LHCb Collaboration – 23 рік співпраці

КРАСИВА ТА ЧАРІВНА ФІЗИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ LHCb (CERN).

http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public

В.М. Пугач

Інститут ядерних досліджень НАН України

Для Вчителів з України.
ЦЕРН, Женева. 12 квітня 2019 р.

Зміст

- **Вступ**

  ЦЕРН. Новий простір знань на LHC.

  LHC – генератор КРАСИВИХ (b-beauty), ЧАРІВНИХ (c-charm),

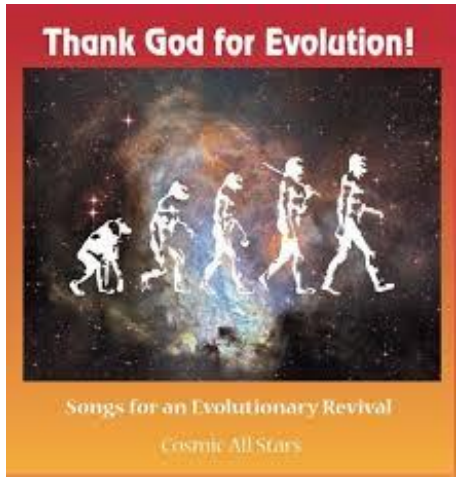
  ДИВНИХ (s-strangeness) та інших зразків матерії.

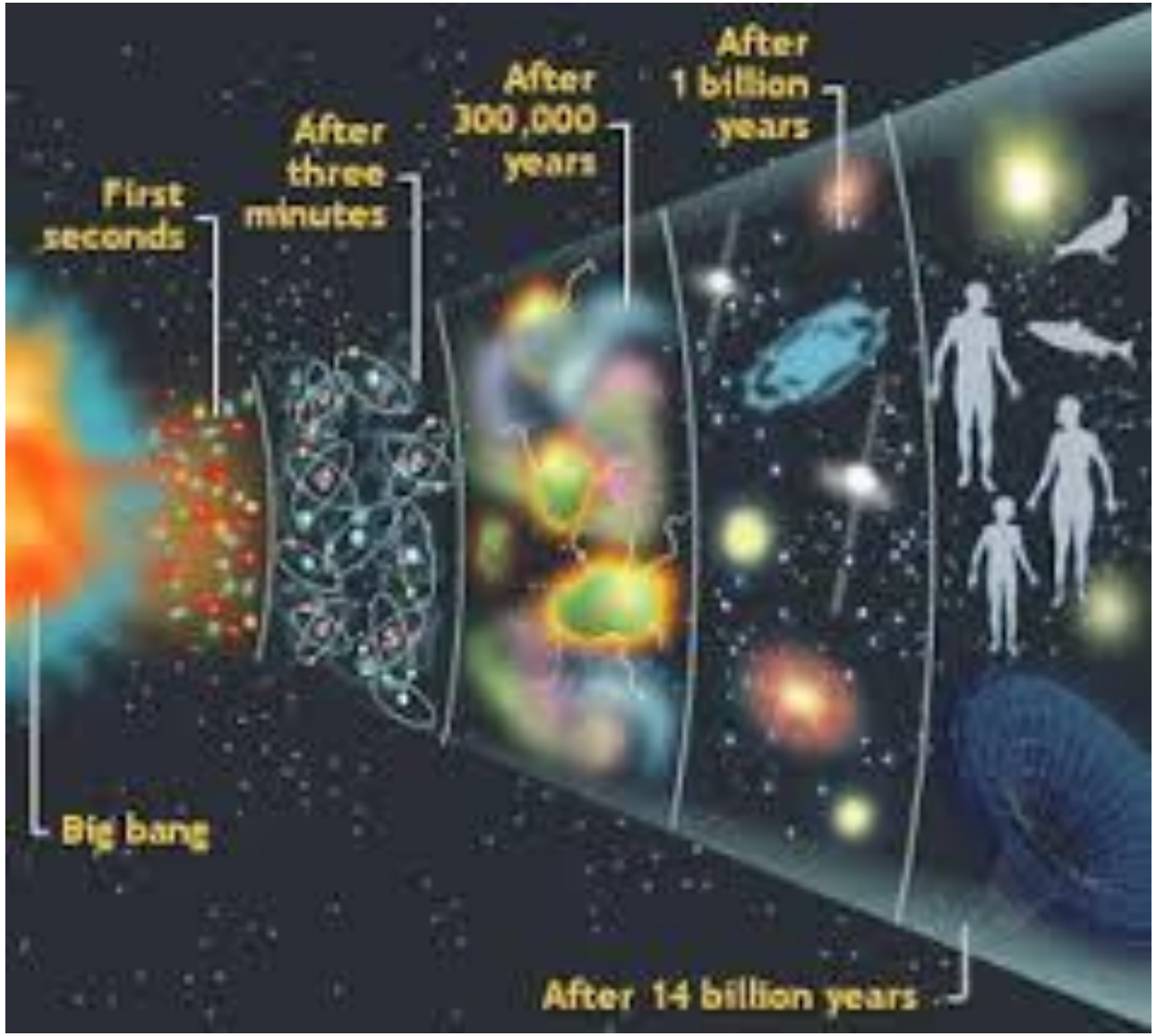
  Фізичні цілі LHCb. Міжнародна Колаборація LHCb.

- **Експеримент LHCb**
- **Вибрані результати експерименту LHCb (березень 2019 р.)**
  - **Властивості важких адронів (маса, час життя, гілки розпаду, …)**
  - **Матерія – Анти матерія (осциляції B – мезонів, порушення CP – симетрії, трикутник унітарності CM…)**
  - **Рідкісні моди розпаду важких адронів – можливе джерело Нової Фізики.**
  - **Екзотичні багатокваркові стани.**
- **Висновки/Перспективи**

LHC (ЦЕРН) – генератор первинної матерії.

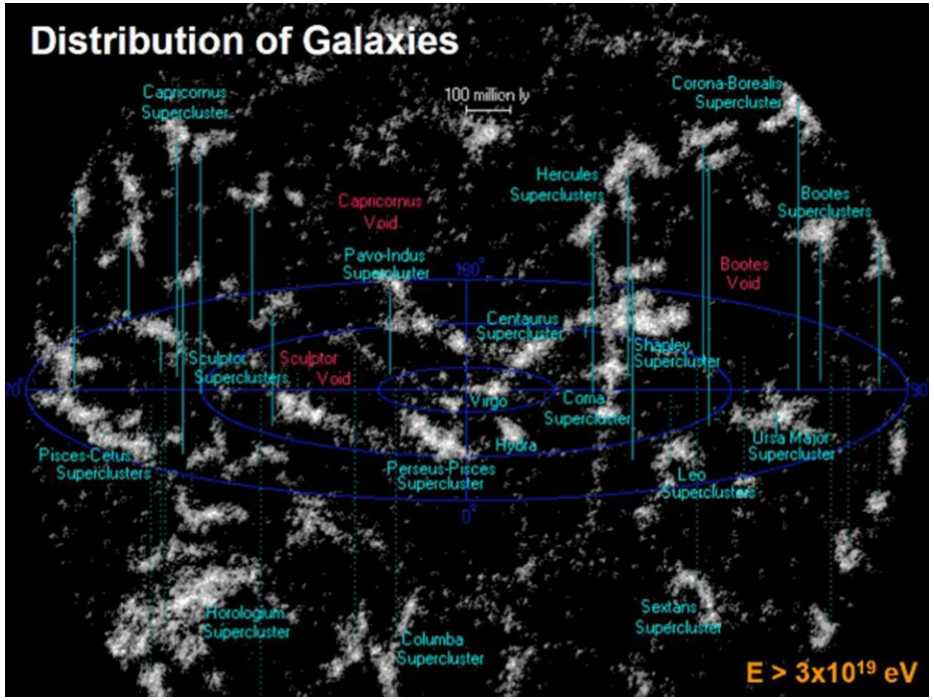
Всесвіт:
BIG BANG, Еволюція …

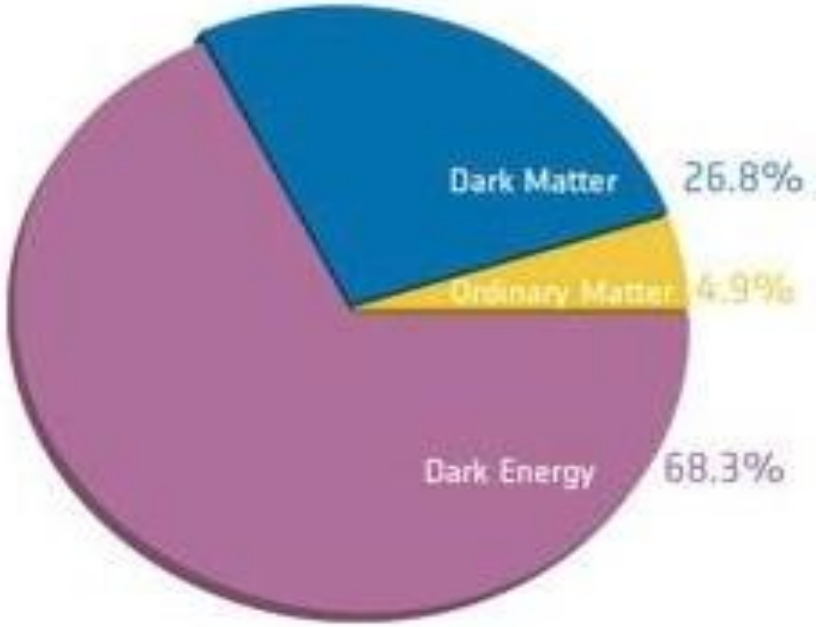




Всесвіт … ?

Баріогенезис… *Як утворилась Матерія ?*





СМ – На початку Всесвіту (BIG BANG),

була однакова кількість матерії і антиматерії …

Усі сучасні дослідження показують : є лише матерія .
Що сталося з антиматерією?

Всесвіт … ?

Баріогенезис… *Як утворилась Матерія ?*

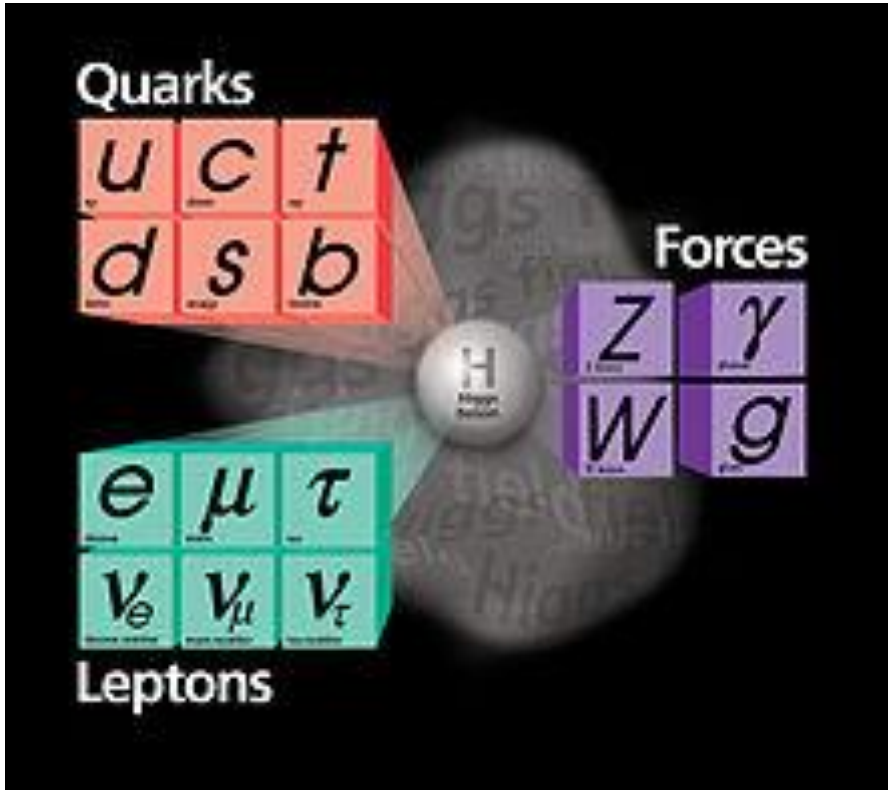
Стандартна Модель елементарних частинок та їх взаємодій

- **12 (+12 анти-) фундаментальних частинок, складових матерії (помаранчеві – кварки,**

  зелені - лептони)

- **4 фундаментальних носіїв сили взаємодії (фіолетові цеглинки).**

- **Бозон Хіггса (в центрі) необхідний для пояснення маси лептонів і кварків.**



http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model

LHC – генератор КРАСИВИХ (b-beauty), ЧАРІВНИХ (c-charm), ДИВНИХ (s-strangeness) та інших зразків матерії.

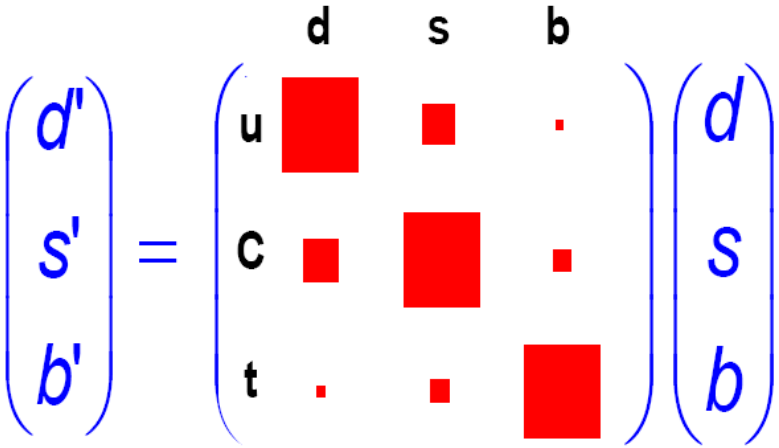
Де взяти зразки кваркової матерії для досліджень

Звичайної (up/down) , Дивної (s-strange), Чарівної (c-charm), Красивої (b-beauty) та Величної (t-top) … ?

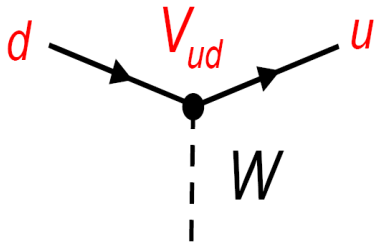
… На LHC в зіткненнях звичайних ядер при високих енергіях – через перетворення їхніх складових (партонів-кварків, глюонів)

із зміною квантового числа – «аромат»:

Передбачення Стандартної моделі по імовірностям таких процесів відзначені Нобелівською премією 2008 р.



Cabibo-Kobayashi-Maskawa (CKM) - матриця



Процес переходу від *u*–кварку до *d* – кварку.

Амплітуда переходу $V_{ud.}$
W –квант електро-слабкого поля

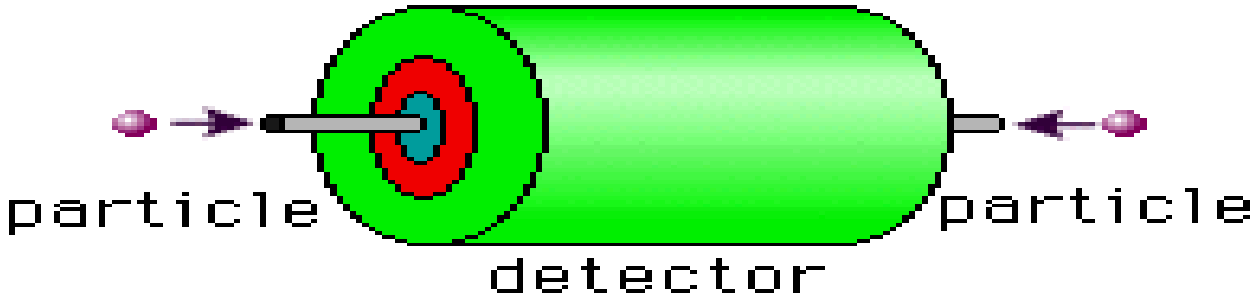
LHC – генератор КРАСИВИХ (b-beauty), ЧАРІВНИХ (c-charm), ДИВНИХ (s-strangeness) та інших зразків матерії.

Новий простір знань на Великому Адронному Колайдері в ЦЕРН (Енергія -10^{13} еВ; Відстані – 10^{-18} м; Час – 10^{-25} с; нові форми матерії , …) :

- **Нові енергії взаємодії**
- **Нові взаємодії**
- **Новий масштаб простору**
- **Новий масштаб часу**
- **Нові об’єкти досліджень**
- **Нові форми матерії**
- **Нові експериментальні засоби досліджень**
- **Нові … ?**

Два типи експериментів в фізиці високих енергій

Fixed Target: В експериментах з фіксованою мішенню продукти взаємодії летять переважно вперед. Тому детектор має вигляд конуса-піраміди і розташовується в напрямку бомбардуючого пучку («форвардний спектрометр»)

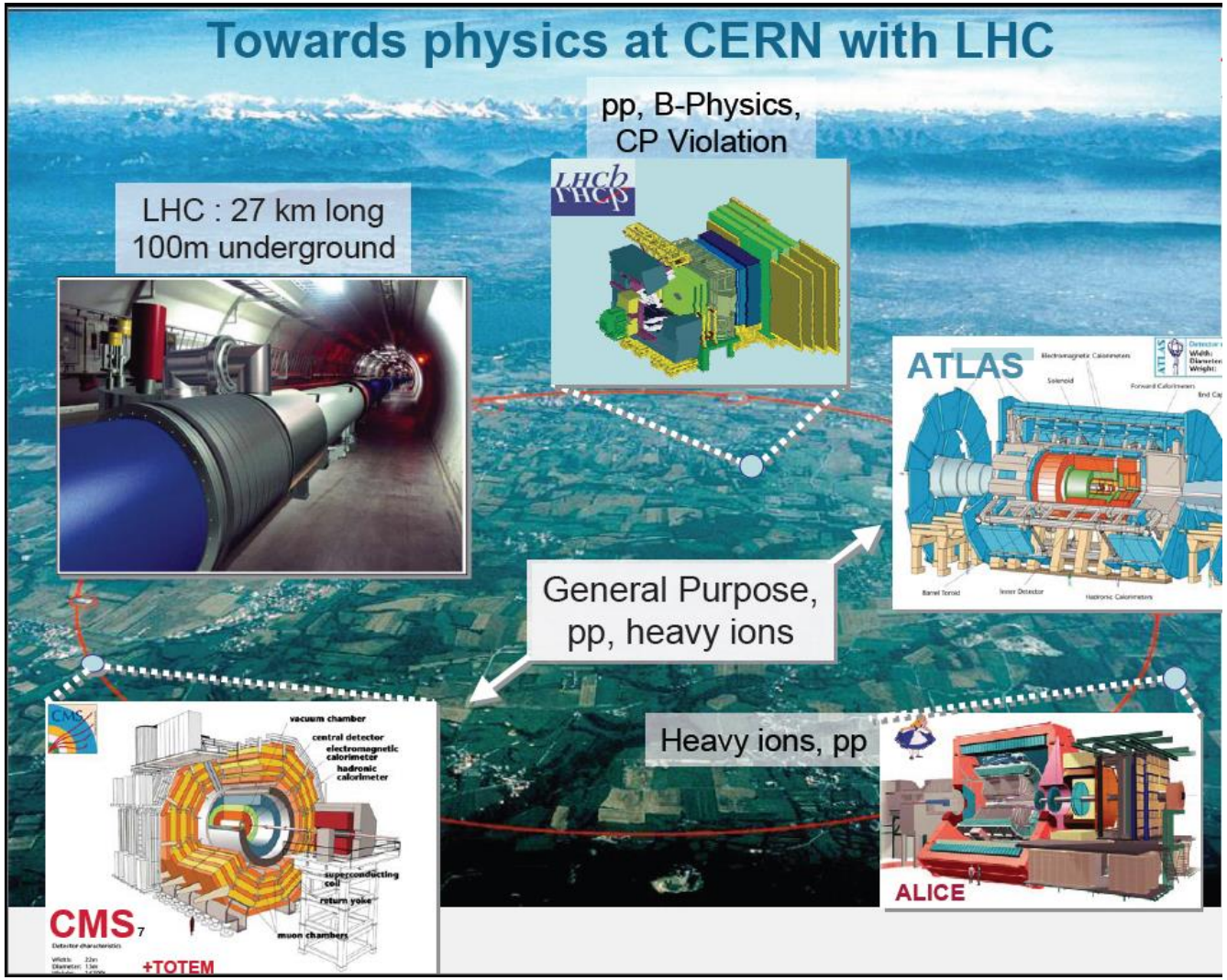


Colliding Beams: В колайдерному експерименті продукти летять в усіх напрямках, тому детектор має вигляд циліндра (‘barrel’).

LHC – генератор КРАСИВИХ (b-beauty), ЧАРІВНИХ (c-charm), ДИВНИХ (s-strangeness) та інших зразків матерії.

4 головних експерименти на LHC: ATLAS, CMS, ALICE, LHCb.

Цілі 4х експериментів в ЦЕРН.



LHC (CERN) - генератор КРАСИВИХ (b-beauty flavored) адронів (B- мезони, Λ_b – баріони), ЧАРІВНИХ (c-charm flavored) адронів та іншої матерії.

Новий простір знань на LHC.

Енергія -10^{13} еВ; Відстані – 10^{-18} м; Час – 10^{-25} с. Нові форми матерії, …

Головні риси науково-технічних досягнень на LHC:

- **Large b cross section (~500 μb)**
- **Large σ_{bb} /$\sigma_{inelastic}$ (>10^{-3}),**
  - ✓ **at fixed target energies -> 10^{-6}**
- **≈ σ_{cc} / $\sigma_{inelastic}$ at fixed target energies**
- **КРАСИВІ b-hadrons (B_u , B_d , B_s , B_c , Λ_b , Σ_b , Ξ_b etc.)**
  - **Large boost, i.e. b-flight length O(cm)**
  - ➢ **better decay time resolution for B_s oscillation physics**
- **To fight against combinatorial backgrounds:?**
  - ➢ **vertexing, PID, and mass resolution**

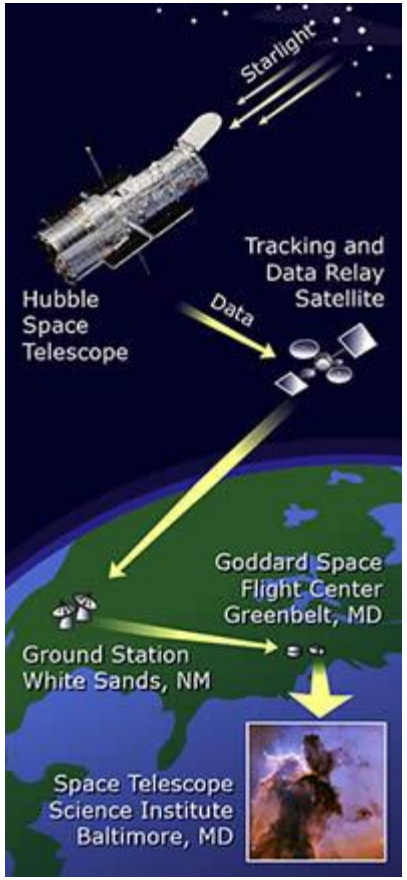
У 2015 році вперше в історії науки

досягнуто енергію протон-протонних зіткнень 13 ТеВ.

Це відкриває можливість спостереження нових явищ та виміру характеристик теоретично передбачуваних кваркових процесів в новому енергетичному просторі.

Що дав людству енергетичний простір електрон-вольтного масштабу ?

Що дав людству енергетичний простір електрон-вольтного масштабу ?

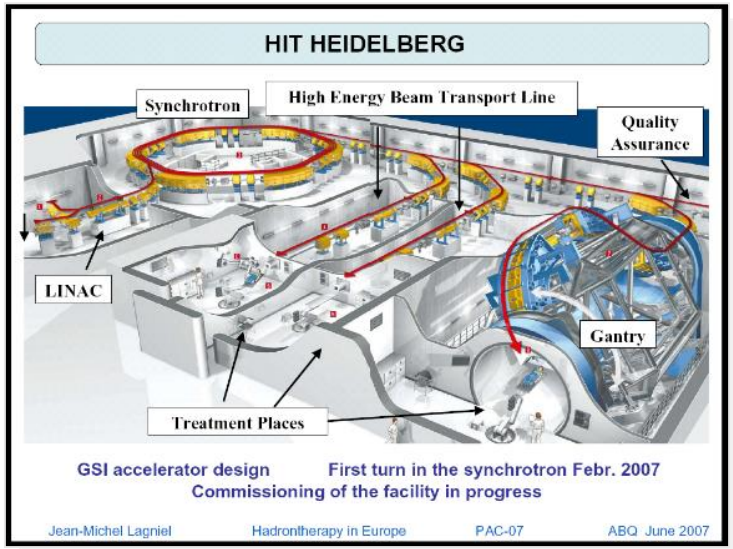


The International Space Station (ISS) is the largest and the most complex orbital outpost in history, and it is the most expensive object ever constructed by mankind at 157 billion dollars.

«Ноїв ковчег для людства»
Міжнародні команди готуються і в ЦЕРН

http://s2.thingpic.com/images/SW/ieQT2MM1gk7Ac3b21zMpeLRj.jpeg

Що дав людству енергетичний простір Мега (10^6)-електрон-вольтного масштабу ?

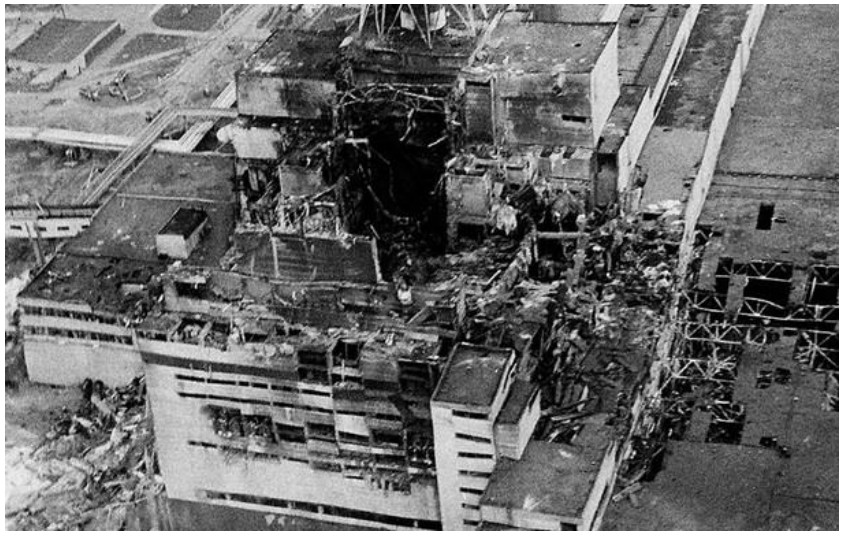


Carbon 12 (3 Tt rooms - 1000 pts/year)

	Investment M €	running cost M €	Tt cost €
• Heidelberg	68	14	26 000
• TERA	89	13	25 000
• Lyon Etoile	88	17	27 000
• Medaustron	75	14	24 000
• Karolinska	80	17	27 000

Чорнобильська трагедія 26 квітня 1996 -2019

https://ua.korrespondent.net/ukraine/3674782-chornobyl-pislia-vybukhu-i-cherez-30-rokiv-foto



4-й енергоблок ЧАЕС через три дні після вибуху 26 квітня 1996 р.

