Б.90

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
физики СО АН СССР
ИНВ. №

ПРЕПРИНТ И Я Ф 76 - 93

Г.И.Будкер, Т.А.Всеволожская, Н.С.Диканский
И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Г.И.Сильвестров,
А.Н.Скринский

ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ВСТРЕЧНЫХ ПРОТОН-АНТИПРОТОННЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В ПРОЕКТЕ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА БОЛЬШОГО СЕРПУХОВА

Новосибирск
1976

ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ВСТРЕЧНЫХ ПРОТОН-АНТИПРОТОННЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В ПРОЕКТЕ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА БОЛЬШОГО СЕРПУХОВА

Г.И.Будкер, Т.А.Всеволожская, Н.С.Диканский,
И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Г.И.Сильвестров,
А.Н.Скринский

А Н Н О Т А Ц И Я

Обсуждается возможность создания встречных протон-антипротонных пучков на энергию 2хI ТэВ. Описана система, позволяющая с помощью электронного охлаждения осуществить накопление и сжатие антипротонного сгустка. Используя Серпуховский синхротрон в качестве инжектора ($N_p = 10^{13}$ протонов/импульс), можно обеспечить, при коэффициенте конверсии $0{,}8 \cdot 10^{-6}$ и времени охлаждения 5 сек, накопление 10^{11} антипротонов за сутки в накопителе НАП. В режиме двух равных по интенсивности сгустков протонов и антипротонов ($N_p = N_{\bar{p}} = 10^{11}$), ускоренных до энергии I ТэВ в Большом Накопителе, можно достичь светимости установки 10^{31} см$^{-2}$.сек$^{-1}$, если β - функция на участке встречи сжата до значения 5 см.

В докладе обсуждаются вопросы эффективной конверсии протонов в антипротоны, накопления и сжатия антипротонов в накопителях с электронным охлаждением, проблемы пространственного заряда при работе со встречными протон-антипротонными пучками и т.д.

Сформулированы условия работы УНК в оптимальном режиме при проведении экспериментов на встречных протон-антипротонных пучках.

Институт ядерной физики предлагает осуществить в программе ускорительно-накопительного комплекса Большого Серпухова встречные протон-антипротонные пучки на основе метода электронного охлаждения, предложенного и разработанного в Институте.

Метод электронного охлаждения /I/ позволяет демпфировать колебания протонов и антипротонов в накопителях, что в свою очередь даёт возможность производить многократное накопление антипротонов в один и тот же фазовый объём, а также сжимать пучки до предельно малых размеров по всем направлениям. Уже потому, что речь идёт о накоплении антипротонов в течение многих тысяч импульсов (циклов синхротрона) в один и тот же фазовый объём, этот метод имеет априорные преимущества по сравнению с любыми другими методами, не использующими демпфирования колебаний. Исключение представляет метод накопления, использующий распад $\tilde{\Lambda}_0$-гиперонов, но он крайне неэффективен. Однако, кроме этого априорного преимущества, имеется еще ряд конкретных преимуществ и, в частности:

а) возможность накопления антипротонов и протонов в промежуточном накопителе небольшой длины, но с большим фазовым объёмом, с последующей инжекцией на основную дорожку узкого, хорошо сформированного пучка. Это позволяет делать основной ускоритель-накопитель на высокие энергии с малой апертурой, что резко снижает стоимость проекта и сокращает сроки его осуществления.

б) Возможность регулирования сечений пучков позволяет получать при заданном количестве частиц предельные светимости, определяемые эффектами встречи, и получать за счёт малого сечения пучка высокие светимости уже при сравнительно малом количестве частиц.

в) Возможность получения сверхзвуковых пучков (доли миллиметра), в которых место реакции определено с высокой точностью. Опыт работы на электрон-позитронных встречных пучках показал, что в ряде экспериментов, особенно в прецизионных, это даёт определённые преимущества.

