



Фабрика Сверхтяжёлых Элементов: итоги и перспективы.

Н.Д. Коврижных

**Объединенный институт ядерных исследований
Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова**



*Семинар отдела ОЭПВАЯ НИИЯФ и
кафедры Общей ядерной физики ФФ МГУ*

02 апреля 2026

Область сверхтяжелых ядер. Теоретические предсказания

The Mechanism of Nuclear Fission

NIELS BOHR

University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark, and The Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey

AND

JOHN ARCHIBALD WHEELER



Стабильность ядер относительно деления



Н.Бор



Дж.А. Уилер

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 78, NUMBER 1

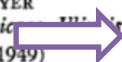
APRIL 1, 1950

Nuclear Configurations in the Spin-Orbit Coupling Model. I. Empirical Evidence

MARIA GOEPPERT MAYER

Argonne National Laboratory, Chicago

(Received December 7, 1949)



Магические числа



М. Гёпперт-Майер

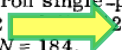
CLOSED SHELLS FOR $Z > 82$ AND $N > 126$ IN A DIFFUSE POTENTIAL WELL

A. SOBICZEWSKI*, F. A. GAREEV and B. N. KALINKIN

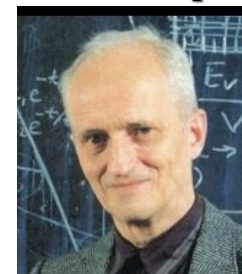
*Joint Institute for Nuclear Research,
Laboratory of Theoretical Physics, Dubna, USSR*

Received 22 July 1966

Proton and neutron single-particle levels calculated for $Z \geq 82$ and $N \geq 126$. Magic numbers are $Z = 114$ and $N = 184$.



Новые магические числа $Z=114$ и $N=184$



А. Собичевский

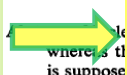
SHELL EFFECTS

IN NUCLEAR MASSES AND DEFORMATION ENERGIES

V. M. STRUTINSKY

*I. V. Kurchatov Institute of Atomic Energy
Moscow, USSR*

Received 20 October 1966



Оболочечные поправки к жидкокапельной энергии ядра

whereas it is supposed to calculate the shell-model correction to the "liquid drop energy" of the nucleus as a function of the occupation number and deformation. A strong correlation between the shell correction and nucleon level density at the Fermi energy was observed. In magic and mid-shell nuclei the calculated deformation energy oscillates around the LDM value. Discussion of problems related to the deformation energy such as nuclear deformations, shell effects in nuclear masses, in deformed nuclei and in nuclear fission, etc. is presented. The role of nucleon pairing is discussed.



В.М. Струтинский

Остров Стабильности СТЭ

Фундаментальные вопросы:

Где границы существования ядерной материи

Где находятся области повышенной стабильности СТЯ – $Z_{\text{mag}} / N_{\text{mag}}$

Каковы радиоактивные свойства СТЯ – $T_{1/2}$, E_{α} , структура

Какими методами синтезировать СТЯ – слияние, передачи

Образуются ли СТЯ в процессе нуклеосинтеза

Существуют ли СТЯ в природе

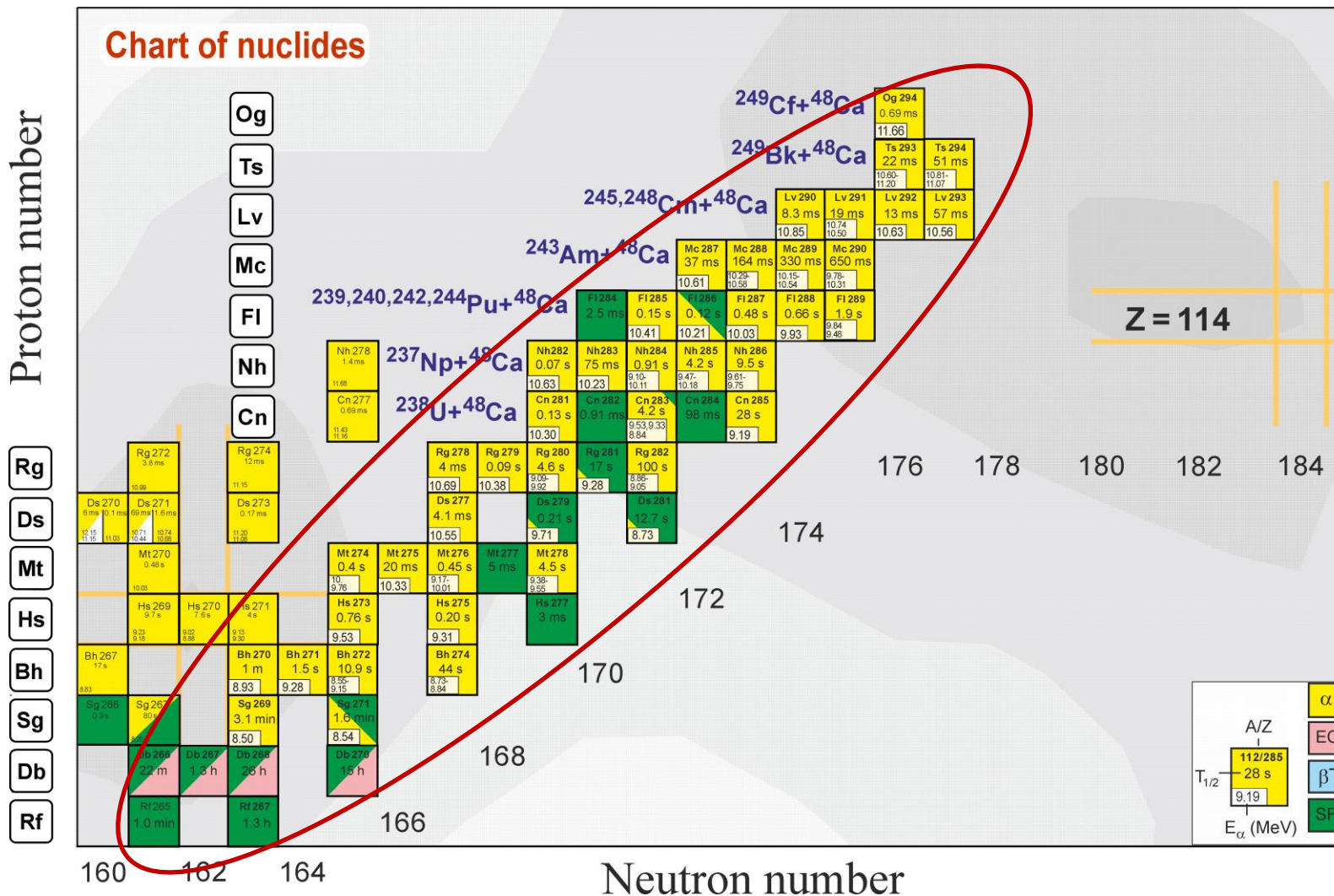
Какова электронная структура атомов СТЭ

До какой степени химические свойства соответствуют гомологам

...

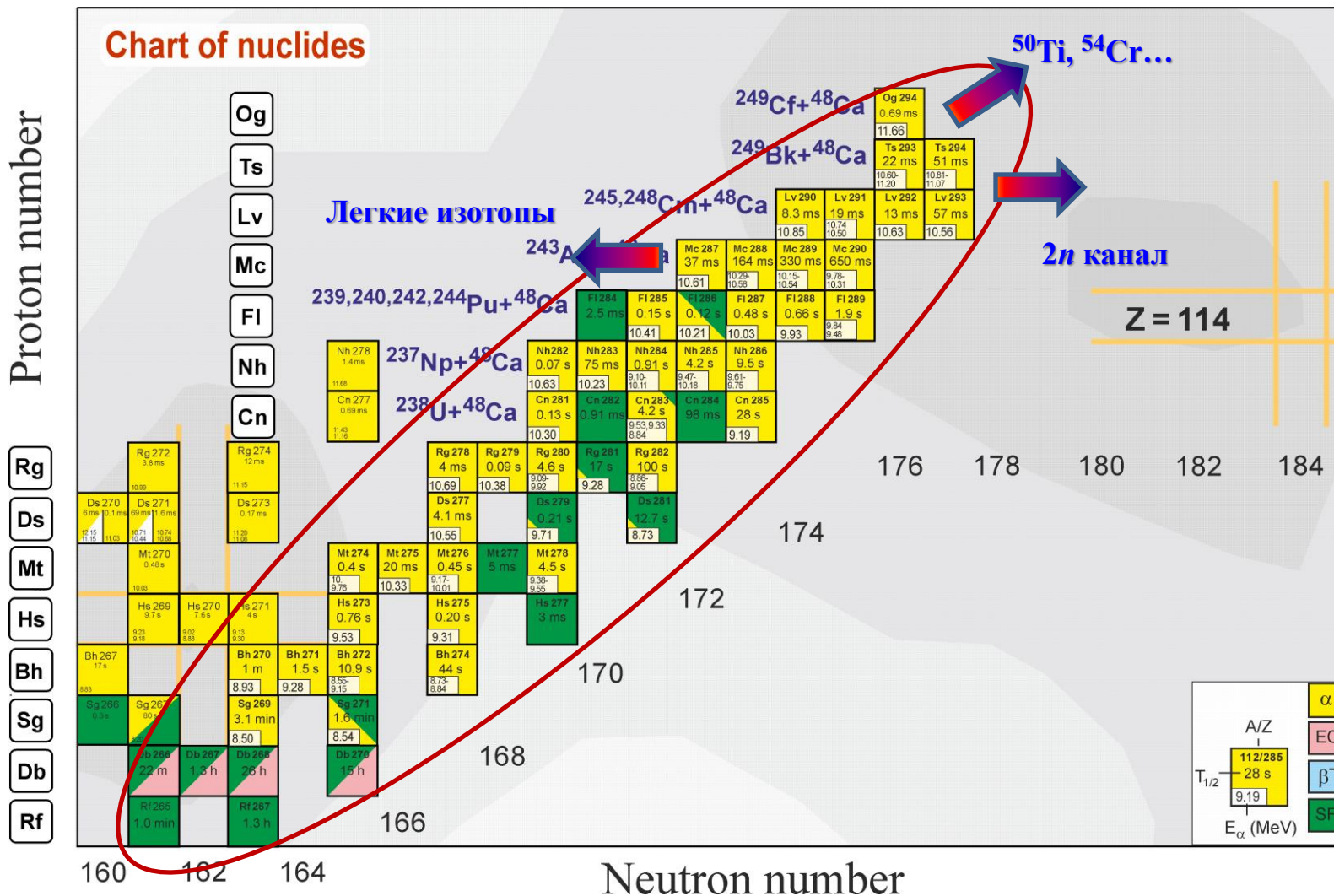
...

Область сверхтяжелых ядер

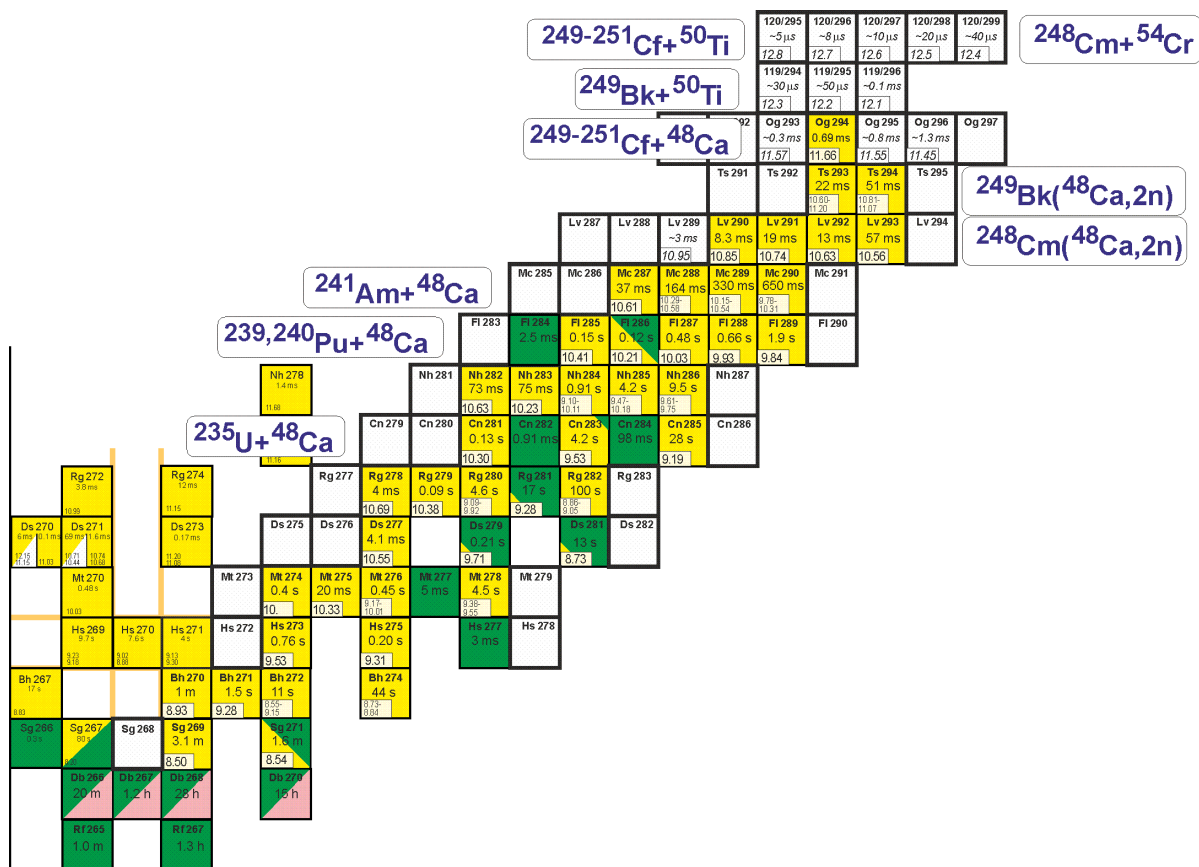


Область сверхтяжелых ядер

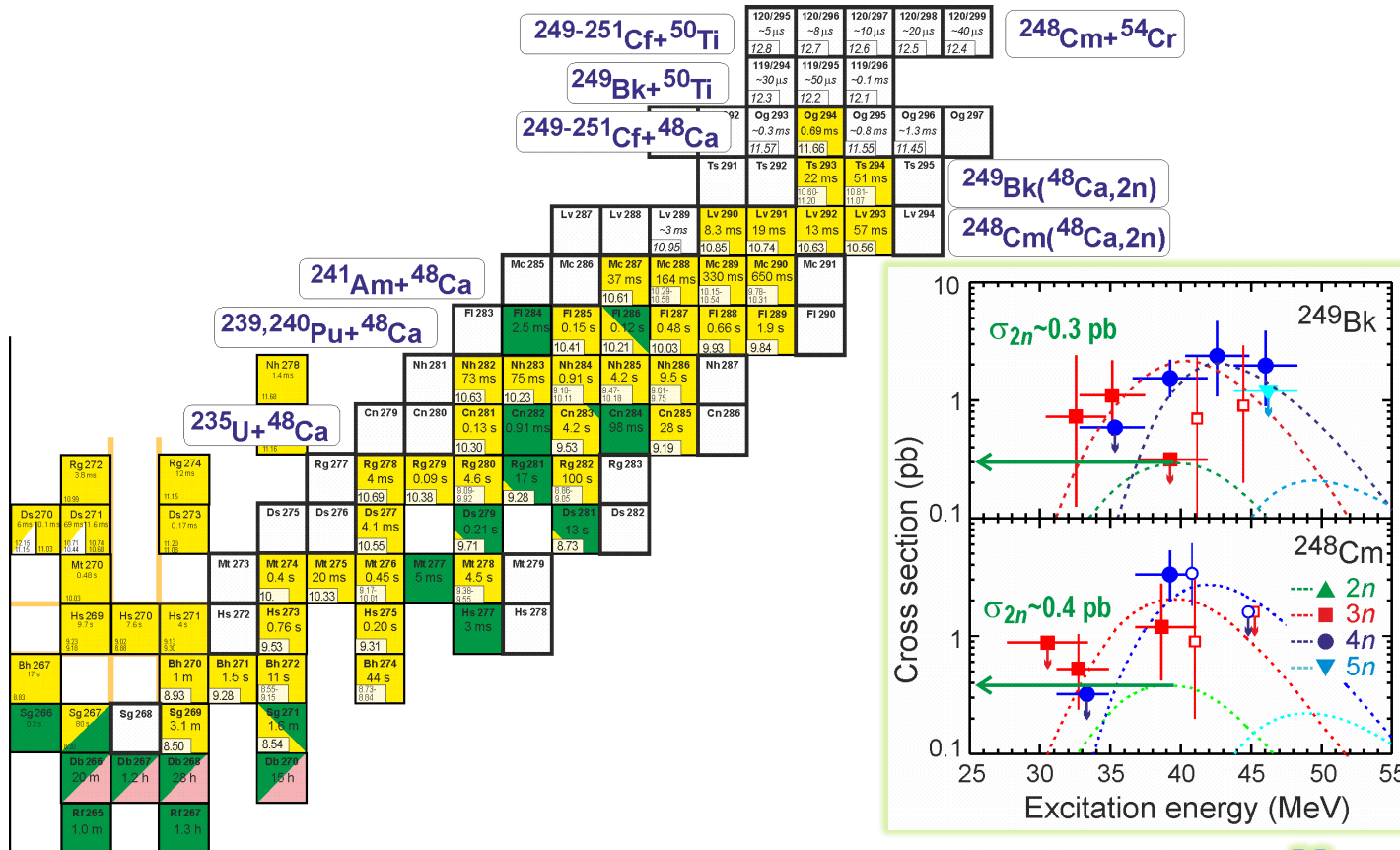
Необходимо расширять область синтезированных СТЯ



Падение сечений образования → повышение чувствительности эксперимента



Падение сечений образования → повышение чувствительности эксперимента



с увеличением N

Синтез элементов тяжелее 118?

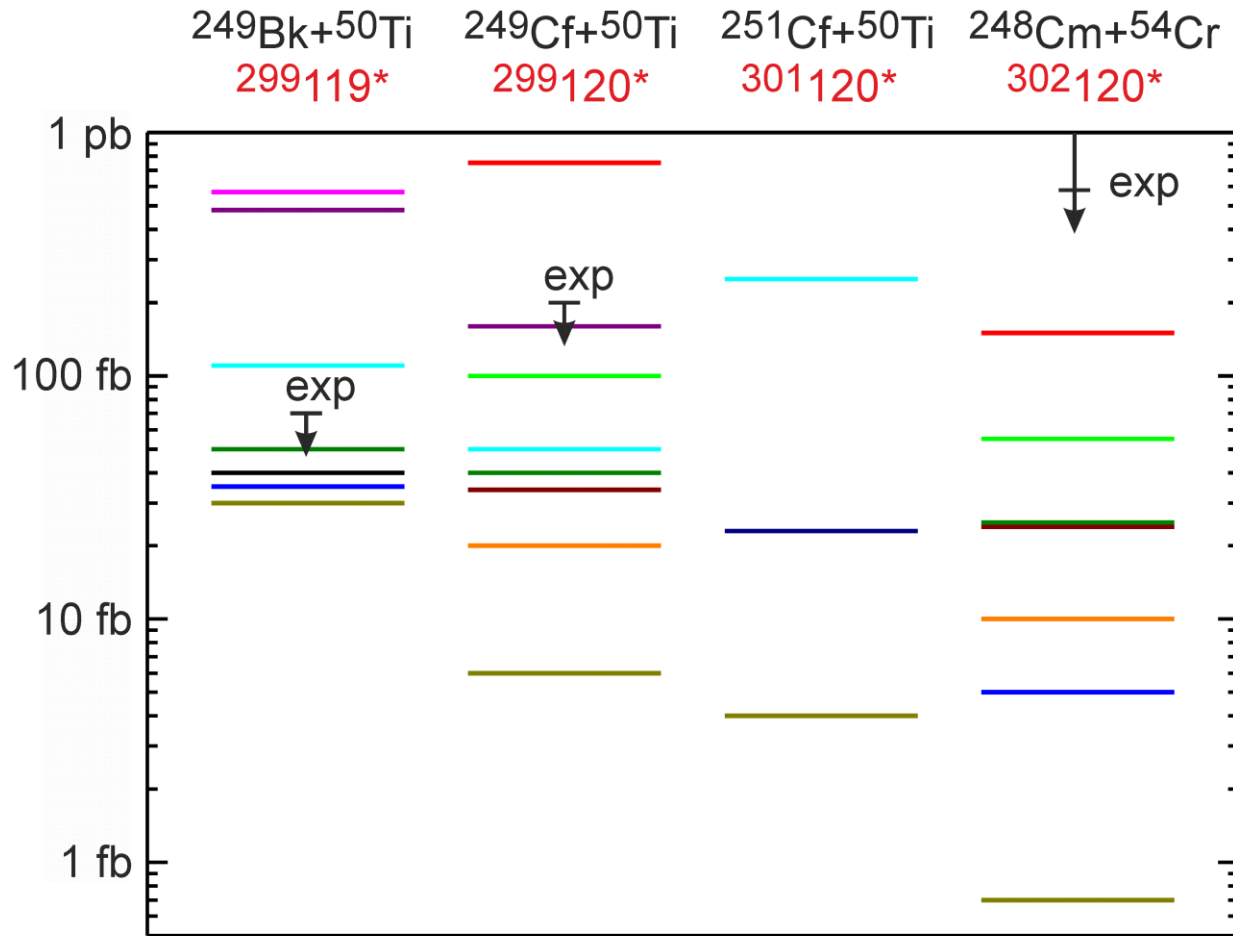
Самая тяжелая мишень: $^{249}\text{Cf} \rightarrow Z_{\text{max}} = 118$



➤ Тяжелые частицы (^{50}Ti , ^{54}Cr , ^{58}Fe , ^{64}Ni)

Необходимо существенное повышение эффективности эксперимента!

Предсказание сечений образования элементов 119 и 120



V.I. Zagrebaev *et al.*, Phys. Rev. C **78**, 034610 (2008)

K. Siwek-Wilczynska *et al.*, Int. J. Mod. Phys. E **19**, 500 (2010).

A.K. Nasirov *et al.*, Phys. Rev. C **84**, 044612 (2011).

Ning Wang *et al.*, Phys. Rev. C **84**, 061601 (2011).

Nan Wang *et al.*, Phys. Rev. C **84**, 061601 (2011).

Z.H. Liu *et al.*, Phys. Rev. C **84**, 031602(R) (2011).

K. Siwek-Wilczynska *et al.*, Phys. Rev. C **86**, 014611 (2012).

A.N. Kuzmina *et al.*, Phys. Rev. C **85**, 014319 (2012).

Jinjuan Zhang *et al.*, Nucl. Phys. A **909**, 36 (2013).

Z.H. Liu, J.D. Bao, Phys. Rev. C **87**, 034616 (2013).

V.I. Zagrebaev, W. Greiner, Nucl. Phys. A **944**, 257 (2015).

G. G. Adamian *et al.*, Phys. Part. Nuc. **47**, 387 (2016).

**Фабрика сверхтяжелых элементов
(СТЭ) Factory:**

**Новый комплекс для исследований
сверхтяжелых ядер**

Задачи Фабрики СТЭ

- **Эксперименты при низких сечениях ($\sigma < 100$ фб)**
 - Синтез новых СТЭ в реакциях с ^{50}Ti , ^{54}Cr ...
 - Синтез новых изотопов СТЭ
 - Изучение свойств распада СТЯ
 - Изучение сечений реакций

- **Эксперименты, требующие большой статистики:**
 - Спектроскопия СТЭ;
 - Химические свойства СТЭ.

Фабрика сверхтяжелых элементов (SHE Factory)

ЛЯР, ОИЯИ

**Новый циклотрон DC 280
и сепараторы**

U-400

Heavy and superheavy
nuclei

U-400M

Light exotic
nuclei

IC-100

Applied research

DRIBs gallery

MT-25
Microtron

NanoLab



Фабрика СТЭ



Новый циклотрон DC 280

^{48}Ca

4.7×10^{13}

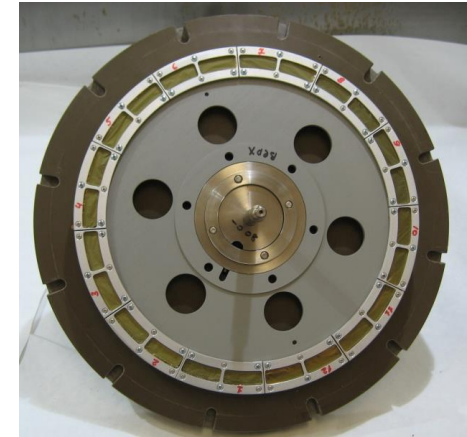
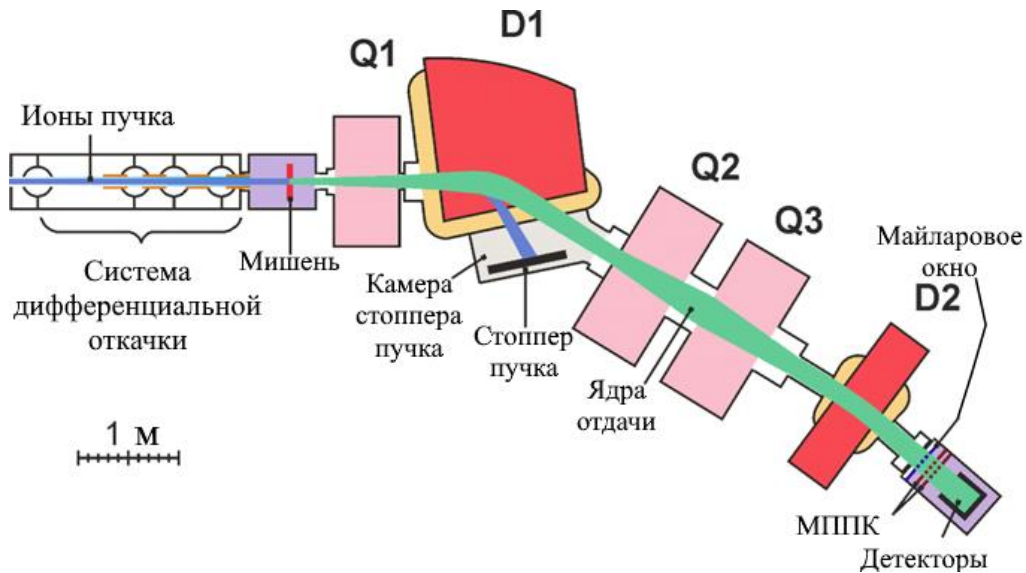
получено

4.1×10^{13}

использовали

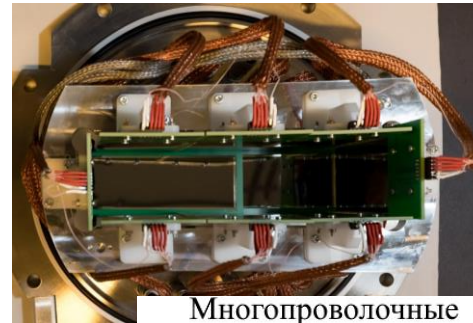
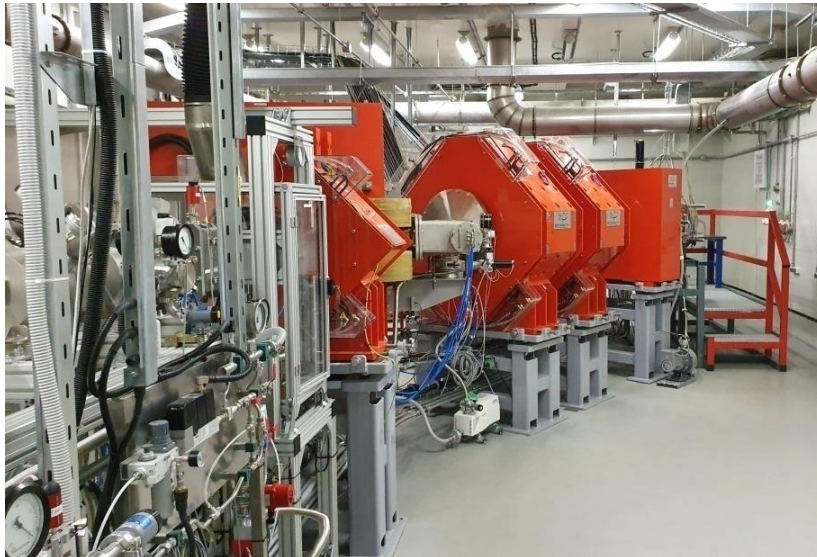
Ион	Ожидаемая интенсивность (частиц в с)
^{18}O	1×10^{14}
^{20}Ne	1×10^{14}
^{40}Ar	1×10^{14}
^{48}Ca	6×10^{13}
^{50}Ti	3×10^{13}
^{54}Cr	4×10^{13}
^{58}Fe	4×10^{13}
^{64}Ni	4×10^{13}
^{70}Zn	2×10^{13}
^{136}Xe	2×10^{13}
^{238}U	5×10^{10}

