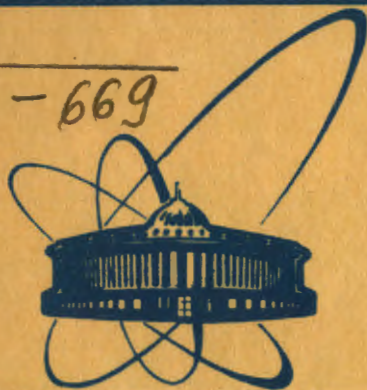


ЛЯП

К-669



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

1107/83

9-82-829

З.Кормань

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ
МОНОХРОМАТИЗАЦИИ ПУЧКА
ЦИКЛОТРОНА У-400

1982

1. ВВЕДЕНИЕ

Запущенный в 1978 году циклотрон У-400 в настоящее время обеспечивает пучки ионов с разными массами и энергетическим разбросом около 1%. Однако для ряда физических экспериментов требуется пучок с разбросом по энергии не больше чем $10^{-3} \div 10^{-4}$. В данной работе рассматривается возможность осуществления монохроматизации выведенного пучка циклотрона У-400 с помощью установки снижения и коммутации /УСК/. Она состоит из двух 90-градусных магнитов с однородным полем, расположенных один над другим так, что нижний магнит имеет возможность вращаться вокруг

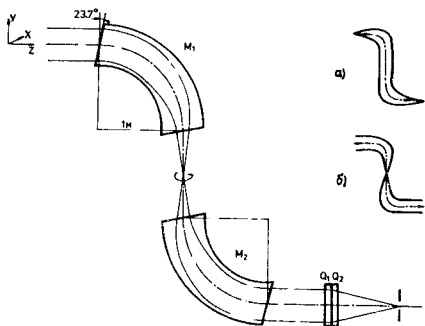


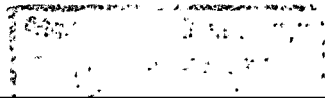
Рис.1. Схема УСК и два возможных вида транспортировки.
а/ бездисперсионная транспортировка, б/ дисперсионная транспортировка.

вертикальной оси /рис.1/. Эта система подробно описана в работах ^{1/} и ^{2/}. Показано, что при отсутствии aberrаций максимально достижимое разрешение системы по энергии составляет $2 \cdot 10^{-4}$. Под влиянием aberrаций размер монохроматического пучка у анализирующей щели увеличивается, что приводит либо к ухудшению достижимого установочной разрешения, либо к уменьшению интенсивности анализируемого пучка. Для оценки этих эффектов в настоящей работе приведены расчеты максимальной разрешающей способности с учетом aberrаций второго порядка.

2. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ В ПЕРВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Приведенная на рис.1 система обладает максимальной разрешающей способностью в том случае, если плоскости поворота пучка в обоих магнитах совпадают /нижний магнит не повернут/. При этом требуется транспортировка типа параллель-параллель /с фокусом пучка между магнитами/. На анализирующую щель пучок фокусируется с помощью дублета квадрупольных линз /рис.2/.

Матрица перехода первого порядка между точками 1 и 2 имеет следующую форму в радиальной плоскости магнита:



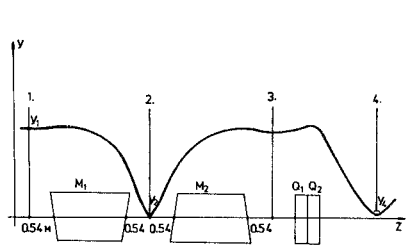


Рис.2. Огибающая пучка в радиальной плоскости.

$$\underline{M}_y = \begin{bmatrix} 0 & a & d \\ -\frac{1}{a} & 0 & e \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad /1/$$

В точке 2 имеется кроссовер пучка с размером $2y_2$, поэтому отношение между y_1 и y_2 определяется следующим образом:

$$y_1 = \sqrt{(0 \cdot y_2)^2 + (-ay_2')^2} = |a| \frac{\mathcal{E}}{y_2}, \quad /2/$$

где $\mathcal{E} = y_2 y_2'$ - произведение полуосей фазового эллипса пучка в радиальной плоскости.

