

Гамма-астрономия и «новая физика»

*Сергей Троицкий
(ИЯИ РАН)*

ВККЛ-2020, 29 сентября



Часть оригинальных результатов получена совместно с
А. Корочкиным, М. Либановым, Г. Рубцовым,
Д. Горбуновым, П. Тиняковым, И. Ткачевым,
М. Fairbairn, Т. Рашбой,
частично - при поддержке РФФ



Российский
научный
фонд



Темы разговора

гамма-астрономия:

- ~~МэВ~~
- Fermi LAT
- черенковские телескопы
- ШАЛ

«новая физика»:

- ~~астрофизика~~
 - физика частиц
 - космология
- } нерешенные задачи



План

1. Рождение пар и каскады:

- нарушение Лоренц-инвариантности
- аксионоподобные частицы
- первичные магнитные поля
- постоянная Хаббла

2. Особенности в спектрах:

- аннигиляция и распады частиц темной материи
- аксионоподобные частицы
- Солнце

3. Что физикам нужно от гамма-астрономов?



План

1. Рождение пар и каскады:

- нарушение Лоренц-инвариантности
- аксионоподобные частицы
- первичные магнитные поля
- постоянная Хаббла

2. Особенности в спектрах:

- аннигиляция и распады частиц темной материи
- аксионоподобные частицы
- Солнце

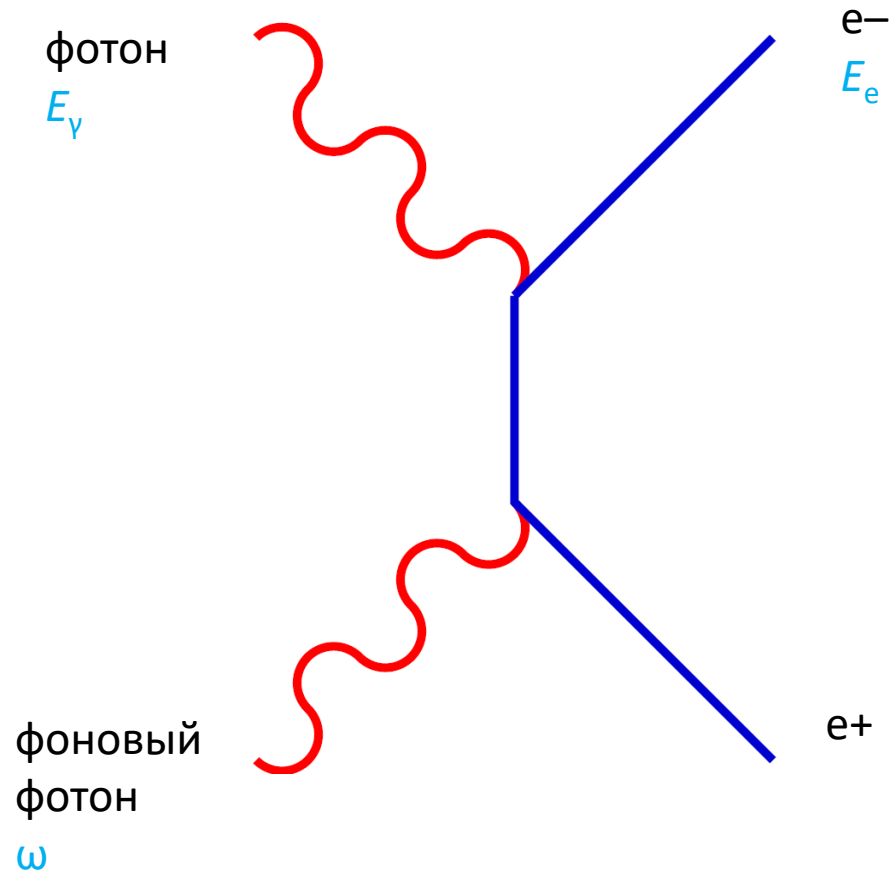
3. Что физикам нужно от гамма-астрономов?



Рождение пар

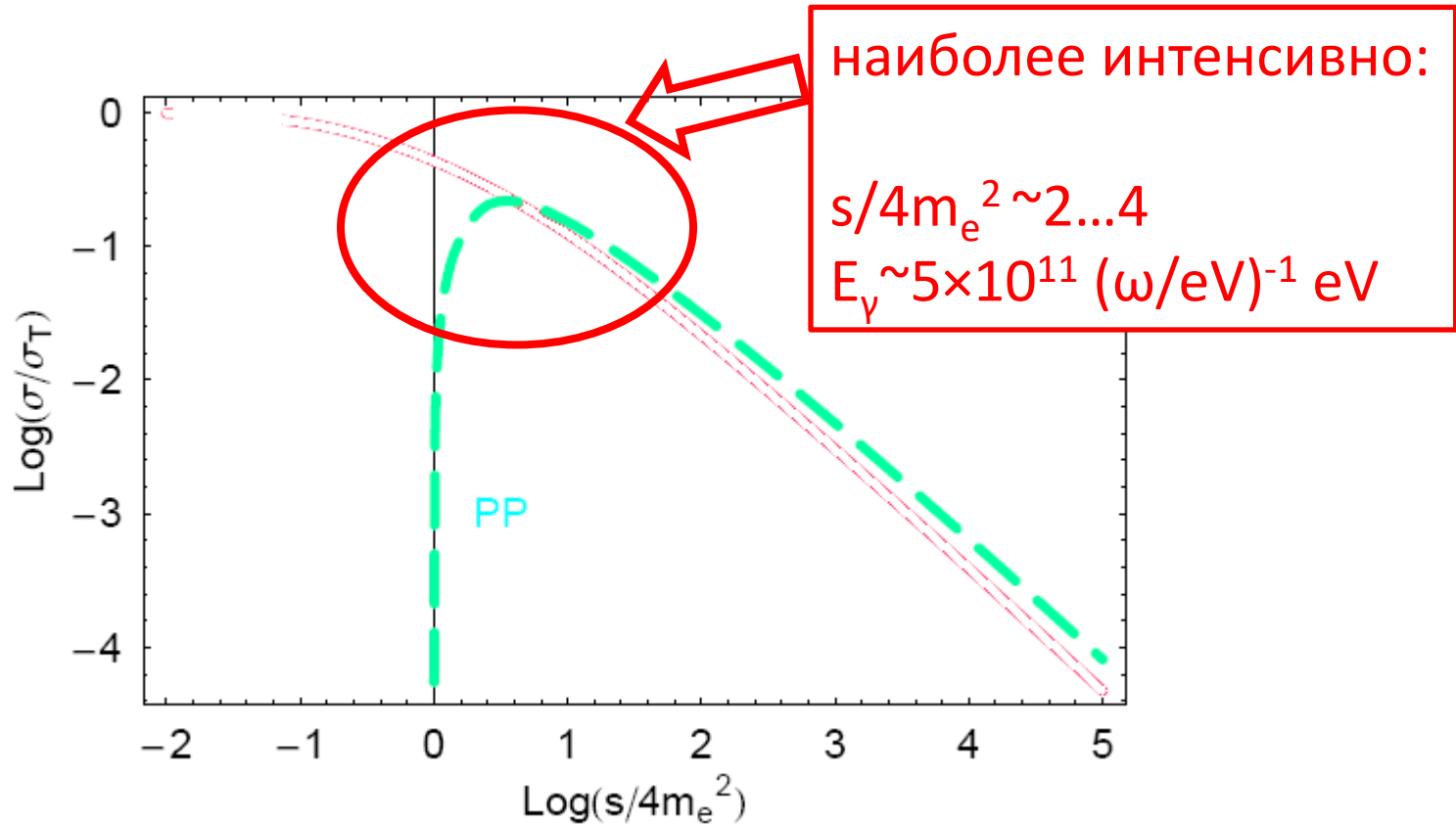
энергичными фотонами на фоновом излучении

Nikishov 1962

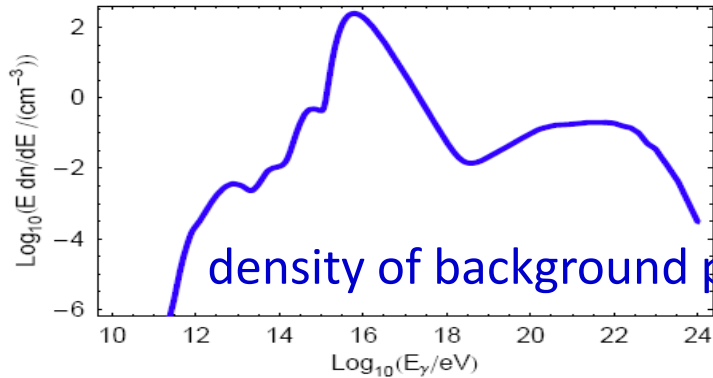


Рождение пар

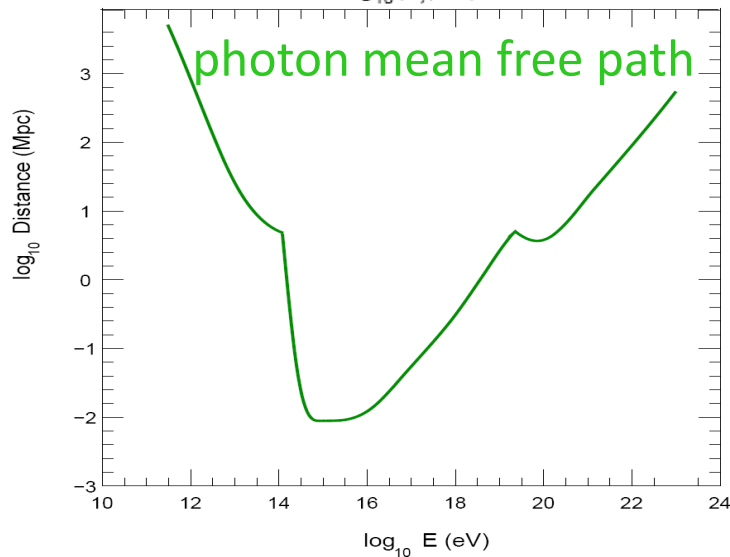
сечение рождения пар (PP):



