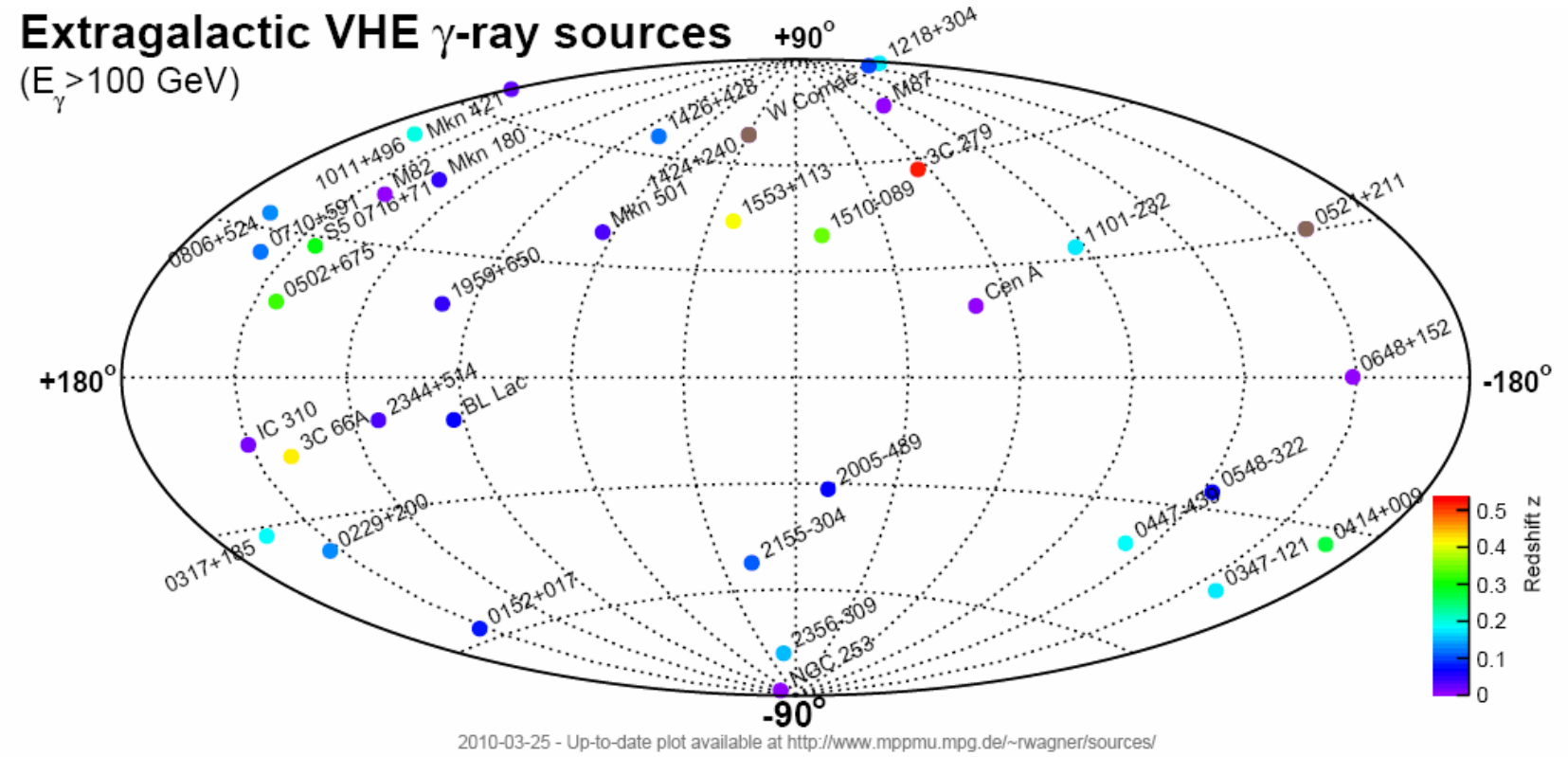
MAGIC 2010

Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

наблюдения удаленных источников в ТэВ-диапазоне (точнее, >100 ГэВ)

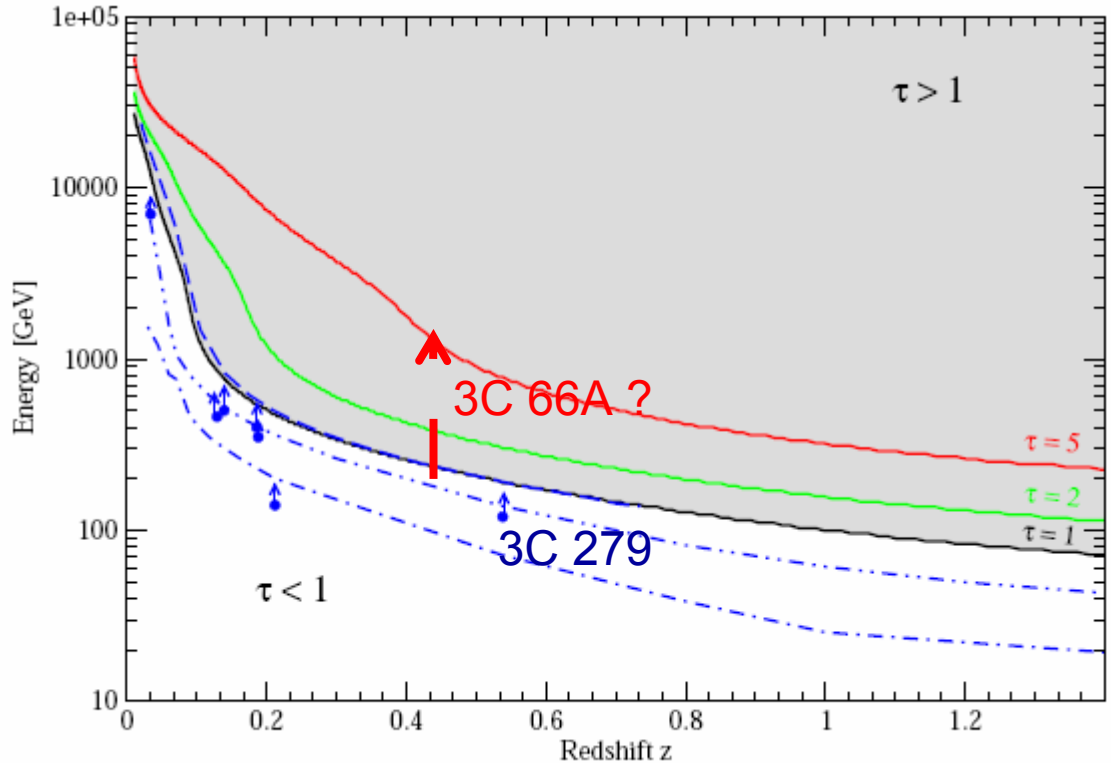
38 внегалактических источников, 20 имеют *z>0.1*, 8 имеют *z>0.3*



Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

энергия фотонов



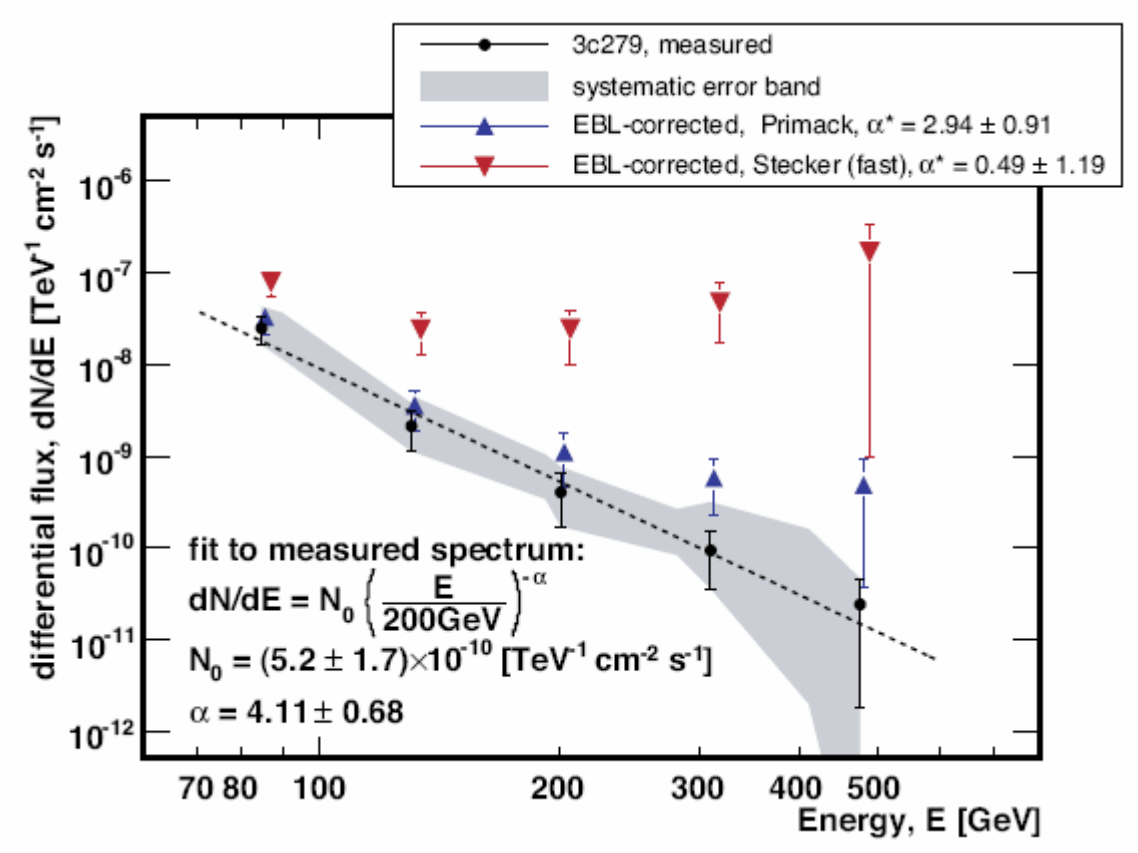
расстояние

оптическая толща Вселенной + источники

Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

спектры излучения в источнике должны загибаться вверх!

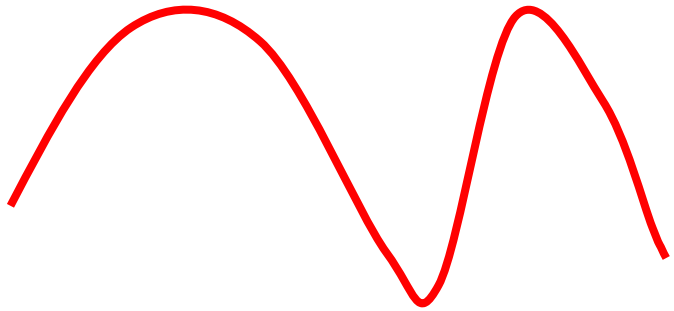


Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

спектры излучения блазаров неплохо изучены:

синхротронный пик ICS-пик



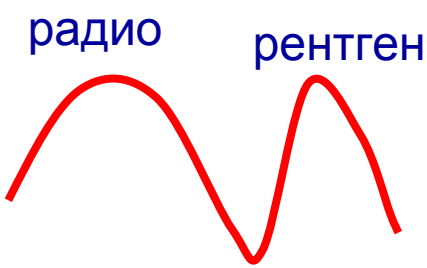
обратное комптоновское рассеяние
тех же самых синхротронных фотонов на реликтовом излучении

