

РАЗВИТИЕ ПРОЕКТА LEPTA

*Е. В. Ахманова^а, В. Ф. Быковский^а, М. К. Есеев^б, А. Г. Кобец^а,
В. И. Лохматов^а, И. Н. Мешков^а, В. Н. Павлов^а, Р. В. Пивин^а,
А. Ю. Рудаков^а, А. А. Сидорин^а, С. Л. Яковенко^а*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Поморский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Архангельск, Россия

В Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) сооружен и вводится в действие накопитель позитронов с электронным охлаждением LEPTA (Low Energy Particle Toroidal Accumulator). Накопитель является генератором направленных потоков ортопозитрония (o-Ps), который генерируется при рекомбинации пучка позитронов, циркулирующих в накопителе, с однопролетным электронным пучком. В 2004 г. накопитель введен в эксплуатацию с циркулирующим электронным пучком. Источник позитронов позитронного инжектора протестирован на новом радиоактивном источнике, доставленном из Южной Африки. Позитронная ловушка введена в эксплуатацию на электронах. Система электронного охлаждения протестирована на импульсном электронном пучке. Процесс ввода в эксплуатацию установки LEPTA представлен в данной статье.

LEPTA (Low Energy Particle Toroidal Accumulator) — the positron storage ring equipped with an electron cooling system — was constructed and is now under commissioning at the Joint Institute for Nuclear Research. The storage ring is aimed for generation of directed fluxes of ortho-positronium (o-Ps), produced in recombination of the positron beam circulating in the ring with single pass cooling electron beam. The storage ring was commissioned with circulating electron beam in 2004. The positron source of the positron injector was tested with new radioactive source delivered from South Africa. The positron trap was commissioned with electrons. Electron cooling system was tested with pulsed electron beam. The progress in the LEPTA commissioning is presented in this report.

PACS: 29.20.-c; 29.20.db; 29.25.-t

ВВЕДЕНИЕ

Основное назначение накопителя LEPTA (рис. 1) — генерация интенсивного потока позитрония для прецизионного измерения его характеристик. Конструкция и принцип действия накопителя неоднократно описаны (см. детали в обзоре [1]). Накопитель состоит из двух тороидальных соленоидов и двух прямолинейных, соединенных в кольцо. На одном из двух прямолинейных участков соленоиды имеют форму цилиндра круглого сечения, на другом участке — форму цилиндра с эллиптическим сечением, так называемые септумные соленоиды. Электронная пушка, коллектор и источник позитронов расположены внутри дополнительных соленоидов. Все соленоиды окружены общим магнитным экраном. Вакуумная камера расположена внутри соленоидов. Однооборотная инжекция позитронов осуществляется при помощи импульсного электростатического кикера.

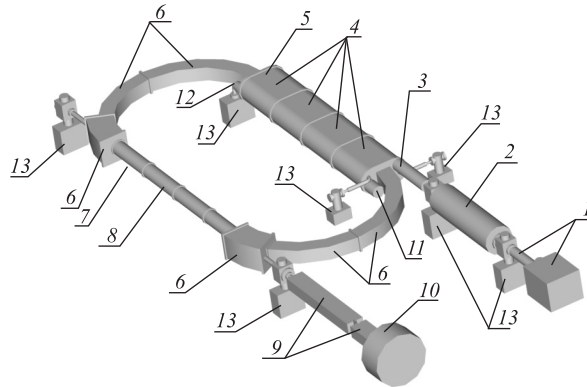


Рис. 1. Схема накопителя LEPTA: 1 — источник позитронов; 2 — позитронная ловушка; 3 — секция инъекции позитронов; 4 — септумные соленоиды; 5 — кикер (расположен внутри септумного соленоида); 6 — тороидные соленоиды; 7 — соленоид и спиральная квадрупольная линза; 8 — секция электронного охлаждения, прямолинейный соленоид; 9, 10 — детекторы; 11 — электронная пушка; 12 — коллектор электронов; 13 — вакуумные насосы

