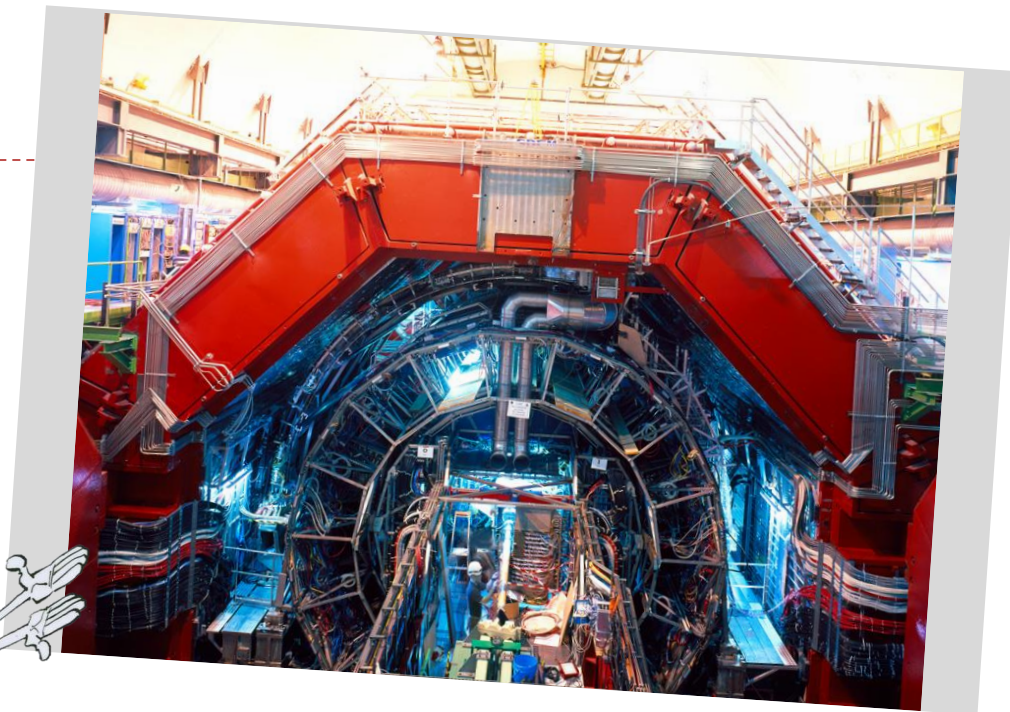


ALICE – експеримент с тежки йони

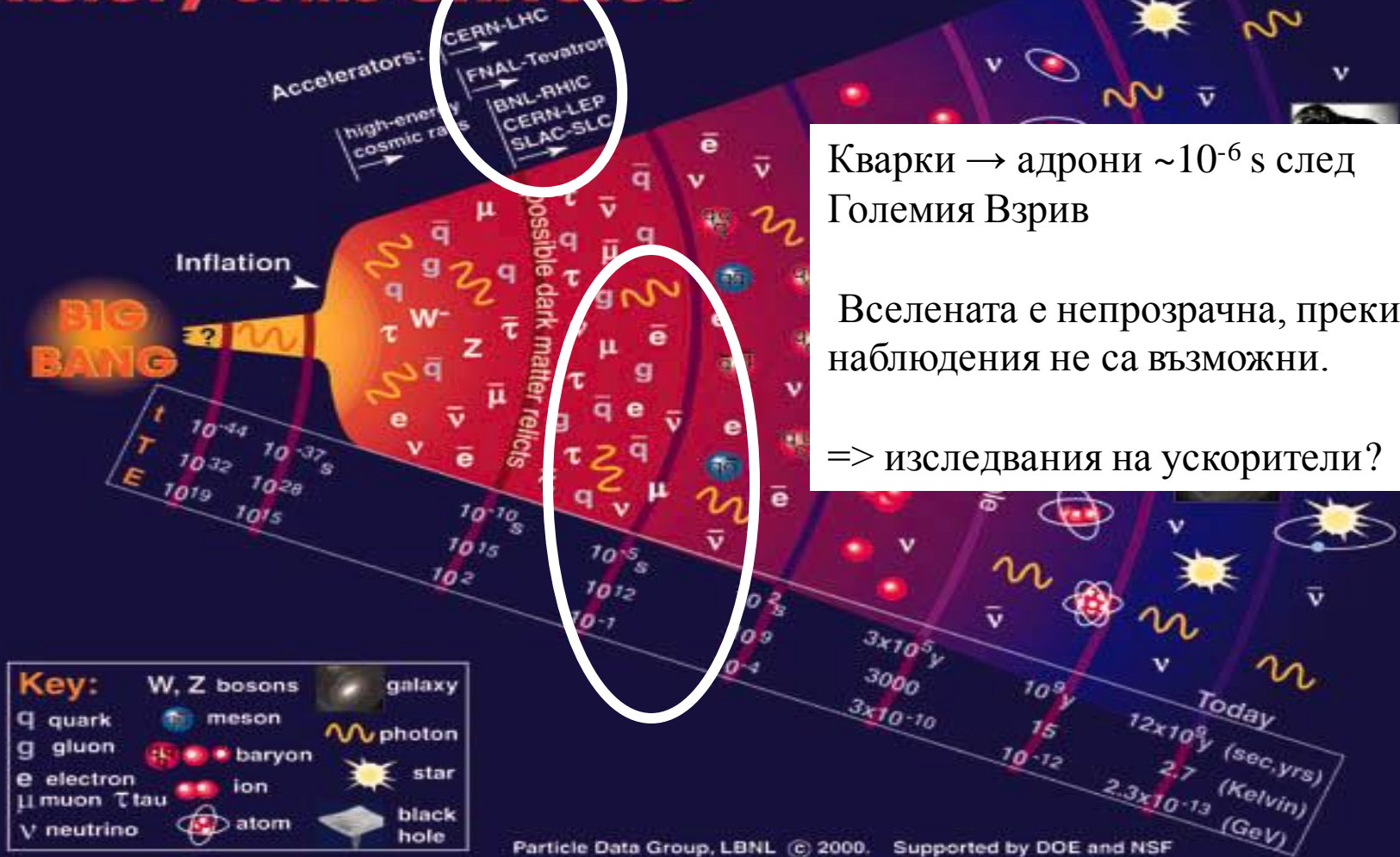
Петър Христов
30/07/2015



ALICE

Научна програма
Детектор
Резултати

History of the Universe



Кварки → адрони $\sim 10^{-6}$ s след Големия Взрив

Вселената е непрозрачна, преки наблюдения не са възможни.

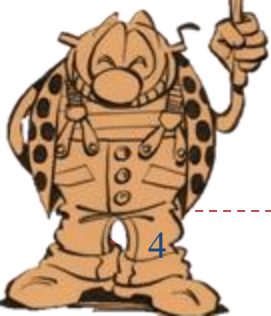
=> изследвания на ускорители?

Физика на тежките йони през погледа на ALICE

- ▶ Научната програма на експеримента е посветена на силното взаимодействие
 - Теоретично описание – квантова хромодинамика (КХД)
 - Главни “герои” – кварки и глюони
- ▶ (Две) загадки на природата
 - Защо масата на силно взаимодействащите частици (адрони) е много по голяма от масата на съставлящите ги кварки?
 - Какво удържа кварките в адроните?



ALICE



- ▶ Цветът (R, G, B) е заряд, съответсвуващ на силното взаимодействие
