

**Федеральное государственное бюджетное учреждение  
"Государственный Научный Центр Российской Федерации  
Институт теоретической и экспериментальной физики"  
им. А.И. Алиханова**

На правах рукописи

**ПАНОВ Игорь Витальевич**

**Образование тяжелых элементов при взрывных  
процессах в звездах.**

Специальность 01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия

Специальность 01.04.02 — Теоретическая физика

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

**Москва — 2014**

УДК 524.35, 539.17

Работа выполнена в в ФГБУ “ГНЦ РФ ИТЭФ”

Научный консультант: доктор физ.-мат. наук,

Надёжин Дмитрий Константинович. ФГБУ “ГНЦ РФ ИТЭФ”

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор, Бисноватый-Коган Геннадий Семёнович.

Главный научный сотрудник, Институт Космических Исследований РАН,  
г. Москва

доктор физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН Домогацкий Григорий Владимирович.

Зав. лаб. нейтринной астрофизики высоких энергий,  
Институт ядерных исследований РАН, г. Москва

доктор физ.-мат. наук Саперштейн Эдуард Евсеевич.

Главный научный сотрудник, НИЦ "Курчатовский Институт",  
г. Москва

Ведущая организация: Объединённый Институт Ядерных Исследований,  
г. Дубна

Защита состоится 18 марта 2014 г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д.201.002.01 в конференц-зале ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ по адресу:  
Москва, Б.Черемушкинская, дом 25

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ

Автореферат разослан 17 февраля 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д.201.002.01

кандидат физ.-мат. наук

Васильев Валерий Васильевич

# **Общая характеристика работы**

## **Актуальность темы**

Образование химических элементов в природе и процессы энерговыделения являются основными предметами исследований ядерной астрофизики.

По устоявшимся представлениям все элементы тяжелее железа были образованы в природе под действием нейтронов, причем половина из них под действием интенсивных потоков нейтронов за характерные времена порядка секунды. Предполагаемая картина их образования стала с развитием ядерных моделей и наблюдений к концу двадцатого века заметно более размытой и новое понимание и осмысление накопленного фактического материала стало актуальным.

В последнее десятилетие резко выросло качество и количество наблюдений обилий тяжелых элементов в атмосферах звезд и в солнечной системе. Более того, в последние годы стала возможной обработка спектров поглощения очень старых звезд низкой металличности с целью получения аналогичной информации для химических элементов от галлия до урана. В результате заметно усложнилась картина возможных сценариев  $r$ -процесса.

Модели предсверхновых и слияния нейтронных звезд - основных предполагаемых астрофизических объектов реализации  $r$ -процесса - стали более детальными. Стал заметен прогресс в получении ядерных данных, в первую очередь для короткоживущих нейтроноизбыточных ядер, которые необходимы как для понимания физических основ протекания  $r$ -процесса, так и для его моделирования. Были получены более жесткие ограничения на возраст нашей Галактики.

Вырос объем наблюдательного материала по сверхновым звездам - одним из основных кандидатов на место протекания r-процесса, равно как и увеличилось продвижение на пути создания последовательной картины взрыва сверхновой. Появились более надежные количественные характеристики основных параметров горячих ветров – энтропии, температуры, плотности, необходимых для определения условий для начала r-процесса.

Стали более четкими очертания теории конкретных механизмов взрыва коллапсирующих сверхновых при до сих пор неясной роли количественного вклада ряда важных физических процессов, в частности, в такой ключевой параметр, как энергия взрыва сверхновой.

Появились гидродинамические модели слияния нейтронных звезд и черных дыр в тесных двойных звездных системах, объясняющие выброс части вещества во внешнее пространство с содержанием тяжелых элементов в количестве, необходимом для объяснения их наблюданной космической распределенности.

Расширились возможности расчета ряда неизвестных характеристик, участвующих в r-процессе сильно нейтронизбыточных ядер и скоростей реакций, вплоть до характеристик делящихся ядер.

В сложившейся ситуации неоспоримую актуальность приобретают исследования, направленные на создание модели нуклеосинтеза, учитывающей как новые наблюдения, так и утилизацию новых ядерных данных, и которая позволила бы надежно определить выходы тяжелых и сверхтяжелых элементов в природе и одновременно оценить применимость и надежность моделей, прогнозирующих скорости реакций и характеристики экзотических атомных ядер. С другой стороны, детальное моделирование процесса нуклеосинтеза может дать определенные ограничения, необходимые для построения теории взрыва сверхновых и слияния нейтронных звезд – возможных кандидатов для r-процесса.

## **Цель работы**

Основная цель диссертационной работы состоит в построении последовательной модели нуклеосинтеза, применимой для разных сценариев образования тяжелых элементов в  $\gamma$ -процессе и объяснении наблюдавшихся обилий тяжелых элементов как в солнечной системе, так и в старых звездах малой металличности.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выполнен расчет ряда ядерных характеристик, таких как вероятности эмиссии запаздывающих нейтронов при бета-распаде нейтроногенитальных ядер и запаздывающего деления для сильно нейтроногенитальных ядер, отвечающих требованиям одного уровня достоверности, рассчитаны скорости реакций под действием нейтронов - радиационного захвата нейтронов и вынужденного деления;
- изучена роль нейтринной вспышки при коллапсе сверхновых звезд в нуклеосинтезе тяжелых элементов и определено влияние захвата нейтрино ядрами тяжелых элементов на эффективность  $\gamma$ -процесса
- создана модель нуклеосинтеза для основного и дополнительного сценариев  $\gamma$ -процесса;
- исследованы зависимости образования тяжелых и сверхтяжелых ядер от моделей прогнозирования характеристик нейтроногенитальных ядер, участвующих в нуклеосинтезе;
- выбраны и протестированы модели спонтанного деления, позволяющие рассчитывать скорости спонтанного деления для сверхтяжелых ядер.

Разработаны и созданы следующие модели:

- Кинетическая модель нуклеосинтеза, учитывающая все парные реакции с нейтронами, протонами, альфа-частицами, бета-распад, реакции захвата электронного нейтрино ядрами и ряд специальных реакций типа 3-альфа-реакции при отказе от приближений типа постоянного тока ядер или точки ожидания. Развитие такой модели позволило объединить

3 этапа моделирования  $\gamma$ -процесса : ядерное статистическое равновесие – альфа-процесс –  $\gamma$ -процесс, объединив все три модели в одной модели быстрого нуклеосинтеза.

- Двухкодовая модель, созданная для моделирования слабого компонента  $\gamma$ -процесса, отличающаяся подробной кинетикой ядерных реакций в области легких ядер, с целью максимального контроля количества образующихся нейтронов в присутствии заметного количества "отравителей" типа углерода или азота.
- Для прогнозирования таких характеристик экзотических ядер как периоды полураспада, вероятности эмиссии запаздывающих нейтронов и деления, были использованы квазиклассические модели на основе теории конечных ферми-систем, ядерная систематика и феноменологические модели.

### **Научная новизна**

В диссертации проведено систематическое исследование нуклеосинтеза в  $\gamma$ -процессе в сценарии слияния нейтронных звезд, где достигаются необходимые условия для образования тяжелых и сверхтяжелых элементов. Особенностью нуклеосинтеза в таком сценарии является необходимость учета процессов деления. Для этой цели создана модель и разработан комплекс программ, учитывающие не только необходимые для протекания  $\gamma$ -процесса реакции радиационного захвата цейtronов и бета-распад, но и реакции с заряженными частицами и деление. Исследованы возможные сценарии развития слабого  $\gamma$ -процесса, в котором синтезируются элементы, выгорающие в основном  $\gamma$ -процессе, с атомным номером менее 130. Изучены характеристики горячих сверхзвуковых ветров над поверхностью молодых нейтронных звезд в качестве места протекания быстрого нуклеосинтеза.

Все перечисленные ниже результаты диссертационной работы получены впервые.

1. Показана важность определения границ нейтронной стабильности, поскольку путь  $\gamma$ -процесса частично проходит по границе нейтронной стабильности атомных ядер. В быстро меняющихся условиях протекания основного нуклеосинтеза и при высокой концентрации свободных нейтронов обосновано понятие динамического пути, быстро смещающегося от границы нейтронной стабильности до дорожки "классического"  $\gamma$ -процесса, приводя к согласованному формированию основных пиков на кривой распределенности.
2. Показана важность деления как для основного процесса образования тяжелых элементов, так и разделения пути развития быстрого нуклеосинтеза на основную ветвь, образующуюся за счет деления, вовлечения продуктов деления в  $\gamma$ -процесс в качестве новых зародышевых ядер и установления квазиравновесия между областью продуктов деления и областью делящихся ядер, и слабую ветвь, формирующуюся потоком нуклеосинтеза, преодолевшим область интенсивного деления и образующим сверхтяжелые элементы.
3. Исследовано влияние различных процессов деления - запаздывающего, вынужденного и спонтанного - на образование тяжелых ядер. Впервые показано преобладание вынужденного, а не запаздывающего, деления в процессе образования и формировании выходов тяжелых элементов.
4. Для большого числа нестабильных трансурановых ядер рассчитаны скорости запаздывающего и вынужденного (впервые) деления не только для тяжелых, но и сверхтяжелых ядер, что позволило впервые численно изучить возможность образования в астрофизических процессах сверхтяжелых элементов.
5. В модели  $\gamma$ -процесса последовательно учтены реакции с заряженными частицами, и показано их заметное влияние на образование химических элементов тяжелее элементов железного пика посредством образования более тяжелых зародышевых ядер и ускорение  $\gamma$ -процесса на начальной стадии.
6. Развита модель слабого  $\gamma$ -процесса в богатой гелием оболочке сверхн-

вой с источником нейтронов, возникающим в процессе неупругого взаимодействия ядер гелия с нейтрино с последующим испарением нейтрона. Расчеты такого нейтрино-индуцированного  $\gamma$ -процесса приводят к образованию части тяжелых элементов с массами от 80 до 130. Впервые показана роль электронных нейтрино в ускорении  $\gamma$ -процесса в коллапсирующих сверхновых за счет захвата сильно нейтронизбыточными ядрами электронного нейтрино, приводящего к образованию нового химического элемента. Этот процесс в дополнение к бета-распаду ускоряет процесс нуклеосинтеза тяжелых ядер.

