

(Доклад на заседании общества "Ресеч Прогресс", февраль 13, 1968, Лоуренсовская ядерная Лаборатория, Калифорнийский Университет, Беркли).

СВЕРХ-ТЯЖЕЛЫЕ ЯДРА

В. Дж. Святецкий

Лоуренсовская Ядерная Лаборатория

Калифорнийский Университет, Беркли, Калифорния.

6 марта, 1968.

В этом докладе я хочу остановиться на 3-х вопросах. Во-первых, я скажу несколько слов об обосновании исследований тяжелых элементов, особенно о теориях, согласно которым предполагаются относительно стабильными ядра с атомными номерами около  $Z=114$ .

Во-вторых, я опишу первые эксперименты, проведенные на "ХИЛИАК"е, целью которых было получение таких ядер.

И в заключение я потрачу несколько минут на спекулятивные рассуждения о чрезвычайно тяжелых "макроядрах".

План:

1. Обоснование;
2. Эксперимент по 114 элементу;
3. Макроядра.

1. В природе найдено 90 элементов, и еще дюжина синтезирована за последние 30 лет. Наиболее тяжелыми известными элементами являются лоуренсий,  $Z=103$ , и курчатовий,  $Z=104$ . Некоторые данные по 105 элементу были представлены в сентябре прошлого года Г.Н. Флеровым из Советского Союза.

В стремлении продолжить периодическую таблицу элементов хотелось бы понять основную причину ограниченного числа элементов почему в таблице около 100 элементов, а не 2 или 3, или, скажем 2 или 3 тысячи? Из каких комбинаций физических величин возникает число 100?



Физические принципы, ограничивающие рамки периодической таблицы, - это конкуренция между ядерными силами притяжения и электростатическими силами расталкивания. Граница периодической таблицы, - это конкуренция между ядерными силами притяжения и электростатическими силами расталкивания. Граница периодической системы определяется процессом деления ядер, происходящим в том случае, когда электростатическое отталкивание протонов превышает "цементирующие" ядерные силы. Действительно, число элементов в периодической таблице - безразмерная величина порядка отношения константы связи для сильных взаимодействий и константы связи для электромагнитных взаимодействий. Это может быть показано следующим образом. При обсуждении деления ядер определяющими величинами являются поверхностная энергия ядра и его кулоновская энергия, определяемые следующими выражениями:

$$E_n = C_1 \cdot A^{2/3}$$

$$\text{и } E_k = C_2 \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

Константа  $C_1$  связана с поверхностным натяжением ядра. Ее величина равняется примерно 20 Мэв, порядка энергии взаимодействия 2-х нуклонов, находящихся на расстоянии  $\sim 10^{-13}$  см. Величина  $C_2 \approx 0,7$  Мэв, т.е. порядка электростатической энергии взаимодействия двух протонов на таких расстояниях. Деление ядер имеет место, если электростатическая энергия ядер сначала равняется и потом превышает поверхностную энергию, т.е. когда

$$C_1 \cdot A^{2/3} \approx C_2 \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

или

$$C_1 \cdot Z^{2/3} \approx C_2 \cdot Z^{5/3}$$

если мы положим  $A \approx Z$ . Отсюда предельное значение величины

$Z$ :

$$Z \text{ пред.} \approx \frac{e_1}{e_2} \approx \text{несколько десятков.}$$

С течением времени было установлено, что эта граница периодической таблицы, определяемая электростатическим отталкиванием, может быть несколько сдвинута оболочечными эффектами. Поэтому, если за пределами периодической таблицы будет замкнутая оболочка протонов или нейтронов, или, желательно, их обоим; это создаст дополнительную связь и дополнительную стабильность ядра. В этом случае становится важным достичь с помощью подходящих средств островов сверхтяжелых ядер с относительно длинными периодами полураспада относительно деления.

В течение ряда лет в этом направлении успехов не было достигнуто, главным образом потому, что предполагали, что следующая замкнутая протонная оболочка, т.е. следующее магическое число протонов будет  $Z = 126$ , по аналогии с известным магическим числом нейтронов  $N = 126$ . Число протонов 126 было слишком далеко за пределами существующей периодической таблицы для того, чтобы его можно было достигнуть имеющимися снарядами из тяжелых ионов. Было похоже на то, что этот вопрос не будет разрешен до тех пор, пока не будут созданы новые ускорители, способные ускорять очень тяжелые ионы.

Взгляд на это положение начал изменяться, когда в результате теоретической работы Г.Мельднера и П.Рёпера в Германии, появившейся примерно в 1965 году, стало выясняться, что  $Z = 114$  скорее чем 126, может быть следующим магическим числом.

Причина того, что замкнутые протонные и нейтронные оболочки различаются в области "сверхэлементов" может быть отнесена за счет влияния электростатической энергии, которая, как мы

уже видели, начинает играть важную роль в ядрах, находящихся в конце периодической таблицы.

Как только возможность существования магического числа  $Z = 114$  была установлена, как это часто случается, выяснилось, что уже имевшиеся расчеты подтвердили то же самое. Так, в учебнике по ядерной физике М.А.Престона на стр.269 дана диаграмма для одночастичных протонных уровней, - так называемая Нильссонская диаграмма уровней, взятая из работы Моттельсона и Нильссона, опубликованной в 1959 году, из которой следует, что  $Z = 114$  является магическим числом.

Вторым фактором, изменившим точку зрения на сверхтяжелые элементы, было дальнейшее уточнение соотношений между магическими числами и высотой барьера потенциальной энергии относительно деления. Это было достигнуто благодаря работе В.Д.Майера и моей почти одновременно с Мельднером и Рёпером, которые показали, что может существовать замкнутая оболочка при  $Z = 114$ .

Наша работа позволила получить довольно неожиданный результат - барьер относительно деления для гипотетического ядра с замкнутыми нейтронными и протонными оболочками может быть также высоким или даже выше барьеров деления многих известных и долгоживущих тяжелых элементов. Кажется, это было чем-то вроде сенсации, и в минувшие два года была проделана значительная теоретическая работа в разных частях земного шара по вопросу о возможности существования сверхтяжелых ядер, особенно по предсказанию следующих магических чисел протонов и нейтронов.

Подведем итог:

Первое предположение Мельднера и Рёпера о том, что  $Z = 114$  а не  $Z = 126$ , является магическим числом, было подтверждено Собичевским, Гареевым и Калининным, <sup>1/4/</sup>Густафсоном, Ламмом,

Нильссоном и Нильссоном<sup>/8/</sup>, Струтинским и Музычкой<sup>/5/</sup>, Фридманом, К.Я. Уонгом<sup>/6/</sup>, Сигером и Перинс<sup>/7/</sup>. Е. Рост высказал сомнения по поводу этих предположений, но его возражения менее чем убедительны.

