

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ 1984 ГОДА

539.12

СТОХАСТИЧЕСКОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ И НАКОПЛЕНИЕ АНТИПРОТОНОВ

С. ван дер Меер

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА СОЗДАНИЯ ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКОВ

Большой проект, осуществление которого было отмечено Нобелевской премией по физике за 1984 г., кроме собственно экспериментов, описанных К. Руббиа, включает сложные установки для осуществления столкновений высокогенергетических протонов и антипротонов (рис. 1). Антипротоны получались при бомбардировке медной мишени протонами с импульсом 26 ГэВ/с,

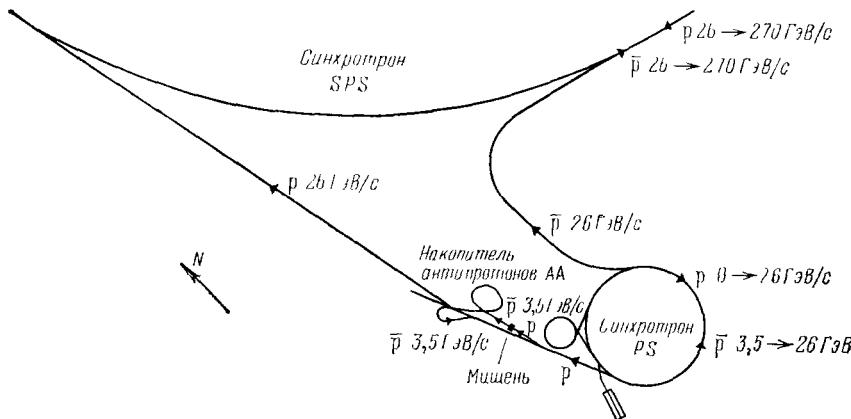


Рис. 1. Общая схема проекта

ускоренными в синхротроне PS. Каждые 2,4 с сгусток протонов с импульсами около 3,5 ГэВ/с направлялся в накопитель антипротонов AA. Типичное время накопления составляло несколько дней. После накопления достаточно большого количества антипротонов ($\sim 10^{11}$) они выводились из накопителя AA, инжектировались в синхротрон PS, где ускорялись до импульса 26 ГэВ/с, и затем выводились в кольцо большого (2,2 км диаметром) синхротрона SPS. Незадолго до этого в противоположном направлении в синхротрон SPS инжектировались протоны с импульсом 26 ГэВ/с, также ускоренные в синхротроне PS. Протоны и антипротоны ускорялись вместе до высокой энергии (270 или 310 ГэВ) и продолжали циркулировать в течение нескольких часов. Встреча сгустков (по 3 сгустка длительностью ~ 4 нс в каждом из пучков) происходила в шести определенных местах взаимодействия кольца SPS, в двух из которых размещалась экспериментальная

*) Van der Meer S. Stochastic Cooling and Accumulation of Antiprotons: Nobel Lecture. Stockholm, 11 December, 1984. — Перевод А. В. Агафонова.

© The Nobel Foundation 1985.

© Перевод на русский язык,
издательство «Наука», Главная редакция
физико-математической литературы,
«Успехи физических наук», 1985.

аппаратура. Столь сложный процесс мог быть осуществлен только благодаря усилиям и преданности нескольких сотен сотрудников. В данной лекции невозможно рассказать обо всем, и я выбрал темой лекции стохастическое охлаждение — метод, который использовался для накопления антипротонов и над которым мне приходилось непосредственно работать.

2. ОХЛАЖДЕНИЕ — ЗАЧЕМ И КАК?

Центральным понятием физики ускорителей является фазовое пространство, которое хорошо известно и в других областях физики. Любой ускоритель или накопитель характеризуется аксептансом, определяемым на языке фазового объема. В накопителе антипротонов должно захватываться большое количество антипротонов, выходящих с мишени, и он должен обладать большим аксептансом, много большим, чем у синхротрона SPS, в котором в конце концов накапливаются антипротоны. Поэтому приходится уменьшать фазовый объем пучка и увеличивать плотность пучка в фазовом пространстве. Увеличивать плотность необходимо с самого начала, поскольку накопление пучка антипротонов осуществляется путем многократной инжекции сгустков. Действительно, плотность частиц в 6-мерном фазовом пространстве в накопителе AA возрастает в 10^9 раз.

Казалось бы, такой процесс идет в нарушение теоремы Лиувилля, запрещающей любые изменения фазового объема посредством консервативных сил, таких, которые создаются электромагнитными полями в ускорителях. Все, что они могут сделать, так это исказить форму фазового объема пучка частиц, не изменяя нигде плотность.

К счастью, можно воспользоваться небольшой хитростью, основываясь на том факте, что в фазовом пространстве частицы представляются точками, разделенными пустым пространством. Мы можем подтолкнуть каждую частицу к центру распределения, выжимая наружу пустое пространство между ними. Естественно, что микромасштабная плотность строго сохраняется, однако в макроскопическом смысле плотность частиц растет. Такой процесс и называется охлаждением, поскольку при этом относительное движение частиц уменьшается.

Конечно, мы можем осуществить такой процесс, только имея информацию о положении отдельных частиц в фазовом пространстве и воздействуя именно на отдельные частицы. Без этих двух предпосылок было бы непонятно, почему частицы, а не пустое пространство выталкиваются внутрь. Таким образом, система стохастического охлаждения должна состоять из датчика (сигнальных электродов), регистрирующего частицы, и исполняющего устройства, действующего на частицы и возбуждаемого усиленным сигналом с сигнальных электродов.

Такая система подобна демону Максвелла, который, как иногда считают, уменьшает энтропию газа, текущего заведенным порядком, и нарушает второй закон термодинамики в этом процессе. Как показал Сциллард¹, измерения, проводимые демоном, сопровождаются ростом энтропии, который и компенсирует любое уменьшение энтропии газа. Кроме того, в реальных системах стохастического охлаждения исполняющее устройство действует далеко не обратимо; поэтому эти системы даже менее дьявольские, чем сам демон.

3. КАЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ БЕТАТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Наиболее просто можно объяснить охлаждение одиночной частицы, циркулирующей в кольце. На рис. 2 показано, как это осуществляется в горизонтальной плоскости. (Обычно охлаждение в горизонтальной и вертикальной плоскостях и в продольном направлении осуществляется независимо.)

