

## ПРОЕКТ LEPTA: ФОРМИРОВАНИЕ И ИНЖЕКЦИЯ ПОЗИТРОННОГО ПУЧКА

*Е. В. Ахманова<sup>а</sup>, М. К. Есеев<sup>б</sup>, А. Г. Кобец<sup>а, в</sup>, И. Н. Мешков<sup>а</sup>,  
А. Ю. Рудаков<sup>а</sup>, А. А. Сидорин<sup>а</sup>, С. Л. Яковенко<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия

<sup>в</sup> Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, Харьков, Украина

В Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) сооружен и вводится в действие накопитель позитронов с электронным охлаждением LEPTA (Low Energy Particle Toroidal Accumulator). Энергия инжектируемых в накопитель позитронов 2–4 кэВ. Основная задача установки — генерирование направленного потока атомов позитрония. Накопительное кольцо было введено в действие в сентябре 2004 г. Позитронный инжектор изготавливался в 2005–2010 гг., а канал транспортировки в 2011 г. В августе 2011 г. начались эксперименты по инжекции электронов и позитронов из инжектора в накопитель. Полученные результаты представлены в этой статье.

The project of the Low Energy Positron Toroidal Accumulator (LEPTA) is under development at JINR (Dubna). The LEPTA facility is a small positron storage ring equipped with the electron cooling system. The project positron energy is of 2–10 keV. The main goal of the facility is to generate an intense flux of positronium atoms — the bound state of electron and positron. Storage ring of LEPTA facility was commissioned in September 2004 and has been under development up to now. The positron injector was constructed in 2005–2010, and beam transfer channel — in 2011. At the end of August 2011 experiments on electron and positron injection into the ring were started. The recent results are presented here.

PACS: 29.27.Ac; 29.27.-a; 41.75.Fr

### ВВЕДЕНИЕ

Основное назначение накопителя LEPTA — генерация интенсивного потока позитрония для прецизионного измерения его характеристик. Конструкция и принцип действия накопителя неоднократно описан (см. детали в обзоре [1]).

### 1. ПРОЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВКИ

Накопитель LEPTA работает в области низких значений энергий позитронов (табл. 1). Для экспериментов по измерениям характеристик атомов позитрония требуется минимально возможный их разброс по углу и скорости. Например, для измерения времени жизни парапозитрония с относительной погрешностью меньше  $1 \cdot 10^{-4}$  (что вдвое меньше значения, достигнутого в настоящее время) относительный разброс по скорости не должен превышать  $10^{-4}$ .

Таблица 1. Проектные параметры накопителя LEPTA

Периметр, м	16,8
Энергия позитронов, кэВ	4–10
Период обращения, нс	500–300
Продольное магнитное поле, Гс	400
Большой радиус тороидов, м	1,45
Градиент спирального квадрупольного поля, Гс/см	10
Радиус позитронного пучка, см	0,5
Количество циркулирующих позитронов	$10^8$
Давление остаточного газа, Торр	$10^{-10}$
Интенсивность, атом/с	$10^4$
Разброс по энергиям	$10^{-3}$

Специфической особенностью накопителя с продольным магнитным полем является то, что электронное охлаждение циркулирующих позитронов уменьшает их температуру, но при этом не меняет поперечный размер пучка. Каждый позитрон охлаждается, оставаясь «привязанным» к своей силовой линии магнитного поля. Поэтому разброс позитронов по скоростям определяется перепадом потенциала собственного поля электронного пучка на радиусе пучка позитронов. Эта разность потенциалов определяется степенью естественной нейтрализации пучка, зависящей от геометрии вакуумной камеры (вариации ее поперечного размера вдоль орбиты позитронов).

## 2. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

Первой физической задачей, которую предстояло решить на накопителе LEPTA, было достижение длительного времени циркуляции в нем частиц. До сих пор было несколько попыток создания подобных накопителей, но ни в одном из них не было достигнуто достаточно длительного времени циркуляции [1].

Второй задачей является электронное охлаждение позитронов и генерация позитрония. Ее успешное решение позволит осуществить постановку уникальных экспериментов на направленных потоках позитрония, это:

1. Проверка СРТ-теоремы, сохранения СР и Р.
2. Квантовая электродинамика в системе позитрония.
  - 2.1. Спектроскопия позитрония.
  - 2.2. Измерение времени жизни пара- и ортопозитрония.
3. Поиск легких нейтральных бозонов (легкого аксиона).
4. Проверка гипотезы «зеркальной вселенной» (темная материя) [2].

В физике позитрония [3] в первую очередь можно выделить проблему измерений параметров схемы распада (аннигиляции) позитрония. При постановке экспериментов на остронаправленных, моноэнергичных, интенсивных потоках позитрония в вакууме исключается влияние среды, неизбежное при традиционных методах генерации позитрония в мишенях. Генерация парапозитрония (p-Ps) будет осуществляться после вывода пучка ортопозитрония (o-Ps) из накопителя на контролируемых переходах в магнитном поле.

