

Совещание по физике тяжелых ионов
Санкт-Петербург, Россия, 2022



**Постановка экспериментов по изучению
гамма-излучения ядер
в цепочках альфа-распада изотопа ^{288}Mc**

Свирихин Александр

Лаборатория Ядерных Реакций им. Г.Н. Флерова,
ОИЯИ, Дубна, Россия

- Мотивация: изучение свойств распада ($\alpha, \beta(\text{ЕС}), \gamma, \text{СЕ}$), гамма-переходы, изомерия, идентификация Z.
- Экспериментальные подходы: получение изучаемых ядер, детектирующие системы.
- Постановка эксперимента в ЛЯР (Фабрика СТЭ): пучок ионов, сепаратор, детекторы, условия проведения экспериментов.
- Выводы.

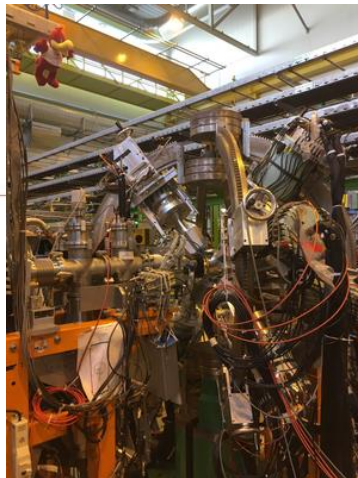
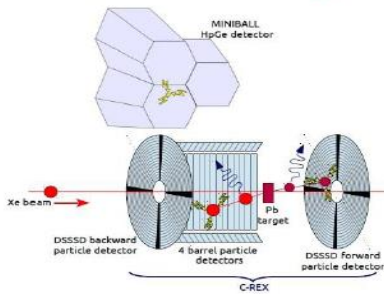
Интерес к γ -излучению тяжелых и сверхтяжелых элементов (СТЭ)

- Поскольку операторы γ -распада хорошо известны, то выявить детали структуры ядра позволяет исследование γ -излучения атомных ядер. В области тяжелых ядер наиболее распространенным методом гамма спектроскопии является измерение спектров γ -квантов и конверсионных электронов (CE) при α - или β -распаде основных и изомерных состояний в атомных ядрах, кулоновском возбуждении атомных ядер с использованием экзотических пучков, гамма распаде изомеров, возбуждаемых в ядерных реакциях.
- Исследования спектров, связанных с различными типами возбуждений, позволяет делать выводы о характере и симметрии остаточных взаимодействий в ядрах, форме ядра в основном и возбужденных состояниях ядер, свойствах колебаний и вращений в атомных ядрах, взаимодействию коллективных и одно-частичных степеней свободы, структуре волновых функций основного и возбужденных состояний атомных ядер.
- Дополнительный бонус при изучении СТЭ - идентификация Z по характеристическому рентгеновскому излучению атомов СТЭ, вызываемому радиоактивными процессами в изучаемых ядрах, преимущественно: β -(EC), γ -распад (вылет конверсионных электронов (CE)).

Экспериментальные подходы

Coulomb excitation setup at ISOLDE MINIBALL + C-REX

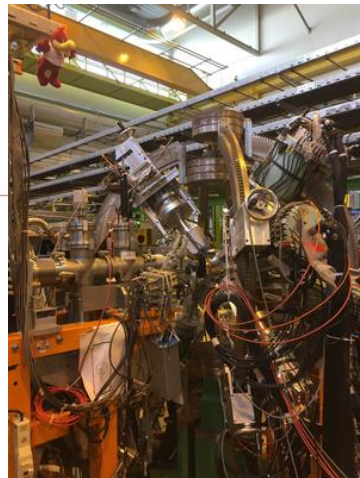
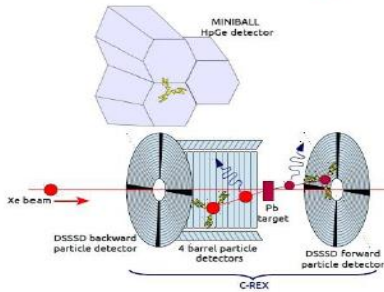
- ^{142}Xe : Cold Plasma Ion Source \rightarrow Clean beam
- ^{142}Xe beam: $1.2 (2) \cdot 10^5$ pps at 4.5 MeV/u
- ^{206}Pb target: $4 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}$ thickness
- In-flight γ -ray emission \rightarrow **Doppler correction!**



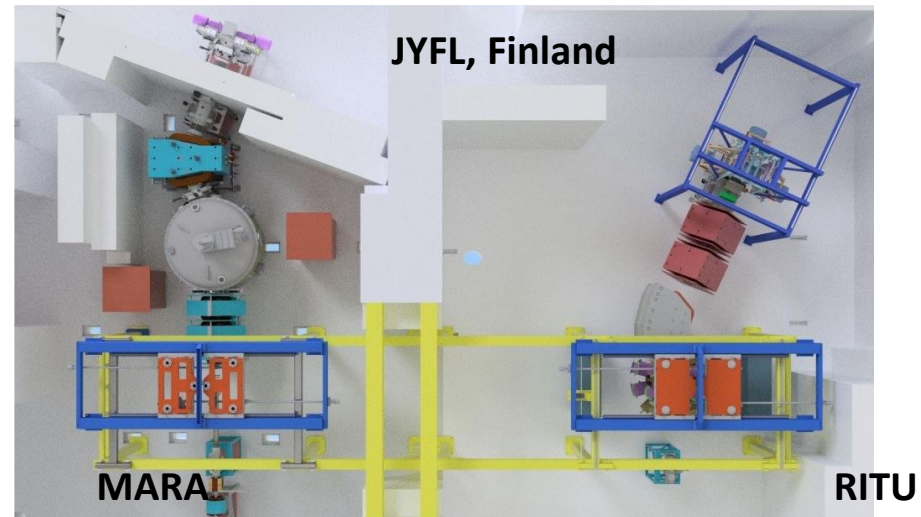
Экспериментальные подходы

Coulomb excitation setup at ISOLDE MINIBALL + C-REX

- ^{142}Xe : Cold Plasma Ion Source \rightarrow Clean beam
- ^{142}Xe beam: $1.2 (2) \cdot 10^5$ pps at 4.5 MeV/u
- ^{206}Pb target: $4 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}$ thickness
- In-flight γ -ray emission \rightarrow **Doppler correction!**

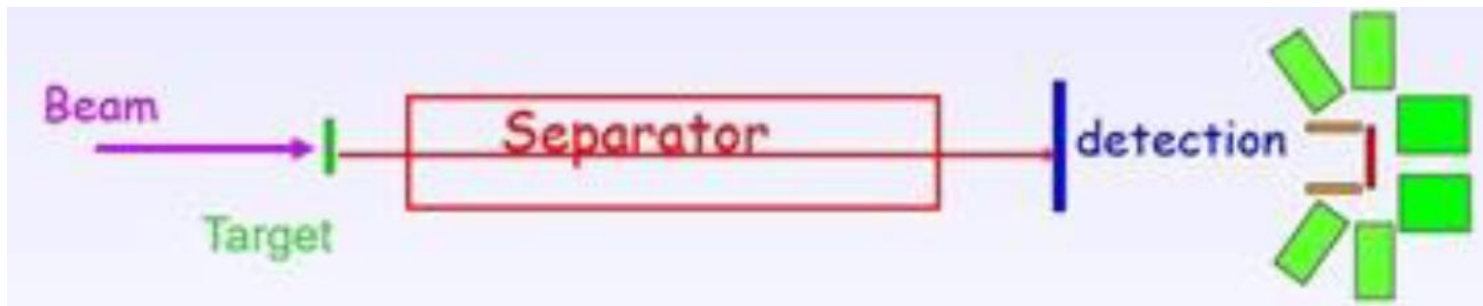


Recoil decay tagging (RDT) method



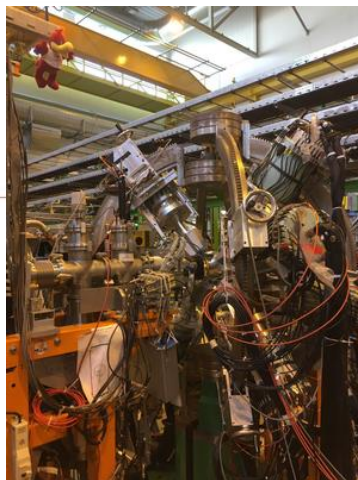
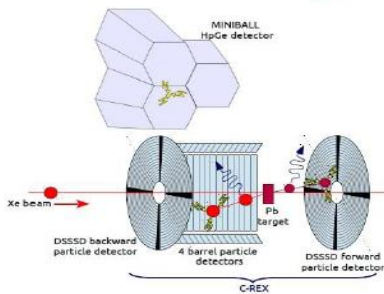
Экспериментальные подходы

