

Ж 53  
А99

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

# Атомная Энергия

Ежемесячный журнал  
ГОД ИЗДАНИЯ ТРИНАДЦАТЫЙ

АТОМИЗДАТ ■ МОСКВА ■ 1968

Том 24 ■ Апрель ■ Вып. 4

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), И. Н. ГОЛОВИН, Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора), А. К. КРАСИН, А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор), П. Н. ПАЛЕЙ, Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМИРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО

### СОДЕРЖАНИЕ

#### СТАТЬИ

- А. К. Красин, И. И. Саламатов, В. Б. Нестеренко, А. Н. Девойно. Развитие исследований в Институте ядерной энергетики АН БССР . . . . . 307
- С. Т. Конобецкий, Б. М. Левитский, Л. Д. Пантелеев. К вопросу о механизме радиационного роста урана при малых дозах облучения . . . . . 312
- В. И. Векслер, В. П. Саранцев, А. Г. Бонч-Осмоловский, Г. В. Долбильов, Г. А. Иванов, И. П. Иванов, М. Л. Иовнович, И. В. Кожухов, А. Б. Кузнецов, В. Г. Маханьков, Э. А. Перельштейн, В. П. Рашевский, К. А. Решетникова, Н. Б. Рубин, С. Б. Рубин, П. И. Рыльцев, О. И. Ярковой. Коллективное линейное ускорение ионов . . . . . 317
- В. П. Дзюленов, В. П. Дмитриевский, Б. И. Замолотчиков, В. В. Кольга. Кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой для многозарядных ионов 323
- В. В. Арсенин, В. А. Чуянов. О возможности подавления дрейфовой неустойчивости неоднородной плазмы с помощью системы обратных связей . . 327
- В. М. Вондаренко, Г. Г. Викторов, А. Г. Тархов. Об использовании космического излучения для оценки эффективности биологических защит . . . . . 330
- С. Н. Барков. Многогрупповой аналитический метод расчета гетерогенного ядерного реактора . . . . 335
- П. Т. Потапенко. Предельная оценка качества внутриреакторного контроля нейтронного потока . . . . 340
- Д. М. Каминкер, К. А. Коноплев, Ю. П. Семенов, В. Д. Тренин. Поведение продуктов радиолиза при работе реактора ВВР-М без системы дегазации 343
- В. А. Жарков, В. П. Терентьев, Г. М. Фрадкин. Получение топлива изотопных электрогенераторов методами нейтронного облучения . . . . . 348
- Ю. В. Рябов, Со Дон Сик, Н. Чиков, Н. Янева. Измерение отношения сечений радиационного захвата и деления для  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  в резонансной области энергий нейтронов . . . . . 351

- В. А. Афанасьев, Б. В. Кебадзе, Г. А. Санковский, В. И. Грицков, И. Н. Соколов, Л. А. Адамовский, С. А. Маркин. Экспериментальное исследование устойчивости корпусного кипящего реактора ВК-50 363

#### АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ

- Д. П. Осанов, В. П. Панова, Г. Б. Радзиевский. Измерение дозовых факторов накопления для точечных изотропных источников  $\gamma$ -излучения низкой энергии в воде 368
- В. А. Жарков, Т. П. Зорина, Г. М. Фрадкин. Самоэкранирование тепловых нейтронов в конечных цилиндрах и телах других геометрий . . . . . 369
- И. Н. Бриккер, В. П. Астафьев, А. Р. Мирзаин. Обращенное решение тепловых уравнений двухкомпонентного ядерного реактора . . . . . 370
- С. Ф. Дегтярев, А. П. Суворов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Пространственные, угловые и энергетические распределения быстрых нейтронов в гидриде лития, воде, вольфраме и карбиде бора 370
- С. Ф. Дегтярев, В. Б. Староверов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Экспоненциальные угловые коэффициенты нейтронов для неводородосодержащих сред 372
- В. К. Даруга, С. Ф. Дегтярев, В. И. Кухтевич, А. Н. Николаев, В. П. Поливанский, Б. И. Синицын, А. П. Суворов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Пространственно-энергетические и угловые распределения нейтронов в литии . . . . . 372
- С. М. Рубанов, В. И. Титов, Л. С. Шкорбатова. Расчет защиты контура с циркулирующим горючим . . 373
- В. Д. Горяченко. Акустическая неустойчивость ядерного реактора . . . . . 374
- В. Д. Горяченко, Е. Ф. Сабаев. Акустические колебания в реакторе с циркулирующим газообразным горючим . . . . . 375
- В. Д. Горяченко, В. А. Денеев, Ю. Ф. Трунин. Влияние изменения плотности делящегося вещества на устойчивость реактора с циркулирующим веществом 376
- В. С. Шуленни. Применение асимптотического  $P_N$ -приближения для расчета ячейки . . . . . 376

