

Ревизия результатов по массам узких состояний боттомония

А.Г. Шамов, МД-1@ВЭПП-4—КЕДР@ВЭПП-4М
Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск

Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН
Дубна, 1-5 Апреля 2024

- 1 Ведение
 - Опубликованные значения масс
 - Причины ревизии
- 2 Метод резонансной деполяризации
- 3 Обработка данных Maskay *et al.* [CUSB@CESR]
- 4 Поправка радиационных поправок
- 5 Уточнение массы электрона
- 6 Интерференция резонанса и подложки
- 7 Масса $\Upsilon(1S)$, MD-1@VEPP-4 vs CUSB@CESR
- 8 Масса $\Upsilon(2S)$, MD-1@VEPP-4 vs ARGUS+CB@DORIS
- 9 Масса $\Upsilon(3S)$, МД-1@VEPP-4
- 10 Итоги ревизии
- 11 Готовящийся эксперимент КЕДР@ВЭПП-4М

$\Upsilon(1S)$ MASS

<u>VALUE (MeV)</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
9460.30 ± 0.26 OUR AVERAGE	Error includes scale factor of 3.3.		
9460.51 ± 0.09 ± 0.05	¹ ARTAMONOV 00	MD1	$e^+ e^- \rightarrow \text{hadrons}$
9459.97 ± 0.11 ± 0.07	MACKAY 84	REDE	$e^+ e^- \rightarrow \text{hadrons}$

Расхождение 3.25σ !

$\Upsilon(2S)$ MASS

<u>VALUE (MeV)</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
10023.26 ± 0.31 OUR AVERAGE			
10023.5 ± 0.5	¹ ARTAMONOV 00	MD1	$e^+ e^- \rightarrow \text{hadrons}$
10023.1 ± 0.4	BARBER 84	REDE	$e^+ e^- \rightarrow \text{hadrons}$

$\Upsilon(3S)$ MASS

<u>VALUE (MeV)</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
10355.2 ± 0.5	¹ ARTAMONOV 00	MD1	$e^+ e^- \rightarrow \text{hadrons}$

¹ Reanalysis of BARU 92B and ARTAMONOV 84 using new electron mass (COHEN 87).

Проблемы:

- Неправильный учет радиационных поправок в W. W. MacKay *et al.*, PRD **29**(1984),2483 (CUSB@CESR), D. P. Barber *et al.*, PLB **135**(1984),498 (ARGUS+CB@DORIS)
- Использование устаревшего значения массы электрона в этих двух работах
- Игнорирование интерференционных эффектов во всех обсуждаемых измерениях
- Расхождение результатов МД-1 и CUSB по $\Upsilon(1S)$

Цель:

- Добиться замены результатов в таблицах PDG, как произошло с лептонными ширинами тяжелых кваркониев после работы J. P. Alexander *et al.*, Nucl.Phys.B **320**(1989)45

Почему сейчас?

- Подготовка к новому эксперименту КЕДР@ВЭПП-4М с ожидаемой точностью около 50 кэВ

Экспериментальные аспекты работ не обсуждаются!

Метод резонансной деполяризации

Электронный пучок в ускорителе может спонтанно поляризоваться, спин прецессирует вокруг направления ведущего поля с частотой

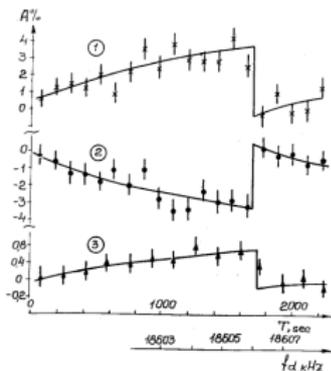
$$\Omega_{\text{spin}} = \omega_{\text{rev}} (1 + \mu' / \mu \gamma)$$
 зависящей от энергии пучка $E = \gamma m_e$

Внешнее электромагнитное поле переменной частоты f_d деполяризует пучок при резонансном условии

