

343
K-89

920883

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

А.Б. Кузнецов

707

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ
ВВОДА И ВЫВОДА ЧАСТИЦ
В СИНХРОФАЗОТРОНЕ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель академик

В.И. Векслер

Дубна 1961

А.Б. Кузнецов

707

С345
К-89

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ
ВВОДА И ВЫВОДА ЧАСТИЦ
В СИНХРОФАЗОТРОНЕ

549 sf.
Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель академик
В.И. Векслер

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

В настоящее время в мире работает несколько ускорителей протонов типа синхрофазотрона. Для успешного использования этих установок физиками требуется, с одной стороны, повышение интенсивности ускоряемых пучков частиц, а с другой стороны, создание достаточно чистых пучков вторичных частиц данного сорта. Первое, в частности, связано с обеспечением достаточно хороших условий инжекции.

Реферируемая диссертация посвящена некоторым вопросам, относящимся к указанным выше проблемам.

Для обеспечения удовлетворительной инжекции протонов в синхрофазотрон обычно необходимо иметь достаточно моноэнергетичный и хорошо сколламированный пучок протонов ^{/1,2/}. Широкий энергетический спектр вводимого пучка протонов нежелателен, так как, во-первых, при этом уменьшается доля частиц, захваченных в режим ускорения ^{/1,2/}, и, во-вторых, ухудшаются условия ввода в тех случаях, когда при вводе требуется поворачивать пучок на значительный угол.

В связи с этим в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ при непосредственном участии автора были проведены соответствующие теоретические и экспериментальные исследования, направленные на улучшение условий инжекции. На основе этих исследований была усовершенствована существующая система ввода ^{/3,4/}, что позволило скомпенсировать дисперсию пучка протонов. Был также спроектирован новый линейный ускоритель-инжектор ^{/5/}, который должен давать пучок протонов с очень малым энергетическим разбросом.

Теория этих вопросов систематизирована и обобщена в первых двух главах диссертации.

В первой главе рассматривается так называемая одночастичная теория протонного линейного ускорителя-инжектора в основном под углом зрения предъявляемых к таким ускорителям особых требований, в частности, высокой моноэнергетичности выходящего из линейного ускорителя пучка частиц.

§ 2 и 3 этой главы носят частично обзорный характер ^{/6,7/}.

В § 2 последовательно рассмотрены основы расчета движения равновесной частицы и параметров системы дрейфовых трубок. Дан вывод аналитического вы-

ражения "фактора времени пролета" ϑ , и проведен анализ его применимости. Показано, что прирост относительной скорости равновесной частицы β_s при определенных условиях очень слабо зависит от номера ускоряющего периода n . В результате чего расчетные формулы приводятся к очень удобному виду, не требующему использования метода последовательных приближений:

$$\Delta\beta_{n,s} = \frac{e E_0 \lambda \cos \Phi_s}{E} G(\mathcal{L}_n),$$

$$\beta_{n,s} = \beta_{n-1,s} + \Delta\beta_{n,s},$$

$$L_n = \lambda \left(\beta_{n-1,s} + \frac{\Delta\beta_{n,s}}{2} \right),$$

$$v_n = \lambda \beta_{n,s} (1 - \alpha),$$

где $G(\mathcal{L}_n) = \frac{\vartheta(\mathcal{L}_n)}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\mathcal{L}_n}{\lambda} \right)^2}$, $\mathcal{L}_n = \lambda \left(\beta_{n-1,s} + \frac{\Delta\beta_{n-1,s}}{2} \right)$,

E_0 - средняя амплитудная напряженность электрического поля, λ - длина волны высокочастотного ускоряющего поля, Φ_s - равновесная фаза, E_0 - энергия покоя протона, L_n - длина n -го ускоряющего периода, $\beta_{n,s}$ - относительная скорость равновесной частицы на выходе из n -го периода, \mathcal{L}_n - длина n -ой дрейфовой трубки, α - отношение длины ускоряющего зазора к L_n .

