

КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ 2,5 МВ И ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ СВЕТИМОСТИ КОЛЛАЙДЕРА NICA

*В. В. Пархомчук¹, М. И. Брызгунов, А. В. Бублей, А. Д. Гончаров,
А. П. Денисов, Н. С. Кремнев, В. А. Полухин, А. А. Путьмаков,
В. Б. Рева, Д. Н. Скоробогатов*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Представлена конструкция и возможности охлаждения системой электронного охлаждения (СЭО) для коллайдера NICA. СЭО существенно подавит внутрипучковое рассеяние и воздействие встречного пучка.

The design and capability of the NICA collider electron cooling system are given in this paper. The presented electron cooling system will substantially suppress intrabeam scattering and the beam–beam effect.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

Светимость L ион-ионного коллайдера NICA будет определяться параметрами пучков и магнитной оптикой в месте встречи:

$$L = \frac{N_b^2}{4\pi\beta_{IP}\varepsilon} f_b, \quad (1)$$

где N_b — число частиц в сгустках; β_{IP} — значение β -функции в месте встречи; ε — значение эмиттанса ионного пучка; f_b — частота поступления ионных сгустков к месту встречи. Эта формула подходит для проверки знаний студентов, но почти всегда является только вершиной айсберга, называемого проблемой получения светимости. Дело в том, что получение малого значения β -функции ограничено нелинейными эффектами: динамической апертурой, хроматизмом машины, временем жизни пучков. Известно, что почти у всех коллайдеров реальная светимость довольно сильно растет во время их работы. Одним из важных факторов являются монохроматичность (малое значение $\Delta p/p$) и малый эмиттанс. Охлаждение пучка уменьшает эмиттанс и разброс импульсов, что открывает возможности увеличения светимости [1].

¹E-mail: parkhomchuk@npi.nsk.ru

ОХЛАЖДЕНИЕ И СВЕТИМОСТЬ

С самых первых лет существования коллайдеров вопрос влияния охлаждения на предельно возможную светимость вызывал острые дискуссии. Дело в том, что вносимый охлаждением сдвиг частоты бетатронных колебаний весьма мал и он определяется уравнением

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_x^2 x = -\lambda \frac{dx}{dt}, \quad (2)$$

где ω_x — частота колебаний по координате x ; λ — размерный (с^{-1}) декремент охлаждения (затухания) колебаний. В результате частота колебаний равна

$$\omega_{1,2} = i\lambda \pm \sqrt{\omega_x^2 - \lambda^2}, \quad (3)$$

где λ описывает медленное уменьшение амплитуды, а сдвиг частоты меняется квадратично относительно λ . В реальной жизни частоты составляют мегагерцы, а времена охлаждения (τ_{cool}) — секунды ($\lambda = 1/\tau_{\text{cool}}$), значит, сдвиг частоты за счет декремента равен $\delta\omega = \lambda^2/(2\omega)$ и он очень мал.

Но затухание влияет не на сдвиг, а на время жизни пучка, останавливая медленный рост амплитуды колебаний. Одна из первых работ, в которой пытались найти эту зависимость (влияние охлаждения), — работа [2]. На рис. 1 из этой работы показано, что максимальный сдвиг растет с увеличением декремента затухания от $0,0001 \text{ с}^{-1}$ до $0,05 \text{ с}^{-1}$, т. е. в 500 раз! Предложено уравнение, иллюстрирующее эти зависимости в виде

$$\xi \approx \left(\frac{\lambda}{f_0} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

где f_0 — частота обращения в накопителе. Совсем без охлаждения время жизни пучков — 1 ч, что соответствует $\lambda_0 = 1/3600 = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, и введение охлаждения со временем 10 с соответствует $\lambda_{\text{max}} = 10^{-1} \text{ с}^{-1}$.

Опыт первых электрон-позитронных коллайдеров показал, что максимальный сдвиг растет с 0,004 до 0,04 в 10 раз, а декремент затухания меняется в интервале $10^{-7} - 2 \cdot 10^{-4}$, т. е. в 2000 раз [2].

