



А.86

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

38

А.С.Артамонов, Я.С.Дербенёв, Е.Л.Салдин

НАКОПИТЕЛЬ ПОЗИТРОНОВ С
ЭЛЕКТРОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ДЛЯ
ПОЛУЧЕНИЯ АНТИВОДОРОДА

ПРЕПРИНТ 84-79

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
Физики СО АН СССР
ИНВ. № _____



НОВОСИБИРСК

НАКОПИТЕЛЬ ПОЗИТРОНОВ С ЭЛЕКТРОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АНТИВОДОРОДА

А.С.Артамонов, Я.С.Дербенев, Е.Л.Салдин

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе рассматривается возможность применения электронного охлаждения для накопления низкоэнергетичных холодных позитронов и их использования для получения антиводорода. Рассмотрен примерный вариант установки с производительностью несколько тысяч антиатомов в секунду. Обсуждаются пути её дальнейшего усовершенствования.

Введение

Единственным мыслимым в настоящее время способом получения антиводорода является рекомбинация антипротона \bar{p} с позитроном e^+ . Этот процесс можно осуществить, располагая достаточно холодными и интенсивными пучками \bar{p} и e^+ , движущимися с одинаковыми скоростями в накопительных кольцах.

Задача накопления антипротонов может считаться решенной как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения с помощью метода электронного охлаждения [1,2] (фактически сама постановка вопроса о получении антиводорода стала возможной после появления этого метода [3]). В данной работе для накопления и охлаждения позитронов предлагается, как и для антипротонов, использовать электронное охлаждение, с помощью которого предполагается получить низкоэнергетичный (порядка нескольких сотен киловольт) циркулирующий пучок с температурой порядка атомных энергий (меньше 1 эВ). Использование для этой цели радиационного охлаждения, эффективно работающего в накопителях на высокие энергии, неприменно из-за больших времен затухания и, следовательно, высоких равновесных температур позитронов^{*)}.

В первой части работы мы коротко опишем основные свойства электронного охлаждения позитронов в однородном магнитном поле и приведем формулы для характерных времен релаксации позитронов в электронном газе. Подробное изложение этого вопроса можно найти в работе [4].

Во второй - рассмотрим наиболее принципиальные вопросы, связанные с созданием накопителя позитронов на низкую энергию с использованием электронного охлаждения.

Затем оценим возможную скорость образования антиводорода. Для значений параметров установки, приведенных в работе, она оказывается порядка нескольких тысяч антиатомов в секунду (примерно то же, что и скорость образования водорода в экспериментах по электронному охлаждению протонов на установке НАИ-М [5,6]).

В заключении мы остановимся на основных причинах, ограни-

^{*)} При столь низких энергиях диффузия позитронов будет определяться не столько квантовыми флуктуациями излучения, сколько шумами в системе питания, рассеянием на остаточном газе и т.д.

чивающих скорость образования антиводорода, и возможных путях их преодоления.

§ I. Электронное охлаждение позитронов

Детальное исследование электронного охлаждения позитронов приведено в работе [4]. Здесь мы остановимся лишь на основных свойствах этого процесса, а также приведем формулы, необходимые для дальнейших расчетов.

При рассмотрении основных свойств электронного охлаждения отвлечемся от эффектов цикличности движения позитронов в накопителе и рассмотрим нерелятивистские позитроны, движущиеся в однородном электронном газе, помещенном в однородное магнитное поле. В результате кулоновского взаимодействия с электронами, позитроны будут релаксировать к некоторому состоянию, которое определяется статистическими свойствами электронного газа и, в частности, разбросом электронных скоростей. Очень важной особенностью электронного пучка, позволяющей многократно усиливать эффективность процесса охлаждения, является малость продольного разброса скоростей по сравнению с поперечным. Эта анизотропия формируется в процессе ускорения электронного пучка [6] и поддерживается сильным продольным магнитным полем, препятствующим обмену энергией между продольной и поперечной степенями свободы электронов. В реальной ситуации продольная температура оказывается столь малой, что ограничивается, в случае быстрого ускорения электронного пучка, лишь флуктуациями энергии кулоновского взаимодействия, то-есть величиной порядка $e^2 n_e^{1/3}$ (n_e - плотность электронного пучка в сопутствующей системе). При адиабатически медленном ускорении пучка [2] можно добиться еще большего уменьшения продольной температуры, в результате чего в расположении электронов могут появиться корреляции кристаллического типа.

При малом разбросе продольных скоростей в электронном потоке в условиях замагниченности может оказаться, что основной вклад в интеграл столкновений дает область прицельных параметров ρ , удовлетворяющих условию $U_A/\Omega < \rho < \rho_{max}$, где ρ_{max} - максимальный прицельный параметр, за которым взаимодействие эффективно уменьшено, U_A - относительная скорость электронного и позитронного ларморовского кружков, Ω - цик-

лотронная частота. В этой области необходимо учитывать влияние магнитного поля на процесс столкновения, т.к. длительность взаимодействия частиц $t \sim \rho/U_A$, оказывается больше ларморовского периода $T \sim \Omega^{-1}$. Интересной особенностью взаимодействия электронов и позитронов в этой области прицельных параметров, в отличие от электронного охлаждения ионов, является то, что интенсивность взаимодействия поперечных степеней свободы электронов с поперечными степенями свободы охлаждаемого пучка не ослабевает по сравнению со случаем, когда магнитное поле отсутствует, а, наоборот, усиливается. Это обусловлено резонансностью взаимодействия частиц одинаковой массы в силу равенства их ларморовских частот^{*}).

Оценим скорость изменения продольного и поперечного импульса позитрона в области прицельных параметров $\rho > U_A/\Omega$. При этом ограничимся вычислением силы трения, поскольку учет диффузионных членов необходим фактически для определения стационарного распределения скоростей позитронов, которое в силу равенства масс электронов и позитронов будет совпадать с распределением скоростей в электронном потоке.

