

Измерение энергии пучка [1]

Наиболее точным современным методом калибровки энергии пучка является метод резонансной деполяризации (РД). В экспериментах с детектором КЕДР проводились регулярные калибровки энергии пучка с рекордной точностью (до 10^{-6}). В промежутках между калибровками энергия пучка вычисляется методом интерполяции с использованием измеренных параметров ВЭПП-4М.

Метод резонансной деполяризации

Метод резонансной деполяризации для измерения энергии пучка был впервые предложен и реализован в ИЯФ [2]. Впоследствии этот подход широко использовался в ИЯФ и в других лабораториях мира.

В ускорителе с плоской орбитой (когда отсутствуют радиальные и продольные магнитные, и электрические поля) спин прецессирует вокруг направления ведущего магнитного поля \mathbf{B} . Вычисляя набег спиновой фазы за период обращения частицы в ускорителе, получим выражение для средней частоты Ω_S прецессии спина:

$$\Omega_S = \left(\frac{q_0}{\gamma} + q' \right) \frac{1}{2\pi} \oint B_{\perp}(\theta) d\theta = \omega_0 \left(1 + \gamma \frac{q'}{q_0} \right), \quad (1)$$

где θ – азимут вдоль замкнутой орбиты, ω_0 – циклическая частота обращения, γ – релятивистский фактор.

Наиболее точным современным методом калибровки энергии пучка является метод резонансной деполяризации, в основе которого лежит прецизионное измерение частоты прецессии спина Ω_S . Деполяризация происходит при введении внешнего электромагнитного поля с частотой Ω_D , удовлетворяющей резонансному условию

$$\Omega_S \pm \Omega_D = n\omega_0 \quad (2)$$

при любом целом n . Факт деполяризации регистрируется любым поляризационно-чувствительным процессом.

Вводя нормализованную спиновую частоту $\nu_s = \frac{\Omega_S}{\omega_0} - 1 = \gamma \frac{q'}{q_0}$, получаем простое выражение для энергии пучка E :

$$E = \nu_s \frac{mc^2}{q'/q_0} = 440.64843(3) \text{ МэВ} \cdot \nu_s. \quad (3)$$

Входящие в это выражение константы известны с высокой точностью: $q'/q_0 = 1.1596521859 \cdot 10^{-3} \pm 3.8 \cdot 10^{-12}$ и $mc^2 = 0.51099892 \pm 4 \cdot 10^{-8}$ МэВ, что дает принципиальную возможность найти энергию частицы по измеренной частоте спиновой прецессии с предельной относительной точностью $7.8 \cdot 10^{-8}$.

Поляризованные электрон-позитронные пучки в накопителях получают благодаря действию магнито-дипольного излучения. При движении частицы ее магнитный момент прецессирует вокруг направления вектора магнитного поля и составляющая магнитного момента, ортогональная полю, уменьшается за счет магнито-дипольного излучения. В результате за характерное время излучения спин ориентируется вдоль магнитного поля (эффект Соколова-Тернова).

Время поляризации в приближении круговой орбиты в однородном магнитном поле может быть выражено через радиус R траектории частицы:

$$\tau_{pol} \cong \frac{R^3}{\gamma^5} \frac{1}{\lambda_e c r_0} = \frac{2.8 \cdot 10^{18} R^3 [\text{м}]}{\gamma^5} \text{ секунд}, \quad (4)$$

где $\lambda_e = \frac{\hbar}{m_e c} = 3.86 \cdot 10^{-11}$ см – комптоновская длина волны, $r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2.818 \cdot 10^{-13}$ см –

классический радиус электрона. На энергии 1.8 ГэВ время поляризации электронного пучка в накопителе ВЭПП-4М составляет около 100 часов. Однако наличие бустерного накопителя ВЭПП-3 с существенно меньшим радиусом орбиты R и временем поляризации порядка одного часа позволяет получать поляризованные пучки, используемые затем в ВЭПП-4М.