Дубненский газонаполненный сепаратор ГНС-2



24-см мишень, 12 секторов

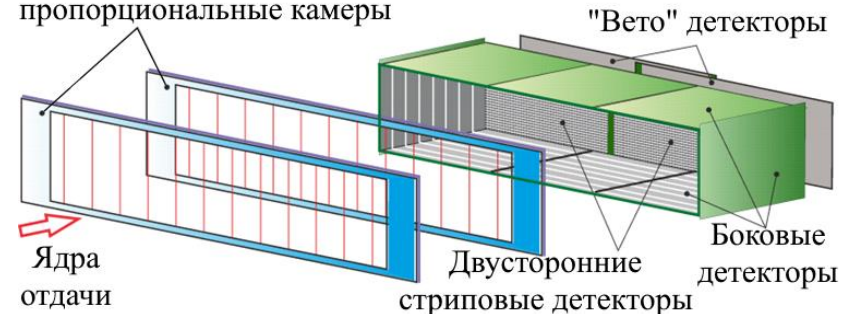
Вращающаяся мишень, магниты (Q1, D1, Q2, Q3, D2), стоппер пучка и детекторы



48×220(60×240) ДКСД
& 60×120 ОКСД

**Цифровая и
аналоговая
электроника**

Многопроволочные
пропорциональные камеры



Дубненский газонаполненный сепаратор ГНС-2

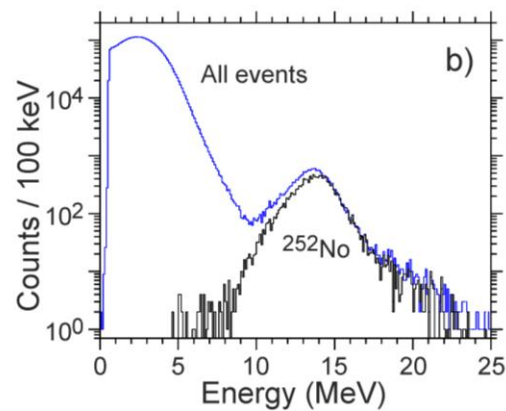
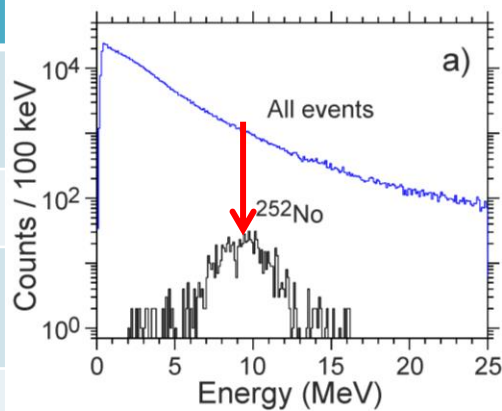
Высокая трансмиссия и фактор подавления фона

Из $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 2-3\text{n})^{288,289}\text{Mc}$:
Вдвое выше трансмиссия

Сравнение результатов на ГНС и ГНС-2
при одной энергии

	ГНС	ГНС-2
Толщина мишени $\text{мг}/\text{см}^2$	0.37	0.36
Доза пучка, 10^{18}	3.3	8.0
Число цепочек	$^{288}\text{Mc} - 6$ $^{289}\text{Mc} - 0$	$^{288}\text{Mc} - 30$ $^{289}\text{Mc} - 5$
Выход	1	2.3

Подавление фона в 200 раз выше



Результаты первых экспериментов на ГНС-2



E (MeV)	239	241	242	244	251	259
Dose $\times 10^{18}$	2.4	2.3	9.2	8.1	2.0	5.0
^{286}Mc	-	-	-	-	-	1
^{287}Mc	-	-	2	-	1	1
^{288}Mc	9	16	52	30	3	-
^{289}Mc	-	1	4	5	-	-

Важные технические вопросы:

Трансмиссия

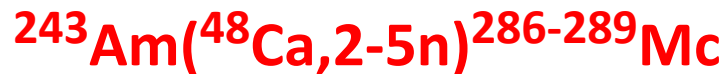
Размер изображения на детекторах

Фон

Систематики зарядовых состояний

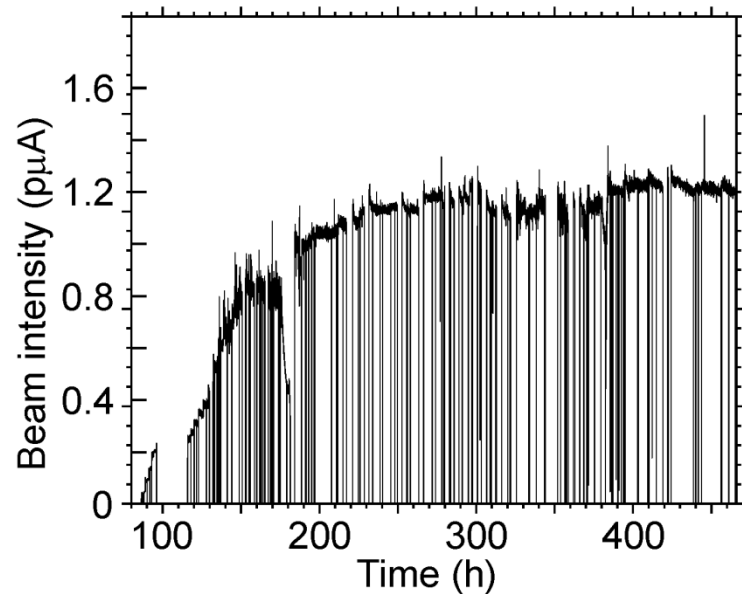
Проверка цифровой и аналоговой систем сбора данных

Результаты первых экспериментов на ГНС-2



E (MeV)	239	241	242	244	251	259
Dose $\times 10^{18}$	2.4	2.3	9.2	8.1	2.0	5.0
^{286}Mc	-	-	-	-	-	1
^{287}Mc	-	-	2	-	1	1
^{288}Mc	9	16	52	30	3	-
^{289}Mc	-	1	4	5	-	-

$I = 1.2-1.3 \mu\text{A}$ 15-см мишень

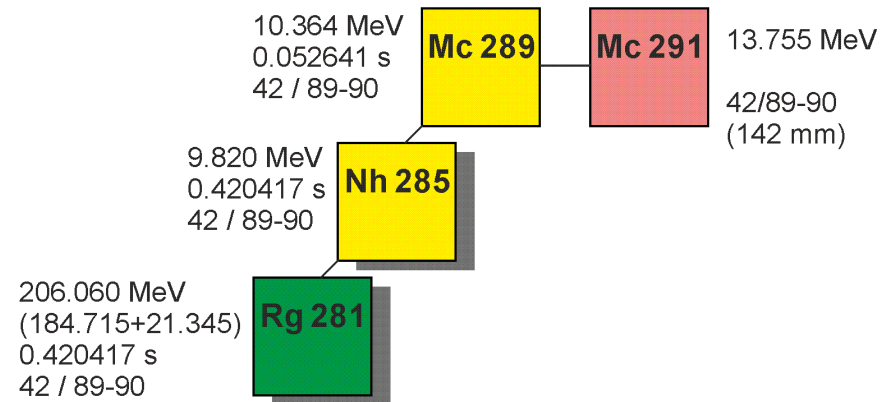


Результаты первых экспериментов на ГНС-2



E (MeV)	239	241	242	244	251	259
Dose $\times 10^{18}$	2.4	2.3	9.2	8.1	2.0	5.0
^{286}Mc	-	-	-	-	-	1
^{287}Mc	-	-	2	-	1	1
^{288}Mc	9	16	52	30	3	-
^{289}Mc	-	1	4	5	-	-

$I = 1.2-1.3 \mu\text{A}$ 15-см мишень

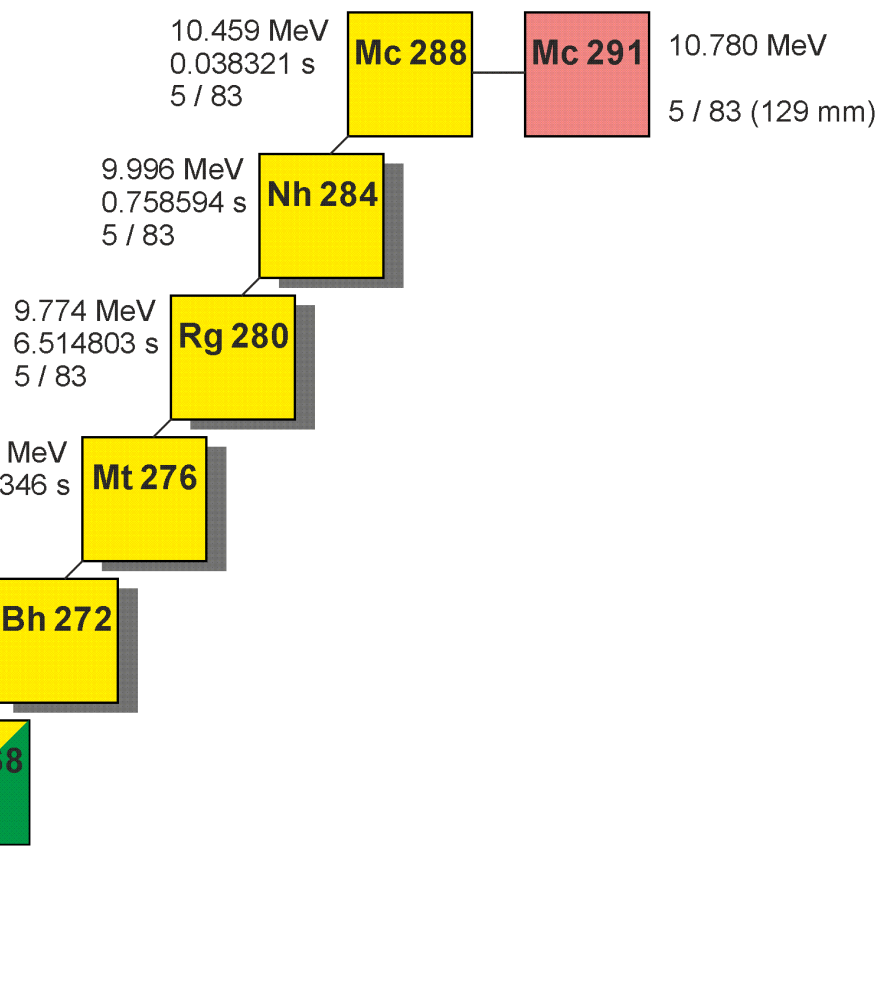


10 новых цепочек ^{289}Mc
При низких энергиях
(+ 4 в 2010-2012 на ГНС)
Функция возбуждения

Результаты первых экспериментов на ГНС-2



E (МэВ)	239	241	242	244	251	259
Доза $\times 10^{18}$	2.4	2.3	9.2	8.1	2.0	5.0
^{286}Mc	-	-	-	-	-	1
^{287}Mc	-	-	2	-	1	1
^{288}Mc	9	16	52	30	3	-
^{289}Mc	-	1	4	5	-	-

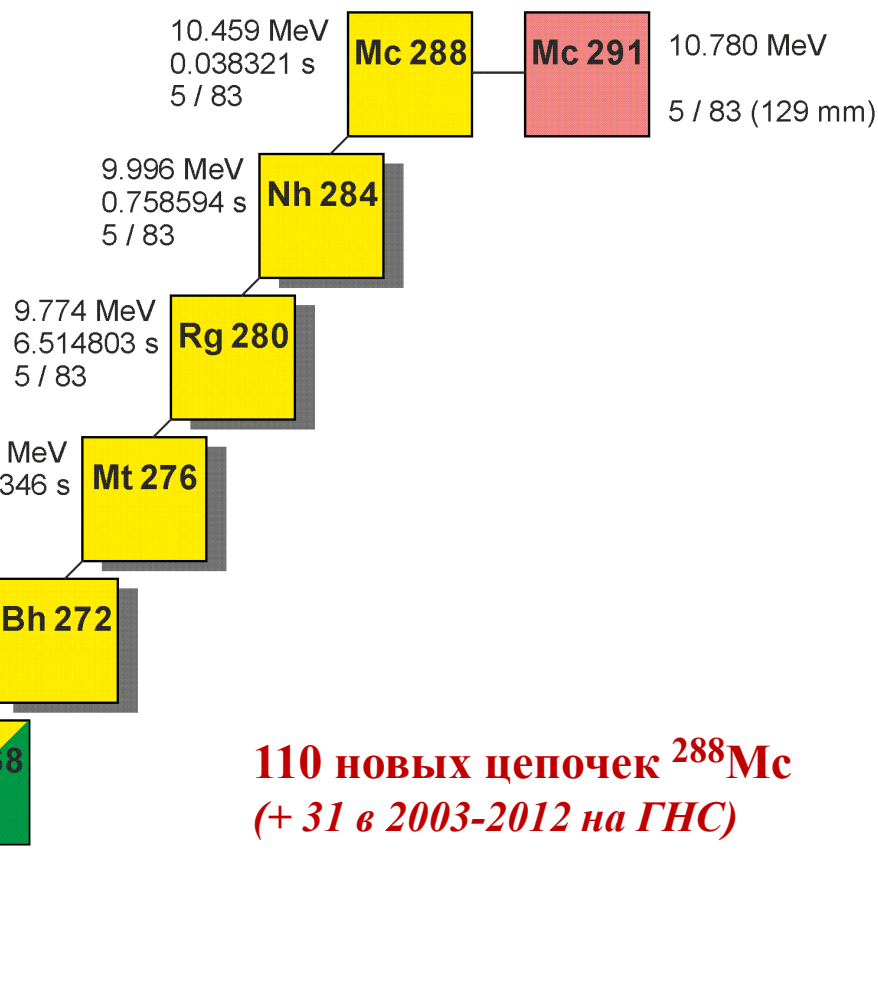


- Функция возбуждения
- Уровень сечения ρ_{ch} канала
- Уровень ветви на ЕС для ^{288}Mc и ^{284}Nh

Результаты первых экспериментов на ГНС-2



E (МэВ)	239	241	242	244	251	259
Доза $\times 10^{18}$	2.4	2.3	9.2	8.1	2.0	5.0
^{286}Mc	-	-	-	-	-	1
^{287}Mc	-	-	2	-	1	1
^{288}Mc	9	16	52	30	3	-
^{289}Mc	-	1	4	5	-	-



- Функция возбуждения
- Уровень сечения ρ_{ch} канала
- Уровень ветви на ЕС для ^{288}Mc и ^{284}Nh

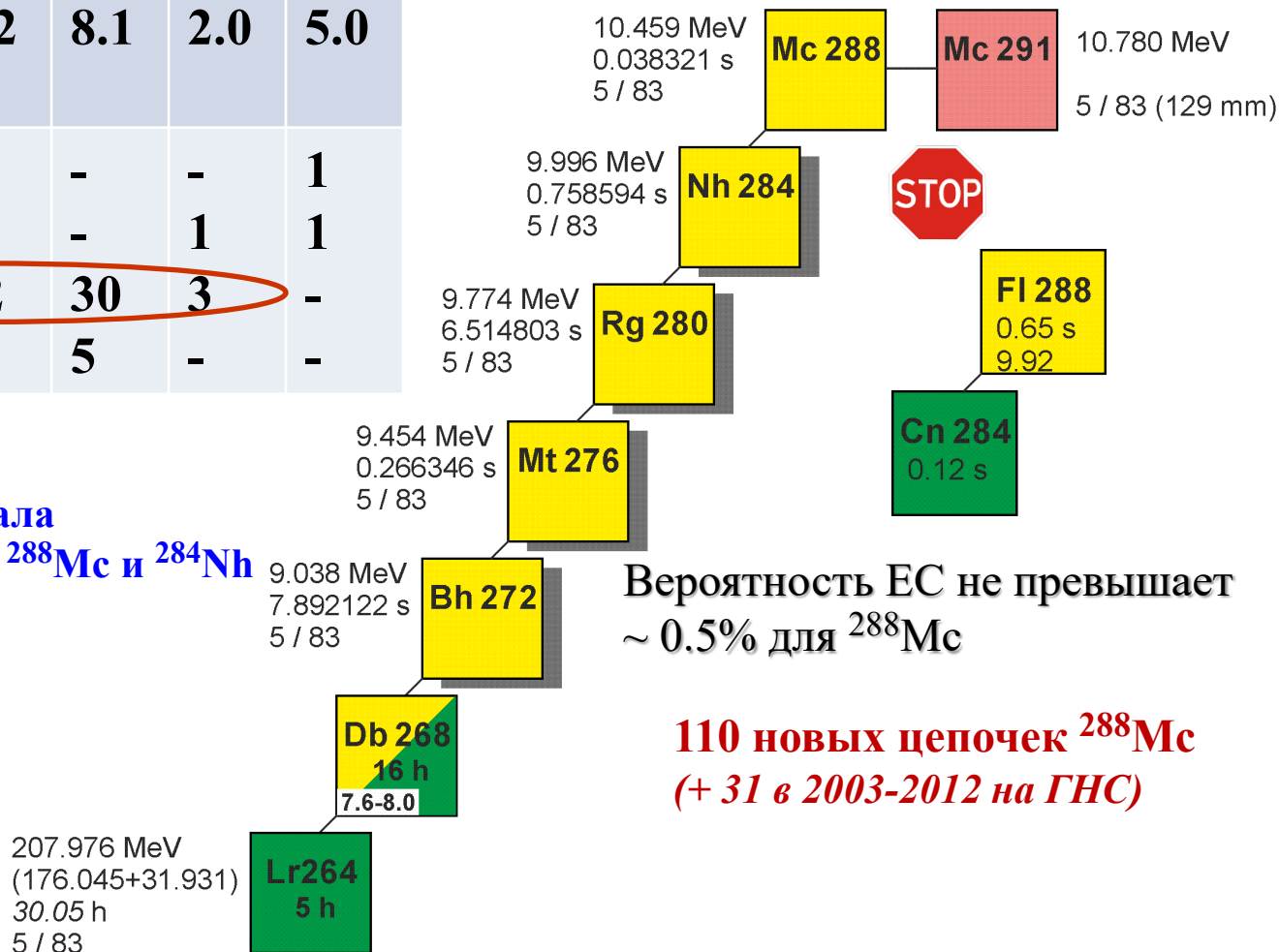
110 новых цепочек ^{288}Mc
(+ 31 в 2003-2012 на ГНС)

Результаты первых экспериментов на ГНС-2

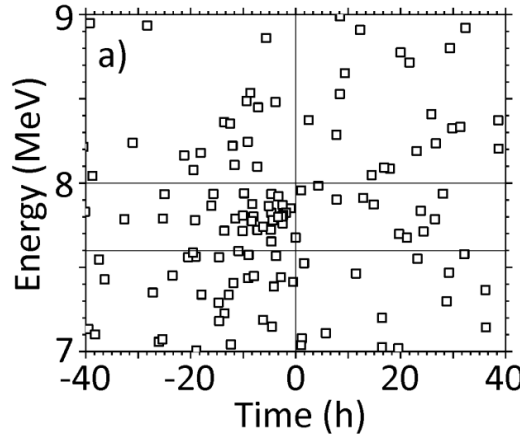


Е (МэВ)	239	241	242	244	251	259
Доза $\times 10^{18}$	2.4	2.3	9.2	8.1	2.0	5.0
^{286}Mc	-	-	-	-	-	1
^{287}Mc	-	-	2	-	1	1
^{288}Mc	9	16	52	30	3	-
^{289}Mc	-	1	4	5	-	-

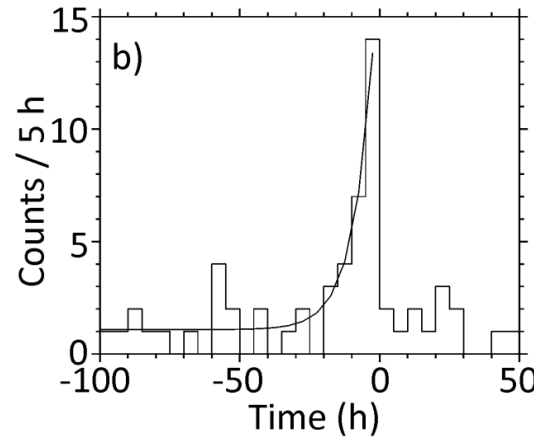
- Функция возбуждения
- Уровень сечения $\sigma_{\text{рхп}}$ канала
- Уровень ветви на ЕС для ^{288}Mc и ^{284}Nh



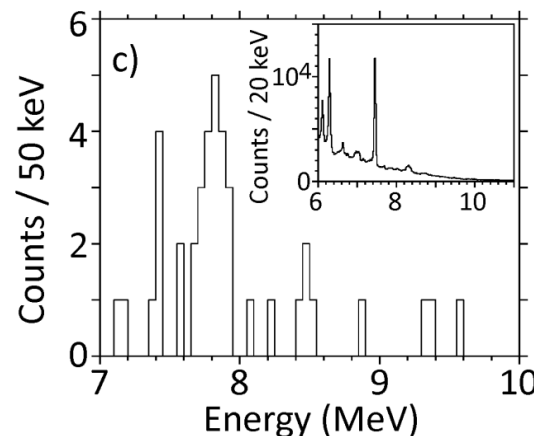
Результаты первых экспериментов на ГНС-2



α -подобные события
 E_α vs время до SF



Временное
распределение
 α -подобные события
 $E_\alpha = 7.6-8.0$ МэВ



Энергетическое
распределение
 α -подобных событий
за $T = 10$ ч

Результаты первых экспериментов на ГНС-2



Первое наблюдение

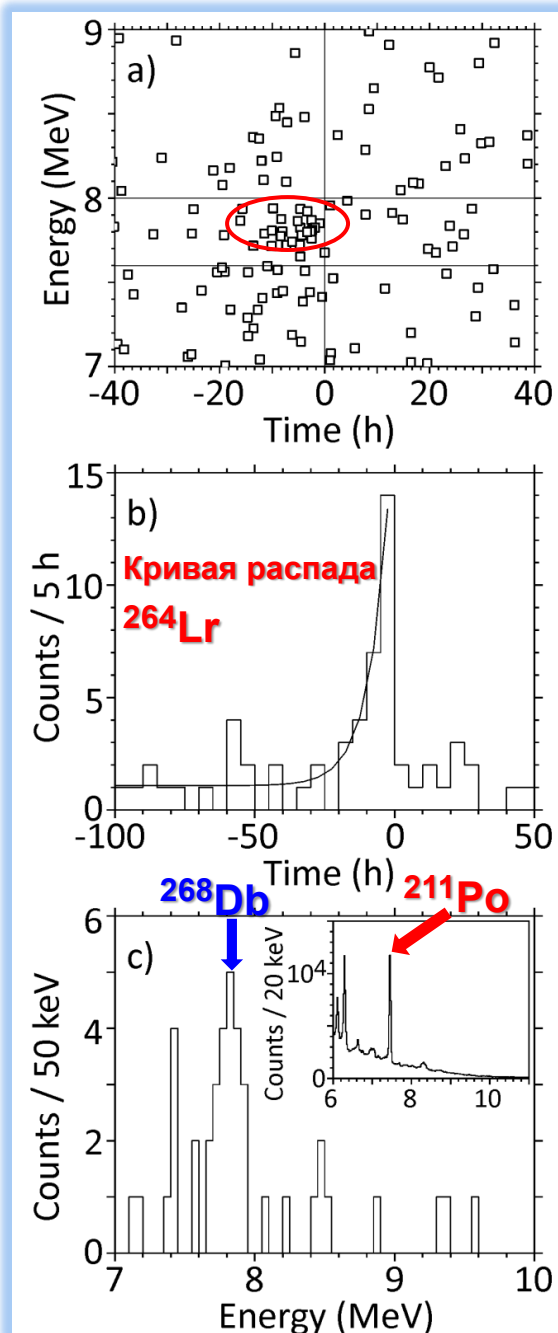
α -распада ^{268}Db

Новый изотоп ^{264}Lr

$$T_{1/2} (^{264}\text{Lr}, \text{SF}) = 4.8_{-1.3}^{+2.2} \text{ ч}$$

$$b_{\alpha} (^{268}\text{Db}) = 51_{-12}^{+14} \%$$

$$T_{1/2} (^{268}\text{Db}) = 16_{-4}^{+6} \text{ ч}$$



α -подобные события
 E_{α} vs время до SF

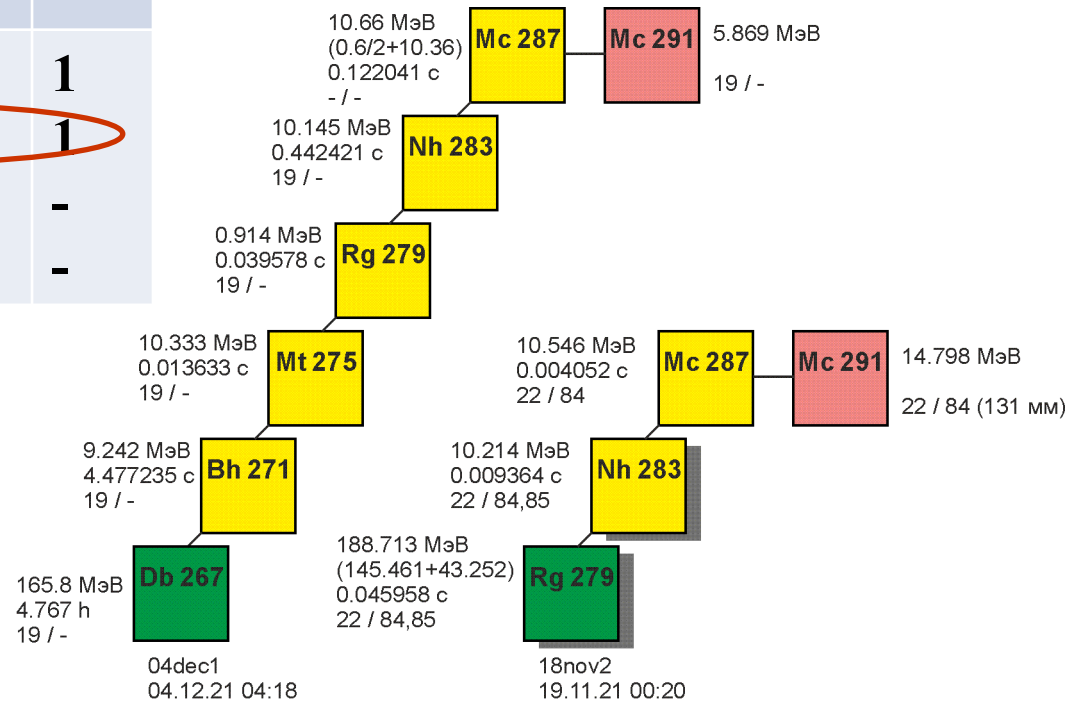
Временное
распределение
 α -подобные события
 $E_{\alpha} = 7.6-8.0$ МэВ

Энергетическое
распределение
 α -подобных событий
за $T = 10$ ч

Результаты первых экспериментов на ГНС-2



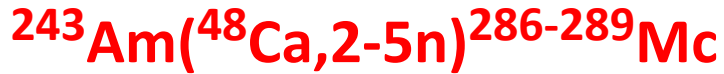
E (МэВ)	239	241	242	244	251	259
Доза $\times 10^{18}$	2.4	2.3	9.2	8.1	2.0	5.0
^{286}Mc	-	-	-	-	-	1
^{287}Mc	-	-	2	-	1	1
^{288}Mc	9	16	52	30	3	-
^{289}Mc	-	1	4	5	-	-