Рассмотрим столкновение двух ларморовских кружков, вращающихся друг относительно друга со скоростью U_A с ларморовскими радиусами z_{e^+} и z_{e^-} , причем $z_{e^+} \gg z_{e^-}$. Определим изменение поперечной энергии позитрона, исходя из закона сохранения энергии. Для этого рассмотрим движение электрона в магнитном поле под действием силы $F \sim \frac{e^2}{z_{e^+}^2} e^{i\Omega t}$ (взаимодействие электрона с позитроном при $\rho > z_{e^-}$ эффективно уменьшено). Принимая во внимание резонансность взаимодействия получим $P_{ie^-} \sim \frac{e^2 t}{z_{e^+}^2} e^{i\Omega t}$. Число электронов, эффективно участвующих во взаимодействии с позитроном, порядка $n_e \cdot z_{e^+}^3$, следовательно:

$$\frac{dP_{ie^-}}{dt} \sim -n_e \cdot z_{e^+}^3 \frac{d}{dt} \left(\frac{e^2 t}{z_{e^+}^2} \right)^2 \sim -\frac{n_e e^4 t}{z_{e^+}} \quad (I)$$

Реально время электрон-позитронного взаимодействия ограничено либо временем пролета через систему электронного ох-

^{*} Строго говоря, необходимо учитывать разброс ларморовских частот, обусловленный энергетическим разбросом в электронном и позитронном пучках. Все последующие выводы, однако, остаются без изменения, при условии, что $\Delta E/E \ll U_A/\rho_{max} \Omega$

лаждения $t_n \sim e/\beta c$, либо временем столкновения $t_s \sim z_{e^+}/\omega_A$, или же временем экранирования взаимодействия поперечных степеней свободы $t_z \sim R/\omega_p^2$ (величина ω_p/R — сдвиг частоты ларморовских осцилляций кулоновским взаимодействием электронов, $\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 n_e/m}$ — электронная плазменная частота). Следовательно, $dP_{ie^+}/dt \sim -ne^4 t/z_{e^+}$, где

$$t = \min \left\{ e/\beta c, z_{e^+}/\omega_A, R/\omega_p^2 \right\}$$

Точный анализ показывает, что выражение для скорости изменения квадрата поперечного импульса при условии $e/\beta c \gg z_{e^+}/\omega_A, R/\omega_p^2$ имеет вид:

$$\frac{dP_{ie^+}^2}{dt} = -8\pi e^4 n_e \begin{cases} \frac{R}{\omega_p^2 z_{e^+}} & \text{при } \frac{\omega_p^2 z_{e^+}}{2R\omega_A} \gg 1 \\ \frac{1}{2\omega_A} & \text{при } \frac{\omega_p^2 z_{e^+}}{2R\omega_A} \ll 1 \end{cases} \quad (2)$$

При определении скорости изменения продольного импульса позитрона необходимо заметить, что конечность времени позитрон-электронного взаимодействия имеет принципиальное значение. Действительно, если рассматривать столкновения ларморовских кружков при их относительном движении из бесконечности в бесконечность, то в силу симметрии соударения, интегральное изменение продольного импульса каждой частицы равно нулю. Однако, при конечном времени взаимодействия t всегда присутствуют незавершенные соударения с прицельными параметрами $\rho \sim t\omega_A$, которые дают основной вклад в обмен продольными импульсами. Рассуждения, аналогичные приведенным выше при рассмотрении поперечных степеней свободы, показывают, что скорость изменения квадрата продольного импульса позитрона определяется выражением (1) с той лишь разницей, что время экранирования оказывается равным периоду ленгмюровских колебаний, то-есть:

$$\frac{dP_{ie^+}^2}{dt} = -4\pi e^4 n_e \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}\omega_p z_{e^+}} & \text{при } \frac{\omega_p z_{e^+}}{\omega_A} \gg 1 \\ \frac{1}{\omega_A} & \text{при } \frac{\omega_p z_{e^+}}{\omega_A} \ll 1 \end{cases} \quad (3)$$

Что касается предела применимости полученных выражений (2) и (3), то он определяется из условия относительной малости изменения продольного и поперечного импульса при электрон-электронном взаимодействии за характерные времена

$$\epsilon_{||} \sim \min \left\{ \frac{e}{\beta c}, \frac{z_{e^-}}{\sqrt{T_{||}/m}}, \omega_p^{-1} \right\} \quad \text{для продольного и}$$

$$\epsilon_{\perp} \sim \min \left\{ \frac{e}{\beta c}, \frac{z_{e^-}}{\sqrt{T_{||}/m}}, \frac{R}{\omega_p^2} \right\} \quad \text{поперечного взаимодействия}$$

Из приведенных выше формул видно, что скорость изменения продольного и поперечного импульса позитрона в достаточно сильных магнитных полях оказывается обратно пропорциональной относительной скорости ларморовских кружков ω_A , которая может оказаться малой в силу малости продольной температуры в электронном пучке. Эта особенность электронного охлаждения может оказаться полезной для ускорения охлаждения позитронов по поперечным степеням свободы, если осуществить предварительное глубокое охлаждение продольного разброса позитронных скоростей.

§ 2. Накопитель позитронов на низкую энергию с использованием электронного охлаждения

Мы рассмотрим наиболее простую реализацию накопителя, состоящего из двух соленоидов, соединенных ахроматическими участками, не вносящими связь между радиальным и вертикальным движением. Магнитные поля в соленоидах предполагаются равными по величине, но имеющими противоположное направление относительно

скорости движения позитронов. Электронное охлаждение осуществляется в обоих соленоидах. Не обсуждая во всех деталях схему накопителя, мы рассмотрим следующие принципиальные вопросы:*)

1. Устойчивость движения позитронов в накопителе относительно малых отклонений от равновесной орбиты.
2. Возможный вариант системы электронного охлаждения.
3. Времена охлаждения и установившийся фазовый объем охлажденного позитронного пучка.

