

Особенности динамики охлаждения на высоковольтной установке электронного охлаждения в COSY

© М.И. Брызгунов,¹ В.С. Камерджиев,² В.В. Пархомчук,¹ В.Б. Рева^{1,3}

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

² Forschungszentrum Juelich, IKP-4,
52425 Юлих, Германия

³ Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: M.I.Bryzgunov@inp.nsk.su

(Поступило в Редакцию 17 ноября 2014 г.)

На немецком синхротроне COSY (Юлих, Германия) заработала установка электронного охлаждения, созданная в ИЯФ СО РАН. Целью создания установки было подавление рассеяния пучка на внутренней мишени вплоть до максимальных энергий протонного пучка. Эта установка реализует идею охлаждения в сильном продольном магнитном поле в высоковольтной области. Движение электронов в магнитном поле сильно улучшает кинетику их столкновения с ионами за счет исключения из процесса столкновений поперечной тепловой скорости, которая, как правило, очень велика. В 2013 г. были проведены первые эксперименты по охлаждению протонного пучка на энергии 200 MeV. В начале 2014 г. проводились сеансы охлаждения протонного пучка на 200, 350, 580, 1660 MeV. Также проводились эксперименты по охлаждению дейтериевого пучка. Приведены результаты экспериментов и сравнение их с теоретическими расчетами времени охлаждения. Полученные результаты могут быть интересны для проектов охлаждения в комплексах NICA (ОИЯИ, Дубна) и FAIR (Дармштадт, Германия).

Введение

Основой метода электронного охлаждения является „теплообмен“ между пучком ионов, циркулирующим в накопителе, и пучком электронов, движущихся с той же средней скоростью. На общем участке траектории в системе покоя пучков „горячие“ протоны охлаждаются за счет кулоновских столкновений в газе „холодных“ электронов. Процесс охлаждения продолжается до тех пор, пока температура протонов в системе центра масс не станет равной эффективной температуре электронов. Кинетика электронного охлаждения обладает рядом особенностей, отличающих ее от модели релаксации двухкомпонентного газа в отсутствие магнитного поля. В первую очередь это связано с тем, что столкновения происходят в сильном магнитном поле. Если электрон за время столкновения успевает совершить большое число ларморовских вращений, то столкновение протона происходит не с точечным электроном, а с некоторым ларморовским кружком, по которому „размазан“ электрон. Данный эффект позволяет исключить из динамики столкновений поперечную тепловую скорость электрона, которая, как правило, очень велика [1].

В 2009–2012 гг. в ИЯФ СО РАН была создана установка электронного охлаждения на энергию электронов до 2 MeV для синхротрона COSY (COoler SYnchrotron) [2]. Синхротрон COSY предназначен для экспериментов с поляризованными и неполяризованными протонами и дейтонами в области энергий до 2880 MeV/c на внутренней мишени или с выводом пучка на внешнюю мишень.

При проведении экспериментов с внутренней мишенью очень важна возможность „охлаждения“ используемого пучка (т.е. уменьшения разброса импульсов частиц) для подавления „греющих“ эффектов. В настоящее время в синхротроне COSY уже используются две системы охлаждения, что отражено в названии синхротрона на английском языке. Электронное охлаждение [3,4] на низкой энергии протонов (примерно до 200 MeV) позволяет провести накопление заряженных частиц и увеличить фазовую плотность пучка перед дальнейшими экспериментами. Стохастическое охлаждение [4,5] препятствует деградации качества пучка при его взаимодействии с мишенью на энергии эксперимента. К сожалению, стохастическому охлаждению присуще естественное ограничение, затрудняющее его работу при большой интенсивности охлаждаемого пучка и малом разбросе импульсов охлаждаемых частиц. Кроме того, стохастическое охлаждение неспособно эффективно работать во всей области энергий, так как для нерелятивистского иона его время пролета системы пикап-электродов существенно зависит от энергии.

Электронное охлаждение на энергии эксперимента будет эффективно подавлять рассеяние на малые углы и небольшие потери на ионизацию, имеющие наибольшую вероятность при взаимодействии частиц с веществом при высоких энергиях. Совместное его использование со стохастическим охлаждением позволит значительно увеличить светимость в экспериментах с внутренней мишенью.

Схема высоковольтной системы электронного охлаждения COSY показана на рис. 1. Стационарный электронный пучок с током до нескольких ампер ускоряется вдоль электростатической колонны 1, и далее по транспортной системе 2 и 3 направляется в секцию охлаждения 4, где движется совместно с ионным пучком. В результате совместного движения происходит передача тепловой энергии от более горячих ионов холодным электронам. Покинув секцию охлаждения, электронный пучок снова попадает в колонну, где практически полностью теряет накопленную энергию и поглощается в электронном коллекторе. На протяжении всего пути пучок находится в сопровождающем магнитном поле.

Установку электронного охлаждения необходимо было вписать в существующий синхротрон, находящийся в готовом здании, поэтому траектория электронов имеет сложную форму: сначала опускается из бака вниз, а затем поднимается вверх для входа в секцию охлаждения.

