

## СЕТЕВАЯ БАЗА ЗНАНИЙ NRV ПО ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

© 2016 г. А. В. Карпов<sup>1),2)\*</sup>, А. С. Деникин<sup>1),2)</sup>, А. П. Алексеев<sup>3)</sup>,  
В. И. Загребаяев<sup>1)</sup>, В. А. Рачков<sup>1)</sup>, М. А. Науменко<sup>1)</sup>, В. В. Сайко<sup>1),2)</sup>

Поступила в редакцию 21.12.2015 г.

Излагаются принципы организации и работы сетевой базы знаний NRV по ядерной физике низких энергий (<http://nr.v.jinr.ru>), которая представляет собой совокупность большого числа оцифрованных экспериментальных данных по свойствам ядер и сечениям ядерных реакций, а также широкого набора связанных между собой вычислительных программ моделирования сложных процессов ядерной динамики, выполняемых непосредственно в окне браузера удаленного пользователя. Дается также обзор современного состояния дел в области использования сетевых информационных технологий в ядерной физике. Возможности базы знаний NRV подробно проиллюстрированы на примере анализа процессов слияния атомных ядер и последующего распада возбужденного составного ядра.

DOI: 10.7868/S0044002716040152

*Посвящается памяти В. И. Загребаяева*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В ОИЯИ создана и продолжает развиваться сетевая база знаний NRV по ядерной физике низких энергий [1–7]. Эта система, работающая через сеть Интернет, представляет собой совокупность большого числа оцифрованных экспериментальных данных по свойствам ядер и сечениям ядерных реакций, а также широкого набора связанных между собой вычислительных программ для моделирования сложных процессов ядерной динамики, которые выполняются непосредственно в окне браузера удаленного пользователя. База знаний NRV сегодня является как мощным инструментом для ядерно-физических исследований, так и образовательным ресурсом. Популярность системы постоянно растет, о чем свидетельствует увеличивающееся число запросов пользователей к ее ресурсам, а также число ссылок на базу знаний в статьях, публикуемых наиболее цитируемыми журналами.

Далее дается обзор современного состояния дел в области использования сетевых информационных технологий в ядерной физике, сформулированы основные принципы работы базы знаний NRV, а также кратко описаны ее основные разделы.

Использование базы знаний NRV на практике подробно продемонстрировано на примере анализа процессов слияния атомных ядер и последующего распада возбужденного составного ядра.

### 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕТЕВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

#### 2.1. Ядерные данные

За более чем 100 лет ядерно-физических исследований было накоплено огромное число экспериментальной информации как по свойствам самих ядер, так и по сечениям ядерных реакций. Эти данные содержатся в статьях, опубликованных в многочисленных ядерно-физических журналах. Современным способом накопления и систематизации подобной информации является создание баз данных. В последние годы наиболее интенсивно развиваются именно сетевые версии баз данных, доступные в сети Интернет в оцифрованном виде через веб-интерфейс (браузер). Создание электронных баз данных и организация доступа к ним через сеть Интернет является сейчас общепризнанным направлением развития научных информационных систем. Среди основных таких баз ядерных данных следует отметить NNDC [8], CDFE [9], TUNL [10], NEA Data bank [11], NACRE [12], NACRE-II [13].

Существующие ядерно-физические ресурсы содержат, как правило, исчерпывающе детальную информацию об исследуемом объекте (свойства атомных ядер или реакции с ними). Многие из

<sup>1)</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

<sup>2)</sup>Государственный университет “Дубна”, Дубна, Россия.

<sup>3)</sup>Чувашский государственный университет, Чебоксары, Россия.

\*E-mail: [karпов@jinr.ru](mailto:karпов@jinr.ru)

них создаются либо крупными исследовательскими институтами (например, Брукхейвенская национальная лаборатория поддерживает базу NNDC [8], а НИИЯФ МГУ — базу CDFE [9]), либо в рамках международных коллабораций (например, базы NEA [11], NACRE [12], NACRE-II [13]). Основным недостатком большинства баз ядерных данных является их узкая направленность. Кроме того, часто отсутствует проработанный инструментарий для дополнительной обработки и описания данных. Обычно информация предоставляется пользователю в текстовом (табличном) виде. Таким образом, даже для получения простейших систематик пользователь вынужден самостоятельно выбирать и переписывать в отдельный файл нужные ему данные, а затем использовать какой-либо графический пакет для их отображения.

## 2.2. Моделирование ядерной динамики

За годы развития ядерной физики и, в частности, изучения динамики ядро-ядерных столкновений был разработан ряд теоретических подходов, которые стали общепринятыми в научном сообществе. К ним можно отнести, например, оптическую модель упругого рассеяния или метод связанных каналов для расчета сечения слияния атомных ядер. На протяжении многих лет разрабатываются программные комплексы (например, FRESCO [14], GRAZING [15] и др.), позволяющие моделировать сразу несколько конкурирующих процессов, происходящих при столкновении ядер. Большинство из данных программных комплексов написаны на языке программирования Fortran и являются свободно распространяемыми. Основным недостатком таких кодов является неудобный интерфейс. Под интерфейсом здесь мы понимаем способ взаимодействия пользователя с программным кодом, для запуска которого необходимо правильно составить входной файл. Как правило, это текстовый файл с большим количеством входных параметров, для правильной подготовки которого требуется изучать достаточно сложные и не всегда полные описания. В результате работы программы пользователь обычно получает текстовый файл, для обработки которого требуется применять сторонние графические приложения. В результате использование этих программ для неподготовленного пользователя оказывается проблематичным. Существуют два основных способа решения обозначенной проблемы.

Первый способ состоит в создании систем моделирования ядерной динамики в виде программы, загружаемой на конкретный компьютер пользователя и работающей на локальном компьютере под определенной операционной системой. К таким системам можно отнести, например, TALYS [16],

EMPIRE [17], LISE++ [18], Windows-NRV [2]. Все эти программные продукты имеют (или могут иметь) графический интерфейс подготовки входных данных, инструментарий анализа полученных результатов моделирования, систему подсказок и описания. Все это значительно облегчает работу пользователя.

Второй способ состоит в организации работы компьютерных кодов на едином сервере (или связанной системе серверов), доступном для пользователя через сеть Интернет. По этому пути пошли разработчики сетевой базы знаний NRV [1–7] (см. подробное описание ниже).

Каждый из способов имеет свои очевидные недостатки. Так, первый способ оказывается зависимым от операционной системы. Кроме того, при его использовании возникают проблемы с обновлением программного обеспечения, в частности, с информированием пользователя о новых возможностях системы, исправлении ошибок и т.п. Все эти сложности исчезают при выборе второго способа. Здесь основными трудностями являются организация гораздо более сложного функционирования системы в сети Интернет, а также распределение вычислительных задач при большом числе переключаемых по времени запросов пользователей.

## 3. НАЗНАЧЕНИЕ, ЦЕЛИ СОЗДАНИЯ И ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ NRV

Разрабатываемая нами система — сетевая база знаний NRV по ядерной физике низких энергий — предназначена для объединения между собой ядерных баз данных с общепринятыми теоретическими подходами к моделированию динамики ядерных реакций на едином сервере с единым графическим интерфейсом и свободным доступом.

Целью создания системы является повышение эффективности использования максимально полного набора экспериментальных данных, специальных программ их обработки и основных фундаментальных моделей строения атомного ядра и сложной динамики ядро-ядерных столкновений. В ее основу заложены следующие направления: 1) постоянно обновляемая база экспериментальных данных по свойствам ядер (массам, электромагнитным свойствам, временам жизни, модам распада, схемам уровней и т.д.); 2) постоянно обновляемая база экспериментальных данных по сечениям различных ядерных процессов; 3) реализация большого числа достаточно сложных (но простых в использовании) моделей и алгоритмов, описывающих различные процессы ядерной динамики при низких и промежуточных энергиях; 4) разработка единого, максимально дружелюбного, пользовательского интерфейса.

