

Мир атомных ядер

Синтез сверхтяжелых элементов

Периодическая система элементов Менделеева

ГРУППА

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 aluminum 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]	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]	88 Ra radium [226.0254]	** Actinoids 89-103															

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

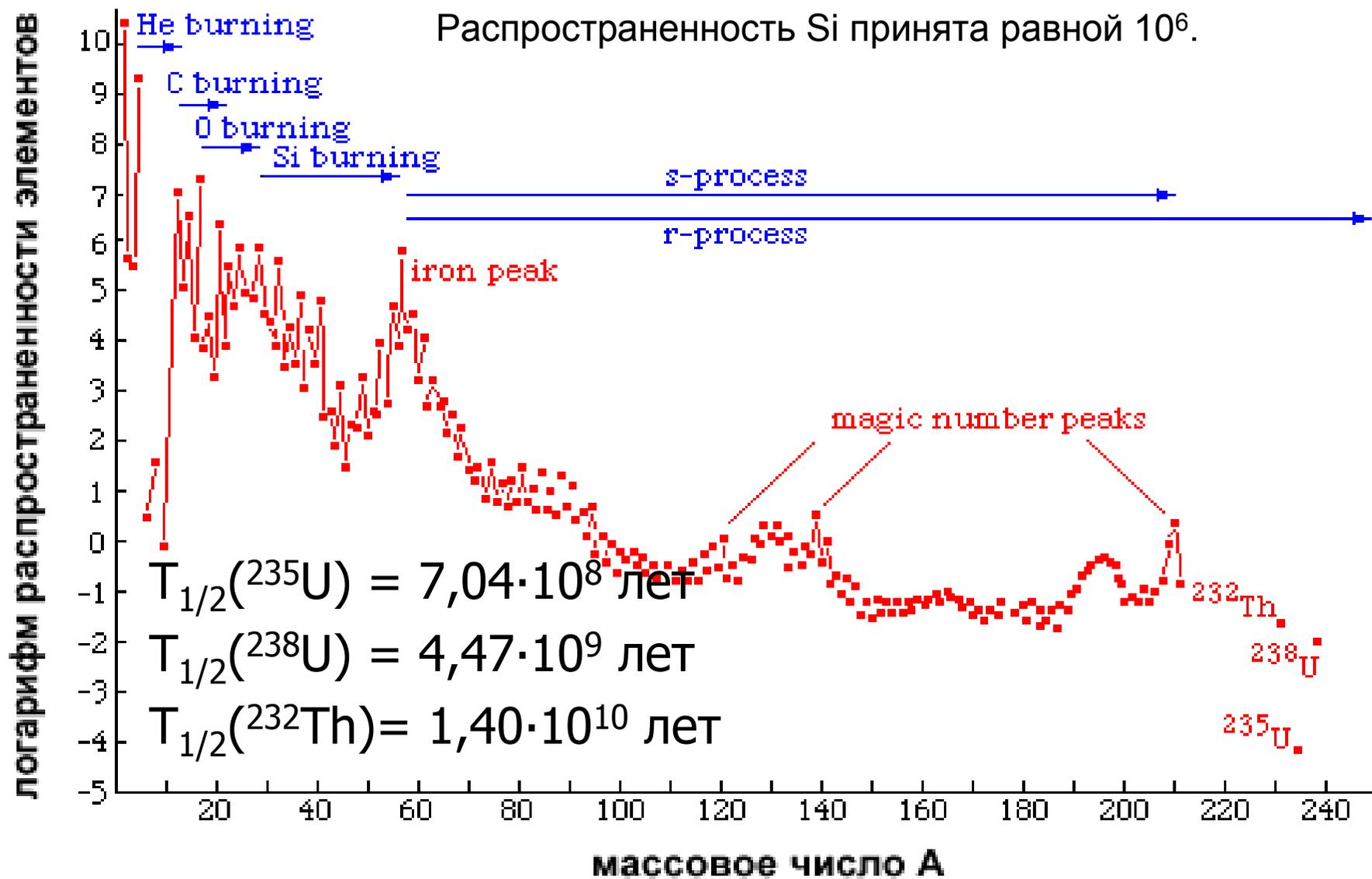
* Lanthanoids

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 168.93421(2)	70 Yb ytterbium 173.054(5)	71 Lu lutetium 174.9668(1)
--	---	---	--	---	--	---	--	--	---	--	---	--	--	--

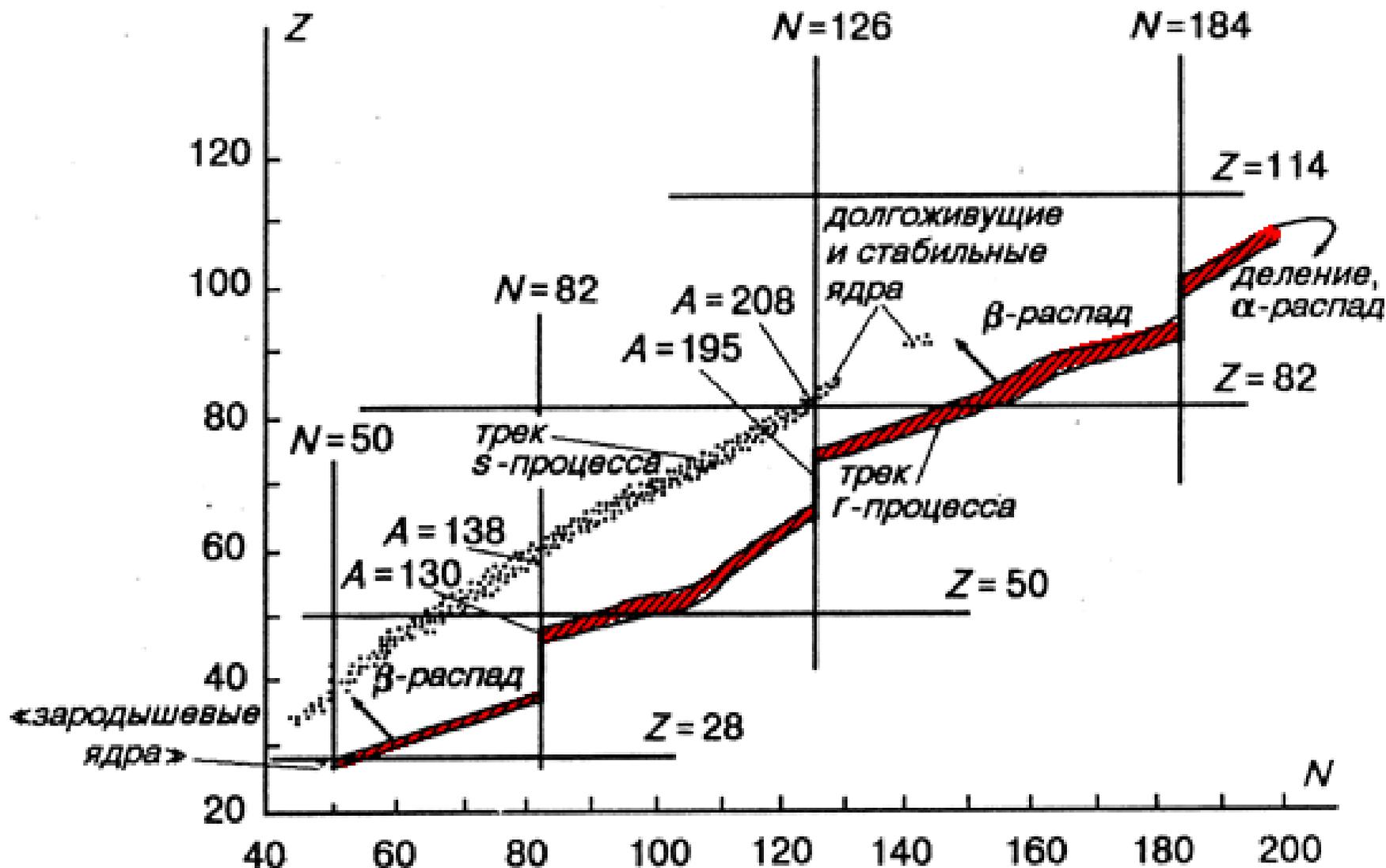
** Actinoids

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

Распространенность нуклидов во Вселенной



Взрывной нуклеосинтез



**Получение
актиноидов с
помощью нейтронов**



Циклотрон

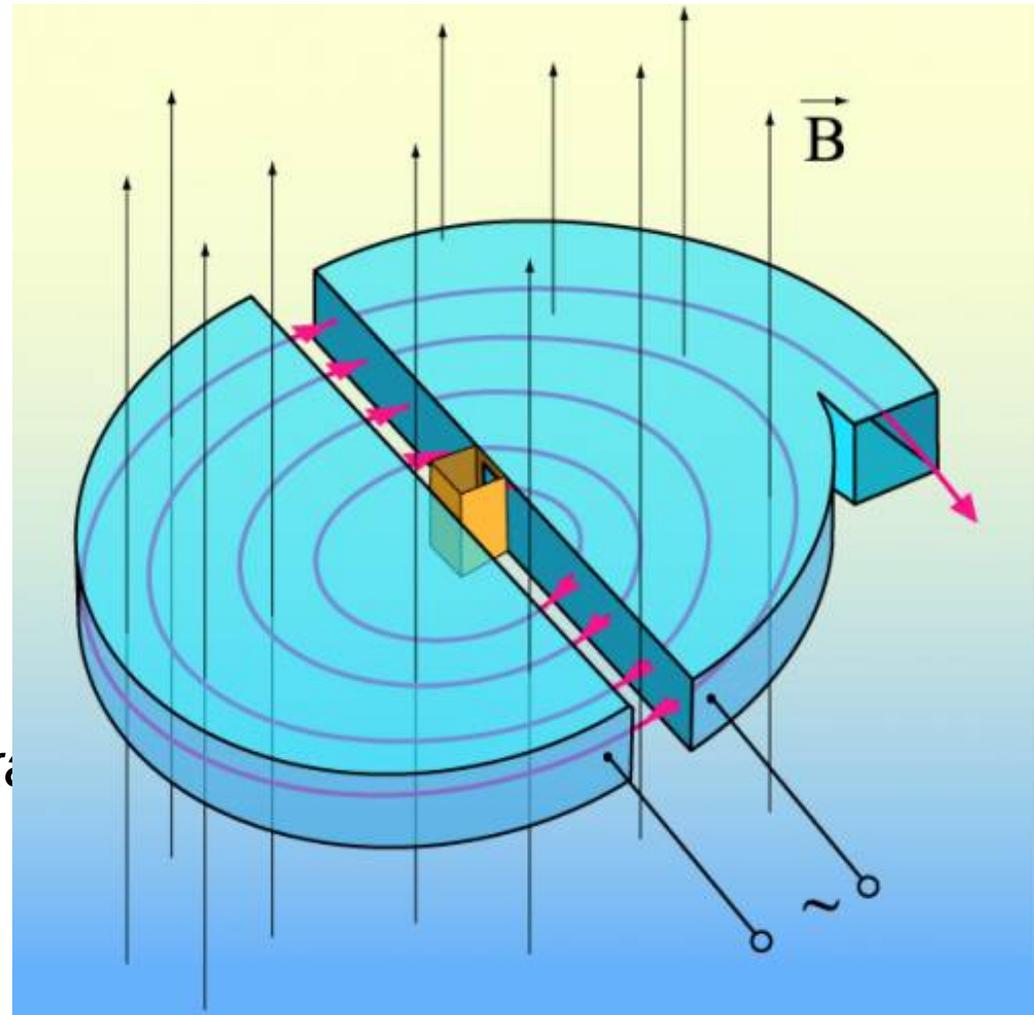
1929 г. Э. Лоуренс предложил идею циклотрона

