



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2009–15
ОУ-У70, ОП, ОРИ

А.А. Архипенко, А.Г. Афонин, В.Т. Баранов, Г.И. Бритвич,
В.А. Майшеев, А.В. Максимов, С.Ф. Решетников, В.Н. Чепегин,
Ю.А. Чесноков, И.А. Язынин

**Исследование эффективности вывода протонов
из ускорителя У-70 кристаллами,
изогнутыми на разные углы**

Протвино 2009

Аннотация

Архипенко А.А., Афонин А.Г., Баранов В.Т. и др. Исследование эффективности вывода протонов из ускорителя У-70 кристаллами, изогнутыми на разные углы: Препринт ИФВЭ 2009–15. – Протвино, 2009. – 9 с., 10 рис., 1 табл., библиогр.: 8.

Приводятся результаты экспериментальных измерений эффективности вывода протонов с энергией 50 ГэВ из протонного синхротрона У-70 ГНЦ ИФВЭ кристаллами кремния, изогнутыми на разные углы. В работе дается полное описание экспериментов, проведенных в 2008 г. Экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования. На основе полученных результатов сформулированы предложения по организации системы вывода из У-70 пучков ионов углерода.

Abstract

Archipenko A.A., Afonin A.G., Baranov V.T. et al. Investigation of Proton Extraction Efficiency from U-70 Accelerator Upon Bending Angle of a Bent Crystal Deflector: IHEP Preprint 2009–15. – Protvino, 2009. – p. 9, figs.: 10, table 1, refs.: 8.

The outcomes of experimental studies of 50 GeV proton extraction from the U-70 proton synchrotron of SRC IHEP with crystals bent for different angles are presented. Full description of experiments realized in 2008 are presented. The data are in good agreement with computer simulation. Taking in account the experimental data, some proposals to construct from U-70 extraction system for carbon ions are formulated.

Введение

В настоящее время в ГНЦ ИФВЭ активно ведутся работы по ускорению пучков легких ионов. Это направление предполагает применение ионов, в частности ионов углерода, для медицинских целей [1], а также развитие программы физических исследований с пучками ионов высоких энергий на протонном синхротроне У-70.

Организация вывода ионов в сложившейся структуре экспериментальной зоны У-70 представляется весьма сложной задачей. Традиционные методы построения системы вывода являются слишком дорогостоящими и требуют больших площадей.

Вместе с тем, хорошо известно (например, [2]), что можно успешно выводить ионы высоких энергий с помощью изогнутых кристаллов. Поэтому, используя эффект каналирования заряженных частиц в изогнутых кристаллах, задачу вывода ионов можно решить с меньшими затратами и в более короткое время.

В основу построения системы вывода ионов может быть заложена идея использования нескольких изогнутых на разные углы кристаллов вместо электромагнитных устройств (электростатические дефлекторы, септум-магниты).

Ожидаемая интенсивность пучка ионов в У-70 и каналирующие свойства кристаллов для ионов существенно отличаются от соответствующих величин для протонов. Кроме того, в связи с принятой геометрией расположения различных экспериментальных установок относительно орбиты ускорителя У-70, отклонение частиц из ускорителя может находиться в диапазоне от 1 до 90 мрад. Соответственно, эффективность каналирования ионов в изогнутых кристаллах будет существенно меняться в зависимости от угла изгиба, а также из-за его длины, если для получения больших углов необходимо увеличение длины кристалла.

При создании системы вывода из У-70 пучков ионов в первую очередь должна быть исследована зависимость эффективности вывода от угла изгиба кристалла. Для решения этой задачи в 2008 г. на ускорителе У-70 проводились эксперименты по исследованию такой зависимости для протонов. Ранее было показано, что при углах изгиба ~ 1 мрад эффективность вывода протонов может достигать $\sim 85\%$ [3]. С использованием кристалла, изогнутого на угол 80 мрад, пучок протонов выводился в один из каналов с эффективностью 10^{-4} , обеспечивая физические установки интенсивностью до 10^7 р/с [4]. Практический интерес представляют как промежуточные углы изгиба, так и углы больше 80 мрад.

Постановка эксперимента

Эксперимент проводился на станции кристаллических дефлекторов СКД-19, расположенной в начале магнитного блока ускорителя №19 (см. рис. 1).



Рис. 1. Общий вид установленной на ускорителе станции с изогнутыми кристаллами.