Decay spectroscopy (DS) method

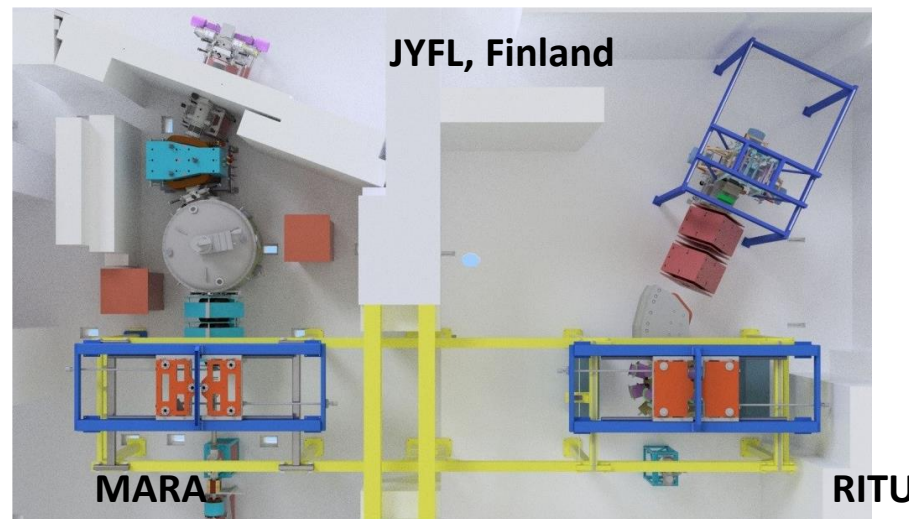


Coulomb excitation setup at ISOLDE MINIBALL + C-REX

- ^{142}Xe : Cold Plasma Ion Source \rightarrow Clean beam
- ^{142}Xe beam: $1.2 (2) \cdot 10^5$ pps at 4.5 MeV/u
- ^{206}Pb target: $4 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}$ thickness
- In-flight γ -ray emission \rightarrow **Doppler correction!**

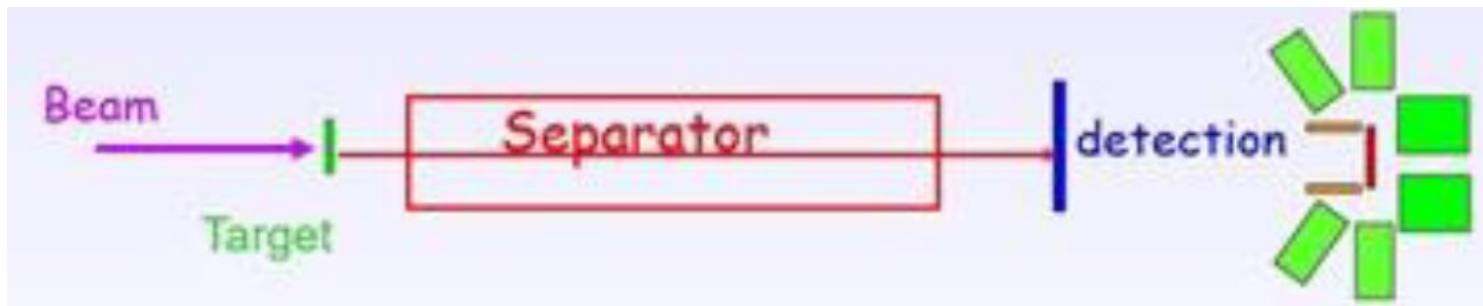


Recoil decay tagging (RDT) method



Экспериментальные подходы

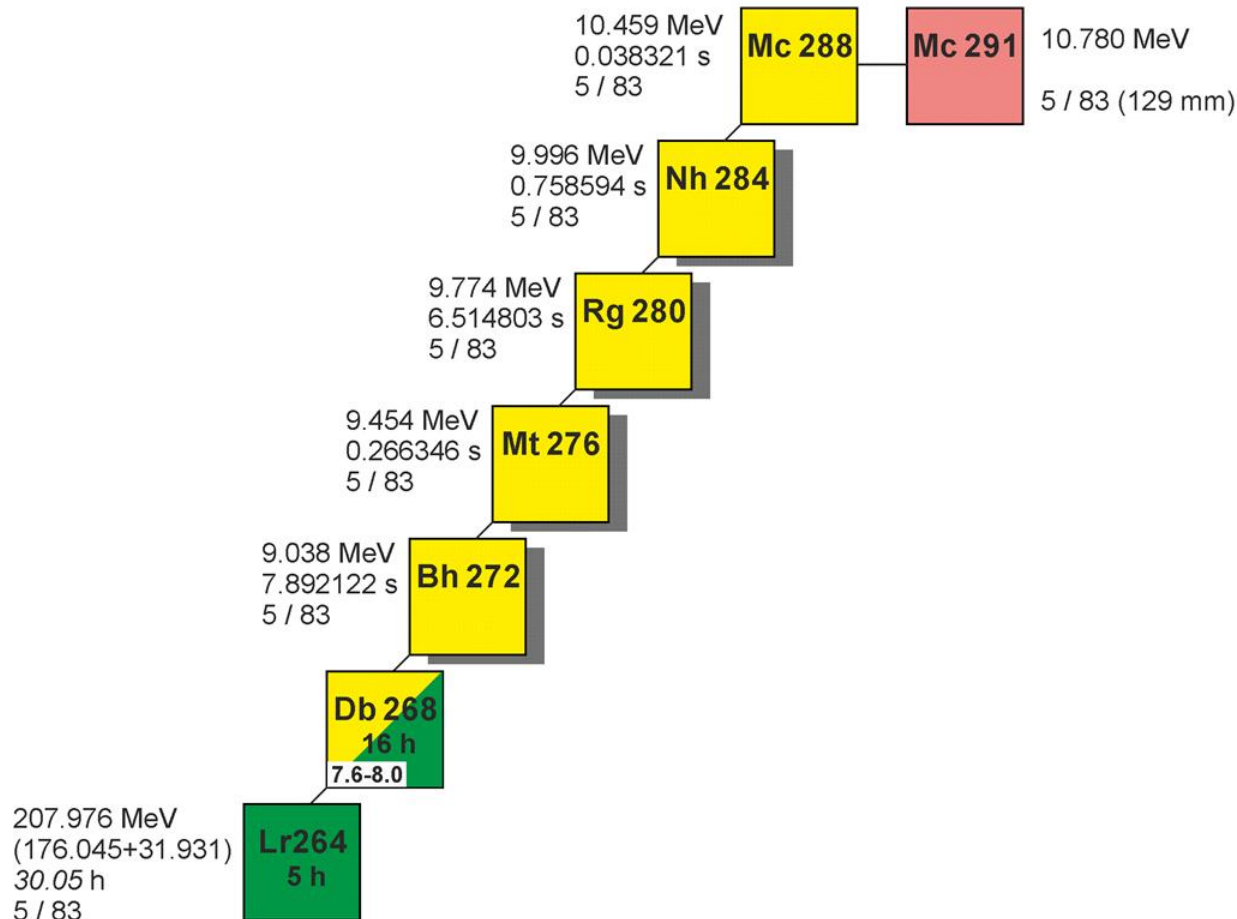
Decay spectroscopy (DS) method



Сепаратор	тип	Детекторы
BGS (Беркли, США)	$Q_v D_h D$ (газ – He)	C3 (corner-cube-clover) 64x64 mm ² DSSSD x 3, 3 x HPGe clovers
RITU (JYFL, Финляндия)	$Q_v D Q_h Q_v$ (газ – He)	New (2022) 128x48 mm ² DSSSD, 3 x HPGe, 1 x HPGe clover
TASCA (GSI, Германия)	$D Q_h Q_v$ (газ – He)	TASISpec DSSSD 60x60 mm ² , BOX-DSSSD, 5 x HPGe
SHELS (ЛЯР)	Q-Q-Q-E-D-D-E-Q-Q-Q-D (вакуум)	GABRIELA DSSSD 100x100 mm ² , BOX-DSSSD, 5 x HPGe Clovers
GRAND (ЛЯР, «Фабрика СТЭ»)	$Q_v D Q_{h(v)} Q_{v(h)} D$ (газ – H, He)	