Рассматривалось несколько вариантов промежуточного накопителя антипротонов с системой электронного охлаждения, размеры

и стоимость которых адэкватны Серпуховскому проекту. Однако, оказалось, что усложнение и удорожание системы не даёт кардинального выигрыша по сравнению с небольшой системой, разработанной в свое время для Новосибирского проекта протон-антипротонных встречных пучков /2/. Поэтому ниже мы остановимся только на этом последнем варианте, внеся в него небольшие изменения, вытекающие из режима работы Серпуховского синхротрона. Не вызывает сомнения, что при детальном проектировании и экспериментальном изучении выбранная схема может претерпеть сильные изменения, однако, в настоящее время она может быть положена в основу реального проекта. Как будет показано ниже, этот вариант может обеспечить светимость $\mathcal{L} > 10^{31}$ см$^{-2}$сек$^{-1}$.

Поскольку окончательный проект основного Серпуховского кольца не выбран, ниже мы будем рассматривать некоторый условный базовый ускоритель-накопитель с энергией I ТэВ, периметром 20 км, диаметром камеры 2A=5 см, числом бетатронных колебаний на обороте $\nu \sim 30$, что соответствует средней β -функции 120 м.

I. НЕКОТОРЫЕ ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОЦЕНКИ

Эффективность системы встречных пучков характеризуется энергией частиц (2E) в системе центра инерции, определяющей возможные реакции, и светимостью $\mathcal{L}$, определяющей количество реакций в единицу времени. Отметим, что для пучков 2 x I ТэВ эффективная энергия составляет 2.10^{15} эВ.

Светимость $\mathcal{L}$ представляет собой величину, которая, будучи умножена на сечение процесса, даёт число актов в единицу времени

$$\mathcal{L} = \frac{N_p N_{\tilde{p}}}{S\,T} \cdot \frac{\ell}{L} \qquad (1)$$

где N_p и $N_{\tilde{p}}$ – число протонов и антипротонов, T – период обращения, S – сечение пучков, L – длина области пересечения пучков, ℓ – протяженность наблюдаемой части длины L. Максимальная светимость достигается при $\ell = L$ и максимальном значении $N_p N_{\tilde{p}}/S$. Последнее определяется эффектами встречи.

Эффекты встречи связаны с тем, что собственное поле одного пучка создает резонансные условия для встречных частиц.

В результате этого минимальное сечение пучка, при котором ж может существовать в камере, определяется вы-

$$i = \frac{r_p \beta_0 N}{\gamma \Delta\nu} \qquad (2)$$

сический радиус протона (r_p =I,6.10^{-16}см),

$\gamma = E/m_p c^2$ – релятивистский фактор, β_0 – значение β – функции в месте встречи (аналог фокусного расстояния магнитной системы), $\Delta\nu$ – допустимый сдвиг частоты бетатронных колебаний, не приводящий к их нелинейной раскачке. $\Delta\nu$ обычно лежит от 0,I до 0,00I в зависимости от времени затухания, выбранной магнитной системы и искусства её настройки. На электрон-позитронных накопителях удается получить $\Delta\nu$, равное 5.10^{-2}. В случае протон-антипротонных встречных пучков, когда отсутствует затухание на высокой энергии, следует, видимо, принять значение на порядок меньше ($\Delta\nu = 5.10^{-3}$). Тогда, считая, что пучок занимает в среднем половину апертуры базового накопителя, из (2) получим:

$$N \leq 10^{13}$$

При большем количестве частиц второй пучок погибает. Конечно, это относится только к двум встречающимся пучкам на одной дорожке. Поскольку поперечное сечение пучка определяется только эффектами встречи, светимость установки при заданном числе антипротонов достигает максимума при $N_p = N_{\tilde{p}}$. Дальнейшее увеличение числа протонов приводит только к расширению пучка антипротонов и, увеличивая фон, не увеличивает светимость.

Максимальная светимость при $N_p = N_{\tilde{p}} = N$ равна:

$$\mathcal{L} = \frac{\gamma \Delta\nu N}{r_p \beta_0 T} \cdot \frac{\ell}{L} \leq 5 \cdot 10^{20} \frac{N}{\beta_0} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1} \qquad (3)$$

где β_0 – значение β – функции (см) в месте встречи. Для увеличения светимости β_0 делают много меньше средней β -функции. При подобном изменении β_r и β_z предельное по эффектам встречи число частиц не меняется. При правильном согласовании

