

Загадки Вселенной

В.А. Рубаков

Институт ядерных исследований РАН,
кафедра физики частиц и космологии
физического факультета МГУ



Успехи науки о Вселенной – космологии:

- Космология стала точной наукой за последние 30 лет
- Свойства современной Вселенной, её эволюция в прошлом известны с хорошей точностью

В то же время:

Имеющихся знаний об элементарных частицах, фундаментальных взаимодействиях, формах материи недостаточно для описания наблюдаемого мира

Известные элементарные частицы



+ АНТИЧАСТИЦЫ: e^+ – позитрон, ... $\bar{\nu}_e$ – антинейтрино, \bar{u} – антикварки, ...

+ частицы, ответственные за взаимодействия:
 фотон \Leftrightarrow электромагнитные, глюоны \Leftrightarrow сильные,
 $W, Z \Leftrightarrow$ слабые

+ бозон Хиггса, ответственный за массы.

Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная **везде одинаковая**

Глубокие обзоры галактик

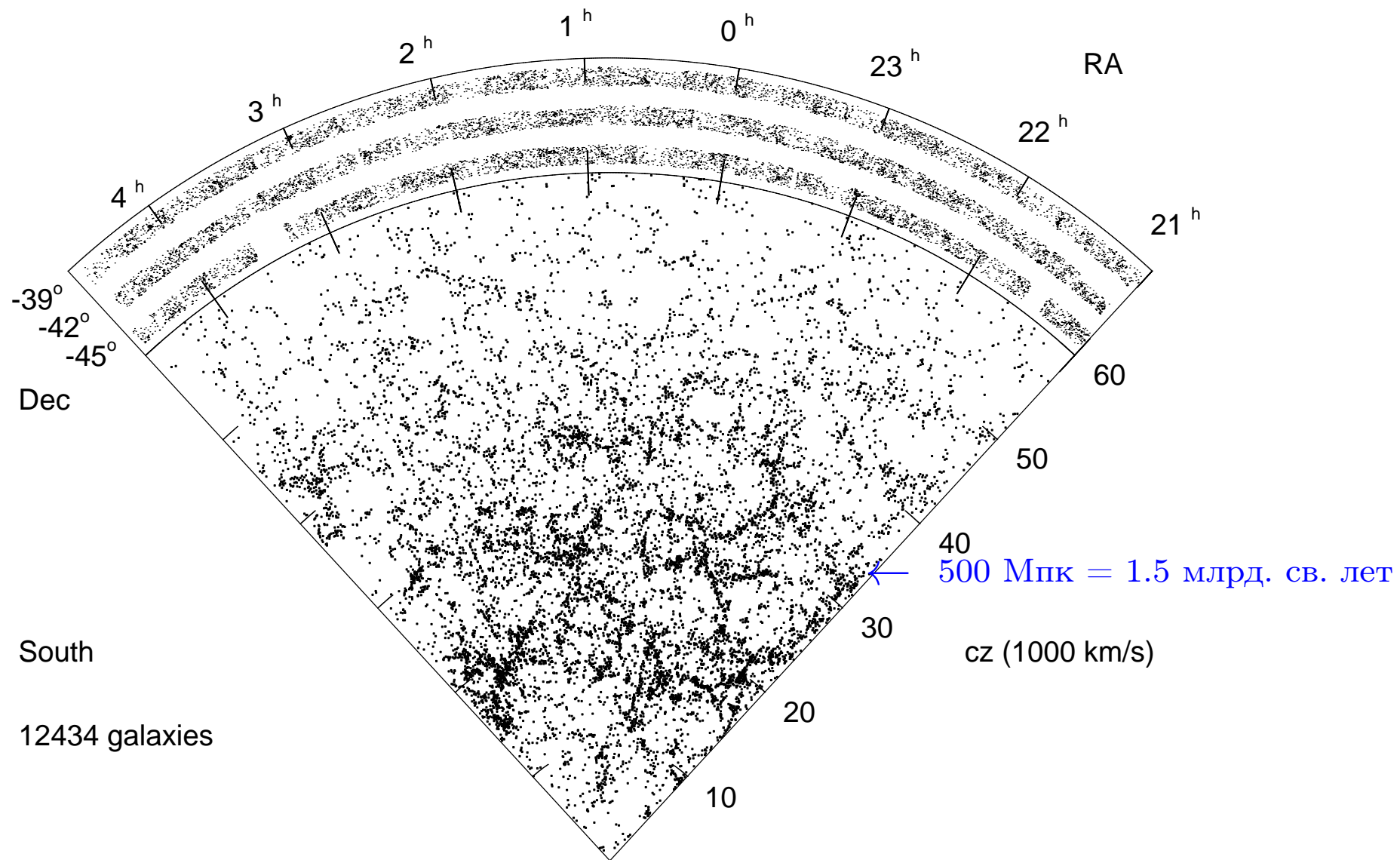


положение во Вселенной нескольких миллионов галактик,
расстояния до 20 млрд. световых лет



карта видимой части Вселенной

Середина 1990-х



Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная **расширяется**

Пространство растягивается во все стороны.

Галактики удаляются от нас; чем дальше галактика, тем быстрее она убегает (закон Хаббла – конец 1920-х).

Эффект Доплера: свет от далеких галактик приходит к нам покрасневшим

Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная расширяется

Сегодня расширение медленное: все расстояния увеличатся вдвое за 10 млрд. лет.

В прошлом Вселенная расширялась гораздо быстрее

В будущем Вселенная будет более разреженной.

В прошлом вещество во Вселенной было гораздо более ПЛОТНЫМ

Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная расширяется
- Вселенная “теплая”

Заполнена тепловым электромагнитным излучением
(Пензиас–Вильсон, 1950-е),

$$T = 2.726 \text{ градусов Кельвина}$$

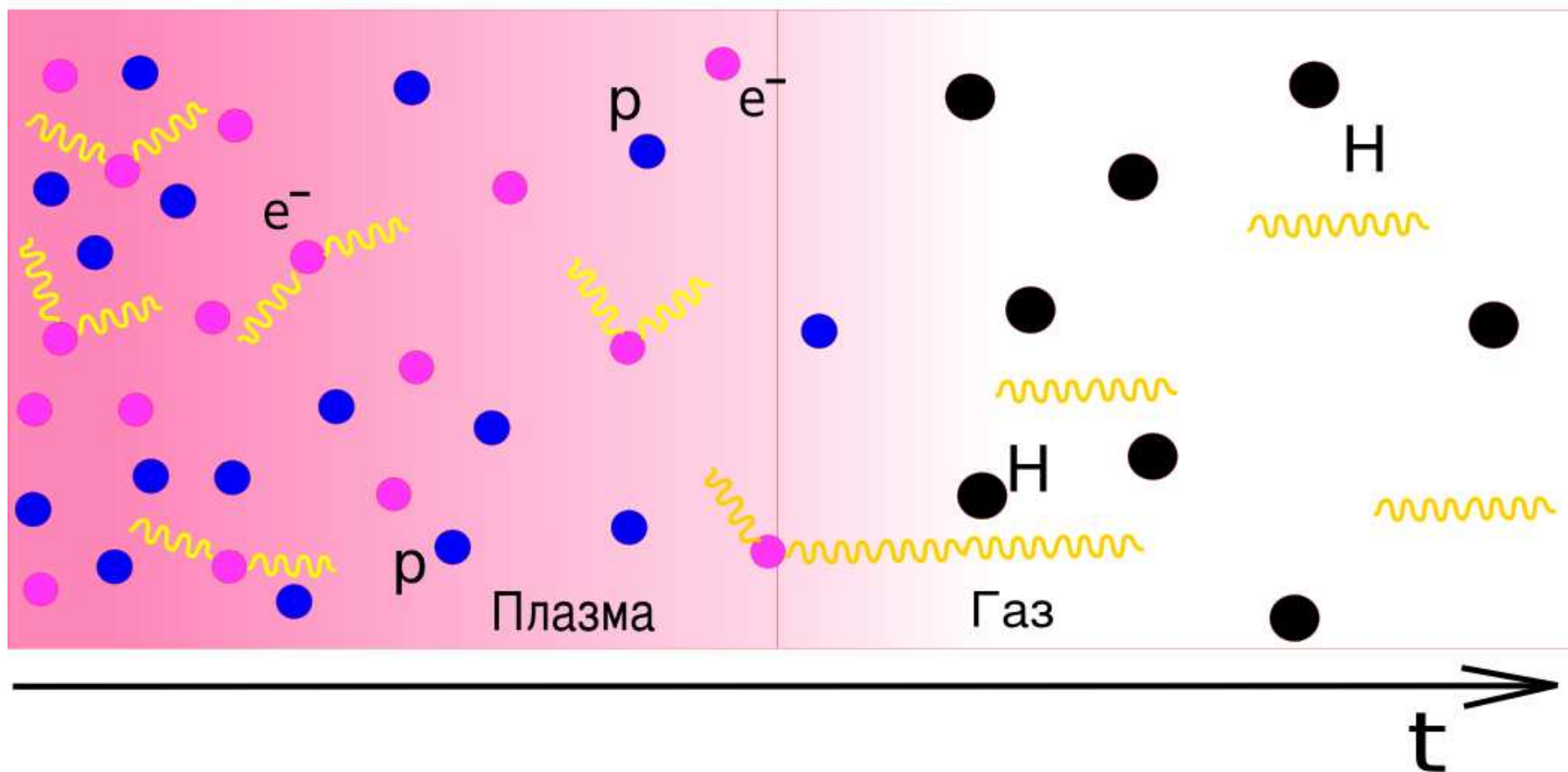
(ниже температуры жидкого гелия)

В прошлом была гораздо более горячей.

Остыла из-за расширения.

Переход плазма–газ

$$T = 3000 \text{ К}$$

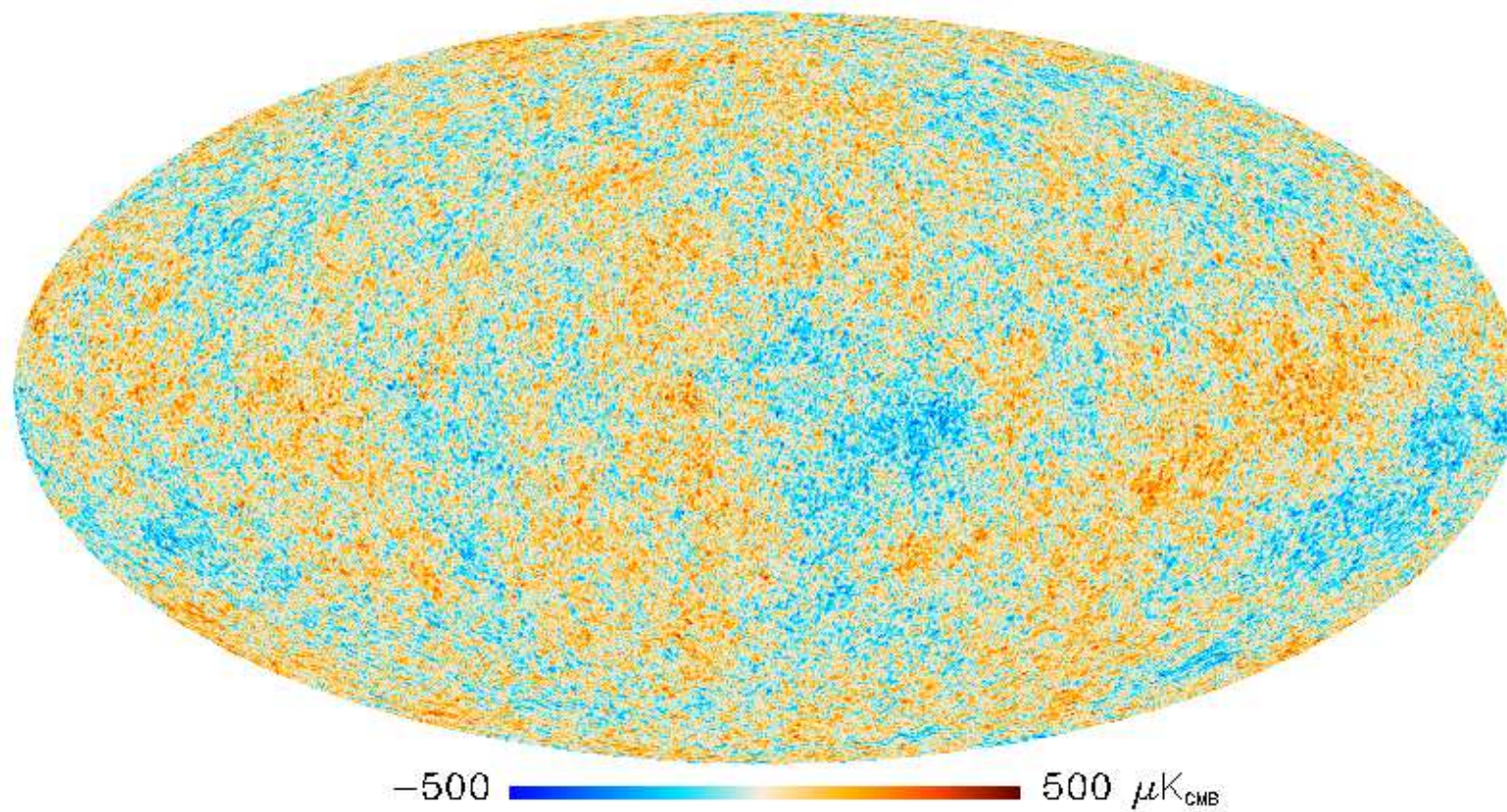


- Измерения температуры реликтового излучения в зависимости от направления на небе



фотоснимок Вселенной в возрасте 380 тыс. лет
(сегодня — 13.8 млрд. лет)

$$\frac{\delta T}{T} \sim 0.0001 - 0.00001 \quad T = 3000^\circ K, \quad \delta T \sim 0.1^\circ K$$



Planck

Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная расширяется
- Вселенная “теплая”
- Наивное продолжение эволюции назад во времени \Rightarrow момент Большого Взрыва: “начало“, бесконечная плотность вещества, бесконечная температура, бесконечная скорость расширения.

Сегодня мы знаем, что горячая стадия не была первой.
Ей предшествовала другая, необычная стадия
(инфляция???)

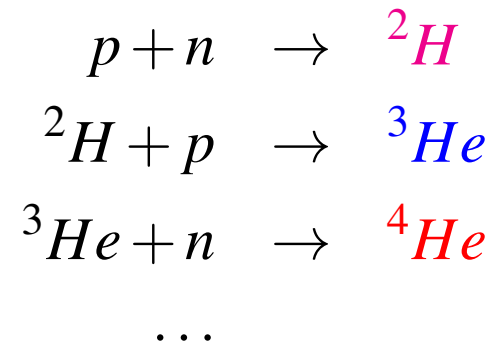
Ранняя Вселенная:

- Переход плазма–газ
 $T = 3000$ градусов,
возраст Вселенной = 380 тыс. лет.

- Эпоха **термоядерных реакций**

$T =$ миллиарды градусов

возраст Вселенной = 1 секунда \rightarrow 3 минуты (!)



