

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Научная сессия Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук

(25 марта 1994 г.)

25 марта 1994 г. в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии РАН. На сессии были заслушаны доклады:

1. И.Д. Караченцев. Скрытая масса в Местной системе галактик

2. В.Г. Клочкова, В.Е. Панчук. Литий и бериллий в проблеме эволюции космического вещества.

3. Дж.А. Степанян. Второй Бюраканский обзор.

4. Ю.Ю. Балага. 10 лет интерферометрии на БТА.

5. Г.М. Бескин, С.Н. Митронова, С.И. Неизвестный, В.Л. Плохотниченко, М.Ю. Попова. Исследования релятивистских и быстропеременных объектов с высоким временным разрешением.

6. Т.В. Шабанова. Обнаружение планетной системы около пульсара 0329+54.

Краткое содержание трех докладов публикуется далее.

PACS numbers: 97.10.Tk

**В.Г. Клочкова, В.Е. Панчук.** Литий и бериллий в проблеме эволюции космического вещества. Особую роль в формировании наших представлений о Вселенной играют элементы Li, Be и B, содержание которых быстро истощается в недрах звезд и не восполняется процессами нормального ядерного синтеза. Из-за кулоновского отталкивания ядер изотопов гелия и низкой концентрации ядер  ${}^3\text{He}$  эти элементы образуются очень медленно, но быстро сгорают в водородной среде. Поэтому значительное количество Li и Be, наблюдаемое в звездных атмосферах, свидетельствует либо о существовании Li и Be в дозвездной фазе и незначительности процессов перемешивания, разбавляющих звездные атмосферы веществом с выгоревшими ядрами Li и Be, либо о наличии процессов, синтезирующих эти элементы с последующим быстрым выносом их в слои, где реакции на протонах уже неэффективны. Содержание Li и Be в космических лучах повышено в сравнении с веществом звезд, что служит основой модели синтеза в реакциях скалывания на ядрах C, N и O. Сложная взаимосвязь и недостаточная теоретическая проработка различных способов синтеза и разрушения легких ядер не позволяют построить количественную картину эволюции этих элементов, согласованную с другими представлениями об эволюции Галактики.

Линии этих элементов расположены в существенно различных участках спектра (LiI  $\lambda 6707 \text{ \AA}$ , BeII  $\lambda 3130 \text{ \AA}$ ), и темп набора наблюдательных данных полностью определяется развитием техники наземной и внеатмосферной спектроскопии. Высокие требования по спектральному разрешению и отношению "сигнал/шум" в большинстве задач оставляют решающее слово за большими телескопами.

В комплексной проблеме эволюции Li и Be можно выделить следующие основные задачи:

1. *Разрушение ядер Li при переходе от звезд класса F к маломассивным G-карликам с конвективными оболочками*

Эффект понижения содержания Li в атмосферах звезд главной последовательности при постепенном переходе к более холодным звездам известен давно и изучен по фотографическим спектрам. Была построена соответствующая этим измерениям модель истощения Li за счет перемешивания вещества оболочки. Применение малощумящих твердотельных светоприемников позволило определить, что содержание Li понижается примерно в 100 раз при переходе от спектрального класса GIV к KIV, т.е. падение интенсивности линии Li оказалось значительно более резким, чем это следовало из фотографических наблюдений, и потребовалось ввести дополнительный механизм истощения Li в ходе эволюции до главной последовательности.

2. *Диффузия ионов Li и Be вдоль радиуса оболочки*

После появления матриц приборов зарядовой связи, чувствительных и в УФ диапазоне, появилась возможность тщательно исследовать соотношение содержаний Li и Be, а также сравнить их с результатами определения содержаний других элементов. Если бы у исследованных F-карликов с дефицитом Be одновременно наблюдались еще и избытки Na и Si и дефицит Mg, Ca и Sc, тогда по аналогии с Am- и Fm-звездами истощение легких элементов Li и Be в верхних слоях атмосферы можно было бы объяснить процессами диффузионного разделения элементов. Однако таких особенностей в химическом составе звезд с нормальным и пониженным содержанием Be не найдено. Следовательно, низкое содержание Be и Li определяется не процессом диффузии, а процессами глобального перемешивания, уменьшающими

содержание легко разрушаемых ядер, но не изменяющимися содержания других элементов.

