

# Космология и Большой адронный коллайдер

В. А. Рубаков

Институт ядерных исследований РАН

# Физика частиц

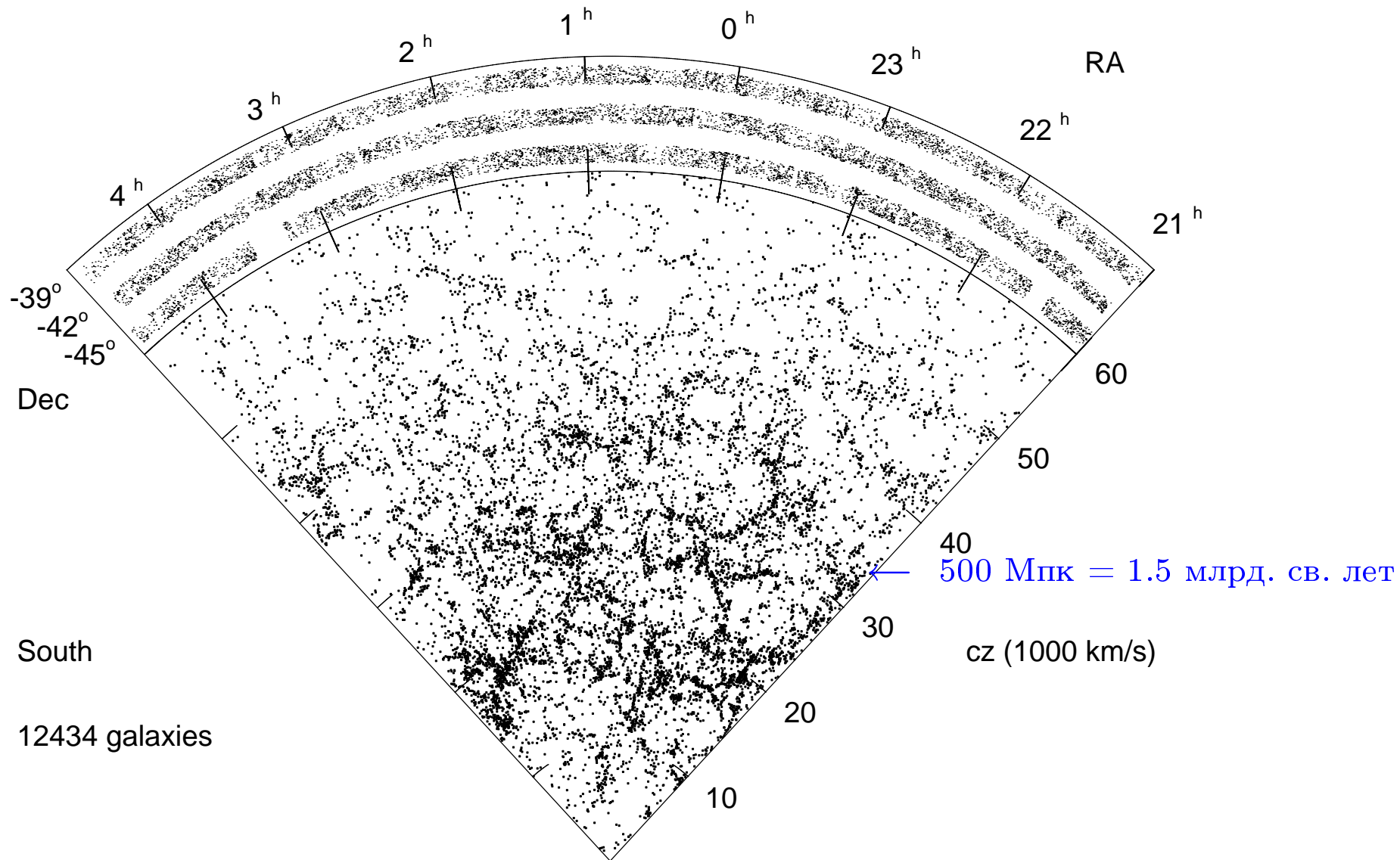
- Законы Природы, свойства элементарных частиц надежно описываются Стандартной моделью вплоть до расстояний  $10^{-16}$  см, энергий 100 ГэВ

Перед фундаментальной физикой встали вопросы совершенно нового характера

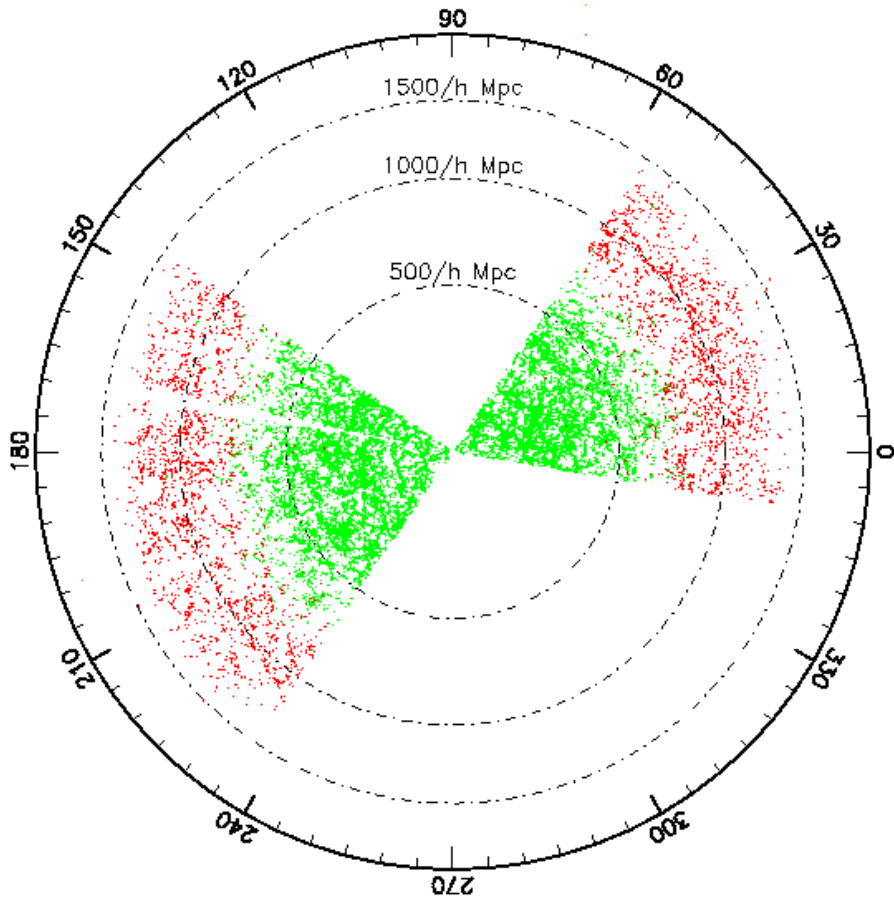
Скорее всего, в ближайшие годы взгляд на природу  
будет существенно дополнен.  
В большой степени благодаря ЛНС.

# Космология: нужен выход за рамки Стандартной модели

- Космология стала точной наукой за последние 15 – 20 лет
- Свойства Вселенной измерены различными способами
  - “Стандартные свечи” — сверхновые типа 1a  
Измеряется темп расширения Вселенной сейчас и сравнительно недалеком прошлом
  - Глубокие обзоры галактик и квазаров  
более  $10^6$  объектов  $\implies$  карта Вселенной  
вплоть до расстояний  $5000 \text{ Мпк} = 15 \cdot 10^9$  световых лет  
Структуры во Вселенной и их эволюция сейчас  
и в прошлом

