LHCb Collaboration – 21 рік співпраці

КРАСИВА ТА ЧАРІВНА ФІЗИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ LHCb (CERN).

(Для Вчителів з України)

В.М. Пугач

Інститут ядерних досліджень НАН України

Зміст

- **Вступ**

  ЦЕРН. Новий простір знань на LHC.

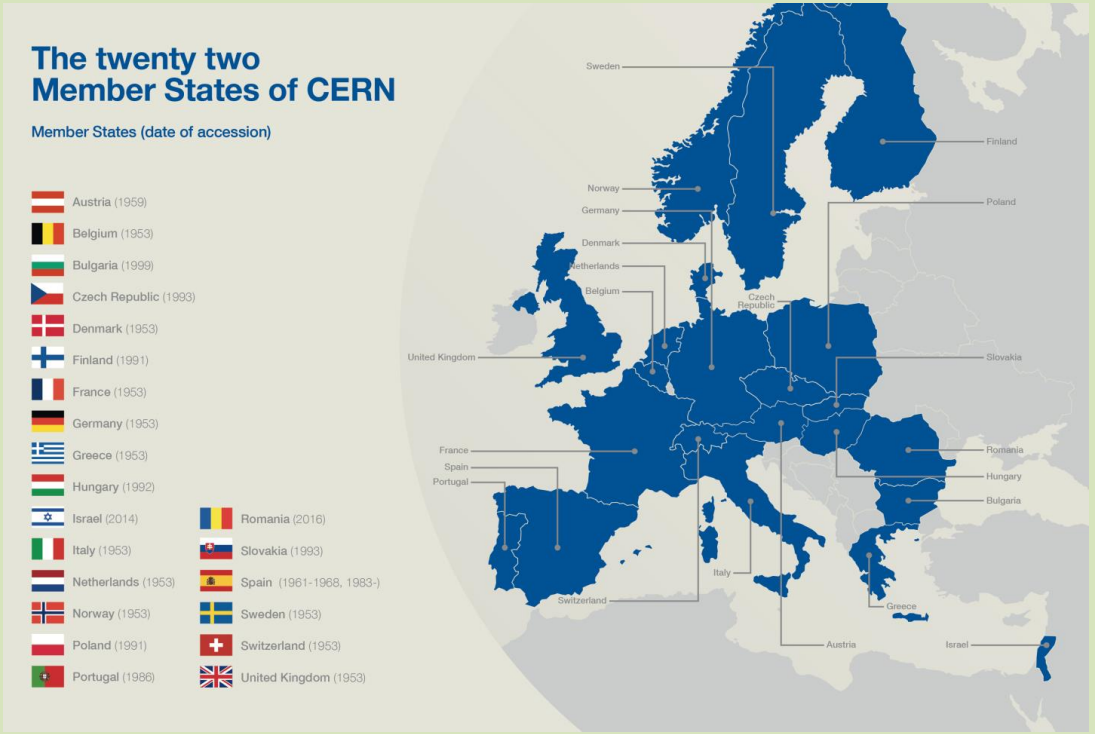
  LHC – генератор КРАСИВИХ (b-beauty), ЧАРІВНИХ (c-charm), ДИВНИХ (s-strangeness) та інших зразків матерії.

  Фізичні цілі LHCb. Міжнародна Колаборація LHCb.

- **Експеримент LHCb**
- **Вибрані результати експерименту LHCb (грудень 2016 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**

ЦЕРН.
Європейський центр ядерних досліджень. Швейцарія (Женева). Великий Адронний Колайдер (ВАК)

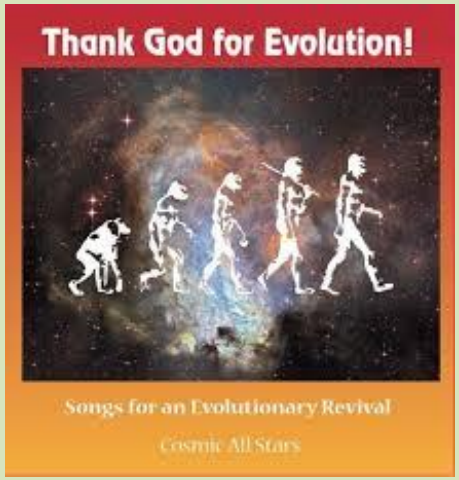
- ЦЕРН (1954 р.) - міжнародна наукова організація - найпотужніший фізичний центр в світі.
- В 1990-х роках в ЦЕРНі створено інтернет. Нова технологія обчислення величезних масивів даних – GRID - для обробки даних експериментів на **ВАК**.
- **ВАК (LHC) - найбільший науковий проект за всю історію людства.**
- **Спорудження ВАК ~14 років, близько $10 млрд.**
- **Кільцевий прискорювач. Тунель 26,7 км під землею (100 м).**
- **Максимальна енергія - 14 ТеВ.**

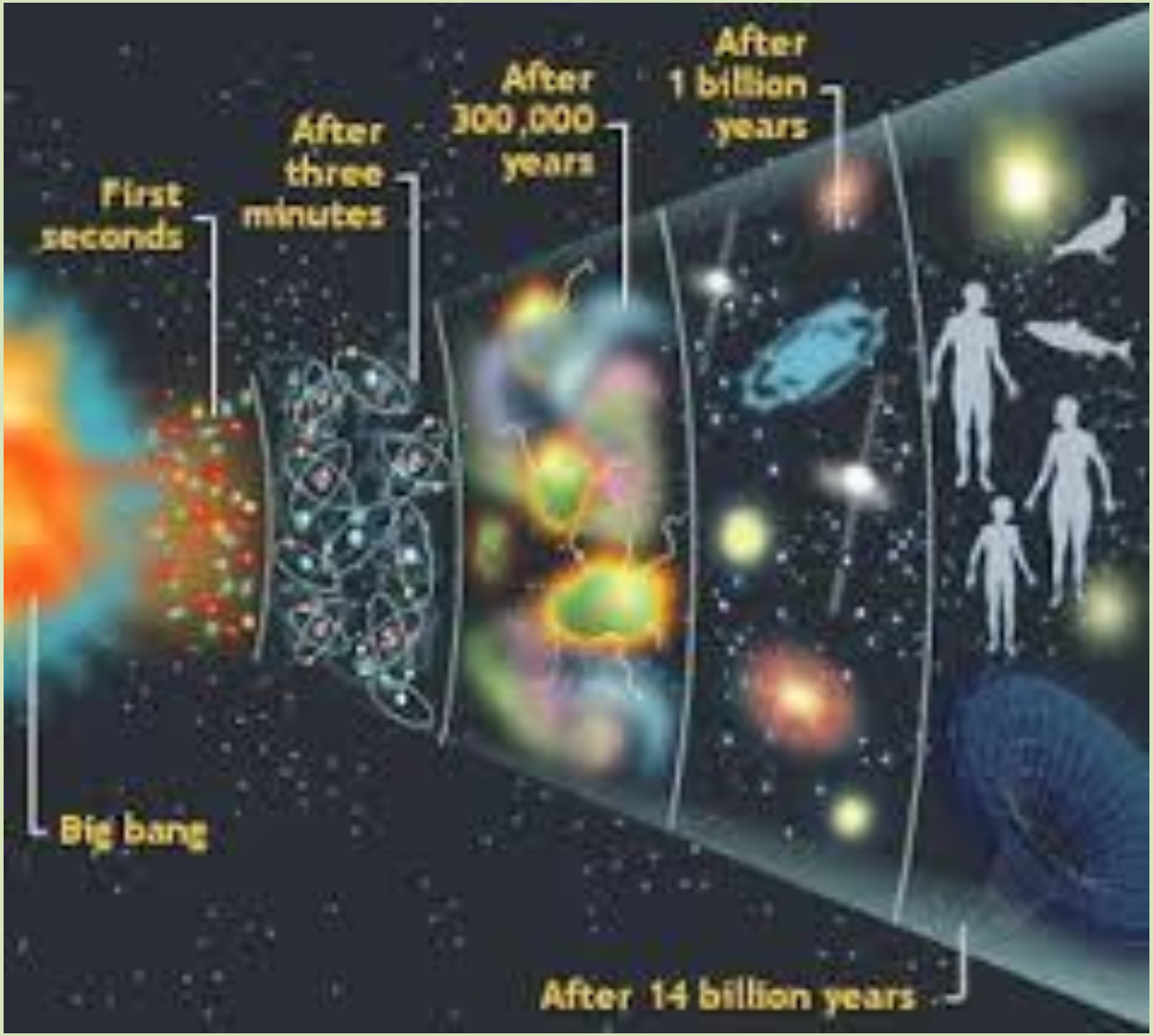


Serbia and Cyprus are associate members in the pre-stage to membership, and Turkey, Pakistan and **Ukraine (2016) are associate members.**

LHC (ЦЕРН) – генератор первинної матерії.

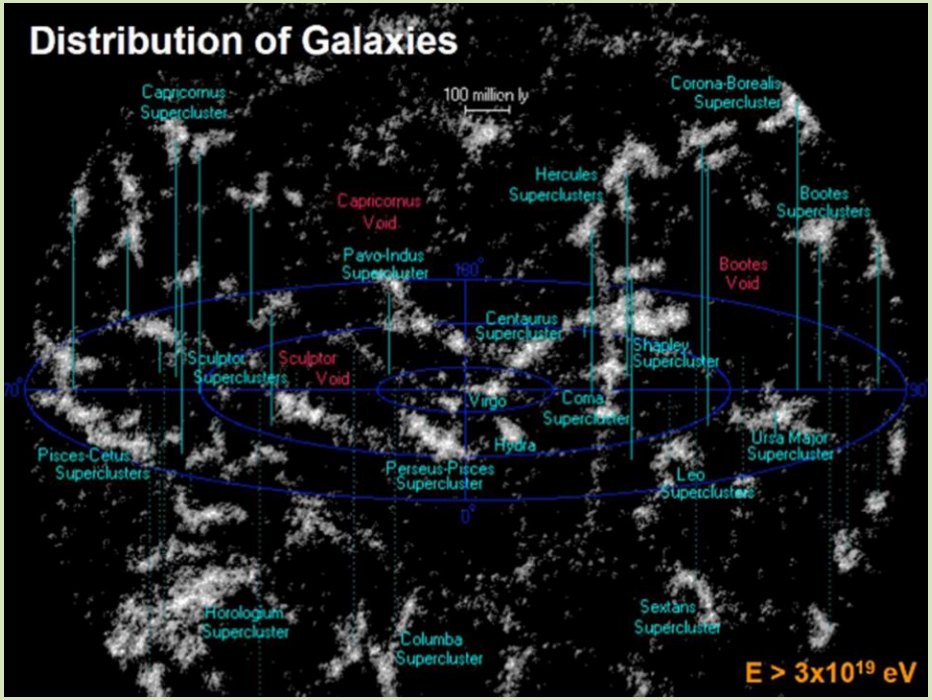
Всесвіт:
BIG BANG, Еволюція …

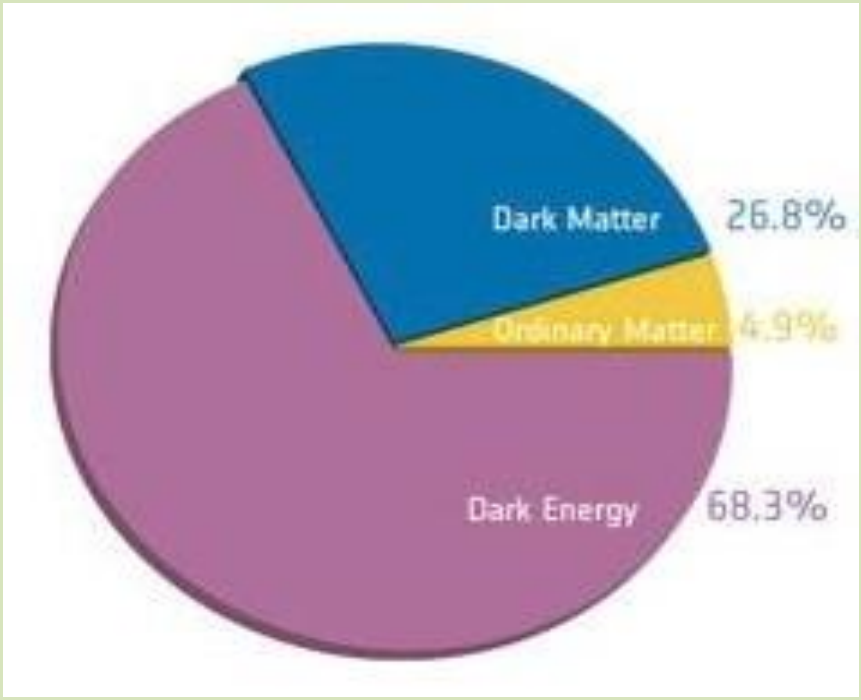




Всесвіт … ?

Баріогенезис… *Як утворилась Матерія ?*



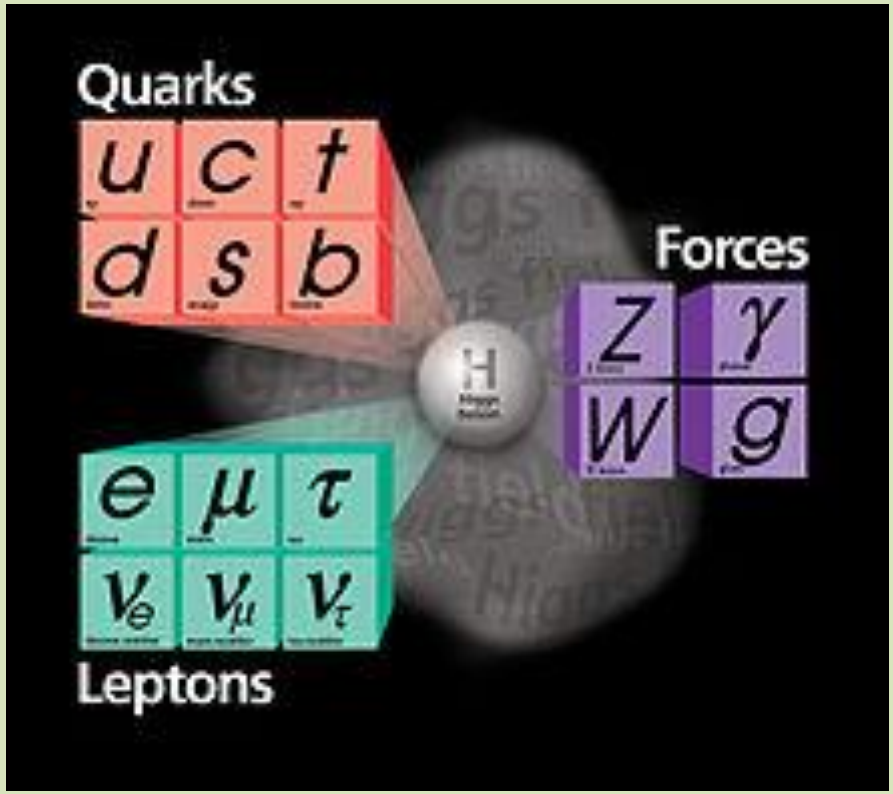


СМ – На початку Всесвіту (BIG BANG),
була однакова кількість матерії і антиматерії …

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

Стандартна Модель елементарних частинок

- **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.**

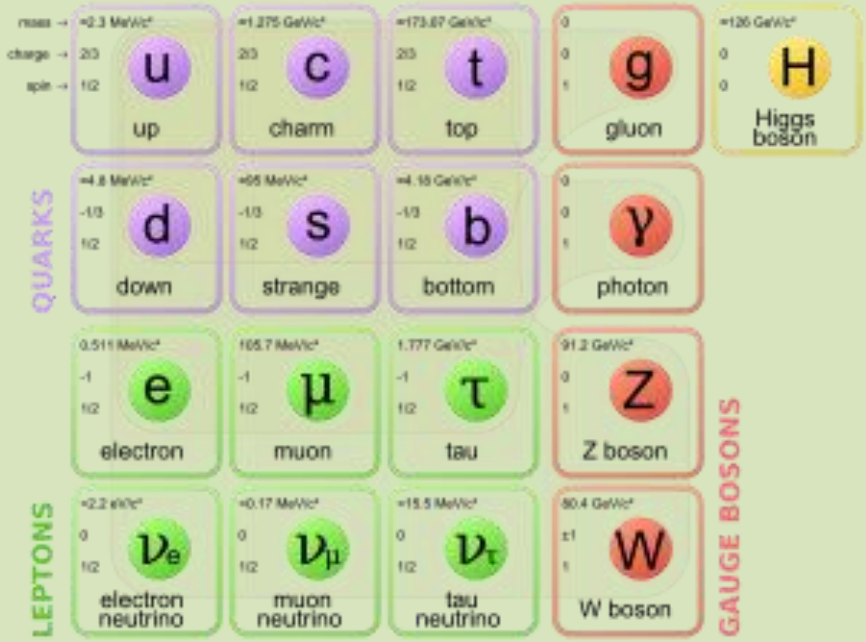


http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model

Кварк-глюонний світ – аттометровий простір (10^{-18} м). Стандартна Модель (СМ).

Три покоління Кварків та Лептонів.

Бозони.

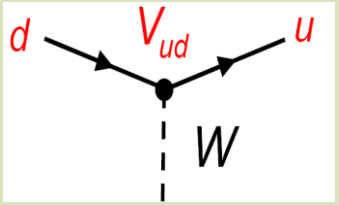


В СМ взаємодії-переходи від одного стану до іншого описують матричними елементами матриці СКМ (Cabibo-Kobayashi-Maskawa)

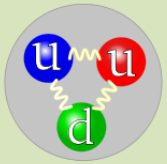
СКМ - матриця

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix}.$$

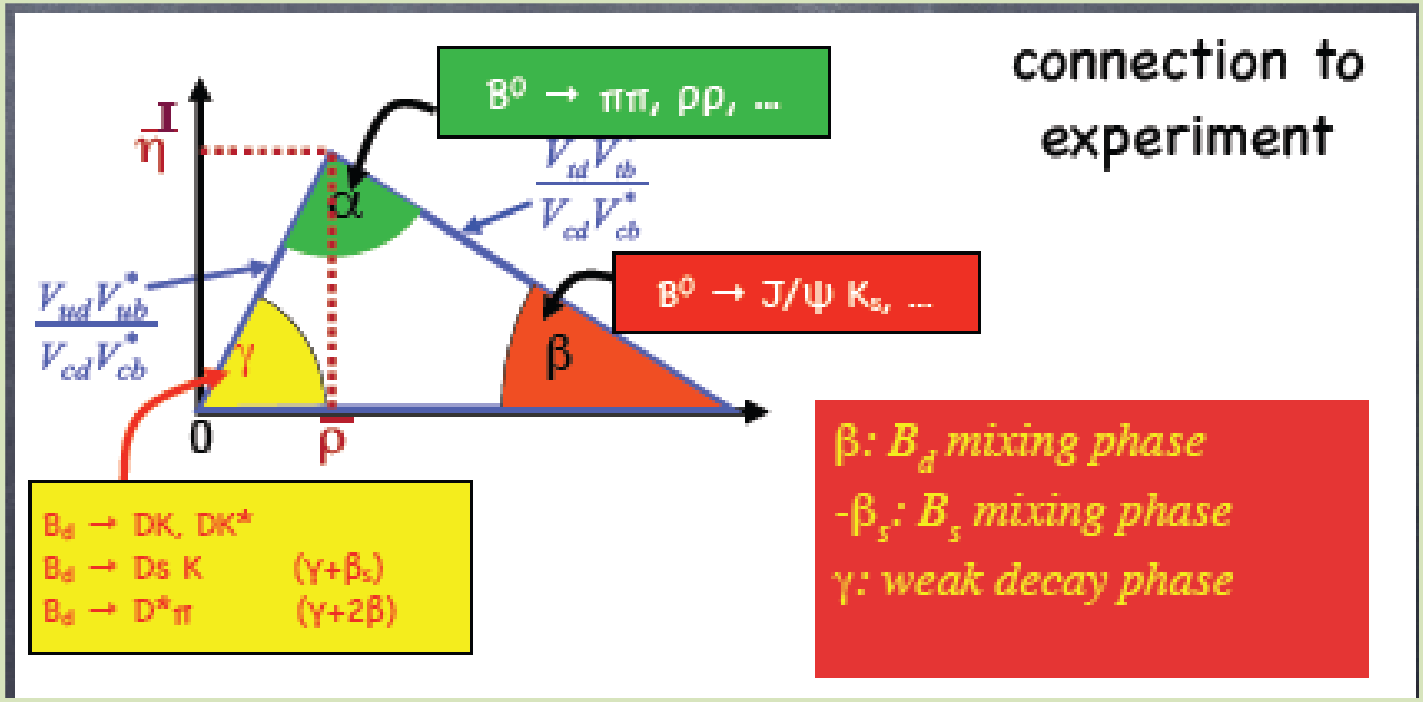
flavor



mass



Діаграма Фейнмана – перехід через слабку вз



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

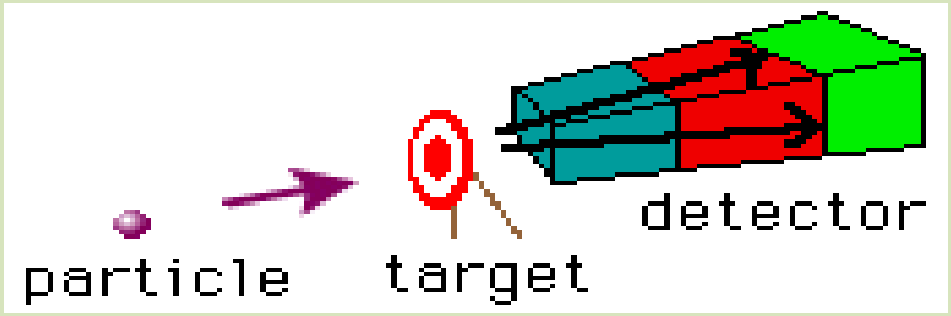
➥ Flavour Eigenzustände (schwache WW) sind Überlagerung der Massen Eigenzustände, verbunden durch CKM Matrix

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

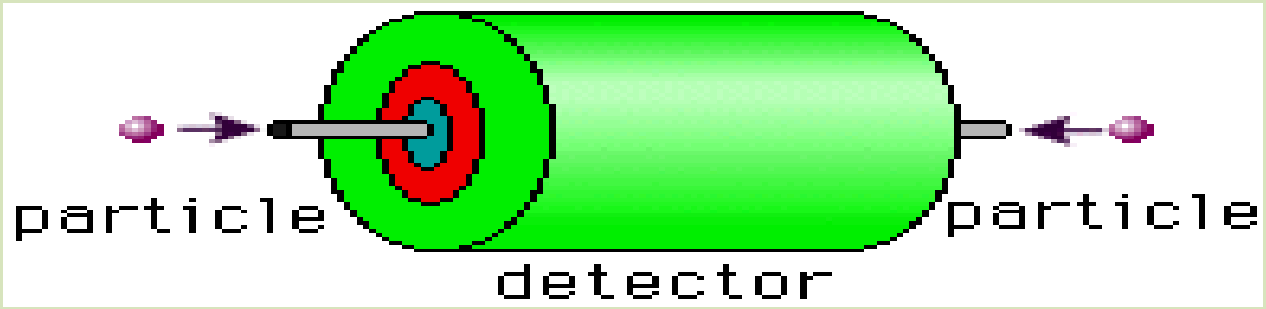
T. Maskawa M. Kobayashi

Ulrich Kerzel (CERN)

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»)

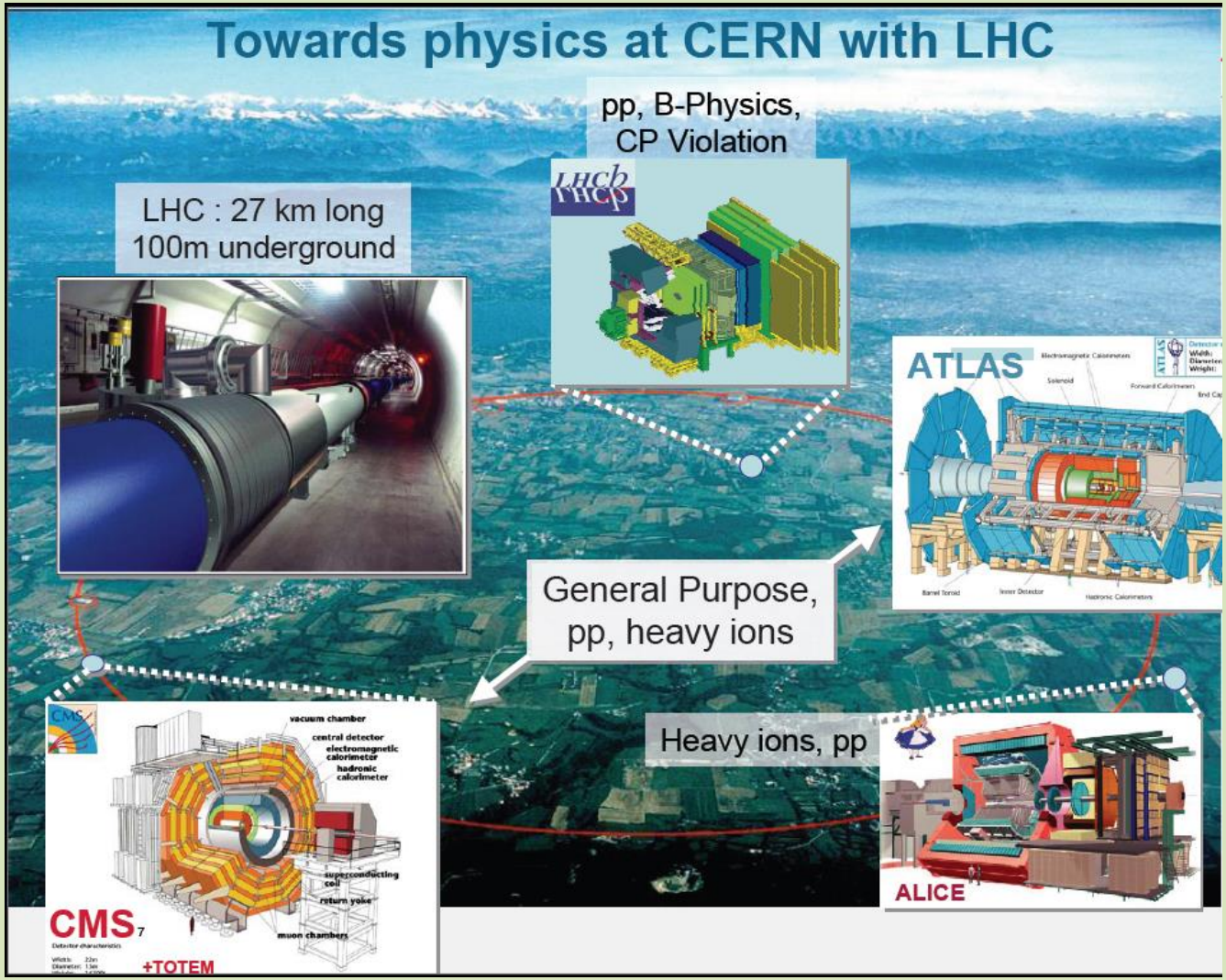


Colliding Beams: В колайдерному експерименті продукти летять в усіх напрямках, тому детектор має вигляд циліндра (‘barrel’).