Дистанционная система управления позволяет производить установку кристалла на нужную координату с точностью до 0,1 мм. С помощью прецизионного гониометра система управления обеспечивала юстировку кристалла по углу в диапазоне углов ± 20 мрад с шагом 13 мкрад. Пучок подводился к кристаллу системой локального искажения орбиты, которая работала в режиме обратной связи по сигналу со сцинтилляционного детектора, регистрирующего потери пучка при прохождении через вещество кристалла. Таким образом, система позволяла обеспечивать режим вывода с длительностью до нескольких секунд.

Локальное искажение орбиты создается дополнительными обмотками блоков № 16 и № 22 ускорителя (бамп 16/22) при рабочей координате кристалла +65 мм от равновесной орбиты. Стартовый ток, при котором пучок касается кристалла, равен ~ 106 А. На рис. 2 представлены общий вид формы локального искажения орбиты и размеры пучков.

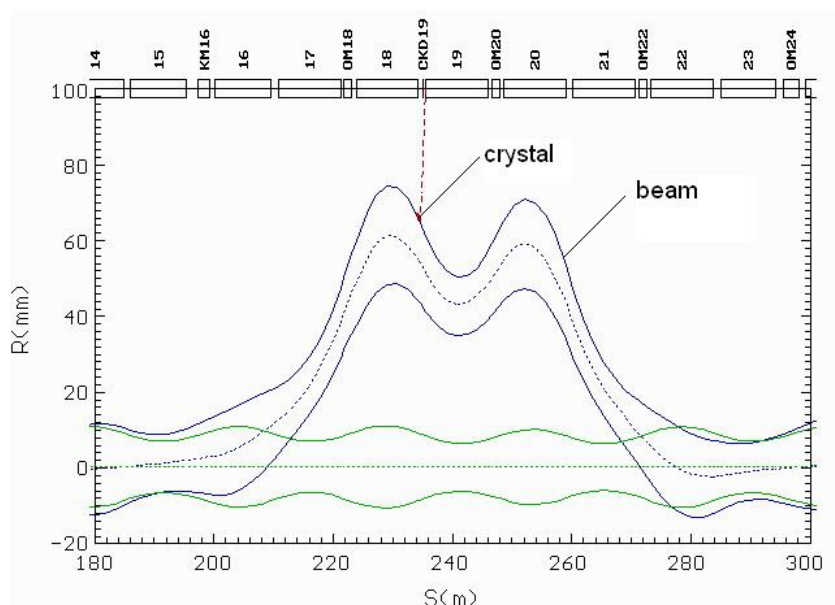


Рис. 2. Конфигурация локального искажения орбиты.

Для проведения экспериментов были изготовлены кристаллы, которые с помощью специальных устройств изгибались на различные углы. На рис. 3 показаны кристаллы, изогнутые в держателях на углы 36 мрад (более короткий) и 64 мрад, а на рис. 4 показаны смонтированные на станции кристаллы, изогнутые на углы 100 и 135 мрад.

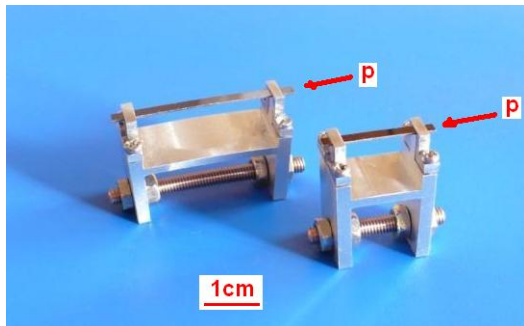


Рис. 3. Кристаллические дефлекторы.

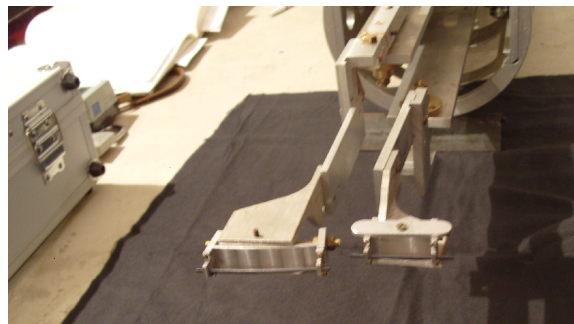


Рис. 4. Кристаллические дефлекторы, смонтированные на СКД19.