Под действием фокусирующих сил частица совершает бетатронные колебания относительно центральной орбиты. При каждом прохождении частицы так называемые дифференциальные сигнальные электроды вырабатывают короткоимпульсный сигнал, амплитуда которого пропорциональна смещению частицы от центральной орбиты. Этот сигнал усиливается и подается на исполняющее устройство, которое осуществляет отклонение частицы. Если между сигнальными электродами и исполняющим устройством укладывается нечетное число четвертей длин волн бетатронных колебаний и если коэффициент усиления выбран правильно, колебания демпфируются. Сигнал должен приходить на исполняющее устройство в то время,

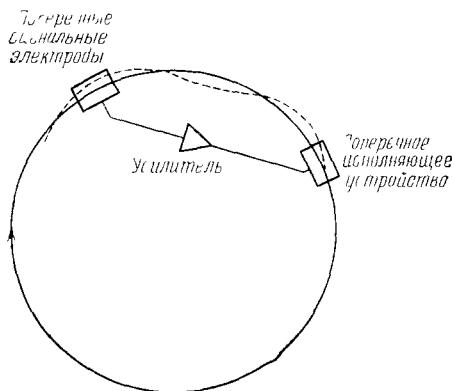


Рис. 2. Схема системы охлаждения горизонтальных бетатронных колебаний одиночной частицы

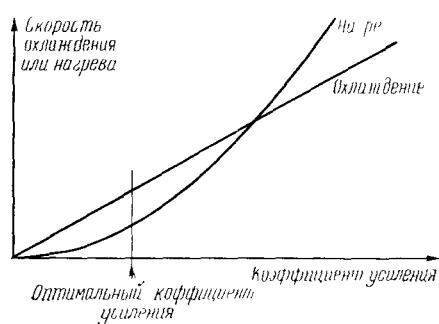


Рис. 3. Зависимость скорости когерентного охлаждения и некогерентного нагрева от коэффициента усиления системы

когда мимо него проходит частица; вследствие того, что при передаче и усилении сигнала возникает временная задержка, путь, по которому идет этот сигнал, должен быть короче длины траектории частицы.

В действительности имеется не одна частица, а много (например, 10^3 или 10^{12}). Ясно, что даже при наличии самой быстродействующей электроники их сигналы будут перекрываться. Тем не менее сигнал от каждой отдельной частицы все же будет присутствовать и будет влиять на охлаждение. Однако теперь мы должны будем уменьшить коэффициент усиления системы, поскольку сигналы от всех других частиц, перекрывающиеся в течение характерного времени реакции системы, будут оказывать возмущающее влияние (нагрев) из-за случайного, в общем случае, распределения по фазам. К счастью, влияние возмущений в среднем оказывается равным нулю и нагрев (т. е. увеличение среднего квадрата амплитуды) происходит только благодаря наличию членов второго порядка. Он пропорционален квадрату коэффициента усиления, в то время как эффект охлаждения — действие частицы на самое себя — зависит от коэффициента усиления линейно. Как показано на рис. 3, мы всегда можем выбрать такой коэффициент усиления, что эффект охлаждения будет доминировать.

4. УПРОЩЕННЫЙ АНАЛИЗ ПОПЕРЕЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Проанализируем теперь процесс, кратко и довольно упрощенно рассмотренный выше, пренебрегая некоторыми эффектами, о которых скажем ниже. Цель данного раздела — дать некоторые представления о возможностях метода, не усложняя картину второстепенными деталями.

В первую очередь предположим, что система обладает постоянным коэффициентом усиления в полосе частот W и нулевым коэффициентом усиления вне этого диапазона. Сигнал, пропускаемый такой системой, может

быть полностью описан посредством $2W$ выборок в единицу времени. Если в кольце имеется N частиц и период их обращения равен T , то каждая выборка будет в среднем содержать информацию о

$$N_s = \frac{N}{2WT} \quad (1)$$

частицах. Существует два подхода:

1) мы можем следить за каждой отдельной частицей и сочетать охлаждение ее собственным сигналом с нагревом за счет сигналов от других частиц;

2) мы можем следить за группами частиц (выборками), о которых говорилось выше, и рассматривать каждую группу как одиночную частицу (ситуация, показанная на рис. 1); такой подход оправдан тем, что сигналы от групп частиц хорошо разрешаются системой.

Эти два подхода эквивалентны и приводят к одинаковому результату. В данном случае мы примем вторую точку зрения. Между прочим, термин «стохастическое охлаждение» возник из данной точки зрения, поскольку мы имеем дело со стохастическим сигналом от случайных выборок². Однако ясно, что первая точка зрения более основательна; охлаждение не является стохастическим процессом.

Сигнальные электроды дают информацию о среднем смещении \bar{x} каждой группы частиц. Чтобы уменьшить его до нуля и сместить каждую частицу с координаты x на $x - \bar{x}$, надо подобрать соответствующий коэффициент усиления. Усредняя по многим случайным группам частиц, получаем, что средний квадрат \bar{x}^2 определяется как

$$\overline{(x - \bar{x})^2} = \bar{x}^2 - \bar{x}^2.$$

Поэтому уменьшение \bar{x}^2 на одном обороте есть $\bar{x}^2/\bar{x}^2 = 1/N_s$, а скорость охлаждения (определенная как обратное время охлаждения) равна $1/\tau = 1/N_s T$. В действительности эту скорость надо еще уменьшить в 4 раза. Первый из коэффициентов $1/2$ обусловлен тем, что, как показано на рис. 2, амплитуда бетатронных колебаний не всегда достигает максимального значения вблизи сигнальных электродов. Поэтому как на сигнальных, так и на исполняющих устройствах амплитуда сигнала определяется с точностью до коэффициента, равного синусу случайной фазы; среднее от квадрата синуса как раз и дает коэффициент $1/2$. Другой коэффициент $1/2$ появляется в связи с тем, что скорость охлаждения определяют обычно не через квадрат амплитуды, а через ее среднеквадратичное значение. Таким образом, с учетом выражения (1) получаем

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{4N_s T} = \frac{W}{2N}. \quad (2)$$

Этот довольно приближенный результат показывает непригодность стохастического охлаждения как практического средства в протонных ускорителях; при типичном значении $N = 10^{13}$ скорость охлаждения оказывается малой по сравнению с частотой повторения импульсов ускорителя, даже если полоса рабочих частот составляет несколько ГГц. Однако для накопительных колец этот метод вполне подходит, поскольку допустимое время охлаждения больше, а интенсивность пучка может быть ниже.

5. ПЕРЕМЕШИВАНИЕ И ТЕПЛОВОЙ ШУМ

При выводе выражения для скорости охлаждения мы считали, что положение частиц в группах случайно и не коррелировано на последовательных оборотах. Основная причина изменения положения частиц состоит в наличии энергетического разброса, ведущего к разбросу частот обращения

частиц. Частицы могут обгонять друг друга, и, если разброс времени оборота велик по сравнению с длительностью выборки, мы характеризуем это как «хорошее перемешивание»; в этом случае справедливым остается приведенный выше вывод. На практике редко удается реализовать такую идеальную ситуацию. В частности, большой разброс частот обращения ультраколлимативистских частиц можно получить только за счет большого разброса в диаметрах орбит; при данной апертуре камеры ускорителя это требует уменьшения допустимого разброса по импульсам.

