

ІЯЦ

INSTITUTE OF PHYSICS OF THE
HUNGARIAN ACADEMY OF SCIENCES
INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

КІУАІ-93-15

Препринт КИЯИ-93-15

Е.Е.Олейник, В.А.Пашин

НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕЗАРЯДКА УСКОРЕННЫХ
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

Киев 1993

Нейтрализация и перезарядка ускоренных отрицательных ионов
/ Олейник Е.Е., Пашин В.А.-Киев, 1993.-8 с.-(Препр./АН Украины.
Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-93-15).

Приведен обзор действующих установок, ускоряющих и использующих пучки отрицательных ионов и нейтральных атомов. Сообщаются теоретические и экспериментальные данные об эффективности перезарядки и нейтрализации различными методами. Исследовано ускорение на циклотроне У-240 ИЯИ АН Украины отрицательных ионов водорода и ионов углерода, а также вывод их при помощи перезарядки на тонких углеродных фольгах.

Ил.5.Список лит.: с.8 (12 назв.).

Neutralization and charge exchange of accelerated negative ions/
Oleinik Ye.Ye., Pashin V.A.-Kiev, 1993.-8 p.-(Prepr./Academy of Sciences of Ukraine. Institute for Nuclear Research; KINR-93-15).

In the paper there is a survey of operating machines which accelerate and use beams of negative ions and neutral atoms. There are theoretical and experimental data of a charge exchange and a neutralization efficiency by different methods. It is investigated the acceleration of hydrogen negative ions and carbon ions in the Cyclotron U-240 INR of Academy of Sciences of Ukraine and declination them out with a help of a charge exchange by thin carbon foil strippers.

5 figs., 12 refs.

Утверждено к печати ученым советом
Института ядерных исследований АН Украины



Е.Е.Олейник, В.А.Пашин, 1993

В последние годы существенно вырос интерес к пучкам ускоренных нейтральных и отрицательных частиц, а также к их источникам. Причем не только к водородным пучкам (протоны, дейтроны), но и к более тяжелым частицам, т.е. ионам и нейтралам углерода, азота, кислорода, алюминия, серы и т.д.

Перезарядка отрицательных ионов в положительные лежит в основе принципа ускорения в тандем-генераторах. Обдирка электронов в процессе ускорения позволяет повышать конечную энергию многозарядных ионов в ускорителях прямого действия.

Использование вывода протонов из циклотронов и синхротронов с помощью обдирки экстраэлектронов ускоренных отрицательных ионов водорода позволяет получить почти стопроцентный вывод пучка. Это значительно уменьшает наведенную радиоактивность оборудования и облучение персонала. Использование эффекта изменения заряда на противоположный дает возможность инжектировать частицы в накопительные кольца и синхротроны. В этих случаях исключаются сложные импульсные магниты, увеличивается эффективность инжекции и сохраняется эмиттанс пучка.

Большое внимание сейчас уделяется получению высокоэнергетических пучков нейтральных частиц. Они образуются при ускорении заряженных частиц с последующей нейтрализацией зарядов. Нейтральные пучки используются для изучения поверхностных явлений, что представляет самостоятельный раздел физики, а также для изучения влияния космического излучения на различные материалы и приборы. Продолжаются эксперименты по использованию нейтральных пучков в разработках термоядерных реакторов.

Во многих лабораториях мира продолжается разработка источников отрицательных ионов. Источники можно разделить на три типа: магнетронные, пеннинговские и мультикасповые (объемные). Два первых относятся к поверхностно-плазменным источникам. Современными источниками могут иметь интенсивность до нескольких ампер.

1. Вывод ионов H^- из циклотрона

Ускорение отрицательных ионов водорода в циклотронах и их вывод при помощи обдирки на тонкой мишени используется уже более тридцати лет. Ярким примером может служить серия прикладных циклотронов CUSLOWE (Бельгия), ускоряющих ионы H^- . CUSLOWE 30 (1) ускоряет ионы H^- до 30 МэВ, интенсивность выведенного пучка порядка