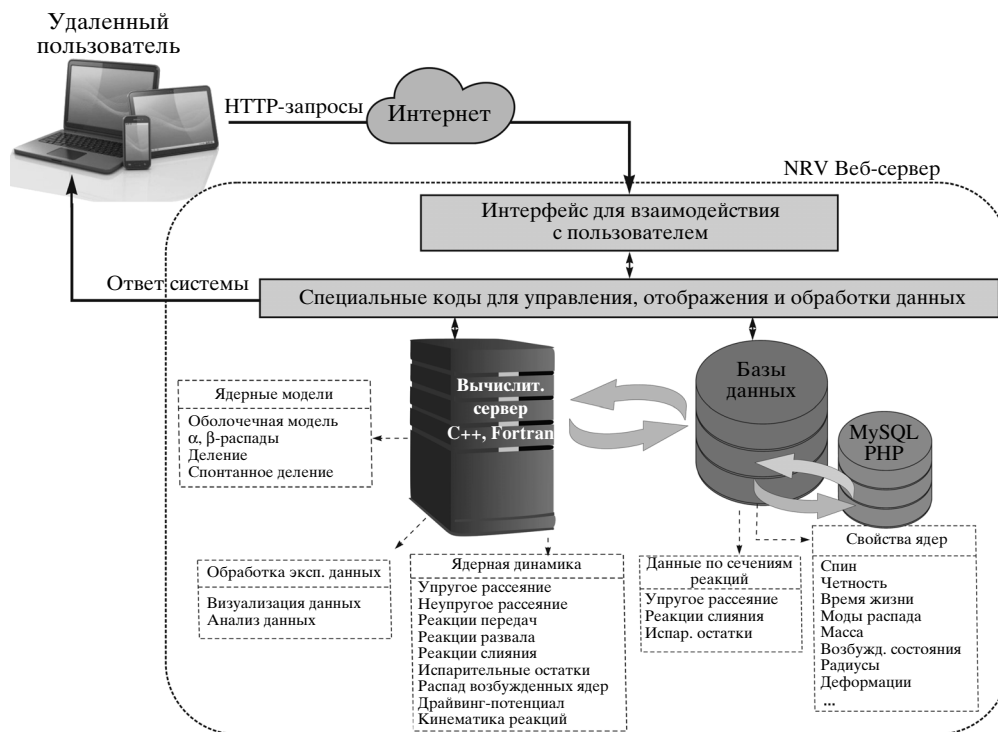


Рис. 1. Схема функционирования базы знаний NRV.

В рамках данного проекта сложные вычислительные программы, имеющие визуальный графический интерфейс для выбора начальных данных, а также графического представления и обработки получаемых результатов, становятся доступными через сеть Интернет. Это достигается за счет разработки веб-приложений, которые представляют собой особый тип программ, построенных по архитектуре «клиент–сервер». Особенность их заключается в том, что само веб-приложение находится и выполняется на сервере, а клиент при этом получает результаты работы через сеть Интернет.

Схема функционирования базы знаний NRV представлена на рис. 1.

### 3.1. Веб-сервер

Доступ к системе осуществляется при помощи веб-браузера (например, Internet Explorer, Mozilla Firefox и др.) через сеть Интернет. Это позволяет любому пользователю получить доступ к базе знаний NRV из любой точки, где есть подключение к сети Интернет. Взаимодействие между клиентом и сервером реализовано с помощью HTML-форм. Соответствующие формы реализуются с использованием языков JavaScript, PHP и HTML. Создание и отладка работы многочисленных HTML-форм является наиболее трудоемкой задачей, которую

приходится решать отдельно для каждой новой задачи, чтобы придать интерфейсу наибольшую интерактивность, обеспечить удобство работы и произвести все необходимые контрольные проверки уже на этапе подготовки данных, исключая выполнение нефизичных запросов.

Обмен данными между сервером и клиентом, создание динамического контента организовано и реализовано средствами языка PHP и технологии Ajax. Значительные компьютерные ресурсы, необходимые при расчетах сложных процессов ядерной динамики (длительность такого счета, например, может составлять от нескольких минут до нескольких часов), требуют особой организации взаимодействия удаленного пользователя с вычислительным сервером. С этой целью на сервере функционирует специальная резидентная служба, запускающая на выполнение расчетные программы, контролирующая их выполнение и отсылающая клиенту промежуточную информацию. По окончании вычисления все результаты направляются пользователю в виде HTML-документа для их дальнейшей обработки и анализа. Данный подход позволяет запускать через веб-браузер самые сложные алгоритмы расчета и получать конечный результат даже после выполнения очень длительного счета.

### 3.2. Вычислительный сервер

Сложные вычислительные программы находятся и выполняются на стороне вычислительного сервера. Пользователь может отслеживать запуск задач и их выполнение с помощью HTML-форм в браузере.

Разрабатываемое программное обеспечение можно разделить на две основные категории: 1) вычислительные программы, реализующие физические модели ядерной динамики (создаются на языках C++ и Fortran); 2) программы для обработки данных и результатов расчета и отображения их в веб-браузере.

### 3.3. Сервер баз данных

Для хранения экспериментальных данных используется реляционная СУБД MySQL [19].

Базы экспериментальных данных по свойствам ядер наполняются нами преимущественно с использованием уже существующих и наиболее авторитетных баз данных (NNDC [8] в Брукхейвене, AMDC [20] в Орсе, NUdat [21] в Лунде и т.д.). Часть информации по свойствам ядер мы находим и вносим в базы данных самостоятельно, используя оригинальные публикации в журналах (прежде всего это касается данных по свойствам сверхтяжелых ядер). В дополнение к экспериментальным данным по свойствам ядер мы самостоятельно создаем и наполняем оцифрованные базы данных по сечениям ядерных реакций: угловым распределениям упругого рассеяния легких и тяжелых ионов, функциям возбуждения процессов слияния ядер, сечениям образования испарительных остатков и т.п.

Таким образом, в качестве интерфейса базы знаний NRV выступает браузер, а в качестве среды, посредством которой происходит обмен данными, — сеть Интернет. Такой подход позволяет сделать базу знаний независимой от операционной системы и легко доступной для удаленных пользователей. Отметим, что наличие удобного пользовательского интерфейса позволяет любому ученому (а также студенту или аспиранту), работающему в области низкоэнергетической ядерной физики, без особого труда использовать общепризнанные и широко применяемые алгоритмы ядерной динамики.

## 4. NRV СЕГОДНЯ

Используя описанный выше подход, на сегодняшний день сделано следующее (в хронологическом порядке).

Созданы и наполнены базы данных по экспериментальным свойствам ядер; разработаны программы для их визуального представления и получения различного рода систематик. Разработаны сетевые версии оптической модели и классической модели упругого рассеяния ядер, позволяющие пользователю с помощью веб-браузера выбрать энергию и параметры взаимодействия в интересующей его реакции и получить в графическом и текстовом виде дифференциальное сечение упругого рассеяния,  $S$ -матрицу, поле траекторий, функцию угла отклонения, парциальные волновые функции и т.д.

Созданы и размещены на сервере программы для теоретического описания процессов неупругого возбуждения коллективных состояний, реакций малонуклонных передач в столкновениях тяжелых ионов (DWBA), а также процессов слияния ядер (в рамках эмпирического и квантового подходов). Наконец, организована работа и постоянное наполнение базы данных по сечениям слияния атомных ядер и выходу испарительных остатков; написаны специальные программы их обработки.

