

Природа тёмной материи

Лекция 9

Первые 3 минуты и первичный нуклеосинтез

4) Тепловая эволюция

5) Первичный нуклеосинтез

- Барион-фотонное отношение
- Концепция нуклеосинтеза
- Эволюция нейтрон-протонного отношения. Закалка и горение нейтронов
- Начало нуклеосинтеза. Синтез тяжёлых элементов
- Кинетика нуклеосинтеза
- Наблюдаемая распространённость первичных элементов
- Согласие с моделью Λ CDM
- Нейтрино

6) Рекомбинация

Барион-фотонное отношение

- Плотность числа барионов сегодня

$$n_B = \frac{\rho_B}{m_p} = \frac{\Omega_B \frac{3H_0^2}{8\pi G}}{m_p} = 1.1 \cdot 10^{-5} \Omega_B h^2 \text{ см}^{-3}$$
$$\Omega_B h^2 \approx 0.02$$

- Плотность числа фотонов сегодня

$$n_\gamma = 407 \text{ см}^{-3}$$

- Их соотношение постоянно; около миллиарда фотонов на барион!

$$\eta \equiv \frac{n_B}{n_\gamma} = 2.7 \cdot 10^{-8} \Omega_B h^2$$

Эта величина чрезвычайно мала, но отлична от нуля.

Она отражает величину барионной асимметрии Вселенной.

Первичный нуклеосинтез: концепция

- ${}^4\text{He}$ больше на 25% - это больше, чем могли произвести звезды
- Вселенная должна была действовать как реактор
- Масштабный коэффициент для энергии в МэВ

$$a \lesssim \frac{\text{meV}}{\text{MeV}} \approx 10^{-9} \ll a_{eq}$$

- в то время было важно только излучение
- Отношение барионов к фотонам η – единственный релевантный параметр

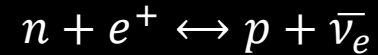
$$\eta = 10^{10} \eta_{10}, \eta_{10} = 273 \Omega_B h^2$$

- Временная шкала в начале эпохи радиационного доминирования

$$t \approx 0.89 \left(\frac{T}{\text{MeV}} \right)^{-2} \text{ c}$$

Первичный нуклеосинтез: тепловое равновесие

Реакции превращения нуклонов при достаточно высоких температурах



При достаточно высокой температуре Вселенной и обилии электронов, позитронов и нейтрино в сравнении с нуклонами, эти реакции обеспечивают сохранение термодинамического равновесия для нуклонов.

Эволюция доли нейтронов

При понижении температуры до $30e9$ К плотность энергии существенно уменьшается (как 4-ая степень температуры) начинают доминировать реакции с образованием более лёгких протонов (распадом нейтронов можно пренебрегать).

Соотношение протонов и нейтронов изменяется в сторону протонов: 62% : 38%.

При падении температуры до $10e9$ К нейтрино выходят из термодинамического равновесия. Реакции $n + \nu_e \leftrightarrow p + e^-$ прекращаются.

Соотношение протонов и нейтронов: 76% : 24%.

Эволюция доли нейтронов

При температуре $3e9$ К начинается синтез ядер гелия, но не напрямую, поскольку плотность нуклонов уже достаточно маленькая для одновременного слияния 4-х нуклонов.

He-4 образуется в результате слияния нуклонов в ядра трития или He-3 с дальнейшим подхватом нуклона.

Гелий-4 мог бы образоваться чуть раньше, но гелий-3 и тритий были ещё не устойчивы. Дейтроны неустойчивы и при этой температуре, поэтому синтез дейтронов и более тяжёлых ядер пока невозможен.

Соотношение протонов и нейтронов: 83% : 17%.

При температуре чуть ниже $1e9$ К Вселенная проходит через «угольное ушко дейтерия» и запускаются реакции его синтеза, а затем и синтеза более тяжёлых элементов.

К этому моменту из-за распада нейтронов соотношение протонов и нейтронов: 87% : 13%.

Закалка нейтронов

Реакции образования нейтронов



Характерный энергетический параметр

$$\Delta m \equiv m_n - m_p = 1.3 \text{ МэВ}$$

Предположим, что имеет место относительно высокая температура

$$T \gtrsim \Delta m, m_e$$

Характерное время между реакциями

$$\tau_{n \leftrightarrow p} = \Gamma_{n \leftrightarrow p}^{-1}$$

Закалка нейтронов

Реакции образования нейтронов

$$\Gamma_n = C_n G_F^2 T^5 \quad \text{где } C_n \sim 1$$

Процессы прекращаются при

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

$$M_{Pl}^* = \frac{M_{Pl}}{1.66\sqrt{g_*}} \quad g_* = 2 + \frac{7}{8} \cdot 4 + \frac{7}{8} \cdot 2 \cdot N_\nu$$

Тогда

$$T_n = \frac{1}{(C_n M_{Pl}^* G_F^2)^{\frac{1}{3}}}$$

$$T_n \approx 1.4 \text{ МэВ}$$

Закалка нейтронов

При более аккуратном вычислении

$$T_n \approx 0.8 \text{ МэВ}$$

Эта величина близка к разности масс протона и нейтрона.

При

$$T \gg \Delta m$$

Концентрация нейтронов в момент закалки была бы сильно подавлена (множителем $\exp(\Delta m/T)$)

При

$$T \ll \Delta m$$

Протонов и нейтронов в плазме было бы поровну. Практически все нуклоны после эпохи нуклеосинтеза связались бы в ядра He-4, а водород во Вселенной отсутствовал бы.

Закалка нейтронов

Оценим остаточную концентрацию нейтронов после закалки

$$n_A = g_A \left(\frac{m_A T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\mu_A - m_A}{T}}$$

Поскольку реакции рождения нейтронов находятся в равновесии

$$\mu_n + \mu_\nu = \mu_p + \mu_e$$

$$\mu_n = \mu_p + \mu_e - \mu_\nu$$

Для релятивистских электронов и позитронов

$$n_{e^-} - n_{e^+} \sim \mu_e T^2$$

Или

$$\frac{n_{e^-} - n_{e^+}}{T} \sim \frac{\mu_e}{T^3}$$

Закалка нейтронов

Оценим остаточную концентрацию нейтронов после закалки

$$n_A = g_A \left(\frac{m_A T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\mu_A - m_A}{T}}$$

Поскольку реакции рождения нейтронов находятся в равновесии

$$\mu_n + \mu_\nu = \mu_p + \mu_e$$

$$\mu_n = \mu_p + \mu_e - \mu_\nu$$

Для релятивистских электронов и позитронов

$$n_{e^-} - n_{e^+} \sim \mu_e T^2$$

Или

$$\frac{n_{e^-} - n_{e^+}}{T^3} \sim \frac{n_p}{T^3} \sim \frac{n_p}{n_\gamma} \sim \frac{\mu_e}{T} \sim 10^{-9}$$

т.е. химический потенциал электронов очень мал.

Закалка нейтронов

Если во Вселенной нет сильной лептонной асимметрии, то

$$n_\nu - n_{\bar{\nu}} \ll n_\nu + n_{\bar{\nu}} \sim T^3$$

Тогда химический потенциал нейтрино $\frac{\mu_\nu}{T}$ также мал.