500 нКА. Магнитное поле и частота ускоряющего напряжения фиксированы. Изменение положения стриппера, состоящего из углеродной фольги толщиной 40 мкг/см², дает вариацию энергии от 15 до 30 МэВ. Установлен внешний источник отрицательных ионов мультикаспового типа, аксиальный инжектор имеет длину 180 см, эффективность инжекции 38% при 100 нКА тока пучка и 25% - при 2 нА на входе в тракт инжекции. Используется для наработки медицинских изотопов: ¹³C, ¹³N, ¹⁶O, ¹⁸F, ⁶⁷Ga, ¹¹¹In, ¹²³I, ²⁰¹Tl. CYCLOWE 10/5 ускоряет протоны до 10 МэВ и дейтроны до 5 МэВ для производства изотопов ¹³C, ¹³N, ¹⁶O, ¹⁸F. Магнит броневого типа является одновременно зарядкой, поэтому ускоритель устанавливается непосредственно в медицинских центрах. CYCLOWE 3-D ускоряет дейтроны до 3 МэВ для получения в основном ¹⁸O.

Представляют также интерес изохронные циклотроны серии CP-42. Ионы Н⁺ производятся во внутренних источнике типа PIG и ускоряются до энергии 42 МэВ. Пучки можно выводить в 4 направлениях. Диаметр полюсов 120 см, конечный радиус ускорения 53 см, два дуанта. Обдирочные фольги (переплетенный графит) толщиной 10¹⁷ ат/см² устанавливаются на карусель. Интенсивность выведенного пучка 200 нКА.

Циклотрон в Минитобе (США) является специализированным для получения ускоренных нейтральных частиц водорода [2]. Первые эксперименты были проведены с пучками Н⁰ интенсивностью 10⁹ см⁻²с⁻¹. Они получались на остаточном газе в вакууме 10⁻⁶ торр. Затем использовалась углеродная фольга толщиной 5 мкг/см², которая давала 5% Н⁰ при энергии 40 МэВ. В дальнейшем предполагается обдирку осуществлять на парах металлов, ожидается эффективность перезарядки до 80% Н⁰.

2. Инжекция в синхротрон и накопительные кольца

В Брукхэвской национальной лаборатории осуществлена инжекция перезарядкой в AGS (синхротрон с переменным градиентом на 30 ГэВ) [3]. При инжекции Н⁺ из линейного ускорителя на 200 МэВ эффективность с помощью септума с инфлектором была 25%. Эффективность инжекции перезарядкой Н⁻ достигает 95%. Преимущества состоят также в том, что резко снижается уровень наведенной радиоактивности и уменьшается мощность ВЧ резонаторов линейного ускорителя.

В Японии использовался мультикасповый источник Н⁻ [4] для многооборотной инжекции обдиркой в бустерный 500 МэВ протонный синхротрон KEK. Из источника выходило 20 нА, 18 нА инжектировалось в

линейный ускоритель и 8,5 мА было получено на выходе из линейного ускорителя с энергией 20 МэВ, и затем следовала инжекция в бустер.

Хорошо известный изохронный циклотрон в Канаде (CYTOMF) обычно давал 130 мкА ионов H^- с энергией 520 МэВ с выводом обдирной на фольге толщиной 5 мкг/см². Разработан проект использования этого циклотрона для инжекции обдирной в накопительное кольцо [5]. В связи с этим было исследовано зарядовое состояние пучка после прохождения мишеней разной толщины (рис. 1).

3. Нагрев плазмы

Нейтральные пучки могут быть использованы для дозированного подогрева термоядерной плазмы. Во многих странах, особенно в США, ведутся усиленные разработки термоядерных реакторов, основанные на этом принципе. Используемые для подогрева плазмы пучки должны быть электрически нейтральными для беспрепятственного проникновения в плазму, удерживаемую магнитными затворами и ловушками. Как показывают эксперименты и теоретические исследования, для нагрева требуются пучки нейтральных частиц с энергией порядка миллиона электрон-вольт и интенсивность несколько ампер. Нейтрализация положительных частиц резко падает с ростом энергии. Например, для дейтронов с энергией выше 200 кэВ эффективность нейтрализации меньше 20% [6]. Это видно на рис. 2. Отрицательные ионы лития в плазме нейтрализуются до 60%, ионы D^- на пучке лазера - до 90% и т.д.

4. Исследование перезарядки и ее использование

В Аргонской национальной лаборатории (США) на базе линейного ускорителя отрицательных ионов водорода до 50 МэВ создан специальный стенд для исследования явлений перезарядки [7]. На рис. 3 показано распределение зарядности в пучке в зависимости от толщины мишени. Предполагается, что при толщине углеродной фольги 600 А, покрытой 100 А алюминием, эффективность нейтрализации будет максимальной и равной 50%.

