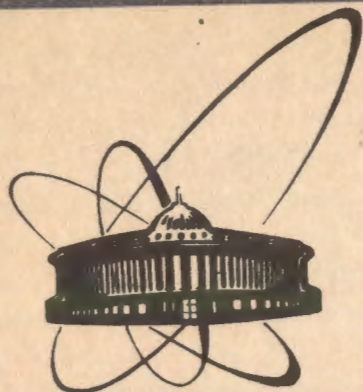


91-508



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

P13-91-508

В.Н.Дугинов, В.Г.Зинов, А.Н.Пономарев*

СТРОБОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД μ SR-ИЗМЕРЕНИЙ
НА ФАЗОТРОНЕ ЛЯП ОИЯИ

*Институт атомной энергии им.И.В.Курчатова, Москва

1991

Техника μ SR (Muon Spin Rotation, Relaxation or Resonance) – ядерно-физический метод измерения локальных микроскопических магнитных полей, основанный на возможности определения направлений магнитных моментов мюонов, имплантированных в изучаемые объекты /1/.

Сочетая свойства элементарного магнитометра и пробного заряда с $Z=1$, мюоны дают возможность решать широкий круг задач от чисто квантовых аспектов диффузии легких примесных частиц в тяжелой кристаллической матрице и проблем фазовых переходов с изменением магнитного порядка до химии молекул, интересных с биологической точки зрения. По характеру получаемой информации метод μ SR близок к ЯМР-спектроскопии, а техника исполнения – к методу возмущенных угловых корреляций.

Уникальные возможности μ SR привели к широкому распространению методики – программы μ SR-спектроскопии занимают до половины рабочего времени на мюонных каналах действующих ускорителей. Комплекс для μ SR-исследований "МЮСПИН" /6/ по своим характеристикам вполне конкурентоспособен с зарубежными установками. Целью данной работы является обсуждение возможностей дальнейшего развития техники μ SR-исследований, основанных на особенностях банчевой структуры фазотрона ЛЯП ОИЯИ.

При проведении μ SR-экспериментов, требующих высокой точности измерения частоты прецессии спина мюона, а следовательно, и большой статистики, наилучшие результаты может дать стробоскопический способ измерений, в котором отсутствует ограничение на интенсивность пучка мюонов, связанное с требованием "только 1 μ и 1e" в фиксированном интервале измерения времен жизни отдельных мюонов. Стробоскопический метод измерения основан на синфазном сложении сигналов позитронов μ^+ – e^- распада от отдельных пачек микроскопической временной структуры мюонного пучка.

Впервые стробоскопический способ измерений на импульсном пучке заряженных частиц был применен в экспериментах по возбужденным γ - γ угловым корреляциям /2/. В

Общественный институт
научных исследований
БИБЛИОТЕКА

настоящее время стробоскопический μ SR-метод реализован только на мезонной фабрике PSI (Швейцария) /3,4/ (см. рис.1). Временной интервал между банчами мюонного пучка (20нс) определяется радиочастотной системой ускорителя протонов ($F=50.633\text{МГц}$, $\Delta F/F \approx 10^{-8}$). Поляризованные мюоны, останавливаясь в образце, прецессируют в магнитном поле B с ларморовской частотой $\omega_{\mu} = \gamma_{\mu} B$, где $\gamma_{\mu} = 2\pi \times 13,55 \text{кГц/Гс}$ — гиромангнитное отношение для мюона. Таким образом, поляризация мюонов накапливается в образце с частотой повторения F . Поляризация мюонного ансамбля имеет тот же период. Конечная средняя поляризация мюонного ансамбля растет только в случае, если частота прецессии мюонов совпадает с частотой повторения банчей пучка или с одной из ее гармоник m с точностью, налагаемой конечным временем жизни мюона τ_{μ} , т.е.