Нетрудно показать, как влияет плохое перемешивание на охлаждение. При выводе скорости охлаждения заменим смещение \bar{x} на меньшую величину $g\bar{x}$. Проводя аналогичные вычисления, получаем

$$\frac{1}{\tau} = \frac{W}{2N} (2g - g^2). \quad (3)$$

Ясно, что это выражение достигает максимума при $g = 1$.

Эти два члена описывают когерентный эффект охлаждения (каждая частица охлаждается своим собственным сигналом) и некогерентный эффект нагрева за счет других частиц соответственно³. Влияние именно второго эффекта и растет при плохом перемешивании из-за корреляции на последовательных оборотах. Нагрев может быть также обусловлен появлением в сигнале тепловых шумов (возникающих обычно в усилителе на первой ступени усиления сигнала от сигнальных электродов). Таким образом, вводя коэффициент перемешивания M (в идеальном случае $M = 1$) и коэффициент тепловых шумов U (равный отношению мощностей шум/сигнал), получаем

$$\frac{1}{\tau} = \frac{W}{2N} [2g - g^2 (M + U)].$$

При оптимальном значении g ($g_{\text{опт}} < 1$)

$$\frac{1}{\tau} = \frac{W}{2N (M + U)}. \quad (4)$$

6. АНАЛИЗ ОБЛАСТЕЙ ЧАСТОТ

Такой качественный анализ можно сделать более точным, развертывая процесс не по времени, а по частотам^{4, 5}.

При каждом прохождении мимо сигнальных электродов (считаем их идеальными) каждая частица наводит сигнал в виде дельта-функции. Фурье-преобразование по частотам сигнала, снимаемого с суммовых сигнальных электродов, который не зависит от поперечного смещения, дает составляющие на каждой гармонике частоты обращения (рис. 4), в то время как для дифференциальных сигнальных электродов каждая линия расщепляется на две из-за модуляции бетатронными колебаниями⁶. Наложение сигналов от многих частиц с слабо отличающимися частотами обращений приводит к слиянию этих линий в полосы, которые называются полосами Шоттки. Они представляют собой шумы, обусловленные конечным числом носителей заряда, как это описывал Шоттки⁶.

Ширина этих полос увеличивается с ростом частоты, а полная мощность остается одинаковой для каждой полосы. Таким образом, плотность мощности меньше в более широких полосах на высоких частотах, до тех пор пока они не начинают перекрываться; в высокочастотной области полосы сливаются и плотность мощности перестает зависеть от частоты. Все это показано на рис. 5 для так называемых продольных линий (для суммовых сигнальных электродов).

Процесс охлаждения можно теперь описать следующим образом. Во-первых, каждая частица охлаждается своим собственным (когерентным)

сигналом. Это означает, что на частотах линий Шоттки фаза соответствующего синусоидального сигнала на исполняющих устройствах должна подбираться так, чтобы воздействие оказывалось на частицу в правильном направлении. Во-вторых, некогерентный нагрев, осуществляемый другими частицами на каждой линии Шоттки, пропорционален плотности мощности шумов вблизи этой линии.⁷ То есть вклад в нагрев будут давать только те

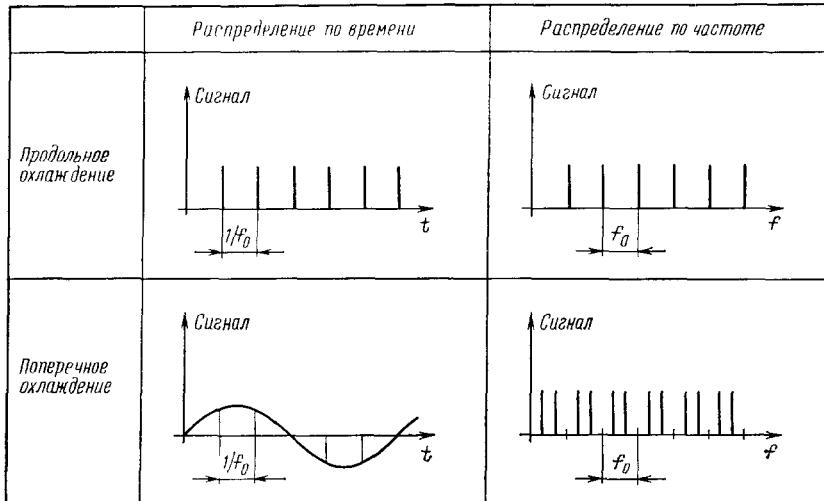


Рис. 4. Распределение сигналов Шоттки по времени и по частоте

частицы, частоты обращения которых близки к частоте возмущенной частицы. Естественно, кроме плотности мощности шумов Шоттки надо учитывать и плотность мощности тепловых шумов.

Для достижения оптимального режима охлаждения коэффициент усиления в каждой полосе Шоттки надо выбирать, исходя из оптимального

баланса между этими двумя эффектами. Если полосы разнесены по частотам, плотность мощности выше в низкочастотной полосе. Следовательно, коэффициент усиления должен быть меньше в этих полосах, что ведет к худшему охлаждению. Это и есть тот самый эффект, который мы называли плохим перемешиванием при рассмотрении процесса во времени. В

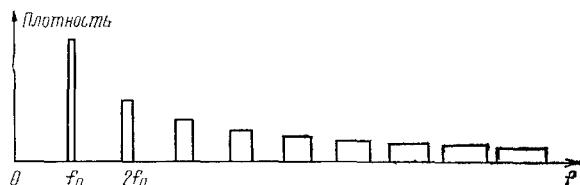


Рис. 5. Продольные полосы Шоттки, создаваемые группой многих частиц со слабо отличающимися частотами обращения.

В области высоких частот полосы перекрываются

в высокочастотной области, где полосы перекрываются, коэффициент усиления не должен зависеть от частоты.

Заметим, что описанная выше картина (т. е. нагрев, обуславливаемый сигналами с частотами, близкими к частотам Шоттки частицы) полностью отличается от временной картины процесса, где казалось, что вклад вносят все частицы группы, независимо от их действительной частоты обращения. Фактически, последнее верно только в том случае, когда перемешивание частиц идеальное и выборки статистически независимы. В более общем случае как оптимальный коэффициент усиления, так и оптимальная скорость охлаждения на одной линии обратно пропорциональны плотности dN/df вблизи линии, а не полному числу частиц N . В временном рассмотрении это

отражалось введением коэффициента перемешивания M , однако зависимость параметров от частоты была потеряна.

