

— МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ —

Лазерный поляриметр — система измерения поляризации
электронного пучка коллайдера ВЭПП–4М

Докладчик:

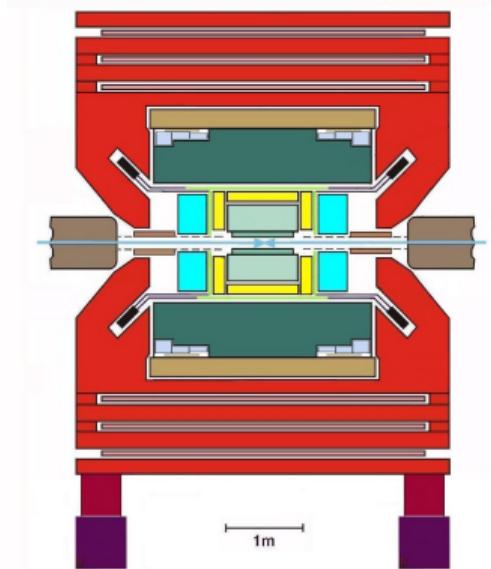
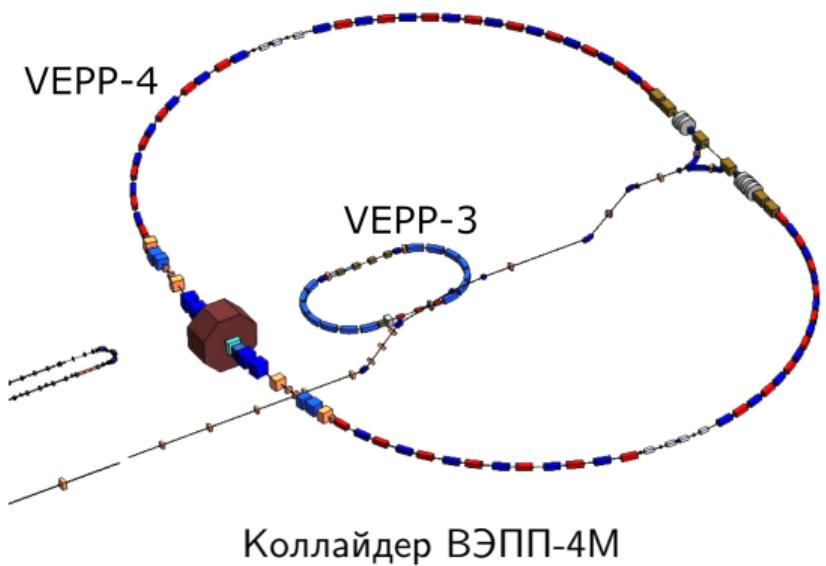
Степан Алексеевич Захаров

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., с.н.с. ИЯФ СО РАН Иван Борисович Николаев

21 июня 2021 г.

Комплекс ВЭПП-4М – КЕДР



Мотивация

- Экспериментальная программа детектора КЕДР → измерения масс в области Υ – резонанса

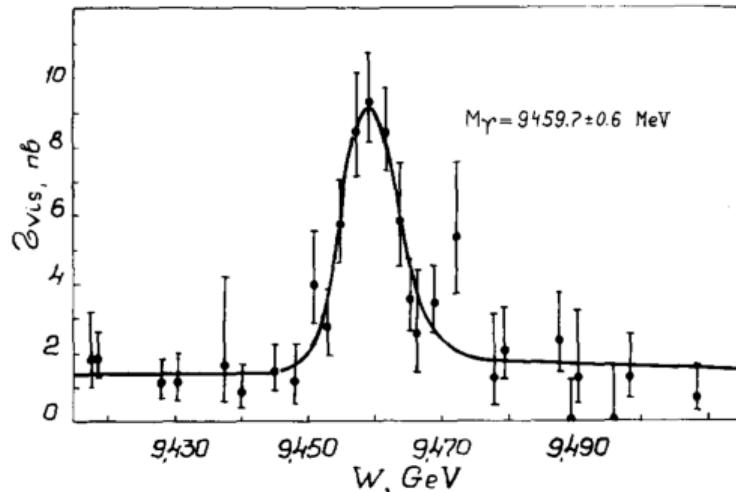


Рисунок из статьи: A.S. Artamonov et al., High Precision Measurement of the Υ Meson Mass, 1982

Мотивация

- Экспериментальная программа детектора КЕДР \rightarrow измерения масс в области Υ – резонанса
- Необходимость в прецизионном измерении энергии пучков

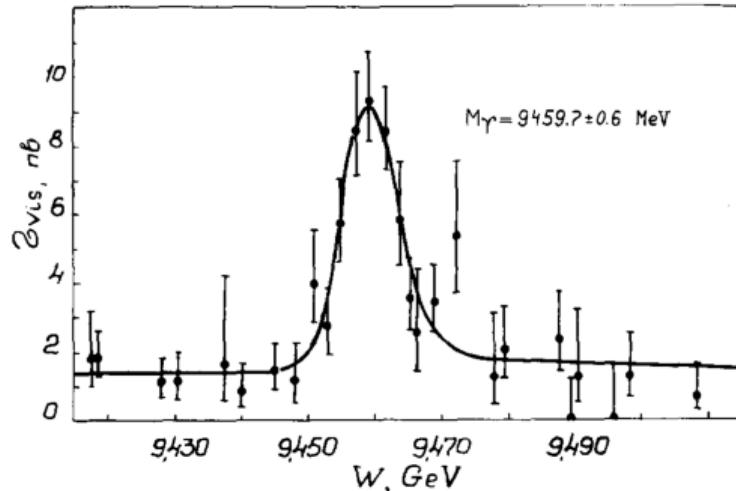


Рисунок из статьи: A.S. Artamonov et al., High Precision Measurement of the Υ Meson Mass, 1982

Мотивация

- Экспериментальная программа детектора КЕДР → измерения масс в области Υ – резонанса
- Необходимость в прецизионном измерении энергии пучков
- ✓ В ИЯФ накоплен большой опыт по различным методам измерения энергии

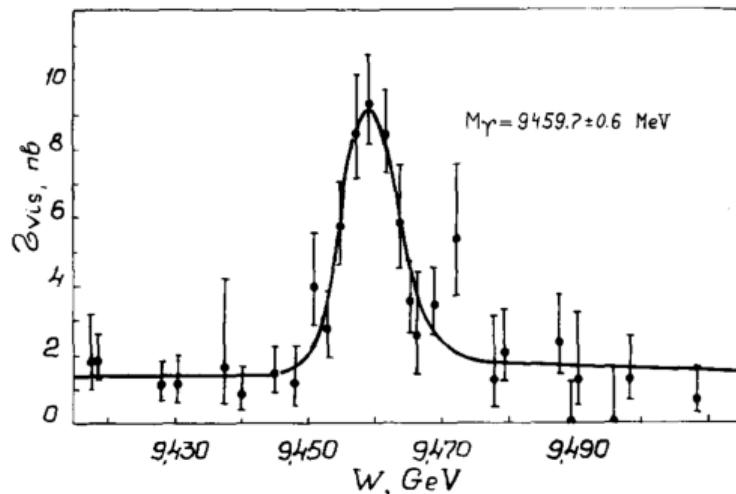


Рисунок из статьи: A.S. Artamonov et al., High Precision Measurement of the Υ Meson Mass, 1982

