

сообщения  
Объединенного  
Института  
Ядерных  
Исследований  
Дубна

9-84-844

А.Д.Дымников\*, Г.М.Осетинский

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
КВАДРУПОЛЬНОГО МИКРОЗОНДА  
С ОБЪЕКТИВОМ  
В ВИДЕ КВАДРУПЛЕТА ВРАЩЕНИЯ  
И ОСЕСИММЕТРИЧНОГО МИКРОЗОНДА  
С ОБЪЕКТИВОМ  
В ВИДЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОЛЕНоиДА

---

\* Ленинградский государственный университет

1984

В настоящей работе исследуются два различных варианта протонного микронзонда. Первый вариант представляет систему, состоящую из 4 квадрупольных линз и являющуюся квадруплетом вращения<sup>/1-3/</sup>. Во втором варианте вместо квадрупольной системы используется осесимметричная магнитная линза в виде сверхпроводящего соленоида.

Для квадруплета вращения рассматривается прямоугольная модель распределения осевого поля. Для соленоида используется колоколообразная Глазеровская модель.

Уравнения движения заряженных частиц в квадрупольной линзе записываются в виде:

$$x'' = -k_k x + \Delta_{kx}, \quad y'' = k_k y + \Delta_{ky}, \quad /1/$$

$$k_k = \frac{B_k}{B\rho a_k} k_{k0}(z), \quad /2/$$

где  $B_k$  - магнитная индукция на полюсах линзы,  $B\rho$  - магнитная жесткость частицы,  $a_k$  - радиус апертуры, для прямоугольной модели  $k_{k0}(z) = 1$ ,  $\Delta_{kx}, \Delta_{ky}$  - многочлены III порядка относительно фазовых переменных  $x, x', y, y'$ .

Аналогично записываются уравнения для соленоида /во вращающейся системе координат/:

$$x'' + k_0^2 x = \Delta_{0x}, \quad y'' + k_0^2 y = \Delta_{0y}, \quad /3/$$

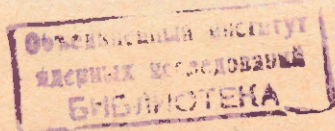
$$k_0 = \frac{B_0}{2B\rho} k_{00}(z). \quad /4/$$

Здесь  $B_0$  - максимальное значение продольного поля на оси линзы. Для колоколообразной модели  $k_{00}(z)$  имеет вид

$$k_{00}(z) = \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{d}\right)^2}, \quad /5/$$

где значение  $z$  отсчитывается от центра линзы,  $d$  - полуширина поля. Глазеровское безразмерное  $k^2$  равно  $k_0^2 d^2$ .

Решение параксиальных уравнений движения можно записать через матрицанты /матрицы перехода/  $X(z/z_0)$  и  $Y(z/z_0)$ :



$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = X(z/z_0) \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix} = Y(z/z_0) \cdot \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix}. \quad /6/$$

Для квадрупольной системы матрицант обозначим нижним индексом "к" / $X_k, Y_k$  / для осесимметричной - индексом "о" / $x_o, y_o$  /. Матрицант, отсчитываемый от входа в квадрупольную систему до выхода из нее, обозначим через  $X_k^*, Y_k^*$ . Соответствующий матрицант для осесимметричной линзы имеет обозначение  $X_o^*, Y_o^*$ .

Как известно, для квадруплета вращения справедливы равенства:

$$X_k^* = Y_k^* = M_k, \quad M_{k+1} = M_{k22}. \quad /7/$$

Для осесимметричной магнитной линзы всегда справедливо:

$$X_o = Y_o = M_o, \quad M_{o11} = M_{o22}. \quad /8/$$

Связь между соответствующими параметрами эквивалентных осесимметричной линзы и квадруплета вращения можно получить из условия равенства матрицантов / $M_k = M_o$  /, что приводит к двум уравнениям:

$$M_{k+d} = M_{o11}, \quad /9/$$

$$M_{k21} = M_{o21}. \quad /10/$$

Как известно, режим работы квадруплета вращения характеризуется нагрузочной кривой  $x_2 = x_2(X_1)$ , где

$$x_i = \sqrt{\frac{B_{ki}}{B_p a_k}} \cdot L_i, \quad i = 1, 2. \quad /11/$$

Здесь индекс 1 относится к I и IV линзам, индекс 2 - к II и III линзам,  $L_i$  - длина линзы.

Для каждой точки на нагрузочной кривой можно найти матричные элементы /или кардинальные элементы  $f_k$  и  $SF_k$  /. Уравнения /9/ и /10/ являются двумя уравнениями для двух неизвестных параметров  $k^2$  и  $d$  эквивалентной /квадруплету вращения/ осесимметричной линзы. Приближенное решение этих уравнений имеет вид:

$$\frac{d}{L_k} \cong \sqrt{\left(\frac{f_k}{L_k}\right)^2 - \left(\frac{SF_k}{L_k} + \frac{1}{2}\right)^2}, \quad /12/$$

$$g = \arccos\left(-\frac{SF_k + \frac{1}{2} L_k}{f_k}\right), \quad k^2 \cong \left(\frac{\pi}{g}\right)^2 - 1, \quad /13/$$

где

$$L_k = 2(L_1 + L_2) + S + \lambda. \quad /14/$$

Здесь  $\lambda$  - расстояние между соседними средними линзами,  $S$  - между соседними средней и крайней.

Для режима работы микрозонда наибольшее из двух  $x$ , а именно  $x_2$ , приблизительно равно 1,  $k^2 \approx 0,2 \div 0,4$ ;  $d \approx 0,3L_k$ .

