

Влияние гамма излучения на изотопический состав межзвездной среды.

В.В. Клименко^{1,3}, А.В. Иванчик^{1,2,3} и Д.А. Варшалович^{1,2,3}

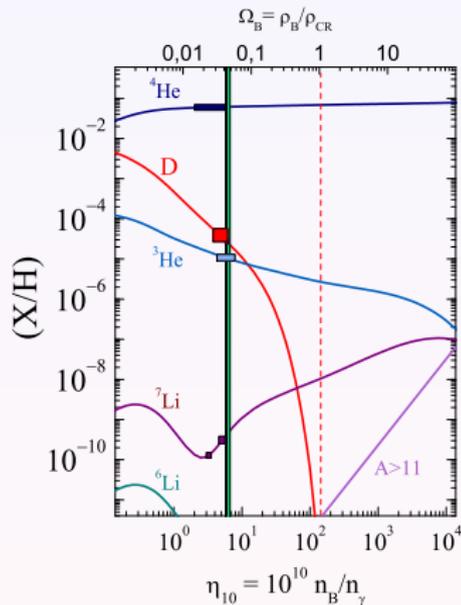
¹Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе

²Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

³Санкт-Петербургский Государственный Академический Университет

30 сентября 2010 г

- Определение отношения количества легких элементов (D , ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ${}^6,{}^7\text{Li}$) к количеству водорода в барионном веществе - один из способов оценки барионного содержания Вселенной Ω_b .
- Согласно Стандартной модели состав среды, сформированный за счет первичного нуклеосинтеза, определяется единственным параметром - относительной плотностью барионного вещества Ω_b .
- D наиболее чувствителен к изменению параметра Ω_b .



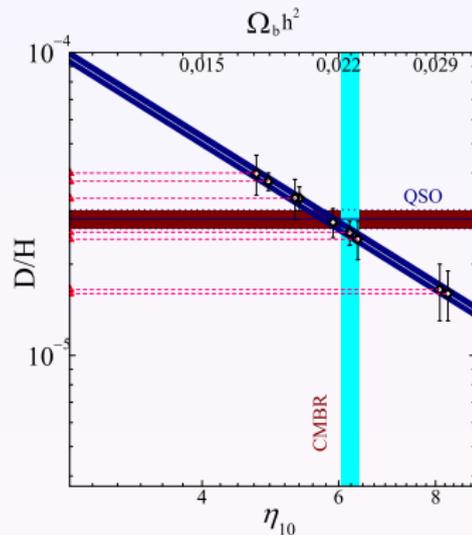
Проблема первичного вещества. D/H

Разброс результатов отношения D/H в первичных облаках превышает наблюдательные погрешности отдельных измерений

Большая дисперсия результатов объясняется неучетом систематических ошибок, величины которых трудно оценить (Steigman 2007).

Эволюция D после BBN проста: он только разрушается → нет физической теории, которая бы объясняла несоответствие экспериментальных данных. (Steigman 2007).

В работе (N.Yu. Gnedin & J.P. Ostriker, 1992) указывается на эффект влияния фотоядерных реакций на изменение состава межзвездной среды после завершения первичного нуклеосинтеза.



В спектре излучения квазара присутствует жесткое рентгеновское и гамма-излучение;

Высокоэнергичные гамма-кванты взаимодействуют с межзвездным веществом, изменяя изотопический состав этого вещества.

Состав среды (Steigman 2007).