Пример представления информации об экспериментальном сечении слияния для реакции  $^{16}\text{O} + ^{144}\text{Sm}$  показан на рис. 2. Данные отображаются в графическом и текстовом формате. Кроме того, приводится информация об источнике данных (ссылка на публикацию) и краткое описание эксперимента. Выбранные данные могут быть сохранены в табличном виде на компьютере пользователя (опция *Download data*). Также существует возможность сравнения сечения слияния для текущей реакции с данными по другим (близким) реакциям, размещенным в базе данных (опция *Compare and process data*). Опция *Theoretical analysis of the data* перенаправляет пользователя в раздел теоретического анализа сечений слияния для выбранной реакции (см. ниже).

Организована работа и постоянное наполнение базы данных по сечениям упругого рассеяния, причем основной упор сделан на реакции с легкими ядрами. В базе знаний размещены программы для расчета одночастичных уровней деформированного ядра в рамках оболочечной модели с реалистичским средним полем в форме потенциала Вудса—Саксона, а также двухцентровой оболочечной модели, которая позволяет рассчитывать систему одночастичных уровней для конфигурации от двух разделенных ядер до компактных форм составного ядра. Пример расчета одночастичных уровней ядра  $^{208}\text{Pb}$  приведен на рис. 3.

В системе имеется возможность расчета ширины распада возбужденных ядер в рамках статистической модели. Кроме того, реализованные ранее модели для описания процессов слияния ядер были

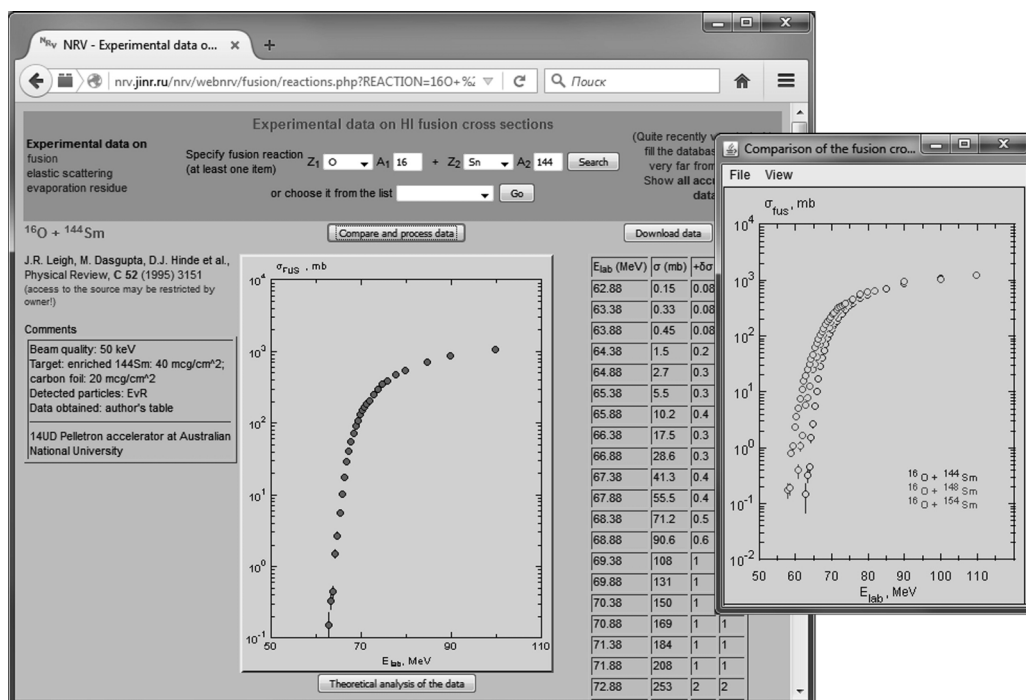


Рис. 2. Пример представления информации об экспериментальном сечении слияния  $^{16}\text{O} + ^{144}\text{Sm}$ .

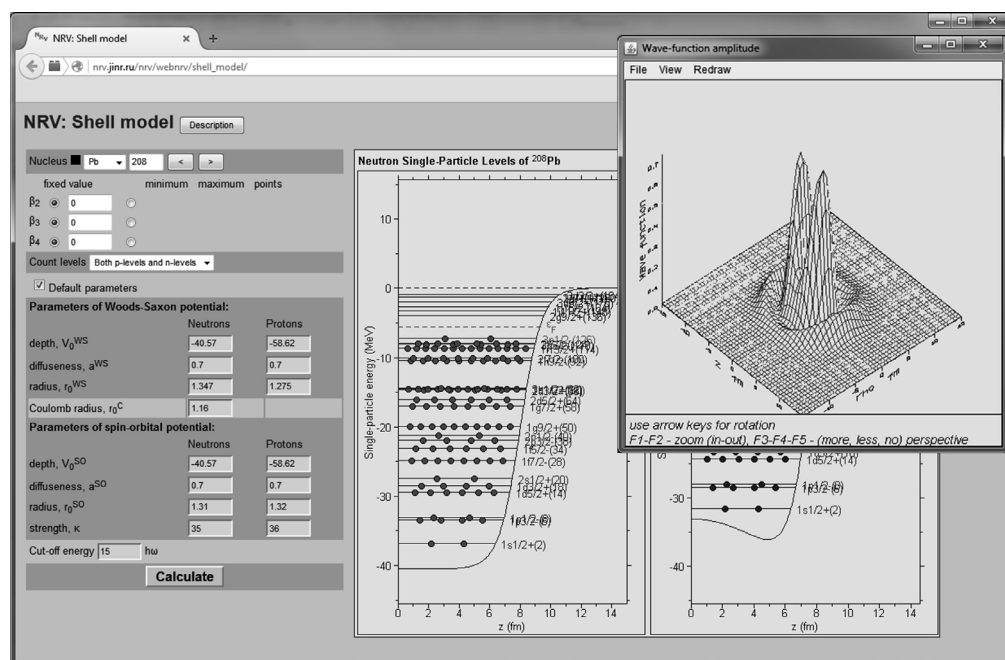


Рис. 3. Пример расчета одночастичных уровней ядра  $^{208}\text{Pb}$ .

объединены со статистической моделью, что позволило рассчитывать сечения образования остатков испарения в реакциях с тяжелыми ионами. Реализована возможность проведения кинематического анализа ядерных реакций с двух- и трехчастичными выходными каналами.

В систему включены также некоторые широко используемые систематики, характеризующие процесс деления атомных ядер (для множественностей пред- и постделительных нейтронов [22], средней кинетической энергии осколков [22, 23]). Реализована возможность расчета массовых и зарядовых

Статистика использования базы знаний за последние годы (число запросов в год)

| Год  | Число запросов ядерных данных | Число запросов на выполнение расчетов |
|------|-------------------------------|---------------------------------------|
| 2011 | 17 000                        | 20 000                                |
| 2012 | 36 000                        | 21 000                                |
| 2013 | 197 000                       | 32 000                                |
| 2014 | 199 000                       | 36 000                                |

распределений осколков спонтанного и низкоэнергетического деления на основе кода GEF [24] и создан комплекс программ для расчета периода полураспада ядер относительно альфа-распада, бета-распада и спонтанного деления.

В базу знаний включена программа GRAZING [15], позволяющая рассчитывать сечения малонуклонных передач в рамках квазиклассического приближения. Кроме того, имеется возможность расчета сечений реакций радиационного захвата в рамках потенциальной модели [25] и включены коды для расчета и анализа фазовых сдвигов упругого рассеяния легких ядер, а также код EPAX [26] для оценки выходов процессов фрагментации.

Все программное обеспечение запускается и взаимодействует с пользователем через обычные веб-браузеры, что делает его независимым от операционной системы.

