

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7-2012-29

На правах рукописи
УДК 539.172.6

МАСЛОВ

Владимир Анатольевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ${}^6\text{He}$ И ${}^6\text{Li}$ С ЯДРАМИ**

**Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра и
элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 2012

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флёрова
Объединенного института ядерных исследований, Дубна

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

Пенионжкевич
Юрий Эрастович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Изосимов
Игорь Николаевич

кандидат физико-математических наук

Конобеевский
Евгений Сергеевич

Ведущая организация: ФГБУ Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»

Защита состоится «__» _____ 2012 г. в ____ часов на заседании
диссертационного совета Д 720.001.06 ОИЯИ при Лаборатории нейтронной
физики и Лаборатории ядерных реакций, 141980 г.Дубна Московской обл.
Объединенный институт ядерных исследований

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института
ядерных исследований.

Автореферат разослан «__» _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Попеко
Андрей Георгиевич

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы: Проблема взаимодействия ядер с нейтронным гало уже много лет, с момента его открытия, является предметом экспериментальных и теоретических исследований. Особенности структуры галообразных ядер должны проявляться при их взаимодействии с другими ядрами. Такие ядра являются слабосвязанными, что должно приводить к увеличению вероятностей их развала, который может сопровождаться последующим слиянием ядра остатка (кора) с ядром мишени или передачи нуклонов. Особый интерес вызывают реакции на пучке ${}^6\text{He}$ с образованием составных ядер и их последующим распадом по каналам испарения нейтронов или деления. Несмотря на почти тридцатилетнюю историю изучения ${}^6\text{He}$ информация о его свойствах, а тем более о механизме его взаимодействия с другими ядрами достаточно противоречива. Эти противоречия свидетельствуют о трудностях постановки экспериментов на пучках радиоактивных ядер, которые определяются относительно слабой интенсивностью вторичных пучков, что не позволяет получать статистически надежные результаты, особенно в области около барьерных энергий. Кроме этого, для исследования функций возбуждения в широком диапазоне энергий (5-70 МэВ/А) приходится варьировать энергию пучка, что затрудняет постановку эксперимента и в некоторых случаях увеличивает энергетический разброс вторичного пучка. Все это приводит к необходимости использования детекторных систем с высокой эффективностью регистрации, монохроматизации вторичного пучка и приведения экспериментов под передними углами.

Эти условия были выполнены нами в процессе проведения описанных ниже экспериментальных исследований.

Главная цель работы: Изучение особенностей, проявляющихся при взаимодействии слабосвязанных ядер- ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{He}$, с другими ядрами. В работе изучались ширины импульсных распределений ${}^4\text{He}$ из развала ${}^6\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$ на различных ядрах мишени в диапазоне энергий $10\text{MeV/A} < E < 46\text{MeV/A}$, с целью

получения информации о наличии и структуре гало в ядрах ${}^6\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$. Были измерены функции возбуждения реакций полного и неполного слияния ${}^6\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$ с различными ядрами при энергии вблизи кулоновского барьера с энергетическим разрешением не хуже ± 400 кэВ. Для такого рода исследований была разработана и создана методика измерения характеристик ядерных реакций на пучках ${}^6\text{He}$ с интенсивностью до 10^7 с $^{-1}$, а также монохроматизации радиоактивных пучков ускоренных ионов при сбросе их энергий до кулоновского барьера на ускорительном комплексе DRIBs.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Экспериментальные значения ширины импульсных распределений ${}^4\text{He}$, полученные из развала ${}^6\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$ на различных ядрах мишени в широком диапазоне энергии (от 10МэВ/А до 46МэВ/А).
2. Методика монохроматизации пучков ускоренных ионов на ускорительном комплексе DRIBs вблизи кулоновского барьера с использованием магнитного спектрометра МСП-144 на выведенном пучке и внутреннего пробника на пучках внутри циклотрона У-400.
3. Экспериментальные зависимости сечения образования 2n-испарительных остатков для реакций ${}^{206}\text{Pb}({}^6\text{He}, 2n){}^{210}\text{Po}$ и ${}^{204}\text{Pb}({}^4\text{He}, 2n){}^{210}\text{Po}$ в околобарьерной области энергии ($E/V_c=0.6\div 1.3$).
4. Экспериментальные результаты по функциям возбуждения образования испарительных остатков, полученных в реакциях полного слияния ${}^6\text{Li}+{}^{209}\text{Bi}$, а также измеренные функции возбуждения образования изотопов ${}^{208}, {}^{210}\text{Po}$, в реакции неполного слияния ${}^6\text{Li} + {}^{209}\text{Bi} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^{211}\text{Po}$ и последующим испарением нейтронов, в широком диапазоне энергий ($E/V_c=0.75\div 1.7$).
5. Результаты измерения угловых распределений упругого и неупругого рассеяния ${}^6\text{Li}$ в реакции ${}^6\text{Li}+{}^{12}\text{C}$ при энергии $E({}^6\text{Li})=63$ МэВ, а также

угловые распределения упругого и неупругого рассеяния ^{12}C в реакции $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ при энергии $E(^{12}\text{C})=121.5$ МэВ.

Основные результаты и научная новизна

Впервые:

На ускорительном комплексе DRIBs был выполнен цикл исследований в около-барьерной области энергий на радиоактивном пучке ^6He .

Получена информация о параллельной составляющей импульсного распределения ^6He при энергии 10 МэВ/А и ^6Li при энергиях 18 и 46 МэВ/А.

Разработана и использована в экспериментах методика, совмещающая прецизионный магнитный спектрометр и высокоэффективный активационный анализ, которая позволила провести подобные исследования.

Получена информация о сечениях реакции подбарьерного слияния $^6\text{He}+^{206}\text{Pb}$. Обнаружено значительное (1000 раз) усиление сечения подбарьерного слияния в этой реакции.

Обнаружено увеличение сечения передачи кластера (d) вблизи кулоновского барьера в реакции $^6\text{Li}+^{209}\text{Bi}$.

