

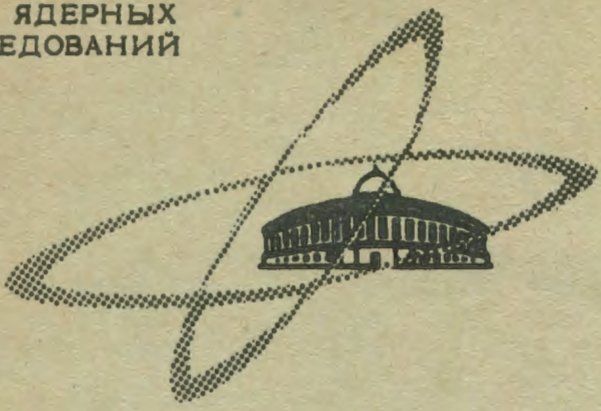
30/ХИ-

ФР-716

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P7 - 4199



Г.Н.Флеров

ПЕРСПЕКТИВЫ СИНТЕЗА НОВЫХ ИЗОТОПОВ
И ЭЛЕМЕНТОВ

Обзорный доклад, представленный
на Совещание экспертов по струк-
туре ядра 1-3 июля 1968 г.

АБСОЛЮТНО ЗАКРЫТЫЙ РАКЕТНИК

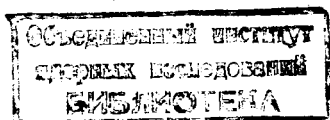
1968

P7 - 4199

Г. Н. Флеров

**ПЕРСПЕКТИВЫ СИНТЕЗА НОВЫХ ИЗОТОПОВ
И ЭЛЕМЕНТОВ**

Обзорный доклад, представленный
на Собрании экспертов по струк-
туре ядра 1-3 июля 1968 г.



В своем докладе я хотел бы остановиться на некоторых вопросах, связанных с перспективами синтеза и изучения свойств новых изотопов и элементов, в областях, далеких от полосы стабильности. При этом, естественно, приходится опираться на многочисленные результаты, полученные благодаря тщательному изучению свойств радиоактивных изотопов, изучению основных закономерностей, действующих в ядре. Все достижения в ядерной физике были возможны только благодаря самоотверженному труду большого отряда физиков, которым приходилось исследовать как можно более широкий круг явлений, входить во множество деталей, делать порой черновую работу, которая, однако, в дальнейшем оказала огромное влияние на развитие науки и техники.

Синтез новых изотопов

После открытия Беккереллем, Марией Склодовской-Кюри и Пьером Кюри естественной радиоактивности и Фредериком Жолио-Кюри - искусственной радиоактивности, начало экспериментальных исследований не существующих в природе изотопов и элементов можно отнести к 1894 году, когда группа итальянских физиков во главе с Э.Ферми поставила опыты по изучению захвата нейтронов различными элементами. Аналогичные исследования в те годы проводились и в Советском Союзе в лаборатории И.В.Курчатова.

Изучая структуру стабильных и радиоактивных ядер, ядерная физика по мере накопления экспериментального материала раскрывает перед нами картину строения материи. Естественно поэтому проанализировать, как далеко продвинулись мы в этом направлении, сколько уже синтезировано и изучено изотопов и сколько еще предстоит получить и изучить их в будущем. Ответ на этот вопрос можно получить, взглянув на рис. 1. На этом рисунке изображены как уже синтезированные изотопы, так и изотопы, которые будут синтезированы в будущем /1/. По осям отложены Z (число протонов в ядре) и $N = A - Z$ (N - число нейтронов в ядре). Стабильные изотопы изображены темными квадратами. Внешний контур, представленный сплошной линией, обозначает границы области стабильности, полученные на основании теоретических оценок. Оценка числа возможных изотопов в этой области дает величину - 4000-5000. До настоящего времени синтезировано 1500 изотопов. Что нового может дать нам синтез и исследование еще неизвестных изотопов? Я думаю, что именно здесь природа готовит нам различного рода неожиданности: новые островки стабильности, новые области деформации, изомерные состояния различных типов и многое другое. Синтезируя такие изотопы как кальций-31 или кальций-70, мы получаем ядра с очень необычными соотношениями протонов и нейтронов, кулоновских и ядерных сил. В связи с этим становится также понятным наш особый интерес к изучению трансурановых элементов, где кулоновские силы очень велики, и поэтому почти не существует обычного барьера деления, а различные оболочечные эффекты могут быть выражены чрезвычайно сильно. Именно в этой области элементов открыт новый вид ядерной изомерии - изомерия формы /2/. Здесь же возможен ряд других интересных явлений, связанных, например, с наличием второго минимума в энергии деформации ядра, предсказанного Струтинским /3/ и т.д.

1. Методы получения новых изотопов

С точки зрения синтеза новых изотопов представляют интерес несколько типов реакций:

