

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Внегалактическая астрономия

Научная сессия Отделения физических наук  
Российской академии наук, 28 октября 2009 г.

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004e.0415

28 октября 2009 г. в конференц-зале Института физических проблем им. П.Л. Капицы РАН состоялась научная сессия Отделения физических наук РАН, "Внегалактическая астрономия".

Объявленная на web-сайте ОФН РАН [www.grad.ac.ru](http://www.grad.ac.ru) повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Варшалович Д.А., Иванчик А.В., Балашев С.А.** (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН). *Первичный нуклеосинтез и HD/H<sub>2</sub> в молекулярных облаках, существовавших 12 млрд лет назад.*

2. **Аптекарь Р.Л., Голенецкий С.В., Мазец Е.П.** (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН). *Исследования космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров в экспериментах ФТИ КОНУС.*

3. **Бескин Г.М., Карпов С.В.** (Специальная астрофизическая обсерватория РАН), **Бондарь С.Ф.** (Научно-исследовательский институт прецизионного приборостроения). *Открытие быстрой оптической переменности гамма-всплесков GRB 080319B и перспективы астрономического мониторинга высокого временного разрешения.*

4. **Старобинский А.А.** (Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН). *Экспериментальное и теоретическое исследование тёмной энергии во Вселенной.*

5. **Засов А.В., Сильченко О.К.** (Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова). *Диски галактик и их эволюция.*

6. **Бурдюжа В.В.** (Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН). *Тёмные компоненты во Вселенной.*

Статьи, написанные на основе докладов 1–3, 5 и 6, публикуются ниже. Расширенное содержание доклада А.А. Старобинского будет представлено в виде обзора, который планируется опубликовать в одном из последующих выпусков УФН.

PACS numbers: 26.30. – k, 26.35. + c, 98.38.Dq  
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004f.0415

## Первичный нуклеосинтез дейтерия и содержание молекул HD/H<sub>2</sub> в межзвёздных облаках, существовавших 12 млрд лет назад

Д.А. Варшалович, А.В. Иванчик,  
С.А. Балашев, П. Петижан

### 1. Первичный нуклеосинтез

В последние годы широко обсуждается вывод о том, что во Вселенной доминируют ранее неизвестные формы материи и энергии — холодная тёмная материя (CDM) и тёмная энергия (DE), а обычное вещество, состоящее из барионов (протонов и нейтронов), составляет лишь 4–5 % от полной плотности энергии. Последнее утверждение основывается на детальном количественном анализе первичного нуклеосинтеза и на тщательном измерении содержания дейтерия в межзвёздном веществе наиболее далёких галактик и протогалактик [1, 2].

Как известно, на ранней стадии космологической эволюции наша Вселенная пережила краткую эпоху, когда температура понизилась настолько, что стали эффективными реакции синтеза атомных ядер из протонов и нейтронов. Вся Вселенная тогда представляла собой единый термоядерный реактор, заполненный почти однородной, полностью ионизованной плазмой с  $T \sim 10^9 - 10^8$  К. Однако та эпоха была столь краткой, что успели образоваться (в заметных количествах) лишь наиболее лёгкие ядра: <sup>2</sup>D, <sup>3</sup>T, <sup>3</sup>He, <sup>4</sup>He, <sup>6</sup>Li, <sup>7</sup>Li, <sup>7</sup>Be. Относительное содержание образовавшихся в процессе первичного нуклеосинтеза реликтовых ядер можно рассчитать, поскольку скорости всех соответствующих реакций хорошо известны. Единственным свободным параметром расчёта является относительная концентра-

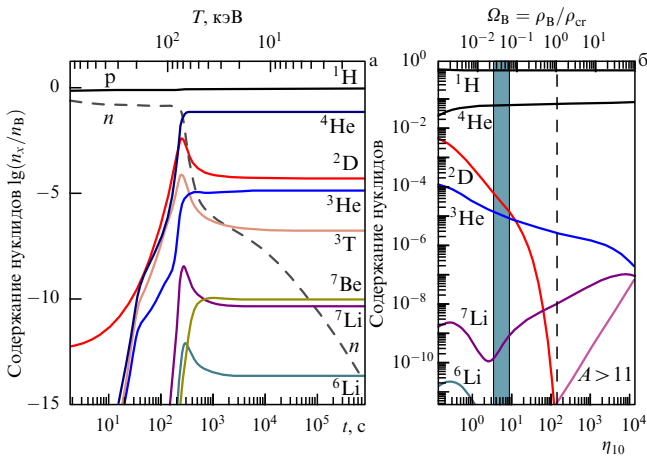
Д.А. Варшалович, А.В. Иванчик. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ

E-mail: varsh@astro.ioffe.ru

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, РФ

С.А. Балашев. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ

П. Петижан (P. Petitjean). Institut d'Astrophysique de Paris, France



**Рис. 1.** Эпоха первичного нуклеосинтеза. (а) Изменение состава вещества со временем  $t$  и соответственно с изменением температуры  $T$ . (б) Относительное содержание образовавшихся в итоге реликтовых ядер как функция отношения концентрации барионов к концентрации фотонов  $\eta_{10} = 10^{10}(n_B/n_\gamma)$ . Сплошные кривые — теоретические значения, затемнённая вертикальная полоса — интервал значений  $\eta_{10}$ , допускаемых астрономическими наблюдениями содержания разных реликтовых ядер, штриховая прямая соответствует  $\rho_B = \rho_{\text{cr}}$ .

ция барионов. И этот параметр можно определить путём сравнения результатов расчёта с данными астрономических наблюдений по содержанию реликтовых ядер.

На рисунке 1а показано, как менялся состав нуклидов с изменением времени  $t$  и температуры  $T$ , которые в ту эпоху были связаны соотношением  $t = AT^{-2}$ , где коэффициент  $A$  определяется эффективным числом степеней свободы ультрарелятивистских частиц (фотонов, нейтрино и антинейтрино всех сортов).

На рисунке 1б представлены результаты расчёта конечного состава реликтовых ядер в зависимости от отношения концентраций барионов и фотонов  $n_B/n_\gamma$ . Затемнённой полосой на рисунке показан интервал значений  $n_B/n_\gamma$ , соответствующих данным астрономических наблюдений по относительному содержанию разных реликтовых ядер. Из рисунка видно, что наиболее чувствительным индикатором отношения концентраций барионов и фотонов  $n_B/n_\gamma$  является относительное содержание первичного дейтерия  $(\text{D}/\text{H})_p$ . Так, например, если бы плотность барионного вещества равнялась критической,  $\rho_B = \rho_{\text{cr}}$ , то мы вообще не видели бы дейтерия, так как его содержание было бы на восемь порядков меньше.

Отношение содержания изотопов  $(\text{D}/\text{H})$  в ходе последующей эволюции могло только уменьшаться, так как при попадании межзвёздного вещества в недра звёзд дейтерий выгорает, превращаясь в гелий. Поэтому для определения  $(\text{D}/\text{H})_p$  необходимы измерения изотопного состава межзвёздного вещества в наиболее ранние эпохи космологической эволюции. Для этой цели используют спектры поглощения квазаров с большими красными смещениями. Квазары являются наиболее мощными источниками излучения, поэтому они видны на расстояниях вплоть до 10–12 млрд световых лет. Другими словами, спектры квазаров, измеряемые сегодня, формировались 10–12 млрд лет назад. При этом излучение самих квазаров используется для просвечивания оказавшихся на луче зрения далёких облаков межзвёздного

и межгалактического газа, которые "впечатывают" в спектр квазара свои линии поглощения. Можно сказать, что квазары служат "рентгеновским аппаратом" для просвечивания Вселенной.

