

4-99-96

На правах рукописи
УДК 539.189

М-77

МОНАХОВ
Дмитрий Евгениевич

БЕЗРАДИАЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ
В МАЛОЧАСТИЧНЫХ СИСТЕМАХ
С КУЛОНОВСКИМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1999

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова
Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
профессор

В. Б. Беляев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Л. Д. Блохинцев

доктор физико-математических наук

Я. Реван

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт физики Санкт-Петербургского государственного университета

Защита диссертации состоится на заседании диссертационного Совета К 047.01.01 Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований "9" июни 1999 г. по адресу: 141980 г. Дубна, Московская область, ЛТФ ОИЯИ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "21" апрель 1999 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета:
доктор физико-математических наук

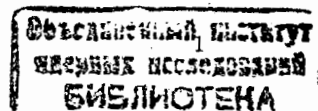

А. Е. Дорохов

Общая характеристика работы

Актуальность

В настоящей диссертации рассматривается несколько малочастичных систем, исследование которых крайне актуально для различных областей современной физики. Одной из таких задач является безрадиационный синтез ^8B в солнечной плазме. Исследование этого процесса представляет большой интерес в связи с проблемой солнечных нейтрино, которая остается нерешенной к настоящему моменту. Анализ экспериментальных данных приводит к парадоксальному результату: выход нейтрино при захвате электронов ядрами ^7Be должен быть сильно подавлен или даже отрицателен, а выход нейтрино в результате распада ^8B оказался в несколько раз меньше теоретически предсказанного стандартной моделью Солнца. Для разрешения упомянутого выше парадокса необходимо проанализировать все возможные каналы уничтожения ядер ^7Be , в частности сечение образования ^8B в результате захвата протонов ядром ^7Be при низких (~ 20 кэВ) энергиях. Экспериментальные данные из-за большого кулоновского барьера между ядрами имеются только для более высоких энергий (~ 120 кэВ), и в дальнейшем их приходится экстраполировать в область низких энергий, что может привести к значительной ошибке.

В работе предложен подход, где в отличие от стандартной модели рассматриваются реакции, начальное состояние которых может представлять собой не только две (*бинарные реакции*), но и три частицы (*трехчастичные реакции*) в непрерывном спектре. Между этими двумя подходами существуют по крайней мере два существенных отличия, которые условно можно классифицировать как кинематические и динамические. Первое представляет собой разницу в правилах от-



бора в бинарных и трехчастичных реакциях, второе вытекает из взаимозависимости различных ядерных процессов. Так некоторые бинарные ядерные реакции, запрещенные законами сохранения (спин, изоспин, четность, и т.д.), возможно смогут протекать при наличии третьей частицы, также участвующей в законах сохранения. Таким образом, трехчастичный механизм может снимать кинематические ограничения на некоторые бинарные реакции и играть существенную роль в ядерных процессах внутри звезд, где плотность вещества достаточно велика. Динамика трехчастичного движения тоже может привести к иной физической картине: процессы, рассматриваемые как независимые в двухчастичном подходе, станут зависимыми при включении трехчастичной динамики. Например, процессы $e^- + {}^7\text{Be}$ и $p + {}^7\text{Be}$ в этом случае станут зависеть друг от друга, поскольку они могут начинаться из одного начального состояния $e^- + p + {}^7\text{Be}$.

Следующей актуальной задачей, рассмотренной в диссертации, является вычисление Оже распада метастабильных состояний антипротонного атома гелия $\text{He}\bar{p}$, который представляет собой обычный атом гелия, где один из электронов заменен на антипротон. В последние годы к его изучению обращено большое внимание как теоретиков, так и экспериментаторов, поскольку он является единственным примером долгоживущей системы нескольких тел атомного масштаба, содержащей антипротон. Кроме того, антипротонный гелий, обладающий чрезвычайно большим угловым моментом, живет микросекунды, что гораздо больше обычного времени жизни антипротона в среде (около 10^{-12} с). Продолжительное время жизни антипротонного гелия объясняется следующими причинами. Большое значение полного углового момента $\sim 30 - 40$ сосредоточено в основном в

угловом моменте между тяжелыми частицами, что является причиной центробежного барьера, который подавляет процессы аннигиляции. Экранирование антипротона электроном подавляет в свою очередь процессы девозбуждения за счет столкновений с окружающими атомами обычного гелия. Таким образом, основным каналом распада, определяющим время жизни и кинетику долгоживущих состояний антипротонного гелия, становится процесс испускания электрона, т.е. Оже переход.

Целью работы является:

- выяснение роли тройных столкновений в солнечной плазме при производстве ядра ${}^8\text{B}$;
- количественное определение роли Оже распада в эволюции метастабильных состояний антипротонного гелия;
- исследование возможности существования трехатомной мюонной молекулы водорода.

Научная новизна и практическая ценность.

- Впервые исследовано влияние электрона непрерывного спектра на скорость реакции захвата протона ядром ${}^7\text{Be}$, и впервые вычислена скорость безрадиационного захвата в присутствии электрона в непрерывном спектре.
- Установлены компоненты волновой функции антипротонного гелия, определяющие амплитуду Оже перехода и реализован метод расчета таких компонент; определены скорости распада ряда состояний антипротонного гелия.

- Впервые исследована возможность существования трехатомной мюонной молекулы и найдены ее основные свойства. В частности, даны оценки энергии основного состояния, размеров системы и скорости Оже распада. Показано, что наличие окологорогового ядерного резонанса ${}^6\text{Li}^*$ может привести к значительному увеличению вероятности ядерного синтеза трех дейтонов.

На защиту выдвигаются следующие результаты:

- оценка роли тройных столкновений в производстве ${}^8\text{B}$ на солнце; расчет скорости реакции $p + e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + e^-$;
- выявление компонент волновой функции антипротонного гелия, определяющих амплитуду Оже перехода, реализация метода расчета таких компонент и его применение для вычисления скорости Оже перехода ряда долгоживущих состояний антипротонного гелия;
- предсказание существования трехатомной мюонной молекулы $D_3\mu$, оценки для ее основных свойств: энергии основного состояния, размеров системы и скорости Оже распада; исследование влияния окологорогового ядерного резонанса ${}^6\text{Li}^*$ на вероятность ядерного синтеза трех дейтонов.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на XV International Conference on Few-Body Problems in Physics, Groningen, Netherlands, July 22–26, 1997; XVI European Conference on Few-Body Problems in Physics, Autrans, France, June 1-6, 1998; Exotic Atoms, Molecules and μCF , Ascona, Switzerland July 19-24 1998 и на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, Дубна.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1]–[6].

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения и трех глав. Общий объем диссертации 90 страниц машинописного текста, включая 11 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 66 наименований.

Содержание работы

Во введении показана актуальность темы и кратко изложены основные результаты работы.

В первой главе рассмотрены некоторые из реакций с ядром ${}^7\text{Be}$, которые не входят в стандартный pp -цикл. Проведен анализ влияния таких реакций на эволюцию ядра ${}^7\text{Be}$ в солнечной плазме и обсуждена их роль в интерпретации экспериментальных данных по солнечным нейтрино. В качестве примера в адиабатическом приближении рассмотрен процесс безрадиационного производства ядер ${}^8\text{B}$ в тройной реакции $p + e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + e^-$. Для внутрисолнечных условий скорость такой реакции составляет 10^{-4} от аналогичного бинарного процесса $p + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$.

В разделе 1.1 качественно исследована роль реакций тройного типа, в разделе 1.2 дано описание использованного формализма. Разделы 1.3 и 1.4 содержат вывод вспомогательных величин для вычисления скорости реакции. Результаты и их обсуждение отнесены к разделу 1.5. Некоторые детали относительно вывода скорости реакции даны в приложениях А.

Вторая глава содержит вычисление скорости Оже распада для долгоживущих состояний антипротонного атома гелия ${}^{3,4}\text{He}\bar{p}$. Были определены компоненты волновой функции, которые вносят наиболь-

ший вклад в матричный элемент перехода. В виду малости их вычисление в рамках вариационного подхода затруднительно. Для определения волновой функции, содержащей такие компоненты, был использован метод, являющийся комбинацией вариационного подхода и метода связанных каналов. Волновая функция дискретного спектра антипротонного гелия искалась в виде

$$\Psi_d^{LM} = C[\Psi_V^{LM} + \sum_{nl\lambda} f_{nl\lambda}(\rho)\Phi_{nl}(r)\mathcal{Y}_{l\lambda}^{LM}(\hat{r}, \hat{\rho})], \quad (1)$$

где Ψ_V^{LM} – волновая функция полученная вариационным методом, $\Phi_{nl}(r)$ – волновая функция водородоподобного иона He \bar{p} , $\mathcal{Y}_{l\lambda}^{LM}(\hat{r}, \hat{\rho})$ – бисферическая гармоника, C – константа нормировки. Для нахождения неизвестных функций $f_{nl\lambda}(\rho)$ решалась система неоднородных дифференциальных уравнений. Использование такого подхода позволило получить более точное описание малых компонент волновой функции, играющих решающую роль в определении скорости Оже перехода. Полученная таким методом волновая функция была использована для расчета скорости Оже распада ряда состояний антипротонного гелия.

Показано, что некоторые метастабильные состояния обладают энергией близкой к энергии специфических короткоживущих состояний, обладающих особенным строением волновой функции. В короткоживущих состояниях электрон находится главным образом в p, d, \dots – волне, в то время как в долгоживущих состояниях он почти полностью s – волновой. Вычисление скоростей распада для таких метастабильных состояний требует учета примеси волновой функции короткоживущего состояния, что было сделано в рамках двухуровневой модели.

В разделе 2.1 представле основной формализм, в разделе 2.2 описан вариационный метод, раздел 2.3 содержит анализ вкладов в матрич-

ный элемент перехода от различных компонент волновой функции, в разделах 2.4 и 2.5 рассмотрены метод связанных каналов и волновая функция конечного состояния соответственно. Результаты численного расчета представлены в 2.6, результаты и их обсуждение отнесены к разделу 2.7. Формулы двухуровневой модели выделены в приложение В, а формулы для матричных элементов в приложение С.

В третьей главе проведен расчёт размеров и энергии основного состояния трех–дейтонной мюонной молекулы $D_3\mu$. Оказалось, что эта молекула имеет два состояния равновесия, одно обладает характерными размерами по порядку величины для мюонных систем, другое – обычных электронных размеров. Было показано, что вероятность слияния дейтонов может значительно увеличиться из-за наличия порогового резонанса ${}^6\text{Li}^*$. Сделанные оценки показали, что эта вероятность значительно выше, чем скорость распада, вызванного Оже переходом.

В разделе 3.1, используя метод сходный с методом Борна–Оппенгеймера, произведен расчет энергии и размеров молекулы $D_3\mu$. Оценки для скорости ядерного перехода и, конкретно, для фактора усиления вследствие промежуточного резонанса в ${}^6\text{Li}^*$ получены в разделе 3.2. Для сравнения скорости ядерной реакции со скоростью обычного атомного распада в разделе 3.3 дана оценка для вероятности Оже перехода. Обсуждение результатов отнесено к разделу 3.4. И, наконец, некоторые детали, связанные с вычислением скорости Оже перехода, приведены в приложении D.

Публикации по результатам диссертации

- 1 V. B. Belyaev, D. E. Monakhov, N. V. Shevchenko, S. A. Sofianos, S. A. Rakityansky, M. Braun, L. L. Howell, W. Sandhas, Nucl. Phys. A **631** 720c (1998).
- 2 D. E. Monakhov, V. B. Belyaev, S. A. Sofianos, S. A. Rakityansky, W. Sandhas, Nucl. Phys. A **635** 257 (1998).
- 3 O. I. Kartavtsev, S. I. Fedotov and D. E. Monakhov, Hyp. Inter. **109**, 125 (1997).
- 4 D. E. Monakhov, V. B. Belyaev, S. A. Sofianos, W. Sandhas, Phys. Rev. A **58** 2760 (1998).
- 5 O. I. Kartavtsev, D. E. Monakhov and S. I. Fedotov to be published in Hyp. Inter. **118/119** (1999).
- 6 D. E. Monakhov, V. B. Belyaev, S. A. Sofianos, W. Sandhas, to be published Hyp. Inter. **118/119** (1999).

Рукопись поступила в издательский отдел
9 апреля 1999 года.