- а) реакции, вызванные заряженными частицами средней энергии

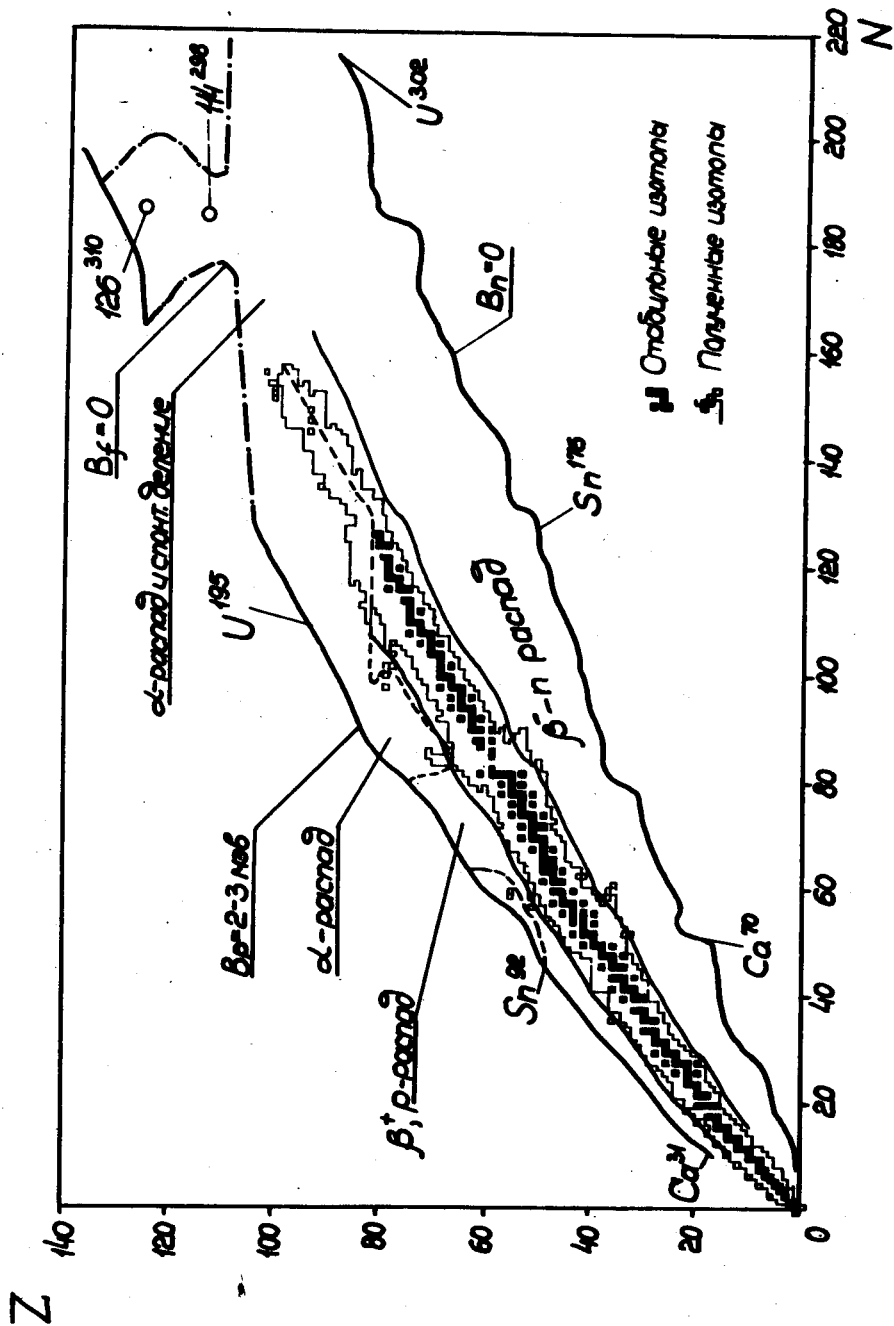


Рис. 1. Карта известных изотопов и тех, которые могут быть синтезированы в будущем.

(p, xn), (α, xn), а также реакции с ^3He , в которых образуются нейтронодефицитные изотопы. Нейтроноизбыточные изотопы можно получить в реакциях (n, p), (n, α), ($p, 2p$), (d, p);

б) низкоэнергетическое деление и нейтронные потоки большой плотности, использование которых приводит к образованию нейтроноизбыточных ядер;

в) реакции, вызванные протонами высокой энергии (скалывание, деление после быстрого каскада), в которых образуются как нейтронодефицитные, так и нейтроноизбыточные ядра.

г) реакции, происходящие под действием тяжелых ионов (полное и неполное слияние, деление при высоких энергиях возбуждения), в которых образуются и нейтронодефицитные и нейтроноизбыточные ядра. При сравнении различных методов получения изотопов необходимо знать сечения этих реакций. Эти значения либо известны, либо их можно получать экстраполяцией из известных сечений подобного типа реакций. Учитывая полученные значения сечений и имеющиеся интенсивности пучков на ускорителях или реакторах, можно оценивать эффективности различных методов получения изотопов в широкой области Z и A . Видимо, при сравнении целесообразно разбить все методы синтеза на две группы:

1) направленные реакции, в результате которых образуются один-два интересующих нас изотопа;

2) реакции, в которых одновременно образуются изотопы в широкой области Z и A .

Преимущество методов синтеза первого типа состоит в простоте идентификации полученных изотопов (по кинематике реакции, по функции возбуждения и так далее). Эти реакции удобны, но они не дают возможности далеко отойти от полосы стабильности, кроме того, не всегда возможно подобрать необходимую комбинацию мишень-частица. Реакции второго типа сразу дают нам большой выбор изотопов в широкой области Z , однако, при этом возникают проблемы экспрессного разделения изотопов и их идентификации. Особенно большие трудности возникают при проведении прецизионных спектрометрических исследований короткоживущих изотопов. Вместе с тем в настоящее время существуют анализирующие системы, работающие непосредственно на пучке

ускоренных частиц ("on-line" системы). В частности, в нашей Лаборатории имеется ряд установок, работающих в режиме "on-line": газонаполненный сепаратор для быстрого выделения (10^{-6} сек) радиоактивных продуктов ядерных реакций с разрешением по массе $\Delta A = \pm 0,03 A$, электромагнитный масс-сепаратор ядер отдачи с разрешением по массе $\Delta A = \pm 0,002 A$ с временем разделения для газообразных продуктов $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ сек, установка для экспрессного непрерывного химического разделения продуктов и др.

Преимущества и недостатки различных способов синтеза подробно рассмотрены в работах Рудстама^{4/}. Из проведенного там анализа следует, что большинство методов не дает возможности далеко отойти от полосы стабильности. Исключение составляют реакции, вызванные протонами высокой энергии. Схема этих реакций следующая: после взаимодействия протона высокой энергии с ядром мишени имеет место либо процесс быстрого нуклонного каскада, либо фрагментация, в результате чего ядро приобретает значительную энергию возбуждения. В дальнейшем осуществляется испарение нейтронов или деление. Вероятность образования набора ядер с различными энергиями возбуждения рассчитывается по методу Монте-Карло с набором констант взаимодействия σ_{pp} , σ_{nn} , σ_{pn} , σ_{pa} , σ_{na} и т.д. Используя подобные расчёты, а также опираясь на экспериментальные данные, Рудстам вывел формулу для расчёта сечения образования изотопов после быстрых процессов, зависящую от четырех параметров. Медленные процессы рассчитываются по обычным формулам ядерной физики. Экспериментально было показано, что относительный ход их сечений меняется слабо с ростом энергии протонов от 500–800 Мэв до 30 Гэв, что видно на рис. 2, где представлены кривые выхода изотопов $1(Z=53)$ при делении урана протонами с энергией 590 Мэв и 18 Гэв^{5/}. Из этих данных также можно заключить, что использование протонов высокой энергии чрезвычайно эффективно для синтеза изотопов с $Z \leq 75$. Надо отметить, что этот метод в течение последних десяти лет с успехом использовался в Дубне, в Лаборатории ядерных проблем для синтеза и изучения свойств изотопов и изомеров в широкой области Z и A .

Для синтеза изотопов трансурановых элементов могут быть использованы либо нейтронные потоки большой плотности, либо тяжелые ионы.