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:
Collider mode

- 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.)
  - ➢ Many primary particles → well defined b production vertex
- 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.

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

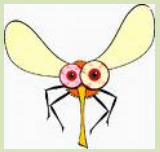
Новий простір знань на Великому Адронному Колайдері в ЦЕРН (Енергія -10^{13} еВ; Відстані – 10^{-18} м; Час – 10^{-25} с; нові форми матерії , …) :

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

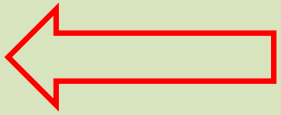
Енергія 13 ТеВ -?

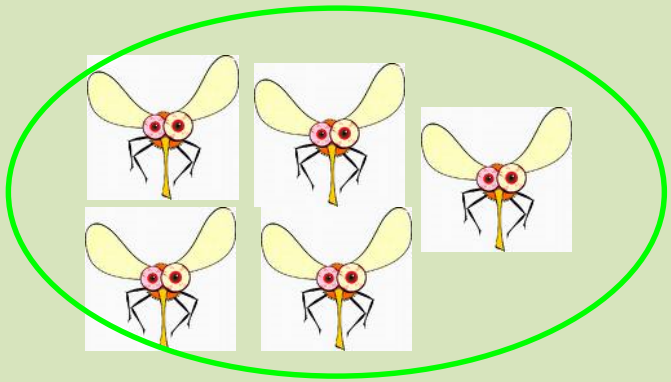
Кожен з протонів на колайдері в ЦЕРН має 6.5 TeV (10^{-6} Дж.)

Це енергія атакуючого комарика !



Але ! В кожному із пучків циркулює понад 10^{14} протонів.
Тому повна енергія пучка - біля 400 МДж !
Таку ж енергію має вибухівка (TNT) масою ~ 100 кг
(або середній авіаносець …)





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

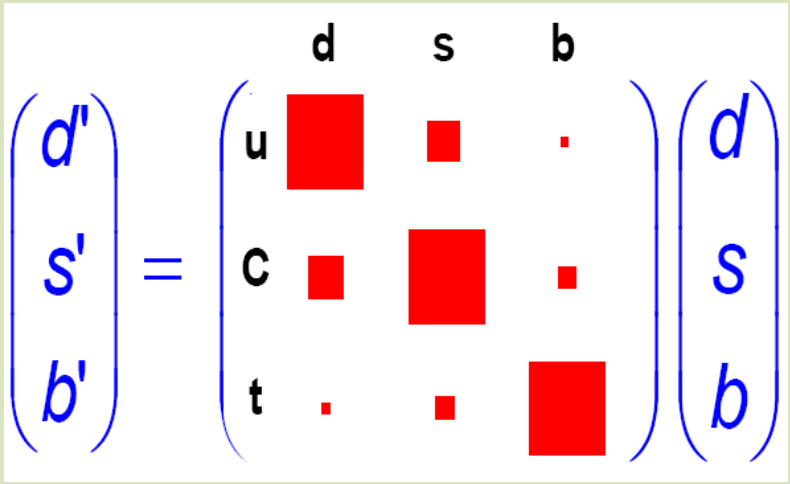
Де взяти зразки кваркової матерії для досліджень

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

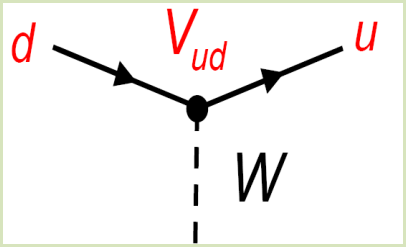
… На LHC в зіткненнях звичайних ядер при високих енергіях – через перетворення їхніх складових (партонів-кварків, глюонів)

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

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:

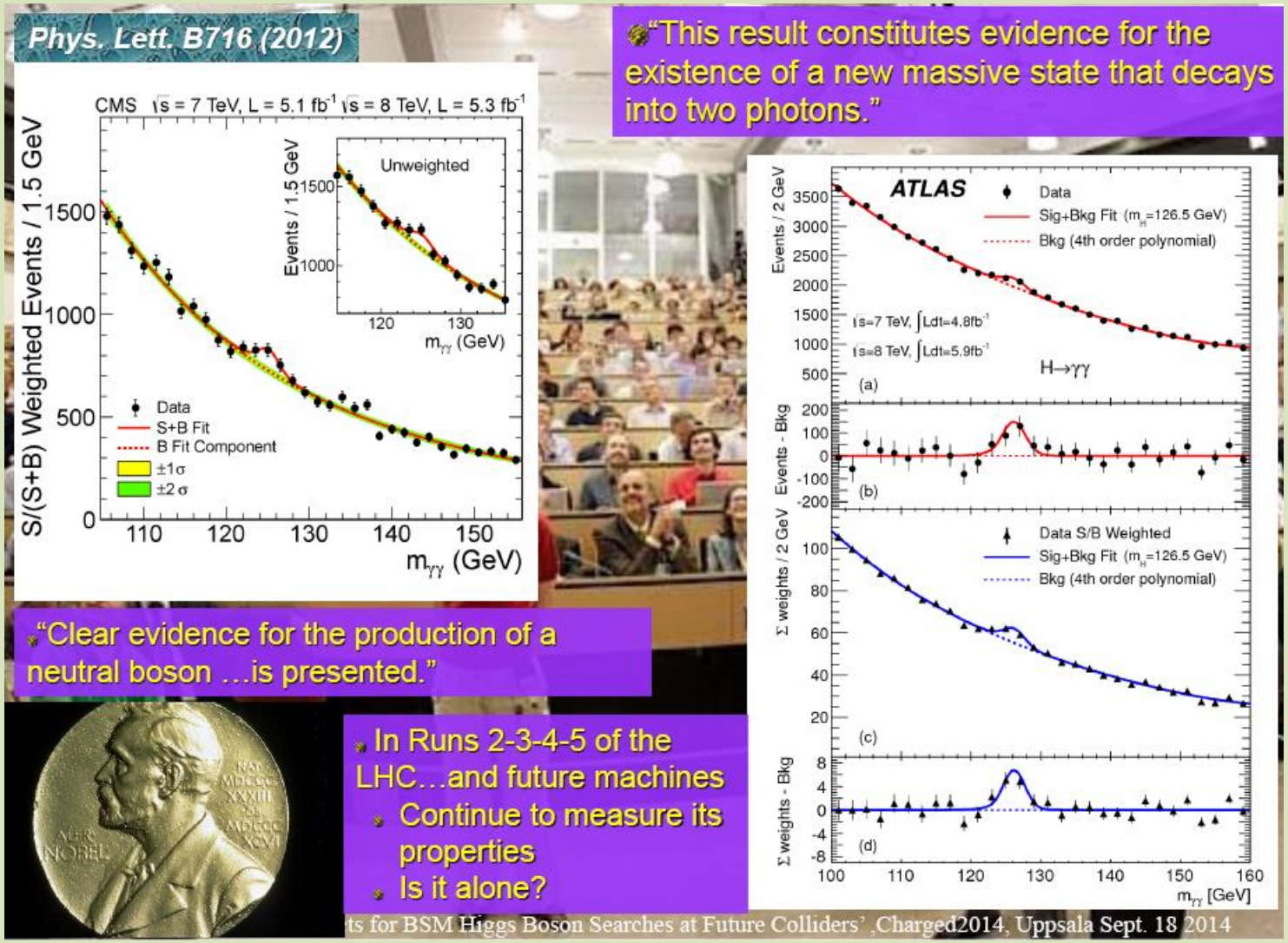
"We observe in our data clear signs of a new particle, at the level of 5 sigma, in the mass region around 126 GeV.

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 простору

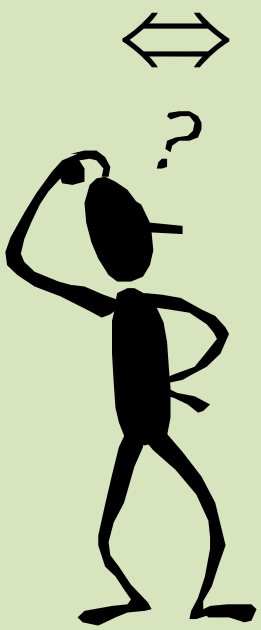
Енергетичний діапазон LHC до 13 ТеВ в протон-протонних зіткненнях

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

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).

Проблема баріогенезису …

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



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.

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 , …**

LHCb 21st Anniversary, CERN. Nov. 5, 2016

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

LHC-B

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, Ukraine
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

ІЯД 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

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

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

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

13 TeB у 2015 та 2016 р.р.

світимість IP-8 (LHCb)

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

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

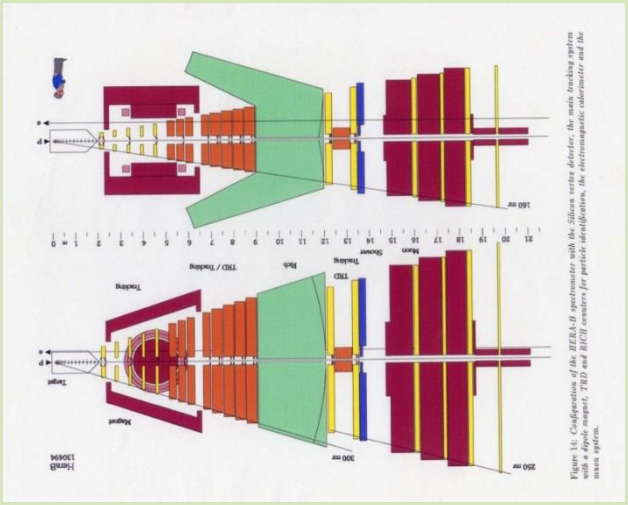
- **Високі радіаційні навантаження**
- **Необіхідність попереднього відбору подій**

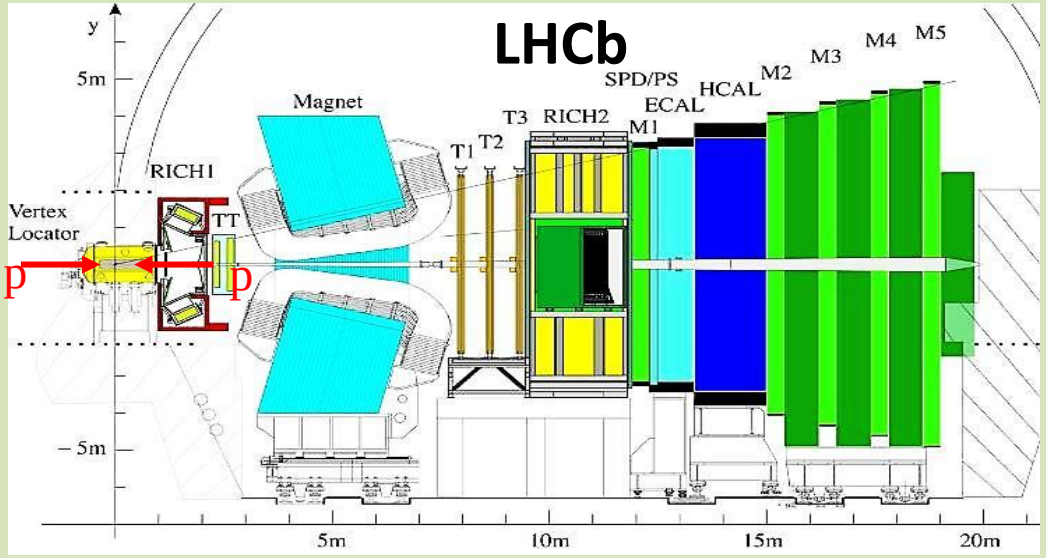
Нова Фізика

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

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

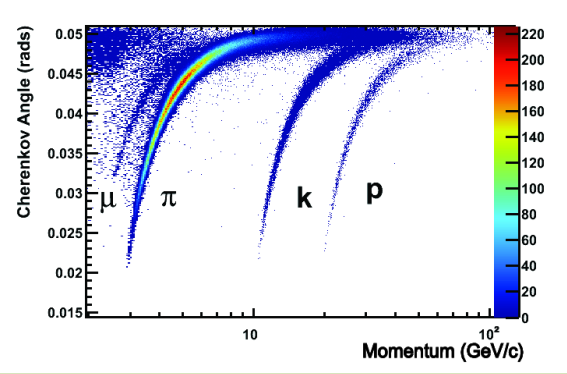
HERA-B. 1994 - 2003



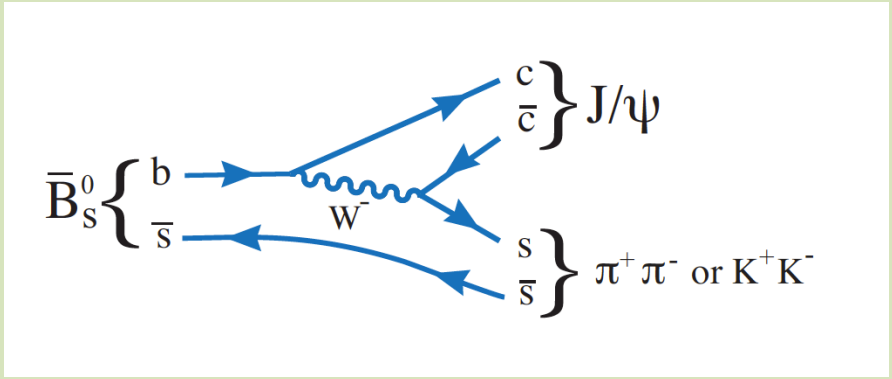


ІЯД НАН України – участь в створенні першої в світі 8-точкової системи ядерних взаємодій.

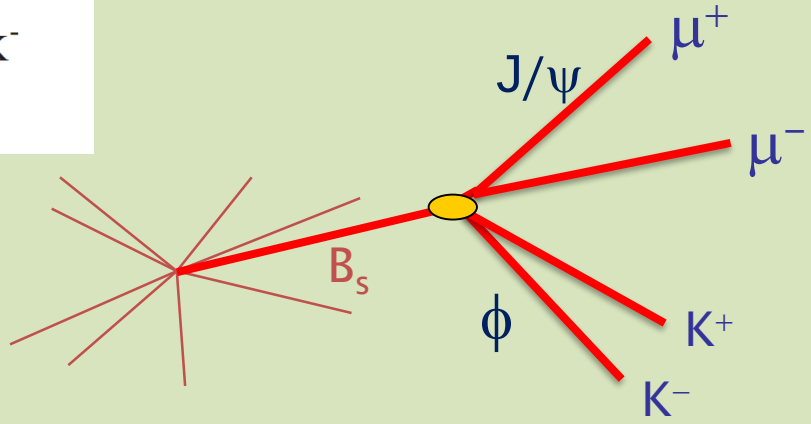
V. Aushev, Yu. Pavlenko, S. Prystupa, Yu. Pylypchenko, V. Pugatch, N. Tkach, Yu. Vasiliev, V. Zerkin



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

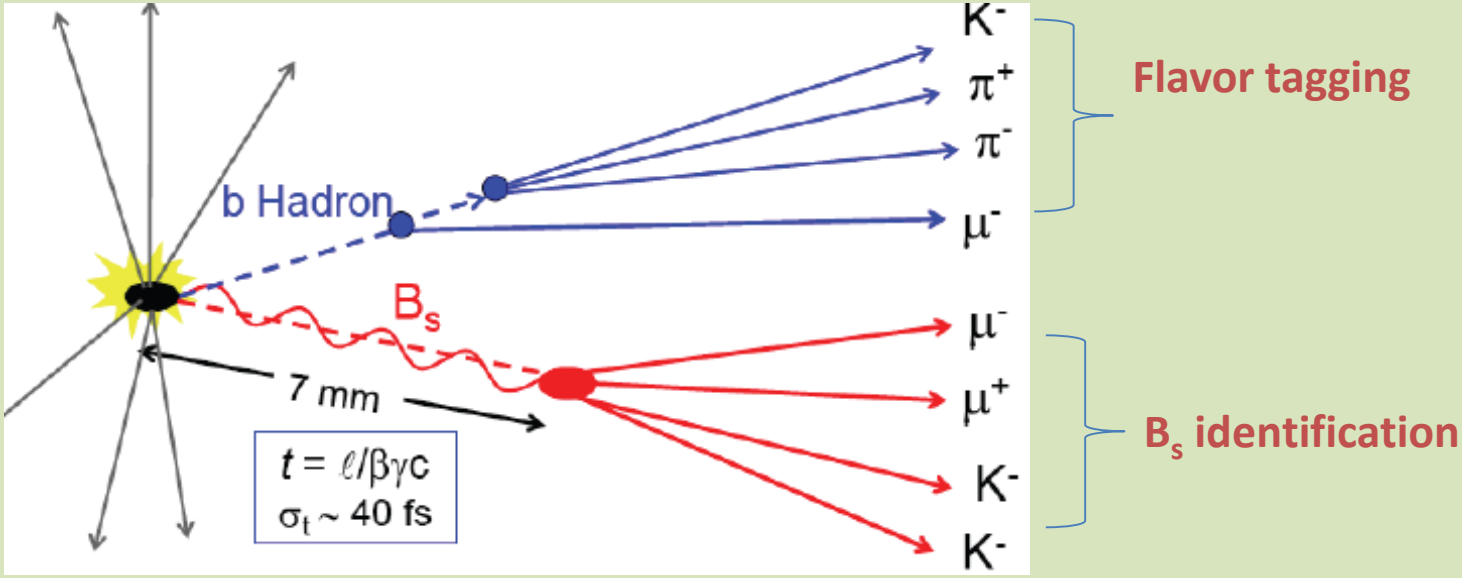


Порушення CP-парності в розпадах важких мезонів

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.

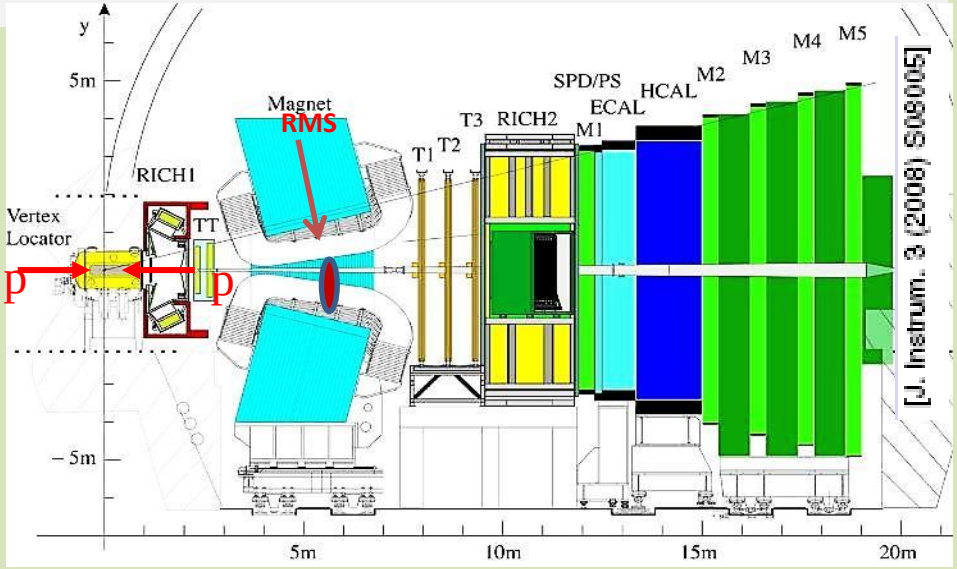
- **Технічне завдання на детекторні модулі визначається фізичними цілями та оптимізацією з урахуванням сучасних детекторних технологій та техніко-економічним базисом колаборації.**

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)

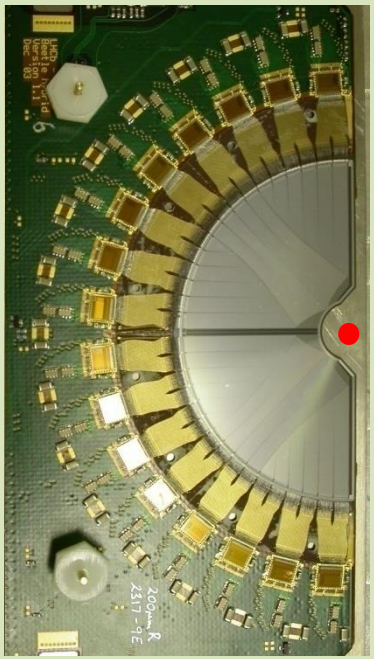
2011: 1.0 fb^{-1} @ 7 TeV

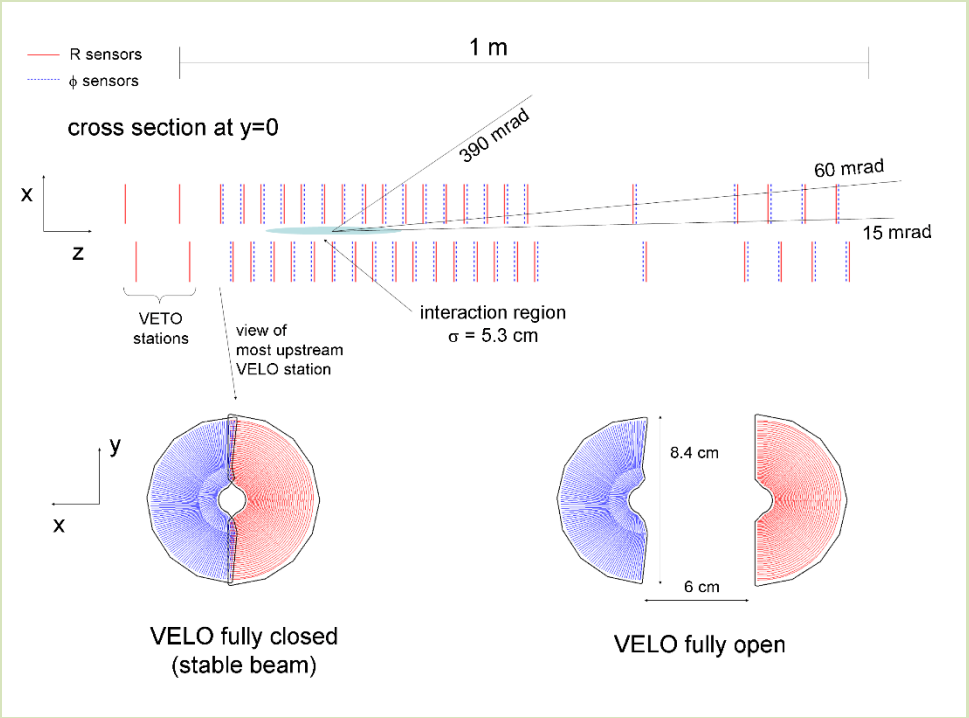
2012: 2.0 fb^{-1} @ 8 TeV

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

Вершинний детектор (VELO – VErtex LOcator)