До последнего времени относительное содержание  $(\text{D}/\text{H})$  определяли только по атомным линиям  $\text{H I}$  и  $\text{D I}$  в спектрах поглощения квазаров. Однако такие измерения наталкиваются на ряд трудностей. Оптические спектры  $\text{D I}$  и  $\text{H I}$  практически одинаковы, лишь длины волн их линий сдвинуты на 0,027%. При этом концентрации этих атомов различаются на 4–5 порядков. Поэтому если лучевая концентрация  $\text{H I}$  мала, то линии  $\text{D I}$  вообще не видны. Если же лучевая концентрация водорода слишком велика, то линии  $\text{H I}$  насыщены, уширены и напыляют на линии  $\text{D I}$  (блендируют их). Более того, линии, идентифицированные как линии  $\text{D I}$ , в принципе могут быть порождены небольшим облаком  $\text{H I}$ , движущимся относительно исследуемого облака со скоростью  $\sim 80 \text{ км с}^{-1}$ , тем более, что на луче зрения действительно находится большое количество таких облаков, движущихся с разными скоростями (так называемый лайман-альфа-лес). Возможно, этими причинами объясняется существенный разброс полученных таким методом значений  $(\text{D}/\text{H})$  (см. раздел 3, рис. 5).

Трудностей с идентификацией линий не возникает, если измерять относительное содержание не атомов  $\text{D I}$  и  $\text{H I}$ , а молекул  $\text{HD}$  и  $\text{H}_2$ , поскольку их спектры существенно различаются, а большинство узких абсорбционных линий не перекрывается. Этот метод до последнего времени не использовался потому, что молекулы  $\text{HD}$  не удавалось обнаружить при больших красных смещениях.

## 2. Облако $\text{HD}/\text{H}_2$ с красным смещением $z = 2,33771$

Нам первыми удалось обнаружить дейтерированный молекулярный водород на больших красных смещениях, идентифицировав линии молекул  $\text{HD}$  в спектре поглощения квазара Q 1232+082, сдвинутые вследствие красного смещения так, что  $\lambda_{\text{набл}}/\lambda_{\text{лаб}} = 1 + z = 3,337714(3)$  [3]. Фактически впервые на большом космологическом расстоянии было обнаружено облако, содержащее наряду с молекулами  $\text{H}_2$  молекулы  $\text{HD}$ . Это облако существовало около 12 млрд лет назад, когда ещё не было Солнечной системы, да и наша Галактика ещё не сформировалась.

На рисунках 2 и 3 представлены схемы уровней и переходов лаймановской серии  $L\alpha'' - 0$  молекул  $\text{H}_2$  и  $\text{HD}$  и участки спектра квазара с линиями, соответствующими этим переходам. В случае  $\text{HD}$  видны линии  $R_0$ , соответствующие переходам из основного состояния  $J = 0$ , а в случае  $\text{H}_2$  видны линии, соответствующие не только переходам из основных состояний пара- $\text{H}_2$  ( $J = 0$ ) и орто- $\text{H}_2$  ( $J = 1$ ), но и из возбуждённых вращательных состояний  $R_J$  и  $P_J$  с  $J = 2, 3, 4, 5$ , поскольку времена жизни молекул  $\text{H}_2$  в этих состояниях  $\tau_J$  на порядки больше аналогичных времён для  $\text{HD}$ .

После дополнительных тщательных измерений спектра этого квазара, выполненных французскими коллегами на 8,2-метровом телескопе VLT (Very Large Telescope) Европейской южной обсерватории (ESO) (Чили), мы определили лучевые концентрации молекул  $\text{HD}$  и  $\text{H}_2$  в этом облаке:  $N(\text{HD}) = (3,4^{+1,6}_{-0,8}) \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и  $N(\text{H}_2) = (4,8 \pm 1,0) \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$  [4]. Отношение лучевых концентраций  $(\text{HD}/\text{H}_2)$  оказалось равным  $(7,1^{+3,7}_{-2,2}) \times 10^{-5}$ .

