

Precise measurement of the VEPP-4M beam energy near $\Upsilon(1S)$ meson peak using resonant depolarization method with laser polarimeter

Николаев И.Б.

Блинов В.Е., Захаров С.А., Каминский В.В., Кудрявцев В.Н.,
Никитин С.А., Пиминов П.А., Шехтман Л.И.



Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН
г. Новосибирск



XXVIII International Conference
"Russian Particle Accelerators Conference"
September 11-15, 2023

- 1 Введение
- 2 Метод резонансной деполяризации
- 3 Лазерный поляриметр на ВЭПП-4М
- 4 Деполяризатор
- 5 Калибровка энергии
- 6 Заключение

- 1 Измерение масс элементарных частиц
 - Низкая энергия: J/ψ , $\psi(5S)$, $\psi(3770)$, D^0 , D^\pm -мезоны, τ -лептон
 - Высокая энергия: $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$, $\Upsilon(4S)$ – мезоны
- 2 Измерения лептонных ширин ψ и Υ – мезонов
- 3 Измерение R в области $2E = 2 \div 10$ ГэВ
- 4 Измерение сечения $\gamma\gamma \rightarrow$ адроны и другие 2γ -процессы
- 5 Измерение вероятностей радиационных переходов в $c\bar{c}$ и $b\bar{b}$ – системах и распадов с вероятностями 10^{-4} и более (десятки распадов на статистике $10^7 c\bar{c}$)

Масса $\Upsilon(1S)$

Шамов, Резанова (doi.org/10.1016/j.physletb.2023.137766), переобработка ранних экспериментов с учётом уточнения массы электрона, радиационных поправок и интерференции пик-подложка.

<i>VALUE</i> (MeV)	<i>DOCUMENT ID</i>	<i>TECN</i>	<i>COMMENT</i>	
9460.40 ± 0.09 ± 0.04	¹ SHAMOV 2023	RVUE	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	
• • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • •				
9460.11 ± 0.11 ± 0.07	² SHAMOV 2023	RVUE	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	
9460.51 ± 0.09 ± 0.05	^{3, 4} ARTAMONOV 2000	MD1	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	
9460.60 ± 0.09 ± 0.05	^{5, 6} BARU 1992B	MD1	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	
9460.59 ± 0.12	BARU 1986	MD1	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	
9460.6 ± 0.4	^{7, 6} ARTAMONOV 1984	MD1	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	
9459.97 ± 0.11 ± 0.07	⁸ MACKAY 1984	CUSB	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	

Цель

Измерение массы и лептонной ширины $\Upsilon(1S)$ -мезона с точностью 50 кэВ (статистика)

Метод резонансной деполяризации

Самый точный ($\Delta E/E \gtrsim 10^{-6}$) метод измерения энергии релятивистских пучков.

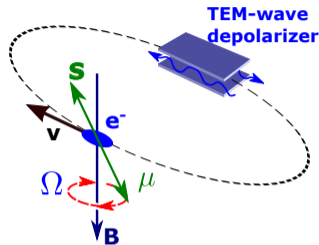
- Предложен и впервые применён в ИЯФ (1974)
- Использован в экспериментах по измерению масс элементарных частиц.
- Φ , K^+ , K^- на коллайдер ВЭПП-2М и детекторе ОЛЯ (1975-1979)
- J/ψ , $\psi(2S)$ — ВЭПП-4, ОЛЯ (1980)
- Υ , $\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$ — ВЭПП-4 (МД-1), CESR (CUSB), DORIS-II(ARGUS, Crystal Ball) (1982-1986)
- K^0 , ω — ВЭПП-2М и КМД (1987)
- Z бозон — LEP (OPAL, DELPHY, L3, ALEPH) (1993)
- J/ψ , $\psi(2S)$, D^+ , D^0 мезоны и τ -лептон на ВЭПП-4М (2003-2012)

Идея метода резонансной деполяризации

Frenkel, Thomas (1926), Bargmann, Michel, Telegdi (1959)

$$\frac{ds^i}{d\tau} = 2\mu F^{ij} s_j - 2\mu' u^i F^{jk} u_j s_k$$

$$\frac{d\vec{s}}{dt} = \underbrace{2\mu \frac{\vec{s} \times \vec{B}'}{\gamma}}_{\text{dynamic}} + \underbrace{(\gamma - 1) \frac{\vec{s} \times [\vec{v} \times \dot{\vec{v}}]}{v^2}}_{\text{kinematik (Thomas precession)}}$$