Это позволяет провести эксперименты по измерению времени жизни орто- и парасостояний позитрония с точностью, недоступной ранее, установить предельные значения вероятности запрещенных распадов с нарушением закона сохранения момента и зарядовой инвариантности и  $e^+e^-$ -аннигиляции с образованием легкого аксиона — одного из кандидатов «темной материи».

### 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ НАКОПИТЕЛЯ

После физического пуска установки в 2005 г. не удалось получить проектное время жизни циркулирующего пучка. Причинами этого являлись неоднородность магнитного поля и недостаточно высокий вакуум. Изменения конструкции накопителя и полученные результаты были описаны ранее [4]. Следующим шагом для увеличения времени жизни циркулирующего пучка было изменение конструкции вакуумной камеры кикера. Камера старого кикера не позволяла увеличить зазор между пластинами больше чем на 32 мм. В новой конструкции это расстояние удалось увеличить до 120 мм (рис. 1). В результате время жизни удалось увеличить до 0,17 с (рис. 2). Хотя оно еще очень далеко от расчетного, видны пути его дальнейшего увеличения.

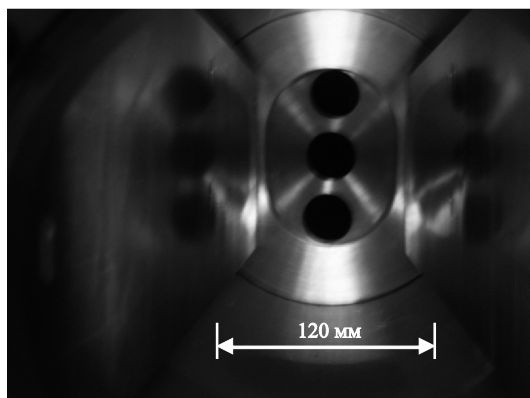


Рис. 1. Новый кикер. Видны входы позитронного (верхний), электронного (нижний) и центрального (равновесная орбита) каналов

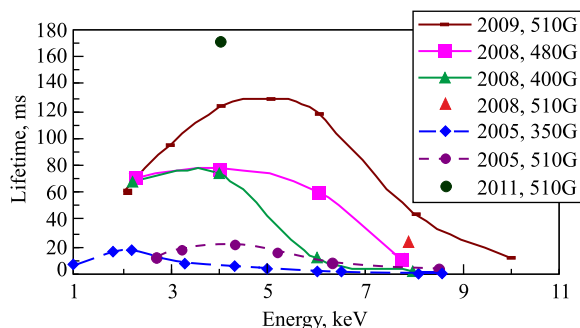


Рис. 2. Зависимость времени жизни электронного пучка, циркулирующего в накопителе, от энергии

#### 4. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Система электронного охлаждения была собрана в конце 2009 г. Тестирование системы начиналось вначале в импульсном режиме. После получения настроек траектории электронного пучка электронная пушка была переведена в постоянный режим.

Таблица 2. Результаты тестирования системы электронного охлаждения в режиме постоянного тока

$E_e$ , кэВ	Ток		
	$I_e$ , мА	$\Delta I_e$ , мкА	$\Delta I_e / I_e$
3	20	230	0,011
5	50	290	0,006
7	64	620	0,01
8,7	105	430	0,004

#### 5. ИНЖЕКТОР ПОЗИТРОНОВ

**5.1. Ловушка позитронов.** Ловушка — это устройство, которое использует статическое электрическое и магнитное поле для удержания заряженных частиц. Исследование процесса накопления производилось вначале с помощью электронов. Накопление осуществлялось с использованием метода «вращающейся стенки» [5]. Профили накопленного электронного пучка для разных времен накопления приведены на рис. 3.

Летом 2010 г. источник позитронов и ловушка были собраны вместе. Начались первые эксперименты по накоплению позитронов. Накопленные позитроны выводились на коллектор, возле которого был установлен сцинтилляционный счетчик (рис. 4).