2 (ГНС) + 1 (TASCA) + 4

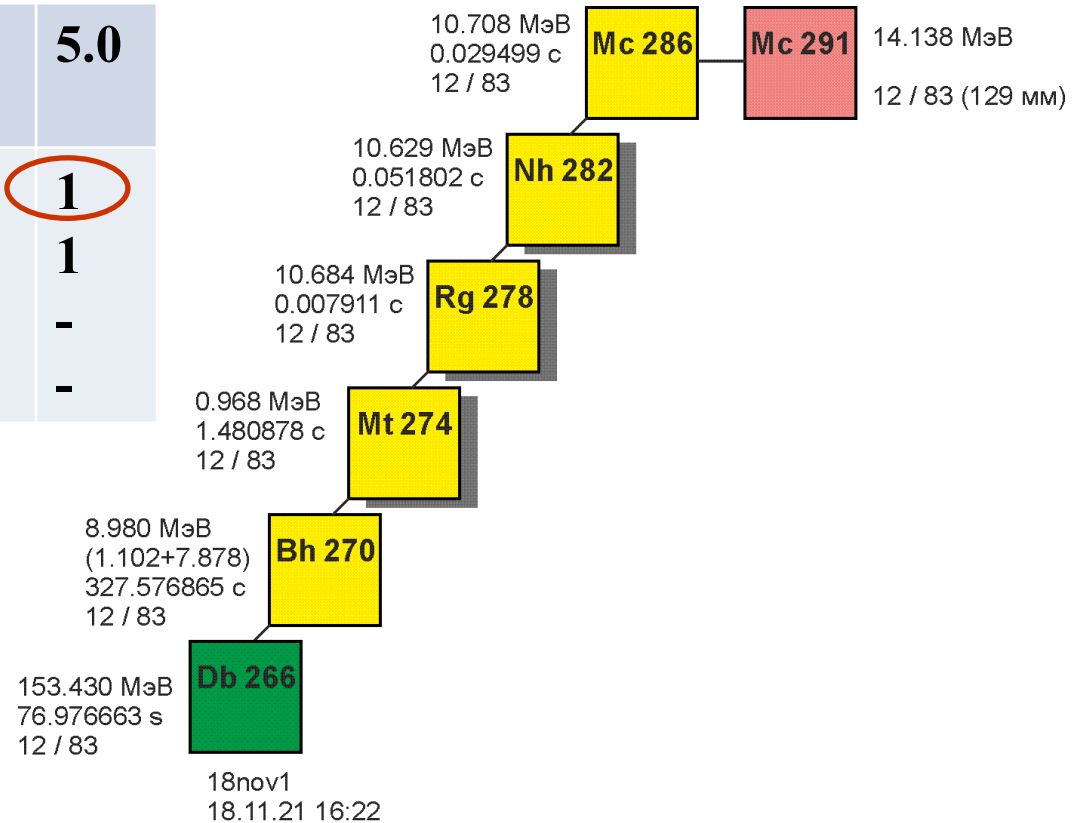
- Функция возбуждения
- Первое наблюдение ^{279}Rg SF

Результаты первых экспериментов на ГНС-2



E (МэВ)	239	241	242	244	251	259
Доза $\times 10^{18}$	2.4	2.3	9.2	8.1	2.0	5.0
^{286}Mc	-	-	-	-	-	1
^{287}Mc	-	-	2	-	1	1
^{288}Mc	9	16	52	30	3	-
^{289}Mc	-	1	4	5	-	-

- Новый изотоп ^{286}Mc

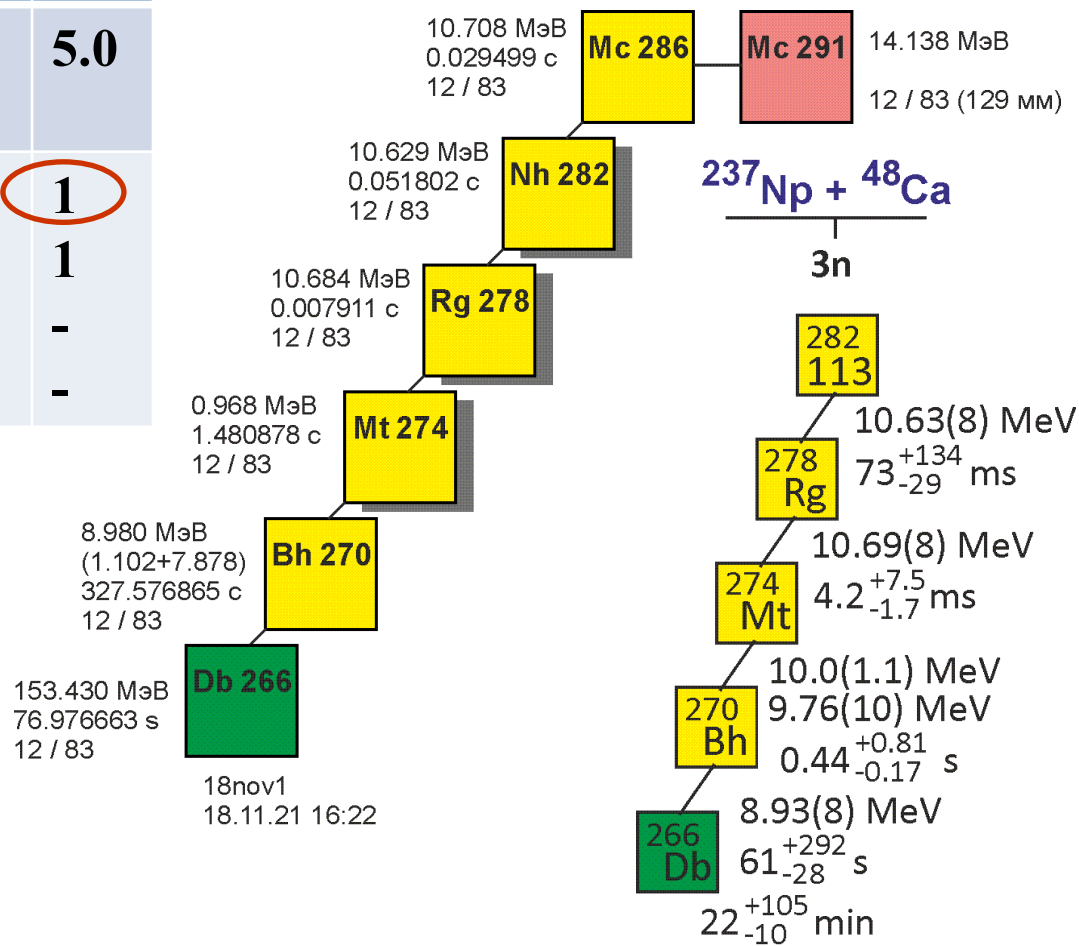


Результаты первых экспериментов на ГС-2



E (МэВ)	239	241	242	244	251	259
Доза $\times 10^{18}$	2.4	2.3	9.2	8.1	2.0	5.0
^{286}Mc	-	-	-	-	-	1
^{287}Mc	-	-	2	-	1	1
^{288}Mc	9	16	52	30	3	-
^{289}Mc	-	1	4	5	-	-

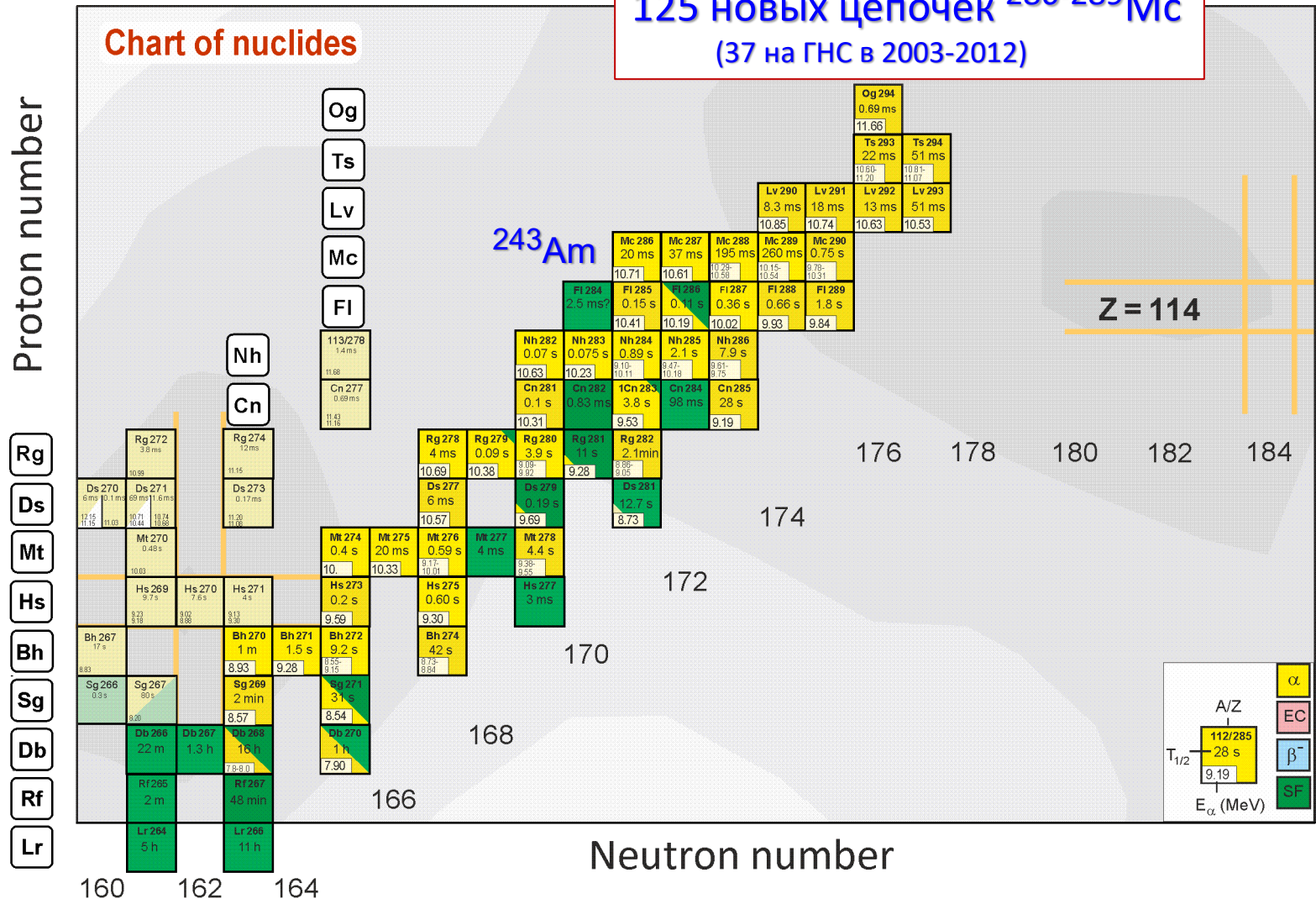
- Новый изотоп ^{286}Mc



Результаты первых экспериментов на ГНС-2



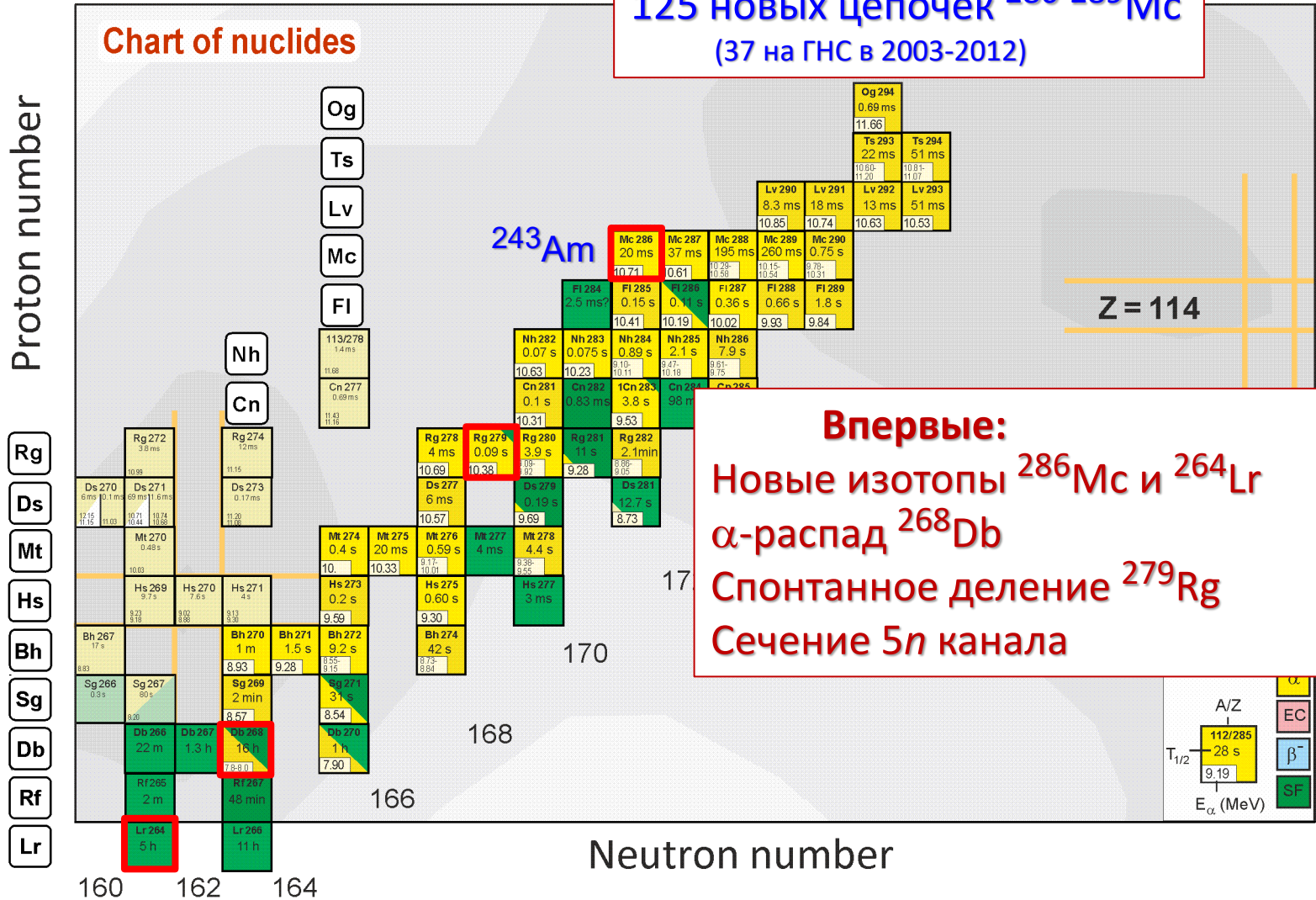
125 новых цепочек $^{286-289}\text{Mc}$
(37 на ГНС в 2003-2012)



Результаты первых экспериментов на ГИС-2



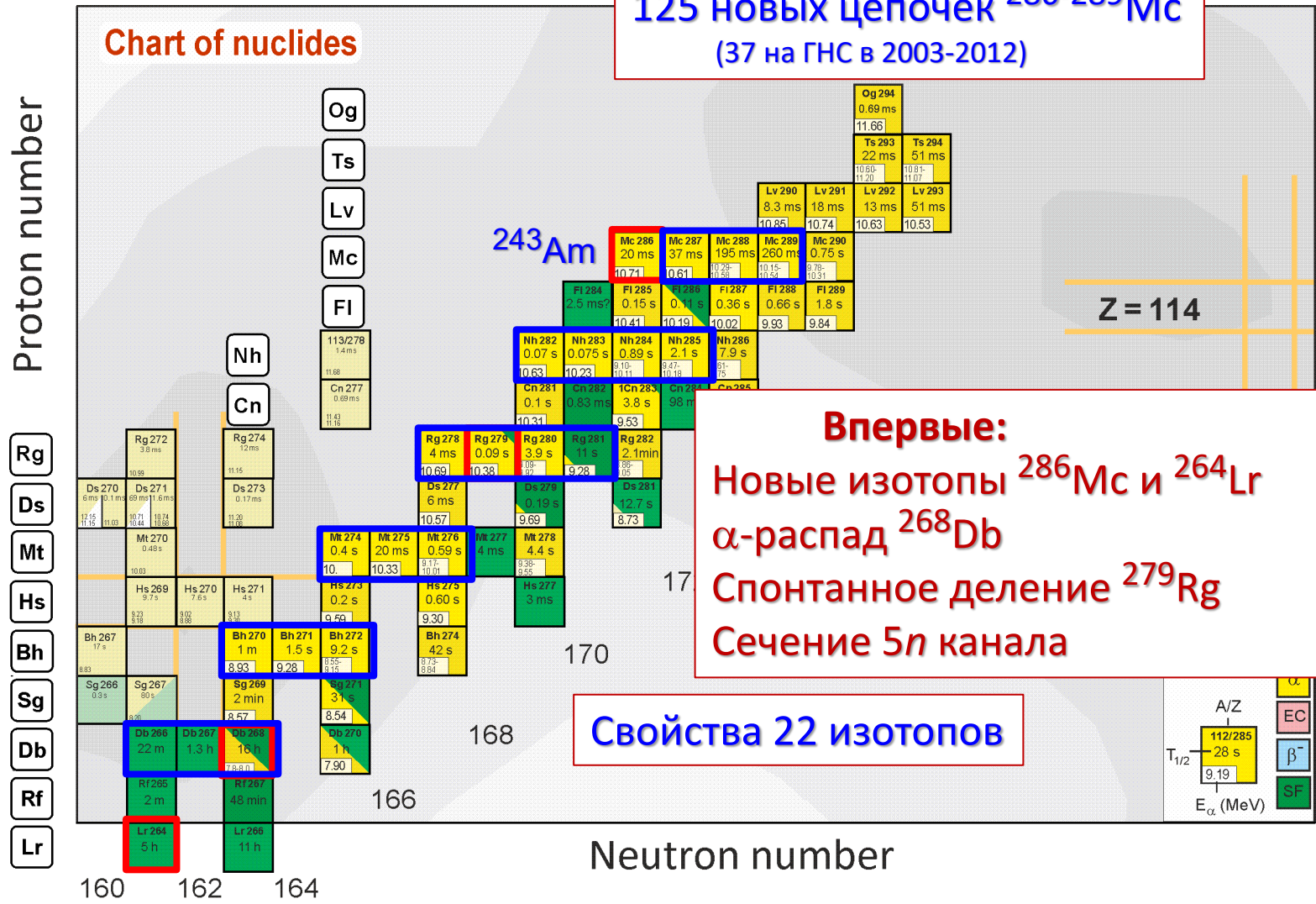
125 новых цепочек $^{286-289}\text{Mc}$
(37 на ГИС в 2003-2012)



Результаты первых экспериментов на ГНС-2



125 новых цепочек $^{286-289}\text{Mc}$
(37 на ГНС в 2003-2012)

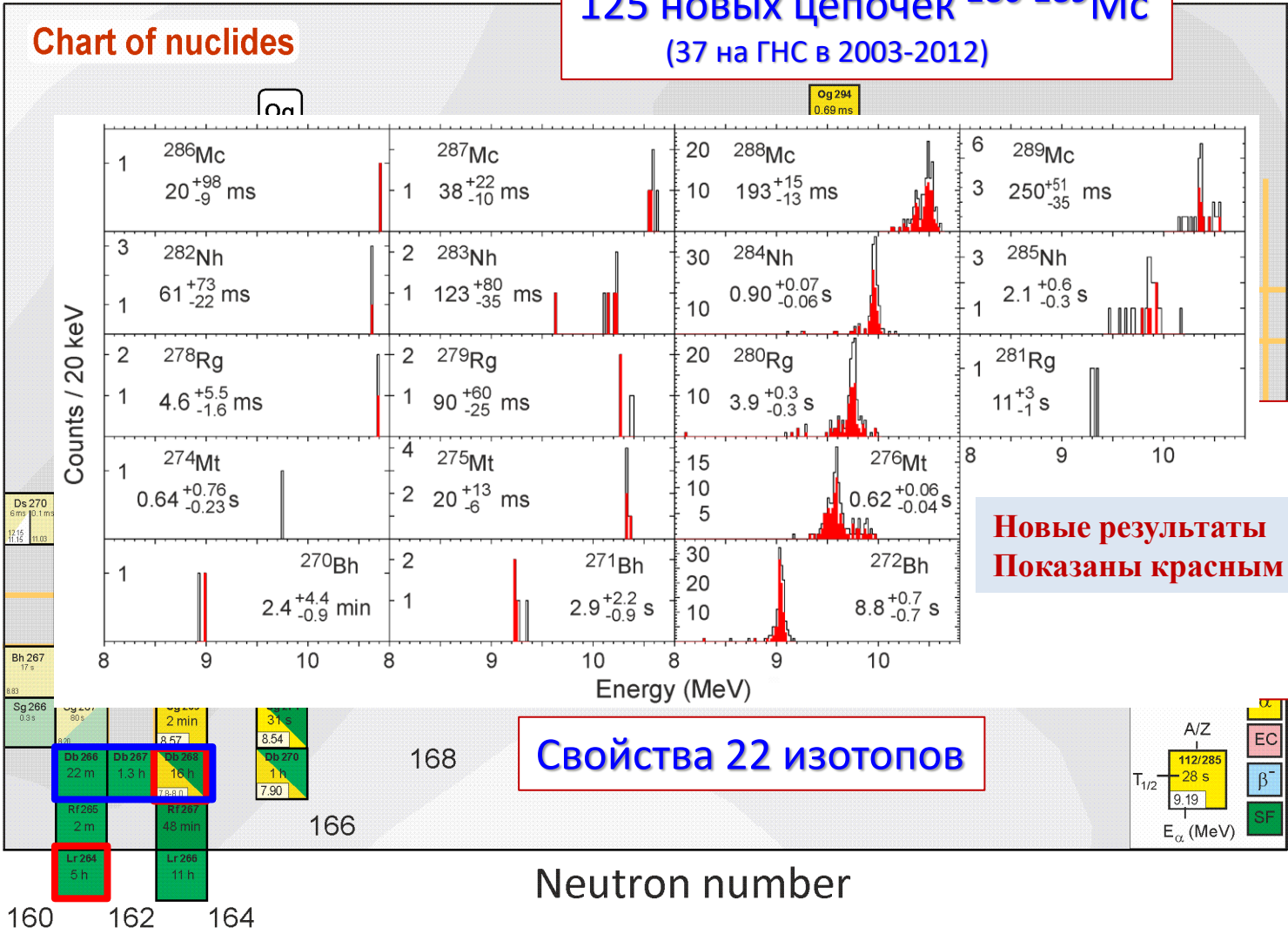


Впервые:
 Новые изотопы ^{286}Mc и ^{264}Lr
 α -распад ^{268}Db
 Спонтанное деление ^{279}Rg
 Сечение 5n канала

Результаты первых экспериментов на ГНС-2



125 новых цепочек $^{286-289}\text{Mc}$
(37 на ГНС в 2003-2012)



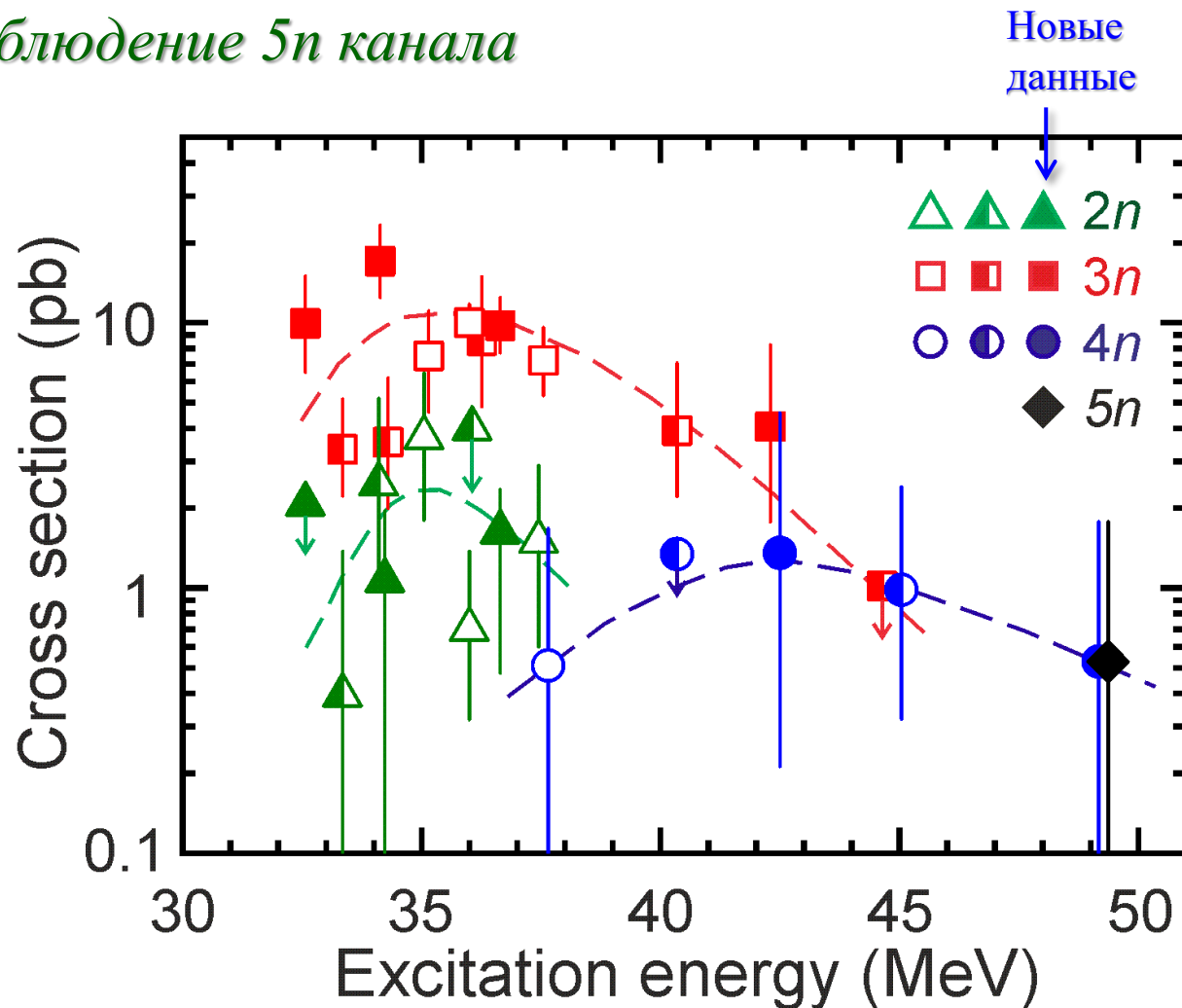
Результаты первых экспериментов на ГНС-2



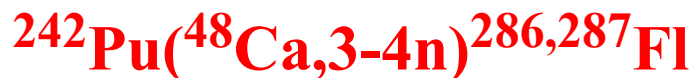
Функции возбуждения

Вдвое выше сечение $3n$ канала

Наблюдение $5n$ канала

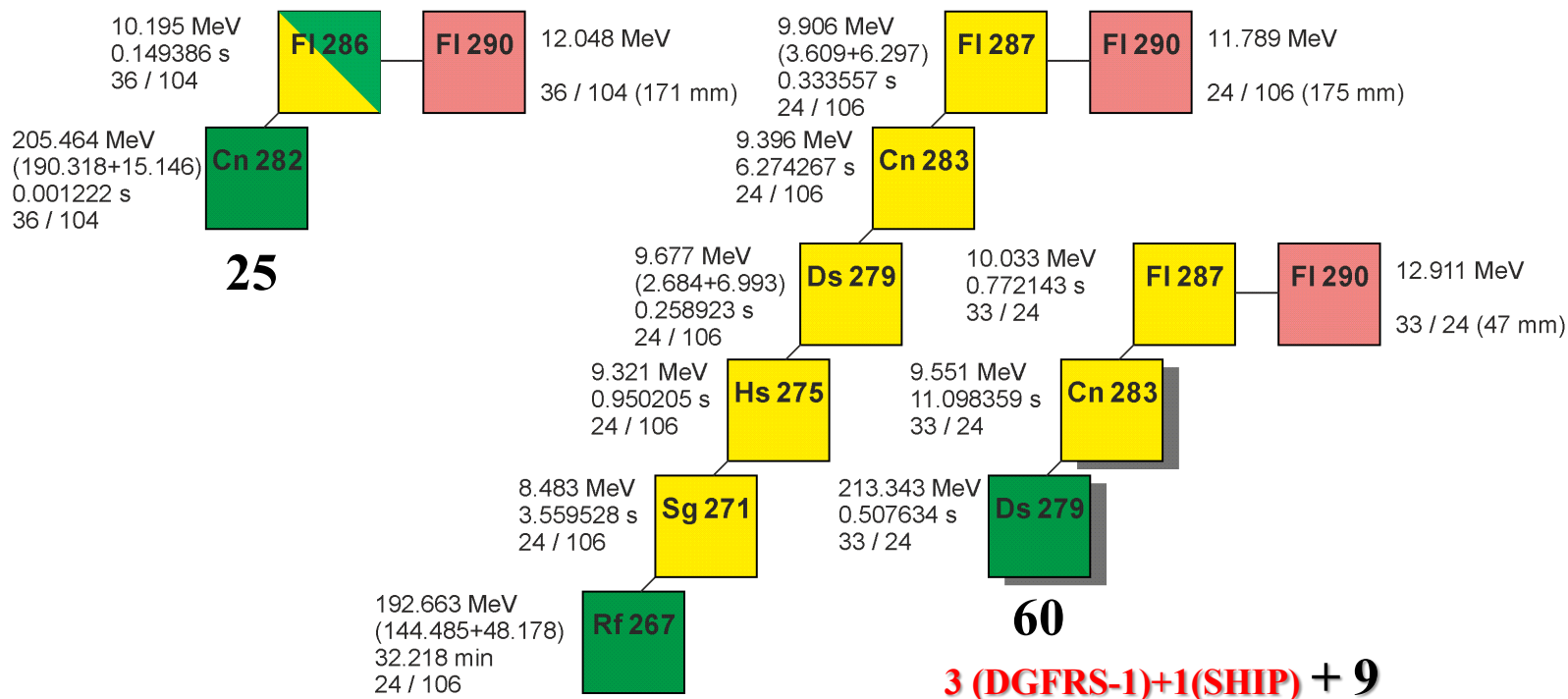


Результаты первых экспериментов на ГНС-2



Толщина мишени (мг/см ²)	E_{lab} (MeV)	E^* (MeV)	Доза пучка $\times 10^{18}$	Число цепочек $3n / 4n$	σ_{3n} (pb)	σ_{4n} (pb)
^{242}Pu 10×0.76, 0.56, 0.35	242.5	37.1-40.7	11.2	65 / 11	10.4	1.8
	247.5	41.3-44.8	5.0	4 / 14	1.2	4.8

