



Прецизно измерване на светимостта на  
експеримента LHCb на Големия адронен колайдер  
и  
първоначална оценка на сеченията за раждане на  
неутрални странни адрони

Росен Матев

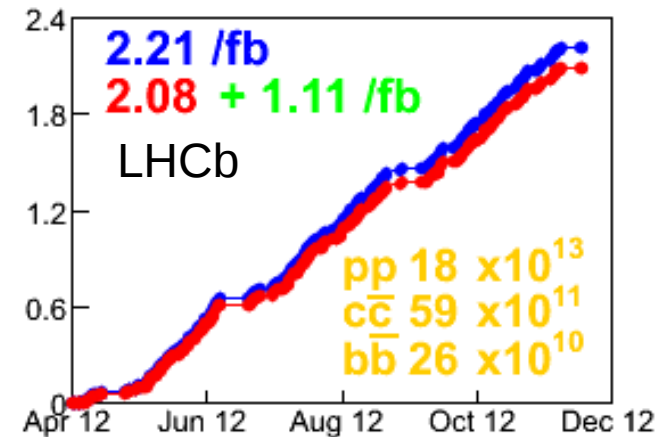
Научен ръководител:  
проф. дфн Румен Ценов  
Научен консултант:  
д-р Якоб Панман

8 януари 2015 г.

# Светимост

$$R = \sigma L$$

- Светимостта (моментна и интегрирана) е основен параметър на ускорителя и експеримента
- Измерването на сечения изисква (прецизно) познаване на интегрираната светимост



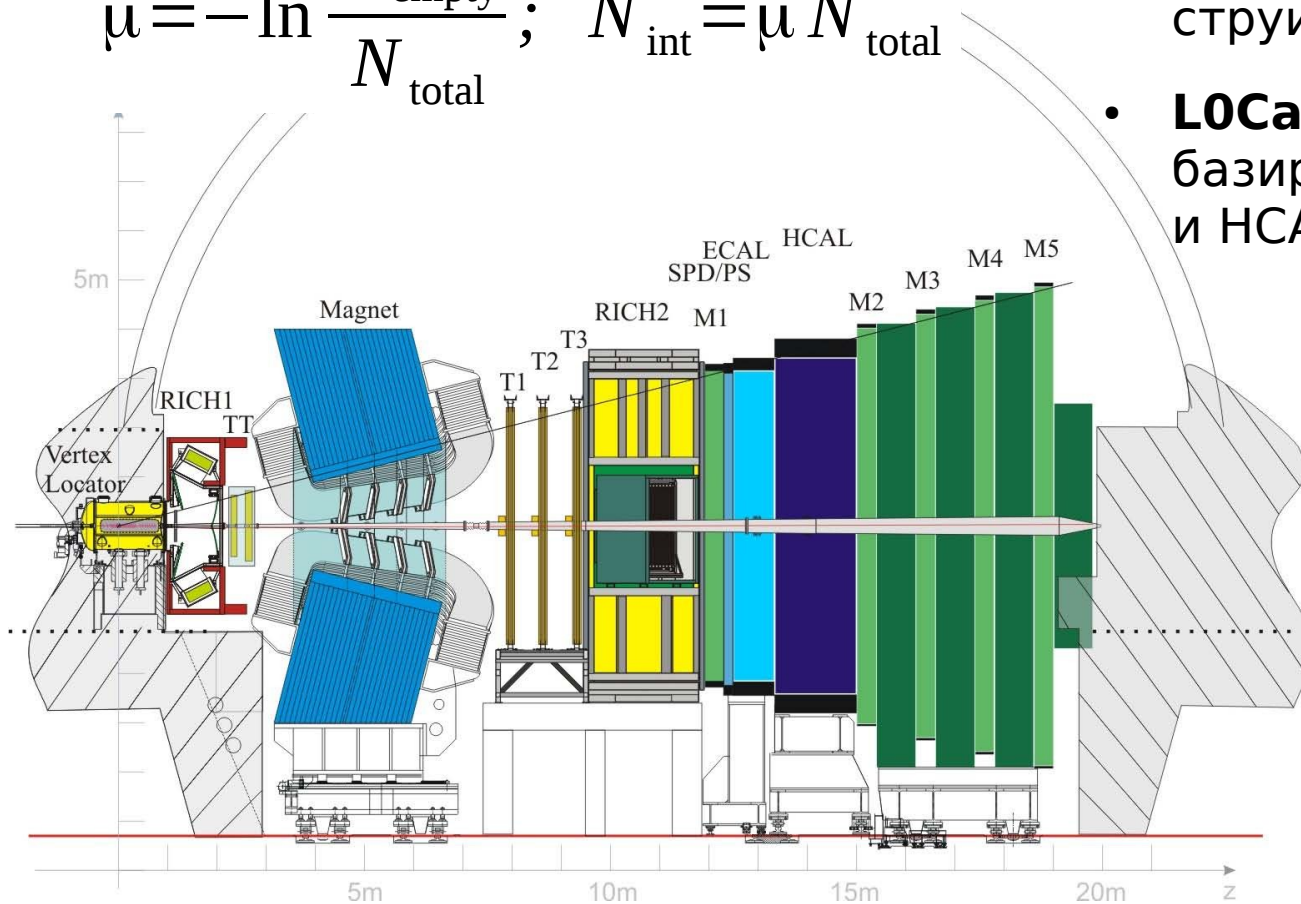
$$\int L dt = \frac{1}{\sigma} N$$

- Броим взаимодействията от даден (ефективен) процес
  - т. нар. "относително измерване"
  - паралелно с набирането на данни за физични измервания
- **Определяме  $\sigma$  (чрез директно измерване)**
  - т.нар. "абсолютно калибриране"
  - метод на van der Meer
  - "beam-gas imaging" метод (приложим само при LHCb)

