

На правах рукописи

ГРИГОРЕНКО

Леонид Валентинович

ДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
КВАНТОВОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ  
НЕСКОЛЬКИХ ТЕЛ ВБЛИЗИ  
ГРАНИЦЫ ЯДЕРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

Специальность 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

г. Дубна, 2009 г.

Работа выполнена в Лаборатории Ядерных Реакций им. Г.Н. Флёрва Объединенного Института Ядерных Исследований (г. Дубна).

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Ершов Сергей Николаевич

доктор физико-математических наук

Чувильский Юрий Михайлович

доктор физико-математических наук

Саперштейн Эдуард Евсеевич

Ведущая организация: Санкт-Петербургский Государственный  
Университет, Физический Факультет.

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 года в  
«\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д 520.009.03 при  
Российском научном центре «Курчатовский институт» по адресу:  
123182 Москва, пл. Курчатова 1, РНЦ «Курчатовский институт».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РНЦ «Курчатов-  
ский институт».

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук

А.Л. Барабанов

# Общая характеристика работы

## Актуальность проблемы.

Основным объектом исследования в представленной работе является двухпротонная радиоактивность. Однако круг рассмотренных явлений оказывается гораздо шире. Это также распады с четырьмя, и даже пятью, частицами в конечном состоянии, эффекты взаимодействия нескольких тел в конечном состоянии, свойства широких состояний в континууме нескольких тел, а также реакции трёхтельного радиационного захвата в астрофизике. Объединяет выбранные для изучения вопросы то, что динамика процессов не редуцируется до привычной двухтельной, и изучение должно вестись с привлечением аппарата теории нескольких тел.

Интерес к данному классу задач определяется активным развитием экспериментальных методик работы с пучками радиоактивных ядер, дающих возможность детальных исследований ядер вдали от линии стабильности. Появляется большое количество новых, зачастую неожиданных, экспериментальных данных, нуждающихся в объяснении. Такие явления, как двух/четырёх нейтронные гало, реакции с несколькими частицами в конечном состоянии и распады на несколько частиц, часто не могут быть поняты даже на качественном уровне в рамках привычного “двухтельного” или “многотельного” мышления и требуют привлечения аппарата теории нескольких тел.

## Научная новизна работ

Основным полученным результатом является создание и развитие последовательных квантовомеханических методов для исследования истинно трёхчастичных распадов на заряженные фрагменты (в том числе, двухпротонной радиоактивности). Подобных методов не существовало на момент публикации наших первых работ по данной теме (2000 год); ещё не было экспериментально обнаружено и само явление двухпротонной радиоактивности (это случилось в 2002 году). На сегодняшний момент наши предсказания в этой области получи-

ли надёжное экспериментальное подтверждение, а методы, развитые в данной работе, остаются единственным теоретическим подходом, претендующим на количественное описание всех наблюдаемых для двухпротонных распадов.

Реакции трёхчастичного радиационного захвата являются обратными для реакций трёхчастичного распада. Развитие количественной теории для трёхчастичных распадов, естественно, привело к улучшению понимания обратных им астрофизических процессов. В наших работах были продемонстрированы недостатки общепринятых на сегодня методов расчёта интенсивностей трёхчастичных захватов в астрофизике и пересмотрен ряд интенсивностей, важных для изучения гр-процесса.

В рамках исследования динамически квантовомеханической задачи нескольких тел вблизи границы ядерной стабильности был исследован также ряд вопросов, представляющих значительный интерес, но ранее не рассматривавшихся:

1. Была обнаружена возможность сильного нарушения изобарической симметрии вблизи границы протонной стабильности для ядер с трёхчастичной структурой (например,  $^{12}\text{O}$ ,  $^{16}\text{Ne}$ ,  $^{17}\text{Ne}$ ,  $^{19}\text{Mg}$ ). Был изучен трёхчастичный механизм нарушения изобарической симметрии и формирования Томас-Эрмановского сдвига.
2. На примере  $^{17}\text{Ne}$  была продемонстрирована возможность существования двухпротонного ядерного гало. Было показано, какие наблюдаемые надо изучить экспериментально для установления наличия двухпротонного ядерного гало в  $^{17}\text{Ne}$ .
3. Был разработан метод оценки ширины пятичастичного распада основного состояния ядра  $^7\text{H}$ . На основе этой оценки удалось получить ограничение снизу на энергию распада  $^7\text{H}$ .
4. Был разработан простой метод качественного учёта механизма реакции при заселении широких состояний в непрерывном спектре нескольких тел.

Он нашёл применение при изучении непрерывного спектра систем  ${}^5\text{H}$  и  ${}^4\text{n}$ .

5. Впервые была продемонстрирована возможность существования мягкой дипольной моды для трёхчастичных систем вблизи границы протонной стабильности. Здесь была показана важность понимания мягкой дипольной моды для реакций трёхчастичного радиационного захвата в астрофизике.
6. Трёхчастичные виртуальные состояния на сегодняшний день являются гипотетическими объектами. Свойства трёхчастичных виртуальных состояний были изучены на примере возможного основного  $0^+$  состояния в  ${}^{10}\text{He}$  со структурой  $[s^2]$ .

## Практическая ценность

Задача об истинно трёхчастичных распадах на заряженные фрагменты (о двухпротонной радиоактивности) является подмножеством более общей задачи о трёхчастичном кулоновском континууме, не разрешённой в общем случае и представляющей значительный теоретический интерес (трёхчастичные системы в атомной, ядерной физике и физике элементарных частиц обычно состоят именно из заряженных фрагментов). То, что задача о двухпротонной радиоактивности не имела удовлетворительного решения почти 40 лет после того, как была сформулирована, указывает на её нетривиальность.

Проведённые исследования имеют, однако, и непосредственные практические приложения.

1. Случай истинно трёхчастичных распадов основных состояний ядер обычно связан с энергией спаривания нуклонов вблизи границы ядерной стабильности и не является в этом смысле экзотическим. Именно этот процесс должен определять “устройство” границы ядерной стабильности в соответствующих областях. Одним из магистральных направлений развития ядерной физики низких энергий на ближайшие годы является дальнейшее

развитие исследований с пучками радиоактивных ядер. Сюда входят вводимые в строй и уже одобренные к строительству новые научные установки/лаборатории DRIBS-3 (Дубна), BigRIPS (RIKEN, Япония), GSI-FAIR (Дармштадт, Германия), ISF (Мичиган, США). Цель, которая ставится перед ними — это, в том числе, достижение границы стабильности (и выход за неё) для максимально обширных областей карты нуклидов.

2. Особенно следует подчеркнуть важность приложений развитых методов для ядерной астрофизики. Такие процессы, как, скажем, нерезонансный трёхчастичный радиационный захват, играют заметную роль в определённых астрофизических окружениях, но могут быть изучены только теоретически (в обозримом будущем принципиально не видно возможности исследовать их экспериментально). Полученные результаты уже привели к значительному пересмотру ряда интенсивностей астрофизических захватов.
3. Для планирования экспериментов по изучению радиоактивных распадов необходимо максимально сузить диапазон времён жизни, в котором ведётся поиск. Для этого требуются теоретические предсказания максимальной достоверности. Результаты настоящей работы позволяют делать такие предсказания для трёхчастичных распадов (двухпротонной радиоактивности).
4. В настоящей работе впервые была показана практическая возможность идентификации спин-четности и установления внутренней структуры ядер по корреляциям в трёхчастичных распадах (выстроенных) систем.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Разработана квантовомеханическая трёхкластерная модель истинно трёхчастичных распадов для заряженных частиц и двухпротонной радиоак-

тивности. Эта модель претендует на количественное описание ширин трёхчастичных распадов в диапазоне от  $10^5$  до  $10^{-15}$  электронвольт (интервал — 20 порядков) и корреляций среди продуктов распада.