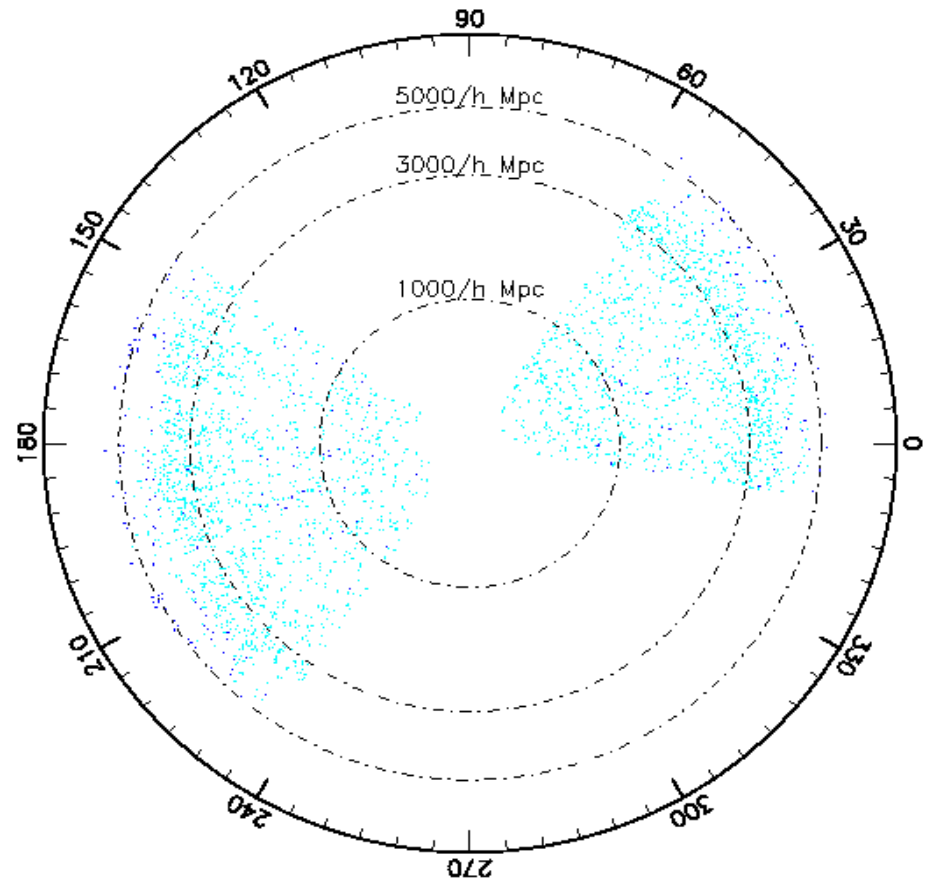


Las Campanas, середина 90'х



Галактики

SDSS, 2000-е



Квезары

# Свойства современной Вселенной:

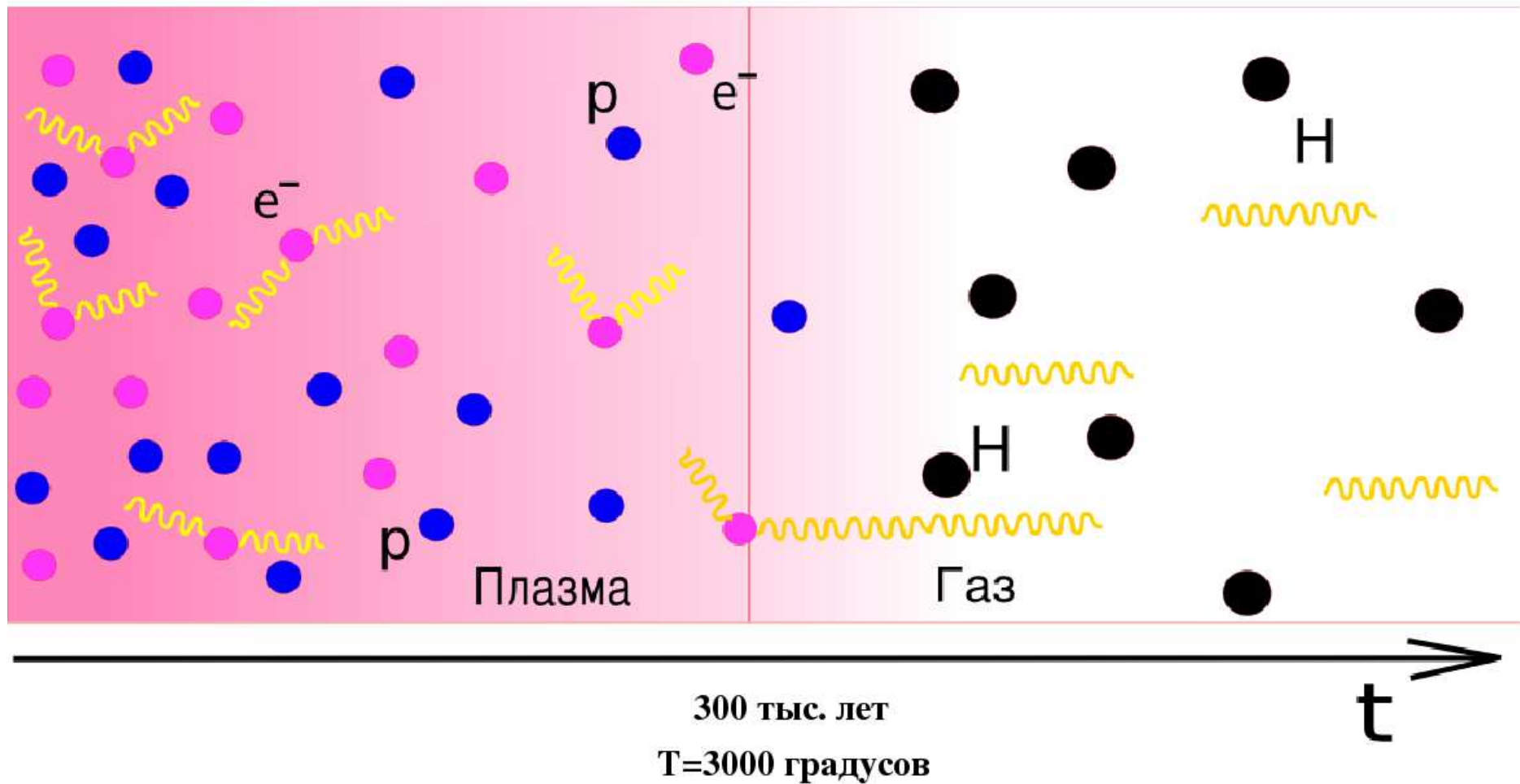
- Видимая Вселенная везде одинаковая (однородность и изотропия)
- Вселенная расширяется
- Вселенная “теплая”

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

$$T = 2.725 \text{ градусов Кельвина}$$

В прошлом была гораздо более горячей.  
Остыла из-за расширения.

# Переход плазма–газ



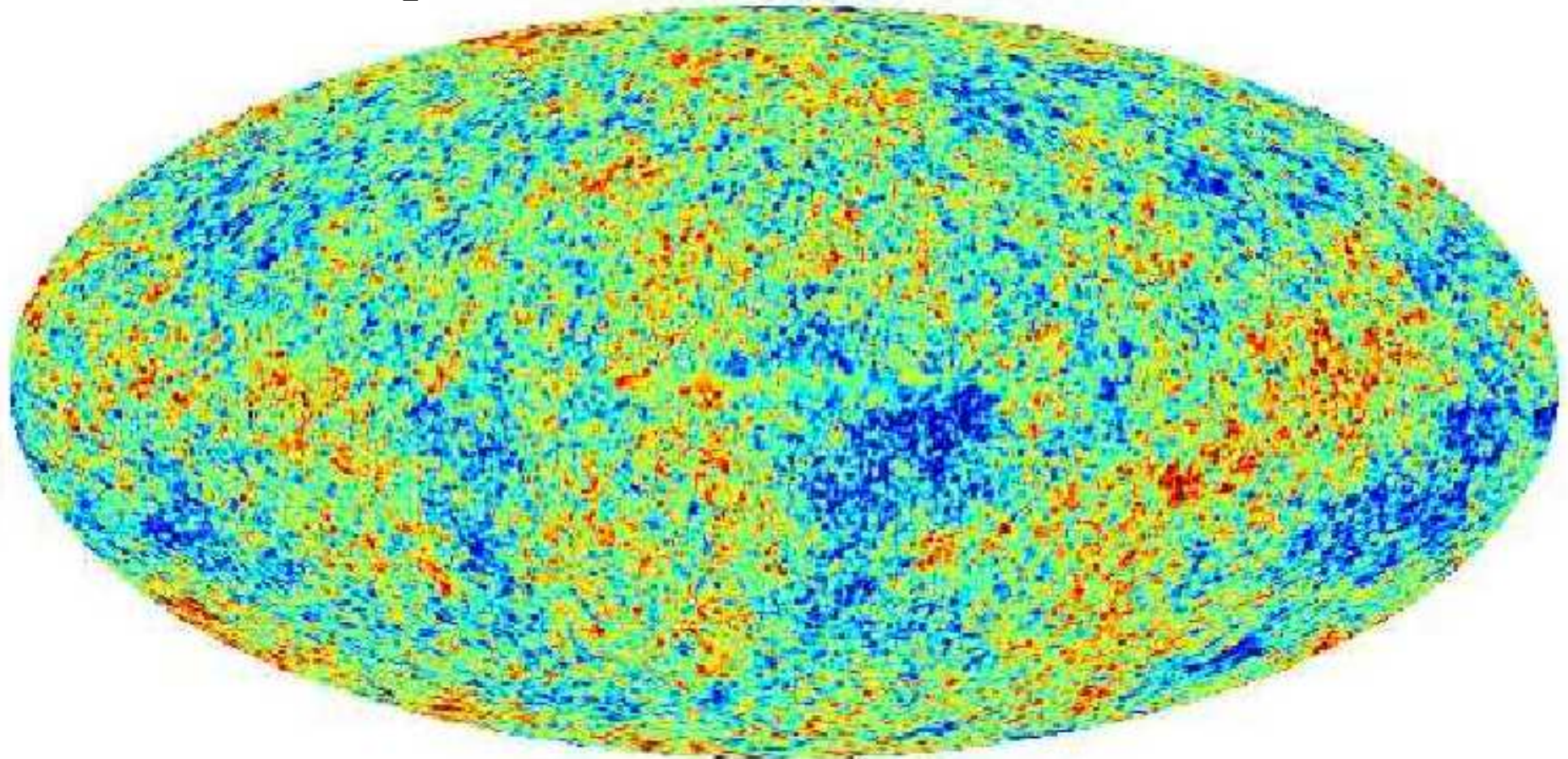
- Измерения температуры реликтового излучения в зависимости от направления на небе



фотоснимок Вселенной в возрасте 380 тыс. лет  
(сегодня — 13.7 млрд. лет)



$$T = 2.725^{\circ}\text{K}, \quad \frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5}$$



WMAP

Разложение “Фурье” флуктуаций температуры:

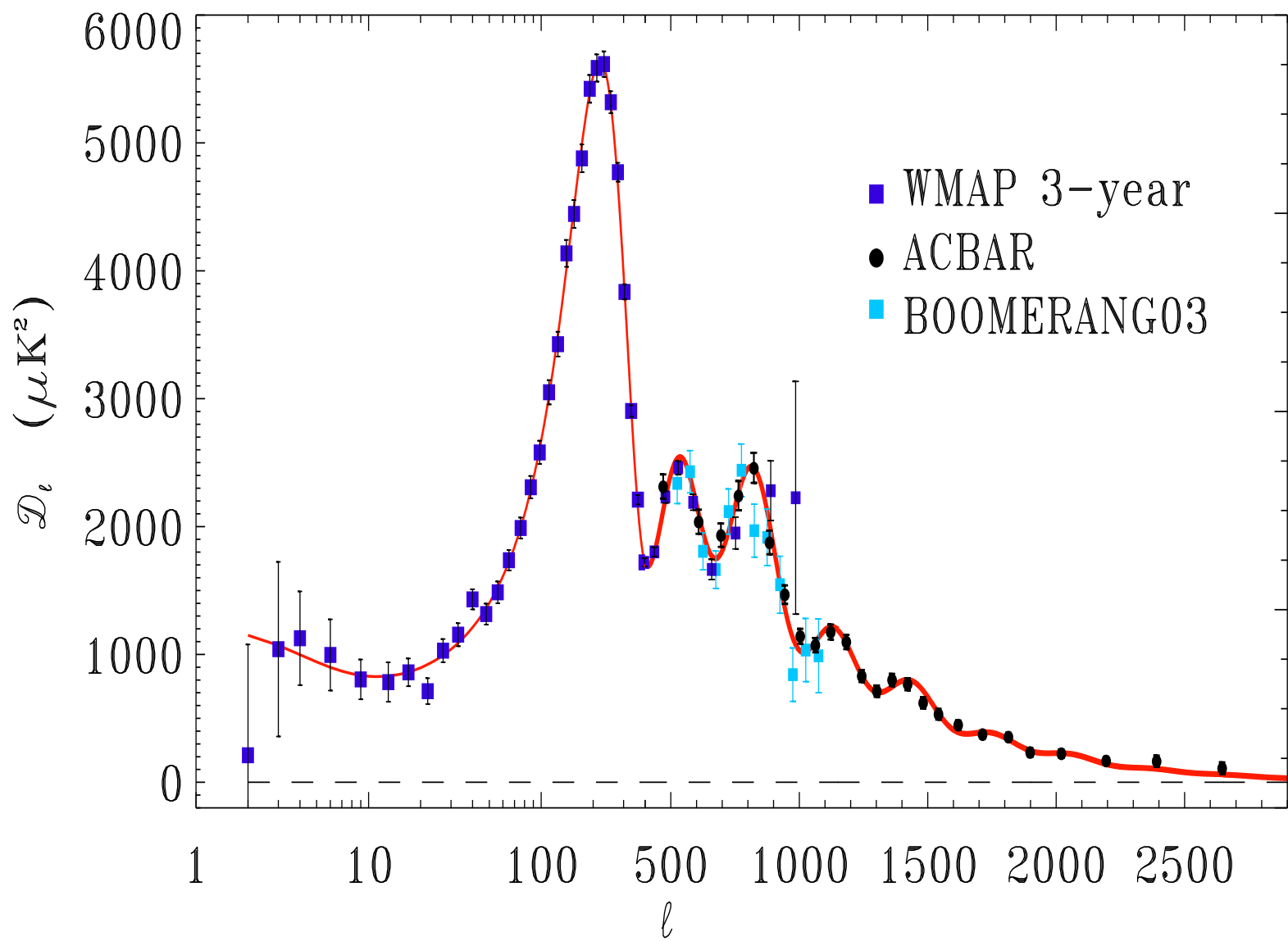
$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

$\langle a_{lm}^* a_{lm} \rangle = C_l$  измеряются; обычно показывают  $D_l = \frac{l(l+1)}{2\pi} C_l$

большие  $l \iff$  малые угловые масштабы, меньшие длины волн

● Физика:

- Первичные неоднородности плотности, заложены до горячей стадии (инфляция?)
- Развитие звуковых волн в космической плазме с ранней горячей стадии до рекомбинации  
 $\implies$  состав космической плазмы
- Распространение фотонов после рекомбинации  
 $\implies$  история расширения Вселенной  
+ геометрия пространства



# Наше пространство евклидово

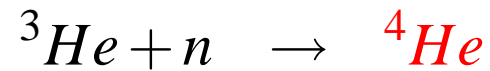
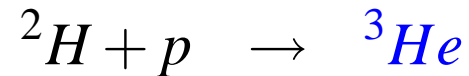
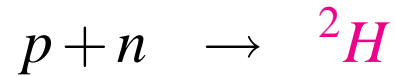
Сумма углов треугольника = 180 градусам.

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

Видимая часть Вселенной – не более  $1/100$  ее полного объема.

# Ранняя Вселенная:

- $T = 1 \text{ MeV} - 50 \text{ keV}$   
возраст Вселенной = 1 секунда  $\rightarrow$  3 минуты (!)



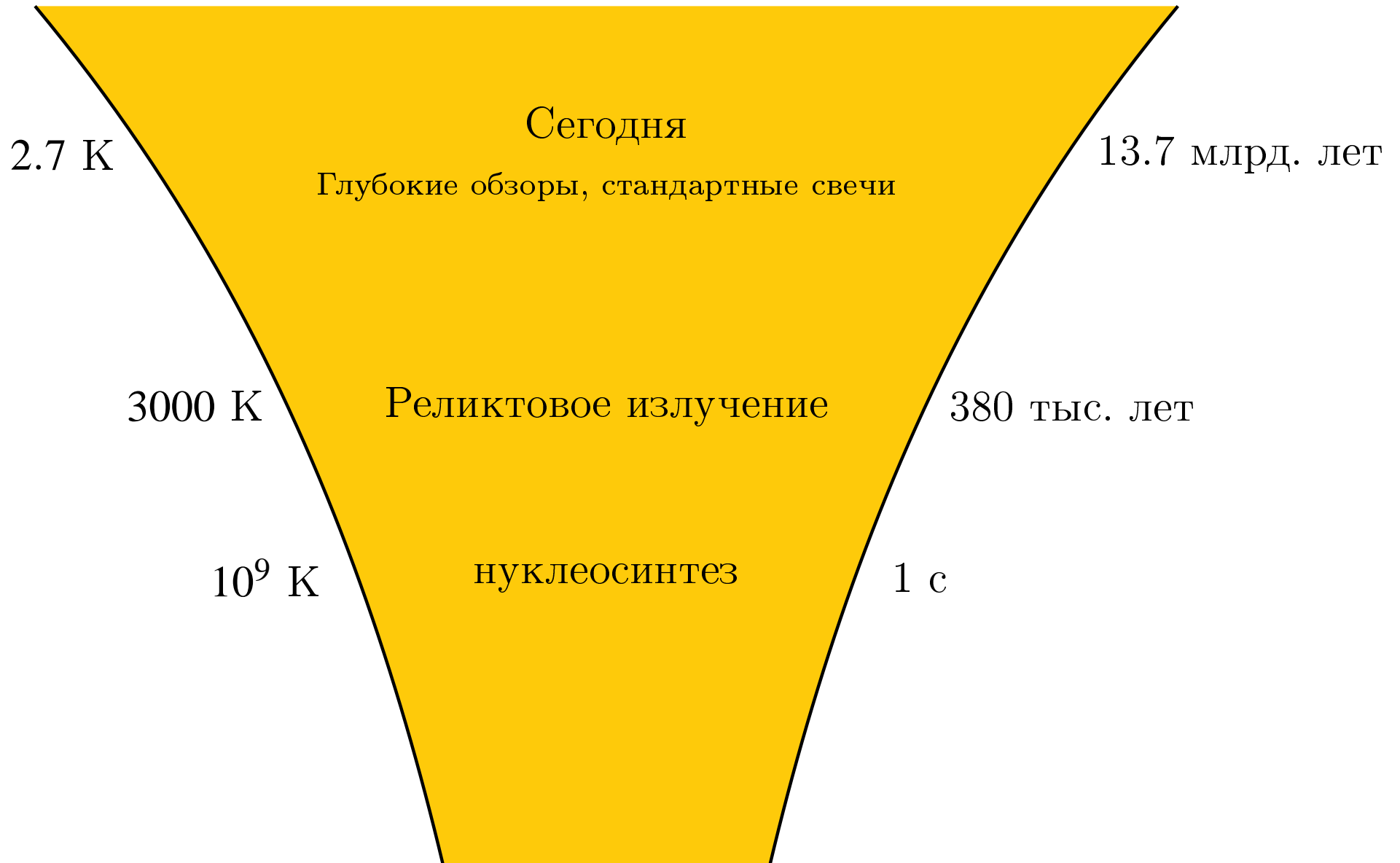
...

Примеси легких элементов измерены

Сравнение наблюдений примеси легких элементов с теорией:

- Проверка теоретического описания ранней Вселенной через 1 секунду после Большого Взрыва

# Этапы эволюции Вселенной и данные о них



- Согласованная картина современной и ранней Вселенной
- Но “ортогональная” имеющейся картине физики частиц
  - Измеренный темп расширения

$$\frac{d \ln R}{dt} = H_0 = \frac{1}{14 \cdot 10^9 \text{ лет}}$$

- Уравнения Эйнштейна–Фридмана:

$$H_0^2 = \frac{8\pi}{3} G \rho_0$$

$G$ : ньютоновская гравитационная постоянная

$\rho_0$ : **полная** плотность энергии во Вселенной

- Полная плотность энергии сегодня

$$\rho_0 = (5.3 \pm 0.5) \frac{\text{GeV}}{\text{m}^3}$$

- Плотность энергии (массы) барионов

реликтовое излучение, нуклеосинтез

$$\rho_B = 0.24 \frac{\text{GeV}}{\text{m}^3}$$

ВСЕГО ОКОЛО 4.5%

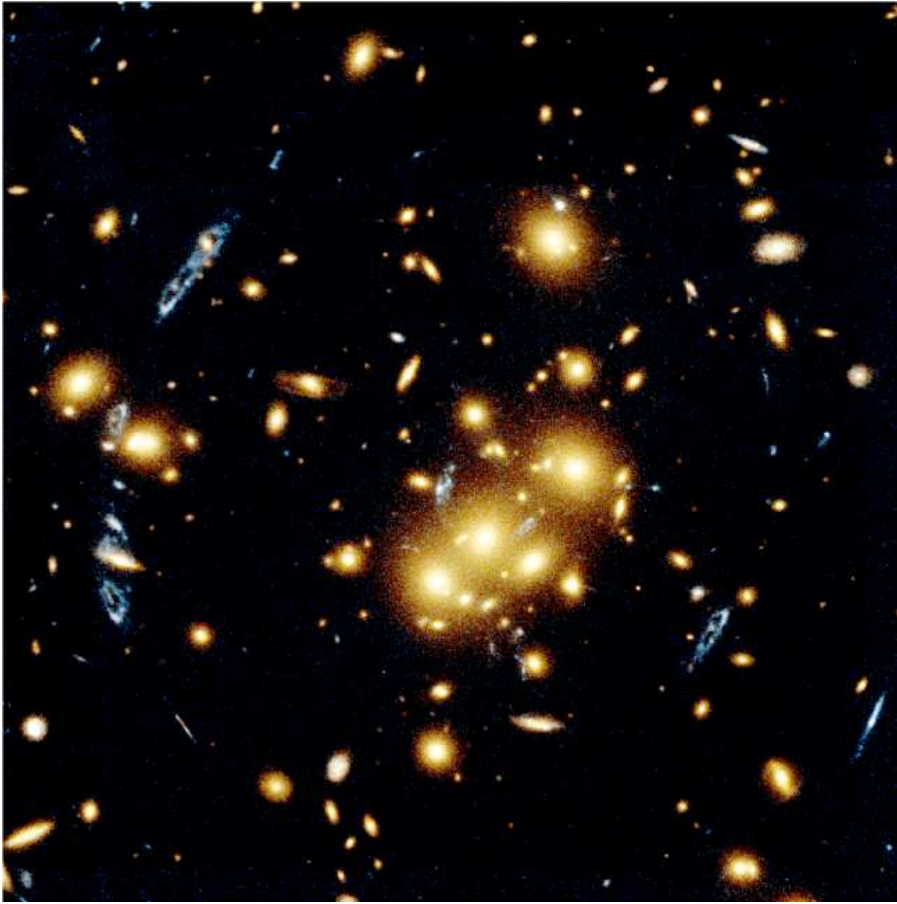
- Нейтрино, фотоны, электроны дают еще меньший вклад
- Основная энергия сосредоточена в неизвестных формах  
Более того...
- Нужна и темная материя  $\approx 20\%$   
и темная энергия  $\approx 75\%$



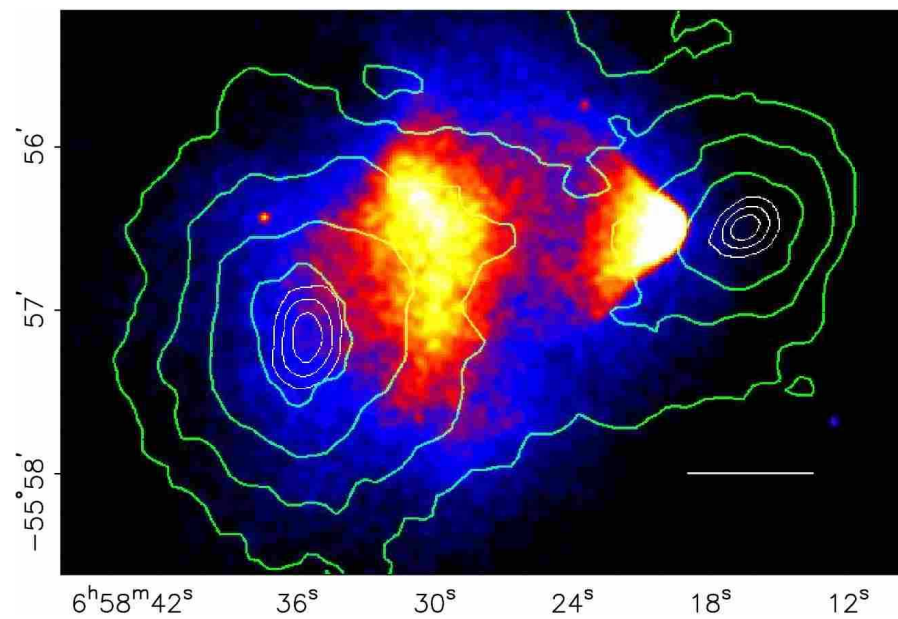
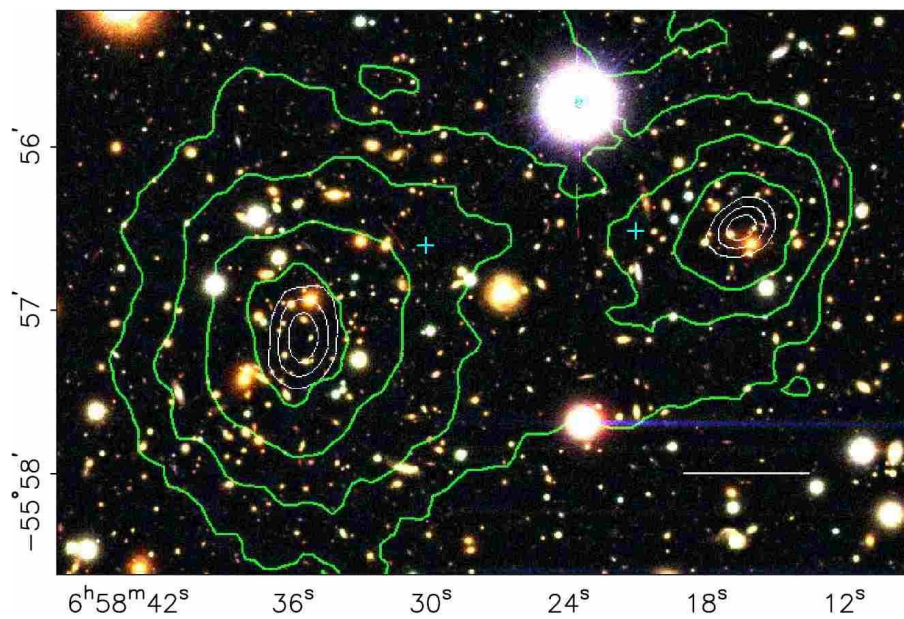
# Темная материя

- данные об образовании галактик и скоплений галактик в процессе эволюции Вселенной
- гравитационные силы в скоплениях галактик,  
 $R \sim 3 \text{ Мпк} \sim 10^7$  световых лет
- кривые вращения на периферии галактик,  
 $R \sim 30 \text{ кпк} \sim 10^5$  световых лет

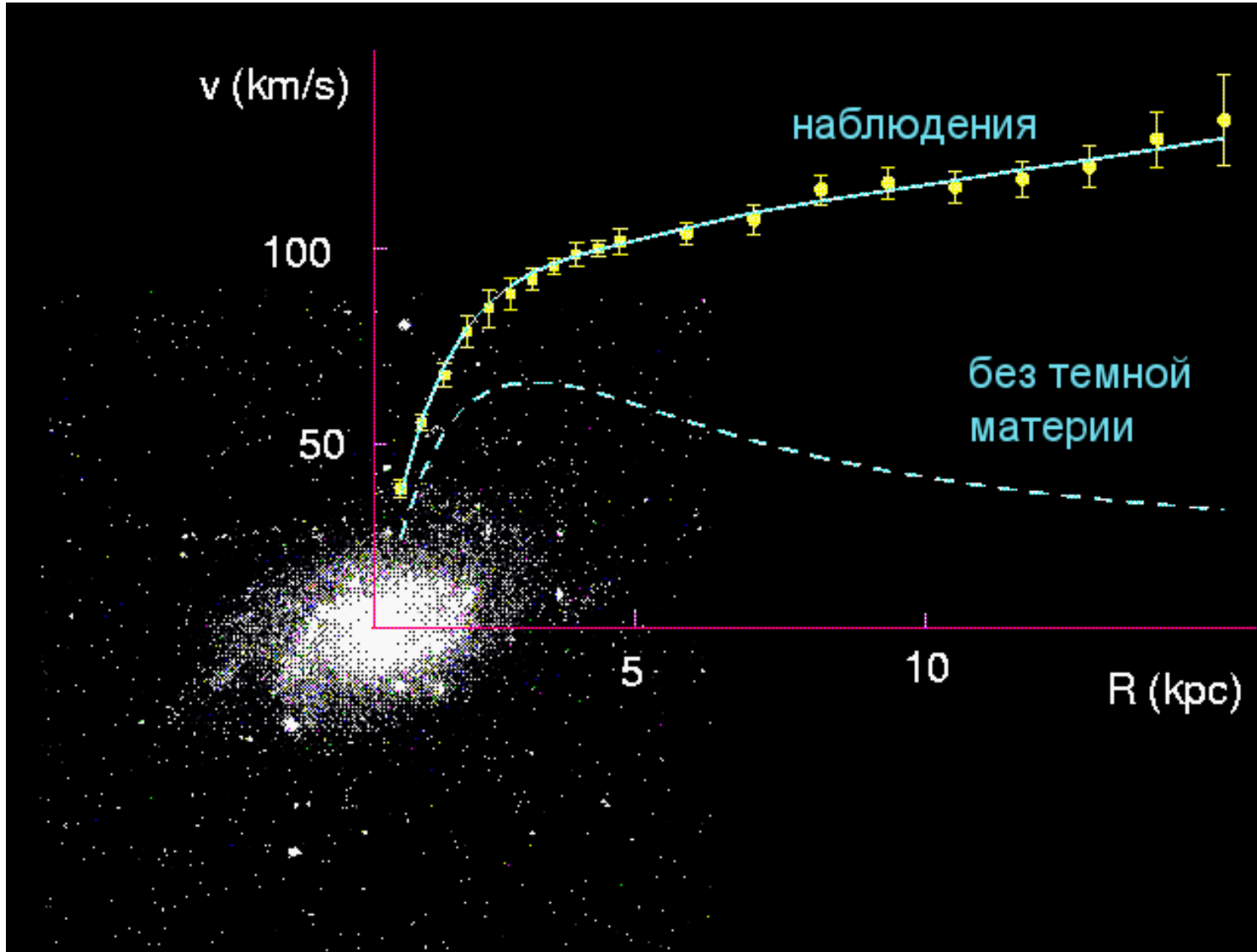
# Гравитационное линзирование СКОПЛЕНИЙ



# Столкнувшиеся скопления галактик



# Кривые вращений В ГАЛАКТИКАХ



# Темная материя жизненно важна для нас

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

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

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

Если бы не темная материя, то

$$\left( \frac{\delta \rho}{\rho} \right)_{today} = 1100 \times (\text{a few}) \cdot 10^{-5} = (\text{a few}) \cdot 10^{-2}$$

Ни галактик, ни звезд ...