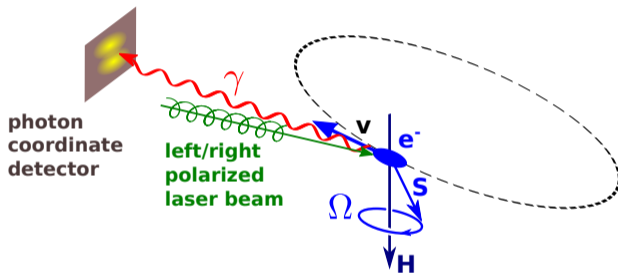
$$\Omega = \omega_0 \left(1 + \frac{E \mu'}{m_e \mu_0} \right) = \omega_0 n \pm \omega_d, \quad n \in \mathbb{Z}$$

$$\delta(\mu'/\mu_0) \approx 1.03 \times 10^{-10} \quad \delta m_e \approx 2.94 \times 10^{-10}$$

$$E = (440.648\,462\,134 \pm 0.000\,000\,137) [\text{МэВ}] \times \left(n - 1 \pm \frac{\omega_d}{\omega_0} \right)$$

Комптоновский поляриметр

Асимметрия вверх-вниз при комптоновском рассеянии лево- и право-поляризованного света на вертикально поляризованном пучке электронов



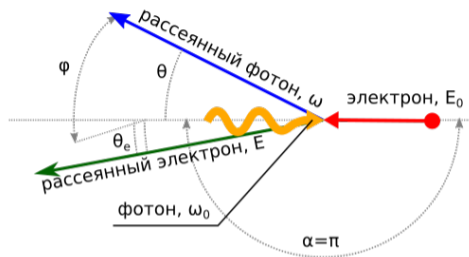
$$\frac{\sigma_{\text{up}} - \sigma_{\text{down}}}{\sigma_{\text{up}} + \sigma_{\text{down}}} \approx -\frac{3}{4} \frac{E\omega_0}{m_e^2} VP \approx 2\%$$

ω_0 — энергия начального (лазерного) фотона,

V — параметр Стокса, круговая поляризация (± 1)

- Идея предложена Байером и Хозе в 1969 г.
- Впервые применено на SPEAR (1979)
- Вскоре применено на ВЭПП-4 (1982)
- Тихонов (1982): СИ от встречного пучка как источник циркулярно-поляризованного света
- Применено на LEP для измерения массы Z-бозона (1993)

Сечение обратного комптоновского рассеяния



P — поперечная поляризация электронов
 Q — параметр Стокса линейной поляризации фотонов
 V — параметр Стокса циркулярной поляризации фотонов
 β — наклон плоскости линейной поляризации
 $\kappa = 4\gamma\omega/m_e$ — «жесткость» фотона

$$\frac{d\sigma(P, Q, V, \varphi, \beta)}{d\Omega_{\text{д}}} = 2\gamma^2 r_e^2 \left[\frac{1}{1 + \gamma^2\theta^2 + \kappa} \right]^2 \left\{ 2 + \frac{\kappa^2}{(1 + \gamma^2\theta^2)(1 + \gamma^2\theta^2 + \kappa)} - \frac{4\gamma^2\theta^2}{(1 + 4\gamma^2\theta^2)^2} (1 - Q \cos(2[\varphi - \beta])) + \frac{2\kappa PV\gamma\theta \sin \varphi}{(1 + \gamma^2\theta^2)(1 + \gamma^2\theta^2 + \kappa)} \right\}.$$

↑
Линейная поляризация γ

↑
Циркулярная поляризация γ

Эффект Соколова-Тернова (1963)

Вероятность синхротронного излучения с поворотом спина

$$W_{\uparrow\downarrow} = \frac{5\sqrt{3}}{16} \frac{e^2 \gamma^5 \hbar}{m^2 c^2 R^3} \left(1 \pm \frac{8}{5\sqrt{3}} \right)$$

