

Приложение к отчёту за 2017 год по проекту
РФФИ № 17-02-00493

*«Лазерный поляриметр для измерения
энергии пучка ВЭПП-4М методом
резонансной деполяризации»*

Николаев И.Б.

13 июня 2018 г.

Содержание

1	Введение	2
2	Заявленные цели Проекта на 2017 год	5
3	Полученные за 2017 год результаты	5
3.1	Детектор фотонов	5
3.2	Система сбора данных	8
3.3	Оптическая система	9
3.4	Калибровка энергии	14
4	Задачи на 2018 год	16
5	Ожидаемые в конце 2018 года результаты	18
6	Заключение	18

Аннотация

Проект направлен на создание лазерного поляриметра для калибровки энергии электронного пучка ВЭПП-4М методом резонансной деполяризации

в будущих экспериментах по прецизионному измерению масс и лептонных ширин Υ -мезонов с детектором КЕДР.

В 2017 году были выполнены следующие работы.

1. Спроектирован и изготовлен новый детектор на основе тройного ГЭУ. Проведены испытания с тестовыми платами электроники. Для нового детектора разработана электроника, закуплены комплектующие. Изготовлены 24 гибридные электронные платы. В настоящее время ведётся монтаж двух тестовых образцов.

2. Ведётся работа над системой сбора данных и управления процессом измерения энергии. Написан сервер и клиент для управления деполяризатором. Написан новый алгоритм реконструкции многофотонных событий. Написан прототип системы сбора данных. Начата работа над графическим пользовательским интерфейсом.

3. Закуплен и введен в эксплуатацию новый лазер со средней мощностью 2 Вт, разработана и изготовлена новая система запуска лазера и управления поляризацией, позволяющая менять поляризацию на каждый импульс лазера. Произведена замена вакуумных зеркал для ввода лазерного излучения в вакуумную камеру, в результате интенсивность комптоновского рассеяния выросла в два раза.

4. Выполнена калибровка энергии пучка на энергии 4 ГэВ.

1 Введение

Эксперименты с детектором КЕДР на ВЭПП-4М требуют измерение энергии пучка. Самым точным методом калибровки энергии релятивистских пучков в накопительных кольцах является метод резонансной деполяризации [1]. На энергии до 2 ГэВ для измерения поляризации используется тушековский поляриметр [2]. Физическая программа детектора КЕДР подразумевает работу на энергии свыше 2 ГэВ для измерения величины R , прецизионного определения параметров Υ резонансов, а также для двухфотонной физики.

На низкой энергии, т.е. в области энергии пси-мезонов, на ускорителе ВЭПП-4М поляризация определяется [2] по интенсивности внутрисгусткового рассеяния (эффект Тушека [3]). Однако сечение внутрисгусткового процесса быстро падает с ростом энергии [4; 5]. Поэтому потребуется другой способ. Для измерения поляризации пучка планируется использовать метод обратного комптоновского рассеяния. Этот метод был предложен в работе [6] и впервые использовался в [7]. Метод основан на асимметрии рассеяния циркулярно поляризованного лазерного излучения на вертикально поляризованном релятивистском пучке (рис. 1).

Величина асимметрии, определяемая как разница рассеянных в верхнюю и нижнюю полусферу фотонов к полному числу рассеянных фотонов. На

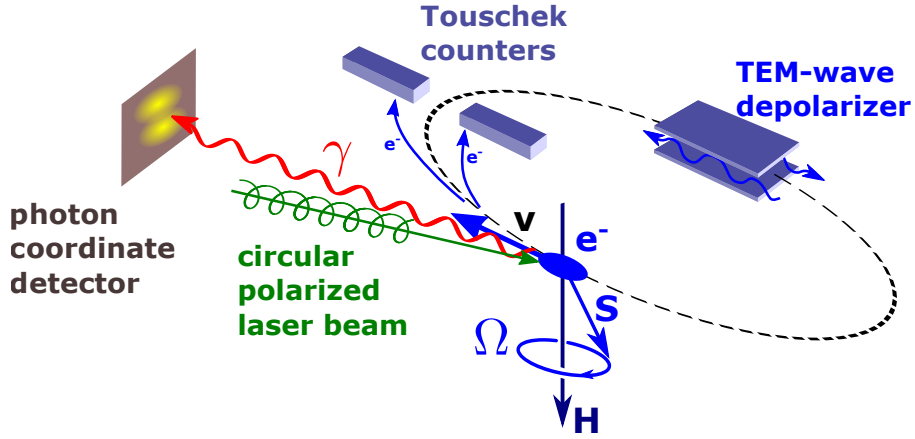


Рис. 1: Вертикально поляризованный электронный пучок деполаризуется ТЕМ-волной. Поляризация измеряется по интенсивности внутрисгусткового рассеяния (эффект Тушека) или по верх-низ асимметрии обратного комптоновского рассеяния циркулярно поляризованных лазерных фотонов

практике удобно использовать разницу между средними вертикальными координатами y рассеявшихся фотонов в детекторе для левой и правой поляризации лазера:

$$\Delta\langle y \rangle = \frac{\hbar\omega_0}{2m_e c^2} LP\Delta V \approx 0.1 \text{ мм}, \quad (1)$$

где ω_0 — энергия лазерного фотона, m_e — масса электрона, P — вертикальная поляризация электронного пучка, ΔV — разница параметров Стокса циркулярной поляризации лазерного пучка, L — расстояние от области рассеяния до места детектирования. Для нашей установки величина составляет около 0.1 мм.

Лазерное излучение при помощи системы управляемых подвижных зеркал вводится через оптические окна внутрь вакуумной камеры ускорителя. Место встречи фотонов с электронами должно находиться в прямолинейном промежутке около квадрупольных линз (рис. 2), где минимален вертикальный разброс импульсов в пучке. Фокусировка осуществляется при помощи моторизованного экспандера лазерного излучения. Характеристики оптического тракта (апертура зеркал, вакуумных окон и экспандера) оказались таковы, что удобнее фокусироваться на ближних линзах. В нашем случае, собственное разрешение координатного детектора фотонов меньше 1 мм, размеры пятна рассеявшихся фотонов в детекторе около 5 мм. Поэтому уменьшение длины пролёта рассеявшихся фотонов не ухудшает точности измерения поляризации.