Были также проведены исследования по нейтрализации пучка H^- с помощью вспышки света [8]. Так как энергетическая ширина вспышки большая и не требуется монохроматичность, то в работе использовалась обычная ксеноновая лампа-вспышка мощностью 900 Вт. Пучок проходил через полый цилиндр с внутренней полированной алюминиевой поверхностью, внутри которого производилась вспышка света. Эффективность нейтрализации пучка была порядка 0,1%. Расчет показывает,

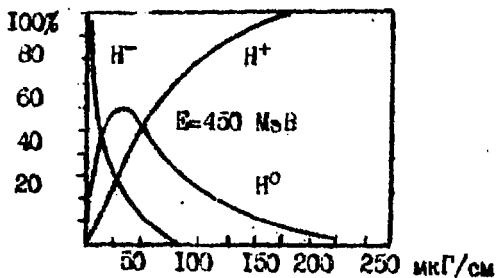


Рис.1. Зависимость перезарядки от толщины мишени.

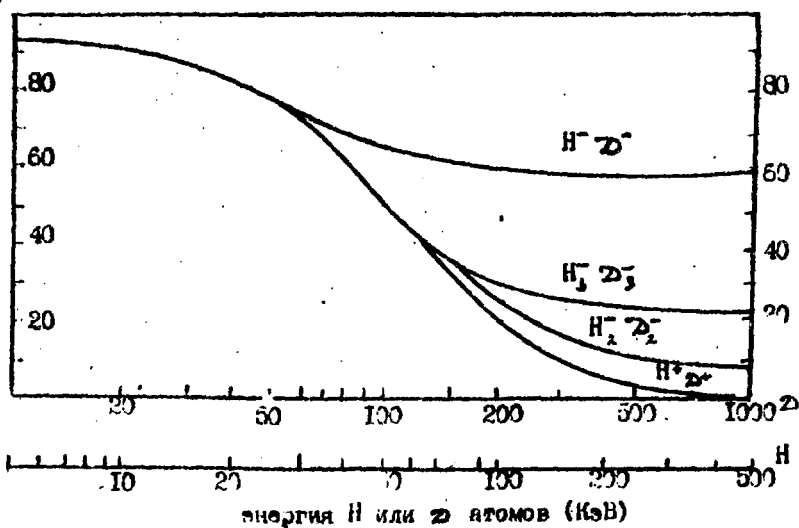


Рис.2. Эффективность нейтрализации в зависимости от энергии.

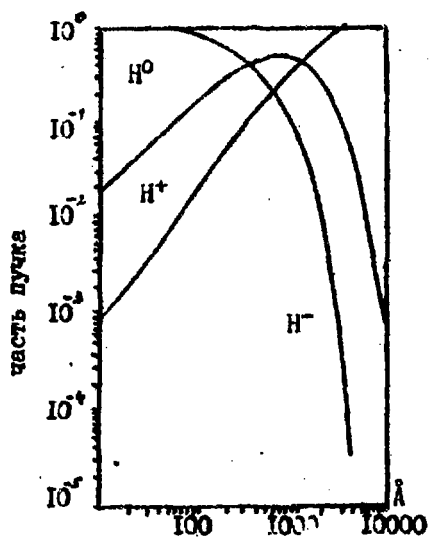


Рис. 3. Зависимость перезарядки от толщины углеродной мишени.

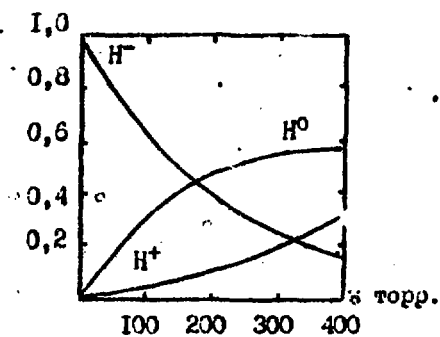


Рис. 4. Зависимость перезарядки от давления водорода в трубке-мишени.

что при мощности света 1000 МВт эффективность нейтрализации достигает: насыщения на уровне 90%.