**7.** При торможении вещества горячего ветра над поверхностью молодых нейтронных звезд найдены условия для протекания быстрого нуклеосинтеза, в которых образуются тяжелые элементы вплоть до платинового пика. В таких условиях распространенность тяжелых элементов слабо зависит от значения температуры среды на стадии торможения вещества ветра.

**8.** Вычислены распространенности химических элементов в эволюционных моделях, описывающих процессы нуклеосинтеза в условиях высокой нейтронизации при слиянии нейтронных звезд, в горячем нейтринном ветре при взрыве сверхновой, в оболочках массивных сверхновых при коллапсе ядра звезды.

**9.** Впервые исследовано совместное влияние различных процессов деления на образование тяжелых и сверхтяжелых ядер, определен вклад вынужденного, запаздывающего и спонтанного деления. Показана сильная зависимость формирования выходов как ядер космохронометров, так и сверхтяжелых элементов от модели спонтанного деления, что позволяет тестировать существующие модели спонтанного деления из сравнения расчетных выходов ядер-космохронометров с наблюдениями их распространенности. Показано наличие ветвления  $\gamma$ -процесса в области трансактинидов на основную ветвь образования тяжелых ядер и слабую ветвь, приводящую к образованию сверхтяжелых ядер в основном  $\gamma$ -процессе, осуществляющимся при высоких концентрациях свободных нейтронов. На основе существующих ядерных дан-

ных рассчитаны выходы сверхтяжелых элементов, образующихся в данном сценарии.

### **Выносимые на защиту положения**

Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, формулируются следующим образом:

1. Кинетическая модель образования тяжелых элементов в быстром нуклеосинтезе на основе учета основных парных реакций с нейтронами, протонами, фотонами и альфа-частицами, бета-распада, деления и захвата электронных нейтрино, обеспечивающих естественный переход от условий ядерного статистического равновесия к  $\alpha$ -процессу, затем замораживанию реакций с заряженными частицами и  $r$ -процессу.
2. Методика расчета и комплекс программ для расчета обилий химических элементов в условиях долговременной экспозиции и формирования основного компонента  $r$ -процесса, когда в условиях высокой степени нейтронизации среды значительная часть зародышевых ядер быстро выгорает, образуя актиниды, продукты деления которых вновь вовлекаются в нуклеосинтез в качестве новых зародышевых ядер. Таким образом устанавливается квази-равновесие относительных выходов изотопов между областью деления и областью ядер-продуктов деления, обеспечивая формирование второго и третьего пиков  $r$ -элементов на кривой распространенности.
3. Модель слабого  $r$ -процесса в гелиевом слое коллапсирующей звезды и двух-кодовая методика расчета обилий химических элементов для формирования слабой компоненты  $r$ -процесса - тяжелых элементов легче элементов кадмievого пика.
4. Вывод о динамическом характере  $r$ -процесса, проходящего в услови-

ях высокой плотности свободных нейтронов вдоль границы нейтронной стабильности и только в конце нуклеосинтеза смещающегося в область ядер, находящихся в области  $\gamma$ -процесса, определяемого статической моделью. Такое изменение пути нуклеосинтеза приводит к торможению  $\gamma$ -процесса в области ядер с числом нейтронов  $N=82$  и  $126$ , что приводит к формированию в одном процессе ядер с массовым числом  $A$  от  $\sim 130$  и более, и формирование пиков расчетной кривой распространенности, положение и размер которых хорошо согласуются с наблюдениями.

5. Результаты исследования вынужденного, запаздывающего и спонтанного деления короткоживущих нейтроноизбыточных актинидов в сценарии слияния нейтронных звезд и характера влияния этих процессов на формирование средних и тяжелых ядер в астрофизическом нуклеосинтезе. Показано, что хотя вынужденное деление отвечает в основном за прерывание распространения волны нуклеосинтеза в область сверхтяжелых элементов, запаздывающее деление сильно влияет на окончательную распространенность тяжелых элементов, а выход ядер космохронометров сильно зависит от модели спонтанного деления.
6. Вывод об ускорении  $\gamma$ -процесса в коллапсирующей сверхновой в результате захвата электронных нейтрино тяжелыми ядрами.
7. Вывод о слабой зависимости выходов тяжелых элементов в  $\gamma$ -процессе в условиях быстро меняющихся параметров горячих ветров в широком диапазоне значений асимптотической температуры, определяемой скоростью замедления разлетающегося вещества при взрыве сверхновых разных масс.
8. Результаты моделирования и численного исследования нуклеосинтеза тяжелых и сверхтяжелых элементов в разных сценариях  $\gamma$ -процесса. Оптимальная модель нуклеосинтеза тяжелых элементов в сценарии сли-

яния нейтронных звезд, показавшая лучшее согласие с наблюдениями, требует установления квазистационарного тока ядер между областью актинидов и областью ядер продуктов деления. В такой модели образуются изотопы сверхтяжелых элементов, однако их время жизни невелико. Наиболее долгоживущие сверхтяжелые элементы не образуются, поскольку их образованию препятствует область ядер с короткими временами жизни спонтанного деления.

### **Научная и практическая значимость работы**

Научная значимость диссертационной работы определяется возможностью объяснения наблюданной распространенности тяжелых элементов как в солнечной системе и звездах главной последовательности, так и в очень старых звездах низкой металличности посредством решения прямой и обратной задач на основе созданной модели нуклеосинтеза. В свою очередь, адекватное изучение результатов теоретического моделирования нуклеосинтеза должно способствовать развитию моделей предсверхновых звезд и построению общей физической картины взрывов коллапсирующих сверхновых.

Практическая значимость работы связана с созданием в ходе многолетних численных исследований комплекса программ для решения задач астрофизического нуклеосинтеза.

Созданные модель нуклеосинтеза и программный пакет могут быть также использованы для оценок выходов сильно нейтроноизбыточных радионуклидов и понимания деталей запаздывающего деления при подготовке специальных экспериментов по изучению образования тяжелых элементов в земных условиях (например, при проведении ядерных взрывов, особенно с высоким выходом нейтронов).

Созданная база данных по скоростям вынужденного деления и вероятностей запаздывающего деления (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=J/A>) может быть использована как в научных целях при дальнейшем изу-

чении образования тяжелых и сверхтяжелых элементов в природе, так и для оценок образования экзотических радионуклидов при техногенных катастрофах на объектах атомной промышленности.

На работы автора имеется множество ссылок. Ряд результатов работ автора получил независимое подтверждение и международное признание.

В соответствии со сказанным выше, результаты, изложенные в диссертационной работе, могут быть использованы во всех научных учреждениях, в которых изучаются проблемы нуклеосинтеза и эволюции химического состава в звездах, сверхновых и их остатках, а также теории атомного ядра, бета-распада и деления ядер.

### **Материалы и методы**

В диссертационной работе были использованы данные наблюдений распространенности химических элементов в веществе солнечной системы (земная кора, метеориты, солнечная корона) и ядерные данные (времена жизни, сечения, распадные характеристики) из различных источников. При создании моделей и сценариев нуклеосинтеза под действием нейтронов ядерно-физические характеристики изотопов и данные о сечениях элементарных процессов были взяты из публикаций в научных изданиях, из специализированных сайтов в интернете или были любезно предоставлены авторами. Основной метод исследований — построение численных моделей нуклеосинтеза в разных сценариях с последующим сравнением их с данными наблюдений и другими прогнозами, полученными независимыми исследователями на основе других моделей.

### **Личный вклад автора**

Часть научных результатов, представленных в диссертации, получена в совместных работах с другими авторами. Вклад автора в эти работы был не меньшим, чем каждого соавтора в отдельности, причем вклад автора в постановку задач и в интерпретацию полученных результатов был не меньше

вкладов других соавторов, а сами решения задач и соответствующие вычисления были выполнены преимущественно диссертантом.

## **Апробация результатов**

Основные результаты, изложенные в диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на астрофизическом, теоретическом и институтском семинарах ИТЭФ (Москва), научных семинарах ГАИШ и НИИЯФ МГУ (Москва), Института Астрофизики Общества им. Макса Планка (МПА, Гархинг, Германия), Института Лауэ-Ланжевена (Гренобль, Франция) Института Физики Базельского университета (Швейцария), и ЛЯР ОИЯИ.

Работы автора докладывались и обсуждались на отечественных и международных конференциях: совещаниях по ядерной астрофизике (1991, 1996, 1998, 2002, 2004, 2008, Рингберг, Германия); Слабые взаимодействия и взаимодействия при низких энергиях (1992 г. Дубна, Россия); "Ядра в космосе" (1992, Карлсруэ, Германия; 1998, Волос, Греция; 2000, Орхус, Дания; 2002 Токио, Япония; 2006 Женева, Швейцария); Слабые и электромагнитные взаимодействия в ядрах (1993 Дубна, Россия); Совещание по Сверхновым, 1993 (С.Петербург, Россия); Конференция по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (сейчас: ЯДРО): 2003 (Москва); 2010 (С.Петербург); 2013 (Москва); "Физика нейтронных звезд" (1997, 2001, 2008; С.Петербург) Int. Conf. Nuclear Data in Science and Technology (1997, Триест, Италия); Congress of Int. Astronomical Union (1997, Moscow, Russia); "Физика высоких энергий" (2001, 2003, 2005, 2007, Москва); "Seminar on Fission" (2003, 2007, 2010, Belgium) Int. Conf. on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements - ТАН (2008, Давос, Швейцария; 2011, Сочи, Россия); ECT Workshop "The Origin of the Elements: A Modern Perspective" (2011, Тренто, Италия); Международное Совещание "Heavy elements nucleosynthesis and galactic chemical evolution" (2011, Одесса, Украина; 2013, Москва); Nuclear Physics in Astrophysics (2013, Лиссабон, Португалия); "Dark Energy" (2013, Новосибирск).

