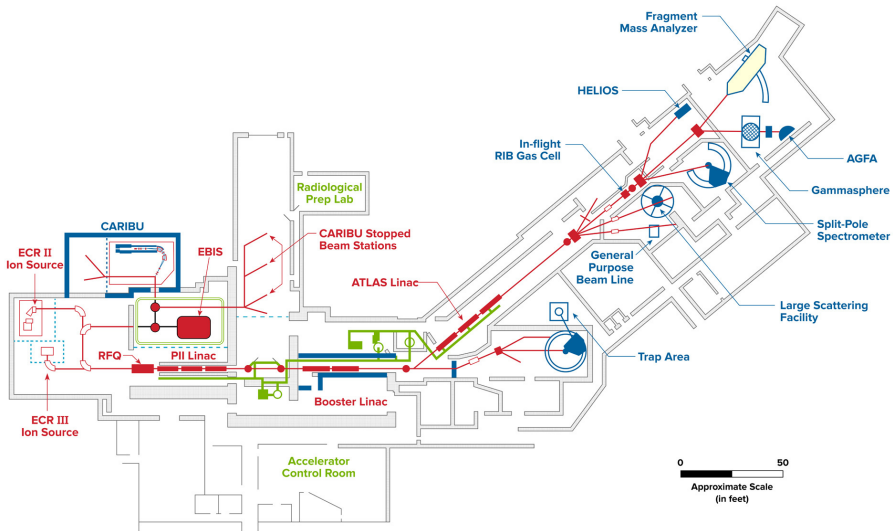


Argonne Tandem Linac Accelerator System – линейный ускоритель тяжелых ионов в Argonne National Laboratory (USA)

Керим Гусейнов

МГУ им. М. В. Ломоносова

17 ноября 2021 г.



Ускорительный комплекс атлас содержит три ускорительные секции: инжектор положительных ионов (Positive Ion Injector), бустер и сам atlas. Суммарное напряжение этих трех частей достигает 50 мегавольт, и ускоряться принципиально могут любые ядра от протона до урана.

RFQ – радиочастотный квадруполь, предназначенный для фокусировки пучка.

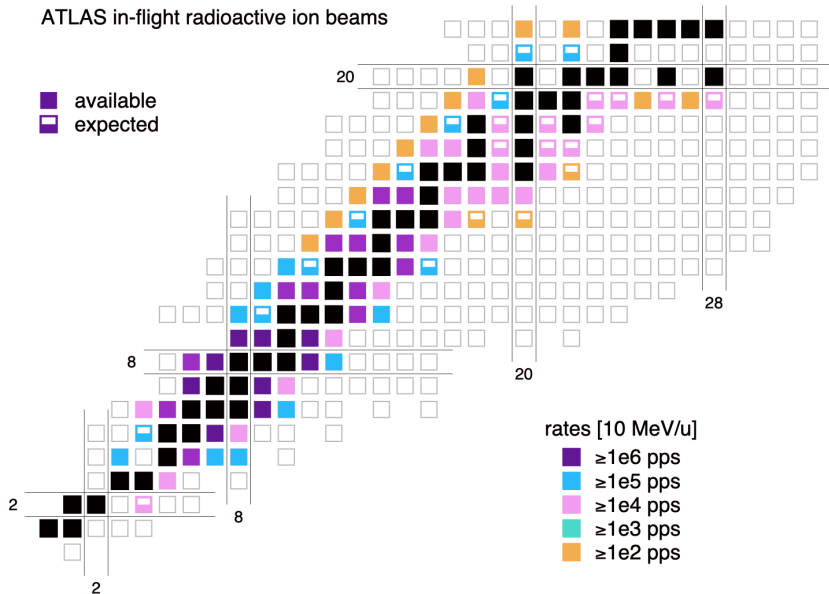
ECR – electron cyclotron resonance – источник ионов, ионизатор.