Основные параметры высоковольтной системы электронного охлаждения приведены в таблице.

Синхротрон COSY состоит из двух секций в форме полуокружностей и двух сорокаметровых прямолинейных промежутков между ними (рис. 2). Полный периметр кольца 183 м. В одном из прямолинейных промежутков установлена система электронного охлаждения на энергию электронов до 100 keV, разработанная в 90-х годах. Высоковольтная система электронного охлаждения расположена во втором промежутке.

Поперечные профили пучка измерялись в реальном времени с помощью профилометра, принцип работы которого основан на измерении профиля ионов, полученных в результате ионизации остаточного газа пучком. За

Основные параметры высоковольтной системы электронного охлаждения синхротрона COSY

Параметр	Значение
Диапазон энергий	0.025–2 MeV
Максимальный электронный ток	3 А
Диаметр катода	30 mm
Длина секции охлаждения	2.69 m
Радиус поворотов	1.0 m
Магнитное поле в секции охлаждения	0.5–2 kG
Вакуум в установке электронного охлаждения	10^{-9} – 10^{-10} mbar
Протяженность вдоль синхротрона	6.39 m
Высота траектории пучка в секции охлаждения	1.8 m

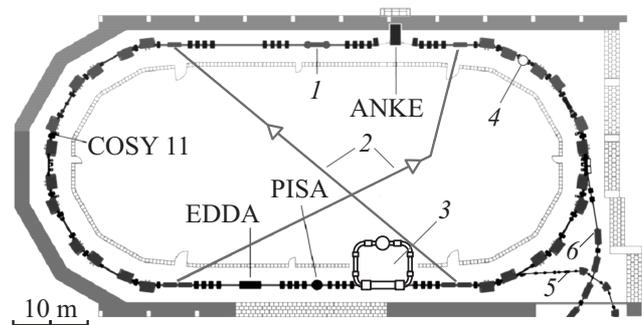


Рис. 2. Схема синхротрона COSY. 1 — система электронного охлаждения до 100 keV, 2 — элементы системы стохастического охлаждения, 3 — высоковольтная система электронного охлаждения, 4 — ионизационный профилометр, 5 и 6 — каналы инжекции и выпуска соответственно.

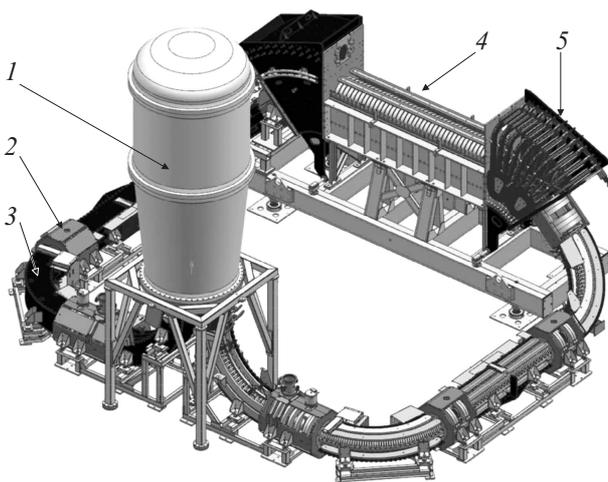


Рис. 1. Трехмерная модель 2 MeV системы электронного охлаждения для COSY. 1 — бак с элегазом высокого давления, содержащий электронную пушку, коллектор, ускоряющие трубки и систему высоковольтного питания, 2 — прямолинейные соленоиды транспортного канала, 3 — поворотные соленоиды транспортного канала, 4 — секция охлаждения, 5 — тороиды.

счет внешнего поперечного электрического поля, создаваемого специальными высоковольтными пластинами, продукты ионизации направляются на детектор, состоящий из микроканальных пластин, фосфорного экрана и ПЗС-матрицы. Чувствительная область детектора имеет прямоугольную форму размером 44 × 96 mm (44 mm в направлении пучка). ПЗС-матрица с разрешением 640 × 480 считывает изображение с фосфорного экрана с частотой до 200 fps [6,7]. В профилометре установлены две такие системы для одновременного измерения как горизонтального, так и вертикального профилей пучка.

Для наших измерений частота считывания 200 fps была избыточна, поэтому считывание происходило с частотой 1 fps.

Эксперименты по охлаждению

Поскольку система рассчитана на работу в очень широком диапазоне энергий, то для испытаний было выбрано несколько значений энергии протонов, на которых и проводились эксперименты.

Энергия электронов 109 keV

Первые эксперименты по охлаждению проводились с пучком протонов с энергией 200 MeV (энергия электронов 109 keV). Выбор такой энергии был обусловлен тем, что при 109 keV движение электронов еще остается адиабатичным, что позволяет избежать многих проблем, связанных с проводкой пучка от пушки до секции охлаждения. При этом время жизни протонного пучка становится значительно выше, чем на энергии инжекции (50 MeV), поэтому легче увидеть охлаждение, если сила трения еще мала из-за не оптимальной настройки электронного пучка. Продольное магнитное поле в секции охлаждения составляло 530 G.