Рождение пар



density of background photons

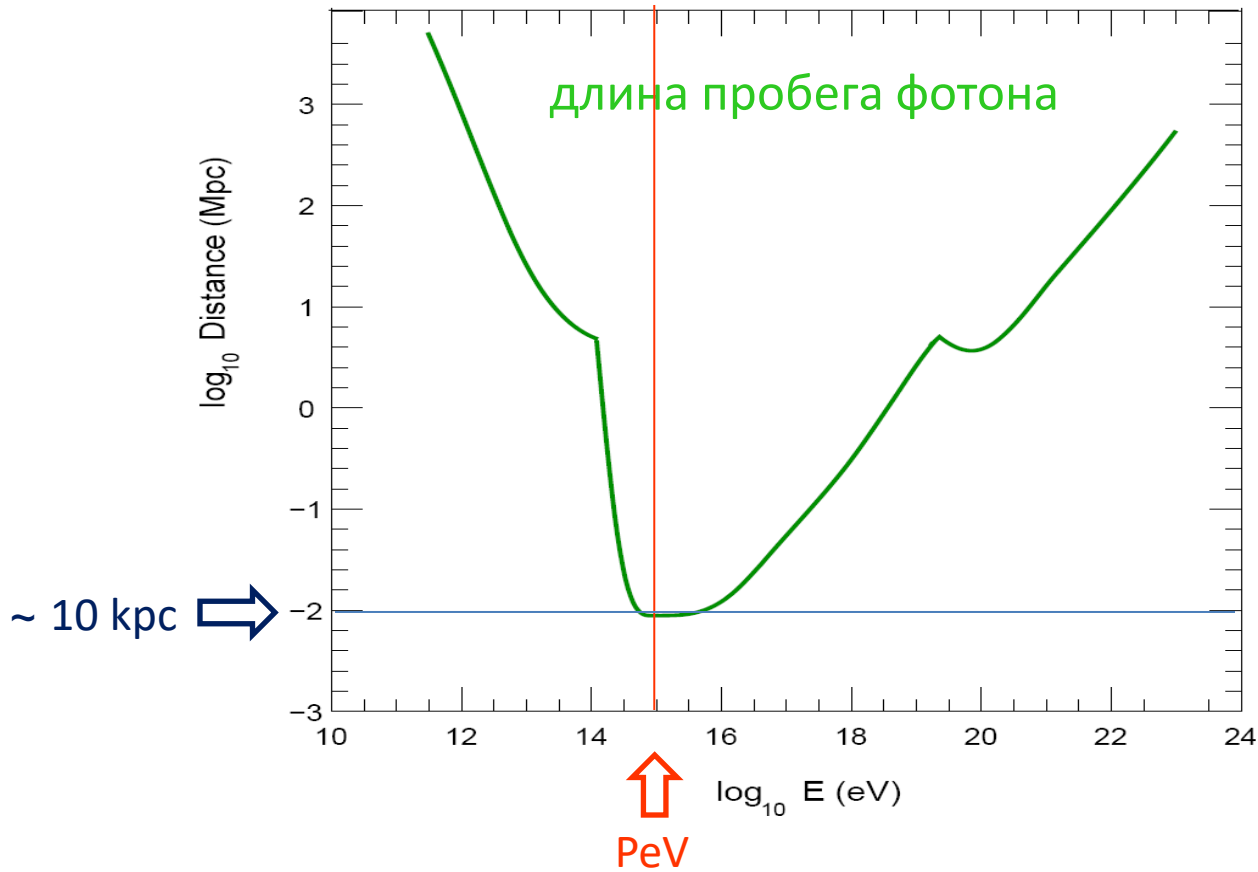


photon mean free path

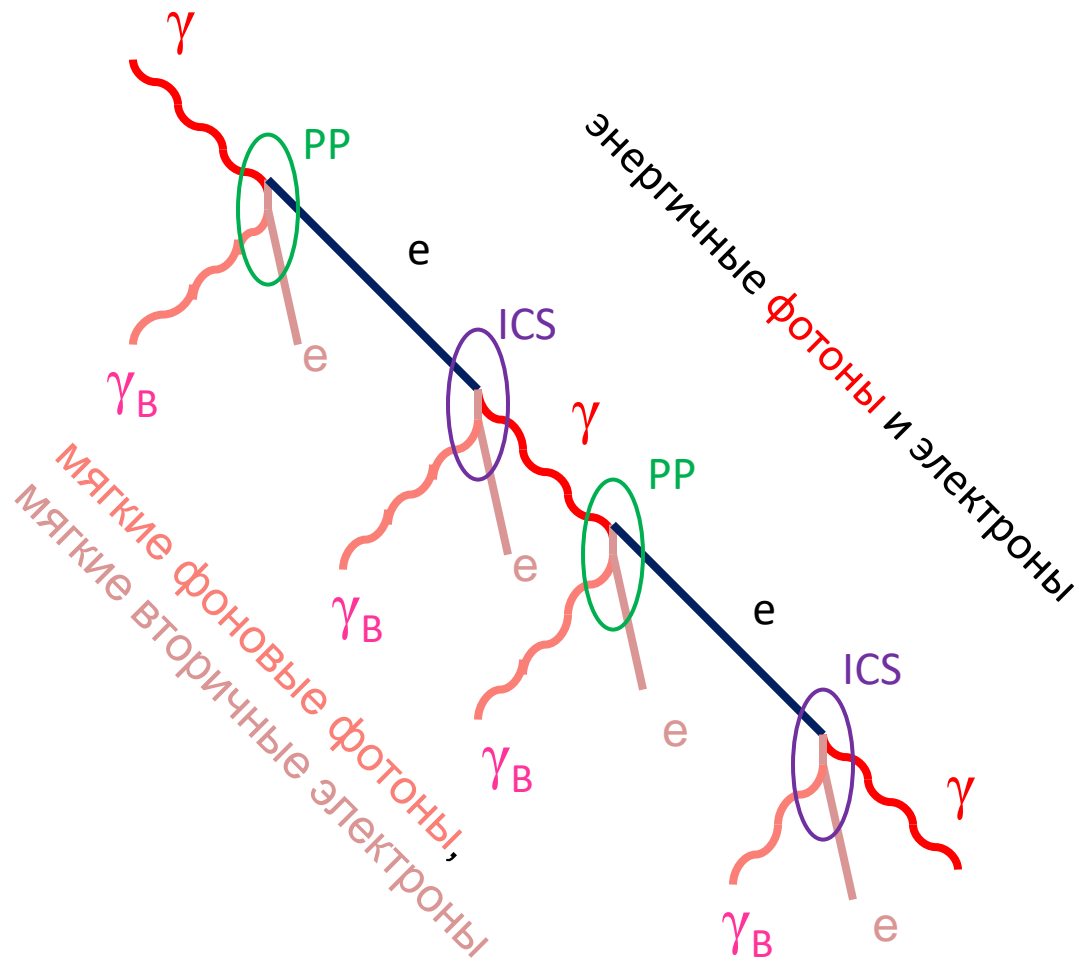
$$E_{\gamma} \sim 5 \times 10^{11} (\omega/\text{eV})^{-1} \text{ eV}$$



Рождение пар



Рождение пар и электромагнитные каскады



PP = рождение пар

ICS = обратное комптоновское
рассеяние



План

1. Рождение пар и каскады:

- нарушение Лоренц-инвариантности
- аксионоподобные частицы
- первичные магнитные поля
- постоянная Хаббла

2. Особенности в спектрах:

- аннигиляция и распады частиц темной материи
- аксионоподобные частицы
- Солнце

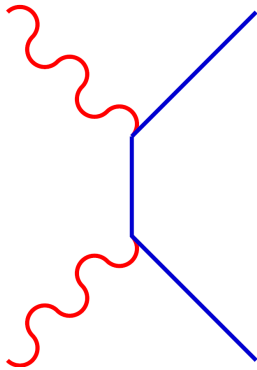
3. Что физикам нужно от гамма-астрономов?



Нарушение Лоренц-инвариантности

- феноменологический подход
- спонтанное нарушение Лоренц-инвариантности?
- модели квантовой гравитации?

изменение дисперсионных соотношений



$$E_a^2 - p_a^2 = m_a^2 \pm |\delta_{a,n}| p_a^{n+2}$$



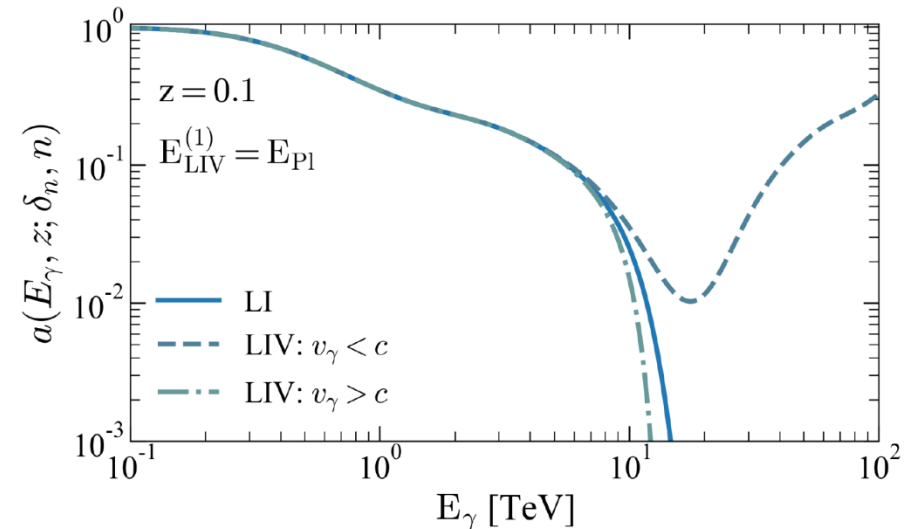
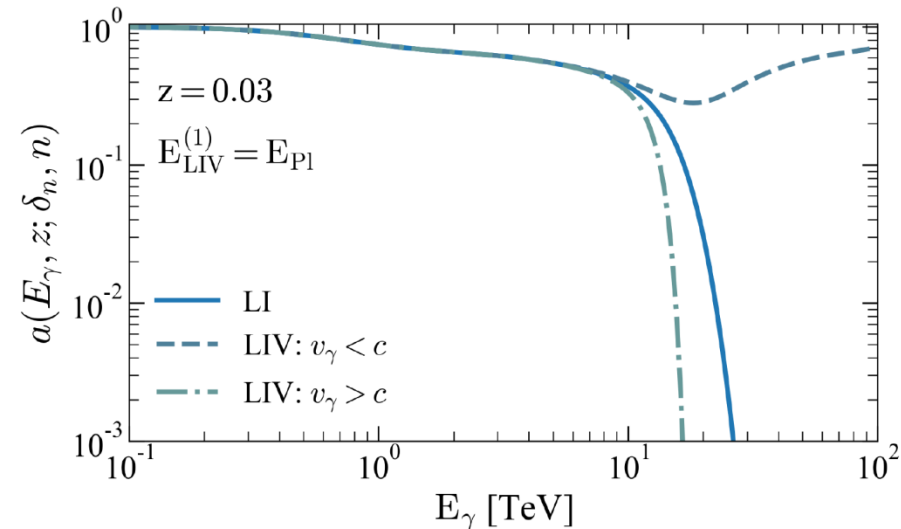
$$E_{\gamma b}^{\text{th}} = \frac{m_e^2}{E_\gamma} - \frac{1}{4} \delta_{\gamma,n} E_\gamma^{n+1}$$

сдвиг пороговой энергии рождения пар



Нарушение Лоренц-инвариантности

- сдвиг порога рождения пар



разный эффект для разных энергий, расстояний до источников,
моделей Лоренц-нарушения

Lang et al. 2019, 2020

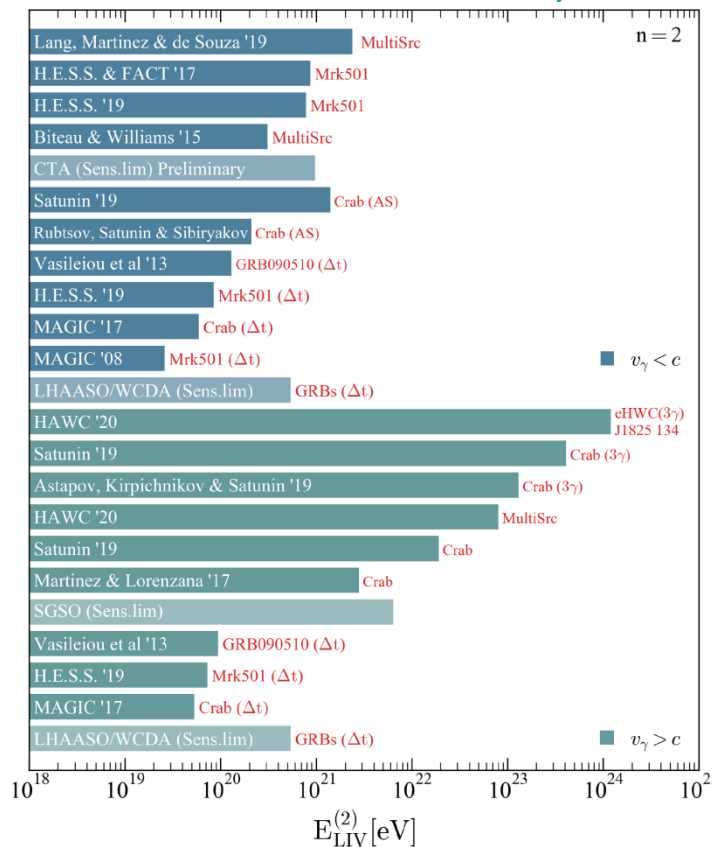
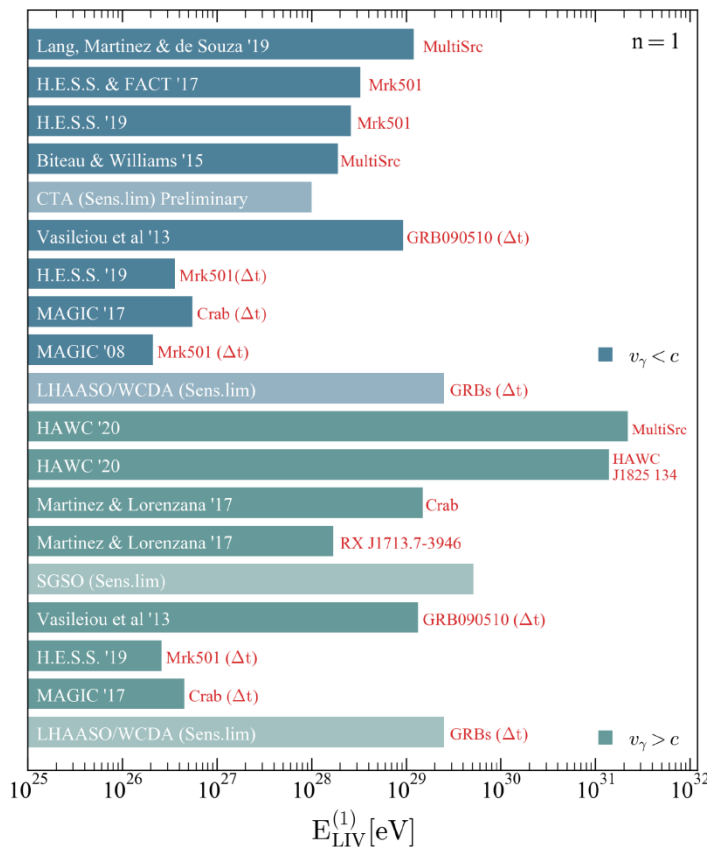


Нарушение Лоренц-инвариантности

- разрешенные процессы распада фотона
- «одновременность» прихода фотонов разных энергий (но...)
- подавление развития атмосферных ливней!