Существует еще один эффект, связанный с перемешиванием, о котором мы до сих пор не упоминали. При движении от сигнальных электродов до исполняющих устройств каждая группа частиц всегда будет до определенной степени смешиваться с соседними. На языке частот этот вредный эффект можно описать как отставание по фазе, растущее с увеличением частоты (частицы, обладающие наибольшей частотой обращения, достигают исполняющих устройств слишком рано, так что сигнал, наведенный ими на сигнальных электродах, запаздывает). Кажется, что даже, используя фильтры в каждой полосе Шоттки, достаточно трудно скорректировать это запаздывание; однако в практических встречающихся ситуациях данный эффект обычно не очень существен⁸.

7. СИСТЕМА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ПУЧКУ

Другой аспект проблемы, с которым мы еще не сталкивались, но который существен для правильного анализа работы системы охлаждения — это петля обратной связи, включающая в себя цепь охлаждения вместе с откликом пучка (рис. 6). Любой сигнал, поданный на исполняющее устройство, приводит к когерентной модуляции пучка (модуляцию положения поперечными исполняющими устройствами и модуляцию по энергии или по плотности продольными). Эта модуляция смазывается перемешиванием частиц, однако какая-то часть ее всегда доходит до сигнальных электродов, замыкая петлю обратной связи.

Отклик пучка достаточно хорошо исследован в теории неустойчивостей пучков в накопительных кольцах. Однако для целей охлаждения его анализ несколько отличается, поскольку области возбуждения и регистрации разнесены в пространстве^{5, 9}. Здесь не имеет смысла обсуждать все детально; однако можно сказать, что если известно распределение частиц по частотам обращения, а также некоторые из параметров накопительного кольца, то расчет отклика пучка как функции частоты не представляет проблемы.

Как отмечалось выше, если полосы Шоттки не перекрываются и можно пренебречь тепловыми шумами, то оптимальный для охлаждения коэффициент усиления реализуется для разорванной петли обратной связи и по абсолютной величине равен единице. При этом фаза сигнала в усилительной цепи отклика должна быть противоположна фазе отклика пучка⁸. В результате оказывается, что в центре распределения оптимальный коэффициент усиления петли в случае поперечного охлаждения должен быть равен -1 . Как только система включается, амплитуда когерентного обратного сигнала становится равной половине амплитуды сигналов Шоттки. Это дает очень удобный метод регулировки коэффициента усиления; правильность установки фазы можно проверить, разрывая где-нибудь петлю обратной связи измеряя ее полный отклик анализатором¹⁰.

8. ПРОДОЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

До сих пор я описывал в основном поперечное охлаждение, т. е. уменьшение амплитуды бетатронных колебаний. Продольное охлаждение уменьшает энергетический разброс и приводит к увеличению продольной плотности. Этот процесс наиболее важен для накопления антипротонов.

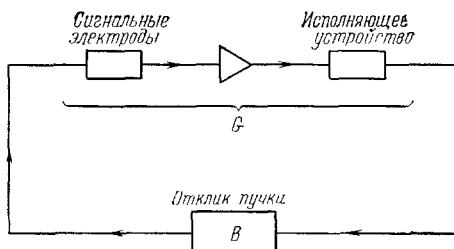


Рис. 6. Эффект обратной связи по пучку. Петля обратной связи замыкается когерентным откликом пучка B .

Один из методов продольного охлаждения (иногда его называют «охлаждением Пальмера»¹¹) очень похож на тот, который показан на рис. 2. Как и ранее, воспользуемся дифференциальными сигнальными электродами, но поместим их в то место, где наиболее велика дисперсия орбит, т. е. там, где положение частицы сильно зависит от ее импульса. Исполняющие

устройства должны теперь обеспечить воздействие на частицы в продольном направлении.

Другой метод состоит в использовании суммовых сигнальных электродов (рис. 7) и выделении частиц с различной энергией посредством введения в систему фильтра («метод Торндала»¹²). Он основан на том, что для частиц разной энергии частоты Шоттки отличаются; функция фильтра состоит в изменении фазы сигнала на 180° в середине полосы, чтобы подтолкнуть частицы с обеих сторон к центру. Такой фильтр можно сделать на основе длинных линий, свойства которых периодически зависят от частоты. В качестве примера на

Рис. 7. Схема системы охлаждения на фильтре

рис. 8, а показан такой фильтр. Линия, закороченная на дальнем конце, ведет себя как закоротка на всех резонансных частотах, которые можно подобрать так, чтобы они совпадали с центром полос Шоттки. Выше этих частот линия обладает индуктивным импедансом, ниже — емкостным; таким

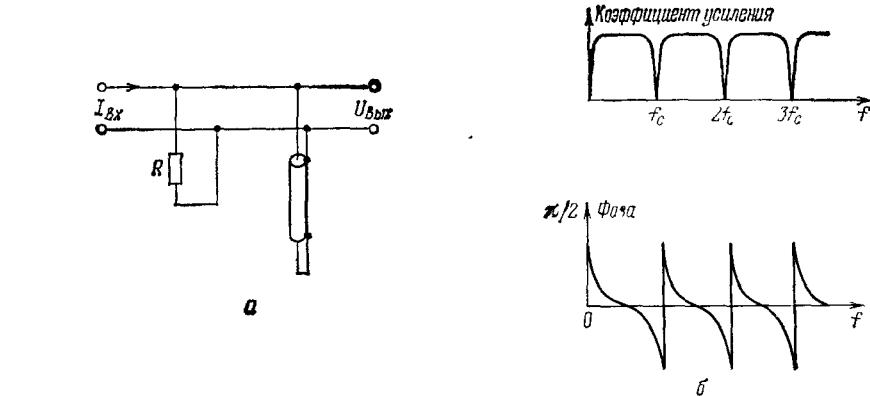


Рис. 8. а — Простой фильтр на передающей линии; б — амплитудо-частотная и фазочастотная характеристики

образом достигается скачок фазы на 180° (рис. 8, б). Если частицы релятивистские, длина линии должна составлять половину длины окружности кольца. Иногда применяют более сложные фильтры на нескольких линиях и/или активные цепи обратной связи¹⁰.