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{5\sqrt{3}}{8} \frac{e^2 \hbar \gamma^5}{m^2 c^2 R^3}, \quad P_0 = \frac{8\sqrt{3}}{15} \approx 92.4\%$$

$$P(t) = P_{\max} \left(1 - e^{-t/\tau} \right); \quad \tau = \tau_p \frac{\tau_d}{\tau_p + \tau_d}; \quad P_{\max} = P_0 \frac{\tau_d}{\tau_p + \tau_d}$$

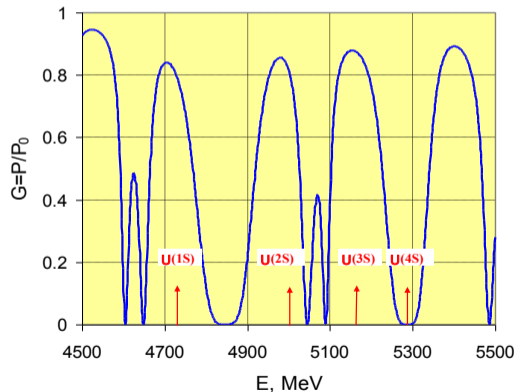
τ_d — вклад от деполяризующих факторов

- Первые наблюдения
 - ВЭПП-2 (Новосибирск) в 1970 г.
 - АСО storage ring (Орсе, Франция) в 1972 г.
- ВЭПП-4М, на энергии $\Upsilon(1S)$:

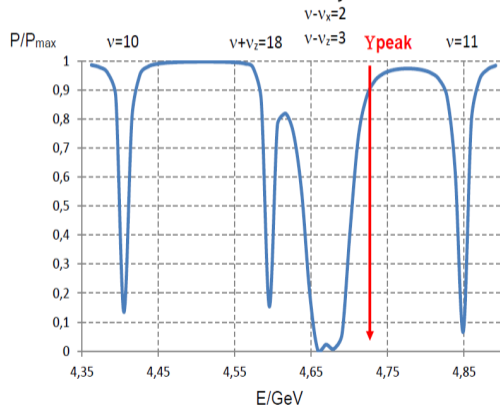
$$\tau_p = \frac{1540 \text{ часов}}{E[\text{ГэВ}]^5} = 40 \text{ мин}$$

Деполаризующие факторы

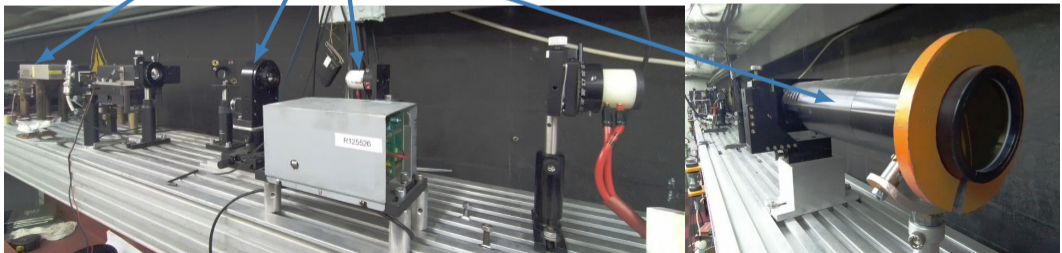
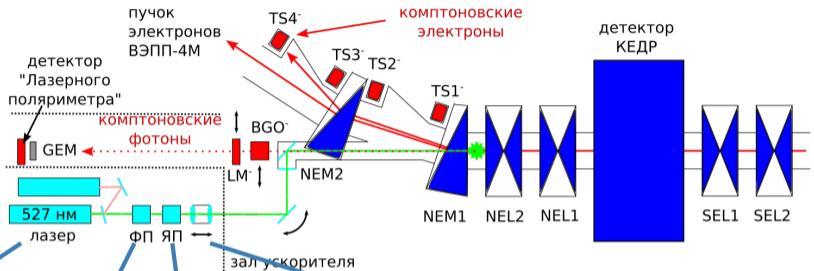
Spin resonances $\nu = k$, $\nu \pm \nu_x = k$,
 $q_x = 8.628$, $q_y = 7.576$ Vertical alignment
100 μ , vertical orbit rms ~ 1.5 mm.



