

Накопитель позитронов низкой энергии для генерации направленных потоков позитрония: статус и развитие

А.В.Иванов, С.А.Ивашкевич, В.В.Калиниченко, Ю.В.Коротаев, И.Н.Мешков, С.В.Мионов,
А.Л.Петров, А.О.Сидорин, А.В.Смирнов, Е.М.Сыресин, Г.В.Трубников,
С.Б.Федоренко, С.Л.Яковенко

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Целью проекта ЛЕПТА (Low Energy Particle Toroidal Accumulator) [1] является создание небольшого позитронного накопителя с электронным охлаждением циркулирующего позитронного пучка. Основное назначение этого накопителя – генерация интенсивного потока связанного состояния электрона и позитрона, так называемого позитрония, и в комплексе с накопителем антипротонов низкой энергии синтез атомов антиводорода в количествах, достаточных для проведения экспериментов.

Введение

Установка ЛЕПТА (рис. 1) включает в себя накопитель позитронов, позитронный инжектор, систему электронного охлаждения и детектор для проведения экспериментов на потоке позитрония.

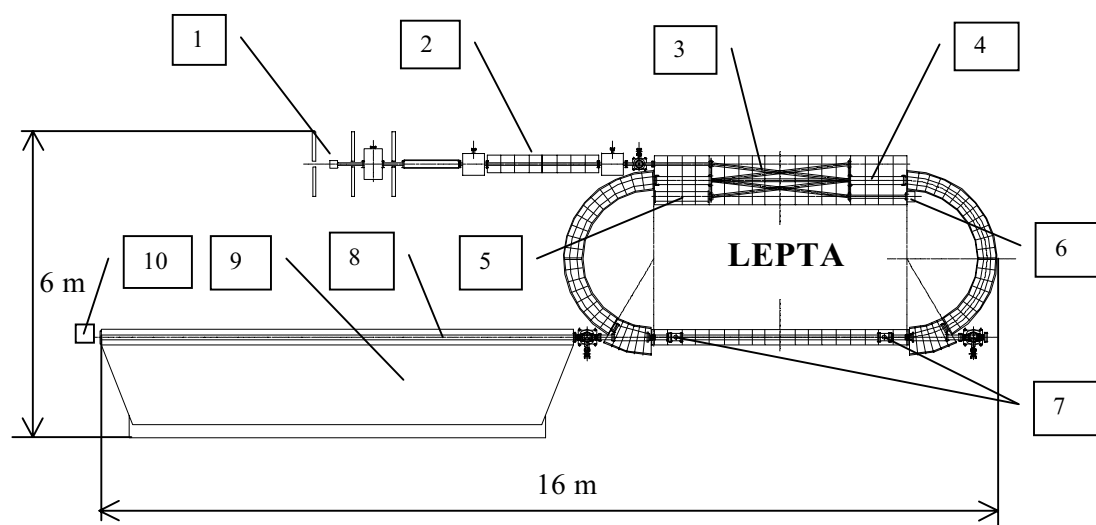


Рис. 1. Установка ЛЕПТА: 1 – источник позитронов; 2 – позитронная ловушка; 3 – септумные обмотки; 4 – кикер; 5 – электронная пушка; 6 – коллектор электронов; 7 – пикап станции; 8 – распадный канал; 9 – дипольный магнит; 10 – детектор позитрония.

Использование продольного магнитного поля для фокусировки позитронов низкой энергии является основной особенностью создаваемого накопителя. На первой стадии работы накопителя планируется использовать источник позитронов на базе β^+ активного изотопа ^{22}Na . Система инжекции включает в себя также и ловушку для предварительного накопления позитронов от источника в количестве, необходимом для инжекции в накопитель. Ближайшим прототипом системы инжекции является позитронная ловушка, разрабатываемая в ЦЕРН для проекта ATHENA [2]. Однооборотная инжекция позитронов в накопитель осуществляется с помощью специальной кикерной обмотки.

