

УДК 621.384.6

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДА ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

*И. Н. Мешков<sup>1</sup>, А. О. Сидорин<sup>1</sup>*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Приводится краткий обзор наиболее существенных и интересных достижений в развитии метода электронного охлаждения, полученных в течение последних лет. Обсуждаются основные приложения метода, приведено описание установок, работающих с применением электронного охлаждения, накопительных колец и ловушек, как действующих, так и находящихся в стадии разработки. Среди современных проблем электронного охлаждения наибольшее внимание уделено развитию теории и численного моделирования, применению электронного охлаждения на низких энергиях, формированию кристаллических пучков в накопителях, развитию метода в области средних и высоких энергий ионов, электронному охлаждению и генерации антиводорода в ловушках, электронному охлаждению позитронов и генерации потоков атомов антиводорода и позитрония.

A brief review of the most significant and interesting achievements in electron cooling method development that took place during the last few years is presented. The description of the electron cooling facilities — storage rings and traps, both in service today and being under development — is given; electron cooling method application is considered. Modern problems in the method development are discussed. Among them are progress in theory and numerical simulations, low-energy electron cooling and its applications, crystalline beam formation, expansion into middle- and high-energy electron cooling, electron cooling in traps, antihydrogen generation, crystalline beam in traps, electron cooling of positrons and antihydrogen in-flight.

### ВВЕДЕНИЕ

За длительный период своего развития, с момента первого сообщения Г. И. Будкера в 1966 г. [1], метод электронного охлаждения получил существенное развитие. После его демонстрации и исследования в первых экспериментах в ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск (1974, рис. 1) [2], в ЦЕРН (1980) [3] и в Лаборатории им. Э. Ферми, США (1982) [4], метод начал использоваться в различных областях физики как одно из средств повышения эффективности экспериментальных исследований.

В настоящее время 10 накопителей, оборудованных системами электронного охлаждения (так называемые «кулеры»), находятся в эксплуатации и сооружается еще две установки (см. таблицу). Кроме того, несколько проектов, ориентированных на использование электронного охлаждения при средних и высоких энергиях, находятся в стадии интенсивного развития. Как и ранее, все существующие кулеры работают в диапазоне низких энергий ионов — менее 700 МэВ/нуклон. Электронное охлаждение было эффективно использовано для ионов практически всех элементов таблицы Менделеева и антипротонов. В настоящее время разрабатываются проекты использования электронного

---

<sup>1</sup><http://lepta.jinr.ru>

## Накопители с электронным охлаждением

Накопитель	Местоположение	Период эксплуатации, гг.	Сорт частиц	Макс. энергия, МэВ/нуклон, $A/Z = 2$	Периметр, м	Система охлаждения	
						Длина, м	$E, \text{кэВ}$
НАП-М	ИЯФ СО АН СССР	1974–1984	$p$	1,5–85	47	1,0	0,8–46
ICE	ЦЕРН, Швейцария	1979–1980	$p$	46	74	1,5	26
Test ring	Фермилаб, США	1980–1982	$p$	200	111	2,0	111
LEAR (LEIR)	ЦЕРН, Швейцария	С 1988	$p$	64	78,6	1,0	35
МОСОЛ (однопролетное охлаждение)	ИЯФ им. Г. И. Булкера, СССР	1986–1988	$p, H^-$	0,85	Длина 3 м	2,4	0,470
IUCF COOLER	Блумингтон, США	С 1988	$A \leq 7$	500	86,8	2,8	10–270
TSR	Гейдельберг, Германия	С 1988	$A \leq 127$	30	55,4	1,5	3–20
TARN-II	Токио, Япония	С 1989	$A \leq 20$	100	77,8	1,5	$\leq 130$
ASTRID	Аарус, Дания	С 1993	Легкие ионы	50	40		27
ESR	Дармштадт, Германия	С 1990	$A \leq 238$	30–560	108,4	2,5	10–320
CELSIUS	Упсала, Швеция	С 1989	$A \leq 40$	340 (1360)	81,8	2,5	10–300
CRYRING	Стокгольм, Швеция	С 1992	$A \leq 238$	0,3–24	51,6	1,1	2–20
COSY	Юлих, Германия	С 1993	$p$	40–2500	184	2	100
HIMAC	Чиба, Япония	С 1993	He, C, Ne, Si, Ar	800	131,88	1	30
SIS	Дармштадт, Германия	С 1998	$A \leq 238$	2,0	216	3,35	35
AD	ЦЕРН, Швейцария	С 1998	Антипротоны	2,76 ГэВ–5,31 МэВ	169,56	2	2,5–30

