



Микромир и Вселенная 2019

Границы ядерного континента

Космический нуклеосинтез

1																	2		
H																	He		
3	4													5	6	7	8	9	10
Li	Be													B	C	N	O	F	Ne
11	12													13	14	15	16	17	18
Na	Mg													Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112		114		116		118		
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	--	--	--		--		--		--		
		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71				
		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103				
		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

■ – Большой Взрыв

■ - Космические лучи

■ - Малые звезды

■ - Массивные звезды

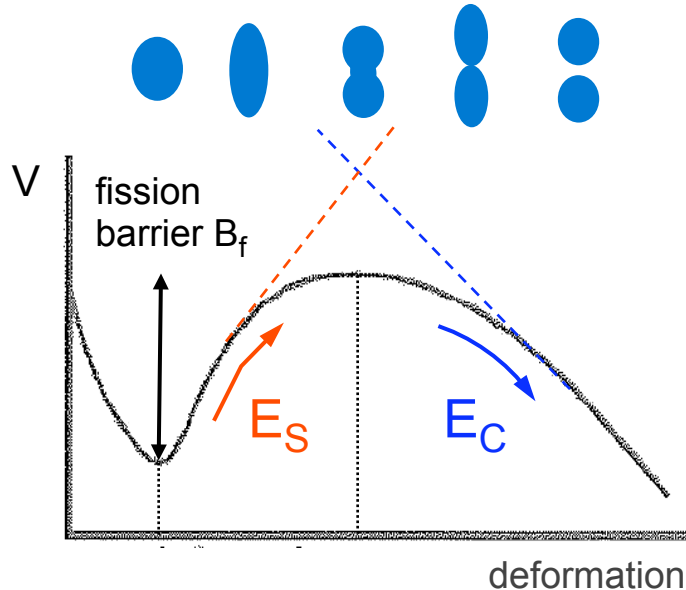
■ - Сверхновая

Сверхтяжелые элементы

Модель жидкой капли (формула Бете-Вайцзеккера)

$$B(Z, A) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C Z^2 A^{-1/3} - a_A \frac{(Z - A/2)^2}{A} + B_5$$

Поверхностная энергия E_S
 Кулоновская энергия E_C
 Энергия симметрии

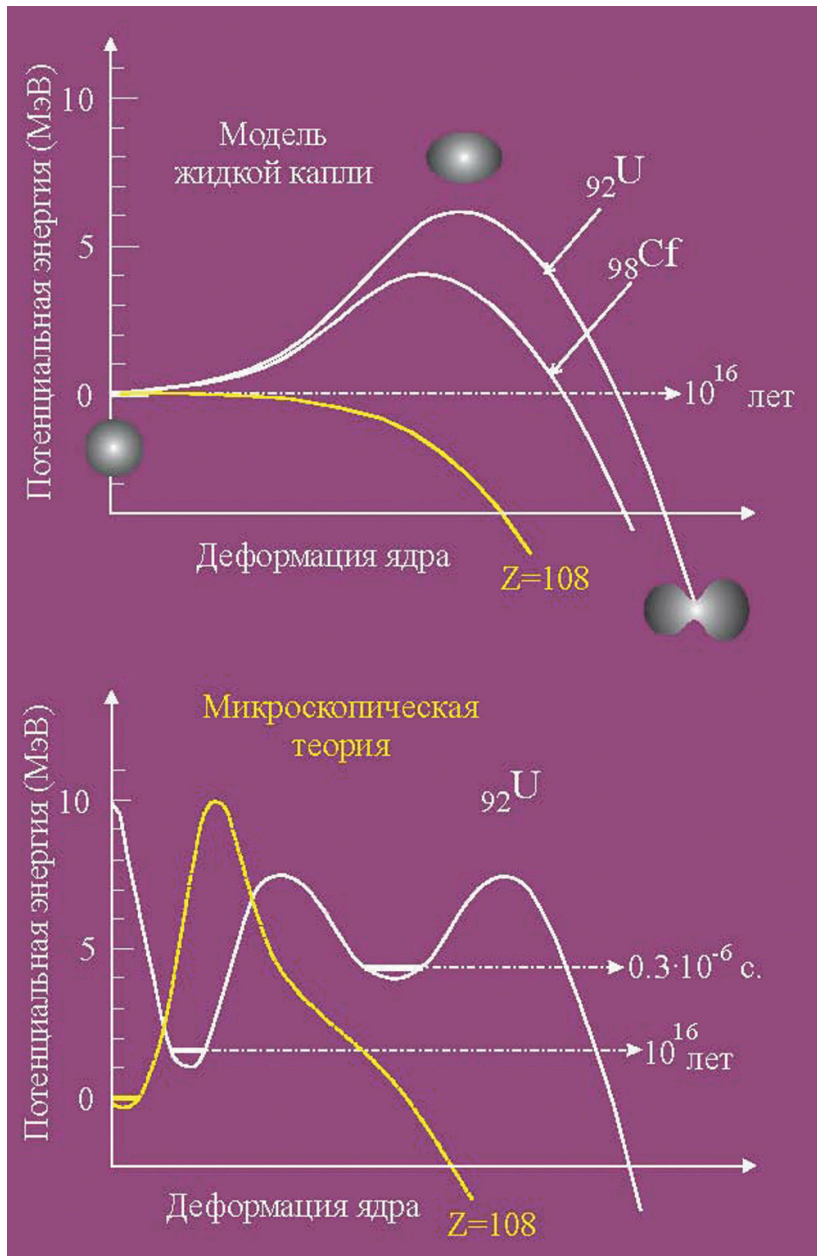


Сверхтяжелые ядра:

$$B_f = 0$$



for $Z^2 / A > 50 \rightarrow Z > 100$



Капельная модель

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

Оболочечные поправки и спаривание нуклонов

Микроскопические поправки:

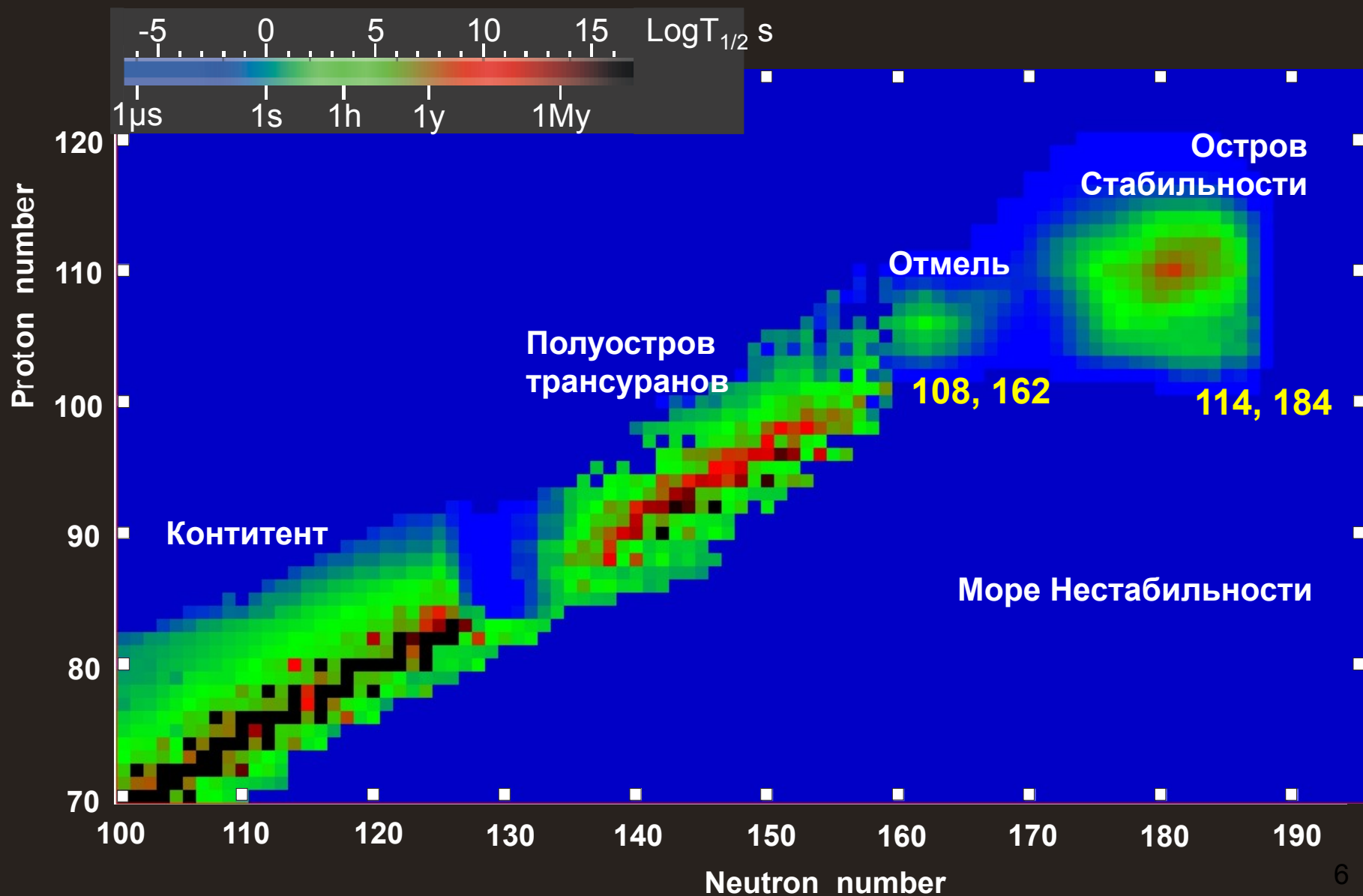
$$B(N, Z) = B(N, Z)_{\text{macro}} + E_{\text{corr}}^{\text{shell}} + E_{\text{corr}}^{\text{pair}}$$

Барьер деления сверхтяжелых элементов определяется поправками на оболочечную структуру и на эффект спаривания:

$$B_f = B(N, Z)_{\text{micro}} = E^{\text{shell}} + E^{\text{pair}}$$

New lands

Макро-микроскопическая теория ядра



Поиск новых элементов

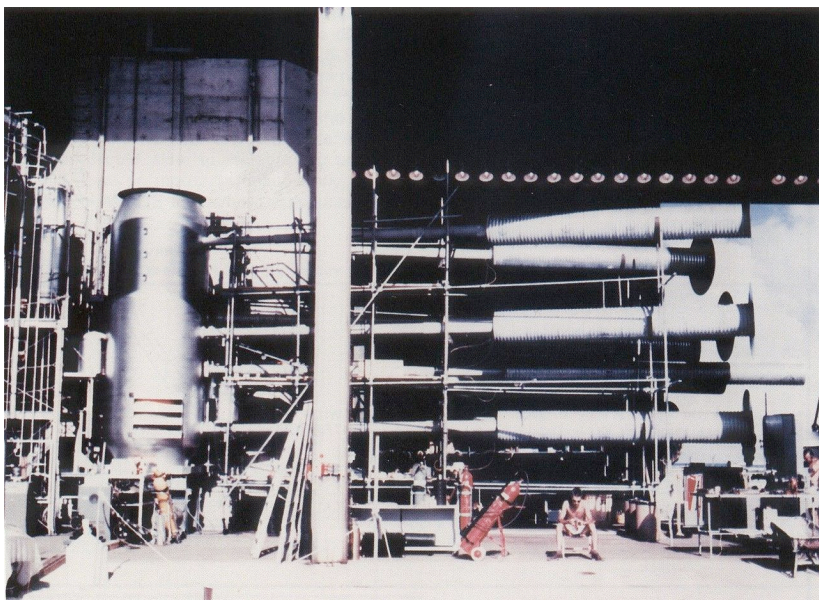
- 1940 - 1952: Синтез элементов $Z = 93 - 100$ путем облучения урана нейтронами (Г.Т. Сиборг, А. Гиорсо и др. (Беркли, США)

→ идентификация химическими методами

Нобелевская премия по химии

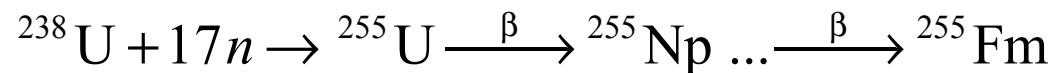
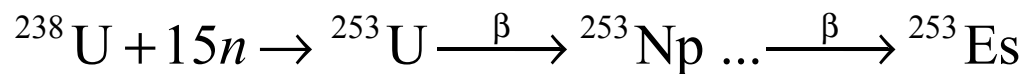
1951 г. – Э. М. Макмиллан, Г.Т. Сиборг. За открытия в области химии трансурановых элементов

