

СОХРАНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПУЧКОВ В НАКОПИТЕЛЯХ ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ СПИНОВЫХ РЕЗОНАНСОВ

Я.С.Дербенев, А.М.Кондратенко, А.Н.Скринский, Ю.М.Шатунов

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

Практический интерес для экспериментов с поляризованными частицами в накопителях и ускорителях представляет прохождение спиновых резонансов без нарушения поляризации. После прохождения с постоянной скоростью ($\dot{\epsilon}_k = \text{const}$) отдельного резонанса, мощность которого определяется фурье-гармоникой возмущения ω_k , степень поляризации вдоль основного магнитного поля с учётом размывания по фазам прецессии изменяется на величину $/1,2,3/$:

$$\delta S_z = 2(e^{-2\mathcal{J}} - 1) S_z,$$

где $\mathcal{J} = \int \omega_k^2 / |\dot{\epsilon}_k|$ характеризует набор фазы в эффективной зоне резонанса

$$|\epsilon_k| \leq \max(\omega_k; \sqrt{\dot{\epsilon}_k}),$$

где $\epsilon_k(t)$ — отстройка по частоте прецессии от спинового резонанса.

При быстром прохождении резонанса $\mathcal{J} \ll 1$ и среднее изменение проекции S_z мало. В обратном случае медленного прохождения ($\mathcal{J} \gg 1$) происходит адиабатический переворот поляризации с экспоненциально малым изменением её степени. Опасность представляют промежуточные случаи, когда $\mathcal{J} \sim 1$ и изменение степени поляризации не мало.

Для электронов и позитронов, кроме того, нужно принимать во внимание деполаризующее действие квантовых флуктуаций энергии

при излучении /4,5/. Этот эффект, который максимален в области спиновых резонансов, приводит к ограничению снизу на величину $|\dot{\epsilon}_k|$ при медленном прохождении /5,6/:

$$|\dot{\epsilon}_k| \gg \nu^2 \frac{\omega_0^2}{\omega_k} \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2, \quad (I)$$

где $\nu = \frac{E}{m c^2} \left(\frac{g-2}{2} \right)$ - аномальная часть частоты прецессии в единицах обращения ω_0 ; $\frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2$ - скорость диффузии энергии из-за квантовых флуктуаций излучения.

Таким образом, прохождение резонанса должно быть либо быстрым ($\mathcal{T} \ll 1$), либо медленным ($\mathcal{T} \gg 1$) с соблюдением условия (I). В экспериментальных условиях осуществление быстрого прохождения опасных резонансов может оказаться технически сложным. Более эффективным может быть использование адиабатического прохождения, однако не за счёт уменьшения скорости $\dot{\epsilon}_k$, а за счёт увеличения опасных гармоник введением специальных полей до такой степени, чтобы условие адиабатичности выполнялось одновременно с условием (I) /3,6/.

Экспериментально вопрос о прохождении спиновых резонансов изучался на накопителе ВЭП-2М. На рис. I представлена расчётная картина резонансов, мощность которых характеризуется отношением времени радиационной поляризации и временем деполаризации. Для расчёта использована модель с введением в идеальную магнитную структуру накопителя возмущения в виде сосредоточенного повернутого квадрупольа, сила которого задается исходя из измерений реальной величины связи поперечных колебаний, определяющей вертикальный размер пучка.

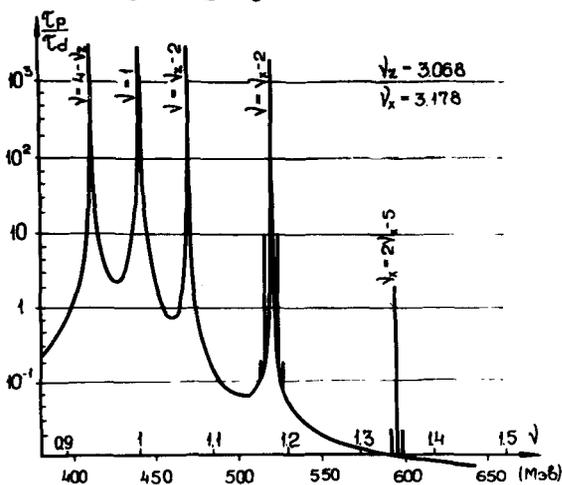


Рис. I.