1. Будем предполагать, что равновесная орбита совпадает с осью симметрии обоих соленоидов. Необходимым условием устойчивости движения позитронов относительно малых отклонений от равновесной орбиты является равенство модулей всех собственных значений матрицы перехода через оборот. Линейное преобразование переменных $x+iy$ и $x'+iy'$ (x и y - поперечные смещения относительно равновесной орбиты; $x' = dx/ds$; $y' = dy/ds$, ds - дифференциал дуги вдоль равновесной орбиты) при прохождении соленоида с резкими краями и адиабатически медленным изменением магнитного поля записывается в виде следующей матрицы:

$$M_{sol} = \begin{pmatrix} \frac{1+e^{-i\alpha}}{2} & \frac{iE\beta_0(e^{-i\alpha}-1)}{2H_0} \\ -\frac{ieH_0}{4E\beta_0}(e^{-i\alpha}-1) & \frac{1+e^{-i\alpha}}{2} \end{pmatrix}, \quad \alpha = \int_0^c \frac{eH(s)}{E\beta_0} ds$$

где $H(s)$ - величина продольного магнитного поля, E - энергия позитрона, $\beta_0 = v_0/c$, H_0 - начальное и конечное значение магнитного поля в соленоиде. Для накопителя, состоящего из двух одинаковых соленоидов, соединенных одинаковыми участками, не вносящими связь между вертикальным и горизонтальным бетатронным движением, матрица однооборотного преобразования запишется в виде: $M_{tot} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} M_{sol}(H) \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} M_{sol}(-H)$

*) В установках с электронным охлаждением неизбежно рассмотрение накопителей с продольным магнитным полем, оказывающим существенное влияние на динамику частиц. Подобные накопители обсуждались в работах [11] и [12] для электронов и антипротонов соответственно.

где

$$= \begin{pmatrix} |K|^2 + LM^* & L^*K + LN^* \\ MK^* + NM^* & ML^* + |N|^2 \end{pmatrix},$$

$$K = \frac{a}{2}(1+e^{-i\alpha}) - \frac{ib}{4K_0}(e^{-i\alpha}-1), \quad M = \frac{c}{2}(1+e^{-i\alpha}) - \frac{id}{4K_0}(e^{-i\alpha}-1),$$

$$L = i\alpha K_0(e^{-i\alpha}-1) + \frac{b}{2}(1+e^{-i\alpha}), \quad N = i\alpha K_0(e^{-i\alpha}-1) + \frac{d}{2}(1+e^{-i\alpha})$$

$K_0 = E\beta_0/eH_0$. Собственные значения приведенной выше матрицы однооборотного преобразования определяются из уравнения

$$\lambda_{1,2} = \frac{|K|^2 + |N|^2 + ML^* + LM^*}{2} \pm \sqrt{\frac{(|K|^2 + |N|^2 + ML^* + LM^*)^2}{4} - 1}$$

откуда нетрудно получить условие устойчивости движения позитронов в накопителе относительно равновесной орбиты:

$$\left| \frac{a+d}{2} \cos \frac{\alpha}{2} + (cK_0 - \frac{b}{4K_0}) \sin \frac{\alpha}{2} \right| \leq 1$$

Это условие показывает, что существует достаточно широкий класс матриц $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ таких, что $-d+d=0$; $b/4K_0 - cK_0=0$; $a^2+4c^2K_0^2=1$, при которых движение позитронов будет устойчивым при любых значениях параметра α . Подобный выбор магнитной структуры накопителя может оказаться весьма полезным при охлаждении (накоплении) позитронов с большим энергетическим разбросом, определяющим дисперсию α . Приведенное выше рассмотрение устойчивости движения позитронов не учитывает возмущений магнитной структуры накопителя и связанные с ними резонансные эффекты. На этом вопросе мы остановимся несколько подробнее после того, как будут приведены примерные параметры системы электронного охлаждения.

2. Рассмотрим возможный вариант системы электронного охлаждения, которая может быть достаточно легко реализована и

иметь достаточно высокий коэффициент рекуперации. Таковыми являются электронные системы с использованием аксиально-симметричных пучков с током до нескольких ампер и энергий до нескольких сотен киловольт, имеющих первенс порядка $0,1-1 \text{ мкА/в}^{3/2}$. В таких системах коэффициент рекуперации может быть сделан лучше $0,95$ [7], и, следовательно, рассеиваемая мощность, принимаемая на коллектор, составит величину порядка нескольких десятков киловатт.

Оптические свойства системы транспортировки электронного пучка определяются фактически однозначно требованием малости разброса поперечных и продольных скоростей в электронном потоке. Действительно, как следует из результатов работы [8], наиболее приемлемой с этой точки зрения является транспортировка пучка в продольном магнитном поле с погруженным в него источником электронов. Разброс электронных скоростей в такой системе будет определяться следующими факторами: температурой катода, пространственным зарядом пучка и несовершенством оптики. Действие пространственного заряда электронного пучка не должно оказывать заметного влияния на кинетику электронного охлаждения позитронов, поскольку приводит к появлению одинаковой дрейфовой скорости как для электронов, так и для позитронов.* Что касается разброса продольных скоростей, то вклад начальной температуры резко падает при потенциальном ускорении [6].

Важным вопросом в задаче электронного охлаждения позитронов является совмещение электронного и позитронного замагниченных пучков. Одним из способов его решения может быть использование адиабатически медленно изменяющегося электрического поля, направленного перпендикулярно магнитному (авторы благодарны И.Н.Мешкову, указавшему им на эту возможность). Дрейф электронов в скрещенных электрическом и магнитном поле будет происходить с одинаковой скоростью $\vec{V}_{др} \sim \vec{E}_\perp \times \vec{H} / H^2$, поэтому для совмещения пучков необходимо, чтобы продольные скорости электронов и позитронов были различными. Тогда разница поперечных смещений

на длине L_c составит величину: $\Delta = L_c E_\perp (1/\beta_{e^+} - 1/\beta_{e^-}) / H$. При $E_\perp = 15 \text{ кВ/см}$; $H = 3 \text{ кГс}$; $L_c = 200 \text{ см}$; $E_{e^+} = 200 \text{ кэВ}$; $E_{e^-} = 50 \text{ кэВ}$ получим $\Delta = 3,5 \text{ см}$. Наличие поперечного электрического поля приведет к градиенту энергии по сечению электронного пучка и

* Разброс энергий, связанный с наличием пространственного заряда, в нашем случае оказывается пренебрежимо малым на размере позитронного пучка.