Исходные базовые проектные параметры ионного пучка взяты из доклада В. Лебедева на МАК NICA и приведены в таблице. Для этих параметров светимость составляет около $L \approx 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Проектные параметры ионного пучка

E_i , ГэВ/нуклон	$N_i \times 10^9$	$\varepsilon_x, 10^{-4} \text{ см} \cdot \text{рад}$	$\varepsilon_y, 10^{-4} \text{ см} \cdot \text{рад}$	$\Delta p/p \times 10^{-3}$	$\tau_{\text{IBS}}, \text{ с}$
1,0	0,28	1,100	0,855	0,69	300
2,0	1,10	1,104	0,811	1,07	625
3,5	3,89	1,117	0,693	1,56	1020
4,5	5,90	1,123	0,595	1,79	1115

В качестве простейшей модели, оценивающей встречные ион-ионные столкновения, была взята модель двух плоских сгустков с нулевой длиной, и прослеживалась во времени траектория пробной частицы. Воздействие на пробную частицу при прохождении сгустка оказал короткий удар, пропорциональный $\Delta p/p = x/F_b(x)$, где $F(0) = \beta_{IP}/(4\pi\xi)$ спадает как для равномерно заряженного цилиндра при выходе частицы из цилиндра по радиусу. Конечно, такая модель преувеличивает нелинейности на высоких гармониках частоты обращения, но может служить оценкой предельно допустимых сдвигов частот бетатронных колебаний. Тривиальность этой модели компенсируется возможностью быстроты счета на РС. Реальные максимальные сдвиги могут быть и выше полученных в расчетах значений.

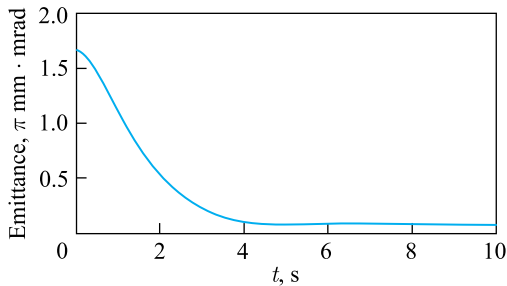


Рис. 1. Поведение эмиттанса ионного пучка при электронном охлаждении в течение 10 с при энергии 4,5 ГэВ/нуклон

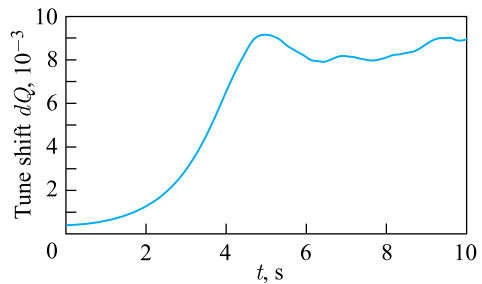


Рис. 2. Максимальный сдвиг частоты бетатронных колебаний до $\Delta Q = 0,008$, вызываемый встречным пучком

На рис. 1 и 2 показано поведение пучка при охлаждении в режиме встречных пучков при энергии 4,5 ГэВ/нуклон. Видно, что электронное охлаждение способно заметно увеличить светимость коллайдера, даже если взять проектные параметры NICA. Естественно, что исследования столкновений в режиме с электронным охлаждением нужно продолжать. Представленные рисунки сделаны без учета внутрипучкового расталкивания. Скромные значения сдвига частот (0,008), полученные при этом моделировании, связаны со слишком грубой моделью пучкового взаимодействия. Сейчас на коллайдере ВЭПП-2000 получены сдвиги в 10 раз более сильные. И, как показывает опыт, высокая светимость достигается последовательной и многолетней настройкой коллайдеров.

ЭЛЕКТРОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

Предлагаемая система электронного охлаждения (СЭО) концентрирует опыт создания установок, начиная с первой в мире установки «Эпоха» (1977) до высоковольтной установки на 2 МВ, размещенной в синхротроне COSY (2013) (рис. 3); всего 8 СЭО. В 2018 г. ИЯФ завершил создание СЭО для бустера NICA (рис. 4). Эта установка имеет параметры, близкие к СЭО на LEIR ЦЕРН для накопления и охлаждения ионов свинца для коллайдера LHC [3]. Описываемая система очень полезна для компенсации проблем ионного инжектора и с 2006 г. успешно используется в ионных заходах на LHC.