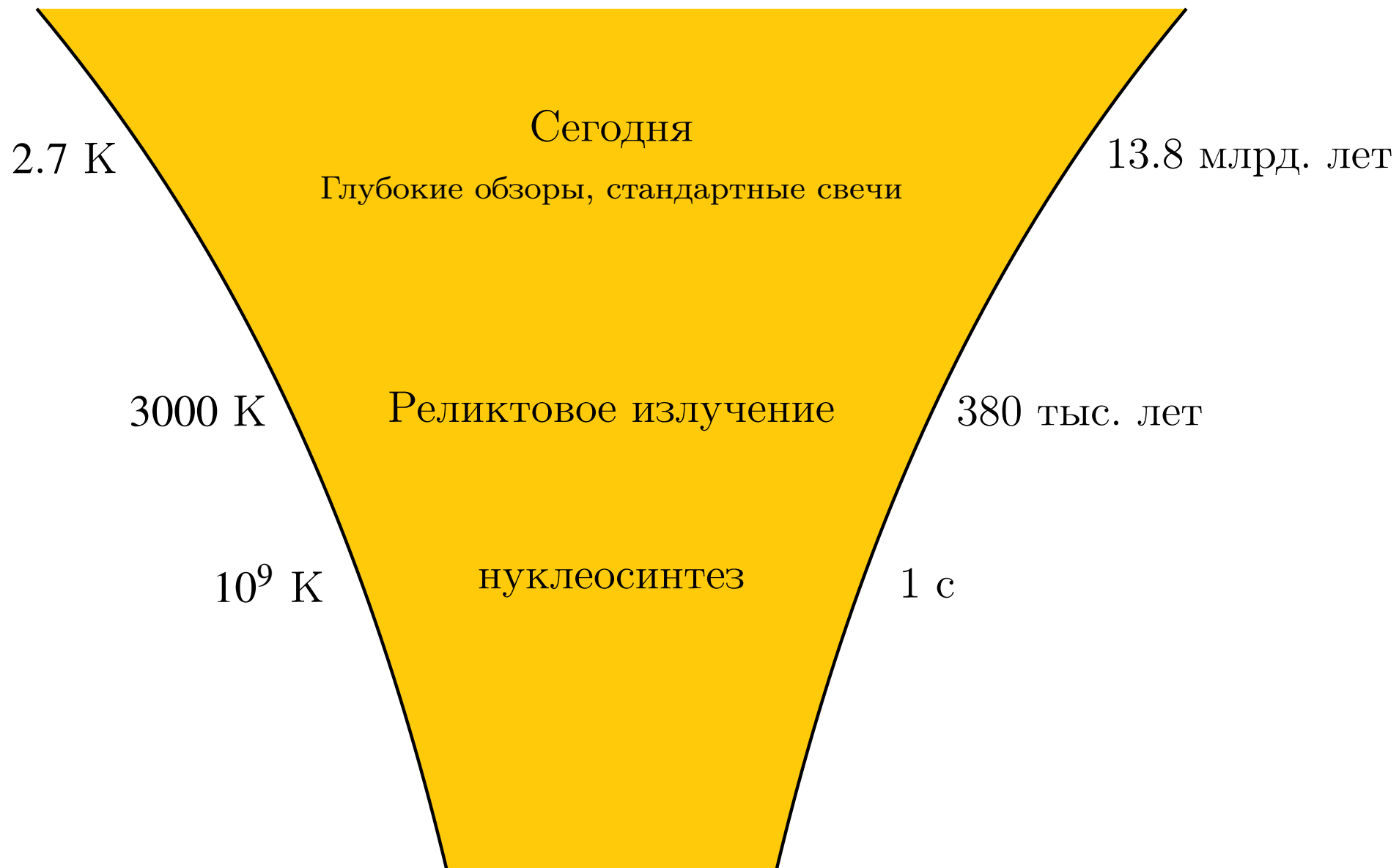
Примеси легких элементов измерены

Сравнение наблюдений примеси легких элементов с теорией:

- Проверка теоретического описания ранней Вселенной через 1 секунду после Большого Взрыва
- Измерение плотности обычного вещества тогда \Rightarrow сейчас

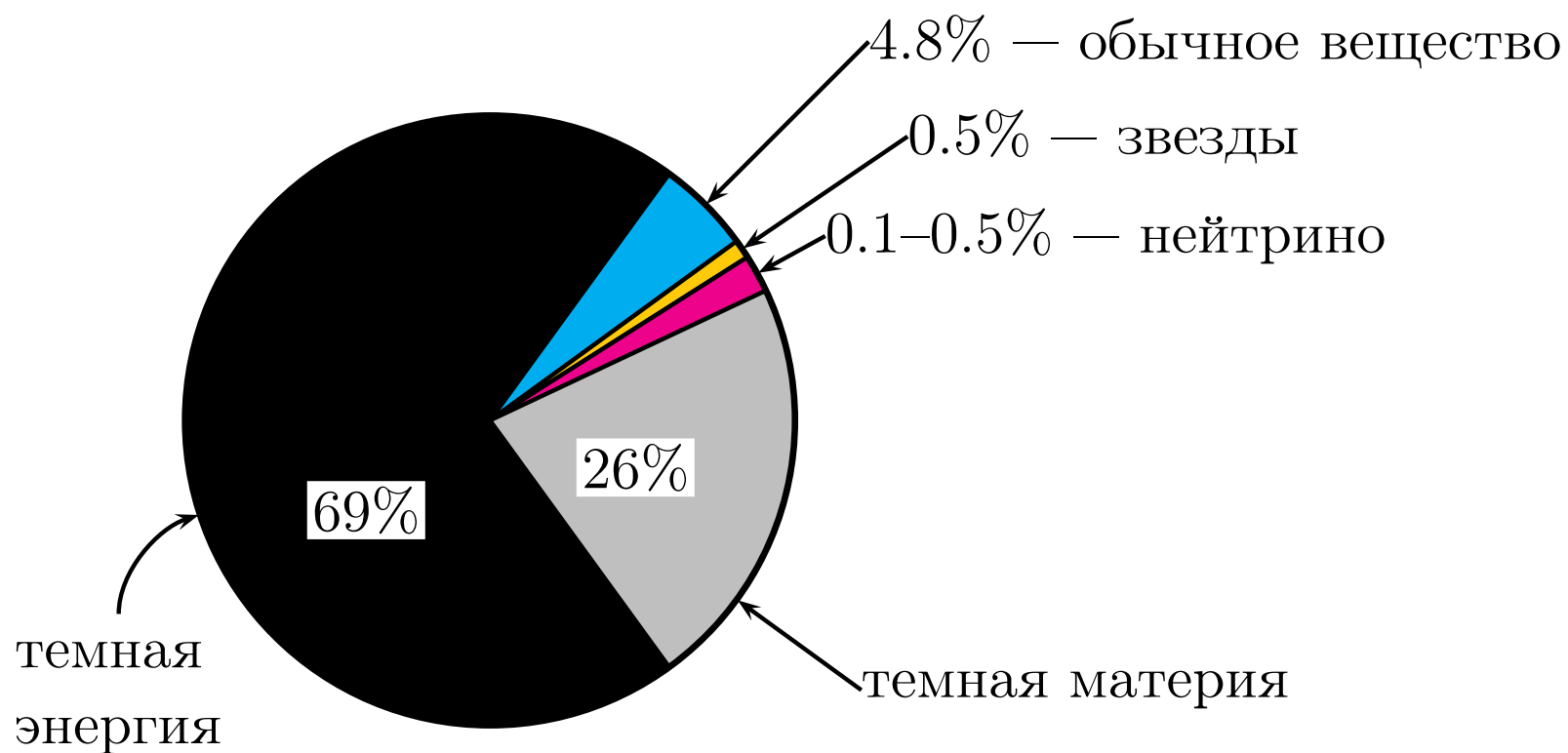
Независимая проверка: измерение свойств реликтового излучения

Этапы эволюции Вселенной и данные о них



Загадки: состав

Баланс энергий в современной Вселенной



Загадка No. 1:

Откуда во Вселенной обычное вещество?

(“проблема барионной асимметрии”)

протон, нейтрон, их тяжелые аналоги = барионы
состоят из трех кварков

Современная Вселенная: вещество есть, антивещества нет.

В чем здесь проблема?

В обычных условиях действует
закон сохранения барионного числа

$$N_B = \frac{1}{3}(N_{\text{кварков}} - N_{\text{антикварков}}) = \text{const}$$

- Единственная причина стабильности протона (3 кварка) —
легчайшей частицы, несущей барионное число

$$\tau_p > 10^{33} \text{ лет}$$

Ранняя Вселенная, $T > 10^{12}$ К = 0.1 ГэВ:

рождение и аннигиляция кварк-антикварковых пар \implies

$$\frac{n_q - n_{\bar{q}}}{n_q + n_{\bar{q}}} \sim 10^{-9}$$

на 1 млрд. пар кварк-антикварк был один “лишний” кварк (!)

Невероятно, чтобы такая асимметрия
была во Вселенной с самого начала.

Она возникла в результате эволюции.

Каким образом?

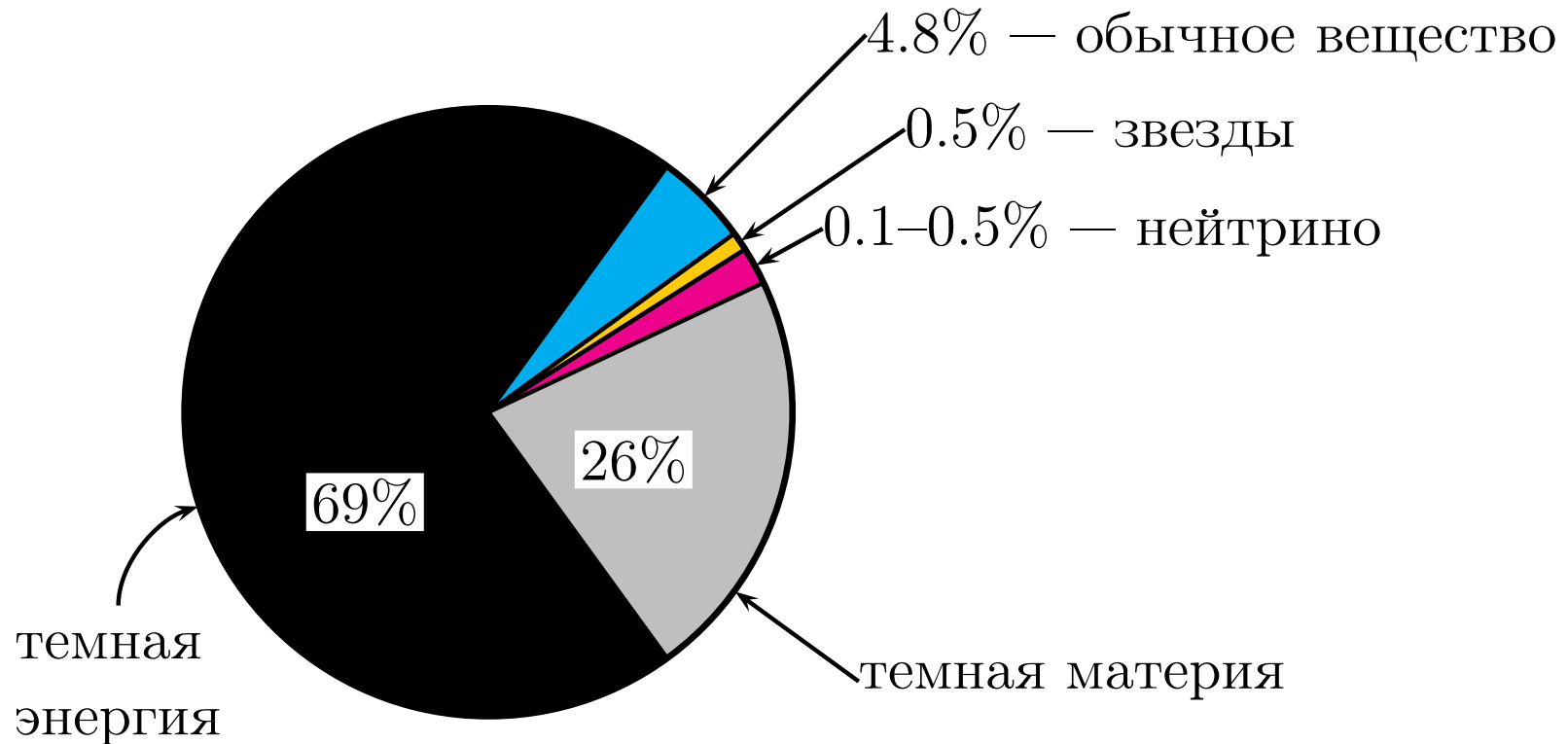
А. Д. Сахаров'67, В. А. Кузьмин'70

Барионная асимметрия жизненно важна для нас.

Если бы ее не было, кварки проаннигилировали бы с
антикварками, и во Вселенной не осталось бы вещества.

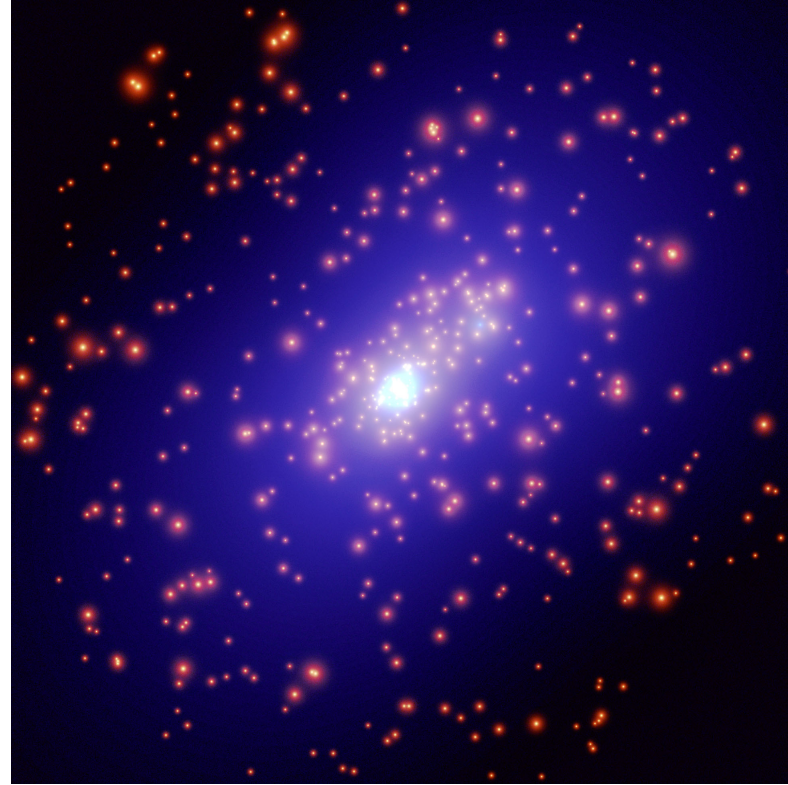
Гипотез много, ни одна не подтверждена

Загадка No. 2: ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ



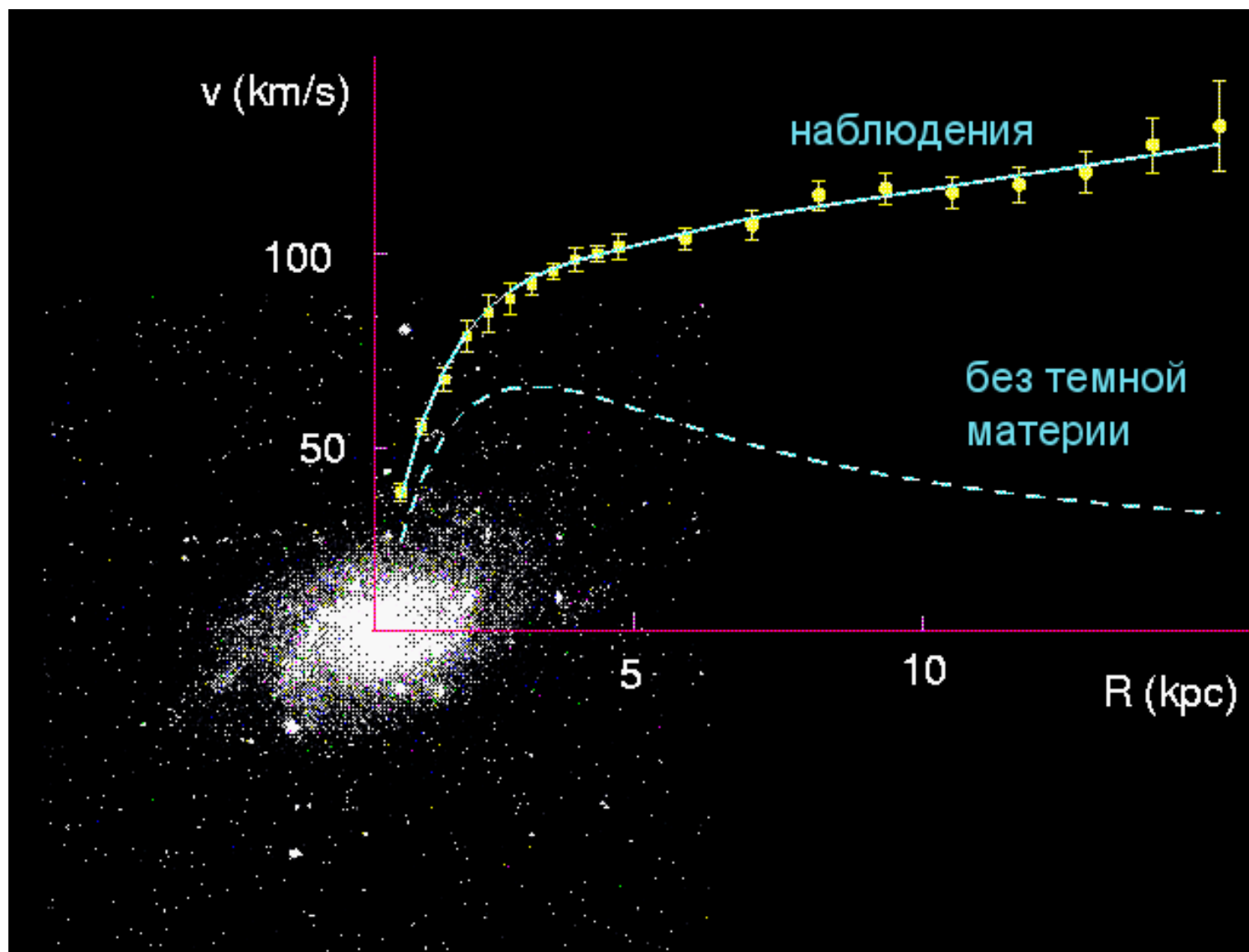
- данные о распределении галактик, реликтовом излучении
- гравитационные силы **в скоплениях галактик**

Гравитационное линзирование



Темная материя

- данные о распределении галактик, реликтовом излучении
- гравитационные силы в скоплениях галактик
- вращение звезд на периферии галактик



Известные элементарные частицы



+ АНТИЧАСТИЦЫ: e^+ – позитрон, ... $\bar{\nu}_e$ – антинейтрино, \bar{u} – антикварки, ...

