

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.663

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРУЮЩИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
УСТРОЙСТВ В ПУЧКЕ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 50 ГэВ

© 2026 г. А. Г. Васильева*, А. А. Дурум, М. Ю. Костин, В. А. Майшеев,
Е. В. Парменова**, В. И. Питалев, И. В. Полуэктов, Ю. Е. Сандомирский,
Ю. А. Чесноков, А. А. Янович

*Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1*

*E-mail: vasilyeva-ag@ihep.ru

**E-mail: Ekaterina.Parmenova@ihep.ru

Поступила в редакцию 04.05.2026

После доработки 03.07.2026

Принята к публикации 13.08.2026

Получение пучков частиц на ускорителях является сложной научно-технической задачей, особенно в области высоких энергий. Пучки частиц на крупных ускорителях обычно отклоняются и фокусируются электромагнитами (дипольными и квадрупольными элементами), где используется поперечное магнитное поле. Новый подход для этой задачи может быть реализован с помощью кристаллических элементов, обладающих как отклоняющими, так и фокусирующими свойствами. В настоящей работе сообщается о тестировании в пучке протонов ускорительного комплекса У-70 НИЦ “Курчатовский институт”–ИФВЭ двух фокусирующих кристаллов с фокусными расстояниями 6.7 м и 9.4 см. Первый кристалл оптимален для энергий частиц диапазона гигаэлектронвольт, второй может использоваться на ускорителях с энергиями меньше или порядка 1 ГэВ.

Ключевые слова: каналирование в кристаллах, ускорители, вывод пучков, фокусировка пучков.

1. ВВЕДЕНИЕ

Получение выведенных пучков частиц на ускорителях – сложная научно-техническая задача, особенно при высоких энергиях. На крупных ускорителях пучки обычно отклоняются и фокусируются с помощью электромагнитов (дипольных и квадрупольных), использующих поперечное магнитное поле. Однако в ряде случаев полезными оказываются изогнутые кристаллы. Их “сила” эквивалентна магнитному полю в 1000 Тл. В режиме каналирования

кристаллы отклоняют пучки частиц, выступая в роли миниатюрных магнитов [1, 2]. Новые задачи, в частности формирование пучков вторичных частиц, требуют создания кристаллических приборов, сочетающих отклоняющие и фокусирующие свойства. В настоящей работе представлены результаты тестирования двух таких фокусирующих кристаллов с фокусными расстояниями 6.7 м и 9.4 см. Первый кристалл оптимален для частиц с энергией в диапазоне ГэВ, второй подходит для ускорителей с энергиями до 1 ГэВ или порядка этой величины.

2. КОНСТРУКЦИЯ ПЕРВОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

При энергиях ускоренного пучка протонов $E \geq 1$ ТэВ, характерных для крупных коллайдеров (таких как Большой адронный коллайдер), энергия вторичных частиц достигает сотен ГэВ. В лабораторной системе отсчета характерный угол разлета таких частиц с мишени определяется соотношением $\theta = 400/p$ ГэВ/с (здесь θ измеряется в мрад), что приводит к углам менее или порядка 1 мрад. Для такого малого углового аксептанса кристаллическое фокусирующее устройство имеет простую конструкцию (рис. 1).

Рис. 1. а – Схема фокусирующего кристаллического устройства; **б** – геометрические параметры на фокусирующем торце кристалла ...

