

# Нелиувиллиевское накопление ядер углерода в ускорительно-накопительном комплексе ИТЭФ

Н. Н. Алексеев, Д. Г. Кошкарев<sup>1)</sup>, Б. Ю. Шарков

Институт теоретической и экспериментальной физики, 117259 Москва, Россия

Поступила в редакцию 27 ноября 2002 г.

После переработки 17 декабря 2002 г.

В Институте теоретической и экспериментальной физики успешно произведен физический запуск нового ускорительно-накопительного комплекса тяжелых ионов. В кольце протонного синхротрона У-10 на энергию 10 ГэВ, переоборудованного в накопитель ионов, осуществлено накопление ядер углерода с энергией 200 МэВ/н при помощи перезарядки на твердой мишени ионов  $C^{4+}$ , ускоренных в бустерном синхротроне УК. Таким образом, экспериментально осуществлено нелиувиллиевское накопление ядер углерода. Ближайшей целью является увеличение числа накопленных ядер до  $2 \cdot 10^{12}$ , соответствующего возможностям имеющейся конфигурации комплекса.

PACS: 52.58.Nm, 52.59.-f

1. Проект тераваттного накопителя в ИТЭФ (ТВН-ИТЭФ) [1] направлен на развитие технологий получения интенсивных ионных пучков высокой мощности ( $\sim 1$  ТВт) и создания на их основе научно-технической базы для исследований в области фундаментальной физики экстремального состояния вещества, для исследований в области релятивистской ядерной физики, инерционного термоядерного синтеза и медицинской физики.

Получение мощного пучка тяжелых ионов наталкивается на определенные трудности. Первой является наличие в кольцевых ускорителях-накопителях так называемого кулоновского предела, который сильно ограничивает достижимую плотность ионного пучка в пространстве канонических переменных.

Кулоновский предел ограничивает число ионов  $N$  в камере кольцевого ускорителя-накопителя следующей формулой:

$$N \sim \varepsilon \beta \gamma^2 A Z^{-2}. \quad (1)$$

В (1)  $A$  – масса иона в атомных единицах,  $Z$  – заряд иона по отношению к заряду электрона,  $\varepsilon$  – инвариантный эмиттанс пучка, то есть эмиттанс, измеренный в канонических переменных координата × импульс,  $\beta$  – скорость ионов в единицах скорости света,  $\gamma$  – релятивистский фактор. Как следует из (1), большую плотность в ионном пучке (то есть большое отношение  $N$  к  $\varepsilon$ ) можно получить только при достаточно большой величине  $\beta \gamma^2$ , то есть только при высокой энергии ионов. Ускорение ионов всегда начинается с малой энергии,

поэтому накопление ионов следует производить после достижения ими максимально возможной для данного ускорителя энергии. Вторым ограничением является принцип сохранения плотности ионных пучков в пространстве канонических переменных – так называемая теорема Лиувилля. В соответствие с этой теоремой фазовый объем, занимаемый частицами в шестимерном пространстве канонических переменных при отсутствии диссипативных сил, сохраняется в процессе ускорения и накопления. Следовательно, накопление ионов будет неизбежно приводить к увеличению величины фазового объема.

Для ряда важных приложений в таком способе накопления мало смысла, так как для экспериментальных задач обычно требуются пучки с большой фазовой плотностью, например для фокусировки на мишень малого размера. Таким образом, практически имеет смысл накопление ионов при сохранении величины  $\varepsilon$ , что возможно лишь при так называемой нелиувиллиевской инжекции. Поскольку теорема Лиувилля справедлива только для ансамбля неразличимых объектов, то при сложении пучков, состоящих из различных по заряду или по массе ионов, теорема Лиувилля не выполняется. Конечно, после сложения ионных пучков в пространстве координат и импульсов необходимо это различие между ионами устранить, что, в случае различных зарядов, можно легко осуществить, пропуская пучки через тонкую перезарядную мишень.

