



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2008–23  
ОП, ОУ-У70

А.Г. Афонин, В.Т. Баранов, В.Н. Горлов, [В.И. Котов], В.А. Майшеев,  
В.И. Терехов, В.Н. Чепегин, Ю.А. Чесноков, И.А. Язынин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОТРАЖЕНИЯ ЧАСТИЦ  
В ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛАХ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ  
КОЛЛИМАЦИИ ПУЧКА В КОЛЬЦЕВОМ УСКОРИТЕЛЕ**

Направлено в «ЯФ» и «Письма в ЖЭТФ»

Протвино 2008

### Аннотация

Афонин А.Г., Баранов В.Т., Горлов В.Н. и др. Исследование применения отражения частиц в изогнутых кристаллах для улучшения коллимации пучка в кольцевом ускорителе: Препринт ИФВЭ 2008–23. – Протвино, 2008. – 6 с., 7 рис., библиогр.: 15.

Недавно сотрудники ГНЦ ИФВЭ совместно с исследователями из нескольких Российских и зарубежных научных центров открыли новое физическое явление – отражение быстрых заряженных частиц в изогнутых кристаллах. В настоящей работе представлены первые экспериментальные результаты по использованию кратного отражения протонов в кремниевых кристаллах для увеличения эффективности коллимации пучка на ускорителе У-70. Приводится сравнение экспериментальных данных с теоретическими моделями.

Созданная техника на отражающих кристаллах может быть использована для увеличения светимости Большого Адронного Коллайдера в ЦЕРН, а также имеет перспективы для вывода ультрастабильных пучков малого эмиттанса на небольших ускорителях с энергией порядка 1 ГэВ для электро-ядерных установок, медицины и индустрии.

### Abstract

Afonin A.G., Baranov V.T., Gorlov V.N. et al. Study of Application of Particle Reflections in Bent Crystal for Improvement of Beam Collimation at Ring Accelerator: IHEP Preprint 2008–23. – Protvino, 2008. – p. 6, figs. 7, refs.: 15.

Recently employees of SRC IHEP together with researchers from several Russian and foreign centers of science have opened the new physical phenomenon – reflection of fast charged particles in the bent crystals. In the present paper the first experimental results on use of multiple reflection of protons in silicon crystals for increase of efficiency of beam collimation on U-70 accelerator are submitted. Comparison of experimental data with theoretical models is resulted. The created technics based on reflecting crystals can be used for increase of luminosity of the LHC at CERN, and also has prospects for extraction of ultrastable low-emittance beams on the middle accelerators with energy of about 1 GeV for electro-nuclear facilities, medicine and the industry.

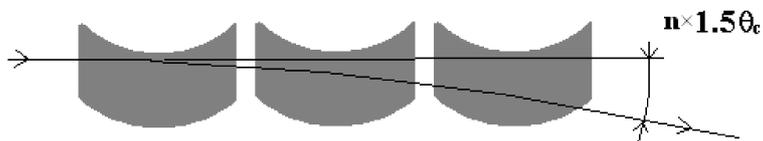
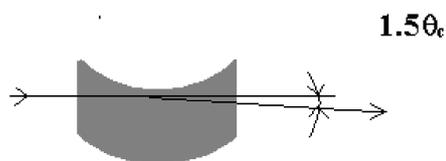
Pacs numbers: 29.27.-a, 42.79.Ag, 61.85.+p

Corresponding author: [Chesnokov@ihep.ru](mailto:Chesnokov@ihep.ru)

Создание эффективно перехватывающих систем локализации потерь является актуальной задачей в связи с необходимостью увеличения интенсивности пучка на действующих кольцевых ускорителях и строительством новых ускорителей и коллайдеров на высокие энергии. Известная классическая двухступенчатая схема коллимации пучка использует тонкий аморфный рассеятель и протяженный поглотитель [1]. Хорошие результаты по улучшению коллимации пучка были получены при использовании вместо аморфных мишеней тонких изогнутых кристаллов, отклоняющих частицы вглубь поглотителя за счет каналирования [2, 3, 4].