Конструкция таких изгибающих устройств, описанных в работе [5], содержит относительно малое количество вещества держателя в области крепления кремниевых пластин и обеспечивает большие углы изгиба кристалла.

Важным моментом при проведении экспериментов являлось детектирование выведенного из ускорителя пучка, отклоненного кристаллом. С этой целью использовалась телевизионная система диагностики пучка. Система состоит из люминесцентного экрана и промышленной телевизионной камеры. Экран изготовлен из сцинтиллятора CsJ(Tl). Этот сцинтиллятор обладает высоким значением световыхода и спектром эмиссии, который хорошо согласуется со спектральной чувствительностью используемой видиконной камеры [6].

Экран располагался на расстоянии ~ 2 м от кристаллов вне вакуумной камеры, так как при больших углах изгиба кристаллов пучок выходил из ускорителя через стенку вакуумной камеры. Размер экрана по горизонтали был выбран исходя из предварительно выполненных расчетов по ожидаемому положению пучка для исследуемых кристаллов.

На рис. 5 представлено изображение выведенного пучка, снятого с экрана монитора в ходе эксперимента с одним из кристаллов. По яркости свечения можно сделать вывод о достаточно высокой эффективности вывода.

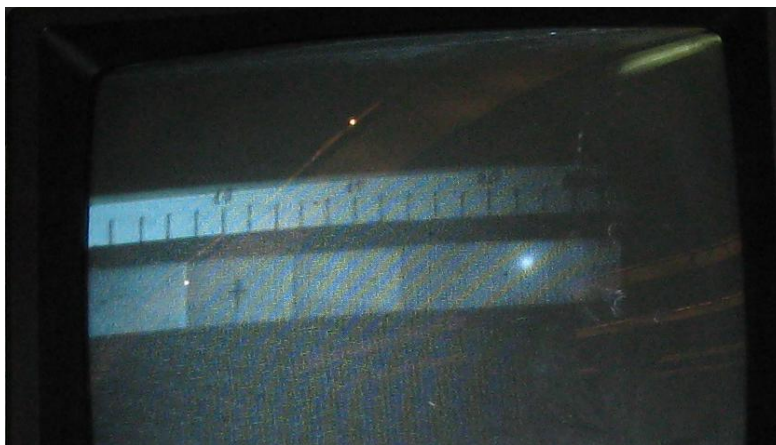


Рис. 5. Изображение выведенного пучка на люминесцентном экране (яркое пятно справа).

На рис. 6 показаны осциллограммы сигналов некоторых процессов при взаимодействии пучка протонов с кристаллом.

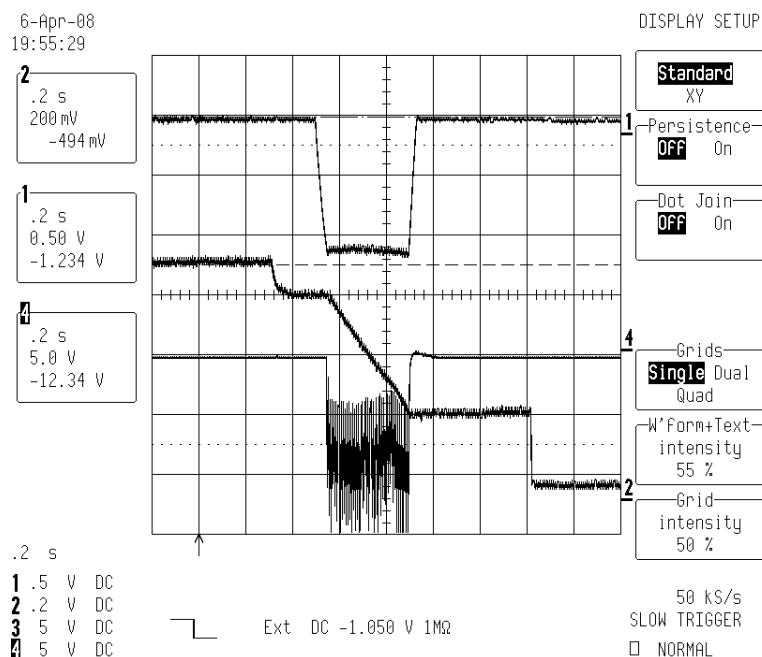


Рис. 6. Осциллограмма процесса наведения пучка на кристалл.

Луч 1 – ток бампа 16/22 при наведении пучка на кристалл.