Кроме того, некоторые из выше упомянутых авторов напик, что вблизи числа нейтронов  $N = 184$  стабильность так же увеличивается.

Эти выводы основываются на экстраполяции одночастичной модели ядра и прежде чем приводить более подробные результаты позвольте сказать несколько слов о принципах, послуживших в основу предсказаний о магических числах за пределами периодической таблицы.

Идея заключается в следующем. Вы выбираете одночастичные потенциальные ямы для протонов и нейтронов, решаете уравнение Шредингера и находите одночастичные уровни энергии. Вы подгоняете подюжини параметров, описывающих потенциальные ямы таким образом, чтобы воспроизвести как можно более точно экспериментальные данные. Эти данные могут быть получены из спектроскопического анализа положения энергетических уровней, из масс ядер в основном состоянии, из наблюдаемых квадрупольных моментов и т.д. Следовательно, есть модель оболочек, которая достаточно хорошо воспроизводит известные магические числа и основные свойства, связанные с оболочечными эффектами. Затем Вы экстраполируете параметры потенциальной ямы в сверхтяжелую область, скажем, к массовому числу  $A \approx 300$  и надеетесь, что в Вашей модели достаточно физики для того, чтобы экстраполяция была довольно надежной. С одной стороны, выяснилось, что выше упомянутая процедура дает хорошие результаты при расчетах дополнительной стабильности ядер, связанной с известными магическими числами.

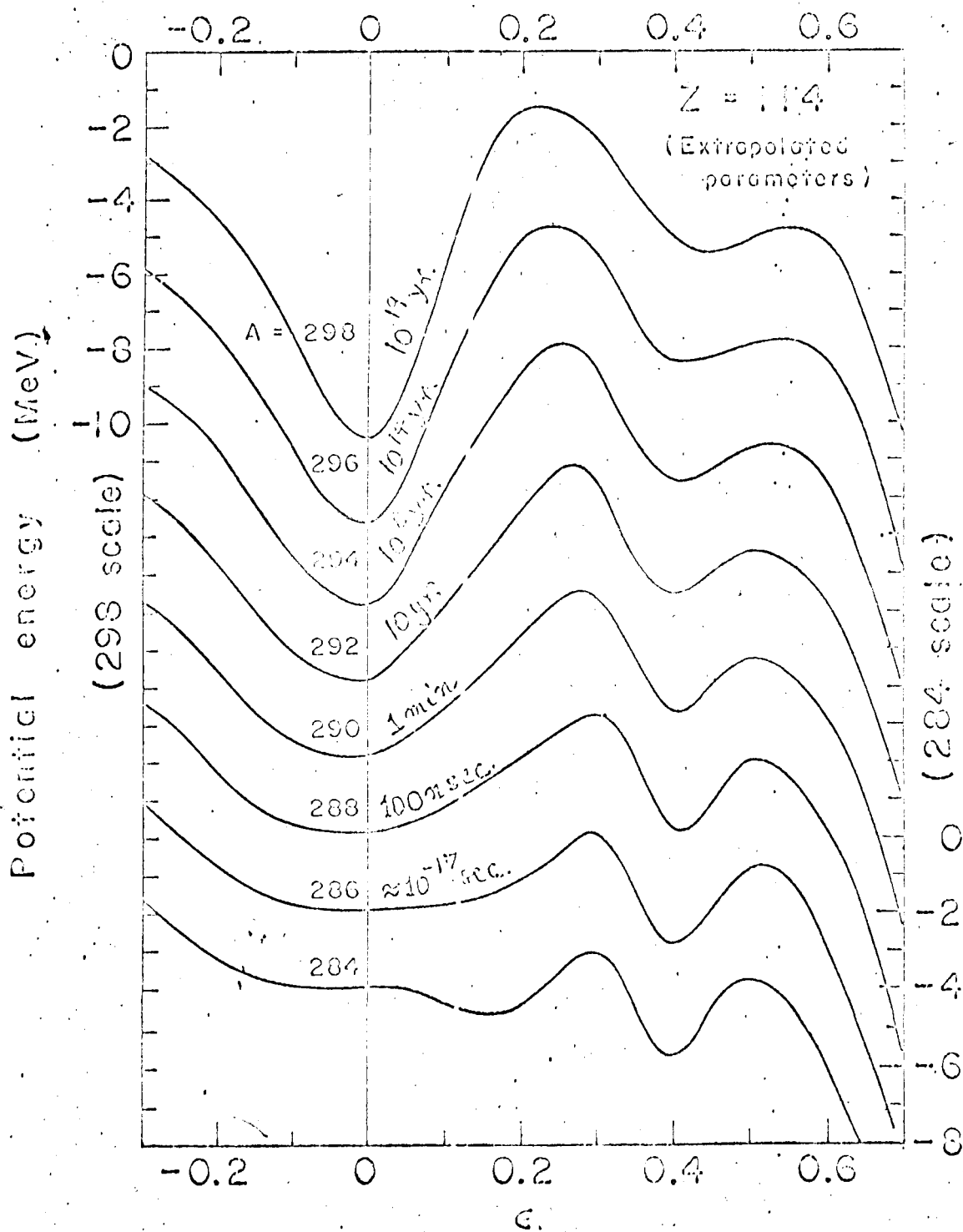
ческими числами. С другой стороны, все предсказания основываются на асимптотической модели в неизвестную часть периодической таблицы. Думаю, что было бы справедливо рассмотреть эти расчеты, как очень разумные предварительные исследования, но их нельзя расценивать, как источник надежных количественных предсказаний.

Расчеты довольно длинные - нужно решить волновое уравнение для многих частиц в деформируемой потенциальной яме и лишь несколько таких исследований, причем далеко не исчерпывающих, сделано в настоящий момент. Расчеты Стигера и Перинго, датированные летом прошлого года, являются наиболее убедительными. Возможно, что наиболее фундаментальные исследования в отношении сворачиваемых элементов представлены работой С.Г. Нильссона и его соавторов в Швеции и Польше, которая была продолжена Нильссоном и Р.Эм. Нильссон здесь, в Миническом отделе. В этих расчетах содержится огромное количество информации, и я хочу показать лишь небольшую часть ее на двух рисунках, имеющих отношение к ожидаемым свойствам изотопов 114-го элемента.

На рис. I показано появление барьеров деления для серии изотопов с  $Z = 114$  и  $N$  от 170 до 184. Дан график энергии деформации ядра в Мэвах в зависимости от параметра деформации  $\xi$ , который характеризует отклонение формы ядра от сферической.