От точки 2 до точки 4 существует транспортировка типа фокус-фокус с увеличением m , зависящим от геометрического положения и силы дублета, поэтому размер пучка на месте анализирующей щели

$$y_4 = m \frac{|a|\mathcal{E}}{y_1} = m \frac{K}{y_1}. \quad /3/$$

Можно показать, что отношение линейной дисперсии (D) и увеличения (m) постоянно и не зависит от параметров квадрупольных линз.

$$\frac{D}{m} = -2d. \quad /4/$$

3. ВЛИЯНИЕ АББЕРРАЦИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Траектории частиц в плоскости поворота пучка описываются формулой /3/

$$y = \sum_{\kappa, \lambda, \mu, \nu, \chi} (y | x_0^\kappa y_0^\lambda x_0'^\mu y_0'^\nu \delta^\chi) x_0^\kappa y_0^\lambda x_0'^\mu y_0'^\nu \delta^\chi, \quad \kappa, \lambda, \mu, \nu, \chi \geq 0, \quad /5/$$

где y_0, y_0' - начальная координата и угловая расходимость частиц в радиальной плоскости, x_0, x_0' - то же самое в аксиальной плоскости, $\delta = \Delta p/p$ - разброс частиц по импульсу.

Члены в скобках обозначают коэффициенты связи между выходной и входными координатами частиц. Из-за симметрии магнитного поля относительно медианной плоскости некоторые коэффициенты равны нулю. На размер моноэнергетического пучка хроматические aberrации не влияют, т.е. коэффициенты, связанные с δ , с этой точки

зрения не важны. Поэтому aberrационные члены второго порядка, играющие роль в транспортировке моноэнергетического пучка, следующие:

$$\Delta = (y | y_0^2) y_0^2 + (y | y_0 y_0') y_0 y_0' + (y | y_0'^2) y_0'^2 + (y | x_0^2) x_0^2 + (y | x_0 x_0') x_0 x_0' + (y | x_0'^2) x_0'^2. \quad /6/$$

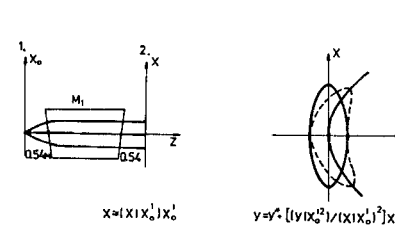


Рис.3. Изменение поперечного сечения пучка из-за aberrационного члена $(y | x_0^2) x_0^2$.

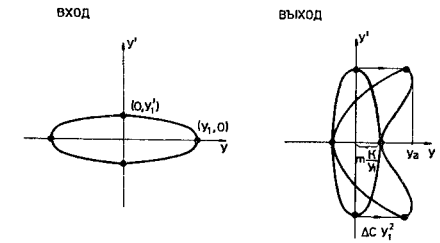


Рис.4. Изменение фазового объема пучка из-за aberrации типа $(y | y_0^2) y_0^2$.

Для монохроматизации требуется пучок на входе с малой угловой расходимостью (y_0') и большим размером (y_0), поэтому из членов в верхней строке /6/ основной вклад вносит первый. В аксиальной плоскости существует возможность такой транспортировки, когда aberrации системы /нижняя строка /6// не ухудшают его разрешение по энергии. Для этого необходимо получить кроссовер пучка в начале системы /малое x_0 , большое x_0' /. Тогда среди рассматриваемых членов определяющую роль будет играть последний. Его влияние на поперечное сечение пучка в точке 2 изображено на рис.3 / y^* - координата частиц по y без этого члена/. Подобная ситуация существует и в точке 4, свидетельствуя о том, что aberrация такого типа только деформирует поперечное сечение пучка без увеличения его размера. При использовании щели, имеющей соответствующую форму, разрешение не ухудшается.