### 3. Глубина перемешивания оболочки

Установлено, что карлики диска с дефицитом Ве имеют и большой дефицит Li. Случаи, когда при неизменном, дозвездном содержании Li наблюдается дефицит Ве, неизвестны. Ядра Ве эффективно разрушаются при более высокой температуре ( $3,5 \cdot 10^6$  К), чем ядра Li ( $2,5 \cdot 10^6$  К). Известны случаи, когда содержание Li уменьшено, а содержание Ве осталось дозвездным, т.е. в данном случае перемешивание затрагивает слои, где эффективно выгорает Li, а Ве еще сохраняется. Скорость выгорания  ${}^6\text{Li}$  в 100 раз превосходит скорость выгорания  ${}^7\text{Li}$ . Следовательно, существует принципиальная возможность исследовать процессы разрушения лития на более коротких временах или при менее эффективном перемешивании оболочек.

### 4. Изменение содержания Li с возрастом и массой звезды

Задача решается путем спектроскопии звезд в рассеянных скоплениях разного возраста. Переходя к более старым скоплениям диска, наблюдаем смещение низкотемпературного завала  $N_{\text{Li}}(T_e)$  в область более горячих звезд. В узком температурном интервале вблизи  $T_e = 6600$  К у нескольких рассеянных скоплений обнаружен провал в концентрации  $N_{\text{Li}}$ . Наличие провала и его глубина зависят от возраста скопления, и провал не образуется на стадии до главной последовательности. Для объяснения провала предложен механизм диффузии, эффективность которой снижается на низкотемпературной части кривой  $N_{\text{Li}}(T_e)$  из-за перемешивания. На высокотемпературной части кривой  $N_{\text{Li}}(T_e)$  за время жизни скопления механизм диффузии не успевает создать существенный дефицит Li в звездной атмосфере.

### 5. Изменение содержания Li с возрастом дозвездного вещества

Сложная картина зависимости содержания Li от температуры звезды резко ограничивает число членов скопления, по спектрам которых можно определить дозвездное содержание Li. По таким звездам, расположенным между точкой поворота и литиевым провалом, построена зависимость содержания Li в дозвездном веществе от возраста исследованного скопления. Повидимому, в диске Галактики идет синтез Li, часть которого не успевает разрушиться в звездном состоянии и попадает в межзвездную среду, из которой образуются более молодые звезды.

### 6. Синтез ядер Li и Ве после образования диска Галактики

Из-за разрушения Li и Ве протонами необходимы особые условия быстрой транспортировки этих ядер из зоны синтеза. Синтез легких элементов возможен на фронте сильной ударной волны, движущейся в оболочке Сверхновой. Легкие элементы образуются в реакциях скальвания на тяжелых ядрах в том случае, если в зоне прогрева ионов на фронте ударной волны энергия частиц превышает 2 МэВ на нуклон. В Сверхновых с начальным содержанием химических элементов, типичным для населения I, на фронте ударной волны в значительном количестве образуются только изотопы  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^{11}\text{B}$ , а в случае химсостава, типичного для населения II, — только  ${}^7\text{Li}$ . Наиболее интересной возможно-

стью является модель синтеза  ${}^7\text{Li}$  при вспышках Новых. Данные наблюдений свидетельствуют о значительном обогащении вещества Новых элементами С, N, O и Ne, а модели быстрых Новых при солнечном начальном содержании  ${}^3\text{He}$  дают обогащение  ${}^7\text{Li}$  более чем в 100 раз. Однако для наблюдаемого содержания  ${}^7\text{Li}$  в Галактике требуется либо сильно увеличить частоту вспышек Новых, либо в 10 раз увеличить содержание  ${}^3\text{He}$ , что не подтверждается наблюдениями межзвездной среды.