X_D	D/H	2.68×10^{-5}
X_{3He}	${}^3\text{He}/\text{H}$	1.06×10^{-5}
X_{4He}	${}^4\text{He}/\text{H}$	7.90×10^{-2}
X_{7Li}	${}^7\text{Li}/\text{H}$	4.30×10^{-10}

Система уравнений для концентраций легких элементов.

$$\frac{dX_{4He}}{dt} = - \left(k_{4He \rightarrow 3H} + k_{4He \rightarrow 3He} + k_{4He \rightarrow D+D} + k_{4He \rightarrow D+pn} + k_{4He \rightarrow 2p+2n} \right) X_{4He} \quad (1)$$

$$\frac{dX_{3H}}{dt} = - \left(k_{3H \rightarrow 3He} + k_{3H \rightarrow D} + k_{3H \rightarrow 2n+p} \right) X_{3H} + k_{4He \rightarrow 3H} X_{4He} \quad (2)$$

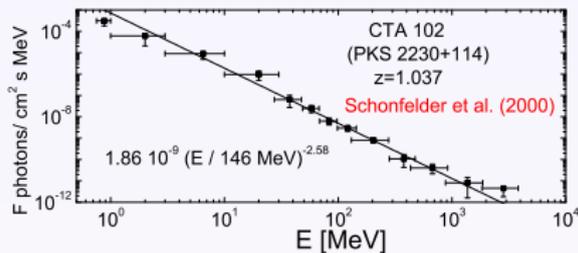
$$\frac{dX_{3He}}{dt} = - \left(k_{3He \rightarrow D} + k_{3He \rightarrow n+2p} \right) X_{3He} + k_{4He \rightarrow 3He} X_{4He} + k_{3H \rightarrow 3He} X_{3H} \quad (3)$$

$$\frac{dX_D}{dt} = -k_{D \rightarrow p+n} X_D + \left(2 \cdot k_{4He \rightarrow D+D} + k_{4He \rightarrow D+pn} \right) X_{4He} + k_{3He \rightarrow D} X_{3He} + k_{3H \rightarrow D} X_{3H} \quad (4)$$

Скорости реакций

$$k = \int_Q^{\infty} \sigma(E) F_{\gamma}(E) dE \quad (5)$$

$$F_{\gamma}(E) = F_0 \left(\frac{E}{\varepsilon_0} \right)^{-\alpha} \frac{\text{ФОТОНОВ}}{\text{см}^2 \text{ с МэВ}} \quad (6)$$



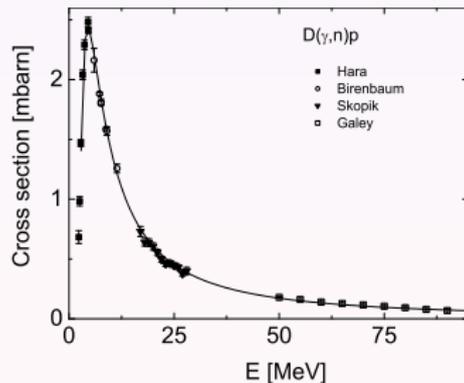
Для **дейтерия** - наиболее простой ядерной системы - сечение взаимодействия можно вычислить аналитически (Берестецкий, Лифшиц, Питаевский, Квантовая электродинамика):