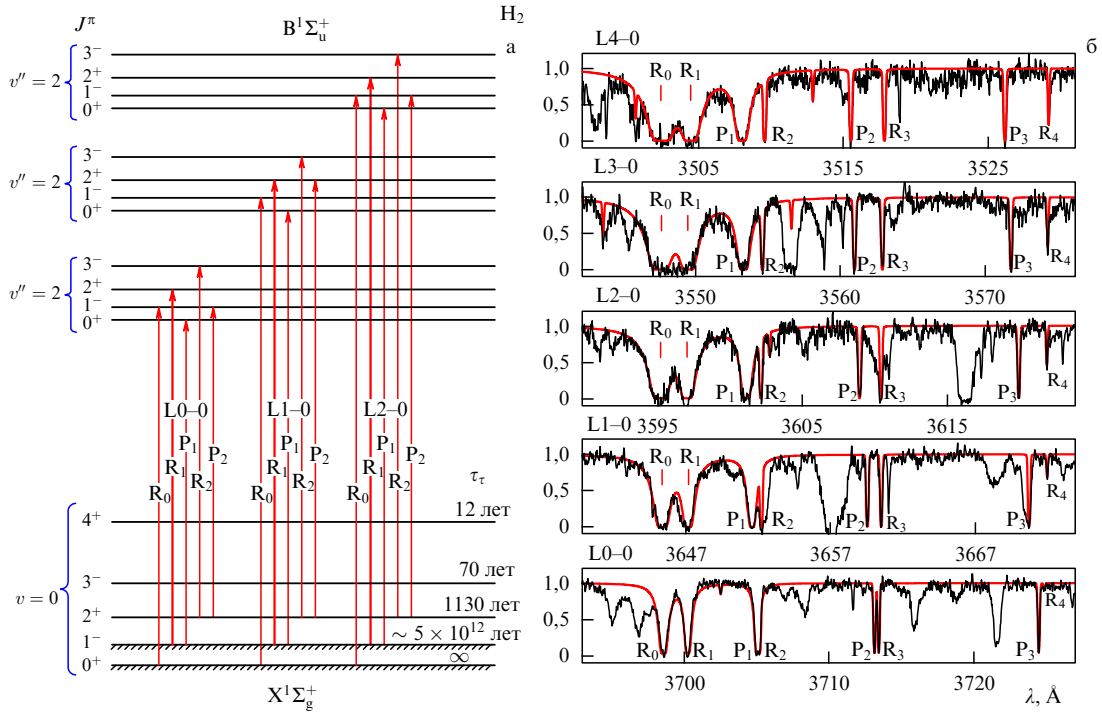


Рис. 2. (а) Схема уровней и переходов лаймановской серии  $Lv'' - v$  молекулы  $H_2$ . (б) Участки спектра квазара Q 1232+082, на которых видны соответствующие линии поглощения  $H_2$ , длины волн которых сдвинуты из-за космологического красного смещения  $\lambda_{набл}/\lambda_{лаб} = 3,33771$ .