В данном устройстве изгиб кристалла в плоскости фокусировки (xz) возникает как вторичная кривизна. Она обусловлена изгибом кремниевой пластины по вертикали (y) и связана с анизотропными свойствами кристаллической решетки [2]. Для изготовления фокусирующего устройства использовалась кремниевая пластина с боковыми гранями, параллельными плоскостям (111). Длина пластины вдоль пучка $L = 30$ мм, толщина $W = 2.5$ мм, размер по вертикали составлял 70 мм. Наличие линейного среза торца пластины приводит к тому, что частицы, захваченные в режим каналирования, поворачиваются на различные углы в зависимости от их поперечной координаты. Это позволяет фокусировать их на некотором расстоянии от кристалла на линии О-О' (рис. 1а). При треугольном срезе длиной $L_T = 3.6$ мм и радиусе изгиба в плоскости (xz) $R = 10$ м (рис. 1б) угол изгиба фокусирующей кромки составляет $\alpha_T = L_T/R = 0.36$ мрад. Угол α'_T , характеризующий захват кристалла, также равен этой величине (из-за подобия треугольников). Фокусное расстояние $F = W/\alpha'_T = 7$ м. Реально измеренное фокусное расстояние немного отличается по ряду причин, изложенных ниже.

Следует отметить, что первые опыты по фокусировке пучка кристаллами проводились еще в 90-е годы прошлого века с помощью устройства, где кристалл зажимался между массивными цилиндрическими зеркалами [3]. Однако этот метод затруднительно применять на ускорителях из-за значительного количества вещества вокруг кристалла.

3. КОРОТКОФОКУСНОЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО (ВТОРОЙ КРИСТАЛЛ)

Фокусирующие устройства, основанные на применении изогнутых кристаллов со скошенным выходным торцом, позволяют достигать фокусных расстояний порядка одного метра. Для низкоэнергетических пучков (с энергией около 1 ГэВ или ниже) требуются на порядок меньшие фокусные расстояния. Реализация данного подхода для малых фокусных расстояний сопряжена с техническими трудностями: достижение необходимого угла скоса (приблизительно 1° или менее) приводит к деградации материала кремния вблизи острого ребра. В связи с этим мы предложили новый метод фокусировки на малых расстояниях. Он основан на использовании изгиба стандартной плоскопараллельной кремниевой пластины, боковые грани которой в поперечном сечении кристалла (в плоскости фокусировки) вырезаются под небольшим углом относительно кристаллографических плоскостей. Этот угол, определяемый как угол разориентации, в нашем случае равен $\theta_m = D/L$, где D – толщина пластины, а L – ее длина в направлении распространения пучка. При такой ориентации направления кристаллографических плоскостей совпадают с направлением диагонали пластины (см. рис. 2а).

Рис. 2. а – Схема фокусировки пучка пластиной кремния..., **б** – внешний вид фокусирующего устройства...

Геометрия рисунка показывает, что фокусное расстояние F пластины, изогнутой на угол α , определяется формулой $F = D/\alpha$. Ранее проведенные эксперименты с новым устройством фокусировки пучков протонов (50 и 400 ГэВ) позволили достичь фокусного расстояния 15 см [4, 5]. В настоящей работе устройство было оптимизировано для уменьшения фокусного расстояния до 9.4 см, что открывает возможности для применения на небольших ускорителях. Для экспериментов использовалась кремниевая пластина, имеющая в горизонтальной проекции длину $L = 9$ мм в направлении пучка и толщину $D = 450$ мкм поперек пучка. Высота пластины равна 70 мм, как и в первом устройстве. При вырезке боковые грани пластины были повернуты на 3° относительно кристаллографических плоскостей (111). Пластина была равномерно изогнута на угол 5 мрад. Принцип изгиба, как и для первого кристалла, основан на анизотропии кристаллической решетки: механический момент сил, приложенный держателем (рис. 2б), изгибает пластину в продольном направлении, создавая необходимый равномерный изгиб в поперечном направлении. В результате фокусное расстояние составило $F = D/\alpha = 9.4$ см при угловом захвате 5 мрад.