На рис. 3 показаны зависимости параметров пучков (поперечные размеры r.m.s., токи пучков) от времени при электронном охлаждении. На рис. 3, *a* видно, что поперечные размеры уменьшаются с $5 \div 7$ до 1 mm. Потери протонного пучка остаются достаточно малыми.

Для описания динамики охлаждения предлагается использовать модель, в которой изменение горизонтального и вертикального эмиттансов протонного пучка ($\varepsilon_{x,y}$)

задается следующим уравнением:

$$\frac{d\varepsilon_{x,y}}{dt} = -\lambda(\varepsilon_x, \varepsilon_y)\varepsilon_{x,y} + \frac{D_{x,y}}{\sqrt{\varepsilon_x \varepsilon_y}}, \quad (1)$$

где первый член в правой части описывает охлаждение (затухание эмиттанса с декрементом λ), а второй — внутривидовое рассеяние и другие „греющие“ факторы, которые в данной модели учтены в виде диффузии с постоянными по времени коэффициентами $D_{x,y}$ и делителем $(\varepsilon_x \varepsilon_y)^{1/2}$, описывающим связь между скоростью диффузии и плотностью ионного пучка n (т.е. $n \sim (\varepsilon_x \varepsilon_y)^{-1/2}$).

Для коэффициента охлаждения используем выражение, отражающее кубический спад скорости охлаждения с отклонением поперечной скорости протонов [1]:

$$\lambda(\varepsilon_x, \varepsilon_y) = \frac{\varepsilon_0^{3/2}}{T_{\text{cool}}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_0)^{3/2}}, \quad (2)$$

где ε_x и ε_y — горизонтальный и вертикальный эмиттансы пучка (r.m.s.), ε_0 — эффективный эмиттанс, при котором начинается спад скорости охлаждения, T_{cool} — время охлаждения малых колебаний.

Эмпирические коэффициенты D_x и D_y введены по каждому из направлений и отражают оптические свойства ускорительного кольца COSY.

На рис. 3, *a* показан результат вычисления динамики охлаждения с использованием этих уравнений с набором свободных параметров $T_{\text{cool}} = 15$ s, $\varepsilon_0 = 2$ mm · mrad, $D_x/D_y = 9 \cdot 10^{-4}/1 \cdot 10^{-4}$ (mm · mrad)²/s. Видно, что выбранные параметры неплохо описывают наблюдаемую динамику охлаждения.

Измерения шоттк-спектра, позволяющие наблюдать эволюцию продольного распределения скоростей в пучке, показали очень быстрое (намного быстрее поперечного) продольное охлаждение.

Увеличение интенсивности протонного пучка приводит к росту скорости потерь протонов. В качестве примера на рис. 3, *b* показаны результаты измерений при начальной интенсивности 3.7 mA. Видно, что пучок быстро охлаждается, однако за это время его интенсивность упала более чем в 3 раза. На этом же рисунке видно, что, если электронное охлаждение выключить (выключив электронный ток), то пучок в поперечном направлении быстро расширится.

При промежуточных интенсивностях может возникать режим, при котором возникают когерентные колебания. Особенно красочно это выглядит на спектре продольного сигнала протонного пучка (рис. 4, *a*), где видны периодические всплески колебаний.

Данный эффект проявляется и в поперечном направлении. На рис. 4, *b* видно, что поперечный размер пучка испытывает некоторые биения (рис. 4, *a* и *b* соответствуют двум разным экспериментам).

Из рис. 4 видно, что данный процесс нестационарный: пучок охлаждается до высокой плотности, что приводит к развитию когерентных колебаний. Данные

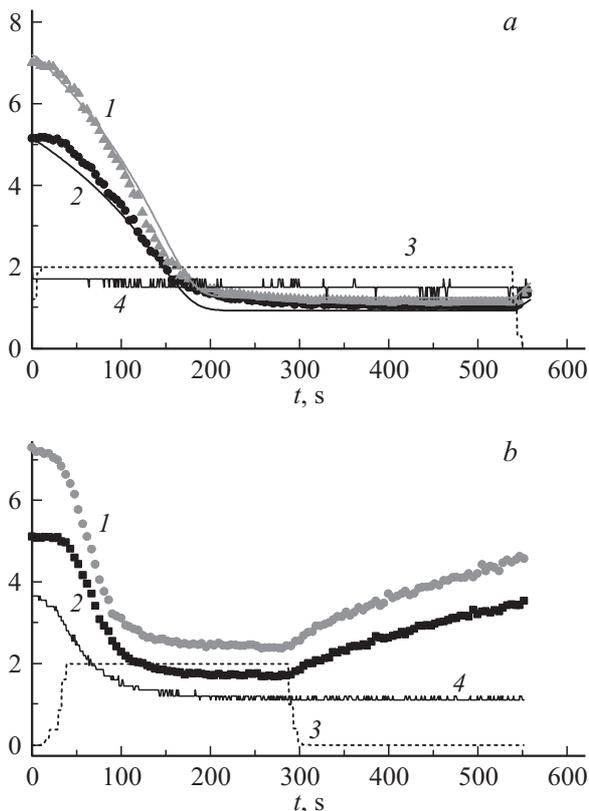


Рис. 3. Зависимость параметров протонного и электронного пучков от времени при охлаждении на 109 keV при начальном токе протонов 1.7 mA (*a*) и 3.7 mA (*b*). 1 и 2 — горизонтальный и вертикальный размеры пучка соответственно (в mm). Маркерами показаны результаты измерений, линиями — результаты моделирования. 3 — ток электронного пучка (деленный на 100 mA), 4 — ток протонного пучка (в mA).