### 7. Роль реакций скальвания на галактических космических лучах

Порядок расположения ядерных сечений реакций скальвания протонами и  $\alpha$ -частицами на ядрах С, N и O повторяет (за исключением  ${}^7\text{Li}$ ) порядок расположения содержаний изотопов Li, Ве и В. Время, необходимое для образования наблюдаемого в диске содержания Ве, сравнимо с временем жизни Галактики. Эти обстоятельства легли в основу модели образования ядер Li, Ве и В в реакциях скальвания на галактических космических лучах. Важным элементом модели является предположение о постоянстве потока и спектра ГКЛ на шкале  $10^{10}$  лет. Наблюдательным тестом модели является изучение соотношения изотопов  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ . Это требует применения предельных значений спектрального разрешения ( $R > 10^5$ ). Исследования атмосфер ярких карликов и субкарликов, а также спектроскопия межзвездной среды показали, что соотношение  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} < 0,1$ , тогда как модель скальвания дает  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0,5$ . Следовательно, для объяснения образования  ${}^7\text{Li}$  следует искать другие причины. С увеличением числа определений содержания Ве в атмосферах самых старых звезд Галактики поставлены новые вопросы. Во-первых, содержание Ве линейно зависит от содержания кислорода, тогда как модель образования ядер Ве в реакциях скальвания на космических лучах дает квадратичную зависимость. Во-вторых, наблюдаемое отношение содержаний  $N_{\text{В}}/N_{\text{Ве}} = 5$ , а в модели скальвания  $N_{\text{В}}/N_{\text{Ве}} = 15$ . И, наконец, если принять модель образования Li на ГКЛ, то наблюдаемое соотношение  ${}^7\text{Li}/\text{Ве}$  не соответствует модельному  $N_{\text{Li}}/N_{\text{Ве}} = 10^{-[\text{Fe}/\text{H}]}$ . Таким образом, классическая модель синтеза легких ядер на ГКЛ поставлена под сомнение. Слабым местом этой модели является предположение о том, что спектр ГКЛ в эпоху формирования Галактики тождественен наблюдаемому сегодня. Спасти модель можно увеличением доли высокоэнергичных ГКЛ ( $E > 200$  МэВ) в ранней Галактике.

### 8. Оценки содержания реликтового лития

Население диска Галактики характеризуется разнообразием значений содержания Li в звездных атмосферах. Для старого населения гало, начиная с  $[\text{Fe}/\text{H}] < -1,5$ , характерно постоянное значение содержания Li. Исключения составляют звезды с температурами ниже 5500 К — здесь Li все-таки разрушается за миллиарды лет жизни субкарлика путем перемешивания оболочки с областями, где протекает протонный цикл. Существуют два пути оценки концентрации первичного Li. Во-первых, можно принять в качестве космологического значения содержания Li в атмосферах субкарликов,  $N_{\text{Li}} = 1,2 \cdot 10^{-10} N_{\text{H}}$ . Барийная плотность в стандартной однородной модели, полученная с использованием этой величины, совпадает с плотностями, оцененными по дейтерию и гелию. Все эти плотности малы, и поэтому

Вселенная не может быть замкнута нуклеонами. Во-вторых, можно принять в качестве нижней оценки космологического значения величину содержания Li в атмосферах молодых карликов диска,  $N_{\text{Li}} = 10^{-9} N_{\text{H}}$ , и предположить, что в более старых объектах большая доля Li разрушена. В пользу этого варианта говорит и то обстоятельство, что существуют хорошо разработанные механизмы разрушения Li и механизмы удаления Li из атмосферы, но неизвестны эффективные способы увеличения содержания Li на порядок при переходе от гало к диску.

