



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P9-94-473

О.Н.Борисов, Л.М.Онищенко

ОСОБЕННОСТИ ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ
В ФАЗОТРОНЕ
ПРИ НАЛИЧИИ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ

Направлено в журнал «Particle Accelerators»

1994

Особенности продольного движения частиц
в фазотроне при наличии ионизационных потерь

Рассматривается влияние ионизационных потерь на диагностической фольге на продольное движение заряженных частиц в фазотроне ОИЯИ. Основные эффекты, полученные аналитически и подтвержденные численными расчетами, состоят в сдвиге синхронной фазы и компрессии амплитуды фазовых колебаний.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1994

Перевод авторов

Borisov O.N., Onischenko L.M.

P9-94-473

Peculiarities of the Particles Longitudinal Motion
in the Phasotron with Presence of the Ionization Losses

The influence of the ionization losses in the diagnostic foil on the longitudinal motion of charge particles at the JINR Phasotron is considered. The main effects, which are obtained analytically and confirmed by numerical calculations, consist in the synchrotronous phase shift and the phase oscillations amplitude compression.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

1 Введение

В Фазотроне ОИЯИ [1,2] для диагностики пучка используются вторично - эмиссионные датчики [3]. Датчик представляет собой полосу фольги толщиной в несколько микрон с радиальной протяженностью $3 \div 5$ мм, устанавливаемую под углом 45° к медианной плоскости на фиксированном азимуте и перемещающуюся по радиусу. Эмитируемые из нее под действием ускоренных протонов вторичные электроны собираются на коллектор, и этот сигнал используется для измерения интенсивности и других характеристик ускоренных частиц.

В работе [4] проанализировано влияние датчиков на поперечное движение частиц пучка. В данной работе рассматривается влияние датчиков на продольное движение частиц. При прохождении через фольгу частицы теряют часть энергии из-за ионизационных потерь. Величина ионизационных потерь зависит от энергии частиц и равна для выбранного датчика $\Delta W \approx -10$ кэВ [5]. Эта величина сопоставима с набором энергии за оборот при напряжении на дуанте $V = 15$ кВ в конце частотной программы (частотная программа $f_0 = 18.2 \div 14.4$ МГц).

2 Изменение равновесной фазы

Когда частица не пересекает фольгу, изменение энергии E ускоренной частицы описывается уравнением [6]

$$\frac{1}{f} \frac{dE}{dt} = eV \cos \varphi, \quad (1)$$

где f — частота обращения частицы,

φ — фаза частицы относительно ускоряющего напряжения,

eV — максимальный набор энергии за оборот.

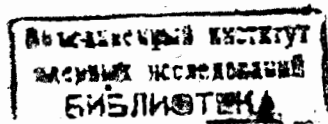
Фаза синхронной частицы, частота обращения которой f_s в каждый момент времени точно совпадает с частотой ускоряющего напряжения f_0 , определяется соотношением

$$\cos \varphi_s = \frac{1}{eV f_s} \frac{dE_s}{dt}. \quad (2)$$

Если ввести параметр $K = -\frac{E_s}{f_s} \left(\frac{\partial f}{\partial E} \right)_s$, который зависит только от структуры магнитного поля и характеризует автофазирующие свойства ускорителя (для Фазотрона $K \approx 0.8$ на конечном радиусе), то получим выражение для $\cos \varphi_s$

$$\cos \varphi_s = -\frac{E_s}{eV f_s^2 K} \frac{df_0}{dt}, \quad (3)$$

где $\frac{df_0}{dt}$ — скорость изменения частоты ускоряющего напряжения.



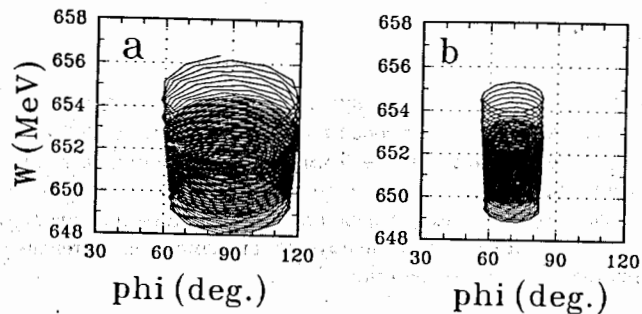


Рис.1 $\cos\varphi_S = 0.003$, $\varphi_0 = 65^\circ$: а) $\Delta W = 0$, б) $\Delta W = -10$ кэВ