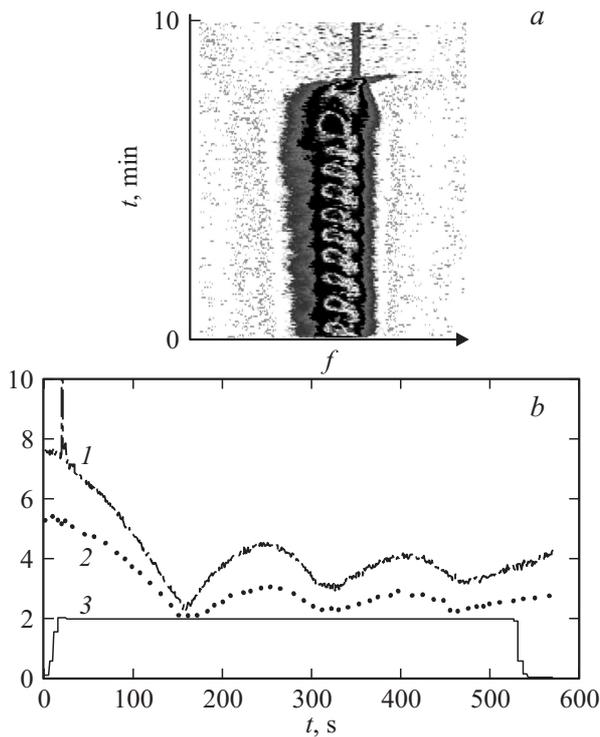


Рис. 4. Влияние когерентных колебаний на продольный спектр (а) и на поперечные размеры (b) охлажденного протонного пучка. 1 и 2 — горизонтальный и вертикальный размеры пучка (в mm), 3 — ток электронного пучка деленный на 100 mA.

колебания сильно ухудшают силу трения, поэтому пучок расширяется, что в свою очередь приводит к затуханию колебаний и увеличению силы трения.

Энергия электронов 192 keV

В первых попытках охлаждения на данной энергии выяснилось, что наблюдаются слабые признаки продольного охлаждения по смещению энергии протонного пучка на анализаторе спектра Шоттке сигнала, но заметного поперечного охлаждения не было. После специальных измерений выяснилось, что центр тяжести электронного пучка испытывает сильное ларморовское вращение в магнитном поле на участке охлаждения.

При движении до секции охлаждения электронный пучок испытывает много поперечных ударов на стыках магнитных элементов. В результате в секцию охлаждения он может войти с заметным углом и будет двигаться вдоль протонного пучка по ларморовской спирали. Для измерений этого вращения можно наблюдать пикапами на выходе из соленоида охлаждения поперечное смещение электронного пучка при небольшом изменении тока питания соленоида. Если предположить, что при таких малых изменениях поля амплитуда и фаза колебаний на входе в соленоид не зависят от поля в нем, то изменение поля будет в основном влиять на фазу вращения в конце соленоида. Наблюдаемое изменение положения пучка

с периодом, определяемым расстоянием L от начала секции охлаждения до пикапа, импульсом электронов p и продольным магнитным полем в секции охлаждения B , позволяет измерить ларморовский радиус R поперечного вращения пучка:

$$x(B) = R \sin\left(\frac{eB}{pc} L + \varphi_0\right). \quad (3)$$

С помощью таких измерений можно подобрать амплитуду дипольного „удара“ специальными катушками, создающими короткое дипольное возмущение до секции охлаждения так, чтобы полностью „погасить“ вращение в секции, и в результате останется только медленное (дрейфовое) смещение пучка.

В качестве примера на рис. 5 показано вертикальное и горизонтальное смещения электронного пучка с энергией 908 keV до компенсации и после компенсации. Видно, что начальный диаметр вращения около $1100 \mu\text{m}$ уменьшился до величины, определяемой шумами измерения ($\approx 10 \mu\text{m}$). Длина ларморовской спирали электронного пучка с энергией 908 keV в поле 1630 G составляет 17 см. В сопутствующей системе координат это соответствует 500 eV энергии поперечного движения, а после компенсации эта энергия уменьшается до 0.5 eV.

После подобной компенсации на 192 keV сразу появилось быстрое электронное охлаждение поперечных размеров протонного пучка. На рис. 6, а показана зависимость параметров пучков от времени при охлаждении. Поле в секции охлаждения осталось равным 530 G.