Для исключения систематической погрешности, связанной с движением

орбиты пучка измерения осуществляется для двух (левой и правой) циркулярных поляризаций лазерного излучения.

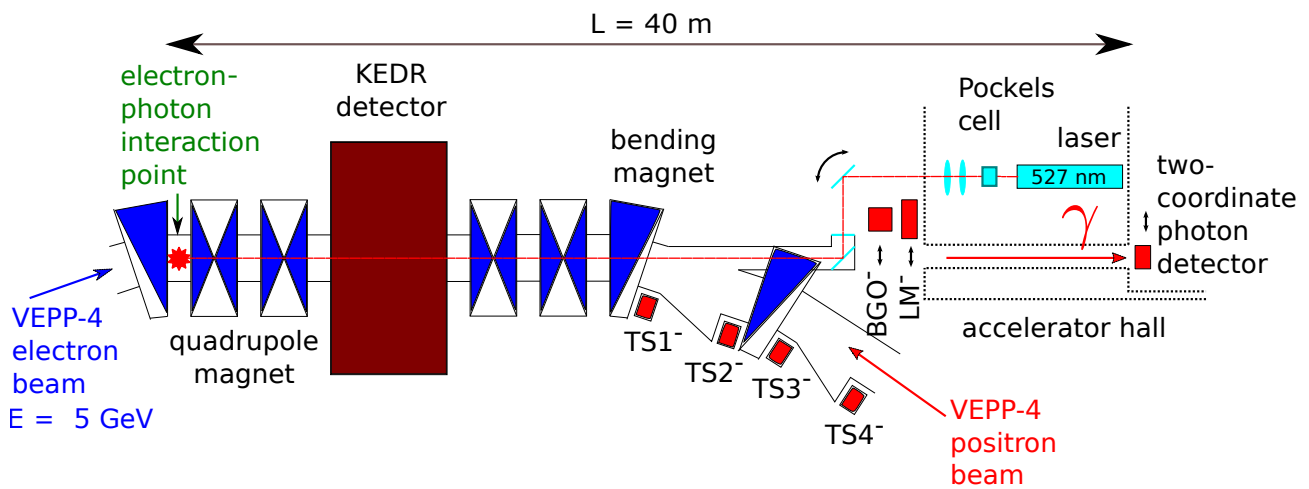


Рис. 2: Схема установки. Место встречи фотонов и электронов расположено около квадрупольных линз. Двухкоординатный детектор фотонов располагается на расстоянии 40 м и 30 м от места встречи.

Регистрация рассеянных фотонов осуществляется при помощи двухкоординатного детектора на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ) [8]. Рассеянные обратно фотоны с энергией до 800 МэВ конвертируются в электроны и позитроны в свинцовой пластине толщиной 12 мм. Координаты заряженных частиц определяются при помощи двухкоординатного детектора на основе ГЭУ. Принципиальная схема детектора изображена на рис. 3.

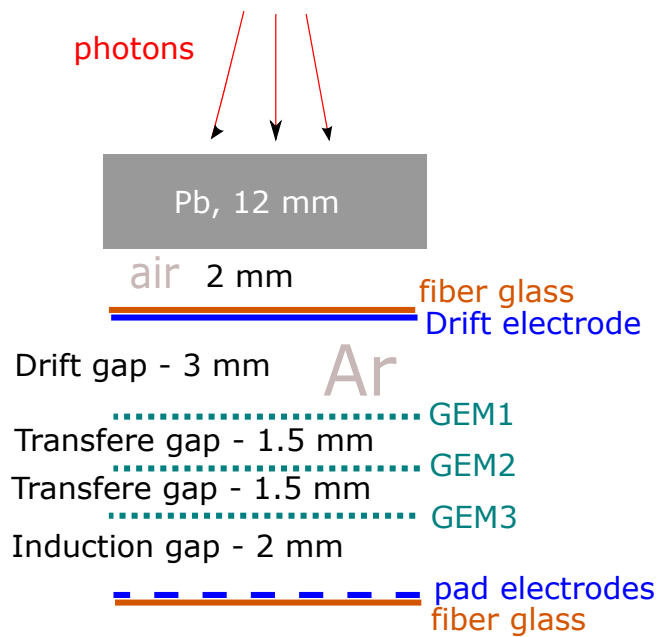


Рис. 3: Схема двухкоординатного детектора на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ).

2 Заявленные цели Проекта на 2017 год

- Спроектировать и изготовить двухкоординатный детектор фотонов.
- Создать систему сбора данных и соответствующее программное обеспечение.
- Настроить оптическое оборудование, обеспечивающее столкновение поляризованного лазерного излучения с электронным пучком.
- Измерить процесс радиационной поляризации на высокой энергии 4-5 ГэВ. Выполнить калибровку энергии.

3 Полученные за 2017 год результаты

3.1 Детектор фотонов

Для текущих экспериментов использовался детектор от эксперимента ДЕЙТРОН [9]. Детектор имеет 160×40 мм чувствительную область с пространственным разрешением 300 мкм. Рассеянные гамма-кванты конвертируются в свинцовой пластине толщиной 12 мм $\approx 2X_0$, что является оптимальным значением. Вероятность конверсии составляет около 50%. Эффективность реги-

страции детектора $\approx 70 \div 80\%$. Детектор может работать с частотой запуска до 2 кГц, при возможностях лазера — 4 кГц. В связи с этим, необходим новый детектор. В 2017 году было сделано следующее.

1. Улучшено Монте-Карло моделирование системы. В геометрию на пути рассеянных гамма квантов добавлены: стеклянное зеркало толщиной 4 мм внутри вакуумной камеры ВЭПП-4М, стенка вакуумной камеры из нержавеющей стали толщиной 0.5 мм, слой воздуха толщиной ≈ 20 м. Геометрия и материалы системы, теперь настраиваются из файла сценария без пересборки исходного кода программы, что позволяет быстро делать моделирование для разных конфигураций системы. На рис. 1 изображен результат моделирования для разных расстояний от конвертера фотонов до детектора. Ухудшение разрешения системы $\approx 0.5\%/мм$. Таким образом, конвертер можно располагать на расстоянии до 5 мм от детектора без существенной потери эффекта. Был под-

