

Вокруг CAST'a: поиски аксионов и других легких частиц

С.В.Троицкий (ОТФ ИЯИ)

Сильная CP-проблема и аксионное решение

- Лагранжиан КХД включает CP-нарушающий член:

$$\Delta\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{\alpha_s}{8\pi} \underbrace{(\Theta - \arg \det M_q)}_{\bar{\Theta}} \text{Tr} \tilde{G}_{\mu\nu} G^{\mu\nu}$$

➔ электрический дипольный момент нейтрона:

$$d_n \sim \bar{\Theta} \times 10^{-16} e \text{ cm}$$

эксперимент:

$$|d_n| < 2.9 \times 10^{-26} e \text{ cm} \quad 90\% \text{ C.L.}$$

$$\bar{\Theta} < 10^{-10}$$

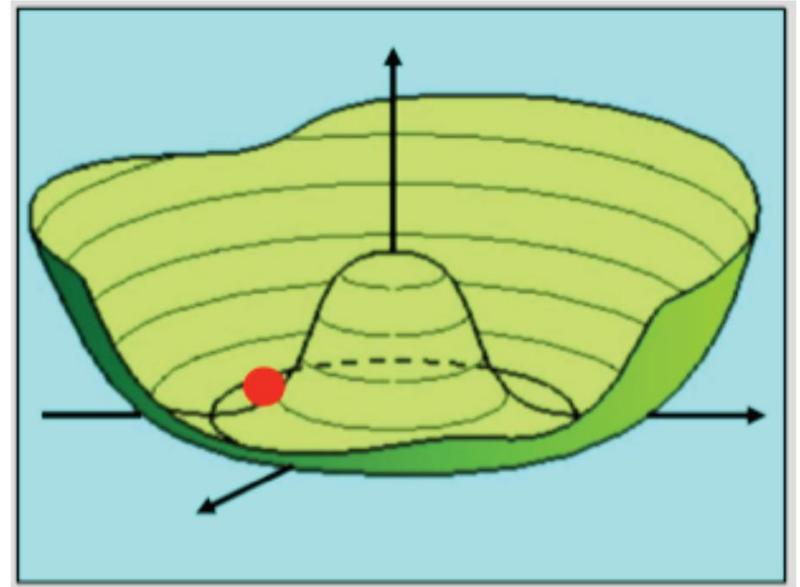
Сильная CP-проблема и аксионное решение

Θ =динамическое поле?

$$\Theta \frac{g^2}{32\pi^2} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a\mu\nu} \mapsto \frac{1}{2} \partial_\mu A \partial^\mu A + \frac{g^2}{32\pi^2} \frac{a}{f_A} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a\mu\nu}$$

$$a \equiv \arg A$$

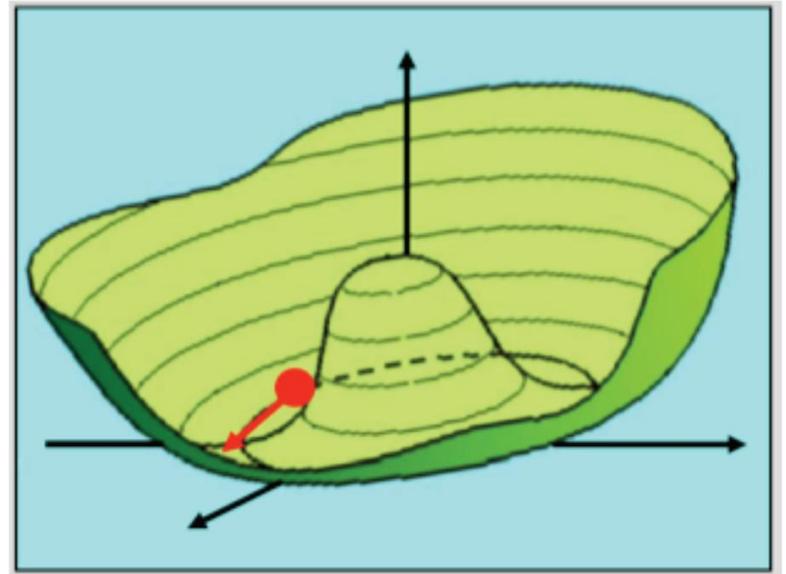
$$V(A) = -f_A^2 A^2 + \frac{\lambda}{4!} A^4$$



Сильная CP-проблема и аксионное решение

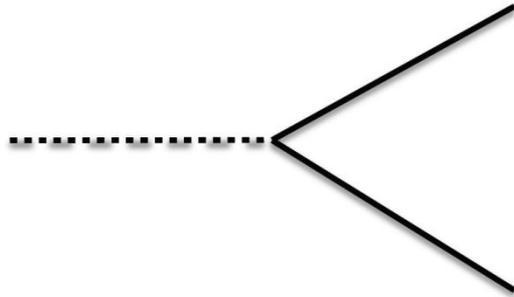
Θ =динамическое поле?

$$\left(\frac{a}{f} + \bar{\Theta}\right) \langle GG \rangle = 0$$

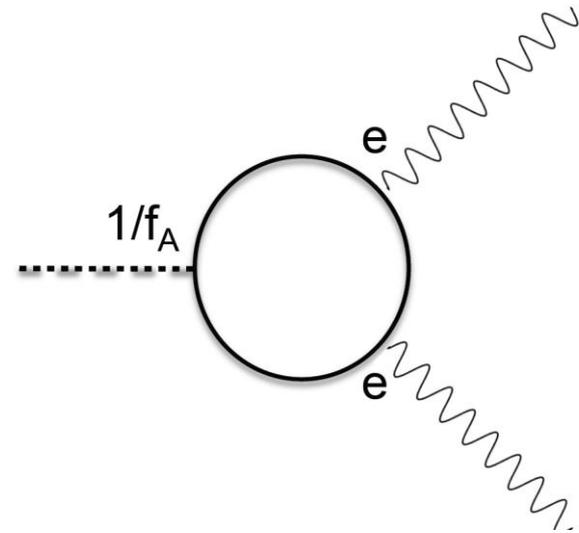


$$V(a) \sim \Lambda_{\text{QCD}}^4 \left(1 - \cos \frac{a}{f_A}\right) \sim \frac{1}{2} \frac{\Lambda_{\text{QCD}}^4}{f_A^2} a^2 = \frac{1}{2} m^2 a^2$$

Взаимодействия аксиона



$$\sim \frac{m_\psi}{f_A} a \bar{\psi} \gamma_5 \psi$$



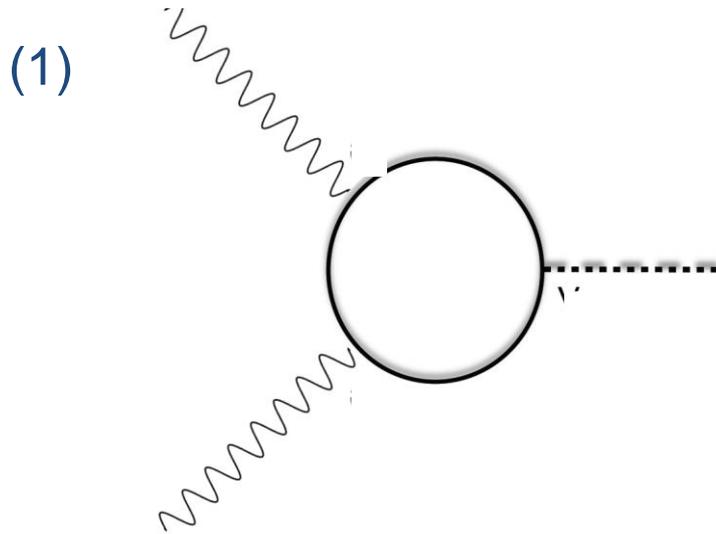
$$\frac{a}{M} F_{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu}, \quad M \sim f_A \sim \frac{\Lambda_{\text{QCD}}^2}{m}$$

m, M независимы \Rightarrow аксионоподобная частица (ALP)
например: любая легкая электронейтральная частица,
взаимодействующая с заряженными фермионами

CAST = CERN axion solar telescope

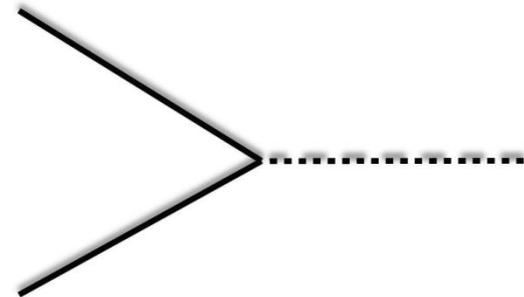
концепция аксионного гелиоскопа [*Sikivie 1983*]

Солнце = источник аксионов:



эффект Примакова

(2)



взаимодействие с электронами

CAST = CERN axion solar telescope

концепция аксионного гелиоскопа [*Sikivie 1983*]

Детектор: длина L , поле B

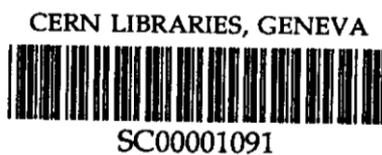
вероятность конверсии:

$$P = 1.7 \times 10^{-17} \left(\frac{B}{9 \text{ T}} \frac{L}{9.3 \text{ m}} \right)^2 \left(\frac{M}{10^{10} \text{ GeV}} \right)^{-2}$$

(вакуум)

(газ \Rightarrow резонансное усиление)

CAST



CERN 99-21
SPSC/P312
August 9, 1999

Sw 199948

реализация:

Proposal to the SPSC

A solar axion search using a decommissioned LHC test magnet



The Solar Axion Telescopic ANtenna

C.E. Aalseth ¹, D. Abriola ², F.T. Avignone III ¹, R.L. Brodzinski ³, J.I. Collar ^{4*},
R. Creswick ¹, D.E. Di Gregorio ², H. Farach ¹, A.O. Gattone ², Y. Giomataris ⁵,
S.N. Gninenko ⁶, N.A. Golubev ⁶, C.K. Guérard ², F. Hasenbalg ², M. Hasinoff ⁷,
H. Huck ², A.V. Kovzelev ⁶, A. Liolios ⁸, V.A. Matveev ⁶, H.S. Miley ³, A. Morales ⁹,
J. Morales ⁹, D. Nikas ⁸, S. Nussinov ¹⁰, A. Ortiz ⁹, G. Polymeris ⁸, G. Raffelt ¹¹,
I. Savvidis ⁸, S. Scopel ⁹, I.N. Semeniouk ⁶, J.A. Villar ⁹, K. Zioutas ^{8,12#}.

- 1) Department of Physics and Astronomy, University of South Carolina, Columbia SC, USA.
- 2) Department of Physics, TANDAR Laboratory, C.N.E.A., Buenos Aires, Argentina.
- 3) Pacific Northwest National Laboratory, Richland WA, USA.
- 4) Groupe de Physique des Solides, UMR CNRS 75-88, Université Paris 7, France.
- 5) CEA/DSM/DAPNIA-C.E.-Saclay, Gif/Yvette, France.
- 6) Institute for Nuclear Research, Moscow, Russia.
- 7) Department of Physics and Astronomy, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- 8) Physics Department, University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece.
- 9) Laboratorio de Física Nuclear y Atlas Energías, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain.
- 10) Department of Physics, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel.

CAST = CERN axion solar telescope

реализация:

NOMAD, 2000

Search for eV (pseudo)scalar penetrating particles in the SPS neutrino beam

S.N. Gninenko**

*EP Division, CERN,
CH 1211, Geneva 23, The Switzerland

(for the NOMAD Collaboration)

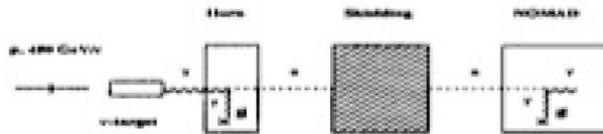
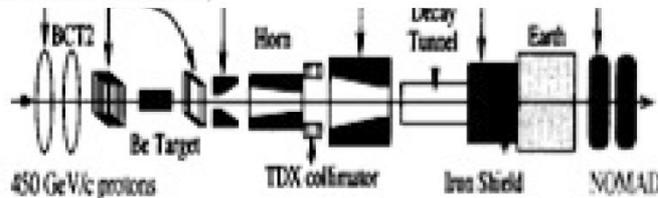
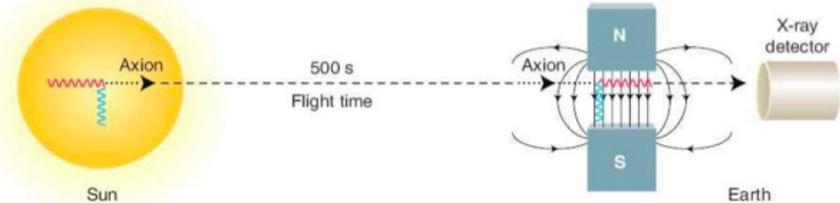


Figure 1. Schematic layouts of the WNF beam line (top) and WNF-NOMAD high energy photon-regeneration experiment (bottom).

CAST, 2006

Principle of the Axion helioscope Sikivie, Phys. Rev. Lett 51 (1983)



Sun: a thermal photon converts into an axion in the Coulomb fields of nuclei and electrons in the solar plasma (**Primakoff process**)

Earth: an axion converts into a photon in a strong transverse magnetic field



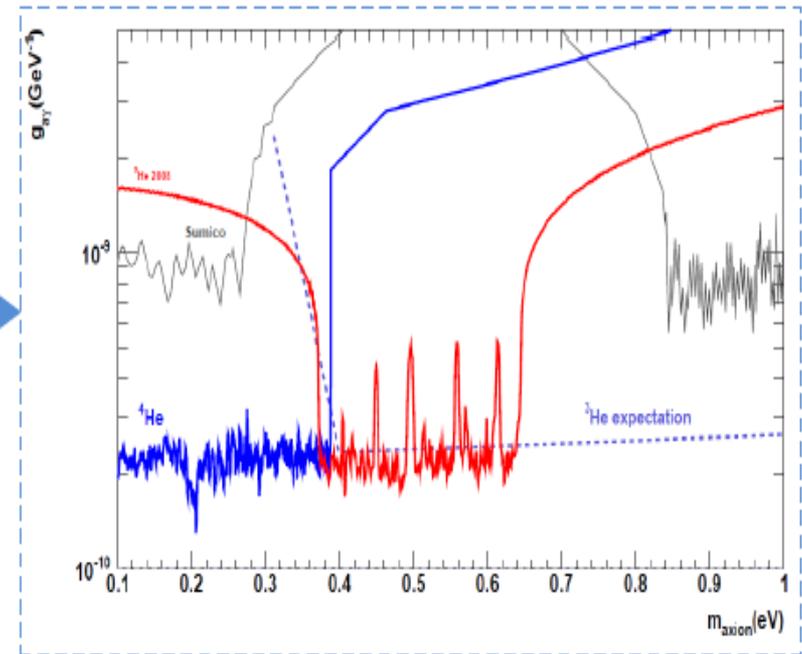
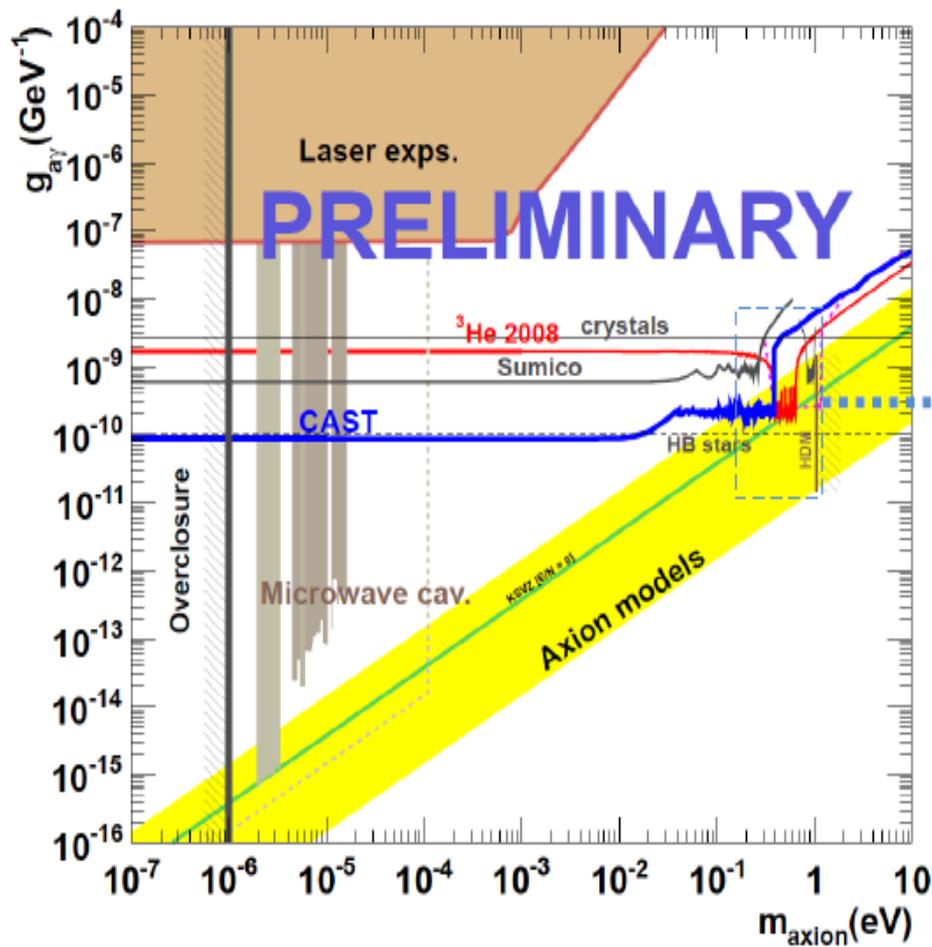
CAST = CERN axion solar telescope

реализация:



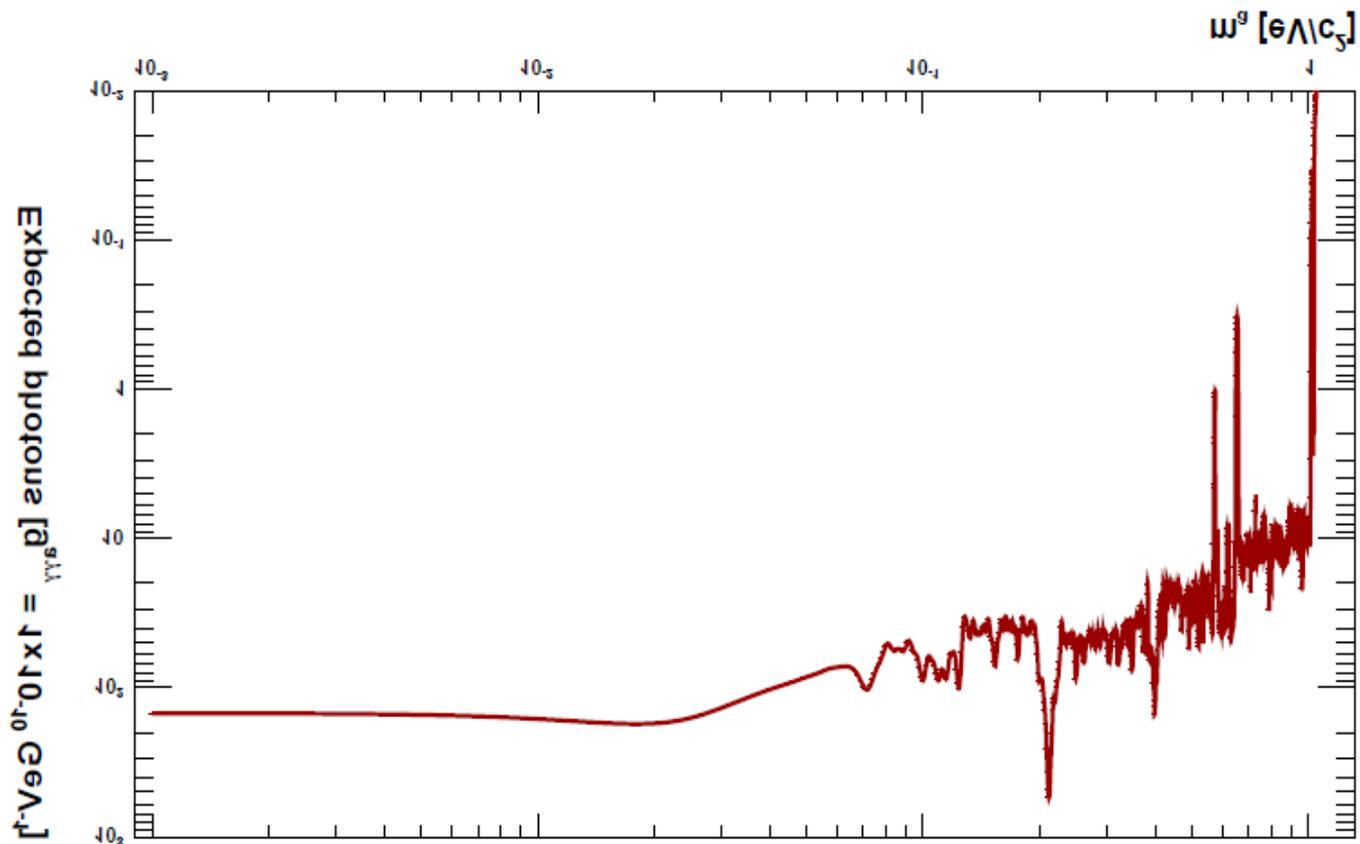
CAST = CERN axion solar telescope

самые последние ограничения на аксионы и ALP:



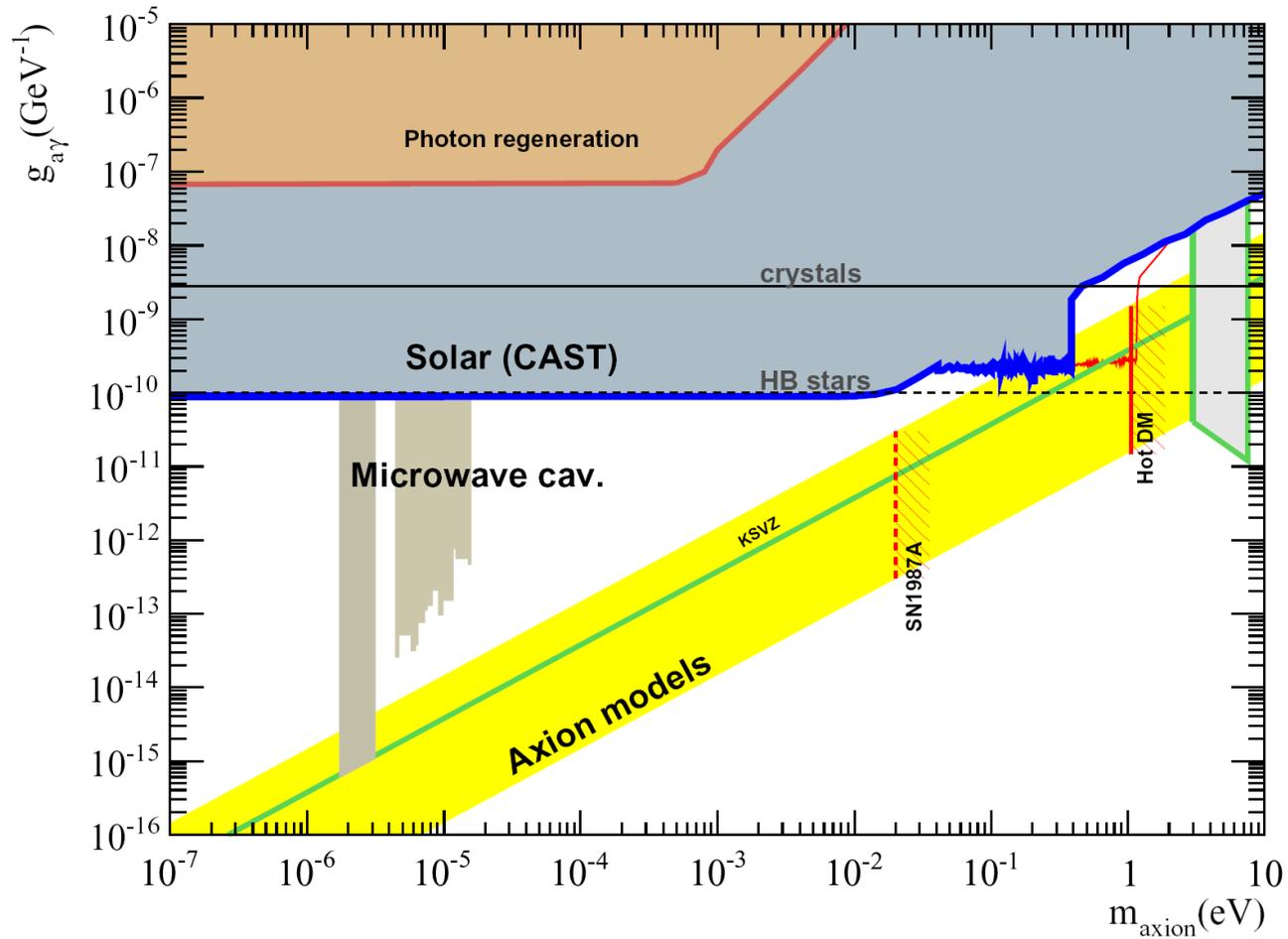
CAST = CERN axion solar telescope

самые последние ограничения на аксионы и ALP:



Ограничения на параметры ALP

другие эксперименты:



Перспектива:

что интересно в ALP, кроме аксиона?

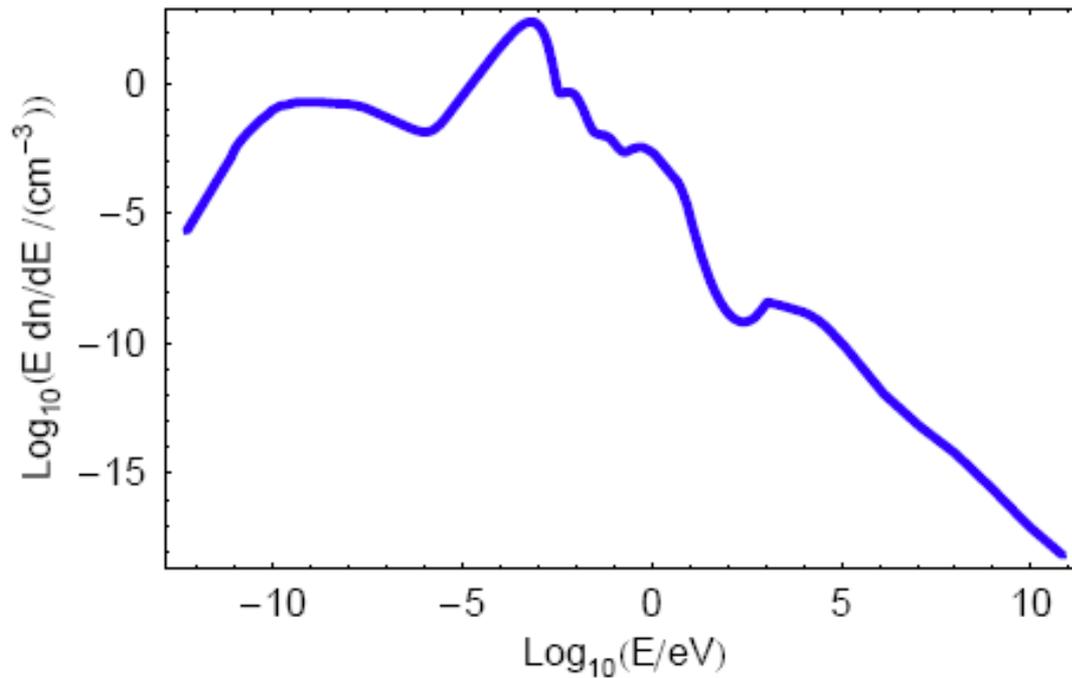
АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ МОТИВИРОВКИ

- (не)прозрачность Вселенной:
 - «IR/TeV кризис»
 - нейтральные частицы сверхвысоких энергий от лацертид
- аномальное охлаждение белых карликов:
 - функция светимости
 - изменение периода со временем
- ряд других указаний

Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

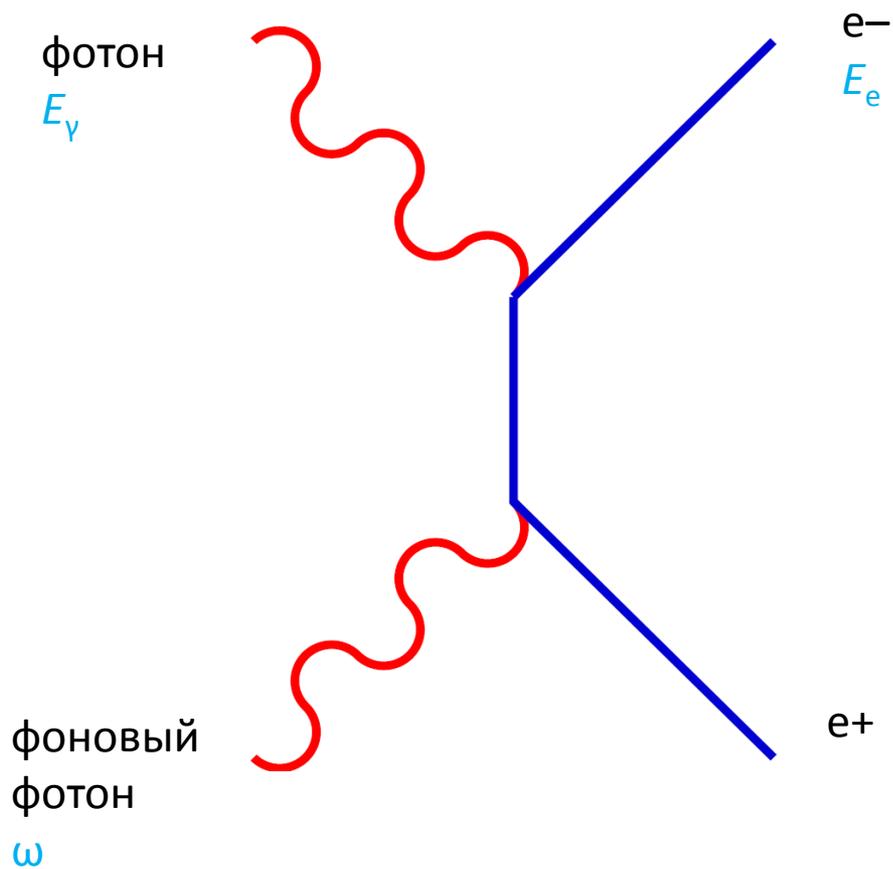
Вселенная заполнена излучением:



Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

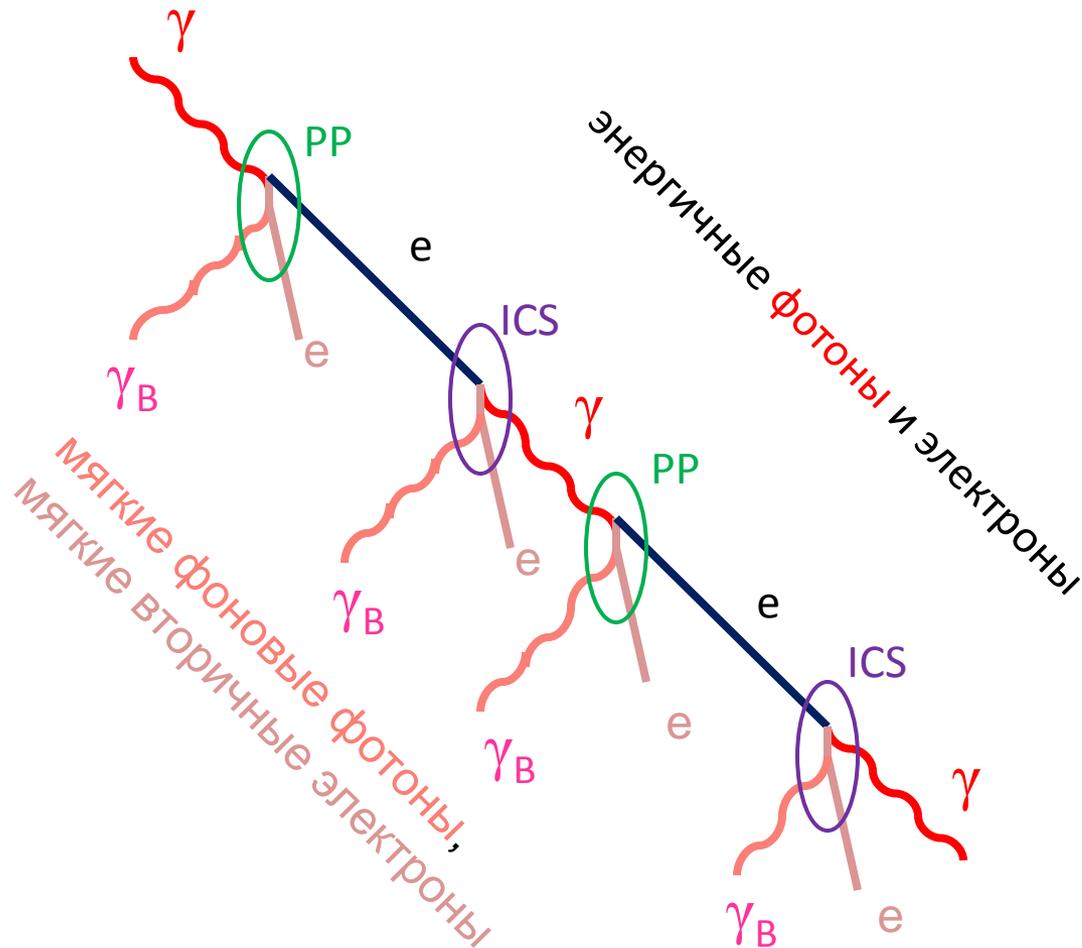
Рождение пар



Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

развитие электромагнитного каскада:



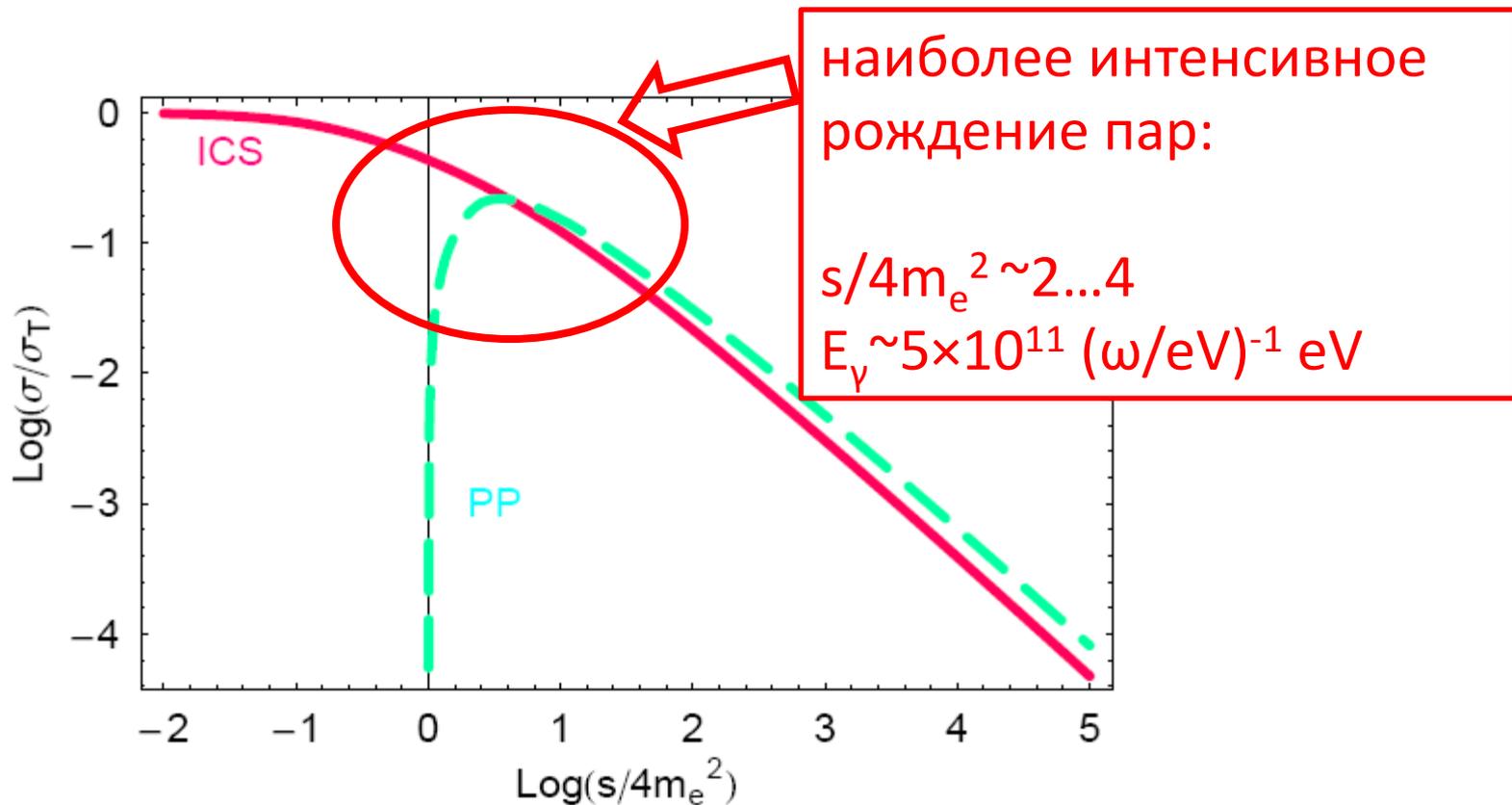
PP = рождение пар

ICS = обратное комптоновское
рассеяние

Почему Вселенная непрозрачна?