Vankov, Stanev 2002

Rubtsov, Satunin, Sibiryakov 2012, 2017



Lang et al. 2020



План

1. Рождение пар и каскады:

- нарушение Лоренц-инвариантности
- **аксионоподобные частицы**
- первичные магнитные поля
- постоянная Хаббла

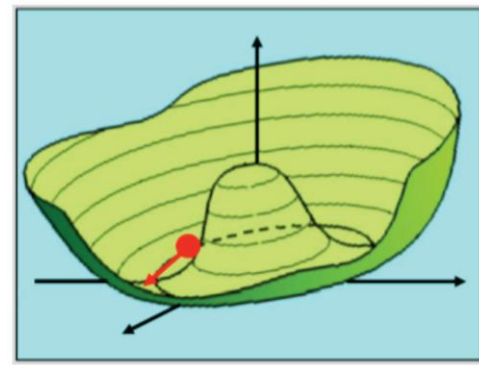
2. Особенности в спектрах:

- аннигиляция и распады частиц темной материи
- аксионоподобные частицы
- Солнце

3. Что физикам нужно от гамма-астрономов?



Axion-like particles (ALPs)

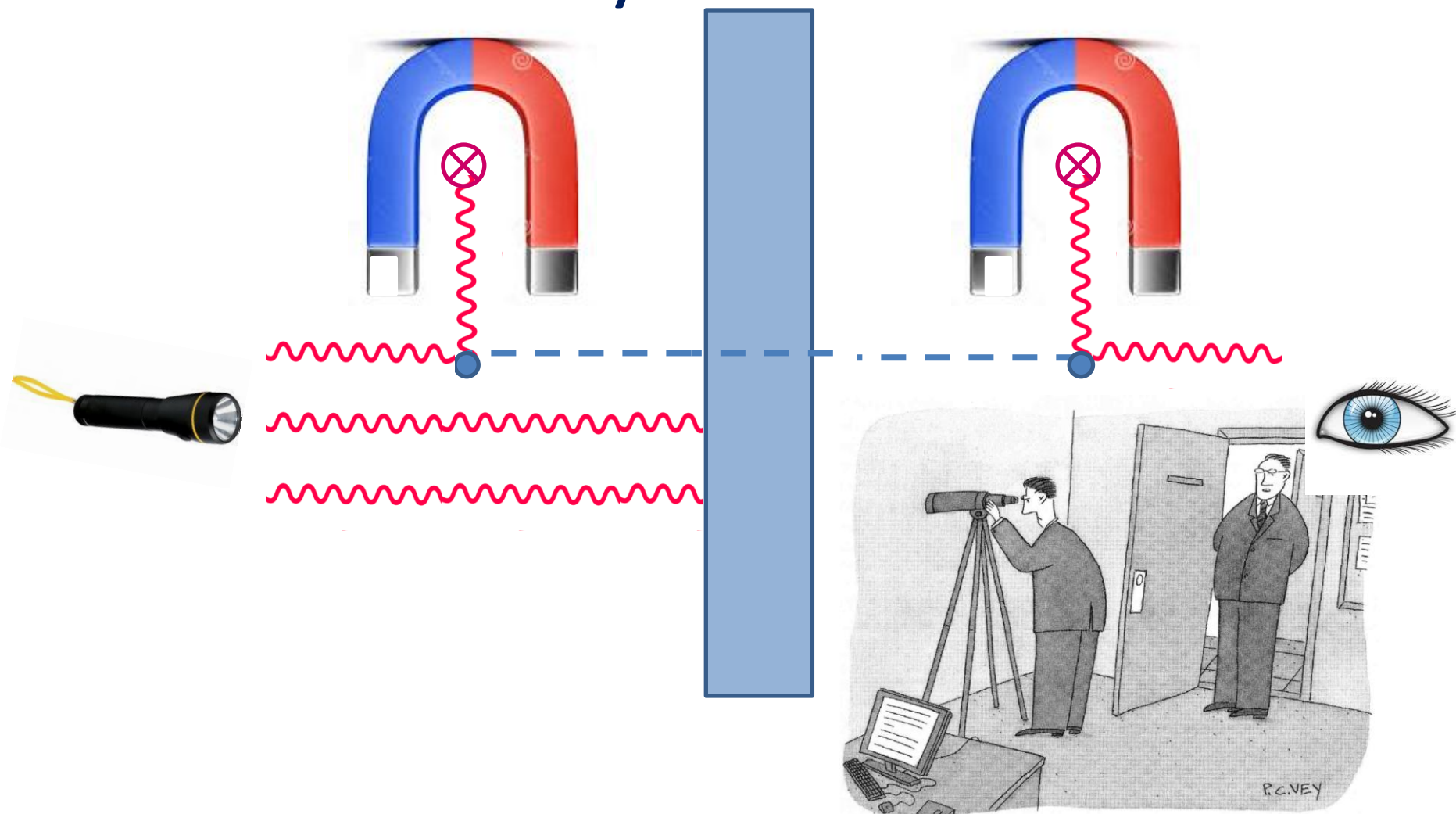


$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}(\partial a)^2 - \frac{1}{2}m^2 a^2 - \frac{1}{4}gaF_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}$$

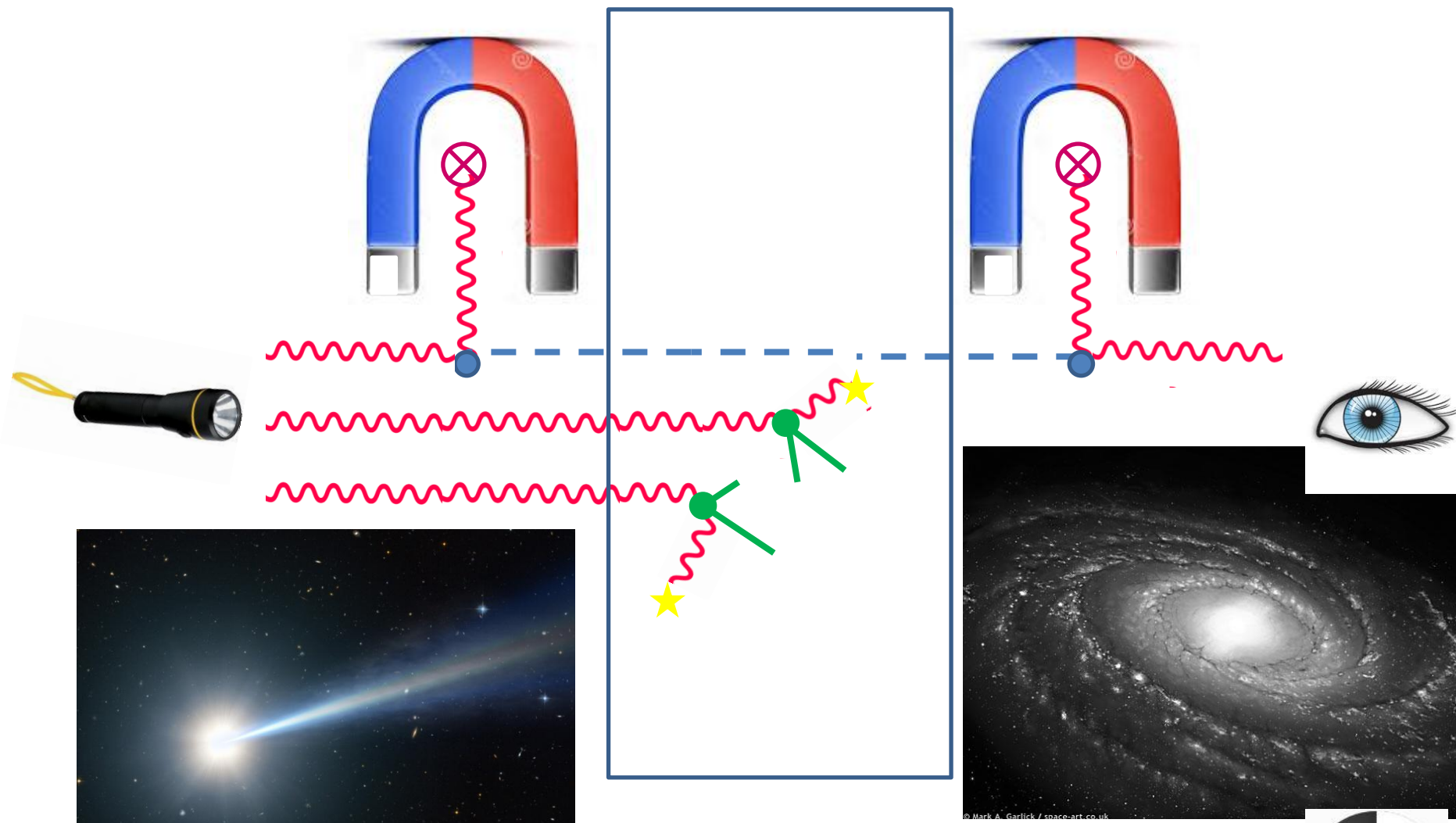
- псевдоголдстоуновские бозоны – всегда при сочетании спонтанного и слабого явного нарушения симметрии
- аналоги аксиона КХД, два параметра в лагранжиане
- смешивание с фотоном во внешнем магнитном поле
- вероятность превращения зависит от массы, константы связи, энергии и магнитного поля



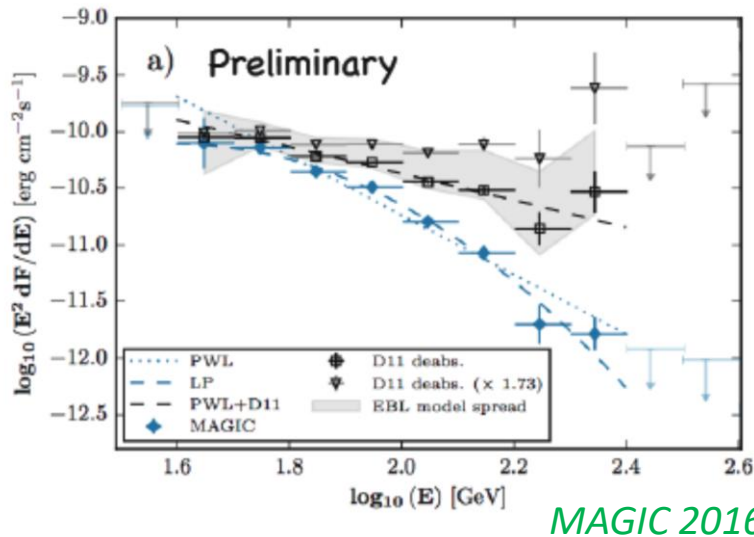
ALP: свет сквозь стену



ALP: свет сквозь Вселенную



ALP: «аномальная прозрачность Вселенной»



- “IR/TeV crisis” – индивидуальные источники *Protheroe, Meyer 2000 +*
- близкие и далекие выглядят по-разному *Kneiske, unpublished*
- статистика изломов в восстановленных спектрах: **изломы при тех энергиях, где существенна поправка на поглощение!**

