

В88.5
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

1
«Некоторые вопросы экспериментальных
исследований в области физики высоких энергий»

В. П. САРАНЦЕВ, В. А. СВИРИДОВ

**КОЛЛЕКТИВНЫЙ МЕТОД УСКОРЕНИЯ:
СОСТОЯНИЕ ДЕЛ И ПРИМЕРЫ ИЗ
ПРОГРАММЫ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

(Конспекты лекций)

МОСКВА — 1975

539.1
C20
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

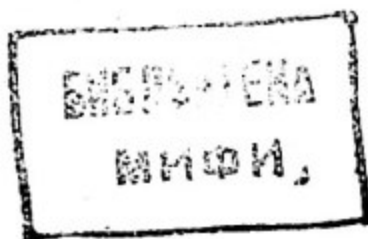
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В.П.Саранцев, В.А.Свиридов

КОЛЛЕКТИВНЫЙ МЕТОД УСКОРЕНИЯ
СОСТОЯНИЯ ДЕЛ И ПРИМЕРЫ ИЗ ПРОГРАММЫ
ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

(Конспекты лекций)



Москва - 1975

КОЛЛЕКТИВНЫЙ МЕТОД УСКОРЕНИЯ : СОСТОЯНИЕ ДЕЛ И ПРИМЕРЫ ИЗ ПРОГРАММЫ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

В.П.Саранцев, В.А.Свиридов

В лекции кратко излагается состояние работ по развитию коллективного метода ускорения и двумя примерами из программ физических исследований на пучках ускорителей электронных колец проиллюстрированы возможности таких установок : рассмотрены метод синтеза и идентификации сверхтяжелых элементов и проблема исследования электронной структуры атомов, заряд которых превышает критический $Z_c \approx 170$ (проверка квантовой электродинамики в сверхсильных полях).

1. Введение

В.И.Векстер предложил¹ различные варианты реализации коллективного метода: ударное ускорение, когерентное и радиационное. Им были сформулированы основы метода ускорения электронно-ионных колец. Под его руководством были начаты экспериментальные и теоретические исследования новой схемы формирования плотных релятивистских колец в установке, предложенной им совместно с В.П.Саранце-

вым и названной адгезатором (адиабатический генератор заряженных тороидов). Для развития метода большое значение имели работы О.И.Ярковского, который заложил основы теории формирования и ускорения электронно-ионных колец².

В коллективном ускорителе тяжелые частицы (протоны, ионы) удерживаются электронным кольцом и ускоряются вместе с ним. Напряженность электрических полей в кольцах может достигать 10 Мв/см.

$$\mathcal{E}_{кул} \approx Ne / \pi R (\alpha + \beta) \quad (1.1)$$

Здесь N — число электронов в кольце, R — большой радиус кольца, α и β — радиальный и аксиальный полуразмеры сечения кольца. Для того, чтобы сформировать кольцо, сильноточный электронный пучок инжектируют в адгезатор, где под действием магнитного поля он сворачивается. Затем магнитное поле медленно (адиабатически) нарастает. Кольцо при этом сжимается, размеры его поперечного сечения уменьшаются и энергия электронов растет. Нейтральные атомы вводятся в сжатое кольцо, ионизируются, захватываются им и ускоряются вместе с кольцом. Поскольку электроны и ионы в направлении ускорения движутся с одинаковой скоростью, то ионы, обладающие большей массой, чем электроны ($M \gg m$), приобретают большую энергию $E = E_e \cdot M/m$. Таким образом, кольцо как

целое можно ускорять в электрических полях так, что тяжелые частицы приобретут энергию большую, чем при прямом их ускорении в тех же полях.

$$E = e \mathcal{E} M/m \gg Ze \mathcal{E} \quad 1.2$$

При этом, конечно, величина внешнего поля $\mathcal{E}$ должна быть ограничена условием удержания ионов в кольце

$$\mathcal{E} < m Z \mathcal{E}_{кул} / M \quad 1.3$$

для случая, когда суммарная масса ионов в кольце много меньше массы электронов, или

$$\mathcal{E} < N_i Z \mathcal{E}_{кул} / N \quad 1.4$$

если $\sum M \gg m N$.

Подробно принцип коллективного метода ускорения ионов рассмотрен в обзоре ³, опубликованном в сборнике ЭЧАЯ, т.2, вып.2(1971).

Расчеты показывают, что коллективный ускоритель сможет ускорять ионы различных элементов. Сейчас представляется, что такая установка будет иметь ряд преимуществ по сравнению с традиционными типами ускорителей. Строительство ускорителя тяжелых ионов является основной задачей Отдела новых методов ускорения ОИЯИ.

2. Состояние работ с ускорителями электронных колец.

За последние годы произошло осмысливание результатов большого количества теоретических и экспериментальных работ, проведенных по всем мире. Это позволило сделать некоторые выводы и определило развитие работ по созданию коллективного ускорителя. Эти выводы затрагивали некоторые принципиальные вопросы коллективного метода ускорения протонов и, в первую очередь, дополнительные ограничения на количество частиц в кольце, возникающие в процессе его формирования и ускорения.

Толчком к исследованиям в этом направлении послужили эксперименты, проведенные в 1971-1972 г.г. в Беркли (США) по формированию электронных колец⁴. Эти эксперименты обнаружили (Рис.1) ранее не наблюдаемый эффект ограничения по числу электронов, захваченных в кольцевой сгусток. В эксперименте наблюдалось интенсивное излучение, соответствующее 30 гармонике частоты обращения. Была предпринята попытка объяснить это явление развитием радиационной неустойчивости.

Линейная теория развития продольной неустойчивости в интенсивных электронных пучках устанавливает пороговое значение интенсивности электронов N , при котором электромагнитные силы, приводящие к возникновению азимуталь-

ных неоднородностей в кольце (банчировка), преобладают над выравнивающим действием разброса электронов по энергии ΔE

$$N = |\eta| \gamma R Z_0 (\Delta E/E)^2 / 2 \beta^3 r_e |Z_m| / m \quad 2.1$$

Здесь $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, r_e - классический радиус электрона, Z_m - продольный импеданс связи пучка, вызывающий амплитуды m -ой гармоники тока в кольце I_m и напряженности электрического поля E_m соотношением $I_m \cdot Z_m = 2\pi R E_m$, R - главный радиус кольца, $Z_0 = 377$ ом, η - относительное изменение частоты обращения при изменении импульса на единицу.

Ограничение по количеству захваченных на кольцевую траекторию электронов ($\sim 7 \cdot 10^{12}$) и интенсивное СВЧ-излучение, обнаруженные в Беркли⁴, были связаны с развитием продольной неустойчивости. В последующие годы были проведены эксперименты с целью разобраться в этом явлении подробно. Исследования проводились в двух различных направлениях - с одной стороны в Беркли были продолжены эксперименты при наличии проводящих стенок (уменьшение Z_m вызывает увеличение порога развития неустойчивости) для электронов с разным разбросом частиц по энергиям, с другой стороны в Дубне велись работы по исследованию механизма захвата в зависимости от времени

инжекции.

Результаты исследований⁵ показали, что, рассчитанные в рамках линейной теории пороги развития радиационной неустойчивости, не удовлетворяют эксперименту. Для иллюстрации приведем зависимость (рис. 2) изменения энергетического разброса электронов в процессе захвата для разного числа электронов в кольце. Там же приведены теоретические пороги. Из рисунка видно, что для энергетического разброса 1–2 процента во всем диапазоне числа электронов в кольце не наблюдается роста энергетического разброса, что обязательно для радиационной неустойчивости.