Т.е. с хорошей точностью выполнено равенство

$$\mu_n = \mu_p$$

Тогда при температуре $T_n \sim 0.8$ МэВ

$$\frac{n_n}{n_p} = \exp\left\{-\frac{\Delta m}{T_n}\right\} \approx 1/5$$

Возраст Вселенной к моменту закалки нейтронов

$$t = \frac{1}{2H(T_n)} = \frac{M_{Pl}^*}{2T_n^2} = 1.2 \text{ с}$$

Закалка нейтронов

Если имеется сильная лептонная асимметрия между нейтрино и антинейтрино, то

$$\frac{n_n}{n_p} = \exp \left\{ -\frac{\Delta m}{T_n} - \frac{\mu_{\nu_e}}{T_n} \right\}$$

Нейтрон-протонное отношение в дальнейшем определит наработанное количество ядер гелия

$$n_{\frac{4}{2}\text{He}} \propto \frac{n_n}{n_p}$$

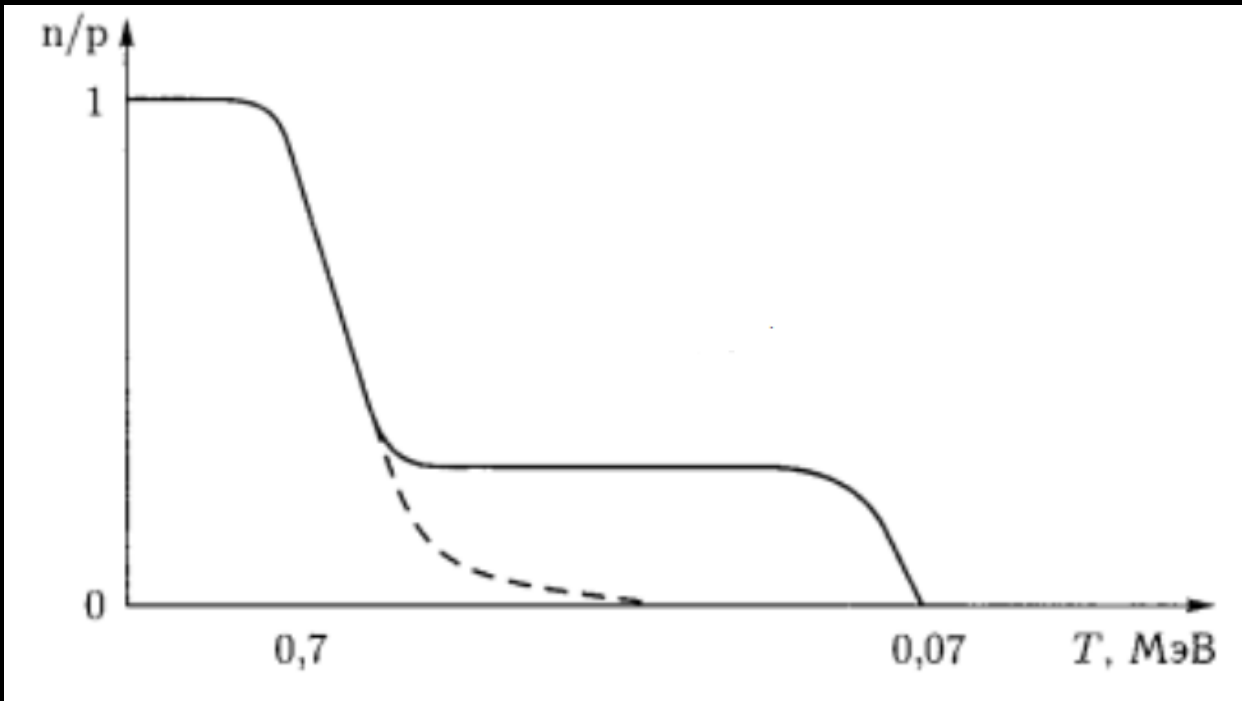
Из сравнения с теорией можно заключить, что отличие отношения от вычисленного не должно быть большим

$$\left| \Delta \left(\frac{n_n}{n_p} \right) \right| \lesssim 0.05$$

Тогда ограничение на химический потенциал электронного нейтрино

$$\left| \frac{\mu_{\nu_e}}{T} \right| \lesssim 0.05$$

Закалка нейтронов

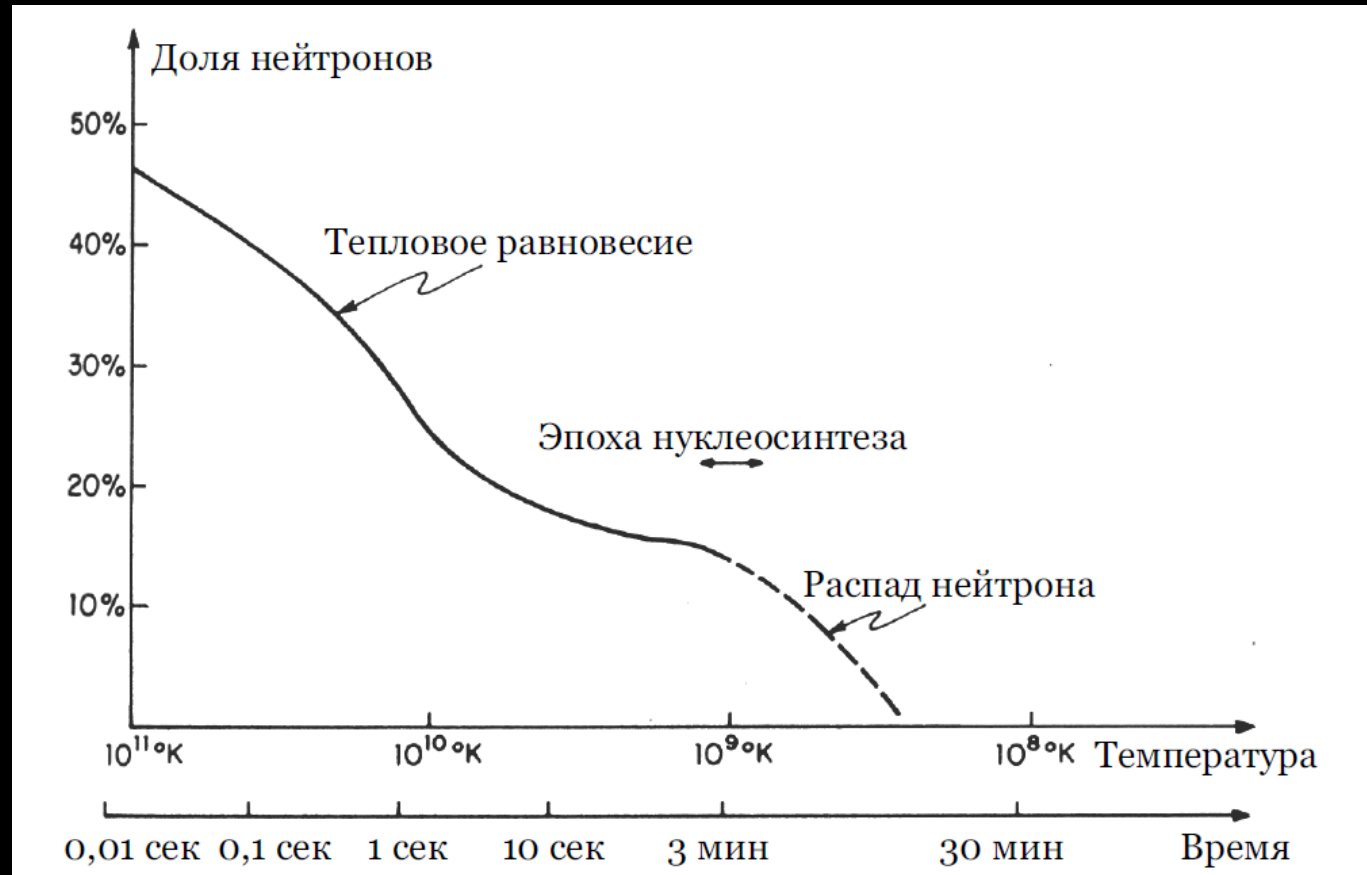


При падении температуры ниже $T_n \approx 0,87 \text{ MeV}$ (при $t \approx 2 \text{ с}$) слабые взаимодействия «вымораживаются» и отношение n/p фиксируется на уровне $1/6$.