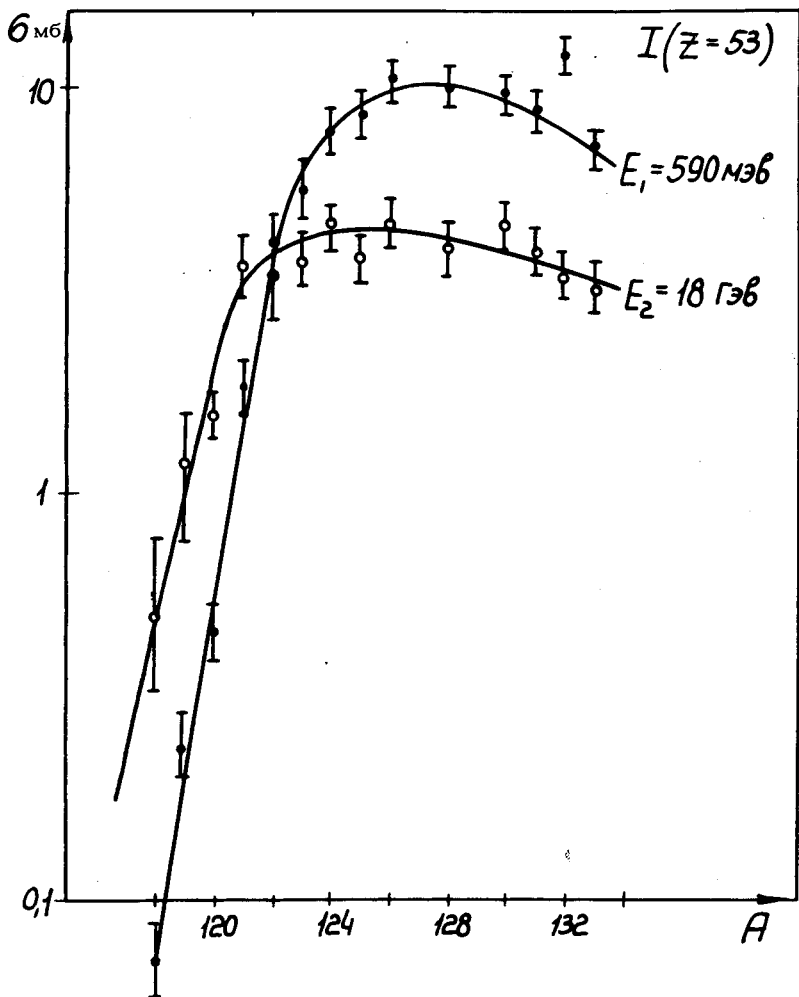


Рис. 2. Кривые выхода изотопов I ($Z = 53$) при делении урана протонами с энергией $E_1 = 590$ Мэв и $E_2 = 18$ Гэв.

Синтез большинства известных изотопов до фермия включительно осуществляется путем облучения урана или плутония нейтронами в ядерных реакторах или при взрывах ядерных устройств. Суть этого метода состоит в том, что в нейтронных потоках большой плотности ядра последовательно захватывают несколько нейтронов до того, как они испытали β -распад. Это дает возможность получить из исходного ядра ^{238}U очень тяжелые изотопы урана, которые в дальнейшем после нескольких β -распадов превращаются в изотопы более далеких элементов. Оптимистические оценки показали, что таким образом можно получить элементы с большим Z ($Z=110, 112$ и т.д.). В этом направлении была проделана грандиозная работа, получена большая плотность нейтронов, разработаны методы экспрессного химического выделения трансурановой фракции, однако, попытка получить ядра с $Z > 100$ не увенчалась успехом/8/.

В то же время с 1954 года в Советском Союзе и США параллельно развивались методы синтеза в реакциях с тяжелыми ионами, что позволило синтезировать элементы до 105 включительно. В настоящее время число синтезированных изотопов в трансурановой области близко к 100.

2. Синтез изотопов в реакциях с тяжелыми ионами

При облучении тяжелыми ионами синтез изотопов можно осуществлять в реакциях следующего типа.

А. Неполное слияние.

Реакции неполного слияния имеют много разновидностей, каждая из которых находится в сложной зависимости от большого числа параметров (энергии, заряда и массы частицы и ядра мишени, структурных свойств взаимодействующих ядер и т.д.). Из всего набора реакций для синтеза изотопов наибольший интерес представляют реакции многонуклонных передач, когда в передаваемом комплексе отношение числа протонов к числу нейтронов может сильно отличаться от единицы. Эти процессы могут быть интересны с точки зрения получения как нейтрондефицитных, так и нейтронизбыточных ядер. В Дубне, например, наблюда-

лась с заметным сечением реакция передачи 5-8 нейтронов^{/7/}. Однако систематическое изучение многоуклонных передач не проводилось, и поэтому трудно предсказать, насколько перспективным окажется этот метод для синтеза изотопов, сильно удаленных от полосы стабильности. Необходимо в ближайшее время провести систематическое исследование реакций многоуклонных передач.

Б. Реакции полного слияния с испарением нейтронов

При взаимодействии тяжелых ионов ($A \leq 40$) с ядром мишени одним из основных процессов является образование составного ядра с большой энергией возбуждения. Переход возбужденных ядер в основное состояние сопровождается, главным образом, испарением нейтронов, что приводит к образованию нейтронодефицитных изотопов. Это дает широкие возможности для исследования ядер, лежащих вне полосы стабильности, при изучении α -распада, протонного распада и т.д. Сечение таких реакций можно записать в общем виде

$$\sigma(A_{\text{о}} - x n) = \sigma_{\text{о}} P_{x n}(E^*) \prod_{i=1}^x \frac{\Gamma_{n i}}{\Gamma_{\text{tot}}},$$

где $\sigma_{\text{о}}$ - сечение образования составного ядра, $P_{x n}(E^*)$ - вероятность того, что ядро с энергией возбуждения E^* испустит x нейтронов. Такие реакции, в частности, чрезвычайно удобны для синтеза нейтронодефицитных изотопов - излучателей протонов. Так, Карнаузову с сотрудниками (Дубна)^{/8/}, а затем канадским и американским физикам^{/9/} удалось синтезировать около двух десятков протонных излучателей, хотя в своих работах они лишь немного отошли от подпорои стабильности. При дальнейшем продвижении в область нейтронодефицитных ядер в реакциях с испарением нейтронов сечение падает, так как резко возрастает вероятность конкурирующих процессов.

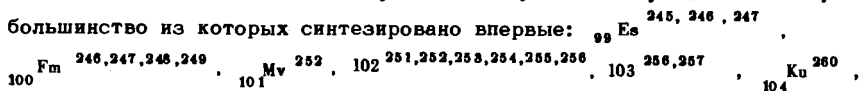
Аналогичная ситуация возникает при синтезе изотопов трансурановых элементов. Реакции с испарением нейтронов в течение последних десяти лет интенсивно использовались для синтеза новых трансурановых элементов^{/10/}. Были разработаны экспрессные физические и химические методы выделения и идентификации. Все это позволило в послед-

ние годы в Дубне синтезировать и изучить физические и химические свойства изотопов 102, 103 и 104 элементов^{/11/}. Недавно здесь были синтезированы два изотопа 105 элемента^{/12/}. Их предварительные характеристики следующие:

$$^{105}_{261} E = 9,4 \pm 0,1 \text{ Мэв}; \quad 0,1 \text{ сек} \leq T_{1/2} \leq 3 \text{ сек}$$

$$^{105}_{260} E = 9,7 \pm 0,1 \text{ Мэв}; \quad T_{1/2} > 0,01 \text{ сек.}$$

В настоящее время проводятся дальнейшие эксперименты по уточнению свойств 105 элемента усовершенствованной методикой. Всего за последние годы в Дубне были синтезированы и изучены следующие изотопы, большинство из которых синтезировано впервые:



$^{105}_{260,261}$. Однако с увеличением Z исследуемых изотопов, в связи с тем, что в реакциях с испарением нейтронов образуются нейтронодефицитные ядра, резко возрастает вероятность деления. Это означает, что вместо ожидаемого, например, изотопа 100 элемента в результате деления образуются два ядра с $Z = 50$. Возрастающая нестабильность ядер при увеличении Z привела к тому, что при решении проблемы синтеза трансурановых элементов приходится иметь дело с чрезвычайно малыми сечениями. Опыты, проведенные в Дубне, показали, что если сечение образования 102 элемента составляет 10^{-8} барн, то для 104 элемента $\sim 2 \cdot 10^{-10}$ барн, а для 105 элемента эта величина еще меньше. Так как падение сечения идет по экспоненте, то увеличение времени экспозиции дела не спасает. Выход здесь виден в получении более тяжелых изотопов данного элемента. Однако в реакциях с испарением нейтронов при использовании определенной комбинации мишень - тяжелый ион удается получить лишь 1-2 нейтронодефицитных изотопа интересующего нас элемента, т.е. необходимо иметь возможность изменять Z и A мишени и иона в широких пределах, что не всегда возможно.