Новый интерес к применению кристаллов для этих целей появился в связи с открытием и исследованием эффекта объемного отражения [5, 6, 7, 8, 9]. Его использование имеет принципиальное преимущество перед каналированием, так как значительно расширяется область эффективной работы по угловому положению кристаллической мишени и уменьшается ее разогрев [10, 11]. В данной работе приводятся первые результаты по использованию объемного отражения частиц в кристаллах для коллимации пучка на ускорителе ГНЦ ИФВЭ при энергии протонов 50 ГэВ.

А)



Б)

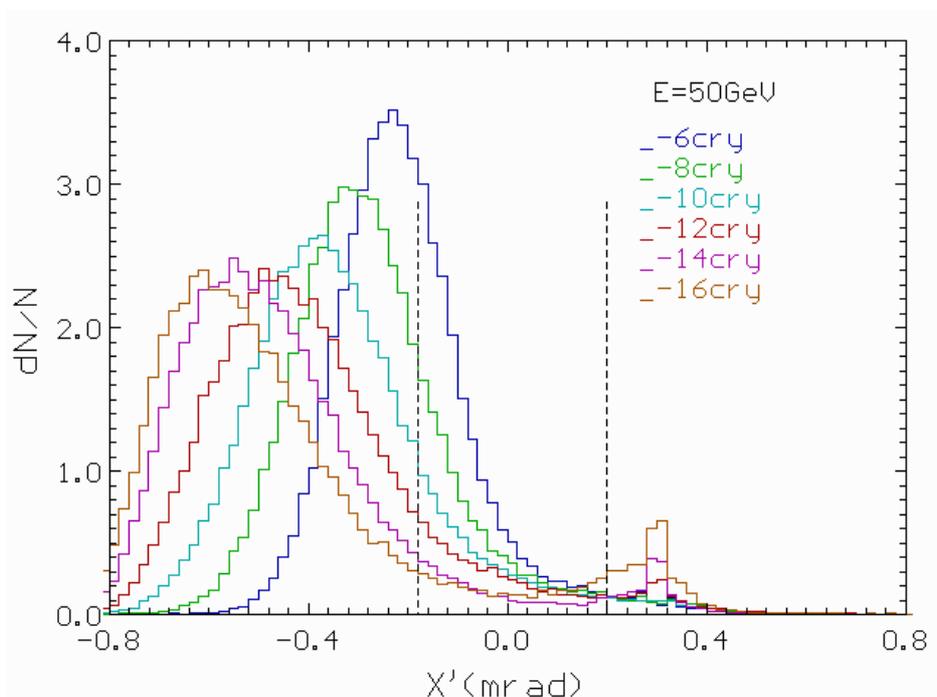
**Рис. 1 а,б.** Эффект объемного отражения и его усиление на цепочке кристаллов.

Объемное отражение обусловлено взаимодействием налетающего протона с потенциалом изогнутой атомной решетки и происходит на малой длине в области касательной к изогнутой

атомной плоскости, приводя к отклонению частицы в сторону, противоположную изгибу (рис. 1а).

Вероятность отражения высока, и при энергиях мультигэвного диапазона приближается к единице. Угол отражения по данным измерения [8] и расчетов [9] составляет полтора критических угла каналирования. Для набора частицей угла отклонения, достаточного для хорошей коллимации, необходимо применить цепочку ориентированных кристаллов (рис. 1б). Для оптимизации мультикристаллической мишени было проведено компьютерное моделирование взаимодействия протонов с мишенью с использованием кодов [12].

На рис. 2 представлены расчетные угловые распределения протонов при однократном взаимодействии с мишенью с разным количеством кристаллов. Пунктирной линией изображены образы края скрепера для пучка размером 3 мм с величинами углов  $\Delta r'_{i_s} = -0.18 \text{ мрад}$  на первом обороте и  $\Delta r'_{i_s} = 0.2 \text{ мрад}$  – через оборот. Частицы, отклоненные за эти линии, попадут на скрепер, а находящиеся внутри линий через несколько оборотов опять попадут на мишень.