285607

225307/м



РГ



На рис. 2—5 показаны отдельные системы модели ускорителя: линейный индукционный ускоритель, камера для получения кольцевых сгустков и ускоряющая ВЧ-система. В настоящее время ведутся работы по выводу и ускорению кольцевого сгустка. По нашим планам наладка и запуск модели закончатся в 1968 г.

Выше приведена таблица основных параметров модели и ориентировочных параметров ускорителя на энергию 1000 Гэв. Отметим, что в разработке отдельных узлов проекта прини-

мали участие О. А. Колпаков, В. Н. Мамонов, Ю. В. Муратов, Ю. Л. Обухов, Ю. И. Смирнов и др.

Поступила в Редакцию 12/X 1967 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Векслер. «Атомная энергия», 2, 42 (1957).
2. Г. И. Будкер. «Атомная энергия», 1, № 5 (1956).
3. W. Bennett. Phys. Rev., 98, 1584 (1955).

## Кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой для многозарядных ионов\*

В. П. ДЖЕЛЕПОВ, В. П. ДМИТРИЕВСКИЙ, Б. И. ЗАМОЛОДЧИКОВ, В. В. КОЛЬГА

УДК 621.384.612.4

Успехи в получении новых трансурановых элементов [1], возможности, которые предсказываются теоретическими исследованиями устойчивости сверхтяжелых элементов [2], а также перспективы использования ускоренных многозарядных ионов в медицине и биологии поставили перед техникой ускорения заряженных частиц новые задачи.

Выбор оптимального типа ускорителя для ускорения многозарядных ионов — одна из таких задач. Если определена требуемая кинетическая энергия частиц в ускорителе на один нуклон, при решении этого вопроса в основном исходят из экономических соображений, а также перспектив дальнейшего развития каждого типа ускорителя.

Существенной особенностью ускорителей многозарядных ионов по сравнению с протонными или дейтонными ускорителями является наличие эффекта изменения заряда при взаимодействии с молекулами остаточного газа вакуумной камеры. Если основываться на известных сечениях этого процесса [3], то связь между давлением в вакуумной камере и временем ускорения будет определяться неравенством

$$p\tau \leq 10^{-10},$$

где  $p$  дано в торрах;  $\tau$  — в секундах.

Таким образом, при эксплуатационных уровнях разрежения в вакуумных камерах современных ускорителей ( $0,5-1 \cdot 10^{-6}$  торр) время ускорения не должно превышать 100—

200 мксек, что соответствует циклотронному способу ускорения.

Вторая особенность ускорителей многозарядных ионов — более жесткое ограничение, накладываемое пространственным зарядом пучка, что связано с большим зарядом каждой частицы и далекими от релятивизма скоростями (при энергиях 6—10 Мэв/нуклон). Предельное число ионов в секунду, определяемое эффектом пространственного заряда, для циклотронов пропорционально частоте собственных колебаний и обратно пропорционально массе иона ( $i \sim \sim \frac{Q\Delta Q}{A}$ ); магнитную систему для таких ускорителей следует выбирать с максимальной жесткостью, так как при ускорении ионов с  $A \gg \gg 200$  этот эффект становится определяющим.