В § 3 излагается теория несвязанных продольно-фазового и радиального движений частиц, и дается обоснование применимости описания продольно-фазового движения дифференциальным уравнением. Кроме того, рассмотрено влияние радиальных колебаний на малые продольно-фазовые колебания. Эта задача сведена к неоднородному уравнению, родственному уравнению Бесселя, частное решение которого имеет вид

$$\varphi_i = \pi h \left[J_\nu(2\sqrt{hN}) \int_0^N \frac{Y_\nu(2\sqrt{hN}) Z_\nu^2(2\sqrt{hN})}{N} dN + Y_\nu(2\sqrt{hN}) \int_0^N \frac{J_\nu(2\sqrt{hN}) Z_\nu^2(2\sqrt{hN})}{N} dN \right],$$

где φ - отклонение фазы от равновесной, $N = \frac{\beta_{n,s}}{\Delta\beta_s}$, $h = -\frac{J^2}{N^2 \beta_s^2}$, J_ν и Y_ν -

функции Бесселя 1-го и 2-го рода, \mathcal{L}_i - общее решение уравнения радиального движения частиц, совершающих малые фазовые колебания,

$$\delta = -2\pi \text{tg} \Phi_s, \quad a = \frac{\cos(\Phi_s - J\omega)}{2 \cos \Phi_s \langle G(L) \rangle}, \quad \nu = \sqrt{(1 - \gamma)^2 - 4d}, \quad d = \frac{\rho}{2} \left(\frac{J}{\lambda \Delta\beta_s} \right)^2 \left\langle \frac{r^2}{N} \right\rangle,$$

z - радиальное отклонение частицы от оси. При определенных условиях удается оценить величину φ_i и показать, что при разумных значениях параметров амплитуды вынужденных фазовых колебаний не превышают 5° .

В § 4 рассмотрены вопросы получения на выходе линейного ускорителя-инжектора пучка частиц с малым энергетическим разбросом. Получены требования на стабильность некоторых параметров этого ускорителя. Учтено влияние радиальных колебаний на энергетический спектр, и показано, что при определенных условиях в новом линейном ускорителе-инжекторе синхрофазотрона ОИЯИ можно иметь 50% выходящих частиц с относительным энергетическим разбросом порядка $\pm 0,2\%$.

Во второй главе рассматривается специальная поворотнo-фокусирующая система^{1/3/}, одним из основных элементов которой является секторный магнит с обычной "градиентной", а также "краевой" фокусировкой^{х/}, причем последняя имеет принципиальное значение. Дело в том, что без использования "краевой" фокусировки, поворот пучка в одиночном магните только с "градиентной" фокусировкой сопровождается, вообще говоря, появлением дополнительной угловой расходимости и размытием пучка. Это обусловлено энергетическим разбросом частиц, выходящих из инжектора, и в дальнейшем в условиях синхрофазотрона ОИЯИ не может быть ничем скомпенсировано. Рассматриваемая система является существенным усовершенствованием прежней, где использовалась только "градиентная" фокусировка. Кроме поворота она обеспечивает достаточную фокусировку пучка по обоим направлениям и дает очень малую дисперсию.

В осуществленном варианте инжекционной системы синхрофазотрона ОИЯИ поворотный магнит сконструирован так, что показатель поля n и так называемые "краевые углы" β и τ могут меняться в широких пределах, что позволяет осуществлять различные варианты выпуска частиц и облегчает настройку системы на оптимум.

^{х/} Впервые расчет "краевой" фокусировки и ее сочетание с "градиентной" были проведены в работе^{1/3/}.

Общая постановка задачи, рассматриваемой в данной главе, состоит в следующем. Пучок частиц, выходящий из некоторой "начальной" плоскости, необходимо повернуть на определенный угол и перевести в "конечную" плоскость, соответствующую входу в камеру синхрофазотрона, причем это нужно сделать так, чтобы характеристики пучка удовлетворяли определенным жестким требованиям.

В § 2 настоящей главы рассмотрены общие оптические свойства и проведен анализ различных режимов настройки поворотных-фокусирующих систем, а в § 3 получена матрица преобразования характеристик пучка для секторного магнита с "градиентной" и "краевой" фокусировкой. Далее проведен детальный анализ различных режимов настройки для случая одного секторного магнита с "градиентной" и "краевой" фокусировкой /§ 4/ и для случая секторного магнита и короткого цилиндрического конденсатора /§ 5/ и показано, что такие системы позволяют устранить влияние дисперсии и обеспечить, при определенных условиях, требуемые характеристики пучка в "конечной" плоскости. В § 6 на основе полученных в предыдущих параграфах результатов рассмотрена усовершенствованная система ввода частиц в синхрофазотрон ОИЯИ.

Опыт наладки и эксплуатации усовершенствованной системы ввода /4/ показал, что развитая во второй главе теория хорошо отражает действительность.