**Рис. 2.** Угловые распределения протонов за мишенью с разным количеством кристаллов.

Из распределений видно, что плотность значительно падает при 10 и более кристаллах. С увеличением количества кристаллов увеличивается длина мишени и, соответственно, увеличиваются потери на ней, что приводит к увеличению потерь и в ускорителе. Детальные исследования с учетом многооборотного перехвата пучка показали, что оптимальное число кристаллов в мишени для наиболее эффективной работы системы составит 10–14 кристаллов с радиусом кривизны  $1 \div 2$  м и углом изгиба  $\sim 1$  мрад. При  $N_c = 10$  средняя величина отклонения в ре-

жиме объемного отражения составляет  $\Delta r'_{av} \approx N \cdot 1.5 \theta_{crit} \approx 0.43 \text{ mrad}$  при энергии пучка 50 ГэВ, так как критический угол или угол каналирования  $\theta_{crit} = 0.029 \text{ mrad}$ .

В настоящее время в нескольких лабораториях были созданы и успешно испытаны на выведенном пучке протонов CERN SPS различные варианты мультикристаллических мишеней [13]. На рис. 3 показана конструкция мультикристаллов, разработанная в ГНЦ ИФВЭ по технологии, предложенной в работе [14].

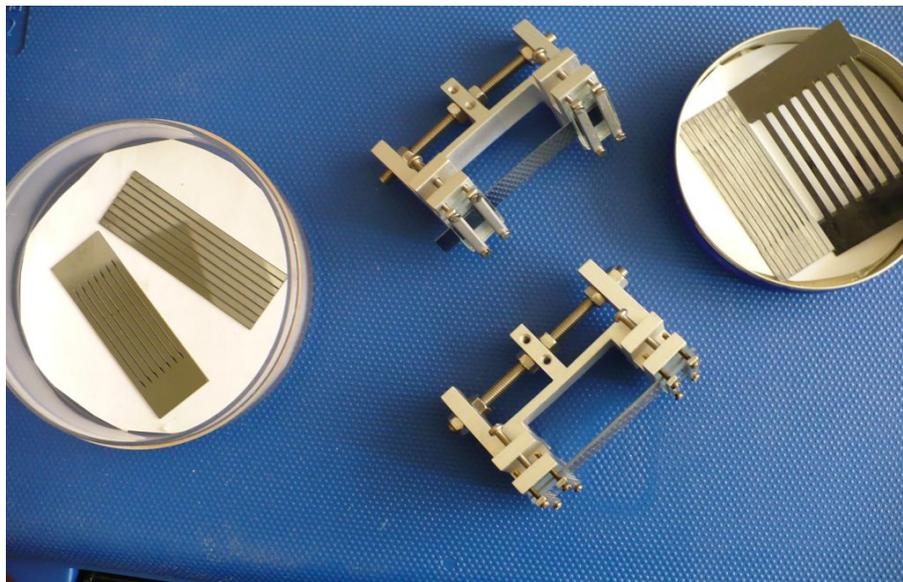


Рис. 3. Этапы изготовления многослойных отражающих структур.

Многослойная структура изготавливается из одной кремниевой пластины ориентации (111), в которой вырезаются несколько продольных отверстий. Далее образованная таким образом решетчатая структура изгибается в металлическом держателе, который обеспечивает идентичный изгиб каждой кремниевой полоски.

В соответствии с рекомендациями моделирования две отражающие структуры с количеством полосок 10 и 7 размещались в системе локализации потерь ускорителя У-70, располагаясь на некотором расстоянии перед стальным поглотителем (скрепером) пучка в качестве первой ступени системы, а сам скрепер выполнял роль второй ступени. Расположение кристаллической станции с двумя кристаллами и устройств диагностики пучка вблизи поглотителя представлено на рис. 4.