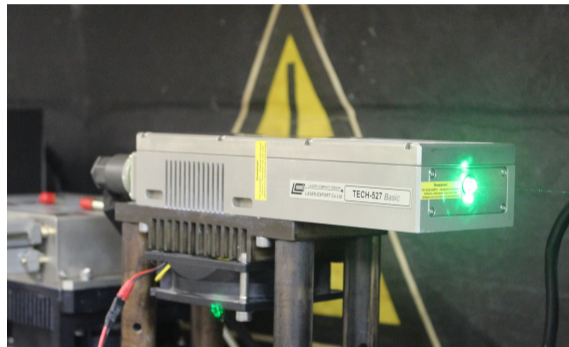
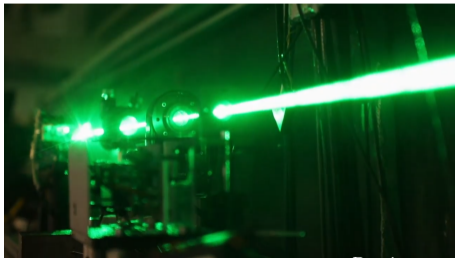
Random rolls of quads of 3×10^{-4}
rad, $q_x = 8.54$, $q_y = 7.58$



Оптическая схема лазерного поляриметра

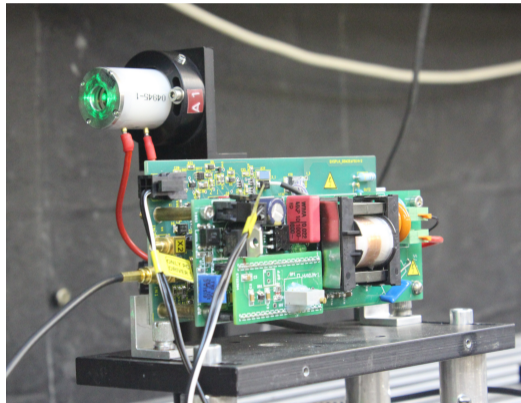


- Nd:YLF с удвоением частоты
- Длина волны 527 нм
- Частота запуска до 4 кГц
- Средняя мощность 2 В
- Длительность импульса 5 нс (1.5 м)
- Нестабильность импульса 2 нс

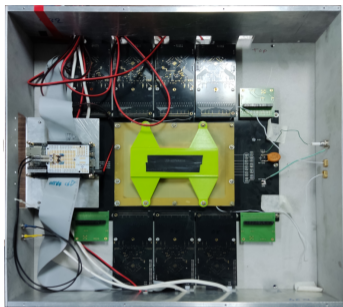


Циркулярная поляризация

- Циркулярная поляризация готовится при помощи фазовой пластинки $\lambda/4$
- Переключение между левой и правой при помощи КД*Р ячейкой Поккельса. Полуволновое напряжение 3 кВ.
- Режимы переключения на каждую вспышку лазера:
 - n-левой — n-правой, где $n=1-16$.
 - Псевдослучайное переключение на основе регистра сдвига с линейной обратной связью (LFSR)

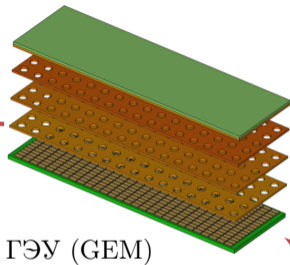


Координатный детектор фотонов



Компоновка детектора

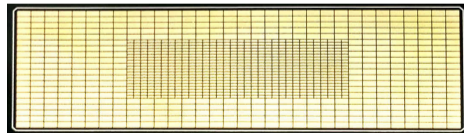
- Газовый электронный умножитель: 3 слоя
- Чувствительная область 40 × 128 мм
- 640 каналов в центре + 512 каналов на периферии
- Частота считывания 4 кГц (3 кадра)



ГЭУ (GEM)