⇨ два пика связаны между собой

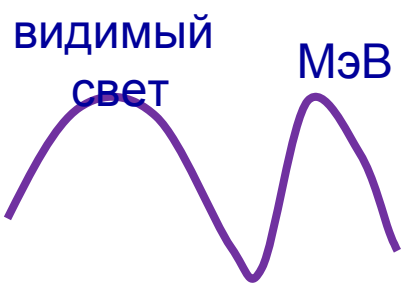
Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

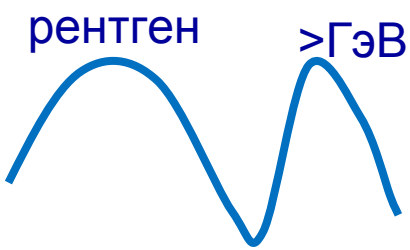
спектры излучения блазаров неплохо изучены:
последовательность блазаров…



FSRQ –
радиояркие квазары с плоским спектром



LBL – лацертиды с низкоэнергетическим пиком

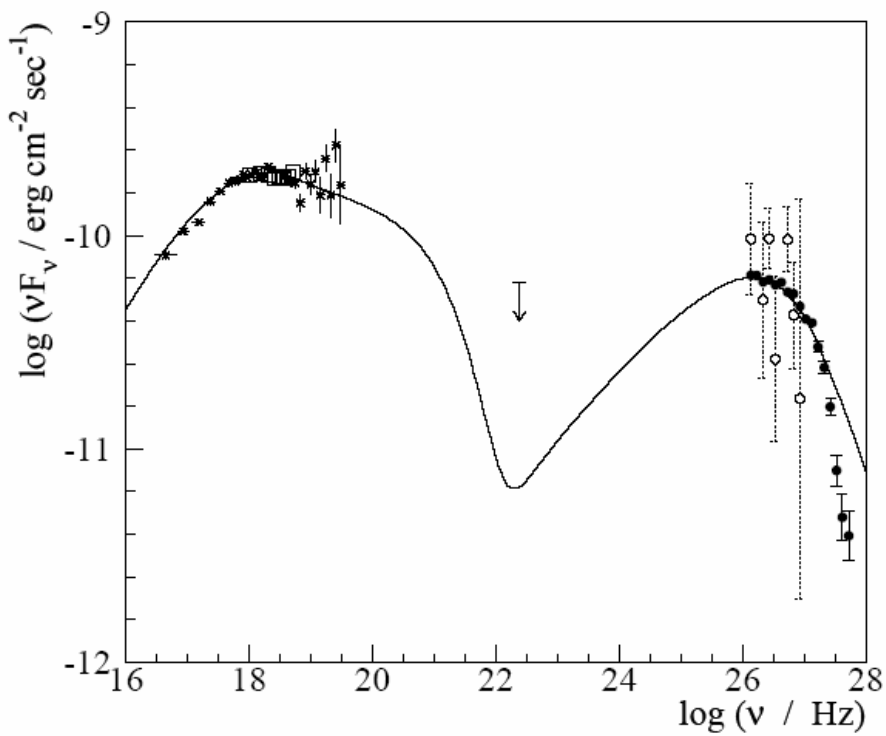


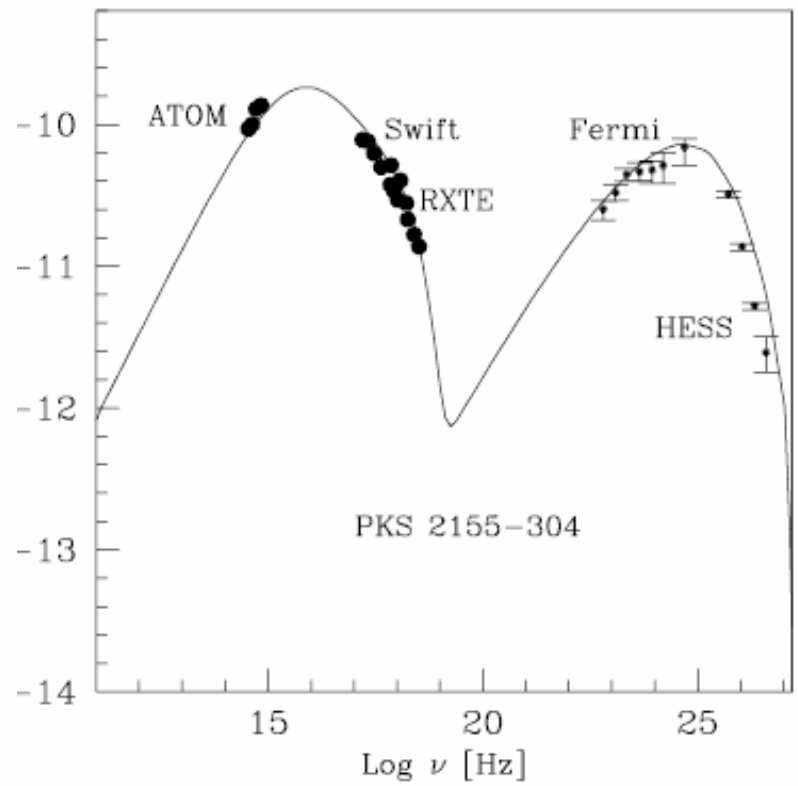
HBL – лацертиды с
высокоэнергетическим пиком

Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

спектры излучения блазаров неплохо изучены:
последовательность блазаров…





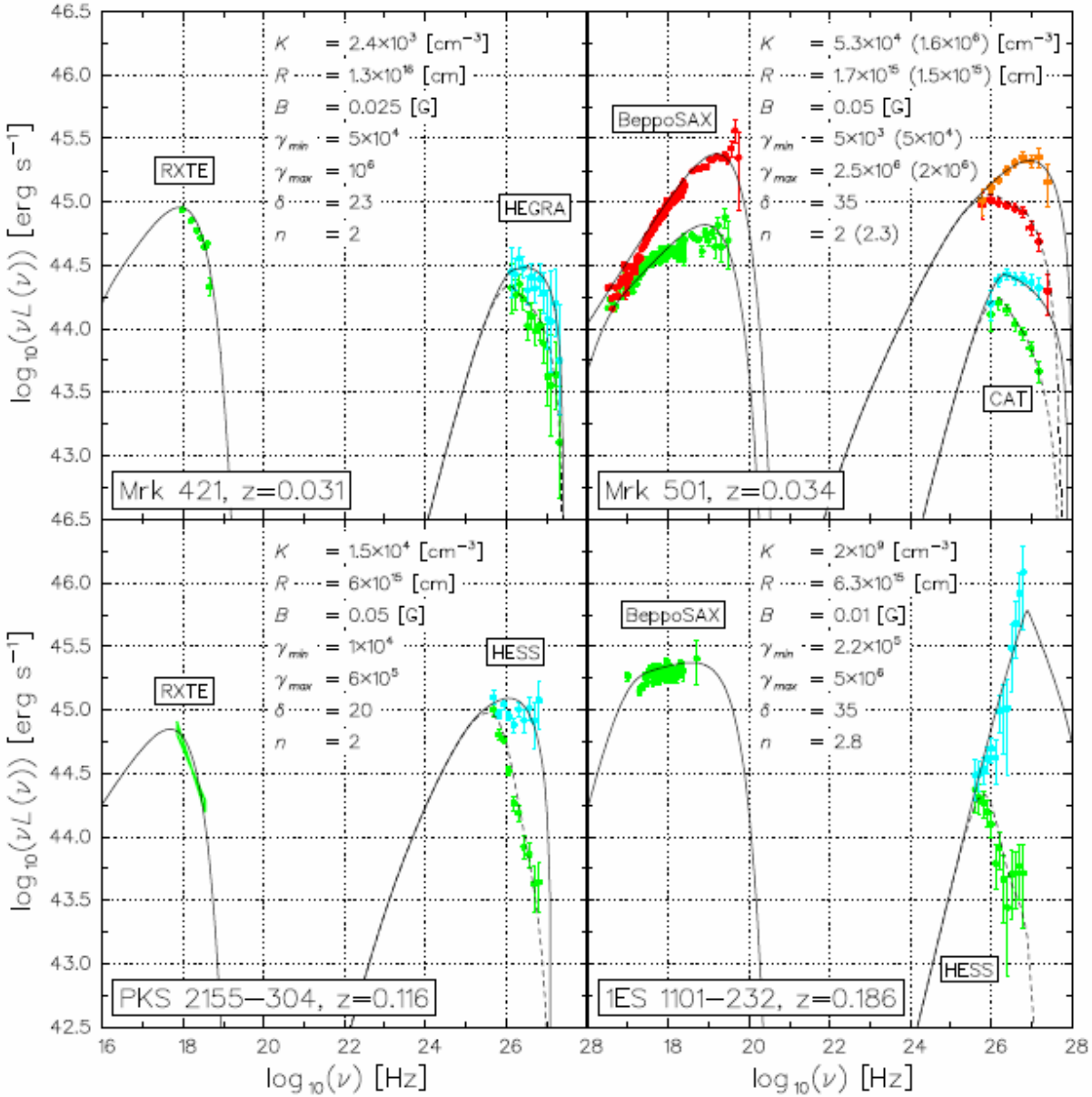
Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

требуемый загиб зависит от расстояния до источника, а не от типа!

(HBL, LBL, FSRQ)

выглядит подозрительно…



Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

предложенные объяснения:

- непрозрачность:
  - блазары на самом деле на близких расстояниях
  - ТэВ-фотоны – вторичные в результате каскада
    (практически нулевое межгалактическое магнитное поле)
  - поглощение в источнике («выедание» спектра)

- прозрачность:
  - нарушение Лоренц-инвариантности
    (модификация сечений электромагнитных процессов)
  - осцилляции фотонов в частицы, не взаимодействующие
    с фоновым излучением

(НЕ)ПРОЗРАЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

1. Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

2. Полезные выводы из непрозрачности Вселенной.

Ограничения на излучение сверхвысоких энергий.

3. Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

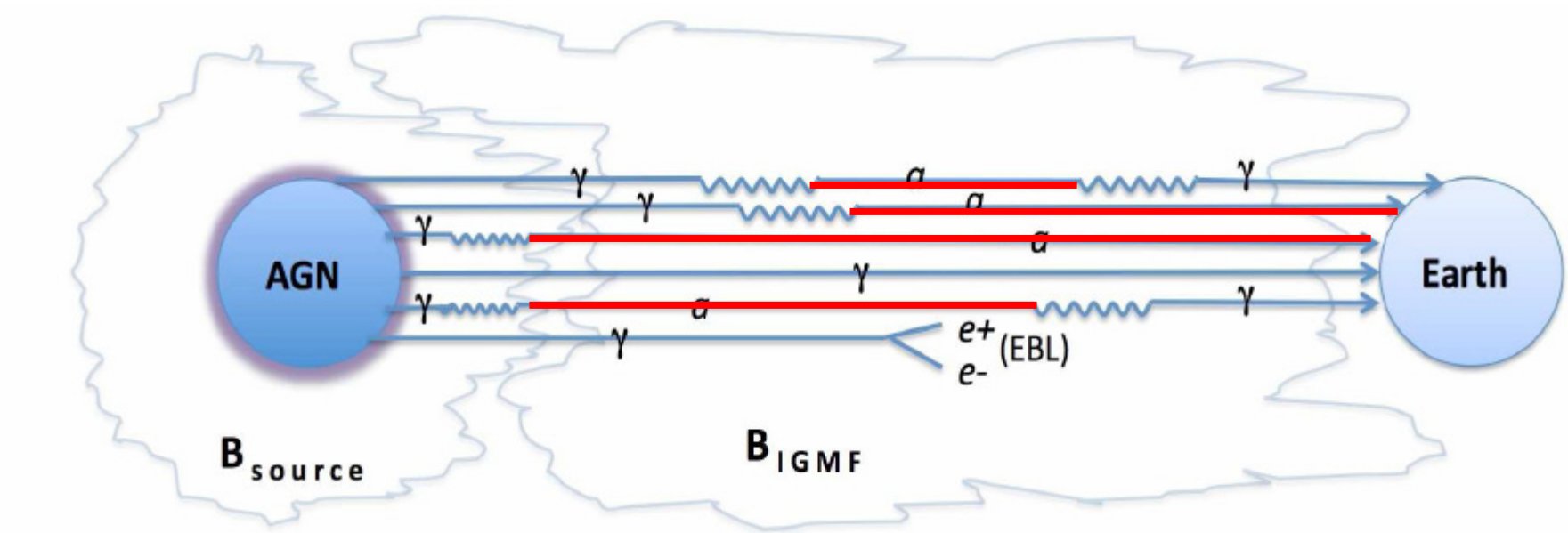
IR/TeV - кризис.

4. Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

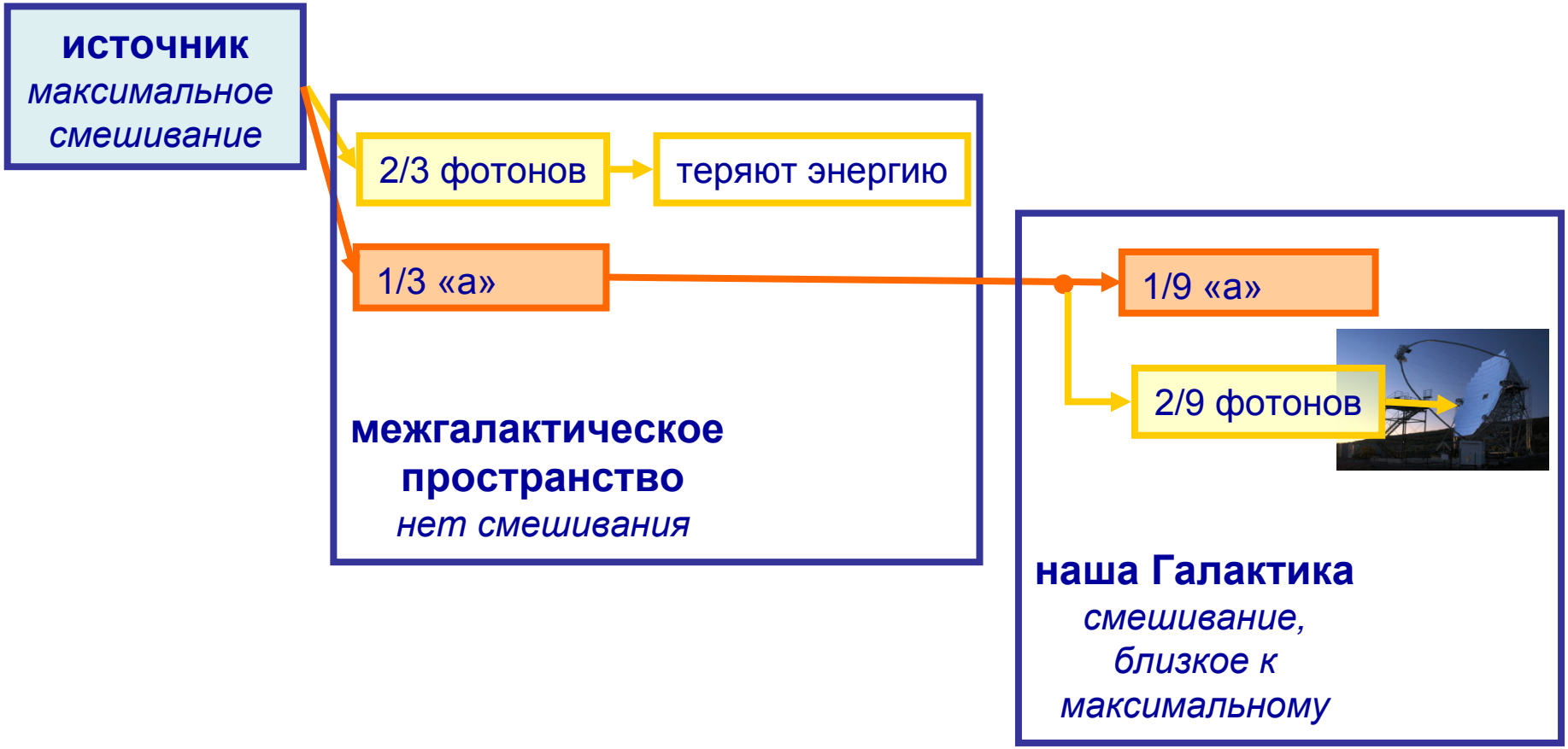
Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.



Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.



Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

нужен «аксион»!

M~10^{10} ГэВ, m~10^{-9} эВ … 10^{-7} эВ

- параметры в разрешенной области
- одни и те же параметры - решение ряда астрофизических проблем:
  - «infrared-TeV crisis» (ТэВ фотоны от далеких блазаров)
  - нейтральные частицы сверхвысоких энергий от лацертид
  - функция светимости активных галактик
  - функция светимости белых карликов?
  - пульсирующее излучение при 20-60 ГэВ от пульсара Крабовидной туманности?
  - корреляции в ориентации плоскостей поляризации квазаров?