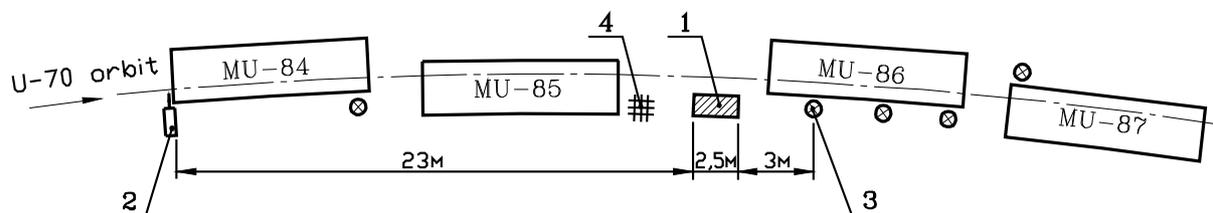
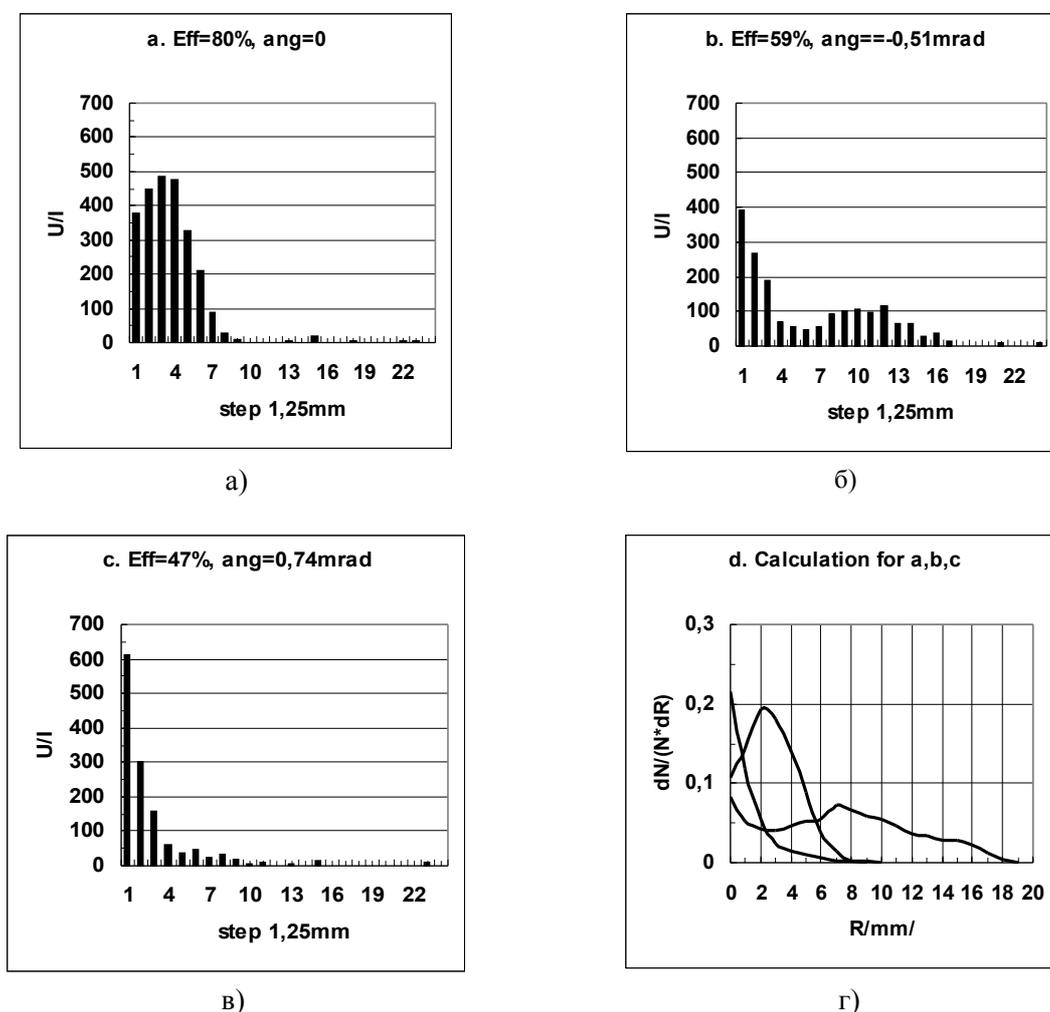


Рис. 4. Расположение кристаллической станции и устройств диагностики пучка вблизи поглотителя. 1 – поглотитель; 2 – кристаллическая станция; 3 – ионизационные камеры; 4 – профилометр; MU – магнитные блоки ускорителя.

С помощью дистанционной системы управления можно менять радиальное положение и угол кристаллических дефлекторов относительно циркулирующего пучка. Для определения эффективности работы установленных кристаллических мишеней используются профилометры, а для оценки качества работы системы коллимации применяются ионизационные камеры, установленные вблизи скрепера. С помощью ионизационной камеры, установленной вблизи мишени, можно оценить потери на ней и по минимуму потерь определить ее оптимальную угловую ориентацию. Характеристики применяемых приборов подробно описаны в [15].