Следовательно, в нашем случае наиболее важным является aberrационный коэффициент второго порядка $\Delta c = (y | y_0^2)$. На рис.4 показано искажение фазового эллипса пучка под влиянием aberrации такого типа. Видно, что размер пучка по y увеличивается только на одной половине плоскости /относительно центральной траектории/. Тогда полный размер пучка на месте анализирующей щели определяется по соотношению:

$$\bar{y} = y_4 + y_a = \frac{mK}{y_1} + \sqrt{\left(\frac{mK}{y_1}\right)^2 + (\Delta c y_1^2)^2}. \quad /7/$$

Это выражение имеет минимум при следующем начальном размере пучка:

$$y_1 = \sqrt[6]{\frac{5}{4}} \sqrt[3]{\frac{mK}{\Delta c}}, \quad \bar{y}_{\text{мин}} = \frac{5}{2} \sqrt[6]{\frac{4}{5}} \sqrt[3]{m^2 K^2 \Delta c}. \quad /8/$$

Максимальная разрешающая способность системы по импульсу выражается с использованием соотношений /4/ и /8/:

$$R = \frac{|D|}{y_{\text{мин}}} = 0,83 \frac{d}{\sqrt[3]{K^2 \frac{\Delta c}{m}}} \quad (K = |a| \text{ Э}). \quad /9/$$

Выражение /9/ свидетельствует о том, что под влиянием aberrаций второго порядка максимальная разрешающая способность системы зависит от значений радиального эмиттанса пучка и aberrационного коэффициента ($y|y_0^2$). Улучшение разрешения с помощью снижения эмиттанса пучка приводит к уменьшению интенсивности анализируемого пучка. Поэтому важно, чтобы aberrационный коэффициент имел как можно меньшее значение. Этого можно достигнуть, не изменяя основных оптических свойств системы, выбором соответствующих параметров магнитов УСК /радиального распределения магнитного поля /параметр β /, радиусов входных (r_1) и выходных (r_2) границ магнитов. В качестве примера в табл.1 показано несколько их значений, при которых коэффициент ($y|y_0^2$) мал. Представленные данные были рассчитаны с помощью программы TRANSPORT - 360 /4/.

Из-за отличий реальных значений параметров от оптимальных значение коэффициента отклоняется от рассчитанного. Отклонение выражается по формуле

$$\Delta c = \sqrt{\left[\Delta\beta \frac{\partial(y|y_0^2)}{\partial\beta}\right]^2 + \left[\Delta r_1 \frac{\partial(y|y_0^2)}{\partial r_1}\right]^2 + \left[\Delta r_2 \frac{\partial(y|y_0^2)}{\partial r_2}\right]^2}. \quad /10/$$

Таблица 1

Некоторые значения параметров магнитов УСК, подходящие для уничтожения aberrации типа ($y|y_0^2$) y_0^2

β	r_1 [м]	r_2 [м]	$ y y_0^2 $ [1/см]
-0.335	∞	∞	$m \cdot 2 \cdot 10^{-7}$
0	1.56	1.56	$m \cdot 4 \cdot 10^{-7}$
0	1.45	∞	$m \cdot 5 \cdot 10^{-7}$

Расчеты показали, что указанное отклонение больше всего чувствительно к ошибке радиального распределения поля ($\Delta\beta$), так как производная $\partial(y|y_0^2)/\partial\beta$ на несколько порядков превосходит остальные. Поэтому выражение /10/ может быть представлено в виде

$$\Delta c \approx \Delta\beta \frac{\partial(y|y_0^2)}{\partial\beta}. \quad /11/$$

В расчетах предполагалось, что магнитное поле однородно в рабочей зоне магнитов. При этом точность определения параметра β производится следующим образом:

$$\Delta\beta = 2 \frac{\rho_0^2}{s^2} \frac{\Delta B}{B} = 355,6 \frac{\Delta B}{B}, \quad /12/$$

где $\rho_0 = 1$ м - радиус поворота пучка, $s = 7,5$ см - половина радиальной апертуры магнитов, $\Delta B/B$ - точность формирования требуемого распределения поля.

По формулам /11/ и /12/, используя рассчитанное значение $\partial(y|y_0^2)/\partial\beta = m \cdot 2,3 \cdot 10^{-2}$ /1/см/, можно найти связь между Δc и $\Delta B/B$.

$$\frac{\Delta c}{m} = 8,2 \frac{\Delta B}{B}. \quad /13/$$

В нашем случае элементы матрицы /1/ имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} a &= 0,124 \text{ /см/мрад/}, \\ d &= 1,78 \text{ /см%/}, \\ e &= 14,39 \text{ /мрад%/}. \end{aligned}$$

Выведенный пучок циклотрона У-400 имеет вертикальный эмиттанс 16π /мм мрад/, т.е. $\text{Э} = 1,6$ /см. мрад/.