Реакция $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am} = 3n + ^{288}\text{Mc}$

$^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$

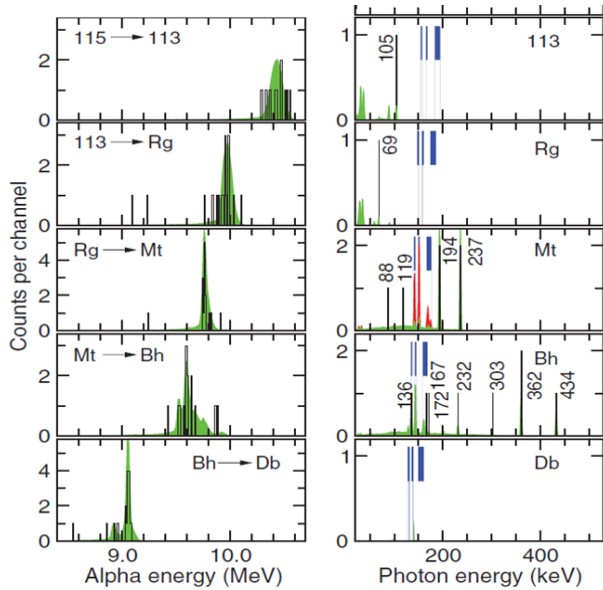


**55 new decay chains
(+31 in 2003, 2010-2012)**

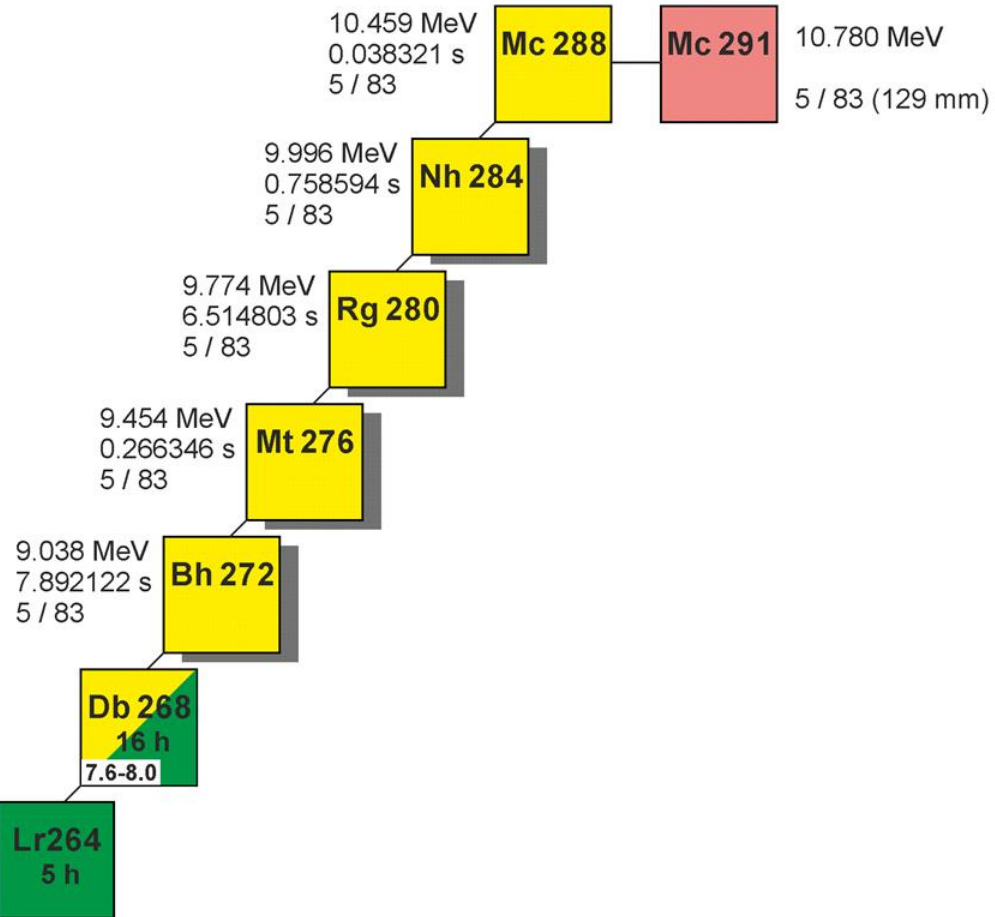
SHE Factory, DGFRS II (2021)

Реакция $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am} = 3n + ^{288}\text{Mc}$

$^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$



D. Rudolph *et al.*, PRL 111, 112502 (2013)
TASCA + TASISpec
 22 «цепочки» - 16 γ -квантов

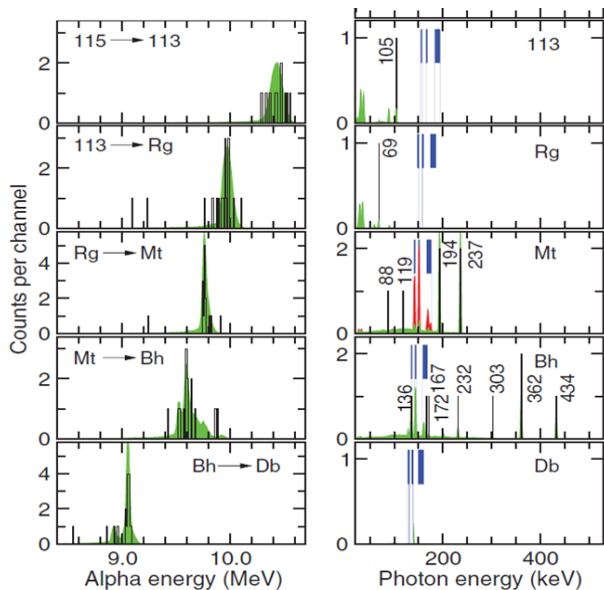


55 new decay chains
(+31 in 2003, 2010-2012)

