

Получение и исследование нейтроноизбыточных и нейтронодефицитных ядер, удаленных от полосы бета-стабильности на установке ISOLDE, CERN

2019 год

Одним из наиболее эффективных методов исследования свойств ядер, удаленных от полости бета-стабильности, является сепарирование радиоактивных нуклидов, получающихся в мишенях под действием протонов с энергиями (600-1400) МэВ. Такие установки ISOL (Isotope Separation on-line) широко распространены в мировой практике.

Масс-сепаратор ПИЯФ «ИРИС» (Исследование радиоактивных изотопов на синхроциклотроне) является единственным прибором подобного рода в России, работающим в линию с ускорителем. Он оснащен современной техникой получения и исследования радиоактивных ядер, главным элементом которой является установка по резонансной лазерной спектроскопии в лазерном ионном источнике.

Работы на установке ИРИС и соответствующие работы по исследованию ядер в районе свинца на установке ISOLDE (CERN) (эксперименты IS 511 и IS 608) скоординированы и взаимодополняют друг друга, позволяя использовать возможности каждой из установок с максимальной эффективностью.

В 2019 году в рамках эксперимента IS 534 опубликованы результаты по среднеквадратичным зарядовым радиусам и магнитным моментам тяжелых изотопов астата $^{217-219}\text{At}$ [1] и ядерно-спектроскопические результаты по альфа-распаду ядра ^{218}At и его тонкой структуре [2].

В рамках эксперимента IS 608 (исследование сосуществования и эволюции форм экзотических ядер висмута) на установке ISOLDE проведены он-лайн эксперименты по исследованию ядерных свойств нейтронно-избыточных изотопов и изомеров висмута. Заканчивается обработка экспериментальных данных, подготавливается соответствующая публикация.

В 2019 году, совместно с коллаборацией IDS (IS 632) опубликованы данные по низколежащим состояниям изотопа ^{133}Sn , образующимся в результате бета-распада ^{133}In , получаемого с помощью селективной лазерной ионизации в ионном источнике

[3]. была продолжена серия публикаций по результатам, полученным в он-лайн экспериментах по лазерно-спектроскопическим исследованиям изотопов ртути IS 598 [4].

Кроме того, опубликованы статьи по лазерно-спектроскопическим исследованиям изотопов диспрозия на установке ISOLDE [5] и он-лайн и офф-лайн исследованиям эффективности ионного источника масс-сепаратора ИРИС (ПИЯФ) [6].

1. Проект CERN-MEDICIS

В 2019 году начались экспериментальные работы на новой установке для получения радионуклидов медицинского назначения CERN-MEDICIS. Она представляет собой офф-лайн мишенно-ионное устройство, масс-сепаратор и коллектор для накопления необходимой активности образцов целевых радиоизотопов. Схема установки представлена на рисунке 1.

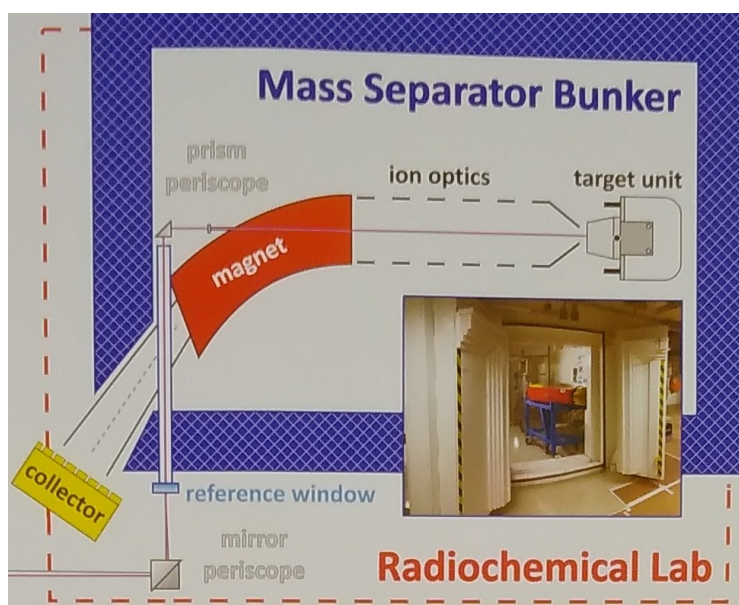


Рисунок 1. Схема установки CERN-MEDICIS. Вид на масс-сепаратор из радиохимической лаборатории.

Предполагалось, что получаемые радиоизотопы будут нарабатываться:

- 1) облучением мишенного вещества на протонном пучке ускорителя PS-Booster (CERN);
- 2) выделением из мишенных веществ, ранее облученных на других установках (реакторе ILL , ускорителях PSI и ARRONAX).

Поскольку в настоящее время ускоритель PS-Booster также затронут программой апгрейда LS2, то в 2019 году использовался второй способ наработки целевых радионуклидов.

Для получения образцов высокой чистоты, необходимых для медицинских исследований, в 2019 году была запущена лазерная система MELISSA (рис. 2), - с помощью эффективной резонансной фотоионизации позволяющая получать химически чистые пучки ионов (то есть обладающая изобарной селективностью). Принцип совместного действия масс-сепарирования и лазерной ионизации показан на рисунке 3.

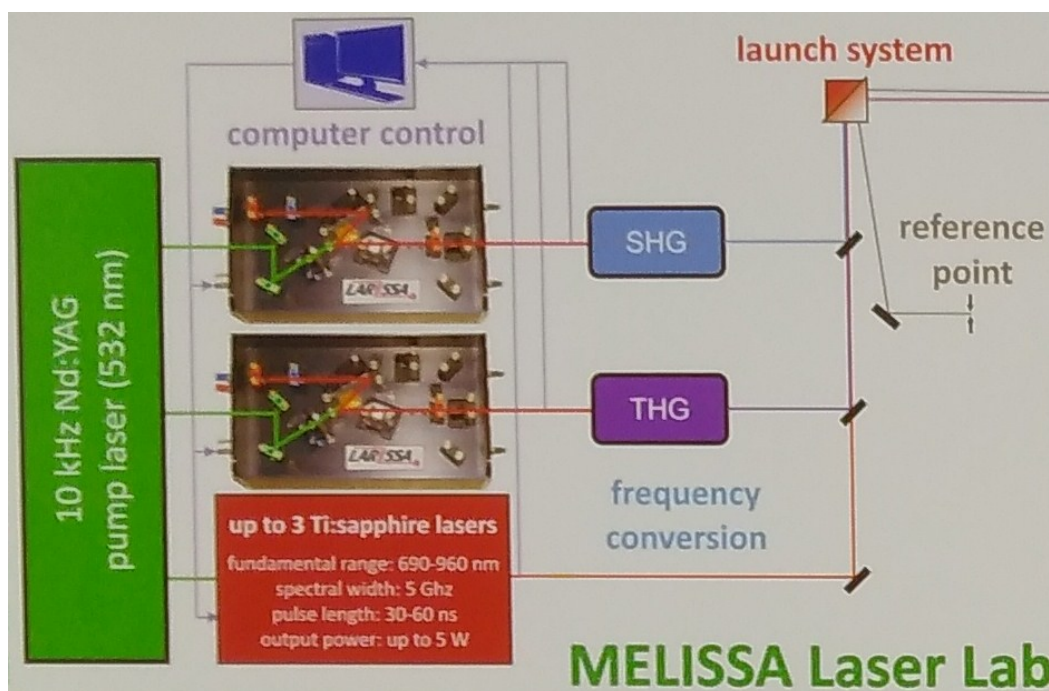


Рисунок 2. Схема установки для резонансной ионизации MELISSA.

