



**Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»**

**Институт ядерной физики и технологий**

**Лаборатория экспериментальной ядерной физики**

**<http://enpl.mephi.ru/>**

**А.И. Болоздыня**

**Экспериментальная ядерная физика**

**Лекция №22**

**Ядерные реакции под действием тяжелых ионов**

**2018**

## ***Лекция №22***

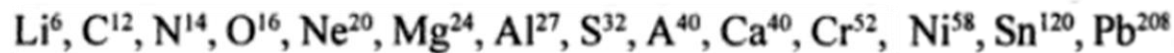
### ***Ядерные реакции под действием тяжёлых ионов***

- 1. Взаимодействия ионов с ядрами**
- 2. Кулоновские возбуждение ядер**
- 3. Упругое рассеяние**
- 4. Реакции прямого взаимодействия**
- 5. Реакции слияния ядер**
- 6. Реакции распада**
- 7. Синтез новых элементов**
- 8. Взаимодействия тяжёлых ионов при релятивистских энергиях**

# 1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ С ЯДРАМИ

С появлением в конце 50-х - в начале 60-х годов XX века пучков ускоренных ионов (ядер) возникло новое направление ядерной физики - **физика тяжёлых ионов**.

«**Тяжёлый ион**» - это любой заряженный «снаряд», тяжелее  $\alpha$ -частицы:  $Z > 2, A > 4$   
Наиболее популярные:

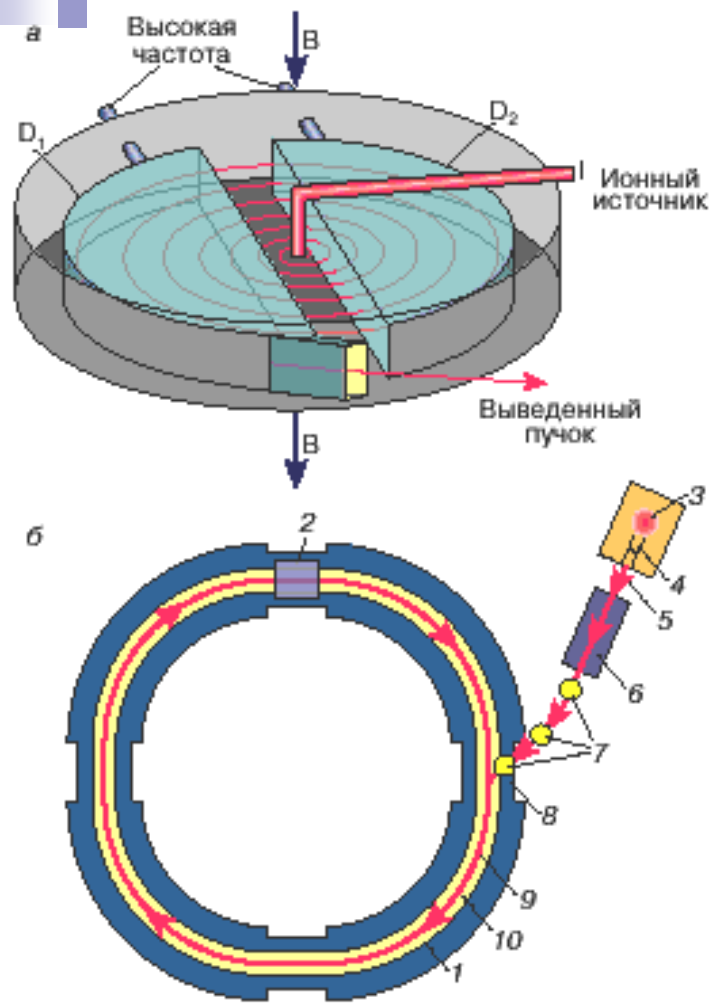


**Физика тяжёлых ионов** изучает коллективные ядерные процессы, характеризующиеся предельно большими изменениями формы ядра, сильным перераспределением энергии между различными степенями свободы систем.

Взаимодействие многозарядных ионов с ядрами обладает целым рядом особенностей, обусловленных наличием у них больших заряда  $Z$  и массы  $M$ :

- 1) передача больших импульсов;
- 2) передача больших моментов;
- 3) обмен большим количеством нуклонов;
- 4) особенности электромагнитного взаимодействия (большое и многократное кулоновское возбуждение, сильная ионизация, короткие пробеги).

Реакции с тяжёлыми ионами предоставляют уникальную возможность получать ядра вблизи **границ стабильности** и проникнуть в область химических элементов второй сотни. Все элементы Периодической системы Менделеева **от 101 до 118** были синтезированы в реакциях с ускоренными тяжёлыми ионами.



Projectile ( <i>m</i> )	Target ( <i>M</i> )	Coulomb Barrier ( $E_B$ ) (MeV)	$E_{lab}$ (MeV)
$C^{12}$	$C^{12}$	7.9	15.7
$C^{12}$	$Ca^{40}$	21.0	27.5
$C^{12}$	$Sn^{120}$	41.5	45.7
$C^{12}$	$Pb^{208}$	59.9	68.7
$Ca^{40}$	$Ca^{40}$	58.5	117.0
$Ca^{40}$	$Sn^{120}$	119.7	159.6
$Ca^{40}$	$Pb^{208}$	175.5	209.2
$Sn^{120}$	$Sn^{120}$	253.4	506.9
$Sn^{120}$	$Rb^{208}$	377.6	595.5
$Pb^{208}$	$Pb^{208}$	567.4	1134.9
$^{238}U$	$^{238}U$	700	

$$E_B = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_1 + R_2}; \quad E_{lab} = \frac{M + m}{M} E_B$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{h^2}{2mE_{lab}} \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow 0.15-1.2 \text{ Fermis}$$

$$R_1 + R_2 \left\{ \begin{array}{l} 17 \text{ fm} \quad Pb^{208} + Pb^{208} \\ 6.59 \text{ fm} \quad C^{12} + C^{12} \end{array} \right.$$

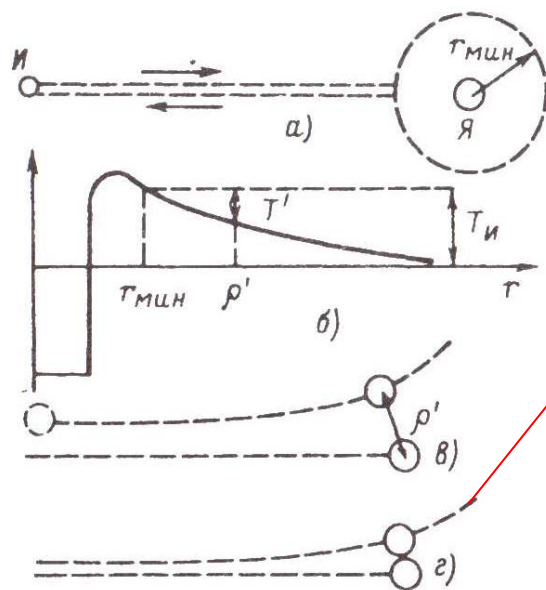
Из соотношения неопределённостей Гейзенберга можно оценить *размер иона «вдоль импульса»*

Сравнительно малые значения длины волны иона позволяют пользоваться для описания столкновения тяжёлого иона с ядром представлениями классической механики

Если энергия иона превышает кулоновский барьер ( $T_{\text{и}} \geq B_{\text{к}}$ ), то наряду с электромагнитным становится возможным и ядерное взаимодействие. При этом если энергия  $T_{\text{и}} = \text{const}$ , то все определяется параметром удара  $\rho'$ , т. е.  $l$ .

а) Для  $\rho' > R_{\text{н}} + R_{\text{я}}$ , т. е. больших  $l$ , будет наблюдаться только электромагнитное взаимодействие.

б) Для  $\rho' = R_{\text{н}} + R_{\text{я}}$  наряду с электромагнитным становится возможным также и ядерное взаимодействие (при касательном контакте).



$$\rho' = R_{\text{я}} + R_{\text{н}} \quad B_{\text{к}}(\rho') = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{н}}}$$

$$l_{gr} = \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{н}}}{\hbar} \sqrt{2M \left( T - \frac{Z_{\text{я}} Z_{\text{н}} e^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{н}}} \right)}$$

$$T_{\text{н}} \gg B_{\text{к}} \quad l_{gr} \gg 1$$

$$T_{\text{н}} = B_{\text{к}} \quad l_{gr} = 0$$

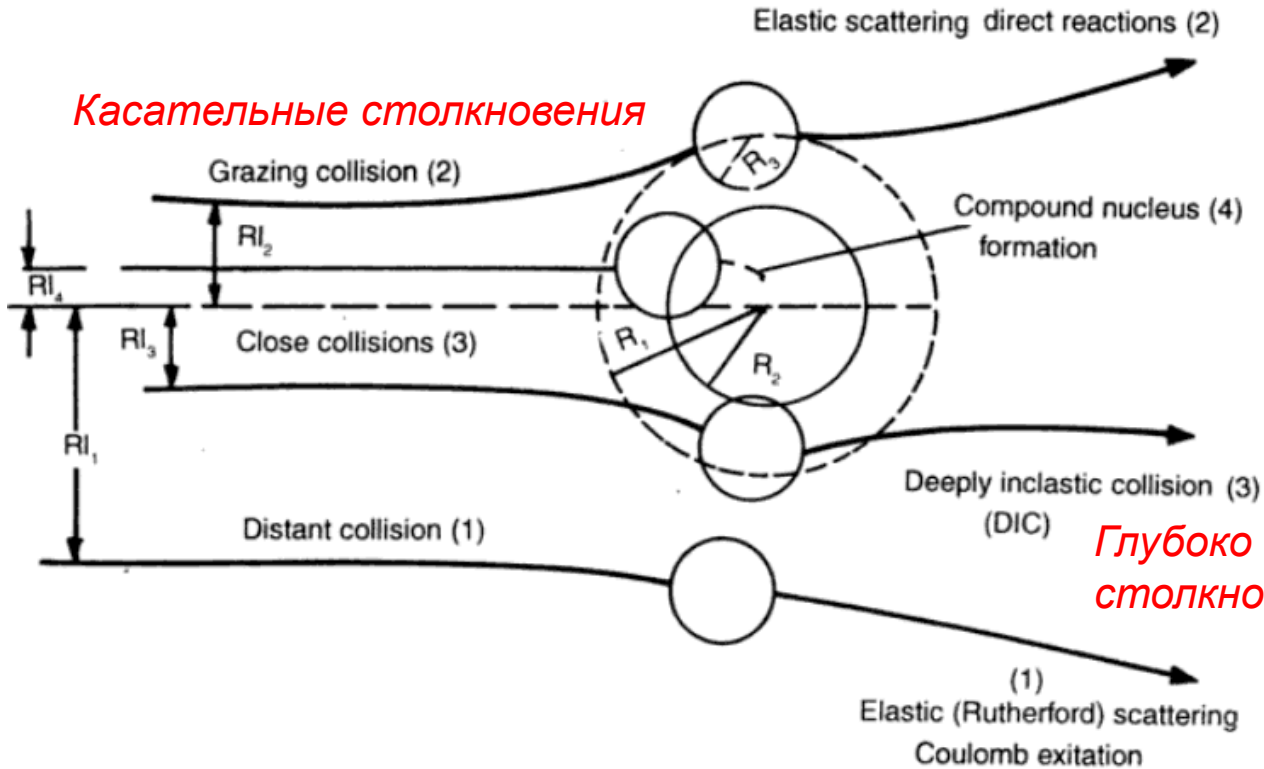
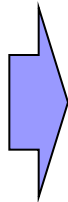
## Возможные механизмы взаимодействия иона с ядром

Классификация реакций тяжёлых ионов с ядрами основана на параметре столкновения

Угловой момент  
 $l\hbar = pR_1 = k\hbar R_1$

*Касательные столкновения*

*Лобовые столкновения*



*Глубоко неупругие столкновения*

*Дальние столкновения  
 Кулоновское возбуждение*

Полное сечение

$$\sigma_T = \pi R^2 = \frac{\pi}{k^2} l^2 = \pi \lambda^2 l^2$$

*Упругое рассеяние* чаще происходит при краевых соударениях

## 2. КУЛОНОВСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ЯДЕР

**Кулоновское возбуждение ядерных уровней** возможно в столкновениях, в которых проявляются **только электромагнитные взаимодействия** тяжёлого иона с ядром, т.е. либо при больших параметрах столкновений ( $\rho > R$ ), либо при кинетической энергии иона, меньшей высоты кулоновского барьера ядра ( $T_u < B_K$ )

В системе центра масс 
$$B_K = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_1 + R_2}$$

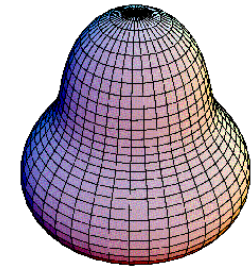
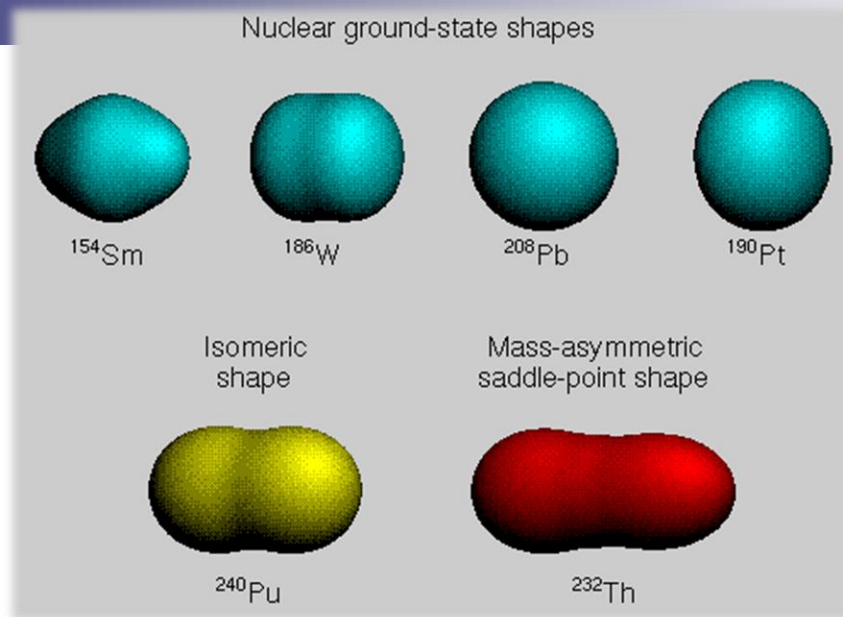
В лабораторной системе 
$$B_K^{\text{лаб}} = \frac{M + m}{M} B_K$$

Сечение кулоновского возбуждения быстро растёт с ростом заряда ядра.

При больших углах рассеяния ( $\theta > 90^\circ$ ) становятся заметным многократное кулоновское возбуждение

В случае тяжёлых ионов, как  $^{136}\text{Xe}$  ( $Z = 54$ ) или  $^{208}\text{Pb}$  ( $Z = 82$ ), становится значительным сечение возбуждения вращательных уровней ядра.