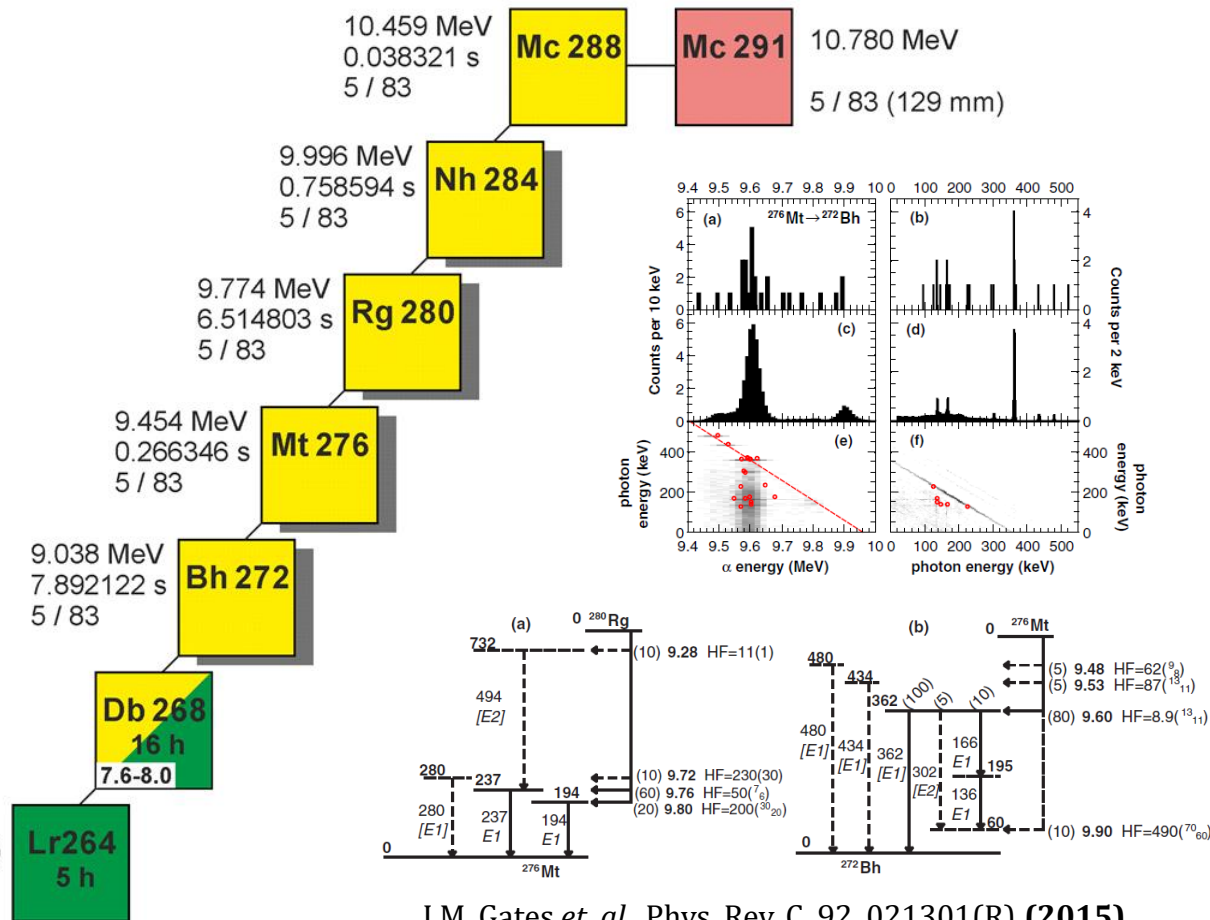
SHE Factory, DGFRS II (2021)

Реакция $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am} = 3n + ^{288}\text{Mc}$

$^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$



D. Rudolph *et. al.*, PRL 111, 112502 (2013)
TASCA + TISISpec
 22 «цепочки» - 16 γ -квантов

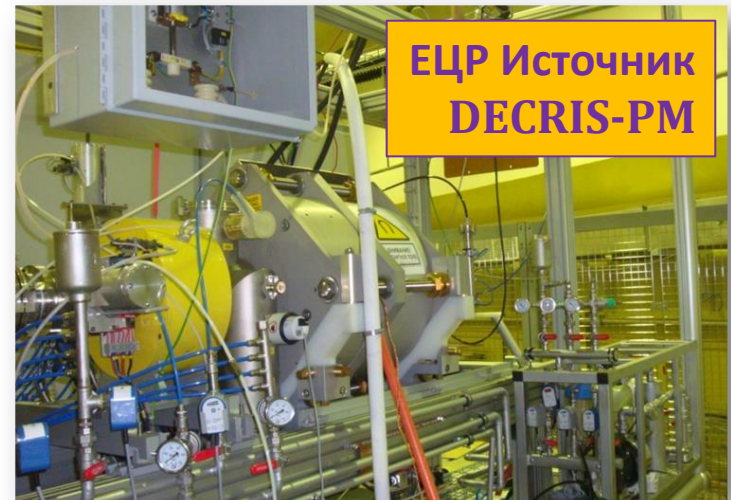


J.M. Gates *et. al.*, Phys. Rev. C. 92, 021301(R) (2015)
BGS + C3

**55 new decay chains
 (+31 in 2003, 2010-2012)**

SHE Factory, DGFRS II (2021)

Постановка эксперимента в ЛЯР (Фабрика СТЭ):



Ion	U-400		DC-280		U-400R	
	Energy (MeV/n)	I (pμA)	Energy (MeV/n)	I (pμA)	Energy (MeV/n)	I (pμA)
⁴⁰ Ar	3.8; 5.1	1.7	4 - 8	10	1 - 5.1	10
⁴⁸ Ca	3.7; 5.3; 8.9; 11; 17.7	1	4 - 8	7.7 (10)	1.6 - 19	2.5 - 1.5
⁵⁰ Ti	3.6; 5.1	0.4	4 - 8	2	1 - 18	1
⁵⁴ Cr	10; 13; 20	0.6	4 - 8	2.5	1-19	1
²³⁸ U	-	-	4 - 8	2-0.2	1.5 - 15	1.5 - 0.1

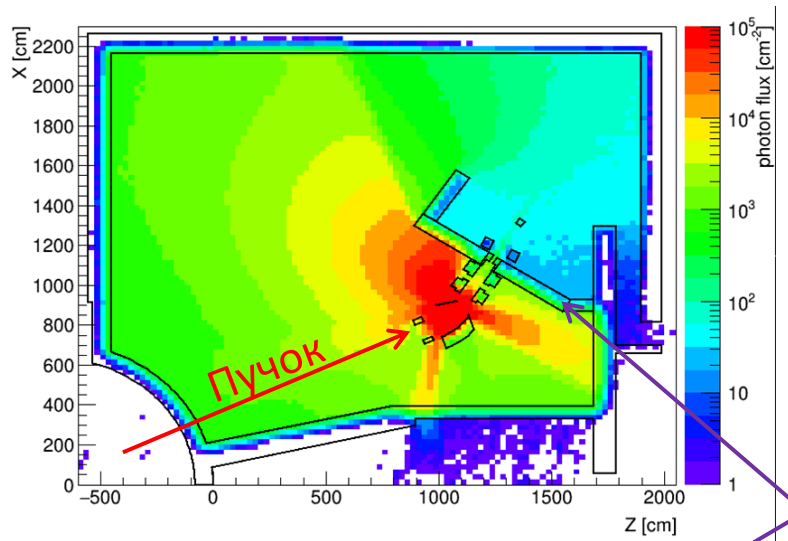
²⁴³Am – мишень Ø150 мм
Ограничение тока – 3 pμA !

Постановка эксперимента в ЛЯР (Фабрика СТЭ):

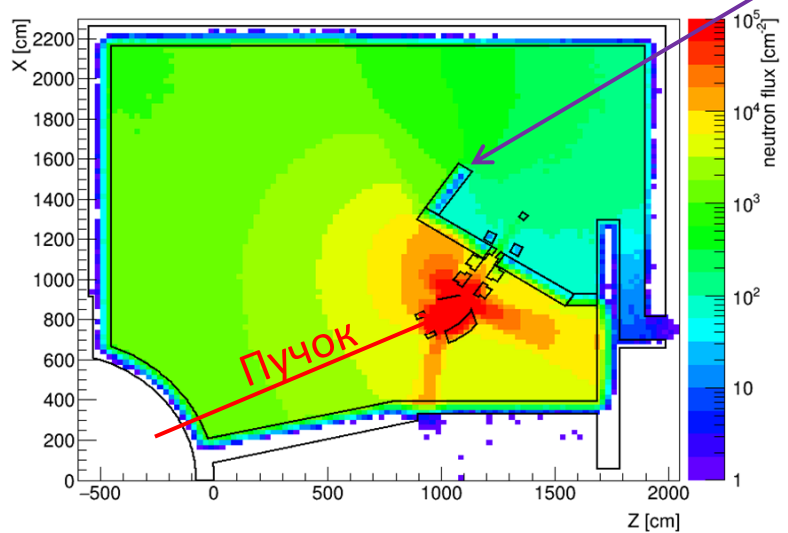


Постановка эксперимента в ЛЯР (Фабрика СТЭ):

