

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 18

ФЕВРАЛЬ, 1982

ВЫПУСК 1

УДК 524.3—85+524.82

ГАЛАКТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ — ТЕСТ ДЛЯ КОСМОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Б. В. ВАГНЕР, Ю. А. ЩЕКНИНОВ

Поступила 13 мая 1980

Принята к печати 5 декабря 1981

Рассмотрен вопрос об изменении содержания дейтерия в процессе галактической эволюции. Показано, что наблюдаемое в современной межзвездной среде количество дейтерия должно соответствовать его космологическому содержанию. Этот вывод не зависит от предположения о скорости аккреции межгалактического газа Галактикой. Изменение количества дейтерия гипотетическими догалактическими сверхмассивными объектами мало. Отмечается важность наблюдений дейтерия в радиолинии D ($\lambda = 91.6$ см) в поглощении.

1. *Введение.* В последнее время все большее внимание астрофизиков привлекает исследование космологических моделей, отличных от стандартной горячей [1—4]. Выход легких элементов во всех этих моделях Вселенной в той или иной степени отличается от соответствующих величин в стандартной модели, которая при плотности вещества $\rho < 7 \cdot 10^{-31}$ г/см³ обеспечивает обилия ⁴He, ³He, D, в целом согласующиеся с наблюдениями. Космологические модели с недопроизводством (или перепроизводством) легких элементов строятся в надежде на то, что эволюционные процессы в Галактике восполнят их недостаток (или уничтожат избыток). В связи с этим особую остроту приобретает вопрос об изменении обилий этих элементов в процессе галактической эволюции и о сопоставлении результатов расчетов с наблюдательными данными.

Содержание ⁴He в однородных изотропных горячих моделях слабо зависит от величины удельной энтропии. И даже в «теплых» моделях выход ⁴He не нарушает границ, допустимых наблюдениями [5]. Правда, при слишком малом значении удельной энтропии соответствие ⁴He с наблюдениями достигается лишь при весьма специфических начальных условиях.

[6]. В анизотропных однородных космологиях выход ${}^4\text{He}$ согласуется с наблюдаемым при определенном выборе параметра анизотропии [7]. В неоднородных же анизотропных моделях среднее содержание ${}^4\text{He}$, соответствующее наблюдениям, достигается при более широком наборе параметров [4]. Таким образом, ${}^4\text{He}$ не может являться достаточно критичным тестом для выбора адекватной картины Мира.

В противоположность этому, дейтерий значительно более чувствителен к условиям в ранней Вселенной. Например, в стандартной модели выход D согласуется с наблюдениями лишь при малой плотности вещества $\rho < 7 \cdot 10^{-11} \text{ г/см}^3$ ($H = 50 \text{ км/с Мпс}$): в «теплых» моделях его получается слишком мало. Так, если удельная энтропия $n_1/n_b < 10^9$, $X_{\text{D}} < 10^{-5}$ [5, 8]. Если же удельная энтропия слишком мала, то дейтерия может получиться много, согласно грубым оценкам вплоть до $X_{\text{D}} \approx 10^{-2}$ [6, 9]. Но в настоящее время отсутствуют расчеты выхода D в холодных моделях, поэтому последняя величина представляется сомнительной. Массовая концентрация дейтерия в неоднородной Вселенной с анизотропной изначальной стадией расширения превышает 10^{-2} , что почти на три порядка больше наблюдаемой величины [4].

По-видимому, дейтерий действительно является своеобразным камнем преткновения — любая попытка отойти от стандартной модели ведет к заметному отклонению предсказываемого содержания D от наблюдаемого. Возникает вопрос: способна ли дальнейшая галактическая эволюция (или предполагаемые активные процессы на предгалактической стадии) сгладить это противоречие (см., например, [10–12])? Эту проблему рассматривал Ривс [13]. Он пришел к выводу, что дейтерий слабо эволюционирует за время жизни Галактики. Однако, в связи с накоплением новых наблюдательных данных и теоретических представлений об эволюции Галактики и галактических объектов (сюда относятся, например, наблюдательные подтверждения взаимодействия Галактики с межгалактическим газом, новые расчеты продукции легких элементов сверхновыми, оценки влияния активных фаз эволюции Галактики на содержание легких элементов) возникла необходимость в пересмотре выводов работы [13].