Зависимость среднеквадратичного значения поперечной координаты x от расстояния l (после фокусирующего кристалла) можно описать следующим уравнением [6]:

$$s_x^2(l) = (\langle x^2 \rangle - \bar{x}^2) \left(1 - \frac{kl}{R}\right)^2 + (\langle \theta^2 \rangle - \bar{\theta}^2) l^2, \quad (1)$$

где R – радиус изгиба кристалла, а θ^2 и $\bar{\theta}$ являются среднеквадратичным значением и средним значением угла рассеяния частицы соответственно. Аналогично $(\langle x^2 \rangle - \bar{x}^2)$ – начальное среднеквадратичное значение поперечной координаты (при $z = 0$), k – постоянный коэффициент, равный либо отношению толщины линейного среза кристалла вдоль оси z к поперечной толщине кристалла (см. рис. 1), либо значению $1/\text{tg}\theta_m$, где θ_m – угол разориентации. Из этих соотношений мы можем найти фокусное расстояние

$$L_f = \frac{R/k}{1+q} \quad (2)$$

и среднеквадратичное значение координаты в точке фокуса

$$s_x^2(L_f) = \frac{(\langle \theta^2 \rangle - \bar{\theta}^2) R^2 / k^2}{1+q} = \frac{(\langle x^2 \rangle - \bar{x}^2) q}{1+q}, \quad (3)$$

где

$$q = \frac{\langle \theta^2 \rangle - \bar{\theta}^2}{\langle x^2 \rangle - \bar{x}^2} \frac{R^2}{k^2}, \quad (4)$$

а среднеквадратичное значение координаты x равно $\sqrt{s_x^2(L)} = s_x(L)$. Видно, что это значение зависит от угловой расходимости каналирующих частиц. При условии равномерного углового распределения каналирующих частиц можно положить, что $\langle \theta^2 \rangle - \bar{\theta}^2 \approx \theta_c^2/3$, где θ_c является критическим углом планарного каналирования. Видно, что размер пучка в фокусе в значительной степени зависит от значения q -фактора. Так, в случае, когда $q \ll 1$, получаем $s_x^2 \approx (\langle x^2 \rangle - \bar{x}^2) q$ и, в частности, размер пучка равен нулю, если расходимость пучка равна 0.

При сравнении экспериментальных результатов мы будем использовать начальный среднеквадратичный размер пучка, который, согласно предположению о равномерном распределении частиц по координатам, равен

$$\left[\int_{-d/2}^{d/2} \rho(x) x^2 dx \right]^{1/2} = d/\sqrt{12},$$

где d – поперечный размер кристалла, $\rho = 1/d$ – функция распределения частиц по координате и

$$\int_{-d/2}^{d/2} \rho(x) x dx = 0.$$

Хотя данное описание фокусировки ранее было представлено в статье [6] для кристаллов с линейным срезом, здесь мы распространили это описание также и на кристаллы с углом разориентации.

4. ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ТЕСТИРОВАНИЮ КРИСТАЛЛОВ НА ПУЧКЕ У-70

Эксперимент проводился на канале 4А ускорительного комплекса У-70 на экспериментальной установке “Кристалл” (рис. 3). Геометрия расположения детекторов и кристалла в гониометре также описана в работе [7]. Пучок протонов умеренной интенсивности (около 10^6 частиц/с) выводился из ускорителя У-70 кристаллическим дефлектором. Пучок имел расходимость $\sigma_x \sim 0.1$ мрад, с помощью коллиматоров формировался профиль пучка с резкими границами размером $s_x \times s_y = 10 \times 30$ мм².

Рис. 3. Схема установки “Кристалл”. Здесь $S_1 - S_3$ сцинтилляционные счетчики, S_h – горизонтальный сканирующий счетчик.

Режим каналирования находился с помощью телескопа сцинтилляционных счетчиков. На рис. 4 показана ориентационная кривая при поиске каналирования в первом кристалле.

Рис. 4. Число событий триггера (совпадения счетчиков S_1, S_2, S_3, S_h), нормированное на совпадение счетчиков S_1, S_2, S_3 на трассе отклоненного кристаллом пучка в зависимости от угла вращения кристалла α_x .

После того, как каналирование было найдено, происходило измерение профиля отклоненного кристаллом пучка в фокусе (на расстоянии 6.7 м от кристалла). Измерение профиля пучка в фокусе было проведено с помощью полимерной радиохромной дозиметрической пленки ЕВТ-3. Пленка сканировалась на планшетном RGB-сканере EpsonExpression 10000 XL в пропускающем режиме с пространственным разрешением 300 точек на дюйм (85 мкм на точку). Обработка исходного изображения осуществлялась в красном цветовом спектре. Результаты измерений показаны на рис. 5.