1932 г. $E_{кин} (p) = 1,2 \text{ МэВ}$ ($D = 25 \text{ см}$)

$$\omega = \frac{v}{R} = v \frac{qB}{mv} = \frac{qB}{m}$$

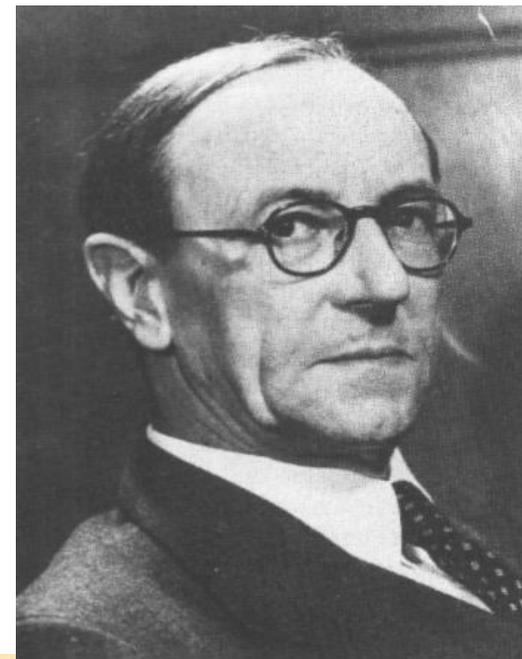
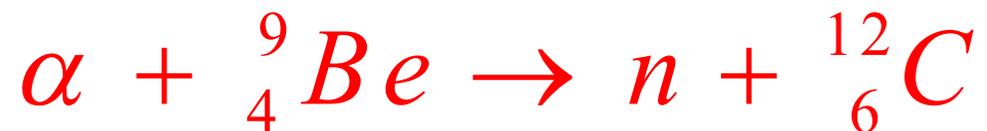
Максимальная кинетическая энергия протонов

$E_{кин} (p) = 22 \text{ МэВ}$ (1939 г.)

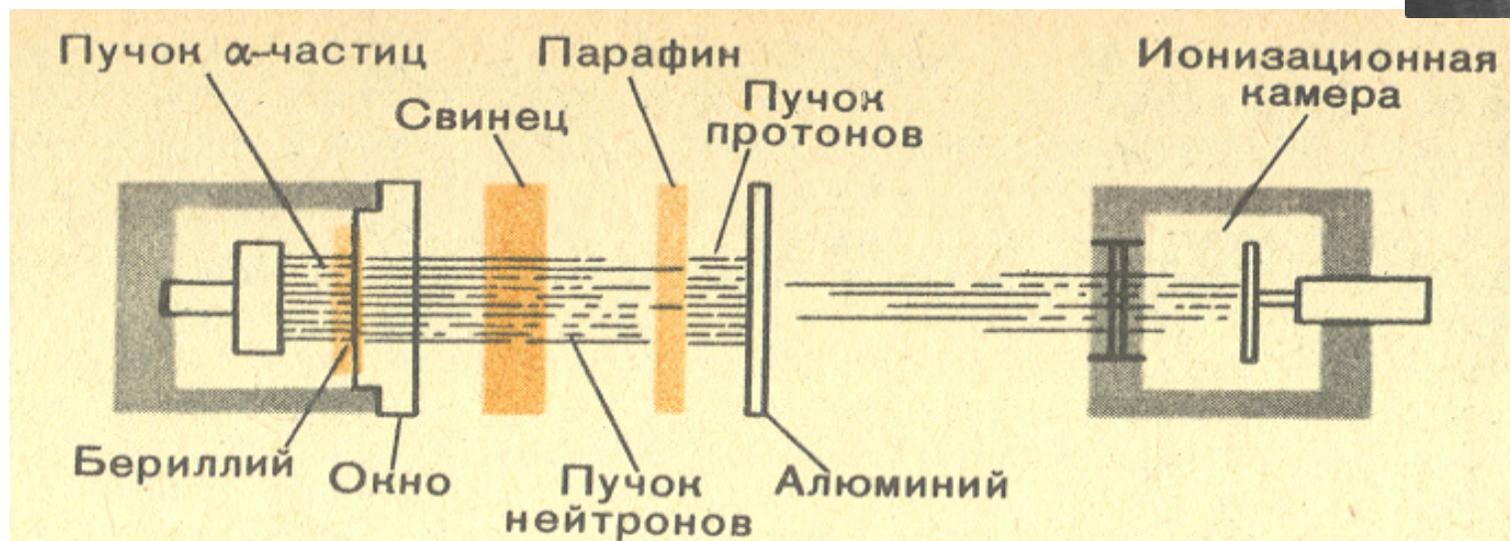


Открытие нейтрона

1932 г.



Дж. Чадвик
1891 - 1974



Нобелевская премия по физике

1935 г. – Дж.Чедвик

За открытие нейтрона

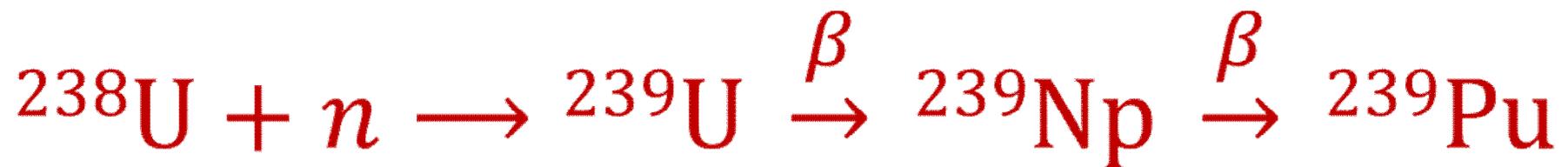
АКТИНОИДЫ

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

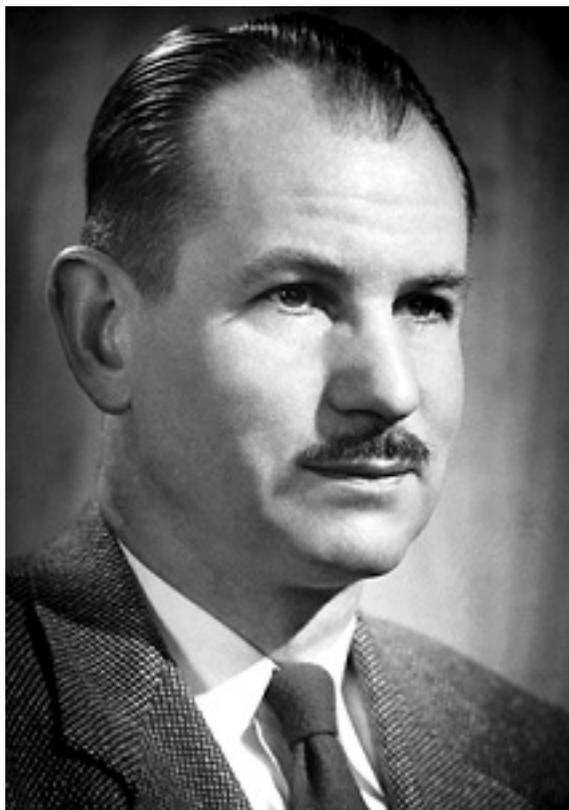


$$T_{1/2}({}^{237}\text{Np}) = 2,144 \cdot 10^6 \text{ лет}$$

$$T_{1/2}({}^{239}\text{Np}) = 2,356 \text{ дней}$$

$$T_{1/2}({}^{239}\text{Pu}) = 2,411 \cdot 10^4 \text{ лет}$$

АКТИНОИДЫ



Edwin Mattison McMillan
(1907 - 1991)



Glenn Theodore Seaborg
(1912 - 1999)

Нобелевская премия по химии

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

Получение актиноидов на ускорителях



АКТИНОИДЫ

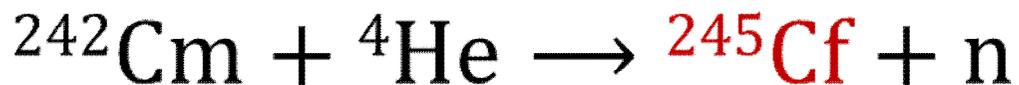
Г.Т. Сиборг, А. Гиорсо и др. (Беркли, США)