В ядрах  $A = 150 - 190$ ,  $A > 230$  наблюдаются необычайно большие квадрупольные моменты, которые означают, что форма этих ядер приобретает форму сплюснутого эллипсоида с отношением большой и малой полуосей  $a / b = 1.2 - 1.3$ .



На основании опытов по кулоновскому возбуждению было установлено, что ядра с  **$A = 20 - 27$** ,  **$A = 150 - 180$**  и  **$A > 220$**  имеют форму вытянутого эллипсоида с отношением большой и малой полуосей около **1,3**.

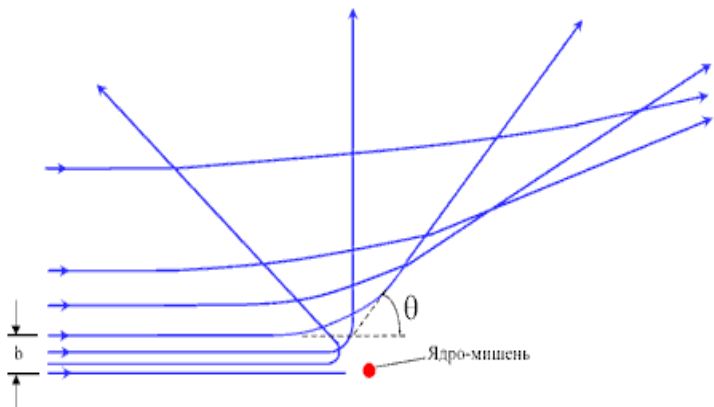
Небольшая область ядер с  **$A = 180 - 190$**  (изотопы Pt и Hg) соответствует сплюснутому эллипсоиду приблизительно с тем же эксцентриситетом.

Ядра, лежащие вне указанных областей, рассматриваются как сферические, хотя их форма может отличаться от идеальной сферы (они имеют, хотя и сравнительно небольшие, но вполне заметные электрические квадрупольные моменты).

Наряду с квадрупольными в ядрах проявляются и колебания более высоких порядков. В первую очередь это октупольные колебания, в которых ядро принимает грушевидную форму.

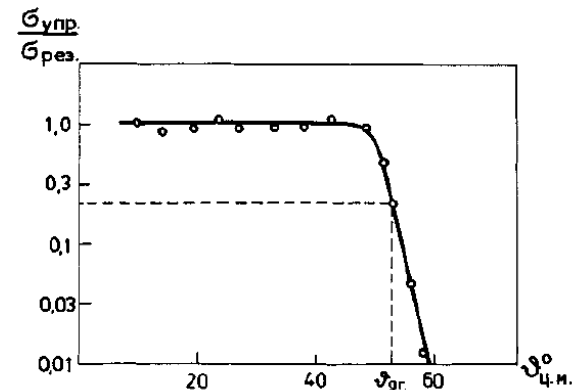
### 3. УПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ

**У.Р.** происходит чаще всего при касательных (*grazing*) соударениях иона с ядром.



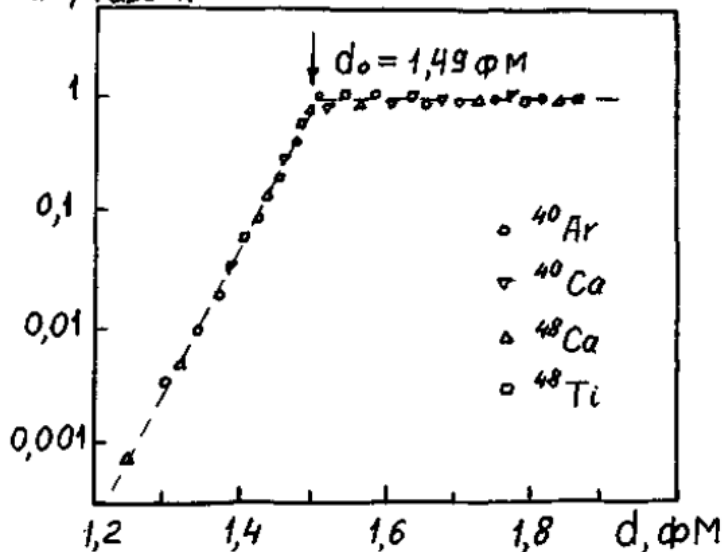
Отношение сечений  
упругого рассеяния к  
резерфордовскому

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4T} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \theta/2}$$



Зависимость отношения сечений упругого рассеяния к резерфордовскому от параметра наибольшего сближения двух ядер  $d$

$$\frac{d\sigma/d\Omega}{(d\sigma/d\Omega)_R}$$



$$\left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{el} / \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_R = 1 - P_{absorb}(d)$$

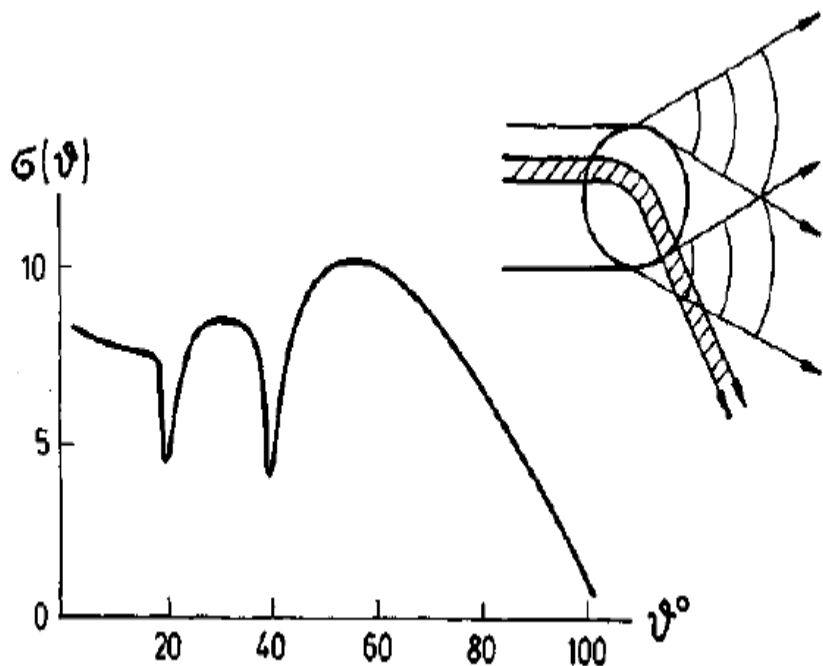
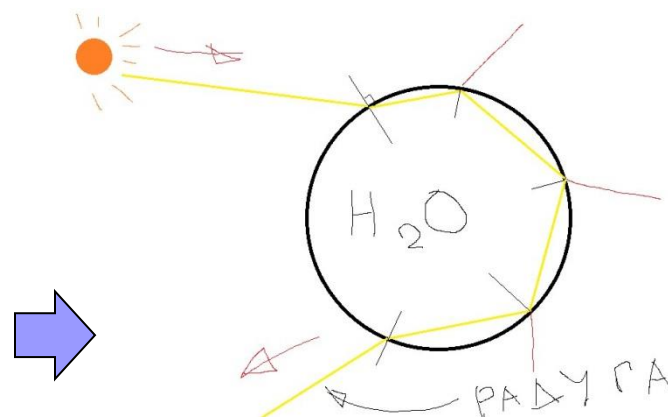
$$\text{где } P_{absorb} = \begin{cases} 0, & \text{для } d > d_0; \\ 1 - \exp\left(-\frac{d-d_0}{\Delta}\right), & \text{для } d < d_0. \end{cases}$$

## Радужное рассеяние

**Радужное рассеяние** возникает в том случае, когда притягивающий ядерный потенциал действует как собирающая линза и отклоняет рассеиваемые ионы на отрицательные углы.

**Р.р.** – ядерный аналог оптического эффекта - радуги

Радужная траектория иона соответствует глубокому проникновению сталкивающихся ядер друг в друга.



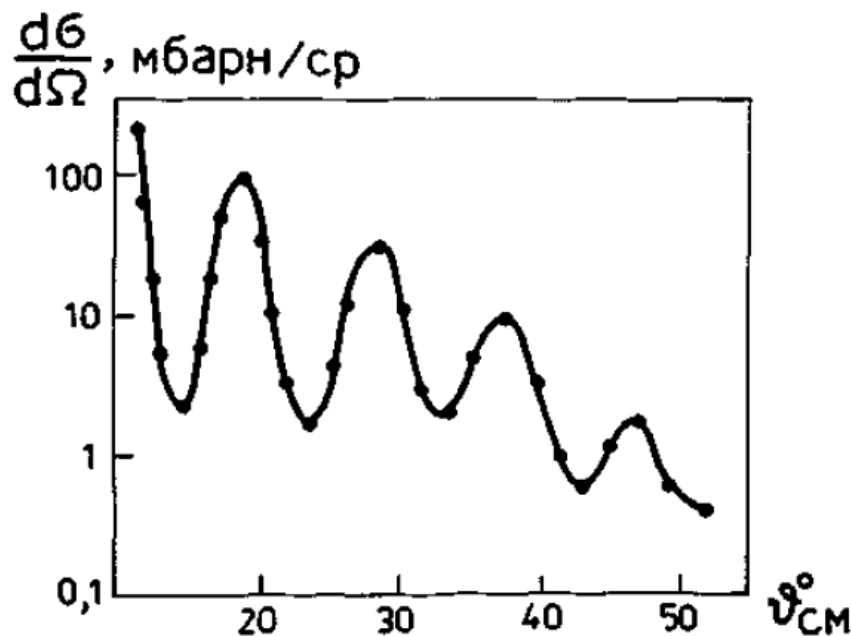
При радужном рассеянии значительная часть траектории иона проходит внутри ядра, поэтому сильное влияние на него оказывает поглощение.

Расстояние наибольшего сближения иона с ядром соответствует точке поворота

**Ядерная радуга проявляется в упругом рассеянии легких ионов на всех мишенях, а в случае ионов тяжелее  $Li$  — на мишенях с  $A \leq 20$  при энергиях более 10 МэВ/нуклон.**

## Дифракция

При взаимодействии относительно *лёгких ядер, когда величина Кулоновского барьера мала по сравнению с энергией падающих ионов* (в случае реакции  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$  величина  $V_{\text{кул}} \approx 10$  МэВ), в *угловом распределении упругого рассеяния* будет наблюдаться дифракция Фраунгофера, которая в оптике возникает, когда расстояние от источника света до экрана бесконечно велико по сравнению с размером отверстия, на котором происходит дифракция



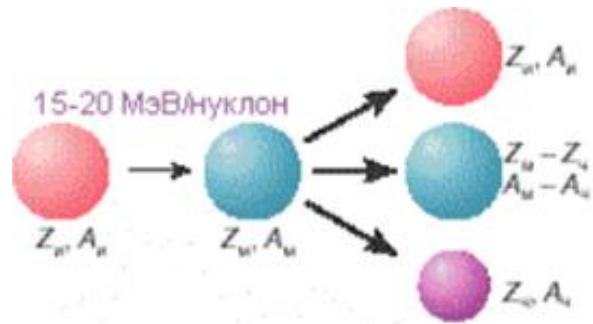
В случае реакции  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$  с энергией в системе ц. м. 78 МэВ два первых максимума расположены при  $\theta_{\text{с.м.}} = 19^\circ$  и  $24^\circ$ .

Зная, что

$$\lambda = \hbar / \sqrt{2\mu E_{\text{ц.м.}}} \approx 0.2 \text{ фм}$$

можно получить  $R(\text{C}+\text{O}) \approx 7 \text{ фм}$ .

## 4. РЕАКЦИИ ПРЯМОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ



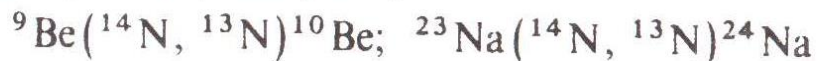
**Прямые реакции** — это реакции, которые протекают при касательных столкновениях ядер мишени и бомбардирующей частицы за времена, на несколько порядков меньшие, чем время установления статистического равновесия в случае образования составного ядра.

### Реакции передачи малого числа нуклонов

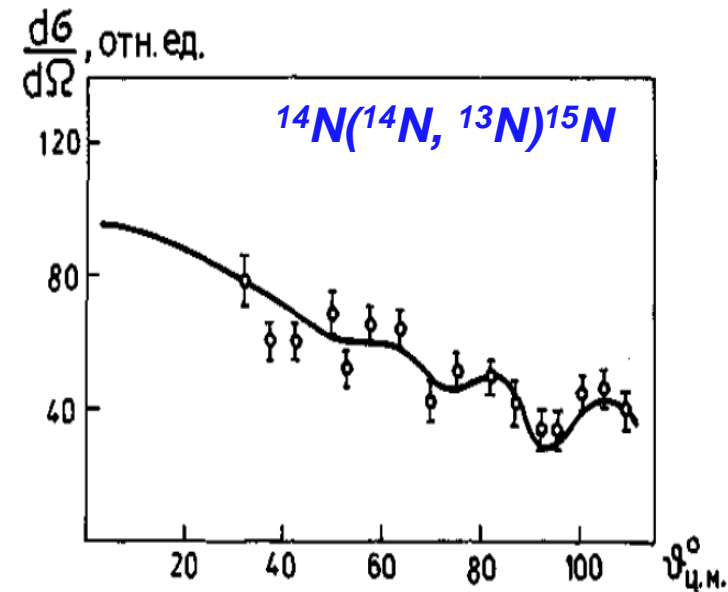
«Туннельная» теория передачи одного нуклона позволяет получать информацию о:

- плотности нуклонов на поверхности ядра эмиттера;
- вероятности проникновения нуклонной волны через отрицательную область кинетической энергии двух ядер;
- плотности ядер на поверхности ядра рецептора.

При касании ядер чаще всего наблюдаются реакции с передачей одного нуклона, например



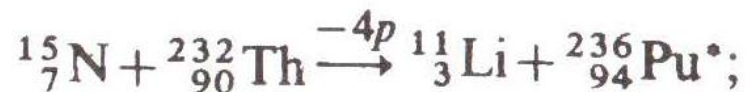
На рисунке показано угловое распределение реакции передачи одного нуклона в реакции  ${}^{14}\text{N}({}^{14}\text{N}, {}^{13}\text{N}){}^{15}\text{N}$  при энергии 12 МэВ в л.с..



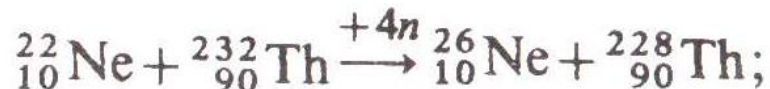
## Реакции передачи нескольких нуклонов

Если  $l < l_{gr}$ , то число передаваемых нуклонов возрастает, в результате чего образуется много различных ядер-продуктов. Приведем несколько примеров реакций передачи, в которых участвуют 4—6 нуклонов:

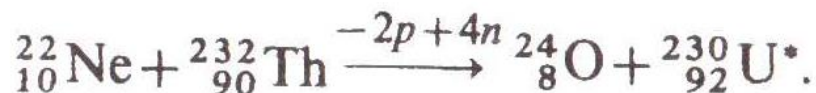
срыв четырех  $p$



подхват четырех  $n$



обмен двух  $p$  на четыре  $n$



Эти реакции приводят к образованию **лёгких нейтроноизбыточных ядер**.