Horns, Meyer 2012
Rubtsov, ST 2014

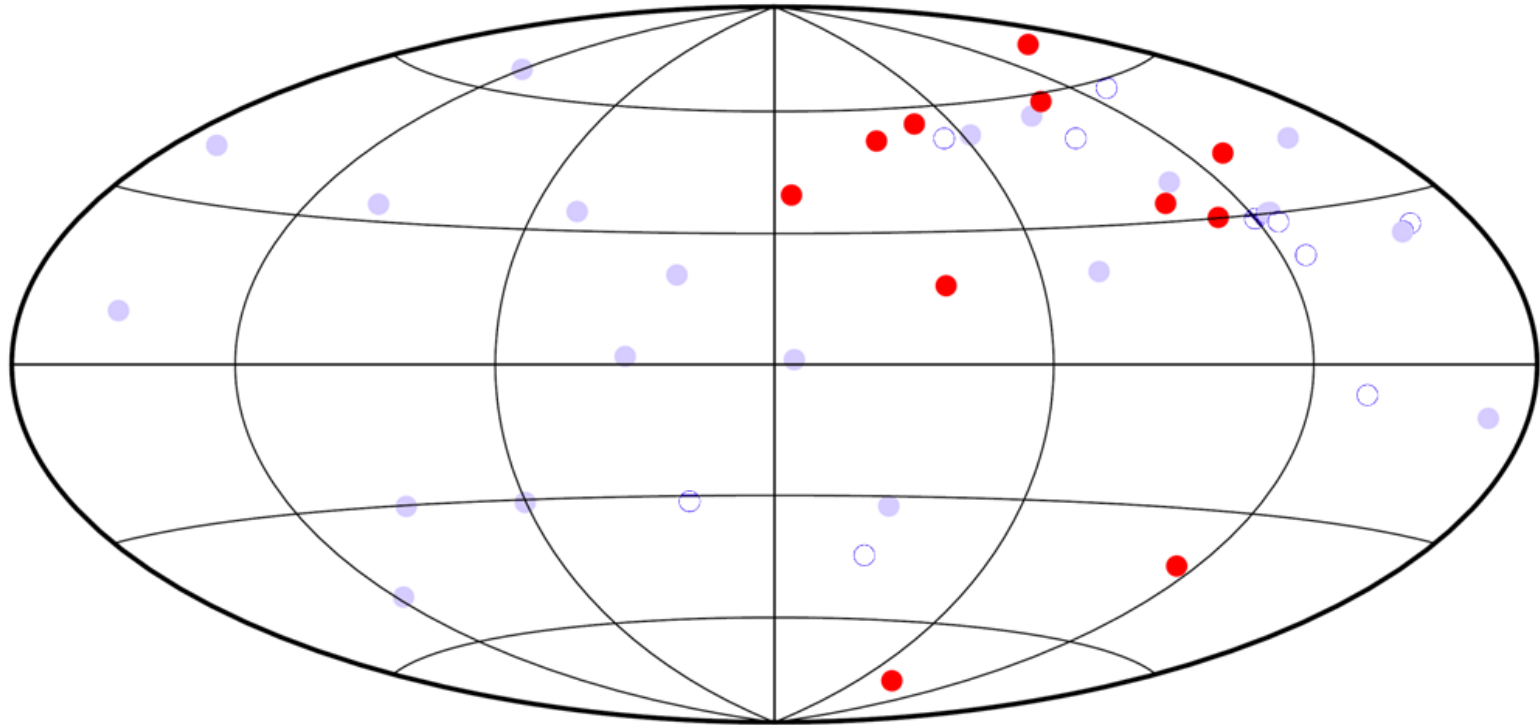
Больше статистика, лучше известны расстояния:

- проблема подтверждается для отдельных источников – старых и части новых
- многие новые, более слабые источники не указывают на проблему
- общая статистическая значимость скромная

Korochkin, Rubtsov, ST 2019



ALP: «аномальная прозрачность Вселенной»

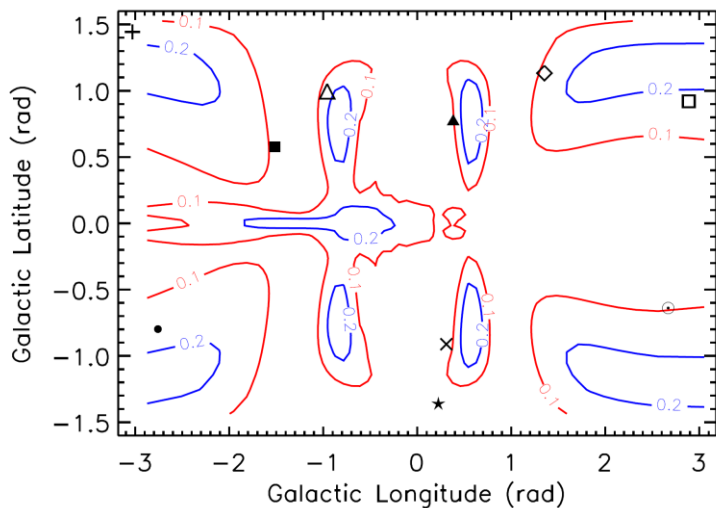


«Аномальные» и «неаномальные» объекты на карте неба

ST 2020

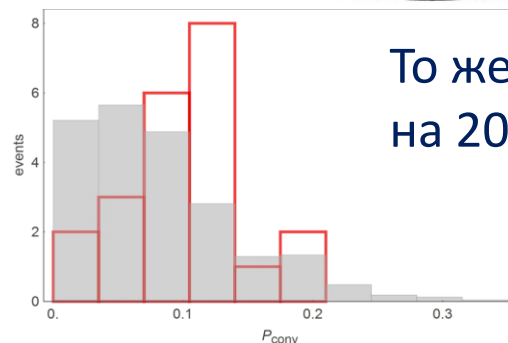
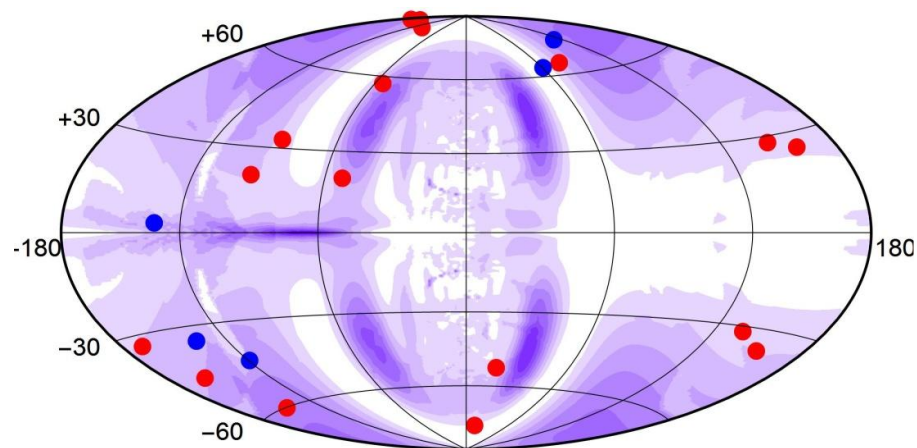


ALP: галактическая конверсия?



Вероятность конверсии в Галактике
Simet, Hooper, Serpico 2008

символы = VHE блазары (2008), $z > 0.1$



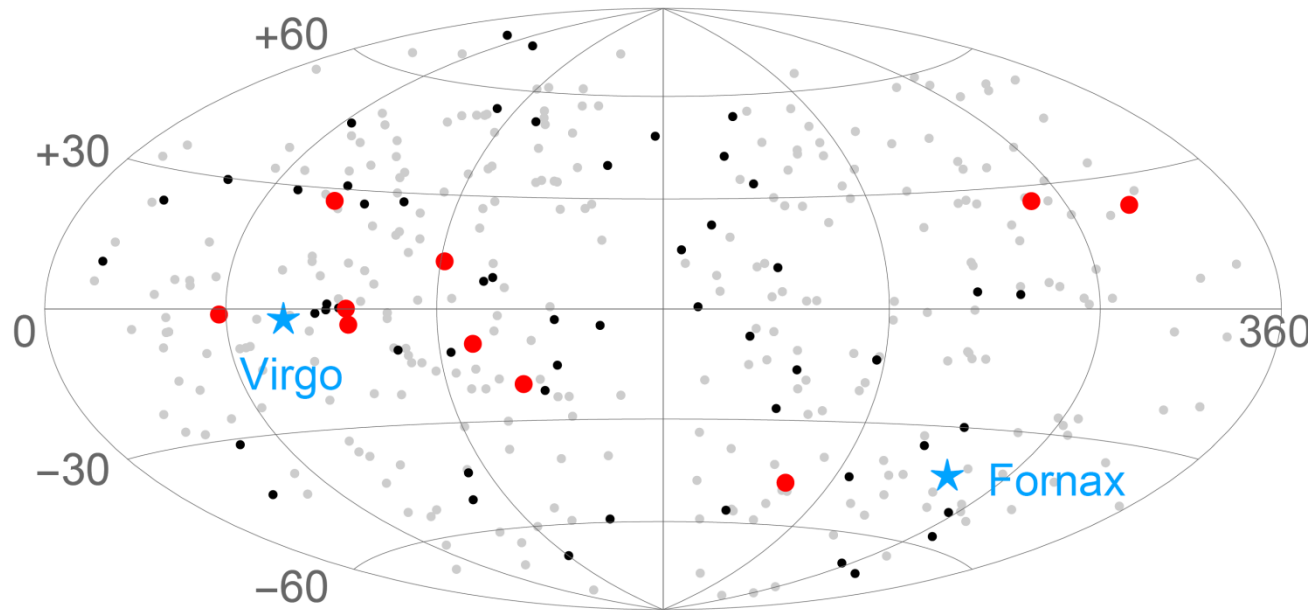
То же по состоянию
на 2015 год

ST 2015

Для современных моделей магнитного поля Галактики – другая картина...



ALP: анизотропия поглощения, связанная с местным филаментом?



«Аномальные» и «неаномальные» объекты на карте неба

ST 2020



Космические лучи и лацетиды: старая история...

Корреляции направлений прихода событий с $E > 10^{19}$ эВ и космологически удаленными объектами, указывающая на нейтральные частицы

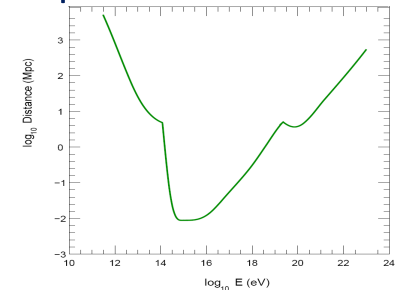
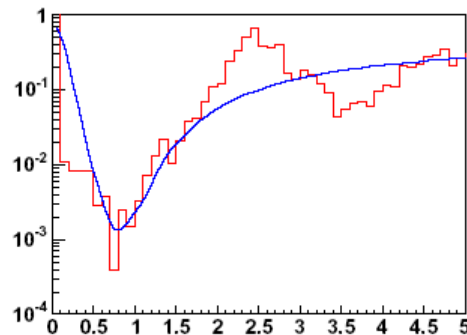
11 пар “лацетиды – космический луч”

