

Ядерная физика и Человек

Сверхтяжелые элементы

Лаборатория ядерных реакций имени Г.Н. Флерова

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 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	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 131.29(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	88 Ra radium [226.0254]	** Actinoids 89-103															

* Lanthanoids

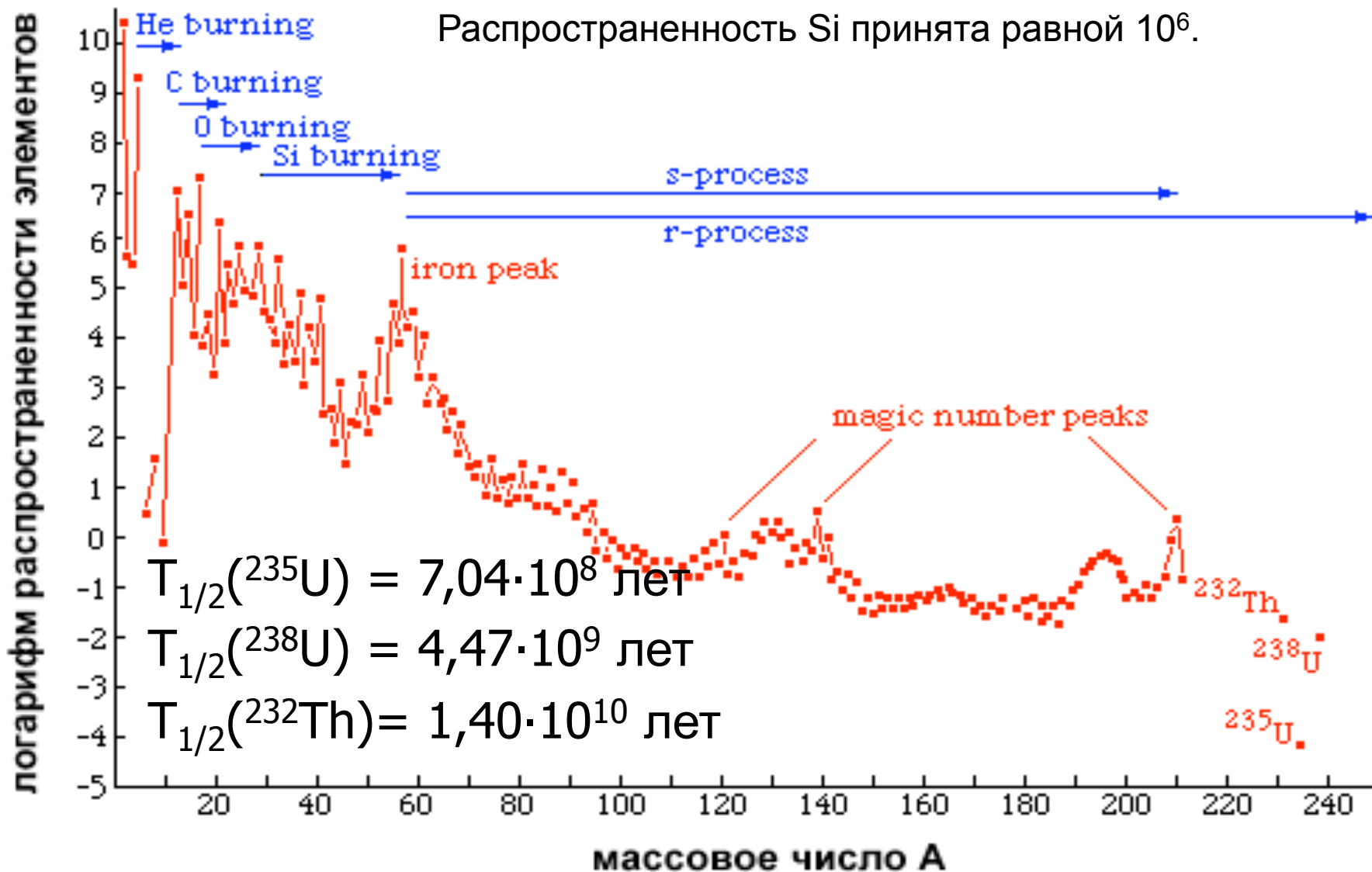
57 La lanthanum 138.90547(7)	58 Ce cerium 140.116(1)	59 Pr praseodymium 140.90765(2)	60 Nd neodymium 144.242(3)	61 Pm promethium [144.91]	62 Sm samarium 150.36(2)	63 Eu europium 151.964(1)	64 Gd gadolinium 157.25(3)	65 Tb terbium 158.92535(2)	66 Dy dysprosium 162.500(1)	67 Ho holmium 164.93032(2)	68 Er erbium 167.259(3)	69 Tm thulium 168.93421(2)	70 Yb ytterbium 173.054(5)	71 Lu lutetium 174.96681(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

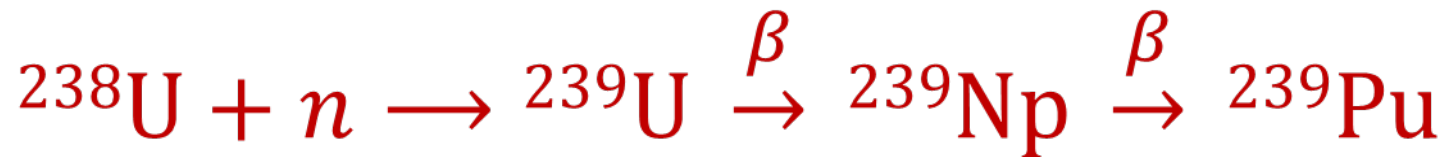
Распространенность Si принята равной 10^6 .



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

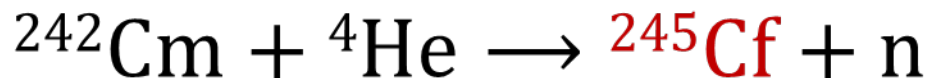
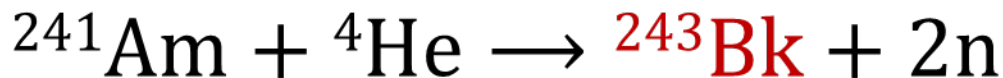
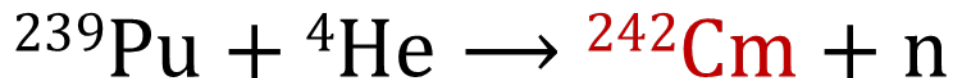
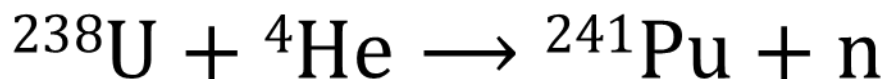


АКТИНОИДЫ

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



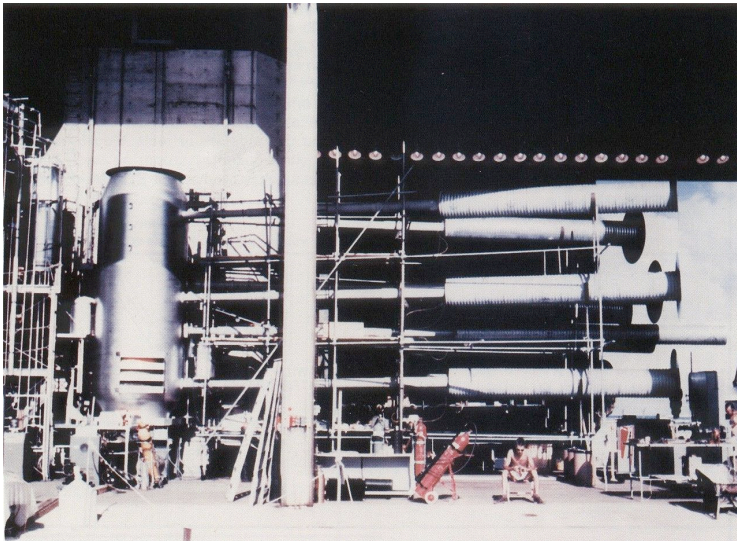
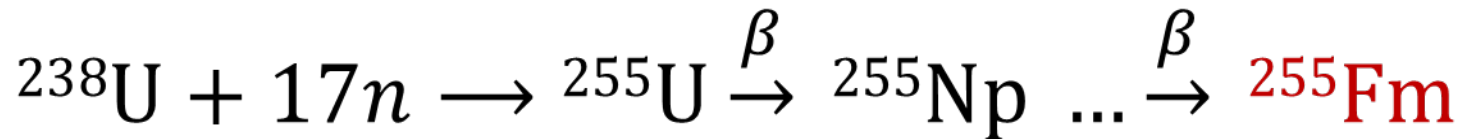
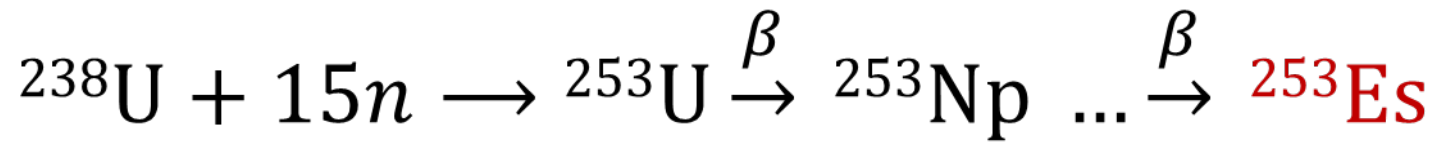
Наиболее
долгоживущие изотопы

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
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	$^{243}\text{Am} + ^{16,18}\text{O} \rightarrow$ $\rightarrow ^{255, 256}\text{Lr} + (3,5)n$

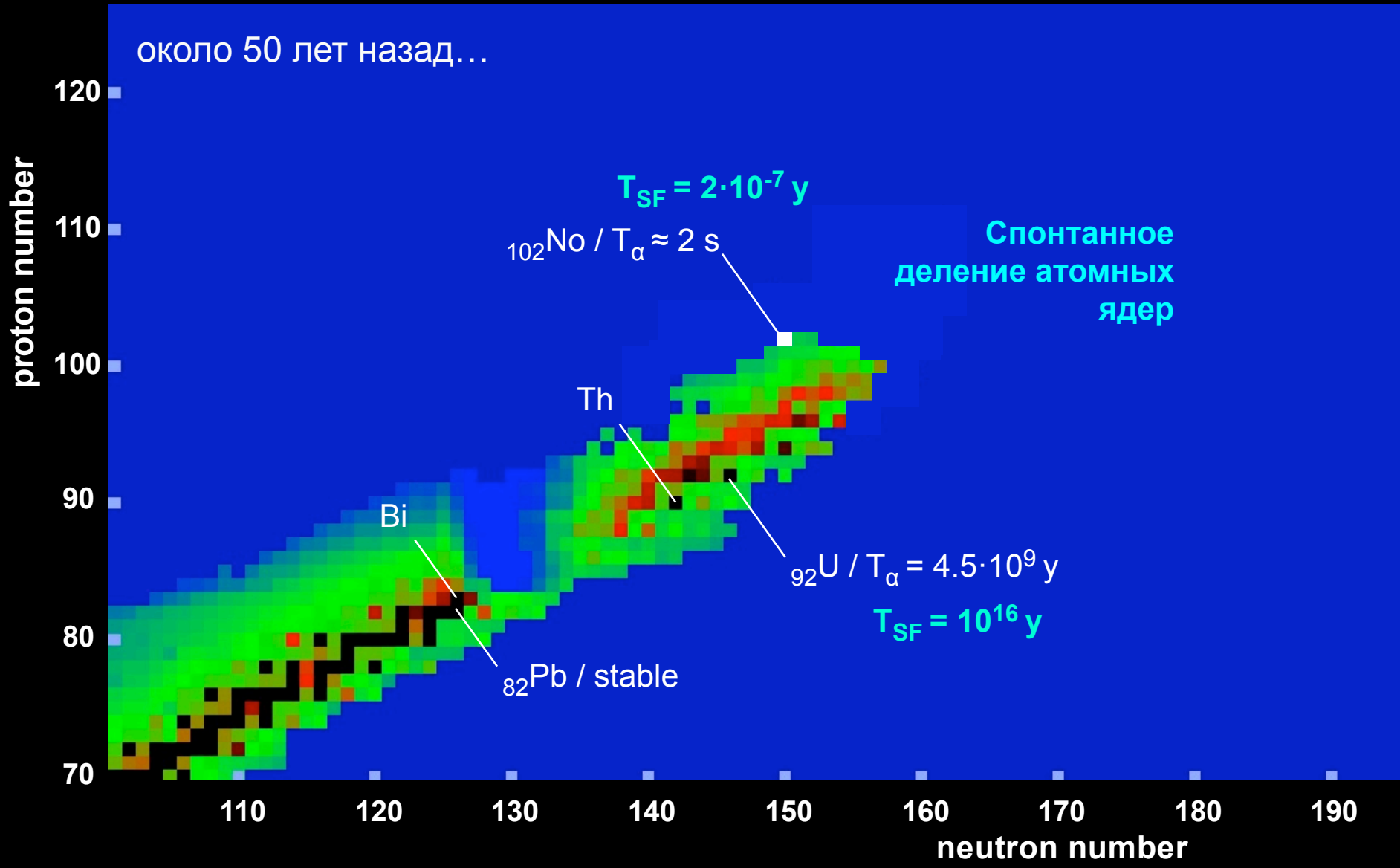
Наиболее
долгоживущие изотопы

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

ПРОБЛЕМЫ:

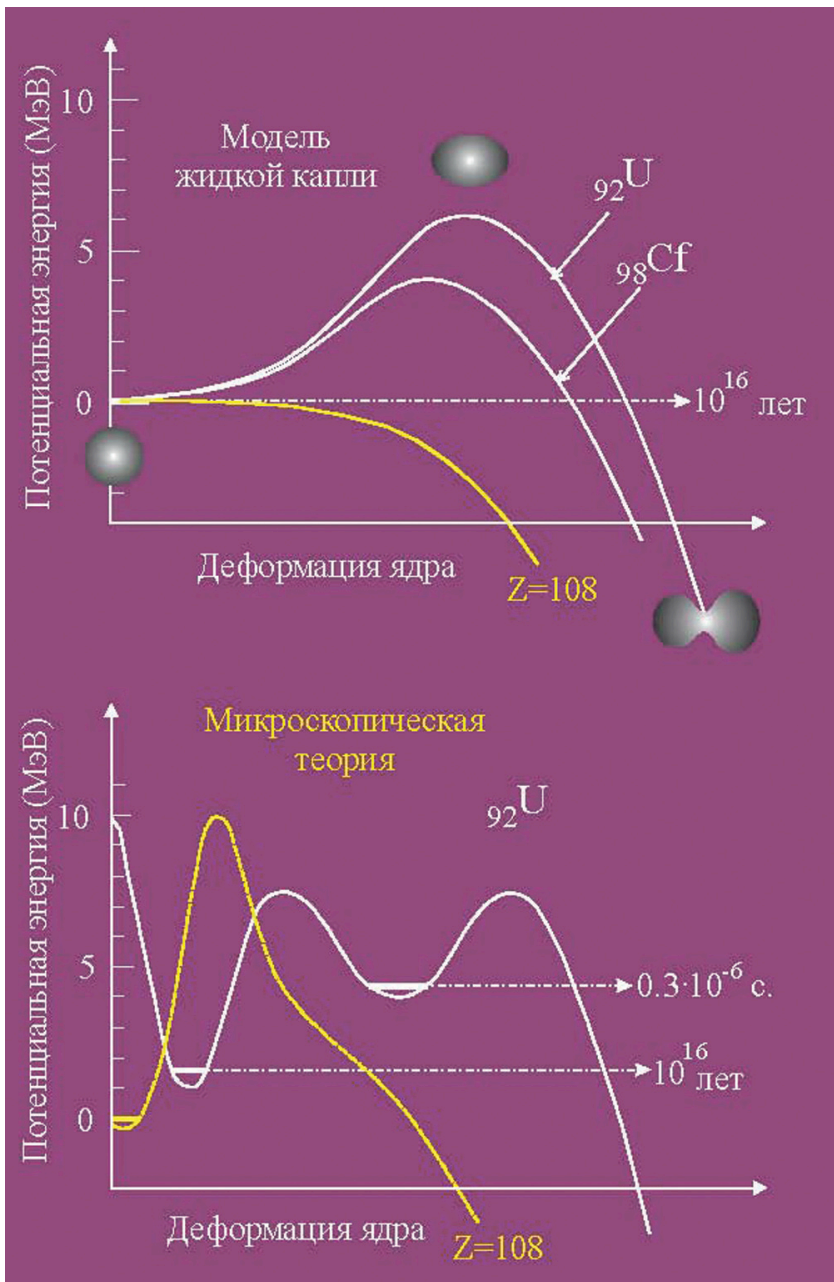
- Отсутствие в требуемых количествах мишеней из тяжелых трансурановых элементов.
- Существенное уменьшение по мере увеличения Z времени жизни изотопов, что значительно усложняет их идентификацию.

около 50 лет назад...

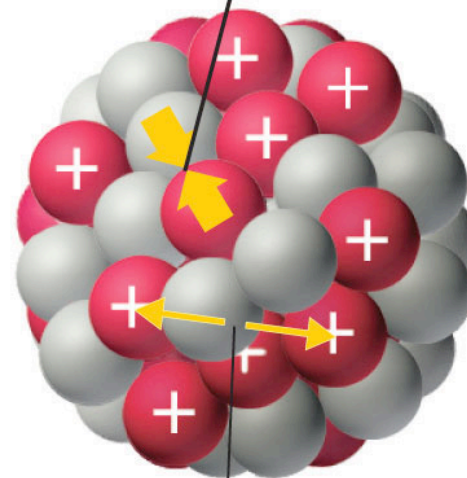


Капельная модель

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



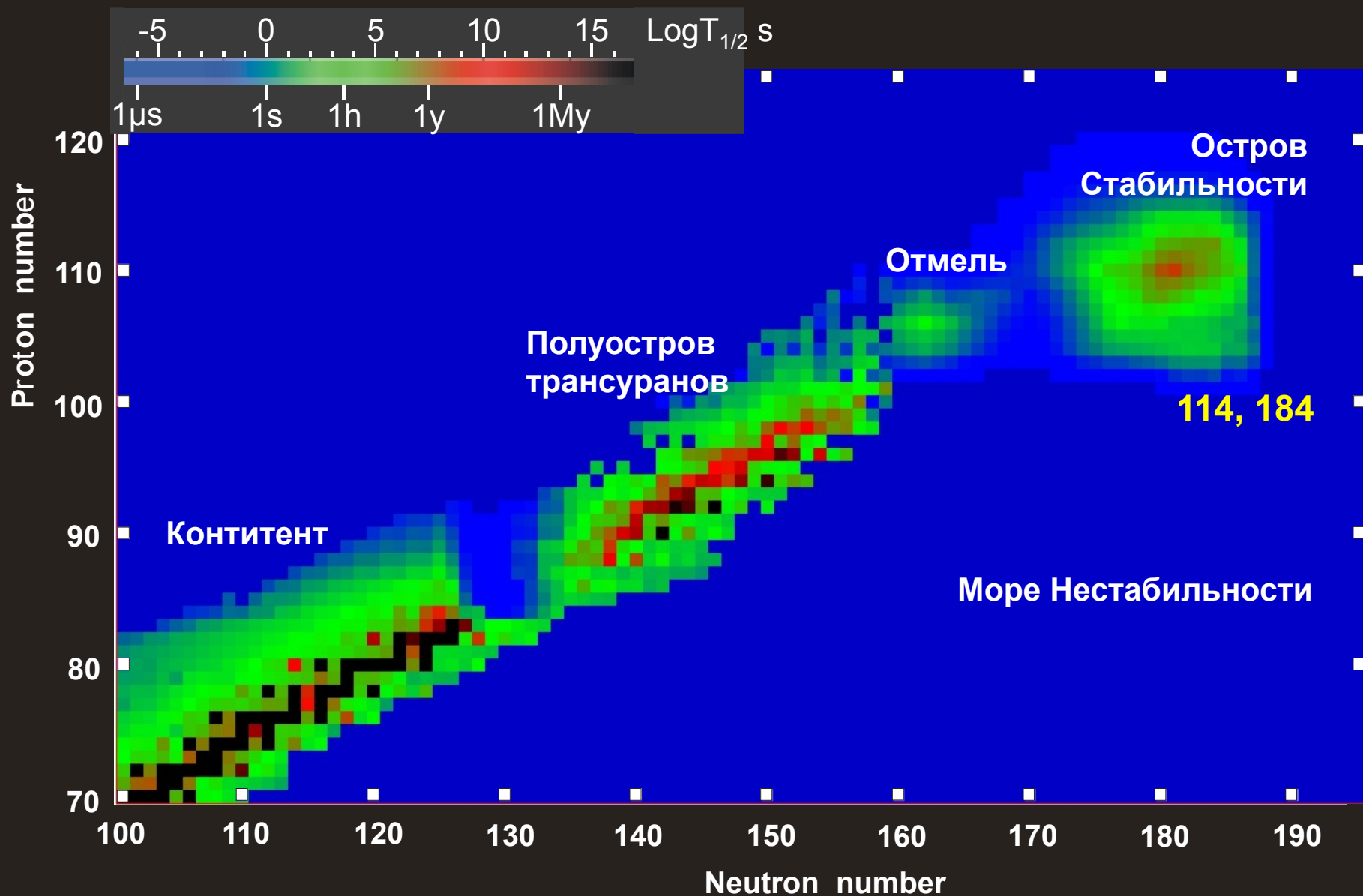
Strong nuclear force



Electrostatic repulsion

New lands

Макро-микроскопическая теория ядра



Горячее слияние

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

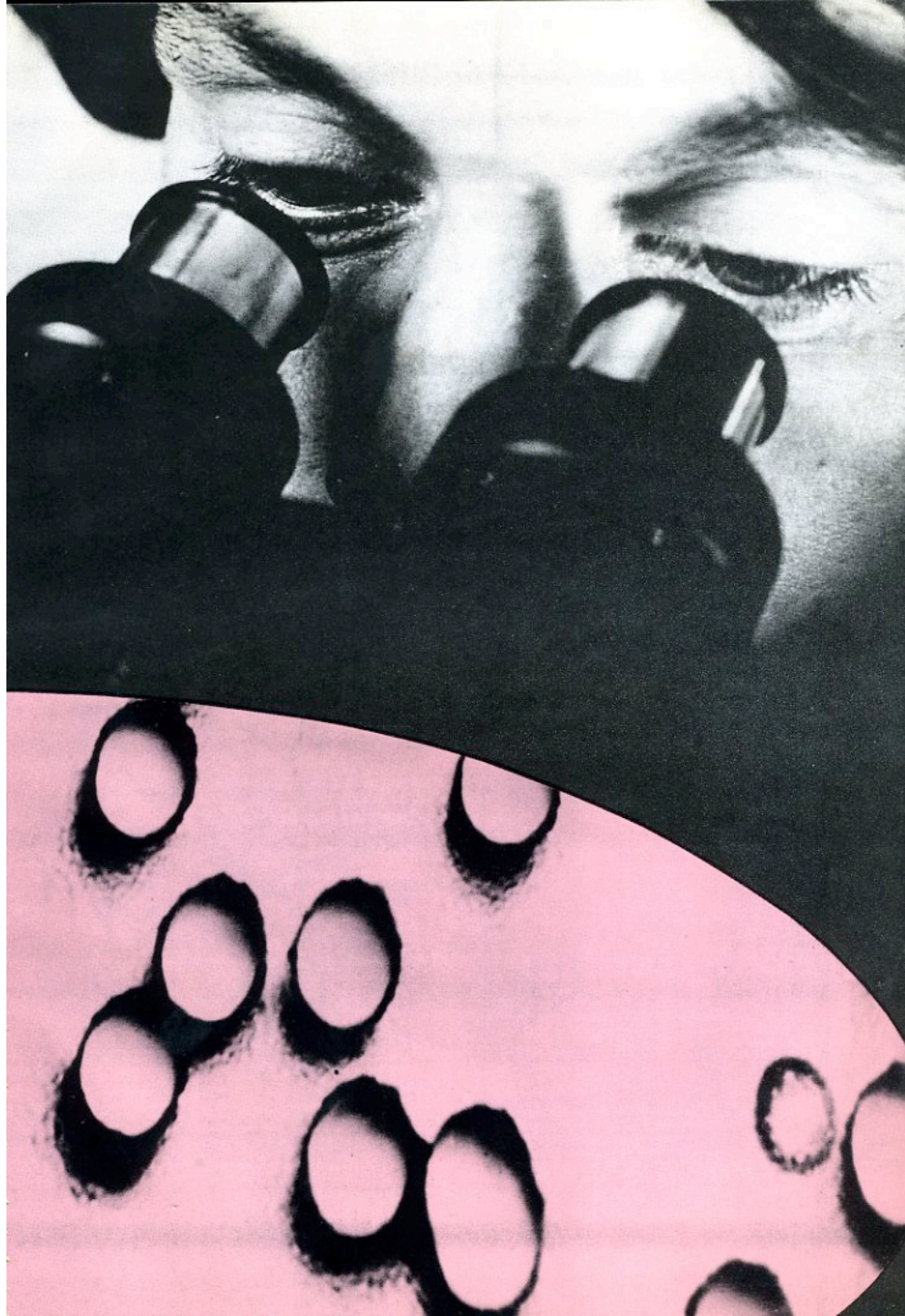
Наиболее
долгоживущие изотопы

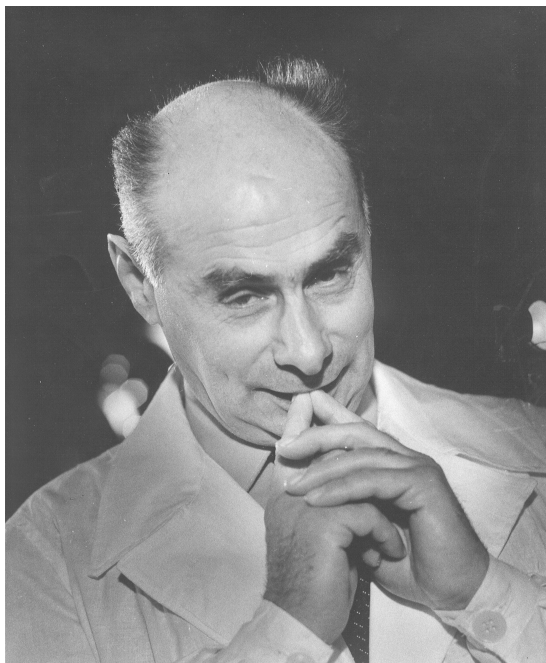
Изотоп	T _{1/2}
²⁶³ Rf	10 минут
²⁶⁸ Db	32 часа
²⁷¹ Sg	2,4 минуты