#### 9. Проблема определения содержания реликтового бериллия

Ядра Li разрушаются быстрее, чем ядра Be. Независимость содержания Li от возраста субкарликов может означать, что ядра Li не успели разрушиться в значимых количествах, тогда и ядра Be в этих же атмосферах заведомо не разрушались, т.е. имеется принципиальная возможность измерить дозвездное, первичное содержание Be. Первая оценка содержания Be в атмосферах субкарликов выполнена еще по наблюдениям ИЗС IUE и составляет  $N_{\text{Be}} < 3 \cdot 10^{-12} N_{\text{H}}$ . После оснащения фокуса Кудэ 3,8-метрового телескопа ААТ эшелле-спектрометром с двумерным счетчиком фотонов выполнены первые высокоточные наземные наблюдения ВеII  $\lambda 3130\text{Å}$ . Оказалось, что в отличие от Li при низких металличностях содержание Be не выходит на плато, а монотонно падает с понижением металличности (увеличением возраста), и минимальное значение составляет  $N_{\text{Be}} = 10^{-13} N_{\text{H}}$ . Обилие Be, вычисленное в рамках однородной стандартной модели Большого Взрыва, составляет  $N_{\text{Be}} = 10^{-18} N_{\text{H}}$  и находится гораздо ниже предела наблюдательных возможностей.

#### 10. Первичный нуклеосинтез с неоднородным распределением плотности

Наблюдательные данные о первичном обилии легких элементов  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$  находятся в хорошем согласии с предсказаниями нуклеосинтеза в стандартной модели Большого Взрыва. Одним из базовых предположений стандартной модели является однородное распределение материи. Если допустить существование флуктуаций плотности в очень ранней Вселенной, то вследствие неодинаковой диффузии нейтронов и протонов из областей высокой плотности возможен дополнительный нуклеосинтез. Предсказывается содержание Be, на три порядка превосходящее  $N_{\text{Be}}$  в стандартной модели. При учете обратной диффузии нейтронов в богатые протонами области указанное различие в содержании Be между однородной и неоднородной моделями снижается. Аналогично литиевому плато, указывающему, по-видимому, на космологическое значение содержания Li, при достижении какого-то минимального значения металличности должно начаться бериллиевое плато, это позволит измерить космологическое содержание Be. Поэтому наблюдения резонансного дублета ВеII  $\lambda 3130\text{Å}$  в спектрах субкарликов являются сегодня одной из важнейших спектроскопических задач, имеющей отношение к проблеме первичных неоднородностей вещества.

Ключевыми наблюдательными программами в проблеме эволюции легких элементов считаем задачу определения изотопного отношения  $^6\text{Li}/^7\text{Li}$  в звездах и в

межзвездной среде, задачу уточнения средней величины содержания  $^7\text{Li}$  в атмосферах наиболее старых звезд гало, задачу массовых определений содержания Be в атмосферах субкарликов.

Основные характеристики спектральной аппаратуры первого поколения (спектральное разрешение, эффективность светоприемников, спектральный диапазон), которой был оснащен 6-метровый телескоп БТА во второй половине 70-х годов, не удовлетворяют ни одному из требований, обеспечивающих выполнение перечисленных ключевых программ. В течение 1989–1992 гг. в САО РАН разработан, изготовлен и используется в наблюдениях комплекс аппаратуры высокого спектрального разрешения, ориентированный на применение отечественных твердотельных светоприемников — матриц приборов зарядовой связи. В состав комплекса входят:

1) Эшелле-спектрометр фокуса Кудэ 1-метрового телескопа (максимальное спектральное разрешение  $R = 1,5 \cdot 10^5$ ). Применяется в задаче определения изотопного отношения  $^6\text{Li}/^7\text{Li}$  в атмосферах ярких звезд и в межзвездной среде.

2) Эшелле-спектрометр фокуса Нэсмита 6-метрового телескопа ( $R = 2,5 \cdot 10^4$ ). Применяется в задаче массового определения содержания Li в атмосферах самих старых непроэволюционировавших звезд Галактики. Изучена выборка старых звезд гало, что позволило понизить ошибку определения первичного  $^7\text{Li}$ . Кроме содержания Li методом моделей атмосфер мы определяем содержание еще 20 химических элементов, синтезируемых в принципиально других процессах.

В отличие от резонансного дублета LiI  $\lambda 6707\text{Å}$ , наблюдения резонансного дублета ВеII  $\lambda 3130\text{Å}$  весьма затруднительны. Во-первых, в этой области спектра субкарлики излучают меньше, чем в красном диапазоне; во-вторых, поглощение озоном составляет здесь около полутора звездных величин; в-третьих, существует проблема адекватного светоприемника (необходимо иметь матрицу ПЗС с УФ чувствительностью); в-четвертых, спектрометр должен иметь хорошее пропускание в ультрафиолете (все светосильные спектрометры, как правило, разрабатывались для диапазонов с  $\lambda_{\text{min}} > 3300 - 3600\text{Å}$ ). Для преодоления этих трудностей нами разработан и изготовлен эшелле-спектрометр первичного фокуса 6-метрового телескопа ( $R = 5 \cdot 10^4$ ). Прибор ориентирован на исследование содержания Be в атмосферах субкарликов, а также для определения содержания Li в звездах и в межзвездной среде.

Все перечисленные спектрометры пригодны и для решения широкого круга других спектроскопических задач.

Работы по уточнению первичного содержания Be и Li выполняются при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 93-02-17196 и проект 94-02-03281-а).

#### Список литературы

- Andersen J, Gustafsson B, Lambert D L *Astron. and Astrophys.* **136** 65 (1984)  
 Voesgaard A M, Tripicco M J *Astrophys. J.* **302** L49 (1986)  
 Борисенко А Н, Маркелов С В, Рядченко В П. *Препринт Спец. астр. обсерв. РАН* № 76 (Зеленчук, 1991)  
 Cayrel R, Cayrel de Strobel D, Campbell B *Astrophys. J.* **283** 205 (1984)  
 Charbonneau P, Michaud G *Astrophys. J.* **334** 746 (1988)

- Dearborn D S, Schramm D, Steigman G, Truran J *Astrophys. J.* **347** 455 (1989)  
 Gilmore G, Gustafsson B, Edvardsson B, Nissen P E *Nature* **357** 379 (1992)  
 Kajino T, Boyd R N *Astrophys. J.* **359** 267 (1990)  
 Menequzzi M, Audouze J, Reeves H *Astron. and Astrophys.* **15** 337 (1971)  
 Michaud G *Astrophys. J.* **302** 650 (1986)  
 Мусаев Ф А *Письма Астрон. ж.* **19** 776 (1993)  
 Панчук В Е, Клочкова В Г, Галазутдинов Г А и др. *Письма Астрон. ж.* **19** 1061 (1993)  
 Spite M, Spite F *Astron. and Astrophys.* **115** 357 (1982)  
 Terasava N, Sato K *Astrophys. J.* **362** L47 (1990)

PASC numbers: 97.60.Jd, 97.60.Lf

**Г.М. Бескин, С.Н. Митронова, С.И. Неизвестный, В.Л. Плохотниченко, М.Ю. Попова.** Исследования релятивистских и быстропеременных объектов с высоким временным разрешением

1. В Специальной астрофизической обсерватории РАН с 1972 г. проводится эксперимент МАНИЯ (Многоканальный Анализ Наносекундных Изменений Яркости) — обширная программа поиска и изучения переменности на временах от  $10^{-7}$  до  $10^2$  с астрофизических объектов различных классов.

Такого рода изменения блеска обусловлены нестационарными процессами трансформации энергии в сильных гравитационных и/или магнитных полях черных дыр и нейтронных звезд (одиночных и входящих в двойные системы), белых карликов, активных областей на вспыхивающих звездах. Наблюдения этих объектов с высоким временным разрешением позволяют судить как об их физических свойствах, так и о закономерностях их взаимодействия с аккрецирующей плазмой. Основной метод исследований — фотометрия с временным разрешением  $10^{-7}$  с. Наблюдения проводятся синхронно в двух UBVR-полосах (до 1992 г. — в одной полосе) с помощью фотометра на счете фотонов, установленного в одном из фокусов 6-метрового оптического телескопа, преобразователя "время-код" "Квантохрон" и РС АТ-386. Аппаратура позволяет определять моменты регистрации отдельных фотонов с точностью  $\pm 20$  нс, последовательности таких событий далее анализируются различными статистическими методами. Об оборудовании и способах обработки наблюдательной информации сообщается в работах [1–3].