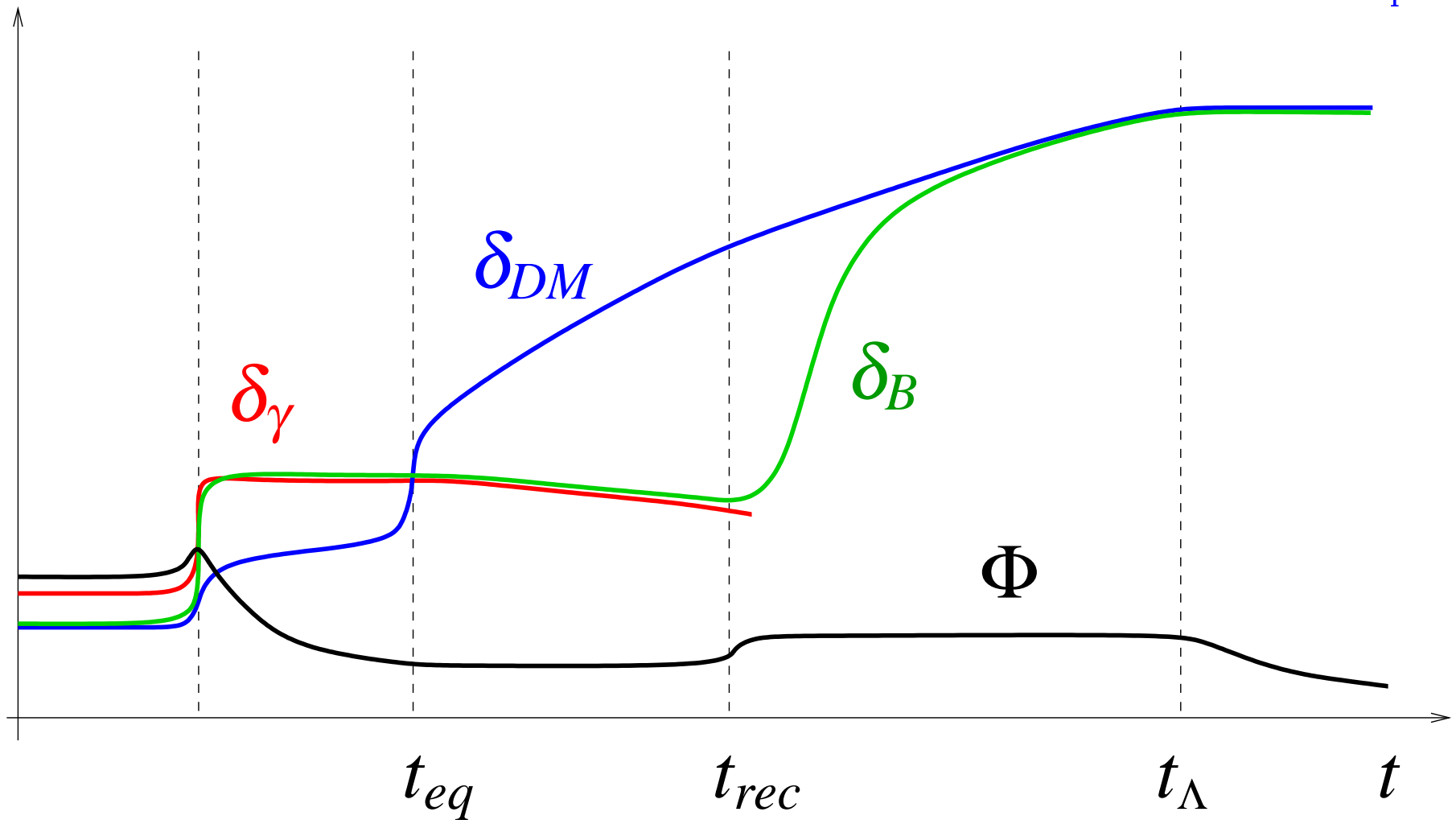
Неоднородности темной материи начинают расти гораздо раньше

# Рост неоднородностей плотности

Радиационное доминирование

Доминирование материи

Доминирование  
темной энергии



# Асимметрия между материей и антиматерией во Вселенной – еще одна проблема космологии

Вещество есть, антивещества нет.

В чем здесь проблема?

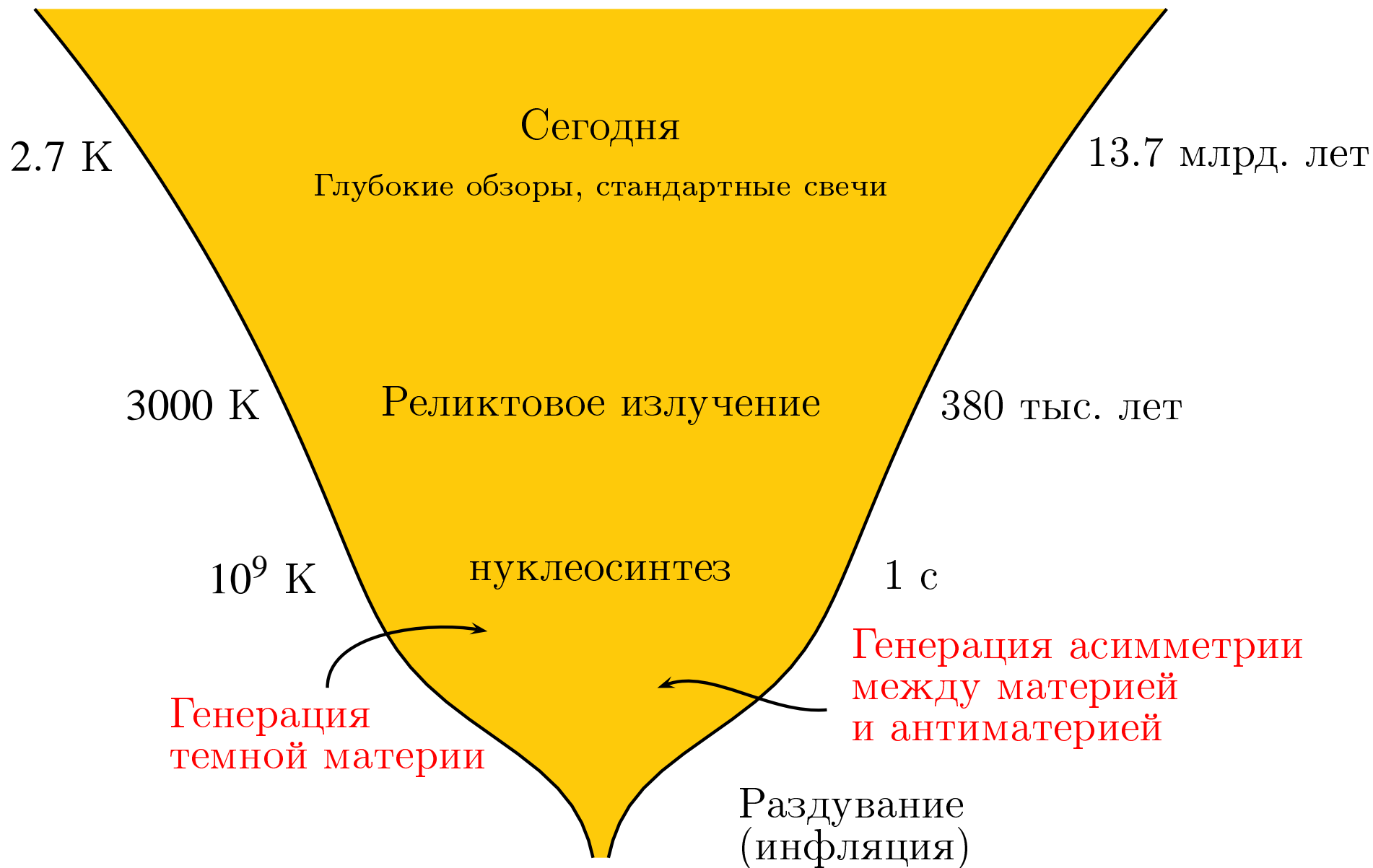
Ранняя Вселенная ( $T > 3 \cdot 10^{12}$  К = 300 MeV):  
рождение и аннигиляция кварк-антикварковых пар  $\Rightarrow$

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

Каким образом такая асимметрия возникла в результате эволюции?