На рис. 5 показаны экспериментально полученные профили отклоненного пучка на переднем торце скрепера при использовании мишени с 10 изогнутыми полосками кристалла. В этом варианте кристаллы ориентированы таким образом, что при объемном отражении отклоненный пучок попадает на скрепер на втором обороте. Первая проволока профилометра расположена на расстоянии  $\sim 1$  мм от края скрепера с шагом профилометра 1,25 мм.



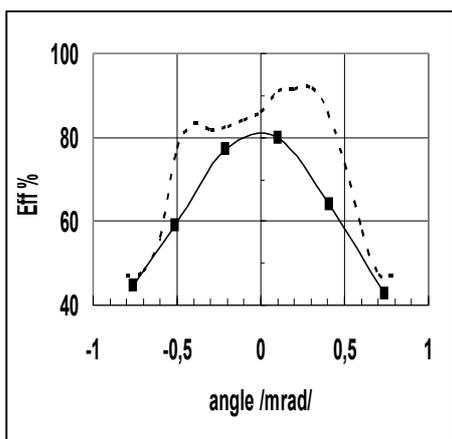
**Рис. 5.** Профили отклоненного пучка для разных ориентаций кристалла (а, б, в); (г) – соответствующие результаты моделирования.

На гистограммах последовательно приведено распределение плотности отклоненного пучка при трех характерных ориентациях мульткристалла, соответствующих объемному отражению

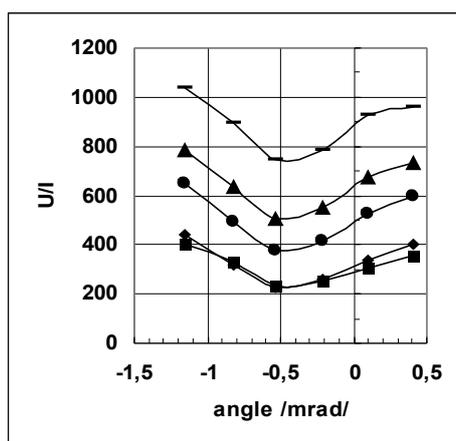
(а), мультиканализованию (б) и разориентированному кристаллу (в). Поведение распределений и величины забросов пучка близки к результатам моделирования (г).

По распределениям пучка в нескольких точках по угловому положению мишени построена ориентационная кривая нормированной интенсивности заброшенных частиц на скрепер (рис. 6, сплошная линия). Пунктирной линией изображена ориентационная кривая, полученная моделированием процесса. Из анализа поведения кривых видно, что угловая область значительного рассеяния пучка мультикристаллом составляет 1 мрад, когда интенсивность заброшенного пучка больше 60%. Отметим, что полная интенсивность пучка на скрепере, включая неконтролируемую зону, составит  $\sim 100\%$ , т.е. для разориентированного случая, порядка 60% пучка попадает на переднюю кромку скрепера и, рассеиваясь, определяет потери. В случае оптимального положения мультикристалла, соответствующего отражению, только  $\sim 15\%$  протонов попадает на кромку скрепера. Незначительные отличия экспериментальных и теоретических данных можно объяснить неидеальной ориентацией полосок в мультикристалле и неизвестным наклоном к пучку внутренней поверхности скрепера.

На рис. 7 приведены ориентационные кривые потерь частиц, измеренные по сигналам 5 ионизационных камер, расположенных вокруг скрепера. Нижняя кривая показывает зависимость величины потерь на мишени от ее углового положения. Потери при оптимальной юстировке мишени уменьшатся в два раза по сравнению с разориентированным случаем, что соответствует расчетам при быстром наведении пучка  $\sim 200$  оборотов, реализованном в опыте.



