

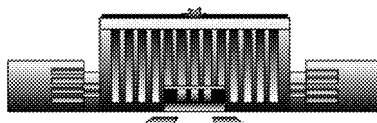


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН
(ИЯФ СО РАН)**

Д.В. Дорохова, Е.Б. Левичев, С.А. Никитин

**ПРОГРАММА ВОЗМОЖНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ
ПРОДОЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ВЭПП-4М**

ИЯФ 2023-05



НОВОСИБИРСК

2023

Программа возможной реализации продольной поляризации на ВЭПП-4М

Д.В. Дорохова, Е.Б. Левичев, С.А. Никитин

Аннотация

Описаны особенности и программа возможной реализации полной сибирской змейки для получения продольной поляризации на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М. В области энергий пучка вблизи 1.5 ГэВ оцениваемое время жизни поляризации со змейкой после согласованной по спину инъекции поляризованного пучка в кольцо коллайдера составляет несколько часов. Дополнительно к сильной зависимости деполяризующего эффекта излучения от энергии, можно исследовать деполяризующее влияние бетатронных колебаний, искажений орбиты в соленоиде змейки, а также устойчивость продольной поляризации в поле встречного пучка. Обсуждается идея эксперимента по получению продольной поляризации без какой-либо модернизации ВЭПП-4М. Она состоит в адиабатическом преобразовании поперечной поляризации в продольную при понижении энергии к значению целого спинового резонанса с использованием поля детектора КЕДР в качестве частичной сибирской змейки. Целью этого специфического эксперимента могло бы стать изучение возможности наблюдения продольной поляризации с применением комптоновского рассеяния циркулярно-поляризованных лазерных фотонов в сочетании с системой регистрации рассеянных электронов ВЭПП-4М, а также и еще одним способом - с помощью Тушековского поляриметра и резонансной деполяризации.

Введение

Существует сравнительно простая возможность получения продольной поляризации частиц в коллайдере ВЭПП-4М, на которую впервые применительно к ВЭПП-4 было указано в давней работе [1]. Прежде всего она обязана бустеру-накопителю ВЭПП-3, в котором в области энергий 1,5÷1,9 ГэВ можно поляризовать электроны и позитроны до степени 80% за счет естественного радиационного механизма Соколова-Тернова за время порядка одного часа. Поляризация в коллайдере обеспечивается за счет согласованной по спину инъекции частиц, уже поляризованных в ВЭПП-3. Второй положительный фактор — это большое время радиационной релаксации спина в кольце коллайдера τ_p [час] $\approx 1540/(E[\text{ГэВ}])^5 \sim 10^2$ часов в указанной области энергий. Это позволяет организовать продольную поляризацию с помощью «сибирской змейки» в виде сверхпроводящего соленоида, вращающего спин на 180° вокруг вектора скорости [2,3].

Такой ротатор вызывает сильную спин-орбитальную связь, которая за счет квантовых флуктуаций ведет к практически полной деполяризации пучка. Но соответствующее время жизни поляризации пропорционально времени радиационной релаксации Соколова-Тернова (τ_p) [4], которое в указанном случае очень велико. Поэтому степень продольной поляризации может

оставаться в диапазоне достаточно высоких значений на временах, сравнимых со временем жизни пучка.

Эффективное применение продольной поляризации на существующем ВЭПП-4М в физическом эксперименте с детектором КЕДР, например, для измерения поляризационного вклада в сечение J/ψ резонанса, вряд ли возможно из-за недостаточно высокой светимости. По оценкам, даже в оптимистическом варианте, предполагающем увеличение светимости ВЭПП-4М в 2 раза, для измерения этого эффекта с довольно низкой точностью ($\sim 25\%$) потребуется не менее 3-х лет*.