Следует подчеркнуть, что идейные основы эксперимента были заложены В.Ф. Шварцманом [4], под его руководством был создан аппаратный комплекс, разработаны алгоритмы поиска переменности. После его кончины в 1987 г., сотрудники созданной им группы продолжают исследования по намеченной им программе.

Ниже приводятся некоторые результаты поиска и исследования релятивистских и быстропеременных объектов с высоким временным разрешением на 6-метровом телескопе.

## 2. Поиск одиночных черных дыр звездных масс

В 1971 г. Шварцман показал [5], что вокруг одиночной черной дыры звездной массы должен образовываться светящийся ореол из аккрецирующего на нее газа. Спектр ореола лишен линий, основное энергетическое излучение приходится на оптический диапазон. Интенсивность излучения аккрецирующей на черную дыру плазмы должна изменяться на характерных временах

$\tau \sim r_g/c \sim 10^{-5}$  с. Последнее свойство является критическим признаком для отождествления какого-либо объекта с черной дырой.

Было отобрано около 200 объектов, спектры которых лишены линий. Часть из них находится близко от Солнца ( $< 200$  пк) — это ДС-карлики, обладающие большими собственными движениями. Другая категория объектов-кандидатов в черные дыры — РОКОСы — звездобразные радиообъекты с континуальными оптическими спектрами.

В течение 1980–1987 гг. были исследованы 20 ДС-карликов и 20 РОКОСов. Ни в одном случае переменность на временах  $10^{-6}$ – $10^2$  с не зарегистрирована [6, 7].

Отсутствие черных дыр среди наблюдавшихся 20 ДС-карликов позволяет получить верхнюю границу для доли черных дыр относительно плотности обычных звезд вблизи Солнца —  $5 \cdot 10^{-4}$ . Эта величина близка к доле звезд с массами, превышающими  $30 M_{\odot}$ .

## 3. Исследование пульсаров

### 3.1. Анализ кривой блеска пульсара в Крабе

В 1986 г. был проведен цикл наблюдений пульсара PSR 0532+21 в R-полосе, в течение которого зарегистрировано около 2 миллионов фотонов от пульсара. Использование стабилизированного реперного сигнала позволило, свернув данные с определенным по ним самим топоцентрическим периодом, получить кривую блеска с разрешением 3,3 мкс [8]. Вершина главного пульса уплощена, ее длительность на уровне 90% от максимума — 230 мкс (рис. 1). Главный импульс не имеет тонкой структуры, верхний предел для ее относительной амплитуды составил 10% на временах 3,3 мкс. С другой стороны, амплитуды спорадических всплесков длительностью от  $5 \cdot 10^{-7}$  до  $6 \cdot 10^{-5}$  с не превышает 6 и 18% соответственно. Таким образом, характеристики частиц и магнитного поля в зоне генерации оптического излучения весьма стабильны и однородны.

### 3.2. Поиски оптического излучения миллисекундных радиопульсаров

Мы исследовали первый миллисекундный пульсар PSR 1937+21 с периодом 1,56 с и входящий в двойную систему пульсар PSR 1953+29 с периодом 6,1 с. Наблюдения проводились в белом свете с диафрагмами 4,5" и 7". Диафрагмы устанавливались по радиокоординатам объектов, от каждого из которых было накоплено несколько миллионов фотонов. Поиски периодов проводились с помощью специальной программы на основе предвычисленных топоцентрических значений. Использовались около 500 пробных периодов. Ни в одном случае после сворачивания данных не было замечено значимых отклонений от пуассоновского разброса. Таким образом, блеск обоих оптических пульсаров не превышает в полосе в  $26^m$ ,  $5$ – $27^m$  [9].

## 4. Исследования вспыхивающих звезд типа UV Ceti

В течение 1983–1986 гг. было проведено несколько циклов наблюдений красных карликов UV Ceti, CN Leo, Wolf 424, V 577 Mon. Всего было зарегистрировано более 100 всплесков с временным разрешением  $5 \cdot 10^{-7}$  с. Статистический анализ накопленной информации показал, что у 90% всплесков длительность переднего фронта меньше 10 с, в четырех случаях блеск возрастал за 0,3–0,8 с (рис. 2), длительность деталей кривых блеска в максиму-