+ частицы, ответственные за взаимодействия:
 фотон \Leftrightarrow электромагнитные, ГЛЮОНЫ \Leftrightarrow сильные,
 $W, Z \Leftrightarrow$ слабые

+ бозон Хиггса, ответственный за массы.

Природа темной материи — область гипотез

- темная материя = массивные частицы, электрически нейтральные. Стабильные.
- Новые симметрии фундаментальных взаимодействий ???
- Нет среди известных частиц
- Популярная гипотеза:
новые, пока не открытые элементарные частицы массы $m = 100\text{--}1000$ масс протона, взаимодействующие, хотя и слабо, с обычным веществом
 - $(1000\text{--}10^4) \frac{\text{штук}}{\text{м}^3}$ здесь и сейчас

Новая физика при энергиях, доступных для изучения на ускорителях

 - Скорее всего, частица темной материи – лишь один из членов нового семейства элементарных частиц.

Пути поиска частиц темной материи

- Эксперименты в подземных лабораториях \Leftrightarrow регистрация частиц темной материи. $(1000-10^4) \frac{\text{частиц}}{\text{м}^3}$ здесь и сейчас

Трудности:

- Мало столкновений этих частиц с обычными атомами
несколько событий в год на тонну мишени
- Слабый сигнал от столкновения
- Мешают естественная радиоактивность, космические лучи.



низкофоновые условия



подземные лаборатории,
сверхчистые изотопы

- Ускорители – коллайдеры высоких энергий \Leftrightarrow рождение частиц темной материи и их партнеров

Большой адронный коллайдер, LHC в CERN

(Международный центр физики высоких энергий вблизи Женевы): pp , $E = 7 + 7$ ТэВ

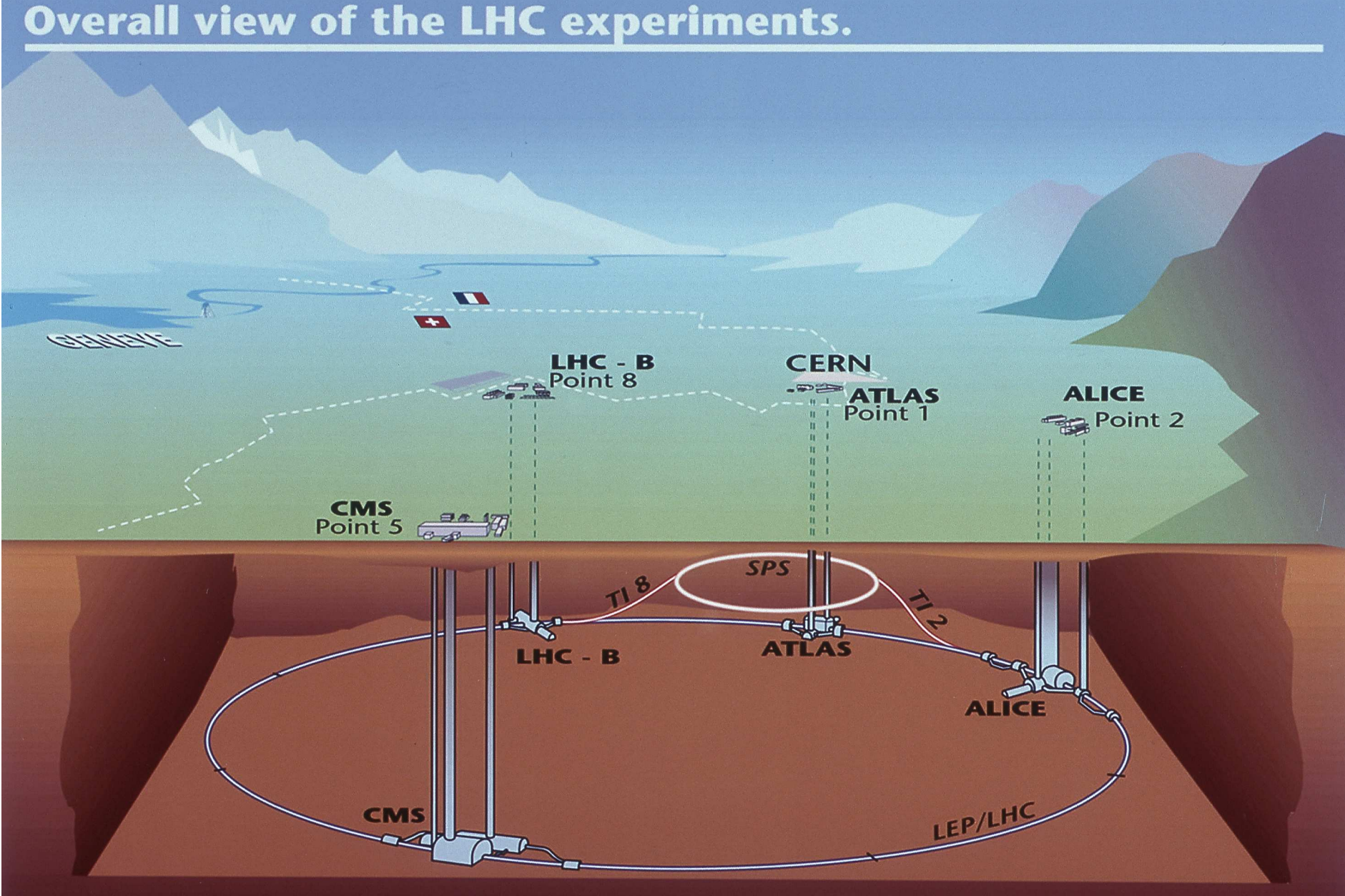
$$pp \rightarrow \bar{Q}\tilde{Q} + \dots$$

The diagram illustrates the decay of a squark-antisquark pair ($\bar{Q}\tilde{Q}$) into a quark-antiquark pair ($q\bar{q}$) and a gluino (\tilde{X}). Red lines represent the decay paths: a vertical line from \bar{Q} and \tilde{Q} meet at a vertex, from which two horizontal lines branch out to q and \bar{q} , and another vertical line goes down to \tilde{X} .

Пока не видно...

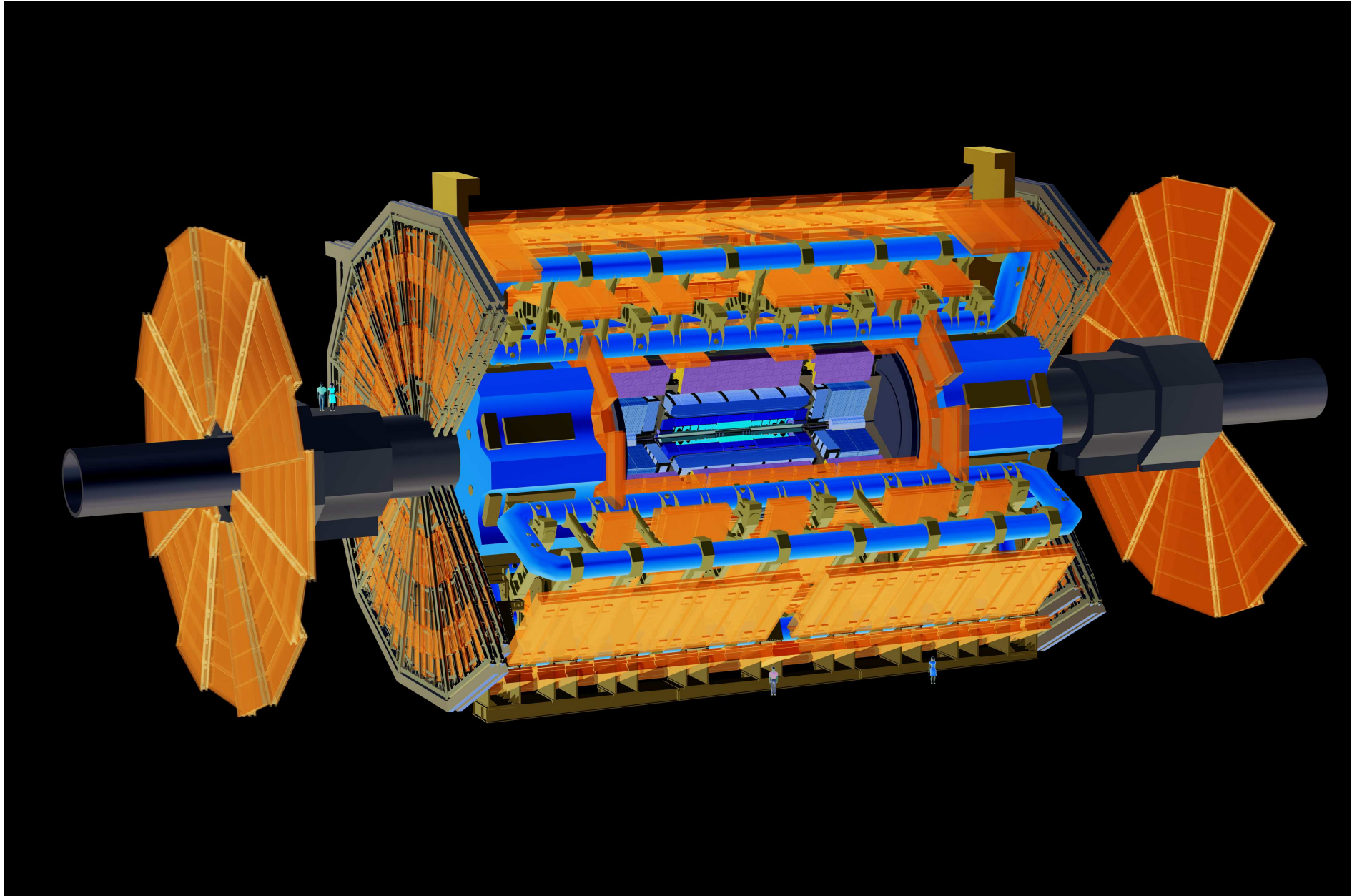
LHC/БАК

Overall view of the LHC experiments.

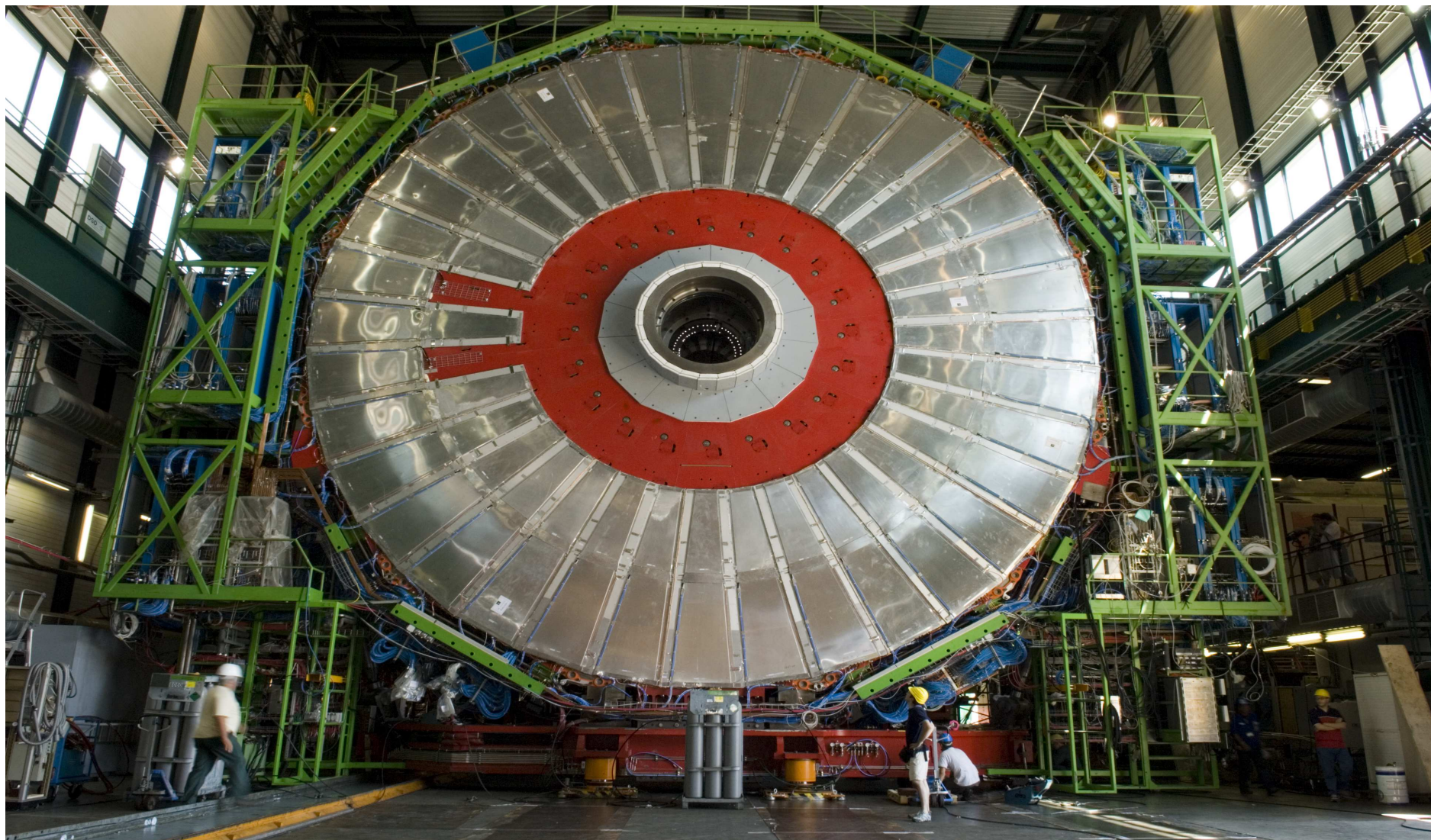


Детекторы LHC/БАК

ATLAS



CMS с торца

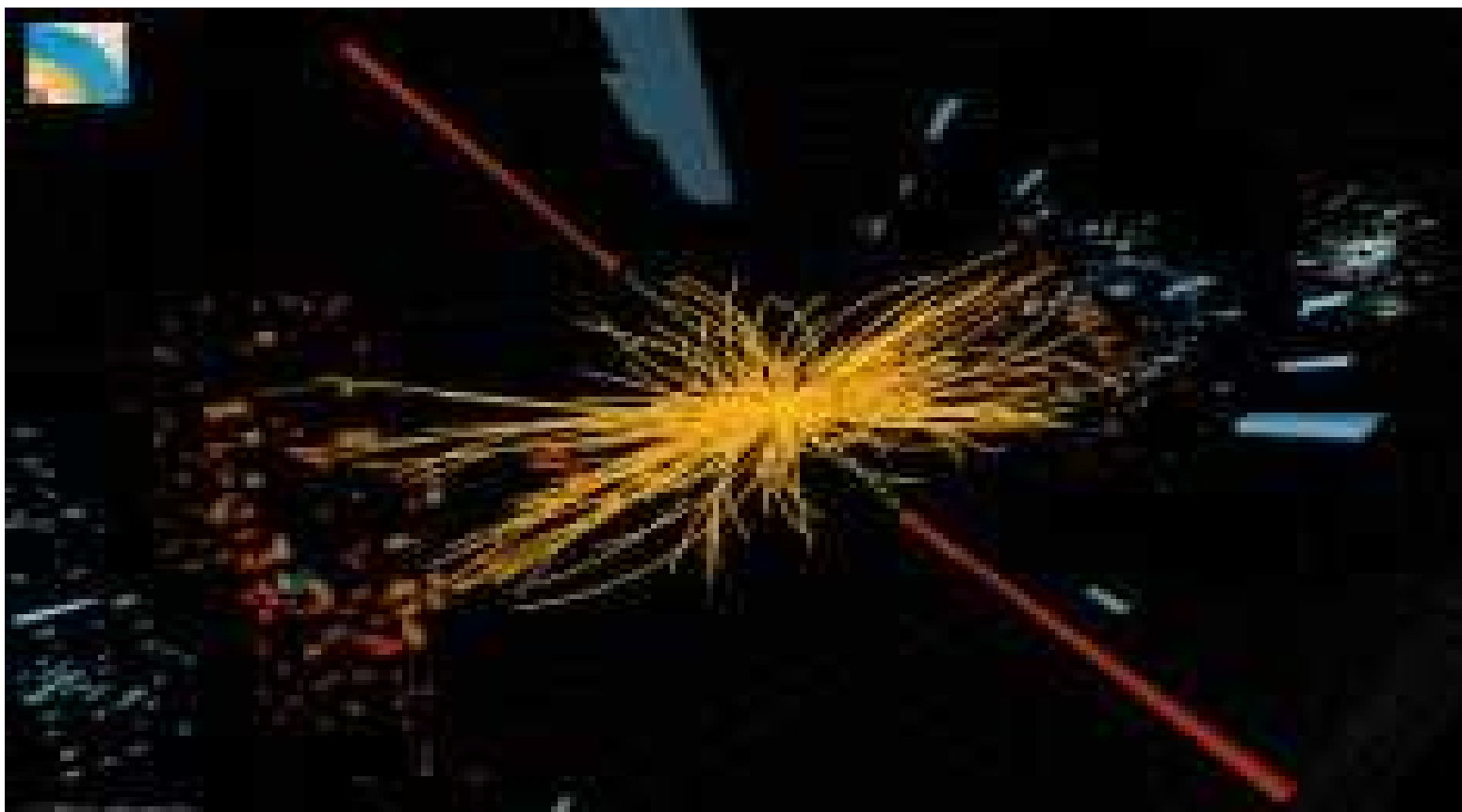


Что видят детекторы?