2. Пересмотрены устоявшиеся представления об ожидаемых временах жизни и корреляциях в возможных двухпротонных распадчиках. Обнаружена связь между корреляциями среди продуктов распада и структурой двухпротонных распадчиков, позволяющая использовать двухпротонные распады в качестве метода исследования ядерной структуры.
3. Дано описание двухпротонных распадов в “точной” полуаналитической модели, использующей упрощённый трёхчастичный гамильтониан. Получено строгое обоснование использования определённых квазиклассических подходов к изучению истинно трёхчастичных распадов. Продемонстрирована непригодность дипротонной модели, долгое время считавшейся едва ли не единственным разумным приближением для двухпротонной радиоактивности.
4. Развита количественная теория реакций трёхчастичного радиационного захвата, обратных к реакциям трёхчастичного распада. Даны новые оценки интенсивностей ряда астрофизических реакций трёхтельного радиационного захвата.
5. Впервые изучены разнообразные качественные проявления динамики нескольких тел в целом ряде экзотических ядерных систем. В частности, представлено рассмотрение следующих явлений:
  - Трёхчастичный механизм нарушения изобарической симметрии (трёхчастичный механизм Томас-Эрмановского сдвига).
  - Оценки многочастичных ширин: случай  ${}^7\text{H}$ .
  - Двухпротонный распад деформированных ядер.
  - Простой метод качественного учёта механизма реакции.

- Свойства широких состояний в непрерывном спектре нескольких тел.  
Основное состояние  ${}^5\text{H}$ ,  ${}^4\text{n}$ .
- “Возбуждённое состояние” трития.
- Трёхчастичное виртуальное состояние в  ${}^{10}\text{He}$ .
- Протонное гало в  ${}^{17}\text{Ne}$ .
- Мягкая дипольная мода в  ${}^{17}\text{Ne}$ .
- Анализ корреляций из распада выстроенного  ${}^5\text{H}$ .

### Апробация работы.

Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались на следующих международных конференциях и рабочих совещаниях:

1. *Two-proton emission as a three-body decay.*

Institute of Physics (UK) Nuclear Physics Conference, April 12–14, 2000, Birmingham, UK.

2. *Two-proton emission as a three-body decay:  ${}^{19}\text{Mg}$  and  ${}^{48}\text{Ni}$ .*

Joint Study Weekend HALO'2000, April 28–30, 2000, Universite Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium.

3. *Two-proton or diproton emission:  ${}^{19}\text{Mg}$  and  ${}^{48}\text{Ni}$  examples.*

European Conference on Few-body Problems in Physics, September 11–16, 2000, Évora, Portugal.

4. *Problems of two-proton radioactivity and three-body decay.*

North-West Europe Nuclear Physics Conference, April 17–20, 2001, Bergen, Norway.

5. *Three-body decays of light nuclei:  ${}^6\text{Be}$ ,  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{O}$ ,  ${}^{16}\text{Ne}$  and  ${}^{17}\text{Ne}$ .*

3rd International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses, ENAM 2001, July 2–8, 2001, Hämeenlinna, Finland.

6. *Problems of two-proton radioactivity and three-body decay.*



International Workshop on the Physics of Halo Nuclei, October 4–12, 2001, ECT\*, Trento, Italy.

7. *Problems of two-proton radioactivity and three-body decay.*

International meeting on the Physics of Halo Nuclei, April 25–26, 2002, hosted by GSI, Weschnitz, Germany.

8. *Broad states in the few-body systems.*

Joint Study Weekend HALO'2002, June 14–16, 2002, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

9. *Two-proton radioactivity and three-body decay: problems and perspectives.*

International Workshop on the Shell model in the Continuum, June 3–8, 2002, ECT\*, Trento, Italy.

10. *Theory of two-proton radioactivity and prospective candidates for experimental studies.*

International Symposium on Proton Emitting Nuclei PROCON 2003, February 12–14, 2003, Legnaro-Padova, Italy.

11. *Few-body continuum ground states.*

Joint Study Weekend HALO'2003, June 26–29, 2003, St. Petersburg, Russia.

12. *Three-body radiative capture reactions in astrophysics.*

International Workshop XXXIV on Gross Properties of Nuclei and Nuclear Excitations, Hirschegg, Kleinwalsertal, Austria, January 15–21, 2006.

13. *Recent progress in the theory of two-proton radioactivity and three-body decay.*

International Conference Cluster 2007, Stratford-upon-Avon, UK, September 3–7, 2007.

14. *Recent progress in the theory of two-proton radioactivity and three-body decay.*

ESNT Workshop: Three-body scattering theory and its applications, CEA/Saclay, France, December 10–14, 2007.

Материалы, вошедшие в диссертацию, также докладывались на следующих

приглашённых семинарах:

1. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, November 1999.  
*Quantum mechanical approach to 2p radioactivity. Qualitative issues.*
2. University of Surrey, Guildford, UK, February 2000.  
*Two-proton emission as a three-body decay.*
3. Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Germany, March 2000.  
*Two-proton emission as a three-body decay.*
4. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, June 2000.  
 *${}^5\text{H}$  in a three-body  ${}^3\text{H}+n+n$  model.*
5. Research Center “The Kurchatov Institute”, Moscow, August 2000.  
*Two-proton emission as a three-body decay.*
6. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, March 2001.  
*Revisiting the  ${}^5\text{H}$  case.*
7. University of Surrey, Guildford, UK, October 2001.  
*Three-cluster decays and 2p emission; overview.*
8. Joint Institute for Nuclear Research (JINR), FLNR, Dubna, Russia, December 2001.  
*Advances in the studies of three-body decays.*
9. Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Germany, February 2002.  
*Three-body decays and two-proton radioactivity: problems and perspectives.*
10. Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Germany, June 2002.  
*Broad states in the few-body systems: examples of  ${}^5\text{H}$  and  ${}^4\text{n}$ .*
11. Joint Institute for Nuclear Research (JINR), FLNR, Dubna, Russia, April 2003.  
*Nuclei beyond the driplines: decays and correlations.*

12. Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Germany, October 2003.

*Exotics near the driplines: few-body dynamics aspect.*

13. Joint Institute for Nuclear Research (JINR), BLTP, Dubna, Russia, December 2004.

*Recent studies of  ${}^5\text{H}$  system: theory and experiment.*

14. Institute of Nuclear Physics, Moscow state university, Moscow, Russia, February 2005.

*Two-proton radioactivity and three-body decay.*

15. Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Germany, April 2005.

*Two-proton radiative capture in astrophysics.*

16. Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Germany, April 2005.  
*On possibility to study a two-proton halo in  ${}^{17}\text{Ne}$ : nuclear fragmentation and Coulomb dissociation.*

17. Joint Institute for Nuclear Research (JINR), FLNR, Dubna, Russia, September 2005.

*Correlation studies of the  ${}^5\text{H}$  spectrum.*

18. Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Germany, October 2006.

*Correlation studies of the light exotic nuclei:  ${}^5\text{H}$  and  ${}^9\text{He}$ . Problematic issues of the  ${}^9\text{He}$  and  ${}^{10}\text{He}$  structure.*

19. GANIL, Caen, France, April 2007.

*Recent progress in the theory of two-proton radioactivity and three-body decay.*

20. University of Birmingham, Birmingham, UK, September 2007.

*Few-body dynamics in experimental studies of reactions with exotic nuclei.*

21. University of Surrey, Guildford, UK, September 2007.

*Qualitative aspects of the two-proton decays.*

22. Joint Institute for Nuclear Research (JINR), FLNR, Dubna, Russia, October 2007.

*Status of the  ${}^6\text{He}(t,p){}^8\text{He}$  and  ${}^8\text{He}(t,p){}^{10}\text{He}$  reaction studies.*

Объединённый семинар с др. ф.-м. н. М.С. Головковым.

23. Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Germany, February 2008.