Объединенный институт
ядерных исследований,
Дубна, СССР

Лаборатория ядерных реакций

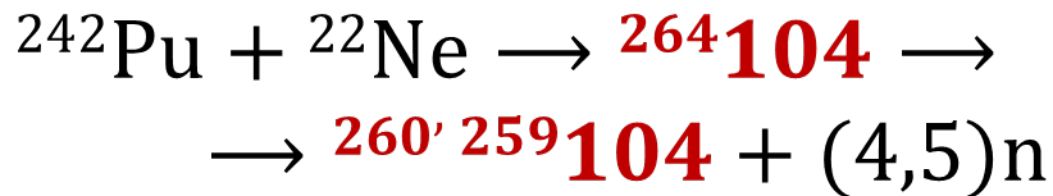




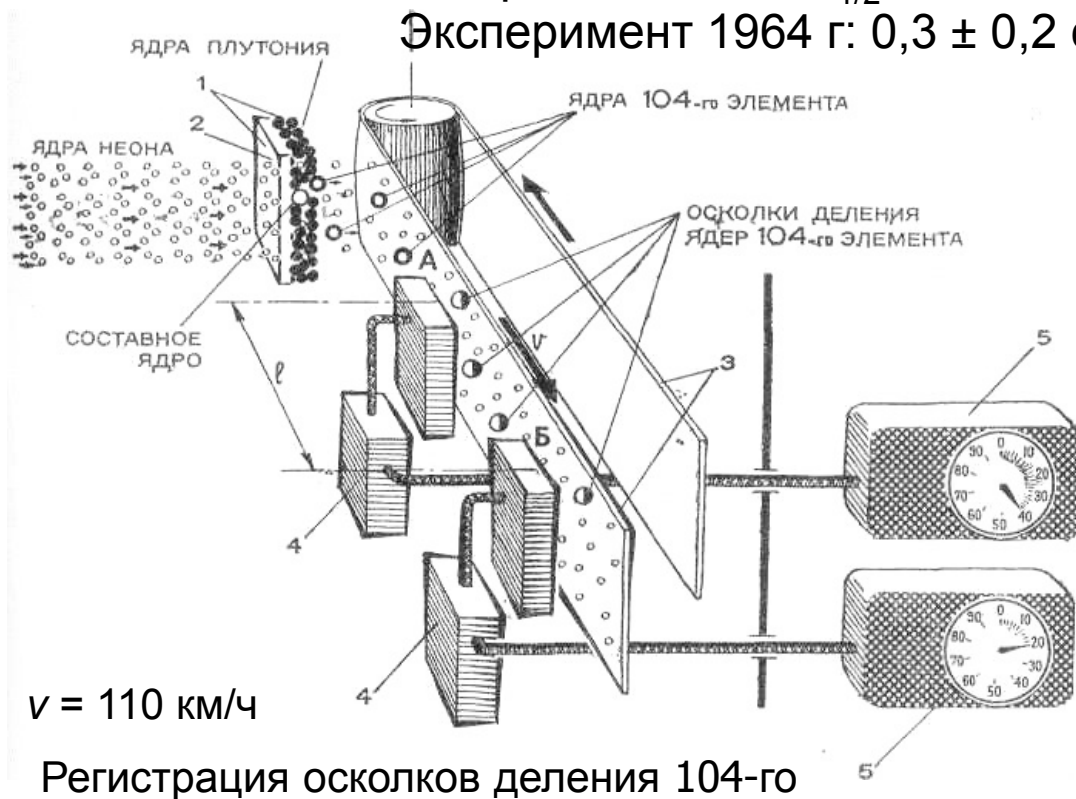
Георгий Николаевич
ФЛЕРОВ

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: $0,3 \pm 0,2 \text{ с}$





ДИПЛОМ

НА ОТКРЫТИЕ

Явление образования радиоактивного изотопа элемента с атомным номером 106

В соответствии с Положением об открытиях, изобретениях и рационализаторских предложениях Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий установил, что гражданами Союза Советских Социалистических Республик

ТРЕТЬЯКОВ ЮРИЙ ПЕТРОВИЧ
ИЛЬИНОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ
ДЕМИН АЛЕКСАНДР ГЛЕБОВИЧ
ПЛЕВЕ АНАТОЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ
ТРЕТЬЯКОВА СВЕТЛАНА ПАВЛОВНА
ПЕНИОНЖКЕВИЧ ЮРИЙ ЭРАСТОВИЧ
ПЛОТНО ВАСИЛИЙ МАКСИМОВИЧ
ИВАНОВ МИХАИЛ ПЕТРОВИЧ
ДАНИЛОВ НИКОЛАЙ АНДРЕЕВИЧ
КОРОТКИН ЮРИЙ СЕМЕНОВИЧ
ФЛЕРОВ ГЕОРГИЙ НИКОЛАЕВИЧ
ОГАНЕСЯН ЮРИЙ ЦОЛАКОВИЧ

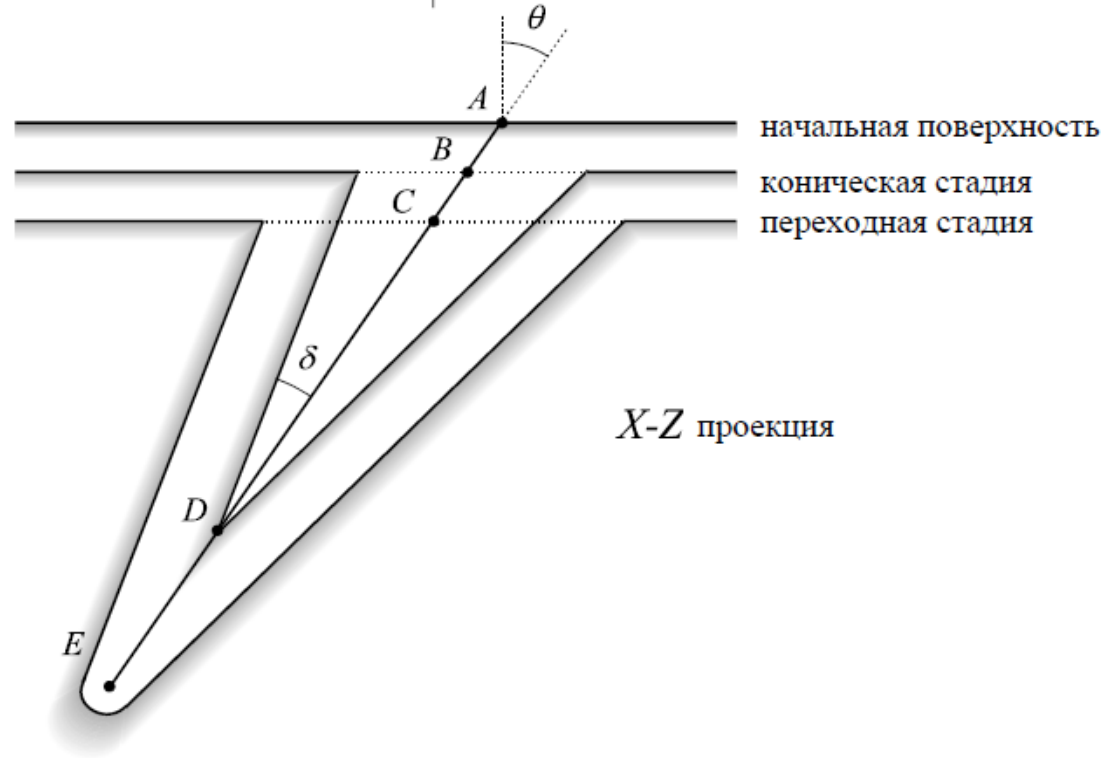
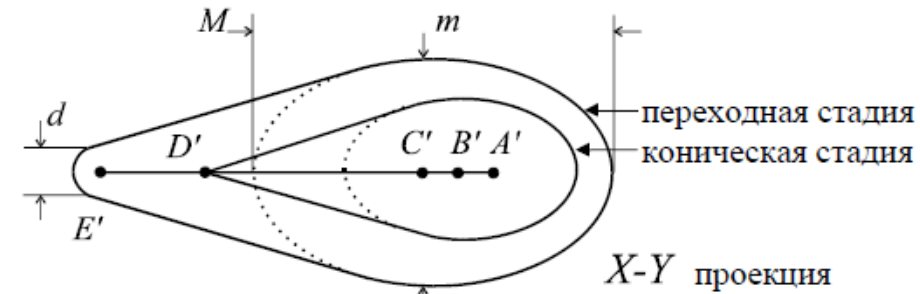
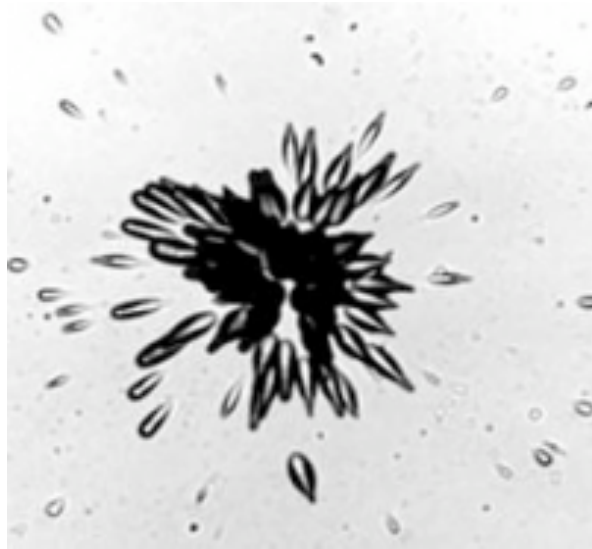
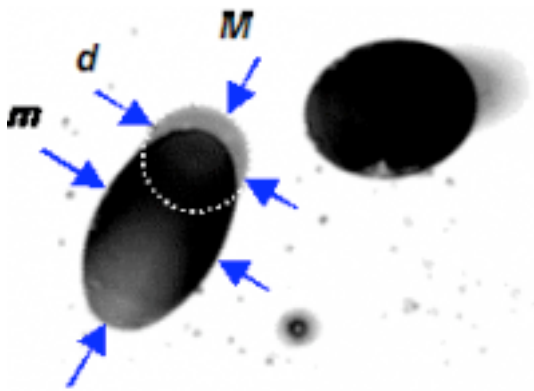
На снимке — участники открытия шестого элемента (слева направо): кандидат физико-математических наук С. П. Третьякова, инженер Н. А. Данилов, механик В. М. Плотко, научный сотрудник Ю. С. Короткин, доктор физико-математических наук Ю. Ц. Оганесян, академик Г. Н. Флеров, кандидат физико-математических наук А. С. Ильинов, инженер Ю. П. Третьяков, научный сотрудник М. П. Иванов.



Синтез сверхтяжелых элементов в Дубне

Год	Номер	Символ	Название
1966	102	No	Нобелий
1965	103	Lr	Лоуренсий
1964	104	Rf	Резерфордий
1970	105	Db	Дубний
1974	106	Sg	Сиборгий
1982	107	Bh	Борий
1984	108	Hs	Хассий
2003	109	Mt	Мейтнерий
	110	Ds	Дармштадтий
	111	Rg	Рентгений
	112	Cn	Коперниций
2003	113	Uut	
1998	114	Fl	Флеровий
2003	115	Uup	
2000	116	Lv	Ливерморий
2010	117	Uus	
2002	118	Uuo	

Твердотельные детекторы



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 $Z = 107 - 112$**

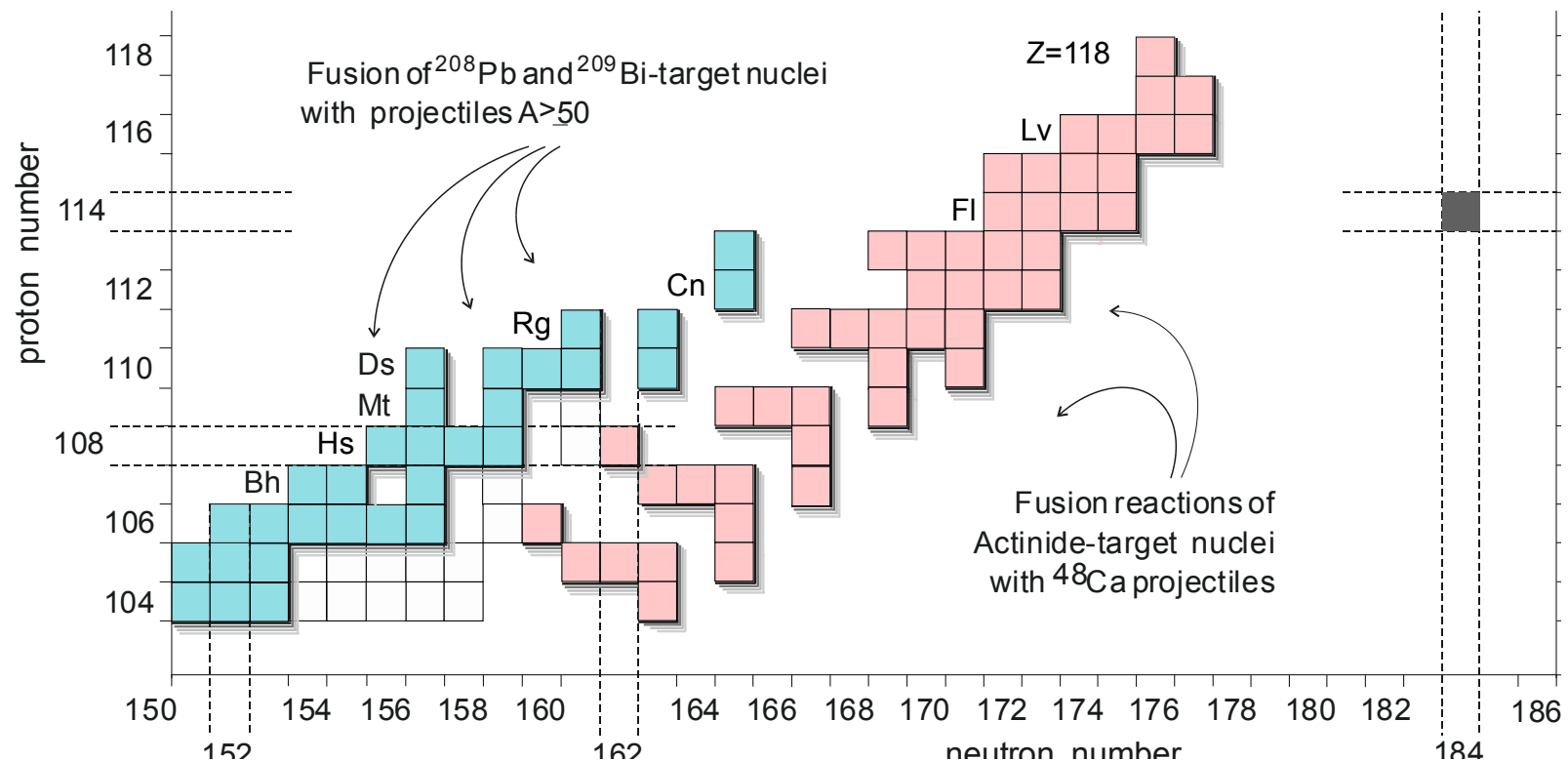
ПРОБЛЕМЫ:

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

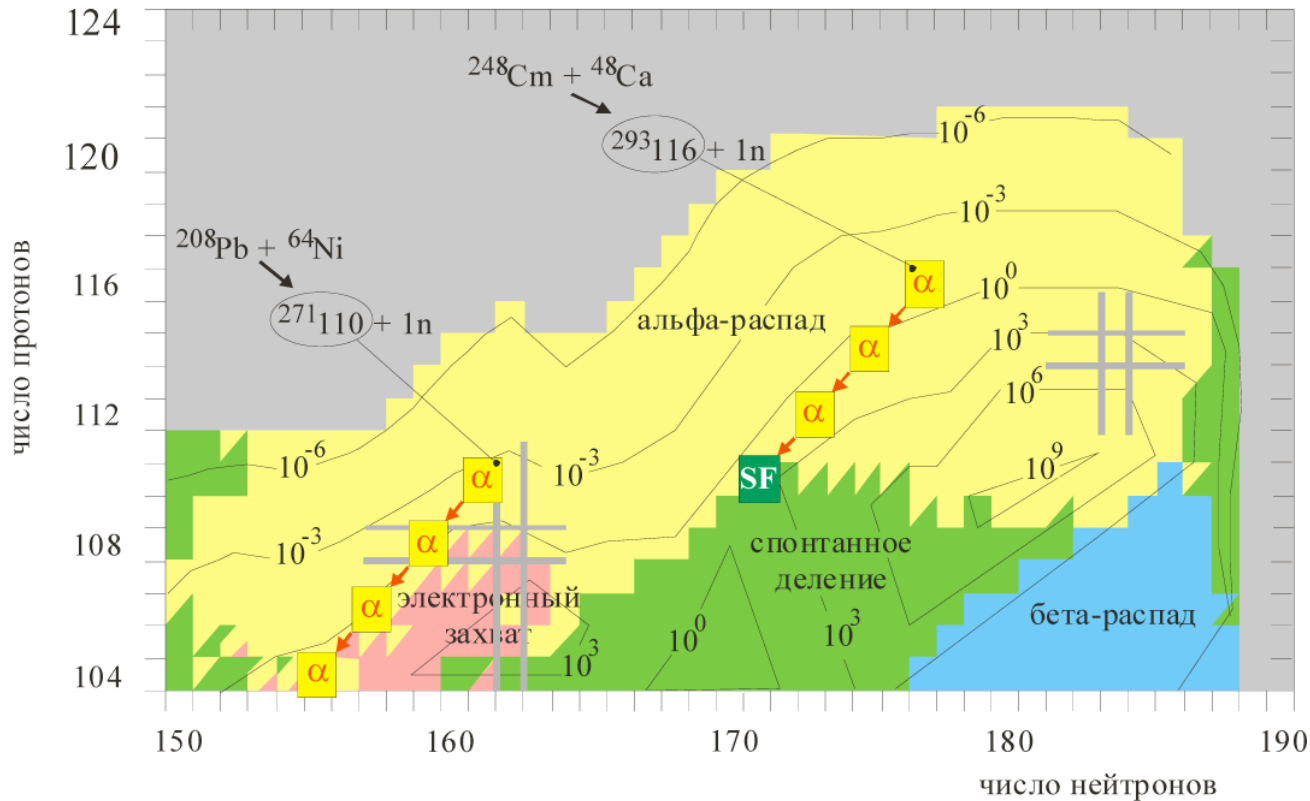
^{48}Ca + Actinide

- 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 $Z = 104 - 118$



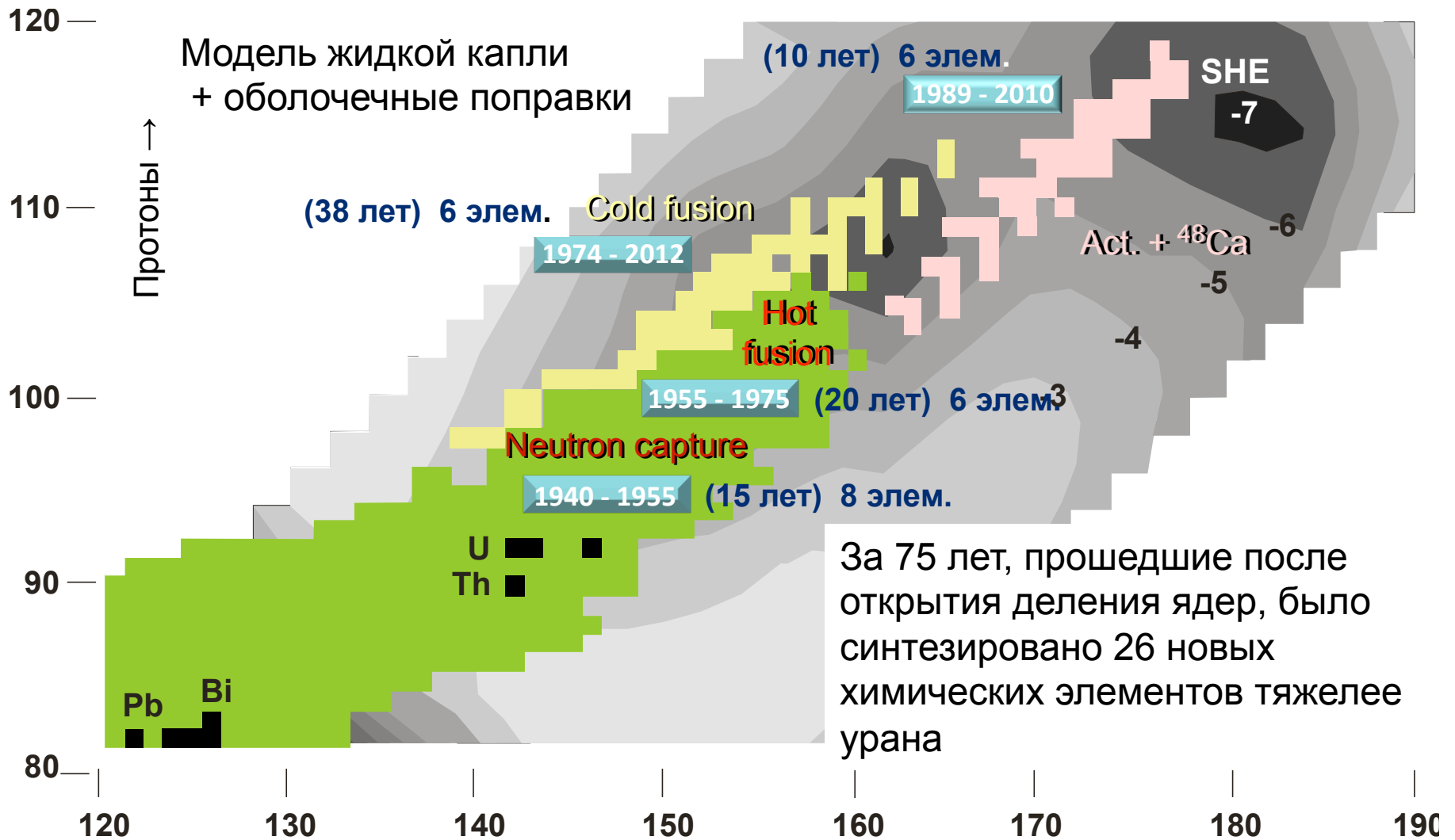
^{48}Ca + Actinide



- 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

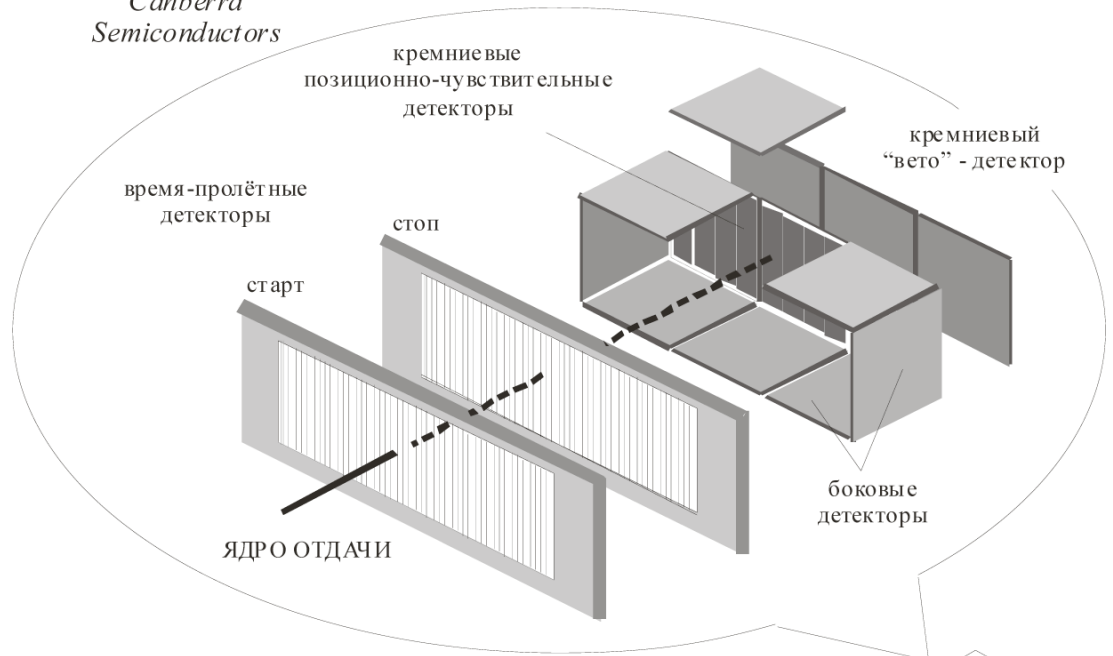
A. Sobiczewski, K. Pomorski, PPNP 58, 292, 2007



Dubna Gas-Filled Recoil Separator

Canberra
Semiconductors

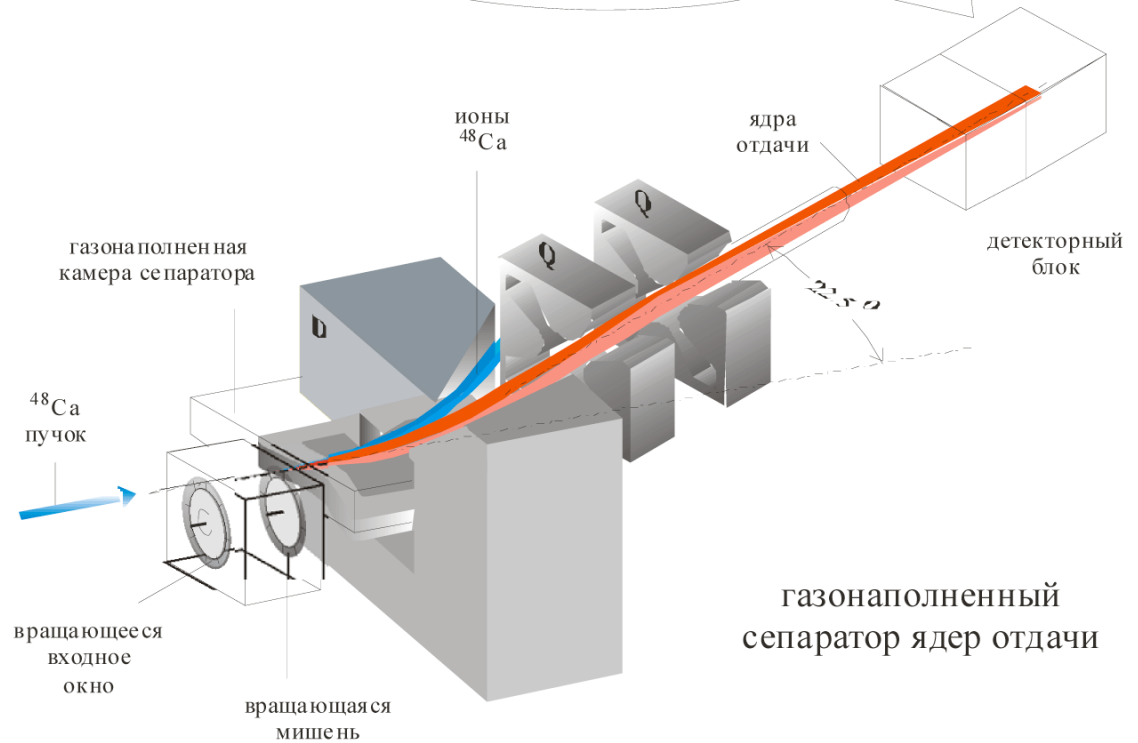
Газонаполненный
Сепаратор
(водород 10^{-3} атм)