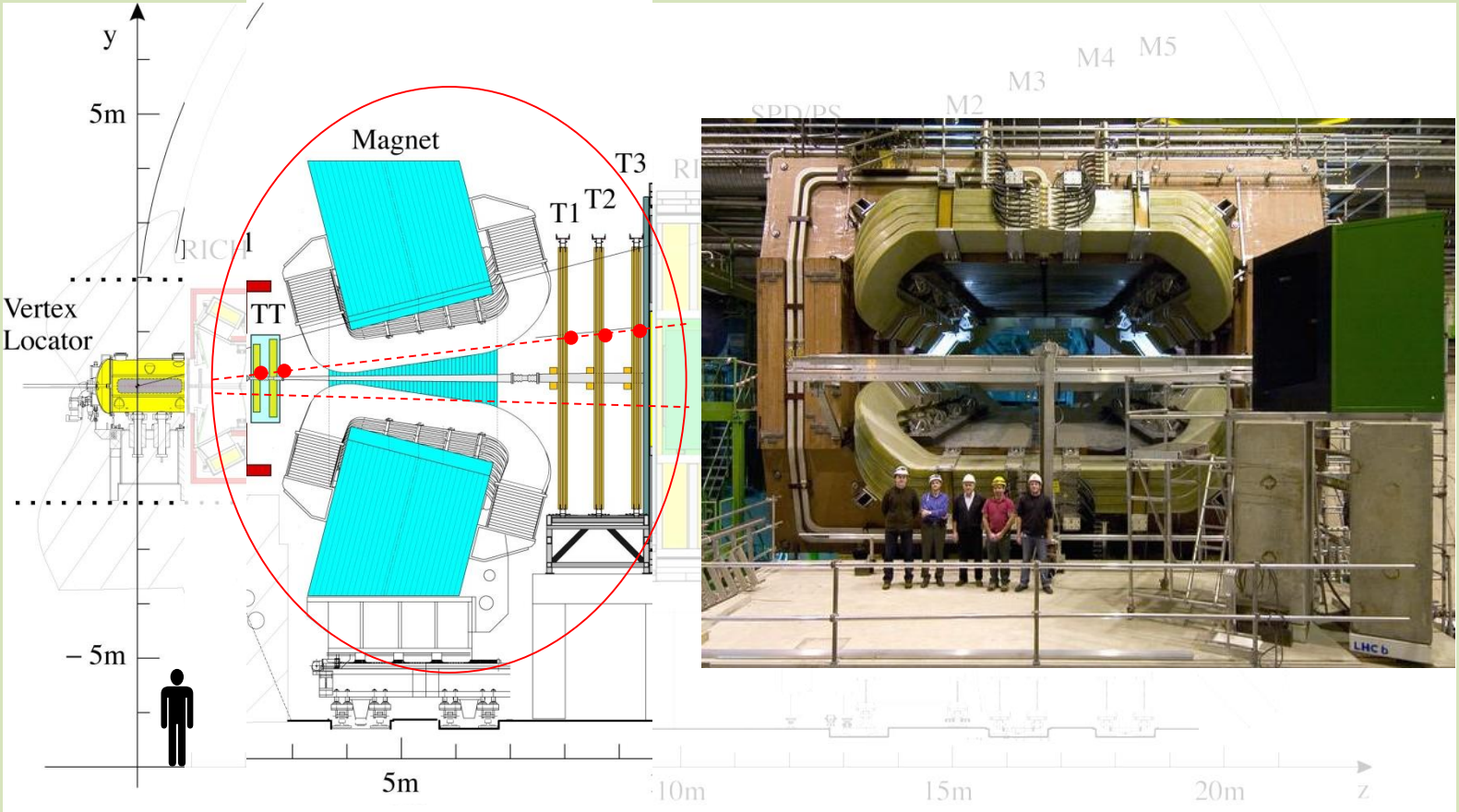
- **Вершинний детектор побудовано на основі кремнієвих мікростріпових сенсорах з $r\phi$ геометрією (стріпи - радіальні та концентричні кола).**
- **Рухомі платформи наближають сенсори до 8 mm від осі пучка протонів – всередині складної системи вторинного вакууму.**
- **За характеристиками найкращий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





Дані з вершинного детектора
Використовуються в тригерній системі попереднього відбору подій

Трекова система та дипольний магніт LHCb

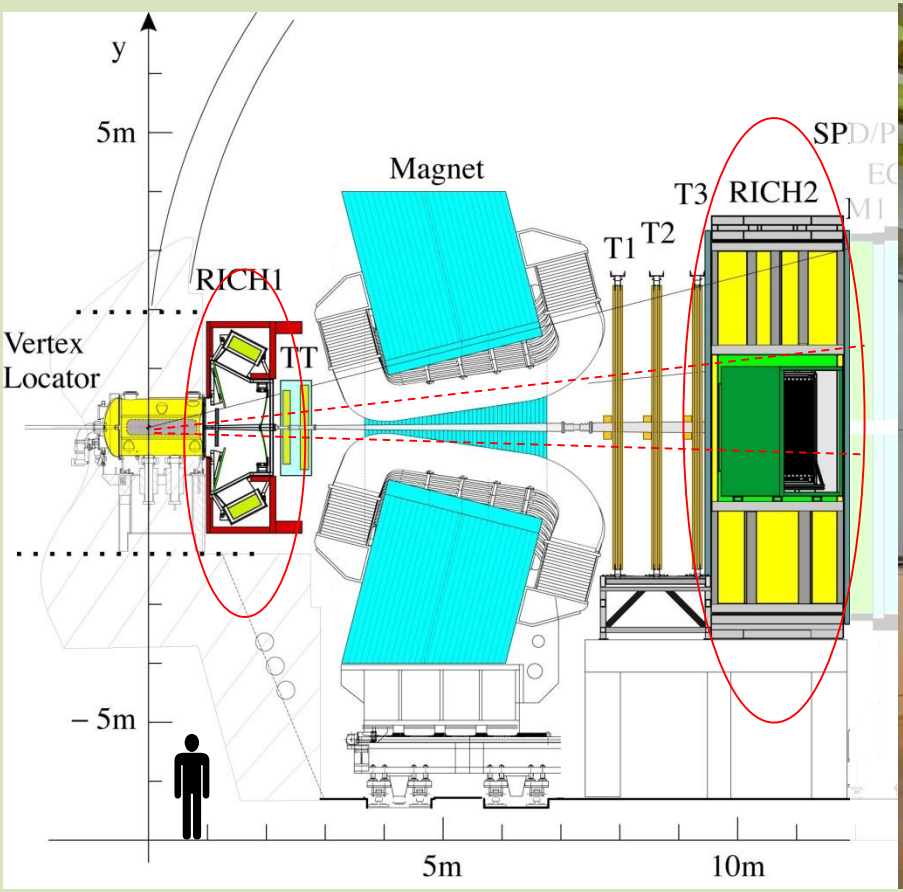


Трекова система та дипольний магніт призначені

для вимірювання кутів та імпульсів заряджених частинок :

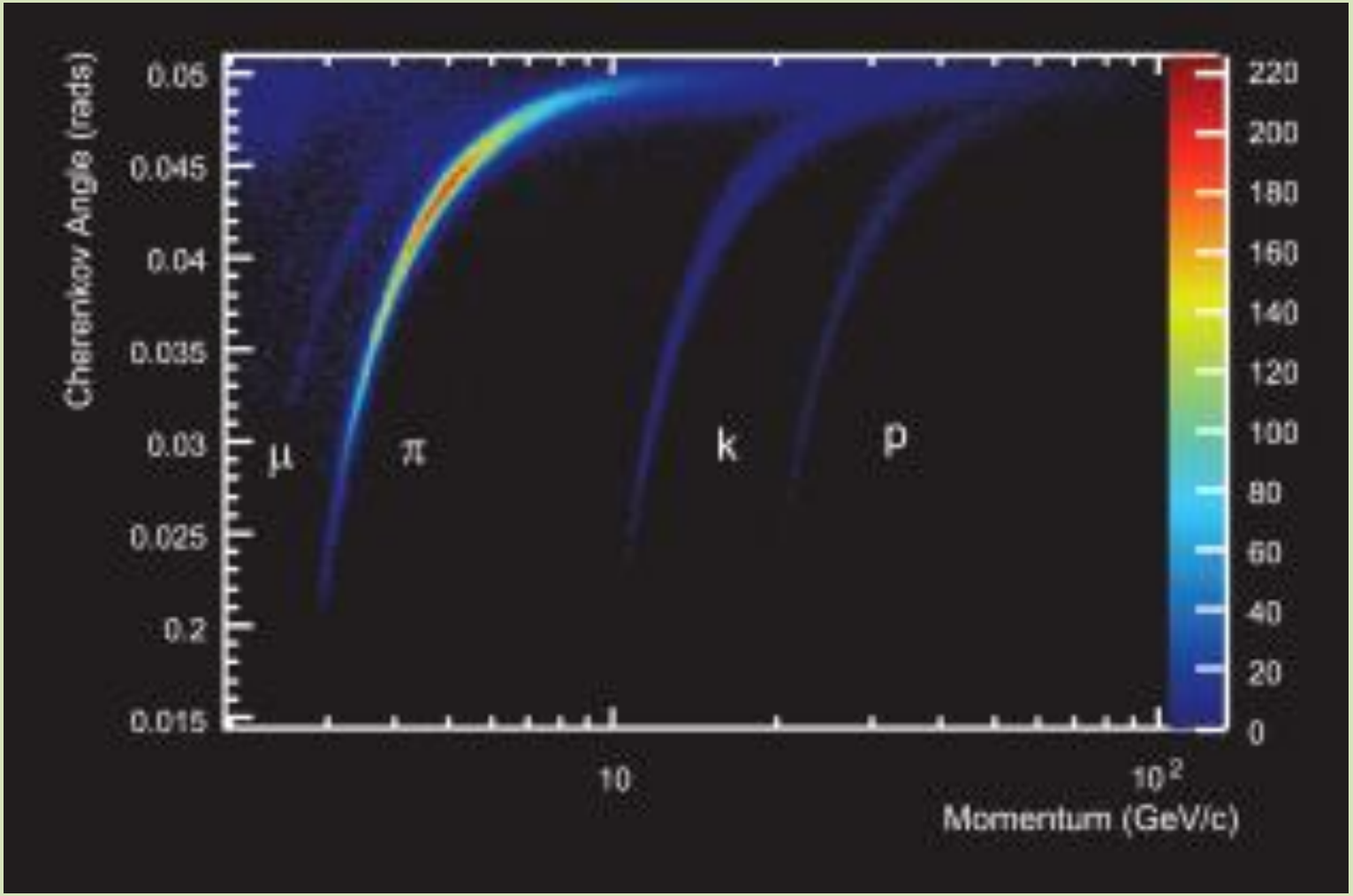
***Δp/p* ~ 0.4 %,** роздільна здатність по інваріантній масі **~ 14 MeV/c^2** (for $B_s \rightarrow D_s K$)

Система ідентифікації сорту частинок – Черенковські детектори

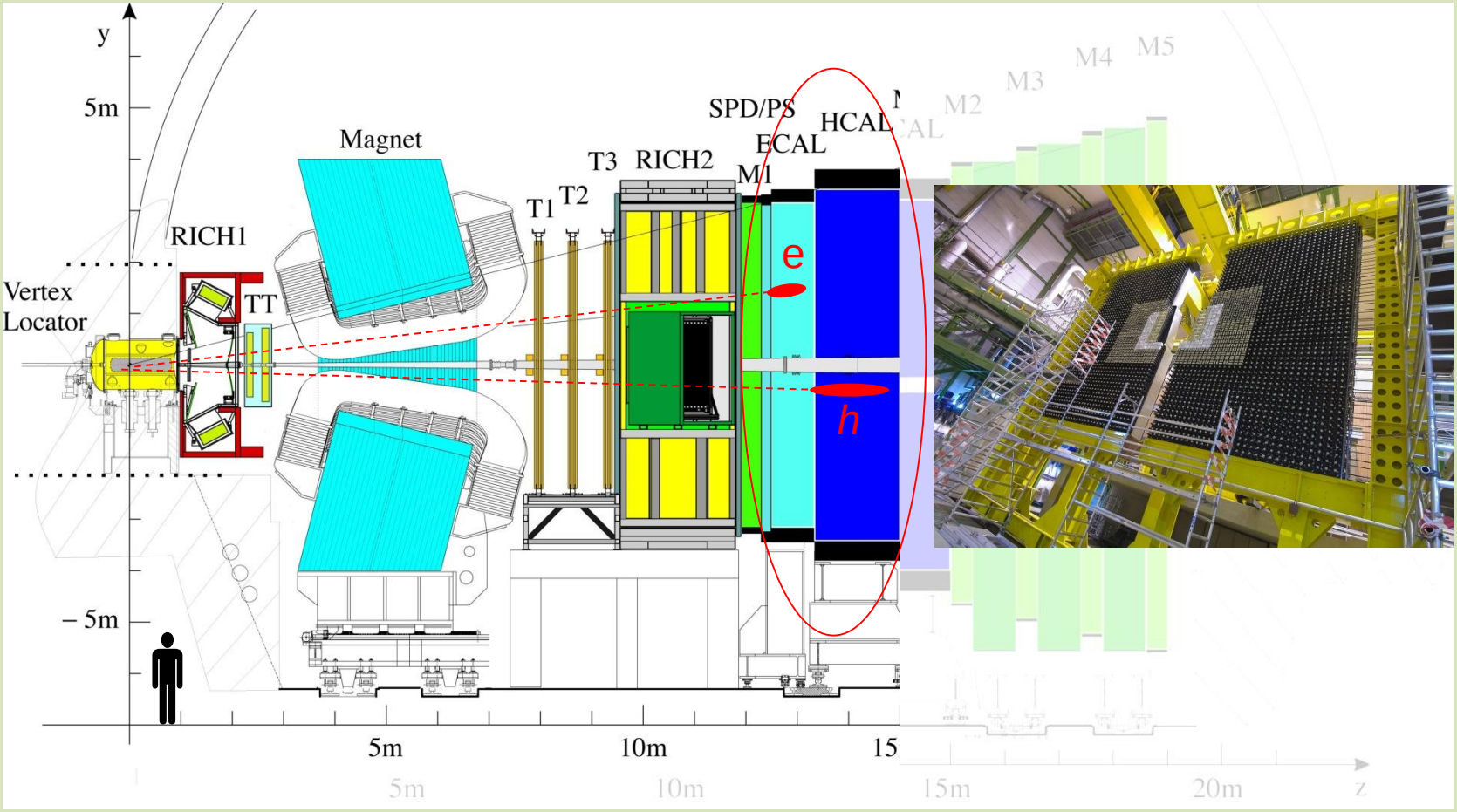


Два черенковських детектори виконують ідентифікацію типу частинок (обведені червоними еліпсами)

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

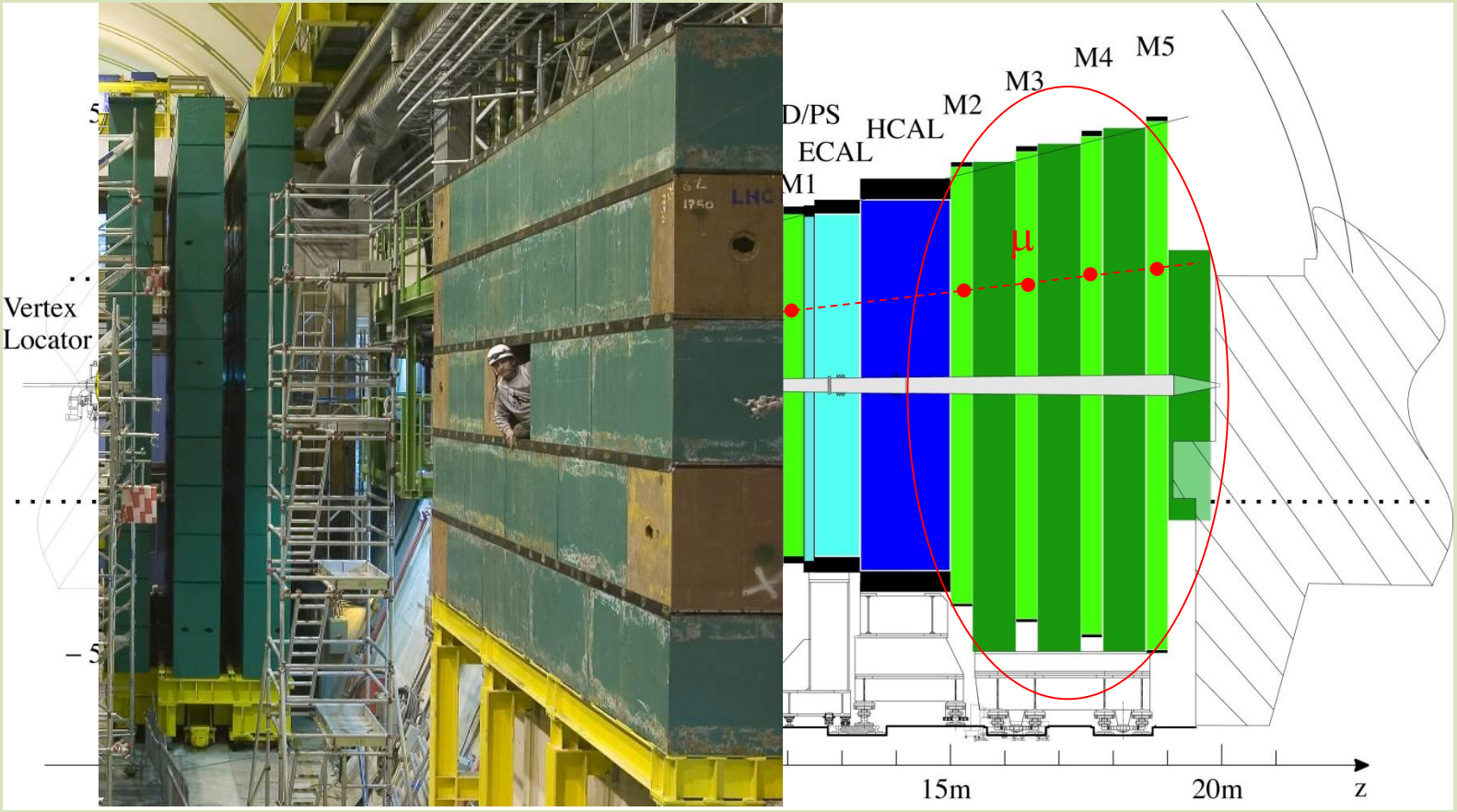


Адронні та електро-магнітні калориметри



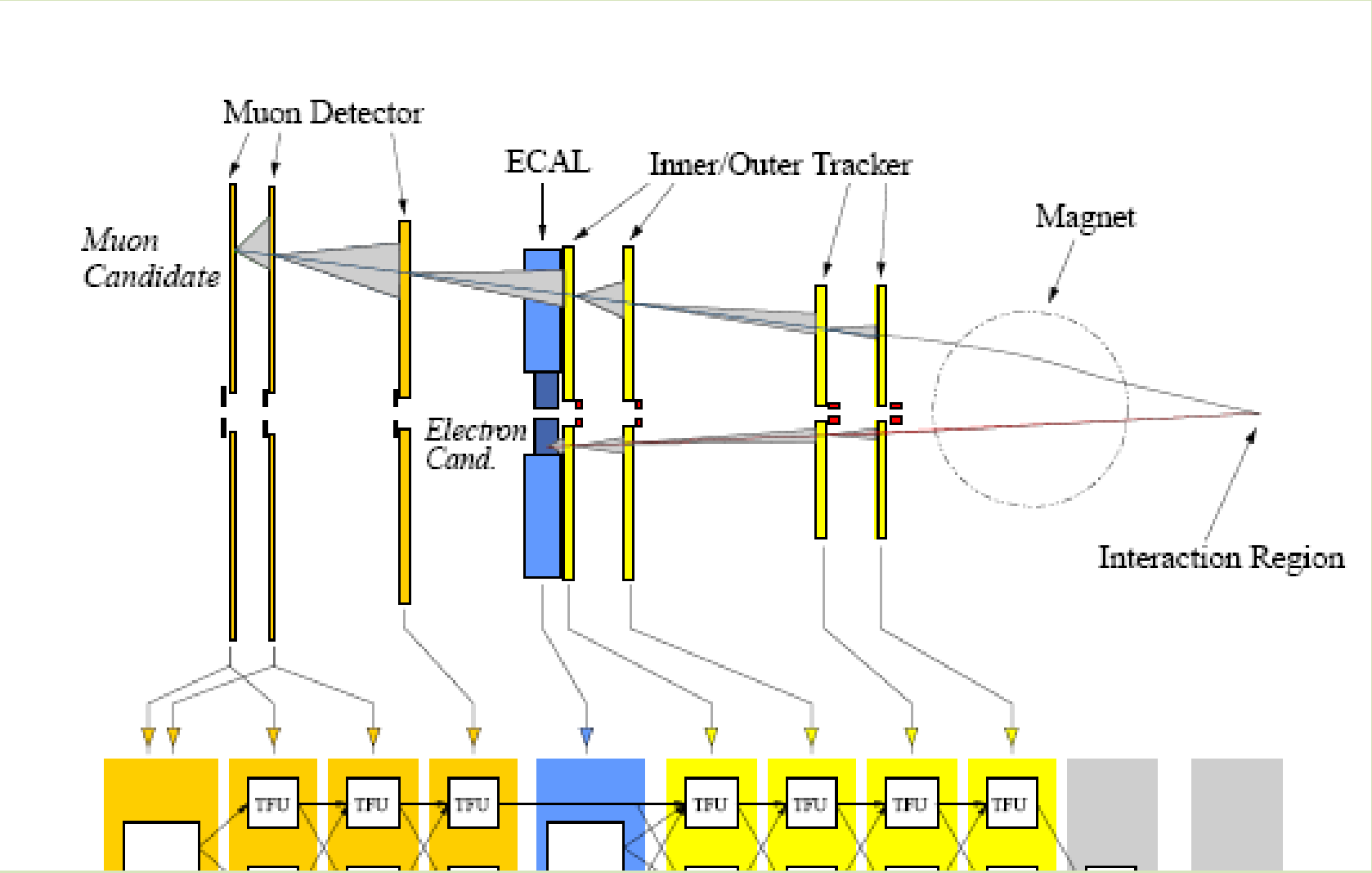
Калориметри ідентифікують електрони, адрони та нейтральні частинки. Дані використовують для тригера першого рівня.