Пучок ^{48}Ca (242 МэВ, 7 $\mu\text{А}$)

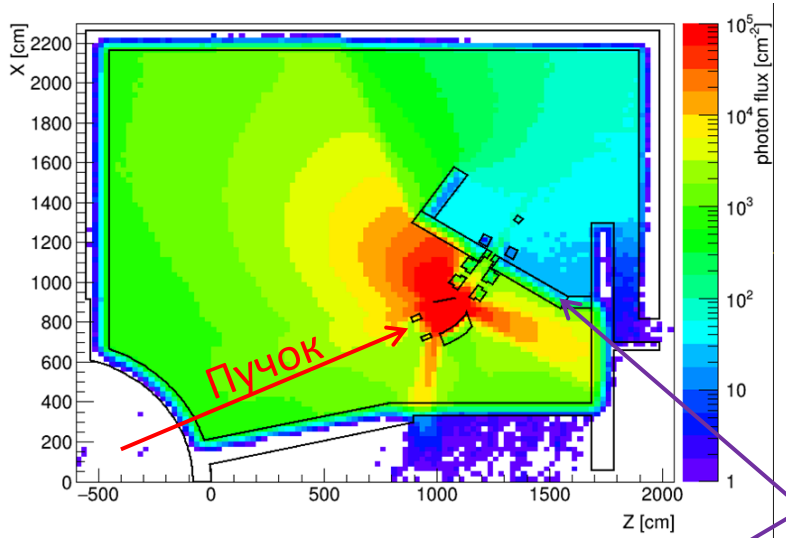


Стена из
ж/б блоков

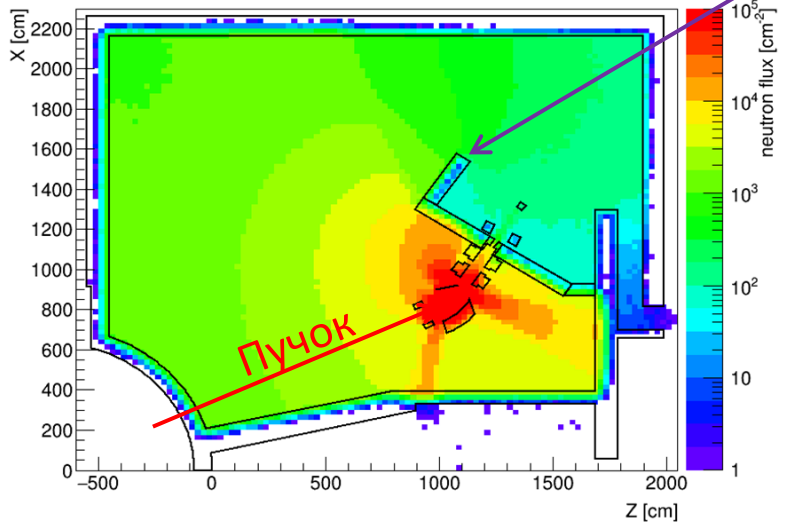


Постановка эксперимента в ЛЯР (Фабрика СТЭ):

Пучок ^{48}Ca (242 МэВ, 7 $\mu\text{А}$)



Стена из ж/б блоков



350 kHz – счет на HPGe!

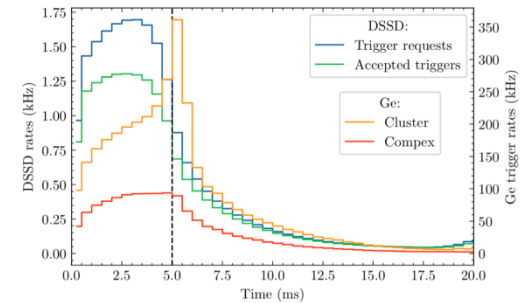
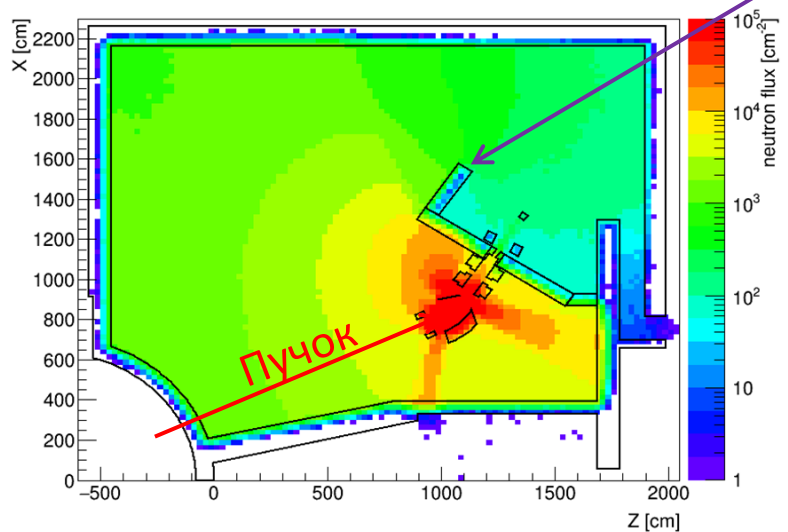
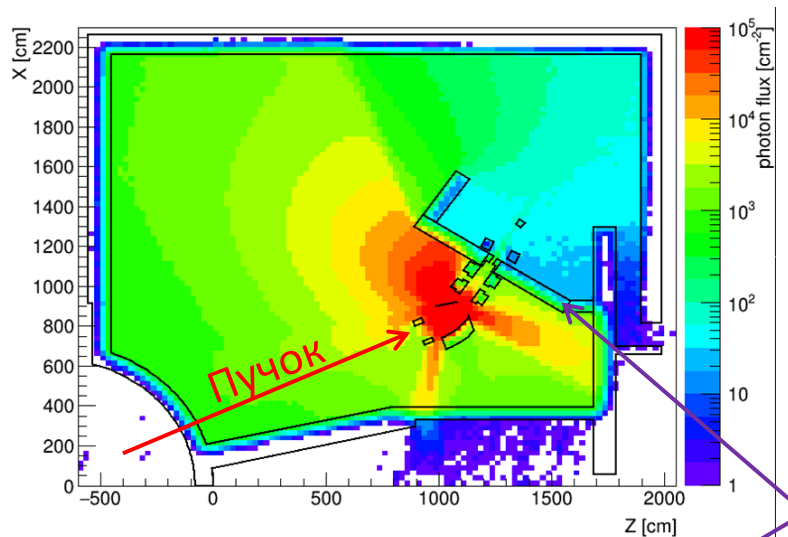


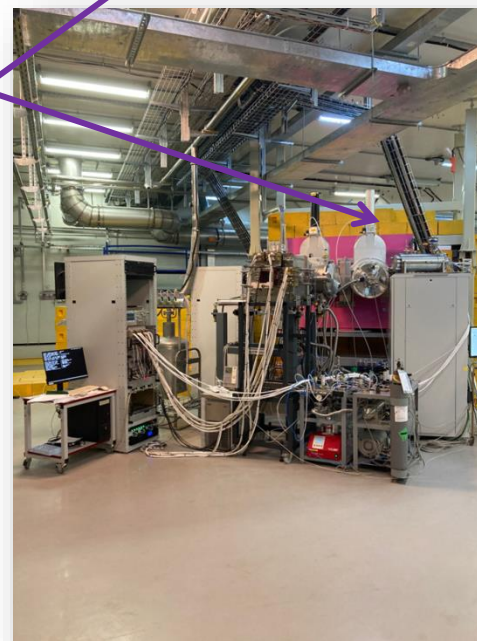
Figure 4.3: Rate of trigger requests and accepted triggers of the DSSDs (left axis) and Ge-trigger rates (right axis) for single crystals in the Cluster and Compex detectors as a function of time after the start of the beam pulse. End of beam pulse is denoted by the dashed vertical line. The beam was pulsed at 45 ns with a $\sim 3.2 \mu\text{A}$ intensity on the Pu target.