Расчёт показывает, что наиболее опасен целый резонанс $\nu = I$, когда частота аномальной прецессии совпадает с частотой обращения. Резонансы первого порядка с частотами вертикальных и радиальных бетатронных колебаний ν_x, ν_z также представляют опасность, однако при естественных размерах пучка гармоники этих резонансов таковы, что технически возможно выполнение условия быстроты прохождения.

Радиационная поляризация пучка электронов проводилась при энергии $E=625$ МэВ, где за 2 часа достигалась степень $\approx 80\%$. Затем энергия снижалась со скоростью 10 МэВ в секунду до уровня, необходимого для заведомого пересечения какого-либо резонанса. Последующее измерение степени поляризации, производимое по регистрации упругого рассеяния в ступке и резонансной деполяризации с помощью высокочастотного поля $\nu/6$, показало сохранение поляризации при быстром пересечении резонансов $\nu = \nu_x - 2$ и $\nu = \nu_z - 2$.

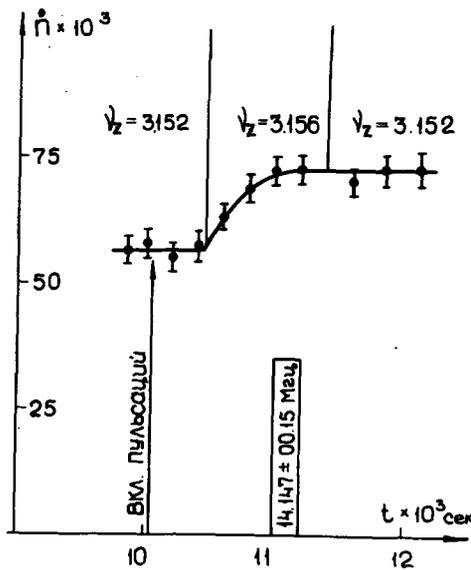


Рис. 2

магнитного поля $\Delta H_z / H_z \approx 2 \cdot 10^{-3}$, что приводит к модуляции частоты спиновой прецессии и усилению резонанса, при $\nu_z = 3,152$ не изменяет степени поляризации, а при $\nu_z = 3,156$ приводит за время $t = 400$ с к полной деполяризации пучка, что подтверждено отсутствием изменения скорости счёта при контрольном включении деполяризующего ВЧ поля на резонансной частоте. Сравнение этого результата с измерением времени деполяризации, проведенном в аналогичных условиях на "внешнем" резонансе, создаваемом деполяризатором с известным значением поля, даёт хорошую оценку величины резонансной гармоники $\omega_{\nu_z-2} \approx 2 \cdot 10^{-8} \omega$, которая по порядку величины совпадает с ожидаемой из модельного расчета.

Последний резонанс был исследован более детально при энергии $E=509,6$ МэВ, где предварительно была проведена точная калибровка энергии пучков по резонансной деполяризации, и искомым резонанс должен наблюдаться при частоте вертикальных бетатронных колебаний $\nu_z = 3,1565$. На рис. 2 показано поведение скорости счёта \dot{n} упругих рассеяний в ступке вблизи этого резонанса. При частоте $\nu_z = 3,152$ поляризация сохраняется в течение длительного времени. Включение шумовых пульсаций ведущего