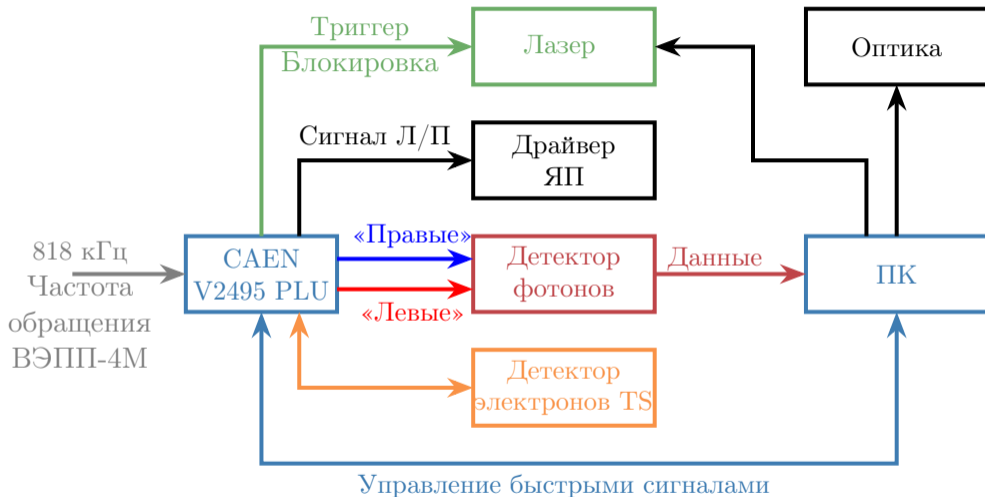


Считывающая плата



Считывающие электроды

Система управления



*PLU = programmable logical unit, универсальный программируемый логический блок (FPGA), ЯП = ячейка Поக்கельса, TS = «tagging system», система мечения

- Генератор DDS500CAM в стандарте КАМАК, прямое управление сканированием через компьютер.
- Опорная частота 5 МГц от рубидиевого стандарта частоты LPFRS-01 со стабильностью 10^{-10} . Кроме того, от рубидиевого стандарта стабилизированы задающий генератор ВЧ ВЭПП-4 и измерение ведущего магнитного поля методом ЯМР.
- Усилитель обеспечивает напряжение на пластинах до 100 В в полосе частот от 0 до частоты обращения 818 кГц.

Деполаризатор на основе TEM волны

- Используются пластины №2 длиной 830мм (l_d) и зазором 40 мм (d_d).
- Процесс деполаризации во времени:

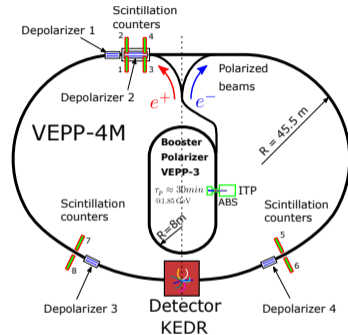
$$P(t) = P(0) \exp \left\{ -\frac{\rho}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t - t_d}{\tau_0} \right) \right] \right\},$$

где ρ — «сила» деполаризатора:

$$\rho = \frac{\pi \omega_0 |w_k|^2}{\dot{E} [\text{кЭВ/с}]} \times 440648 [\text{кЭВ}] \gtrsim 1,$$

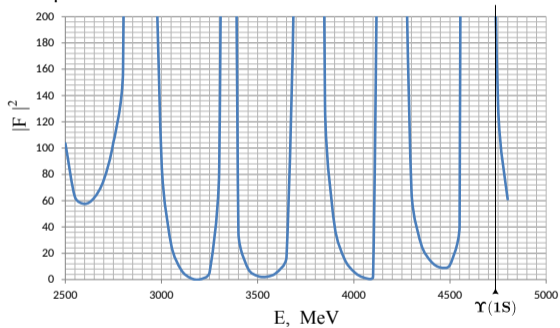
$\dot{E} = 1$ кЭВ/с, w_k — амплитуда спиновой гармоники определяется напряжением U на пластинах и функцией спинового отклика F^ν :

$$w_k = \frac{\nu U |F^\nu| l_d}{2\pi d_d B \rho}$$

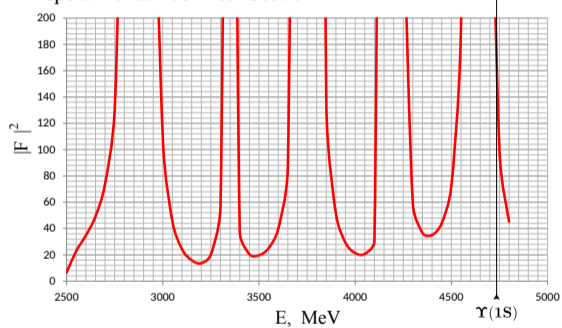


Функция спинового отклика

Depolarizer close to EL3



Depolarizer at Technical Section



$$D^{L,R}(x, y) = \frac{dN^{L,R}(x, y)}{dxdy} = \int B(x, y, \theta'_x, \theta'_y) C^{L,R}(\theta'_x, \theta'_y) d\theta'_x d\theta'_y \approx$$