При появлении ионизационных потерь уравнение (1) переходит в

$$\frac{1}{f} \frac{dE}{dt} = eV \cos\varphi - \Delta W. \quad (4)$$

Появление в правой части уравнения члена $\Delta W < eV$ может интерпретироваться как изменение фазы синхронной частицы, выражение для которой теперь приобретает вид

$$\cos\varphi_S = -\frac{E_S}{eV K f_S^2} \frac{df_0}{dt} + \frac{\Delta W}{eV}. \quad (5)$$

Оба члена в правой части выражения (5) положительны. Таким образом, ионизационные потери приводят к увеличению $\cos\varphi_S$, т. е. к уменьшению размера области фазовой устойчивости. Следовательно, должны измениться и амплитуды фазовых колебаний.

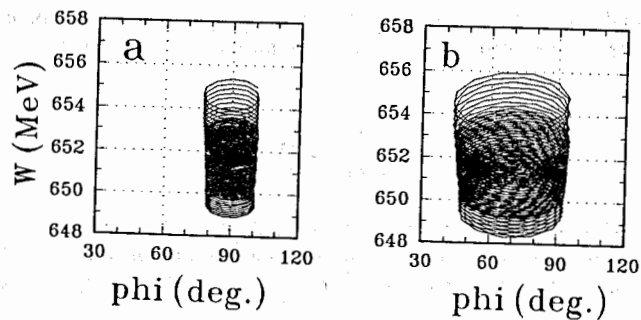


Рис.2 $\cos\varphi_S = 0.17$, $\varphi_0 = 90^\circ$: а) $\Delta W = 0$, б) $\Delta W = -10$ кэВ

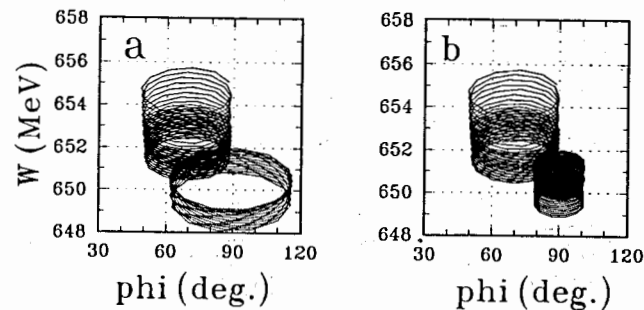


Рис.3 $\cos\varphi_S = 0.003$, $\Delta W = -10$ кэВ при $W > 652$ МэВ:
а) $\varphi_0 = 65^\circ$, б) $\varphi_0 = 90^\circ$

Для проверки данного заключения было проведено численное интегрирование уравнения (4). Расчет осуществлялся по программе "LONMOT" [7], использующей реальные магнитное поле и зависимость частоты ускоряющего напряжения от времени. Рассматривались два режима ускорения: "медленный" ($df_0/dt = -10^7$ с⁻², $\cos\varphi_S = 0.003$) и "быстрый" ($df_0/dt = -5 \cdot 10^8$ с⁻², $\cos\varphi_S = 0.17$).

На Рис.1 частица с начальной энергией 650 МэВ и начальной фазой 65° ускоряется при напряжении на дуанте 15 кВ и $\cos\varphi_S = 0.003$ ($\varphi_S \approx 89.8^\circ$). На Рис.1а показано фазовое движение этой частицы при отсутствии потерь, а на Рис.1б при $\Delta W = -10$ кэВ за оборот. Видно, что наличие ионизационных потерь приводит к изменению синхронной фазы от 89.8° к 70° и к уменьшению амплитуды фазовых колебаний.

На Рис.2 частица с той же начальной энергией, но с начальной фазой 90° , ускоряется в том же режиме. На Рис.2а потери отсутствуют, а на Рис.2б $\Delta W = -10$ кэВ за оборот. И в этом случае происходит изменение синхронной фазы, но амплитуда фазовых колебаний увеличивается.