На Колорадском циклотроне (СМА) [9] проводились эксперименты по нейтрализации и перезарядке отрицательных ионов водорода с энергией 4 - 18 МэВ. Пучок H^- проходил через трубку длиной 32,2 см с вакуумной откачкой и наполненной водородом. Анализ перезарядки проводился магнитом. На рис.4 показаны результаты исследований.

В Брукхэвской национальной лаборатории исследовалась эффективность нейтрализации отрицательных ионов высокой энергии плазменными мишенями [10]. Ускоритель - тандем-генератор. Плазменная мишень длиной 1 м создавалась двумя катодными разрядниками. Исследовались водородная и аргонная плазма для нейтрализации пучков D^- , Li^- , C^- , O^- , Si^- при энергиях 2-8 МэВ. На мишени имелась соленоидная обмотка, которая создавала продольное магнитное поле 0,02 Тл. Плотность плазмы, т.е. толщина мишени зависит от давления газа, тока разряда, магнитного поля. Для 3 МэВ D^- нейтрализация 50% в газе H_2 и 66% в плазме H_2 . Остальные ионы имели меньшую нейтрализацию, т.е. Si^- - 27% (аргонная плазма), C^- - 35% (аргонная плазма), O^- - 43% (H_2 плазма).

В Институте ядерных исследований АН Украины на циклотроне У-240 было осуществлено экспериментальное ускорение отрицательных ионов водорода и вывод протонов с использованием обдирки электронов на тонкой графитовой фольге. В режиме ускорения протонов до энергии 50 МэВ были изменены направления токов во всех обмотках магнита. В связи с тем, что использовался обычный штатный источник протонов и вакуумная система без специальной модернизации, интенсивность ионов H^- и отклоненных с конечной орбиты протонов была мала (около 1 нКА). Как показали расчеты [11] и опыт эксплуатации других циклотронов, установка специального источника ионов H^- (типа Эллера) и улучшение вакуумной системы с целью повышения скорости откачки и устранения высокомолекулярных углеводородов (продуктов деятельности диффузионных масляных насосов) могут позволить увеличение интенсивности протонов в десятки и даже в сотни раз, причем проблема вывода интенсивного пучка ионов исчезает.

Изменение положения обдиравшей фольги по радиусу и азимуту дает возможность варьировать энергию отклоненных частиц и направить их в заданное место. Для этого была составлена программа расчета траекторий заряженных частиц в реальных известных неоднородных магнитных и электрических полях [12]. На рис.5 представлены

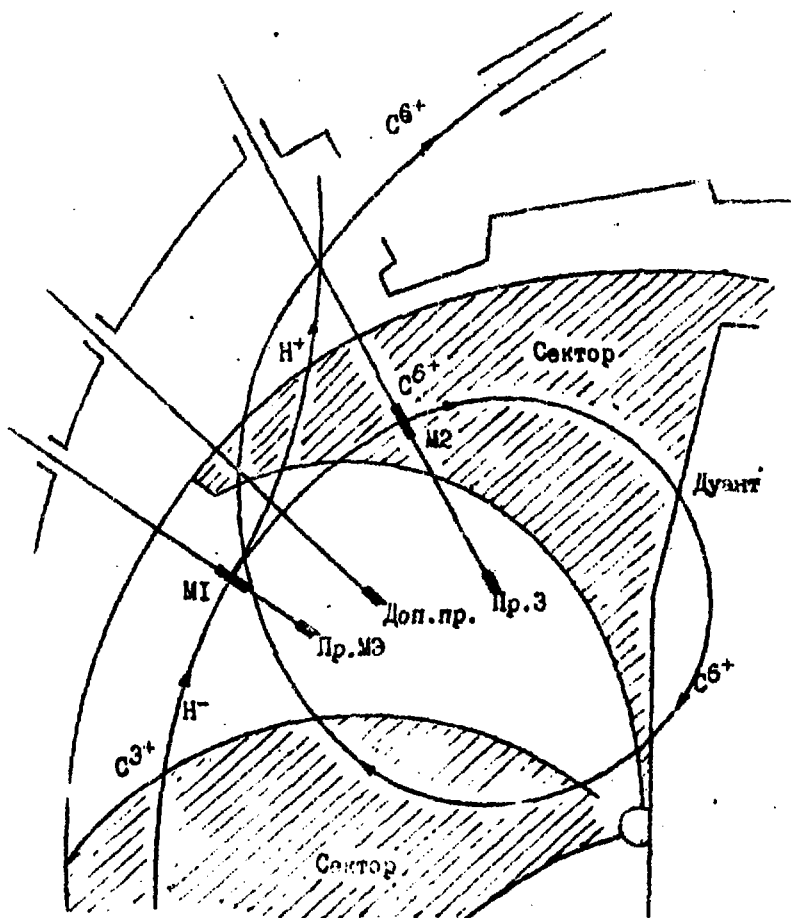


Рис. 3. Схемы расположения пробников в циклотроне У-240 и траектория ионов водорода и углерода после обдирки. MI - мишень перезарядки ионов водорода, M2 - мишень обдирки зарядов ионов углерода.

