

ДИНАМИКА ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ $^{197}\text{Au}^{32+}$ И $^{197}\text{Au}^{79+}$ В ИНЖЕКЦИОННОЙ ЦЕПОЧКЕ КОЛЛАЙДЕРА NICA

Елисеев А.В., Мешков И.Н., Михайлов В.А., Сидорин А.О., ОИЯИ

Аннотация

Основной целью разрабатываемого в ОИЯИ проекта NICA является проведение экспериментов на встречных пучках тяжелых ионов в области энергий $1 \div 4.5$ ГэВ/нуклон со светимостью уровня $1 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В данной статье, на примере ионов золота, рассматривается режим работы инжекционной цепочки коллайдера, предусматривающий получение на выходе Нуклотрона сгустка с параметрами, требуемыми для экспериментов.

LONGITUDINAL DYNAMICS OF $^{197}\text{Au}^{32+}$ AND $^{197}\text{Au}^{79+}$ BEAMS IN THE NICA COLLIDER INJECTION CHAIN

Eliseev A.V., Meshkov I.N., Mikhailov V.A., Sidorin A.O., JINR

Abstract

General goal of the NICA project being constructed is to provide collisions of heavy ion beams in the energy range from 1 to 4.5 GeV/u at the luminosity level of $1 \cdot 10^{27} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. On example of gold ions the formation of the bunch in the collider injection chain at parameters required for the experiments is described in this article.

Введение

Достижение проектной светимости коллайдера NICA [1] при столкновениях тяжелых ионов планируется за счет накопления в каждом из колец пучка с интенсивностью до $1.7 \cdot 10^{10}$ частиц, сгруппированного в 17 сгустков. Среднеквадратичная длина сгустка должна составлять 0.3 м, среднеквадратичный относительный разброс по импульсу около 0.001, поперечный эмиттанс ограничен снизу эффектами пространственного заряда и его необходимо регулировать в зависимости от энергии пучка (Таблица 1). В проекте NICA рассматривается два альтернативных метода заполнения колец коллайдера ионами. В соответствии с первым из них, первоначально в каждом из колец накапливается распущенный пучок требуемой интенсивности, а затем производится его группировка и сжатие сгустков до требуемой длины. При реализации второго метода, сгусток с параметрами, требуемыми при столкновениях, подготавливается инжекционной цепочкой и переводится в соответствующую сепаратрису одного из колец коллайдера, работающих со включенной ВЧ системой. Кольца коллайдера заполняются сгустком за сгустком до требуемого количества сгустков. В этом варианте все сложности по подготовке сгустка с требуемыми параметрами ложатся на инжекционную цепочку, состоящую из вновь создаваемых тяжелоионного линейного ускорителя и бустерного синхротрона (Бустера), и модернизированного синхротрона Нуклотрон. В данной статье рассмотрена динамика продольного движения ионов в Бустере и Нуклотроне при реализации второго метода, как наиболее сложного с технической точки зрения.

	При инжекции в бустер	На выходе Нуклотрона	
Сорт ионов	$^{197}\text{Au}^{32+}$	$^{197}\text{Au}^{79+}$	
Количество ионов	$2 \cdot 10^9$	$1.0 - 1.5 \cdot 10^9$	
Кинетическая энергия частиц, ГэВ/нукл	0.0062	1	4.5
Относительный разброс по импульсу	0.00025	0.001	0.0008
Длина сгустка, м	60	0.3	0.3
Продольный эмиттанс пучка (нормализованный), эВ·с	3.6	1.0	2.4
Поперечный эмиттанс пучка (нормализованный), п·мм·мрад	5.5	7.0	1.2

Таблица 1. Характеристики пучка при инжекции в Бустер и перед его переводом в коллайдер (приведены среднеквадратичные параметры сгустков)

Параметры и режимы работы ускоряющих ВЧ систем Бустера и Нуклотрона оптимизировались путем численного моделирования динамики продольного движения с помощью компьютерной программы ESME [2]. В расчетах предполагалось, что после 1-2 однооборотных инжекций из линейного ускорителя, произведенных при постоянном магнитном поле, в Бустере циркулирует распущенный пучок, занимающий весь его периметр – 212.2 м. Дальнейшие преобразования параметров пучка в процессе формирования сгустка можно разбить на следующие основные этапы:

- Адиабатический захват на четвертой гармонике частоты обращения, обеспечивающий согласование эмиттанса пучка с продольным аксептаносом Бустера и минимизацию потерь частиц при переходе от циркуляции к ускорению.
- Ускорение до энергии электронного охлаждения, равной 100 МэВ/нукл.
- Охлаждение пучка до необходимых значений продольного и поперечного эмиттансов.
- Ускорение на первой гармонике частоты обращения до энергии 600 МэВ/нукл.
- Обдирка ионов и перевод в Нуклотрон.
- Ускорение до энергии эксперимента от 1 до 4.5 ГэВ/нукл.
- Компрессия сгустка и его перевод в коллайдер.

Единственная возможность активного формирования фазового объема пучка в инжекционной цепочке заключается в использовании системы электронного охлаждения в Бустере. Соответственно, при охлаждении учитывается последующее увеличение эмиттанса из-за ошибок согласования ВЧ систем при переводе из одного ускорителя в другой, разного рода нестабильностей в процессе ускорения, и - неизбежная причина роста фазового объема – взаимодействие пучка с перезарядной мишенью в канале транспортировки между Бустером и Нуклотроном.

Получению короткого сгустка способствует его адиабатическое сжатие в процессе ускорения, поскольку, при сохранении продольного эмиттанса неизменным, фазовая протяженность сгустка уменьшается как $|\eta/\gamma|^{1/4}$, где γ – релятивистский фактор, а $\eta = \gamma^{-2} - \gamma_{\text{ф}}^{-2}$ – слип-фактор. В результате, при неизменном ВЧ напряжении при ускорении в Бустере от энергии охлаждения до перевода в Нуклотрон сгусток адиабатически сжимается в 1.36 раза; при ускорении в Нуклотроне до 1 ГэВ/нукл – в 1.2 раза и в 3.0 раза при ускорении до 4.5 ГэВ/нукл.

1. Динамика продольного движения в Бустере

Оптимальный режим работы инжекционной цепочки соответствует темпу роста поля в Бустере равному 1 Тл/с. Критическая энергия Бустера составляет 3.8 ГэВ/нукл [3].

Ускорительный цикл формируется согласованным изменением во времени двух характеристик: магнитного поля $B(t)$ – главной переменной и амплитуды ВЧ напряжения на ускорительных станциях $V(t)$ – зависимой переменной, при этом, закон связи между магнитным полем и амплитудой напряжения варьируется в зависимости от поставленной цели. Связь амплитуды ускоряющего напряжения с изменением магнитного поля выражается: $V \sin \phi_s = 2\pi R \frac{d(B\rho)}{dt}$, где ϕ_s – синхронная фаза, R – средний радиус орбиты, $B\rho$ – магнитная жесткость. Основной набор энергии в Бустере осуществляется при линейном росте магнитного поля. Значение синхронной фазы выбрано равным 30° , что с одной стороны обеспечивает зону устойчивого движения частиц протяженностью $\sim \frac{1}{2}$ периметра ускорителя, а с другой стороны соответствует технически реализуемой амплитуде напряжения ВЧ станций равной 7 кВ. Частота обращения частиц в Бустере при изменении энергии с 6.2 МэВ/нукл до 600 МэВ/нукл увеличивается в 9 раз. Для уменьшения диапазона перестройки генератора был выбран следующий режим работы ВЧ системы Бустера: ускорение до энергии электронного охлаждения происходит на 4-й гармонике частоты обращения частиц, а после охлаждения пучок группируется и ускоряется на 1-й гармонике. В результате изменение частоты происходит в пределах от 634 кГц до 2400 кГц.

После инжекции в Бустер пучок с продольным эмиттансом 3.6 эВ·с занимает весь периметр ускорителя. Согласование эмиттанса пучка с аксептансом ускорителя может быть осуществлено ускоряющей ВЧ системой с использованием методики адиабатического захвата (АЗ) [4]. Процесс захвата происходит при постоянной средней энергии частиц, и состоит в медленном (адиабатическом) повышении амплитуды ВЧ напряжения на «столе» магнитного поля. Начальное напряжение V_1 выбирается таким образом, чтобы соответствующая ему площадь продольного аксептанса A_1 была намного меньше начального эмиттанса пучка. Коэффициент адиабатичности α_c для процесса захвата определяется следующим образом:

$$\frac{dA}{A} = \alpha_c \frac{dt}{T_s}, \quad (1)$$

где T_s – период синхротронных колебаний. Коэффициент α_c при осуществлении захвата можно поддерживать постоянным (изоадиабатический закон увеличения V). Закон изменения ускоряющего напряжения в таком случае принимает вид:

$$V(t) = \frac{V_2}{\left[\sqrt{\frac{V_2}{V_1}} - \frac{\alpha_c}{T_s} t \right]^2} \quad (2)$$