*New vision of  ${}^{8,9,10}\text{He}$  spectra - theory and experiment.*

24. CENBG, Bordeaux, France, March 2008.

*Three-body continuum dynamics in the dripline nuclei.*

25. University of Seville, Seville, Spain, March 2008.

*Three-body continuum dynamics in the dripline nuclei.*

26. Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Germany, April 2008.

*Qualitative aspects of the three-body dynamics for nuclear astrophysics.*

## **Публикации.**

По результатам исследований, составивших основу диссертации, опубликовано 35 работ в реферируемых журналах. Основные результаты диссертации изложены в 27 работах, перечисленных далее. Результаты, вошедшие в эти работы, были получены автором в период 1999–2008 гг.

## **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа состоит из восьми глав (включая введение и заключение) и изложена на 196 страницах машинописного текста, включая 59 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 256 наименований.

## Содержание работы

**Первая глава** является введением, где формулируется предмет исследования, рассматривается история вопроса, делается обзор литературы, даётся краткая характеристика проведённых исследований и перечисляются основные результаты.

Когда мы говорим о важности динамики нескольких тел в рассматриваемой задаче, это означает, что движение всех (более чем двух) частиц (кластеров) в данной системе оказывается сильно скоррелировано таким образом, что волновые функции или амплитуды процессов не могут быть удовлетворительно описаны произведением двухчастичных членов (или малой суммой таких произведений). Простейшим критерием перехода к такой динамике могут быть соотношения между энергетическими порогами различных процессов в соседних ядрах.

Ярким примером такой ситуации является явление двухпротонной радиоактивности, теоретически предсказанное В. И. Гольданским в 1960 г. [V. I. Goldansky, Nucl. Phys. **19** (1960) 482], а экспериментально открытое совсем недавно (2002 г. — распад основного состояния  $^{45}\text{Fe}$ ). Энергетические условия двухпротонной радиоактивности  $S_{2p} < 0$ ,  $S_p > 0$  иллюстрируются на Рис. 1а: резонанс в подсистеме  $A - 1$  находится выше, чем в системе  $A$  и становится недоступен для последовательного распада. Распад такой системы получил название *истинно трёхчастичного*. Случай, показанный на Рис. 1а, обычно связан с энергией спаривания нуклонов вблизи границы ядерной стабильности и не является здесь экзотическим.

В диссертации рассматривается также ряд других физических систем, где динамика задачи нескольких тел становится определяющей.

**Вторая глава.** Для решения задачи трёх тел мы используем метод гиперсферических гармоник (МГГ). В этой главе кратко вводятся обозначения и очерчиваются основные идеи метода.

В МГГ при решении задачи трёх тел от Якобиевских векторов  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{Y}$  (со-

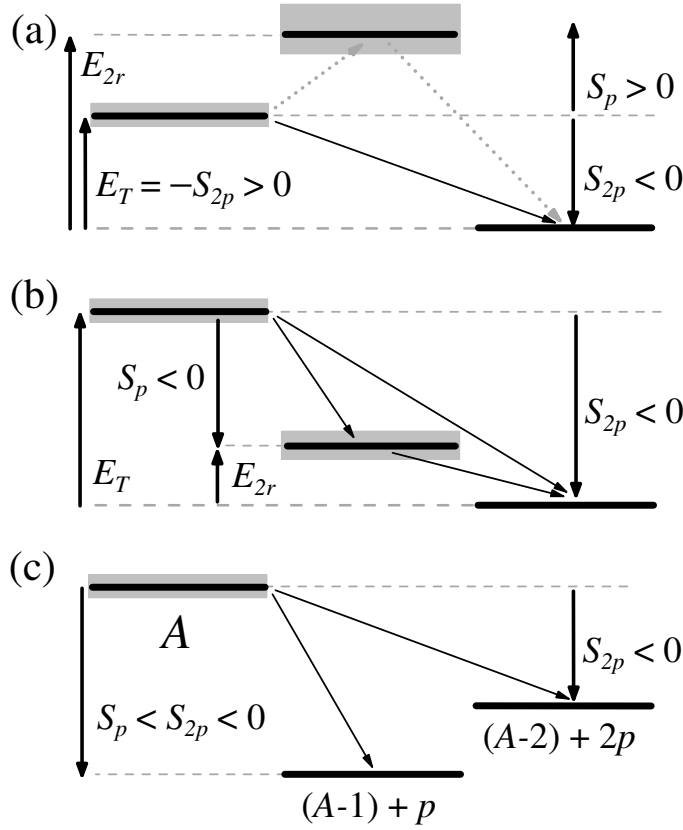


Рис. 1: Энергетические условия для различных мод трёхчастичного распада (двухпротонной радиоактивности): истинно трёхчастичный распад  $A \rightarrow (A-2)+2p$  (a) — в промежуточной системе нет состояний, доступных для последовательного распада; последовательный распад  $A \rightarrow (A-1)+p \rightarrow [(A-2)+p]+p$  (b); случай, когда одновременно открыт (обычно доминирующий) бинарный канал распада  $A \rightarrow (A-1)+p$  (c).

пряжённые им импульсы обозначаются  $k_x$  и  $k_y$ , см. Рис. 2) мы переходим к “коллективному радиусу” (гиперрадиусу)  $\rho$  и пятимерному углу  $\Omega_\rho$ , после чего формальная схема решения уравнения Шрёдингера (УШ) начинает напоминать обычное для задачи двух тел отделение угловых переменных. Расчётная схема после этого соответствует движению одной эффективной частицы в сильно деформированном центральном поле.

**Третья глава.** В этой главе строится квантовомеханическая теория трёхчастичных распадов (двухпротонной радиоактивности). В задаче о радиоактивности речь идёт об очень узких состояниях. Ширины таких состояний опреде-

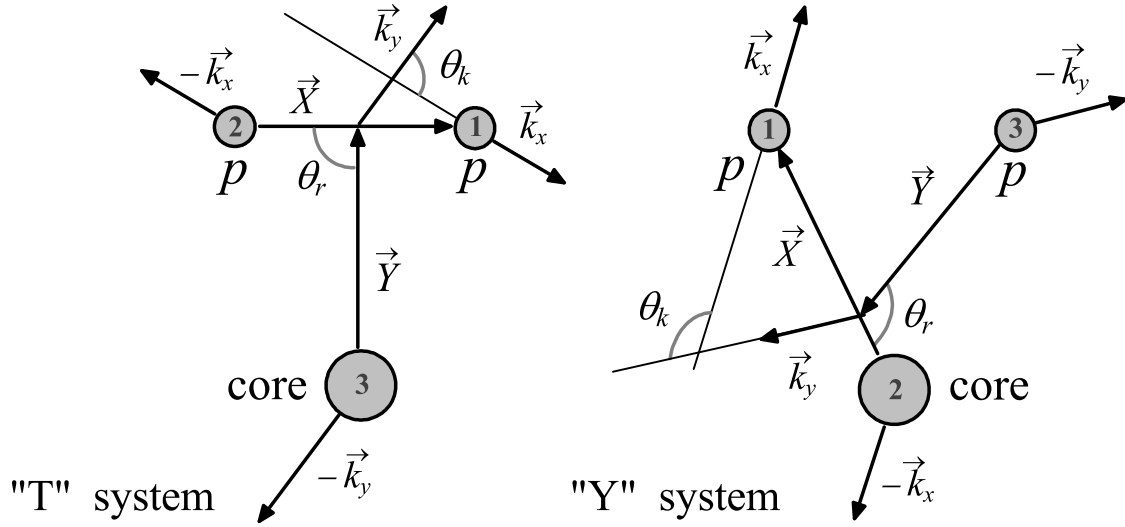


Рис. 2: Якобиевские переменные для задачи трёх тел в координатном и импульсном пространствах. Для задачи, скажем, кор+ $N+N$  (две частицы тождественны) существует две невырожденных Якобиевских системы, называемых “Т” и “У”.