С другой стороны эксперименты в Дубне показали, что в выбранной системе инъекции существует коллективный механизм, приводящий к "самозахвату" частиц на замкнутую орбиту. Эффективность "самозахвата" достигает максимума при пятиоборотной инъекции. При этом величина нормального захвата падает до нуля. Этим объясняется ограничение по числу захваченных частиц при многооборотной инъекции. Суммируя результаты этих экспериментов, можно утверждать, что при формировании электронных колец на используемых уровнях интенсивности ($\sim 10^{13}$ электронов) ограничения, по-видимому, связаны с условиями захвата, а не с развитием неустойчивостей.

Другой класс ограничений на ускорения кольца, нагру-

женного ионами, относится к электронно-ионной неустойчивости. Изучение этого вопроса проводилось в основном в теоретическом плане. Экспериментальные наблюдения такого резонанса (радиального) были проведены в Гаршинге⁶ при экспериментах по ускорению кольца, нагруженного азотом и гелием. Было показано, что при формировании и ускорении кольцевого сгустка около анизотропной поверхности (например, системы "беличье колесо") наступает стабилизация радиального резонанса и ускорение проходит нормально. Продольные колебания изучались только на различных теоретических моделях.

Сейчас сложилась такая ситуация, что в рамках теории решить вопрос о допустимых ускорениях не представляется возможным, и окончательно эффективность ускорения протонов в коллективном ускорителе (и, соответственно, перспективы создания ускорителя на высокие энергии) может быть определима только в экспериментах с кольцами электронов. Другая картина с ускорением тяжелых ионов. Известны достоинства коллективного метода для ускорения тяжелых ионов: независимость, по крайней мере, в первом приближении, процесса ускорения от сорта иона, высокий темп набора энергии ионом, позволяющий достаточно просто варьировать эту энергию и т.д. Эти факторы, если даже не касаться экономических соображений, в случае ускорения очень тяжелых

ионов, скажем урана, обеспечивают коллективному ускорителю определенное преимущество.

Практическая реализация ускорителя тяжелых ионов обязательно проходит через этап создания электронных колец высокой плотности. Этим определяется направление исследований по созданию нового типа ускорителя. Как ускорение тяжелых ионов, так и проведение основных экспериментов по ускорителю высоких энергий потребовало создания систем, позволяющих формировать плотные электронные сгустки.

Максимальное число электронов, которое удастся получить в настоящее время в кольцах на разных установках колеблется в интервале $(5 \cdot 10^{12} + 10^{13})$. Анализ экспериментальных данных и технических возможностей показывает, что это число может быть увеличено до $3 \cdot 10^{13}$. Этого достаточно, чтобы ответить на основные вопросы и определить возможности коллективного метода ускорения в получении частиц высоких энергий. На базе таких колец представляется возможным создать систему для ускорения тяжелых ионов. Ниже мы остановимся на конкретных путях решения этой задачи ⁷ и основных результатах, полученных в Дубне.

Адгезатор. Определяющим в создании "Адгезатора" является выбор камеры, в которой происходит формирование электронного кольцевого сгустка. Для того, чтобы избежать

радиационных эффектов, необходимо было приближать металлические экраны к пучку. Экраны при этом выбираются таким образом, чтобы полностью экранировать поле возмущения в кольце на частотах, кратных частоте обращения, но в то же время полностью пропускать внешние магнитные поля, сжимающие кольцо. Металлическая камера адгезатора представляет собой сварную конструкцию, выполненную из листовой нержавеющей стали (Рис.3). Система источников магнитного поля (Рис.4) состоит из катушек четырех ступеней сжатия, формирующих импульсное магнитное поле, и выводного ускоряющего соленоида. На рис. 5 приведено распределение магнитного поля вдоль траектории кольца в зависимости от времени (кривая 1) и график изменения радиуса электронного кольца (кривая 2). На рис. 6 показаны измерения и расчетные значения n - траектории для пучка с начальным значением $\gamma = 4,5$.

Силунд. Электронный ускоритель, используемый в качестве инжектора, дает 10-15 наносекундный импульс электронов с $E = 2-3$ Мэв, $\Delta E/E < 3 \cdot 10^{-2}$ и током ~ 500 а.

В настоящее время ведутся работы по формированию электронных колец в адгезаторе и исследованию их характеристик.

3. Два примера из программы физических

* исследований с пучками тяжелых

ионов коллективного ускорителя.

Ускоренные ядра уже много лет широко используются для решения разнообразных задач ядерной физики. За это время определились тенденции развития ускорителей тяжелых ионов (в первую очередь, они связываются с увеличением массы ускоряемых ядер и интенсивности пучков). Установилась тематика физических исследований на них⁸. Здесь будет рассмотрено только 2 примера из возможной программы экспериментов, чтобы подчеркнуть некоторые возможности в физических исследованиях с тяжелыми ионами, которые специфичны для коллективного ускорителя и могут открыться с его запуском.

3.1 Особенности пучков коллективного ускорителя тяжелых ионов.

Коллективный ускоритель тяжелых ионов имеет особенности (по сравнению с используемыми в настоящее время циклотронами или линейными ускорителями), которые могут открыть путь для постановки совершенно новых экспериментов или для применения новых методик исследования уже известных проблем.

Например, такой ускоритель позволяет, в принципе, получать ядра тяжелых элементов, полностью лишенные электронной оболочки. Электроны кольца автоматически производят ионизацию тяжелых атомов, захваченных в кольцо. Не-возможно переоценить экспериментальную возможность проведения исследований с "голыми" ускоренными ядрами тяжелых элементов. Наличие таких пучков тяжелых элементов со свободными электронными оболочками позволяет подойти вплотную к исследованиям в интереснейшей области квантовой электродинамики, связанной с сильными полями, где не рабствует теория возмущений.

Очевидным достоинством коллективного ускорителя тяжелых ионов является способность ускорять любые ядра различных элементов вплоть до самых тяжелых. Менее очевидным, но чрезвычайно важным для экспериментов достоинством такого ускорителя является пространственная (и, соответственно, временная) структура его пучка. Для ускорения заряженных частиц коллективным методом необходимо создание плотной электронной среды, которая удерживает ионы. В качестве такой среды используется кольцо электронов в магнитном поле. Если размер сечения кольца порядка нескольких миллиметров, а скорость ускоренных ионов

$\beta \sim 0.1$, то время взаимодействия с мишенью оказывается около 10^{-10} сек. Столь короткий сброс пучка на

мишень позволяет иметь стартовый сигнал для запуска аппаратуры, измеряющей интервал времени между взаимодействием ионов с мишенью и попаданием продуктов взаимодействия на детектирующую аппаратуру с точностью до 100 пикосекунд. Это особенность ускорителя, позволяя по времени пролета измерять скорость частиц и обеспечивая отличные условия для сепарации частиц, существенно расширяет арсенал методических возможностей эксперимента и открывает новые пути в экспериментальной физике тяжелых ионов (в частности, в исследовании проблемы существования "острова" сверхтяжелых элементов с $Z \sim 110-126$ — одной из интереснейших задач ядерной физики).

3.2 Синтез и идентификация сверхтяжелых ядер.

Свыше 100 лет назад Д.И.Менделеев сформулировал закон периодического изменения свойств элементов в зависимости от их атомного номера. За прошедшее столетие в его таблице после U^{92} заполнено еще 14 клеток. Проблема поиска новых более тяжелых элементов остается одной из важнейших в современной ядерной физике⁹.

В лекции рассматривается одна из возможных экспериментальных схем поиска сверхтяжелых элементов на коллективном ускорителе ионов⁷. В основу схемы положены принципы, используемые в экспериментальной физике высоких энергий. Коллективный ускоритель позволяет проводить

измерения скорости ядра сверхтяжелого элемента V , измеряя время пролета его. До сих пор этот параметр ядра отдачи не использовался в экспериментах по поиску новых ядер из-за невозможности иметь, в связи с чрезвычайно малым пробегом ядер в веществе, два сигнала от движущегося ядра в начале и в конце его траектории.