Pu 239 2.411·10 ⁴ a	Pu 240 6563 a	Pu 241 14.35 a
Np 238 2.117 d	Np 239 2.355 d	Np 240 7.22 m
U 237 6.75 d	U 238	U 239 23.5 m
Pa 236 9.1 m	Pa 237 8.7 m	Pa 238 2.3 m



1952 г. А. Гиорсо и др. (Беркли, США)

₉₉Es Эйнштейний, **₁₀₀Fm** Фермий



1 ноября 1952 года. Атолл Эниветок.
Айви Майк

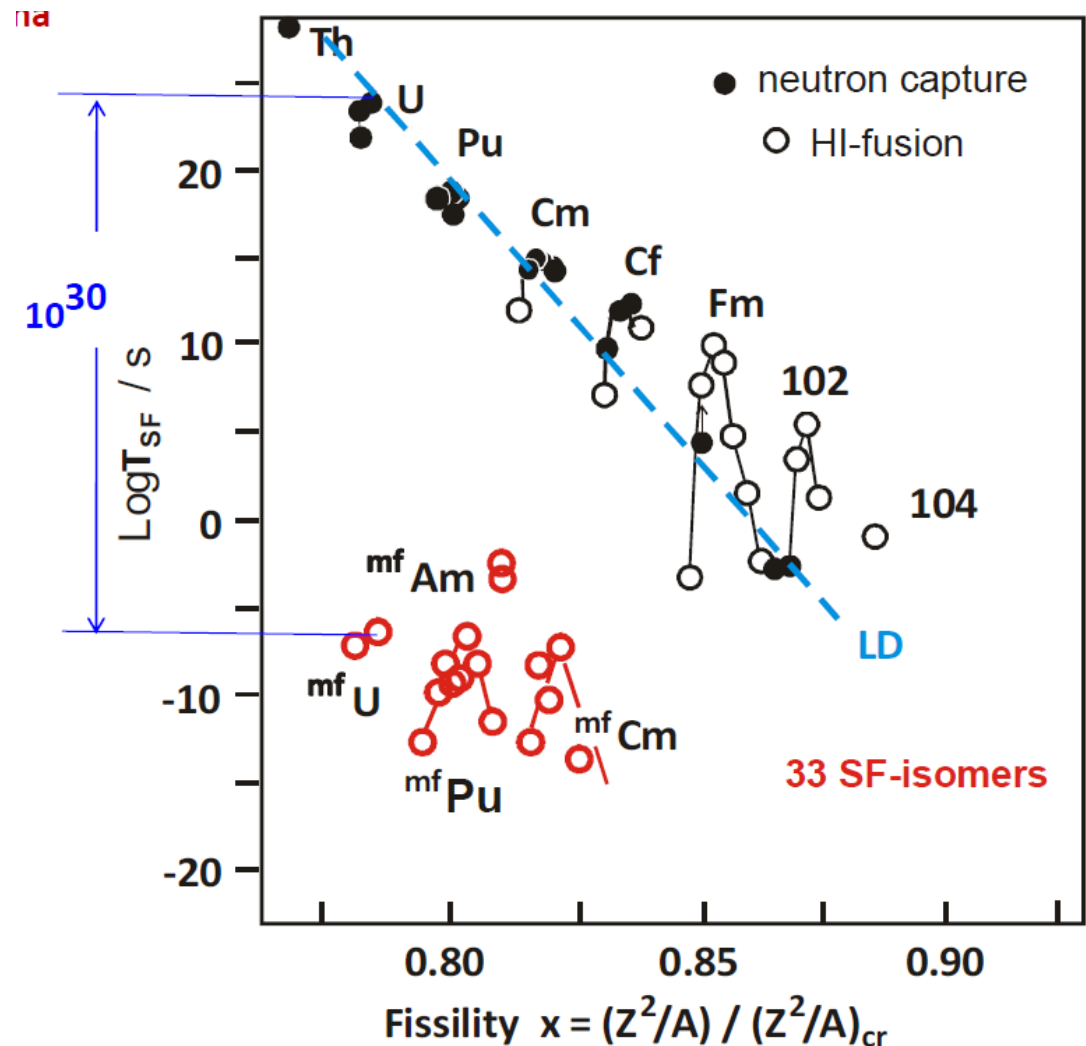
Поиск новых элементов

- 1958 - 1974: Синтез элементов $Z = 101 - 106$
в реакциях слияния (Беркли, США) (ОИЯИ, Дубна)

Мишень: ${}_{94}\text{Pu}$, ${}_{95}\text{Am}$, ${}_{98}\text{Cf}$
Пучок: ${}^{22}\text{Ne}$, ${}^{18}\text{O}$, ${}^{12}\text{C}$, и др

ПРОБЛЕМЫ:

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





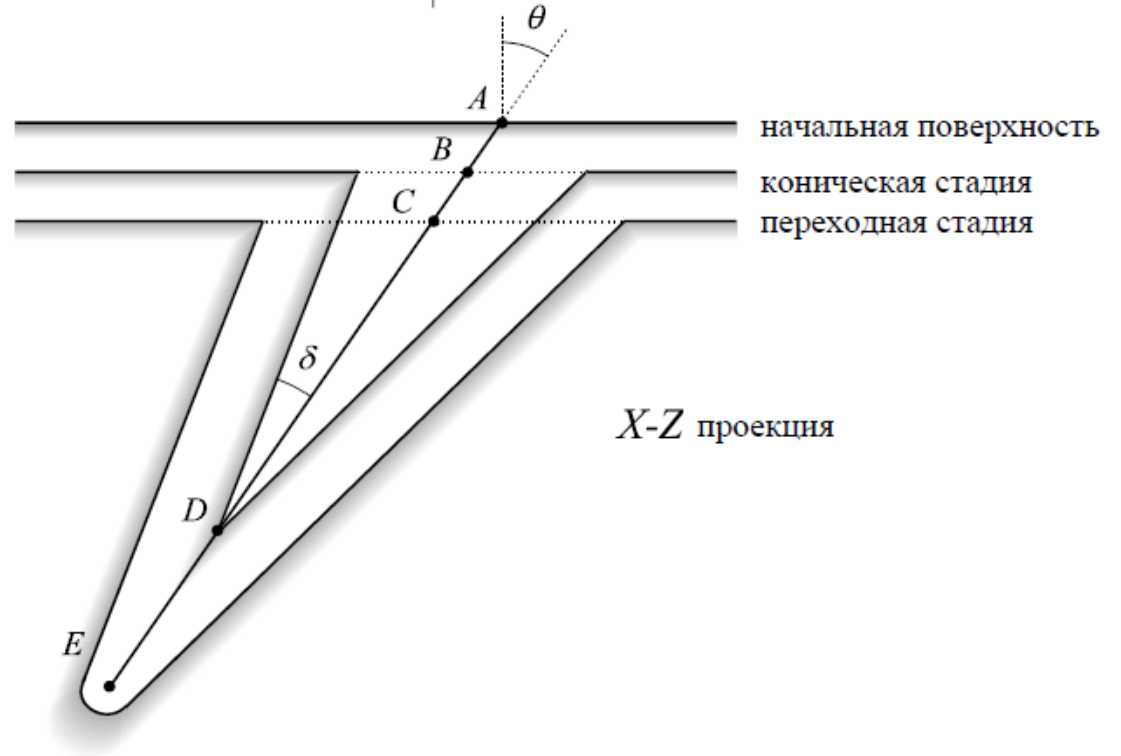
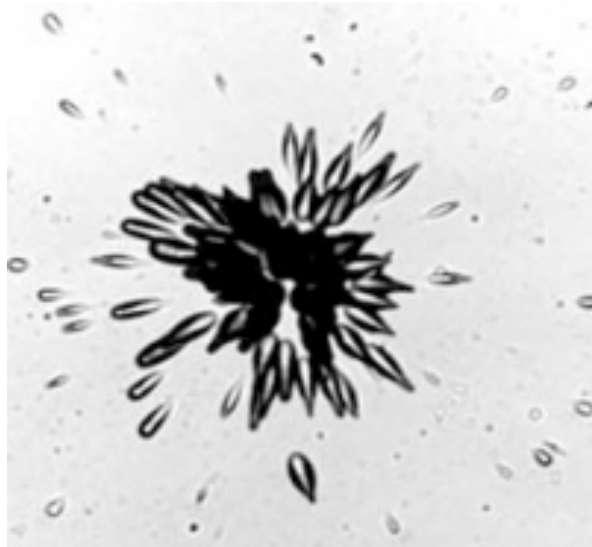
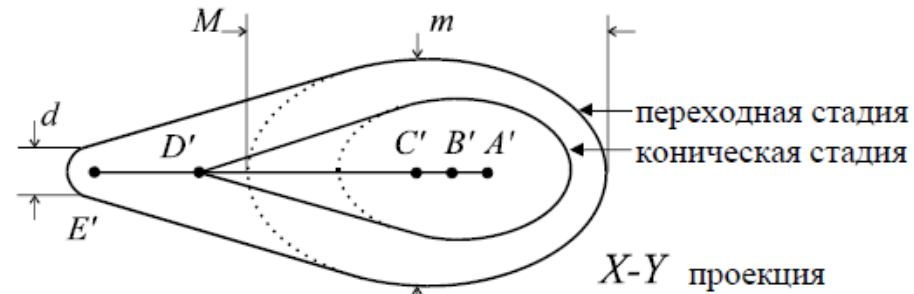
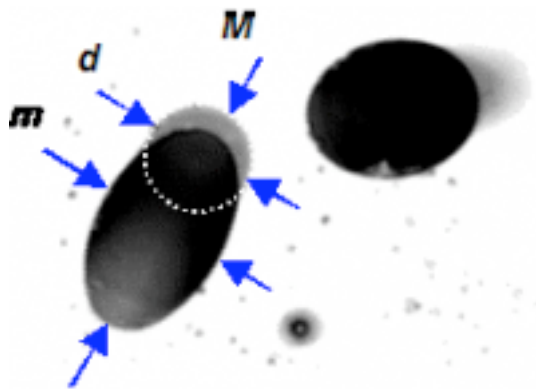
Объединенный институт
ядерных исследований,
Дубна, СССР