Луч 2 – сигнал интенсивности циркулирующего пучка, верхнее положение луча соответствует начальной интенсивности I_0 , нижнее – отсутствию пучка.

Луч 4 – сигнал детектора обратной связи при взаимодействии пучка с кристаллом.

Примерно за ~ 200 мс до начала наведения проводилось формирование пучка за счет обрезания гало ($\sim 0,13I_0$), для того чтобы работать с плотной частью пучка и минимизировать изменение тока бампа при наведении. Как видно из осциллограммы, не весь пучок наводился на кристалл. В данном цикле полная интенсивность пучка составляла около $2 \cdot 10^{12}$ протонов. Неиспользованная часть пучка ($\sim 0,34I_0$) сбрасывалась в конце плато на поглотитель в 86-м прямолинейном промежутке (ФЭП).

Главной целью эксперимента являлось количественное измерение эффективности вывода. Для этого использовался метод активационного анализа.

Измерение эффективности вывода

Для измерения эффективности вывода активационным методом были изготовлены специальные детекторы, представляющие собой кассету, содержащую стопку фольг. В первом случае в качестве материала детектора использовались алюминиевая фольга размером $40 \times 0,5 \times 10$ мм³. Кассета содержала 60 таких фольг, и полные размеры детектора составили $40 \times 30 \times 10$ мм³ (высота, поперечный размер, длина вдоль пучка). Для оценки числа протонов, прошедших через детектор, использовалась реакция $^{27}\text{Al} (p, 3 p n) ^{24}\text{Na}$.

Во втором эксперименте использовался детектор из графита с размерами полосок $50 \times 3 \times 20$ мм³. Такие полоски в количестве 17 штук были собраны в кассету с общими размерами $50 \times 51 \times 20$ мм³. В этом случае использовалась реакция $^{12}\text{C} (p, p n) ^{11}\text{C}$.

На рис. 7 изображен детектор с использованием графитовых полосок.



Рис. 7. Активационный детектор.

Процедура измерений заключалась в следующем. После оптимизации угла кристалла по отношению к падающему на кристалл пучку и визуального обнаружения пучка на люминесцентном экране на это место устанавливался активационный детектор, и проводилось его облучение. Во время экспозиции регистрировалась величина интенсивности пучка, сбрасываемой на кристалл.

Длительность облучения определялась прежде всего необходимостью накопления достаточного числа используемых при обработке изотопов. Так, при облучении графита толщиной 2 см необходимо на образование одного ядра изотопа углерода ^{11}C сбросить в среднем 137 протонов. Неизвестным фактором была эффективность вывода, т.е. сколько протонов выводилось при фиксированной величине сброса на кристалл. Еще одним фактором, определяющим длительность экспозиции, являлся режим работы ускорителя, стабильность интенсивности пучка от цикла к циклу. В среднем за время экспериментов интенсивность пучка, сбрасываемого на кристалл, составляла $1 \cdot 10^{12}$ протонов за цикл, и продолжительность экспозиции составляла 300 циклов.

После облучения кассеты с фольгами (или полосками) демонтировались и сразу проводились измерения активности каждой фольги. Полученная информация давала возможность восстановить профиль выведенного пучка и полную интенсивность прошедшего через детектор пучка.

Активность изотопов (в первом эксперименте ^{24}Na , во втором – ^{11}C) после облучения определялась в сцинтилляционном спектрометре с кристаллом NaJ (Tl) диаметром 150 мм и высотой 150 мм. В первом случае интенсивность измерялась по пику полного поглощения гамма-квантов с энергией 2754 кэВ, а во втором эксперименте – по пику полного поглощения аннигиляционных гамма-квантов с энергией 511 кэВ.

На рис. 8 представлен измеренный такой методикой профиль пучка, выведенного одним из кристаллов.