# Ефективни процеси

- Дефинираме ефективния процес чрез дефиниция на "не-празно" пресичане на два бънча
- Определяме броя на взаимодействията по броя на празните пресичания ("-logP<sub>0</sub>" метод)

$$\mu = -\ln \frac{N_{\text{empty}}}{N_{\text{total}}}; \quad N_{\text{int}} = \mu N_{\text{total}}$$



- **RZVelo:** поне два реконструирани трека във вертекс детектора VELO
- **Track:** = RZVelo, но само трекове пресичащи цилиндъра  $|z| < 300 \text{ mm}$  &  $r < 4 \text{ mm}$
- **Vertex:** поне един реконструиран вертекс в цилиндъра
- **LOCalo:** сложна дефиниция базирана на активностите в SPD и HCAL калориметрите

# Метод на van der Meer (VDM)

Разглеждаме една двойка пресичащи се бънчове

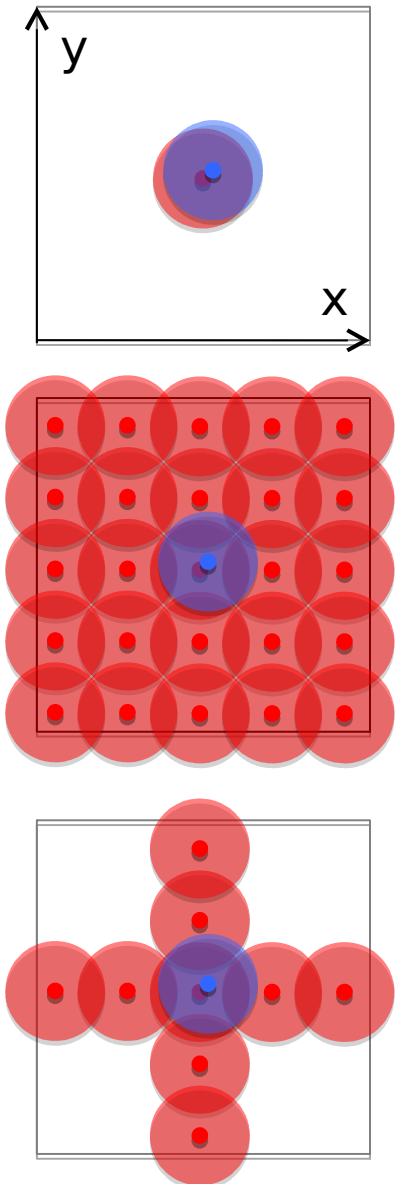
- $N_i$  – броят частици в бънча от сноп  $i$
- $\mu$  – среден брой взаимодействия на пресичане
- $\rho_i(x, y)$  – напречни плътности на бънchoвете

$$\mu = \frac{R}{f_{rev}} = \frac{\sigma L}{f_{rev}} = \sigma N_1 N_2 \int \rho_1(x, y) \rho_2(x, y) dx dy$$

Идеята на Simon van der Meer: *разместваме напречно сноповете и интегрираме скоростта на броене*

$$\mu(\Delta x, \Delta y) = \sigma N_1 N_2 \int \rho_1(x, y) \rho_2(x + \Delta x, y + \Delta y) dx dy$$
$$\int \mu(\Delta x, \Delta y) d\Delta x d\Delta y = \sigma N_1 N_2 \underbrace{\int \rho_1(x, y) \rho_2(x + \Delta x, y + \Delta y) dx dy d\Delta x d\Delta y}_{=1}$$

- 2-d (растерно) сканиране би било твърде бавно
- Правим 1-d сканиране по осите  $\Delta x=0$  и  $\Delta y=0$ 
  - достатъчно ако  $\rho_i(x, y)$  са  $x$ - $y$  факторизируеми
  - методът е прост (измерва се само скорост на броене)



\* в действителност: по-малки стъпки и едновременно преместване на двата снопа

# Извършени калибровки по VDM метода

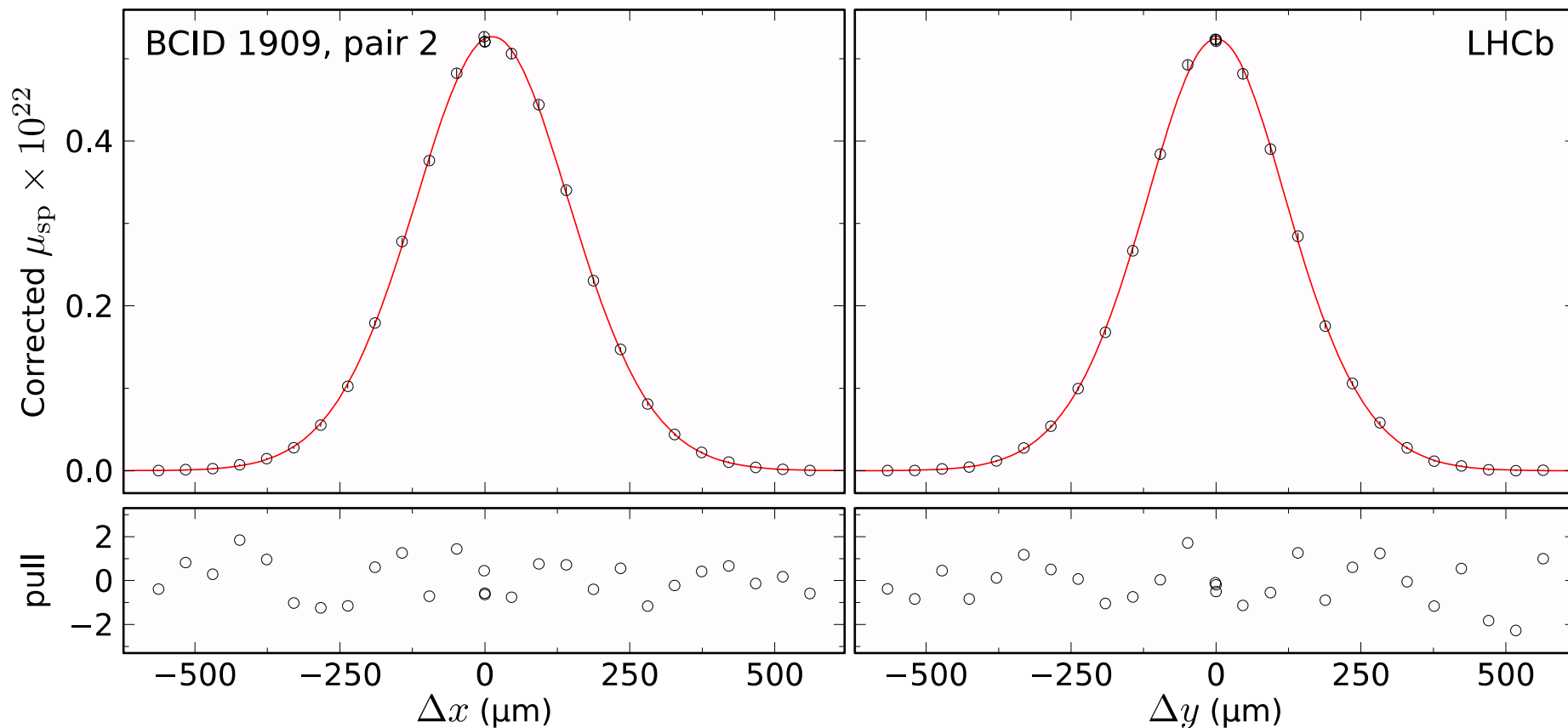
- p-p  $\sqrt{s} = 7$  TeV, Oct 2011
- p-p  $\sqrt{s} = 8$  TeV, Apr 2012
- p-p  $\sqrt{s} = 8$  TeV, Jul 2012
- p-Pb  $\sqrt{s_{NN}} = 5$  TeV, Jan 2013
- Pb-p  $\sqrt{s_{NN}} = 5$  TeV, Feb 2013