Тем не менее, «сибирская змейка» на ВЭПП-4М и экспериментальное исследование ускорительных аспектов продольной поляризации могут быть важны, например, для поляризационной программы будущей Супер Чарм Тау Фабрики с «сибирскими змейками» [5]. В частности, сверхпроводящий соленоид для ВЭПП-4М может стать прототипом соленоидов для Супер Чарм Тау. Большое внимание уделяется «сибирским змейкам» на основе соленоидов в китайском проекте циклического e^+e^- суперколлайдера СЕРС [6]. Свойства спиновых ротаторов в электрон-позитронных накопителях изучены еще недостаточно. Влияние излучения на поляризацию делает их более сложными по отношению к свойствам аналогичных устройств, применяемых для прохождения спиновых резонансов в кольцевых ускорителях тяжелых частиц. К настоящему времени известен только один пример реализации «сибирской змейки» на электронном накопителе – на энергии около 700 МэВ на AmPS (Нидерланды) [7, 8]. На ВЭПП-4М это возможно при более высоких энергиях с ограничением на уровне около и выше 2 ГэВ, где деполяризация становится существенной. Дополнительно к сильной зависимости деполяризующего эффекта излучения от энергии, можно исследовать деполяризующее влияние бетатронных колебаний, искажений орбиты в соленоиде змейки, а также устойчивость продольной поляризации в поле встречного пучка. Последнее представляет особый интерес, так как подобные эксперименты в отношении циклических e^+e^- коллайдеров с «сибирской змейкой» еще не проводились.

Ниже описаны особенности и программа возможной реализации полной сибирской змейки на ВЭПП-4М с точки зрения построения необходимой электронной оптики. Обсуждается идея [9] эксперимента по получению продольной поляризации без какой-либо модернизации ВЭПП-4М. Она состоит в адиабатическом преобразовании поперечной поляризации в продольную при понижении энергии к целому спиновому резонансу с использованием поля детектора КЕДР в качестве частичной сибирской змейки.

*) Авторы выражают благодарность А.Е. Блинову за большую помощь в оценке эффективности эксперимента на ВЭПП-4М с детектором КЕДР по измерению спиновой поправки в сечение рождения адронов в J/ψ пике с использованием продольно поляризованных электронов.

Целью такого специфического эксперимента могло бы стать изучение возможности наблюдения продольной поляризации с применением комптоновского рассеяния циркулярно-поляризованных лазерных фотонов в сочетании с системой регистрации рассеянных электронов ВЭПП-4М [10-12], а также и еще одним способом - с помощью Тушековского поляриметра и резонансной деполяризации.

1. Кинематика и время жизни продольной поляризации

Необходимый интеграл поля соленоида Сибирской змейки равен $4.6 \nu \text{ Тл}\cdot\text{м}$ ($\nu = \gamma a$ параметр спиновой частоты в единицах частоты обращения частицы в накопителе, γ – релятивистский фактор, $a = (g - 2)/2$ – отношение аномальной и нормальной частей гиромагнитного отношения электрона). При расположении змейки в промежутке, противоположном месту встречи, динамически устойчивое направление поляризации – периодический с азимутом вектор \vec{n} - ориентировано строго вдоль скорости частиц в промежутке с местом встречи. С изменением азимута \vec{n} совершает вращение в медианной плоскости в соответствии с набегом фазы спиновой прецессии в ведущем магнитном поле. Его проекция на скорость на входе в Сибирскую змейку и выходе из неё принимает разные по знаку значения $\pm \cos \pi \nu$. Вследствие поворота спина в соленоиде на π эффективная частота прецессии в кольце накопителя $\nu_0 = 1/2$ независимо от средней энергии частиц в пучке.

Наибольший вклад в спин-орбитальную связь в схеме с Сибирской змейкой вносит дисперсия вращения спина вокруг вектора ведущего поля. Согласно кинетическим формулам [2] радиационной поляризации характерное время деполяризации приближенно равно [3]

$$\tau_d \approx \frac{54}{11} \frac{\tau_p}{\pi^2 \nu^2} \propto E^{-7}.$$

Оптика на вставке с Сибирской змейкой выполняется с условием локализации связи поперечных колебаний на этом участке. В этом случае вклад бетатронных колебаний в скорость деполяризации можно учесть в виде [1]

$$\tau_d \approx \frac{54}{11} \frac{\tau_p}{\pi^2 \nu^2} F(\nu, \nu_x).$$

Помимо зависимости от частоты горизонтальных бетатронных колебаний (ν_x) и энергии коэффициент $F(\nu, \nu_x)$ имеет зависимость от параметров оптики вставки [13]. Деполяризация резонансно усиливается с приближением частоты ν_x к полуцелому значению. В таблице 1 приведены оценки времени τ_d для одного из вариантов оптики вставки при положении бетатронных частот ВЭПП-4М вблизи рабочей точки ($\nu_x/\nu_y = 0.54/0.58$).

Таблица 1. Оценка времени жизни продольной поляризации при разных значениях энергии.