Практическая значимость

Разработанный в настоящей работе метод магнитного спектрометра в сочетании с активационным анализом позволяет исследовать реакции с радиоактивными пучками низкой интенсивности ($\sim 10^6\text{c}^{-1}$), как в ЛЯР ОИЯИ на ускорительном комплексе DRIBs, так и в других центрах. Полученные данные представляют интерес для дальнейшего исследования структуры экзотических

ядер как в ядерных реакциях, так и в других областях науки, например в астрофизике.

Апробация работы

Значительная часть результатов была получена впервые. Результаты исследований представлялись автором на международных конференциях и совещаниях:

- 1 VII Open Scientific Conference of Yang Scientists JINR Dubna February 2003
(устный доклад)
- 2 VIII International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2003)
17-21 June, 2003, Moscow, Russia
(постерный доклад)
- 3 LIV International Meeting on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure
(NUCLEUS-2004) June 22-25, 2004 Belgorod, Russia
(устный доклад)
- 4 International Symposium on Exotic Nuclei EXON 2004, Peterhof, Russia, July 4-12,
2004
(постерный доклад)
- 5 IX Open Scientific Conference of Yang Scientists JINR Dubna February 2005
(устный доклад)
- 6 International Meeting "XVth Colloque GANIL", Giens, France, 29.05.2006 -
02.06.2006

(постерный доклад)

7 57 International Meeting on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure

(NUCLEUS-2004) June 24-29, 2007 Voronezh Russia

(устный доклад)

8 59 International Meeting on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure June 15-

19, 2009 Cheboksary Russia

(устный доклад)

9 International Symposium on Exotic Nuclei EXON 2009, Sochy, Russia, 27.09.2009

– 03.10.2009

(постерный доклад)

Результаты исследований опубликованы в восьми статьях в реферируемых журналах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения и списка литературы.

Во введении рассматривается проблема, обосновывается актуальность и задачи исследования. Сформулирована цель работы и кратко изложен материал диссертации.

Первая глава представляет описание особенностей взаимодействия легких экзотических ядер. Здесь также содержится литературный обзор исследований, проведенных по этой тематике. Приводятся анализ имеющихся экспериментальных результатов по исследованию наиболее характерных каналов реакций со слабосвязанными ядрами, таких как, реакций упругого и неупругого рассеяния, реакций слияния и передачи части нуклонов, реакций развала и анализ

импульсных распределений. Этот анализ позволяет сформулировать постановку задачи, и показывает актуальность проблемы.

Во Второй главе описываются современные экспериментальные методы измерения импульсных распределений фрагментов при развале различных легких экзотических ядер. Из анализа следует, что наиболее прецизионной методикой является использование магнитного спектрометра. Приводятся экспериментальные измерения импульсных распределений ${}^4\text{He}$ полученных из развала ${}^6\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$ на различных ядрах мишени в широком диапазоне энергии (от 10 МэВ/А до 46 МэВ/А). Проводится анализ полученных в экспериментах данных по ширинам импульсных распределений с целью получения зависимости ширины импульсных распределений от атомного номера мишени и энергии пучка, а также от энергии связи нейтронов в этих ядрах. На основании этих данных делаются выводы о наличии и структуре гало в этих ядрах.

Эксперимент по измерению импульсных распределений ${}^4\text{He}$ полученных из развала ${}^6\text{He}$ проводился на ускорительном комплексе DRIBs с использованием магнитного спектрометра МСП-144. А измерение импульсных распределений ${}^4\text{He}$ полученных из развала ${}^6\text{Li}$ проводилось на ускорителе У-400М с использованием двух методик: многослойного полупроводникового телескопа и магнитного анализа.

В данной главе приведено краткое описание и даны основные параметры магнитного спектрометра МСП-144, используемого для измерения импульсных распределений продуктов развала.

Для измерения импульсных распределений продуктов развала ${}^6\text{He}$ использовались две мишени, тяжелая (золото) и легкая (углерод). Мишени выбирались исходя из того, что механизм развала различается – на тяжелых ядрах он происходит в основном под действием кулоновских сил, а на легких – под действием ядерных. В результате эксперимента были измерены распределения параллельной составляющей импульса ${}^4\text{He}$, полученного при развале ${}^6\text{He}$ на ядрах золота и углерода. Измерение продольного импульса в случае тяжелой мишени исключает вклад от кулоновского отклонения, как это имеет место при измерении

поперечного импульса, так как продольный импульс не чувствителен к дифракционному уширению и отражает лишь связь фрагмента в ядре [1]. Результаты измерений представлены на рис. 1. Полученные распределения, описывались функциями Гаусса. Как видно из рисунков, наблюдаются узкие импульсные распределения ($\sigma = 28\text{-}29$ МэВ/с). Если бы ${}^6\text{He}$ был обычным, не галоидальным ядром, то эта величина должна составлять около 100МэВ/с [2]. Малая ширина импульсного распределения подтверждает экзотичность ядра ${}^6\text{He}$ и наличие в нем гало (или скина).

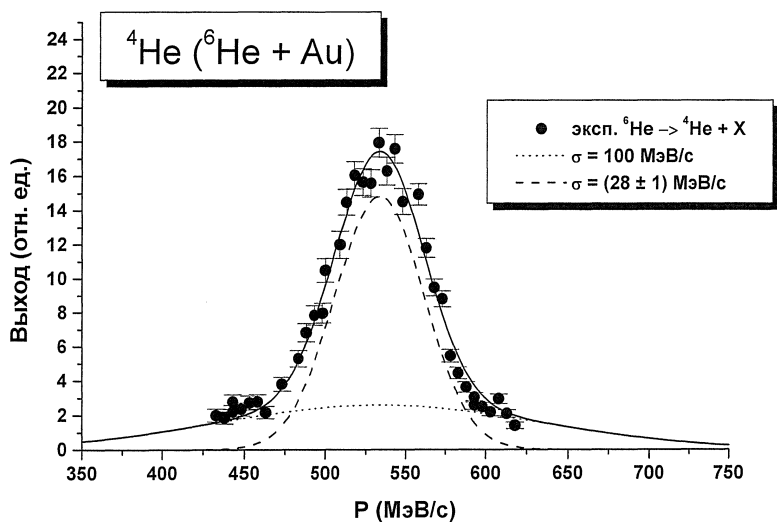


Рис. 1 Импульсные распределения ${}^4\text{He}$ полученные из развала ${}^6\text{He}$ на ядрах Au