Более перспективным методом синтеза тяжелых изотопов трансурановых элементов может оказаться деление под действием тяжелых ионов. В Дубне Оганесяном с сотрудниками проводилось систематическое изучение механизма деления возбужденных ядер^{/13/}. С помощью ускоренных

ионов от ^{11}B до ^{40}Ar включительно можно было исследовать область ядер до $Z^2/A = 44$. Облучались мишени Ta ($Z = 73$), Au ($Z = 79$), Bi ($Z = 83$), U ($Z = 92$). Радиохимическим методом выделялись Te ($Z = 52$), Ba ($Z = 56$), редкоземельная группа, а также - в ряде случаев - тяжелые осколки от Au ($Z = 79$) до At ($Z = 85$). В дальнейшем с помощью Ge(Li) -детектора измерялась γ -радиоактивность осколков, и по полученному спектру производилась идентификация изотопов и определение их выхода. Распределение осколков по массе хорошо описывается функцией Гаусса

$$P(A_f) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\sigma^2} \exp \left[-\frac{(A_f - \frac{A_0}{2})^2}{\sigma^2} \right],$$

где A_f и A_0 - масса осколка и составного ядра; σ^2 - параметр, определяющий ширину массовой кривой. Были получены следующие результаты:

1. Ширина массового распределения резко возрастает с ростом Z^2/A составного ядра, и в случае $^{238}\text{U} (^{40}\text{Ar}, f)$ наблюдается большой выход изотопов Au ($Z = 79$), Tl ($Z = 81$), Pb ($Z = 82$), Bi ($Z = 83$), Po ($Z = 84$) и At ($Z = 85$). Ширина изотопных распределений также резко возрастает с ростом Z^2/A (рис. 3 и 4).

2. Осколки деления с большой вероятностью образуются в изомерных состояниях. Так, например, в реакции $^{92}\text{U}^{238} (^{10}\text{Ne}^{20}, f)$ были получены в одном облучении все известные изомеры Tl с большим выходом (рис. 5).

3. Ранее уже отмечалось, что в реакциях с испарением нейтронов образуются короткоживущие изотопы трансурановых элементов. Так, в реакции $^{94}\text{Pu}^{242} (^{22}\text{Ne}, 4n) ^{104}\text{Zr}^{260}$ образуется изотоп $^{104}\text{Zr}^{260}$. При делении сверхтяжелых составных ядер масса наиболее вероятного изотопа значительно больше. Для примера можно указать, что наиболее вероятная масса 104 элемента в реакции $^{92}\text{U}^{238} (^{86}\text{Kr}^{84}, f)$ и $^{92}\text{U}^{238} (^{54}\text{Xe}^{132}, f)$ равна 104^{274-xn} . В реакции, идущей через составное ядро, это соответствовало бы облучению $^{94}\text{Pu}^{242}$ несуществующим изотопом Ne^{32} . При облучении урана ураном наиболее вероятная масса 104 элемента еще больше. Выход любого изотопа данного элемента в делении можно оценить по следующей формуле:

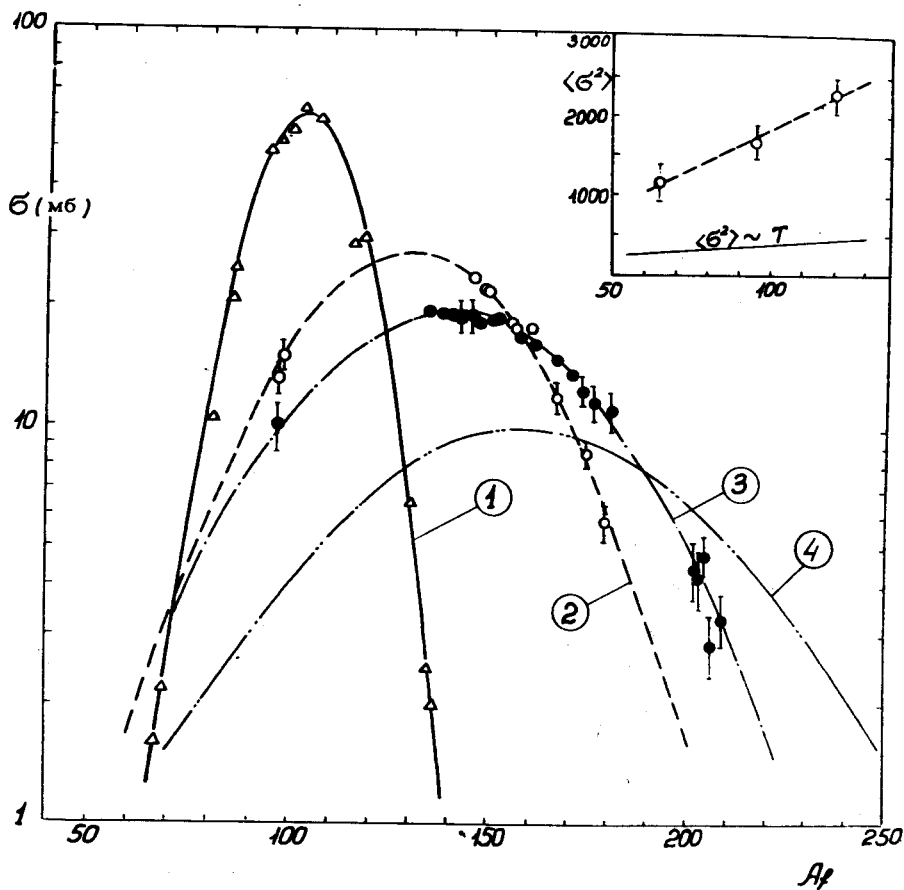


Рис. 3. Массовые распределения осколков деления в реакциях

1. ${}_{79}\text{Au}^{197}({}_6\text{C}^{12}f)$; 2. ${}_{92}\text{U}^{238}({}_{10}\text{Ne}^{20}f)$; 3. ${}_{92}\text{U}^{238}({}_{18}\text{Ar}^{40}f)$;
4. Расчётное массовое распределение осколков деления в реакции ${}_{92}\text{U}^{238}({}_{36}\text{Kr}^{64}f)$.