EBIS – electron beam ion source

CARIBU – Californium Rare Isotope Breeder Upgrade

Кроме ускорителей, важной частью комплекса является CARIBU – система, позволяющая выделять определенные нейтроноизбыточные осколки спонтанного распада калифорния 252.

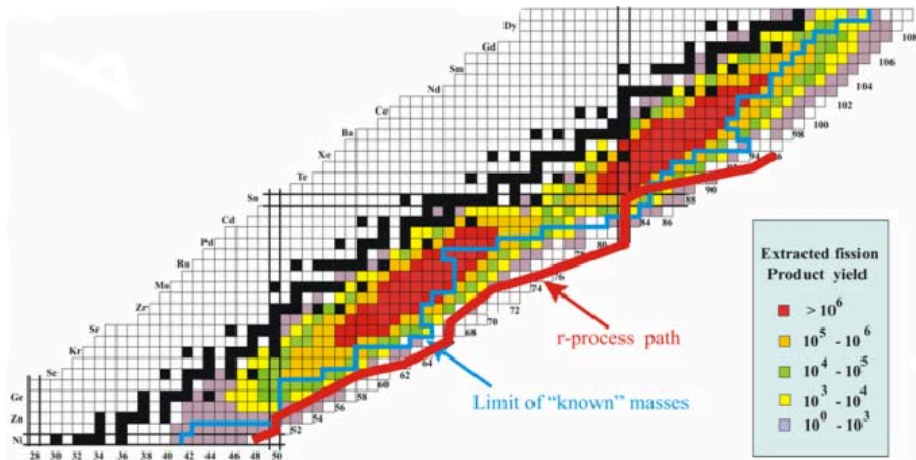
ATLAS in-flight radioactive ion beams



Кроме того, система атлас предоставляет еще и пучки легких радиоактивных ядер вблизи долины стабильности. Для их получения пучок из ускорителя направляют в газовую камеру или на фольгу, где ядра пучка проходят через реакции нуклонного обмена, а затем продукты фокусируются и направляются уже в нужную мишень. Для повышения качества и чистоты пучка мгновенно распадающиеся обратно продукты отделяются, а также производится отбор по импульсу.

Таким образом, в роли налетающей частицы может выступать целый ряд радиоактивных легких ядер массами до примерно 40.

CARIBU – подача продуктов распада ^{252}Cf



CARIBU – подача продуктов распада ^{252}Cf

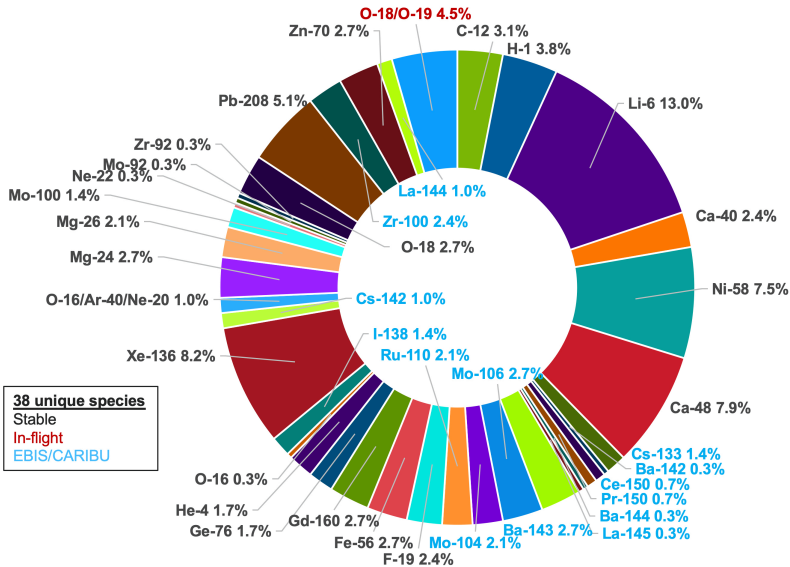
Калифорний распадается в камере с очень чистым гелием (газом), где фрагменты быстро теряют энергию, затем ускоряются до 30 КэВ и попадают в масс-анализатор, где производится отбор. Затем они переносятся к EBIS и к квадруполю RFQ в начало самого ускорителя.