Идею использования нелиувиллиевского накопления выдвинул в 1963 г. академик Г. И. Будкер, предложивший осуществлять многооборотную инжекцию

<sup>1)</sup>e-mail: Koshkarev@vitepl.itep.ru

протонов с помощью перезарядки пучка ионов  $H^-$  в протоны на установленной в камере синхротрона тонкой мишени [2]. Широкого распространения это предложение не получило, так как при инжекции протонов в синхротрон энергия протонов достаточно низка, а, как было отмечено выше, в этом случае устанавливаемая кулоновским пределом предельная интенсивность легко достигается обычными методами инжекции. Попытка применить этот метод для накопления ионов тяжелых элементов сталкивается с другой проблемой, связанной с наличием большого числа электронов на атомных оболочках ионов таких элементов. По этой причине при пересечении перезарядной мишени неизбежно возникают большие потери интенсивности. В ряде публикаций [3, 4] предлагалось обойти эту проблему, используя для перезарядки не мишень, а мощный пучок лазерного излучения с длиной волны, обеспечивающей резонансное сечение перезарядки. Эта идея продолжает разрабатываться [5], но пока не реализована. Связано это с тем, что требуется мощное коротковолновое излучение, получаемое только на сложных и очень дорогих лазерах на свободных электронах.

В проекте ТВН оказалось возможным вернуться к идее использования тонкой мишени для перезарядки ионов тяжелых элементов, так как в этом проекте накапливаются только голые ядра и при достаточно высокой энергии, когда равновесный заряд иона после пересечения мишени становится равным заряду ядра. При столь высокой энергии вероятность рекомбинационного подхвата электрона в мишени ничтожно мала ( $10^{-3}$ ), а с учетом геометрии пучков меньше еще на фактор  $4 \cdot 10^{-2}$ , то есть составляет величину около  $4 \cdot 10^{-5}$ . Теоретически это позволяет увеличивать в  $\leq 10^4$  раз интенсивность накапливаемого пучка по сравнению с инжектируемым.

**2.** В создаваемой по проекту ТВН установке предполагается накапливать интенсивный пучок голых ядер с энергией до 0.7 ГэВ/н в накопительном кольце, переоборудованном из кольцевого магнита протонного синхротрона У-10.

Накопление интенсивного ионного пучка происходит следующим образом. Не полностью ободраные ионы (с  $Z/A \sim 0.25-0.45$ ) в диапазоне массовых чисел до  $A \sim 60$  производятся в лазерном источнике с потенциалом экстракции 50–100 кВ. Затем ионы ускоряются в линейном инжекторе И-3 до энергии  $Z \times 4$  МэВ [6]. Полная энергия ионов достигается в бустерном синхротроне УК. Ускоренный ионный пучок выводится из УК за один оборот и инжектируется в накопительное кольцо У-10 с использованием метода перезарядной инжекции [1, 7]. Процесс повто-

ряется с частотой 1 Гц до достижения кулоновского предела.

В настоящее время наладка процесса накопления осуществляется с лазерным источником на основе  $CO_2$ -лазера с энергий в луче  $\approx 5$  Дж. Проектный уровень мощности пучка предполагается получать с более мощным лазером на энергию  $\sim 100$  Дж [8]. Тем не менее, последние усовершенствования источника позволили улучшить стабильность его работы и поднять пиковый ток пучка ионов углерода  $C^{4+}$  на выходе лазерного источника до 500 мА.

Максимальный ток ионов  $C^{4+}$  на выходе из И-3 достигает 5 мА при величине пикового тока в пучке 80 мА.

Бустерный синхротрон УК ускоряет ионы  $C^{4+}$  с начальной энергией 1.3 МэВ/н до энергии 300 МэВ/н [9]. Необходимая для ускорения ионов перестройка частоты ускоряющего поля (в 15 раз) достигается при помощи двух резонаторов с ферритовым заполнением, работающих последовательно, один за другим, с перестройкой по частоте в диапазонах, соответственно 0.6–2.2 МГц и 2.2–10 МГц. Интенсивность пучка ионов  $C^{4+}$  на выходе из УК увеличилась с момента запуска ускорителя в 2000 г. более чем на порядок и достигает в настоящее время  $2 \cdot 10^9$  частиц в цикле.