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

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

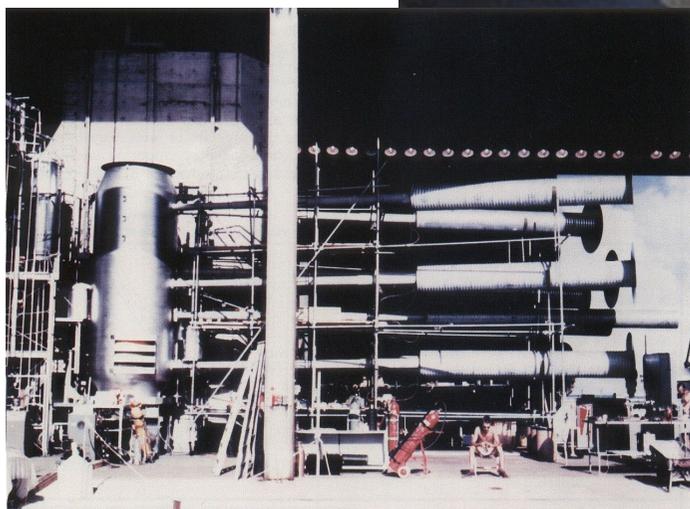
Наиболее долгоживущие изотопы

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



**Получение
актиноидов в
интенсивных потоках
нейтронов**

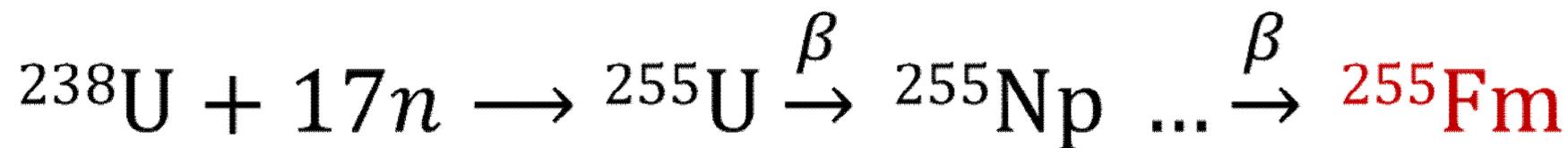
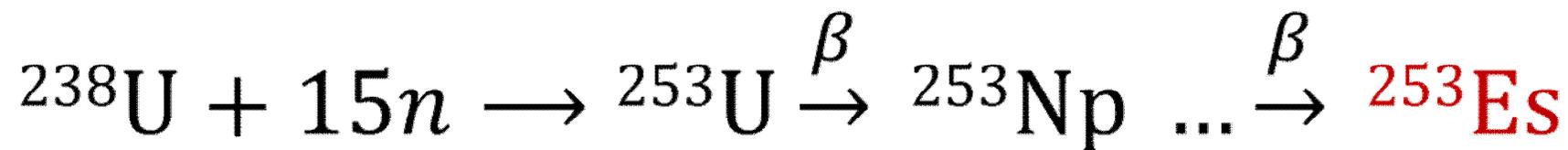
1 ноября 1952 года. Атолл Эниветок. Айви Майк



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
${}^{257}\text{Fm}$	100 дней

**Получение
трансфермиевых
ядер на ускорителях**

Трансфермиевые элементы

Элемент	Год	Лаборатория	Реакция
¹⁰¹Md Менделевий	1955	Беркли, США	$^{253}\text{Es} + ^4\text{He} \rightarrow ^{256}\text{Md} + n$
¹⁰²No Нобелий	1963	Дубна, СССР	$^{248}\text{Cm} + ^{13}\text{C} \rightarrow$ $\rightarrow ^{257}\text{No} + 4n$
¹⁰³Lr 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

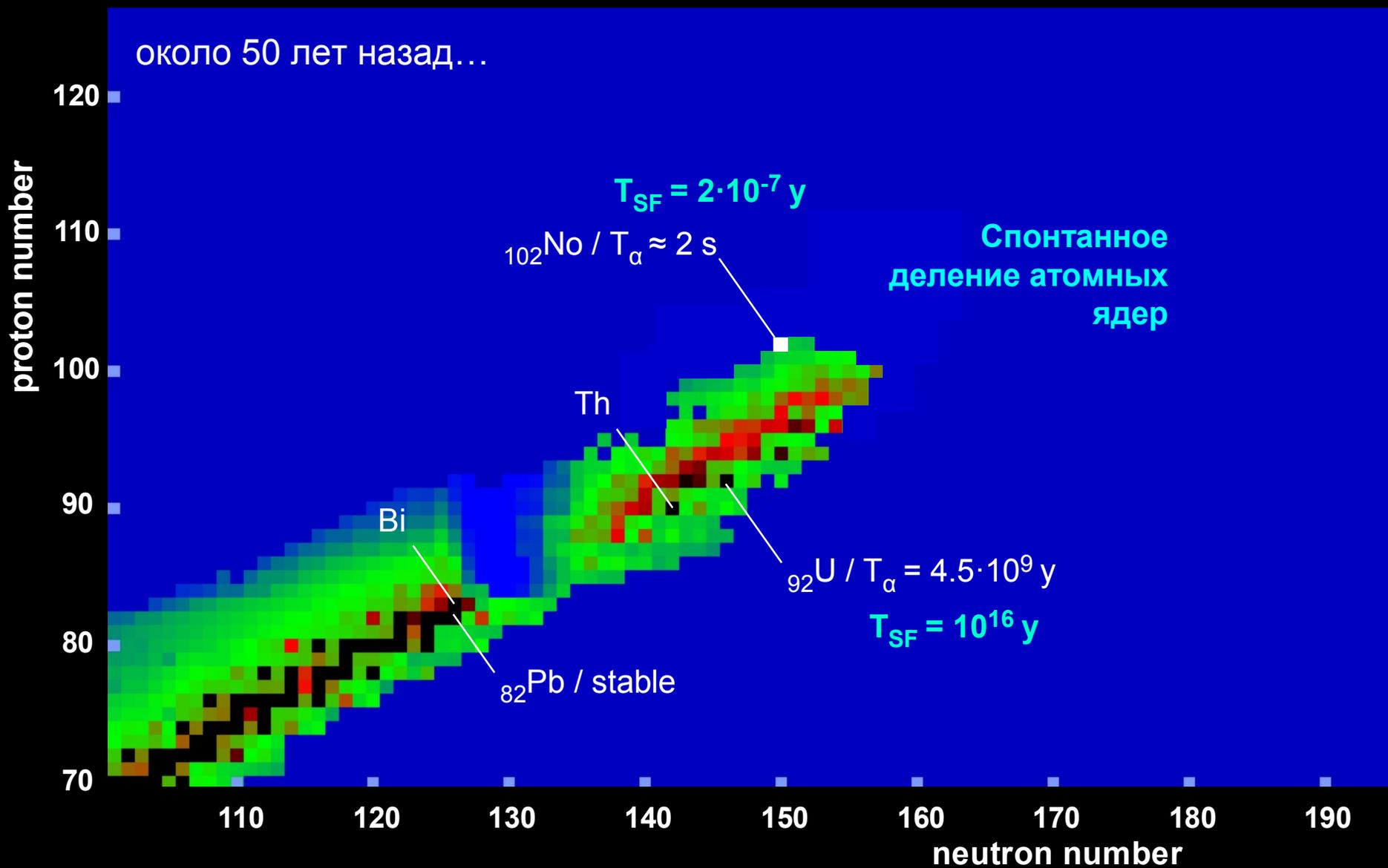
ПРОБЛЕМЫ:

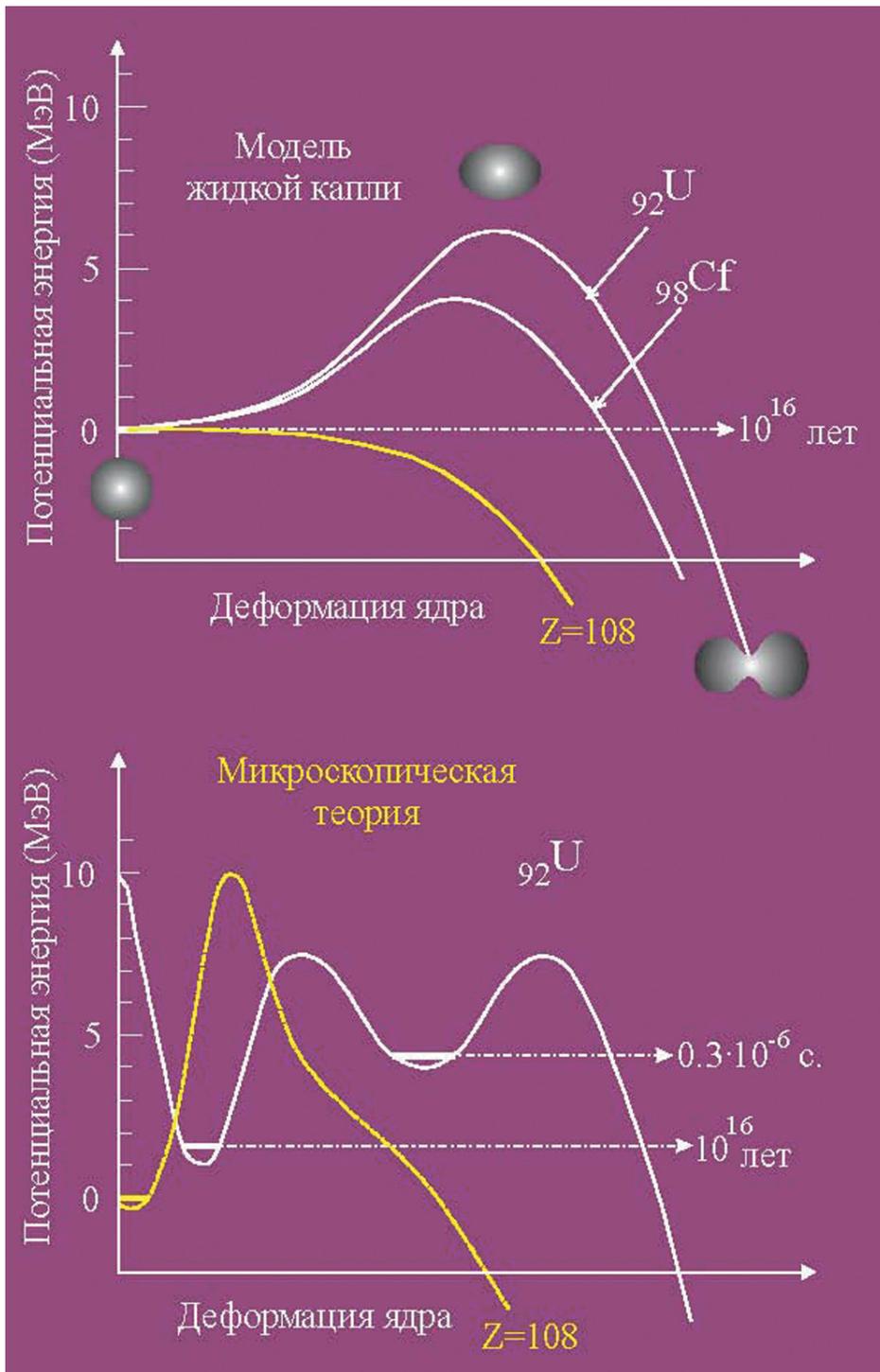
- Отсутствие в требуемых количествах мишеней из тяжелых трансурановых элементов.
- Существенное уменьшение по мере увеличения Z времени жизни изотопов, что значительно усложняет их идентификацию.