Для совмещения и разведения циркулирующего позитронного и однопролетного электронного пучков используются септумная обмотка и центробежный дрейф электронов в тороидальных секциях накопителя.

Позитроний образуется при взаимодействии позитронов со свободными электронами охлаждающего электронного пучка, имеющего скорость близкую к скорости позитронов. Это позволяет получить интенсивный поток атомов позитрония с малой угловой расходимостью и малым разбросом по скоростям. При экспериментах на пучках позитрония точность измерения его характеристик может быть улучшена на несколько порядков по сравнению с традиционными методами, использующими генерацию позитрония в мишенях [3]. Кроме того, могут быть осуществлены многие эксперименты, невозможные при традиционной методике.

Периметр накопителя ЛЕПТА составляет примерно 18 метров, продольное магнитное поле имеет величину 400 Гс, энергия циркулирующих позитронов 10 кэВ. Ожидаемые угловой и энергетический разбросы пучка позитрония составляют $2 \cdot 10^{-3}$ и $(1-5) \cdot 10^{-4}$ соответственно. При 10^9 позитронов, циркулирующих в накопителе, поток позитрония равен примерно 10^4 атомов в секунду.

В ходе реализации проекта были решены следующие задачи:

- разработан технический проект накопителя и технология изготовления его основных узлов;
- изготовлена и протестирована вакуумная камера накопителя;
- изготовлен и настроен соленоид секции электронного охлаждения, в настоящее время изготавливаются остальные узлы магнитной системы;
- разработан эскизный проект системы инжекции на основе радиоактивного изотопа;
- разработан эскизный проект детектора для проведения первых экспериментов на потоке позитрония.

Система электронного охлаждения включает в себя электронную пушку (позиция 5, рис. 1), размещенную в соленоиде септума, и коллектор электронов (позиция 6, рис. 1), размещаемый снаружи магнитного экрана накопителя. Узлы системы электронного охлаждения разрабатываются и изготавливаются на базе стенда электронного охлаждения Лаборатории ядерных проблем.

На начальной стадии работы накопителя планируется экспериментальное исследование динамики циркулирующего пучка, измерение компонент силы трения при электронном охлаждении позитронов и исследование параметров равновесного состояния пучка после завершения процесса охлаждения, измерение зависимости темпа рекомбинации электронов и позитронов от величины их относительной скорости. Решение этих проблем позволит уточнить параметры детектора для первых запланированных экспериментов на потоке позитрония, а именно: измерения времени жизни орто-позитрония и сравнения электрических зарядов электрона и позитрона.

1. Система инжекции

Пучок позитронов на выходе системы инжекции должен иметь радиус 0.5 сантиметра, при энергии 10 кэВ и интенсивности $10^8 - 10^9$ частиц. Длительность импульса инжекции не превышает 300 наносекунд, период повторения 100 секунд (что соответствует времени жизни пучка в накопителе). На начальной стадии работы накопителя мы планируем использовать источник на основе β^+ активного изотопа ^{22}Na (позиция 1 на рис. 1). Капсула с изотопом активность 10 – 20 мКю размещается на криогенной панели и охлаждается до температуры 5.5 К. Капсула располагается внутри медного электрода конической формы. Позитроны из источника имеют непрерывный энергетический спектр вплоть до энергии 545 кэВ и замедляются в слое благородного газа (неона), сконденсированного на коническом электроде. Эффективность модератора такого типа лежит в интервале от 0.2 до 0.8%. Энергетический разброс позитронов после модератора равен 2 – 5 эВ, они ускоряются в статическом поле до энергии 40 эВ и через фильтр Вина направляются в ловушку пенинговского типа. Интенсивность пучка позитронов на входе в ловушку составляет $1-2 \cdot 10^6$ частиц в секунду. Источник позитронов и линия транспортировки погружены в продольное магнитное поле величиной 200 Гс, создаваемое системой отдельных катушек.