3 пары ожидается при случайном распределении

вероятность иметь ≥ 11 пар: $4 \cdot 10^{-4}$

*Gorbunov, Tinyakov,
Tkachev, ST 2004*

*HiRes Collaboration
2005*



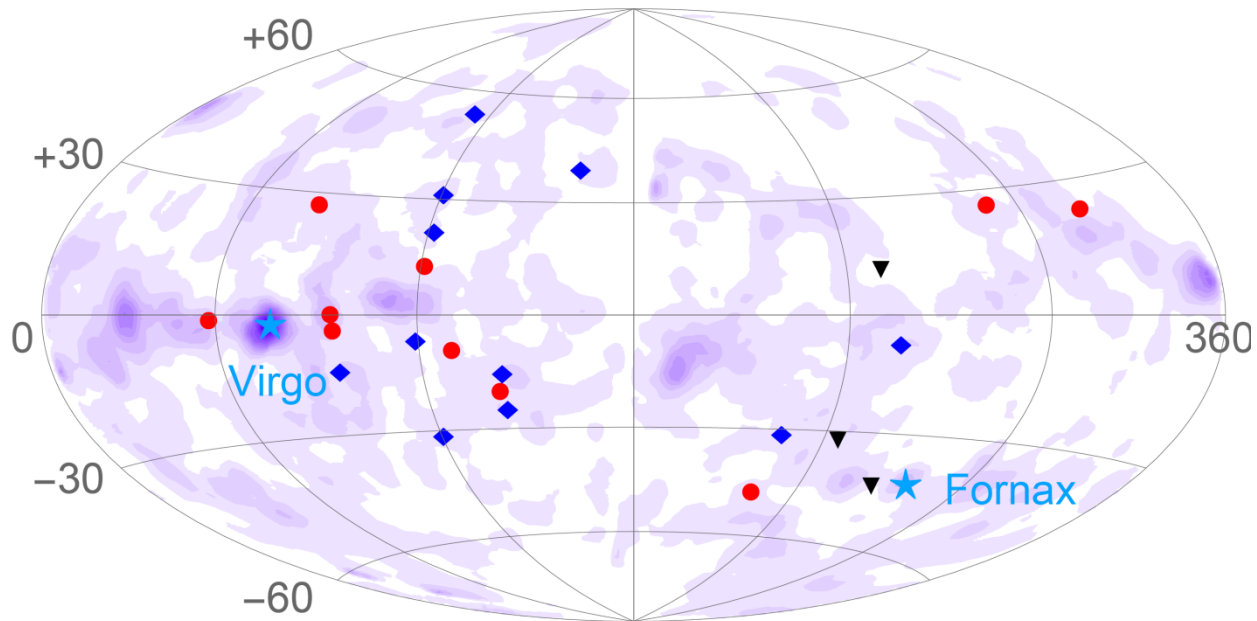
- можно объяснить ALP-фотонной конверсией
- не в Галактике, а в филаменте

Fairbairn, Rashba, ST 2009

угловое разрешение HiRes stereo остается непревзойденным рекордом...



ALP: «аномальная прозрачность Вселенной»



Красные: «аномальные» VHE блазары

Синие: «HiRes» BL Lacs

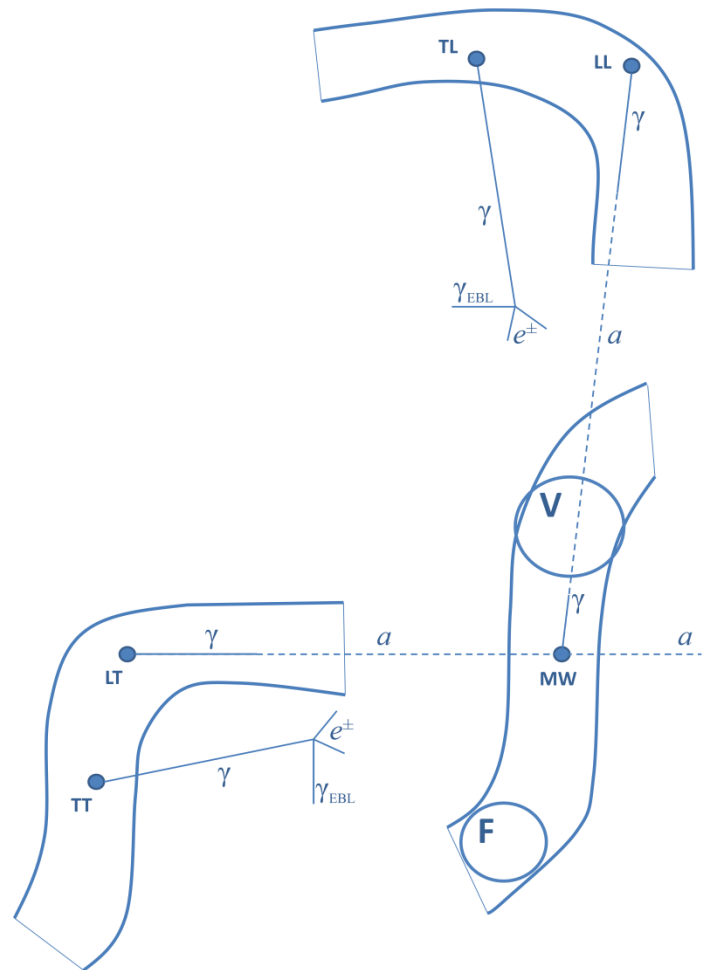
Черные: VHE GRB (не участвуют в статистическом анализе)

Заливка: сглаженная плотность близких галактик

ST 2020



ALP: «аномальная прозрачность Вселенной»



ST 2020



План

1. Рождение пар и каскады:

- нарушение Лоренц-инвариантности
- аксионоподобные частицы
- **первичные магнитные поля**
- постоянная Хаббла

2. Особенности в спектрах:

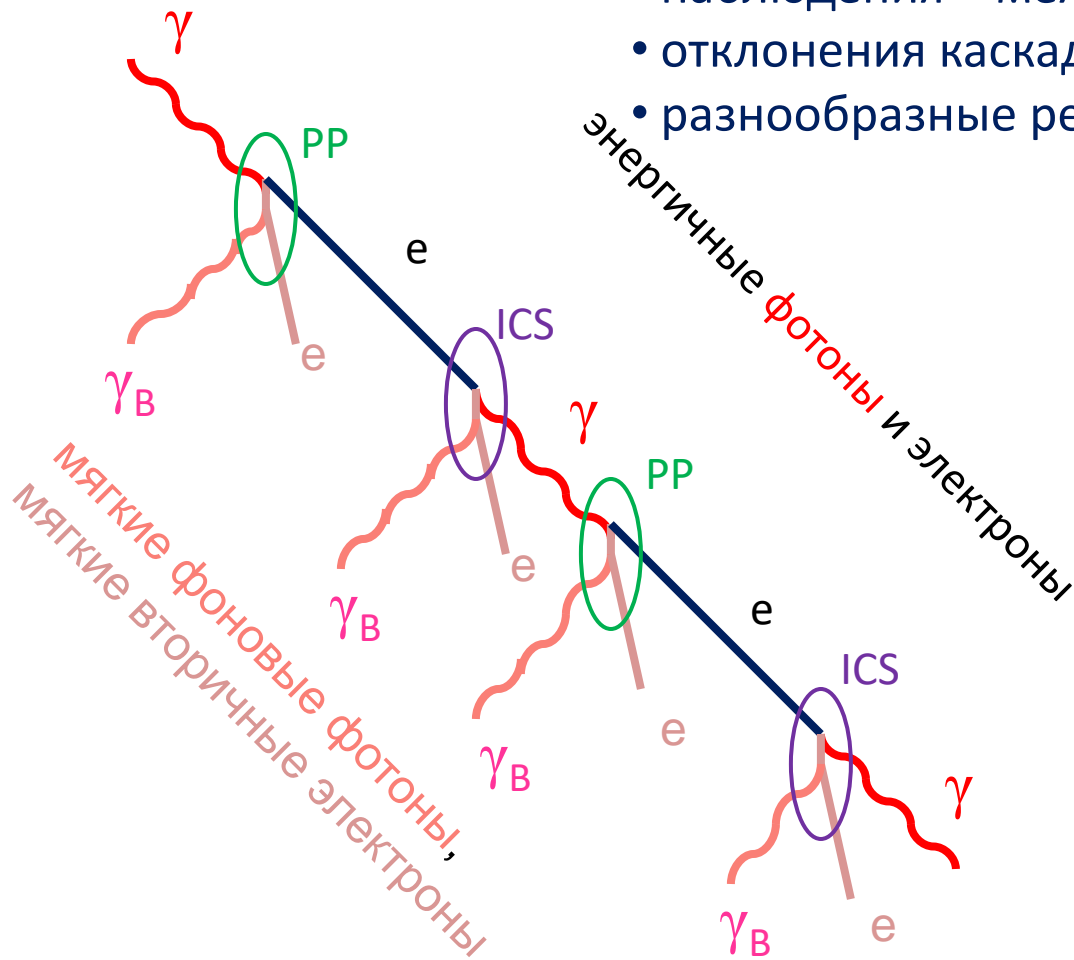
- аннигиляция и распады частиц темной материи
- аксионоподобные частицы
- Солнце

3. Что физикам нужно от гамма-астрономов?



Первичные магнитные поля?

- важно для космологии
- наблюдения – межгалактические магнитные поля
- отклонения каскадных электронов – «гало»
- разнообразные результаты



см. также доклад Егора Подлесного



План

1. Рождение пар и каскады:

- нарушение Лоренц-инвариантности
- аксионоподобные частицы
- первичные магнитные поля
- **постоянная Хаббла**

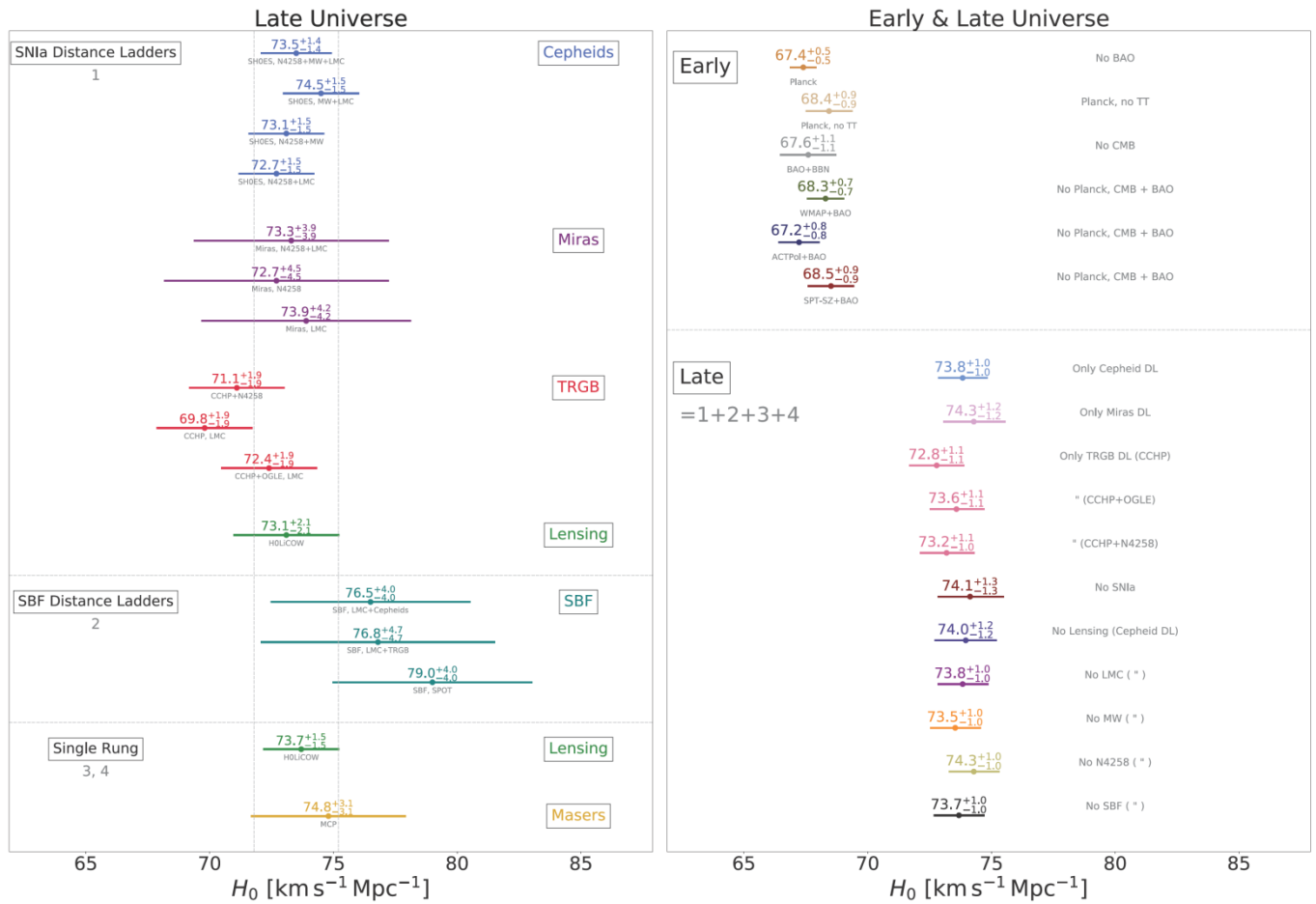
2. Особенности в спектрах:

- аннигиляция и распады частиц темной материи
- аксионоподобные частицы
- Солнце

3. Что физикам нужно от гамма-астрономов?