E	t_d
МэВ	мин
1548	425
1777	160
1846	120

На энергии J/Psi пика время деполяризации равно 425 мин. Пусть $P_0 = 75\%$ - степень поляризации пучка, инжектированного в кольцо ВЭПП-4М и полностью согласованного по направлению вектора поляризации. Средняя степень продольной поляризации за $t = 1.5$ часа времени наблюдения составит

$$\langle P \rangle = P_0(1 - e^{-t/\tau_d})\tau_d/t = 66\% .$$

2. Инжекция поляризованного пучка

Инжекция поляризованного пучка происходит в техническом промежутке коллайдера ВЭПП-4М, в центре которого предполагается разместить Сибирскую змейку (см. Рис. 1). Траектория пучка в канале инжекции ВЭПП-3-ВЭПП-4М совершает эволюцию в трех плоскостях. При этом вектор поляризации на выпуске из канала может иметь различные направления в зависимости от энергии инжекции. Равновесное направление поляризации - вектор \vec{n} - в техническом промежутке коллайдера с Сибирской змейкой лежит в медианной плоскости с проекцией $\cos \pi \nu$ на направление скорости циркулирующего пучка, т.е. тоже зависит от энергии через параметр ν . Для наиболее полного согласования вектора поляризации инжектируемого пучка с энергией 1548 МэВ с равновесным направлением предлагается применить комбинацию из двух импульсных соленоидов с углами поворота спина вокруг вектора скорости F1 и F2, разместив их в канале так, как показано на Рис.1. Имеющийся в канале в настоящее время импульсный соленоид F3 [14] с интегралом поля 5 Тл·м служит для согласования вектора поляризации позитронов в экспериментах с применением метода резонансной деполяризации по измерению масс [12].

Для обсуждаемого варианта получения продольной поляризации на энергии 1548 МэВ соленоид F3 не подходит. Согласно проведенному моделированию кинематики спина в канале можно получать противоположные знаки спиральности электронов в основном месте встречи (детектор КЕДР) у последовательно инжектируемых сгустков $e1$ и $e2$. В первом сгустке $S_n = -0.97$ при $F_1=100^\circ$, $F_2=0$; во втором сгустке $S_n = +0.85$ при $F_1 = -120^\circ$, $F_2=55^\circ$. В экономном варианте можно ограничиться одним соленоидом F1 (F2 и F3 исключены): $S_n = -0.97$, $F_1 = 100^\circ$ и $S_n = +0.65$, $F_1 = -80^\circ$.

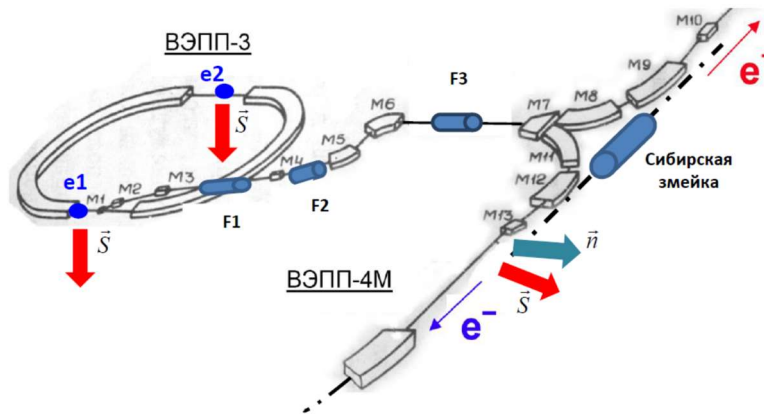


Рис.1. Схема инъекции поляризованных электронных сгустков ($e1$ и $e2$) из бустера ВЭПП-3 в кольцо коллайдера на энергии 1548 МэВ. F1, F2 и F3 - импульсные соленоиды в канале инъекции (F3 с интегралом поля 5 Тл·м существует в настоящее время). Стрелки, помеченные как \vec{S} , соответствуют вектору поляризации инжектируемого пучка в бустере и на впуске в технический промежуток ВЭПП-4М; \vec{n} - равновесное направление поляризации в коллайдере; M с порядковым номером - магниты канала, поворачивающие пучок в разных плоскостях.

