

3. Агранович В. М. Эффекты сильного агармонизма в спектрах комбинационного рассеяния света.— В кн. А. Пулс, Ж. П. Матье. Колебательные спектры и симметрия кристаллов. М., 1973, с. 408—433.
4. Агранович В. М. Бифононы и ферми-резонанс на поляритонах в спектрах комбинационного рассеяния света.— В сб. Современные проблемы спектроскопии комбинационного рассеяния света. М., 1978, с. 12—23.

Поступила в редакцию  
07.09.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1980, т. 21, № 5

УДК 621.384.633

Л. А. САРКИСЯН

## УСКОРЕНИЕ В КОЛЬЦЕВОМ ЦИКЛОТРОНЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДО РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЙ

В последние годы предложен ряд проектов ускорительных комплексов с целью получения тяжелых ионов (вплоть до урана) релятивистских энергий [1—4] для исследования фундаментальных свойств ядерной материи (например, ядра в сверхплотном состоянии [5]).

В работе [1] рассмотрен ускорительный комплекс тяжелых ионов, состоящий из источника ионов низкой зарядности (15 кэВ/нуклон), линейного ускорителя (0,6 МэВ/нуклон) и каскада из двух циклотронов, повышающих последовательно энергию всех ионов до 10 и 300 МэВ/нуклон. Заряд и число ионов в секунду в последней ступени следующие: уран — 73;  $1,4 \cdot 10^{13}$ ; ксенон — 46; криптон — 32; аргон — 17;  $3 \cdot 10^{14}$ . Вакуум  $10^{-7}$  мм рт. ст. Аналогичная схема ускорения принята в работе [2].

В работе [3] ускорительный комплекс состоит из источника ионов (15 кэВ/нуклон), линейного ускорителя (10 МэВ/нуклон) и двух синхротронов (ТИС'а и синхрофазотрона ОИЯИ), последовательно повышающих энергию ионов (250 и 3400 МэВ/нуклон для урана и 860 и 4100 МэВ/нуклон для ионов с  $A/z=2$ ). Особенность работы синхротрона ТИС'а состоит в одновременном ускорении ионов с переменной зарядностью. Радиус орбиты ТИС'а — 25 м. Максимальное число частиц в импульсе —  $10^8$ — $10^{11}$  при частоте циклов 1—3 Гц (ТИС) и 0,1 Гц (синхрофазотрон). Вакуум  $10^{-7}$  мм рт. ст. В работе [4] для получения тяжелых ионов с энергией до 1 ГэВ/нуклон (до урана включительно) рассмотрен ускорительный комплекс НУМАТРОН, состоящий из линейного ускорителя с энергией до 10 МэВ/нуклон, накопительного кольца и синхротрона. Средний ток ионов  $\sim 0,01$ — $0,001$  мкА (вакуум  $10^{-10}$  мм рт. ст.). Сопоставление проектов показывает, что достижимый средний ток ионов в циклотронах на  $\sim 2$ —3 порядка будет выше, чем в синхротронах. Что же касается конечной энергии, то она может быть увеличена от 200—500 МэВ/нуклон до 1—2 ГэВ/нуклон на основе кольцевого циклотрона с происхождением целых резонансов по радиальным бетатронным колебаниям ( $Q_r = 2, 3, 4, \dots$ ), предложенного автором в 1970 г. для генерации  $K$ -мезонов [6]. Моделирование динамики движения протонов по полным уравнениям на ЭВМ показало, что благодаря эффекту сильного после-резонансного затухания с ростом радиуса орбиты возбужденных в целом резонансе амплитуд свободных радиальных колебаний заряженных частиц в магнитном поле с пространственной вариацией возможно

медленное прохождение целых резонансов [7, 8]. В настоящее время разработка протонных кольцевых циклотронных типа  $K$ -мезонных фабрик предложенным способом начата в Канаде (8,5 ГэВ) [9] и Швейцарии (8 ГэВ) [10].

Примерные параметры кольцевого циклотрона тяжелых ионов ( $A/z=2$ ), повышающего энергию с 300 до 1000 МэВ/нуклон (для ионов с  $A/z=2,59$  конечная энергия составит  $\sim 650$  МэВ/нуклон) следующие: магнитное поле в центре 5 кЭ, периодичность структуры поля 10, вариация поля 0,6—1, параметр спирали Архимеда 54,6—69,4 см, частота аксиальных бетатронных колебаний 0,2, частота радиальных бетатронных колебаний 1,3—2,1, радиус бесконечной орбиты 1251 см. Начальный и конечный радиусы ускорения 810 и 1090 см. Среднее магнитное поле на этих радиусах равно 6,6 и 10,2 кЭ. Азимутальная протяженность спирального сектора  $\sim 15^\circ$ , угол спирали изменяется на периоде структуры магнитного поля на  $\sim 5^\circ$ . Ускорение осуществляется с помощью пяти прямолинейных резонаторов (набор энергии 3 МэВ/оборот на единичный заряд). При допуске на вторую гармонику магнитного поля 0,5 Э увеличение амплитуды радиальных колебаний составит  $\sim 2$  см в зоне целого резонанса  $Q_r=2$  ( $r \approx 1050$  см при энергии 845 МэВ/нуклон). При энергии 1000 МэВ/нуклон амплитуда колебаний уменьшится до  $\sim 1$  см. Вывод пучка может быть осуществлен на основе эффекта расширения замкнутых орбит [1].