Поскольку представляется интересным сравнить ядро ${}^6\text{He}$ с его изобаром ${}^6\text{Li}$, изучались также импульсные распределения фрагмента ${}^4\text{He}$, полученного из развала ${}^6\text{Li}$. Измерения проводились с помощью двух методик при различных энергиях:

В первом случае замедленный пучок ${}^6\text{Li}$ проходил через многослойный полупроводниковый телескоп. Роль мишени в этом телескопе играл один из

полупроводниковых детекторов, который являлся активной мишенью, с которой снимался ΔE сигнал. Идентифицировав с помощью первых двух ΔE детекторов прохождение ${}^6\text{Li}$ до мишени, и обнаружив на выходе ${}^4\text{He}$, мы определяли импульсное распределение ${}^4\text{He}$ (рис. 2). Энергия ${}^6\text{Li}$ в этом эксперименте составляла 109 МэВ. С аналогичной методикой было измерено импульсное распределение ${}^8\text{Li}$ полученное из развала ${}^9\text{Li}$ на золотой мишени. Эксперимент проводился на ускорителе У-400м, и вторичный пучок ${}^9\text{Li}$ получался на установке КОМБАС. Был получен пучок ${}^9\text{Li}$ с очисткой $\sim 90\%$ и энергией 21 МэВ/А. В результате было получено импульсное распределение с шириной $\sigma = 44 \pm 2$ МэВ/с. Как и в случае ${}^7\text{Li}$ получилось промежуточное значение – больше чем у ${}^6\text{He}$ но меньше чем у сильно связанных ядер (рис. 3).

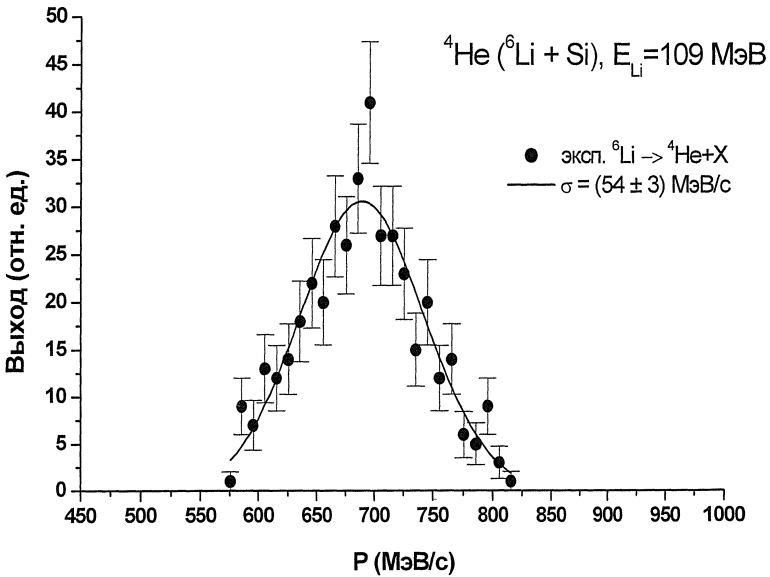


Рис. 2. Импульсные распределения ${}^4\text{He}$ полученные из развала ${}^6\text{Li}$ на ядрах Si.

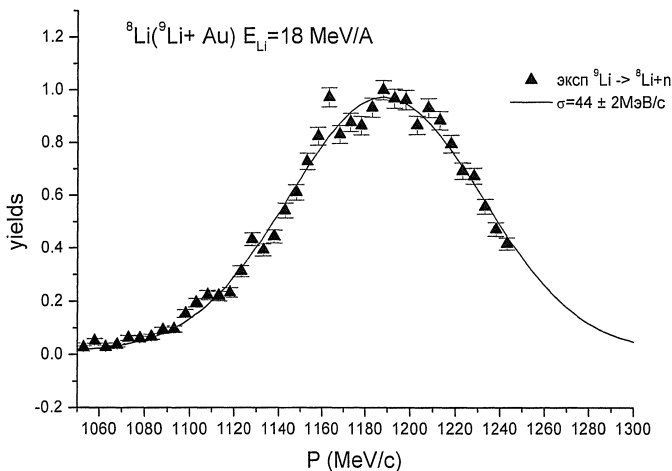


Рис. 3. Импульсные распределения ${}^8\text{Li}$ полученные из развала ${}^9\text{Li}$ на ядрах золота.

Таким образом, в результате эксперимента обнаружился достаточно интересный факт – для ${}^6\text{He}$ ширина импульсного распределения α -частиц, полученных из его развала, оказалась $\sim 30 \text{ МэВ/с}$, в то время как ширины импульсных распределений, полученных из развала ${}^6\text{Li}$ оказались $\sim 50 \text{ МэВ/с}$, хотя для обычных ядер эта величина обычно составляет около 95 МэВ/с [2]. Это показывает на промежуточное положение ${}^6\text{Li}$ между галообразными и обычными ядрами.

Для более полного анализа, были изучены ранее полученные экспериментальные данные, чтобы расширить спектр применяемых мишеней и энергий. Для большей наглядности данные зависимость представлена в виде графика (рис.4).