$$\approx \int B(x - x', y - y') C^{L,R}\left(\frac{x'}{L}, \frac{y'}{L}\right) \frac{dx' dy'}{L^2} = B(x, y) \otimes \tilde{C}^{L,R}(x, y),$$

$$C(\theta_x, \theta_y)^{L,R} = \frac{d\sigma^{L,R}}{d\theta_x d\theta_y}(\theta_x, \theta_y),$$

$$B^*(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{\hat{D}}{\hat{C} + \delta} \cdot R \right),$$

$$\hat{D} = \mathcal{F} \left[\frac{D^L}{N_L} + \frac{D^R}{N_R} \right], \quad \hat{C} = \mathcal{F} [\tilde{C}^L + \tilde{C}^R],$$

$$R = \frac{|\hat{C}|^2}{|\hat{C}|^2 + k \sum |\hat{C}|^2},$$

\mathcal{F} и \mathcal{F}^{-1} — прямое и обратное двумерное преобразование Фурье.

$\delta \approx 10^{-12}$ — регуляризирующий параметр необходимый для подавления нулей в знаменателе;

R — функция регуляризации Винера

- Предварительный фильтр данных: заполнение средними значениями для выключенных каналов.
- Дискретное преобразование Фурье в расширенной области: $(32 \times 20) \rightarrow (96 \times 60)$ для подавления краевых эффектов.
- Минимизация χ^2

$$\chi^2 = \sum_{x,y} \frac{(\Delta D(x,y) \cdot [B^* \otimes C] - D(x,y) \cdot [B^* \otimes \Delta C])^2}{(B^* \otimes C - B^* \otimes \Delta C)^2 \cdot D^L(x,y)/N_L^2 + (B^* \otimes C + B^* \otimes \Delta C)^2 \cdot D^R(x,y)/N_R^2},$$

где $\Delta D(x,y) = D^L/N_L - D^R/N_R$, $\Delta C(x,y) = C^L - C^R$

- Пять свободных параметров: P , Q , β , $\delta N = (N_L - N_R)/(N_L + N_R)$. Регуляризатор $k_{reg} = 10^{-4}$ подобран «руками» и фиксирован.

Пример двумерной подгонки

Fit results (fit method 3)

begin: 2023-05-24 18:34:00

end: 2023-05-24 18:34:50

$\chi^2/ndf = 717/636 = 1.13$

$prob(\chi^2) = 0.0143$

$L = 29.90$ m

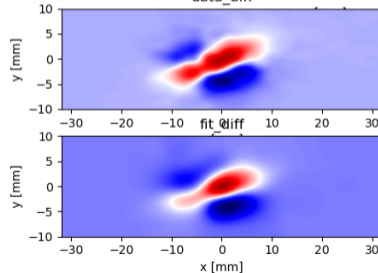
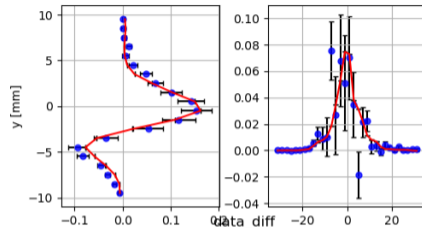
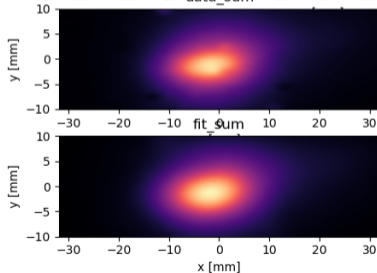
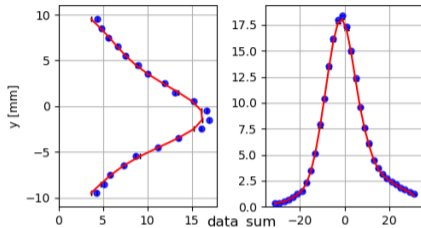
$P = 0.808 \pm 0.077$

