

Ревизия результатов по измерению масс $\Upsilon(1S) - \Upsilon(3S)$

А. Шамо́в и О. Резанова

*Дела давно минувших дней,
преданья старины глубокой
'Руслан и Людмила', песнь 1*

О планируемом эксперименте КЕДР/ВЭПП-4М

А. Шамо́в

*Идет направо – песнь заводит,
Налево – сказку говорит
Там же, посвящение*

6 июня - День Пушкина

- 1 Введение
- 2 Опубликованные результаты
- 3 Измерение энергии методом резонансной деполяризации
- 4 Обработка данных Maskay *et al.* [CUSB/CESR]
- 5 Поправки к радиационным поправкам
- 6 Уточнение массы электрона
- 7 Учет интерференции резонанса и подложки
- 8 Масса $\Upsilon(1S)$
- 9 Масса $\Upsilon(2S)$
- 10 Масса $\Upsilon(3S)$
- 11 Заключение
- 12 О планируемом эксперименте КЕДР/ВЭПП-4М

В преддверии эксперимента по измерению массы Υ -мезонов на ВЭПП-4М желательно привести все опубликованные результаты к общему знаменателю

- устранив проблемы в учете радиационных поправок
- учтя уточнение массы электрона
- приняв во внимание интерференцию распадов резонанса и нерезонансной подложки

Желательно также уменьшить противоречие результатов МД-1/ ВЭПП-4 и CUSB/CESR по массе $\Upsilon(1S)$ -мезона, связанное с проблемами в обработке данных, о чем известно уже 30 с лишним лет

Ускорительные аспекты работ никак не затрагиваются!

Можно надеяться, что убедительная публикация на эту тему повлечет за собой исправление значения масс в PDG, как произошло в 1989 году со значением лептонных ширин ψ - и Υ -мезонов

Восстановление данных по зависимости сечения от энергии пучков по опубликованным рисункам с точностью до пикселя позволило увеличить точность поправок и обойтись без моделирования

$\Upsilon(1S)$ 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	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons
9459.97 ± 0.11 ± 0.07	MACKAY 84	REDE	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons

Противоречие 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	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons
10023.1 ± 0.4	BARBER 84	REDE	$e^+ e^- \rightarrow$ 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	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons

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

Измерение энергии методом резонансной деполяризации

Электронный пучок спонтанно поляризуется, частота прецессии спина

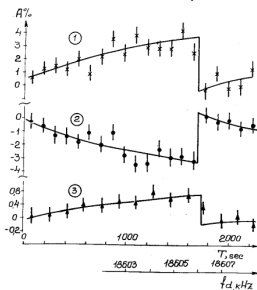
$$\Omega_{\text{spin}} = \omega_{\text{rev}} (1 + \mu' / \mu \gamma) \text{ зависит от энергии пучка } E = \gamma m_e$$

Внешнее поле изменяющейся частоты f_d деполяризует пучок при условии

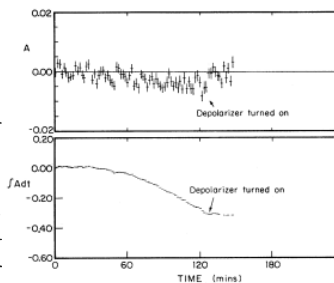
$$\Omega_{\text{spin}} = m \cdot \omega_{\text{rev}} + n \cdot f_d \quad (\Upsilon(1S) \text{ на ВЭПП-4: } m = 11, n = 1)$$

По f_d в момент деполяризации и ω_{rev} определяется энергия пучка

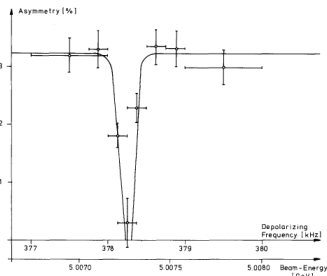
Деполяризация детектировалась по скачку асимметрии рассеяния СИ на встречном пучке (предложение Ю.А.Тихонова, ВЭПП-4/1,2/) и асимметрии рассеяния продольно поляризованного лазерного излучения (ВЭПП-4/3/, CESR и DORIS)



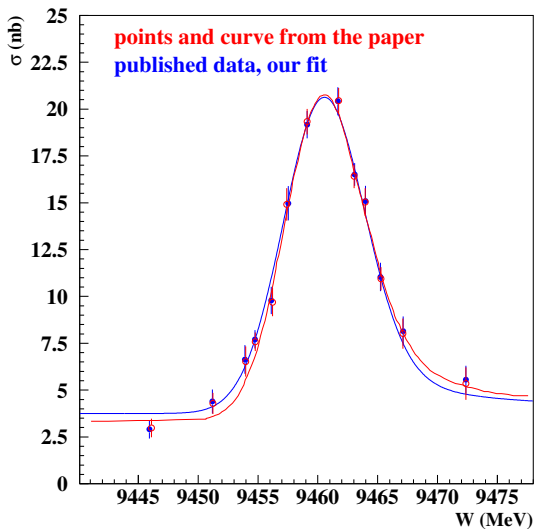
ВЭПП-4



CESR



DORIS



Наша подгонка опубликованных данных с соответствующим учетом рапоправок дает массу на 0.375 МэВ выше опубликованного значения

Опечатка в данных?

Максимально точно восстановили данные с рисунка в статье, точки совпадают

Разница в массах связана с вычислением подгоночной функции. Мы вычисляем правильно (независимо А.Д.Букин, Тодышев, Шамов)

Одна опечатка была найдена (О.Р.), но не уменьшила разницу масс!

Первая работа по р.п. к узким резонансам:

Ya.I.Azimov, A.I.Vainshtein, L.N.Lipatov, V A.Khoze, JETP Lett. **21**(1975)172

При обработке данных CUSB и ARGUS+CB использовалась формула из работы J.D.Jackson and D.L.Scharre, NIM **128**(1975)13

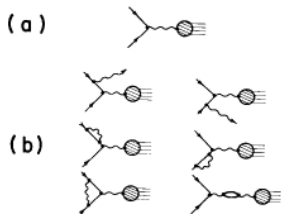


Fig. 1. e^+e^- annihilation via one-photon exchange. (a) Lowest order diagram; (b) Higher order diagrams, the top two involving real (soft) photon emission and the next four each involving one additional virtual photon.

Получен 'радиационный гауссиан' G_R : свертка вероятности излучения энергии с гауссовым энергетическим разбросом G и сечение в предположении нулевой ширины резонанса

Учитывалось излучение дополнительных мягких фотонов, если излучен реальный фотон, и не учитывалось, если фотоны виртуальные

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

Ошибка в массе Υ зависит от энергетического разброса, ~ 100 кэВ

Методом резонансной деполяризации по частоте прецессии спина $\Omega_{\text{spin}}/\omega_{\text{rev}} = 1 + \mu'/\mu\gamma$ определяется средний лоренц-фактор электронов пучка, для вычисления энергии пучка и массы рождаемого частицы нужно знать массу электрона.

Во время экспериментов по измерениям масс Υ -мезонов табличная точность массы электрона составляла 2.8 ppm, что давало ошибку 26 кэВ в массе $\Upsilon(1S)$.

В работе E.R.Cohen and B.N.Taylor, «The 1986 adjustment of the fundamental physical constants», Rev.Mod.Phys. **59**(1987)1121 значение массы электрона было поправлено на -8.5 ppm с уменьшением ошибки до 0.3 ppm из-за уточнения величины e/h

Результаты МД-1 были пересчитаны в Phys.Lett. **B474**(2000)427, для $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$ и $\Upsilon(3S)$ сдвиги масс составляют -80, -85 и -88 кэВ, соответственно.

Результаты с CESR и DORIS не поправлялись

Ya.I. Azimov *et al.*, JETP Lett. **21**(1975)172: вклад резонанса в состояние f в мягкофотонном приближении без учета энергетического разброса (сейчас используем уточненную формулу):

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

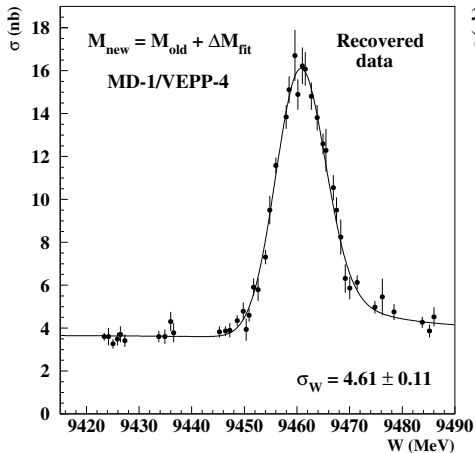
где $f(W) = \left(\frac{M/2}{M-W-i\Gamma/2}\right)^{1-\beta}$, $\beta = \frac{4\alpha}{\pi} \left(\ln \frac{W}{m_e} - \frac{1}{2}\right)$

Параметр λ определяет силу интерференции Для суммы адронных мод (b_m и $\mathcal{B}_m^{(s)}$ относительные вероятности моды в подложке и в сильном распаде, а ϕ_m - фаза интерференции сильной и электромагнитной 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, и сумма в правой части (1) зануляется.

Сдвиг массы Υ растет с энергетическим разбросом, ~ 100 кэВ

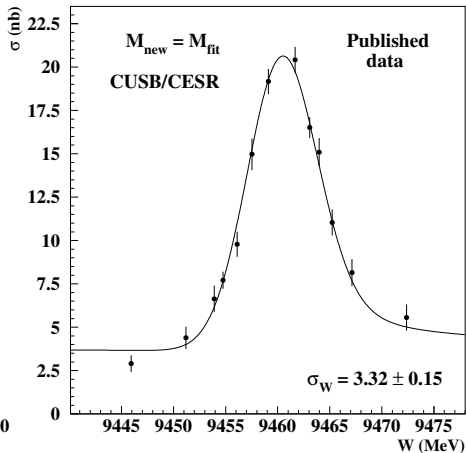


$$M_{\text{old}} = 9460.51 \pm 0.09 \pm 0.05$$

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

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

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

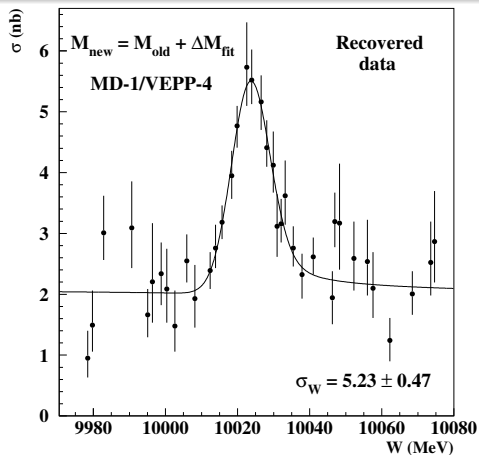


$$M_{\text{old}} = 9459.97 \pm 0.11 \pm 0.07$$

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

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

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

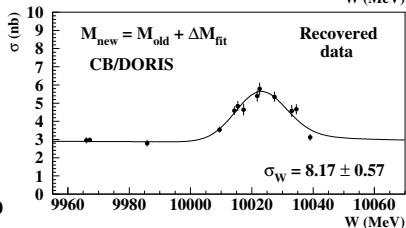
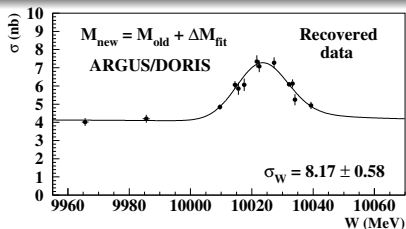


$$M_{\text{old}} = 10023.5 \pm 0.5$$

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

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

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

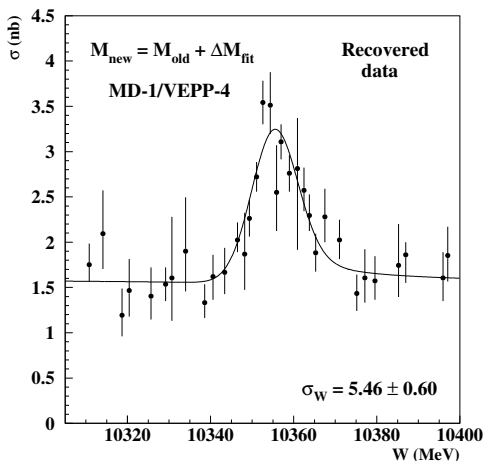


$$M_{\text{old}} = 10023.1 \pm 0.4$$

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

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

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



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

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

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

- Показано, что подгонка данных CUSB/CESR по массе $\Upsilon(1S)$ была проведена не вполне корректно, масса оказалась сдвинута на -0.375 МэВ
- В случаях, когда это требовалось, опубликованные значений масс поправлены на
 - некорректный учет радиационных поправок,
 - использование устаревшего значения массы электрона,
 - эффект интерференции распадов резонанса и нерезонансных событий

$\Upsilon(1S)$:	$9460.51 \pm 0.09 \pm 0.05$	\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

- Разница в результатах МД-1 и CUSB по массе $\Upsilon(1S)$ уменьшилась с 3.25σ до 1.83σ

О планируемом эксперименте (1)

Можно спорить, насколько востребовано повышение точности массы Υ -мезонов, бесспорно то, что [в обозримом будущем] оно может быть осуществлено только на ВЭПП-4М.

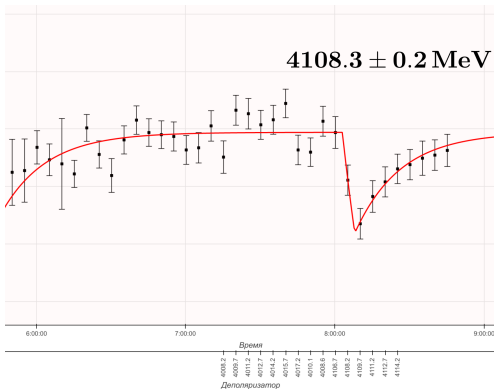
Планируется уменьшить статистическую ошибку массы $\Upsilon(1S)$ до 50 кэВ, требуемый интеграл светимости 6-9 пб⁻¹ в зависимости от того, удастся ли оптимизировать энергетический разброс ВЭПП-4М.

Оптимистическая оценка времени набора – 1.5-2.5 месяца без учета затрат на калибровку энергии. Число заходов – 350–500.

На данный момент

- Разработан и испытан лазерный поляриметр (И.Николаев, В.Каминский С.Захаров и др.), ведутся работы по его усовершенствованию
- Выставлены приемники СИ для работы выше 4.5 ГэВ в пучке
- Получена поляризация пучков на энергии 4.1 ГэВ, на 4.73 ГэВ поляризации пока нет, требуется подстройка режима ВЭПП-4М
- Идет выбор схемы эксперимента, минимизирующий систематические ошибки

Пример калибровки энергии:



К выбору схемы эксперимента:

На ВЭПП-4 калибровка энергии делалась или до начала набора статистики, или после него. Во время набора **был включен деполяризатор**, чтобы избежать вариации эффективности регистрации событий в зависимости от угла φ , что добавляло время поляризации к продолжительности захода. Хотелось бы оценить, насколько существ-

енными могут быть вариации эффективности, и **по возможности отказаться от принудительной деполяризации**.

Требуется помощь теоретиков, чтобы получить угловые распределения для $e^+e^- \rightarrow 3g$ с учетом поляризации пучков.

О планируемом эксперименте (3)

Завершу перечислением систематических эффектов, учтывавшихся при измерении массы $\Upsilon(1S)$ на ВЭПП-4, с указанием их величины:

- 1 Точность знания масс электрона - ± 26 кэВ, теперь ± 3 кэВ.
- 2 Точность измерения частоты деполяризации и частоты обращения ± 14 кэВ, теперь пренебрежимо.
- 3 Вертикальные искажения орбиты -9 ± 7 кэВ, при оценке не учитывалась замкнутость орбиты, завышено. Потребуется изучения.
- 4 Движение рожденного Υ -мезона -4.1 ± 0.2 кэВ, ошибка, было -1.1 ± 0.1 кэВ, ожидается -1.3 ± 0.2 кэВ.
- 5 Разница энергии позитронов и электронов, пренебрежимо. Не рассматривалось влияние электрических полей, будет < 10 кэВ?
- 6 Смещение пика из-за зависимости размера пучка от энергии из-за хроматизма β -функций -25 ± 10 кэВ, нужно измерять хроматизм.
- 7 Детекторные нестабильности ± 15 кэВ, потребует изучения
- 8 Стабильность энергетического разброса ± 25 кэВ, потребует изучения.
- 9 Точность вычисления сечения ± 10 кэВ, теперь ± 3 кэВ.
- 10 Не рассматривалось наличие электростатически наведенной вертикальной дисперсии. Требуется изучения, ОПАСНО!
- 11 Влияние потенциала пучка не рассматривалось, ожидается -5 ± 3 кэВ.

В сумме было -40 ± 50 кэВ. Нужно бороться за уменьшение ошибки!

Энергия столкновения e^+e^- -пары, усредненная по импульсам частиц

$$\langle W \rangle_p \approx \langle E_+ + E_- \rangle - \frac{1}{2} (\theta_x^2 + \theta_y^2) E - \frac{\sigma_E^2}{2E} - \frac{(\langle E_+ \rangle - \langle E_- \rangle)^2}{4E}.$$

Разброс энергии пучка на ВЭПП-4 в области $\Upsilon(1S)$ $\sigma_E = 4.6/\sqrt{2}$ МэВ,

Сдвиг энергии за счет движения Υ -мезона $4.6^2/2/9460 = 0.0011$ МэВ

Оценка систематических эффектов для CESR (резонаторы смещены на 1/3 кольца относительно диаметра CLEO-CUSB):

TABLE II. A list of errors. Shifts in the mass due to vertical orbit distortions and luminosity corrections are shown.

Source of Error	Size (keV)
Statistical error of fit	± 110
Systematic fitting error	± 40
Vertical orbit distortion	-5 ± 5
Error (m_e)	± 26
Error $[(g-2)/2]$	± 0.026
Error (f/f_0)	± 8
Relative Υ velocity correction	± 0.002
e^- beam $\langle E \rangle$ systematic errors:	
Radiation from quadrupoles and energy dispersion	± 0.14
Second-order correction to energy loss around the ring	± 0.044
Transverse electric wake fields in the rf cavities	± 8
Shift of luminosity away from the sum of averages due to chromaticity	$+ 40 \pm 40$