Мотивация

- Экспериментальная программа детектора КЕДР → измерения масс в области Υ – резонанса
 - Необходимость в прецизионном измерении энергии пучков
- ✓ В ИЯФ накоплен большой опыт по различным методам измерения энергии
- ⇒ Создание новой установки «Лазерный поляриметр»

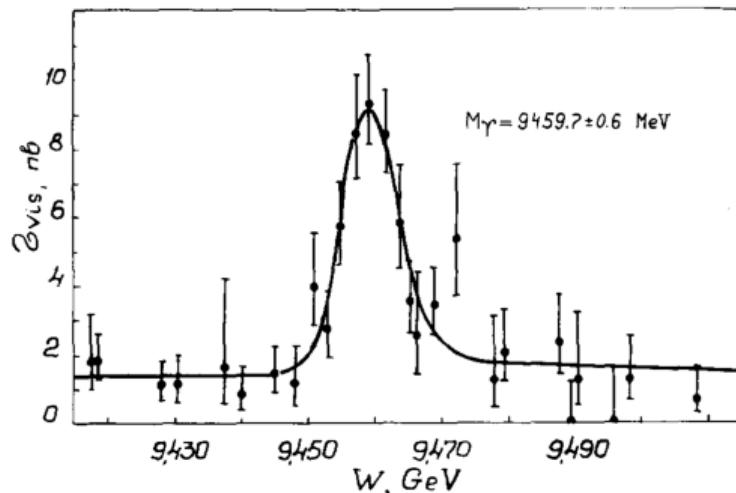
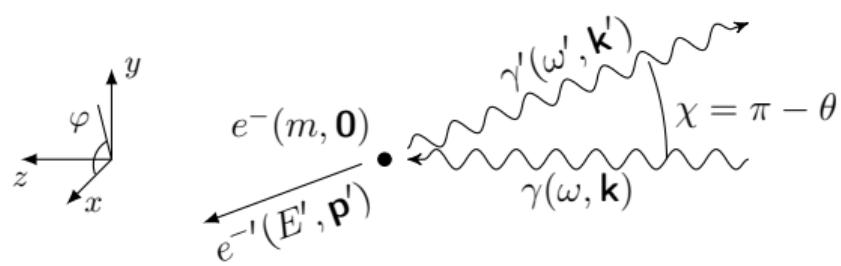


Рисунок из статьи: A.S. Artamonov et al., High Precision Measurement of the Υ Meson Mass, 1982

Рассеяние поляризованных фотонов на поляризованных электронах

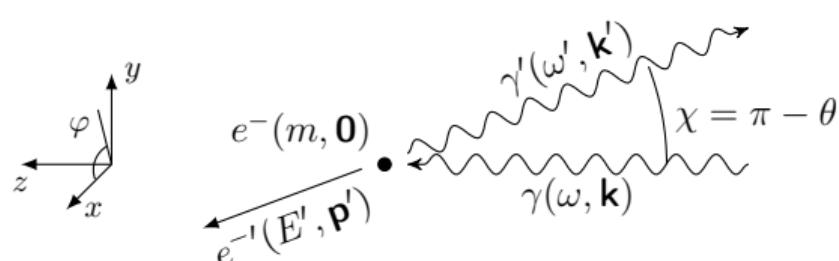


$\vec{\xi}$ – Вектор поляризации фотонов
 $\vec{\zeta}$ – Вектор поляризации электронного пучка
 $P = |\vec{\zeta}|$, $\vec{\xi} = [I, Q, V, U]^*$
 $\eta = \gamma\theta$, $\kappa = \frac{4\gamma\omega_0}{m_e}$

$$\begin{aligned}\frac{d\sigma_K(\vec{\xi}, \vec{\zeta})}{d\Omega_L} = & 4\gamma^2 r_e^2 \left[\frac{1}{1 + \eta^2 + \kappa} \right]^2 \left[1 - \frac{2\eta^2}{(1 + \eta^2)^2} \left[1 - \sqrt{Q^2 + U^2} \cos(2\{\varphi - \varphi_0\}) \right] + \right. \\ & \left. + \kappa P V \frac{\eta}{(1 + \eta^2)(1 + \eta^2 + \kappa)} \sin(\varphi) \right]\end{aligned}$$

* Q, U, V – параметры Стокса, $\sqrt{Q^2 + U^2}$ – полная степень линейной поляризации, φ_0 – угол поворота плоскости линейной поляризации, V – циркулярность поляризации

Рассеяние поляризованных фотонов на поляризованных электронах



$\vec{\xi}$ – Вектор поляризации фотонов
 $\vec{\zeta}$ – Вектор поляризации электронного пучка
 $P = |\vec{\zeta}|$, $\vec{\xi} = [I, Q, V, U]^*$
 $\eta = \gamma\theta$, $\kappa = \frac{4\gamma\omega_0}{m_e}$

$$\frac{d\sigma_K(\vec{\xi}, \vec{\zeta})}{d\Omega_L} = 4\gamma^2 r_e^2 \left[\frac{1}{1 + \eta^2 + \kappa} \right]^2 \left[1 - \frac{2\eta^2}{(1 + \eta^2)^2} [1 - \sqrt{Q^2 + U^2} \cos(2\{\varphi - \varphi_0\})] + \right.$$

$$\left. + \kappa P V \frac{\eta}{(1 + \eta^2)(1 + \eta^2 + \kappa)} \sin(\varphi) \right]$$