Вакуумная камера ловушки (позиция 2 на рис. 1) состоит из двух боксов, предназначенных для откачки и ввода питания, соединенных цилиндрической камерой, расположенной внутри соленоида с полем порядка 400 Гс. Внутри этой камеры размещается система изолированных друг от друга электродов, изготовленных из позолоченного алюминия, к которым прикладываются электростатические потенциалы, создающие пробочную конфигурацию поля в продольном направлении. Диаметры электродов подбираются таким образом, чтобы создать расчетную величину градиента давления буферного газа (азота) вдоль системы. При оптимальном распределении потенциала и давления эффективность ловушки такого типа достигает 60%. Позитроны накапливаются в ловушке в течение 100 секунд и термализуются при соударениях с молекулами буферного газа. Источник позитронов и ловушка расположены под электростатическим потенциалом +10 кВ,

что соответствует энергии инжекции в накопитель. После завершения процесса накопления позитроны извлекаются импульсом электрического поля и направляются на вход накопителя. Энергетический спектр пучка позитронов определяется перепадом поля на длине сгустка в ловушке и составляет примерно 10 эВ, что соответствует области устойчивости поперечных колебаний частиц в накопителе. Интенсивность инжектированного пучка равна примерно 10^8 частиц. В дальнейшем, для повышения интенсивности пучка планируется использовать источник позитронов на базе линейного электронного ускорителя.

2. Накопитель ЛЕПТА

Конструкция накопителя ЛЕПТА описана в статьях [1; 4 – 6]. Накопитель (рис. 1, табл. 1) состоит из двух тороидальных и двух прямолинейных соленоидов, соединенных в рейстрек и окруженных общим магнитным экраном. Вакуумная камера накопителя располагается внутри соленоидов. Центробежный дрейф позитронов в тороидальных соленоидах компенсируется поворотным полем соответствующей величины. Для формирования замкнутой орбиты используется дополнительная обмотка, создающая спиральное квадрупольное поле, подобное полю стелларатора. Эта обмотка состоит из двух пар спиральных проводников с противоположным направлением тока и размещается на вакуумной камере внутри прямолинейного соленоида.

Расчет динамической апертуры и параметров пучка в накопителе был выполнен на специально разработанной программе ВЕТАТРОН, предназначенной для моделирования динамики частиц в случае жесткой связи между горизонтальной и вертикальной степенями свободы [7-9].

Для тестирования и настройки узлов магнитной системы накопителя создан экспериментальный стенд, включающий в себя системы питания и охлаждения соленоидов и устройство для позиционирования измерительного датчика. Для измерения магнитного поля используется датчик, работающий на принципе ядерного магнитного резонанса, точность измерения которого составляет 10^{-5} в диапазоне поля от 0.5 до 30 кГс [10].

Таблица 1. Основные параметры накопителя ЛЕПТА.

Периметр	м	18.12
Энергия позитронов	кэВ	10.0
Период обращения	нсек	300
Продольное магнитное поле	Гс	400
Радиус поворота в тороидальных секциях	м	1.45
Поворотное магнитное	Гс	1.75
Градиент спирального квадрупольного поля	Гс/см	10.0
Радиус пучка позитронов	см	0.5
Число циркулирующих позитронов	-	$1 \cdot 10^9$
Давление остаточного газа	Торр	$1 \cdot 10^{-10}$
Время жизни пучка позитронов	сек	100
Система электронного охлаждения		
Длина секции охлаждения	м	4.53
Ток пучка	А	0.5
Радиус пучка	см	1
Время охлаждения	мсек	100
Параметры пучка ортопозитрония		
Интенсивность	сек ⁻¹	$1 \cdot 10^4$
Угловой разброс	мрад	1
Энергетический разброс	-	$1 \cdot 10^{-3}$
Диаметр пучка на выходе накопителя	см	1.1
Распадная длина	м	8.52

К настоящему времени изготовлен, протестирован и настроен соленоид секции электронного охлаждения. После коррекции относительная неоднородность магнитного поля на его оси не превышает $\Delta B/B \sim 5 \cdot 10^{-4}$, что соответствует расчетной величине. Изготовление остальных узлов магнитной системы находится в завершающей стадии.