Безпосередньо під час вибуху загинула одна людина, ще одна померла вранці.

Близько 4 години ранку пожежа, що виникла після вибуху, була локалізована, а до 6-ї години ранку загашена. Пожежники не дали перекинутися вогню на 3-й енергоблок.

Перші уражені серед пожежників з'явилися о 2 годині ночі, пізніше у 134 співробітників ЧАЕС і рятувальних команд розвинулася променева хвороба, 28 з них померли протягом кількох місяців. Згодом загинули тисячі ліквідаторів.

Що очікує людство в енергетичному просторі Тера (10^{12}) - електрон-вольтного масштабу ? …

- ???
- ?????
- ???????
- **Дослідження на Великому Адронному Колайдері – 10^{13} еВ**

LHC – генератор КРАСИВИХ (b-beauty), ЧАРІВНИХ (c-charm), ДИВНИХ (s-strangeness) та інших зразків матерії.

Новий простір знань на Великому Адронному Колайдері в ЦЕРН (Енергія -10^{13} еВ; Відстані – 10^{-18} м; Час – 10^{-25} с; нові форми матерії , …) :

- **Нові енергії взаємодії**
- **Нові взаємодії**
- **Новий масштаб простору**
- **Новий масштаб часу**
- **Нові об’єкти досліджень**
- **Нові форми матерії**
- **Нові експериментальні засоби досліджень**
- **Нові … ?**

Фізичні цілі LHC :

- **Mass of particles …**

  Як відбувається утворення маси частинок ?…

- **Стандартна Модель :**
  - **Має бути Нове поле, в якому частинки акумулюють масу. Ті частинки, які взаємодіють сильно з цим полем, стають важкими. Ті, що взаємодіють слабо, стають легкими …**

- **Носіями (квантами) цього поля мають бути так звані "Бозони Хіггса" , передбачені теорією (СМ) і спостережені.**

- **Екперименти на Великому Адронному Колайдерові (LHC, ЦЕРН) – ATLAS, CMS … націлені на пошук бозонів Хіггса (нових частинок, їх може бути і декілька (як у випадку квантів слабкої взаємодії - W^+, W^-, Z^0).**

Початок ери
Великого Адронного Колайдера (2008 рік)
Одна із головних цілей – пошук бозонів Хіггса

Серед шукачів нових явищ є і наші українці – Олександр Охріменко, ВФВЕ ІЯД НАН України.

Експеримент LHCb – “CP violation, …”

4 липня 2012 р. ЦЕРН.
Бозон Хіггса спостережено !

ATLAS spokesperson Fabiola Gianotti:

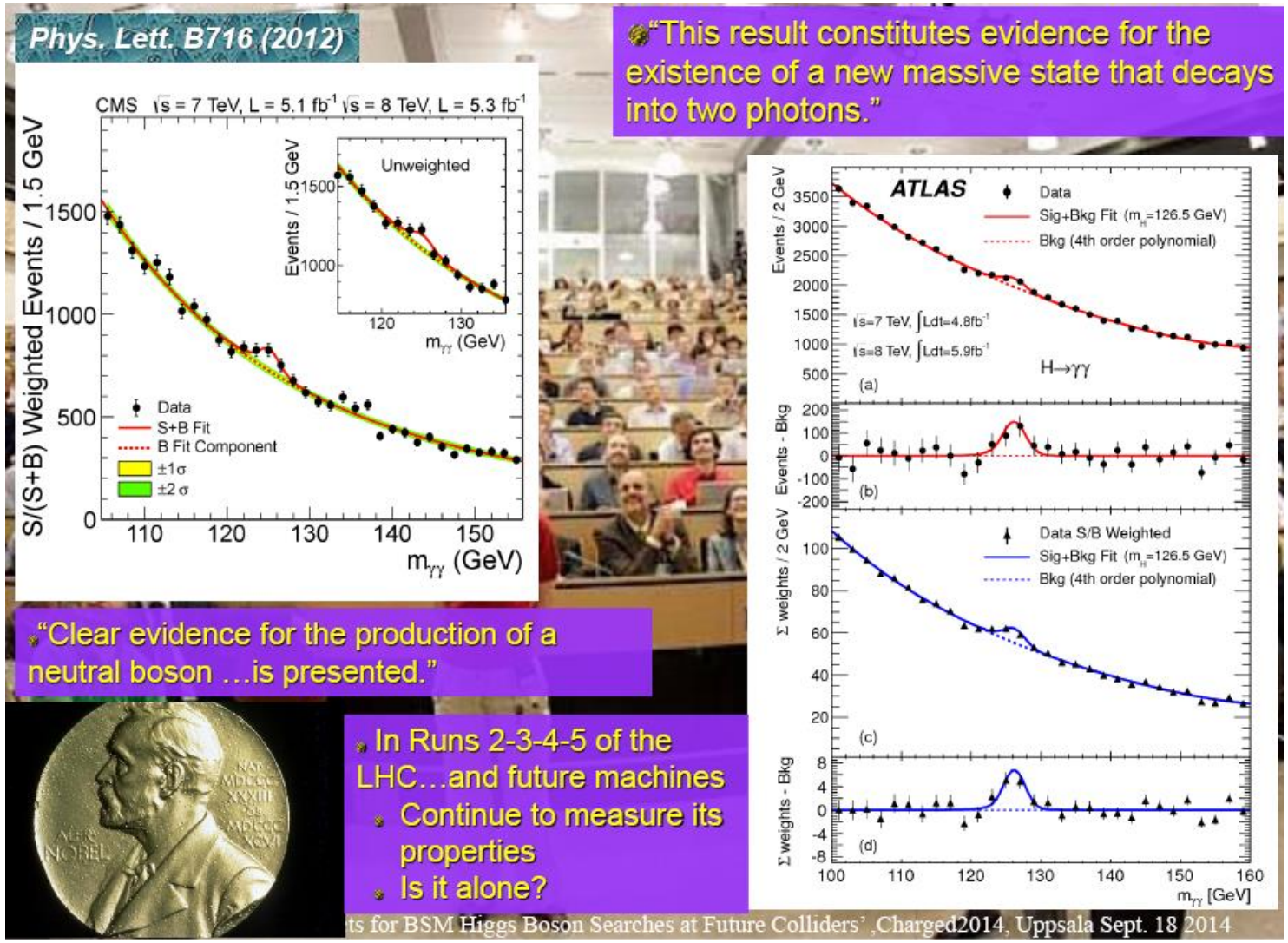
"We observe in our data clear signs of a new particle, at the level of 5 sigma, in the mass region around 126 GeV.

Fabiola Gianotti
з 2016 р. – Генеральний директор ЦЕРН.

Phys. Rev. Lett. 13, 508–509 (1964)
Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons.
Peter W. Higgs

Поле, в якому частинки акумулюють масу. Ті частинки, які взаємодіють сильно з цим полем, стають важкими. Ті, що взаємодіють слабо - легкими…

Краса наукового відкриття



Властивості ядерної матерії, характерні для атто-метрового (10^{-18} м) простору

В експерименті LHCb - дослідження відмінностей в еволюції розпадів матерії та анти-матерії (прецизійні виміри CP-порушень в розпадах важких мезонів) а також їх рідкісних мод розпаду, модифікація яких теоретично можлива процесами за межами Стандартної Моделі (СМ).

Енергетичний діапазон LHC до 13 ТеВ

в протон-протонних зіткненнях

- **Нова фізика (взаємодії, частинки, форми матерії, …) ?**

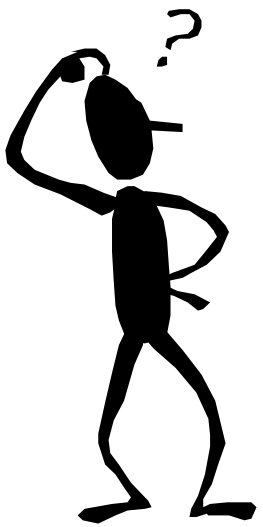
Фізичні цілі LHCb

- **Природа асиметрії між матерією та анти-матерією.**
- **Дослідження фізики ароматів (The physics of flavor).**
  - **СКМ матриця & трикутник унітарності**
  - **Порушення CP симетрії в розпадах B – мезонів**
  - **Осциляції B – мезонів**
  - **Пошук фізики за межами СМ**
  - **Рідкісні моди розпаду B – мезонів**
  - **Спектроскопія важких адронів – пошук нових резонансів, кваркових структур , …**

Проблема баріогенезису …

Порушення CP парності у розпадах каонів може бути пояснене в рамках Стандартної Моделі.

$\Leftrightarrow$



Порушення CP парності у Всесвіті не може бути пояснене в рамках Стандартної Моделі

Експеримент LHCb націлений на пошук порушення CP парності за межами Стандартної Моделі, використовуючи B-мезони.

LHCb 24th Anniversary, CERN. Nov. 5, 2019

LETTER OF INTENT

A Dedicated LHC Collider Beauty Experiment
for Precision Measurements of CP-Violation

CERN/LHCC 95-5
LHCC/ I 8
25 August 1995

Last update
28 March 1996

(В числі членів LHCb Колаборації – вчені двох інститутів з України)

Imperial College, London, U.K.
A. Duane, A. Howerd, I. Last, J.G. McEwen[3], D. Websdale

University of Oxford, Oxford, U.K.
N. Harnew, F. Harris, T. Hessing, G. Wilkinson

Institute of Physics and Techniques, Kharkov, Ukrain
Yu.N. Ranjuk, P.V. Sorokin

Institute for Nuclear Research, Kiev, Ukraine
V.E. Auschev, A.A. Klipenstein, I.N. Kolomiets, V.I. Medvedev, Yu.N. Pavlenko, V.M. Pugatch, N.M. Tkatch, V.V. Zerkin

LHC-B

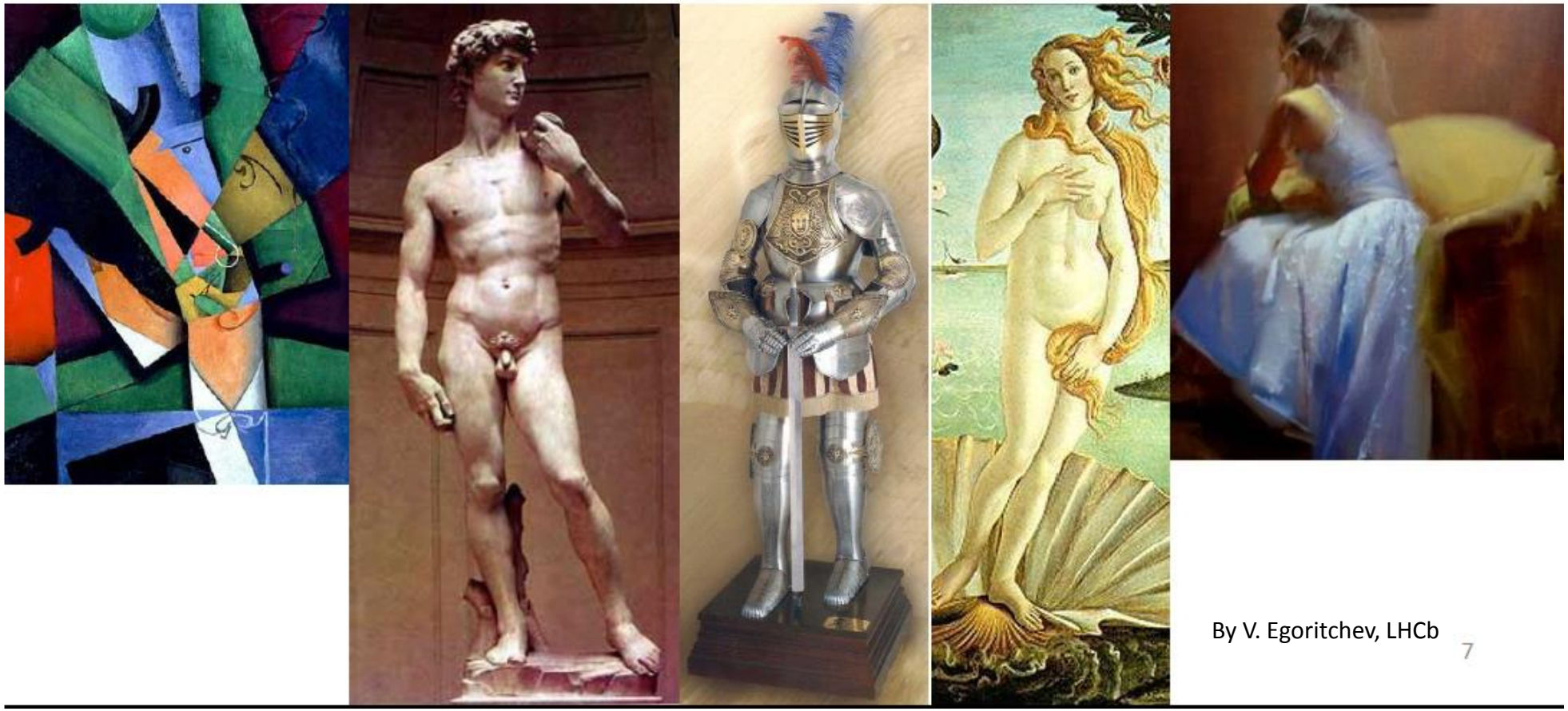
Україна: Інститут ядерних досліджень НАН України (Київ) – 8 чол. , ХФТІ (Харків) – 2 чол.

Фізичні цілі експерименту LHCb

Strange production

Open and hidden charm production

Open and hidden beauty production



By V. Egoritchev, LHCb

7

Красиві (Beauty), Чарівні (Charm), Дивні (Strange) events in LHCb

10^{11} протонів в кожному з понад 2000 банчів зіткались при 7 та 8 ТеВ у 2011 та 2012 р.р.

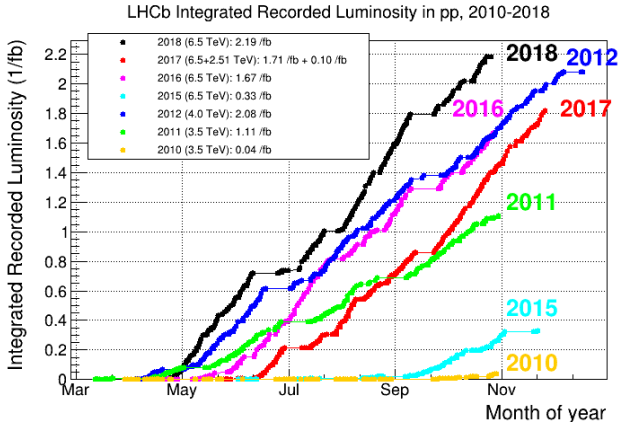
13 ТеВ у 2015 - 2019 р.р.

світимість IP-8 (LHCb)

(2-4) * 10^{32} cm $^{-2}$ s^{-1}

В кожному р-р зіткненні утворюється біля 1500 заряджених частинок :

- Високі радіаційні навантаження
- Необіхідність попереднього відбору подій



- 100,000 $b\bar{b}$ pairs produced per second
- $b\bar{b}$ pairs produced at low angle in the same forward or backward cone

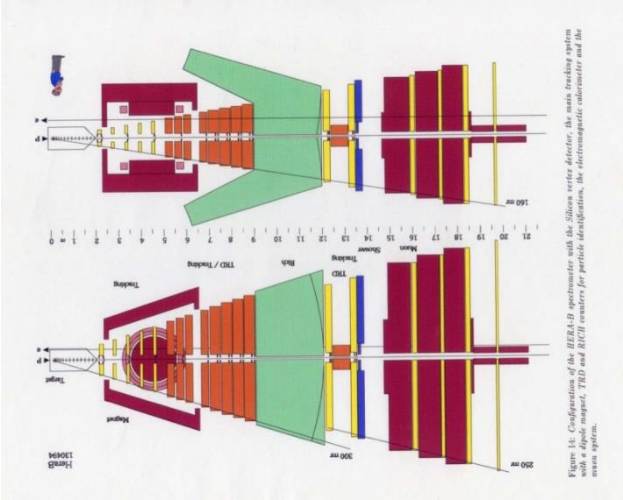
Нова Фізика

Може модифікувати характеристики порушення CP симетрії та рідкісних мод розпаду важких адронів через її вклад в петльових діаграмах

ІЯД НАН України

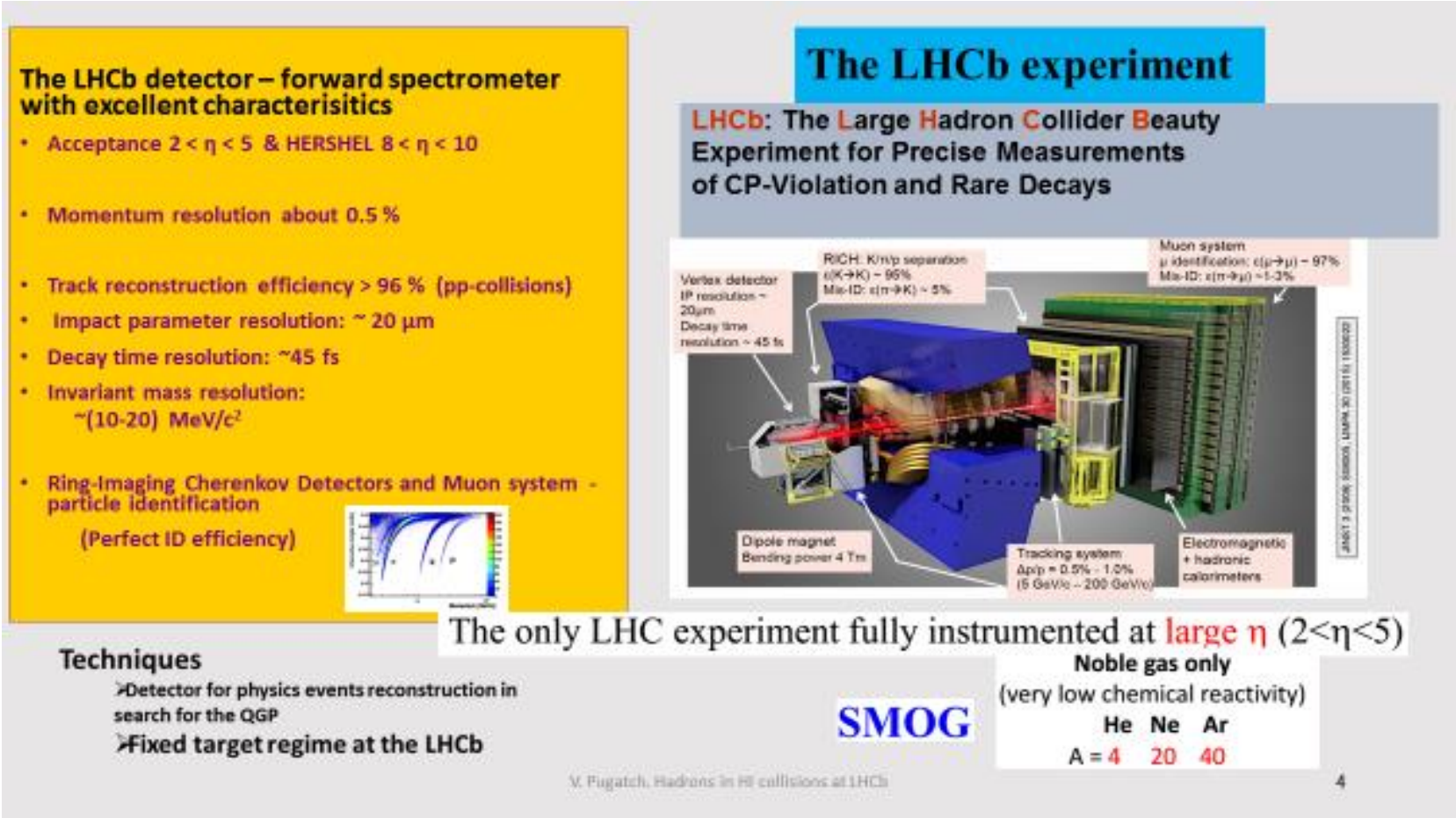
початок дослідження властивостей красивої та чарівної матерії.
HERA-B - dedicated B-physics experiment (1992 – 2003).
800/920 GeV proton beam at fixed target .DESY (Hamburg)

HERA-B. 1994 - 2003

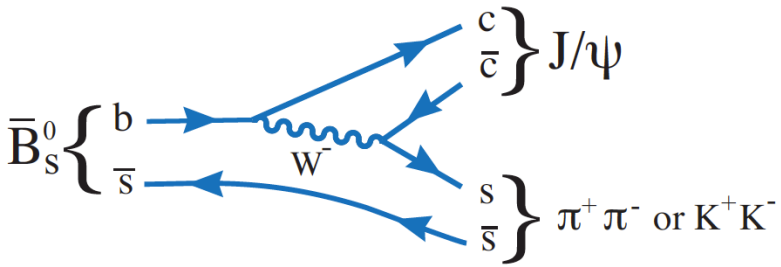


ІЯД НАН України – участь в створенні першої в світі 8-точкової системи ядерних взаємодій.

V. Aushev, Yu. Pavlenko, S. Prystupa, Yu. Pylypchenko, V. Pugatch, N. Tkach, Yu. Vasiliev, V. Zerkin

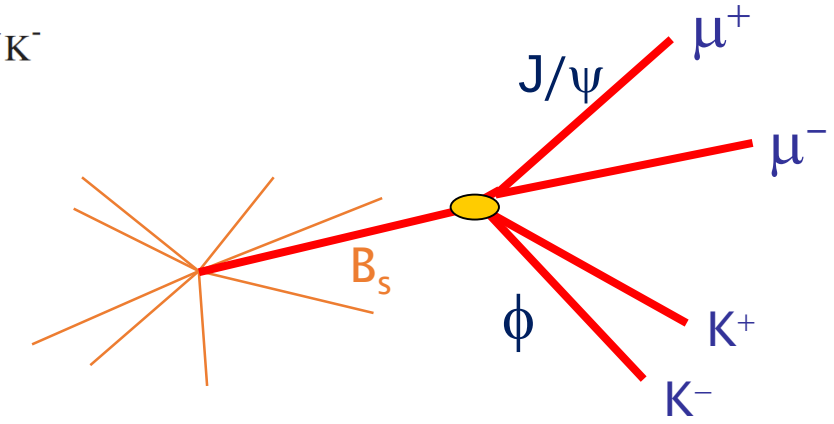


Фізико-технічні аспекти конструкції детектора LHCb: визначаються вимогами до реконструкції досліджуваних фізичних подій



- $B_s \rightarrow J/\psi\Phi$ and $B_s \rightarrow J/\psi\pi\pi$
- Чисті канали розпаду
- Прозора ідентифікація

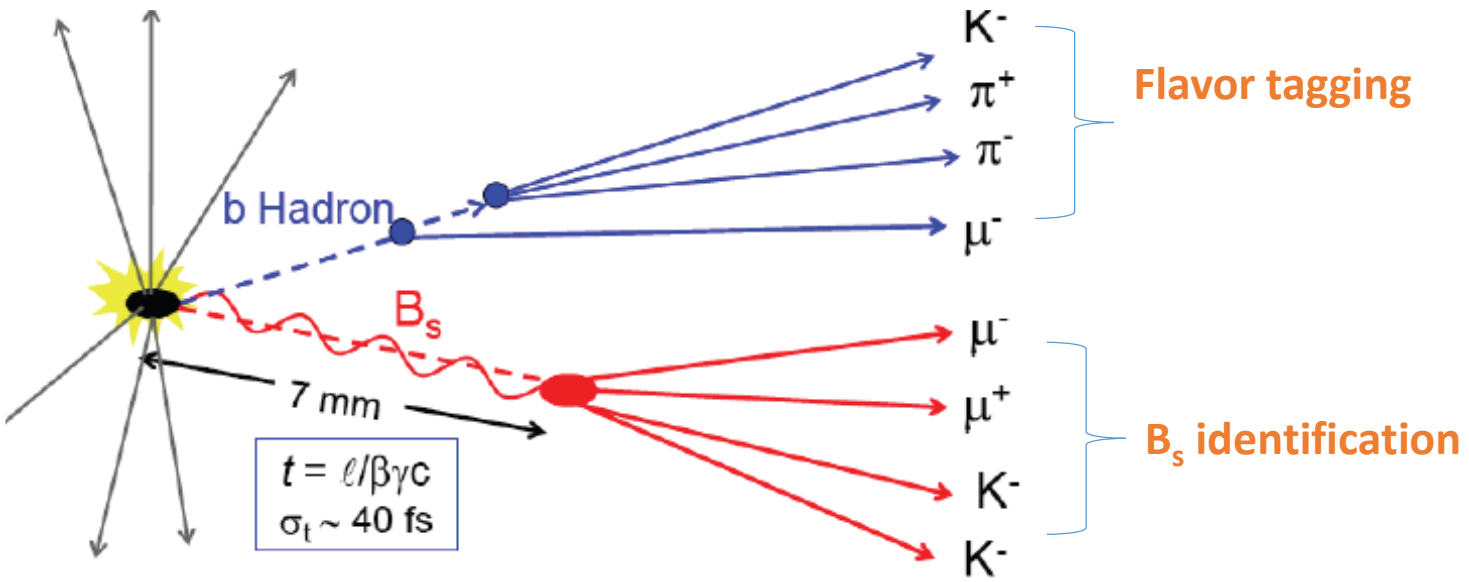
Порушення CP-парності
в розпадах важких мезонів



B – фізика.

Реконструкція розпадів B-мезонів

Реконструкція подій з красивими мезонами в LHCb



- **Ефективний тригер для відбору продуктів розпаду B мезонів**
- **Чітке виділення вторинних вершин – можливість дослідження осциляцій B мезонів з роздільною здатністю по часу - 40 fs.**
- **Подавлення фону завдяки:**
  - **Висока роздільна здатність по інваріантній масі (~ 14 МеВ/c^2)**
  - **Довершена ідентифікація типу частинок**
  - **Зміна напрямку магнітного поля (усунення штучної асиметрії)**

Фізико-технічні принципи побудови детекторних систем ФВЕ.