Циркулярная поляризация γ

Линейная поляризация γ

Регистрация поляризации электронного пучка

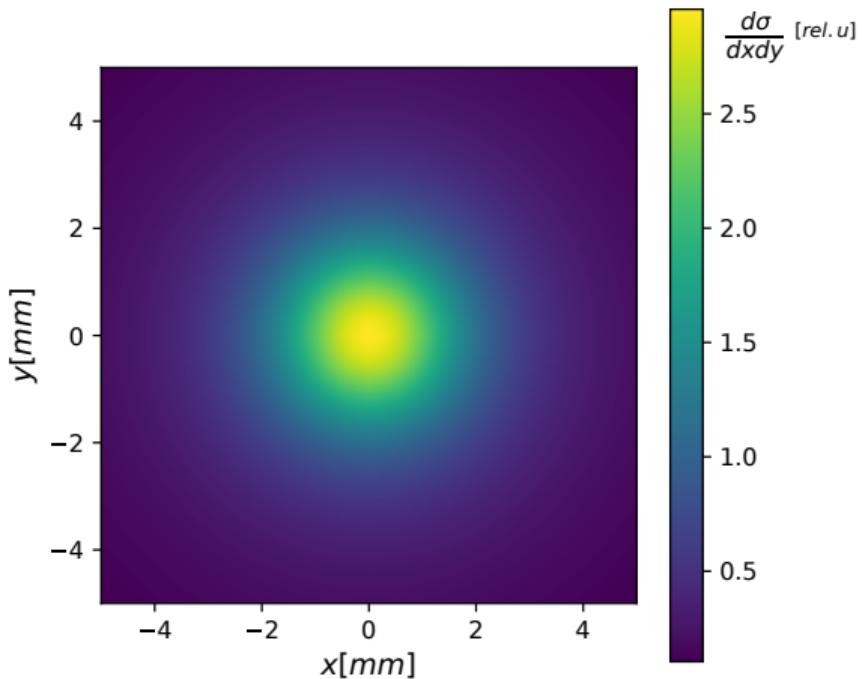
- При наличии у фотонов циркулярной поляризации, сечение становится чувствительным к поляризации электронного пучка

- Стоит ожидать эффект порядка:

$$\Delta \langle y \rangle = \frac{\omega_0}{2m_e} P \ell \Delta V \sim 140 \text{ мкм}^*$$

- Он хорошо определяется по разностному распределению:

$$\frac{d\sigma}{dxdy}[L] - \frac{d\sigma}{dxdy}[R]$$



* ℓ – Расстояние от точки взаимодействия до точки регистрации рассеянного фотона, ω_0 – энергия лазерного фотона

Регистрация поляризации электронного пучка

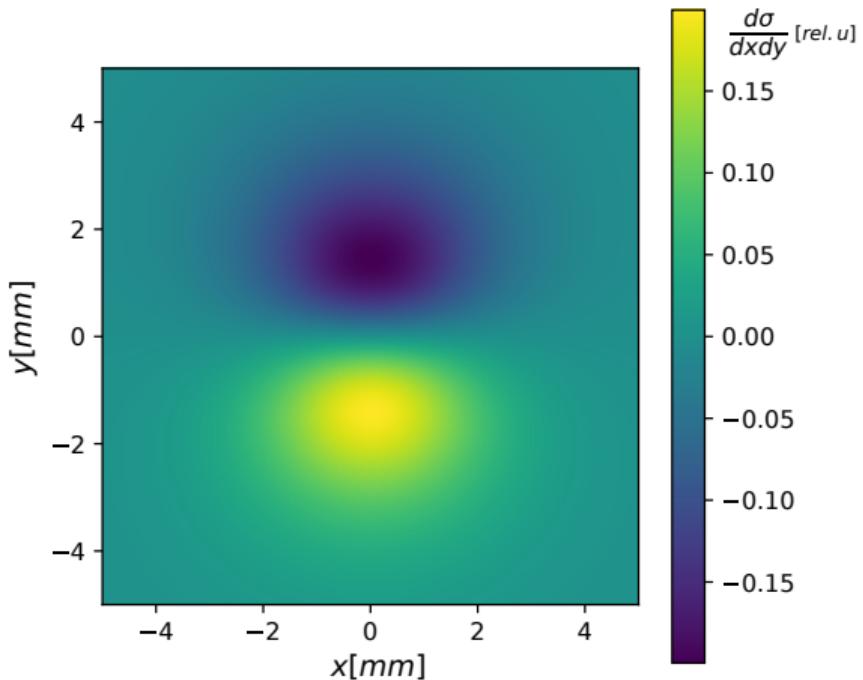
- При наличии у фотонов циркулярной поляризации, сечение становится чувствительным к поляризации электронного пучка

- Стоит ожидать эффект порядка:

$$\Delta \langle y \rangle = \frac{\omega_0}{2m_e} P \ell \Delta V \sim 140 \text{ мкм}^*$$

- Он хорошо определяется по разностному распределению:

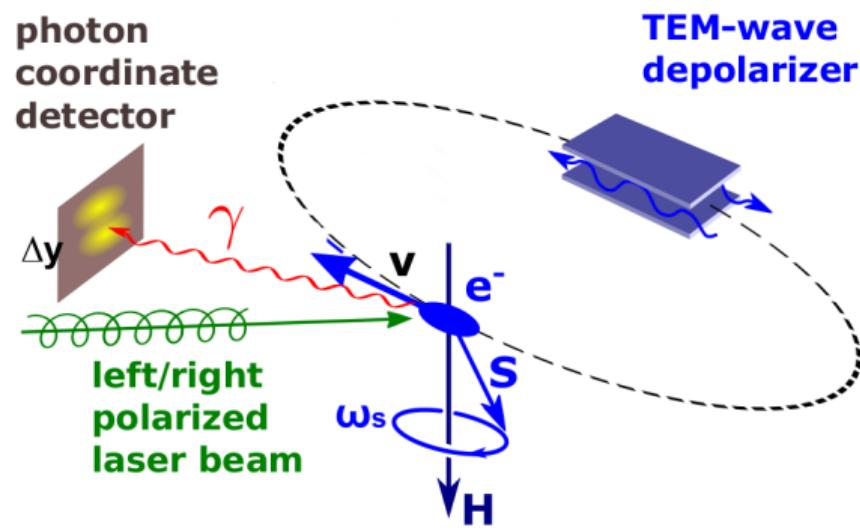
$$\frac{d\sigma}{dxdy}[L] - \frac{d\sigma}{dxdy}[R]$$



* ℓ – Расстояние от точки взаимодействия до точки регистрации рассеянного фотона, ω_0 – энергия лазерного фотона

Схема эксперимента по наблюдению поляризации

- Радиационная поляризация электронов
 - ↓ Приготовление циркулярно поляризованных фотонов
 - ↓ Рассеяние оптических фотонов на пучке электронов
 - ↓ Регистрация рассеянных γ – квантов с привязкой к поляризации начальных фотонов
 - ↓ Получение координатных распределений для двух поляризаций.