Приведенные соображения побудили авторов рассмотреть возможность использования кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой для ускорения многозарядных ионов.

Ускоритель состоит из кольцевой магнитной системы, которая обеспечивает жесткую фокусировку по двум ортогональным осям ( $Q_r, z > > 1$ ) и изохронность замкнутых орбит; системы ускорения, представляющие собой резонансные полости, работающие на постоянной частоте, и инжектора частиц типа Ван де Граафа или Кокрофта — Уолтона.

К настоящему времени проведено сравнительно немного исследований, посвященных ускорению многозарядных ионов с массой  $A > 40$  на ускорителях прямого действия [3]. Однако эти исследования показывают, что можно полу-

\* Статья печатается в порядке обсуждения.



чить пучки тяжелых ионов с зарядом  $Z = 10$  интенсивностью не менее 10 *мкА*. Следует ожидать, что в ближайшее время эти возможности будут исследованы более подробно на ускорителях прямого действия при потенциалах  $U = 1,5 \div 5$  МэВ. При выбранной кольцевой системе ускорителя и заданном напряжении инжекции на радиусе инжекции будет иметь место зависимость

$$\frac{A}{Z} \cdot \frac{U}{H_n^2} = \text{const}, \quad (1)$$

где  $H_n$  — среднее поле на радиусе инжекции. Требование жесткой фокусировки приводит к необходимости использовать кольцевую форму магнита циклотрона. Отношение конечного радиуса к радиусу инжекции определяется выражением

$$\chi = \frac{R_K}{R_n} = \frac{\sqrt{W_K/A}}{\sqrt{W_n/A}} \left[ 1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{(W_K - W_n)}{AE_{0p}} \right], \quad (2)$$

где  $W_K/A$  — величина конечной кинетической энергии, отнесенная к одному нуклоу ядра;  $W_n/A$  — то же при энергии инжекции;  $E_{0p}$  — энергия покоя протона. Рост среднего магнитного поля, обеспечивающий изохронность замкнутых орбит, при увеличении энергии должен составлять

$$H = H_0 \frac{E}{E_0} = H_0 \left( 1 + \frac{W}{AE_{0p}} \right). \quad (3)$$

При этом соответствующая изохронная частота иона

$$\omega = \frac{Z}{A} \omega_p, \quad (4)$$

где  $\omega_p = \frac{ecH_0}{E_{0p}}$  — угловая частота протона в магнитном поле  $H_0$ . Так как кинетическая энергия на один нуклон не превышает 6–10 МэВ, то изменение среднего магнитного поля согласно выражению (3) составляет 0,6–1,0%.

Если создавать жесткую фокусировку ионов при помощи периодической структуры магнитного поля, то, как известно [4], частоты собственных колебаний при  $n \ll 1$  можно вычислить по формулам

$$\left. \begin{aligned} Q_z &\approx \varepsilon \sqrt{0,5 + \text{tg}^2 \alpha}; \\ Q_r &\approx 1 + \frac{\varepsilon^2}{N^2} \left( \frac{N^2}{N^2 - 4} + \frac{3}{4} \text{tg}^2 \alpha \right), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $\alpha$  — угол между спиралью и радиусом-вектором в данной точке;  $N$  — число периодов

структуры поля;  $\varepsilon = \frac{H_N}{H}$  — относительная амплитуда основной гармоники;  $n$  — показатель среднего магнитного поля.

Выражение для линии равной напряженности магнитного поля имеет вид (цилиндрическая система координат):

$$r = r_0 e^{\varphi \text{ctg} \alpha}. \quad (6)$$

Так как величина  $n \ll 1$ , при выборе параметров  $\varepsilon$ ,  $H$  и  $\alpha$  необходимо исходить из условия постоянства частот свободных колебаний, а также учитывать резонансные эффекты вблизи частоты  $Q_r = 1$ . Анализ показывает, что при амплитуде радиальных колебаний порядка 2–3 см и  $\varepsilon \text{tg} \alpha \approx 1$  можно избежать нелинейного резонанса  $Q_r = \frac{N}{N}$  при  $N = 4$ . В этом случае частота радиальных колебаний составит  $Q_r = 1,10 \div 1,15$  и низшие гармоники не вызовут простого и параметрического резонансов при допуске  $\sim 10^{-3}$ .