Остров Стабильности

Карта изотопов

Модель жидкой капли

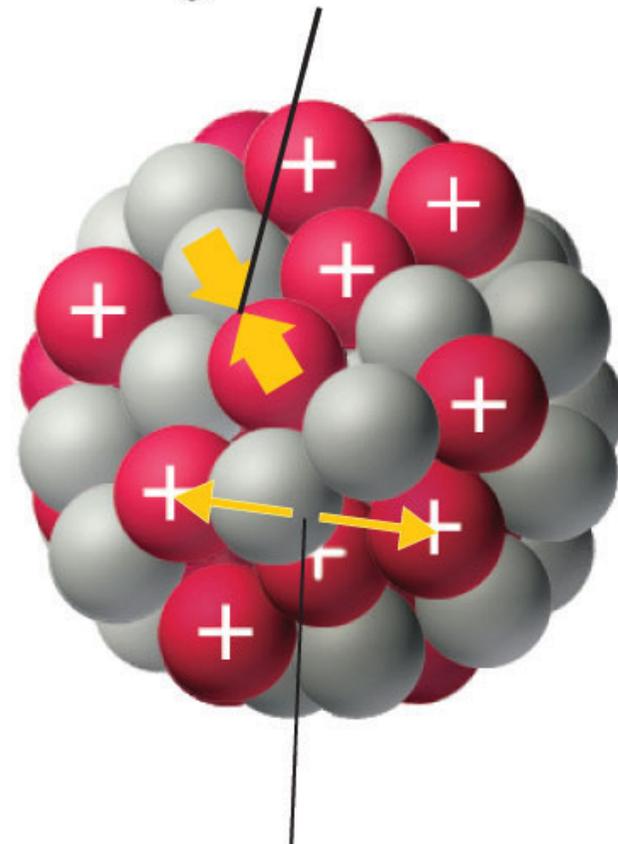




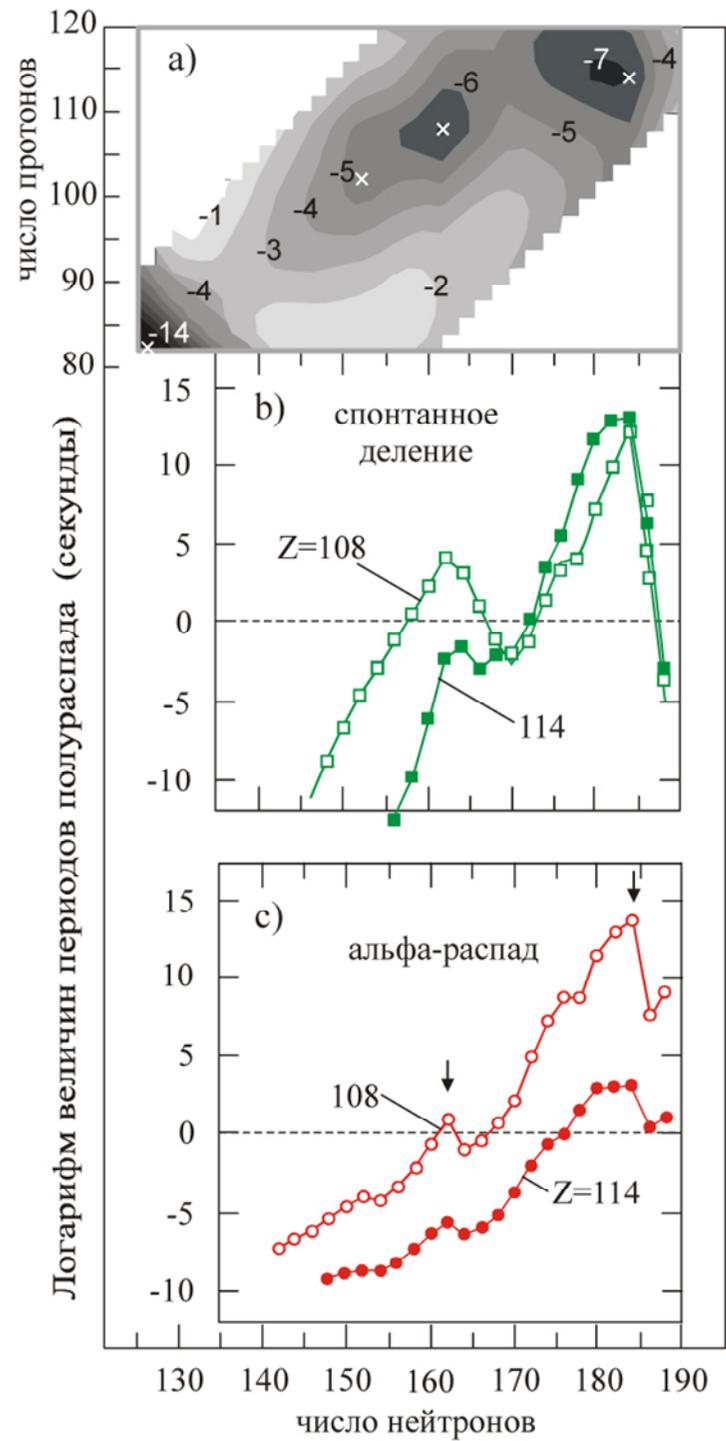
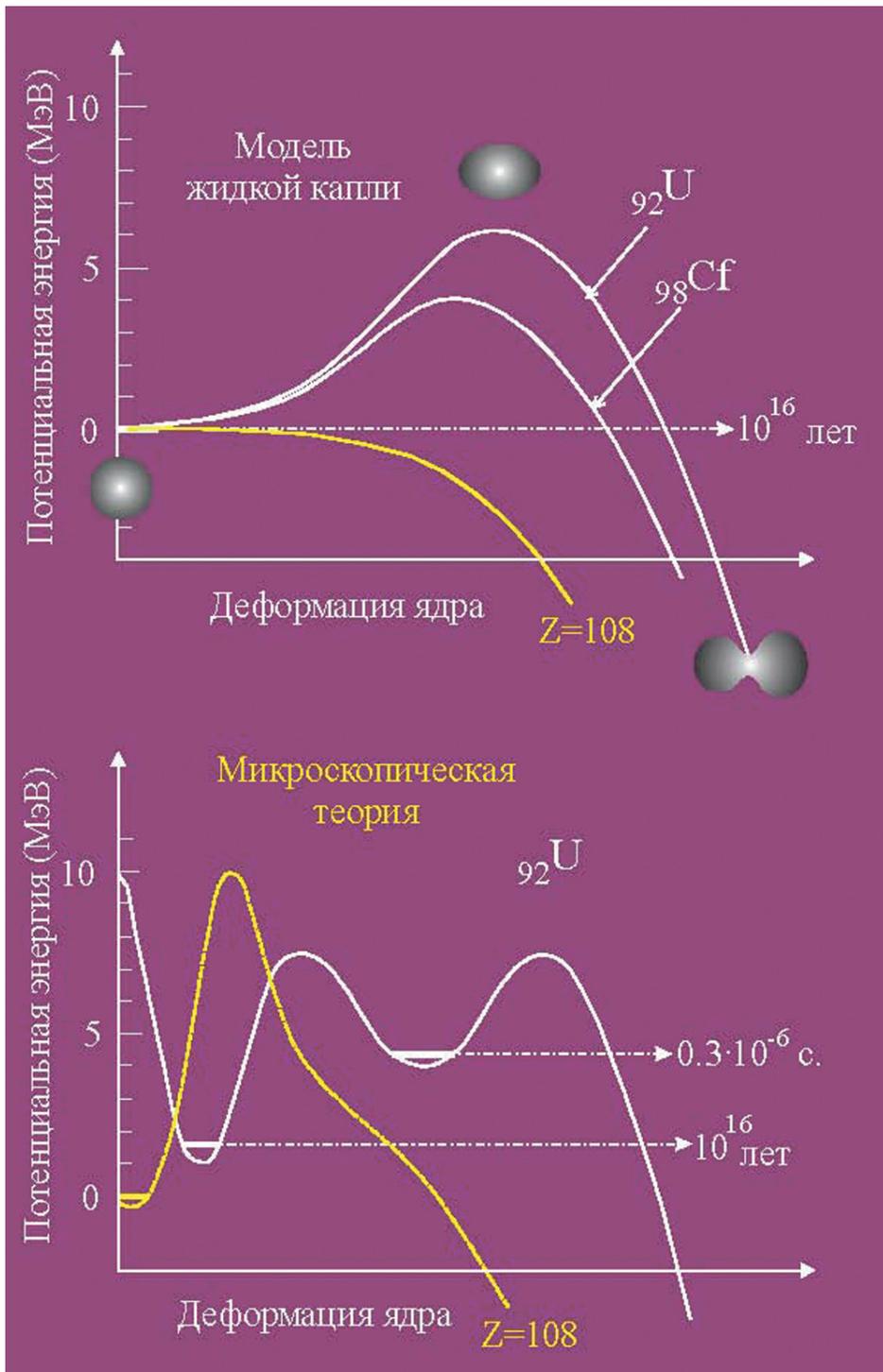
Капельная модель