Далее протекал свободный распад нейтронов и при их количестве $1/7$ температура оказалась подходящей для объединения в ядра.

Отношение числа нейтронов к числу протонов в зависимости от температуры плазмы в расширяющейся Вселенной. Штриховая линия – равновесная концентрация, плато – закалка нейтронов, падение – переход в легкие ядра

Доля нейтронов на временной шкале



Начало нуклеосинтеза

Ядерные реакции, в которых синтезируются дейтерий, тритий, изотопы гелия и лития достаточно хорошо изучены в земных условиях: температуры, темпы реакций и др.

Однако существуют трудности с предсказанием доли именно первичных элементов, поскольку плохо изучены вероятности их образования в звёздном нуклеосинтезе.

Например, сжигают или синтезируют звёзды гелий-3?

Обычно требуется описать обилие первичных дейтерия, гелия-4 и лития-7.

В 1960-е годы астрономы заметили, что гелий-4 распределён в Галактике сравнительно равномерно в отличие от тяжёлых элементов.

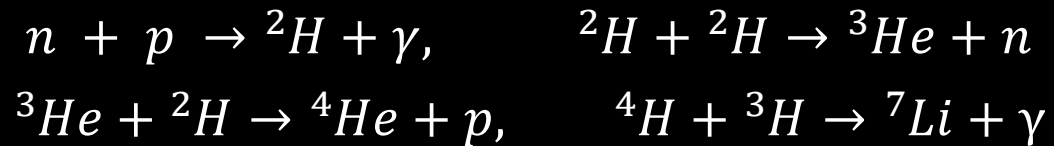
Это согласуется с представлениями о том, что гелий является первичным, а более тяжёлые элементы образовались позднее в звёздном синтезе.

Начало нуклеосинтеза

- Слияние ядер дейтерия имеет решающее значение на фоне фотонов до

$$T_D \approx 78 \text{KeV}$$

- Некоторые цепочки слияния лёгких ядер в последующие ~ 100 с

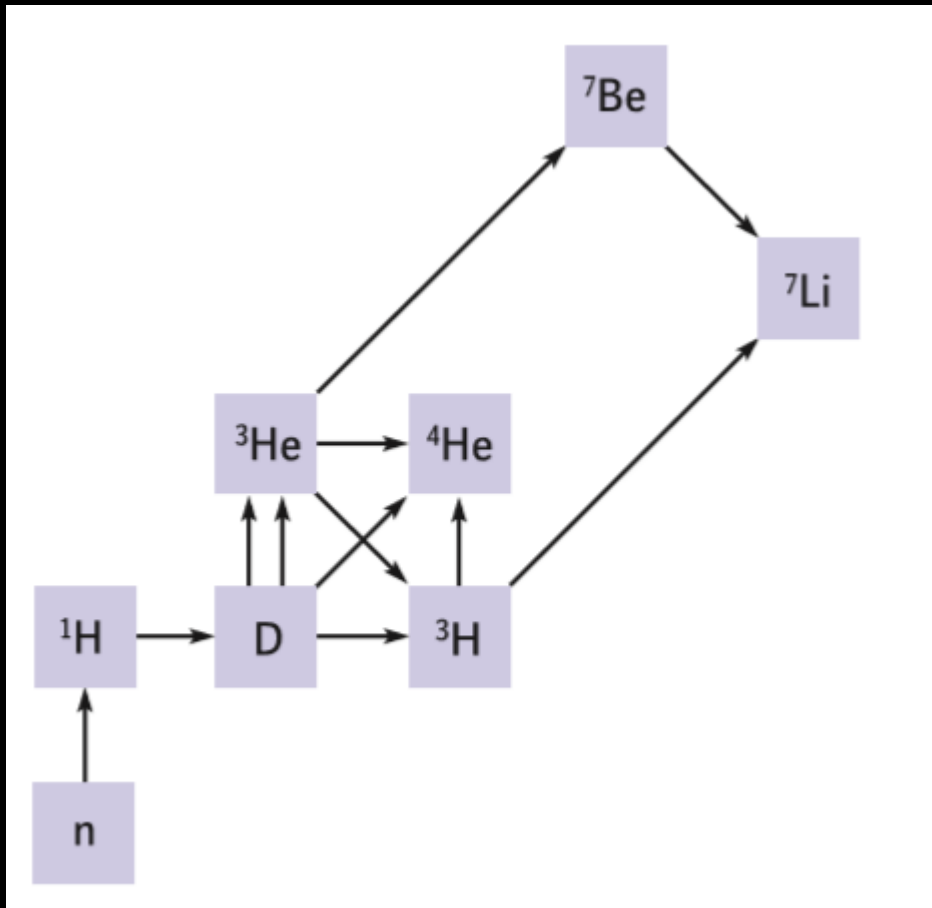


- Происходит синтез более тяжёлых элементов вплоть до лития-7.
- Преобладание гелия зависит от фактора Больцмана

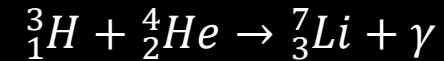
$$\frac{n_n}{n_p} = \exp\left(-\frac{Q}{kT_n}\right)$$

Цепочки первичного нуклеосинтеза

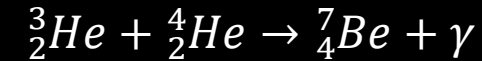
Главные ядерные реакции
первичного нуклеосинтеза.



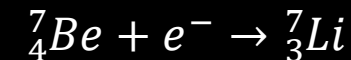
Синтез лития



Синтез бериллия

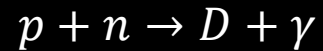


Однако бериллий неустойчив и эффективно испытывает e-захват



Синтез тяжёлых элементов

Образование дейтерия



Во время синтеза более тяжёлых элементов химические потенциалы протона и нейтрона сильно отличаются. Тогда концентрация частиц в пренебрежении их разностью масс

$$n_n = 2 \left(\frac{m_p T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{\mu_n - m_n}{T}}$$

$$n_p = 2 \left(\frac{m_p T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{\mu_p - m_p}{T}}$$

Синтез тяжёлых элементов

Можно показать, что концентрация ядер (A, Z) даётся выражением

$$n_A = n_p^Z n_n^{A-Z} 2^{-A} g_A A^{\frac{3}{2}} \left(\frac{2\pi}{m_p T} \right)^{\frac{3}{2}(A-1)} e^{-\frac{\Delta_A}{T}}$$

$$\Delta_A = Z m_p + (A - Z) m_n - m_A$$

Введя безразмерное число нуклонов, связанных в ядра и плотность числа барионов

$$X_A = \frac{A n_A}{n_B}$$

$$n_B = 0.24 \eta_B T^3$$

Получается т.н. уравнение Саха для доли первичных ядер

$$X_A = X_p^Z X_n^{A-Z} 2^{-A} g_A A^{\frac{5}{2}} \eta_B^{A-1} \left(\frac{2.5T}{m_p} \right)^{\frac{3}{2}(A-1)} e^{-\frac{\Delta_A}{T}}$$

Синтез тяжёлых элементов

Малый энтропийный множитель

$$\eta_B^{A-1} \left(\frac{2.5T}{m_p} \right)^{\frac{3}{2}(A-1)}$$

Может быть подавлен экспонентой только при температурах много ниже энергии связи ядра.

Только с этого момента концентрация ядер перестанет быть мала.