следовательно к его деформации. При указанных выше параметрах разность смещений диаметрально противоположных точек электронного пучка диаметром два миллиметра (заметим, что диаметр позитронного пучка в соленоиде предполагается менее миллиметра) составит величину $\sim 2 \text{ мм}$. Заметим, однако, что плотность электронного пучка при этом не меняется.

Одна из возможных реализаций системы электронного охлаждения может выглядеть следующим образом (см.рис.1).

На начальном участке электроны ускоряются до нескольких десятков киловольт, а позитроны уменьшают свою энергию на ту же величину. На следующем участке происходит совмещение пучков, имеющих различную продольную скорость. Затем энергии электронов и позитронов выравниваются и следует участок электронного охлаждения. После этого электроны вновь тормозятся, а позитроны ускоряются. Затем пучки разводятся в поперечном электрическом поле, электроны принимаются на коллектор, а позитроны восстанавливают свою энергию и выходят из соленоида. Поперечное электрическое поле, используемое для сведения и разведения пучков, приводит, вообще говоря, к когерентному ларморовскому закручиванию как электронов, так и позитронов. Действие этого эффекта оказывается, однако, чрезвычайно слабым в случае адиабатически медленно изменяющегося по отношению к ларморовскому вращению электрического поля, то-есть при $\ell_x \gg \lambda$ где ℓ_x - характерная длина изменения поперечного электрического поля, $\lambda = R_c c / e H$. Так для $E = 200 \text{ кэВ}$, $H = 3 \text{ кГс}$ получим $\ell_x \gg 1 \text{ см}$.

Наличие соленоидов с полями в несколько килогаусс и длиной несколько метров приводит к большим (порядка нескольких сотен) эффективным бетатронным частотам $\nu \sim H L_c / 2\pi R_c$, L_c - длина соленоида. Это предъявляет довольно жесткие требования к допускам на смещение отдельных элементов накопителя, к стабильности системы питания, а также к параметрам позитронного пучка. Действительно, при некотором заданном значении номинала ΔV , заведомо меньшем единицы (расстояние между параметрическими резонансами равно $0,5$), относительный допуск $\Delta V / V$ меняется пропорционально V^{-1} , что требует повышения относительной точности всех параметров. Необходимо, однако, отметить, что гармоники возмущения магнитной структуры \tilde{H}_n столь высокого порядка ($K \sim V \sim 100$) для рассматриваемого накопителя, состоящего из от-

носительно малого числа элементов N ($N \ll 100$) будут подчеркнуты весьма слабо. Это должно существенно упростить создание установки подобного типа. В принципе, по-видимому, возможна ситуация, когда мощность электронного трения будет сравнима или даже превосходить мощность машинных резонансов.

Оценим требования на стабильность системы питания соленоидов и на параметры позитронного пучка при разумном допустимом сдвиге бетатронных частот $\Delta \gamma \sim 10^{-1}$. Для накопителя позитронов с энергией $E_{e^+} \sim 200$ кэВ, имеющем два соленоида с полем $H = 3$ кГс и длиной $L_s = 5$ метров каждый:

$$\left| \frac{\Delta H}{H} \right| + \left| \frac{\Delta \rho_n}{\rho_n} \right| \sim 10^{-3}$$

Это условие накладывает скорее ограничения на скорость накопления (величину захватываемого фазового объема) позитронов. Действительно, стабильность магнитного поля может быть сделана лучше 10^{-4} , а относительный разброс продольных импульсов в охлажденном позитронном пучке в рассматриваемом нами случае будет определяться продольной температурой электронного пучка, то-есть

$$\Delta \rho_n / \rho_n \sim \sqrt{T_n / mc^2 / \beta_n}$$

что при $T_n \sim e^2 n_e^{1/3} \sim 10^{-4}$ ($n_e \sim 10^9 / \text{см}^3$) составит величину порядка $2 \cdot 10^{-5}$.

3. Установившийся фазовый объем охлажденного позитронного пучка будет определяться соотношением трения и диффузии. Трение в рассматриваемом нами накопителе обусловлено взаимодействием позитронов с электронным пучком. В то же время процессов, разогревающих пучок и увеличивающих тем самым его фазовый объем, может быть несколько. Прежде всего это взаимодействие с самим электронным пучком, далее рассеяние и потери (флуктуации потерь) энергии при взаимодействии с атомами остаточного газа; различного рода шумы, имеющие чисто внешнее происхождение и, наконец, взаимодействие позитронов внутри самого накопленного позитронного пучка: некогерентный сдвиг частот бетатронных колебаний, внутреннее рассеяние. Как показывают оценки, нетрудно реализовать ситуацию, когда фазовый объем охлажденного пучка позитро-

нов малой интенсивности будет определяться исключительно взаимодействием с электронным пучком. Это значит, что при отсутствии на участке охлаждения связи между продольным и поперечным движением ($\psi = 0$) продольная и поперечная температура охлажденного позитронного пучка окажутся равными соответственно продольной и поперечной температуре пучка электронов. При этом поперечный фазовый* объем в случае больших времен охлаждения (много больших периода обращения в накопителе) окажется порядка T_n / eH , где H - продольное магнитное поле в месте расположения электронного охлаждения. Времена релаксации к этому состоянию можно оценить по формулам, приведенным в § I. Например, для накопителя позитронов и системы электронного охлаждения со следующими параметрами: $E_{e^+} = 200$ кэВ (на участке охлаждения $E_{e^-} = 100$ кэВ), $n_e = 10^9$ I/см³; L^o (длина участка электронного охлаждения) = 6 метров; L (периметр накопителя) = 30 метров; $H = 3$ кГс; время охлаждения позитронного пучка с относительным разбросом продольных скоростей $u_n / \beta_n c \sim 10^{-3}$ и угловым разбросом $\Delta \theta \sim 10^{-3}$ будет равно:

$$T = \frac{(\gamma \beta_n)^3 \Delta \theta^2 u_n L}{4\pi \beta_n c^2 n_e z_e^2 L^o} \approx 0,1 \text{ сек}, \quad \left(\frac{\omega_p^2 z_e^2}{2L u_n} \sim 10^{-2} \ll 1 \right)$$