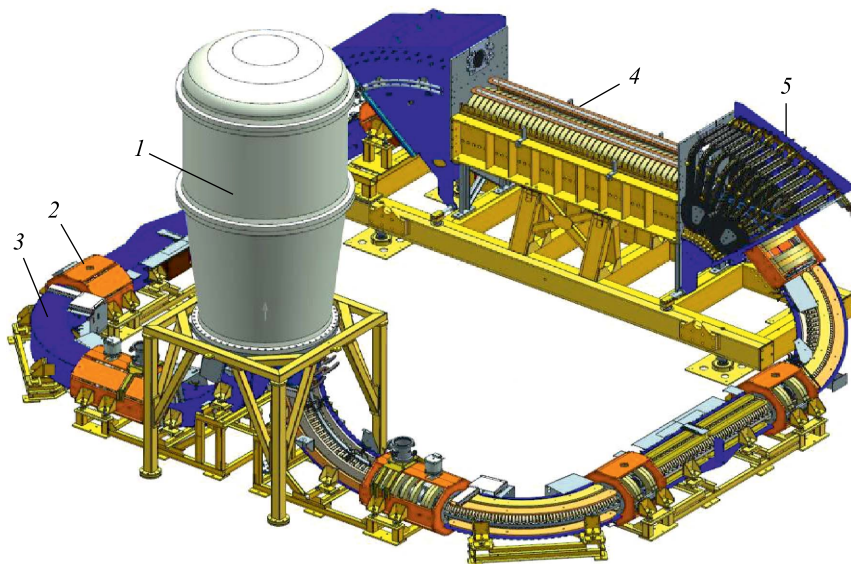


Рис. 3. 3D-модель СЭО для синхротрона COSY: 1 — бак с высоковольтным оборудованием для генерации электронного пучка с энергией 2 МэВ; 2 — согласующие соленоиды; 3 — поворотные на 90° соленоиды; 4 — участок охлаждения, где ионный пучок взаимодействует с электронами; 5 — тороидальные соленоиды для сведения ионного и электронного пучков

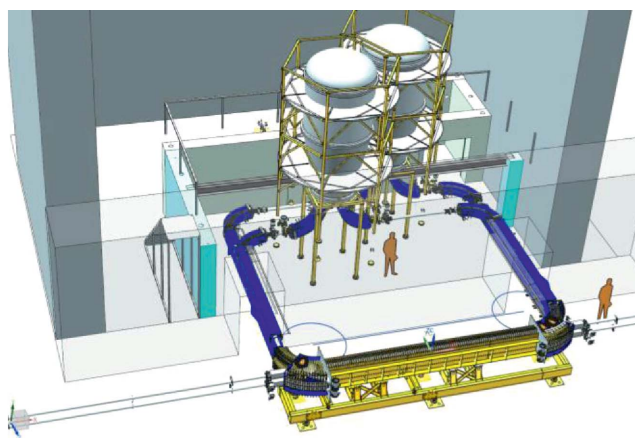


Рис. 4. Внешний вид проекта СОЭ для NICA

Из рис. 5 и 6 хорошо видно, что сразу после инжекции пучок ионов занимает практически всю апертуру (50 мм), а затем электронное охлаждение (рис. 7) сжимает его до 2–3 мм, что эквивалентно 100-кратному уменьшению эмиттанса ионного пучка. Затем следует вторая инжекция, охлаждение и далее ускорение ионов.