Эффективность
регистрации:

для α -частиц 87%

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

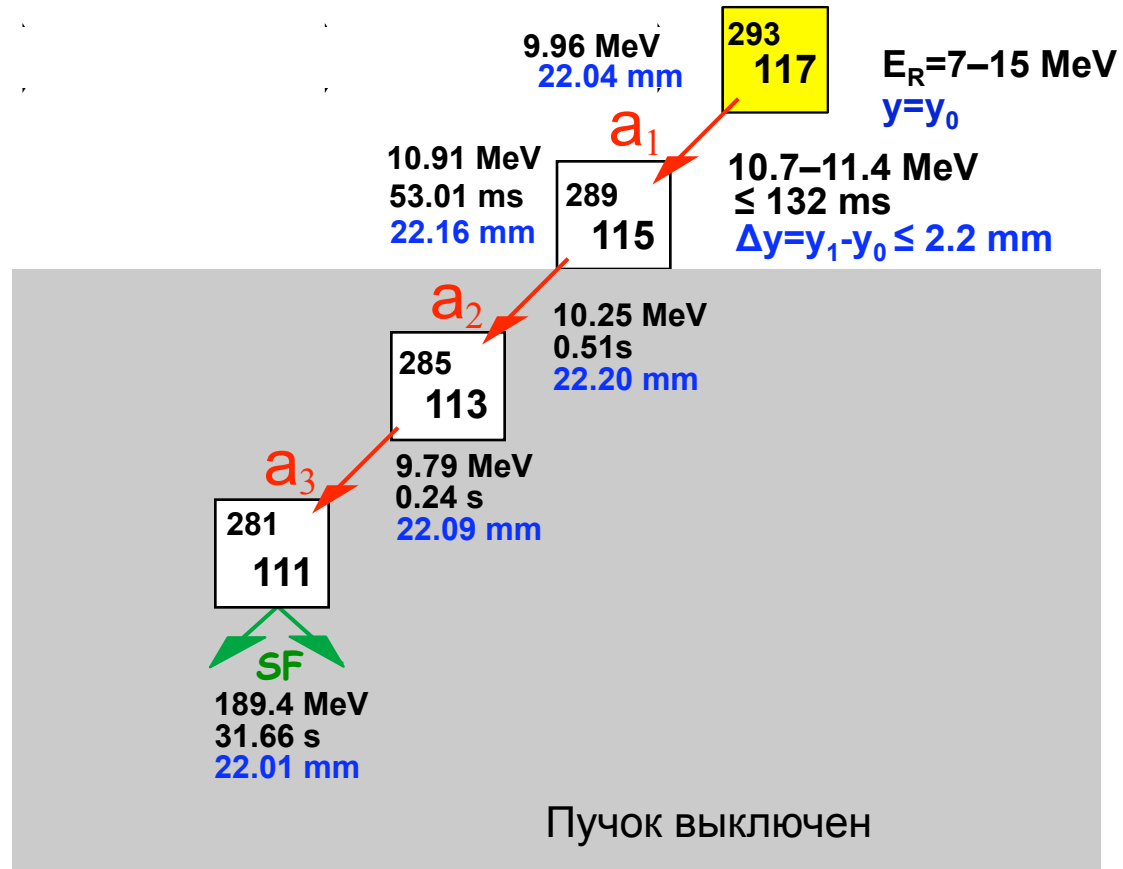


Низкофоновая схема детектирования

^{249}Bk
мишень

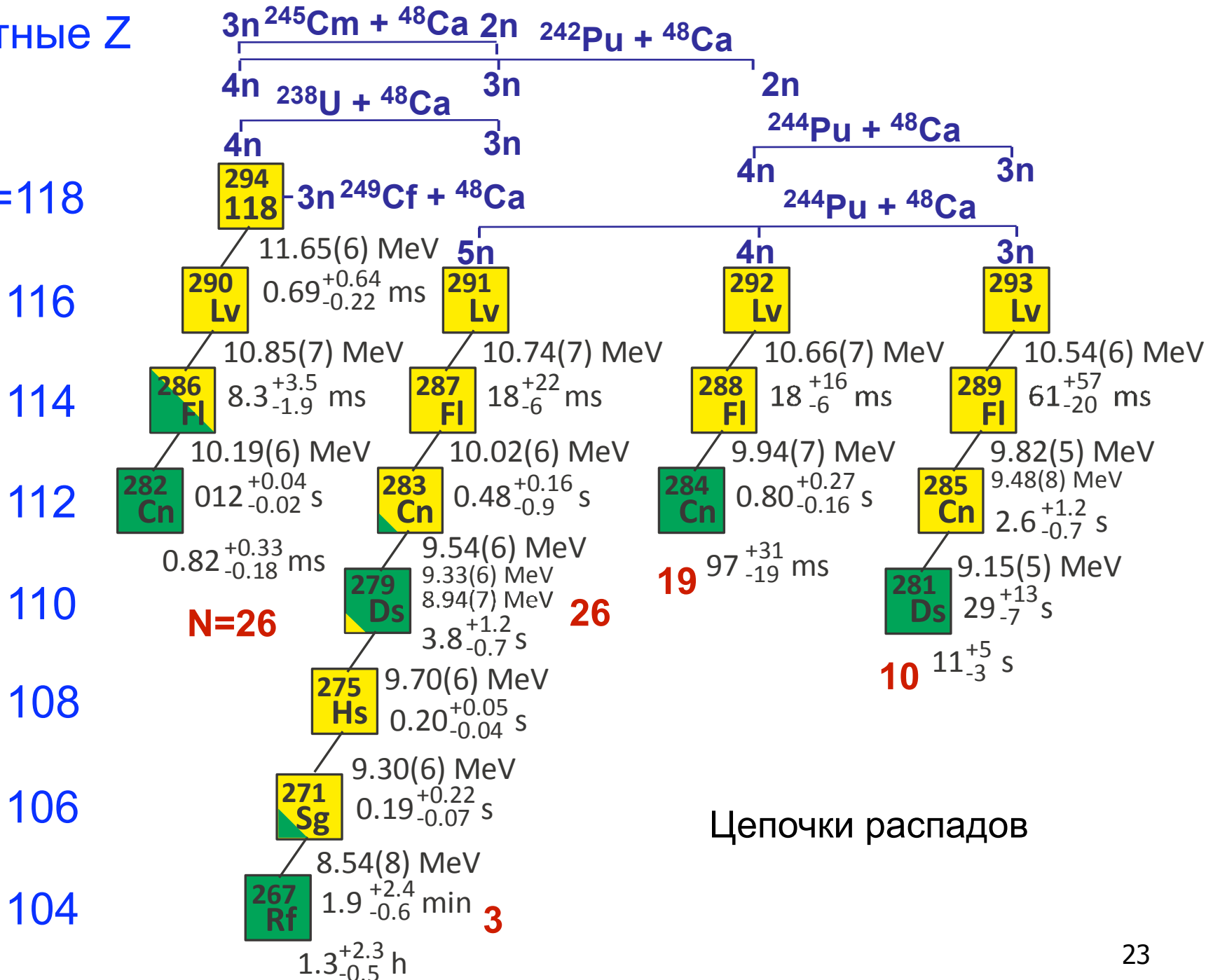
сепаратор

Фокальная
плоскость
детектора



Четные Z

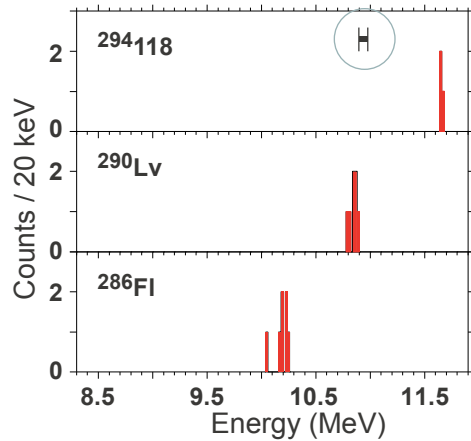
Z=118



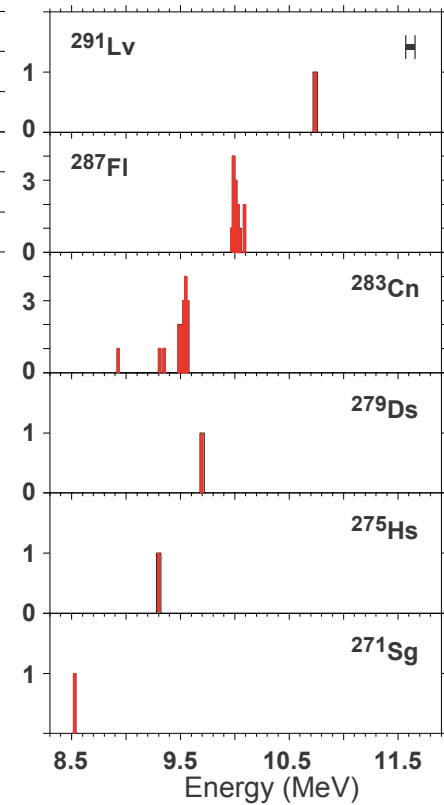
Цепочки распадов

Четные Z 1999 - 2005

$^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$

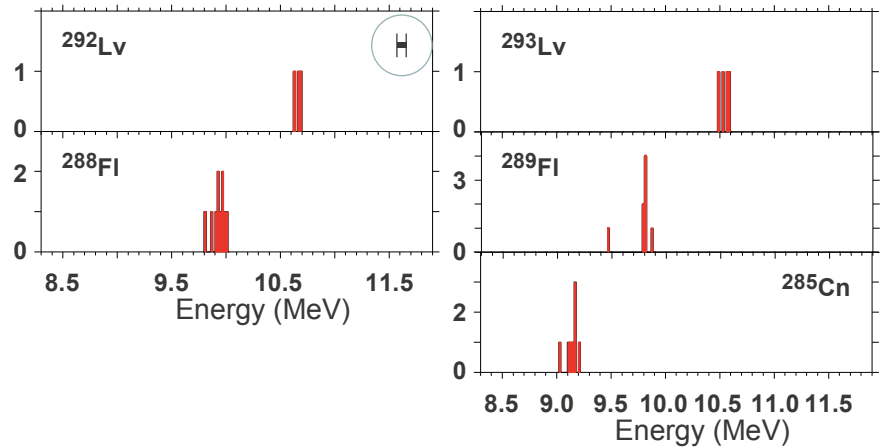


$^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$

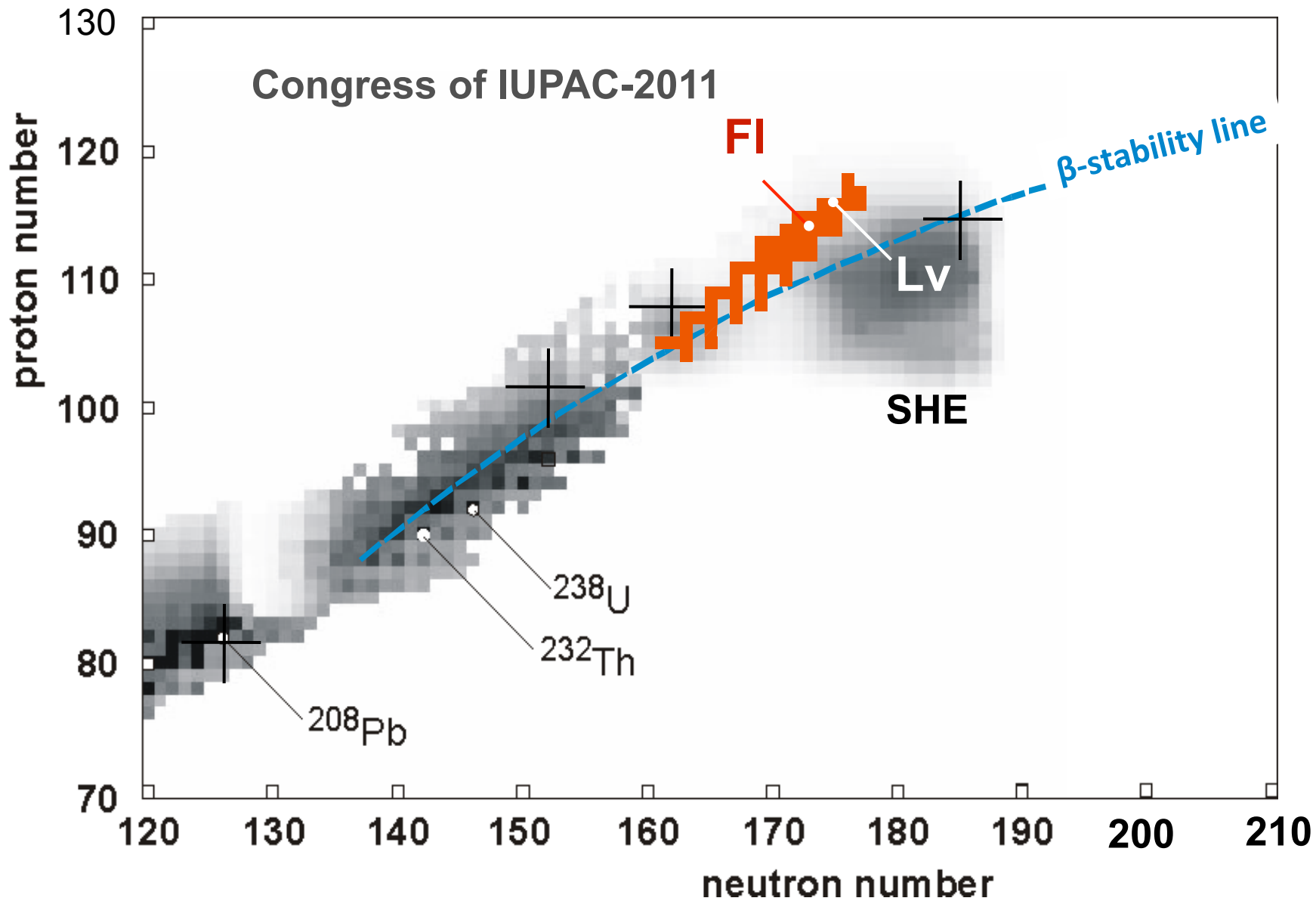


Спектры альфа-частиц

$^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$



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



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 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 [98.906(3)]	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 131.29(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 192.227(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 [208.982(4)]	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 [278]	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