За время существования базы знаний динамика посещаемости веб-ресурса демонстрирует уверенный рост. В частности, за 2014 год общее число запросов к базе знаний составляло в среднем более 600 в день, из них более 500 запросов к базам данных, около 100 запросов в день на выполнение расчетов, что является хорошим показателем с учетом узкой направленности данного проекта. Статистика использования базы знаний за последние годы приведена в таблице.

По отзывам и цитированию в журналах помимо России база знаний NRV также интенсивно используется в США, Германии, Франции, Китае, Индии, Италии, Польше и других странах.

## 5. СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ

Развитие базы знаний NRV можно разделить на три основных направления: 1) наполнение и обновление существующих баз данных; 2) добавление новых моделей для описания динамики ядерных реакций; 3) обновление пользовательского интерфейса.

До настоящего времени для отображения и обработки результатов пользовательских запросов мы использовали и продолжаем использовать апплеты, написанные на языке Java. Однако в последнее время появились тенденции, свидетельствующие о постепенном отказе от поддержки виртуальной Java-машины (а следовательно, и Java-апплетов) новыми версиями браузеров. Так, некоторые браузеры (например, Google Chrome) уже не поддерживают Java-плагин, ссылаясь на его небезопасность. Кроме того, получившие широкое распространение планшетные компьютеры и другие мобильные устройства не поддерживают виртуальную Java-машину. Одним из путей решения указанной проблемы может быть постепенный переход с технологии Java-апплетов на язык JavaScript, который в настоящее время поддерживается всеми браузерами без установки дополнительных плагинов. В настоящий момент технологии JavaScript (в частности, Ajax) совместно с PHP и HTML5 Canvas обладают всем инструментарием, необходимым для полноценной работы базы знаний: создание элементов управления, работа с графическими примитивами, обмен данными между клиентским устройством и сервером. Таким образом, мы рассматриваем возможность перехода от Java-апплетов к коду, написанному на языке JavaScript.

В этой связи отметим, что в последнее время было создано несколько интересных средств разработки, основанных на свободно распространяемом программном обеспечении. Среди них Google Web Toolkit (GWT) [27], позволяющий веб-разработчику создавать Ajax-приложения на основе языка Java. При включении в базу знаний новых кодов для анализа фазовых сдвигов в упругом рассеянии ядер мы использовали пакет GWT. В целом опыт работы с GWT можно считать успешным. Однако некоторые обнаруженные недостатки (в частности, отсутствие подробной документации) этого пакета заставляют нас рассматривать также другие возможности, например, платформу ASP.NET [28].

Наиболее перспективной альтернативой выглядит использование средств языка HTML5. На данный момент уже реализован код на языке JavaScript, предназначенный для построения графиков на элементе Canvas, определенном в стандарте HTML5. Данный код используется, например, в интерфейсе адиабатической ротационной модели (FRESCO [14]) раздела *Inelastic scattering* (см. рис. 4).

Поиск наиболее эффективного решения оказывается трудной задачей, поскольку требует детального рассмотрения возможностей и ограничений каждой технологии, а также оценки ее развития и поддержки IT-разработчиками.

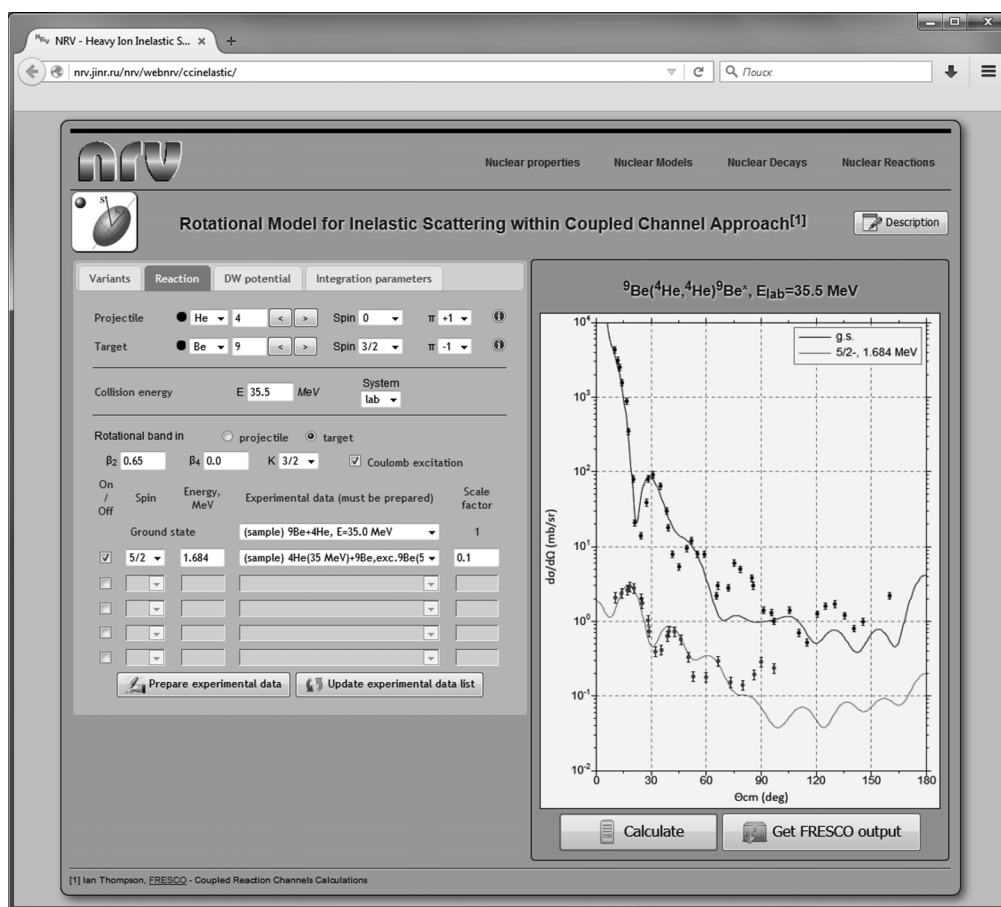


Рис. 4. Интерфейс адиабатической ротационной модели (FRESCO [14]) раздела *Inelastic scattering*.

## 6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ NRV В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ЦЕЛЯХ

База знаний NRV может использоваться как в научно-исследовательской, так и в образовательной сфере деятельности. На основе существующей базы знаний студенты, обучающиеся в области ядерной физики, могут изучать динамику ядерных реакций, проводить анализ экспериментальных данных на основе общепризнанных моделей (например, оптической модели упругого рассеяния, метода искаженных волн в применении к реакциям неупругого возбуждения и передач, метода сильной связи каналов для описания реакций слияния). Во всех перечисленных моделях динамика столкновения ядер определяется, прежде всего, потенциалом их взаимодействия. Проведение данного анализа подразумевает правильный выбор свойств ядер (например, их размеров), потенциала взаимодействия и его параметров. Например, на основе анализа данных по упругому рассеянию могут быть сделаны выводы о размерах ядер. В процессе выполнения работы по изучению реакций слияния могут быть проанализированы данные при энергии

как выше, так и ниже кулоновского барьера. Сравнение расчетов в одномерной модели с экспериментальными данными позволяет сделать вывод о влиянии других степеней свободы на процесс слияния атомных ядер. Основываясь на структуре возбужденных состояний сталкивающихся ядер, могут быть выбраны наиболее важные степени свободы, дающие вклад в сечение слияния. Учесть влияние таких степеней свободы на процесс слияния ядер можно как в квантовом, так и в эмпирическом подходе.

Таким образом, NRV представляет собой удобный, понятный и наглядный инструмент для приобретения и закрепления умений и навыков работы с современными теоретическими подходами к описанию свойств отдельных нуклидов, моделированию динамики ядерных столкновений, а также навыков работы с экспериментальными данными и их систематизации. Разработка методических пособий и рекомендаций для выполнения практических работ позволит эффективно внедрить базу знаний NRV в образовательный процесс любого вуза, ведущего подготовку в области ядерной физики.