Рис. 5. Профиль сфокусированного пучка (виден слева), OD – оптическая плотность.

Справа виден широкий профиль падающего пучка протонов. Слева расположен узкий сфокусированный пучок. Его размер $\sigma_x = 0.2 \pm 0.05$ мм. Согласно расчетам, для пучка с начальным среднеквадратичным размером 0.72 мм и со среднеквадратичной расходимостью 0.17 мкрад для кристалла с $R = 10$ м и $k = 3.6/2.5 = 1.44$ получаем среднеквадратичный размер пучка в фокусе 0.12 мм. Это значение заметно меньше измеренного. Расчетное значение фокусного расстояния равно 6.76 м, что близко к выбранному. Различие результатов расчета и

измерений мы объясняем наличием воздуха между кристаллом и детектором. С учетом рассеяния в воздухе значение фокусного расстояния равно 5.915 м, а среднеквадратичный размер пучка 0.24 ± 0.017 мм.

Мы рассчитали влияние воздушной среды на размер пучка с помощью соотношения

$$\tilde{s}_x^2(l) = s_x^2(l) + \theta_{ms}^2 l^2, \quad (5)$$

где θ_{ms} – среднеквадратичное отклонение угла многократного рассеяния в воздухе, а $\tilde{s}_x^2(l)$ – скорректированный размер пучка. Для выполнения расчетов мы применили рекомендацию Particle Data Group [8] аппроксимировать центральную часть – 98% событий углового распределения – функцией Гаусса со среднеквадратичным отклонением, равным

$$\theta_{ms} = \frac{13.6 \text{ МэВ}}{\beta c} \sqrt{l/X_0} [1 + 0.038 \ln(l/X_0)], \quad (6)$$

где p – импульс частицы, βc – скорость частицы, X_0 – радиационная длина среды. Погрешность данной формулы приводится в работе [8] и оценивается как $\pm 11\%$.

Величина расчетного среднеквадратичного размера пучка в фокусе удовлетворительно согласуется с результатами измерений. Таким образом, измеренный коэффициент увеличения при фокусировке (коэффициент сжатия) равен $0.2/0.72 = 0.28$ или, другими словами, первоначальное изображение было уменьшено в $0.72/0.2 = 3.6$ раза. Расчетный коэффициент сжатия в вакууме равен $0.12/0.72 = 0.17$, что соответствует уменьшению начального размера в 6 раз. Рисунки 6, 7 иллюстрируют рассчитанные огибающие пучка для двух кристаллов и измеренные в ходе эксперимента размеры пучка в фокусе.

Рис. 6. Огибающие пучка для первого кристалла...

Рис. 7. Огибающие пучка для второго кристалла.

Аналогичные измерения были проведены и для другого кристалла. На рис. 8 представлен профиль пучка, реконструированный по данным цифрового сканирования пленки. Сфокусированный пучок (пик в центре), прошедший через кристалл в режиме каналирования, имеет плотность в несколько раз выше, чем у падающего пучка. Это наблюдение справедливо, несмотря на то что лишь около 10% падающих частиц отклонялись за счет каналирования в кристалле. Измеренный размер пучка в фокусе равен $\sigma_x = (2.6 \pm 1)$ мкм, что подтверждается данными на рис. 8.

Для этого случая мы также провели расчеты, исходя из следующих начальных данных: толщина кристалла 0.45 мм, что соответствует среднеквадратичному размеру, равному 0.13 мм, радиус кристалла $R = 0.9 \text{ см}/0.005 = 1.8$ м, $k = 1/\text{tg}(3^\circ) = 19.1$; начальная среднеквадратичная

расходимость пучка 17 мкрад. Согласно расчетам, фокусное расстояние равно 9.4 см, среднеквадратичный размер пучка в фокусе равен 1.63 мкм. Расчеты с учетом воздуха незначительно увеличивают размер пучка (до 1.66 мкм). Это означает, что первоначальный размер пучка был уменьшен по крайней мере в $0.13/0.0026 = 50$ раз.

