

## ИСКЛЮЧЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ВРЕМЯИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО НАБЛЮДЕНИЮ ОСЦИЛЛЯЦИЙ СПИНА ПОЗИТРОНИЯ

A new method of differential nonlinearity calculation in data processing of positronium spin rotation experiment is proposed.

В современной физике для исследования свойств вещества широко применяются позитронные методы, в их числе изменение скорости счета  $3\gamma$ -совпадений, измерение времени жизни позитронов, исследование угловых корреляций аннигиляционных  $\gamma$ -квантов, измерение энергетического спектра аннигиляционного излучения.

Три первых метода базируются на применении схем совпадений для регистрации соответственно: совпадений между тремя аннигиляционными квантами; запаздывающих совпадений между регистрацией ядерного  $\gamma$ -кванта, сопровождающего испускание позитрона, и последующей регистрацией одного из аннигиляционных  $\gamma$ -квантов; совпадений между двумя аннигиляционными  $\gamma$ -квантами в зависимости от угла их разлета. Однако ни один из названных методов наблюдения аннигиляции позитронов не позволяет определять ориентацию спина ортопозитрония в момент аннигиляции. Между тем знание динамики вектора поляризации атома позитрония в веществе позволило бы получать информацию о сверхтонких взаимодействиях атома позитрония в веществе, как это делается в экспериментах по мюонному спиновому вращению [1].

В 1976 г. профессором В.Г. Барышевским была предложена идея нового метода исследования вещества с помощью позитронов, позволяющего получать такую информацию [2]. Идея метода позитрониевого спинового вращения заключается в следующем. Спин ортопозитрония прецессирует во внешнем магнитном поле, что проявляется ввиду анизотропного углового распределения квантов распада относительно спина позитрония в осцилляциях скорости счета при измерении времени его жизни.

Эти осцилляции были обнаружены в эксперименте белорусскими учеными [3] и учеными из Гонконга [4]. Вплоть до настоящего момента все эксперименты проводились в силикагеле, где время жизни ортопозитрония почти не отличается от времени его жизни в вакууме. В настоящее время ведется подготовка к эксперименту по обнаружению осцилляций в конденсированной среде, в которой время жизни ортопозитрония менее 10 нс, однако дифференциальная нелинейность оборудования и высокий фон, обусловленный  $2\gamma$ -аннигиляцией позитронов (позитрония), делают это затруднительным.

В представленной работе развита методика исключения дифференциальной нелинейности при обработке экспериментальных спектров.

Следует отметить, что основной вклад в дифференциальную нелинейность вносится электроникой амплитудного цифрового преобразователя (АЦП). В настоящее время существует аппаратура, обладающая низкой (<0,1 %) дифференциальной нелинейностью, но она дорогая.

Рассмотрим типичный спектр  $3\gamma$ -аннигиляции (рис. 1). Пик обусловлен аннигиляцией свободных позитронов и парапозитрония. Время жизни сво-

бодных позитронов и парапозитрония намного меньше временного разрешения аппаратуры. Поэтому пик имеет гауссову форму с шириной, равной временному разрешению аппаратуры. Центр пика находится в 38 канале (см. рис. 1), которому мы ставим в соответствие момент термализации позитронов в веществе и образования позитрония.

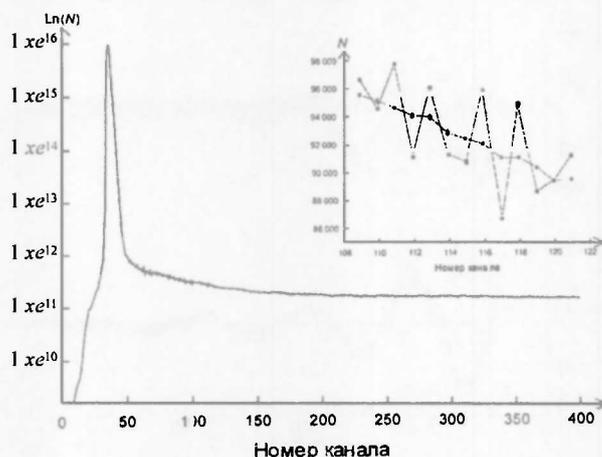


Рис. 1. Временной спектр, полученный при регистрации актов аннигиляции позитронов в веществе в магнитном поле (нижний график в логарифмическом масштабе). Сглаживание дифференциальной нелинейности методом скользящего среднего (верхний график). Один канал соответствует 2,2 нс.  $N$  – число отсчетов