Измерение энергии ядра E по сбору полного ионизационного заряда, образуемого им в веществе, вместе с данными о скорости его позволяет вычислить массу ядра. Дополнительная информация о свойствах ядра может быть получена из измерений некоторых других параметров ядра: ионизационные потери энергии вдоль траектории dE/dx , распадные характеристики ядра, (если оно будет иметь время распада $10^{-6} \leq T_{1/2} < 10$ сек) и т.д. Наконец, весьма существенным для достоверности результатов является измерение координат треков.

4. О возможности наблюдения рождения позитронов при столкновении ядер с большим Z .

Вопрос об электронной структуре образующихся в столкновениях тяжелых ядер "квазиатомов", заряд которых превышает критический (критическим зарядом называют заряд Z_c , при котором основной уровень дискретного спектра $1s_{1/2}$ достигает границы нижнего континуума $E = -mc^2$).

представляет значительный интерес, так как непосредственно связан с проверкой квантовой электродинамики в неисследованной еще области сверхсильных полей. Подробно рассмотрение проблемы и история вопроса приведены в ^{10-12.}

В последнее время в связи с работами над ускорителями тяжелых ионов открылась перспектива образования в столкновениях тяжелых ядер с зарядами Z_1 и Z_2 атомных систем (Z_1, Z_2, e) , для которых уровень $1S_{1/2}$ оказывается расположенным в области нижнего континуума, превращаясь в квазистационарное состояние с энергией

$$\mathcal{E} = -(|\mathcal{E}_0| - i\gamma/2)$$

Здесь $\mathcal{E}_0 < -m_0 c^2$, m_0 — масса электрона, c — скорость света. При этом существенно, что возможна реализация вакантного уровня $1S_{1/2}$ системы (Z_1, Z_2, e) , для чего достаточно ¹³, чтобы только одно из ядер перед столкновением имело незаполненный электроном уровень

$1S_{1/2}$ (при условии, что заряд второго ядра не превышает заряд "голого" ядра). В части случаев следствием образования системы (Z_1, Z_2, e) с вакантным уровнем $1S_{1/2}$ и $\mathcal{E}_0 < -m_0 c^2$ будет рождение электронно-позитронных пар, захват электронов на К-оболочку объединенного атома и излучение позитронов. Экспериментальное наблюдение спонтанного рождения позитронов в этом процессе, так же как регистрация характеристического γ -излуче-

ния такого квазиатома открывает путь исследования проблемы сверхтяжелых атомов.

4.1 Характеристическое излучение "квазиатомов" зарегистрировано в ряде экспериментов¹⁴⁻¹⁷. Рис. 7 поясняет это явление. При сближении двух ядер (рисунок относится к случаю столкновения ядер углерода) происходит перестройка электронных уровней так, что, когда расстояние между ядрами углерода становится меньше размеров К-орбиты магния ($Z = 12$), структура уровней составного ядра оказывается близкой к структуре уровней магния. В процессе столкновения могут быть радиационные переходы. Спектр γ -лучей непрерывный. Верхняя граница его должна соответствовать КХ-излучению магния, если энергия углерода достаточно велика. Качественно такая картина и была зарегистрирована сначала в столкновении ядер углерода¹⁴, затем и в случае более тяжелых ядер¹⁵⁻¹⁷. Было установлено, что это излучение имеет ожидаемые для явления спонтанного излучения интенсивность и верхнюю границу энергетического спектра, и не может быть связано ни с примесями в мишени более тяжелых элементов, ни с наложениями импульсов в электронных схемах, ни с другими известными источниками ошибок¹⁵. Наконец, еще один аргумент в пользу такой интерпретации явления получен в опытах по измерению присущей этому явлению асимметрии в угловом распределении излучения относи-

тельно направления пучка ускоренных ядер¹⁷.

Таким образом, можно считать, что характеристическое излучение составных систем обнаружено. Начальный шаг в направлении исследования сверхтяжелых атомов сделан. Существенным для дальнейшего исследования этой проблемы является установление факта, что в довольно значительном числе случаев ($2-5 \cdot 10^{-4}$) К-оболочка одного из атомов, участвующих в столкновении, оказывается вакантной (рис. 8)¹⁶. Это означает, что в принципе, для поиска явления спонтанного рождения позитронов не обязательно иметь пучок полностью ободранных ядер: в части случаев и у ядер с заполненными К-оболочками при прохождении через мишень образуются К-вакансии.

4.2 Оценка сечения спонтанного рождения позитронов при столкновении тяжелых ядер, энергетического спектра позитронов и фоновых условий сделана в работах В.С.Попова^{11, 12, 18}. Зависимость сечения от энергии для случая столкновения ядер урана приведена на рис. 9. Очевидно, что эксперимент должен проводиться при энергиях ниже кулоновского барьера ($E \lesssim 6$ Мэв/нуклон), чтобы избежать фона, связанного с ядерным взаимодействием. Выберем для определенности $E = 4$ Мэв/нуклон. Для этой энергии $\sigma \approx 10^{-26}$ см², а энергетический спектр позитронов имеет характерное распределение с максимумом при энергии ~ 200 Кэв и с шириной на полувысоте ~ 120 Кэв — вели-

чины, не создающие трудностей для постановки эксперимента.

Наиболее опасным фоновым процессом является образование e^+e^- путем парной конверсии при переходах, вызванных кулоновским возбуждением ядер. Оценки сечения рождения e^+ в этом процессе $\sigma \sim 10^{-28} \text{ см}^2$. Другие явления (прямое рождение пар в переменном электрическом поле сталкивающихся ядер урана, "конверсия радиационных γ - квантов на "чужих" ядрах мишени и т.д.) дают меньший вклад в фон эксперимента.

Существенно, что фоновые эффекты не вносят принципиальных осложнений, т.к. эксперимент допускает возможность постановки чистого контрольного опыта. Выше уже отмечалось, что одним из условий образования позитронов является отсутствие электронов у атома с большим Z (это связано с тем, что скорость сближения ядер много меньше скорости электрона на К-оболочке каждого из них, поэтому перестройка атомной структуры ядер Z_1 и Z_2 в структуру системы $Z_1 + Z_2$ происходит адиабатически, и на К-уровень составного атома переходит электрон с нижнего уровня более тяжелого ядра). Поэтому позитроны могут спонтанно рождаться в случае, например, облучения мишени урана "голыми" ядрами плутония, но этот процесс не должен идти, когда плутониевая мишень облучается ионами урана. В то же время для фоновых процессов условия

образования позитронов в обоих случаях практически идентичны.

К сожалению, из-за большой вероятности захвата на внешние орбиты электронов мишени "голым" ядром урана и последующего радиационного перехода их на К-оболочку эффективная длина мишени (длина, на которой возможно образование позитронов) оказывается порядка $10^{-5} + 10^{-6}$ см, что приводит к соответствующему снижению выхода позитронов.

4.3 Итак, в ближайшие годы начнется поиск позитронов, образованных сильным электрическим полем сталкивающихся тяжелых ядер. Если это будет на пучках линейных ускорителей,^{х)} то, поскольку, вакансии в К-оболочке образуется в очень малой доле ядер ($10^{-3} - 10^{-4}$ для ядер *Nb*, а для урана, по-видимому, еще меньше), основная трудность эксперимента будет связана с проблемой отделения искоемых событий от фоновых (парная конверсия при радиационных переходах возбужденных в электромагнитном взаимодействии ядер), число которых может на 2-3 порядка превышать полезные события.

Коллективный метод ускорения (если бы такие ускорители были построены) более адекватен поставленной задаче, поскольку на такого рода установках возможно, в принципе, получение полностью ионизированных атомов. Предложения

по созданию подобных установок, правда пока для ядер аргона, уже существуют¹⁹. На рис. 10 приведена рассчитанная зависимость от времени зарядности ионов Z^* , захваченных в электронное кольцо такой установки по данным¹⁹.