$I = 0.05, 0.1 \dots 1, 1.5, 2.0, 2.5, 3$ (1 week) μA 24-см мишень
 $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$



Результаты первых экспериментов на ГНС-2

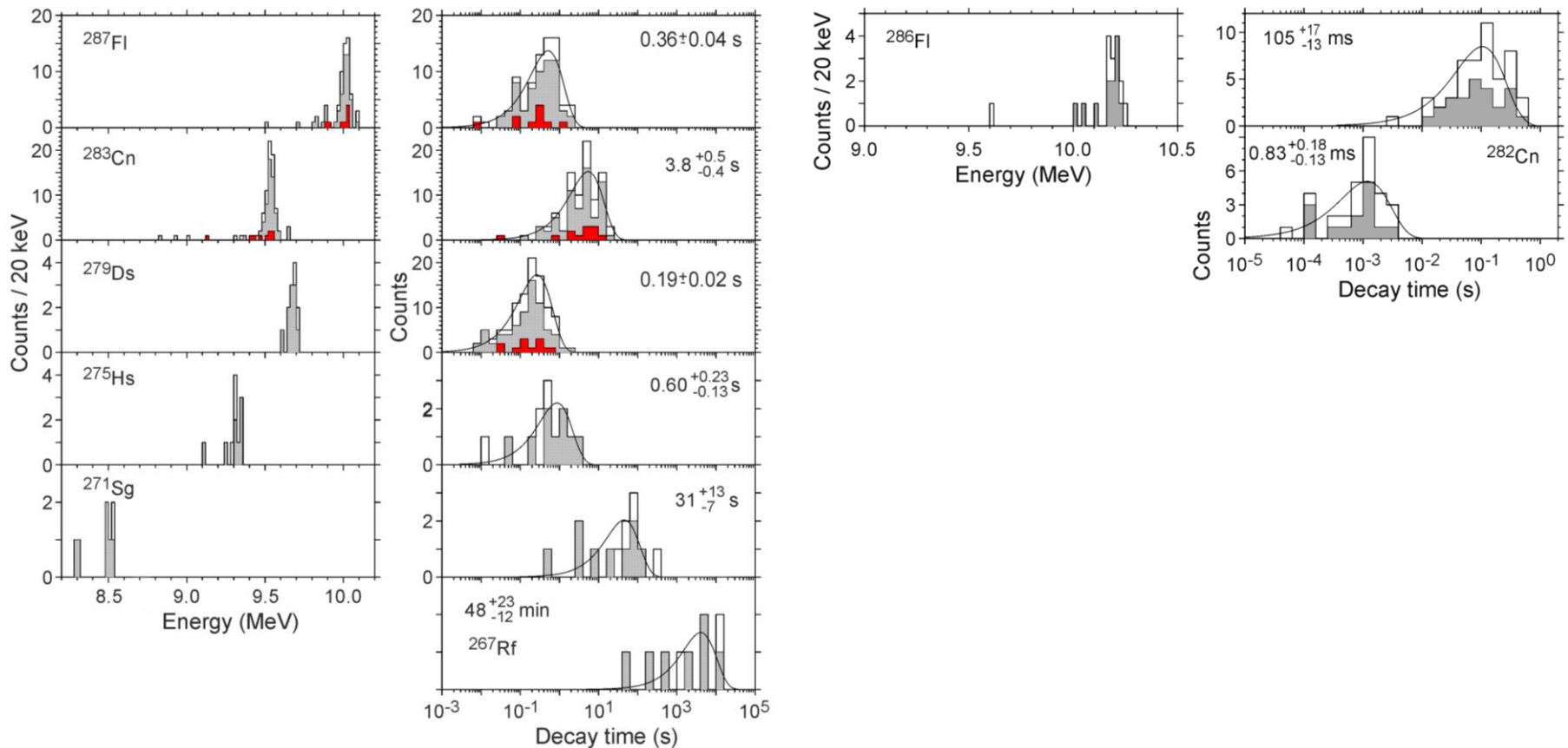
$^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},3-4n)^{286,287}\text{Fl}$

Свойства распада 8 изотопов

Зависимость распадов ^{287}Fl , ^{283}Cn , and ^{279}Ds от структуры уровней (?)

Ненаблюдение 9.6-МэВ α -линии ^{286}Fl

Распад на 2^+ уровень ^{282}Cn или через изомерные состояния ^{286}Fl и ^{282}Cn (?)



Результаты первых экспериментов на ГНС-2

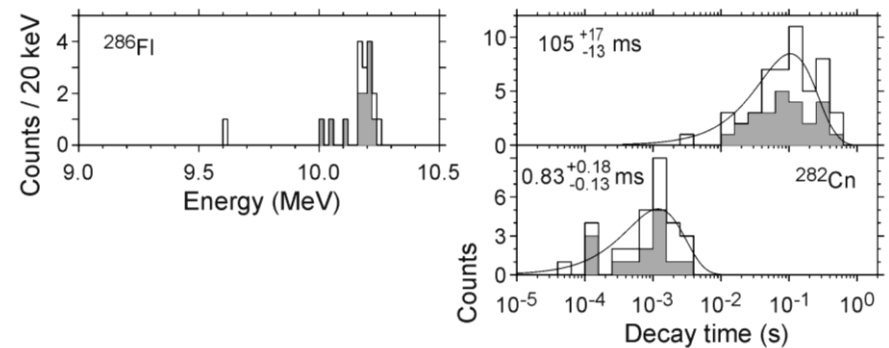
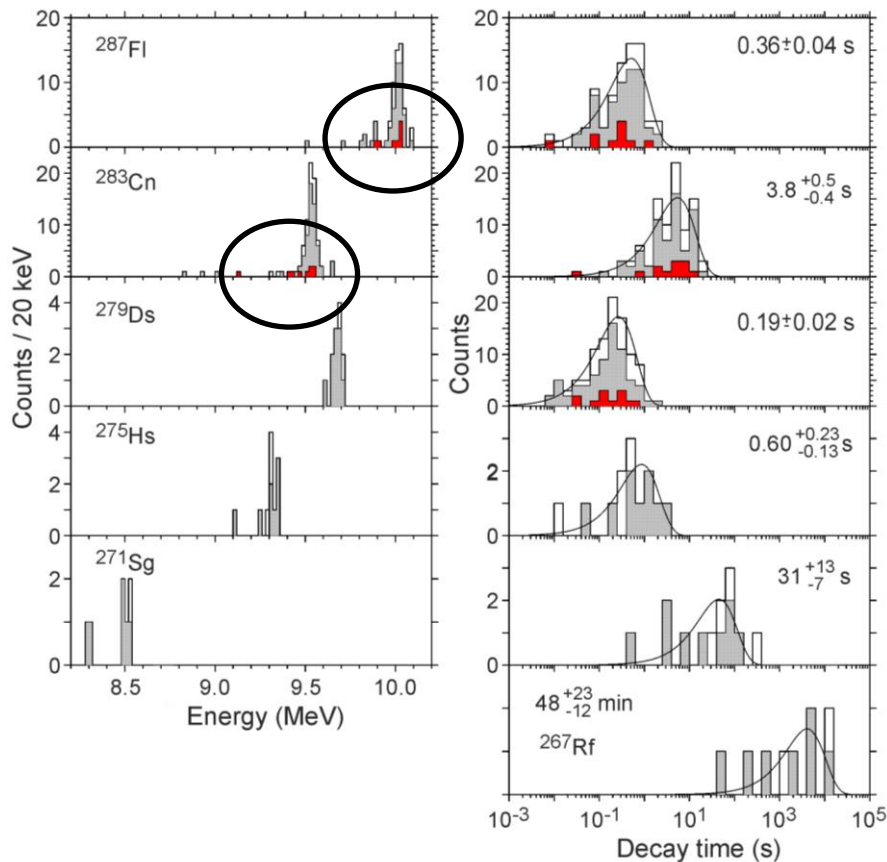
$^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3-4n)^{286,287}\text{Fl}$

Свойства распада 8 изотопов

Зависимость распадов ^{287}Fl , ^{283}Cn , and ^{279}Ds от структуры уровней (?)

Ненаблюдение 9.6-МэВ α -линии ^{286}Fl

Распад на 2^+ уровень ^{282}Cn или через изомерные состояния ^{286}Fl и ^{282}Cn (?)



Распады ^{287}Fl и ^{283}Cn с меньшими энергиями И временами жизни приводят к α -распаду ^{279}Ds

Результаты первых экспериментов на ГНС-2

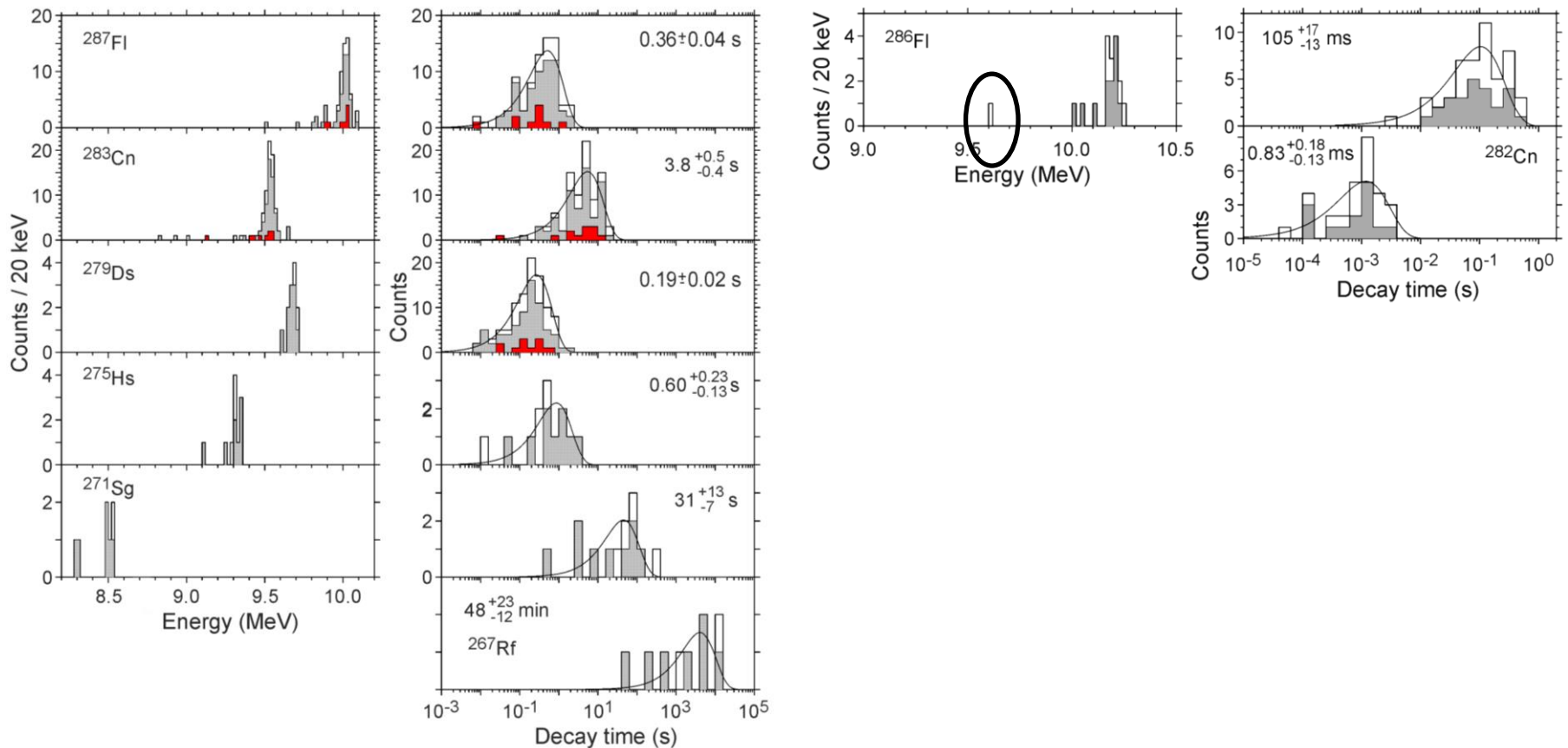
$^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},3-4n)^{286,287}\text{Fl}$

Свойства распада 8 изотопов

Зависимость распадов ^{287}Fl , ^{283}Cn , and ^{279}Ds от структуры уровней (?)

Ненаблюдение 9.6-МэВ α -линии ^{286}Fl

Распад на 2^+ уровень ^{282}Cn или через изомерные состояния ^{286}Fl и ^{282}Cn (?)



Результаты первых экспериментов на ГНС-2

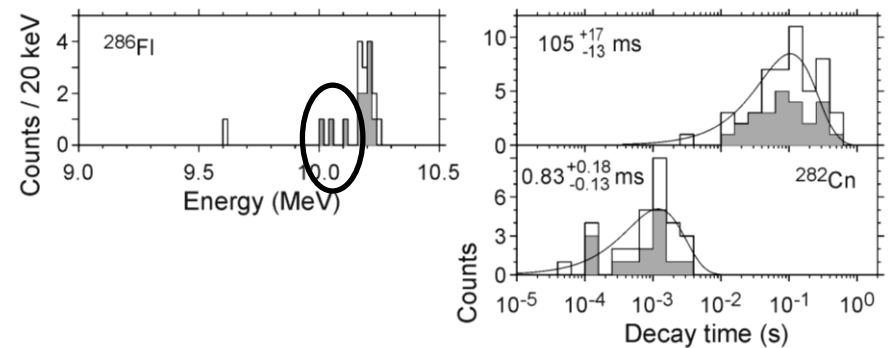
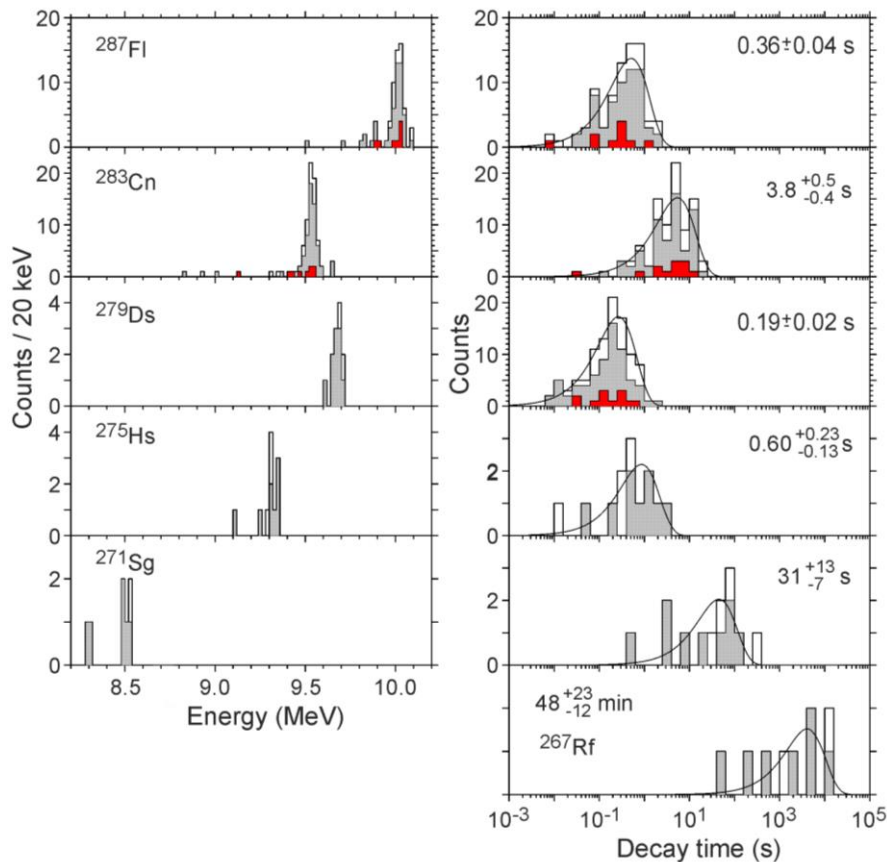
$^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3-4n)^{286,287}\text{Fl}$

Свойства распада 8 изотопов

Зависимость распадов ^{287}Fl , ^{283}Cn , and ^{279}Ds от структуры уровней (?)

Ненаблюдение 9.6-МэВ α -линии ^{286}Fl

Распад на 2^+ уровень ^{282}Cn или через изомерные состояния ^{286}Fl и ^{282}Cn (?)



Впервые:
 Переход через 0^+ (^{286}Fl) \rightarrow 2^+ (^{282}Cn)
 (деформация ядер)

Результаты первых экспериментов на ГНС-2

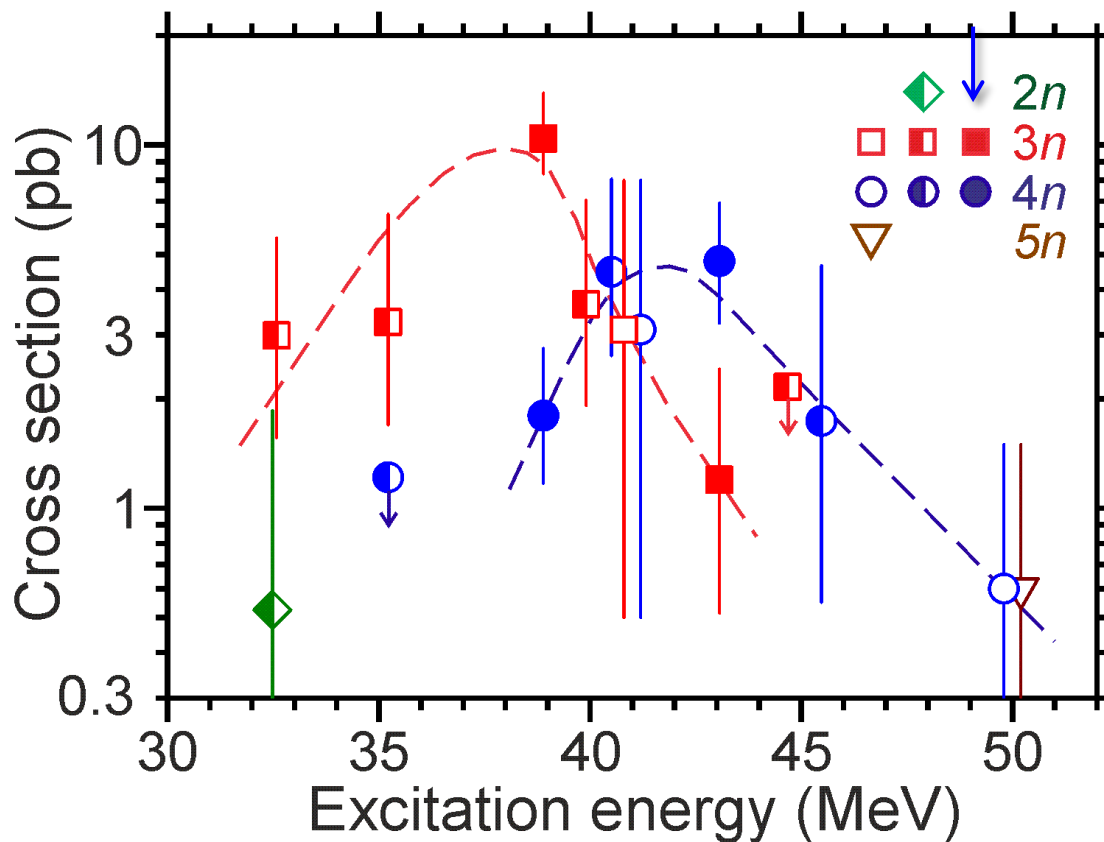


94 цепочки распада

Функции возбуждения

2-3 раза большее сечение 3n канала

Новые данные



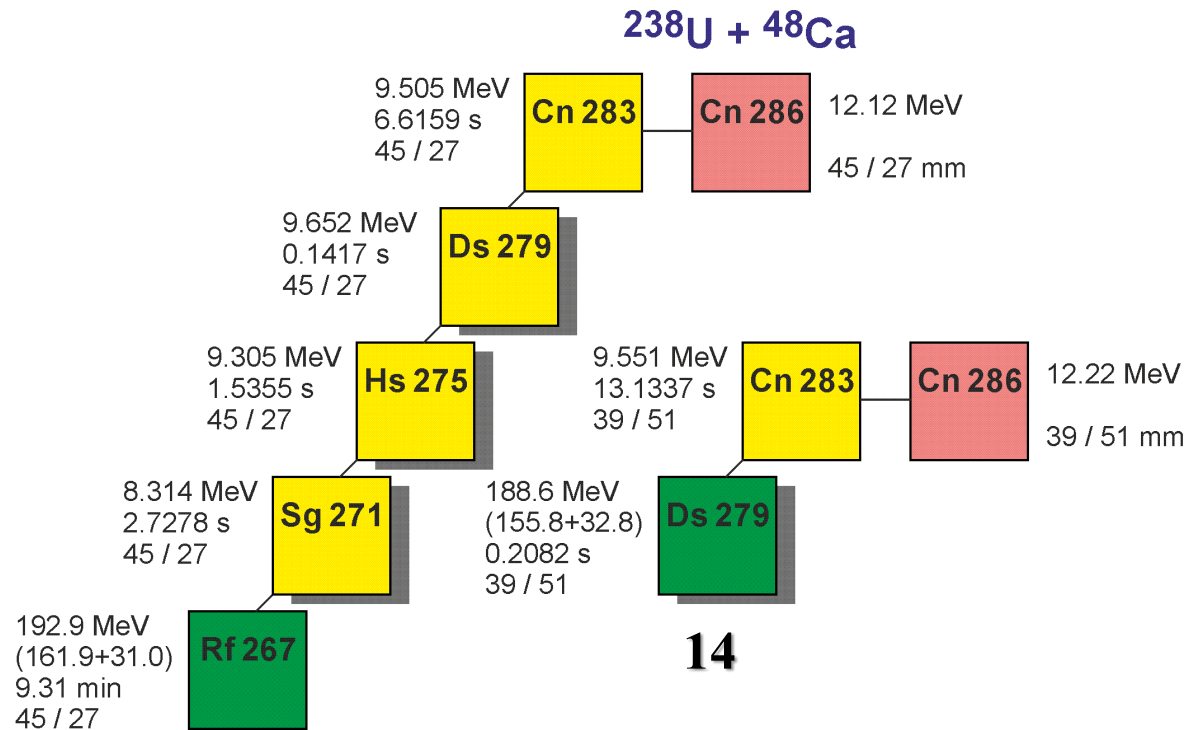
Результаты первых экспериментов на ГНС-2



16 цепочек распада

Зависимость свойств распада ^{283}Cn и ^{279}Ds от структуры уровней (?)

$I = 0.5, 1, \dots \underline{6.5} \mu\text{A}$ 24-см мишень



3 (DGFRS)+1(SHIP) + 9 (^{242}Pu) + 2

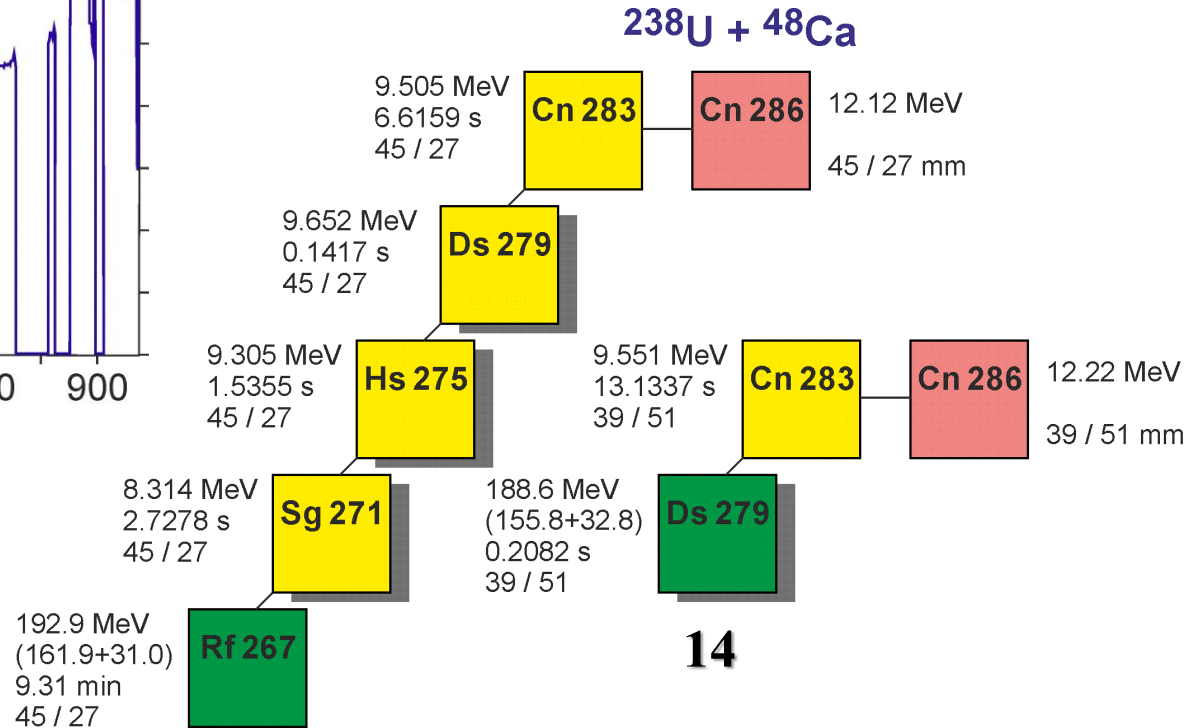
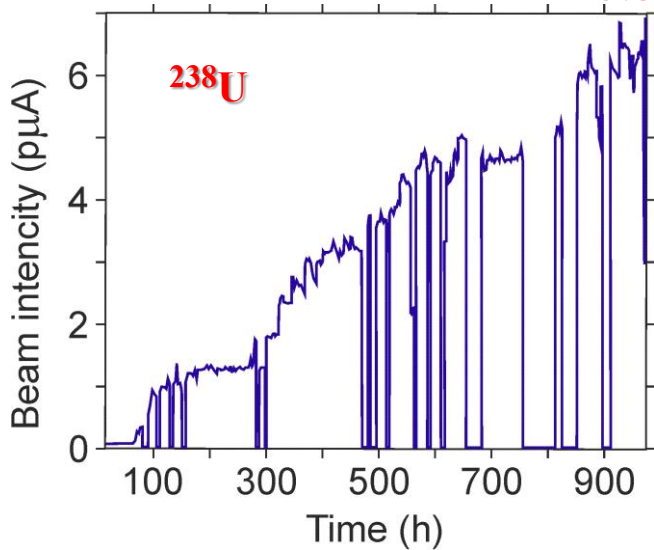
Результаты первых экспериментов на ГНС-2



16 цепочек распада

Зависимость свойств распада ^{283}Cn и ^{279}Ds от структуры уровней (?)