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

Strong nuclear force

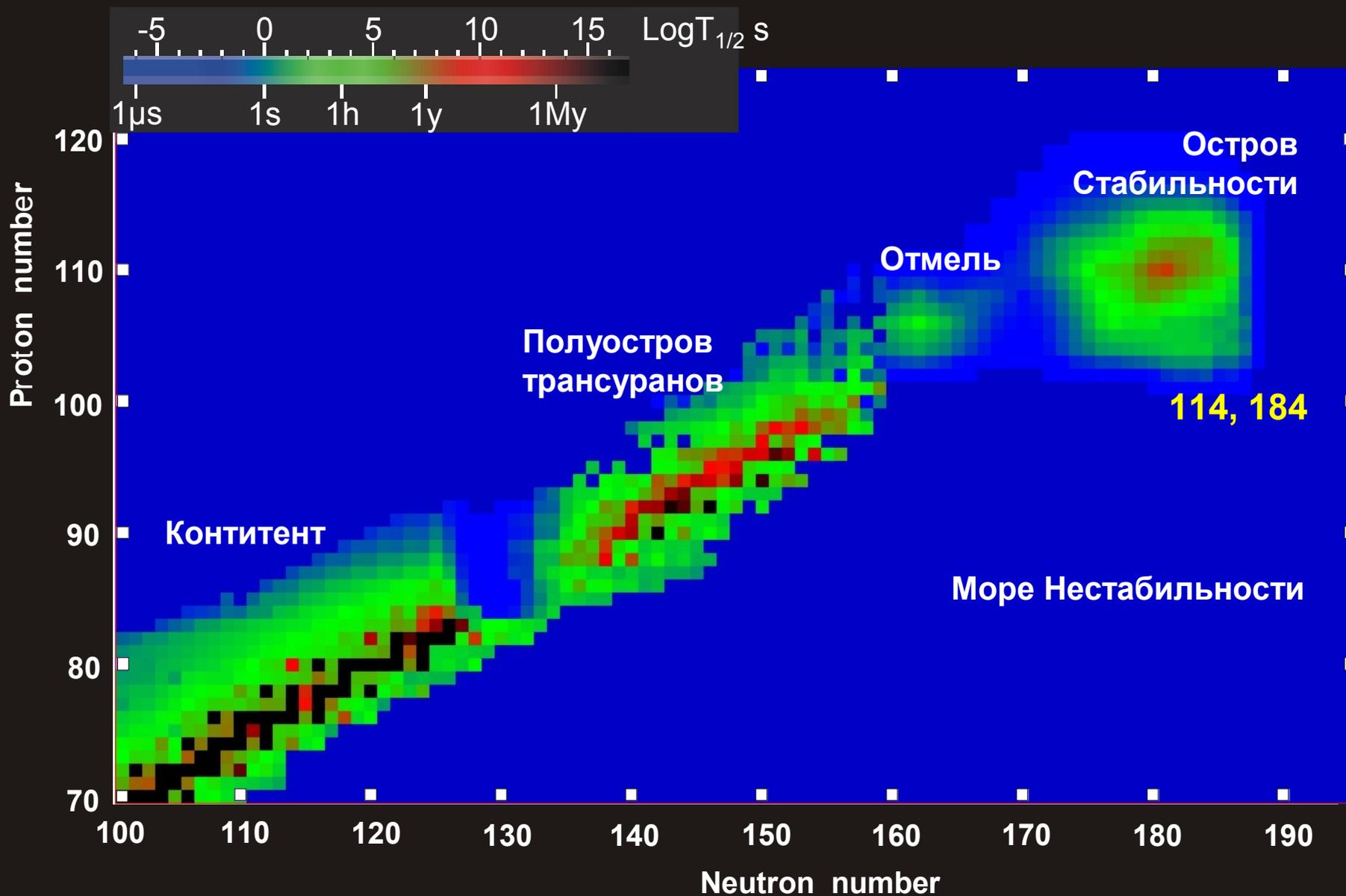


Electrostatic repulsion



New lands

Макро-микроскопическая теория ядра



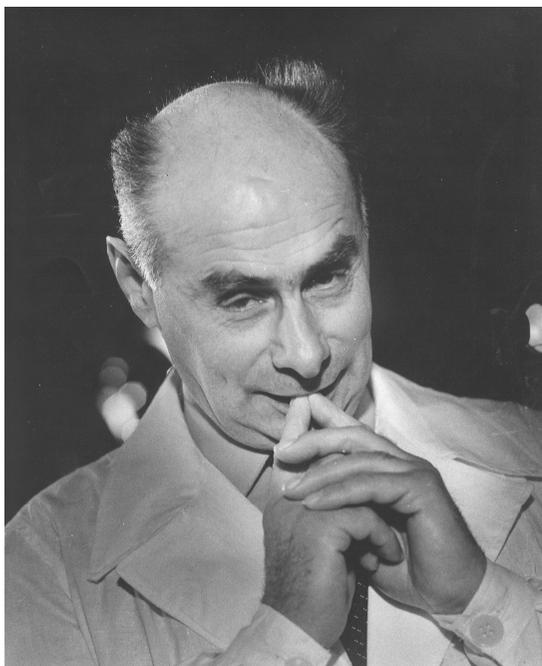
Горячее слияние ядер

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	$^{249}\text{Cf} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{257}\text{Rf} + 4\text{n}$
¹⁰⁵Du 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



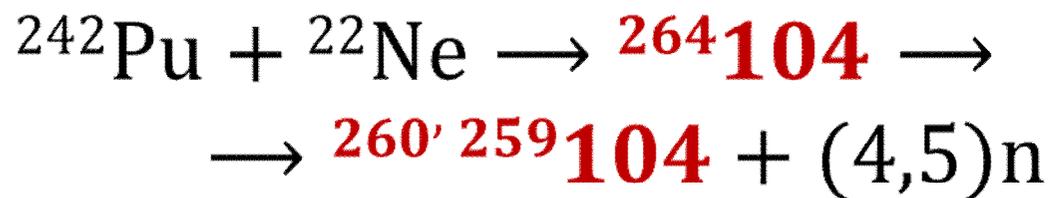
Георгий Николаевич
ФЛЕРОВ

На 2015 г:

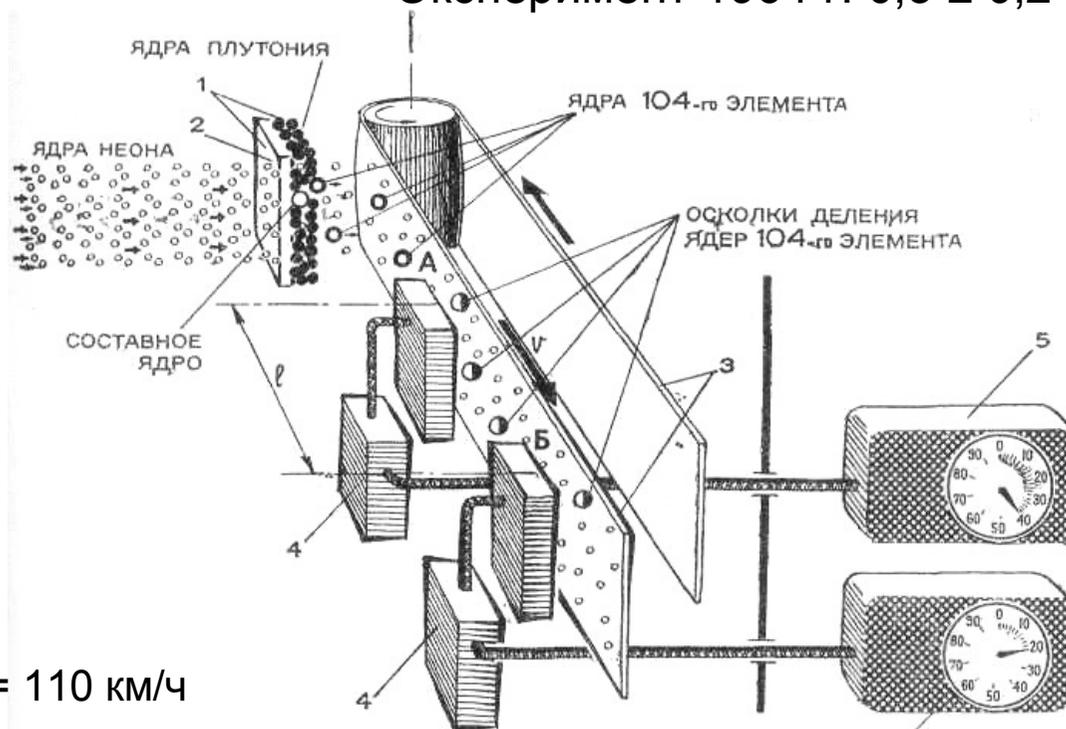
$T_{1/2} (^{259}\text{Rf}) \sim 3,2 \text{ с}$

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

Взятие 104-го



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



Регистрация осколков деления 104-го

Холодное слияние

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: $Z > 18$ ($^{40,48}\text{Ca}, ^{54}\text{Cr}, ^{58}\text{Fe}, ^{62,64}\text{Ni}$ 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