$$\sigma(E) = \sigma_0 Q^{3/2} \frac{(E - Q)^{3/2}}{E^3} \quad (7)$$

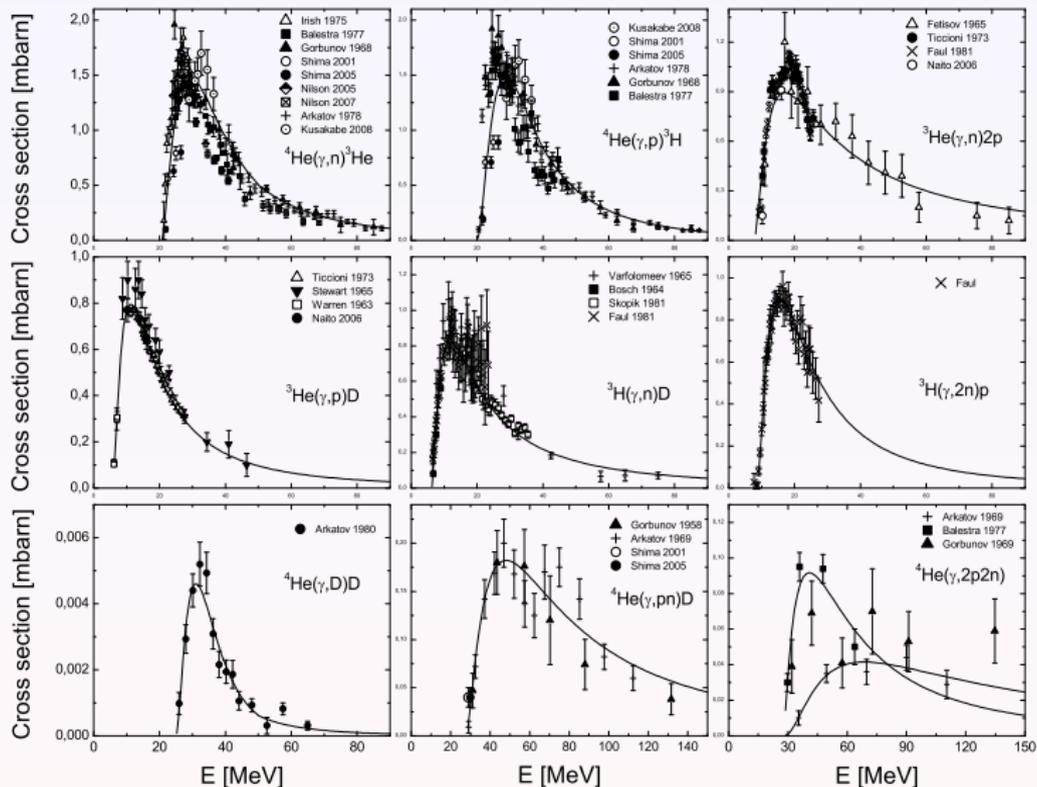
Теоретические расчеты сечений других элементов недостаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными (Джибути и др. 1965, Балестра и др. 1977).

$$\sigma(E) = \sigma_0 Q^{\gamma-\beta} \frac{(E - Q)^{\beta}}{E^{\gamma}} \quad (8)$$

где σ_0 , β и γ - подгоночные параметры.



Сечения реакций. Аппроксимация



Зависимость скоростей реакций от наклонов спектра

Динамика системы определяется **соотношением** между скоростями реакций, определяющих **наработку** или **распад** элемента.

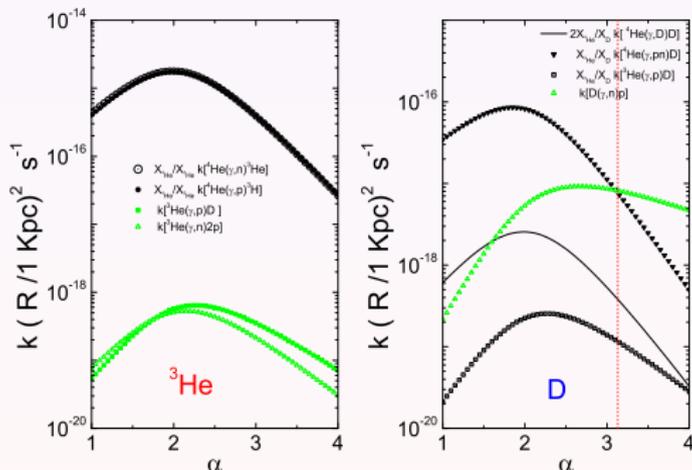
$$k = 10^{-27} \left(\frac{\sigma_0}{1 \text{ мбарн}} \right) (F_0 \varepsilon_0^{-\alpha}) \left(\frac{Q}{1 \text{ МэВ}} \right)^{1-\alpha} \int_1^{1000/Q} \frac{(x-1)^\beta}{x^{\gamma+\alpha}} dx \quad (9)$$

$$\frac{L_\gamma}{4\pi R^2} = \int_1^{1000} F_0 \left(\frac{E}{\varepsilon_0} \right)^{-\alpha} E dE \quad (10)$$

Для квазара с **заданной** светимостью в диапазоне от 1-1000 МэВ $L_\gamma = 10^{49}$ эрг/с, получаем зависимость скоростей реакций от **жесткости спектра** α .