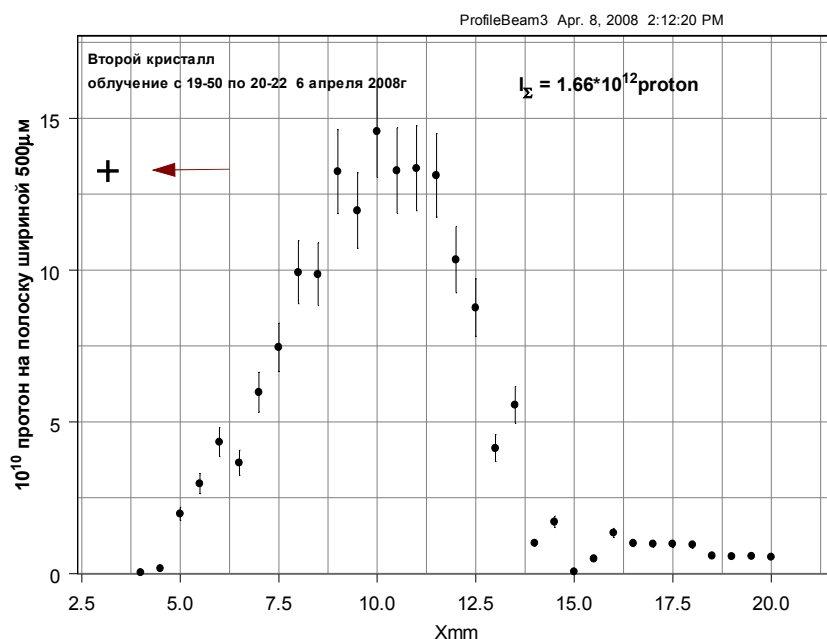


Рис. 8. Профиль пучка, измеренный активационным методом.

Для обеспечения уверенности в полученных результатах были проведены дополнительные эксперименты. Один из них заключался в следующем. Контрольный детектор размещался в канале транспортировки, и на него выводился пучок в режиме быстрого вывода. При этом штатными средствами измерялись как интенсивность этого выведенного пучка, так и интенсивность забираемого из ускорителя пучка. Так как эффективность быстрого вывода близка к 100%, такой эксперимент позволял надежно подтверждать результаты активационного метода.

Еще одним способом подтверждения достоверности полученной в эксперименте информации являлось измерение времени полураспада изотопов. С этой целью одна из облученных фольг (пластинок) периодически измерялась на спектрометре.

Измеренный таким образом период полураспада изотопа ^{24}Na составлял (15.00 ± 0.06) часа, что в пределах погрешности измерений совпадает с принятым в литературе значением (14.9590 ± 0.0012) часа.

Для изотопа ^{11}C измеренный период полураспада равен (20.42 ± 0.05) мин, что также совпадает с литературными данными (20.39 ± 0.02) мин.

Экспериментальные результаты

Всего в течение двух сеансов нами были проведены измерения с 4 кристаллами, изогнутыми на разные углы. Энергия протонов при этом составляла $E = 50$ ГэВ. Характеристики кристаллов представлены в таблице. В скобках указана длина изогнутой части кристалла.

Полученные в ходе экспериментов результаты, а также ранее опубликованные данные [3], [4] представлены на рис. 9. На этом же рисунке приведены данные компьютерного моделирования. В расчетах учитывался многооборотный характер движения частиц через кристалл, и рассматривалось взаимодействие частиц с кристаллом и держателем. Канализирующие свойства кристалла описывались программой SCRAPER [7].

Таблица.

№ кристалла	Материал	Размеры (мм) длина, высота, толщина	Угол изгиба (мрад)
1	Кремний	25(16)x2,5x0,5	$\sim 36 \pm 1$
2	Кремний	40(31)x2,5x0,5	$\sim 64 \pm 1$
3	Кремний	53(30)x2,0x1,0	$\sim 100 \pm 1,5$
4	Кремний	70(55)x2,0x1,5	$\sim 135 \pm 1,5$

В расчетах рассматривался многооборотный характер движения частиц в реальной структуре ускорителя и многократное взаимодействие их с кристаллом. При расчетах прохождения частиц через кристалл использовался метод Монте-Карло с учетом влияния искривленного межплоскостного электрического поля. Рассматривались процессы многократного кулоновского рассеяния, ионизационных потерь, синхротронного излучения, неупругого, дифракционного и упругого ядерного взаимодействий.