Dubna Gas-Filled Recoil Separator

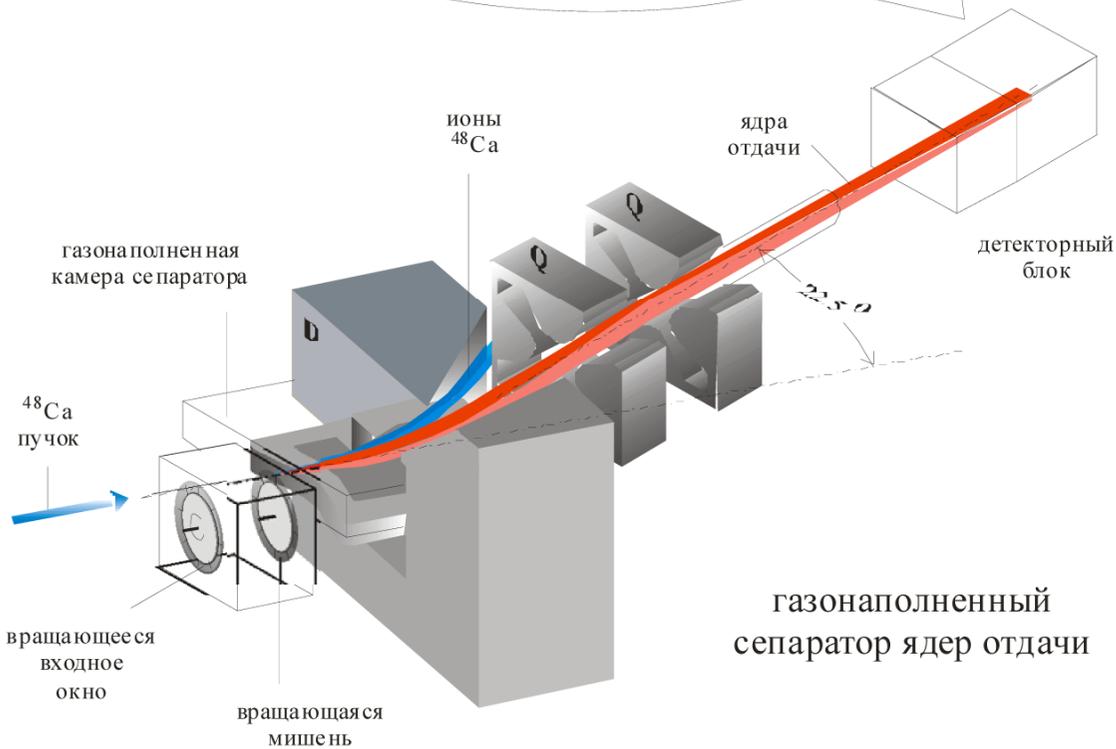
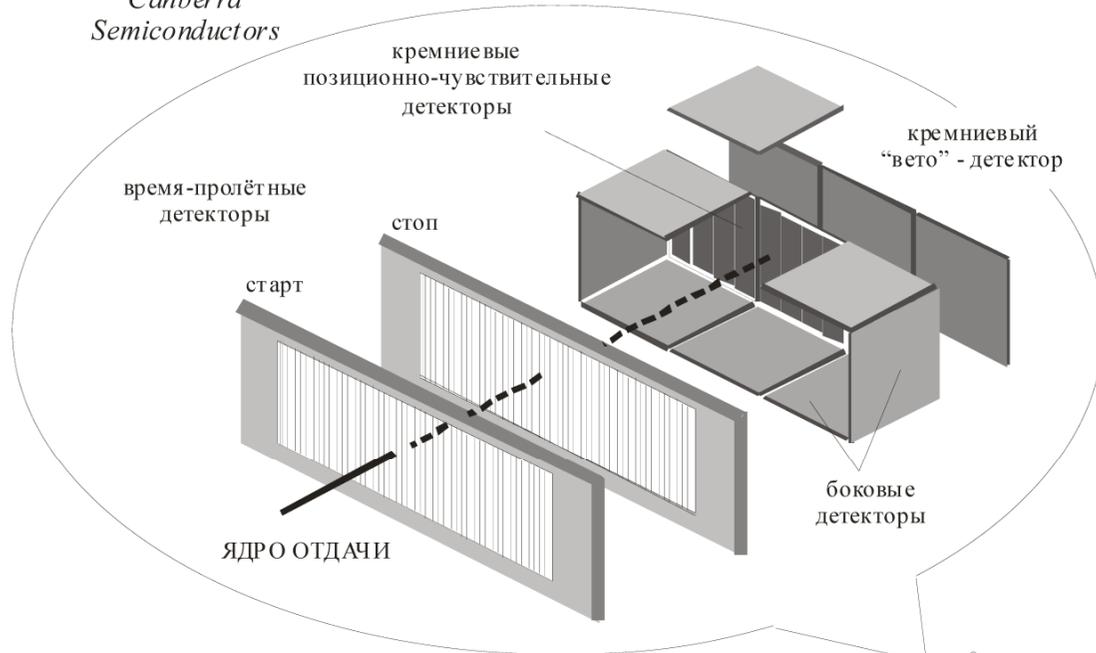
Газонаполненный
Сепаратор
(водород 10^{-3} атм)

Эффективность
регистрации:

для α -частиц 87%

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

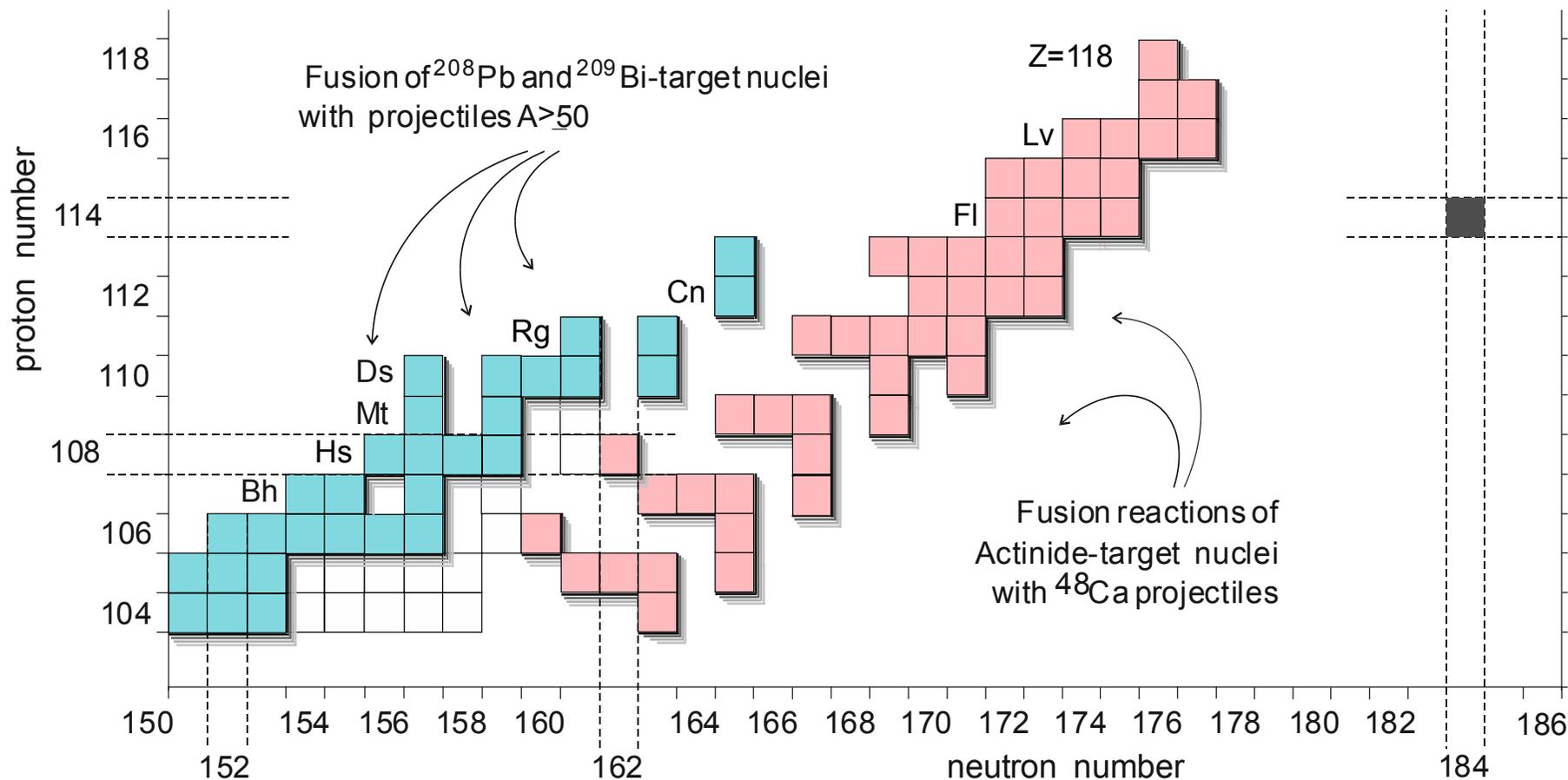
Canberra
Semiconductors



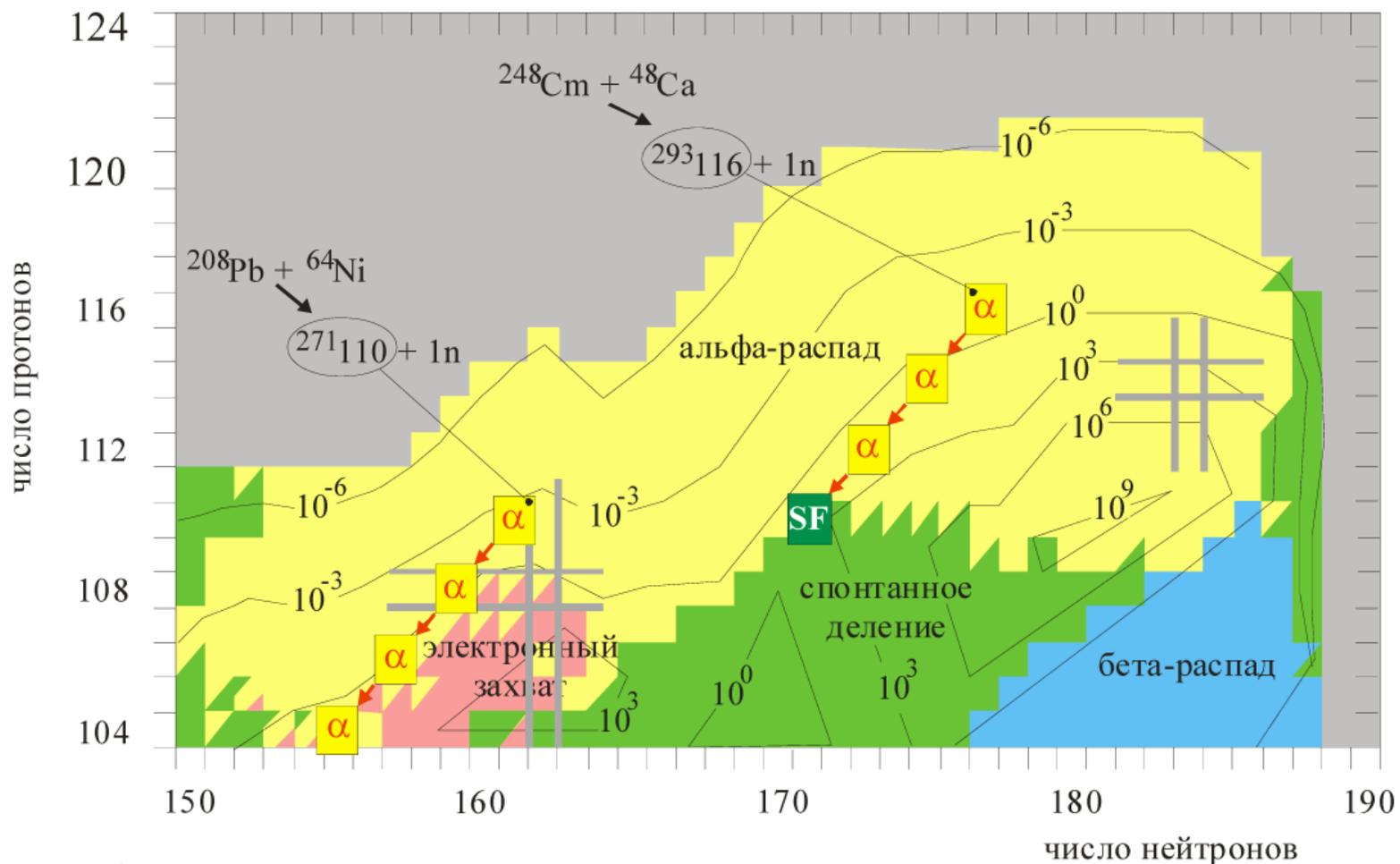
^{48}Ca + Actinide

- 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 $Z = 104 - 118$



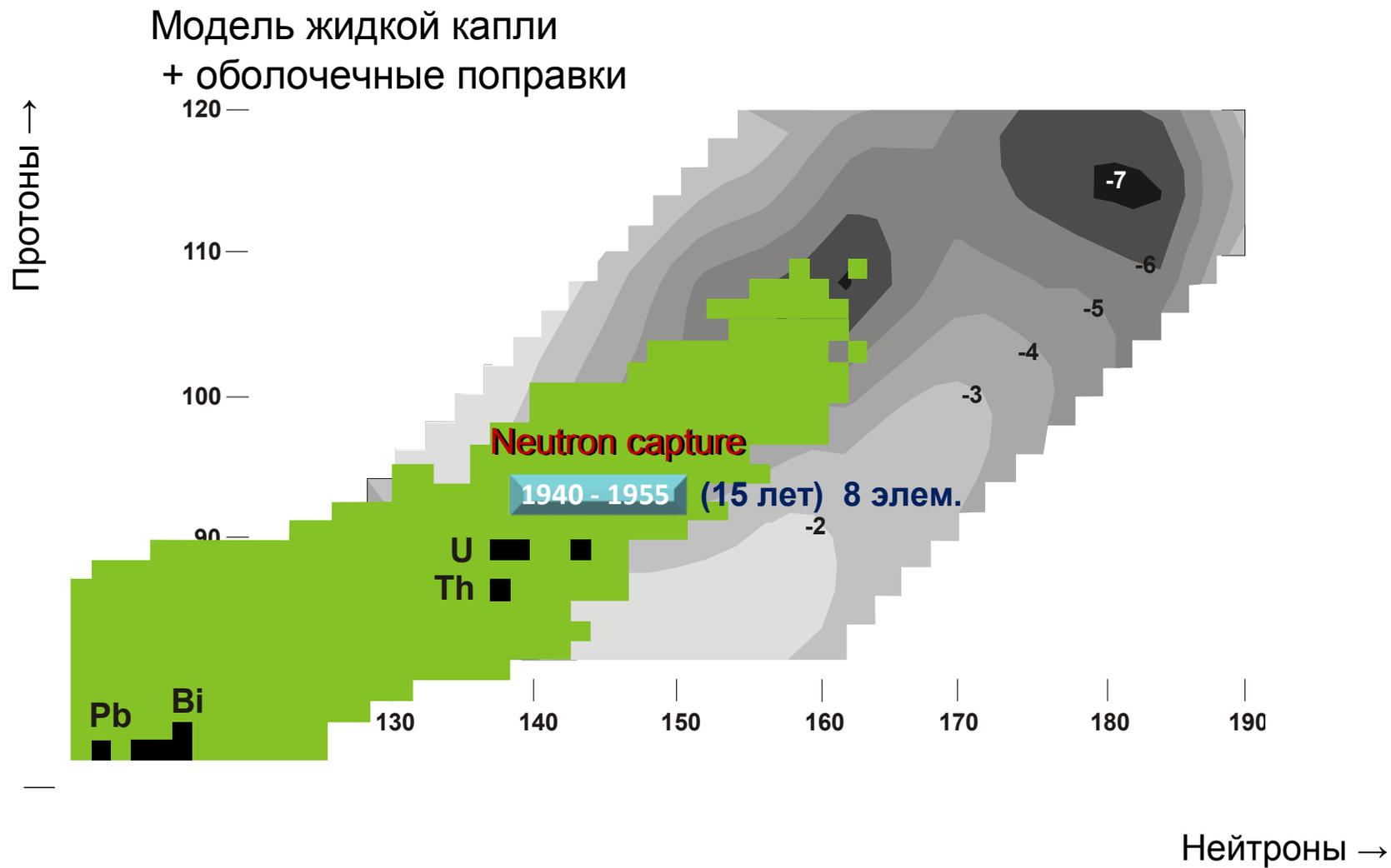
^{48}Ca + Actinide



- 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

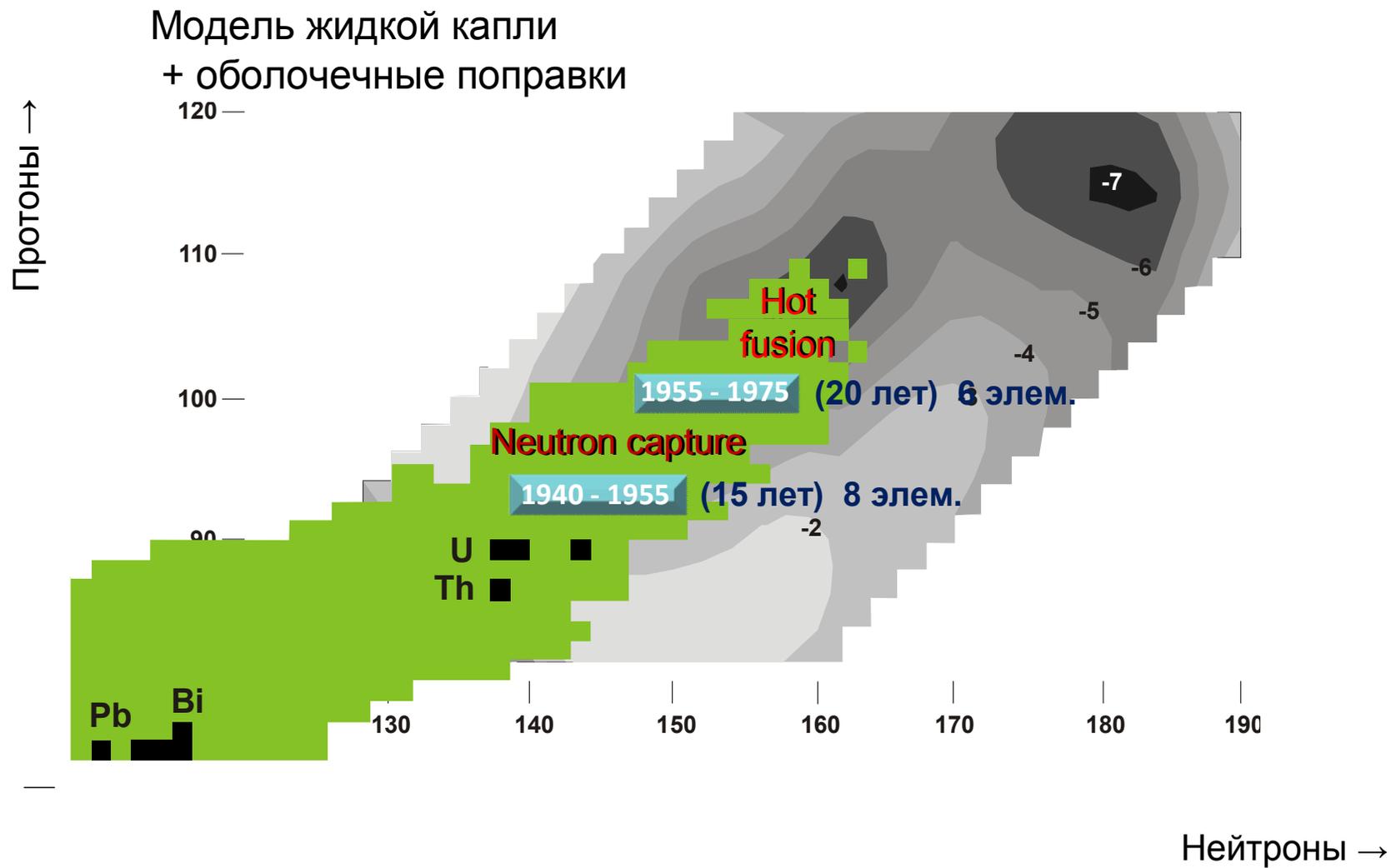
Синтез элементов

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



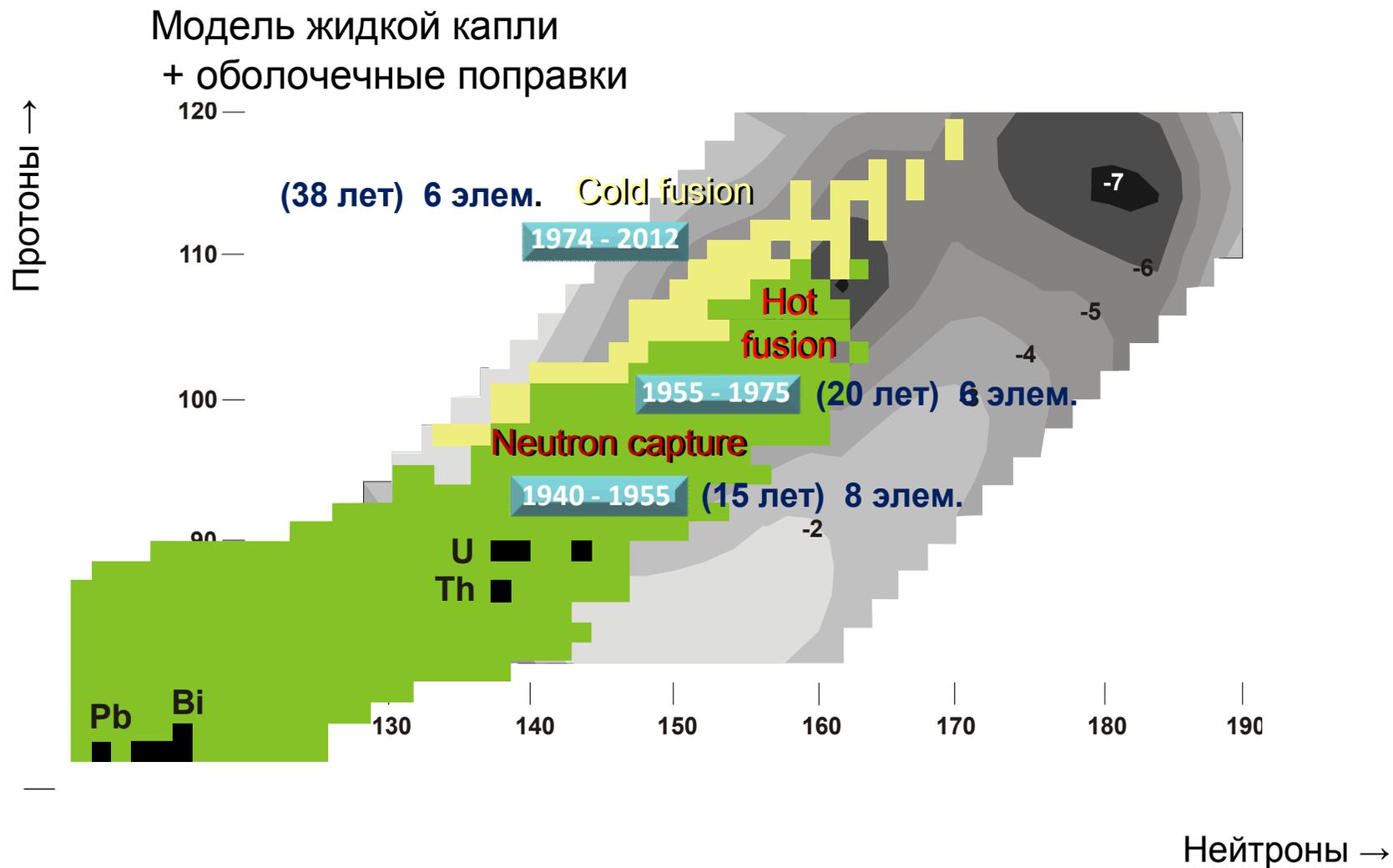
Синтез элементов

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



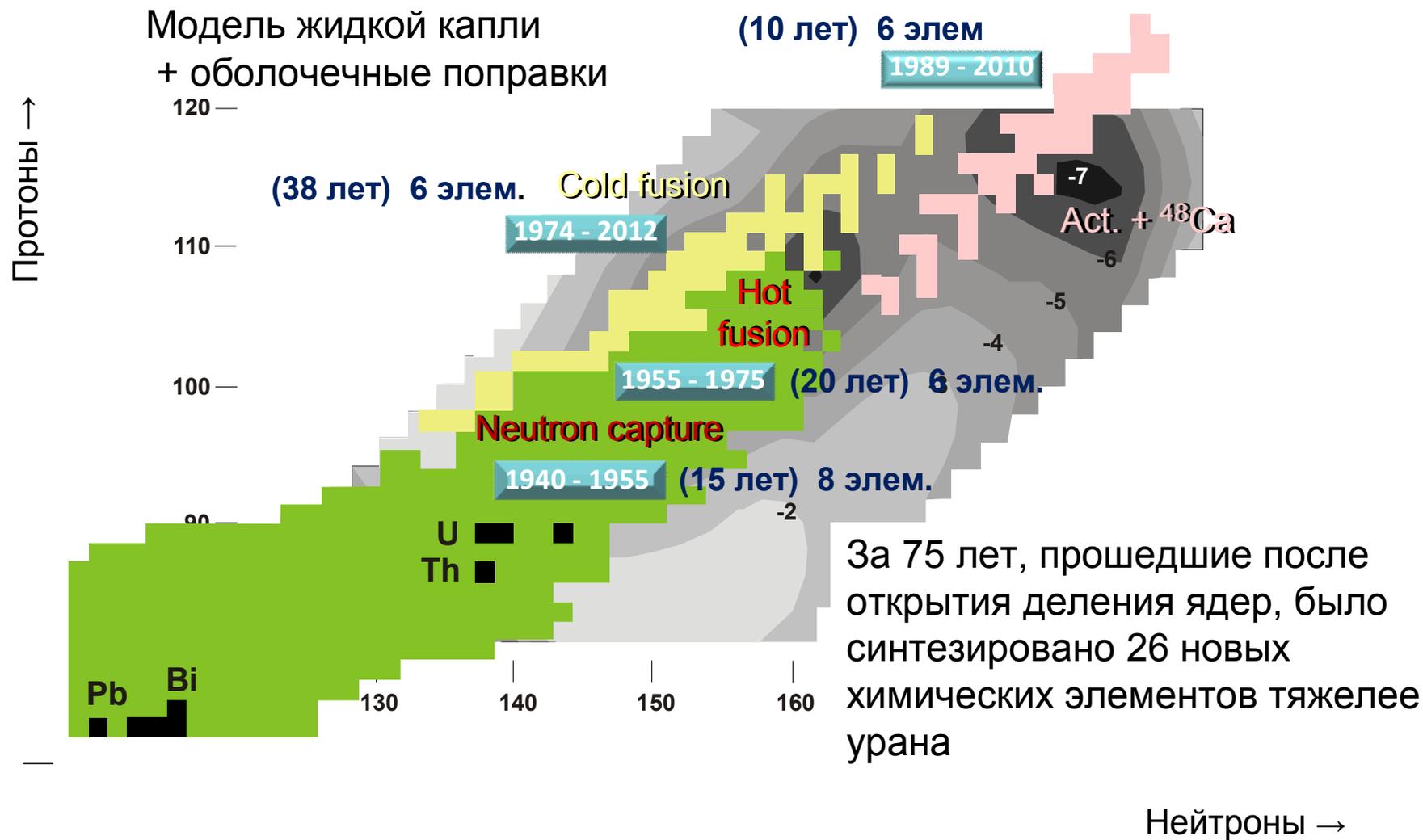
Синтез элементов

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



Синтез элементов

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



Подтверждение результатов DGFRS

2007 - 2014

A/Z	Эксп.	Лаборатория	Публикация
²⁸³ 112	SHIP	GSI Darmstadt	Eur. Phys. J. A32, 251 (2007)
²⁸³ 112	COLD	PSI-FLNR (JINR)	NATURE 447, 72 (2007)
^{286, 287} 114	BGS	LBNL (Berkeley)	P.R. Lett. 103, 132502 (2009)
^{288, 289} 114	TASCA	GSI – Mainz	P.R. Lett. 104, 252701 (2010)
^{292, 293} 116	SHIP	GSI Darmstadt	Eur. Phys. J. A48, 62 (2012)
^{287, 288} 115	TASCA	GSI – Mainz	P.R. Lett. 111, 112502 (2013)
^{293, 294} 117	TASCA	GSI – Mainz	P.R. Lett. 112, 172501 (2014)
^{292, 293} 116	GARIS	RIKEN Tokyo	Accelerator Progress Rep. (2013)

SHE-Factory

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

**Повышение в
10 раз**

Новый ускоритель
Высоко
интенсивные
пучки: Ca-48
Ti-50
Ni-64

Фактор 10-20

**Зависит
от прочности
мишени**

SC- сепаратор
& позиционные
детекторы

**Фактор 3-5
Зависит
от интеллекта**

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