ляются либо при помощи интегральных формул, либо посредством “естественного” определения ширины. Для задачи о трёхчастичном распаде оказывается применимо только второе:

$$\Gamma = j/N .$$

Здесь  $j$  — это поток через гиперсферу большого радиуса  $\rho_{\max}$ , а  $N$  — нормировка (т.е. число частиц) внутри гиперсферы  $\rho_{\text{int}}$ :

$$j = \frac{1}{M} \int d\Omega_\rho \text{Im} \left[ \Psi^{(+)\dagger} \rho^{5/2} \frac{d}{d\rho} \rho^{5/2} \Psi^{(+)} \right]_{\rho=\rho_{\max}}, \quad N = \int d\Omega_\rho \int_0^{\rho_{\text{int}}} \rho^5 d\rho |\Psi^{(+)}|^2 .$$

Волновая функция  $\Psi^{(+)}$  представляет решение трёхчастичного УШ с чисто расходящейся асимптотикой и комплексной энергией

$$(\hat{H} - E + i\Gamma/2)\Psi^{(+)} = 0 .$$

Нами было предложено использовать приближённые граничные условия Кулоновской задачи трёх тел, полученные диагонализацией Кулоновского взаимодействия на гиперсфере большого радиуса и конечном гиперсферическом базисе. Это приближение показало себя как достаточно точное для задачи об истинно трёхчастичном распаде.

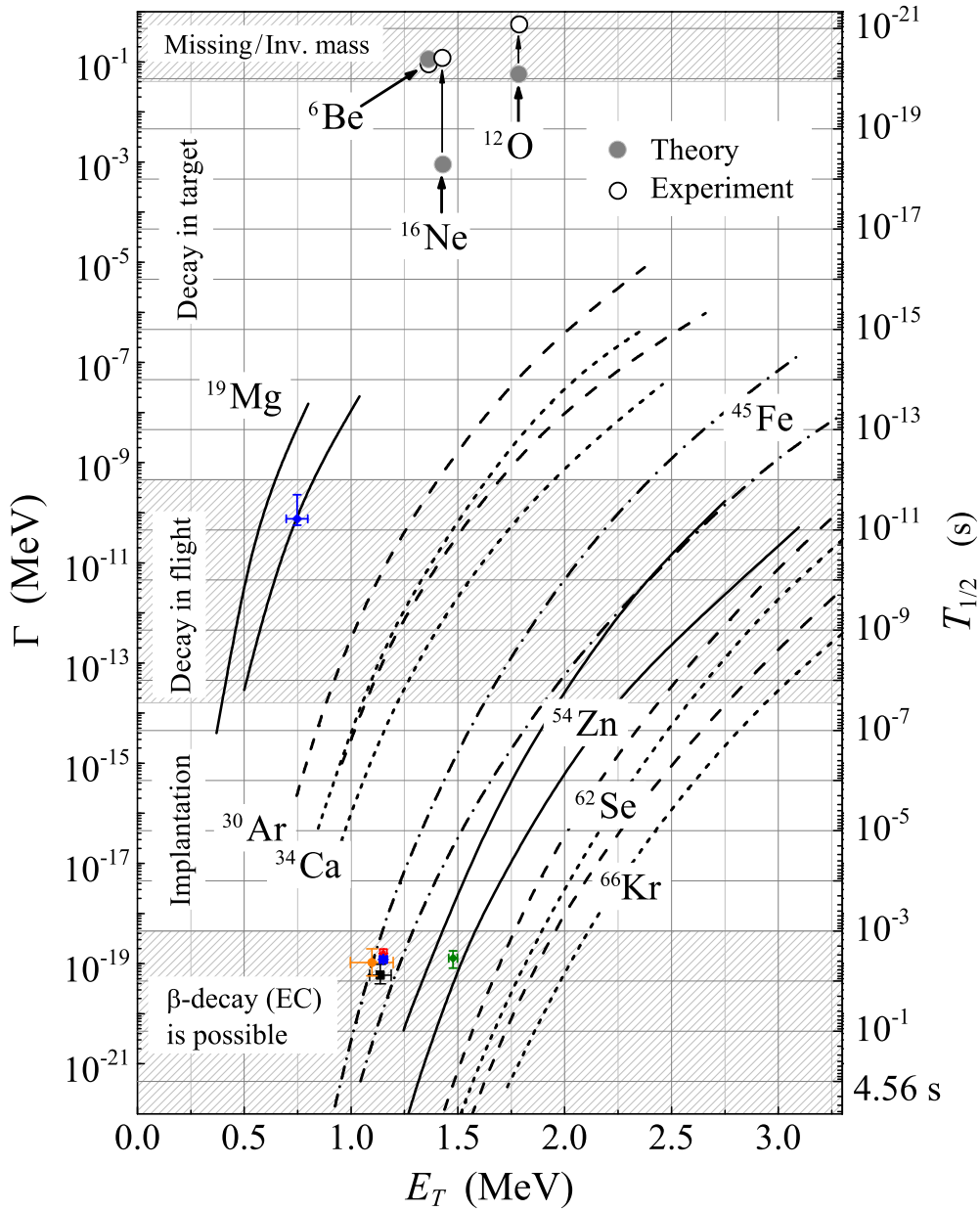


Рис. 3: Предсказание ширин трёхчастичных распадов в диапазоне от типичной для радиоактивности до типично ядерных величин. Заштрихованные полосы грубо выделяют диапазоны ширин, где должны применяться различные экспериментальные техники. Предсказания для “тяжёлых” двухпротонных распадчиков приводятся в виде допустимых, с учётом неопределённости ядерной структуры, полос (две кривые). Для ядер, скажем,  $p$ - $f$  оболочки верхняя кривая отвечает доминированию  $p^2$  конфигурации в структуре, а нижняя —  $f^2$ .

В этой главе далее рассматриваются свойства модели как в техническом (сходимости различных характеристик), так и в физическом (чувствительность



к физическим характеристикам модели) аспектах. Изучаются систематические свойства двухпротонных распадов (см., например, Рис. 3) и динамические механизмы этого процесса. Мы рассматриваем, в частности, систематики корреляций между продуктами для двухпротонных распадов и их чувствительность к структуре распадающейся системы.

**Четвертая глава.** В этой главе рассматриваются конкретные примеры систем — двухпротонных распадчиков. Здесь приводятся и сравниваются результаты теоретических и экспериментальных исследований наиболее изученных на сегодняшний день случаев —  ${}^6\text{Be}$ ,  ${}^{19}\text{Mg}$  и  ${}^{45}\text{Fe}$ . И времена жизни, и корреляции между продуктами распада находятся в хорошем согласии с теорией.

Для  ${}^6\text{Be}$  и  ${}^{45}\text{Fe}$  измерены полные корреляции. Для трёхчастичной системы полная картина корреляций в распаде описывается двумя параметрами (в предположении, что спиновые степени свободы ненаблюдаемы). Удобным выбором таких параметров являются

$$\varepsilon = E_x/E_T \quad , \quad \cos(\theta_k) = \frac{(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y)}{k_x k_y} .$$

Параметр  $\varepsilon$  отвечает за распределение энергии между Якобиевскими подсистемами  $X$  и  $Y$  ( $E_x$  — это энергия относительного движения по координате  $X$  в данной Якобиевской системе,  $E_T$  — полная энергия распада). Угол  $\theta_k$  показывает относительную ориентацию Якобиевских импульсов  $\mathbf{k}_x$  и  $\mathbf{k}_y$  (см. Рис. 2). На Рисунке 4 видно, что имеется весьма детальное согласие между теорией и экспериментом.