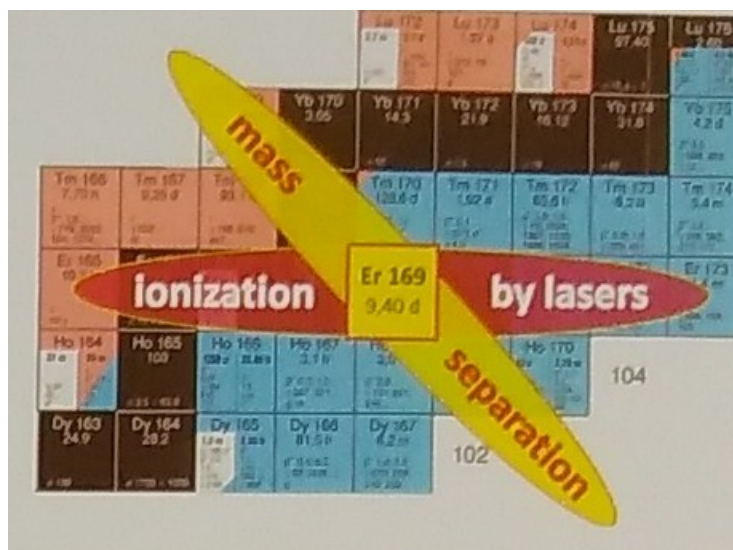


Рисунок 3. Принцип действия селективного выделения целевого радиоизотопа с помощью масс-сепаратора и лазерной ионизации.

С помощью лазерной ионизации планируется получить сверхчистые образцы изотопов Tb, Er, Ac, Lu и других элементов.

1.1. Получение радиоизотопа ^{169}Er на установке MEDICIS

Изотоп ^{169}Er является одним из самых перспективных нуклидов для применения в рецептор-таргетированной бета-терапии благодаря его низкой энергии β^- -распада (диапазон энергий 98-351 кэВ), а также низкой энергии и слабой интенсивности гамма-линий: 109.8 кэВ ($1.3 \times 10^{-3} \%$) и 118.2 кэВ ($1.4 \times 10^{-4} \%$). Эти характеристики важны для клинического применения радиофармпрепаратов на основе данного изотопа, поскольку обеспечивают минимальный риск повреждения здоровых тканей в процессе лечения.

В настоящее время изотоп ^{169}Er получают облучением нейтронами обогащенного стабильного ^{168}Er в реакции нейтронного захвата $^{168}\text{Er}(n,\gamma)^{169}\text{Er}$. Сечение такого процесса не очень велико для тепловых нейтронов (около 2 барн), что ограничивает возможности наработки целевого ^{169}Er и приводит к соотношению между ^{168}Er и ^{169}Er 600:1 в конце процесса облучения (и даже больше в момент применения).

Данный факт сильно снижает эффективность радиофармпрепарата, поскольку молекулы-векторы (используются для доставки радиоактивности к пораженным тканям) с равной вероятностью связываются как с радиоактивным, так и со стабильным изотопами эрбия.

Использование масс-сепаратора и лазерной резонансной ионизации на установке MEDICIS, как показано на рисунке 3, позволяет получить чистый ионный пучок изотопа ^{169}Er и собрать на коллекторе образец наилучшим образом подходящий для производства радиофармпрепарата.

В 2019 году при участии сотрудников ПИЯФ был проведен эксперимент по выделению ^{169}Er из мишенного вещества, облученного на реакторе Института Лауэ-Ланжевена (ILL) в Гренобле и доставленного в ЦЕРН.

Для резонансной ионизации эрбия использовалась двухступенчатая схема с автоионизационным состоянием (рис. 4)

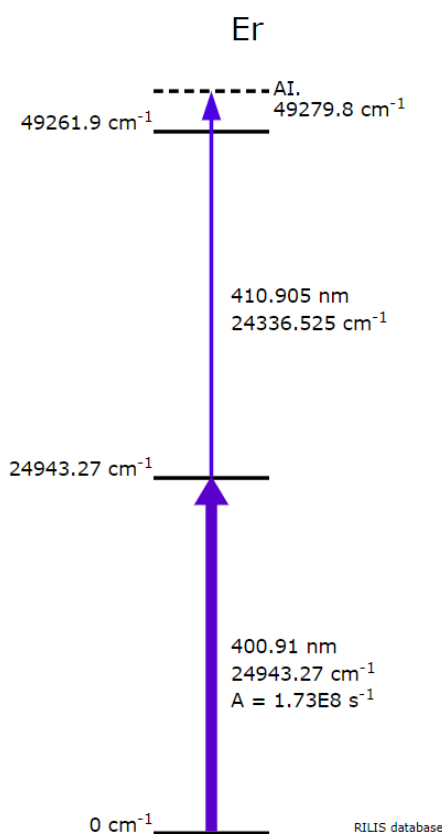


Рисунок 4. Схема резонансной ионизации атомов эрбия.

Она была реализована на лазерном комплексе MELISSA с помощью двух твердотельных, перестраиваемых по длине волны лазеров на титанате сапфира с внутрирезонаторным удвоением частоты.

Ионный пучок высаживался на специальные фольги, установленные на коллекторе масс-сепаратора (рис. 5).

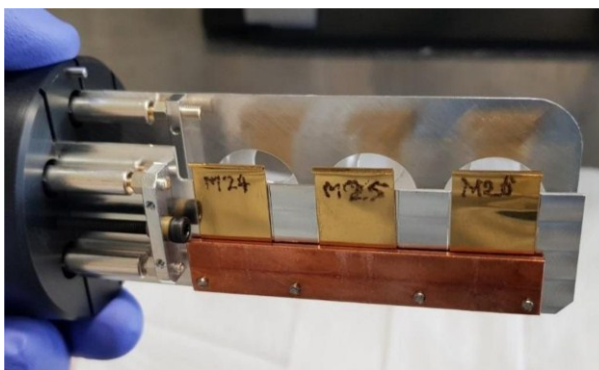


Рисунок 5. Коллектор масс-сепаратора с фольгами для накопления целевого радионуклида.

Накопление активности проводилось в течение трех суток. По мере накопления радиоизотопов (около 80 МБк) образцы извлекались из камеры коллектора масс-сепаратора и отправлялись для доклинических испытаний в Национальную физическую лабораторию (NPL, Великобритания).

2. Лазерная спектроскопия и сосуществование форм ядер астата (IS 534) и исследование области деформации в легких изотопах золота методом лазерной спектроскопии (IS 534 Addendum)

В 2019 году опубликованы результаты, полученные в рамках эксперимента IS 534 [1].

Методом лазерной ионизационной спектроскопии в ионном источнике установки ИЗОЛДЕ были проведены измерения изотопических сдвигов (ИС) и сверхтонкого расщепления (СТР) атомных уровней радиоактивных изотопов ^{217,218,219}At на

атомном переходе $\lambda_2 = 795.4$ нм (см. Рис. 6).