В коллективном ускорителе тяжелых ионов обдирка электронов происходит автоматически: электронное кольцо, образующее удерживающую ионы потенциальную яму, состоит из электронов с энергией 10–20 Мэв, которые в процессе движения по круговой орбите непрерывно ионизируют захваченные кольцом ионы. Время полной ионизации можно оценить, если известны плотность электронов в кольце и сечение ионизации, определяемое в основном, потенциалом ионизации К-оболочки. Если взять для оценки уже полученные в экспериментах значения плотности электронов в кольце $n \sim 2 \cdot 10^{12} \text{ 1/см}^3$, то рассчитанное время полной ионизации ядра урана, например, оказывается равным ~ 10 сек. Основные трудности эксперимента, создаваемые большой длительностью обдирки, являются чисто техническими. Одна из них связана с потерями энергии электронами кольца на синхротронное излучение. Величина энергии, излучаемой электро-

х) Близки к завершению линейные ускорители тяжелых ионов "Super - NILAC" (США, Беркли) и "UNILAC" (ФРГ, Дармштадт): в ближайшие годы можно ожидать получения на этих установках ускоренных пучков урана.

ном за один оборот, относительно невелика, но большое время существования кольца и малый радиус орбиты коллективного ускорителя вынуждает искать способы компенсации потерь энергии. Еще одна сложная техническая задача ставится условием предотвращения накопления в электронном кольцевом сгустке ионов, образующихся в результате столкновений электронов с атомами остаточного газа. Из-за большого времени ионизации тяжелых ядер вакуум в камере ускорителя должен быть несма глубоким.

Несмотря на относительно большое сечение, возможная скорость набора событий спонтанного рождения позитронов ограничивается малым эффективным пробегом "голого" ядра в мишени, малой частотой срабатывания такой установки и ограничением на количество захваченных в кольцо тяжелых ядер из-за рассеяния на них электронов кольца. Тем не менее она оказывается вполне разумной (порядка единиц событий за час работы установки).

5. Заключение.

Теоретические расчеты и эксперименты по формированию и ускорению электронных колец, выполненные в Дубне, Беркли, Гаршинге подтверждают возможность создания коллективного ускорителя тяжелых ионов, запуск которого открывает новые возможности для исследований.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ.

Рис. 1 Зависимость числа захваченных в кольцо электронов от интенсивности инжектируемого тока.

Рис. 2. Зависимость импульсного разрешения электронов в кольце в функции тока кольца для начальных значений энергетического разброса инжектируемых электронов 0,2 , 1 и 2%.

Рис. 3 Камера адгезатора.

Рис. 4 Схема расположения катушек, создающих магнитное поле адгезатора.

Рис. 5. Графики изменения равновесного радиуса электронного кольца (2) и магнитного поля (1) в зависимости от времени.

Рис. 6 Расчетная (сплошная волнистая линия) и измеренная (точки) n -траектории электронного кольца в адгезаторе для пучка с начальным значением $\gamma = 4,5$. При $R < 8,5$ см приведены измеренные значения n -траектории для $\gamma = 4$ и $\gamma = 5$. Сплошные гладкие линии ограничивают область, где частоты аксиальных бетатронных колебаний (с учетом пространственного заряда) лежат в пределах $0,07 < \nu_z < 0,5$.

Рис.7 Схема перестройки электронных уровней для квазиатома, образующегося при столкновении ядер угле-

рода, в функции расстояния между ядрами ¹⁴.

Рис. 8 Спектр X-лучей, образующихся при рассеянии ионов ниобия с энергией 65 Мэв на ниобии ¹⁶. Первые 2 пика в спектре обязаны своим происхождением медной подложке мишени, вторые – KX-лучи ниобия.

Рис. 9 Зависимость сечения спонтанного рождения позитронов в столкновении ядер урана от энергии.

Рис.10 Зависимость от времени зарядного состава ионов аргона, захваченных электронным кольцом ¹⁹.

ЛИТЕРАТУРА.

1. V. I. Veksler. *Coherent Principle of Acceleration of Charged Particles, Symposium, CERN, 1, 80 (1956); А.Э. 5, 427 (1957)*
2. О.И.Ярковой. ЖТФ, XXXП, вып. П 1285 (1962).
3. И.Н.Иванов и др. ЭЧАЯ, т.1, вып.2, 391, Москва, Атомиздат (1971).
4. C.R. Lamberton et al, LBL-1315 (1973).
5. A. Faltsens et al, *Proc. of the IX-th Intern. Conf. on High Energy Accelerators, SLAC, 2-7 May (1974), p. 226.*
6. C. Andelfinger et al. *ibid.* p. 218
7. Л.С.Барабаш и др. Дубна, Р9-7697 (1974).
8. Г.Н.Флеров и др. Дубна, 7-7204, 7-7073, P14-7060 (1973), P7-7571, P14-7754 (1974).
9. Г.Н.Флеров, Дубна, P7-8407 (1974).
10. Я.Б.Зельдович, В.С.Попов. УФН, 105, 403, 1971.
11. В.С.Попов, ЖЭТФ, 65, 35, 1973.
12. В.С.Попов, ЯФ, 19, 165, 1974.
13. С.С.Герштейн, В.С.Попов. *Nuovo Cim. Lett.* 6, 593, 1973.
14. T.R. Macdonald et al. *Phys. Rev. Lett.* 30, 471, 1973.

15. W.E. Meyerhof et.al. *Phys. Rev. Lett.*
30, 1279, 1973.
16. P. Gippner et al. *JINR Dubna*,
E7-8006.
17. J.S. Greenberg et.al. *Phys. Rev. Lett.*
33, 473, 1974.
18. М.С.Маринов, В.С.Попов, ЯФ, 20, 1223, 1974.
19. T.M. Hauptman et.al., *Proc. IX Intern
Conf. on High Energy Accelerators*,
SLAC, 1974.