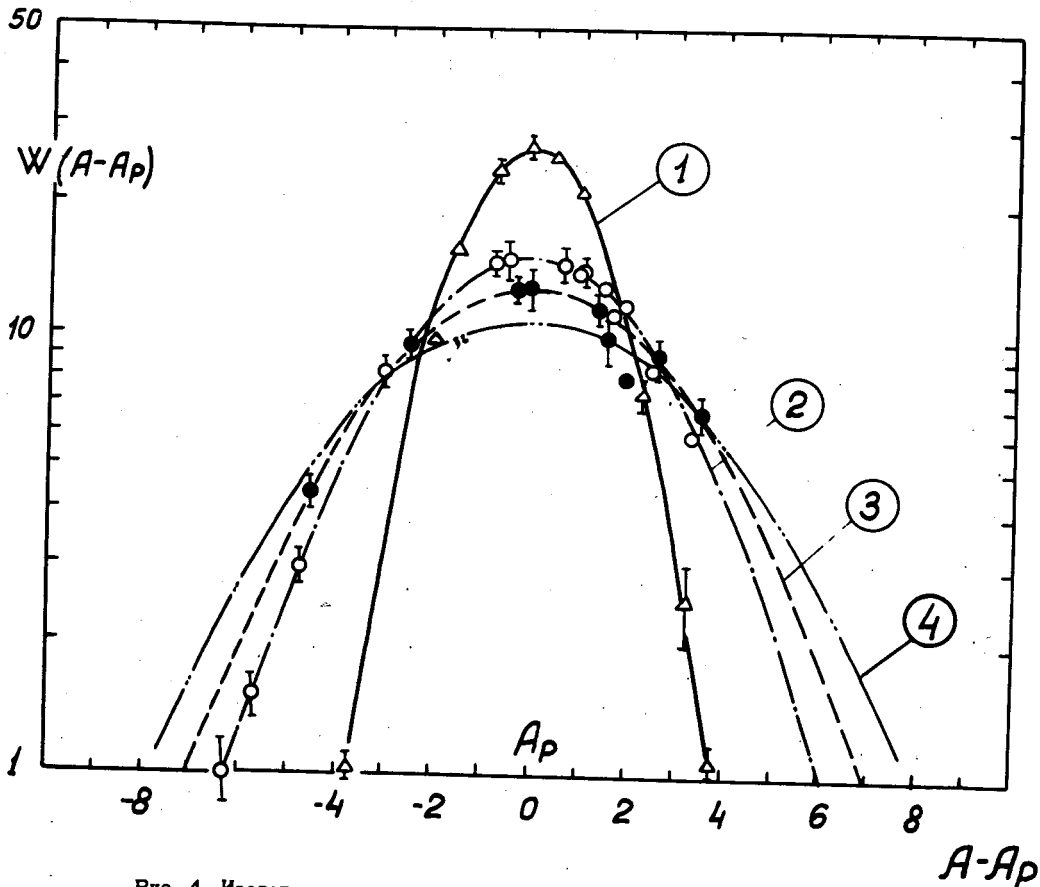


Рис. 4. Изотопные распределения осколков деления в области ядер с $57 \leq Z \leq 64$. Объяснение кривых дано на рис. 3.

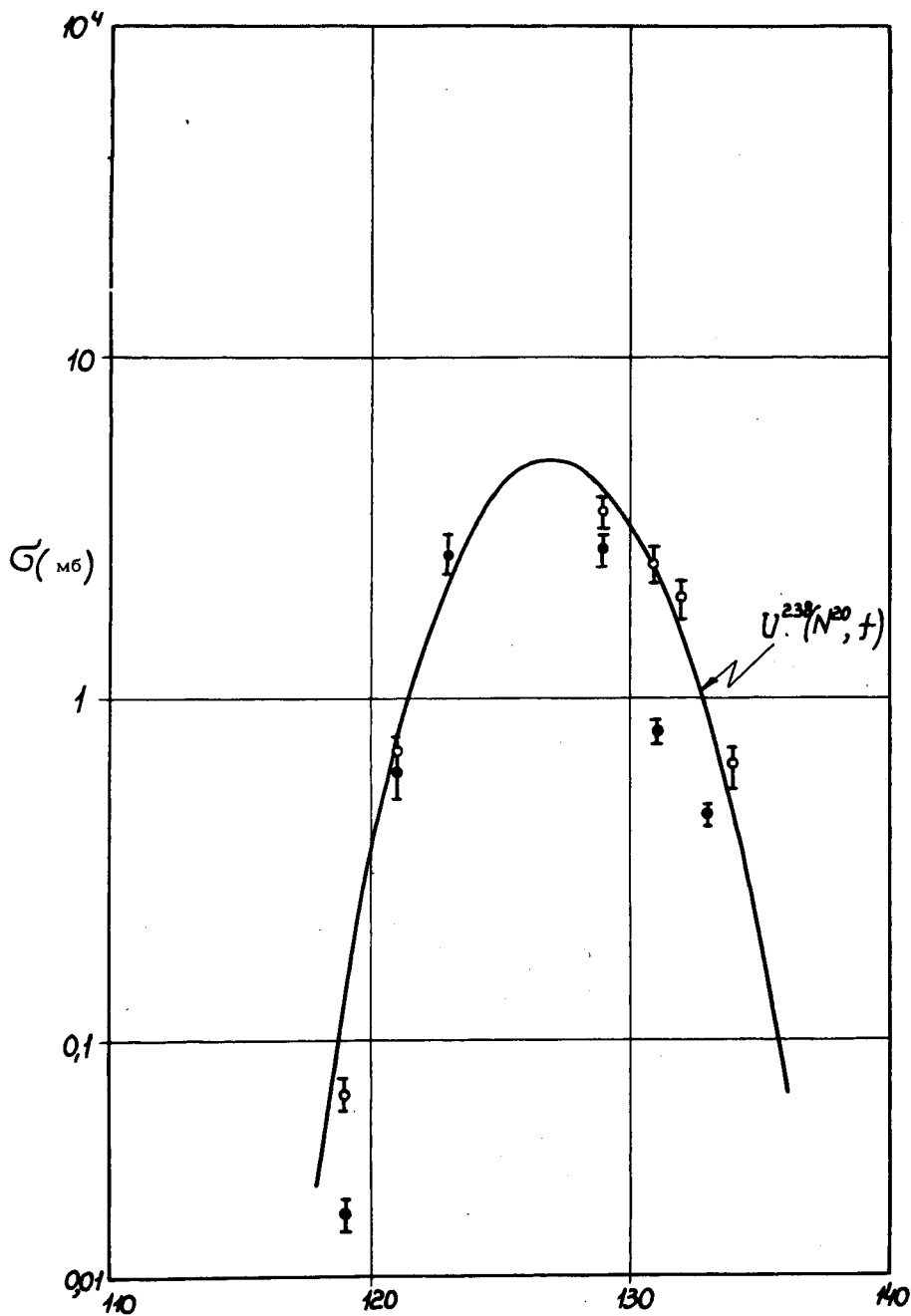


Рис. 5. Выходы изотопов Te ($Z = 52$) в реакции ${}_{92}\text{U}^{238}({}_{10}\text{Ne}^{20})$.
Открытые кружки - основное состояние; чёрные точки - изомерное состояние.

$$f(A_f, Z) = \sigma_0 P(A_f) f(Z - Z_p(A_f)) P_{xn} (E^*) \prod_{i=1}^x \frac{\Gamma_{ni}}{\Gamma_{tot}}$$

где $A_f' = A_f - x_n$, $P(A_f)$ - вероятность образования массы A_f в делении, а функция $f(Z - Z_p(A_f))$ определяет вероятность выхода различных изобар с массой A_f .