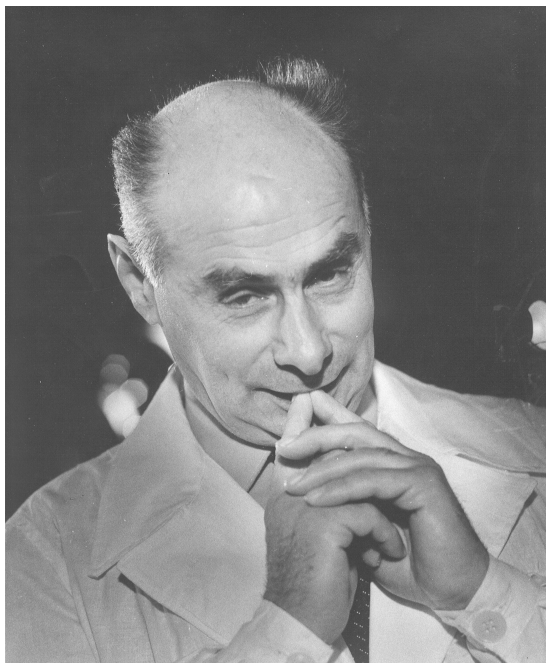
Лаборатория ядерных реакций



Микромир и Вселенная

Твердотельные детекторы

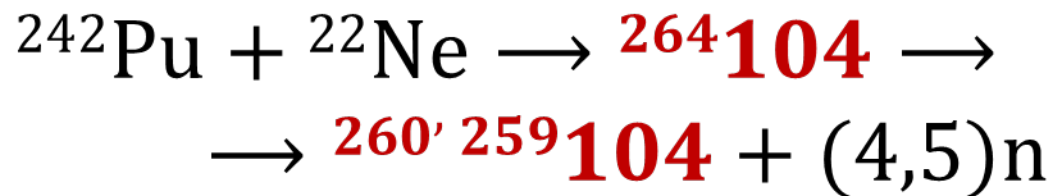




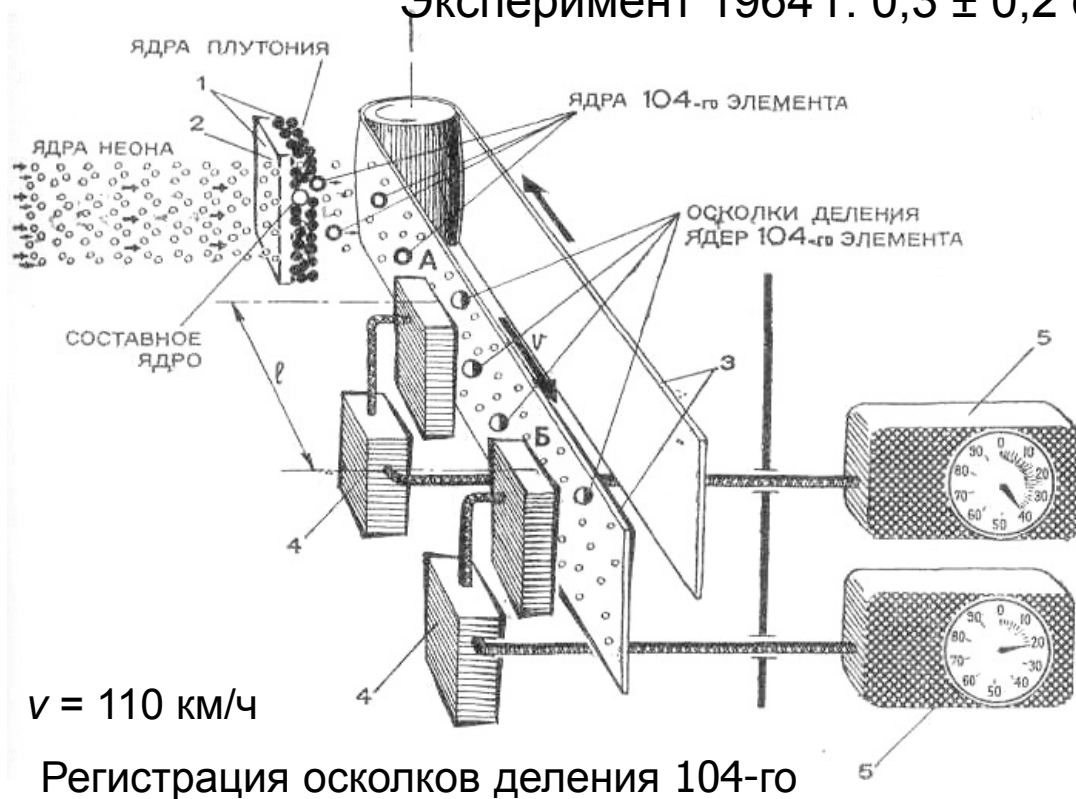
Георгий Николаевич
ФЛЕРОВ

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 граждане 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	Nh	Нихоний
1998	114	Fl	Флеровий
2003	115	Mc	Московский
2000	116	Lv	Ливерморий
2010	117	Ts	Тенессин
2002	118	Og	Оганесон

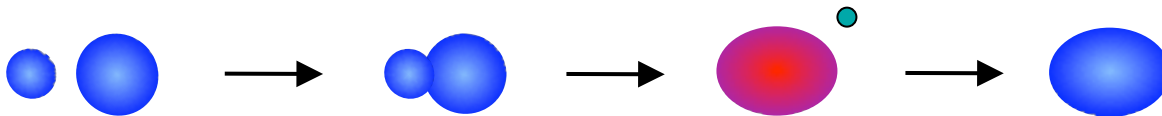
Поиск новых элементов

- с 1980: Исследование **реакции слияния**

- 1981 – 1996 Синтез элементов $Z = 107 - 112$ в **реакциях холодного слияния GSI (SHIP), Дармштадт** (П. Армбрустер, С. Хофманн, Г. Мюнценберг и др.);
- 2004: Синтез $Z = 113$ в **RIKEN, Япония** (К. Морита и др.)

«Холодное слияние»

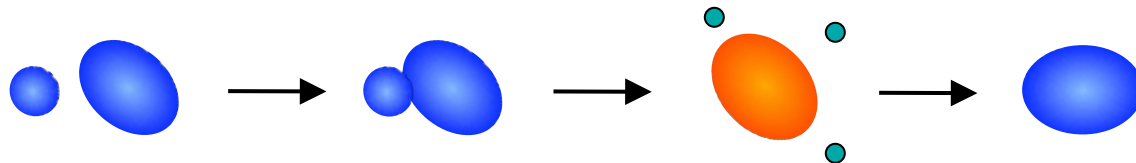
Мишень: ^{208}Pb ($Z=82$, $N=126$) или ^{209}Bi ($Z=83$, $N=126$)
Пучок: $Z > 18$ ($^{40, 48}\text{Ca}$, ^{54}Cr , ^{58}Fe , $^{62, 64}\text{Ni}$ и др.)
Минимальная кинетическая энергия пучка
Слияние магических ядер $E_x \sim 12 - 20$ МэВ



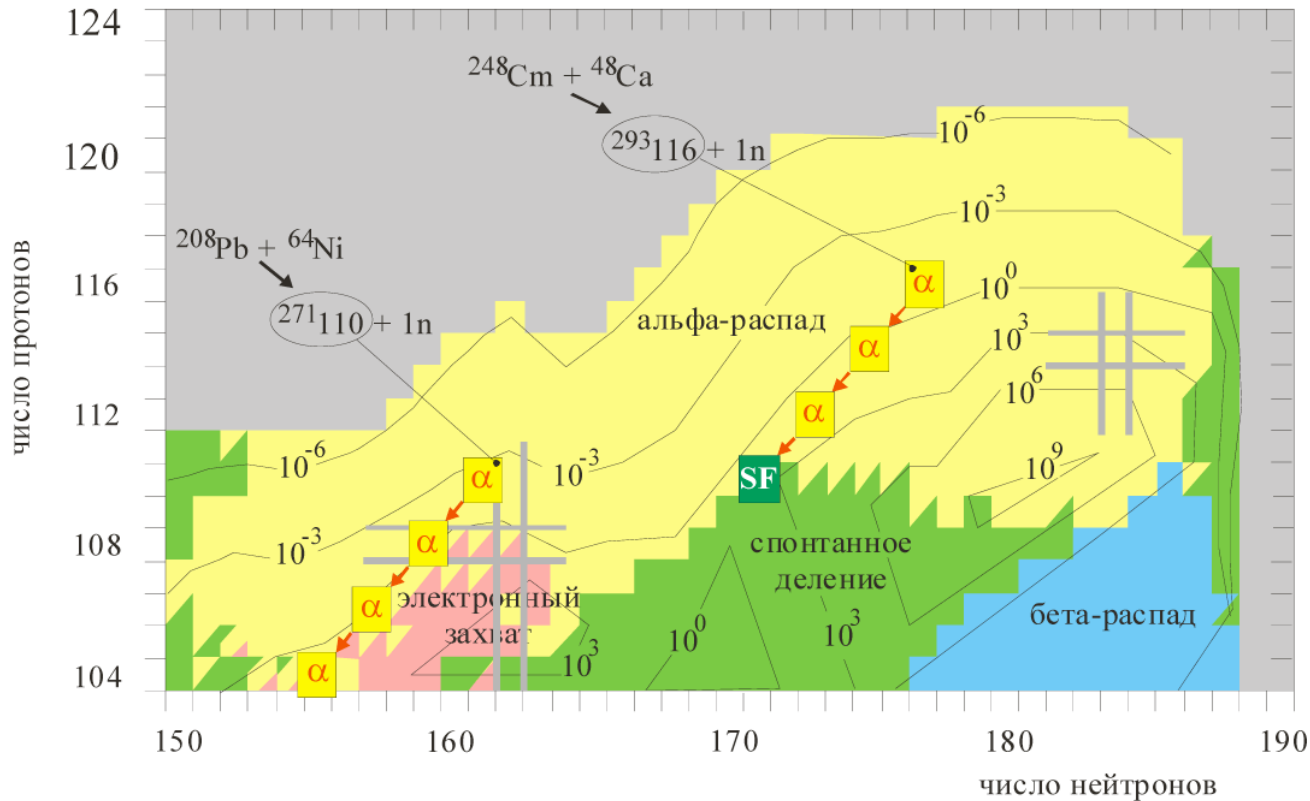
- Синтез элементов $Z = 113 - 118$ в Дубне в реакциях слияния ^{48}Ca с **мишенями из актинидов**

Горячее слияние →

Мишень: Актиниды **Pu, Am, Cm** и **Cf** ($Z = 94-96, 98$)
Пучок: ^{48}Ca ;
 $E_x = 30 - 40$ MeV;



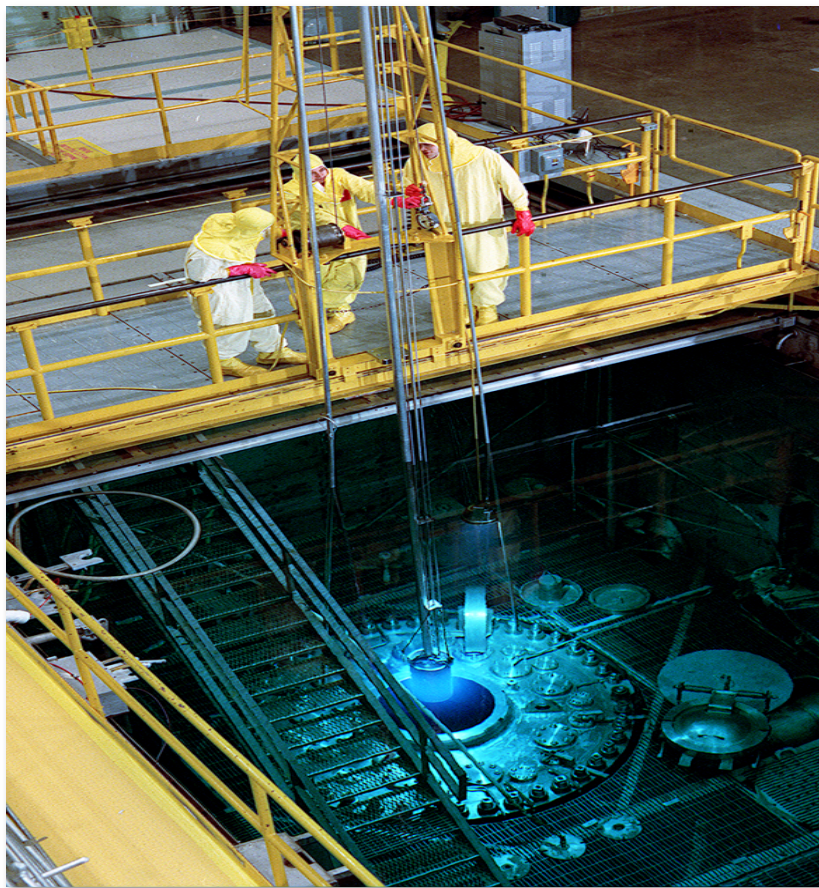
^{48}Ca + Actinide



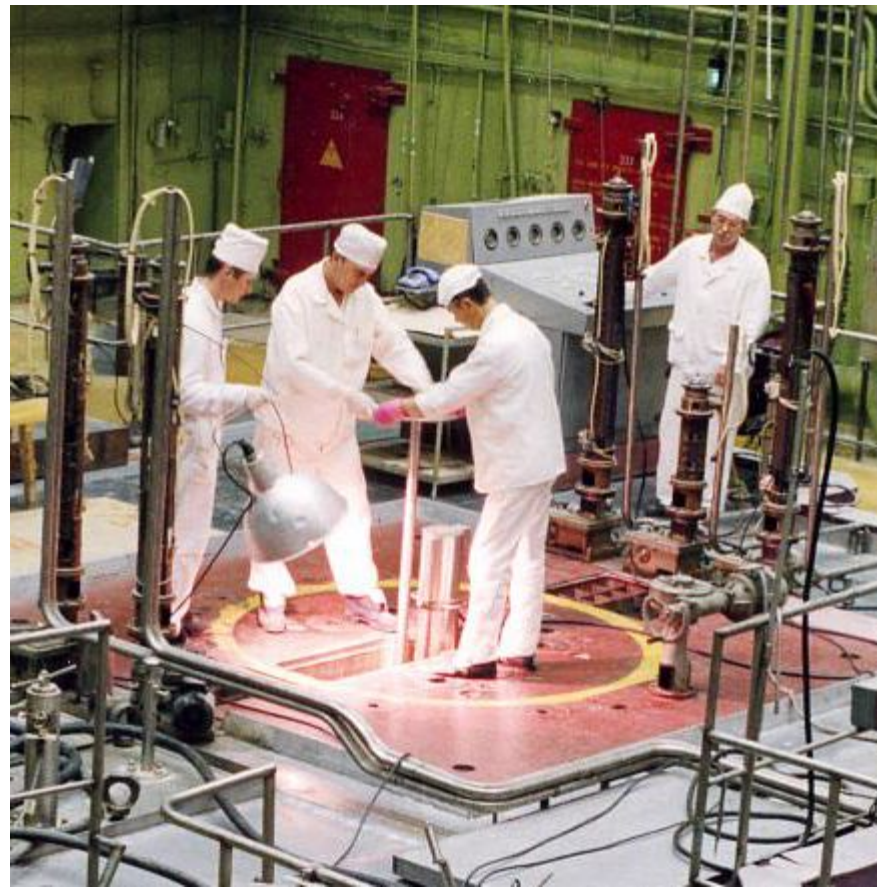
- Силы Кулона $\sim Z_1 \times Z_2 < 2000$
- ^{48}Ca – дважды магическое ядро
- Энергия возбуждения компанд-ядра $\sim 30\text{-}35$ МэВ
- Регистрация семейства альфа-распадов