Примерно половина продуктов становятся ионами с зарядом +1 или +2, а между распадом калифорния и попаданием в квадруполи проходит около 40 мс. Кроме того разделение продуктов очевидно не зависит от химических свойств.

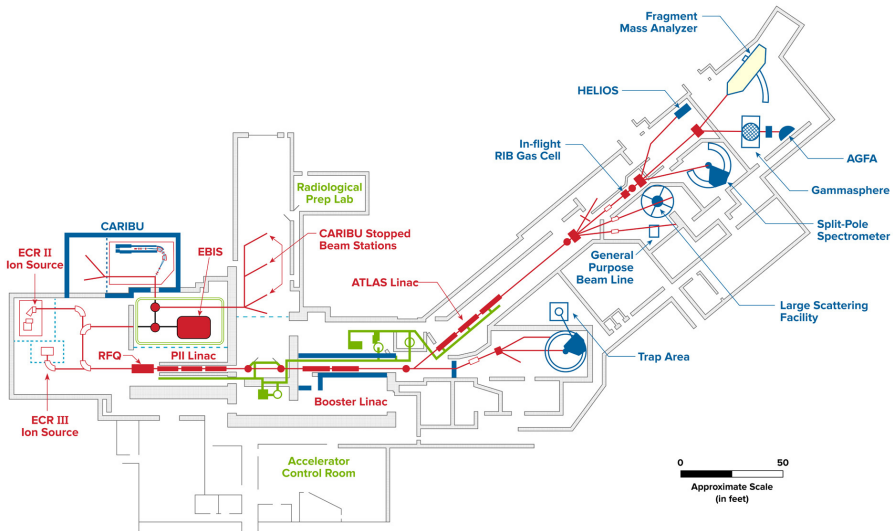
Ускоряются такие ядра до 15 МэВ/нуклон

Максимальные энергии стабильных ядер изменяются от 18-20 МэВ/нуклон для легких до 9-10 для тяжелых.

Нестабильные легкие достигают около 15 МэВ/нуклон вместо 20.



Выше показаны доли наиболее часто используемых ядер. Каждый год проводится примерно 50 экспериментов, суммарно занимающих около 6000 часов работы (8 месяцев в год).



Рассмотрим элементы установки после мишеней.

Анализатор фрагментов масс используется для разделения продуктов реакции на интересующей мишени и непроизводивших ядер. Также он используется в схеме совпадений при одновременной регистрации фотонов и ядер. Также он используется и в обычном назначении – для определения отношения заряда к массе.

HELIOS (Helical Orbit Spectrometer) это винтовой орбитальный спектрометр или же спектрометр с винтовыми орбитами. Здесь мишень располагается непосредственно внутри соленоида, который представляет собой обычный магнит из МРТ. Мишень и детектор находятся на оси соленоида, а продукты реакции загибаются и летят обратно к оси. Детектор можно переставлять так, чтобы ловить продукты с определенной энергией, зарядом и прочее. HELIOS используется для изучения реакции передачи одного или нескольких нуклонов, кластеров, неупругого рассеяния, используют в основном для нестабильных пучков.

AGFA – argonne gas filled separator – газовый сепаратор, используется для изучения тяжелых и сверхтяжелых ядер. Например, для поиска изомерных состояний в таких ядрах и изучения ядер вблизи протонной радиоактивности, а также изучения тяжелых нейтроноизбыточных ядер в глубоко неупругих реакциях.

Gammasphere – детектор фотонов, состоящий из 100 германиевых детекторов.