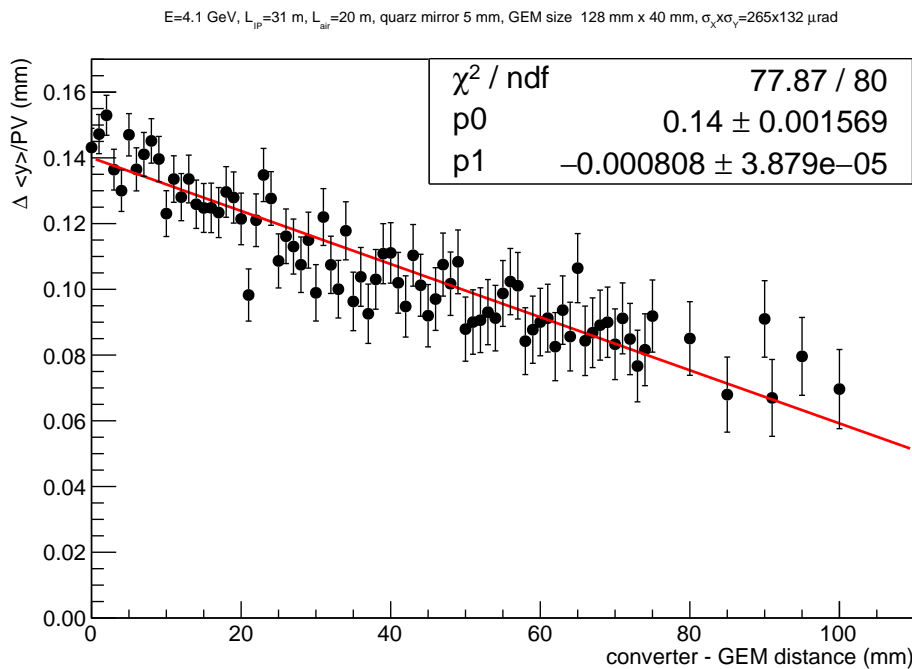


Рис. 4: Моделирование величины эффекта в зависимости от расстояния между свинцовым конвертером и детектором

тверждён результат старого моделирования (без воздуха, зеркала, стенок), в котором определено оптимальная толщина свинцовой пластины 12 мм (рис. 5).

2. Для нового детектора разработана электроника, закуплены комплек-

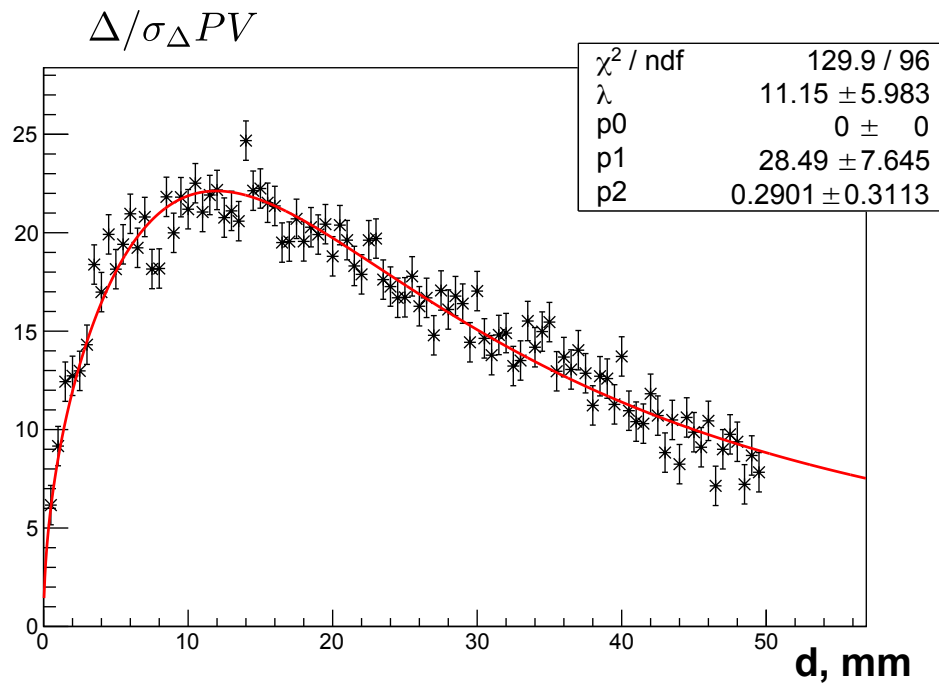


Рис. 5: Монте-Карло моделирование отношения величины эффекта к статистической ошибке. Максимум достигается при 12 мм свинца

тующие. Изготовлены 24 гибридных плат. В настоящее время ведётся монтаж двух плат для тестирования.

3. Разработан и изготовлен новый детектор на основе тройного ГЭУ. Детектор выполнен по новой разборной технологии (рис. 6). Проведены испытания с тестовыми платами электроники.

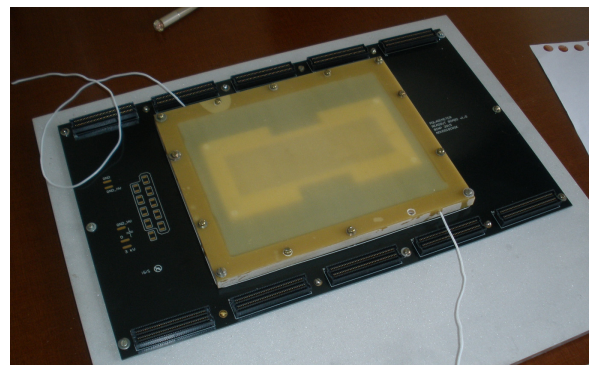
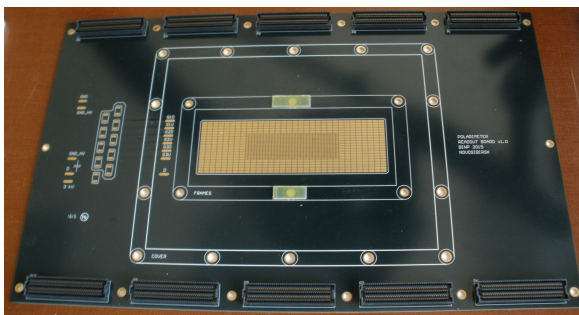


Рис. 6: Плата со считывающей структурой (слева). Детектор в сборе (справа)

3.2 Система сбора данных

Для первых экспериментов была написана простая система сбора и обработки данных на основе исходного кода для детектора эксперимента ДЕЙТРОН. Сигнал от светодиода при прохождении лазерного импульса использовался в качестве триггера. Оцифрованные величины зарядов с прямых и наклонных полосок детектора отправлялись на компьютер по сети Ethernet. Каждое событие помечалось состоянием поляризации, выдаваемой системой запуска лазера БЗЛ-1 (см. следующий раздел). Сырые данные детектора реконструировались двумя способами.