 - ▶ Въведен, за да обясни съществуването на $\Omega^-(s\uparrow s\uparrow s\uparrow)$
 - ▶ 70-те години => цветът е заряд за силното взаимодействие
 - ▶ В природата се срещат само “безцветни” състояния
 - ▶ Този ефект се нарича **конфайнмент (удържане)**: няма строго математическо доказателство
- ▶ Кваркови (фермионни) степени на свобода
 - ▶ 6 типа (аромата): u, d, s, c, b, t
 - ▶ 3 цвята: R, G, B
 - ▶ 2 зарядови състояния: кварк и антикварк
 - ▶ 2 спинови състояния: $\uparrow\downarrow$



Глуон

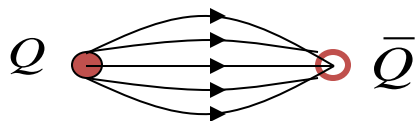
- ▶ Глуоните пренасят силното взаимодействие
 - ▶ Глуоните взаимодействат помежду си → **асимптотическа свобода, конфайнмент, спонтанно нарушаване на киралната симетрия**
- ▶ Глуонни (бозонни) степени на свобода
 - ▶ 8 варианта на цвят
 - ▶ 2 кирални състояния (проекции на спина върху импулса)



Квантова хромодинамика (КХД)