Мюонна детекторна система

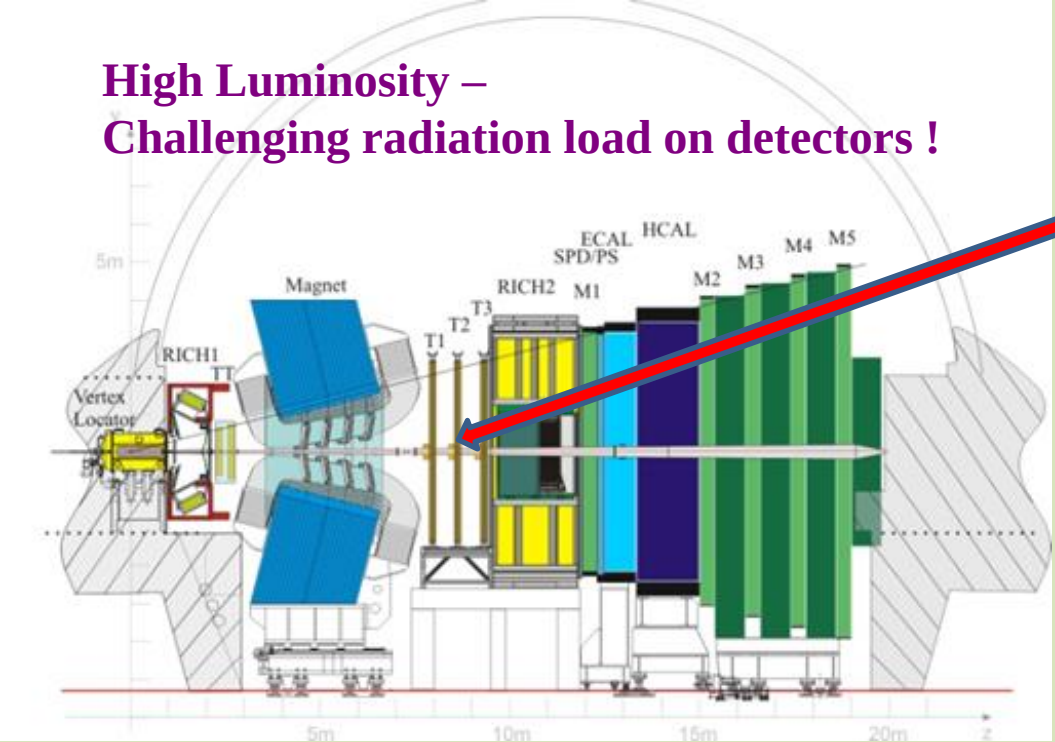


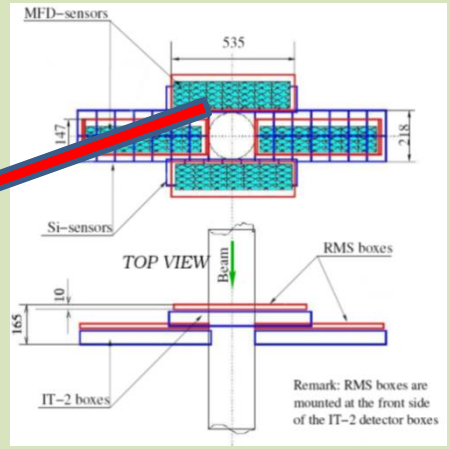
Мюонна система ідентифікує мюони. Дані з мюонної системи також використовують в тригері першого рівня

Реконструкція мюонних та електронних треків



Система Радіаційного Моніторингу в експерименті LHCb

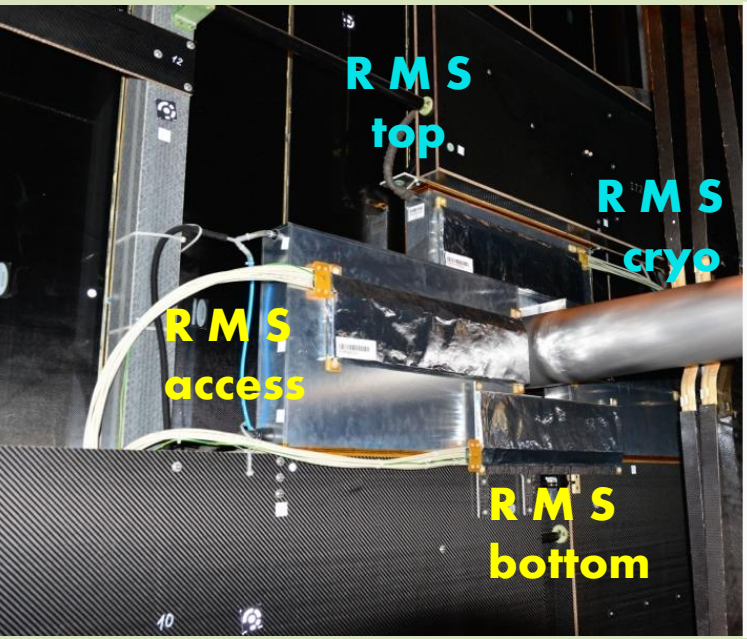


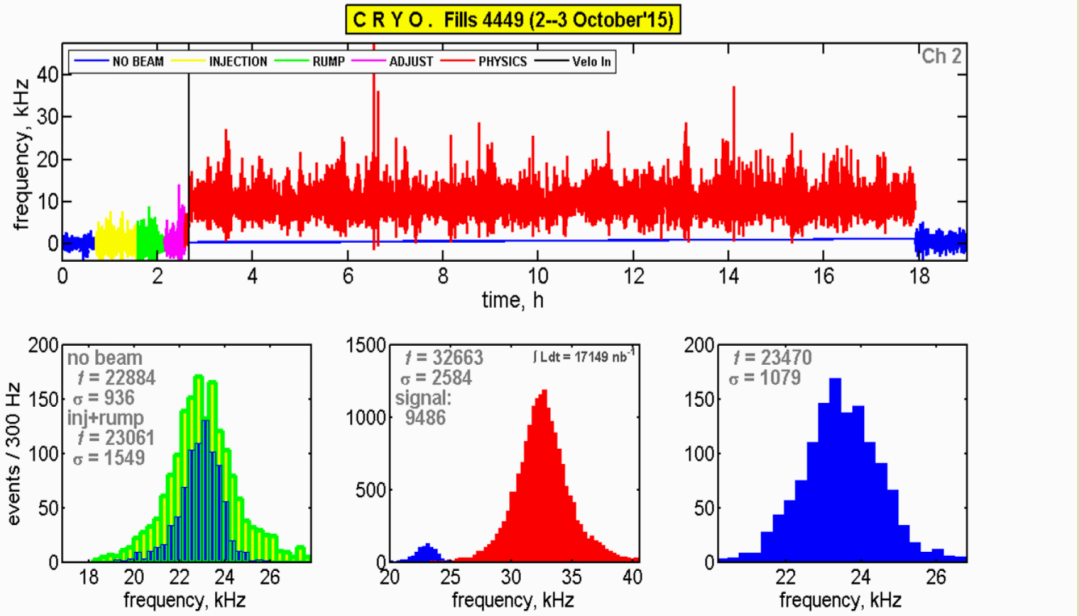


Фізичні принципи, технологія,
Експлуатація –
ІЯД НАН України

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

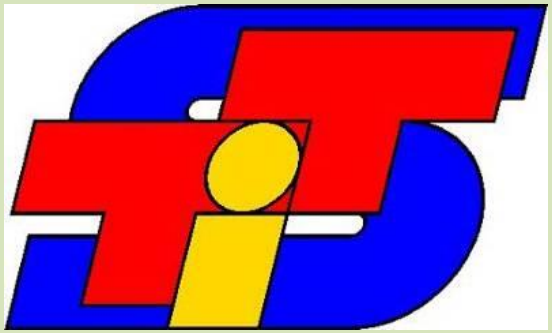
LPHE, EPFL Lausanne

KINR, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

Budker Institute for Nuclear Physics, Novosibirsk

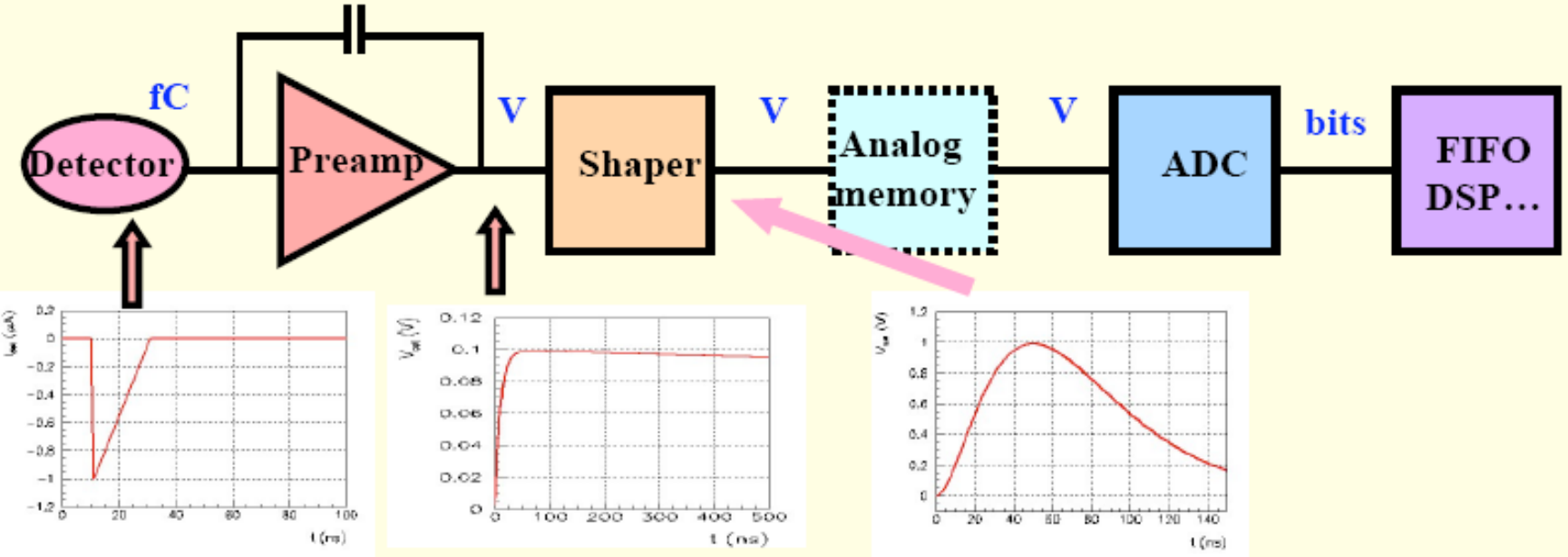
Universidade de Santiago de Compostela

Physik-Institut der Universität Zürich



Вимірювання фізичних величин – через електричні сигнали від сенсорів

- Most front-ends follow a similar architecture

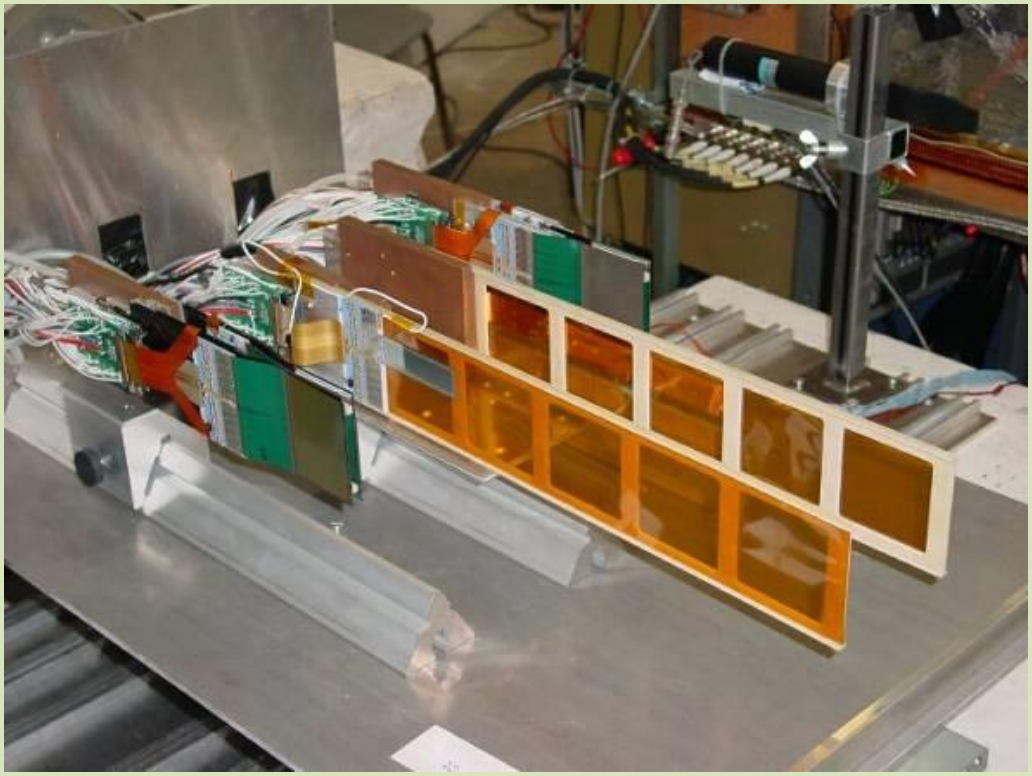


- Very small signals (fC) -> need amplification and optimisation of S/N (filter)
- Measurement of amplitude and/or time (ADCs, discris, TDCs)
- Several thousands to millions of channels
- Needs time to decide to keep or not the event : memory

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).

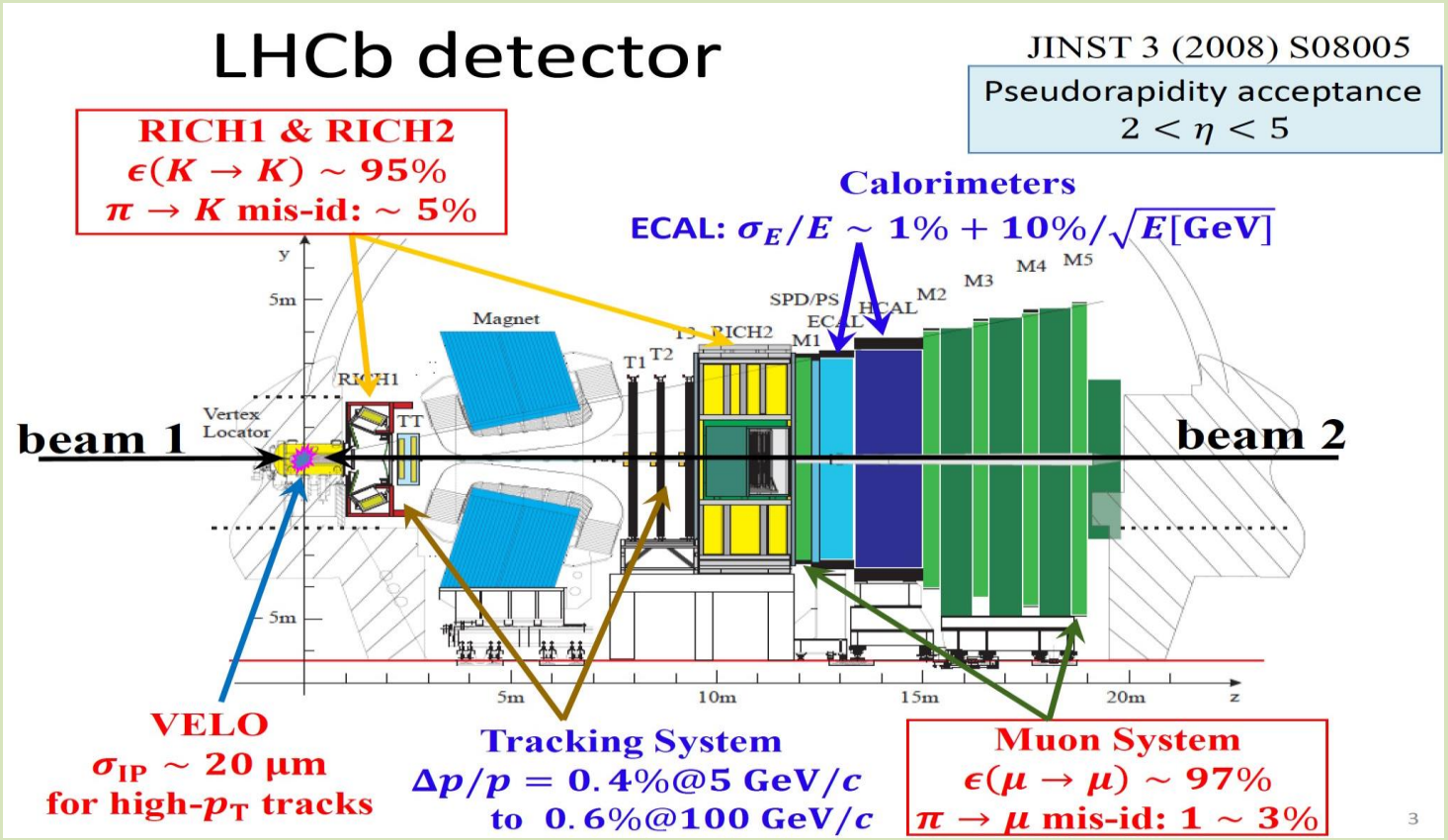
Ціль – ефективність реконструкції треків прототипами мікростріпових детекторів.

Кремнієві детектори в трекових системах

Монтаж Кремнієвого Трекера для експеримента LHCb –

За участю аспіранта З ІЯД НАН України

Як знайти шукану подію серед мільярдів можливих ?



Int.J.Mod.Phys.A30(2015)1530022

- Чітко змоделювати подію за фізичними ознаками
- Реконструювати подію із відгуків мільонів детекторних сигналів

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

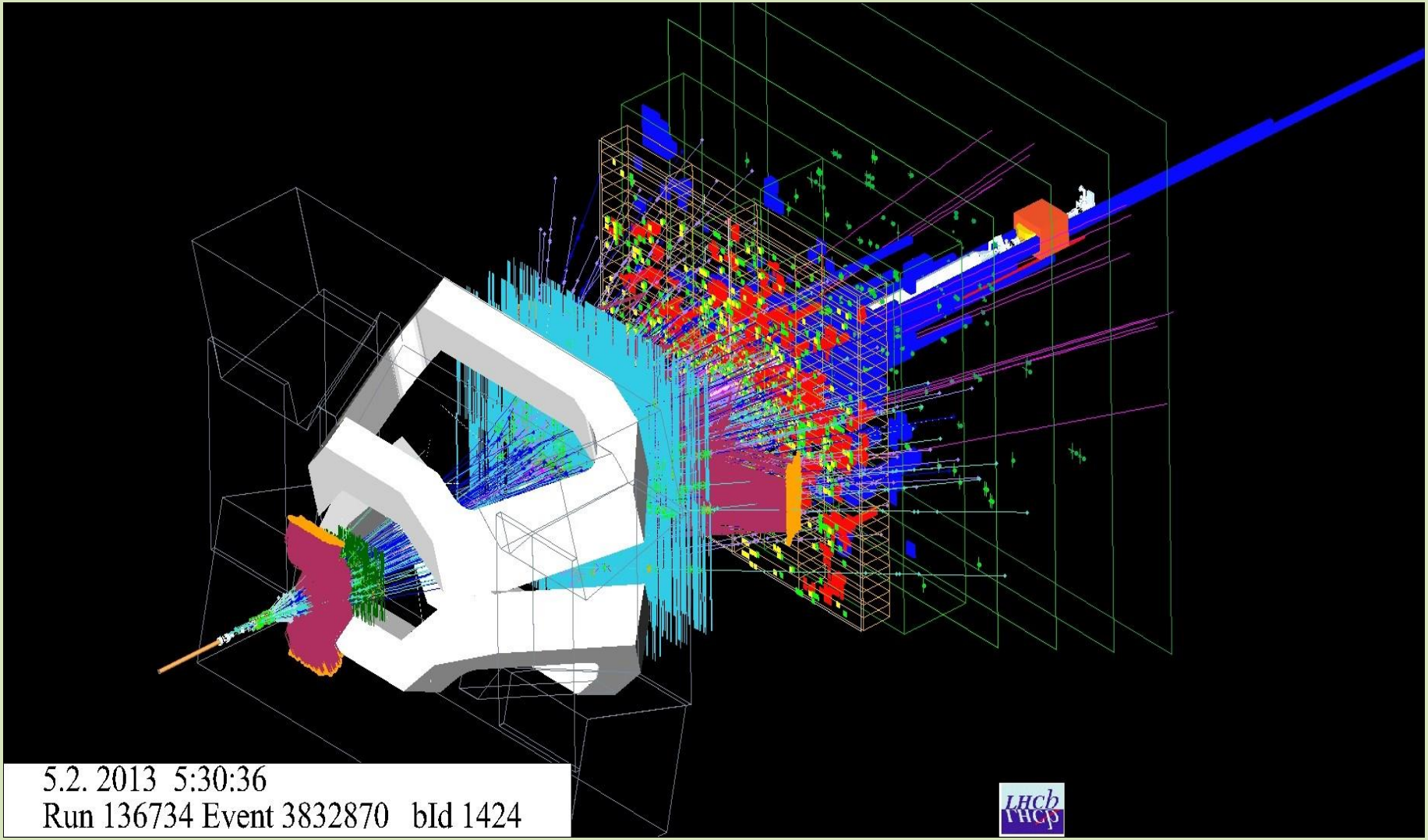
- **Реконструкція події.**

“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 !**

A typical pPb interaction



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.

СКМ матриця та трикутник унітарності

Порушення CP симетрії в рамках СМ описується матрицею Кабібо-Кобаяші-Маскава:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} = V_{CKM} \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

СКМ матриця в параметризації Вольфенштейна

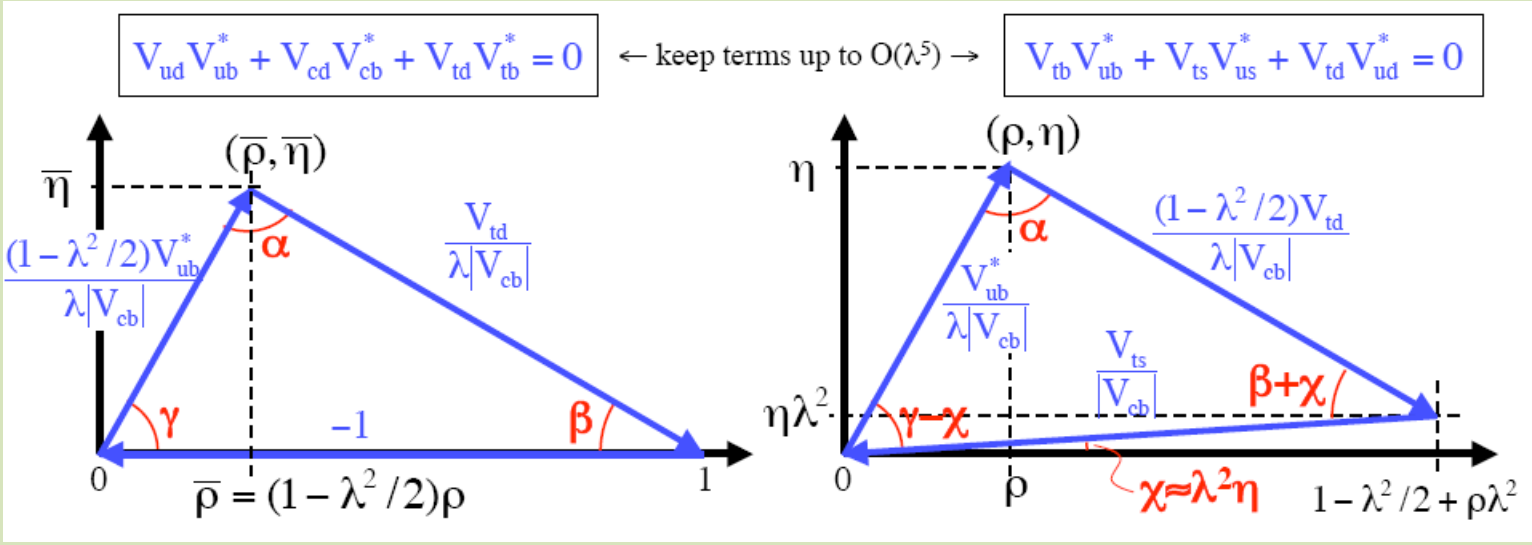
$$\lambda = s_{12}, \quad A = \frac{s_{23}}{\lambda^2}, \quad \rho + i\eta = \frac{s_{13} e^{i\delta_{13}}}{A\lambda^3}$$

δ_{13} is the CP violation phase

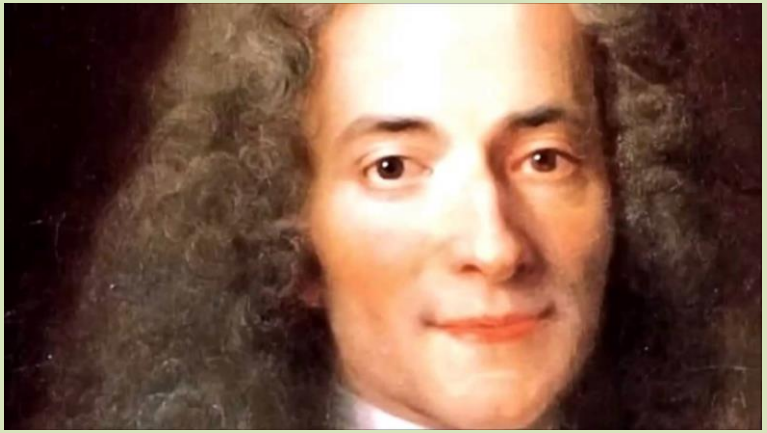
$$s_{ij} = \sin\theta_{ij}$$

СКМ матриця описує імовірність переходу кварка одного типу в інший, імовірність переходу $|V_{ij}|^2$. Замкнутість **трикутника унітарності** означатиме довершеність СМ.

$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$ ← keep terms up to $O(\lambda^5)$ → $V_{tb}V_{ub}^* + V_{ts}V_{us}^* + V_{td}V_{ud}^* = 0$



Реконструкція подій. Аналіз даних. Фізичні висновки.