Отметим, что точное измерение столь малых величин затруднено в основном из-за ограниченного разрешения сканера, находящегося на уровне нескольких микрометров. Следовательно, полученный нами профиль пучка дает завышенную оценку его реального размера в фокусе.

Рис. 8. Профиль пучка по данным сканирования пленки с максимальным разрешением.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе протестированы два фокусирующих кристаллических устройства – с дальним и коротким фокусами. При этом стоит отметить, что фокусировка пучка частиц высокой энергии (50 ГэВ) кристаллическим устройством на расстоянии 9.4 см продемонстрирована впервые в мире, это примерно в 100 раз сильнее, чем это делают электромагнитные квадруполь.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда №25-22-00555 (<https://rscf.ru/project/25-22-00555/>) при поддержке НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ.

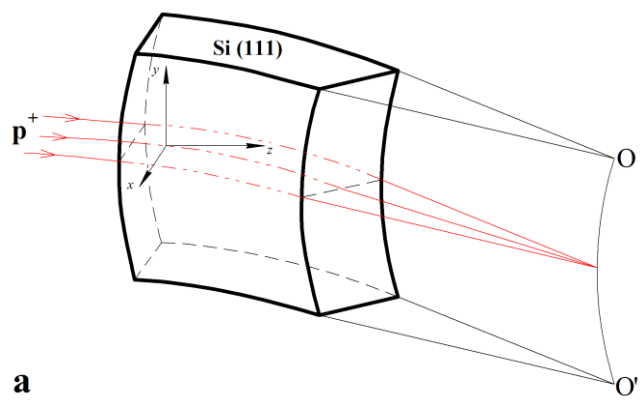
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tsyganov E.N.* Estimates of cooling and bending processes for charged particle penetration through a monocrystal. Fermilab preprint ТМ-684, Batavia, 1976.
2. *Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A., Kotov V.I.* Crystal channeling and its application at high-energy accelerators. Berlin: Springer, 1997.
3. *Гордеева М.А., Гурьев М.П., Денисов А.С. и др.* Письма в ЖЭТФ. 1991. Т. 54. С. 485.
[*Gordeeva M.A., Gur'ev M.P., Denisov A.S. et al.* JETP Lett. 1991. V. 54. P. 487.]
4. *Афонин А.Г., Барнов Е.В., Бритвич Г.И. и др.* Письма в ЖЭТФ. Т. 106. С. 727.
<https://doi.org/10.7868/S0370274X17120037>
[*Afonin A.G., Barnov E.V., Britvich G.I. et al.* JETP Lett. 2017. V. 105. P. 763.
<https://doi.org/10.1134/S0021364017120050>]