Преимущество применения фильтров, особенно для пучков малой интенсивности, состоит в том, что ослабление сигнала на центральных частотах производится после предусилителя, а не до него, как в случае дифференциальных сигнальных электродов. Поэтому отношение сигнал/шум получается существенно выше. Кроме того, на частотах ниже примерно 500 МГц, где допустимо уже применение ферритов, суммовые сигнальные электроды можно сделать более короткими, чем дифференциальные, и, следовательно,

освободить место для другого оборудования. Это также позволяет улучшить отношение сигнал/шум. Конечно, на практике применять охлаждение с помощью фильтров можно, если полосы Шоттки разнесены по частотам (плохое перемешивание).

9. СИГНАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ И ИСПОЛНИЯЩИЕ УСТРОЙСТВА

Часто система охлаждения имеет октавную полосу частот с наивысшей частотой, в два раза большей наименее. Сигнальные электроды, обладающие разумно плоской частотной характеристикой, могут быть сделаны из петель,

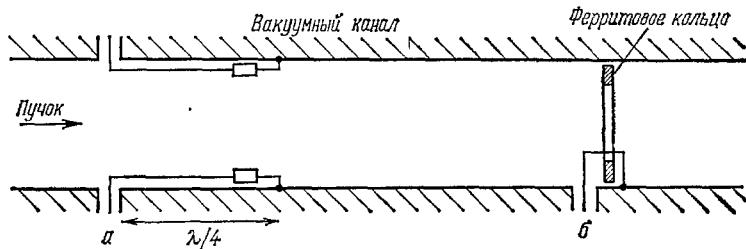


Рис. 9. Петлевой и кольцевой ферритовые сигнальные электроды (исполняющее устройство имеет аналогичный вид).

Отметим, что для петлевого устройства, работающего в режиме исполнения, направление пучка должно быть противоположным

длина которых равна четверти длины волны в середине полосы частот (рис. 9, a). На дальнем конце устанавливается согласующее сопротивление, предотвращающее отражение сигнала (или, на языке частот, для обеспечения правильного фазового соотношения между частицами и сигналом). Две петли, расположенные с разных сторон от пучка, можно коммутировать различным образом и использовать их либо в качестве суммовых, либо дифференциальных сигнальных электродов. Одна и та же структура может выполнять функции сигнальных или исполняющих устройств. Суммовые сигнальные или исполняющие устройства могут изготавливаться из феррита с одной или несколькими петлями вокруг (рис. 9, б).

В области высоких частот (обычно >1 ГГц) представляет интерес применение разрезных сигнальных или исполняющих устройств¹³ (рис. 10). Поле, создаваемое частицей, проникает в передающую линию, расположенную за щелями. Если щель короче, чем $\lambda/2$, то коэффициент связи мал и вклады от каждой щели могут суммироваться, при условии, что скорость распространения сигнала вдоль линии равна скорости частицы. Используя множество подобных элементов и усиливая мощность сигнала в согласованных общих цепях, можно улучшить отношение сигнал/шум для сигнальных электродов. Кроме того, для этих целей применяется охлаждение согласующих сопротивлений и/или предусилителей до криогенных температур.

Применение нескольких исполняющих устройств вместо одного позволяет уменьшить полную требуемую мощность. Иногда этот фактор ограничивает скорость охлаждения.

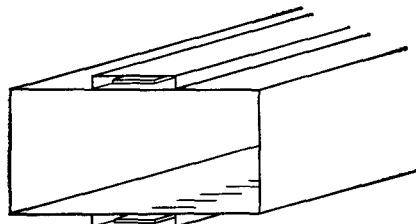


Рис. 10. Конструкция разрезных сигнальных и исполняющих устройств.

Один из концов линии нагружен резистором с импедансом, равным характеристическому импедансу линии

10. НАКОПЛЕНИЕ АНТИПРОТОНОВ; СТОХАСТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ НАКОПЛЕНИЯ

Теперь можно объяснить, как работает накопитель антипротонов. Однако в первую очередь следует подчеркнуть, что стохастическое охлаждение — не единственный метод, подходящий для этой цели. В самом деле, еще в 1966 г. Г. И. Будкер¹⁴ предложил схему создания встречных pp-пучков, в которой охлаждение должно было осуществляться электронами — так называемый метод электронного охлаждения. Холодный электронный пучок, проходя вместе с антипротонами, должен охлаждать последний посредством электромагнитных взаимодействий (рассеяния).

Первоначально мы и хотели воспользоваться этой идеей. Однако, как оказалось, для эффективного охлаждения высокосмиттансного пучка его

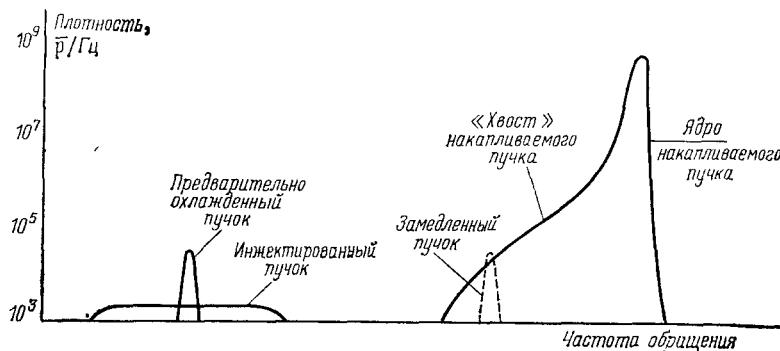


Рис. 11. Распределение плотности по частотам обращения в накопителе антипротонов. Справа показан накапленный пучок, слева — вновь инжектированный струек до и после предварительного охлаждения

частицы должны обладать небольшой энергией. То есть необходимо строить дополнительное кольцо для замедления антипротонов. Поэтому мы предпочли более простой стохастический метод охлаждения в одном накопительном кольце с фиксированным магнитным полем.

На рис. 11 показана зависимость плотности частиц от частоты обращения (или от энергии, положения центральной орбиты и т. п.; по горизонтальной оси можно отложить любую из этих величин). Справа показан уже накапленный пучок. Слева — пучок малой плотности, инжектируемый каждые 2,4 с. Положение последнего отличается от положения накапленного пучка в тех местах окружности кольца, где велика дисперсия структуры. Поэтому в таком месте инжекционный импульсный магнит может сдвигать инжектируемые частицы, не воздействуя на накапленный пучок. Сигнальные и исполняющие устройства, применяемые на первой ступени охлаждения (предварительное продольное охлаждение) размещаются здесь же. Реально они представляют собой ферритовые структуры, окружающие инжектируемый пучок (рис. 12). Сигнальные электроды работают в суммовом режиме (200 электродов, каждый длиной 25 мм вдоль направления пучка), а для охлаждения используется система Торнада с фильтрами¹⁵. На рис. 13 показано, как в течение 2 с на порядок уменьшается ширина распределения. Число антипротонов составляет $\sim 7 \cdot 10^6$, рабочая полоса частот 150—500 МГц.