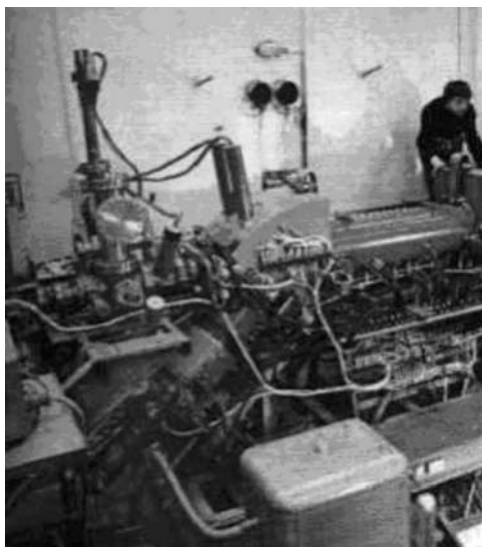


Рис. 1. Начало эпохи электронного охлаждения: первая система электронного охлаждения ЭПОХА (электронный пучок, охлаждающий антипротоны) в ИЯФ им. Г. И. Будкера, Новосибирск

охлаждения для молекулярных ионов и макрочастиц. Малая величина направленной компоненты скорости электронов в таких системах сближает их с электронным охлаждением в ловушках, используемым для получения антиводорода. Сооружается первый накопитель с электронным охлаждением позитронов. Разрабатываются проекты продвижения электронного охлаждения в область энергий ионов до 100 ГэВ/нуклон.

## 1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Среди наиболее заметных результатов, полученных с помощью электронного охлаждения, можно отметить следующие.

1) *Физика частиц.* Эксперименты с охлажденными и выведенными пучками антипротонов на накопителе LEAR в ЦЕРН принесли ряд новых результатов в физике частиц. В качестве примера можно указать на экспериментальное открытие нарушения правила Окубо–Цвейга–Иидзуки в протон-антипротонных взаимодействиях при низких энергиях, что подтверждает сложную структуру нуклонов [5].

Важные результаты были получены в физике частиц средних энергий («физике мезонов») в экспериментах по взаимодействию протонов энергией в 1–2 ГэВ с внутренней или внешней мишенью на трех накопительных кольцах с электронным охлаждением: IUCF (США), COSY (Германия), CELSIUS (Швеция).

2) *Физика ядра.* Исследования по физике радиоактивных ядер и редких изотопов, экзотических состояний атомного ядра проводятся на накопителях ESR и SIS (GSI, Германия). Например, на ESR были осуществлены сверхточные измерения масс различных изотопов с относительной погрешностью менее чем  $\Delta M/M \leq 10^{-6}$ .

3) *Атомная физика.* Новый этап в изучении атомной и молекулярной физики стал возможен благодаря накопителям TSR (Германия), CRYRING (Швеция), ASTRID (Дания). Пучок электронов на этих установках используется и для охлаждения ионов, и в качестве электронной мишени, что позволяет исследовать взаимодействия ионов с электронами в чистых вакуумных условиях.

4) *Генерация антиводорода.* Первые атомы антиводорода были получены «в полете» на накопителе LEAR в 1996 г. [6]. Позднее ввод в эксплуатацию синхротрона-кулера AD сделал возможным постановку экспериментов по генерации антиводорода «в покое» — на установках ATHENA и ATRAP. Успешное получение антиводорода на обеих установках, о чем было сообщено в 2003 г., было бы невозможным как без электронного охлаждения антипротонов в процессе их замедления в AD, так и без электронного охлаждения в ловушках, которое было впервые реализовано на этих установках.