D при $\alpha \geq 3.13$
только **разрушается**.

^3He при любых α
только **нарабатывается**.

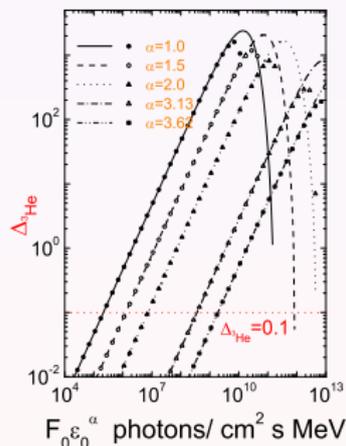
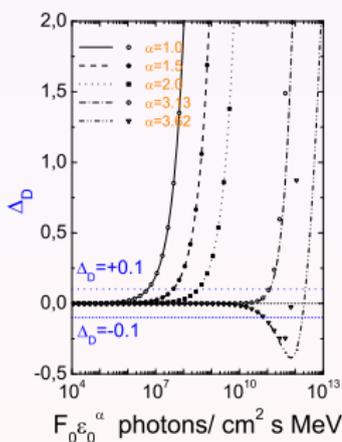
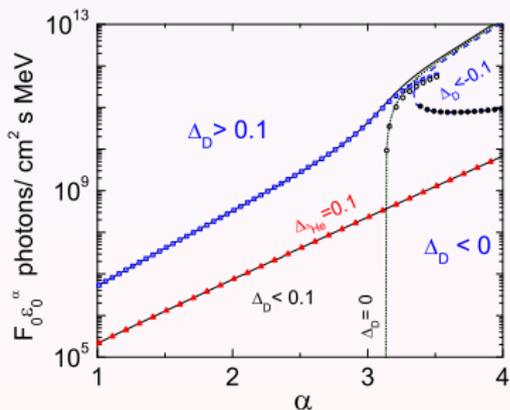


Эволюция системы

Для времени облучения межзвездного вещества излучением квазара $t_0=1$ млрд. лет изменение концентраций определяется единственным параметром $F_0 \varepsilon_0^\alpha$ - величиной плотности потока излучения на энергии 1 МэВ

$$\Delta(X) = \frac{X(t) - X(0)}{X(0)} \simeq f_1(\alpha) \left(F_0 \varepsilon_0^\alpha 10^{-27} t \right) + f_2(\alpha) \left(F_0 \varepsilon_0^\alpha 10^{-27} t \right)^2 \quad (11)$$

На диаграмме 'плотность потока на энергии 1 МэВ - наклон спектра' определены области 10-процентного изменения содержания элементов в среде.



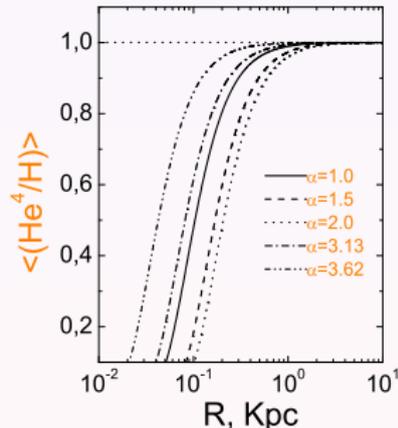
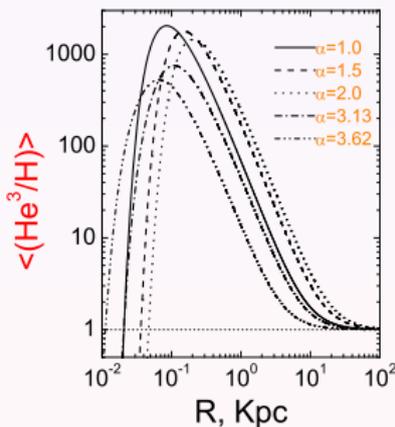
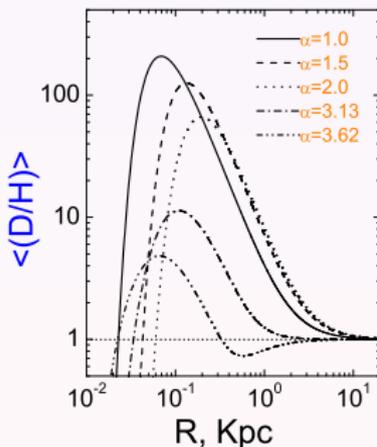
Эффективный радиус воздействия