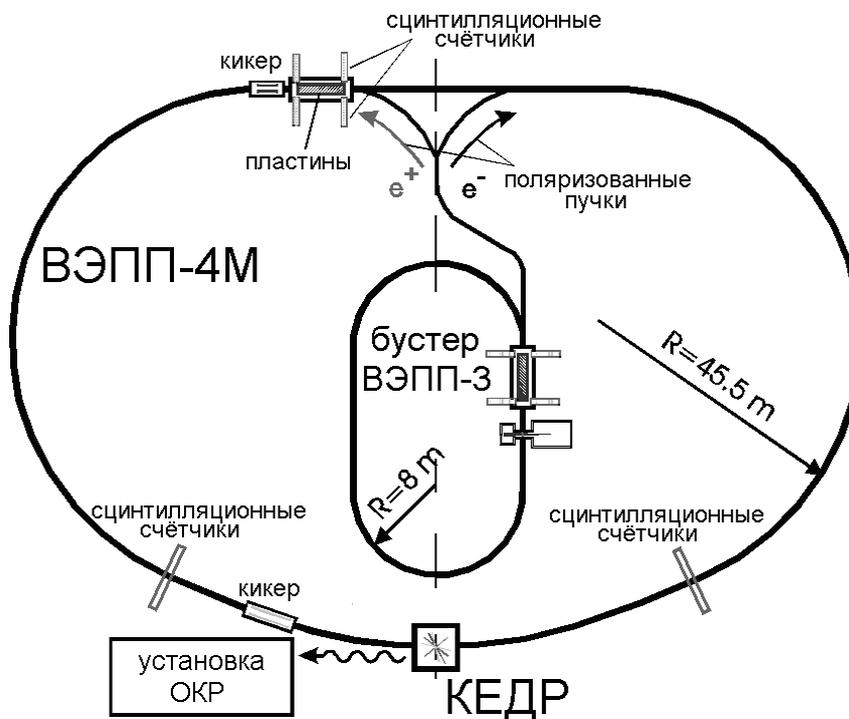


Рисунок 1 – Схема расположения аппаратуры для измерения энергии пучка методом резонансной деполяризации.

Схема расположения аппаратуры для измерения энергии пучка ВЭПП-4М методом резонансной деполяризации [3] приведена на рис. 1. Деполяризация пучка осуществляется с помощью кикера, представляющего собой пару согласованных полосковых линий, находящихся внутри вакуумной камеры. В линии создается бегущая ТЕМ волна, распространяющаяся по движению пучка, частота которой линейно изменяется в диапазоне, заведомо перекрывающем значение ожидаемой частоты прецессии спина. Синусоидальный сигнал деполяризатора на ТЕМ волне вырабатывается разработанным в ИЯФ прецизионным синтезатором с предельным разрешением по шагу перестройки частоты лучше $6 \cdot 10^{-7}$ Гц.

Для регистрации факта деполяризации пучка используется эффект внутрисгусткового рассеяния частиц (эффект Тушека). Скорость счета рассеянных частиц, зависящая от спина, измеряется двумя парами сцинтилляционных счетчиков, установленных на участке вакуумной камеры цилиндрического сечения. Счетчики каждой пары вводятся внутрь апертуры в горизонтальной плоскости с обеих сторон и регистрируют Тушек-электроны, рассеянные по периметру кольца. Для подавления некоррелированного шума используется схема совпадений регистрируемых событий в счетчиках пары. Выражение для скорости счета рассеянных частиц \dot{N} можно записать в виде [4]:

$$\dot{N} = \frac{\sqrt{\pi} r_0^2 c N_b^2}{\gamma^5 V_b (c \sigma_p / E)^3} \cdot (a + b P^2)$$

$$a = a(\varepsilon_1, \varepsilon_2), \quad b = b(\varepsilon_1, \varepsilon_2), \quad \varepsilon_{1,2} = [\Delta p_{1,2} / (\gamma \sigma_p)]^2 \quad (5)$$

$$\Delta p_1 = \Delta p_1(A), \quad \Delta p_2 = \Delta p_2(A_g)$$

где P – степень поляризации пучка; N_b – число частиц в сгустке; V_b – объем сгустка в лабораторной системе отсчета, σ_p – разброс поперечного импульса в пучке, a и b – некие рассчитываемые функции, зависящие от нижней (Δp_1) и верхней (Δp_2) границ по передаче импульса, причем, $b < 0$; A – расстояние от счетчика до орбиты; A_g – геометрическая апертура ускорителя. Из формулы (5) следует, что в момент деполяризации происходит изменение скорости счета рассеянных электронов. В частности, на накопителе ВЭПП-4М скорость счета изменяется на величину порядка 1–3%. Регистрация такого малого изменения скорости счёта затруднена временными нестабильностями пучка, влияние которых примерно совпадает по величине с эффектом. Поэтому регистрируются рассеянные частицы от двух сгустков, отстоящих друг от друга на полпериода обращения, один из которых поляризованный, а другой нет. С помощью введенных в вакуумную камеру сцинтилляционных счётчиков измеряется отношение скоростей счёта рассеянных электронов от поляризованного (\dot{N}_1) и неполяризованного (\dot{N}_0) сгустков: $1 - \dot{N}_0 / \dot{N}_1$. В момент деполяризации происходит скачок в наблюдаемом отношении, пропорциональный квадрату степени поляризации (см. рис. 2). Деполяризация осуществляется ТЕМ волной, частота которой линейно со временем перестраивается в диапазоне, заведомо включающем значение ожидаемой частоты прецессии спина. Зная частоту деполяризатора в момент времени скачка в отношении скоростей счета, можно найти частоту прецессии спина, и, по формуле (3), среднюю энергию пучка.