Так как корреляции в двухпротонном распаде оказались чувствительны к деталям внутренней структуры распадающихся ядер, то данный вид информации может использоваться как дополнительный “инструмент” для извлечения спектроскопической информации из экспериментальных данных. При этом, если в случае обычных бинарных распадов спектроскопическая информация извлекается из соотношения экспериментальных и расчётных ширин состояний, то в случае  $2p$  распада нам становится доступна независимая проверка этой информации по корреляционным данным.

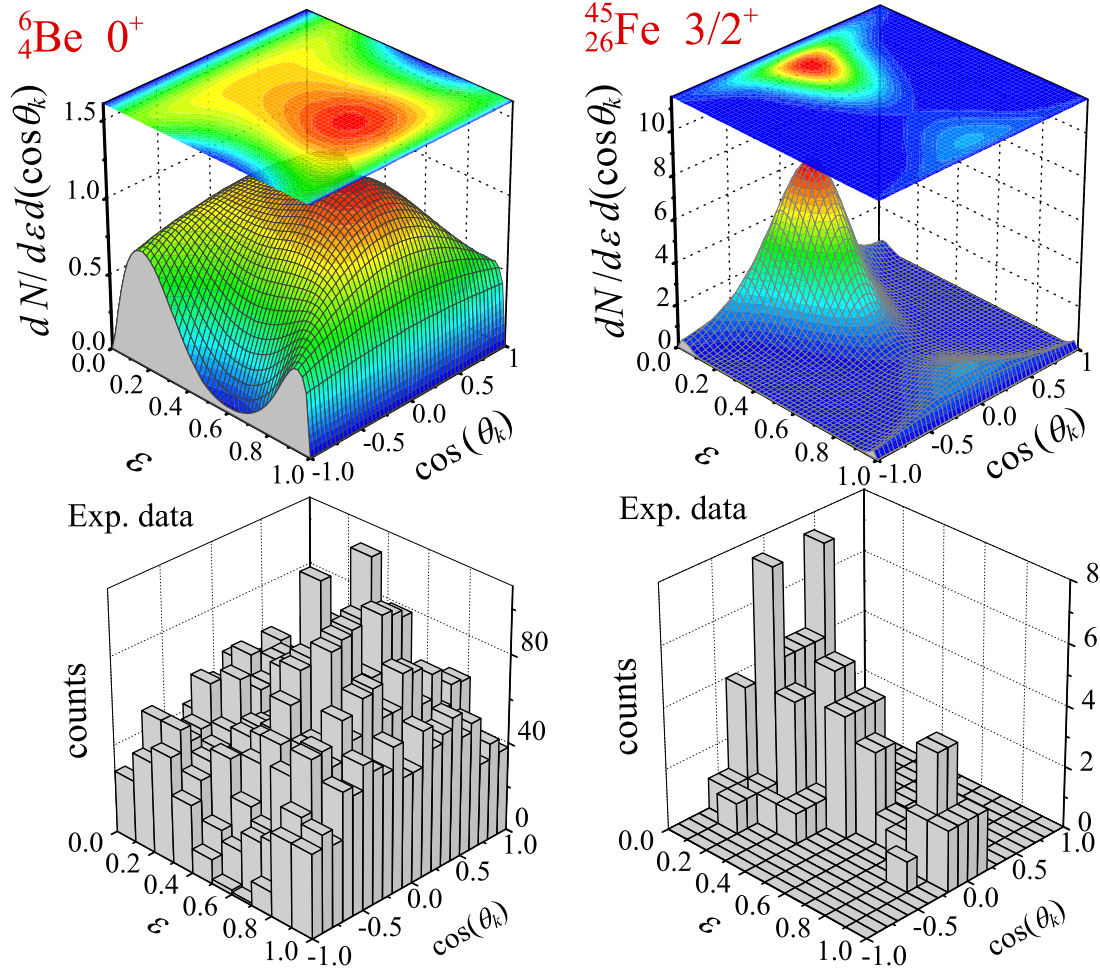


Рис. 4: Полные картины корреляций для распадов основных состояний  ${}^6\text{Be}$  и  ${}^{45}\text{Fe}$  в Якобиевской “Т” системе. Здесь величина  $\varepsilon$  является отношением энергии между протонами к полной энергии распада, а угол  $\theta_k$  показывает относительную ориентацию Якобиевских импульсов  $\mathbf{k}_x$  и  $\mathbf{k}_y$ . Теоретические предсказания даны в верхней части рисунка, а соответствующие экспериментальные данные показаны под ними.

**Пятая глава.** Исторически, теоретическое осмысление двухпротонной радиоактивности началось с квазиклассических оценок (“одновременная” и “дипротонная” модели). Однако, с формулировкой этих моделей связан ряд неточностей, ошибок или ошибочных интерпретаций. В этой главе рассматриваются упрощенные подходы к  $2p$  распадам. Конструируется точная полуаналитическая модель, основанная на приближённом трёхчастичном Гамильтониане. Она позволяет провести прецизионную проверку результатов МГГ, а также по-

лучить математически строгое обоснование для квазиклассических моделей и лучше понять их особенности и область применимости. В частности, здесь мы приходим к выводу о неприемлемости “дипротонной” модели (для многих исследователей представление о двухпротонной радиоактивности до сих пор сводится к упрощённой картине с испусканием “дипротона”).

**Шестая глава.** В этой главе кратко рассматриваются различные качественные проявления динамики нескольких тел в целом ряде экзотических ядерных систем. Изложение здесь строится “от явления”, т.е. рассматриваются проявления данной “физики” в тех системах, где они наиболее иллюстративны. В частности, рассматриваются:

1. **Трёхчастичный механизм нарушения изобарической симметрии (трёхчастичный механизм Томас-Эрмановского сдвига).** В работе [4] исследовалась проблема сильного расхождения между теоретическими и экспериментальными ширинами для ядер  $^{12}\text{O}$  и  $^{16}\text{Ne}$ . На основе расчётов и различных оценок было показано, что экспериментальные ширины, вероятнее всего, должны быть пересмотрены. В этих ядрах, а, возможно, и в других сходных по структуре ядрах  $s/d$  оболочки, была обнаружена возможность серьёзного нарушения изоспиновой симметрии: веса  $s^2$  и  $d^2$  компонент в  $^{12}\text{O}$  и  $^{16}\text{Ne}$  могут отличаться на десятки процентов от соответствующих весов в зеркальных ядрах. Согласно расчётам, эта перестройка структуры в значительной степени отвечает за аномальный изотопический (Томас-Эрмановский) сдвиг (ТЭС). Это явление было охарактеризовано как трёхчастичный механизм Томас-Эрмановского сдвига (в противовес каноническому определению ТЭС [R.G. Thomas, Phys. Rev. **88** (1952) 1109; J.V. Ehrman, Phys. Rev. **81** (1951) 412], как связанному только с разницей в поведении радиальных частей ВФ глубоко- и слабо-связанных нуклонов).
2. **Оценки многочастичных ширин: случай  $^7\text{H}$ .** Недавно были получены первые свидетельства о существовании низколежащего основного со-

стояния в ядре  ${}^7\text{H}$  [A.A. Korshennikov *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 082501]. Эта система должна распадаться по весьма экзотическому пятичастичному  ${}^3\text{H}+4n$  каналу. В работе [12] был предложен метод оценки времени жизни ядра  ${}^7\text{H}$  как функции энергии распада. Экспериментальная попытка наблюдения долгоживущего (наносекунды и более) ядра  ${}^7\text{H}$  дала негативный результат, но, используя теоретическую оценку, позволила наложить нижний предел на энергию распада.