Детектируются все заряженные частицы и фотоны.

Определяется тип частицы – электрон, фотон, мюон, адрон (протон, нейтрон, мезон).

Измеряется энергия и направление движения каждой частицы.



Так могло бы выглядеть событие с рождением новой частицы

Непрямые поиски частиц темной материи

- Регистрация **продуктов аннигиляции X -частиц в центре Земли, Солнца**

$$X + \bar{X} \rightarrow \pi^{\pm}, K^{\pm} + \dots \rightarrow \nu, \bar{\nu} + \dots$$

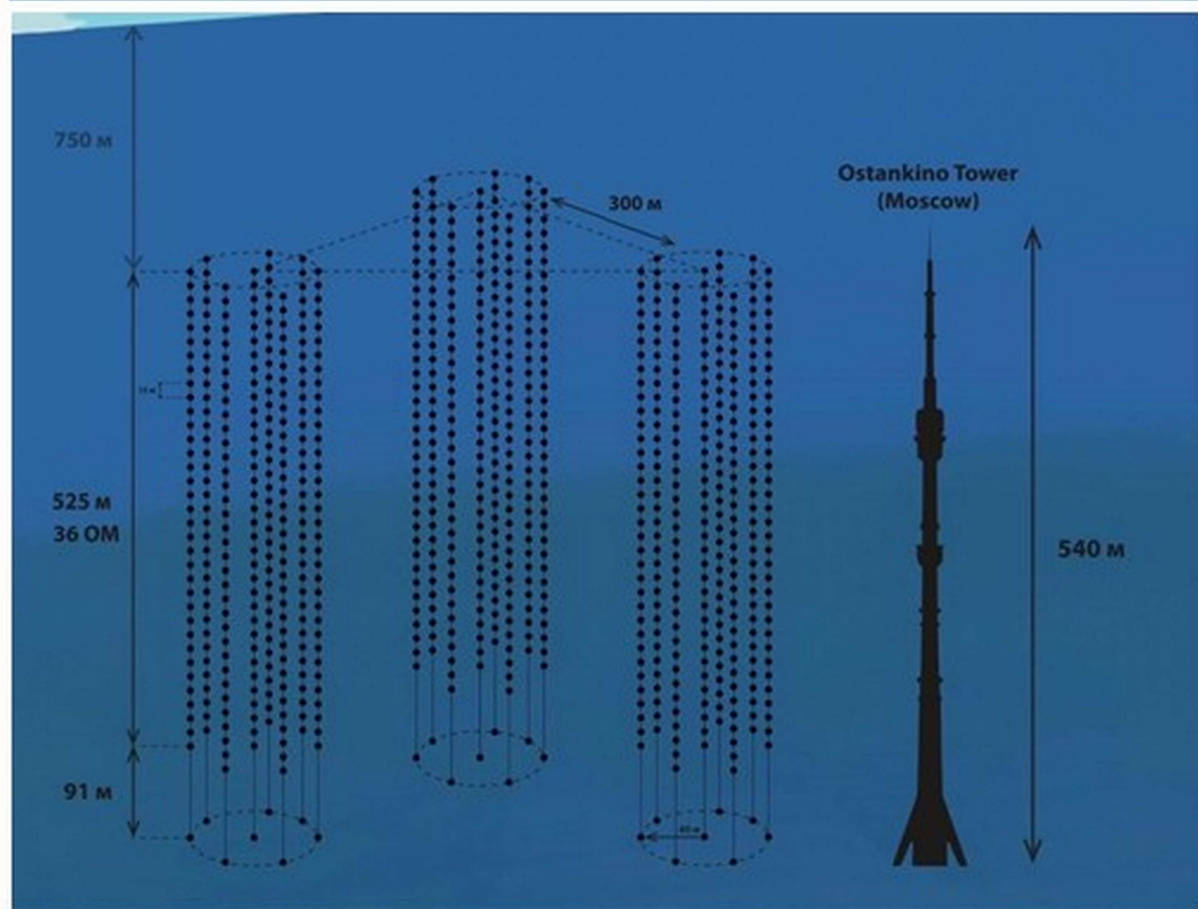
Нейтрино
высоких \implies
энергий

- Подземный сцинтилляционный телескоп Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.
- Байкальский нейтринный телескоп; IceCUBE (Южный полюс)

- Регистрация продуктов аннигиляции в космосе.

Поиск фотонов, e^+ , \bar{p} , прилетающих из космоса

FermiLAT, Pamela (Россия – Италия), AMS на МКС.



Еще гипотезы

Частицы темной материи — легкие

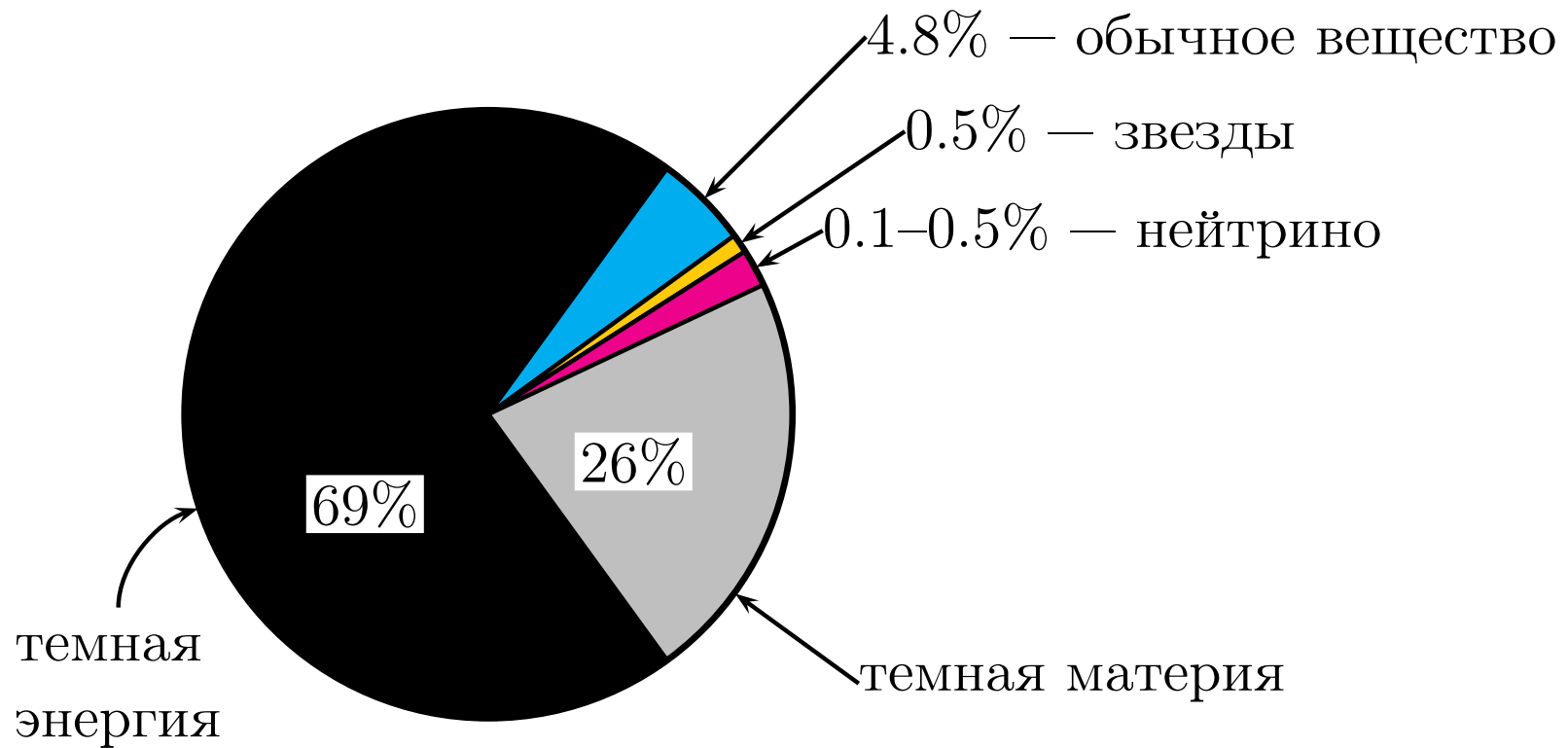
- Стерильные нейтрино с массой в области нескольких кэВ (гораздо легче электрона). Троицк ν -масс, [ИЯИ РАН](#)



- Аксионы, аксино, гравитино, ...

Природа темной материи — одна из главных загадок физики микромира. Есть реальная надежда на решение этой загадки в обозримом будущем. Это будет важнейшим открытием XXI века.

Загадка No. 3: ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ



ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

- Однородно “разлита” во Вселенной, не собирается в сгустки (галактики, скопления)
- Вселенная сегодня расширяется **с ускорением**

Темп расширения **растет**



АНТИГРАВИТАЦИЯ

- Нет противоречия с общей теорией относительности, если **плотность** темной энергии **не меняется** (или почти не меняется) **при расширении Вселенной**

Природа темной энергии — возможно главная загадка физики XXI века

- Энергия вакуума?
- Новое сверхслабое поле?
- Новая гравитация на сверхбольших расстояниях?

Пожалуй, главная загадка: начало

Что было до горячей стадии эволюции Вселенной?

● Глобальные вопросы:

- Почему Вселенная такая большая и однородная?
- Почему она была такая горячая?
- Почему наше пространство евклидово?

Сумма углов треугольника = 180 градусам – экспериментальный факт.

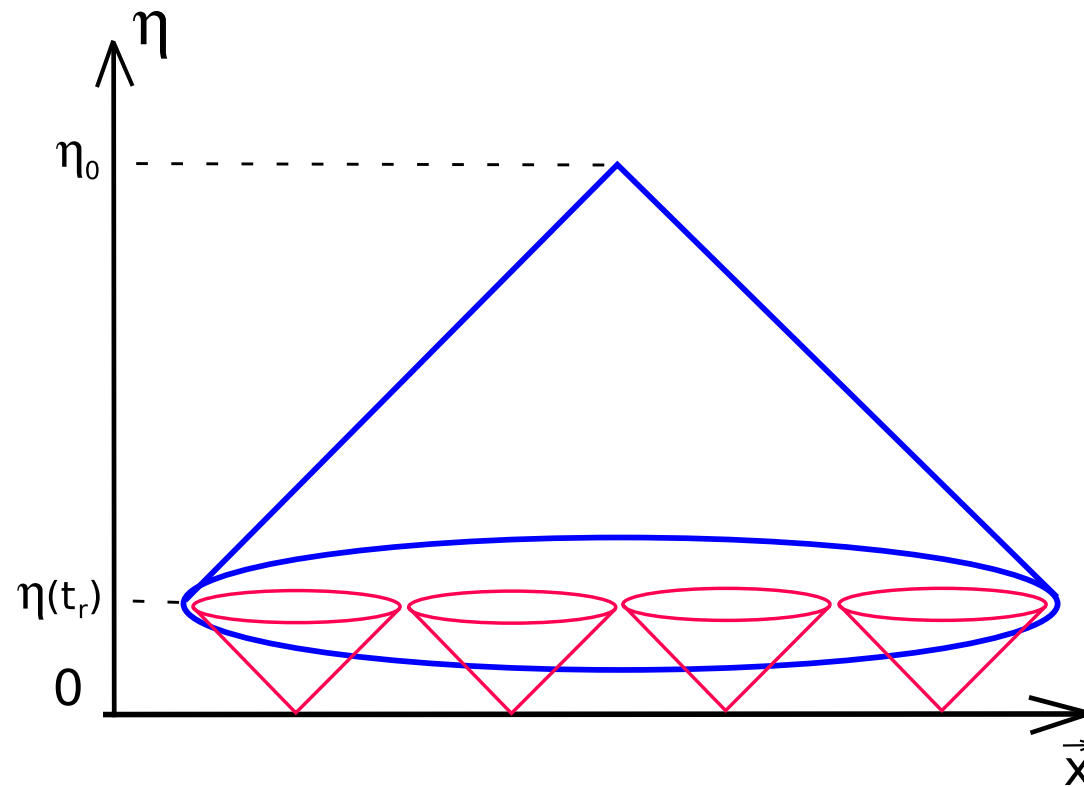
Речь идет о треугольниках со сторонами
40 млрд. световых лет !

Видимая часть Вселенной – не более 1/100 ее полного объема. Скорее всего, еще меньше.

● Происхождение неоднородностей во Вселенной

Ключ: причинность.

Причинная структура пространства-времени в теории горячего Большого взрыва

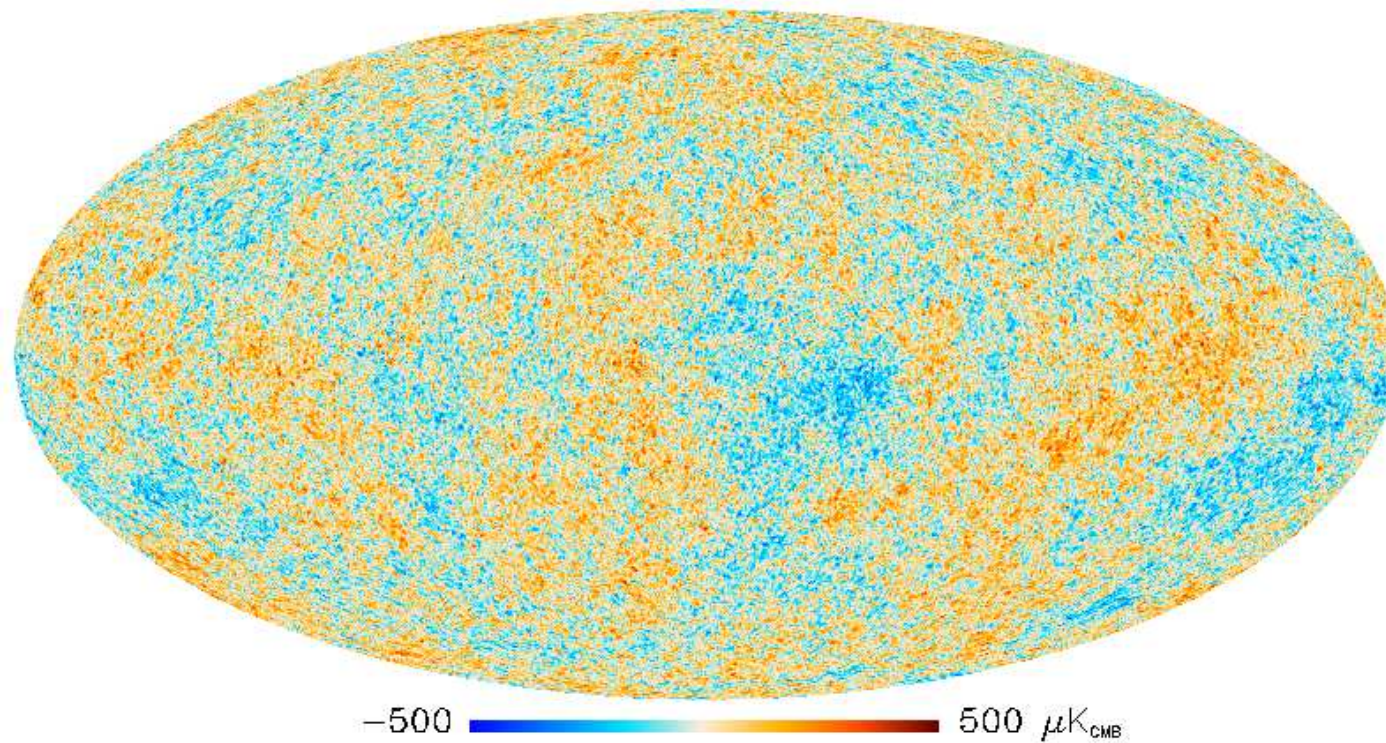


Горизонт: максимальное расстояние, которое проходит сигнал, испущенный сразу после Большого взрыва = максимальный размер причинно-связанной области

Угловой размер горизонта эпохи рекомбинации = 2° .