Из этой формулы видно, что хотя сечение образования определенного изотопа данного элемента невелико (для максимума массового распределения не превышает $5 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$), однако отход от наиболее вероятной массы данного элемента на величину ≈ 8 нейтронов уменьшает выход всего на один порядок. Поэтому даже при делении урана неонем этот метод получения изотопов более эффективен, чем деление урана тепловыми нейтронами. Кроме того, можно надеяться, что при переходе к более тяжелым ионам, таким как $Kr (Z = 36)$, $Xe (Z = 54)$, $W (Z = 74)$, в осколках деления мы сможем синтезировать изотопы трансураниевых элементов вплоть до 105 элемента со значительно большими сечениями, чем в реакциях с образованием составного ядра. Можно предполагать, что деление окажется перспективным методом для систематического изучения "изомерии формы" в различных областях периодической системы. Это могут быть как спонтанно делящиеся изомеры, так и изомеры, распадающиеся по другим каналам - путем аномальных γ -переходов, необычных видов α -распада и так далее.

Перспективы синтеза сверхтяжелых элементов

До недавнего времени считалось, что граница периодической системы определяется конкуренцией поверхностных сил притяжения и кулоновских сил отталкивания^{/14/}. Однако в дальнейшем было показано, что при рассмотрении стабильности тяжелых ядер необходимо учитывать неоднородности в энергетическом распределении нуклонов - так называемые "оболочечные эффекты"^{/3/}. Первоначально предполагалось, что по аналогии с известным магическим числом для нейтронов $N = 126$ следующее магическое число для протонов будет также $Z = 126$. Кроме того, из расчё-

тов получалось, что для нейтронов магическим числом будет $N = 184$, т.е. ядро 126^{310} должно быть дважды магическим /15/. Однако расчёты схемы одночастичных уровней протонов в потенциале с размытым краем показали, что магическим числом для протонов будет $Z = 114$ и, таким образом, дважды магическим должно явиться ядро 114^{298} /16/. В это же время в нашей Лаборатории Музычкой и Струтинским был проведен более тщательный анализ стабильности ядер с $104 \leq Z \leq 130$ и $170 \leq N \leq 190$. По методу Струтинского, кроме оценки щели в одночастичном спектре, рассчитывалась зависимость энергии ядра от его деформации. Было показано, что существует целая область сферических ядер вокруг 114^{298} , устойчивость которых по отношению к спонтанному делению по мере удаления от центра области монотонно уменьшается /17/. В дальнейшем подобные результаты были приведены в работе Святецкого /18/. Кроме того в ряде работ оцениваются времена жизни различных изотопов этой области по отношению к спонтанному делению, α -распаду, β -распаду и электронному захвату. Эти результаты, конечно, далеки по точности от того, что хотели бы иметь экспериментаторы, так как небольшая ошибка в расчётах может дать сильное отклонение от ожидаемой величины времени жизни (для примера укажем, что изменение $\Delta Q_{\alpha} \approx 0,5$ Мэв, приводит к изменению в $\Delta \tau_{\alpha} \approx 10^3$), но сам факт существования области сверхтяжелых ядер в настоящее время не вызывает сомнения. Так, из рис. 6, взятого из работы Святецкого /18/, видно, что для наиболее стабильных изотопов 114 элемента время жизни относительно спонтанного деления $\tau_{\text{сп}} \geq 10^{16}$ лет (оценка полного времени жизни, которая включает α -распад, β -распад и электронный захват, дает значительно меньшую величину $\tau = 10^2 - 10^7$ лет).

Подобные расчёты существуют и для элементов $Z = 122-126$, однако, их времена жизни по α - и β -распаду не должны превышать 10^{-3} сек. Теперь возникает вопрос, как добраться до острова стабильности? Попасть в эту область можно, совершив прыжок через область нестабильных элементов (100-110), что может быть сделано в лабораторных условиях только в реакциях с тяжелыми ионами.

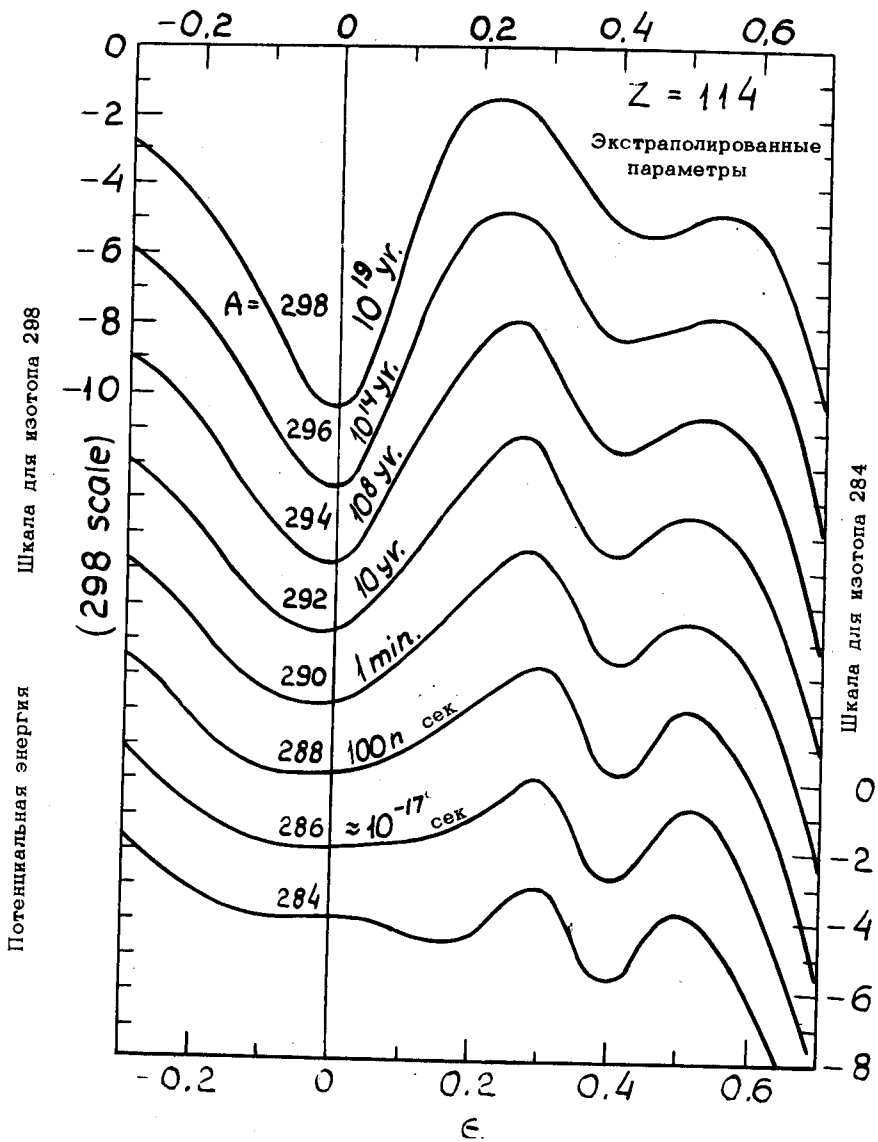


Рис. 8. Ожидаемые времена жизни по спонтанному делению для изотопов 114 элемента.