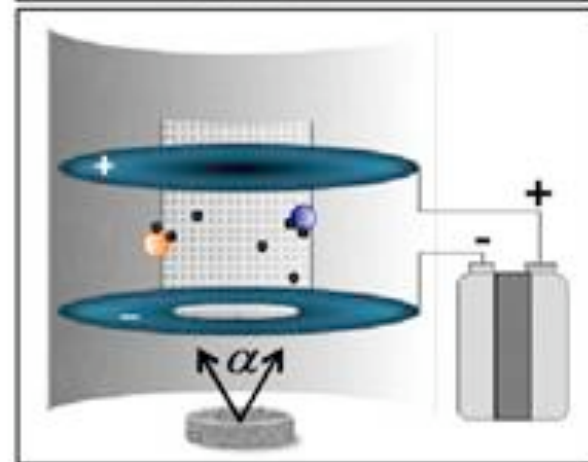
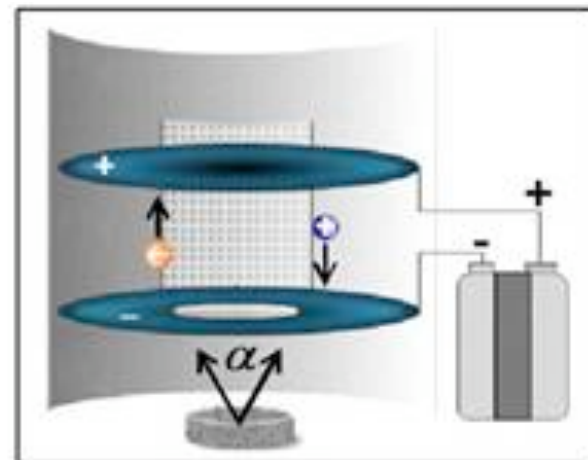
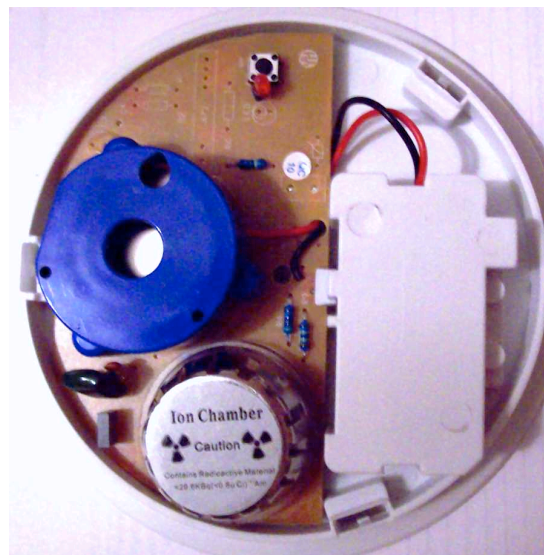
57 La lanthanum 138.90547(7)	58 Ce cerium 140.116(1)	58 Pr praseodymium 140.90765(2)	60 Nd neodymium 144.242(3)	61 Pm promethium [144.91]	62 Sm samarium 150.36(2)	63 Eu europium 151.964(1)	64 Gd gadolinium 157.25(3)	65 Tb terbium 158.92535(2)	66 Dy dysprosium 162.500(1)	67 Ho holmium 164.93032(2)	68 Er erbium 167.259(3)	69 Tm thulium 168.93421(2)	70 Yb ytterbium 173.054(5)	71 Lu lutetium 174.9668(1)
89 Ac actinium [227.03]	90 Th thorium 232.03806(2)	91 Pa protactinium 231.03688(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]

** Actinoids

Детектор дыма

^{241}Am

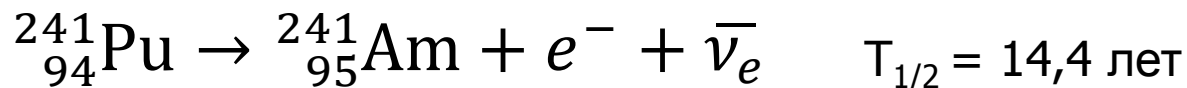
(~0.26 микрограмма
на детектор).



$$T_{1/2} = 432,6 \text{ года}$$

$$E_{\alpha} = 5,64 \text{ МэВ}$$

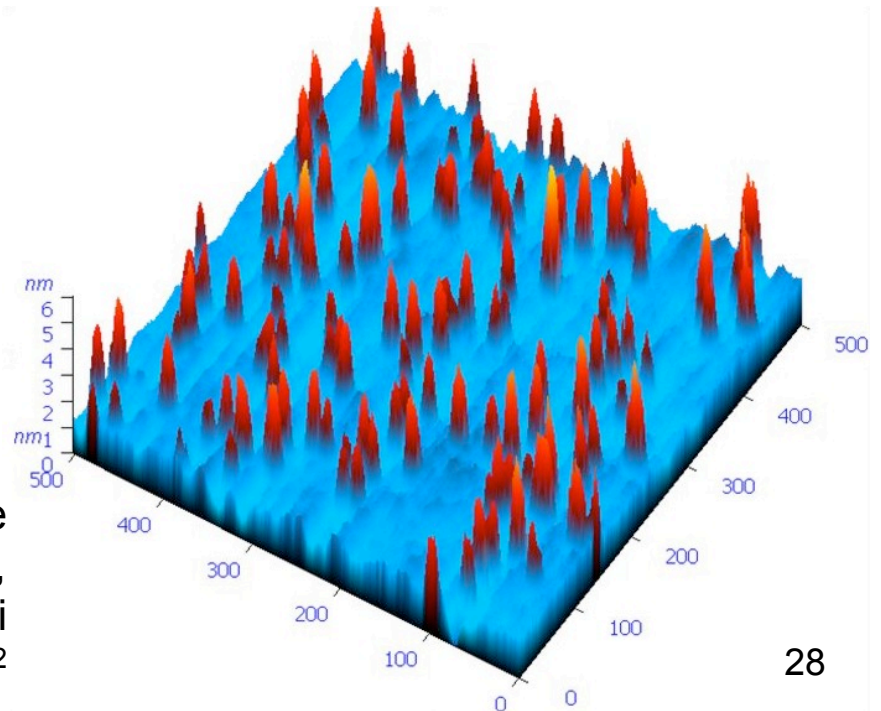
Проблема Америция



Взаимодействие тяжелых ионов с веществом. Модификация физических свойств облученных материалов

- моделирование эффектов, вызываемых осколками деления в конструкционных реакторных материалах;
- исследование структурных эффектов ионизации высокой плотности в радиационно-стойких диэлектриках;
- разработка основ технологии высокоэнергетической ионной имплантации;
- исследование процессов формирования наноразмерных дефектов, вызываемых единичными тяжелыми ионами высоких энергий на поверхности твердых тел.

Наноразмерные структуры, образованные на поверхности MgAl_2O_4 , образованные ионами Vi с энергией 710 МэВ при потоке $5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$





Циклотрон

Ускорительный комплекс У400

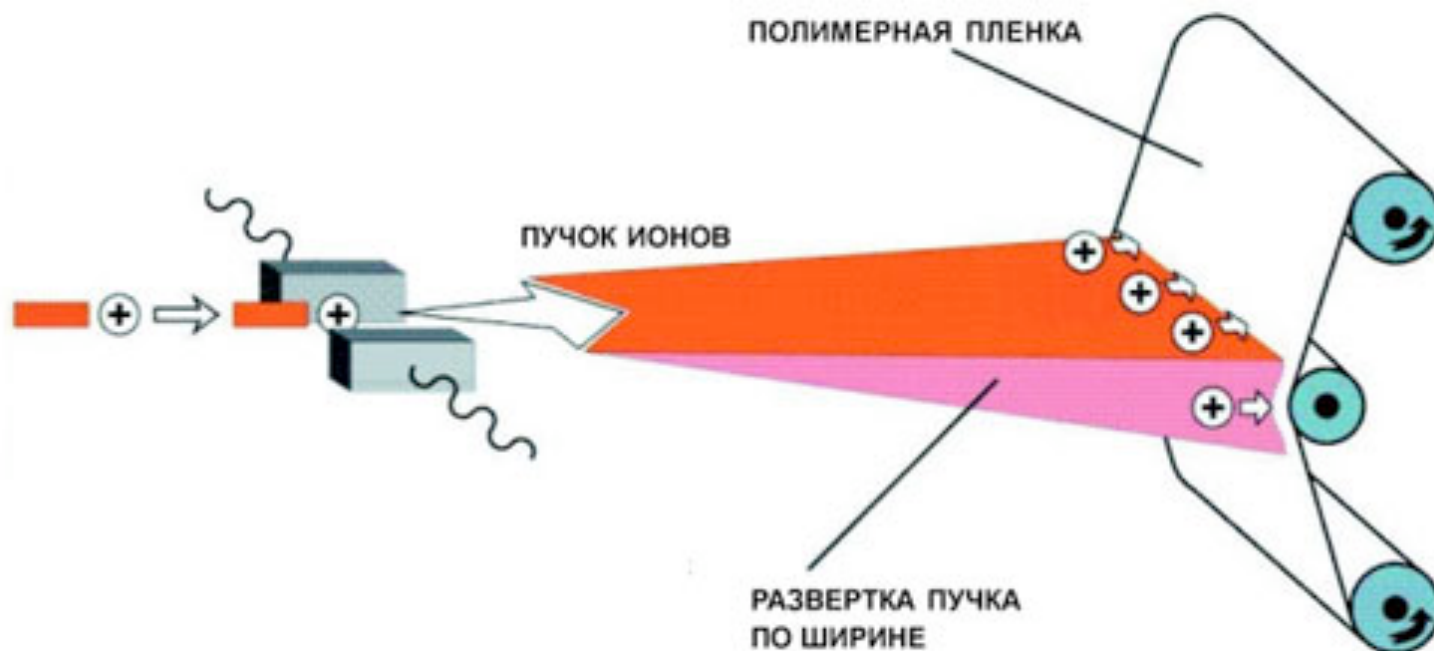
Запущен в 1979 году

Пучки ускоренных ионов $A = 4 - 209$
с энергией $3 - 29$ МэВ/нуклон

Магнит 2100 тонн, диаметр 4 м

Потребление энергии $1,5$ МВт

Трековые мембраны



ИЦ-100

диаметр полюсов

1 метр

Потребление энергии 150 кВт.