На Рис.3 показано фазовое движение частицы, ускоряющейся при тех же условиях. Первоначально ионизационные потери отсутствуют, но как только энергия частицы достигает $W = 652$ МэВ, появляются потери $\Delta W = -10$ кэВ за оборот в течение всего последующего ускорения. Рис.3а соответствует частице с начальной фазой 65° , а Рис.3б — 90° . Траектории после появления ионизационных потерь практически совпадают для разных фаз. Это связано с тем, что частицы достигают фольги на вершине фазовой траектории и, соответственно, начинают движение с учетом потерь практически при одинаковых начальных условиях ($W = 652$ МэВ, $\varphi \approx 90^\circ$).

На Рис.4а показано фазовое движение частиц при быстром режиме ускорения $\cos\varphi_S = 0.17$ для начальной энергии 650 МэВ и нескольких начальных фаз (20° , 60° , 100°). При достижении частицей энергии 654 МэВ появляются ионизационные потери с величиной $\Delta W = -10$ кэВ. На Рис.4б представлены результаты подобных

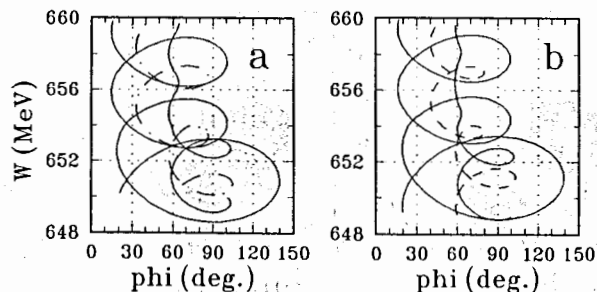


Рис.4 $\cos\varphi_S = 0.17$, $\Delta W = -10$ кэВ при $W > 654$ МэВ, $\varphi_0 = 20^\circ, 60^\circ, 100^\circ$:
а) $W_0 = 650$ МэВ, б) $W_0 = 649$ МэВ

расчетов для частиц с начальной энергией 649 МэВ. Здесь также виден сдвиг синхронной фазы и уменьшение амплитуды колебаний.

3 Компрессия амплитуды фазовых колебаний

В дальнейшем проводилось более подробное исследование фазового движения частицы в процессе перехода от ускорения без ионизационных потерь к ускорению при наличии потерь. В предыдущих расчетах в определенный момент появлялись ионизационные потери и затем они присутствовали. В реальной ситуации частица за одно фазовое колебание совершает несколько сотен оборотов, причем на некоторых оборотах она проходит через диагностическую фольгу, а на остальных ионизационных потерь нет. При дальнейших численных расчетах полагалось, что ионизационные потери присутствуют лишь в том случае, если энергия частицы превышает определенную величину (652 МэВ для наших расчетов).

При анализе результатов численных расчетов было замечено, что кроме сдвига синхронной фазы наблюдается затухание амплитуды фазовых колебаний. На Рис.5 показана фазовая траектория частицы с начальной энергией 650 МэВ и начальной фазой 65° для режима ускорения $\cos\varphi_S = 0.017$ ($\varphi_S \approx 89^\circ$).

Рассмотрим качественно эффект компрессии фазовых колебаний. Продольное движение частицы можно разбить на три этапа:

- ионизационные потери отсутствуют ($\Delta W = 0$);
- ионизационные потери за период фазового колебания присутствуют лишь на некоторых оборотах;
- ионизационные потери присутствуют на каждом обороте.

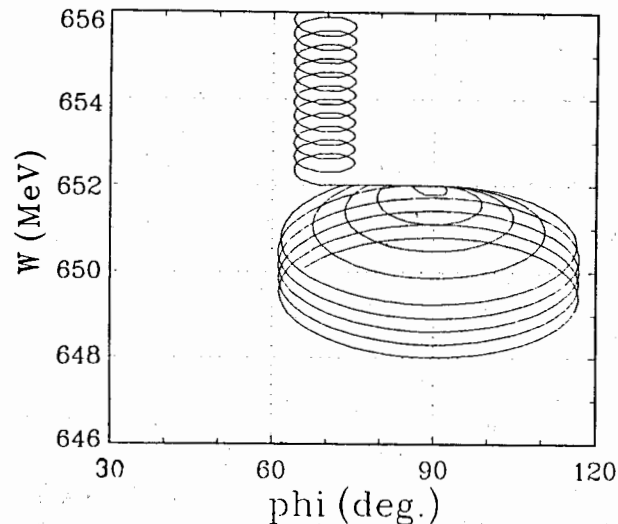


Рис.5 $\cos\varphi_S = 0.017$, $W_0 = 650$ МэВ, $\varphi_0 = 65^\circ$,
 $\Delta W = -10$ кэВ при $W > 652$ МэВ