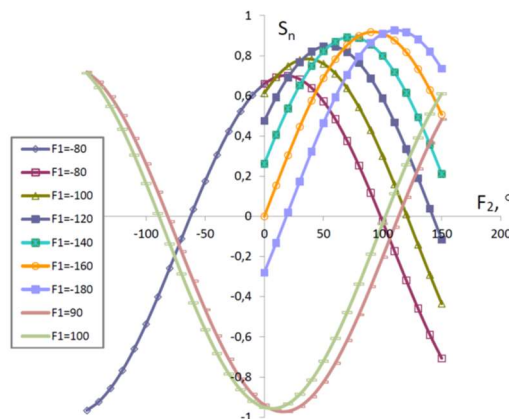


Рис. 2. Проекция $S_n = \vec{S} \cdot \vec{n}$ поляризации на равновесное направление при инъекции в зависимости от углов (даны в градусах) поворота спина в импульсных соленоидах F1 и F2. Соленоид F3 выключен. Энергия инъекции 1548 МэВ.

3. Оптика вставки с Сибирской змейкой

Для локализации связи колебаний на участке вставок с соленоидами применяются различные комбинации повернутых и нормальных квадрупольных линз, например [1,15,16]. В нашем случае удобно применить схему [16,17], изображенную на Рис.3. Матрица перехода вставки M_{total} напоминает матрицу пустого промежутка с длиной, равной длине вставки, с той разницей, что возникает знаковая инверсия положения точек в фазовом пространстве по одному из направлений колебаний (по X или по Y - в

зависимости от сочетания знаков полей элементов оптической схемы). Это приводит к существенному сдвигу бетатронных частот ВЭПП-4М. Для компенсации этого сдвига в расчетах применена коррекция градиента в арках коллайдера.

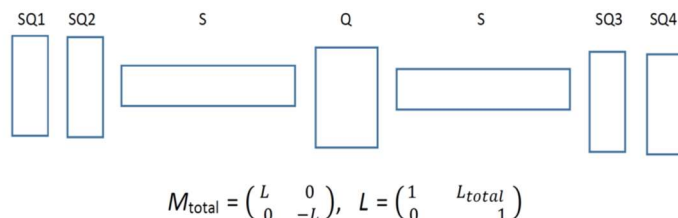


Рис. 3. Оптическая схема вставки с Сибирской змейкой. S – соленоиды; SQ_{1...4} – повернутые на $\pm 45^\circ$ квадруполь; Q – квадруполь; L_{total} – полная длина вставки; M_{total} – матрица вставки 4×4; L – матрица 2×2 пустого промежутка длиной L_{total} .

Рассмотрены два однотипных варианта схемы вставки: с длинами 532 и 430 см, при том, что в центре технического промежутка имеется около 6 м для её возможного размещения. В более длинной вставке поле соленоидов меньше: 5.58 Тл против 6.46 Тл на энергии 1548 МэВ. Параметры одной из оптических схем сведены в Таблицу 2.

Таблица 2. Параметры вставки длиной 532 см на энергии 1548 МэВ

Длина соленоида	2×145 см
Поле соленоида	5.58 Тесла
Градиент × длина (Q)	-2.136 кГс/см × 36 см
Градиент × длина (SQ1,SQ4)	-1.766 кГс/см × 24 см
Градиент × длина (SQ2,SQ3)	+1.564 кГс/см × 20 см
Угол поворота (SQ1,SQ4)	+45°
Угол поворота (SQ2,SQ3)	-45°
Зазор SQ1 - SQ2 и SQ3 - SQ4	7 см
Зазор SQ2 - S и S - SQ3	26 см
Зазор S - Q	22 см

Предполагаемый диаметр вакуумной камеры 80 мм. Численное согласование параметров выполнено таким образом, что матрица перехода M_{total} предельно близка к желаемой. Более точные по сравнению с табличными значения градиентов (за счет увеличения количества полученных значащих цифр после запятой) отвечают занулению диагональных блоков матрицы M_{total} с очень малой погрешностью (вплоть до $\sim 10^{-15}$). Тем не менее, в реальных условиях из-за неопределенности в знании энергии на уровне $10^{-5} \div 10^{-4}$ и примерно такой же точности задания полей соленоида и линз потребуются их подстройка для достижения максимальной степени локализации связи.

Поведение на участке вставки обобщенных параметров Твисса β_1 и β_2 для нормализованных переменных с учетом связи колебаний (обозначены как β_x и β_y , в которые переходят β_1 и β_2 за пределами вставки), а также дисперсионных функций (обозначены как D_x , D_y) показано на Рис.4. Вне вставки указанные функции с хорошей точностью повторяют функции исходной структуры ВЭПП-4М при том, что учтены коррекции градиента в арках, необходимые для возвращения бетатронных частот в исходную рабочую точку $Q_x/Q_y = 8.539/7.580$ (без коррекции $Q_x/Q_y = 8.539/8.079$).