Эти кривые энергии деформации имеют существенное значение для ответа на вопрос, будет ли ядро стабильным относительно деления или нет. Семейство кривых иллюстрирует несколько предельных ситуаций. Для изотопа с  $N = 170$  ( $A = 284$ ), не-

-1/a-



XDLG81-1650

Fig. 1

чае  $N=184$ ; при  $N=184$   $T_{1/2} \approx 10^{20}$  лет.

Нильссоном были рассмотрены или рассматриваются в настоящее время изотопы других элементов с  $Z$  от 114 до 124. Вместо подробного описания этих результатов позвольте мне сделать следующее. Похоже на то, что результаты, полученные Нильссоном и Никсом, также как и результаты Сигера и Перри подчиняются закономерности, вытекающей из поведения оболочечных эффектов вблизи известных магических чисел в периодической системе. Поэтому я использую эту закономерность и сравниваю с имеющимися предсказаниями для того, чтобы составить частично гипотетическую карту острова стабильности с центром при  $Z=114$  и  $N=184$  - земли обетованной, до которой мы пытаемся добраться.

На рисунке 3, в основу которого положена работа Майе и моя, показано полуэмпирическое обобщение всего, что известно о влиянии замкнутых оболочек на стабильность ядер. Серая полоса на рисунке изображает известную часть периодической таблицы в координатах  $N$  и  $Z$ . Показана топографическая карта оболочечных эффектов. Линиями обозначены линии уровня от  $-10$  Мэв до  $+10$  Мэв, которые выражают энергию дополнительной связи, т.е. дополнительную стабильность, благодаря оболочечным эффектам (минус 10 Мэв обозначает энергию дополнительной связи - наименьшая масса). Этот график имеет к нашей дискуссии следующее отношение: оказывается, что дополнительная стабильность, обусловленная оболочечными эффектами, прямо отражается в высоте барьера деления. Зависимость тривиальна: 1 Мэв дополнительной стабильности дает 1 Мэв дополнительного барьера деления.



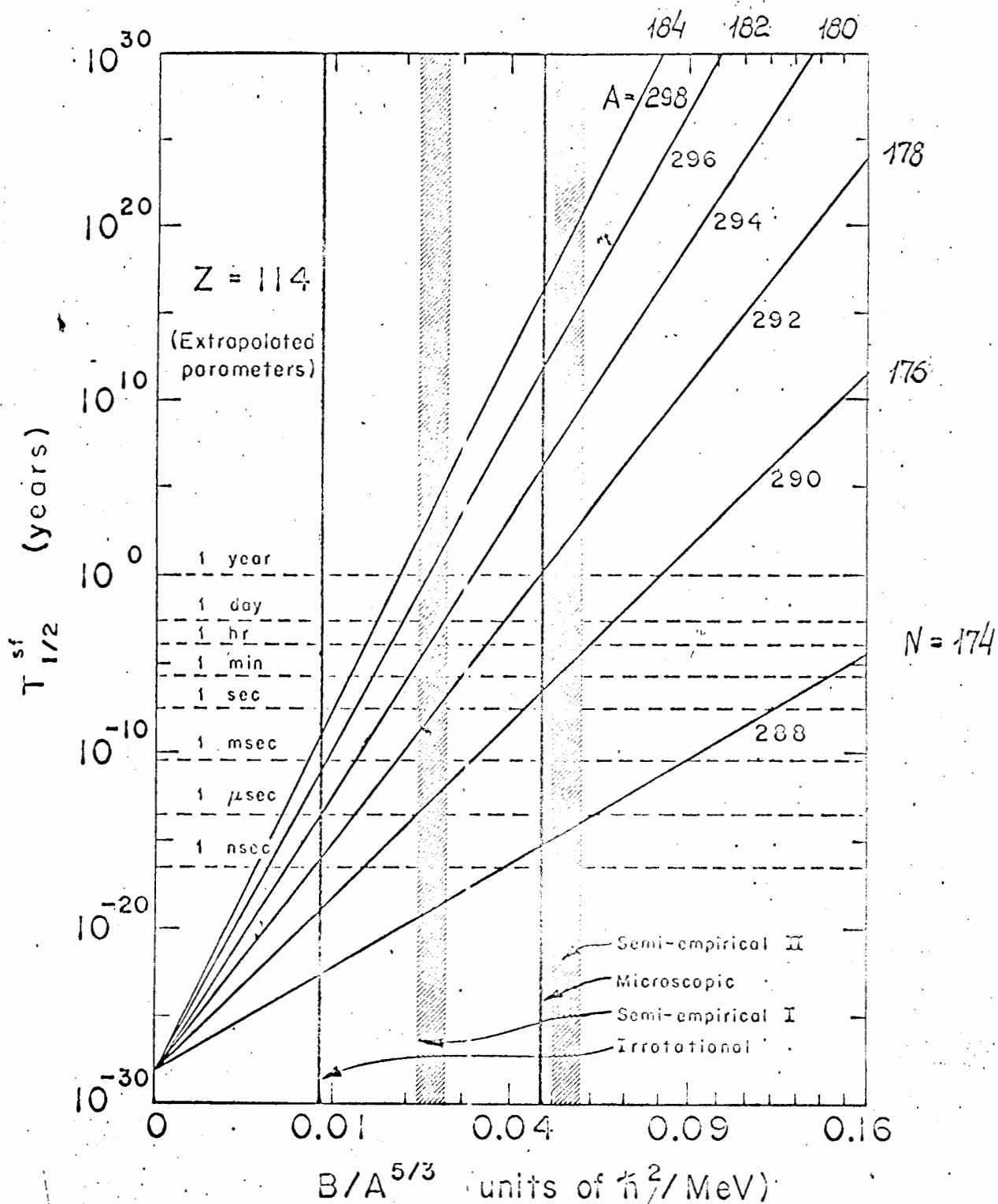


Fig. 2

XBL681-1647

Рассматривая периодическую таблицу, Вы увидите ряд долин, простирающихся вдоль линий магических чисел, которые обозначают дополнительную стабильность, связанную с замкнутыми оболочками. Я хочу, чтобы Вы обратили внимание на то обстоятельство, что в области дважды магических чисел, где пересекаются две долины, есть квадратные области дополнительной стабильности с границами приблизительно расположенными под углом  $45^\circ$  к осям координат.