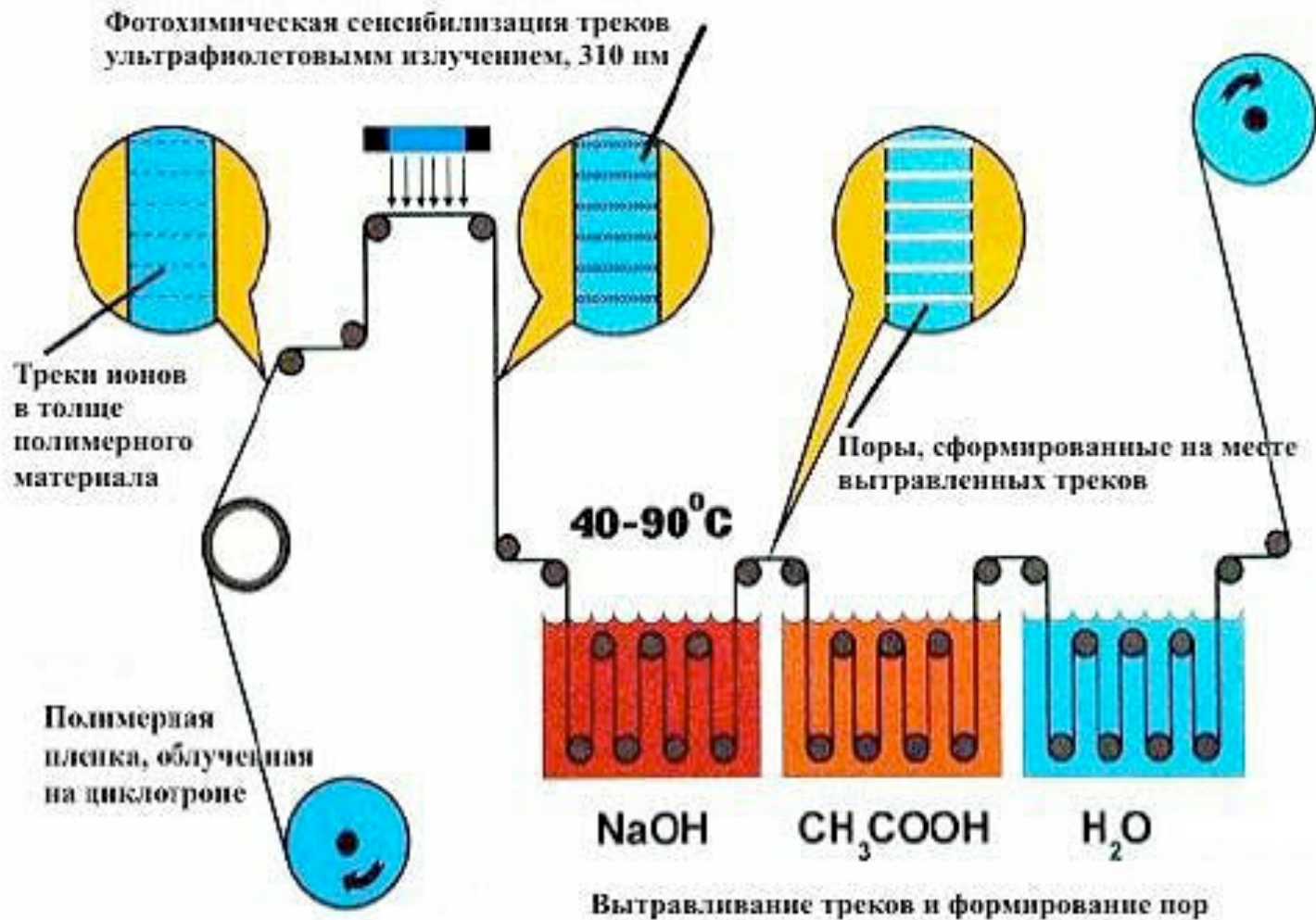
Энергия ионов (Xe, Kr)

1,2 МэВ/нуклон

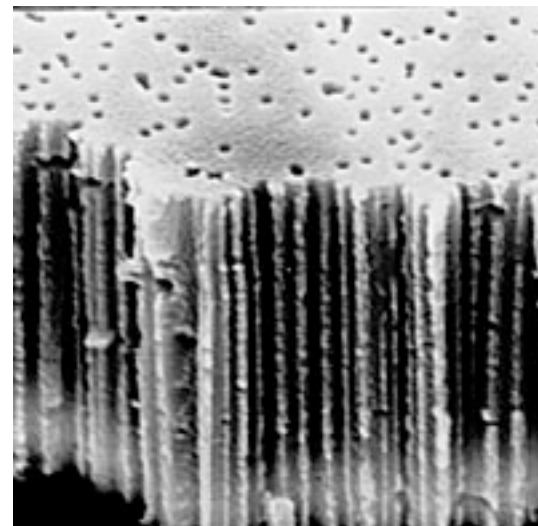
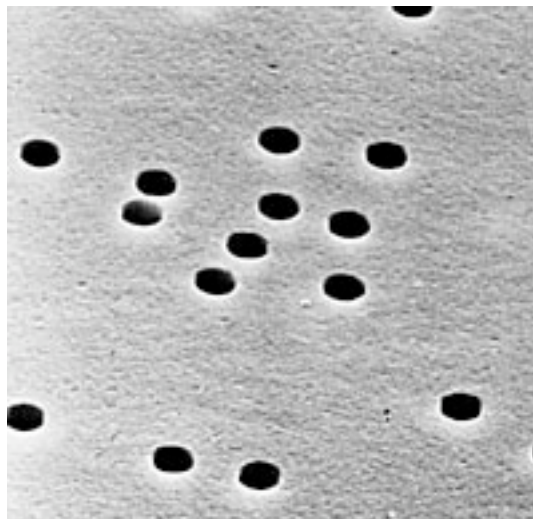
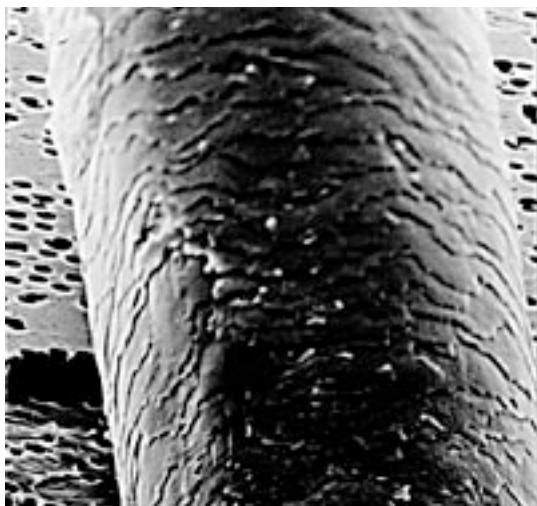
Толщина пленки

20 мкм

Трековые мембраны



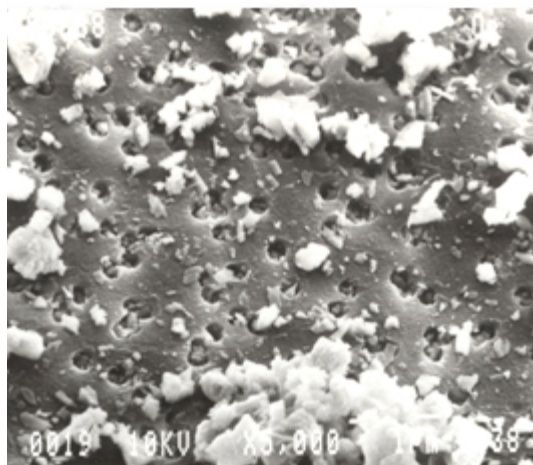
Трековые мембраны



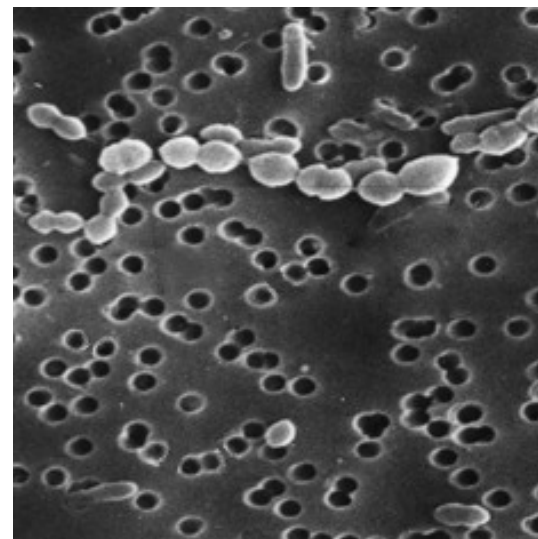
толщина –
от 12 мкм до 21 мкм;

диаметр пор –
от 30 нм до 15000 нм;