После предварительного охлаждения половина ферритовых структур сдвигается вниз быстрым исполнительным механизмом¹⁶ и предварительно охлажденный пучок может группироваться ВЧ напряжением и сдвигаться, замедляясь, к низкочастотному «хвосту» накапливаемого пучка (см. рис. 11). В целом, весь процесс, включая перемещение вверх «затвора» для возвращения на место сигнальных и исполняющих устройств, занимает 400 мс.

Затем плавно выключается ВЧ напряжение ¹⁷, пучок разгруппировывается, и частицы «осаждаются» в хвосте накапливаемого пучка.

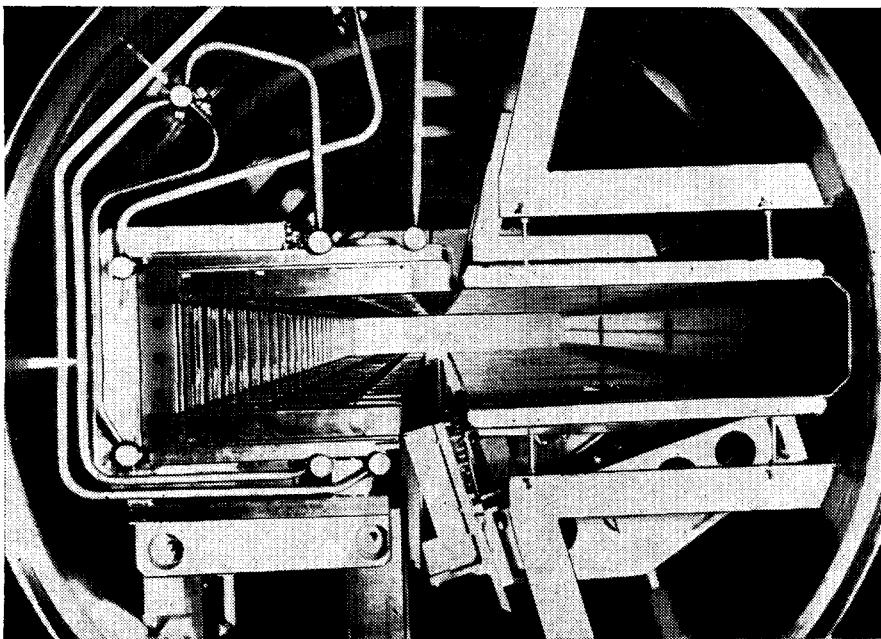


Рис. 12. Внутри вакуумной камеры слева видны исполняющие устройства системы предварительного охлаждения, а справа — пустое пространство, в котором циркулирует накапленный пучок.

В центре фотографии — разомкнутые ферритовые структуры исполняющих устройств. Они замыкаются ферритовыми стержнями, смонтированными на затворном механизме, который вращается относительно оси, находящейся далеко справа

В течение последующих 2,4 с их надо убрать отсюда, поскольку теорема Лиувилля запрещает вводить следующий сгусток в то же самое место, не убирая предыдущие частицы. Поэтому с помощью другой системы продольного охлаждения с рабочей полосой частот 250—500 МГц осуществляется сдвиг этих частиц в сторону более высоких частот обращения по градиенту плотности ¹⁸.

Коэффициент усиления второй системы накопления должен зависеть от энергии (или от частоты обращения). В действительности градиент плотности резко растет к центру накапливаемого пучка (заметим, что на рисунке плотность отложена в логарифмическом масштабе) и для оптимального охлаждения коэффициент усиления должен меняться обратно пропорционально градиенту. Мы достигли этого, используя в качестве сигнальных устройств небольшие четвертьволновые петли и располагая их ниже и выше области циркуляции хвоста в таком месте, где они наиболее чувствительны к хвосту, но менее чувствительны к удаленному ядру накоплен-

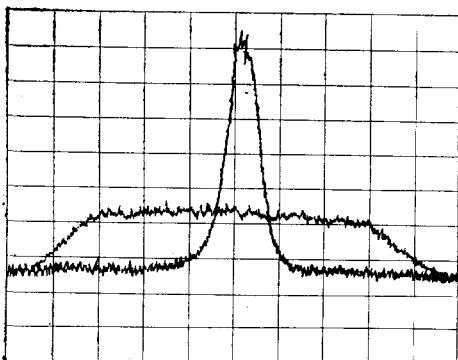


Рис. 13. Предварительное охлаждение пучка из $6 \cdot 10^6$ антипротонов за 2 с. Продольные полосы Шоттки на 170-й гармонике частоты обращения (314 МГц) до и после охлаждения пучка

ного пучка. Правда, при этом ухудшилось отношение сигнал/шум для области вблизи ядра пучка. Поэтому пришлось использовать две системы сигнальных устройств, каждая из которых размещалась на различных радиусах и имела собственный предусилитель и собственную регулировку коэффициента усиления. С такой аппаратурой мы достигли быстрого охлаждения на границе

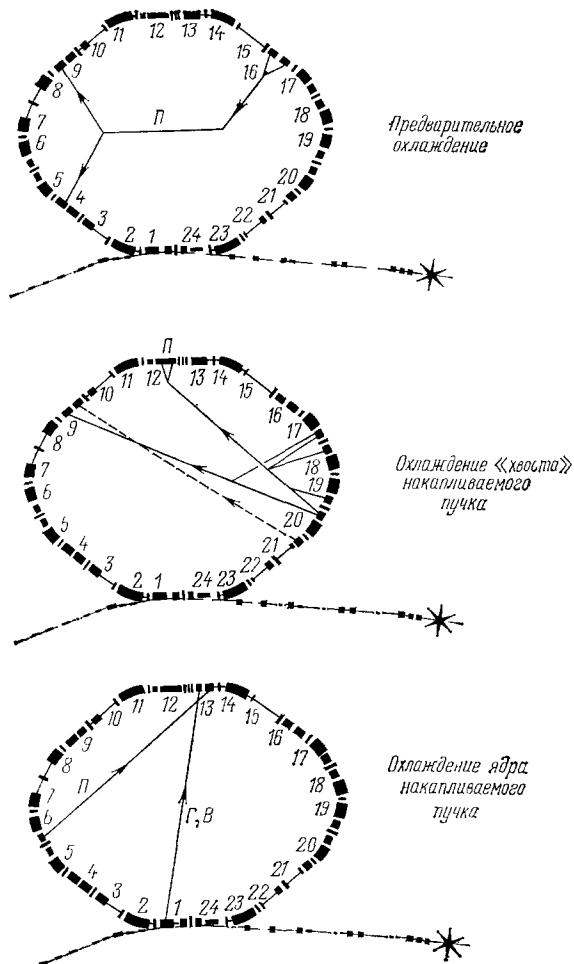


Рис. 14. Схема накопителя антипротонов с семью системами охлаждения. **P** — система продольного охлаждения, **B** — система вертикального охлаждения, **G** — система горизонтального охлаждения

накапливаемого пучка, куда смещаются охлаждаемые частицы, и медленного охлаждения плотного ядра, где это допустимо, поскольку частицы циркулируют там в течение нескольких часов.