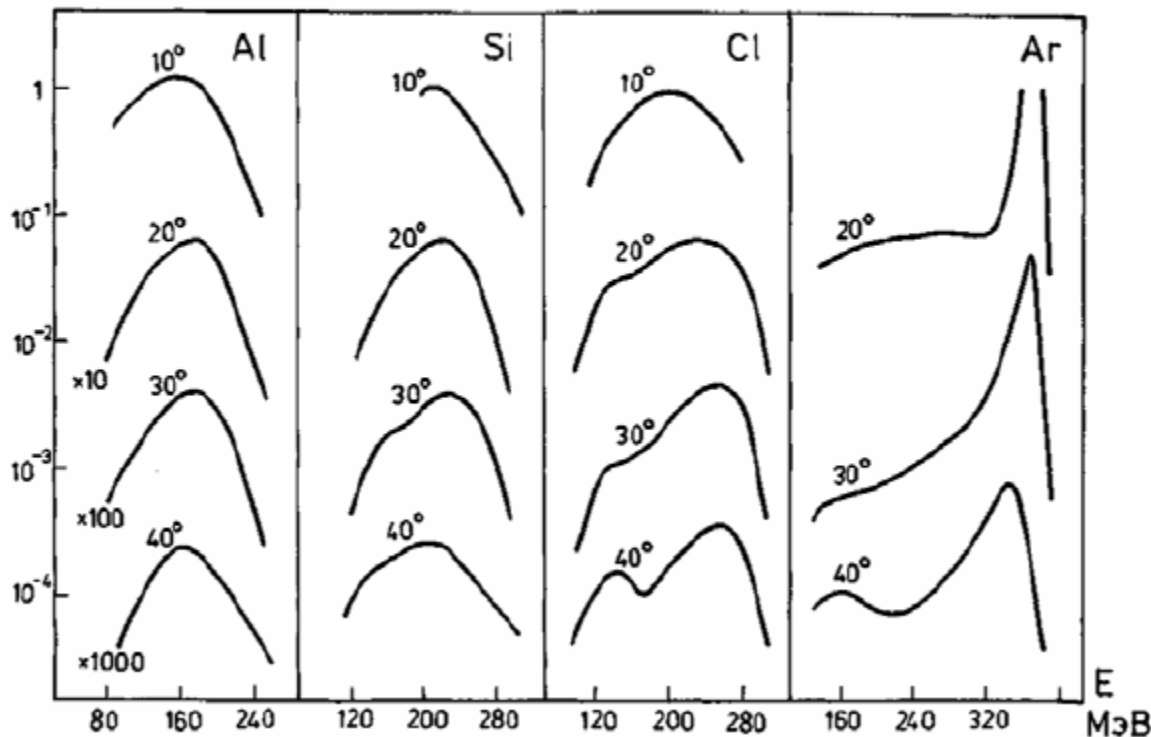
Изучение нейтроноизбыточных ядер привело к открытию запаздывающих нейтронов, 2-, 3-нейтронной и тритиевой радиоактивности

## Ядерные реакции глубоко неупругих передач

Этот класс реакций впервые был обнаружен в Дубне в конце 1960-х годов при изучении энергетических спектров лёгких продуктов реакций при  $l < l_{gr}$

Характерная особенность **г.н.п.** -- образование низкоэнергетических продуктов реакций. Этот тип реакции **доминирует при взаимодействии тяжёлых ионов с массой  $A > 30$ .**

$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega}$ , мбарн/МэВ·ср

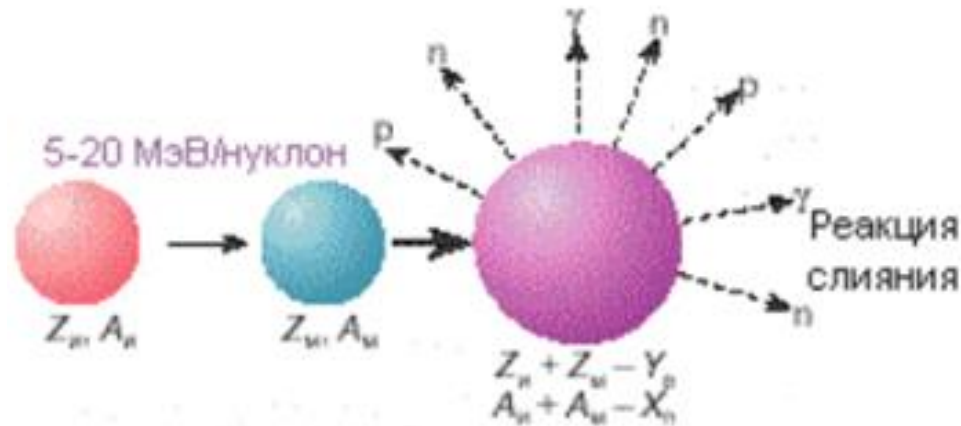


Энергетические спектры продуктов реакции  $^{232}\text{Th} + ^{40}\text{Ar}$  при различных углах

Характерные особенности энергетических спектров глубоко неупругих передач — **близость наиболее вероятной энергии продуктов реакции к выходному кулоновскому барьеру и независимость от энергии бомбардирующих ионов.**

При передаче небольшого числа **нуклонов в угловом распределении имеется максимум в районе угла касательного столкновения.**

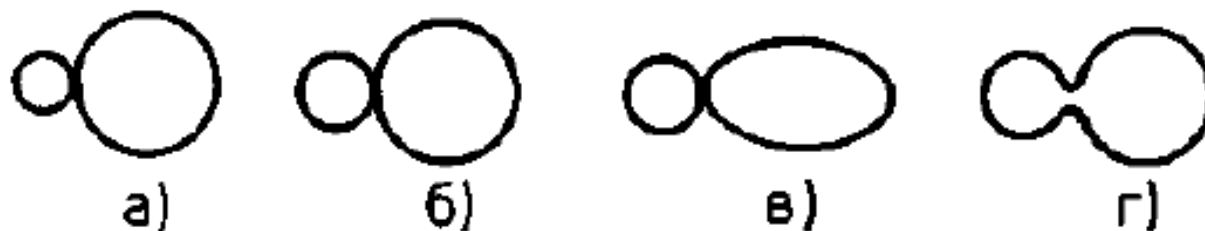
## 5. РЕАКЦИИ СЛИЯНИЯ ЯДЕР



При реакции слияния имеет место **образование составного или компаунд-ядра**, распад которого происходит независимо от способа его образования за времена  $10^{-21}-10^{-20}$  с

Реакции слияния тяжелых ионов и ядра мишени представляют один из вероятных каналов взаимодействия в диапазоне энергии, который простирается от  $E_{lab} \sim B_{Coul} \sim 2-5$  МэВ/нуклон до  $E_{lab} \sim E_F \sim 30$  МэВ/нуклон и позволяет получать **нейтронодефицитные ядра**

**При распаде компаунд-ядер удастся получить метастабильные состояния холодных сильно вращающихся ядер, отвечающие аномальным деформациям.** Так были открыты супердеформированные ядра с необычно большим отношением большой и малой осей 2:1.



Конфигурация систем, образующихся при столкновениях различных ядер с ядром мишени с  $A=125$ : а) «снаряд» - протон; б), в), г) «снаряд» - ядро  $A=25$

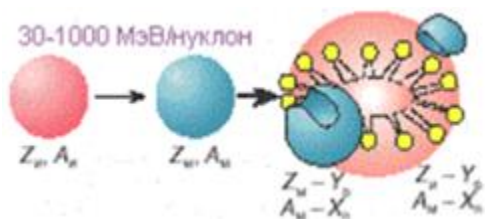
Реакции слияния представляют источник получения и исследования разнообразных экзотических ядер: ядер, далеких от линии  $\beta$ -стабильности, испытывающих новые виды радиоактивного распада (протонный или двухпротонный распад, запаздывающее деление, эмиссия тяжелых кластеров), новых ядерных изомеров, новых трансурановых нуклидов.

При распаде компаунд-ядер  $A \leq 150$  происходит испускание нейтронов или частиц

Компаунд-ядра  $A > 200$  чаще всего распадаются на два осколка

С применением реакций слияния на пучках тяжёлых ионов с различными атомными номерами за последние 30 лет были открыты новые химические элементы с порядковыми номерами **102 – 118**.

# 6. ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ



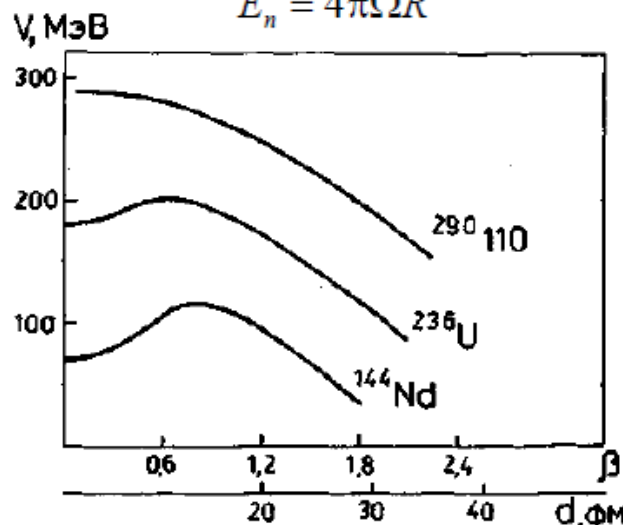
*Деление возбуждённых ядер на два примерно равных по массе осколка характерно для тяжёлых ядер ( $Z > 92$ ). Модель - разрыв заряженной капли несжимаемой жидкости под действием*

энергии кулоновского расталкивания входящих в состав ядра протонов

$$E_k = \frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{R}$$

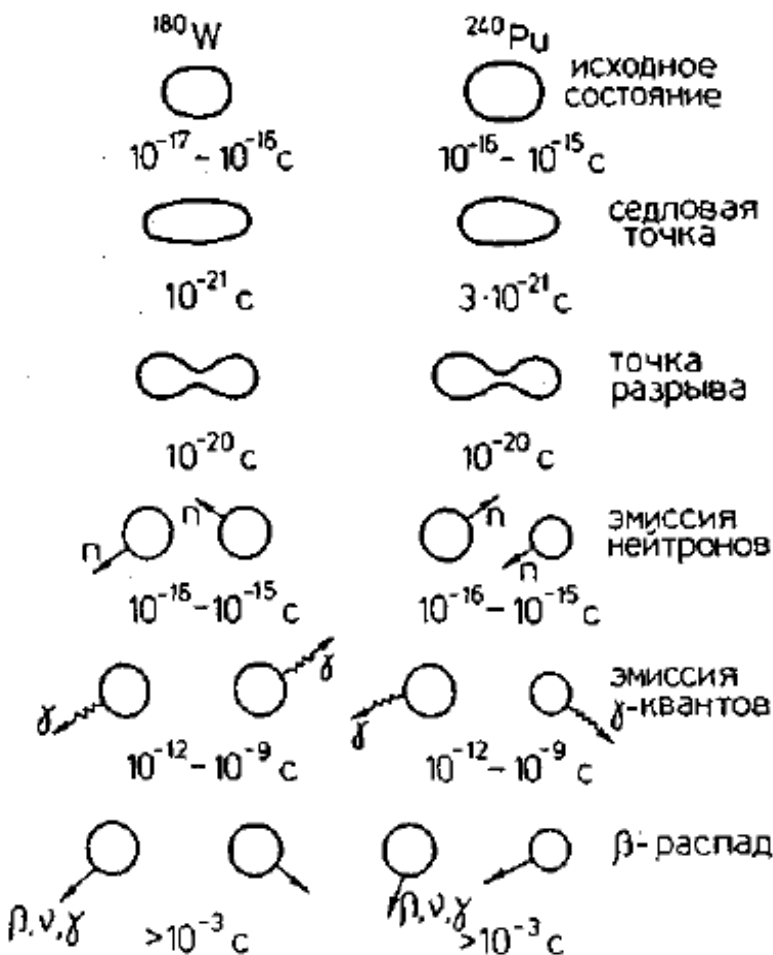
с учётом энергии поверхностного натяжения

$$E_n = 4\pi\Omega R^2$$



Зависимость потенциальной энергии ядра от параметра деформации  $\beta$  или расстояния между осколками  $d$ .

$$\beta = \frac{2}{3} \frac{a-b}{\sqrt[3]{ab^2}}$$



## Особенности деления ядер тяжёлыми ионами

### 1. Высокая энергия возбуждения составного ядра.

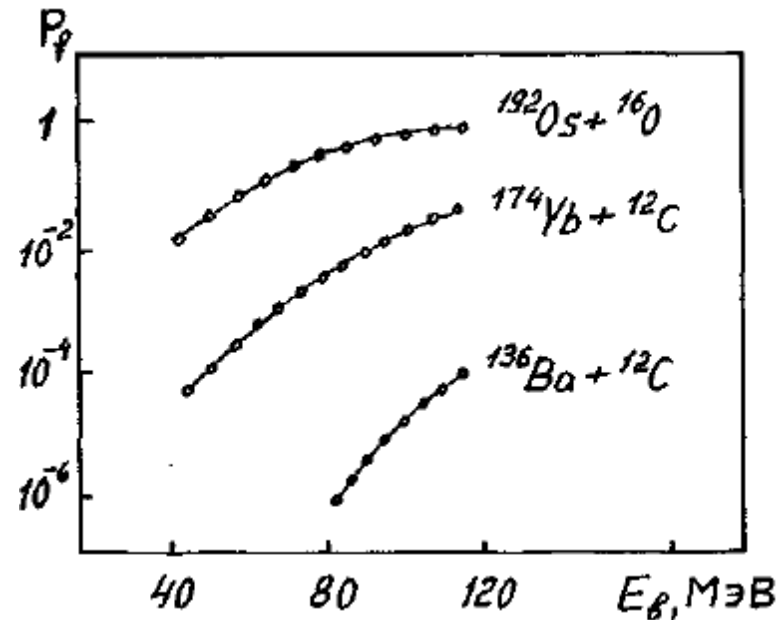
Например, в реакции  $^{40}\text{Ar} + ^{191}\text{Ir}$  при энергии ионов аргона 400 МэВ образуется составное ядро  $^{231}\text{Pa}$  с энергией возбуждения 220 МэВ.