Для выполнения условия адиабатичности коэффициент α_c должен быть много меньше единицы. Однако чем меньше значение коэффициента, тем дольше длится захват. Основным механизмом потерь ионов в Бустере является изменение их зарядового состояния при взаимодействии с остаточным газом. Сечение этого процесса максимально при энергии инъекции, поэтому необходимо обеспечить минимально возможную длительность начального участка ускорения. Поэтому параметры, определяющие режим АЗ, выбирались таким образом, чтобы:

- эффективность захвата была близка к 100%
- продолжительность захвата была минимальна
- увеличение продольного эмиттанса в процессе захвата было минимальным.

В качестве примера на Рис. 1 показаны результаты численного моделирования движения частиц при $\alpha_c = 0.21$, начальная амплитуда ВЧ напряжения составляет 100 В, конечная – 1.5 кВ. При длительности захвата 25 мс его эффективность с точностью расчета составляет 100 %, рост продольного эмиттанса не превышает 5 %.

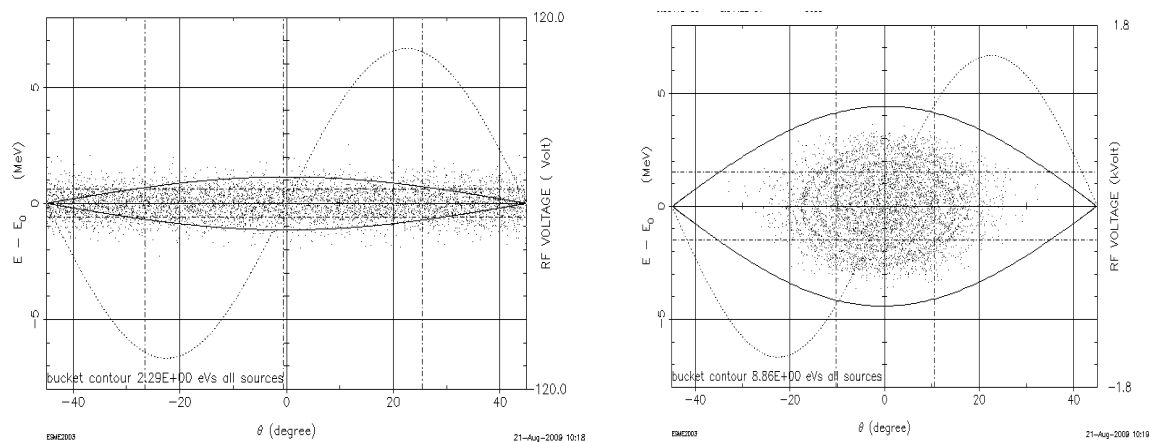


Рис. 1. Распределение частиц в фазовой плоскости продольного движения до и после АЗ.

Для сохранения продольного эмиттанса переход со «стола инъекции» к линейному росту поля должен быть достаточно медленным (адиабатичным). Период синхротронных колебаний в конце АЗ равен 2.5 мс, следовательно, длительность перехода не может быть меньше, чем ~ 10 мс. Для простоты при моделировании всех переходных режимов (как в Бустере, так и в Нуклотроне) было выбрано параболическое изменение магнитного поля ($B \sim t^2$). При переходе к растущему полю форма сепаратрисы меняется при смещении равновесной фазы в соответствии dB/dt . Поддержание в процессе переходного периода площади продольного акцептанса (за счет соответствующего изменения амплитуды ВЧ)

постоянной при хорошей адиабатичности процесса позволяет избежать потерь частиц. Моделирование показывает, что линейное изменение амплитуды ВЧ напряжения с 1.5 кВ до 7 кВ при длительности перехода 40 мс позволяет осуществить переход к ускорению без потерь. В дальнейшем ускорение до энергии электронного охлаждения осуществляется при постоянном темпе роста поля 1 Тл/с и при постоянной амплитуде ВЧ напряжения равной 7 кВ. Переход на «стол» поля для электронного охлаждения осуществляется также за 40 мс, после его завершения длина каждого сгустка составляет примерно 4.1 м при относительном разбросе по импульсу $2.4 \cdot 10^{-4}$.