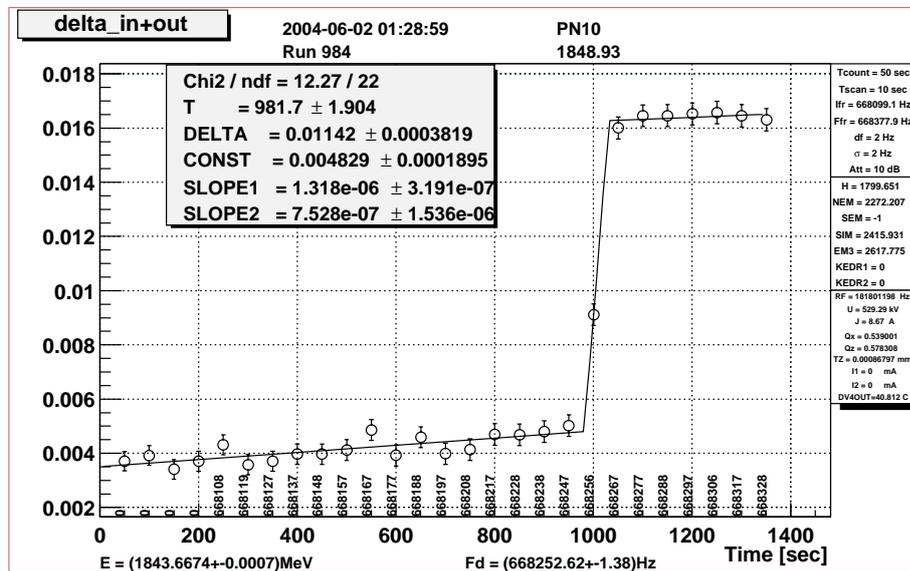


Рисунок 2 – Отношение скоростей счета поляризованного и неполяризованного сгустков в процессе деполяризации.

Эффективность (скорость деполяризации на внешнем спиновом резонансе) деполяризатора зависит от его спектральной характеристики и мощности, условий пересечения и ширины спинового резонанса. Важным фактором для деполяризатора с поперечным полем является спиновый "отклик" [5] – спиновые возмущения, приобретаемые вследствие возбуждаемых ТЕМ волной колебаний частицы в фокусирующей структуре накопителя. Этот "отклик", который необходимо рассчитывать для проведения резонансной деполяризации в контролируемых условиях, может как усилить, так и ослабить прямое действие поля деполяризатора на спин.

Вследствие разброса энергии частиц в пучке возникает так называемый мгновенный разброс спиновых частот (σ_v) – в относительных единицах $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ (около 1 МэВ в единицах энергии). Кроме того, имеется еще одна характеристика распределения спиновых частот в пучке – собственная ширина спиновой линии (ε_v), которая отвечает усреднению по синхротронным и бетатронным колебаниям и может быть отлична от нуля из-за квадратичной нелинейности ведущего поля. Процесс вынужденной резонансной деполаризации занимает много времени по сравнению с периодами орбитального движения, что позволяет рассматривать спектр спиновых частот как линейчатый. Одновременно это объясняет, почему спиновую частоту можно измерить с ошибкой, много меньше мгновенного разброса σ_v . Спектр спиновых частот с учетом модуляции спинового движения орбитальным состоит из основной и боковых линий, отстоящих от основной на расстояние, кратное частотам синхротронных (ν_s) и бетатронных ($\nu_{x,y}$) колебаний. Боковой резонанс проявляется тем заметнее, чем выше индекс модуляции (отношение амплитуды к частоте модуляции). Бетатронные частоты (их нецелая часть, если выражать в единицах частоты обращения) более чем на порядок, превышают синхротронную частоту, следовательно, индекс бетатронной модуляции и её влияние намного меньше. Деполаризация на первом боковом спиново-синхротронном резонансе дает систематическую ошибку определения энергии пучка примерно 4 МэВ. Простая проверка положения найденного резонанса путем вариации напряжения ВЧ резонаторов помогает устранить эту ошибку.