Программа эксперимента. Структура ядер

- Сравнение свойств ядер $A < 20$ с вычислениями по модели оболочек.
- Исследование свойств нейтроноизбыточных ядер: изменения в структуре оболочек, спаривание, новые коллективные возбуждения.
- Изучение воздействия слабой энергии связи на ядра вблизи протонной радиоактивности: структура оболочек, деформация, радиоактивность. Особое внимание области $N = Z$ при $50 < A < 100$, а также вблизи ^{100}Sn .
- Изучение ядер с зарядом $Z > 100$ и проверка теорий, описывающих сверхтяжелые ядра.
- Изучение свойств ядер при больших спинах и энергиях возбуждения, включая взаимосвязь коллективных и одночастичных степеней свободы, поиск новых коллективных мод и их спектральных сигнатур по всей таблице, изучение зависимости плотности уровней от углового момента и температуры.

Программа эксперимента. Нуклеосинтез в звездах

- Измерение сечений реакций расширенного CNO-цикла.
- Измерение сечений (α, p) и (p, γ) реакций на пути rp -процесса.
- Измерение сечений реакций между тяжелыми ионами при энергиях, соответствующих горению в звездах.
- Изучение реакций, ответственных за образование ядер p -процесса.
- Изучение масс и свойств распадов ядер вблизи линии r -процесса, в частности, вблизи $N = 82, 126$ и в редкоземельном пике.

Программа эксперимента. Динамика вблизи кулоновского барьера

- Изучение подавления слияния при экстремальных подбарьерных энергиях, особенно в системах, актуальных для ядерной астрофизики.
- Влияние ядерной структуры (деформация, структура оболочек, диссипация и др.) на слияние, особенно для реакций, приводящих к ядрам с $Z > 100$.
- Влияние избытка нейтронов на ядерные реакции вблизи кулоновского барьера.

Программа эксперимента. Проверка симметрий природы

- Поиски возможных расширений Стандартной модели путем улучшения на порядок ограничений на скалярную, тензорную и правую компоненты электрослабых взаимодействий.
- Проверка гипотезы сохранения векторного тока и унитарности первого ряда матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава путем изучения бета-распадов.
- Изучение спектров антинейтрино в распадах продуктов деления для определения природы видимой аномалии реакторных нейтрино, наблюдавшейся в экспериментах по осцилляции нейтрино.

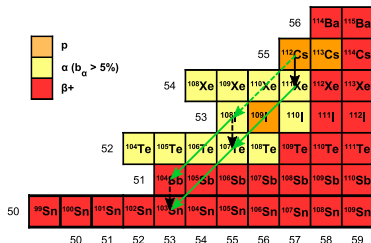
Программа эксперимента. Приложения ядерной физики

- Использование ускорительной масс-спектрометрии для изучения сечений захвата нейтронов различными изотопами, представляющими интерес для реакторной физики и ядерной астрофизики.
- Изучение свойств распада нейтроноизбыточных изотопов, важных для точного моделирования динамики в новых циклах ядерного топлива.
- Использование бомбардировки тяжелыми ионами для изучения повреждений материалов, рассматриваемых для передовых реакторов, и модификации сверхпроводящих материалов.
- Разработка новых способов образования отдельных изотопов для медицинских нужд.

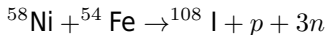
Публикации – названия говорят за себя

- Proton decay of ^{108}I and its significance for the termination of the astrophysical rp -process. [Phys. Lett. B 792, 187 (2019)]
- Masses and β -Decay Spectroscopy of Neutron-Rich Odd-Odd $^{160,162}\text{Eu}$ Nuclei: Evidence for a Subshell Gap with Large Deformation at $N=98$. [Phys. Rev. Lett. 120, 182502 (2018)]
- Direct Evidence of Octupole Deformation in Neutron-Rich ^{144}Ba . [Phys. Rev. Lett. 116, 112503 (2016)]
- Precision Mass Measurements of Neutron-Rich Neodymium and Samarium Isotopes and Their Role in Understanding Rare-Earth Peak Formation. [Phys. Rev. Lett. 120, 262702 (2018)]
- Shape Coexistence and the Role of Axial Asymmetry in ^{72}Ge . [Phys. Lett. B 754, 254 (2016)]
- Modeling Multi-Nucleon Transfer in Symmetric Collisions of Massive Nuclei. [Phys. Lett. B 771, 119 (2017)]
- Reaction rate for carbon burning in massive stars. [Phys. Rev. C 97, 012801 (2017)]