Начальные эмиттансы $\varepsilon_x/\varepsilon_y = 1.52/3.0 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. После охлаждения малого протонного тока 0.2 mA пучок охлаждается с малыми потерями до эмиттансов

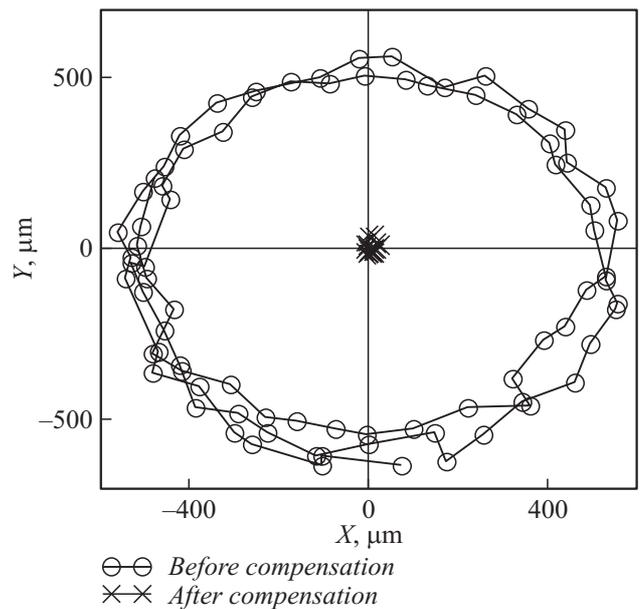


Рис. 5. Измерение смещения электронного пучка с энергией 908 keV при изменении поля в секции охлаждения до компенсации и после компенсации.

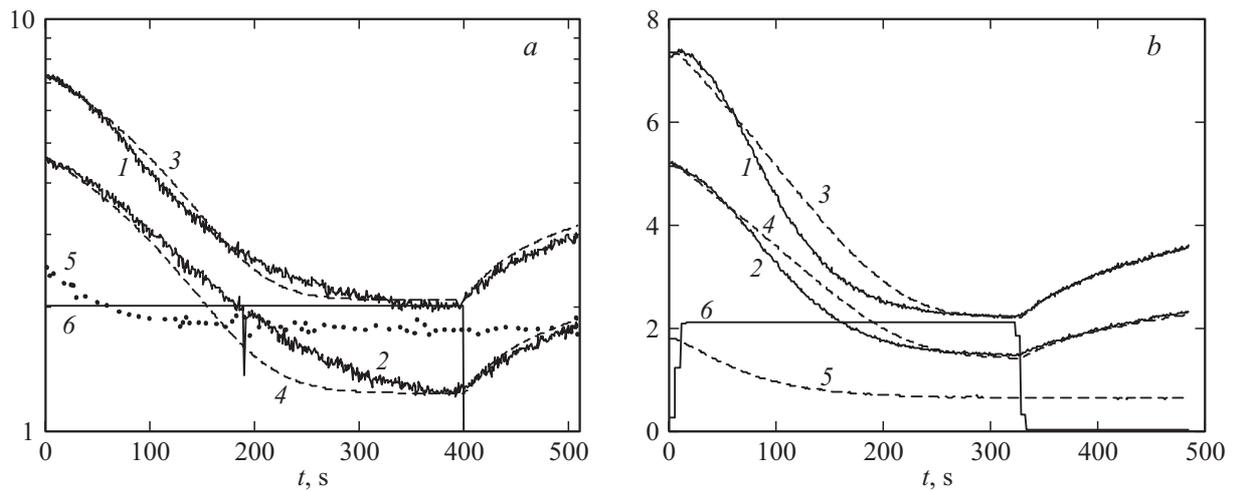


Рис. 6. Охлаждение на энергии 192 keV при токе инжекции 0.2 мА (а) и 2 мА (б). 1 и 2 — измеренные горизонтальный и вертикальный размеры протонного пучка (в мм), 3 и 4 — горизонтальный и вертикальный размеры пучка, подобранные по модели (в мм), 5 — ток протонного пучка (для а деленный на 0.1 мА, для б деленный на 1 мА), 6 — ток электронного пучка, деленный на 100 мА.