Выводы

(НЕ)ПРОЗРАЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

1. Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

2. Полезные в **селенной.**

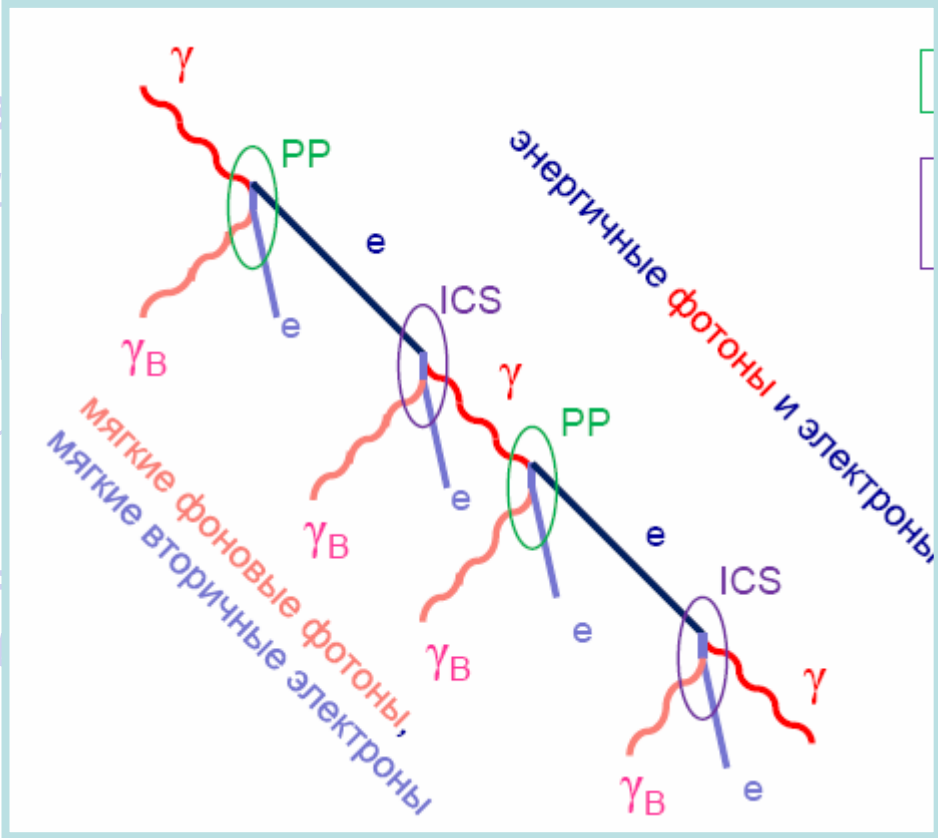
Ограничени *энергий.*

3. Возможно, **ажется!**

IR/TeV - кри

4. Как сделать

Осцилляци *легкие частицы.*



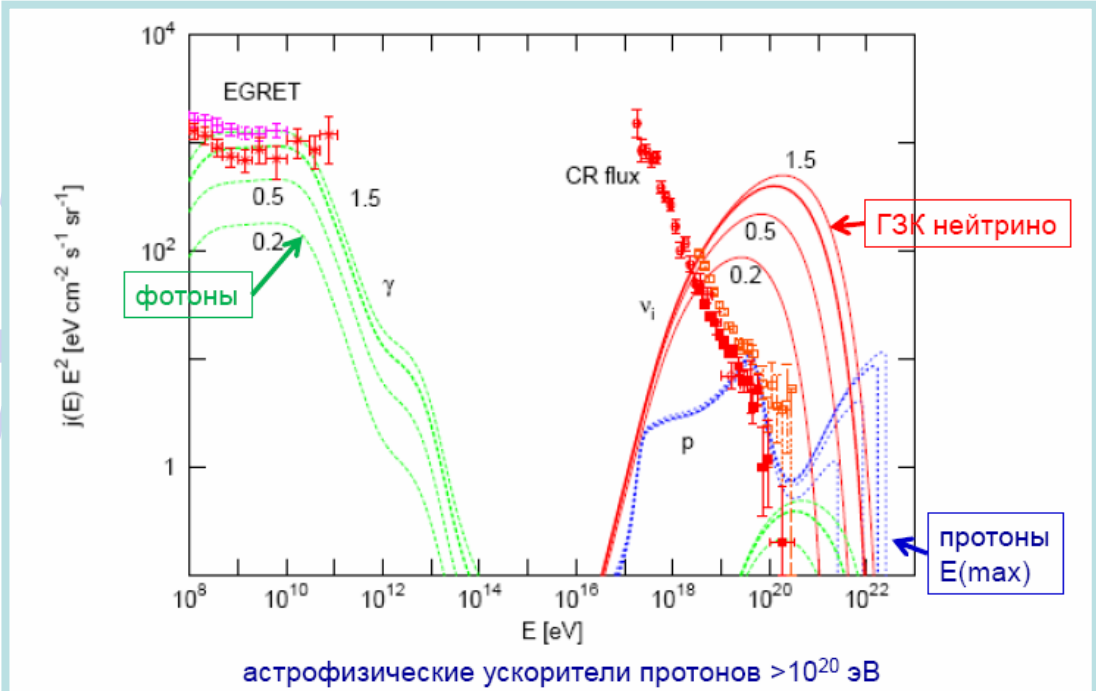
(НЕ)ПРОЗРАЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

1. **Почему Вселенная непрозрачна?**
   Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