5) *Физика пучков.* Эффект скачкообразного уменьшения разброса по импульсу охлаждаемого пучка при медленном убывании его интенсивности, впервые обнаруженный на установке НАП-М, был впоследствии детально исследован на ESR, SIS [7] и CRYRING [8]. Он был интерпретирован как упорядочивание ионного пучка, циркулирующего в накопителе («кристаллизация»), и недавно трехмерные кристаллические пучки были получены на небольшом накопительном кольце PALLAS (Германия) [9].

Развитие метода электронного охлаждения инициировало в физике пучков возникновение нового метода охлаждения — лазерного. В результате электронного охлаждения ионного пучка его температура существенно уменьшается и достигает такой величины, при которой можно эффективно использовать лазерное охлаждение, что и было продемонстрировано на накопителях TSR, ASTRID, ESR.

6) *Использование «охлажденных электронами» ионов в терапии раковых заболеваний.* Одно из наиболее важных применений электронного охлаждения, возникших в последнее время, было разработано в NIRS (Япония), где пучок ионов  $^{13}\text{C}^{6+}$  ускоряется и охлаждается в синхротроне HIMAC (Heavy Ion Medicine Accelerator), и, после вывода, используется для позитронной томографии. Возможны и другие медицинские применения пучков с малой величиной эмиттанса.

## 2. СООРУЖАЕМЫЕ УСТАНОВКИ

Метод электронного охлаждения переживает стадию бурного развития — постоянно появляются новые идеи в теории и технологии, возникают новые области его применения. В настоящее время создается несколько новых установок с электронным охлаждением. В первую очередь это тяжелоионный комплекс HIRFL–CSR в Институте современной физики (Ланчжоу, Китай), состоящий из двух накопителей, подобно проекту K4–K10 [10], разработанному в ОИЯИ в 90-х годах. В отличие от проекта K4–K10, работы по которому были прекращены из-за отсутствия финансирования, оба накопителя в Ланчжоу уже изготовлены, две системы электронного охлаждения для них построены в ИЯФ им. Г. И. Будкера (рис. 2).

Накопитель LEAR (Low Energy Antiproton Ring), успешно использовавшийся в ЦЕРН в 90-е годы, как отмечалось выше, будет трансформирован в накопитель ионов (LEIR) для накопления ионов свинца и инжекции в каскад ускорителей ЦЕРН — PSB, PS, SPS

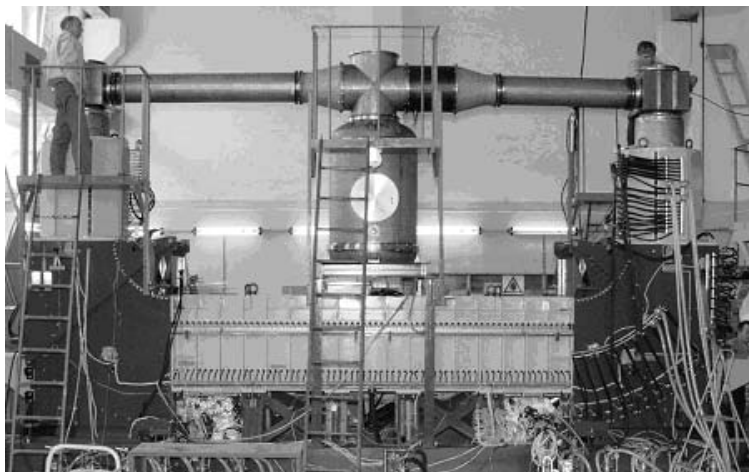


Рис. 2. Тестирование в Ланчжоу системы электронного охлаждения комплекса HIRFL–CSR (изготовлена в ИЯФ им. Г. И. Будкера)

и, окончательно, в ЛНС. Этот проект уже реализуется, и новая система охлаждения для него разработана ИЯФ им. Г. И. Будкера.