Для целого резонанса $\nu = 1$ ($E=440,65$ МэВ) расчет показывает, что без специальных мер "безопасное" его прохождение невозможно ($\omega_{\nu=1} \approx 10^{-5} \omega_0$). Кроме того, несколько усложняют картину синхротронные колебания энергии (с частотой $\nu_g \ll 1$), которые, как известно [2], приводят к медленной модуляции частоты прецессии и появлению боковых резонансов, отстоящих на $n\nu_g$ (n - целое) от основного. Минимальное значение n определяется условием $n_{\min} \cdot \nu_g \geq \omega_k$. В наших условиях индекс синхротронной модуляции $m = \frac{\delta}{\nu_g} \ll 1$ (δ - амплитуда модуляции) и мощность боковых резонансов быстро падает с возрастанием их номера: $\omega_{k,n} = \omega_k \frac{m^n}{2 \cdot n!}$. Отсюда следует ограничение снизу на величину вводимого поля, которая должна обеспечить медленное прохождение основного резонанса и быстрое для первого из возможных боковых:

$$(\omega_{k,n})^2 \ll |\dot{\epsilon}_k| \ll \omega_k^2 \quad (2)$$

Для экспериментальной проверки ситуации в начале было проведено несколько циклов измерений, в которых энергия пучка поляризованных позитронов снижалась до области целого резонанса и после нескольких секунд выдержки возвращалась к начальному значению. Измерения показали, что поляризация сохраняется при опускании до 448 МэВ и полностью исчезает при 443 МэВ, что, по-видимому, связано с деполяризующим воздействием квантовых флуктуаций.

Для подавления деполяризации в одном из промежутков накопителя ВЭП-2М был установлен соленоид с продольным магнитным полем $\langle H_{||} / H_z \rangle = 0,03$. Такой величины поля достаточно для выполнения условий (1) и (2) при скорости изменения энергии 10 МэВ в секунду. При этом центральный резонанс проходится динамически медленно, а первый из возможных боковых ($n_{\min} = 3$), связанных с синхротронными колебаниями, - быстро.

Эксперимент проводился следующим образом. К ступку поляризованных позитронов добавлялся равный и сдвинутый по фазе на четверть оборота неполяризованный ступок. Сравнение скорости счёта упругих рассеяний в каждом ступке даёт непрерывное и быстрое измерение степени поляризации первого из них. На энергии $E=509,6$ МэВ поочередно быстрым изменением ν_x и ν_z пересекались резонансы $\nu = \nu_x - 2$ и $\nu = \nu_z - 2$, затем включалось продольное поле на время снижения энергии до уровня 400 МэВ. Последующее измерение показало сохранение степени поляризации. В контрольном

цикле без введения продольного магнитного поля (экспериментальные точки показаны пунктиром) наблюдается полное исчезновение поляризации позитронов.

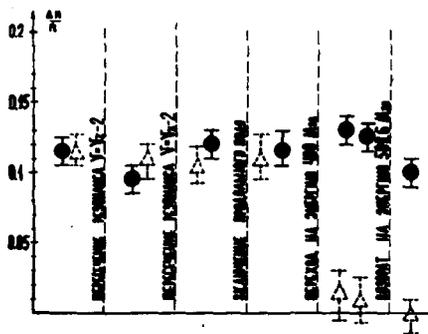


Рис. 3

В целом полученные результаты показывают возможность работы с поляризованными позитронами в широком диапазоне экспериментальных условий в накопителях.

Авторы признательны С.И.Середнякову, Г.М.Тумайкину и всему коллективу ВЭШ-2М за помощь в проведении экспериментов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. M.Froisart, R.Stora. Nucl.Instr. and Meth., 7, 297 (1960).
2. Я.С.Дербенев и др. ЖЭТФ, 60, 1216 (1971).
3. Я.С.Дербенев и др. ДАН СССР, 223, 830 (1975).
4. В.Н.Байер и др. ДАН СССР, 165, 783 (1965).
5. Я.С.Дербенев и др. ЖЭТФ, 62, 430 (1972).
6. А.М.Кондратенко. Кандидатская диссертация, Новосибирск, 1974.
7. С.И.Середняков и др. ЖЭТФ, 71, 2025 (1976).