На Рис.6 изображено несколько замкнутых фазовых траекторий (для удобства рассматриваем стационарные орбиты). При отсутствии ионизационных потерь частица движется по фазовой траектории вокруг синхронной частицы с некоторой амплитудой. В некоторый момент частица, двигаясь по траектории 1, достигает диагностической фольги и теряет часть энергии ΔW . Так как энергия частицы заметно больше энергии синхронной частицы, то при этом она переходит на фазовую траекторию 2 с меньшей амплитудой (как показано стрелочками на Рис.6). Двигаясь вдоль этой траектории, частица при взаимодействии с фольгой попадает на траекторию 3 с еще меньшей амплитудой и так далее. В принципе после однократной потери энергии и перехода на внутреннюю траекторию частица может в течение нескольких фазовых колебаний не взаимодействовать с фольгой, пока фазовая траектория не достигнет фольги в процессе ускорения. Это определяется соотношением прироста энергии за одно фазовое колебание и величины ионизационных потерь.

Таким образом, фазовая траектория как бы сворачивается до малых амплитуд. Этот процесс происходит до тех пор, пока синхронная частица не наберет такую энергию, что при очередной потере энергии из-за взаимодействия с фольгой она перейдет на фазовую траекторию 6 с большей амплитудой, как это показано на Рис.7. Двигаясь вдоль этой траектории, частица при взаимодействии с диагностической фольгой имеет энергию меньше, чем синхронная частица, и переходит на траекторию 7. Таким образом, как показано на Рис.7 стрелочками, происходит сдвиг равновесной фазы. После того, как синхронная частица наберет достаточную

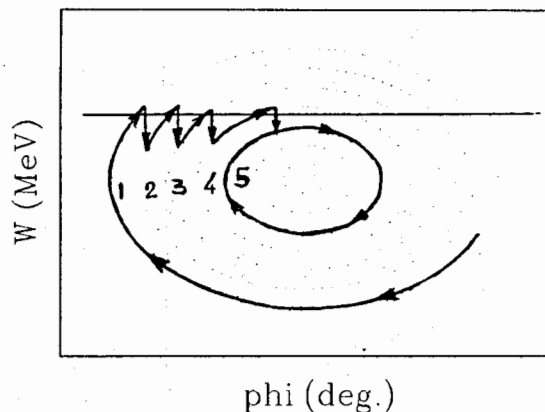


Рис.6 Уменьшение амплитуды колебания ($W > W_S$)

энергию, ионизационные потери будут присутствовать на каждом обороте и установятся фазовые колебания около новой синхронной фазы, но уже с малой амплитудой колебания (Рис.5).

Как видно из этих рассуждений, амплитуда фазовых колебаний, установившихся около новой синхронной фазы, практически не зависит от первоначальных амплитуд. На Рис.8 показаны фазовые траектории для различных начальных амплитуд при $\Delta W = -15$ кэВ ($\cos\varphi_S = 0.017$), а на Рис.9 все эти варианты сведены вместе. Таким образом, видно, что произошла компрессия фазовых колебаний. Величина остаточной амплитуды фазовых колебаний практически не зависит от начальной амплитуды и определяется, главным образом, соотношением между величинами набора энергии $eV\cos\varphi_S$ и ионизационных потерь ΔW .

Если бы величина ионизационных потерь была одинаковой для всех частиц, то таким способом можно было бы достичь очень существенной (на порядок) компрессии амплитуд фазовых колебаний. Однако процесс ионизационных потерь имеет статистический характер и распределение частиц по потерям энергии характеризуется функцией Ландау [8]. Ширина этого распределения для большей части частиц обычно не превышает 30% от средней величины потерь. Из-за зависимости сдвига равновесной фазы от величины ионизационных потерь частицы в конечном состоянии будут совершать фазовые колебания около различных равновесных фаз, что можно интерпретировать как эффективное увеличение (после затухания) фазового размера пучка. На Рис.10 совмещены фазовые траектории частиц при различных начальных амплитудах и величинах ионизационных потерь $\Delta W = -12.5, -15.0, -17.5$ кэВ.