Проект MUSES, реализуемый в RIKEN (Япония), претерпел существенные изменения в последнее время ввиду сокращения объемов финансирования. Несмотря на это, электронное охлаждение остается одним из ключевых его элементов.

Из установок электронного охлаждения в области средних энергий наиболее близка к физическому воплощению система охлаждения для антипротонов с энергией 9 ГэВ, сооружаемая в рамках программы повышения светимости тэватрона в Лаборатории им. Э. Ферми. Основные элементы этой системы в настоящее время изготовлены и начато их тестирование.

В ОИЯИ создается небольшой накопитель ЛЕПТА, основное назначение которого — измерение характеристик связанного состояния электрона и позитрона, так называемого позитрония. На этой установке планируется реализовать и исследовать процесс электронного охлаждения позитронов. В настоящее время основные элементы накопителя ЛЕПТА и его системы электронного охлаждения изготовлены. Осуществляется поэтапная сборка и тестирование накопителя с помощью модельного электронного пучка [11].

### 3. ЭЛЕКТРОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ НА НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

**3.1. Охлаждение пучков высокой интенсивности.** Новый уровень понимания природы ограничений интенсивности охлаждаемого ионного пучка был достигнут в последние годы. Экспериментальные исследования инъекции и накопления протонов, проведенные на COSY [12], показали, что потери частиц происходят вследствие двух явлений:

- 1) потери частиц непосредственно после инъекции;
- 2) потери в охлажденном пучке ионов вследствие развития когерентной неустойчивости с трансформацией горизонтальных колебаний в вертикальные. Начальные потери,

возможно, вызваны нелинейностью собственных полей электронного пучка. Другое объяснение связано с развитием плазменных колебаний в электронном и ионном пучках, приводящих к возникновению шума и сокращению времени жизни ионов с большими амплитудами бетатронных колебаний. Аналогичный эффект — так называемый «электронный нагрев» — впервые был обнаружен на накопителе CELSIUS [13].

Вторая стадия потерь имеет место, когда в охлажденном пучке возникают когерентные колебания. Потери частиц вызываются, как правило, вертикальными колебаниями пучка из-за меньшей величины вертикального акселтанса. Трансформация горизонтальных колебаний в вертикальные, впервые наблюдавшаяся на COSY, впоследствии была обнаружена и на синхротроне HIMAC (NIRS, Япония) [14]. Исчерпывающего объяснения этого эффекта в настоящее время не существует, поэтому необходимы дальнейшие детальные исследования.

**3.2. От упорядочивания пучков к кристаллическим пучкам.** Новый прилив интереса к упорядоченным пучкам в ионных накопителях возник в последнее время в связи с задачей получения высокой светимости при столкновении электронных пучков с пучками радиоактивных ионов. Низкая интенсивность пучков радиоактивных ионов, получаемая на выходе фрагмент-сепаратора, и малое время жизни ядер приводят к низкой интенсивности пучка, накопленного в кольце, — порядка  $10^5$ – $10^6$  частиц. При обычных поперечных размерах пучка такая интенсивность недостаточна для измерения распределения заряда внутри ядра. Эксперименты на ESR показали, что упорядочивание («кристаллизация») ионного пучка ведет к резкому уменьшению его радиуса — вплоть до нескольких микрон. В принципе, это позволяет уменьшить радиус электронного пучка в точке встречи и, в результате, повысить светимость на несколько порядков. Для достижения этой цели необходимо повысить интенсивность ионного пучка в упорядоченном состоянии примерно на три порядка по сравнению с достигнутой в настоящее время. Теоретические исследования [15] и первые эксперименты со сгруппированными упорядоченными пучками, выполненные на ESR и CRYRING, дали весьма многообещающие результаты. Для экспериментального исследования возможности реализации столкновений электронного пучка с упорядоченным пучком ионов в рамках проекта MUSES планируется перевезти накопитель TARN II из KEK в RIKEN и ввести его в эксплуатацию с требуемыми изменениями магнитной структуры.

