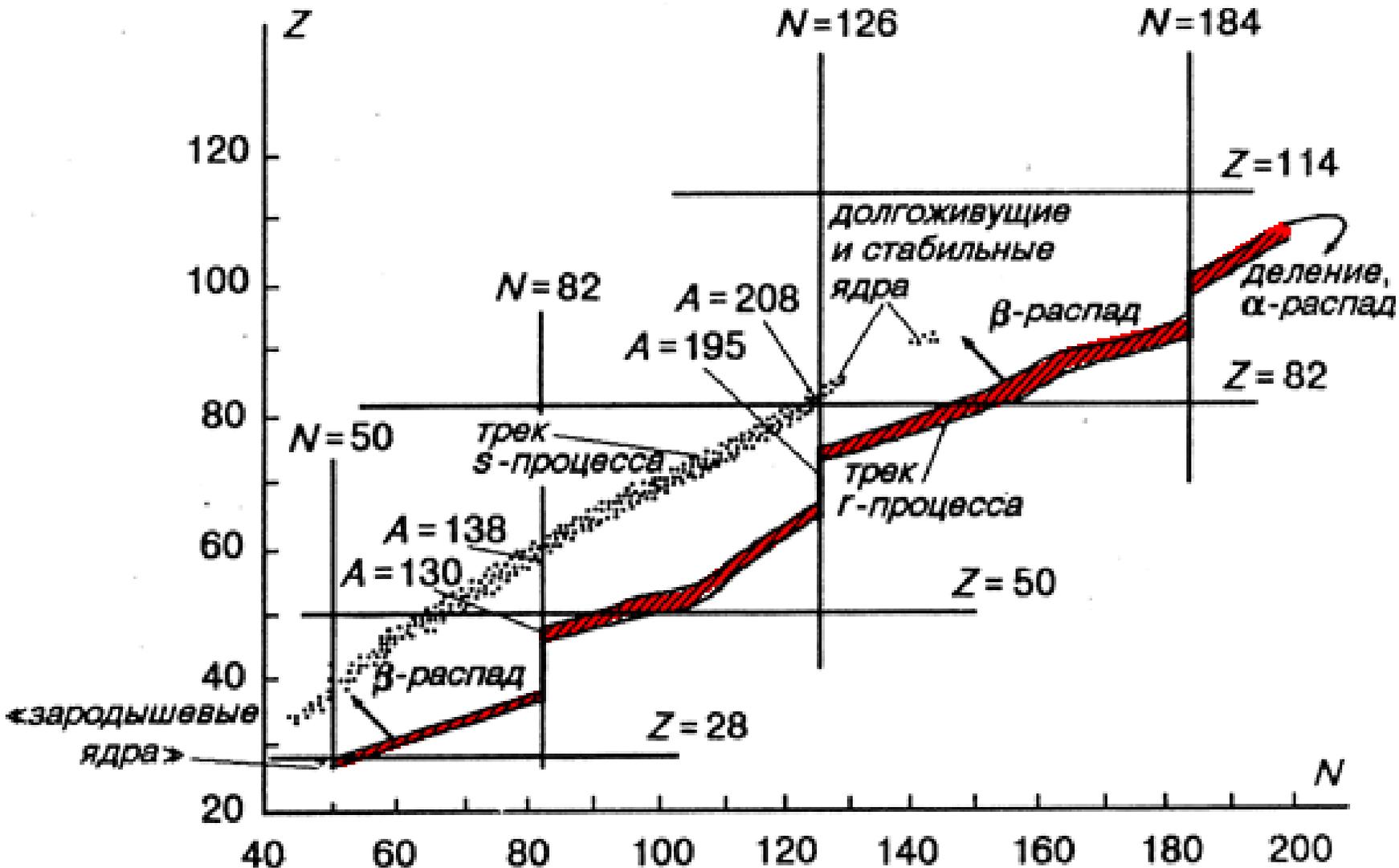




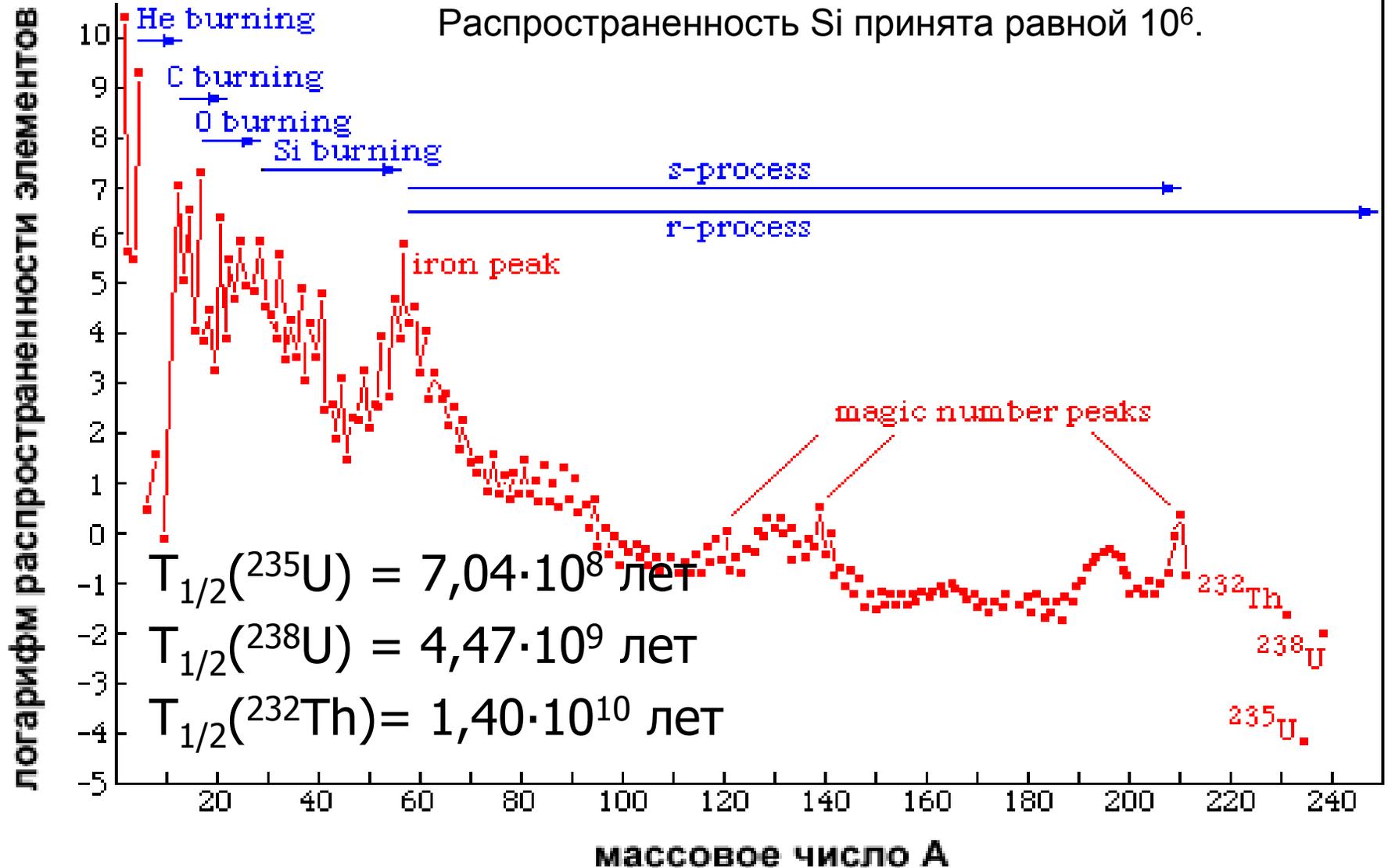
Рождение и жизнь атомных ядер

**Синтез
сверхтяжелых
элементов**

Взрывной нуклеосинтез



Распространенность нуклидов во Вселенной



Периодическая система элементов Менделеева

ГРУППА

ПЕРИОД

1932 г.

Категории

Alkali metals	Actinoids	Halogens
Alkaline earth metals	Post-transition metals	Noble gases
Transition metals	Metalloids	Properties unknown
Lanthanoids	Nonmetals	

Происхождение

-  Изначальный
-  Радиоактивный распад
-  Искусственный синтез

Состояние

-  Твердое
-  Жидкое
-  Газообразное

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H hydrogen 1.00794(7)																	2 He helium 4.002602(2)
2 Li lithium 6.941(2)	4 Be beryllium 9.012182(3)											5 B boron 10.811(7)	6 C carbon 12.0107(8)	7 N nitrogen 14.0067(2)	8 O oxygen 15.9994(3)	9 F fluorine 18.9984032(5)	10 Ne neon 20.1797(6)
3 Na sodium 22.98976928(2)	12 Mg magnesium 24.3050(6)											13 Al aluminium 26.9815386(8)	14 Si silicon 28.0855(3)	15 P phosphorus 30.973762(2)	16 S sulfur 32.065(5)	17 Cl chlorine 35.453(2)	18 Ar argon 39.948(1)
4 K potassium 39.0983(1)	20 Ca calcium 40.078(4)	21 Sc scandium 44.955912(6)	22 Ti titanium 47.867(1)	23 V vanadium 50.9415(1)	24 Cr chromium 51.9961(6)	25 Mn manganese 54.938045(5)	26 Fe iron 55.845(2)	27 Co cobalt 58.933195(5)	28 Ni nickel 58.6934(4)	29 Cu copper 63.546(3)	30 Zn zinc 65.38(2)	31 Ga gallium 69.723(1)	32 Ge germanium 72.64(1)	33 As arsenic 74.92160(2)	34 Se selenium 78.96(3)	35 Br bromine 79.904(1)	36 Kr krypton 83.798(2)
5 Rb rubidium 85.4678(3)	38 Sr strontium 87.62(1)	39 Y yttrium 88.90585(2)	40 Zr zirconium 91.224(2)	41 Nb niobium 92.90638(2)	42 Mo molybdenum 95.96(2)	43	44 Ru ruthenium 101.07(2)	45 Rh rhodium 102.90550(2)	46 Pd palladium 106.42(1)	47 Ag silver 107.8682(2)	48 Cd cadmium 112.411(8)	49 In indium 114.818(3)	50 Sn tin 118.710(7)	51 Sb antimony 121.760(1)	52 Te tellurium 127.60(3)	53 I iodine 126.90447(3)	54 Xe xenon 131.293(6)
6 Cs caesium 132.9054519(2)	56 Ba barium 137.327(7)	* Lanthanoids 57-71	72 Hf hafnium 178.49(2)	73 Ta tantalum 180.9479(1)	74 W tungsten 183.84(1)	75 Re rhenium 186.207(1)	76 Os osmium 190.23(3)	77 Ir iridium 192.217(3)	78 Pt platinum 195.084(9)	79 Au gold 196.966569(4)	80 Hg mercury 200.59(2)	81 Tl thallium 204.3833(2)	82 Pb lead 207.2(1)	83 Bi bismuth 208.98040(1)	84 Po polonium [208.9824]	85 At astatine [209.99]	86 Rn radon [222.02]
7 87	88 Ra radium [226.0254]	** Actinoids 89-103															

* Lanthanoids

57 La lanthanum 138.90547(7)	58 Ce cerium 140.116(1)	59 Pr praseodymium 140.90765(2)	60 Nd neodymium 144.242(3)	61 Pm promethium [144.91]	62 Sm samarium 150.36(2)	63 Eu europium 151.964(1)	64 Gd gadolinium 157.25(3)	65 Tb terbium 158.92535(2)	66 Dy dysprosium 162.500(1)	67 Ho holmium 164.93032(2)	68 Er erbium 167.259(3)	69 Tm thulium 168.93412(2)	70 Yb ytterbium 173.054(5)	71 Lu lutetium 174.9668(1)
--	---	---	--	---	--	---	--	--	---	--	---	--	--	--

** Actinoids

89 Ac actinium [227.03]	90 Th thorium 232.03806(2)	91 Pa protactinium 231.03588(2)	92 U uranium 238.02891(3)
---	--	---	---

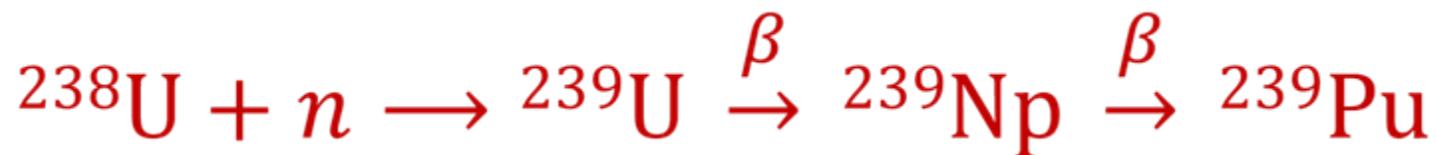
АКТИНОИДЫ

1940 г. Э.М. Макмиллан, Ф.Х. Абельсон.

${}_{93}\text{Np}$ Нептуний

1941 г. Э.М. Макмиллан, Г.Т. Сиборг, Дж.В. Кеннеди,

А.К. Валь. ${}_{94}\text{Pu}$ Плутоний



$$T_{1/2}({}^{237}\text{Np}) = 2,14 \cdot 10^6 \text{ лет}$$

$$T_{1/2}({}^{239}\text{Pu}) = 2,41 \cdot 10^4 \text{ лет}$$

Нобелевская премия по химии

1951 г. – Э. М. Макмиллан, Г.Т. Сиборг. За открытия в области химии трансурановых элементов

АКТИНОИДЫ

Г.Т. Сиборг, А. Гиорсо и др. (Беркли, США)

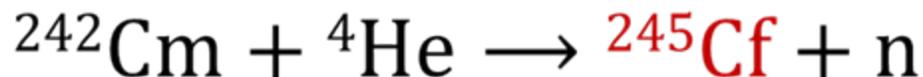
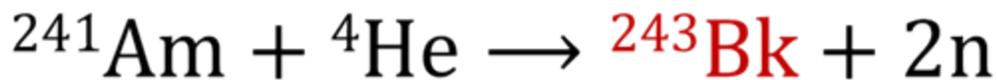
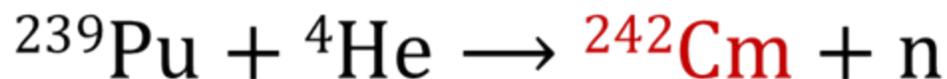
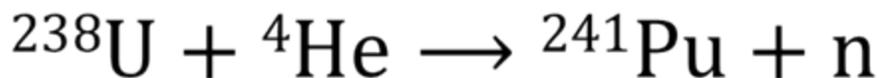
1944 г. ${}_{95}\text{Am}$ Америций, ${}_{96}\text{Cm}$ Кюрий

1949 г. ${}_{97}\text{Bk}$ Берклий, ${}_{98}\text{Cf}$ Калифорний



Наиболее

долгоживущие изотопы

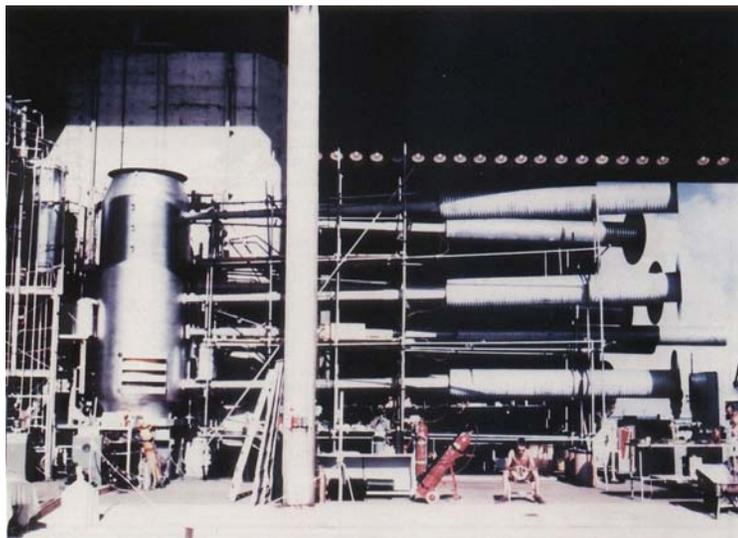
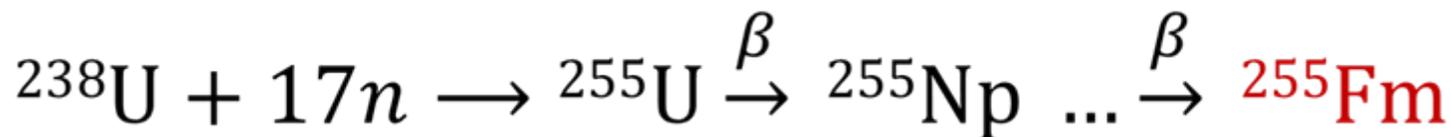
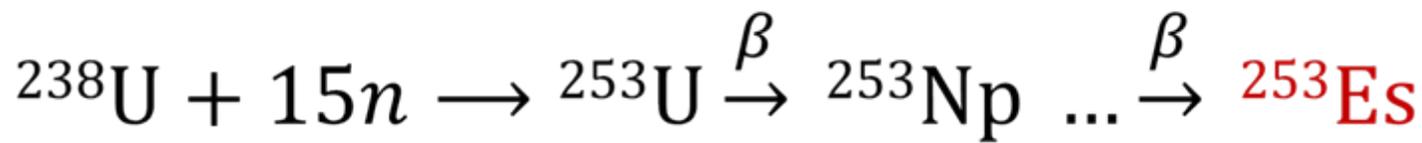


Изотоп	$T_{1/2}$
${}^{243}\text{Am}$	7370 лет
${}^{247}\text{Cm}$	$1,56 \cdot 10^7$ лет
${}^{247}\text{Bk}$	1380 лет
${}^{251}\text{Cf}$	898 лет

АКТИНОИДЫ

1952 г. А. Гиорсо и др. (Беркли, США)

${}_{99}\text{Es}$ Эйнштейний, ${}_{100}\text{Fm}$ Фермий



Наиболее
долгоживущие изотопы

Изотоп	$T_{1/2}$
${}^{252}\text{Es}$	472 дня
${}^{257}\text{Cf}$	100 дней

1 ноября 1952 года. Атолл Эниветок.
Айви Майк

Трансфермиевые элементы

Элемент	Год	Лаборатория	Реакция
¹⁰¹ Md Менделевий	1955	Беркли, США	$^{253}\text{Es} + ^4\text{He} \rightarrow ^{256}\text{Md} + n$
¹⁰² No Нобелий	1963	Дубна, СССР	$^{248}\text{Cm} + ^{13}\text{C} \rightarrow$ $\rightarrow ^{257}\text{No} + 4n$
¹⁰³ Lr Лоуренсий	1961	Беркли, США	$^{249}\text{Cm} + ^{10,11}\text{B} \rightarrow$ $\rightarrow ^{255, 256}\text{Lr} + (4,5)n$
	1965	Дубна, СССР	$^{243}\text{Am} + ^{16,18}\text{O} \rightarrow$ $\rightarrow ^{255, 256}\text{Lr} + (3,5)n$

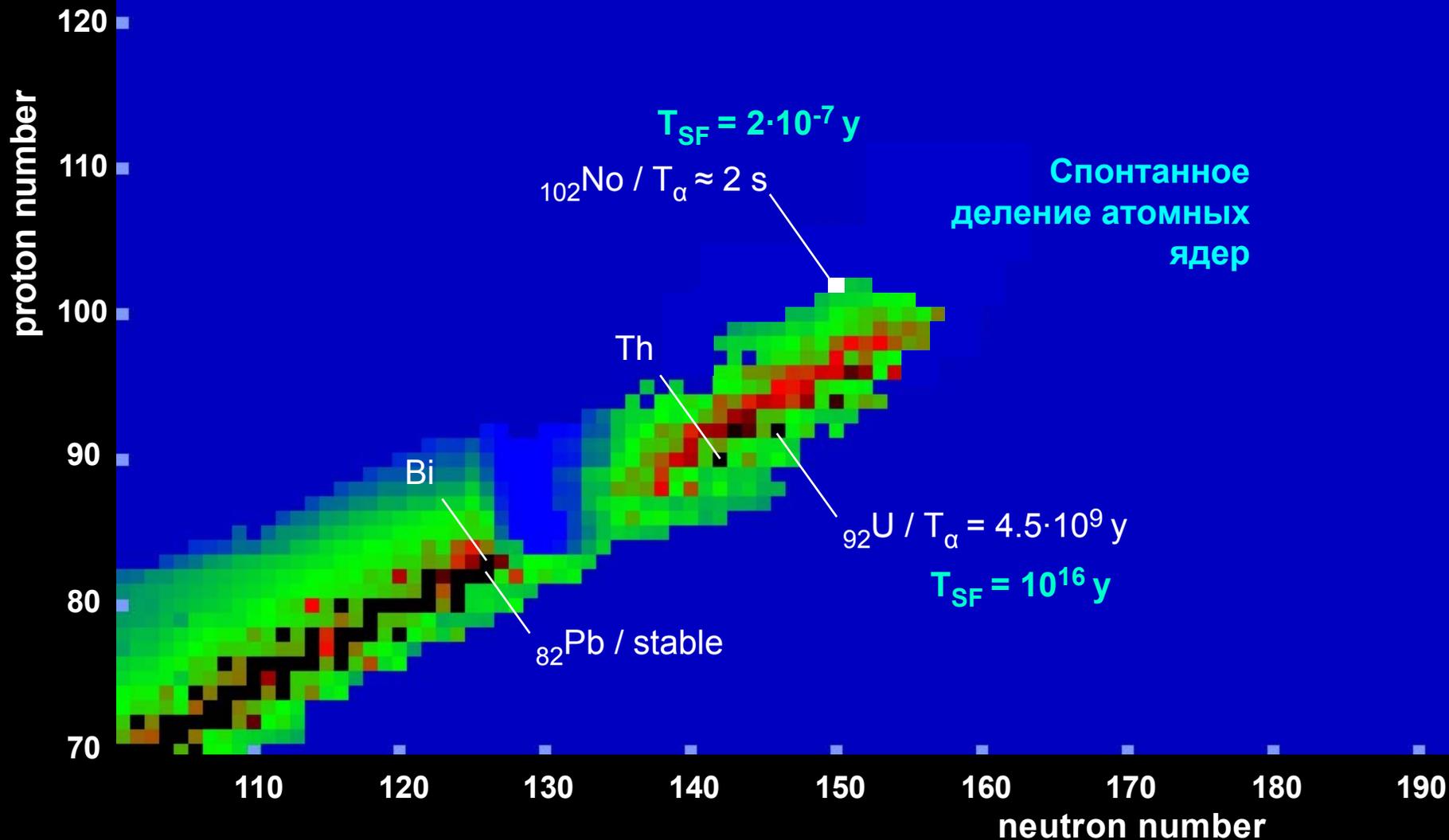
Наиболее
долгоживущие изотопы

Изотоп	T _{1/2}
²⁵⁸ Md	56 суток
²⁵⁹ No	58 минут
²⁶² Lr	4 часа

ПРОБЛЕМЫ:

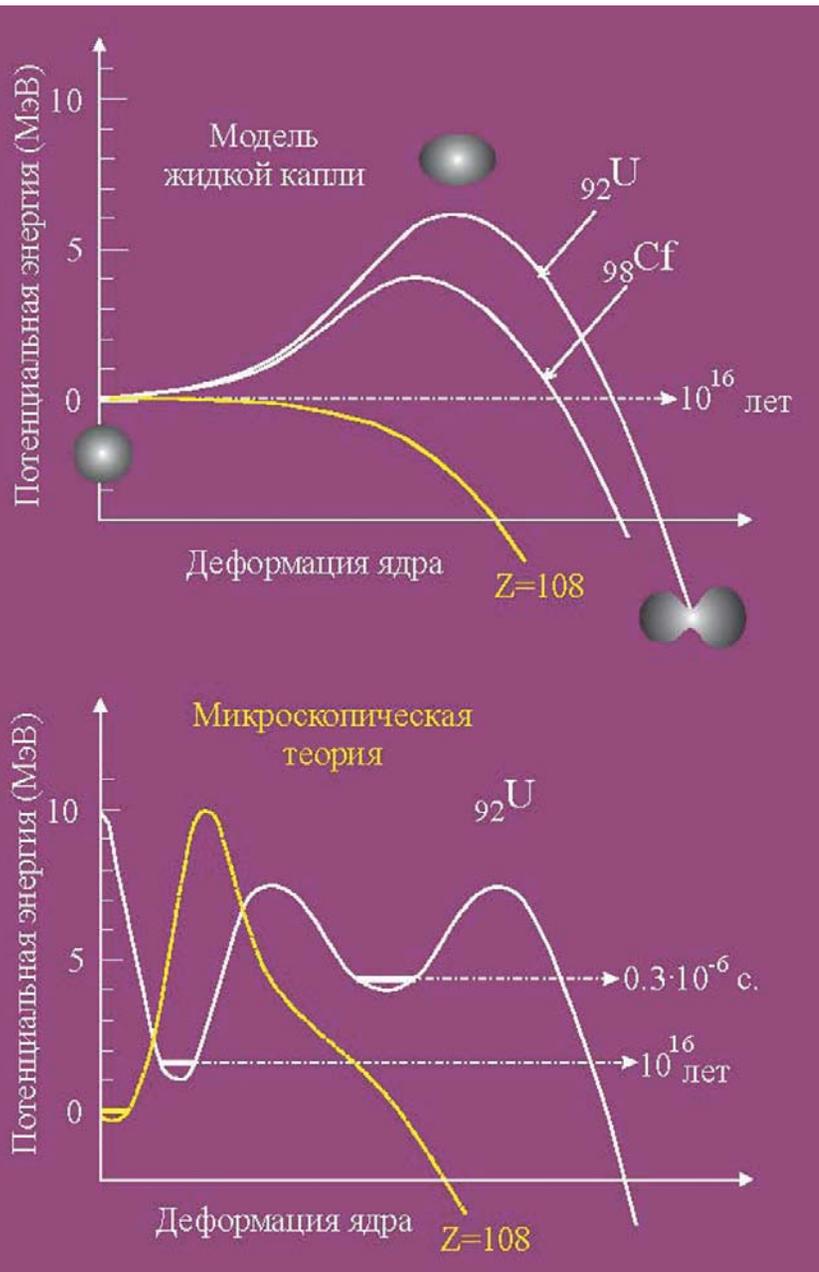
- Отсутствие в требуемых количествах мишеней из тяжелых трансурановых элементов.
- Существенное уменьшение по мере увеличения Z времени жизни изотопов, что значительно усложняет их идентификацию.

около 50 лет назад...

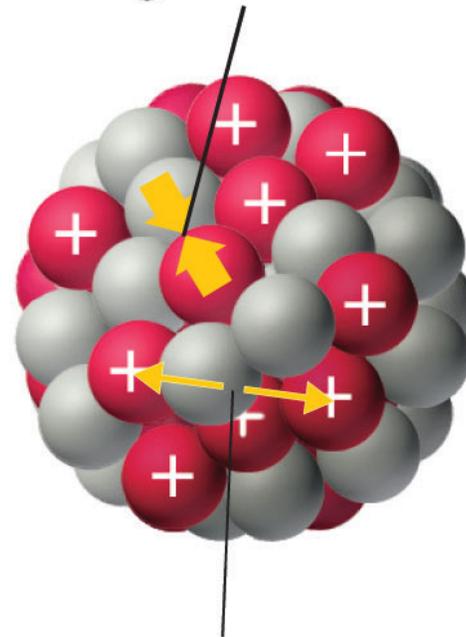


Капельная модель

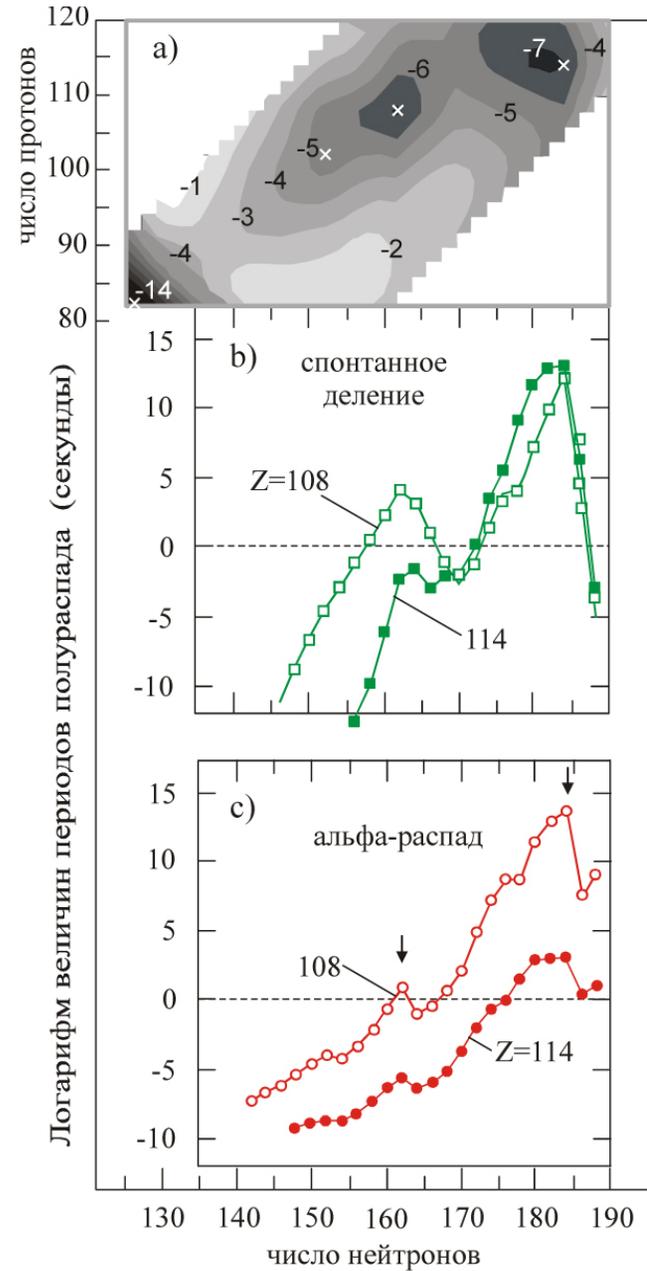
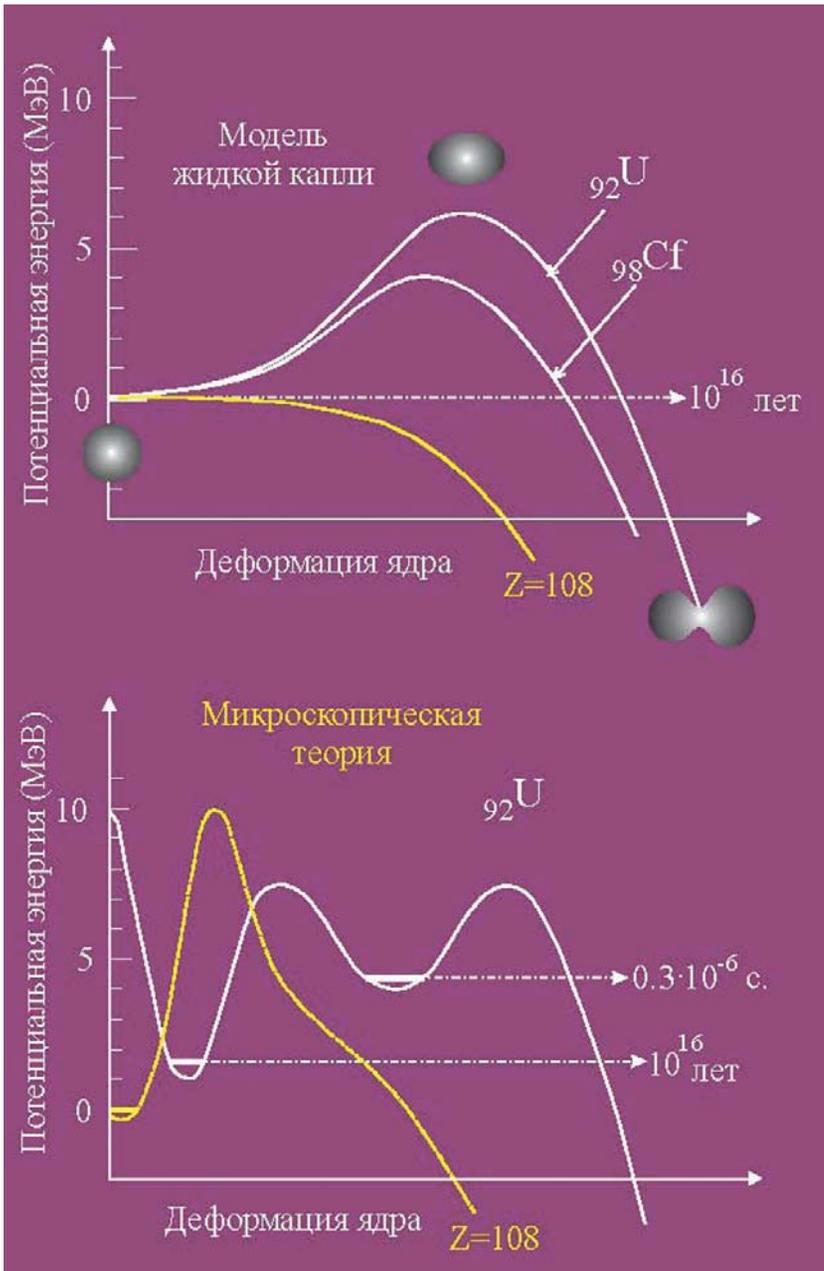
Для $Z \geq 104$ время жизни $\sim 10^{-19}$ с



Strong nuclear force

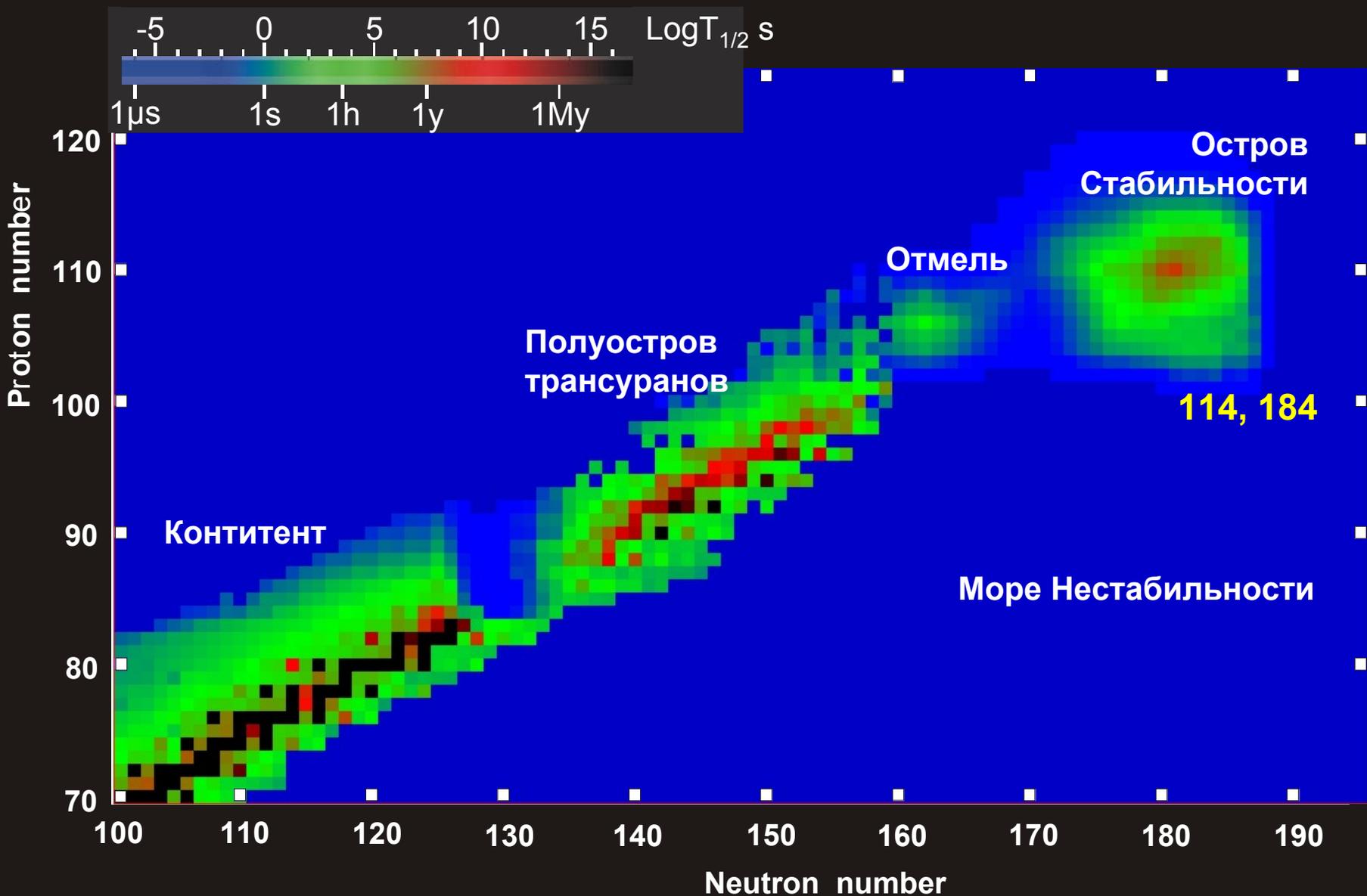


Electrostatic repulsion



New lands

Макро-микроскопическая теория ядра

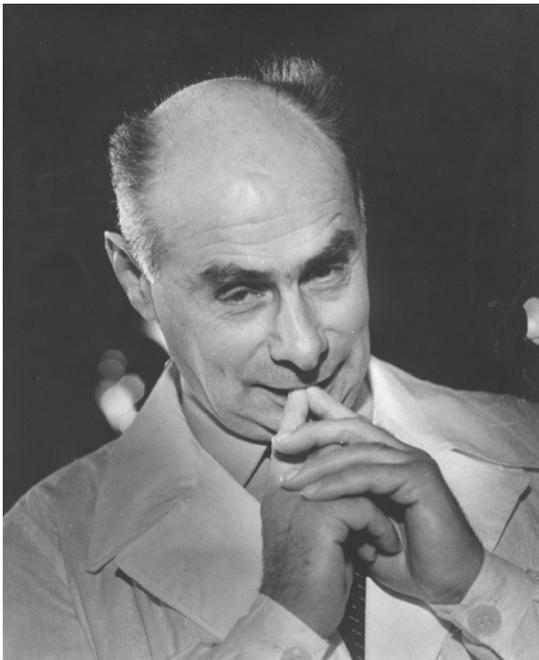


Горячее слияние

Элемент	Год	Лаборатория	Реакция
¹⁰⁴Rf Резерфордий	1964	Дубна, СССР	$^{242}\text{Pu} + ^{22}\text{Ne} \rightarrow$ $\rightarrow ^{260,259}\text{Rf} + (4,5)\text{n}$
	1969	Беркли, США	$^{249}\text{Cf} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{257}\text{Rf} + 4\text{n}$
¹⁰⁵Db Дубний	1970	Дубна, СССР	$^{242}\text{Am} + ^{22}\text{Ne} \rightarrow ^{264}\text{Db}$
	1970	Беркли, США	$^{242}\text{Cf} + ^{15}\text{N} \rightarrow ^{264}\text{Db} + 4\text{n}$
¹⁰⁶Sg Сиборгий	1974	Беркли, США	$^{249}\text{Cf} + ^{18}\text{O} \rightarrow ^{263}\text{Sg} + 4\text{n}$
	1974	Дубна, СССР	$^{243}\text{Am} + ^{16,18}\text{O} \rightarrow$ $\rightarrow ^{255,256}\text{Lr} + (3,5)\text{n}$

Наиболее
долгоживущие изотопы

Изотоп	T _{1/2}
²⁶³ Rf	10 минут
²⁶⁸ Db	32 часа
²⁷¹ Sg	2,4 минуты



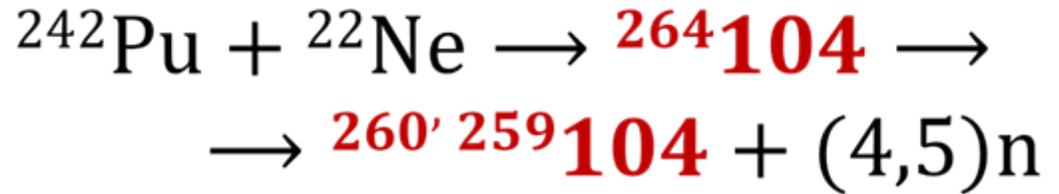
Георгий Николаевич
ФЛЕРОВ

На 2015 г:

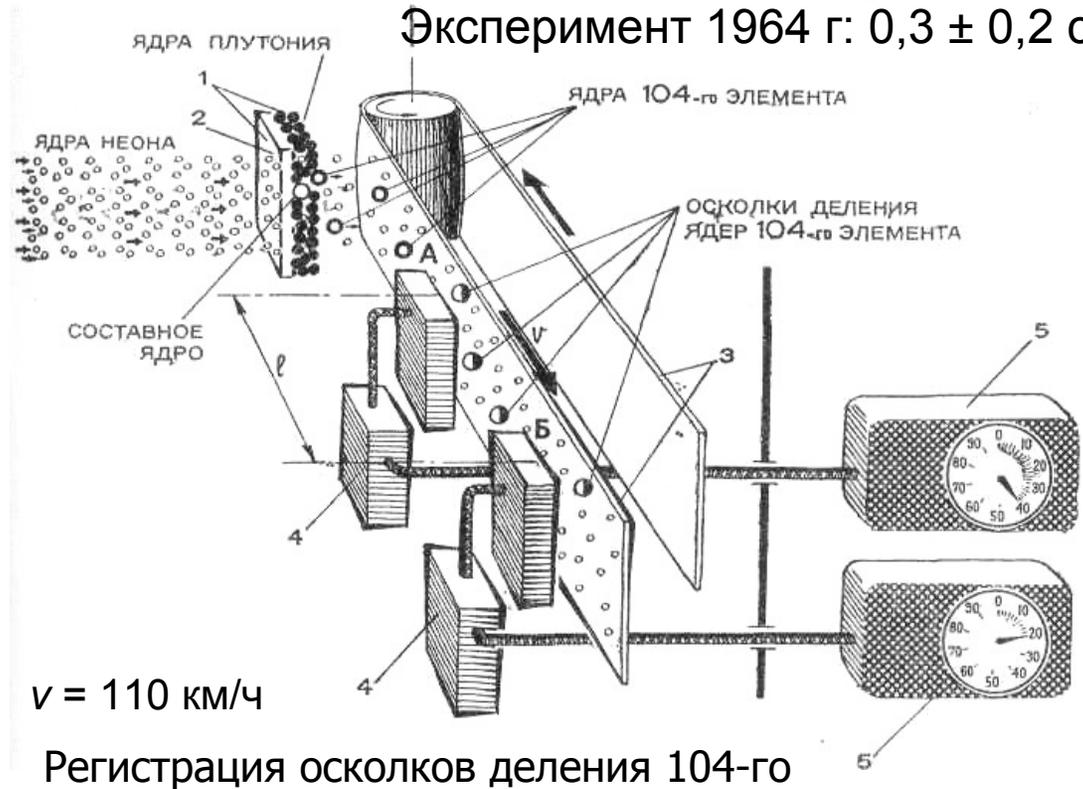
$T_{1/2} (^{259}\text{Rf}) \sim 3,2 \text{ с}$

$T_{1/2} (^{260}\text{Rf}) \sim 0,02 \text{ с}$

Взятие 104-го



Предсказание: $T_{1/2} \sim 0,013 \text{ с}$
 Эксперимент 1964 г: $0,3 \pm 0,2 \text{ с}$



Холодное слияние

ПРОБЛЕМА горячего синтеза:

- Высокая энергия возбуждения ($E_x \sim 20 - 40$ МэВ):
 - Вероятность испустить нейтрон в 100 раз меньше вероятности деления. Для охлаждения необходимо 4-5 нейтронов, следовательно вероятность «выживания» ядра $\sim (10^{-2})^4 = 10^{-8}$
 - Уменьшение роли оболочек

1974 г. Ю.Ц. Оганесян, А.Г. Дёмин и др. **Реакции «холодного слияния»**
Мишень: ^{208}Pb ($Z=82$, $N=126$) или ^{209}Bi ($Z=83$, $N=126$)

Пучок: $Z > 18$ (^{40}Ca , ^{48}Ca , ^{54}Cr , ^{58}Fe , ^{62}Ni , ^{64}Ni и др)

Минимальная кинетическая энергия пучка

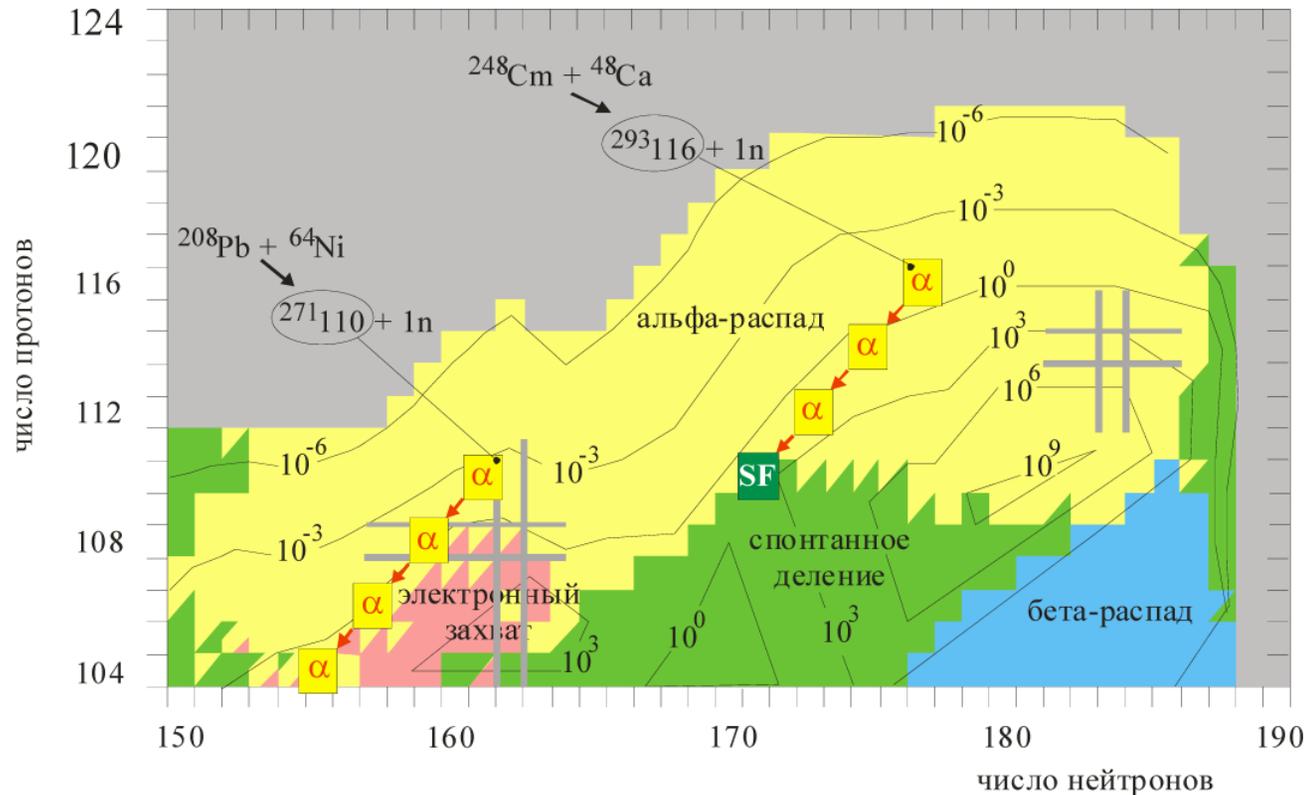
Слияние магических ядер $E_x \sim 12 - 20$ МэВ

1976 - 96 гг. GSI, Дармштадт, ГДР. **Синтез элементов с $Z = 107 - 112$**

ПРОБЛЕМЫ:

- Рост кулоновского отталкивания при $Z > 50$ ($^{208}\text{Pb} + ^{50}\text{Zn}$: $Z_1 \times Z_2 = 2460$)
- Недостаток нейтронов в компаунд-ядре

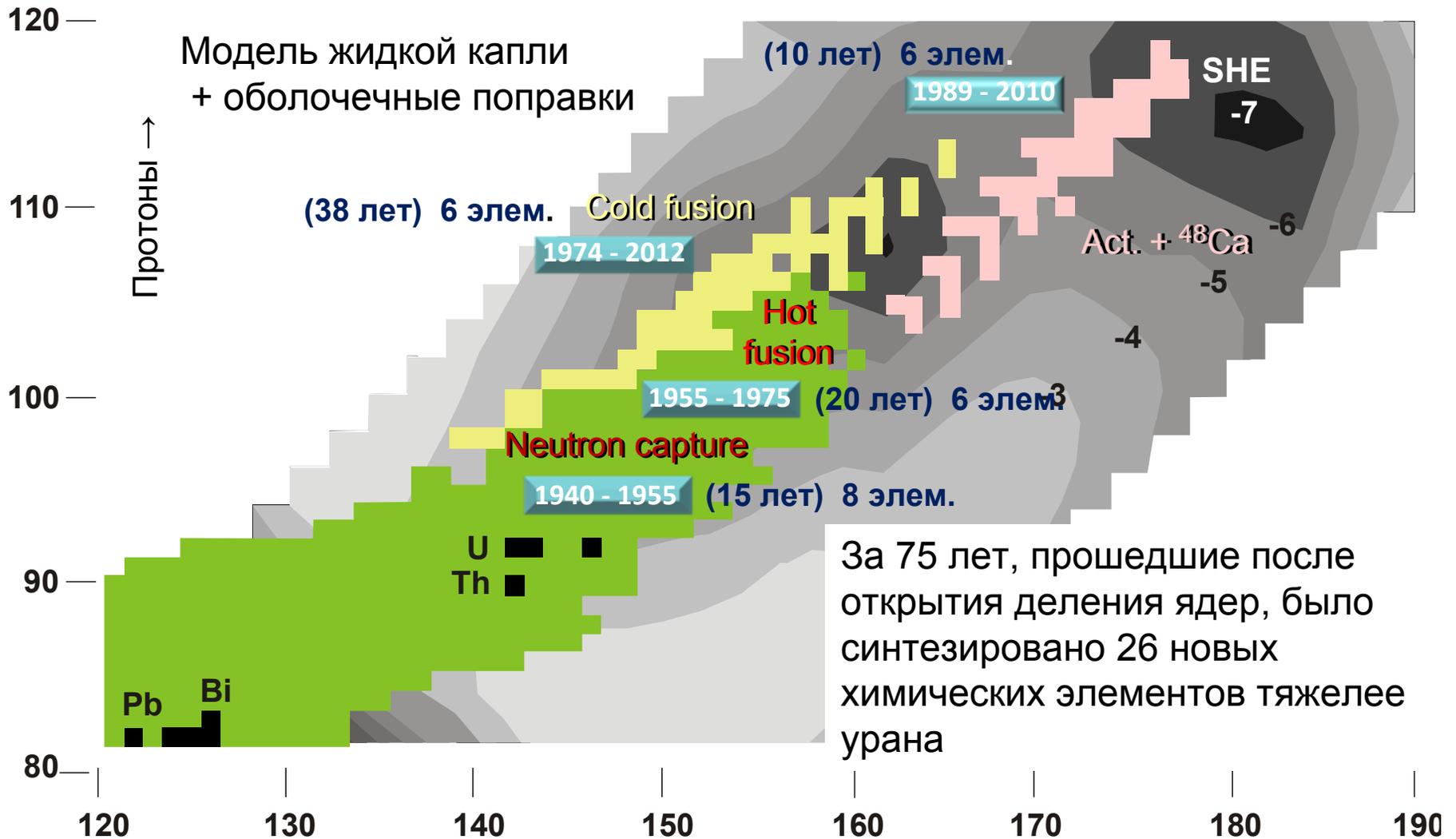
^{48}Ca + Actinide



- Силы Кулона $\sim Z_1 \times Z_2 < 2000$
- ^{48}Ca – дважды магическое ядро
- Энергия возбуждения компаунд-ядра $\sim 30\text{-}35$ МэВ
- Регистрация семейства альфа-распадов
- **Синтез элементов с $Z = 104 - 118$**

Синтез элементов

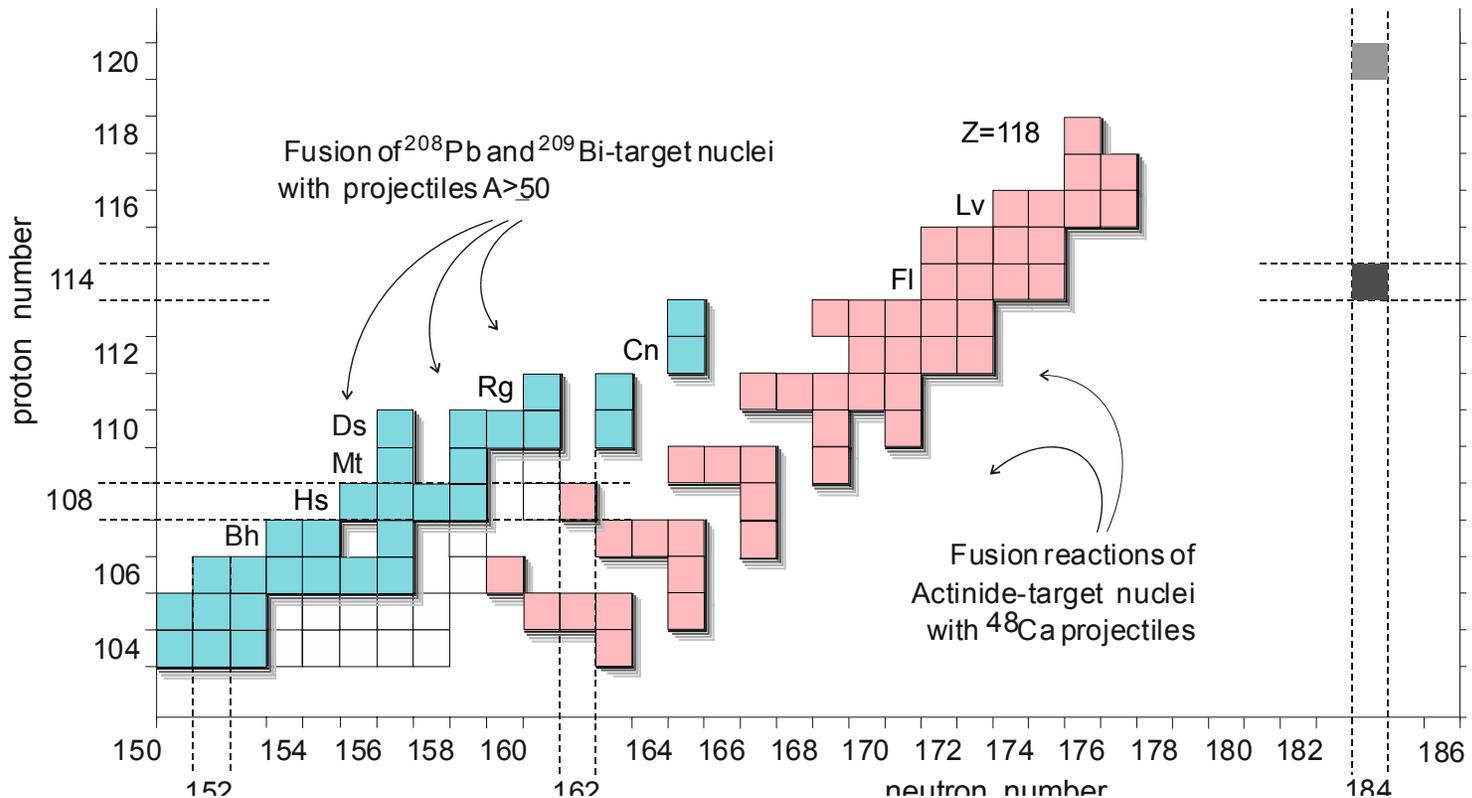
A. Sobiczewski, K. Pomorski, PPNP 58, 292, 2007



^{48}Ca + Actinide

- Природный кальций: 0,187% ^{48}Ca
- Пучок: ^{48}Ca $8 \cdot 10^{12}$ /с (расход 0.5 мг/час)
- Мишени: **Pu, Am, Cm** и **Cf** ($Z = 94-96, 98$) [Ок-Ридж, США; Димитроград, Россия; Саров, Россия]

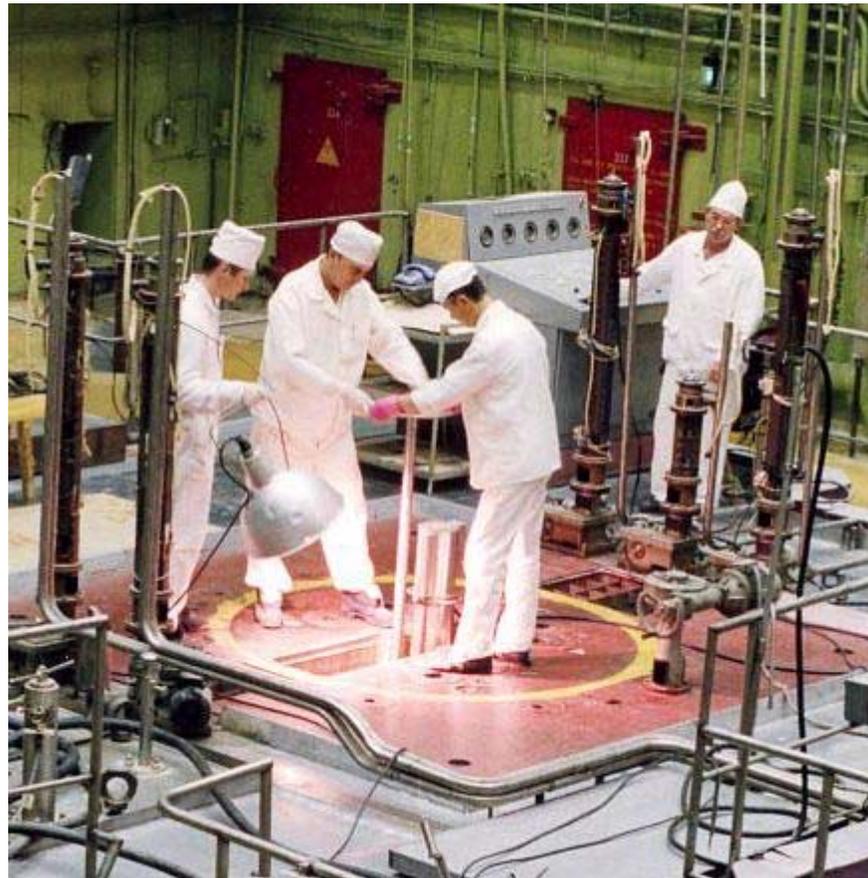
Синтез элементов с $Z = 104 - 118$



Производство тяжелых изотопов

HFIR, ORNL, Oak Ridge, USA, 85 MW

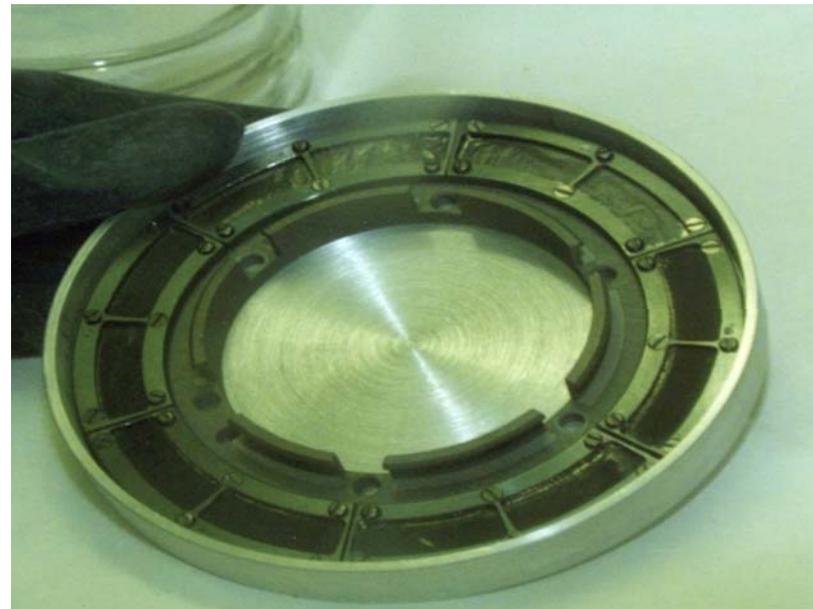
СМ-3, IAR, Димитровград, РФ, 100 MW



Мишень



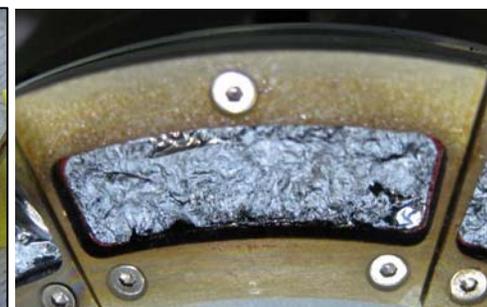
Work on mixed Cf
at REDC ORNL



^{249}Cf (351 y)	^{250}Cf (13 y)	^{251}Cf (898 y)
5.61 mg	1.43 mg	4.03 mg
50.7%	12.9%	36.4%
Average thickness 0.35 mg/cm ²		



перед экспериментом...



и после

Сверхпроводящий источник ионов 18 GHz ECR

DECRISS-SC2

Пучок ^{48}Ca на ускорителе
тяжелых ионов **U400**

Энергия: 235-250 МэВ
($v \approx 0.1$ c);

Интенсивность: 1.0-1.5 μA
($n \times 10^{12} \div 10^{13}$ 1/c);

Потребление: 0.5-0.8 мг/ч
Доза: $(0.3-3.0) \cdot 10^{19}$



Цена за 1 мг

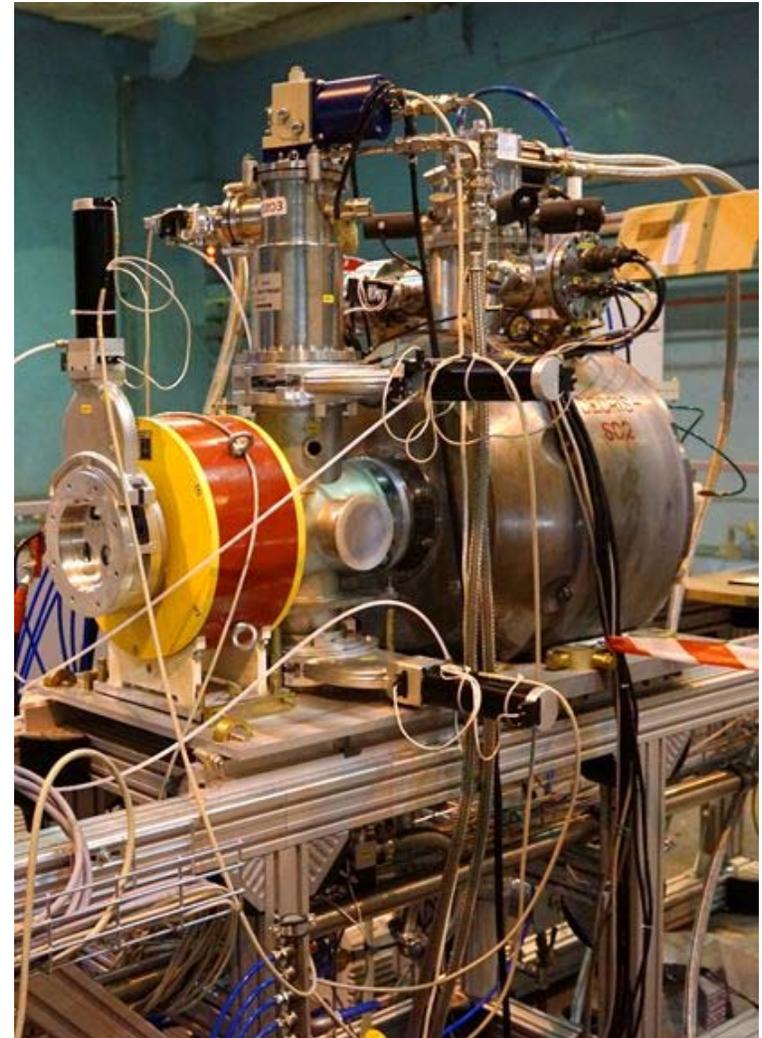
$^{197}\text{Au} \approx 0.045$ US\$

$\text{natU}_3\text{O}_8 \approx 0.03$ US\$

$^{239}\text{Pu} \approx 4$ US\$

$^{48}\text{Ca} \approx 80$ US\$

$^{249}\text{Cf} \approx 60,000$ US\$

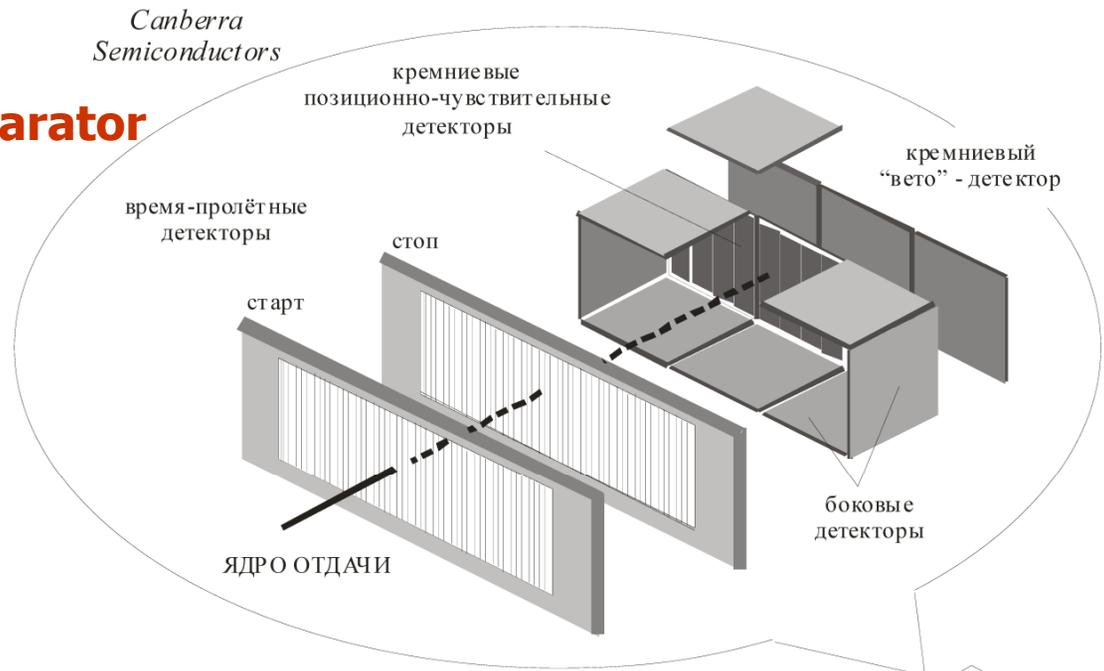


Синтез сверхтяжелых элементов (U-400)



Dubna Gas-Filled Recoil Separator

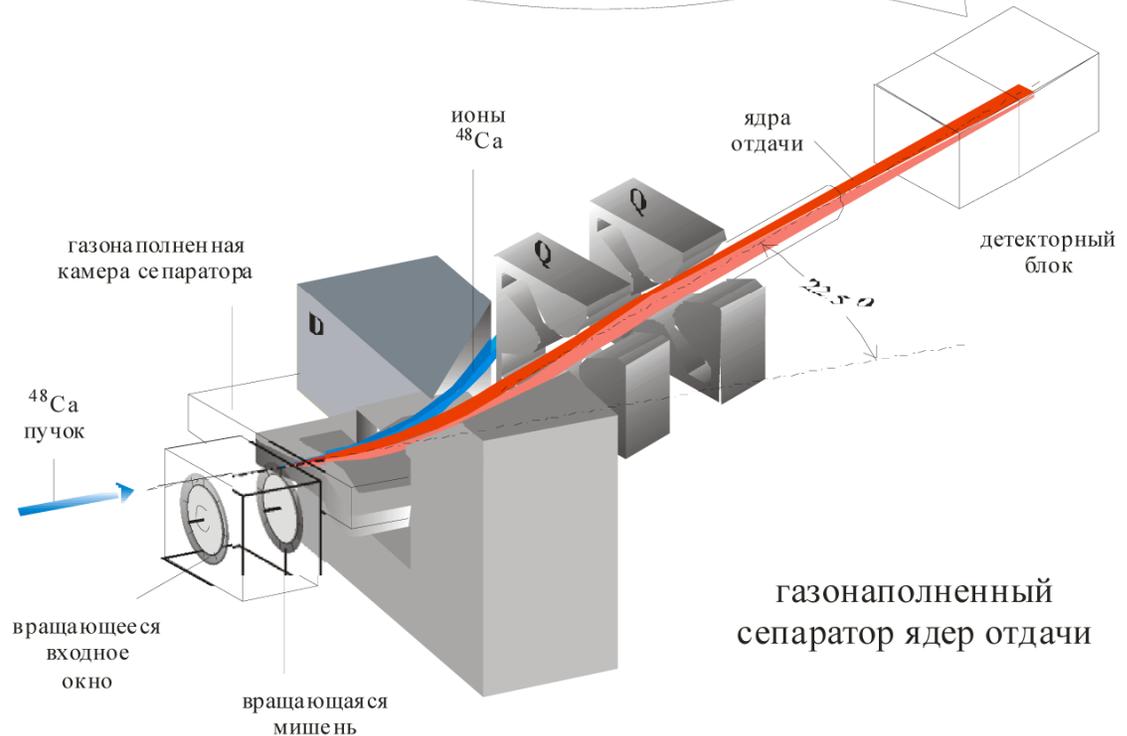
Газонаполненный
Сепаратор
(водород 10^{-3} атм)



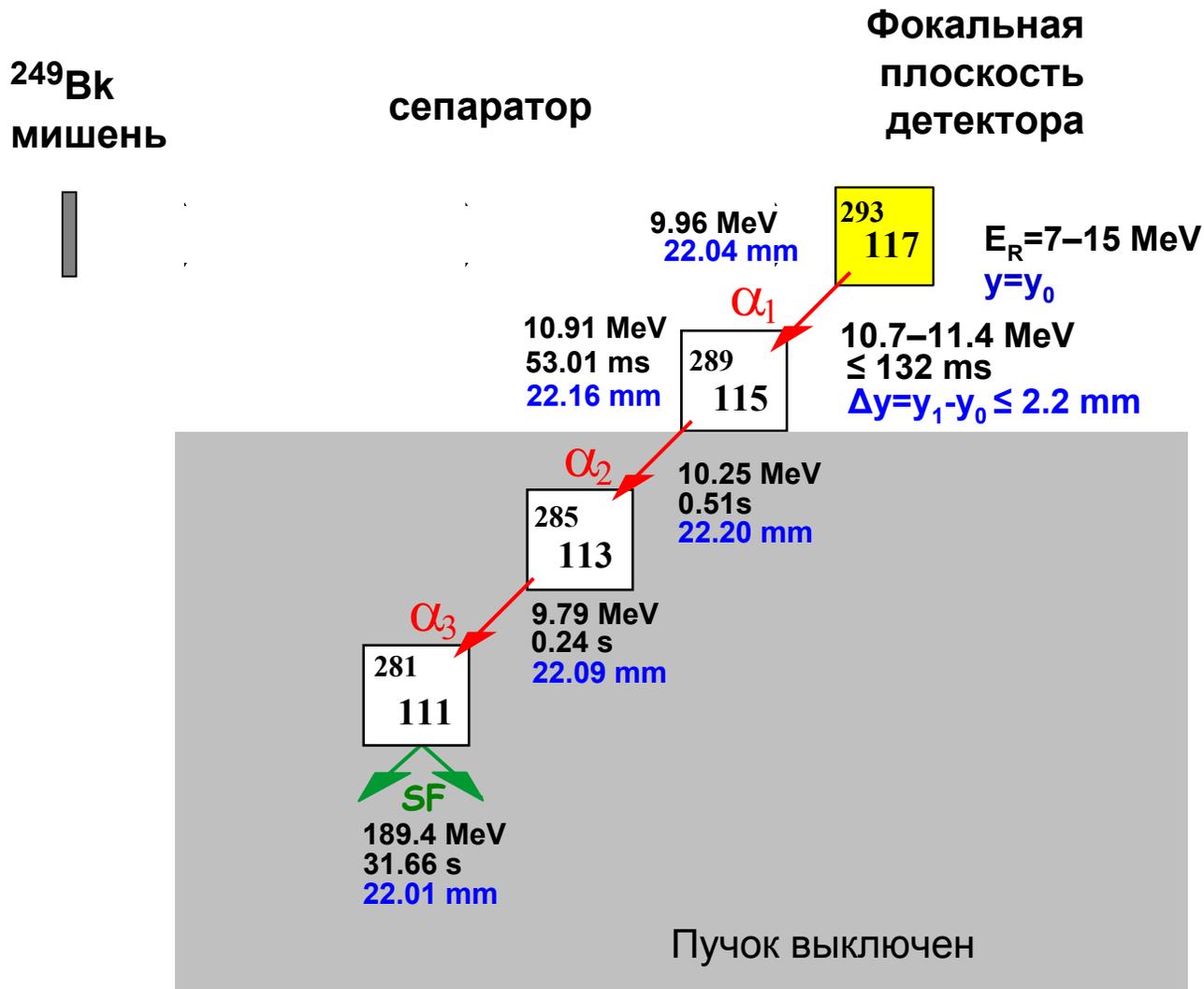
Эффективность регистрации:

для α -частиц 87%

для SF осколков
один фрагмент 100%
два фрагмента $\approx 40\%$



Низкофоновая схема детектирования



Четные Z

Z=118

116

114

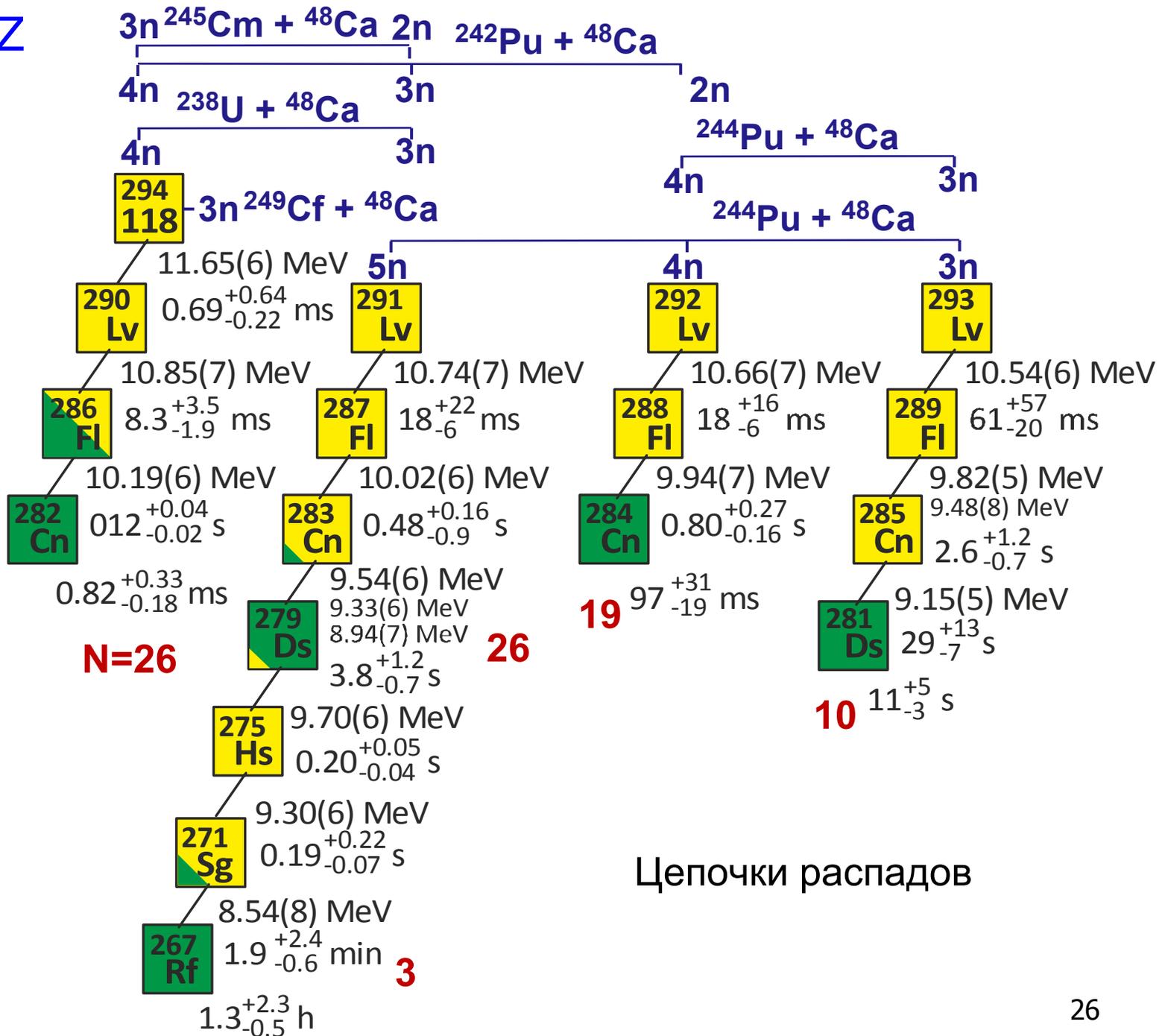
112

110

108

106

104



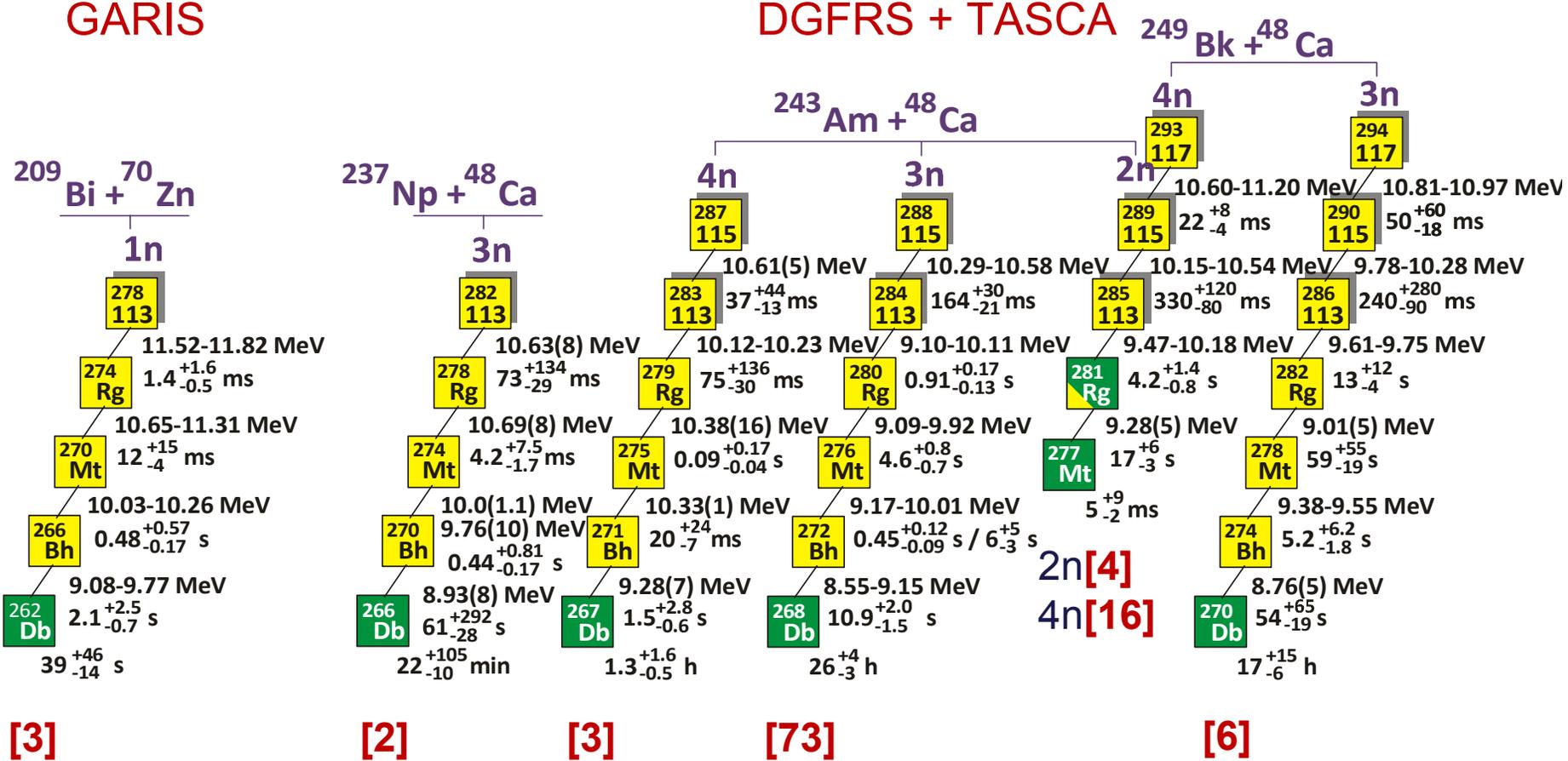
Цепочки распадов

Нечетные Z

Июнь, 2013

GARIS

DGFRS + TASCA





International Union of Pure
and Applied Chemistry

Май 2011:

Признание открытия новых элементов **114** и **116**

Май 2012:

Утверждение названия **Flerovium** для элемента **114**
и названия **Livermorium** для элемента **116**

30 декабря 2015:

Признание открытия новых элементов **113**, **115**, **117** и **118**

Приоритет :

- **113:** RIKEN (Япония)
- **115** и **117:** ОИЯИ (Дубна) - LLNL (США) – ORNL (США)
- **118:** ОИЯИ (Дубна) – LLNL (США)

8 июня 2016:

Предварительные рекомендации по названиям элементов **113**, **115**, **117**, **118**

(Нихоний) 113	Флеровий 114	(Московский) 115	Ливерморий 116	(Теннессин) 117	(Оганесон) 118
(Nh)	Fl	(Mc)	Lv	(Ts)	(Og)
(Nihonium)	Flerovium	(Moscovium)	Livermorium	(Tennessine)	(Oganesson)

*Все эти элементы впервые были синтезированы
на ускорительном комплексе У400*

Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова (ОИЯИ, Дубна).

Периодическая система элементов Менделеева

ГРУППА

ПЕРИОД

2006 г.

Категории

Alkali metals	Actinoids	Halogens
Alkaline earth metals	Post-transition metals	Noble gases
Transition metals	Metalloids	Properties unknown
Lanthanoids	Nonmetals	

Происхождение

-  Изначальный
-  Радиоактивный распад
-  Искусственный синтез

Состояние

-  Твердое
-  Жидкое
-  Газообразное

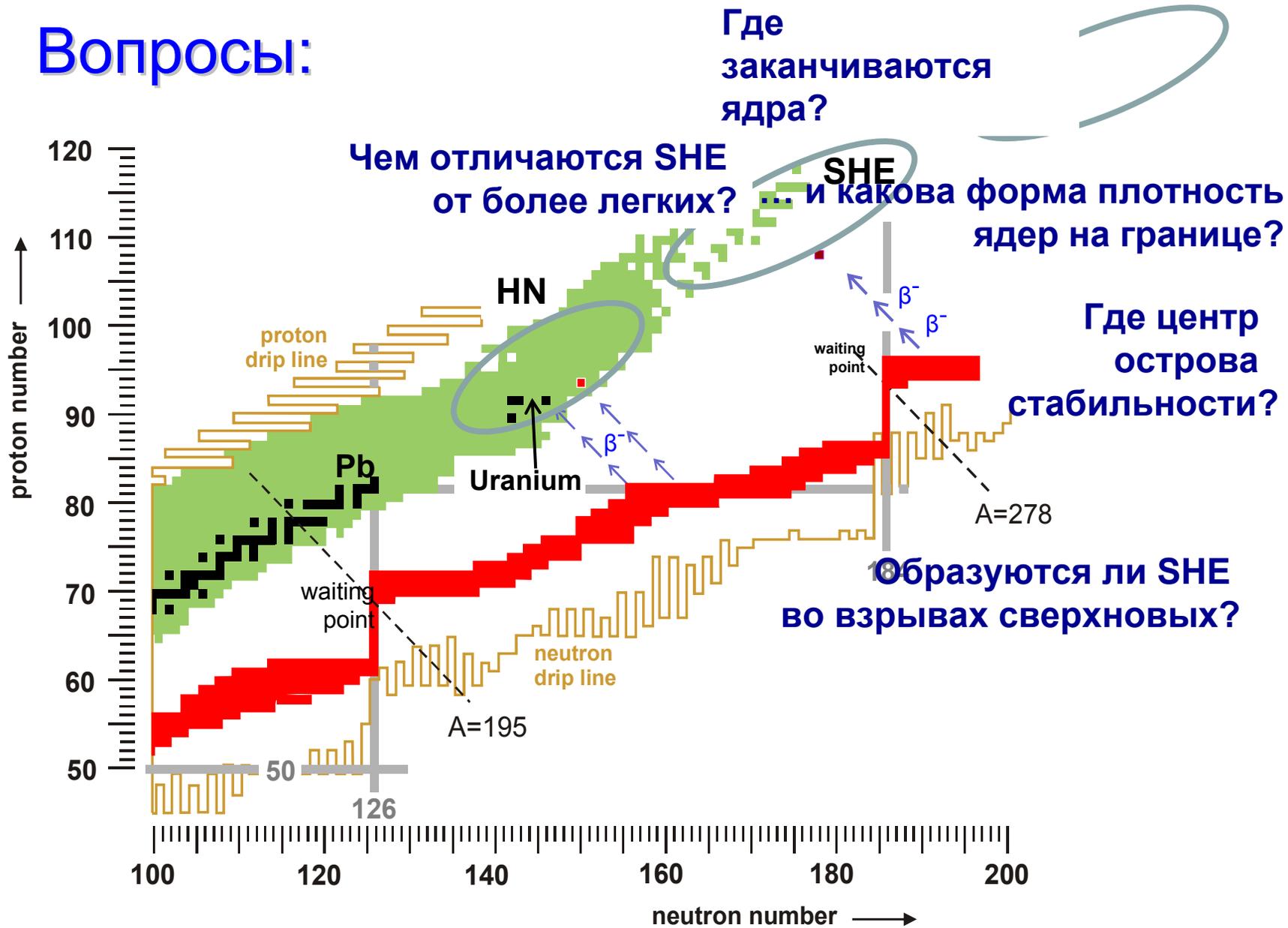
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H hydrogen 1.00794(7)																	2 He helium 4.002602(2)
3 Li lithium 6.941(2)	4 Be beryllium 9.012182(3)											5 B boron 10.811(7)	6 C carbon 12.0107(8)	7 N nitrogen 14.0067(2)	8 O oxygen 15.9994(3)	9 F fluorine 18.9984032(5)	10 Ne neon 20.1797(6)
11 Na sodium 22.98976928(2)	12 Mg magnesium 24.3050(6)											13 Al aluminium 26.9815386(8)	14 Si silicon 28.0855(3)	15 P phosphorus 30.973762(2)	16 S sulfur 32.065(5)	17 Cl chlorine 35.453(2)	18 Ar argon 39.948(1)
19 K potassium 39.0983(1)	20 Ca calcium 40.078(4)	21 Sc scandium 44.955912(6)	22 Ti titanium 47.867(1)	23 V vanadium 50.9415(1)	24 Cr chromium 51.9961(6)	25 Mn manganese 54.938045(5)	26 Fe iron 55.845(2)	27 Co cobalt 58.933195(5)	28 Ni nickel 58.6934(4)	29 Cu copper 63.546(3)	30 Zn zinc 65.38(2)	31 Ga gallium 69.723(1)	32 Ge germanium 72.64(1)	33 As arsenic 74.92160(2)	34 Se selenium 78.96(3)	35 Br bromine 79.904(1)	36 Kr krypton 83.798(2)
37 Rb rubidium 85.4678(3)	38 Sr strontium 87.62(1)	39 Y yttrium 88.90585(2)	40 Zr zirconium 91.224(2)	41 Nb niobium 92.90638(2)	42 Mo molybdenum 95.96(2)	43 Tc technetium [98.9063]	44 Ru ruthenium 101.07(2)	45 Rh rhodium 102.90550(2)	46 Pd palladium 106.42(1)	47 Ag silver 107.8682(2)	48 Cd cadmium 112.411(8)	49 In indium 114.818(3)	50 Sn tin 118.710(7)	51 Sb antimony 121.760(1)	52 Te tellurium 127.60(3)	53 I iodine 126.90447(3)	54 Xe xenon 131.293(6)
55 Cs caesium 132.9054519(2)	56 Ba barium 137.327(7)	* Lanthanoids 57-71	72 Hf hafnium 178.49(2)	73 Ta tantalum 180.9479(1)	74 W tungsten 183.84(1)	75 Re rhenium 186.207(1)	76 Os osmium 190.23(3)	77 Ir iridium 192.217(3)	78 Pt platinum 195.084(9)	79 Au gold 196.966569(4)	80 Hg mercury 200.59(2)	81 Tl thallium 204.3833(2)	82 Pb lead 207.2(1)	83 Bi bismuth 208.98040(1)	84 Po polonium [208.9824]	85 At astatine [209.99]	86 Rn radon [222.02]
87 Fr francium [223.0197]	88 Ra radium [226.0254]	** Actinoids 89-103	104 Rf rutherfordium [261.12]	105 Db dubnium [268.13]	106 Sg seaborgium [271.13]	107 Bh bohrium [279]	108 Hs hassium [277.15]	109 Mt meitnerium [276.15]	110 Ds darmstadtium [281.16]	111 Rg roentgenium [280.16]	112 Cn copernicium [285.17]	113 Uut ununtrium [284.18]	114 Fl flerovium [289.19]	115 Uup ununpentium [288.19]	116 Lv livermorium [293]	117 Uus ununseptium [294]	118 Uuo ununoctium [294]

* Lanthanoids

57 La lanthanum 138.90547(7)	58 Ce cerium 140.116(1)	59 Pr praseodymium 140.90765(2)	60 Nd neodymium 144.242(3)	61 Pm promethium [144.91]	62 Sm samarium 150.36(2)	63 Eu europium 151.964(1)	64 Gd gadolinium 157.25(3)	65 Tb terbium 158.92535(2)	66 Dy dysprosium 162.500(1)	67 Ho holmium 164.93032(2)	68 Er erbium 167.259(3)	69 Tm thulium 168.9342(12)	70 Yb ytterbium 173.054(5)	71 Lu lutetium 174.9668(1)
89 Ac actinium [227.03]	90 Th thorium 232.03806(2)	91 Pa protactinium 231.03588(2)	92 U uranium 238.02891(3)	93 Np neptunium [237.0482]	94 Pu plutonium [244.0642]	95 Am americium [243.0614]	96 Cm curium [247.0704]	97 Bk berkelium [247.0703]	98 Cf californium [251.0796]	99 Es einsteinium [252.0829]	100 Fm fermium [257.0951]	101 Md mendelevium [258.0996]	102 No nobelium [259.1009]	103 Lr lawrencium [262.11]

** Actinoids

Вопросы:





SHE-Factory

Наработка изотопов:
Cm-248
Bk-249
Cf-251

**Повышение в
10 раз**



From Yuri Oganessian. ARIS 2014, June 5, 2014 in Tokyo, Japan

SHE - фабрика

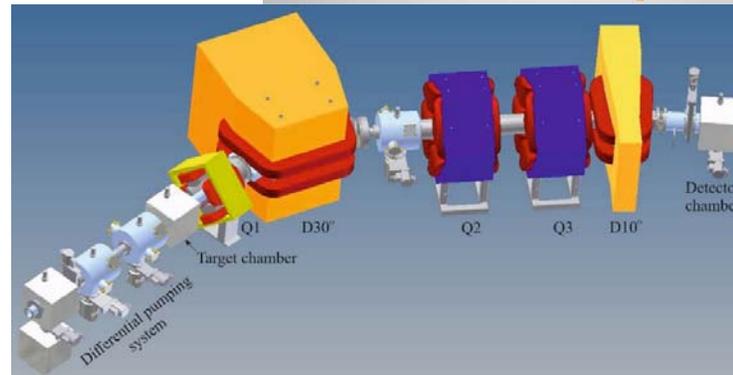
- 2016: Завершение строительства здания и монтаж циклотрона
- 2017: Тестирование пучков
- 2018: Первые эксперименты



Циклотрон DC-280

Новые установки:

- Новый газо-наполненный сепаратор
- пре-сепаратор для химии SHE
- Сепаратор SHELS
- Etc.



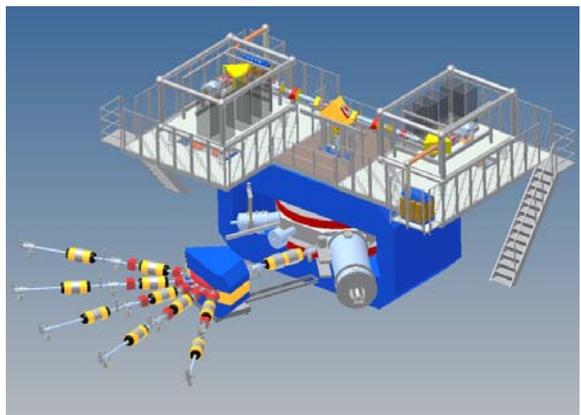


DC-280
SHE factory

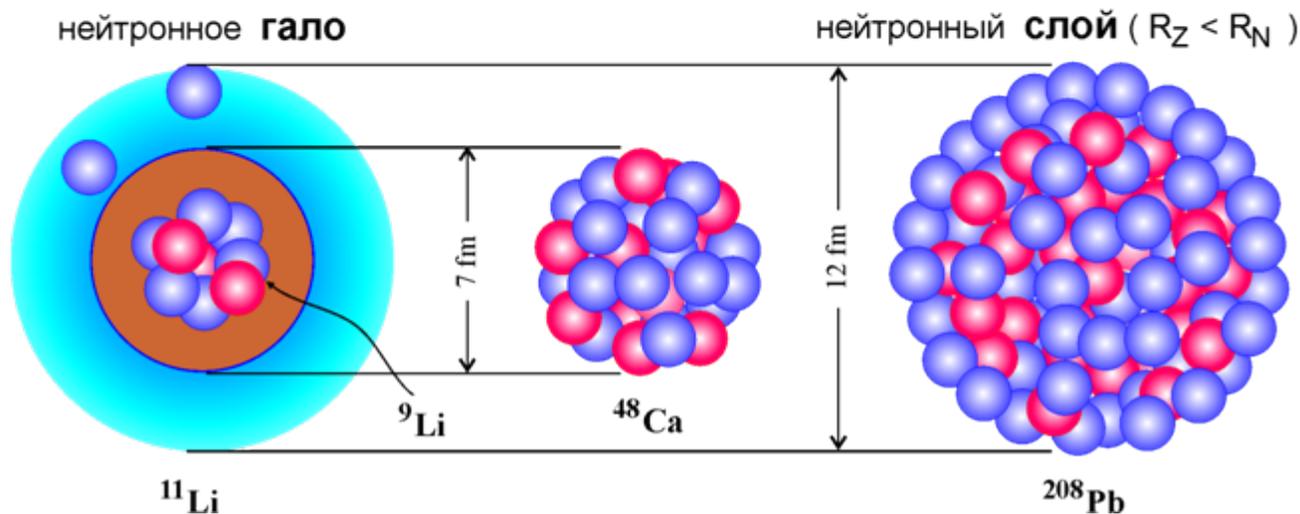
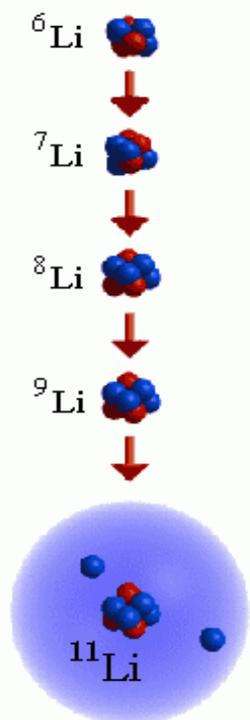
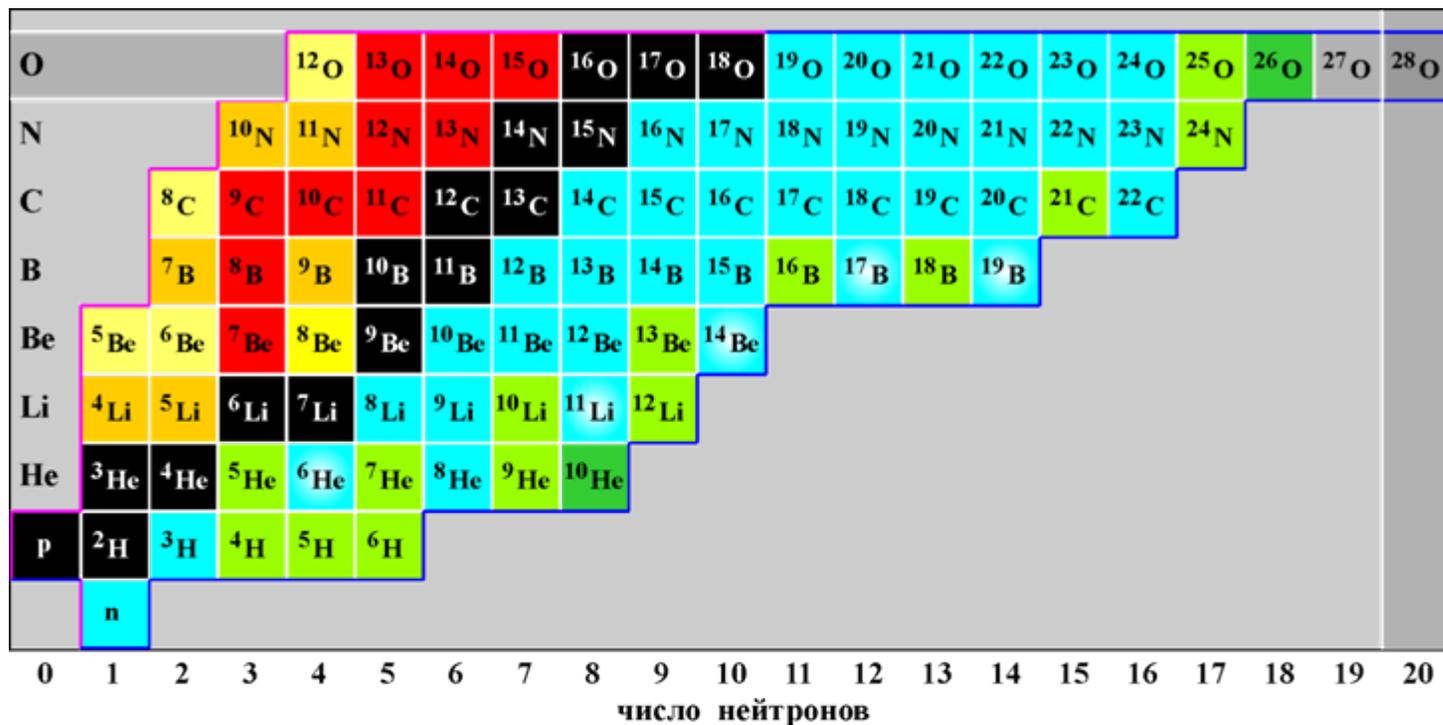
U-400
Heavy and superheavy
nuclei

U-400M
Light exotic
nuclei

IC-100
Applied re

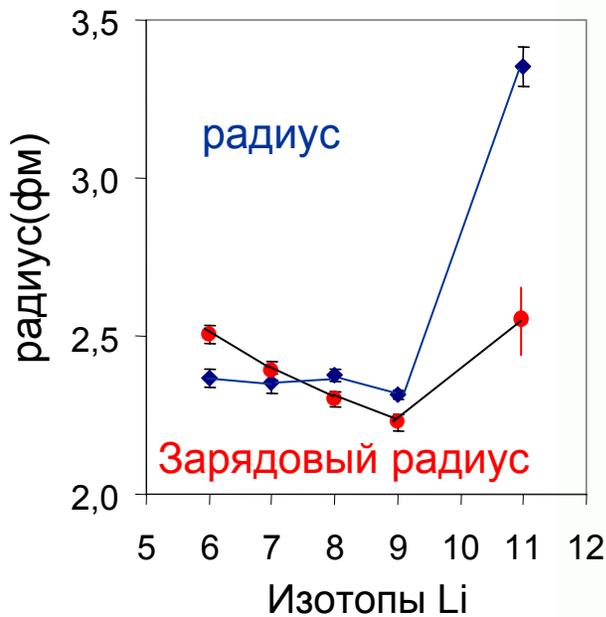
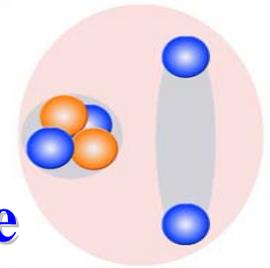
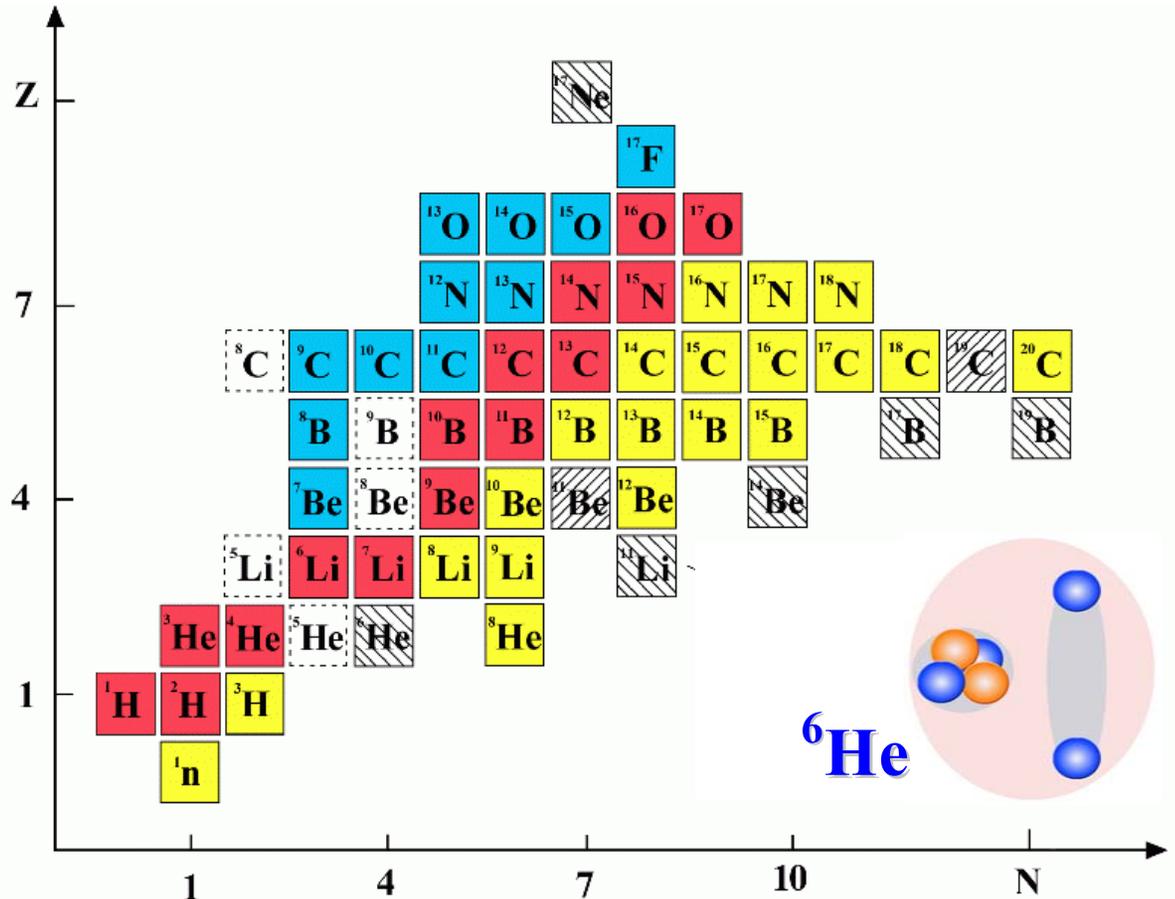


Ядра на границе стабильности



Ядра на границе стабильности

Нейтронное гало



 **Neutron halo**

 **Stable (~ 200)**

 **Borromean**

 **Unstable (> 6000)**

Ядра на границе стабильности

Стабильные ядра

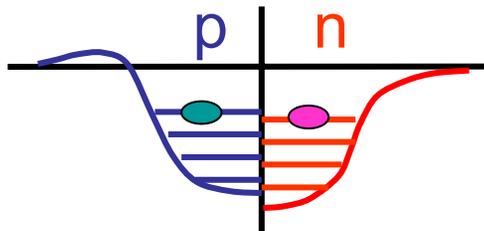
$$N / Z \sim 1 - 1.5$$

$$\varepsilon_S \sim 6 - 8 \text{ MeV}$$



$$\rho_0 \sim 0.16 \text{ fm}^{-3}$$

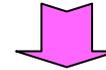
Протоны и нейтроны
однородно перемешаны



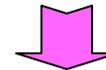
Нестабильные ядра

$$N / Z \sim 0.6 - 4$$

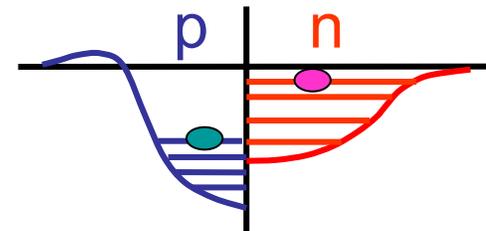
$$\varepsilon_S \sim 0 - 40 \text{ MeV}$$



Разъединение распределений
протонов и нейтронов

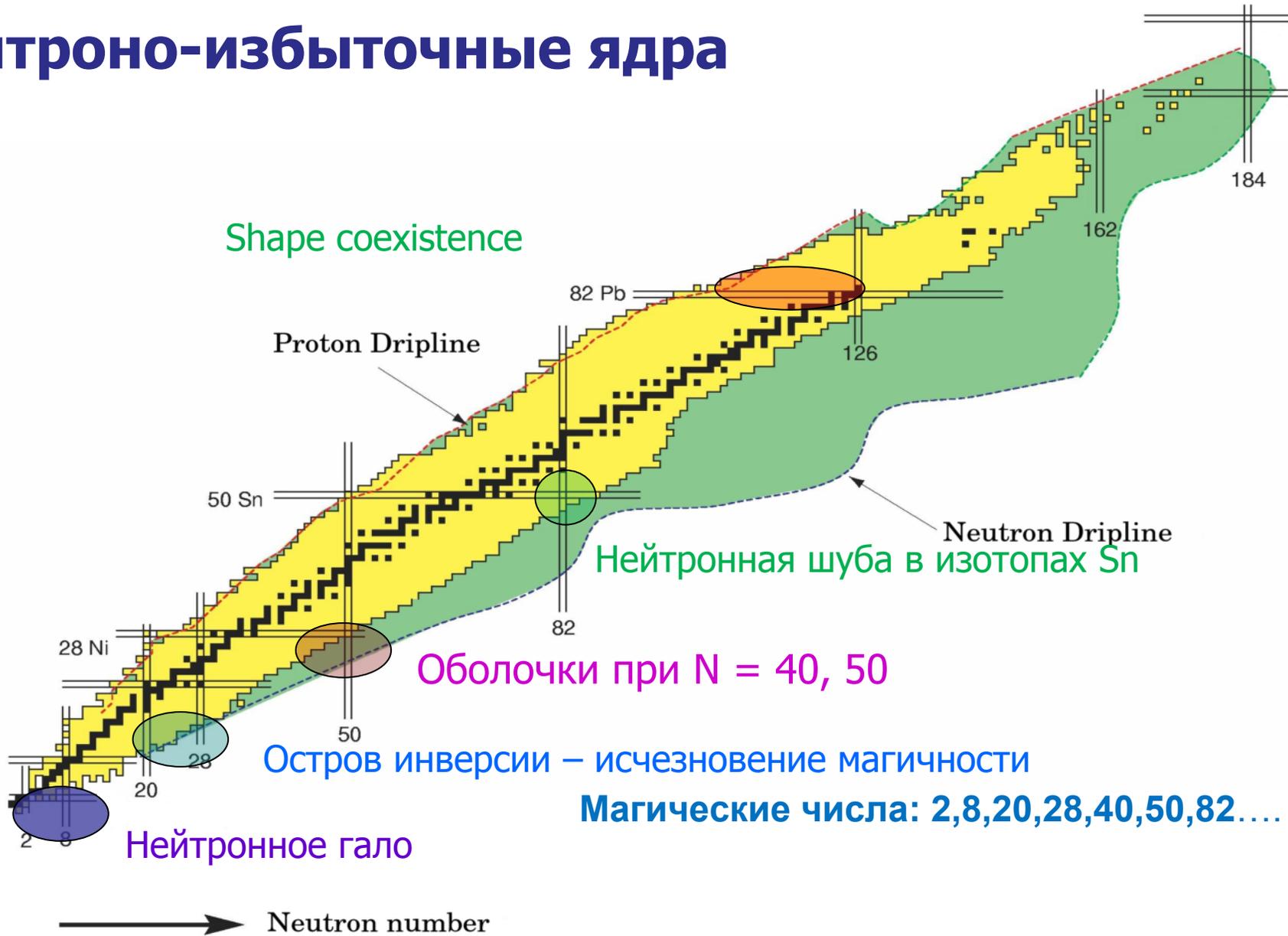


нейтронное гало и
нейтронная шуба



Нейтронно-избыточные ядра

Proton number
↑



Exotic nuclei