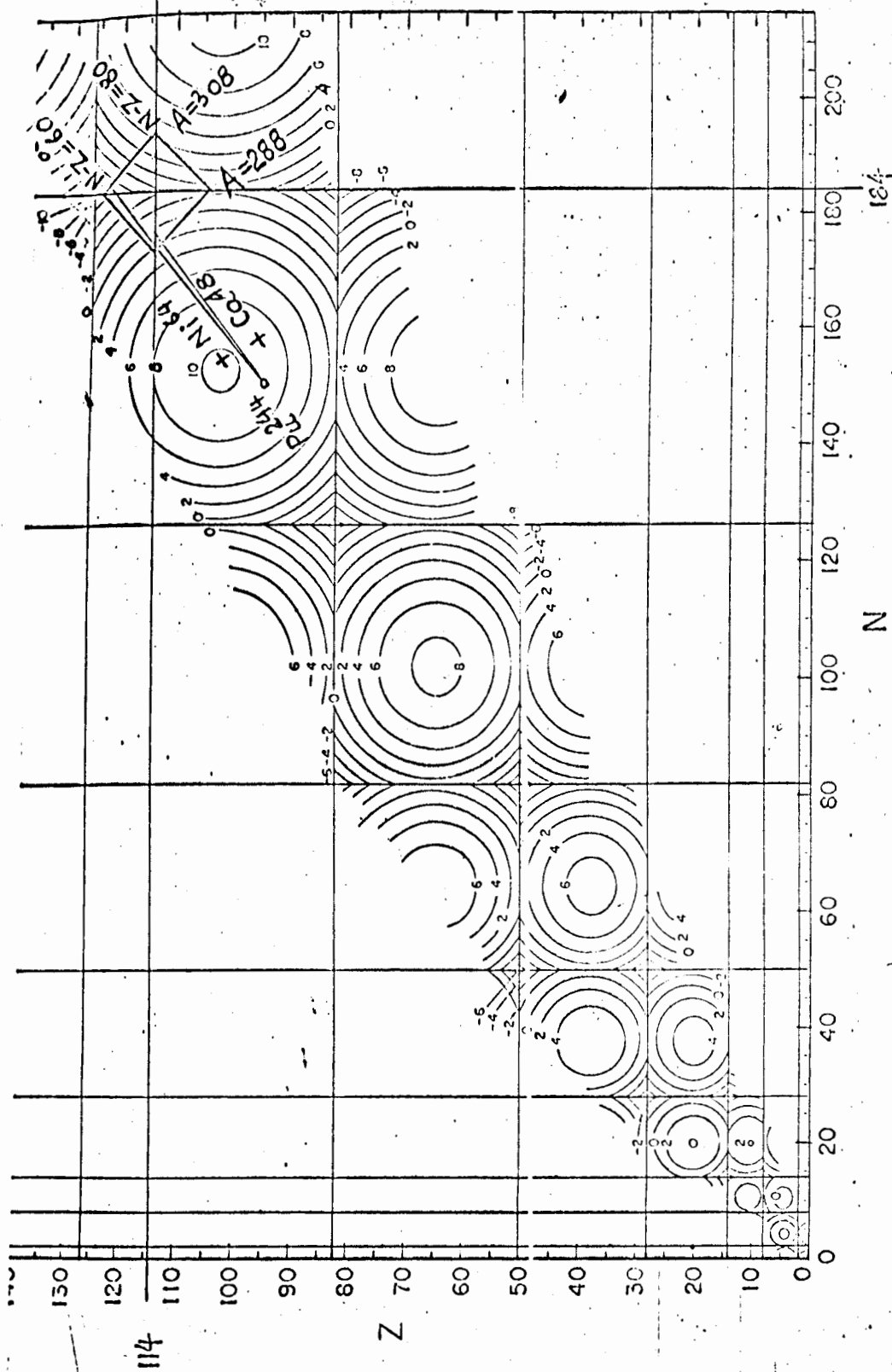
Предсказанное двойное магическое число при  $Z = 114$  и  $N = 184$  показано справа. Для него предполагается наличие дополнительной связи величиной в несколько Мэв. Используя результаты Нильссона и Никса как основу, и добавив значительную долю догадок (за что Нильссон и Никс не могут быть ответственны) я нарисовал квадрат, внутри которого можно ожидать времени жизни относительно деления более наносекунд. Это определяет остров относительной стабильности, который можно надеяться изучить экспериментально. Углы острова находятся при  $Z \approx 104$  и  $Z \approx 124$ , и при  $N \approx 174$  и  $N \approx 194$ . Боковые стороны определяются  $A \approx 288$  и  $A \approx 308$ , а также  $N-Z \approx 60$  и  $N-Z \approx 80$ . Как я говорил, не принимайте эти цифры слишком буквально.

Возникают два вопроса:

- (1) Как добраться до острова?
- (2) Как выглядят туземцы?

Меня занимает преимущественно первый вопрос; уверен, что туземцы будут похищены, как только мы найдем путь добраться до них.

Можно думать о трех способах знакомства с туземцами:



114

N

Рис. 3. Показаны линии уровня в Мэв двухмерной оболочечной функции  $S(N, Z)$ . Серая полоса соответствует области ядер и изотопов с массами  $A=82, 126$  - гипотетические. Комбинированные  $Z=114, N=184$  - гипотетические. Отмечен остров стабильности с центром в этой точке также как и рядом:

$N=200 + N=64 = 124, Z=126 + Z=18 = 144$

48

11488

(1) Искать сверхтяжелые элементы в природе.

(2) Добавлять большие дозы нейтронов к известным тяжелым элементам (в реакторах большой интенсивности или путем ядерных взрывов) и положиться на успешный захват нейтронов и бета-распады для того, чтобы добраться до острова (это похоже на попытку плыть к острову).

(3) Бомбардировать тяжелую мишень тяжелыми ионами с целью достичь этот остров одним прыжком. (Это похоже на перелет в самолете или ракете).

Метод (1) представляет интерес только в том случае, если все периоды полураспада нужных элементов чрезвычайно велики. Это относится также к альфа- и бета-распадам и представляется нереальным.

Метод (2) кажется безнадежным в настоящее время, хотя в будущем он может оказаться осуществимым.

Метод (3) является стандартным способом получения новых элементов.

Большинство работ по новым элементам в наши дни сделано на ХИЛАК<sup>е</sup> в Беркли и в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне севернее от Москвы, в группе, возглавляемой Г.Н.Флеровым. Если сверхтяжелые элементы будут получены в ближайшем будущем, это произойдет, вероятно, в одном из этих двух мест.