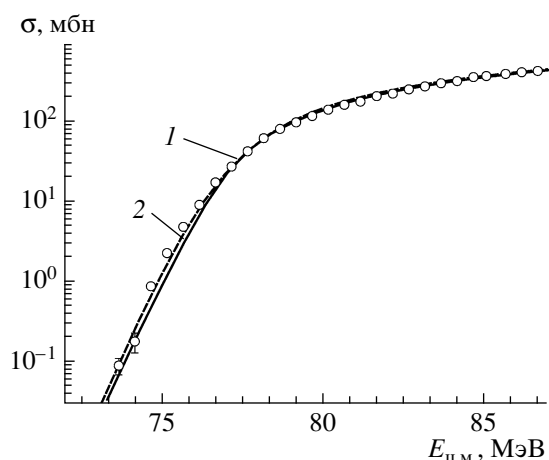
## 7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ NRV ДЛЯ АНАЛИЗА РЕАКЦИЙ СЛИЯНИЯ АТОМНЫХ ЯДЕР И РАСПАДА ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТАВНЫХ ЯДЕР

Реакции около- и подбарьерного слияния атомных ядер являются сложными процессами, зависящими от большого числа степеней свободы. Интерес к этим реакциям не ослабевает в течение многих лет, как со стороны экспериментаторов, так и теоретиков. Реакции слияния играют важную роль при изучении многих процессов. Одним из них является получение новых сверхтяжелых элементов, образование которых происходит в результате реакций слияния двух тяжелых ионов. Реакции слияния легких ядер играют важную роль в нуклеосинтезе во Вселенной. При энергиях ниже кулоновского барьера большое значение может иметь связь относительного движения сталкивающихся ядер с другими степенями свободы, такими, как колебания ядерной поверхности, статическая деформация сталкивающихся ядер, а также перераспределение нуклонов. В процессе слияния атомных ядер образуется возбужденное составное ядро, которое затем может либо поделиться на две приблизительно равные части, либо выжить, испустив одну или несколько легких частиц (преимущественно нейтронов) и/или гамма-квантов.

Обозначенный круг задач ядерной динамики может быть достаточно полно изучен с использованием базы знаний NRV. Система включает в себя базы экспериментальных данных по сечениям слияния ядер и сечениям образования остатков испарения. Для расчета сечений слияния используются две основные модели: квантовая модель связи каналов [29] и эмпирическая модель связи каналов [30]. Процесс девозбуждения составного ядра рассматривается в рамках статистической модели [31]. Объединение моделей для анализа процессов слияния и последующего распада возбужденного составного ядра позволяет рассчитывать сечения слияния-деления и образования остатков испарения. Ниже описаны и проиллюстрированы на конкретных примерах основные возможности системы по каждому из разделов.

### 7.1. Сечения слияния атомных ядер

Анализ процессов слияния атомных ядер доступен в разделе *Fusion* базы знаний. Раздел включает в себя базу экспериментальных данных по сечениям слияния и предоставляет возможность моделирования этого процесса в методе связанных каналов. База данных по сечениям слияния является наиболее полной из баз по сечениям ядерных реакций, размещенных в NRV. В настоящий момент она содержит более 1500 функций возбуждения. Пример отображения данных для конкретной реакции показан на рис. 2.



**Рис. 5.** Пример анализа в базе знаний NRV сечений слияния для реакции  $^{36}\text{S} + ^{90}\text{Zr}$  в рамках эмпирической [30] (кривая 1) и квантовой [29] (кривая 2) моделей связи каналов. Экспериментальные данные — из работы [32].

В NRV реализована возможность расчета сечения слияния в рамках двух моделей сильной связи каналов: квантовой [29] и эмпирической [30]. Оба подхода позволяют учитывать связь относительного движения сталкивающихся ядер с их коллективными степенями свободы (поверхностные колебания сферических ядер и/или вращение деформированных ядер). Следует отметить, что результаты, получаемые в этих моделях, близки между собой и находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Это иллюстрируется на рис. 5, где представлен анализ сечения слияния для реакции  $^{36}\text{S} + ^{90}\text{Zr}$  в рамках эмпирической (кривая 1) и квантовой (кривая 2) моделей сильной связи каналов в сравнении с экспериментальными данными из работы [32]. В эмпирическом методе связи каналов также имеется возможность дополнительно учесть каналы перераспределения нейтронов с положительными значениями  $Q$  [33].

Пример диалога для подготовки входных данных показан на рис. 6. Как и в других разделах базы знаний, мы предлагаем пользователю возможность выбора входных параметров модели “по умолчанию”. Эта возможность основывается на имеющемся у нас опыте анализа соответствующего процесса.

Диалог подготовки входных данных содержит несколько основных подразделов.

**Model.** Этот раздел позволяет выбирать между эмпирическим и квантовым вариантами метода сильной связи каналов. Описание моделей дано в подразделе *Description* базы знаний.

**Reaction.** Служит для выбора изучаемой комбинации снаряд-мишень и диапазона энергий столкновения.

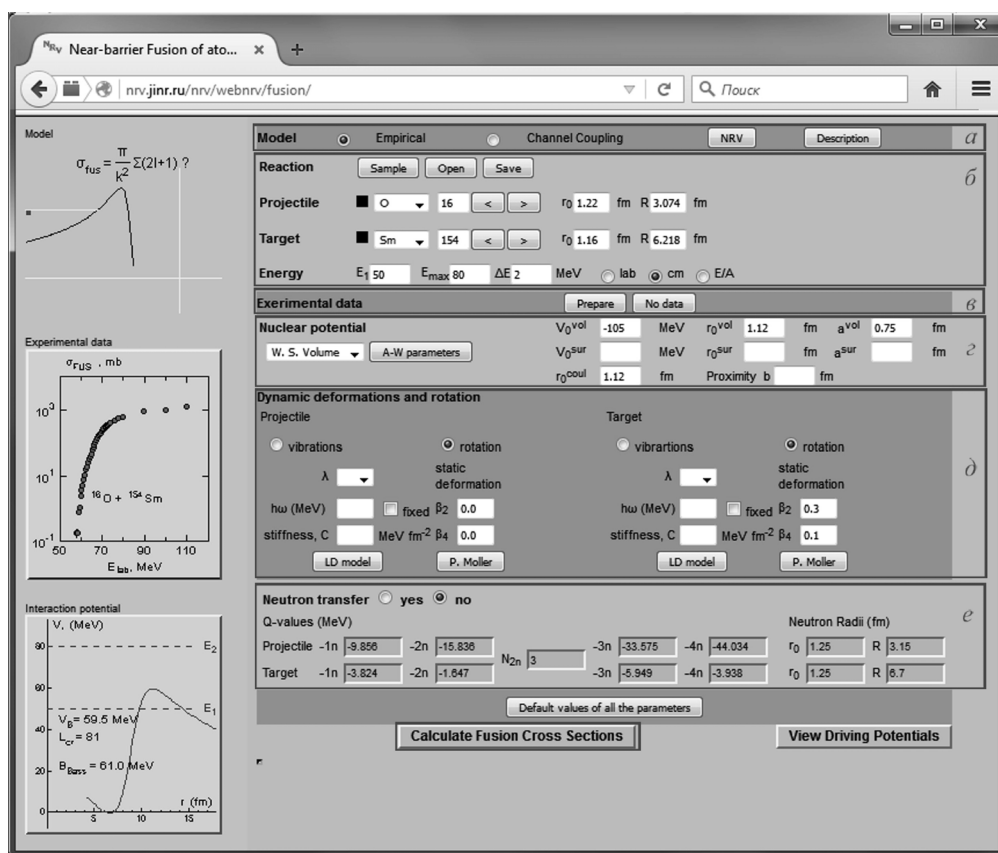


Рис. 6. Пример диалога для подготовки входных данных.

