

Сравнение частот прецессии спина электронных сгустков [1]

Прецизионные измерения частоты прецессии спина являются необходимым подготовительным этапом для эксперимента по проверке СРТ теоремы на электрон-позитронном накопителе [2]. Одно из фундаментальных положений современной физики, СРТ теорема предсказывает равенство g -факторов, масс, зарядов, магнитных моментов, времен жизни и других параметров частиц и соответствующих им античастиц.

На комплексе ВЭПП-4 с 2004 г. проводятся эксперименты по исследованию возможности проверки СРТ теоремы для электронов и позитронов в накопительном кольце с относительной точностью до 10^{-10} путем одновременного измерения частот прецессии их спинов методом резонансной деполяризации. Частота прецессии спина в накопителе определяется комбинацией аномального магнитного момента, массы и заряда частицы. В силу этого в одном измерении можно повысить точность сравнения составного параметра, представляющего собой комбинацию сразу трех фундаментальных параметров электрона и позитрона. Ранее подобный эксперимент был поставлен в ИЯФ на накопителе ВЭПП-2М [3], результаты которого сами авторы интерпретировали как сравнение АММ электрона и позитрона с точностью 10^{-8} . В настоящее время среднемировая точность сравнения аномальных магнитных моментов, масс и зарядов электрона и позитрона составляет $3 \cdot 10^{-9}$, $8 \cdot 10^{-9}$ и $4 \cdot 10^{-8}$, соответственно.

Описываемые эксперименты в методическом отношении направлены на достижение минимальной статистической ошибки, а также на изучение источников систематической ошибки и мер по их устранению. Для измерения средней частоты прецессии спина в пучке используется система абсолютной калибровки энергии методом резонансной деполяризации [4]. Необходимая для экспериментов поляризация пучка электронов или позитронов производится в бустерном накопителе ВЭПП-3, после чего поляризованный пучок инжектируется в ВЭПП-4М. Деполяризация пучка, инжектированного в ВЭПП-4М, осуществляется с помощью “кикера”, представляющего собой пару согласованных полосковых линий, находящихся внутри вакуумной камеры. В линии создается бегущая ТЕМ волна, распространяющаяся в направлении по движению пучка, частота которой линейно со временем изменяется в диапазоне, включающем ожидаемое значение частоты спинового резонанса. Схема подключения линии реализована таким образом, что формируемая стоячая волна одновременно воздействует на электроны и позитроны с одинаковой интенсивностью. Синусоидальный сигнал раскачки генерируется разработанным в ИЯФ прецизионным синтезатором, позволяющим перестраивать частоту с разрешением лучше 10^{-6} Гц. Для регистрации факта деполяризации пучка используется эффект внутрисгусткового рассеяния частиц (эффект Тушека). Скорость счета рассеянных частиц, зависящая от степени их поляризации, измеряется сцинтилляционными счетчиками, установленными на участке вакуумной камеры цилиндрического сечения. Счетчики вводятся внутрь апертуры в горизонтальной плоскости с обеих сторон и регистрируют Тушек-электроны, рассеянные по всему периметру кольца.

В самом простом варианте методического эксперимента с двумя электронными сгустками, один из которых поляризован, а другой, используемый для нормировки, не поляризован, находится предельное разрешение в измерении частоты деполяризации, зависящее от статистической ошибки, т.е. от скорости счёта Тушековских частиц. В схеме с двумя такими парами сгустков путем сравнения двух одновременно измеренных частот деполяризации можно изучать, например, систематическую ошибку, вызванную зависимостью средней частоты спина в сгустке от его тока. В этом случае выявляется предельное разрешение в сравнении частот деполяризации, которое и определяет максимально возможную точность при сравнении спиновых частот электронов и позитронов. К 2006 г. нами была достигнута рекордно высокая точность сравнения частот деполяризации двух электронных сгустков – $2 \cdot 10^{-8}$ [2].

В 2008 году начата новая серия экспериментов с применением модернизированной системы регистрации тушековских частиц. Эксперименты проводятся в условиях, обеспечивающих более высокую эффективность, чем в предыдущих сериях.