Значение времени охлаждения хорошо совпадает с ожидаемой скоростью охлаждения. Скорость электронного охлаждения, или декремент охлаждения, в системе пучка

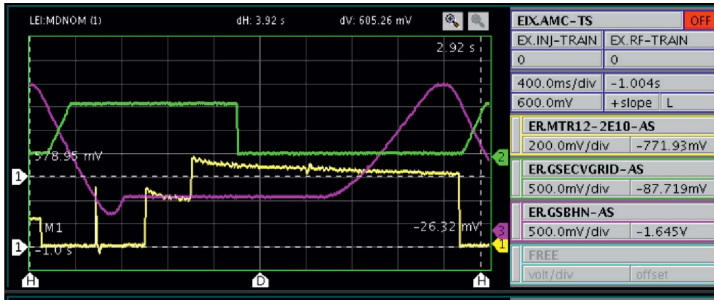


Рис. 5. Магнитный цикл работы накопителя-бустера LEIR: 1 — ток пучка ионов свинца во время 3-секундного цикла в LEIR; 2 — ток электронного пучка, включаемый перед инъекцией ионов; 3 — магнитное поле накопителя-бустера LEIR во время инъекции, охлаждения и ускорения ионов свинца

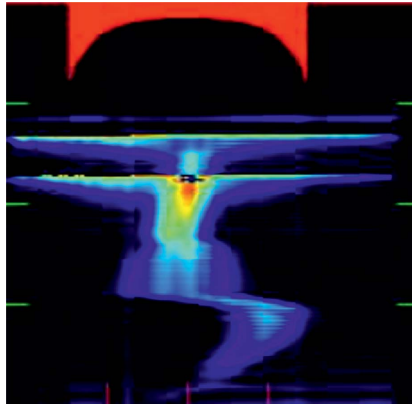


Рис. 6. Профили электронного и ионного пучков в разные моменты цикла

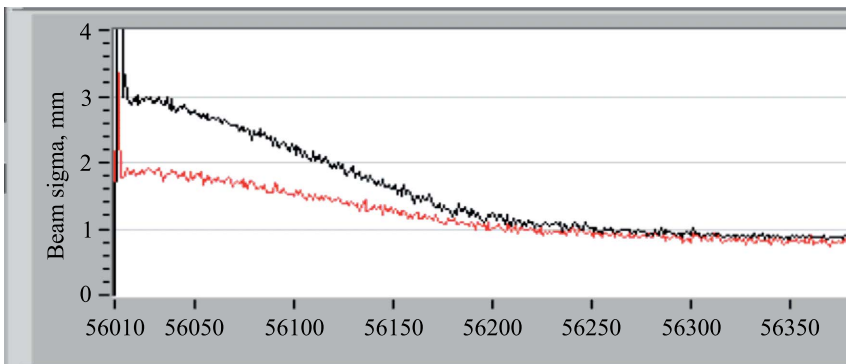


Рис. 7. Охлаждение протонного пучка с энергией 1,8 ГэВ. Время охлаждения обоих эмиттансов ~ 100 с. Число частиц $N_p = 3 \cdot 10^8$, ток электронного пучка $I_e = 800$ мА, кинетическая энергия электронов $E_e = 909$ кВ

определяется следующим выражением [4]:

$$\lambda = \frac{4e^4 Z^2 n_e L n_c}{M m_e V_i^3} \eta. \quad (5)$$

Для NICA $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ — элементарный заряд; $Z = 79$ — заряд иона золота в атомных единицах; $n_e = 4,5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ — плотность электронного пучка; $L n_c = 10,2$ — кулоновский логарифм; $\eta = 0,014$ — доля электронного пучка в орбите ионов; $M = 3,29 \cdot 10^{-22} \text{ г}$ — масса иона; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ г}$ — масса электрона; $V_i = 5,2 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ — скорость движения иона в покоящемся электронном газе. Для NICA время охлаждения при энергии 4,5 ГэВ/нуклон и эмиттансе 1 мм·мрад составит в лабораторной системе координат 28 с, а после достижения эмиттанса 0,1 мм·мрад — 1 с. Столь мощное охлаждение и дает надежду на высокую светимость.

На рис. 8 показано расположение катушек коррекции для согласования орбиты электронного и ионного пучков.

На рис. 9 показана конструкция бака с элегазом SF6 высоковольтного терминала с электронной пушкой, смещенной относительно оси ускорительной трубки.

На рис. 10 показана электронная пушка со смещением катода для защиты от бомбардировки катода вторичными ионами из остаточного газа.