- Модульний принцип конструкції.
- Роздільна здатність (просторова, часова, амплітудна, тощо).
- Швидкодія.
- Радіаційна стійкість.
- Довготривала надійність в умовах низьких температур, електромагнітних наводок , тощо.

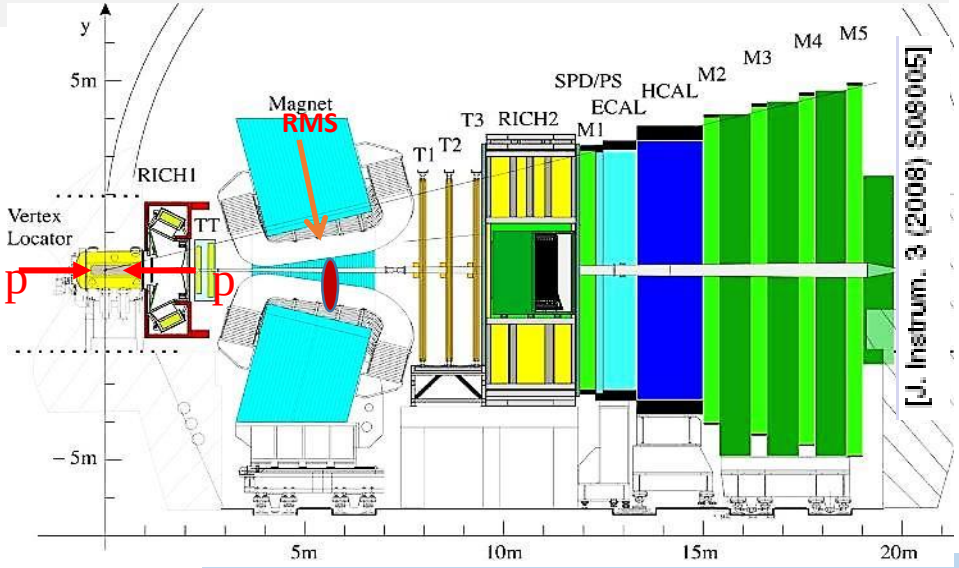
- **Технічне завдання на детекторні модулі визначається фізичними цілями та оптимізацією з урахуванням сучасних детекторних технологій та техніко-економічним базисом колаборації.**

The LHCb experiment

LHCb детектор – форвардний спектрометр з відмінними характеристиками

- Аксептанс $2 < \eta < 5$
- Роздільна здатність по імульсу ~ 0.5 %
- Ефективність реконструкції треків > 96 %
- Роздільна здатність по прицільному параметру ~ 20 μm
- Роздільна здатність по часу розпаду: ~45 fs
- Роздільна здатність по інваріантній масі: ~ 14 MeV/c^2
- Відмінна ефективність ідентифікації частинок > 90%

LHCb: The Large Hadron Collider Beauty Experiment for Precise Measurements of CP-Violation and Rare Decays



Інтегрована світимість (p-p зіткнення)

2011: 1.0 fb^{-1} @ 7 TeV

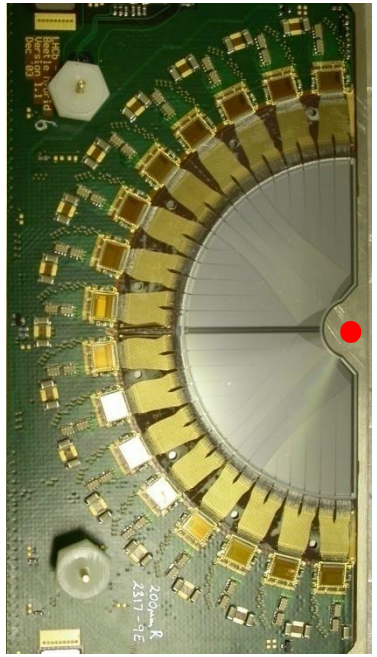
2012: 2.0 fb^{-1} @ 8 TeV

2015, 2016: 1.9 fb^{-1} @ 13 TeV

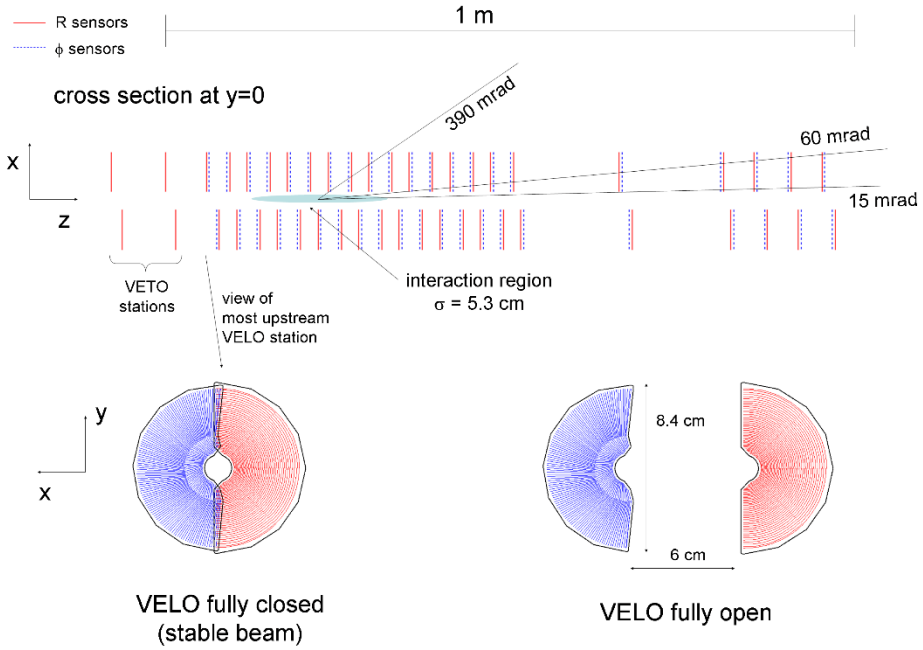
2017: **1.82 /fb** @ 13 TeV

Вершинний детектор (VELO – VErtex LOcator)

- **Вершинний детектор побудовано на основі кремнієвих мікростріпових сенсорах з $r\phi$ геометрією (стріпи - радіальні та концентричні кола).**
- **Рухомі платформи наближають сенсори до 8 mm від осі пучка протонів – всередині складної системи вторинного вакууму.**
- **За характеристиками найкращий в світі – забезпечує роздільну здатність по часу ~ 40 fs (важлива величина для дослідження осциляцій B_s розпадів)**

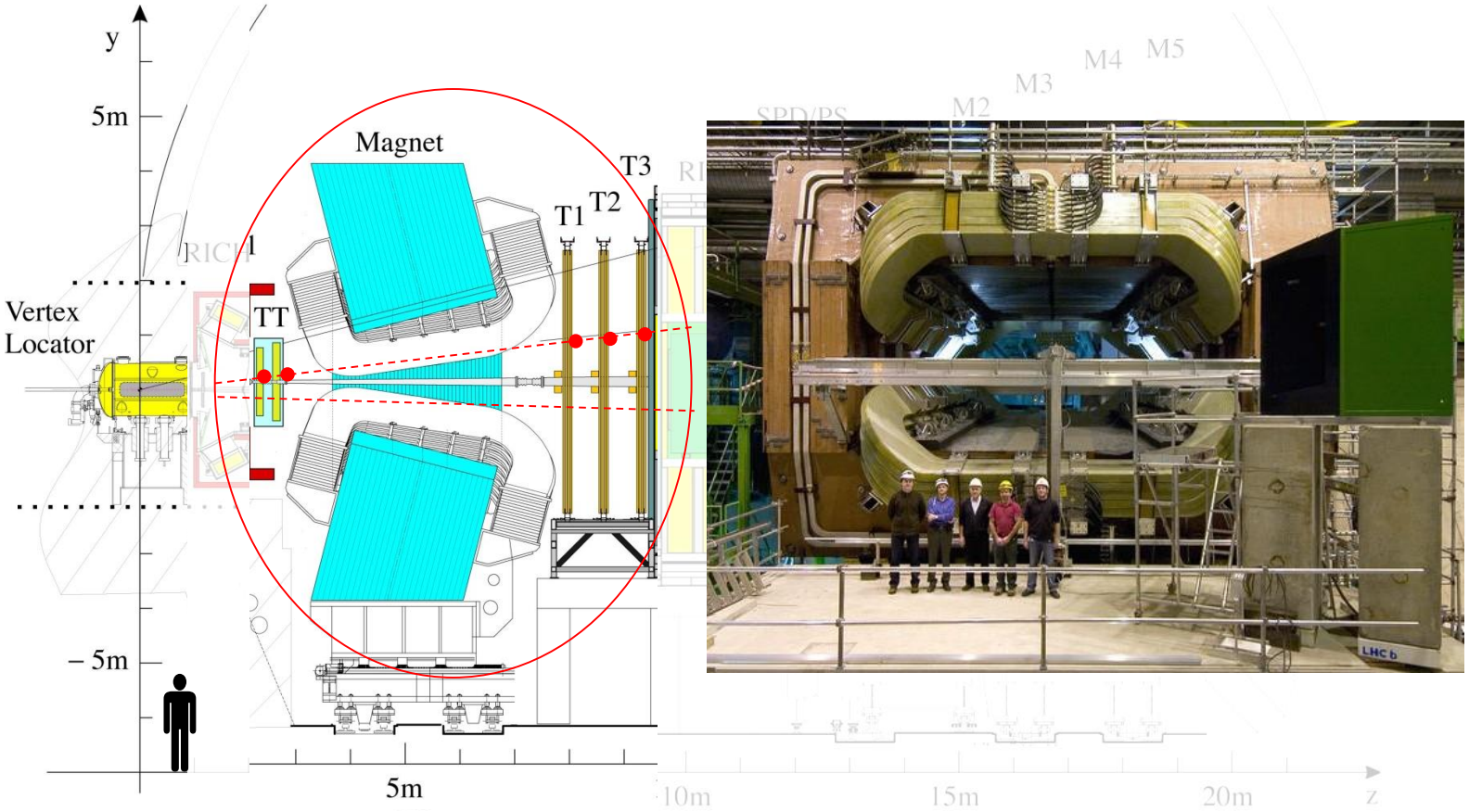


Beam



Дані з вершинного детектора
Використовуються в тригерній системі попереднього відбору подій

Трекова система та дипольний магніт LHCb

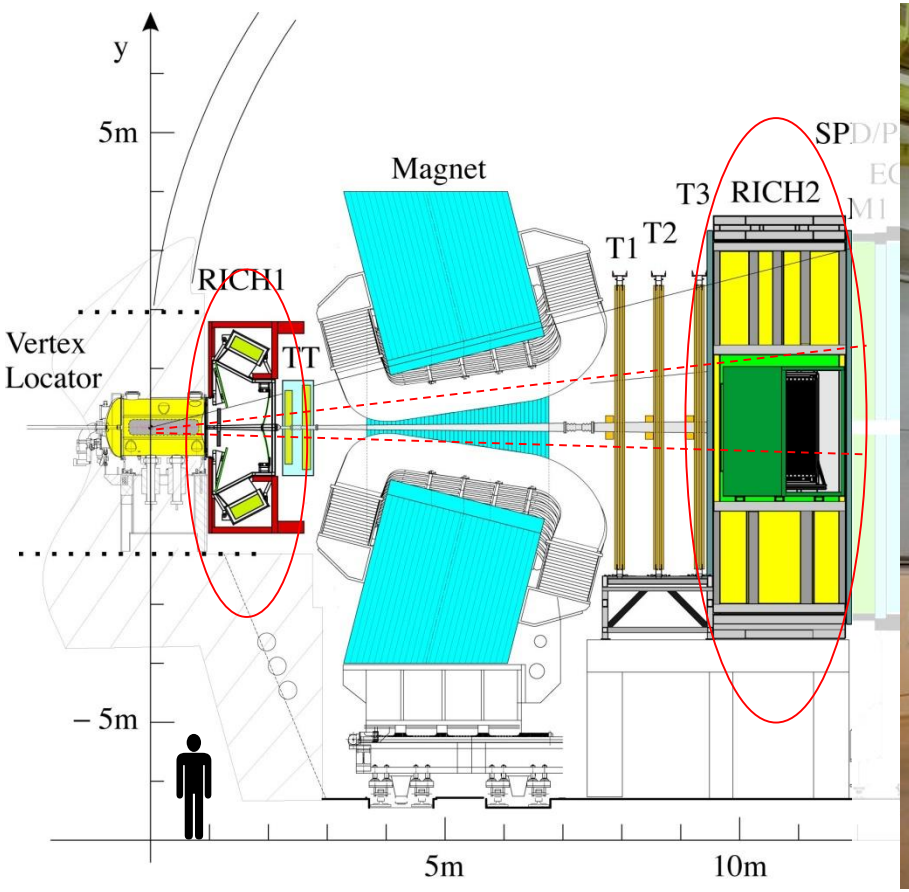


Трекова система та дипольний магніт призначені

для вимірювання кутів та імпульсів заряджених частинок :

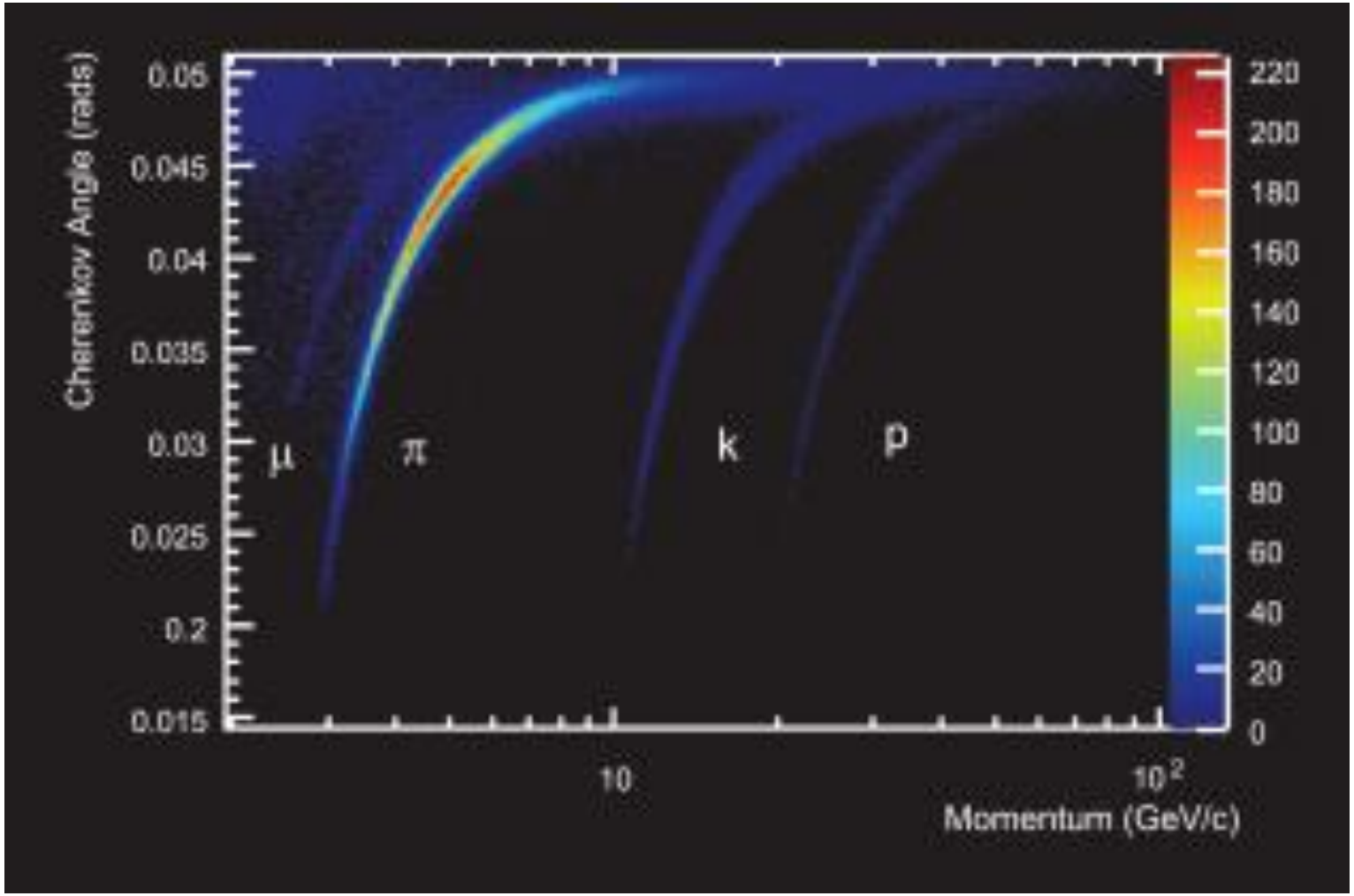
***Δp/p* ~ 0.4 %,** роздільна здатність по інваріантній масі **~ 14 MeV/c²** (for $B_s \to D_s K$)

Система ідентифікації сорту частинок – Черенковські детектори

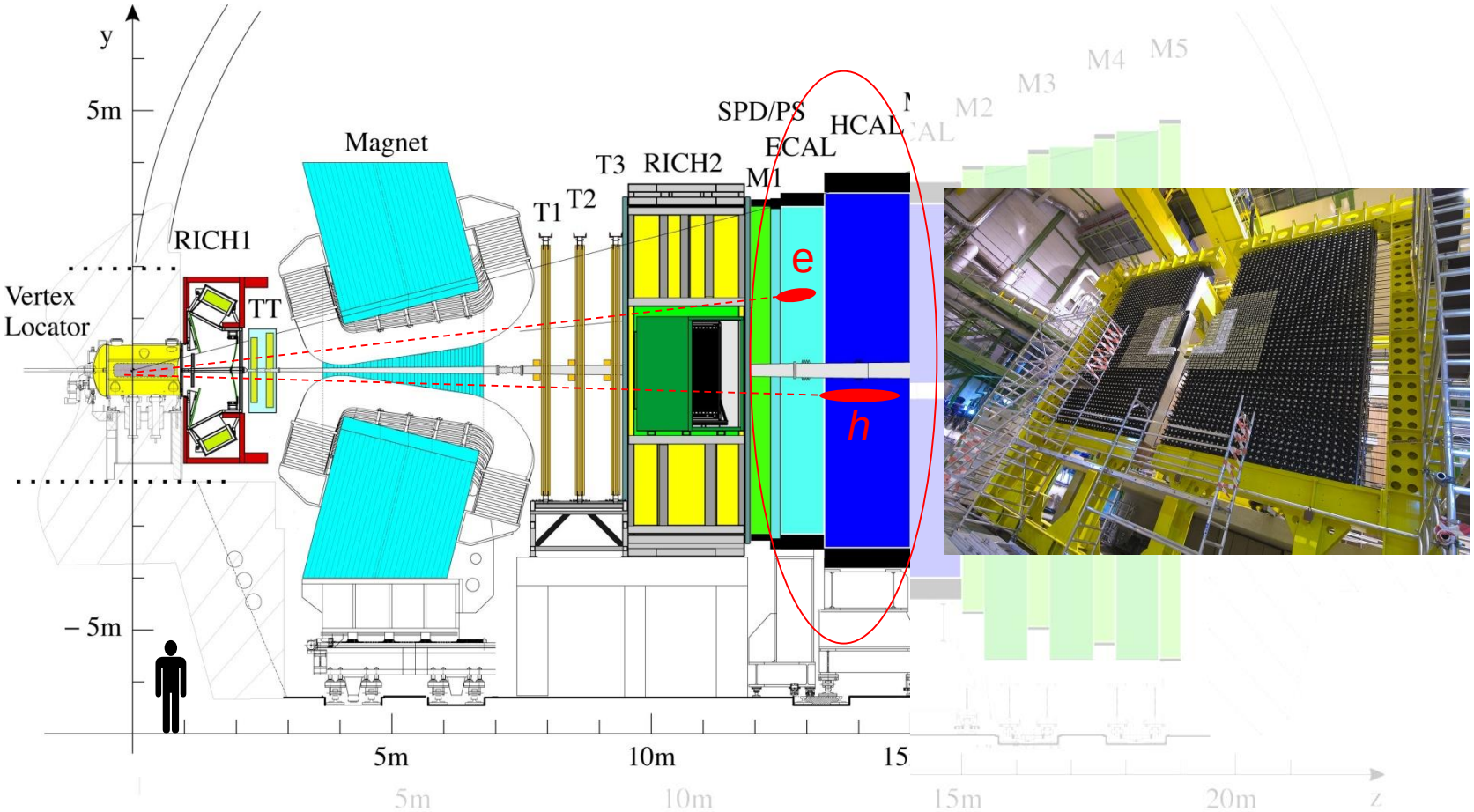


Два черенковських детектори виконують ідентифікацію типу частинок (обведені червоними еліпсами)

Висока ефективність ідентифікації типу частинок. LHCb-2013. Ring Imaging Cherenkov Identification system.

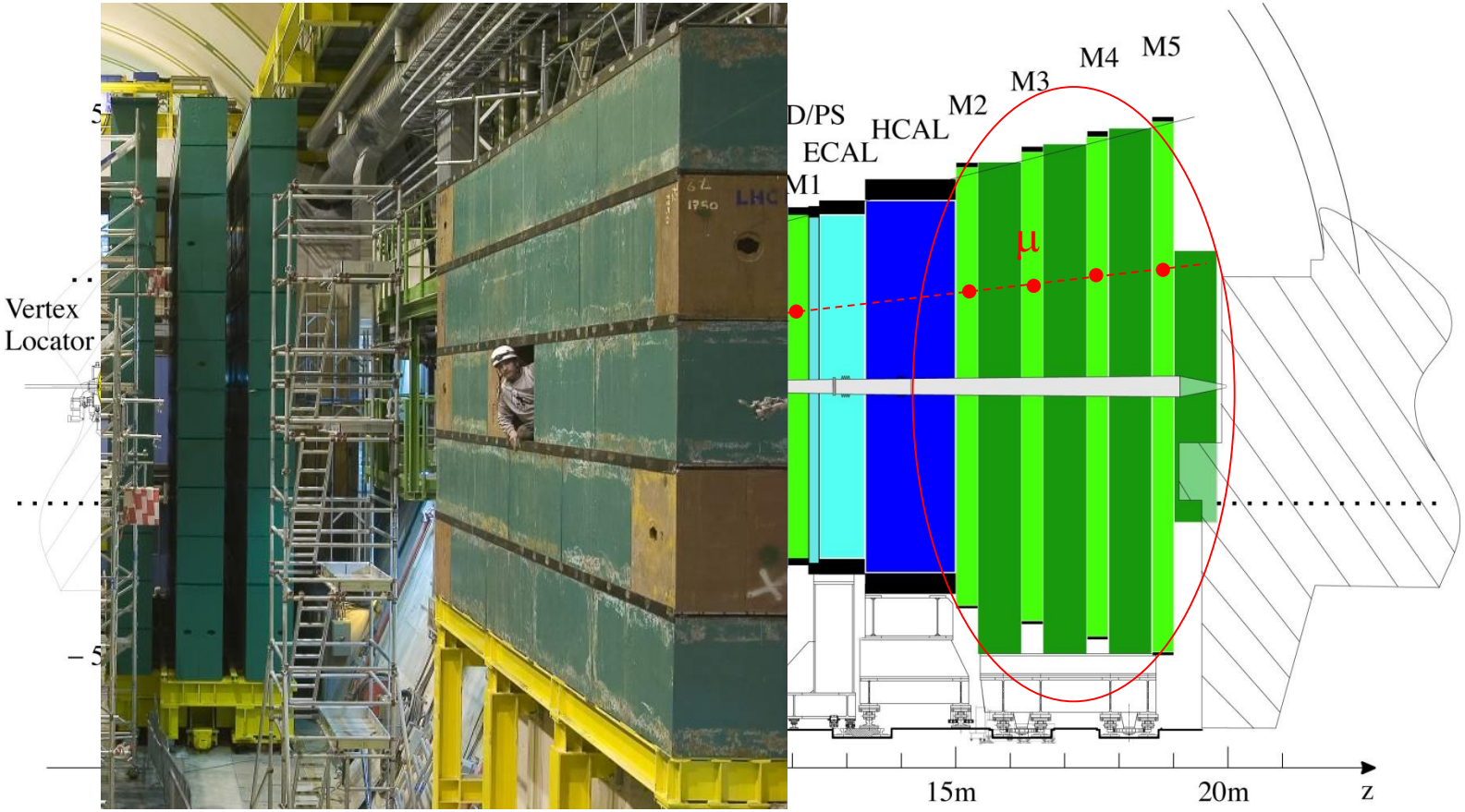


Адронні та електро-магнітні калориметри



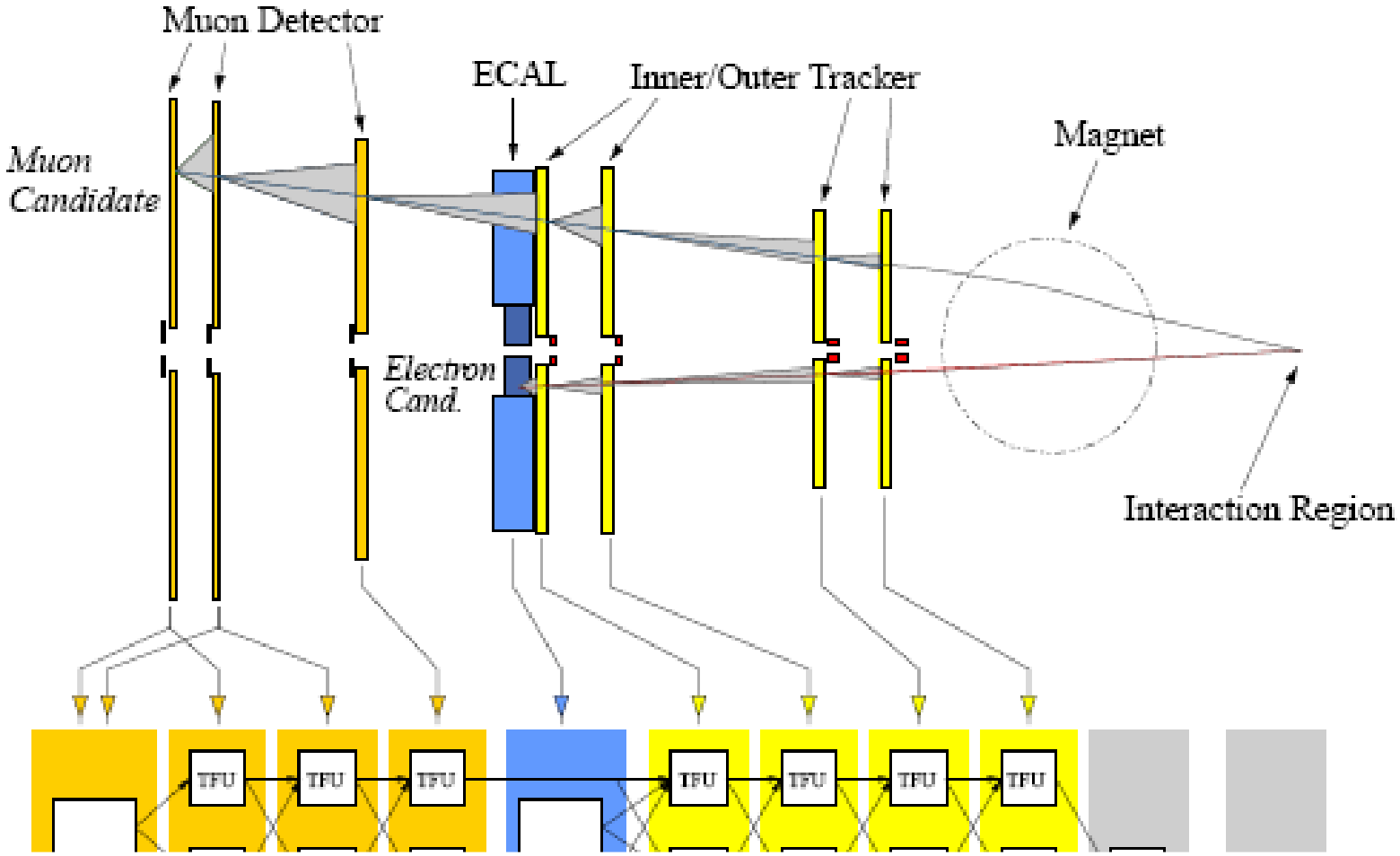
Калориметри ідентифікують електрони, адрони та нейтральні частинки. Дані використовують для тригера першого рівня.