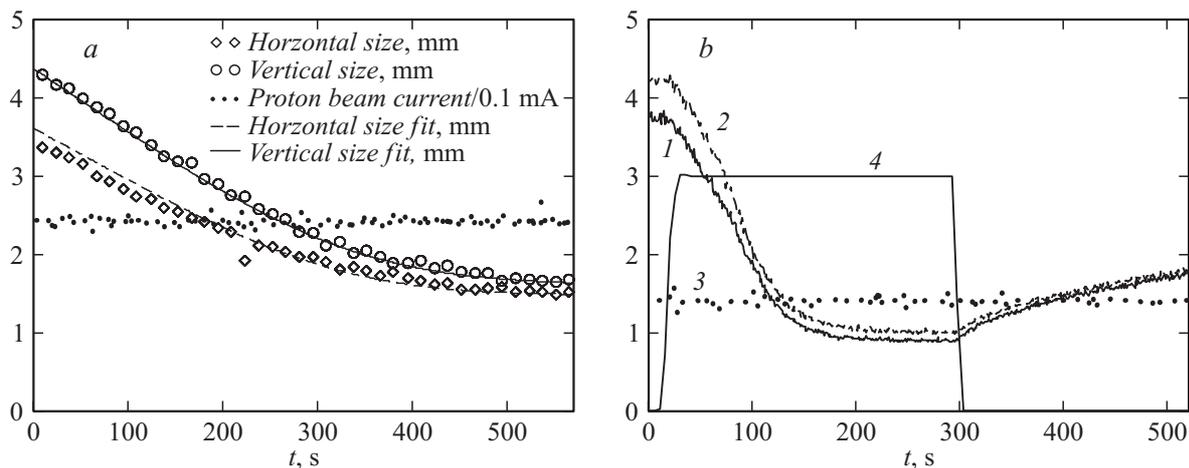


Рис. 7. Зависимость параметров пучков от времени при электронном охлаждении на энергии 316 keV электронным пучком с током 150 мА (а) и 300 мА (б). 1 и 2 — горизонтальный и вертикальный размеры протонного пучка (в мм), 3 — ток протонного пучка, деленный на 0.1 мА, 4 — ток электронного пучка, деленный на 100 мА.

$\varepsilon_x/\varepsilon_y = 0.11/0.22 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Исходя из модели, описанной выше, время охлаждения ($1/\lambda$) вначале составляет 140 s, в равновесном состоянии 50 s. Параметры рассеяния $D_x/D_y = 4 \cdot 10^{-4}/7 \cdot 10^{-4} (\text{mm} \cdot \text{mrad})^2/\text{s}$, а эффективный эмиттанс составляет $\varepsilon_0 = 4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$.

Как и в экспериментах по охлаждению на 109 keV, при инжекции более интенсивного пучка сильно увеличивается скорость потерь. На рис. 6, б показаны результаты эксперимента при токе инжекции 2 мА. Видно, что за время охлаждения интенсивность падает до примерно 0.7 мА.

Охлаждение на 316 keV

Данная энергия выбрана исходя из требований эксперимента ANKE [8]. При переходе к данной энергии

было решено увеличить и магнитное поле в секции охлаждения до 1430 G.

На рис. 7, а показаны результаты измерений параметров пучков при охлаждении электронным током 150 мА. Начальные эмиттансы $\varepsilon_x/\varepsilon_y = 0.4/3.0 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ охлаждались до эмиттансов $\varepsilon_x/\varepsilon_y = 0.07/0.4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Параметр рассеяния $D_x/D_y = 0.7 \cdot 10^{-4}/4 \cdot 10^{-4} (\text{mm} \cdot \text{mrad})^2/\text{s}$. Время охлаждения ($1/\lambda$) в равновесном состоянии 60 s, а эффективный эмиттанс составляет $\varepsilon_0 = 5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$.

При увеличении электронного тока до 300 мА (рис. 7, б) скорость охлаждения возрастала. Начальные эмиттансы $\varepsilon_x/\varepsilon_y = 0.4/2.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ уменьшались до значений $\varepsilon_x/\varepsilon_y = 0.03/0.12 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Параметры рассеяния $D_x/D_y = 3.5 \cdot 10^{-5}/2 \cdot 10^{-4} (\text{mm} \cdot \text{mrad})^2/\text{s}$, эф-

фактивный эмиттанс $\epsilon_0 = 5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Вначале время охлаждения составляло 150 s, в равновесии — 36 s.

Эксперименты на 908 keV

Как уже говорилось, синхротрон COSY оснащен также системой стохастического охлаждения. Поскольку на момент проведения экспериментов по электронно-му охлаждению система стохастического охлаждения была настроена на энергию, соответствующую энергии электронов примерно 908 keV, то было решено провести эксперименты по высоковольтному электронному охлаждению на этой же энергии. На рис. 8 показаны измерения размеров протонного пучка в различных условиях охлаждения.

На рис. 8 видно, что в горизонтальном направлении совместное охлаждение позволяет сжать пучок сильнее, чем при одном электронном. Однако в вертикальном направлении для случая совместного охлаждения пучок быстро сжимается в начале, но потом сжатие практически прекращается, хотя при одном электронном охлаждении пучок продолжает сжиматься дальше. Причем именно в вертикальном направлении работает система стохастического охлаждения.

Данный эффект связан с возникновением когерентных колебаний в охлажденном пучке. В продольном спектре было видно, что при включении системы стохастического охлаждения для сильно охлажденного пучка происходит возбуждение колебаний, которые приводят к расширению в вертикальном направлении. При этом в горизонтальном направлении сила трения достаточно велика, чтобы компенсировать данное расширение. Таким образом, для сильно охлажденного пучка стохастическое охлаждение начинает его греть.