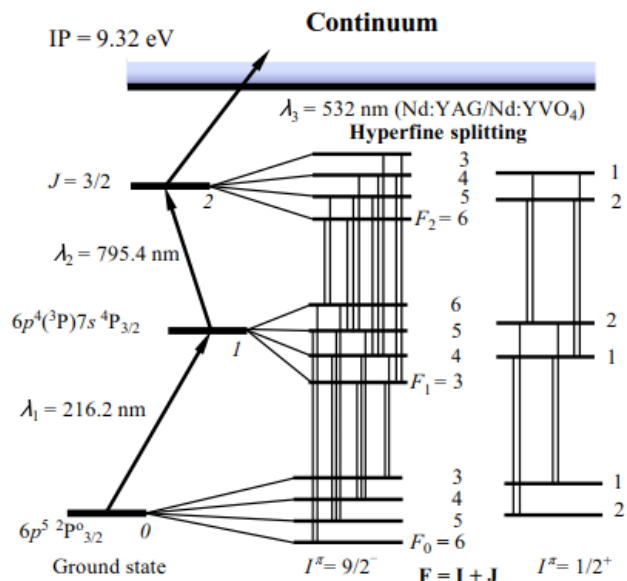


Рисунок 6. Схема ионизации атомов астата.

Оптические спектры цепочки изотопов астата, демонстрирующие изотопические сдвиги и сверхтонкую структуру соответствующих оптических линий, представлены на рисунке 7.

Величины изотопических сдвигов и констант сверхтонкой структуры, полученные из оптических спектров изотопов $^{217-219}\text{At}$ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Изотопические сдвиги и константы сверхтонкой структуры, полученные из оптических спектров изотопов $^{217-219}\text{At}$. Для ^{218}At приведены результаты для двух возможных спинов.

Atomic number	I	$\delta\nu_{A,205}$ (MHz)	a (MHz)	b (MHz)
217	(9/2)	-13800(80)	-329(4)	-840(150)
218	(2)	-15810(130)	-239(17)	380(200)
218	(3)	-15590(130)	-167(16)	330(200)
219	(9/2)	-16580(120)	-311(4)	-700(150)

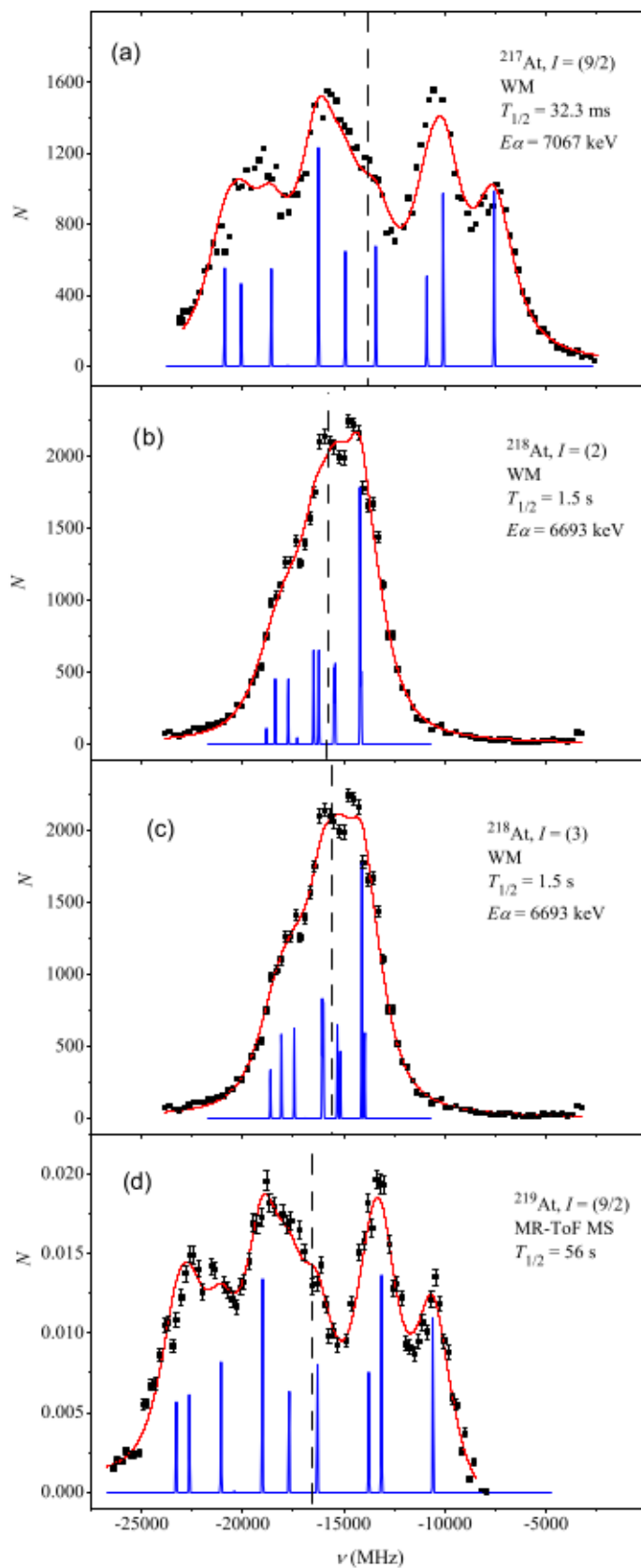


Рисунок 7. Оптические спектры, полученные на атомном переходе

$$\lambda_2 = 795.4 \text{ нм.}$$

В таблице 2 приведены значения магнитных дипольных и электрических квадрупольных моментов, а также изменений среднеквадратичных зарядовых радиусов изотопов астата, извлеченные из изотопических сдвигов и констант сверхтонкой структуры.

Таблица 2. Изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов, значения магнитных дипольных и электрических квадрупольных моментов изотопов астата.

Atomic number	I	$\mu(\mu_N)$	$Q_S(b)$	$\delta\langle r^2 \rangle_{A,205}(\text{fm}^2)$	γ_A
217	(9/2)	3.703(45) {56}	-1.40(25) {70}	1.194(7) {62}	
218	(2)	1.195(84) {29}	0.63(33) {32}	1.369(11) {71}	1.45(11)
218	(3)	1.25(12) {3}	0.55(33) {27}	1.349(11) {70}	1.29(11)
219	(9/2)	3.502(45) {53}	-1.17(25) {59}	1.435(10) {74}	

На рисунке 8 представлены значения g -фактора ($g=\mu/I$) для Z -нечетных и N -четных ядер при $N \geq 126$.