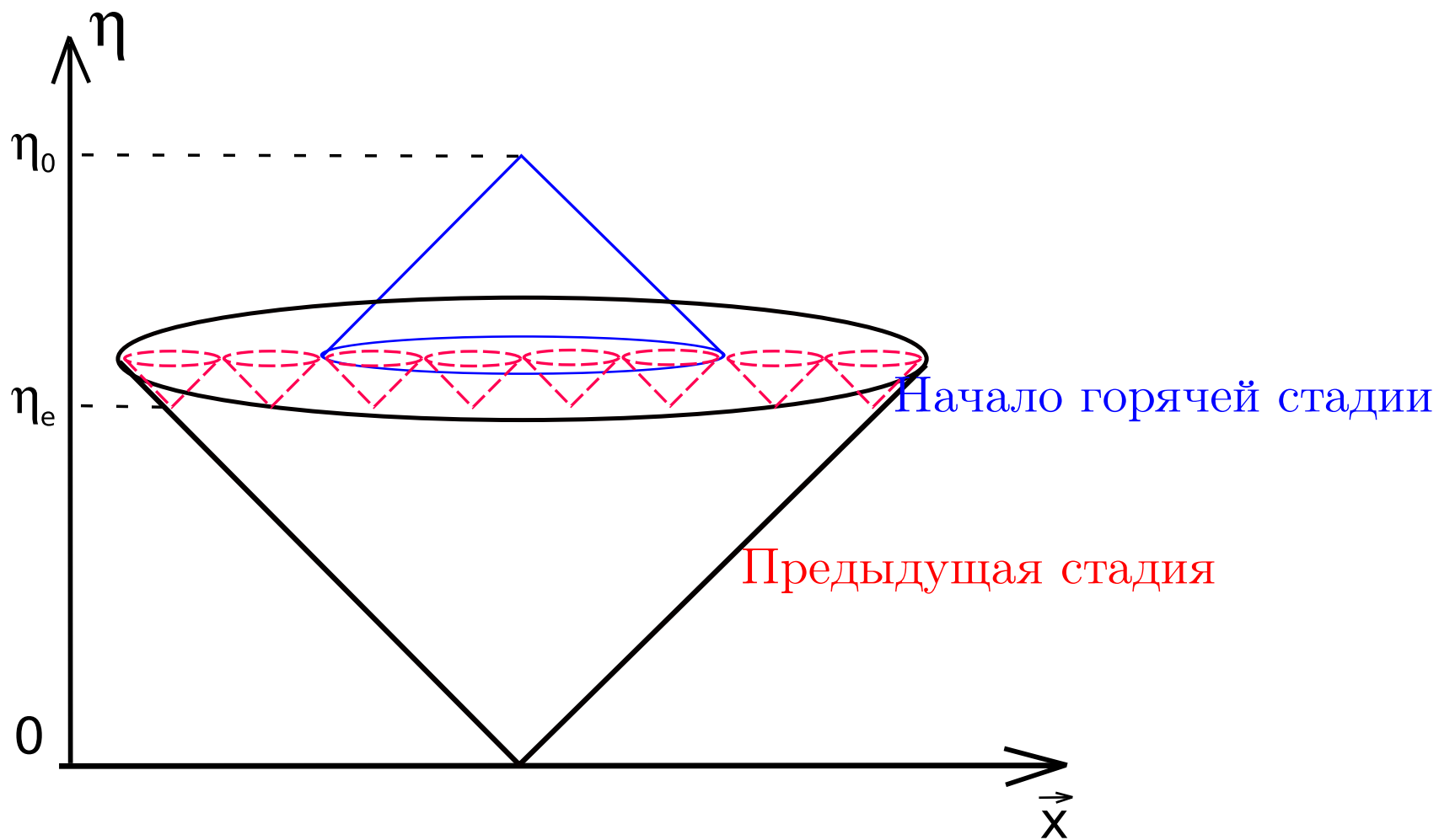
В эпоху рекомбинации неоднородностей углового размера больше 2° не должно быть.

А они есть!



Значит, горячая стадия не была первой!

Причинная структура в полной теории



Проект ответа:

Теория раздувающейся (инфляционной) Вселенной

А. А. Старобинский;

A. Guth;

А. Д. Линде; A. Albrecht, J. Steinhardt

circa 1980

Раздувание = расширение с гигантским **ускорением**,
с микро- до макро-размеров за малые доли секунды.

Но не исключены и альтернативы:

- Сжатие – отскок – расширение
- “Разгоняющаяся Вселенная”, старт с малой плотностью энергии и малым темпом расширения

- механизм генерации начальных возмущений плотности:
усиление вакуумных флуктуаций квантовых полей.

Реализуется в инфляционной теории

В. Муханов, Г. Чибисов;

S. Hawking;

А. Старобинский;

A. Guth, S.-Y. Pi;

circa 1980

Согласуется с наблюдательными данными.

- Аналогичный механизм работает и в теориях, альтернативных инфляции

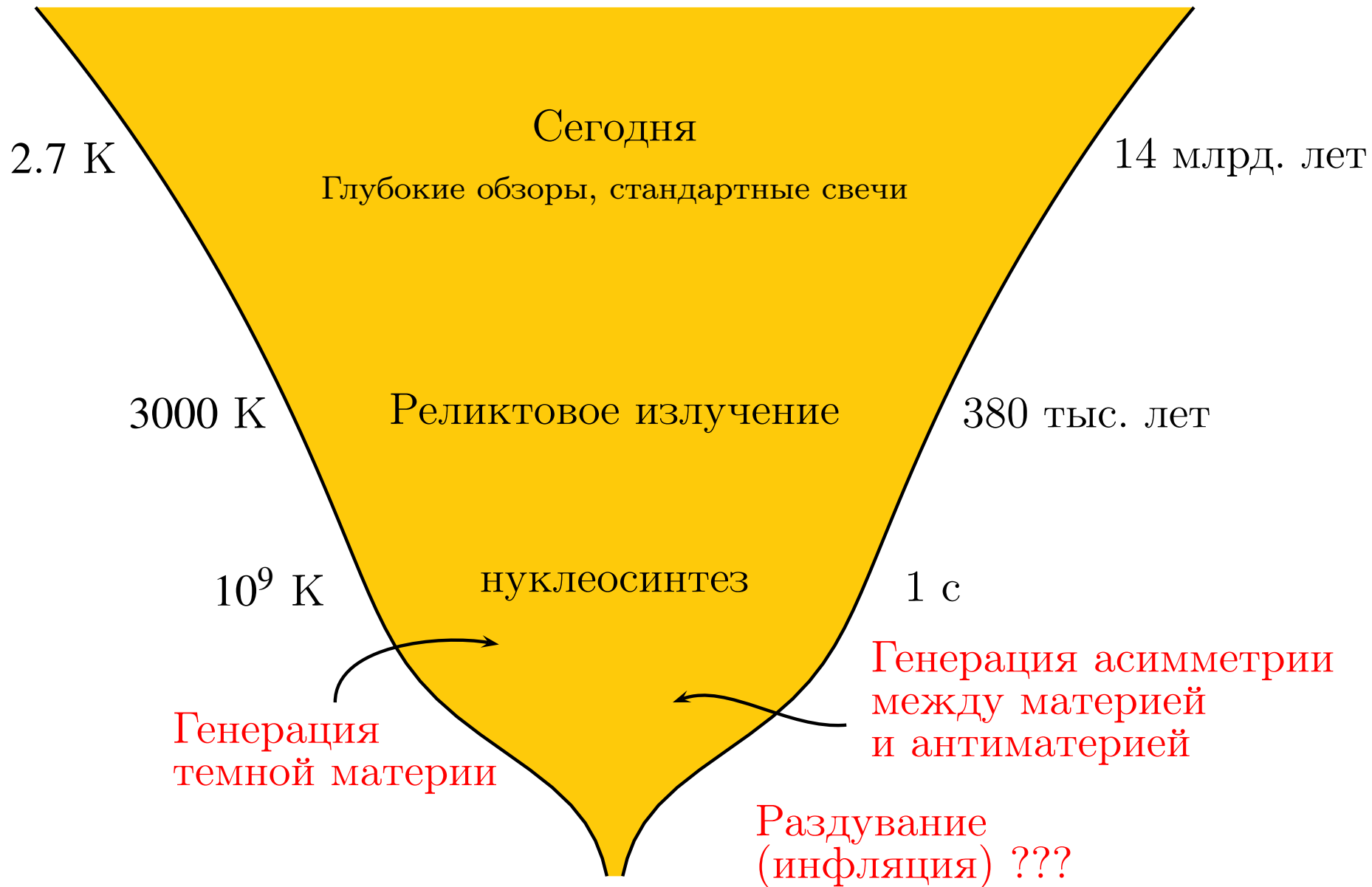
Удастся ли выяснить, что было до горячей стадии?

Нужно более детально изучить свойства космологических неоднородностей

- Реликтовые гравитационные волны были бы доказательством инфляции.
[Длины волн – миллиарды световых лет!]
- Тонкие корреляционные свойства неоднородностей.
Пока не обнаружены.

Механизмы инфляции и альтернатив \longleftrightarrow физика сверхмалых расстояний, сверхвысоких энергий

В перспективе: изучение методами наблюдательной космологии.



Космологические данные о темной материи, темной энергии,
асимметрии между веществом и антивеществом,
неоднородностях в Вселенной –
свидетельство неполноты наших представлений
об элементарных частицах и полях,
фундаментальных физических законах.

Современный этап развития естествознания:
начало кардинального расширения взглядов на природу

ГЛАВНЫЕ ОТКРЫТИЯ ВПЕРЕДИ

Backup slides

Барионная асимметрия: требуется:

- Нарушение известных законов сохранения

– до недавнего времени не наблюдалось

- Барионное число $B = \frac{1}{3}(N_q - N_{\bar{q}})$,

- Лептонные числа $L_e = (N_{e^-} + N_{\nu_e}) - (N_{e^+} + N_{\bar{\nu}_e})$, L_μ , L_τ .

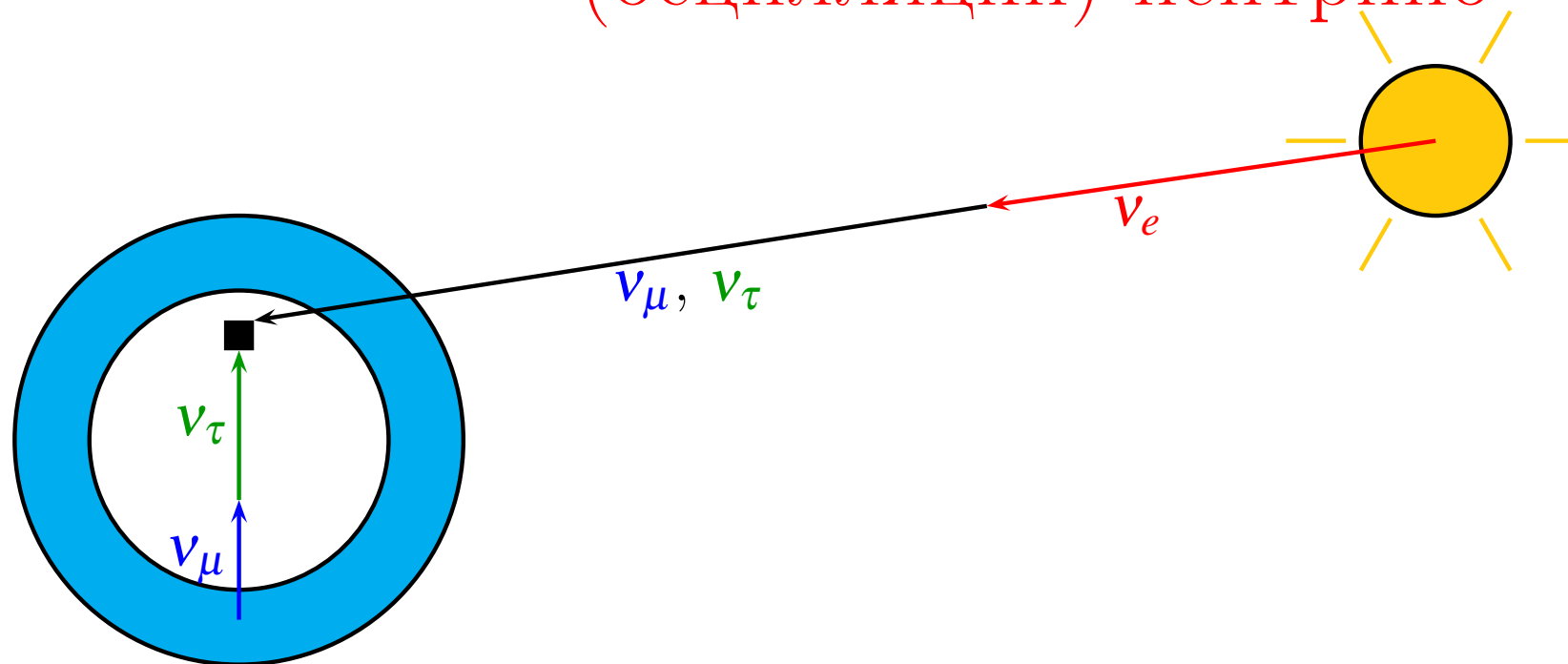
Распад мюона $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$

Вероятность распада $\mu \rightarrow e \gamma$ меньше 10^{-11} (!)

- Различие между материей и антиматерией во взаимодействиях частиц

– наблюдалось, но чересчур слабое

Ключ: взаимопревращения (осцилляции) нейтрино



Super-K

Ускорительные ν_μ : K2K
T2K, Minos

Homestake (США)

Kamiokande, Super-K (Япония)

ГГНТ — SAGE (Россия)

GALLEX/GNO (Италия)

SNO (Канада)

Реакторные $\bar{\nu}_e$: KamLAND

CHOOZ, Daya Bay, RENO

Нарушение законов сохранения лептонных чисел!

В принципе, этого достаточно для объяснения асимметрии между веществом и антивеществом во Вселенной.

Предстоит узнать:

● Массы нейтрино \longleftrightarrow влияние на эволюцию Вселенной

● Различие свойств нейтрино и антинейтрино (нарушение CP) \longleftrightarrow асимметрия между веществом и антивеществом

Может ли темная материя состоять из обычного вещества?

“кирпичи”, планеты, ...

НЕТ !

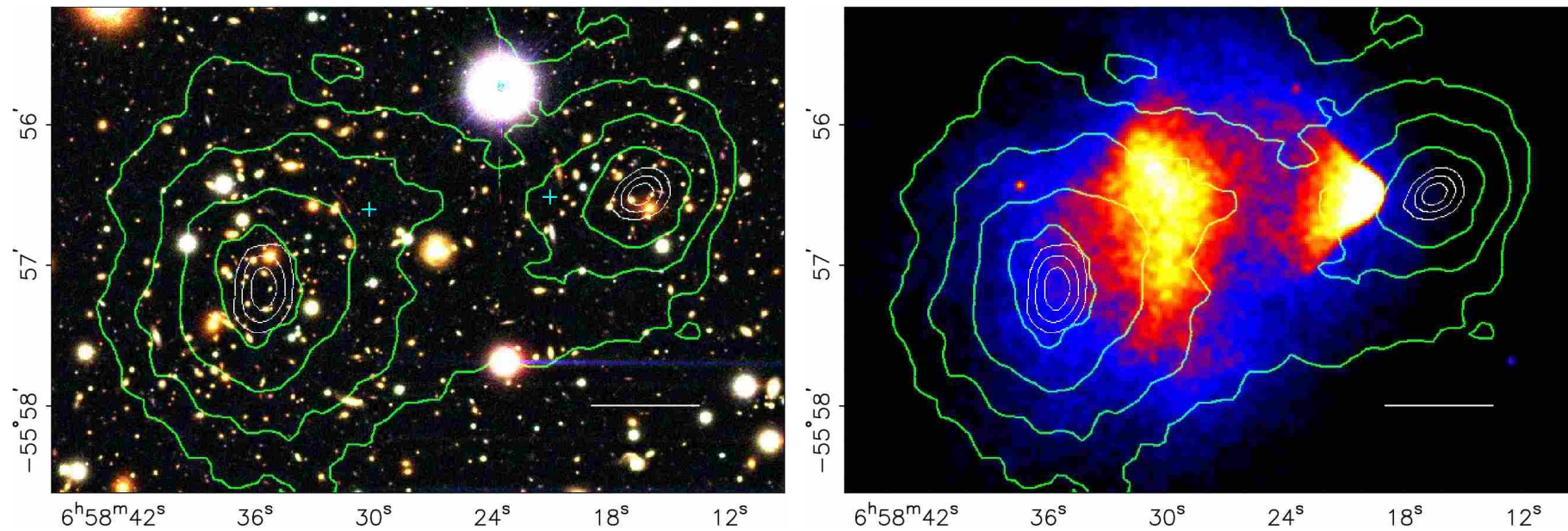
Независимые измерения средней плотности массы обычного вещества:

- Первичный нуклеосинтез
- Реликтовое микроволновое излучение

Можно ли обойтись без темной материи, изменив гравитационный закон Ньютона на больших расстояниях?

НЕТ !

Скопления после столкновения



Контурные – распределение **массы**.