$$|\omega_{\mu} - 2\pi m F| < 1/\tau_{\mu}$$

Поляризация мюонного ансамбля определяется стробоскопической техникой: позитроны от распада мюонов регистрируются позитронным телескопом, расположенным в плоскости прецессии мюонов во временных воротах, синхронизированных с временной структурой пучка (рис.1). Таким образом, позитронный телескоп определяет величину и фазу мюонной поляризации в системе координат, вращающейся с частотой ω . Временные промежутки между соседними банчами разбиваются на N одинаковых последовательных интервалов ("ворота"), положение которых жестко синхронизировано с положением банчей. Процедура измерений состоит в определении N суммарных счетов, при регистрации позитронов от распада мюонов во временных "воротах", соответствующих номеру, отсчитываемому от начала каждого банча. Таким образом снимаются N зависимостей счетов в воротах от внешнего поля H , $S_i(H)$ ($i=1...N$). S_i будет иметь следующий вид:

$$S_i = N_0 \lambda_i \left(1 + \sum_m A_{\text{eff}}(2\pi m F) \frac{\cos \varphi_{i,m} - x_m \sin \varphi_{i,m}}{1 + x_m^2} \right),$$

где N_0 — общее число позитронов, зарегистрированных

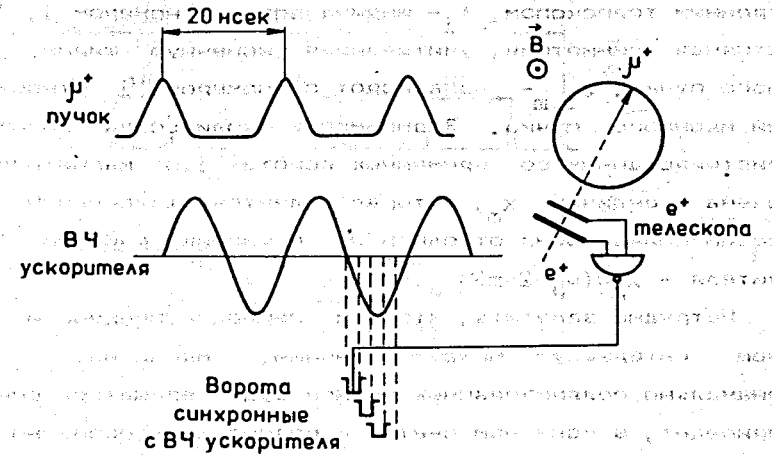


Рис.1. Схема стробоскопических измерений на ускорителе PSI.

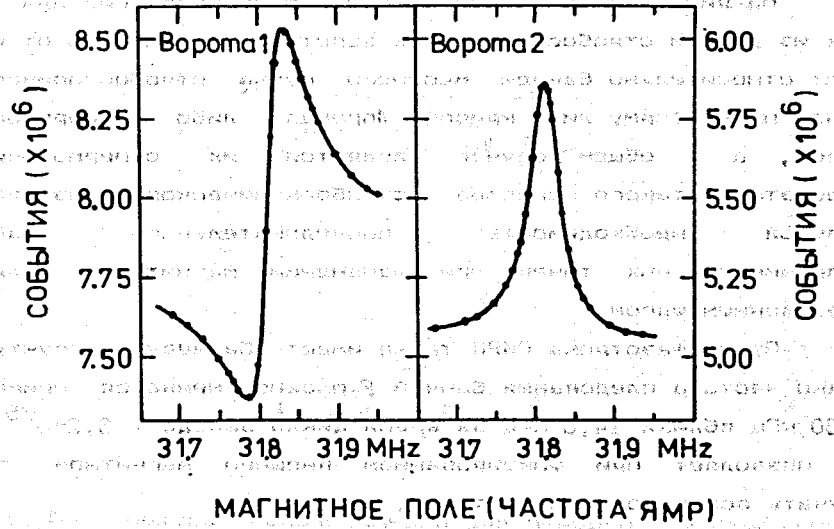


Рис.2. Стробоскопический сигнал для двух различных ворот.

позитронным телескопом, λ_i - ширина ворот с номером i , A_{eff} - эффективная асимметрия, учитывающая конечную ширину банчей мюонного пучка, $\varphi_{i,m}$ - фаза ворот с номером i относительно банчей мюонного пучка. Зависимость количества позитронов, зарегистрированных во временных воротах i , от магнитного поля заключена в величине x_m , которая является отклонением частоты прецессии спина мюона от одной из гармоник рабочей частоты ускорителя - $x_m = (\omega_\mu - 2\pi m F) \tau_\mu$.

Нетрудно заметить, что при периоде прецессии мюона, кратном интервалу между банчами, магнитные моменты первоначально поляризованных мюонов будут вращаться синфазно, что приведет, в конечном счете, к резонансным особенностям в зависимостях $S_i(H)$. Сравнение этих зависимостей с теоретическими моделями позволяет с высокой точностью определять сдвиг среднего магнитного поля на мюоне в исследуемом образце относительно внешнего поля и оценивать скорость релаксации поляризации мюонов.

На рис. 2 приведен вид стробоскопического сигнала для двух из десяти стробоскопических ворот. В зависимости от фазы ворот относительно банчей мюонного пучка стробоскопический сигнал имеет форму либо кривой Лоренца, либо дисперсионной кривой, а в общем случае является их суперпозицией. Недостатком такого способа стробоскопического измерения является необходимость последовательного набора экспериментальных точек при изменении магнитного поля с определенным шагом.

Пучки фазотрона ОИЯИ также имеют банчевую структуру. Однако частота следования банчей F плавно меняется примерно на 30 кГц вблизи 14,6 МГц за время цикла вывода $T=3,2\text{ мс}/5,6/$. Это позволяет при фиксированном внешнем магнитном поле получать всю резонансную кривую.

Если интервал T разбить на M подынтервалов t_i ($i=1..M$), как показано на рис. 3 для $M=32$, то средней частоте следования банчей на каждом подынтервале F_i будет соответствовать своя резонансная частота прецессии спина мюона $\omega_i = 2\pi F_i$, которой можно сопоставить значение среднего

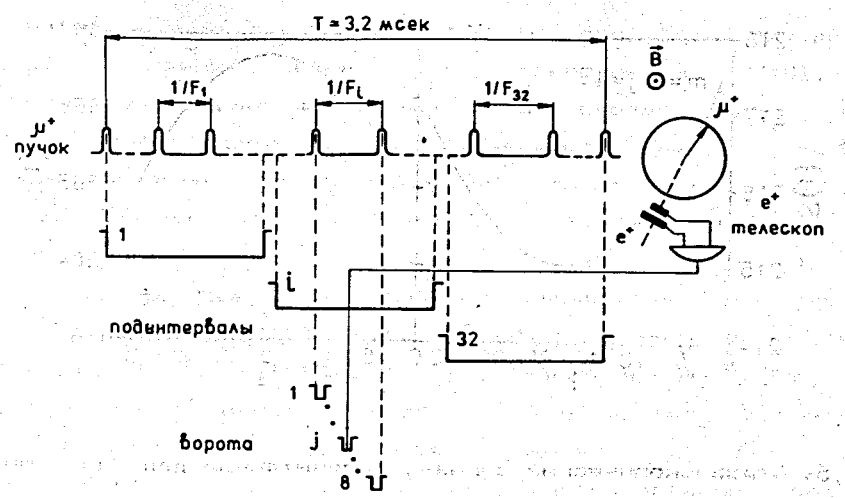


Рис. 3. Схема стробоскопических измерений на фазотроне ЛЯП ОИЯИ.

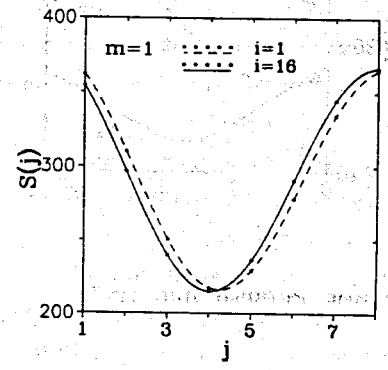


Рис. 4. Вид спектра, рассчитанного для первого и шестнадцатого подынтервалов цикла вывода фазотрона.