А. Д. Сахаров'67, В. А. Кузьмин'70

Требуется нарушение закона сохранения барионного числа





Темная материя и барионная асимметрия  
принципиально важны для нашего существования

- Без темной материи не было бы галактик и звезд
- Если бы не было барионной асимметрии, кварки проаннигилировали бы с антикварками, и во Вселенной не осталось бы вещества

Происхождение непонятно

Требуется выход за рамки Стандартной модели

**ШАНС ДЛЯ БОЛЬШОГО АДРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА**

# Правдоподобная гипотеза: WIMP

- Новая, нейтральная **стабильная** (по космологическим меркам) тяжелая частица
  - Отсутствует в Стандартной модели
  - **Стабильность**: новое сохраняющееся квантовое число  
↔ новая симметрия
- Рождаются парами в ранней Вселенной при  $T \simeq M$ , аннигилируют парами при  $T < M$ , концентрация замораживается при  $T \sim M/30$ 
  - Современная плотность массы слабо (логарифмически) зависит от  $M$  и сильно — от сечения аннигиляции,  $1/\sigma$

Если аннигиляция в  $s$ -волне,  $\sigma = \sigma_0/v$ , то отношение массы к энтропии (требуется  $3 \cdot 10^{-10}$  GeV)

$$\frac{Mn}{s} = \# \frac{\ln(MM_{Pl}\sigma_0)}{\sigma_0 M_{Pl}}$$

- Современная плотность правильная, если
  - Область масс:  $M \sim (10 - 1000)$  GeV
  - Взаимодействия сравнимы со слабыми:  
нерелятивистское сечение аннигиляции  
 $\sigma_0 = (1 \div 2) \cdot 10^{-36}$  cm<sup>2</sup>

**NB:** Комбинация гравитационного и электрослабого масштабов

Как раз в области LHC

- Суперсимметрия: нейтралино  $\chi$

Однако, сечение аннигиляции типично слишком мало

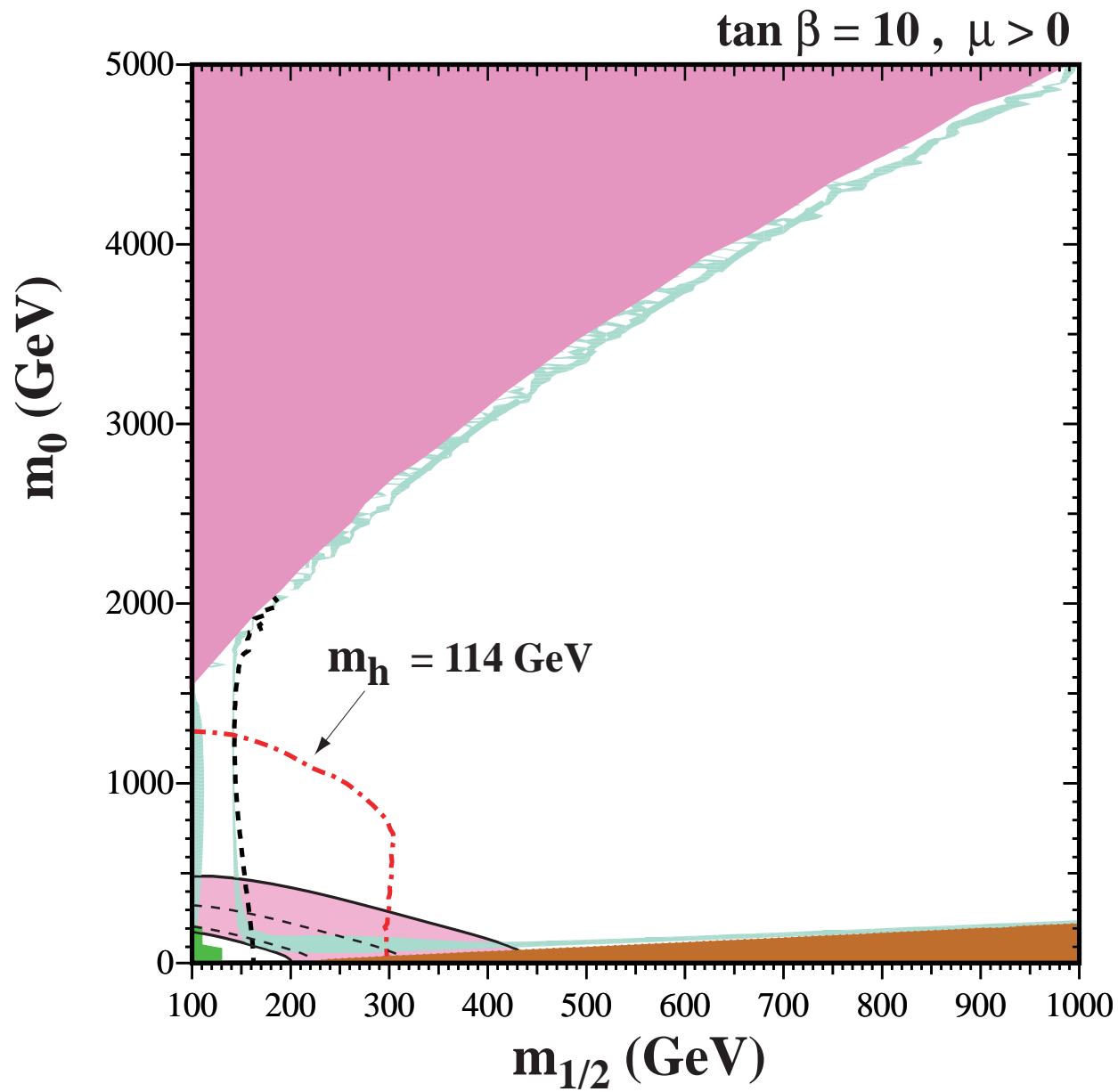
- Фактор подавления:  $\langle \sigma v \rangle \propto v \propto \sqrt{T/M_\chi}$

из-за аннигиляции в  $p$ -волне в случае  $\chi\chi \rightarrow Z^* \rightarrow q\bar{q}, l\bar{l}$ :

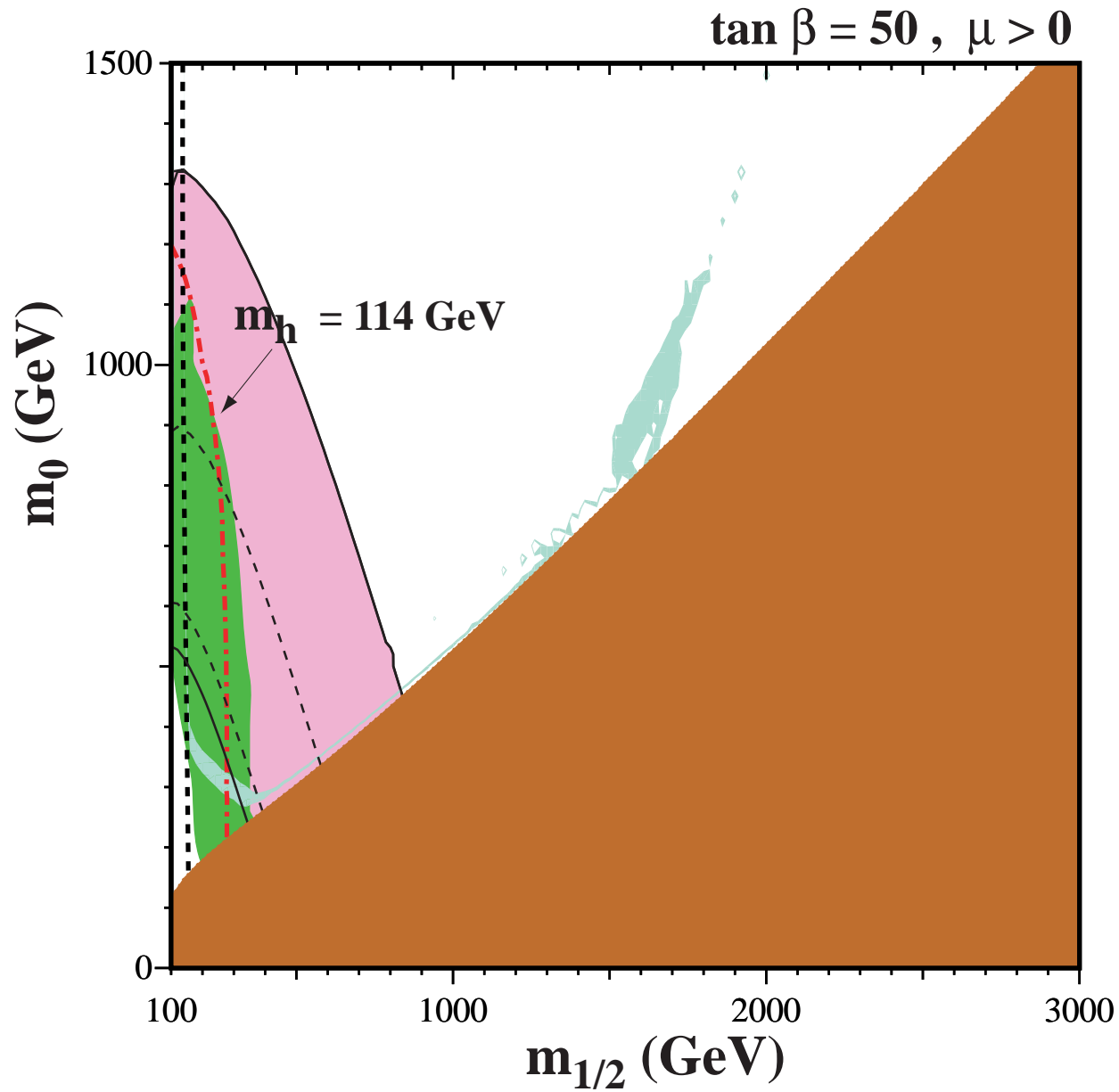
- Релятивистские  $q\bar{q}$ , (аксиально)-векторное взаимодействие  $\implies$  полный угловой момент  $J = 1$

- $\chi\chi$ : одинаковые фермионы  $\implies$  принцип Паули запрещает  $L = 0$  и параллельные спины  $\implies$   $p$ -волновая аннигиляция

# mSUGRA при небольшом $\tan \beta$



# Большие $\tan \beta$ лучше



# Теплая темная материя: гравитино?

- WIMPs: холодная темная материя (CDM), скорости частиц всегда пренебрежимо малы.

- Облачка над CDM

Численные симуляции формирования структур в модели CDM дают

- Слишком много карликовых галактик

предсказывается несколько сотен карликов — спутников нашей Галактики

до сих пор обнаружено около 20

- Слишком большая плотность в центрах галактик (“cusps”)

- Еще не кризис

Но что если структуры на малых масштабах действительно подавлены?