- Была написана одотрековая реконструкция, когда из прямых и наклонных полосок выбираются полоски с максимальным зарядом. При больших нагрузках, когда множественность зарегистрированных фотонов больше или порядка единицы такая реконструкция приводит к потере статистики. Данная реконструкция использовалась для наблюдения поляризации непосредственно во время эксперимента.
- В связи с этим, была написана реконструкция на основе центра тяжести. Для прямых и наклонных полосок детектора по отдельности вычислялся центр тяжести распределения. Затем вертикальная координата вычислялась как разница между этим двумя значениями. Данный тип реконструкции использовался “оффлайн” для получения оконча-

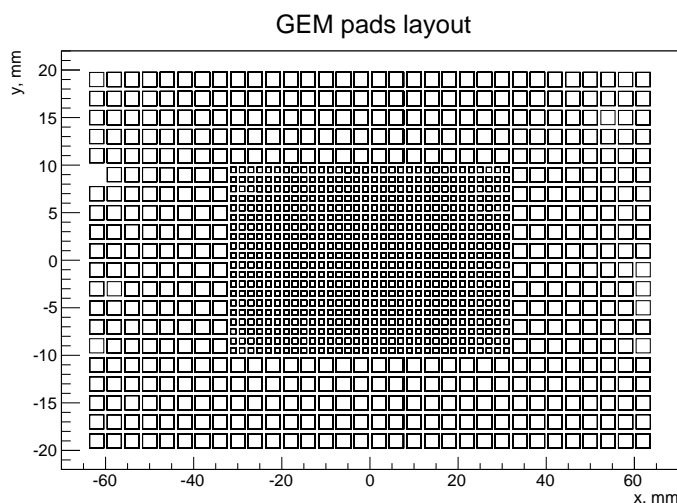


Рис. 7: Геометрия чувствительных анодных электродов детектора. Центральная область имеет размер $64 \times 20 \text{ мм}^2$ с электродами размером $2 \times 1 \text{ мм}^2$. Остальные электроды имеют размер $4 \times 2 \text{ мм}^2$.

тельного результата.

Реконструированные данные накапливались в виде файлов на компьютере и далее обрабатывались следующим способом: события с левой и правой циркулярной поляризацией лазера накапливались в соответствующие гistogramмы. Для них вычислялось среднее значение, ошибка среднего и, наконец, разница средних значений, что и является искомым эффектом.

Оборудование для деполяризации пучка заимствуется из тушековского поляриметра. В связи с этим из исходного кода тушековского поляриметра выделен код для управления деполяризатором, который оформлен в виде сетевого сервиса для удобства совместного использования как старым (тушековским) поляриметром так и новым лазерным.

Таким образом программная часть системы управления и сбора данных лазерного поляриметра будет состоять из сетевых служб, что облегчит легкость при модернизации оборудования. Начата работа над графическим интерфейсом пользователя, который написан на языке Python с использованием библиотеки PyQt. Написан первый прототип, осуществляющий мониторинг в виде графика текущего значения асимметрии комптоновского рассеяния.

3.3 Оптическая система

Оптическая подсистема лазерного поляриметра в значительной мере пересекается с оптической частью установки по калибровке системы регистрации рассеянных электронов. В существующей системе был заменён зелёный лазер и добавлена возможность управления поляризацией этого лазера. В этом году было сделано следующее:

1. Для увеличения интенсивности лазерного излучения в месте встречи с электронным сгустком была произведена замена вакуумных зеркал для ввода лазерного излучения в вакуумную камеру как с электронной так и с позитронного направления. В результате количество рассеянных фотонов увеличилось в два раза и с 300 Гц/мА до 600 Гц/мА.
2. Вместо имеющегося лазера с энергией импульса 200 мкДж был введён в эксплуатацию новый лазер ТЕСН-527 Advanced производства НПО «Лазер-Компакт» с энергией импульса 500 мкДж длиной волны 527 нм с частотой повторения импульсов до 4 кГц (Рис. 9). Количество рассеянных фотонов на частоте работы 2 кГц составляет 3 кГц/мА. С использованием нового детектора, который может работать на частоте 2 кГц ожидается увеличение числа рассеянных фотонов до 6 кГц/мА. Вес-



Рис. 8: Лазер ТЕСН-527 с максимальной средней мощностью 2 Вт

ной 2017 г. лазер возвращался на гарантийный ремонт производителю для доработки системы запуска. Для попадания в пучок нам требуется синхронизация момента выстрела лазера с пролётом пучка, так чтобы они встречались в требуемом месте встречи с точностью лучше 5 нс. Производитель переделал систему запуска переводя её в режим синхронизации по заднему фронту импульса накачки. В связи с этим, нам потребовалось переделать свою часть системы запуска лазера, что и было сделано.

3. Для нового лазера разработана и изготовлена система запуска и управления поляризацией (БЗЛ-1), которая переключает поляризацию на каждую вспышку лазера при помощи ячейки Поккельса, а не один раз в секунду, как в ранее. Блок запуска лазера принимает на вход синхроимпульсы пролёта пучка (признак нулевой сепаратрисы 2 кГц), генерирует импульс накачки лазера длительность 215 мкс, импульс включения ячейки Поккельса и признак поляризации для детектора. При этом имеется возможность изменять количество импульсов после которого происходит смена поляризации 1-16.
4. Создана новая система управления поляризацией (рис. 10). Для этого приобретена новая KDP ячейка Поккельса фирмы Thorlabs Inc. с полуволновым напряжением 3.5 кВ, а также драйвер ячейки Поккельса DPB-10-4.2S фирмы Eksma Optics. Линейная поляризация лазера при помощи $\lambda/4$ фазовой пластинки преобразуется в циркулярную. В нужный момент на драйвер ячейки Поккельса подается импульс дли-