Так как из источника трудно получить ионы с большим зарядом ( $Z > 10$ ) [5], необходимо обеспечить возможность ускорения частиц с широким диапазоном отношений  $Z/A$ . Если  $A_{\text{мин}} \gg 40$ , то диапазон  $Z/A = 1/5 \div 1/20$  будет охватывать весь желательный набор ионов:  $\text{Ar}_{40}^{+2} \div \text{Ar}_{40}^{+8}$ ;  $\text{Kr}_{84}^{+5} \div \text{Kr}_{84}^{+14}$ ;  $\text{Xe}_{132}^{+7} \div \text{Xe}_{132}^{+26}$ ;  $\text{U}_{238}^{+12} \div \text{U}_{238}^{+46}$ .

Полный диапазон частот ионов при заданном интервале  $Z/A$  и выполнении (1) определяется соотношением

$$\frac{\omega_{\text{макс}}}{\omega_{\text{мин}}} = \frac{\sqrt{(Z/A)_{\text{макс}}}}{\sqrt{(Z/A)_{\text{мин}}}}. \quad (7)$$

Если использовать ускорение на кратных частотах, диапазон (7) можно реализовать на одной частоте резонансной системы. Обозначив кратность ускорения на этой частоте  $q_0$ , получим интервал значений  $q$  для заданного диапазона частот:

$$\left. \begin{aligned} q_{\text{макс}} &= q_0 \frac{\sqrt{(Z/A)_{\text{макс}}}}{\sqrt{(Z/A)_0}}; \\ q_{\text{мин}} &= q_0 \frac{\sqrt{(Z/A)_{\text{мин}}}}{\sqrt{(Z/A)_0}}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где индекс 0 соответствует иону, ускоренному на кратности  $q_0$ . Ускоряющая система представляет собой несколько резонансных полостей (число которых  $m \leq q_0$ ), равномерно размещенных по азимуту кольцевой магнитной зоны. При угловой протяженности каждого



ускоряющего электрода  $\delta = \pi/q_0$  набор энергии ионом, ускоряемым на кратности  $q \neq q_0$ , будет отличаться от резонансного набора на каждой полости:

$$\frac{\Delta E}{\Delta E_{\text{рез}}} = \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{q}{q_0} \right). \quad (9)$$

Если ускоряющий потенциал на каждой полости равен  $V$ , то полное число оборотов иона в ускорителе

$$v = \frac{A}{Z} \cdot \frac{W_{\text{к}}/A}{\text{meV}} \quad (10)$$

даже при потенциалах  $V = 20 \div 25 \text{ кэВ}$  незначительно превышает числа оборотов, характерные для обычных циклотронов. Смещение иона по фазе в процессе ускорения будет в  $q$  раз больше, чем в обычном циклотроне, что приводит к необходимости стабилизации магнитного поля с точностью  $10^{-4}$ .

Шаг частиц по радиусу в кольцевом циклотроне определяется из выражения

$$\Delta R = \frac{Z}{2A} \cdot \frac{\text{meV}}{W_{\text{к}}/A} R_{\text{к}}. \quad (11)$$

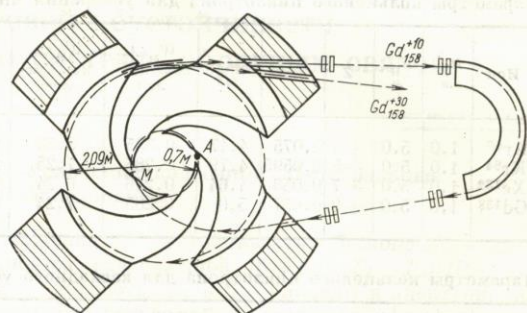
Множитель  $mZ$  в (11) позволяет доводить шаг иона за один оборот на конечном радиусе до  $0,5-1 \text{ см}$  так что практически проблема вывода частиц из камеры ускорителя становится элементарной.