магнитной системы места встречи с основной магнитной системой это не приведёт к расширению пучка в основной магнитной системе. В противном случае уже небольшие неточности в этом согласовании могут привести к расширению пучка в основной магнитной системе и ещё больше понизить предельное число частиц накопителя. На электрон-позитронных накопителях β_0 удается довести до 5 см (такой же должна быть сделана длина сгустка). В нашем случае получение таких малых значений β - функции и коротких сгустков может представить трудности: для малых β -функций могут потребоваться большие поля, а короткие сгустки при отсутствии затухания скорее всего будет трудно сохранить длительное время, в особенности, для больших N. Поэтому будем каждый раз рассматривать два значения β -функции в месте встречи: 5 см и 200 см, которые в каком-то смысле, ограничивают сверху и снизу интересующий нас интервал.

$$\left.\begin{aligned} \mathcal{L} &= 10^{20} N \\ d &= \sqrt{2.10^{-16} N}\ (\text{см}) \end{aligned}\right\} \text{при} \quad \beta_0 = 5 \text{ см} \qquad (4)$$

$$\left.\begin{aligned} \mathcal{L} &= 2{,}5.10^{18} N \\ d &= \sqrt{8.10^{-15} N}\ (\text{см}) \end{aligned}\right\} \text{при} \quad \beta_0 = 200 \text{ см}$$

Здесь d - диаметр пучка, соответствующий (2).

В первом случае светимость $\mathcal{L} = 10^{31}$ получается уже при $N = 10^{11}$ за счёт того, что в месте встречи диаметр пучка $d \simeq 4.10^{-2}$мм. Эти параметры уже достигнуты на современных электрон-позитронных накопителях.

При вакууме 10^{-11}торр взаимодействие с остаточным газом много меньше, чем со встречным пучком, и последнее определяет время жизни пучка при отсутствии коллективных процессов, радиочастотных шумов и т.п.

При энергии I ТэВ определяющим является ядерное взаимодействие ($\sigma_{эд} \simeq 5.10^{-26}$см$^{-2}$), а количество частиц, выбывающих из пучка из-за взаимодействия с частицами встречного пучка, есть:

$$\frac{dN}{dt} = \sigma_{эд}\mathcal{L} = \begin{cases} 5.10^{-6} N \text{ сек}^{-1} & \text{при } \beta_0 = 5 \text{ см} \\ 1{,}2.10^{-7} N \text{ сек}^{-1} & \text{при } \beta_0 = 200 \text{ см} \end{cases} \qquad (5)$$

Таким образом, время жизни пучка по этому процессу составляет 2,5 суток для β_0 = 5 см и 100 дней для β_0 = 200 см.

Как уже говорилось, в основу проекта положен метод электронного охлаждения /I/.

При инжекции антипротонов в промежуточный накопитель необходимо обеспечить захват антипротонов с большим разбросом поперечных импульсов, который и определяет в этом случае время охлаждения. Затухание достаточно сжатого пучка антипротонов происходит с характерным временем, определяемым температурой электронного пучка. Вводя одномерный поперечный фазовый объём пучка антипротонов

$$\Omega = \pi \theta_{\tilde{p}} \frac{x}{2} = \pi \theta_{\tilde{p}}^2 \beta \qquad (6)$$

($x = 2\theta\beta$ - поперечный размер, все величины - на участке охлаждения), удобно представить время охлаждения цилиндрического пучка антипротонов в виде:

$$\tau_{\tilde{p}} \simeq 0.1 \frac{\left(\frac{v}{c}\right)^4 \gamma^5}{r_p r_e \eta L} \cdot \frac{e}{J_e} \cdot \frac{\Omega^{5/2}}{\sqrt{\beta}} \qquad (7)$$

где $J_e = j_e S = j_e \Omega \beta$ - полный ток электронов.

Эффективность накопителя, где происходит охлаждение пучка антипротонов, в данном случае установки НАП, параметры которой приведены в разделе 4, характеризуется захватываемым фазовым объёмом Ω и временем затухания $\tau_{\tilde{p}}$. Поскольку время затухания растёт как $\Omega^{5/2}$, а число антипротонов, захватываемых из конвертора, только как Ω (см.(10), раздел 2), мы пришли к выводу, что наиболее рационально выбрать Ω таким, чтобы время охлаждения равнялось периоду цикла работы синхротрона:

$$\tau_{\tilde{p}} = 5 \text{ сек}$$

При токе J_e = 100 а и средней β - функции накопителя НАП, равной 5 м, получаем $\Omega = 0{,}8.10^{-2}$, что соответствует поперечному размеру пучка в накопителе 2,5 см.