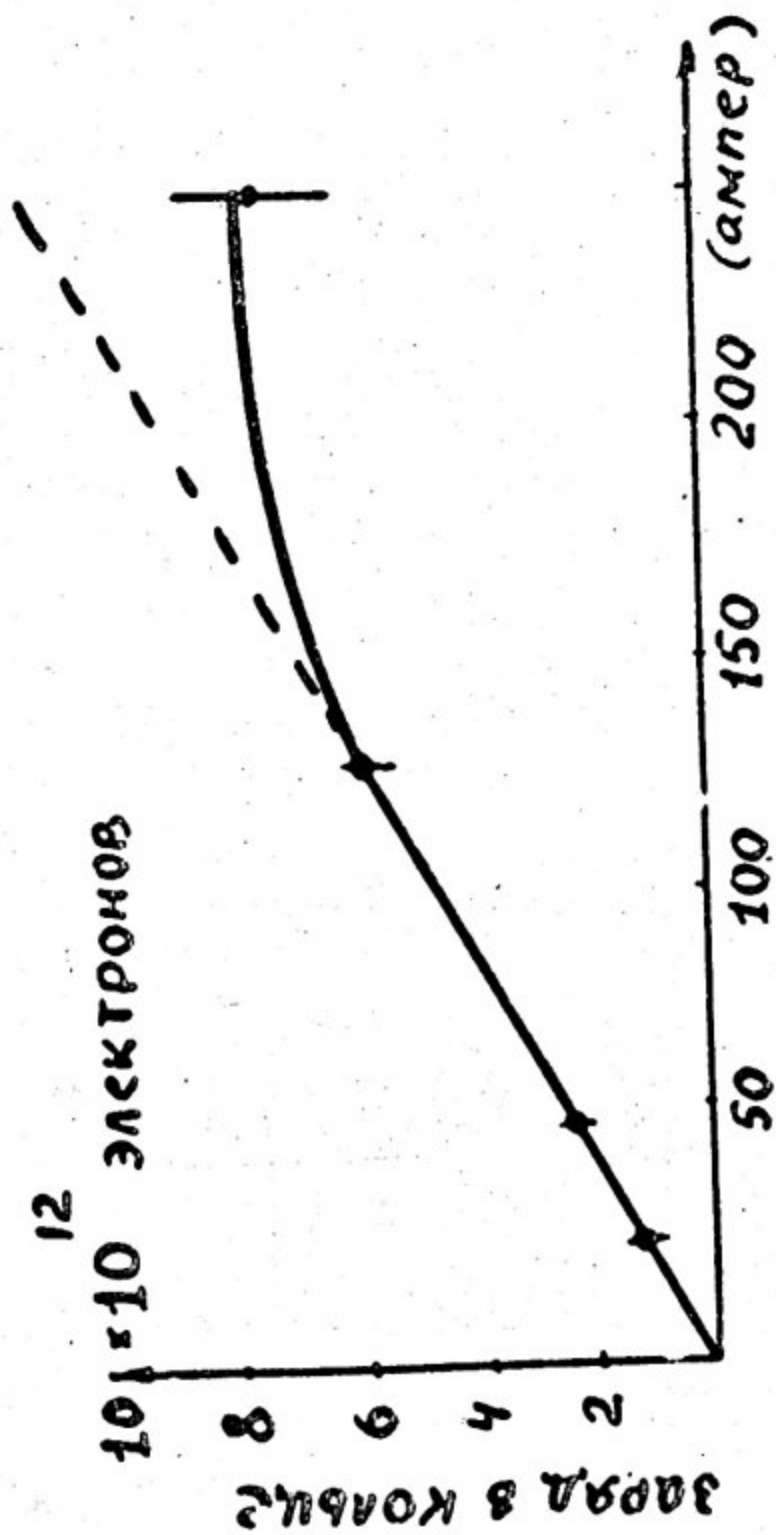
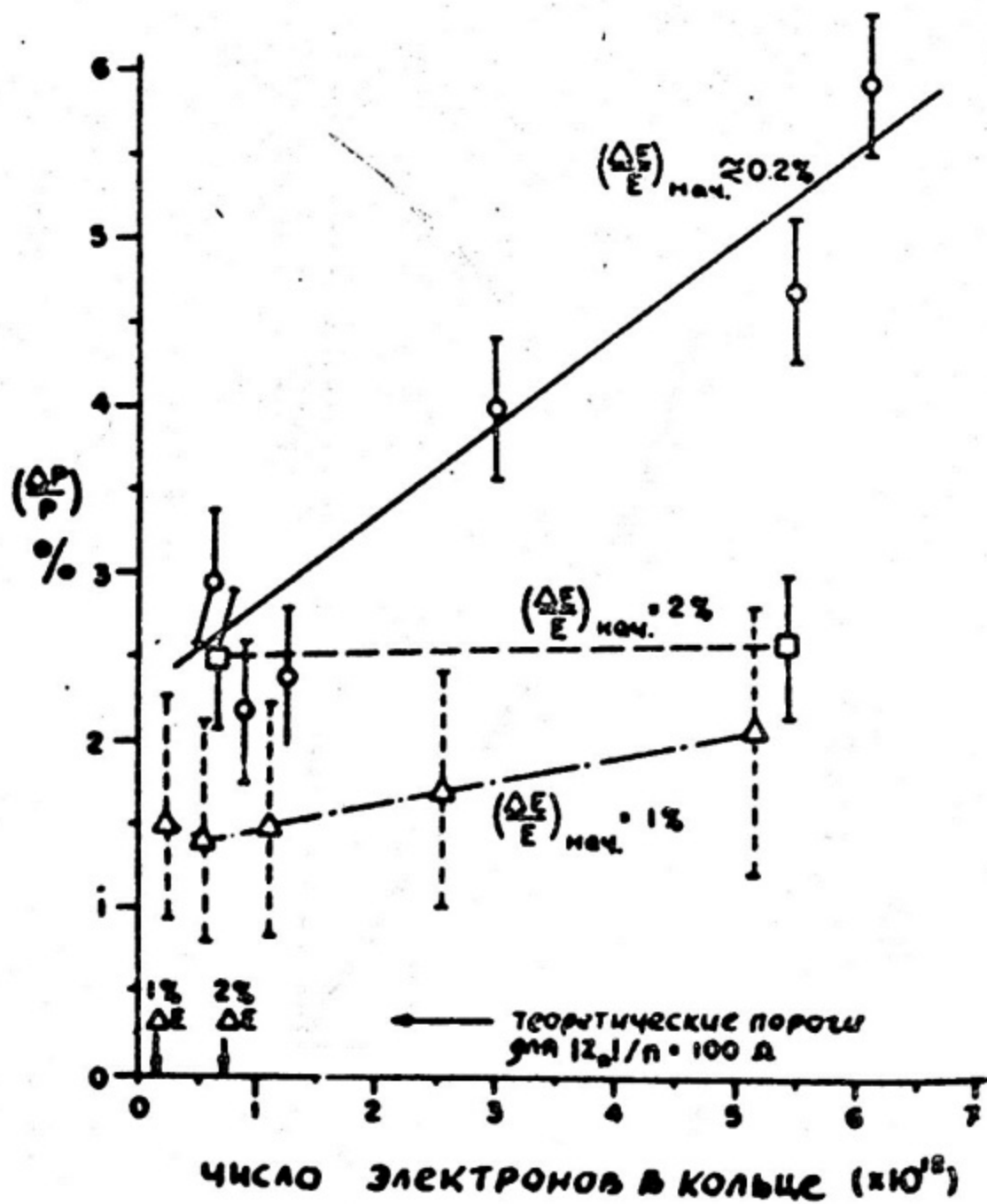