Синтез дейтронов начинается, когда концентрация ядер перестаёт быть малой

$$X_D(T_{NS}) \sim \eta_B \left(\frac{2.5T_{NS}}{m_p} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{\Delta_D}{T_{NS}}} \sim 1$$

Подставляя сюда известную энергию связи и долю барионов, получается энергия, соответствующая моменту начала первичного нуклеосинтеза

$$T_{NS} \approx 65 \text{ кэВ}$$

Возраст Вселенной в период нуклеосинтеза

Возраст Вселенной в этот момент

$$t_{NS} = \frac{1}{2H(T_{NS})} = \frac{M_{Pl}^*}{2T_{NS}^2}$$

$$M_{Pl}^* = \frac{M_{Pl}}{1.66\sqrt{g_*}}$$

$$g_* = 2 + \frac{7}{8} \cdot 4 + \frac{7}{8} \cdot 2 \cdot N_\nu \cdot \left(\frac{4}{11}\right)^{4/3}$$

Для 3-х сортов нейтрино $N_\nu = 3$

$$t_{NS} = 265 \text{ с} \approx 4.5 \text{ мин}$$

Именно столько времени прошло от момента Большого взрыва до появления ядер дейтерия и начала синтеза более тяжёлых элементов.

Синтез тяжёлых элементов

Синтез гелия-4 начинается, когда концентрация ядер перестаёт быть малой

$$X_{\text{He}} = X_p^2 X_n^2 \cdot 8\eta_B^3 \left(\frac{2.5T}{m_p}\right)^{-\frac{9}{4}} e^{-\frac{\Delta_{\text{He}}}{2T}} \sim 1$$

Находя отсюда концентрацию нейтронов, получается концентрация произвольного ядра, выраженная через энергию связи ядра гелия-4 (протонов в плазме больше, чем нейтронов, поэтому $X_p \sim 1$)

$$X_A = \left[\eta_B \left(\frac{2.5T}{m_p}\right)^{\frac{3}{2}} \right]^{\frac{3}{2}Z - \frac{1}{2}A - 1} \exp\left\{ \frac{\Delta_A - \frac{\Delta_{\text{He}}(A - Z)}{2}}{T} \right\}$$

$$X_A \simeq 10^{7.4(A+2-3Z)} \exp\left\{ \frac{\Delta_A - \frac{\Delta_{\text{He}}(A - Z)}{2}}{T} \right\}$$

Знак показателя экспоненты зависит от энергии связи ядра на нейтрон. Эта величина максимальна для ядра гелия-4 и именно с них энергетически выгодно начинать синтез.

Однако синтез задержан до тех пор, пока не образуются дейтроны в достаточном количестве, поскольку 3-х или 4-х частичные реакции сильно подавлены даже в ранней Вселенной.

Синтез тяжёлых элементов

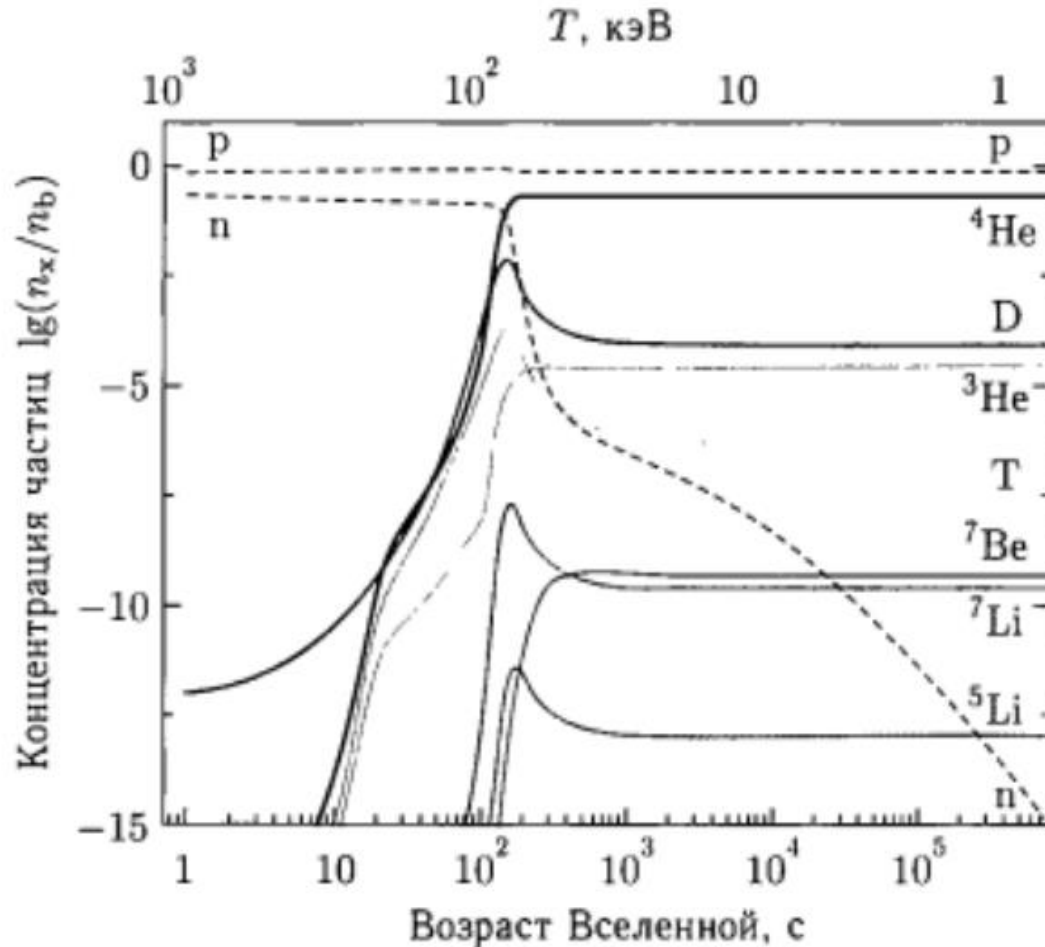
$$n_{{}^4\text{He}}(T_{NS}) = \frac{1}{2} n_n(T_{NS})$$

$$\frac{n_n(T_{NS})}{n_p(T_{NS})} \approx \frac{1}{5} \cdot e^{-(t_{NS}/\tau_n)} \approx \frac{1}{7}$$

$$X_{{}^4\text{He}} = \frac{m_{{}^4\text{He}} \cdot n_{{}^4\text{He}}(T_{NS})}{m_p (n_p(T_{NS}) + n_n(T_{NS}))} = \frac{2}{\frac{n_n(T_{NS})}{n_p(T_{NS})} + 1} \approx 25\%$$

$$\Delta N_{\nu,eff} \leq 1, \quad T \sim 1 \text{ МэВ}$$

Синтез тяжёлых элементов



Процесс первичного нуклеосинтеза в космологической стандартной модели [Ivanchik et al., 2001].

Синтез тяжёлых элементов

Для генерации более массивных ядер не хватает времени, Вселенная быстро расширяется и плотность частиц убывает.

Если бы плотность оставалась большой, как, например, в звёздах, было бы возможно образование и более тяжёлых элементов.

Космологические параметры

Концентрация ядер «на выходе» чувствительна к двум космологическим параметрам: плотности пылевой фазы при заданной температуре и полной плотности энергии всех релятивистских частиц (радиационной фазы).