Предельная интенсивность пучка в кольцевом циклотроне с жесткой фокусировкой, определяемая эффектом поперечного пространственного заряда, будет значительно превышать предельную интенсивность в обычном циклотроне. Отношение этих предельных интенсивностей

$$\frac{i_{\text{ж. ц}}}{i_{\text{ц}}} = \frac{Q_1 \Delta Q}{Q_2^2}, \quad (12)$$

где  $Q_1, Q_2$  — соответствующие частоты аксиальных колебаний кольцевого и обычного циклотронов. Так как в обычных циклотронах  $Q_2 \ll 0,1$ , то при  $Q_1 > 1$  и  $\Delta Q \gg 0,1$  из отношения (12) следует, что интенсивность внутреннего пучка в циклотроне с жесткой фокусировкой по крайней мере на порядок может превысить интенсивность в обычном циклотроне. В настоящее время основным фактором, ограничивающим интенсивность такого ускорителя, будет интенсивность инжектора.

Для уменьшения кольцевой зоны магнитного поля возможен вариант ускорителя с повторным циклом ускорения. Если выведенный из ускорителя пучок ионов с зарядом  $Z_1$  дополни-



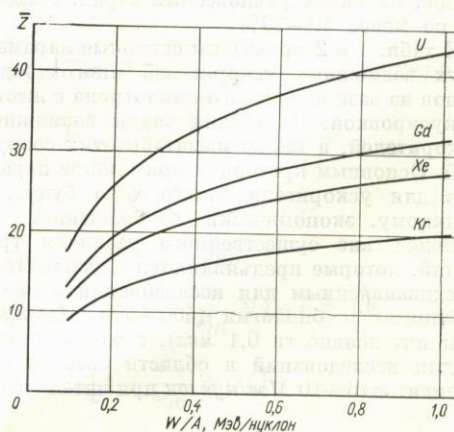
Р и с. 1. Схема каскадного ускорения многозарядных ионов в кольцевом циклотроне:

А — ось аксиальной инжекции от ускорителя Кокрофта — Уолтона; М — перезарядная мишень.

тельно ионизировать до заряда  $Z_2$ , то при условии

$$\frac{Z_2}{Z_1} \approx \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{и}}} \quad (13)$$

возможен второй цикл ускорения без перестройки магнитного поля с общим увеличением энергии за оба цикла в  $\chi^4$  раз на один нуклон. Дополнительная ионизация после первого цикла ускорения осуществляется при прохождении пучком твердой мишени, установленной на радиусе инжекции, как показано на рис. 1, где приведена схема каскадного ускорения. Толщина мишени подбирается так, чтобы не вызвать заметного рассеяния ионов. На рис. 2 приведена зависимость равновесного заряда ионов после прохождения твердой мишени от



Р и с. 2. Равновесный заряд ионов после прохождения твердой мишени.

Параметры кольцевого циклотрона для ускорения многозарядных ионов

Таблица 1

Ион	$R_{и'}$ м	$R_{к'}$ м	Z	Z/A	$U_{инж'}$ Меэ	$W_{и'/A}$ Меэ/нуклон	$W_{к'/A}$ Меэ/нуклон	$H_{и'}$ эс	$H_{к'}$ эс	$f_{обр'}$ Мгц	q	N	$\epsilon$	ctg $\alpha$	$Q_z$	$Q_r$	$f_0$ Мгц
Ar <sup>40</sup>	1,0	5,0	+3	0,075	4,47	0,335	8,53	11 141	11 242	1,276	12	} 4	0,5	0,436	1,2	1,08— 1,09	15,314
Kr <sup>84</sup>	1,0	5,0	+5	0,0595	4,79	0,285	7,25	12 960	13 060	1,178	13						
Xe <sup>132</sup>	1,0	5,0	+7	0,053	4,64	0,246	6,24	13 517	13 606	1,094	14						
Gd <sup>158</sup>	1,0	5,0	+9	0,057	5,0	0,285	7,24	13 530	13 650	1,178	13						