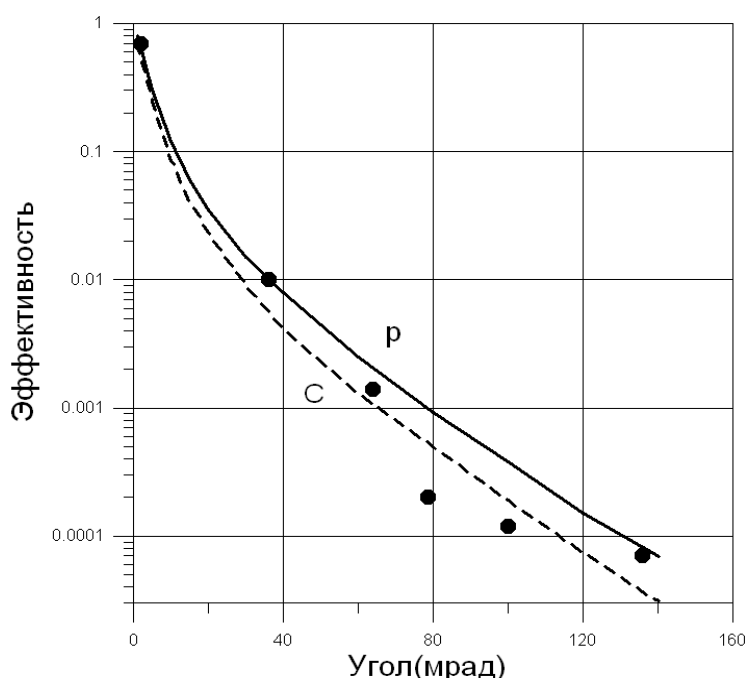


Рис. 9. Зависимость эффективности вывода пучка из У-70 от угла изгиба кристалла.

Как видно из рис. 9, наблюдается хорошее согласие с расчетом экспериментальных данных, полученных для ионов водорода или протонов энергии 50 ГэВ (сплошная кривая), позволяющее делать прогнозы для вывода ионов и оптимизации режимов работы У-70 с ионами. Для более тяжелых ионов эффективность вывода падает из-за увеличения сечения неупругого ядерного взаимодействия с веществом кристалла. Так, для ионов углерода при энергии $E = 25$ ГэВ/и (пунктирная линия) расчетная эффективность падает в два раза при углах отклонения больших 20 мрад. Поскольку ожидаемая интенсивность ионов углерода составляет 10^{10} частиц в цикле, для одновременной работы нескольких установок, использующих кристаллические дефлекторы, целесообразно ограничивать углы изгиба кристаллов величиной 60 мрад. Такие схемы вывода принципиально возможны и в настоящее время прорабатываются [8, 9]. Один из вариантов вывода представлен на рис. 10.

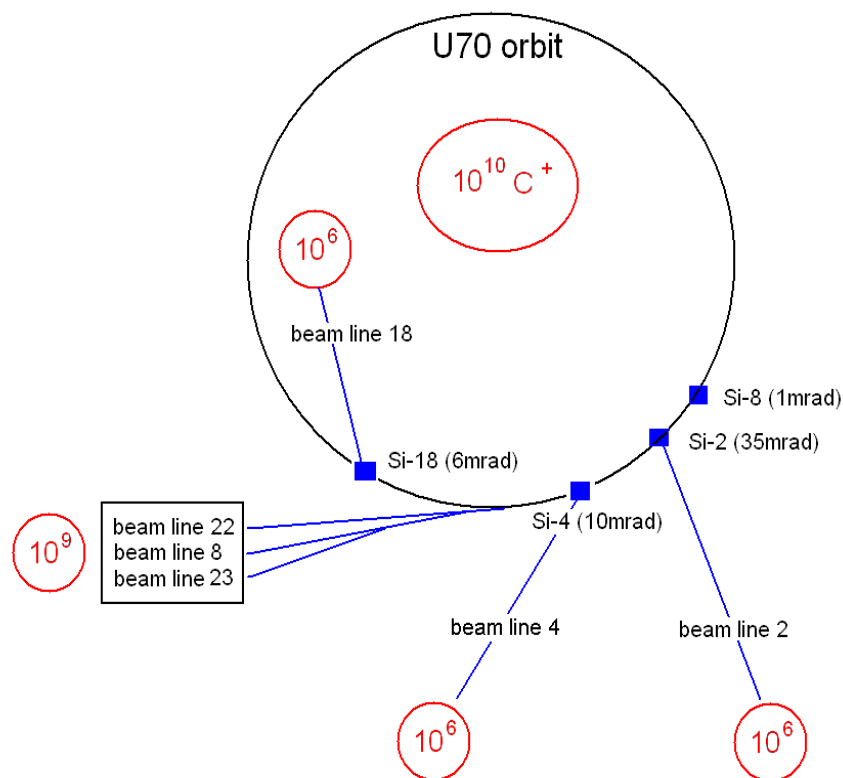


Рис. 10. Возможный вариант организации вывода ионов углерода из ускорителя У-70.