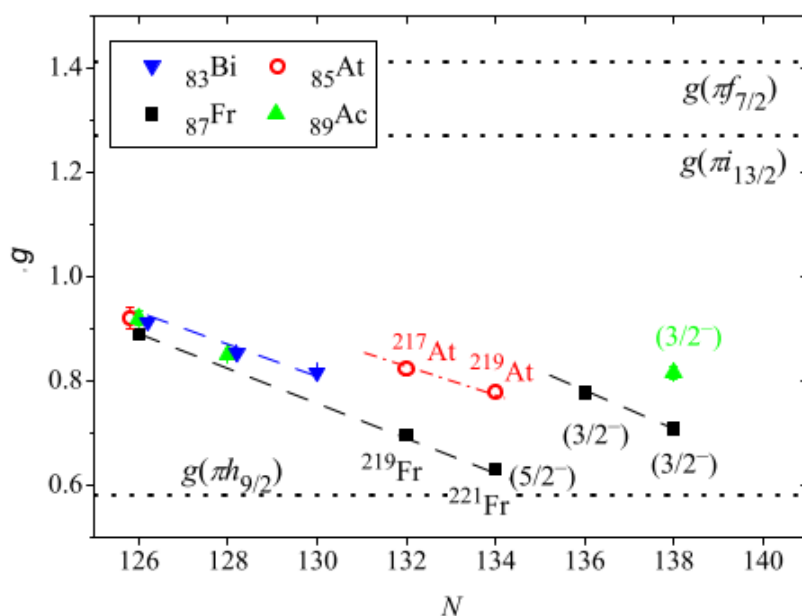


Рисунок 8. Значения g -факторов для N -четных ($N \geq 126$) ядер астата (полые кружки), франция (квадраты), актиния (треугольники) и висмута (обратные треугольники).

Хотя значения g-факторов нечетных изотопов астата уменьшаются при переходе от N=132 к N=134 с той же скоростью, что и для изотонов франция, их абсолютные значения значительно больше, чем у ядер $^{219,221}\text{Fr}_{132,134}$ (см. рис. 8). Это увеличение не может быть объяснено примесью сферической конфигурации $f_{7/2}$ из-за ее небольшого спина. Однако, если предположить наличие октупольной деформации у ядер астата, то смешивание состояний с конфигурациями $\pi=-1h_{9/2}$ и $\pi=+1i_{13/2}$ с большим спином может привести к росту магнитного момента. Таким образом, отклонение значений g-факторов изотопов $^{217,219}\text{At}$ от известной систематики может быть связано с появлением октупольной деформации в этих ядрах.

На рисунке 9 показаны изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов ядер астата в окрестности N=126. Пунктирные линии показывают предсказания дроблет-модели с постоянной деформацией. Как видно из таблицы 2, зарядовые радиусы ^{218}At в предположении разных спинов совпадают в пределах экспериментальной погрешности и не были бы различимы на рис.9. Поэтому на рисунке представлено значение для спина $I=3$.

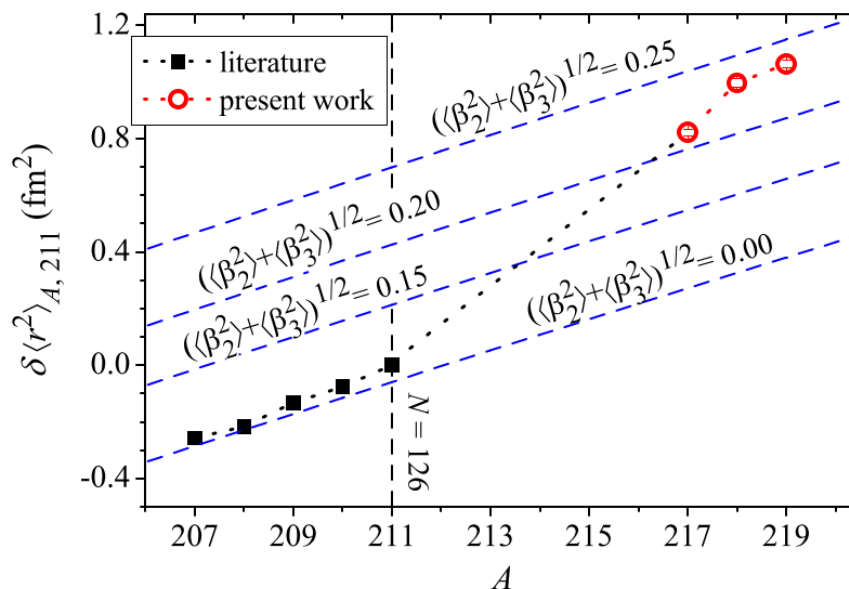


Рисунок 9. Изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов тяжелых изотопов астата.

На рисунке 9 хорошо видно изменение скорости хода изотопической зависимости при пересечении точки $N=126$. Это явление называется оболочечным эффектом и оно наблюдается для различных изотопических цепочек зарядовых радиусов вблизи $N=28, 50, 82, 126$. Для сравнения величины оболочечного эффекта у разных изотопических цепочек используется безразмерный параметр ξ_{even} :

$$\xi_{\text{even}} \equiv \frac{\delta \langle r^2 \rangle_{128,126}}{\delta \langle r^2 \rangle_{126,124}} = \frac{\delta v_{128,126}^F}{\delta v_{126,124}^F}$$

А также, когда нет экспериментальных данных для $N=128$, модифицированный параметр ξ_{even}^* :

$$\xi_{\text{even}}^* \equiv \frac{2}{N_0 - 126} \frac{\delta \langle r^2 \rangle_{N_0, 126}}{\delta \langle r^2 \rangle_{126, 124}} = \frac{2}{N_0 - 126} \frac{\delta v_{N_0, 126}^F}{\delta v_{126, 124}^F}$$

где N_0 – наименьшее число нейтронов изотопа, с $N > 126$, для которого измерен изотопический сдвиг.

На рисунке 10 представлены параметры оболочечного эффекта для ядер в окрестности свинца, полученные в эксперименте в сравнении с теоретическими расчетами.

На рисунке хорошо виден линейный рост параметра оболочечного эффекта с увеличением Z . Подобный рост также может указывать на увеличение октупольной деформации при $N=132$ при переходе от $Z=84$ к $Z=88$.

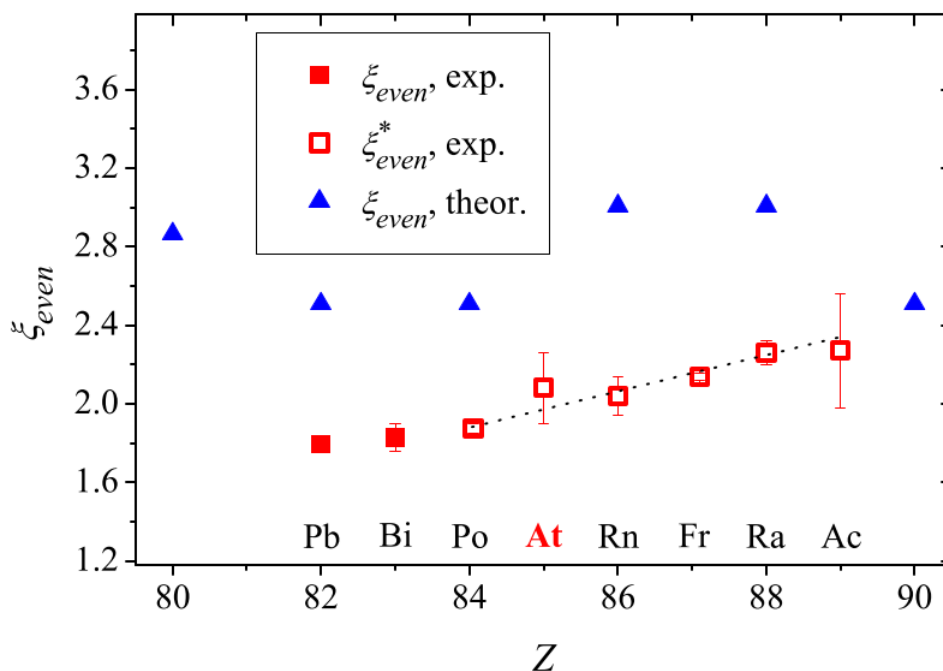


Рисунок 10. Параметры оболочечного эффекта ядер в области свинца.