**Table 8.** Parameters of VDM scans. The scan pairs marked with an asterisk are not used in the determination of the central value of the cross-section (as explained in the text). The step duration indicates the period of stable conditions available for the measurement.

Pair	Scans	Axes	Offset	Number of steps	Separation range	Duration step (s)	total (min)
<i>pp</i> at $\sqrt{s} = 8$ TeV, Apr 2012, Fill 2523							
1	2/3	$x/y$	0/0	31/31	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	15	12/12
2*	1/4	$x''/y''$	0/0	33/31	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	15	13/12
3	5/6	$x/y$	0/0	17/17	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	15	7/7
4*	7/8	$y/x$	$\sim 2\sigma_n/2\sigma_n$	17/17	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	15	7/7
<i>pp</i> at $\sqrt{s} = 8$ TeV, Jul 2012, Fill 2853							
1	1/2	$x/y$	0/0	27/27	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	15	12/12
2	3/4	$x/y$	0/0	27/27	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	15	12/12
3	5/6	$x/y$	0/0	27/27	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	15	12/12
4	7/8	$x/y$	0/0	27/27	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	15	12/12
5*	9/10	$x/y$	0/0	51/51	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	15	21/21
6*	11/12	$y/x$	$\sim 2\sigma_n/2\sigma_n$	27/27	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	15	12/12
<i>pp</i> at $\sqrt{s} = 7$ TeV, Oct 2011, Fill 2234							
1	1/2	$x/y$	0/0	31/31	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	15	13/13
2	3/4	$x/y$	0/0	17/17	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	15	8/8
3	5/6	$x/y$	0/0	17/17	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	15	8/8
<i>pPb</i> at $\sqrt{s_{NN}} = 5$ TeV, Jan 2013, Fill 3505							
1	1/2	$x/y$	0/0	27/27	$\pm 6\sigma_n/\pm 6\sigma_n$	30	17/17
2	3/4	$x/y$	0/0	27/27	$\pm 6\sigma_n/\pm 5\sigma_n$	30	17/17
<i>Pbp</i> at $\sqrt{s_{NN}} = 5$ TeV, Feb 2013, Fill 3542							
1	1/2	$x/y$	0/0	27/27	$\pm 6\sigma_n/\pm 5\sigma_n$	30	17/17
2	3/4	$x/y$	0/0	27/27	$\pm 6\sigma_n/\pm 5\sigma_n$	30	17/17

# Експериментални данни

- $\mu \rightarrow \mu_{sp} = \mu/(N_1 N_2)$  – с нема се зависимостта от намаляващия интензитет на бънчовете
- Една двойка пресичащи се бънчове, юли 2012 ( $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ )



# Източници на систематични неопределености

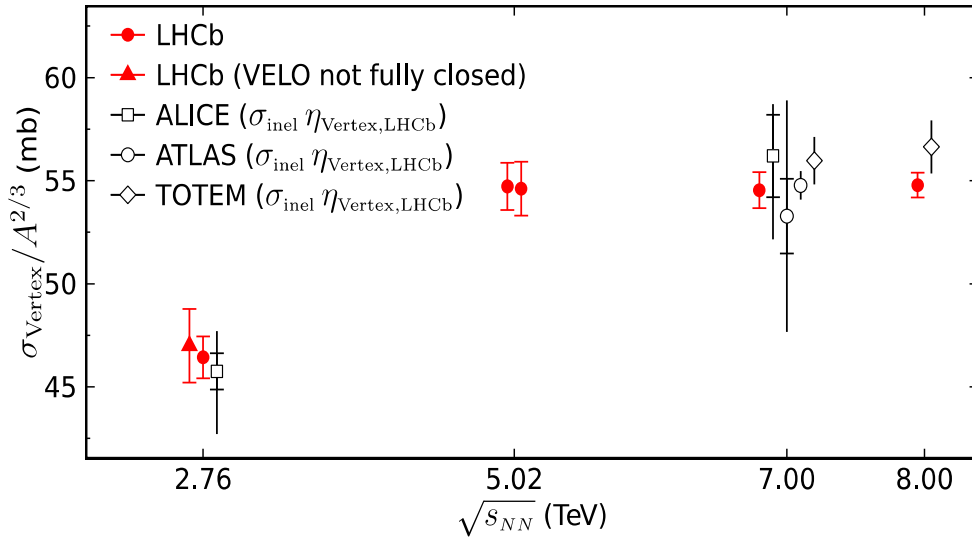
$$\sigma_{eff} = N_1 N_2 \int \mu(\Delta x, \Delta y) d\Delta x d\Delta y = N_1 N_2 \frac{\int \mu(\Delta x, 0) d\Delta x \int \mu(0, \Delta y) d\Delta y}{\mu(0, 0)}$$