Ускоренный в УК пучок выводится за один оборот для последующей перезарядной инжекции в кольцо У-10 (рис.1).

Минимизация числа проходов ионов через перезарядную мишень в процессе накопления обеспечивается за счет смещения циркулирующего в накопителе пучка на перезарядную мишень только на время инжекции новой порции ионов. Эта операция снижает до минимума возмущающее воздействие мишени на накапливаемый пучок. (Материал перезарядной мишени – майлар; размер мишени –  $10 \times 5$  мм<sup>2</sup>; толщина мишени – 5 мг/см<sup>2</sup>.)

**3.** Наладка накопления пучка выполнялась при включенном ВЧ поле с амплитудой  $\approx 1$  кВ. При этом инжектируемый пучок перезарядывался с десятой кратности частоты ускоряющего поля в УК на вторую в У-10. Периодичность циклов ускорения и инжекции составляла 4.2 с. Согласование траектории инжектируемого пучка с отклоненной на одном обороте орбитой циркулирующего пучка осуществлялось настройкой угла пересечения траектории инжекции с мишенью, изменением индукции магнитного поля в накопительном кольце, а также подбором положения мишени в камере накопителя и коррекцией равновесной орбиты.

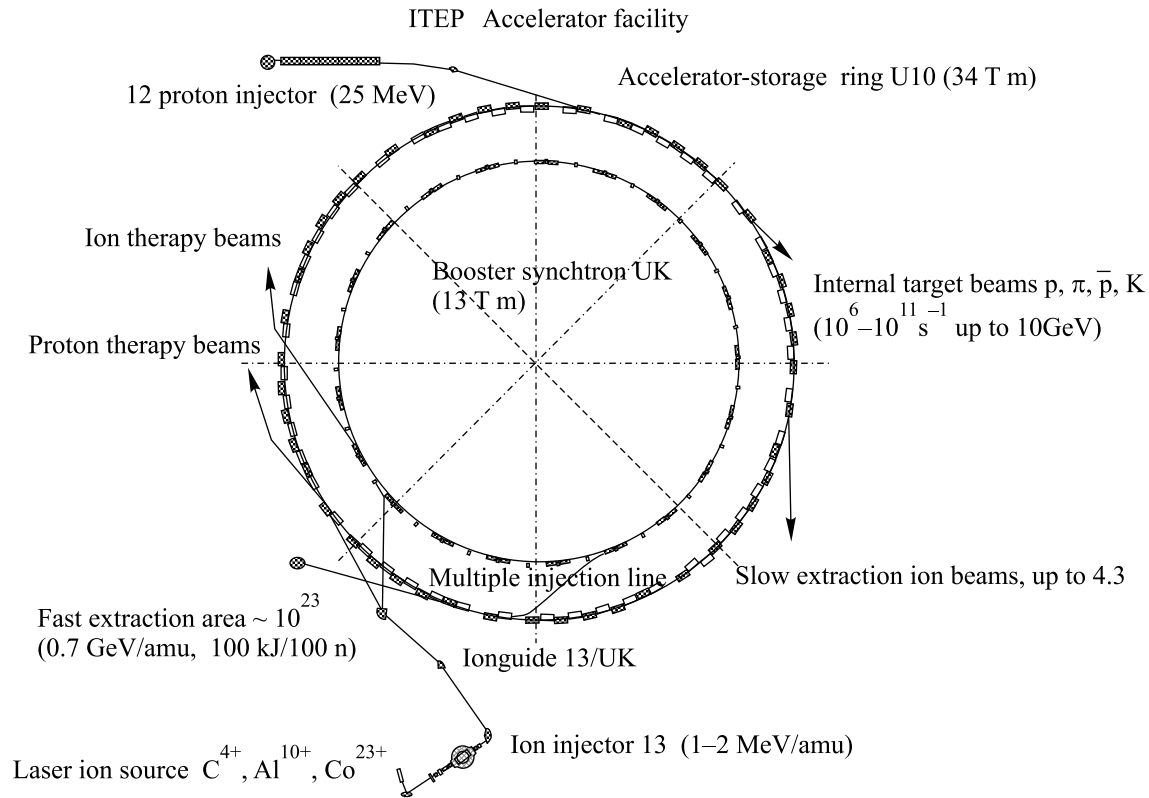


Рис.1. Общая схема накопительного комплекса ТВН-ИТЭФ

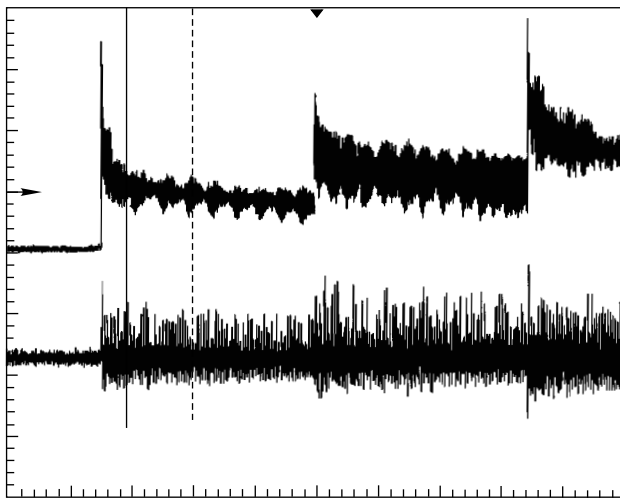


Рис.2. Начальная часть осциллограммы накопления ионов углерода при энергии 200 МэВ/н в кольце У-10 (верхний – интенсивность пучка  $5 \cdot 10^8$  ионов/дел., нижний – сигнал с электростатического датчика)

В результате многократного повторения операции перезарядной инжекции в накопительном кольце У-10 было накоплено  $\geq 10^{10}$  ядер углерода (рис.2). Таким образом, экспериментально с помощью пере-