Независимо от возможности его практического использования для ядерно-физического эксперимента, упорядоченный пучок ионов в накопителе является самостоятельным интересным объектом исследований. В последнее время ионные кристаллы были получены на небольшом накопителе PALLAS (диаметр накопителя примерно 20 см, энергия ионов всего несколько эВ). Получение двумерных и трехмерных ионных кристаллов является одной из целей проекта нового накопителя (проект S-LRS), разрабатываемого в Университете Киото [16].

**3.3. Прогресс в теории и численном моделировании.** Возможность применения систем электронного охлаждения с параметрами, лежащими за пределами технически освоенного диапазона, стимулирует новые исследования теории процесса охлаждения. Прежде всего, это относится к таким проектам, как система электронного охлаждения антипротонов Лаборатории им. Э. Ферми, система электронного охлаждения для RHIC (BNL, США), новый проект GSI по охлаждению антипротонов, электронное охлаждение позитронов на накопителе ЛЕПТА (ОИЯИ). Уже диапазон значений магнитных полей, которые предполагается использовать для фокусировки электронного пучка в

секции охлаждения (от 50 Гс в Лаборатории им. Э. Ферми, до 2 Тл на RHIC), свидетельствует о том, что эффекты, связанные с замагниченностью электронного пучка, по-прежнему нуждаются в теоретическом осмыслении. Новая модель парных соударений ионов с замагниченными электронами разработана группой теоретиков из Эрлангенского университета (Германия) в сотрудничестве с ЦЕРН. Теоретические и численные исследования процесса электронного охлаждения позитронов проводятся в рамках проекта ЛЕПТА.

Определенный прогресс, достигнутый в понимании процесса упорядочивания ионного пучка, связан с критериями образования одномерных и двумерных ионных кристаллов. Эти критерии получены на основе модели парных соударений ионов в накопителе.

Для моделирования процесса охлаждения разработано несколько компьютерных кодов. Код МОСАС, разработанный в ИТЭФ, основан на использовании метода Монте-Карло для моделирования электронного охлаждения, внутривпучкового рассеяния, взаимодействия пучка с внутренней мишенью и т.п. Эта программа использовалась как для моделирования процесса накопления ионов в накопителе ТВН в ИТЭФ, так и при проектировании новых ионных накопителей в Японии и Германии. Программа SIMCOOL разработана в ИЯФ им. Г. И. Будкера для моделирования процесса охлаждения в коллайдере RHIC. В Брукхейвенской лаборатории совместно с Университетом Калифорнии начато также создание пакета программ для расчета силы трения, действующей на ион в замагниченном электронном пучке. Сектор электронного охлаждения ОИЯИ совместно с GSI, RIKEN, BNL и ИТЭФ осуществляет дальнейшее развитие программы ВЕТАСОЛ [17], достаточно широко используемой при проектировании систем охлаждения. Одна из целей ее дальнейшего развития — численное исследование процесса формирования кристаллических пучков.

**3.4. Развитие техники электронного охлаждения.** Новые технические усовершенствования системы электронного охлаждения, предложенные в ИЯФ им. Г. И. Будкера на стадии проектирования систем охлаждения для проекта HIRFL–CSR, были реализованы и протестированы. Наиболее существенные из них:

- формирование в электронной пушке трубчатого («полого») электронного пучка с целью предотвращения развития неустойчивости охлажденного пучка ионов;
- использование электростатического поля для компенсации центробежного дрейфа электронов в тороидальных соленидах с целью повышения эффективности рекуперации электронного пучка;
- использование коллектора электронов специальной конструкции, обеспечивающей рекордно высокую эффективность захвата электронов.

На накопителе TSR было изготовлено и установлено устройство нового типа (хотя по принципу конструкции оно представляет собой лишь несколько модифицированную систему электронного охлаждения) — электронная мишень для экспериментов по атомной физике, — в котором реализована идея адиабатического ускорения электронного пучка [18]. В комбинации с криогенной электронной пушкой с фотокатодом и адиабатическим расширением электронного пучка в прямолинейной секции это позволяет получить электронный пучок с экстремально низкой температурой в системе частиц.