Асимптотическа
свобода

Удържане на
кварките



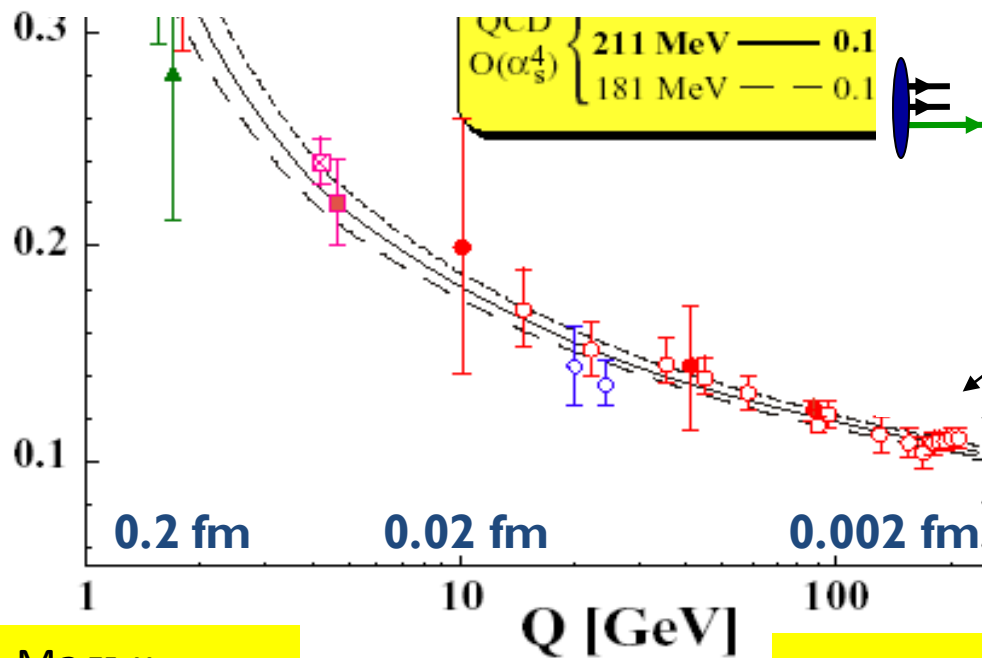
Gross

Politzer

Wilczek

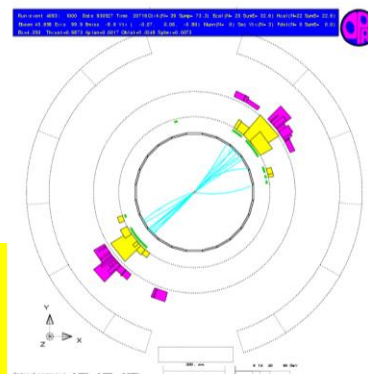
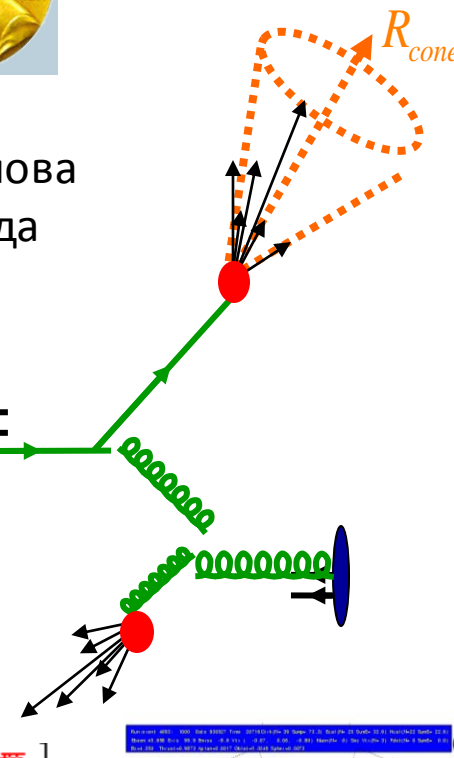