- Популациите на сноповете  $N_1$  и  $N_2$
- **Избраният модел** за  $\mu(\Delta x, \Delta y)$ 
  - използваме информация от независимото измерване по метода "beam-gas imaging"
- Разстоянието между сноповете ( $\Delta x$  и  $\Delta y$ )
  - мащаб на преместванията (калибровка на номиналната скала)
  - електромагнитно взаимодействие на бълновете (beam-beam deflection)
  - неконтролируем дрифт на сноповете
- Средният брой взаимодействия  $\mu$ 
  - фон от взаимодействия на снопа с остатъчния газ
  - вариация на геометричната ефективност
  - dynamic  $\beta$  ефект
- **Повторяемостта** – получаваме ли идентичен резултат при повторение на сканиранията

# Систематични неопределености на калибровките по VDM метода

Source	8 TeV			7 TeV	5 TeV		
	April	July	Corr.		<i>pPb</i>	<i>PbP</i>	Corr.
VDM profile description							
Fit model	0.50	0.50	yes	0.50	1.31	1.34	yes
Fit bias	0.20	0.20	yes	0.20			
Linear correlation	0.15		no				
Parameter assumptions	0.60	0.90	yes	0.90			
Constraints from BGI	0.30	0.30	yes	0.80			
Length scale	0.50	0.50	yes	0.50	1.10	1.10	no
VELO transverse scale	0.05	0.05	yes	0.05	0.05	0.05	yes
Beam-beam effects	0.27	0.30	yes	0.29	0.06	0.05	yes
Scan variation and drift	0.54	0.30	no	0.20	0.67	1.31	no
Non-reproducibility (fifth scan pair in July)	0.80	0.80	yes	0.80			
Statistical	0.06	0.05	no	0.11	0.26	0.25	no
Rate measurement							
Beam-gas background	0.03	0.07	yes	0.08	0.34	0.21	yes
Beam-beam background	0.09	0.18	yes	0.09	0.65	0.71	yes
Efficiency of rate observable	0.13	0.07	yes	0.17	0.04	0.06	yes
Bunch population uncertainties							
DCCT population product	0.22	0.24	yes	0.24	0.31	0.34	no
FBCT offset	0.04	0.06	yes	0.01	0.21	0.09	no
BPTX cross-check	0.13	0.06	yes		0.14	0.14	no
Ghost charge	0.05	0.03	yes	0.07	0.14	0.19	no
Satellites charge	0.02	0.03	yes	0.25	0.07	0.09	no
No satellite measurements	0.43		no				
Total	1.52	1.54		1.71	2.05	2.36	





Method	Absolute calibration			Relative calibration uncertainty ✓	Total uncertainty
	$\sigma_{vis}$ (mb)	Weight	Uncertainty		
<i>pp</i> at $\sqrt{s} = 8$ TeV					
BGI	$60.62 \pm 0.87$	0.50	1.43% (0.59%)		
✓ VDM	$60.63 \pm 0.89$	0.50	1.47% (0.65%)		
Average	$60.62 \pm 0.68$		1.12%	0.31%	1.16%
<i>pp</i> at $\sqrt{s} = 7$ TeV					
BGI	$63.00 \pm 2.22$	0.13	3.52% (1.00%)		
✓ VDM	$60.01 \pm 1.03$	0.87	1.71% (1.00%)		
Average	$60.40 \pm 0.99$		1.63%	0.53%	1.71%
<i>pp</i> at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV					
BGI	$52.7 \pm 1.2$		2.20%	0.25%	2.21%
<i>pPb</i> at $\sqrt{s_{NN}} = 5$ TeV					
✓ VDM	$2126 \pm 49$		2.05%	1.03%	2.29%
<i>PbPb</i> at $\sqrt{s_{NN}} = 5$ TeV					
✓ VDM	$2120 \pm 53$		2.36%	0.82%	2.50%

## Precision luminosity measurements at LHCb



### The LHCb collaboration

E-mail: [rosen.matev@cern.ch](mailto:rosen.matev@cern.ch)

**ABSTRACT:** Measuring cross-sections at the LHC requires the luminosity to be determined accurately at each centre-of-mass energy  $\sqrt{s}$ . In this paper results are reported from the luminosity calibrations carried out at the LHC interaction point 8 with the LHCb detector for  $\sqrt{s} = 2.76, 7$  and 8 TeV (proton-proton collisions) and for  $\sqrt{s_{NN}} = 5$  TeV (proton-lead collisions). Both the “van der Meer scan” and “beam-gas imaging” luminosity calibration methods were employed. It is observed that the beam density profile cannot always be described by a function that is factorizable in the two transverse coordinates. The introduction of a two-dimensional description of the beams improves significantly the consistency of the results. For proton-proton interactions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV a relative precision of the luminosity calibration of 1.47% is obtained using van der Meer scans and 1.43% using beam-gas imaging, resulting in a combined precision of 1.12%. Applying the calibration to the full data set determines the luminosity with a precision of 1.16%. This represents the most precise luminosity measurement achieved so far at a bunched-beam hadron collider.