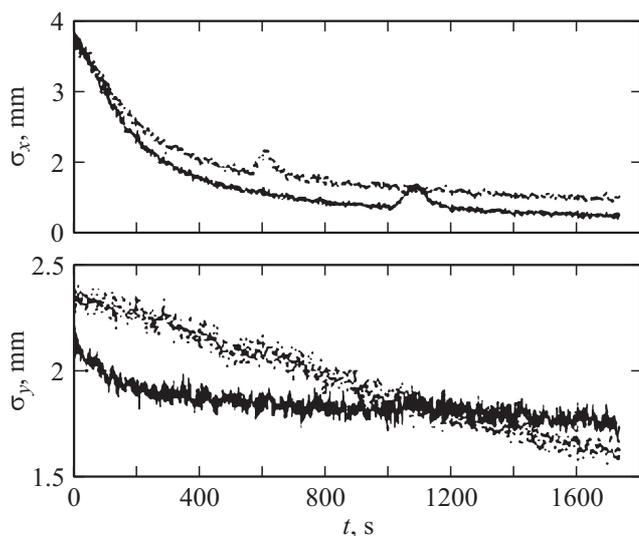


Рис. 8. Измерения размеров протонного пучка в различных условиях охлаждения на энергии 908 keV: точки — только электронное охлаждение, линии — при электронном охлаждении и с включенной системой вертикального стохастического охлаждения.

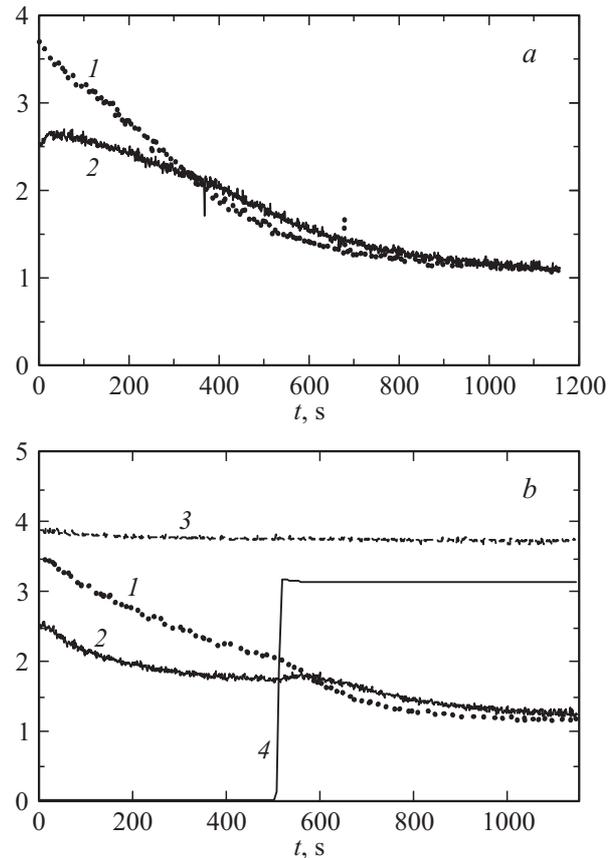


Рис. 9. Изменения параметров пучков при совместном охлаждении на 908 keV: *a* — на начальном этапе (до 300 s) работают обе системы, после 300 s стохастическое охлаждение отключено; *b* — на начальном этапе только стохастическое охлаждение, затем добавлено электронное. 1 и 2 — горизонтальные и вертикальные размеры протонного пучка (деленный на 0.1 mA), 3 — ток протонного пучка (деленный на 100 mA), 4 — ток электронного пучка (деленный на 100 mA).

Если систему стохастического охлаждения использовать только на начальном этапе для предварительного сжатия, а затем в 300 s ее выключить, то оба размера сжимаются до 1 mm (рис. 9, *a*). Начальное время охлаждения составляет около 500 s, в равновесии время охлаждения достигает 140 s. Эффективный эмиттанс $\epsilon_0 = 0.24 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, $T_{\text{cool}} = 55 \text{ s}$, $D_x/D_y = = 2 \cdot 10^{-5}/1.2 \cdot 10^{-4} (\text{mm} \cdot \text{mrad})^2/\text{s}$.

Эксперименты по совместному охлаждению представляют большой интерес, поскольку стохастическое охлаждение особенно эффективно при охлаждении больших амплитуд колебаний, а электронное, напротив, эффективно на малых амплитудах.

На рис. 9, *b* показано изменение параметров протонного пучка от времени в цикле с совместным действием двух видов охлаждения. В начале цикла было включено только стохастическое охлаждение. Примерно в середине цикла, было добавлено электронное охлаждение,

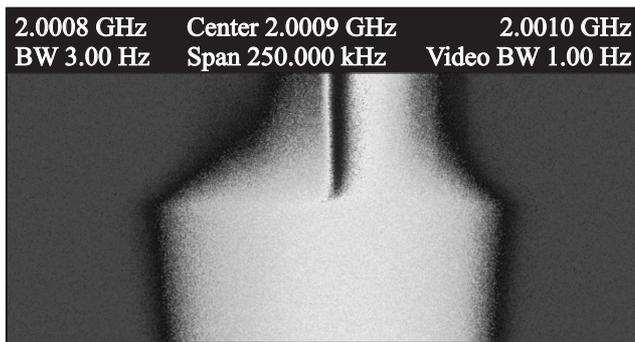


Рис. 10. Эволюция шоттке-спектра при совместном охлаждении (время снизу вверх, полное окно 10 min). До 300 s включено только стохастическое охлаждение. В 300 s добавлено электронное охлаждение.