Поперечный фазовый объем позитронов после охлаждения уменьшится на три порядка и окажется равным 10^{-6} см.рад. Время охлаждения, которое в данном случае определяется большим поперечным фазовым объемом, можно существенно уменьшить, если, используя связь продольной и поперечных степеней свободы, перераспределить декременты затухания. При этом необходимо, во-первых, существование зависимости потерь энергии (продольной силы трения) позитронов от поперечного смещения и, во-вторых, наличие ψ -функции в месте расположения соленоида с электронным охлаждением. Тогда времена затухания поперечной (бетатронной) и продольной скорости можно оценить, исходя из следующих формул:

* что касается продольного фазового объема, то мы будем рассматривать не сбунчиванный позитронный пучок. Радиационные потери в рассматриваемом накопителе будут настолько малы, что могут восполняться (компенсироваться) электронным пучком

$$f \frac{dV_{\perp}^2}{dt} \sim - \frac{4\sqrt{\epsilon}^4 N_e}{v_{\perp} m} \left(1 - 2 \frac{\psi}{v_{\perp} c} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{v_{\perp}^2}{v_{\perp}^2} \right)$$

$$f \frac{dV_{\parallel}}{dt} \sim - \frac{4\sqrt{\epsilon}^4 N_e}{v_{\parallel} m} \left(1 + 2 \frac{\psi}{v_{\parallel} c} \frac{\partial u}{\partial x} \right), \text{ где}$$

V_{\perp} и V_{\parallel} - амплитуды колебаний поперечной и продольной скоростей позитронов в сопутствующей системе на участке охлаждения, ψ - функция, усредненная по периоду ларморовских осцилляций, $\partial u / \partial x$ - градиент продольной гидродинамической скорости электронного пучка. Тогда при $\psi = 20$ см, $1/v_{\perp} c \cdot \partial u / \partial x \sim 2 \cdot 10^{-5} / \text{см}$ и тех же значениях фазового объема инжектируемого позитронного пучка время затухания уменьшится почти на два порядка.

Примерная схема установки, предназначенной для накопления позитронов и образования антиводорода, приведена на рис.2. Электронный пучок из линейного импульсного ускорителя 1 попадает на конвертор 2. Полученный в результате конверсии пучок позитронов, инжектируется в накопитель, где осуществляется накопление позитронов с использованием электронного охлаждения в соленоидах 3 и 4. Частота инжекции в накопитель определяется временем затухания и для приведенного выше примера (без перераспределения декрементов) может составить величину ~ 10 Гц. Образование антиводорода происходит в одном из прямолинейных промежутков 5 позитронного накопителя при совмещении позитронного и антипротонного пучков.

§ 3. Образование антиводорода

Образование антиводорода происходит в прямолинейном промежутке позитронного накопителя в результате рекомбинации при совмещении e^+ и p^- - пучков. Энергия относительного движения позитронов и антипротонов в сопровождающей пучки системе отсчета в рассматриваемом нами случае оказывается много меньше потенциала ионизации. В этой области энергий относительного движения сечение рекомбинации определяется формулой:

$$\sigma_A = \frac{16 \sqrt{\alpha} \tau_e^2}{3 \sqrt{3} \beta^2} \epsilon_n (2I / m v^2)$$

Здесь $\tau_e = e^2 / mc^2$ - классический радиус электрона, α - постоянная тонкой структуры, v - относительные скорости в сопровождающей системе отсчета, $I = 13,6$ эВ - потенциал ионизации. Предполагая, что e^+ и p^- - пучки не сгруппированы, получим следующую оценку для скорости образования антиводорода:

$$\frac{dN_A}{dt} = \frac{N_{e^+} N_{p^-} \epsilon \min(S_{e^+}, S_{p^-})}{f^2 N_{e^+} N_{p^-} S_{e^+} S_{p^-}} \sigma_A v \quad (4)$$

где N_{e^+} и N_{p^-} - полное число позитронов и антипротонов, соответственно, S_{e^+} и S_{p^-} - поперечные сечения пучков, l_{e^+} и l_{p^-} - периметры накопителей, ϵ - длина участка рекомбинации.

В свою очередь N_{e^+} и N_{p^-} - определяются сдвигом бетатронных частот вследствие кулоновского взаимодействия^{*}). В гладком приближении магнитной структуры накопителя число накопленных частиц равно:

$$N_{e^+, p^-} \sim \frac{218 \gamma (1 - \gamma^2) f \epsilon_{e^+, p^-}}{\tau_{e^+, p^-}}$$

где $\delta \gamma \sim 0,1$ - допустимый сдвиг бетатронных частот, γ - релятивистский фактор, ϵ_{e^+, p^-} - эмиттансы пучков, τ_{e^+, p^-} - классический радиус позитрона (антипротона). Максимально возможные эмиттансы позитронного и антипротонного пучков определяются различного рода апертурными ограничениями (размером вакуумной камеры накопителя, нелинейными машинными резонансами). Они заведомо должны превышать значения эмиттансов, установившихся в результате электронного охлаждения, для того чтобы использование последнего имело смысл, то-есть

^{*}) Это утверждение относится к слабoreлятивистским пучкам, для ультрарелятивистских пучков максимально возможное число накопленных частиц будет определяться когерентными неустойчивостями.

$$\epsilon_{e^+}^{max} \gg \frac{T_L \beta_{e^+}^0}{mc^2(\gamma^2-1)} \quad ; \quad \epsilon_{p^-}^{max} \gg \frac{T_L \beta_{p^-}^0}{mc^2(\gamma^2-1)}$$

где T_L и T_n - эффективные поперечная и продольная температура электронного пучка, $\beta_{e^+}^0$ и $\beta_{p^-}^0$ - бета-функции позитронного и антипротонного накопителя в местах расположения электронного охлаждения. Подставляя поэтому в (4) и (5) значения эмиттансов позитронного и антипротонного пучков, установившихся в результате электронного охлаждения (без учета действия пространственного заряда накопленного пучка) мы получим, очевидно, заниженную оценку для скорости образования антиводорода. Не исключено, что на самом деле она может оказаться значительно выше.