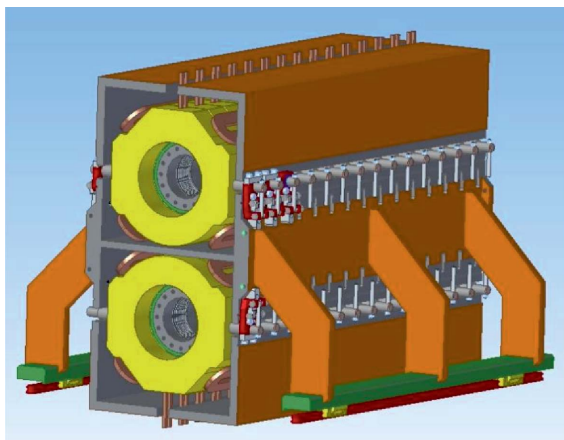


Рис. 8. Расположение катушек коррекции для согласования орбиты электронного и ионного пучков

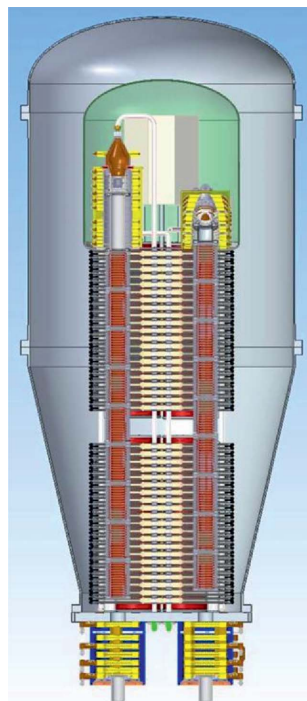


Рис. 9. Конструкция бака с элегазом SF6 высоковольтного терминала

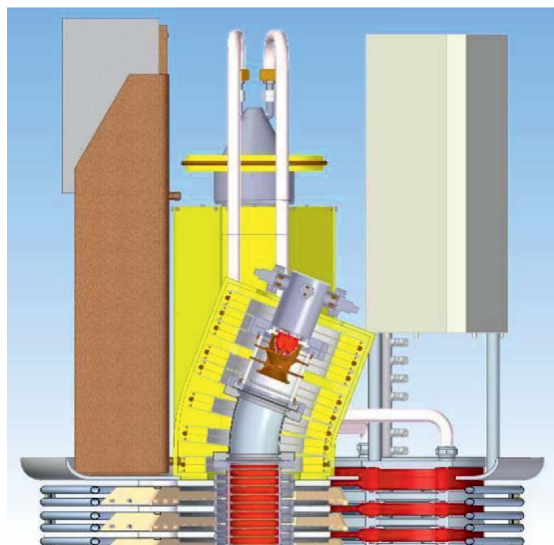


Рис. 10. Электронная пушка со смещением катода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая система электронного охлаждения для коллайдера NICA базируется на опыте СЭО для многих уже работающих систем, что дает надежду на получение высоких скоростей охлаждения. Совместно создаваемая усилиями многих лабораторий установка NICA позволит вывести исследования столкновений тяжелых ядер на новый мировой уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будкер Г. И., Скринский А. Н. Электронное охлаждение и новые возможности в физике элементарных частиц // УФН. 1978. Т. 124. С. 561–595; http://ufn.ru/ufn78/ufn78_4/Russian/r784a.pdf.
2. Kail E., Talman R. Scaling of Luminosity Data between e^+e^- Storage Rings // Part. Accel. 1983. V. 14. P. 109–118; <https://cds.cern.ch/record/138533/files/p109.pdf>.
3. Tranquille G., Chanel M., Carly Ch., Prieto V., Sautier R., Bublely A., Parkhomchuk V., Reva V., Brizgunov M., Vedenev M., Panasyuk V. Commissioning of the LEIR Electron Cooler with Pb^{54+} Ions. <http://rupac2006.inp.nsk.su/ready/webo01.pdf>.
4. Пархомчук В. В., Скринский А. Н. Электронное охлаждение — 35 лет развития // УФН. 2000. Т. 170. С. 473–493; <http://ufn.ru/ru/articles/2000/5/a/similar.html>.