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Полный объем диссертации составляет 318 страницы, включая 98 рисунков и 8 таблиц. Список литературы насчитывает 396 наименований.

# Краткое содержание диссертации

Во **Введении** приводятся основные сведения о нуклеосинтезе под действием нейтронов, его роли в образовании тяжелых ядер, ядерно-физические основы существования двух ветвей такого нуклеосинтеза: медленной - s-процесс (slow) и быстрой - r-процесс (rapid). Показана связь распространенности химических элементов, образованных в r-процессе со структурой и свойствами атомных ядер. Рассматриваются различные сценарии и механизмы взрыва массивных звезд, приводящие к условиям, в которых может идти r.-процесс. Изложено современное состояние проблемы быстрого нуклеосинтеза: каким оно представляется на основе наблюдений распространенности химических элементов как в солнечной системе, так и в спектрах очень старых звезд низкой металличности. Сделан обзор различных сценариев взрыва сверхновых и гидродинамических моделей конечных стадий эволюции звезд, завершающихся взрывными процессами с образованием избытка нейтронов, необходимого для поддержания r-процесса. Оценено наличие и надежность теоретических моделей, прогнозирующих различные характеристики короткоживущих нейтронизбыточных ядер, участвующих в r-процессе, в первую очередь в области актинидов и трансактинидов, где различные процессы деления приводят к зациклению процесса нуклеосинтеза и установлению квазистационарного тока ядер между областью актинидов и ядер-продуктов деления, а также появлению слабой ветви нуклеосинтеза, приводящей к образованию сверхтяжелых элементов. Кроме того, обоснована актуальность темы настоящей диссертационной работы и сформулированы основная цель работы, выносимые на защиту положения и их научная новизна. Рассмотрена научная и практическая значимость работы, отмечен личный вклад автора, изложена история апробации результатов и приведен список публикаций автора по теме диссертации.

В **первой главе** изложена физико-математическая постановка задачи численного решения быстрого нуклеосинтеза, с учетом не только нейтронов, но и заряженных частиц, в реакциях с которыми образуется начальное распределение зародышевых ядер; показана эволюция области протекания  $r$ -процесса, приводящая к формированию основных пиков на кривой распространенности элементов тяжелее железа.

В § 1.1 перечислены вопросы, возникающие при решении проблемы образования тяжелых элементов в процессе быстрого нуклеосинтеза, которые могут быть объединены в 3 группы:

1. К первой, основной, должны быть отнесены вопросы типа - где, при каких условиях, стартует  $r$ -процесс? - в каких астрофизических объектах реализуются условия для протекания  $r$ -процесса? - каков сценарий, приводящий к появлению необходимых условий и их поддержанию в течение достаточного времени? Какова динамика изменения условий быстрого нуклеосинтеза?

2. Ко второй группе относятся вопросы, ответы на которые позволяют понять – где же кончается  $r$ -процесс? Какие причины вызывают его остановку? Истощение ли это свободных нейтронов или катастрофически быстрое падение плотности вещества от значений, характерных для плотного и сверхплотного состояния вещества до плотностей разреженного газа? Или же это процессы деления трансурановых ядер, последовательное изучение которых только начинается.

3. К третьей группе относятся задачи прогнозирования и(или) уточнения ядернофизических свойств ядер (энергий связи, сечений, вероятностей запаздывающих процессов, деления, скоростей распада и синтеза и др.), решение которых позволит определить распространенность ядер, образующихся в  $r$ -процессе.

Показано, что формирование распространенности тяжелых элементов, образованных в  $r$ -процессе, должно проходить в области ядер, примыкающей

к границе нейтронной стабильности, что достигается в процессе взрывного нуклеосинтеза со временем протекания несколько сотен миллисекунд.

Для решения поставленных задач в § 1.2 сформулирована физическая модель образования тяжелых элементов и описан адекватный модели численный метод, позволяющий решить основную задачу нуклеосинтеза - определить количество и изотопное распределение образующихся химических элементов.

Приближение ядерного статистического равновесия является основным подходом при моделировании образования промежуточных элементов и элементов группы железа на равновесных стадиях эволюции звезд. Однако для r-процесса и предшествующих ему других динамических процессов взрывного типа эта модель неприменима, и необходимо учитывать кинетику различных ядерных реакций, скорости которых меняются очень быстро в зависимости от изменения параметров сценария, в котором достигается значительный избыток свободных нейтронов. При создании модели были учтены не только обычно рассматриваемые реакции захвата нейтронов, бета-распад с сопутствующей эмиссией запаздывающих нейтронов, обратные  $(\gamma, n)$ -реакции, но и основные парные термоядерные реакции, важные на этапе нуклеосинтеза, предшествующего r-процессу и формирующие в ряде сценариев зародышевые для r-процесса ядра с участием нейтронов, протонов и альфа-частиц. Кроме того, детально были учтены три основные моды деления - запаздывающее, вынужденное и спонтанное, ранее последовательно и одновременно не рассматривавшиеся. Процессы деления очень важны для основной моды r-процесса, в которой образуется большая часть тяжелых ядер, включая уран, торий и, возможно, сверхтяжелые элементы. Кроме того, был учтен и альфа-распад в области актинидов и трансактинидов - для прослеживания эволюции химических элементов на больших временных масштабах.

Изменение концентраций каждого ядра описывается дифференциальным

уравнением:

$$\begin{aligned}
 dY_{A,Z}/dt = & -\lambda_\beta(A, Z)Y_{A,Z} + \\
 & + \sum_{i=0,1,2,3} \lambda_\beta(A+i, Z-1)P_i(A+i, Z-1) \cdot Y_{A+i,Z-1} + \\
 & + \sum_{j=1,2,3,4} \sum_{k=1,2,3,4_{k \neq j}} \lambda_{kj}(A, Z) \cdot Y_{A,Z} + \lambda_{jk}(A-1, Z) \cdot Y_{A-1,Z} + \\
 & + \sum_{A_f, Z_f} W_{\beta df}(A_f, Z_f, A, Z) \lambda_\beta(A_f, Z_f) P_{\beta df}(A_f, Z_f) \cdot Y_{A_f,Z_f} + \\
 & + \sum_{A_f, Z_f} W_{nf}(A_f, Z_f, A, Z) \lambda_{nf}(A_f, Z_f) \cdot Y_{A_f,Z_f} + \\
 & + \sum_{A_f, Z_f} W_{sf}(A_f, Z_f, A, Z) \lambda_{sf}(A_f, Z_f) \cdot Y_{A_f,Z_f} \quad (1)
 \end{aligned}$$

где  $\lambda_{ij}$  определяет скорости различных реакций. Для двухчастичных реакций  $(A, Z) + i \rightarrow (A_f, Z_f) + j$ ;  $i, j = n, p, \alpha, \gamma$ .  $W_{nf}$ ,  $W_{sf}$  и  $W_{\beta df}$  - распределения ядер-продуктов деления делящего ядра  $A_f$ ,  $Z_f$  при вынужденном, спонтанном и запаздывающем делении соответственно.  $P_{in}$  и  $P_{\beta df}$  - вероятности эмиссии к запаздывающим нейтронов и запаздывающего деления.

Для решения задач, связанных с образованием части тяжелых ядер, где нет деления, но результаты чувствительны к точности расчета выхода нейтронов, в § 1.3 описана двухкодовая методика, основанная на раздельном рассмотрении нуклеосинтеза легких и тяжелых ядер, когда один код контролирует кинетику примерно 120 реакций между легкими и промежуточными ядрами ( $n, p, D, T, ^3He, ^4He \dots ^{24}Mg, \dots Fe$ ), в то время как второй код включает более чем 4000 уравнений, описывающих превращение затравочных ядер железа в более тяжелые элементы через многочисленные захваты нейтронов и протонов, и последующий бета-распад.

Ядерные данные для делящихся и часто деформированных ядер - сечения деления, барьеры деления, энергии связи нейтрона, массы ядер – продуктов деления, могут быть получены в настоящее время только (за единичными исключениями) расчетно. Поэтому одна из задач исследования - обеспечить модель нуклеосинтеза ядерными данными и попытаться оценить степень их надежности. Для этой цели в главе 2 были рассмотрены и рассчитаны наи-

более важные характеристики атомных ядер, без которых невозможно моделирование нуклеосинтеза тяжелых ядер в  $\gamma$ -процессе.

Первая часть главы **2** посвящена расчетам скоростей захвата нейтрона и вынужденного деления при астрофизических энергиях  $\sim 0.1 - 10$  МэВ. В разделах **2.2.2**, **2.2.3** в рамках статистической модели Вольфенштейна-Хаузера-Феашбаха получены прогнозы скоростей вынужденного деления и радиационного захвата нейтронов в широком диапазоне характерных для астрофизического нуклеосинтеза температур ( $10^8 \leq T(K) \leq 10^{10}$ ) и ядер (все возможные изотопы химических элементов  $84 \leq Z \leq 118$ , т.е. от Ро до Uuo), и различных теоретических моделей определения масс и барьеров деления. На основе расчетов получены коэффициенты для зависящих от температуры аппроксимаций скоростей реакций - аналогичные формулам стандарта библиотеки REACLIB [1], которые использовались в предшествующих работах [2]. Коэффициенты для формул, необходимые для он-лайн расчета значений астрофизических (звездных) скоростей реакций, приведены в таблицах. Эти данные, совместно с вероятностями запаздывающих процессов, также рассчитанные в данной главе в рамках единого теоретического подхода, составляют основу огромного массива ядернофизических параметров для большинства изотопов тяжелых элементов. Рассчитанные характеристики позволяют проводить моделирование  $\gamma$ -процесса в области как тяжелых, так и сверхтяжелых элементов с учетом обратной связи между трансурановой областью и областью ядер - продуктов деления.