Изготовлен прототип спиральной квадрупольной обмотки с адиабатическим изменением поля на входе и выходе. В каждом поперечном сечении обмотка повторяет геометрию линзы Пановского, что должно обеспечить хорошую линейность фокусирующего поля. Для измерения угловых возмущений вносимых в пучок этой обмоткой, в настоящее время создается экспериментальный стенд, оборудованный системой оптического измерения углового распределения.

Изготовлена и собрана вакуумная камера накопителя. При ее тестировании был получен вакуум 10^{-7} Торр. В настоящее время ведется подготовка к прогреву камеры и получению расчетной величины остаточного давления.

3. Первые эксперименты на пучке позитрония

Первый эксперимент, который планируется осуществить на пучке позитрония, имеет целью сравнение электрических зарядов электрона и позитрона – частиц, формирующих этот атом. Он может быть осуществлен путем измерения смещения пучка после дрейфа в поперечном магнитном поле. Дипольный магнит для этого эксперимента (позиция 9, рис. 1) имеет длину 8.5 метра, величина поля 2 Т. Координатно-чувствительный детектор (например, можно использовать микроканальную пластину с цифровой видеокамерой) располагается на выходе магнита. Положение центра тяжести пучка позитрония может быть измерено с точностью 0.02 – 0.1 мм. При параметрах пучка, представленных в табл.1, по предварительным оценкам, точность измерения относительной разницы зарядов $\delta e/e \leq 4 \cdot 10^{-10}$ может быть достигнута при продолжительности эксперимента $4 \cdot 10^3$ секунд.

На этом же детекторе может быть осуществлен эксперимент по измерению времени жизни ортопозитрония. При этом эксперименте поперечное магнитное поле не используется, а количество детекторов должно быть увеличено как минимум до трех. Детекторы располагаются вдоль дрейфовой камеры (позиция 8, рис. 1) на расстоянии 3-5 метров один от другого и используются для измерения темпа распада о- P_s на длине порядка двух распадных длин. Статистическая погрешность измерения распадной длины λ имеет минимальное значение при $L = 0.68\lambda$, L – база измерений, и для большого числа точек измерения для получения точности $\delta\lambda/\lambda \sim 10^{-5}$ необходимое время проведения эксперимента составляет примерно $\sim 2 \cdot 10^7$ сек ~ 1 год. Это означает, что получение максимально возможной интенсивности пучка позитрония является ключевым моментом при проведении этого эксперимента.

Благодарности

Эта работа поддержана грантом РФФИ №99-02-17716.

Литература

- [1] I. Meshkov, A. Sidorin. NIM. A 391 (1997), p. 216.
- [2] M.H. Holzscheiter et al. Nucl. Phys. B **56A**, p. 336 (1997).
- [3] I. Meshkov. Phys. Part. Nucl. 28(2), March-April 1997, p.198.
- [4] И.Н. Мешков, А.О. Сидорин, Е.М. Сыресин, А.В. Смирнов. Накопитель низкоэнергичных позитронов (электронов) с продольным магнитным полем. – XVI Совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 20 – 22 октября, 1998 года, стр. 19.
- [5] Yu.V. Korotaev, I.N. Meshkov, S.V. Mironov, A.O. Sidorin, E. Syresin. – 6th European Particle Accelerator Conference, Stockholm, 1998, p. 853.
- [6] A. Ivanov et al. NIM. A 441(2000), p. 262.
- [7] I. Meshkov et al. The particle dynamics in the electron cooling system with circulating electron beam, NIM A 441(2000), p.267.
- [8] I. Meshkov et al., NIM A 441(2000), p.145.
- [9] E. Syresin, et al. – Proc. of the workshop on Beam Cooling and Related Topics, Montreux, 4-8 October 1993, CERN 94-03, p. 159.
- [10] S.A. Ivashkevich. JINR Rapid Communication, p. 11-94-202, Dubna, 1994.