### 2. Большой момент, вносимый в ядро ионом.

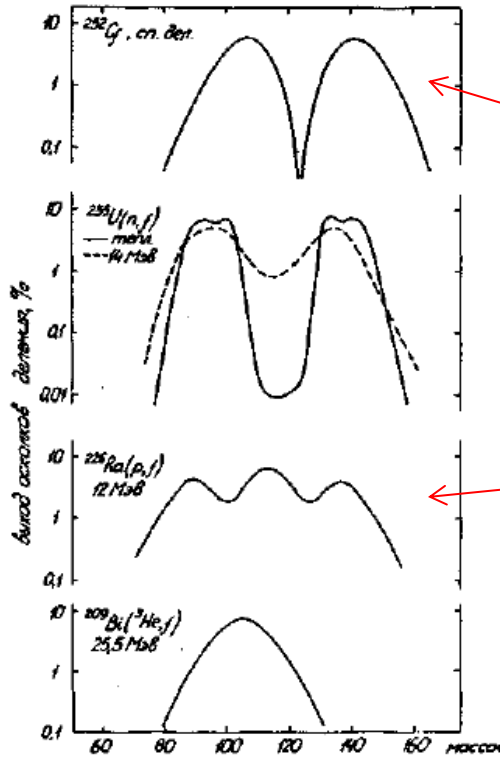
При касательных столкновениях величина углового момента может превышать  $100 \hbar$ . С ростом углового момента ядра происходит уменьшение высоты барьера деления и, следовательно, увеличение вероятности деления.

### 3. Образование ядер трансурановых элементов, а также ядер с аномальным соотношением протонов и нейтронов

Зависимость вероятности деления ядра от его энергии возбуждения в реакциях с тяжёлыми ионами



## Превращения энергии и энергия частиц при делении



Реакция деления и энергия частиц	Энергия, МэВ					
	$E_{кин.}$	$E_{возб.}$		$E_{расп.}$		
		f	n	$\gamma$	$\beta$	$\gamma$
$^{256}\text{Fm, s.f.}$	198	32	8	8	10	12
$^{252}\text{Cf, s.f.}$	186	31	7	7	7	10
$^{239}\text{Pu} + n, \text{тепл.}$	179	21	7	6	6	9
$^{238}\text{U} + n, 14,7 \text{ МэВ}$	172	22	7	7	7	10
$^{233}\text{U} + \alpha, 30 \text{ МэВ}$	176	36	8	3	4	5
$^{226}\text{Ra} + p, 12 \text{ МэВ}$	159	20	6	5	5	7
$^{209}\text{Bi} + ^{22}\text{Ne}, 175 \text{ МэВ}$	171	90	12	3	4	5
$^{197}\text{Au} + ^{16}\text{O}, 136 \text{ МэВ}$	156	80	12	3	4	5

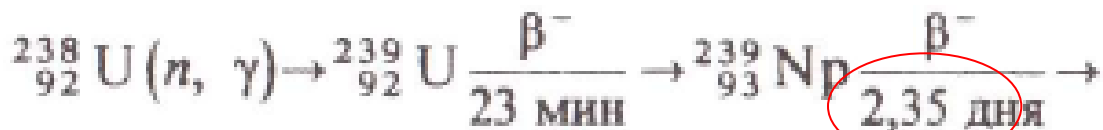
В случае слабовозбужденных ядер основная доля выделяющейся энергии (более 70%) приходится на кинетическую энергию осколков, которая увеличивается с ростом Z и A делящегося ядра.

С увеличением энергии частиц, вызывающих деление, кинетическая энергия осколков практически не меняется, но растет их энергия возбуждения, а в ней та ее часть, которая связана с испусканием мгновенных нейтронов. При этом энергия, уносимая  $\gamma$ -квантами, растет сравнительно мало. В то же время происходит уменьшение энергии, связанное с радиоактивным распадом осколков (эта энергия уносится электронами, нейтрино и  $\gamma$ -квантами). Последнее связано с тем, что испарение нейтронов из возбужденных осколков приближает их к долине  $\beta$ -стабильности, и длина цепочки последовательных  $\beta$ -распадов уменьшается.

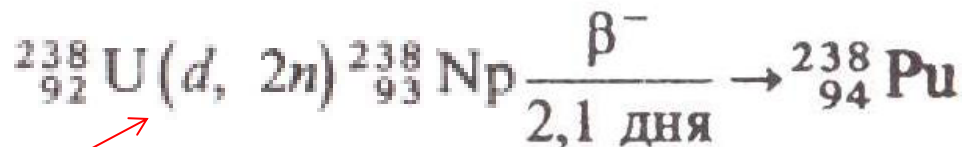
## 7. СИНТЕЗ НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Первые элементы тяжелее урана (*трансураны*) были синтезированы в реакциях захвата нейтронов ядрами изотопа урана  $^{238}\text{U}$ :

**Нептуний ( $^{239}\text{Np}$ )** в 1940 г. синтезировали Э.Макмиллан (Н.п.1951) и Ф.Эйбелсон (Беркли), облучая уран нейтронами, полученными на 94-см циклотроне путем бомбардировки Ве ионами дейтерия

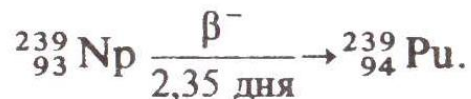


**Плутоний ( $^{238}\text{Pu}$ )**. December 14, 1940 by Dr. Glenn T. Seaborg (Nob.Pr.1951), Joseph W. Kennedy, Edwin M. McMillan (N.P. 1951), and Arthur C. Wahl by deuteron bombardment of in the 60-inch cyclotron at the University of California, Berkeley.



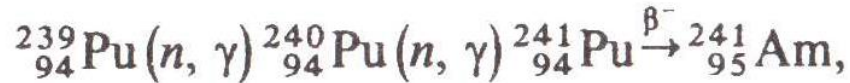
16 МэВ

Второй изотоп плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$  был открыт в 1941 г. Сиборгом и др. в качестве продукта  $\beta$ -превращения другого изотопа нептуния:

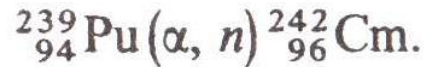


Z>94

В 1944 г. были открыты америций  ${}_{95}\text{Am}$ , названный в честь Америки, и кюрий  ${}_{96}\text{Cm}$  — в честь Марии и Пьера Кюри. Америций был впервые получен в ядерном реакторе, где идет реакция



а кюрий — в реакции



Пионерские работы Г. Сиборга и его коллег, проведенные в **1940–1953** гг. в Радиационной национальной лаборатории (Беркли, США), привели к открытию **восьми искусственных элементов с  $Z = 93–100$**  при этом наиболее тяжелый **изотоп  ${}^{257}\text{Fm}$  с  $T_{1/2} \sim 100$  дней**.

Дальнейшее продвижение в область более тяжелых ядер было практически невозможно из-за исключительно короткого периода полураспада следующего изотопа  **${}^{258}\text{Fm}$  ( $T_{1/2} \sim 0.3$  мс)**. Попытки обойти это ограничение в импульсных потоках нейтронов большой мощности, возникающих при ядерном взрыве, не дали желаемых результатов.

Элементы **тяжелее  $\text{Fm}$  ( $Z=100$ )** были синтезированы в реакциях с ускоренными **тяжелыми ионами**, когда в ядро-мишень вносится комплекс протонов и нейтронов.

В настоящее время эксперименты по синтезу новых трансурановых элементов проводятся в ускорительных научных центрах США (Беркли и Окридж), Германии (Дармштадт), **России (Дубна)**, Японии (Вако, РИКЕН).

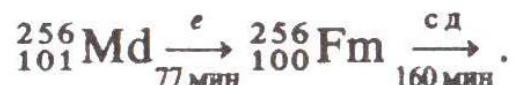
Z>100

101	<b>Md</b>
Менделевий Mendelevium	
$(Rn)5f^{13}6d^07s^2$	

В 1965 г. группа Гиорсо (США) открыла 101-й элемент — менделевий, названный в честь великого русского химика Д. И. Менделеева. Менделевий был открыт в реакции



которая идет под действием очень интенсивного потока  $\alpha$ -частиц с энергией 41 МэВ. Идентификация  ${}_{101}\text{Md}$  была сделана по известным свойствам  ${}^{256}_{100}\text{Fm}$ , который образуется в процессе  $e$ -захвата  ${}^{256}_{101}\text{Md}$ :



Продвижение в область элементов **тяжелее 106** стало возможным после открытия в 1974 г. реакций **«холодного слияния»**.

В этих реакциях в качестве мишенного материала используются **«магические»** ядра стабильных изотопов :  ${}^{208}\text{Pb}$  ( $Z = 82$ ,  $N = 126$ ) или  ${}^{209}\text{Bi}$  ( $Z = 83$ ,  $N = 126$ ), которые бомбардируются ионами тяжелее аргона.

В процессе холодного слияния высокая энергия связи нуклонов в «магическом» ядре-мишени приводит к поглощению энергии при перестройке двух взаимодействующих ядер в тяжёлое ядро суммарной массы.

**Реакции холодного слияния массивных ядер были успешно использованы для синтеза шести новых элементов, от 107-го до 112-го** (П. Армбрустер, З. Хофман, Г. Мюнценберг и др.) в Национальном ядерно-физическом центре GSI в Дармштадте (Германия).

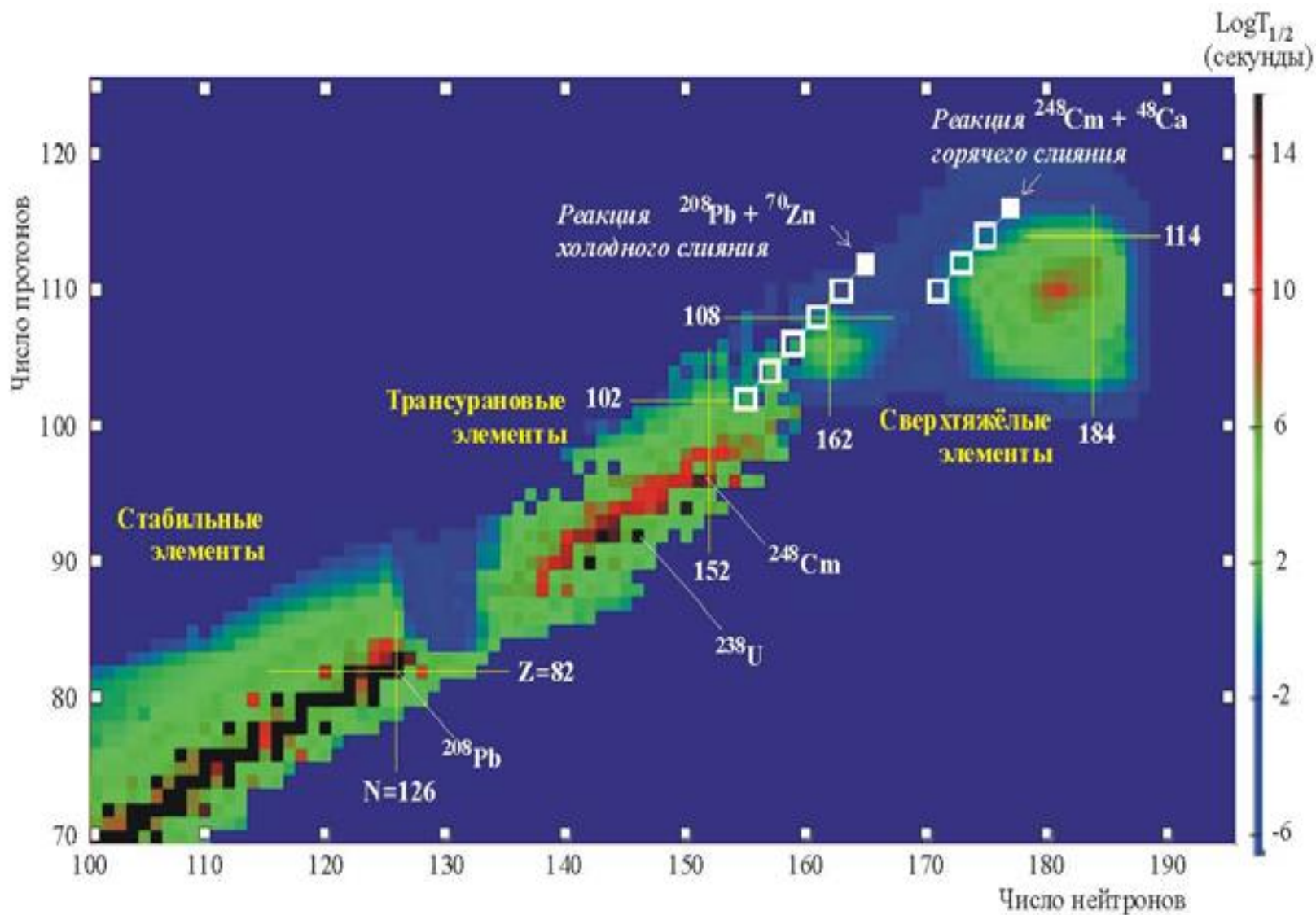
С дальнейшим увеличением атомного заряда ионов вероятность их слияния с ядрами мишени  $^{208}\text{Pb}$  или  $^{209}\text{Bi}$  сильно уменьшается из-за возрастания кулоновских сил отталкивания

Исследования свойств трансурановых элементов с  $Z > 104$  показали, что их **времена жизни по отношению к спонтанному делению уменьшаются значительно медленнее, чем это следует из классических представлений.**

Теоретические расчёты, учитывающие оболочечную структуру ядер, объясняют это и предсказывают **существование области стабильных тяжёлых ядер вблизи замкнутых оболочек из 114 протонов и 184 нейтронов.**

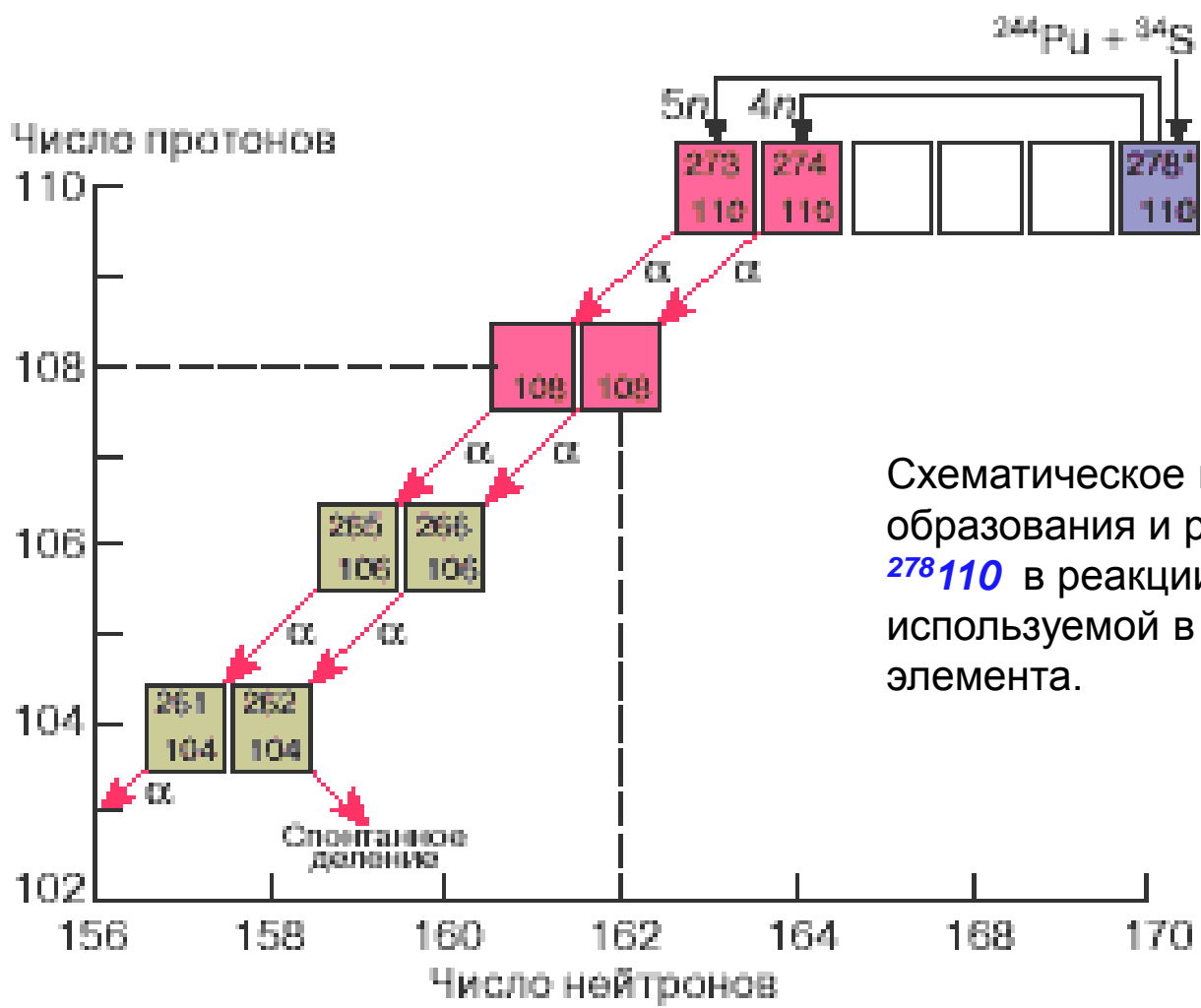
Последние расчёты показывают также повышение стабильности ядер в районе  **$N=162$** .