#### 4. РАЗВИТИЕ МЕТОДА В ОБЛАСТЬ СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

После прекращения работ по созданию системы электронного охлаждения на накопителе PETRA (DESY, Германия) перспективы использования электронного охлаждения на более высоких энергиях связываются в основном с четырьмя проектами, интенсивно развивающимися в настоящее время. В первую очередь это система электронного охлаждения Лаборатории им. Э. Ферми, создание которой находится в завершающей стадии. На разных стадиях проработки находятся проекты систем электронного охлаждения коллайдера RHIC, накопителя HESR (High Energy Storage Ring) в новом проекте GSI и накопителя COSY на максимальной энергии ионного пучка.

Проект международного ускорительного комплекса нового поколения, разрабатываемый в GSI, предполагает использование электронного охлаждения для антипротонов с энергией несколько ГэВ на накопителе HESR и электронного охлаждения ионов в накопителе NESR (New Experimental Storage Ring) при энергии 800 МэВ/нуклон. Обе системы охлаждения, разрабатываемые в сотрудничестве с ИЯФ им. Г. И. Будкера, базируются на традиционной схеме с повышением энергии электростатически ускоренных электронов.

Иное решение, позволяющее увеличить энергию электронов до 50 МэВ, предложено группой ИЯФ им. Г. И. Будкера для проекта системы охлаждения RHIC, с возможностью использования для этой цели линейного резонансного ускорителя. Сгруппированный и ускоренный электронный пучок подвергается преобразованию продольного эмиттанта для уменьшения разброса по импульсу и оптимизации длины сгустка и затем инжектируется в соленоид секции охлаждения. После пролета секции охлаждения энергия электронов рекуперируется в том же самом линейном ускорителе.

Одна из возможностей осуществления электронного охлаждения протонов или дейтронов в COSY на энергии эксперимента заключается в использовании небольшого накопителя электронов и охлаждении ионов электронным пучком, циркулирующим в этом накопителе. Возможность получения циркулирующего пучка электронов требуемого качества будет исследована в рамках проекта ЛЕПТА, одна из целей которого – изучение динамики электронного (или позитронного) пучка в накопителе с фокусировкой продольным магнитным полем. С другой стороны, реализация проекта ЛЕПТА откроет путь к генерации потоков атомов антиводорода [19].

#### 5. ЭЛЕКТРОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ В ЛОВУШКАХ, ГЕНЕРАЦИЯ АНТИВОДОРОДА

Электронное (и позитронное) охлаждение антипротонов в магнитной ловушке пеннинговского типа является одним из ключевых процессов, позволивших осуществить генерацию антиводорода в ЦЕРН в 2002 г. В отличие от электронного охлаждения в накопительных кольцах электронное охлаждение в ловушках имеет ряд специфических особенностей: электронное облако имеет обратный характер «сплющенного» распределения по скоростям: разброс по продольной компоненте скорости существенно больше, чем по поперечной; поперечная степень свободы электронного или позитронного пучка охлаждается за счет синхротронного излучения в сверхсильном магнитном поле; позитронное охлаждение антипротонов требует захвата частиц с противоположным знаком электрического заряда в одном и том же месте ловушки [20].



Экспериментальное и теоретическое исследование этого процесса необходимо для подготовки первых экспериментов с атомами, захваченными в ловушку. Успешная генерация антиводорода в ловушках стимулирует интерес к генерации потоков антиатомов с использованием накопительных колец, что позволит реализовать эксперименты в другой постановке и осуществить комплексное исследование свойств антивещества [19].