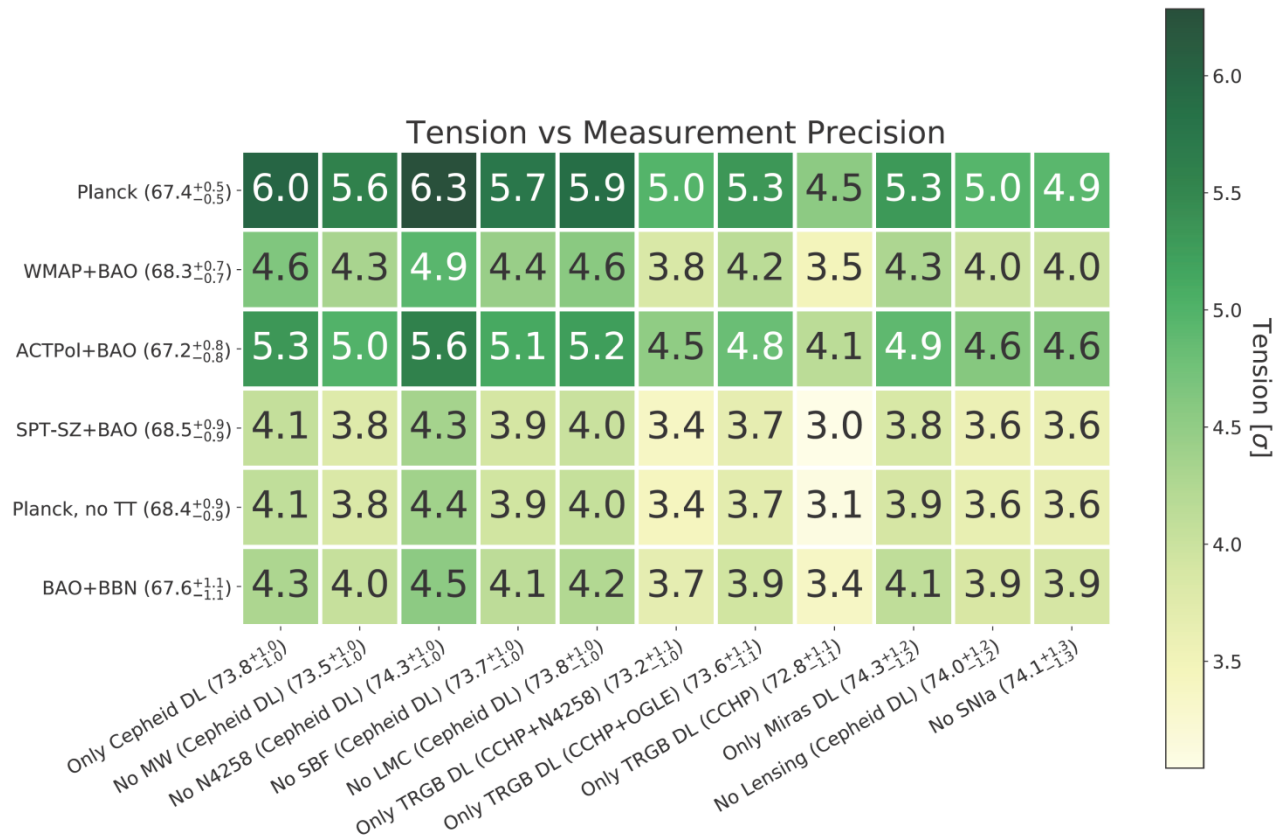
Постоянная Хаббла: «хаббловский кризис»?



Riess 2020



Постоянная Хаббла: «хаббловский кризис»?



Riess 2020



Постоянная Хаббла и прозрачность Вселенной

$$\tau(E, z) = \int_0^z \left(\frac{dl}{dz'} \right) dz' \int_0^2 d\mu \frac{\mu}{2} \int_{\varepsilon_{th}}^{\infty} d\varepsilon' \sigma_{\gamma\gamma}(\beta') n(\varepsilon', z'), \quad (1)$$

$$\left| \frac{dt}{dz'} \right| = \frac{1}{H_0(1+z')E(z')}$$

$$E(z') \equiv \sqrt{\Omega_m(1+z')^3 + \Omega_\Lambda}$$

Dominguez et al. 2019

Methodology	H_0 [km s ⁻¹ Mpc ⁻¹]	Ω_m
Gamma-ray Attenuation	$65.8^{+3.1}_{-3.0}$	0.32 (fixed)
Gamma-ray Attenuation	68 (fixed)	$0.17^{+0.07}_{-0.08}$
Gamma-ray Attenuation	$67.4^{+6.0}_{-6.2}$	$0.14^{+0.06}_{-0.07}$



План

1. Рождение пар и каскады:

- нарушение Лоренц-инвариантности
- аксионоподобные частицы
- первичные магнитные поля
- постоянная Хаббла

2. Особенности в спектрах:

- аннигиляция и распады частиц темной материи
- аксионоподобные частицы
- Солнце

3. Что физикам нужно от гамма-астрономов?



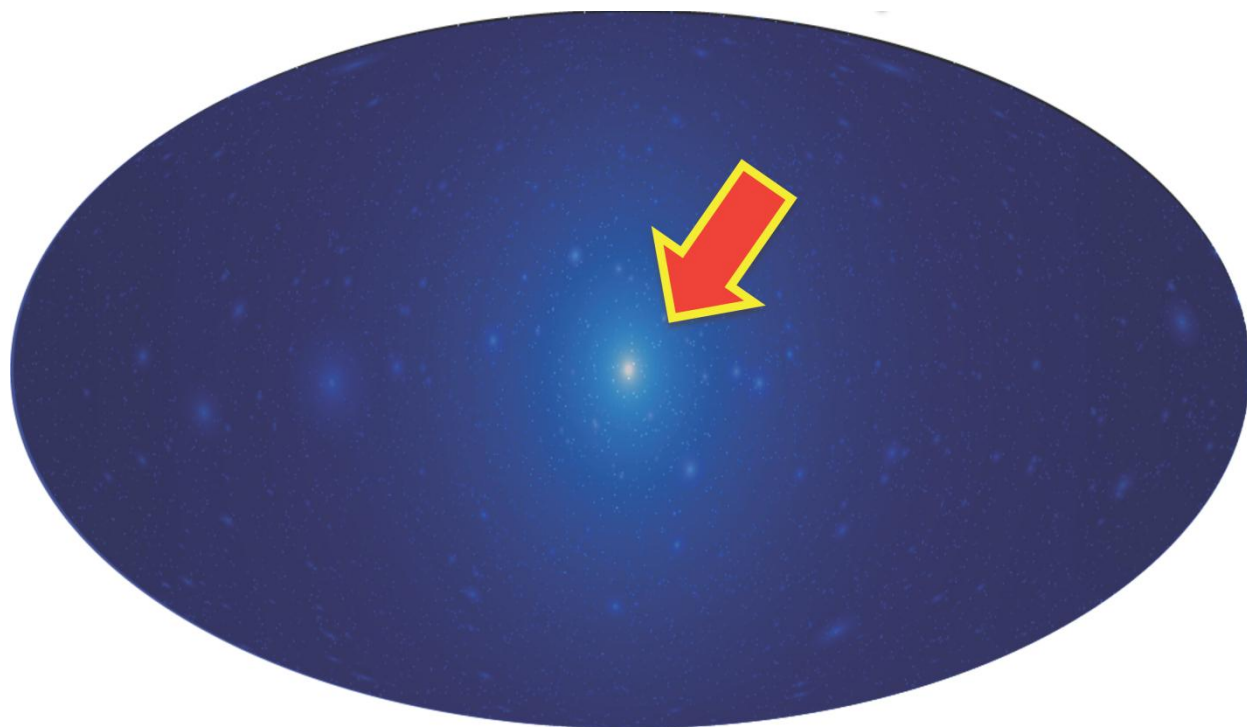
Тёмная материя



Bertone, Tait 2019 (+)



Тёмная материя: WIMP, аннигиляция



ожидаемый сигнал от центра Галактики



Тёмная материя: WIMP, аннигиляция

Galactic Center Fermi GeV Excess (GCE)

Searches

GCE found by morphological template fitting:

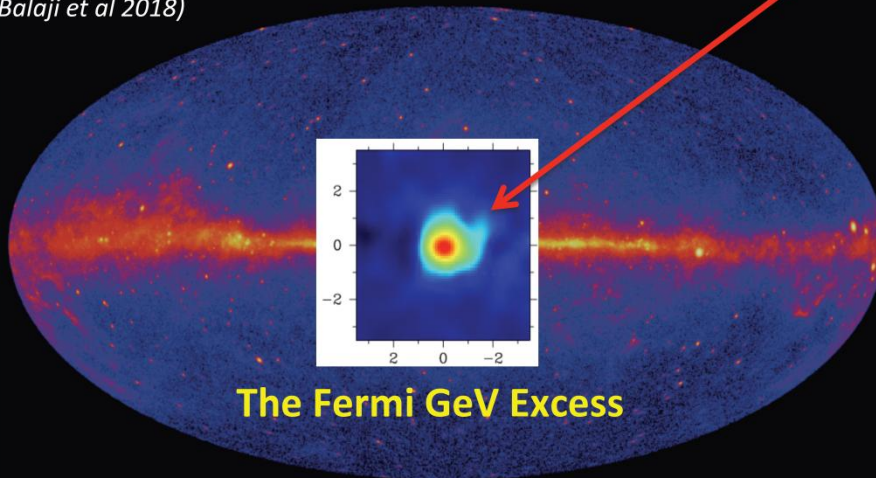
$$\text{data}_i = \sum_j c_{ij} \text{template}_{ij}$$

Also new approaches, e.g., wavelets

(Balaji et al 2018)

→ Confirmed by multiple studies

Goodenough & Hooper (2009)
Vitale & Morselli (2009)
Hooper & Goodenough (2011)
Hooper & Linden (2011)
Boyarsky et al (2011)
Abazajian & Kaplinghat (2012)
Gordon & Macias (2013)
Hooper & Slatyer (2013)
Huang et al (2013)
Macias & Gordon (2014)
Abazajian et al (2014, 2015)
Calore et al (2014, 2015, 2016)
Daylan et al (2014)
Zhou et al (2014)
Selig et al (2015)
Huang et al (2015, 2016)
Gaggero et al (2015)
Carlson et al (2015, 2016)
Yan & Aharonian (2016)
Ackermann et al (2016, 2017)
Horiuchi et al (2016)
Linden et al (2016)
Macias et al (2016)
Ajello et al (2017, 2018)
Macias et al (2018, 2019)
Bartels et al (2018)
Balaji et al (2018)
Zhong et al (2019)
etc

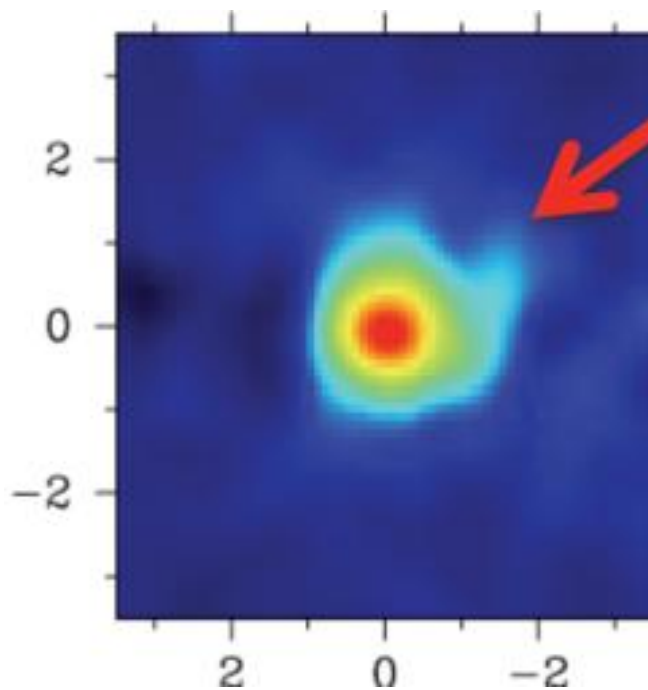


Shunsaku Horiuchi (Virginia Tech)

Horiuchi 2019



Тёмная материя: WIMP, аннигиляция



Тёмная материя или нет?

- объяснение с миллисекундными пульсарами
- ряд астрофизических предположений
- вопрос пока открыт

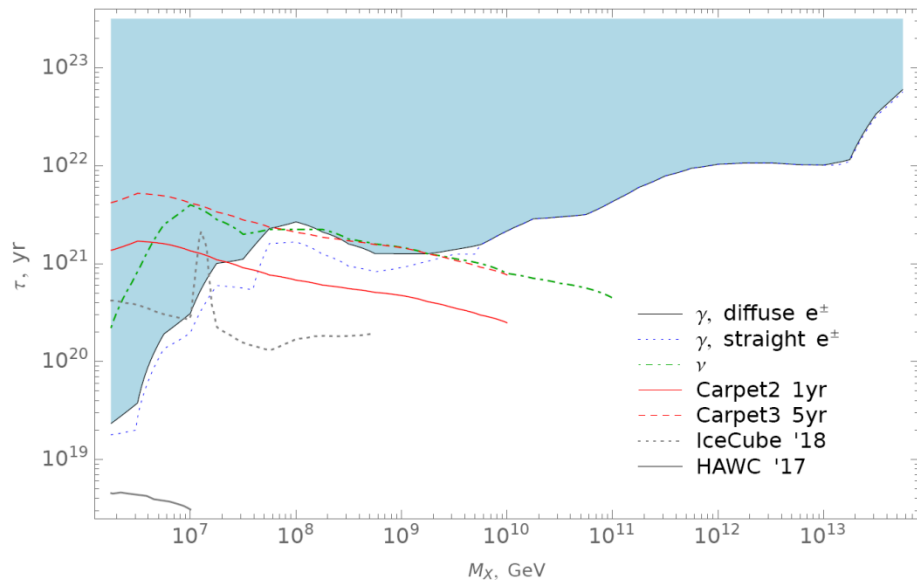


Тёмная материя: сверхтяжелая, распады

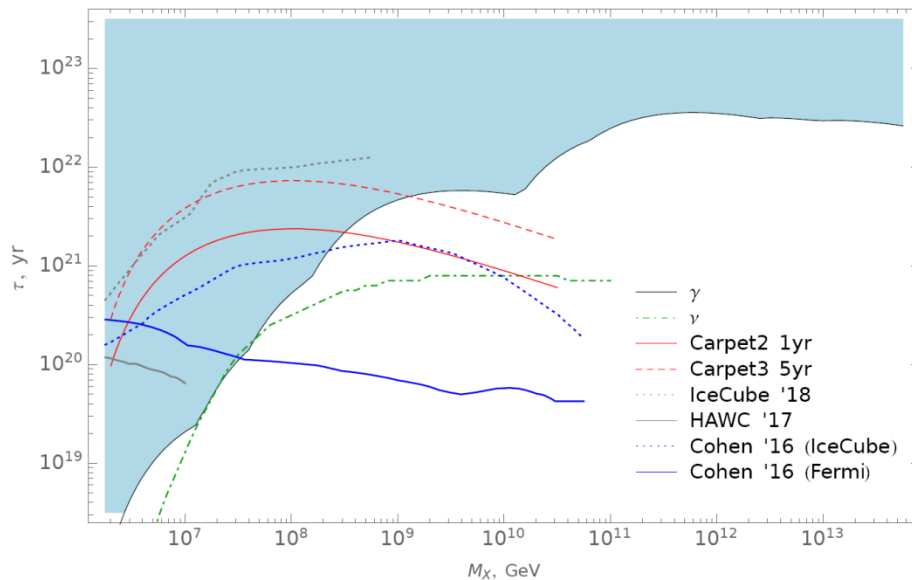
Kuzmin, Rubakov 1997

Berezinsky, Kachelriess, Vilenkin 1997

Фотоны – наиболее строгие ограничения, даже для нейтринного канала распада!



(a) $X \rightarrow \nu\bar{\nu}$ *Kachelriess, Kalashev, Kuznetsov 2018*



(b) $X \rightarrow q\bar{q}$

- диффузное излучение гало
- карликовые галактики



План

1. Рождение пар и каскады:

- нарушение Лоренц-инвариантности
- аксионоподобные частицы
- первичные магнитные поля
- постоянная Хаббла

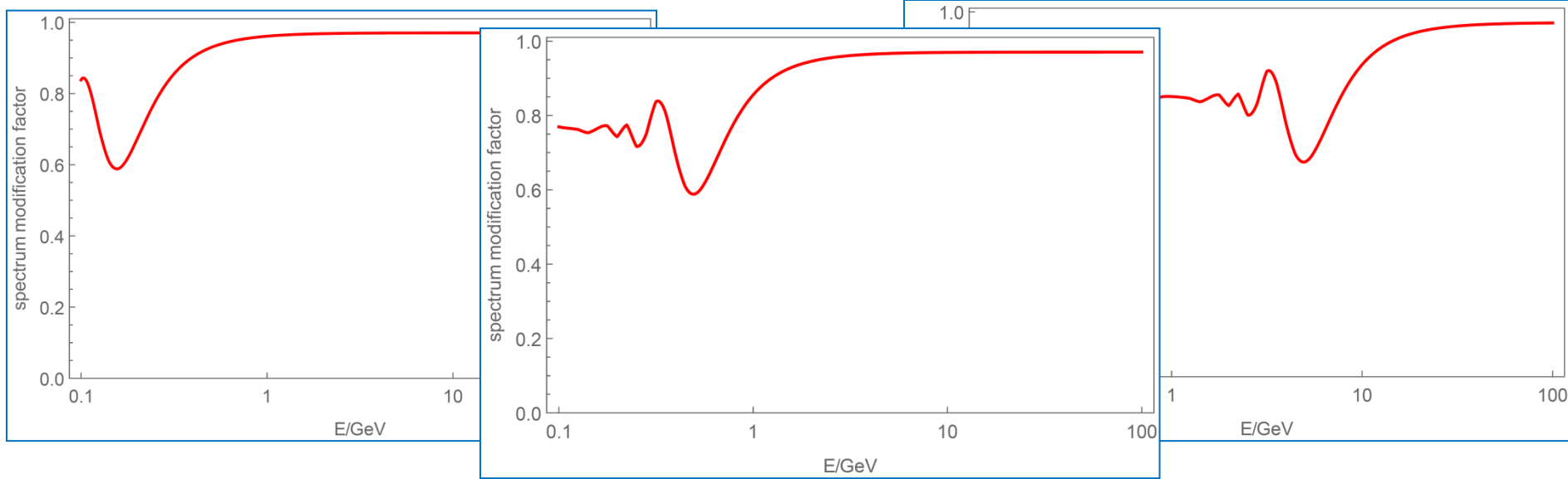
2. Особенности в спектрах:

- аннигиляция и распады частиц темной материи
- **аксионоподобные частицы**
- Солнце

3. Что физикам нужно от гамма-астрономов?



ALP и нерегулярности в спектрах



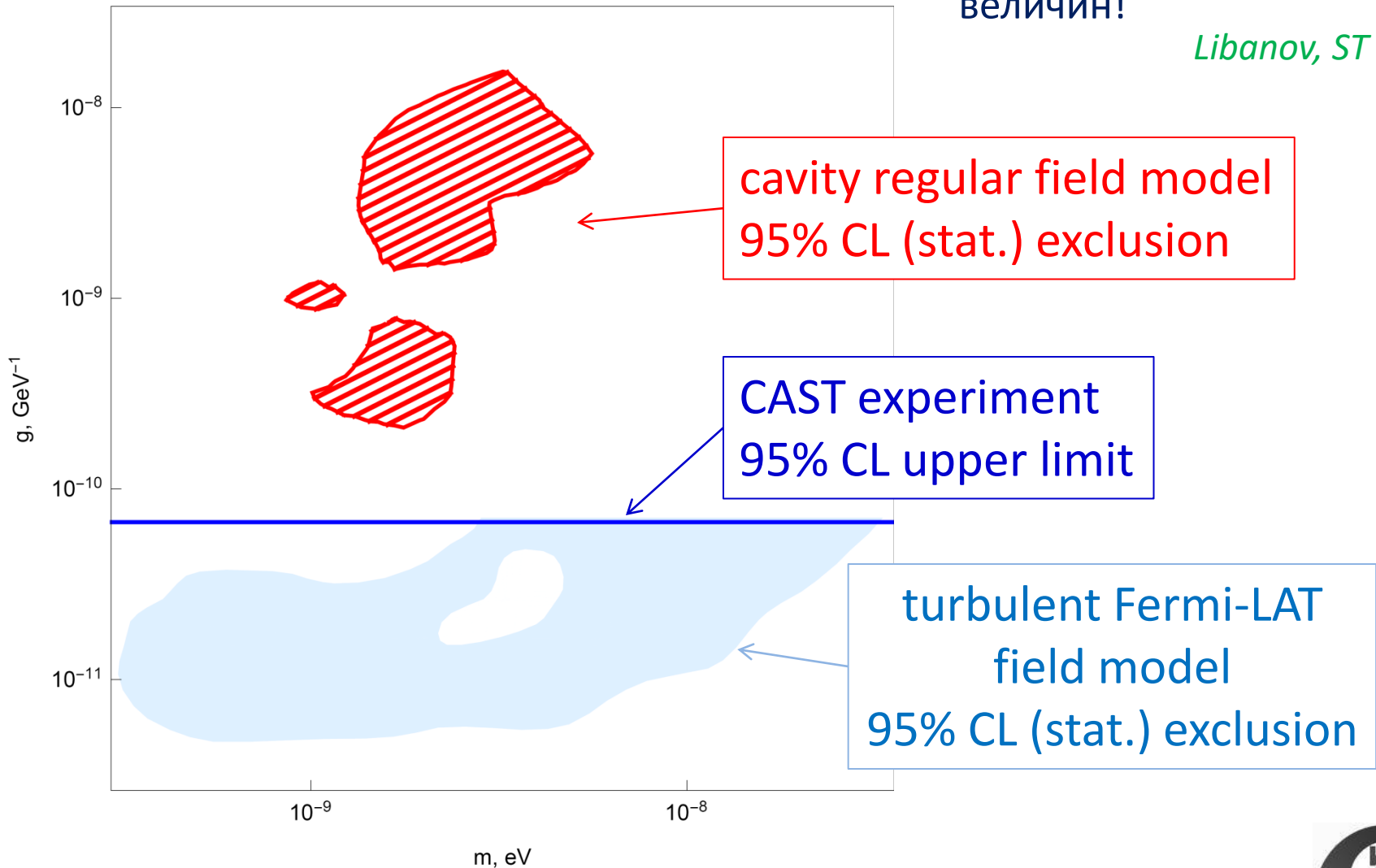
- отпечаток ALP-фотонных осцилляций в области энергий, где статистика велика
- нужно очень хорошо знать магнитное поле



ALP и нерегулярности в спектрах

- систематика – порядки величин!