Мюонна детекторна система



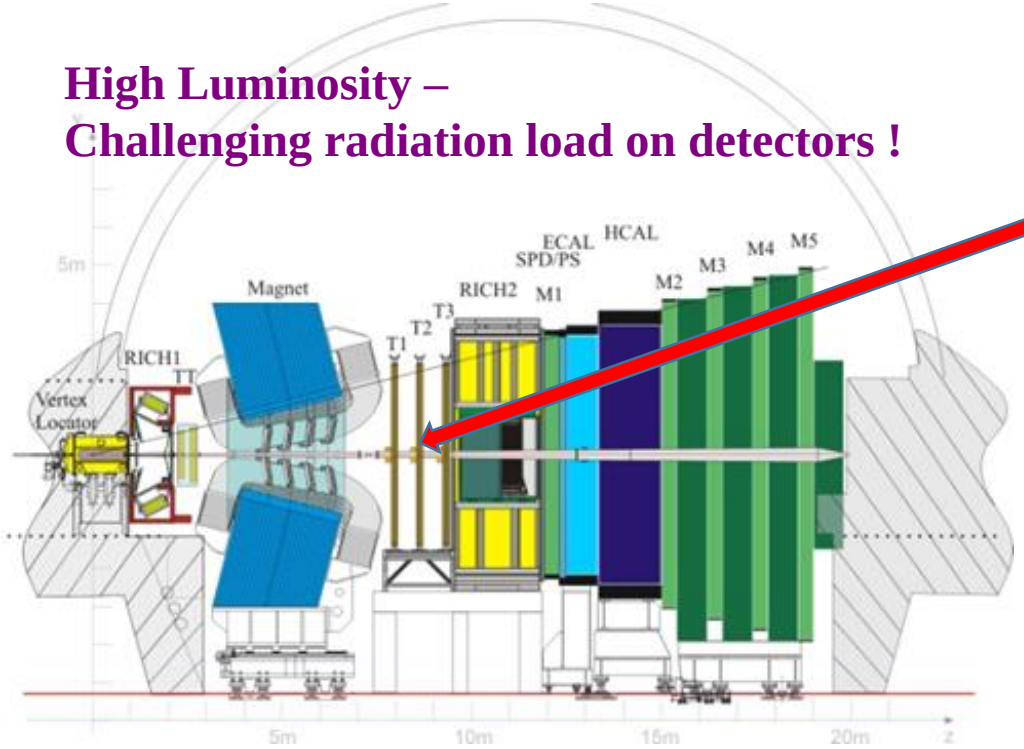
Мюонна система ідентифікує мюони. Дані з мюонної системи також використовують в тригері першого рівня

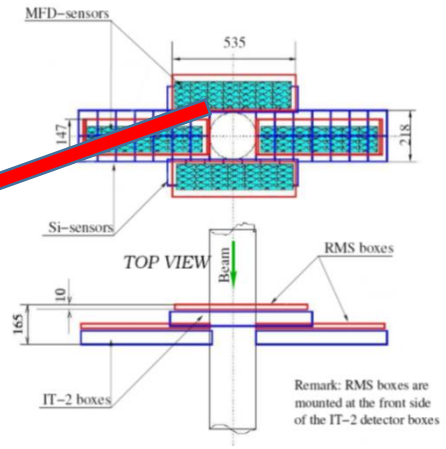
Реконструкція мюонних та електронних треків



Система Радіаційного Моніторингу в експерименті **LHCb**

High Luminosity –
Challenging radiation load on detectors !

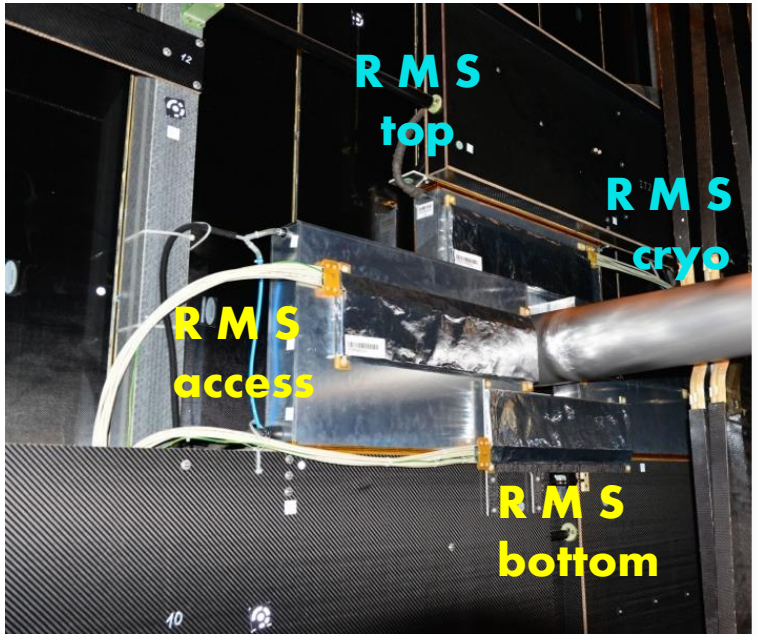


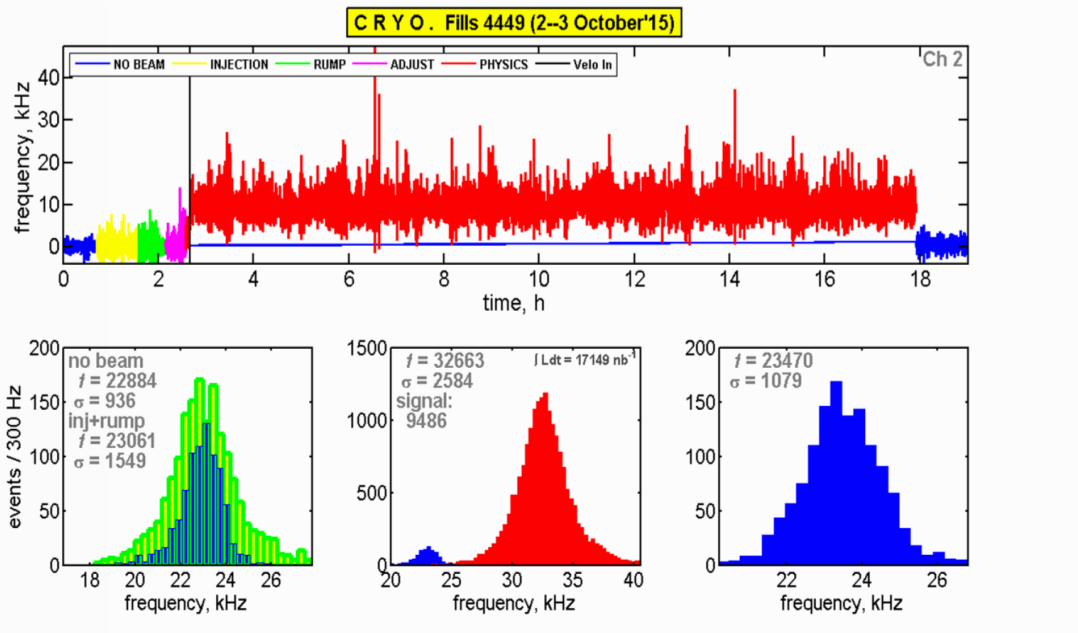


Фізичні принципи, технологія, Експлуатація – ІЯД НАН України

Створена в ІЯД НАН України Система Радіаційного Моніторингу забезпечує в реальному часі вимірювання дозових навантажень на чутливі до радіаційного впливу детекторні модулі експерименту LHCb, а також світимості експерименту.
Номінальна світимість LHC складає $L = 10^{34}$ см$^{-2}$с$^{-1}$ для експериментів ATLAS, CMS та $L = 3\ 10^{32}$ см$^{-2}$с$^{-1}$ — для експерименту LHCb.

Система Радіаційного Моніторингу (RMS)
Протон-протонні зіткнення. Енергія 13 ТеВ





Експеримент LHCb.

28 металево-фольгових сенсорів RMS навкруги Be - іонопроводу LHC .

Фізика, Техніка, Експлуатація RMS - ІЯД НАН України

Відгук детекторів RMS (блок «CRYO»)

Кольори –
різний статус експерименту LHCb:

Фіолетовий—ADJUST

Червоний—PHYSICS

Кремнієві детектори в трекових системах LHCb

Institutes involved in the **LHCb Silicon Tracker**:

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

LPHE, EPFL Lausanne

KINR, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

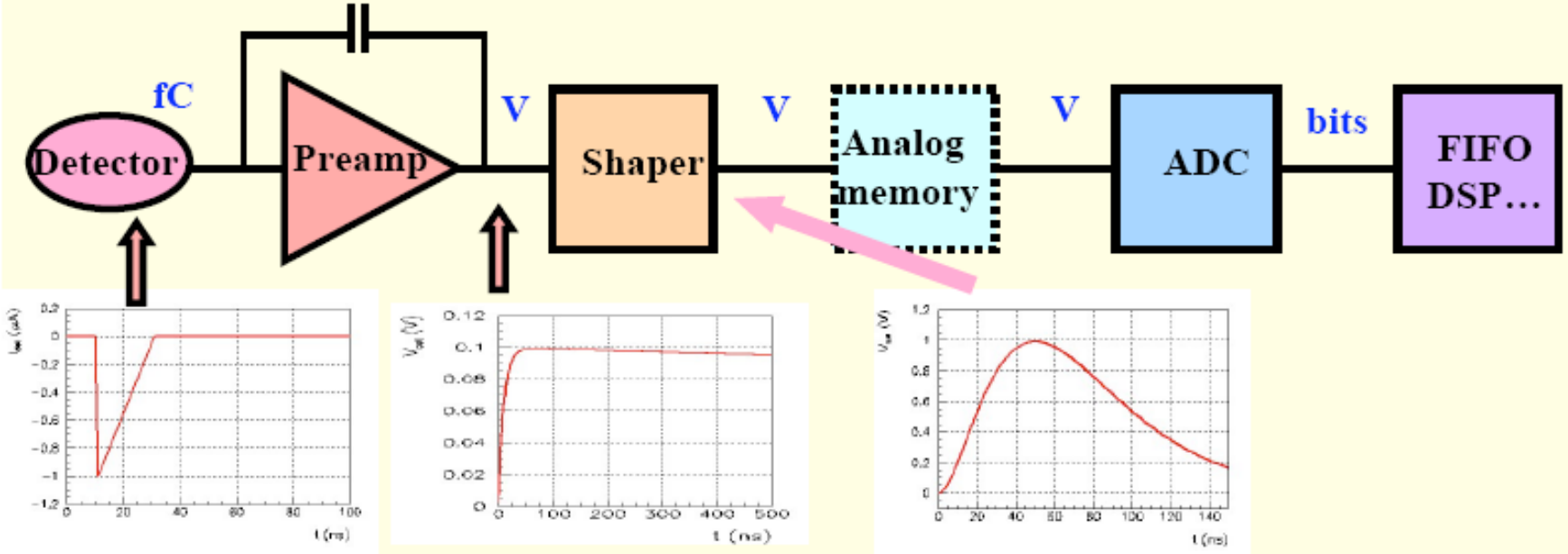
Budker Institute for Nuclear Physics, Novosibirsk

Universidade de Santiago de Compostela

Physik-Institut der Universität Zürich

Вимірювання фізичних величин – через електричні сигнали від сенсорів

➢ Most front-ends follow a similar architecture

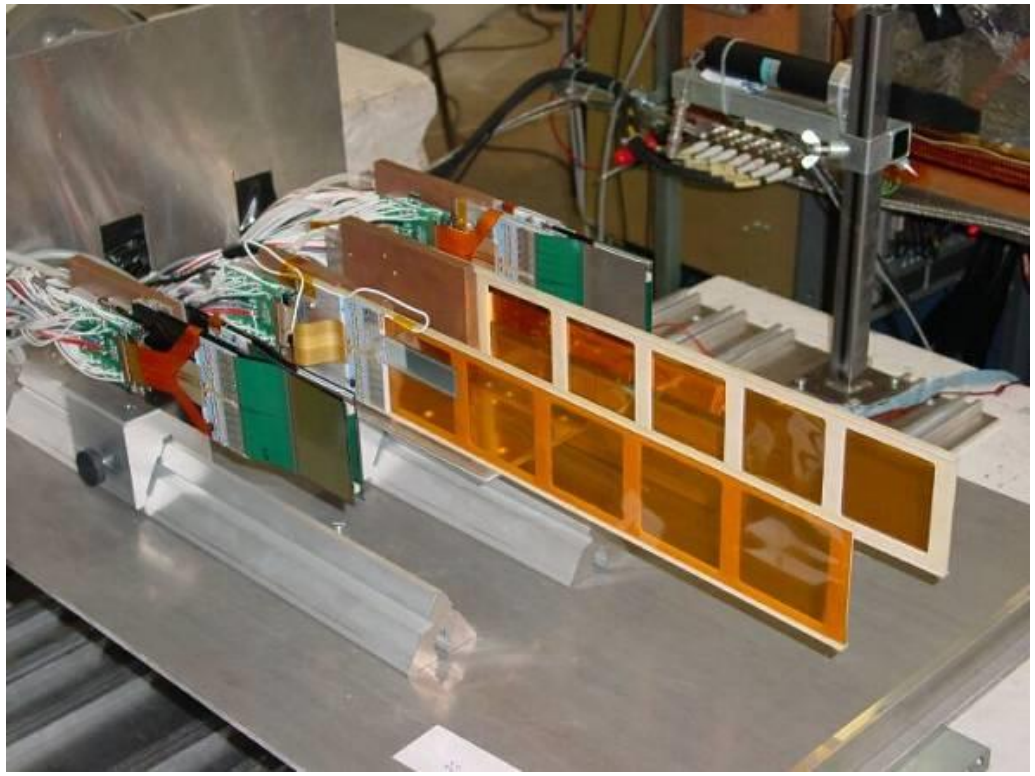


- Very small signals (fC) -> need amplification and optimisation of S/N (filter)
- Measurement of amplitude and/or time (ADCs, discris, TDCs)
- Several thousands to millions of channels
- Needs time to decide to keep or not the event : memory

Оцінка якості прототипів трекових системах

Дослідження прототипів Кремнієвих односторонніх мікростріпових детекторів (прямокутники на поліімідній плівці коричневого кольору) для експерименту LHCb (**Виробництво ін-ту мікроприладів, Київ).**

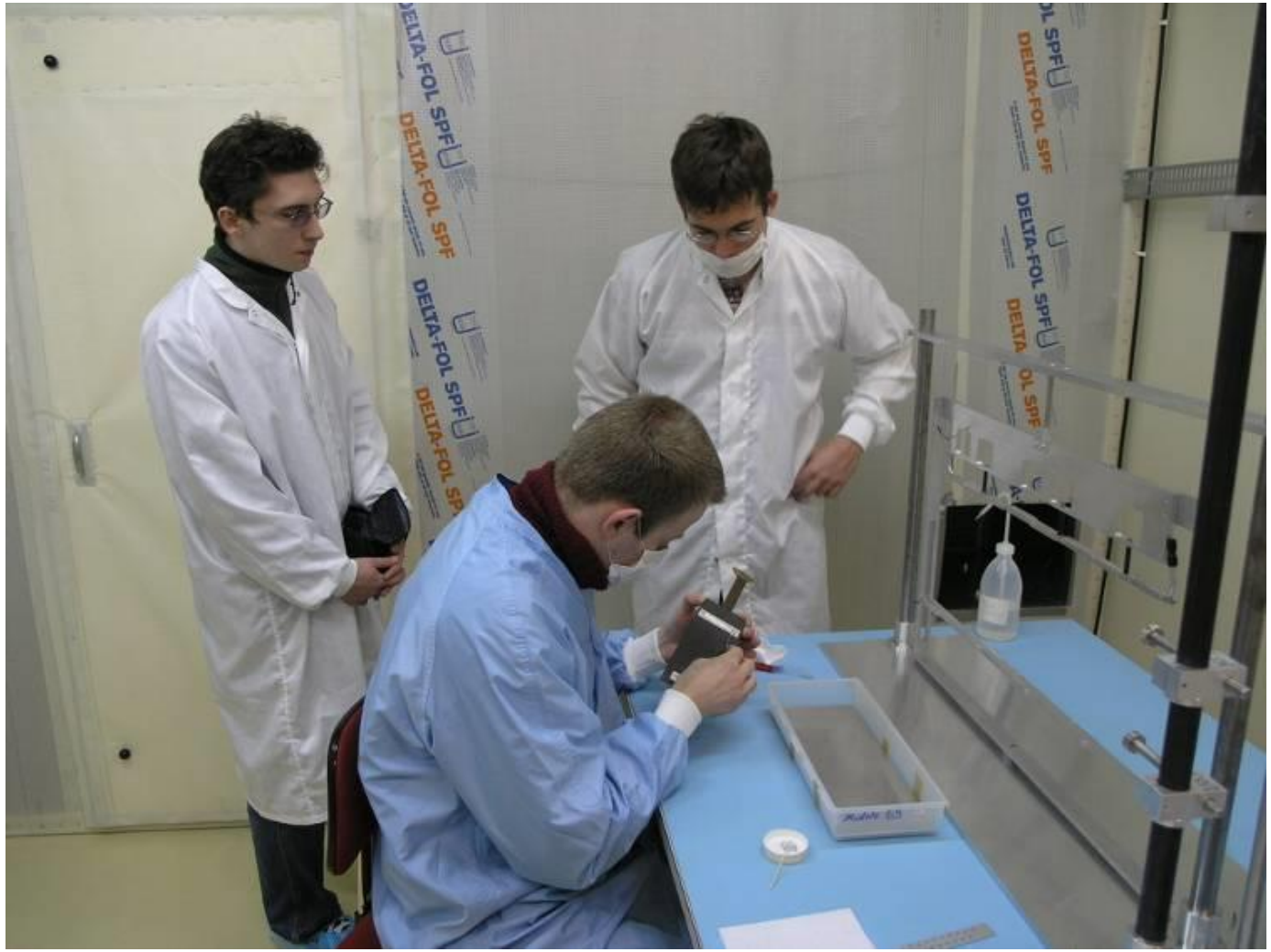
CERN.
Тестовий пучок мезонів З енергією 15 ГеВ створює треки, що фіксуються телескопами двохсторонніх мікростріпових детекторів HERA-B (мікро-кабелі зеленого кольору).



Тригер – від сцинтиляційного детектора (справа – конструкція чорного кольору).

Ціль – ефективність реконструкції треків прототипами мікростріпових детекторів.

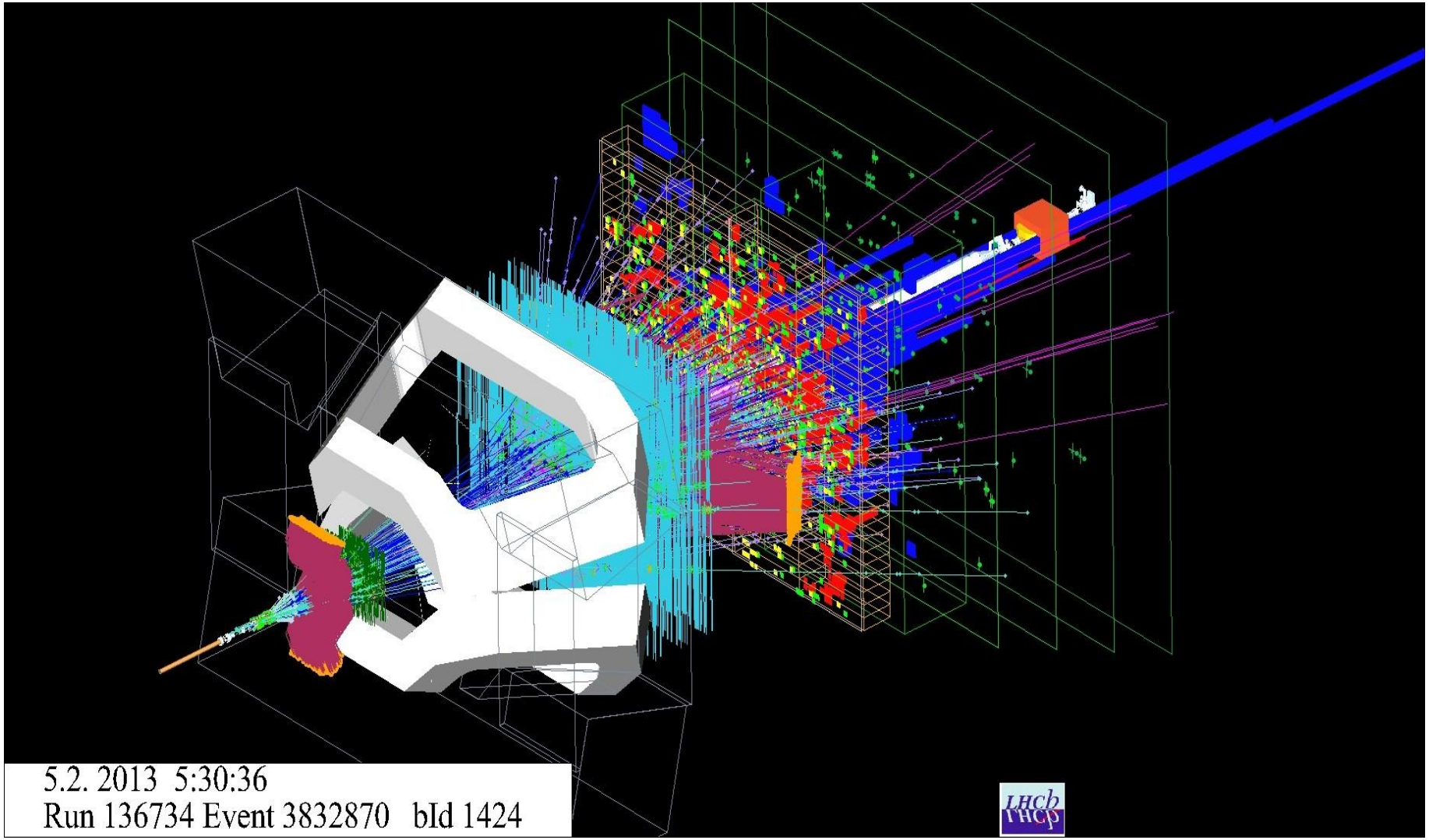
Кремнієві детектори в трекових системах



Монтаж Кремнієвого Трекера для експеримента LHCb –

За участю аспіранта З ІЯД НАН України

A typical pPb interaction



Фізичні величини, вимірювані в експериментах ФВЕ

- Тип частинки (заряд, маса)
- Енергія. Імпульс. Інваріантна маса
- Час життя. Ширина резонансу. Співвідношення гілок розпаду
- Спін. Орбітальний момент
- Множинність, центральність події
- Поперечні перерізи: кутові, енергетичні та часові розподіли, кореляції продуктів розпаду проміжних станів
- З аналізу даних: кути трикутника унітарності, ступінь порушення CP-парності, фактори ядерної модифікації, тощо.
- Нові фізичні величини … ?

На шляху до фізичних результатів

- **Реконструкція події.**

“Event” – «Подія» – як свідоцтво нового явища, передбаченого теорією та реконструйованого «Монте-Карло» з урахуванням рис детекторної системи.