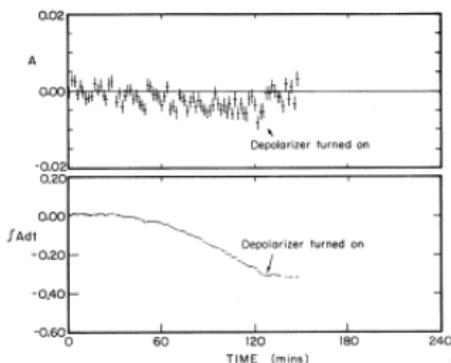
$$\Omega_{\text{spin}} = m \cdot \omega_{\text{rev}} + n \cdot f_d \quad (\Upsilon(1S) \text{ at VEPP-4: } m = 11, n = 1)$$

Измерение f_d и ω_{rev} в момент деполяризации позволяет определить энергию пучка с точностью $\sim 10^{-6}$

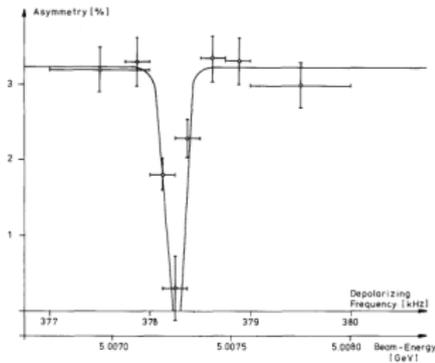
Момент деполяризации в обсуждаемых экспериментах определялся, используя асимметрию рассеяния продольно поляризованных фотонов на поперечно поляризованном пучке:



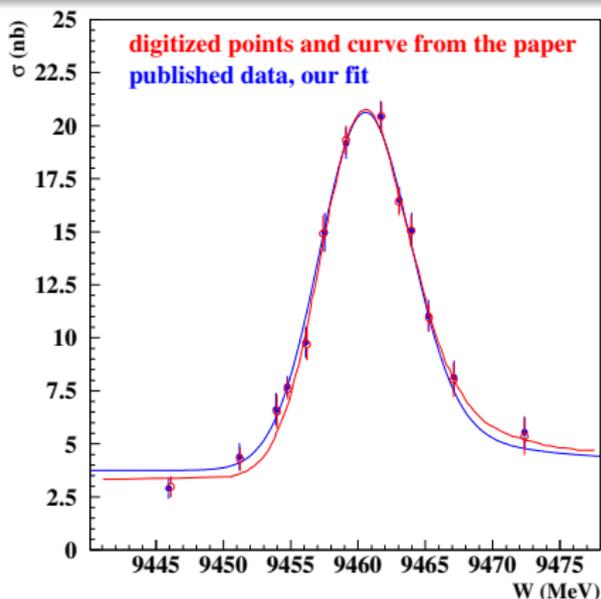
ВЭПП-4 (синхротронное излучение)



CESR (лазер)



DORIS (лазер)



Наш фит опубликованных данных с одинаковым учетом радиационных поправок в 1986 г. дал значение массы на 0.375 МэВ выше приведенного в статье.

Опечатка в данных?

Данные из опубликованного в журнале рисунка были восстановлены с максимально возможной точностью с помощью графического редактора. Точки совпали, а подгоночные кривые - нет.

Разница в массах связана с вычислением резонансной кривой. Несколько разных реализаций используемых математических функций дают одинаковые результаты.

Была найдена и исправлена опечатка в таблице формирования 13 точек для подгонки по результатам 22 заходов. Влияние ее на массу пренебрежимо.

*) CUSB — Columbia University – Stony Brook

Поправка радиационных поправок

Первая опубликованная работа по р.п. при рождении узких резонансов:
Ya.I.Azimov, A.I.Vainshtein, L.N.Lipatov, V A.Khoze, JETP Lett. **21**(1975)172,
парой месяцев позже появилась хорошая альтернатива:
M.Greco, G.Pancheri-Srivastava, Y.Srivastava, Nucl.Phys. **B101**(1975)234

Однако, в большинство обработок ψ и Υ до 1985 проводилось в соответствии с

J.D.Jackson and D.L.Scharre, NIM **128**(1975)13

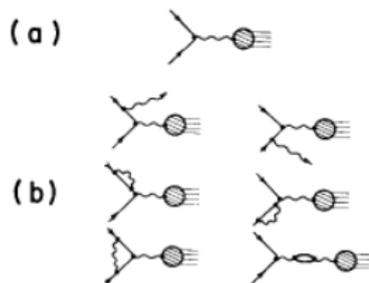


Fig. 1. e^+e^- annihilation via one-photon exchange. (a) Lowest order diagram; (b) Higher order diagrams, the top two involving real (soft) photon emission and the next four each involving one additional virtual photon.