При размещении Сибирской змейки в центре технического промежутка, в котором находится паразитное место встречи (IP2), необходимо предусмотреть соответствующее разведение орбит электронов и позитронов в экспериментах по изучению деполяризующего влияния поля встречного пучка. В обычных условиях разведение создается зеркально симметричным включением электростатических пластин по обеим сторонам промежутка и в IP2 имеет амплитуду около 4 мм. В рассматриваемом случае знак напряжений на пластинах на одной из сторон системы разведения надо сменить на противоположный. Внутри вставки вертикальное разведение переходит в горизонтальное (Рис.5) и в центре, т.е. в IP2, имеет амплитуду в два раза меньше исходной, что, вероятно, потребует увеличить напряжение на пластинах при включенной змейке.

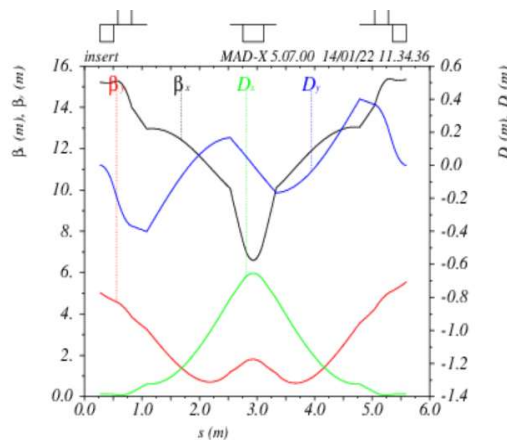


Рис.4. Нормализованные огибающие пучка и дисперсионные функции на участке вставки ($L_{total} = 532$ см).

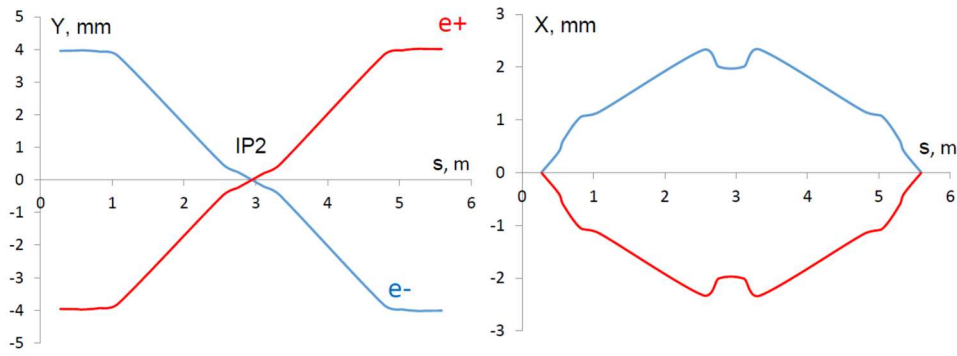


Рис. 5. Электростатическое разведение орбит на участке вставки. Исходное разведение происходит по вертикали с амплитудой 4 мм.

Сумма интегралов продольного поля на оси соленоидов задается требованием на угол поворота спина 180° и равна $2B_{1/2}\sqrt{4r^2 + h^2}(1 + a) = \pi B\rho$. Здесь $B\rho$ - магнитная жесткость; r и h внутренний радиус и длина катушки каждого соленоида соответственно; $B_{1/2} = \frac{1}{2} \frac{\pi B\rho}{(1+a)\sqrt{4r^2+h^2}}$ - величина продольного поля B_s в центре соленоида. С использованием этих данных рассчитано распределение в соленоидах поперечных полей, появляющихся при наличии разведения орбит (x и y - отклонения орбиты от оси соленоида):

$$B_y \approx -\frac{y}{2} \frac{dB_s}{ds} + B_s \frac{dx}{ds},$$

$$B_x \approx -\frac{x}{2} \frac{dB_s}{ds} + B_s \frac{dy}{ds}.$$

Результаты расчета с помощью MADX влияния этих полей на эмиттансы пучка с учетом и без учета многократного внутрисгусткового рассеяния (IBS) в сравнении со случаем отсутствия разведения приведены в Таб.3.