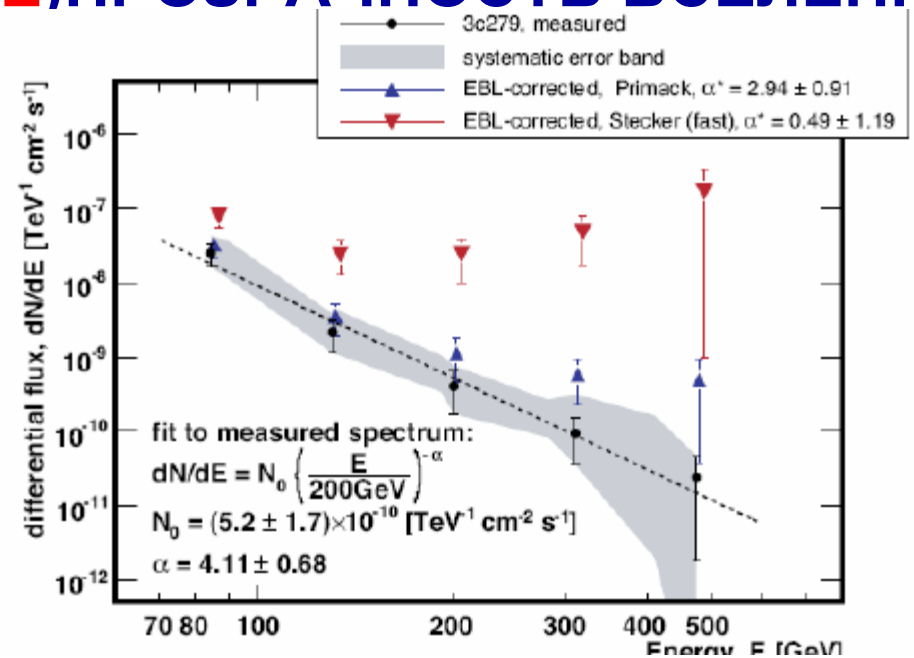
2. **Полезные выводы из непрозрачности Вселенной.**
   Ограничения на излучение сверхвысоких энергий.

3. **Возможно, ся!**
   IR/TeV - кр

4. **Как сделат**
   Осцилляци ие
   частицы.



(НЕ)ПРОЗРАЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ



1. Почему Е
   Электрс ом излучении.

2. Полезны ı Вселенной.
   Огранич ıх энергий.

3. Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR/TeV - кризис.

4. Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

(НЕ)ПРОЗРАЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

1. Почему Вселенная непрозрачна?

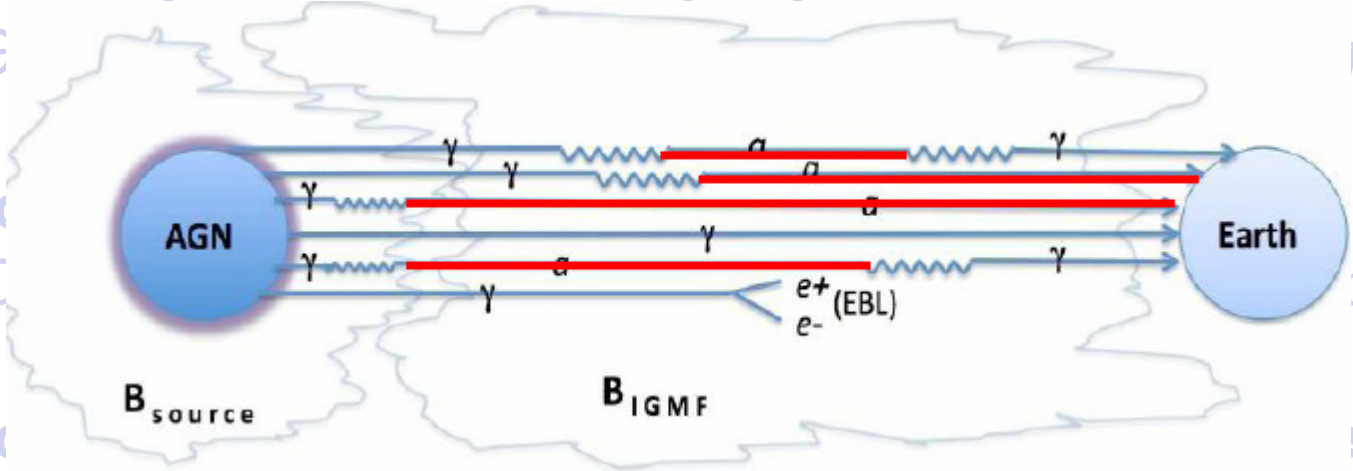
Э… …учении.

2. По… …енной.

С… …огий.

3. Во… …тся!

IR/TeV - кризис.



4. Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

(НЕ)ПРОЗРАЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

1. Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

2. Полезные выводы из непрозрачности Вселенной.

Ограничения на излучение сверхвысоких энергий.

3. Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR/TeV - кризис.

4. Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

Дополнительно

Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

$$\boxed{\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial^\mu \psi \partial_\mu \psi - m^2 \psi^2) - \frac{1}{4}\frac{\psi}{M} F_{\mu\nu}\widetilde{F}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}}$$

ψ

псевдоскалярное поле (аксионоподобная частица)

$F_{\mu\nu}$

тензор напряжений электромагнитного поля

$\widetilde{F}_{\mu\nu} = \epsilon_{\mu\nu\rho\lambda} F_{\rho\lambda}$

дуальный тензор

Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

$$A(\mathbf{x},t) \quad \mapsto \quad A(\mathbf{x})\mathrm{e}^{-i\omega t}, \quad \omega^2+\partial_z^2 \quad \mapsto \quad 2\omega\left(\omega - i\partial_z\right)$$

$$\Downarrow$$

$$\left(i\partial_z + \omega + \mathcal{M}\right)\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ a \end{pmatrix} = 0$$

где $$\mathcal{M} \equiv \begin{pmatrix} \Delta_p & 0 & \Delta_{Mx} \\ 0 & \Delta_p & \Delta_{My} \\ \Delta_{Mx} & \Delta_{My} & \Delta_m \end{pmatrix}$$

Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

$$\Delta_p = \frac{\omega_p^2}{2\omega}$$

плазменная частота

$$\omega_p^2 = 4\pi\alpha\frac{n_e}{m_e}$$

$$\mathcal{M} \equiv \begin{pmatrix} \Delta_p & 0 & \Delta_{Mx} \\ 0 & \Delta_p & \Delta_{My} \\ \Delta_{Mx} & \Delta_{My} & \Delta_m \end{pmatrix}$$

$$\Delta_M = \frac{B}{2M}$$

$$\Delta_m = \frac{m^2}{2\omega}$$

Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

вероятность осцилляций (для постоянных B, n_e):

$$P = \frac{4\Delta_M^2}{\left(\Delta_p - \Delta_m\right)^2 + 4\Delta_M^2} \sin^2\left(\frac{1}{2} L \Delta_{\rm osc}\right)$$

где

$$\Delta_{\rm osc}^2 = \left(\Delta_p - \Delta_m\right)^2 + 4\Delta_M^2$$

Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

условия максимального смешивания:

$$\Delta_m \ll 2\Delta_M \quad \Rightarrow \quad \omega \gg 70\ \text{эВ} \left(\frac{m}{10^{-9}\ \text{эВ}}\right)^2 \left(\frac{B}{\text{Гс}}\right)^{-1} \left(\frac{M}{10^{10}\ \text{ГэВ}}\right)$$

$$\Delta_p \ll 2\Delta_M \quad \Rightarrow \quad n_e \ll 10^{20}\ \text{см}^{-3} \left(\frac{\omega}{10^{19}\ \text{эВ}}\right) \left(\frac{B}{\text{Гс}}\right)$$

$$L \gtrsim \frac{\pi}{\Delta_{\rm osc}} \quad \Rightarrow \quad L \gtrsim 5.8 \times 10^{-3}\ \text{пк} \left(\frac{B}{\text{Гс}}\right)^{-1} \left(\frac{M}{10^{10}\ \text{ГэВ}}\right)$$

Как сделать Вселенную попрозрачнее?

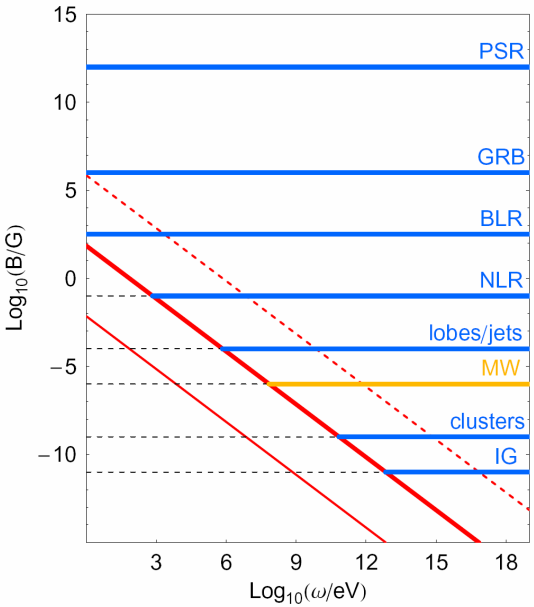
Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

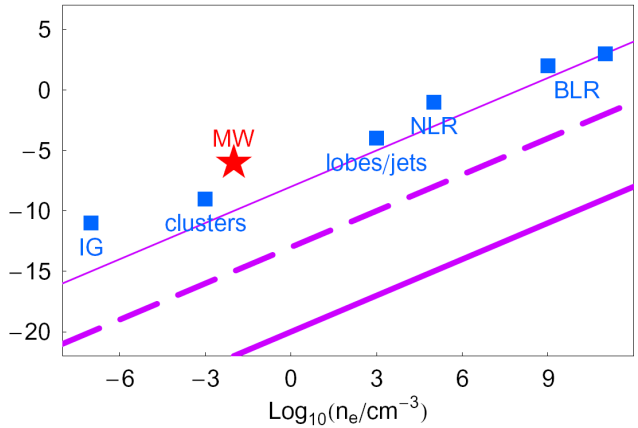
условия максимального смешивания:

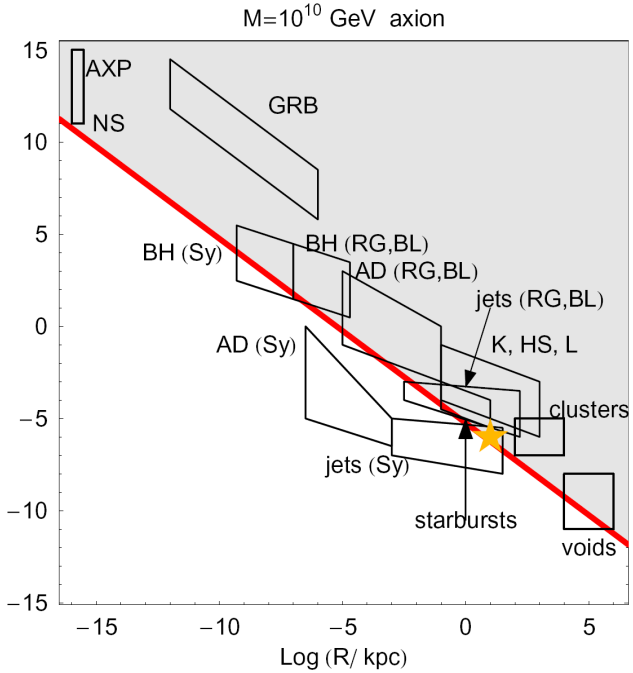
$$\Delta_m \ll 2\Delta_M$$

$$\Delta_p \ll 2\Delta_M$$

$$L \gtrsim \frac{\pi}{\Delta_{\rm osc}}$$







Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

M~10^{10} ГэВ, m~10^{-9} эВ … 10^{-7} эВ

нужен «аксион»!