Производство тяжелых изотопов

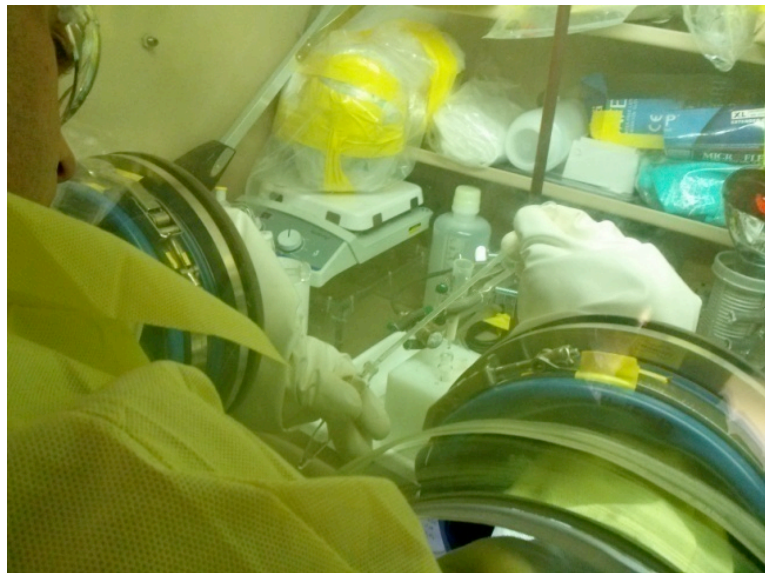
HFIR, ORNL, Oak Ridge, USA, 85 MW



СМ-3, IAR, Димитровград, РФ, 100 MW

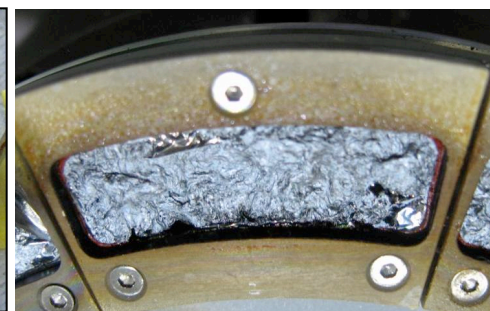


Мишень



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

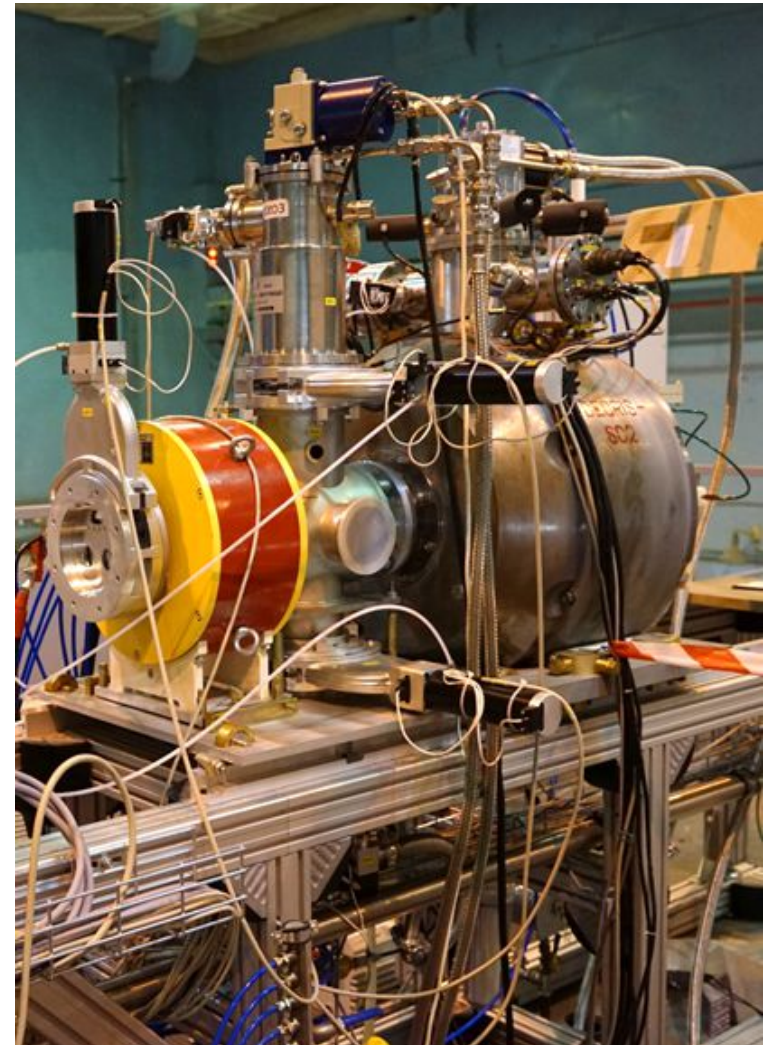
$^{197}\text{Au} \approx 0.045$ US\$

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

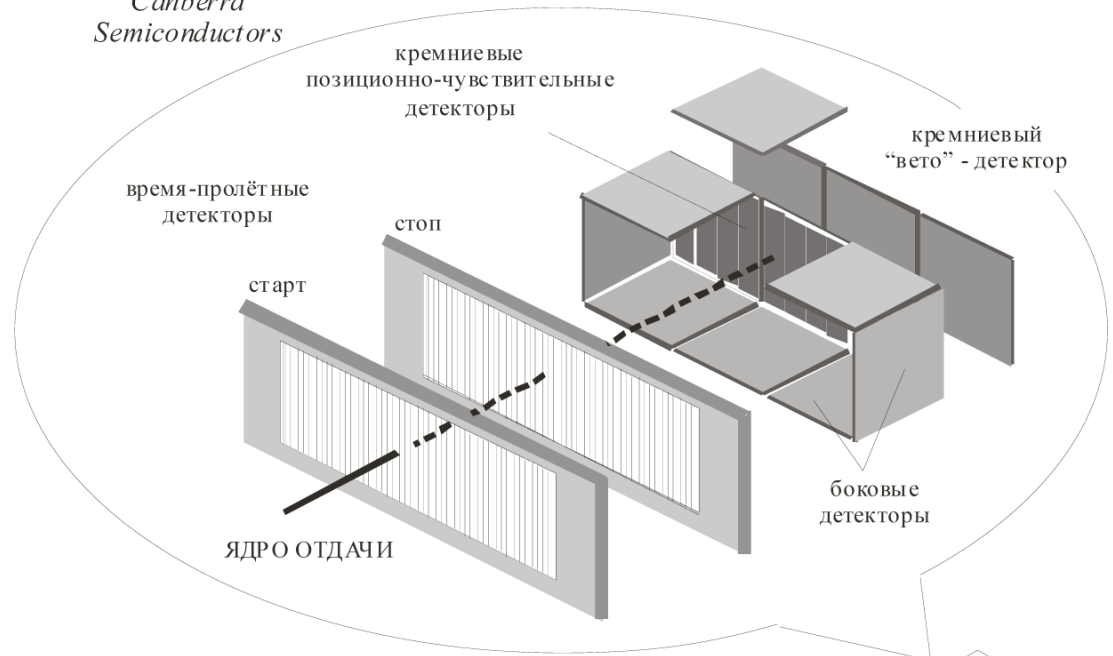


Пучки ускоренных ионов $A = 4 - 209$
с энергией $3 - 29$ МэВ/нуклон
Магнит 2100 тонн, диаметр 4 м
Потребление энергии $1,5$ МВт

Dubna Gas-Filled Recoil Separator

Canberra
Semiconductors

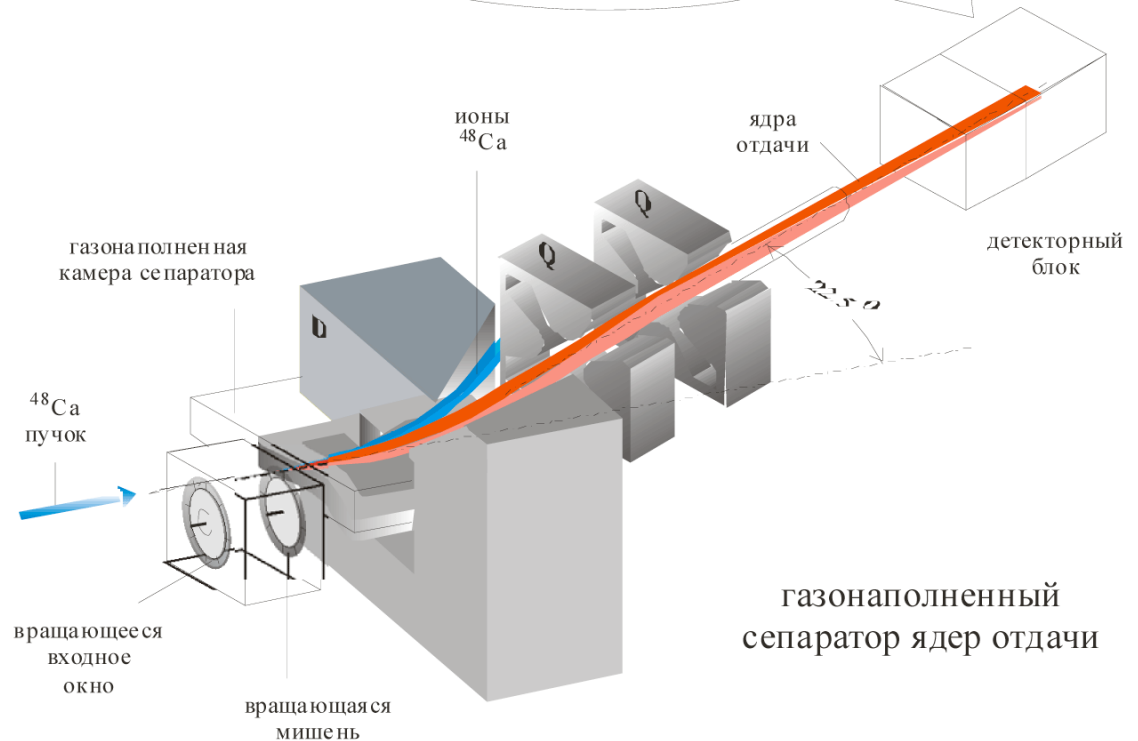
Газонаполненный
Сепаратор
(водород 10^{-3} атм)



Эффективность
регистрации:

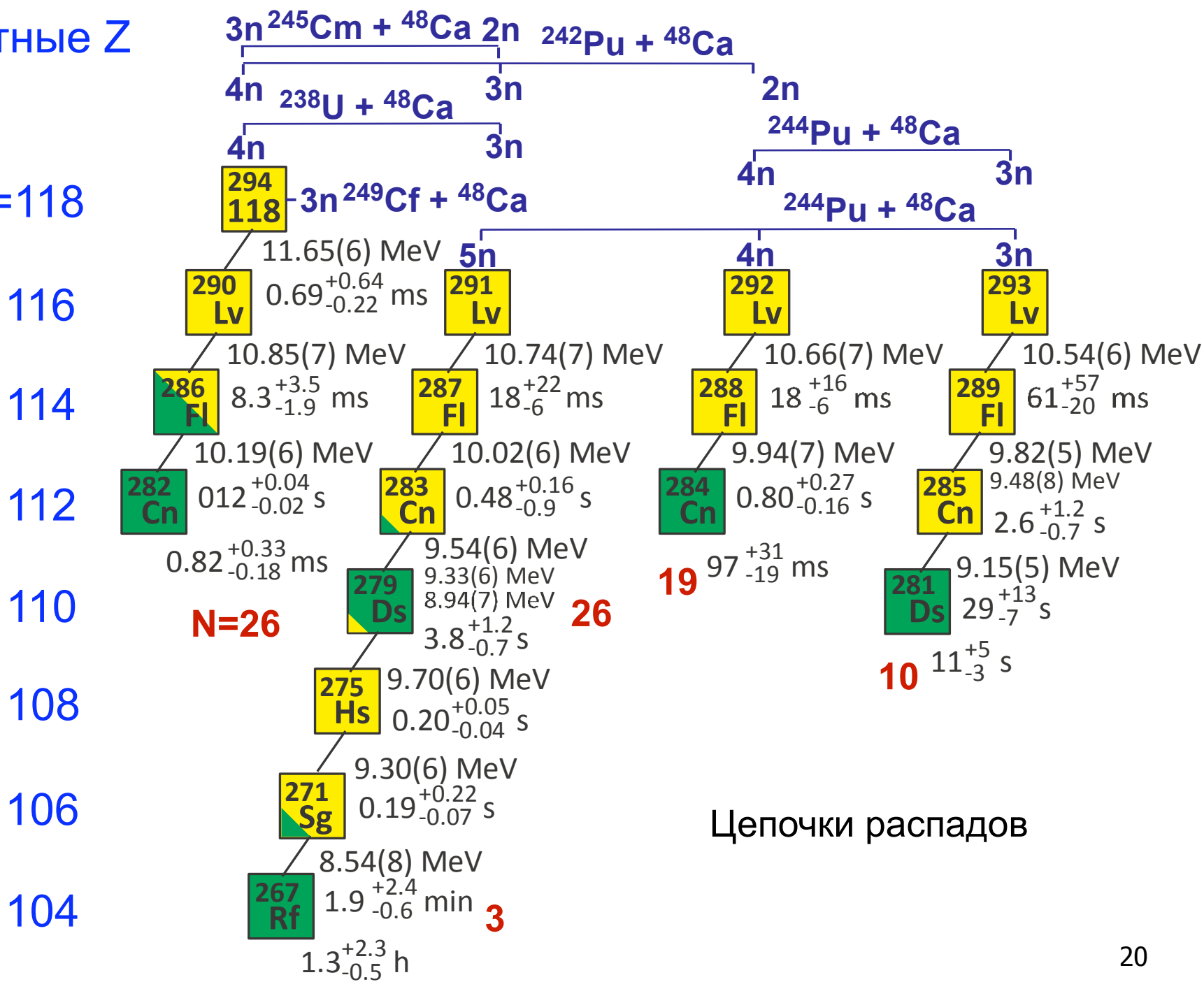
для α -частиц 87%

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



Четные Z

Z=118



Цепочки распадов



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**

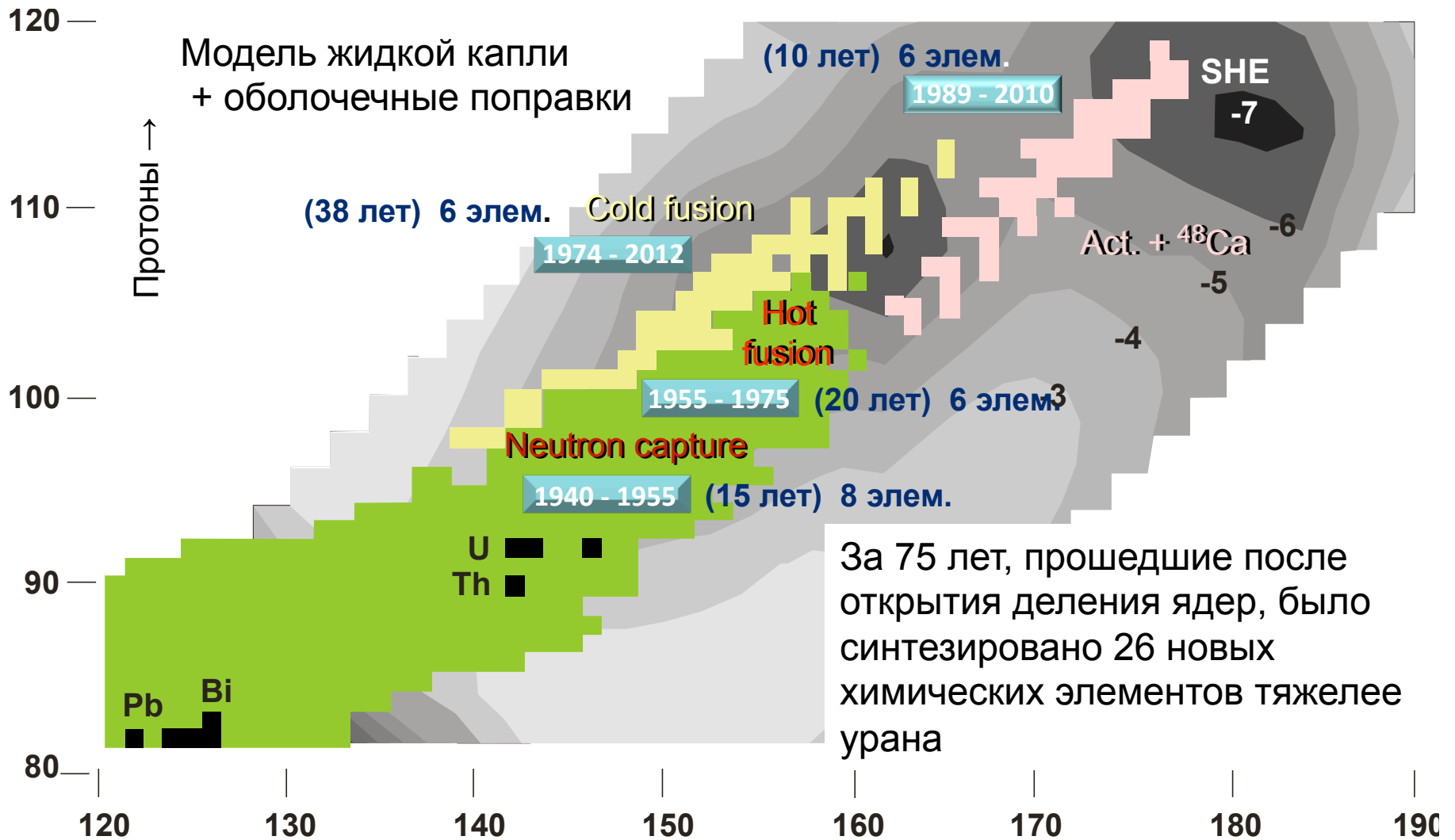
(Нихоний) 113	Флеровий 114	(Московский) 115	Ливерморий 116	(Теннессин) 117	(Оганесон) 118
(Nh)	Fl	(Mc)	Lv	(Ts)	(Og)
(Nihonium)	Flerovium	(Moscovium)	Livermorium	(Tennessine)	(Oganesson)

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

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

Синтез элементов

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



Вопросы:

Где заканчиваются ядра?



Чем отличаются SHE от более легких?

... и какова форма плотности ядер на границе?

Где центр острова стабильности?

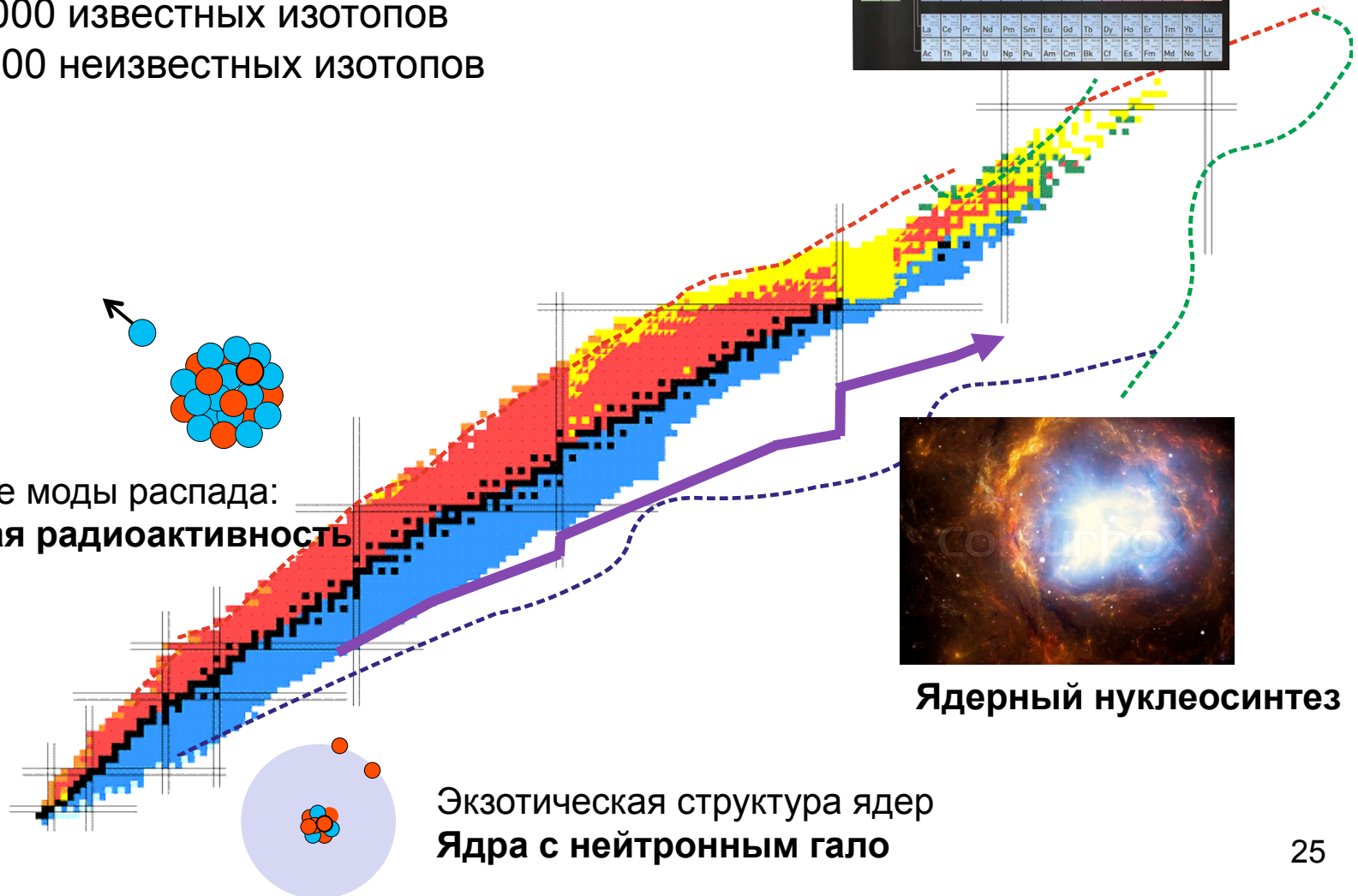
Образуются ли SHE во взрывах сверхновых?