В предыдущем разделе была получена оценка для эмиттанса позитронного пучка $\epsilon_{e^+} \sim 10^{-6}$ ($N_{e^+} \sim 10^6$). Для эмиттанса антипротонов мы воспользуемся значением $\epsilon_{p^-} \sim 10^{-6}$ ($N_{p^-} \sim 2 \cdot 10^9$), полученным в экспериментах по электронному охлаждению протонов [4,5].

Тогда для β_{e^+,p^-} - функции в месте образования антиводорода равных соответственно $\beta_{e^+} = 100$ см; $\beta_{p^-} = 100$ см; периметров накопителей $\Pi_{e^+} = \Pi_{p^-} = 30$ метров и для длины участка образования антиводорода 3 метра получим:

$$\frac{dN_A}{dt} \sim 3 \cdot 10^3 \text{ /сек} \quad (\beta_n \sim 5 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2)$$

Наряду с образованием антиводорода будут происходить еще два процесса, приводящие к потере позитронов. Это образование позитрония со скоростью:

$$\frac{dN_P}{dt} \sim 5 \cdot 10^2 \text{ /сек} \quad (\beta_p = 46 \mu)$$

и аннигиляция электрон-позитронных пар, которая в данном случае ($I \gg m\beta^2/2$), однако, будет происходить преимущественно через образование позитрония.

Таким образом, для образования антиводорода с максимальной возможной скоростью ($dN_A/dt \sim 3 \cdot 10^3$) необходимо обеспечить

скорость накопления позитронов со скоростью $3 \cdot 10^3 \text{ сек}^{-1}$

Скорость накопления позитронов равна:

$$N_{e^+} = 6 \cdot 10^{18} J_e \cdot K_1 \cdot K_2, \quad \text{где}$$

J_e - средний ток линейного электронного ускорителя (А);

K_1 - коэффициент конверсии электронов в позитроны с энергией порядка 0,2 МэВ ($\text{МэВ}^{-1} \text{ Стер}^{-1}$); K_2 - коэффициент захвата позитронов в накопитель: $K_2 \sim \Delta E_{e^+} (\text{МэВ}) \Omega_{\text{нак}} / \Omega_{e^+}$, здесь ΔE_{e^+} - захватываемый накопителем позитронов интервал энергий $\sim 10^5$ МэВ, $\Omega_{\text{нак}}$ - поперечный фазовый объем принимаемый накопителем (двухмерный) $\sim 10^{-5} \text{ рад}^2 \cdot \text{см}^2$, Ω_{e^+} - фазовый объем, рождающихся в результате конверсии позитронов $\sim 1 \text{ рад}^2 \cdot \text{см}^2$.

Существующие экспериментальные данные по конверсии электронов в низкоэнергетичные позитроны [9], позволяют принять коэффициент конверсии для электронов с энергией 35 МэВ в позитроны с энергией 0,2 МэВ порядка $2 \cdot 10^{-3}$ ($\text{МэВ}^{-1} \text{ Стер}^{-1}$).

Приведенные выше оценки показывают, что импульсный электрический ускоритель с параметрами: $E_e \sim 35$ МэВ, $J_e \sim 50$ А, τ (длительность импульса) ~ 100 нсек при частоте инжекции в накопитель ~ 5 Гц (напомним, что время затухания в рассматриваемом накопителе $\sim 0,1$ сек), обеспечит нужную скорость накопления позитронов.

Таким образом, рассмотренная выше схема позитронного накопителя позволяет получить порядка нескольких тысяч атомов антиводорода в секунду. Отметим, что наши оценки не предполагали использование каких-либо элементов системы охлаждения сильно отклоняющихся по своим параметрам от уже реализованных. Поэтому приведенная оценка скорости выхода антиводорода кажется достаточно реалистичной. Разработка систем с более напряженными параметрами и использование специальных приемов, реализация которых потребует дополнительных экспериментальных исследований дает перспективу увеличения выхода антиводорода вплоть до существующего выхода антипротонов.

* Рассмотренная схема инжекции (см. также заключение) разумеется не является единственно возможной, однако, она вполне адекватна поставленной задаче. Схема с промежуточным накопителем на высокую энергию, во-первых, представляется более громоздкой, во-вторых, не может существенно увеличить скорость накопления, поскольку и в этом накопителе предельный ток будет ограничиваться кулоновским взаимодействием на низкой энергии (энергии инжекции в основной накопитель).

Заключение

По-видимому, наиболее сильным ограничением на скорость образования антиводорода является кулоновский предел по накопленному току позитронов и антипротонов. Есть два пути его повышения: компенсация пространственного заряда и увеличение кинетической энергии пучков. В первом случае предельно накопленный ток будет определяться различного рода когерентными неустойчивостями, во втором — возможностями системы электронного охлаждения (создание системы электронного охлаждения на сравнительно высокие энергии представляет известные трудности). Так при увеличении энергии позитронов до 1–2 МэВ скорость образования антиводорода (за счет увеличения токов позитронов и антипротонов) возрастает на два–три порядка. Как показывают простейшие оценки, использование стимулированной рекомбинации позволяет увеличить скорость образования антиводорода еще на порядок.

Для обеспечения столь высокой скорости накопления позитронов ($\sim 10^7$) существуют по крайней мере две возможности: использование предварительного газового охлаждения позитронов и уменьшение времени затухания позитронов при инъекции в накопитель. Работоспособность газового охлаждения позитронов была доказана экспериментально в работе [10], по предварительным оценкам его использование в рассмотренной выше схеме может увеличить скорость накопления позитронов на три–четыре порядка.