'Радиационный гауссиан' G_R был получен сверткой гауссовского разброса по энергии пучков G и вероятности потери энергии за счет множественного излучения мягких фотонов в приближении нулевой ширины резонанса.

Излучение дополнительных фотонов учитывалось для диаграмм (а), но не (b)

$$\sigma(W) \propto G_R(W-M) + \delta_V \cdot G(W-M) \quad \text{вместо} \quad (1 + \delta_V) \cdot G_R(W-M)$$

Сдвиг массы зависит от разброса энергии пучков, ~ 100 кэВ для Υ

Метод резонансной деполяризации дает значение среднего лоренц-фактора электронов пучка, так что энергия пучка пропорциональна массе электрона m_e . В 1983 неточность m_e была около 2.8 ppm, что соответствовало 26 кэВ в массе $\Upsilon(1S)$.

«The 1986 adjustment of the fundamental physical constants»,
E.R.Cohen and B.N.Taylor, Rev.Mod.Phys.**59**(1987)1121:

значение m_e сдвинулось на -8.5 ppm с уменьшением неопределенности до 0.3 ppm вследствие уточнения значения e/h

Результаты с ВЭПП-4 были пересчитаны в Phys.Lett. **B474**(2000)427
Сдвиги масс составили -80, -85 и -88 кэВ для $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$ и $\Upsilon(3S)$,
соответственно

Результаты с CESR и DORIS остались неизменными

Интерференция резонанса и подложки

Ya.I. Azimov *et al.*, JETP Lett. **21**(1975)172

вклад резонанса в конечное состояние f в приближении мягких фотонов (нуждается лишь в небольших уточнениях):

$$\sigma^{\Upsilon \rightarrow f}(W) = \frac{12\pi}{M^2} \left(1 + \frac{3}{4}\beta\right) \left[\frac{\Gamma_{ee}\Gamma_f}{\Gamma M} \operatorname{Im} f(W) - \frac{2\alpha\sqrt{R_f}\Gamma_{ee}\Gamma_f}{3W} \lambda \operatorname{Re} \frac{f(W)}{1-\beta/6} \right]$$

$$\text{где } f(W) = \left(\frac{M/2}{M-W-i\Gamma/2} \right)^{1-\beta}, \quad \beta = \frac{4\alpha}{\pi} \left(\ln \frac{W}{m_e} - \frac{1}{2} \right)$$

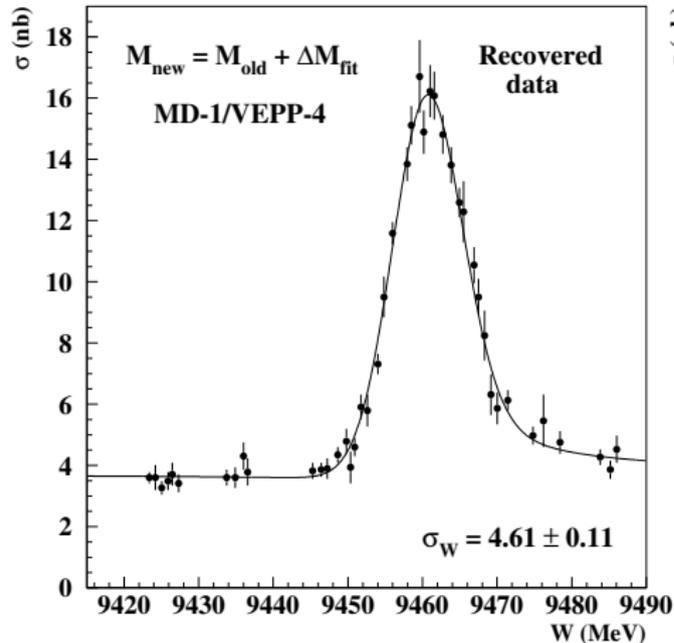
Параметр λ определяет силу интерференционного эффекта, $\lambda=1$ и $R_f=1$ для $f = \mu^+\mu^-$. Для суммы адронных мод распада (b_m и $\mathcal{B}_m^{(s)}$ – относительные вероятности моды в электромагнитных и сильных распадах, соответственно, ϕ – фаза интерференции электромагнитной и сильной амплитуд)

$$\lambda = \sqrt{\frac{R\mathcal{B}_{ee}}{\mathcal{B}_h}} + \sqrt{\frac{1}{\mathcal{B}_h}} \sum_m \sqrt{b_m \mathcal{B}_m^{(s)}} \langle \cos \phi_m \rangle. \quad (1)$$