Радиальная апертура накопителя НАП обеспечивает захват антипротонов с разбросом энергии около 5%. Определенное усовершенствование системы электронного охлаждения, о котором будет сказано

в разделе 3, позволяет, несмотря на большой энергетический разброс в пучке антипротонов, сохранить время охлаждения пучка тем же, что и для пучка с малым разбросом (в нашем случае 5 сек).

II. КОНВЕРСИЯ ПРОТОНОВ В АНТИПРОТОНЫ

Фазовый объём рождающихся антипротонов будет малым несмотря на большие углы рождения вторичных частиц, если удастся сделать достаточно малым размер антипротонного пучка в месте конверсии. Такой прием очень эффективен при электрон-позитронной конверсии, что определяется малостью радиационной длины вольфрама, используемого в качестве материала конвертора (радиационная длина около 3 мм). Ядерная длина даже самых тяжелых веществ не меньше 7 см. Продольная протяженность источника антипротонов приводит к появлению эффективного фазового объёма у антипротонного пучка даже при бесконечно тонком пучке протонов. Для антипротонов с импульсом p средний квадрат углов рождения есть

$$\langle \theta^2 \rangle = \frac{2 m_p m_\pi c^2}{p^2} \qquad (8)$$

и разброс координат на выходе из конвертора длиной $\ell_к$ равен

$$\Delta r = \pm \frac{\ell_к \theta}{2} \qquad (9)$$

Соответственно, эффективный одномерный фазовый объём, в котором рождаются антипротоны, составляет

$$\Omega_{\tilde{p}} = \frac{\pi \ell_к \langle \theta^2 \rangle}{2} = \frac{\pi \ell_к m_p m_\pi c^2}{p^2} \qquad (10)$$

Для антипротонов с импульсом p = I,8 ГэВ/с при длине мишени $\ell_к$ = 7 см (порядка длины ядерного поглощения) эта формула дает $\Omega_{\tilde{p}} \simeq 0{,}9$ рад. Величина эта намного превышает возможный фазовый объем накопителя антипротонов с электронным охлаждением, и без специальных мер может быть использована лишь малая доля полного фазового объёма рождающихся антипротонов.

Для накопителя с фазовым объёмом Ω, много меньшим полного эмитанса $\Omega_{\tilde{p}}$, и захватываемым относительным разбросом импульсов $\Delta p_{\parallel}/p$ эффективный коэффициент конверсии протонов с импульсом 70 ГэВ/с в антипротоны с импульсом I,8 ГэВ/с будет равен

$$\alpha = \frac{N_{\tilde{p}}}{N_p} = 2\ 10^{-3}\, \Omega\, \frac{\Delta p_{\parallel}}{p} \qquad (11)$$

При разбросе импульсов 5% и фазовом объеме накопителя Ω = = $0{,}8 \cdot 10^{-2}$, при котором время охлаждения может быть сделано меньше времени следования импульсов ускорителя (5 сек), эффективный коэффициент конверсии будет около

$$\alpha = 0{,}8 \cdot 10^{-6} \qquad (12)$$

При числе ускоренных протонов 10^{13} протонов/импульс скорость накопления антипротонов будет равна

$$\frac{dN_{\tilde{p}}}{dt} = 1{,}6 \cdot 10^{6}\ \tilde{p}\ /\text{сек} \qquad (13)$$

Уже такая скорость накопления может обеспечить предельную светимость установки

$$\mathcal{L} = \frac{dN_{\tilde{p}}}{dt}\, \frac{1}{\sigma_{pg}} = 3 \cdot 10^{31}\,\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1} \qquad (14)$$

Правда, время выхода на эту светимость, зависящее от значения β - функции в месте встречи, составит при этом много суток.