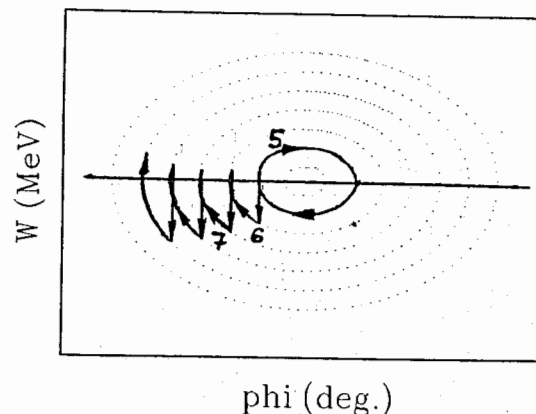


Рис.7 Сдвиг синхронной фазы ($W < W_S$)

На Рис.11 показаны фазовые траектории частиц для вдвое большего (60%) разброса величин ионизационных потерь ($\Delta W = -10.0, -15.0, -20.0$ кэВ). Но даже в этом случае виден эффект компрессии амплитуды фазовых колебаний частиц в пучке.

4 Заключение

Таким образом, можно отметить, что эффект влияния ионизационных потерь энергии в диагностической фольге состоит в следующем:

- сдвиг синхронной фазы на величину, определяемую величиной ионизационных потерь
- компрессия амплитуд фазовых колебаний около новой синхронной фазы.

Конечно, прохождение через фольгу наряду с затуханием фазовых колебаний будет приводить (из-за многократного рассеяния) к увеличению поперечных размеров пучка. Это требует отдельного рассмотрения, но можно отметить, что на стадии затухания фазовых колебаний частица в течение фазового колебания взаимодействует с фольгой незначительную часть времени (несколько оборотов). Это позволяет предполагать, что увеличение поперечных размеров пучка не будет значительным.

Авторы благодарны профессору В.П.Дмитриевскому и доктору Е.Кеил за полезные дискуссии и замечания.