Ниже мы рассмотрим все видимые на сегодняшний день пути изменения космологического содержания дейтерия (звездная эволюция, взрывы сверхновых, активность галактического ядра, нуклеосинтез в предгалактических сверхмассивных объектах и т. д.), в двух предельных случаях: а) приток массы межгалактического вещества в Галактику пренебрежимо мал; б) масса аккрецируемого межгалактического вещества сравнима с массой газовой составляющей Галактики. В результате будет показано, что в том и другом случаях наблюдаемое в настоящее время содержание дейтерия не более чем в 2–3 раза отличается от его содержания в догалактиче-

ском веществе. Поэтому дейтерий может служить тестом для выбора космологических моделей, что увеличивает актуальность дальнейших наблюдений его распространенности в Галактике.

2 Дейтерий может выгорать в звездах за счет реакции $p + D \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$. Тогда наблюдаемое обилие ${}^3\text{He}$ в атмосферах звезд дает верхнюю границу содержания дейтерия в дозвездном веществе. К сожалению, ${}^3\text{He}$ наблюдался только в солнечной атмосфере, причем ${}^3\text{He}/{}^4\text{He} \approx 4 \cdot 10^{-4}$. Наблюдения однократно ионизованного ${}^3\text{He}$ в межзвездной среде по линии 3.46 см дают верхнюю границу ${}^3\text{He}/\text{H} < 4 \cdot 10^{-5}$ [13]. В настоящее время мы имеем слишком мало информации для того, чтобы делать окончательные заключения о распространенности ${}^3\text{He}$ в Галактике. Можно лишь указать на тот факт, что начальное содержание дейтерия в протосолнечном газе во всяком случае не превышало $\text{D}/\text{H} < 10^{-4}$. С другой стороны, звезды ниже класса В7, которые выжигают дейтерий в процессе своей эволюции, эжектируют в межзвездную среду слишком мало вещества, чтобы заметно изменить ее химсостав [26]. Значительное увеличение содержания дейтерия за счет разрушения ядер ${}^4\text{He}$ в период активных фаз эволюции Галактики или в результате синтеза в ударных волнах представляется маловероятным в связи с возникающими энергетическими трудностями [11, 23, 25] (подробнее см. в [10]).

В некоторых работах предполагается, что догалактическое вещество было предварительно обогащено тяжелыми элементами, эжектируемыми гипотетическими сверхмассивными объектами. Это предположение связано с наличием заметного количества тяжелых элементов в самых старых звездах Галактики. В свою очередь, предгалактический нуклеосинтез может привести к заметному изменению содержания дейтерия по сравнению с космологическим [14]. На наш взгляд, необходимости в такой гипотезе нет. Если догалактическое вещество не содержало тяжелых элементов, то согласно расчетам [15] массы первых звезд были достаточно велики ($\approx 20 M_{\odot}$). Такие звезды быстро эволюционируют, за время $t \approx 10^6$ лет, значительная часть их превращается в сверхновые и обогащает окружающее вещество тяжелыми элементами. Принимая продолжительность процесса образования первых звезд $t_0 \approx 10^6$ лет (джинсовское время, соответствующее начальной плотности в протогалактике, $\rho = 10^{-20}$ г/см³) и химический состав вещества сбрасываемых оболочек подобным современному, можно получить массовую концентрацию тяжелых элементов $Z \approx 10^{-4}$. Отсюда, для доли вещества Галактики, прошедшего через сверхновые первого поколения, получим верхнюю оценку $\alpha < 0.01$.

В работе [16] рассматривалась возможность получения дейтерия разрушением ядер ${}^4\text{He}$ энергичными космическими лучами, которые генери-

руются «праквазарами» при красных смещениях $z \approx 200-400$. Требуемое энерговыделение $\epsilon_D \approx 6 \cdot 10^{18}$ эрг/г. Но для того, чтобы получить всю наблюдаемую массу Fe в Галактике, требуется всего $\epsilon_{Fe} \approx 10^{16}$ эрг/г. Как показывают расчеты [17], в сверхмассивных объектах синтезируется достаточно много тяжелых элементов, поэтому можно ожидать, что предполагаемое в [16] энерговыделение приведет к перепроизводству Fe по сравнению с наблюдениями.