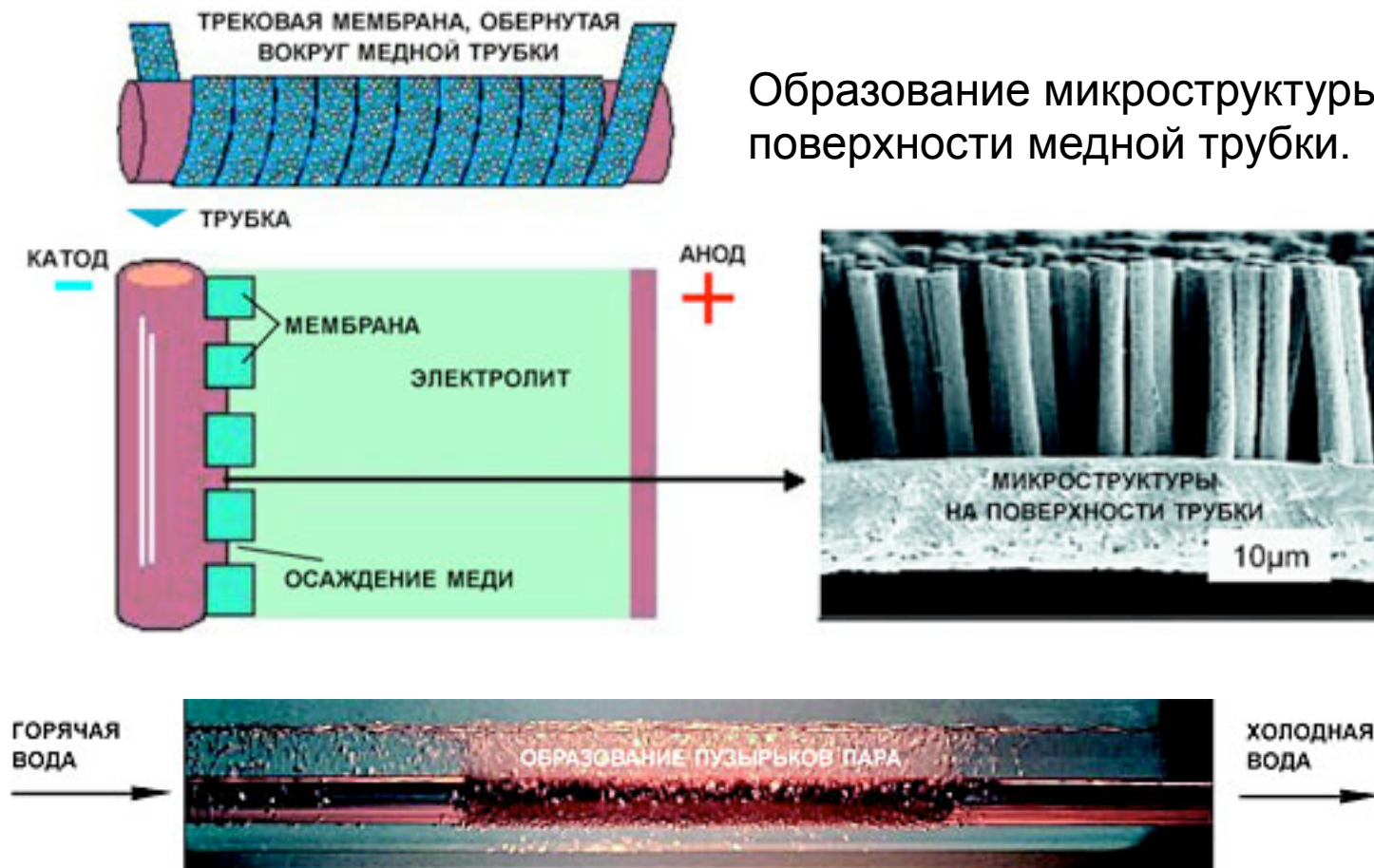
плотность –
 $10^6 \div 10^8$ пор/см²



Загрязнение на поверхности мембраны в результате очистки водопроводной воды



Трековые мембраны



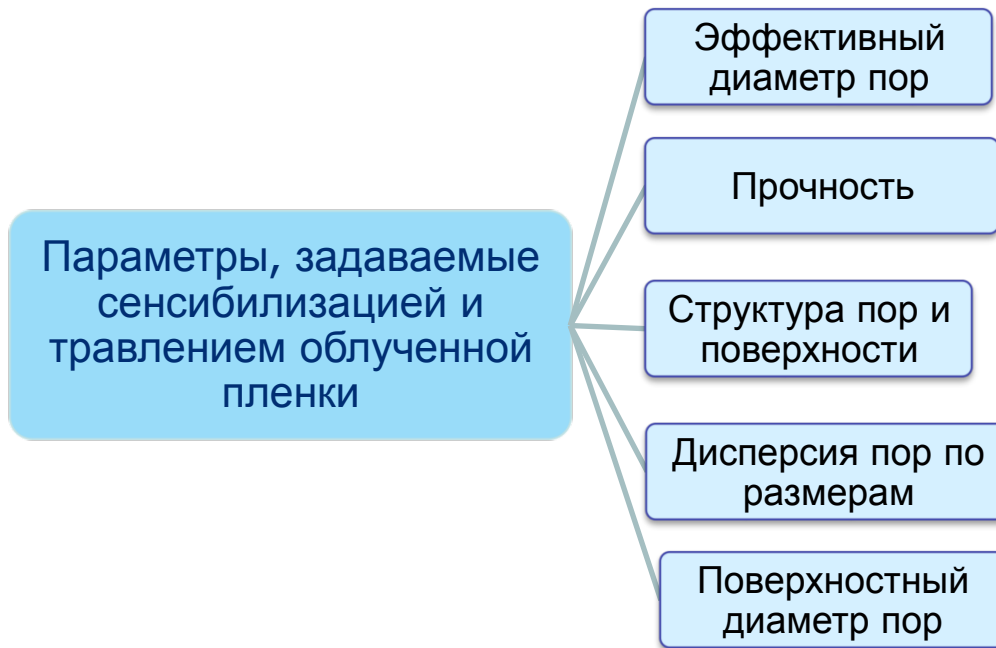
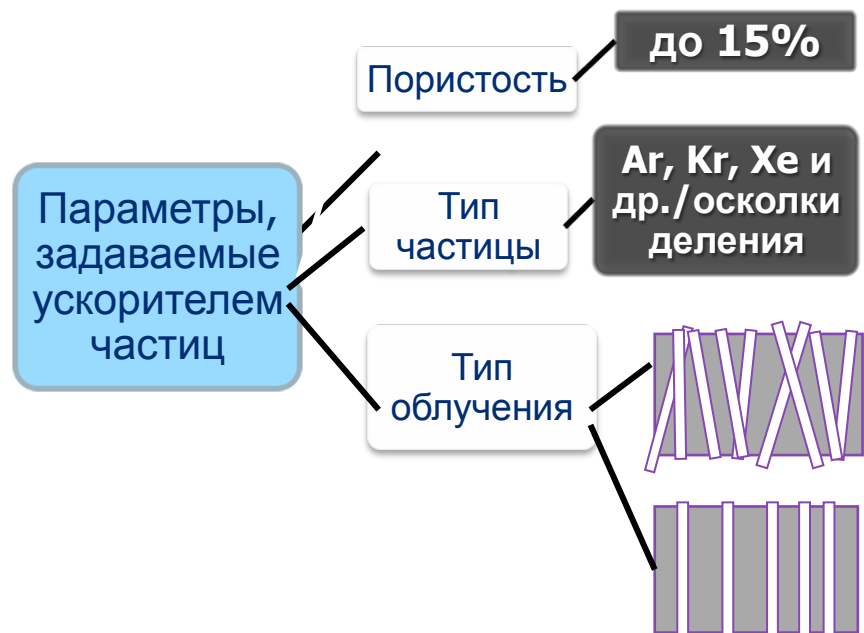
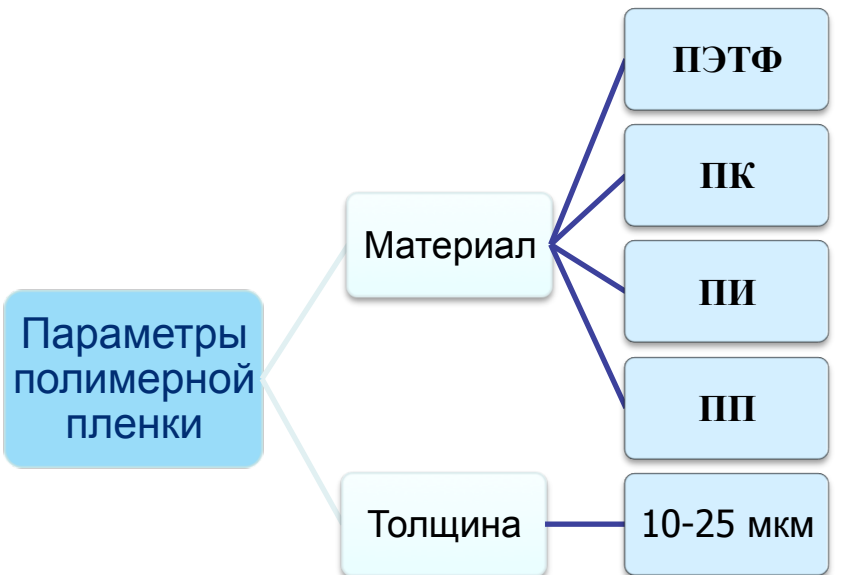
Медная трубка с микроструктурами на поверхности гораздо лучше отводит тепло, чем гладкая. На фото видно, что на участке с микроструктурами происходит интенсивное кипение охлаждающей жидкости.

Трековые мембраны

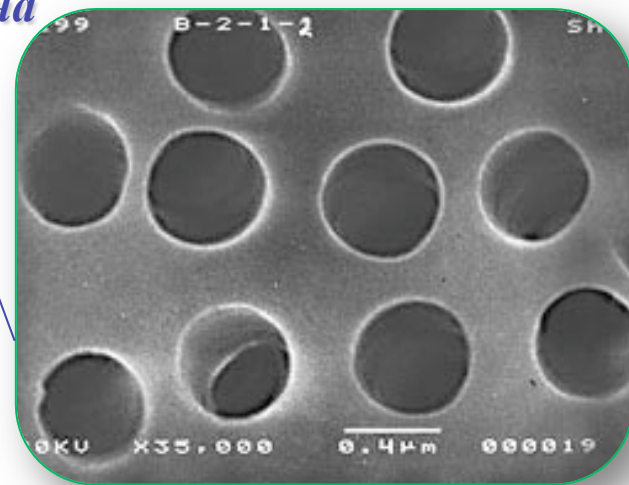
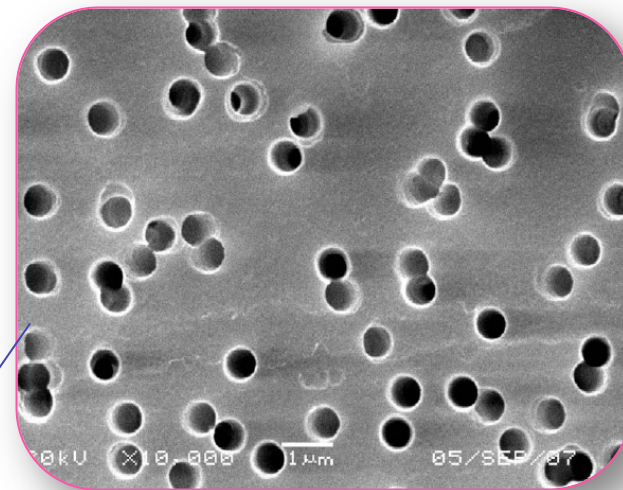
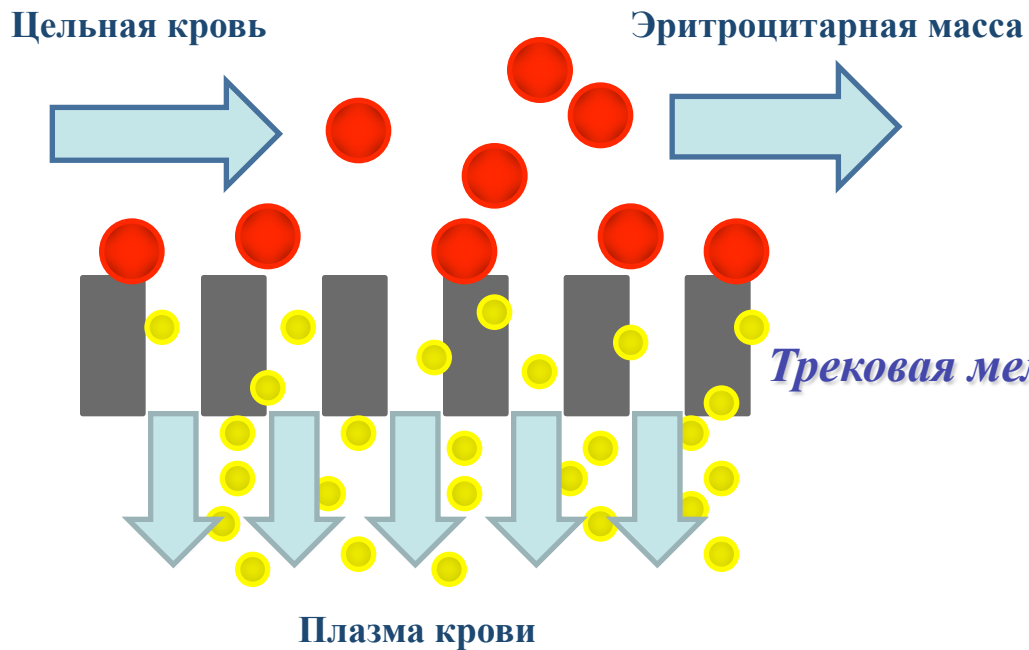
Уникальность трековых мембран как фильтрующего материала:

- правильная геометрия пор;
- возможность контролировать количество пор на единице поверхности;
- исключительно малая дисперсия пор по размерам (2 - 5 %);
- высокая селективность;
- биологическая инертность;
- радиационная безопасность;
- низкий уровень дефектности

Основные параметры трековых мембран



Принципиальная схема разделения крови на плазму и эритроцитарную массу на мембранном фильтре



Эритроциты	7-8 мкм
Лейкоциты	4,5-14 мкм
Тромбоциты	2-4 мкм

Трековые мембраны



ЛЯР ОИЯИ

®
ТРЕКПОР
ТЕХНОЛОДЖИ
ХОЛДИНГОВАЯ КОМПАНИЯ

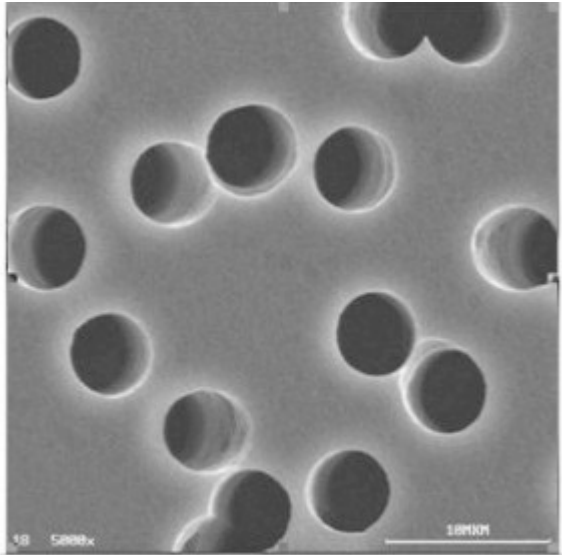


Кластер ядерно-физических
и нанотехнологий

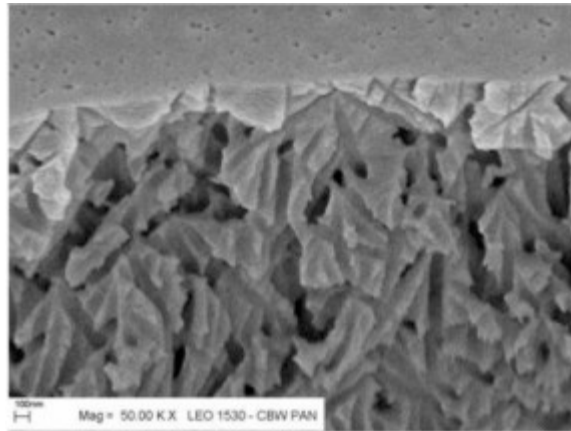


Премия Правительства РФ 2008 года в области науки и техники
за разработку и создание технологии плазмафереза и внедрение
ее в медицинскую практику

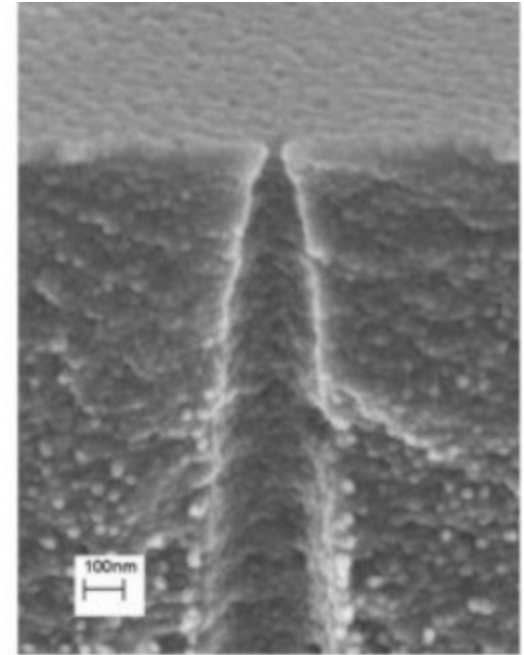
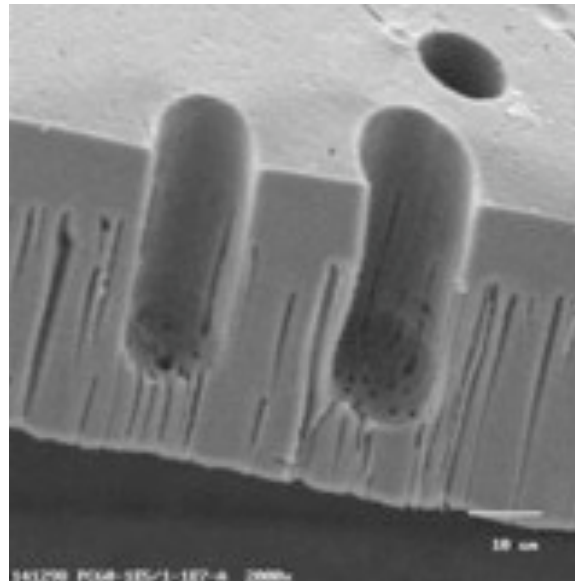
Трековые мембраны



Мембрана с плоской поверхностью для сбора и анализа клеток



Вертикальный срез трековой мембраны для ультрафильтрации с поверхностным слоем. Диаметр пор на поверхностном слое равен 20 нм.



Асимметричная нано-пора пулеобразной формы

микроканалы

Лабораторная фильтрация



Очистка воды в домашних условиях



Медицина



Промышленная фильтрация



Сенсоры



Культивирование клеток



Мембранный катализ



Нанотехнологии