Электронный пучок инжектируется электронной пушкой, расположенной левее и ниже равновесной траектории позитронов. Проходя септум, электроны под действием поперечного магнитного поля смещаются в горизонтальной плоскости по направлению к равновесной траектории позитронов и попадают в кикер. Поскольку инжекция электронного пучка начинается после окончания инъекции позитронного пучка, когда кикер уже выключен, электронный пучок проходит кикер без отклонения. На входе в первый тор электроны оказываются ниже позитронного пучка. Направление центробежного дрейфа в торе определяется знаком заряда частиц. Поскольку дополнительное вертикальное магнитное поле компенсирует центробежный дрейф позитронов, для электронов оно имеет «обратное» направление и, соответственно, их дрейфовое смещение удваивается. Параметры установки подобраны таким образом, что, проходя через септумный соленоид и первый тор, электроны поднимаются на траекторию позитронов на входе в прямолинейную секцию — пучки совмещаются. В прямолинейной секции позитроны вначале проходят область со спиральным квадрупольным магнитным полем, а затем попадают на участок электронного охлаждения. На этом участке и происходит рекомбинация электронов и позитронов с образованием позитрония (Ps). Электрически нейтральные атомы Ps будут выводиться в экспериментальный канал. После прохода прямолинейной секции во втором торе они, благодаря дрейфу, разделяются. Электронный пучок попадает в выводной канал септума и транспортируется в коллектор.

«Фокусировка» (удержание) заряженных частиц в накопителе LEPTA осуществляется продольным магнитным полем, которое присутствует на всей орбите циркулирующего пучка, а устойчивость движения обеспечивается спиральным квадрупольным полем, которое формируется «стеллараторной» обмоткой (этот термин возник в физике плазмы, где для удержания плазмы в стеллараторах в дополнение к продольному магнитному полю используется спиральная мультипольная обмотка).

1. ПРОЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВКИ

Накопитель LEPTA работает в области низких значений энергий позитронов (см. таблицу). 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} .

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).

Два метра секции охлаждения «заняты» спиральной квадрупольной линзой. Однако в продольном магнитном поле траектории электронов и позитронов, движущихся вдоль одной и той же силовой линии, совпадают с точностью до различия поперечных компонент их скоростей. Поэтому рекомбинация электронов и позитронов с образованием позитрония будет происходить и на участке с поперечным полем линзы. Единственный

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}
Система электронного охлаждения	
Длина секции охлаждения, м	4(2)
Ток пучка электронов, А	0,5
Радиус электронного пучка, см	1
Параметры пучка ортопозитрония	
Интенсивность, атом/с	10^4
Угловая расходимость, мрад	1
Разброс по энергиям	10^{-3}

недостаток — большой угловой разброс потока атомов Ps:

$$\Delta Q \sim G \frac{a}{B} \sim 1,25 \cdot 10^{-2},$$

где G — градиент поля линзы; B — поле соленоида; $a = \min \{a^+, a^-\}$, a^+ , a^- — размеры пучков позитронов и электронов соответственно.

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 длительное время циркуляции [1]. На накопителе LEPTA удалось значительно продвинуться в решении этой задачи (разд. 4 ниже).

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

1. Проверка СРТ-теоремы, сохранение CP и P.
2. Квантовая электродинамика в системе позитрония.
 - 2.1. Спектроскопия позитрония.
 - 2.2. Измерение времени жизни паразитрония.
 - 2.3. Измерение времени жизни 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 паразитрония (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 паразитрония с точностью, недоступной ранее, установить вероятность распадов с нарушением закона сохранения момента и зарядовой инвариантности, существенно улучшить точность измерения параметров легкого аксиона, гипотетически ответственного за расхождение между экспериментальным и теоретическим временем жизни ортопозитрония. Предлагаемая схема проведения экспериментов позволит осуществить измерение тонкой структуры и лэмбовского сдвига в спектре ортопозитрония на потоке атомов методом атомного интерферометра.