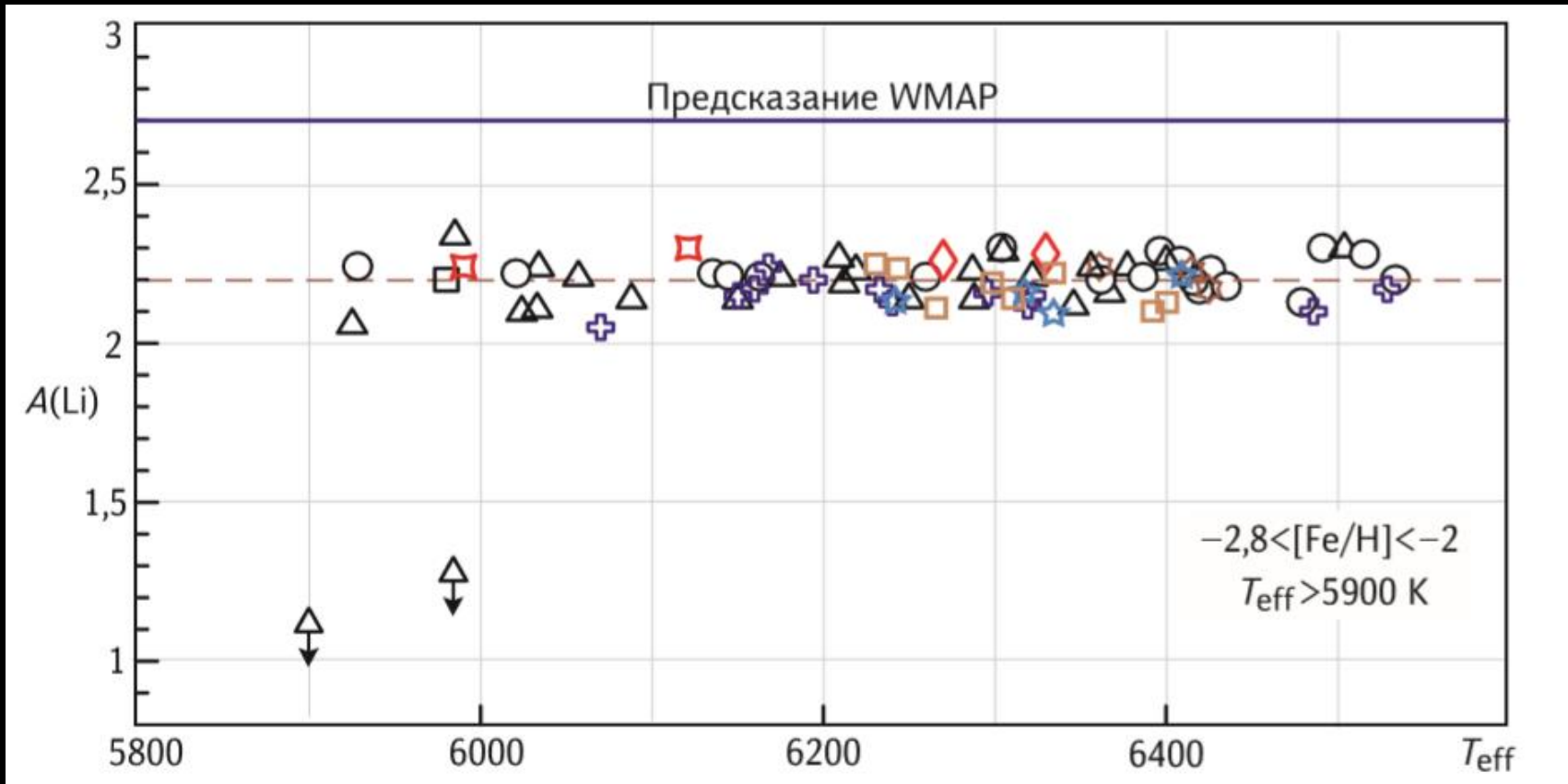
Через уравнение Фридмана они определяют темп расширения радиационно-доминированной Вселенной и, следовательно, изменение температуры плазмы со временем в эпоху нуклеосинтеза.

Поскольку температура излучения в каждый момент известна, всё сводится к двум параметрам: количеству барионной материи на один фотон и отношению плотности релятивистских частиц в эпоху первичного нуклеосинтеза к полной плотности фотонов и нейтрино 3-х ароматов.

Наблюдаемая распространённость первичных элементов Литий

- Изменение концентрации первичного лития:
 - фрагментация более тяжёлых элементов космическими лучами;
 - конвективный перенос из фотосферы вглубь звёзд.
- Как определить количество первичного лития?
 - наблюдение заведомо старых звёзд;
 - наблюдение звёзд со спокойной и ламинарной атмосферой (массивные и горячие).
- Моника и Франсуа Спит наблюдали звёзды гало с $[Fe/H] < -2$ и $T_{eff} > 5900K$.

Наблюдаемая распространённость первичных элементов Литий



Проблемы с производством лития — плато Спита в сравнении с предсказаниями стандартной Λ CDM-космологии (Spite et al., 2012). Разные значки соответствуют данным разных авторов.

Наблюдаемая распространённость первичных элементов Литий

- $A(\text{Li})=2.2$ – соответствует минимальному, но не самому вероятному значению, предсказываемому теорией Лямбда-CDM.
- Некоторые оценки дают от 0.1 до 0.3 убыль ядер лития в фотосферах старых звёзд, т.е. распространённость первичных элементов лития может быть 2.3-2.5.
- Наблюдается отличие от предсказаний по наблюдениям реликтового фона.
- Выбор значения доли барионов требует дополнительной информации о распространённости других ядер.

Наблюдаемая распространённость первичных элементов Гелий

- Изменение концентрации первичного гелия:
 - нуклеосинтез в звёздах (содержание растёт);
 - оценки дают различное обогащение: от 2 до 5 раз.
- Как определить количество первичного лития?
 - наблюдение химически не эволюционировавших областей.
- Карликовые неправильные галактики (BCDG, Blue Compact Dwarf Galaxies) богаты газом, в котором легко рассеиваются продукты нуклеосинтеза звёзд и бедны тяжёлыми элементами, т.е. не прошли стадию химической эволюции.
- Галактика IZw18 с $Z \approx 0.02Z_c$
- Сегодня обнаружены несколько десятков галактик с $Z < 0.01Z_c$

Наблюдаемая распространённость первичных элементов Гелий

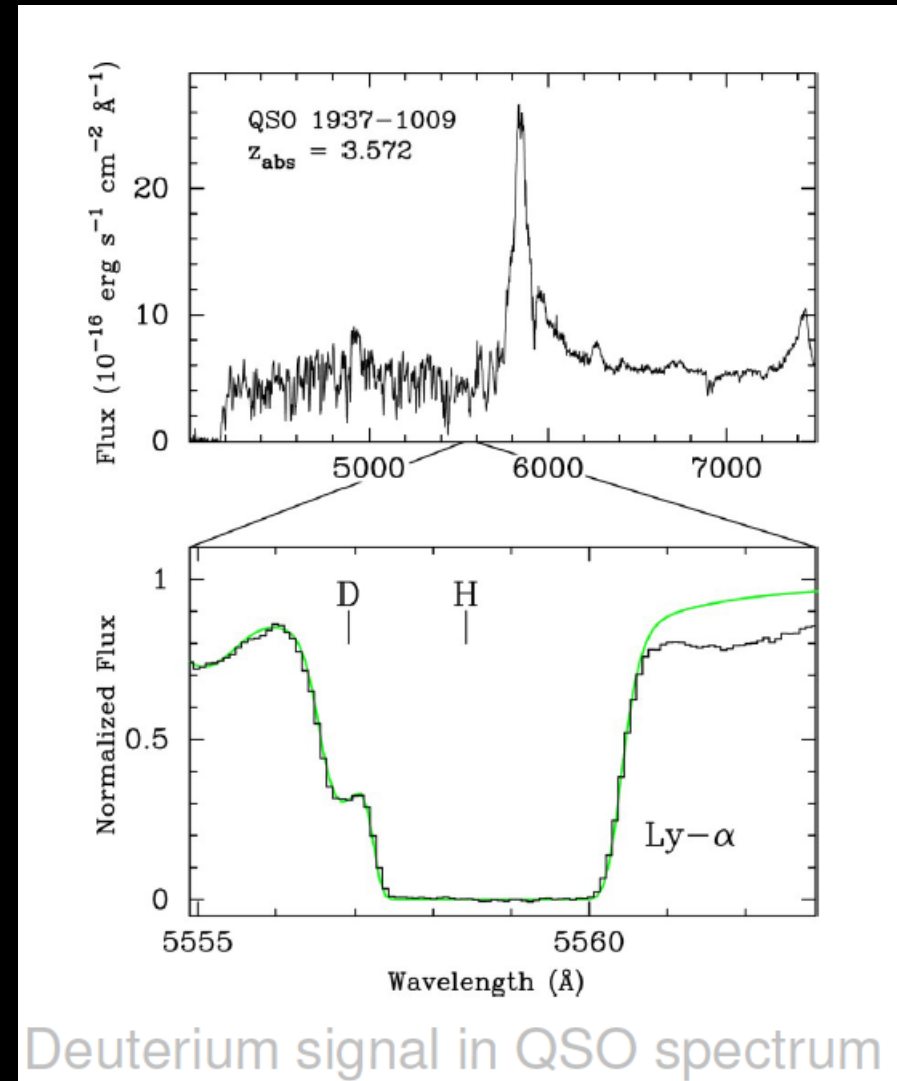
- Наблюдается интенсивность эмиссионных линий ионизованного гелия.
- Строится зависимость распространённости гелия Y от среднего заряда галактики Z , которая экстраполируется к 0.
- Результаты на одном и том же ограниченном наборе галактик:
 - $Y=0.245\pm 0.003$ (Изотов, Туан, 1998)
 - $Y=0.238\pm 0.002$ (Peimbert, 2002)
- Систематические отклонения:
 - столкновение возбуждённых и де-возбуждённых ядер гелия;
 - неточное знание доли нейтрального гелия в межзвёздной среде;
 - линии эмиссии молодого звёздного населения;
 - ...