На нижнем графике рис. 1, начиная с 48-го канала, четко видны изломы (см. также верхний график), амплитуда которых существенно превышает статистическую ошибку. Эти изломы являются следствием дифференциальной нелинейности времяизмерительного тракта, которая ведет к различной ширине каналов амплитудного анализатора. Обычно различие в ширине четных и нечетных каналов составляет 1–2%. “Хвост” этого спектра содержит также временные осцилляции,

однако их не видно из-за большой дифференциальной нелинейности.

Дифференциальная нелинейность почти не влияет на интегральные характеристики спектра, т. е. на время его жизни, но обычно уменьшает возможность наблюдения временных осцилляций, особенно в веществе с относительно коротким временем жизни. Это происходит вследствие того, что порядок величины амплитуды осцилляций ввиду вращения спина ортопозитрония может совпадать с разностью в скорости счета из-за дифференциальной нелинейности.

Для уменьшения влияния дифференциальной нелинейности, т. е. для улучшения наблюдения осцилляций, в настоящей работе было проведено сглаживание экспериментальных данных перед их обработкой по методу скользящего среднего, который заключается в следующем. Значения в каждой точке спектра пересчитываются (сглаживаются) по формуле (1), т. е. используется значение не только в одной точке, но и в соседних:

$$N'_i = 1/7 \sum_{i-3}^{i+3} N_i, \quad (1)$$

где  $N_i$  – число отсчетов в  $i$ -м канале анализатора, при этом статистическая ошибка должна быть пересчитана по формуле:

$$\sigma_i'^2 = 1/7 \sum_{i-3}^{i+3} \sigma_i^2. \quad (2)$$

Усредненный участок временного спектра изображен на верхнем графике на рис. 1.

В настоящей работе используются спектры, полученные экспериментально [5], содержащие осцилляции спина  $Ps$  в магнитном поле. Для каждо-

го спектра с фазой осцилляций 0 отнять соответствующий спектр с фазой осцилляций  $\pi$  с совпадающими параметрами. После применения метода скользящего среднего было произведено вычитание спектров с разной фазой осцилляции. При этом экспоненциальные части спектра сокращаются, и разностный спектр будет содержать только осцилляции (рис. 2).

Для исследования дифференциальной нелинейности вычтем усредненный спектр из спектра, содержащего дифференциальную нелинейность. Данная процедура проводилась для различных наборов экспериментальных данных, полученных при изменении величины магнитного поля. Построенные графики отражают зависимость дифференциальной нелинейности от номера канала. Но ее величина не зависит от напряженности магнитного поля. Была построена гистограмма (рис. 3), содержащая статистическое распределение дифференциальной нелинейности. На рис. 3, а приведено число каналов, в котором была зафиксирована дифференциальная нелинейность заданной величины.

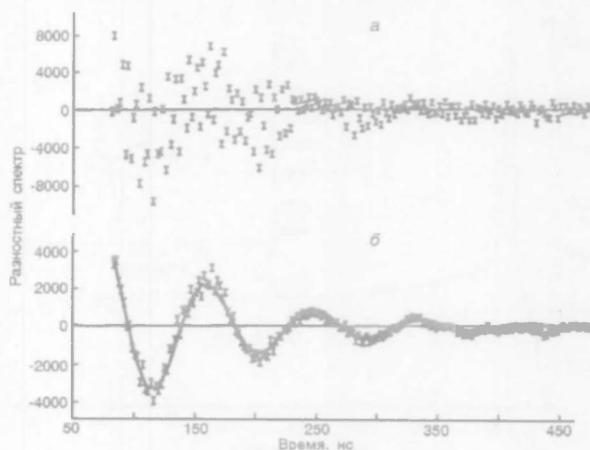


Рис. 2. Спектр, полученный после вычитания двух экспериментальных спектров, которые отличаются фазой осцилляции без (а) и с (б) предварительной обработкой методом скользящего среднего.