Цвет – распределение **обычного вещества**, горячего газа

КОСМОЛОГИЯ

Неоднородности плотности обычной материи (барионов) в эпоху рекомбинации, $T = 3000$ К

$$\delta_B \equiv \left(\frac{\delta \rho_B}{\rho_B} \right)_{rec} \simeq \left(\frac{\delta T}{T} \right)_{CMB} = 10^{-4} - 10^{-5}$$

Неоднородности растут как $\frac{\delta \rho}{\rho}(t) \propto T^{-1}$

Если бы не темная материя, то

$$\left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)_{today} = 1100 \cdot (10^{-4} - 10^{-5}) = 10^{-1} - 10^{-2}$$

Ни галактик, ни звезд ...

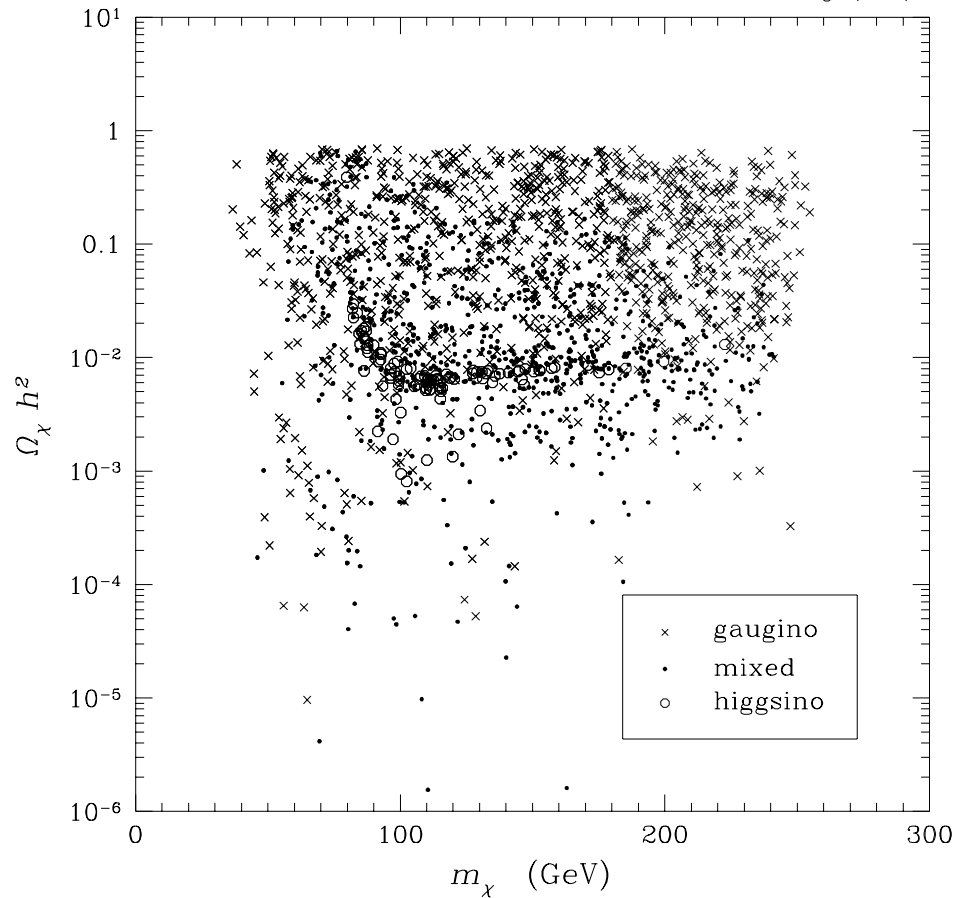
Неоднородности темной материи начинают расти гораздо раньше

Темная материя жизненно важна для нас

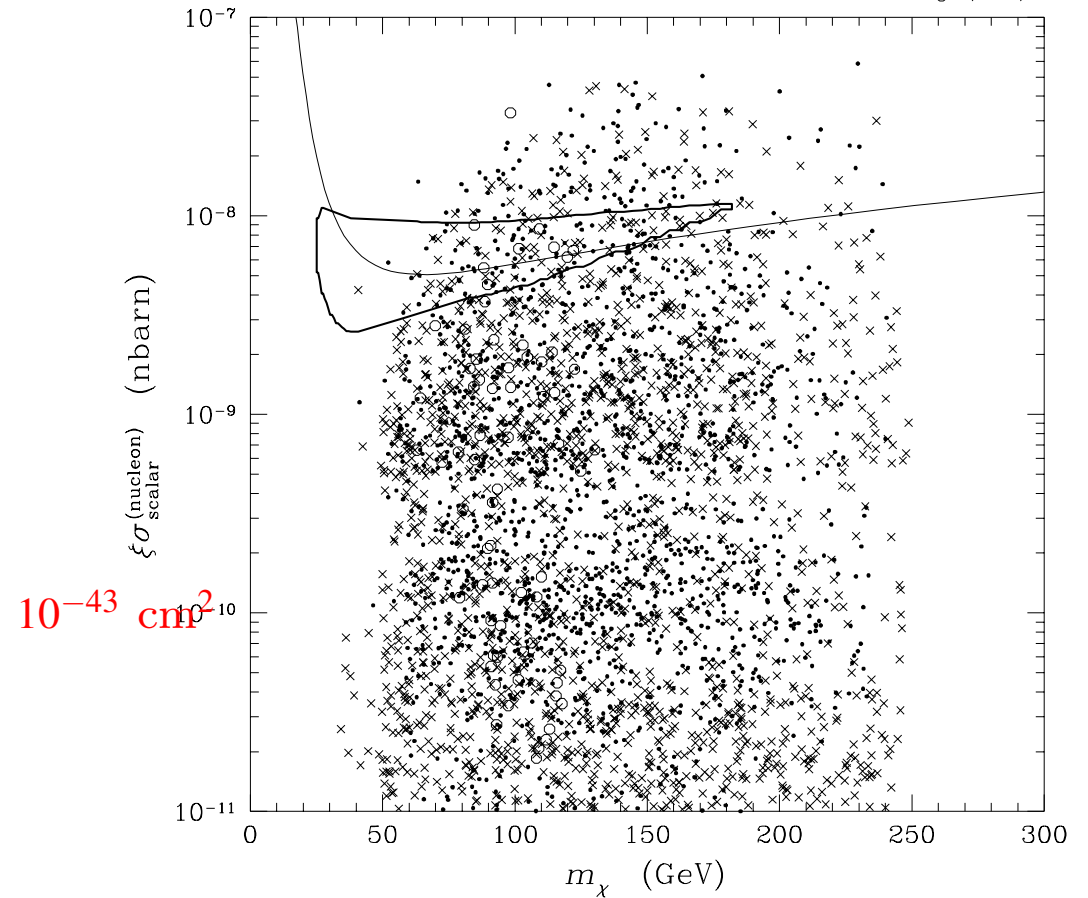
SUSY WIMPs 20 years ago

Direct detection (spin independent) expectations and limits

A. Bottino, N. Fornengo (1999)



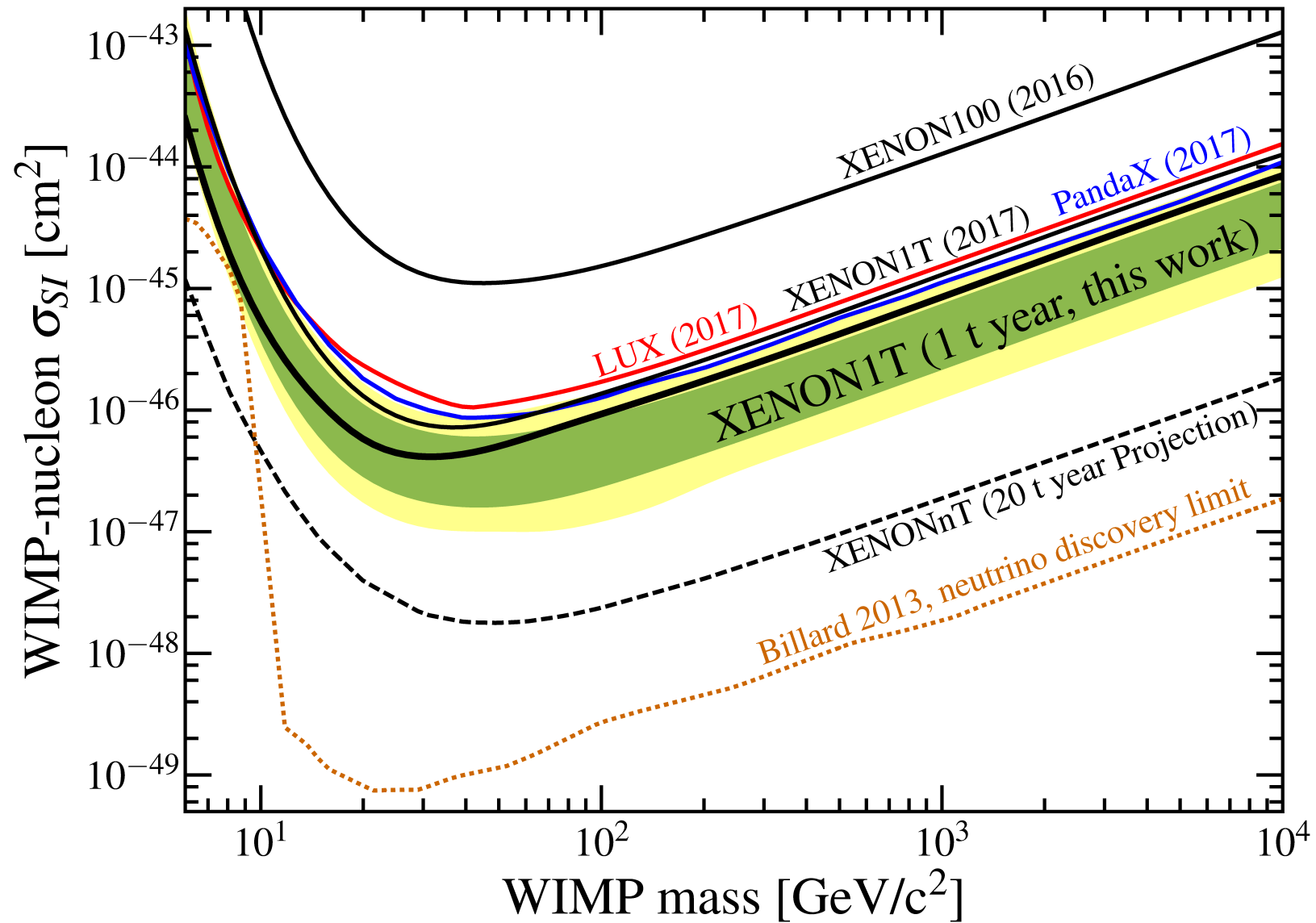
A. Bottino, N. Fornengo (1999)



Bottino, Fornengo' 1999

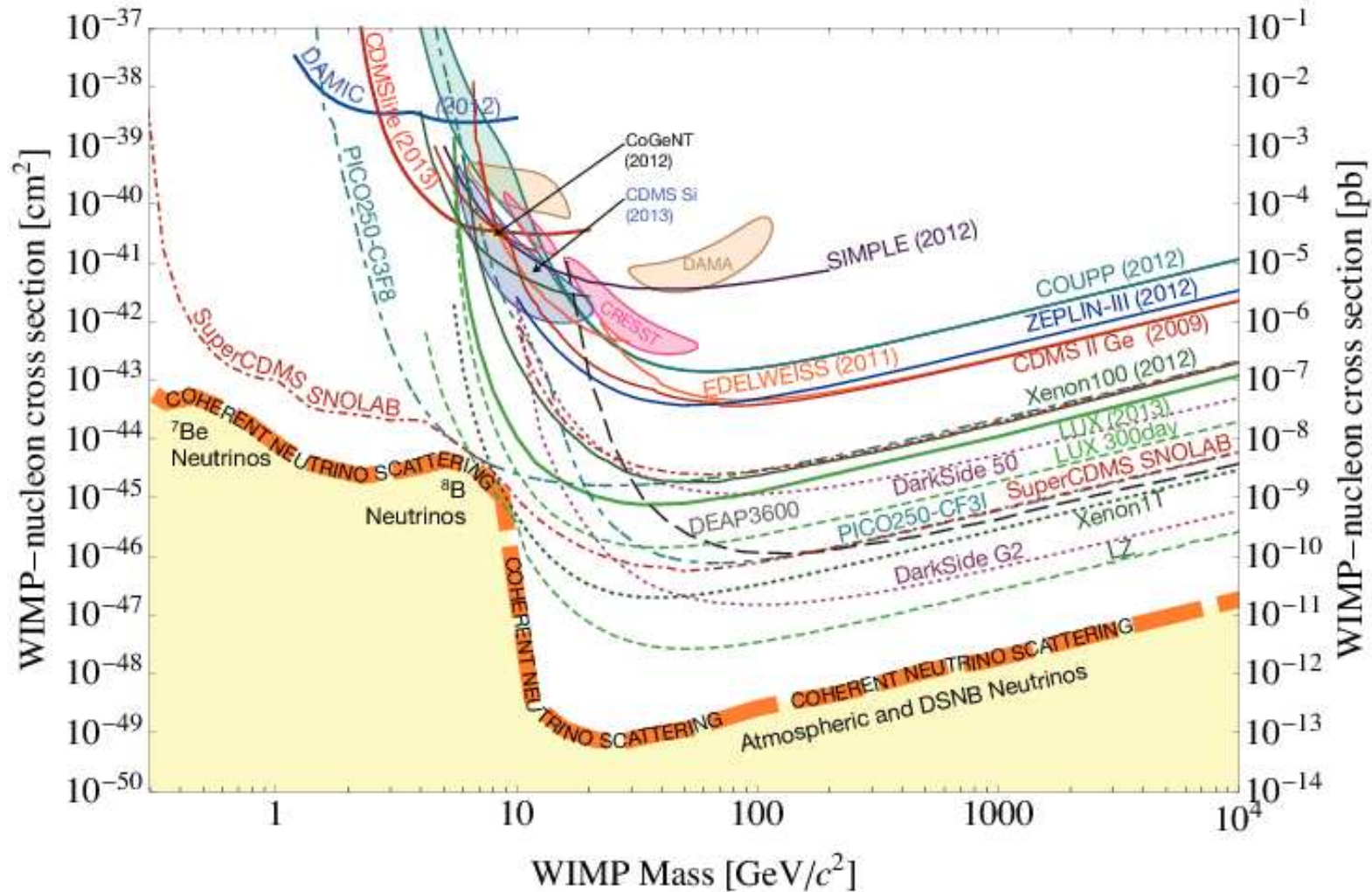
Xenon-1T, PandaX, LUX

Spin-independent, direct detection



Direct detection limits today and tomorrow

Roszkowski, Sessolo, Trojanowski 1707.06277



Еще гипотезы

- Аксионы

Сверхлегкие элементарные частицы с $m = (10^{-5} - 10^{-6})$ эВ

Мотивированы физикой частиц. Единственный параметр – масса.

Бозе-конденсат, нулевые пространственный импульсы \longleftrightarrow когерентно осциллирующее поле. Холодная темная материя.

- Аксионоподобные частицы, ALPs. Два неизвестных параметра – масса и константа взаимодействия.

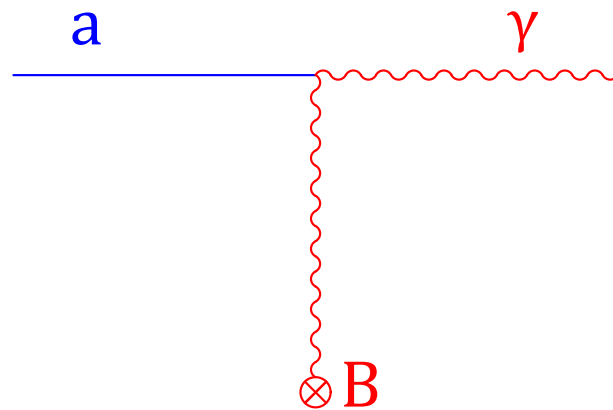
Менее мотивированы.

Поиски

Взаимодействие $a\gamma\gamma$ $C_{a\gamma\gamma} \cdot a(x)(\vec{E} \cdot \vec{H})$

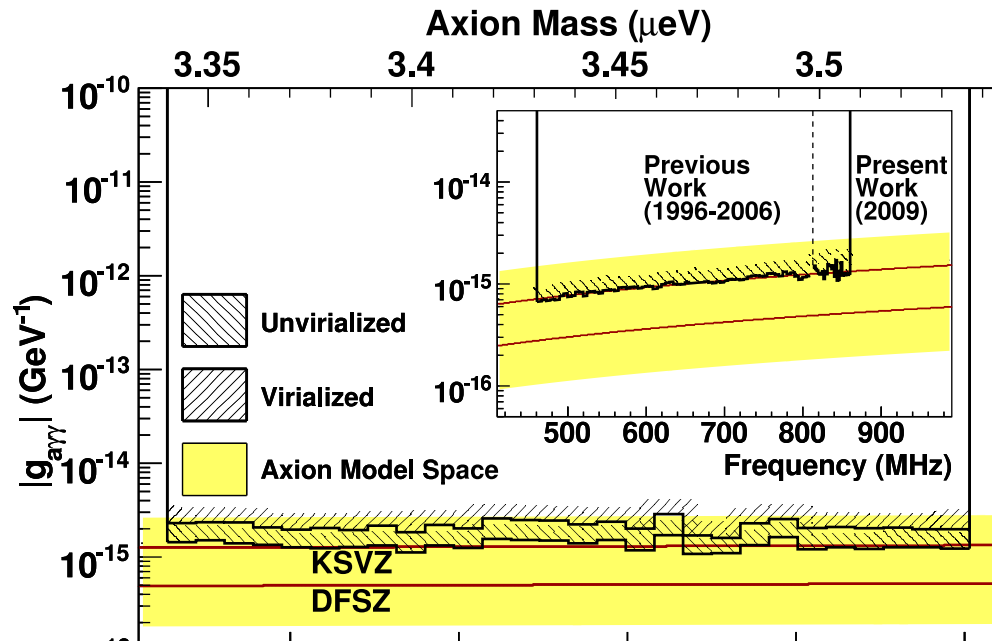
- Аксион: $C_{a\gamma\gamma} \propto m$
- ALP: $C_{a\gamma\gamma}$ – свободный параметр

Конверсия аксиона темной материи в фотон в магнитном поле в резонаторе $10^{-6} \text{ eV}/2\pi = 240 \text{ MHz}$.