В разделе **2.2.4** на основе проведенных расчетов скоростей захвата нейтронов ядрами и вынужденного деления были получены их аппроксимации. Формулы и коэффициенты для этих аппроксимаций приведены в доступных для научной общественности интернет-таблицах базы данных CDS. Формат таблиц и необходимые комментарии приведены в Приложении диссертации.

В § **2.1** было показано, что основным типом деления, прерывающим продвижение  $\gamma$ -процесса в область сверхтяжелых элементов, является вынужден-

ное деление. Однако запаздывающее деление остаётся тем не менее важным по следующим причинам: 1. После истощения нейтронного потока, распространность химических элементов продолжает изменяться только за счет бета распадов и запаздывающего деления, причем сильнее всего меняется состав трансурановых элементов и элементов вблизи пика  $A=130$ ; 2. В начале стадии охлаждения, когда плотность нейтронов еще не мала, то конкурирующий с запаздывающим делением процесс эмиссии запаздывающих нейтронов приводит после бета-распада к увеличению захватов нейтронов и вынужденного деления; 3. Согласованный расчет вероятностей запаздывающего деления и эмиссии запаздывающих нейтронов важен для правильных расчетов изменения концентраций за счет ветвления в сценариях, упомянутых в п. 1. и п. 2.

Поэтому § 2.3 посвящен запаздывающим процессам при бета-распаде сильно нейтронизбыточных ядер - запаздывающему делению и эмиссии запаздывающих нейтронов. В качестве основы для запаздывающих процессов использовалась развитая ранее модель силовой функции бета-распада [3], основанная на теории конечных ферми-систем Мигдала.

Роль запаздывающего деления в  $\gamma$ -процессе была оценена достаточно давно (смотри, например, [4-6]). В этих работах параметры запаздывающего деления определялись из микроскопических расчетов и считалось, что запаздывающее деление наиболее важно для образования ядер-космохронометров [5,7], но слабо влияет на выход других тяжелых ядер.

В результате подробных расчетов нуклеосинтеза в сценариях с большим временем протекания  $\gamma$ -процесса и учете запаздывающих процессов на всех этапах быстрого нуклеосинтеза было показано, что на последней стадии  $\gamma$ -процесса (когда плотность свободных нейтронов падает ниже критической) запаздывающее деление заметно влияет на выходы тяжелых элементов, образующихся в  $\gamma$ -процессе.

Расчеты вероятностей запаздывающего деления, сделанные для масс и ба-

рьеров деления, основанных на обобщенной модели Томаса–Ферми с поправкой Струтинского, показали, что использование силовых функций на основе ТКФС приводит к уменьшению рассчитываемых величин вероятности запаздывающего деления  $P_{\beta df}$ , переоцененных в ранних работах [4].

В расчетах выходов ядер-космохронометров становится важным расчет скоростей спонтанного деления. Поэтому в § 2.4 на основе современных прогнозов барьеров деления рассчитаны параметры различных представлений формулы Святецкого, определяющей скорость спонтанного деления.

В основном  $r$ -процессе происходит зацикливание нуклеосинтеза за счет интенсивного деления и воспроизводства выгоревших зародышевых ядер ядрами-продуктами деления, и поэтому становится важным знать массовое распределение продуктов деления. Поскольку точные расчеты распределения осколков деления сильно нейтроноизбыточных актинидов только ведутся [8], нами на основе систематики ядерных данных были получены феноменологические распределения по массам ядер-продуктов деления (см. § 2.5), использовавшиеся в расчетах.

Для представления степени надёжности сделанных расчетов были проведены сравнения с экспериментальными данными, показавшими хорошее совпадение теории и эксперимента.

В процессе моделирования выходов актинидов в импульсном  $r$ -процессе при облучении урана интенсивными нейтронными потоками было показано, что существует возможность тестирования расчетных скоростей реакций. Так, было показано, что применение в моделях нуклеосинтеза скоростей реакций на основе предсказаний барьеров и масс в рамках подхода Хартри–Фока–Боголюбова значительно уменьшает нечетно-четный эффект колебаний выходов соседних изотопов, образующихся в нуклеосинтезе, а расчеты выходов трансурановых элементов в импульсном нуклеосинтезе, сделанные с использованием обобщенной модели Томаса–Ферми и рассчитанных скоростей вынужденного и запаздывающего деления показали хорошее совпадение рас-

четов и измерений выходов актинидов, включая обращение нечетно-четного эффекта в области  $A \sim 255$  (**§ 2.7**).

Глава 3 посвящена исследованию динамики горячего ветра от протонейтронной звезды и развитию условий для нуклеосинтеза под действием нейтронов. Известно, что в нейтринном ветре от горячих нейтронных звезд, возникающем в результате взрыва сверхновой, создаются условия для протекания  $r$ -процесса. Часть вещества на поверхности нейтронной звезды, нагреваясь нейтрино от сколлапсированного ядра сверхновой, выбрасывается в окружающую среду. Вещество выброса сильно нейтронизовано и характеризуется высокой энтропией, умеренной плотностью и температурой, быстро падающей в результате разлета и охлаждения ниже температуры замораживания реакций с заряженными частицами.

В настоящей главе исследовано влияние динамики потоков выбрасываемого вещества на больших временных интервалах на нуклеосинтез в  $r$ -процессе. Для этого были рассмотрены две фазы выброса вещества, когда начальная фазы свободного разлета вещества сменяется второй, более медленной, стадией расширения. В данном исследовании использовалось схематичное описание динамики ветра, которое позволило изучить процесс нуклеосинтеза в нейтринном ветре, заторможенном ударной волной, и влияние на него таких характеристик, как асимптотические температура и плотность, а также энтропия и характерный временной масштаб разлета вещества.

В **§ 3.1** был сделан вывод о том, что охлаждение вещества сверхновой во время разлета вещества на больших временных интервалах оказывает существенное влияние на нуклеосинтез в  $r$ -процессе. В частности, медленная фаза разлета с уменьшающимися температурой и плотностью, которая следует за первоначальным быстрым сверхзвуковым разлетом, более благоприятна для сильного  $r$ -процесса, чем рассмотренные ранее [9-11] модели с постоянными граничными условиями.

В **§ 3.2** рассмотрены модели торможения вещества ветра, приводящие к

созданию условий для  $r$ -процесса. В § 3.4 подробно рассмотрена динамика ветра в зависимости от асимптотики температуры и плотности на стадии торможения вещества ветра. В § 3.5 и в § 3.6 представлены результаты численного моделирования нуклеосинтеза в веществе ветра и определены значения параметров вещества ветра, благоприятные для образования тяжелых элементов вплоть до платинового пика. Показано, что в случае умеренного торможения выброшенного ветром вещества, выход тяжелых элементов слабо чувствителен к значению асимптотической температуры в пределах от  $T_9(t_0) = 0.3$  до  $T_9(t_0) = 1.4$ .

Вообще говоря, образование элементов пика 196, а тем более сверхтяжелых элементов (СТЭ) требует большой продолжительности  $r$ -процесса, такой, чтобы установившаяся в процессе деления обратная связь с областью продуктов деления приводила к стационарному течению  $r$ -процесса в области  $A$  от  $\sim 100$  до  $230$ — $260$ . Такая длительность нуклеосинтеза достижима в сценариях, реализующих модель длительной нейтронной экспозиции, типа выброса в межзвездную среду сильно нейтронизованного вещества при слиянии нейтронных звезд в процессе эволюции тесных двойных систем или струй с поверхности нейтронных звезд, где начальное для  $r$ -процесса отношение числа нейтронов к зародышевым ядрам достаточно велико (более 300).

В исследовании нуклеосинтеза в сценарии слияния нейтронных звезд, приведенном в главе 4, сделан подробный анализ роли разных типов деления в  $r$ -процессе. В § 4.1 установлено, что длительная нейтронная экспозиция — необходимое условие для образования элементов платинового пика и трансуранных элементов.

В § 4.2 анализируется зависимость выходов тяжелых элементов от запаздывающего и вынужденного деления. Проанализированы существующие базы данных по вероятностям запаздывающего деления. Показано, что погрешности в модели могут приводить к значительному изменению относительного выхода тяжелых элементов, прежде всего в области второго и третьего пиков

на кривой распространенности. Показана динамика быстрого нуклеосинтеза во времени.

В § 4.3 исследован относительный вклад вынужденного, запаздывающего и спонтанного деления на образование как тяжелых, так и сверхтяжелых элементов в  $\gamma$ -процессе. Показано, что все три типа деления атомных ядер: вынужденное, запаздывающее и спонтанное – оказываются важны в сценариях  $\gamma$ -процесса, реализующих нуклеосинтез в среде с большой концентрацией нейтронов. Также показано, что быстрый нуклеосинтез является тем астрофизическим процессом, в котором в природе, в принципе, могут быть образованы сверхтяжелые элементы. Однако для окончательного ответа на этот вопрос нужно не только развитие сценариев, но и создание надежных моделей прогнозирования времен жизни спонтанного деления и барьеров деления, к неточностям в которых сильно чувствительны выходы сверхтяжелых элементов и ядер-космохронометров. Поэтому только те модели, которые дают хорошее согласие с наблюдениями для выходов ядер-космохронометров, могут быть использованы для прогнозирования выходов сверхтяжелых элементов. Однако и они должны применяться с осторожностью, особенно основанные на прогнозируемых величинах барьера деления: величина барьера деления вблизи области нейтронной стабильности для трансактинидов, как показывают недавние расчеты барьеров деления [12], может быть выше принятых в настоящее время значений, что может привести к значительным изменениям искомых выходов.

