



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**  
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

Препринт 2023–2

В.И. Гаркуша, В.Н. Запольский, В.П. Карташев

**Оптическая система протонного микроскопа  
с параллельным пучком**

Протвино 2023

**Аннотация**

Гаркуша В.И. и др. Оптическая система протонного микроскопа с параллельным пучком: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2023–2. – Протвино, 2023. – 7 с., 2 рис., 1 табл., библиогр.: 9.

Рассматривается метод создания оптической системы протонной радиографической установки с параллельным (нормальным к плоскости изображения) протонным пучком. Приводится пример оптической системы для протонного пучка с энергией 35 ГэВ.

**Abstract**

Garkusha V.I. et al. Optical system of a proton microscope with a parallel beam: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2023–2. – Protvino, 2023. – p. 7, fig. 2, tables 1, refs.: 9.

A method for creating the optical system of a proton radiographic setup with a parallel (normal to the image plane) proton beam is considered. An example of an optical system for a proton beam with energy of 35 GeV is given.

## **Введение**

Основными преимуществами протонного микроскопа по сравнению с протонными радиографическими установками, работающими без увеличения изображения исследуемого объекта, является более высокое пространственное разрешение, определяемое малой хроматической длиной его магнитооптической системы, а также уменьшение вклада в конечное разрешение эффекта размытия сигнала в регистрирующей системе. Кроме этого, высокая плотность протонного пучка в пределах относительно небольшого поля обзора протонного микроскопа определяет более высокую контрастную чувствительность таких установок.

Как правило, в существующих протонных микроскопах [1-5] для фокусировки рассеянного в исследуемом объекте протонного пучка используется оптическая система, состоящая из четырех квадрупольных линз с чередующейся полярностью, объединенных в два объектива. При этом с целью минимизации хроматических aberrаций просвечивание исследуемого объекта производится протонным пучком, имеющим в приближении малого фазового объема виртуальные точечные источники в обеих поперечных плоскостях.

В ряде случаев это приводит к искажениям (размытию) границ между разнотолщинными элементами исследуемого объекта, в частности при исследовании объектов цилиндрической формы. В данной работе рассматривается возможность использования в качестве оптики протонного микроскопа системы из квадрупольных линз, обеспечивающей просвечивание исследуемых объектов параллельным (нормальным к плоскости изображения) протонным пучком.

### **1. Преобразование параметров траекторий частиц в оптической системе протонной радиографической установки**

В приближении малого фазового объема исходного протонного пучка и относительно небольшой толщины исследуемого объекта преобразования параметров траекторий про-

шедших через объект протонов в координаты изображения объекта в двух поперечных плоскостях оптической системы могут быть записаны в виде:

$$x = (R_{11} + R'_{11}\delta p)x_0 + (R_{12} + R'_{12}\delta p)(x'_0 + x'_s), \quad (1a)$$

$$y = (R_{33} + R'_{33}\delta p)y_0 + (R_{34} + R'_{34}\delta p)(y'_0 + y'_s), \quad (1б)$$

где  $x_0, x'_0, y_0, y'_0$  – начальные параметры траектории,  $\delta p = \Delta p/p_0$  – относительное изменение импульса,  $x'_s, y'_s$  – угловые отклонения за счет многократного кулоновского рассеяния в материале объекта,  $R_{ij}$  и  $R'_{ij} = \partial R_{ij}/\partial p$  – коэффициенты матрицы преобразования параметров траекторий и соответствующие им абберационные коэффициенты. Из условия фокусировки частиц в месте регистрации изображения объекта следует  $R_{12} = R_{34} = 0$ .