**KEYWORDS:** Pattern recognition, cluster finding, calibration and fitting methods; Instrumentation for particle accelerators and storage rings - high energy (linear accelerators, synchrotrons)

ARXIV EPRINT: [1410.0149](https://arxiv.org/abs/1410.0149)

# Сечение за раждане на $W^\pm$ бозони ( $pp \rightarrow W^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ ) при $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$

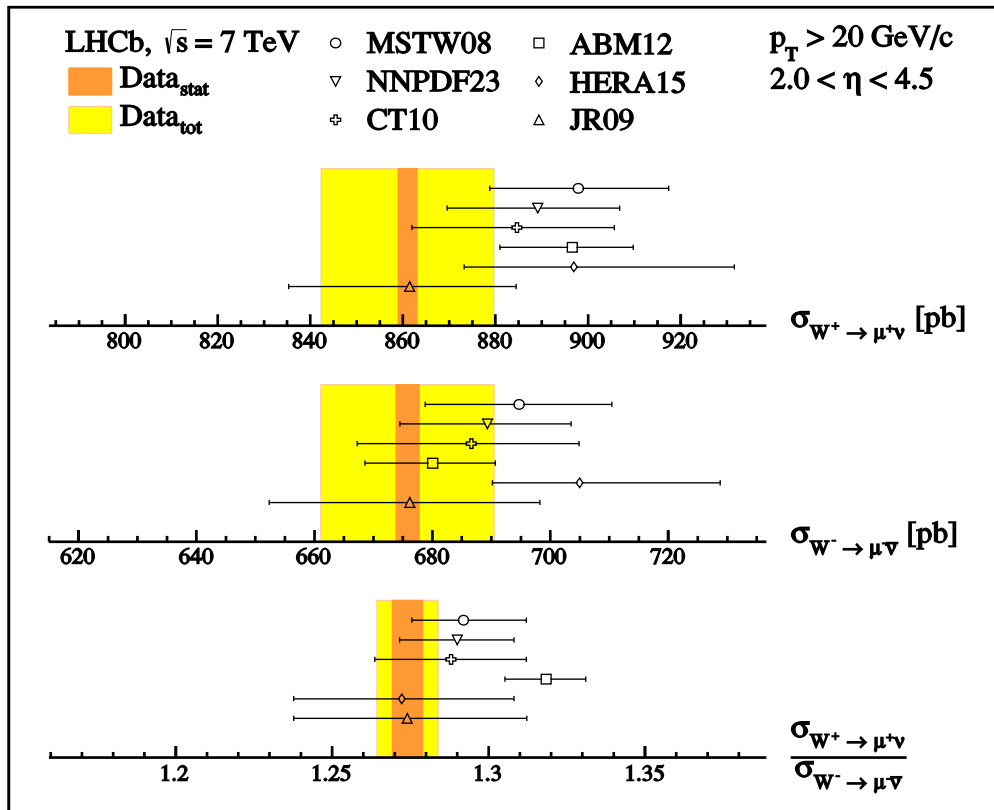
- Прецизното измерване на сеченията за раждане на W и Z бозони представлява важен тест за Стандартния Модел
- Експерименталните неопределености на партонните разпределения в протона са големи при малки стойности на променливата на Бьоркен  $x$
- Геометричната ефективност на LHCb ( $2 < \eta < 5$ ) позволява провеждането на измервания, чувствителни към партонните разпределения до  $x \sim 10^{-6}$ , допълвайки другите експерименти на LHC
- Неопределеността на светимостта е доминираща

Source	$\Delta\sigma_{W^+ \rightarrow \mu^+ \nu}$ [%]	$\Delta\sigma_{W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}}$ [%]	$\Delta R_W$ [%]
Template shape	0.28	0.39	0.59
Template normalisation	0.10	0.10	0.06
Reconstruction efficiency	1.21	1.20	0.12
Selection efficiency	0.33	0.32	0.18
Acceptance and FSR	0.18	0.12	0.21
Luminosity	1.71	1.71	—

# Сечение за раждане на $W^\pm$ бозони ( $pp \rightarrow W^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ ) при $\sqrt{s} = 7$ TeV

$$\sigma_{W^+ \rightarrow \mu^+ \nu} = 861.0 \pm 2.0 \pm 11.2 \pm 14.7 \text{ pb},$$

$$\sigma_{W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}} = 675.8 \pm 1.9 \pm 8.8 \pm 11.6 \text{ pb},$$



PUBLISHED FOR SISSA BY SPRINGER

RECEIVED: August 20, 2014  
ACCEPTED: December 1, 2014  
PUBLISHED: December 10, 2014

## Measurement of the forward $W$ boson cross-section in $pp$ collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV



### The LHCb collaboration

E-mail: [simone.bifani@cern.ch](mailto:simone.bifani@cern.ch)

ABSTRACT: A measurement of the inclusive  $W \rightarrow \mu\nu$  production cross-section using data from  $pp$  collisions at a centre-of-mass energy of  $\sqrt{s} = 7$  TeV is presented. The analysis is based on an integrated luminosity of about  $1.0 \text{ fb}^{-1}$  recorded with the LHCb detector. Results are reported for muons with a transverse momentum greater than  $20 \text{ GeV}/c$  and pseudorapidity between 2.0 and 4.5. The  $W^+$  and  $W^-$  production cross-sections are measured to be

$$\sigma_{W^+ \rightarrow \mu^+ \nu} = 861.0 \pm 2.0 \pm 11.2 \pm 14.7 \text{ pb},$$

$$\sigma_{W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}} = 675.8 \pm 1.9 \pm 8.8 \pm 11.6 \text{ pb},$$

where the first uncertainty is statistical, the second is systematic and the third is due to the luminosity determination. Cross-section ratios and differential distributions as functions of the muon pseudorapidity are also presented. The ratio of  $W^+$  to  $W^-$  cross-sections in the same fiducial kinematic region is determined to be

$$\frac{\sigma_{W^+ \rightarrow \mu^+ \nu}}{\sigma_{W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}}} = 1.274 \pm 0.005 \pm 0.009,$$

where the uncertainties are statistical and systematic, respectively. Results are in good agreement with theoretical predictions at next-to-next-to-leading order in perturbative quantum chromodynamics.