Постановка эксперимента в ЛЯР (Фабрика СТЭ):

Пучок ^{48}Ca (242 МэВ, 7 рмА)

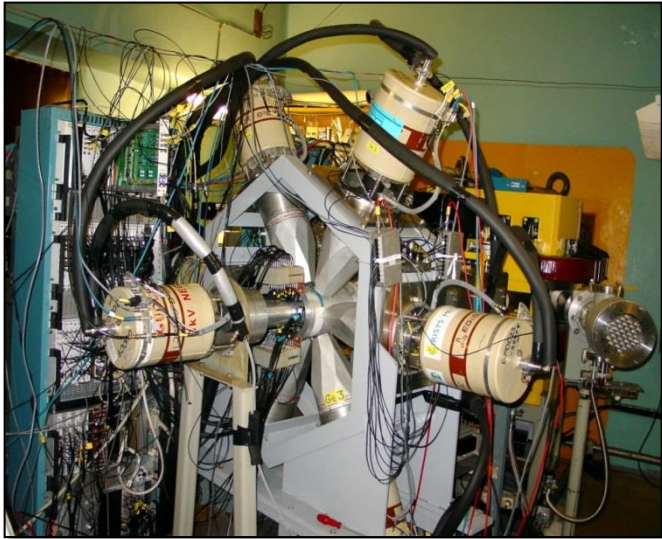


Стена из
ж/б блоков

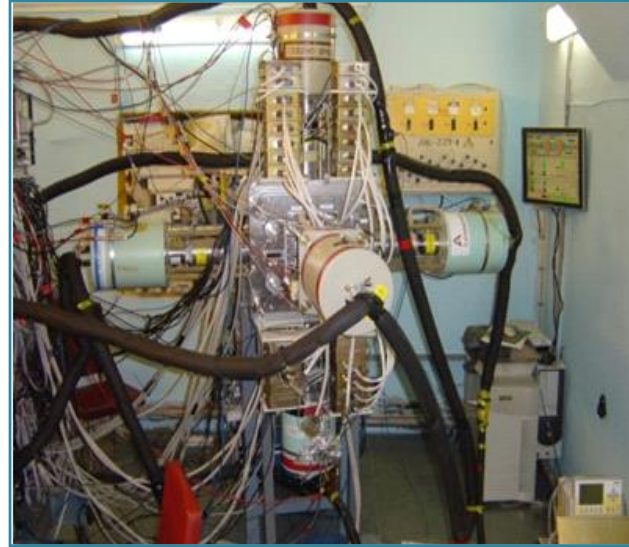


Постановка эксперимента в ЛЯР (Фабрика СТЭ):

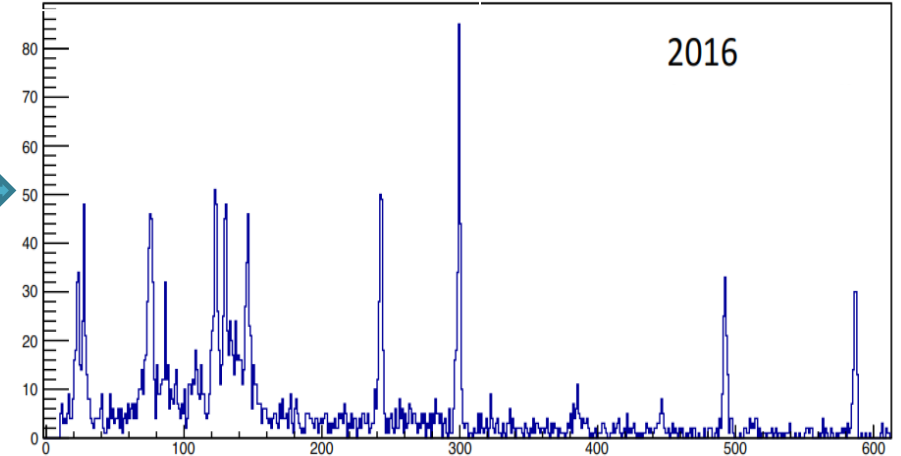
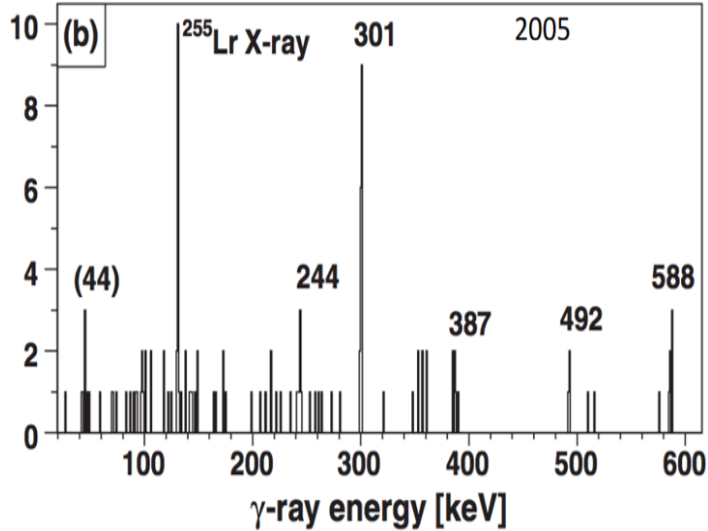
GABRIELA