Для заданного $t_0 = 1$ млрд. лет и светимости квазара $L_\gamma = 10^{49}$ эрг/с определены профили концентраций элементов по мере удаления облучаемой области от квазара.

$$\left\langle \left(\frac{X}{H} \right) \right\rangle = \frac{\int_0^R X(r) 4\pi r^2 dr}{\int_0^R X(0) 4\pi r^2 dr}$$

←

Учитывая процессы диффузии и переноса вещества в среде, рассматриваем усредненное по объему значение.



Общая статистика

Для квазара светимости $L_\gamma = 10^{49}$ эрг/с в диапазоне 1-1000 МэВ
и времени облучения среды $t_0 = 1$ млрд. лет:

D Возрастает до 100 раз на расстояниях $\simeq 0.1$ Кпс
Увеличивается на 10-процентов на расстояниях $\simeq 10$ Кпс

^3He Возрастает до 1000 раз на расстояниях $\simeq 1$ Кпс
Увеличивается на 10-процентов на расстояниях $\simeq 50$ Кпс

^4He Уменьшается на 10-процентов на расстояниях $\simeq 0.5$ Кпс

При этом в задаче проявляется автомодельность
решения в **перенормировке масштаба** R для
разных L.

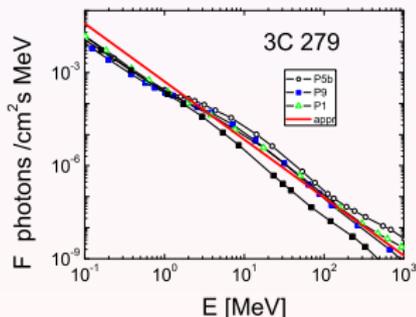
$$R_{\text{нов}} = R_{\text{стар}} \left(\frac{L_{\text{нов}}}{L_{\text{стар}}} \right)^{(1/2)}$$

QSO 3C 279 (Hartman et al. 2001)

$$F_0 = 4.25 \times 10^{-9}, \varepsilon_0 = 523, \alpha = 0.87 \quad (12)$$

$$z = 0.538, \Omega_m = 0.274, \Omega_\Lambda = 0.726, h = 0.705 \quad (13)$$

$$L_\gamma = 10^{49} \text{ эрг/с} \quad (14)$$



Заключение

- Аппроксимированы сечения основных фотоядерных реакций, происходящих в межзвездной среде под влиянием гамма-излучения.
- Определены скорости реакций в зависимости от расстояния до квазара, его светимости в гамма-диапазоне и жесткости спектра.
- Для заданного значения наклона спектра определены пороговые значения спектрального потока, соответствующие 10-процентному изменению относительного содержания D и ^3He в среде.
Эффективный радиус воздействия излучения квазара светимостью 10^{49} эрг/с в диапазоне 1-1000 МэВ - порядка 1 Кпс.
- Влияние фотоядерных реакций может быть важно для оценки первичного содержания легких элементов.
- Данный эффект может быть использован для регистрации потухших источников интенсивного гамма-излучения.