### Карта тяжелых нуклидов

«Острова стабильности» следующие за «полуостровом» тория, урана и трансурановых элементов — предсказания микроскопической теории ядра.



$110 5f^{14}6d^97s^2$

**Ds**

Darmstadtium  
(269)

Схематическое представление образования и распада составного ядра  $^{278}110$  в реакции слияния  $^{244}\text{Pu} + ^{34}\text{S}$ , используемой в Дубне для синтеза 110-го элемента.

# Таблица Менделеева

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	<b>H</b> Водород 1.00794	<b>Ds</b> Дармштадтий (271) 2-8-18-32-32-17-1										<b>He</b> Гелий 4.002602						
2	<b>Li</b> Литий 6.941	<b>Be</b> Бериллий 9.012182											<b>B</b> Бор 10.811	<b>C</b> Углерод 12.0107	<b>N</b> Азот 14.0067	<b>O</b> Кислород 15.9994	<b>F</b> Фтор 18.9984032	<b>Ne</b> Неон 20.1797
3	<b>Na</b> Натрий 22.98976928	<b>Mg</b> Магний 24.3050											<b>Al</b> Алюминий 26.9815386	<b>Si</b> Кремний 28.0855	<b>P</b> Фосфор 30.973762	<b>S</b> Сера 32.065	<b>Cl</b> Хлор 35.453	<b>Ar</b> Аргон 39.948
4	<b>K</b> Калий 39.0983	<b>Ca</b> Кальций 40.078	<b>Sc</b> Скандий 44.955912	<b>Ti</b> Титан 47.867	<b>V</b> Ванадий 50.9415	<b>Cr</b> Хром 51.9961	<b>Mn</b> Марганец 54.938045	<b>Fe</b> Железо 55.845	<b>Co</b> Кобальт 58.933195	<b>Ni</b> Никель 58.6934	<b>Cu</b> Медь 63.546	<b>Zn</b> Цинк 65.38	<b>Ga</b> Галлий 69.723	<b>Ge</b> Германий 72.64	<b>As</b> Мышьяк 74.92160	<b>Se</b> Селен 78.96	<b>Br</b> Бром 79.904	<b>Kr</b> Криптон 83.796
5	<b>Rb</b> Рубидий 85.4678	<b>Sr</b> Стронций 87.62	<b>Y</b> Иттрий 88.90585	<b>Zr</b> Цирконий 91.224	<b>Nb</b> Нобий 92.90638	<b>Mo</b> Молибден 95.96	<b>Tc</b> Технеций (97.9072)	<b>Ru</b> Рутений 101.07	<b>Rh</b> Родий 102.90550	<b>Pd</b> Палладий 106.42	<b>Ag</b> Серебро 107.8682	<b>Cd</b> Кадмий 112.411	<b>In</b> Индий 114.818	<b>Sn</b> Олово 118.710	<b>Sb</b> Сурьма 121.760	<b>Te</b> Теллур 127.60	<b>I</b> Йод 126.90447	<b>Xe</b> Ксенон 131.293
6	<b>Cs</b> Цезий 132.9054519	<b>Ba</b> Барий 137.327	<b>La-Lu</b>	<b>Hf</b> Гафний 178.49	<b>Ta</b> Тантал 180.94788	<b>W</b> Вольфрам 183.84	<b>Re</b> Рений 186.207	<b>Os</b> Осмий 190.23	<b>Ir</b> Иридий 192.2217	<b>Pt</b> Платина 195.084	<b>Au</b> Золото 196.966569	<b>Hg</b> Ртуть 200.59	<b>Tl</b> Таллий 204.3833	<b>Pb</b> Свинец 207.2	<b>Bi</b> Висмут 208.98040	<b>Po</b> Полоний (209.9824)	<b>At</b> Астат (209.9871)	<b>Rn</b> Радон (222.0176)
7	<b>Fr</b> Франций (223)	<b>Ra</b> Радий (226)	<b>Ac-Lr</b>	<b>Rf</b> Резерфордий (261)	<b>Db</b> Дубний (262)	<b>Sg</b> Сиборгий (266)	<b>Bh</b> Борий (264)	<b>Hs</b> Хассий (277)	<b>Mt</b> Митнерий (268)	<b>Ds</b> Дармштадтий (271)	<b>Rg</b> Рентгений (272)	<b>Cn</b> Коперниций (285)	<b>Uut</b> Унунтрий (284)	<b>Fl</b> Флеровий (289)	<b>Uup</b> Унунпентадий (288)	<b>Lv</b> Ливерморий (292)	<b>Uus</b> Унунсептдий (294)	<b>Uuo</b> Унуноктдий (294)

Для элементов, не имеющих стабильных изотопов, в скобках указывается масса изотопа с наибольшим периодом полураспада.

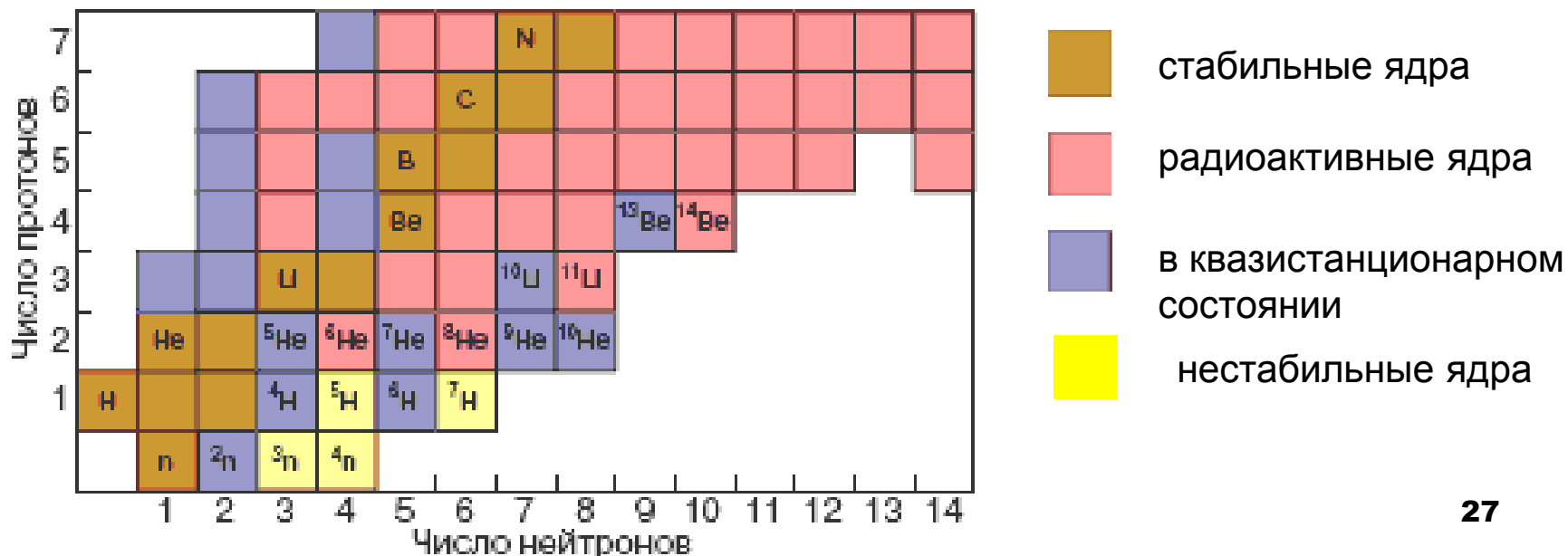
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
<b>La</b> Лантан 138.90547	<b>Ce</b> Церий 140.116	<b>Pr</b> Прозердий 140.90765	<b>Nd</b> Неодим 144.242	<b>Pm</b> Прометий (145)	<b>Sm</b> Самарий 150.36	<b>Eu</b> Европий 151.964	<b>Gd</b> Гадолиний 157.25	<b>Tb</b> Тербий 158.92535	<b>Dy</b> Диспрозий 162.5	<b>Ho</b> Гольмий 164.93032	<b>Er</b> Эрбий 167.259	<b>Tm</b> Тулий 168.93421	<b>Yb</b> Иттербий 173.054	<b>Lu</b> Лютеций 174.9668
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
<b>Ac</b> Актиний (227)	<b>Th</b> Торий 232.03806	<b>Pa</b> Протактиний 231.03688	<b>U</b> Уран 238.02891	<b>Np</b> Нептуний (237)	<b>Pu</b> Плутоний (244)	<b>Am</b> Америций (243)	<b>Cm</b> Кюрий (247)	<b>Bk</b> Берклий (247)	<b>Cf</b> Калифорний (251)	<b>Es</b> Эйнштейний (252)	<b>Fm</b> Фермий (257)	<b>Md</b> Менделевий (258)	<b>No</b> Нобелий (259)	<b>Lr</b> Лоуренсий (262)

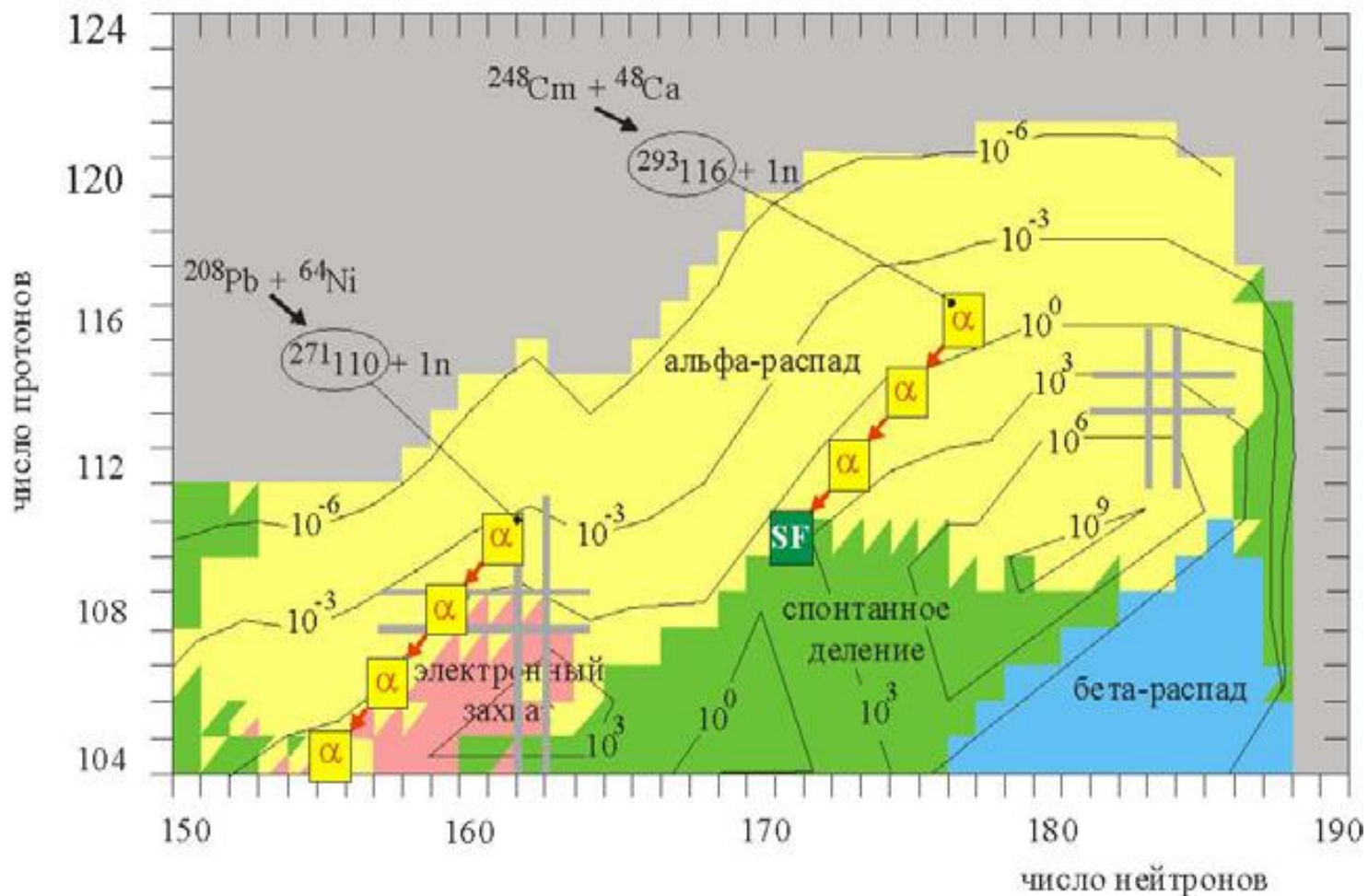
## Границы ядерной стабильности

В настоящее время известно около 2000 нуклидов, многие из которых производятся в больших количествах в промышленном масштабе. Однако задача синтеза новых радиоактивных ядер далеко не исчерпана, так, согласно существующим оценкам, *число ядерно-стабильных изотопов может достигать 5000.*

У стабильных ядер отношение числа нейтронов к числу протонов меняется от  $N/Z = 1.0$  в начале Периодической системы до  $N/Z = 1.6$  в конце. Отклонение от этого отношения понижает устойчивость ядер: вначале они становятся бета-радиоактивными, а потом распадаются с вылетом нуклонов. Появление границы стабильности с увеличением числа протонов связано с ростом вклада кулоновской энергии, в результате чего ядро становится неустойчивым к испусканию протона или спонтанному делению.