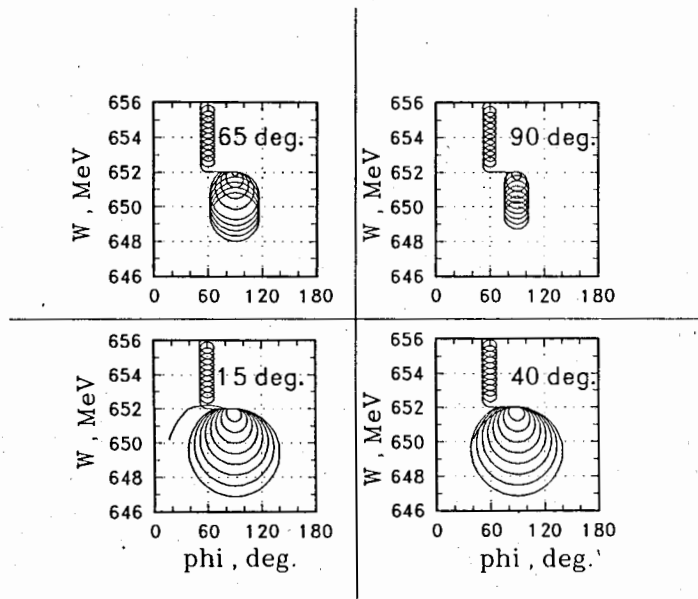


Рис.8 $\cos\varphi_S = 0.017$, $\Delta W = -15$ кэВ

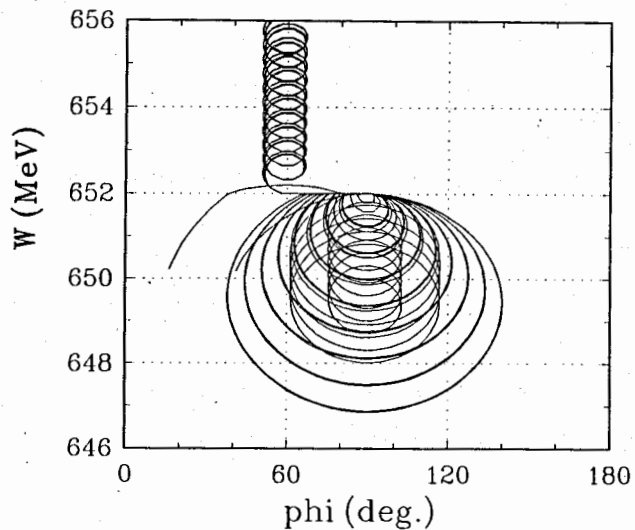


Рис.9 $\cos\varphi_S = 0.017$, $\Delta W = -15$ кэВ

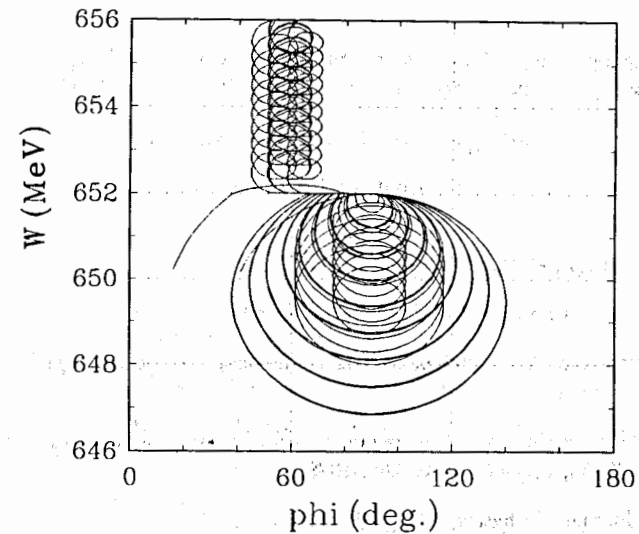


Рис.10 $\cos\varphi_S = 0.017$, $\Delta W = -12.5, -15.0, -17.5$ кэВ

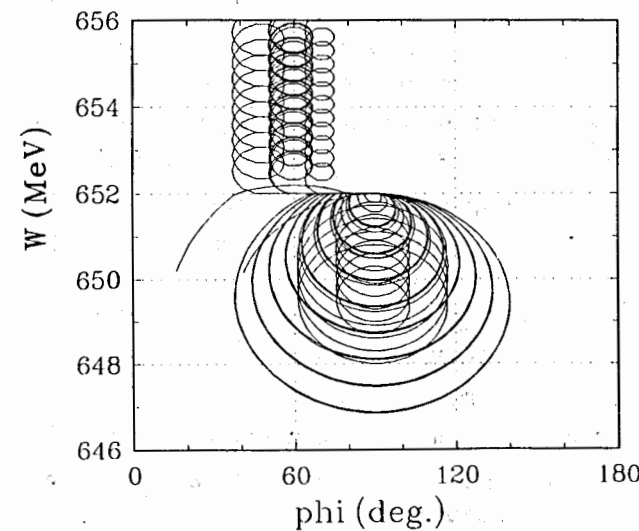


Рис.11 $\cos\varphi_S = 0.017$, $\Delta W = -10.0, -15.0, -20.0$ кэВ

Литература

1. А. А. Демьянов и др., "Фазотрон ОИЯИ и его пучки", XIII Совещание по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Д9-92-380, Дубна, 1992
2. L. M. Onischenko, "JINR Phasotron", PAC-87, Washington, v.2, p.878, 1987
3. V. V. Kolga et al., Twelfth Int. Conf. on Cycl. and Their Appl., Berlin, p.317, 1989
4. А. Л. Беляев и др., ОИЯИ, 13-88-575, Дубна, 1988
5. Л. М. Онищенко и др., ОИЯИ, Р9-91-226, Дубна, 1991
6. А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев, "Теория циклических ускорителей", Физматгиз, Москва, 1962
7. С. Б. Ворожцов и др., XI Совещание по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Д9-89-52, Дубна, т.2, с. 161, 1988
8. L. Landau, Journal of Physics, v.8, p.201, 1944

Рукопись поступила в издательский отдел
8 декабря 1994 года.