Ожидаемый средний ток ионов, ускоренных в циклотроне, составит  $\sim 10$  мкА для ионов аргона и  $\sim 1$  мкА для ионов урана. Отметим, что использование сверхпроводящих обмоток позволит примерно в 2 раза уменьшить радиальные размеры кольцевого циклотрона, либо примерно вдвое повысить энергию ионов.

Проведенное рассмотрение показывает, что ускорение тяжелых ионов с помощью кольцевых циклотронов с прохождением целых резонансов по  $Q_r$  до энергии  $\sim 1$ —2 ГэВ/нуклон имеет преимущество перед ускорением с помощью быстроциклирующих синхротронов до той же энергии (интенсивность пучков существенно больше).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А. А. и др. Циклотронный комплекс для ускорения многозарядных ионов до релятивистских энергий.—Препринт ОИЯИ, Д9—11584, Дубна, 1978, 20 с.
2. Kondo M. Recent developments at the Osaka RCNP 230 cm cyclotron and a proposal for a new ring accelerator.—JEEE Trans. on Nucl. Sci., 1979, NS-26(2), p. 1904—1911.
3. Балдин М. и др. Ускорительный комплекс тяжелых ионов.—Тр. VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1979, т. 2, с. 347—353.
4. Hiraо Y. NUMATRON project.—JEEE Trans. on Nucl. Sci., 1979, NS-26(3), p. 3736—3738.
5. Мигдал А. М. Устойчивость вакуума и предельные поля.—ЖЭТФ, 1971, 61, вып. 6, с. 2208—2224.
6. Саркисян Л. А. Возможность ускорения протонов на энергию выше энергии покоя в изохронном циклотроне.—Тр. II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., ВИНТИ, 1972, т. 1, с. 33—34; Возможность ускорения в изохронном циклотроне протонов на энергию свыше  $E_0$ .—Атомная энергия, 1971, 30, вып. 5, с. 446—448; Двухступенчатый изохронный циклотрон на энергию  $\sim 3,7$  ГэВ — каонная фабрика.—Атомная энергия, 1972, 32, вып. 1, с. 55—56.
7. Саркисян Л. А. Моделирование на ЭВМ прохождения целых резонансов в циклотронной каонной фабрике.—Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1976, 17, № 3, с. 282—287; Кольцевой циклотрон — каон-нейтронный генератор.—Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1979, 20, № 3, с. 45—51; Перспективы высокоэнергетичных сильноточных циклотронов.—Тр. VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1979, т. 1, с. 285—288.

8. Sarkisyan L. A. Higher energies of meson facilities in perspective.— Nuclear Instruments and Methods, 1977, 142, p. 393—397.
9. Craddock M. K., Kost C. J., Richardson J. R. A ring cyclotron kaon factory.— IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1979, Sci., NS-26(2), p. 2065—2069.
10. John W. Present and future developments at S.I.N.— IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1979, NS-26(2), p. 1950—1957.

Поступила в редакцию  
18.09.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1980, т. 21, № 5

УДК 539.17.014

**О. В. БОРМОТ, Ю. В. МЕЛИКОВ, В. А. РЯБОВ**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕНИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЛЩИНЫ КРИСТАЛЛА ПРИ СМЕЩЕННЫХ ИСТОЧНИКАХ ЧАСТИЦ**

В процессе разработки метода измерения времен жизни возбужденных ядерных состояний, основанного на эффекте теней, возникают различные проблемы. Удобным средством их исследования являются резонансные ядерные реакции с возбуждением изолированного состояния составного ядра. Связано это с возможностью точной фиксации глубины слоя кристалла, в котором протекает реакция, и плавного изменения глубины путем регулирования энергии ускоренных частиц. В частности, с помощью резонансных реакций можно, в принципе, изучать влияние смещения за время жизни составного ядра из узла кристаллической решетки на форму тени в условиях, когда толщина слоя кристалла, через который проходят частицы — продукты реакции, настолько мала, что не успевает установиться статистическое равновесие в фазовом пространстве поперечного движения. Подобные ситуации привлекают внимание в связи с поисками возможностей повышения чувствительности метода и расширения диапазона доступных измерению времен жизни в сторону меньших значений [1].

Однако на пути экспериментального исследования этих явлений стоит ряд трудностей, связанных с несовершенством структуры приповерхностных слоев и недостаточной радиационной стойкостью кристалла, малой величиной выхода реакции в случае представляющих наибольший интерес узких резонансов и др. Поэтому в данной работе применен метод численного моделирования на ЭВМ процесса прохождения заряженных частиц через тонкие слои кристалла. Этим методом изучалось влияние толщины слоя на такие параметры тени, чувствительные к смещению составного ядра из узла решетки, как  $\chi_{\text{мин}}$  — интенсивность в минимуме углового распределения и  $\Delta\psi$  — смещение центра осевой тени относительно направления кристаллографической оси.

Проводилось численное моделирование траекторий заряженных частиц, падающих на кристалл под небольшим углом к кристаллографической оси, и вычислялась вероятность их взаимодействия с ядрами, смещенными из узлов решетки кристалла, т. е. использовалась геометрия «обратной тени». Распределение смещения ядер задавалось в виде суперпозиции гауссовой функции и экспоненты, что отражает тепловые колебания ядер и смещение составного ядра за время его жизни под действием импульса частицы, вызвавшей реакцию.