$I = 0.5, 1, \dots, 6.5 \mu\text{A}$ 24-см мишень

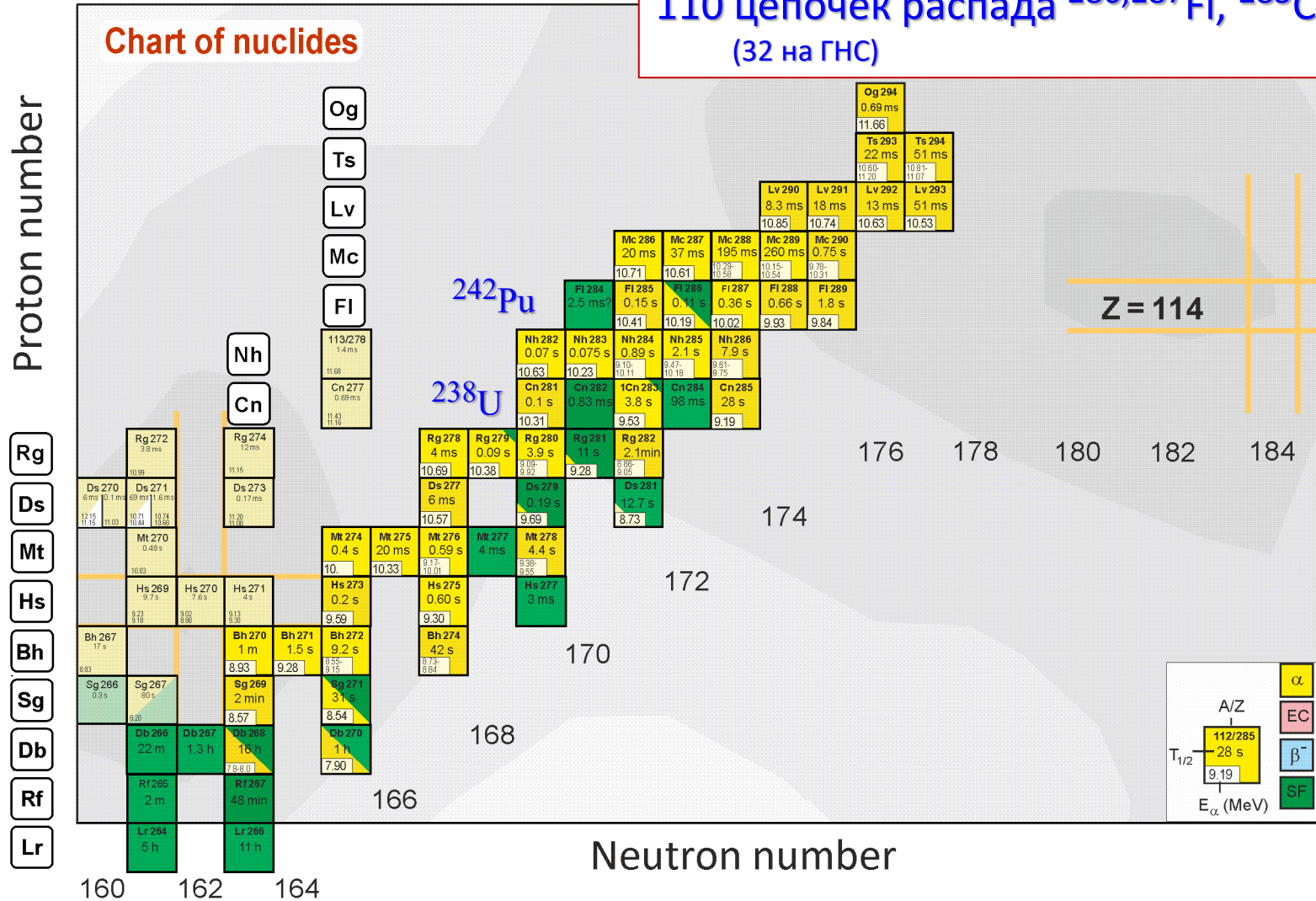


3 (DGFRS)+1(SHIP) + 9 (^{242}Pu) + 2

Результаты первых экспериментов на ГНС-2

$^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3-4n)^{286,287}\text{Fl}$ and $^{238}\text{U}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{283}\text{Cn}$

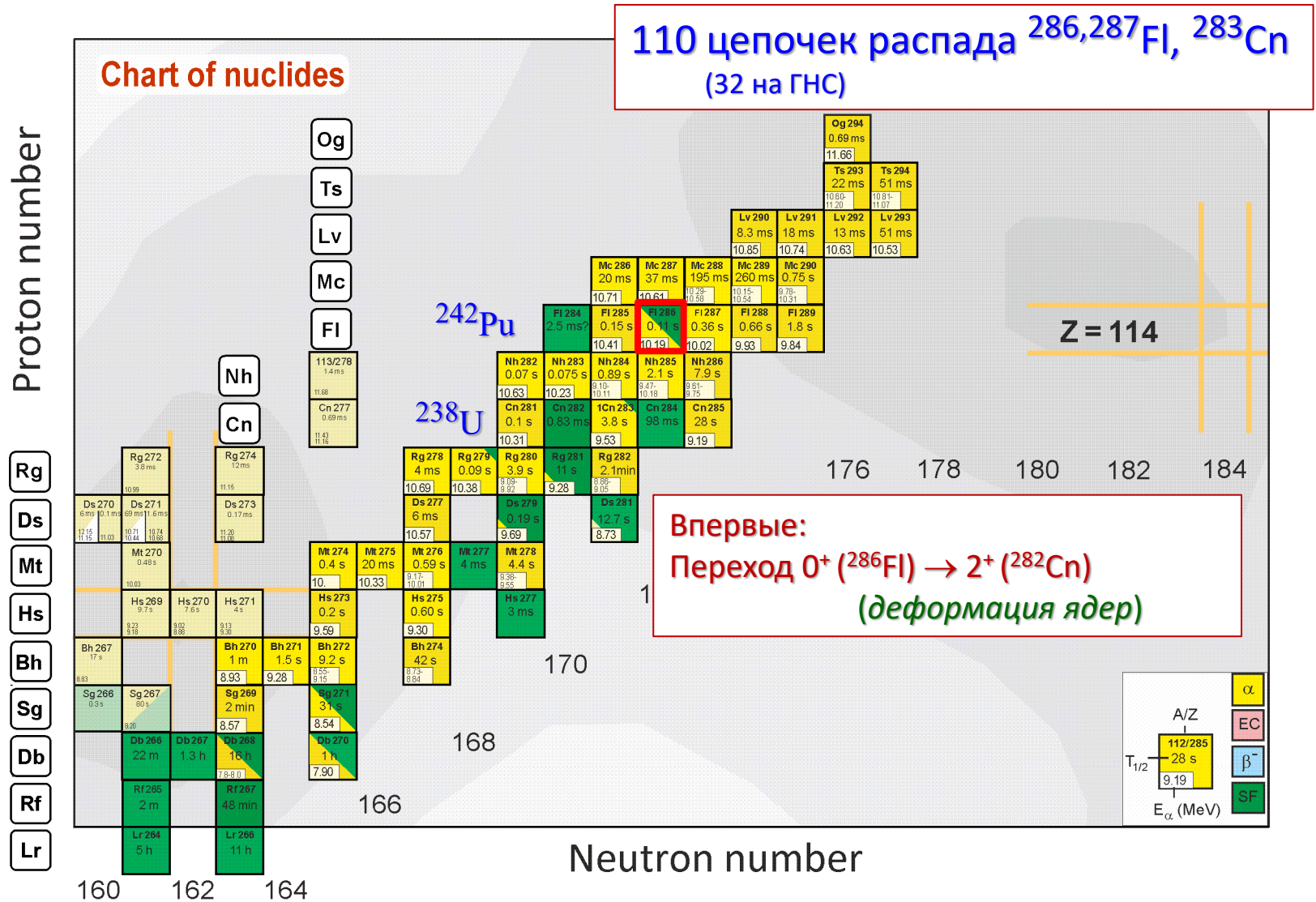
110 цепочек распада $^{286,287}\text{Fl}$, ^{283}Cn
(32 на ГНС)



$I = 3 \mu\text{A}$ 24-см мишень

Результаты первых экспериментов на ГНС-2

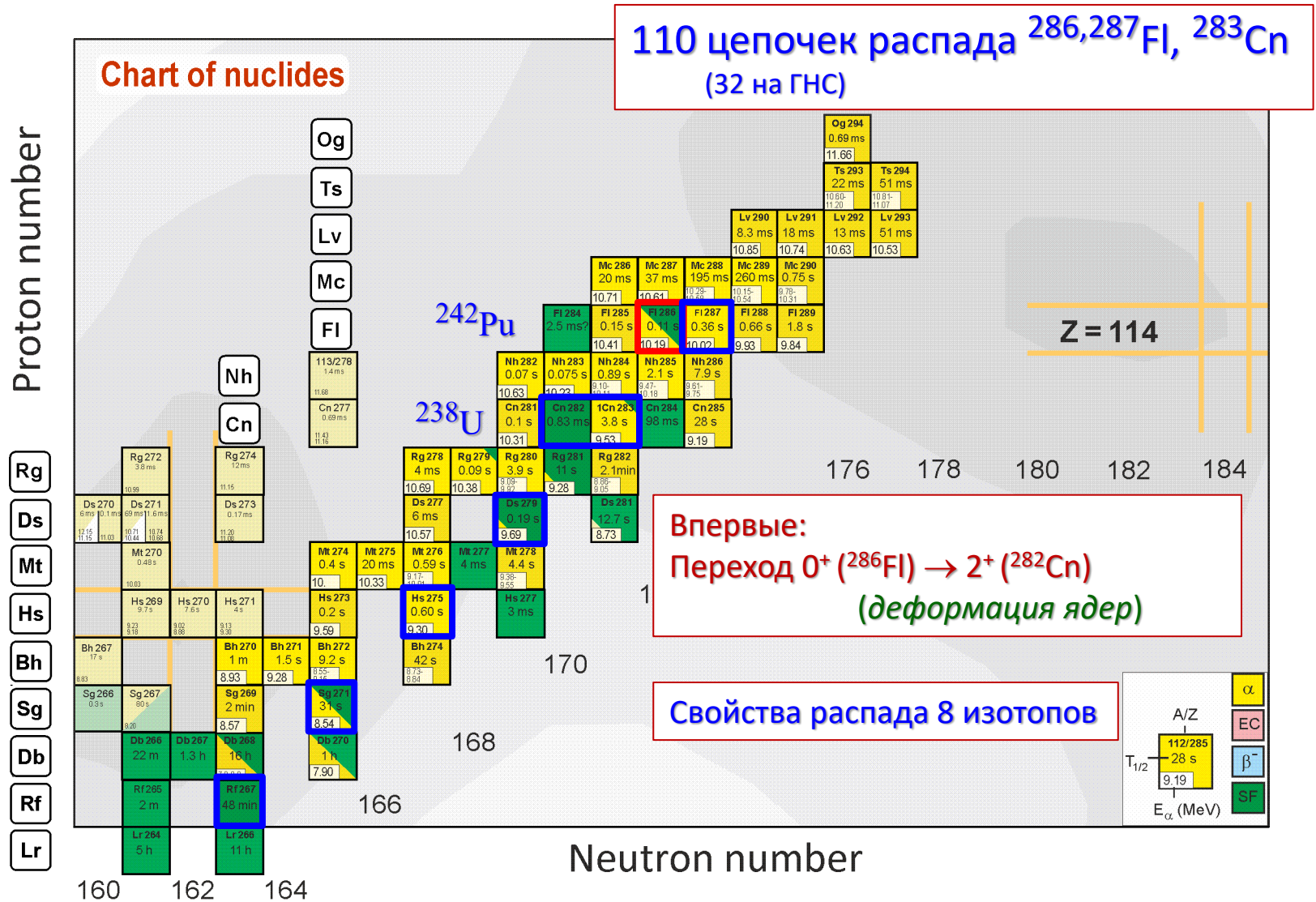
$^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3-4n)^{286,287}\text{Fl}$ and $^{238}\text{U}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{283}\text{Cn}$



I = 3 μA 24-см мишень

Результаты первых экспериментов на ГНС-2

$^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3-4n)^{286,287}\text{Fl}$ and $^{238}\text{U}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{283}\text{Cn}$

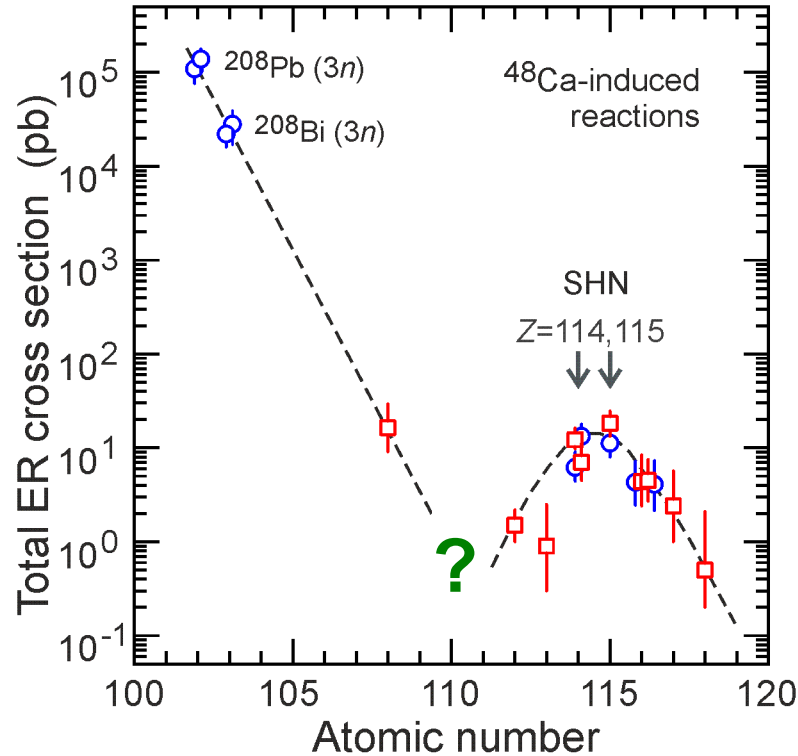


I = 3 μA 24-см мишень

Масштаб стабильности – минимум?



Сечения и свойства ядер ${}^{275-277}\text{Ds}$



$$\sigma_{ER}(E_{c.m.}) = \sigma_c(E_{c.m.}) P_{CN}(E_{c.m.}) W_{sur}(E_{c.m.})$$

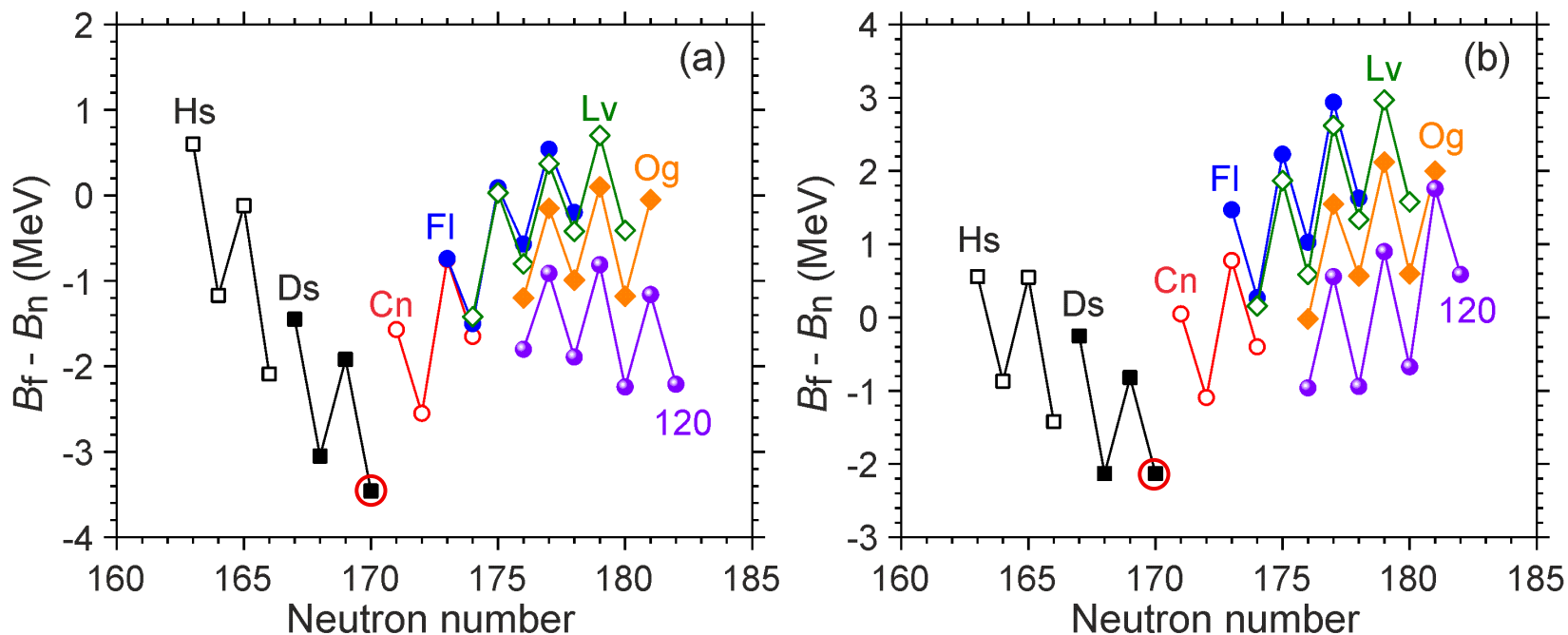
Масштаб стабильности – минимум?



Сечения и свойства ядер $^{275-277}\text{Ds}$

$$W_{\text{sur}} \sim \exp(B_f - B_n)$$

Jachimowicz, Kowal, J. Skalski, ADNDT **138**, 101393 (2021). Möller, Sierk, Ichikawa, Sagawa, ADNDT **109-110**, 1 (2016).



Зависимость ($B_f - B_n$) от числа нейтронов для изотопов элементов от 108 (Hs) до 120, продуктов реакций ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U , $^{242,244}\text{Pu}$, $^{245,248}\text{Cm}$, $^{249,251}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$ и $^{245,248}\text{Cm} + ^{54}\text{Cr}$.

Ядра с минимальной стабильностью



Новые ядра ^{276}Ds , ^{272}Hs , ^{268}Sg

Новый изотоп ^{275}Ds ,

подтверждение свойств ^{271}Hs , ^{267}Sg и ^{263}Rf

^{276}Ds

$4n$

new

Первое наблюдение распада в известные ядра

Hs 267 0.80 s 52 ms α 9.73 α - m	Hs 268 0.38 s α 9.479	Hs 269 9.7 s α 9.13, 8.95 g, m	Hs 270 3.6 s α 9.16	Hs 271 4 s α 9.13, 9.30	new	Hs 273 760 ms α 9.76 α 9.53
Bh 266 2.1 s α 9.08	Bh 267 17 s α 8.83			Bh 270 61 s α 8.93	Bh 271 1.2 s α 9.35	Bh 272 12.0 s α 8.73 - 9.15
Sg 265 8.9 s 16.2 s α 8.80 8.90 sf m, g	Sg 266 21 s sf α 8.77, 8.52 g - g		new	Sg 269 3.1 m α 8.50		Sg 271 1.9 m α 8.54 sf
		Db 266 22 m sf ($\alpha?$, $\alpha?$)	Db 267 1.8 h sf	Db 268 27 h sf ($\alpha?$, $\epsilon?$)		Db 270 1.1 h α 7.90 sf
Rf 263 11 m sf $\alpha?$		Rf 265 1.0 m sf		Rf 267 1.3 h sf		

Ядра с минимальной стабильностью



Новые ядра ^{276}Ds , ^{272}Hs , ^{268}Sg

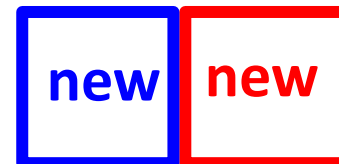
Новый изотоп ^{275}Ds ,

подтверждение свойств ^{271}Hs , ^{267}Sg и ^{263}Rf

^{275}Ds ^{276}Ds

5n

4n



Первое наблюдение распада в известные ядра

Hs 267 0.80 s 52 ms α 9.73 α - m	Hs 268 0.38 s α 9.55 sf	Hs 269 9.7 s α 9.13, 8.95 g, m	Hs 270 3.6 s α 9.16	Hs 271 4 s α 9.13, 9.30 conf	new	Hs 273 760 ms α 9.53
Bh 266 2.1 s α 9.08	Bh 267 17 s α 8.83			Bh 270 61 s α 8.93	Bh 271 1.2 s α 9.35	Bh 272 12.0 s α 8.73 - 9.15
Sg 265 8.9 s α 8.80 8.90 sf α - g	Sg 266 21 s α 8.70 sf α - g, m	conf	new	Sg 269 3.1 m α 8.50		Sg 271 1.9 m α 8.54 sf
		Db 266 22 m sf (α?, α?)	Db 267 1.8 h sf	Db 268 27 h sf (α?, ε?)		Db 270 1.1 h α 7.90 sf
Rf 263 11 m sf conf		Rf 265 1.0 m sf		Rf 267 1.3 h sf		

Ядра с минимальной стабильностью

Свойства распада четырёх изотопов определены впервые

TABLE II. Summary decay properties of nuclei synthesized in present studies. The first three columns show nucleus, decay mode and branch, as well as half-life. The next four columns show α -particle energy E_α , α -decay energy Q_α , and partial half-lives with respect to α decay and SF.

Nucleus	Decay mode, branch (%) ^{a,b}	Half-life ^b	E_α (MeV) ^c	Q_α (MeV) ^c	T_α ^b	T_{SF} ^b
²⁷⁶ Ds	SF: 57 ⁺¹⁵ -18	0.15 ^{+0.10} -0.04 ms	10.746(28)	10.904(28)	0.36 ^{+0.32} -0.15 ms	0.27 ^{+0.23} -0.10 ms
²⁷⁵ Ds	α	0.43 ^{+0.29} -0.12 ms	11.200(19)	11.365(19)		
²⁷² Hs	α	160 ⁺¹⁹⁰ -60 ms	9.628(21)	9.772(21)		
²⁶⁸ Sg	SF	13 ⁺¹⁷ -4 s				

^a Branch is given for the most probable decay mode (α or SF). The branching ratio is not listed when only one decay mode was observed.

^b Error bars correspond to 68%-confidence level.

^c Energy uncertainties (standard deviations) given in parenthesis correspond to the data with the best energy resolution.

Ядра с минимальной стабильностью

Структура уровней ядер с нечётным N

TABLE II. Summary decay properties of nuclei synthesized in the $^{232}\text{Th}+^{48}\text{Ca}$ reaction in present studies. The first three columns show nucleus, decay mode, and experimental half-life. The next five columns show α -particle energy E_α , α -decay energy Q_α , as well as calculated spin and partial half-lives with respect to α decay and SF.

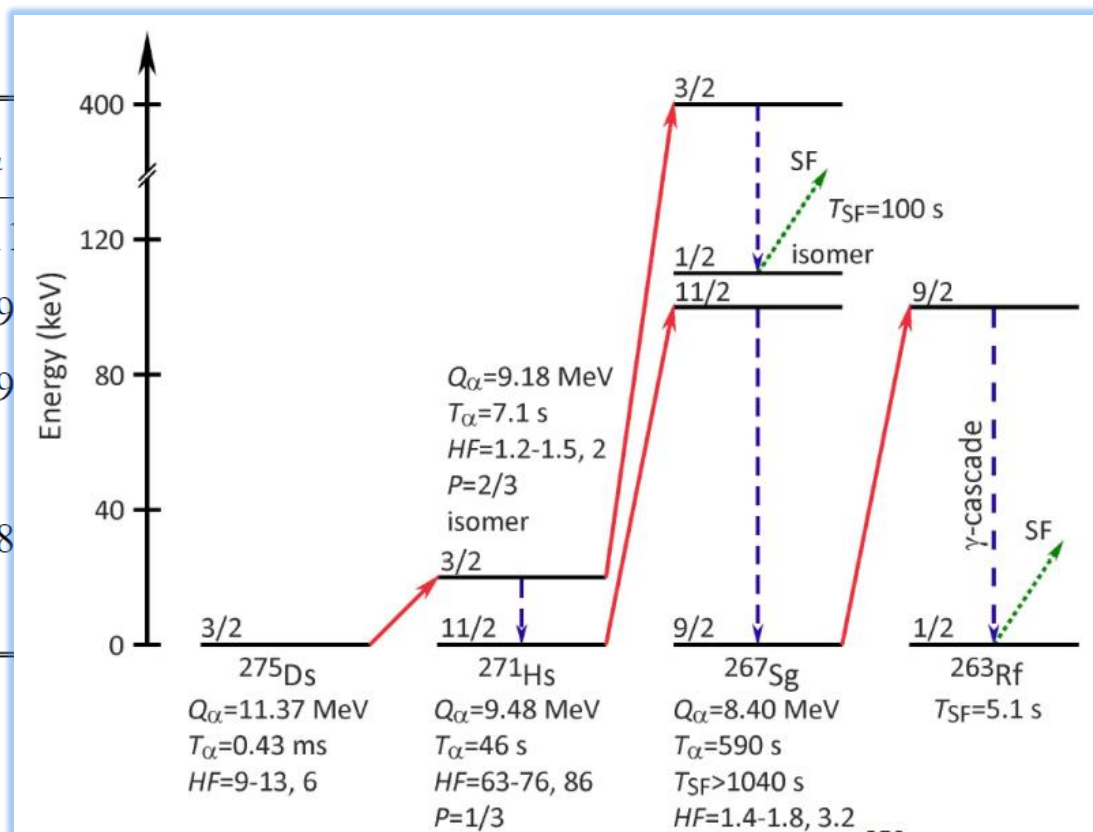
Nucleus	Decay mode	$T_{1/2}^{exp}$	E_α (MeV) ^a	Q_α (MeV) ^a	Spin	T_a^{calc}	T_{SF}^{calc}
^{275}Ds	α	$0.43^{+0.29}_{-0.12}$ ms	11.20(2)	11.37(2)	3/2	0.22 ms	2.0 s
^{271}Hs	α	$7.1^{+8.4}_{-2.5}$ s	9.05(2)	9.18(2)	3/2	5.1 s	6.0 min
^{271}Hs	α	46^{+56}_{-16} s	9.34(2)	9.48(2)	11/2	63 s	21 h
^{267}Sg	SF	100^{+92}_{-39} s ^b	–	–	1/2	16 h	140 s
^{267}Sg	α	$9.8^{+11.3}_{-4.5}$ min ^b	8.27(2)	8.40(2)	9/2	6 min	2.9 h
^{263}Rf	SF	$5.1^{+4.6}_{-1.7}$ s ^b	–	–	1/2	0.5 h	6.4 s

Ядра с минимальной стабильностью

Структура уровней ядер с нечётным N

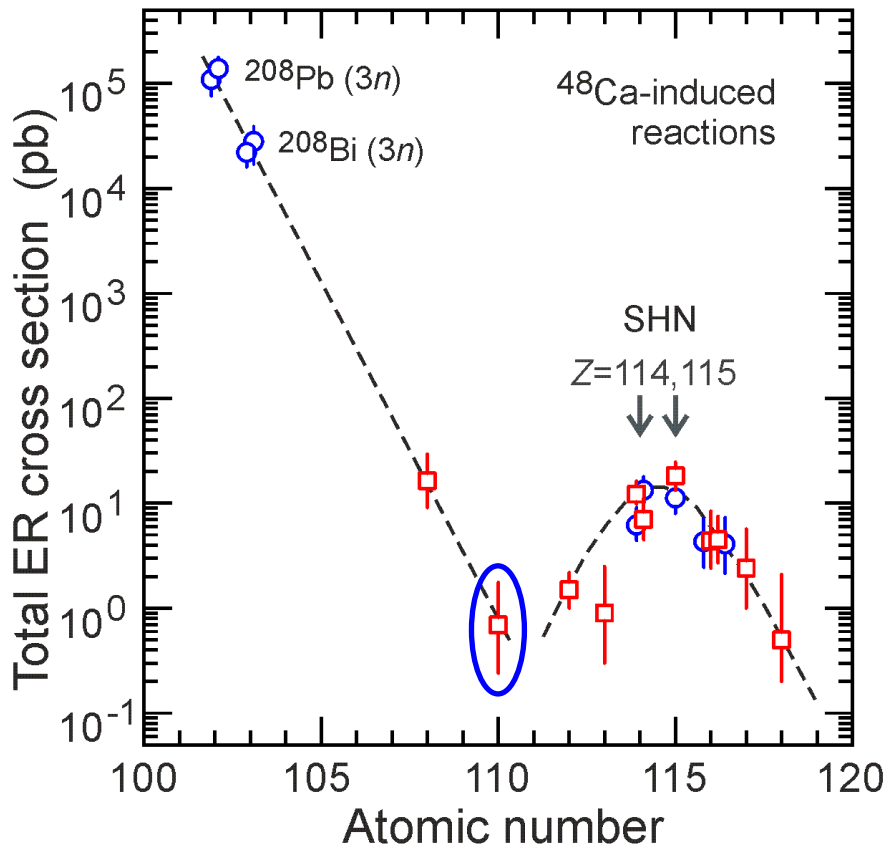
TABLE II. Summary decay properties of nuclei synthesized in the $^{232}\text{Th}+^{48}\text{Ca}$ reaction in present studies. The first three columns show nucleus, decay mode, and experimental half-life. The next five columns show α -particle energy E_α , α -decay energy Q_α , as well as calculated spin and partial half-lives with respect to α decay and SF.