На рисунке 11 показан параметр так называемого четно-нечетного эффекта, когда зарядовые радиусы претерпевают скачкообразные изменения при переходе от изотопа с четным N к изотопу с нечетным. Если этот параметр равен единице, то четно-нечетный эффект отсутствует, если он меньше 1, то имеет место нормальный четно-нечетный эффект, если больше 1, - обратный четно-нечетный эффект.

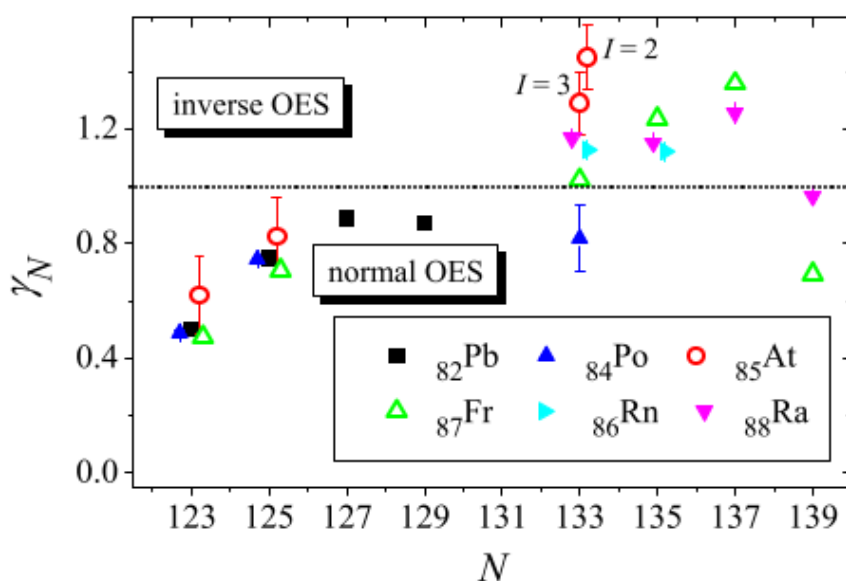


Рисунок 11. Параметр четно-нечетного эффекта ядер в области свинца.

Как видно из рисунка 11, при $N < 131$ и $N > 137$, имеет место нормальный четно-нечетный эффект для всех изотопических цепочек ($\gamma_N < 1$), тогда как для Fr, Ra и Rn изотопов с $133 < N < 137$, параметр $\gamma_N > 1$, что означает обратный четно-нечетный эффект. Для изотопов $^{217-219}\text{At}$ это правило сохраняется. И поскольку имеется сильная корреляция между обратным четно-нечетным эффектом и наличием октупольной деформации, это обстоятельство также указывает на наличие такой деформации у ядер астата вблизи $N=133$.

3. Исследование сосуществования и эволюции форм ядер висмута методом спектроскопии в лазерном ионном источнике и запаздывающего деления ядра ^{188}Bi (IS 608)

В рамках эксперимента по исследованию сосуществования форм у нейтронно-дефицитных ядер в области свинца в 2019 году были обработаны данные исследований нейтронно-дефицитных изотопов висмута, проведенных на установке ISOLDE.

Результаты этих исследований были представлены на международной конференции, посвящённой применению лазеров в ядерных исследованиях PLATAN-2019 (Майнц, Германия, 19 – 25 мая 2019) В докладе: M.D. Seliverstov on behalf of IS608 collaboration “In-source laser photoionization spectroscopy of very neutron-deficient Bi isotopes: new example of nuclear shape staggering” (Спектроскопия нейтронно-дефицитных изотопов висмута в лазерном источнике: новый пример эффекта чередования форм ядер).

В докладе представлены результаты измерения зарядовых радиусов и электромагнитных моментов нейтронно-дефицитных изотопов висмута вплоть до $A = 188$ (рис. 12). Результаты свидетельствуют о наличии эффекта чередования форм, аналогичного эффекту, наблюдаемому у изотопов ртути.

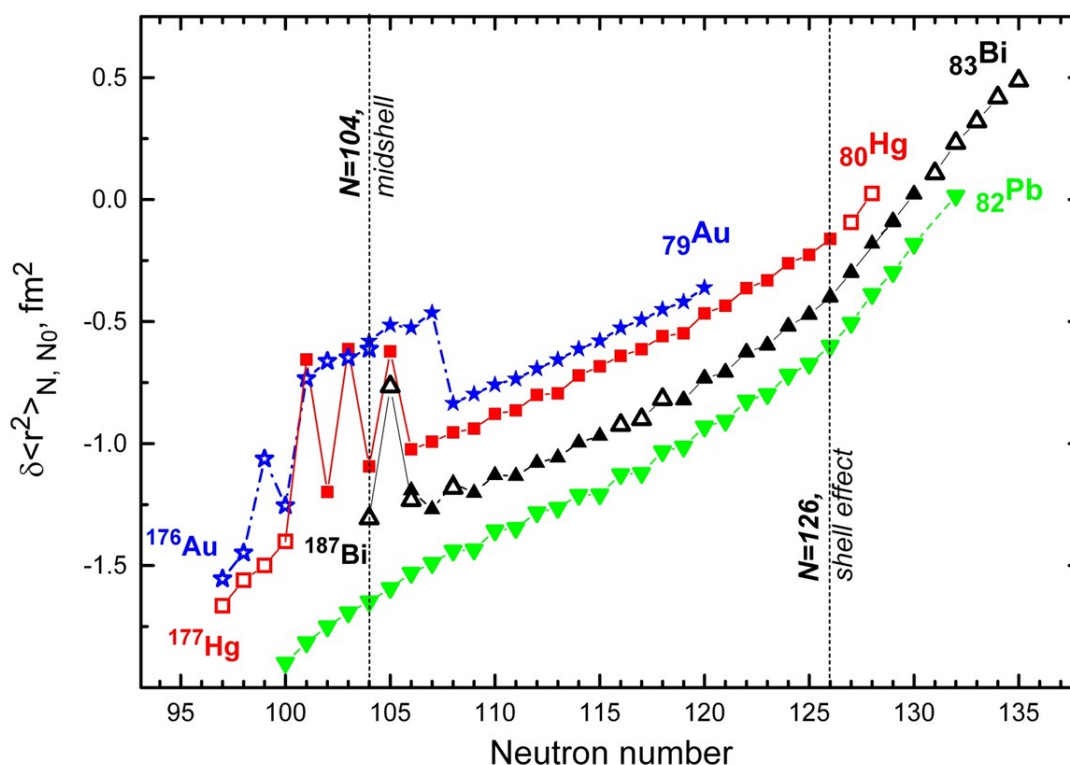


Рисунок 12. Изменение зарядовых радиусов изотопов висмута в сравнении с изотопическими цепочками свинца, ртути и золота.

До настоящего времени цепочка изотопов ртути являлась единственной, где наблюдался такой эффект.

В докладе так же представлены результаты исследований стабильности и точности измерений с помощью метода спектроскопии в лазерном ионном источнике и представлен так называемый «интеграционный метод» для определения ядерного спина по сверхтонкой структуре атомного оптического перехода в случае неполного разрешения оптических спектральных линий.