Параметры $\Delta E/E$ и $2y_1$ в зависимости от $\Delta c/m$, рассчитанные по формулам /8/ и /9/, представлены в табл.2. Используя выражение /13/, можно определить точность формирования магнитного поля, требуемую для осуществления установки определенного разрешения.

В случае, когда отсутствуют aberrации, достижимое разрешение системы ограничивается только радиальной шириной магнитной дорожки / $2s = 15$ см/ и, как показано в /2/, при использовании полной ширины радиальной апертуры магнитов УСК получается $\Delta E/E = 2 \cdot 10^{-4}$. Как следует из табл.2, с учетом aberrации и при полном использовании магнитной дорожки максимальное разрешение системы по энергии составляет $4 \cdot 10^{-4}$, что в свою очередь, требует формирования магнитного поля с точностью $\Delta B/B = 6 \cdot 10^{-6}$. В этом случае

интенсивность пучка с данным значением монохроматичности составит около 4% от интенсивности пучка, выведенного из циклотрона. При точности формирования магнитного поля на уровне 10^{-8} вследствие необходимости снижения радиального эмиттанса пучка его интенсивность с монохроматичностью $4 \cdot 10^{-4}$ будет равна около 1% от интенсивности выведенного пучка.

Таблица 2

Достижимое разрешение по энергии с помощью УСК и начальный размер пучка в зависимости от значения отклонения коэффициента ($y|y_0^2$) от нуля.

$\frac{\Delta c}{m}$ [1/см]	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}
$\frac{\Delta E}{E}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
$2y_1$ [см]	15	12	7	5.6

В заключение автор выражает благодарность В.Н.Мельникову за помощь в работе и Н.И.Тарантину за полезные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кленин Б.А. и др. ОИЯИ, 9-10213, Дубна, 1976.
2. Тарантин Н.И. ОИЯИ, P9-11536, Дубна, 1978.
3. Brown K.L. Advances Particle Phys., 1967, 1, p. 71.
4. Brown K.L. et al. SLAC Report No. 91, Stanford, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 декабря 1982 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

ДЗ-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
Д1,2-12036	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12450	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
Д4-80-271	Труды VII Всесоюзного совещания, по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д2-81-543	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д10,11-81-622	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д17-81-758	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д1,2-82-27	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Р18-82-117	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Д2-82-568	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д9-82-664	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д3,4-82-704	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Кормань З. 9-82-829
Расчет системы монохроматизации пучка циклотрона У-400

Проведен анализ системы монохроматизации пучка циклотрона У-400, состоящей из двух поворотных магнитов с однородным полем. Дано краткое описание оптических свойств системы в первом приближении и рассмотрен эффект аббераций второго порядка с целью определения их влияния на ее разрешающую способность. Показано, что существует оптимальная транспортировка пучка, при которой роль этих аббераций минимальна. Достижимое разрешение при этом зависит от радиального эмиттанса пучка и от значения абберационного коэффициента (γ/y_0^2). В результате расчетов определена связь между этим коэффициентом и точностью формирования требуемого распределения поля магнитов. Приведенные данные показывают, что при формировании магнитного поля с точностью на уровне $\Delta B/B = 10^{-4} - 10^{-3}$ система обеспечит пучок с монохроматичностью $\Delta E/E = 4 \cdot 10^{-4}$ и с интенсивностью несколько процентов от интенсивности выведенного из циклотрона пучка.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Kormany Z. 9-82-829
Calculation of Monochromatization System of the U-400 Cyclotron Beam

Monochromatization system of the U-400 cyclotron beam, consisting of two bending magnets with a homogeneous field, is analysed. The first order optical properties of the system are shortly described and the effect of the second order aberrations are examined in order to determine their effect on the system resolution power. The existence of an optimal beam transporting is shown, when the effect of these aberrations is minimal. The achievable resolution depends on the radial beam emittance and the value of the (γ/y_0^2) aberration coefficient. Due to these calculations a relation is determined between this coefficient and the accuracy of the required magnetic field shaping. The results show that in the case of the field shaping accuracy on the level $\Delta B/B = 10^{-4} - 10^{-3}$ the system will provide monochromatic beam with $\Delta E/E = 4 \cdot 10^{-4}$ and with the intensity of several percent of the extracted from the cyclotron beam intensity.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.