3. **Двухпротонный распад деформированных ядер.** Исключительно сильная двухпротонная ветвь наблюдалась в распаде высоковозбуждённого  $21^+$  изомера ядра  ${}^{94}\text{Ag}$  в работе [17]. Данные, полученные в этой работе, находятся на пределе современных экспериментальных методик; попытки их проверки до сих пор приводили к противоречивым результатам. Интерпретируемые “как есть”, они приводят к выводу о необходимости существования значительной деформации (даже гипердеформации) в данном ядре и критическом влиянии деформации как на время жизни, так и на корреляции между протонами.
4. **Простой метод качественного учёта механизма реакции.** Он был использован для исследования свойств широких состояний в непрерывном спектре нескольких тел (см. далее).
5. **Свойства широких состояний в непрерывном спектре нескольких тел. Основные состояния  ${}^5\text{H}$  и  ${}^4\text{n}$ .** (I) В работе [1] был изучен трёхчастичный континуум  ${}^3\text{H}+n+n$ . Было предсказано, что основное состояние системы  ${}^5\text{H}$  находится примерно в 3 MeV над порогом  ${}^3\text{H}+n+n$ . Позднее, появление новых (и противоречивых) экспериментальных данных стимулировало нас опять обратиться к этому вопросу [10, 11]. В работе [10] обсуждаются общие вопросы исследования широких состояний. Нами была показана качественная разница между широкими состояниями в двухчастичном континууме и в континууме нескольких тел. Работа

[11] целиком посвящена обсуждению противоречий в различных экспериментах по  ${}^5\text{H}$ . (II) Система  ${}^4\text{n}$  (“тетранейтрон”) изучалась в работе [9] в рамках четырехтельного гиперсферического подхода. Было показано, что  ${}^4\text{n}$  не может быть связанным или даже узким квазистационарным состоянием. Несмотря на это, мы пришли к заключению, что эффект взаимодействия в конечном состоянии (ВКС) может быть наблюдаемым при подходящем выборе реакции как сравнительно низкоэнергетический пик в спектре отсутствующей массы системы  ${}^4\text{n}$ .

6. **“Возбуждённое состояние” трития.** В экспериментальной работе [D.V. Aleksandrov *et al.*, JETP Lett. **59** (1994) 320] в реакции  ${}^6\text{He}(p,\alpha){}^3\text{H}$  был получен широкий пик в спектре отсутствующей массы системы  ${}^3\text{H}$  прямо над  $d$ - $n$  порогом развала. Он был интерпретирован как свидетельство существования возбужденного состояния  ${}^3\text{H}$ . Существование пика было подтверждено в работе [8]. Однако в этой работе было продемонстрировано, что данный пик в спектре отсутствующей массы может быть связан не с притяжением в канале  $d$ - $n$ , а с отталкивающим ВКС в каналах  $d$ - $\alpha$  и  $n$ - $\alpha$  при условии ограниченной (и весьма небольшой) полной энергии, доступной для всех продуктов реакции в экспериментах [D.V. Aleksandrov *et al.*, JETP Lett. **59** (1994) 320] и [8].

7. **Трёхчастичное виртуальное состояние в  ${}^{10}\text{He}$ .** В последние годы в литературе много внимания уделялось так называемым ефимовским состояниям. Формой динамики, отвечающей несколько недосвязанным ефимовским состояниям, должны быть трёхчастичные виртуальные состояния. Пока нет полного согласия между теоретиками об ожидаемых свойствах таких объектов. В работе [23] был предложен метод теоретического исследования трёхчастичных виртуальных состояний и рассмотрен вопрос о возможных наблюдаемых свойствах гипотетического трёхчастичного виртуального состояния в  ${}^{10}\text{He}$ . Последние экспериментальные данные [26] подтверждают заключения, полученные в [23] относительно пер-

вого резонансного состояния в  $^{10}\text{Ne}$ , однако оставляют вопрос о виртуальных состояниях в значительной степени открытым.

8. **Протонное гало в  $^{17}\text{Ne}$ . Мягкая дипольная мода в  $^{17}\text{Ne}$ .** Цикл работ [6, 14, 15, 18, 19, 20] в той или иной степени затрагивает свойства ядра  $^{17}\text{Ne}$ . В этой системе оказался сконцентрирован целый “букет” интересных динамических свойств: сильное  $s$ - $d$  смешивание и, соответственно, трёхчастичный механизм ТЭС, возможность существования протонного гало, а также, истинно двухпротонный распад первого возбуждённого состояния, очень важный для астрофизики. Возможность существования мягкой дипольной моды в ядрах вблизи протонной границы стабильности была впервые предсказана в работе [18].

9. **Анализ корреляций из распада выстроенного  $^5\text{H}$ .** В экспериментальной работе [13, 16] система  $^5\text{H}$  исследовалась посредством реакции передачи двух нейтронов  $^3\text{H}(t, p)^5\text{H}$  на первичном пучке тритонов с энергией 57.7 МэВ с использованием жидкой тритиевой мишени. Была восстановлена полная кинематическая картина реакции; спектр энергии  $^5\text{H}$  и корреляционные спектры для продуктов его распада получены из регистрации тройных  $p$ - $t$ - $n$  и четверных  $p$ - $t$ - $n$ - $n$  совпадений. Был развит теоретический формализм для анализа корреляционных экспериментальных данных получаемых из распадов выстроенных трёхчастичных систем со спином, а также методика корректного введения поправок на эффективность регистрации, с полноценным учётом корреляционной картины распада изучаемой системы. Результаты анализа экспериментальных данных были представлены в компактном аналитическом виде, не требующем при дальнейшем “использовании” (например, при сравнении с теорией) знания особенностей экспериментальной установки. На основе анализа интерференционной картины было установлено, что в этой реакции заселяется в основном низколежащий дублет  $5/2^+$ - $3/2^+$ ; положение основного  $1/2^+$  состояния  $^5\text{H}$  было надёжно установлено как  $\sim 1.8$  МэВ.

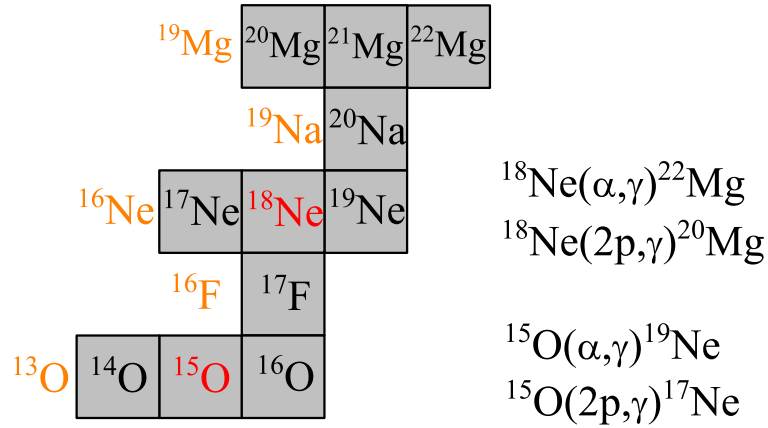


Рис. 5: Граница ядерной стабильности вблизи легчайших “точек ожидания” rp-процесса, которыми являются ядра  $^{15}\text{O}$  и  $^{18}\text{Ne}$ . “Ожидание” здесь связано с большим (для границы стабильности) временем жизни этих систем относительно  $\beta$ -распада (122 и 1.67 сек. соответственно). Ускоренный выход из точек ожидания возможен посредством  $\alpha$ -захвата или посредством  $2p$  процесса.

**Седьмая глава.** Изучение двухпротонной радиоактивности, возможно, имеет прикладное значение для ядерной астрофизики. Здесь речь идёт о процессах двухпротонного радиационного захвата (к этому же классу относятся реакции синтеза с участием двух  $\alpha$ -частиц). Очевидно, что такие процессы могут играть роль только при исключительно высоких плотностях и температурах. Пример такого астрофизического окружения — это источники  $\gamma$ -всплесков, связываемые со взрывным горением аккреционного водорода на поверхности нейтронных звёзд.