Рис. 1



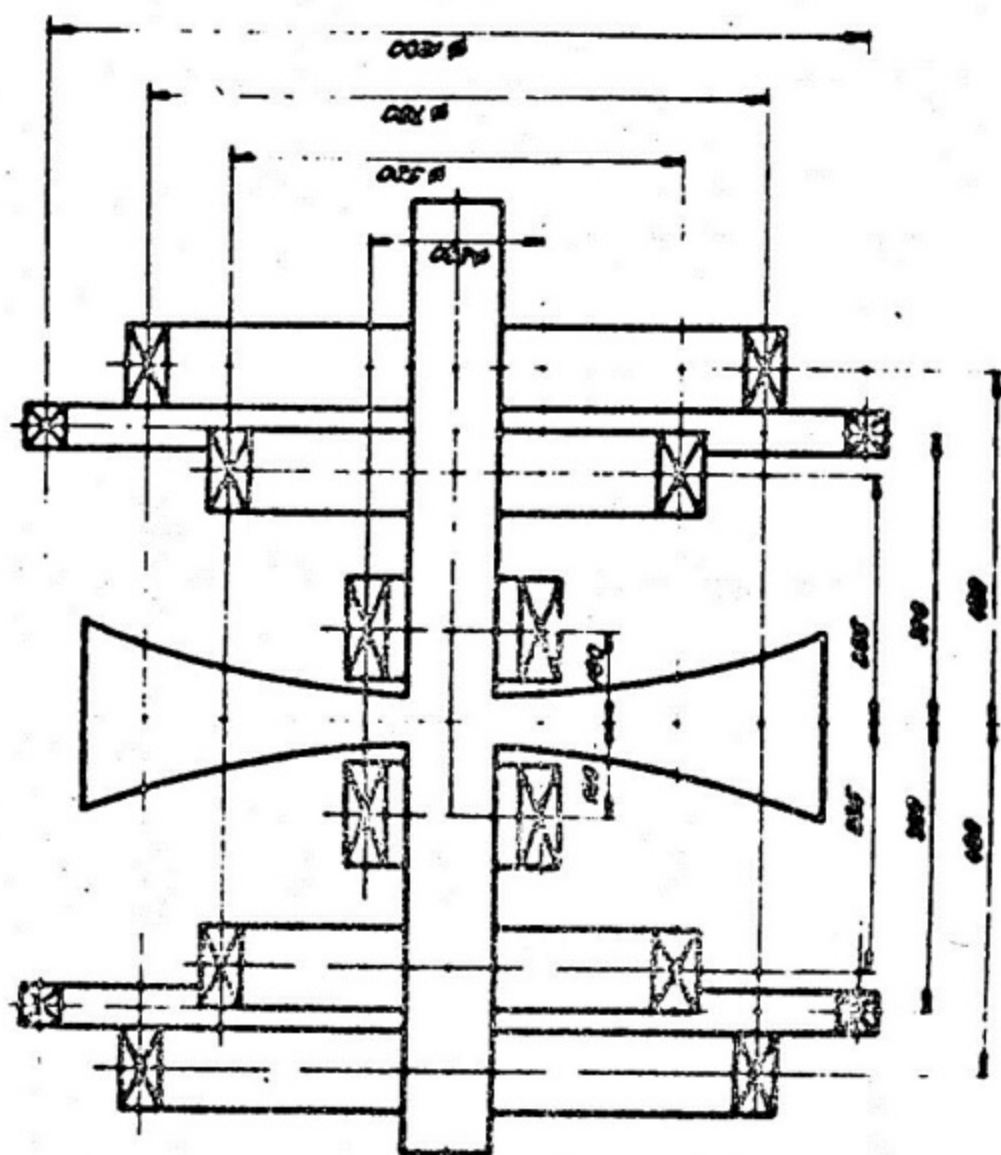


Рис. 4

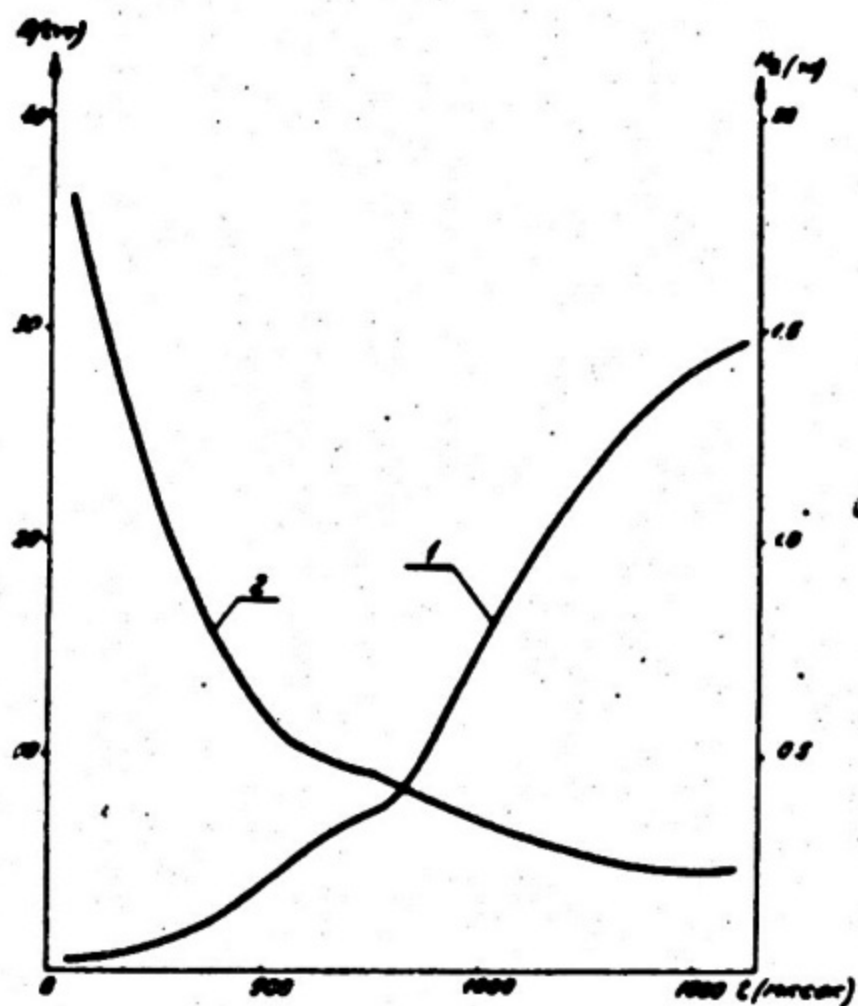


Рис. 5

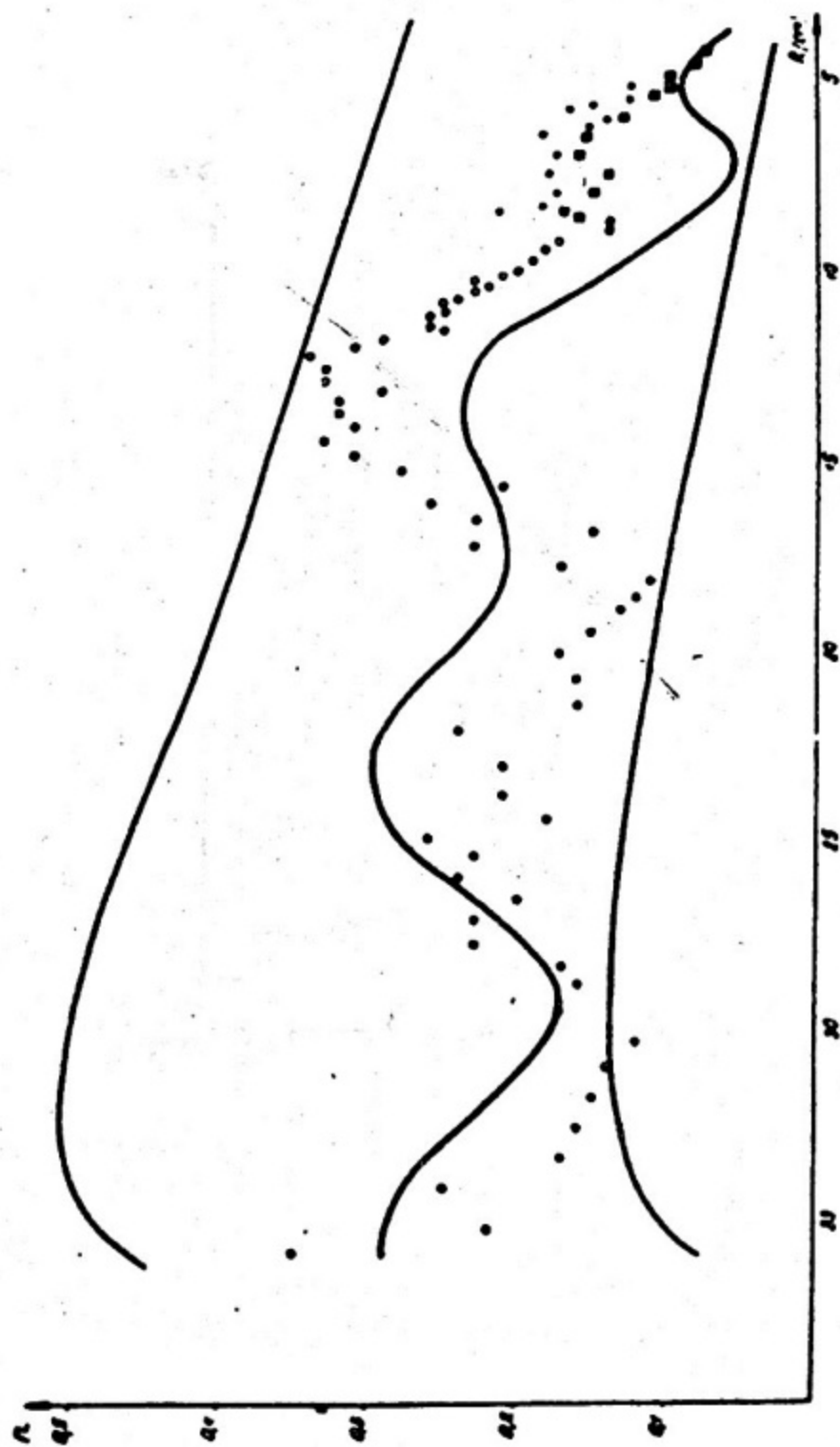


Рис. 6.