# Теплая темная материя

- Частицы отщепляются релятивистскими,  $T_f \gg m$ .
- Остаются **релятивистскими до  $T \sim m$**  (в предположении начального теплового распределения). Рост структур начинается только после этого.
- Неоднородности малых масштабов разглаживаются  $\implies$  объекты малых масс не формируются (“free streaming”)
- **Подавление формирования карликовых галактик при  $m \sim 1 - 10 \text{ keV}$**

Подходящий кандидат — гравитино  
в моделях с низким масштабом нарушения суперсимметрии



Рождение гравитино в распадах суперпартнеров  $\tilde{S}$ :

$$\frac{m_{3/2} n_{3/2}}{s} \simeq \# \sum_{\tilde{S}} \frac{M_{\tilde{S}}^3}{m_{3/2}} \frac{1}{M_{Pl}}$$

Для  $m_{3/2} = \text{a few keV}$ , значение  $3 \cdot 10^{-10}$  GeV получается при

$$M_{\tilde{S}} \simeq 100 - 300 \text{ GeV}$$

Нужны легкие суперпартнеры

и низкая максимальная температура во Вселенной  $T_{max} \lesssim 1 \text{ TeV}$   
(иначе перепроизводство в процессах рассеяния,  
“gravitinosstrahlung”)

Не очень правдоподобно,  
но с теплой темной материей всегда так

$$\text{NB: } \Gamma_{NLSP} \simeq \frac{M_{\tilde{S}}^5}{m_{3/2}^2 M_{Pl}^2} \implies c\tau_{NLSP} = \text{a few} \cdot \text{mm} \div \text{a few} \cdot 100 \text{ m}$$

при  $m_{3/2} = 1 \div 10 \text{ keV}$ ,  $M_{\tilde{S}} = 100 \div 300 \text{ GeV}$

В любом случае, темная материя, скорее всего, связана с целым пластом новой физики

Серьезные и обоснованные надежды на LHC

Гарантированно?

Отнюдь нет. Кандидаты, неподвластные LHC:

- аксион
- стерильные нейтрино
- еще большая экзотика.

# Барионная асимметрия: условия Сахарова

Три необходимых условия генерации асимметрии должны выполняться в одно время:

- несохранение барионного числа
- *C*- и *CP*-нарушение:  
микрофизика различает частицы и античастицы
- Нарушение теплового равновесия

Может ли барионная асимметрия генерироваться за счет физики на масштабе энергий 100 ГэВ — ТэВ ?

На первый взгляд НЕТ: время жизни протона  $\tau_p > 10^{33}$  лет  
 $\implies$  масштаб энергий  $10^{16}$  ГэВ

# Однако

Барионное число **не сохраняется** в электрослабых взаимодействиях

необходимы большие флуктуации полей  $W$ - и  $Z$ -бозонов

Скорость несохранения подавлена при нулевой температуре туннельной экспонентой

$$e^{-\frac{16\pi^2}{g_W^2}} \sim 10^{-165}$$

Высокие температуры: большие **тепловые** флуктуации (“сфалероны”).

**$B$ -несохранение** — быстрое по сравнению с космологическим расширением при  $T \gtrsim 100$  ГэВ.

ПРОБЛЕМА:

Вселенная расширяется медленно. Темп расширения при  $T \sim 100$  ГэВ

$$H^{-1} \sim 10^{-10} \text{ с}$$

Слишком медленный для нарушения теплового равновесия?

## Единственный шанс: фазовый переход 1-го рода, сильно неравновесный процесс

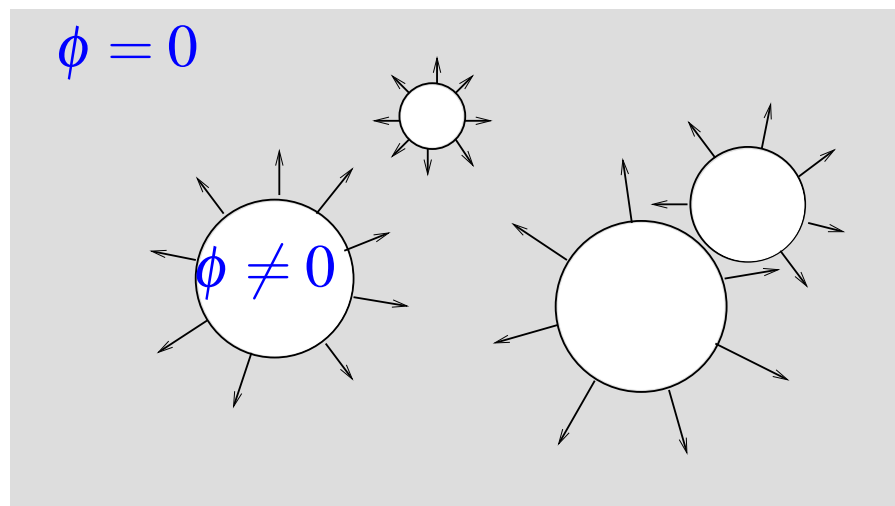
Электрослабая симметрия нарушена в вакууме, но не нарушена при  $T \gtrsim 100$  ГэВ.

Аналогия: сверхпроводник становится нормальным металлом при “высокой”  $T$

Переход может в принципе быть 1-го рода

Переход 1-го рода происходит из переохлажденного состояния путем образования пузырьков новой фазы с  $r \sim 10^{-16}$  см, их расширения с  $v \sim 0.1c$  до  $r \sim 0.1H^{-1} \sim$  мм, столкновения стенок и перколяции.

Кипящая Вселенная, далекая от теплового равновесия



А как на самом деле?

В Стандартной модели фазового перехода 1-го рода нет

Ее свойства при высоких температурах вычисляются однозначно

- Фазового перехода нет вообще, есть гладкий кроссовер
- Кроме того, слишком слабое нарушение  $CP$

Что требуется для электрослабой генерации барионной асимметрии?

- Новые поля/частицы
  - Должны сильно взаимодействовать с хиггсовскими бозонами
  - Должны присутствовать в плазме при  $T \sim 100$  ГэВ  
 $\implies$  масса не более 300 ГэВ
- дополнительный источник  $CP$ -нарушения, лучше в хиггсовском секторе  $\implies$  несколько хиггсовских полей

Более общо, бариогенезис при  $T \sim 100$  ГэВ требует сложной динамики в секторе, нарушающем электрослабую симметрию

при  $E \sim (\text{a few}) \cdot 100$  ГэВ

Область ЛНС

Гарантии нет:

- Барионная асимметрия может генерироваться тем же механизмом, который дает массы нейтрино (лептогенезис)
- Есть и целый ряд других механизмов

В любом случае ЛНС позволит  
продвинуться в раннюю Вселенную

$$T \sim 10 - 100 \text{ GeV} \iff t \sim 10^{-8} - 10^{-10} \text{ s}$$

Вполне возможно, что именно на этом этапе генерировалась темная материя и/или барионная асимметрия.

Есть, впрочем, загадка  $\rho_{DM} \approx \rho_B$

Случайность?



# Еще более радикальная возможность

## Проблема иерархии:

Почему электрослабый масштаб  $M_W \sim 100 \text{ GeV}$   
настолько меньше  
гравитационного  $M_{Pl} \sim 10^{19} \text{ GeV}$ ?

- Суперсимметрия: из-за логарифмической эволюции констант с энергией ренормгруппа
- Дополнительные измерения пространства и низкий гравитационный масштаб: на самом деле гравитационный масштаб равен TeV. Выяснится с помощью LHC

Ясно, что открытие тэвной гравитации перевернет космологию

- Стандартная космологическая эволюция началась в лучшем случае с  $T \sim \text{TeV}$
- Инфляция, если вообще была, происходила при плотности энергии не более  $\text{TeV}^4$
- Темная материя, барионная асимметрия генерировались при  $T \lesssim \text{TeV}$

ИЛИ

Все это происходило в режиме квантовой гравитации

- Мечта:

- Изучение квантовой гравитации на коллайдерах
- Изучение самой ранней Вселенной на коллайдерах

# В заключение:

ЛНС вполне может открыть вещи, жизненно важные для нас:

темную материю

механизм генерации барионной асимметрии

Вполне возможно, совсем не те, что обсуждались в докладе

Возможно, нечто еще более выдающееся,

вроде дополнительных измерений и

тэвной гравитации

Или нечто, о чем теоретики даже не догадываются

В любом варианте физическая картина мира будет другой.  
Космология — в том числе.



# Backup slides

WIMPs

## Simple but very suggestive scenario

- Assume there is a new heavy stable particle  $X$ 
  - Interacts with SM particles via pair annihilation (and crossing processes)

$$X + X \leftrightarrow q\bar{q}, \text{ etc}$$

- Mass:  $M_X$ , annihilation cross section at non-relativistic velocity  $v$ :  $\sigma(v)$
- Assume that maximum temperature in the Universe was high,  $T \gtrsim M_X$
- Calculate present mass density



- Friedmann equation:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 \equiv H^2 = \frac{8\pi}{3M_{Pl}}\rho$$

- Early epoch (radiation dominated): Stefan–Boltzmann

$$\rho = \frac{\pi^2}{30}g_*T^4$$

$g_*$ : number of relativistic degrees of freedom (about 100 in SM at  $T \sim 100$  GeV). Hence

$$H(T) = \frac{T^2}{M_{Pl}^*}$$

with  $M_{Pl}^* = M_{Pl}/(1.66\sqrt{g_*}) \sim 10^{18}$  GeV at  $T \sim 100$  GeV

- Number density of  $X$ -particles in equilibrium at  $T < M_X$ :  
Maxwell–Boltzmann

$$n_X = g_X \left( \frac{M_X T}{2\pi} \right)^{3/2} e^{-\frac{M_X}{T}}$$

- Mean free time wrt annihilation:

$$\tau_{ann} \equiv \Gamma_{ann}^{-1} = \frac{1}{n_X \langle \sigma v \rangle}$$

- Freeze-out:  $\Gamma_{ann}(T_f) \sim H(T_f) \implies n_X(T_f) \langle \sigma v \rangle \sim T_f^2 / M_{Pl}^* \implies$

$$T_f \simeq \frac{M_X}{\log(M_X M_{Pl}^* \langle \sigma v \rangle)}$$

NB: large log  $\iff T_f \sim M_X / 30$

Define  $\langle \sigma v \rangle \equiv \sigma_0$  (constant for  $s$ -wave annihilation)

- Number density at freeze-out

$$n_X(T_f) = \frac{T_f^2}{\sigma_0 M_{Pl}^*}$$

- Number-to-entropy ratio at freeze-out and later on

$$\frac{n_X(T_f)}{s(T_f)} = \# \frac{n_X(T_f)}{g_* T_f^3} = \# \frac{\log(M_X M_{Pl}^* \sigma_0)}{M_X \sigma_0 g_* M_{Pl}^*}$$

where  $\# = 45/(2\pi^2)$ .