Расчеты распространенности тяжелых элементов в сценарии слияния нейтронных звезд показали также, что выход сверхтяжелых элементов сильно зависит от модели спонтанного деления. Использование моделей спонтанного деления, приводящих к расширению области спонтанного деления, приводит к завышению доли вклада спонтанного деления и закрывает дополнительную и еще не рассмотренную возможность второго пути образования СТЭ, когда  $\gamma$ -процесс, пройдя вдоль границы нейтронной стабильности в область ядер

с  $A \geq 300$ , может в результате бета-распадов обойти область с большими скоростями спонтанного и запаздывающего деления и через альфа-распады ядер с  $A \geq 300$  привести к образованию наиболее долгоживущих изотопов из острова стабильности.

Развитие сценариев процесса образования сверхтяжелых элементов в природе [13] и появление новых прогнозов ядерных данных [14] дает основание на заметный прогресс в вопросе определения конкретных изотопов СТЭ, образующихся в природе, что необходимо как при планировании экспериментов, так и в поисках следов СТЭ на земле и в космосе, однако для таких прогнозов требуются более надежные расчеты скоростей спонтанного деления трансактинидов.

В § 4.4 на основе расчетов распространенности ядер-космохронометров методом изотопных отношений для разных моделей ядерных данных было показано, что большинство расчетных значений концентраций космохронометрических пар в модели галактического нуклеосинтеза, близком к равномерному, но с обогащением тяжелых элементов перед образованием планет солнечной системы за счет близкой к планетарному облаку вспышки быстрого нуклеосинтеза, возможно связанного со взрывом сверхновой, указывает на значение возраста вселенной в диапазоне от 11 до 18 млрд лет и не противоречит определенному другими методами значению. Однако, поскольку зависимость возраста от используемых ядерных данных, как было показано ранее [7], порядка 20%, значение возраста вселенной методом изотопных отношений подлежит переоценке на основе новых ядерных данных и уточненных наблюдений распространенности ядер космохронометров.

Проведенные расчеты  $r$ -процесса в сценарии слияния нейтронных звезд, использующие значения ядерных масс и барьеров деления, вычисленные в обобщенной модели Томаса-Ферми и основанных на них скоростях реакций [15], массовое распределение ядер-продуктов деления и для всех рассмотренных моделей спонтанного деления хорошо описывают наблюдаемую распрос-

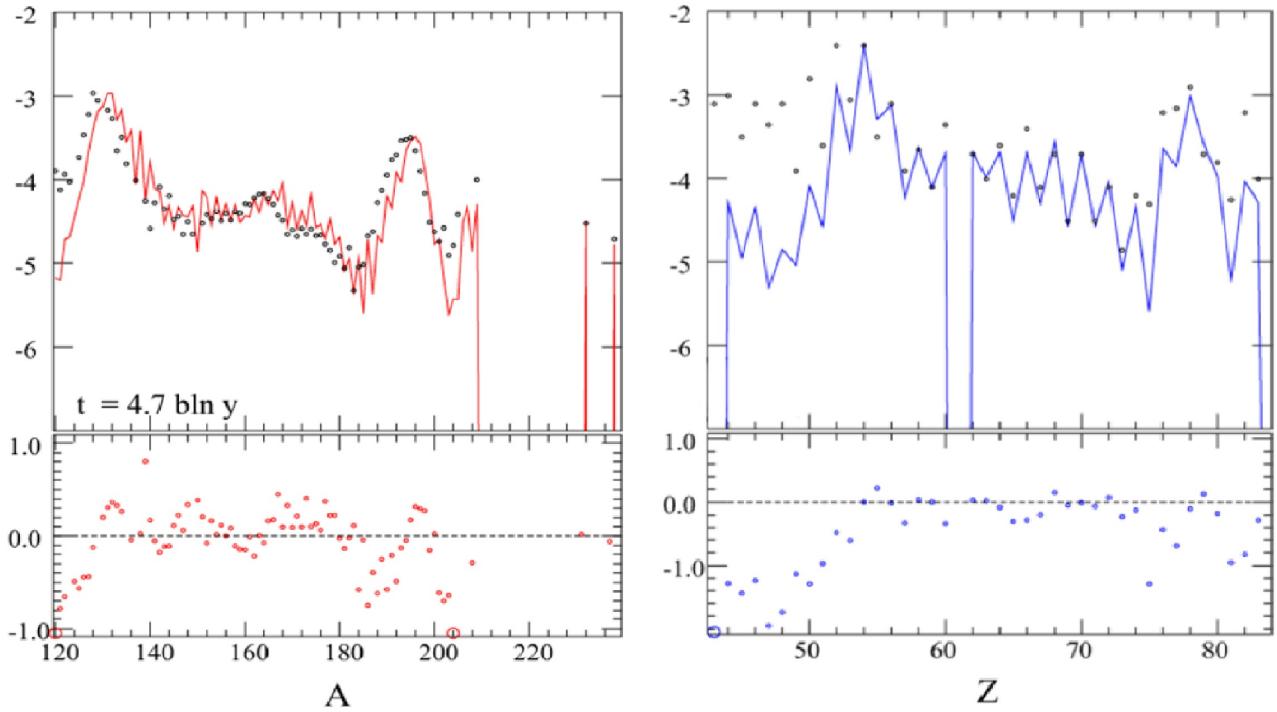


Рис. 1: Расчетная распространенность изотопов  $Y_A$  (слева) и  $Y_Z$  (справа) через 4.7 млрд лет после окончания  $r$ -процесса. В нижней части рисунков показано отношение расчетных и наблюдаемых распространеностей.

траненность химических элементов в области от второго до третьего пика на наблюдаемой кривой распространенности (Рис.1), что подтверждает реальность сценария слияния нейтронных звезд в качестве основного сценария  $r$ -процесса.

В целом в главе 4 изучены особенности протекания  $r$ -процесса в области трансурановых элементов и показана важность деления как для основного процесса образования тяжелых элементов, так и разделения пути развития быстрого нуклеосинтеза - на основную ветвь, образующуюся за счет деления, вовлечения продуктов деления в  $r$ -процесс в качестве новых зародышевых ядер и установления квазиравновесия между областью продуктов деления и областью делящихся ядер, и слабую ветвь, формирующуюся потоком нуклеосинтеза, преодолевшим область интенсивного деления и образующим сверхтяжелые элементы.

Впервые показано преобладание вынужденного, а не запаздывающего, де-

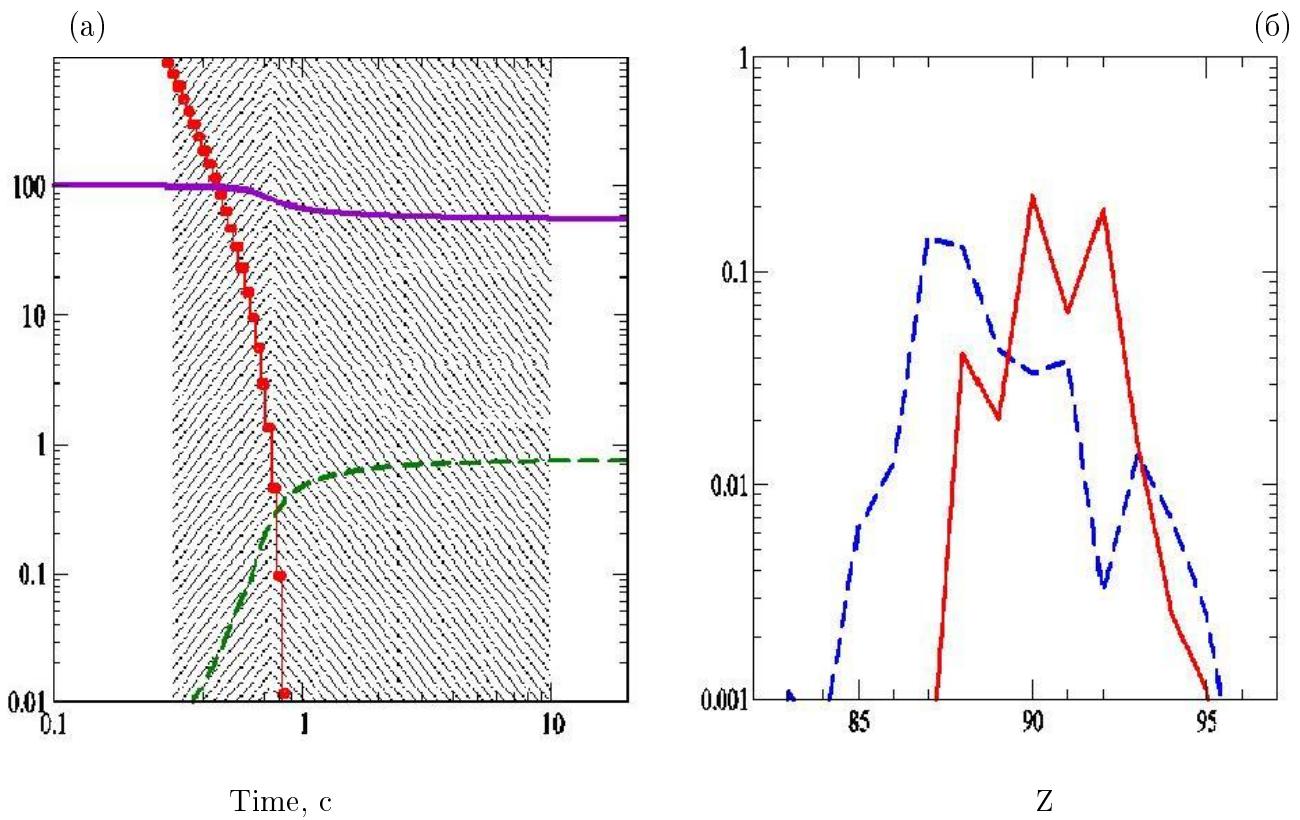


Рис. 2: а) Доля вторичных ядер (в процентах), образованных за счет вынужденного деления (линия) и отношение числа делений в процессе бета-распада к числу делений в результате вынужденного деления (штриховая линия); концентрация свободных нейтронов (линия с кружками); заштрихованы области, где преобладает вынужденное (левая штриховка) и запаздывающее (правая штриховка) деление; б) доля химических элементов, распавшихся в течение нуклеосинтеза в сценарии СНЗ за счет вынужденного (линия) и запаздывающего (штриховая линия) деления.