arXiv:1408.4354

# Сечения за раждане на $V^0$ ( $K_S^0$ и $\Lambda/\bar{\Lambda}$ )

- $K_S$  ( $ds$ ) и  $\Lambda$  ( $uds$ ) са неутрални странни адрони, разпадащи се най-често по каналите  $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$  и  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$
- Експерименталната сигнатура са два трека с противоположен заряд (от където произлиза  $V^0$ ) и подходяща инвариантна маса
- Изучаването на сеченията за раждане дава ценна информация за КХД, необходима например за „настройване“ на Монте Карло симулации на  $pp$  взаимодействия
  - $s$  кваркът е твърде лек  $\Rightarrow$  пертурбативният подход е неприложим
  - чувствителен тест за модели на адронизация ( $S(p)=0$ )
  - референтна точка за изследването на странност във взаимодействията на тежки йони
- Strangeness suppression
  - направени ранни измервания на LHCb показват голямо несъответствие между данни и модели (JHEP 08 (2011) 034; Phys. Lett. B 703 (2011) 267-273)

# Измерване на сечението

- Диференциално сечение по бързина ( $y$ ) и напречен импулс ( $p_T$ )

$$\frac{d^2 \sigma(pp \rightarrow K_s^0 X)}{dy dp_T} = \frac{1}{\Delta y \Delta p_T L_{inte}} \frac{N_{signal}^{obs}}{\epsilon_{total} \times BR(K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)}$$

$$\frac{d^2 \sigma(pp \rightarrow \Lambda(\bar{\Lambda}) X)}{dy dp_T} = \frac{1}{\Delta y \Delta p_T L_{inte}} \frac{N_{signal}^{obs}}{\epsilon_{total} \times BR(\Lambda \rightarrow p \pi)}$$

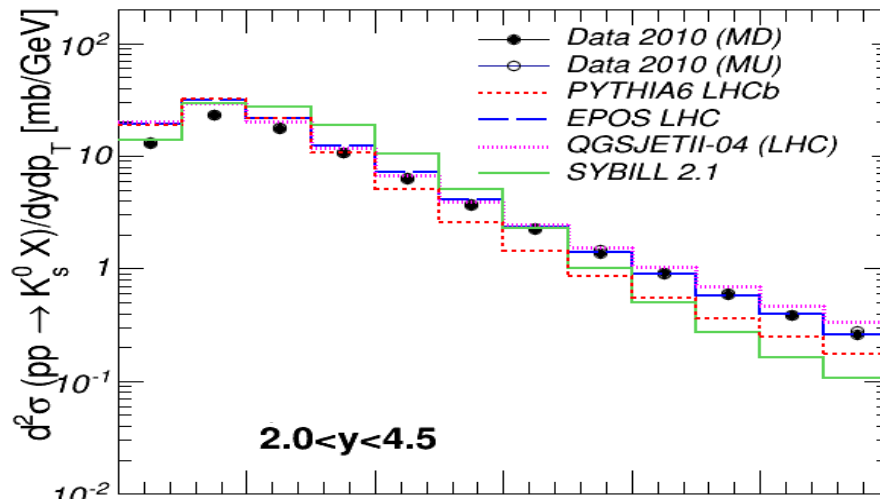
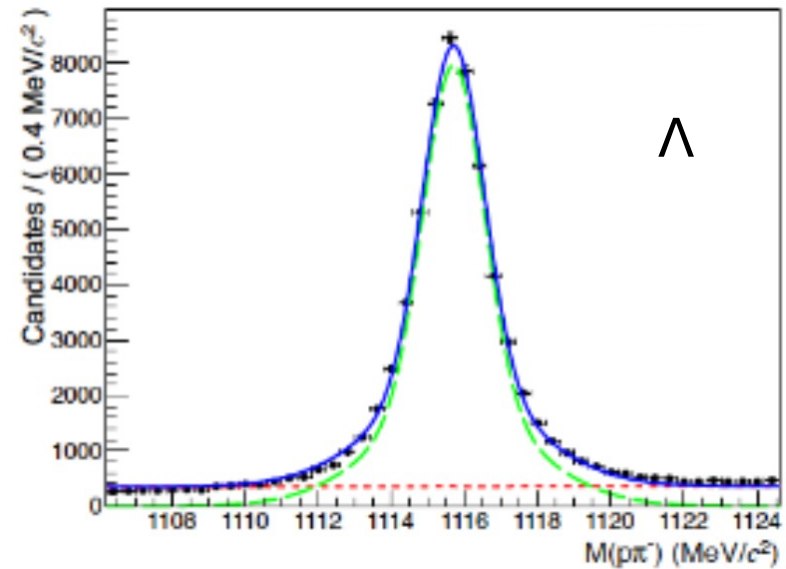
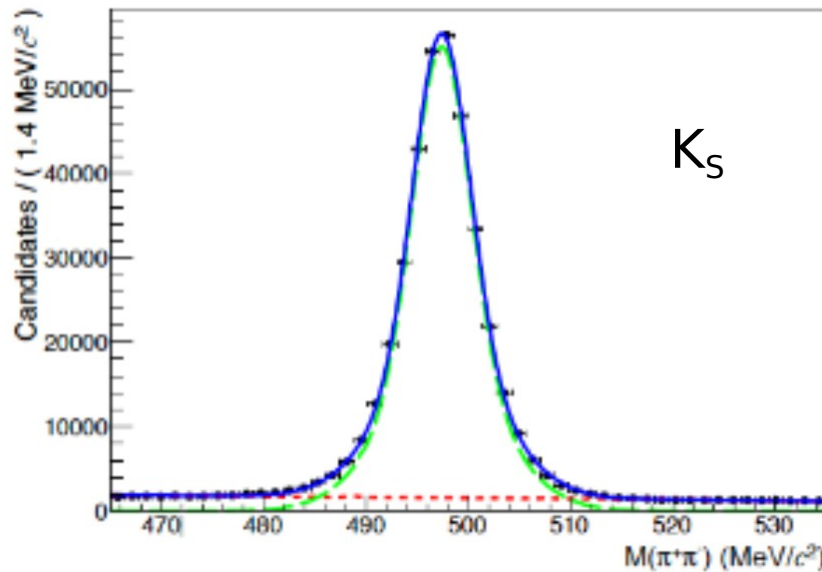
- Ефективност (геометрична, за реконструкция и селекция)