3. а) *Ограничения на изменение содержания дейтерия взрывами сверхновых.* В этом разделе мы будем предполагать, что масса межгалактического газа, аккрецированного Галактикой за время ее жизни, меньше наблюдаемой массы ее газовой составляющей ($\sim 10^9 M_\odot$). Это означает, что наблюдаемый в настоящее время химсостав является результатом переработки первичного вещества в процессе эволюции Галактики. За исключением солнечной системы, все имеющиеся наблюдения D относятся к межзвездному газу, поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только эволюцию газовой составляющей Галактики (в звездах дейтерий не наблюдался). Процент вещества, прошедшего через стадию звезд, в том числе и сверхновых, должен быть значительным, поскольку массовая концентрация тяжелых элементов в газе $Z \approx 0.02$ [18]. Долю вещества, прошедшего через сверхновые, можно оценить, сравнивая содержание железа в космических лучах, которые имеют химсостав, подобный химсоставу вещества сверхновых, со средним космическим. Содержание Fe в космических лучах примерно совпадает с его содержанием в солнечной системе [19]. Однако, в сравнении со средним космическим, железа в космических лучах в 5—20 раз больше [20, 21]. Отсюда можно сделать вывод, что не более 5—20% вещества Галактики прошло через сверхновые. Действительно, в процессе распространения в межзвездной среде ядра железа разрушаются. Согласно [22], полное сечение разрушения ядер ^{56}Fe при энергии ~ 600 Мэв составляет $\sigma_{Fe} = 600$ мб. Толщина водорода, необходимая для разрушения 60% ядер, $x = \rho/\sigma_{Fe} N_H = 2.5$ г/см², что несколько меньше значения ($x_0 = 3 \div 5$ г/см²), обычно принимаемого при исследовании распространения космических лучей [19].

Близкую оценку доли вещества, прошедшего через сверхновые, можно получить из энергетических соображений. Энергия связи устойчивого изотопа ^{56}Fe составляет $E = 60$ Мэв, поэтому, принимая для энергии взрыва сверхновой II типа $E = (3 \div 10) \cdot 10^{50}$ эрг, получим полное количество ядер ^{56}Fe , производимое одной сверхновой: $N_{Fe} = E/E = (3 \div 10) \cdot 10^{51}$. Для массы сброшенной оболочки $M_{SN} = 10 M_\odot$ получим верхнюю оценку для отношения ^{56}Fe к водороду (по числу атомов) $\text{Fe}/\text{H} = (3 \div 10) \cdot 10^{-4}$, что близко к наблюдаемому в космических лучах. Итак, доля вещества, прошедшего через сверхновые, во всяком случае не меньше, чем 2—10%.

С другой стороны, эта величина не может заметно превышать 0,1, т. к. в спектре масс звезд массивные звезды ($M > 10 M_{\odot}$), которые могут превращаться в сверхновые второго типа, составляют примерно 10%. Приведенные выше оценки указывают на то, что взрывы сверхновых могут лишь незначительно уменьшить содержание космологического дейтерия. Заметное увеличение содержания этого элемента также представляется маловероятным [13, 23—25]. Один из последних расчетов производства дейтерия в результате взаимодействия нейтринного потока от коллапсирующего ядра сверхновой с веществом оболочки выполнен в работе [35]. Максимальное значение массовой концентрации D в оболочке не превышает 10^{-5} , т. е. вклад этого процесса в обогащение межзвездной среды дейтерием составляет $\Delta X \sim 10^{-6}$.

6) *Ограничения на изменение содержания дейтерия звездами.* Вообще говоря, количество вещества, эжектируемого звездами, сравнимо с массой газовой составляющей Галактики [26]. Химсостав сбрасываемого вещества может сильно отличаться от первичного. Но большая часть эжектируемого вещества обеспечивается истечением из оболочек звезд классов ОВ. Согласно существующим представлениям, конвекции в этих звездах развита слабо, поэтому химический состав их оболочек близок к составу вещества, из которого эти звезды образуются. С другой стороны, звезды, у которых вследствие конвекции дейтерий полностью выгорает (ниже класса В7), поставляют в межзвездную среду малое количество вещества. В результате этого звездная эволюция не приводит к заметному изменению содержания дейтерия в межзвездной среде по сравнению с догалактическим обилием.

4. В предыдущем разделе мы пренебрегали аккрецией межгалактического вещества на Галактику, однако простые оценки показывают, что приток вещества из межгалактического пространства может быть значительным. Действительно, темп аккреции можно оценить как

$$\dot{M} = 4\pi r_{\text{ак}}^2 \rho_{\text{ин}} V \quad (\text{г/с}),$$

где $\rho_{\text{ин}}$ — плотность межгалактического газа; $r = 15$ кпс — аккреционный радиус галактики, $V = (2GM_r/r)^{1/2}$ — параболическая скорость, M_r — масса галактики. Принимая $\rho_{\text{ин}} = 10^{-28} - 10^{-29}$ г/см³, $M_r = 2 \cdot 10^{11}$ г, получим $\dot{M} = (0,1 - 1) M_{\odot}/\text{год}$. Близкая оценка получена в [27] из анализа наблюдений высокоскоростных облаков: $\dot{M} = 3M_{\odot}/\text{год}$. Следовательно, за время жизни Галактики приток массы может составить $(1 - 3) \cdot 10^{10} M_{\odot}$. Натекающий межгалактический газ может быть обогащен тяжелыми элементами, в частности, железом, за счет эжекции