Nucleus	Decay mode	$T_{1/2}^{exp}$	E_α
^{275}Ds	α	$0.43^{+0.29}_{-0.12}$ ms	1
^{271}Hs	α	$7.1^{+8.4}_{-2.5}$ s	9
^{271}Hs	α	46^{+56}_{-16} s	9
^{267}Sg	SF	100^{+92}_{-39} s ^b	
^{267}Sg	α	$9.8^{+11.3}_{-4.5}$ min ^b	8
^{263}Rf	SF	$5.1^{+4.6}_{-1.7}$ s ^b	

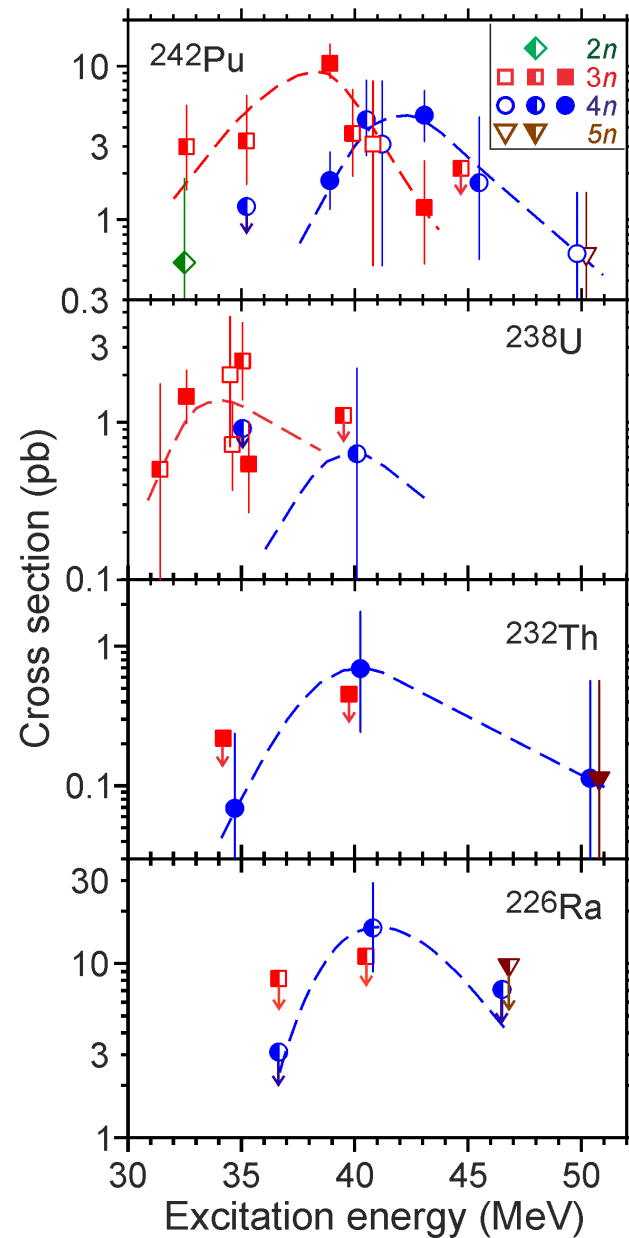


Ядра с минимальной стабильностью

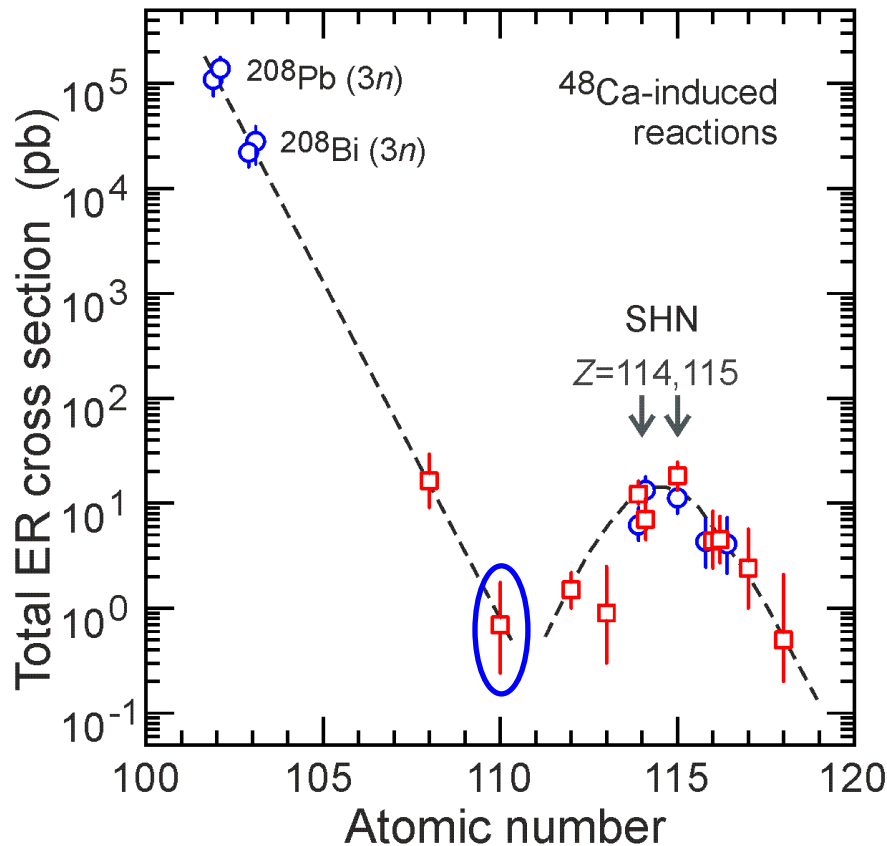
$^{232}\text{Th}(^{48}\text{Ca}, 4-5n)^{275,276}\text{Ds}$



$\sigma_{3n} > \sigma_{4n}$ для ^{242}Pu и ^{238}U
 $\sigma_{3n} < \sigma_{4n}$ для ^{232}Th и ^{226}Ra

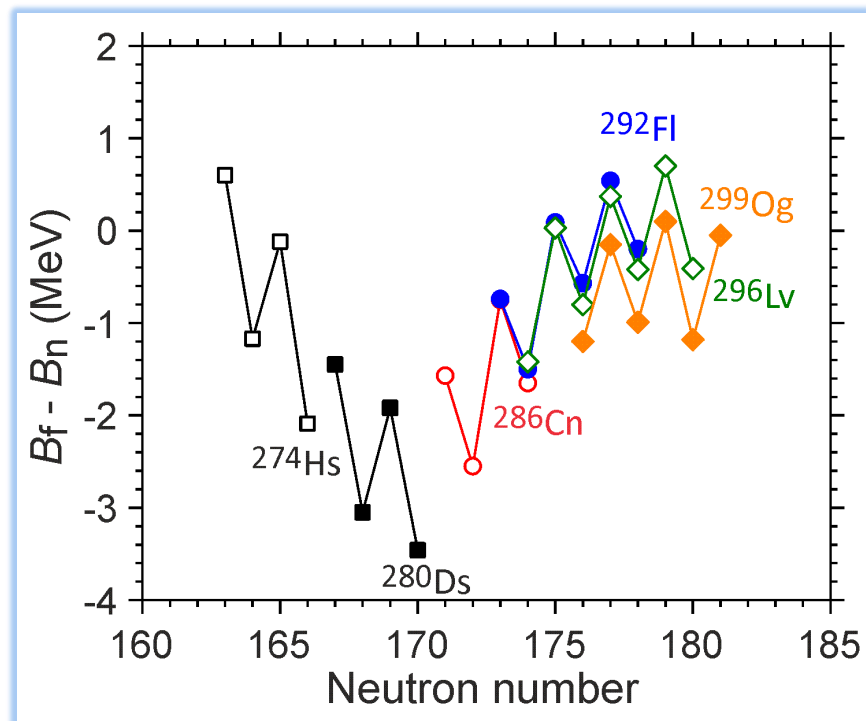


Ядра с минимальной стабильностью



**Выживаемость СТЯ
с минимумом $B_f - B_n$**

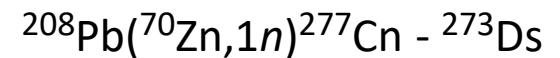
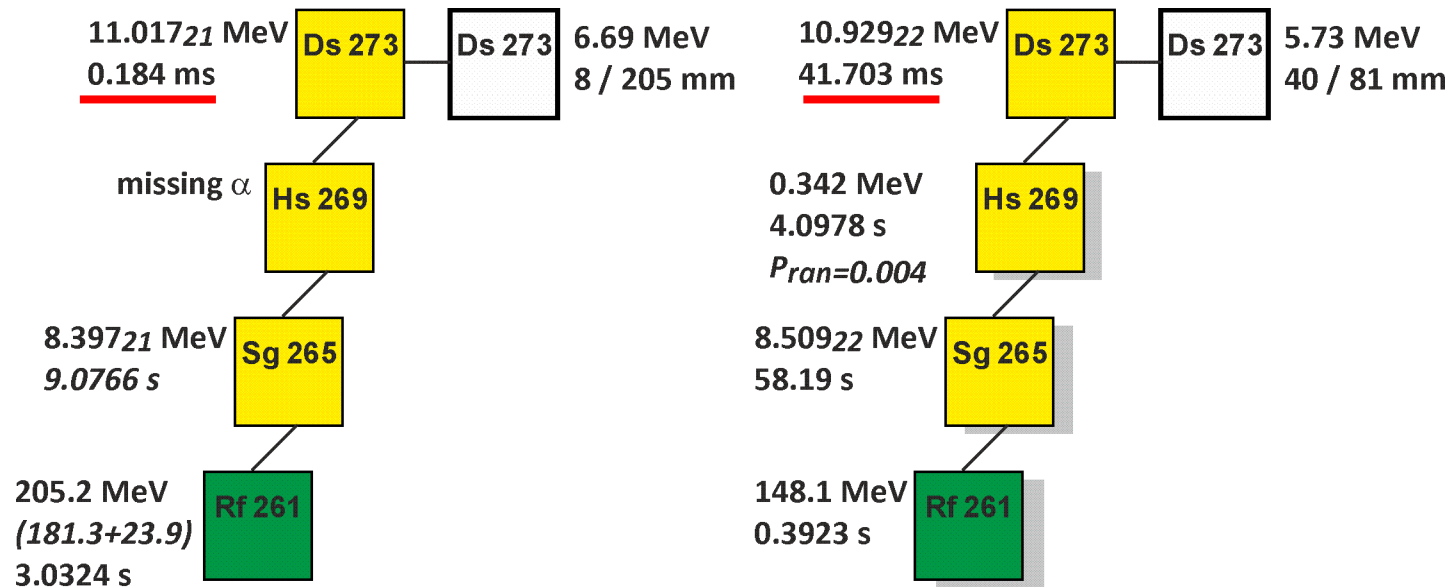
$$W_{\text{sur}} \sim \exp(B_f - B_n)$$



Ядра с минимальной стабильностью



Сечение реакции и свойства распада ^{273}Ds

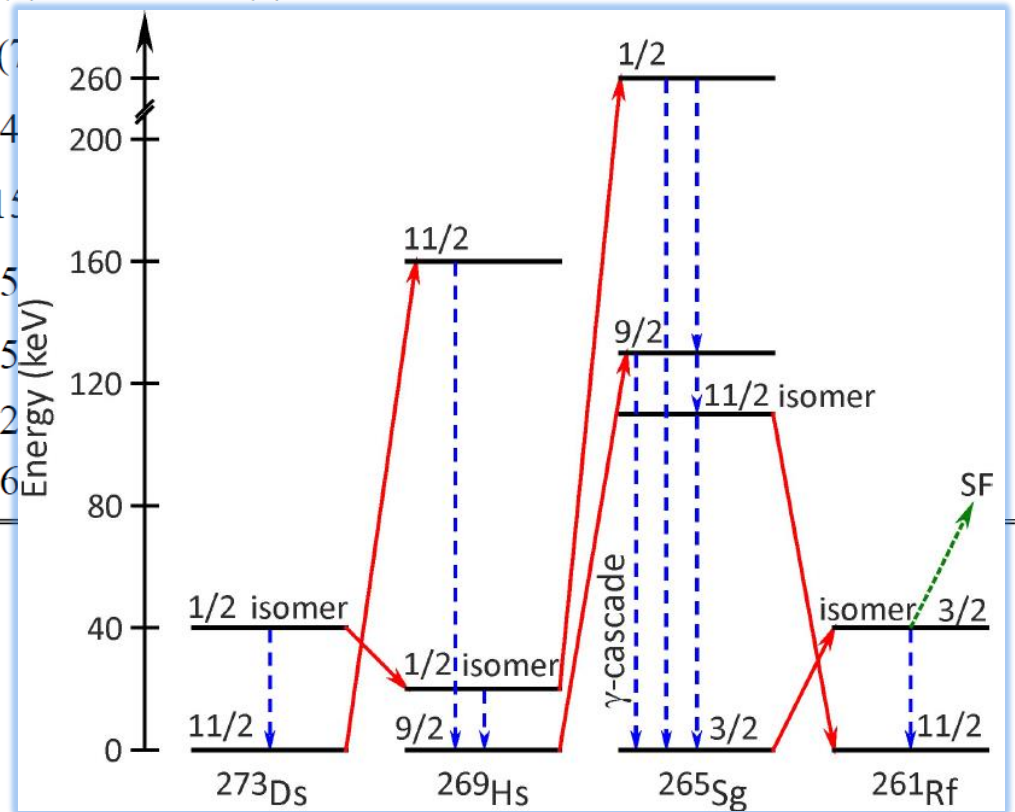


Структура уровней ядер с нечётным N

Nucleus	Decay mode	$T_{1/2}^{exp}$	E_α (MeV)	Q_α (MeV)	Spin	T_a^{calc}	T_{SF}^{calc}
$^{273}\text{Ds}^a$	α	30^{+140}_{-15} ms	10.93(2)	11.09(2)	11/2	87 ms	110 s
$^{273}\text{Ds}^b$	α	$0.18^{+0.11}_{-0.05}$ ms	11.10(7)	11.27(7)	1/2	0.21 ms	47 s
$^{269}\text{Hs}^a$	α	13^{+10}_{-4} s	9.20(4)	9.34(4)	9/2	15 s	2.2 h
$^{269}\text{Hs}^b$	α	$2.8^{+13.6}_{-1.3}$ s	9.08(15)	9.22(15)	1/2	3 s	14 min
$^{265}\text{Sg}^a$	α	$8.5^{+2.6}_{-1.6}$ s	8.84(5)	8.97(5)	11/2	11 s	14 h
$^{265}\text{Sg}^b$	α	$14.4^{+3.7}_{-2.5}$ s	8.69(5)	8.82(5)	3/2	12 s	59 min
$^{261}\text{Rf}^a$	α	68 ± 3 s	8.28(2)	8.41(2)	11/2	87 s	12 min
$^{261}\text{Rf}^b$	SF	$2.6^{+0.7}_{-0.5}$ s	8.51(6)	8.64(6)	3/2	7.4 s	3.7 s

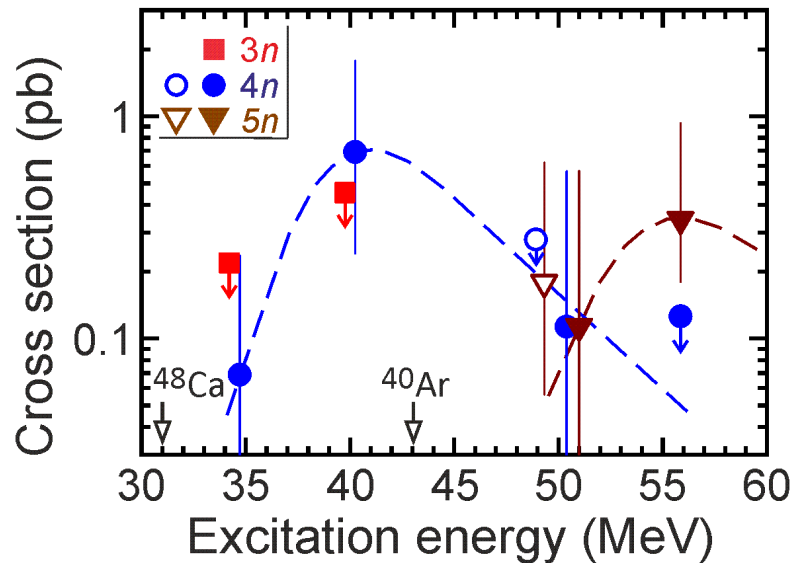
Структура уровней ядер с нечётным N

Nucleus	Decay mode	$T_{1/2}^{exp}$	E_α (MeV)	Q_α (MeV)	Spin	T_a^{calc}	T_{SF}^{calc}
$^{273}\text{Ds}^a$	α	30^{+140}_{-15} ms	10.93(2)	11.09(2)	11/2	87 ms	110 s
$^{273}\text{Ds}^b$	α	$0.18^{+0.11}_{-0.05}$ ms	11.10(7)	11.26(7)	11/2		
$^{269}\text{Hs}^a$	α	13^{+10}_{-4} s	9.20(4)	9.36(4)	11/2		
$^{269}\text{Hs}^b$	α	$2.8^{+13.6}_{-1.3}$ s	9.08(15)	9.24(15)	11/2		
$^{265}\text{Sg}^a$	α	$8.5^{+2.6}_{-1.6}$ s	8.84(5)	9.00(5)	11/2		
$^{265}\text{Sg}^b$	α	$14.4^{+3.7}_{-2.5}$ s	8.69(5)	8.85(5)	11/2		
$^{261}\text{Rf}^a$	α	68 ± 3 s	8.28(2)	8.44(2)	11/2		
$^{261}\text{Rf}^b$	SF	$2.6^{+0.7}_{-0.5}$ s	8.51(6)	8.67(6)	11/2		



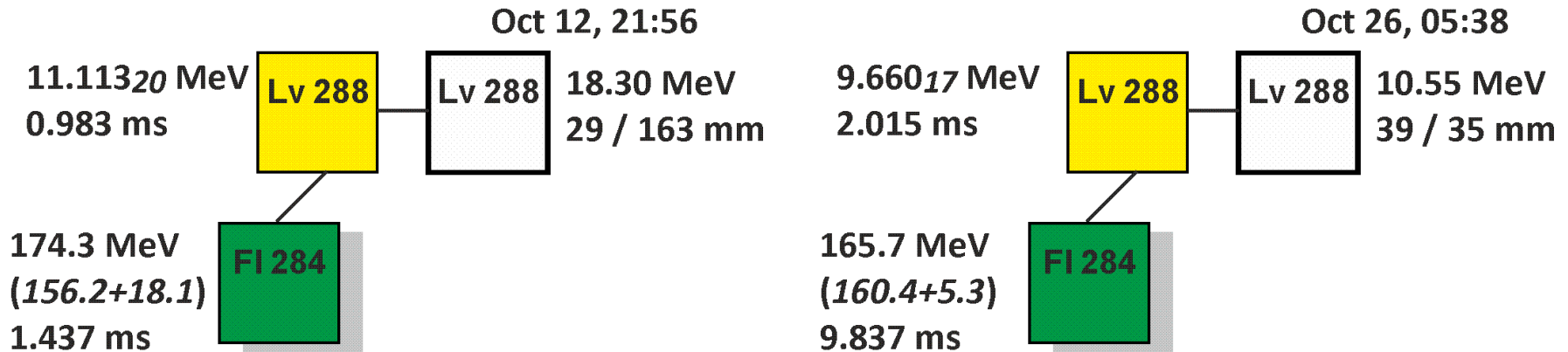
Reaction, target thickness, energy in lab system, excitation energy, beam dose, number of decay chains of $^{277}\text{Ds}(3n)$, $^{276}\text{Ds}(4n)$, $^{275}\text{Ds}(5n)$ and $^{273}\text{Ds}(5n)$ and their production cross-section

Reaction	Thickness (mg/cm ²)	E_{lab} (MeV)	E^* (MeV)	Dose $\times 10^{19}$	No. of decay chains $3n/4n/5n$	σ_{3n} (pb)	σ_{4n} (pb)	σ_{5n} (pb)	
(2022)	0.89	231.1	32.3-36.6	2.4	0/1/0	<0.2	$0.07^{+0.17}_{-0.06}$	–	
	0.76	237.8	37.9-42.1	1.9	0/5/0	<0.5	$0.7^{+1.1}_{-0.5}$	–	
(2023)	$^{232}\text{Th}+^{48}\text{Ca}$	0.65	250.6	48.9-52.3	2.0	0/1/1	–	$0.11^{+0.46}_{-0.09}$	$0.11^{+0.46}_{-0.09}$
		0.65	257	54.2-57.5	3.2	0/0/5	–	<0.2	$0.34^{+0.59}_{-0.16}$
(2023)	$^{238}\text{U}+^{40}\text{Ar}$	0.69	212	47.5-50.7	3.2	0/0/2			$0.18^{+0.22}_{-0.12}$



Эксперименты с пучками тяжелее ^{48}Ca

Эксперимент $^{238}\text{U} + ^{54}\text{Cr}$



Мишень ^{238}U : 0.72 мг/см²

Доза: 7.2×10^{19}

Энергия возбуждения: 42 МэВ

Сечение ~ 36 (12-82) фб

Впервые:

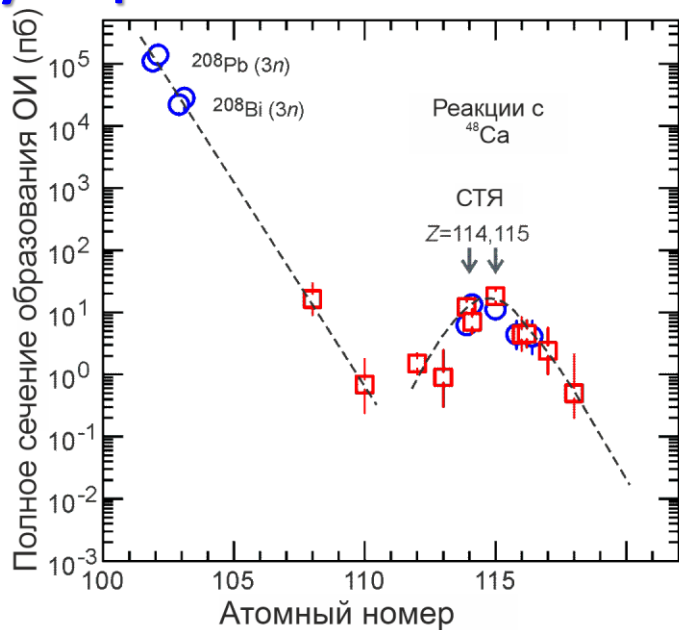
Актинид + ^{54}Cr

Новый изотоп ^{288}Lv

Подтверждение ^{284}Fl

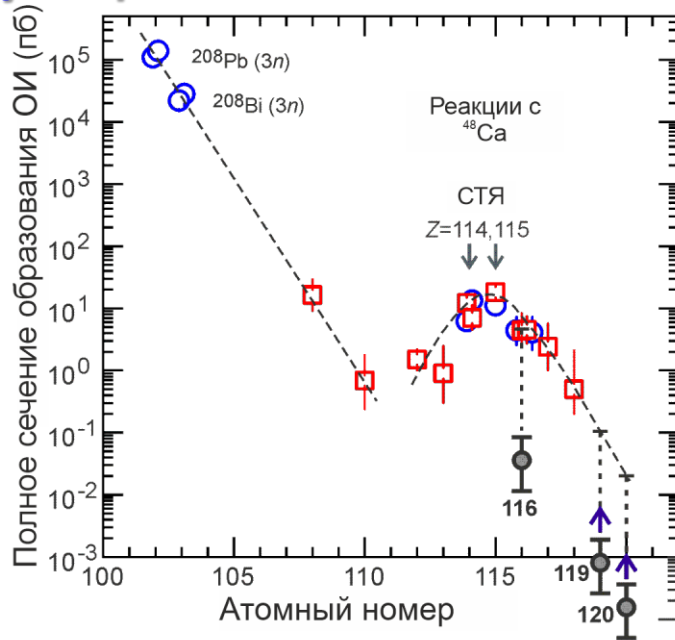
Следующий этап

Синтез новых элементов 119 и 120



Следующий этап

Синтез новых элементов 119 и 120



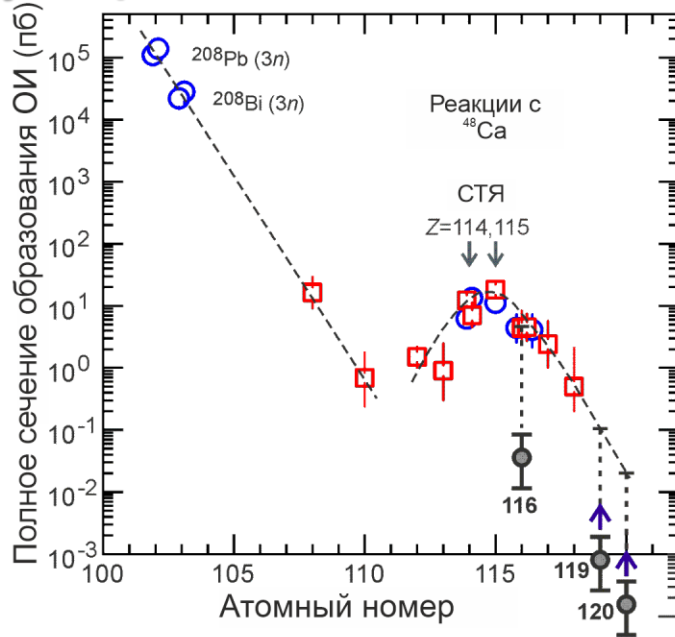
$\sigma=1$ фб, $h_t=0.7$ мг/см², $I_{\text{пучка}}=4$ рμА → ≈ 1 / 3 года

$Z_{\text{маг}} = 120 - 126?$

119:
Сечение ~1 фб

Следующий этап

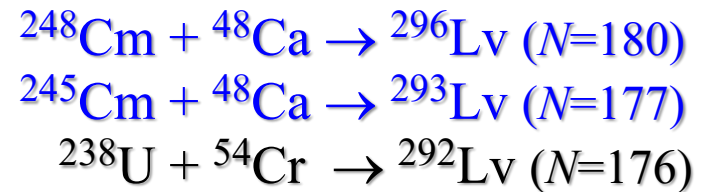
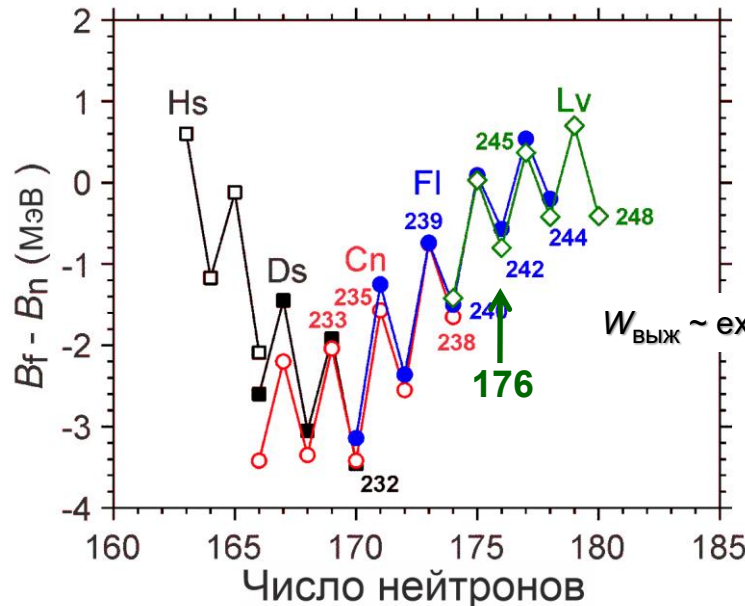
Синтез новых элементов 119 и 120



$\sigma=1$ фб, $h_t=0.7$ мг/см², $I_{\text{пучка}}=4$ рµА → ≈ 1 / 3 года

119:
Сечение ~1 фб

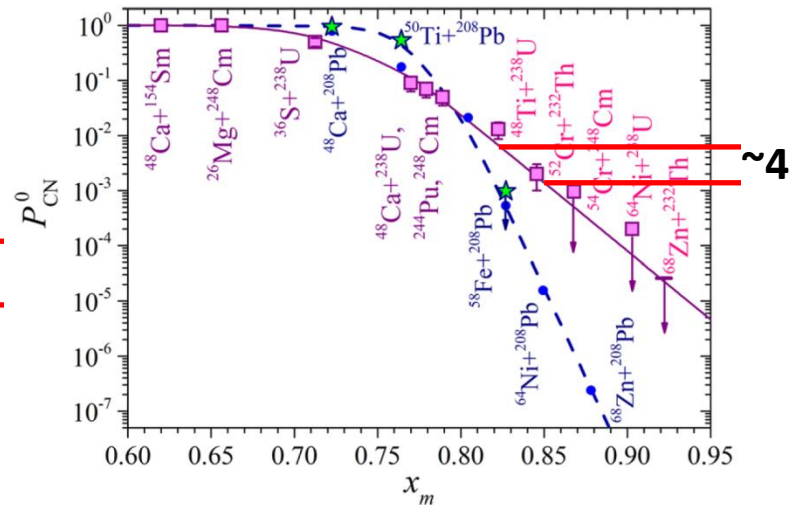
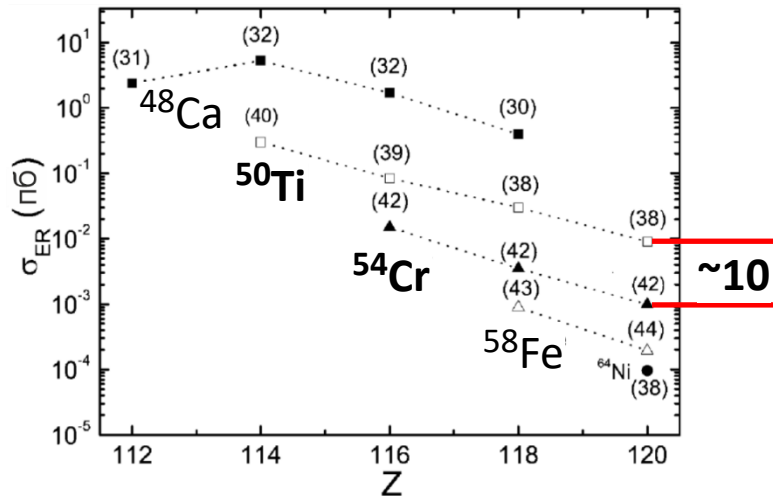
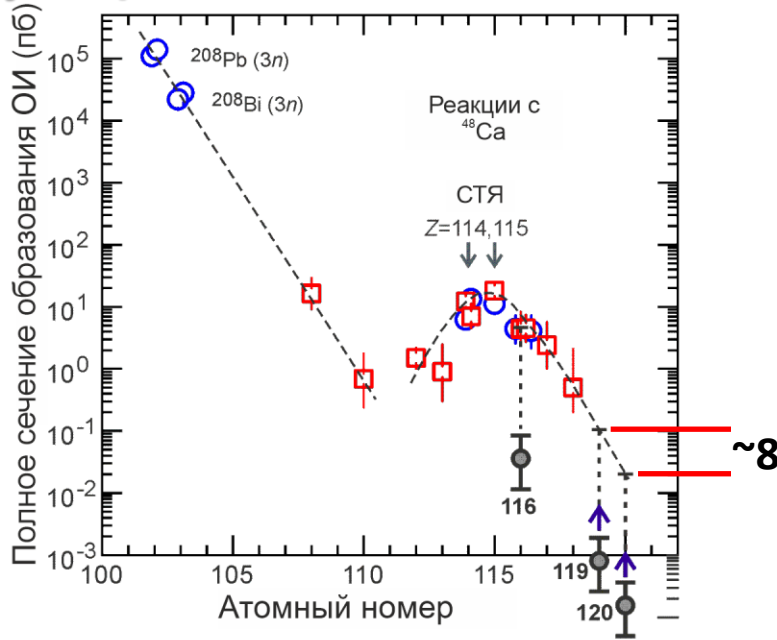
**Точность
оценки:
Эксперимент**



**Меньшая выживаемость –
Большая вероятность
образования составного ядра**

Следующий этап

Синтез новых элементов 119 и 120

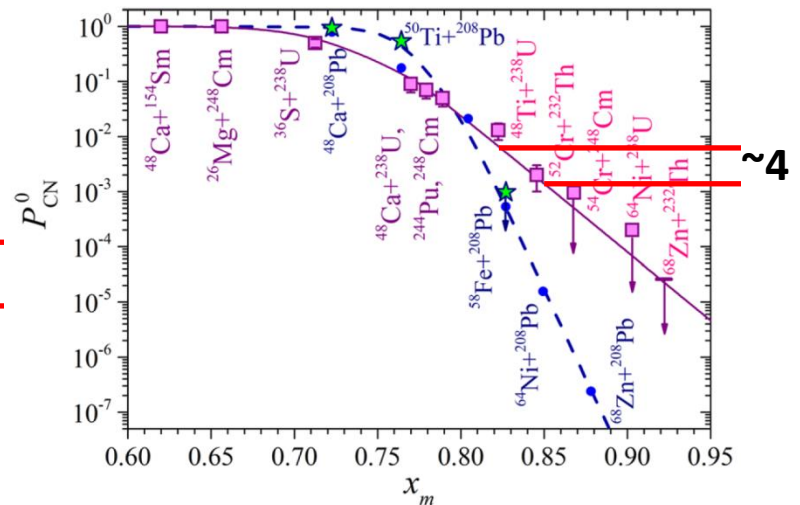
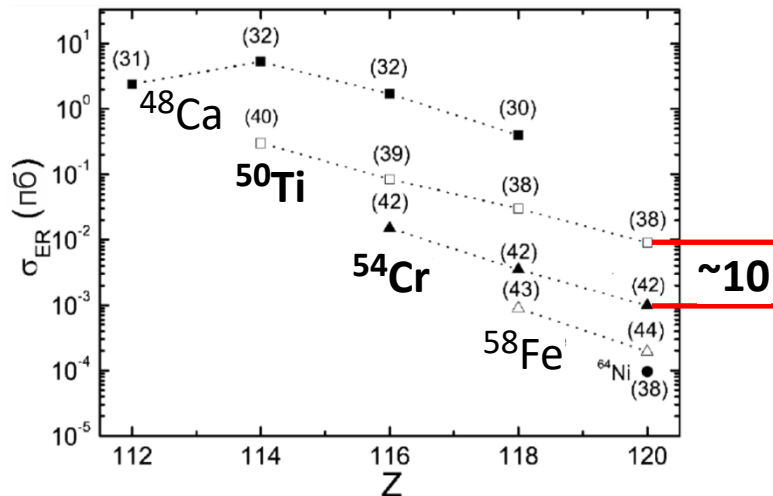
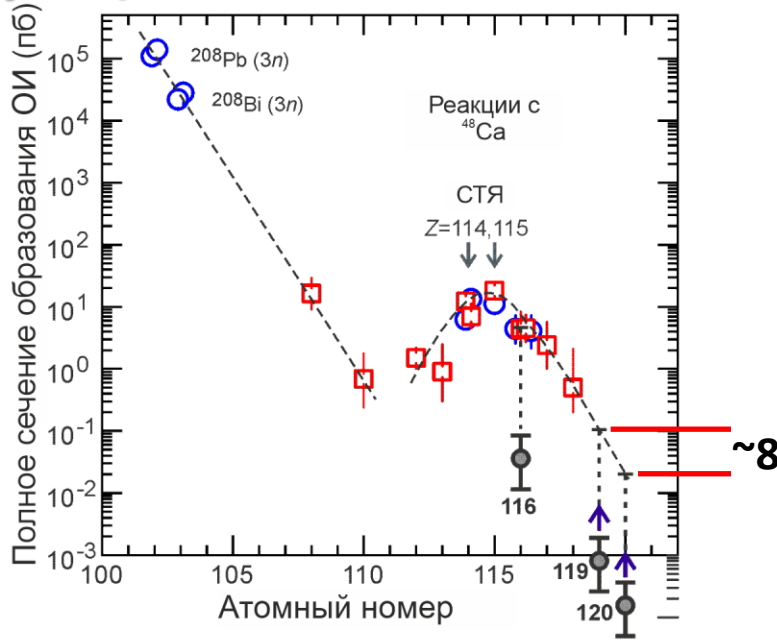


G.G. Adamian *et al.*, PRC 101, 034301 (2020)

M.G. Itkis *et al.*, EPJ A 58, 178 (2022)

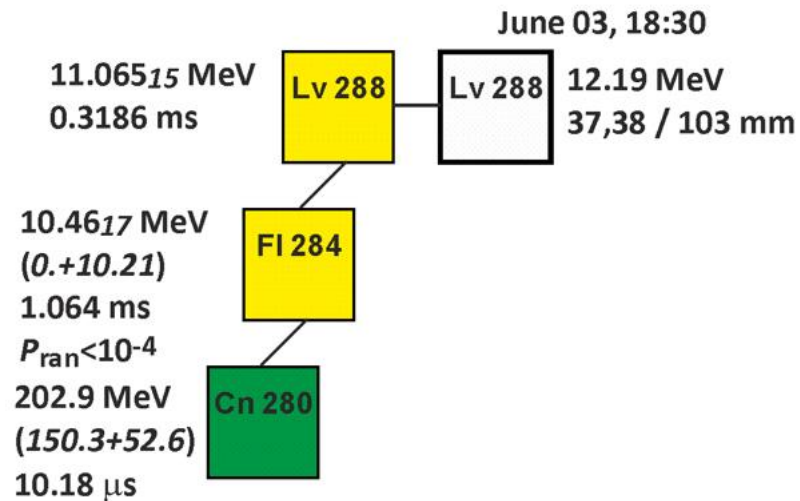
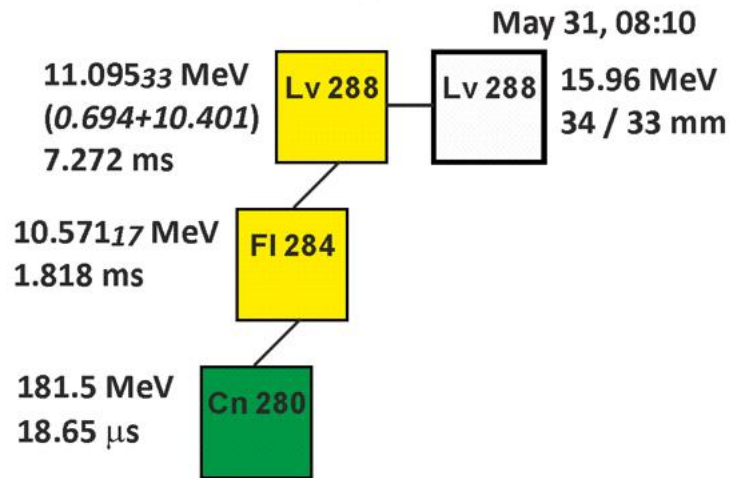
Следующий этап

Синтез новых элементов 119 и 120



Эксперименты с пучками тяжелее ^{48}Ca

Эксперимент $^{242}\text{Pu} + ^{50}\text{Ti}$



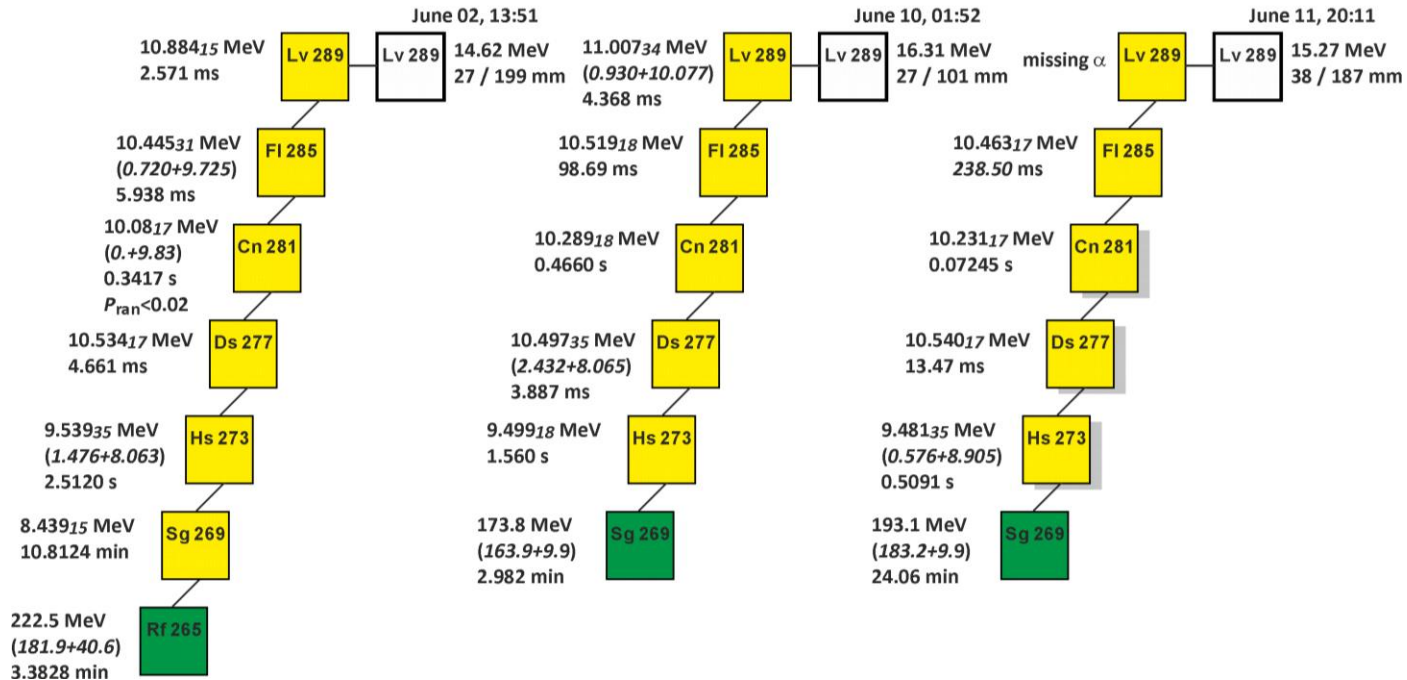
Мишень ^{242}Pu : 0.72 мг/см²
Доза пучка: 1.5×10^{19}
Энергия возбуждения: 41 МэВ

Сечение ~ 220 (70-490) фб

Впервые:
Новый изотоп ^{280}Cn
 α -распад of ^{284}Fl

Эксперименты с пучками тяжелее ^{48}Ca

Эксперимент $^{242}\text{Pu} + ^{50}\text{Ti}$



Мишень ^{242}Pu : 0.72 мг/см²

Доза пучка: 1.5×10^{19}

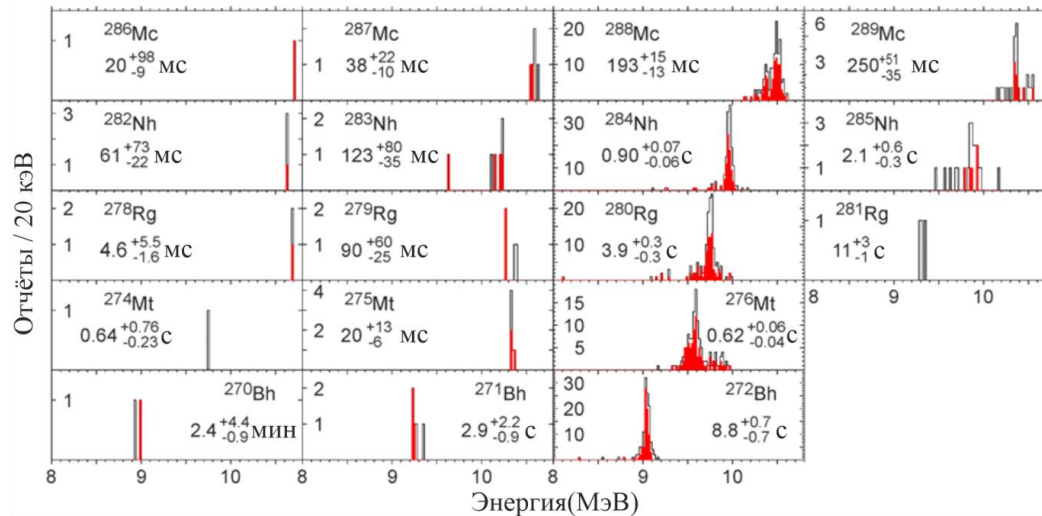
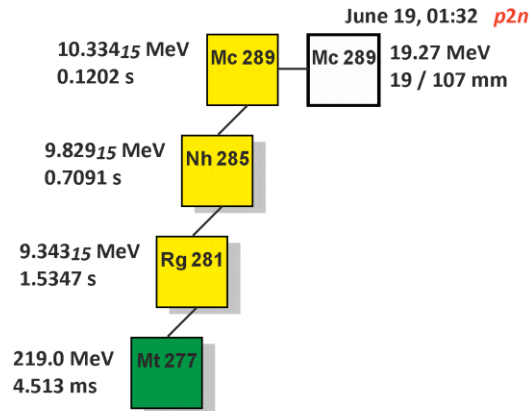
Энергия возбуждения: 41 MeV

Сечение ~ 320 (140-660) фб

Впервые:

Новый изотоп ^{289}Lv

Эксперимент $^{242}\text{Pu} + ^{50}\text{Ti}$

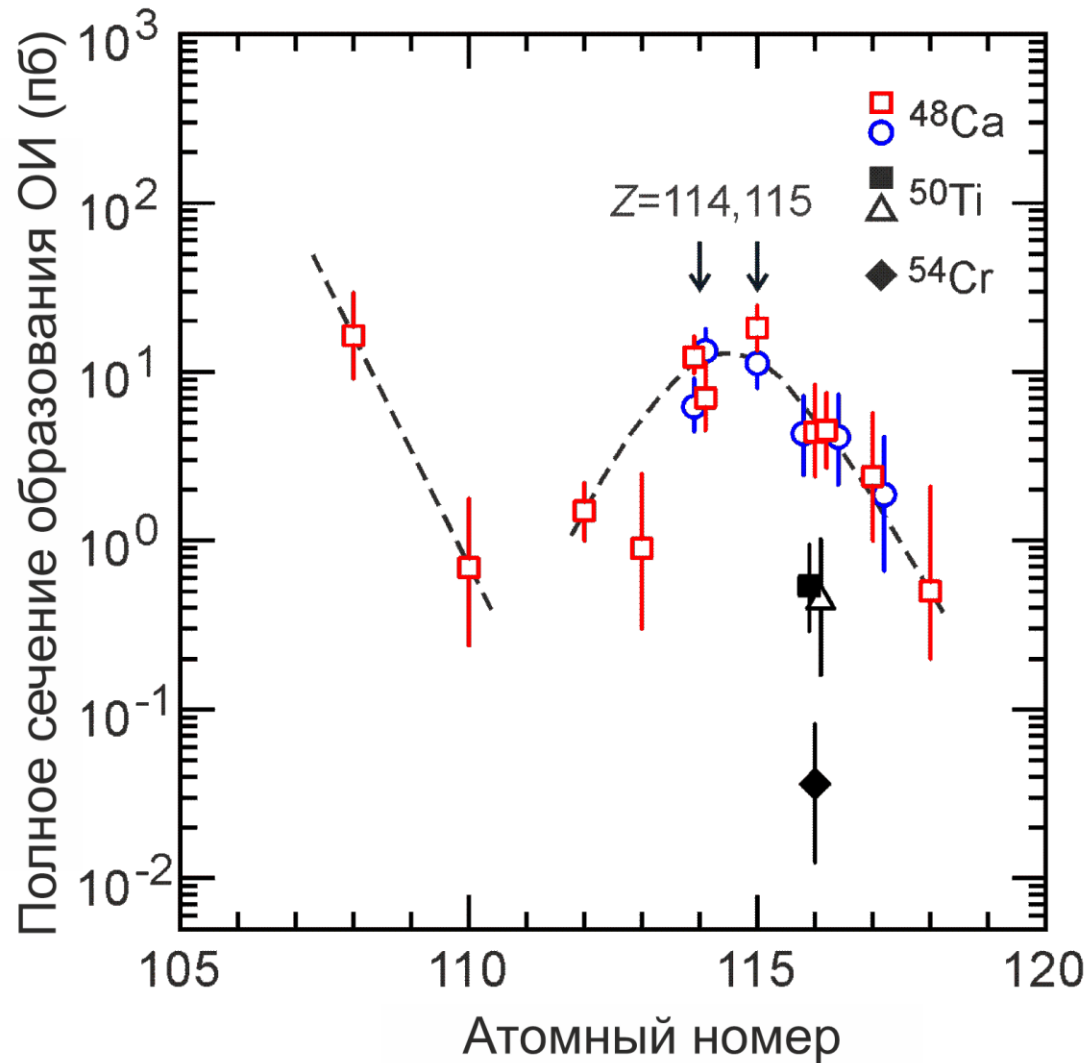


Мишень ^{242}Pu : 0.72 мг/см²
 Доза пучка: 1.5×10^{19}
 Энергия возбуждения: 41 МэВ
 Сечение ~0.11 (0.02-0.37) пб

Впервые:
pxn канал
 Actinid + ^{48}Ca , ^{50}Ti , ^{54}Cr

Эксперименты с пучками тяжелее ^{48}Ca

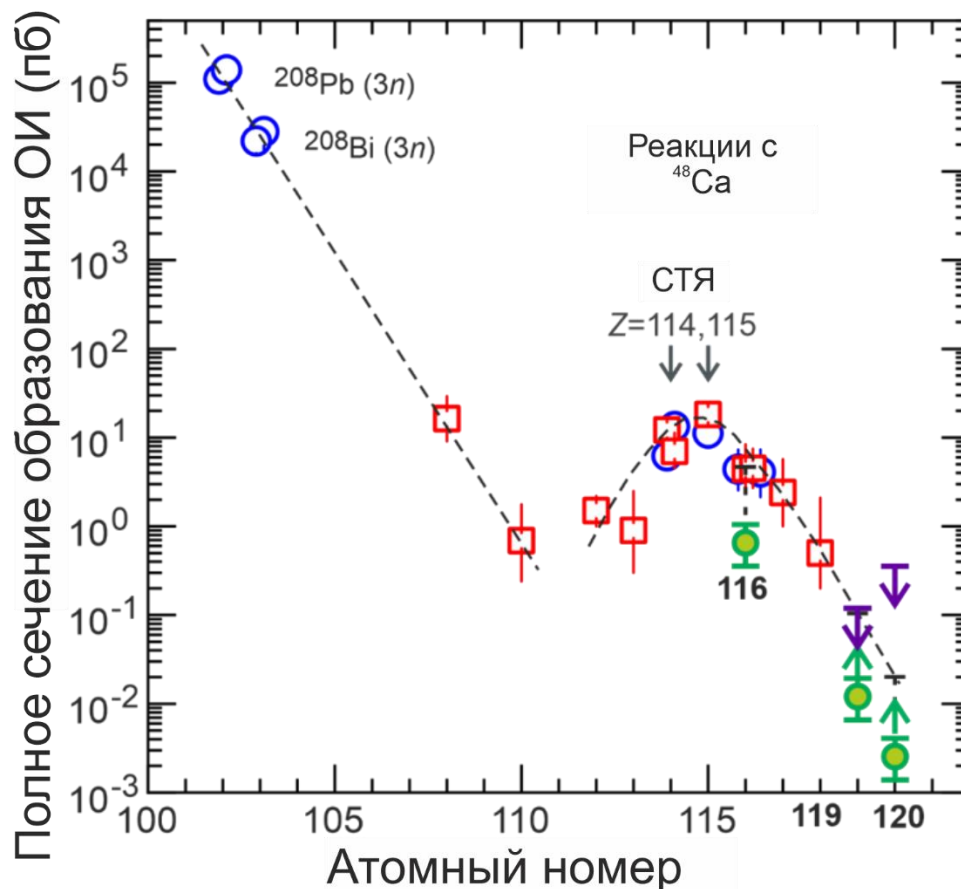
Сечения образования сверхтяжёлых элементов



$^{50}\text{Ti} + ^{244}\text{Pu}$
J.M. Gates *et al.*
PRL 133, 172502 (2024)

Эксперименты с пучками тяжелее ^{48}Ca

Сечения образования сверхтяжёлых элементов



119: ~ 10 фб
120: ~ 2.5 фб

Gates 2024: 25-50 фб Z=120
Khuyagbaatar 2024: 20 фб Z=119
6 фб Z=120

ГНС-2: Результаты экспериментов



Синтез новых изотопов ^{286}Mc и ^{264}Lr

α -распад ^{268}Db

Спонтанное деление ^{279}Rg

В два раза больше сечение $3n$ канала

Впервые измерено сечение $5n$ канала



В два-три раза больше сечение $3n$ канала

Распад через разные уровни ^{287}Fl и ^{283}Cn приводят к α -распаду или SF ^{279}Ds

Переход через уровни $0^+ \rightarrow 2^+$ в α -распадах ^{286}Fl



Синтез 4 новых изотопов ^{268}Sg , ^{272}Hs , ^{275}Ds , ^{276}Ds

Структура уровней ядер в цепочке распада ^{275}Ds

Сечение образования изотопов Ds (мин. стабильность)

Распад СТЯ ^{275}Ds в известные ядра



Структура уровней ядер в цепочке распада ^{273}Ds

Сечение образования изотопов Ds (мин. стабильность)

ГНС-2: Результаты экспериментов



Сечение реакции актинид + ^{54}Cr (уменьшение на ~ 150)

Синтез нового изотопа ^{288}Lv

Подтверждение ^{284}Fl



Сечение реакции (уменьшение на ~ 10)

Синтез новых изотопов ^{289}Lv и ^{280}Cn

α -распад ^{284}Fl

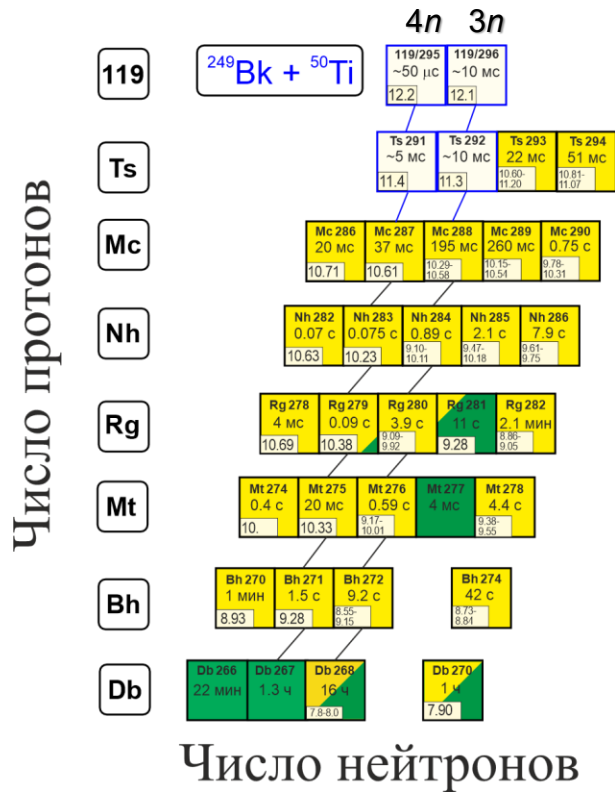
Первое наблюдение *pхп*-испарительного канала

Сечение реакции с ^{50}Ti в ~ 15 раз больше, чем ^{54}Cr

Открытие новых СТЭ 119 и 120 в пределах чувствительности эксперимента!

Будущее:

Синтез нового элемента 119 в реакции $^{249}\text{Bk} + ^{50}\text{Ti}$



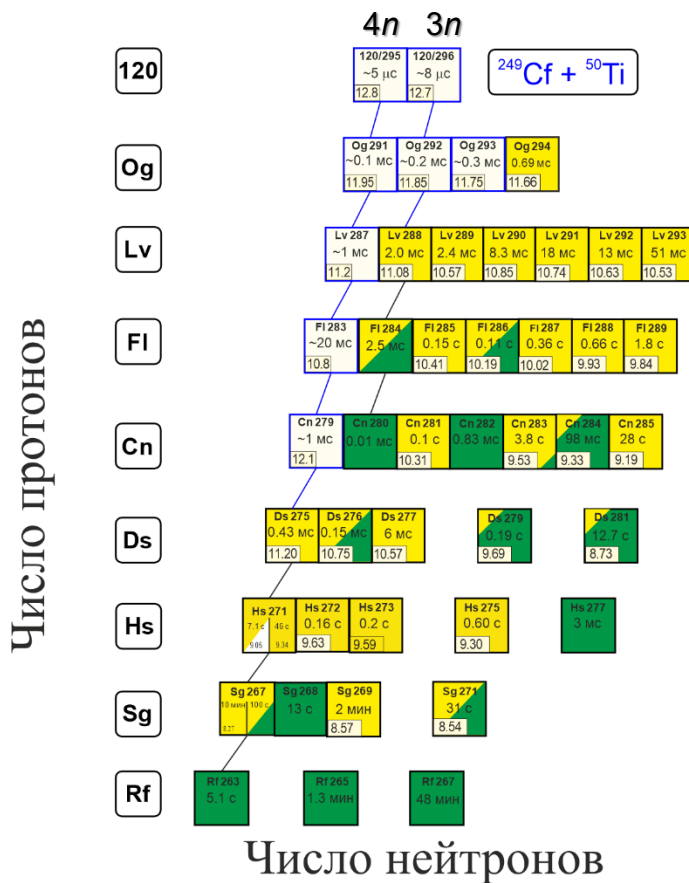
$$\sigma = 10 \text{ фб}, h_t = 0.3 \text{ мг/см}^2 \rightarrow \text{доза } 3 \times 10^{20} \rightarrow 1 \text{ ядро в год}$$

Оценки сечений
119: ~10 – 20 фб

если $Z_{\text{mag}} > 114$, сечение выше

Будущее:

Синтез нового элемента 120 в реакции $^{249}\text{Cf} + ^{50}\text{Ti}$



$$\sigma = 10 \text{ фб}, h_t = 0.3 \text{ мг/см}^2 \rightarrow \text{доза } 3 \times 10^{20} \rightarrow 1 \text{ ядро в год}$$

Оценки сечений
120: ~ 3 – 50 фб

если $Z_{\text{mag}} > 114$, сечение выше

График поступления изотопов (материалы Совета РАН по физике тяжёлых ионов)

год	Имеется	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2033
Pu-242	250 мг											
Am-243	250 мг											
Cm-248	25 мг											
Cm – тяжёлые изотопы	5 г, Cm-248 – 3%	5 г, Cm-248 – 7%										
Смесь изотопов Cm	1 г											
Bk-249				35 мг	35 мг							
Cm-245 обогащенный						35 мг						
Смесь изотопов Cm				Cm-248 0.5%	Cm-248 3%	Cm-248 8%						
Cm-248 обогащенный								35 мг				
Cf-249						40 мг						
Смесь изотопов Cf								20 мг	20 мг	20 мг	20 мг	
Cf-251 обогащенный									2,6 мг	3,1 мг	3,2 мг	3,5 мг

Промежуточный продукт из НИИАР во ВНИИЭФ

Готовый продукт из НИИАР в ОИЯИ

Готовый продукт из ВНИИЭФ в ОИЯИ

→ Электромагнитное обогащение изотопов (ВНИИЭФ)

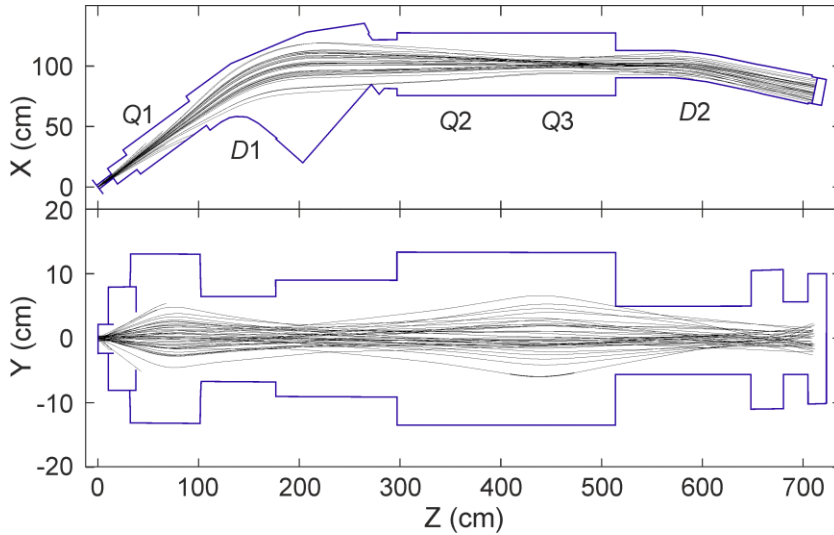
→ Радиохимическое выделение дочерних нуклидов (НИИАР)

Протоколы рабочих совещаний от 07.02.2023 №195-04/83678 и от 11.10.2024.

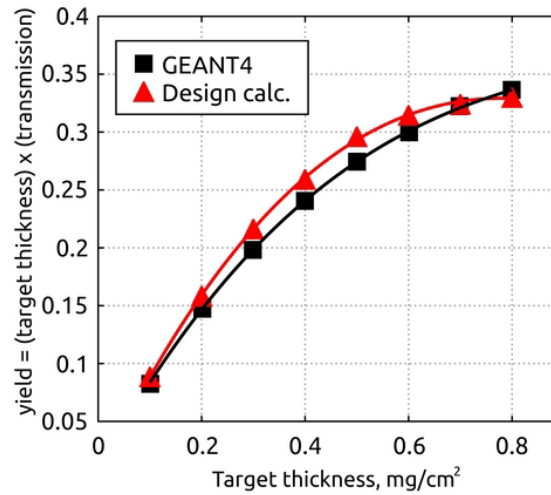
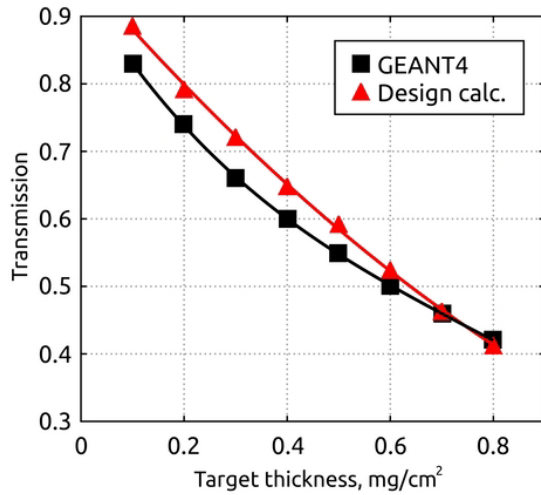
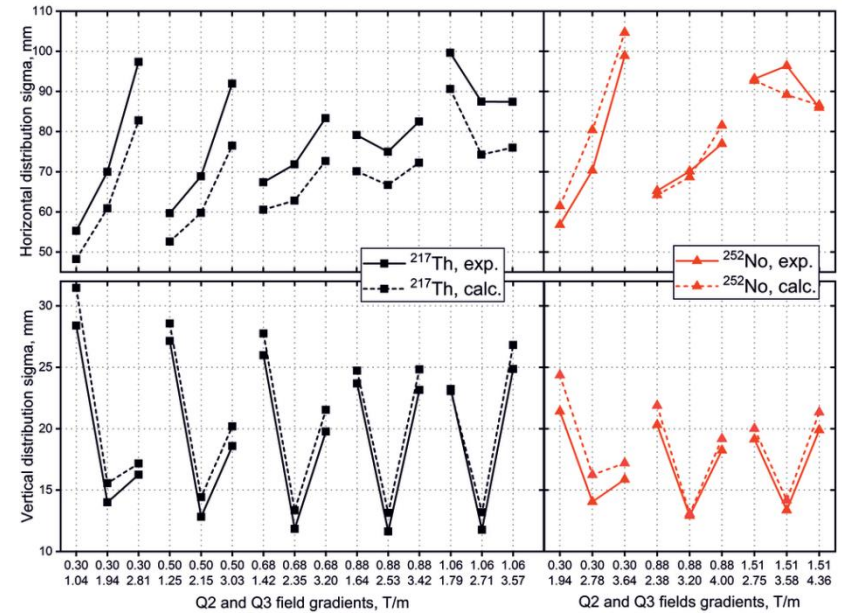
Спасибо за внимание!



Моделирование траекторий ядер в DGFRS-2 (модель GEANT4)



Траектории ^{252}No



Экспериментальные и расчетные ширины распределений для ^{174}Yb и ^{252}No при разных Q2 и Q3

Сравнение результатов расчетов трансмиссии (слева) и выхода (справа) по проекту и по модели в GEANT4

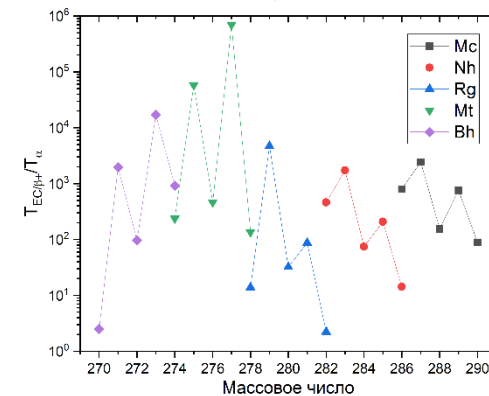
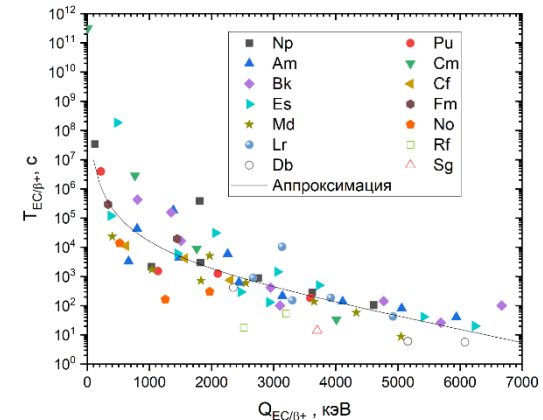
pxn-канал реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ и электронный захват в ядрах ^{288}Mc и ^{284}Nh

- Экспериментальные данные аппроксимировались формулой, предложенной Колесниковым:

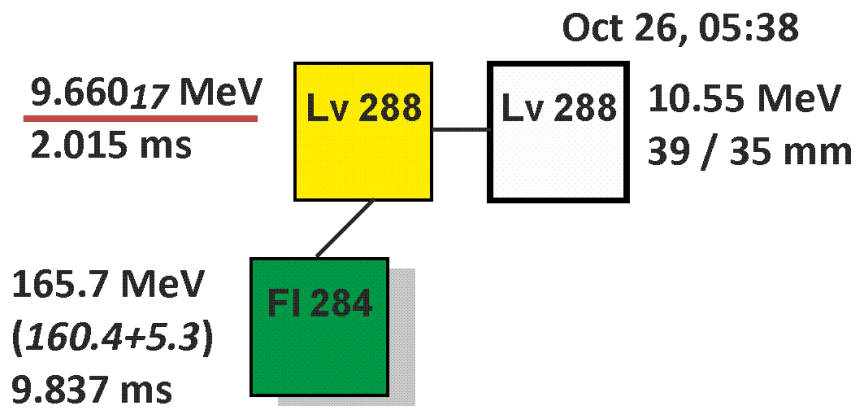
$$\log_{10} T_{\beta} = A - B * \log_{10} Q_{\beta} - C * Q_{\beta}^D$$

- Аппроксимировались только нечётные по A и нечётно-нечётные ядра.

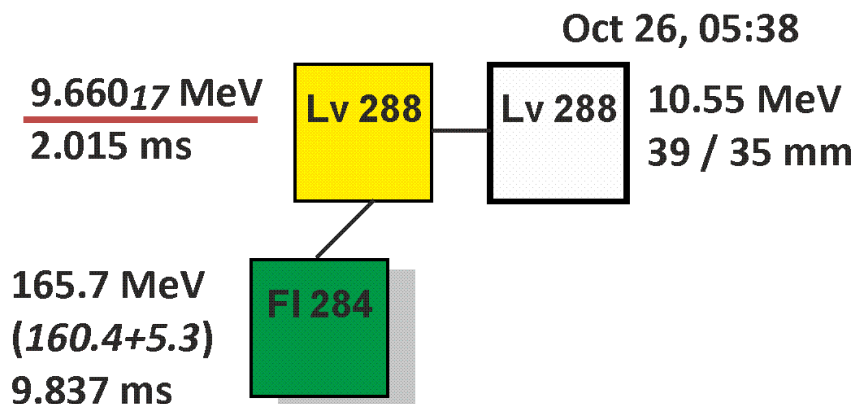
- Величина $T_{\text{EC}/\beta^+}/T_{\alpha}$ чуть выше 100 для ^{288}Mc , а для соседних нечётно-чётных изотопов ^{287}Mc и ^{289}Mc эта величина ещё выше на порядок.
- Величина $T_{\text{EC}/\beta^+}/T_{\alpha}$ на уровне 100 для ^{284}Nh , а для соседних нечётно-чётных изотопов ^{283}Nh и ^{285}Nh , а также нечётно-нечётного ^{282}Nh они в несколько раз и даже на порядок выше.
- **Из всего вышесказанного можно заключить, что вероятности наблюдения *pxn*-канала и EC/β^+ очень малы!**



Эксперимент $^{238}\text{U} + ^{54}\text{Cr}$



Эксперимент $^{238}\text{U} + ^{54}\text{Cr}$



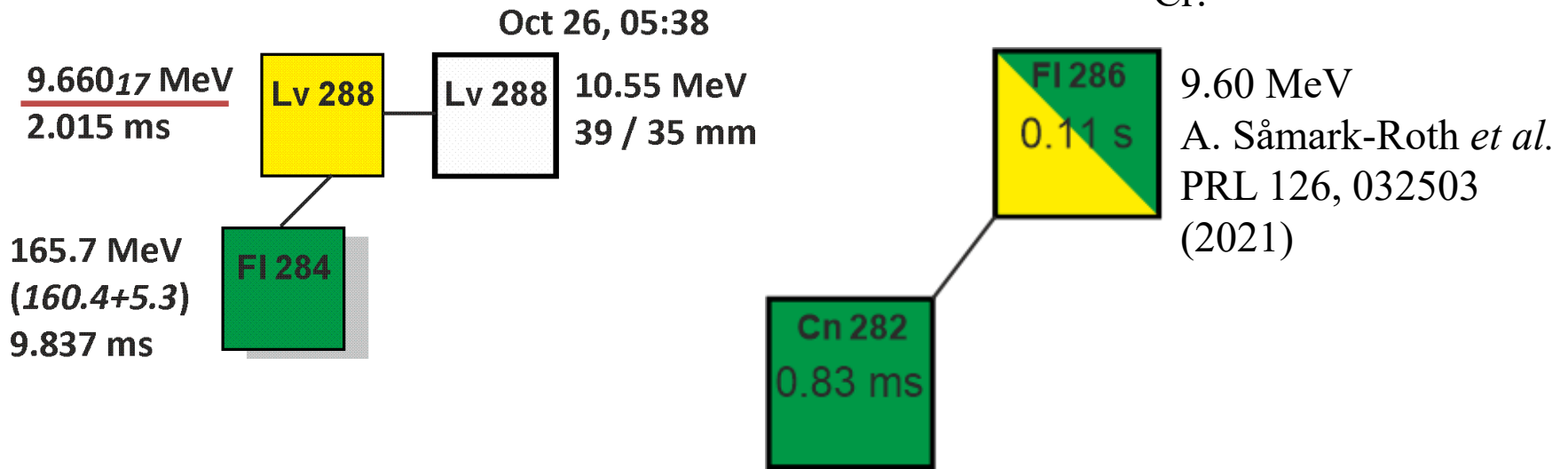
Вероятные причины:

1. Временное изменение коэффициента усиления регистрирующей аппаратуры – не может быть подтверждено или опровергнуто.
2. α -частица оставила энергию только в фокальном детекторе и вылетела из него под малым углом.
3. Распад на возбуждённое состояние ^{284}Fl – маловероятно вследствие большой разницы между энергиями α -распада и близкими временами распада.

Эксперимент $^{238}\text{U} + ^{54}\text{Cr}$

Вероятные причины:

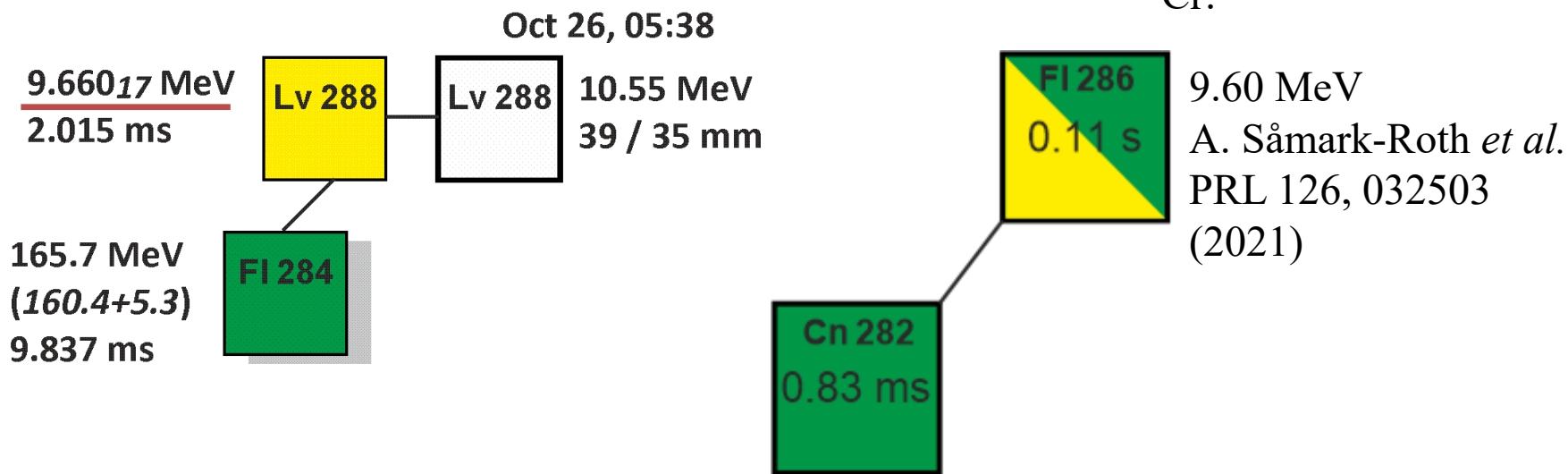
4. Это продукт αn -канала реакции $^{238}\text{U} + ^{54}\text{Cr}$:



Эксперимент $^{238}\text{U} + ^{54}\text{Cr}$

Вероятные причины:

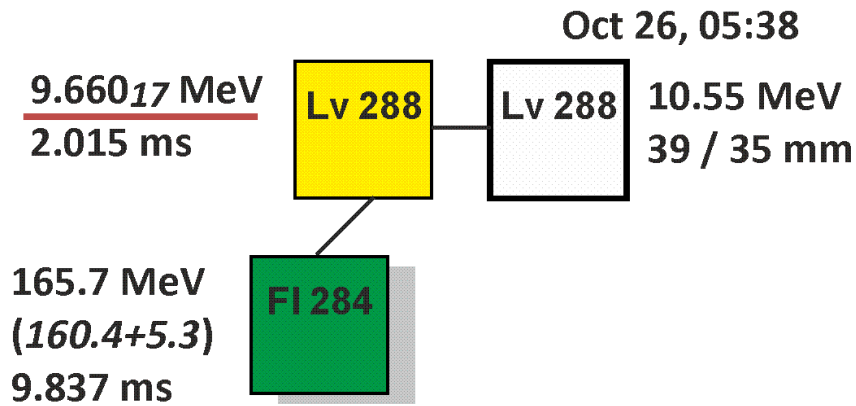
4. Это продукт *αхп*-канала реакции $^{238}\text{U} + ^{54}\text{Cr}$:



$$^{286}\text{Fl}: T_{1/2} = 105_{-13}^{+17} \text{ мс} \Rightarrow P(2.015 \text{ мс}) \sim 10^{-2}$$

$$^{282}\text{Cn}: T_{1/2} = 0.83_{-0.13}^{+0.18} \text{ мс} \Rightarrow P(9.837 \text{ мс}) \sim 3 * 10^{-4}$$

Эксперимент $^{238}\text{U} + ^{54}\text{Cr}$

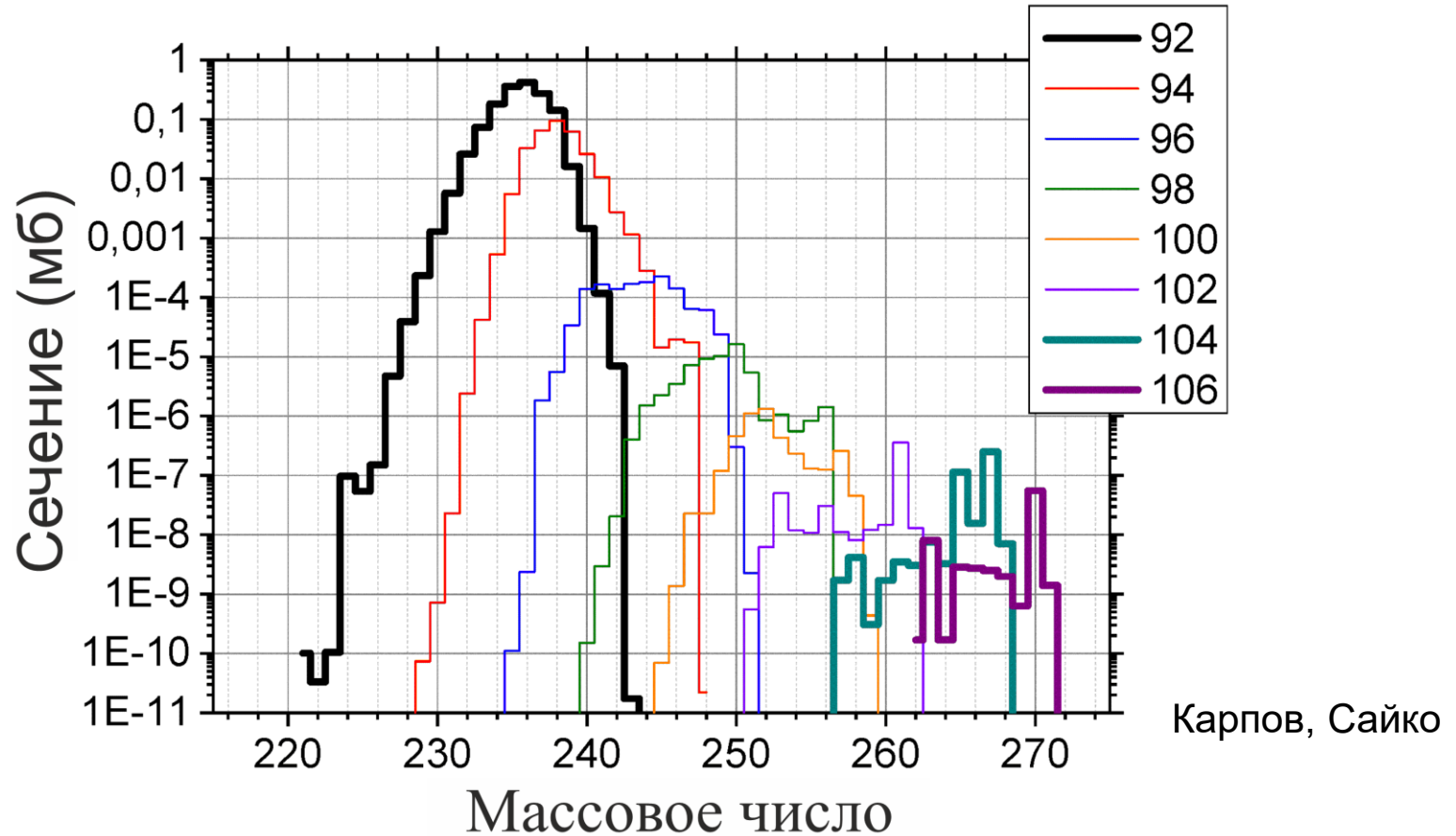


Возможные причины:

5. Это продукт реакции многонуклонных передач:



Выходы продуктов реакций многонуклонных передач

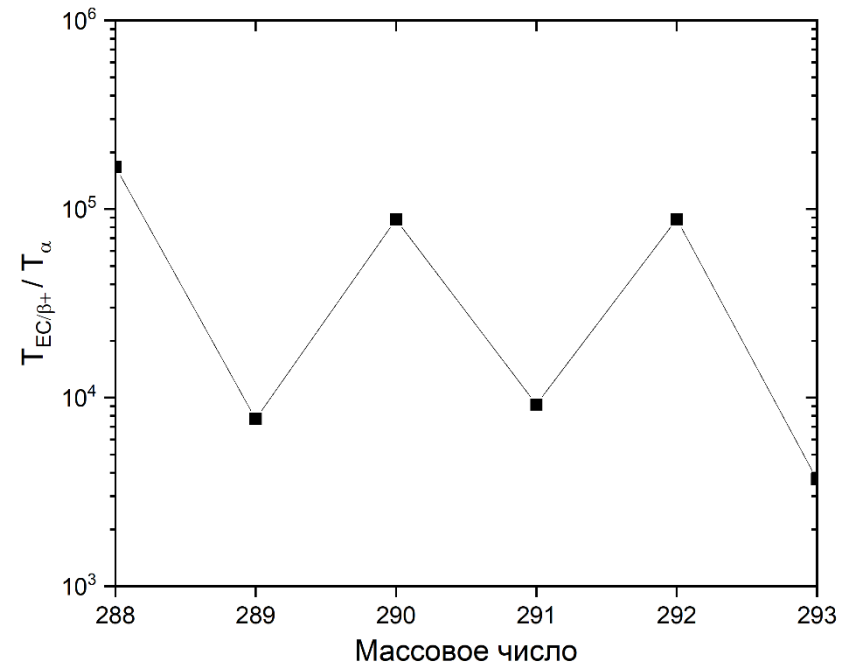
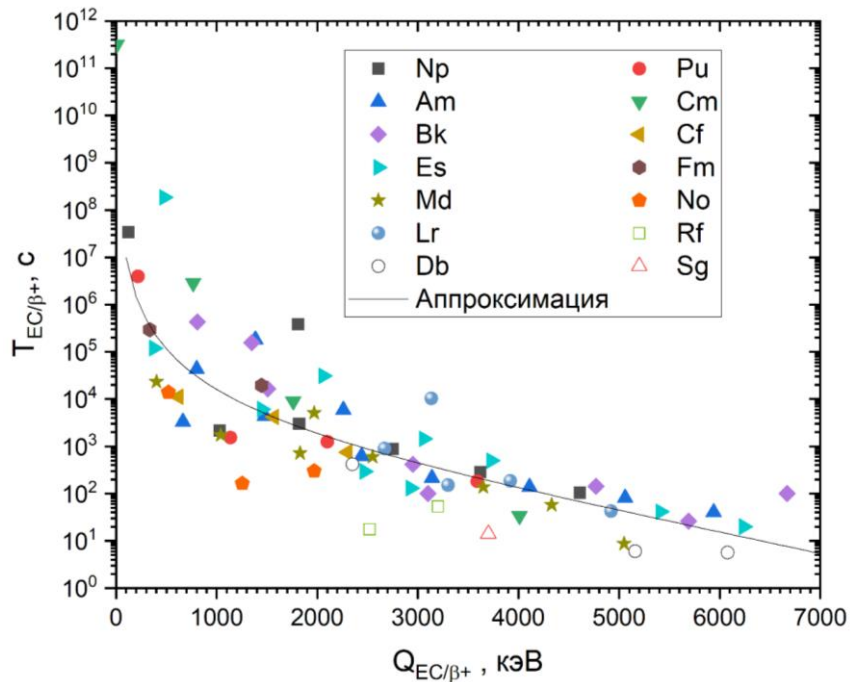


$$Y(^{260}\text{Sg} / ^{262,264,266,268,270}\text{Sg}) < 1/500$$

Мы отнесли вторую цепочку распада предположительно к изотопу ^{288}Lv

Эксперимент $^{242}\text{Pu} + ^{50}\text{Ti}$

рхп-канал или EC/β^+ ?



F. G. Kondev, M. Wang, W. J. Huang, S. Naimi,
and G. Audi, Chin. Phys. C 45,
030001 (2021).

Наблюдение *рхп*-канала более вероятно, чем EC/β^+ -распада