

Новый эксперимент по измерению массы ипсилон-мезона на коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР.

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



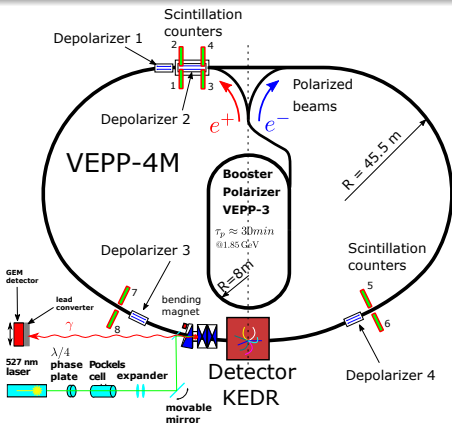
LXXV Международная конференция ЯДРО-2025.
Санкт-Петербург, 1-6 Июля 2025

Новый эксперимент по измерению массы $\Upsilon(1S)$ -мезона

Измерения масс узких резонансов, таких как J/ψ , $\psi(2S)$, $\Upsilon(1S)$ - $\Upsilon(3S)$, с точностью лучше 10^{-5} не востребовано теорией, но важно с точки зрения метрологии. Полученные значения масс используется для калибровки шкалы e^+e^- -коллайдеров и калибровки детекторов во многих экспериментах по физике элементарных частиц. В настоящее время единственным коллайдером, позволяющим проверить и уточнить имеющиеся данные, является ВЭПП-4М, работа которого близится к завершению.

- 1 Детектор КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М
- 2 Метод резонансной деполяризации
- 3 Ревизия результатов по массам $\Upsilon(1S)$ - $\Upsilon(3S)$
- 4 Лазерный поляриметр ВЭПП-4М
- 5 Новый эксперимент КЕДР@ВЭПП-4М
- 6 Текущий результат
- 7 Заключение

Коллайдер ВЭПП-4М



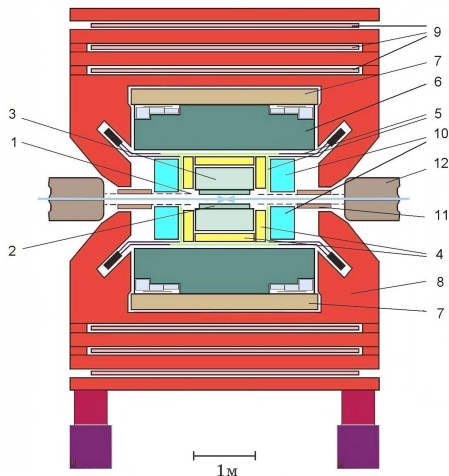
ВЭПП-4 работал в 1981-1985 с МД-1,
с 1998 – ВЭПП-4М с Кедр

Периметр	366 м
Энергия пучка	1 ÷ 5 ГэВ
Количество сгустков	2 × 2
Светимость:	$E = 1.9 \quad 2 \cdot 10^{30} \frac{1}{\text{CM}^2 \cdot \text{C}}$
	$E = 3.5 \quad 1 \cdot 10^{31} \frac{1}{\text{CM}^2 \cdot \text{C}}$

Измерение энергии методом
резонансной деполяризации:

- Тушековский поляриметр (внутрисгустковое рассеяние), $E < 2$ ГэВ
Мгновенная точность измерений $\simeq 1 \times 10^{-6}$
Точность интерполяции энергии $(5 \div 15) \times 10^{-6}$ (10 ÷ 60 keV)
- Лазерный поляриметр (асимметрия рассеяния поляризованного света).
При 4.73 ГэВ статистическая точность $\simeq 1.5 \times 10^{-6}$ за 10 – 20 минут,
корректируемая систематическая неопределенность 1×10^{-6} (10 кэВ)

Детектор КЕДР



- ❶ Вакуумная камера
 - ❷ Вершинный детектор
 - ❸ Дрейфовая камера
 - ❹ Аэрогелевые счетчики
 - ❺ Сцинтилляционные счетчики
 - ❻ Калориметр на жидком криптоне
 - ❼ Сверхпроводящая катушка
 - ❽ Ярмо магнита
 - ❾ Мюонная система
 - ❿ CsI калориметр
 - ⓫ Компенсационный соленоид
 - ⓬ Линза ВЭПП-4м
-
- Монитор светимости по ОТИ в направлениях e^+ и e^-
 - Система регистрации рассеянных электронов для изучения двухфотонной физики

Обзор результатов на низких энергиях Physics of Particles and Nuclei. Volume 54, pp. 185-226

Метод резонансной деполяризации (1975. ИЯФ)

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

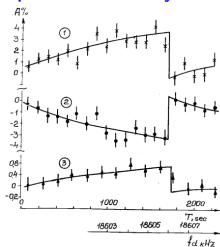
$$\Omega_{\text{spin}} = \omega_{\text{rev}} (1 + \mu'/\mu \gamma) \text{ зависящей от энергии пучка } E = \gamma m_e$$

Внешнее электромагнитное поле переменной частоты f_d деполяризует пучок при резонансном условии

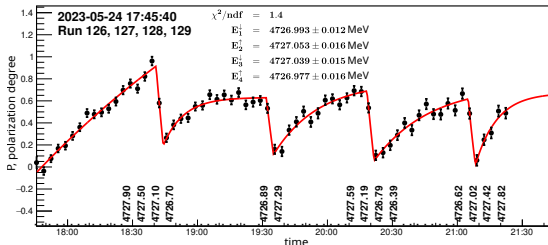
$$\Omega_{\text{spin}} = m \cdot \omega_{\text{rev}} + n \cdot f_d \quad (\Upsilon(1S) \text{ at VEPP-4: } m = 11, n = 1)$$

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)



ВЭПП-4М (лазер)

$\Upsilon(1S)$ MASS

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

Расхождение 3.25 σ !

$\Upsilon(2S)$ MASS

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

Необходимость ревизии

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 $\Upsilon(1S)$ по техническим причинам

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 обсуждались!

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
	$9459.97 \pm 0.11 \pm 0.07$		$9460.11 \pm 0.11 \pm 0.07$	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

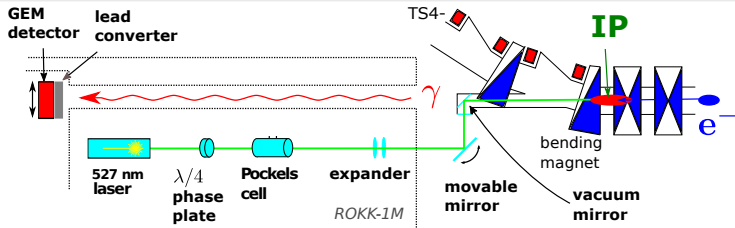
Среднее значение массы $\Upsilon(1S)$, вычисленное по правилам PDG
 9460.29 ± 0.15 МэВ

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

$\Upsilon(1S)$ MASS		9460.40 ± 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 ± 0.12	BARU	1986	MD1	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons
9460.6 ± 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 .				

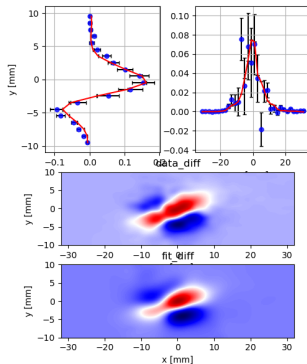
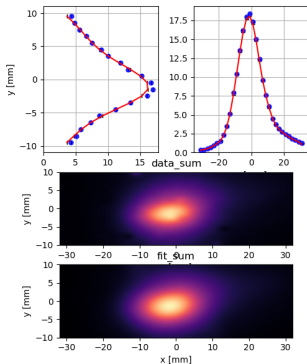
Исключение результата CUSB снижает надежность табличного значения массы поскольку неопределенности ускорительной природы оценить нелегко

Лазерный поляриметр ВЭПП-4М



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
 $P = 0.808 \pm 0.077$
 $Q = -0.494 \pm 0.014$
 $\beta = 40.57 \pm 0.73^\circ$
 $DN = 0.002 \pm 0.001$
 $k_{reg} = 1.0e-4$



V. Kaminskiy *et al.*, JACoW IBIC2024 (2024), THP61

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 $\Upsilon(1S)$:

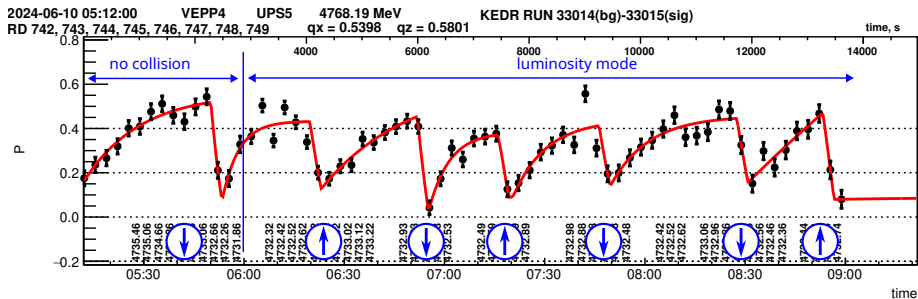
- Систематические неопределенности < 30 кэВ (6.3 ppm)
- Статистическая ошибка массы < 40 кэВ
- Статистическая ошибка $\Gamma_{ee} < 1\%$

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

Новый эксперимент КЕДР@ВЭПП-4М (сейчас)

Планировалось провести несколько 7-точечных сканирований области $\Upsilon(1S)$, 5 точек в области резонанса и по одной выше и ниже резонанса, на данный момент проведено одно полноценное сканирование

Схема набора статистики на примере лучшего заполнения ВЭПП-4М (3 часа 15 минут, 20 нб^{-1}):



240 перепусков пучка, характерное время подготовки пучков 60 минут, число калибровок энергии на одних пучках в области резонанса от 1 до 7, в среднем 2.6

Систематические неопределенности (кэВ)

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

и текущие предварительные оценки

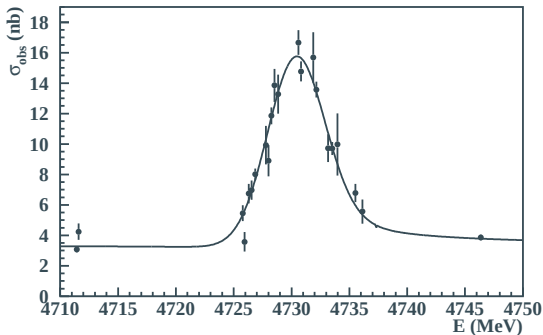
Systematic uncertainties in J/ψ scans (keV):

<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. 10.
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		20.
Asymmetric distortion of the energy distribution*	1.9		18. 10.
Beam potential	1.9		6.
Detection efficiency instability	1.8		5. 15.
Residual machine background	0.7		3.
Luminosity measurements	1.7		5. 25.
Interference in the hadronic channel	2.7		20.
<i>Sum in quadrature</i>	≈ 7.2	$\rightarrow$	$\simeq 40$

* — correction uncertainty

Текущий результат

В мае 2024 проведено сканирование области $\Upsilon(1S)$ с интегралом светимости 1.1 пб^{-1} .



Предварительный результат:

$$M(\Upsilon(1S)) = 9460.30 \pm 0.15 \pm 0.04 \text{ МэВ}$$

$$\sigma_W = 4.85 \pm 0.17 \pm 0.03 \text{ МэВ}$$

Внесена поправка на эффект хроматизма системы фокусировки коллайдера

$$\Delta M = -0.07 \pm 0.01 \text{ МэВ}$$

- На коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР начат эксперимент по измерению массы $\Upsilon(1S)$ –мезона методом резонансной деполяризации с точностью $5 \cdot 10^{-6}$, вдвое лучшей, чем у имеющихся данных.
- В ходе подготовки к нему разработан лазерный поляриметр и проведена ревизия результатов по измерению масс узких состояний Υ –семейства.
- В мае 2024 набрана статистика 1.4 пб^{-1} , соответствующая 12 тысячам распадов $\Upsilon(1S)$, в ходе набора проведено 150 с лишним измерений энергии пучка.
- По данным одного сканирования (1.1 пб^{-1}) получен предварительный результат

$$M(\Upsilon(1S)) = 9460.30 \pm 0.15 \pm 0.04 \text{ МэВ (КЕДР/ВЭПП-4М)}$$

согласующийся с предыдущими измерениями

$$M(\Upsilon(1S)) = 9460.40 \pm 0.09 \pm 0.04 \text{ МэВ (МД-1/ВЭПП-4)}$$

$$M(\Upsilon(1S)) = 9460.11 \pm 0.11 \pm 0.07 \text{ МэВ (CUSB/CESR)}$$

но уступающий им по точности 60 и 20 процентов, соответственно.

- Осенью 2024 эксперимент был приостановлен для изготовления и замены некоторых элементов вакуумной камеры ВЭПП-4М
- Завершение эксперимента планируется в 2026 году

Спасибо за внимание!