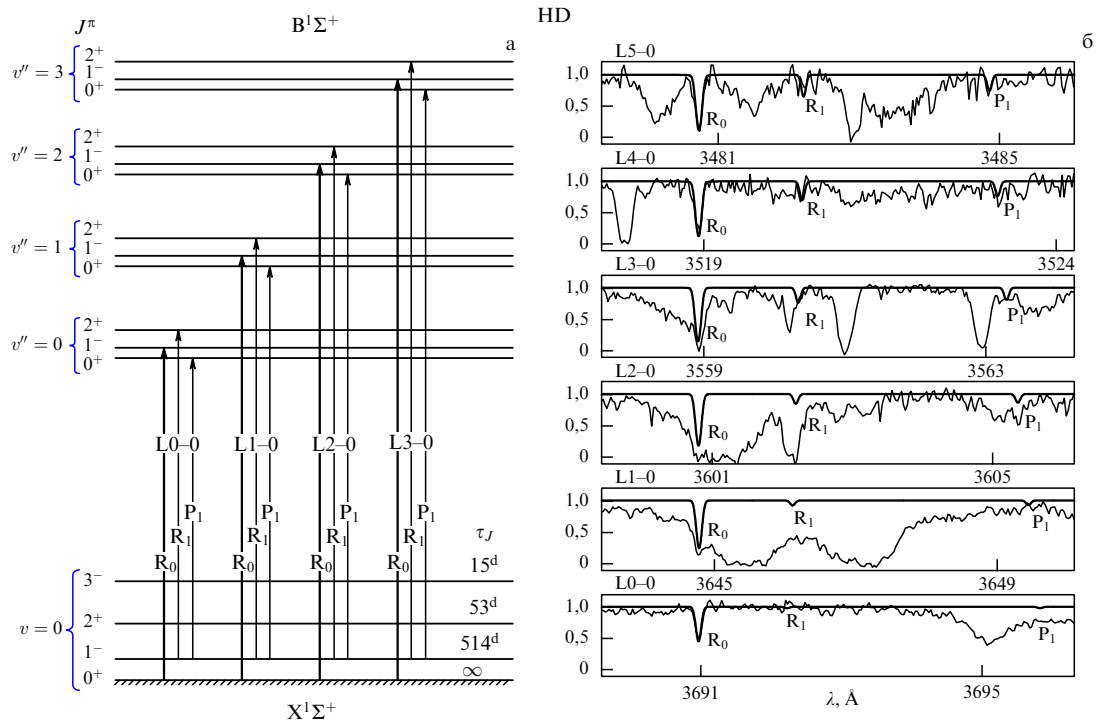
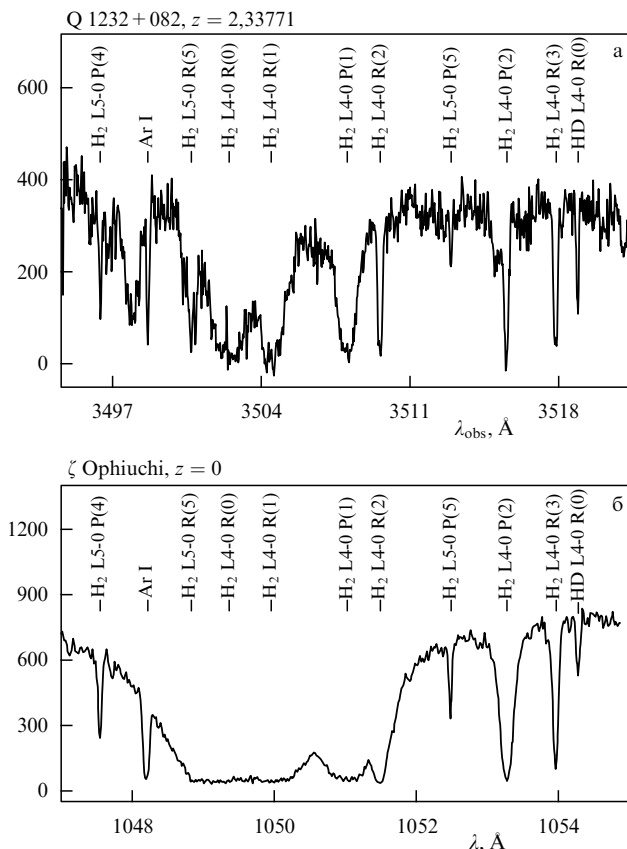


Рис. 3. (а) Схема уровней и переходов молекулы HD. (б) Участки спектра, на которых видны линии HD, с  $\lambda_{набл}/\lambda_{лаб} = 3,33771$ .

Это значение существенно превосходит аналогичные значения в межзвёздных молекулярных облаках нашей Галактики,  $(0,4-4,0) \times 10^{-6}$  [5]. На рисунке 4 представлен полученный спектр квазара Q 1232+082 [4] в сравнении с абсорбционным спектром ζ Orh [6], характеризующим межзвёздное молекулярное облако Галактики. Оба фрагмента спектра отвечают одному и тому же интервалу длин волн в сопутствующей системе, но для

астронома-наблюдателя шкалы длин волн сдвинуты из-за красного смещения в 3,33771 раза. Из сравнения спектров видно, что относительное содержание молекул (HD/H<sub>2</sub>) в облаке, существовавшем 12 млрд лет назад, было значительно больше, чем в нашу эпоху. Количественная оценка показывает, что это отношение различается почти в 200 раз.



**Рис. 4.** Представлен спектр квазара Q 1232+082 [4] в сравнении с абсорбционным спектром  $\zeta$  Oph [6], характеризующим межзвёздное молекулярное облако нашей Галактики. Оба фрагмента спектра отвечают одному и тому же интервалу длин волн в сопутствующей системе, но для астронома-наблюдателя шкалы длин волн сдвинуты из-за красного смещения в 3,33771 раза. Из сравнения спектров видно, что относительное содержание молекул (HD/H<sub>2</sub>) в облаке, существовавшем 12 млрд лет назад, было значительно больше, чем в нашу эпоху.