Наблюдаемая распространённость первичных элементов Дейтерий

- Изменение концентрации первичного гелия:
 - нуклеосинтез в звёздах (содержание убывает);
 - реальные сегодняшние измерения – лишь нижний предел содержания дейтерия.
- Как определить количество первичного лития?
 - наблюдение околосолнечного галактического пространства, $\frac{D}{H}(t = t_0) = (1.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-5}$;
 - изучение метеоритов, лунного грунта, $\frac{D}{H}(t = 4.5 \text{ млрд. лет}) = (2.25 \pm 0.25) \cdot 10^{-5}$;
- Джон Уэбб предложил в 1991 году измерять содержание первичного дейтерия по линиям поглощения Ly-альфа далёких квазаров ($z > 3$).

Наблюдаемая распространённость первичных элементов Гелий

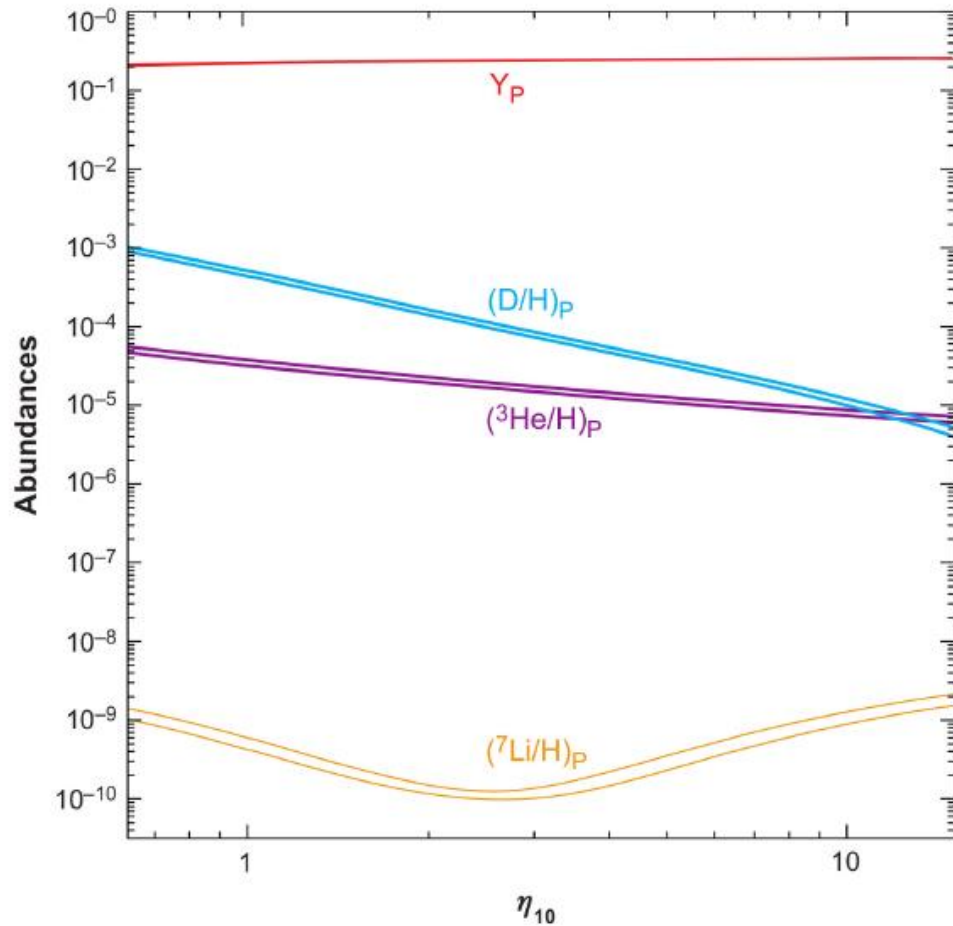
- Как и наблюдаемая линия поглощения водорода, должна существовать и линия поглощения дейтерия, но немного смещённая из-за большей массы ядра (т.н. изотопический сдвиг).



Наблюдаемая распространённость первичных элементов Гелий

- Результаты наблюдения:
 - Carswell, Webb et al. , $\frac{D}{H} = 2 \cdot 10^{-4}$; нереалистично много, невозможно объяснить ни одной теоретической моделью.
 - Burles, Tyler et al. , $\frac{D}{H} = 3 \cdot 10^{-5}$;
- Современные оценки дают $\frac{D}{H} = (2.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$

Первичный нуклеосинтез: расчёты



From Steigman 2007

Можно ли согласовать между собой наблюдения первичного обилия каждого из этих элементов при одном и том же значении параметра η ?