Затем пучок распускается за счет медленного снижения амплитуды ВЧ напряжения, в течение 1 с осуществляется его электронное охлаждение. По завершении формирования требуемой величины поперечного эмиттанса и уменьшения продольного эмиттанса пучка до ~ 2.0 эВ·с, производится его группировка на первой гармонике частоты обращения. В дальнейшем за 40 мс осуществляется переход со «стола» электронного охлаждения к линейно растущему магнитному полю с темпом роста $dB/dt = 1$ Тл/с. Аналогичным образом, ускоренный до 600 МэВ/нукл пучок переводится на плато магнитного поля для его перевода в Нуклотрон. На протяжении всего этого периода амплитуда ВЧ напряжения постоянна и равна 7кВ.

2. Динамика продольного движения в Нуклотроне

Перед инжекцией в Нуклотрон пучок проходит через станцию обдирки, расположенную в канале транспортировки из Бустера. Эффективность обдирки ионов золота с зарядового состояния $32+$ до $79+$ на максимальной энергии Бустера составляет не менее 80%. Взаимодействие ионов с мишенью ведет к увеличению, главным образом, продольного эмиттанса пучка, что связано с флуктуацией ионизационных потерь энергии и неоднородностью толщины мишени. При использовании силиконовой фольги с неоднородностью толщины менее 0.5% рост продольного эмиттанса составит ~ 0.5 эВ·с [5]. Наиболее сложные условия по согласованию продольного движения соответствуют переводу сгустка в Нуклотрон со «стола» магнитного поля Бустера в растущее магнитное поле Нуклотрона. Ситуация принципиально не изменится если синхронизация двух ускорителей по фазе и частоте потребует осуществление перевода пучка со «стола» на «стол». При этом продольное движение частиц в Нуклотроне будет происходить в более «комфортных» условиях. Максимальная амплитуда ВЧ напряжения, достижимая при использовании существующих ВЧ станций Нуклотрона, составляет 10 кВ. Если перевод сгустка осуществляется при амплитуде напряжения 8.5 кВ, то площадь продольного акцептанса ускорителя в момент инжекции превышает эмиттанс пучка в 4.5 раза, поэтому

фазовые траектории, начиная с момента инжекции, находятся в центре сепаратрисы, а само продольное движение близко к линейному. В дальнейшем, для сохранения постоянной площади сепаратрисы, амплитуда напряжения варьируется в интервале $7 \div 10$ кВ (Таблица 2). После достижения максимальной энергии, равной 4.5 ГэВ/нукл и выхода на «стол» поля, длина сгустка составляет 3.4 м, относительный разброс по импульсу - $7 \cdot 10^{-5}$, при амплитуде напряжения, равной 200 В.

Интервал энергий, МэВ/н	600 ÷ 4500
Частота ВЧ, МГц	0.94 ÷ 1.17
Номер гармоники	1
Продольный эмиттанс сгустка, эВ·с	<3
Амплитуда ВЧ при захвате, кВ	8.5
Амплитуда ВЧ при росте поля, кВ	7–10
Темп роста магнитного поля, Тл/с	1
Время ускорения, сек	1.6

Таблица 2. Параметры ВЧ системы при ускорении пучка в Нуклотроне

3. Компрессия сгустка

На «столе» перевода пучка из Нуклотрона в коллайдер предполагается осуществить компрессию сгустка либо методом скачка амплитуды напряжения, либо методом скачка фазы. При компрессии сгустка методом скачка фазы можно обойтись существующими ВЧ станциями Нуклотрона. Однако, из-за существенно нелинейного движения, при этом происходит рост продольного эмиттанса примерно в 1.5 раза, что может быть недопустимо. Для компрессии сгустка скачком амплитуды напряжения предполагается разработать дополнительную «ударную» ВЧ станцию с максимальной амплитудой до 100 кВ. Станция должна включаться на несколько миллисекунд.