Скорость накопления антипротонов можно в несколько раз увеличить, используя для повышения коэффициента конверсии следующий прием. Вместо одной мишени - конвертора используются несколько коротких мишеней, между которыми помещаются разработанные в ИЯФ очень коротко-фокусные параболические или литиевые линзы /3/, передающие изображение пучка антипротонов с мишени на мишень (рис.I). При этом фазовые объёмы антипротонов со всех мишеней совмещаются друг с другом, и итоговый фазовый объем (рассеяние в мишенях и линзах может быть сделано достаточно малым) оказывается равным фазовому объему короткой одиночной мишени. Кроме того, в запасе остается повышение на порядок даваемого ускорителем числа протонов, которое с использованием бустера должно составить 10^{14} протонов-импульс. Полное осуществление описываемой системы может обеспечить, таким образом, скорость накопления вплоть до $1 \cdot 10^{8}$ $\tilde{p}$ /сек.

Для огромного числа экспериментов достаточно светимости 10^{31} см$^{-2}$сек$^{-1}$. Такая светимость при скорости накопления порядка 10^8 антипротонов/сек будет достигаться уже очень быстро. В принципе же, эта скорость накопления (разумеется после решения остальных, очень сложных проблем) может обеспечить светимость еще на два порядка выше.

III. НАКОПИТЕЛЬ АНТИПРОТОНОВ НАП И СИСТЕМА ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

В рассматриваемом проекте установка НАП предназначена только для охлаждения конвертируемых антипротонов. Конечно, после охлаждения предыдущей порции антипротонов можно инжектировать новую порцию, как это делается в электрон-позитронных накопителях, однако, при очень большом числе импульсов накопления это технически не оправдано. Поэтому предполагается использование промежуточного накопителя с малой апертурой и упрощенной системой электронного охлаждения, в который антипротоны будут инжектироваться после охлаждения в НАП и где будет осуществляться многократное накопление охлажденных и хорошо сформированных сгустков. Это снимает с установки НАП требование очень высокого вакуума, который трудно получить в системе, где будут циркулировать килоамперные токи, и, кроме того, упрощает систему впуска в НАП, поскольку снимается требование, чтобы "хвосты" высоковольтных импульсов не выбивали даже малые доли пучка (напомним, что в НАП впускается широкий антипротонный пучок, и требования на систему впуска и без того довольно тяжелые). Предлагаемая схема накопления антипротонов показана на рис.2.

Установка НАП представляет собой накопитель типа рейстрек с краевой фокусировкой и длинными прямолинейными промежутками (7м), предназначенными для размещения устройств электронного охлаждения. Схема аналогична установке НАП-М /I/. Радиус поворотных магнитов 3 м, вертикальная апертура 3 см, горизонтальная апертура 42 см, магнитное поле 20 кГс, β - функция около 5 м, энергия антипротонов I,I ГэВ (импульс I,8 ГэВ/с).

При энергии накапливаемых антипротонов порядка ГэВ рационально использовать систему электронного охлаждения с рекуперацией энергии электронного пучка, аналогичную той, которая используется в настоящий момент на экспериментальной установке ИЯФ. В прямолинейных промежутках накопителя в продольном магнитном поле пропускается со скоростью, равной скорости антипротонов, пучок электронов, энергия которых затем рекуперируется. В обсуждаемом случае речь идет о токе порядка 100 А при напряжении около 0,6 Мв. Соответствующие эксперименты по рекуперации энергии электронов, проведенные в более простой геометрии и примерно при том же напряжении, но несколько меньших токах, дали положительные результаты. Довольно подробно изучен процесс рекуперации энергии электронов в продольном магнитном поле при напряжении около 100 кВ и токе IA /4/. Совокупность полученных результатов показывает, что при реактивной мощности пучка в обсуждаемом проекте порядка 100 МВт его активная мощность также достаточно велика - порядка нескольких сот киловатт, поскольку напряжение на рекуператоре хотя практически и не зависит от полной энергии электронов (при достаточно хорошей оптике рекуператора), возрастает с ростом тока пучка (как $J_e^{2/3}$), и для тока 100 А трудно рассчитывать, что его удастся сделать существенно меньше I кВ. Это ограничивает как величину тока в пучке, так и количество пучков. Поэтому в настоящее время мы рассматриваем систему, в которой один и тот же электронный пучок с током 100 а многократно проходит через область электронного охлаждения, перемещаясь с одного радиуса на другой и меняя при этом энергию соответственно энергии антипротонов.