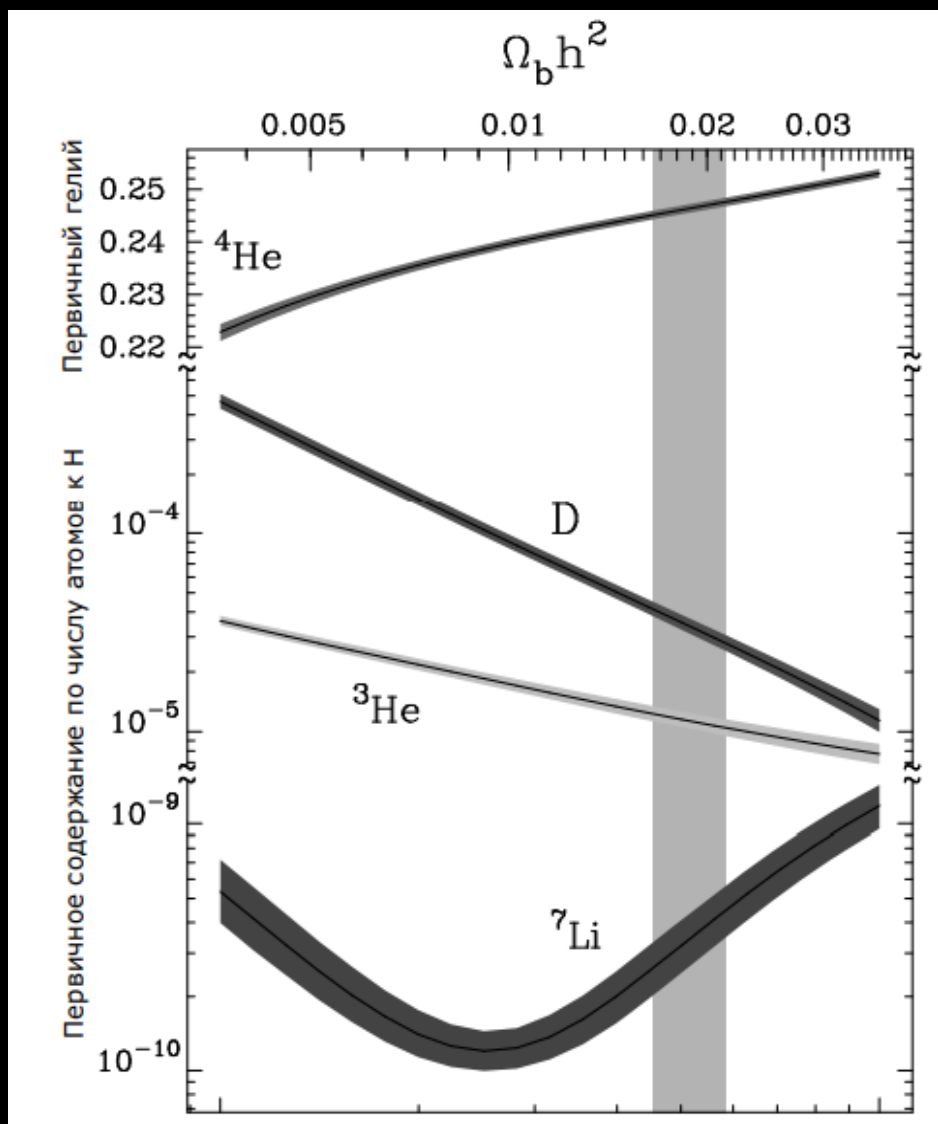
Наблюдаемому значению Li соответствуют два значения: 1.7 и 4.

1.7 согласуется с Уэббом и Пеймбертом
4 согласуется с Барлетсом и Изотовым

! Теория первичного нуклеосинтеза работает, но какое значение параметра верное?

Нужен ещё способ.

Первичный нуклеосинтез: расчёты и измерения

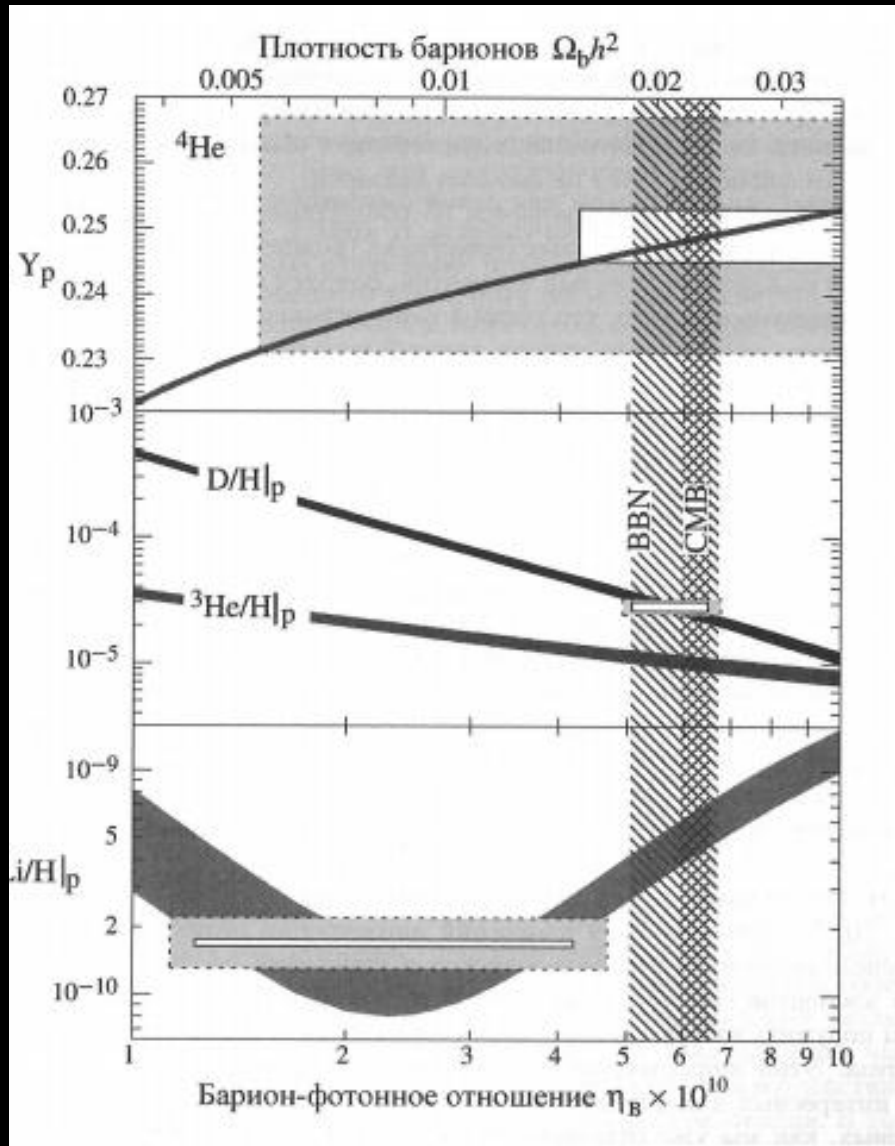


Расчет химического содержания ядер легких элементов, образовавшихся в результате первичного нуклеосинтеза (для гелия — процент массы по отношению к массе водорода, для других элементов — число ядер по отношению к числу протонов), как функция плотности барионного вещества $\Omega_b h^2$.

Вертикальная полоса соответствует наблюдениям содержания легких элементов по спектрам далеких квазаров.

Доля барионов $\eta_{10} \approx 5$.
Ширина полосы достаточно большая, но исключить вариант 1.7 позволяет.

Первичный нуклеосинтез: расчёты и измерения



Массовые доли элементов по отношению к водороду.

Линии – результаты вычислений, прямоугольники – данные измерений, вертикальная полоса – ограничение по анизотропии реликтового излучения.

Доля барионов $\eta_{10} \approx 6.2$.

Первичный нуклеосинтез: расчёты и измерения

При этом значении предсказание модели первичного нуклеосинтеза в рамках Лямбда-CDM

$$\frac{D}{H} = 2.6 \cdot 10^{-5}$$

согласуется с наблюдениями

$$Y_{He} = 0.278$$

превышает наблюдаемое значение, даже с учётом последних наблюдений 0.255 ± 0.003 (Ю.И. Изотов и др. 2014)

результат соответствует эффективному числу родов нейтрино 3.54 ± 0.35

$$\frac{{}^7Li}{H} = 5.24 \cdot 10^{-10}$$

$$A({}^7Li) \approx 2.8$$

в 4 раза превышает плато Спитов

Первичный нуклеосинтез: резюме

- Преобладание нейтронов $X_n \approx 0.17$ при вымораживании
- Нейтронный распад до начала термоядерного синтеза при $t_D \approx 150$ с уменьшает до $X_n \approx 0.14$ что значит преобладание ${}^4\text{He}$ $Y \approx 0.28$