Proton decay of ^{108}I and its significance for the termination of the astrophysical rp -process

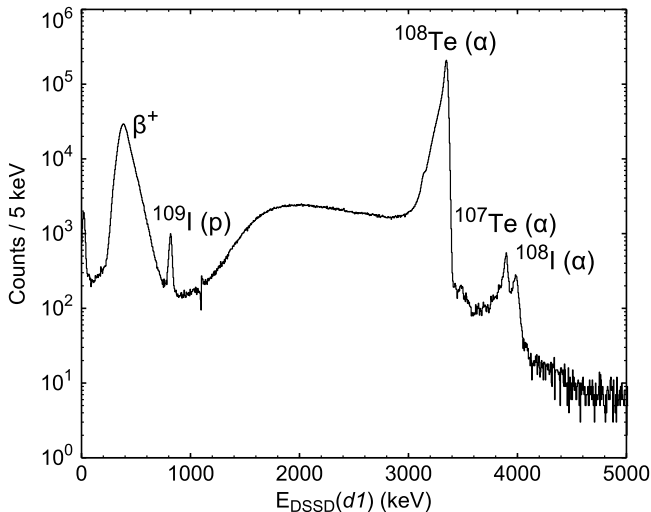


$^{112}_{55}\text{Cs}$ стабильнее $^{113}_{55}\text{Cs}$ и, возможно, $^{104}_{51}\text{Sb}$ стабильнее ожидаемого. Тогда именно через него идет путь rp -процесса. Для нахождения $Q_p(^{104}\text{Sb})$ ищется $Q_p(^{108}\text{I})$.



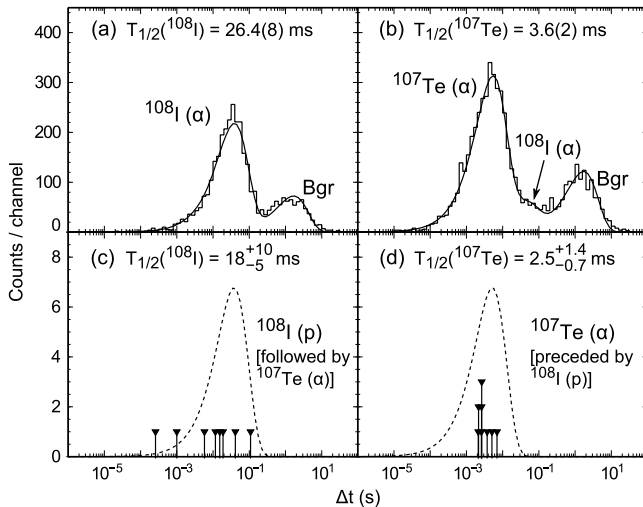
- Выделялись ионы с $A = 108$ и зарядом $+26, +27$.
- Рассматривались цепи событий попадание-распад и попадание-распад-распад в одном и том же пикселе кремниевого детектора.

Proton decay of ^{108}I and its significance for the termination of the astrophysical rp -process



Все распады без каких-либо отборов.

Proton decay of ^{108}I and its significance for the termination of the astrophysical rp -process



Все распады и парциальные распады по определенным каналам.