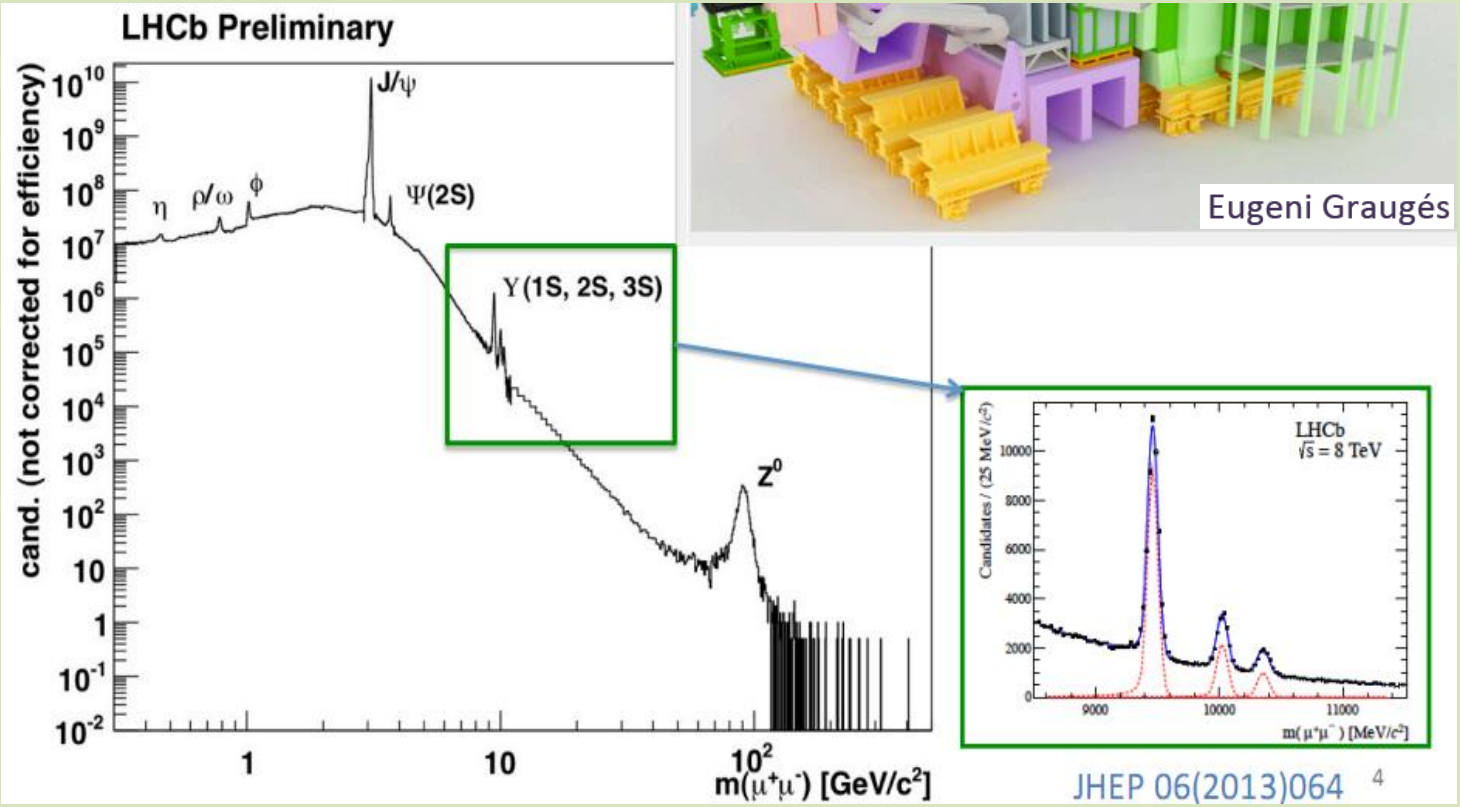
Вольтер. "Філософські роздуми", 1686 р.

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.

Спектроскопія – довершене знаряддя досліджень та пошуку «Нового»



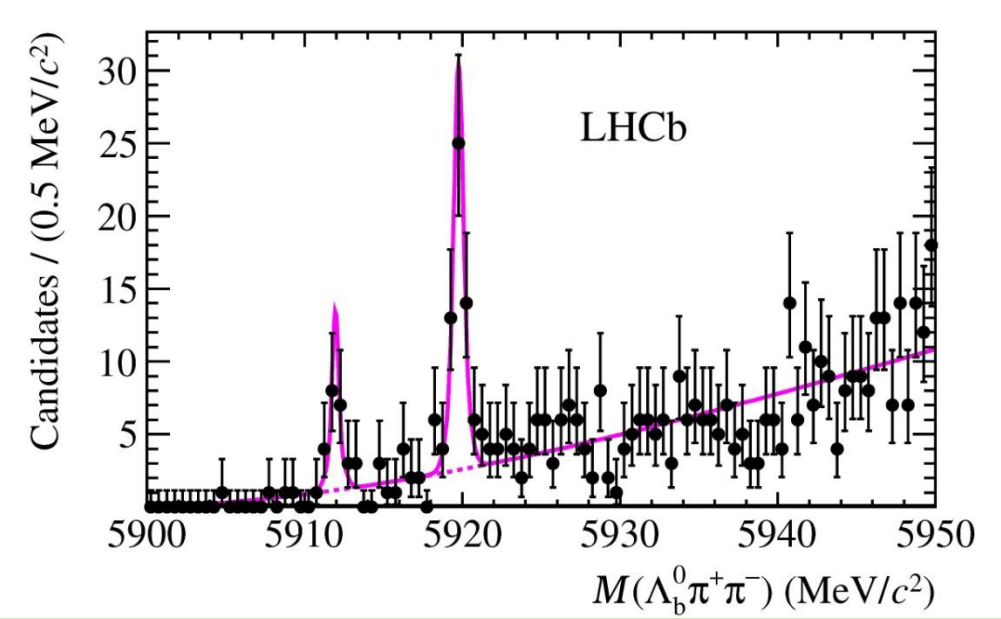
Роздільна здатність по інваріантній масі : ~(10-20) MeV/c^2

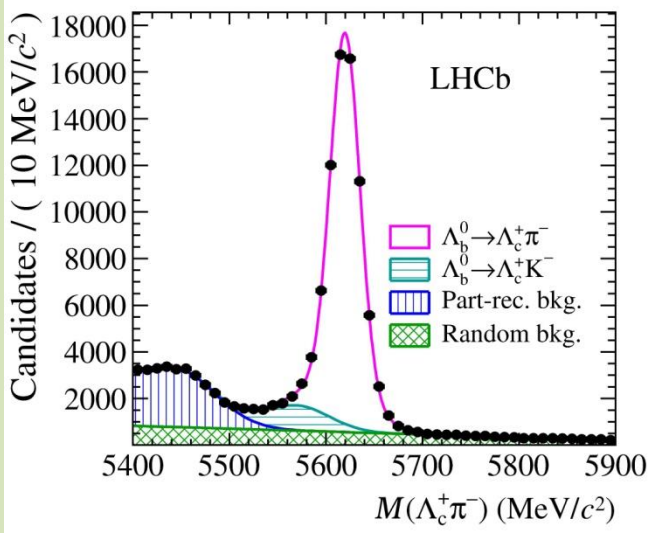
Висока енергія зіткнень ядер на LHC призводить до зростання інтенсивності генерації важких адронів на кілька порядків у порівнянні із лептонними колайдерами.

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

Spectroscopy - a perfect tool
for searching "NEW".

Спостереження збуджених станів баріонів Λ_b





Λ_b reconstructed in the $\Lambda_c^+\pi^-$ invariant mass spectrum.

Phys.Rev.Lett.109(2012)172003

Excited states are known for the Λ and Λ_c .
Two excited states of Λ_b (at 5911.95 and 5919.76 MeV/c^2) were observed for the first time in the Λ_b^0 $\pi^+\pi^-$ mass- spectrum. Uncertaintes are less than 1 MeV/^{2}c.

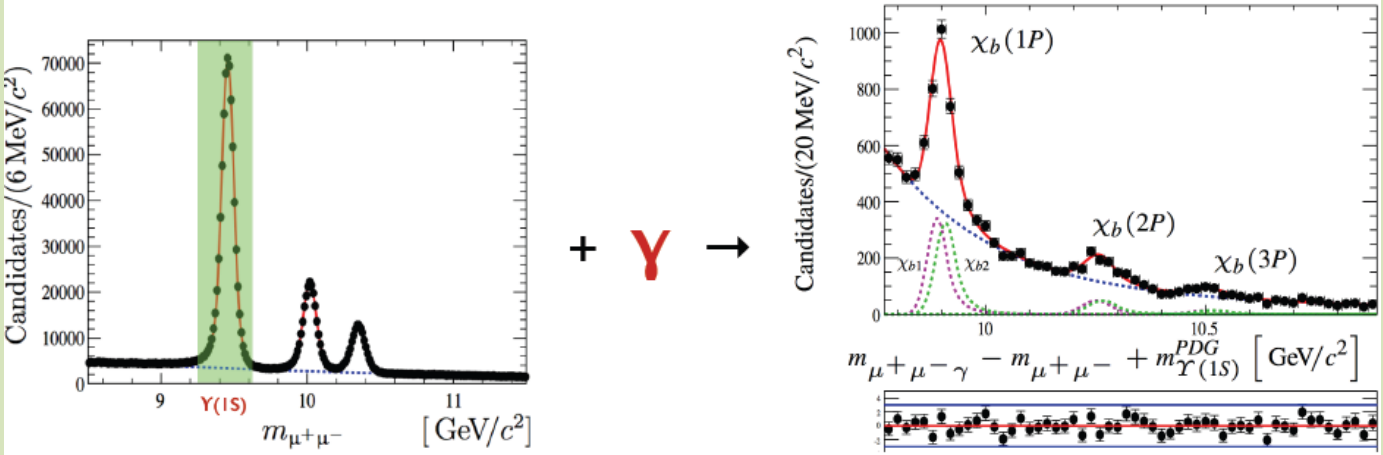
Discrepancies with theories reach 20 – 30 MeV/c^2

Спектроскопія важких ароматів

LHCb-PAPER-2014-031

$\chi_{b's}$ production & decays/2

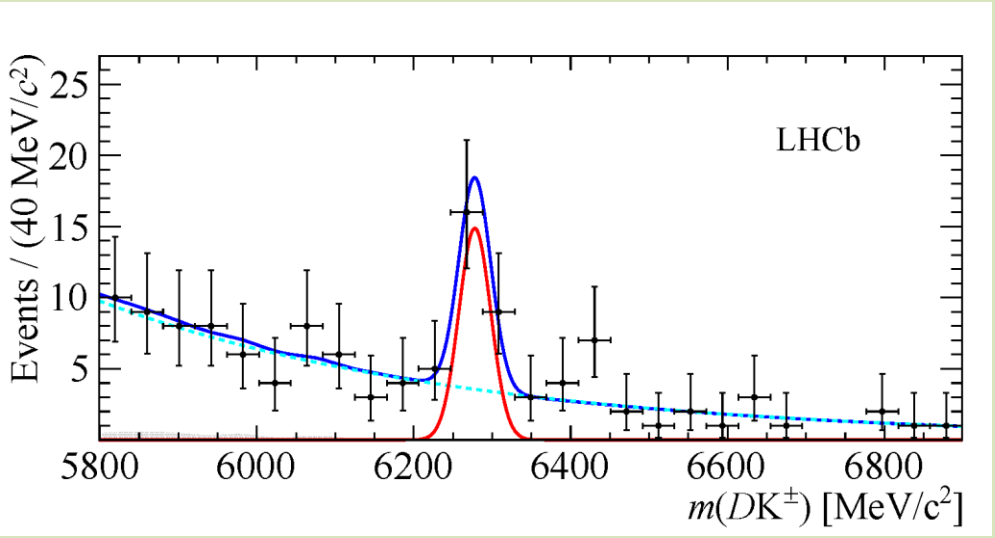
- the « method » :



- **calorimetric** γ : « high » stat. / « low » resol.
- b_0 neglected, b_1 and b_2 fitted simultaneously (assume Δm_{12} and N_{b2}/N_{b1})
- main systematics : fit model and γ reconstruction
- analysis with **converted** γ (« low » stat. / « high » resol.) coming soon …

P. Ghez BEACH 2014 14

Спектроскопія – довершене знаряддя досліджень та пошуку «Нового»



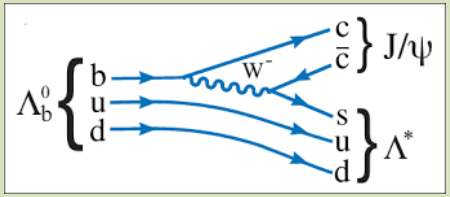
Новий результат LHCb , представлений на Нараді «СКМ»
Mumbai, India. 1 грудня 2016 р.
http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/Welcome.html#CKM2016

B_c^+ - єдиний мезон, що складається з двох важких кварків з різним ароматом:
b- (красивий) та
c- (чарівний) - кварк.

Знайдений сигнал – несподіванка – набагато перевищує теоретичні передбачення !

Детальні дослідження мають встановити Причину – неадекватні розрахунки, чи НФ – сигнал ?

Порівняння часів життя B-мезона та Λ_b- баріона



HQE-теорія [NPB, 483, 339, 1997] :

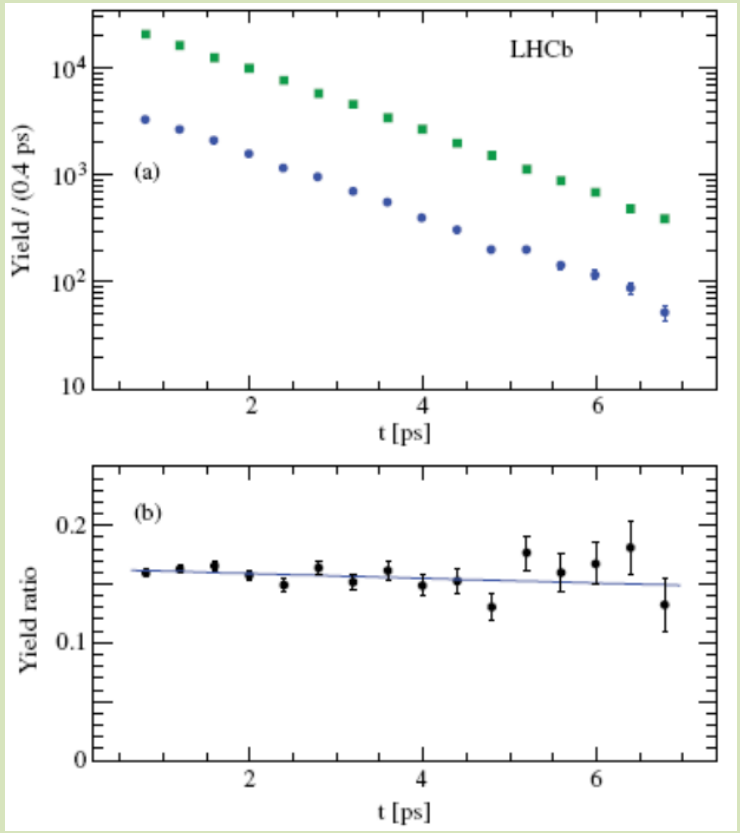
- **Важкий b-кварк визначатиме час життя в обох зразках матерії з *b кварком !***
- **Тобто час життя B-мезона та Λ_b- баріона має є бути однаковим.**

- **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:**

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

Підтвердження HQE – теорії.



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 B – 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

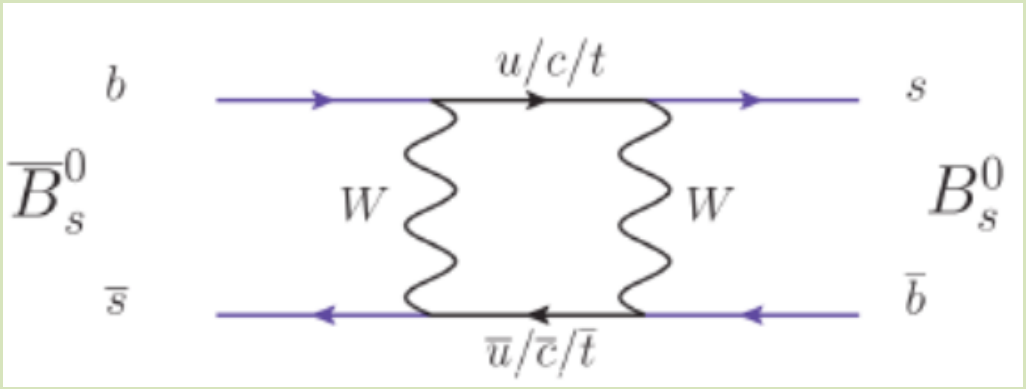
CP Violation (CPV) – потенціальне джерело Нової Фізики:

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

Можливі три шляхи для порушення CP симетрії:

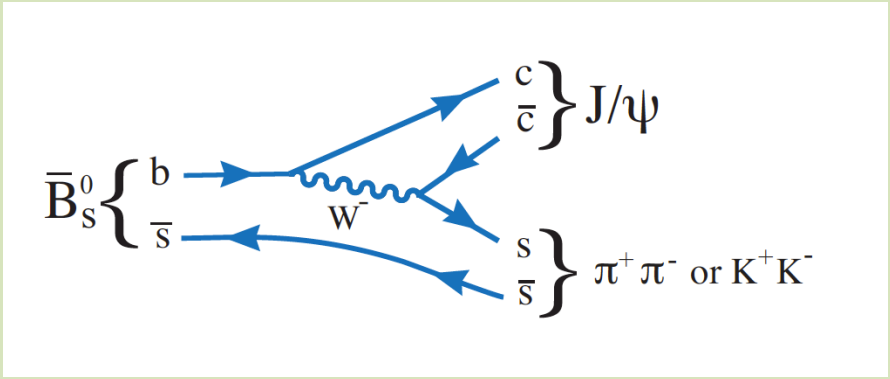
- **Прямий – в розпадах**
- **Непрямий – за рахунок «змішування»**
- **Через інтерференцію цих двох процесів**

B – mesons mixing (oscillations)

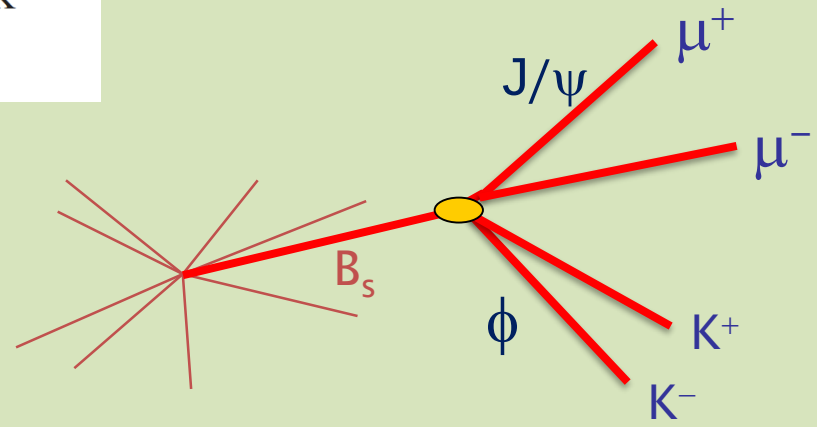


«Змішування» може протікати також через
Петльові діаграми за участю важких проміжних – > Нова Фізика !

Порушення CP-парності в розпадах важких мезонів



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



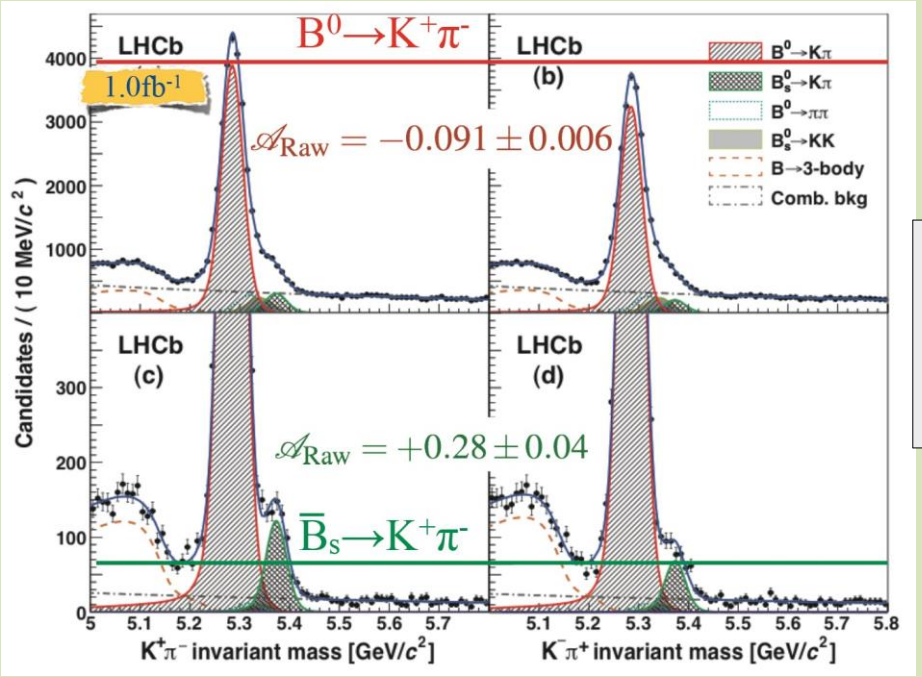
Порушення CP симетрії в прямих розпадах Красивих мезонів

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.

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

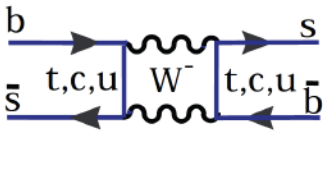
Перше спостереження СЗ – порушення в розпадах B^0_s мезонів.

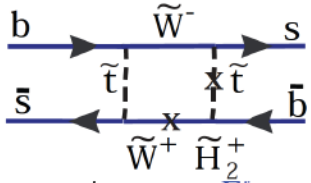
Результати узгоджуються із розрахунками Стандартної Моделі

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

Порушення CP симетрії через змішування в розпадах B мезонів

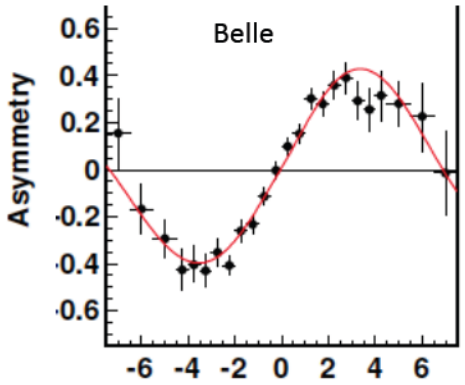
B mixing and CP violation





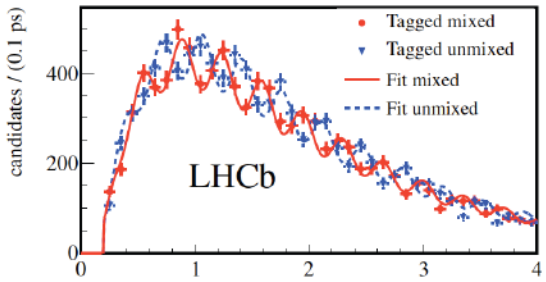
Time evolution of Flavor Eigenstates

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



PDG 2012

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



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

M. Artuso, DPF 2013, August 17, 2013 8

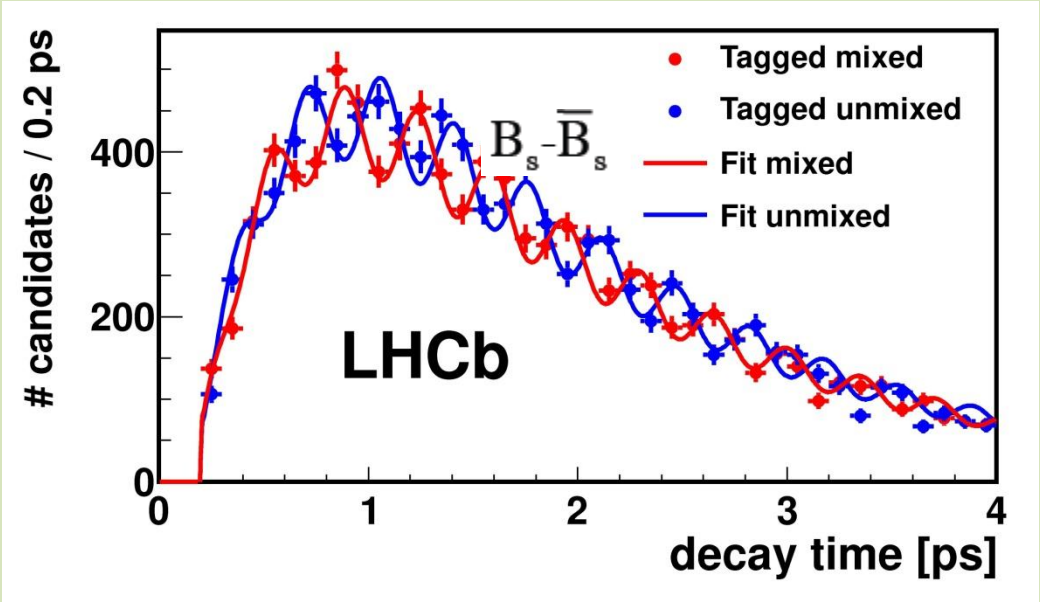
Спостереження еволюції подій за участю частинок та анти-частинок може надати сигнал про Нову фізику.