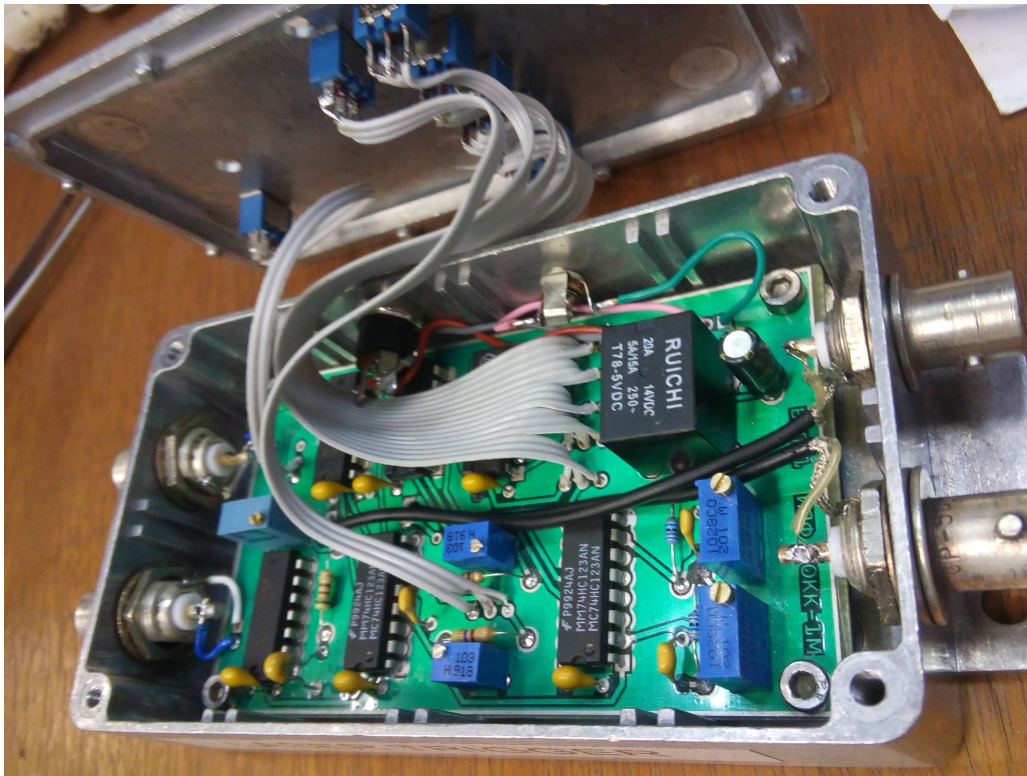


Рис. 9: Блок запуска лазера и управления поляризацией

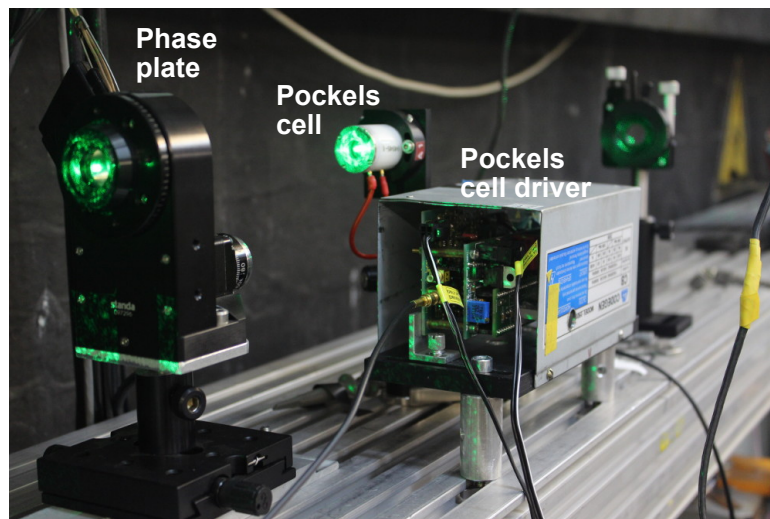


Рис. 10: Моторизированная вращающаяся $\lambda/4$ фазовая пластика (phase plate), ячейка Погкельса (Pockels cell), драйвер ячейки Погкельса (Pockels cell driver).

тельностью 1 мкс. Драйвер формирует полуволновое высоковольтное напряжение на ячейке Погкельса. Таким образом поляризация лазерного пучка изменяется от одной циркулярной к другой циркулярной.

5. Система управления лазерного поляриметра в значительной мере пересекается с установкой по лазерной калибровке системы регистрации рассеянных электронов (СРРЭ) детектора КЕДР. Из-за низкой надёжности БЗЛ-1 начата работа над следующей версией блока запуска лазера. Система управления должна решать следующие задачи (Рис. 5)

- Выработка сигналов на запуск 3 лазеров из сигнала синхронизации пучка ВЭПП-4
 - (а) лазер 527 нм на электронной стороне, длительность импульса накачки 200 мкс, синхронизация происходит по заднему фронту импульса.
 - (б) лазер 1064 нм на электронной стороне, длительность импульса 100 нс, синхронизация по переднему фронту.
 - (с) трехчастотный лазер (1064, 527, 263 нм), длительность импульса 100 нс, синхронизация по переднему фронту.

Для каждого из режимов работы должны быть подобраны соответствующие задержки чтобы попадать в пучок.

- Включение драйвера ячейки Поккельса для управления поляризации лазера. Переключение должно осуществляться в различных режимах, в том числе и случайным чередованием левой и правой поляризации.
- Регистрация факта генерации лазерного импульса.
- Выработка сигнала триггера для координатного детектора регистрации рассеянных фотонов на основе ГЭУ.
- Регистрация (счёт и амплитуду) сигнала со счётчика системы рассеянных электронов TS4-, TS4+.
- Выработка сигналов для триггера СРРЭ.
- Измерение амплитуды сигнала для системы измерения циркулярной поляризации.
- Систему блокировки работы лазера при отсутствии сигнала синхронизации с пучком.