На уровне партонной модели сильные $3g$ и электромагнитные $q\bar{q}$ распады не интерферируют, так что в правой части (1) должна занулиться. То же произойдет при некоррелированных ϕ_m .

Сдвиг массы растет с энергетическим разбросом, ~ 100 keV

Маца $\Upsilon(1S)$ ($M_{\text{эВ}}$)

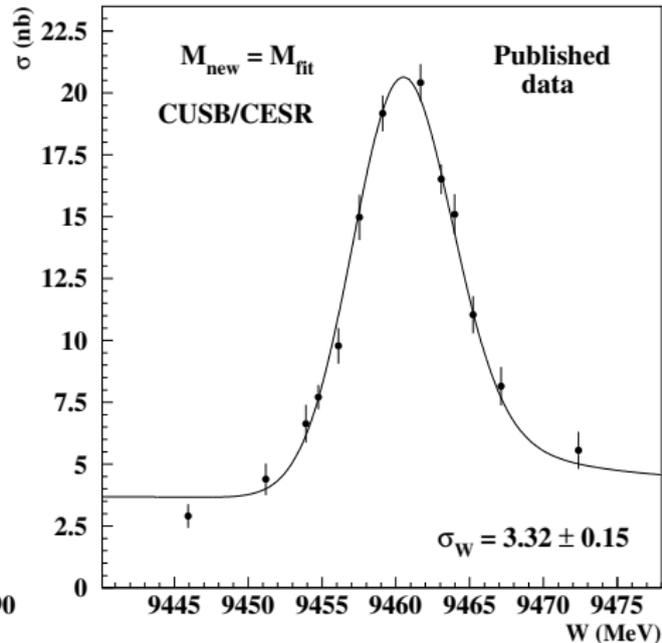


$$M_{\text{old}} = 9460.51 \pm 0.09 \pm 0.05$$

$$M_{\text{new}} = 9460.40 \pm 0.09 \pm 0.04$$

$$\Delta(\text{int}) = -0.112$$

MD-1 – CUSB: $3.25\sigma \rightarrow 1.83\sigma$



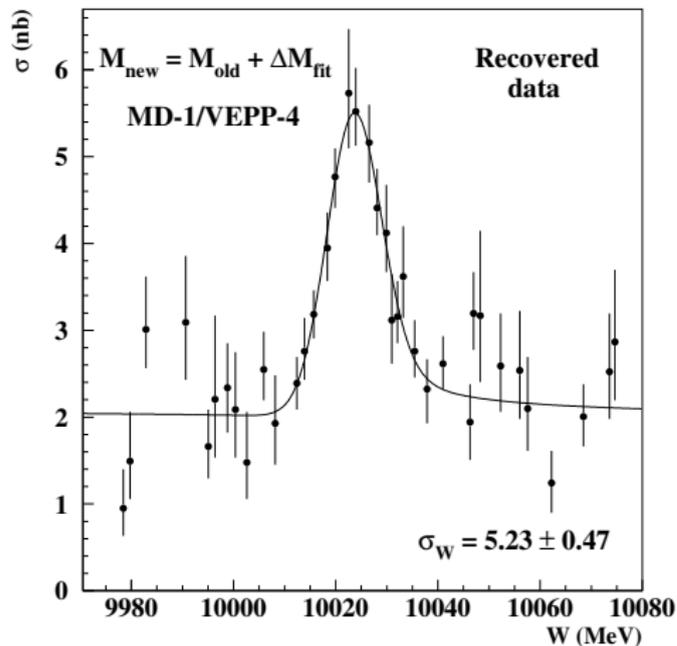
$$M_{\text{old}} = 9459.97 \pm 0.11 \pm 0.07$$

$$M_{\text{new}} = 9460.11 \pm 0.11 \pm 0.07$$

$$\Delta(\text{int}) = -0.071 \quad \Delta(m_e) = -0.081$$

$$\Delta(JS) = -0.081 \quad \Delta(\text{fit}) = +0.375$$

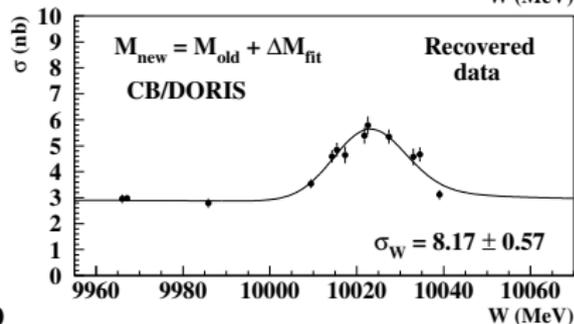
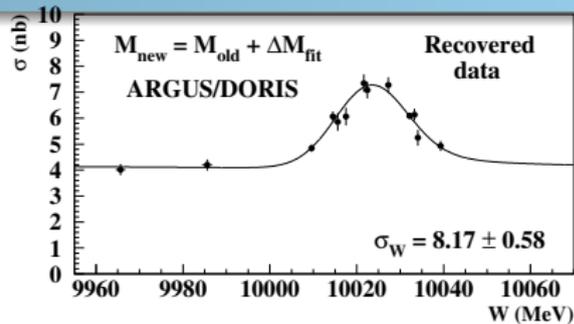
$\Upsilon(2S)$ mass (M_{eB})



$$M_{\text{old}} = 10023.5 \pm 0.5$$

$$M_{\text{new}} = 10023.4 \pm 0.5$$

$$\Delta(\text{int}) = -0.105$$



$$M_{\text{old}} = 10023.1 \pm 0.4$$

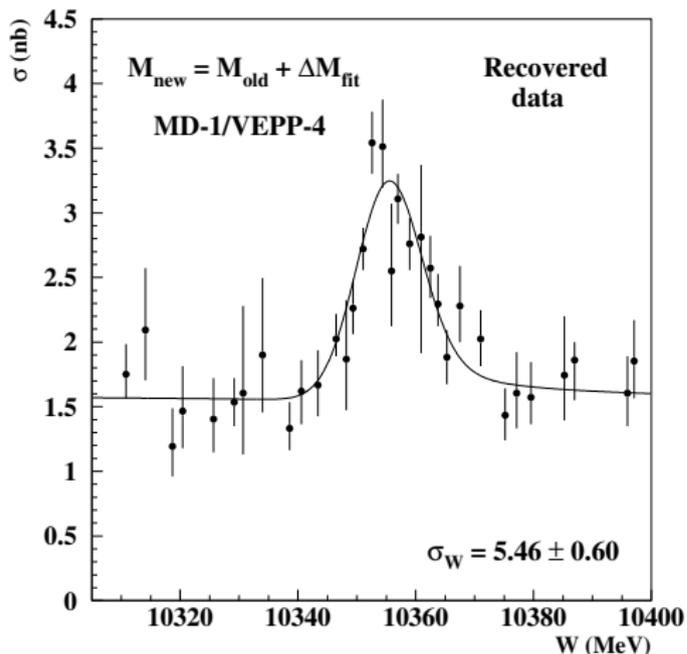
$$M_{\text{new}} = 10022.7 \pm 0.4$$

$$\Delta(\text{int}) = -0.168 \quad \Delta(m_e) = -0.086$$

$$\Delta(JS) = -0.181$$

MD-1 - (ARGUS+CB): $0.62\sigma \rightarrow 1.06\sigma$

$\Upsilon(3S)$ mass (MeV)



$$M_{\text{old}} = 10355.2 \pm 0.5$$

$$M_{\text{new}} = 10355.1 \pm 0.5$$

$$\Delta(\text{int}) = -0.130$$

Итоги ревизии (1)

- Показано, что значение массы $\Upsilon(1S)$, опубликованное в работе CUSB/CESR, некорректно. В рамках использованного в работе подхода сдвиг составляет -0.375 МэВ.
- При необходимости, опубликованные значения были поправлены на:
 - Некорректный учет радиационных поправок
 - Использование устаревшего значения массы электрона
 - Интерференционные эффекты

$\Upsilon(1S)$:	$9460.51 \pm 0.09 \pm 0.05$	\rightarrow	$9460.40 \pm 0.09 \pm 0.04$	MD-1
	$9559.97 \pm 0.11 \pm 0.07$		$9460.11 \pm 0.11 \pm 0.07$	CUSB
$\Upsilon(2S)$:	10023.5 ± 0.5	\rightarrow	10023.4 ± 0.5	MD-1
	10023.1 ± 0.4		10022.7 ± 0.4	ARGUS+CB
$\Upsilon(3S)$:	10355.2 ± 0.5	\rightarrow	10355.1 ± 0.5	MD-1

- Расхождение в результатах МД-1 and CUSB по массе $\Upsilon(1S)$ уменьшилось с 3.25σ до 1.83σ

Среднее значение массы $\Upsilon(1S)$, вычисленное по правилам PDG

$$9460.29 \pm 0.15 \text{ МэВ}$$

A.G.Shamov and O.L.Rezanova, Phys.Lett. B839 (2023) 137766

$T(1S)$ MASS		9460.40 \pm 0.10 MeV		
VALUE (MeV)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT	
9460.40 \pm 0.09 \pm 0.04	¹ SHAMOV	2023	RVUE $e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	
• • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • •				
9460.11 \pm 0.11 \pm 0.07	² SHAMOV	2023	RVUE $e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	
9460.51 \pm 0.09 \pm 0.05	^{3, 4} ARTAMONOV	2000	MD1 $e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	
9460.60 \pm 0.09 \pm 0.05	^{5, 6} BARU	1992B	MD1 $e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	
9460.59 \pm 0.12	BARU	1986	MD1 $e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	
9460.6 \pm 0.4	^{7, 6} ARTAMONOV	1984	MD1 $e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	
9459.97 \pm 0.11 \pm 0.07	⁸ MACKAY	1984	CUSB $e^+ e^- \rightarrow$ hadrons	
¹ Reanalysis of MD1 data using the electron mass from COHEN 1987, the radiative corrections from KURAEV 1985 and interference effects.				
² Obtained by reanalysing CUSB data (MACKAY 1984), but not authored by the CUSB collaboration.				
³ Reanalysis of BARU 1992B and ARTAMONOV 1984 using new electron mass (COHEN 1987).				
⁴ Superseded by SHAMOV 2023.				
⁵ Supersedes BARU 1986.				
⁶ Superseded by ARTAMONOV 2000.				
⁷ Value includes data of ARTAMONOV 1982.				
⁸ Reanalysed by SHAMOV 2023.				

Исключение результата CUSB снижает надежность табличного значения массы поскольку неопределенности ускорительной природы оценить нелегко

Опыт работы KEDR@VEPP-4М по измерению масс:

“Final analysis of KEDR data on J/ψ and $\psi(2S)$ masses” PLB **749**(2015)50

- 6 J/ψ и 7 $\psi(2S)$ точных сканирований 2002–2008
- Систематические неопределенности в сканировании $7 \div 10$ keV (2.5 ppm)
- рассмотрено более 15 источников неопределенности

Разница условий на ψ и Υ :

ψ : Инжекция из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М на энергии точки сканирования

Υ : Ускорение в ВЭПП-4М от 1.9 до 4.73 ГэВ

Υ : Некоторые систематические неопределенности $\propto E_{beam}^2$

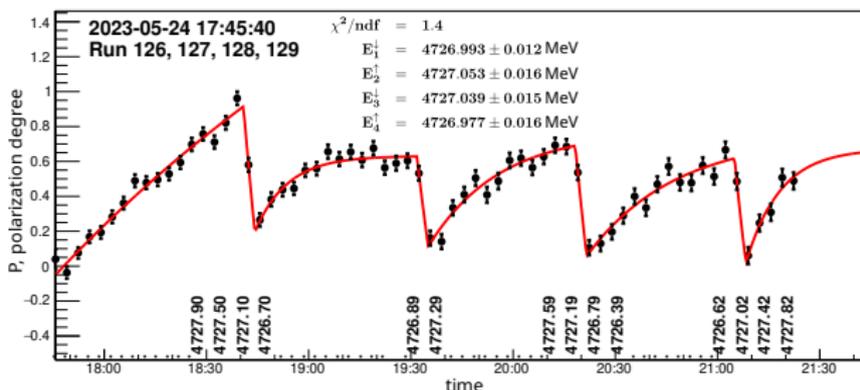
Цели эксперимента на $\Upsilon(1S)$:

- Систематические неопределенности < 30 кэВ (6.3 ppm)
- Статистическая ошибка массы < 40 кэВ
- Статистическая ошибка $\Gamma_{ee} < 1\%$

Интегральная светимость $\simeq 10 \text{ pb}^{-1}$, $\simeq 400$ runs,
 $\simeq 3$ месяца при пиковой светимости $0.5 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Состояние дел:

- Получена поляризация в окрестности $E_{beam} = 4.73$ ГэВ
- Улучшена температурная стабильность ВЭПП-4М
- Проведено короткое тестовое сканирование $\Upsilon(1S)$
- Оптимизирован энергетический разброс
- Хорошо работает лазерный поляриметр:



★ Надеемся начать работу в ближайшее время

Ожидаемые систематические неопределенности (кэВ)

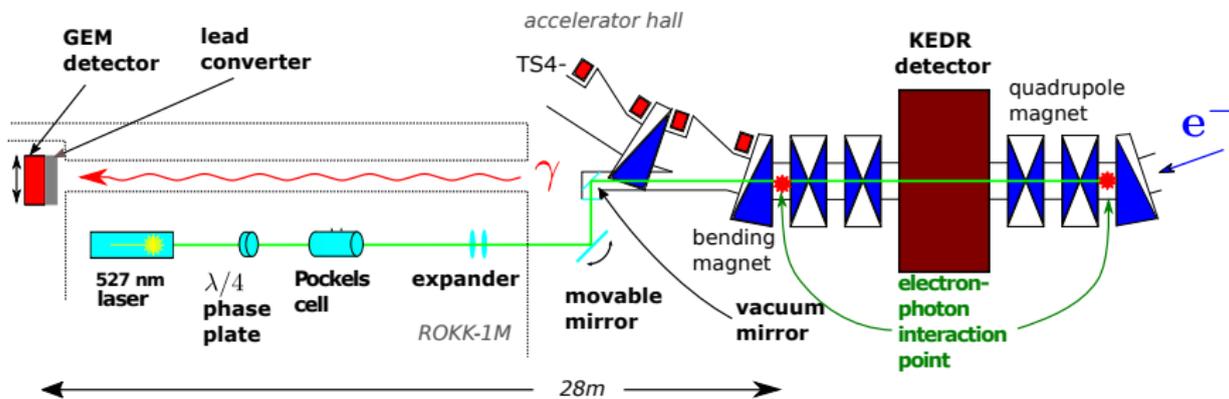
Пересчет неопределенностей с J/ψ на $\Upsilon(1S)$, таблица из PLB **749**(2015)50

Systematic uncertainties in J/ψ scans (keV):

<i>Uncertainty source</i>	J/ψ	\rightarrow	$\Upsilon(1S)$
Energy spread variation	1.8		17.
Energy calibration accuracy	1.9		6.
Energy assignment to DAQ runs	3.5		12.
Beam separation in parasitic I.P.s*	1.7		
Beam misalignment in the I.P.	1.5		5.
e^+ , e^- -energy difference	1.2		4.
Symmetric distortion of the energy distribution	2.1		6.
Asymmetric distortion of the energy distribution*	1.9		18.
Beam potential	1.9		6.
Detection efficiency instability	1.8		5.
Residual machine background	0.7		3.
Luminosity measurements	1.7		5.
Interference in the hadronic channel	2.7		20.
<i>Sum in quadrature</i>	≈ 7.2	\rightarrow	$\simeq 35$

* — correction uncertainty

Layout of the laser polarimeter:



V. E. Blinov *et al.*, JINST 15 (2020) C08024