Основная проблема состояла в том, что система охлаждения хвоста пучка должна быть достаточно мощной для быстрого смещения частиц. Поэтому ее исполняющие устройства должны бы были также возмущать медленно охлаждаемое ядро накопленного пучка (частота сигналов Шоттки не перекрывает с частотами обращения частиц ядра, однако это не так для тепловых шумов). Проблема возникает из-за того, что исполняющие устройства должны располагаться в месте, где дисперсия равна нулю, чтобы не возбуждать горизонтальные бетатронные колебания. Поэтому они действуют на все частицы (хвоста и ядра) одинаково.

Эта проблема была решена применением фильтров на длинных линиях, которые были описаны выше и которые подавляли характерные частоты

частиц ядра. Эти фильтры нежелательным образом меняют также фазу сигнала в области, близкой к ядру; однако это не играет существенной роли, поскольку охлаждение ядра пучка осуществляется третьей более широкополосной системой (1—2 ГГц). В то время, когда частицы смещаются в сторону ядра, они охлаждаются также в горизонтальном и вертикальном направлениях вначале системой охлаждения хвоста, затем 1—2 ГГц системой



Рис. 15. Общий вид накопителя антипротонов до того, как он был закрыт бетонными плинтами.

Светлый материал вокруг вакуумной камеры — теплоизоляция. Для получения высокого вакуума и сверхвысокого вакуума камера может прогреваться до 300 °С. Видны пересекающие внутренность кольца передающие линии

охлаждения ядра. Расположение различных цепей охлаждения показано на рис. 14. На снимке (рис. 15) можно разглядеть некоторые из длинных линий, по которым передается сигнал на исполняющие устройства.

Когда в пучке накапливается достаточное количество антипротонов (обычно, $2 \cdot 10^{11}$), часть из них ($\sim 30\%$) выводится в синхротрон PS, а из него в основной синхротрон SPS. Для этого осуществляется группировка частиц накапленного пучка. Длина сгустка регулируется соответствующим подбором сепараторы¹⁹. Эти частицы ускоряются, пока не окажутся на той же самой орбите, на которую инжектируются обычные частицы. Процесс повторяется (в настоящее время 3 раза); каждый раз происходит заполнение одной сепараторы в синхротроне SPS. Оставшийся пучок антипротонов представляет собой основу для следующего процесса накопления.

11. СИСТЕМА ПРОДОЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ; УРАВНЕНИЕ ФОККЕРА — ПЛАНКА

Основное отличие систем поперечного и продольного охлаждения заключается в том, что последняя изменяет продольное распределение, от которого зависит некогерентный нагрев, а также и другие эффекты, как, например, обратная связь по пучку. Все это усложняет теорию; все же, если известны все параметры, кое-что можно рассчитать.

Определим поток Φ как число частиц, имеющих определенную энергию (или частоту обращения) в единицу времени. Можно показать, что⁵

$$\Phi = F\Psi - D \frac{\partial \Psi}{\partial f_0}, \quad (5)$$

где Ψ есть плотность dN/df_0 , а F и D — медленно меняющиеся функции, зависящие от различных параметров системы, а также и от распределения частиц. Первый из членов в выражении (5) описывает когерентное охлаждение, второй — некогерентный (диффузионный) эффект, влияние которого сводится к выталкиванию частиц в направлении уменьшения градиента плотности при воздействии возмущающих шумов.

Воспользовавшись уравнением непрерывности

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial f_0} = 0,$$

отражающим отсутствие потерь, получаем уравнение типа уравнения Фоккера — Планка:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial f_0} (F\Psi) + \frac{\partial}{\partial f_0} \left(D \frac{\partial \Psi}{\partial f_0} \right), \quad (6)$$

с помощью которого можно рассчитать изменение плотности от частоты обращения и от времени для заданного начального распределения. Находящиеся на границе частицы вводятся как заданный поток в этом месте.

Медленно меняющиеся функции F и D зависят от многих параметров системы (от характеристик сигнальных и исполняющих устройств, коэффициента усиления усилителя, характеристик фильтра, распределения частиц в пучке и т. п.). Они рассчитываются с учетом вкладов всех полос Шоттки. На практике найти аналитическое решение уравнения (6) не представляется возможным и оно решается с помощью сложных численных методов.

Такие расчеты позволили в результате прийти к определенной конструкции системы накопления антипротонов. В то же время проведенные на малом экспериментальном накопительном кольце (ICE) исследования подтвердили все ожидаемые эффекты охлаждения в масштабе времени до 10 с. Однако никоим образом невозможно было проверить работу системы накопления пучка (увеличивающей плотность на 4 порядка). Бессспорно, мы шли на определенный риск, начав осуществление проекта, не имея возможности удостовериться в правильности выбранного подхода. К счастью, все вело себя в соответствии с теорией и, хотя число инжектируемых антипротонов было меньше, чем предполагалось, в 3,5 раза, охлаждение сработало так, как и ожидалось.

12. ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СТОХАСТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ; НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ

В настоящее время система стохастического охлаждения применяется в ЦЕРН в накопителе антипротонов AA и низкоэнергетичном накопителе LEAR, в котором накапливаются антипротоны после замедления в синхротроне PS. Перед тем как в прошлом году начался демонтаж пересекающихся накопительных колец ISR, в них также проводились эксперименты с антипротонами и устройствами охлаждения.

Особенно привлекательным выглядит применение охлаждения в основном синхротроне SPS, где происходит взаимодействие встречных пучков высокой энергии, поскольку с его помощью можно было увеличить время жизни пучков и уменьшить их поперечные размеры. Трудности обусловлены группировкой пучка; сгустки частиц в этом ускорителе очень узкие (3 сгустка по 4 нс длительностью). Из-за группировки каждая полоса Шоттки расщепляется на узкие сателлитные плотные полосы, сигналы которых ока-

зываются коррелированными²⁰. Тем не менее проект имеется и существуют надежды на увеличение до некоторой степени времени жизни пучка²¹.