вещества из галактик. Например, в [28] показано, что обилие железа в этом газе может достигать $Fe/H = 3 \cdot 10^{-5}$. Учет аккреции газа с таким химическим составом не меняет выводов раздела 3а. В другом предельном случае, когда межгалактический газ имеет первичный химический состав, оценки доли вещества, прошедшего через сверхновые, должны быть изменены: эта доля должна быть выше, по крайней мере в 2—5 раз, чтобы обилие железа соответствовало наблюдаемому значению этой величины. При этом количество дейтерия, первоначально вошедшего в Галактику, может быть значительно уменьшено за счет выгорания. Но, благодаря аккреции межгалактического газа, его содержание будет восполняться, и в результате в настоящее время наблюдаемое отношение D/H должно быть близко к догалактическому.

5. *Атомарный дейтерий* наблюдался в межзвездной среде по линиям $L_2 - L$ в спектрах поглощения быстро движущихся звезд [29]. Авторы оценивают обилие дейтерия величиной $D/H \approx 1.5 \cdot 10^{-2}$. Близкую величину получают из наблюдений поглощения ультрафиолетового излучения звезд молекулами HD [30]. Однако эти значения характеризуют содержание дейтерия лишь в локальной области порядка 100—200 пс. Наблюдения дейтерия в радиолиниях позволяют оценить его содержание в значительно более широкой области. В туманности Ориона по наблюдениям на частотах 72 и 145 ГГц DCN с учетом химического фракционирования для содержания дейтерия была получена следующая оценка: $D/H \approx 10^{-5} - 10^{-6}$ [31]. Следует отметить, что значительная часть дейтерия находится в межзвездной среде в атомарном состоянии. Поэтому наиболее обширную информацию о распределении дейтерия в Галактике в целом (но не в отдельных плотных облаках) можно получить из наблюдений в сверхтонкой структуре основного состояния D ($\lambda = 91.6$ см) и поглощении. Такие измерения производились в направлении на галактический центр [32, 33] и на Сас А [34]. В работах [32, 33] получена верхняя граница $D/H < 3.5 \cdot 10^{-4}$, в работе [34] — $D/H < 7 \cdot 10^{-5}$. Перечисленные выше результаты, а также наблюдения D в солнечной системе показывают, что в разных областях Галактики обилие D не превосходит 10^{-4} и более вероятное значение $D/H \approx (1 - 3) \cdot 10^{-5}$. Эта величина близка к значению D/H в стандартной модели Вселенной с малой плотностью вещества [5].

Если дальнейшие наблюдения дейтерия в различных направлениях не обнаружат $D/H \gg 10^{-5}$, то космологические модели, в которых имеет место перепроизводство дейтерия (см., например, [4]), следует признать неудовлетворительными. С другой стороны, как пока-

зывают расчеты [10, 13, 23, 24], в процессе эволюции Галактики содержание дейтерия не может заметно увеличиваться. С этой точки зрения космологические модели, в которых $D/H < 10^{-5}$, являются противоречащими наблюдениям.

В этой связи очевидна необходимость дальнейшего уточнения содержания дейтерия в Галактике. Поскольку, как показано выше, в процессе галактической эволюции количество дейтерия значительно измениться не может, такие наблюдения будут иметь большое значение для анализа ранних этапов эволюции Вселенной.

На наш взгляд, одной из возможностей уточнения D/H являются новые наблюдения поглощения в направлении Cas A в линии 91.6 см. Это представляется возможным в связи с недавними наблюдениями поглощения в линии 11.5 м ^{14}N , для которой получено значение оптической толщи $\tau_N = 2 \cdot 10^{-1}$ (см. [18], стр. 226). Для линии $\lambda = 91.6$ см значение оптической толщи $\tau_D = \tau_N$ при $D/H = 10^{-5}$ и $N/H = 8 \cdot 10^{-5}$. Тот факт, что оптическая толщина в линии ^{14}N $\lambda = 11.5$ м в этом направлении оказывается столь высокой, может свидетельствовать о наличии достаточно плотных областей межзвездного газа на луче зрения. Такая же возможность не исключается и для других дискретных радиоисточников, например Tau A и DR4, для которых условия наблюдения в линии D $\lambda = 91.6$ см являются наиболее благоприятными: достаточно большой поток радиоизлучения и сравнительно большие расстояния до них.

Таким образом, как было показано выше, количество дейтерия в межзвездной среде отражает его космологическое содержание. В связи с этим особую актуальность приобретают дальнейшие наблюдения в линии 91.6 см.

Авторы благодарны А. А. Сучкову за обсуждение работы и полезные замечания.

Ростовский государственный
университет

GALACTIC DEUTERIUM AS A TEST OF COSMOLOGICAL MODELS

B. V. VAINER, Yu. A. SHCHEKINOV

The influence of Galactic evolution on the deuterium abundance is considered. We show that observable interstellar deuterium is cosmological. This conclusion is independent of the rate of accretion of inter-

galactic gas by Galaxy. The effect of hypothetical pregalactic active objects on cosmological deuterium is small. New observations of interstellar deuterium in absorption at $\lambda = 91.6$ cm are significant.

ЛИТЕРАТУРА

1. B. J. Carr, M. J. Rees, *Astron. Astrophys.*, 61, 705, 1977.
2. B. J. Carr, *M. N.*, 181, 293, 1977.
3. E. Saar, Preprint A-5, Tartu Obs., 1979.
4. O. V. Drygakova, L. M. Ozernoj, N. V. Polikhov, B. V. Valner, *Astron. Astrophys.*, 98, 57, 1981.
5. R. V. Wagoner, *Ap. J.*, 179, 343, 1973.
6. M. Kaufman, *Ap. J.*, 160, 459, 1970.
7. K. Thorne, *Ap. J.*, 148, 51, 1967.
8. B. J. Carr, Proc. 4-th EPS Gen. Conf., Chapl. 4, 1979, p. 220.
9. B. J. Carr, *Astron. Astrophys.*, 60, 13, 1977.
10. D. N. Schramm, R. V. Wagoner, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, 27, 37, 1977.
11. Л. М. Озерной, В. В. Черномордик, *Астрон. ж.*, 52, 1156, 1975.
12. S. A. Calgate, *Ap. J., Lett.*, 181, L53, 1973.
13. H. Reeves, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 12, 437, 1974.
14. H. Reeves, J. Audouze, W. Fowler, D. Schramm, *Ap. J.*, 179, 909, 1973.
15. J. Silk, *Ap. J.*, 211, 648, 1977.
16. R. I. Epstein, *Ap. J.*, 212, 595, 1977.
17. R. Wagoner, *Ap. J., Suppl. ser.*, 18, 247, 1969.
18. С. А. Каплан, С. Б. Пикельнер, *Физика межзвездной среды*, М., 1979.
19. P. Meyer, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 7, 1, 1969.
20. С. Хаякава, *Физика космических лучей*, ч. 2, Мир, М., 1974, стр. 48.
21. В. А. Гинабурт, *Теоретическая физика и астрофизика*, М., 1975.
22. G. M. Raitbeck, F. Upton, *Spat. Nucl. Reactions*, Dordrecht, 1976, p. 83.
23. R. I. Epstein, W. D. Arnett, D. N. Schramm, *Ap. J., Suppl. ser.*, 31, 111, 1976.
24. В. Э. Гольдберг, В. М. Чечеткин, *Астрон. ж.*, 53, 782, 1976.
25. Ю. К. Мелик-Алавердян, *Астрофизика*, 10, 123, 1974.
26. С. Р. Потташ, в сб. «Космическая газодинамика» под ред. С. Б. Пикельнера, Мир, М., 1972, стр. 313.
27. Я. Яанисте, Э. Саар, *Письма АЖ*, 3, 9, 1977.
28. Y. Rephaelt, *Ap. J.*, 225, 335, 1978.
29. J. R. Rogerson, D. G. York, *Ap. J., Lett.*, 186, L95, 1973.
30. L. Spitzer, E. Jenkins, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 13, 133, 1975.
31. R. V. Soloman, N. Y. Woolf, *Ap. J., Lett.*, 173, L313, 1973.
32. D. A. Csesarsky, A. T. Moffet, J. M. Pasachoff, *Ap. J., Lett.*, 180, L1, 1973.
33. J. M. Pasachoff, D. A. Csesarsky, *Ap. J.*, 193, 65, 1974.
34. S. Weinreb, *Nature*, 193, 367, 1962.
35. G. V. Domogatsky, P. A. Erumzhyan, D. K. Nadyozhn, *Astrophys. Space Sci.*, 58, 273, 1978.