ления в процессе образования и формировании выходов тяжелых элементов (Рис.2), и впервые исследовано совместное влияние различных процессов деления на образование тяжелых и сверхтяжелых ядер, определен вклад вынужденного, запаздывающего и спонтанного деления на образования тяжелых ядер.

Показана сильная зависимость формирования выходов ядер космохронометров, а также сверхтяжелых элементов, от модели спонтанного деления, что позволяет тестировать существующие модели спонтанного деления путем сравнения расчетных выходов ядер-космохронометров с наблюдениями их

распространенности. Показано наличие ветвления  $r$ -процесса в области трансактинидов на основную ветвь образования тяжелых ядер и слабую ветвь, приводящую к образованию сверхтяжелых ядер в основном  $r$ -процессе, осуществляющимся при высоких концентрациях свободных нейтронов. На основе существующих ядерных данных определены изотопы сверхтяжелых элементов, образующиеся в данном сценарии, и рассчитаны их выходы. Величина их выходов может быть относительно велика (Рис.3), но сильно зависит от используемых теоретических моделей, а время жизни образующихся сверхтяжелых изотопов невелико.

В главе 5 в рамках схематической модели, основанной на эволюционном сценарии взрыва сверхновой [16], исследован вопрос - могут ли астрофизические процессы быстрого захвата нейтронов привести к образованию сверхтяжелых элементов при взрыве сверхновой, и могут ли они быть обнаружены в природе.

Для этой цели были проведены расчеты нуклеосинтеза с использованием полностью динамических кинетических моделей в предположении, что в рассматриваемой среде отношение числа нейтронов к числу зародышевых ядер достаточно велико для возможности образования сверхтяжелых ядер. Расчеты были сделаны для двух наборов ядерных масс и барьеров деления и двух предельных случаев физических условий, определяемых температурой, что приводит к моделям "холодного" и "горячего"  $r$ -процесса. Учитывались все возможные каналы деления и соответствующие распределения продуктов деления. Было показано, что для таких моделей и условий, возможных при взрыве сверхновой II типа, образование сверхтяжелых ядер с  $A \sim 300$  происходит, однако образовавшиеся изотопы имеют короткое время жизни и быстро распадаются за время от нескольких дней до нескольких лет.

В главе 6 были рассмотрены различные варианты слабого  $r$ -процесса, в котором, избыток нейтронов недостаточен для поддержания сильного  $r$ -процесса и могут образовываться только изотопы химических элементов с массовым

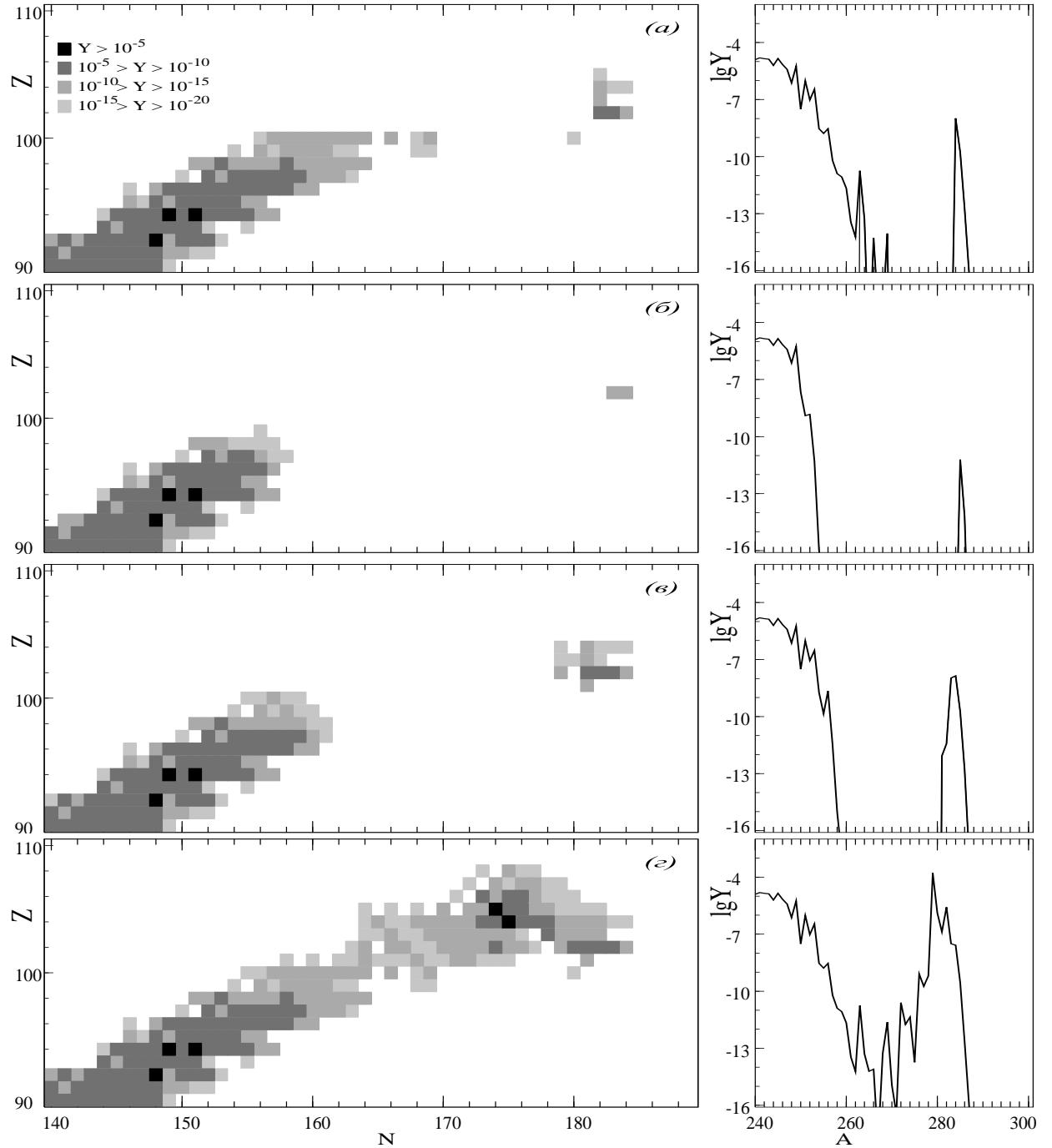


Рис. 3: Выход сверхтяжелых элементов в  $r$ -процессе:  $Y(Z, N)$  (слева) и  $Y(A)$  (справа) при использовании скоростей спонтанного деления (сверху вниз): феноменологической модели [17] - (a); аппроксимаций на основе экспериментальных - (б) и теоретических - (в) барьеров деления; расчетов [18] - (г) на момент времени  $\tau_R = 1000$  с. Значения концентраций  $Y_{ZN} > 10^{-5}$  обозначены черным,  $10^{-10} < Y_{ZN} < 10^{-5}$  - темно-серым,  $10^{-15} < Y_{ZN} < 10^{-10}$  - серым,  $10^{-15} < Y_{ZN} < 10^{-20}$  - светло-серым.

числом от 80 до 130.

В § 6.1 рассмотрен слабый r-процесс, в котором нейтроны, необходимые для образования тяжелых ядер, образуются в результате развала ядер гелия, вызванного рассеянием на них нейтрино от сколлапсированного ядра звезды. В этом же параграфе рассмотрен впервые предложенный механизм ускорения r-процесса в результате прямого захвата электронных нейтрино тяжелыми ядрами, что приводит к увеличению зарядового числа, как при  $\beta^-$ -распаде.

В § 6.2 рассмотрен сценарий r-процесса при взрыве термоядерной сверхновой, являющийся развитием модели rbc-процесса, предложенного в 80-х годах прошлого века как возможный сценарий нуклеосинтеза тяжелых элементов при взрыве термоядерной сверхновой.

Таким образом, в главе 6 было показано, что образование ядер в области  $A \approx 80 - 130$  может происходить:

1) в гелиевой оболочке сверхновой за счет источника нейtronов, возникающего при возбуждении ядер гелия нейтрино от коллапсирующего ядра с последующим испарением нейtronов частью ядер. Этот реалистичный механизм будет в дальнейшем исследоваться по мере развития соответствующих сценариев. В соответствии с выводами работы [19] о сильном влиянии реакций, вызванных протонами  $(p, \gamma)$ ,  $(p, n)$  на формирование зародышевых ядер, показано, что: а) распределение зародышевых ядер сдвигается в сторону более тяжелых изотопов, увеличивая количество захваченных ядрами железного пика почти в 2 раза, уменьшая тем самым величину одного из самых жестких параметров - отношения свободных нейtronов к зародышевым ядрам; б) приводит к ускорению r-процесса.