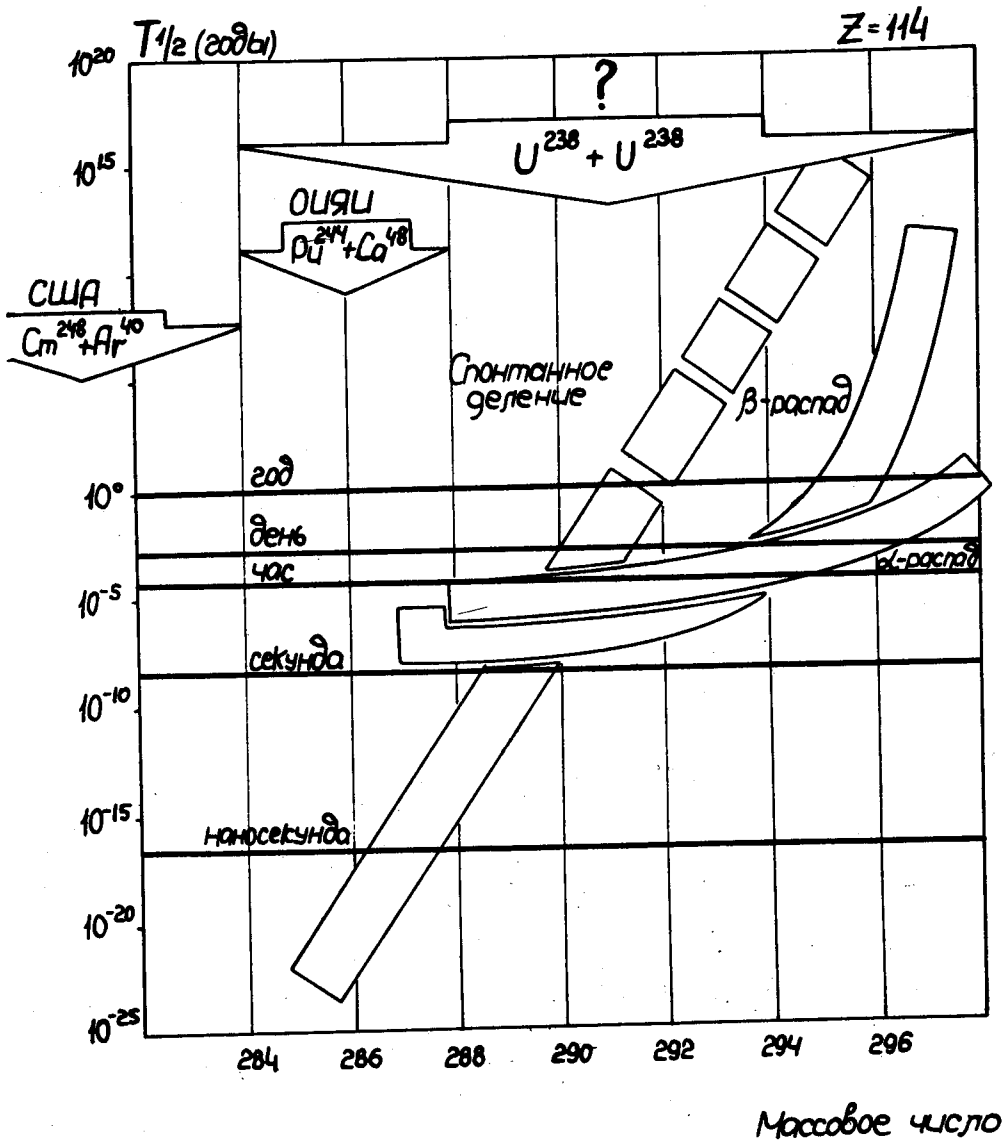
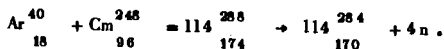


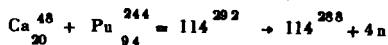
Рис. 7. Возможные методы синтеза изотопов 114 элемента.

В 1967 году группа американских физиков (Святецкий, Томпсон и другие) попыталась синтезировать 114 элемент. Самая тяжелая частица, ускоренная в настоящее время на линейном ускорителе тяжелых ионов, — $^{40}_{18}\text{Ar}$, поэтому была использована реакция

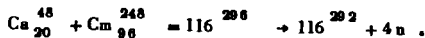


Изотоп $^{114}_{284}$ находится далеко от дважды магического ядра $^{114}_{298}$, и надежда получить 114 элемент в этой реакции была невелика.

Действительно, эффект не был обнаружен, и авторы дают верхнюю границу для сечения образования $= 10^{-30} - 10^{-31} \text{ см}^2 / 18/$. Значительно более перспективной выглядит реакция



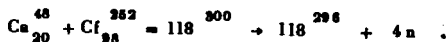
или

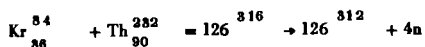
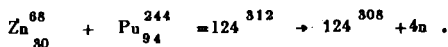
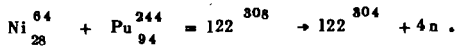


Это видно из рис. 7. В настоящее время в нашей Лаборатории $^{48}_{20}\text{Ca}$ ускорен и проводятся фоновые опыты.

Однако ситуация с синтезом 114 элемента может значительно улучшиться как только появится возможность ускорять ионы тяжелее криптона. Так, при делении урана $^{238}_{92}\text{U}$ наиболее вероятная масса тяжелого осколка с $Z = 114$ равна $A_1 = 305$, а энергия возбуждения осколка будет соответствовать испарению 4–6 нейтронов. Для того чтобы получить этот изотоп в реакции, идущей через составное ядро, необходимо было бы облучать $^{244}_{94}\text{Pu}$ не существующим в природе сверхтяжелым изотопом $^{81}_{20}\text{Ca}$.

При переходе к более тяжелым элементам $Z = 120-128$ легче подобрать необходимую комбинацию мишень-ион для синтеза изотопов с $N = 184$. Для примера укажем





и так далее. В случае этих реакций составные ядра могут получаться с очень небольшой энергией возбуждения, поэтому, если не появятся дополнительные факторы, повышающие энергию возбуждения, сечения образования этих изотопов могут быть велики $\approx 10^{-26} - 10^{-28} \text{ см}^2$.

При появлении более тяжелых ионов осколки деления заполняют большую часть периодической системы, поэтому появится возможность синтеза большого количества новых нейтроноизбыточных ядер.