Спонтанный вылет нейтронов из ядер ожидается при отношении  $N/Z = 2.0 - 2.2$ .





Теоретические предсказания о типах распада и периодах полураспада изотопов сверхтяжелых элементов с различным числом протонов и нейтронов.

Для изотопа 116-го элемента с массой 293, образующегося в реакции слияния ядер  $^{248}\text{Cm}$  (Кюриум) и  $^{48}\text{Ca}$ , ожидаются три последовательных  $\alpha$ -распада, которые завершаются спонтанным делением правнучатого ядра 110-го элемента с массой 281 (Дармштадтий).

За последние 50 лет Периодическая таблица пополнилась 17 новыми элементами (102 – 118), из которых в ОИЯИ синтезировано 9, в том числе в последние 13 лет 5 наиболее тяжёлых (сверхтяжёлых) элементов Периодической таблицы.

Синтез 114-118 элементов явился первым экспериментальным открытием существования «островов стабильности» в области сверхтяжелых элементов

В 2011 году IUPAC признал за коллаборацией ОИЯИ и Ливерморской национальной лабораторией (США) приоритет в открытии 114 и 116 элементов, которые получили названия: 114 элемент — Flerovium, Fl; 116 элемент — Livermorium, Lv

**Флеровий** в честь Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ, являющейся признанным лидером в области синтеза сверхтяжелых элементов, и ее основателя выдающегося физика академика Георгия Николаевича Флёрва (1913-1990)



Г.Н. Флёрв  
(1913-1990)



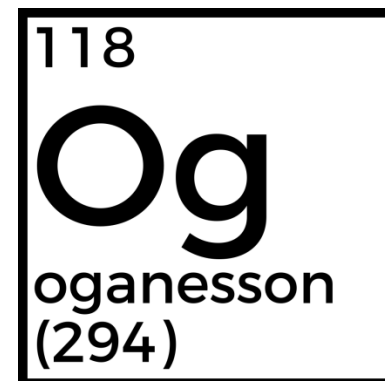
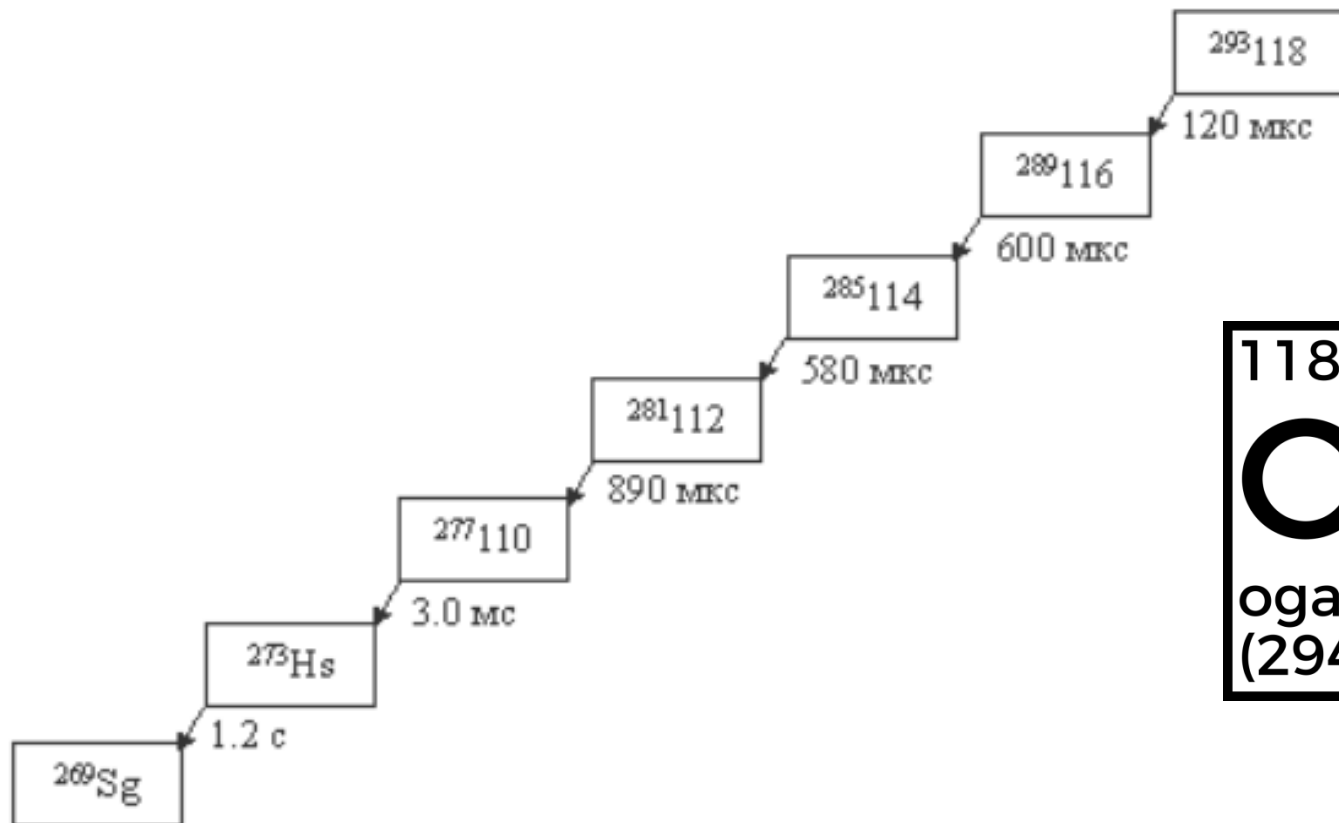


**В официальном пресс-релизе от 08.06.2016 г. IUPAC вынес свое определение по предложенным названиям, а именно:**

**Авторами открытия новых элементов предложены названия:**

- Нихоний и символ Nh для элемента 113,
- Московий и символ Mc для элемента 115,
- Теннессин и символ Ts для элемента 117 и
- **Оганесон и символ Og для элемента 118.**

**Отделение неорганической химии IUPAC рассмотрело и изучило эти предложения и рекомендует принять их. С этого времени отводится пять месяцев на их публичное обсуждение до их официального утверждения Советом IUPAC.**



Цепочка последовательных  $\alpha$ -распадов изотопа  $^{293}\text{118}$

## Юрий Цолакович Оганесян

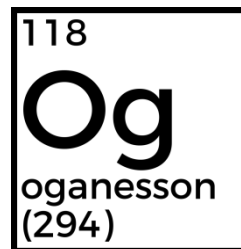
Родился 14 апреля 1933 в г. Ростове-на-Дону.

В 1956 году окончил МИФИ

Доктор физико-математических наук (1970).

Член-корреспондент АН СССР с 1990 г.

Академик РАН с 2003 г. — Отделение физических наук РАН



Председатель Научного совета РАН по прикладной ядерной физике.

Ю. Ц. Оганесян входит в редколлегию и редсоветы журналов «Физика элементарных частиц и атомного ядра», «Europhysics news» и «Ядерная физика». В течение многих лет был членом редакционного совета «J. Phys. G», «Nuclear Physics News International», членом Учёных советов GANIL (Франция) и RIKEN (Япония).

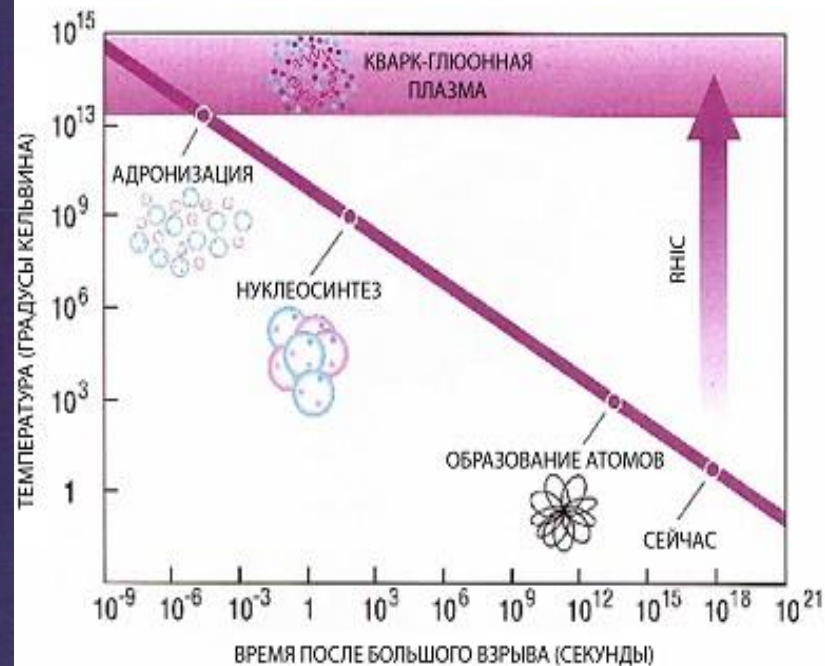
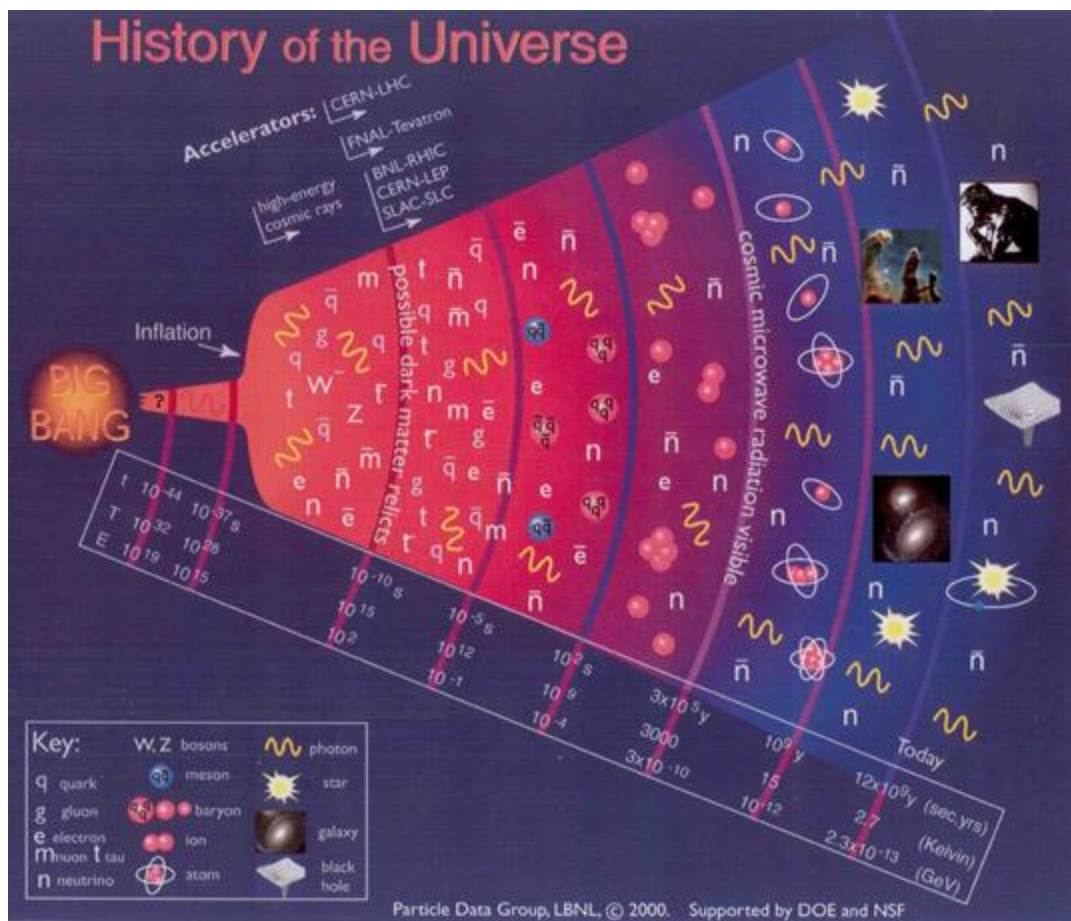
Профессор Университета в Париже и Конан Университета в Кобе (Япония).

Избран иностранным членом Сербской академии наук и искусств (1995 г.), иностранным членом Национальной Академии наук Армении.

Почётный доктор Франкфуртского университета им. Гёте (Германия, 2002 г.), университета в г.Мессина (Италия, 2002 г.).

