Институт теоретической и
экспериментальной физики

FERMILAB
MAR 2 2 2001
LIBRARY

4-00

ITEP-4-00

Д.Г.Кошкарев, А.В.Бархударян

Продольная компрессия протонного пучка в установке LHC CERN

Fermilab Library
0 1160 0089648 4

NAME | I.D. No. | M.S.

Москва 2000

FERMILAB LIBRARY

УДК 621.384 М-16

ПРОДОЛЬНАЯ КОМПРЕССИЯ ПРОТОННОГО ПУЧКА В УСТАНОВКЕ LHC CERN: Препринт ИТЭФ 4-00/

Д.Г.Кошкарев, А.В.Бархударян - М., 2000 - 4с.

Предложен эффективный метод продольной компрессии сгруппированного пучка протонов высокой энергии. При весьма высокой степени компрессии пучка потери протонов практически отсутствуют. Значительная мощность оконечного импульса протонов достигается при умеренных требованиях к амплитуде и линейности ВЧ поля.

Longitudinal compression of the proton beam for the LHC design

D.G.Koshkarev, A.V.Barkhudaryan

Effective method of the longitudinal compression of the bunched proton beam has been proposed. For the very high beam compression any particle losses aren't really noticeable. The high proton pulse power is realized by the moderate requirements on amplitude and linearity of RF voltage.

Рис. - 2, список лит. - 2 наим.

© Институт теоретической и экспериментальной физики, 2000

1. Введение

Как было показано в работах [1;2], протонный пучок, ускоренный в LHC до максимальной энергии и сжатый до длительности 40 наносекунд, является уникальным инструментом для исследований в термоядерной физике и в физике высокой плотности энергии в материи. Однако, практическая реализация этого предложения встречает серьезные трудности из-за высокой степени компрессии протонного пучка. К сожалению, эта очень серьезная проблема не была практически рассмотрена в указанных работах. После дополнительных исследований в этой области, мы можем предложить эффективное и реалистическое решение этой задачи.

2. Компрессия протонного пучка

Ускоренный до максимальной энергии LHC сильно сгруппированный протонный пучок теоретически может быть сжат в 2000 раз в продольном направлении из-за очень малой величины фазового объема для продольного движения протонов. Главной проблемой такой компрессии является требование большой амплитуды ВЧ электрического поля при очень высокой степени линейности поля. Обычный метод – дебанчирование пучка на основной гармонике ВЧ поля а затем группировка на частоте обращения протонов в кольце - не может быть использован здесь из-за его чрезвычайно низкой эффективности при столь большом коэффициенте компрессии.

Эффективность этого метода (δ) может быть определена как доля первичного пучка, захваченная в оконечный банч в результате компрессии. Для синусоидального ВЧ поля с учетом его нелинейности мы можем получить грубую оценку δ из соотношения

$$\delta \cong \frac{\sqrt{6}}{\pi\sqrt{\chi}} \ , \qquad (1)$$

где χ - коэффициент компрессии.

Из (1) δ сразу получается равным 1.7% для $\chi = 2000$. Этот результат очень плох и, очевидно, должен быть улучшен. Известный метод, который улучшает линейность ВЧ поля добавлением высших синусоидальных гармоник, в данном случае практически неприменим из-за очень большого числа необходимых гармоник.

В данной работе предложен новый метод решения этой задачи. Основная идея этого метода состоит в использовании последовательности ВЧ полей с номерами гармоник, увеличивающимися на единицу соответственно уменьшению длины пучка. Пусть последовательность банчей пучка имеет основную гармонику с номером, равным K, по отношению к частоте обращения протонов в кольце. Тогда первое в нашей последовательности ВЧ поле должно будет иметь гармонику с номером K+1. Под действием этого поля энергия каждого банча изменяется в соответствии со сдвигом его фазы относительно

фазы поля, при этом все банчи смещаются к нулевым фазам. Когда центры всех банчей будут находиться в нулевой фазе, ВЧ поле с гармоникой К+1 отключается, и включается ВЧ поле с гармоникой К+2. Этот процесс повторяется до тех пор, пока все банчи не получат энергию, необходимую для окончательной компрессии при свободном дрейфе. Перед началом дрейфа все банчи должны быть повернуты относительно своих центров с помощью дополнительного ВЧ поля для коррекции ориентации банчей в фазовом пространстве.

При выполнении вычислений в этом методе компрессии был обнаружен новый эффект автокоррекции нелинейности продольной динамики пучка. Из-за нелинейности ВЧ поля банчи, расположенные далеко от центра пучка не получают необходимой энергии и не достигают нулевых фаз. Поэтому при включении следующей гармоники ВЧ поля эти банчи начинают движение с большей фазы и получают больший прирост энергии, что может полностью скомпенсировать недостаток энергии для их последующего дрейфа.

Таблица 1. Параметры LHC

Энергия протонов	ТэВ	7
Длина кольца	м	26659
Частота обращения	КГц	11.25
Накопленная энергия пучка	МДж	334
Частота ВЧ поля	МГц	400.8
Скважность банчей	нс	24.95
Число частиц в банче	-	$1.05 \cdot 10^{11}$
Продольный эмиттанс	эВ·с	1
Длина банча	м	0.075
Разброс по импульсам в банче	-	$\pm 10^{-4}$

Основные параметры установки LHC, использованные при расчете компрессии протонного пучка даны в табл. 1, а параметры системы компрессии приведены в табл. 2.