Теперь я хочу остановиться на очень интересных результатах, полученных группой профессора Фаулера, которые недавно были сообщены профессором Пауэллом /19/. Эта группа использует фотографические эмульсии для изучения элементного состава космических лучей. Недавно ими были обнаружены следы частиц, ионизирующая способность которых указывает на то, что их заряд $Z \approx 106$. Эти результаты, если они будут подтверждены, явятся безусловным доказательством существования долгоживущих сверхтяжелых элементов.

Однако, как нам кажется, оценка величины Z в настоящее время не может быть сделана достаточно надежно. Это связано с тем, что хорошо изучены в космических лучах пока только следы релятивистских ядер железа ($Z = 26$), а заряды более тяжелых элементов определяются экстраполяцией от этих значений. Поэтому следует уточнить калибровочные характеристики для формы следов тяжелых ядер в фотоэмульсиях. В частности, можно использовать тот факт, что в интервале Z от 83 до 90 все изотопы являются радиоактивными с малым временем жизни. Поэтому, если надежно изучить ионизирующую способность частиц с $Z = 83$ и 90, то в дальнейшем можно будет использовать эти данные для определения заряда более тяжелых частиц. Опираясь на экспериментальные данные, полученные нами при синтезе элементов в области Z от 100 до 105,

можно показать, что время жизни самых долгоживущих изотопов этих элементов не превышает нескольких дней. С другой стороны, многочисленные теоретические оценки указывают, что наиболее стабильными по всем видам ядерного распада должны быть изотопы элементов с Z , близким к $Z = 114$. Поэтому мы считаем, что если будет подтвержден факт наблюдения в космических лучах тяжелых ядер с $Z > 100$, то это могут быть только изотопы элементов с $110 \leq Z \leq 116$.

Учитывая скорости частиц в космических лучах, сечение деления при столкновении с атомами водорода и ряд других факторов, можно ориентировочно оценить возможные времена жизни частиц с $Z > 100$ в космических лучах. Эти оценки дают времена $\sim 10^6 - 10^8$ лет.

Теперь я хотел бы коснуться геохимического аспекта этой проблемы.

Химические исследования курчатовия, проведенные в нашей Лаборатории, показали, что начиная с $Z = 104$ заселяется внешняя электронная оболочка, т.е. курчатовий оказался уже не актинидом, а химическим аналогом гафния. Поэтому можно предполагать, что изотопы 110, 112, 114 элементов должны являться аналогами платины, ртути и свинца. Тогда наиболее долгоживущие среди этих тяжелых ядер ($T_{1/2} \geq 10^8$ лет) можно попытаться обнаружить в природных минералах. Но так как поиск каждого из них должен осуществляться в различных природных соединениях, то, как нам кажется, наиболее подходящими в смысле химической обособленности являются соединения свинца. Если опираться на данные, полученные Фаулером и др.^{19/}, то по оценкам возможная примесь изотопов "жасвинца" в первозданном свинце составляет $\sim 10^{-14}$. Так как "жасвинец" по нашим предположениям должен испытывать спонтанное деление, то не лишены смысла поиски спонтанного деления в свинцовых минералах.

Если ожидаемая примесь "жасвинца" составляет $\sim 10^{-14}$ при $T_{1/2} \sim 10^6 - 10^8$ лет, то наблюдаемый период распада свинца должен соответствовать величине $\sim 10^{20} - 10^{22}$ лет. Поэтому для регистрации актов спонтанного деления в природном свинце необходимо разработать метод, позволяющий использовать большие количества свинца и нечувствительный к фону осколков деления, обусловленных космическими лучами

или другими причинами. В дальнейшем, если будет получен положительный эффект, то, разработав соответствующие химические методы выделения "экаспинца" из свинца или используя масс-сепараторы, можно будет провести идентификацию этих изотопов и изучение их свойств. Аналогичная методика может быть применена и при поисках изотопов "экаплатины", "экартути" и т.д.

С другой стороны, необходимо отметить, что если в космических лучах или при изучении различных минералов будут обнаружены долгоживущие ($T_{1/2} \geq 10^6$ лет) изотопы сверхтяжелых элементов, то должна существовать целая плеяда изотопов и элементов, обладающих меньшими временами жизни, которые могут быть синтезированы и изучены на ускорителях тяжелых ионов.

В настоящее время определилось несколько интересных направлений, связанных с вопросами поиска и синтеза изотопов сверхтяжелых элементов. Каждое из этих направлений содержит в себе много интересных и неизученных вопросов, и прогресс любого из них может оказать огромное влияние на дальнейшее развитие ядерной физики, позволит по новому подойти к проблеме происхождения элементов и развить исследования химических и физических свойств далеких элементов.

Л и т е р а т у р а

1. Flerov G.N. *Nucleonica* 12, 1081 (1967); Г.Н.Флеров. Препринт ОИЯИ Д7-3623, 1967.
2. С.М.Поликанов. УФН 94, 43 (1968).
3. Strutinsky V.M., *Nucl. Phys.*, A95, 420 (1967).
Strutinsky V.M. *Nucl. Phys.* in print (1968).
4. Rudstam G., *Phil. Mag.*, 44, 344 (1955).
5. Rudstam G., Sørensen G. J. *Inorg. Chem.*, 28, 771 (1965).
6. Cowan G.A. Доклад на международной конференции по физике тяжелых ионов, Дубна, 1966 вып.2.
7. Е.Д.Донец. Г.Кумпф. ЖЭТФ 44, 799 (1963). Grochulski et al. *Contr. Intern. Conference on Nuclear Structure 7-11 (1967)* 215, Tokyo, Japan.

8. В.А.Карнаухов и др. Препринт ОИЯИ Р-1072, 1962.
9. Barton et al. *Canad. J. Phys.*, 41, 2007 (1963).
10. Г.Н.Флеров и др. ДАН СССР 120, 73 (1958).
Ghiorso et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1, 18 (1958).
11. Г.Н.Флеров. Препринт ОИЯИ Д7-3444, 1967. Е.Д.Донец, В.А. Друин,
В.Л.Михеев, Препринт ОИЯИ Р7-3766, Дубна, 1968.
12. Г.Н.Флеров и др. Препринт ОИЯИ Р7-3808, Дубна, 1968.
13. С.А.Карамян и др. Препринт ОИЯИ Р7-3732, Дубна, 1968.
14. Hill D., Wheeler J. *Phys. Rev.*, 89, 1102 (1953).
15. Myers W.D., Swiatecki W.J., *Nucl. Phys.*, 81, 1 (1966).
16. Wheeler, Maldner H., UCRL-16843 (1966).
Sobiczewski et al. *Phys. Lett.*, 22, 500 (1966).
17. В.М.Струтинский, Ю.А. Музычка. Доклад на международной конферен-
ции по физике тяжелых ионов, Дубна, 1966, вып. 2. Ю.А.Музычка
и др. Препринт ОИЯИ Р7-3733, Дубна, 1968.
18. Swiatecki W.J. *Super-Heavy Nuclei*, March 6, 1968,
G.Nilson et al. UCRL-18068 (1968).
19. С.Ф.Пауэлл. Вестник Академии наук СССР № 8, 1968 г.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 декабря 1968 года.