Для применяемой в существующих протонных радиографических установках оптической системы, состоящей из четырех квадрупольных линз с чередующейся полярностью, минимизация влияния хроматических аббераций на траектории частиц обеспечивается за счет работы с протонным пучком, исходные параметры траекторий которого связаны соотношениями  $x'_0 = -(R'_{11}/R'_{12})x_0$  и  $y'_0 = -(R'_{33}/R'_{34})y_0$ . При этом выражения (1) могут быть представлены как:

$$\Delta x = x/R_{11} - x_0 = R'_{12}\delta p x'_s/R_{11}, \quad (2a)$$

$$\Delta y = y/R_{33} - y_0 = R'_{34}\delta p y'_s/R_{33}. \quad (2б)$$

Отсюда следует, что в рассматриваемом приближении пространственное разрешение такой оптической системы определяется в первую очередь относительными величинами ее хроматических аббераций  $R'_{12}$  и  $R'_{34}$  или хроматическими длинами оптической системы, определяемыми как  $C_x = |R'_{12}|/K$  и  $C_y = |R'_{34}|/K$ , где  $K = |R_{11}| = |R_{33}|$  – коэффициент линейного увеличения. Влияние других факторов на разрешающую способность протонной радиографической установки рассмотрено в работе [6].

Кроме хроматических эффектов к искажению (размытию) изображения исследуемого объекта в рассмотренных выше системах приводит не параллельность исходного протонного пучка, при которой точки объекта, расположенные на одной поперечной координате, но находящиеся на разной глубине объекта, проецируются в разные точки изображения. Это искажение проявляется в основном для исследуемых объектов с продольными плоскостями и возрастает как при увеличении протяженности объекта, так и по мере удаления элементов объекта от оси системы.

В связи с этим представляет интерес рассмотрения оптической системы протонной радиографической установки, обеспечивающей использование для облучения исследуемого объекта параллельного (нормального к плоскости изображения) протонного пучка с  $x'_0 = 0$  и  $y'_0 = 0$ . При этом выражения (1) могут быть представлены как:

$$\Delta x = x/R_{11} - x_0 = R'_{11}\delta px_0/R_{11} + R'_{12}\delta px'_s/R_{11}, \quad (3a)$$

$$\Delta y = y/R_{33} - y_0 = R'_{33}\delta py_0/R_{33} + R'_{34}\delta py'_s/R_{33}. \quad (3б)$$

В данном случае к дополнительному размытию и смещению изображения точек исследуемого объекта приводят отличные от нуля абберрационные коэффициенты  $R'_{11}$  и  $R'_{33}$ . Для протонного микроскопа с  $K > 1$  вклад этих абберрационных коэффициентов в искажение изображения объекта понижен в  $K$  раз, тем не менее, их минимизация, как и выравнивание всех абберрационных коэффициентов в двух поперечных плоскостях является основной задачей при выборе и оптимизации оптической системы протонного микроскопа с параллельным пучком.

## 2. Оптическая система протонной радиографической установки с параллельным пучком

Рассмотрим оптическую систему из квадрупольных линз, вторая половина которой, представляющая собой зеркальное отражение первой половины, повернута на угол  $90^\circ$  относительно оптической оси системы. Если  $H$  и  $V$  – матрицы преобразования первой половины системы, соответственно, в горизонтальной и вертикальной плоскостях, то матрицы преобразования всей системы могут быть представлены в виде [7]:

$$M_x = \begin{pmatrix} v_{22} & v_{12} \\ v_{21} & v_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{22}h_{11} + v_{12}h_{21} & v_{22}h_{12} + v_{12}h_{22} \\ v_{21}h_{11} + v_{11}h_{21} & v_{21}h_{12} + v_{11}h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \quad (4a)$$

$$M_y = \begin{pmatrix} h_{22} & h_{12} \\ h_{21} & h_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{11}h_{22} + v_{21}h_{12} & v_{22}h_{12} + v_{12}h_{22} \\ v_{21}h_{11} + v_{11}h_{21} & v_{12}h_{21} + v_{22}h_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{22} & m_{12} \\ m_{21} & m_{11} \end{pmatrix}. \quad (4б)$$