- D - самый надежный барометр; измеренное превышение

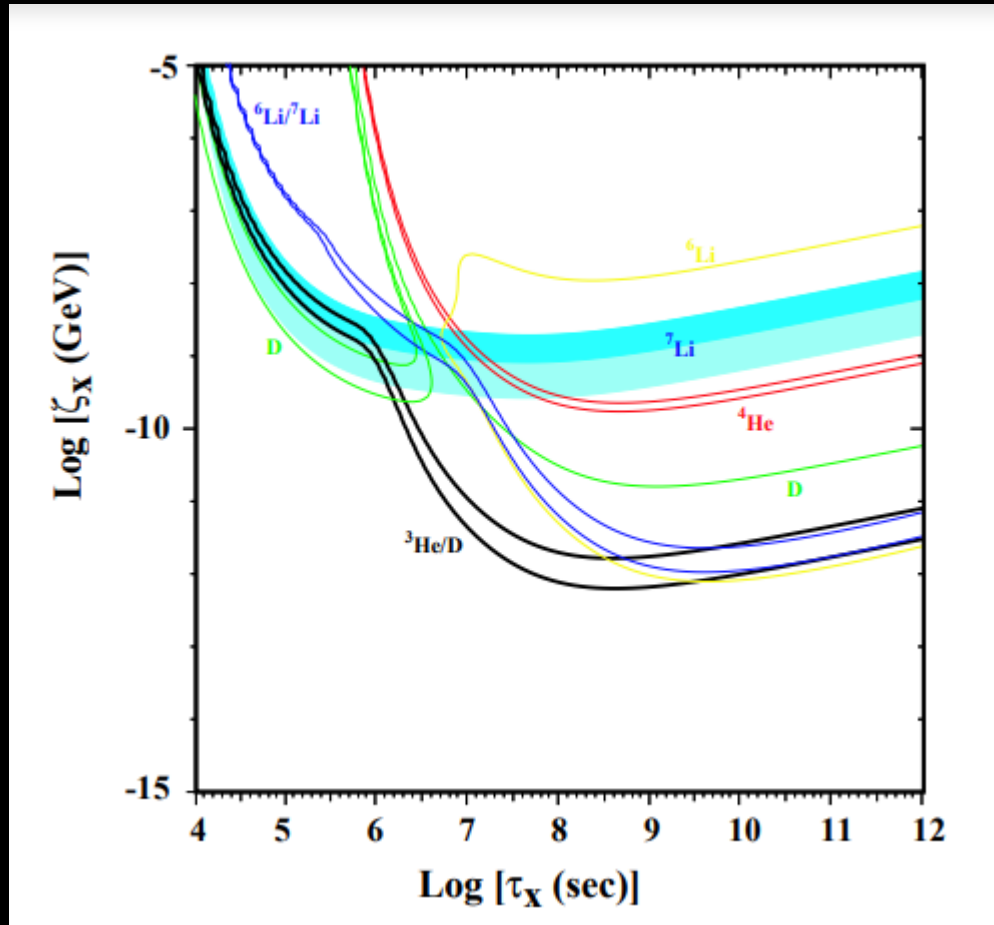
$$\frac{n_D}{n_H} = (2.68_{-0.25}^{+0.27}) \cdot 10^{-5}$$

- содержание D и ${}^3\text{He}$ уменьшается с увеличением ${}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$

- измеренное преобладание элементов дает

$$0.0207 \lesssim \Omega_B h^2 \lesssim 0.0234$$

Первичный нуклеосинтез: тёмная материя

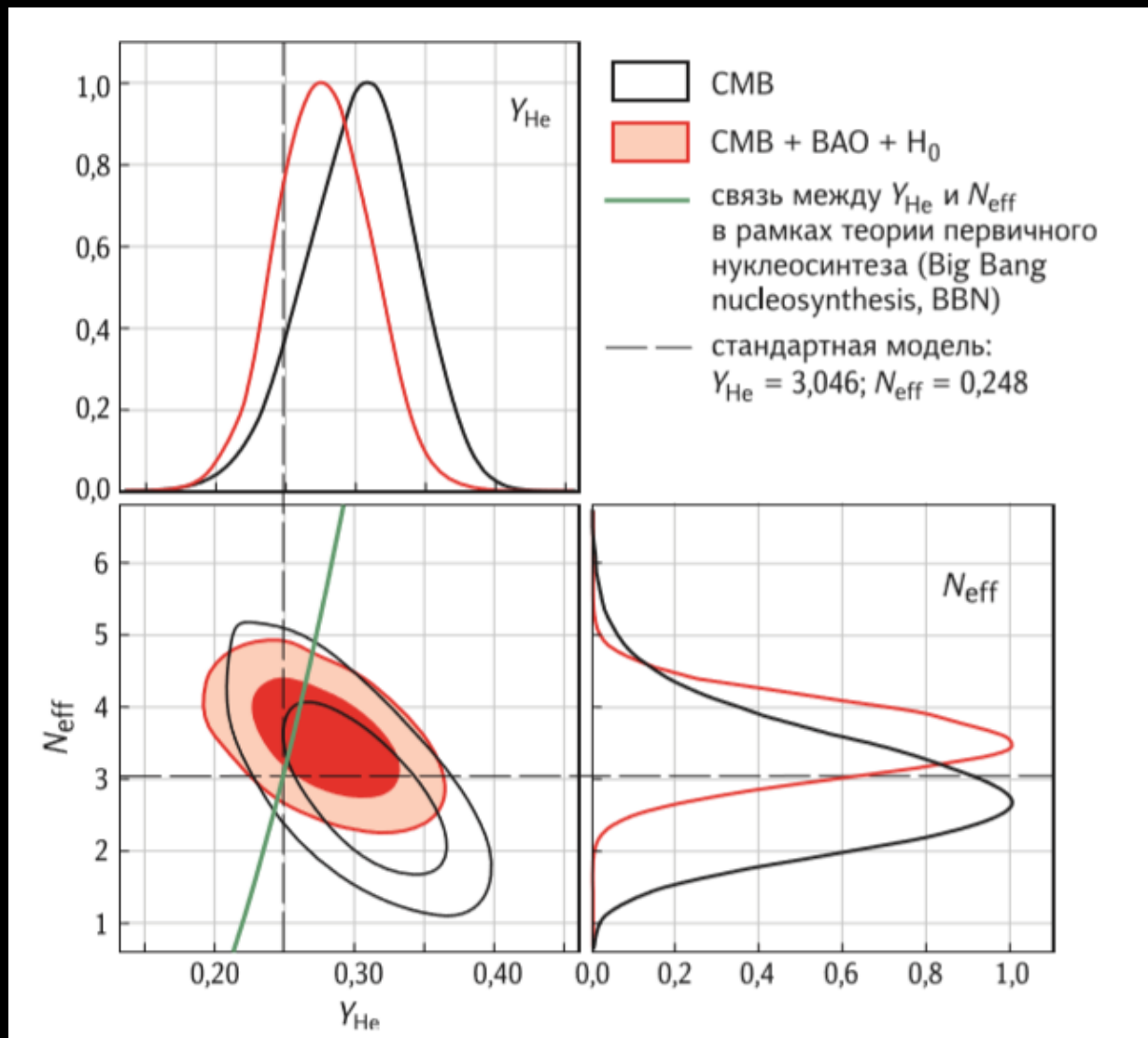


Первичный нуклеосинтез: тёмная материя

Влияние тёмной материи на протекание первичного нуклеосинтеза:

- вклад в общую плотность барионов
- влияние на скорость расширения Вселенной и время протекания реакций
- распад с образованием гамма или адронов, разрушающих образованные элементы

Первичный нуклеосинтез: нейтрино



Ограничения на первичное содержание гелия и эффективное количество сортов нейтрино на уровнях вероятности 68% и 95%.

CMB — cosmic microwave background; BAO — baryon acoustic oscillation, найденные по угловому и радиальному распределению галактик в пространстве.

Похоже, нужен четвертый тип нейтрино! (Hinshaw, 2013)