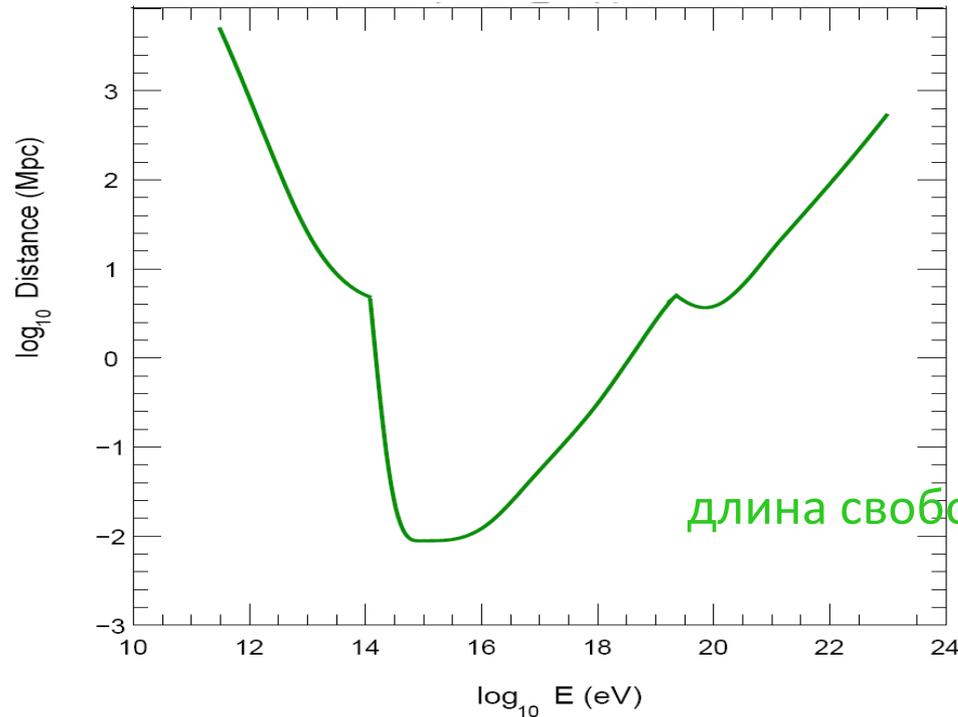
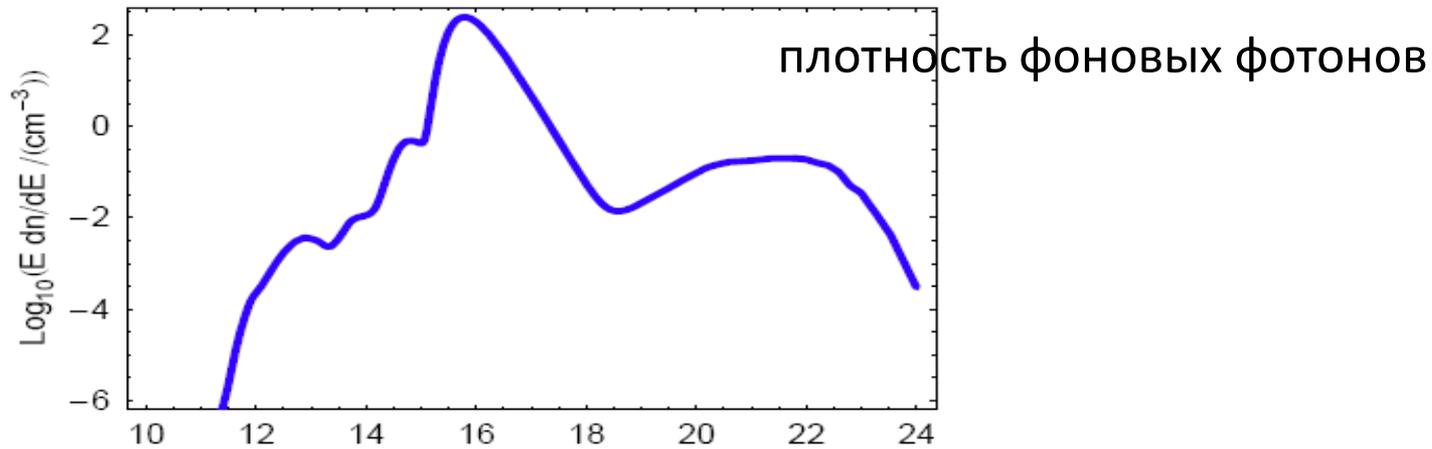
Электромагнитные каскады на фоновом излучении.

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



Почему Вселенная непрозрачна?

Электромагнитные каскады на фоновом излучении.



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

Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

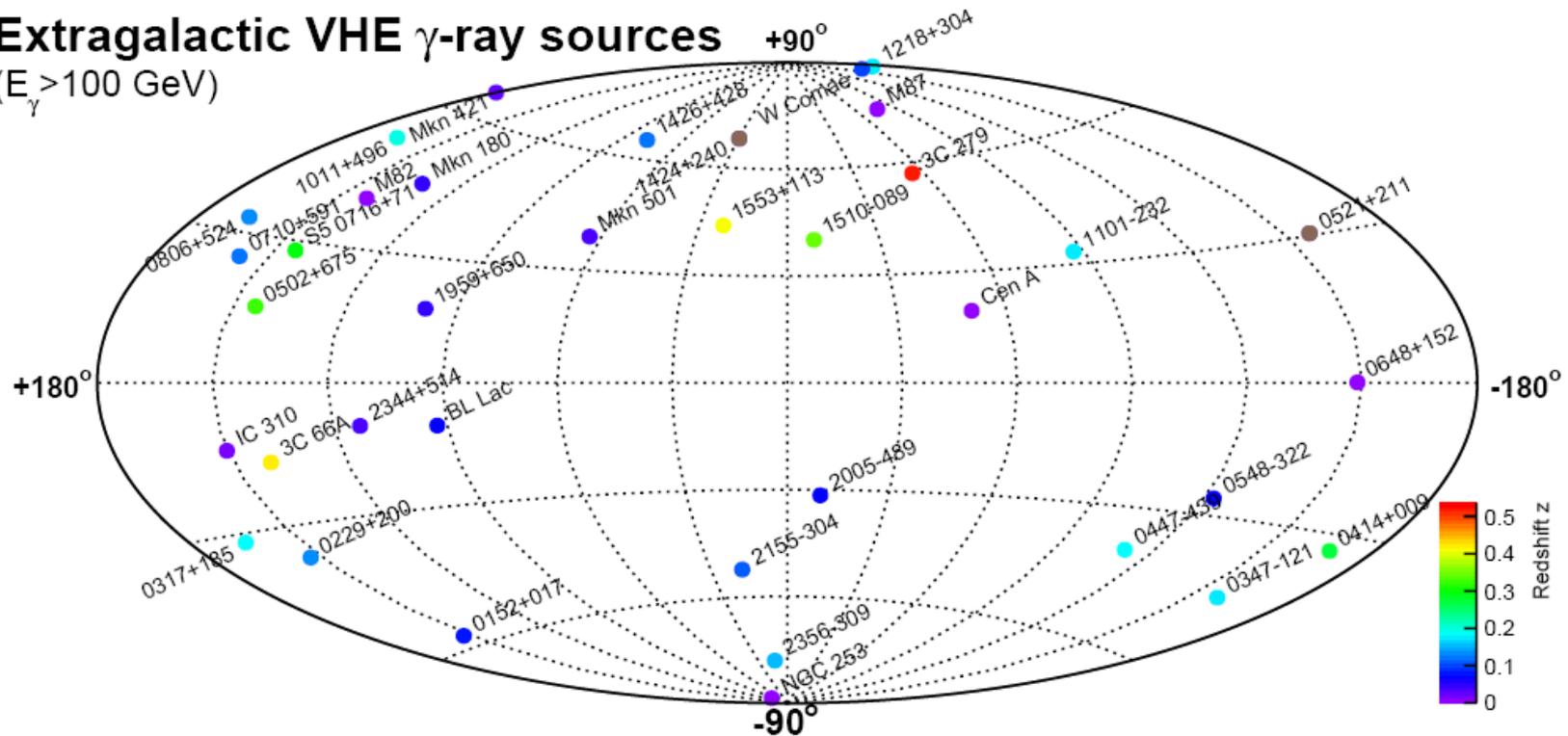
IR-TeV кризис.

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

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

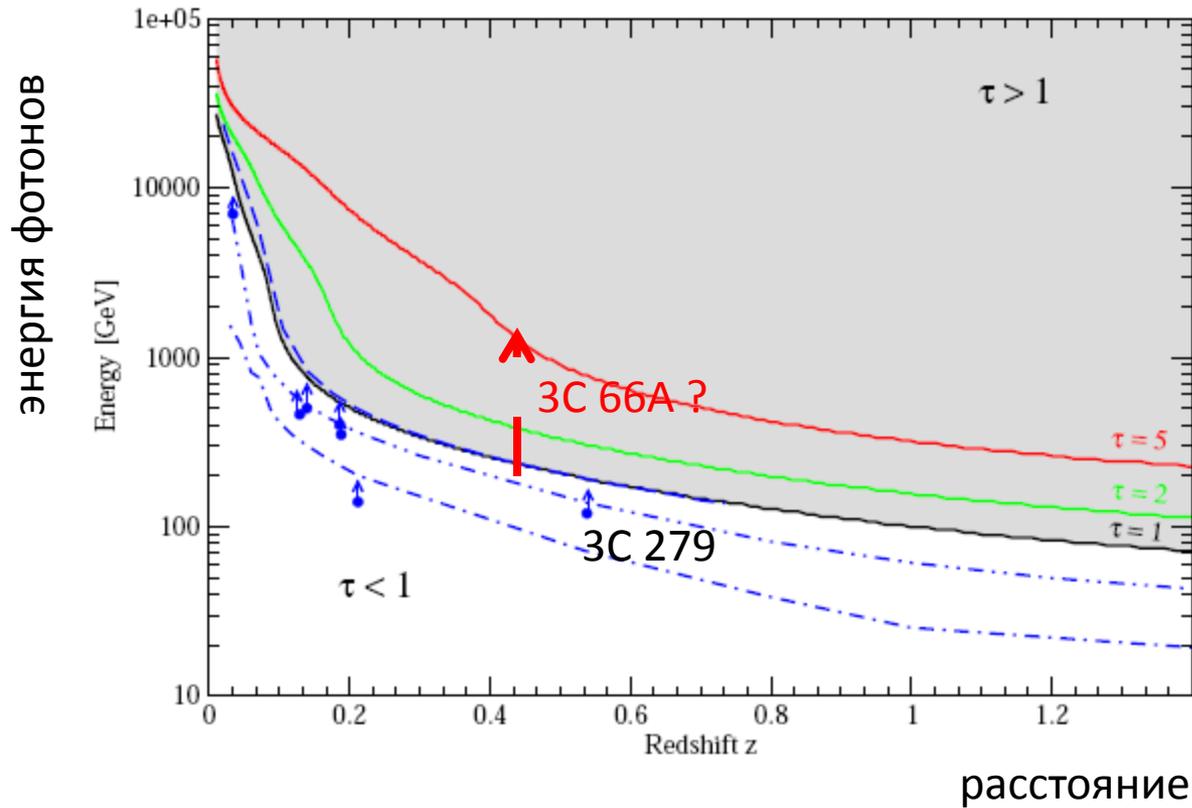
Extragalactic VHE γ -ray sources

($E_\gamma > 100$ GeV)



2010-03-25 - Up-to-date plot available at <http://www.mppmu.mpg.de/~rwagner/sources/>

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

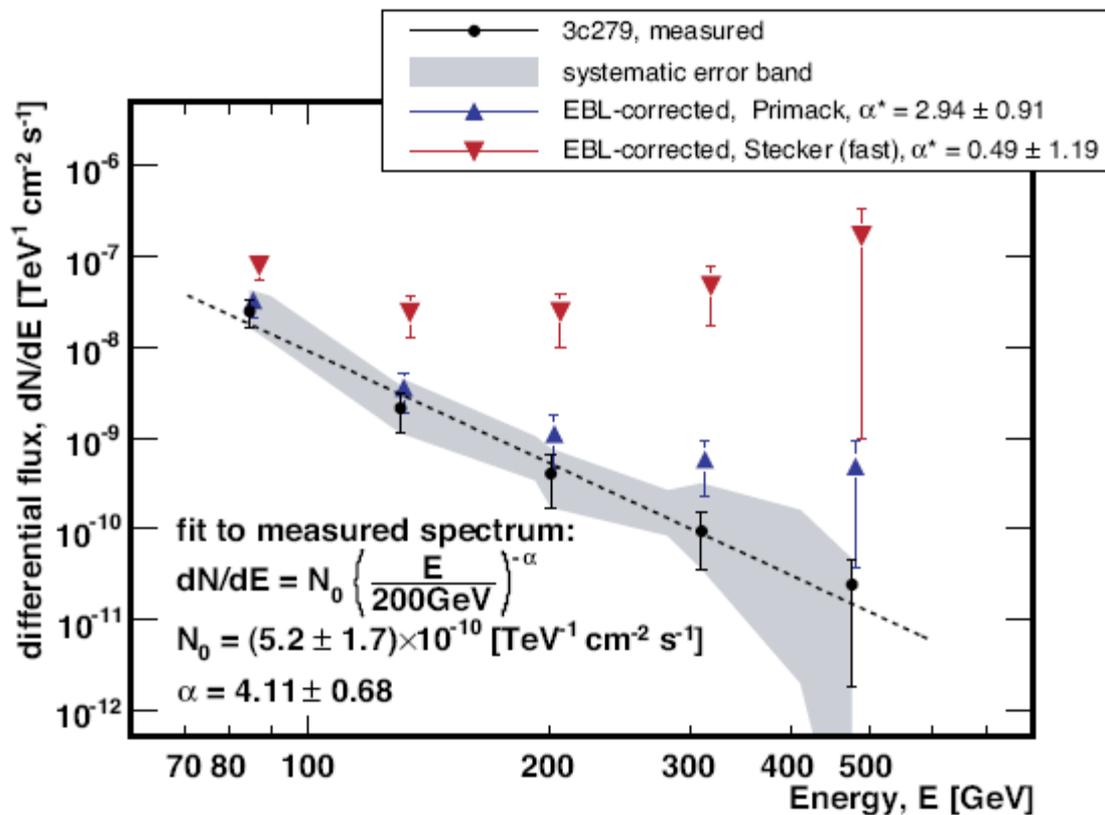


оптическая толща Вселенной + источники

Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

спектры излучения в источнике должны загигаться вверх!