Подобные помехи измерению спиновой частоты могут оказывать также модуляционные резонансы, которые вызваны регулярными низкочастотными пульсациями ведущего поля. Они намного более опасны, чем синхротронные, из-за резкого снижения возможности отличить их от основного. На ВЭПП-4М приняты меры по подавлению низкочастотных пульсаций поля до уровня 1–10 ppm, что дает замедление скорости деполаризации при частоте пульсаций 50 Гц на первом боковом резонансе по сравнению с основным более, чем на порядок [6]. В этих условиях правильный учет “спинового отклика” деполаризатора при задании амплитуды ТЕМ волны и выбор скорости сканирования её частоты позволяют полностью исключить возможность деполаризации пучка на паразитном модуляционном резонансе, которая на энергии 1.85 ГэВ приводила бы к систематической ошибке $> 2 \cdot 10^{-5}$ (> 40 кэВ).

Предельная точность абсолютной калибровки энергии пучка МРД обусловлена шириной спиновой линии, которая по оценкам и в согласии с данными специальных экспериментов по “сверхтонкому” сканированию [7] на ВЭПП-4М составляет $\varepsilon_v \sim 5 \cdot 10^{-7}$ (около 1 кэВ). Другим ограничивающим точность параметром является обратное время, за которое происходит резонансная деполаризация. В экспериментах по измерению масс частиц с детектором КЕДР этот параметр был одного порядка с шириной спиновой линии.

На ВЭПП-4М изучены либо изучаются и другие источники систематической ошибки при использовании калибровок энергии МРД:

- нарушение закона пропорциональности между спиновой частотой и энергией (неплоская или с кручением орбита) [8,9];
- зависимость средневзвешенной частоты спиновой прецессии в сгустке от его тока;
- влияние малых возмущений орбиты (например, при разведении орбит в паразитных местах встречи);
- долговременная стабильность энергии между последовательными калибровками (температурная составляющая, стабильность частоты ВЧ, стабильность магнитных элементов) [10].

Для уточнения ошибки в определении энергии в системе центра масс по данным калибровок энергии только одного из пучков (электронного), которая входит в окончательный результат измерения масс частиц детектором КЕДР, исследовались:

- соответствие локальной энергии в месте встречи средней энергии по кольцу, измеряемой РД (асимметрия потерь на излучение, продольное ускорение частиц в поле встречного сгустка);
- соответствие средневзвешенной по светимости энергии по методу РД (хроматизм бета-функции, влияние разведения в паразитных местах встречи на вертикальную дисперсию в основном месте встречи) [11];
- соответствие энергии рождающихся частиц кинетической энергии, определяемой по частоте прецессии спина (потенциал в пучке) [12].

Начаты эксперименты по одновременной деполяризации и измерению энергий МРД электронного и позитронного пучков с целью выявления указанной выше систематической ошибки. В частности, если токи пучков одинаковы, то ошибка в определении энергии в системе центра масс может быть оценена по измеренным в этих специальных экспериментах значениям энергий электронов $\langle E_- \rangle$ и позитронов $\langle E_+ \rangle$ по формуле

$$\delta \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\langle E_- \rangle - \langle E_+ \rangle}{\langle E_- \rangle}.$$

По предварительным данным, разница энергий электронов и позитронов, измеренная МРД, составляет порядка 1 кэВ и связана, в основном, с разведением орбит в паразитных местах встречи.

Интерполяция энергии между калибровками

В экспериментах по физике высоких энергий необходимо знать энергию пучка во время набора статистики, а калибровки энергии проводятся тогда, когда набор статистики не проводится. Точность измерения энергии в момент калибровки равна 1 кэВ, но из-за нестабильности параметров накопителя во времени значение энергии в процессе набора статистики отличается от измеренного. Для вычисления энергии использовалась следующая зависимость от параметров ускорителя:

$$E_{beam} = \alpha_H H_{NMR} [1 + \alpha_T (T_{ring} - T_{NMR})] f(T_{ring}, T_{cool}, T_{wall}) + A(t) \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau_{day}} - \varphi(t)\right) + \delta E_{on} \exp\left(-\frac{t_{on}}{\tau_{on}}\right) + \delta E_{cycle} \exp\left(-\frac{t_{cycle}}{\tau_{cycle}}\right) + E_0(\Delta i, t), \quad (7)$$