за счет чего в поперечном направлении пучок стал сжиматься быстрее.

Система стохастического охлаждения синхротрона COSY позволяет охлаждать протоны только в поперечном направлении. На рис. 10 показана эволюция продольного распределения в протонном пучке при совместном действии двух систем охлаждения.

Из рис. 10 видно, что вначале под действием только стохастического охлаждения происходит медленное расширение энергетического разброса. Сразу после включения электронного пучка образуется центральное „ядро“ охлажденного пучка, в которое втягиваются отклоненные по энергии частицы.

Предварительное включение системы стохастического охлаждения заметно ускорило начальное охлаждение электронным пучком.

Охлаждение сгруппированного пучка

До сих пор приводились результаты экспериментов по охлаждению пучка протонов постоянного тока, однако эксперименты по охлаждению сгруппированных

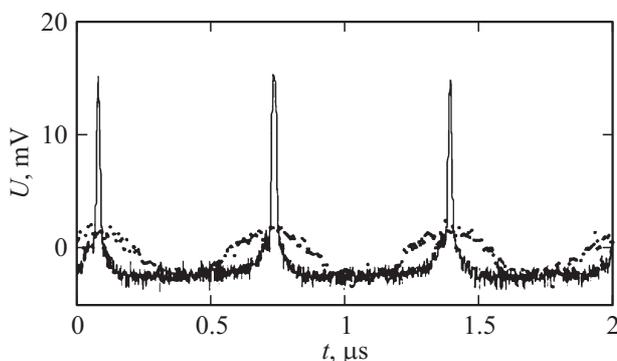


Рис. 11. Продольный профиль протонного пучка, измеренный с пикапа: точки — в начале цикла, линия — после охлаждения.

пучков также проводились. При работе со сгруппированным пучком становится сложно наблюдать за его продольным спектром, поскольку в нем преобладает когерентная составляющая. Но эффект от продольного охлаждения можно наблюдать, измеряя с пикапа сигнал, дающий информацию о продольном профиле пучка, поскольку уменьшение продольного разброса приводит к укорачиванию сгустков.

На рис. 11 показаны результаты измерений профиля сгруппированного протонного пучка до электронного охлаждения и после для энергии электронов 908 keV. Видно, что сгусток сильно сжался в продольном направлении. При этом амплитуда сигнала выросла в несколько раз за счет увеличения плотности тока в центре сгустка.

Данный результат интересен с точки зрения проектирования комплекса NICA (ОИЯИ, Дубна), где для формирования коротких сгустков предполагается использовать мощную систему питания ускоряющей структуры. Результаты данного эксперимента показывают, что укорачивания сгустков можно добиться за счет совместного действия электронного охлаждения (которое планируется использовать в системе) и сравнительно слабого ВЧ.

Заключение

На синхротроне COSY были проведены первые успешные эксперименты по охлаждению протонов при помощи новой высоковольтной установки электронного охлаждения, разработанной в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Большой диапазон рабочих энергий в охладителе позволил провести ряд экспериментов на энергии протонов от 200 MeV до 1.66 GeV. Результаты показали оправданность использования высоковольтных систем электронного охлаждения с сильным продольным магнитным полем в секции охлаждения для улучшения качества ионных пучков в накопителях.

Авторы хотели бы выразить благодарность большой группе сотрудников ИЯФ СО РАН, участвовавших в создании высоковольтной установки электронного охлаждения. Также авторы благодарны коллективу COSY за помощь при запуске охладителя и команде из ОИЯИ (И. Мешкову, А. Кобец и С. Яковенко) за полезные дискуссии в пультовой COSY во время экспериментов.

Список литературы

- [1] Пархомчук В.В., Скринский А.Н. // УФН. 2000. Т. 170. № 5. С. 473–493.
- [2] Reva V.B., Alinovskiy N.I., Bedareva T.V. et al. // Proc. of COOL'13. Murren, Switzerland, 2013. P. 79–83.
- [3] Derissen W., Maier R., Pfister U. et al. // Proc. of EPAC'92. Berlin, Germany, 1992. P. 839–841.
- [4] Prasuhn D., Dietrich J., Maier R. et al. // NIM A. 2000. Vol. 441. P. 167–174.

- [5] *Stassen R., Bechstet U., Dietrich J.* et al. // Proc. of EPAC'98. Stockholm, Sweden, 1998. P. 553–555.
- [6] *Bohme C., Dietrich J., Kamerdzhiev V.* et al. // Proc. of DIPAC'09. Basel, Switzerland, 2009. P. 191–193.
- [7] *Giacomini T., Forck P., Liakin D.* et al. // Proc. of DIPAC'11. Hamburg, Germany, 2011. P. 419–421.
- [8] Measurement of the spin correlation parameter $A_{x,z}$ of the quasi-free $pn \rightarrow \{pp\}_{s\pi}$ — reaction at ANKE, Status Report for COSY Proposal # 213, http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/anke/proposal/StatusReport_CW.pdf (на 13.01.2014).