Алгоритм измерения поляризации

↓ Совместная аппроксимация распределений функциями вида:

$$F[L] \sim \frac{d\sigma}{dxdy}(\sqrt{Q^2 + U^2}, \varphi_0, P, +V) * G_2(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \sigma_x, \sigma_y),$$

$$F[R] \sim \frac{d\sigma}{dxdy}(-\sqrt{Q^2 + U^2}, \varphi_0, P, -V) * G_2(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \sigma_x, \sigma_y).^*$$

- Параметр Р аппроксимирующей функции есть степень поляризации электронного пучка

$*G_2$ – двумерная гауссова плотность распределения

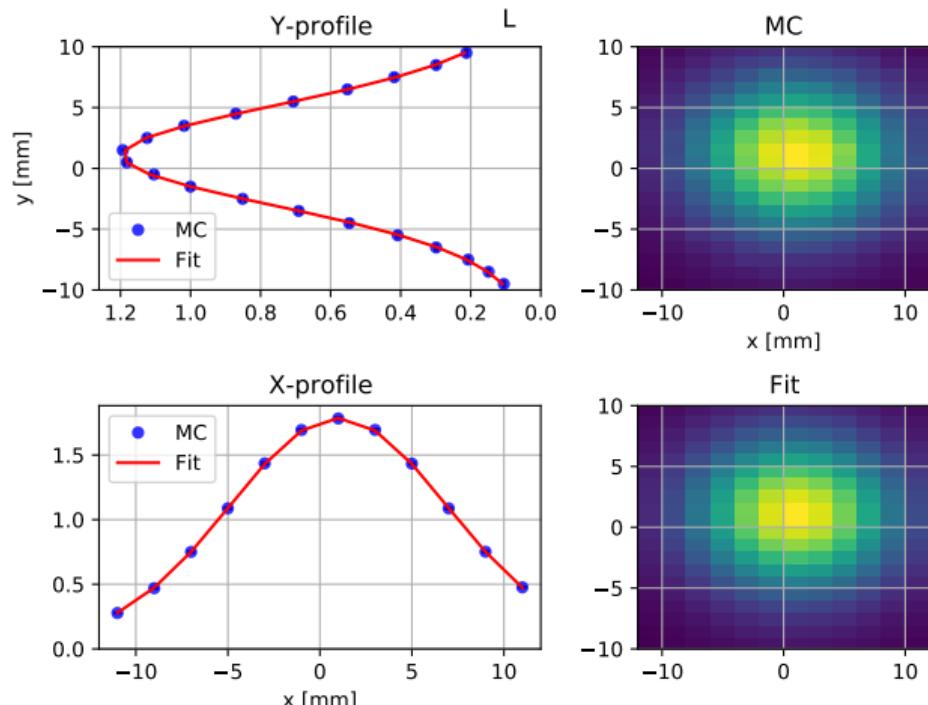
Валидация метода на MC моделировании

Параметры распределений:
моделирования и его
аппроксимации

Параметр	MC	Fit
$\sqrt{Q^2 + U^2}$	0.2	0.20 ± 0.02
V	0.98	0.98 ± 0.02
P	0.9	0.89 ± 0.11

Для оценок использовалась
статистика: $N_{evt} = 5 \cdot 10^5$
Приведенное значение критерия
Пирсона: $\chi^2/\text{ndf} = 0.82$

Координатное распределение для фотонов с левой
циркулярностью



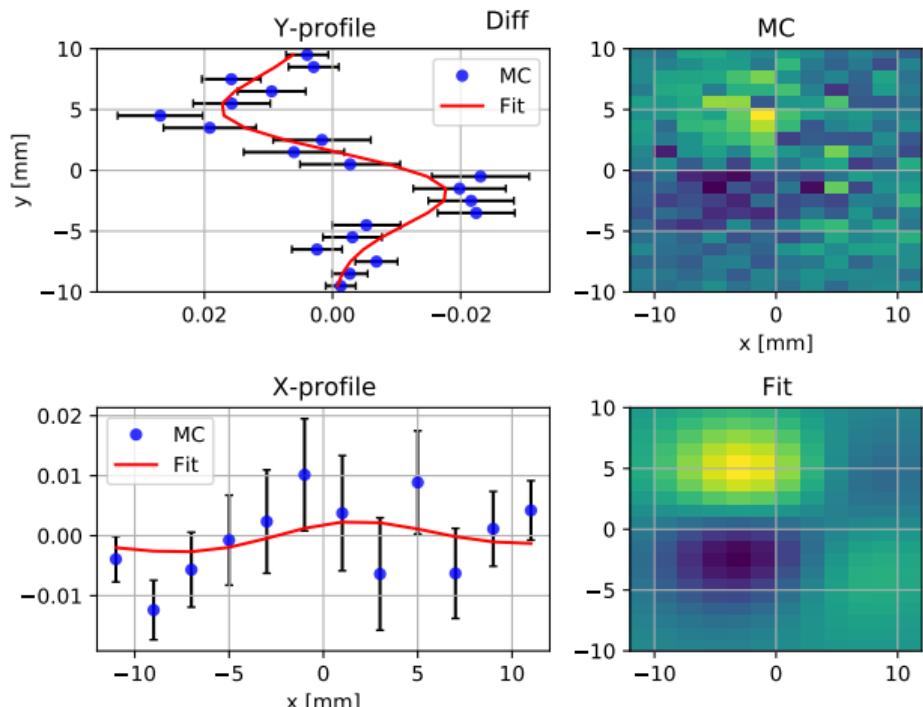
Валидация метода на MC моделировании

Параметры распределений:
моделирования и его
аппроксимации

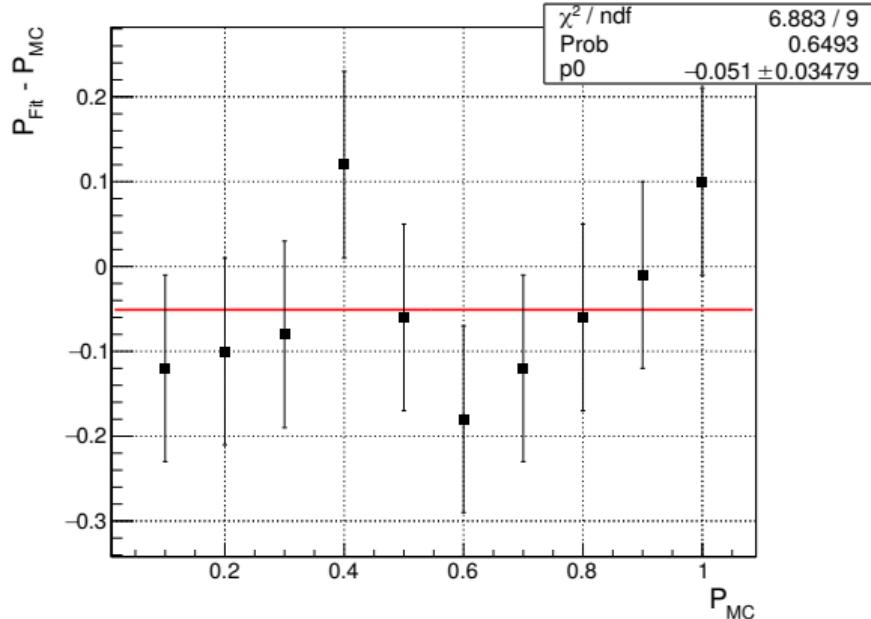
Параметр	MC	Fit
$\sqrt{Q^2 + U^2}$	0.2	0.20 ± 0.02
V	0.98	0.98 ± 0.02
P	0.9	0.89 ± 0.11