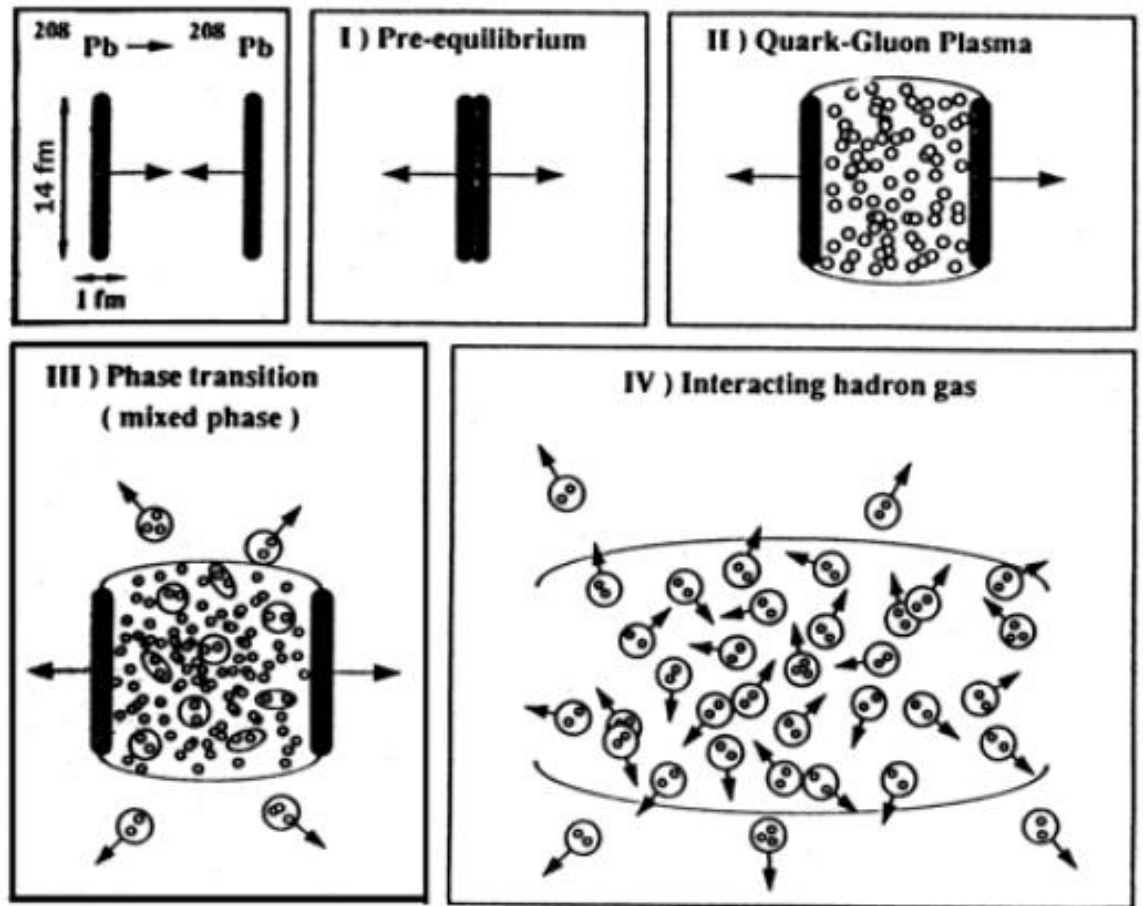
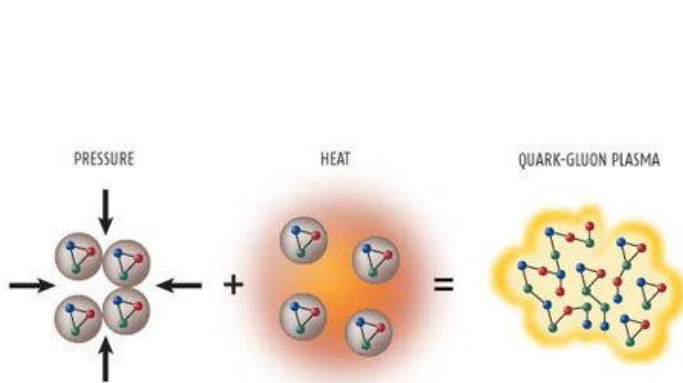
# 8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ ПРИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЯХ

Общепринятой в настоящее время моделью образования Вселенной является образование Вселенной в результате Большого взрыва. В этой модели в интервале времени  $10^{-10}$ – $10^6$  с после Большого взрыва материя существовала в виде **кварк-глюонной плазмы**.

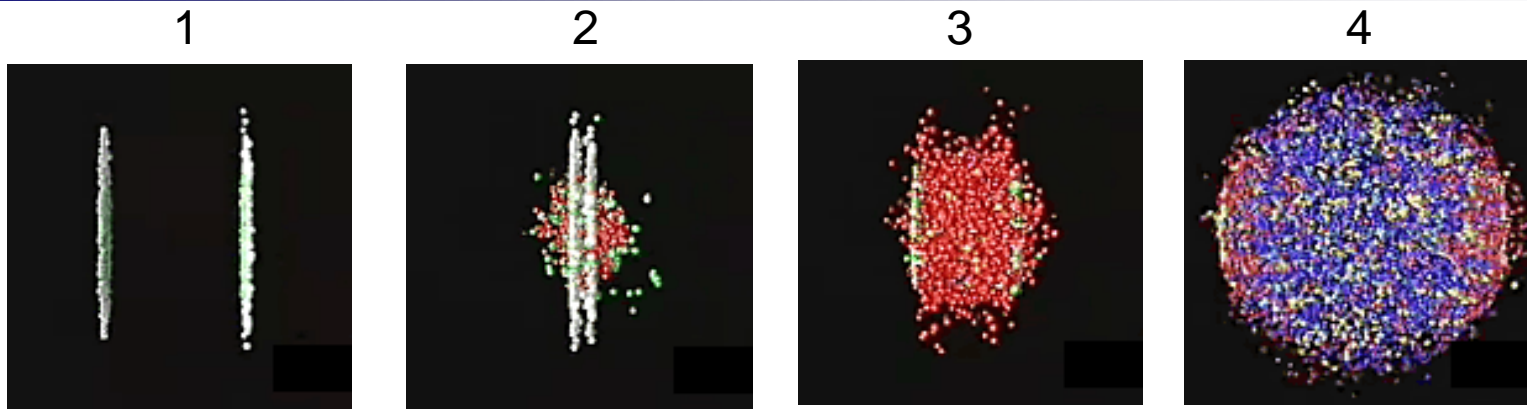


В результате лобового столкновения тяжелых релятивистских ядер могут быть получены плотность и температура материи, существовавшие в первые мгновения жизни Вселенной.

**Кварк-глюонная плазма** – состояние сильно разогретой сильно-взаимодействующей материи, в которой освобожденные цветные кварки и глюоны образуют непрерывную среду (хромоплазму) и могут распространяться в ней как квазисвободные частицы.



Переход в состояние кварк-глюонной плазмы ядерной материи происходит при температуре, отвечающей кинетической энергии адронов **~ 200 МэВ**



1. Релятивистские ядра на подлёте друг к другу.

2. Начальная фаза столкновения.

При условии, что превышена критическая плотность энергии  $> 2 \text{ ГэВ/фм}^3$  или, другими словами, превышена критическая температура  $200 \text{ МэВ}$ , происходит фазовый переход в кварк-глюонную плазму. Из сгустка вылетают только фотоны, для которых длина свободного пробега много больше размеров сгустка.

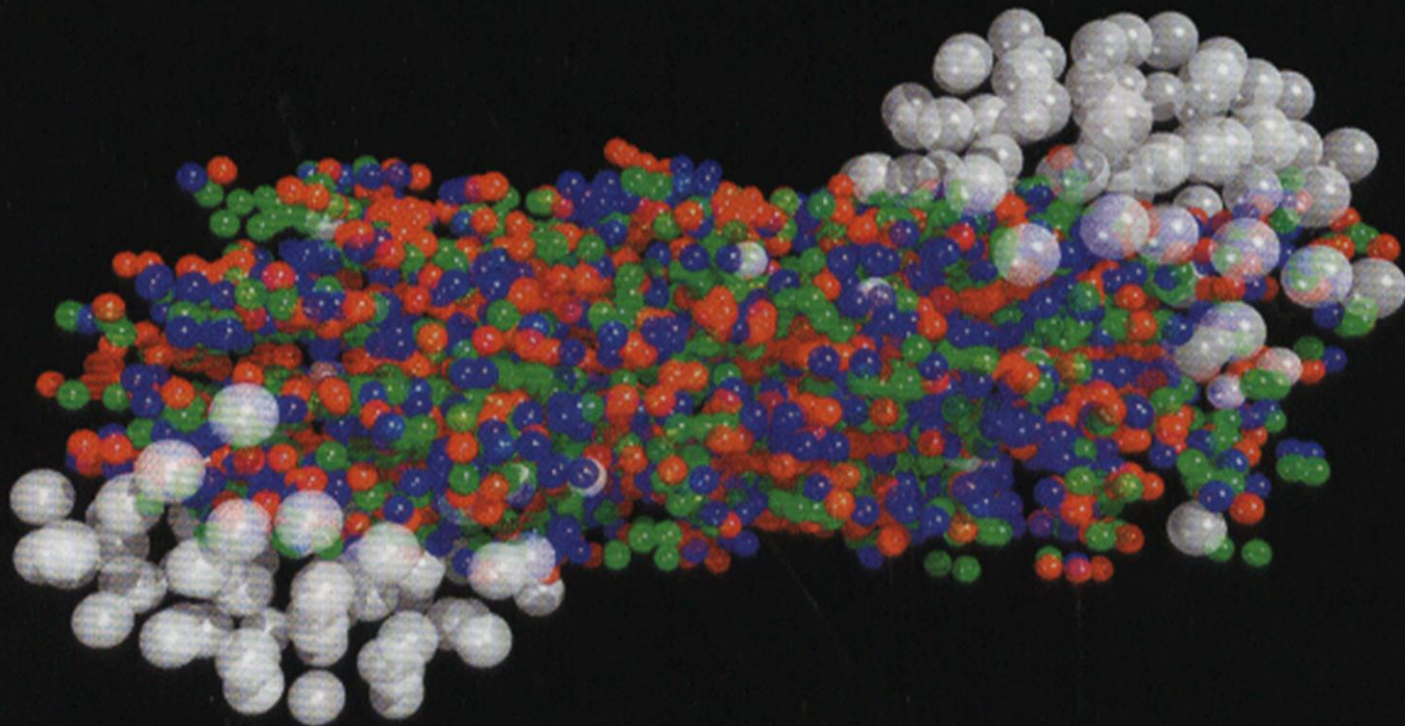
3. Расширение и охлаждение сгустка.

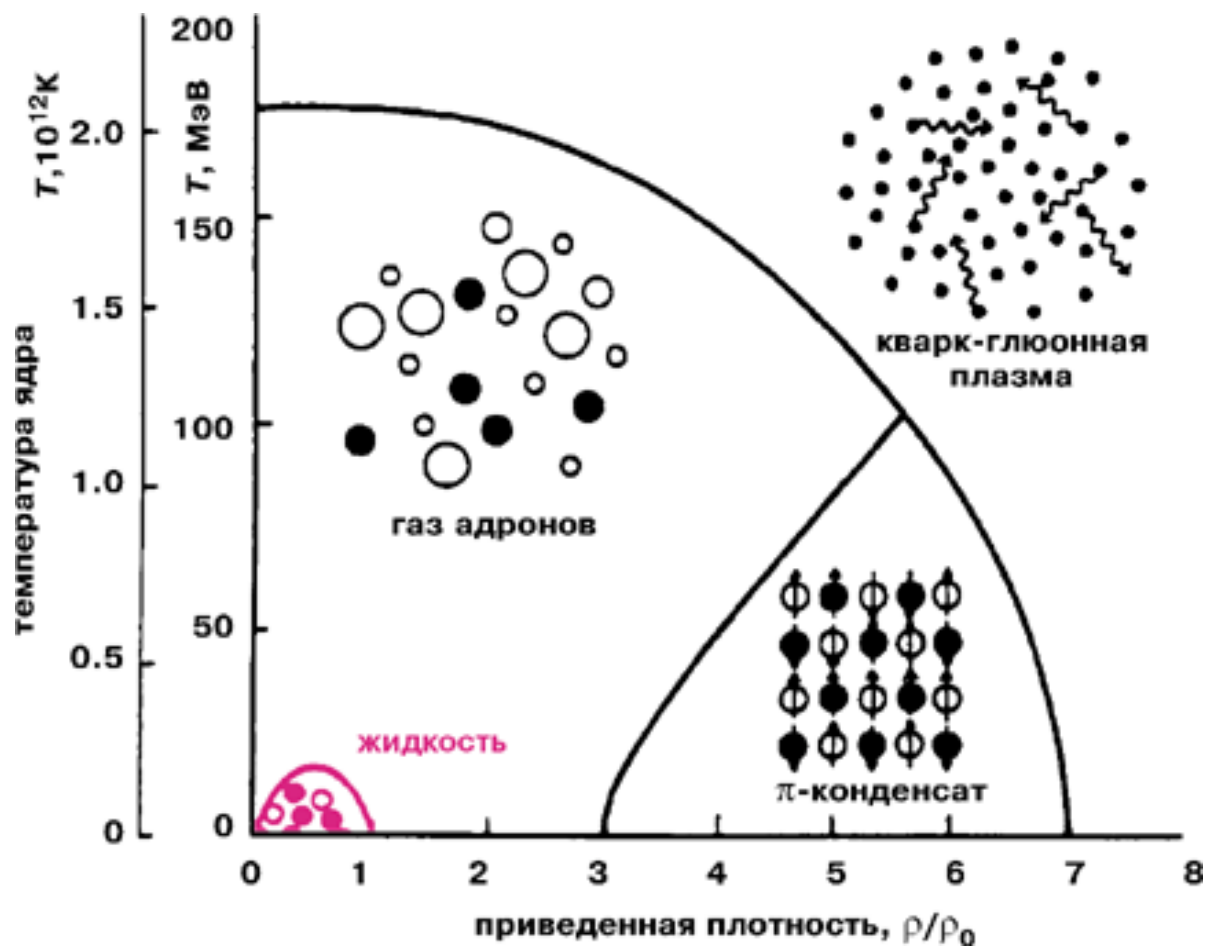
При понижении температуры до критической происходит обратный переход из кварк-глюонной плазмы в обычную адронную материю.

4. Завершающая фаза эволюции сгустка - замораживание (*freeze-out*).

Размеры сгустка становятся больше длины свободного пробега для сильного взаимодействия. Все взаимодействия прекращаются, характеристики адронов больше не меняются (состояние системы "замораживается"). Начинается разлёт адронов, часть из них или продукты их распадов попадают в детекторы.


Модель столкновения двух ядер свинца — цветные мелкие кружочки — это кварк-глюонная плазма, более крупные светлые шарики — нейтроны и протоны, не встретившие преграды при не совсем лобовом столкновении двух ядер.