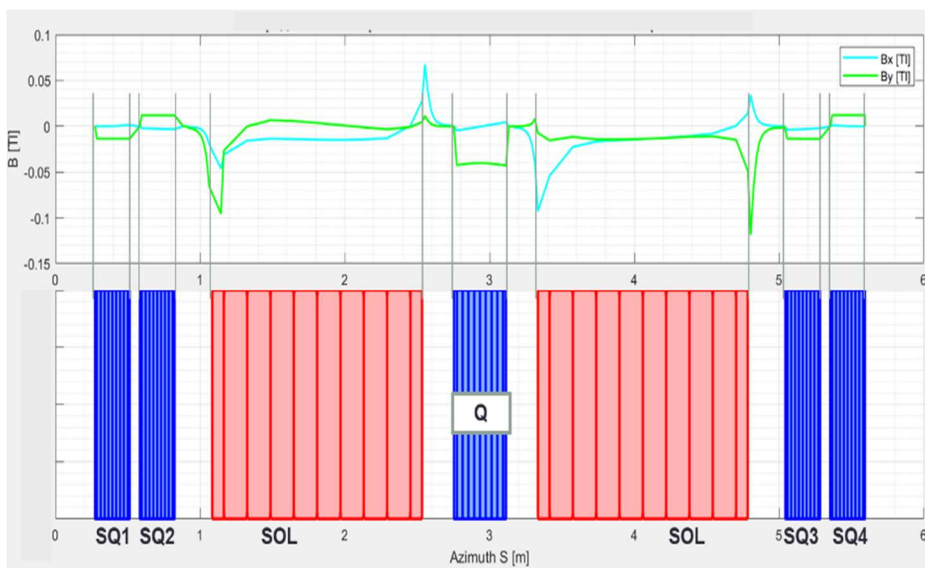


Рис.6. Распределение поперечных полей (в единицах Тл) вдоль оси соленоидов змейки.

Таблица 3. Эмиттансы и разброс энергии с учетом и без учета IBS и разведения орбит, E=1548 МэВ

	С учетом IBS, I=10 мА		Без учета IBS	
	Без разведения	С разведением	Без разведения	С разведением
ϵ_x [м]	$3.3 \cdot 10^{-8}$	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$1.8 \cdot 10^{-8}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$
ϵ_y [м]	$2.7 \cdot 10^{-10}$	$2.9 \cdot 10^{-10}$	$1.6 \cdot 10^{-14}$	$8.8 \cdot 10^{-12}$
σ_E/E	0.00034	0.00036	0.00025	0.00027

В дальнейшем потребуется количественный анализ влияния поперечных полей в соленоиде на радиационную кинетику продольной поляризации, как это было сделано в [1] в отношении бетатронных колебаний, возбуждаемых квантовыми флуктуациями в поворотных магнитах.

4. Программа -минимум

Предлагается реализовать метод получения продольной поляризации в электрон-позитронном коллайдере с инъекцией поляризованного пучка из бустера ВЭПП-3 на энергии 1548 МэВ. Этапы программы-минимум:

- проектирование и изготовление двух SC соленоидов с интегралом не менее 145 см × 5.6 Тл, 5-ти “теплых” квадрупольей (4 повернутых на 45°, одной нормальной, с градиентами не менее 3 кГс/см) и вакуумной камеры вставки;
- разработка или подбор источников питания соленоидов и линз;
- монтаж вставки в центре технического промежутка;
- изготовление импульсного соленоида с интегралом поля не менее 5 Т·м (источником послужит один из ГИМНов, оставшихся после закрытия установки Позитрон) и его размещение в канале инъекции между магнитами M₃ и M₄ (Рис.1), а в дополнение перенести туда же имеющийся соленоид F3 (5 Т·м) для получения требуемого в сумме на 1548 МэВ интеграла 9.1 Т·м;
- проведение эксперимента по получению продольной поляризации электронов со спиральностью двух знаков ($S_n = -0.97$ и $S_n = +0.65$);
- изучение факторов влияния на время жизни продольной поляризации (энергия, бетатронные колебания, искажения орбиты, встречный пучок);
- изучение возможности применения имеющихся на ВЭПП-4М комптоновского поляриметра и системы регистрации рассеянных электронов для измерения степени продольной поляризации в сочетании с Тушековским поляриметром [11,18].

5. Адиабатическая трансформация поперечной поляризации в продольную

Существует интересная возможность [9] получить продольную поляризации еще до постановки специальной Сибирской змейки на коллайдер. Она заключается в адиабатической трансформации поперечной поляризации в продольную при полностью декомпенсированном поле КЕДР. Это позволило бы предварительно изучить особенности наблюдения продольной поляризации лазерным поляриметром в сочетании с системой рассеянных электронов ВЭПП-4М в режиме периодической смены знака циркулярной поляризации лазерных фотонов.