расчетные траектории ионов H^- и трехзарядных ионов углерода C^{3+} в конце ускорения на равновесной орбите и после перезарядки на фольге. Для ионов H^- фольга устанавливалась на пробнике магнитного экрана (Пр.МЭ) и отклоненные протоны регистрировались штатным пробником циклотрона МЭ (Пр.З). Для перезарядки ионов углерода фольга устанавливалась на Пр.З и измерение отклоненного пучка ионов C^{3+} проводилось дополнительным пробником (Доп.пр.).

Проведенные эксперименты совпали с расчетом, что подтверждает возможность теоретических расчетов любых вариантов с помощью составленной программы. В настоящее время эти работы используются для создания интенсивного источника ионов H^- и циклотрона для прикладных работ ЦМР-144.

Список литературы

1. Bol L.L., Lacroix M., Lagnoye G. et al. Operating experience with a 30 MeV, 500 mA H^- cyclotron//Nucl.Instr. & Meth.-1989.-B40/41.-Part 2.-P.874.
2. McKee J.S.C., Mathur M.S. Investigation and characterization of space material//Nucl.Instr. & Meth.-1991.-B56/57.-P.860.
3. Barton D.S., Ahrens L.A., Glenn I.W. et al. Charge exchange injection at the AGS//IEEE Trans.NS-30.-1983.-N4.-P.2787.
4. Takagi A., Mori Y., Igarashi Z. et al. Accelerated beam from CUSP H^- ion source//Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, 3-d International Symposium.-Brookhaven.-1983.-P.520.
5. Laxdal R., Craddock M.K., Cho W. et al. Matching an isochronous cyclotron to a Synchrotron to provide a high intensity injector//IEEE Trans.NS-30.-1983.-N4.-P.2013.
6. Staten L.S. Magnetic fusion energy heating development plan //Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, 3-d International Symposium.-Brookhaven.-1983.-P.587.
7. Kramer S.L., Mofe D.R. Measuring beam emittance for high-energy H^- accelerators//IEEE Trans.NS-28.-1981.-N3.-P.2174.
8. Kramer S.L., Stipp V., Krieger C., Madsen J. High efficiency beam splitting for H^- accelerators//IEEE Trans.NS-32.-1985.-Vol.5.-Part 2.-P.2989.
9. Smythe R., Toevs J. Collisional electron detachment from hydrogen atoms and negative hydrogen ions between 4 and 18 MeV //Physical Review.-1965.-Vol.139.-N1A.-P.15.
10. Hershovitch A.I., Johnson V.M., Kovarik V.I. et al. Neutralization efficiency of plasma targets for high energy negative ions//Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, 3-d International Symposium.-Brookhaven.-1983.-P.561.
11. Быков В.И., Лиев А.Ф., Олейник Е.Е. Оценка потерь интенсивности при ускорении ионов H^- в циклических ускорителях на низкие и средние энергии.-Киев, 1981.-14 с.-{ Препр./ АН УССР, Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-01-21 }.
12. Нечаев А.А., Олейник Е.Е. Получение и ускорение ионов H^- на циклических ускорителях//Физика и техника ускорителей заряженных частиц (Материалы зимней школы физики ЛИАФ).-Л.-1988.-С.3-41.

Научное издание

ОЛЕЙНИК Евгений Евгеньевич

ПАВЛИН Владлен Андреевич

НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕЗАРЯДКА УСКОРЕННЫХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

Редактор Л.Н.Троян

Подп. в печ. 18.06.93. Формат 60x90/16. Бум. офс. №2. Офс. печ.
Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,5. Тираж 160 экз. Заказ 104
Цена 10 к.

СНТБ с ЭП Института ядерных исследований АН Украины
252028, Киев-28, проспект Науки, 47