Анализ полученного спектра показал, что исследуемое облако всё же содержит небольшое количество вещества, переработанного звёздами, т.е. обеднённого дейтерием. Об этом свидетельствует наличие в спектре линий некоторых атомов и ионов, в частности, линия Ar I, указанная на рис. 4. В результате количественного анализа [7] удалось показать, что содержание в газе таких элементов как Si, P, S, Ar, Ti в 30–40 раз меньше солнечного. Например, содержание Ar в облаке составляло  $(2,4^{+1,9}_{-1,0})\%$  от солнечного содержания. В протосолнечной системе отношение (D/H) составляло  $1,94 \times 10^{-5}$  [8], т.е. отличалось от первичного на 30–50 %, поэтому есть основания полагать, что (D/H) в этом облаке отличается от первичного (D/H)<sub>p</sub> лишь на 1–2 %.

Итак, исследуемая абсорбционная система представляет собой холодное разрежённое облако межзвёздного газа, входящее в удалённую галактику или протогалактику. Кинетическая температура газа, определённая по относительному содержанию орто- и пара-H<sub>2</sub>, составляет  $T = 67 \pm 11$  К. Средняя концентрация газа, определённая из относительной заселённости уровней тонкой структуры основного состояния атомов C I, составляет  $(71 \pm 28)$  см<sup>-3</sup>. Размер облака порядка 1 пк. Анализ спектра показал, что атомы O I, N I, Ar I с потенциалами ионизации более 13,6 эВ присутствуют в облаке лишь в

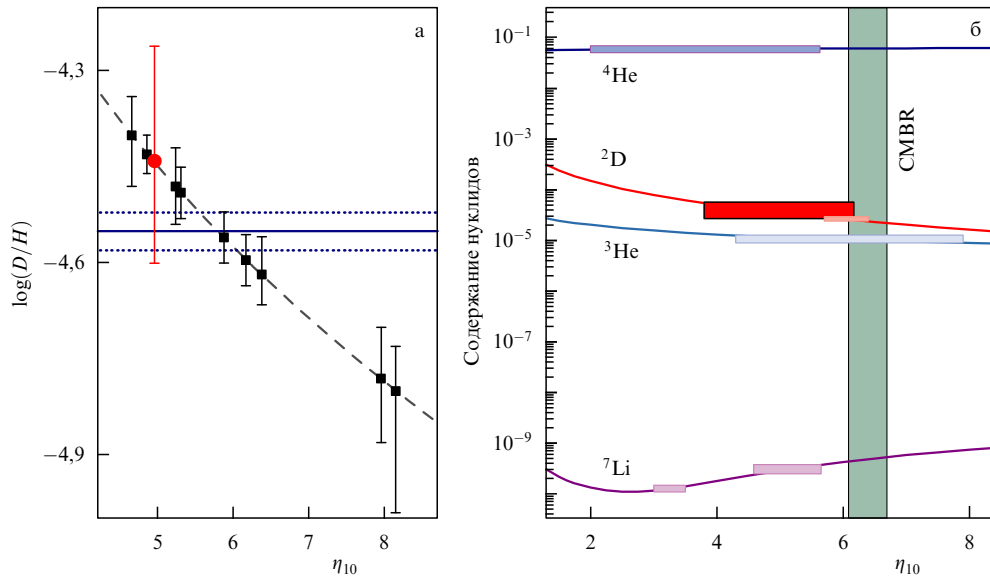
нейтральном состоянии, тогда как C, Mg, Al, Si, P, S, Ti, Mn, Fe с потенциалами ионизации менее 13,6 эВ представлены в виде как однозарядных ионов (преимущественно), так и нейтральных атомов. Это обстоятельство позволяет оценить поток ионизирующего ультрафиолетового (УФ) излучения в исследуемом облаке. Перенос излучения в линиях H<sub>2</sub> для этого облака детально рассмотрен в работе [9].

Таким образом, детальный анализ полученного спектра позволил выявить эволюционные изменения химического и изотопного состава вещества, произошедшие за 12 млрд лет, и определить физические условия, существовавшие в облаке в ту эпоху.