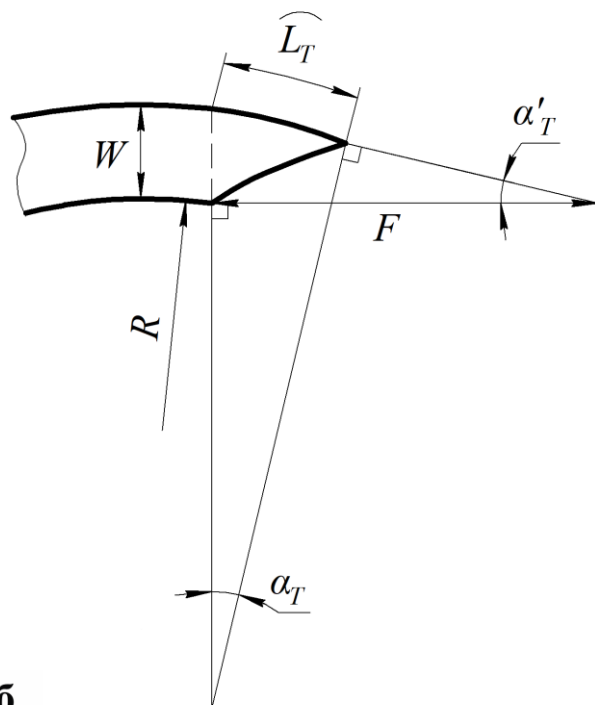
5. *Scandale W., Arduini G., Cerutti F. et al.* Nucl. Instrum. Methods B. 2018. V. 414. P. 104.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.10.036>
6. *Scandale W., Arduini G., Cerutti F. et al.* Phys. Rev. Accel. Beams. 2018. V. 21. № 1. P. 014702.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.014702>
7. *Афонин А.Г., Барнов Е.В., Бритвич Г.И. и др.* ПТЭ. 2016. № 4. С. 16.
<https://doi.org/10.7868/S0032816216030162>
[*Afonin A.G., Barnov E.V., Britvich G.I. et al.* Instrum. Exp. Tech. 2016. V. 59. P. 497.
<https://doi.org/10.1134/S002044121603012X>]
8. *Beringer J., Arguin J.-F., Barnett R.M. et al.* Phys. Rev. D. 2012. V. 86. P. 010001.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.010001>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** **а** – Схема фокусирующего кристаллического устройства. **б** – Геометрические параметры на фокусирующем торце кристалла (масштаб не соблюдается)
- Рис. 2.** **а** – Схема фокусировки пучка пластиной кремния. Направления кристаллографических плоскостей совпадают с направлением диагонали в горизонтальном прямоугольном сечении (в плоскости фокусировки). **б** – Внешний вид фокусирующего устройства. Пластина в горизонтальной плоскости под действием вертикального изгибающего момента приобретает индуцированную кривизну
- Рис. 3.** Схема установки “Кристалл”. Здесь S_1 – S_3 – сцинтилляционные счетчики, S_h – горизонтальный сканирующий счетчик
- Рис. 4.**—Число событий триггера (совпадения счетчиков S_1 , S_2 , S_3 , S_h), нормированное на совпадение счетчиков S_1 , S_2 , S_3 на трассе отклоненного кристаллом пучка в зависимости от угла вращения кристалла α_x
- Рис. 5.** Профиль сфокусированного пучка (слева), OD – оптическая плотность
- Рис. 6.** Огибающие пучка для первого кристалла: 1 – расчет для условий вакуума между кристаллом и детектором, 2 – расчет для условий наличия воздуха между кристаллом и детектором, 3 – с учетом возможной ошибки, оцененной в работе [8] и равной $\pm 11\%$; 4 – измеренный размер пучка в фокусе
- Рис. 7.** Огибающие пучка для второго кристалла: 1 – расчеты, которые не дают видимого различия между огибающими для условий вакуума или наличия воздуха между кристаллом и детектором; 2 – измеренный размер пучка в фокусе
- Рис. 8.** Профиль пучка со сканера при максимальном разрешении