ФИЗИКА на границах карты изотопов

118 известных элементов
Около 3000 известных изотопов
около 4000 неизвестных изотопов

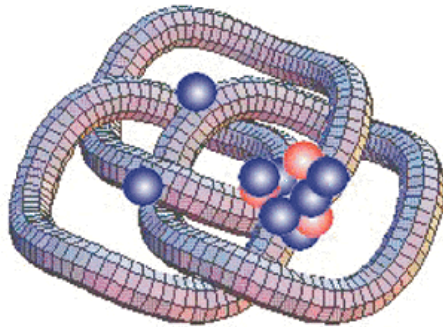
Сверхтяжелые элементы

H	He																
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne										
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar										
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo		
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

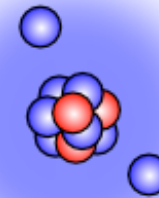


ЭКЗОТИКА

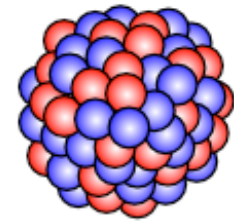
- Нейтронное гало
- Двухнейтронное гало, системы Борромео



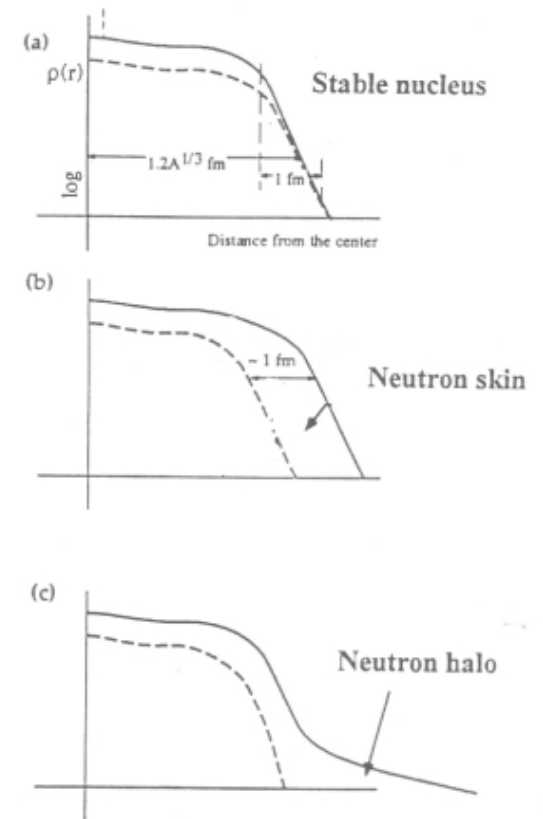
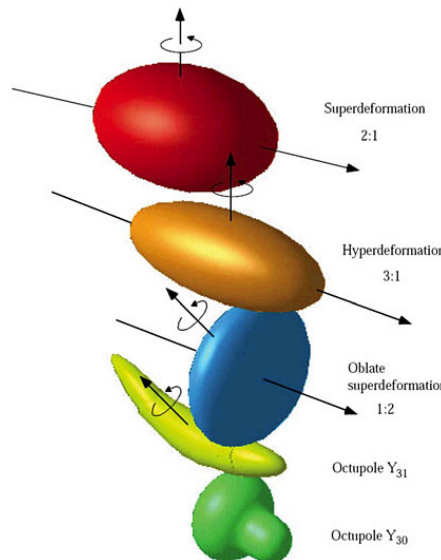
^{11}Li



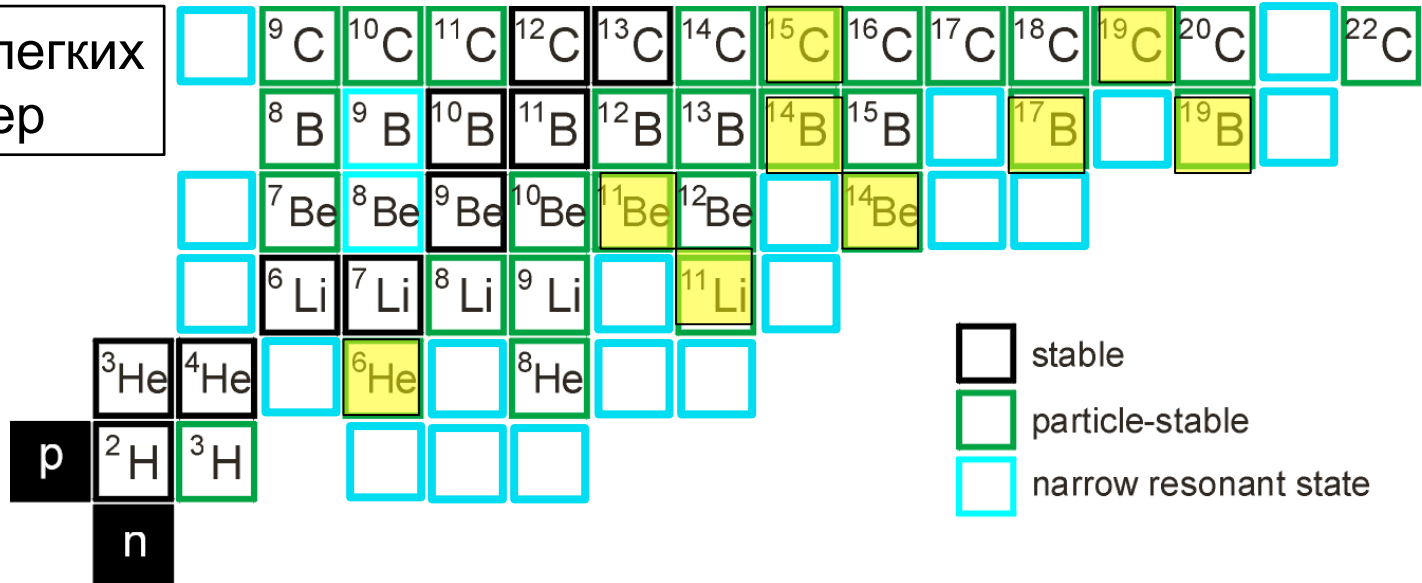
^{208}Pb



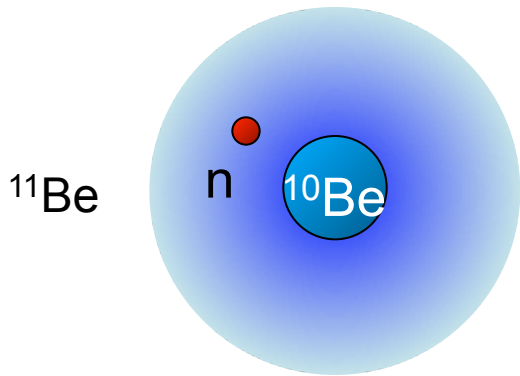
- Четырехнейтронное гало
- Нейтронная шуба
- Супердеформации



Карта легких ядер

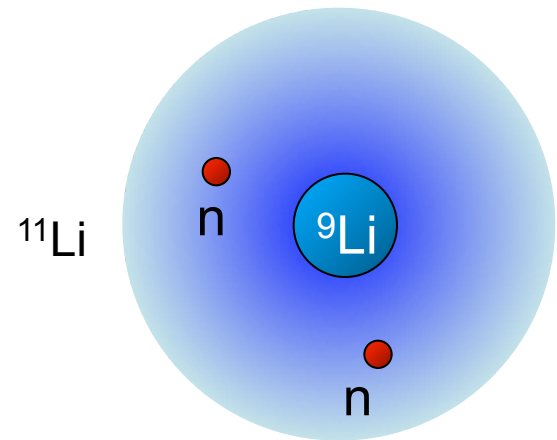


1n halo nucleus



$S_n = 504$ keV

2n halo nucleus

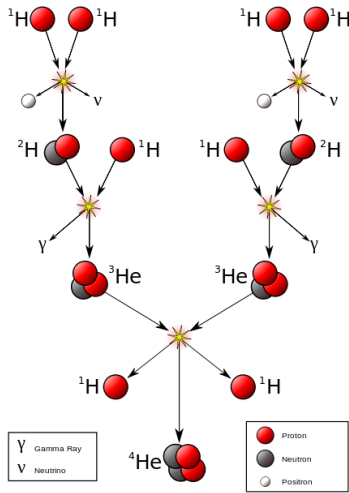


$S_{2n} = 300$ keV

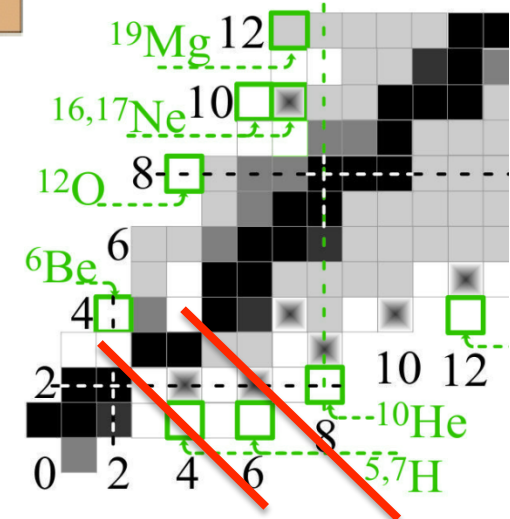
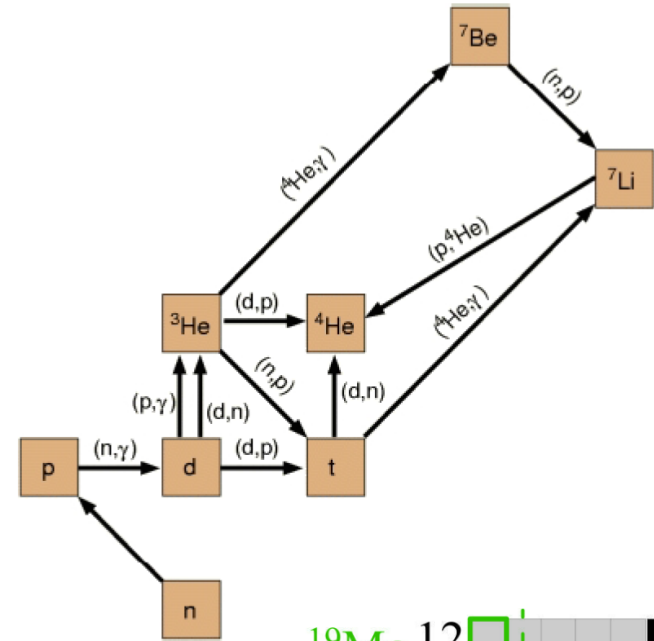
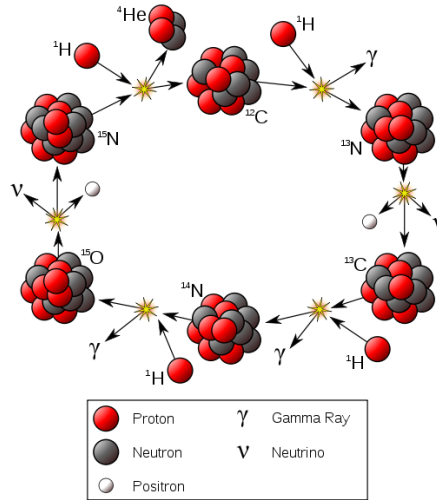
НУКЛЕОСИНТЕЗ

Дозвездный нуклеосинтез

р-р цикл



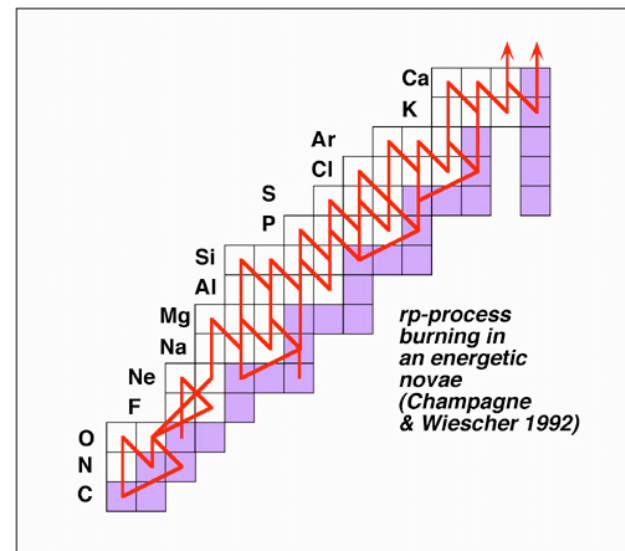
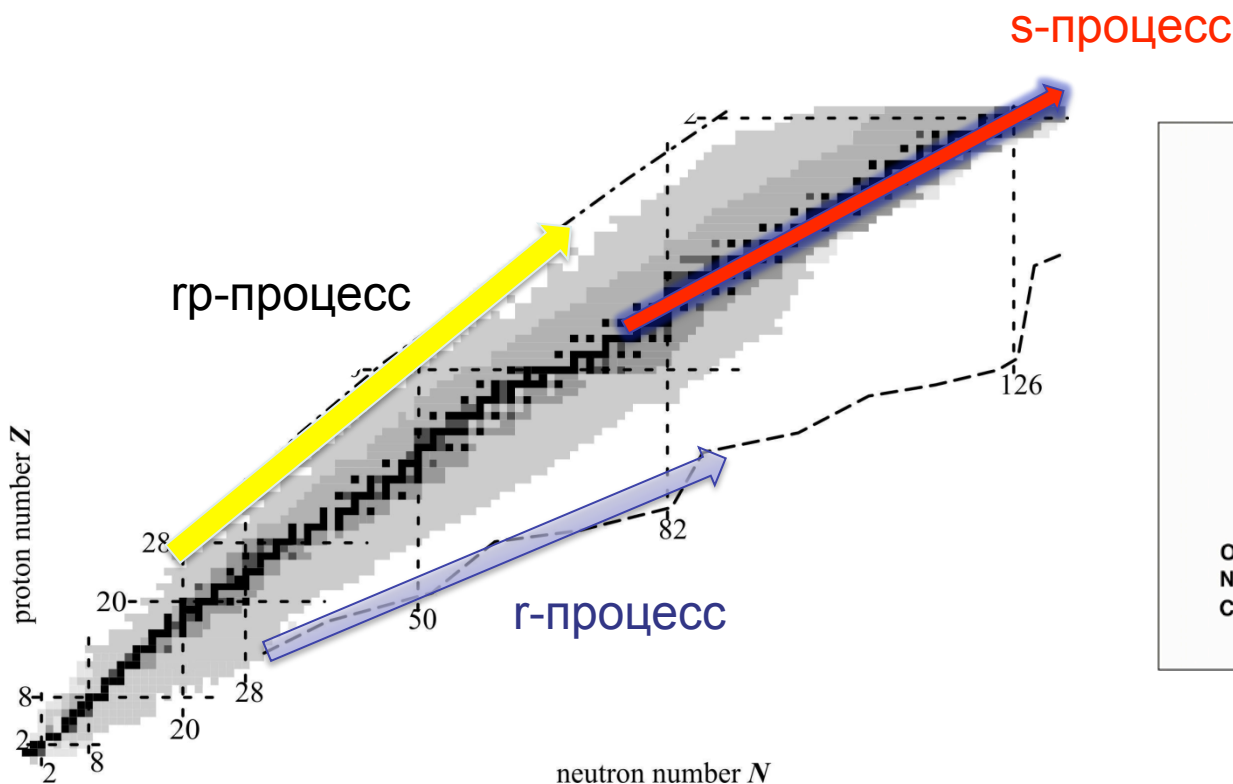
CNO цикл