Для оценок использовалась
статистика: $N_{evt} = 5 \cdot 10^5$
Приведенное значение критерия
Пирсона: $\chi^2/\text{ndf} = 0.82$

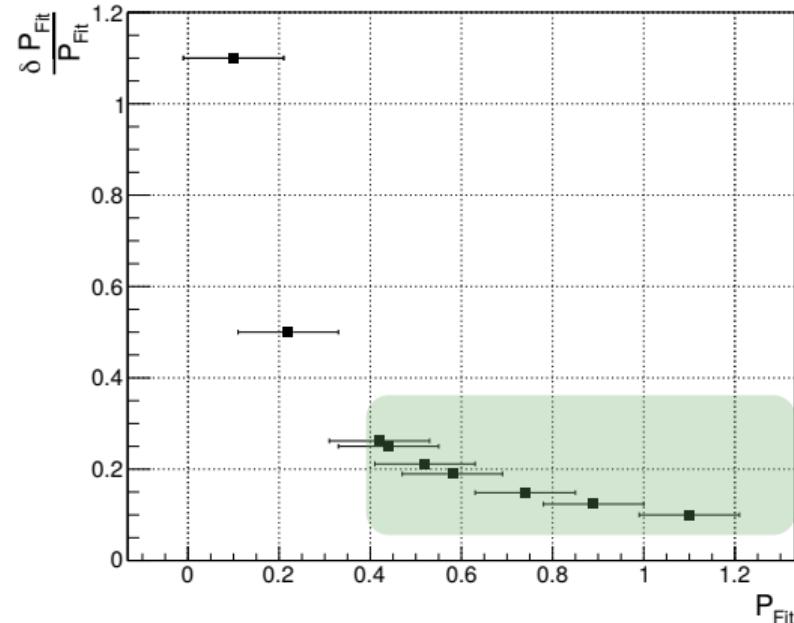
Разностное распределение для фотонов с левой и
правой циркулярностью



Оценка систематических ошибок метода



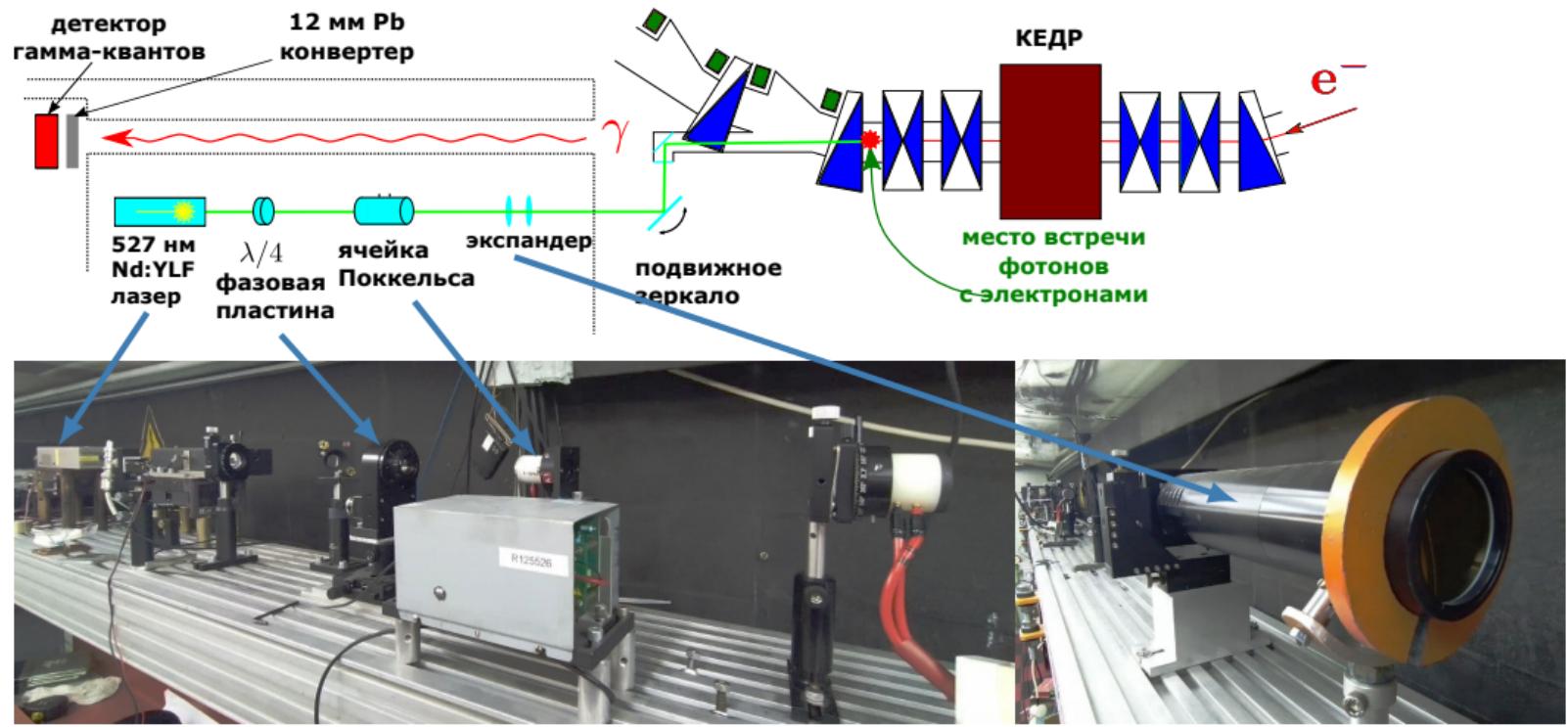
Разность параметров поляризации пучка:
заложенного в моделировании и определенного
из аппроксимации