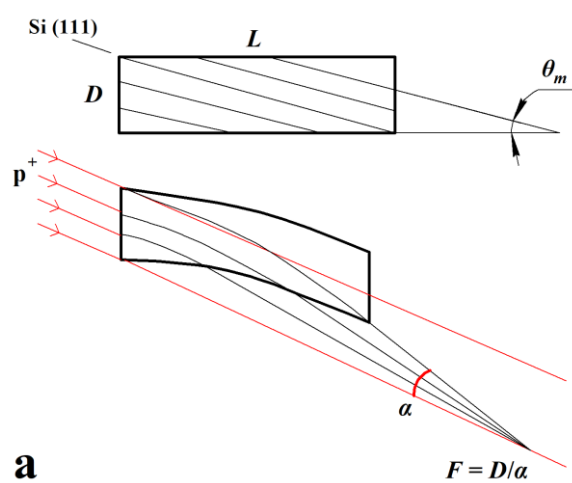


a

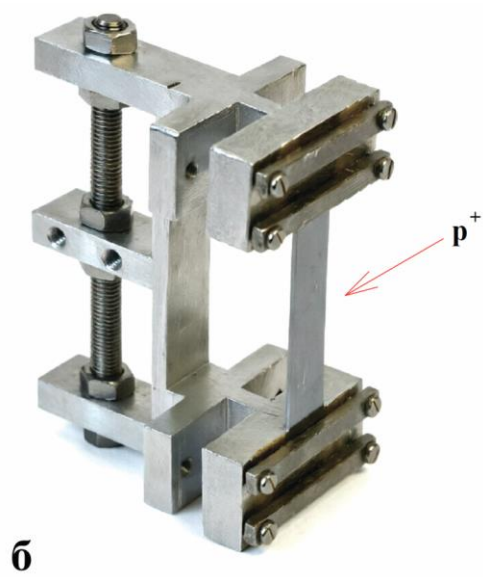


б

Рис. 1.



a



б

Рис. 2.

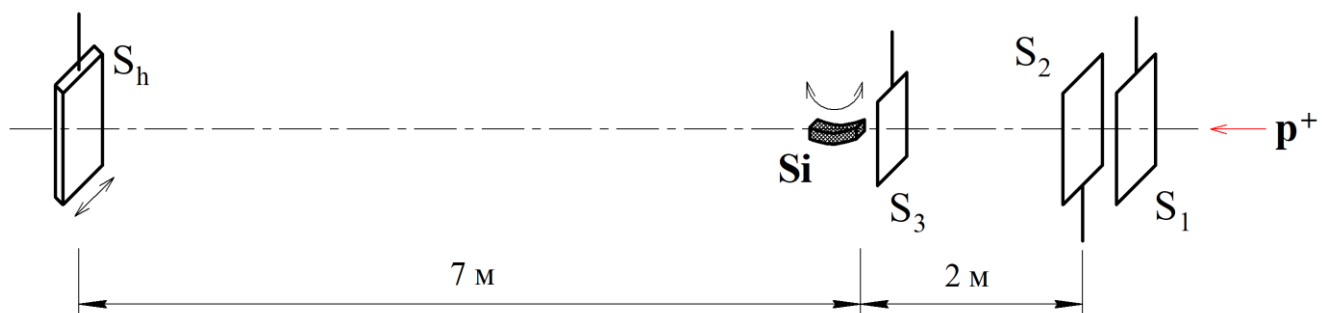


Рис. 3.

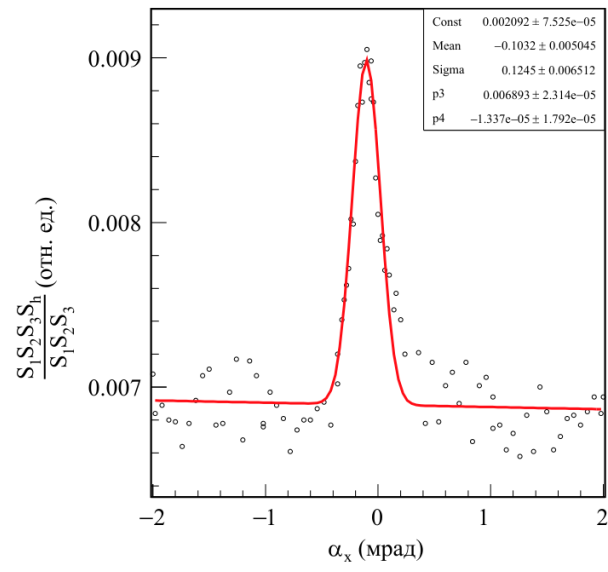


Рис. 4.