A=5 A=8

- Последовательность реакций с испусканием лептонов и гамма-квантов
- Уравнения химического равновесия
- Данные: (p,γ) , (α,γ) , (p,p') , (α,p) , (n,γ) , (α,n) , β^- , β^+
- Каталитические циклы (pp vs. CNO)
- Пропуски масс $A=5$, $A=8$

НУКЛЕОСИНТЕЗ

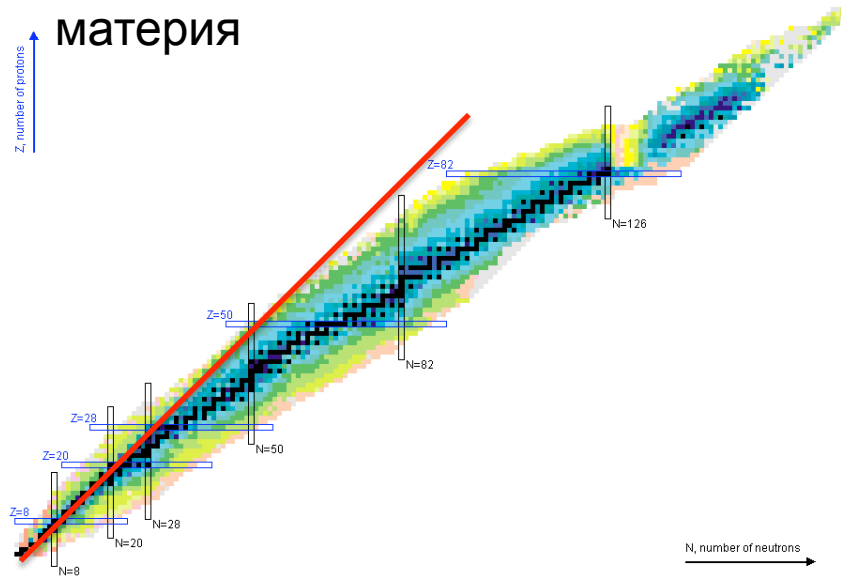


- Медленный захват нейтронов – slow process
- Быстрый захват нейтронов – rapid process
- Быстрый захват протонов – rp-process
- Распространенность элементов связаны с r-процессом
- Для количественного описания необходима информация о ядрах и реакциях на границах существования ядер

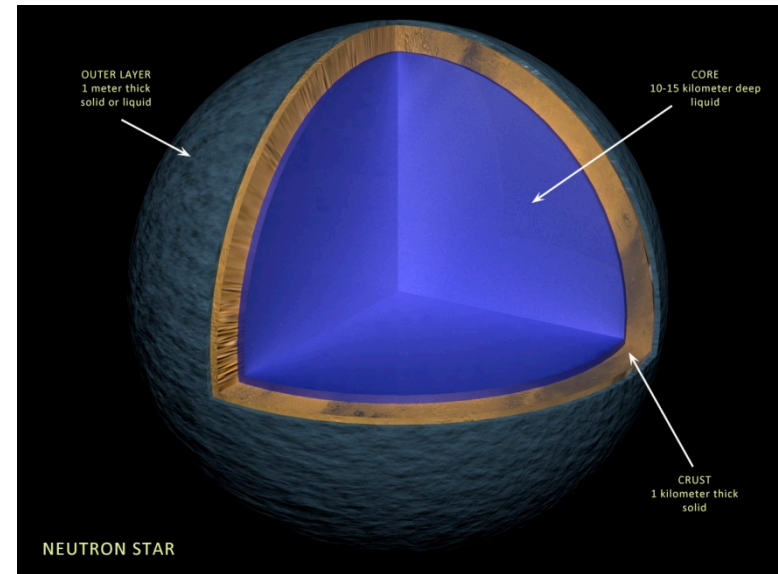
Адронная материя в нейтронных звездах

Уравнение состояния для ядерной материи

Известные ядра: почти
симметричная ядерная
материя



Нейтронная звезда: ОЧЕНЬ
большое ядро с ассиметричной
материей



Продвигаясь к границам существования ядер мы
получаем экспериментальные данные о все более
ассиметричной материи

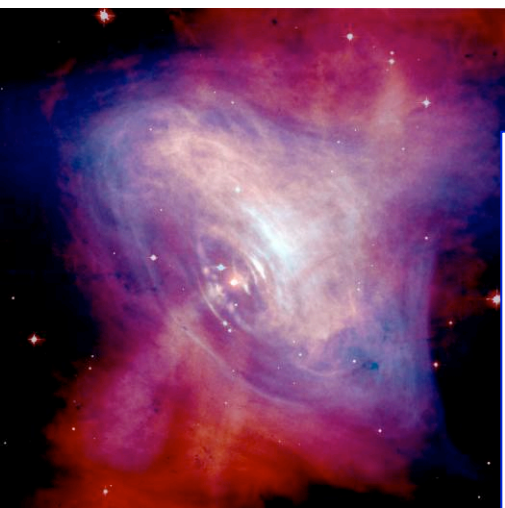
Адронная материя в нейтронных звездах

Фракция барионов: зависит от YN , YY взаимодействия

-> Максимальная масса звезды, скорость остывания

Для более реалистичных расчетов нужны

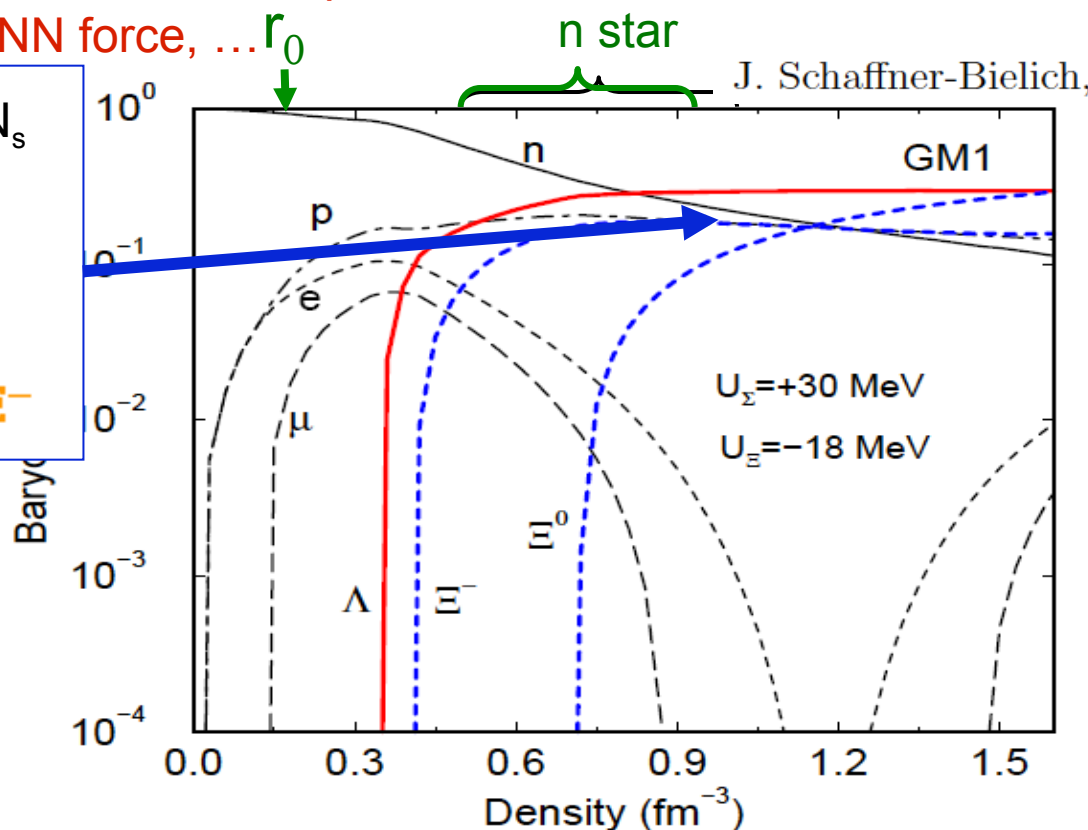
данные по гиперядрам



XN , LL , SN , KN forces, LN p-wave force,
 NNN and YNN force, ... r_0

$N_u \sim N_d \sim N_s$

$p, n, \Lambda, \Xi^0, \Xi^-$



ВОПРОСЫ:

Тяжелые ($M = 1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$)

нейтронные звезды

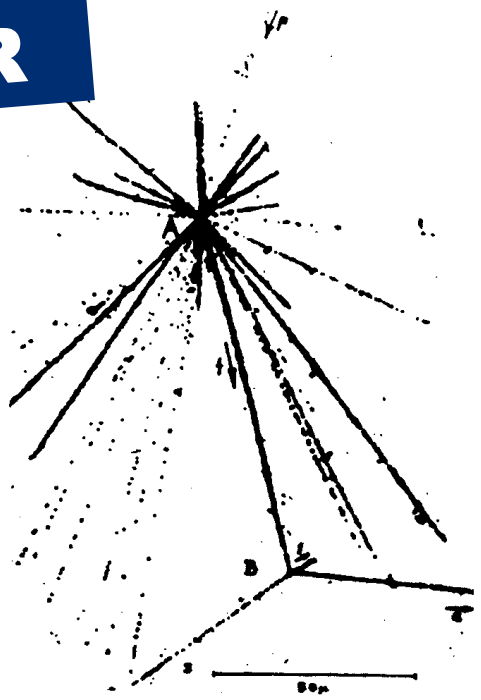
Появление e, K^{bar}

Существование странной материи

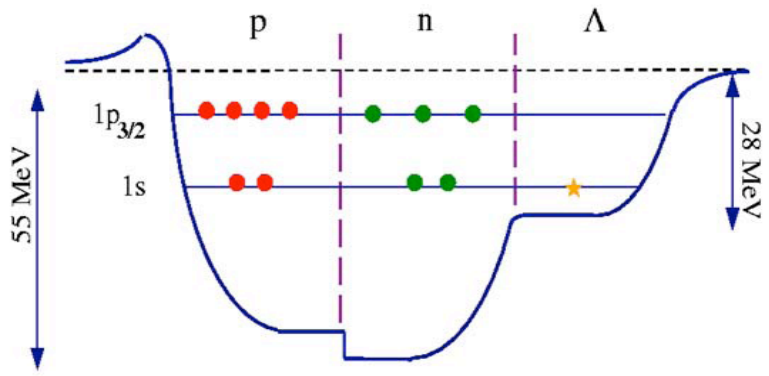
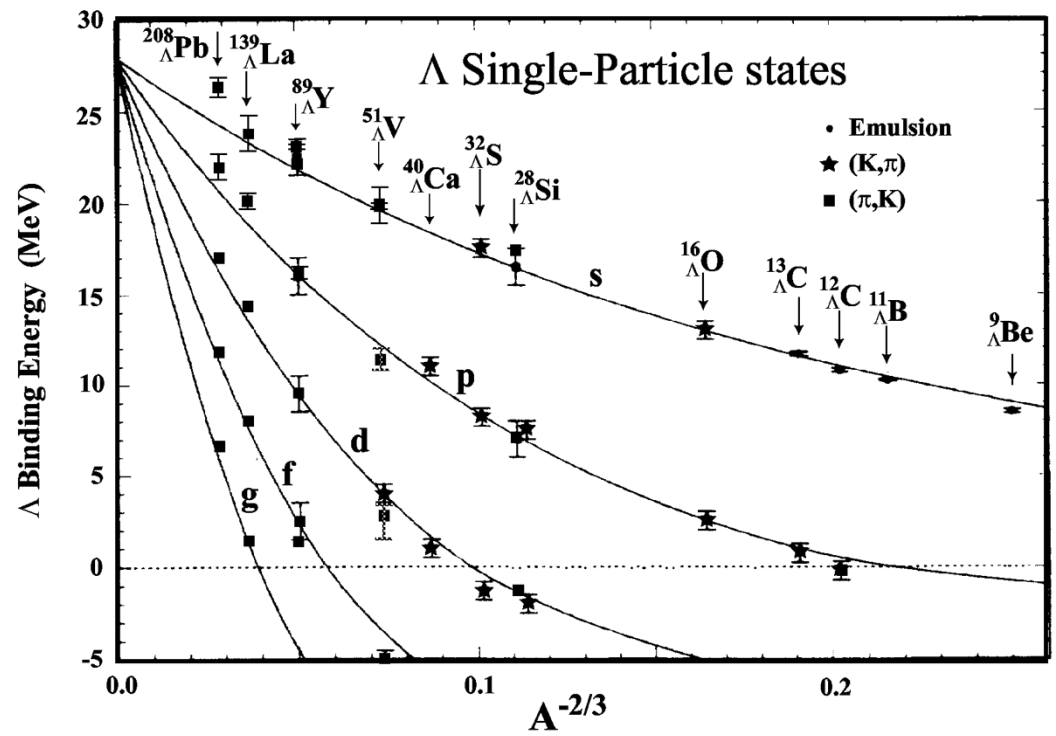
CR