Проблемы, близкие к возникающим при электронном охлаждении в ловушках, приходится решать и при охлаждении молекулярных ионов низкой энергии или пучков макро-частиц: направленная компонента скорости электронов при этом может быть сравнима с температурным разбросом электронов по скоростям. На электростатическом накопителе, сооружаемом в КЕК, планируется охлаждать циркулирующий пучок сверхтяжелых ионов при помощи электронного облака, располагающегося на орбите накопителя в специальной ловушке [21].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Более чем тридцатилетняя история развития метода электронного охлаждения показала его высокую эффективность как средства расширения экспериментальных возможностей в различных областях физики. Электронное охлаждение и в настоящее время является динамично развивающейся областью техники и физики, продолжая привлекать интерес как с точки зрения применения его в новых областях науки, так и с точки зрения экспериментального изучения самого процесса охлаждения.

Работа поддержана РФФИ (грант № 02-02-16911).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Budker G. I.* // Proc. of Intern. Symp. on Electron and Positron Storage Rings, Saclay, 1966. P. II-I-I; *Atom. Energ.* 1967. V. 22. P. 346.
2. *Анашин В. В. и др.* // Тр. 4-го Всесоюзного совещ. по ускорителям заряженных частиц. М., 1975. Т. 2. С. 308.
3. *Bell M. et al.* // *Nucl. Instr. Meth.* 1981. V. 190. P. 237.
4. *Ellison T. et al.* // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1983. V. NS-30. P. 2370.
5. *Nomokonov V. P., Sapozhnikov M. G.* // *Part. and Nucl.* 2003. V. 34. P. 184.
6. *Baur G. et al.* // *Phys. Lett. B.* 1996. V. 368. P. 251.
7. *Steck M. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 1996. V. 77. P. 3803.
8. *Danared H. et al.* *Ordered Ion Beams in CRYRING* // Proc. of the Workshop on Ion Beam Cooling, Toward the Crystalline Beam, Kyoto, Nov. 12–14, 2001. P. 43.
9. *Schats T., Schramm U., Habs D.* *Crystalline Ion Beams in PALLAS* // *Ibid.* P. 74.
10. *Ter-Akopian G. M.* K4–K10 project. TREBLE: Two Ring Exotic Beam Laboratory. CERN 94-03. 1994. P. 422.

11. Антропов В. К. и др. Проект LEPTA: первые эксперименты с электронным пучком // Докл. на V Науч. семинаре памяти В. П. Саранцева, Дубна, 23–24 сент. 2003 г.
12. Мешков И. Н. и др. Перезарядная инжекция в синхротрон с электронным охлаждением // Письма в ЭЧАЯ. 2004. № 3[120]. С. 43.
13. Reistad D. Measurements of Electron Cooling and «Electron Heating» at CELSIUS. CERN 94-03. 1994. P. 164.
14. Noda K. et al. Electron Cooling Experiments at the HIMAC Synchrotron // Proc. of the Workshop on Ion Beam Cooling, Toward the Crystalline Beam, Kioto, Nov. 12–14, 2001. P. 129.
15. Мешков И. Н. и др. Кристаллические пучки в накопителях заряженных частиц // Письма в ЭЧАЯ. 2004. № 3[120]. С. 32.
16. Noda A. Laser Equipped Cooler Storage Ring, LSR at ICR, Kioto University // Proc. of the Workshop on Ion Beam Cooling, Toward the Crystalline Beam, Kioto, Nov. 12–14, 2001. P. 3.
17. Trubnikov G. et al. BETACOOOL // Proc. of the Intern. Workshop on Beam Cooling and Related Topics, Bad Honnef, May 13–18, 2001.
18. Диканский Н. С. и др. Предельные возможности электронного охлаждения. Препринт ИЯФ 88-61. Новосибирск, 1988.
19. Мешков И. Н. // ЭЧАЯ. 1997. Т. 28, вып. 2. С. 198.
20. Меньшиков Л. И., Ландуа Р. Состояние исследований по «холодному» антиводороду // УФН. 2003. Т. 173, № 3. С. 233.
21. Tanabe T., Noda K., Watanabe I. An Electron Target/Cooler for Extremely Low-Energy Ion Beams at the Electrostatic Storage Ring // Proc. of the Workshop on Ion Beam Cooling, Toward the Crystalline Beam, Kioto, Nov. 12–14, 2001. P. 213.