**Рис. 6.** Ориентационная кривая эффективности заброса протонов на поглотитель в сравнении с моделированием.



**Рис. 7.** Ориентационная кривая потерь частиц вокруг скрепера по ионизационным камерам.

Похожие результаты были получены для второго мультикристалла с 7 полосками, когда при объемном отражении отклоненный пучок попадает на скрепер на первом обороте. Было установлено, что оба мультикристалла эффективно отклоняли циркулирующий пучок вглубь поглотителя за счет кратного отражения. Свыше 80% частиц отражались в кристалле и забрасывались на поглотитель на расстояние более 1 мм от края. Ожидается, что при таких параметрах из кольца ускорителя можно будет выводить свыше 90% частиц при забросе в тонкостенный электростатический дефлектор.

Приведенные теоретические и экспериментальные результаты доказывают полезность использования отражающих мультикристаллов для системы локализации потерь в У-70. Созданная техника на отражающих кристаллах может быть использована для увеличения светимости Большого Адронного Коллайдера в ЦЕРН, а также имеет перспективы для вывода ультрастабильных пучков малого эмиттанса на небольших ускорителях с энергией порядка 1 ГэВ для электроядерных установок, медицины и индустрии.

Работа поддержана Дирекцией ИФВЭ, Госкорпорацией Росатом и грантами РФФИ №№ 07-02-00022-а, 08-02-01453-а, 08-02-13533-офи\_ц, 08-02-91020 –ЦЕРН.

### Список литературы

1. J.B.Jeanneret. Phys.Rev STAB. **1**, 081001 (1998).
2. A.G. Afonin, V.T.Baranov, V.M.Biryukov et al. Phys. Rev. Lett. **87**, 094802 (2001).
3. R.P. Fliller, A. Drees, D. Gassner et al Phys.Rev.ST Accel.Beams **9**:013501, 2006.
4. Richard A. Carrigan, Alexandr I. Drozhdin, Raymond P. Fliller et al. Channeling collimation studies at the Fermilab Tevatron. Channeling-2006 conference, Frascati, Italy, 2006
5. A. M. Taratin and S. A. Vorobiev,. Phys. Lett. A **119**, 425 (1987)
6. Y.M. Ivanov, A.A.Petrinin, V.V.Scorobogatov et al. Phys. Rev. Lett. **97**, 144801 (2006)
7. Y.M. Ivanov , N.F.Bondar, Yu.A.Gavrikov et al. JETP Letters, **84**, 372, 2006.
8. W. Scandale, D.A.Steel, A.Carnera et. al. Phys. Rev. Lett., **98**, 154801 (2007).
9. V.A. Maishev, Phys. Rev. ST AB, **10**, 084701 (2007).
10. I.A.Yazynin, "BEAM EXTRACTION WITH USING OF VOLUME REFLECTION EFFECT IN CRYSTALS", PAC, 1995, v.3, p. 1952-1954.
11. I.A. Yazynin, A.G. Afonin, Yu.A. Chesnokov et al. Proc.SPIE Int.Soc.Opt.Eng.6634:66340H, 2007, May 2007. 10 pp..
12. I.A. Yazynin, I.I. Degtyarev. "The efficiency of U-70 scraper system", Paper presented at Particle Accelerator Conference, 2001, p.1640-1642.
13. W.Scandale, A.Vomiero, S.Baricordi et al . Observation of Multiple Volume reflection of ultrarelativistic protons by a sequence of several bent silicon crystals, submitted to Phys.Rev.-Lett.
14. Yu.A.Chesnokov. Invited talk at "Crystal Channeling" workshop, 9-10 March, CERN, Geneva, 2006.
15. Proton beam extraction from the IHEP accelerator using short silicon crystals. A.G. Afonin, V.T. Baranov, V.M. Biryukov et al. Phys.Part.Nucl.. **36**:21-50,2005, Fiz.Elem.Chast.Atom.Yadra **36**:43-99, 2005.

*Рукопись поступила 29 октября 2008 г.*

А.Г. Афонин, В.Т. Баранов, В.Н. Горлов и др.  
Исследование применения отражения частиц в изогнутых кристаллах для улучшения коллимации пучка в кольцевом ускорителе.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Н.В.Ежела.

---

Подписано к печати 30.10.2008. Формат 60 × 84/8.      Офсетная печать.  
Печ. л. 1.      Уч.- изд. л. 0,8.      Тираж 80.      Заказ 88.      Индекс 3649.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,  
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2008-23, ИФВЭ, 2008

---