- Mass-to-entropy ratio

$$\frac{M_X n_X}{s} = \# \frac{\log(M_X M_{Pl}^* \sigma_0)}{\sigma_0 \sqrt{g_*(T_f)} M_{Pl}}$$

- Most relevant parameter: annihilation cross section  $\sigma_0 \equiv \langle \sigma v \rangle$  at freeze-out

$$\frac{M_X n_X}{s} = \# \frac{\log(M_X M_{Pl}^* \sigma_0)}{\sigma_0 \sqrt{g_*(T_f)} M_{Pl}}$$

- Correct value, mass-to-entropy =  $3 \cdot 10^{-10}$  GeV, at

$$\sigma_0 \equiv \langle \sigma v \rangle = (1 \div 2) \cdot 10^{-36} \text{ cm}^2$$

- Weak scale cross section.

Gravitational physics and EW scale physics combine into

$$\text{mass-to-entropy} \simeq \frac{1}{M_{Pl}} \left( \frac{\text{TeV}}{\alpha_W} \right)^2 \simeq 10^{-10} \text{ GeV}$$

- Mass  $M_X$  should not be much higher than 100 GeV

Weakly interacting massive particles, WIMPs.

Cold dark matter candidates

# Warm dark matter

- Decouples when relativistic,  $T_f \gg m$ .
- Remains **relativistic** until  $T \sim m$  (assuming thermal distribution). Does not feel gravitational potential before that.
- Perturbations of wavelengths shorter than horizon size at that time get smeared out  $\implies$  small size objects do not form (“free streaming”)
- Horizon size at  $T \sim m$

$$l(T) = H(T \sim m)^{-1} = \frac{M_{Pl}^*}{T^2} = \frac{M_{Pl}^*}{m^2}$$

Present size of this region

$$l(t_0) = \frac{T}{T_0} l(T) = \frac{M_{Pl}}{m T_0}$$

(modulo  $g_*$  factors).

Objects of initial size smaller than  $l_0$  are less abundant

- Initial size of dwarf galaxy  $l_{dwarf} \sim 100 \text{ kpc} \sim 3 \cdot 10^{23} \text{ cm}$   
Require

$$l_0 \simeq \frac{M_{Pl}}{m T_0} \sim l_{dwarf}$$

$\implies$  obtain mass of DM particle

$$m \sim \frac{M_{Pl}}{T_0 l_{dwarf}} \sim 3 \text{ keV}$$

$(M_{Pl} = 10^{19} \text{ GeV}, T_0^{-1} = 0.1 \text{ cm}).$

- Particles of masses in keV range  
are good warm dark matter candidates

# Warm dark matter: additional argument

- Initial phase space density of dark matter particles:  $f(\vec{p})$ , independent of  $\vec{x}$ .

Fermions:

$$f(\vec{p}) \leq \frac{1}{(2\pi)^3} \quad \text{by Pauli principle}$$

Not more than one particle in quantum unit of phase space volume  $\Delta\vec{x}\Delta\vec{p} = (2\pi\hbar)^3$ .

Thermal distribution:  $f_{max} = \frac{1}{2(2\pi)^3}$

Expect maximum initial phase space density about  $(2\pi)^{-3}$

- Non-dissipative motion of particles, gravitational interactions only: particles tend to penetrate into empty parts of phase space  $\implies$  Maximum phase space density decreases in time.

But not by many orders of magnitude



- Maximum phase space density today

$$f_{0,max}(\vec{x}, \vec{p}) = \frac{\#}{(2\pi)^3}$$

with  $\# < 1$  but not by many orders of magnitude

- Observable:

$$Q(\vec{x}) = \frac{\rho_{DM}(\vec{x})}{\langle v^2 \rangle^{3/2}}$$

$\rho_{DM}(\vec{x}) \iff$  gravitational potential

$\langle v^2 \rangle \iff$  velocities of stars

$$Q = m^4 \frac{n(\vec{x})}{\langle p^2 \rangle^{3/2}} \simeq m^4 f_0(\vec{x}, \vec{p})$$

- Largest observed (Coma Berencies)

$$Q_{max} = 2 \cdot 10^{-2} \frac{M_{\odot}/\text{pc}^3}{\text{km/s}}$$

$$Q_{max} = 2 \cdot 10^{-2} \frac{M_{\odot}/\text{pc}^3}{\text{km/s}}$$

With  $M_{\odot} \simeq 1 \cdot 10^{63}$  keV,  $1 \text{ pc} = 1.5 \cdot 10^{26} \text{ keV}^{-1}$ ,  $\text{km/s} = 3 \cdot 10^{-6}$

$$\begin{aligned} Q_{max} &= 0.2 \text{ keV}^4 \\ &\simeq m^4 f_{0,max} = m^4 \frac{\#}{(2\pi)^3} \end{aligned}$$

If maximum observed  $Q$  indeed estimates the largest phase space density of DM particles in the present Universe, then

$$m = (\text{a few}) \cdot \text{keV}$$

NB: Independent argument, does not work for bosons.

# Gravitinos

- Mass  $m_{3/2} \simeq F/M_{Pl}$   
 $\sqrt{F}$  = SUSY breaking scale.  
 $\implies$  Gravitinos light for low SUSY breaking scale.  
E.g. gauge mediation
- Light gravitino = LSP  $\implies$  Stable
- Decay width of superpartners into gravitino + SM particles

$$\Gamma_{\tilde{S}} \simeq \frac{M_{\tilde{S}}^5}{F^2} \simeq \frac{M_{\tilde{S}}^5}{m_{3/2}^2 M_{Pl}^2}$$

$M_{\tilde{S}}$  = mass of superpartner  $\tilde{S}$

## Gravitino production in decays of superpartners

$$\frac{d(n_{3/2}/s)}{dt} = \frac{n_{\tilde{g}}}{s} \Gamma_{\tilde{g}}$$

$n_{\tilde{g}}/s = \text{const} \sim g_*^{-1}$  for  $T \gtrsim M_{\tilde{g}}$ , while  $n_{\tilde{g}} \propto e^{-M_{\tilde{g}}/T}$  for  $T \ll M_{\tilde{g}}$   
 $\implies$  production most efficient at  $T \sim M_{\tilde{g}}$  (slow cosmological expansion with unsuppressed  $n_{\tilde{g}}$ )

$$\frac{n_{3/2}}{s} \simeq \frac{\Gamma_{\tilde{g}}}{g_* H(T \sim M_{\tilde{g}})} \simeq \frac{M_{Pl}^*}{g_* M_{\tilde{g}}^2} \cdot \frac{M_{\tilde{g}}^5}{m_{3/2}^2 M_{Pl}^2}$$

Mass-to-entropy ratio

$$\frac{m_{3/2} n_{3/2}}{s} \simeq \frac{M_{\tilde{g}}^3}{m_{3/2}} \frac{1}{g_*^{3/2} M_{Pl}}$$

$$\frac{m_{3/2} n_{3/2}}{s} \simeq \sum_{\tilde{S}} \frac{M_{\tilde{S}}^3}{m_{3/2}} \frac{1}{g_*^{3/2} M_{Pl}}$$

For  $m_{3/2} =$  a few keV, mass-to-entropy =  $3 \cdot 10^{-10}$  GeV

$$M_{\tilde{S}} \simeq 100 \div 300 \text{ GeV}$$

Need light superpartners

and low maximum temperature in the Universe,  $T_{max} \lesssim 1$  TeV to avoid overproduction in collisions of superpartners (and in decays of squarks and gluinos if they are heavy)

Rather contrived scenario, but generating warm dark matter is always contrived

$$\text{NB: } \Gamma_{NLSP} \simeq \frac{M_{\tilde{S}}^5}{m_{3/2}^2 M_{Pl}^2} \implies c\tau_{NLSP} = \text{a few} \cdot \text{mm} \div \text{a few} \cdot 100 \text{ m}$$

for  $m_{3/2} = 1 \div 10$  keV,  $M_{\tilde{S}} = 100 \div 300$  GeV

Longer lifetime for heavier gravitino (CDM candidate)

# Anthropic

# Cosmology may be telling us something different — and unpleasant

## ● Friendly fine-tunings

- Dark energy density  $\sim (10^{-3} \text{ eV})^4$   
Just right for galaxies to get formed
  - Primordial density perturbations  $\frac{\delta\rho}{\rho} \sim 10^{-5}$   
Just right to form stars  
but not supermassive galaxies w/o planets
  - Dark matter sufficient to produce structure
- Also
- Light quark masses and  $\alpha_{EM}$   
Just right for  $m_n > m_p$   
but stable nuclei
  - Many more...

Is the electroweak scale a friendly fine-tuning?

# Anthropic principle/environmentalism

“Our location in the Universe is necessarily privileged to the extent of being compatible with our existence as observers”

Brandon Carter'1974

Fig

Recent support from “string landscape”

We exist where couplings/masses are right

Problem: never know which parameters are environmental and which derive from underlying physics

Disappointing, but may be true

May gain support from LHC, if not enough new physics





橋山 樺「グランドキャニオン」1961年