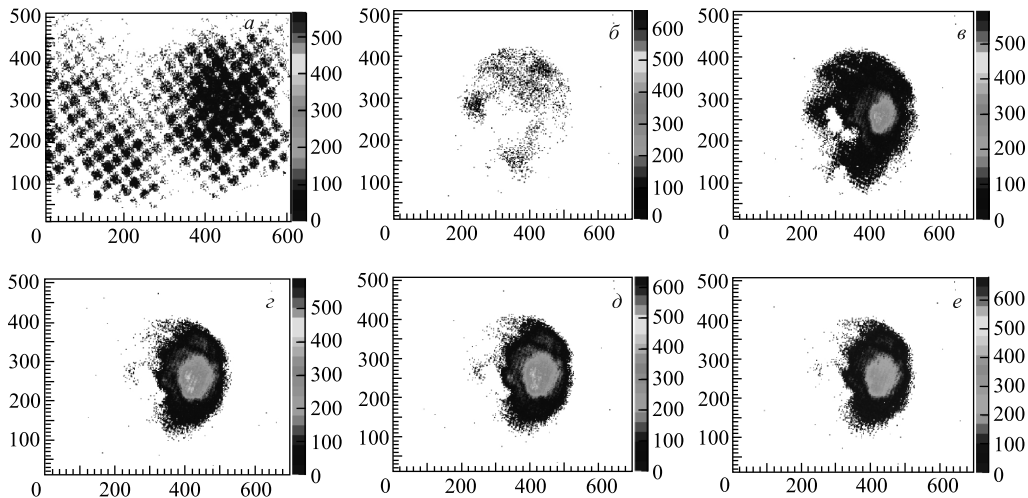


Рис. 3. Профили накопленного электронного пучка: а) 30 с, стенка выкл.; б) 15 с, стенка вкл.; в) 20 с, стенка вкл.; г) 30 с, стенка вкл.; д) 40 с, стенка вкл.; е) 90 с, стенка вкл.

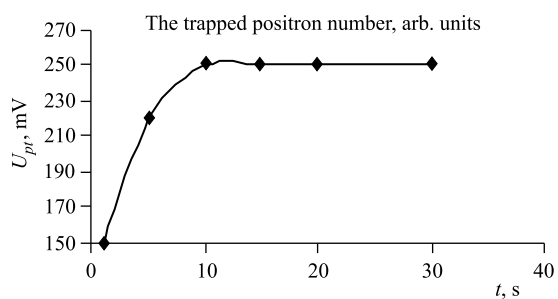


Рис. 4. Зависимость числа накопленных позитронов от времени накопления

**5.2. Канал инъекции позитронов.** Изготовление и сборка канала инъекции в августе 2011 г. были завершены, и начато тестирование. Тестирование осуществлялось с помощью электронного пучка от тестовой пушки (рис. 5), помещенной на входе в ловушку позитронов. Специальный механизм позволяет вводить пушку в апертуру позитронного пучка.



Рис. 5. Тестовая электронная пушка

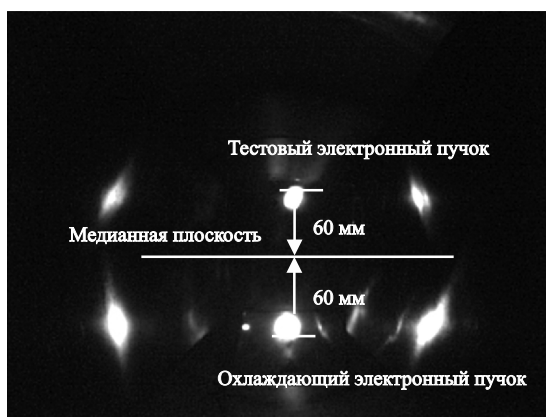


Рис. 6. Изображения двух электронных пучков

Кольцо было разомкнуто, и в вакуумной камере кикера находилось стекло с нанесенным люминофором. На рис. 6 приведены одновременно изображения двух электронных пучков — от тестовой пушки и пушки электронного охлаждения. С использованием полученных настроек удалось инжектировать в кольцо постоянный позитронный пучок.

По завершении проводок позитронов в кольцо была закончена его сборка и начаты эксперименты по инжекции позитронов и их захвату в режим циркуляции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закончены изготовление и сборка основных элементов установки LEPТА. Осуществлена проводка позитронов из инжектора в накопительное кольцо. Введена в действие система электронного охлаждения позитронов. Задача ближайшего будущего — настройка циркуляции позитронного пучка, электронное охлаждение позитронов и генерация позитрония.

Работа поддержана грантом РФФИ № 09-02-00084.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мешков И. Н. и др. Модифицированный бетатрон // ЭЧАЯ. 2005. Т. 36, вып. 5. С. 1071–1133.
2. Окунь Л. Б. Зеркальные частицы и зеркальная материя: 50 лет гипотез и поисков // УФН. 2007. Т. 177, № 4. С. 397–406.
3. Мешков И. Н. Экспериментальные исследования физики антиводорода и позитрония. Проблемы и возможности // ЭЧАЯ. 1997. Т. 28, вып. 2. С. 495–540.
4. Мешков И. Н. Развитие проекта LEPТА // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7(163). С. 814–820.
5. Surko C. M., Greaves R. G. Radial Compression and Inward Transport of Positron Plasmas Using a Rotating Electric Field // Physics of Plasmas. 2001. V. 8. P. 1879–1885.