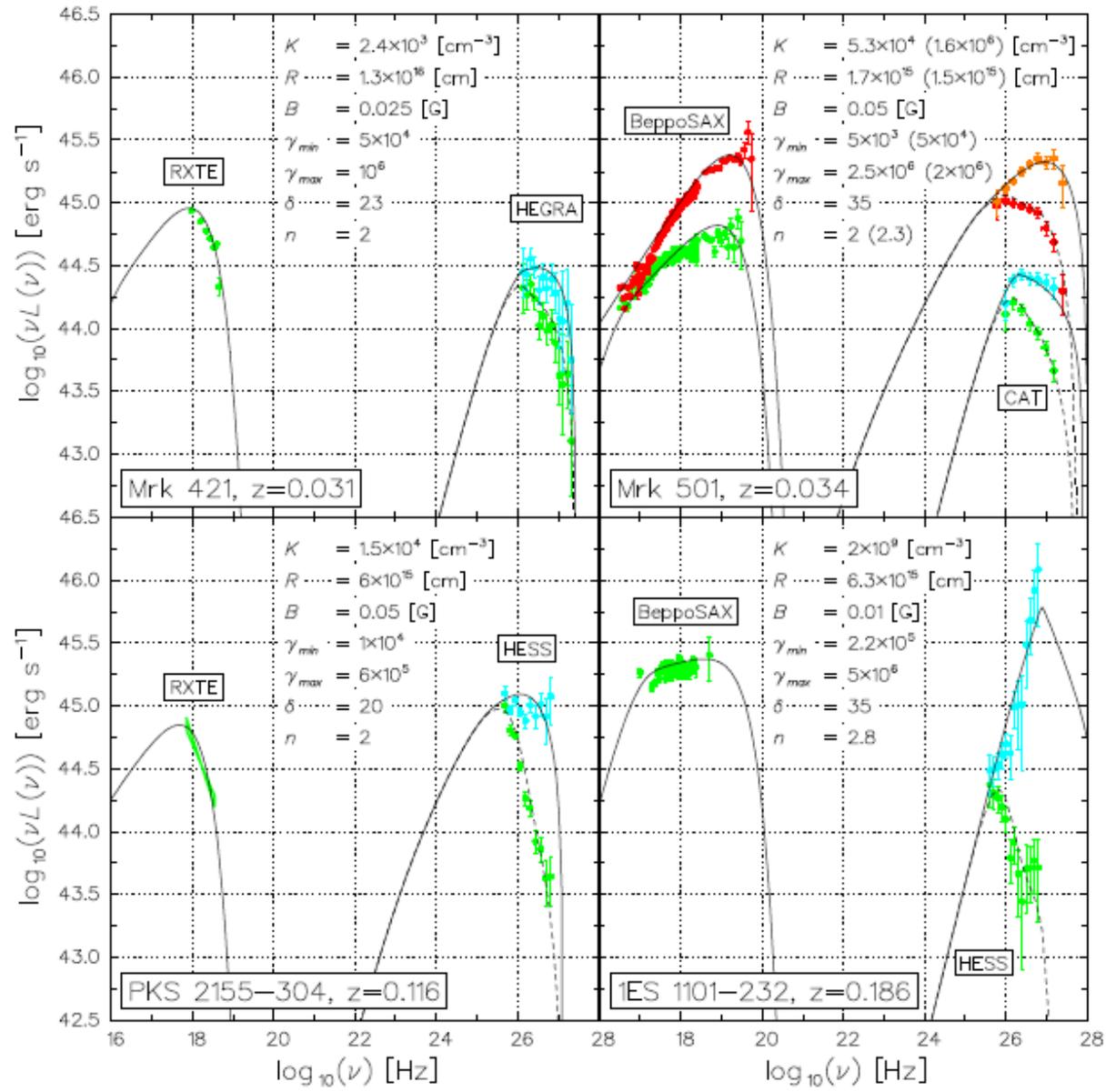
Возможно, Вселенная прозрачнее, чем кажется!

IR-TeV кризис.

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

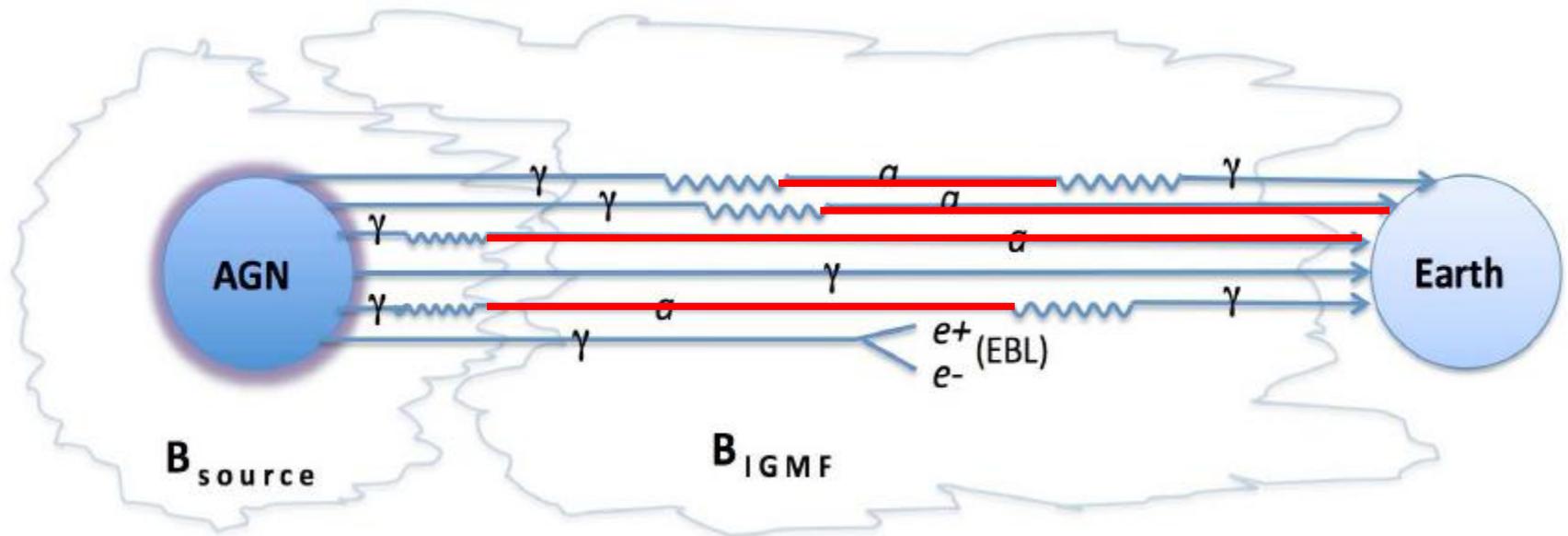
(HBL, LBL, FSRQ)

Выглядит
подозрительно...



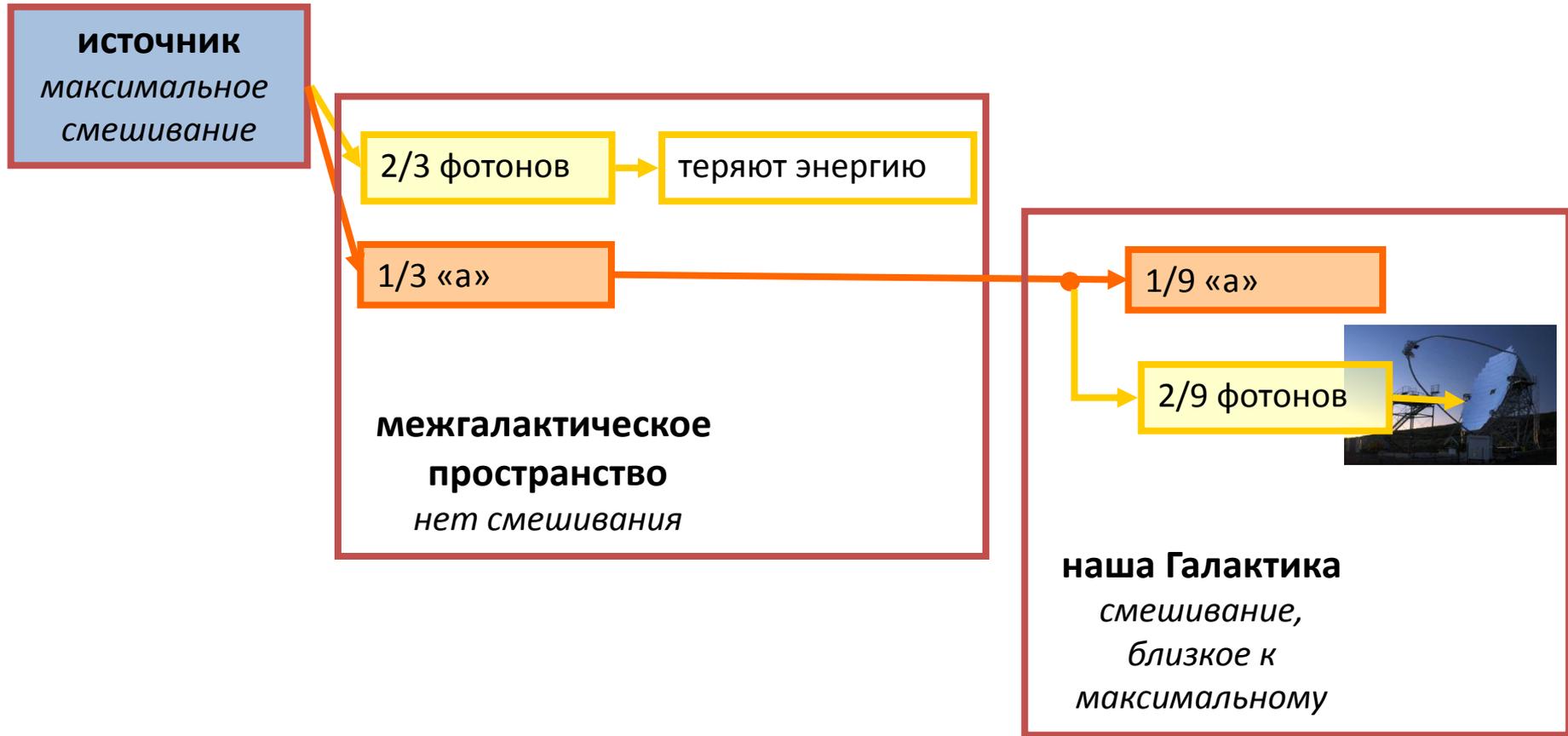
Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.



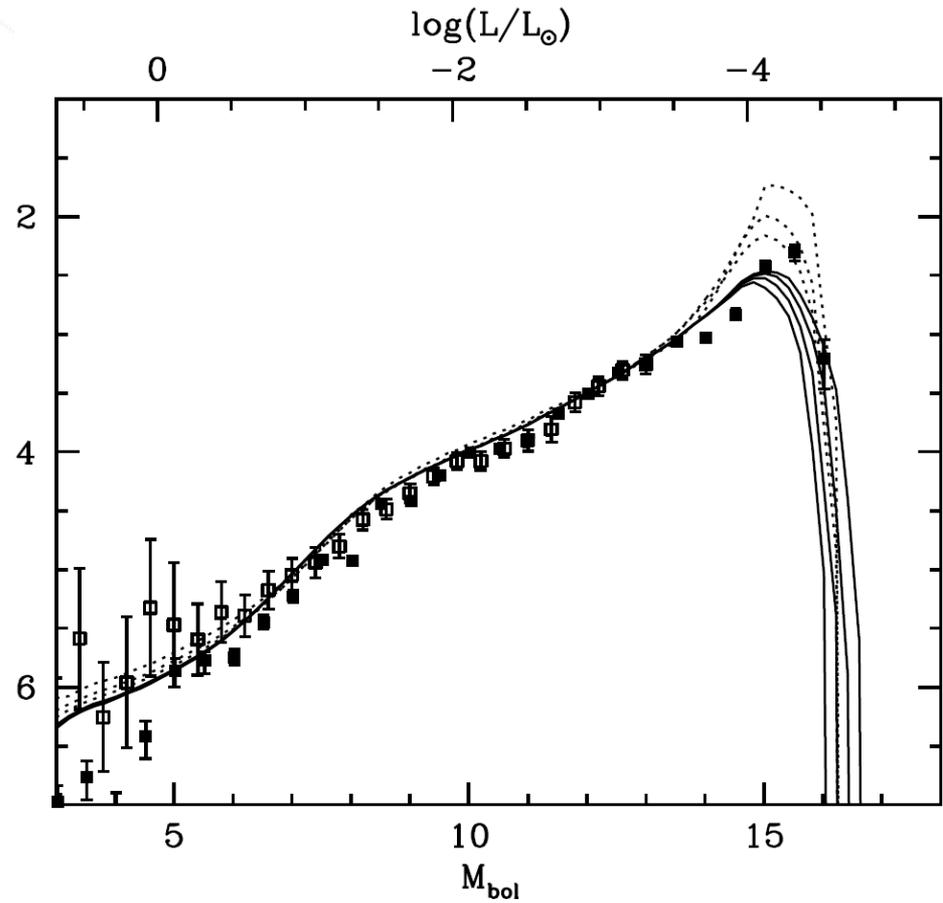
Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.



Белые карлики

функция светимости дает точное измерение параметров эволюции

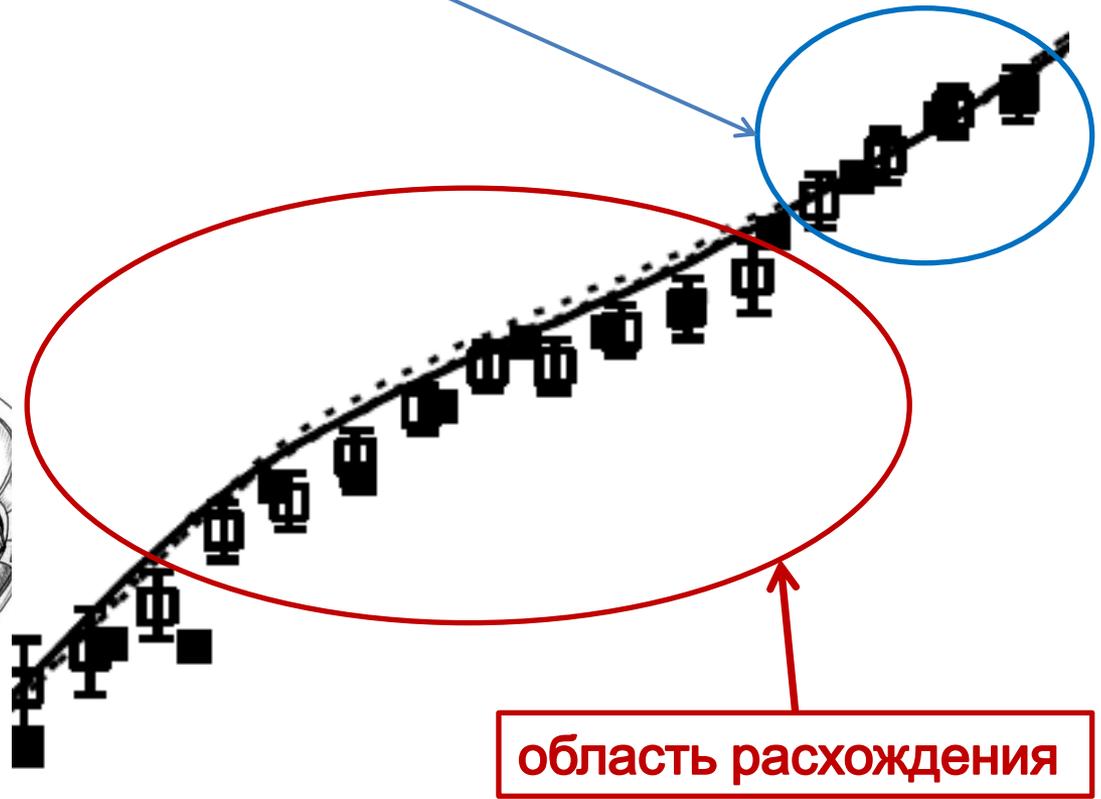


Белые карлики

функция светимости дает точное измерение параметров эволюции



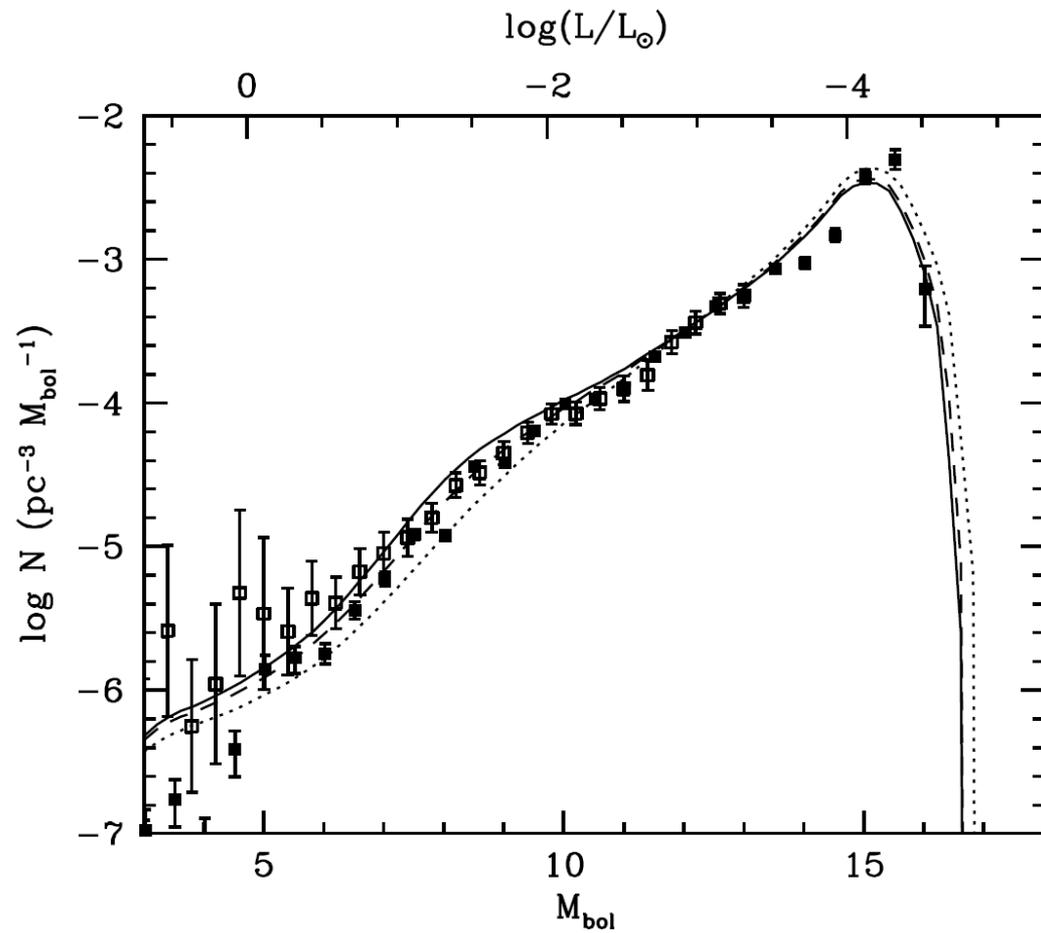
область нормировки



область расхождения

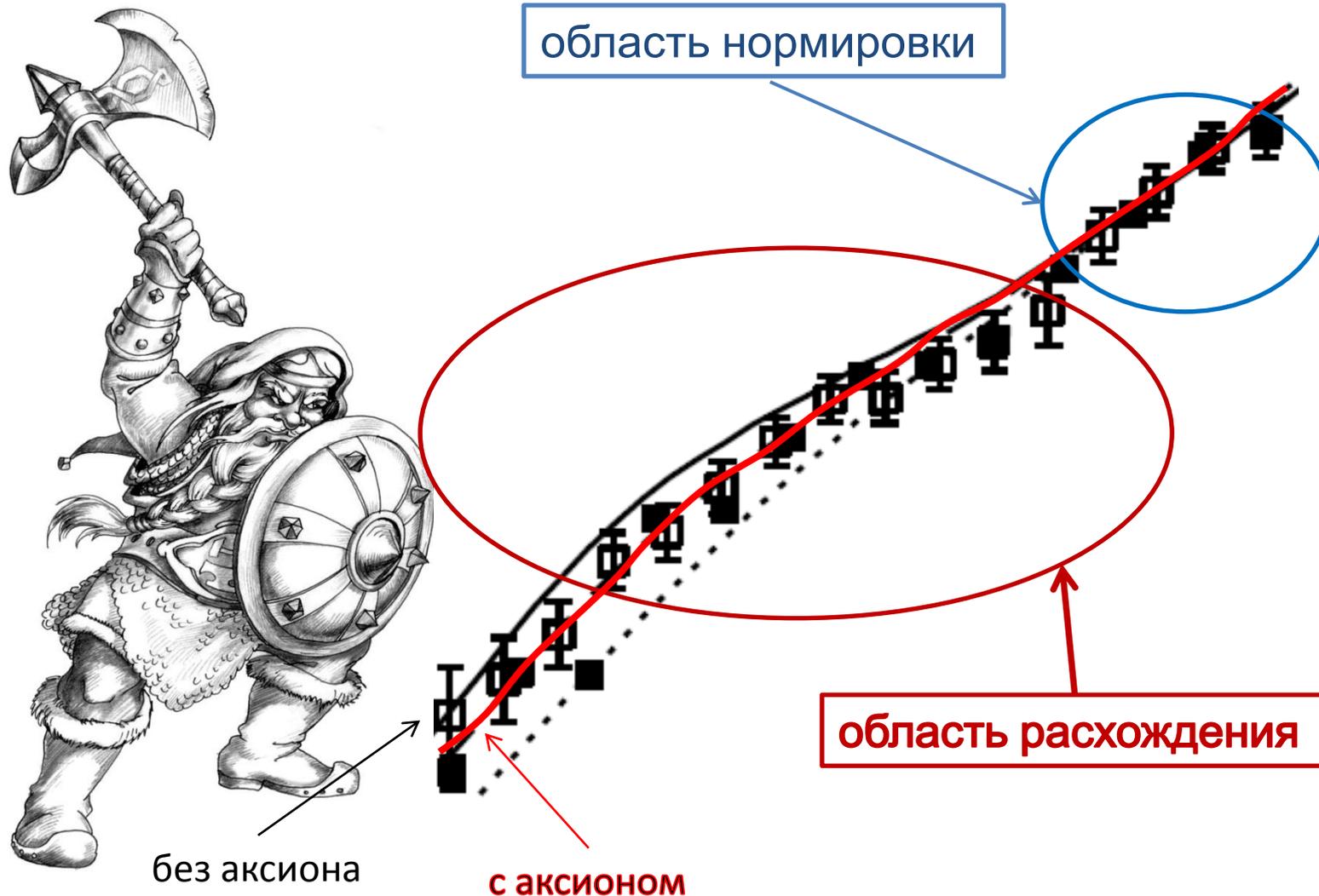
Белые карлики

функция светимости дает точное измерение параметров эволюции



Белые карлики

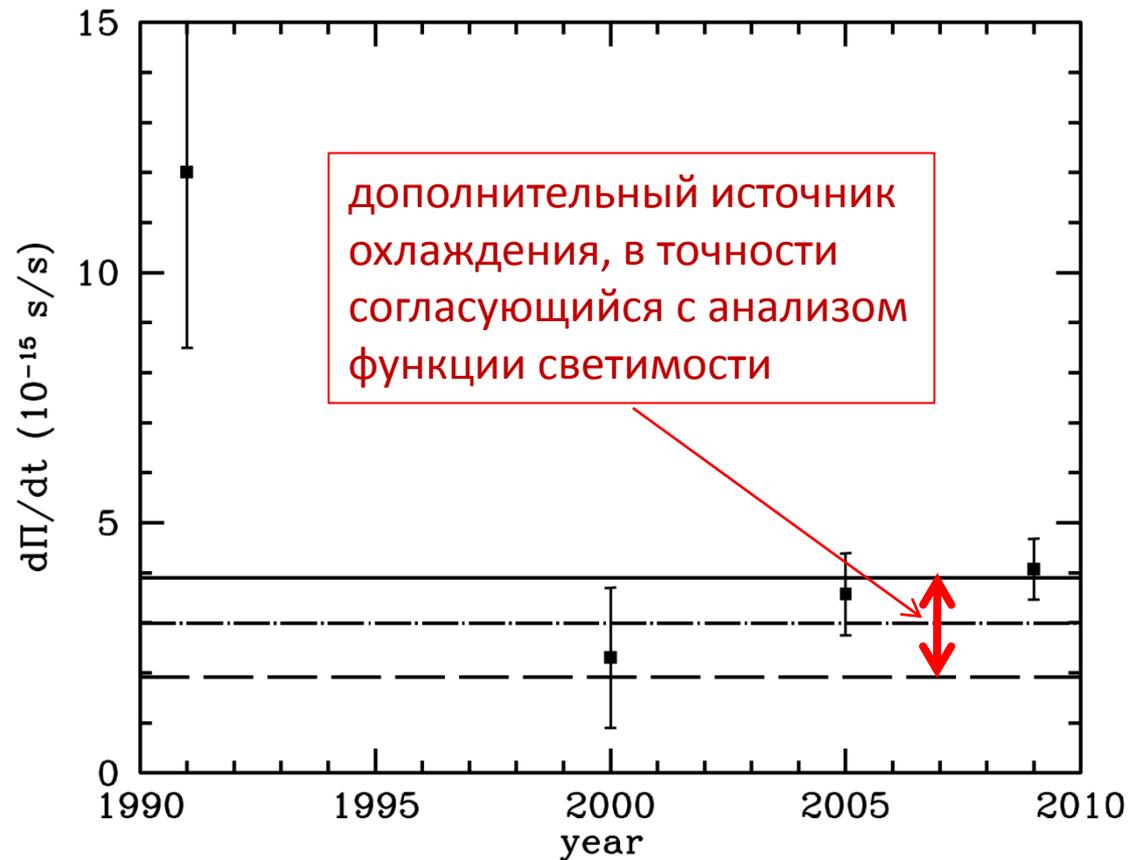
ALP, взаимодействующая с электронами, улучшает согласие



Белые карлики

непосредственное измерение скорости охлаждения!

G117–B15A



$$\dot{\Pi} = 4.07 \pm 0.61 \times 10^{-15} \text{ s/s.}$$

Перспектива:

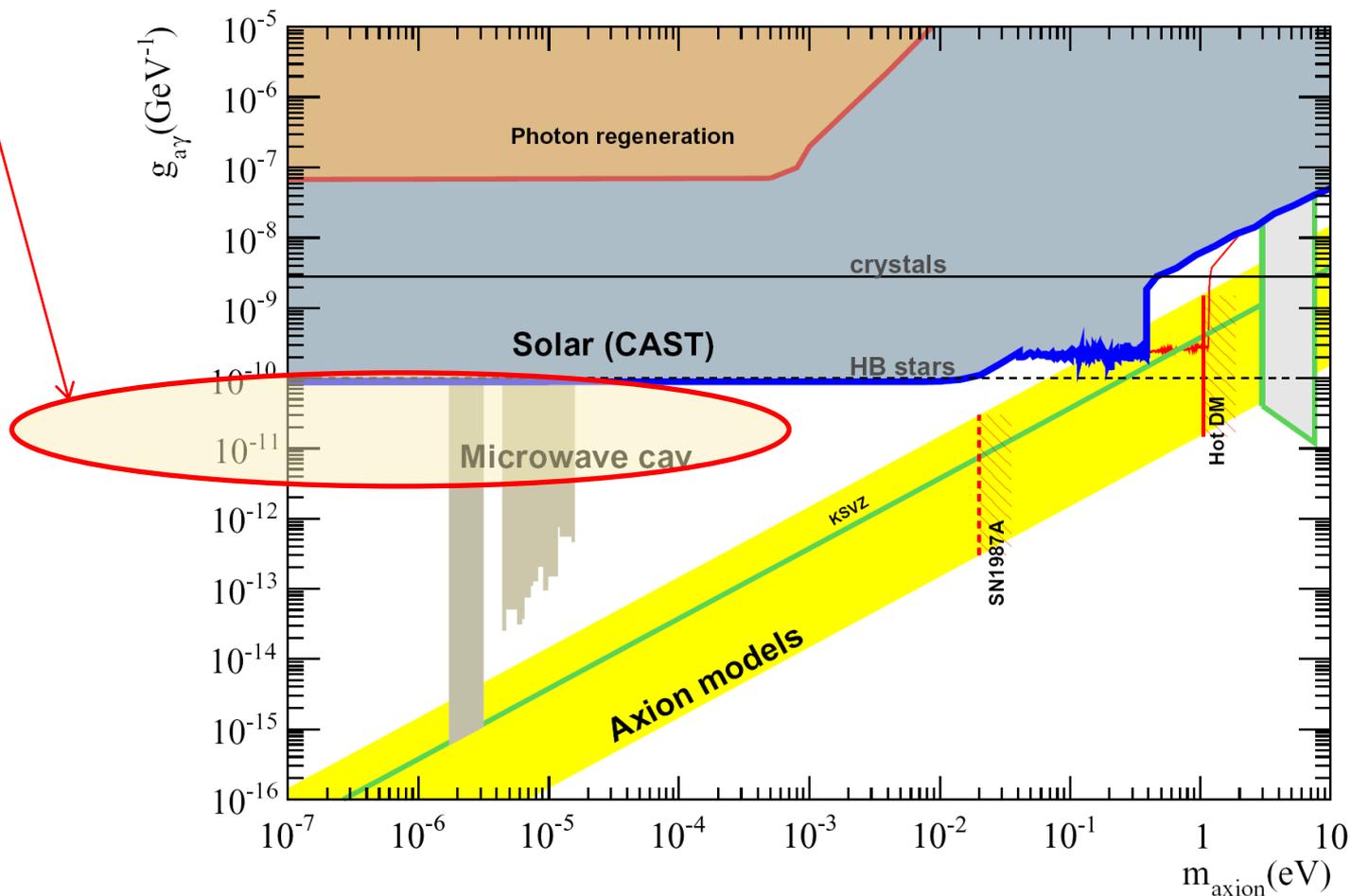
что интересно в ALP, кроме аксиона?

АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ МОТИВИРОВКИ

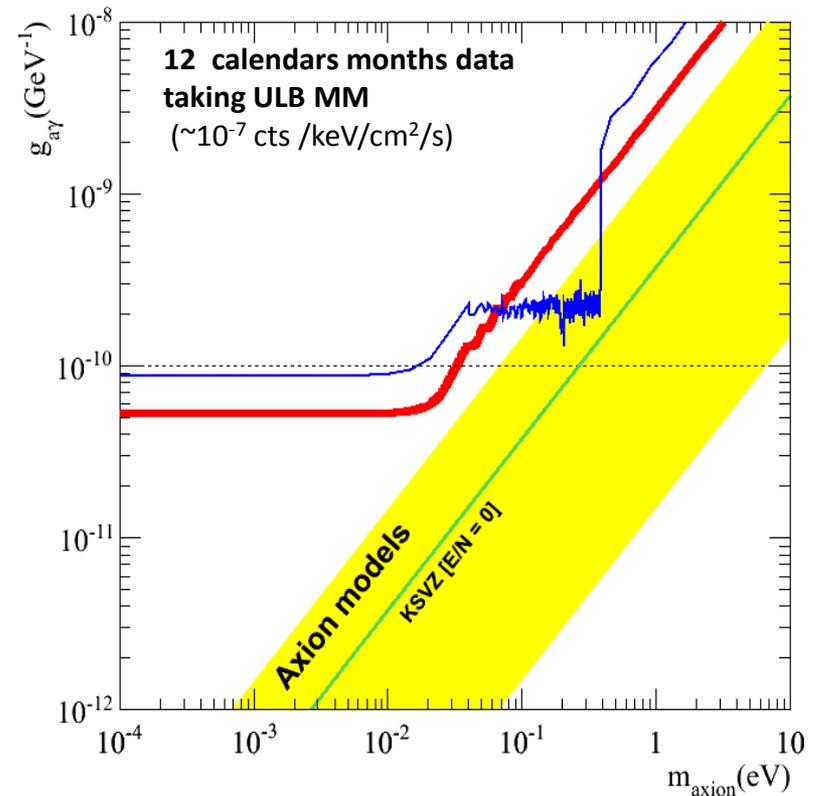
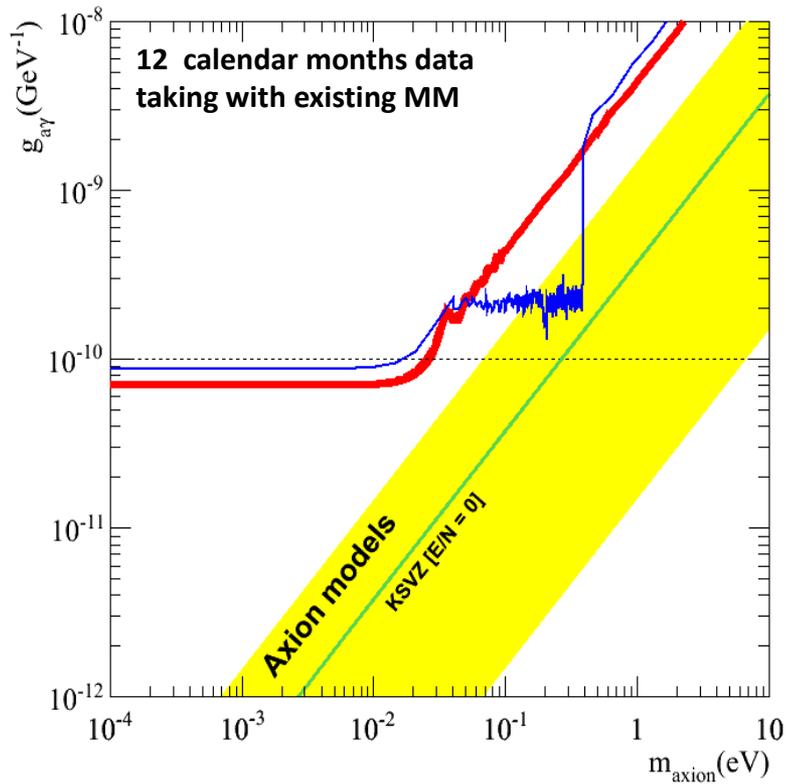
- (не)прозрачность Вселенной:
 - «IR/TeV кризис»
 - нейтральные частицы сверхвысоких энергий от лацертид
- аномальное охлаждение белых карликов:
 - функция светимости
 - изменение периода со временем
- ряд других указаний

Ограничения на параметры ALP

астрофизически мотивированная область



Перспективы CAST



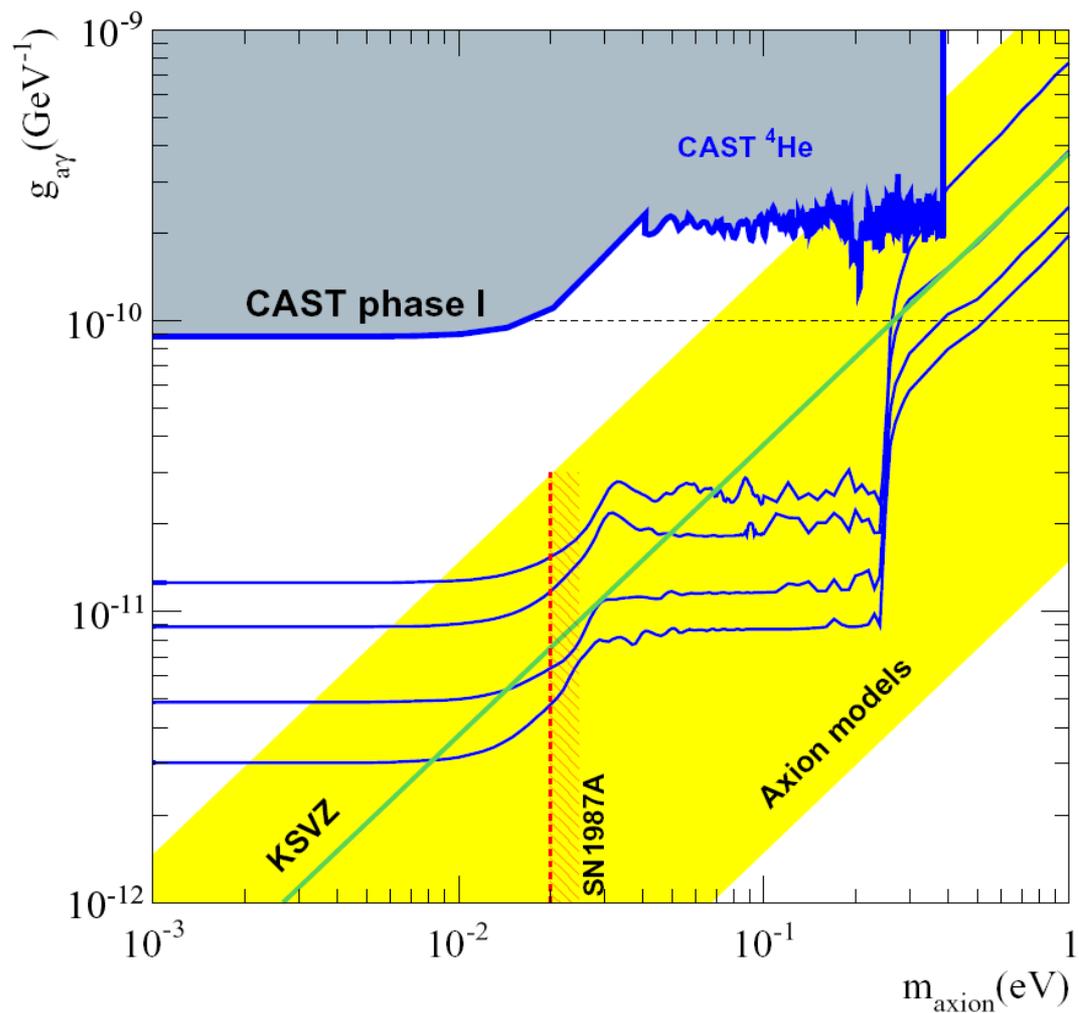
NGAH – новый аксионный гелиоскоп (проект, 2011)

Towards a new generation axion helioscope

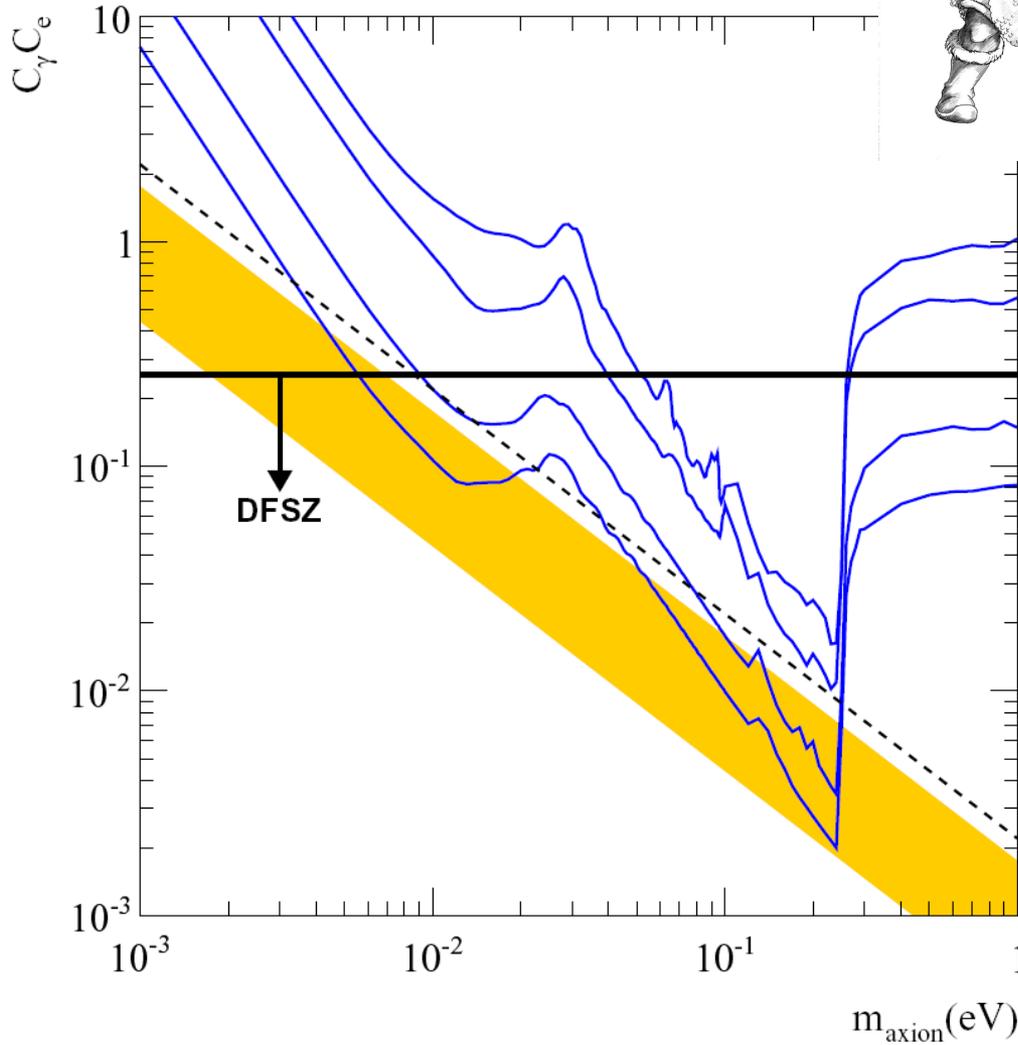
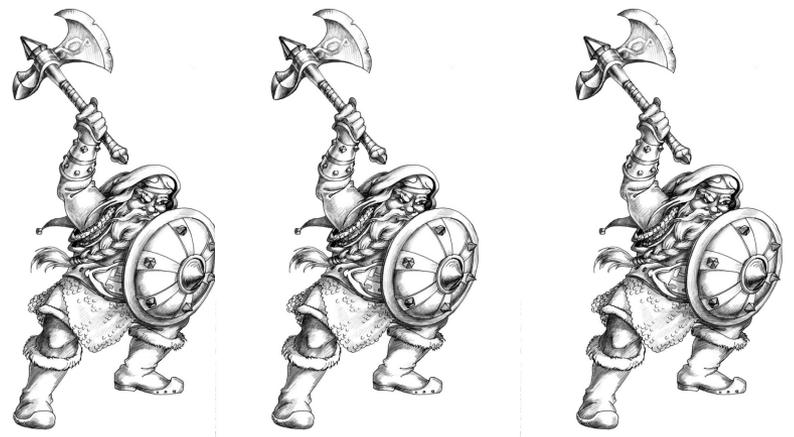
15

parameter	units	CAST-I	NGAH 1	NGAH 2	NGAH 3	NGAH 4
B	T	9	3	3	4	5
L	m	9.26	12	15	15	20
A	m ²	2×0.0015	1.2	2.6	2.6	4.0

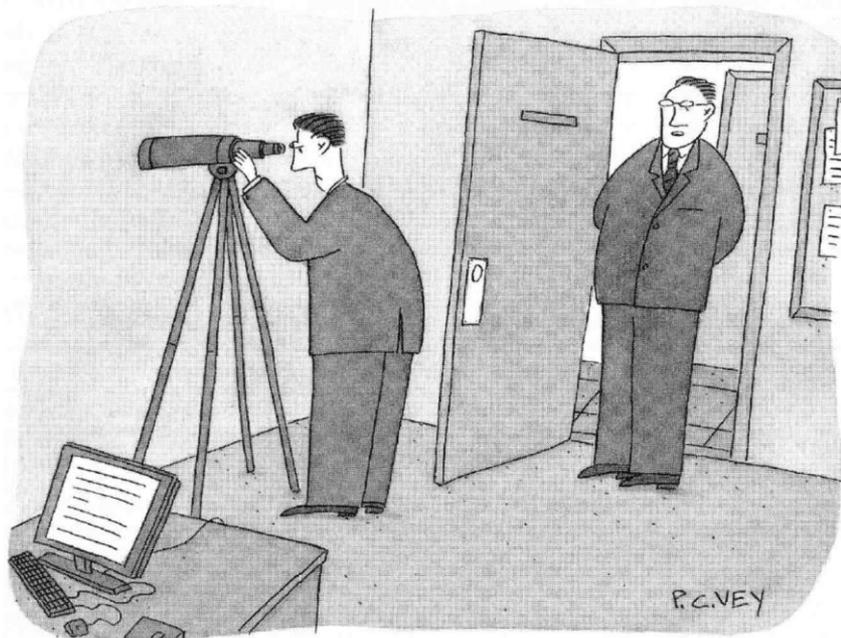
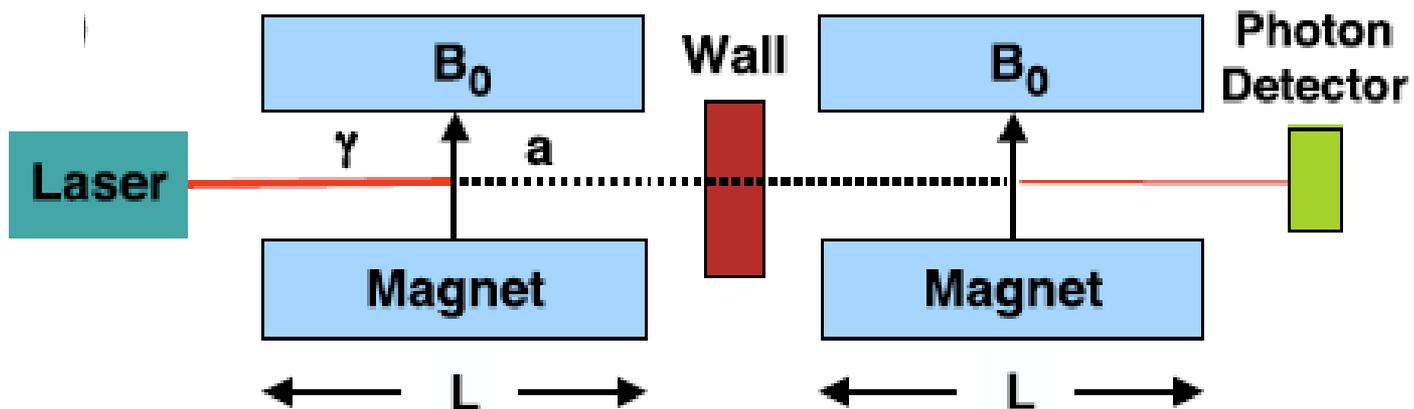
NGAN – новый аксионный гелиоскоп (проект, 2011)



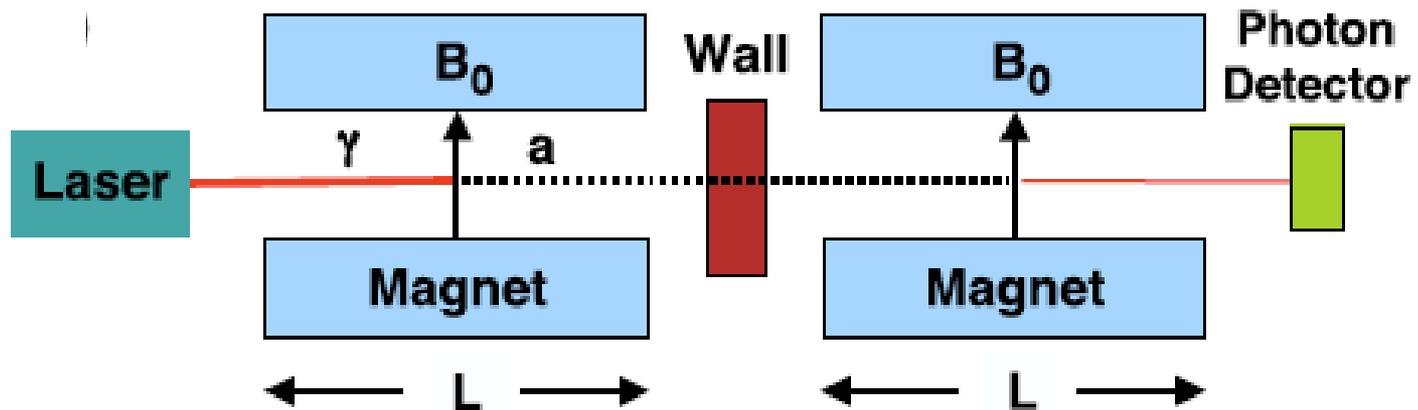
NGАН и белые карлики



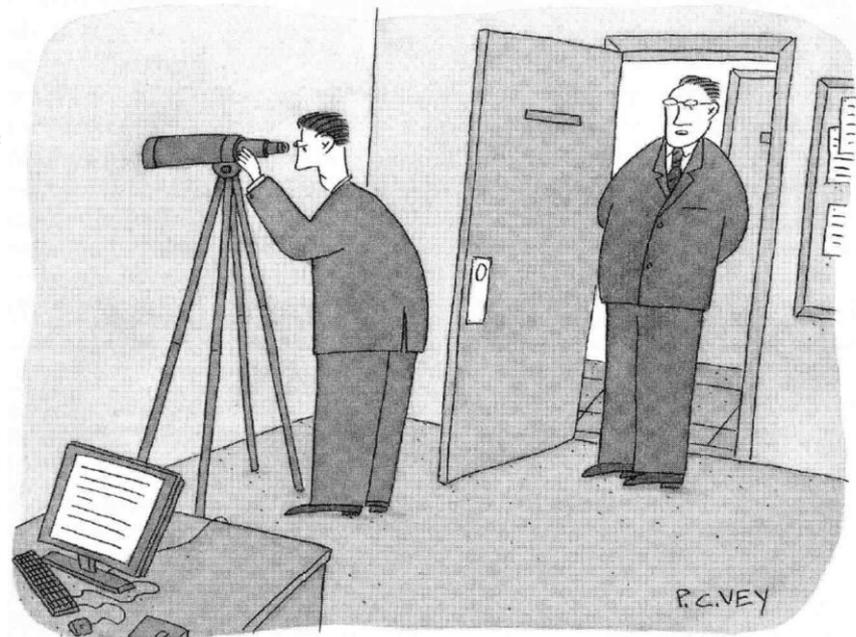
Другой подход – «свет сквозь стену»



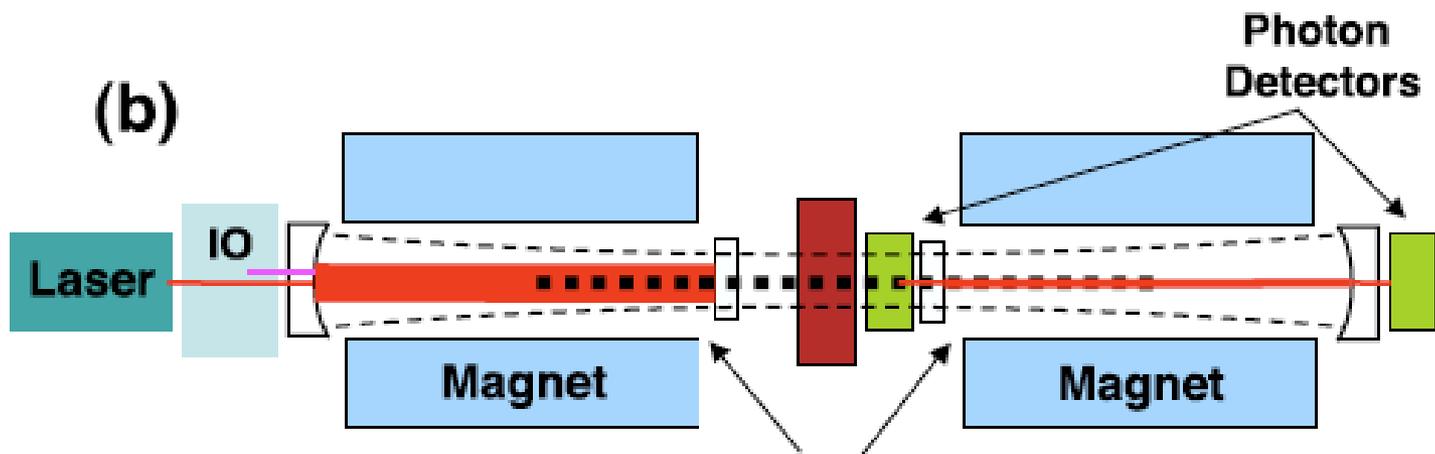
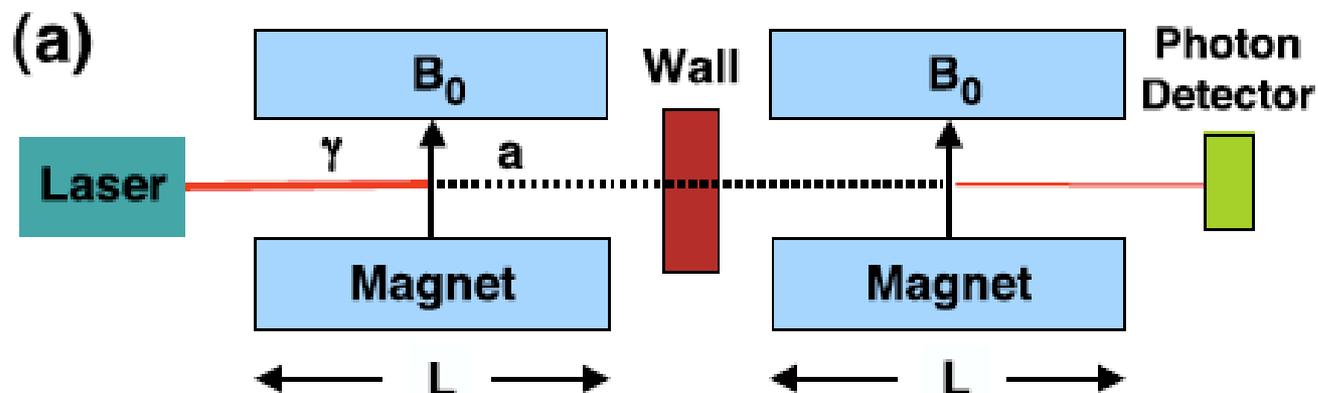
Другой подход – «свет сквозь стену»



$$p_{0,reg} = \left[\frac{2\omega B_0}{M_a m_a^2} \sin\left(\frac{m_a^2 L}{4\omega}\right) \right]^4$$



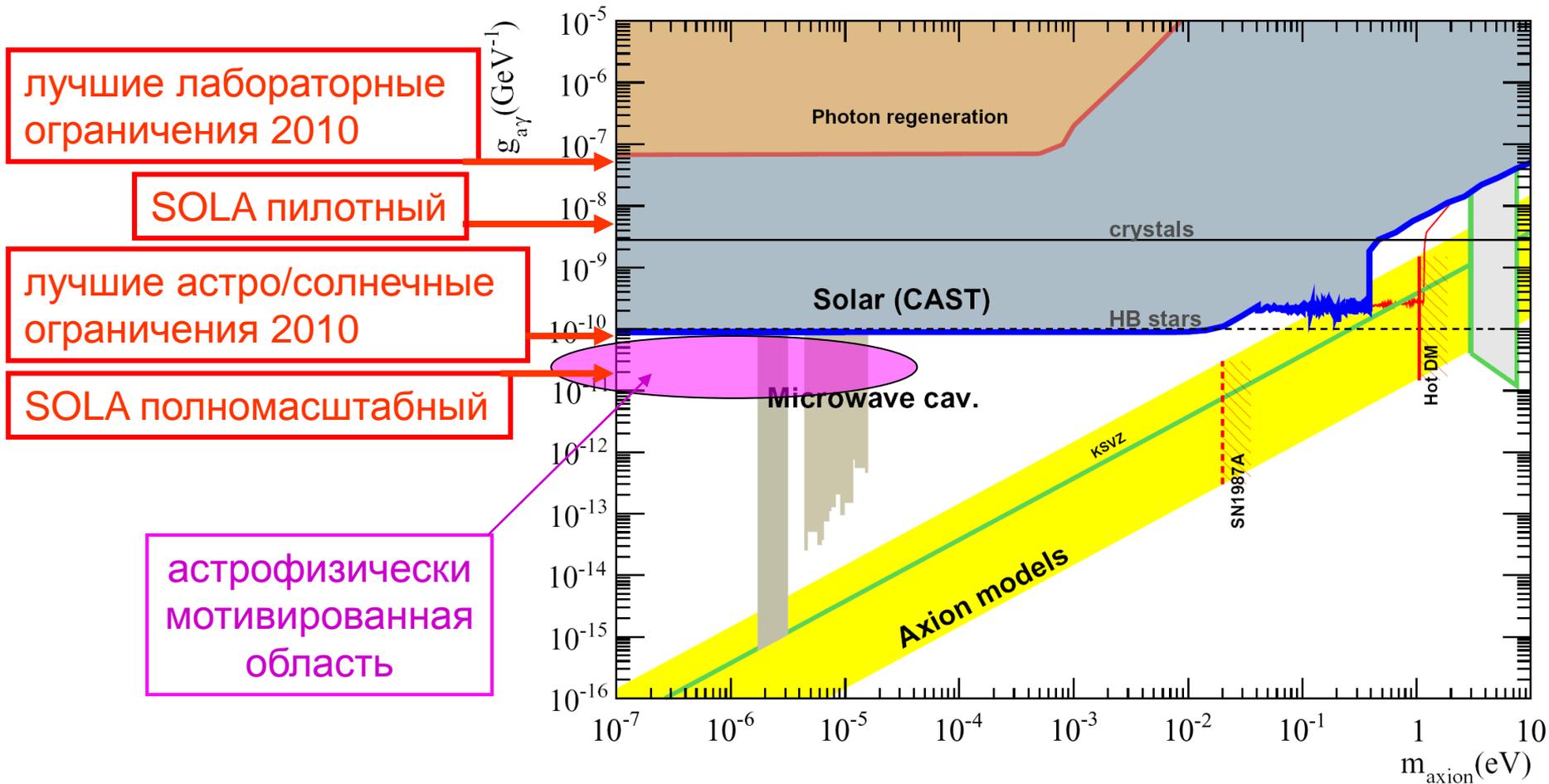
Резонансная регенерация



Matched Fabry-Perots

$$P_{res.reg.} = 2 \left(\frac{F}{\pi} \right)^2 \left[\frac{2\omega B_0}{M_a m_a^2} \sin \left(\frac{m_a^2 L}{4\omega} \right) \right]^4$$

Резонансная регенерация: перспективы



Не только аксионы (ALP)!

те же эксперименты могут использоваться для поиска других легких, очень слабо взаимодействующих частиц:

- фотоны скрытого сектора («парафотоны»)
- «хамелеоны»

Парафотоны

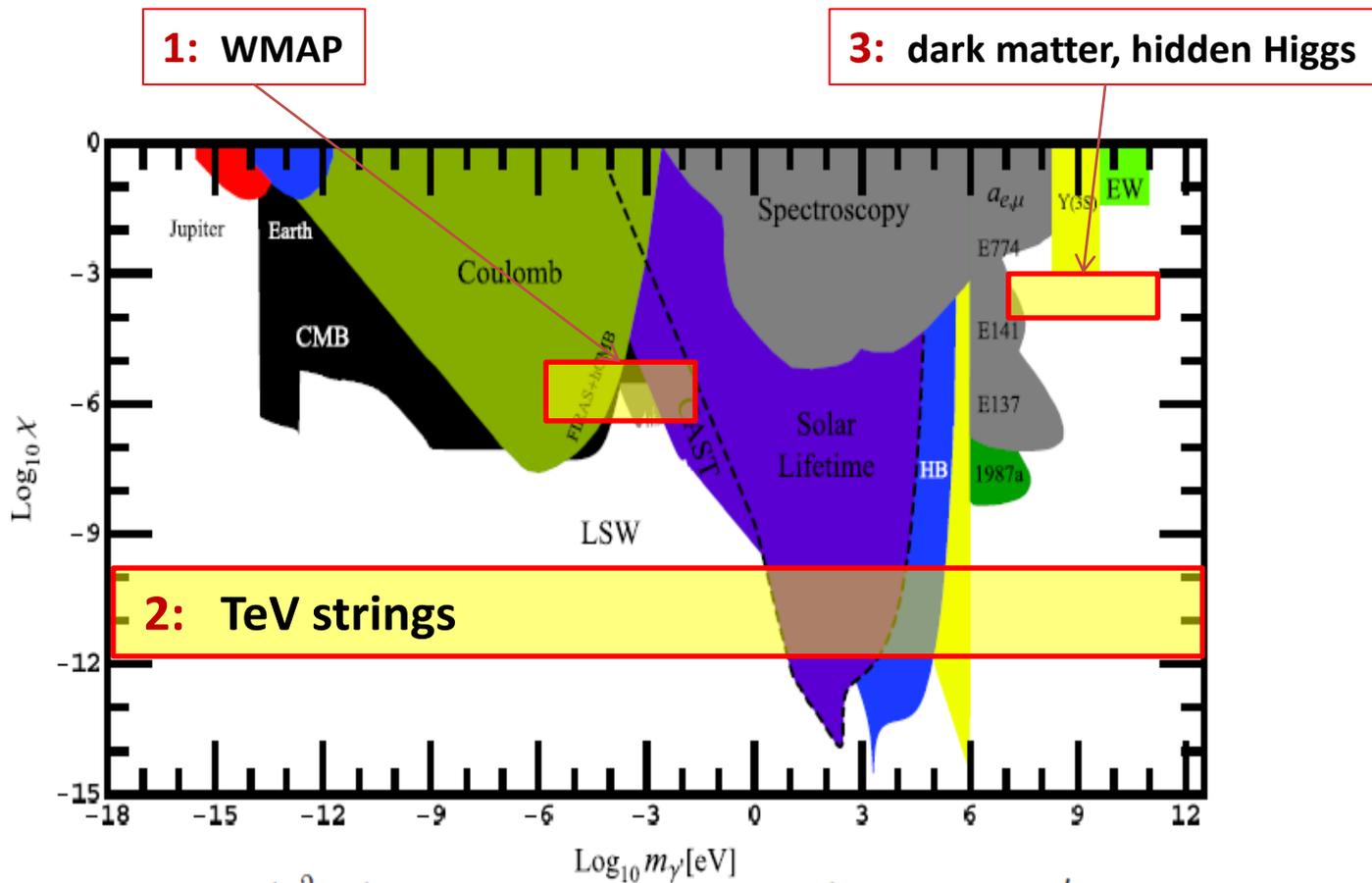
- Скрытые сектора (теории за пределами Стандартной модели):
 - динамическое нарушение суперсимметрии
 - компактификации теории струн
 - и т.д.
- Обычно: неперенормируемые взаимодействия
 - подавлены масштабом передачи
- **Порталы**: перенормируемые взаимодействия
 - Хиггсовский портал (скрытый скаляр)
 - нейтринный портал (скрытый фермион)
 - **кинетическое смешивание (скрытый вектор)**
- **кинетическое смешивание** обязательно, если есть $U(1)$ калибровочное поле в скрытом секторе
 - струнные объединенные теории
 - gauge-mediated нарушение суперсимметрии
 - и т.д.

Парафотоны (масса m , смешивание χ)

Три интересных области:

1. Вклад в эффективное число нейтринных ароматов по CMB:
(WMAP7: $N_{\text{eff}} = 4.34 \pm 0.86 - 0.88$)
 $\chi = (1.1 - 2.4) \times 10^{-6}$
 $m = (10^{-5} - 10^{-2}) \text{ eV}$
2. ТэВ-гравитация в некоторых струнных моделях:
 M_{Planck} связана с χ
 $\chi \sim (10^{-12} - 10^{-10})$
(ограничено снизу первыми данными LHC)
3. “Unified” DM, “secluded” DM, “hidden” Higgs:
 - DAMA, PAMELA, ATIC, FERMI, INTEGRAL...
 - необычные распады хиггсовского бозона с массой $\sim 100 \text{ GeV}$ $\chi \sim (10^{-4} - 10^{-3})$
 $m \sim \text{GeV}$

Парафотоны (масса m , смешивание χ)



Парафотоны (масса m , смешивание χ)

ускорители

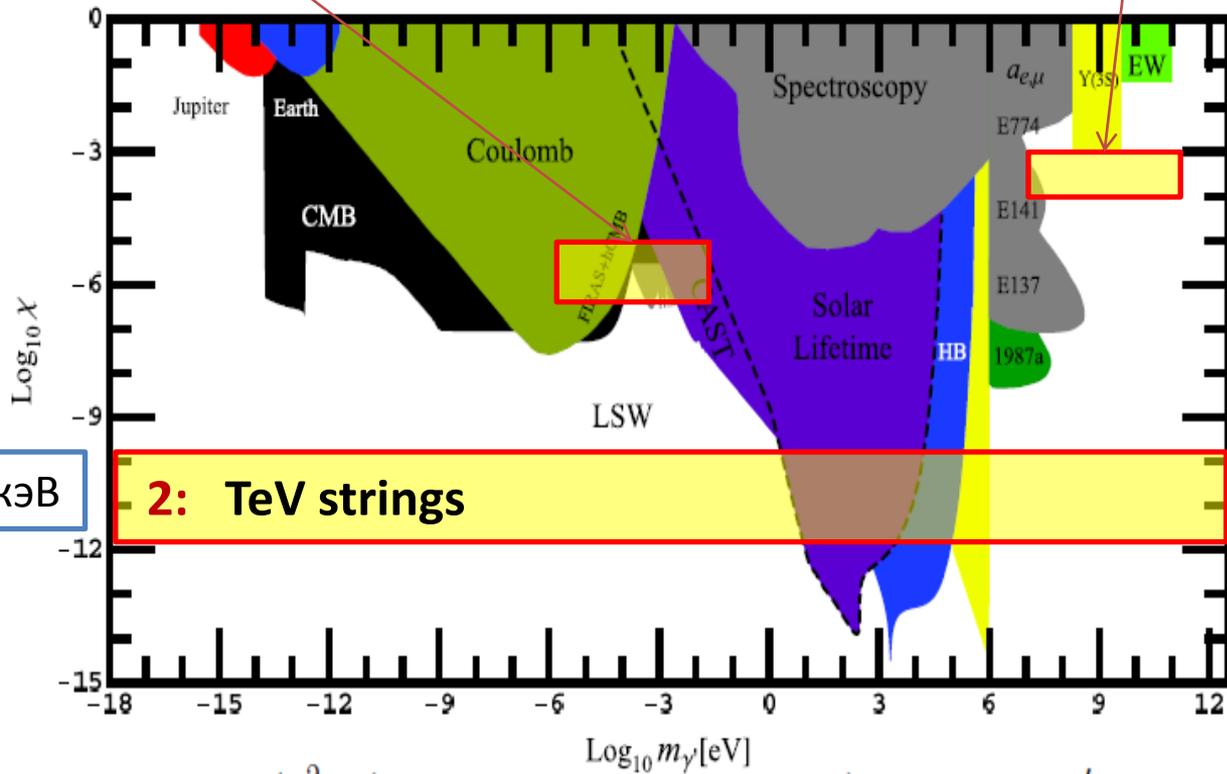
СВЕТ СКВОЗЬ СТЕНУ,
гелиоскопы ЭВ

1: WMAP

3: dark matter, hidden Higgs

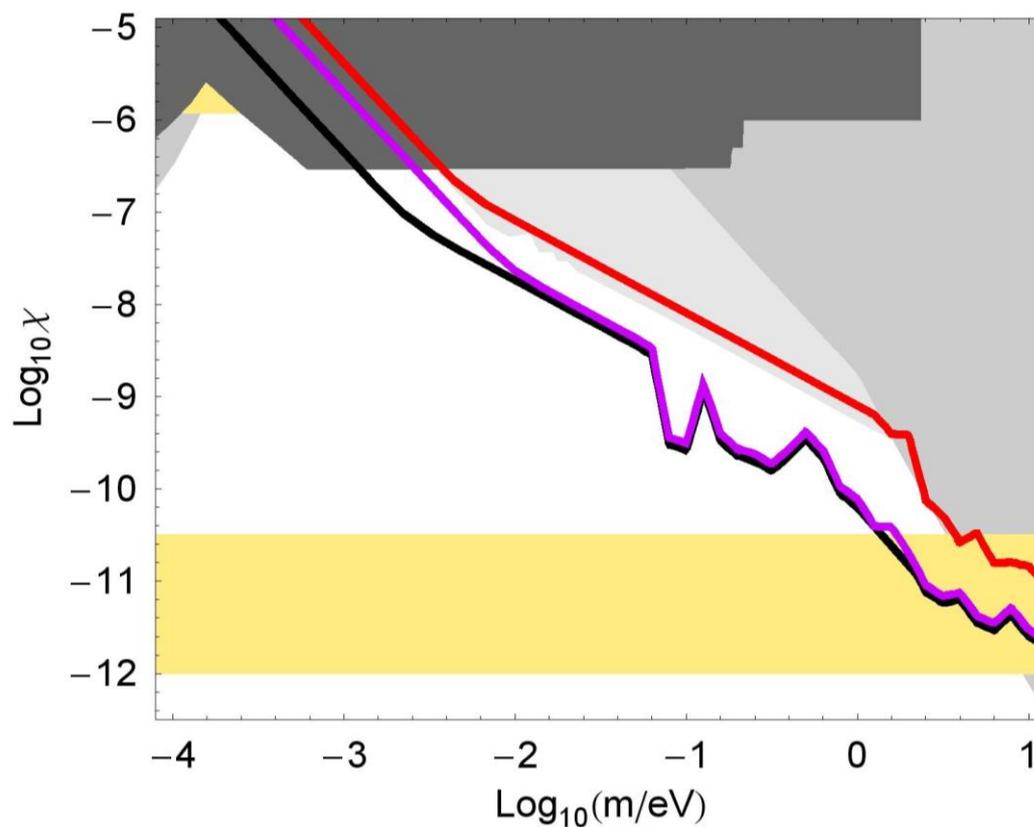
гелиоскопы кЭВ

2: TeV strings



Парафотоны (масса m , смешивание χ)

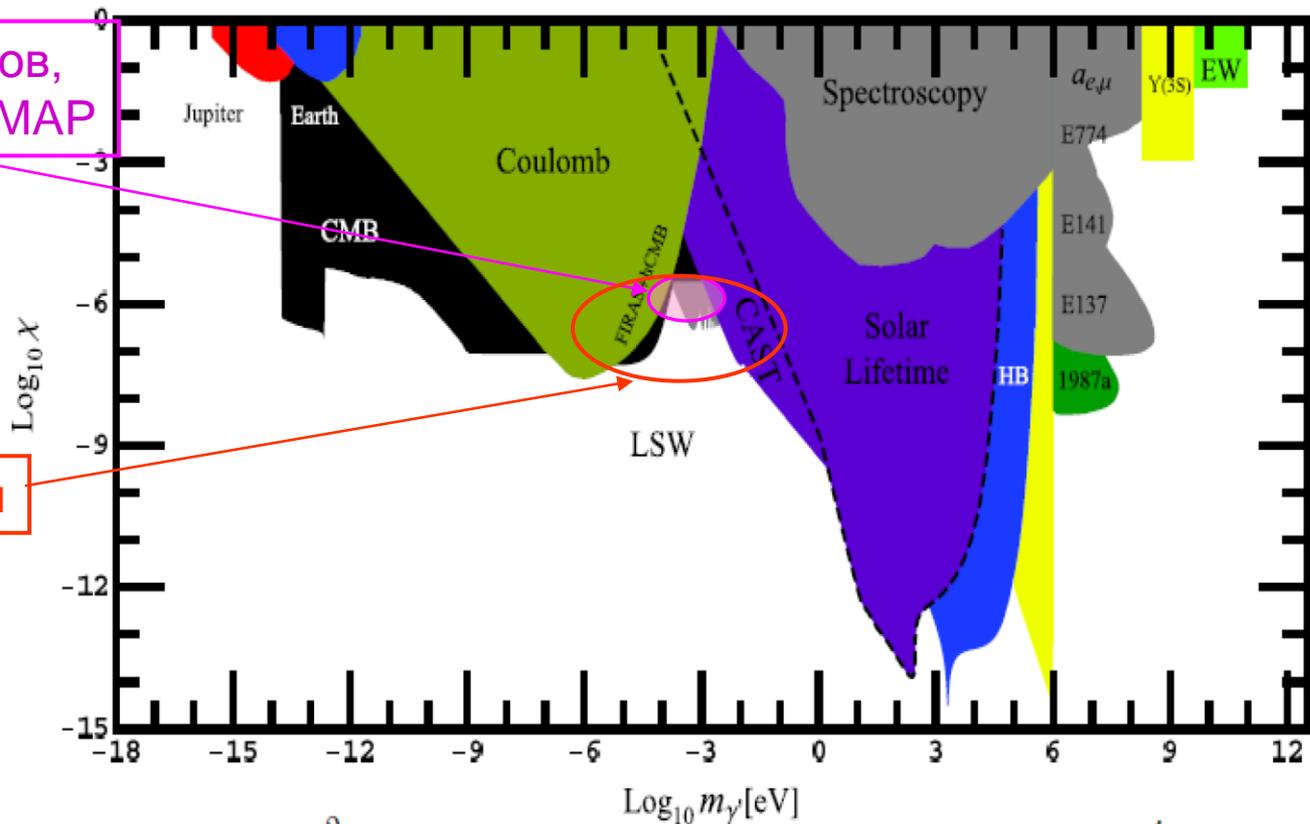
CAST - кэВ



Парафотоны (масса m , смешивание χ)