- **Реєстрація події та її реконструкція включають такі кроки аналізу даних**
  - **Ідентифікація продуктів (mass, charge, momentum, energy, spin, …)**
  - **Вимірювання треків – реконструкція вершин розпаду**
  - **Кутовий розподіл**
  - **Множинність події**
  - **Кількість подій – поперечні диференційні перерізи**
  - **Співвідношення гілок розпаду по різним каналам**

- **Мільйони сенсорів для ефективної реєстрації хітів від частинок !**

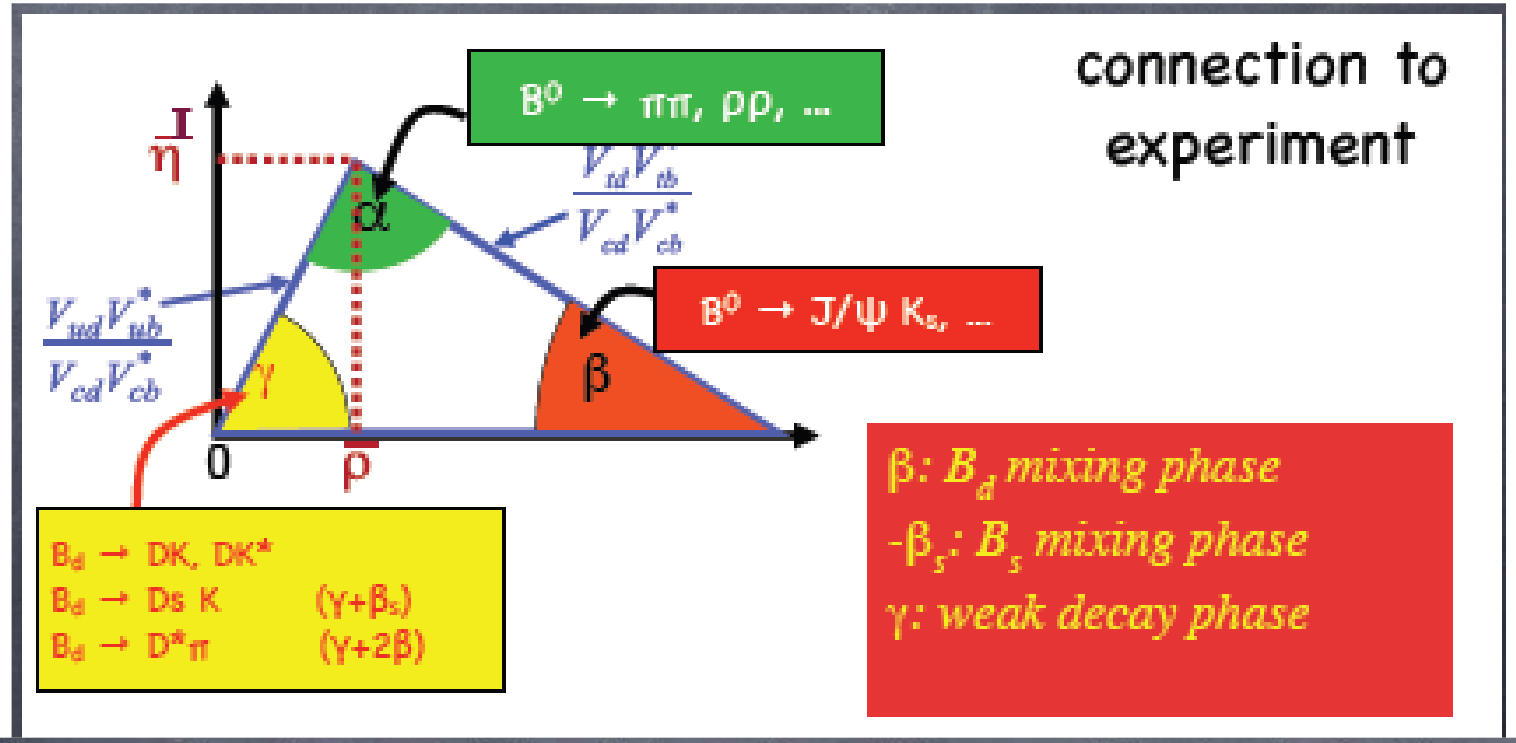
Монте Карло симуляція, визначення ефективності реконструкції фізичної події

Монте Карло симуляція. Дві частини:

- **МК генерація події** - згенеровані частинки проходять через детекторну систему
- **МК реконструкція** симульованих даних в той же самий спосіб, що використовується і для реальних даних
- Симуляція розпаду частинок і детекторна відповідність базується на програмному пакеті GEANT .
- Щоб порівняти реальні дані і дані МК реконструкції необхідно як можливо точніше описати розташування, розмір, геометричну форму і побудову спектрометра.

Фізичні цілі LHCb

- **Природа асиметрії між матерією та анти-матерією.**
- **Дослідження фізики ароматів (The physics of flavor).**
  - **СКМ матриця & трикутник унітарності**
  - **Порушення CP симетрії в розпадах B – мезонів**
  - **Осциляції B – мезонів**
  - **Пошук фізики за межами СМ**
  - **Рідкісні моди розпаду B – мезонів**
  - **Спектроскопія важких адронів – пошук нових резонансів, кваркових структур , …**



Flavour – Theorie von Cabibbo, Kobayashi und Maskawa (Nobelpreis 2008)

➡ Flavour Eigenzustände (schwache WW) sind Überlagerung der Massen Eigenzustände, verbunden durch CKM Matrix

- CKM Matrix ist complex and unitär: 4 unabhängige Parameter
  - ➡ 3 Winkel + 1 Phase → CKM Dreieck

Ulrich Kerzel (CERN)

T. Maskawa

M. Kobayashi

Реконструкція подій. Аналіз даних. Фізичні висновки.

Вольтер. “Філософські роздуми”, 1686 р.

Філософи, які створюють теорію будови Всесвіту, схожі з нашими мандрівниками, які їздять в Константинополь а потім розповідають про Сералі.

Сераль вони бачать тільки зовні, і все ж думають, що знають, що робить там султан із своїми фаворитками.

Voltaire,

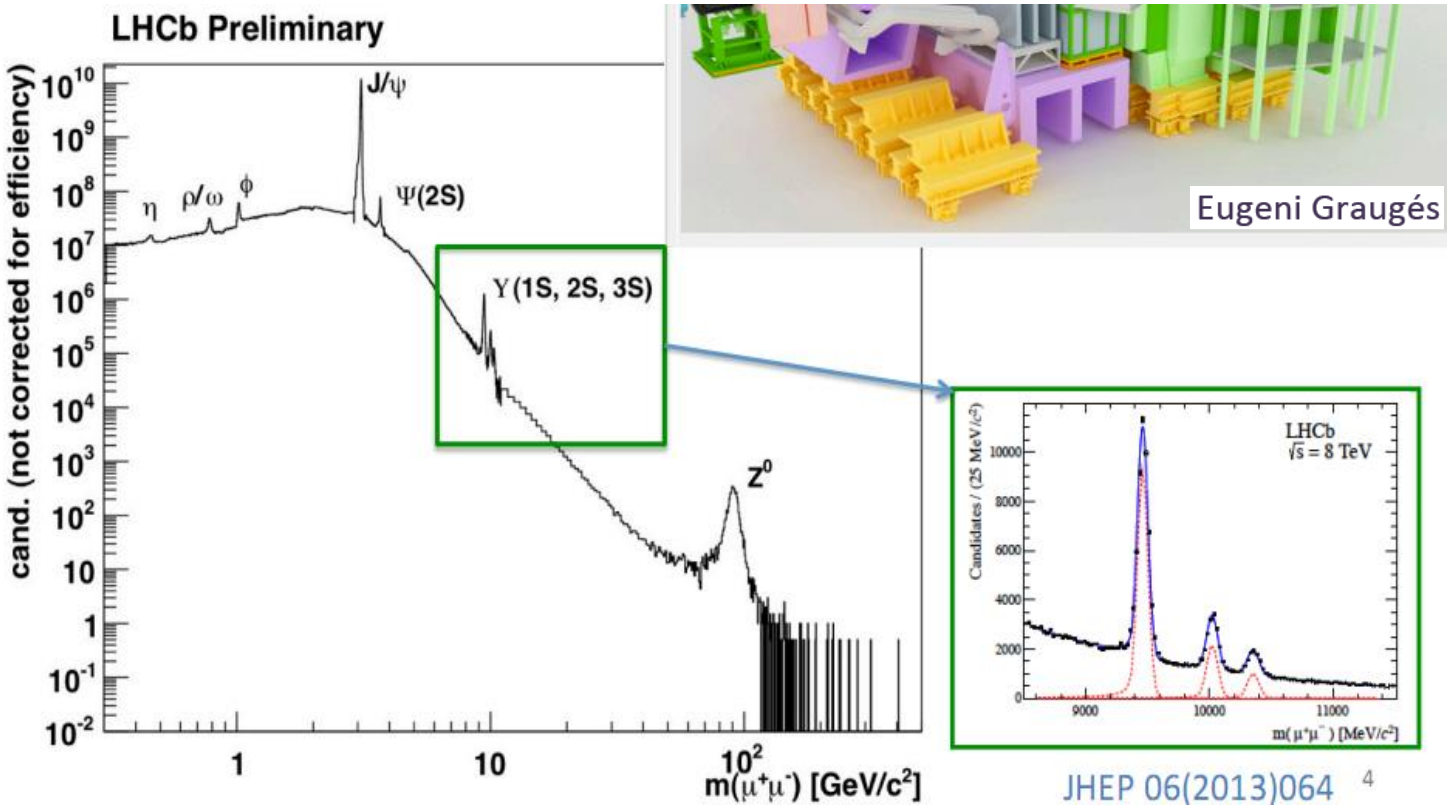
pseudonym **of François-Marie Arouet**

(born November 21, 1694, Paris, France—died May 30, 1778, Paris),

one of the greatest of all French writers.

Вибрані результати експерименту LHCb
Властивості важких адронів
(маса, час життя, гілки розпаду, …)

Спектроскопія – довершене знаряддя досліджень та пошуку «Нового»



JHEP 06(2013)064 4

Роздільна здатність по інваріантній масі : ~(10-20) MeV/c²

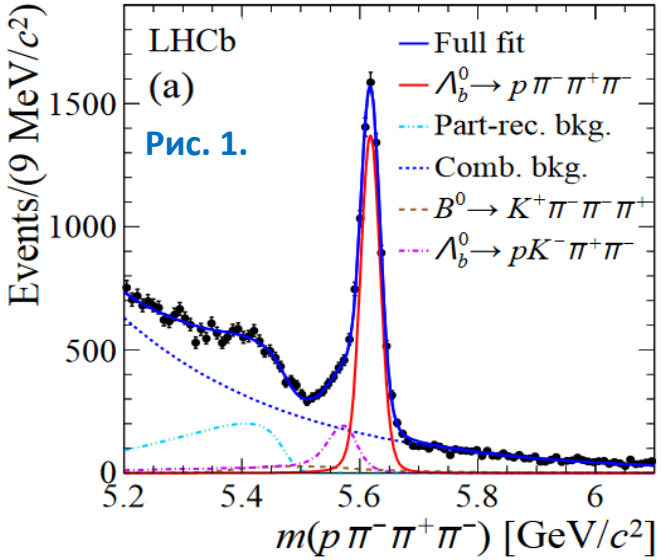
Висока енергія зіткнень ядер на LHC призводить до зростання інтенсивності генерації важких адронів на кілька порядків у порівнянні із лептонними колайдерами.

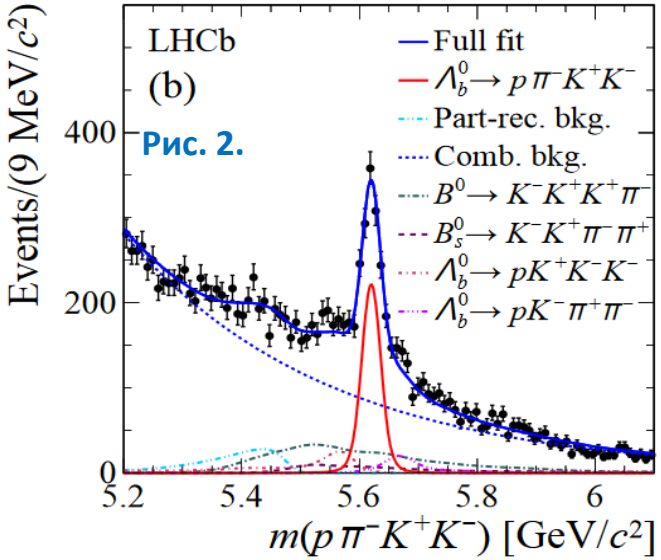
Всі b- адронні зразки матерії були спостережені (окрім з t- кварком)

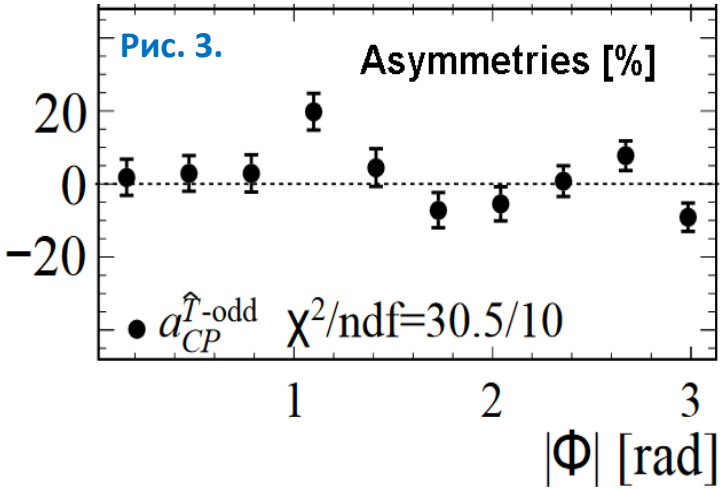
Порушення CP-парності у розпадах Λ_b^0

Нещодавні результати LHCb (2017 р.)

Представлені результати отримані із 3 фб$^{-1}$ даних, накопичених в експерименті LHCb при енергіях p-p-зіткнень 7 та 8 ТеВ.



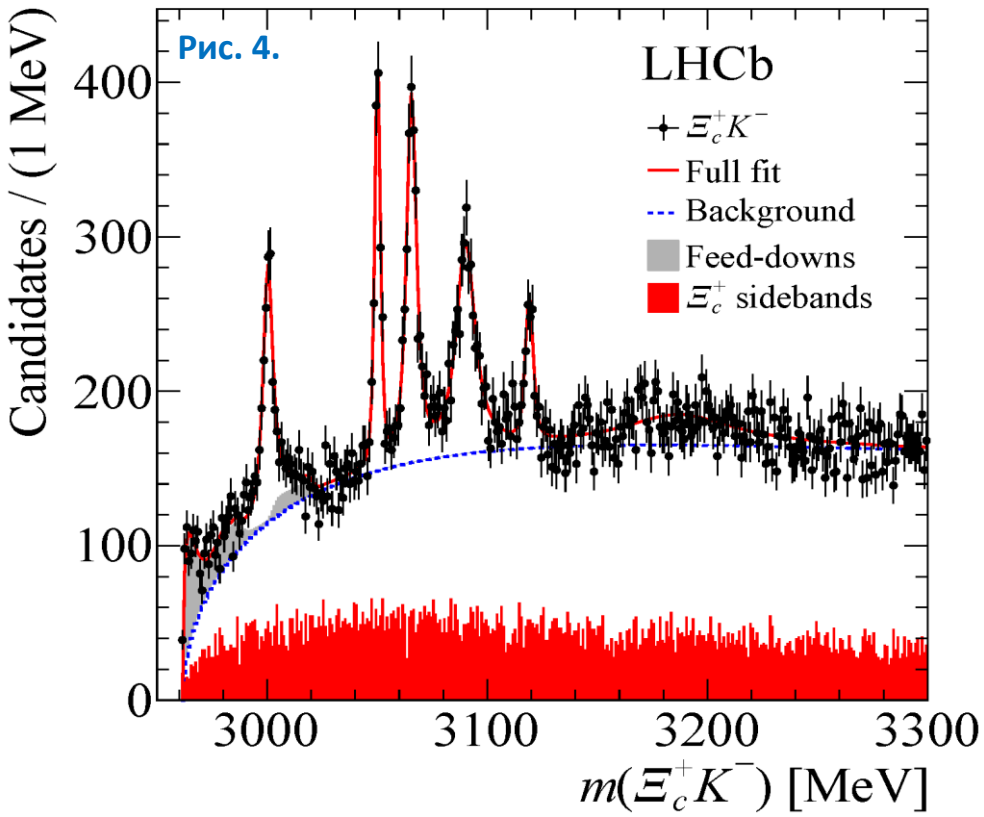




Реконструкція подій - по каналам розпаду:
$\Lambda_b^0 \to p\pi^-\pi^+\pi^-$, $\Lambda_b^0 \to p\pi^-K^+K^-$ (**рис. 1 та 2**, відповідно).
Асиметрія $a_{CP}^{T\text{-odd}}$ (**рис. 3**) виміряна в залежності від кута **Φ** між двома площинами розпаду ($p\pi^-$ *та* $\pi^+\pi^-(K^+K^-)$) і сягає до **20%** із статистичною значимістю 3.3 стандартних відхилення.
*Nature Physics **13**, (2017) 391–396.*

Вперше спостережене **порушення CP-парності** у розпадах **чарівних баріонів Λ_b^0** із значимістю **3.3σ.**

Нещодавні результати LHCb
(2018 р.)



Вперше спостережені та виміряні маси збуджених станів Ω_c^0(ssc, 2697) баріону (маси в МеВ вказані в дужках):

$\Omega_c(3000)^0$,

$\Omega_c(3050)^0$,

$\Omega_c(3066)^0$,

$\Omega_c(3090)^0$,

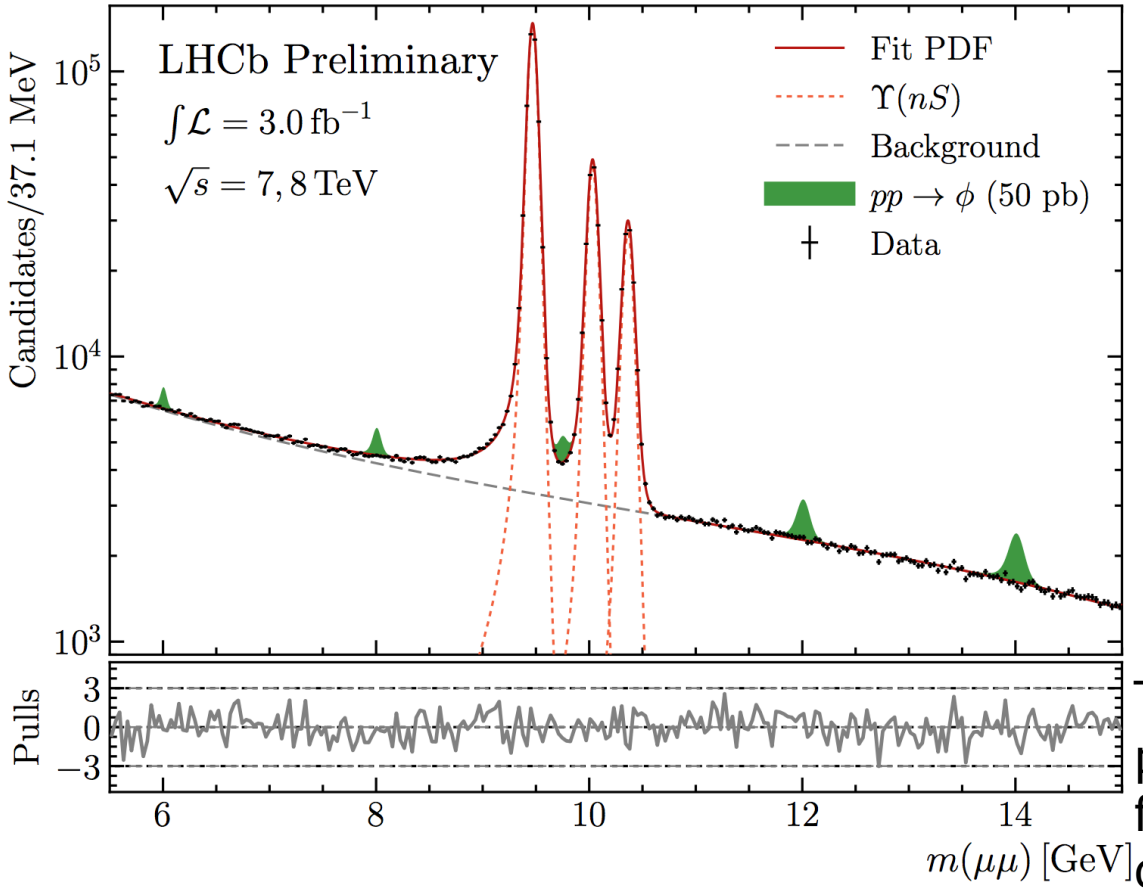
$\Omega_c(3119)^0$.

Реконструкція подій - по каналу розпаду:

$$\Omega_c^0 \rightarrow \Xi_c^+(pK^-\pi^+)K^-.$$

Phys. Rev. Lett. ***118*** *(2017) 182001.*

Нещодавні результати LHCb
(березень 2018 р.)



The 53rd **Rencontres de Moriond** session devoted to **ELECTROWEAK INTERACTIONS AND UNIFIED THEORIES** (La Thuile, **March 10th - 17th, 2018**.

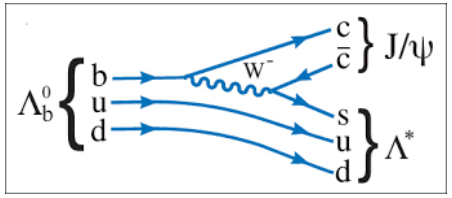
Search for a dimuon resonance in the Y mass region. The only known fundamental scalar particle is the Higgs boson with a mass of 125 GeV.
However, additional spin-0 particles, called **Φ bosons**, arise in many extensions of the Standard Model (SM) and are often predicted to be lighter than the Higgs boson.

The image shows the mass spectrum of the muon pair in the whole search region. Mass peaks for five hypothetical Φ-boson mass hypotheses are displayed in green. No evidence was found.

Виміри часу життя –
засіб ідентифікації «Знаного»
та « Нового»

Вибрані результати експерименту LHCb
Властивості важких адронів
(маса, час життя, гілки розпаду, …)

Порівняння часів житя B-мезона та Λ_b- баріона



HQE-теорія [NPB, 483, 339, 1997] :

- **Важкий b-кварк визначатиме час життя в обох зразках матерії з *b кварком !***
- **Тобто час життя B-мезона та Λ_b- баріона**

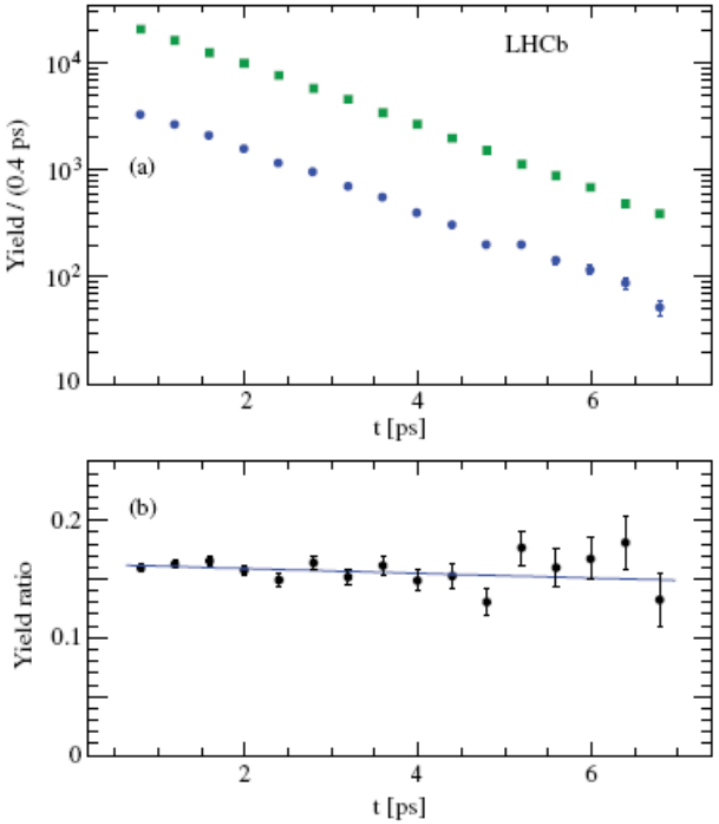
має є бути однаковим.

- **Однак, апріорі невідома роль третьої частинки в Λ_b- баріоні … Вона може бути суттєвою !**
- **З наших ранніх досліджень трьох-частинкових процесів в ядерній фізиці ми спостерігали модифікацію ширини (часу життя) коротко живучих резонансів кулонівським полем третьої частинки …**

- **LHCb result:**

Підтвердження HQE – теорії.

$$\tau(\Lambda_b)/\tau(B_0) = 0.976 \pm 0.012 \pm 0.006$$



PRL **111**, 102003 (2013)

$$\tau(\Lambda_b) = 1.482 \pm 0.018 \pm 0.012 \text{ ps}$$

Вибрані результати експерименту LHCb
Матерія – Анти матерія
Осциляції В – мезонів,
порушення CP – симетрії, …)

Порушення CP симетрії –
один із чинників асиметричної розбудови Всесвіту

Ingredients for Baryogenesis

	Standard Model	*BSM*
• *B violation (sphalerons)*	✓	✓
• *C & CP violation*	✗	✓
• *Out-of-equilibrium or CPT violation*	✗	✓

Три Умови Сахарова
виникнення баріонної асиметрії
Всесвіту:

- **Незбереження баріонного числа**
- **Порушення CP-симетрії**
- **Порушення теплового балансу**

Порушення CP симетрії

CP Violation (CPV) – потенціальне джерело Нової Фізики:

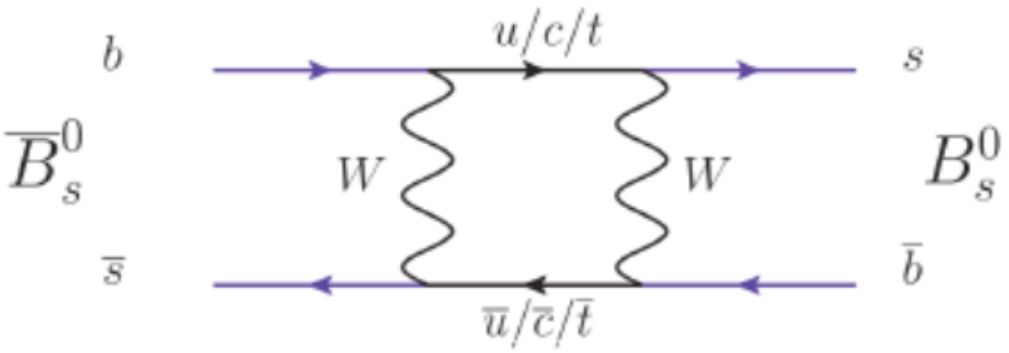
- **Розрахунки за Стандартною Моделлю рівня порушення CP симетрії на багато порядків недостатні для пояснення баріонної асиметрії Всесвіту**

Можливі три шляхи для порушення CP симетрії:

- **Прямий – в розпадах**
- **Непрямий – за рахунок «змішування»**
- **Через інтерференцію цих двох процесів**

B – mesons

mixing (oscillations)



«Змішування» може протікати також через

Петльові діаграми за участю важких проміжних – > Нова Фізика !