Proton decay of ^{108}I and its significance for the termination of the astrophysical rp -process

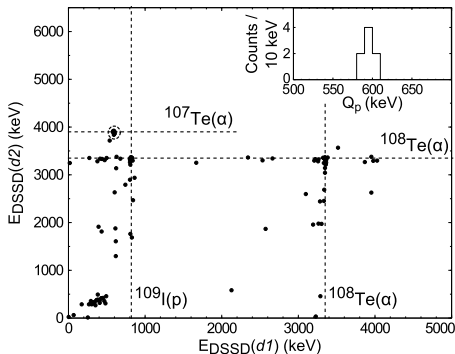


Fig. 4. Energy-energy correlation matrix for two subsequent decay events in R - $d1$ - $d2$ chains, when the R - $d1$ and $d1$ - $d2$ time differences are less than 130 ms and 18 ms, respectively. The inset provides the energy spectrum of the newly observed ^{108}I proton decay events, which are highlighted with a dashed circle in the main panel. Due to a high count rate in the DSSD and the long half-life, ^{108}Te α -decay events self-correlate randomly. The dashed lines mark the energies of selected, previously identified, charged-particle decay activities in this region.

Proton decay of ^{108}I and its significance for the termination of the astrophysical rp -process

Table 1

Q values, half-lives $T_{1/2}$, and mass excesses Δ obtained in the present study compared to the literature values.

Quantity	This work	AME2016 [31,38,39]	Other studies	
$Q_p(^{108}\text{I})$ (keV)	597(13)	600(110)	≥ 240	[19]
$Q_p(^{104}\text{Sb})$ (keV)	510(20)	510(100)	$\lesssim 600$	[26]
			≥ 150	[19]
			≤ 520	[19]
			$\lesssim 550$	[26]
$Q_\alpha(^{108}\text{I})$ (keV)	4097(10)	4100(50)	4099(5)	[26]
$Q_\alpha(^{107}\text{Te})$ (keV)	4007(10)	4008(5)	3982(16)	[40]
			4012(10)	[32]
$Q_\alpha(^{112}\text{Cs})$ (keV)	3940(20)	3930(120)	≥ 3830	[19]
			≤ 4210	[19]
			$\lesssim 3940$	[29]
$T_{1/2}(^{107}\text{Te})$ (ms)	3.6(2)	3.1(1)	$3.6^{+0.6}_{-0.4}$	[40]
			3.1(1)	[29]
$T_{1/2}(^{108}\text{I})$ (ms)	26.4(8)	36(6)	36(6)	[29]
$\Delta(^{104}\text{Sb})$ (MeV)	-59.17(8)	-59.17(12)		
$\Delta(^{108}\text{I})$ (MeV)	-52.65(8)	-52.65(13)		

Proton decay of ^{108}I and its significance for the termination of the astrophysical rp -process

Для начала рассмотрим сам йод 108. В сферической модели оболочек квазиклассическое приближение дает парциальное время жизни 150 мс и 70 с для вылета из d и g состояния, соответственно. Полученное в работе значение 5 с находится ровно между этими, то есть с уверенностью можно сказать лишь что состояния сильно смешиваются. Однако можно предположить, что деформация йода 108 примерно такая, как у 109, а одиночные протон и нейтрон располагаются на смесях $\frac{1}{2}^{+}$ и $\frac{3}{2}^{+}$ по схеме Нильсона. Учитывая ожидаемый спин Te 107, получается, что преобладать должен $l = 2$ протон.

Эта статья не может похвастаться прорывным результатом, но, мне кажется, она все равно хорошо демонстрирует производимую на ATLAS работу.

- Использование CARIBU для получения и изучения нейтроноизбыточных ядер при низких энергиях.
- Модернизация сверхпроводников и увеличение максимальной энергии для получения новых радиоактивных изотопов на лету в реакциях с большой передачей импульса.
- Переход на сверхпроводники в источниках ионов для увеличения интенсивности пучков стабильных ядер и ядер, образующихся на лету.
- Создание генератора нейтронов и замена калифорния в CARIBU на тонкую фольгу из актинидов, которые будут испытывать вынужденное деление под действием нейтронов из генератора.
- Внедрить стабильные пучки в интервалы между пучками от CARIBU, что позволит увеличить время работы установки на 35-50%.