Процесс компрессии заключается в медленном адиабатическом понижении напряжения на штатной ВЧ станции Нуклотрона до 200 В (которое осуществляется при выходе на «стол» поля) с последующим включением дополнительной ВЧ станции. При работе на 1-й кратности частоты обращения сгусток будет находиться в центре сепаратрисы, а движение в фазовом пространстве при компрессии будет близко к линейному. В этом случае коэффициент сжатия сгустка $r = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \sqrt{\frac{V_2}{V_1}}$ зависит только от соотношения начального V_1 и конечного V_2 напряжений. На Рис. 2 приведены результаты моделирования процесса сжатия сгустка при скачке напряжения до 70 кВ, при этом с точностью до точности расчета, продольный эмиттанс сгустка сохраняется постоянным.

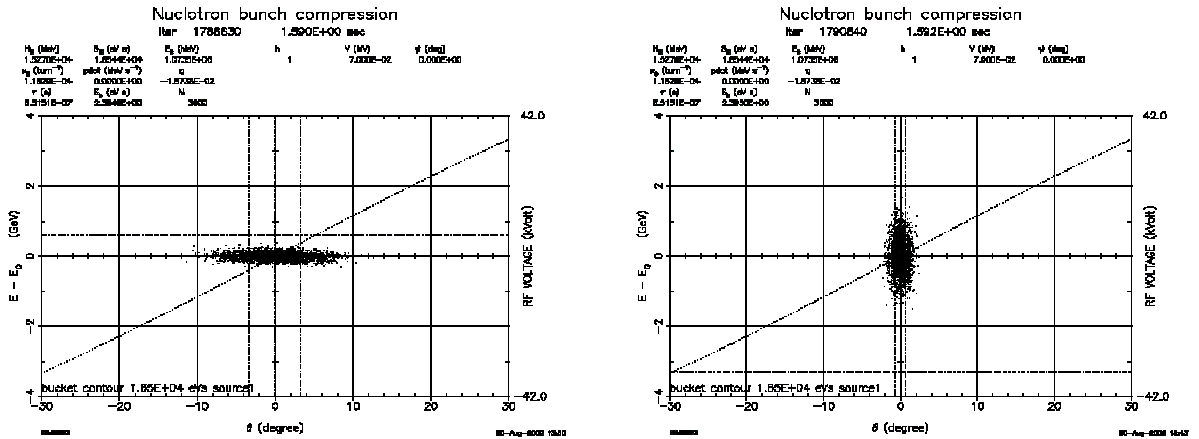


Рис 2. Сгусток ионов Au^{79+} на фазовой плоскости до и после процедуры компрессии

Заключение

На основании численного моделирования продольной динамики частиц в Бустере и Нуклотроне выбраны основные параметры ВЧ систем, позволяющие получить на выходе Нуклотрона сгусток ионов, подготовленный для столкновений в коллайдере NICA. Проектирование ускоряющей ВЧ системы Бустера проводится совместно с ИЯФ им. Будкера СО РАН. Для компрессии сгустка методом скачка напряжения потребуются разработка проекта и изготовление дополнительной «ударной» ВЧ станции Нуклотрона.

Экспериментальные исследования процесса адиабатического захвата планируется осуществить в ближайших сеансах Нуклотрона, соответствующая аппаратура изготовлена и опробована [6].

Список литературы

1. A.N.Sissakian for NICA collaboration, “Nuclotron-based ion collider facility” Intern. conference LP’07, Daegu, Korea, August 2007.
2. <http://www-ap.fnal.gov/ESME/>
3. А.В.Бутенко и др., Бустерный синхротрон ускорительного комплекса, труды VIII Международного семинара по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П.Саранцева, Алушта, 31 августа – 5 сентября, 2009.
4. V.I.Volkov, A.V.Eliseev, I.B.Issinsky, A.D.Kovalenko. Simulation of Quasi-Adiabatic Beam Capture into Acceleration at the Nuclotron. Communication of JINR P9-2003-154, Dubna, 2003.
5. C. Montag, L. Ahrens, P. Thieberger, Tomographic measurement of longitudinal emittance growth due to stripping foils, Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee.

6. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., Алфеев А.В. и др., Итоги 39-го сеанса Нуклотрона, Сообщения ОИЯИ, Р9-2009-131, Дубна 2009.