$Q = -0.494 \pm 0.014$

$\beta = 40.57 \pm 0.73^\circ$

$DN = 0.002 \pm 0.001$

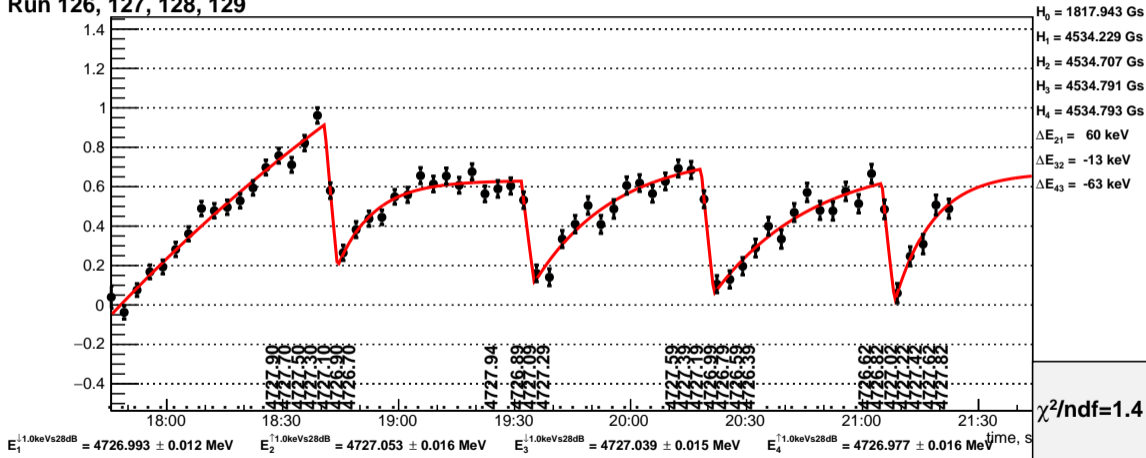
$k_{reg} = 1.0e-4$



- 1 Подготовка пучков (45 минут в среднем)
 - Сброс предыдущих пучков, цикл в ВЭПП-4
 - Накопление электронов в ВЭПП-3, ускорение и перепуск в ВЭПП-4
 - Накопление позитронов в ВЭПП-3, ускорение и перепуск в ВЭПП-4
 - Усокрение пучков от 1.9 ГэВ до 4.7 ГэВ.
- 2 Релаксация поля и радиационная поляризация ~30 мин. Пучки разведены.
- 3 Сведение пучков и набор статистики (2 часа) детектором КЕДР с одновременными калибровками энергии. Всего 3 калибровки на заход с чередованием направления сканирования.

Пример калибровки энергии

2023-05-24 17:45:40
Run 126, 127, 128, 129

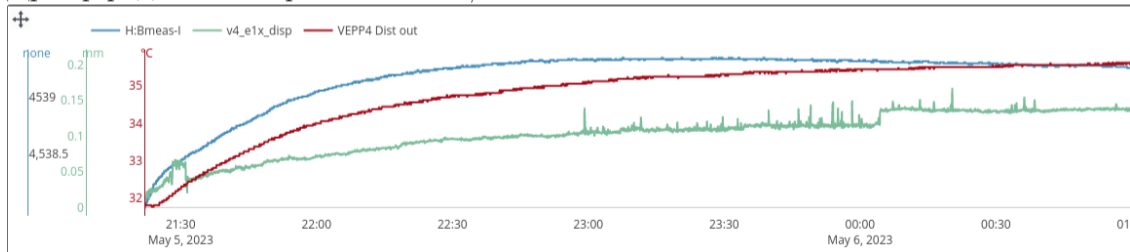


Факторы влияющие на точность однократной калибровки

- Статистика.
 - Новое охлаждаемое водой медное зеркало.
 - Ток в пучке > 3 мА (~ 50 кГц)
 - Настройка оптической системы
 - Нацеливание
 - Увеличение циркулярной поляризации
- Стабильность измерения поляризации.
 - Определение "формы" пучка прямо из данных. Двумерная подгонка.
 - Уменьшение вклада линейной поляризации.
 - Подавление вибраций и пульсаций пучка путём псевдослучайного переключения поляризации.
- Дрейф энергии.
- Пульсации поля.
- Ширина спиновой линии.