Порушення CP симетрії в прямих розпадах Красивих мезонів

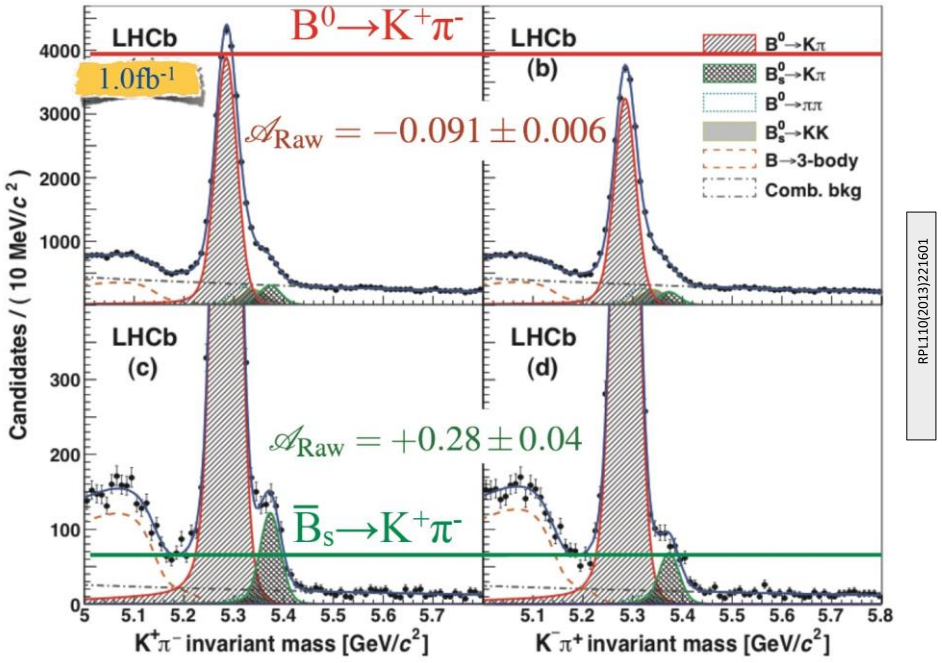
Вибрані результати експерименту LHCb
Матерія – Анти матерія
Осциляції B – мезонів,
порушення CP – симетрії, …)

Measuring asymmetries – restrict the systematic errors

Asymmetries were derived from measured data for decays of neutral B_d as well as B_s mesons (to get rid out of systematic errors)

$$A_{CP}(B^0 \to K^+\pi^-) = \frac{\Gamma(\overline{B}^0 \to K^-\pi^+) - \Gamma(B^0 \to K^+\pi^-)}{\Gamma(\overline{B}^0 \to K^-\pi^+) + \Gamma(B^0 \to K^+\pi^-)}$$

$$A_{CP}(B_s^0 \to K^-\pi^+) = \frac{\Gamma(\overline{B}_s^0 \to K^+\pi^-) - \Gamma(B_s^0 \to K^-\pi^+)}{\Gamma(\overline{B}_s^0 \to K^+\pi^-) + \Gamma(B_s^0 \to K^-\pi^+)}$$



RPL110(2013)221601

$A_{CP}(B^0 \to K^+\pi^-) = -0.091 \pm 0.006$

The most precise measurement.

$A_{CP}(B^0_s \to K^-\pi^+) = +0.28 \pm 0.04$

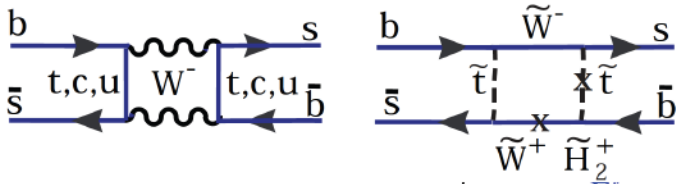
Перше спостереження CЗ – порушення в розпадах B^0_s мезонів.

Результати узгоджуються із розрахунками Стандартної Моделі

Вибрані результати експерименту LHCb
Матерія – Анти матерія
Осциляції B – мезонів,
порушення CP – симетрії, …)

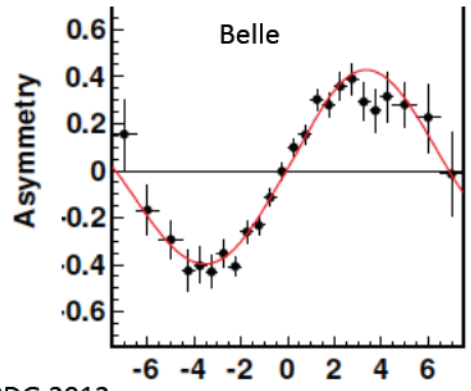
Порушення CP симетрії
через змішування в розпадах B мезонів

B mixing and CP violation



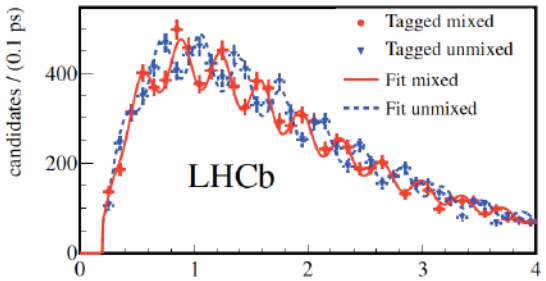
Time evolution of Flavor Eigenstates

$$i\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} B_s^0 \\ \bar{B}_s^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11}^s - i\frac{\Gamma_{11}^s}{2} & M_{12}^s - i\frac{\Gamma_{12}^s}{2} \\ M_{12}^{s*} - i\frac{\Gamma_{12}^{s*}}{2} & M_{22}^s - i\frac{\Gamma_{22}^s}{2} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} B_s^0 \\ \bar{B}_s^0 \end{pmatrix}$$



PDG 2012

$$\Delta m_d = 0.507 \pm 0.004 \ \ \mathrm{ps}^{-1}$$



$$\Delta m_s = 17.768 \pm 0.023 \ (\mathrm{stat}) \pm 0.006 \ (\mathrm{syst}) \ \mathrm{ps}^{-1}$$

M. Artuso, DPF 2013, August 17, 2013

8

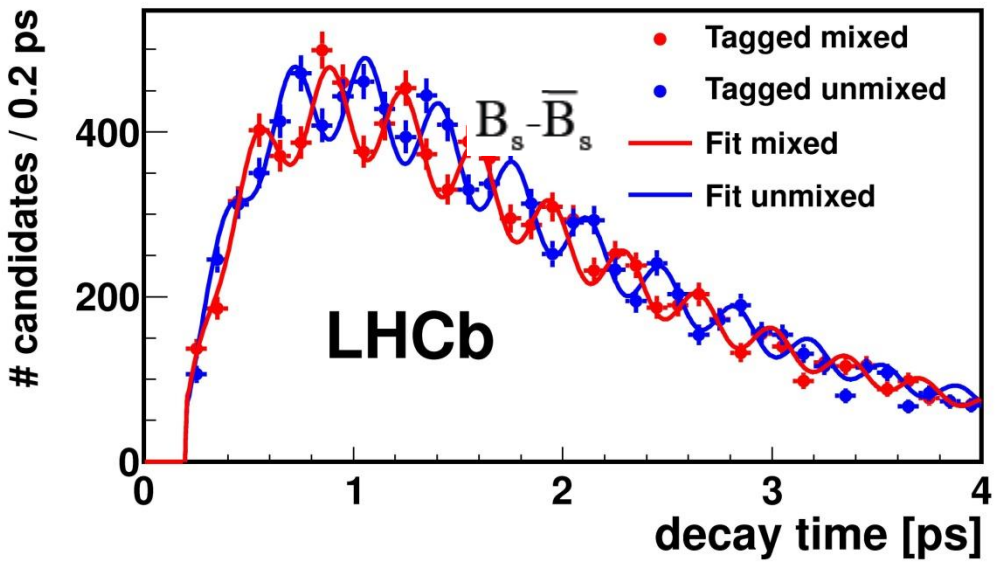
Спостереження еволюції подій за участю частинок та анти-частинок може надати сигнал про Нову фізику.

Частота осциляцій B_s мезонів

LHCb вимірює еволюцію аромату (змішування) з точністю 45 fs, завдяки реконструкції вторинних вершин розпаду B мезонів з точністю 30-40 μm (VELO !).

Характерні риси «змішування»: різниця мас Δm (визначається частотою змішування), різниця ширин розпаду ΔГ, фаза між амплітудами ропаду та змішування Φ_s .

Результати для B_s –мезонів: розпади через $D^-_s\pi^+$ and $D^+_s\pi^-$.



Вилучена частота осциляцій становить :

$$\Delta m_s = 17.768 \pm 0.023 \pm 0.006\ ps^{-1}$$

Порушення CP симетрії через B_s змішування

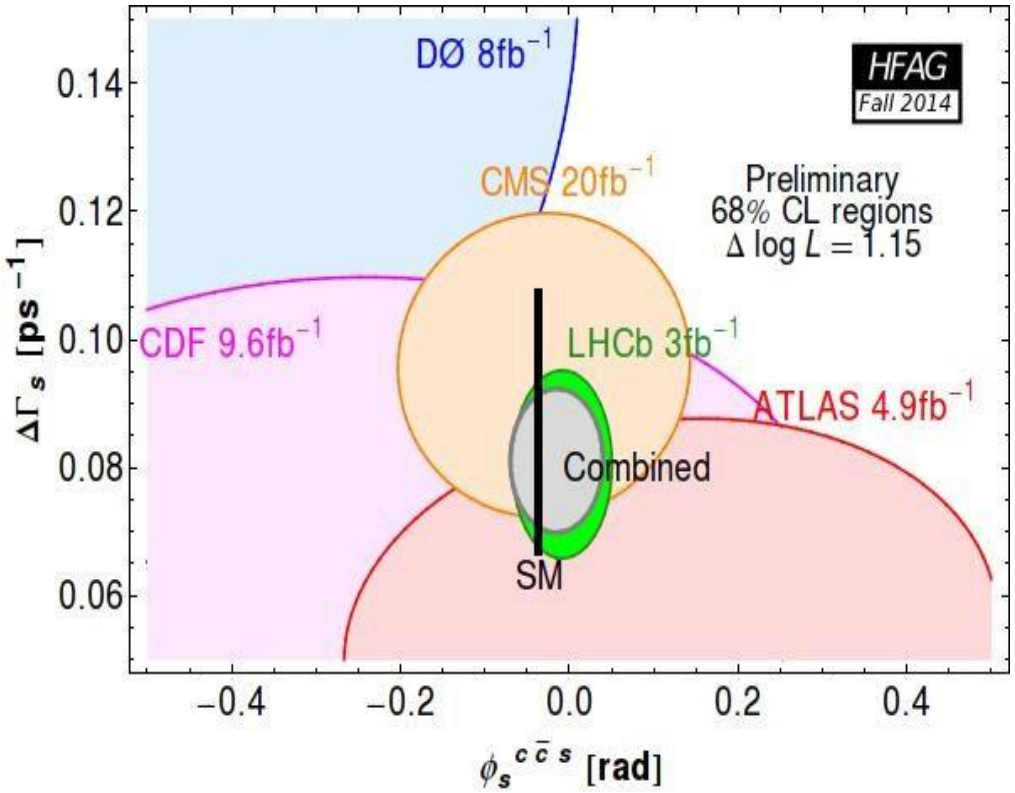
Time dependent decay studies for measuring CP violating parameters in B_s mixing:

$B_s \rightarrow J/\Psi\, K^+K^-$ and

$B_s \rightarrow J/\Psi\, \pi^+\pi^-$

CP violating phase Φ_s may include new physics …

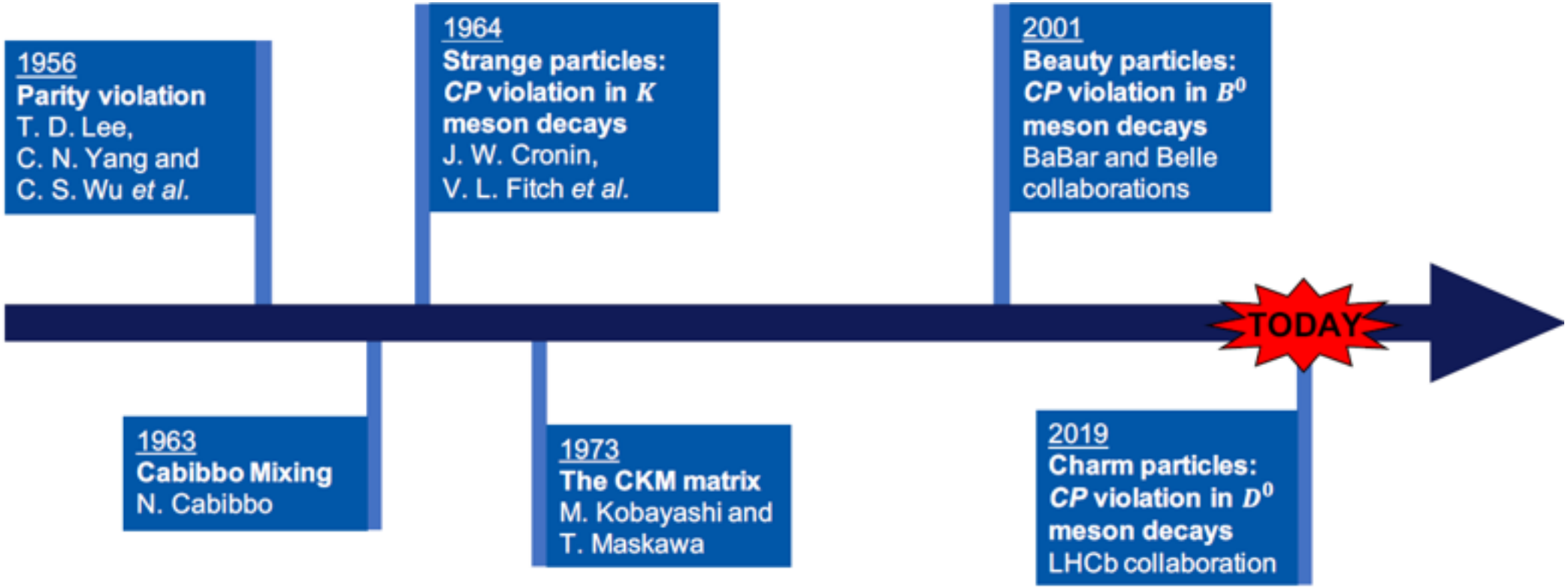
Combined for two processes results are compatible with SM.



(Phys.Lett. B736 (2014) 186) – Update for 3 fb^{-1}

Φ_s = (70 +/- 68 +/- 8) mrad

21 March 2019, LHCb:
Discovery of CP violation in charm particle decays.



An important milestone in the history of particle physics.

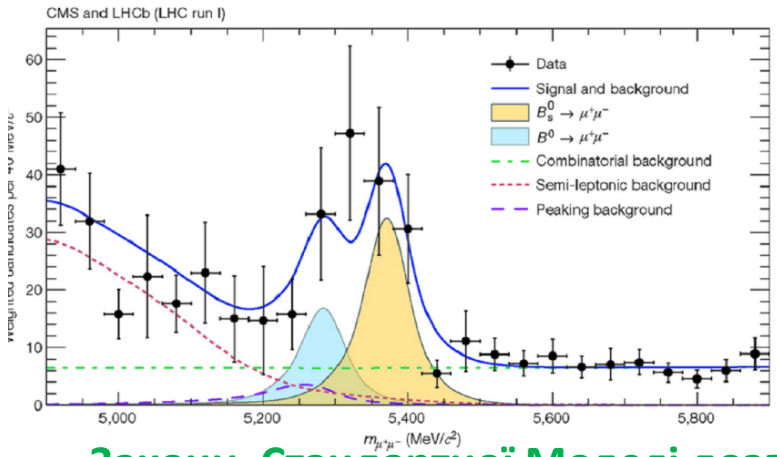
[ΔA_{CP} = (-0.154±0.029)%]

LHCb, CMS.
Вперше спостережені рідкісні розпади B-мезонів …
крок до Нової Фізики ?

Вибрані результати експерименту LHCb
Рідкісні моди розпаду важких адронів – можливе джерело Нової Фізики.

$$B_s \to \mu^+\mu^-$$

Nature 522 (2015) 68



Combination of CMS and LHCb data results in first observation of $B_s \to \mu^+\mu^-$ and first evidence for $B^0 \to \mu^+\mu^-$

Results consistent with SM at 2σ level

Закони Стандартної Моделі дозволяють такі розпади
на рівні 1 події на 1- 10 мільярдів випадків

Standard Model - FCNC and helicity suppressed processes with pure leptonic final state.

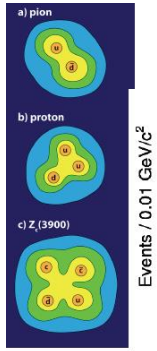
Вперше в світі виміряна імовірність таких розпадів B- мезонів співпадає з передбаченням СМ в межах 20 - 50 відсотків.

Нові виміри (2015 – 2017 р.р.) при енергії 13 ТеВ з більш високою статистикою – можуть стати чутливими до внеску процесів за межами Стандартної Моделі.

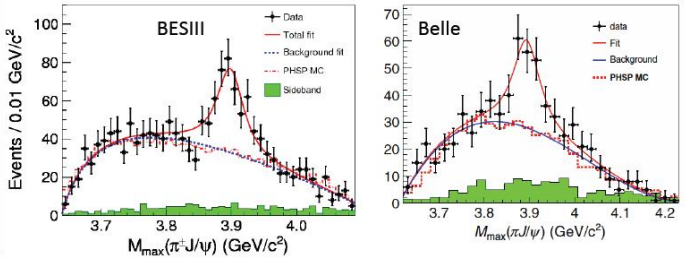
Спостереження тетра-кваркової структури
Z (4430) – four-quarks resonant state

Z(3900) (BELLE, PRL 110 (2013) 252002

Z(4430) - $c\bar{c}u\bar{d}$



$Z_c(3900)$



Belle: 927 fb^{-1} of ISR data at Υ(nS) energy

Phys.Rev.Lett. 110 (2013) 252002

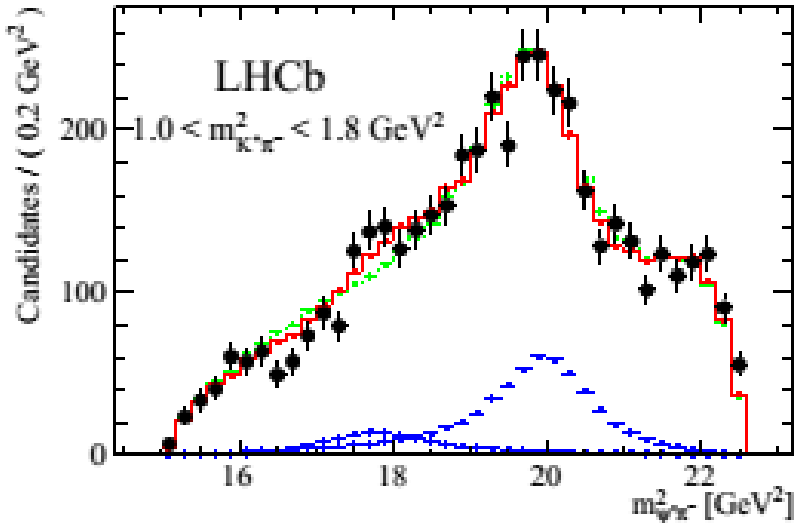
- Mass = (3894.5±6.6±4.5) MeV
- Width = (63±24±26) MeV
- Fraction = (29.0±8.9)% (stat. error only)

BES-III: 525 pb^{-1} @ Υ(4260) peak energy

Phys.Rev.Lett. 110 (2013) 252001

- Mass = (3899.0±3.6±4.9) MeV
- Width = (46±10±20) MeV
- Fraction = (21.5±3.3±7.5)%

M. Artuso, DPF 2013, August 17, 2013 36



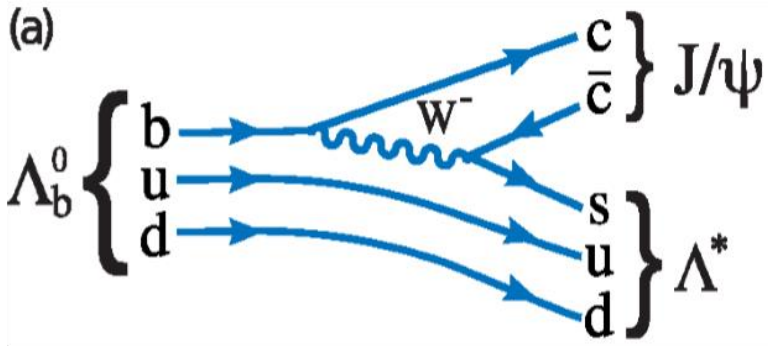
LHCb – Confirmed (PRL, 112, 222002 (2014)

The same decay studied: $B^0 \to K^+\pi^-\psi(2S)$

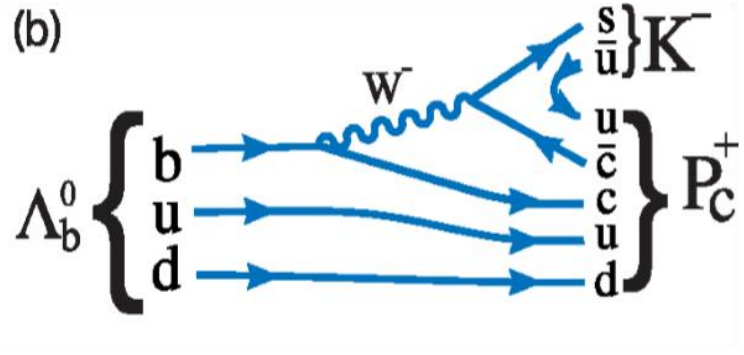
$J^P = 1^+$ assigned

LHCb-2015.

Відкриття пента-кваркової



expected



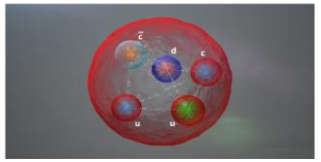
discovered

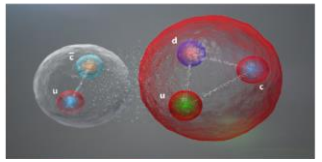
arXiv:1507.03414

- reconstruct J/ψ in $\mu^+\mu$
- look for Λ^* states in pK decay
- study Dalitz plot

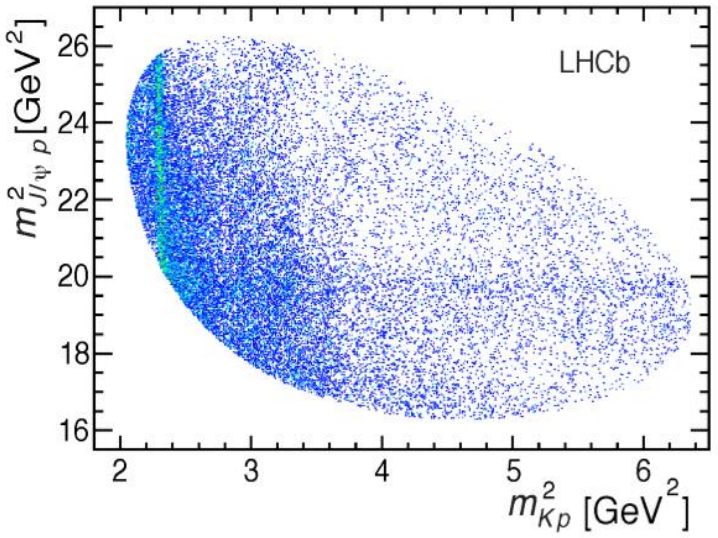
fit fractions	$8.4 \pm 0.7 \pm 4.2\%$	$4.1 \pm 0.5 \pm 1.1\%$
best fit J^P	$3/2$	$5/2^+$

- alternative spin-parity assignments have almost the same fit quality
- discussion on the interpretation has started. . .





e.g. $\overline{D}^*\Sigma_c$ $\overline{D}^*\Sigma_c^*$ (arXiv:1507.04249)



LHCb in 2015

Guy Wilkinson. Closing remarks. LHCb week, Dec 2015

Pentaquark discovery has been chosen as one of top 10 breakthroughs of year.

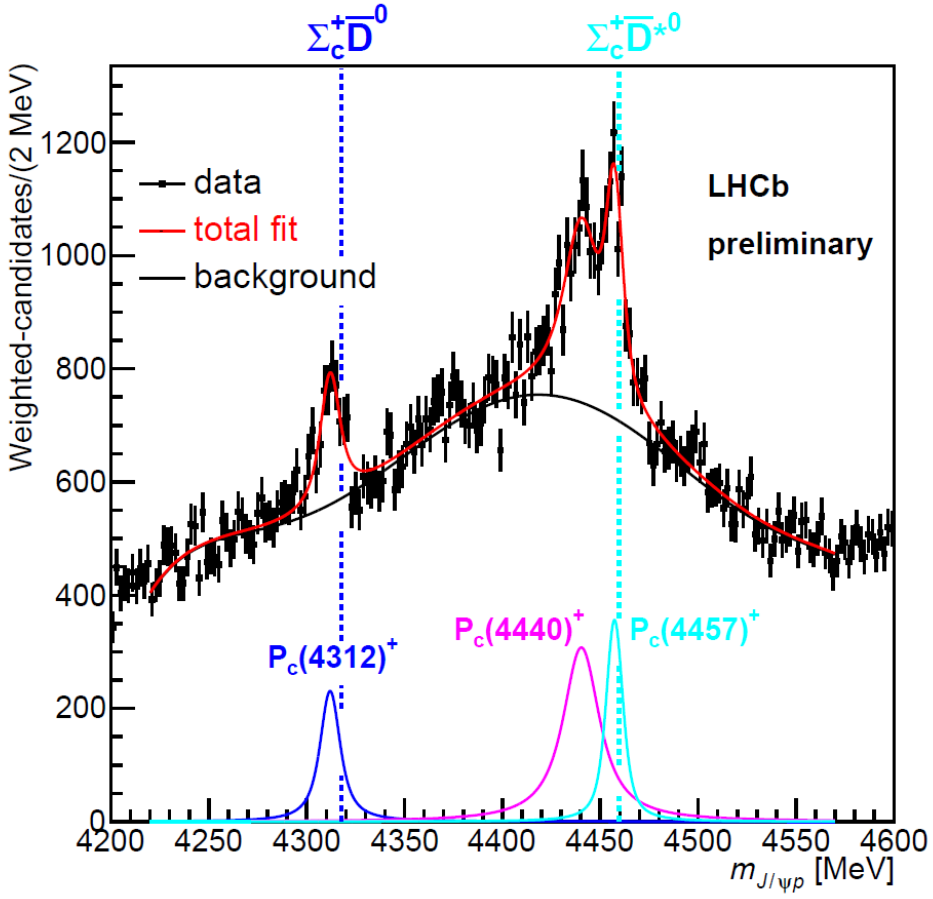
Criteria:

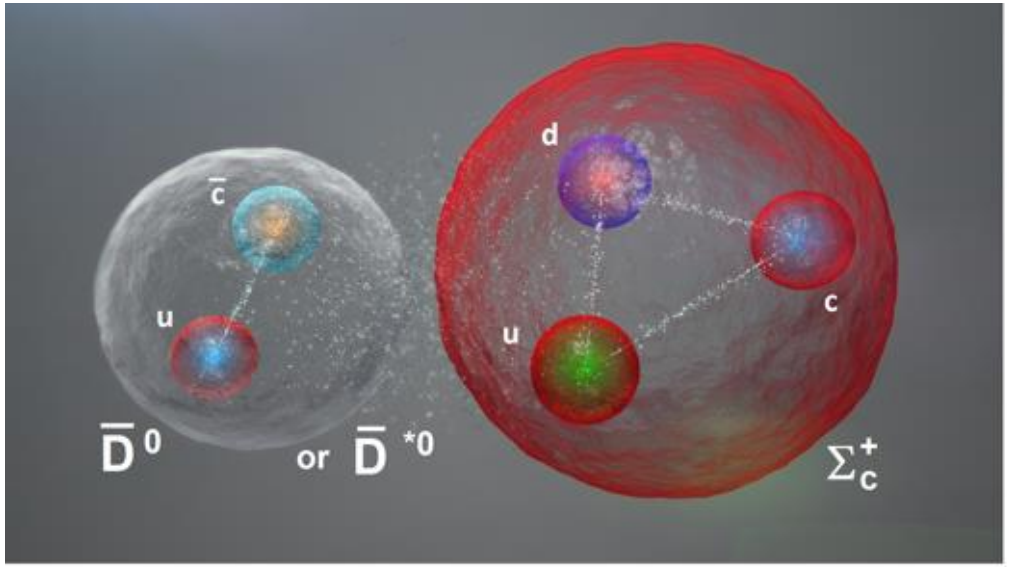
- **Fundamental importance of research**
- **Significant advance in knowledge**
- **Strong connection between theory & expt**
- **General interest to all physicists**

Only particle physics entry on the list.