**Experimental data.** Пользователь имеет возможность либо отказаться от включения экспериментальных данных в анализ, либо выбрать данные для анализа. При этом данные могут быть взяты как из соответствующей базы данных, так и введены самим пользователем. Экспериментальные данные, включенные в анализ, отображаются в виде графика в левой части окна (см., например, рис. 6).

**Nuclear potential.** Пользователю предлагается выбрать наиболее часто используемые потенциалы ядро-ядерного взаимодействия (потенциал Вудса—Саксона или проксимити). Параметры потенциала Вудса—Саксона могут быть определены автоматически согласно систематике Акюза—Винтера [34]. Зависимость ядро-ядерного потенциала от расстояния между центрами ядер также показана в виде графика в отдельном Java-апплете в левой нижней части окна. Горизонтальными штриховыми линиями показан выбранный диапазон энергий столкновения.

**Dynamic deformations and rotation.** Пользователь может указать, какие коллективные степени свободы будут учтены при расчете, и выбрать параметры возбуждения соответствующего типа. При этом реализована возможность автоматического

определения значений соответствующих параметров из базы данных по свойствам ядер.

**Nucleon transfer.** Этот подраздел реализован только в эмпирической модели сильной связи каналов и позволяет учесть влияние нейтронных передач на сечение слияния. Все необходимые для этого данные определяются автоматически.

Для запуска расчетного кода необходимо нажать кнопку *Calculate fusion cross sections*. В NRV реализована возможность расчета и анализа следующих связанных величин: сечений слияния, функций распределения по барьерам слияния, а также парциальных сечений слияния. На рис. 7 приведен пример анализа сечений слияния  ${}^4\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$  из работы [35], выполненного с использованием базы знаний NRV. Кривая 1 показывает расчеты сечения слияния для реакции  ${}^4\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$  в рамках эмпирической модели связи каналов без учета нейтронных передач, кривые 2 и 3 — расчеты сечения слияния для реакции  ${}^6\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$  без учета и с учетом нейтронных передач соответственно в сравнении с экспериментальными данными [36, 37].

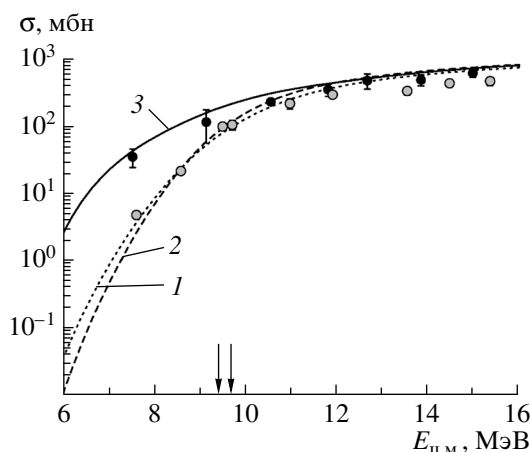


Рис. 7. Пример анализа в базе знаний NRV сечений слияния для реакций  ${}^4\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$ , извлеченный из работы [35]. Экспериментальные данные — из [36, 37].

## 7.2. Распад возбужденного вращающегося ядра

Раздел базы знаний NRV *Decay of excited nuclei* предназначен для моделирования распада высоковозбужденного вращающегося ядра на основе статистической модели [31]. Основными характеристиками, рассчитываемыми в этом разделе, являются плотность уровней возбужденного ядра (в зависимости от энергии); ширины испускания легких частиц из возбужденного ядра (нейтронов, протонов, альфа-частиц, гамма-квантов), а также делительная ширина; вероятности выживания ядра во всех возможных каналах. Описание статистической модели дано в подразделе *Description*. Пример диалога для подготовки входных данных показан на рис. 8. Пользователь может выбрать рассчитываемую величину: ширины распада и плотности уровней (*Decay widths*) или вероятность выживания (*Survival probability*). Далее необходимо выбрать ядро, его угловой момент, а также диапазон энергий возбуждения. Для всех параметров модели (свойства материнского и дочерних ядер, а также детали расчета плотности уровней) могут быть оставлены значения по умолчанию (*Default values*). Для начала счета необходимо нажать кнопку *Calculate*. Расчет вероятности выживания можно выполнить двумя способами: методом Монте-Карло (в этом случае учитываются все возможные каналы с испарением нейтронов, протонов и альфа-частиц) либо методом вложенных интегралов (тогда учитываются только каналы с испусканием 1–6 нейтронов). Второй способ обеспечивает большую скорость расчета, например, при моделировании распада возбужденных сверхтяжелых ядер, когда вероятность выживания является крайне малой величиной. Во всех остальных случаях предпочтительнее использовать метод

Монте-Карло, поскольку он является наиболее общим.

В основном окне браузера (рис. 8) отображаются результаты расчетов ширины распада ядра относительно испускания нейтронов, протонов, альфа-частиц, гамма-квантов, а также деления. В этом же разделе NRV можно выполнить расчеты вероятности выживания ядра, а также энергетической зависимости плотности уровней (показаны в отдельных окнах).

## 7.3. Анализ реакций слияния-деления и слияния-выживания

Объединение в рамках базы знаний кодов для расчета сечения слияния и моделирования распада составного ядра дает возможность изучения процессов слияния-деления и слияния-выживания по каналам испускания нейтронов, протонов и альфа-частиц. Реализован прямой переход между соответствующими разделами базы знаний NRV. Прямой доступ возможен также из главного меню базы знаний (раздел *Evaporation residues*). Продолжается наполнение базы экспериментальных данных по сечениям образования остатков испарения. Имеющиеся в базе данные, а также данные пользователя могут быть включены в анализ. Для этого имеется соответствующая опция в окне отображения экспериментальных данных, а также на странице подготовки параметров модели, показанной на рис. 6. Диалог подготовки параметров модели близок к диалогу раздела *Decay of excited nuclei* базы знаний (см. выше). В нем отображаются анализируемая реакция и диапазон энергий. Для изменения реакции и/или диапазона энергий столкновения необходимо перейти в раздел *Fusion* и заново рассчитать сечение слияния для требуемой комбинации снаряд–мишень.

Метод связанных каналов позволяет рассчитывать так называемое сечение захвата, которое при слиянии не слишком тяжелых ядер практически совпадает с сечением слияния. Однако для ряда реакций слияния, например, реакций, ведущих к образованию сверхтяжелых ядер, вероятность  $P_{\text{CN}}$  образования составного ядра (CN) из конфигурации двух касающихся ядер может быть существенно меньше единицы. В работе [38] была предложена эмпирическая формула для  $P_{\text{CN}}$ , справедливая для реакций холодного синтеза (в которых мишенью является свинец или висмут). Это эмпирическое соотношение может быть учтено в NRV при расчете сечения образования остатков испарения (опция *use empirical formula for CN formation probability*). Пример подобного расчета, выполненного в базе знаний NRV для реакции  ${}^{54}\text{Cr} + {}^{208}\text{Pb} \rightarrow {}^{262-x}\text{Sg}$  ( $x = 1-4$ ), представлен на