3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ НАКОПИТЕЛЯ

После физического пуска установки в 2005 г. не было получено расчетное время жизни циркулирующего пучка. Причинами этого являлись неоднородность магнитного

поля и недостаточно высокий вакуум. Для устранения неоднородностей были переделаны магнитные экраны, изменена конструкция шин обратного тока и скорректированы неоднородности магнитного поля с помощью катушек коррекций. Для улучшения вакуума в кольце была изготовлена охлаждаемая квадрупольная линза и установлены геттерные насосы.

3.1. Шины обратного тока. Изменения в конструкции шин обратного тока были вызваны тем, что старый способ их коммутации не позволял обеспечить равномерное распределение токов по шинам. Внутри каждого соленоида проложено шесть шин обратного тока. Старый способ коммутации предусматривал коммутацию серповидными медными пластинками по три шины. Чтобы иметь возможность выравнять токи с помощью внешних балластных резисторов, эти серповидные пластинки разрезаны, а коммутация выведена за пределы стыков.

3.2. Коррекция продольного магнитного поля. Параметры катушек коррекции были рассчитаны по результатам измерения магнитного поля на всех стыках соленоидов. После установки катушек коррекции неоднородность поля была снижена до уровня $\Delta B/B \leq 2 \cdot 10^{-2}$ (рис. 2).

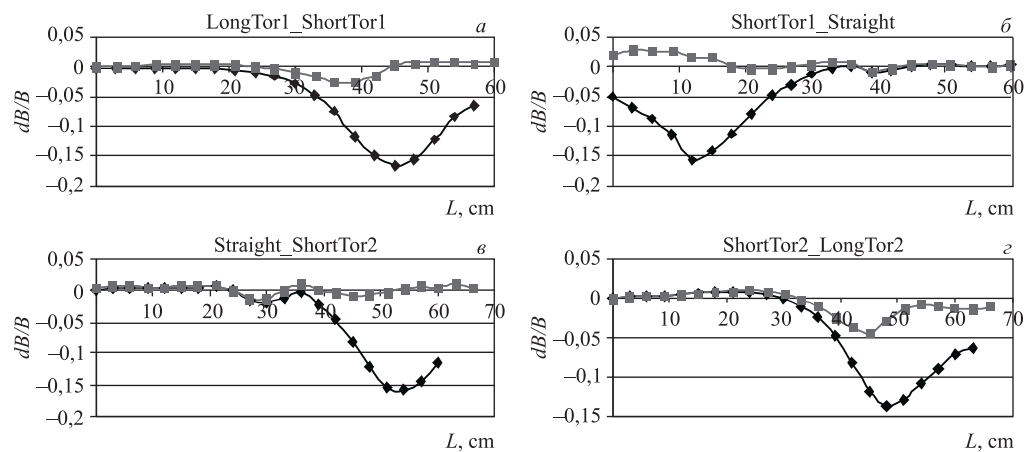


Рис. 2. Измерения магнитного поля до и после применения катушек коррекций —◆— без коррекции; —■— с коррекцией

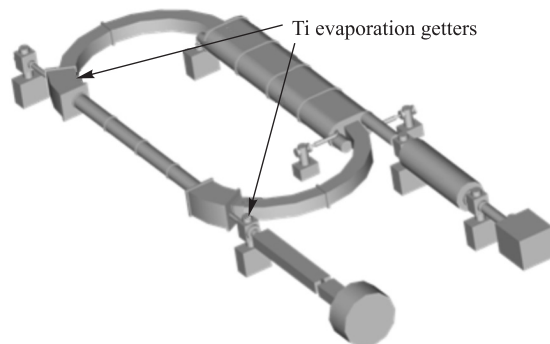


Рис. 3. Расположение распыляемых титановых геттеров

3.3. Спиральная квадрупольная линза. Был изготовлен новый спиральный квадруполь. Было решено сделать обмотки охлаждаемыми. Это изменило температурный режим в прямолинейной секции и улучшило вакуумные условия.