Трёхчастичный радиационный захват является весьма маловероятным процессом. Однако его важность резко возрастает, если последовательность обычных двухчастичных радиационных захватов через основное состояние промежуточной системы становится невозможной. А именно, если ядерно-стабильных состояний промежуточная система не имеет. Такая ситуация нередка вдоль границы стабильности; фрагмент карты изотопов в окрестностях  $^{17}\text{Ne}$ , иллюстрирующий эту ситуацию, показан на Рис. 5. В этом случае трёхчастичный радиационный захват может идти *последовательно* через промежуточные резонансы или *прямо* из трёхчастичного континуума, см. Рис. 6. Прямой трёхчастичный

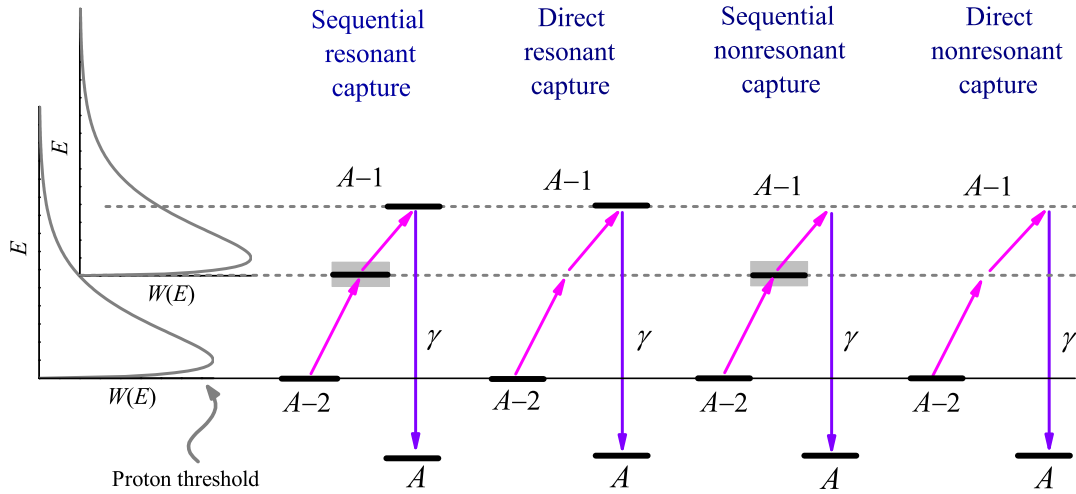


Рис. 6: Механизмы трёхчастичного радиационного захвата в астрофизических процессах. Энергетическое распределение индивидуальных протонов описывается Больцмановским распределением, проиллюстрированным в левой части рисунка.

захват является обратным процессом для истинно трёхчастичных распадов.

Развивая необходимый формализм, мы приходим к выводу, что существуют ситуации, когда общепринятые методы расчёта (квазиклассические по сути) трёхчастичных захватов (как резонансных, так и нерезонансных) для астрофизики дают сбой, и нужны более аккуратные квантовомеханические методы расчёта. На примере  $2p$ -захвата на  $^{15}\text{O}$  мы показываем, что применение таких методов может привести к пересмотру характера протекания важных астрофизических процессов. При этом требуется надёжное знание характеристик двух-протонных процессов, как резонансных, так и нерезонансных, в непрерывном спектре.

**Восьмая глава** содержит краткое заключение и далее используется автором для выражения благодарности коллегам и соавторам.



## Основные результаты опубликованы в следующих работах:

- [1] N. B. Shul'gina, B. V. Danilin, L. V. Grigorenko, M. V. Zhukov, J. M. Bang,  
*Nuclear structure of  ${}^5\text{H}$  in a three-body  ${}^3\text{H}+n+n$  model*,  
Phys. Rev. **C62** (2000) 014312 (4 pages).
- [2] L. V. Grigorenko, R. C. Johnson, I. G. Mukha, I. J. Thompson, M. V. Zhukov,  
*Theory of two-proton radioactivity with application to  ${}^{19}\text{Mg}$  and  ${}^{48}\text{Ni}$* ,  
Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 22-25.
- [3] L. V. Grigorenko, R. C. Johnson, I. G. Mukha, I. J. Thompson, M. V. Zhukov,  
*Two-proton radioactivity and three-body decay. I. General problems and theoretical approach*,  
Phys. Rev. C **64** (2001) 054002 (11 pages).
- [4] L. V. Grigorenko, I. G. Mukha, I. J. Thompson, M. V. Zhukov,  
*Two-proton widths of  ${}^{12}\text{O}$ ,  ${}^{16}\text{Ne}$  and three-body mechanism of Thomas-Ehrman shift*,  
Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 042502 (4 pages).
- [5] M. Pfützner, E. Badura, C. Bingham, B. Blank, M. Chartier, H. Geissel, J. Giovinazzo, L. V. Grigorenko, R. Grzywacz, M. Hellstrom, Z. Janas, J. Kurcewicz, A. S. Lalleman, C. Mazzocchi, I. Mukha, G. Munzenberg, C. Plettner, E. Roeckl, K. P. Rykaczewski, K. Schmidt, R. S. Simon, M. Stanoiu, J.-C. Thomas,  
*First Evidence for the Two-Proton Decay of  ${}^{45}\text{Fe}$* ,  
Eur. Phys. J. **A 14** (2002) 279-285.
- [6] L. V. Grigorenko, I. G. Mukha, M. V. Zhukov,  
*Prospective candidates for the two-proton decay studies. I: structure and Coulomb energies of  ${}^{17}\text{Ne}$  and  ${}^{19}\text{Mg}$* ,  
Nucl. Phys. **A713** (2003) 372-389; Erratum Nucl. Phys. **A740** (2004) 401.

- [7] L. V. Grigorenko, I. G. Mukha, M. V. Zhukov,  
*Prospective candidates for the two-proton decay studies. II: exploratory studies of  $^{30}\text{Ar}$ ,  $^{34}\text{Ca}$  and  $^{45}\text{Fe}$ ,*  
 Nucl. Phys. **A714** (2003) 425-440.
- [8] G. V. Rogachev, J. J. Kolata, V. Z. Goldberg, L. V. Grigorenko, F. D. Becchetti, P. A. DeYoung, J. D. Hinnefeld, L. O. Lamm, J. Lupton, T. W. O'Donnell, D. A. Roberts, S. Shaheen,  
*Final state interaction or a Tritium excited state?*  
 Phys. Rev. C **68** (2003) 024602 (7 pages).
- [9] L. V. Grigorenko, and M. V. Zhukov,  
*Two-proton radioactivity and three-body decay. II. Exploratory studies of lifetimes and correlations,*  
 Phys. Rev. **68** C (2003) 054005 (15 pages).
- [10] L. V. Grigorenko, N. K. Timofeyuk, and M. V. Zhukov,  
*Broad states beyond the neutron dripline. Examples of  $^5\text{H}$  and  $^4n$ ,*  
 Eur. Phys. J. **A 19** (2004) 187-201.
- [11] L. V. Grigorenko,  
*Experimental puzzle of  $^5\text{H}$ ,*  
 Eur. Phys. J. **A 20** (2004) 419-427.
- [12] M. S. Golovkov, L. V. Grigorenko, A. S. Fomichev, Yu. Ts. Oganessian, Yu. I. Orlov, A. M. Rodin, S. I. Sidorchuk, R. S. Slepnev, S. V. Stepantsov, G. M. Ter-Akopian, R. Wolski,  
*Estimates of the  $^7\text{H}$  width and lower decay energy limit,*  
 Phys. Lett. **B588** (2004) 163-171.
- [13] M. S. Golovkov, L. V. Grigorenko, A. S. Fomichev, S. A. Krupko, Yu. Ts. Oganessian, A. M. Rodin, S. I. Sidorchuk, R. S. Slepnev, S. V. Stepantsov, G. M. Ter-Akopian, R. Wolski, M. G. Itkis, A. A. Bogatchev, N. A. Kondratiev,