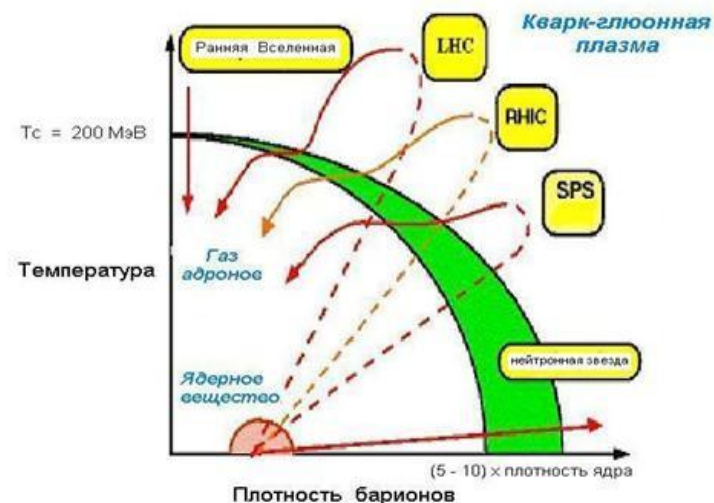


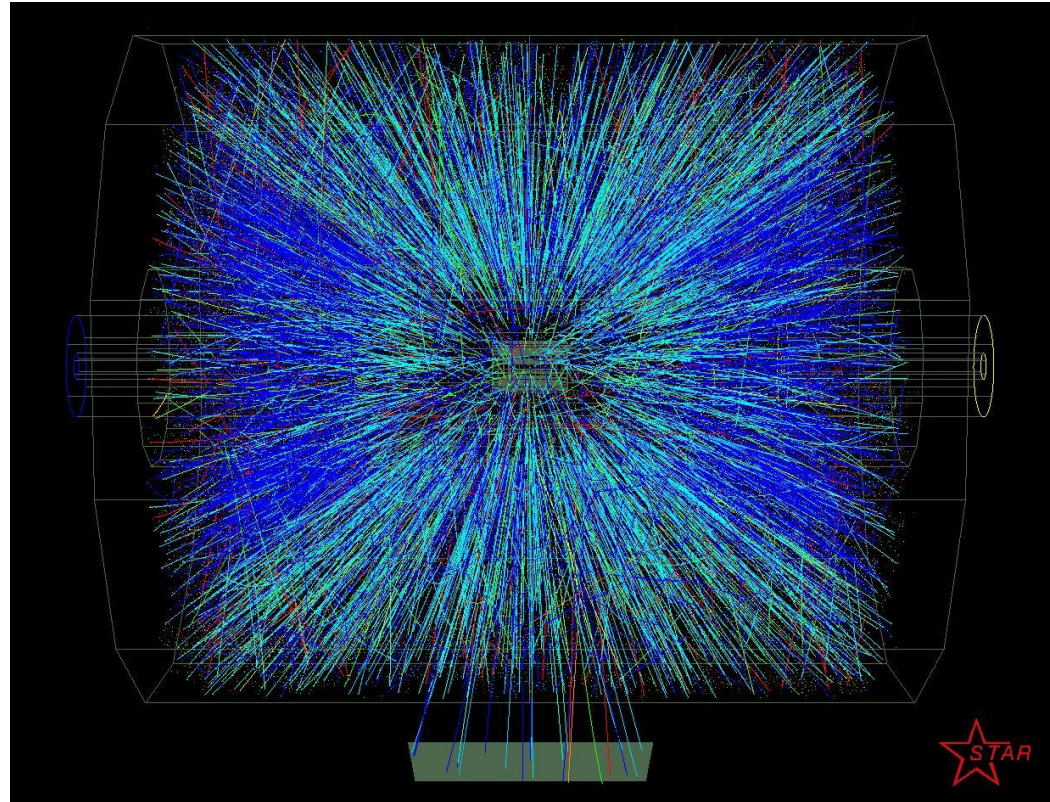
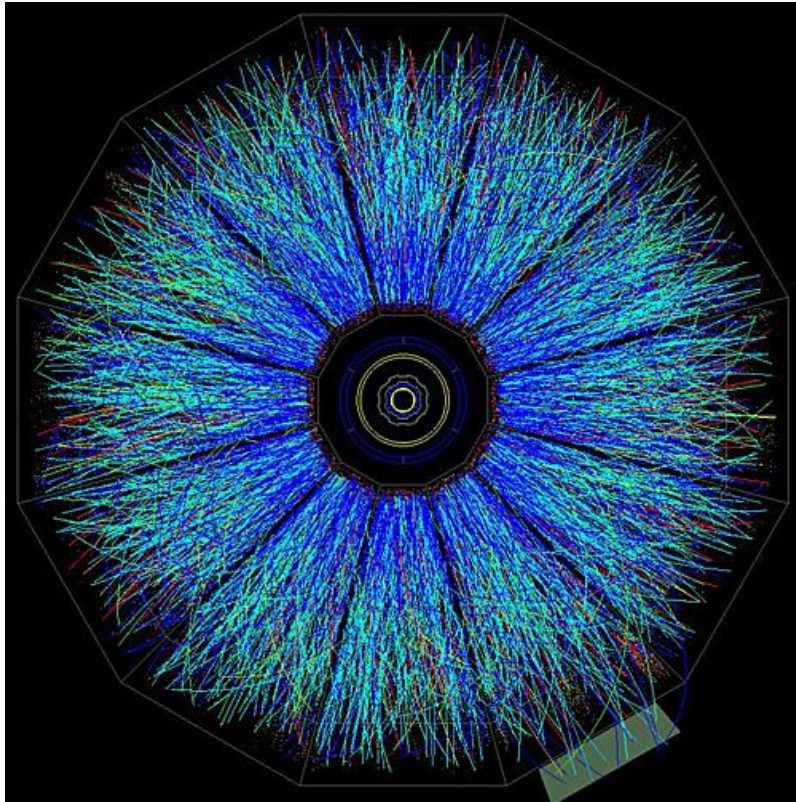


Предполагаемая полная фазовая диаграмма ядерного вещества с указанием линий переходов между различными фазами

*Эксперименты по изучению кварк-глюонной плазмы ведутся на самых крупных ускорителях при максимально возможных энергиях сталкивающихся пучков релятивистских ядер*

- **SPS** в ЦЕРН'е ядерная программа идет с 1987 года. На **SPS** - неподвижная мишень, энергия пучка ядер свинца 160ГэВ на нуклон, но из-за неподвижности мишени в итоге получается 17ГэВ на пару нуклонов в системе центра масс. **NA-61** 
- **RHIC** в **BNL** запущен в 2000 году: энергия пучков 100ГэВ на нуклон, при столкновении в центре масс 200ГэВ на нуклонную пару. Эксперименты **STAR**, **PHENIX**, **PHOBOS**, **BRANDS**
- **LHC** в ЦЕРН'е – энергия пучков 2750 ГэВ/нуклон, что соответствует 5500ГэВ на пару нуклонов в системе центра масс. Эксперименты **ATLAS**, **ALICE**, **CMS**, **LHCb**

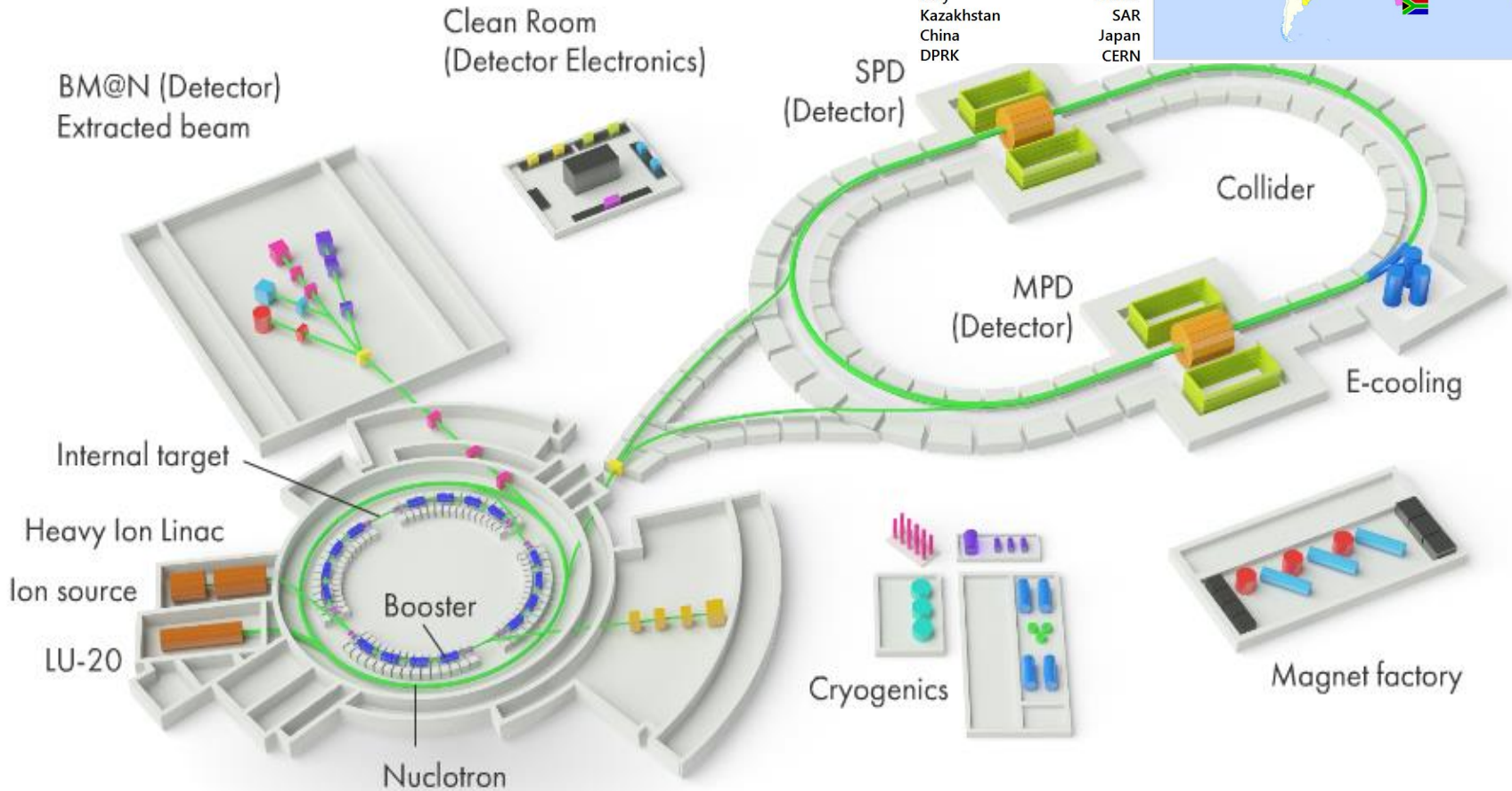




Столкновение ионов Au-Au, зарегистрированное в детекторе STAR на коллайдере RHIC  
(энергия в центре масс 130 ГэВ/нуклон)

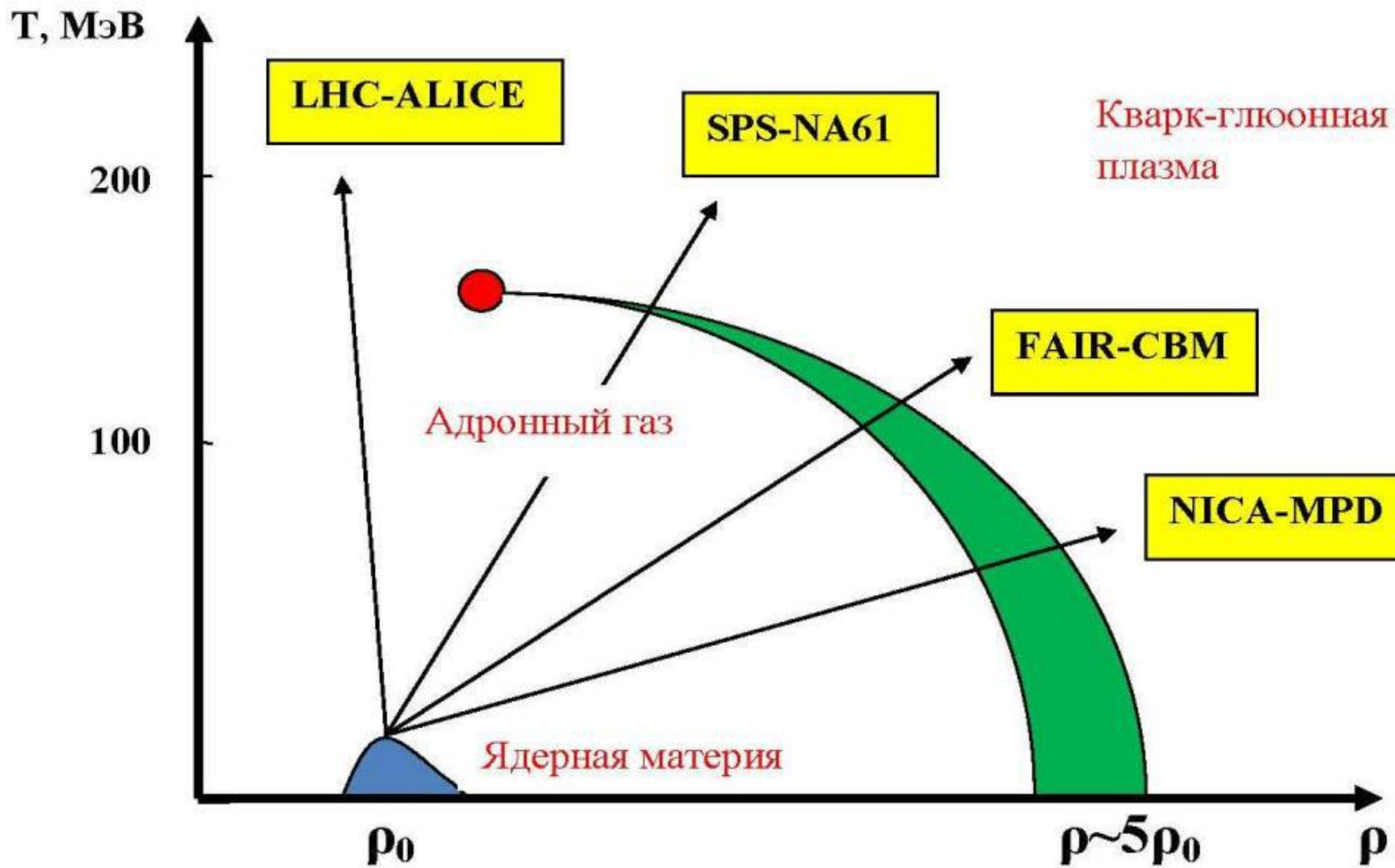
# NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) ОИЯИ, Дубна

- Australia
- Azerbaijan
- Armenia
- Belarus
- Bulgaria
- Brazil
- Vietnam
- Germany
- Greece
- Georgia
- India
- Italy
- Kazakhstan
- China
- DPRK
- Moldova
- Mongolia
- Poland
- Romania
- Russia
- Serbia
- Slovakia
- USA
- Czech Republic
- Ukraine
- Kazakhstan
- France
- SAR
- Japan
- CERN



NICA will provide variety of beam species ranged from protons and polarized deuterons to very massive gold ions. *Heavy ions will be accelerated up to kinetic energy of 4.5 GeV per nucleon, the protons – up to 12.6 GeV.* The heart of the NICA complex is the upgraded accelerator "Nuclotron" (have being working at JINR from 1993). The two interaction points are foreseen at the NICA collider rings: one for heavy-ion studies with the MPD detector and another for polarized beams for the SPD experiment.

Эксперименты по изучению горячей и плотной ядерной материи



## ***Вместо заключения:***

*This is physics at its most fundamental, investigating both the matter at the beginning of the universe and the force—the “strong interaction”—that holds nuclei and quarks together.*

©2015



## Источники информации

1. Введение в физику тяжёлых ионов: Учебное пособие / Под. ред. Ю.Ц. Оганесяна. М.: МИФИ, 2008. – 424 с.  
[http://library.mephi.ru/Data-IRBIS/book-mephi/Oganesyana\\_Vvedenie\\_v\\_fiziku\\_tyazhelyh\\_ionov\\_2008.pdf](http://library.mephi.ru/Data-IRBIS/book-mephi/Oganesyana_Vvedenie_v_fiziku_tyazhelyh_ionov_2008.pdf)
2. Ю. Э. Пенионжкевич. Ядерные реакции с тяжёлыми ионами и синтез новых ядер, Соросовский образовательный журнал, N 3, 2001 г.;  
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/mirrors/synt.html#2>
3. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Глава VIII, XI.
4. M.G. Itkis. Nuclear Reaction Mechanism Induced by Heavy Ions, 5th ASCR International Workshop “Perspectives in Nuclear fission” Tokai, Japan, 14-16 March 2012;  
[http://asrc.jaea.go.jp/fission\\_workshop/&Itkis.pdf](http://asrc.jaea.go.jp/fission_workshop/&Itkis.pdf)