Применена запущенная в 2007 году распределенная система регистрации тушековских частиц с частотой полезной загрузки до 1 МГц при токе пучка около 2 мА (со старой системой максимальная загрузка достигала 100–200 кГц). Достигнутая частота регистрируемых событий отвечает статистической ошибке, которую в принципе необходимо обеспечить в эксперименте по сравнению спиновых частот электрона и позитрона с точностью 10^{-10} .

Для долговременной стабилизации поля поворотных магнитов ВЭПП-4М разработана система обратной связи по сигналу датчика ЯМР в калибровочном магните. ЯМР магнитометр измеряет магнитное поле с точностью не хуже $0.5 \cdot 10^{-6}$. Цифро-аналоговый преобразователь формирует сигнал, пропорциональный полю, который подается на добавочные витки в катушке бесконтактного датчика тока. Сигнал датчика тока используется в цепи обратной связи для стабилизации источника тока, питающего магниты ведущего поля ВЭПП-4М. Полоса частот контура стабилизации составляет 0.1 Гц, диапазон регулировки поля – около $\pm 10^{-4}$. Применение системы позволило уменьшить постоянную составляющую дрейфа величины ведущего поля примерно на порядок – до уровня 1 кэВ/сутки. Термостабилизация в системе водяного охлаждения магнитов обеспечивалась с точностью до 0.1°C . На рис. 1а представлены показания ЯМР датчика поля в калибровочном магните в двух режимах работы источника питания ведущего поля: с выключенной и включенной обратной связью. Рис. 1б в более мелком масштабе демонстрирует долговременную стабильность поля при включенной обратной связи. Значения поля даны в эрстедах, 10^{-3} эрстеда соответствуют примерно 1 кэВ энергии частиц, циркулирующих в накопителе.

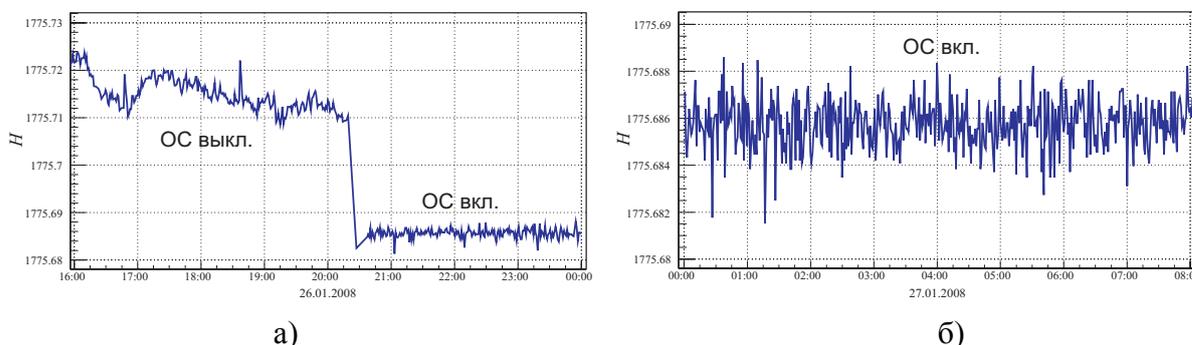


Рисунок 1 – Стабилизация магнитного поля с помощью системы обратной связи.

В экспериментах по “сверхтонкому сканированию” с модернизированной системой регистрации использовалась стабилизация ведущего магнитного поля с помощью системы обратной связи, а также привязка задающего генератора ускоряющего ВЧ напряжения, синтезаторов частоты деполяризатора и ЯМР магнитометра к рубидиевому стандарту частоты, обеспечивающему стабильность 10^{-10} . Удалось достичь рекордного разрешения $(1-3) \cdot 10^{-9}$ по частоте резонансной деполяризации [5], дальнейшее повышение точности ограничено уровнем остаточной нестабильности ведущего поля.