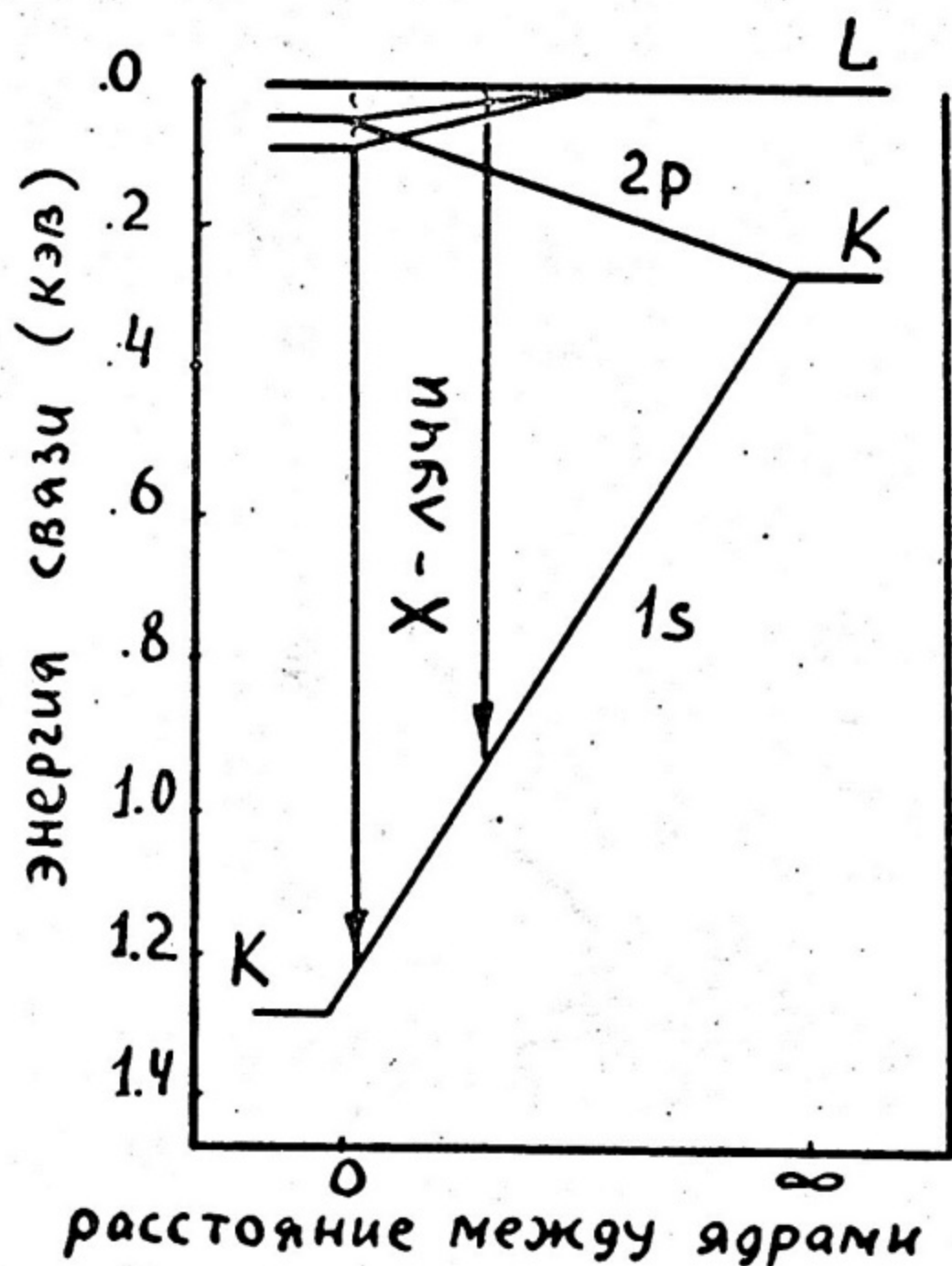
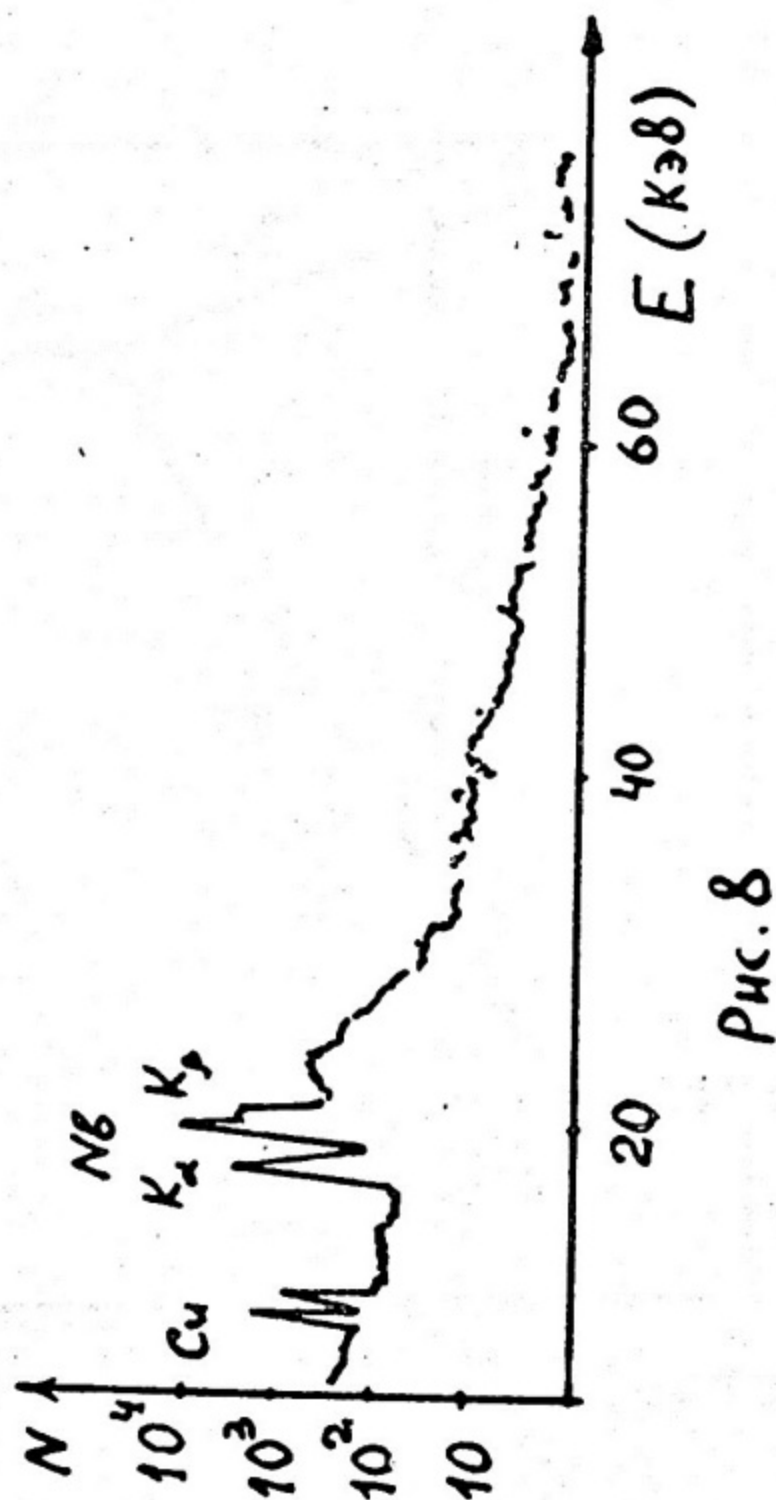