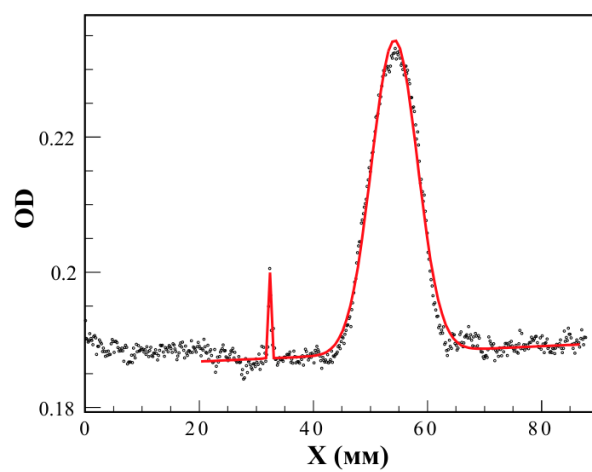


Рис. 5.

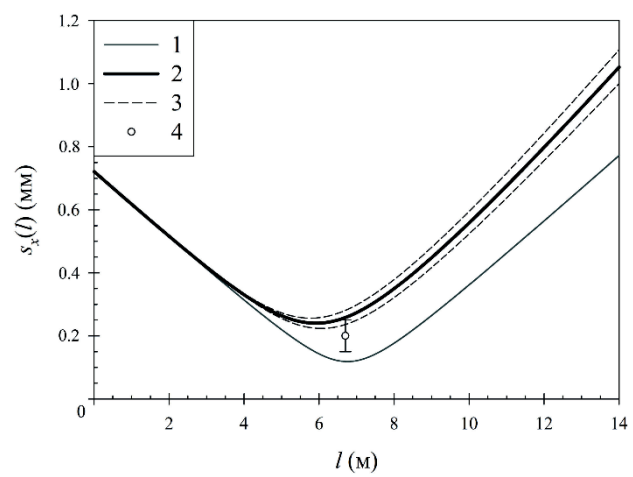


Рис. 6.

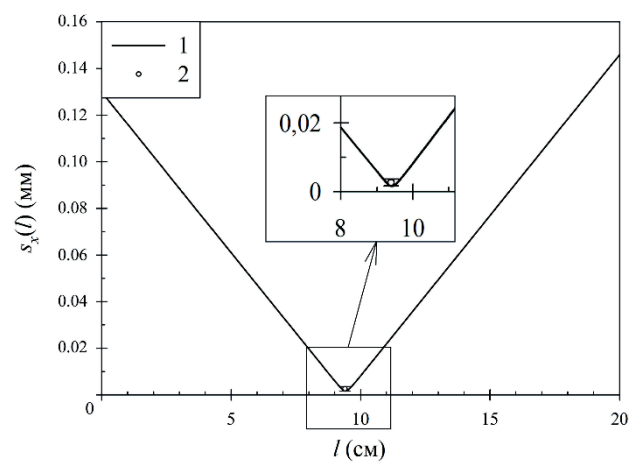


Рис. 7.

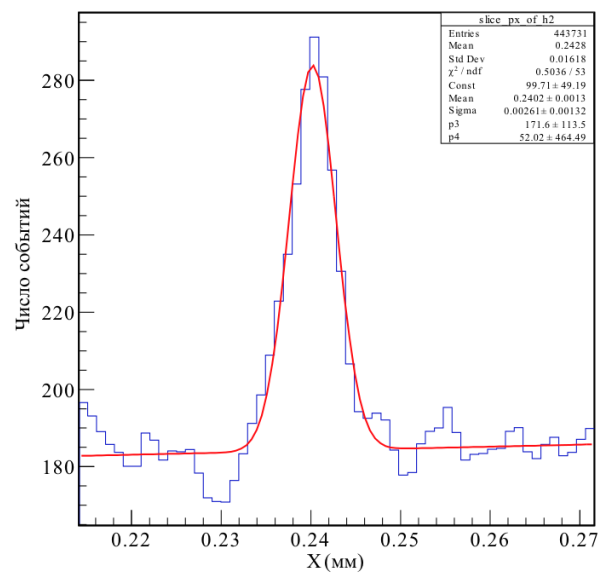


Рис. 8.