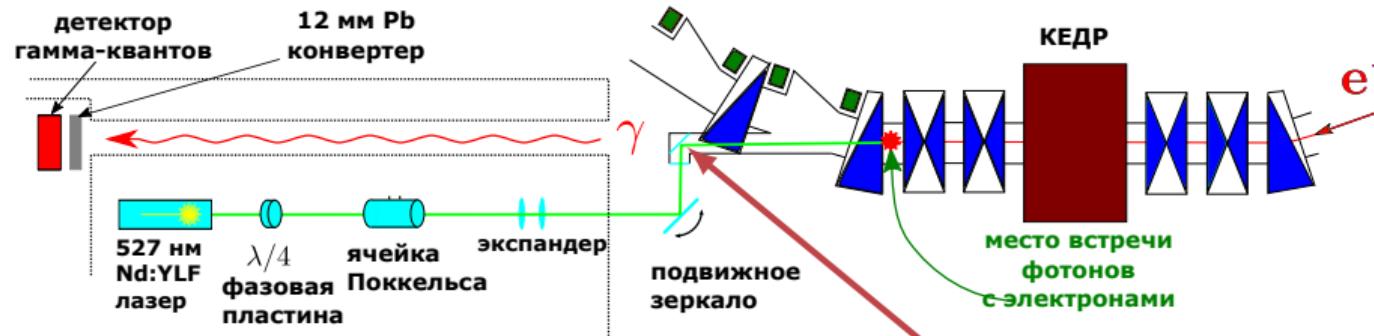
Относительная ошибка определения
поляризации электронного пучка

Экспериментальная реализация метода

Принципиальная схема «Лазерного поляриметра»



Проверка поляризации лазерного пучка



Параметры поляризации после отражения от двух зеркал:

$$Q = 0.44 \pm 0.01$$

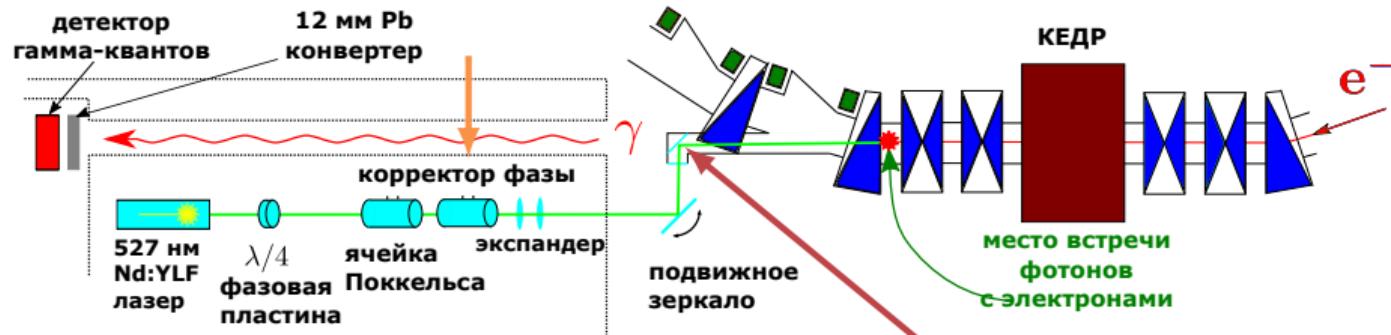
$$U = 0.36 \pm 0.01$$

$$V = 0.82 \pm 0.01$$

$$\sqrt{Q^2 + U^2} = 0.57 \pm 0.01$$

Q, U, V – параметры Стокса оптического пучка

Проверка поляризации лазерного пучка



Параметры поляризации после
отражения от двух зеркал:

$$Q = 0.10 \pm 0.01$$

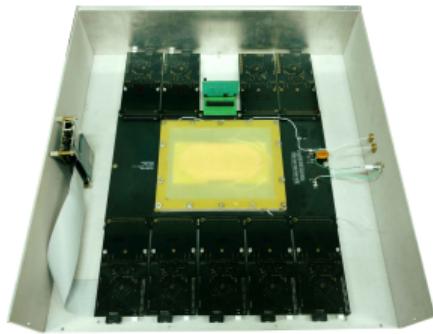
$$U = 0.01 \pm 0.01$$

$$V = 0.99 \pm 0.01$$

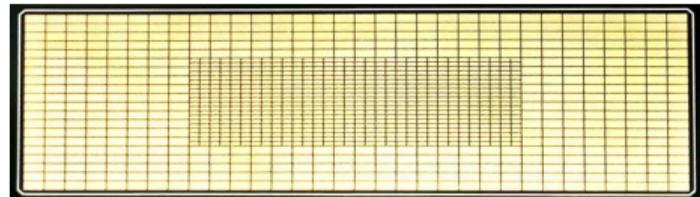
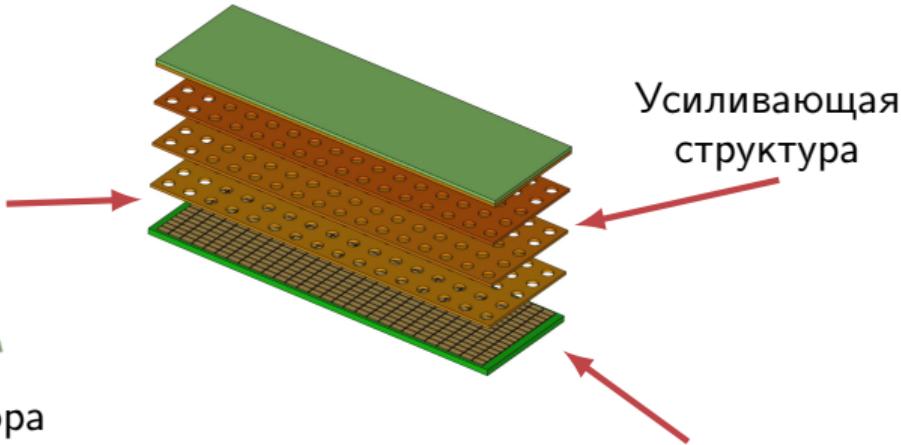
$$\sqrt{Q^2 + U^2} = 0.10 \pm 0.01$$

Q, U, V – параметры Стокса оптического пучка

Координатный детектор фотонов



Прототип GEM детектора



Считывающая структура

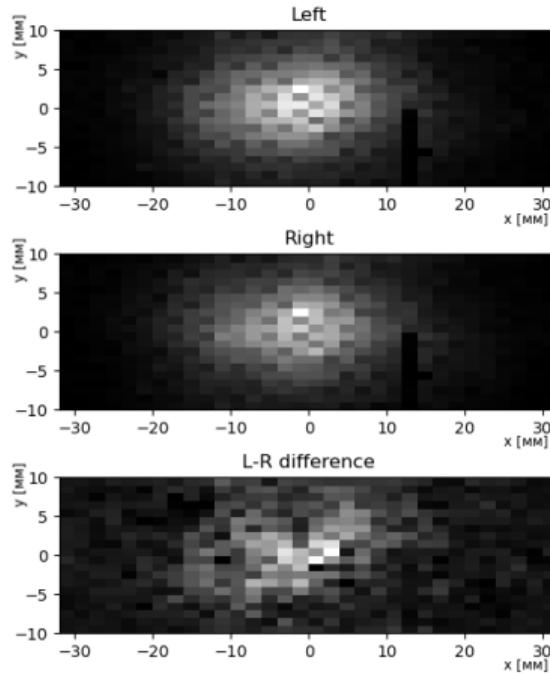
- Усиливающая структура: 3 GEM электроды
- Чувствительная область: 40×128 мм
- Количество каналов: 640 + 512
- Ожидаемые загрузки: 10 – 15 кГц