Заключение

В ГНЦ ИФВЭ проведены эксперименты по выводу протонов с помощью изогнутых кристаллов на большие углы отклонения при энергии протонов 50 ГэВ. На основе полученных данных рассмотрена возможность вывода ионов из ускорителя У-70. Предлагаемый метод вывода ионов несколькими изогнутыми на разные углы кристаллами представляется рациональным и удобным. Положительными сторонами метода вывода пучка ионов кристаллами являются возможность одновременной работы нескольких установок на ограниченном пространстве, отсутствие пульсаций интенсивности во времени и простота реализации.

Полученные зависимости эффективности вывода пучка кристаллом от угла изгиба характерны не только для У-70. Эти данные отражают общую закономерность для ускорителей и коллайдеров с учётом незначительных вариаций, учитывающих особенности расположения кристаллов и параметры конкретных машин.

Авторы работы выражают благодарность оперативному персоналу ОУ У-70 и Отдела пучков за участие в проведении экспериментов.

Работа поддержана Дирекцией ГНЦ ИФВЭ, Госкорпорацией Росатом (контракт №Н.4е.45.03.09, 1047), грантами РФФИ №№ 07-02-00022-а, 08-02-01453-а, 08-02-13533-офи_ц.

Список литературы

- [1] Ю.М.Антипов, А.В.Василевский, А.П.Воробьев и др. Медицинский облучательный центр с пучком ионов углерода на базе ускорительного комплекса ИФВЭ. - Труды 16 совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2, Протвино, 1998, с. 212-220.
- [2] A.Arduini, K.Cornelis, K.Elsener et al. "Extraction of 22 TeV/c lead ions from the CERN SPS Using a bent silicon crystal." - Proc. Part.Acc.Conf., 1997, Vancouver, May 1997, pp. 171-173.
- [3] А.Г.Афонин, В.Т.Баранов, В.М.Бирюков и др. - Вывод пучка протонов из ускорителя ИФВЭ с помощью коротких кристаллов кремния. ЭЧАЯ, 2005, т.36, вып.1, с.44-99.
- [4] A.A. Aseev, M.D.Bavizhev, E.A.Lyudmirsky, V.A.Maishev and Yu.S.Fedotov. Extraction of the 70 GeV proton beam from the IHEP accelerator towards beam line 2(14) with a bent single crystal. NIM. A 309 (1991) V. 309, Is. 1-2, P. 1-4.
- [5] S. Stokov, V. Biryukov, Yu. Chesnokov et. al. Steering beam of charged particles using Silicon crystals. - J.Phys. Soc. Jap. 76:064007, 2007.
- [6] R.Jung, G.Feroli, S.Hutchins. Single pass optical profil monitoring. - Proc. Of DIPAC, pp.10-14, Mainz, Germany, May 2003.
- [7] I.I.Degtyarev, O.A.Liashenko, I.A.Yazynin. Applications of Coupled SCRAPER-RTS&T Code in Radiation Therapy. - Proc. of EPAC 2000, Vienna, Austria, p. 2506-2508.
- [8] А.Г.Афонин, Ю.С.Федотов, Ю.А.Чесноков, И.А.Язынин. О возможности вывода ускоренного пучка легких ионов в направлении 18 канала при помощи изогнутого кристалла, Доклад на международном совещании "Взаимодействие легких ядер с ионами". - Протвино, 2006.
- [9] А.Г. Афонин, В.И. Котов, В.А. Маишеев, А.В. Максимов, И.А. Язынин. Развитие системы медленного вывода пучка с помощью изогнутых кристаллов применительно к выводу ионов. Рабочее совещание по проблемам взаимодействия легких ионов с ядрами. Протвино, 2008, http://www.ihep.su/ihep/doc_seminar/LINC-2008/linc_2008.html.

Рукопись поступила 29 сентября 2009 г.

А.А.Архипенко, А.Г.Афонин, В.Т.Баранов и др.
Зависимость эффективности вывода протонов с энергией 50 ГэВ изогнутыми кристаллами
от угла изгиба кристалла

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати	5.10.2009.	Формат $60 \times 84/8$.	Офсетная печать.
Печ.л. 1,37.	Уч.– изд.л. 1,1.	Тираж 80.	Заказ .
			Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142284, Протвино Московской обл.