Для этого было решено использовать схему на основе программируемых пользователем вентильных матриц (FPGA) из-за легкости реализации с их помощью сложной логики и внесения новых изменений в схему. Созданный код можно адаптировать для различных плат в том числе

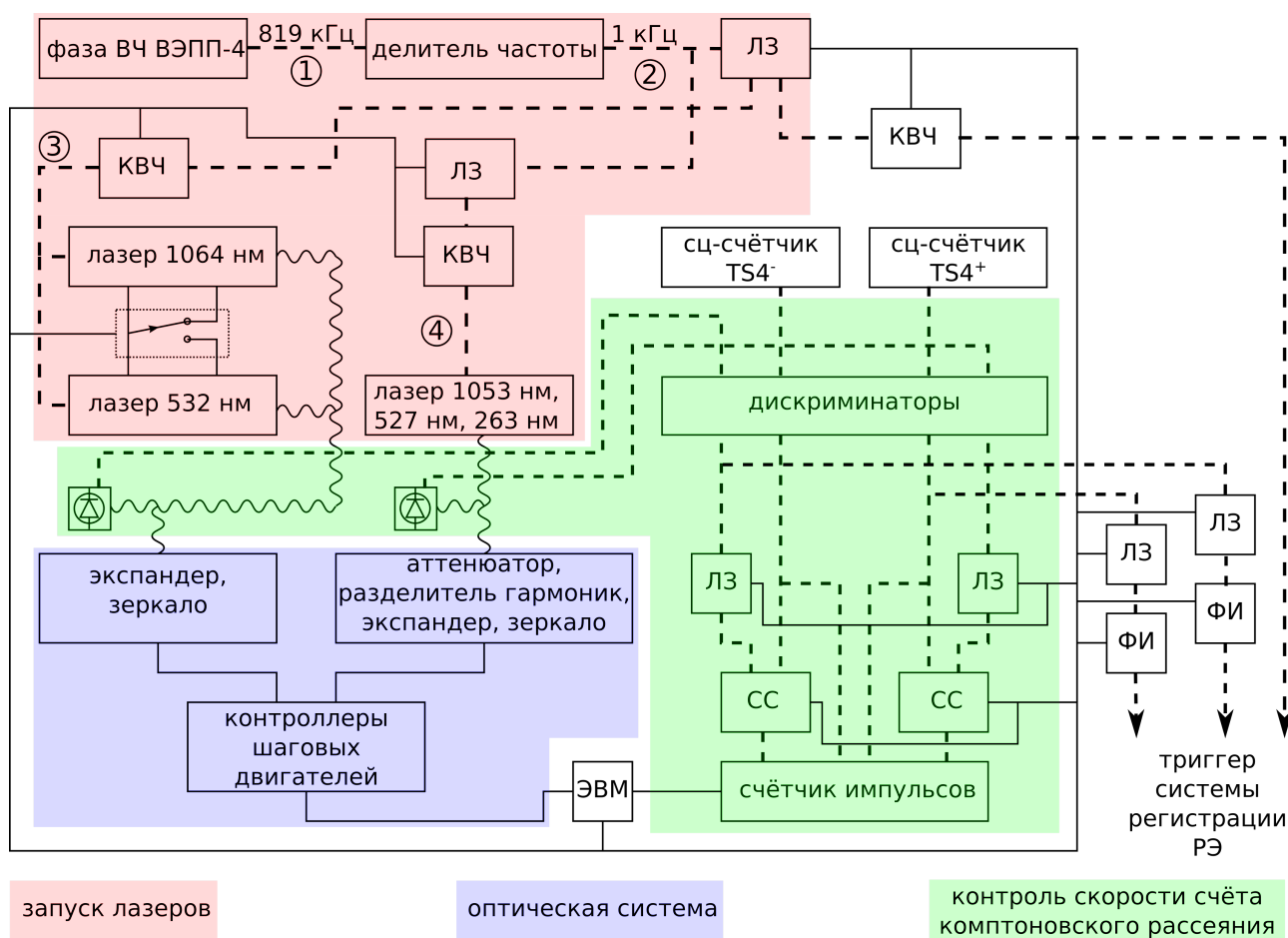


Рис. 11: Принципиальная схема управления лазерным поляриметром и системой калибровки СРРЭ

и для желаемой модернизации системы с КАМАКа на VME. Бала приобретена плата DE10-Nano Kit с FPGA Cyclon V, оснащённая Dual-core ARM Cortex-A9 с установленной ОС Linux, а также рядом периферийных устройств, что должно упростить создание системы. Разработка велась в САПР Quartus 17.1 с использованием языка описания и верификации аппаратуры SystemVerilog. Был создан прототип программы, получены сигналы, характеристиками которых можно управлять.

Осциллограмма сигналов для управления поляризацией показана на рисунке 5

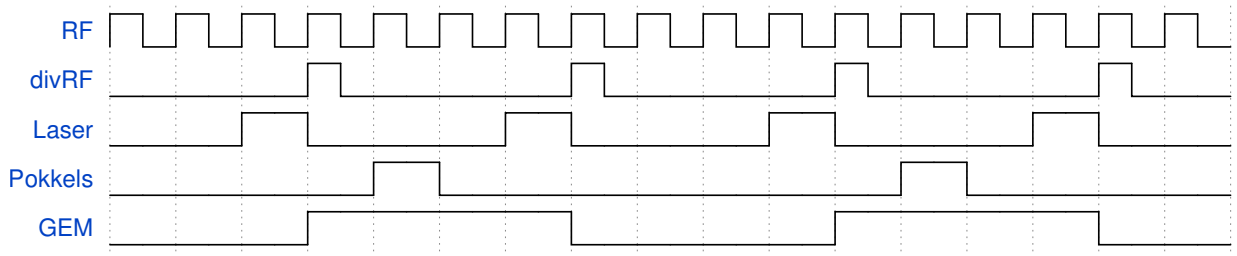


Рис. 12: Временная диаграмма для лазерного поляриметра. RF — сигнал синхронизации с пучком, divRF — импульсы запуска лазера, Laser — импульсы накачки лазера, Pokkels — импульсы управления высоковольтным напряжением на ячейке Поккельса, GEM — признак поляризации для каждого события в координатном детекторе фотонов.

3.4 Калибровка энергии

Проведены первые калибровки энергии при помощи лазерного поляриметра с использованием детектора от эксперимента ДЕЙТРОН [9]. Первые калибровки энергии были выполнены ещё со старым лазером, когда с новым лазером возникли сложности с системой запуска. Измерения проводились на энергии 4 и 4.1 ГэВ, где идеальное расчётное время радиационной поляризации [10] составляет 80 минут. На энергии $\Upsilon(1S)$ -мезона, где время поляризации составляет 40 минут, ВЭПП-4М не мог работать из-за поломки пластин электростатического разведения в техническом промежутке. Характерные токи в этих измерения 4 — 7 мА.