зарядной инжекции ионов углерода была продемонстрирована работоспособность принципа нелиувиллиевского накопления – физической основы тяжелоионного накопительного комплекса ТВН-ИТЭФ.

4. Итак, к настоящему времени завершены следующие этапы сооружения накопительного комплекса ТВН-ИТЭФ:

- 1) получены высокозарядные ионы  $C^{4+}$  в лазерном источнике,
- 2) осуществлено ускорение ионов  $C^{4+}$  в линейном инжекторе И-3,
- 3) получено ускорение ионов  $C^{4+}$  в бустерном синхротроне УК,
- 4) осуществлено накопление ионов по перезарядной схеме  $C^{4+} \Rightarrow C^{6+}$  в накопительном кольце У-10 до уровня  $\sim 10^{10}$  ядер углерода.

Ближайшая цель состоит в получении максимально достижимой для данной конфигурации комплекса интенсивности накопленного пучка.

1. Г. Кошкарёв, Н. Н. Алексеев, Б. Ю. Шарков, *Труды XV Сессии по ускорителям заряженных частиц*, г. Протвино, т. 2, 1996, стр. 319.
2. Г. И. Будкер, Г. И. Димов, *Труды международной конференции по ускорителям заряженных частиц*, 1963 г.,

- М.: Атомиздат, 1964.
3. R. C. Arnold, D. G. Koshkarev, B. Y. Sharkov, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-24, 1428 (1977).
  4. C. Rubbia, Nucl. Instr. and Meth. **A278**, 253 (1989).
  5. I. Hofmann, Laser and Particle Beams **8**, 527 (1990).
  6. N. N. Alexeev, S. L. Bereznitsky, and V. I. Nikolaev, EPAC-2000, 2000, p. 1283.
  7. B. Sharkov, G. Koshkarev, M. D. Churazov, NIMA №1-2, 415, 22-26 (1998).
  8. B. Y. Sharkov, S. Kondrashov, I. Roudskoy, Rev. Sci. Instrum. **69**, 1035 (1998).
  9. Н. Н. Алексеев, В. Н. Балануца, С. Л. Березницкий и др., Труды XVII Совещания по ускорителям заряженных частиц, г. Протвино, 2000, т.2, 2000, стр. 231.