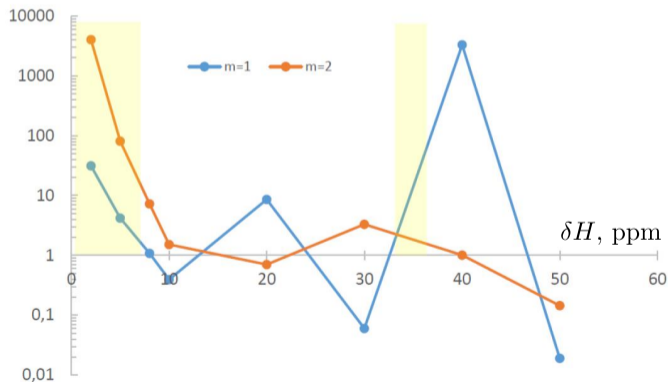
Дрейф энергии

- быстрая релаксация поля после укорения 30 мин, 0.5 МэВ → выжидаем релаксацию
- медленный температурный дрейф ~ 80 кэВ/град \Rightarrow нужна термостабилизация. Можно добиться 0.2град в холодное время.
- Дрейф радиальной орбиты 140кэВ/мм \rightarrow 14 кэВ



$$\frac{\tau_d^{(m)}}{\tau_d^{(0)}} = \left[\frac{J_0(\nu\delta H/\nu_H)}{J_m(\nu\delta H/\nu_H)} \right]^2 \quad \nu_H = \frac{50\text{Hz}}{818\text{kHz}}$$

Ratio $\tau_d^{(m)}/\tau_d^{(0)}$ vs. 50 Hz ripples $\delta H/H$ [ppm]



- При уровне пульсаций 10 ppm и выше 50 Гц пульсации приводят к 45 кэВ разнице в энергии между сканированиями вверх/вниз
- Требуется уровень пульсаций < 7 ppm (желтая область)

Ширина спиновой линии

- $\varepsilon_\nu \sim \nu < H''(\sigma_{x\beta}^2 + \sigma_{x\gamma}^2) >$ — уширение линии за счёт квадратичной нелинейности поля,
- $\varepsilon_{\text{diff}} \sim \frac{\sigma_\nu}{v_\gamma} \frac{\lambda_\gamma}{2\pi}$ — вклад в ширину радиационной диффузии спиновой фазы,
- $\delta f_d \sim \sqrt{\dot{f}_d}$ — уширение линии деполаризатора при монотонном сканировании со скоростью \dot{f}_d .

	E GeV	f_0 kHz	σ_ν spin tune spread due to energy spread [turn ⁻¹]	ν_γ synchrotron tune [turn ⁻¹]	σ_ν/ν_γ modulation index	$\lambda_\gamma/2\pi$ radiation decrement [rad ⁻¹]	ε_ν due to non-linearity [turn ⁻¹]	$\varepsilon_{\text{diff}}$ due to radiative diffusion [turn ⁻¹]	$\frac{\sqrt{\varepsilon_\nu^2 + \varepsilon_{\text{diff}}^2}}{v}$	Spin line half-width [keV]
VEPP-4M	1.85	820	0.0015	~0.01	~0.015	1.8e-6	~4e-6	2.7e-7	~1e-6	~2
	4.73		0.0098	0.015	~0.7	3.0e-5	~1e-4	2.1e-5	~1e-5	~22
LEP	45.6	11	0.061	0.083	0.73	4.7e-4	-	3.4e-4	~3e-6	~140
FCC-ee	45.6	3	0.039	0.025	1.56	1.25e-4	~7.3e-5	2e-4	~2.3e-6	~108
	80		0.120	0.080	1.50	6.8e-4	-	1.0e-3	5.6e-6	450

- Создан прибор «Лазерный поляриметр» позволяющий калибровать энергию пучка ВЭПП-4М с точностью $\sim 3 \times 10^{-6}$ (15 кэВ) для эксперимента по прецизионному измерению массы $\Upsilon(1S)$ мезона с детектором КЕДР.
- Точность измерения поляризации 5% за 50 секунд.
- Прибор позволяет калибровать энергию одновременно с набором данных.
- Требуется полная автоматизация.
- Необходима термостабилизация.
- Стабилизация источников питания, контроль пульсаций.
- Требуется определить ширину спиновой линии.