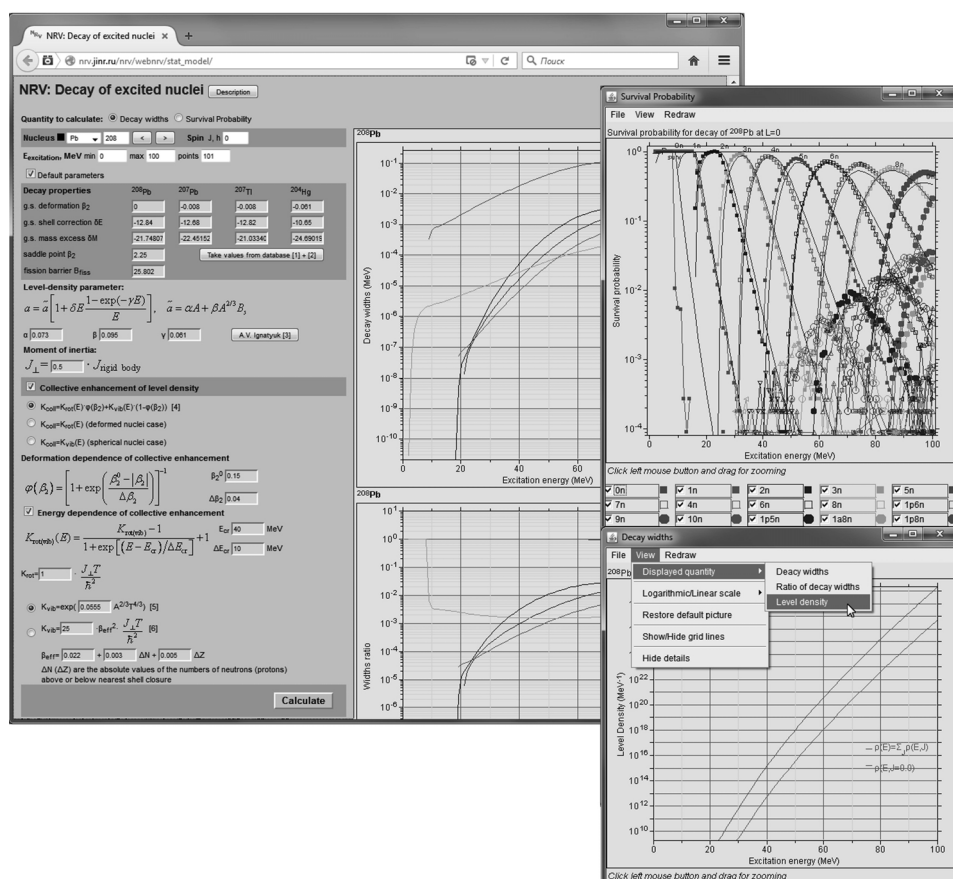


Рис. 8. Иллюстрация возможностей раздела *Decay of excited nuclei*.

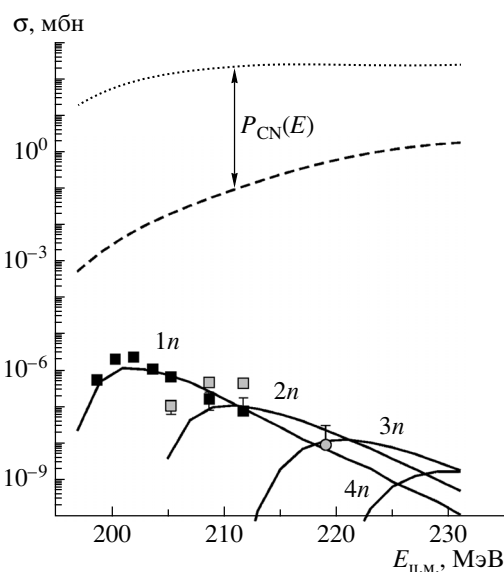


Рис. 9. Пример анализа в базе знаний NRV сечений образования изотопов сверхтяжелого элемента сиборгия в реакции слияния  $^{54}\text{Cr} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{262-x}\text{Sg}$  ( $x = 1-4$ ). Экспериментальные данные — из [39].

рис. 9, где точечной кривой показано сечение захвата, а штриховой кривой — сечение слияния с учетом  $P_{\text{CN}}$ . Сплошные кривые соответствуют рассчитанным сечениям синтеза сверхтяжелых ядер в испарительных каналах  $1n-4n$ . Точки — экспериментальные данные из работы [39].

Опция *calculate fission Z-N yield* работает только при выборе метода Монте-Карло для моделирования распада возбужденного ядра и служит для расчета двумерного распределения фрагментов реакции слияния-деления по зарядам и массам. Остальные компоненты диалога не отличаются от описанных в предыдущем разделе.

На рис. 10 приведено сравнение экспериментальных данных [40, 41] по сечениям образования изотопа  $^{46}\text{Sc}$  в реакции  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, 2p)^{46}\text{Sc}$  с расчетами [42] в рамках испарительной модели, реализованной в базе знаний NRV. Как видно из рисунка, теоретические кривые достаточно хорошо согласуются с экспериментом во всем диапазоне энергий.

В планы дальнейшего развития уже реализованного в NRV комплекса программ для моделирования процессов слияния ядер и последующего распада образующегося составного ядра входит

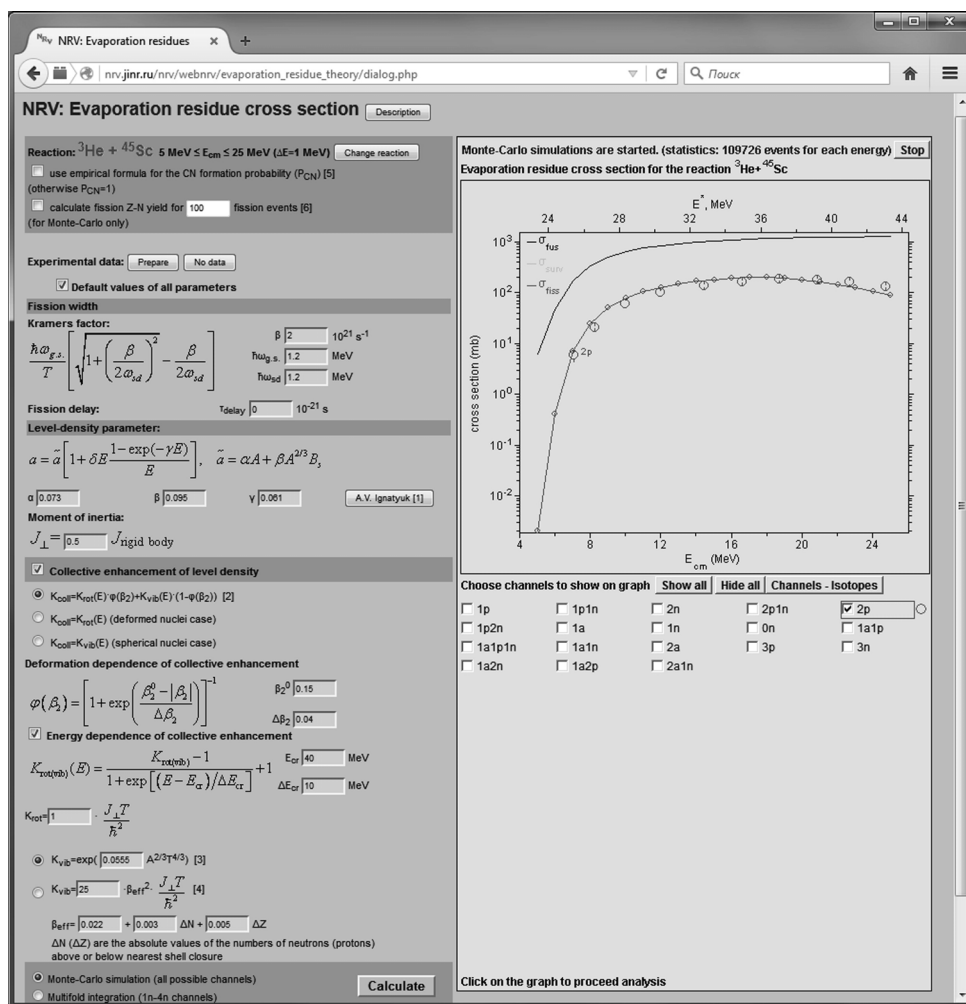


Рис. 10. Сравнение экспериментальных данных [40, 41] по сечениям образования изотопа  $^{46}\text{Sc}$  в реакции  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, 2p)^{46}\text{Sc}$  с расчетами [42] в рамках испарительной модели, реализованной в базе знаний NRV.