где H_{NMR} – магнитное поле, измеряемое ЯМР-магнитометром в калибровочном дипольном магните, запитанном последовательно с магнитами полуколец ВЭПП-4М, T_{NMR} – температура калибровочного магнита, T_{ring} и T_{cool} – средние температуры кольца и охладителя (воздуха или воды), T_{wall} – температура, измеряемая на некоторой глубине в стенах тоннеля, в котором расположен ускоритель, t – текущее время, а t_{on} и t_{cycle} обозначает время, прошедшее после последнего включения коллайдера и после последнего магнитного цикла, соответственно. $\alpha_H, \alpha_T, \delta E_{on}, \delta E_{cycle}, \tau_{on}, \tau_{cycle}$ – свободные параметры, определяемые подгонкой всех калибровок энергии, выполненных в определенном режиме работы коллайдера. Простейшие (линейные или ступенчатые) функции $f(T), A(t), E_0(\Delta i, t)$ имеют дополнительные свободные параметры.

На протяжении всего эксперимента [13] (218 калибровок) квазистатистическая точность интерполяции варьируется в пределах от 6 до 8 кэВ. Различные варианты функций $f(T), A(t),$ и $\varphi(t)$ были испробованы для оценки систематической неопределенности результирующих значений J/ψ и $\psi(2s)$ мезонов.

Для использования полной формы параметризации (7) требуется большое число калибровок энергии без существенного изменения режима работы ускорителя. В экспериментах по измерению массы $\psi(3770)$, D-мезонов и массы τ -лептона была использована упрощенная форма (7), где использовались относительно короткие интервалы времени. Число свободных параметров изменялось от 4 до 7. Достигнута точность интерполяции 10÷15 кэВ при сканировании узких резонансов и 15÷30 кэВ при сканировании $\psi(3770)$ и порога τ -лептона.

Литература

1. О.В. Анчугов, В.Е. Блинов, А.В. Богомягков, А.А. Волков, А.Н. Журавлев, С.Е. Карнаев, В.А. Киселев, Е.Б. Левичев, О.И. Мешков, С.И. Мишнев, И.И. Морозов, Н.Ю. Мучной, С.А. Никитин, И.Б. Николаев, В.В. Петров, П.А. Пиминов, Е.А. Симонов, С.В. Синяткин, А.Н. Скринский, В.В. Смалюк, Ю.А. Тихонов, Г.М. Тумайкин, В.М. Цуканов, А.Г. Шамоу, Д.Н. Шатилов, Д.А. Шведов. Применение методов ускорительной физики в экспериментах по прецизионному измерению масс частиц на комплексе ВЭПП-4 с детектором КЕДР // Приборы и техника эксперимента, 2010, № 1, с. 20–33.
2. А.Д. Букин, Я.С. Дербенев, А.М. Кондратенко, Л.М. Курдадзе, С.И. Середняков, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин, Ю.М. Шатунов // Препринт ИЯФ СО АН СССР 75-64 и Труды V международной конференции по физике высоких энергий, Варшава, 1975.
3. V. Blinov, Proc. of EPAC 2002, Paris, 2002, 1954-1956.
4. S. Nikitin, I. Nikolaev, Proc. of EPAC 2006, Edinburgh, 2006, 1184-1186.
5. Ya.S. Derbenev, A.M. Kondratenko and A.N. Skrimsky, Part. Acc., vol. 9, No. 4 (1979), 247-265.
6. С.А. Никитин, Препринт ИЯФ СО РАН 2005-54.
7. V. Blinov et al., Beam Dynamics Newsletters, No. 48, April 2009, 207-217.
8. A. Bogomyagkov, S. Nikitin, A. Shamov, Proc. of RuPAC 2006, Novosibirsk, 2006, MOAP02.
9. S. Nikitin, Proc. of RuPAC 2006, Novosibirsk, 2006, MOAP01.
10. A. Bogomyagkov et al., Proc. of EPAC 2002, Paris, 2002, 386-388.
11. A. Bogomyagkov et al., Proc. of the 22nd PAC, Albuquerque, 2007, 63.
12. A. Bogomyagkov et al., Proc. of APAC 2004, Gyeongju, Korea, 2004, TUP11002.
13. V.M. Aulchenko, S.A. Balashov, E.M. Baldin et al. (KEDR Collab.) // Phys. Lett. B. v. 573 (2003) 63, e-Print: hep-ex/0306050.