Сценарий такого эксперимента, по сути дополнительного к основной программе продольной поляризации, может выглядеть следующим образом. Инжекция поляризованного пучка из ВЭПП-3 происходит на энергии 1500 МэВ и не требует дополнительных манипуляций в отношении кинематики спина в канале ВЭПП-3-ВЭПП-4М. Используя 0.6 Т поле соленоида КЕДР с эффективной длиной 3.3 метра как частичную Сибирскую змейку (анти-соленоиды выключаются после инъекции, бетатронная связь, вносимая полем детектора, компенсируется двумя повернутыми квадрупольями [19]), необходимо адиабатически медленно понизить энергию в ВЭПП-4М до значения 1320 МэВ (целый спиновый резонанс $\nu = 3$). В силу особенностей кинематики спина в накопителе со вставкой в виде соленоида появляется сдвиг частоты прецессии от значения, определяемого вертикальным ведущем полем, из-за чего на энергии 1320 МэВ она не становится кратной частоте обращения (Рис.7). При этом поляризация частиц на азимуте размещения соленоида, в данном случае в детекторе КЕДР, приобретет строго продольное направление независимо от интеграла поля в нем. Например, такая же конфигурация возникала на короткое время в момент адиабатического пересечения целых спиновых резонансов с применением частичной Сибирской змейки в экспериментах [20,21]. Еще один пример – создание подобных условий, но уже без участия продольных магнитных полей, а с использованием радиальных дипольных корректоров на накопителе ELSA [22].

Время радиационной релаксации спина τ_p на энергии 1320 МэВ составляет около 400 часов. Поэтому, несмотря на сильную спин-орбитальную связь (из-за продольного поля детектора КЕДР), расчетное время жизни продольной поляризации будет не таким уж и малым – примерно 20 минут. Эта оценка следует из соотношения времен деполяризации на целом спиновом резонансе $\nu = k$ для полной и частичной Сибирских змеек [20].

$$\frac{\tau_d(\pi)}{\tau_d(\alpha)} \approx \frac{12}{\alpha^2}$$

где π и $\alpha \ll 1$ соответствующие углы поворота спина вокруг вектора скорости. Угол поворота спина в поле КЕДР на энергии 1320 МэВ равен $\alpha = 0.454$ rad. Время деполяризации в случае полной Сибирской змейки $\tau_d(\pi) \approx (54/11) \cdot \tau_p / (\pi^2 \nu^2) \approx 22$ часа и, следовательно, $\tau_d(\alpha) \sim 20$ минут. Можно

попытаться за это время произвести наблюдение продольной поляризации с помощью лазерного поляриметра и регистрации рассеянных электронов в режиме периодической смены знака циркулярной поляризации лазерных фотонов.

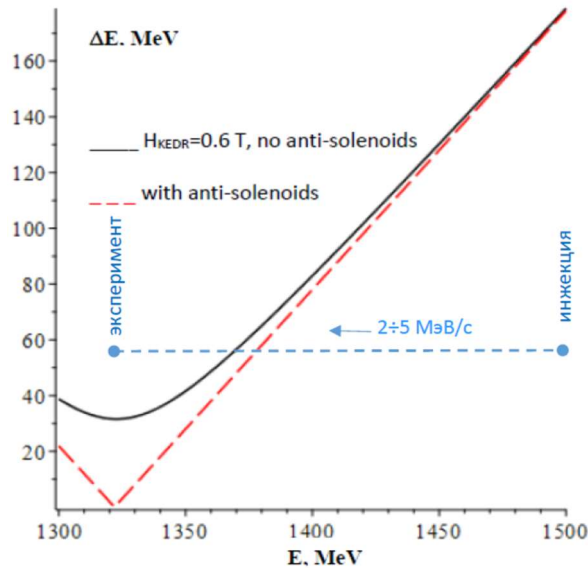


Рис. 7. Отстройка от резонанса $\nu=3$ как функция энергии

Сам факт наличия поляризации в пучке в создаваемых необычных условиях предполагается контролировать еще одним способом - с помощью Тушековского поляриметра и резонансной деполяризации [18]. Например, скорость естественной деполяризации за счет квантовых флуктуаций можно будет измерять, наблюдая изменение скорости счета тушековских электронов поляризованного сгустка по отношению к неполяризованному. При резонансной деполяризации по величине скачка в относительной скорости рассеянных частиц в указанных сгустках можно будет оценить степень поляризации. Разумеется, о продольной ориентации поляризации в соленоиде КЕДРа можно будет судить косвенным образом, т.к. данный метод не чувствителен к направлению спина относительно координатных осей ускорителя.