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{sel+rec} \times \epsilon_{tr} \quad \epsilon_{rec+sel} = \frac{N_{MC, rec+sel}^{V0}}{N_{MC, enerated}^{V0 prompt}} \quad (N_{MC, generated}^{V0 prompt} \rightarrow c \cdot \sum_{i=1}^n \tau_i < 10^{-9} m) \quad \epsilon_{tr} \rightarrow 1$$

- Разглеждаме всички комбинации от противоположно заредени частици.
- Селектираме по: качество на трековете и фитираната точка на разпад, инвариантна маса, близост на реконструираната траектория на  $V^0$  до първично  $pp$  взаимодействие

# Първи резултати

- Пример с данни от 7 TeV (2010)
  - „чиста“ извадка: малък среден брой взаимодействия на пресичане => нисък фон от случайни комбинации

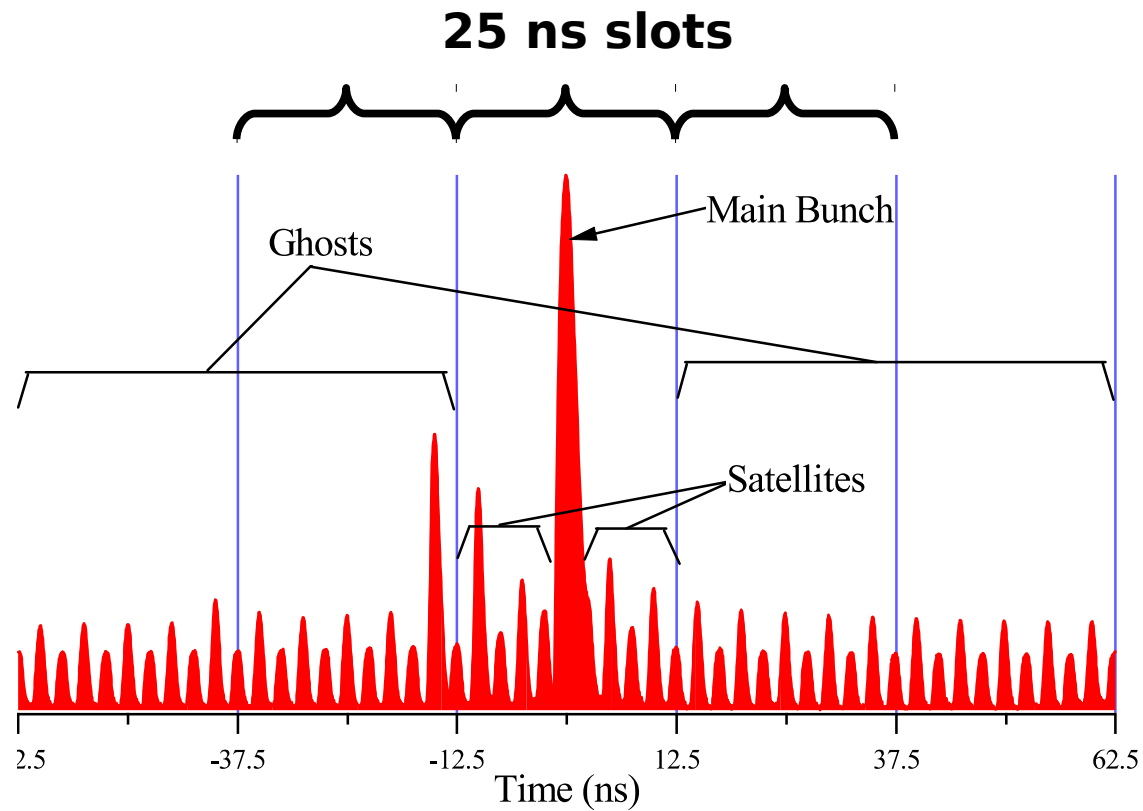
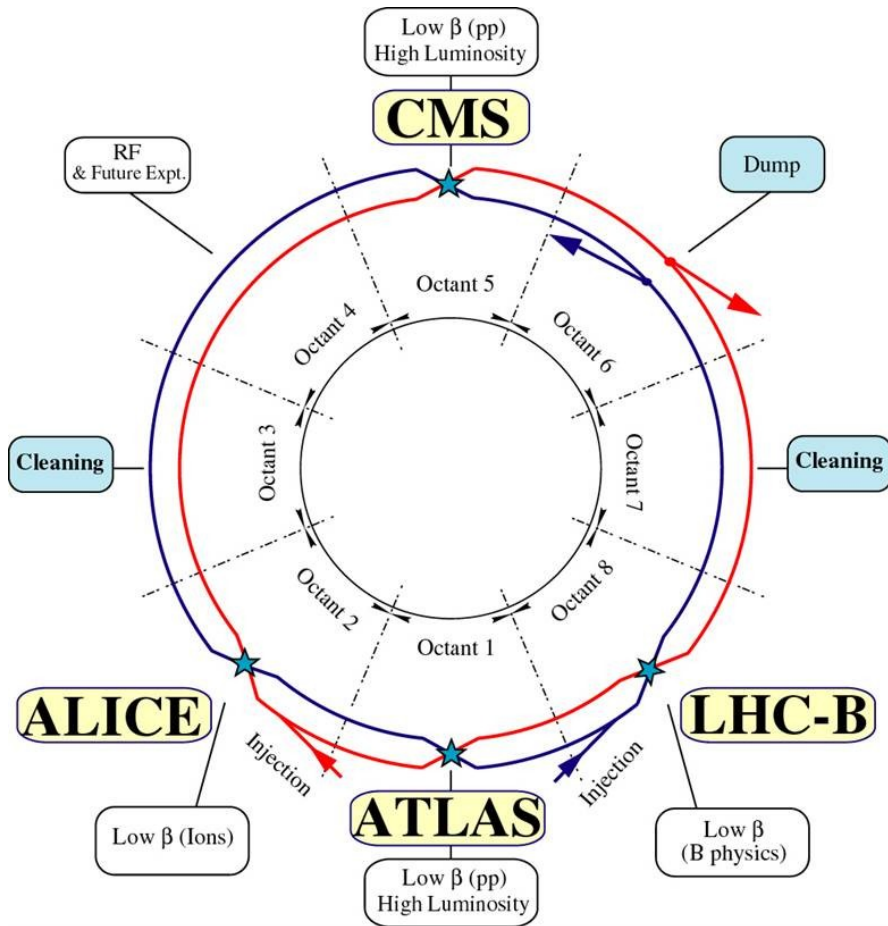