Оптические системы, используемые для целей протонной радиографии, характеризуются наличием, так называемой Фурье-плоскости, в которой устанавливается коллиматор, используемый для повышения контрастности изображения. Для этого в нашем случае необходимо в обеих поперечных плоскостях потребовать фокусировку параллельного пучка в точку на некотором (достаточном для размещения коллиматора) расстоянии  $\delta$  от выходного края системы, т.е.

$$m_{11} + \delta m_{21} = 0, \quad m_{22} + \delta m_{21} = 0, \quad \text{откуда следует } m_{11} = m_{22} = -\delta m_{21}.$$

После выполнения этих условий система становится аксиально-симметричной ( $M_x = M_y = M$ ) и можно без потери общности в дальнейшем рассматривать матрицу системы только в одной из поперечных плоскостей. Если теперь добавить перед входным краем системы свободный промежуток длиной  $\delta$ , то матрица такой системы (от одной фокальной плоскости до другой) примет наиболее простой вид:

$$M = \begin{pmatrix} 0 & -1/m_{21} \\ m_{21} & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Пусть теперь  $\alpha$  – расстояние от исследуемого объекта до входной фокальной плоскости системы, а  $\beta$  – расстояние от выходной фокальной плоскости системы до изображения этого объекта, тогда результирующая матрица преобразования от объекта до его изображения  $R$  будет иметь вид:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1/m_{21} \\ m_{21} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \alpha \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta m_{21} & -1/m_{21} + \alpha \beta m_{21} \\ m_{21} & \alpha m_{21} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Здесь  $K = \beta|m_{21}|$  – коэффициент увеличения протонной радиографической установки.

Условие фокусировки рассеянных в облучаемом объекте протонов сводится к выполнению равенства  $-1/m_{21} + \alpha \beta m_{21} = 0$ , откуда  $\alpha \beta = 1/m_{21}^2$  и, следовательно,

$$\alpha = 1/K|m_{21}|, \quad \beta = K/|m_{21}|.$$

Последние соотношения означают, что для изменения коэффициента увеличения установки, построенной на основе рассматриваемой системы из квадрупольных линз, достаточно изменить всего два расстояния – расстояние от объекта до входной фокальной плоскости системы и расстояние от выходной фокальной плоскости системы до регистрирующей аппаратуры. При этом режимы всех квадрупольных линз, а также положение коллиматора (Фурье-плоскости) остаются неизменными.

Минимально необходимое для реализации такой установки количество квадрупольных линз равно четырем. При использовании шести квадрупольных линз можно дополнительно потребовать выполнение условия  $\partial m_{11}/\partial p = \partial m_{22}/\partial p$ , что, как следует из вида матриц преобразования (4), превращает рассматриваемую оптическую систему в аксиально-симметричную с учетом также и хроматических aberrаций.

### 3. Пример оптической системы для пучка с энергией 35 ГэВ

В качестве примера характеристики оптической системы из шести квадрупольных линз, рассчитанной нами для протонного пучка с энергией 35 ГэВ, приведены в табл.1. Две крайние квадрупольные линзы имеют длину 1 м и максимальный градиент магнитного поля

13 Тл/м, а четыре остальных – длину 2 м и максимальный градиент магнитного поля 20 Тл/м. Диаметр апертуры всех линз равен 100 мм. Расстояние  $\delta$  принято равным 1.2 м, при этом  $M = \begin{pmatrix} 0 & 8.819 \\ -0.1134 & 0 \end{pmatrix}$ .

Таблица 1. Основные параметры рассматриваемой в качестве примера оптической системы.