### 3. Относительное содержание изотопов (D/H) и содержание барионов

Для того чтобы определить отношение содержания изотопов (D/H) по относительному содержанию молекул (HD/H<sub>2</sub>), в общем случае необходимо учитывать все каналы рождения и гибели этих молекул. Доминирующий канал разрушения молекул H<sub>2</sub> и HD — это диссоциация ультрафиолетовым излучением в резонансных линиях. Под действием УФ-излучения молекулы возбуждаются и переходят из основного состояния X<sup>1</sup>Σ<sub>g</sub><sup>+</sup> в верхние электронные состояния B<sup>1</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup> и C<sup>1</sup>Π<sub>u</sub>, т.е. возбуждение происходит в линиях лаймановской и вернеровской полос в диапазоне 1120–912 Å (именно эти линии и наблюдаются в спектрах квазаров). Около 87 % молекул, возбуждённых УФ-излучением, возвращаются в основное электронное состояние (на разные колебательно-вращательные уровни), а около 13 % молекул диссоциируют. Однако при проникновении в облако излучение в линиях лаймановской и вернеровской полос поглощается, линии насыщаются, так что молекулы H<sub>2</sub> и HD внутри облака оказываются экранированными от разрушающего их УФ-излучения. Самоэкранирование облака начинается тогда, когда оптическая толщина в резонансных линиях достигает единицы, что соответствует лучевой концентрации молекул  $\sim 4 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. В нашем случае измеренные лучевые концентрации молекул H<sub>2</sub> и HD существенно превосходят это критическое значение. При таких условиях согласно результатам расчётов в модели межзвёздных молекулярных облаков [10–12] практически весь газ внутри облака должен быть молекуляризован, т.е. весь D должен находиться в форме HD, а H — в форме H<sub>2</sub>. В этом случае устанавливается универсальное соотношение: (HD/H<sub>2</sub>) = 2(D/H). Это обстоятельство позволило нам определить отношение изотопов в исследуемом облаке: (D/H) =  $(3,6^{+1,9}_{-1,1}) \times 10^{-5}$  [4].

Полученное значение (D/H) сопоставляется с результатами других работ на рис. 5, где показано содержание дейтерия и других реликтовых ядер в зависимости от относительной концентрации барионов  $n_B/n_\gamma$ . Представлены (рис. 5a) результаты измерений (D/H) в спектрах квазаров по абсорбционным линиям атомов DI/NI и по молекулярным линиям HD/H<sub>2</sub> (данные и ссылки по этим работам приведены в [4]). На рисунке 5b результаты измерений относительной распространённости реликтовых ядер <sup>2</sup>D, <sup>3</sup>He, <sup>4</sup>He, <sup>7</sup>Li сопоставляются с расчётными кривыми и со значением  $n_B/n_\gamma$ , полученным из анализа спектра угловых флуктуаций температуры реликтового излучения [13].



**Рис. 5.** Относительное содержание дейтерия и других реликтовых ядер как функция относительной концентрации барионов  $\eta_{10} = 10^{10}(n_B/n_\gamma)$ . (а) Результаты измерений  $(D/H)$  в спектрах квазаров по абсорбционным линиям атомов  $D\text{I}/\text{H}\text{I}$  (квадраты) и по молекулярным линиям  $\text{HD}/\text{H}_2$  (кружок) [4]. (б) Результаты измерений относительной распространённости реликтовых ядер сопоставляются с расчётными кривыми и со значением  $n_B/n_\gamma$ , полученным из анализа анизотропии реликтового излучения (Cosmic Microwave Background Radiation, CMBR) [13].