Рассмотрим пример квадрупольного зонда с параметрами:  $L_1 = L_2 = L$ ,  $s = \lambda = 0$ ,  $x_1 = 0,617$ ,  $x_2 = 1$ ,  $a = 17,5L$ ,  $g = 0,66L$ ,  $M = 0,24$ ,  $L = 20$  см, где  $a$  - расстояние от первой диафрагмы до входа в I линзу,  $g$  - расстояние от выхода из IV линзы до мишени,  $M$  - увеличение. Для соленоида соответственно получим:  $k^2 \approx 0,23$ ,  $d = 0,3L_k$ . Для протонов с энергией 3 МэВ имеем  $B_p = 2,5$  Т м,  $B_o \approx 10$  Т,  $B_{k2}/a_k = 0,625$  Т/см,  $B_{k1}/a_k = 0,238$  Т/см,  $d \approx 0,24$  м. Сравнение хроматических aberrаций обоих типов линз показывает, что они приблизительно равны. Расширение пятна на мишени, вызванное импульсным разбросом частиц в пучке,  $\Delta x_p = \Delta u_p = \Delta r_p$ , где для осесимметричной линзы  $\Delta r_p = \Delta r_{op}$ , а для квадруплета вращения  $\Delta r_p = \Delta r_{kp}$ . Для приведенного выше примера микрозонда

$$\Delta r_{op} \approx 11 \cdot L_k \cdot \frac{\Delta p}{p} \alpha, \quad \Delta r_{kp} \approx 12 \cdot L_k \cdot \frac{\Delta p}{p} \alpha, \text{ где } \alpha - \text{начальный угол расходимости пучка.}$$

Размытие пятна на мишени за счет геометрических aberrаций при достаточно малых размерах одной диафрагмы /20-30 мкм/ в основном определяется сферической aberrацией, и для квадруплета вращения равно:  $\Delta r_{k, \max} \approx c_k \cdot L_k \cdot \alpha^3$ , а для соленоида  $\Delta r_{o, \max} \approx c_o \cdot L_k \cdot \alpha^3$ . Для вышеприведенного примера микрозонда  $c_k \approx 7200$  /прямоугольная модель/,  $c_o = 4700$ .

Расчеты для колоколообразной модели осевого поля в квадрупольных линзах указывают на то, что отличие в величинах  $c_k$  и  $c_o$  вызвано не различием типов полей, а различием вида осевого распределения поля. Для колоколообразного распределения поля  $c_k = 4300$ .

Таким образом, квадруплет вращения и соленоид в указанном примере микрозонда практически совпадают по всем основным оптическим характеристикам, как линейным, так и нелинейным. Основное различие состоит в величинах магнитной индукции на оси соленоида и на полюсах квадрупольных линз.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дымников А.Д., Явор С.Я. ЖТФ, 1963, 33, 7, с. 851.
2. Дымников А.Д., Фишкова Т.Я., Явор С.Я. ЖТФ, 35, 3, с. 431, 1965.
3. Андрианов С.Н., Дымников А.Д., Осетинский Г.М. ОИЯИ, Р9-12873, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 декабря 1984 года.

В Объединенном институте ядерных исследований начал выходить сборник "Краткие сообщения ОИЯИ". В нем будут помещаться статьи, содержащие оригинальные научные, научно-технические, методические и прикладные результаты, требующие срочной публикации. Будучи частью "Сообщений ОИЯИ", статьи, вошедшие в сборник, имеют, как и другие издания ОИЯИ, статус официальных публикаций.

Сборник "Краткие сообщения ОИЯИ" будет выходить регулярно.

The Joint Institute for Nuclear Research begins publishing a collection of papers entitled *JINR Rapid Communications* which is a section of the *JINR Communications* and is intended for the accelerated publication of important results on the following subjects:

Physics of elementary particles and atomic nuclei.  
Theoretical physics.  
Experimental techniques and methods.  
Accelerators.  
Cryogenics.  
Computing mathematics and methods.  
Solid state physics. Liquids.  
Theory of condensed matter.  
Applied researches.

Being a part of the *JINR Communications*, the articles of new collection like all other publications of the Joint Institute for Nuclear Research have the status of official publications.

*JINR Rapid Communications* will be issued regularly.



Дымников А.Д., Осетинский Г.М. 9-84-844  
Сравнение параметров квадрупольного микрозонда с объективом в виде квадруплета вращения и осесимметричного микрозонда с объективом в виде сверхпроводящего соленоида

Исследованы два различных варианта реализации протонного микрозонда. Первый вариант представляет систему, состоящую из 4 квадрупольных линз с симметрией квадруплета вращения. Вторым вариантом является микрозонд, в котором фокусирующая система /объективная/ создается осесимметричным магнитным полем в виде сверхпроводящего соленоида. Проведено сравнение магнитных полей в обоих вариантах.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Dymnikov A.D., Osetinskij G.M. 9-84-844  
Comparison of Parameters of Quadrupole Microbeam with an Objective in the form of Rotation Quadruplet and of Axisymmetric Microbeam with an Objective in the Form of Superconducting Solenoid

Two versions of construction of proton microbeam focusing systems have been studied. The first one is a system of four quadrupole lenses with a quadruplet rotation symmetry. In the second version the microbeam could be obtained by using a focusing system consisting of axisymmetric magnetic fields from a superconducting solenoid. The magnetic fields which can be achieved using these two systems are compared and discussed.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984