Сплошная линия (б) описывает теоретический спектр

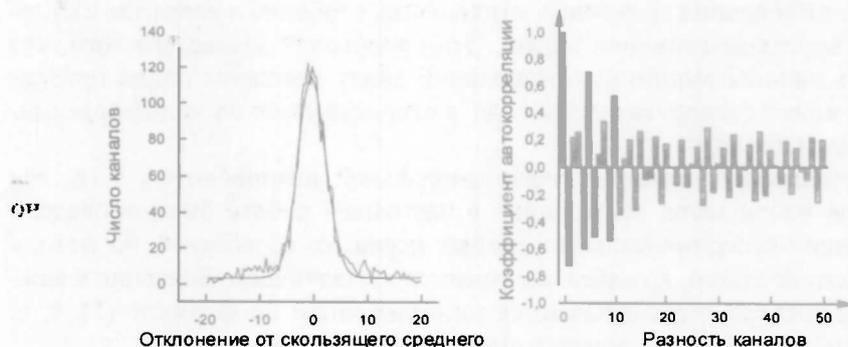


Рис. 3. Гистограмма статистического распределения отклонения полученных на эксперименте распределений от скользящего среднего и автокорреляционная функция

На рис. 3, б отражен коэффициент корреляции между дифференциальной нелинейностью в различных каналах. Коэффициент не стремится к нулю, как обычно при увеличении расстояния между каналами. Это свидетельствует о сильной связи между значениями дифференциальной нелинейности в различных, даже далеко отстоящих друг от друга, каналах. А также о том, что процедура усреднения позволила исключить только наиболее быстро меняющуюся часть дифференциальной нелинейности.

При наличии только статистической ошибки нормализованный на корень из числа отсчетов в канале график должен представлять собой распределение Гаусса с единичной полушириной на полувывоте  $\sigma=1$ . Нами получена кривая гауссовой формы (что свидетельствует о стохастической природе дифференциальной нелинейности), но со значением  $\sigma=2,3$  (см. рис. 3). Дифференциальная нелинейность пропорциональна разности между  $\sigma$ , полученной нами при фитировании, и единицей, которая должна оставаться в отсутствие дифференциальной нелинейности. Таким образом, систематическая ошибка, вызванная дифференциальной нелинейностью, превышает в 1,3 раза статистическую ошибку эксперимента.

\* \* \*

Предложенный метод позволяет исключить дифференциальную нелинейность непосредственно в процессе обработки данных. Отметим, что прямое измерение дифференциальной нелинейности в данном эксперименте невозможно, так как ее величина существенным образом зависит от загрузки времяизмерительного тракта и может меняться в ходе эксперимента.

Уменьшить дифференциальную нелинейность можно также суммированием данных в соседних каналах. Однако этот способ приводит к существенному увеличению шага дискретизации и тем самым к меньшей точности.

Автор выражает благодарность А.В. Берестову за предоставленные экспериментальные спектры, А.А. Хрущинскому за идею исключения дифференциальной нелинейности, О.Н. Метелице и В.В. Понарядову за обсуждения и поддержку работы.

1. Baryshevsky V.G. // Phys. Stat. Sol. 1984. (b) 124. 619.
2. Andrukhovich S.K., Baryshevsky V.G., Berestov A.V. et al. // Phys. Lett. 1989. A 136. 2835.
3. Fan S., Beling C.D., Fung S. // 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Positron Annihilation. Beijing, 1994.
4. Baryshevsky V.G., Metelitsa O.N., Tichomirov V.V. // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1989. 22. P. 2835.
5. Baranov V.V., Berestov A.V., Martinkevich B.A. et al. // Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk, seriya fiziceskaya. 1994. Vol. 58. № 4. P. 137.

Поступила в редакцию 05.02.2001.

**Бирзал Екатерина Александровна** – аспирант кафедры физики твердого тела БГУ. Научные руководители – кандидат физико-математических наук, доцент В.В. Понарядов, кандидат физико-математических наук О.Н. Метелица.