Параметры кольцевого циклотрона для каскадного ускорения многозарядных ионов

Таблица 2

Ион	$R_{и'}$ м	$R_{к'}$ м	Первый цикл							Второй цикл										
			Z	Z/A	U, Меэ	$W_{и'/A}$ Меэ/нуклон	$W_{к'/A}$ Меэ/нуклон	$H_{и'}$ эс	$H_{к'}$ эс	$f_{обр'}$ Мгц	q	Z	Z/A	$W_{и'/A}$ Меэ/нуклон	$W_{к'/A}$ Меэ/нуклон	$H_{и'}$ эс	$H_{к'}$ эс	$f_{обр'}$ Мгц	q	$f_0$ Мгц
Kr <sup>84</sup>	0,7	2,09	+7	0,0833	1,66	0,138	1,24	9 186	9 232	1,168	39	+21	0,25	1,24	11,16	9 186	9 232	3,504	13	45,55
Xe <sup>132</sup>	0,7	2,09	+9	0,0682	1,48	0,101	0,91	9 614	9 662	1,001	45	+27	0,205	0,91	8,19	9 614	9 662	3,003	15	45,04
Gd <sup>158</sup>	0,7	2,09	+10	0,0633	1,42	0,090	0,814	9 814	9 863	0,949	48	+30	0,190	0,814	7,33	9 814	9 863	2,847	16	45,55
U <sup>238</sup>	0,7	2,09	+12	0,0504	1,61	0,081	0,73	11 653	11 712	0,897	51	+36	0,151	0,73	6,57	11 653	11 712	2,691	17	45,75

Примечание. Здесь  $N = 4$ ;  $\epsilon = 0,7$ ;  $ctg \alpha = 0,638$ ;  $Q_z = 1,2$ ;  $Q_r = 1,10 + 1,11$ .

энергии для различных ионов [6]. Для ионов урана необходимо использовать экспериментальные данные работы [7]. При использовании каскадного ускорения наряду с возможностью ускорять ионы урана существенно понижается энергия инжекции.

Если заряды ионов после прохождения мишени распределены по кривой Гаусса, число ионов, имеющих равновесный заряд, составляет не менее 10—20%.

В табл. 1 и 2 приведены основные параметры двух возможных ускорителей многозарядных ионов на базе кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой. Из таблиц видны возможности ускорителей, а также масштабы этих сооружений. Основным критерием при выборе параметров для ускорителя такого типа будут, по-видимому, экономические соображения.

Вследствие существенного различия требований, которые предъявляются к ускорителям, предназначенным для исследований в области медицины и биологии (400—500 Меэ/нуклон при интенсивности 0,1 мка), с одной стороны, и для исследований в области сверхтяжелых элементов (6—10 Меэ/нуклон при интенсивности

10—20 мка), с другой, — целесообразно разделять эти задачи по типам ускорителей. Если для первой задачи весьма близким к оптимальному решению является использование синхрофазотрона с жесткой фокусировкой и накопительным кольцом (типа «Омнитрон»), то для второй задачи оптимальное решение — использование ускорителей циклотронного типа.

Поступила в Редакцию 28/VII 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Г. Н. Флеров и др. «Атомная энергия», 17, 310 (1964).
- W. Myers, J. Swiatecki. Nucl. Phys., 81, 1 (1966).
- The Omnitron: a Multipurpose Accelerator. UCRL-11764 (1964).
- Д. П. Василевская и др. «Атомная энергия», 8, 189 (1960).
- A. Ghiorso, R. Main, B. Smith. Trans. Nucl. Sci., 13, 280 (1966).
- И. С. Дмитриев, В. С. Николаев. ЖЭТФ, 47, 615 (1964).
- L. Grodzins et al. Phys. Letters, 24B, 282 (1967).