Для того, чтобы захватить антипротоны с малым поперечным фазовым объёмом ($\Omega_z \approx \Omega_r$) и большим энергетическим разбросом, необходимая радиальная апертура накопителя много больше вертикальной. Сделаем размер электронного пучка по обоим направлениям одинаковым (порядка вертикальной апертуры). Если систему сопровождающего магнитного поля выполнить в виде плоского тора (рис.3), то центробежный дрейф на поворотах вокруг радиальной оси за один оборот будет смещать электронный пучок в радиальном направлении. При $H_{\parallel}$ = 5 кГс электронный ток 100 А

пройдёт I4 раз через область охлаждения до рекуперации. Циркулирующий в камере ток будет порядка I,4 кА при токе катода IOOA. Таким способом увеличение полезного тока пучка электронов достигается без увеличения мощности, рассеиваемой в коллекторе, и нагрузки источников.

Для того, чтобы на каждом радиусе скорость электронов совпадала со скоростью антипротонов, надо в области охлаждения создать радиальный градиент электрического потенциала. Для этого сверху и снизу - над и под орбитой - на участке охлаждения натягиваются изолированные проволоки с распределённым по ним потенциалом. Максимальное напряжение на этих проводниках $\pm 5\%$ от полного. Таким образом, затухание будет определяться только разбросом поперечных скоростей и будет вызывать уменьшение только амплитуд бетатронных колебаний. После того, как "температура" антипротонного газа уменьшится, скорость электронного охлаждения резко возрастает, и,снимая потенциал с камеры, можно довольно быстро стянуть все антипротонные пучки к одной равновесной орбите.

Соответствующие эксперименты по ускорению и замедлению протонного пучка охлаждающими его электронами при изменении энергии последних проведены с положительным результатом на экспериментальной установке НАП-М.

IУ. ОБЩАЯ БЛОК-СХЕМА И СХЕМА РАБОТЫ УСТАНОВОК В РЕЖИМЕ ДЛИТЕЛЬНОГО НАКОПЛЕНИЯ

Схематически комплекс (рис.2) состоит из следующих элементов:

I. Синхротрон на 76 ГэВ со всеми инжекторными устройствами и т.п. При максимальных требованиях на число антипротонов может оказаться необходимой некоторая переделка ВЧ-системы с тем, чтобы все частицы собрать в конце ускорения в один сгусток длиной меньше периметра НАП (или несколько сгустков такой же длины при использовании нескольких накопителей НАП). Того же результата можно достичь с помощью системы, укладывающей одновременно несколько сгустков в один НАП (система каналов-задержек). При менее жестких требованиях можно ограничиться имеющейся системой,

попытавшись увеличить число частиц в одной сепаратрисе.

2. Протон-антипротонная конверсионная система с линзами многократного использования при магнитных полях в них порядка нескольких сот килогаусс (рис.I).

3. Накопитель-охладитель антипротонов - установка НАП со средним радиусом 7,5 м с кинетической энергией антипротонов I,I ГэВ (импульс I,8 ГэВ/с).

4. Система электронного охлаждения с тороидальным магнитным полем. Ток катода IOOA, циркулирующий ток I,4 кА, энергия электронов - 0,6 МэВ. Поскольку в тороидальном продольном магнитном поле неизбежно имеется область, где ток электронов течёт в обратном направлении, возможно использование системы одновременно на два накопителя НАП, расположенные друг над другом, что может оказаться полезным при инжекции из нескольких сепаратрис синхротрона.

5. Промежуточный накопитель антипротонов. Для него может быть выбрана магнитная система типа НАП-М с уменьшенной апертурой при энергии I,I ГэВ или другая фокусирующая структура, допускающая длинные промежутки для (упрощенной) системы электронного охлаждения.

6. Основной базовый ускоритель-накопитель на энергию I ТэВ.

Характерной особенностью магнитной системы ускорителя-накопителя для осуществления эффективной работы в режиме встречных пучков является необходимость иметь в месте встречи пучков малое значение β - функции, что следует из (4). Детальный анализ позволяет надеяться создать магнитную структуру, имеющую значение β -функции вплоть до десяти сантиметров. Кроме поперечных размеров, необходимо уменьшение и длины сгустков до значений порядка значения β -функции.