3.4. Вакуумная система. На выходе прямолинейной секции был установлен распыляемый титановый геттер, что позволило снизить давление в вакуумной камере до уровня $\leq 2 \cdot 10^{-9}$ Торр. Второй геттер будет установлен на входе секции (рис. 3), и еще два — на входе и выходе септумного соленоида.

4. СТАТУС ПРОЕКТА

4.1. Источник позитронов. В июле 2009 г. введен в эксплуатацию новый источник позитронов на основе изотопа ^{22}Na , переданный в ОИЯИ безвозмездно из института iThemba Labs (ЮАР). Эксперименты по формированию потока медленных позитронов в инжекторе LEPTA подтвердили эффективность созданной конструкции замедлителя: параметры спектра позитронов были оптимизированы подбором слоя замедлителя — замороженного неона (рис. 4).

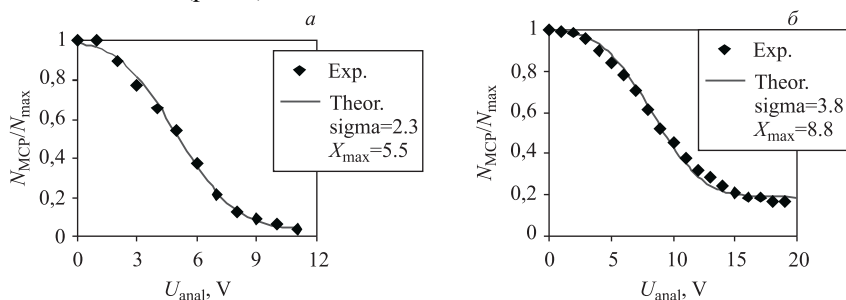


Рис. 4. Интегральный спектр позитронов на выходе из источника при двух значениях толщины d замороженного неона фитированный функцией ошибок: максимум гауссовского распределения соответствует энергии позитронов 8,8 (а) и 5,5 (б) эВ, а ширина спектра — 3,8 (а) и 2,3 (б) эВ соответственно

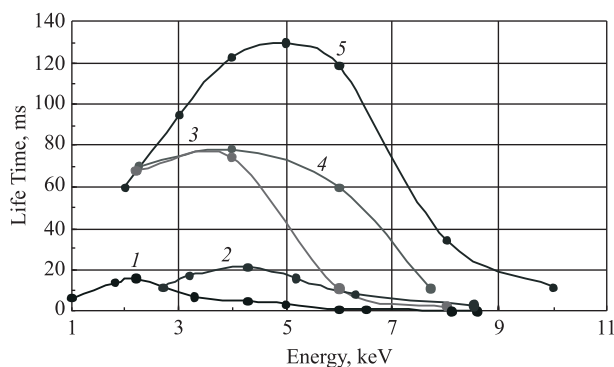


Рис. 5. Зависимость времени жизни электронного пучка, циркулирующего в накопителе, от энергии электронов: 1, 2 — первые результаты (2005 г.); 3, 4 — после ввода в действие «шин обратного тока» (2008 г.); 5 — после коррекции поля на стыках соленоидов и улучшения вакуума (2009 г.)

4.2. Время жизни циркулирующего пучка в накопителе. Измерение времени жизни пучка, циркулирующего в накопителе, проводилось на тестовом электронном пучке. В 2005 г. в накопителе впервые получен циркулирующий электронный пучок. После коррекции продольного магнитного поля и улучшения вакуума удалось существенно увеличить время жизни пучка в накопителе (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ближайшем будущем будет проверена работоспособность коллектора. Также будут проведены испытания ловушки на позитронах (до этого испытания происходили на электронах). В конце этого — начале следующего года будет закончен канал ввода и будут проведены эксперименты по циркуляции позитронного пучка.

Геттеры были предоставлены Леонтием Мироненко из Института ядерной физики им. Г. И. Будкера. Работа поддержана грантами РФФИ № 09-02-00084, № 09-02-90731.

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.