

Новая физика и гамма-всплеск GRB 221009A

Сергей Троицкий
(ИЯИ РАН)

Марковские чтения, 17 мая 2023





**«Астрофизика
в каком-то смысле становится ближе к микрофизике»**

М.А. Марков, «Будущее науки», УФН 114 (1973) 719



Гамма- всплеск GRB 221009A

✓ абсолютный рекорд по мощности GRB и по энергии фотонов

- Fermi LAT: самый высокоэнергичный фотон от GRB за все время наблюдения (99 ГэВ)
- LHAASO: фотоны вплоть до 18 ТэВ за (0-2000) сек от T0
- Ковер-2: фотоноподобное событие 251 ТэВ через 4356 сек после T0
- расстояние: красное смещение $z=0.151$
(линии поглощения в afterglow, затем излучения в спектре host galaxy)
- галактическая широта 4° - близко к плоскости Млечного Пути
- сочетание небольшого расстояния и высокой интенсивности – наблюдение на Земле раз в (10-50) тысяч лет



GRB 221009A, наблюдения при небывало высоких энергиях

TITLE: GCN CIRCULAR
NUMBER: 32677
SUBJECT: LHAASO observed GRB 221009A with more than 5000 VHE photons up to around 18 TeV
DATE: 22/10/11 09:21:54 GMT
FROM: Judith Racusin at GSFC <judith.racusin@nasa.gov>



Yong Huang, Shicong Hu, Songzhan Chen, Min Zha, Cheng Liu, Zhiguo Yao and Zhen Cao report on behalf of the LHAASO experiment

We report the observation of GRB 221009A, which was detected by Swift (Kennea et al. GCN #32635), Fermi-GBM (Veres et al. GCN #32636, Lesage et al. GCN #32642), Fermi-LAT (Bissaldi et al. GCN #32637), IPN (Svinkin et al. GCN #32641) and so on.

GRB 221009A is detected by LHAASO-WCDA at energy above 500 GeV, centered at RA = 288.3, Dec = 19.7 within 2000 seconds after T_0 , with the significance above 100 s.d., and is observed as well by LHAASO-KM2A with the significance about 10 s.d., where the energy of the highest photon reaches 18 TeV.

This represents the first detection of photons above 10 TeV from GRBs.

The LHAASO is a multi-purpose experiment for gamma-ray astronomy (in the energy band between 10^{11} and 10^{15} eV) and cosmic ray measurements.

LHAASO: фотоны вплоть до 18 ТэВ в интервале (0-2000) сек после T_0



GRB 221009A, наблюдения при небывало высоких энергиях



The Astronomer's Telegram

[Post](#) | [Search](#) | [Policies](#)
[Credential](#) | [Feeds](#) | [Email](#)

2 Nov 2022; 09:59 UT

This space for free for your conference.

MIAPP workshop on
Interacting Supernovae
6 February - 3 March 2023
Garching, Germany

Ne/O Si

...s, The Astronomer's Telegram is free to read, free to publish
...e. Thank you.

[[Previous](#) | [Next](#) | [ADS](#)]

Swift J1913.1+1946/GRB 221009A: detection of a 250- TeV photon-like air shower by Carpet-2

ATel #15669; *D. D. Dzhappuev, Yu. Z. Afashokov, I. M. Dzaparova, T. A. Dzhatdоеv, E. A. Gorbacheva, I. S. Karpikov, M. M. Khadzhiev, N. F. Klimenko, A. U. Kudzhaev, A. N. Kurenya, A. S. Lidvansky, O. I. Mikhailova, V. B. Petkov, E. I. Podlesnyi, N. A. Pozdnukhov, V. S. Romanenko, G. I. Rubtsov, S. V. Troitsky, I. B. Unatlokov, I. A. Vaiman, A. F. Yanin, K. V. Zhuravleva (Carpet-2 group, INR RAS)*

on 12 Oct 2022; 13:56 UT

Credential Certification: [Sergey Troitsky \(st@ms2.inr.ac.ru\)](mailto:st@ms2.inr.ac.ru)

Related

- 15712 Detection of the emerging supernova spectrum from the afterglow of GRB221009A
- 15703 Insight-HXMT observation on the prompt emission and afterglow of GRB 221009A
- 15685 GRB221009A/Swift J1913.1+1946: RT-22 Simeiz observations
- 15677 MAXIGSC refined analysis of the bright X-ray afterglow of GRB 221009A/Swift J1913.1+1946
- 15675 Swift J1913.1+1946/GRB 221009A: Galactic sources of > 100 TeV-photon in spatial coincidence with the 250-TeV photon-like air shower reported by Carpet-2
- 15674 GRB221009A/Swift



Ковёр-2: фотоноподобное событие ≈ 251 ТэВ через 4536 сек от T0 (фон 1.2×10^{-4})



Тема доклада: фотоны >10 ТэВ от GRB 221009A и физика частиц

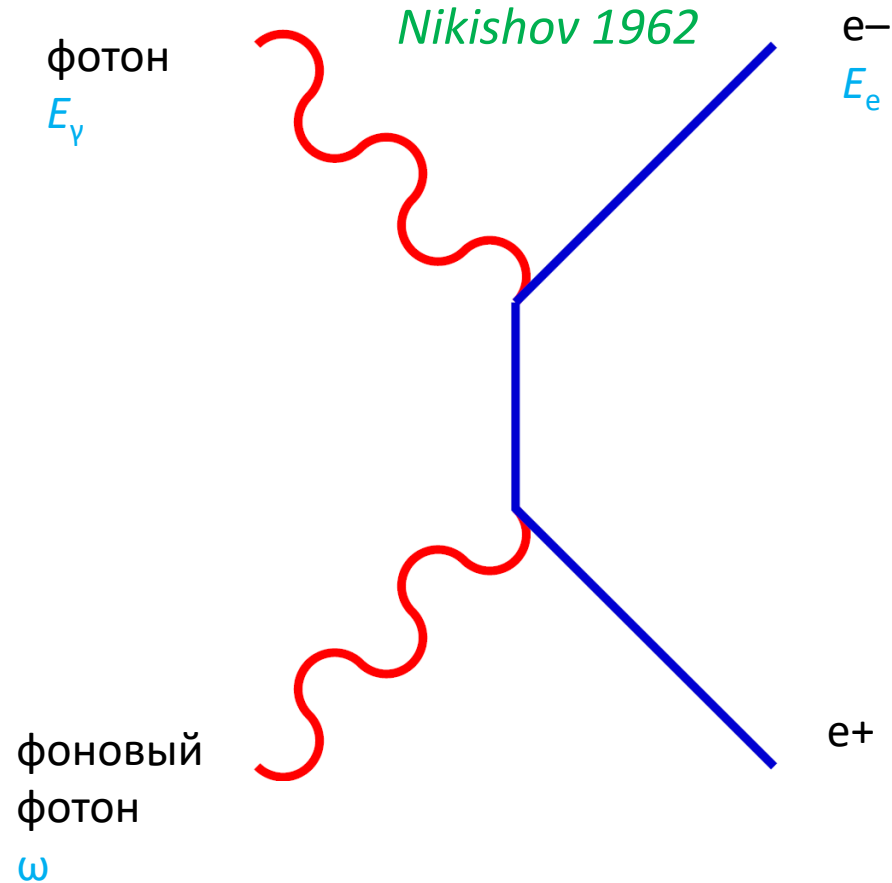
- результаты LHAASO и Ковра-2 пока не опубликованы в журналах
- оба эксперимента выделяют фотоноподобные события на фоне адронных и могут ошибаться
- источник в плоскости Галактики – могут приходить фотоны, не связанные с гамма-всплеском
- для Ковра-2 вероятность фонового события 1.2×10^{-4} включает и адронный фон, и фон от других источников (data-driven)
- для LHAASO подобные вероятности пока не опубликованы
- ✓ **далее предполагаем, что зарегистрированные события – фотоны, связанные с этим гамма-всплеском**
- откуда они там взялись – не задумываемся...



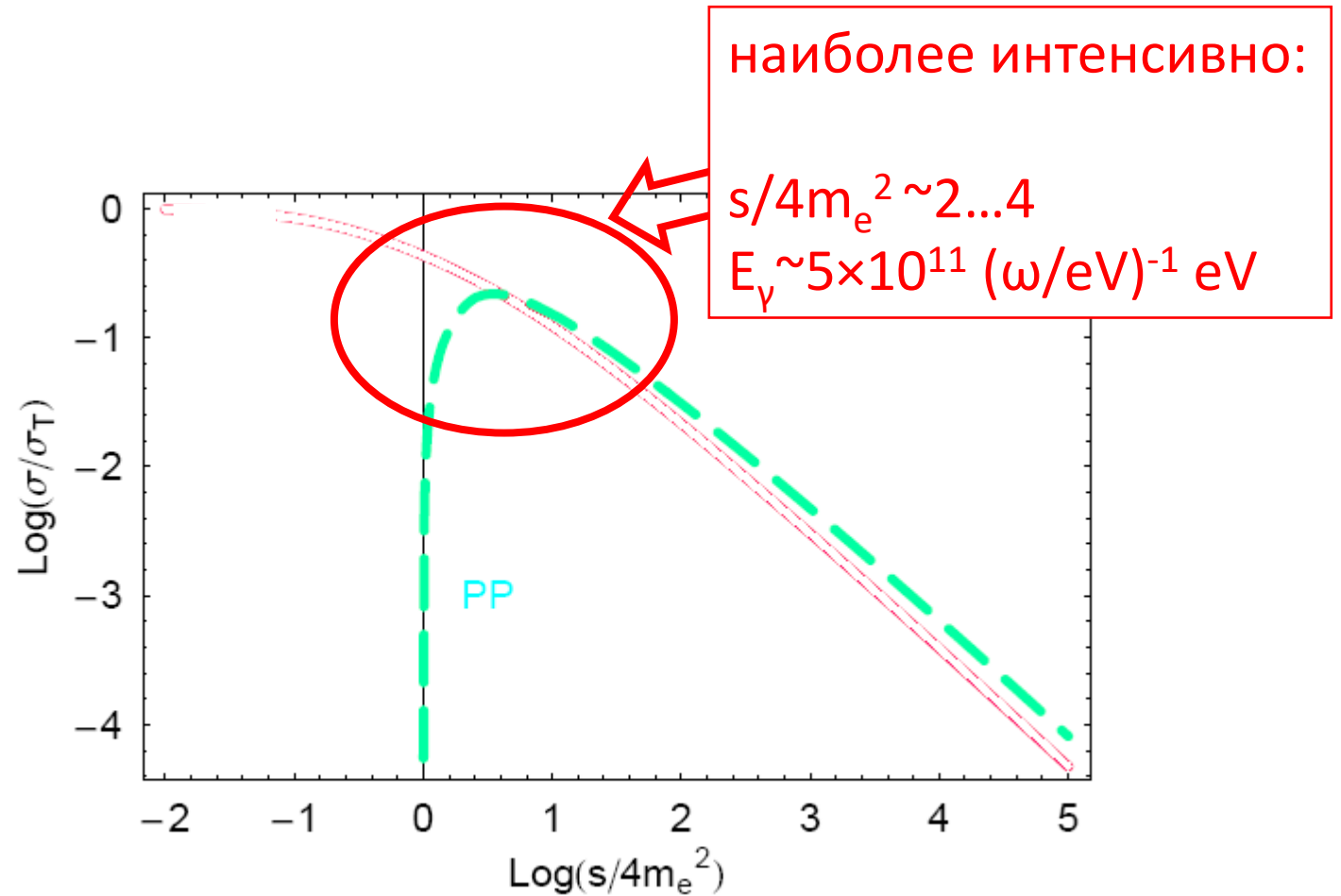
Рождение пар

энергичными фотонами
на фоновом излучении

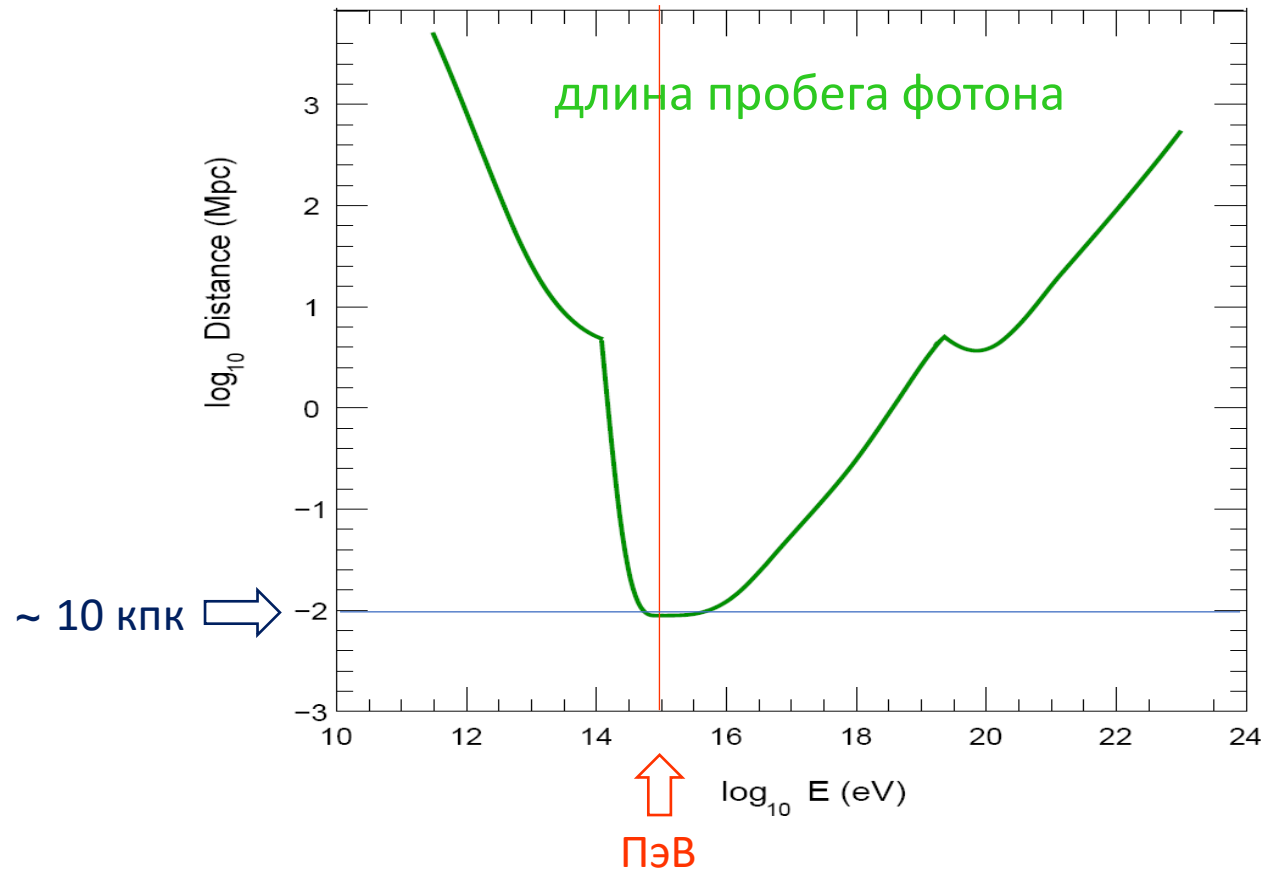
Nikishov 1962



сечение рождения пар (PP):



Рождение пар



для $z=0.151$ (GRB 221009A)
оптическая толщина
для 18 ТэВ, 15 ± 5
для 251 ТэВ, >3000

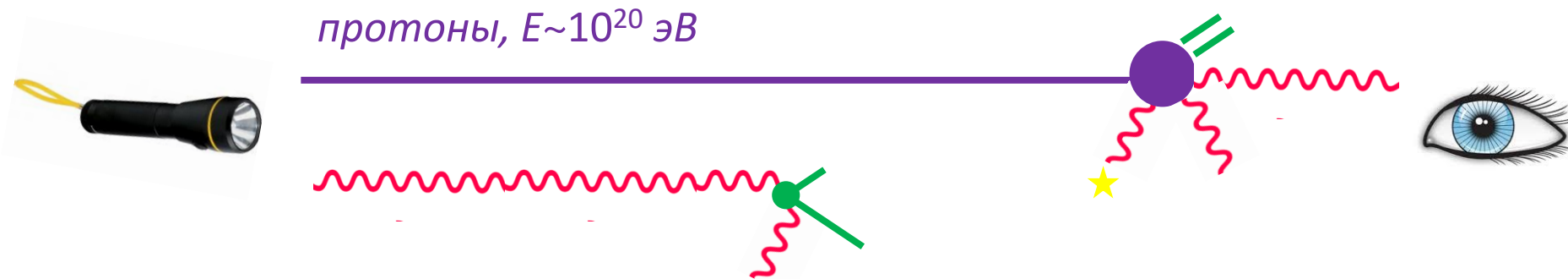


ФОТОНЫ НЕ ИЗ ИСТОЧНИКА, ХОТЯ И СВЯЗАНЫ С НИМ?

- те же источники рождают протоны сверхвысоких энергий
- ГЗК-процесс дает вторичные фотоны (из распадов π^0)

Essay, Kusenko

- ❑ заряженные частицы разных энергий следуют разными траекториями
- ❑ трудно объяснить отсутствие временной задержки
- ❑ расстояние до GRB заметно больше ГЗК-радиуса

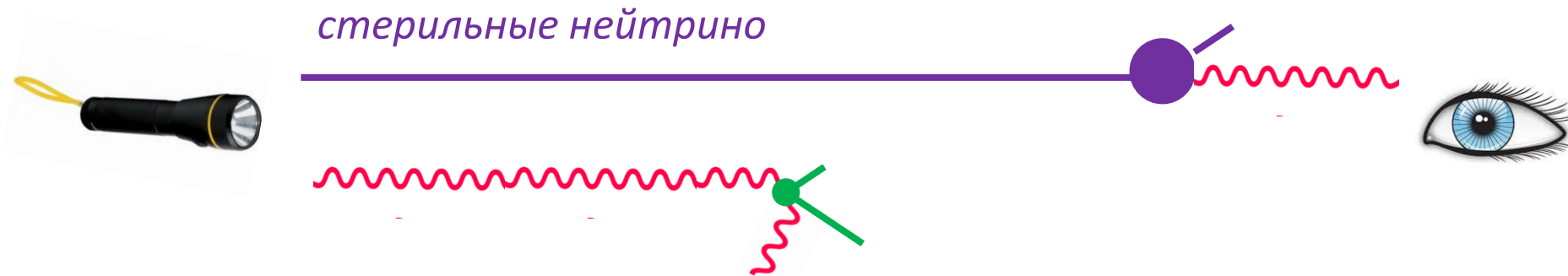


ФОТОНЫ НЕ ИЗ ИСТОЧНИКА, ХОТЯ И СВЯЗАНЫ С НИМ?

- те же источники рождают стерильные нейтрино высоких энергий
- распады стерильных нейтрино дают вторичные фотоны

Smirnov, Traunter; Huang et al.; ...

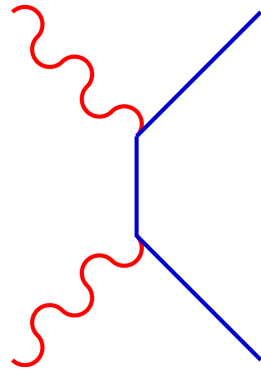
- ❑ не зарегистрированы обычные нейтрино от GRB 221009A
- ❑ ограничения на популяцию нейтрино от гамма-всплесков
- ❑ fine tuning: расстояние до GRB много больше длины пробега фотонов, требуется подстройка времени жизни стерильного нейтрино



Нет рождения пар: нарушение Лоренц-инвариантности?

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

изменение дисперсионных соотношений



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



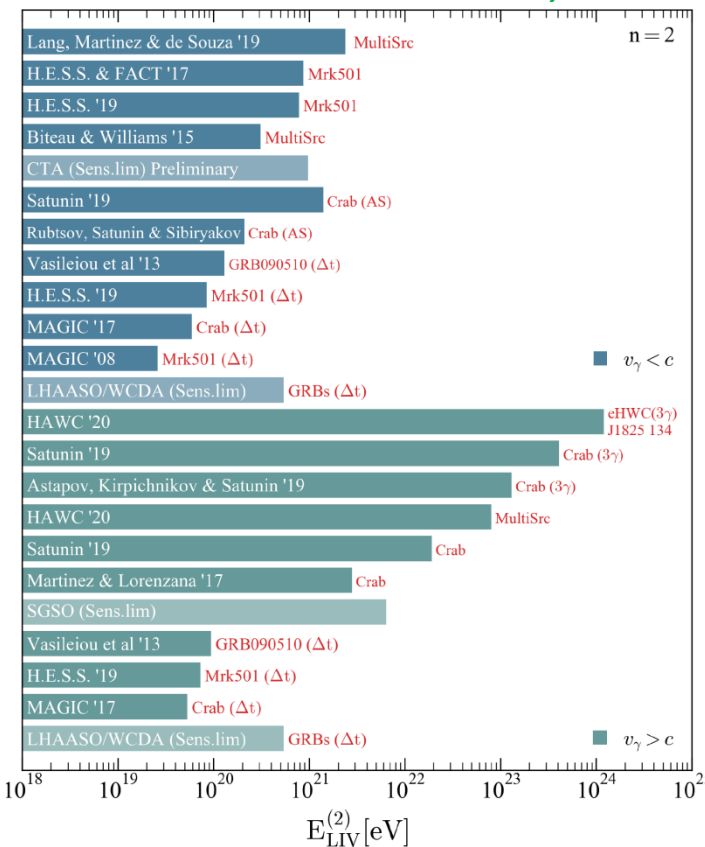
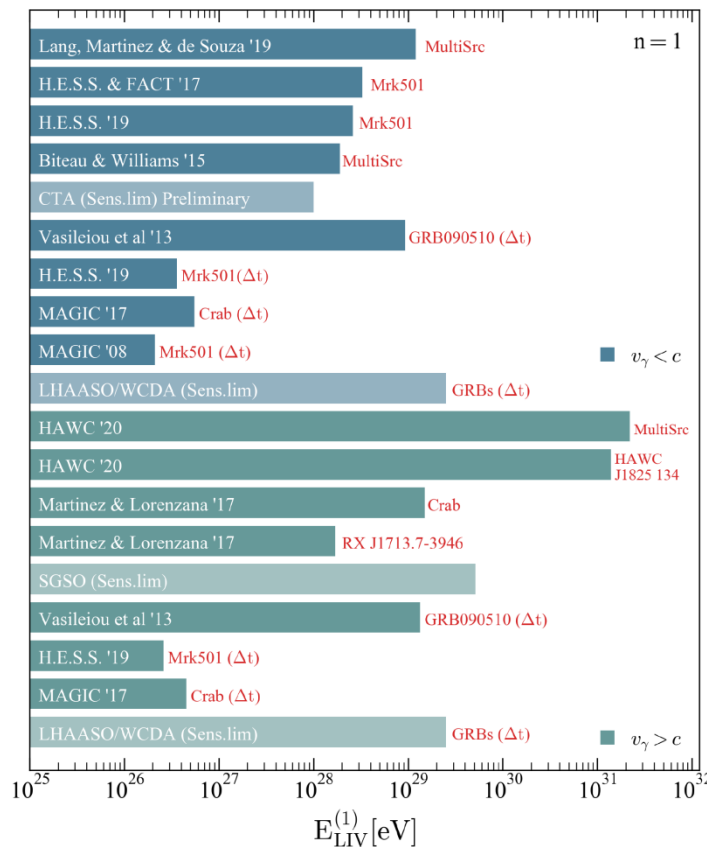
$$E_{\gamma b}^{\text{th}} = \frac{m_e^2}{E_\gamma} - \frac{1}{4} \delta_{\gamma,n} E_\gamma^{n+1}$$

сдвиг пороговой энергии рождения пар



Нет рождения пар: 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*

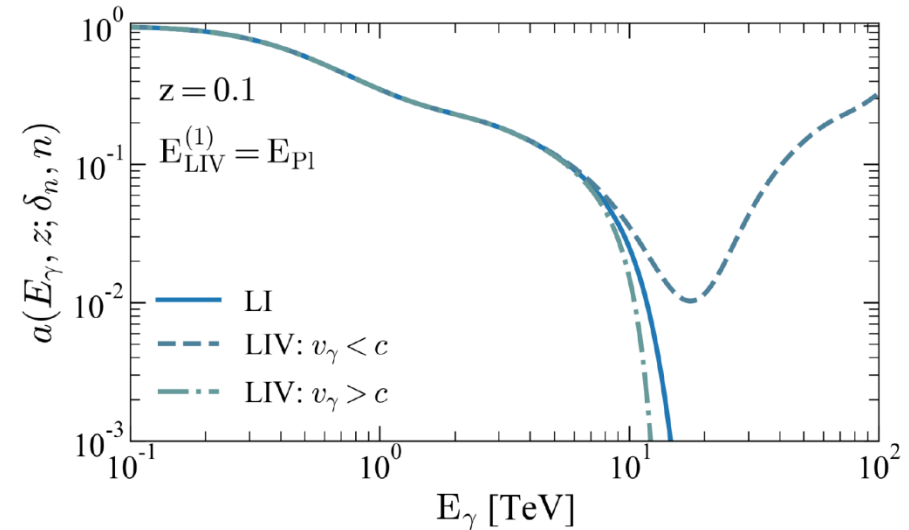
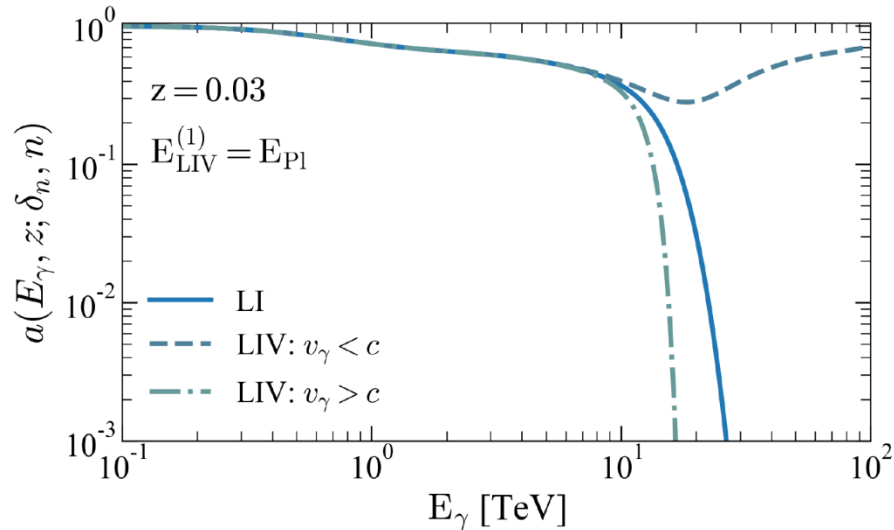


Lang et al. 2020



Нет рождения пар: нарушение Лоренц-инвариантности?

- сдвиг порога рождения пар



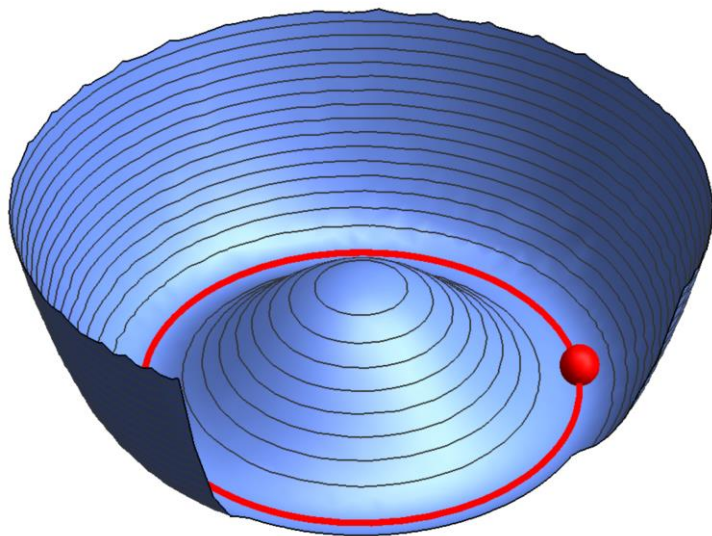
разный эффект для разных энергий, расстояний до источников,
моделей Лоренц-нарушения

Lang et al. 2019, 2020

экспериментально разрешенное Лоренц-нарушение может объяснить 251 ТэВ, но вряд ли 18 ТэВ

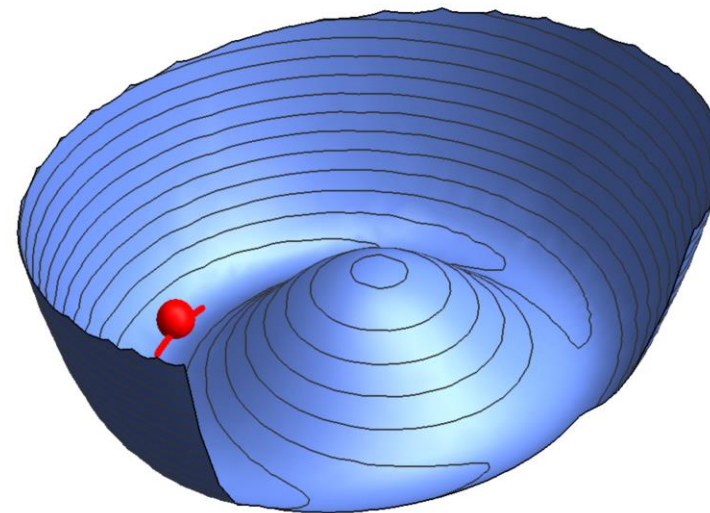


Аксионоподобные частицы (axion-like particles, ALPs)



спонтанное нарушение $U(1)$:
голдстоуновский бозон ($m=0$)

(один масштаб)



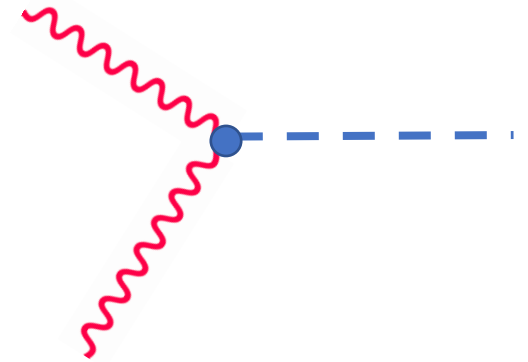
спонтанное + слабое явное нарушение:
псевдоголдстоуновский бозон (легкий)

(два масштаба)



Аксионоподобные частицы (ALPs)

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



- вершина разрешена всеми симметриями, должна появиться

- размерная константа g подавлена масштабом нарушения U(1)

 - ✓ для конкретной модели может быть связана с массой, напр. аксион КХД

$$\frac{a}{M}F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}, \quad M \sim f_A \sim \frac{\Lambda_{\text{QCD}}^2}{m}$$

- смешивание с фотоном во внешнем магнитном поле

- вероятность превращения зависит от массы, константы связи, энергии и магнитного поля



ALP-фотонные осцилляции

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

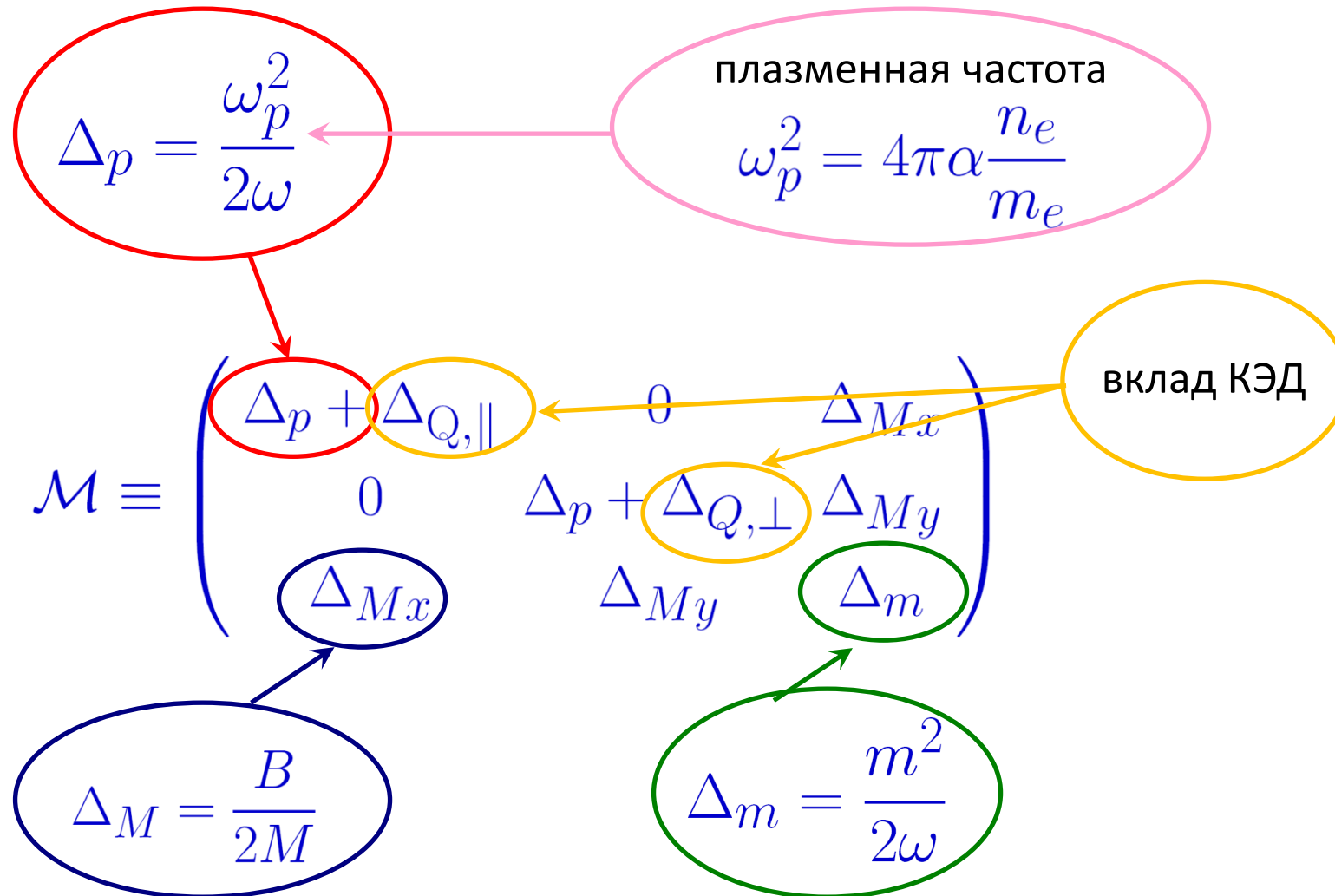


$$(i\partial_z + \omega + \mathcal{M}) \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ a \end{pmatrix} = 0$$

где $\mathcal{M} \equiv \begin{pmatrix} \Delta_p + \Delta_{Q,\parallel} & 0 & \Delta_{Mx} \\ 0 & \Delta_p + \Delta_{Q,\perp} & \Delta_{My} \\ \Delta_{Mx} & \Delta_{My} & \Delta_m \end{pmatrix}$



ALP-фотонные осцилляции



ALP-фотонные осцилляции

$$i \frac{d\rho(y)}{dy} = [\rho(y), \mathcal{M}(E, y)], \quad \mathcal{M} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & -igB_\theta \\ 0 & 0 & -igB_\phi \\ igB_\theta & igB_\phi & \frac{m^2}{E} \end{pmatrix}$$

$$\rho(0) = \text{diag}(1/2, 1/2, 0) \quad \rightarrow \quad \rho_{11}(y) + \rho_{22}(y)$$

вероятность перехода для постоянных B, n_e :

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

$$\text{где } \Delta_{\text{osc}}^2 = (\Delta_p + \Delta_{Q,\perp} - \Delta_m)^2 + 4\Delta_M^2$$



ALP-фотонные осцилляции

условия максимального смешивания:

$$\Delta m \ll 2\Delta_M \quad \Rightarrow \quad \omega \gg 700 \text{ eV} \left(\frac{m}{10^{-9} \text{ eV}} \right)^2 \left(\frac{B}{\text{G}} \right)^{-1} \left(\frac{M}{10^{11} \text{ GeV}} \right)$$

$$\Delta_p \ll 2\Delta_M \quad \Rightarrow \quad n_e \ll 10^{13} \text{ cm}^{-3} \left(\frac{\omega}{\text{TeV}} \right) \left(\frac{B}{\text{G}} \right)$$

$$\Delta_{Q,\perp} \ll \Delta_M \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{\omega}{\text{TeV}} \right) \left(\frac{B}{\text{G}} \right) \ll 7.52 \times 10^{-2}$$

$$L \gtrsim \frac{\pi}{\Delta_{\text{osc}}} \quad \Rightarrow \quad L \gtrsim 5.8 \times 10^{-2} \text{ pc} \left(\frac{B}{\text{G}} \right)^{-1} \left(\frac{M}{10^{11} \text{ GeV}} \right)$$

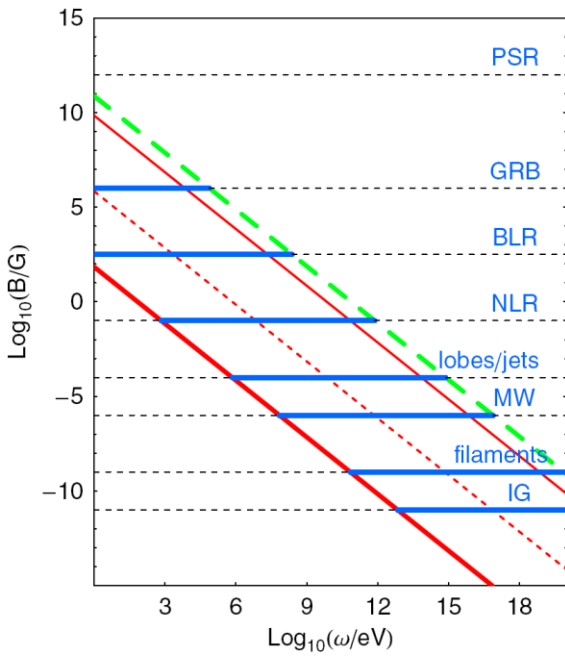


ALP-фотонные осцилляции

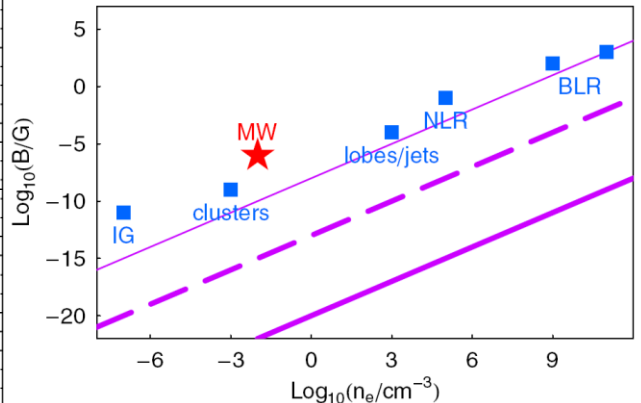
условия максимального смешивания:

$$\Delta_m \ll 2\Delta_M$$

$$\Delta_{Q,\perp} \ll \Delta_M$$



$$\Delta_p \ll 2\Delta_M$$

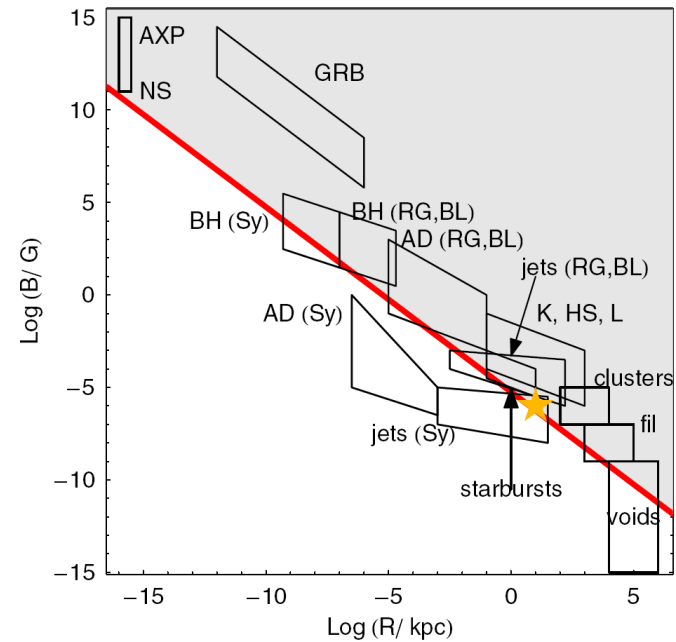


Fairbairn et al. 2009

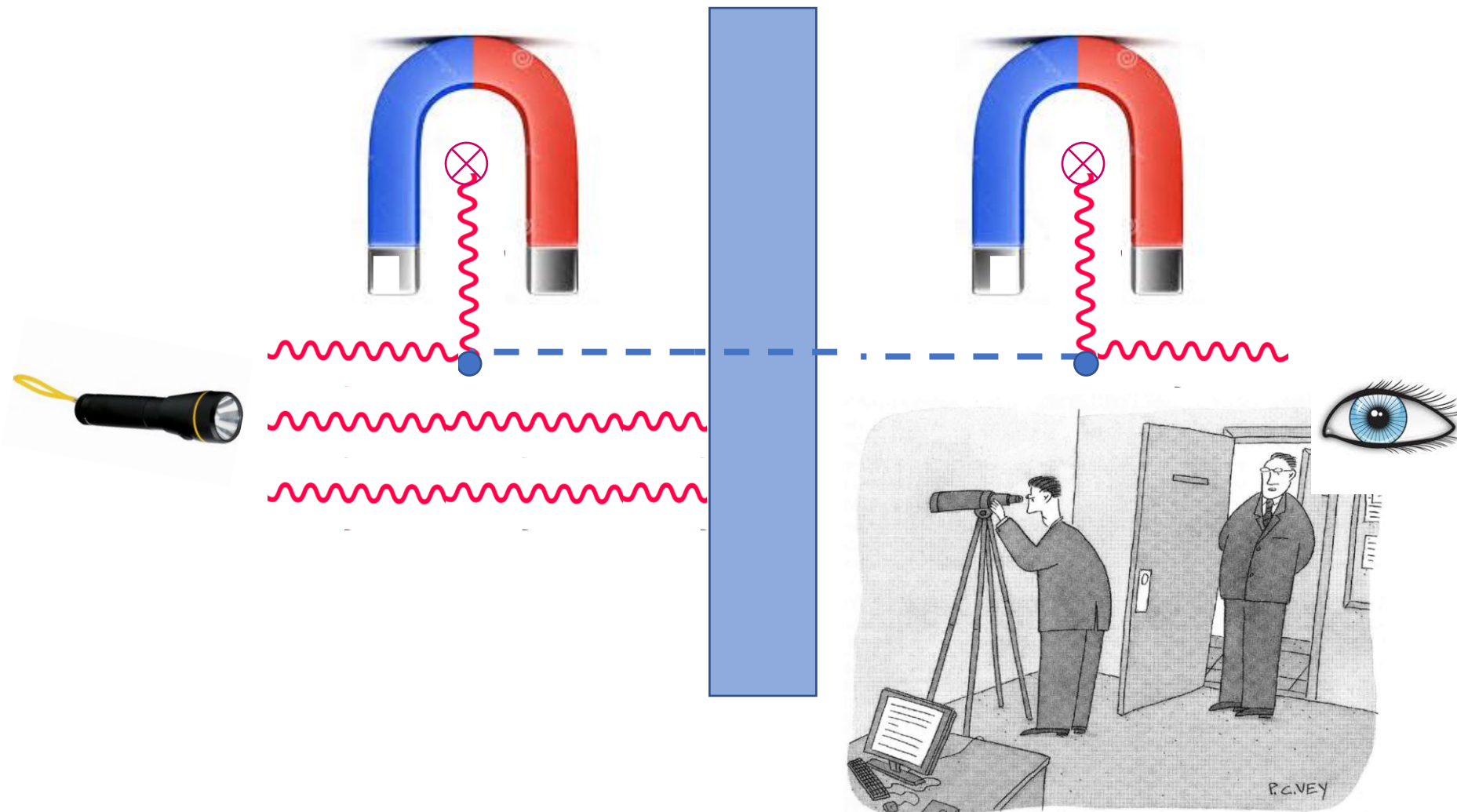
$$L \gtrsim \frac{\pi}{\Delta_{osc}}$$



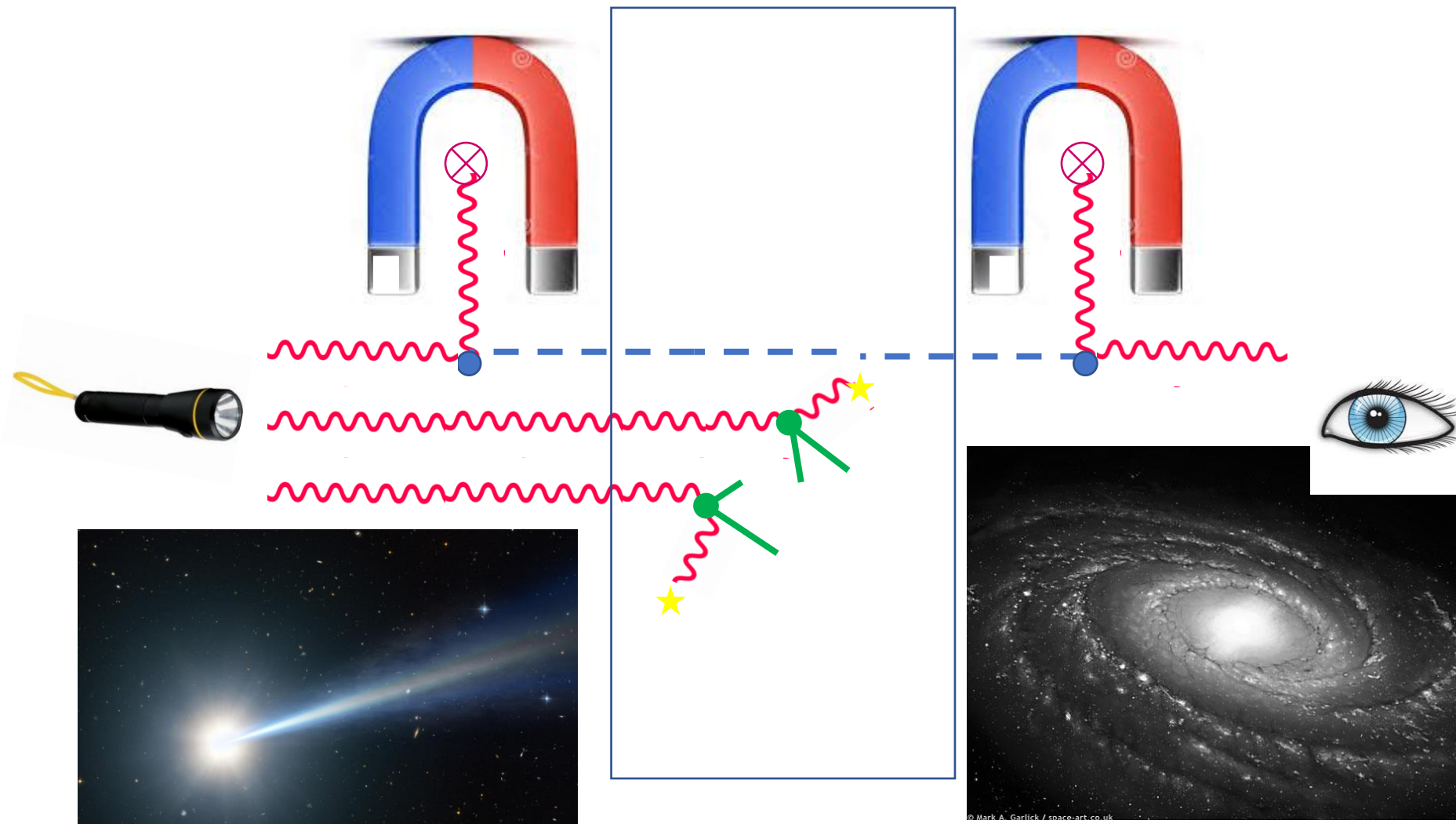
M=10¹⁰ GeV axion



ALP: свет сквозь стену

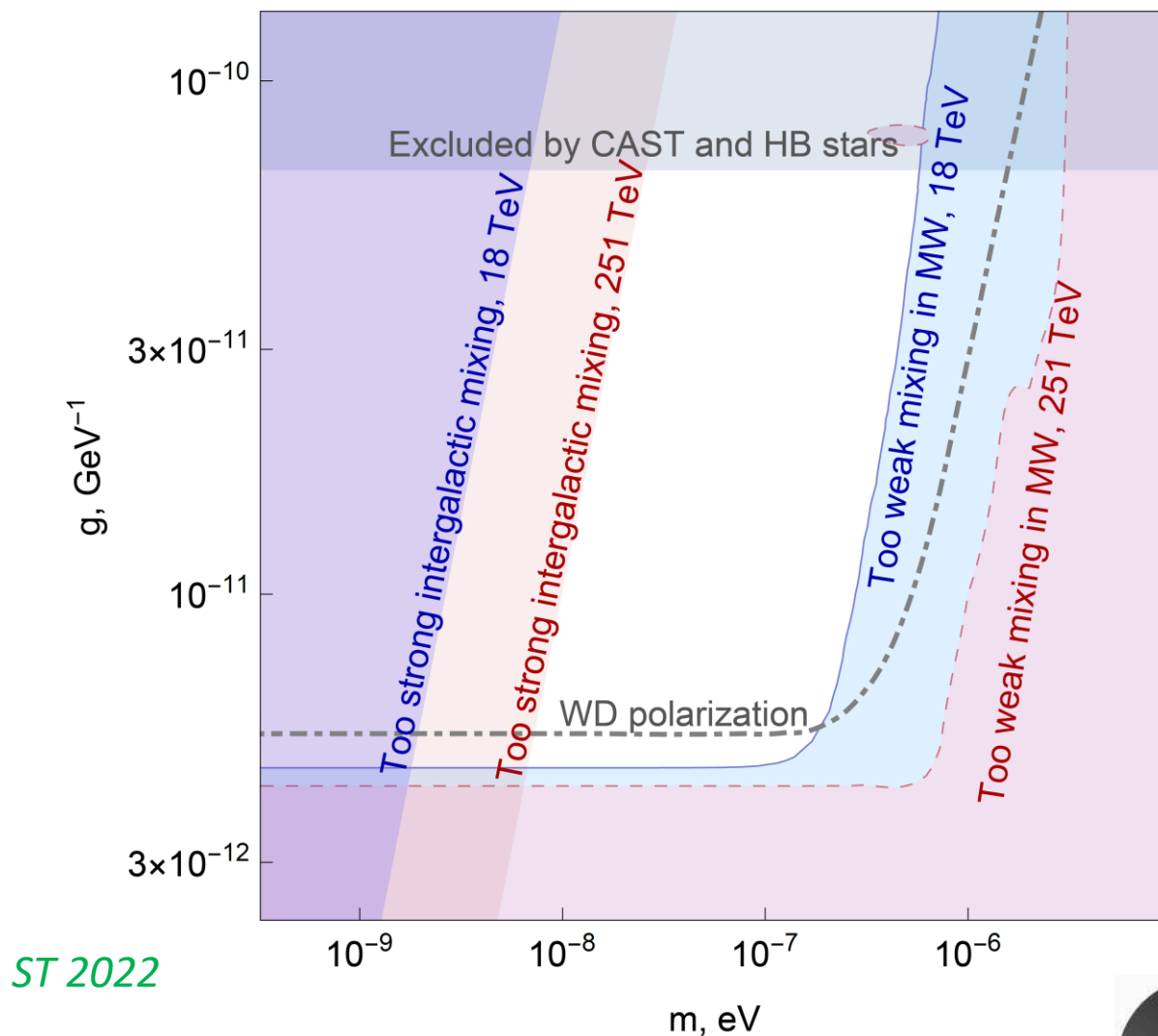


ALP: свет сквозь Вселенную



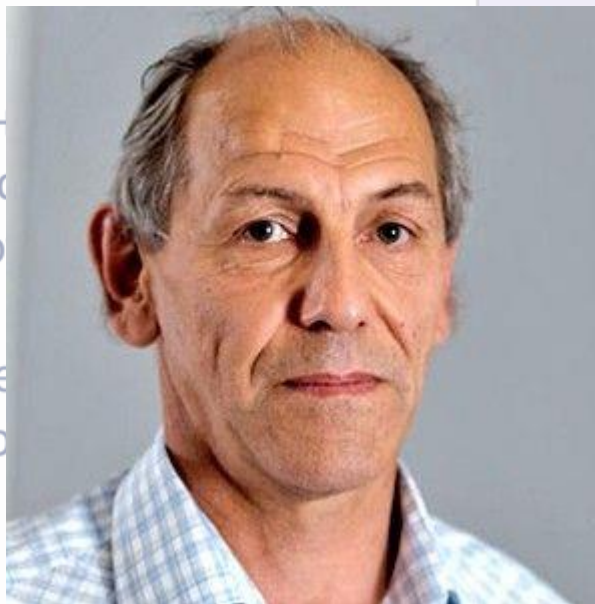
Параметры ALP для GRB 221009A

- предполагаем максимальное смешивание в источнике: 1/3 фотонов в ALP
- предполагаем отсутствие смешивания в межгалактическом пространстве (всё, что переходит в фотонный канал, поглотится)
- вычисляем смешивание в Галактике (направление на GRB, магнитное поле Pshirkov et al.)
- требуем выживание $>1\%$ потока

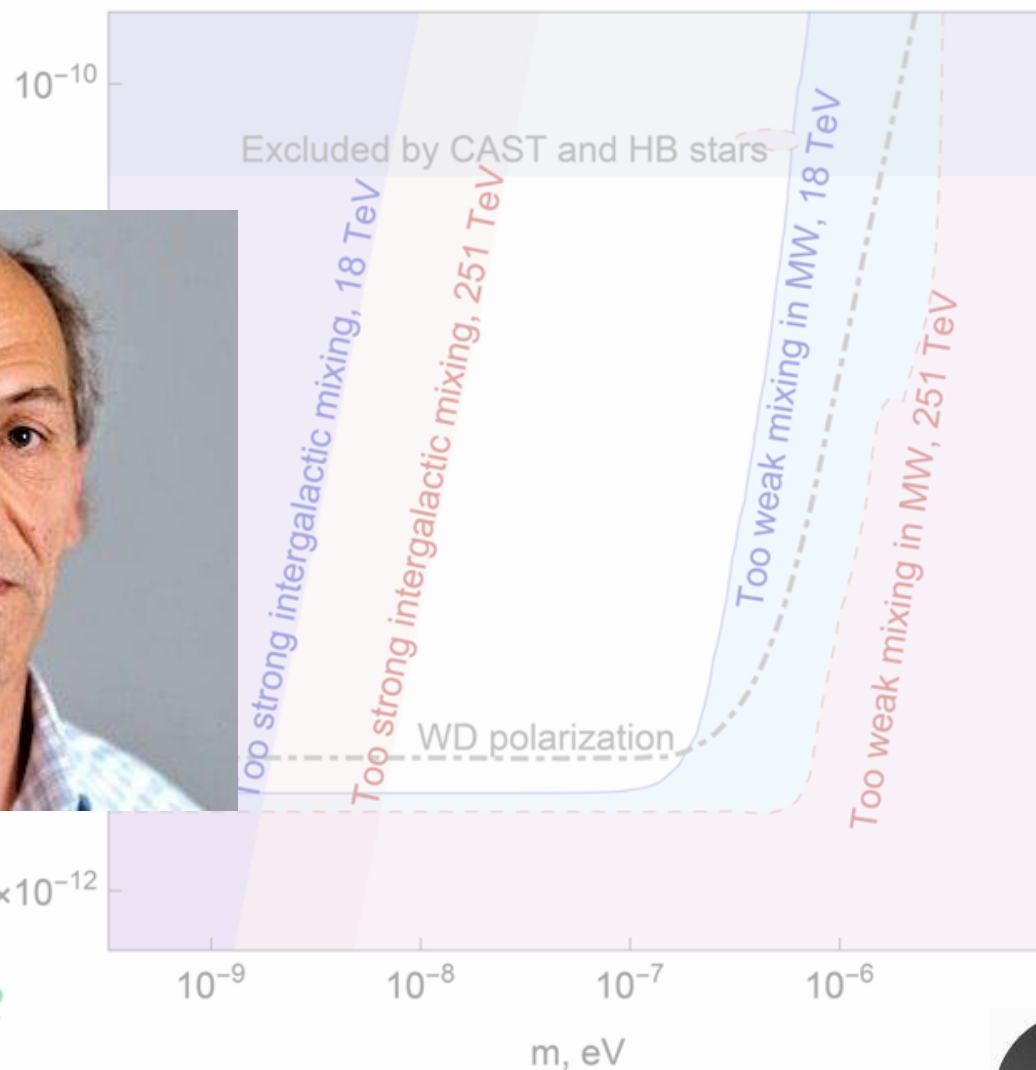


Параметры ALP для GRB 221009A

- предполагаем максимальное смешивание в источнике: 1/3 фотонов в ALP
- предполагаем отсутствие смешивания в межгалактическом пространстве (всё переходит в фотонный канал, поглощается)
- вычисляем смешивание в Галактике (направление на GRB, магнитное поле) (Pshirkov et al.)
- требуем выживание $>1\%$ потока

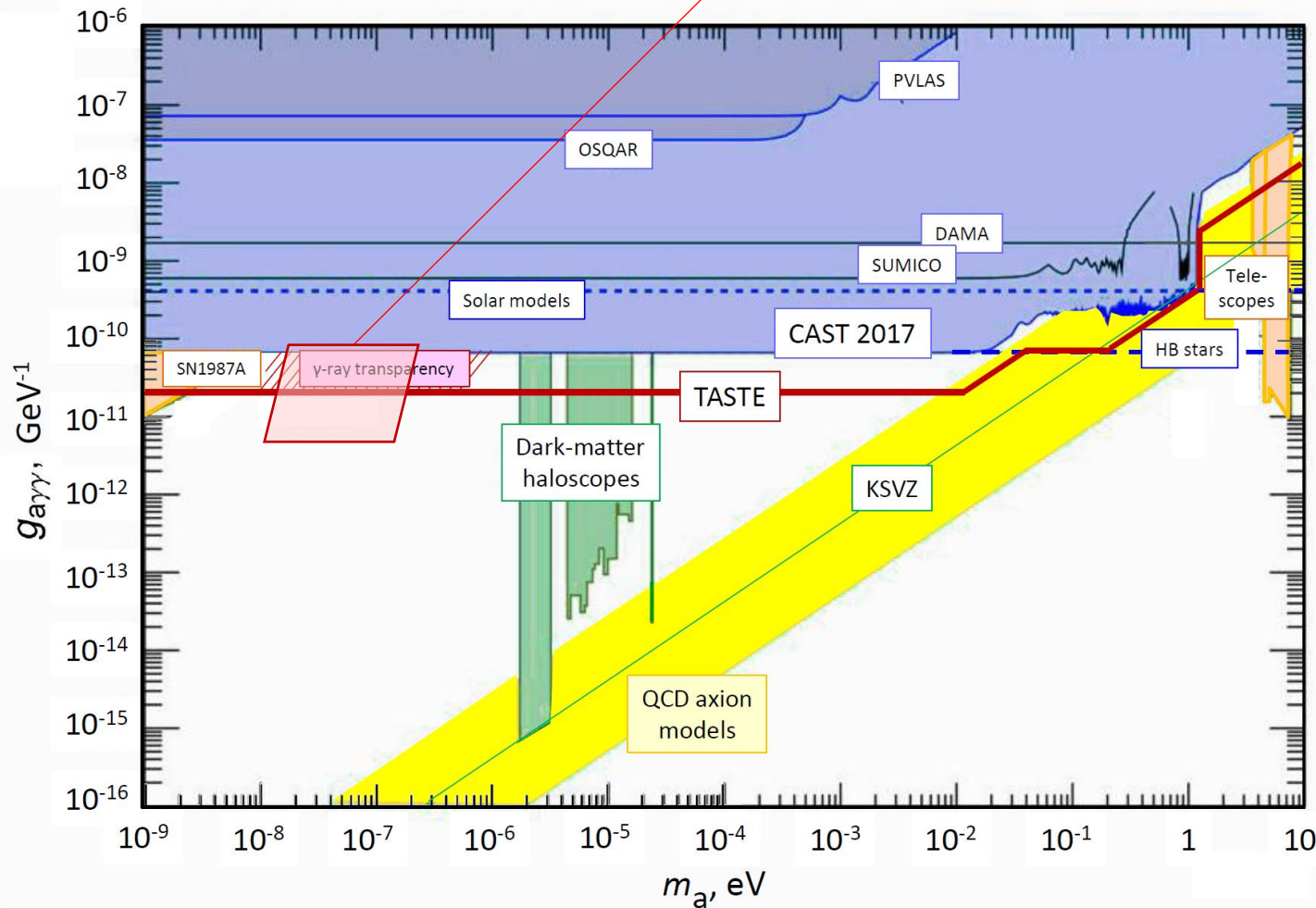


ST 2022



Параметры ALP

$$m \sim (\text{a few}) 10^{-8} \text{ eV}, \quad g_{a\gamma} \sim (\text{a few}) 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$$



- разрешенная область параметров
- мотивация из эволюции звезд
- в простых моделях – не аксион КХД, не частица темной материи



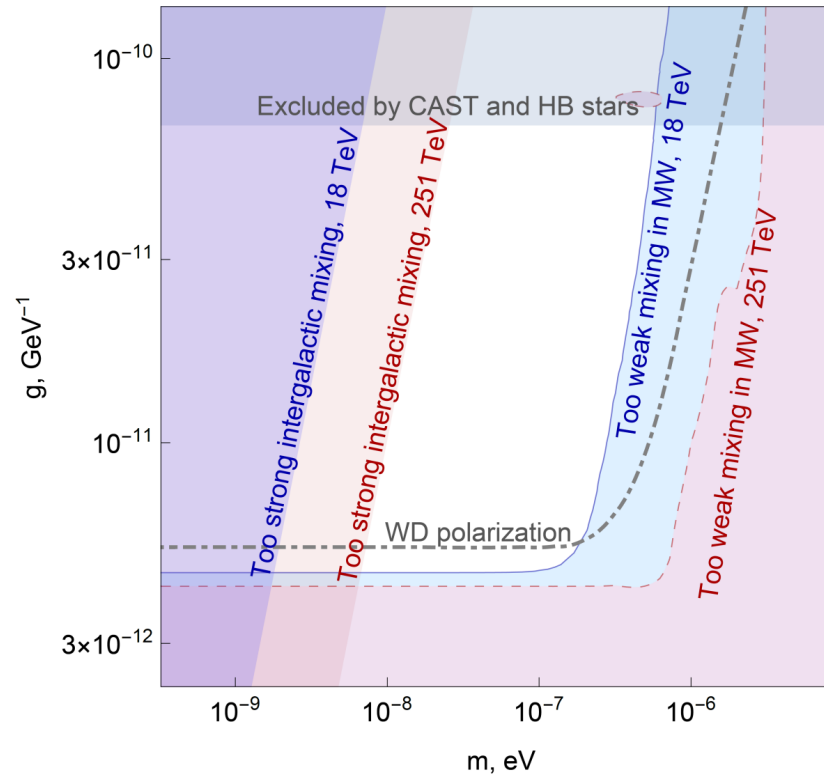
Смешивание в источнике?

- предполагаем максимальное смешивание в источнике: 1/3 фотонов в ALP

статья «пользуется популярностью»,
но это предположение вызвало
справедливую критику коллег

Galanti, Roncadelli, Tavecchio – “wishful thinking”

Carenza, Marsh – предположили, что поле родительской галактики – как в Млечном Пути, GRB находится в центре, ориентация к лучу зрения случайная – не получили сильного смешивания



Родительская галактика GRB 221009A

Hubble Space Telescope

Levan et al. 2023

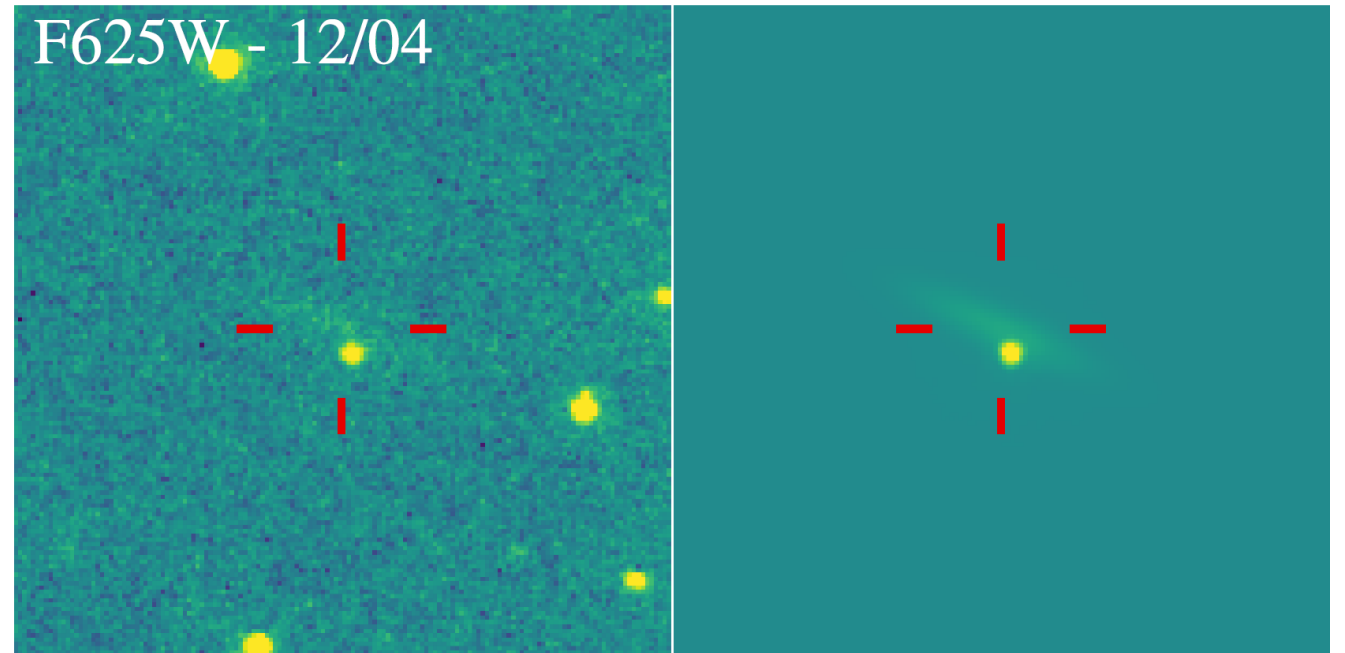
информации немного, но она интересная!

геометрия

- дисковая галактика, видимая с ребра!
- положение GRB в галактике

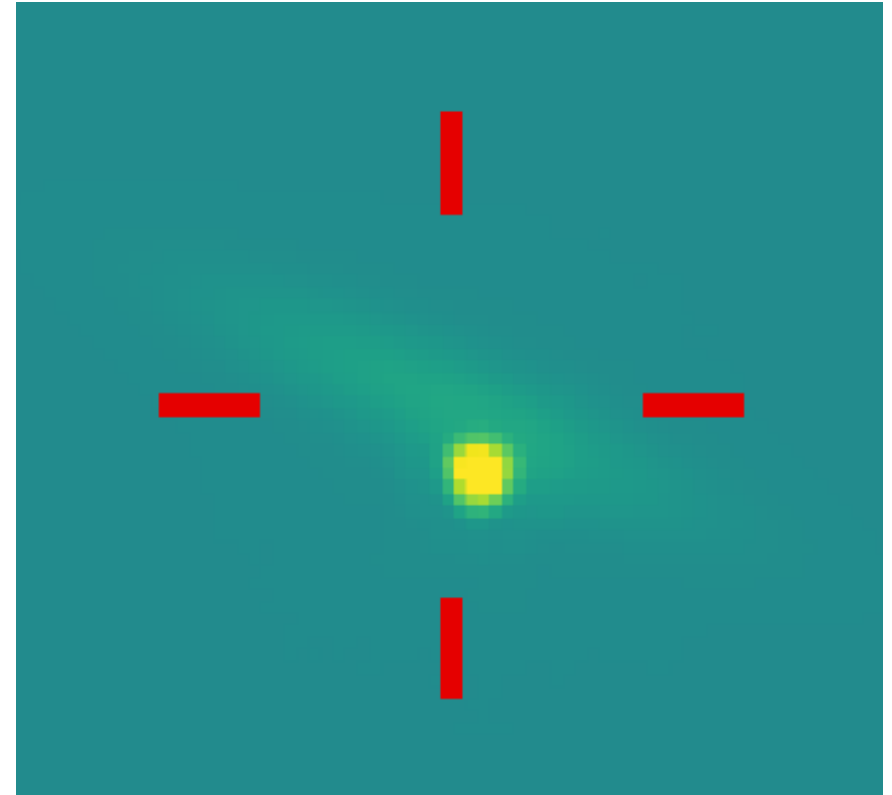
размеры, светимость,
профиль распределения звёзд...

галактика вполне типична для родительских галактик длинных гамма-всплесков



Родительская галактика GRB 221009A – видна с ребра!

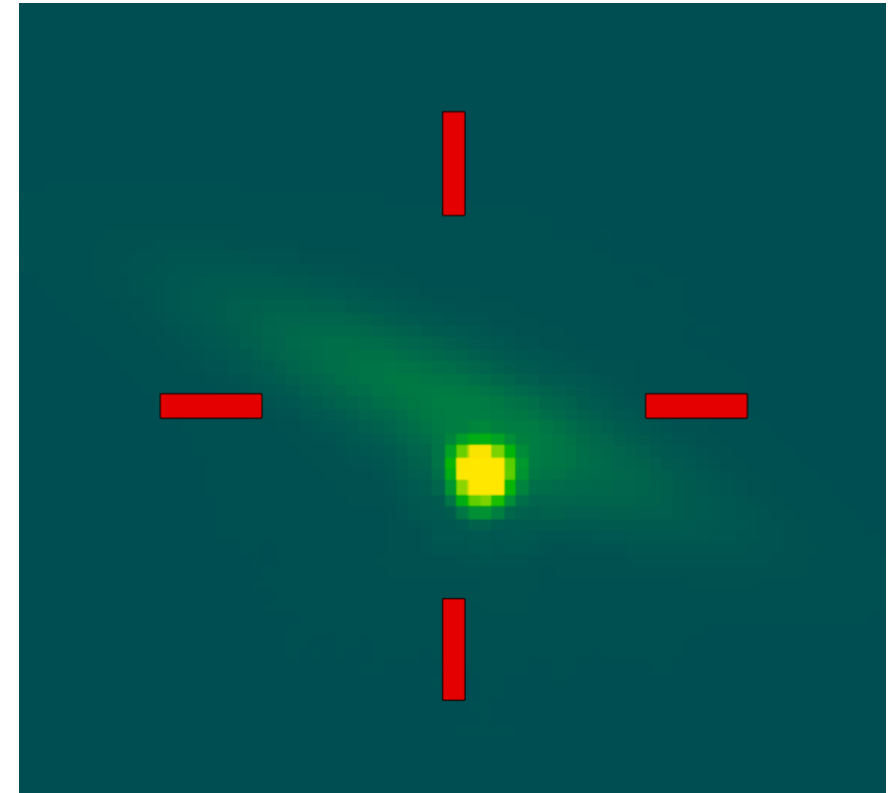
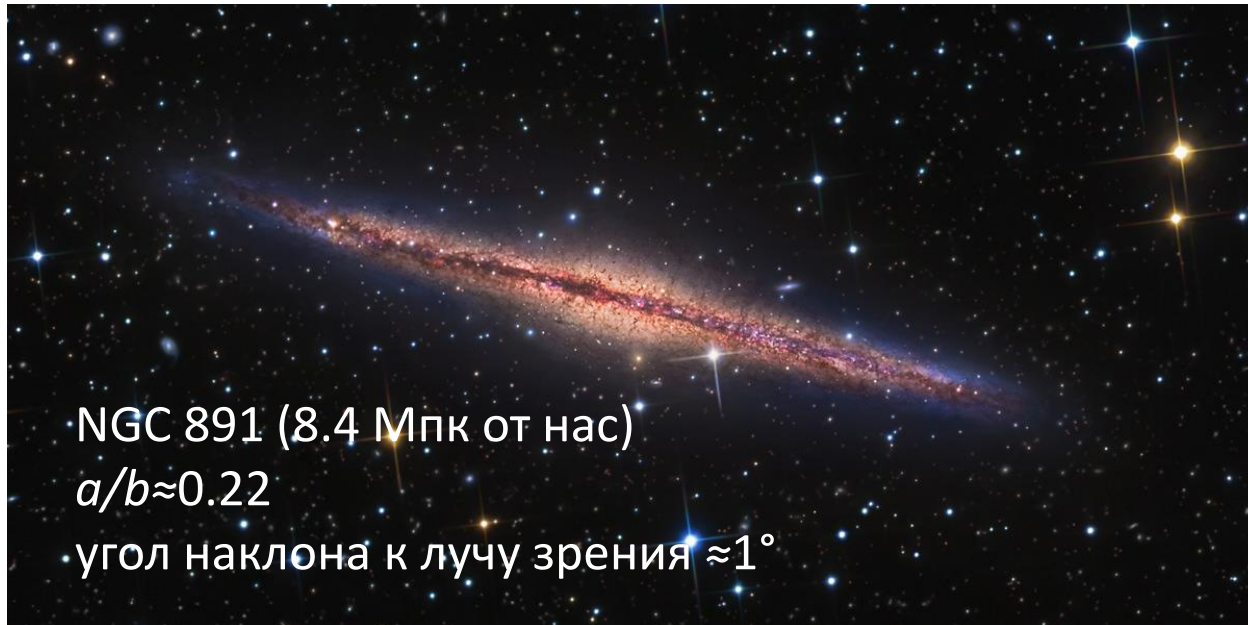
отношение полуосей эллиптического фита $a/b \approx 0.21$
Levan et al. 2023



Родительская галактика GRB 221009A – видна с ребра!

отношение полуосей эллиптического фита $a/b \approx 0.21$

Levan et al. 2023



Родительская галактика GRB 221009A – видна с ребра!

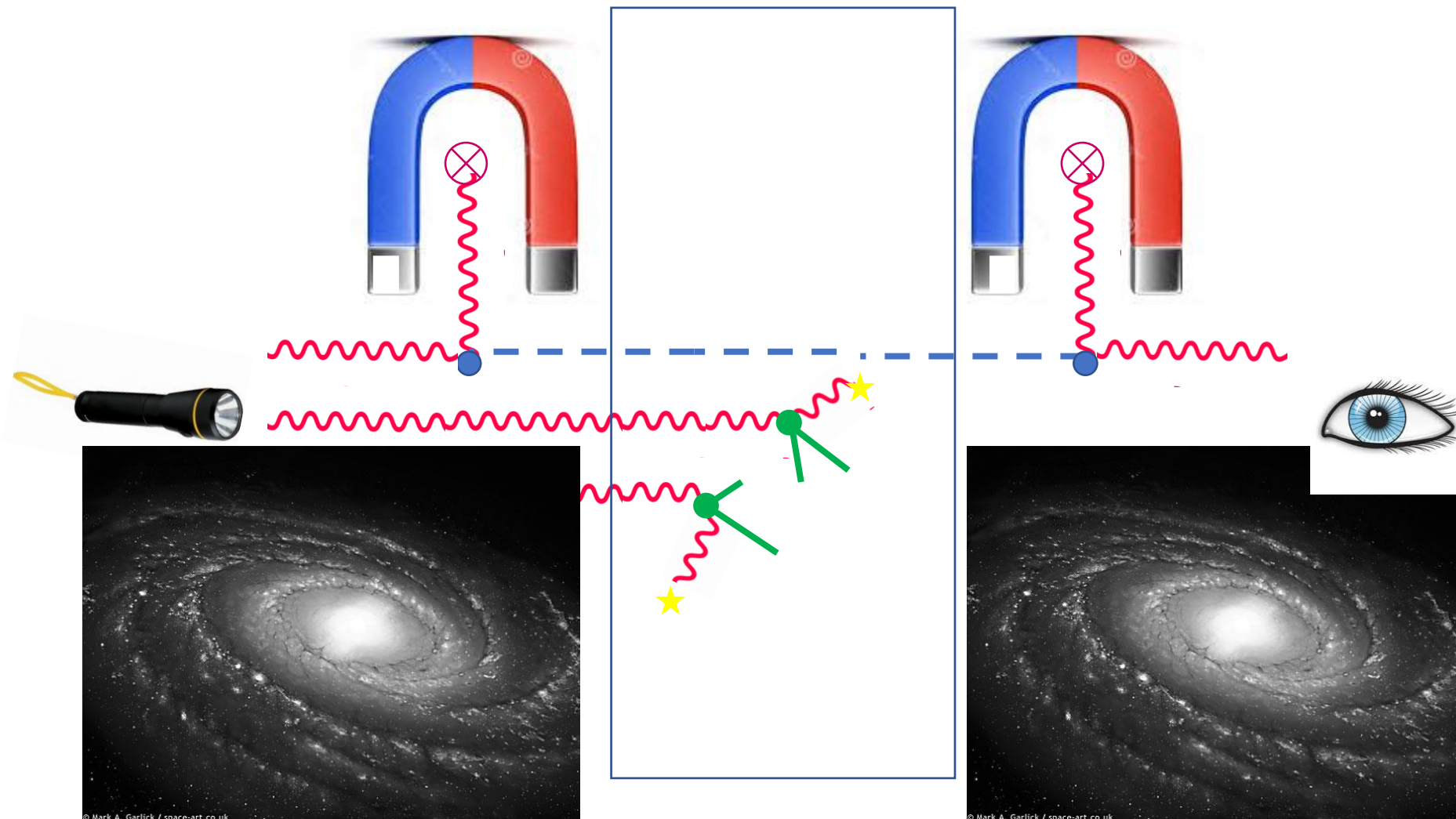
- редкий случай: угол плоскости галактики к лучу зрения $\approx 0^\circ$
- излучение от GRB по пути к нам проходит сквозь диск родительской галактики
- но угол плоскости Млечного Пути к лучу зрения $\approx 4^\circ$

излучение от GRB проходит сквозь диски родительской галактики и Млечного Пути!

магнитное поле сосредоточено в дисках – больше вероятность ALP-фотонной конверсии



ALP: свет сквозь Вселенную



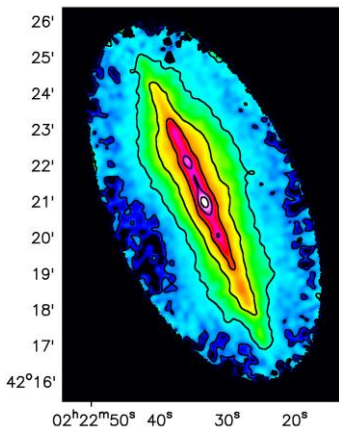
Магнитное поле родительской галактики GRB 221009A: игрушечная модель

- модель поля Млечного Пути *Pshirkov et al.*, гладко дополненная в центре (ближе 2.5 кпк к центру нет спиральных ветвей *Baikova, Bobylev 2022*)
- поле гало, чтобы объяснить результаты измерений поля NGC 891
- космологические моделирования формирования дисковых галактик с магнитными полями “Auriga”, *Pakmor et al. 2017*
- информация о родительской галактике GRB 221009A из наблюдений HST *Levan et al. 2023*

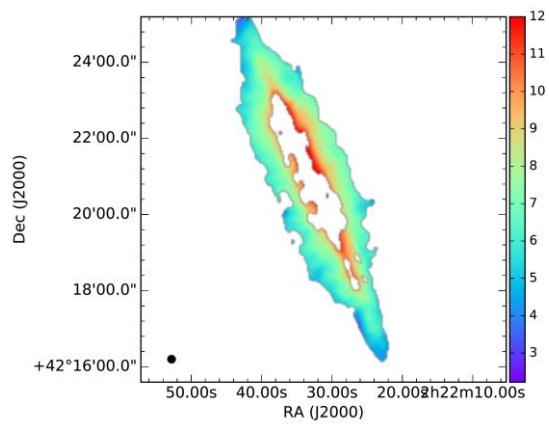


Магнитное поле родительской галактики GRB 221009A: игрушечная модель шаг 1: Млечный Путь и NGC 891

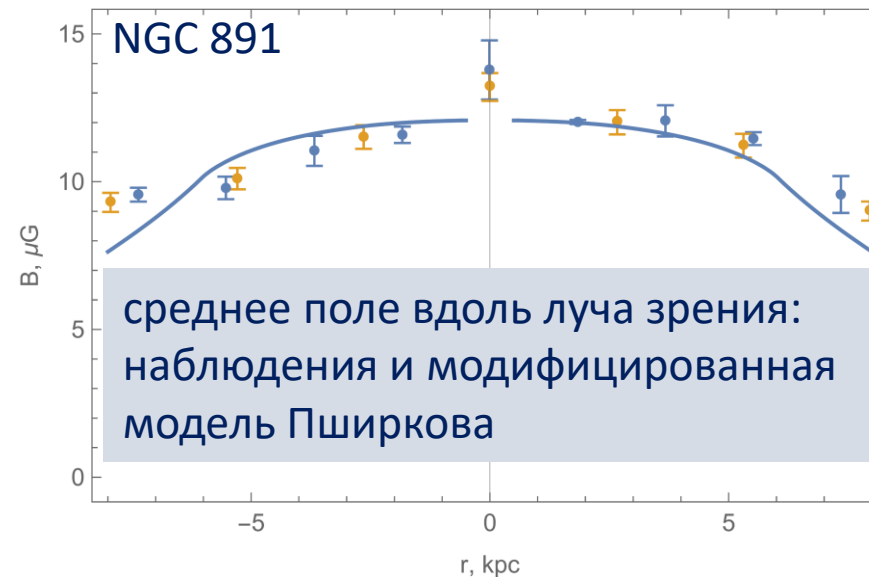
- модель поля Млечного Пути *Pshirkov et al.*, гладко дополненная в центре (ближе 2.5 кпк к центру нет спиральных ветвей *Bobylev&Baikova 2022*)
- NGC 891 – “близнец” Млечного Пути, наблюдается с ребра. Близкое расстояние позволяет изучить структуру магнитного поля. Требуется “X-shape” поле гало.



Schmidt et al. 2019



Mulcahy et al. 2018

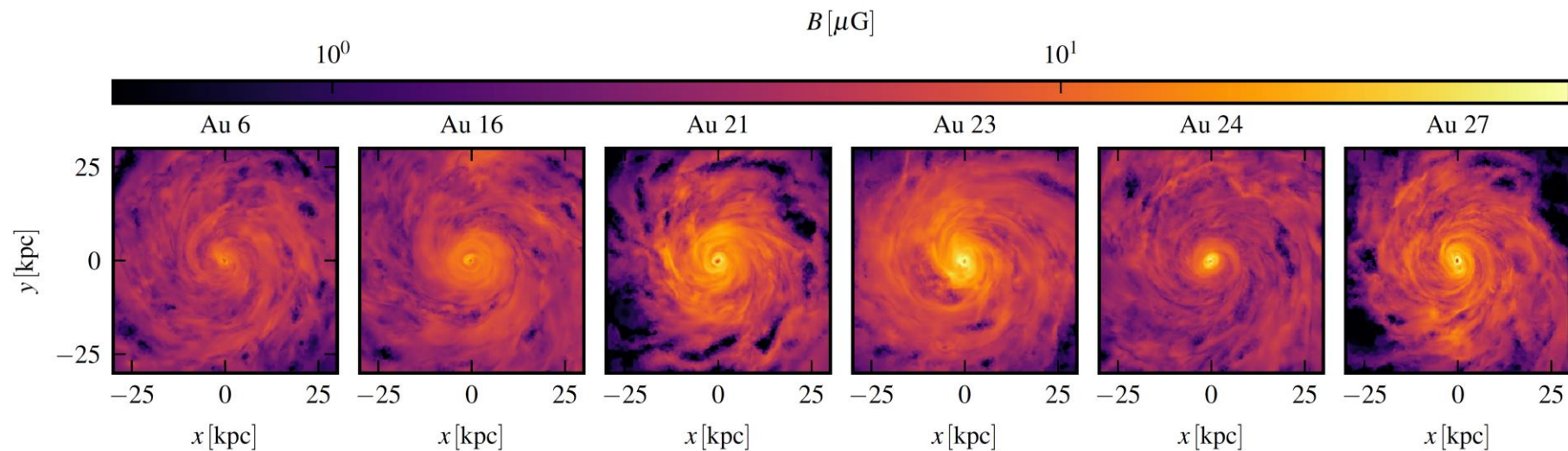


Магнитное поле родительской галактики GRB 221009A:

игрушечная модель

шаг 2: масштабирование параметров с использованием Auriga

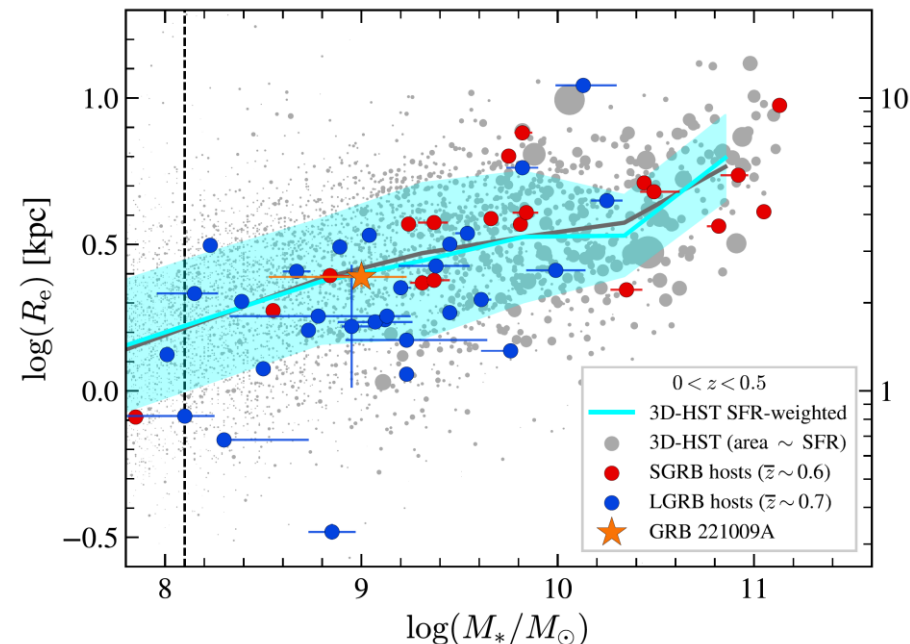
- полная компьютерная модель 30 дисковых галактик с их магнитными полями, отобранные из космологических моделирования Auriga *Pakmor et al. 2017*
- масштабирование:
 - ✓ центрального значения поля как $(\Sigma\text{SFR})^{0.4} \equiv (\text{плотность скорости звездообразования})^{0.4}$
 - ✓ радиальных масштабов поля как $(R_{\text{eff}})^1 \equiv (\text{эффективный радиус распределения звезд})^1$



Магнитное поле родительской галактики GRB 221009A: игрушечная модель

шаг 3: параметры галактики с использованием наблюдений HST

- R_{eff} измерен и полная звездная масса M_* оценена в [Levan et al. 2023](#)
- там же установлено, что галактика – типичная star-forming galaxy
- для таких галактик есть соотношение между M_* и ΣSFR для данного расстояния [Popesso et al. 2022](#)
- параметры NGC 891 опубликованы по результатам наблюдений в ряде работ



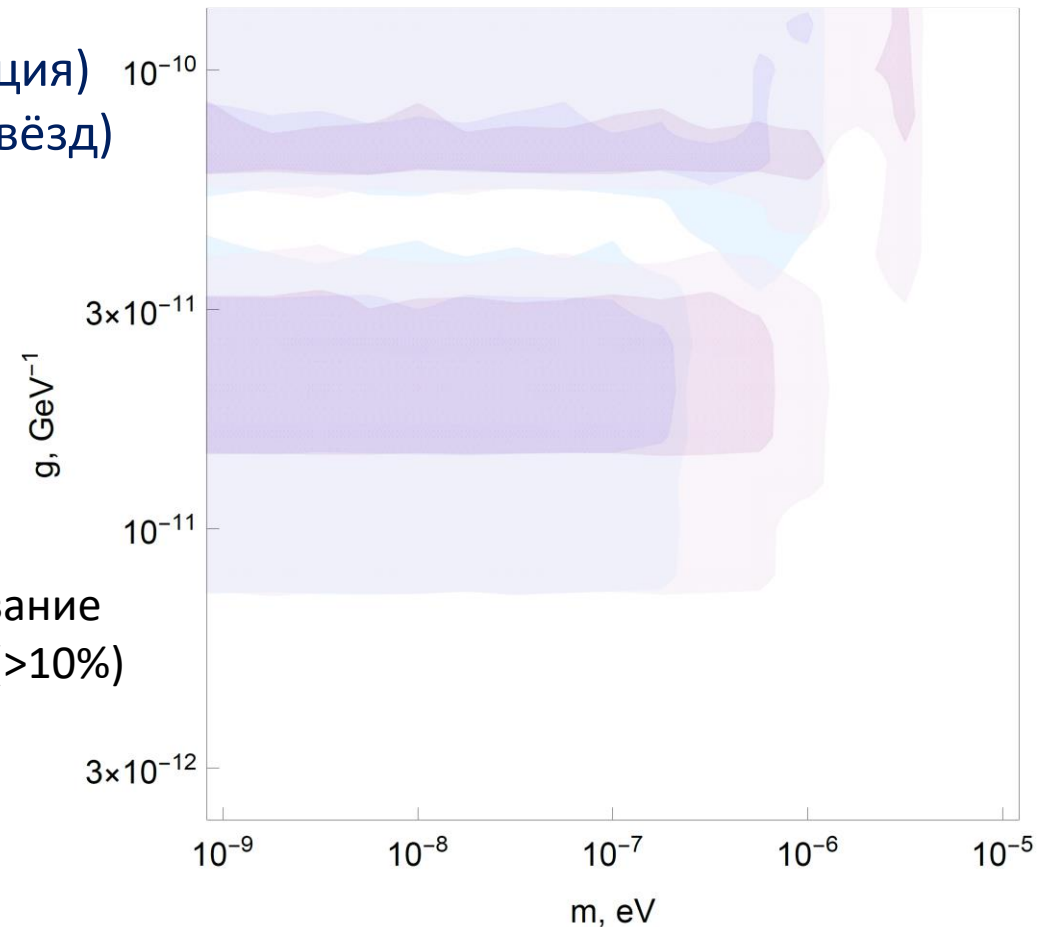
Конверсия в ALP в магнитном поле родительской галактики GRB 221009A

- осталось неизвестным:
 - положение GRB вдоль луча зрения (видна только проекция)
(случайные положения в соответствии с распределением звёзд)
 - ориентация спиральных ветвей
(случайные повороты от 0 до 2π)
- результаты моделирования:

пространство параметров ALP

темная закрашка: максимальное смешивание
светлая закрашка: сильное смешивание ($>10\%$)
(в 68% реализаций)

розовый: для 18 ТэВ
голубой: для 251 ТэВ



ST 2023, to appear



Заключение

- GRB 221009A – рекордный гамма-всплеск по мощности и по энергии фотонов
- расстояние большое – красное смещение $z=0.151$
- фотоны LHAASO (до 18 ТэВ)
- фотоноподобное событие, Ковер-2 (251 ТэВ)
- из-за рождения пар на фоновых излучениях фотоны таких энергий до нас долетать не должны
- фотоны из Галактики? Вторичные частицы? Нарушение Лоренц-инвариантности?
- аксионоподобные частицы с экспериментально разрешенными параметрами могут объяснить наблюдение фотонов
- уникальная ориентация родительской галактики и Млечного Пути допускает сильную конверсию и реконверсию
- изучение моделей физики частиц с помощью астрофизики!



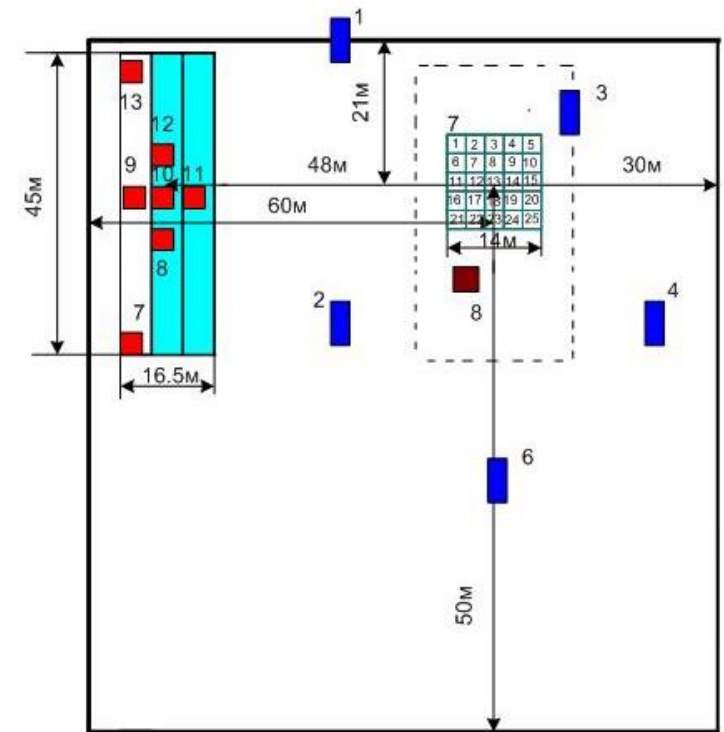
ЗАПАСНЫЕ СЛАЙДЫ

Часть оригинальных результатов получена при поддержке РФФ, грант 22-12-00253



Ковер-2: поиск фотонных ливней

- энергия: по центральному Ковру
- направление прихода: по выносным пунктам
- тип первичной частицы: по мюонному детектору
- фотонные ливни бедны мюонами
- полное Монте-Карло (ливень+установка)
 - ✓ «фотонная энергия» (отличается от КЛ)
 - ✓ критерии отбора фотонных кандидатов по отношению n_{μ}/N_e

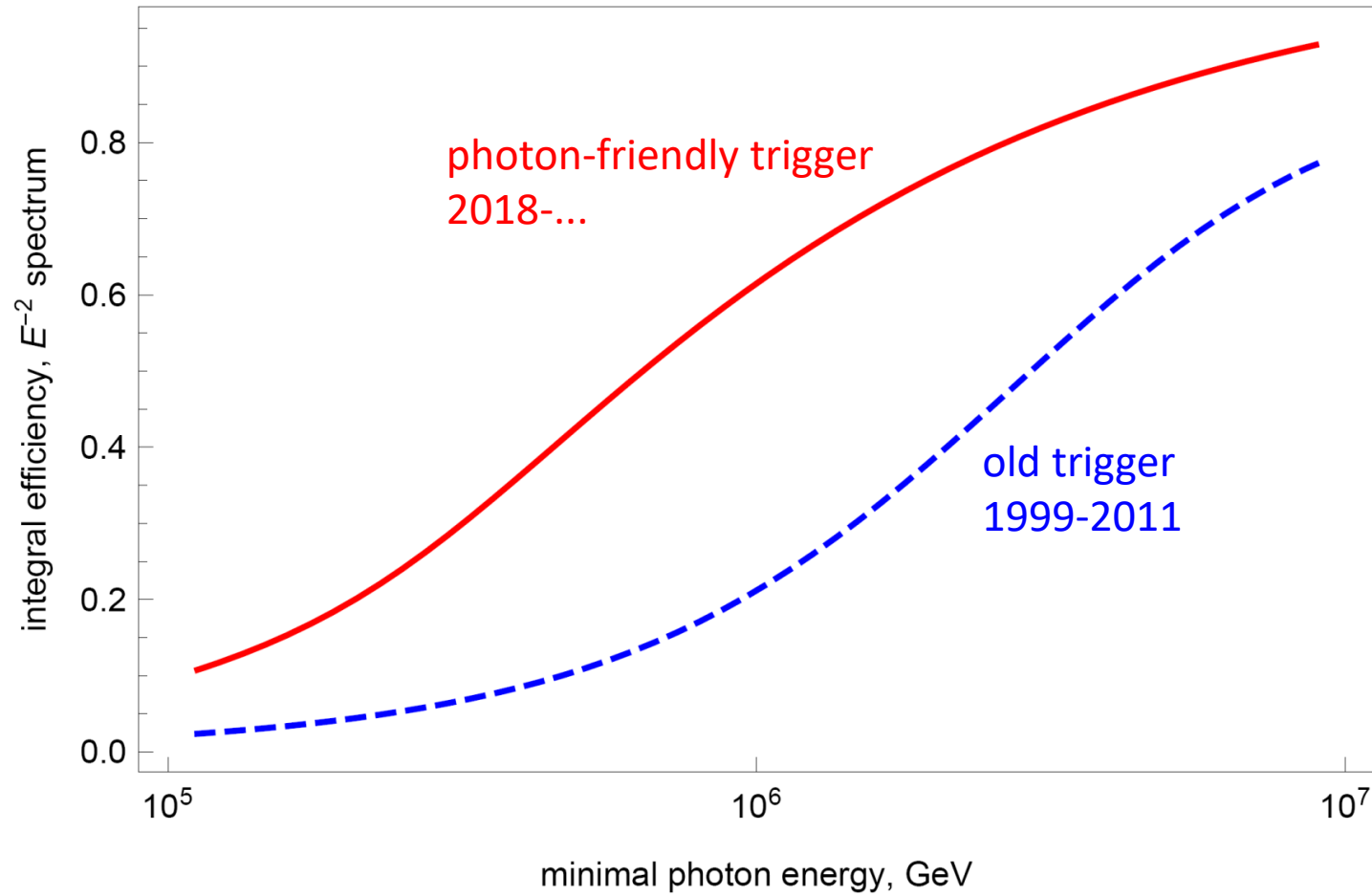


стандартный анализ: 1241 день, 100634 события, фотонных кандидатов 1346



Ковер-2: поиск фотонных ливней

- эффективность регистрации фотонов



Недавний результат Ковра

регистрация вспышки из области Cygnus одновременно с нейтрино IceCube

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 916:L22 (5pp), 2021 August 1

© 2021. The American Astronomical Society. All rights reserved.

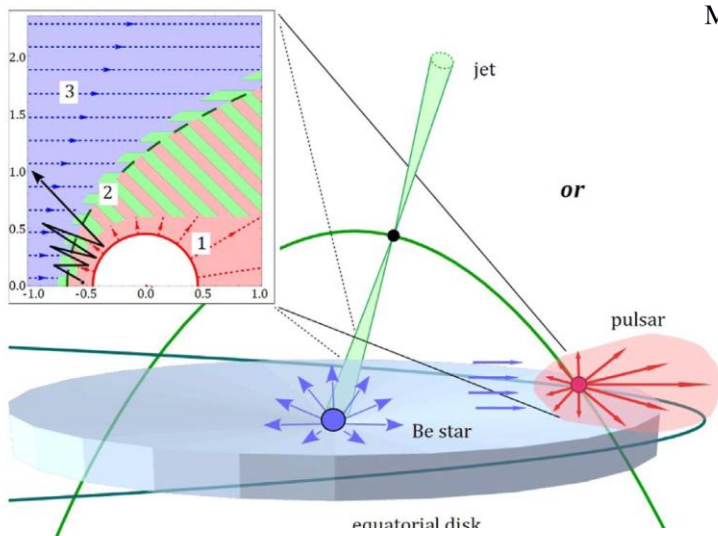
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac14b2>



CrossMark

Observation of Photons above 300 TeV Associated with a High-energy Neutrino from the Cygnus Region

D. D. Dzhappuev¹, Yu. Z. Afashokov¹, I. M. Dzaparova^{1,2}, T. A. Dzhatdov^{1,3}, E. A. Gorbacheva¹, I. S. Karpikov¹, M. M. Khadzhiev¹, N. F. Klimenko¹, A. U. Kudzhaev¹, A. N. Kurenya¹, A. S. Lidvansky¹, O. I. Mikhailova¹, V. B. Petkov^{1,2}, E. I. Podlesnyi^{1,3,4}, V. S. Romanenko¹, G. I. Rubtsov¹, S. V. Troitsky¹, I. B. Unatlov¹, I. A. Vaiman^{3,4}, A. F. Yanin¹, Ya. V. Zhezher^{1,5}, and K. V. Zhuravleva¹,

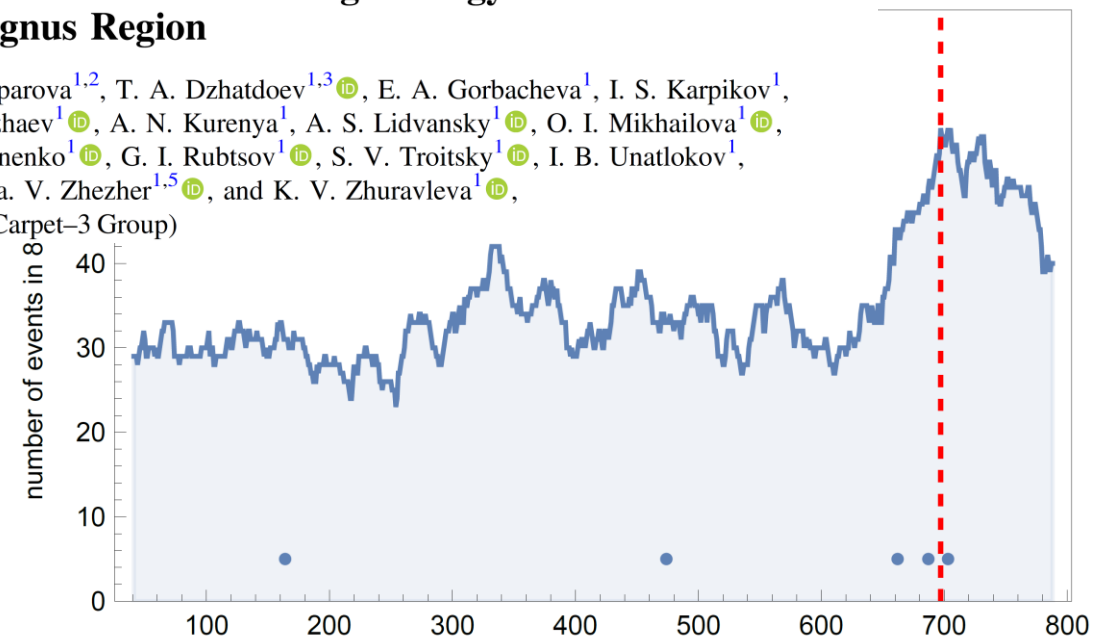


THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 921:L10 (5pp), 2021 November 1

© 2021. The American Astronomical Society. All rights reserved.

OPEN ACCESS

(Carpet-3 Group)



<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac2f3d>

days of data collection



CrossMark

PeV Photon and Neutrino Flares from Galactic Gamma-Ray Binaries

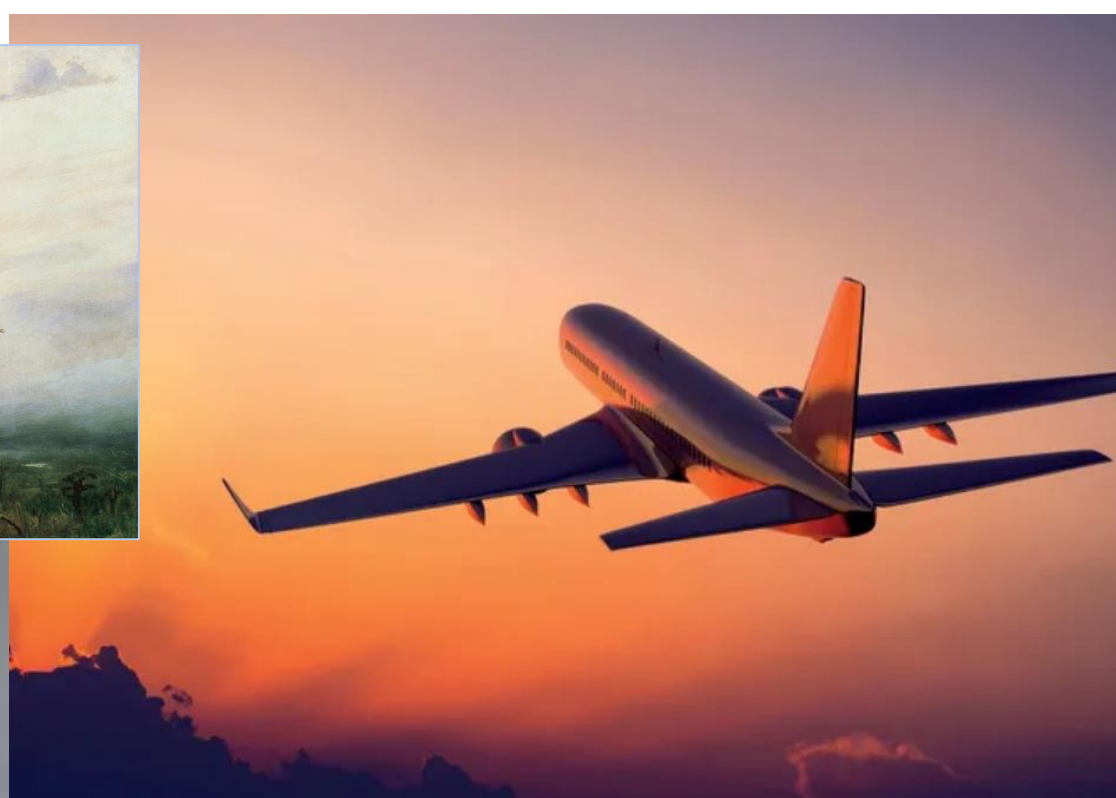
A. M. Bykov¹, A. E. Petrov¹, M. E. Kalyashova^{1,2}, and S. V. Troitsky³

¹Ioffe Institute, 26 Politekhnicheskaya, St. Petersburg, 194021, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politekhnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russia

³Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, 60th October Anniversary Prospect 7a, Moscow, 117312, Russia

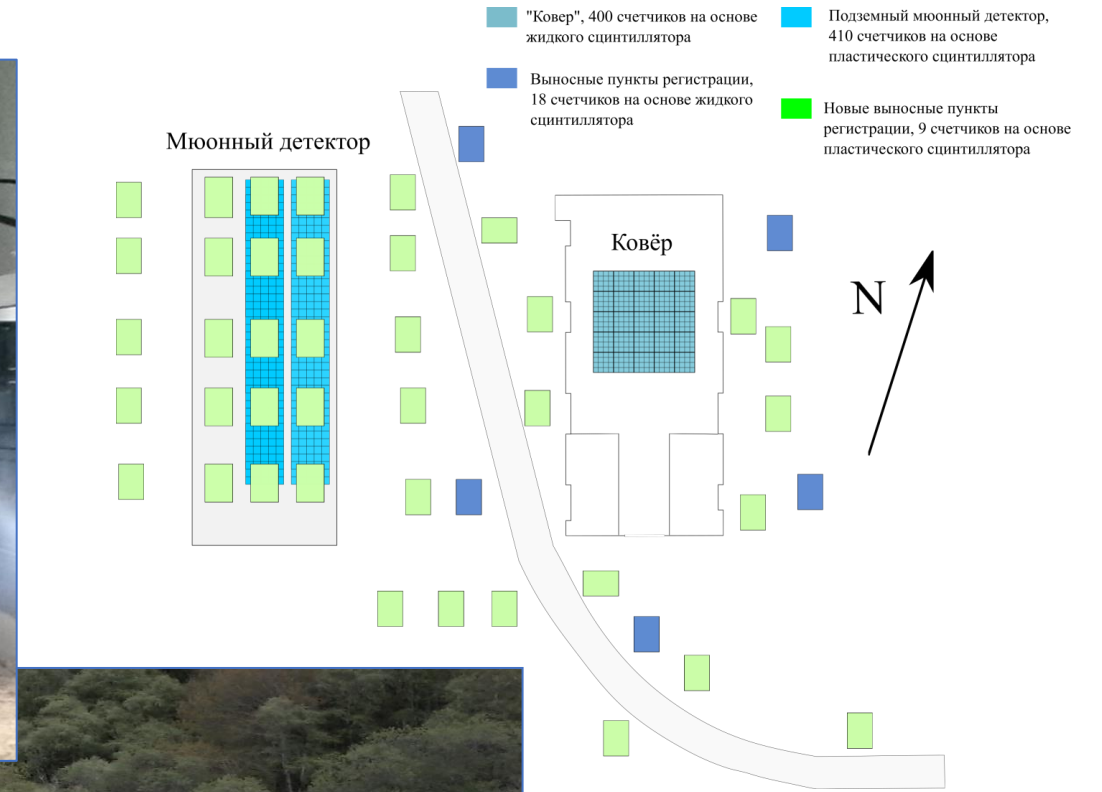




Даже при наличии крупных установок, подобных LHAASO, маленькие вроде Ковра, удаленные по географической долготе, могут дать важные результаты



Смотря в будущее: Ковер-3



Пришли ли «проблемные» фотоны от GRB 221009A ?

LHAASO 18 ТэВ и адронный фон

- детали анализа LHAASO не опубликованы
 - некоторые авторы пытались оценить фон для 2000 сек в LHAASO на основе других анализов, про которые опубликована информация (Crab)
 - это неправильно: разные критерии отбора для разных анализов
 - это неправильно: усреднение по зенитным углам против конкретного диапазона углов
 - у них получилось, что фон от адронных ливней сравним с сигналом
- ✓ все предварительное, рецензируемые публикации будут не скоро



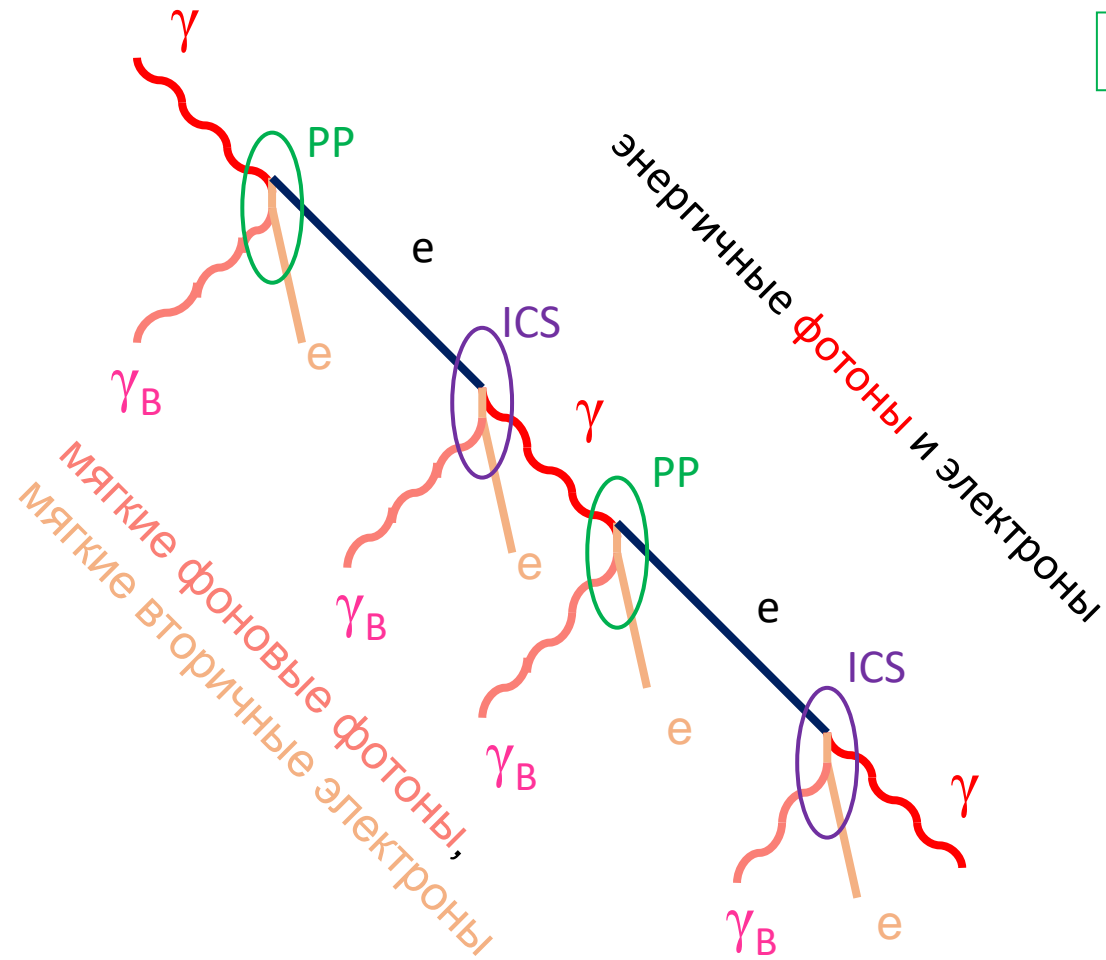
Пришли ли «проблемные» фотоны от GRB 221009A ?

Ковер-2, 251ТэВ и галактический фон

- галактическая широта 4° - близко к плоскости Млечного Пути
 - в диске Галактики – взаимодействие космических лучей с газом
 - в диске Галактики много источников энергичных фотонов, до 1.4 ПэВ
 - астротелеграмма авторов из HAWC: источник >100 ТэВ в круге ошибок Ковра-2
 - такое событие с данного направления 1 раз в 428 дней, $p=1.2 \times 10^{-4}$ (pre trial)
- ✓ все предварительное, рецензируемые публикации будут не скоро



Рождение пар и электромагнитные каскады



PP = рождение пар

ICS = обратное комптоновское рассеяние



Фотоны не из источника?

- электромагнитные каскады дают вторичные фотоны

Dzhatdov et al.

- заряженные частицы разных энергий следуют разными траекториями
- расстояние до GRB много больше характерной длины развития каскада