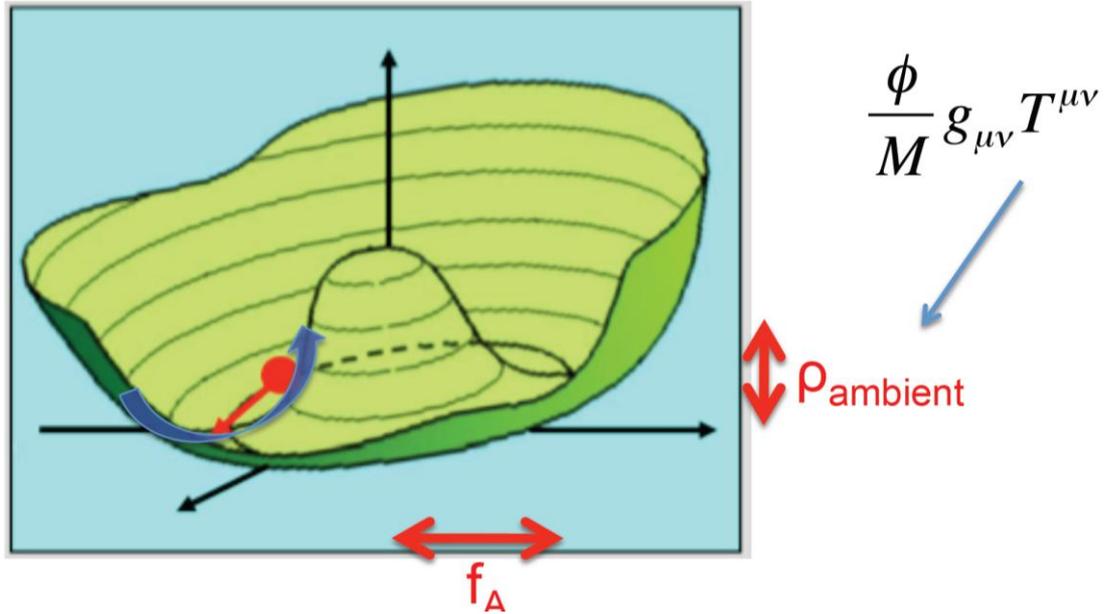
SOLA

область параметров, мотивированная WMAP



Хамелеоны (масса переменная)

одна из моделей для объяснения ускоренного расширения Вселенной («темная энергия»)



Выводы

Выводы

1. **CAST** *вроде бы* продлен на 2 года под лозунгами поиска:
 - ALP (астрофизически мотивированных)
 - парафотонов
 - хамелеонова **не** КХД-аксионов!
2. Проект **будущего** гелиоскопа NGAH с большой площадью детектирования
3. Резонансная регенерация – метод достичь той же чувствительности **в лаборатории**

ИЯИ может поучаствовать!

запасные слайды:
аксион-фотонные осцилляции

Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

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

ψ

псевдоскалярное поле
(аксионоподобная
частица)

$F_{\mu\nu}$

тензор напряжений
электромагнитного поля

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

дуальный тензор

Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

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

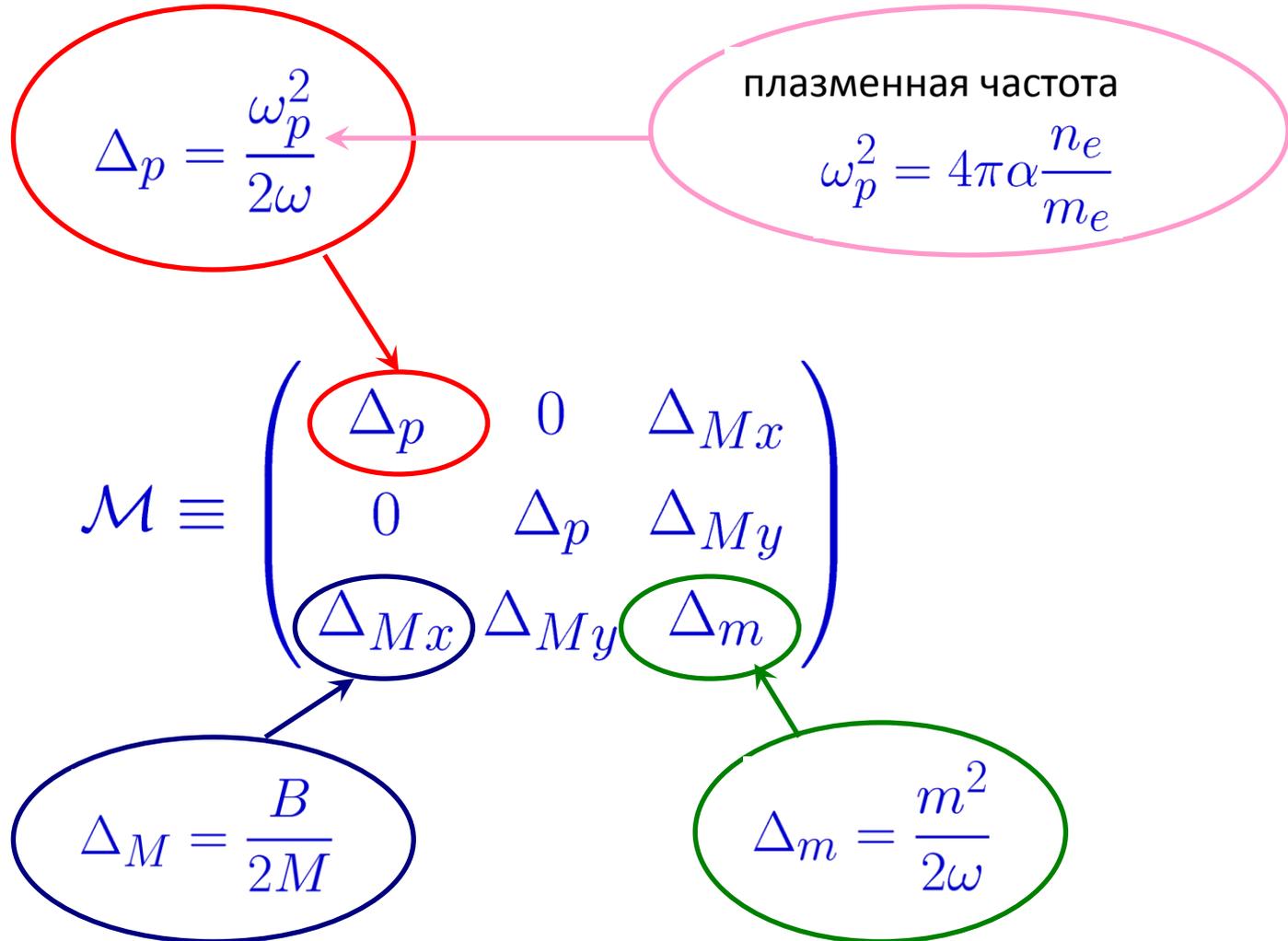


$$(i\partial_z + \omega + \mathcal{M}) \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ a \end{pmatrix} = 0$$

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

Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.



Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

вероятность осцилляций (для постоянных B , n_e):

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

где

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

Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

условия максимального смешивания:

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

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

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

Как сделать Вселенную попрозрачнее?

Осцилляции фотонов в гипотетические легкие частицы.

условия максимального смешивания:

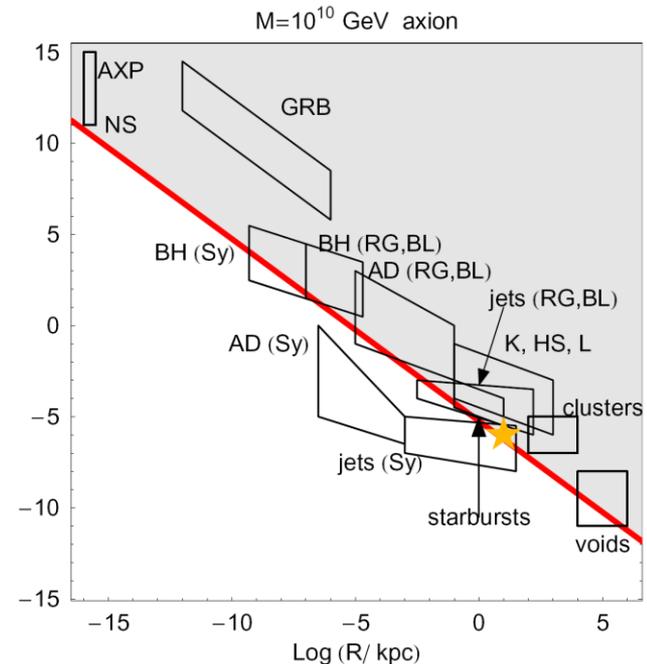
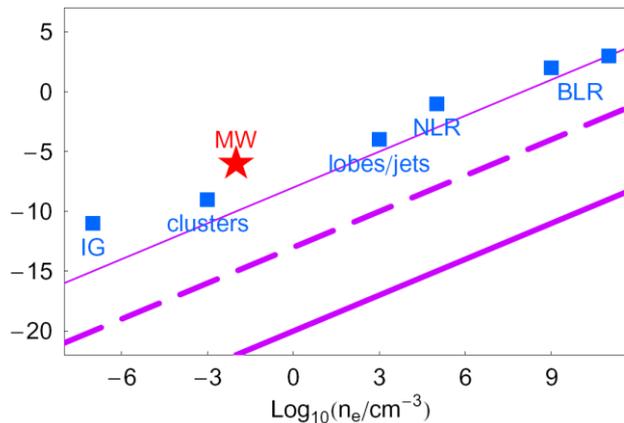
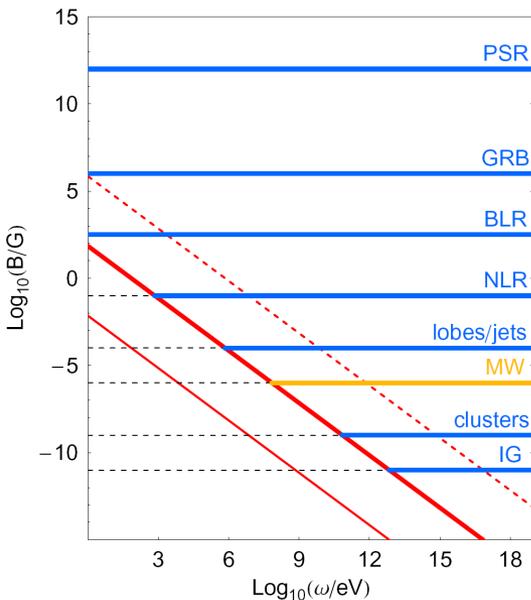
$$\Delta m \ll 2\Delta_M$$



$$\Delta p \ll 2\Delta_M$$



$$L \gtrsim \frac{\pi}{\Delta_{\text{OSC}}}$$



Parameters:

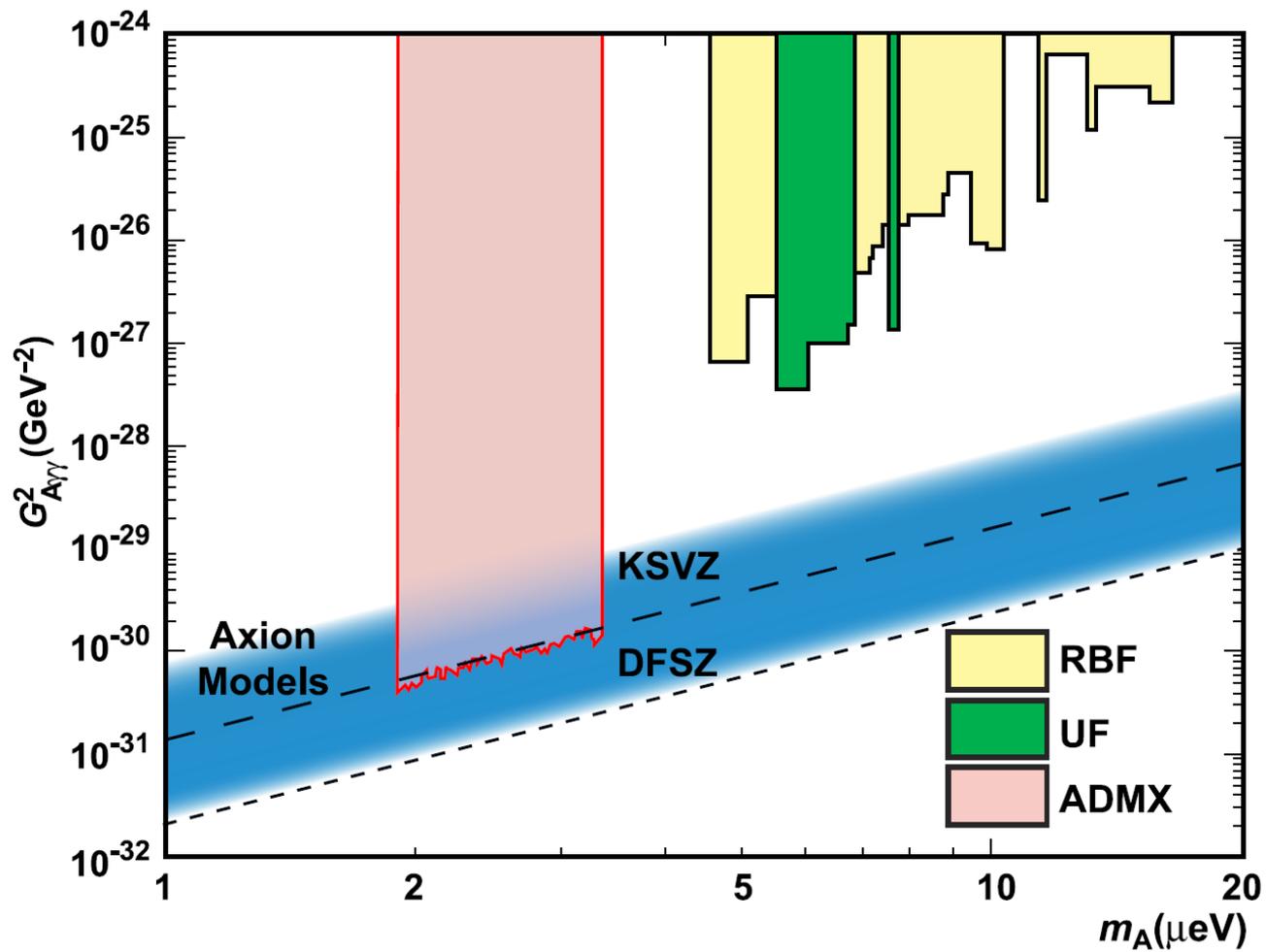
• U(1) hidden gauge coupling

• mixing coupling

• paraphoton mass

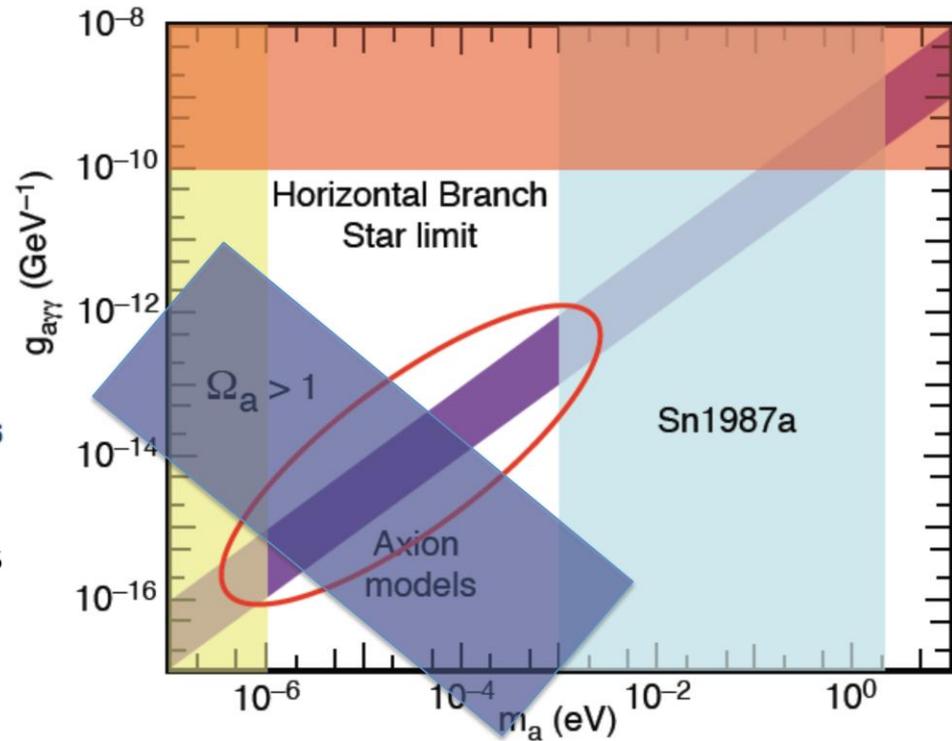
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}'^2 - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}'^2 - \frac{\sin\chi}{2}F_{\mu\nu}'B_{\mu\nu}' + \frac{m^2}{2}B_{\mu}'^2 - eA_{\mu}'j_{\mu} - gB_{\mu}'\eta_{\mu}.$$

m, χ relevant for oscillations



$$\Omega_A h^2 \approx 0.3 \left(\frac{f_A}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{7/6}$$

$$\approx 0.3 \times \left(\frac{m_a}{10^{-5} \text{ eV}} \right)^{-7/6}$$



Preferred region for cold axion dark matter