Здесь в Беркли группа А.Гиорсо на ХИЛАК<sup>е</sup> имеет известную и длинную историю в области открытия новых элементов. Начиная с лета прошлого года, когда нас впервые взволновала возможность получения 114-го элемента, группа Стена Томпсона из Лаборатории Ядерной Химии, работала, главным образом, в направлении прои-

новения на остров сверхтяжелых элементов. Участвовали в экспериментах:

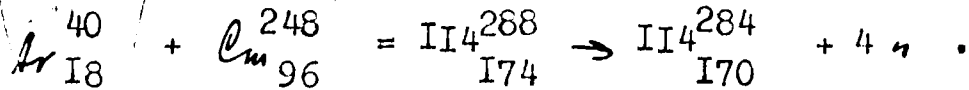
Г.Р.Боуман	Р.М.Латимер
Р.Г.Гатти	Л.Г.Моретто
Дж.К.Джаред	С.Г.Томпсон

Мы использовали опыт Гиорсо и его группы в области исследований сверхтяжелых элементов. Т.Сиккеланд помог нам в первых работах. Мы также пользовались программой для счетно-вычислительных машин, разработанной Т.Сиккеландом, Дж.Е.Кларксоном, Д.Ф.Лебеком и А.Гиорсо, которая имела большую ценность в определении оптимальных энергий бомбардирующих частиц и предполагаемых поперечных сечений.

Наше предприятие несколько отличается от традиционного, ведь периодическая таблица расширяется шаг за шагом маленькими шагами. В нашем случае мы должны сделать один большой прыжок, опираясь на теорию, которая скажет, куда направиться и чего ждать. Это похоже на морское или воздушное путешествие, если сравнить его с изучением земли. Нам повезло в том отношении, что нашими штурманами в критический момент были С.Г.Нильссон и Дж.Р.Никс (К сожалению, в прошлом месяце произошел пиратский налет во время сильного волнения и Никс был похищен и увезен в Лос-Аламос).

Какие тяжелые ионы и тяжелые мишени нужно использовать для того, чтобы добраться до острова? Обследование периодической таблицы показывает, что проблема эта нетривиальна. Вероятно, только дюжина комбинаций мишени и снаряда дают возможность приземлиться непосредственно на острове. (Я упомяну косвенные методы позже). Ограничивающим фактором является внесение достаточ-





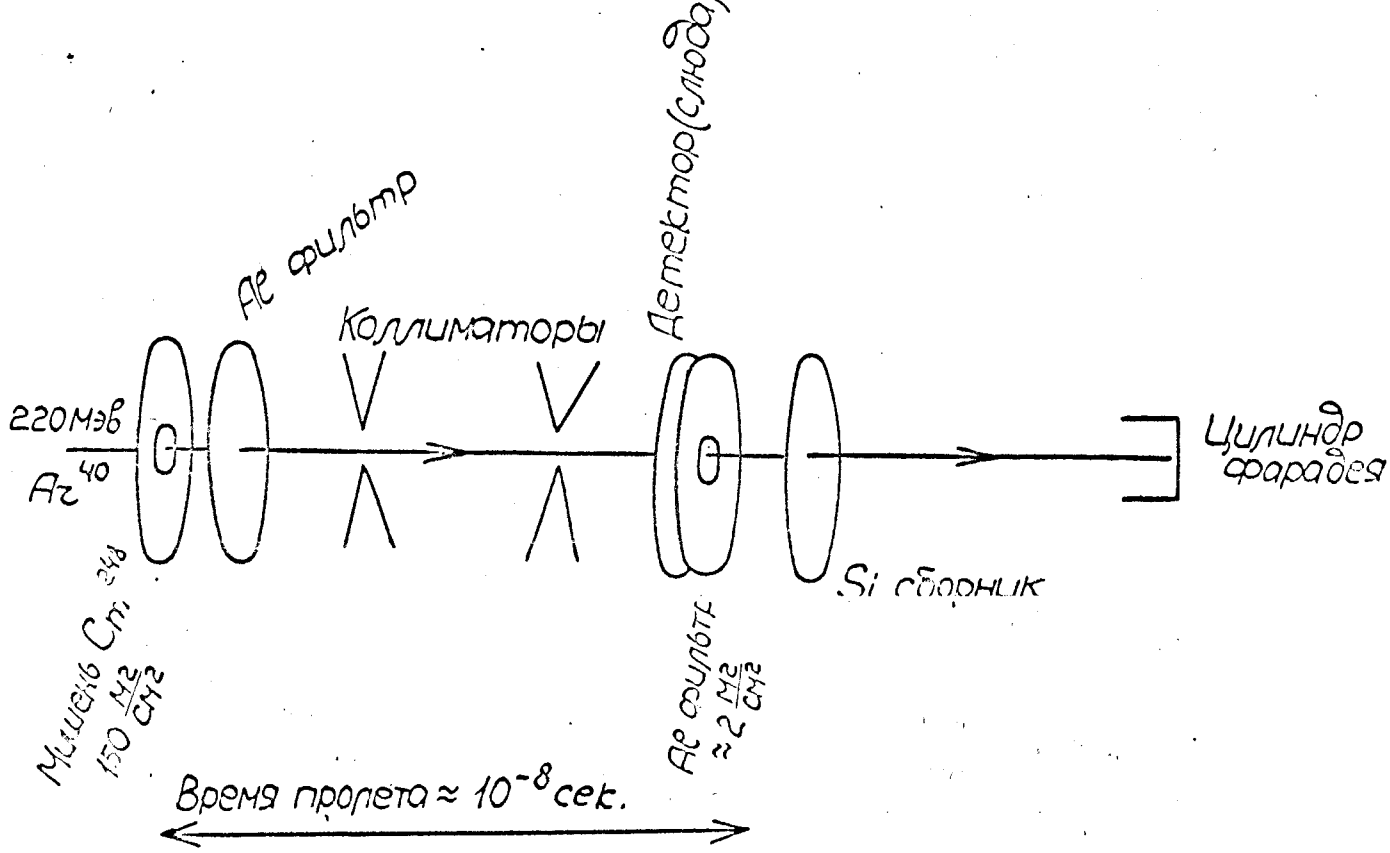
Изотоп элемента II4 со 170 нейтронами находится вне западной части на расстоянии, равном четырем нейтронам - эта девиация вызвана "охлаждающим нейтронным ветром", связанным с испарением нейтронов из составного ядра. Поэтому, к сожалению, мы еще не в состоянии бомбардировать Западную Точку.

В результате наши возможности получения достаточно долгоживущего изотопа элемента II4 выглядят неблестяще. Тем не менее, мы продолжаем эксперимент  $\text{Ar} + \text{Cm}$  по двум причинам. Во-первых, это дает нам возможность развивать чувствительную и надежную методику регистрации для использования в будущем. Вторая причина, как я уже упоминал, заключается в том, что соображения на которых основан магический квадрат, нельзя рассматривать как твердые предсказания. Не исключена возможность, что природа окажется более доброй, чем Нильссон и Никс. Я уверен, что наши штурманы в отличие от настоящих, будут рады, если мы налетим на риф, не отмеченный на карте к западу от магического квадрата.