Таблица 2 . Параметры системы компрессии

Порядковый номер операции	Гармоника ВЧ поля, К	Амплитуда напряжения ВЧ поля, МВ	Длительность операции, мс
1	3565	90	13.96
2	3566	90	7.03
3	3567	90	5.42
4	3568	90	4.71
5	Свободный пролет	-	228
6	3620	5.1	8.00
7	Свободный пролет	-	15660

Для смещения банчей по энергии и фазе в расчет было включено 4 гармоники ВЧ поля с номерами К+1,...,К+4 и одинаковой амплитудой напряжения 90 МВ. Перед началом компрессии протонного пучка К=3564.

Длительность действия гармоник ВЧ поля приведена в табл. 2. Корректирующее ВЧ поле имеет амплитуду напряжения 4 МВ и гармонику К=3620. Перед включением корректирующего поля банчи удлиняются при свободном пролете, длительность которого составляет 228 мс. После коррекции в фазовом пространстве банчи при свободном пролете за счет приобретенной энергии сходятся к центру первичного пучка. Длительность последнего пролета составляет 15.66 секунд, при этом длина банчей и, следовательно, длительность финального протонного импульса будет тем меньше, чем меньше разброс по импульсам в банчах.

Для уменьшения разброса по импульсам в банчах необходимо растянуть банчи перед включением корректирующего ВЧ поля, но этому препятствует нелинейность поля – можно использовать не более 50% расстояния между банчами. Так как корректирующее ВЧ поле имеет небольшую амплитуду напряжения, то нелинейность его поля может быть скорректирована включением в противофазе третьей гармоники ВЧ с номером К =10860 и амплитудой напряжения 0.57 МВ. При этом амплитуда основной гармоники напряжения ВЧ поля (К=3620) увеличивается до 5.1 МВ. Таким образом удается повысить эффективность компрессии на 30%.

Таблица 3. Параметры пучка после компрессии

Длина пучка	м	6
Длительность	нс	60
Разброс по импульсам в пучке	-	$\pm 2.3 \cdot 10^{-3}$
Энегия пучка	МДж	90
Средняя мощность в пучке	ТВт	1500
Пиковая мощность	ТВт	3300

Результатом приведенной выше последовательности операций является продольная компрессия 30% первичного протонного пучка до импульса длительностью 60 наносекунд со средней мощностью пучка в импульсе $1.5 \cdot 10^3$ ТВт.

Результаты расчета компрессии протонного пучка в LHC представлены в табл. 3 и на рис. 1 и 2. На рис. 1 показано положение в продольном фазовом пространстве (t, $\Delta p/p_0$) центрального и каждого сотого из 1000 банчей в момент максимального сжатия пучка. На рис. 2 показано распределение энергии по длине финального протонного пучка.

3. Заключение

Предложенный метод позволяет выполнить продольную компрессию пучка, занимающего 30% длины кольца накопителя LHC. Так как кольцо LHC заполняется последовательными инжекциями протонов из SPS, то естественно предположить, что для компрессии пучка надо изначально заполнить только 30% длины кольца. Отсюда следует, что в предложенном методе продольной компрессии пучка потери частиц полностью отсутствуют. Протонный пучок содержит при этом 90 МДж энергии, а средняя мощность в импульсе равна $1.5 \cdot 10^3$ ТВт (пиковая мощность в импульсе равна $3.3 \cdot 10^3$ ТВт), что достаточно для многих экспериментов в области физики материи с высокой плотностью энергии.

Рассмотренный метод продольной компрессии сгруппированного пучка может быть использован для получения интенсивных ионных пучков в зарядово-симметричном драйвере ИТС, так как все операции по продольной компрессии должны выполняться до слияния различных пучков в оконечном канале транспортировки. Расчеты показали, что при высоком коэффициенте продольной компрессии (достигающем величины 400) эффективность сборки ионов составляет 90%.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта по проекту МНТЦ №1137.

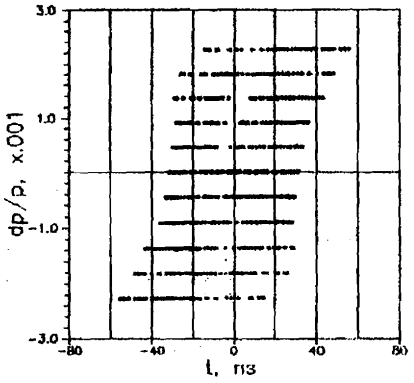

Рис.1 Фазовые координаты банчей после компрессии

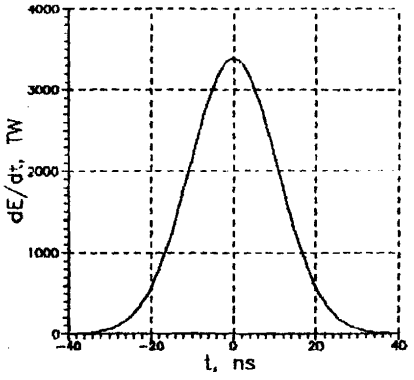

Рис.2 Распределение энергии в финальном протонном пучке

Литература

[1]. M.D.Churazov, D.H.H.Hoffmann, D.G. Koshkarev, Yu.S.Khodyrev, .Yu.Sharkov, P.Spiller. Ignition Experiments with High Energy Proton Beam. GSI Annual Report. 1997.,GSI-98-09,(1998), p.16.

[2] D.G. Koshkarev. Proceedings of 3rd Japan-USA Workshop on Physics and Engineering of Ion Beam Inertial Fusion. December 7-9, 1998. University of Tokyo.

Подписано к печати 9.06.00 Формат 60x90 I/I6
Усл.-печ.л. 0,25. Уч.-изд.л. 0,I5. Тираж 9I экз. Заказ 4.
Индекс 3649

Отпечатано в ИТЭФ, II7259, Москва, Б.Черемушкинская, 25