GABRIELA 2.0



$^{48}\text{Ca}(^{209}\text{Bi}, 2n)^{255}\text{Lr}$ Доза пучка 1.4×10^{18}

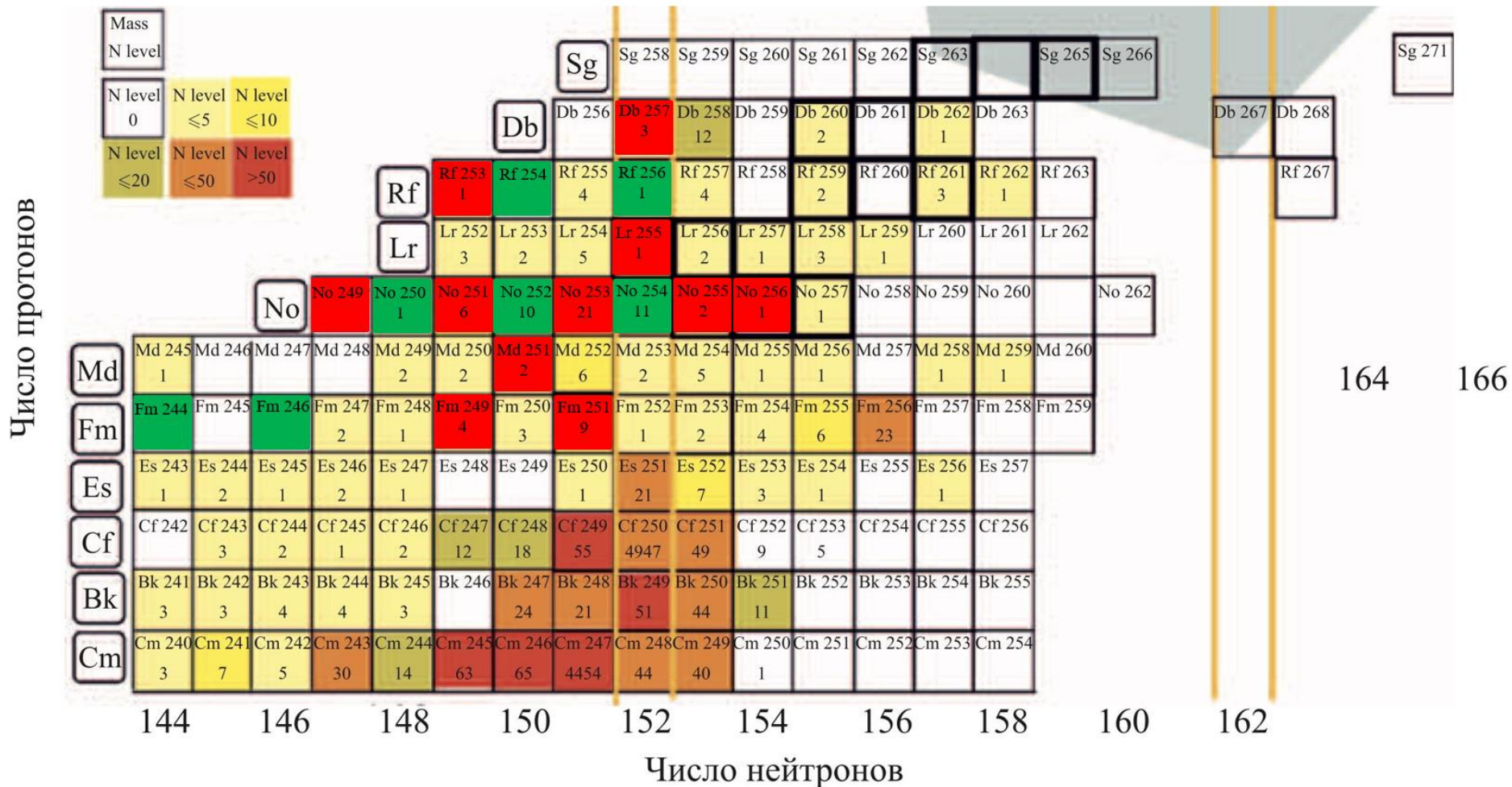


Постановка эксперимента в ЛЯР (Фабрика СТЭ):

VASSILISSA/SHELLS

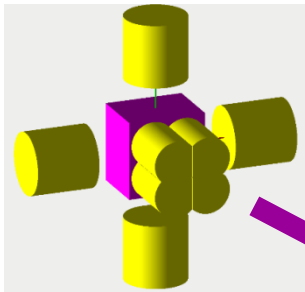
■ γ , EC, α

■ SF(TKE, neutron multiplicity)

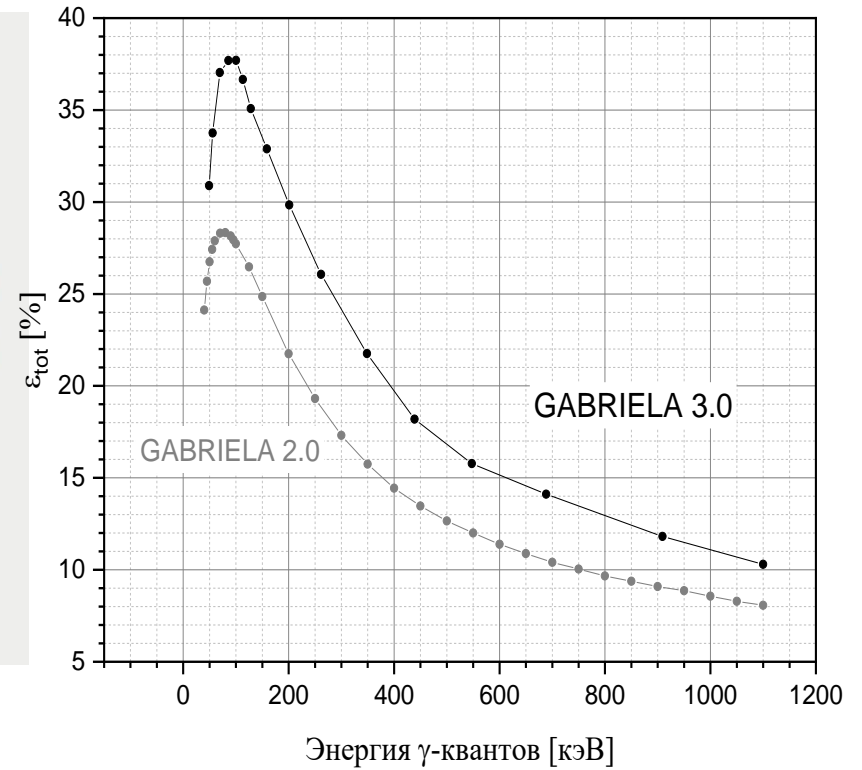
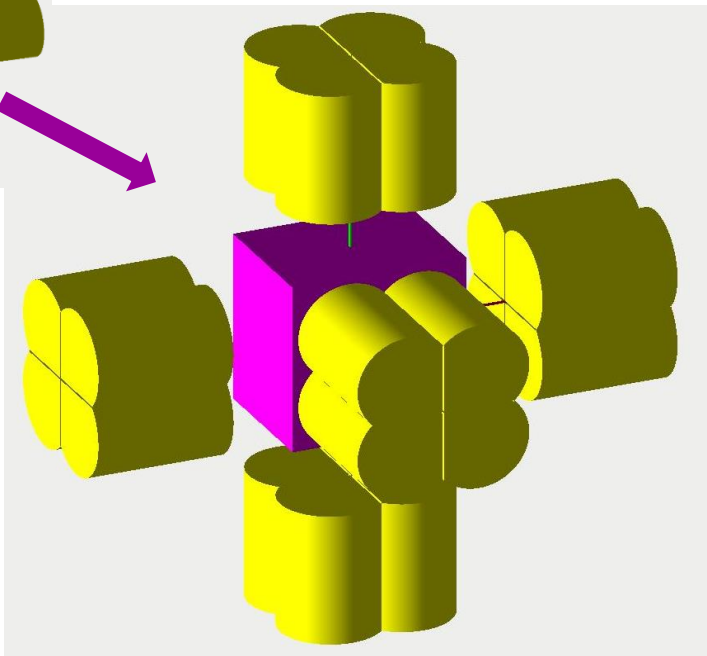


Постановка эксперимента в ЛЯР (Фабрика СТЭ):

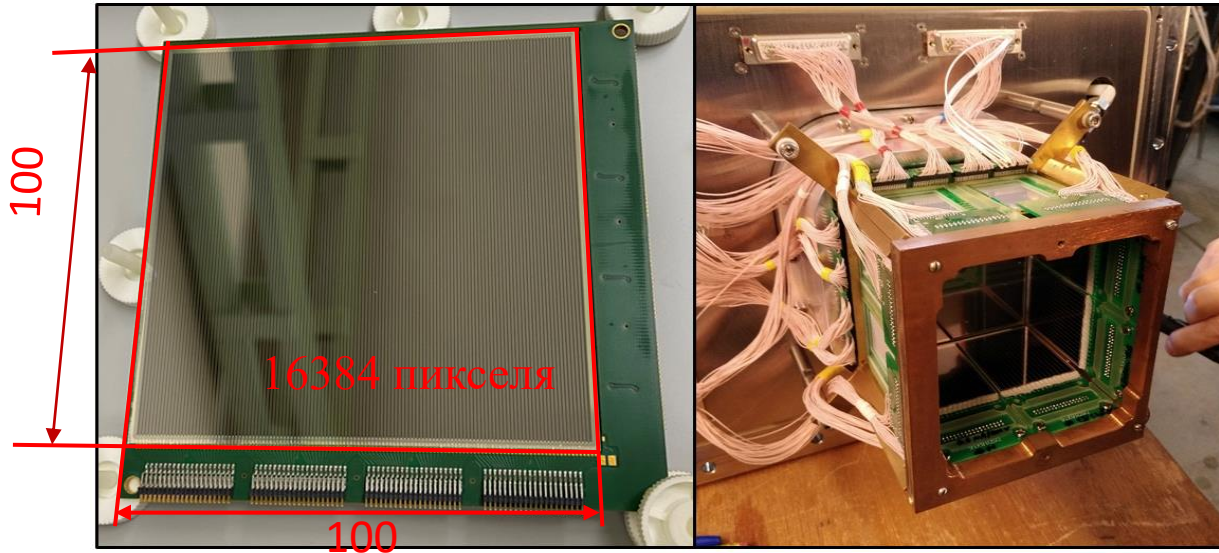
GABRIELA 2.0



GABRIELA 3.0



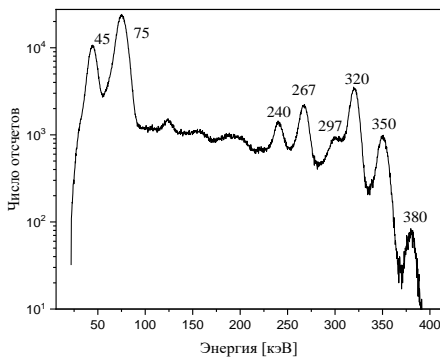
Постановка эксперимента в ЛЯР (Фабрика СТЭ):