Позвольте рассказать Вам более подробно о том эксперименте, которым мы занимаемся последние 6 месяцев.

#### Эксперимент по II4-му элементу.

Эксперимент чрезвычайно прост:





Предполагается, что  $A_r^{40}$  полностью поглощается  $См^{248}$ . Многие компаунд-ядра могут распадаться, но те, что уцелеют, будут выбиты из мишени с энергией  $220 \frac{40}{288} = 31$  Мэв. Затем они тормозятся в  $Al$  - фольге, назначение которой отфильтровывать те из нежелательных примесей, которые могут вылетать из мишени. Составные ядра, если время их жизни больше, чем  $10^{-8}$  сек. оседают затем на  $Li$  - сборнике. Сборник прозрачен для ионов аргона имеющих энергию 220 Мэв. Предполагается, что ядра  $II4$ -го элемента, осевшие на сборнике, будут спонтанно делиться либо сначала испытают бета или альфа-распад, а затем будут делиться. В любом случае осколки деления от  $II4$ -го элемента или от дочернего продукта будут регистрироваться на слюдяном диске, повернутом к сборнику, но защищенном от пучка. Следы деления на слюде видны в микроскоп после травления плавиковой кислотой.

В типичном эксперименте, скажем, в проведенном нами 8-го сентября 1967 года, мы имели  $0,56 \times 10^{15}$  ионов аргона, прошедших через  $См^{248}$  толщиной  $150 \text{ мг/см}^2$ . Слюдяной детектор зарегистрировал 28 следов деления. Мы были бы удовлетворены этим, но, к несчастью, накануне празднования открытия  $II4$ -го элемента, к своему удивлению, обнаружили, просматривая второй кусок слюды из контрольного опыта, когда  $См$  мишень была убрана, что продолжаем получать  $II4$ -й элемент и с той же скоростью, что и раньше. Должно быть, это был случай спонтанного образования  $II4$ -го элемента или, что более вероятно, мы столкнулись с трудностями фона. Видите ли, сборник подвергается воздействию  $10^{15}$  ионов аргона, и если в нем есть малейшая примесь достаточно тяжелого элемента, то он будет распадаться и оставлять следы на слюде. Примеси элементов между  $Li$  и  $U$  порядка 1 часть на  $10^8$  буде

достаточно для появления следов, которые мы видели. Мы иска-  
чистые сборники и  $Li$ , используемый нами, уже на порядок ч-  
ще чем  $Al$ , с которого мы начинали. Кроме этого, для отдел-  
ния осколков деления  $U^{235}$ -го элемента от осколков деления пр-  
сей мы можем использовать еще одну возможность, более тонку-  
но потенциально очень эффективную. В ее основе лежит тот факт,  
что ядра  $U^{235}$ -го элемента, осевшие на сборники, будут неподвиж-  
ны во время деления, тогда как примеси, делящиеся под дейст-  
вием ионов  $Ar$ , будут делиться в полете. Из-за большого импу-  
лса, внесенного аргоном, осколки, движущиеся назад, будут иметь  
значительно уменьшенную энергию. Они могут быть отфильтрова-  
ны другой алюминиевой фольгой, расположенной над слюдяным детек-  
тором. Эффект может быть действительно колоссальным, так как  
энергия осколков уменьшается с примерно 100 Мэв до 30-50 Мэв.  
Для примесей более легких, чем  $U$ , эффект будет даже сильнее,  
и примеси ниже редких земель вообще не будут способны давать  
осколки движущиеся назад. Однако, остаются трудности, связанные  
с очень тяжелыми примесями, так как ядра вблизи урана могут  
разлетаться даже после того, как их слегка заденет аргон. В этом  
случае их импульс вперед будет мал и отличить образующиеся  
осколки деления от осколков элемента  $U^{235}$  будет очень трудно.  
Установлено, что  $Al$  фильтр, расположенный над слюдой, уменьшил  
количество следов на порядок, и мы считаем, что можем создать  
окончательную детектирующую систему (окончательную в практиче-  
ском смысле), в которой не будет следов деления примесей после  
облучения.

Вторая трудность, с которой мы сталкиваемся, когда мы  
начинаем видеть следы деления, не связанные с фоном, — идея

тификация полученных элементов и изотопов. Идентификация нового элемента всегда сложна, если полученные поперечные сечения небольшие. Хотя вполне возможно получить большие поперечные сечения, используя подходящие ионы, не следует рассчитывать на это. Рассмотрим эти проблемы идентификации. Первый  $\alpha$  фильтр-одна из мер, которая поможет исключать некоторые альтернативы. Мы также готовим камеру рассеяния для наблюдения совпадений осколков. Я не хочу касаться этих вопросов сейчас, поскольку, к счастью или к несчастью, они потребуют в будущем больших усилий для их разрешения. До сих пор мы не наблюдали событий, к которым можно было бы с уверенностью отнести к чему-либо еще кроме фission. Можно было бы подвести итог нашим экспериментам к настоящему времени, сказав, что мы установили верхний предел для поперечных сечений образования более легких изотопов 114-го элемента, отстоящих на несколько нейтронов к Западу от магического квадрата (Наш верхний предел относится только к изотопам с  $T_{1/2}$  между наносекундами и днями - время полета ядра отдачи к сборнику равно величине порядка наносекунд, и продолжительность облучения на ХИЛАК<sup>е</sup> порядка 1 дня).

Предельное значение поперечного сечения, установленное нами для реакции ( $Cm^{248} + Ar^{40} \rightarrow Z = 114; N = 170$ ) приблизительно равно  $10^{-30} - 10^{-31} \text{ см}^2$ .

Подробное описание результатов можно найти в ежегодном отчете Химического Отдела (за 1967 год).

Сейчас мы разрабатываем новую систему, включающую несколько усовершенствований, которые позволят нам отодвинуть ниже этот верхний предел. Однако, как я уже объяснял, мы не рассчитываем найти сверхтяжелые элементы даже при помощи усовершен-

вованной системы до тех пор, пока мы используем ионы <sup>40</sup>.  
Ключ к получению сверхтяжелых элементов, если они существуют, в предсказанной области - это получение обогащенных нейтронами ионов из области между  $\text{Ca}^{48}$  и  $\text{Ni}^{64}$ . Я показал эти две возможности на рис.3.