2) В сценариях взрыва термоядерных сверхновых вопрос протекания слабого r-процесса менее изучен, хотя исследовались различные варианты сценариев, в которых, однако, был слишком мал избыток нейtronов, использовались искусственные варианты нейтронного источника типа  $^{13}C$ , и значимое

количество элементов за железным пиком не образовывалось. Однако при повышенном нейтронном избытке тяжелые элементы могут образоваться в следующих случаях: а) если первоначальный избыток нейтронов очень велик и характерное гидродинамическое время мало, могут образоваться все элементы от железа до урана, причем рассмотренный в настоящей работе сценарий образования тяжелых элементов требует значительно меньшего количества свободных нейтронов; б) если нейтронов после остывания вещества недостаточно для синтеза элементов тяжелее ксенона, то этот сценарий образования химических элементов может быть принципиально важен для выяснения вопроса об образовании этих элементов в природе, поскольку существующие модели  $r$ -процесса при взрыве массивных сверхновых II типа или слияний нейтронных звезд позволяют получить хорошее согласие с наблюдениями только для масс  $A > 120$ . Поэтому при наличии сценария, обеспечивающего высокую начальную нейтронизацию вещества -  $\eta_0 \geq 0.30$ , может быть реализован слабый  $r$ -процесс, ответственный за образование ядер с  $A < 130$ , однако таких сценариев пока нет.

В **заключении** дана краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы основные результаты и выводы, кратко изложены перспективы исследований нуклеосинтеза в области актинидов.

В **приложении** приведены форматы и описание таблиц, содержащих как расчеты скоростей реакций при фиксированных значениях температуры, так и коэффициенты к аппроксимационным формулам, позволяющие вычислять значения скоростей реакций при произвольном значении температуры из рассмотренного диапазона значений. Таблицы находятся в открытом доступе базы данных CDS (Strasbourg Astronomical Data Center, CDS, URL: <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=J/A>).

## **Публикации по теме диссертации**

Изложенные в диссертации результаты были опубликованы в 1990–2013 гг. в 50 работах (из них 36, обозначенные звездочкой, опубликованы в журналах списка ВАК, а 4 - без соавторов),

- 1.\* Панов И.В., Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Влияние эффектов запаздывающего деления на образование трансурановых элементов // Известия. РАН, сер. физ. 1990. Т. 54(11). С. 2137-2142.
2. Nadyozhin D.K., Panov I.V. The influence of neutrino flux upon the nucleosynthesis of heavy nuclei. In: 3d International Symposium on Weak and Electromagnetic Interactions in Nuclei (WEIN-92), (Dubna, Russia, June 16–22, 1992): proceedings / Edited by Tc. Vylov, World Scientific Publishing Co., Utopia Press, Singapore. 1993. P. 479-486.
- 3.\* Панов И.В. Сечения захвата нейтрино нейтронизбыточными ядрами // Письма в Астрон. журн. 1994. Т. 20. С. 616-622.
- 4.\* Панов И.В., Птицын Д.А., Чечеткин В.М. Проблема образования элементов за железным пиком и  $rbc$ -процесс // Письма в Астрон. журн. 1995. Т. 21(2). С. 209-214.
- 5.\* Блинников С.И., Панов И.В., Птицын Д.А., Чечеткин В.М. Физическое обоснование процесса нуклеосинтеза тяжелых элементов // Письма в Астрон. журн. 1995. Т. 21(6). С. 872-876.
- 6.\* Блинников С.И., Панов И.В. Кинетическая модель для быстрого нуклеосинтеза // Письма в Астрон. Журн. 1996. Т. 22. С. 45-54.
- 7.\* Панов И.В. Радиационный захват нейтронов и  $r$ -процесс // Известия РАН, сер. физ. 1997. Т. 61. С. 210-219.
- 8.\* Nadyozhin D.K., Panov I.V. Nucleosynthesis Induced by Neutrino Spallation of Helium // Nuclear Physics A. 1997. Vol. 621. P. 359-362.

- 9.\* Nadyozhin D.K., Panov I.V., Blinnikov S.I. The neutrino-induced neutron source in helium shell and r-process nucleosynthesis // *Astronomy and Astrophysics*. 1998. Vol. 335. P. 207-217.
- 10.\* Герасименко Б.Ф., Крамаровский Я.М., Панов И.В. Расчет сечений нейтронного захвата ядер, образующихся в астрофизическом r-процессе // *ЯФ*. 1999. Т. 62. вып. 1. С. 119-125.
- 11.\* Панов И.В., Надёжин Д.К. Роль протонов и альфа-частиц в быстром нуклеосинтезе в оболочке коллапсирующей сверхновой // *Письма в Астрон. журн.* 1999. Т. 25. вып. 6. С. 435-440.
- 12.\* Nadyozhin D.K., Panov I.V. A two-code iterative method to calculate the light and heavy element synthesis // *Nuclear Physics A*. 2001. Vol. 688. P. 590-592.
- 13.\* Надёжин Д.К., Панов И.В. Итерационный метод для одновременного расчета синтеза как легких, так и тяжелых элементов // *Письма в Астрон. Журн.* 2001. Т. 27. С. 440-450.
- 14.\* Панов И.В., Блинников С.И., Тилеманн Ф.-К. Нуклеосинтез тяжелых элементов: результаты вычислительного эксперимента // *Письма в Астрон. Журн.* 2001. Vol. 27(4). P. 279-290.
- 15.\* Panov I.V., Freiburghaus C., Thielemann F.-K. Could fission provide the formation of chemical elements with  $A \leq 120$  in metal-poor stars? // *Nuclear Physics A*. 2001. Vol. 688. P. 587-589.
- 16.\* Панов И.В., Чечеткин В.М. Об образовании химических элементов за железным пиком // *Письма в АЖ*. 2002. Т. 28. вып. 7. С. 541-553.
- 17.\* Панов И.В. Где проходит путь r-процесса: предельные случаи и сравнение с наблюдениями // *Письма в Астрон. Журн.* 2003. Т. 29. С. 195-201.

- 18.\* Панов И.В., Тилеманн Ф.-К. Проблема деления и г-процесс: скорости вынужденного и запаздывающего деления // Письма в Астрон. Журн. 2003. Т. 29. С. 510-521.
- 19.\* Panov I.V., Thielemann F.-K. Final r-process yields and the influence of fission: the competition between neutron-induced and beta-delayed fission // Nuclear Physics A. 2003. Vol. 718. P. 647-649.
- 20.\* Thielemann F.-K., Argast D., Brachwitz F., Hix W.R., Hoflich P., Liebendorfer M., Martinez-Pinedo G., Mezzacappa A., Panov I., Rauscher T. Nuclear cross sections, nuclear structure and stellar nucleosynthesis // Nuclear Physics A. 2003. Vol. 718. P. 139-146.
- 21.\* Панов И.В., Тилеманн Ф.-К. Проблема деления и г-процесс: конкуренция между вынужденным и запаздывающим делением // Письма в Астрон. Журн. 2004. Т. 30. С. 711-719.
- 22.\* Panov I.V., Kolbe E., Pfeiffer B., Rauscher T., Kratz K.-L., Thielemann F.-K. Calculations of fission rates for r-process nucleosynthesis // Nuclear Physics A. 2005. Vol. 747. P. 633-654.
23. Panov I.V., Korneev I.Yu. Fission recycling in the r-process and formation of the second peak with  $A = 130$ . In: International Symposium on Nuclear Astrophysics "Nuclei in the Cosmos - IX"(CERN, Geneva, June 25-30, 2006): proceedings. / Proceedings of Science. 2006. PoS (NIC-IX) 156.
24. Nadyozhin D.K., Panov I.V. Neutrino-induced nucleosynthesis as a probe into the mechanism of supernovae. In: International Symposium on Nuclear Astrophysics "Nuclei in the Cosmos - IX"(CERN, Geneva, June 25-30, 2006): proceedings. / Proceedings of Science. 2006. PoS (NIC-IX) 147.
25. Martínez-Pinedo G., Kelic A., Langanke K., Schmidt K., Mocelj D., Fröhlich C., Thielemann F. -K., Panov I., Rauscher T., Liebendo"rfer M., Zinner

- N., Pfeiffer B., Buras R., Janka H.-Th. Nucleosynthesis in neutrino heated matter: The vp-process and the r-process. In: International Symposium on Nuclear Astrophysics "Nuclei in the Cosmos - IX"(CERN, Geneva, June 25-30, 2006): proceedings. / Proceedings of Science. 2006. PoS (NIC-IX) 064.
- 26.\* Надёжин Д.К., Панов И.В. Слабый компонент r-процесса как результат взаимодействия нейтрино с гелиевым слоем сверхновой // Письма в Астрон. Журн. 2007. Vol. 33. P. 385-389.
27. Martinez-Pinedo G., Mocelj D., Zinner N.T., Kelic A., Langanke K., Panov I., Pfeiffer B., Rauscher T., Schmidt K.-H., Thielemann F.-K. The role of fission in the r-process // Progress in Particle and Nuclear Physics. 2007. Vol. 59(1). P. 199-205.
28. Thielemann F.-K., Frohlich C., Hirschi R., Liebendorfer M., Dillmann I., Mocelj D., Rauscher T., Martinez-Pinedo G., Langanke K., Farouqi K., Kratz K.-L., Pfeiffer B., Panov I., Nadyozhin D.K., Blinnikov S., Bravo E., Hix W.R., Hoflich P., Zinner N.T. Production of intermediate-mass and heavy nuclei // Progress in Particle and Nuclear Physics. 2007. Vol. 59(1). P. 74-93.
29. Thielemann F.-K., Mocelj D., Panov I., Kolbe E., Rauscher T., Kratz K.-L., Farouqi K., Pfeiffer B., Martinez-Pinedo G., Kelic A., Langanke K., Schmidt K.-H., Zinner N. The R-Process Supernovae and Other Sources of the Heaviest Elements // International Journal of Modern Physics E. 2007. Vol. 16(4). P. 1149-1163.
30. Korneev I.Yu., Panov I.V., Rauscher T., Thielemann F.-K. SMOKER and NON-SMOKER neutron-induced fission rates. In: Seminar on Fission VI (Corresdonk, Belgium, 18-21 September 2007): proceedings / Eds C.Wagemans, J.Wagemans and P.D'hondt. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore. 2008. P. 177-186.