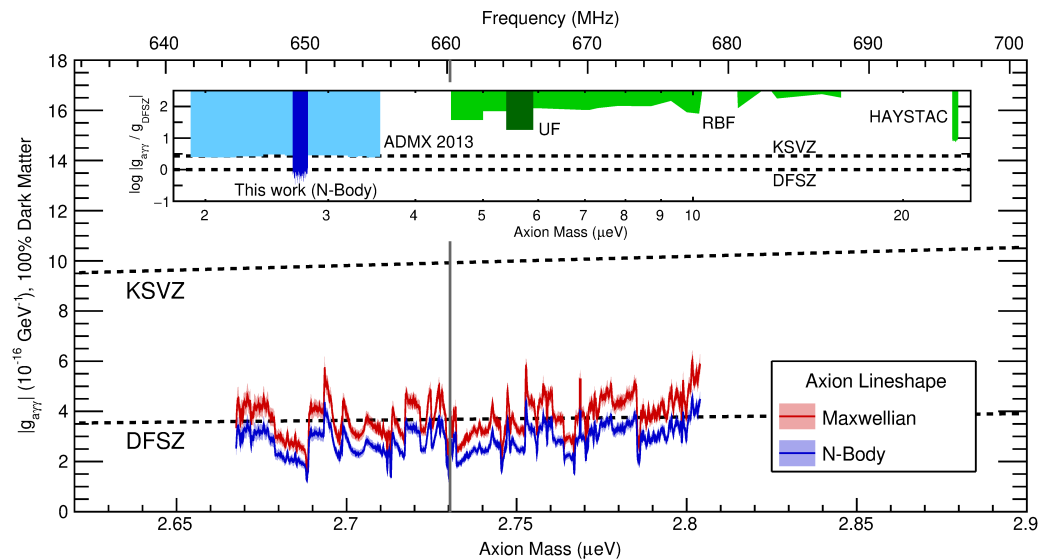


Требуется высокая добротность резонатора \implies узкая полоса частот \implies маленький шаг по $m_a \implies$ долгое дело.

Поиск аксионов

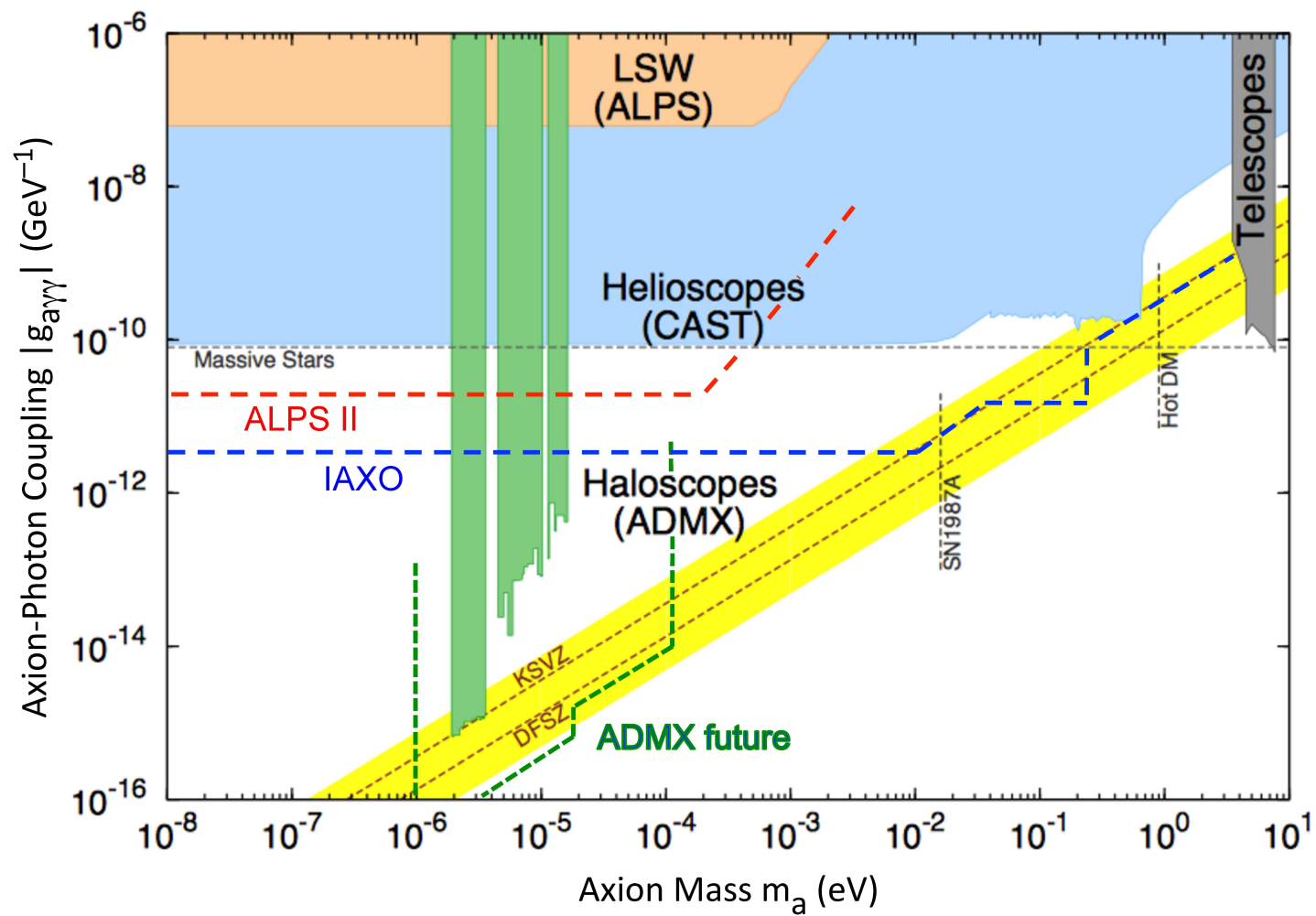


ADMX, PRL '2010



ADMX, PRL '2018

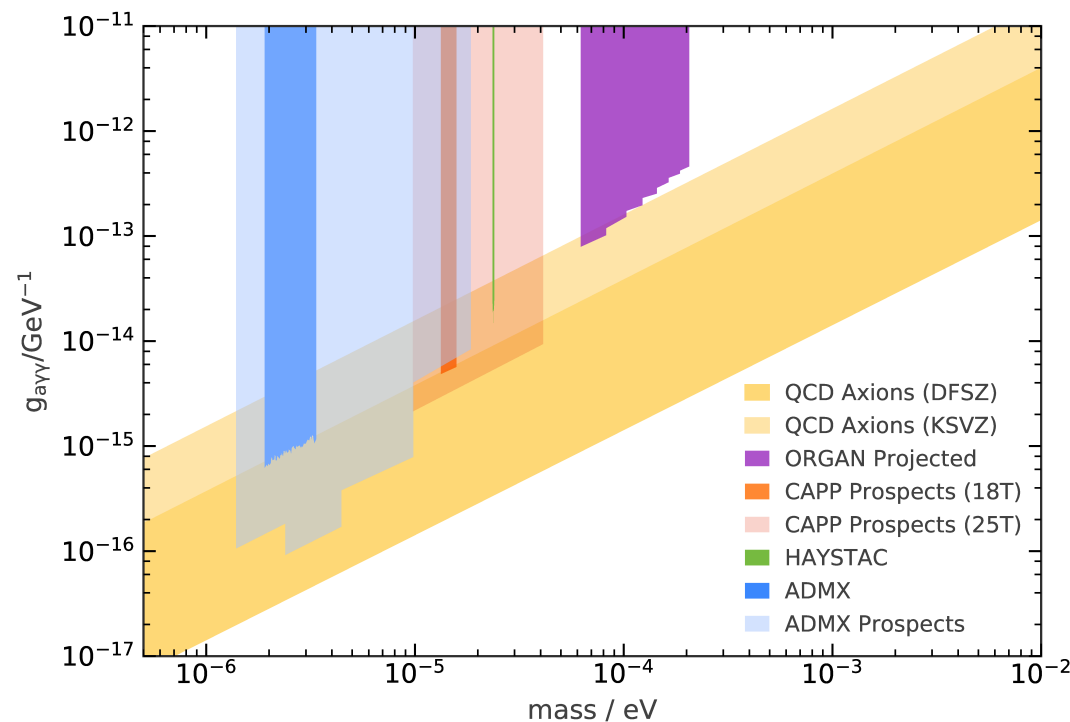
Начало пути



New efforts in axion searches:

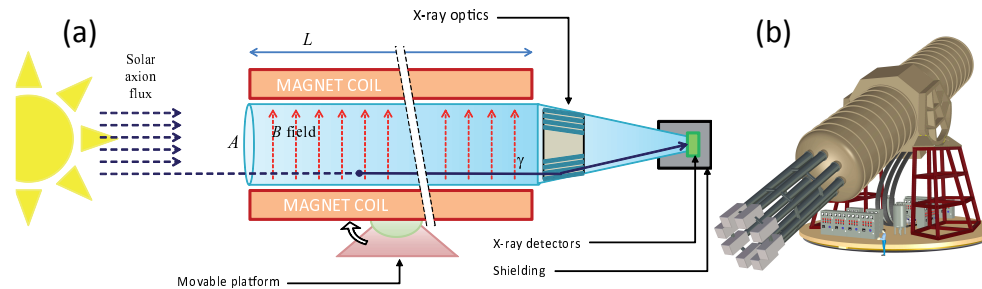
- CAPP, axion-photon conversion in magnetic field, $m_a = (3 \cdot 10^{-6} - 10^{-4}) \text{ eV}$;
- MADMAX, axion-photon conversion at boundaries of dielectric discs in magnetic field $m_a \gtrsim 4 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$
- CASPEr, time-varying EDM of nuclei in oscillating axion background \implies spin precession, $m_a \lesssim 10^{-9} \text{ eV}$

All aim at dark matter QCD axions

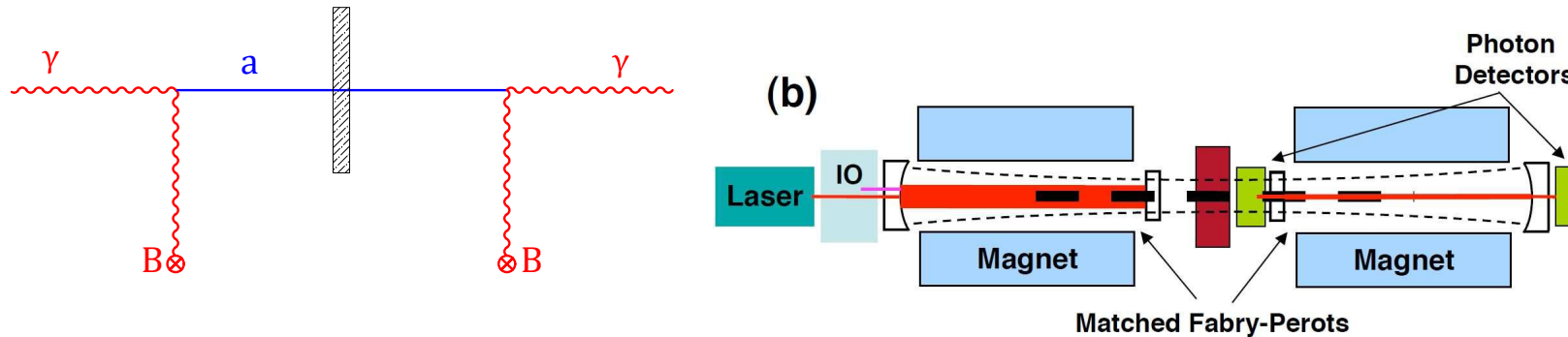


Поиски ALPs сегодня и завтра

- Галоскопы – ALPs из гало Галактики: ADMX, CAPR, MADMAX, CASPEr
- Гелиоскопы – ALPs из Солнца: CAST, IAXO, TASTE



- “Свет сквозь стену” ALPS I, ALPS II



- Ускорители (beam dump): SHiP

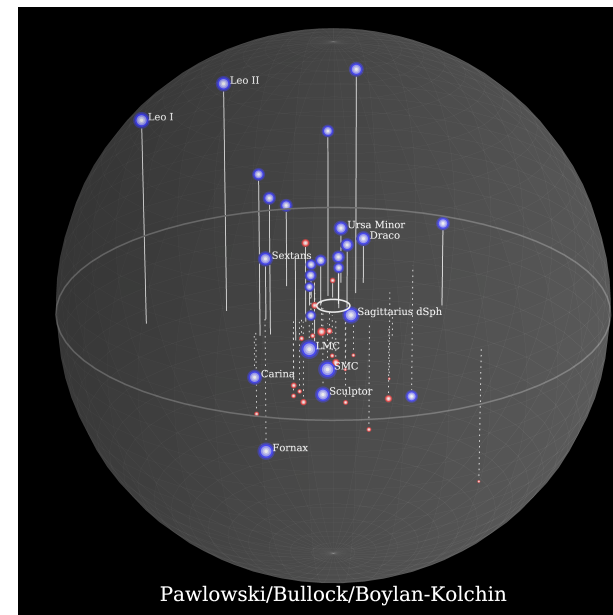
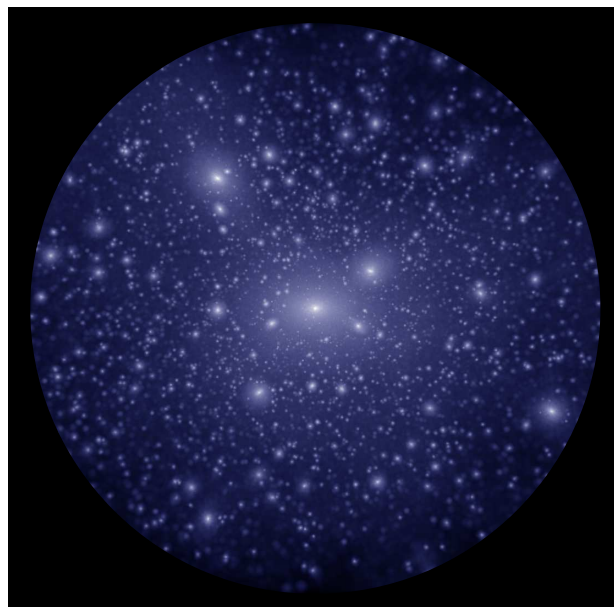
Аргумент в пользу стерильного нейтрино

Астрофизика

Маловато галактик-спутников Млечного Пути

Численные симуляции с холодной темной материей прекрасно согласуются с наблюдениями на масштабах обычных галактик и выше,

но дают сотни карликовых галактик в окрестностях галактик, аналогичных Млечному Пути. Этого не наблюдается.



Область 250 кпк вокруг Млечного Пути

● Астрофизика?

- Небольшие сгустки-гало темной материи с $M \lesssim 10^9 M_\odot$ неэффективны для создания светящейся компоненты.

Тогда

- должны быть многочисленные очень тусклые галактики с $M \gtrsim 10^8 M_\odot$
- много совсем темных гало $M \gtrsim 10^6 - 10^7 M_\odot \implies$ можно регистрировать по грав. линзированию

Будут обнаружены в течение ~ 10 лет, в особенности благодаря LSST (Large synoptic survey telescope)

- Физика частиц: теплая темная материя частицы с массой $m_\chi \sim$ несколько keV в тепловом равновесии в ранней Вселенной. Релятивистские до $T \sim m_\chi \implies$ неоднородности плотности небольших размеров не растут, а замываются.

Пример – стерильные нейтрино

Есть и еще указания на нестыковки модели холодной темной материи и наблюдений на небольших масштабах (несколько кпк)

РАЗВИЛКА

- Реальны ли астрофизические “аномалии” на небольших масштабах?
 - Если реальны – будет требоваться решение в рамках физики частиц. Возможно, **теплая темная материя**
 - Не реальны – подтверждение **холодной темной материи**, наблюдение небольших темных сгустков
 $M \sim 10^5 - 10^7 M_{\odot}$.