В будущем, когда станут доступными более тяжелые ионы, возможность достижения магического квадрата может быть увеличена за счет других типов реакции, других методов обстрела острова стабильности. Иными словами, Вы стремитесь выстрелить в объект расположенный за островом и затем рассчитываете на испускание заряженных частиц для того, чтобы попасть в цель: Вас несет вниз к острову "течение заряженных частиц".

При небольшом "перелете" можно надеяться на испускание альфа-частиц, возможно, лития, бериллия, углерода или ядер кислорода. Преимущество реакций "перелета" заключается в том, что можно получить более высокие отношения числа нейтронов к числу протонов в конечных ядрах. Это можно видеть при переходе к реакциям "далекого перелета" типа  $\text{Pu}^{244} + \text{Pu}^{244}$ . Это тот тип реакций, который особенно нравится Флерову. Сначала вы образуете шарик с массовым числом  $A = 488$  и  $N = 300$  и  $Z = 188$ . Этот шарик затем ~~разваливается~~ разваливается на 2, 3, 4 или более частей. Эти части могут различаться по массам, но предполагается, что они имеют отношение числа протонов и нейтронов где-то около  $188/300 = 0.6267$ . Таким образом, при взрыве будут образовываться ядра в пределах всей периодической таблицы. Как вы можете убедиться, центр такого пятна очень близко подходит к центру магического квадрата, где отношение  $\frac{Z}{N} = 0,6196$ . (Он проходит через  $Z = 115$ ,  $N = 184$ ). Этот предельный "пере-

лет" будет иметь также то преимущество, что он заполняет такую большую часть периодической таблицы продуктами, что есть возможность найти новые элементы, где бы они ни находились - возможно и за  $Z = 114$ . (С.Г.Нильссон имеет данные, свидетельствующие о том, что, возможно,  $Z = 164$  - магическое число). Идея здесь заключается в том, что вы засыпаете структурный рельеф на протяжении всей периодической таблицы осколками шарика, которые собираются в углублениях, связанных с магическими числами.

Позвольте резюмировать эту часть моего доклада, прежде чем перейти к вопросу о предположениях по поводу макроядер.

В известной части периодической таблицы есть 6 или 7 магических чисел нейтронов и протонов, из них  $N = 126$  и  $Z = 82$ , наиболее известны. Нет оснований думать, что 126 и 82 - последние замкнутые оболочки. Их может быть еще несколько в области до  $A = 500$ , которая будет доступна после применения новых типов ускорителей тяжелых ионов. Тогда можно будет получить ряд новых сверхтяжелых элементов. Только на острове вокруг  $Z = 114$ ,  $N = 184$  для которого накапливаются теоретические данные, может быть найдено 20 элементов (около 200 изотопов!) с периодами полураспада более наносекунд. Что касается гораздо более близкого будущего, то один берег этого острова, а именно, элементы с  $Z$  от 114 до 124, почти достигаем для ускорителей, имеющих уже в Беркли и Дубне. Для достижения этой цели необходимо получение ускорителей тяжелых ионов  $\text{Ca}^{48}$  и  $\text{N}^{64}$ .

### Макроядра?

Разрешите закончить доклад некоторыми гипотезами о самом самом отдаленном конце периодической таблицы элементов. Как я уже говорил в начале, таблица в ее современном виде ограничива-

ся электростатическим отталкиванием, которое превышает ядерное поверхностное натяжение. Кажется, что это абсолютный конец, но давайте тем не менее рассмотрим все более и более взрывчатые системы, которые будут постепенно образовываться при делении к ядру все большего количества частиц. Посмотрим, что должна сказать нам о судьбе таких систем полуэмпирическая формула капельной модели для энергий связи. Эта формула пренебрегает оболочечными эффектами, которые были до сих пор в центре нашего внимания, но она хорошо воспроизводит тенденции в среднем, которые я и хочу сейчас рассмотреть.

Формула для энергии связи выглядит следующим образом:  
 $E = -c_1(\text{объем}) + c_2(\text{поверхность}) + (\text{кулоновская энергия}) + \dots$

Последние два члена являются секретными: Секретный Член один и Секретный Член два. Сейчас мы к ним подойдем.

Мы отмечали ранее, что для того, чтобы капля ядерной жидкости была стабильна относительно деления, необходимо, что

$$\frac{\text{Кулоновская энергия}}{\text{Поверхностная энергия}} \lesssim 1$$

Оказывается, что мы ошибаемся в два раза. В действительности количественное условие

$$x = \frac{1}{2} \frac{\text{Кулоновская энергия}}{\text{Поверхностная энергия}} < 1$$

есть истинное условие стабильности ядра.

Когда мы переходим к более тяжелым ядрам  $x$  становится больше 1 и система будет все более и более нестабильной. При  $x = 2.212$  происходит, однако, странная вещь. Электростатическое давление становится таким большим, что в центре образуется пузырь (ядерная кавитация). Ядро в форме толстой сферической

ложительным зарядом, экранированным электронным облаком. Вопрос стабильности или нестабильности такого объекта, насколько мне известно, является нерешенной проблемой.

Оставим его без ответа и вернемся к твердому шаровидному ядру, так как здесь нас ждет еще один сюрприз. Будем добавлять больше и больше частиц в ядро, стараясь все время сделать его твердым и сферическим. Оно будет стремиться выйти из повиновения - это похоже на состояние, когда сидишь на бомбе, готовой взорваться. Что может остановить кулоновскую энергию от взрыва? Да, вы угадали, это может сделать Секретный Член два!

Секретный Член 2 - это гравитационная энергия ядра:

$$S_2 = \frac{3}{5} \frac{G M^2 A^2}{R}, \quad \text{где } M - \text{масса нуклона.}$$

Она имеет ту же форму, что и кулоновская энергия

Кулоновская энергия  $= \frac{3}{5} \frac{e^2 Z^2}{R}$  (или  $\frac{1}{2} \frac{e^2 Z^2}{R}$  если протоны предпочтут сидеть на поверхности ядра).

Если ядро достаточно велико, гравитационная энергия нейтрализует кулоновское отталкивание. Насколько большим оно должно быть?

Сначала мы должны решить, каким должно быть отношение  $\frac{Z}{A}$  нашего макроядра. Нам хотелось бы, чтобы оно было бета-стабильным, поэтому мы будем действовать вдоль долины бета-стабильности. Если использовать стандартное ядерное уравнение для определения местонахождения этой долины, что будет почти наверняка ошибкой, - (смотри ниже), мы находим для больших

$$Z = (\text{константа}) A^{1/3}$$

Константа равна примерно 100. Поэтому мы имеем

$$\text{Кулоновская энергия} \approx \frac{3}{5} \frac{e^2 (100)^2 A^{2/3}}{R}.$$

Приравнивая кулоновскую и гравитационную энергию, мы находим

$$A^{1/3} \approx \frac{(100^2 e^2)^{1/4}}{2M^2}$$

или  $A^{1/3} \approx 10^{10}$ ,

$$A \approx 10^{30},$$

$$Z \approx 10^{12}$$

$$R \approx 10^{-13} \times 10^{10} = 10^{-3} \text{ см.}$$

масса  $\approx 1$  тонна.