Частота осциляцій B_s мезонів

LHCb вимірює еволюцію аромату (змішування) з точністю 45 fs, завдяки реконструкції вторинних вершин розпаду В 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 $D^+_s\pi^-$.

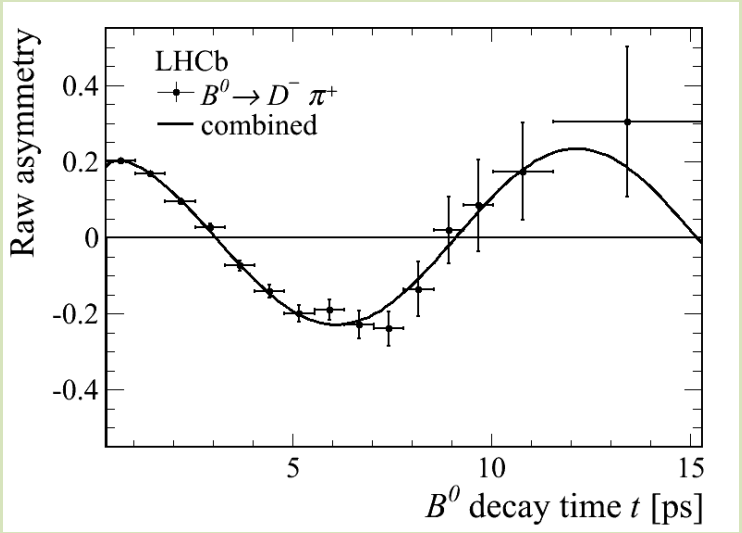


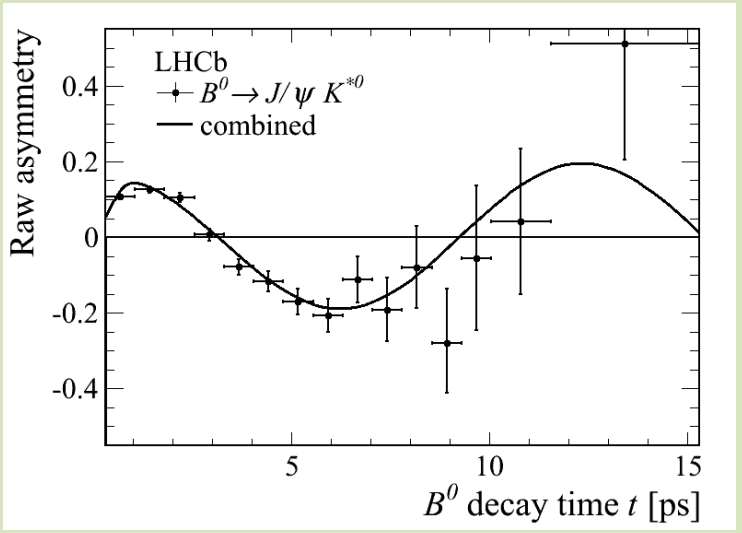
Вилучена частота осциляцій становить :

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

Evolution of Events in Time – signature for "NEW"

B^0 oscillations observed in $D^+\pi^-$ and $J/\psi K^{*0}$ decays





LHCb-PAPER-2013-006
arXiv.1304.4741
PLB.719(2013)318

Combined for two decay channels

$$\Delta m_d = 0.5156 \pm 0.0051 \pm 0.0033\ ps^{-1}$$

The most precise measurement
of the oscillation frequency for B^0 mesons.

Порушення CP симетрії через B_s змішування

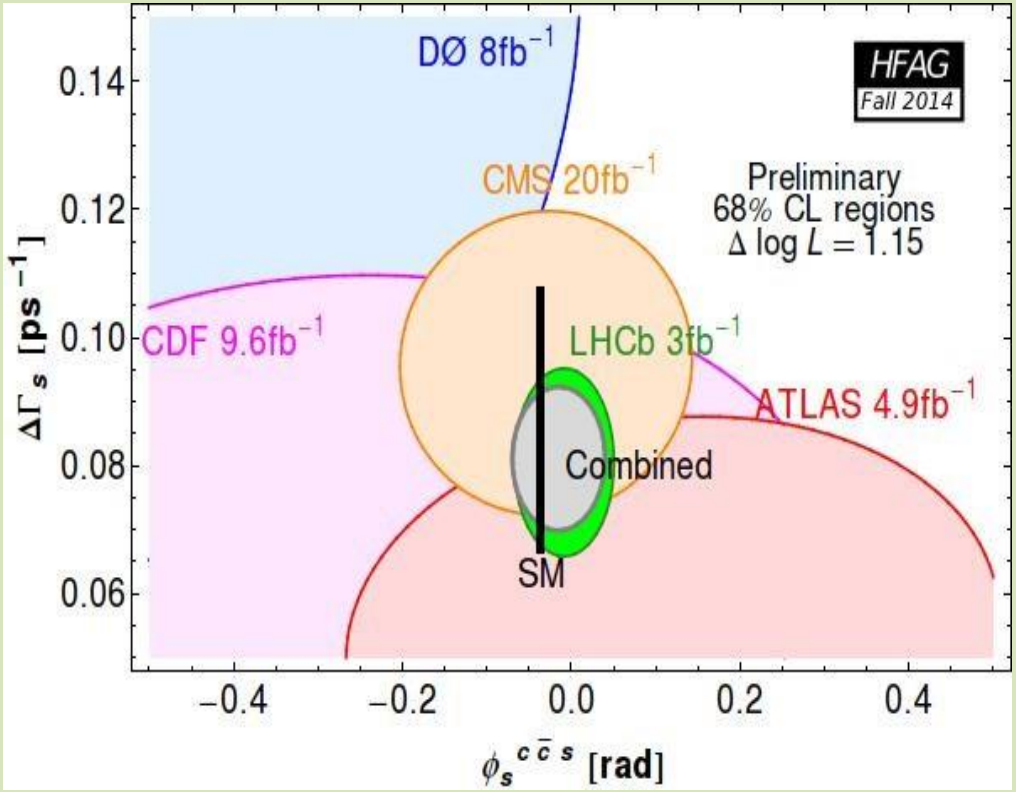
Time dependent decay studies for measuring CP violating parameters in B_s mixing:

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

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

CP violating phase Φ_s may include new physics …

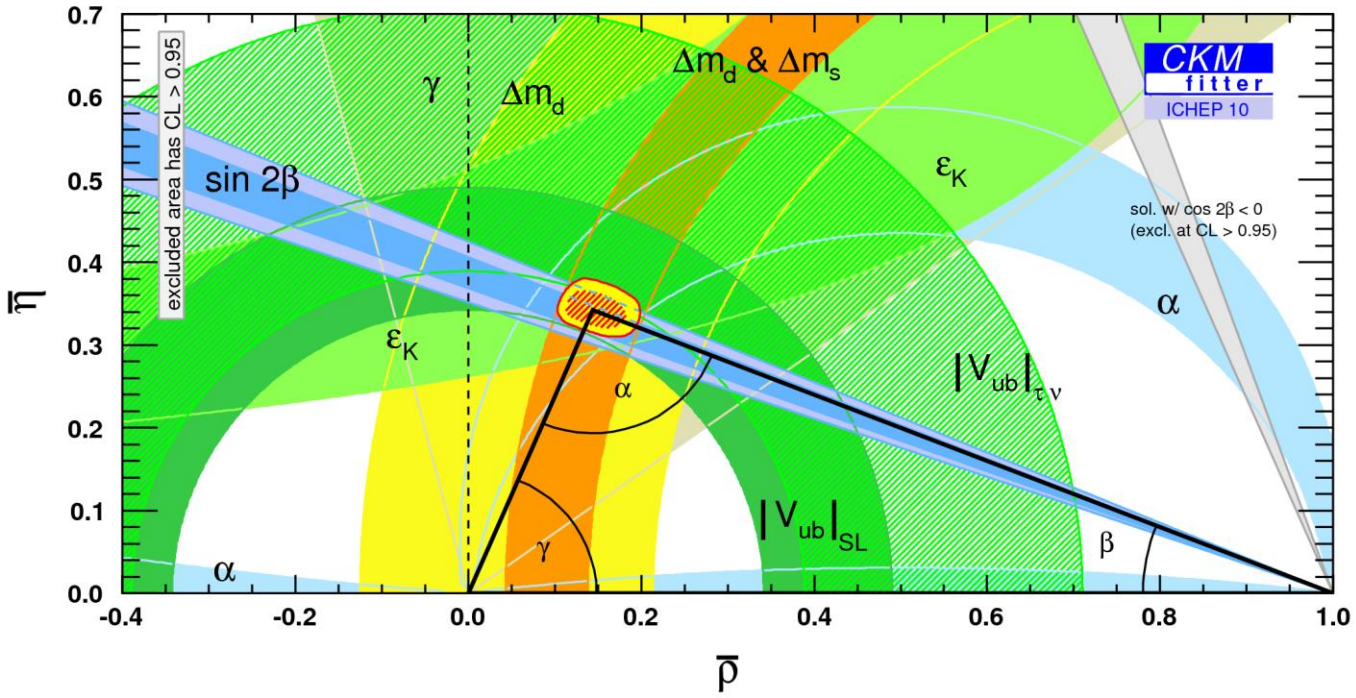
Combined for two processes results are compatible with SM.



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

Φ_s = (70 +/- 68 +/- 8) mrad

Трикутник унітарності та експеримент

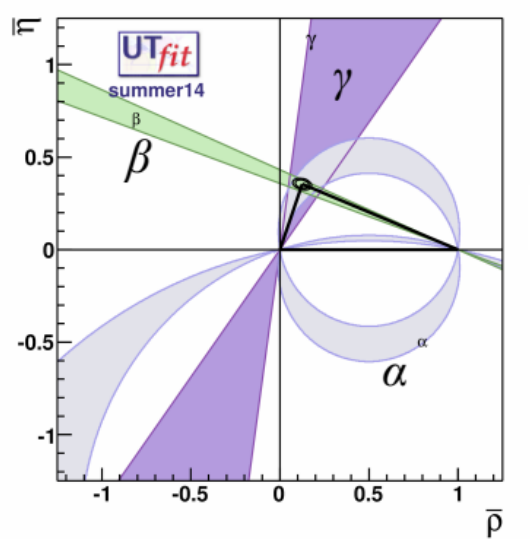


Матричні елементи СКМ матриці вимірюють експериментально з розпадів K, D та B мезонів. Співвідношення між матричними елементами – сторони та кути трикутника.

α = 91.0 [+7.5 -5.6] (±2σ)
β = 21.8 [+1.9 -1.4] (±2σ)
γ = 67.2 [+5.4 -7.4] (±2σ)

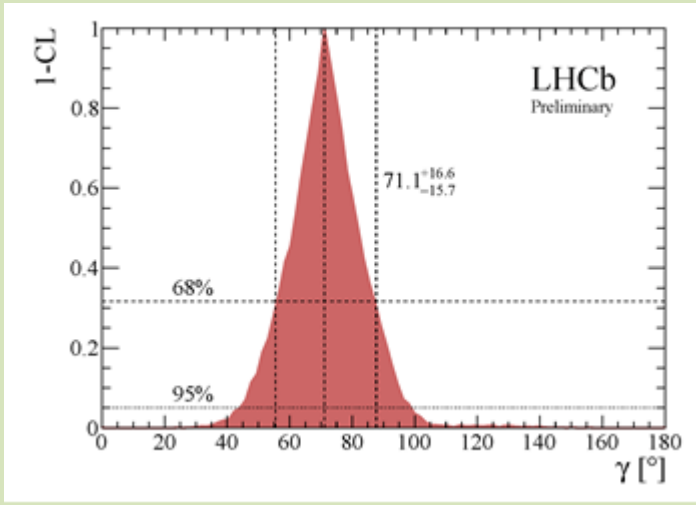
LHCb: CKM кути трикутника унітарності.

ϕ_3 (γ) from $B^{\pm} \to Dh^{\pm}$ decays



$$\gamma = \arg\left(\frac{-V_{ud}V_{ub}^{*}}{V_{cd}V_{cb}^{*}}\right)$$

LHCB-PAPER-2013-020.
PLB, 726, 151 (2013)



The $B^{\pm} \to DK$ and $B^{\pm} \to D\pi$ decays were analyzed :
D decays: KK, $\pi\pi$, $K^0_S\pi\pi$, $K^0_S KK$ or $K\pi\pi\pi$.

Example: $\gamma = (71.1^{+16.6}_{-15.7})°$ for $B^{\pm} \to DK$ decay (68% CL).

- Least well determined Unitarity Triangle angle:
  - BaBar: $(69^{+17}_{-16})°$ [Phys. Rev. D 87 (2013) 052015]
  - Belle: $(68^{+15}_{-14})°$ [arXiv:1301.2033]
  - LHCb: $(67 \pm 12)°$ [LHCb-CONF-2013-006]

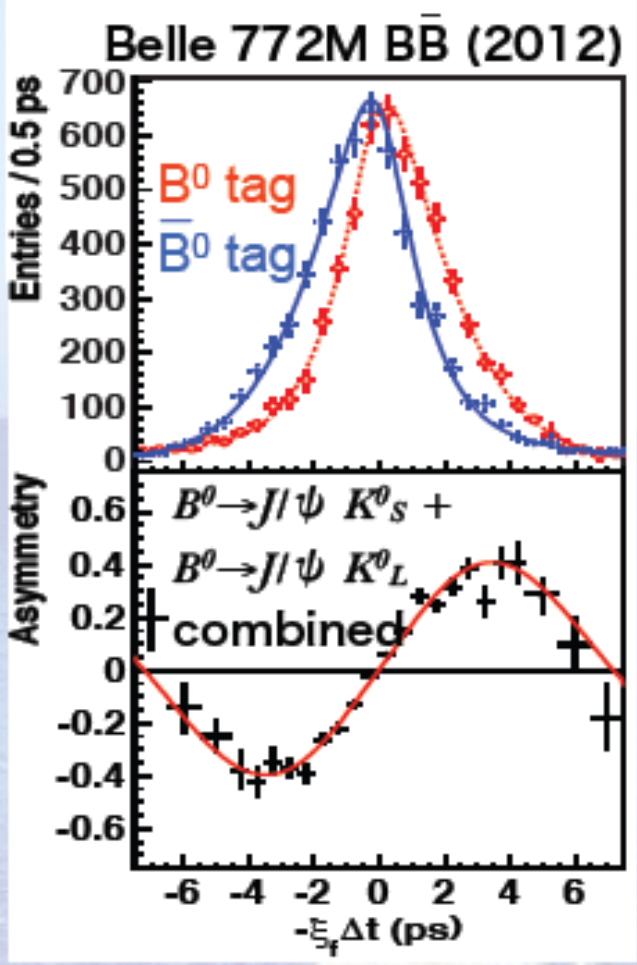
Results combined for all specified channels:

$55.4 < \gamma < 82.3$ (68 % CL)

Best fit value $\gamma = 72.6^{0}$

CKM angles in the Unitarity Triangle.

Angle ϕ_1 (β)



$$\mathcal{A}_{CP} = \frac{\mathcal{P}(\overline{B^0}(\Delta t) \to f_{CP}) - \mathcal{P}(B^0(\Delta t) \to f_{CP})}{\mathcal{P}(\overline{B^0}(\Delta t) \to f_{CP}) + \mathcal{P}(B^0(\Delta t) \to f_{CP})}$$

$$= S \sin\Delta m\Delta t + A \cos\Delta m\Delta t$$

mixing induced CPV — direct CPV

Δm: mass difference of eigenstates

Δt: decay time difference of eigenstates

BELLE

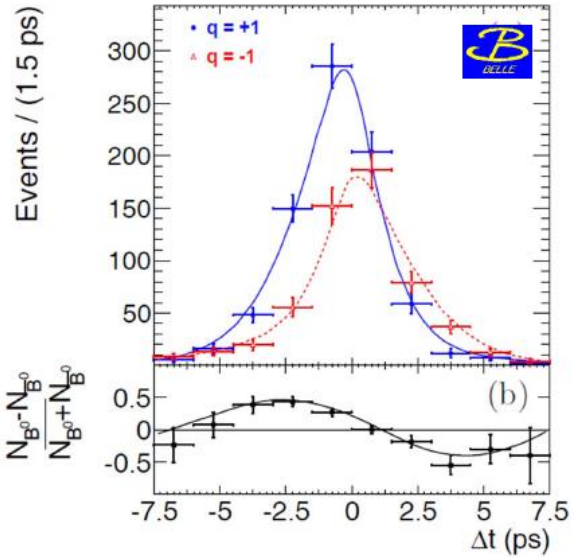
$\sin 2\phi_1 = 0.667 \pm 0.023 \pm 0.012$

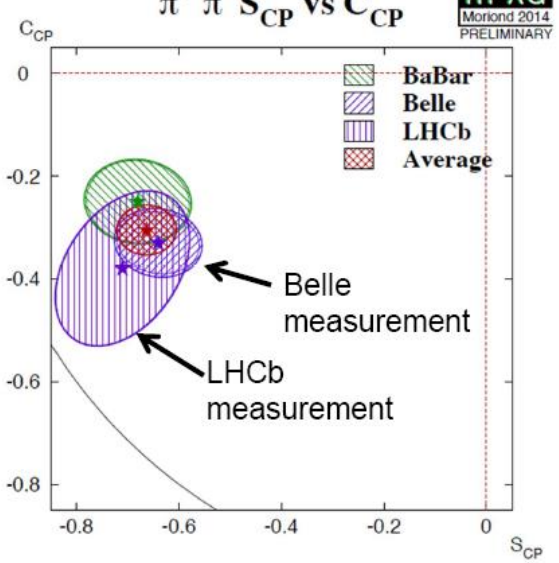
$A_f = 0.006 \pm 0.016 \pm 0.012$

PRL108,171802(2012)

CKM angles in the Unitarity Triangle.

Angle ϕ_2 (α) . B^0 -> $\pi^+\pi^-$





PRD 88, 092003 (2013)

(most precise measurement so far)

$$\mathcal{A}_{CP} = +0.33 \pm 0.08 \pm 0.03$$
$$\mathcal{S}_{CP} = -0.64 \pm 0.06 \pm 0.03$$

C. Kiesling, 13th International Workshop on Meson Production, Properties and Interactions, Krakow, May 29 - June 3, 2014 30

$\phi_2 \in [85.0°, 148.0°]$ (Belle results only)

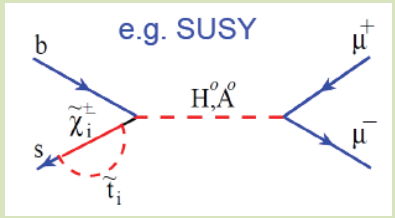
Global fit: ϕ_2 (α) = (85.4 +/- 4) ^{0}

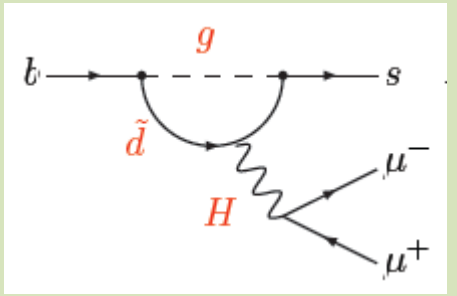
LHCb: рідкісні моди розпаду

$B^0_s \to \mu^+\mu^-$ and $B^0 \to \mu^+\mu^-$

Standard Model - FCNC and helicity suppressed processes with pure leptonic final states , *PRL 112 101801 (2014)* :

- ❑ Br $(B^0_s \to \mu^+\mu^-) = (3.65 \pm 0.23) \times 10^{-9}$
- ❑ Br $(B^0 \to \mu^+\mu^-) = (1.1 \pm 0.10) \times 10^{-10}$





-> **If in experiment different – evidence for New Physics.**

Results: 1. $B^0_s \to \mu^+\mu^-$

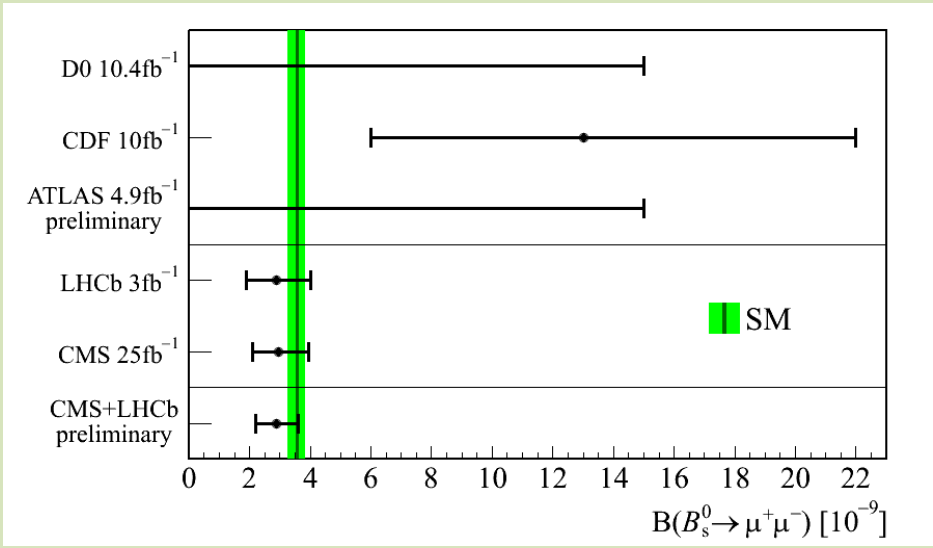
First observation LHCb *(PRL 111, 101805 (2013))*
Combined LHCb & CMS (2014)
(preliminary) (2.9 +/- 0.7) x 10^{-9}

LHCb-PAPER-2014-049
CMS-XXX-XXX-14-XXX
August 27, 2014

2. $B^0 \to \mu^+\mu^-$

$$\mathcal{B}(B^0 \to \mu^+\mu^-) = \left(3.6\,^{+1.6}_{-1.4}\right) \times 10^{-10}$$

Results consistent with the SM



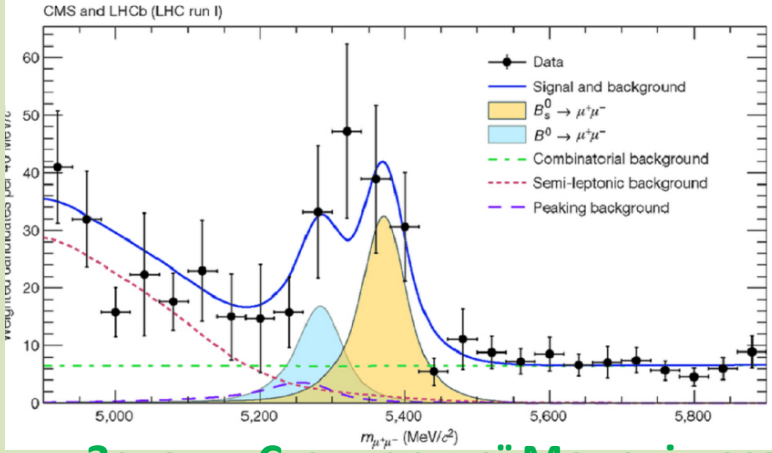
New Physics - the next digit of data accuracy ?

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.

LHCb: Рідкісні моди розпаду. Кутові розподіли

$B^0 \to K^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$.

arXiv:1308.1707 (2013)

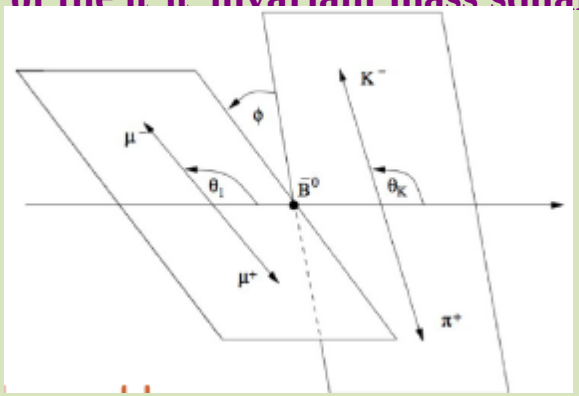
$B^0 \to K^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$ - FCNC process via loop diagram in SM.