Электронный пучок накапливался в ВЭПП-3, затем инжектировался на энергии 1.9 ГэВ в ВЭПП-4М. Затем пучок ускорялся до рабочей энергии 4 ГэВ. Для калибровки энергии методом резонансной деполяризации необходимо сохранить поляризацию, избежав деполяризующих спин-бетатронных резонансов. Для этого необходимо приблизительно знать энергию пучка с точностью ± 5 МэВ и соответственно подстроить рабочие бетатронные частоты. Кроме того, необходимо знать диапазон в котором следует искать энергию. Для этого ожидаемая энергия вычислялась по измеренным методом ЯМР значениям ведущего магнитного поля и калибровки на энергии $E = 1.9$ ГэВ.

Скорость счёта рассеянных фотонов в детекторе составляла 3.5 кГц (0.5 кГц/мА) или примерно 2 фотона на каждую лазерную вспышку. Поляризация лазерного пучка изменялась каждые 16 выстрелов. Измеренное значение разницы в параметре Стокса для левой и правой поляризации составляло $\Delta V = 1.87$. Максимально возможная степень поляризации электронного пучка составля-

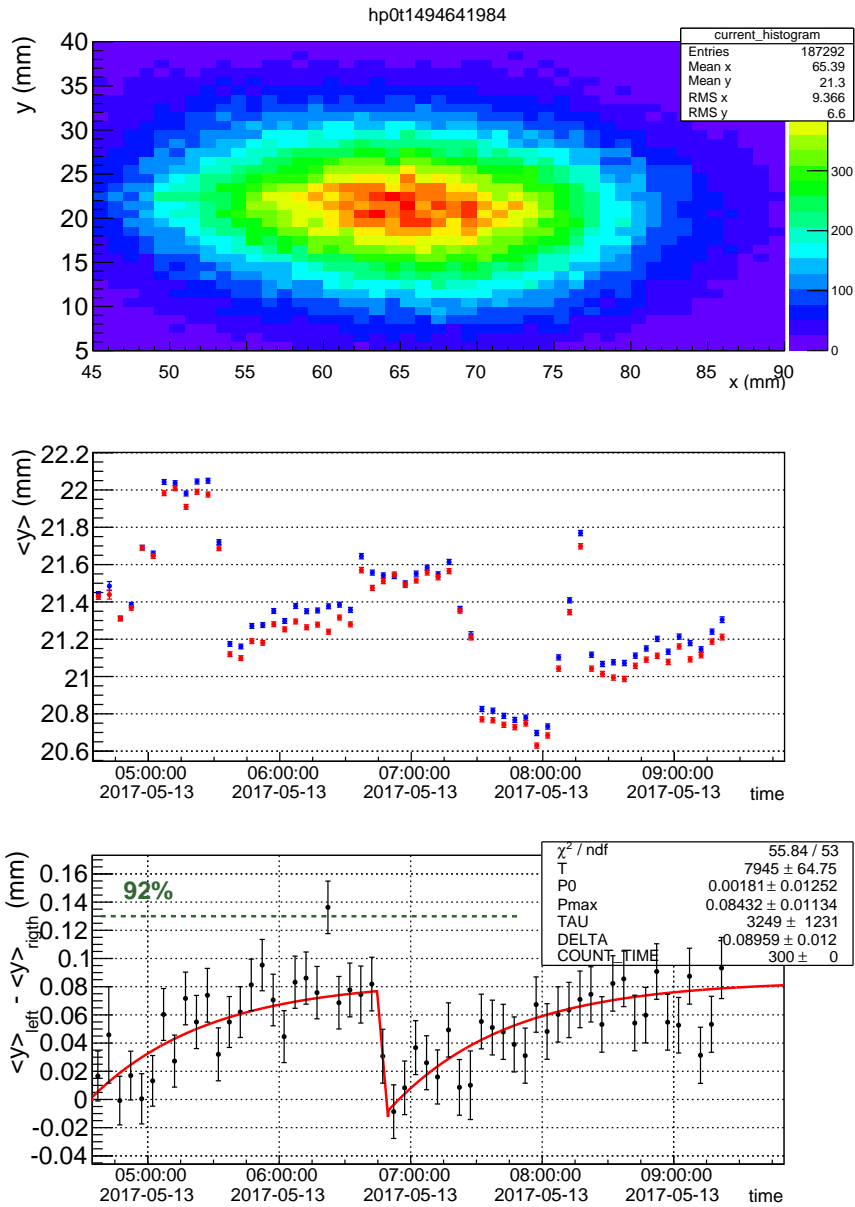


Рис. 13: Первая калибровка энергии с использованием лазерного поляриметра. На верхней картинке изображено пятно рассеянных обратно гамма квантов в детекторе. На средней картинке изображена зависимость вертикальной координаты пятна от времени. На нижней картинке показана зависимость асимметрии, выраженной в смещении среднего вертикального положения пятна для левой и правой поляризации лазера. Пунктиром помечена идеальная 92% степень поляризации.

ет 0.92, однако эта величина уменьшается из-за влияния деполяризующих резонансов кольца. На рисунке 13 изображена первая калибровка энергии. Ви-

ден процесс радиационная поляризация. После двух часов поляризации, был включен деполяризатор и выполнено сканирование по частоте вблизи ожидаемой резонансной частоты. Деполяризация осуществляется бегущей ТЕМ волной, частота которой управляется компьютером. Были использованы дополнительные пластины, находящиеся в техническом промежутке ВЭПП-4М, эффективность которых на энергии 4 ГэВ выше чем, пластин в экспериментальном промежутке, используемых до этого. Скорость сканирования составляла 18.6 Гц/с или 10 кэВ/сек в соответствующих энергетических единицах. Диапазон сканирования был от 4052.6 до 4072.6 МэВ, чтобы покрыть неопределённость энергии. Около 6:50 происходит деполяризация пучка, затем снова начинается процесс радиационной поляризации. Экспериментальные данные были подогнаны моделью с экспоненциальным законом поляризации со свободным моментом деполяризации.

Новая схема переключения поляризации на каждый выстрел лазера полностью себя оправдала. На рисунке 13 видно, что нестабильности в положении пятна ~ 1 мм не сказываются на эффекте.