Скоро узнаем!

Sterile neutrinos

- Needed to give masses to ordinary neutrinos
- One sterile neutrino species may be light.
Seemingly, nothing wrong with $m_{\nu_s} = \text{a few keV} - \text{a few MeV}$
 - Not well motivated by see-saw
- Production in early Universe through mixing with ordinary neutrinos (say, ν_e), mixing angle θ_s .

Lifetime longer than age of Universe $\nu_s \rightarrow 3\nu$:

$$\theta_s^2 \lesssim 10^{-7} \left(\frac{50 \text{ keV}}{m_{\nu_s}} \right)^5$$

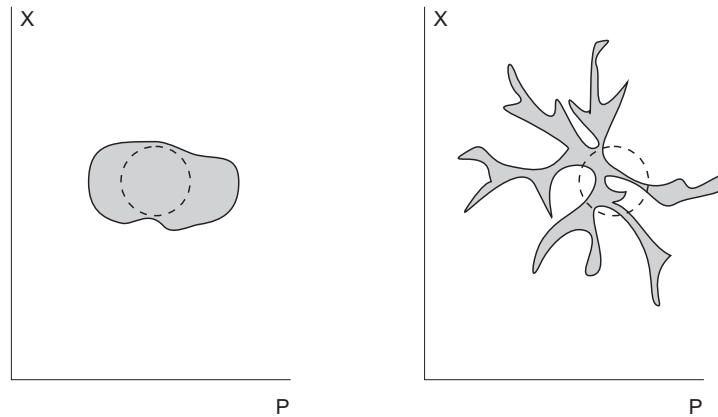
This is why ν_s must be light.

- Particularly interesting case: $m_{\nu_s} = \text{a few keV}$:
Warm Dark Matter

Bounds on sterile neutrino mass

Mildly depend on production mechanism through initial distribution in momenta; assume thermal

- Must be capable of forming dwarf galaxies, $M \gtrsim 10^9 M_\odot \implies$ comoving free streaming length $\gtrsim 100$ kpc $\implies m_{\nu_s} \gtrsim 4$ keV
- “Tremaine–Gunn”: maximum phase space density (coarse-grained) decreases in time



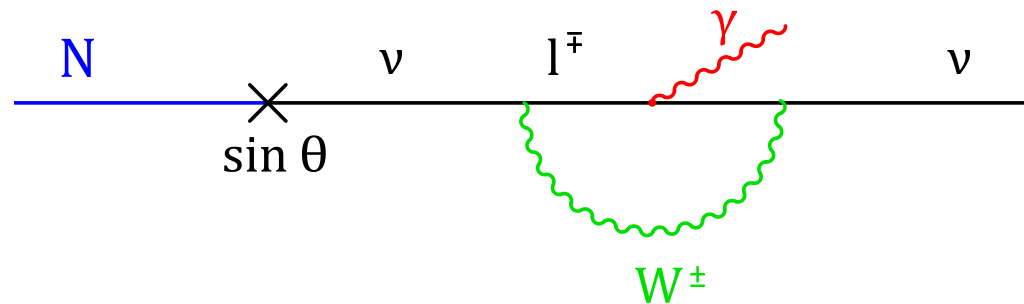
$$f(p, \vec{x}) = \frac{dN}{d^3x d^3p} \simeq \frac{n}{p^3} \simeq \frac{\rho/m}{m^3 v^3} \lesssim f_{in}^{max}(p) \implies m_{\nu_s} \gtrsim 5 \text{ keV}$$

- Lyman- α : $m_{\nu_s} \gtrsim 8$ keV.

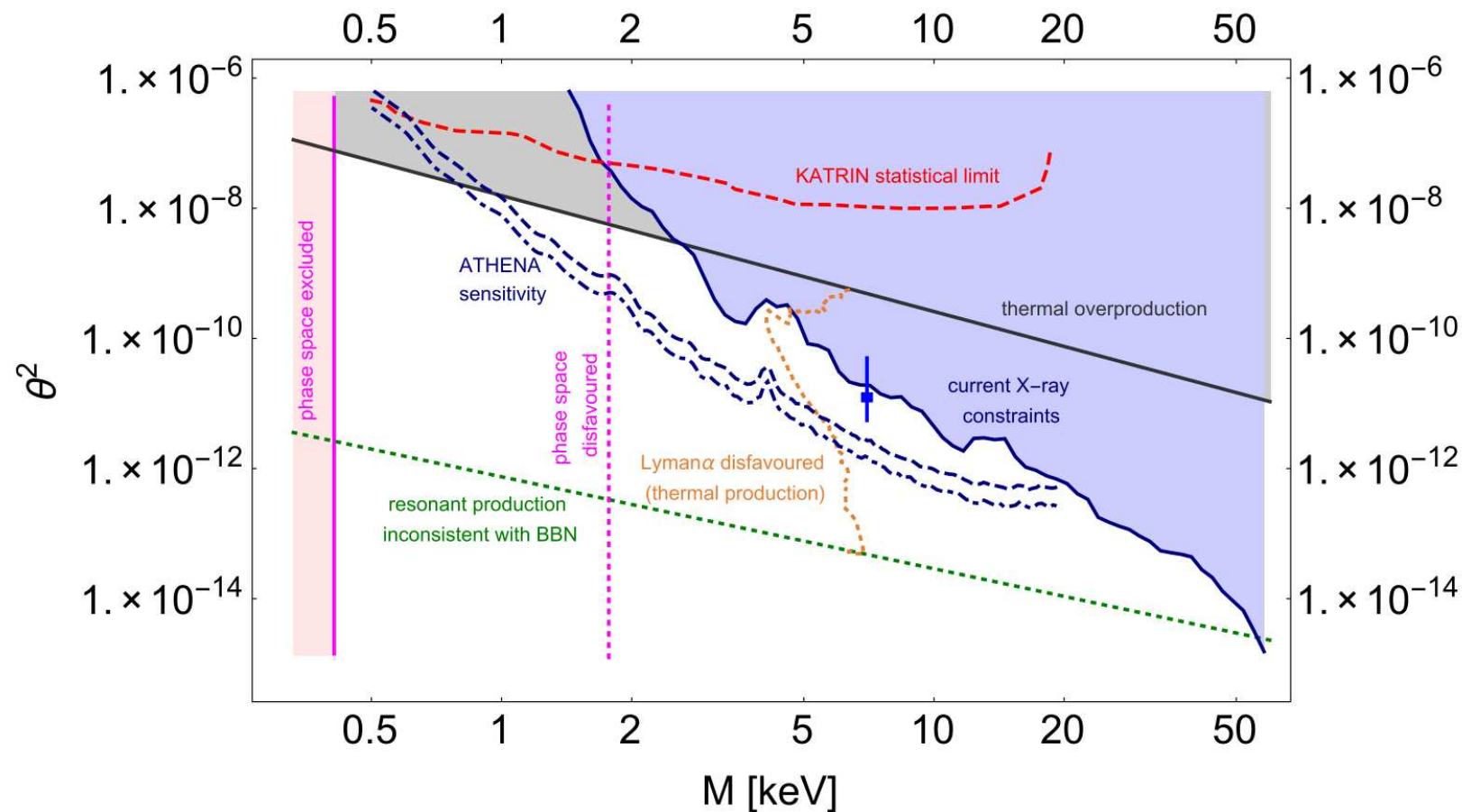
Non-resonant thermal production mechanism,
 $\nu \rightarrow \nu_s$ in early Universe:

$$\Omega_s \simeq 0.2 \cdot \left(\frac{\sin 2\theta_s}{10^{-4}} \right)^2 \cdot \left(\frac{m_{\nu_s}}{1 \text{ keV}} \right)$$

But $\nu_s \rightarrow \nu \gamma \implies$ Search for photons with $E = m_{\nu_s}/2$ from sky.



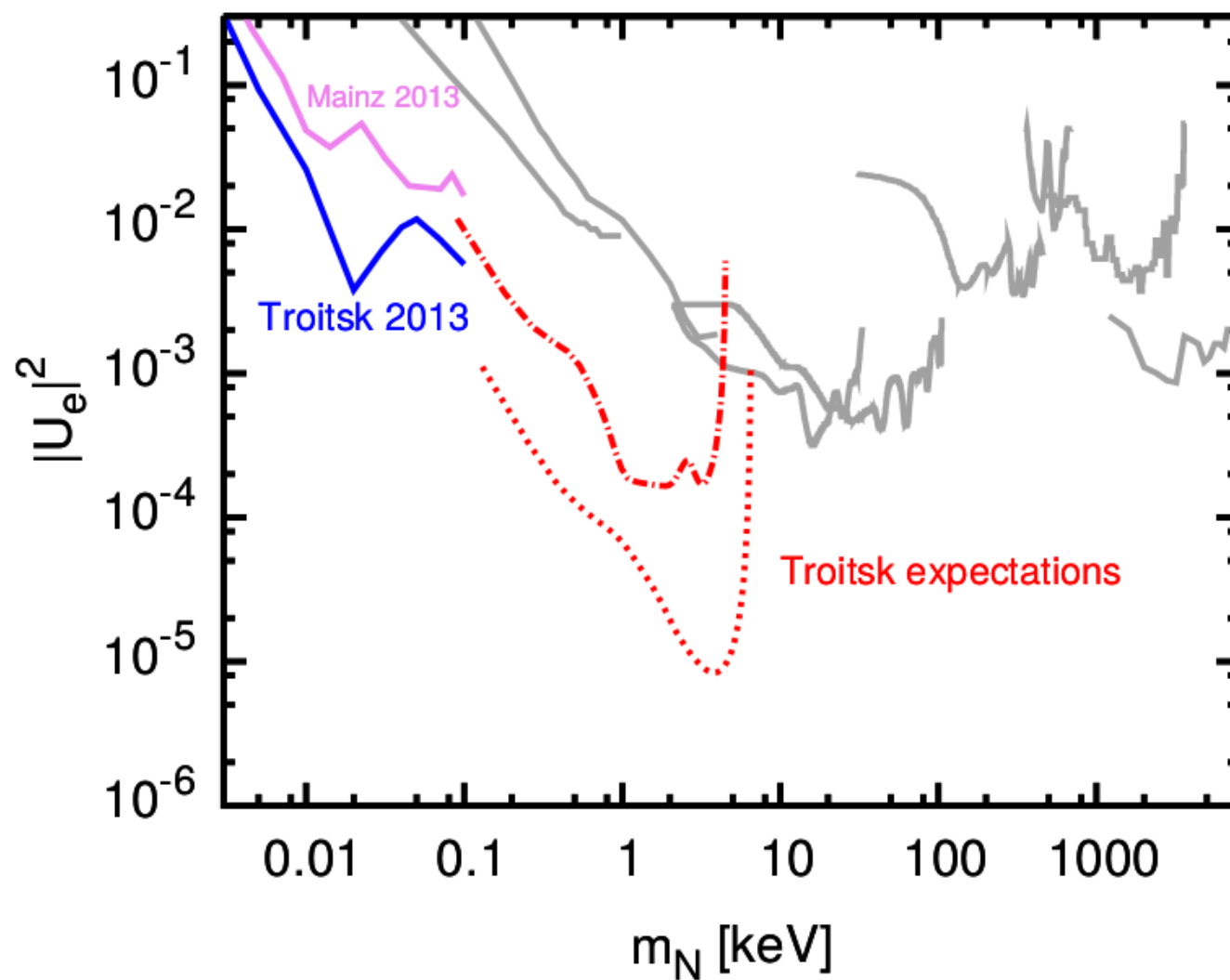
Search for photons with $E = m_{\nu_s}/2$



Straightforward version of scenario **ruled out**

But more contrived (assuming lepton asymmetry or phase transition) does not

Laboratory search: long way to go



Sterile neutrino summary

- Fairly contrived (small m_{ν_s} , complicated production mechanism), but not impossible.
- Search in terrestrial experiments notoriously difficult.
- Possible signal: gamma-line with $E = m_{\nu_s}/2$ from the sky.
NB: 3.5 keV gamma-line controversy unresolved.
- Will gain support if small-scale astrophysical anomalies are confirmed.

More clouds over weakly interacting CDM?

- Core-cusp problem
CDM simulations show singular density at centers of galaxies (cusps, $\rho \propto 1/r$) while observations show smooth cores.
- Too-big-to-fail problem
CDM simulations show too many dense heavy ($M \sim 10^{10} M_{\odot}$) dwarf galaxies.

Astrophysical solutions: Effects due to baryons.

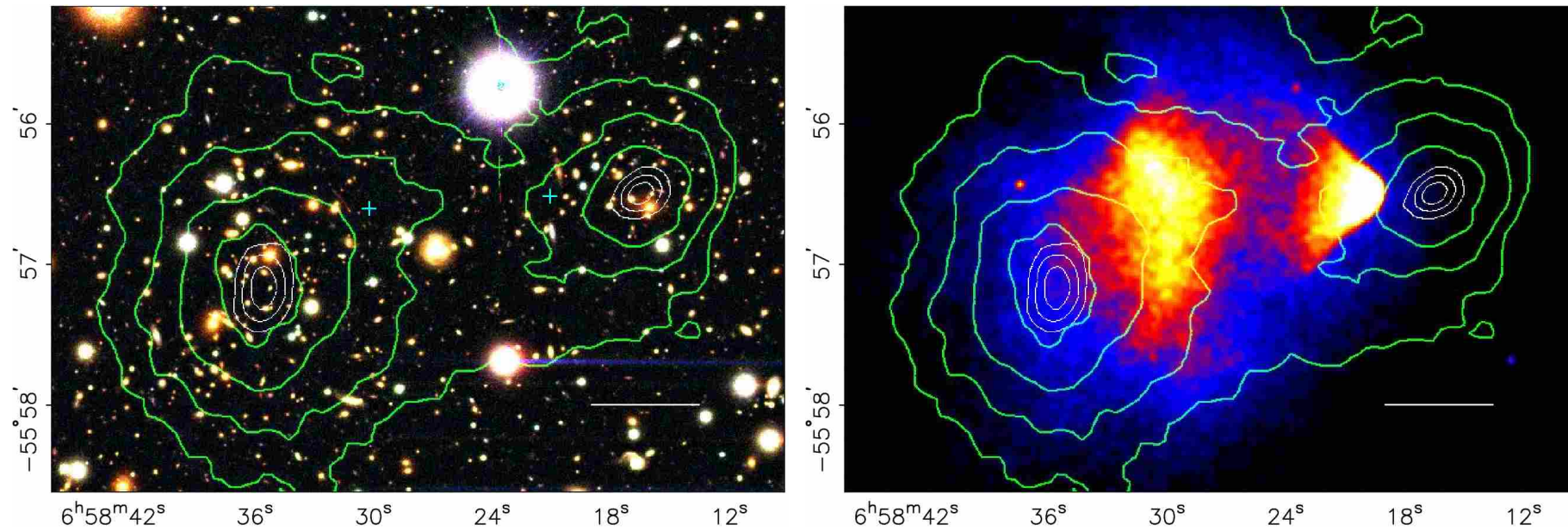
Particle physics solution: Strongly interacting dark matter, SIMP.

Mean free path $l \sim 1$ kpc, mass density $\rho \sim \text{GeV}/\text{cm}^3 \implies$

$$l\sigma_{\chi\chi}n_{\chi} = l\frac{\sigma_{\chi\chi}}{m_{\chi}}\rho_{\chi} \sim 1 \implies \frac{\sigma_{\chi\chi}}{m_{\chi}} \sim 10^{-24} \text{cm}^2/\text{GeV}$$

t -channel exchange of light mediator V : $m_V \sim 10 - 100$ MeV. V must decay into e^+e^- , $\gamma\gamma$ (mixing with γ , Z or Higgs), otherwise it would be dark matter itself \implies SHiP.

Tension with Bullet cluster



Contours: distribution of **mass**.

Color: distribution of **baryons**, hot gas

Dark matter scattering cross section

$$\sigma_{\chi\chi} < 10^{-24} \text{ cm}^2$$

Yet another particle physics solution: Fuzzy dark matter.

Boson of mass $m_\chi \sim 10^{-22}$ eV

Oversimplified picture: De Broglie wavelength ~ 1 kpc at $v_\chi \sim 10$ km/s \implies structures of small sizes suppressed.

Non-thermal production: coherently oscillating scalar field.

- Axion-like Lagrangian (pseudo-Nambu–Goldstone)

$$L = \frac{F^2}{2} (\partial\theta)^2 - \mu^4 (1 - \cos^2\theta) \approx \frac{F^2}{2} (\partial\theta)^2 - \frac{\mu^4}{2} \theta^2$$

$$a(x) = F\theta(x) \quad \implies \quad m_a = \frac{\mu^2}{F}$$

- Misalignment production mechanism.

- Initially $\theta = \text{const} \sim 1$

- θ starts to oscillate when $H \sim m_a$

- Correct mass density today, $\Omega_a \sim 0.25$, $m_a = 10^{-22}$ eV

$\iff F \simeq 10^{17}$ GeV, string/GUT scale!

In principle detectable through pulsar timing!