В гл. 3 диссертации проводится теоретическое обоснование и анализ одного из методов создания на выходе из синхрофазотрона чистых пучков вторичных частиц данного сорта, предложенного В.И. Векслером и В.А. Петуховым /9,10/. Этот метод при энергиях выше нескольких Бэв является наиболее обещающим.

Суть основной идеи метода заключается в следующем. Одновременно вылетевшие из мишени в одном и том же направлении и с одинаковыми импульсами антипротон \bar{p} и π^- -мезон, пролетев некоторое расстояние L , из-за имеющейся у них разности относительных скоростей $\Delta\beta$ разделятся / \bar{p} отстанет от π^- / на некоторое расстояние $l = L\Delta\beta$. Если теперь на их пути поместить устройство, в котором отклоняющее поле за время $\frac{L}{c}$ сменит фазу на противоположную, то можно повернуть π^- на угол γ в одну сторону, а \bar{p} - на угол $-\gamma$ в другую сторону и на некотором расстоянии получить пространственное разделение \bar{p} и π^- .

Одним из основных вопросов, возникающих при осуществлении данного метода, является создание такой высокочастотной структуры вторичных частиц, вылетающих из мишени, или, что то же самое, импульсов ускоренных протонов, попадающих на мишень, чтобы отдельные пучки частиц появлялись через определенные интервалы времени T , а время образования пучков Δt было существенно меньше T .

В § 2 гл. 3 на основе закономерностей движения частиц внутри ускорителя рассмотрены две возможности создания высокочастотной структуры попадания протонов на внутреннюю мишень /метод "обдирки" и метод "просачивания"/. В § 3 получены условия, при которых обеспечивается требуемая скважность импульсов вторичных частиц. В частности, показано, что оба метода могут эффективно использоваться только в том случае, если амплитуды свободных радиальных колебаний не превышают радиальной полуширины сепаратрисы. В § 4 рассмотрено возможное замазывающее действие щелевых колебаний и показано, что в условиях антипротонного канала синхрофазотрона ОИЯИ они не играют существенной роли.

Изложенные в гл. 3 диссертации теоретические соображения послужили основой при разработке антипротонного канала синхрофазотрона ОИЯИ.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах /3а,3б,5,8/.

Л и т е р а т у р а

1. М.С. Рабинович. Основы теории синхрофазотрона. Труды ФИАН X, 23 /1958/.
2. Н.Б. Рубин, О.И. Ярковой. Особенности захвата частиц в синхрофазотронный режим ускорения. Препринт ОИЯИ, Р-849, Дубна /1960/.
- 3а А.А. Коломенский, А.Б. Кузнецов, Н.Б. Рубин. Поворотно-фокусирующая система для ввода частиц в синхрофазотрон. Препринт ОИЯИ Р-250, Дубна /1958/.
- 3б А.А. Коломенский, А.Б. Кузнецов, Н.Б. Рубин. О поворотной-фокусирующей системе для ввода частиц в синхрофазотрон, ЖЭТФ 29, 981 /1959/.

4. С.К. Есия, Л.П. Зяновьев, К.П. Мызников, В.П. Саранцев, Настройка основных параметров пучка протонов, входящего в синхрофазотрон. Препринт ОИЯИ Р-555, Дубна /1960/.
5. Л.П. Зяновьев, А.Б. Кузнецов, Н.Б. Рубин, В.П. Саранцев. Физические обоснования протонного линейного ускорителя-инжектора синхрофазотрона. Препринт ОИЯИ Р-519, Дубна /1960/.
6. L.W. Alvarez et al. Berkley Proton Linear Accelerator, Rev. Sci. Instr., 26, III (1955).
7. W.K.H. Panofsky. University of California Radiation Laboratory Report, N UCRL-1216 (February 1951)
8. R.M. Sternheimer. Double Focusing of Charge Particles with a Wedge-Shaped, Non-Uniform Magnetic Field, Rev. Sci. Instr., 23, 629 (1952).
9. В.И. Векслер. О запуске синхрофазотрона на 10 Бэв и первых результатах физических исследований /Доклад на II международной конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1958 г./, Доклады советских ученых 1, 253 /1959/.
10. В.Н. Зубарев, В.С. Кладницкий, А.Б. Кузнецов, С.В. Мухин, Л.С. Охрименко, Н.Б. Рубин, И.Н. Семенюшкин. Физические основы антипротонного канала. Препринт ОИЯИ Р-371, Дубна /1959/.

Рукопись поступила в издательский
отдел 28 марта 1961 г.