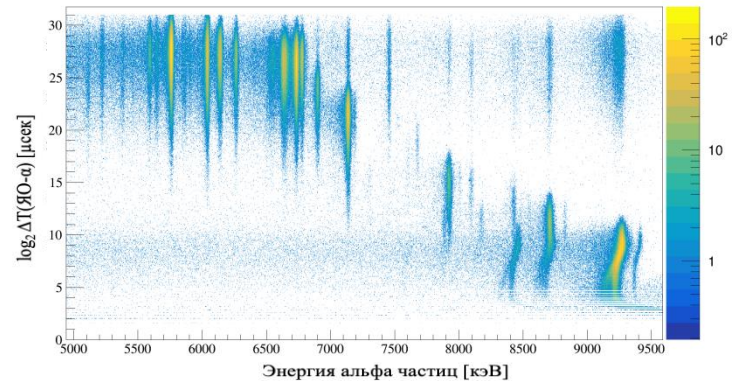
GABRIELA 2.0

	Энергетическое разрешение (ПШПВ), кэВ	Пороги, кэВ
Фокальный DSSD детектор	10.8±0.6 кэВ для энергии 320 кэВ (КЭ); 16.5±0.8 кэВ для энергии 7.92 МэВ (альфа)	40-60
Боковые детекторы	14.4±1.2 кэВ для 320 кэВ (КЭ); 120±11 кэВ для энергии 7.92 МэВ (альфа)	60-100

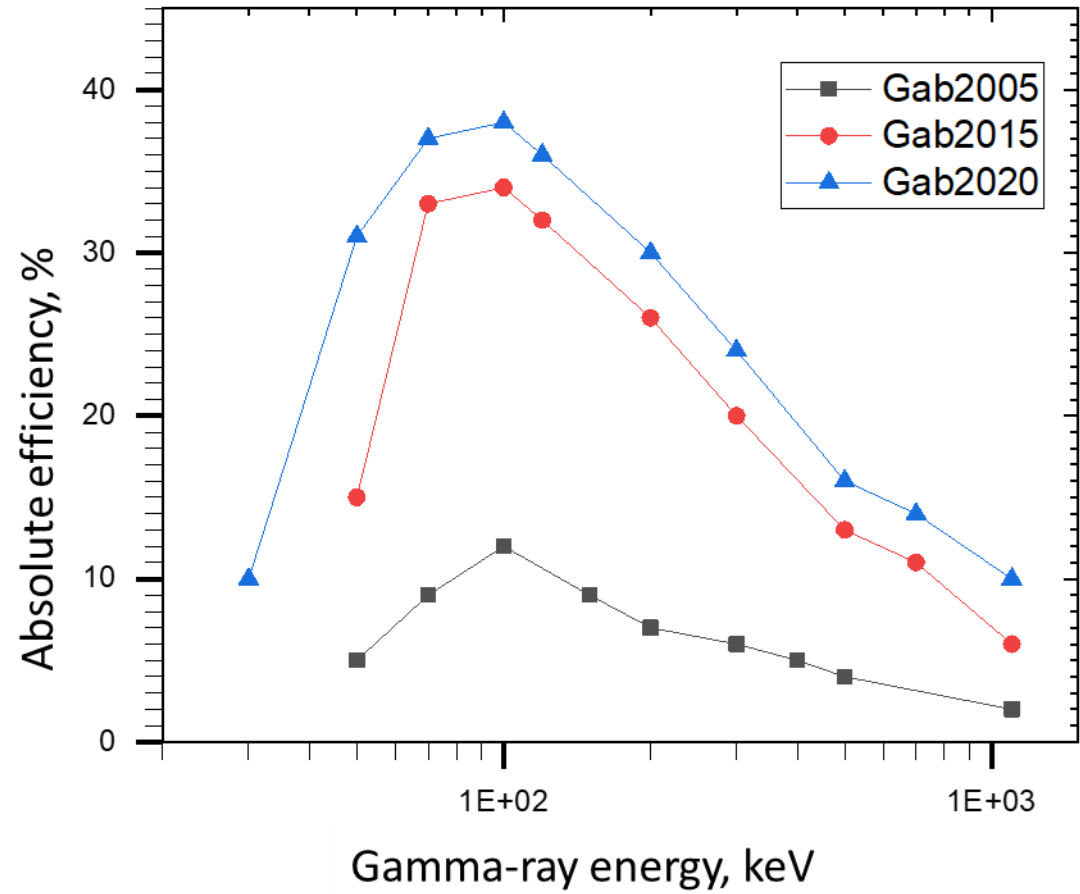
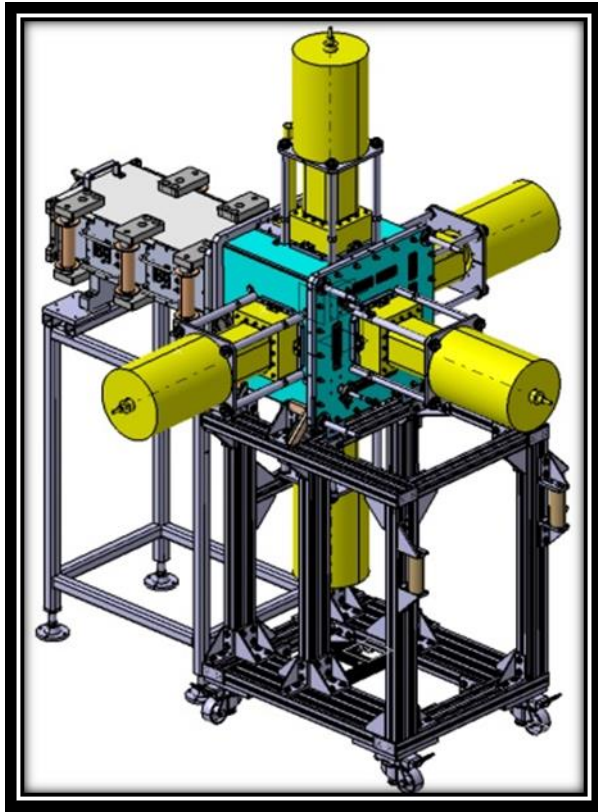
Энергетический спектр боковых детекторов в логарифмическом масштабе для электронов, испущенных источником ^{133}Ba



Энергетический спектр альфа-частиц реакции $^{48}\text{Ca}+^{174}\text{Yb}$ в зависимости от разницы времен между зарегистрированными ЯО и последующими альфа-распадами в одном и том же пикселе.



Постановка эксперимента в ЛЯР (Фабрика СТЭ):



Выводы:

- Проведение эксперимента по изучению гамма-излучения ядер в цепочках альфа-распада изотопа ^{288}Mc на «Фабрике СТЭ» возможно уже в 2023 году (после окончания испытаний детектирующей системы GABRIELA 3.0 на SHELS).
- Принимая во внимание рабочие параметры ускорителя ДЦ-280 и ранее проведенные эксперименты на ГНС-2, прогноз по результатам эксперимента – 3-4 события ^{288}Mc в сутки.
- За 100 дней можно синтезировать до 300 «цепочек» ^{288}Mc , для которых можно зарегистрировать не менее 220 γ -квантов.



Спасибо за внимание!