$K$	$\alpha$ , м	$\beta$ , м	$R'_{11}/K = R'_{33}/K$	$R'_{12}/K = R'_{34}/K$ , м	$l$ , м
1	8.82	8.82	3.18	56.0	33.50
3	2.94	26.46	2.03	25.3	45.26
7	1.26	61.73	1.71	19.0	78.85

Схема расположения оборудования рассматриваемой в качестве примера оптической системы микроскопа с  $K = 3$ , а также траектории протонов, условно проходящих через исследуемый объект, приведены на рис. 1. Поле обзора (акцептанс), определяемое апертурными ограничениями квадрупольных линз для рассматриваемой оптической системы с  $K = 3$ , приведено на рис. 2. В случае  $K = 7$  поле обзора лишь незначительно отличается от приведенного на рис. 2.

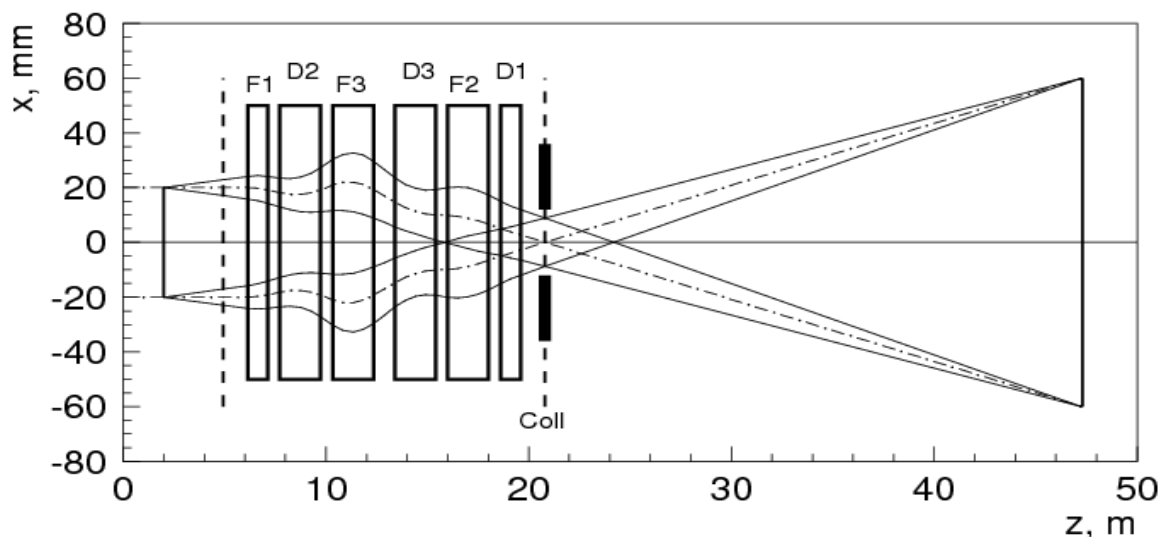


Рис. 1. Оптическая схема протонного микроскопа ( $K = 3$ ) с параллельным пучком. Вертикальными штриховыми линиями показаны фокальные плоскости, вторая из которых является Фурье-плоскостью системы. Траектории частиц приведены в горизонтальной плоскости с углом рассеяния  $\pm 1$  мрад в месте расположения исследуемого объекта.

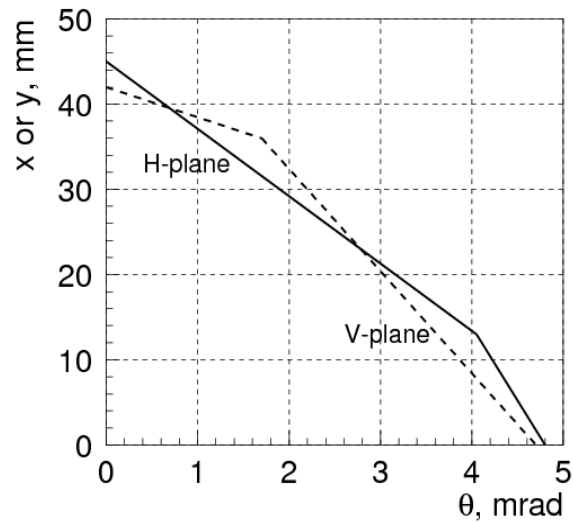


Рис. 2. Поле обзора протонного микроскопа ( $K = 3$ ) с параллельным пучком.