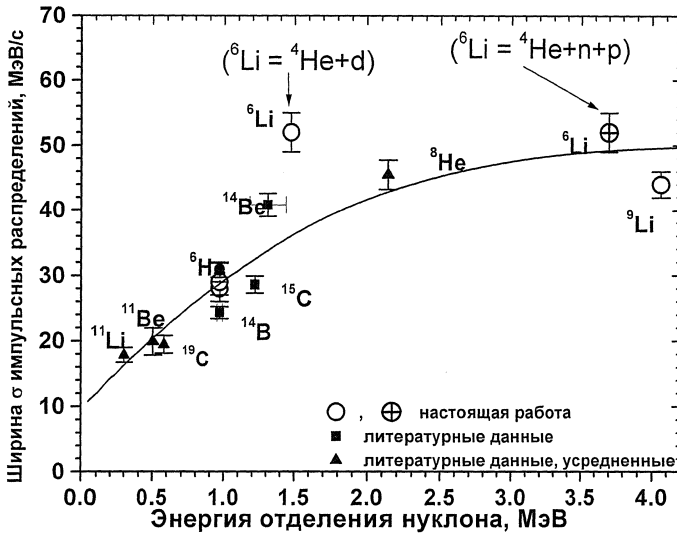


Рис. 4. Систематика ширин импульсных распределений фрагментов из развала различных ядер в зависимости от энергии связи одного или двух нейтронов в этих ядрах.

Видно, что наблюдается плавное увеличение ширины с ростом энергии связи. Если посмотреть на схему уровней ${}^6\text{Li}$, то можно увидеть, что энергия отделения дейтона от ${}^6\text{Li}$ (1.47 МэВ) существенно отличается от энергии отделения $n+p$ (3.7 МэВ). Ширина импульсного распределения зависит в основном только от энергии связи измеряемого фрагмента в ядре. Из рис.4 видно, что вариант ${}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + n + p$ лучше согласуется с полученной зависимостью. Таким образом, есть основание полагать, что это также отражает ($n-p$)-гало для 0^+ (3,563 МэВ) уровня ${}^6\text{Li}$.

Третья глава содержит описание методики монохроматизации пучков ускоренных ионов на ускорительном комплексе DRIBs вблизи кулоновского барьера с использованием магнитного спектрометра МСП-144 на выведенном

пучке и внутреннего пробника на пучках внутри циклотрона У-400, которая позволила получить энергетическое разрешение не хуже ± 400 кэВ при интенсивности пучка $2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$. Измерены функции возбуждения реакции слияния ${}^6\text{He}$ со ${}^{206}\text{Pb}$ с образованием испарительных остатков после испуская 2-х нейтронов в области энергий вблизи барьера слияния ($E/V_c=0.6\div 1.3$). А также функции возбуждения реакций полного и неполного слияния ${}^6\text{Li}$ с ядрами Bi в широком диапазоне энергий ($E/V_c=0.75\div 1.7$). Эти результаты были получены с использованием нами предложенной высокоэффективной активационной методики.

Экспериментально измеренные функции возбуждения для реакции ${}^{206}\text{Pb}({}^6\text{He}, 2n){}^{210}\text{Po}$ и ${}^{208}\text{Pb}({}^4\text{He}, 2n){}^{210}\text{Po}$ представлены на Рис.5. Сечение ${}^{206}\text{Pb}({}^6\text{He}, 2n){}^{210}\text{Po}$ реакции в максимуме в соответствии с расчетами по статистической модели (см. пунктирную кривую) должно быть мало, так как ее максимум расположен при энергиях ниже кулоновского барьера. Однако, из представленных на этом рисунке экспериментальных данных видно, что даже при энергии частиц ${}^6\text{He}$ ниже кулоновского барьера реакции ${}^{206}\text{Pb} + {}^6\text{He}$, сечение образования ${}^{210}\text{Po}$ – продукта после испарения из составного ядра 2-х нейтронов – составляет заметное значение (~ 10 мбн). Таким образом, из полученных нами данных видно, что наблюдается существенное увеличение сечений реакций слияния ядер ${}^{206}\text{Pb}$ с ядрами ${}^6\text{He}$ вблизи барьера по сравнению с расчетами по статистической модели. На том же рисунке (сплошная кривая) показаны результаты расчетов вероятности реакции полного слияния с последующим испарением 2 нейтронов по двухступенчатой модели слияния [4].

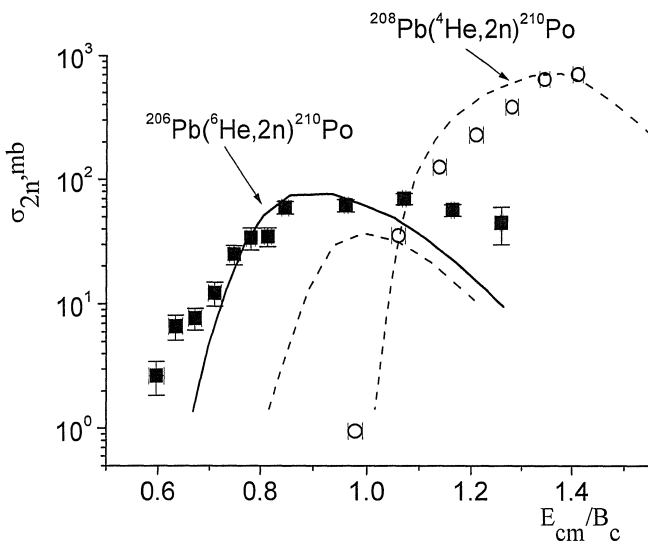


Рис. 5. Зависимости сечения образования 2n-испарительных остатков для реакций $^{206}\text{Pb}(^6\text{He}, 2n)^{210}\text{Po}$ (■) и $^{208}\text{Pb}(^4\text{He}, 2n)^{210}\text{Po}$ (○) как функции отношения энергии в системе центра масс к энергии кулоновского барьера (E_{cm}/B_c). Пунктирные и сплошная кривые взяты из работы [3] и соответствуют статистической модели (для реакций $^{206,208}\text{Pb}(^6,^4\text{He}, 2n)\text{Po}^{210}$) и модели последовательного слияния [3, 4] (для реакции $^{206}\text{Pb}(^6\text{He}, 2n)\text{Po}^{210}$), соответственно.