Гиперядра

$$B_{\Lambda}(^{A+1}_{\Lambda}Z) = E_{CB}(^{A+1}_{\Lambda}Z) - E_{CB}(^AZ)$$



M. Danysz, J. Pniewski, Delayed Disintegration of a Heavy Fragment Emitted in Nuclear Explosion, *Bull. Acad. Pol. Sci.* 1, 42 (1953)

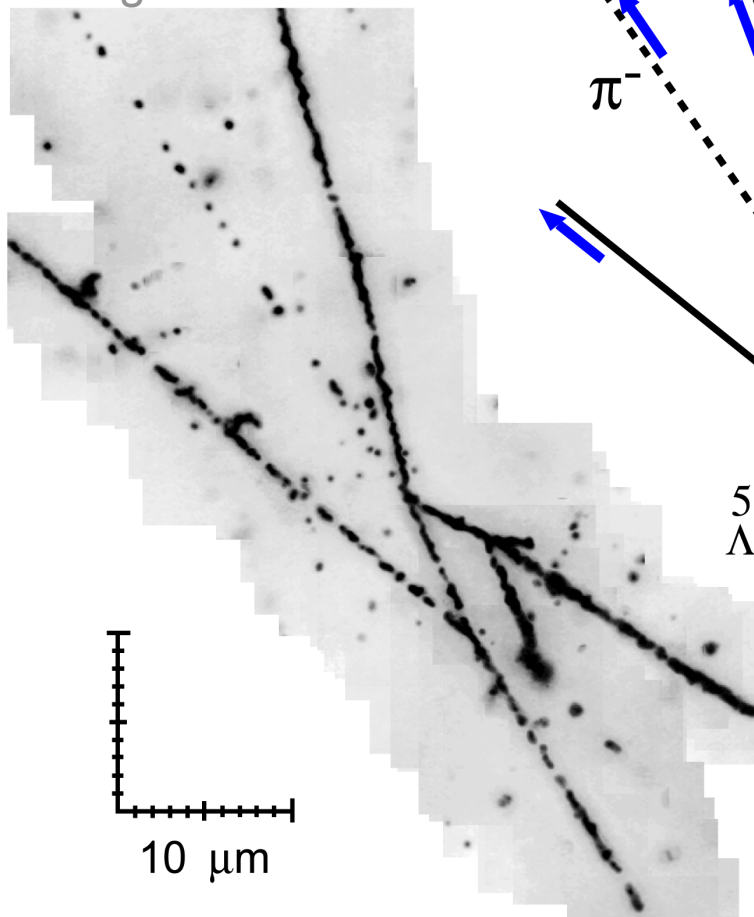


Гиперон, находясь в окружении нетождественных частиц (нуклонов), не подвержен действию принципа Паули.

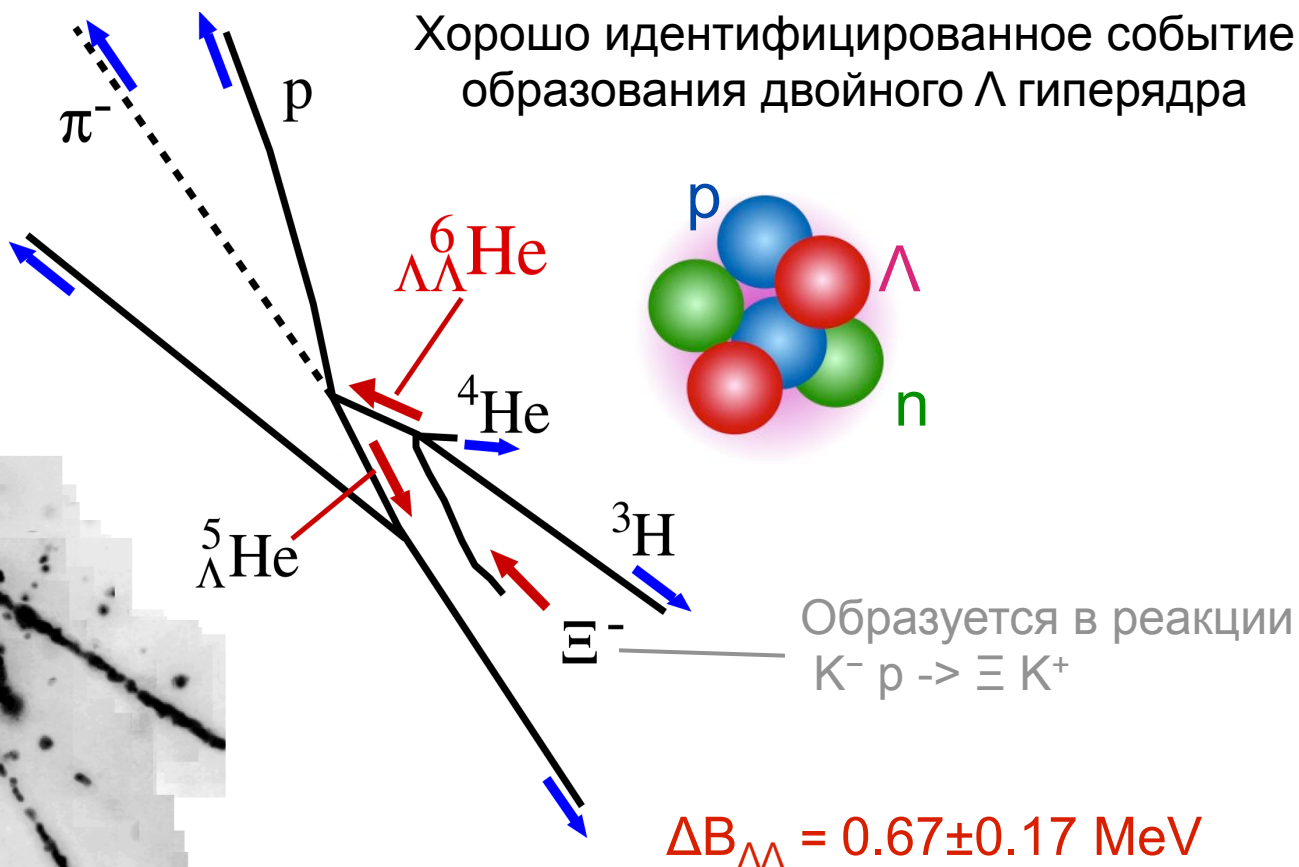
Гиперон-нуклонное притяжение слабее, чем нуклон-нуклонное

Двойные гиперядра

Nagara event



Takahashi et al., PRL 87 (2001) 212502



Странные ядра

$N_u \sim N_d \sim N_s$



“Stable”

Странность в нейтронных звездах ($\rho > 3 - 4\rho_0$)
Странность адронной материи ($A \rightarrow \infty$)

$p, n, \Lambda, \Xi^0, \Xi^-$

Рост
плотности



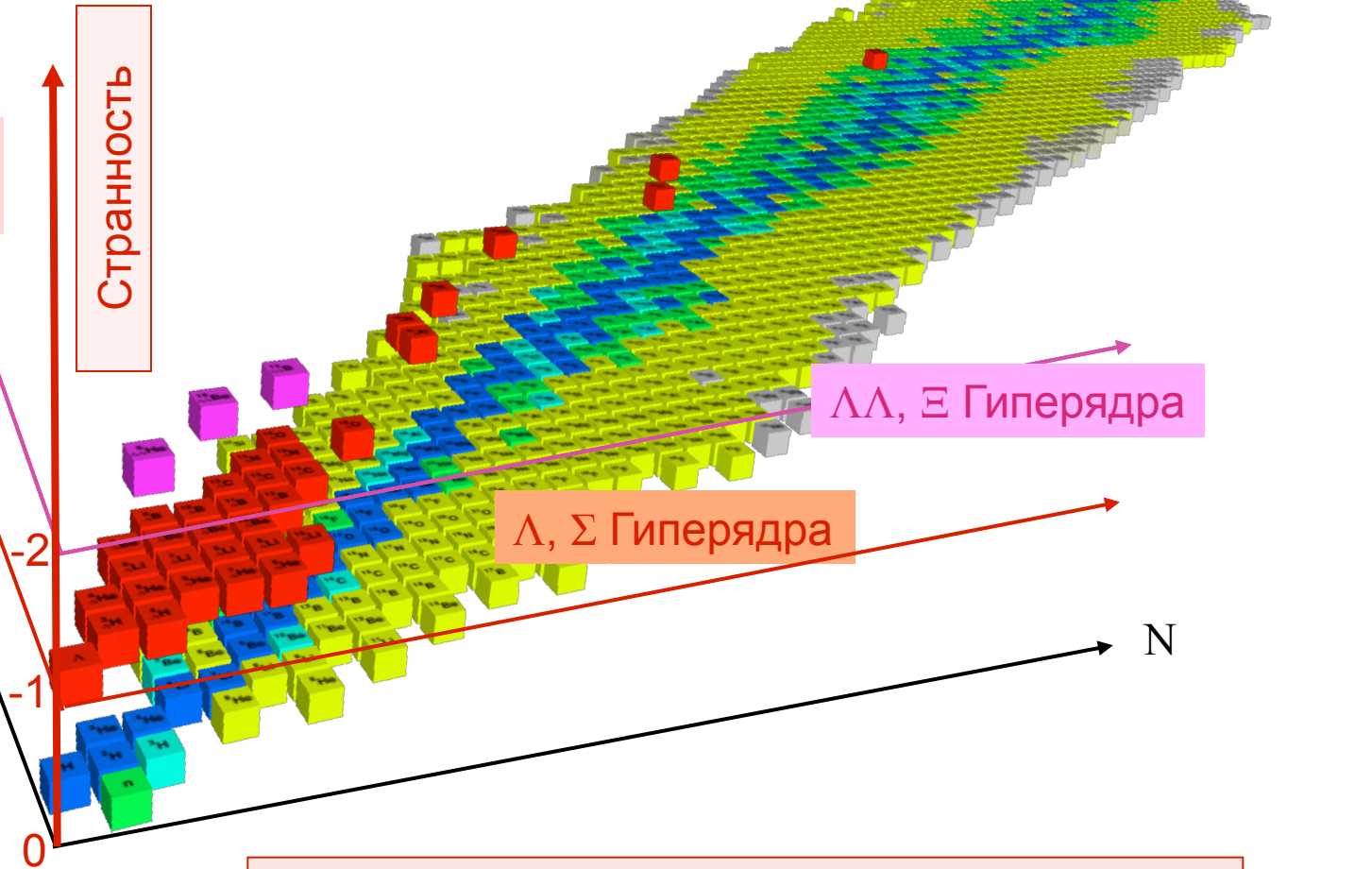
Λ



p

n

Z



$\Lambda\Lambda, \Xi$ Гиперядра

Λ, Σ Гиперядра

3-D карта изотопов