В обсуждаемом проекте речь идёт об очень больших временах существования пучков. Нет оснований надеяться на внешнее подавление шумов в магнитном поле и ВЧ-системе до такого уровня, при котором метровый и, тем более, десятисантиметровый сгусток сохранит свои размеры в течение 10^6сек. Однако можно попробовать бороться с этими эффектами, используя автоподстройку ВЧ по пучку таким образом, чтобы в результате воздействия шумов происхо-

дили колебания пучка как целого, без возбуждения некогерентных колебаний. Полезными могут оказаться переход на очень короткие длины волн ВЧ-системы при высоком напряжении на резонаторах, что повышает частоты фазовых колебаний, а также введение среднего трения, пусть даже и небольшого.

С точки зрения использования синхротрона и базового ускорителя для других экспериментов, а также для решения принципиальных вопросов, связанных с большим временем существования пучка на высокой энергии без затухания, наиболее перспективным может оказаться метод работы с утилизацией накопленных антипротонов между циклами подъёма и спуска магнитного поля в базовом ускорителе. На первый взгляд, такая утилизация кажется тривиальной. Для этого достаточно провести всю последовательность перепусков между ускорителем и накопителем антипротонов в обратном порядке. В режиме полной утилизации появляется новая идеология процесса накопления, напоминающая идеологию ВЭПП-2М. Между двумя подъёмами и спусками поля необходимо добавлять антипротоны в количестве, равном потерям частиц за счёт взаимодействия с остаточным газом и встречным пучком, т.е. много меньше, чем без процесса утилизации (см.I). Время жизни пучка на высокой энергии в этом случае достаточно сделать в несколько раз больше времени подъёма и спуска поля в базовом накопителе, чтобы это практически не сказалось на средней светимости. При этом, резко облегчается решение вопросов борьбы с шумами и другие проблемы, связанные с длительным существованием пучков. В таком режиме в систему вводится среднее затухание, время которого равно длительности одного цикла. После каждого цикла пучок возвращается обновленным. Конечно, такой режим требует определённой гигиены и аккуратности в процессах замедления, ускорения и перепусков.

Отметим, что при работе с утилизацией базовый ускоритель-накопитель работает как обычный ускоритель на I ТэВ несколько пониженной интенсивности, поскольку утилизировать надо только антипротоны, а протоны можно в каждом часто повторяющемся цикле выбрасывать на мишень.

7. Система впуска-выпуска и система каналов, соединяющих

следующие установки:

а) синхротрон-конверсионная система;
б) конверсионная система - накопитель-охладитель НАП;
в) НАП - промежуточный накопитель;
г) промежуточный накопитель - синхротрон;
д) синхротрон - базовый ускоритель-накопитель.

Приведенная последовательность перечисления каналов отражает и последовательность перепуска частиц при инжекции антипротонов. Последовательность накопления антипротонов во времени можно представить себе следующим образом. Синхротрон и вся система накопления антипротонов работают непрерывно в течение времени, пока светимость в основном (базовом) накопителе не уменьшится заметно за счёт потери частиц и расширения пучка. После этого магнитное поле базового накопителя опускается до энергии частиц 76 ГэВ. Оставшиеся в накопителе частицы сбрасываются (выпускаются) на любой энергии и могут быть использованы для экспериментов на мишенях с протонным и антипротонным пучками, а накопленные в промежуточном накопителе и ускоренные после этого в синхротроне антипротоны впускаются в базовый ускоритель-накопитель. Следующим импульсом синхротрона инжектируется равное количество протонов. После этого поле ускорителя-накопителя вновь поднимается до предельного (или соответствующего выбранной энергии эксперимента). Такие циклы, как уже указывалось, должны проводиться крайне редко.

Достоинством такого метода является возможность работы при постоянных параметрах в течение длительного времени. Это позволяет настраивать систему с высокой точностью, добиваться предельно большого значения $\Delta\nu$ и, соответственно, высокой светимости. Однако, как указывалось, этот метод содержит в себе принципиальный, пока ещё не решенный элемент, а именно, необходимость долгого существования короткого пучка при отсутствии затухания.