На Рис. 5 для сравнения представлена функция возбуждения для реакции $^{208}\text{Pb}(^4\text{He}, 2n)^{210}\text{Po}$, в которой образовывалось то же составное ядро ^{212}Po , что и в случае с пучком ^6He . Измерения проводились нами на циклотроне Ювяскюльского университета (Финляндия) с помощью описанной выше активационной методики. Сравнение сечений для двух реакций $^{206}\text{Pb}(^6\text{He}, 2n)^{210}\text{Po}$ и $^{208}\text{Pb}(^4\text{He}, 2n)^{210}\text{Po}$, показывает на значительное влияние входного канала реакции на процесс слияния. В случае реакции со слабо-связанным ядром, слияние с относительно высокой вероятностью может протекать в

глубокоподбарьерной области энергий. Хорошее согласие экспериментальных функций возбуждения с расчетом по двухступенчатой модели слияния для реакции $^{206}\text{Pb}(^6\text{He},2n)^{210}\text{Po}$ свидетельствует о том, что процесс последовательной передачи нейтронов для слабосвязанных ядер, по-видимому, является основным фактором, влияющим на вероятность слияния ^6He и ^{206}Pb и увеличивающим сечение реакции в глубокоподбарьерной области.

Кроме того, было проведено экспериментальное исследование реакций полного и неполного слияния ^6Li с ядром Bi в широком диапазоне энергий ($E/V_c=0.75\div 1.7$). Эксперимент был выполнен на ускорителе У400 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ с использованием пучка ионов ^6Li с энергией 55 ± 0.6 МэВ. Для получения пучка с высоким энергетическим разрешением в работе использовался метод его монохроматизации с помощью магнитного анализатора. Для регистрации продуктов реакций применялся активационный метод. Были измерены энергетические зависимости выходов продуктов различных каналов реакции. Для вычисления сечений конкретных каналов реакции по α -распаду продуктов этих реакций учитывалась, помимо потока бомбардирующих частиц, эффективность регистрации используемых детекторов (она была не хуже 30%), число образовавшихся ядер с учетом вероятности альфа-распада, а также задержка по времени до начала каждого измерения и время измерения α -распада наведенной активности в каждой мишени. Расчитанные таким образом зависимости сечений от энергии для реакций полного слияния с последующим испарением нейтронов представлены на Рис.6.

Из рисунка видно, что во всей области энергий имеется хорошее согласие измеренных функций возбуждения с результатами, полученными в работе [6]. Как следует из полученных данных в подбарьерной области энергий наблюдается относительно высокая вероятность процесса слияния. Следует отметить, что экспериментальные функции возбуждения испарительных реакций хорошо согласуются с расчётами по статистической модели [5].

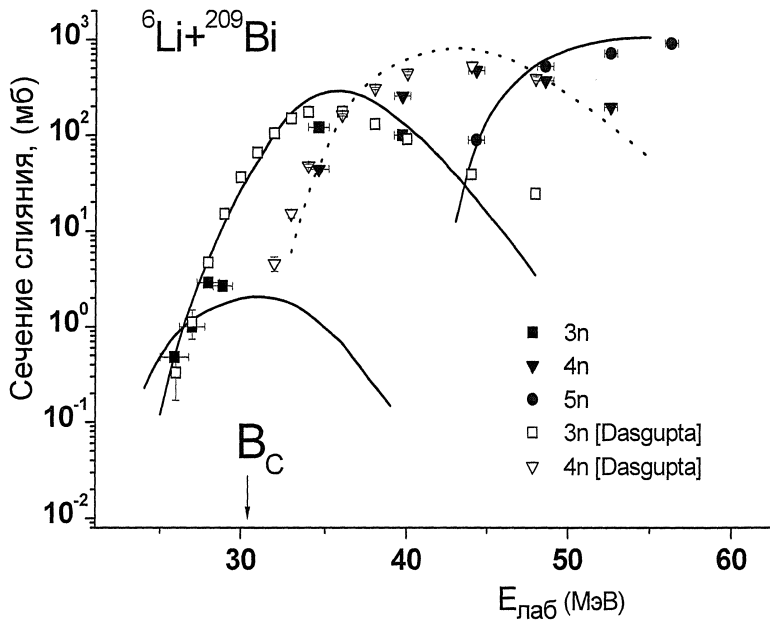


Рис.6. Функции возбуждения образования испарительных остатков, полученных в реакциях полного слияния ${}^6\text{Li} + {}^{209}\text{Bi}$. Экспериментальные значения, полученные в настоящей работе, представлены символами ■, ▼, ● для 3n, 4n и 5n испарительных каналов, соответственно. Для сравнения, экспериментальные данные из работы [6] по 3n и 4n испарительным каналам представлены □, ▽ символами. Кривые соответствуют расчетам по коду ALICE-MP [5].

В случае реакций неполного слияния происходит слияние образовавшихся фрагментов (${}^4\text{He}$ и d) в результате развала ${}^6\text{Li}$ с ядром мишени. Наиболее вероятным процессом, по-видимому, является поглощение образовавшихся дейтронов из-за меньшего значения кулоновского барьера. Слияние дейтронов с

ядрами мишени по сравнению с альфа- частицами также более предпочтительно, исходя из значений Q -реакции:

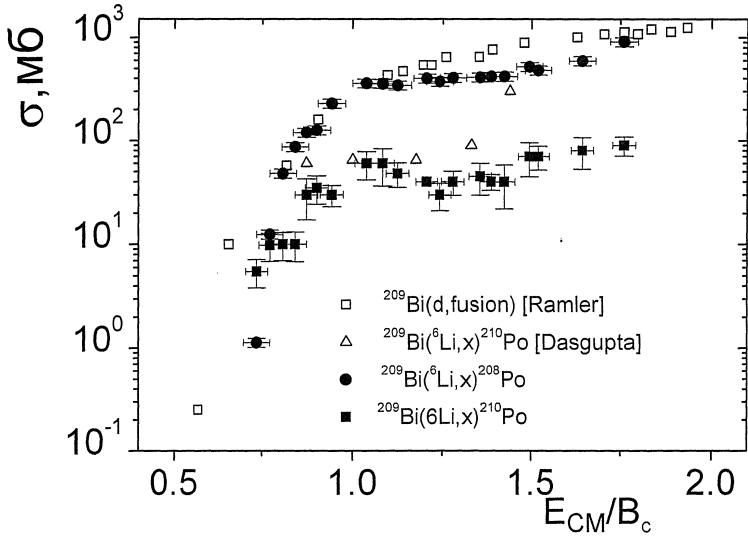
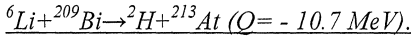
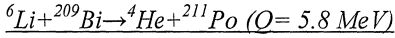


Рис. 7. Функция возбуждения образования изотопов ${}^{208}, {}^{210}\text{Po}$ в реакции ${}^6\text{Li} + {}^{209}\text{Bi}$. Экспериментальные значения представлены \bullet и \blacksquare символами, соответственно. Для сравнения, экспериментальные данные из работы [7] по полному слиянию в реакции $d + {}^{209}\text{Bi}$ представлены \square символами, а также функция возбуждения для реакции ${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{Li}, x){}^{210}\text{Po}$ [8] в виде Δ символов.

Для сравнения на рис.7 приведены данные по реакции слияния $d + {}^{209}\text{Bi}$ из работы [7]. Видно, что ход функций возбуждения и абсолютные сечения в обоих случаях (реакции неполного слияния с ${}^6\text{Li}$ и реакции полного слияния $d + {}^{209}\text{Bi}$) совпадают.

В работе [8] был проведен анализ реакций ${}^9\text{Be}+{}^{208}\text{Pb}$ и ${}^{18}\text{O}+{}^{198}\text{Pt}$, в которых образуются составные ядра радона, те же, что и в случае реакций с ${}^{6,7}\text{Li}$, на висмутовой мишени. Функции возбуждения в этом случае также хорошо описываются статистической моделью. Как показано в этой работе, вклад процессов, связанных с передачей частиц ядру-мишени, приводящей к образованию изотопов Po и At пренебрежимо мал ($< 2\%$ от $\sigma_{\text{хп}}$). Это позволяет сделать два важных для нас вывода: во-первых, образование изотопов Po и At не происходит через канал полного слияния (CF) в реакциях с ионами ${}^6\text{Li}$; во-вторых, в реакциях с ионами лития имеется большой вклад от реакций неполного слияния.

Четвертая глава посвящена упругому рассеянию ${}^6\text{Li}$ на ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{12}\text{C}$ на ${}^{12}\text{C}$. Рассматриваются различные экспериментальные методы измерения угловых распределений упругого и неупругого рассеяния. В настоящей работе использовался магнитный анализ с использованием МСП-144. Проведены измерения угловых распределений упругого и первого возбужденного уровня рассеяния ядер ${}^6\text{Li}$ с энергией 63 ± 0.5 МэВ на ядрах мишени ${}^{12}\text{C}$ в диапазоне углов от 10 до 95 градусов в системе центра масс. Описываются, проведенные нами, расчеты угловых распределений упруго и неупруго рассеянных ядер ${}^6\text{Li}$ в рамках оптической модели и методом DWBA, соответственно. Предложена параметризация феноменологического оптического потенциала взаимодействия ядер ${}^6\text{Li}$ в широком диапазоне масс ядер мишени, которая необходима для анализа данных, которые будут получены, на радиоактивном пучке ${}^6\text{He}$. Таким образом, предложенная методика, позволит произвести прецизионные измерения угловых распределений упругого рассеяния на ускоренном радиоактивном пучке ${}^6\text{He}$ на установке DRIBs при интенсивности пучка не менее 10^8с^{-1} .

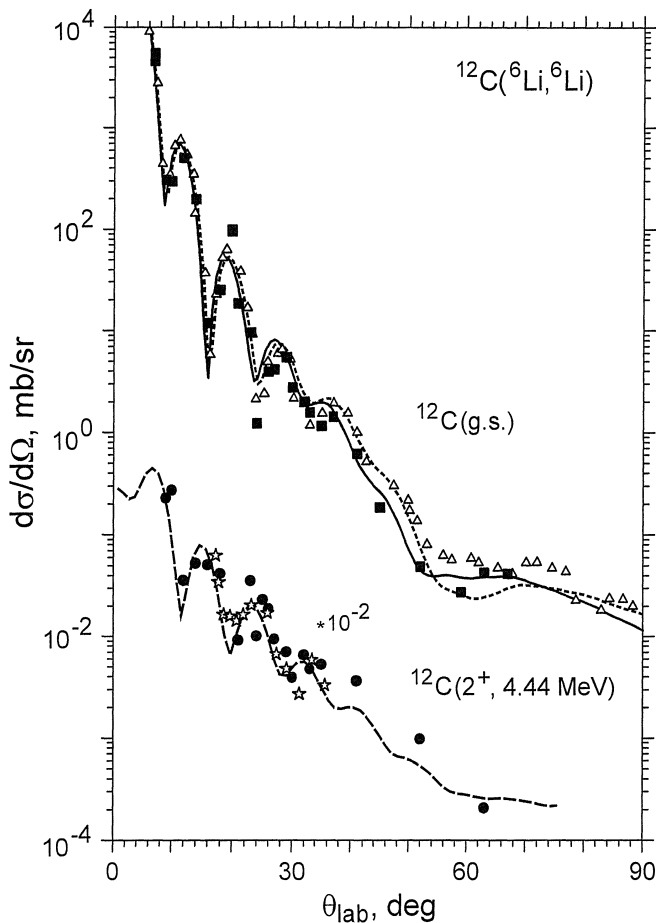


Рис. 8. Измеренные и расчетные дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния ${}^6\text{Li}$ на ядрах ${}^{12}\text{C}$. Сплошные символы экспериментальные данные при $E = 63$ МэВ, полученные в данной работе, сплошная и пунктирная кривые – дифференциальное сечение упругого рассеяния, рассчитанное по оптической модели для $E = 63$ и 59.8 МэВ, соответственно. Штриховая кривая – дифференциальное сечение неупругого рассеяния ${}^{12}\text{C}({}^6\text{Li}, {}^6\text{Li}){}^{12}\text{C}^*(2^+, 4.44 \text{ МэВ})$, рассчитанное методом DWBA. Треугольники – сечения упругого рассеяния, измеренные в работе [9] для данной реакции при энергии $59,8$ МэВ, звездочки – сечения неупругого рассеяния при энергии 63 МэВ, измеренные в работе [10].

Кроме того, с использованием методики магнитного спектрометра, были произведены измерения угловых распределений упругого и неупругого рассеяния ядер ^{12}C с энергией $121,5 \pm 0,8$ МэВ на ядрах мишени ^{12}C в диапазоне углов от 18 до 50 градусов в системе центра масс. Описывается анализ определения радиусов для основного и возбужденных состояний с помощью дифракционного метода. В результате анализа угловых распределений получены экспериментальные свидетельства того, что радиус возбужденного состояния 0^+ (7.65 МэВ) в ядре ^{12}C существенно больше радиуса как основного состояния, так и состояния 2^+ (4.44 МэВ).

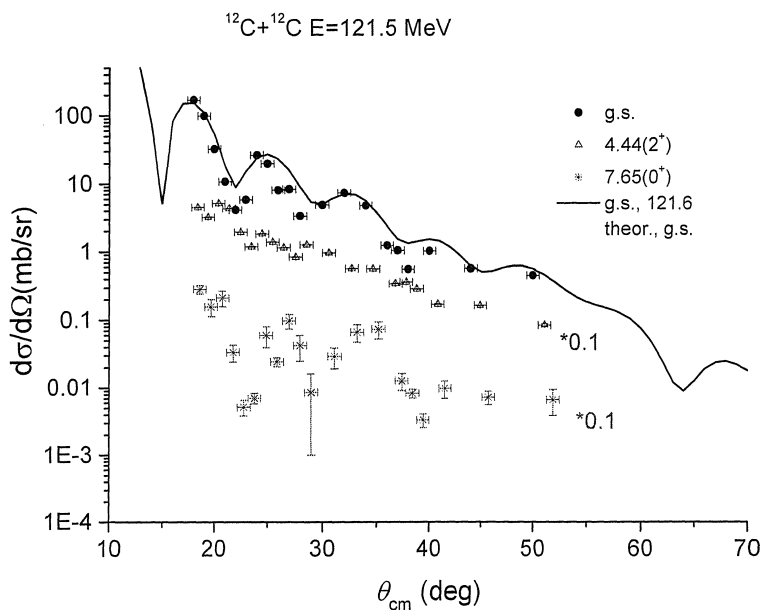


Рис 9. Угловое распределение упругого и неупругого рассеяния ^{12}C в реакции $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ при энергии $E_{\text{п.с.}} = 121.5$ МэВ. Неупругое рассеяние происходит при возбуждении 2^+ (4.44 МэВ) и 0^+ (7.65 МэВ) – состояний ^{12}C . Сплошная кривая – расчет по оптической модели.

Из рисунка 9 видно хорошее согласие угловых распределений полученных для основного состояния реакции $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ как с литературными данными, так и с теоретическим расчетом.

В данной работе было проведено измерение угловых распределений упругого и неупругих (4.44, 7.65) каналов реакции $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$, при энергии $E=121.5$ МэВ, в угловом диапазоне от 18 до 50 градусов в системе центра масс.

По положению дифракционных минимумов и максимумов, были рассчитаны дифракционные радиусы для основного и $0^+(7.65$ МэВ) состояний. В результате получилось, что среднее значение дифракционного радиуса для состояния $0^+(7.65$ МэВ) больше на 0.5 fm чем для основного состояния. Это согласуется с результатом работы [11], полученными при рассеянии α -частиц и ^3He на ядрах ^{12}C . Таким образом подтверждается что радиус состояния $0^+(7.65$ МэВ) (состояния Хойла) аномально большой.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации:

1. Создана методика измерения характеристик ядерных реакций на пучках ^6He с относительно низкой интенсивностью с использованием как прецизионного магнитного анализа, так и высокоэффективной активационной методики.
2. Создан специализированный программный комплекс для набора и обработки многопараметрических экспериментальных данных, получаемых с помощью прецизионного магнитного спектрометра МСП-144
3. Разработана методика монохроматизации пучков ускоренных ионов на ускорительном комплексе DRIBs вблизи кулоновского барьера с использованием магнитного спектрометра МСП-144 на выведенном пучке и внутреннего пробника на пучках внутри циклотрона У-400, которая позволила получить энергетическое разрешение не хуже ~ 400 кэВ при интенсивности пучка $2 \cdot 10^7$ с-1.

4. Измерены ширины импульсных распределений ${}^4\text{He}$, полученные из развала ${}^6\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$ на различных ядрах мишени в широком диапазоне энергии, которые свидетельствуют о наличии гало в ядре ${}^6\text{He}$ и о промежуточном n-p гало в ${}^6\text{Li}$.

5. Получены экспериментальные зависимости сечения образования 2n-испарительных остатков для реакций ${}^{206}\text{Pb}({}^6\text{He}, 2n){}^{210}\text{Po}$ и ${}^{208}\text{Pb}({}^4\text{He}, 2n){}^{210}\text{Po}$, которые демонстрируют, что реакция слияния ядра ${}^6\text{He}$ с ядрами мишени ${}^{206}\text{Pb}$ происходит глубоко под барьером.

6. Экспериментально измерены функции возбуждения образования испарительных остатков, полученных в реакциях полного и неполного слияния ${}^6\text{Li}+{}^{209}\text{Bi}$. Показано, что с наибольшей вероятностью происходит передача кластера d на кулоновском барьере.

7. Измерены угловые распределения упругого и неупругого рассеяния ${}^6\text{Li}$ в реакции ${}^6\text{Li}+{}^{12}\text{C}$ при энергии $E_{6\text{Li}}=63$ МэВ, и ${}^{12}\text{C}$ в реакции ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$ при энергии $E_{12\text{C}}=121.5$ МэВ, которые демонстрируют, что радиус возбужденного состояния 0^+ (7.65 МэВ) в ядре ${}^{12}\text{C}$ существенно больше радиуса как основного состояния, так и состояния 2^+ (4.44 МэВ).

В приложении описывается методика расчета кинематических характеристик для упругого и неупругого рассеяния и реакций передач.

Список публикаций с основными результатами диссертации:

- 1 **В.А.Маслов**, Р.А.Астабатьян, Д.С.Байбородин, И.Винцоур, А.С.Деникин, Т.К.Жолдыбаев, В.И. Загребяев, Р. Калпакчиева, И.В. Кузнецов, С.П. Лобастов, С.М. Лукьянов, Э.Р. Маркарян, Л. Михайлов, Ю.Ц. Оганесян, Ю.Э. Пенионжкевич, Н.К. Скобелев, Ю.Г. Соболев, В.Ю. Угрюмов, А.А. Хассан
Упругое и неупругое рассеяние ${}^6\text{Li}$ на ядрах ${}^{12}\text{C}$ при энергии 63 МэВ
Известия РАН. Серия физическая, т.69, N11, с. 1578-1584, (2005)
- 2 Yu.E.Penionzhkevich, R.A.Astabatyan, N.A.Demekhina, Z.Dlouhy, R.Kalpakchieva, A.A.Kulko, S.P.Lobastov, S.M.Lukyanov, E.R.Markaryan, **V.A.Maslov**, Yu.A.Muzychka, Yu.Ts.Oganessian, D.N.Rassadov, N.K.Skobelev, Yu.G.Sobolev, V.Yu.Ugryumov, J.Vincour, T.Zholdybaev
Some Peculiarities in the Interaction of ${}^6\text{He}$ with ${}^{197}\text{Au}$ and ${}^{206}\text{Pb}$
Phys.Part. and Nucl.Lett. 3, 362 (2006)
- 3 R.Kalpakchieva, **V.A.Maslov**, R.A.Astabatian, A.A.Kulko, S.M.Lukyanov, E.R.Markarian, Yu.Ts.Oganessian, Yu.E.Penionzhkevich, N.K.Skobelev, Yu.G.Sobolev
Momentum Distributions of ${}^4\text{He}$ Nuclei from the ${}^6\text{He}$ and ${}^6\text{Li}$ Breakup
Yad.Fiz. 70, 649 (2007)
- 4 Yu.E.Penionzhkevich, R.A.Astabatyan, N.A.Demekhina, G.G.Gulbekian, R.Kalpakchieva, A.A.Kulko, S.M.Lukyanov, E.R.Markaryan, **V.A.Maslov**, Yu.A.Muzychka, Yu.Ts.Oganessian, R.V.Revenko, N.K.Skobelev, Yu.G.Sobolev, D.A.Testov, T.Zholdybaev
Excitation functions of fusion reactions and neutron transfer in the interaction of ${}^6\text{He}$ with ${}^{197}\text{Au}$ and ${}^{206}\text{Pb}$
Eur.Phys.J. A 31, 185 (2007)

- 5 Yu.E.Penionzhkevich, R.Kalpakchieva, A.A.Kulko, S.M.Lukyanov, **V.A.Maslov**, N.K.Skobelev
Peculiarities of nuclear reactions induced by ${}^6\text{He}$ and ${}^6\text{Li}$ nuclei near the Coulomb barrier
Int. J. Mod. Phys. E, 17, №10 (2008) 2349.
- 6 Yu.E.Penionzhkevich, S.M.Lukyanov, R.A.Astabatian, N.A.Demekhina, M.P.Ivanov, R.Kalpakchieva, A.A.Kulko, E.R.Markarian, **V.A.Maslov**, Yu.A.Muzychka, R.V.Revenko, N.K.Skobelev, V.I.Smirnov, Yu.G. Sobolev
Complete and incomplete fusion of ${}^6\text{Li}$ ions with Bi and Pt
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 36 (2009) 025104.
- 7 S.M.Lukyanov, Yu.E.Penionzhkevich, R.A.Astabatian, N.A.Demekhina, Z.Dlouhy, M.P.Ivanov, R.Kalpakchieva, A.A.Kulko, E.R.Markarian, **V.A.Maslov**, R.V.Revenko, N.K.Skobelev, V.I.Smirnov, Yu.G.Sobolev, W.Trazska, S.V.Khlebnikov
Study of the $2n$ -evaporation channel in the ${}^4,6\text{He} + {}^{206,208}\text{Pb}$ reaction
Phys. Lett. B, 670 (2009) 321.
- 8 **В.А.Маслов**, Р.А.Астабатьян, С.А.Гончаров, В.А.Дамаскин, А.Н.Данилов, А.С.Демьянова, З.Длоугы, М.П.Иванов, Р.Калпакчиева, А.А.Кулько, С.М.Лукьянов, А.А.Оглоблин, Ю.Э.Пенионжкевич, Р.В.Ревенко, Н.К.Скобелев, Д.А.Тестов
Изучение дифракционного рассеяния ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$ с возбуждением экзотического состояния 0^+_{2} ядра ${}^{12}\text{C}$ (состояния Хойла)
письма в ЭЧАЯ. (2011) Т.8, N1(164). С.53-62

Список литературы:

1. N.A. Orr et al., Phys. Rev. Lett. 69, 2050 (1992).
2. A.S. Goldhaber, Phys. Lett. B 53, 306 (1974)
3. Zagrebaev V.I., Phys. Rev. C 67, 061601(R) (2003)
4. Penionzhkevich Yu.E. et al., Phys.Rev.Lett. 96, 162701 (2006)
5. Yu.A. Muzychka and B. I. Pustynnik Phys. At. Nucl. 45, 90 (1987)
6. M. Dasgupta et al, Phys Rev C 66 041602R (2002)
7. W.J.Ramler et al., Phys. Rev.C, v.114,N1 (1959)
8. M.Dasgupta et al. Phys.Rev.C 70, 024606 (2004)
9. H.G. Bingham et al., Phys. Rev C 11, 1913 (1975)
10. R.W. Ollerhead et al., Phys. Rev B 134, 74 (1964)
11. A.S.Demyanova et al., Journal of Modern Phys. E17, 2118 (2008)

Получено 11 марта 2012 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 14.03.2012.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,62. Уч.-изд. л. 1,46. Тираж 100 экз. Заказ № 57601.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/