31. Nadyozhin D.K., Panov I.V. Neutrino-induced nucleosynthesis in supernovae: synthesis of light elements and neutrino-driven r-process // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2008. Vol. 35. id. 014061. P. 1-5.
- 32.\* Панов И.В., Корнеев И.Ю., Тилеманн Ф.-К. r-процесс в области трансуранных элементов и вклад продуктов деления в нуклеосинтез ядер с  $A \leq 130$  // Письма в Астрон. Журн. 2008. Т. 34. С. 189-197.
- 33.\* Panov I.V. and Janka H.-Th. On the Dynamics of Proto-Neutron Star Winds and r-Process Nucleosynthesis // Astronomy and Astrophysics. 2009. Vol. 494(3). P. 829-844.
34. Gopka V.F., Yushchenko A.V., Yushchenko V.A., Panov I.V., Kim Ch. Identification of absorption lines of short half-life actinides in the spectrum of Przybylski's star (HD 101065) // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. 2008. Vol. 24(2). P. 89-98.
35. Petermann I., Arcones A., Kelic A., Langanke K., Martinez-Pinedo G., Schmidt K.-H., Hix W.R., Panov I.V., Rauscher T., Thielemann F.-K., Zinner N. R-process nucleosynthesis calculations with complete nuclear physics input // In: Int. Symposium on Nuclear Astrophysics "Nuclei in the Cosmos - X (CERN, Geneva, July 27 - Aug 1, 2008): proceedings / CERN: Proceedings of Science. 2008. PoS (NIC-X) 143.
- 36.\* Панов И.В., Корнеев И.Ю., Тилеманн Ф.-К. Сверхтяжелые элементы и r-процесс // ЯФ. 2009. Т. 72. С. 1026-1033.
- 37.\* Blinnikov S. I, Panov I. V., Rudzsky M. A., Sumiyoshi K. The equation of state and composition of hot, dense matter in core-collapse supernovae // Astronomy Astrophysics. 2011. Vol. 535. id. A37. P. 1-13.
38. Thielemann F-K., Dillmann I., Farouqi K., Fischer T., Frohlich C., Kelic-Heil A., Korneev I., Kratz K-L., Langanke K., Liebendorfer M., Panov I.V.,

- Martinez-Pinedo G., Rauscher T. The r-, p-, and rp-Process // J. Phys.: Conf. Ser. 2010. Vol. 202. id. 012006. P. 1-13.
39. Petermann I., Martinez-Pinedo G., Arcones A., Hix W.R., Kelic A., Langanke K., Panov I.V., Rauscher T., Schmidt K.-H., Thielemann F.-K., Zinner N. Network calculations for r-process nucleosynthesis // J. Phys.: Conf. Ser. 2010. Vol. 202. id. 012008. P. 1-11.
- 40.\* Metzger B.D., Martinez-Pinedo G., Darbha S., Quataert E., Arcones A., Kasen D., Thomas R., Nugent P., Panov I.V., Zinner N.T. Electromagnetic Counterparts of Compact Object Mergers Powered by the Radioactive Decay of R-process Nuclei // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2010. Vol. 406. P. 2650-2662.
- 41.\* Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И., Панов И.В. Расчеты образования трансурановых элементов в интенсивных нейтронных потоках в адиабатических условиях // Известия РАН, сер. физ. 2010. Т. 74(4). С. 504-508.
- 42.\* Panov I.V., Korneev I. Yu., Rauscher T., Martinez-Pinedo G., Kelic-Heil A., Zinner N. T., Thielemann F.-K. Neutron-induced astrophysical reaction rates for translead nuclei // Astronomy and Astrophysics. 2010. Vol. 513. id. A61. P. 1-13.
- 43.\* Панов И.В., Корнеев И.Ю., Раушер Т., Тилеманн Ф.-К. Скорости нейтронных реакций для r-процесса // Известия РАН, сер. физ. 2011. Т. 75. С. 520-525.
- 44.\* Thielemann F.-K., Arcones A., Kappeli R., Liebendorfer M., Martinez-Pinedo G., Langanke K., Farouqi K., Kratz K.-L., Panov I.V., Korneev I.Yu. What are the astrophysical sites for the r-process and the production of heavy elements? // Progress in Particle and Nuclear Physics. 2011. Vol. 66(2). P. 346-353.

45. Panov I.V., Korneev I.Yu., Rauscher T., Thielemann F.-K. r-process reaction rates for the actinides and beyond. In: Seminar on Fission VI (Gent, Belgium, 17-20 May 2007): proceedings / Eds C.Wagemans, J.Wagemans and P.D'hondt. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore. 2011. P. 255-262.
- 46.\* Корнеев И.Ю., Панов И.В. Вклад деления в нуклеосинтез тяжелых элементов в астрофизическом r-процессе // Письма в Астрон. Журн. 2011. Т. 37(12). С. 930-939.
- 47.\* Petermann I., Langanke K., Martinez-Pinedo G., Panov I.V., Reinhard P.-G., Thielemann F.-K. Have superheavy elements been produced in nature? // Eur. Phys. J. A. 2012. Vol. 48. P. 122-133.
- 48.\* Панов И.В., Корнеев И.Ю., Лютостанский Ю.С., Тилеманн Ф.-К. Вероятности запаздывающих процессов для ядер, участвующих в r-процессе // ЯФ. 2013. Т. 76(1). С. 88–101.
- 49.\* Панов И.В., Корнеев И.Ю., Мартинец-Пинедо Г., Тилеманн Ф.-К. Влияние скорости спонтанного деления на выход сверхтяжелых элементов в r-процессе // Письма в Астрон. Журн. 2013. Т. 39. №3. С. 173-182.
- 50.\* Панов И.В., Долгов А.Д. Влияние моделей спонтанного деления на образование ядер космохронометров в r-процессе // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 98. С. 504-507.

## Список литературы

1. Cyburt R. H., Amthor A. M., Ferguson R., et al. The JINA REACLIB Database // The ApJ S. 2010. Vol.189(1). P. 240-252.
2. Rauscher T., Thielemann F.-K., Kratz K.-L. Applicability of the Hauser-Feshbach approach for the determination of astrophysical reaction rates // Nucl. Phys. A. 1997. Vol. 621 P. 331-334.
3. Алексанкин В.Г., Лютостанский Ю.С., Панов И.В. Периоды полураспада ядер, удаленных от линии стабильности, и структура силовой функции  $\beta$ -распада // Ядерная Физика. 1981 Т. 34. С. 1451.
4. Thielemann F.-K., Metzinger J., Klapdor H. V. Beta-delayed fission and neutron emission: Consequences for the astrophysical r-process and the age of the galaxy. // Phys. A. 1983. Vol. 309. P. 301-317.
5. Cowan J.J., Thielemann F.-K., Truran J.W. The R-process and nucleochronology // Phys. Reports. 1991. Vol. 208. P. 267-394.
6. Лютостанский Ю.С., Ляцук В.И., Панов И.В. Влияние запаздывающего деления на образование трансурановых элементов // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1990. Т. 54. С. 2197-2208
7. Лютостанский Ю.С., Малеванный С.В., Панов И.В., Чечеткин В.М. Возможность определения возраста галактики методом уран-ториевых изотопных соотношений // Ядерная физика. 1988. Т. 47(5). С. 1226-1237.
8. Kelic A., Zinner N., Kolbe E., et al. Cross sections and fragment distributions from neutrino-induced fission on r-process nuclei // Physics Letters B. 2005. Vol. 616. P. 48-58.
9. Wanajo Sh., Kajino T., Mathews G. J., Otsuki K. The r-Process in Neutrino-driven Winds from Nascent, “Compact” Neutron Stars of Core-Collapse Supernovae // ApJ. 2001. Vol. 554(1). P. 578-586.
10. Wanajo Sh., Itoh N., Ishimaru Yu., et al. The r-Process in the Neutrino Winds of Core-Collapse Supernovae and U-Th Cosmochronology // ApJ. 2002. Vol. 577. P. 853-865.

11. Terasawa M., Sumiyoshi K., Yamada S., et al. r-Process Nucleosynthesis in Neutrino-driven Winds from a Typical Neutron Star // ApJ. 2002. Vol. 578. P. L137-L140.
12. Moller P., Sierk A.J., Ichikawa T. et al. Heavy-element fission barriers // Phys. Rev. C. 2009. Vol. 79. P. 064304(45pp).
13. Petermann I., Langanke K., Martinez-Pinedo G., Panov I.V., Reinhard P.-G., Thielemann F.-K. Have superheavy elements been produced in nature? // Eur. Phys. J. A. 2012. Vol. 48. P. 122-133.
14. Erler J., Langanke K., Loens H.P., et al. Fission properties for r-process nuclei // Phys. Rev. C. 2012. Vol. 85. id. 025802. P. 1-12.
15. Panov I.V., Korneev I. Yu., Rauscher T., Martinez-Pinedo G., Kelic-Heil A., Zinner N. T., Thielemann F.-K. Neutron-induced astrophysical reaction rates for translead nuclei // Astronomy and Astrophysics. 2010. Vol. 513. id. A61. P. 1-13.
16. Arcones A., Janka H.-Th., Scheck L. Nucleosynthesis-relevant conditions in neutrino-driven supernova outflows // Astronomy Astrophysics. 2007. Vol. 467. P. 1227–1248.
17. Панов И.В., Корнеев И.Ю., Тилеманн Ф.-К. r-процесс в области трансуранных элементов и вклад продуктов деления в нуклеосинтез ядер с  $A \leq 130$  // Письма в Астрон. Журн. 2008. Т. 34. С. 189-197.
18. Zagrebaev V.I., Karpov A.V., Mishustin I.N. et al.) // Phys. Rev. C. 2011. Vol. 84. id. 044617. P. 1-8.
19. Панов И.В., Надёжин Д.К. Роль протонов и альфа-частиц в быстром нуклеосинтезе в оболочке коллапсирующей сверхновой // Письма в Астрон. журн. 1999. Т. 25. вып. 6. С. 435-440.