### Заключение

Рассмотренная выше оптическая система может быть применена для создания протонной радиографической установки с  $K \geq 1$  и параллельным пучком на облучаемом объекте, - в том числе и в связи с обсуждавшимся ранее в работе [8] предложением о создании протонного микроскопа в экспериментальной зоне ускорителя У-70.

Помимо возможности работы с параллельным протонным пучком к преимуществам такой оптической системы, состоящей, по меньшей мере, из шести квадрупольных линз, следует отнести ее полную аксиальную симметрию, сопоставимую со «стеклянной» оптикой. Обеспечить выполнение дополнительного условия  $R'_{11} = R'_{33} = 0$  можно при использовании более сложной оптической системы. В частности, оптическая система протонной радиографической установки с  $K = 1$ , состоящая из восьми квадрупольных линз с коллиматором в плоскости симметрии, рассматривалась в [9].

К недостаткам рассмотренной выше системы следует отнести необходимость размещать исследуемый объект на разных расстояниях от квадрупольных линз при создании протонной радиографической установки (микроскопа) с несколькими позициями для регистрации изображения и, соответственно, коэффициентами увеличения.



## Список литературы

- [1] C.T. Mottershead, J.D. Zumbro. Magnetic optics for proton radiography. Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference, p. 1397. DOI: 10.1109/PAC.1997.750705.
- [2] T. Mottershead, D. Barlow, B. Blind et al. Design and operation of a proton microscope for radiography at 800 MeV. Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, p. 702. DOI: 10.1109/PAC.2003.1289014.
- [3] A.V. Kantsyrev, A.A. Golubev, A.V. Bogdanov et al. TWAC-ITEP Proton microscopy facility. Instruments and Experimental Techniques. 2014, v. 57, No. 1, p. 1. DOI: 10.1134/S0020441214010151.
- [4] H.Y. Barminova, V.I. Turtikov. Proton microscope design for 9 GeV pRad facility. Journal of Instrumentation. 2016, v. 11, No. 5, p. 05021. DOI: 10.1088/1748-0221/11/05/P05021.
- [5] D. Varentsov, O. Antonov, A. Bakhmutova et al. Commissioning of the PRIOR proton microscope. arXiv:1512.05644v2 [physics.ins-det].
- [6] T. Wei, G.J. Yang, J.D. Long, J.S. Shi. Image blur in high energy proton radiography. Chinese Physics C. 2013, v. 37, No. 6, p. 068201. DOI: 10.1088/1674-1137/37/6/068201.
- [7] В.П. Карташев, В.И. Котов, Ю.С. Ходырев. Симметричные системы из квадрупольных линз. Журнал технической физики. 1976, т. 46, № 6, с. 1342.
- [8] И.Л. Ажгирей, В.И. Гаркуша, В.Н. Запольский, В.П. Карташев, К.Л. Михайлюков. Протонный микроскоп в экспериментальной зоне ускорителя У-70 (предложение новой экспериментальной установки). Препринт 2017-6, Протвино, 2022.
- [9] G.J. Yang, Z. Zhang, T. Wei et al. Theoretical study of magnetic lens with parallel beam matched. Nuclear Science and Techniques. 2017, 28:17. DOI: 10.1007/s41365-016-0168-5.

*Рукопись поступила 21 февраля 2023 г.*



В.И. Гаркуша и др.

Оптическая система протонного микроскопа с параллельным пучком.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 06.03.2023	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.
Печ.л. 0, 75. Уч.– изд.л. 0,9.	Тираж 60.	Заказ 3. Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ  
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

[www.ihep.ru](http://www.ihep.ru); библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