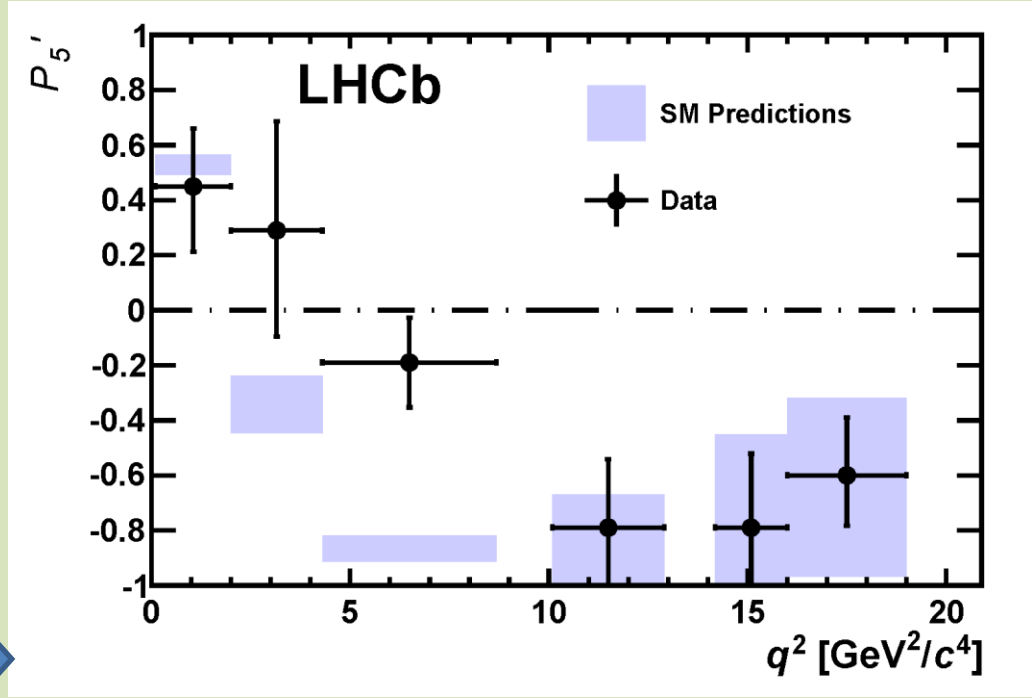
- Possibility of modification of angular distributions due to contribution of new particles.

Descotes-Genon, JMatias, Virto: arXiv:1307.5683 (2013)

In total, P_{1-8} parameters determining angular distribution of final state products have been measured.

The P_5' observable is shown as a function of the $\mu^+\mu^-$ invariant mass squared q^2.



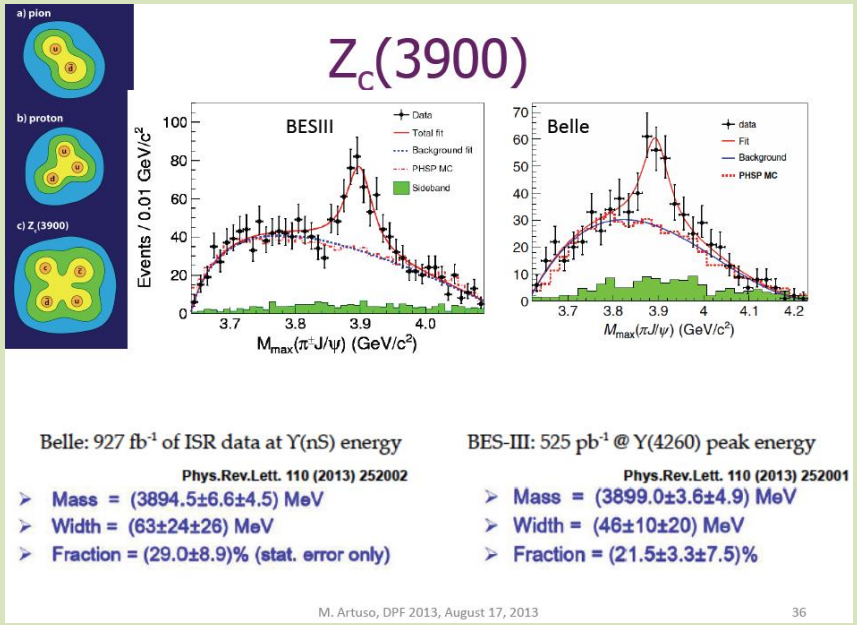


J. H EP. 08 (2013) 131

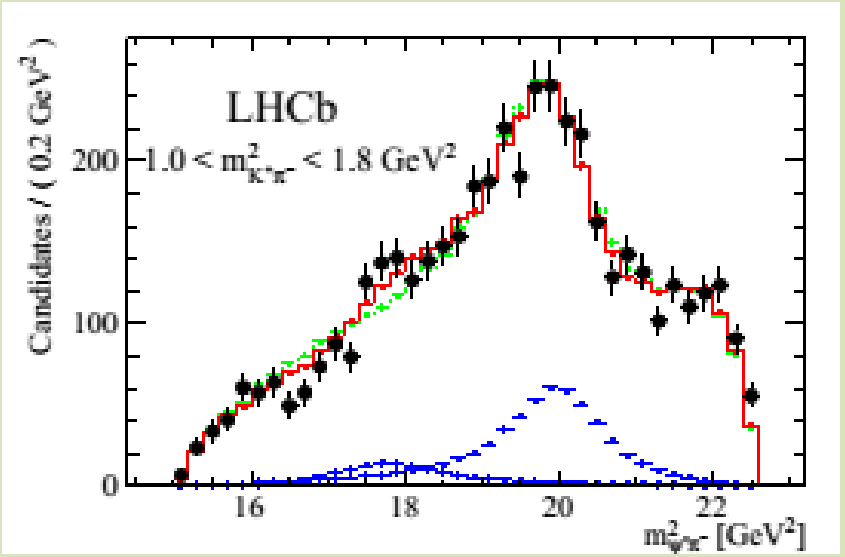
3.7σ deviation of data above the Standard Model prediction is observed at $4.3 < q^2 < 8.68$ GeV^2/c^4.

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

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



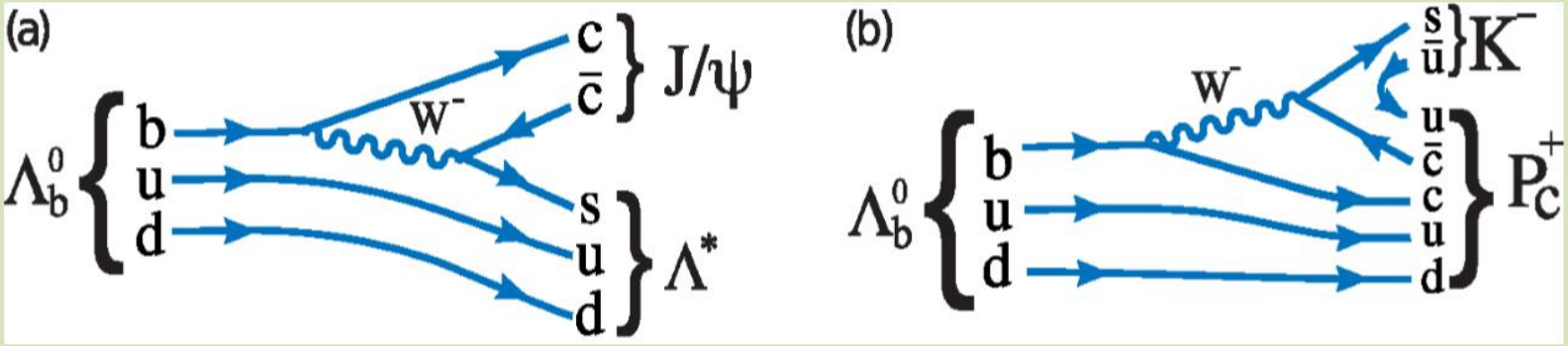
Z(4430) - $c\bar{c}u\bar{d}$



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

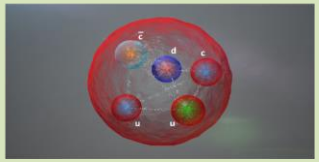


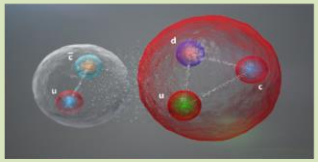
expected **discovered**

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

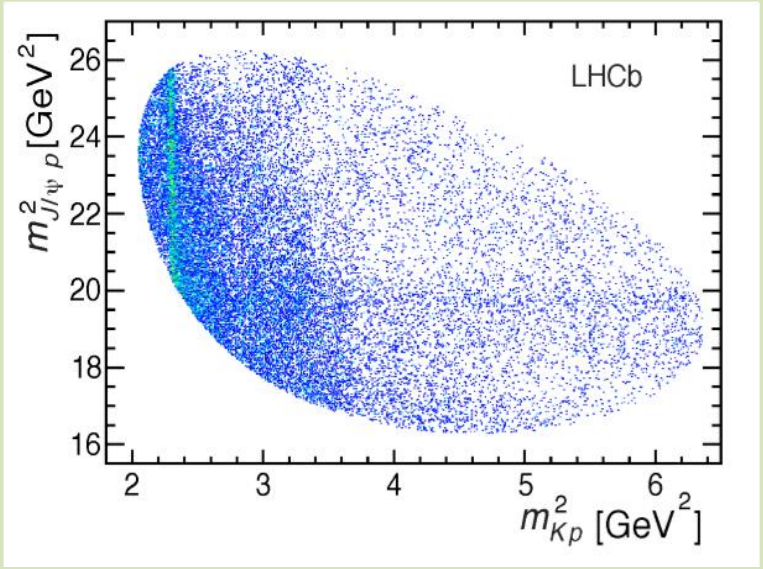
fit fractions	$8.4 \pm 0.7 \pm 4.2\%$	$4.1 \pm 0.5 \pm 1.1\%$
best fit J^P	$3/2$	$5/2^+$

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





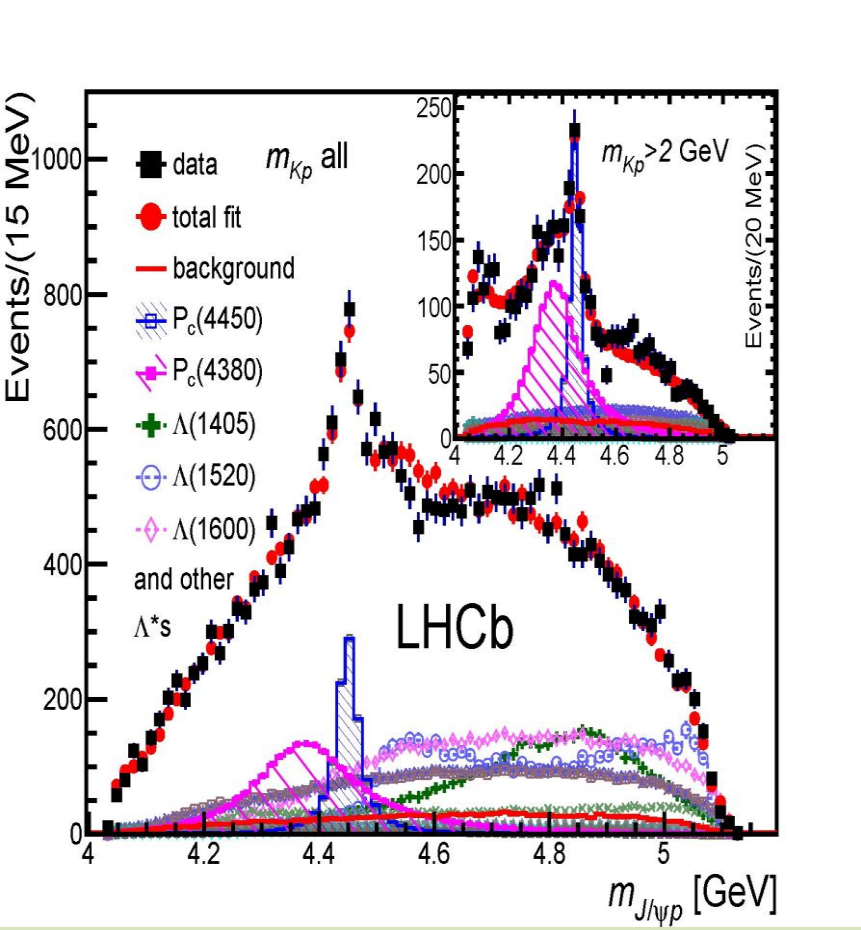
e.g. $\overline{D}^*\Sigma_c$ $\overline{D}^*\Sigma_c^*$ (arXiv:1507.04249)

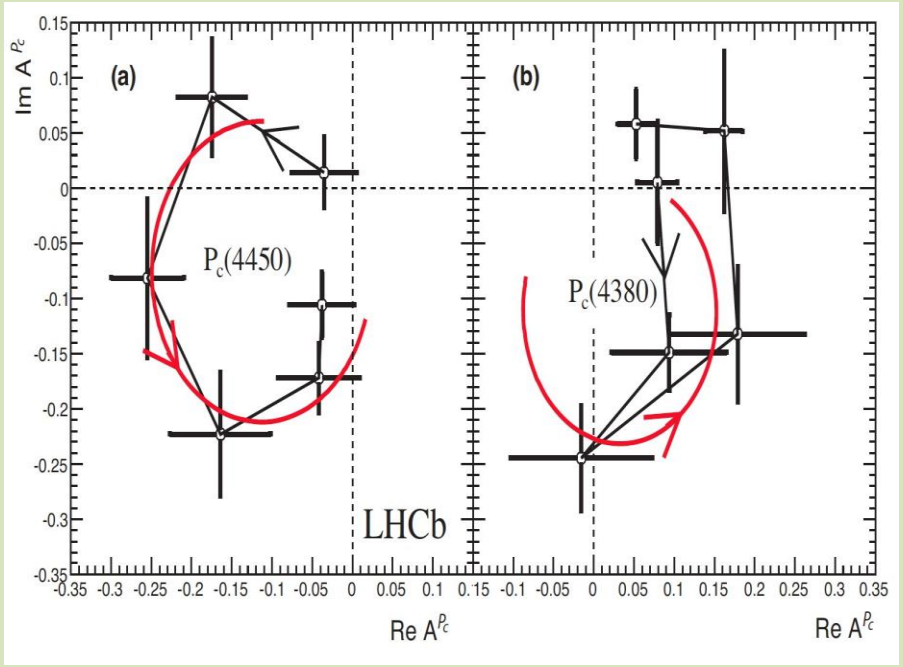


arXiv:1507.03414

LHCb-2015.

Відкриття пента-кваркової стуктури





Підтвердження спостереження пента-кваркових резонансів за діаграмою Агранда

Виміряний розподіл
по інваріантній масі J/Psi та протона

LHCb in 2015

Guy Wilkinson. Closing remarks. LHCb week, Dec 2015

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

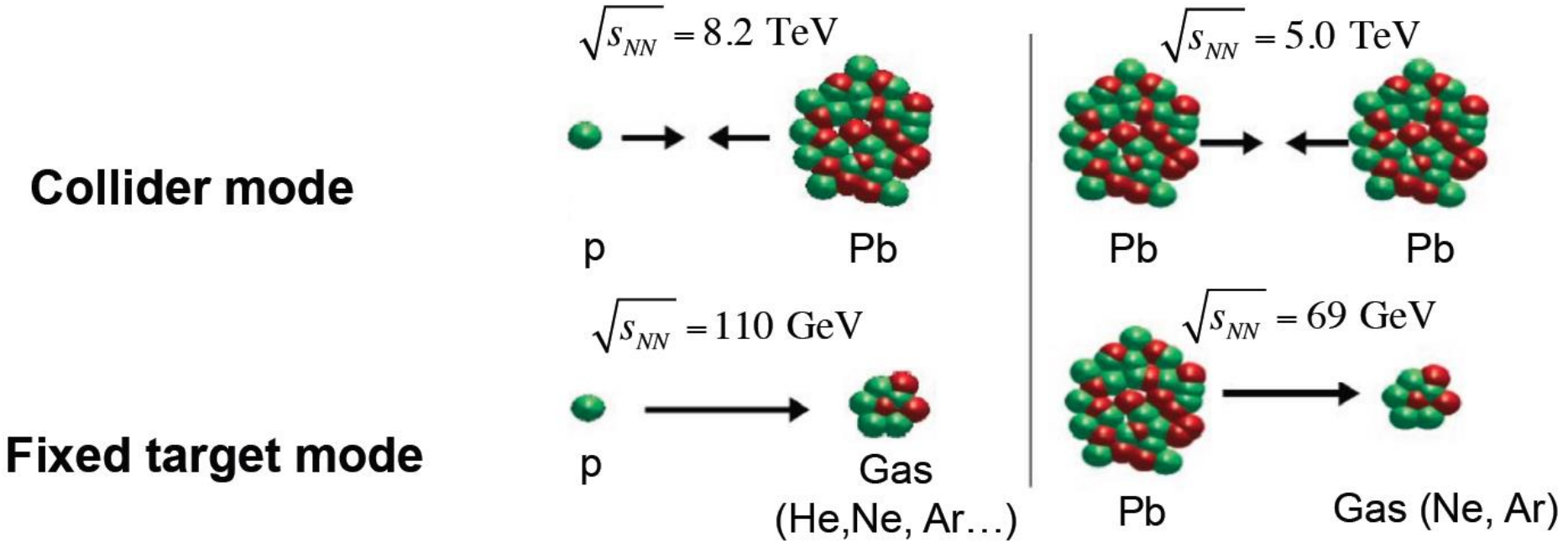
Criteria:

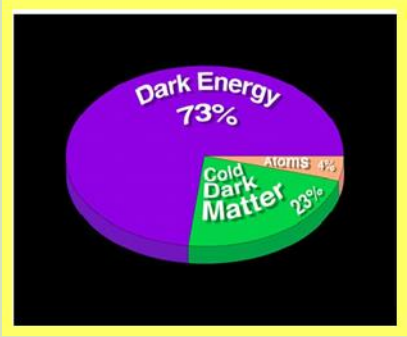
- **Fundamental importance of research**
- **Significant advance in knowledge**
- **Strong connection between theory & expt**
- **General interest to all physicists**

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 !**

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

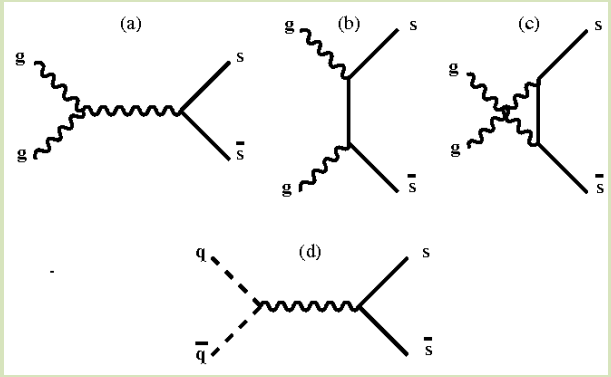




Властивості взаємодій в атто-метровому просторі

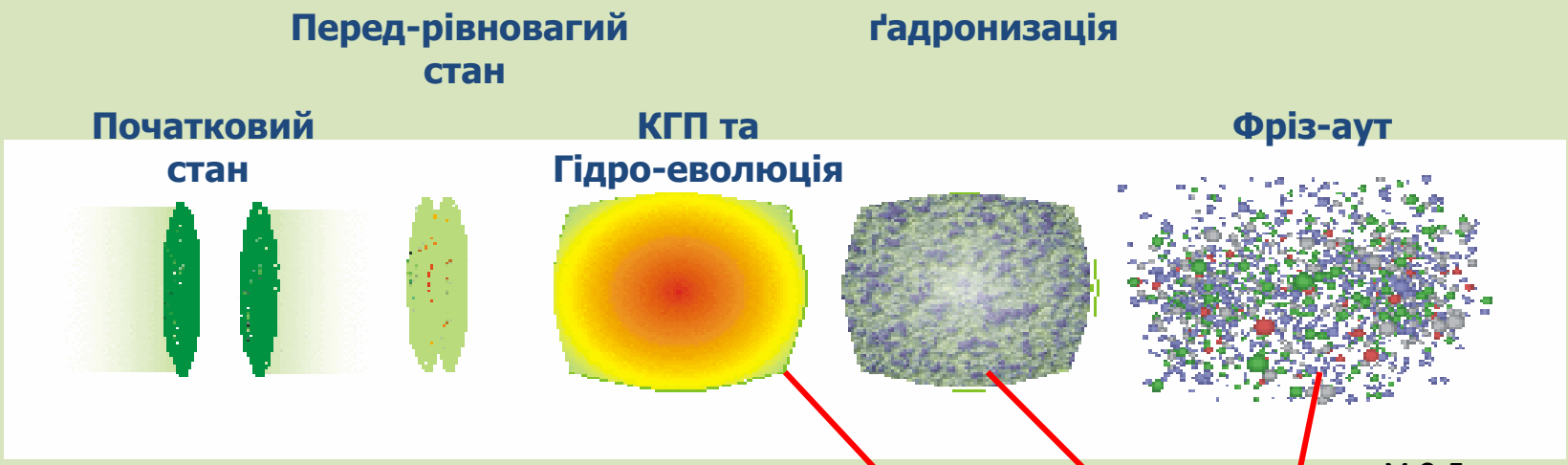
Властивості взаємодій в атто-метровому просторі визначаються кварк-глюонними ступенями свободи.

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).

Модель еволюції процесу ядро-ядерних зіткнень



Спостережувані величини

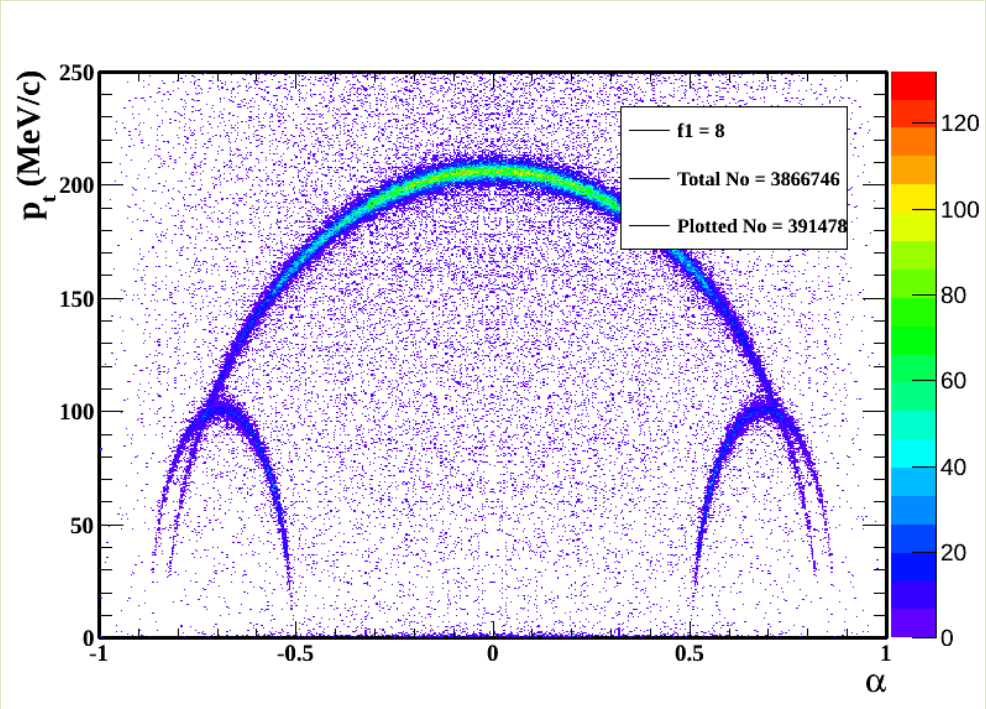
Фазовий перехід до деконфайнмента

- Функції збудження та потоки дивних частинок (K, Λ, Ξ, Σ, Ω)
- Функції збудження та потоки частинок, які містять c-кварк (J/ψ, ψ′, Λ_c, D^0, D□) або b-кварк

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.