4. Лазерная спектроскопия изотопов ртути (IS 598)

В 2019 году была опубликована подробная статья посвященная лазерно-спектроскопическим исследованиям нейтронно-дефицитных изотопов ртути [4].

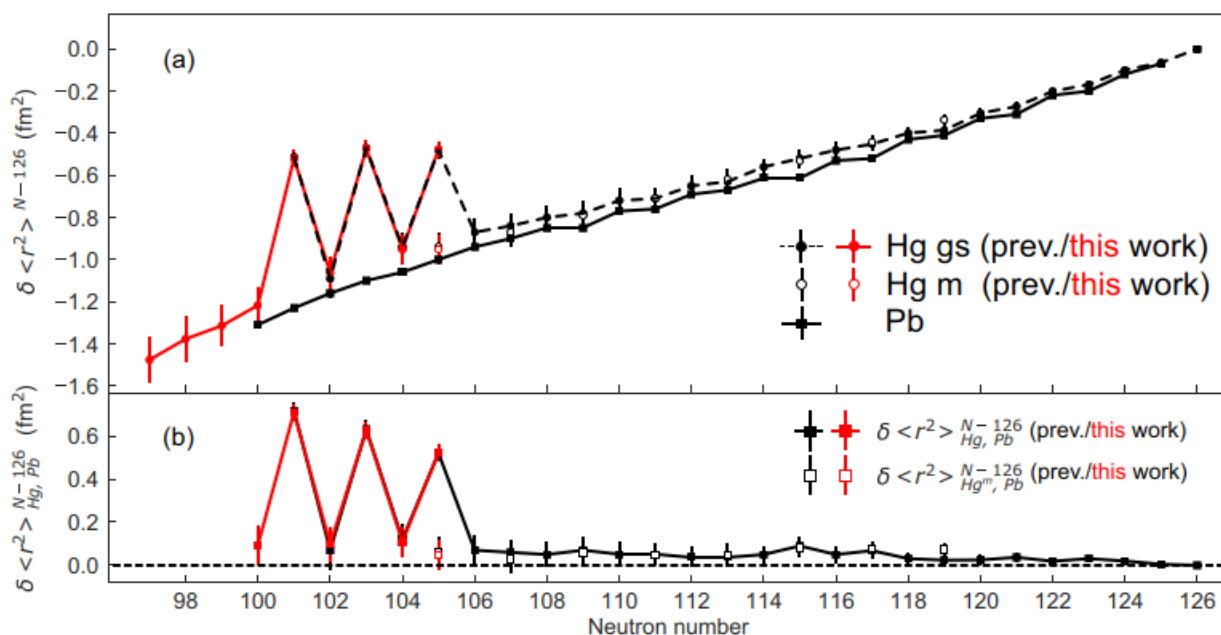


Рисунок 13. (а) Сравнение изменений зарядовых радиусов изотопических цепочек ртути и свинца. (б) Разница между изменениями зарядовых радиусов ртути и свинца.

На рисунке 13 (а) показаны изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов для изотопических цепочек ртути и свинца. Можно наблюдать три области с различным поведением изотопической зависимости ртути. У изотопов с $N > 105$ имеет место плавный ход изотопической зависимости, аналогичный изотопам свинца. При $100 < N < 106$, в области нейтронных оболочек $N=82$ и $N=126$ наблюдается значительный четно-нечетный эффект. Здесь поведение основных состояний нечетных ядер сильно отличается от плавного хода зависимости свинца (см. рис 13 б).

В данной работе установлена третья область характерного поведения зарядовых радиусов ртути,- прекращение четно-нечетного эффекта при ^{180}Hg и возвращение к плавному ходу изотопической зависимости, аналогичному свинцу. Это возвращение самых легких, слабо деформированных ядер ртути к поведению, наблюдаемому у сферических ядер свинца, обозначает границы четно-нечетного эффекта вблизи нейтронной подоболочки при $100 < N < 106$.

Экспериментальные результаты сравнивались с расчетами по методу Хартри-Фока, а именно DFT(Density Functional Theory)-метод, а также с расчетами по методу Монте-Карло, – MСSM (Monte-Carlo Shell Model). DFT-расчеты с эффективными силами Скирма предсказывают скачок в изотопической зависимости зарядовых радиусов вблизи нейтронной подоболочки N=104, когда основное состояние имеет сильную деформацию (рис. 14).

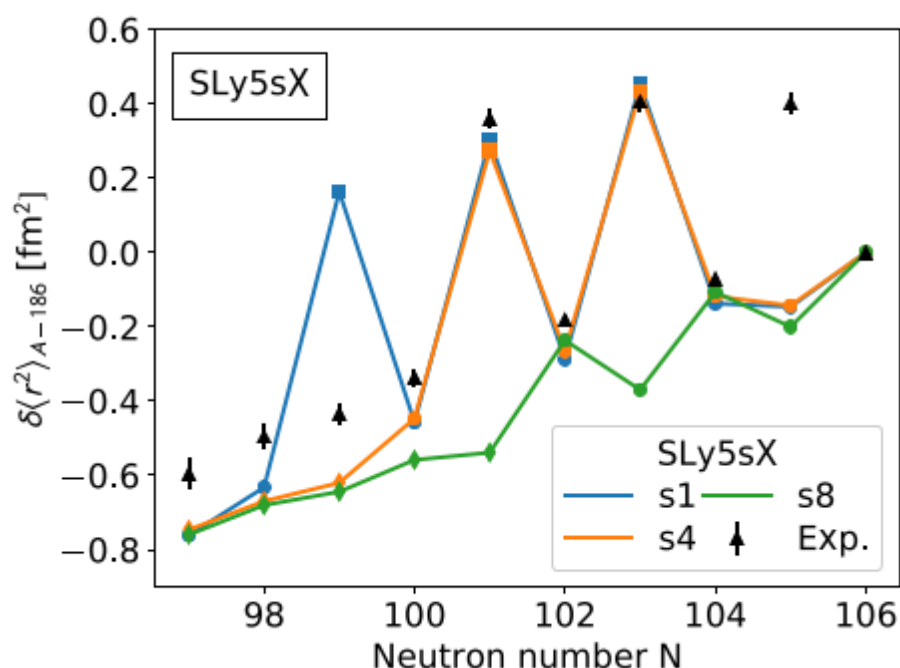


Рисунок 14. Изменения зарядовых радиусов изотопов ртути в сравнении с DFT-расчетами с эффективными силами Скирма. S4 – эффективные силы Sly5s4.

Эффективные силы UNEDF1^{SO} предсказывают четно-нечетный эффект качественно правильно, но со сдвижкой на два нейтрона (рис. 15).

MСSM расчеты с использованием экспериментально полученных спинов и четностей дает хорошее согласие с измеренными величинами электромагнитных моментов и зарядовых радиусов (см. рис. 16). В этом подходе обнаружен механизм появления четно-нечетного эффекта в ртути: значительное изменение заселенностей протонной орбитали $\pi h_{9/2}$ и нейтронной орбитали $\nu i_{13/2}$.