Методика проведения измерений

- Сведение оптического пучка и пучка электронов

Методика проведения измерений

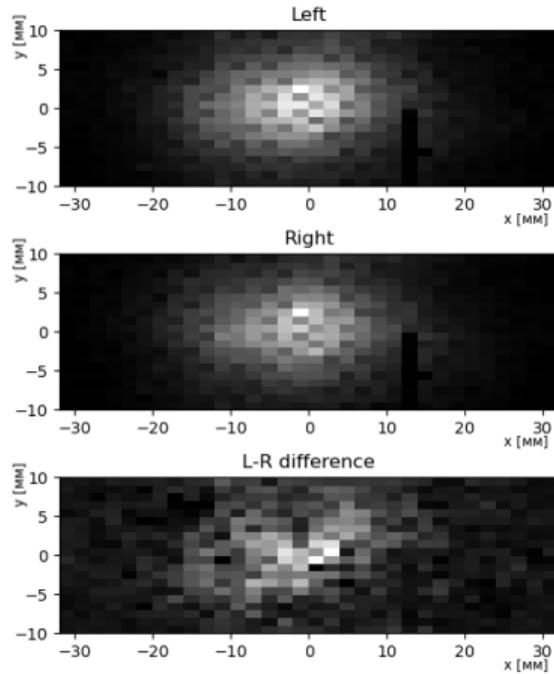
- Сведение оптического пучка и пучка электронов
- Поиск пятна рассеянных γ – квантов



Монитор детектора: по нему осуществлялись первичный контроль и настройка системы

Методика проведения измерений

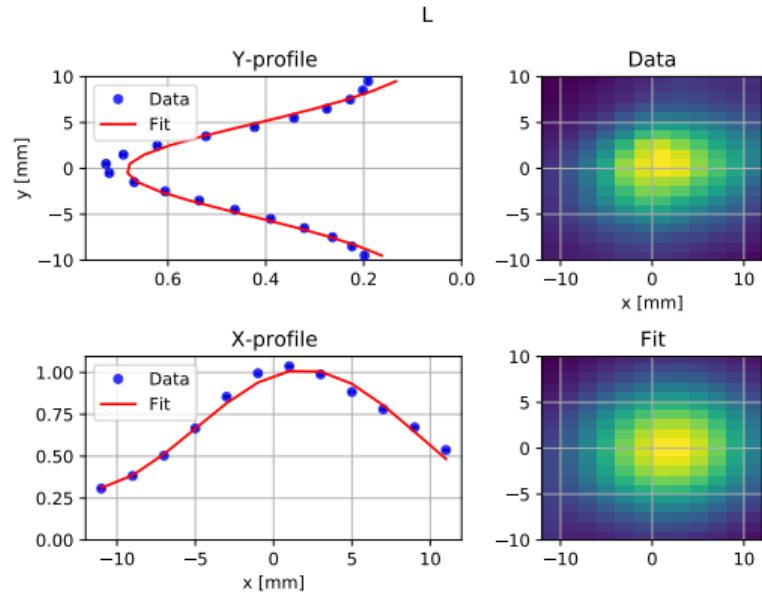
- Сведение оптического пучка и пучка электронов
- ↓ Поиск пятна рассеянных γ – квантов
- ↓ Подстройка оптической поляризации по эффекту в детекторе



Монитор детектора: по нему осуществлялись первичный контроль и настройка системы

Методика проведения измерений

- Сведение оптического пучка и пучка электронов
- ↓ Поиск пятна рассеянных γ – квантов
- ↓ Подстройка оптической поляризации по эффекту в детекторе
- ↓ Накопление статистики и вычисление параметра поляризации пучка из аппроксимации данных



Аппроксимация данных с детектора
теоретической плотностью распределения

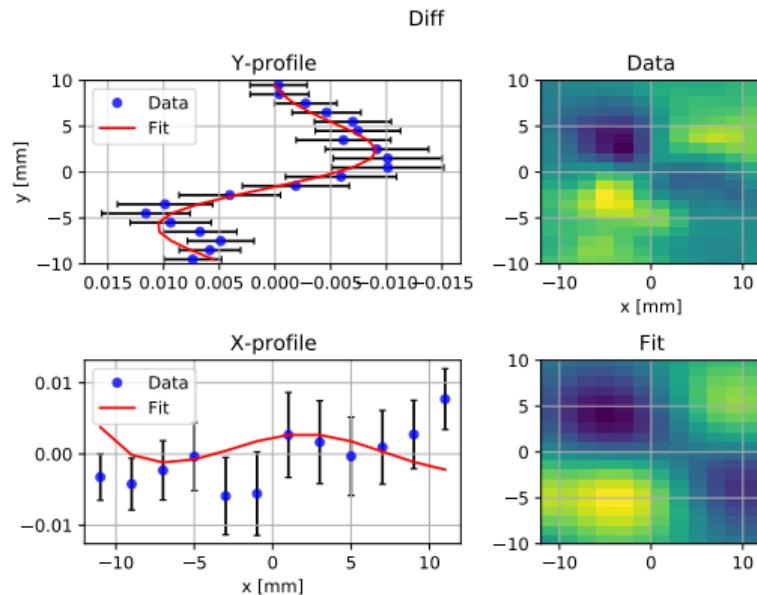
Результаты: измерение поляризации электронного пучка

✓ Смогли наблюдать поляризацию

✓ Из аппроксимации данных:

Параметр	Значение
$\sqrt{Q^2 + U^2}$	0.53 ± 0.02
V	0.85 ± 0.03
P	0.63 ± 0.14

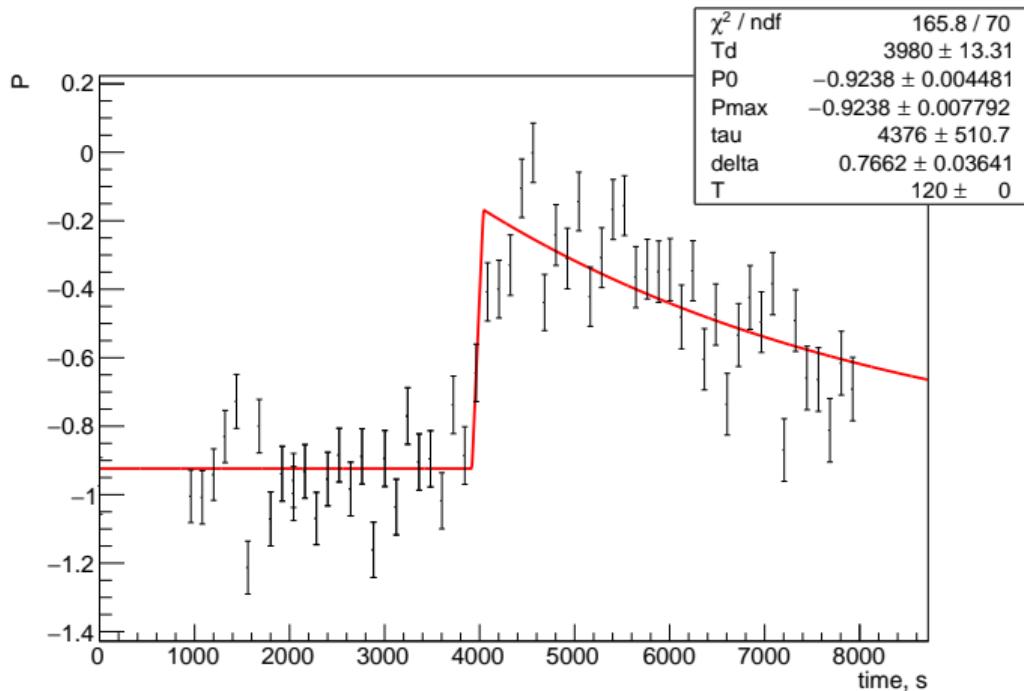
- В этой точке предсказывалась поляризация $P_{th} > 0.8$
- ⇒ Необходимо улучшать точность настройки оптической поляризации
- ⇒ А также изучить детекторные систематики



Аппроксимация разностного распределения данных

Результаты: сканирование по энергии в точке $E \approx 4.1$ GeV

- Использовали метод резонансной деполяризации
- Измерили энергию пучка в точке $E \approx 4.1$ GeV
- ✓ $E_{exp} = 4116 \pm 0.15$ Mev ($\delta E/E \sim 10^{-5}$)
- Отработали методику



Сканирование по частоте деполяризующего поля. За привязку значения времени к энергии отвечает параметр Td

Заключение

- Создан прототип «Лазерного поляриметра» — ключевая часть новой системы измерения энергии ускорителя ВЭПП-4Мы
 - Проведен обзор теории рассеяния поляризованных фотонов на электронах
 - Разработано программное решение для обработки и анализа данных с координатного детектора γ – квантов
- ✓ На Монте-Карло моделировании оценены систематики метода аппроксимации ($\delta P \sim 5\%$)
- ✓ Измерена поляризация электронного пучка: $P = 0.63 \pm 0.14 \pm 0.05 \%$
- ✓✓ Проведено первое сканирование энергии с использованием новой системы $\delta E/E \sim 10^{-5}$!

— МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ —

Лазерный поляриметр — система измерения поляризации
электронного пучка коллайдера ВЭПП–4М

Докладчик:

Степан Алексеевич Захаров

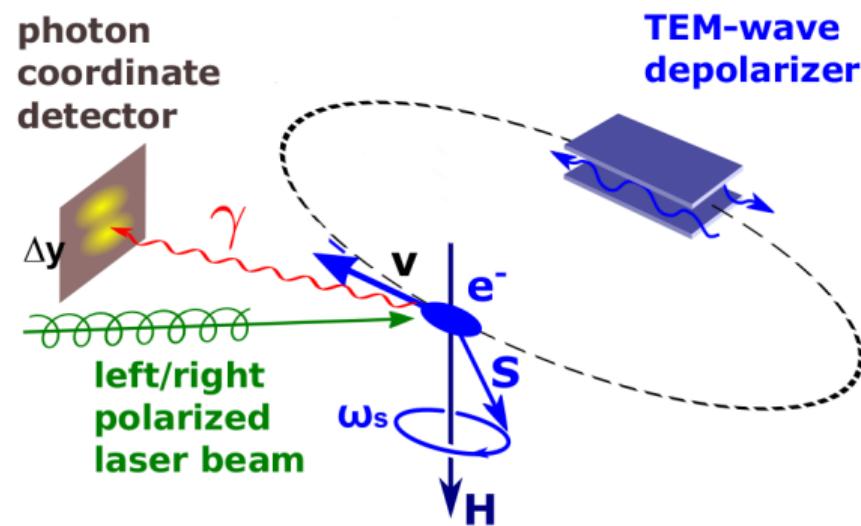
Научный руководитель:

к.ф.-м.н., с.н.с. ИЯФ СО РАН Иван Борисович Николаев

21 июня 2021 г.

Backup: Метод резонансной деполяризации

- Радиационная поляризация пучков:
$$P = G\zeta_0(1 - e^{-t/G\tau_p})$$
- Воздействие деполяризующим полем: $\omega_s = k\omega_r \pm \omega_d$
- Энергию находим из соотношения частот: $\omega_s = \omega_r \left(\frac{q'}{q_0 m c^2} + 1 \right)$



$$\Delta\langle y \rangle = \frac{\hbar\omega_0}{2m_e c^2} P \ell \Delta V$$

Backup: Основные систематики измерений

- ✓ Асимметрия флагов поляризации
(Контролируется аппаратно)
- ✓ Нециркулярность лазерного пучка
(Измерили и теперь можем корректировать)
- ⇒ Неоднородность эффективности регистрации детектора
(Ждем пока заработает весь детектор)
- ✓ Дрейф орбиты пучка
(Наблюдаем и можем нивелировать)

Backup: Обзор существующих методов измерения E

Через B методом ЯМР

$$\frac{p_c}{eB} = R$$

- ✓ Простой метод контроля Е
- ✗ Измерение локально
- ✗ Низкая точность ($\delta E/E \sim 10^{-3}$)

По энергии ОКР фотонов

$$\omega_{max} = \frac{4\gamma^2\omega_0}{1 + \frac{4\gamma\omega_0}{m_e}}$$

- ✓ Достаточная точность ($\delta E/E \sim 2 \times 10^{-5}$)
- ✗ Проблемы с полным поглощением γ

Метод резонансной деполяризации

$$\omega_s(\gamma) = k\omega_r \pm \omega_d$$

- ✓ $\delta E/E \sim \times 10^{-6}$
- ✗ Сложность измерения эффекта

Тушековское (внутрисгустковое) рассеяние

- ✓ Относительно просто регистрировать эффект: при деполяризации $\dot{N} \uparrow$
- ✗ Малая скорость счета в области интереса: $\dot{N} \sim \gamma^{-5}$
- ✗ Регистрируется только факт разрушения поляризации

Асимметрия рассеяния оптических фотонов поляризованными электронами

- ✓ Возможность прямого измерения поляризации
- ✗ Необходимость регистрировать маленький пространственный эффект