Измерялась величина $S=1-(dN_1/dt)/(dN_2/dt)$, где dN_1/dt – скорость счета тушековских электронов, рассеянных из поляризованного сгустка, а dN_2/dt – из неполяризованного. При “сверхтонком сканировании” процесс деполяризации имеет вид затянутого скачка, длительность которого зависит от ширины спиновой линии и от относительной скорости дрейфа спиновой частоты, определяемой стабильностью ведущего поля. Рис. 2 отображает типичный процесс сканирования частоты деполяризатора со скоростью 2.5 эВ/сек (скорость дана в единицах энергетической шкалы, т.к. частота прецессии спина частицы пропорциональна ее энергии). Длительность

затянутого скачка составляет 14 ± 3 сек. Частота деполяризации определена с относительной точностью $1.5 \cdot 10^{-9}$.

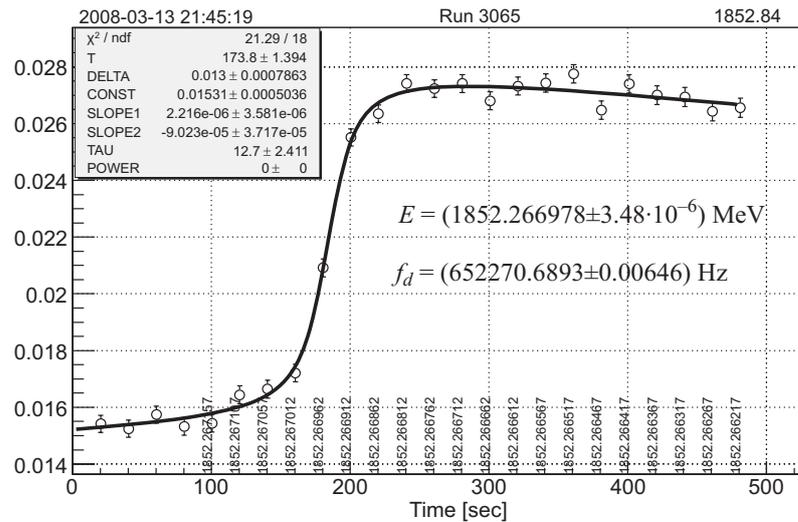


Рисунок 2 – Типичный случай “сверхтонкого сканирования”.

Теоретически изучен процесс “сверхтонкого” сканирования, при котором ширина линии деполяризатора много меньше ширины линии частоты спиновой прецессии (около $5 \cdot 10^{-7}$) на основе двух специально разработанных моделей. Одна модель – феноменологическая, с привлечением методов Монте-Карло для моделирования счета рассеянных тушековских электронов в процессе сканирования. Другая – аналитическая – модель следует из кинетической теории резонансной спиновой диффузии и содержит основные физические параметры эксперимента. Обе модели позволяют описывать процесс деполяризации в согласии с наблюдениями и объяснить изменение формы скачка влиянием нестабильности ведущего поля.

Принимая во внимание полученные результаты, мы оцениваем достижимую точность прямого сравнения спиновых частот электрона и позитрона на ВЭПП-4М как $\leq 10^{-9}$, что является новым шагом в повышении точности СРТ эксперимента.

Литература

1. Анчугов О.В., Блинов В.Е., Богомягков А.В., Журавлев С.Е., Карнаев С.Е., Карпов Г.В., Киселев В.А., Куркин Г.Я., Левичев Е.Б., Мешков О.И., Мишнев С.И., Мучной Н.Ю., Никитин С.А., Николаев И.Б., Петров В.В., Пиминов П.А., Симонов Е.А., Синяткин С.В., Скринский А.Н., Смалюк В.В., Тихонов Ю.А., Тумайкин Г.М., Шамов А.Г., Шатилов В.В., Шведов Д.А., Шубин Е.И., Эксперименты по физике пучков заряженных частиц на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М // ЖЭТФ т. 136, вып. 4 (2009) 690-702
2. O. Anchugov et al. Record-high resolution experiments on comparison of spin precession frequencies of electron bunches using the resonant depolarization technique in the storage ring // Proc. of EPAC 2006, Edinburgh, 2006, pp. 2787–2789.
3. I.V.Vasserman et al. // Phys. Lett. 198B (1987) p. 302.
4. V.E. Blinov et al. // NIM A 598 (2009) pp. 23–30.
5. V. Blinov et al. Study of the possibility of increasing the accuracy of CPT invariance test at electron-positron storage rings // ICFA Beam Dynamics Newsletter No. 48 (2009) pp. 207–217.