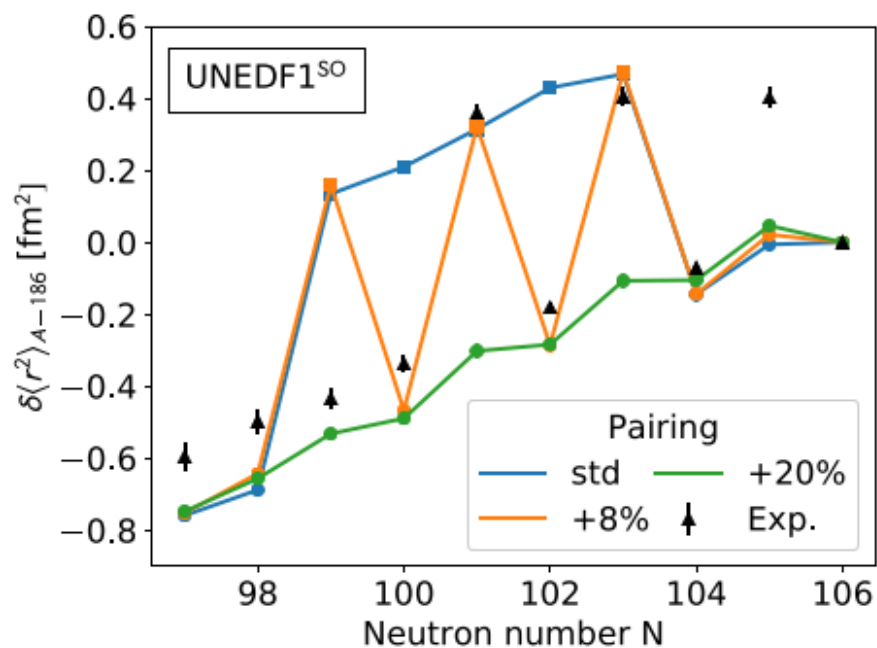


Рисунок 15. Изменения зарядовых радиусов изотопов ртути в сравнении с DFT-расчетами с эффективными силами UNEDF1^{SO}.

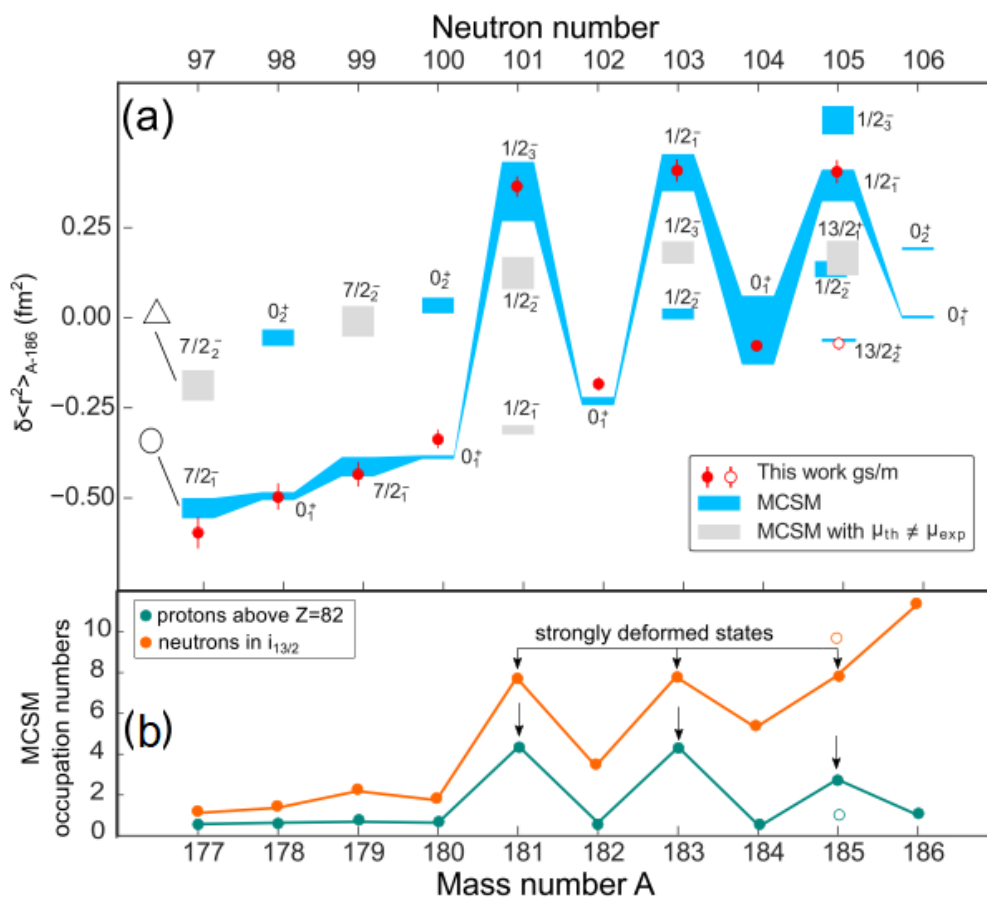


Рисунок 16. Изменения зарядовых радиусов изотопов ртути в сравнении с расчетами MCSM.

Хотя четно-нечетный эффект в изотопах ртути – уникальный эффект, замеченный только в данной области карты нуклидов, он очень хорошо иллюстрирует конкуренцию одночастичных и коллективных степеней свободы в атомном ядре, приводящую к заметным изменениям свойств ядер.

5. Публикации по Эксперименту ISOLDE в 2019 г.

1. A. E. Barzakh, ..., A. N. Andreyev, M. D. Seliverstov, ..., D. V. Fedorov, V. N. Fedosseev, ..., P. L. Molkanov, et al, *Inverse odd-even staggering in nuclear charge radii and possible octupole collectivity in $^{217,218,219}\text{At}$ revealed by in-source laser spectroscopy*, Phys. Rev. C **99**, 054317 (2019).
2. J. G. Cubiss, A. N. Andreyev, A. E. Barzakh, ..., D. V. Fedorov, V. N. Fedosseev, ..., P. L. Molkanov, ..., M. D. Seliverstov, et al., *Fine structure in the α decay of ^{218}At* , Phys. Rev. C **99**, 064317 (2019).
3. M. Piersa, ..., A. E. Barzakh, ..., D. V. Fedorov, V. N. Fedosseev, et al., *β -Decay of ^{133}In : emission from neutron-unbound states in ^{133}Sn* , Phys. Rev. C **99**, 024304 (2019).
4. S. Sels, ..., A. N. Andreyev, ..., A. E. Barzakh, ..., D. V. Fedorov, V. N. Fedosseev, ..., P. L. Molkanov, ..., M. D. Seliverstov, et al., *Shape staggering of mid-shell mercury isotopes from in-source laser spectroscopy compared with density functional theory and Monte Carlo shell model calculations*, Phys. Rev. C **99**, 044306 (2019).
5. I. Tomandl, J. Vacík, U. Köster, L. Viererbl, E. A. Maugeri, S. Heinitz, D. Schumann, M. Ayranov, J. Ballof, R. Catherall, K. Chrysalidis, T. Day Goodacre, D. Fedorov, V. Fedosseev, K. Johnston, B. Marsh, S. Rothe, J. Schell, and Ch. Seiffert, *Measurement of the $^7\text{Be}(n, p)$ cross section at thermal energy*, Phys. Rev. C **99**, 014612 (2019).
6. F. Flavigny, ... , M.D. Seliverstov, *Microscopic structure of coexisting 0^+ states in ^{68}Ni probed via two-neutron transfer*, Phys. Rev C **99**, 054332 (2019).