На основе теории первичного нуклеосинтеза было определено с использованием полученного значения  $(D/H)$  отношение концентраций барионов и фотонов реликтового излучения:  $n_B/n_\gamma = (5 \pm 1) \times 10^{-10}$  [4]. При этом для расчёта кинетики первичного нуклеосинтеза мы использовали модифицированный пакет программ [14, 15]. Согласно стандартной космологической модели, отношение концентраций  $n_B/n_\gamma$  должно сохраниться со времени первичного нуклеосинтеза до наших дней, т.е. считается, что в процессе эволюции барионы не распались и частицы холодной тёмной материи (CDM) не превращались в барионы. В нашу эпоху концентрация реликтовых фотонов, соответствующая температуре  $T_0 = 2,726$  К, составляет  $n_\gamma = 411 \text{ см}^{-3}$ . Поэтому средняя концентрация барионов  $n_B(0) = (2,1 \pm 0,4) \times 10^{-7} \text{ см}^{-3}$ . Однако, в отличие от распределения вещества в эпоху первичного нуклеосинтеза, когда среда была почти однородной, современное распределение вещества крайне неоднородно, поэтому  $n_B(0)$  представляет собой среднее значение по большой области пространства, порядка 100 Мпк. Полученное значение  $n_B(0)$  соответствует  $(3,7 \pm 0,8) \%$  от критической плотности (при постоянной Хаббла  $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ ). Это согласуется в пределах ошибок измерений со значением, полученным из анализа флуктуаций температуры реликтового излучения [13].

#### 4. Заключение

Впервые на больших космологических расстояниях обнаружено облако холодного разреженного газа, содержащее молекулы  $\text{HD}$  и  $\text{H}_2$ . Изучен состав вещества и физические условия, существовавшие в этом облаке  $\sim 12$  млрд лет назад. Показано, что отношение лучевых концентраций  $(\text{HD}/\text{H}_2)$  было существенно выше, чем в современную эпоху в межзвёздных облаках нашей Галактики [4].

Определено относительное содержание изотопов  $(D/H)$  в этом облаке новым (независимым) методом из

отношения лучевых концентраций молекул  $\text{HD}/\text{H}_2$  в рамках моделей молекулярных облаков [10–12]. Полученное значение  $(D/H) = (3,6^{+1,9}_{-1,1}) \times 10^{-5}$  позволило на основе стандартной космологической модели первичного нуклеосинтеза определить среднюю плотность барионов во Вселенной в нашу эпоху:  $\Omega_B \equiv \rho_B/\rho_{\text{cr}} = (3,7 \pm 0,8) \%$  [4].

Работа была поддержана программой Президиума РАН "Происхождение, строение и эволюция объектов Вселенной", Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 08-02-01246а и грантом НШ-3769.2010.2.

#### Список литературы

1. Steigman G *Annu. Rev. Nucl. Part. Syst.* **57** 463 (2007)
2. Pettini M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **391** 1499 (2008)
3. Варшалович Д А и др. *Письма в Астрон. журн.* **27** 803 (2001) [Varshalovich D A et al. *Astron. Lett.* **27** 683 (2001)]
4. Ivanchik A V et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* (2010) (принято к печати), doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16383.x; arXiv:1002.2107
5. Lacombe S et al. *Astron. Astrophys.* **430** 967 (2005)
6. Spitzer L (Jr.), Jenkins E B *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **13** 133 (1975)
7. Балашев С А и др., подготовлена к печати
8. Ladders K, Palme H, Gail H-P, in *Landolt-Börnstein, New Series. Astronomy and Astrophysics* (Berlin: Springer-Verlag) (в печати); arXiv:0901.1149
9. Балашев С А, Варшалович Д А, Иванчик А В *Письма в Астрон. журн.* **35** 171 (2009) [Balashev S A, Varshalovich D A, Ivanchik A V *Astron. Lett.* **35** 150 (2009)]
10. Abgrall H et al. *Astron. Astrophys.* **253** 525 (1992)
11. Le Bourlot J *Astron. Astrophys.* **360** 656 (2000)
12. Le Petit F, Roueff E, Le Bourlot J *Astron. Astrophys.* **390** 369 (2002)
13. Komatsu E et al. *Astrophys. J. Suppl.* **180** 330 (2009); arXiv:0803.0547
14. Орлов А В, Варшалович Д А "Кинетика первичного нуклеосинтеза: новый пакет программ", Препринт № 1719 (СПб: ФТИ РАН, 1999)
15. Иванчик А В, Орлов А В, Варшалович Д А *Письма в Астрон. журн.* **27** 723 (2001) [Ivanchik A V, Orlov A V, Varshalovich D A *Astron. Lett.* **27** 615 (2001)]