Для уменьшения времени затухания (а, следовательно, увеличения частоты инъекции) можно использовать два приема: перераспределение декрементов (эта возможность оценивалась выше) и "подметание" [2].

Использование "подметания" кажется весьма целесообразным именно в силу особенности охлаждения позитронов в магнитном поле, заключающейся в том, что скорость охлаждения как продольного, так и поперечного фазового объема в достаточно сильном магнитном поле, оказывается обратно пропорциональной относительной продольной скорости электронов и позитронов. С использованием этого приема инъекция позитронов в накопитель представ-

ляется следующим образом^{*}). Вновь инжектируемая порция горячих позитронов весьма быстро (возможно за несколько десятков оборотов) охлаждается путем подметания по продольной степени свободы до предельно малых температур порядка $e^2 n_e^{-1/3}$. После этого происходит интенсивное, определяемое очень малыми $\sim \sqrt{e^2 n_e^{-1/3}/m}$ относительными продольными скоростями электронов и позитронов, охлаждение поперечного фазового объема, усиленное перераспределением декрементов. Таким приемом можно добиться затухания инжектируемых позитронов с разбросом по энергии $\Delta E/E \sim 10^{-3}$ и поперечным фазовым объемом (одномерным) $C_x \sim C_z \sim 3 \cdot 10^{-3}$ за несколько сот оборотов, а значит многократного увеличения частоты инъекции и, следовательно, скорости накопления позитронов.

Хотя изложенные соображения требуют дальнейшего тщательного рассмотрения, они позволяют надеяться на создание установки с производительностью 10^7 – 10^8 атомов антиводорода в секунду. Не исключено, что подобный источник монохроматического пучка позитронов может быть использован для решения ряда научных задач.

^{*}) Отметим, что прием "подметания" имеет смысл проводить только в том случае, если колебания продольной скорости позитронов, связанные с конечной величиной поперечного фазового объема, весьма малы ($\Delta v \sim \sqrt{e^2 n_e^{-1/3}/m}$). Такой характер движения частиц в накопителе можно реализовать (с известной точностью) если матрица перехода между соленоидами является единичной.

Л и т е р а т у р а :

1. Г.И.Будкер. "Атомная Энергия", т.22, в.5 (1967).
2. Н.С.Дербенев, А.Н.Скринский. "Physics Reviews", ser. "Soviet Physical Reviews", vol. 3, p. 165-273.
3. Г.И.Будкер, А.Н.Скринский. УФН, 1973, т.124, № 4.
4. А.С.Артамонов, Н.С.Дербенев. Электронное охлаждение позитронов (в печати).
5. Г.И.Будкер, Н.С.Диканский, В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, А.Н.Скринский, Б.Н.Сухина. Экспериментальное исследование электронного охлаждения. Препринт ИЯФ СО АН СССР, № 33 (1976).
6. Г.И.Будкер, А.Ф.Булдучев, Н.С.Диканский, В.И.Кононов, В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, А.Н.Скринский, Б.Н.Сухина. Новые результаты исследований по электронному охлаждению. В сб. "Труды Пятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц", т.1, 236 (1977)
7. А.Н.Шарана. Экспериментальное исследование рекуперации энергии интенсивного электронного пучка. Канд. дисс. 1982 г.
8. В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, Р.А.Салимов. ЖТФ, 41, № II, 2204 (1971).
9. R.E. Sund, R.B. Walton, Nucl. Instr. and Meth. 27 (1964), 109.
10. Б.Н.Саников. Исследование прохождения позитронов через газы. Препринт ИЯФ СО АН СССР № 33 (1972).
11. Ya. S. Derbenev. Proceedings of the Workshop on the cooling of high energy beams. The University of Wisconsin, November 3, 4, 1978.

12. Т.А.Всеволожская, Б.И.Гришанов, Я.С.Дербенев, Н.С.Диканский, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский, В.И.Балбеков, Г.Г.Гуров, А.И.Дрождин, К.Н.Мызников, Ю.С.Седотов, В.А.Ярба. В сборнике "Труды Седьмого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц", т.1, 229 (1981).