Рис. 7



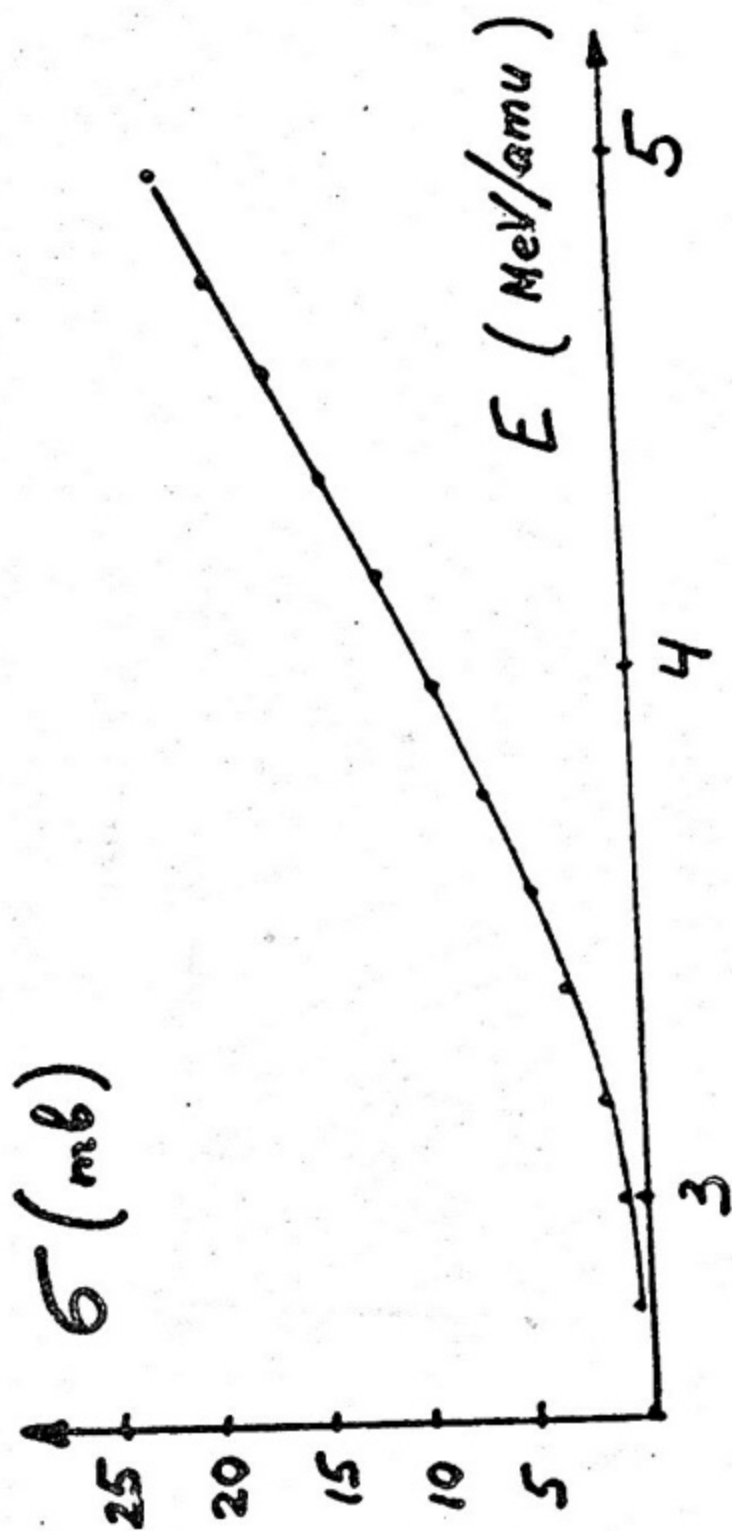


Рис. 9.

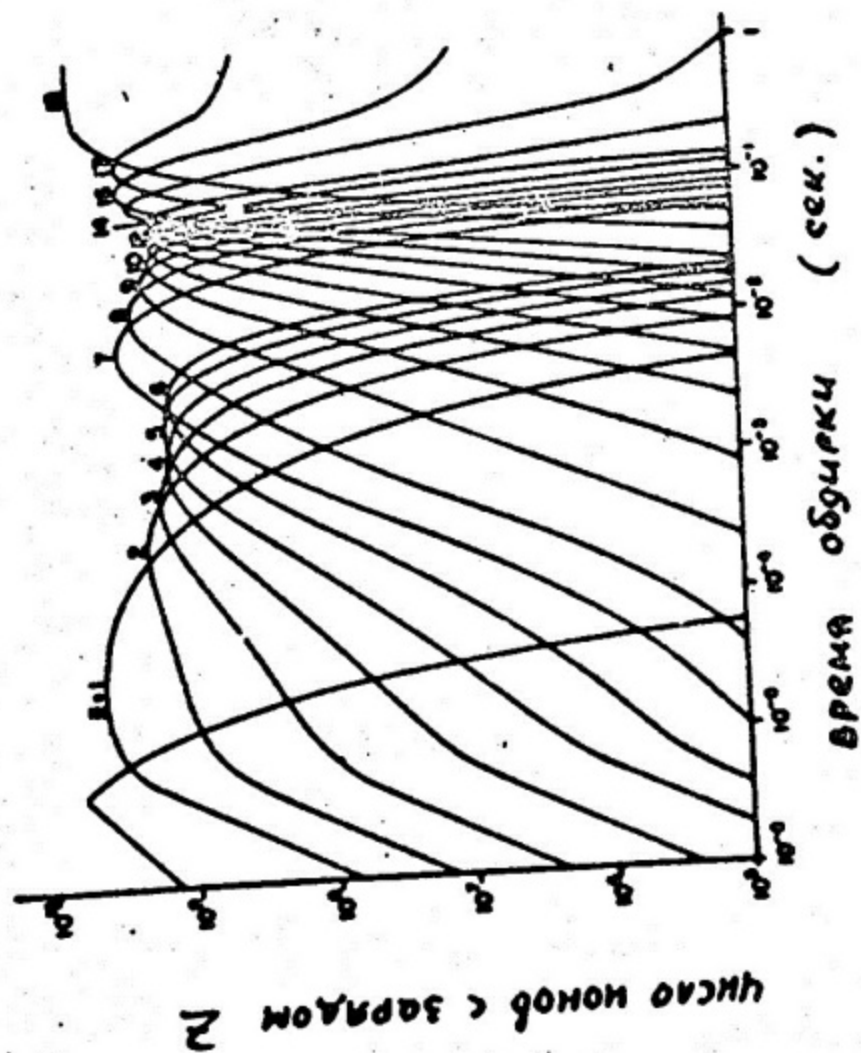


Рис. 10



Издание МИФИ, 1975.

Л.91159. Подп. к печати 13/У-75 г. Объем 2,25 п.л.

Заказ 762. Цена 20 к. Тираж 250.

Типография МИФИ, Каширское шоссе, дом 1.