Два метода за определяне на добива:

- изваждане на фона оценен с кубичен полином
- фитиране на сигнала с емпирична крива

Благодаря за вниманието!

# Large Hadron Collider





# Тригер и “-log0” метод

- LHCb има прозорец на тригера от 25 ns – веднъж на всяко пресичане на “слотове” от двата снопа. Те могат да съдържат протони (b) или да са празни (e) – (ee, be, eb, bb).
- Всеки 25 ns, “readout supervisor” решава дали да изчете целия детектор и да прати събитието към софтуерния тригер.
- За целите на светимостта, използваме случаен тригер. С избрани честоти записваме събития от ee, be, eb, bb:
  - По време на набиране на данни – 0.7:0.15:0.1:0.05 kHz
  - За абсолютна калибровка – 20:1:1:0.5 kHz
- Искаме да измерим честотата на взаимодействие на частици от двата снопа
  - възможни са множество взаимодействия на пресичане (Поасоново разпределение)
- ~~Вариант 1:~~ използваме характеристика пропорционална на броя взаимодействия
  - Необходим е прецизен контрол над ефективността (прагове) и линейността (насищане)
- Вариант 2: броим “празните” събития и използваме, че средния брой взаимодействия може да се оцени с 
$$\hat{\mu} = -\log \hat{P}_0 = -\log N_0/N$$

# Относително измерване на светимостта

$$R = \sigma L \Rightarrow \int L dt = \frac{1}{\sigma} N_{int}$$

$$N_{int} = \sum N_{trg} \mu / f_{samp}, \quad f_{samp} = \frac{f_{rnd}}{n_{bb} f_{LHC}}$$

- Данните са разделени на порции (напр. файл или последователни 60 сек.)
- За всяка, определяме  $\mu$  по  $-\log 0$  метода, (приемайки, че условията ( $\mu$ ) остават постоянни)
- Мъртвото време е отчетено чрез броя наблюдавани тригери (и зададената честота)

# Корекции и систематични неопределености на относителното измерване

- Фон – основен принос от взаимодействия на снопа с остатъчния газ.
  - Оценяват се използвайки  $b_e$  и  $e_b$  пресичания
- Вариации на позицията на разпределението на взаимодействията (luminous region (LR))
  - нехомогенна геометрична ефективност за детектиране на трек/вертекс
  - значителни вариации на позицията поради (контролирани) премествания на сноповете
- Разхвърляне на  $\mu$  по бънчове (ок. 1300)
  - не е възможно семплирането на всеки бънч с достатъчна честота => пренебрегваме разхвърлянето => необходима е корекция

$$N_{int}^{true} = - \sum_i N_i \log N_{0,i}/N_i \neq - \left( \sum_i N \right) \log \frac{\sum N_{0,i}}{\sum N_i}$$

# Корекции и систематични неопределености на относителното измерване

Source	8 TeV	<i>pp</i>		<i>pPb</i>	<i>Pbp</i>
		7 TeV	2.76 TeV	5 TeV	5 TeV
Beam-beam background	0.13	0.24	0.13	0.95	0.73
Efficiency of the observable	0.19	0.07	0.12	0.09	0.11
Bunch spread	0.14	0.09	0.10	0.03	0.03
Bunch spread (cross-check)	0.09	0.44			
Stability	0.12	0.13	0.14	0.39	0.35
Total	0.31	0.53	0.25	1.03	0.82
Correction					
Efficiency of the observable	-0.54	-0.11	-0.12	-0.09	-0.11
Bunch spread	+0.72	+0.99	+0.10	+0.03	+0.03

- Основна проверка за стабилността на референтния ефективен процес (Track) е сравнението му с ефективен процес използващ коренно различен поддетектор (L0Calo).
- Вариацията на отношението на двете сечения през 2012 (8 TeV) е 0.12%!

# Популации на сноповете

$$N_1 N_2 \quad N = \frac{N_{fast}}{\sum N_{fast}} N_{DC} (1 - f_{ghosts})(1 - f_{satellites})$$

- $N_{fast}/\Sigma$  – относителни популации, потенциално нелинеен отклик на инструмента и/или ненулево отместване, малка неопределеност. Посредством LHC FAST BCST и ATLAS BPTX инструменти.
- $N_{DC}$  – пълен интензитет на сноповете, малка неопределеност. Посредством LHC DCBCST инструмент.
- $f_{ghosts}$  – ghost charge fraction (заряд извън номинално пълни слотове). Прецизно измерване от LHCb (Colin Barschel) чрез наблюдение на взаимодействия в празни слотове (ee).
- $f_{satellites}$  – satellite charge fraction (заряд в пълен слот, но е извън главния RF bucket). Посредством LHC LDM инструмент.