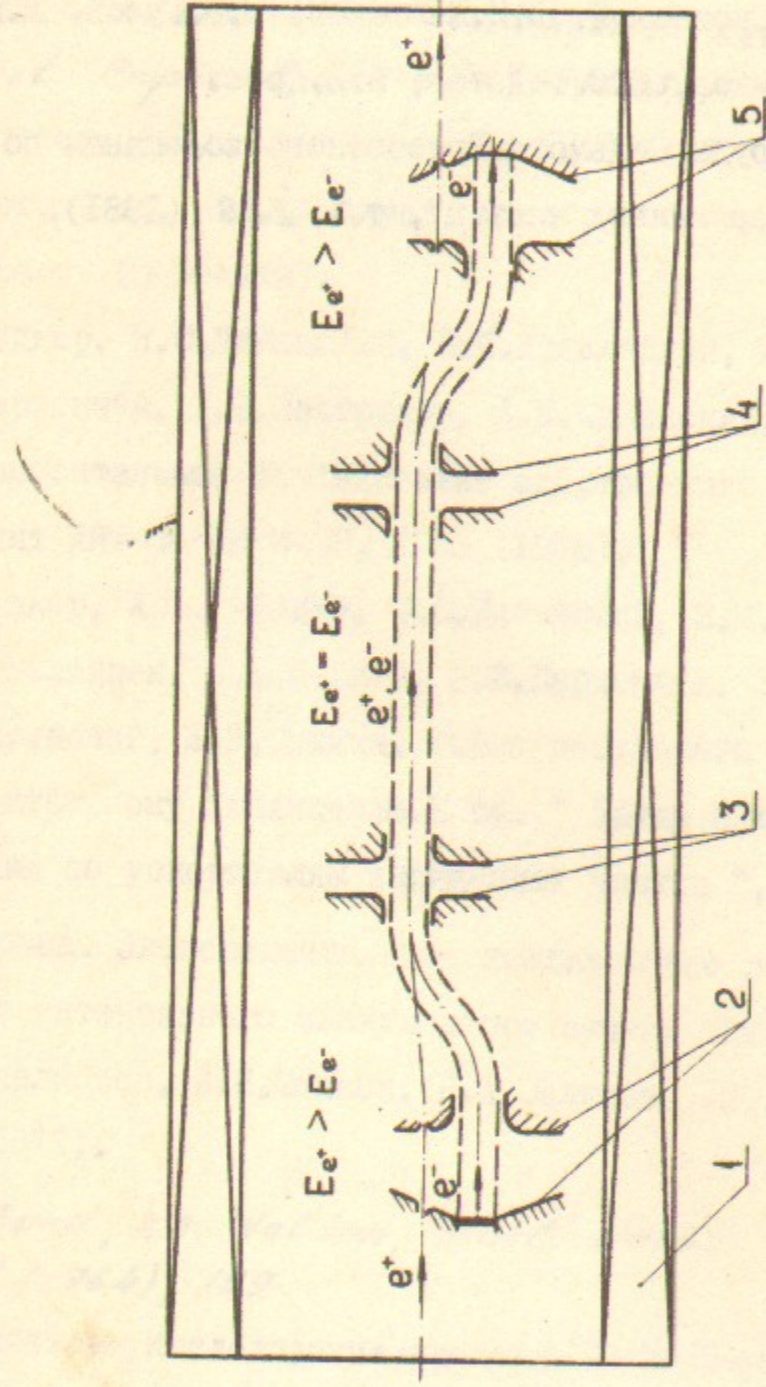


Рис.1.

1 - соленоид; 2 - электронная пушка; 2-3 - совмещение e^+ и e^- пучков;
3-4 - электронное охлаждение позитронов; 4-5 - разведение e^+ и e^-
пучков; 5 - рекуператор.

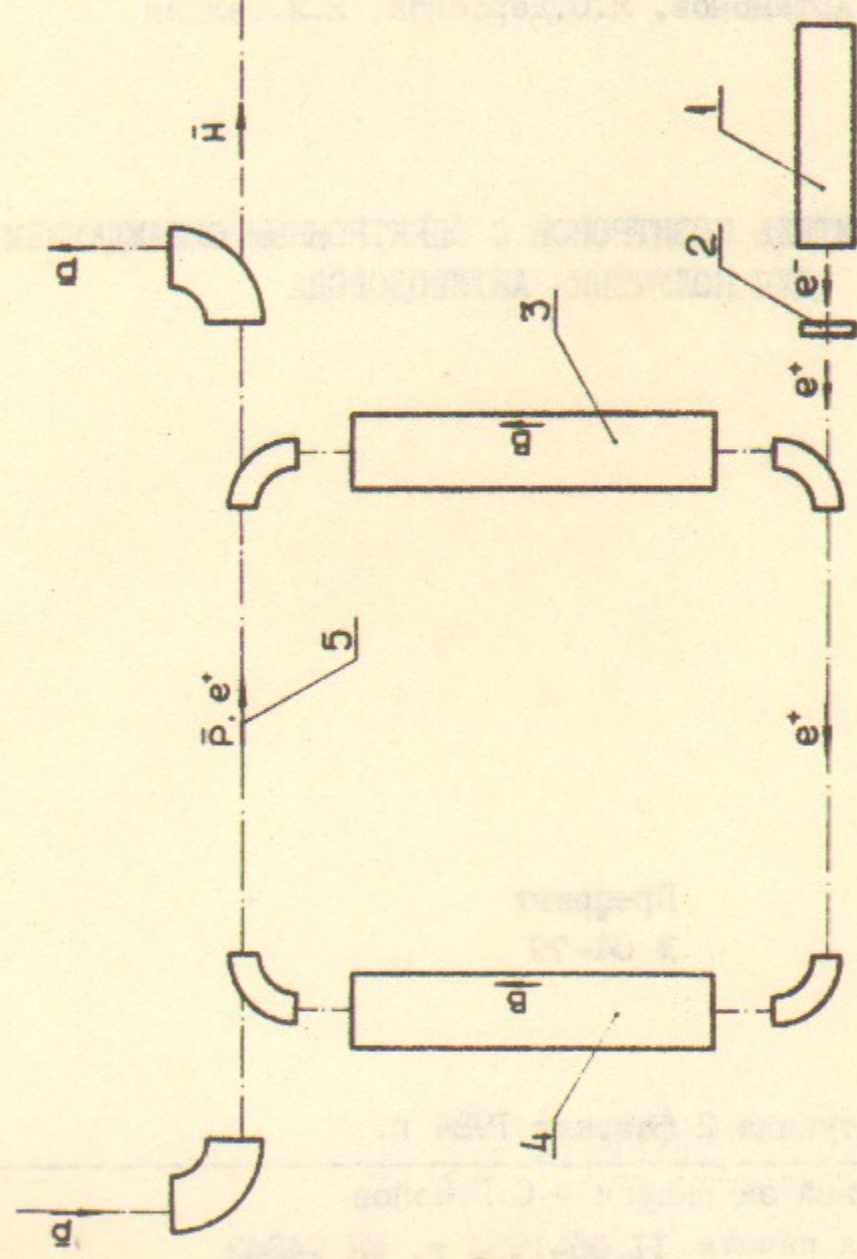


Рис.2.

1 - импульсный электронный ускоритель; 2 - конвертор,
3,4 - соленоиды с электронным охлаждением; 5 - участок
образования антиводорода.

А.С. Артамонов, Я.С.Дербенёв, Е.Л.Салдин

НАКОПИТЕЛЬ ПОЗИТРОНОВ С ЭЛЕКТРОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АНТИВОДОРОДА

Препринт
№ 84-79

Работа поступила 2 февраля 1984 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 11.06-1984 г. МН 04343

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.1,6 печ.л., 1,3 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 79.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90