- E. M. Kozulin, A. A. Korshennikov, E. Yu. Nikolskii, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig, R. Palit, V. Bouchat, V. Kinnard, T. Materna, F. Hanappe, O. Dorvaux, L. Stuttgé, A. A. Yukhimchuk, V. V. Perevozchikov, Yu. I. Vinogradov, S. K. Grischechkin, S. V. Zlatoustovskiy, V. Lapoux, R. Raabe, L. Nalpas,  
*Observation of excited states in  $^5\text{H}$ ,*  
 Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 262501 (4 pages).
- [14] L. V. Grigorenko, Yu. L. Parfenova, and M. V. Zhukov,  
*Possibility to study a two-proton halo in  $^{17}\text{Ne}$ ,*  
 Phys. Rev. C **71** (2005) 051604(R).
- [15] L. V. Grigorenko, and M. V. Zhukov,  
*Three-body resonant radioactive capture reactions in astrophysics,*  
 Phys. Rev. C **72** (2005) 015803.
- [16] M. S. Golovkov, L. V. Grigorenko, A. S. Fomichev, S. A. Krupko, Yu. Ts. Oganessian, A. M. Rodin, S. I. Sidorchuk, R. S. Slepnev, S. V. Stepantsov, G. M. Ter-Akopian, R. Wolski, M. G. Itkis, A. A. Bogatchev, N. A. Kondratiev, E. M. Kozulin, A. A. Korshennikov, E. Yu. Nikolskii, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig, R. Palit, V. Bouchat, V. Kinnard, T. Materna, F. Hanappe, O. Dorvaux, L. Stuttgé, A. A. Yukhimchuk, V. V. Perevozchikov, Yu. I. Vinogradov, S. K. Grischechkin, S. V. Zlatoustovskiy, V. Lapoux, R. Raabe, L. Nalpas,  
*Correlation studies of the  $^5\text{H}$  spectrum,*  
 Phys. Rev. C **72** (2005) 064612.
- [17] Ivan Mukha, Ernst Roeckl, Leonid Batist, Andrey Blazhev, Joachim Döring, Hubert Grawe, Leonid Grigorenko, Mark Huyse, Zenon Janas, Reinhard Kirchner, Marco La Commara, Chiara Mazzocchi, Sam L. Tabor, Piet Van Duppen,

- Proton-proton correlations observed in two-proton radioactivity of  $^{94}\text{Ag}$ ,*  
Nature **439** (2006) 298–302.
- [18] L. V. Grigorenko, K. Langanke, N. B. Shul'gina, and M. V. Zhukov,  
*Soft dipole mode in  $^{17}\text{Ne}$  and the astrophysical  $2p$  capture on  $^{15}\text{O}$ ,*  
Phys. Lett. **B641** (2006) 254-259.
- [19] L. V. Grigorenko and M. V. Zhukov,  
*Two-proton radioactivity and three-body decay. III. Integral formulas for decay widths in a simplified semianalytical approach,*  
Phys. Rev. C **76** (2007) 014008 (17 pages).
- [20] L. V. Grigorenko and M. V. Zhukov,  
*Two-proton radioactivity and three-body decay. IV. Connection to quasiclassical formulation,*  
Phys. Rev. C **76** (2007) 014009 (9 pages).
- [21] I. Mukha, K. Sümmerer, L. Acosta, M. A. G. Alvarez, E. Casarejos, A. Chatillon, D. Cortina-Gil, J. Espino, A. Fomichev, J. E. Garcia-Ramos, H. Geissel, J. Gomez-Camacho, L. Grigorenko, J. Hofmann, O. Kiselev, A. Korshennikov, N. Kurz, Yu. Litvinov, I. Martel, C. Nociforo, W. Ott, M. Pfützner, C. Rodriguez-Tajes, E. Roeckl, M. Stanoiu, H. Weick, and P. J. Woods,  
*Observation of two-proton radioactivity of  $^{19}\text{Mg}$  by tracking the decay products,*  
Phys. Rev. Lett., **99** (2007) 182501 (4 pages).
- [22] K. Miernik, W. Dominik, Z. Janas, M. Pfützner, L. Grigorenko, C. R. Bingham, H. Czyrkowski, M. Cwiok, I. G. Darby, R. Dabrowski, T. Ginter, R. Grzywacz, M. Karny, A. Korgul, W. Kusmierz, S. N. Liddick, M. Rajabali, K. Rykaczewski, and A. Stolz,  
*Two-proton Correlations in the Decay of  $^{45}\text{Fe}$ ,*  
Phys. Rev. Lett., **99** (2007) 192501 (4 pages).

- [23] L. V. Grigorenko, and M. V. Zhukov,  
*Problems with interpretation of  $^{10}\text{He}$  ground state*,  
 Phys. Rev. C **77** (2008) 034611 (13 pages).
- [24] I. Mukha, L. Grigorenko, K. Sümmerer, L. Acosta, M. A. G. Alvarez, E. Casarejos, A. Chatillon, D. Cortina-Gil, J. Espino, A. Fomichev, J. E. Garcia-Ramos, H. Geissel, J. Gomez-Camacho, J. Hofmann, O. Kiselev, A. Korshennikov, N. Kurz, Yu. Litvinov, I. Martel, C. Nociforo, W. Ott, M. Pfützner, C. Rodriguez-Tajes, E. Roeckl, M. Stanoiu, H. Weick, and P. J. Woods,  
*Proton-proton correlations observed in two-proton decays of  $^{19}\text{Mg}$  and  $^{16}\text{Ne}$* ,  
 Phys. Rev. C **77** (2008) 061303(R) (5 pages).
- [25] L. V. Grigorenko, M. S. Golovkov, G. M. Ter-Akopian, A. S. Fomichev, Yu. Ts. Oganessian, V. A. Gorshkov, S. A. Krupko, A. M. Rodin, S. I. Sidorchuk, R. S. Slepnev, S. V. Stepantsov, R. Wolski, D. Y. Pang, V. Chudoba, A. A. Korshennikov, E. A. Kuzmin, E. Yu. Nikolskii, B. G. Novatskii, D. N. Stepanov, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig, A. Ninane, F. Hanappe, L. Stuttgé, A. A. Yukhimchuk, V. V. Perevozchikov, Yu. I. Vinogradov, S. K. Grishechkin, S. V. Zlatoustovskiy,  
*Soft dipole mode in  $^8\text{He}$* ,  
 Part. and Nucl. Lett. **6** (2009) 118-125.
- [26] M. S. Golovkov, L. V. Grigorenko, G. M. Ter-Akopian, A. S. Fomichev, Yu. Ts. Oganessian, V. A. Gorshkov, S. A. Krupko, A. M. Rodin, S. I. Sidorchuk, R. S. Slepnev, S. V. Stepantsov, R. Wolski, D. Y. Pang, V. Chudoba, A. A. Korshennikov, E. A. Kuzmin, E. Yu. Nikolskii, B. G. Novatskii, D. N. Stepanov, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig, A. Ninane, F. Hanappe, L. Stuttgé, A. A. Yukhimchuk, V. V. Perevozchikov, Yu. I. Vinogradov, S. K. Grishechkin, S. V. Zlatoustovskiy,  
*Possible novel interpretation of the  $^8\text{He}$  and  $^{10}\text{He}$  spectra studied in the  $(t,p)$*

*reaction,*

Phys. Lett. B **B672** (2009) 22-28.

- [27] L. V. Grigorenko, T. D. Wiser, K. Mercurio, R. J. Charity, R. Shane, L. G. Sobotka, J. M. Elson, A. H. Wuosmaa, A. Banu, M. McCleskey, L. Trache, R. E. Tribble, and M. V. Zhukov,  
*Three-body decay of  ${}^6\text{Be}$ ,*  
arXiv:0812.4065.