расширение числа характеристик процесса, доступных для анализа. Прежде всего это касается расчета множественностей и энергетических спектров частиц, испускаемых как из выживших, так и из поделившихся ядер. В последнем случае будет реализована возможность анализа характеристик как предделительных (вылетающих из составного ядра), так и постделительных частиц (вылетающих из осколков).

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проанализировано современное состояние дел в области использования сетевых информационных технологий в ядерной физике, сформулированы основные принципы работы базы знаний NRV, а также кратко описаны ее основные разделы. Возможности базы знаний подробно проиллюстрированы на примере анализа процессов слияния атомных ядер и последующего распада возбужденного составного ядра.

Сетевая база знаний NRV по ядерной физике низких энергий обеспечивает быстрый доступ к современным экспериментальным данным по ядерной структуре и сечениям ядерных реакций, а также предоставляет возможность анализа данных и моделирования процессов ядерной динамики в рамках устоявшихся физических подходов.

Сетевая база знаний NRV имеет несколько уникальных преимуществ по сравнению с другими ядерными базами данных и в настоящее время широко используется не только для научных целей, но также в качестве ценного инструмента в процессе образования в области ядерной физики.

Работа поддержана грантом № 15-07-07673-а Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сетевая база знаний NRV по низкоэнергетической ядерной физике, <http://nr.v.jinr.ru/>

2. V. Zagrebaev and A. Kozhin, JINR Report No. E10-99-151 (Dubna, 1999).
3. А. С. Деникин, В. И. Загребаев, В. В. Самарин и др., в сб.: *Труды Всероссийской научной конференции "Научный сервис в сети Интернет", Новороссийск, 2003, Тезисы докладов* (Изд-во МГУ, Москва, 2003), с. 14.
4. А. С. Деникин, А. П. Алексеев, В. И. Загребаев и др., в сб.: *Труды Всероссийской научной конференции "Научный сервис в сети Интернет", Новороссийск, 2006, Тезисы докладов* (Изд-во МГУ, Москва, 2006), с. 211.
5. А. С. Деникин, А. В. Карпов, А. П. Алексеев и др., в сб.: *Труды Всероссийской научной конференции "Научный сервис в сети Интернет", Новороссийск, 2008, Тезисы докладов* (Изд-во МГУ, Москва, 2008), с. 393.
6. A. S. Denikin, V. I. Zagrebaev, A. V. Karpov, *et al.*, in *Proceedings of the 2nd South Africa – JINR Symposium: Models and Methods in Few- and Many-Body Systems. Book of Abstracts* (Dubna, Russia, 2010), p. 145.
7. А. В. Карпов, А. С. Деникин, А. П. Алексеев и др., в сб.: *Труды Всероссийской научной конференции "Научный сервис в сети Интернет", Новороссийск, 2015, Тезисы докладов* (ИПМ им. М. В. Келдыша, Москва, 2015), с. 119.
8. NNDC, <http://www.nndc.bnl.gov/index.jsp/>
9. CDFE, <http://cdfc.sinp.msu.ru/index.en.html/>
10. TUNL, <http://www.tunl.duke.edu/nucldata/>
11. NEA, Data bank <http://www.oecd-neo.org/dbprog/>
12. NACRE, <http://pntpm.ulb.ac.be/Nacre/>
13. NACRE-II, <http://www.astro.ulb.ac.be/nacrei/>
14. FRESKO, <http://www.fresco.org.uk/>
15. GRAZING, <http://personalpages.to.infn.it/~nanni/grazing/>
16. TALYS, <http://www.talys.eu/>
17. EMPIRE, <http://www.nndc.bnl.gov/empire219/>
18. LISE++, <http://lise.nslc.msu.edu/lise.html/>
19. MySQL, <http://www.mysql.com/>
20. AMDC, <http://amdc.impcas.ac.cn/>
21. NUdat, <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>
22. М. Г. Иткис, А. Я. Русанов, ЭЧАЯ **29**, 389 (1998) [Phys. Part. Nucl. **29**, 160 (1998)].
23. V. E. Viola, K. Kwiatkowski, and M. Walker, Phys. Rev. C **31**, 1550 (1985).
24. B. Jurado and K.-H. Schmidt, <http://www.khs-erzhausen.de/GEF.html/>
25. P. Descouvemont, *Theoretical Models for Nuclear Astrophysics* (Nova Science, New York, 2003).
26. <http://www-alt.gsi.de/documents/FRS-reference-2012-001.html/>
27. <http://www.gwtproject.org/>
28. <http://www.asp.net/>
29. В. И. Загребаев, В. В. Самарин, ЯФ **67**, 1488 (2004) [Phys. Atom. Nucl. **67**, 1462 (2004)].
30. V. I. Zagrebaev, Phys. Rev. C **64**, 034606 (2001).
31. A. V. Karpov, V. I. Zagrebaev, and V. V. Saiko, *Description of the Statistical Model*, [http://nrv.jinr.ru/nrv/webnrv/stat\\_model/description/description.pdf](http://nrv.jinr.ru/nrv/webnrv/stat_model/description/description.pdf)
32. A. M. Stefanini, L. Corradi, A. M. Vinodkumar, *et al.*, Phys. Rev. C **62**, 014601 (2000).
33. V. I. Zagrebaev, Phys. Rev. C **67**, 061601 (2003).
34. A. Winther, Nucl. Phys. A **594**, 203 (1995).
35. V. A. Rachkov, A. V. Karpov, A. S. Denikin, and V. I. Zagrebaev, Phys. Rev. C **90**, 014614 (2014).
36. M. Fisichella, V. Scuderi, A. Di Pietro, *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **282**, 012014 (2011).
37. V. Scuderi, A. Di Pietro, P. Figueroa, *et al.*, Phys. Rev. C **84**, 064604 (2011).
38. V. Zagrebaev and W. Greiner, Phys. Rev. C **78**, 034610 (2008).
39. S. Hofmann, F. P. Heßberger, D. Ackermann, *et al.*, Nucl. Phys. A **734**, 93 (2004).
40. Н. К. Скобелев, А. А. Кулько, Ю. Э. Пенионжкевич и др., Письма в ЭЧАЯ **10**, 671 (2013) [Phys. Part. Nucl. Lett. **10**, 410 (2013)].
41. Н. К. Скобелев, А. А. Кулько, Ю. Э. Пенионжкевич и др., Изв. РАН. Сер. физ. **77**, 878 (2013) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **77**, 795 (2013)].
42. М. А. Науменко, В. В. Самарин, Ю. Э. Пенионжкевич, Н. К. Скобелев, Изв. РАН. Сер. физ. **80**, 294 (2016) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **80**, 264 (2016)].

## NRV WEB KNOWLEDGE BASE ON LOW-ENERGY NUCLEAR PHYSICS

**A. V. Karpov, A. S. Denikin, A. P. Alekseev, V. I. Zagrebaev, V. A. Rachkov,  
M. A. Naumenko, V. V. Saiko**

The paper describes the principles of organization and operation of the NRV web knowledge base on low-energy nuclear physics (<http://nrv.jinr.ru>), which is a combination of a large number of digitized experimental data on the properties of nuclei and nuclear reaction cross sections, as well as a wide range of interconnected computer programs for modeling complex processes of nuclear dynamics which work directly in the browser of a remote user. The paper also gives an overview of the current situation in the field of application of network information technologies in nuclear physics. The features of the NRV knowledge base are illustrated in detail on the example of the analysis of fusion of atomic nuclei and subsequent decay of the excited compound nucleus.