OK, **this is not the Nobel prize, but it highlights our importance in HEP as a whole, and to CERN in particular !**

26 March 2019, LHCb: Observation of new pentaquarks.





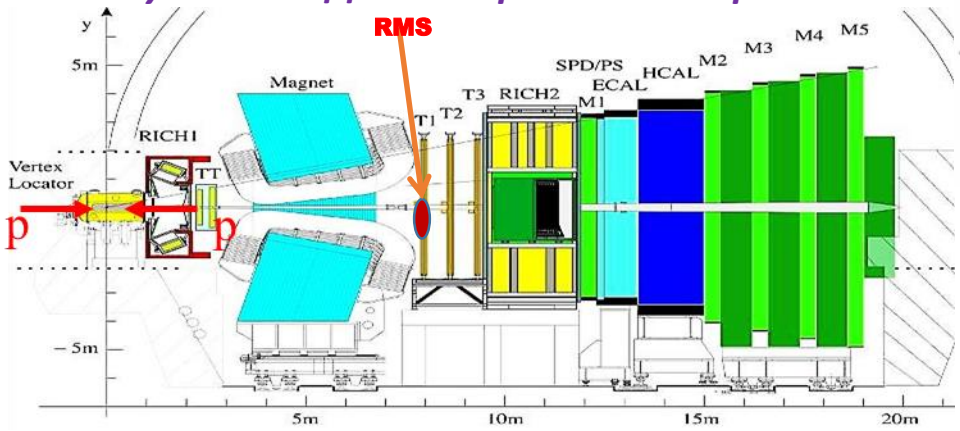
A description of these states as tightly bound clusters of five quarks is also plausible. A full understanding of the internal structure of the observed states will require more experimental and theoretical study.

Україна – асоційований член ЦЕРН (з 2016 р.)

Відкриття нової частинки з подвійною чарівністю на Великому Адронному Колайдері (ЦЕРН, Женева)

Експеримент LHCb

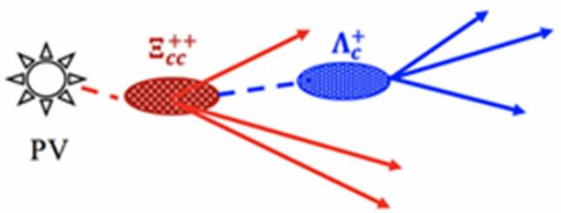
участь ІЯД НАН України з 1998 р.

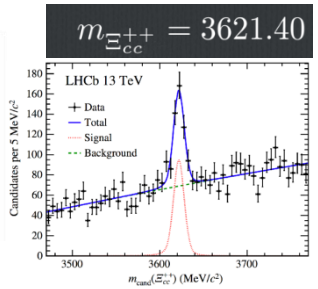


Дослідження взаємодій в новому енергетичному просторі до 10^{13} еВ, в мільйони разів більшого за енергетику ядерних процесів.

Структура матерії в АТТО-метровому (10^{-18} м) просторі з часом взаємодій 10^{-26} с.

25 May 2018: Long life(time) of the exceptionally charmed particle Ξ_{cc}^{++}

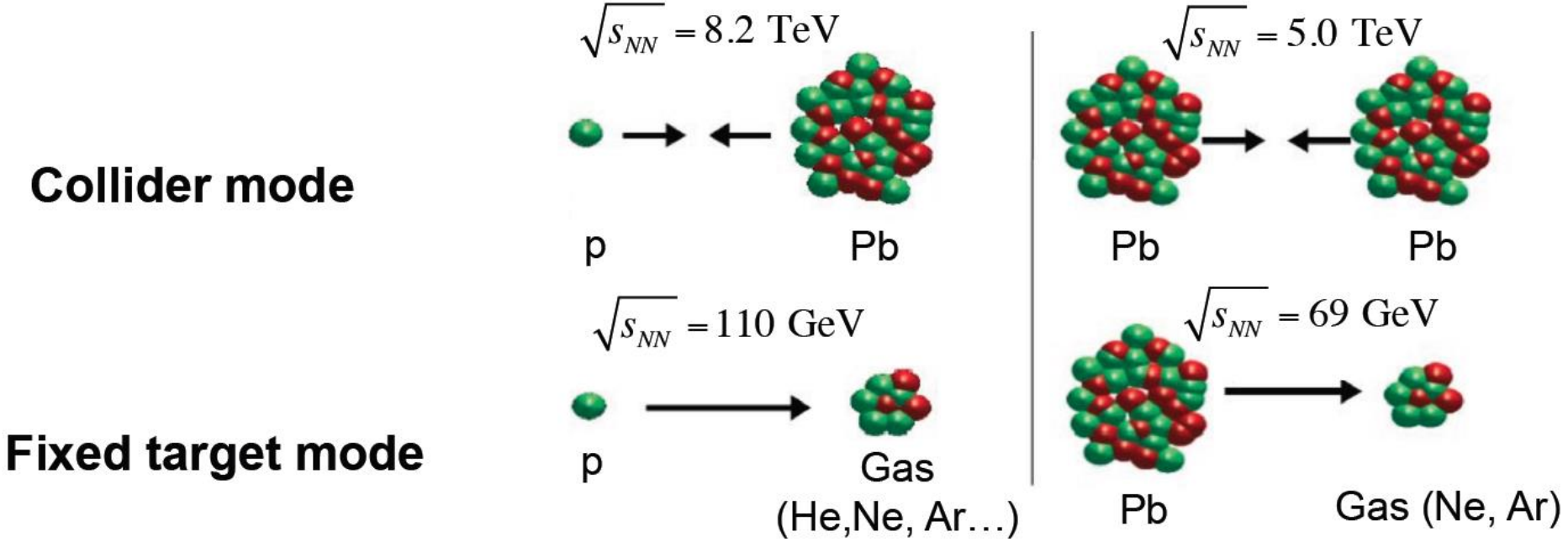




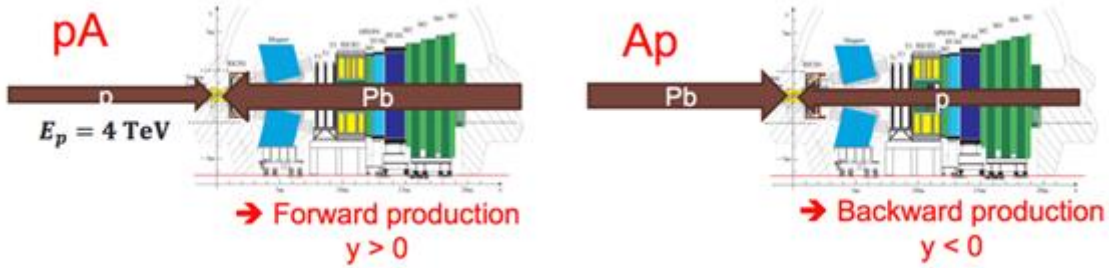
Продукт сильної взаємодії двох протонів при енергії 13 ТеВ, новий баріон Ξ_{cc}^{++}, народившись в первинній вершині (на рис., PV), еволюціонує в поле слабкої взаємодії, завершуючи своє довге життя, 0.256 ps розпадом до легших баріонів. Маса Ξ_{cc}^{++} (3621.4 МеВ/с ^{2}) у 3.6 разів більша за масу ядра водню.

Подальші дослідження за участю вчених ІЯД НАН України мають встановити в цих процесах роль явищ Нової фізики.

Генерація дивних, чарівних та красивих адронів
в ядро-ядерних зіткненнях в експерименті LHCb.



Важкі іони в експерименті LHCb



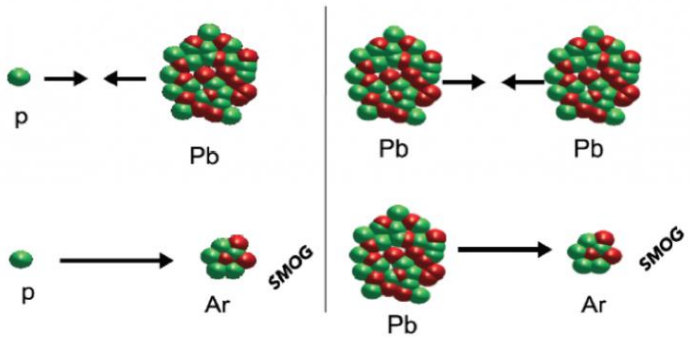
$$y = \frac{1}{2}\ln\frac{E+p_Z}{E-p_Z}:$$

p-p: 2,5 < y < 4,5;
***p*Pb: 2,0 < y < 4,0;**
Pb*p*: −5,0 < y < −3,0.

Режим **зустрічних пучків:**

- ***p*Pb** *при* $\sqrt{s_{NN}}$ *= 5.02 ТеВ -1.1 нб*$^{-1}$ *;* **Pb*p*** *- 0.5 нб*$^{-1}$
- ***p*Pb** *при* $\sqrt{s_{NN}}$ *= 8.16 ТеВ - 12.5 нб*$^{-1}$ *;* **Pb*p*** *- 17.4 нб*$^{-1}$
- **PbPb** *при* $\sqrt{s_{NN}}$ *= 5.0 ТеВ - ~ 4 мкб*$^{-1}$
- **XeXe** *при* $\sqrt{s_{NN}}$ *= 5.4 ТеВ - 0.2—0.4 мкб*$^{-1}$

Вплив ядерного середовища **Кварк-глюонна плазма**



Режим ***фіксованої мішені (SMOG):***

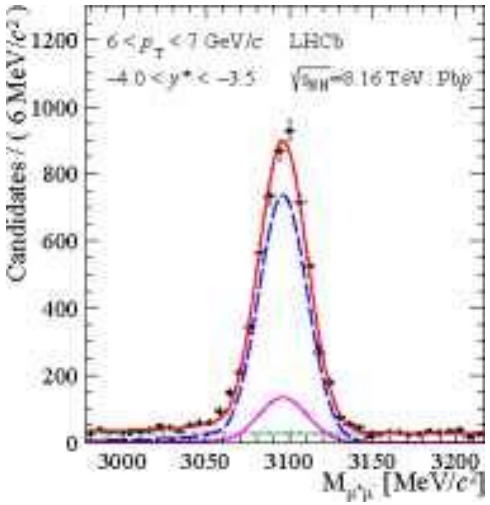
- ***p*He** *при* $\sqrt{s_{NN}}$ *= 110 ГеВ - 2.3 нб*$^{-1}$ *;*
- ***p*Ne** *при* $\sqrt{s_{NN}}$ *= 110 ГеВ - 1.50 нб*$^{-1}$ *;* ***p*Ne** *при* $\sqrt{s_{NN}}$ *=68.6 ГеВ - 200 нб*$^{-1}$
- ***p*Ar** *при* $\sqrt{s_{NN}}$ *= 110 ГеВ - 3 нб*$^{-1}$ *;* ***p*Ar** *при* $\sqrt{s_{NN}}$ *= 68.6 ГеВ - 0.05 нб*$^{-1}$
- **PbAr** *при* $\sqrt{s_{NN}}$ *= 68.6 ГеВ - 0.05 нб*$^{-1}$
- **PbNe** *при* $\sqrt{s_{NN}}$ *= 54.5 ГеВ - 0.05 мкб*$^{-1}$.

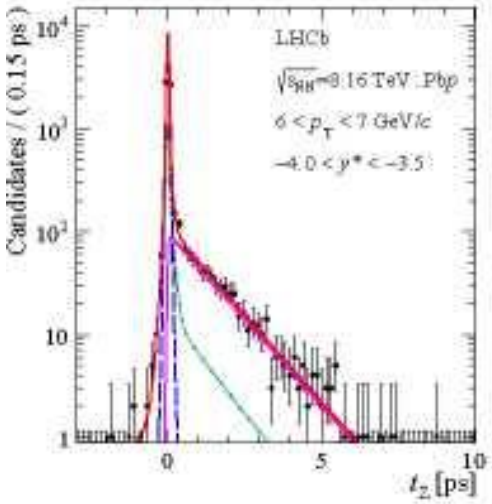
Heavy ions collisions:.
Selected LHCb results
Collider mode. p-A.

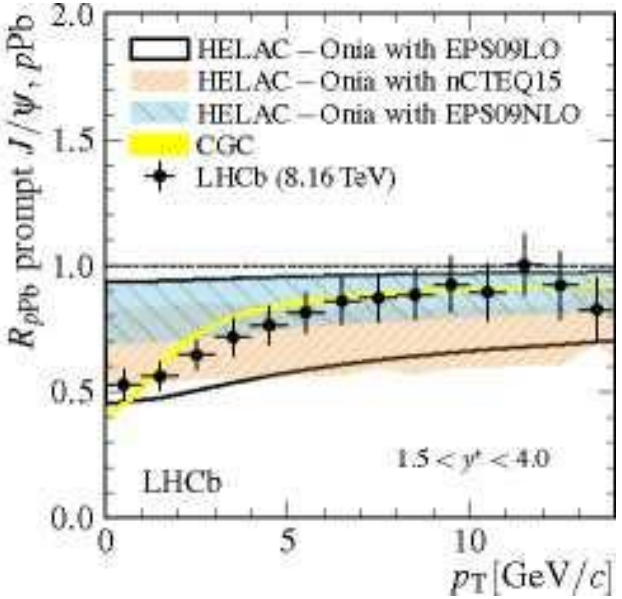
J/ψ production in pPb collisions at 8.16 TeV

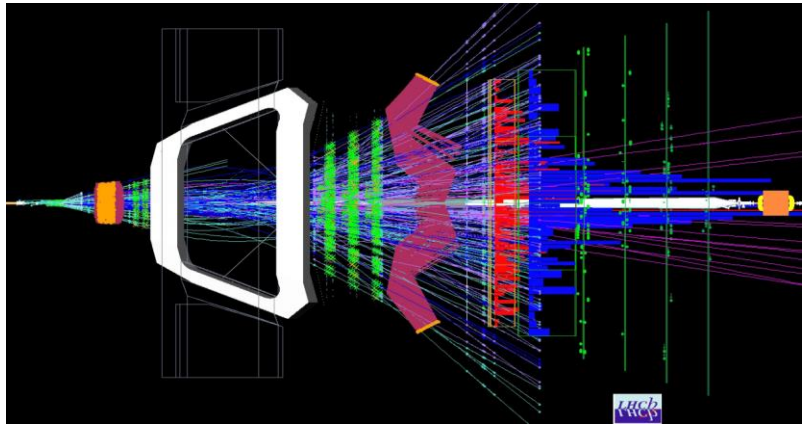
powerful LHCb vertexing (few tens fs in time) for separation prompt and delayed events)

LHCb-PAPER-2017-014,PLB 774 (2017) 159.









Middle figure illustrates Principle of separation:

'Prompt' and **'non-prompt'** events (from b-decays)

Observations:

Prompt production- strong suppression in p_T distribution at forward rapidity

Theoretical description:

nuclear PDFs EPJC77 (2017) 1 & Color Glass Condensate calculations PRD91 (2015) no.11, 114005 accounting for observations

coherent energy-loss JHEP 1303 (2013) 122 accounting for rapidity dependence (see next slide)

Conclusion:

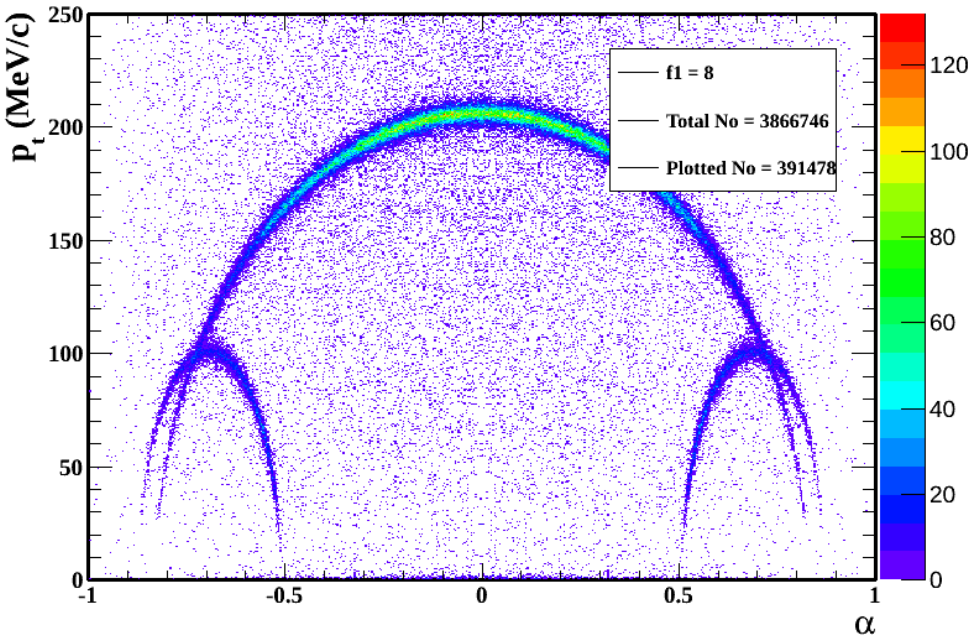
Results constrain nPDFs in unexplored area at low-x,

see PRL 121,052004(2018)

Аналіз фізичних даних LHCb в ІЯД НАН України.

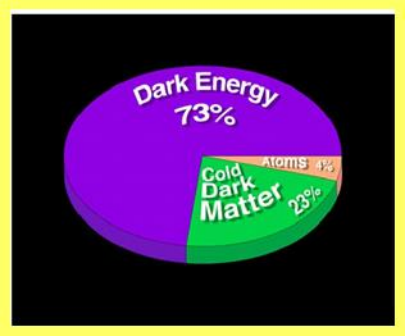
Диференційні поперечні перерізи утворення V^0 частинок у протон-протонних та протон-ядерних зіткненнях в експерименті LHCb

Виміряно диференційні поперечні перерізи утворення K_S^0 мезонів та Λ баріонів у протон-протонних та протон-ядерних (ядра ^{208}Pb) зіткненнях при енергіях у системі центру мас 7 та 5 ТеВ, відповідно.



Розподіл подій з протон-ядерних зіткнень за діаграмою Арментероса – Подолянського.

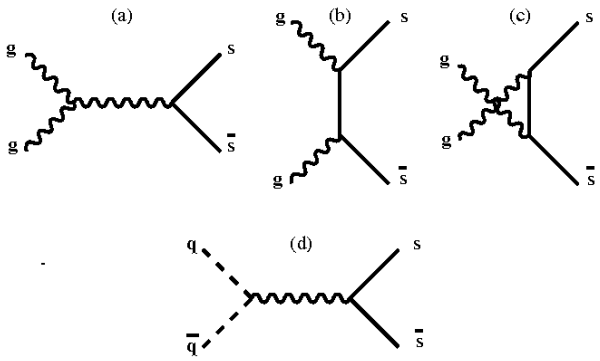
K_S^0 мезони: верхня вітка - (парабола)
Λ баріони: дві нижніх параболи,
зліва – частинки, справа – анти-частинки



Властивості взаємодій в атто-метровому просторі

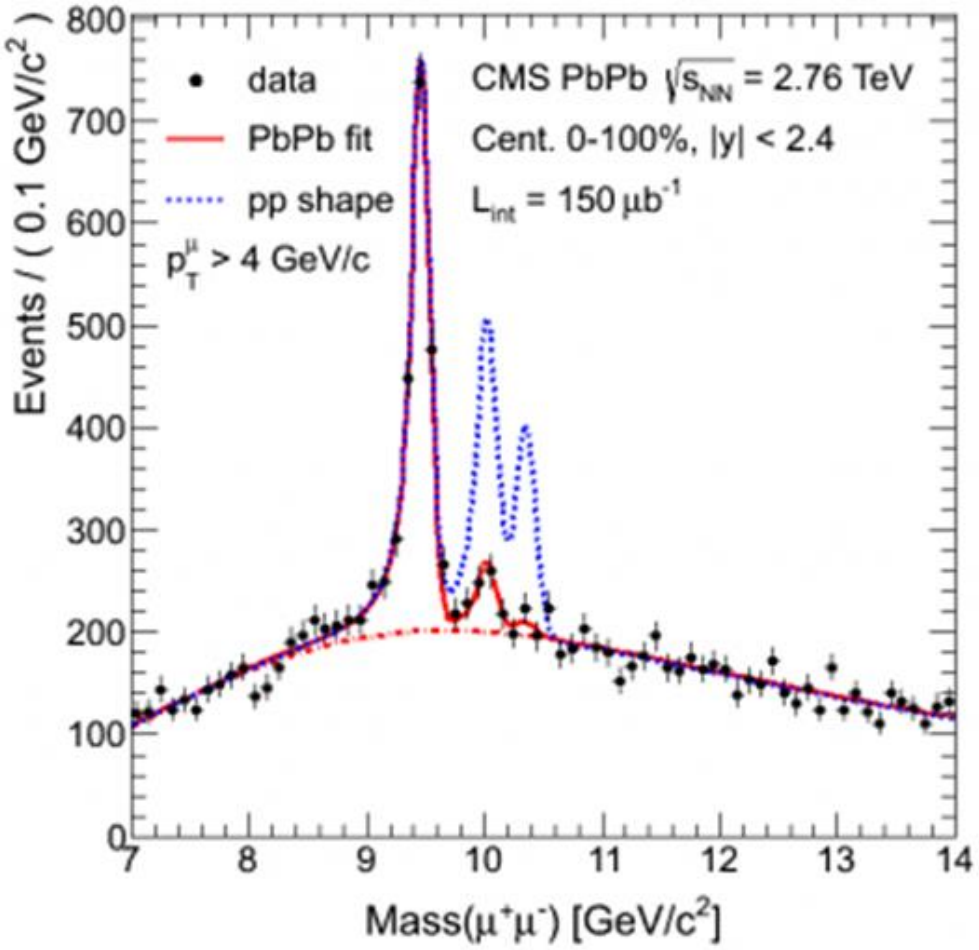
Властивості взаємодій в атто-метровому просторі визначаються кварк-глюонними ступенями свободи.

В експерименті LHCb досліджується генерація дивних (strange), чарівних (charm) та красивих (beauty) адронів (мезонів та баріонів) при енергіях первинних зіткнень ядер від 0.1 ТеВ до 13 ТеВ.

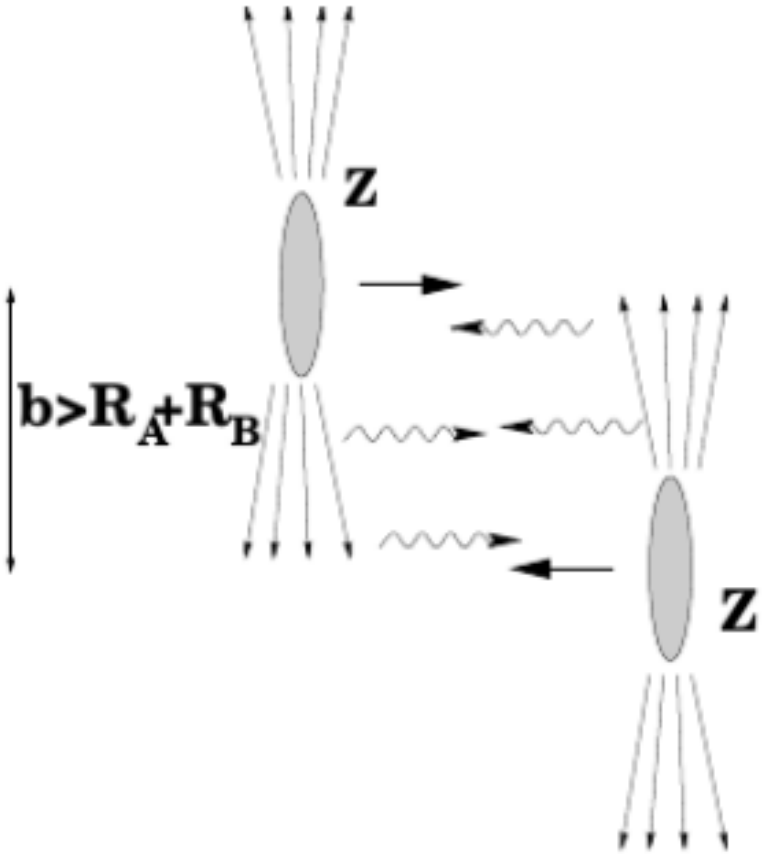


Закономірності сильних взаємодій при таких енергіях визначаються кварк-глюонними ступенями свободи при високій температурі (~ 170 МеВ) та помірній густині (на рівні звичайної ядерної матерії).

Приклад ролі ядерного середовища в ядро-ядерних зіткненнях при високих енергіях.



Генерація J/ψ мезонів в ультрапериферичних 208Pb-208Pb зіткненнях при енергії $\sqrt{s_{NN}}$ = 5 ТеВ в експерименті LHCb



Характерні особливості УПЗ Pb-Pb

- реакції за участю електромагнітного поля (∞):
  - чисто електромагнітні ($\gamma\gamma$)
  - фотон-ядерні (γA)
- прицільний параметр $b > R_A + R_B$
  - $b > 14$ фм для Pb-Pb
  - мала множинність треків у детекторі LHCb для таких подій
- чисті процеси (обмежений комбінаторний фон
  - континуум від $\gamma\gamma \to e^+e^-/\mu^+\mu^-$
- повністю реконструйовані події
  - $PbPb \to Pb + (J/\psi \to \mu^+\mu^-) + Pb$
- великий потік фотонів $\propto Z^2$
  - фактор 6700 в перерізі для Pb-Pb

Генерація *J/ψ* мезонів в ультрапериферичних 208Pb-208Pb зіткненнях при енергії $\sqrt{s_{NN}}$ = 5 ТеВ в експерименті LHCb (результати 2018 р.)