В интервале 1500-1320 МэВ нет опасного т.н. “intrinsic” спинового резонанса $\gamma a \pm \nu_y = k$ ($\nu_y = 8.58$ частота вертикальных бетатронных колебаний), что сильно облегчает задачу сохранения поляризации при понижении энергии. Возможность безопасного пересечения спиновых резонансов со скоростью 10-20 МэВ/с при декомпенсации поля КЕДР ранее продемонстрирована в экспериментах [20,23].

Благодарности

Авторы выражают признательность А.В. Богомягкову и С.В. Синяткину за важные замечания и техническую помощь в выполнении работы по оптимизации оптики ВЭПП-4М; И.Б. Николаеву и В.В. Каминскому за комментарии, касающиеся возможности применения систем лазерного

поляриметра и регистрации рассеянных электронов ВЭПП-4М для наблюдения продольной поляризации.

Литература

1. С.А. Никитин, Е.Л. Салдин. Препринт ИЯФ 81-19, 1981.
2. Я.С. Дербенев, А.М. Кондратенко. Препринт ИЯФ 72-68, 1972; ЖЭТФ, 64, 1918 (1973).
3. Я.С. Дербенев, А.М. Кондратенко. Препринт ИЯФ 76-112, 1976; Ya.S.Derbenev et al., Part. Accel. 8, 115 (1978).
4. А.А. Соколов, И.М. Тернов. ДАН СССР (1963), т. 153, №5, с. 1052-1054.
5. Super Charm–Tau Factory. Conceptual Design Report. Novosibirsk, 2011.
6. W. Xia, Z. Duan, J. Gao and Y. Wang. Investigation of spin rotators in CEPC at the Z-pole. Radiat. Detect. Technol. Methods 6, 490 (2022).
7. T. Zwart et al., DOI: 10.1109/PAC.2001.988190
8. H.R. Poolman et al., Phys.Rev.Lett. 84 (2000) 3855-3858.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.3855
9. Sergei Nikitin. Possible beam studies at VEPP-4M. Presentation at EU Horizon 2020 “Future Circular Collider Innovation Study”, 10 November 2020.
10. V.E.Blinov et al, Status of laser polarimeter at VEPP-4M. 2020 JINST 15 C08024
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/08/C08024>
DOI 10.1088/1748-0221/15/08/C08024
11. V.S.Bobrovnikov et al, The energy calibration system of the KEDR tagger. 2020 JINST 15 C08024
DOI 10.1088/1748-0221/9/10/C10017
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/9/10/C10017/pdf>
12. V.E. Blinov et al., Nuclear and Particle Physics Proceedings NPPP275, S2405-6014(15)00517-910. 1016/j.nuclphysbps.2015.09.028
13. S.A. Nikitin. NIMA 378 (1996) 495-498. DOI: 10.1016/0168-9002(96)00529-3
14. О.П. Гордеев и др. Препринт ИЯФ 83-110, 1983.
15. Я.С. Дербенев, А.М. Кондратенко. Препринт ИЯФ 78-74, 1978.
16. А.А. Жоленц, В.Н. Литвиненко. Препринт ИЯФ 81-80, 1981.
17. Я.С. Дербенев и др. Препринт ИЯФ 83-93, 1983.
18. V.E. Blinov et al., NIMA 598 (2009) 23.
19. С.А. Никитин, И.Я. Протопопов. Препринт ИЯФ 99-44 (1999).
<https://www.inp.nsk.su/publications>
20. А.К. Barladyan et al., DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.112804, November 2019.
21. L. Barkov et al., JETP Lett. 46, 164 (1987).
22. O. Boldt et al., Proceedings of IPAC 2012, TUPPC067, 1326-1328.
<https://accelconf.web.cern.ch/ipac2012/papers/tuppc067.pdf>
23. А. Н. Журавлев и др., Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, No 7(232). С. 876–893.

Д.В. Дорохова, Е.Б. Левичев, С.А. Никитин

**ПРОГРАММА ВОЗМОЖНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ
ПРОДОЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ВЭПП-4М**

Препринт ИЯФ 2023-05

Ответственный за выпуск М.В.Кузин

Работа поступила 22.11.2023 г.

Сдано в набор 24.11.2023 г.

Подписано в печать 24.11.2023 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1печ.л.,
1.2 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 16

Обработано на РС и отпечатано на
ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11