В США создается накопительный комплекс антипротонов, аналогичный тому, который имеется в ЦЕРН. В нем также применяется стохастическое охлаждение. Предполагается, что скорость накопления антипротонов в этой установке будет на порядок выше, чем в ЦЕРН, поскольку для генерации антипротонов будут использованы более высокоэнергетические первичные пучки, а охлаждение антипротонов будет осуществляться на более высоких частотах. Тем временем мы строим в ЦЕРН второе накопительное

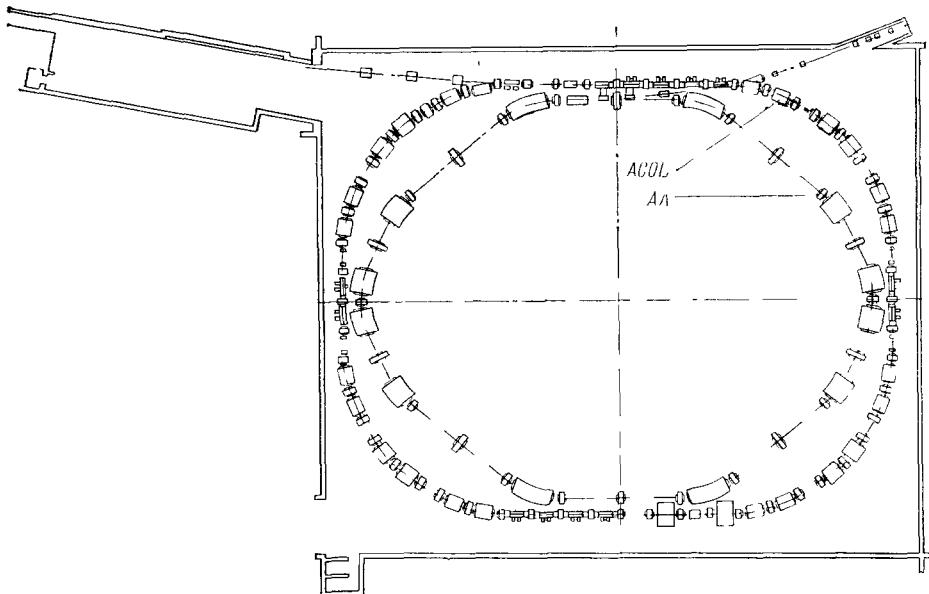


Рис. 16. Новое накопительное кольцо антипротонов ACOL (строится), расположенное вокруг накопителя антипротонов AA.

В новом кольце скорость накопления антипротонов будет на порядок выше. Накопленный же пучок будет циркулировать в накопителе AA

кольцо, которое окружает имеющийся накопитель антипротонов AA (рис. 16), на аналогичном принципе работы. Оно будет более жесткофокусирующим, что позволит увеличить по крайней мере в 2 раза поперечный аксептанс и в 4 раза продольный. Увеличение фокусирующих сил приведет к уменьшению перемешивания, и, следовательно, система охлаждения должна будет работать на более высоких частотах (вплоть до 4 ГГц). Существующий накопитель антипротонов AA предполагается использовать для длительной циркуляции накопленного пучка. Его система охлаждения также будет улучшаться.

Развитие теории стохастического охлаждения во многом обязано Х. Г. Хьюорду, Д. Мелю, Ф. Сахереру и Л. Торндалу. Последний внес также большой вклад в создание большинства систем охлаждения в ЦЕРН, и сомнительно, что без его изобретения метода фильтров можно бы было создать накопитель антипротонов. Я должен также выразить признательность за неоценимый вклад Г. Каррону (электроника систем охлаждения), Л. Фолтину (разрезные сигнальные устройства) и К. Тейлору (1—2 ГГц система охлаждения).

Р. Биллиндж вместе со мной возглавлял проект создания накопителя антипротонов, и главным образом благодаря его участию в разработке и умелому руководству накопитель был построен в рекордные сроки (2 года) и работал так хорошо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Szilard L.—Zs. Phys., 1929, Bd 53, S. 840.
2. Van der Meer S. Stochastic Damping of Betatron Oscillations in the ISR: CERN/ISR-PO/72-31.—Geneva, 1972.
3. Möhl D. In: Proc. of the CERN Accelerator School on Antiprotons for Cooling Beam Facilities.—Geneva: CERN. 84-15, 1984.
4. Sacherer F. Stochastic Cooling Theory: CERN/ISR-TH/78-11.—Geneva, 1978.
5. Möhl D., Petrucci G., Thorndahl L., van der Meer S.—Phys. Rep., 1980, v. 58, p. 73.
6. Schottky W.—Ann. Phys., 1918, Bd 57, S. 544.
7. Heward H. G. The Elementary Theory of Landau Damping; CERN 65-20.—Geneva, 1965.
8. Van der Meer S. Optimum Gain and Phase for Stochastic Cooling Systems: CERN/PS-AA/83-48.—Geneva, 1983.
9. Van der Meer S. A Different Formulation of the Longitudinal and Transverse Beam Response: CERN/PS-AA/80-4.—Geneva, 1980.
10. Van der Meer S.—IEEE Trans. Nucl. Sci., 1981, v. NS-28, p. 1994.
11. Palmer R. B. BNL (1975) (частное сообщение).
12. Carron G., Thorndahl L. Stochastic Cooling of Momentum Spread by Filter Techniques, CERN/ISR-RF/78-12.—Geneva, 1978.
13. Faletti L. Nucl. Instr. and Meth., 1978, v. 148, p. 449.
14. Budker G. I., In: Proc. of Intern. Symposium on Electron and Positron Storage Rings.—Saclay, 1966, p. 11-1-1; AЭ, 1967, т. 22, с. 346.
Budker G. I. et al.—Part. Acc., 1976, v. 7, p. 197.
15. Van der Meer S.—Precooling in the Antiproton Accumulator: CERN/PS-AA/78-26.—Geneva, 1978.
16. Flander D. C., Milner S., Pearce P., Poncelet A. The Antiproton Accumulator Shutters: Design, Technology and Performance.—Geneva: CERN/PS/84-23, 1984.
17. Johnson R., van der Meer S., Pedersen F., Shering G.—IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983, v. NS-30, p. 2290.
18. Van der Meer S. Stochastic Stacking in the Antiproton Accumulator: CERN/PS-AA/78-22.—Geneva, 1978.
19. Johnson R., van der Meer S., Pedersen F.—IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983, v. NS-30, p. 2123.
20. Herr H., Möhl D. Bunched Beam Stochastic Cooling; CERN/EP/Note 79-34.—Geneva, 1979.
21. Boussard D., Chatterjee S., Dome G., Linnecker T. Feasibility Study of Stochastic Cooling of Bunches in the SPS: CERN/SPS/84-4.—Geneva, 1984.
22. Design Report Tevatron I project.—Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Ill., 1983.