Реконструкція фізичних подій $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ (1)

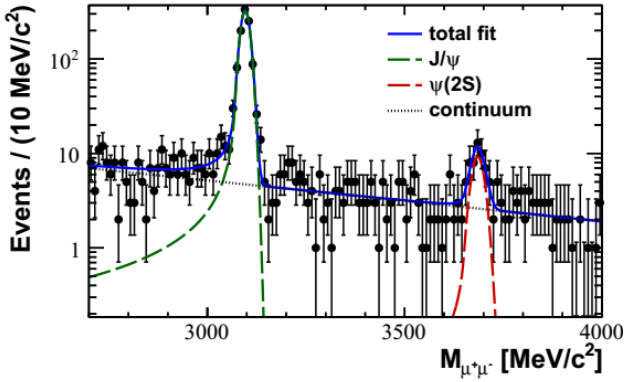
Крок 1 – фітування спектра інваріантної маси – ізоляція континуума

Сигнальне вікно:

- $|m_{PDG}(J/\psi) - m(\mu^+\mu^-)| < 65\,\mathrm{MeV}/c^2$
- відповідає довірчому інтервалу $\pm 5\sigma$ для J/ψ

Модель фітування:

- дві Crystal Ball ф-ції (піки)
- еспоненціальна функція (континуум)
- фіксована сигма $\psi(2S)$ піка

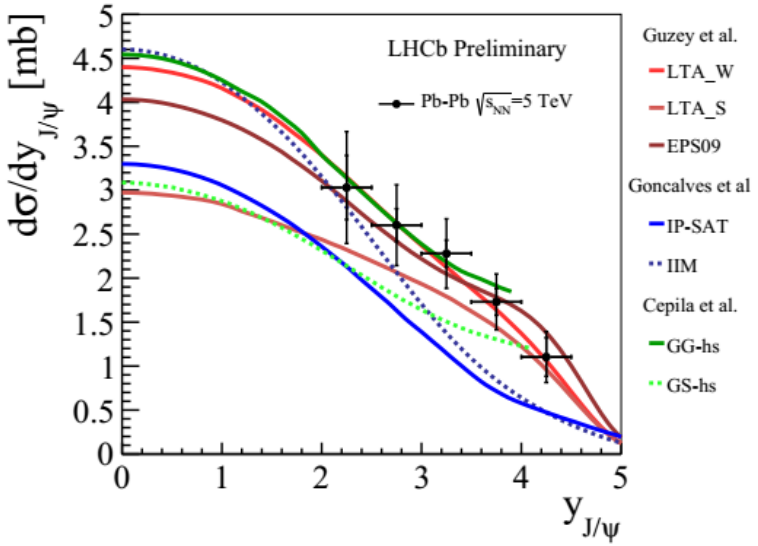


Виміряний спектр інваріантної маси J/ψ та $\psi(2S)$ кандидатів, що задовольняє критерії відбору

- Інтегральний переріз становить

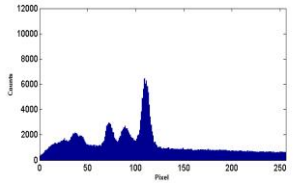
  $5{,}3 \pm 0{,}2(\text{стат.}) \pm 0{,}8(\text{сист.})$мб

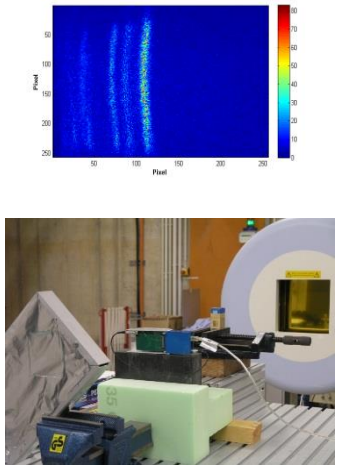
  в інтервалі $2 < y_{J/\psi} < 4{,}5$
- Теоретичні моделі:
  - Guzey (моделі pQCD)
  - Gonçalves (Color Dipole підхід)
  - Cepila (варіація Color Dipole підходу)

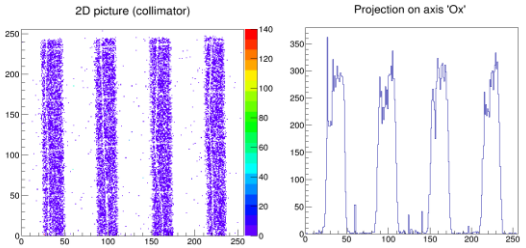


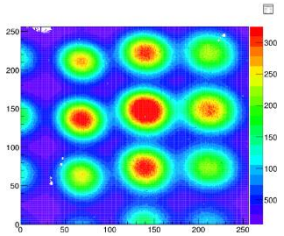
Застосування мікродетекторів ФВЕ в інших галузях наукових досліджень

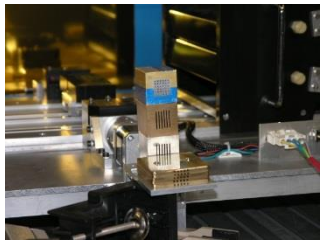
- Рентгенівський дифрактометр (ІПМ НАН України)
- Тандем-генератор (ЕГП-10к) ІЯД НАН України
- Хайдельберзький Іонний Терапевтичний центр (HIT, Хайдельберг, ФРН).



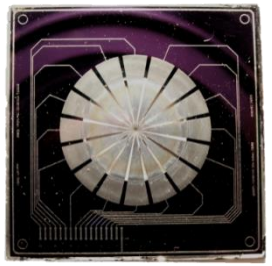


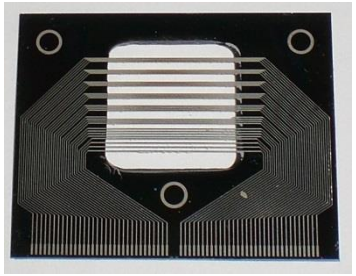




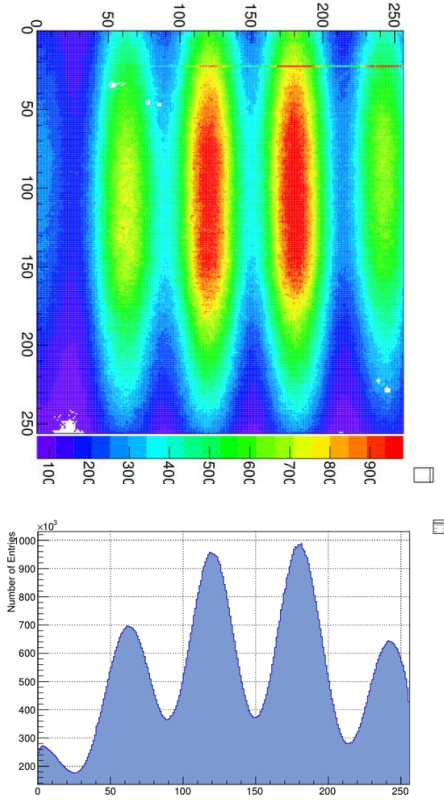


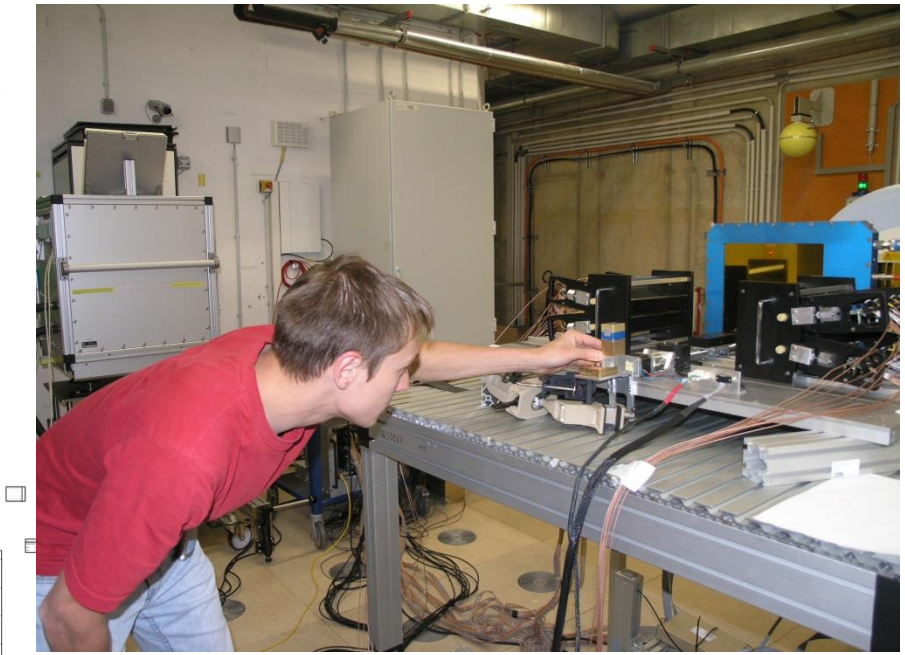
- **Перспективи використання металевих мікростріпових детекторів (розробка ІЯД НАНУ):**
  - **3 доповіді на Семінарі «Детекторні системи для фізики високих енергій», в рамках діяльності Міжнародної асоційованої лабораторії LIA IDEATE, 15 - 16 жовтня 2015 р. м. Орсе (Франція).**
  - **Спільний проект для PHIL (LAL) – тестування елементів ILC, CLIC**

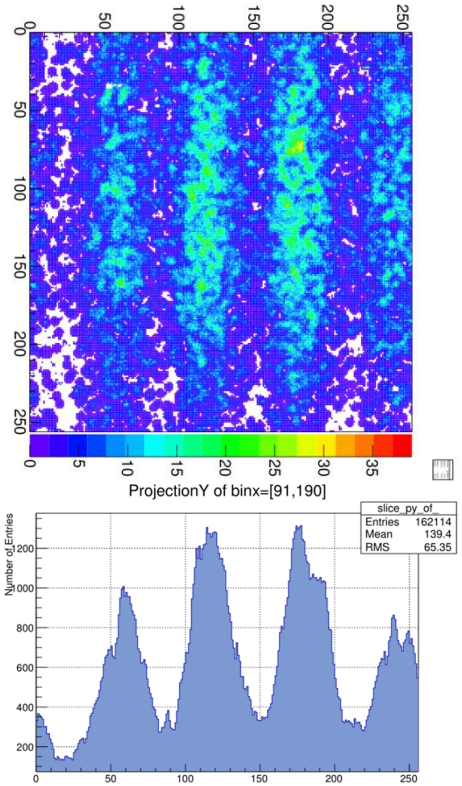




Зображення фракціонованого пучка іонів вуглецю з енергією 250 МеВ/нуклон. HIT (Heidelberg).







Ю. Сорокін (ІЯД НАН України) встановлює українські коліматори в **HIT (Heidelberg), June 2014.**

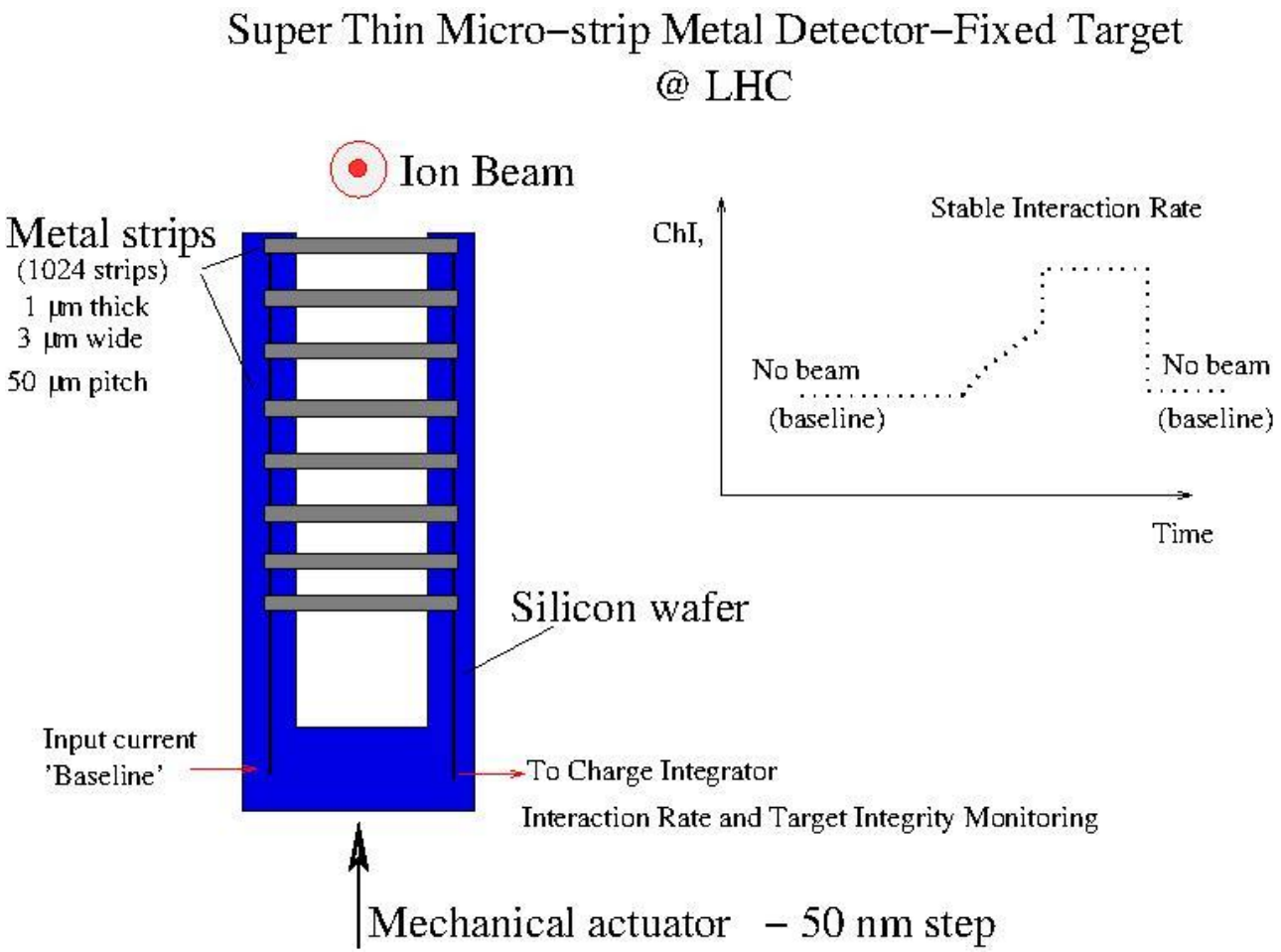
Іонні пучки, сформовані щілинним коліматором. Розподіл виміряно мікропіксельним гібридним детектором TimePix (CERN).

Іонні пучки, сформовані щілинним коліматором. Розподіл виміряно мікропіксельним металевим детектором TimePix (CERN).

Techniques:

➢**Metal microstrip detector-target**

Superthin Wire Target - HOW-and When TO-DO it at LHCb ? VELO – VErtex Locator construction after (LS3 ?) upgrade



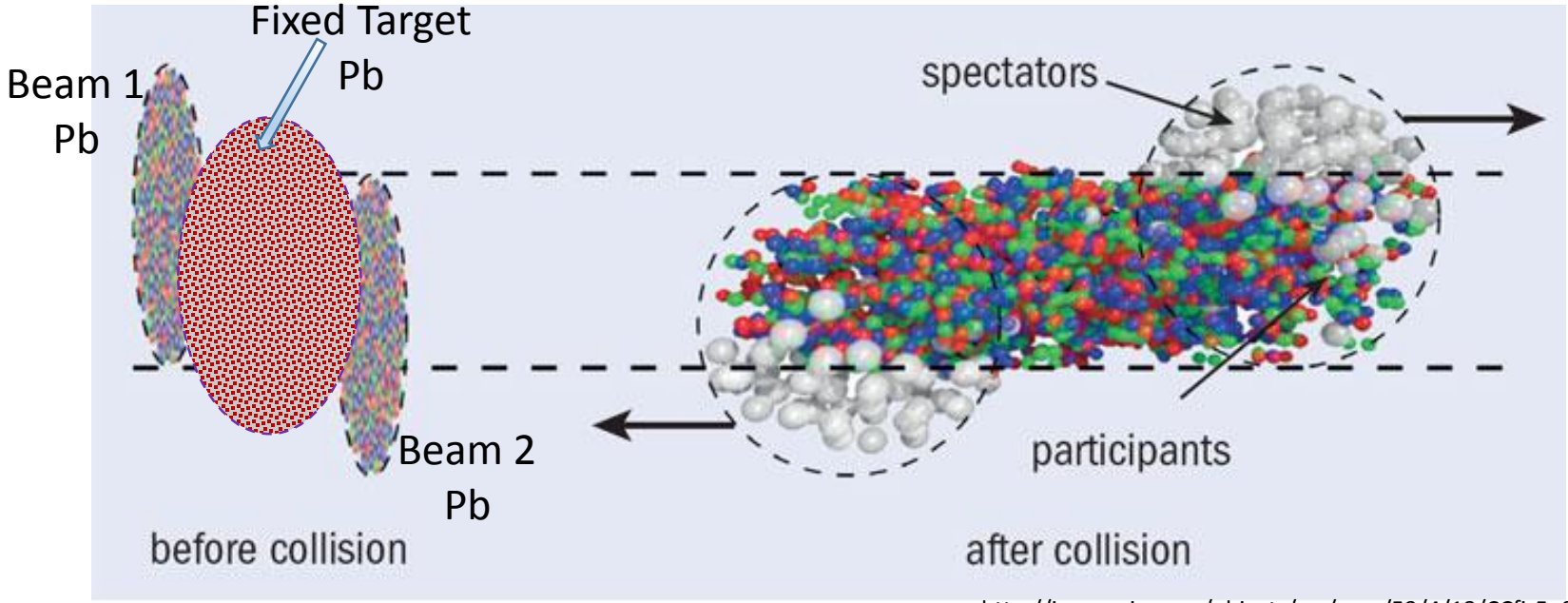
Metal Microstrip Detector –MMD-1024.

Nano-technologies evolve fast
– already nowadays- carbon nano-tubes, fullerene structures, graphenes, …
May become a nano-wire target components.

Different fixed targets behave differently in collisions …

[Bullet Time | City Gallery Wellington]

Three-nuclei interaction – two nuclei from LHC beams and one from the LHCb Microstrip Target



http://images.iop.org/objects/ccr/cern/53/4/18/CCfir5_04_13.jpg

Events with three nuclei interaction !

- **Intriguing opportunity with metal microstrip target – never explored in earlier experiments !**
- **Might be very interesting phenomenon – what is the interaction energy of three nucleons (two from LHC beams and one from the fixed target) ?**
- **What will be the Equation of State ?**
- **Which temperatures and densities of the hot matter part might be ?**

Heavy ions collisions:.
LHCb Upgrade
Fixed Target mode.

The LHCb collaboration is presently considering several proposals to extend Heavy Ion Fixed Target programme

Upgrades with crystal target for c-quark MDM, EDM, polarised target further upstream & wire targets are under discussion

LHC ERA

HL-LHC ERA

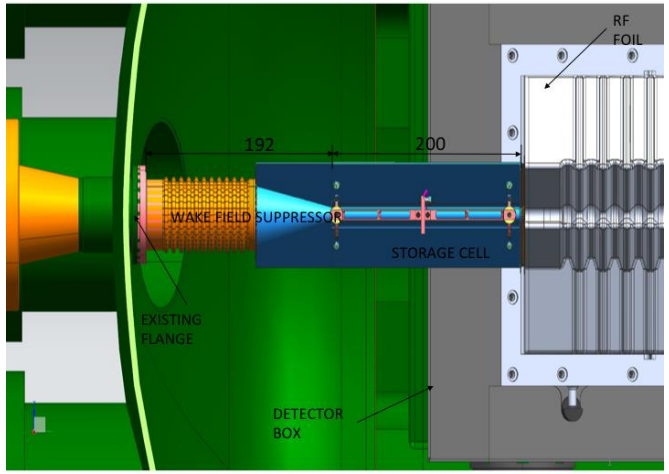
3 fb-1		♦5 fb-1				50 fb-1		300 fb-1
2011-2012		2015-2018	LS2	2021-2023	LS3	2026-2029	LS4	2031-...
Run 1	Run 2			Run 3		Run 4		Run 5...

LHCb Upgrade I LHCb LS3 Consolidation LHCb Upgrade II

SMOG2?

OTHER TARGETS

Bent crystals? Polarised gas? Metal wires?



SMOG2: the injected gas inside a 20 cm long storage cell (1 cm in diameter) in front of the VELO.

-Up to two order of magnitude higher luminosity,

- Will operate also deuterium and noble gases

LHCb – Плани.

- **2015-2018 – Фізичні дослідження при енергії 13 ТеВ**

- **2019-2020 рік – модернізація LHC та експериментальних методик**
  - **Мета - підвищити майже на порядок світимість.**
  - **Одержати в 10 разів більшу статистику (50/фб)**
  - **Мати можливість спостерігати рідкісні явища, в тому числі з Нової Фізики.**

- **2020 – 2022 р.р. - Фізичні дослідження при енергії 14 ТеВ**

Нова Фізика має існувати !

- **Для її спостереження мають бути винайдені нові принципи детекторних систем, реконструкції подій, прискорювальної та комп'ютерної техніки, тощо.**

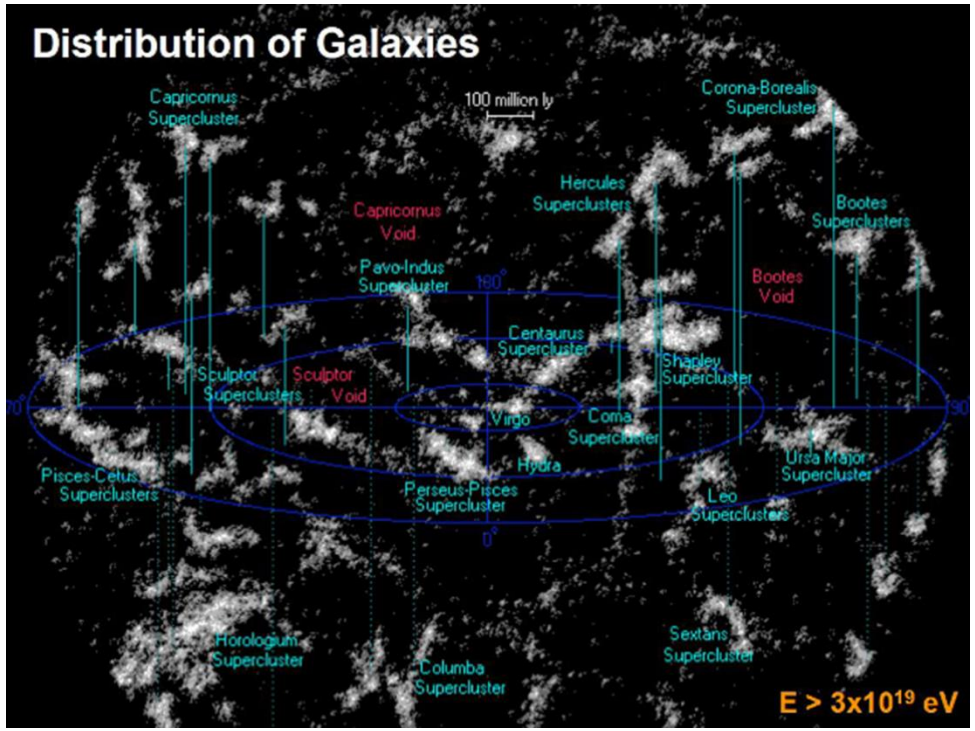
- **Новий величезний енергетичний постір, відкритий на LHC, безумовно багатий на нові явища. Мабуть для їх відкриття потрібно винайти нові спостережувані величини – достойна задача для фізиків – дослідників, в тому числі з України !**

Від 10^{13} еВ до 10^{21} еВ, далі …

Heisenberg, Werner. Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science. (New York: Harper & Row Publishers, 1962). p. 201.

Існуючі наукові концепції завжди охоплюють лише дуже обмежену частину реальності, а інша частина, яка ще не стала зрозумілою, є нескінченою.

Всякий раз, коли ми переходимо від відомого до невідомого, ми можемо сподіватися на те, що ми його зрозуміємо, але ми, можливо, дізнаємося в той же час про новий сенс слова «розуміння».



Розподіл галактик за випромінюванням з енергією понад 10^{19} еВ.

Масштаб: ⟷ - 100 мільйонів світлових років, біля $3*10^{21}$ км (радіус Землі - $6.4*10^{3}$ км)

ВИСНОВКИ

- З 2015 р. на Великому Адронному Колайдері розпочато дослідження при новій енергії p-p зіткнень, 13 ТеВ, та суттєво підвищеній світимості.
- 24 річницю Колаборація LHCb (ЦЕРН) відзначила визначними фізичними результатами.
- Здійснено численні дослідження причин асиметричної еволюції матерії-антиматерії
- З аналізу розпаду важких мезонів, до складу яких входять красиві (beauty) або чарівні (charm) кварки, виміряно їх основні характеристики.
- Одержані результати (маса, час життя, частоти осциляцій, співвідношення гілок розпаду, тощо) є найбільш точними або одержані вперше в світі (пента-кварк, $B_s \to \mu^+\mu^-$ фракція розпадів, подвійно заборонених в рамках СМ, 10^{-9} – 10^{-10}, CPV in B^0_s, тощо).
- Техніка експерименту фундаментальних досліджень ставить виклик найсучаснішим технологіям і спонукає науково-технічний прогрес людства
- Всі ці сфери діяльності очікують на прихід нових інтелектуальних сил, в тому числі з України.

ПОДЯКА

- ЦЕРН – колегам з Колаборацій LHCb, MEDIPIX
- За творчу співпрацю колегам з відділу фізики високих енергій ІЯД НАН України:

PhD: Borysova Maryna, Chaus Andriy, Lymanets Anton, Obikhod Tetyana,

Sorokin Iouri, Teklishin Maxim, Yakovenko Victor

SR: Kovalchuk Olexii, Kyva Volodymyr, Militsiya Victor, Malygina Ganna, Momot Eugenia, Okhrimenko Olexandr, Pugatch Tetyana, Pugach Mykhailo, Storozhyk Dmytro

Students: Dobishuk Vasyl, Koliev Sergiy (PhD), Kostiuk Igor, Trohimchuk Katerina, Lukashenko Valerija.

- За підтримку наших робіт в ЦЕРН та ІЯД НАН України:
  - Раді з Фізики Високих Енергій НАН України
  - Міжвідомчій Раді з наукового приладобудування
  - LIA IDEATE – Проект УНТЦ 9903.

Дякую за увагу!

Backup slides