Периодическая система элементов Менделеева

2006 г.

ГРУППА

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
ПЕРИОД	1	1 H hydrogen 1.00794(7)																	2 He helium 4.002602(2)	
	2	3 Li lithium 6.941(2)	4 Be beryllium 9.012182(3)																	10 Ne neon 20.1797(6)
	3	11 Na sodium 22.98976928(2)	12 Mg magnesium 24.3050(6)																	18 Ar argon 39.948(1)
	4	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)	
	5	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(3)	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	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]	
	7	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 [270]	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]	

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

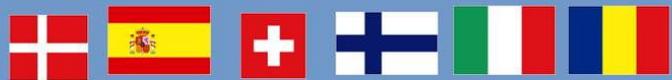
* Lanthanoids

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)
--	---	---	--	---	--	---	--	--	---	--	---	--	--	--

** Actinoids

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 [258.0986]	102 No nobelium [259.1009]	103 Lr lawrencium [262.11]
---	--	---	---	--	--	--	---	--	--	--	---	---	--	--

Elements & Country of Discovery

1 H	 UK 23 Sweden 19 Germany 19 U.S.A. 17 France 17 Russia 6 Austria 2															2 He			
3 Li	4 Be	 Denmark 2 Spain 2 Swit. 2 Finland 1 Italy 1 Romania 1										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
11 Na	12 Mg	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn		
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo		
58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu						
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr						

Credit given to both where joint or independently discovered. IUPAC recognised only. Collated by Jamie Gallagher, @jamiebgall