7. L. Ghys, A. N. Andreyev, ..., A. Barzakh, et al., *α -decay properties of $^{200,202}\text{Fr}$* , Phys. Rev. C **100**, 054310 (2019).

6. Выступления на конференциях в 2019 году

1. A. E. Barzakh. *Hyperfine structure anomaly in heavy atoms: modern status and problems*, One-day workshop on studying nuclear structure and properties by means of atomic-molecular spectroscopy NRC KI – PNPI, 3 April, 2019, Gatchina, Russia (<http://id.pnpi.spb.ru/novosti/179-odnodnevnoe-rabochee-soveshchanie-po-issledovaniyu-svoystv-i-struktury-atomnykh-yader-metodami-atomno-molekulyarnoj-spektroskopii-nits-ki-piyaf-gatchina-orlova-roshcha.html>)
2. A.E. Barzakh, *Hyperfine structure anomaly in heavy nuclei: current experimental status and problems*, Workshop on Electronic atomic factors and hyperfine anomalies for nuclear physics, 15 April, 2019, Brussels, Belgium.
3. A.E. Barzakh, *Shell effect in radii at $N = 126$* , Workshop on the “Physics between lead and uranium: in preparation of new experimental campaigns at ISOLDE” Tuesday April 16 (14.00 h) to Thursday April 18 (18.00 h), 2019, Leuven, Belgium.
4. M.D. Seliverstov, on behalf of RILIS-Gatchina-WINDMILL-ISOLTRAP collaboration, *In-source laser photoionization spectroscopy of very neutron-deficient Bi isotopes: new example of nuclear shape staggering*, International Conference Merger of the Poznan Meeting on Lasers and Trapping Devices in Atomic Nuclei Research and the International Conference on Laser Probing May 20 - 24, 2019, Helmholtz Institute and Johannes Gutenberg University, Mainz, Germany. (<https://indico.him.uni-mainz.de/event/24/>)
5. A.E. Barzakh, *Hyperfine structure anomaly in heavy nuclei: gold isotopes*, EOS topical workshop on Magnetic Moments – Experiment versus Theory, November 6, 2019, Brussels, Belgium.

6. A.E. Barzakh, *Shell effect in radii at $N = 126$: new results*, EVEREST meeting (EOS project), November 7, 2019, Brussels, Belgium.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A. E. Barzakh, ..., A. N. Andreyev, M. D. Seliverstov, ..., D. V. Fedorov, V. N. Fedosseev, ..., P. L. Molkanov, et al, *Inverse odd-even staggering in nuclear charge radii and possible octupole collectivity in $^{217,218,219}\text{At}$ revealed by in-source laser spectroscopy*, Phys. Rev. C **99**, 054317 (2019).
2. J. G. Cubiss, A. N. Andreyev, A. E. Barzakh, ..., D. V. Fedorov, V. N. Fedosseev, ..., P. L. Molkanov, ..., M. D. Seliverstov, et al., *Fine structure in the α decay of ^{218}At* , Phys. Rev. C **99**, 064317 (2019).
3. M. Piersa, ..., A. E. Barzakh, ..., D. V. Fedorov, V. N. Fedosseev, et al., *β -Decay of ^{133}In : emission from neutron-unbound states in ^{133}Sn* , Phys. Rev. C **99**, 024304 (2019).
4. S. Sels, ..., A. N. Andreyev, ..., A. E. Barzakh, ..., D. V. Fedorov, V. N. Fedosseev, ..., P. L. Molkanov, ..., M. D. Seliverstov, et al., *Shape staggering of mid-shell mercury isotopes from in-source laser spectroscopy compared with density functional theory and Monte Carlo shell model calculations*, Phys. Rev. C **99**, 044306 (2019).
5. K. Chrysalidis, A.E. Barzakh, R. Ahmed, A.N. Andreyev, J. Ballof, J.G. Cubiss, D.V. Fedorov, V.N. Fedosseev, L.M. Fraile, R.D. Harding, U. Köster, B.A. Marsh, C. Raison, J.P. Ramos, R.E. Rossel, S. Rothe, K. Wendt, S.G. Wilkins, *In-source laser spectroscopy of dysprosium isotopes at the ISOLDE-RILIS*, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B, (2019).
6. V.N. Panteleev, A.E. Barzakh, L.Kh. Batist, D.V. Fedorov, V.S. Ivanov, F.V. Moroz, P.L. Molkanov, S.Yu. Orlov, M.D. Seliverstov, Yu.M. Volkov, *Highly Efficient Ion Source for Surface and Laser Ionization*, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B, (2019).

7. V. N. Pantelev, A. E. Barzakh, L. Kh. Batist, D. V. Fedorov, V. S. Ivanov, F.V. Moroz, P. L. Molkanov, S. Yu. Orlov, and Yu. M. Volkov, *The radioisotope complex project “RIC-80” at the Petersburg Nuclear Physics Institute*, *Review of Scientific Instruments* **86**, 123510 (2015).

Приложение

Объем используемых средств на визиты сотрудников ПИЯФ, связанных с выполнением научной программы, составил 98.4 % от утвержденной суммы в 12000 долларов США. Указанная сумма затрат связана с визитами специалистов из ПИЯФ на установку ISOLDE для участия в работах на установке RILIS, в обработке данных, полученных экспериментами IS 608, IS 610, IS 641 и IS 650, а также для участия в работах по выделению радиоизотопов медицинского назначения на установке MEDICIS. Общая длительность визитов сотрудников ПИЯФ на установку ISOLDE за счет средств Министерства образования и науки РФ составила 85 ч./дня (три сотрудника).

В 2019 году были опубликованы результаты по среднеквадратичным зарядовым радиусам и магнитным моментам тяжелых изотопов астата, полученные ранее в онлайн экспериментах (эксперимент ИРИС – ISOLDE IS 534). Также были опубликованы ядерно-спектроскопические данные по исследованию схемы альфа-распада ядра ^{218}At .

Совместно с коллаборацией IDS (ISOLDE Decay Station) в рамках эксперимента IS 632 исследовались низколежащие состояния изотопа ^{133}Sn , образующиеся в результате бета-распада ^{133}In , получаемого с помощью селективной лазерной ионизации в ионном источнике.

В 2019 году была продолжена серия публикаций по результатам, полученным в он-лайн экспериментах по лазерно-спектроскопическим исследованиям изотопов ртути IS 598.

Готовятся и другие публикации по экспериментам IS 598 и IS 608 («Исследование сосуществования и эволюции форм ядер висмута методом спектроскопии в лазерном ионном источнике»).

В 2019 году на установке CERN-MEDICIS (MEDical Isotopes Collected from ISOLDE) были проведены первые тесты по выделению радиоизотопа медицинского назначения ^{169}Er из мишени на основе облученного на реакторе ILL (Гренобль) обо-

гащенного ^{168}Er . Разделение проводилось на масс-сепараторе MEDICIS с применением новой лазерной системы резонансной ионизации MELISSA (MEDICIS Laser Ion Source Set-Up). Полученные сверхчистые образцы изотопов медицинского назначения поступили для доклинических исследований в Национальную физическую лабораторию (NPL, Великобритания) и PSI (Швейцария).

Опыт, полученный на MEDICIS будет полезен для осуществления проекта РИЦ-80 в ПИЯФ.