Libanov, ST 2020



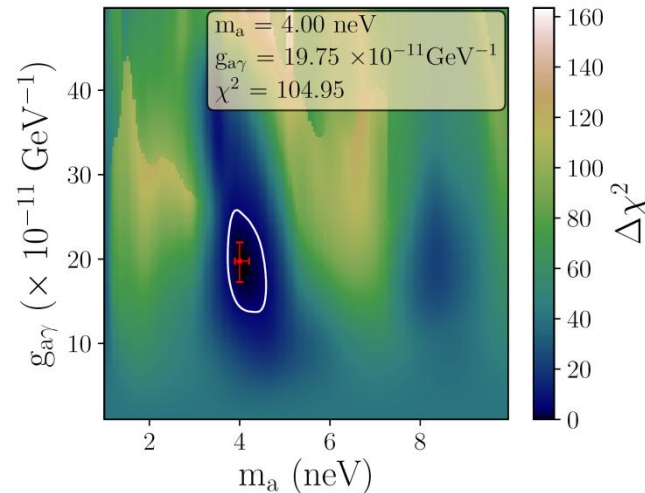
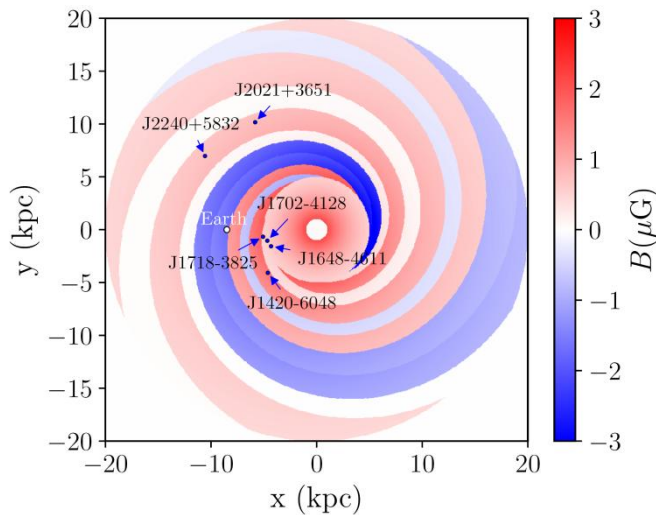
ALP и нерегулярности в спектрах

галактические источники?

- поле известно лучше, хотя и плохо
- положительный сигнал?
- параметры не очень согласуются с ограничениями из Солнца и звезд
- предложено объяснение

Horns et al. 2017

Pallathadka et al. 2020



План

1. Рождение пар и каскады:

- нарушение Лоренц-инвариантности
- аксионоподобные частицы
- первичные магнитные поля
- постоянная Хаббла

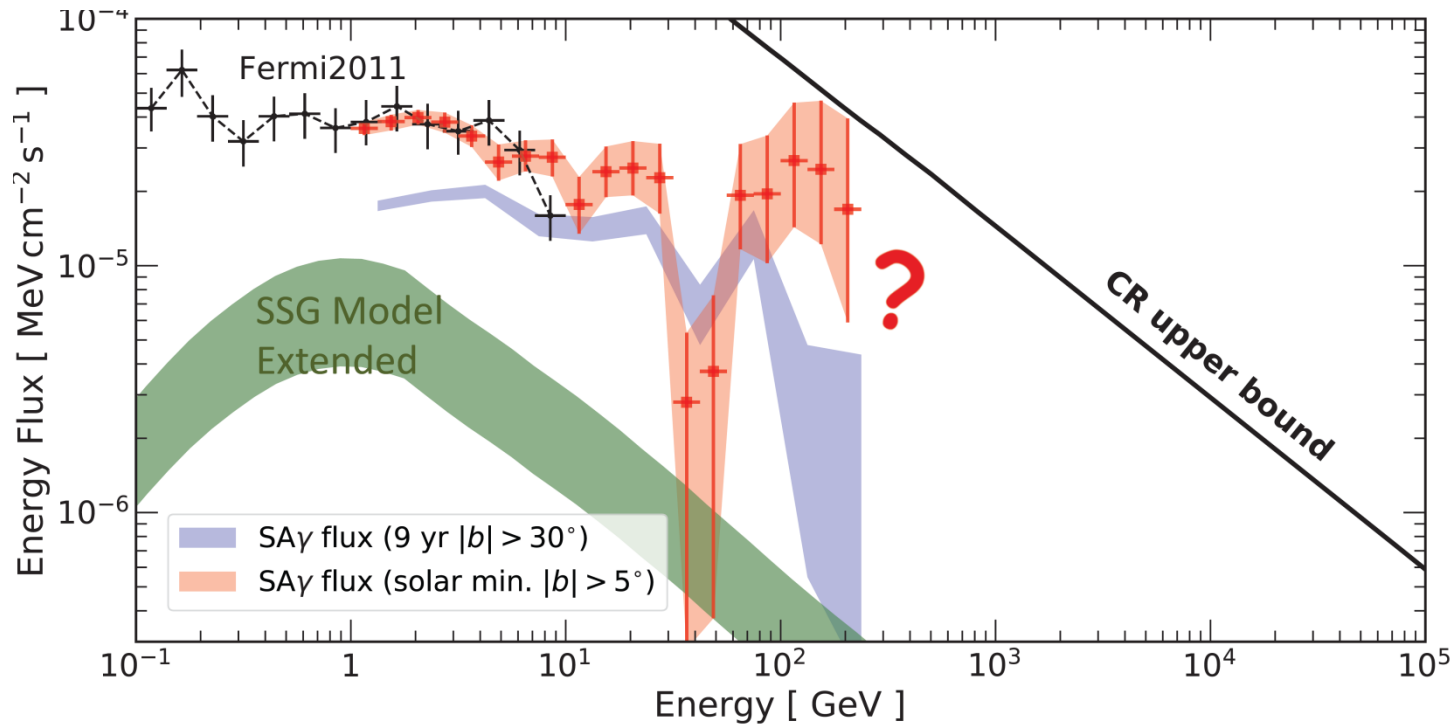
2. Особенности в спектрах:

- аннигиляция и распады частиц темной материи
- аксионоподобные частицы
- **Солнце**

3. Что физикам нужно от гамма-астрономов?



Солнце: аномалии в спектре Fermi LAT?



Tang et al. 2018

- гамма-излучение Солнца – от взаимодействий КЛ
- аномально высокий поток?
- загадочный провал при 30 ГэВ, особенно в солнечном минимуме
- проверяется в данных прошедшего минимума...



План

1. Рождение пар и каскады:

- нарушение Лоренц-инвариантности
- аксионоподобные частицы
- первичные магнитные поля
- постоянная Хаббла

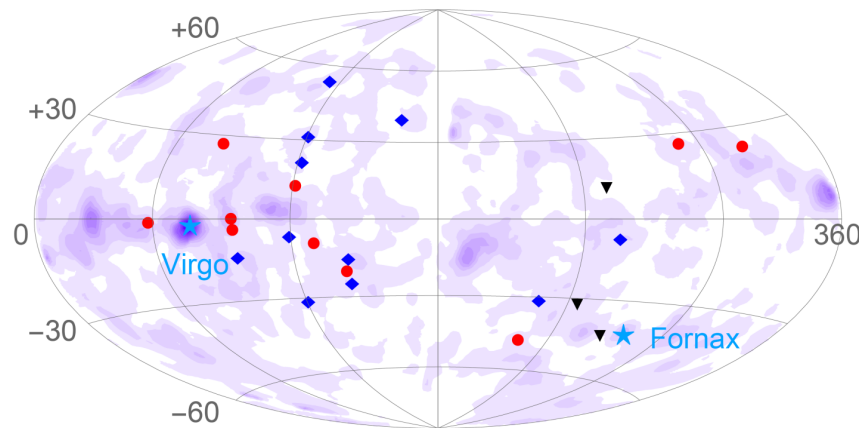
2. Особенности в спектрах:

- аннигиляция и распады частиц темной материи
- аксионоподобные частицы
- Солнце

3. Что физикам нужно от гамма-астрономов?



Что нужно физикам от гамма-астрономов?



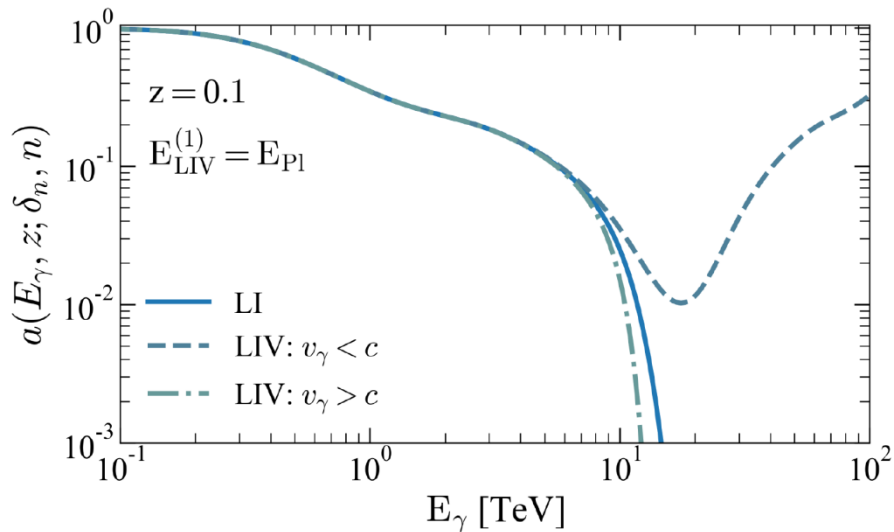
- **однородные выборки!**

(хотя бы публикация верхних пределов, когда не нашли сигнал...)

СТА, ШАЛ-установки



Что нужно физикам от гамма-астрономов?



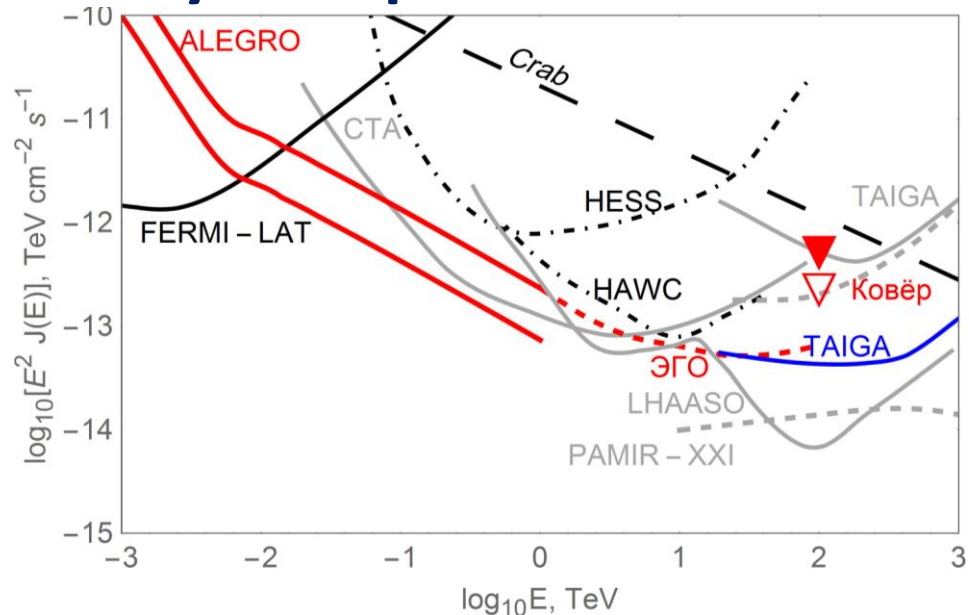
- **высокие энергии!**

выше 100 ТэВ

LHAASO, TAIGA, Ковёр-3 и т.д.



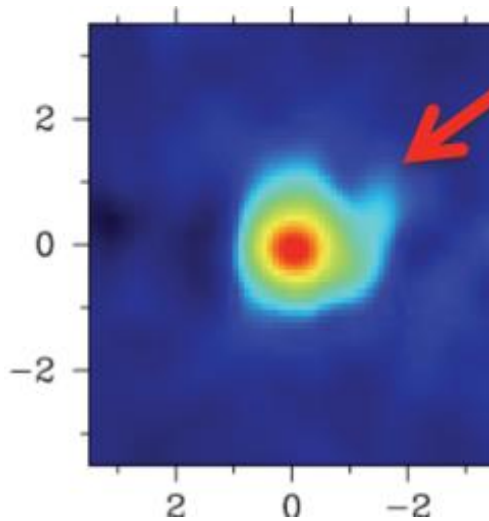
Что нужно физикам от гамма-астрономов?



- **заполнение пробела в чувствительности между Fermi и CTA**
около 10 ГэВ
большая экспозиция и быстрое наведение
вспышки далеких блазаров и GRB
низкопороговый черенковский телескоп (ALEGRO)



Что нужно физикам от гамма-астрономов?



- **надежное понимание астрофизических сигналов от центра Галактики**

фоны для поиска аннигиляции темной материи
комплексные астрофизические исследования



Что нужно физикам от гамма-астрономов?

...хотя бы....

- однородные выборки
- высокие энергии >100 ТэВ
- заполнение пробела в чувствительности на 10 ГэВ
- надежное понимание астрофизических сигналов от центра Галактики
- открытые данные – не только Fermi LAT

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