Результат неожиданный. Когда я в первый раз доводил до конца этот расчет, я думал, что привлечение гравитации к ядронной проблеме наверное приведет к объекту типа нейтронной звезды. Но совсем нет учета гравитационной и электростатической энергий приводит к размерам не большим, чем размеры частицы пыли, с трудом видимой невооруженным взглядом. В объектах такой величины и больше, гравитация стабилизирует макроядро относительно деления. Будет ли такой объект действительно стабильным? Можно ли найти его в космосе?

Несколько вопросов остаются открытыми. Во-первых, расчет бета-стабильности нужно сделать более точным, с учетом члена  $\beta$ . Это может резко изменить оценку отношения  $Z : A$ . Во-вторых, если отношение  $Z : A$  порядка  $10^{12} : 10^{30} = 10^{-18}$  то макроядро, по-существу, является каплей нейтронной материи и необходимо поэтому ответить на вопрос, является ли связанная нейтронная материя. Неясно, стабильно ли ядро относительно утечки нейтронов, одного за другим, даже если оно устойчиво относительно макроскопических изменений формы. Мне известны две имеющие отношение к данному вопросу работы о нейтронно-



материи: Е.Е.Салпетер, *Анн.Физ.* II, 393 (1960) ; и К.А.Брак  
Дж.Г.Гаммель и Дж.Т.Кубис, *Физ.Рев.* II8, 1095 (1960). Нейтр  
ная материя - это один из бесчисленных вопросов, на которые  
может дать также ответ Билл Майерс из здешней Теоретической  
группы в рамках его трактовки ядра с точки зрения модели То  
са-Ферми. Из этих работ следует, что энергия связи нейтронн  
материи трудно определима, поскольку она представляет собою  
разность между двумя большими почти одинаковыми числами. Во  
можно, что нейтронная материя не связана, но я считал бы эт  
вопрос открытым.

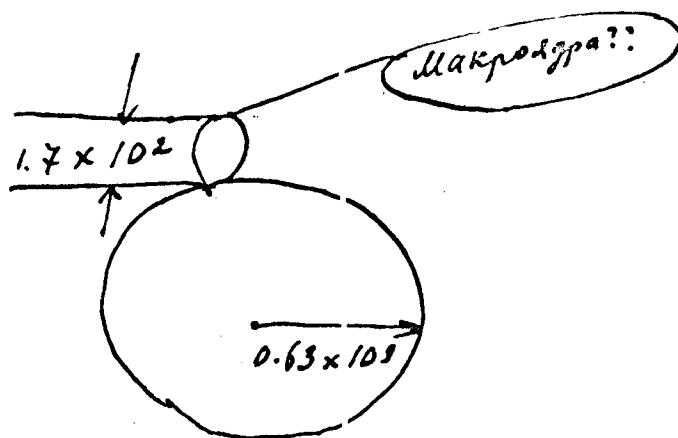
Мой вывод о стабильности макроядер, кажется, также мож  
считать неокончательным. Для изучения этой проблемы следует  
взять ур. (1) для энергии  $N$  нейтронов,  $Z$  протонов и  $Z_2$  эл  
тронов, включая величины  $S_1$  и  $S_2$ , и исследовать как можно  
более исчерпывающие различные равновесные конфигурации, исхо  
из условия

$$\delta E = 0 \quad (2)$$

Надеюсь, что я убедительно доказал необходимость быть  
готовым к сюрпризам. Во-первых, к сюрпризам, связанным с ма  
ческими числами (они несколько бледнеют после наших рассужде  
о макроядрах). Далее, к сюрпризам, которые могут предподнест  
электронные и гравитационные энергии.

Как предостережение против предположения, что нет ниче  
более интересного, чем ядра с атомными номерами около 100 бу  
следующий результат. Мы знаем эмпирически, что условие равно  
весия (2) имеет очень, очень странные решения. Одно из них  
проиллюстрировано на рисунке. Предположим, мы берем  $N =$   
 $1,9 \times 10^{51}$ ,  $Z = 1,7 \times 10^{51}$  и  $Z_2 = 1,7 \times 10^{51}$ . Тогда для нас являет

фактом, что одно решение ур. (2) будет иметь форму двух соприкасающихся макроядер - большого и малого. Большое имеет форму шара в радиусом  $6,3 \times 10^8$  см. Малое сильно деформировано его большая ось -  $1,7 \times 10^2$  см. Это малое макроядро действительно странно. Оно имеет руки, ноги и бороду - и рассуждает о макроядрах в среду вечером<sup>х)</sup>.



пример решения  $\delta E = 0$ .

- 
- х)  $0,63 \cdot 10^9$  см - радиус земного шара,  
 $1,7 \cdot 10^2$  см - примерный рост бородатого В.Дж.Святецкого.

REFERENCES

1. G. T. Seaborg, article for Ann. Rev. of Nucl. Sci. preprint, 1968.
2. H. Meldner and P. Röper, referred to on p. 68 in W. D. Myers and W. J. Swiatecki, UCRL-11930 (1965); Nucl. Phys. 81, 1 (1966); also H. Meldner, UCRL-16843 (1966).
3. M. A. Preston, Physics of the Nucleus (Addison-Wesley Publishing Co., 1962); T. Sikkeland, J. E. Clarkson, D. F. Lebeck, and A. Ghiorso, UCRL-16773.
4. A. Sobiczewski, F. A. Garcev, and B. N. Kalinkin, Phys. Letters 22, 500 (1966).
5. V. M. Strutinski and Yu. A. Muzychka, Proc. International Conference of the Physics of Heavy Ions, 13-19 October 1966, Dubna, Vol. 2, p. 51.
6. C. Y. Wong, Phys. Letters 21, 688 (1966).
7. P. A. Seeger and R. C. Ferisho, IA-3751, UC-34, Physics, TID-4500 Los Alamos report, 1967.
8. C. Gustafson, I. L. Lamm, B. Nilsson, and S. G. Nilsson, Proc. Lysekil Conference, 1967.
9. E. E. Salpeter, Ann. of Physics 11, 393 (1960); K. A. Brueckner, J. L. Gammel, and J. T. Kukis, Phys. Rev. 118, 1095 (1960).