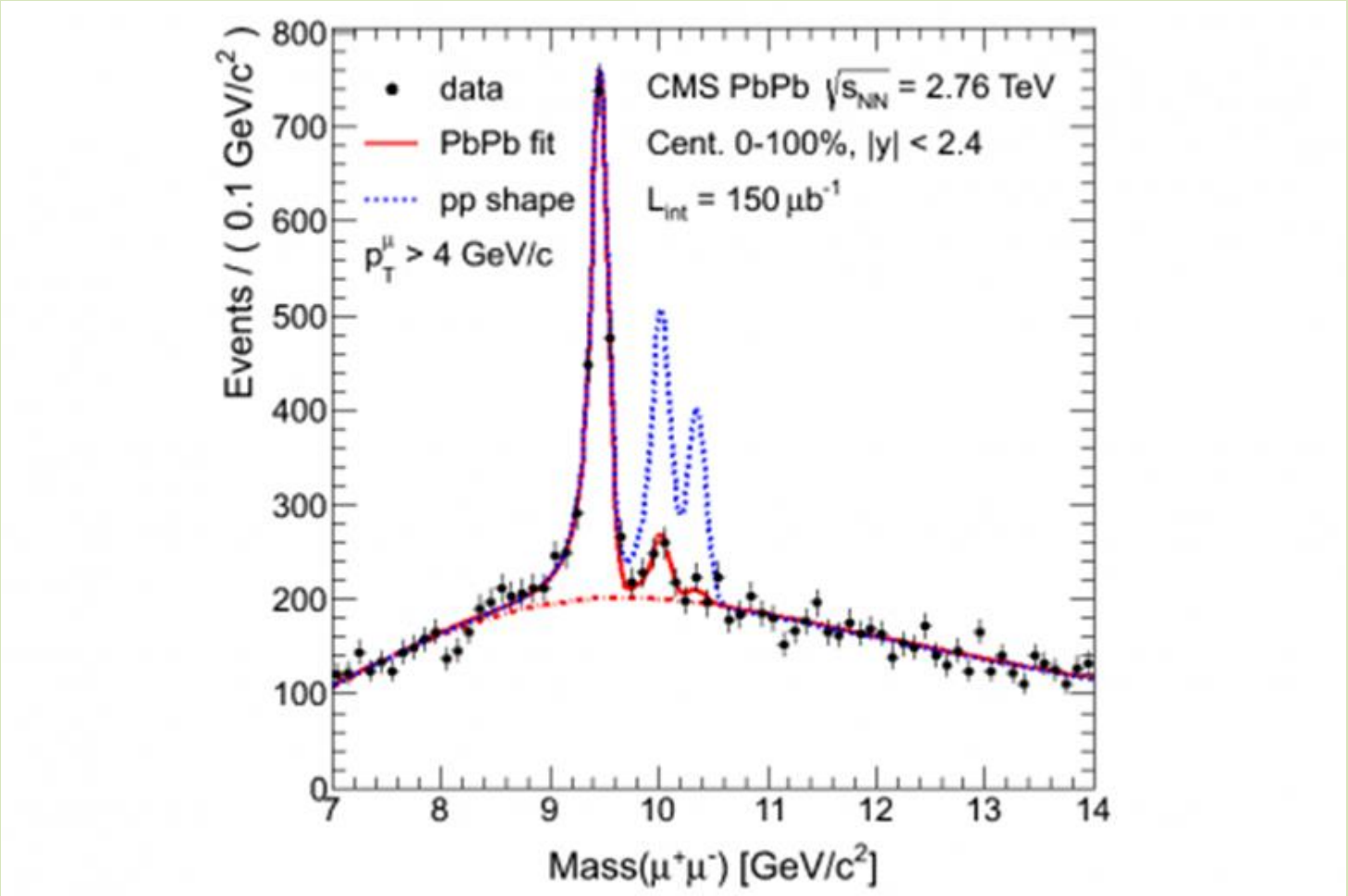


Розподіл подій з протон-ядерних зіткнень за діаграмою Арментероса – Подолянського.

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

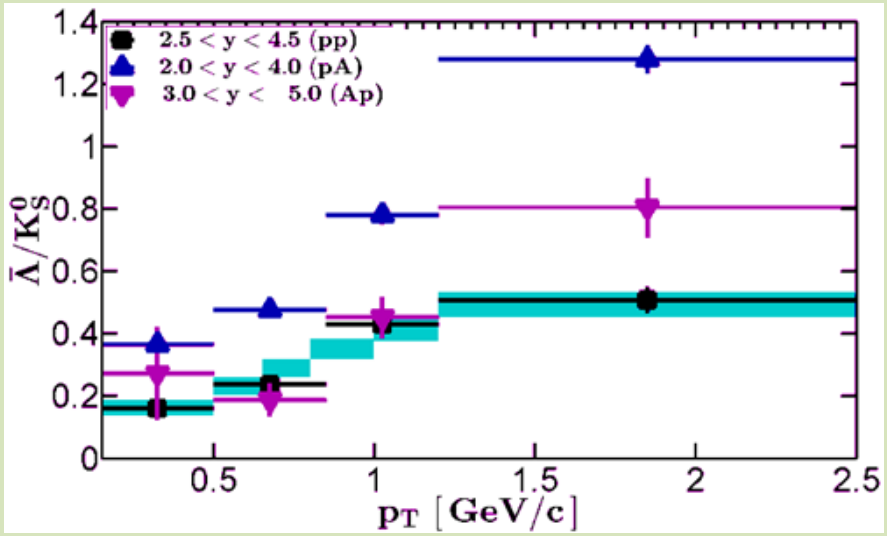
Приклад ролі ядерного середовища

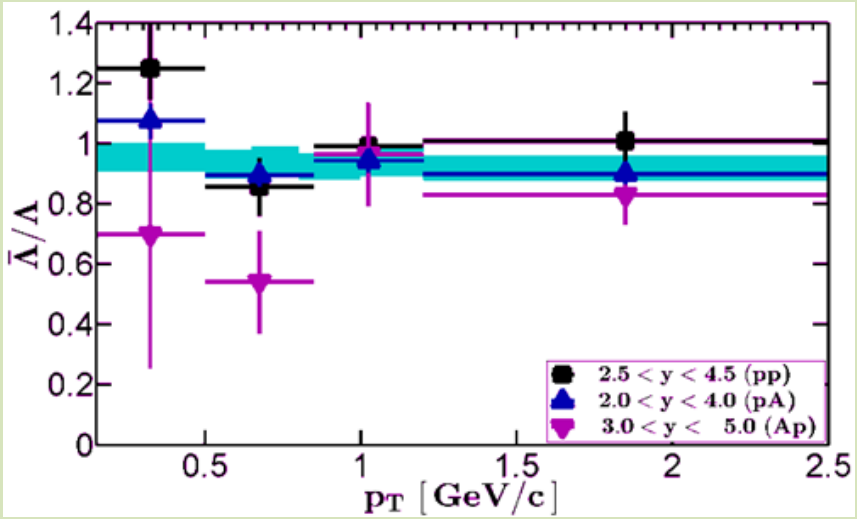
в ядро-ядерних зіткненнях при високих енергіях.



Аналіз фізичних даних LHCb - 2015

Ratios of production cross-sections



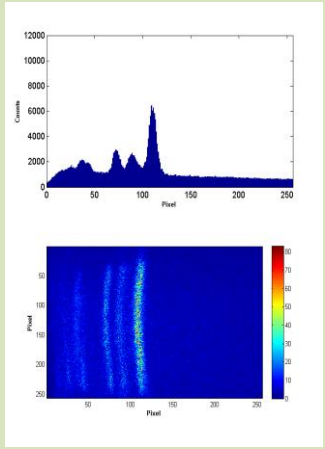


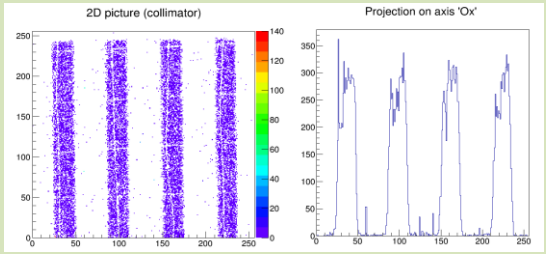
Відношення перерізів утворення $\bar{\Lambda}$-баріонів до K^0_S-мезонів (ліворуч) та Λ-баріонів (праворуч) у p-p (чорні квадрати), p-A (сині трикутники з вершиною внизу) та A-p (пурпурні трикутники з вершиною вгорі).

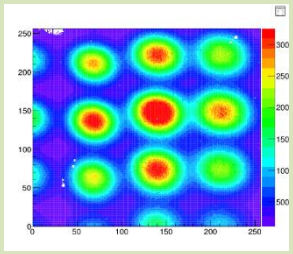
Смарагдовий колір - виміри для p-p зіткнень при 7 ТеВ, опубліковані раніше Колаборацією LHCb [4].

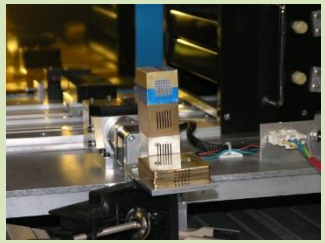
Застосування мікродетекторів в інших галузях наукових досліджень

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

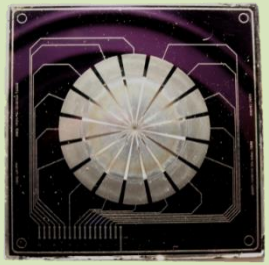


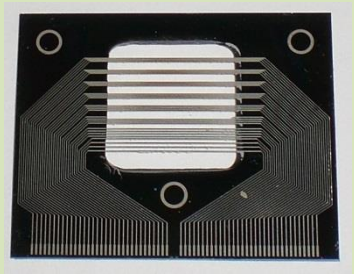




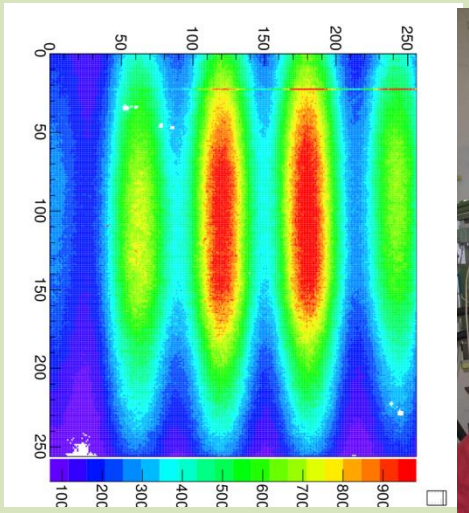


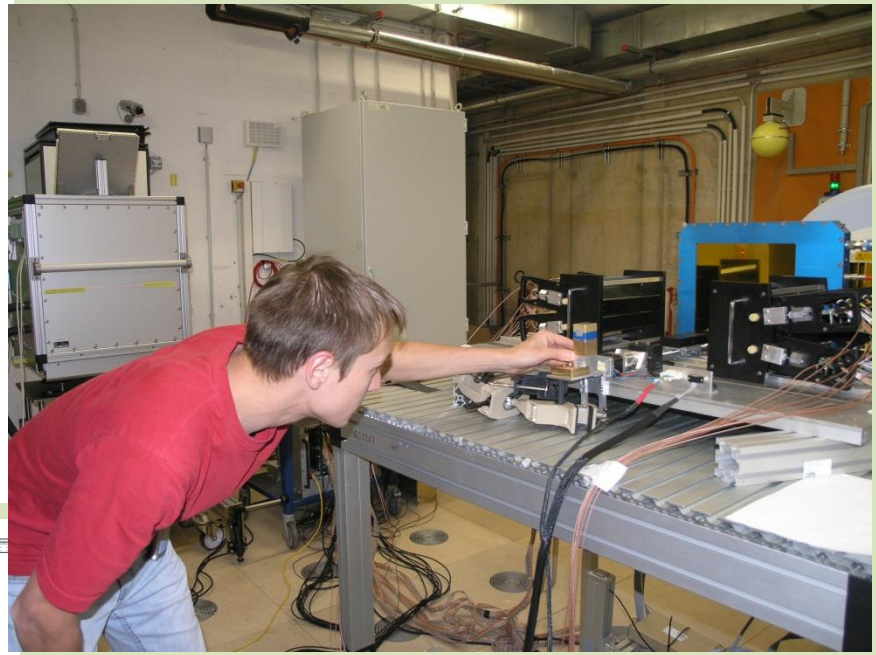
- **Перспективи використання металевих мікростріпових детекторів (розробка ІЯД НАНУ):**
  - **З доповіді на Семінарі «Детекторні системи для фізики високих енергій», в рамках діяльності Міжнародної асоційованої лабораторії LIA IDEATE, 15 - 16 жовтня 2015 р. м. Орсе (Франція).**
  - **Спільний проект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

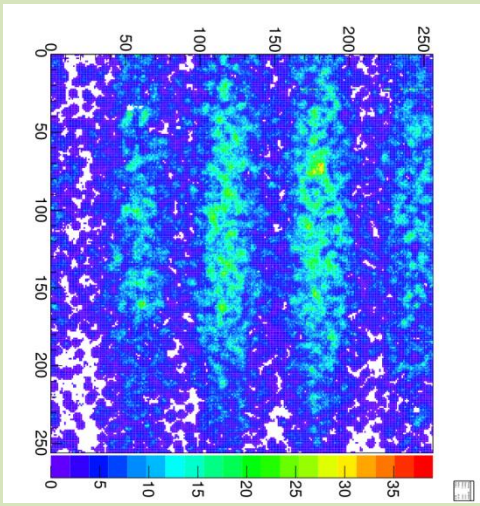


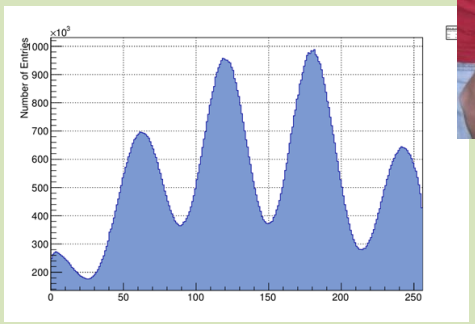


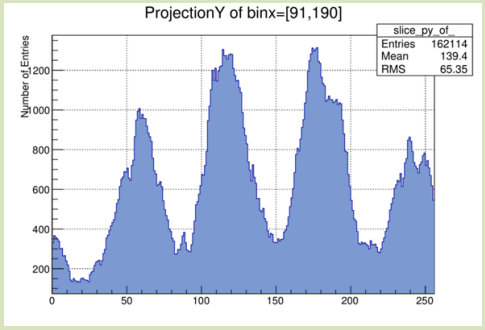
Зображення фракціонованого пучка іонів вуглецю з енергією 250 МеВ/нуклон. HIT (Heidelberg), June 2014.











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).

LHCb – Плани.

- **2015-2017 – Фізичні дослідження при енергії 13 ТеВ**

- **2018-2019 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.**

- **2019 – 2020 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.**

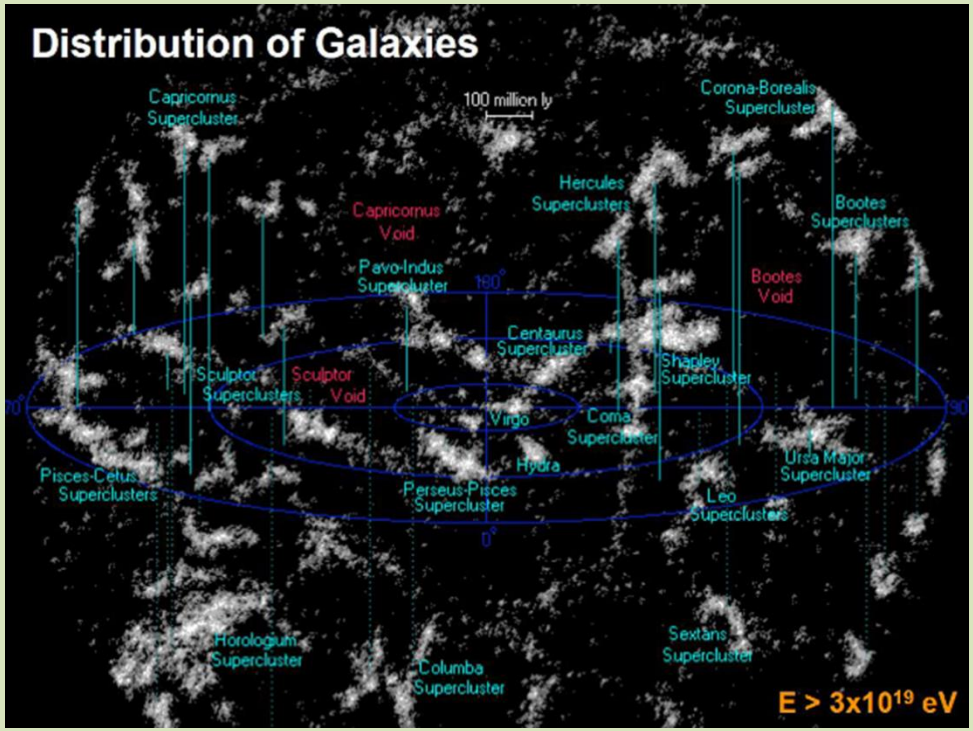
- **Новий величезний енергетичний постір, відкритий на LHC, безумовно багатий на нові явища. Мабуть для їх відкриття потрібно винайти нові спостережувані величини – достойна задача для фізиків – дослідників, в тому числі з України !**

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.**
- **21 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
  - Державному фонду фундаментальних досліджень

Дякую за увагу!

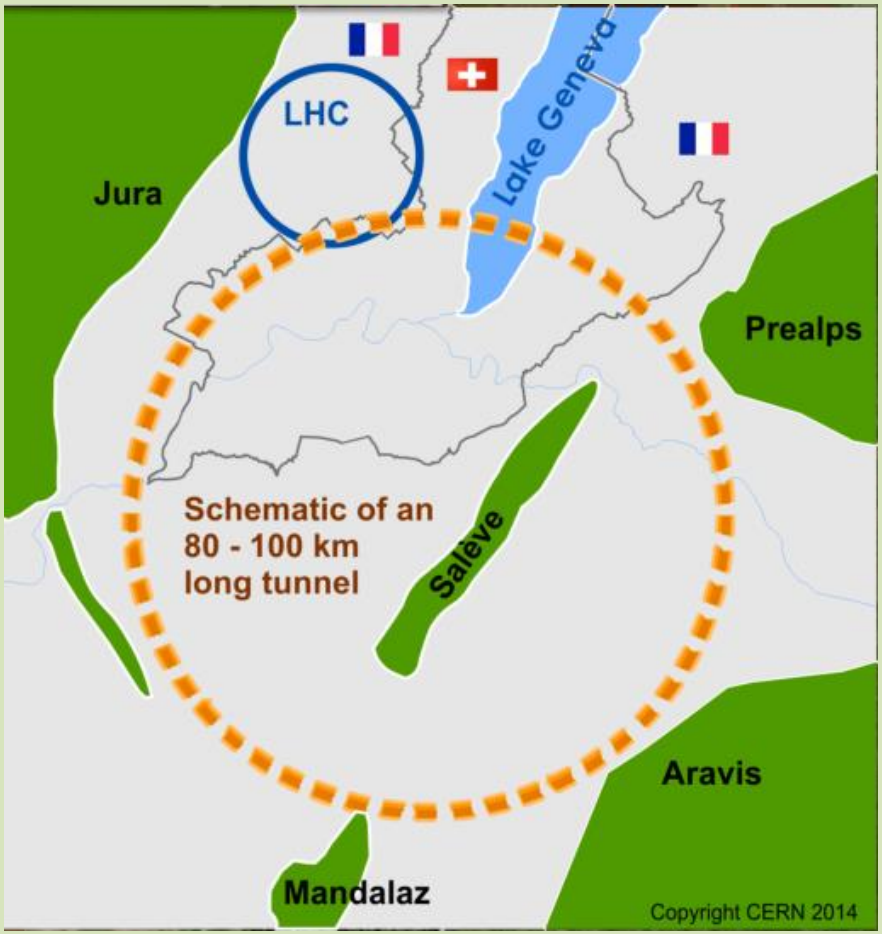
Backup slides

The Future Circular Collider (FCC)

pp collider (FCC-hh, protons or ions) – 100 TeV CoM – defines infrastructure.

H+/- coproduction with tb **2 orders of magnitude higher at 100 than at 14 TeV CoM MG4**

Aim for CDR/Cost Review for next ESG (2018) Physics ~2040



Reference: TLEP/FCC-ee physics 1308.6176, JHEP 01 (2014) 164

S. Gascon-Shotkin 'Prospects for BSM Higgs Boson Searches at Future Colliders' ,Charged2014, Uppsala Sept. 18 2014

Навіщо працювати над детекторами – навіщо шукати нові методи ???

1.Why work on detectors – why invent new methods ???

Albert Einstein 1930 at the opening of the Berlin broadcasting exhibition:
listen to: (http://www.einstein-website.de/z_biography/redefunkausstellung.html)

"Verehrte An- und Abwesende!

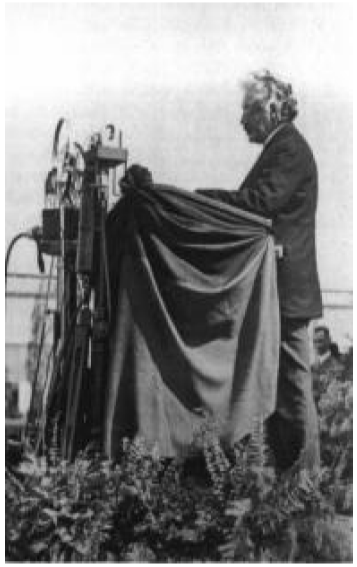
Wenn Ihr den Rundfunk höret, so denkt auch daran, wie die Menschen in den Besitz dieses wunderbaren Werkzeuges der Mitteilung gekommen sind. Der Urquell aller technischen Errungenschaften ist die göttliche Neugier und der Spieltrieb des bastelnden und grübelnden Forschers und nicht minder die konstruktive Phantasie des technischen Erfinders.

Sollen sich auch alle schämen, die gedankenlos sich der Wunder der Wissenschaft und Technik bedienen und nicht mehr davon geistig erfasst haben als die Kuh von der Botanik der Pflanzen, die sie mit Wohlbehagen frisst."

"Venerated Attendees and Absentees!

When you listen to broadcasting, think also about how we got to own this wonderful tool of communication. The source of all technical achievements is the divine curiosity and the play instinct of tinkering and pondering scientists, and also the constructive imagination of technical inventors.

All should be ashamed, who thoughtlessly use the wonders of science and technology and understand of them as little as the cow does of the botany of plants on which she feeds with pleasure" (translation© R.Klanner – no warranty)



Welcome R.Klanner Joint Instrumentation Seminar - 5.2.10 2

А. Ейнштейн. 1930 р.

На відкритті виставки з радіо-мовлення:

Шановні Присутні та Відсутні !

Коли ви слухаєте радіотрансляцію,

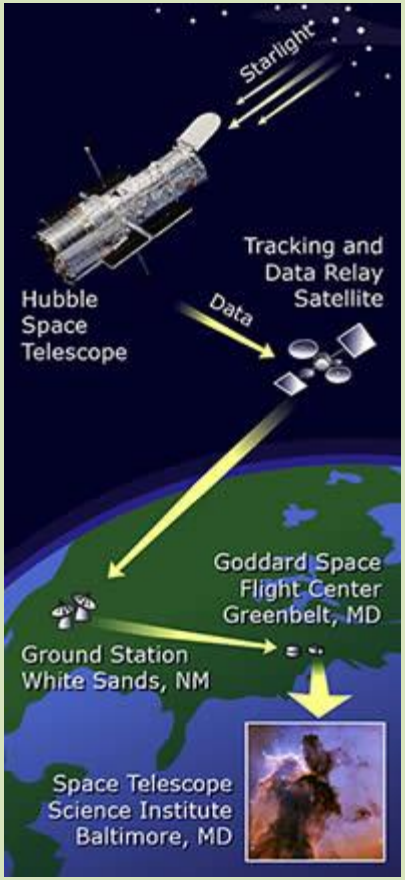
замисліться також над тим, як людство стало володарем цього прекрасного знаряддя комунікації.

Джерелом усіх технічних досягнень є божественна допитливість та ігорний інстинкт вчених майструвати чи розмишляти, а також конструктивна фантазія технічних винахідників.

Повинно бути соромно тим, хто бездумно використовує чудеса науки і техніки, розуміючи їх так мало, як корова ботаніку рослин, які вона поїдає з насолодою.

Що дав людству енергетичний простір електрон-вольтного масштабу ?

Що дав людству енергетичний простір електрон-вольтного масштабу ?

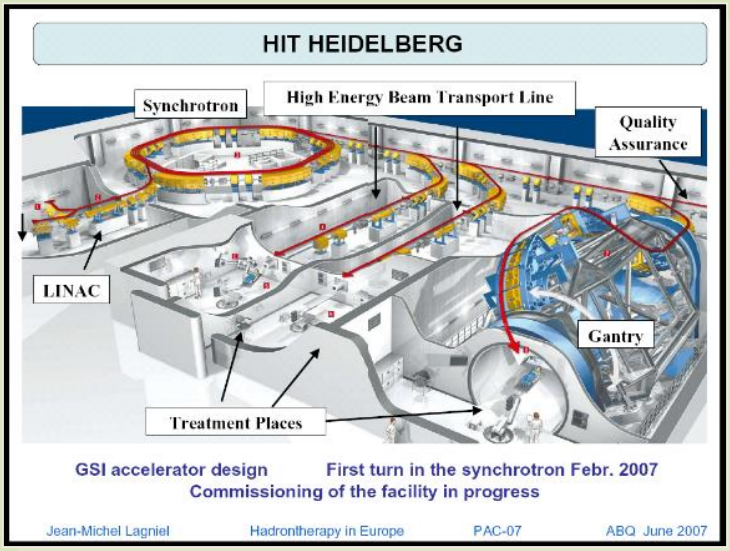


The International Space Station (ISS) is the largest and the most complex orbital outpost in history, and it is the most expensive object ever constructed by mankind at 157 billion dollars.

«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

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

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