Проведенный анализ показывает, что метод электронного охлаждения позволяет при использовании Серпуховского синхротрона в качестве инжектора протонов накапливать достаточное количество антипротонов для осуществления на основном кольце ускорителя-накопителя встречных протон-антипротонных пучков очень высокой

светимости на предельную энергию проектируемой Серпуховской машины. Использование разработок, проведенных в Новосибирске, позволяет придать системе накопления антипротонов конкретный вид, а проведенные экспериментальные исследования и технические испытания элементов и большие запасы, заложенные в проекте, дают достаточную уверенность в его практической осуществимости.

Литература

I.Г.И.Будкер, Я.С.Дербенев, Н.С.Диканский, В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, Б.Н.Сухина, А.Н.Скринский. "АЭ" 40, №I, 49 (I976).

2. Report of VAPP-NAP Group in Proccedings of 8-th Intern. Conf. on High-Energy Accelerators, CERN, p72 (1971)

3.Б.Ф.Баянов, Г.И.Будкер, Г.С.Виллевальд, Т.А.Всеволожская, В.Н.Карасюк, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский. "Система эффективной протон-антипротонной конверсии". Доклад на У Всесоюзном совещании по уск.заряж.частиц, г.Дубна (I976).

4.В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Р.А.Салимов, А.Н.Скринский, В.Г.Файнштейн. ЖТФ 46, №8, I678 (I976).

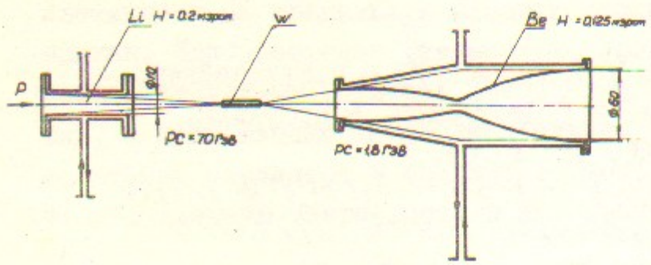
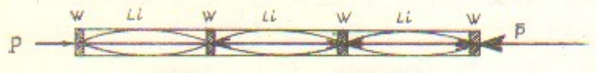


Рис.I. Две схемы протон-антипротонной конверсии

а)



б)

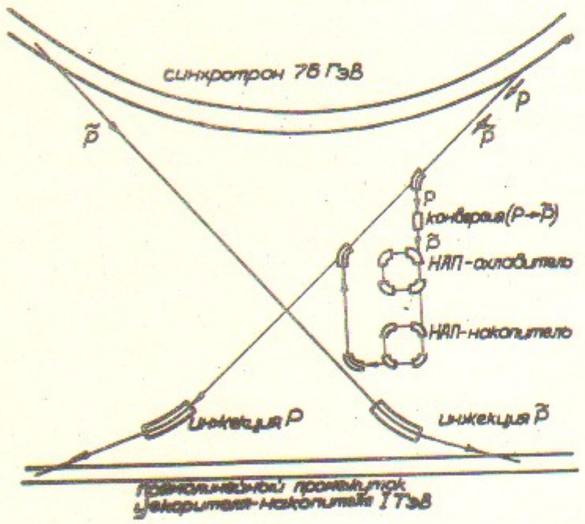


Рис.2. Схема протон-антипротонного комплекса.

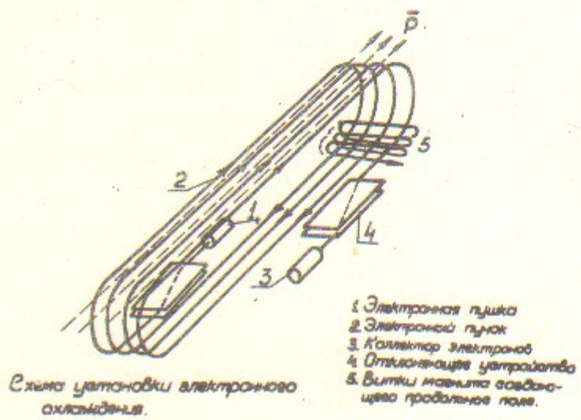


Рис.3. Схема установки электронного охлаждения.

Работа поступила - 26.7-1976г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
Подписано к печати 28.9-1976г. МН 02987
Усл. I,0 печ.л., 0,9 учетно-изд.л.
Тираж 200 экз. Бесплатно
Заказ № 93.

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР