



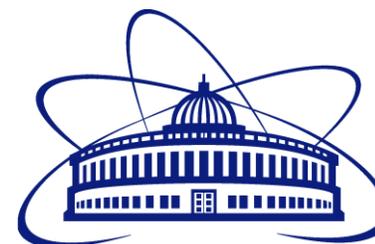
Полная реконструкция B^* мезонов и измерение их масс

Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН

Поликарпов Сергей



11 марта 2026



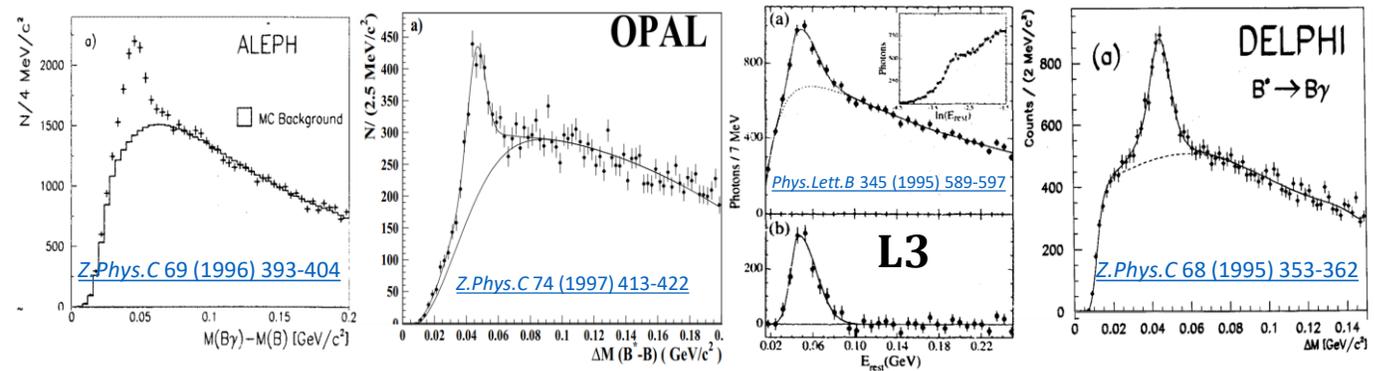
История измерений V^* мезонов

Эксперименты LEP [L3](#), [DELPHI](#), [OPAL](#), [ALEPH](#)
 $Z \rightarrow b\bar{b}$, **инклюзивная** реконструкция V мезонов как **b-jet**
 Изучались распределения **b-jet** + **конвертировавший γ**
 Измерялась «средняя между V^{*+} , V^{*0} , V_s^{*0} » разность масс
 $m(V^*) - m(V)$

*подразумевает $\Delta m = m(V^{*0}) - m(V^0) = m(V^{*+}) - m(V^+)$
 для D мезонов эти Δm отличаются на 1.5 MeV!*

$m_{B^*} - m_B$	VALUE (MeV)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN
	45.21 ± 0.21		OUR FIT	
	45.42 ± 0.26		OUR AVERAGE includes data from $m_{B^*} - m_B$	
	46.2 ± 0.3 ± 0.8		¹ ACKERSTAFF 1997M	OPAL
	45.3 ± 0.35 ± 0.87	4227	¹ BUSKULIC 1996D	ALEP
	45.5 ± 0.3 ± 0.8		¹ ABREU 1995R	DLPH
	46.3 ± 1.9	1378	¹ ACCIARRI 1995B	L3

28+ year-old measurements!



Разности масс также измерялись из распадов P -волновых B_s^0

$m(B^{*+}) - m(B^+)$ измерено [LHCb](#) через разность положений пиков $B_{s2}^*(5840)^0 \rightarrow V^{*+} K^-$ и $B_{s2}^*(5840)^0 \rightarrow V^+ K^-$

$m(B^{*+}) - m(B^{*0})$ измерено [CMS](#) через разность положений пиков $B_{s1}(5830)^0 \rightarrow V^{*0} K_S^0$ и $B_{s1}(5830)^0 \rightarrow V^{*+} K^-$

В PDG до сих пор [одна страница](#) для V^{*+} и V^{*0} !

B^+	$1/2(0^-)$	B^+ MASS	5324.71 ± 0.21 MeV
B^0	$1/2(0^-)$	$m_{B^*} - m_B$	45.21 ± 0.21 MeV
B^+ / B^0 ADMIXTURE		$m_{B^{*+}} - m_{B^+}$	45.37 ± 0.21 MeV
$B^+ / B^0 / B_s^+ / b$ -baryon ADMIXTURE		$ (m_{B^{*+}} - m_{B^+}) - (m_{B^{*0}} - m_{B^0}) $	< 6 MeV CL=95.0%
V_{cb} and V_{cb} CKM Matrix Elements		$m_{B^{*0}} - m_{B^0}$	0.91 ± 0.26 MeV
B^*	$1/2(1^-)$		
$B_1(5721)$	$1/2(1^+)$		

Основная проблема: фотоны низкой энергии из $V^* \rightarrow V\gamma$

Изучение B_s^{*0} на В-фабриках

Масса B_s^{*0} измерялась на В-фабриках используя спектр B_s^0 из распадов $\Upsilon(5S)$:

- $\Upsilon(5S) \rightarrow B_s^0 \bar{B}_s^0$
- $\Upsilon(5S) \rightarrow B_s^{*0} \bar{B}_s^0$
- $\Upsilon(5S) \rightarrow B_s^0 \bar{B}_s^{*0}$
- $\Upsilon(5S) \rightarrow B_s^{*0} \bar{B}_s^{*0}$

Результаты Belle и CLEO не согласуются между собой (PDG scale factor 2.9)

$m_{B_s^*} - m_{B_s}$			
VALUE (MeV)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
$48.5^{+1.8}_{-1.5}$	OUR FIT		Error includes scale factor of <u>2.9</u> .
46.1 ± 1.5	OUR AVERAGE		
$45.7 \pm 1.7 \pm 0.7$	¹ AQUINES 2006	CLEO	$e^+ e^- \rightarrow \Upsilon(5S)$
47.0 ± 2.6	² LEE-FRANZINI 1990	CSB2	$e^+ e^- \rightarrow \Upsilon(5S)$

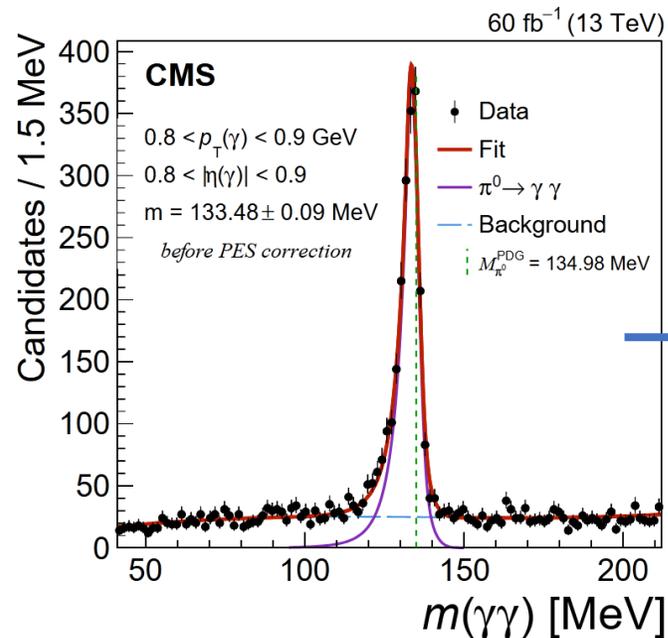
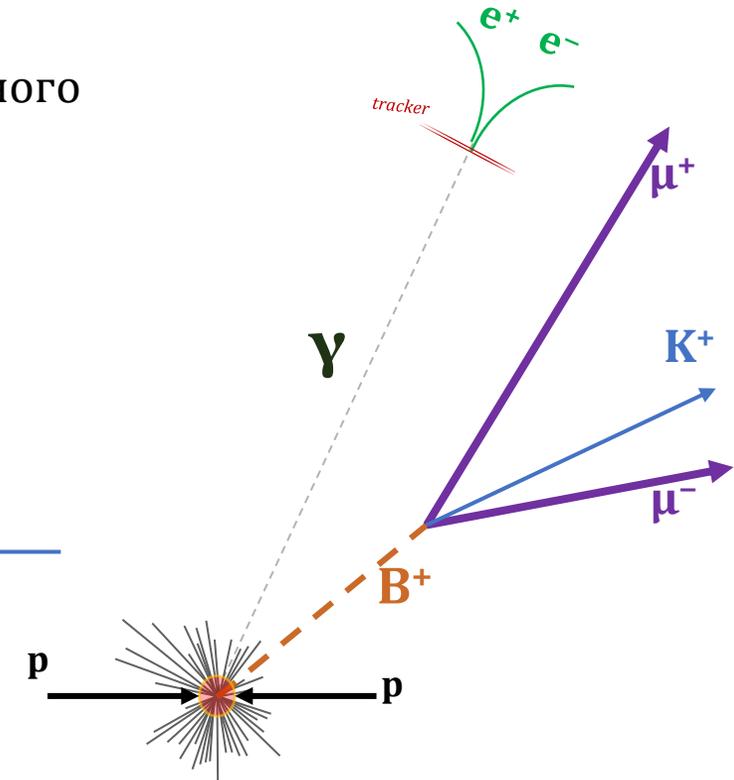
B_s^* MASS			
From mass difference below and the B_s^0 mass.			
VALUE (MeV)	DOCUMENT ID	TECN	
$5415.4^{+1.8}_{-1.5}$	OUR FIT		Error includes scale factor of <u>2.9</u> .
5415.8 ± 1.5	OUR AVERAGE		Error includes scale factor of 2.6.
$5416.4 \pm 0.4 \pm 0.5$	LOUVOT 2009	BELL	
$5411.7 \pm 1.6 \pm 0.6$	¹ AQUINES 2006	CLEO	

Используя данные CMS, отдельно полностью реконструируем B^+ , B^0 , и B_s^0 мезоны в распадах с J/ψ , + фотон

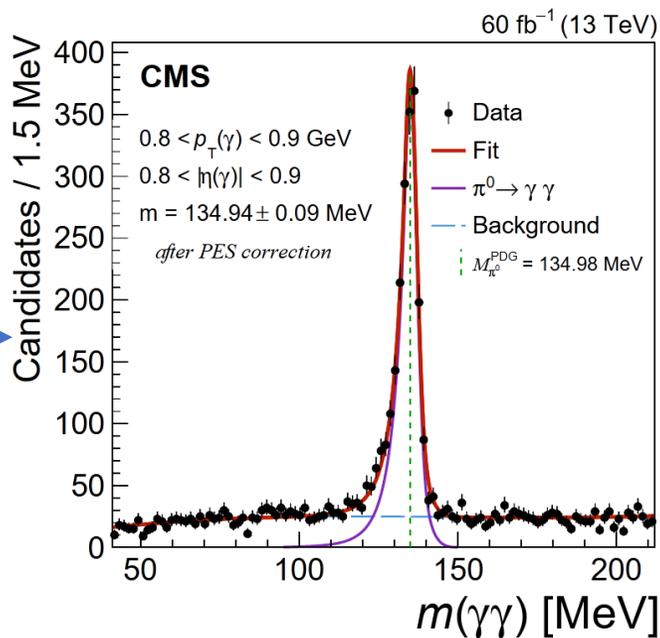


Реконструкция B^*

- Используются все данные Run-2 с димьюонными триггерами, без выбора одного
 - $B^+ \rightarrow \psi K^+$
 - $B^0 \rightarrow \psi K^*(892)^0 [K^+\pi^-]$
 - $B_s^0 \rightarrow \psi \phi [K^+K^-]$
 - $J/\psi, \psi(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$
- **e^+e^- конверсии** для реконструкции мягких фотонов



Пример
калибровки



PDG π⁰ mass: 134.9768 ± 0.0005 MeV

Энергия конверсий недооценена, проведена процедура калибровки энергии конверсий в зависимости от p_T и η, используя π⁰ → γγ (2 конверсии)

Оптимизация фита

$$M(X\gamma) = m(X\gamma) - m(X) + M^{PDG}(X)$$

Разрешение по $M(B\gamma)$ сильно зависит от псевдобыстроты (η) и почти не зависит от p_T

С помощью **ToyMC** (псевдоэксперименты) было получено, что наилучшая точность в измерении масс V^* достигается при использовании одновременной аппроксимации:

- В трёх диапазонах $|\eta|$ для V^{*+}
 - $0 < |\eta| < 0.6,$ $0.6 < |\eta| < 1.0,$ $1.0 < |\eta| < 1.4$
- В двух диапазонах $|\eta|$ для V^{*0}
 - $0 < |\eta| < 0.9,$ $0.9 < |\eta| < 1.5$
- В двух диапазонах $|\eta|$ для V_s^{*0}
 - $0 < |\eta| < 0.8,$ $0.8 < |\eta| < 1.4$

Итого 7 распределений $M(B\gamma)$ в одновременной аппроксимации

Формы сигнала и фона

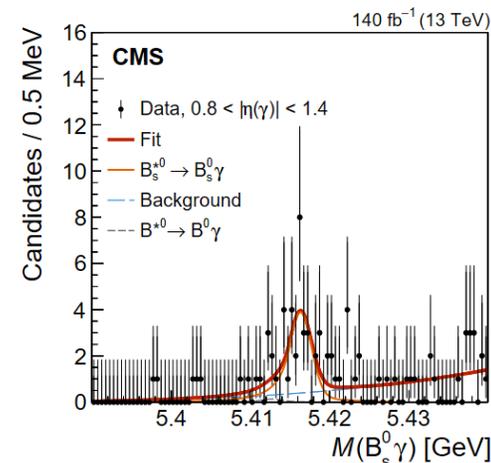
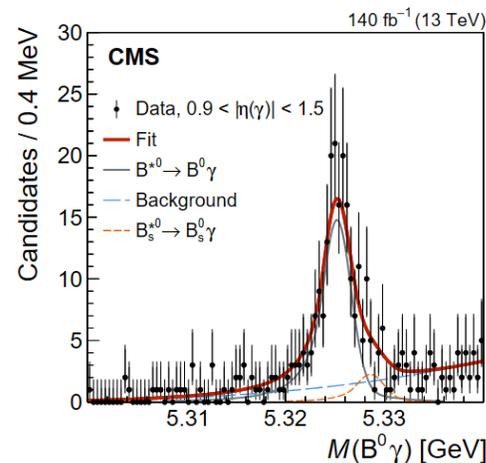
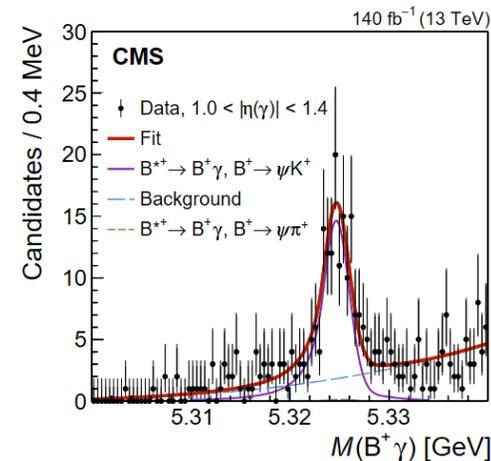
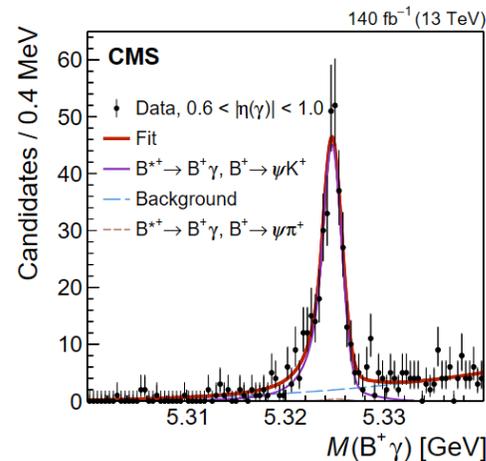
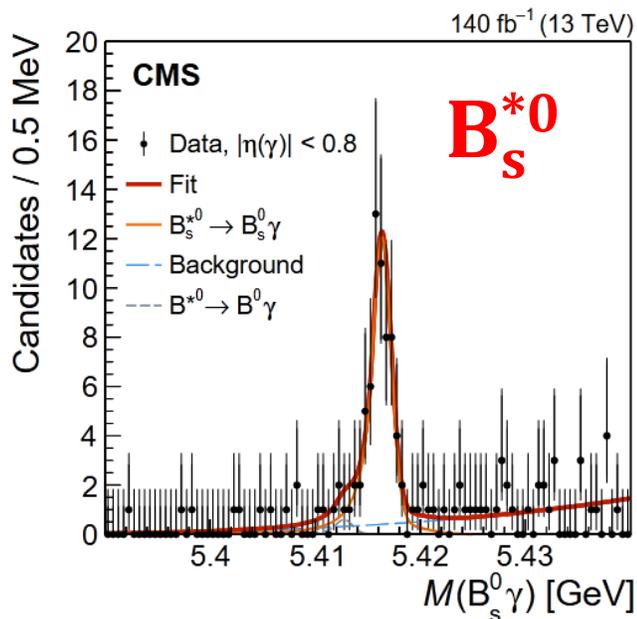
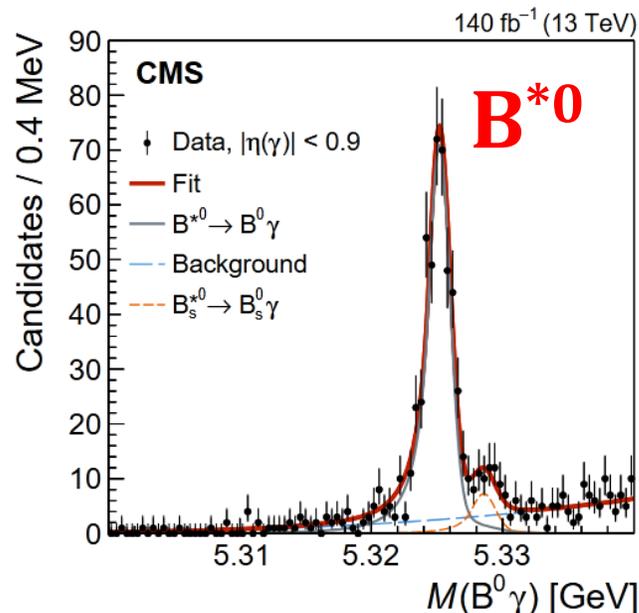
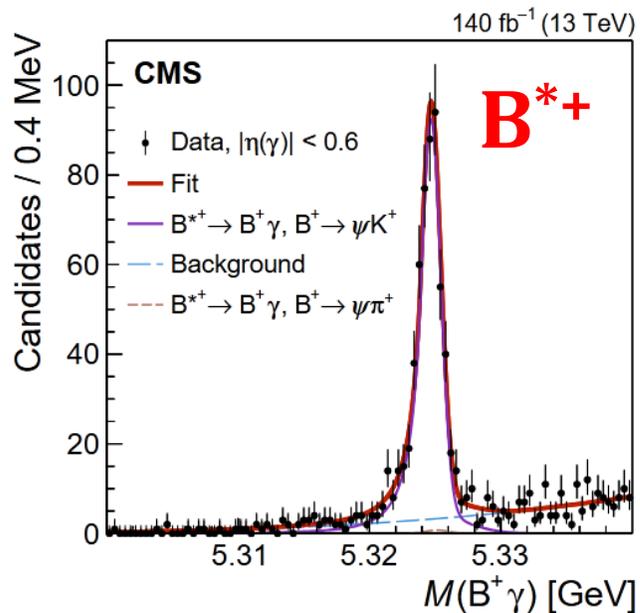
Сигнал (в каждом из 7 диапазонов) моделируется двойной функцией Кристалл-Болл со всеми параметрами, фиксированными из МС, и дополнительным свободным параметром (~ 1) на который умножены все ширины (для учёта разности разрешения между данными и МС)

Комбинаторный фон: $(m-m^0)^\beta$ с общим β

$B^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ - фиксированная форма и нормировка относительно сигнала $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$
 $J/\psi \pi^+$ -комбинации могут быть восстановлены как сигналы $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$

Фон от взаимных вкладов $B^{*0} \Leftrightarrow B_s^{*0}$ - сигнальные формы со сдвигом на ~ 86 MeV
 $B^{*0} \rightarrow \psi K^+ \pi^-$ могут быть восстановлены как сигналы $B_s^{*0} \rightarrow \psi K^+ K^-$ и наоборот

СИГНАЛЫ В* В ДАННЫХ



3 states reconstructed fully exclusively for the 1st time
 Precision order of magnitude better than PDG
 Systematics much smaller than stat. uncertainty

РЕЗУЛЬТАТЫ

	Parameter	Value
1	$\Delta m(B^{*+}) \equiv m(B^{*+}) - m(B^+)$	$45.277 \pm 0.039 \pm 0.027 \text{ MeV}$
2	$\Delta m(B^{*0}) \equiv m(B^{*0}) - m(B^0)$	$45.471 \pm 0.056 \pm 0.028 \text{ MeV}$
3	$\Delta m(B_s^{*0}) \equiv m(B_s^{*0}) - m(B_s^0)$	$49.407 \pm 0.132 \pm 0.041 \text{ MeV}$
4	$m(B^{*+})$	$5324.69 \pm 0.04 \pm 0.03 \pm 0.07 \text{ MeV}$
5	$m(B^{*0})$	$5325.19 \pm 0.06 \pm 0.03 \pm 0.08 \text{ MeV}$
6	$m(B_s^{*0})$	$5416.34 \pm 0.13 \pm 0.04 \pm 0.10 \text{ MeV}$
7	$m(B^{*0}) - m(B^{*+})$	$0.50 \pm 0.07 \pm 0.01 \pm 0.05 \text{ MeV}$
8	$m(B_s^{*0}) - m(B^{*+})$	$91.66 \pm 0.14 \pm 0.03 \pm 0.12 \text{ MeV}$
9	$m(B_s^{*0}) - m(B^{*0})$	$91.15 \pm 0.14 \pm 0.03 \pm 0.12 \text{ MeV}$
10	$m(B_s^{*0}) - \frac{1}{2} [m(B^{*0}) + m(B^{*+})]$	$91.40 \pm 0.13 \pm 0.03 \pm 0.12 \text{ MeV}$
11	$\Delta m(B^{*0}) - \Delta m(B^{*+})$	$0.19 \pm 0.07 \pm 0.01 \text{ MeV}$
12	$\Delta m(B_s^{*0}) - \Delta m(B^{*+})$	$4.13 \pm 0.14 \pm 0.03 \text{ MeV}$
13	$\Delta m(B_s^{*0}) - \Delta m(B^{*0})$	$3.94 \pm 0.14 \pm 0.03 \text{ MeV}$
14	$\Delta m(B_s^{*0}) - \frac{1}{2} [\Delta m(B^{*0}) + \Delta m(B^{*+})]$	$4.03 \pm 0.13 \pm 0.03 \text{ MeV}$
15	$\Delta m(B^{*0}) / \Delta m(B^{*+})$	$1.0043 \pm 0.0015 \pm 0.0002$
16	$\Delta m(B_s^{*0}) / \Delta m(B^{*+})$	$1.0912 \pm 0.0031 \pm 0.0007$
17	$\Delta m(B_s^{*0}) / \Delta m(B^{*0})$	$1.0866 \pm 0.0031 \pm 0.0007$
18	$2 \Delta m(B_s^{*0}) / [\Delta m(B^{*+}) + \Delta m(B^{*0})]$	$1.0889 \pm 0.0030 \pm 0.0007$

PDG 2024 [MeV]

45.34 ± 0.20

45.34 ± 0.20

48.5 ± 1.4

Основной результат:
сверхтонкие расщепления
Точность на порядок
превосходит среднемировую

Adding PDG
B masses

“B* mass” $5324.75 \pm 0.20 \text{ MeV}$ (PDG)

B_s^{*0} mass $5415.4 \pm 1.4 \text{ MeV}$ (PDG)

Разности масс векторных состояний

В согласии, и в 3 раза
точнее

$M_{B^{*0}} - M_{B^{*+}} = 0.91 \pm 0.24 \pm 0.09 \pm 0.02 \text{ MeV}$

[CMS-BPH-16-003](#)

первые измерения

Разности сверхтонких
расщеплений:
первые измерения

Отношения сверхтонких
расщеплений
первые измерения

Разности масс между векторными и основными состояниями

Очарованные мезоны

$$m(D^0) < m(D^+) < m(D_s^+)$$
$$\Delta m(D^{*+}) < \Delta m(D^{*0}) < \Delta m(D_s^{*+})$$

$$m_u < m_d < m_s$$
$$\Delta m_d < \Delta m_u < \Delta m_s$$

Прелестные мезоны

$$m(B^+) < m(B^0) < m(B_s^0)$$
$$\Delta m(B^{*+}) < \Delta m(B^{*0}) < \Delta m(B_s^{*0})$$

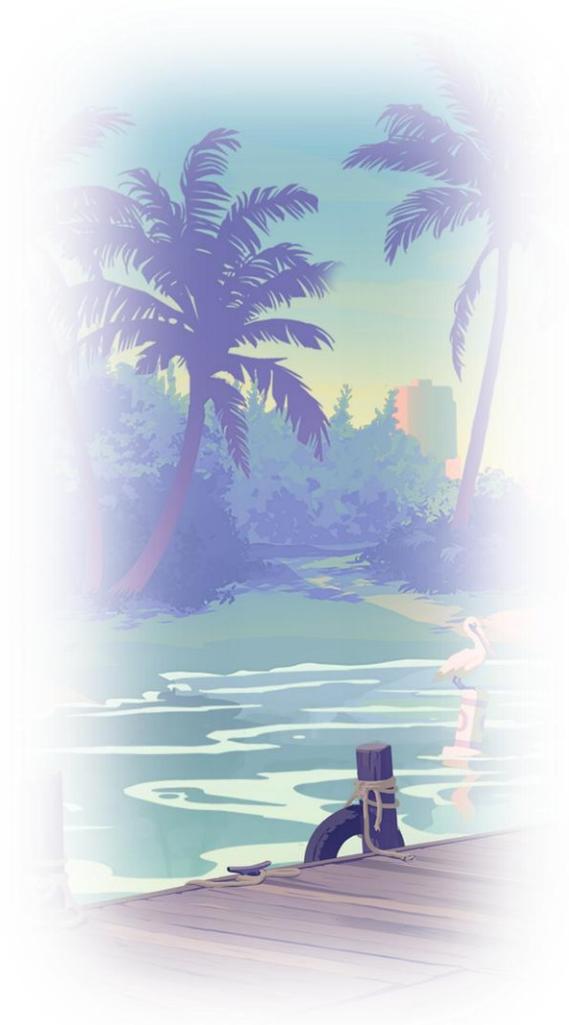
$$m_u < m_d < m_s$$
$$\Delta m_u < \Delta m_d < \Delta m_s$$

?



- **Впервые полностью восстановлены векторные мезоны V^{*+} , V^{*0} , и V_S^{*0}**
 - На порядок улучшена точность измерений соответствующих сверхтонких расщеплений!
 - 18 измеренных параметров (разности/отношения)
- Планируется продолжить исследования с конверсионными фотонами используя данные Run-2 + Run-3

Thank you!



BACKUP



COMPARISON WITH THEORY

*Most predictions we found have no uncertainties; have no fractions of MeV (while experimental precision is ~ 0.1 MeV); don't discuss presented here ratios or differences; and they **all** don't distinguish B^+ and B^0 ☹*

Only few (lattice) theory papers provide uncertainties and comment on mass differences between vector and ground states, i.e. hyperfine splitting in B system.

Parameter	Measurement, MeV	Theory, MeV
$\Delta m(B^{*+})$ $m(B^{*+}) - m(B^+)$	$45.277 \pm 0.039 \pm 0.027$	50 ± 3 [10] 39 ± 2 [24]
$\Delta m(B^{*0})$ $m(B^{*0}) - m(B^0)$	$45.471 \pm 0.056 \pm 0.028$	41.7 ± 5.3 [25]
$\Delta m(B_s^{*0})$ $m(B_s^{*0}) - m(B_s^0)$	$49.407 \pm 0.132 \pm 0.041$	52 ± 3 [10] 38 ± 1 [24] 37.8 ± 6.7 MeV [25]

[10] Phys.Rev.D 86 (2012) 094510

[24] JHEP 01 (2025) 123

[25] Phys.Rev.D 92 (2015) 5, 054509

One paper [10] comments that the ratio of hyperfine splittings $\Delta m(B_s)/\Delta m(B)$ can be predicted with lower uncertainty:

Parameter	Measurement	theory
$\frac{\Delta m(B^{*0})/\Delta m(B^{*+})}{\frac{m(B^{*0})-m(B^0)}{m(B^{*+})-m(B^+)}}$	$1.0043 \pm 0.0015 \pm 0.0002$	—
$\frac{\Delta m(B_s^{*0})/\Delta m(B^{*+})}{\frac{m(B_s^{*0})-m(B_s^0)}{m(B^{*+})-m(B^+)}}$	$1.0912 \pm 0.0031 \pm 0.0007$	1.007 ± 0.034 [10]
$\frac{\Delta m(B_s^{*0})/\Delta m(B^{*0})}{\frac{m(B_s^{*0})-m(B_s^0)}{m(B^{*0})-m(B^0)}}$	$1.0866 \pm 0.0031 \pm 0.0007$	
$\frac{2 \cdot \Delta m(B_s^{*0})}{\Delta m(B^{*+}) + \Delta m(B^{*0})}$	$1.0889 \pm 0.0030 \pm 0.0007$	

[10] Phys.Rev.D 86 (2012) 094510

R. J. Dowdall, C. T. H. Davies, T. C. Hammant, and R. R. Horgan, "Precise heavy-light meson masses and hyperfine splittings from lattice QCD including charm quarks in the sea"

PEAKING CONTRIBUTIONS

$B^0 \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-$ During reconstruction, pion may be swapped with kaon

(well-known feature from many analyses with B^0 , the same P5' BPH-21-002, etc)

We obtain the fraction of swapped component w.r.t. “correctly-tagged” to be about 9%

However, the observed **shape in $M(B\gamma)$ is consistent with the correct component**, with no shift or broadening

→ We ignore this, since swapped candidates will give the same signal shape

Since we have no hadron ID, $B^0 \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-$ can look like $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ and vice versa

To suppress these, we have anti- ϕ cut in B^0 selection and a narrow $\phi \rightarrow K^+ K^-$ mass cut in B_s^0 selection

Still, some fraction of events passes through

The shapes was studied in MC (removing ϕ and anti- ϕ cuts to increase stats) and we found that

- $B^{*0} \rightarrow B^0 \gamma \rightarrow J/\psi K^+ \pi^- \gamma$ reflection in $M(B_s^0 \gamma)$ has the **same shape as $B^{*0} \rightarrow B^0 \gamma$ signal, just shifted** by 87.54 MeV
- $B_s^{*0} \rightarrow B_s^0 \gamma \rightarrow J/\psi K^+ K^- \gamma$ reflection in $M(B^0 \gamma)$ has the **same shape as $B_s^{*0} \rightarrow B_s^0 \gamma$ signal, just shifted** by -87.78 MeV

For the normalization, B_s^0 is not reliable due to significant contribution of $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ decays not through ϕ resonance

For the B^{*0} reflection in $M(B_s^0 \gamma)$, it is estimated to be $\sim 0.67\%$ of the B^{*0} signal

measured observables: ratios and differences

1. $\Delta m(B^{*+}) \equiv m(B^{*+}) - m(B^+)$, directly
2. $\Delta m(B^{*0}) \equiv m(B^{*0}) - m(B^0)$, directly
3. $\Delta m(B_s^{*0}) \equiv m(B_s^{*0}) - m(B_s^0)$, directly
4. $m(B^{*+})$, using 1. and PDG B^+ mass
5. $m(B^{*0})$, using 2. and PDG B^0 mass
6. $m(B_s^{*0})$, using 3. and PDG B_s^0 mass
7. $\Delta m(B^{*0}) - \Delta m(B^{*+})$, directly
8. $\Delta m(B_s^{*0}) - \Delta m(B^{*+})$, directly
9. $\Delta m(B_s^{*0}) - \Delta m(B^{*0})$, directly
10. $\Delta m(B_s^{*0}) - \frac{\Delta m(B^{*0}) + \Delta m(B^{*+})}{2}$, directly

Discussed in
previous slides

11. $m(B^{*0}) - m(B^{*+})$, using 7. and PDG mass difference $m(B^0) - m(B^+)$
12. $m(B_s^{*0}) - m(B^{*+})$, using 8. and PDG mass difference $m(B_s^0) - m(B^+)$
13. $m(B_s^{*0}) - m(B^{*0})$, using 9. and PDG mass difference $m(B_s^0) - m(B^0)$
14. $m(B_s^{*0}) - \frac{m(B^{*0}) + m(B^{*+})}{2}$, using 10. and PDG mass difference $m(B_s^0) - \frac{m(B^0) + m(B^+)}{2}$
15. $\Delta m(B^{*0}) / \Delta m(B^{*+})$, directly
16. $\Delta m(B_s^{*0}) / \Delta m(B^{*+})$, directly
17. $\Delta m(B_s^{*0}) / \Delta m(B^{*0})$, directly
18. $\frac{2 \cdot \Delta m(B_s^{*0})}{\Delta m(B^{*+}) + \Delta m(B^{*0})}$, directly

7 out of 18: 4,5,6,11,12,13,14 – are just shifted by a PDG value w.r.t. another observable

(Statistical and) **systematic uncertainties of 1,2,3 are correlated** and can cancel in difference/ratio →
extract all 11 values in each test/variation and evaluate systematics “separately” for the 11 observables

Theory/model uncertainties are also expected to be reduced in the difference/ratio predictions

SYSTEMATIC UNCERTAINTIES

In all cases systematic uncertainties are much smaller than statistical ones

Source	$m(B^{*+}) - m(B^+)$	$m(B^{*0}) - m(B^0)$	$m(B_s^{*0}) - m(B_s^0)$
Signal model	4	8	21
Signal shape parameters	15	15	18
Yield ratios of $ \eta(\gamma) $ ranges	1	2	10
Background shape	2	<1	7
Cross-feed $B_s^{*0} \leftrightarrow B^{*0}$	<1	1	10
Photon energy scale, statistical	12	14	16
Photon energy scale, systematic	18	18	19
Total	27	28	41

← in keV

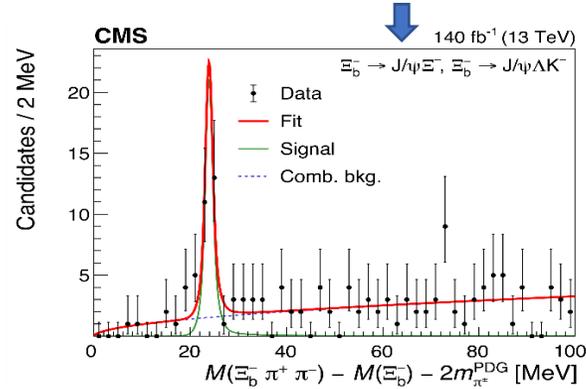
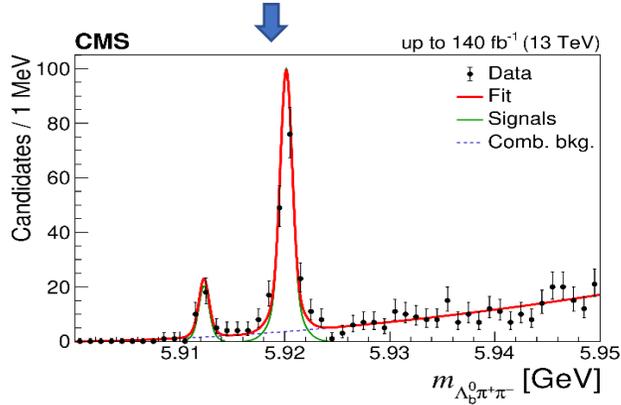
Source	$\Delta m(B^{*0}) - \Delta m(B^{*+})$	$\Delta m(B_s^{*0}) - \Delta m(B^{*+})$	$\Delta m(B_s^{*0}) - \Delta m(B^{*0})$	$\Delta m(B_s^{*0}) - \frac{\Delta m(B^{*0}) + \Delta m(B^{*+})}{2}$
Measured value	194	4130	3936	4033
Statistical uncertainty	68	138	139	134
Signal model	4	23	23	23
Signal shape parameters	1	3	3	3
Yield ratios of $ \eta(\gamma) $ ranges	3	11	7	9
Background shape	3	9	6	8
Cross-feed $B_s^{*0} \leftrightarrow B^{*0}$	1	10	12	11
Photon energy scale, statistical	4	11	11	11
Photon energy scale, systematic	<1	2	2	2
Total systematic uncertainty	7	31	30	30

← in keV

Source	$\Delta m(B^{*0}) / \Delta m(B^{*+})$	$\Delta m(B_s^{*0}) / \Delta m(B^{*+})$	$\Delta m(B_s^{*0}) / \Delta m(B^{*0})$	$\frac{2 \Delta m(B_s^{*0})}{\Delta m(B^{*+}) + \Delta m(B^{*0})}$
Measured value	1.00428	1.09122	1.08656	1.08888
Statistical uncertainty	0.00151	0.00306	0.00309	0.00297
Signal model	0.00009	0.00050	0.00052	0.00052
Signal shape parameters	0.00002	0.00003	0.00004	0.00003
Yield ratios of $ \eta(\gamma) $ ranges	0.00008	0.00023	0.00016	0.00020
Background shape	0.00005	0.00020	0.00014	0.00017
Cross-feed $B_s^{*0} \leftrightarrow B^{*0}$	0.00003	0.00023	0.00025	0.00015
Photon energy scale	0.00009	0.00025	0.00024	0.00024
Total systematic uncertainty	0.00016	0.00067	0.00066	0.00065

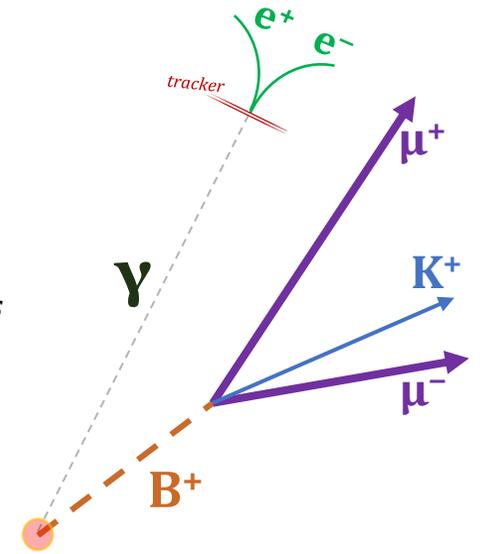
PV refit to improve the resolution

We are using the PV refit, developed and pioneered in [BPH-19-003](#) ($\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$), and used in [BPH-20-004](#) ($\Xi_b^- \pi^+ \pi^-$)

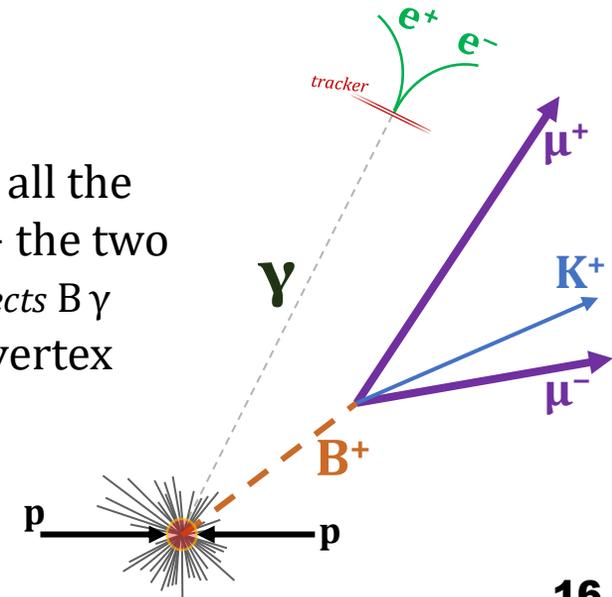


PV refit improves mass resolution

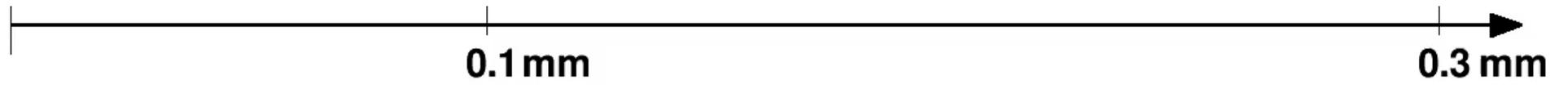
B γ vertex fit:
Fit 2 *KinematicObjects* into same vertex



PV refit: fit all the PV tracks + the two *KinematicObjects* B γ into same vertex



$t = -5.5 \cdot 10^{-13} \text{ s}$



*