Измеренный эффект составляет $\Delta\langle y \rangle = 0.084 \pm 0.01$ мм. Время радиационной поляризации 54 ± 20 минут. Соответствующая поляризация электронного пучка 60 ± 8 %. Измеренная энергия $E = 4066.41 \pm 0.65$ МэВ. Несмотря на низкую скорость счёта из-за использования маломощного лазера, измерения подтвердили возможность наблюдения поляризации при помощи лазерного поляриметра, а также возможность калибровки энергии. Полученное значение энергии соотнесено с измерениями ведущего магнитного поля методом ЯМР. Это позволяет интерполировать энергетическую шкалу ускорителя ВЭПП-4М:

$$E[\text{МэВ}] = -7.2 \pm 1.4 + (1.0417 \pm 0.0004) \cdot H[\text{Гс}]$$

в диапазоне $E = 1.9 - 4.1$ ГэВ, где в настоящее время ведётся эксперимент с детектором КЕДР по измерению величины R . В дальнейшем, уменьшая скорость сканирования и диапазон сканирования удалось измерить энергию пучка с точностью 50 кэВ.

4 Задачи на 2018 год

Целью проекта является создание прибора, позволяющего измерять энергию пучка с высокой точностью. Для этого в 2018 году необходимо решить следующие задачи:

- Детектор фотонов

1. Измерение характеристик нового детектора на основе ГЭУ, его обслуживание. (Л.Шехтман, С.Захаров).
 2. Моделирование характеристик детектора (И.Николаев, Т.Мальцев).
 3. Монтаж и создание считывающей электроники детектора (В.Кудрявцев, А.Талышев).
 4. Создание моторизированной двухкоординатной системы позиционирования детектора (И.Николаев).
- Оптическая система
 1. Поддержание работы всей оптической системы (В. Каминский, В. Ивакин)
 2. Модернизация системы измерения поляризации лазера (И. Николаев, С. Захаров)
 - Система управления оптической системой и сбором данных.
 1. Модернизация программной части управления системой фокусировки и нацеливания лазера. (В. Каминский)
 2. Проектирование и создание новой системы запуска лазера и управление поляризацией (В. Каминский, В. Ивакин, В. Кудрявцев).
 3. Создание системы сбора данных (И. Николаев, В. Ивакин, В. Кудрявцев).
 4. Создание системы управления положением детектора (И. Николаев).
 5. Создание графического пользовательского интерфейса (В. Ивакин).
 6. Интеграция с тушековским поляриметром (И. Николаев)
 7. Общая автоматизация процесса измерения поляризации и калибровки энергии (И. Николаев, В. Ивакин).
 - Эксперименты с поляризованными пучками
 1. Поляризованный пучок в ВЭПП-4М (С. Никитин)
 - (a) Расчёт поляризации электронного пучка.
 - (b) Расчёт характеристик деполяризатора, параметров сканирования.

- (с) Настройка режимов ВЭПП-4М, оптимальных для получения и сохранения поляризованного пучка.
2. Согласование работы лазерного поляриметра с детектором КЕДР (В. Блинов, И. Николаев)

5 Ожидаемые в конце 2018 года результаты

1. Ввод в эксплуатацию нового детектора на подвижной моторизированной двухкоординатной платформе.
2. Ввод в эксплуатацию новой системы запуска лазера и управления поляризацией.
3. Будет создана новая система измерения поляризации.
4. Калибровки энергии пучка ВЭПП-4М на энергии 3.5 ГэВ, 4 ГэВ, 4.5 ГэВ и, возможно, на 4.73 ГэВ (энергии рождения $\Upsilon(1S)$ мезона)

6 Заключение

Лазерный поляриметр находится в активной разработке. Выполнена первая калибровка энергии при помощи лазерного поляриметра на энергии 4 ГэВ. В дальнейших планах создать новую систему запуска лазера и управления поляризацией. Изготовить электронику нового детектора. Ввести в эксплуатацию новый детектор. Создать моторизованную систему позиционирования детектора. Автоматизировать систему управления и сбора данных лазерного поляриметра.

Список литературы

1. Метод абсолютной калибровки энергии пучков. Измерение массы Φ мезона. / А. Д. Букин, Я. С. Дербенёв [и др.] // Высокие энергии и элементарные частицы. Дубна. ОИЯИ. — 1975. — С. 138. — Труды V международного симпозиума по физике высоких энергий и элементарных частиц.
2. Absolute calibration of particle energy at VEPP-4M / V. Blinov, A. Bogomyagkov [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. — 2002. — Т. A494. — С. 81–85. — DOI: 10.1016/S0168-9002(02)01449-3.

3. Lifetime and beam size in a storage ring / C. Bernardini [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 1963. — Т. 10. — С. 407–409. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.10.407.
4. *Никитин С., Николаев И.* Расчёт интенсивности тушековских электронов в накопителе ВЭПП-4М // ЖЭТФ. — 2012. — Т. 142, № 1. — С. 44–55.
5. Measurement of The Energy Dependence of Touschek Electron Counting Rate / V. Blinov, V. Kiselev [и др.] // Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference. — New-York, USA, 04.2011. — MOP182.
6. *Baier V. N., Khoze V. A.* Determination of the transverse polarization of high-energy electrons // Sov.J.Nucl.Phys. — 1969. — Т. 9. — С. 238–240.
7. A backscattered laser polarimeter e^+e^- storage rings / D. B. Gustavson, J. J. Murray [и др.] // Nuclear Instruments and Methods. — 1979. — Т. 165, № 2. — С. 177–186. — ISSN 0029-554X. — DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X\(79\)90268-4](http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X(79)90268-4). — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X79902684>.
8. *Sauli F.* GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors // Nucl.Instrum.Meth. — 1997. — Т. A386. — С. 531–534. — DOI: 10.1016/S0168-9002(96)01172-2.
9. Development of high resolution tracking detectors with Gas Electron Multipliers / L. I. Shekhtman, V. M. Aulchenko [и др.] // Journal Of Instrumentation. — 2014. — АВГ. — Т. 9. — ISSN 1748-0221. — DOI: 088/1748-0221/9/08/C08017. — International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics, Budker Inst Nucl Phys, Novosibirsk, RUSSIA, FEB 24-MAR 01, 2014.
10. *Sokolov A. A., Ternov I. M.* On Polarization and Spin Effects in Synchrotron Radiation Theory // Sov. Phys. Dokl. — 1964. — Т. 8. — С. 1203–1205.