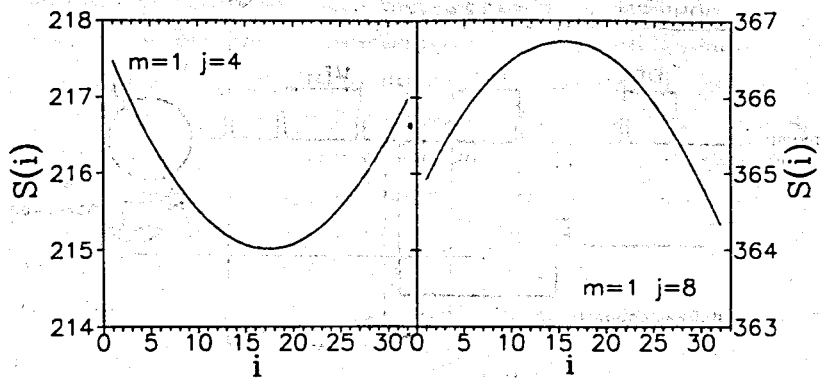


Рис. 5. Стробоскопический сигнал, рассчитанный для фазотрона ЛЯП ОИЯИ.

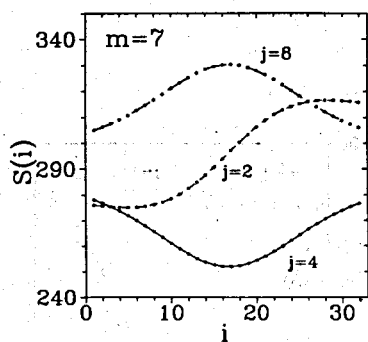


Рис. 6. Стробоскопические кривые для $m=7$.

поля на мюоне $B_i = \omega_i / \gamma_{\mu}$. Проводя для каждого подынтервала i процедуру измерений, аналогичную примененной в PSI, мы получим за один цикл измерений набор счетов $S_j(B_i)$, где $j=1..N$ - номер ворот внутри промежутков между соседними банчами. Описанный способ удобен тем, что полностью отпадает необходимость многократной точной установки внешнего поля для получения резонансной кривой.

Было проведено численное моделирование для случая изменения частоты следования микробанчей мюонного пучка фазотрона ОИЯИ от 14,608 МГц до 14,578 МГц за время 3,2 мс при полуширине на полувывоте микробанча, равной 5 нс. Магнитное поле на мюоне предполагалось равным 1077,7 Гс, что соответствует частоте вращения спина мюона, равной средней частоте повторения микробанчей во время цикла вывода. На рисунке 4 представлены спектры для двух подынтервалов микробанча пучка для случая первой гармоники ($m=1$). Пунктиром обозначен спектр, "набранный" в первом подынтервале ($i=1$), сплошной линией - спектр при $i=16$. Резонансное поведение зависимости количества счетов позитронов от номера подынтервала, а следовательно, от частоты следования микробанчей пучка отчетливо видно на рисунке 5. Аналогичные расчеты были проведены и для гармоник более высокого порядка. На рисунке 6 показаны стробоскопические сигналы при $m=7$, т.е. для поля на мюоне, равном 7543,9 Гс. Эти кривые рассчитаны для случая нулевой ширины микробанча мюонного пучка, т.к. конечная ширина микробанчей приводит к уменьшению эффективной асимметрии A_{eff} и к "размыванию" стробоскопического сигнала для высоких гармоник. Поэтому для стробоскопических измерений на фазотроне ЛЯП ОИЯИ, как и на мезонной фабрике PSI, оптимальными являются первые 2-3 гармоники.

Предложенный метод применим и для экспериментов по время-угловыми корреляциям (ВУК) на пучках фазотрона ЛЯП ОИЯИ.

Литература

1. A.Schenck, Muon Spin Rotation Spectroscopy (Adam Hilger Ltd., Bristol and Boston, 1985).
2. J. Christiansen et al., Phys.Rev., 1970, C1, p.613.
3. E.Klempt et al., Phys.Rev., 1982, B25, p.652.
4. F.N.Gygax et al., Phys.Lett., 1988, A127, p.447.
5. А.А.Глазов и др., Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2 стр.242, Дубна, 1987 (Д9-87-105).
6. V.H. Dodokhov et al., Hyperfine Inter., 1990, 65, p.1167.

Рукопись поступила в издательский отдел

21 ноября 1991 года.