2004
Нобелова
награда



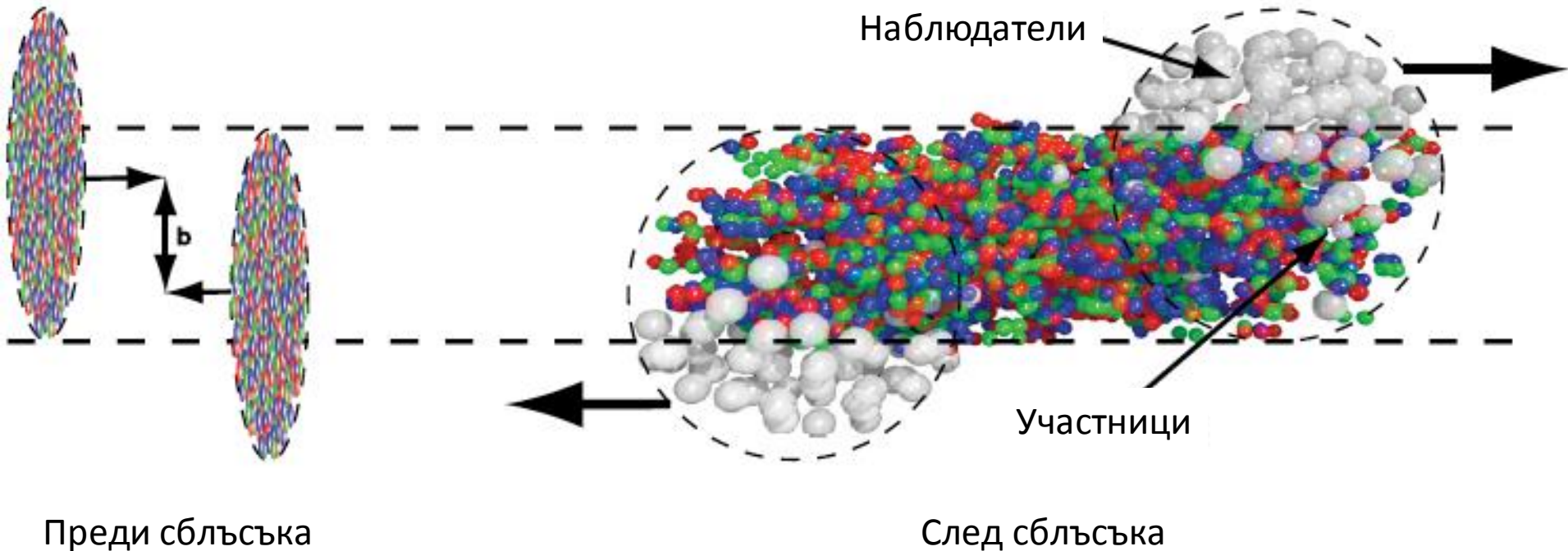
Малък
импулс

Голям
импулс

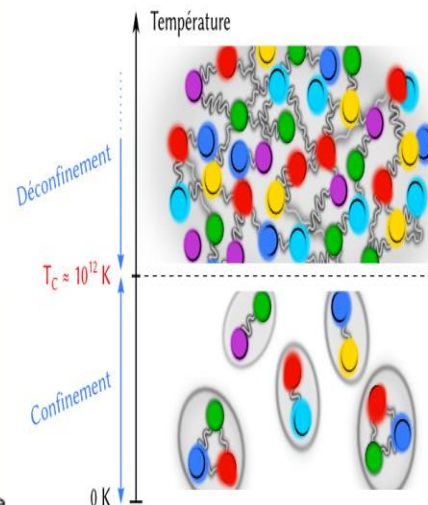
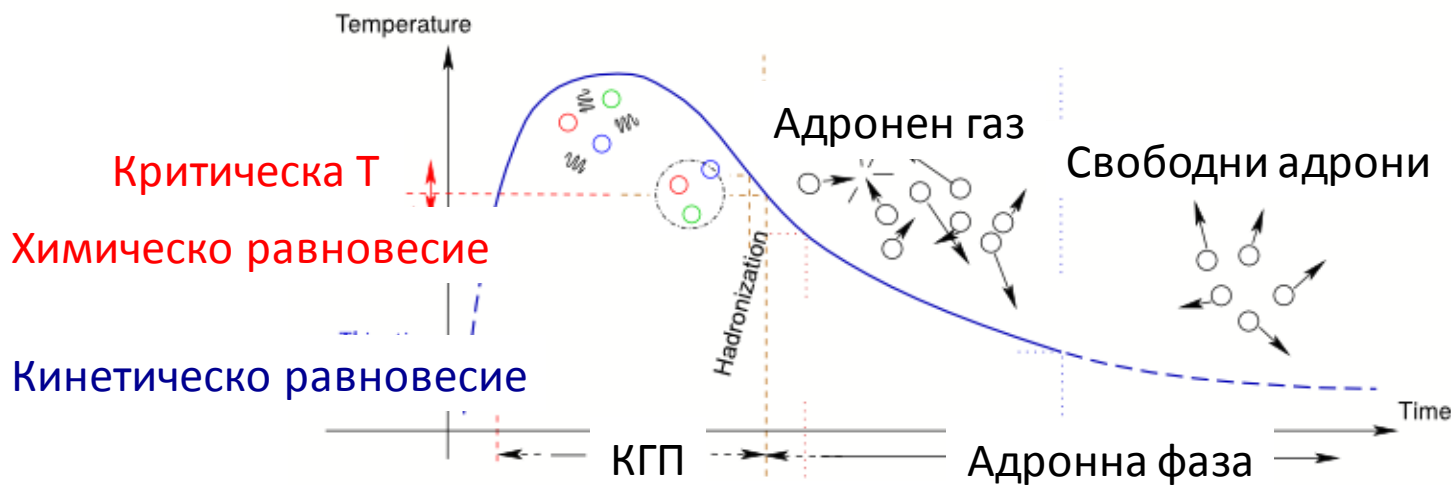
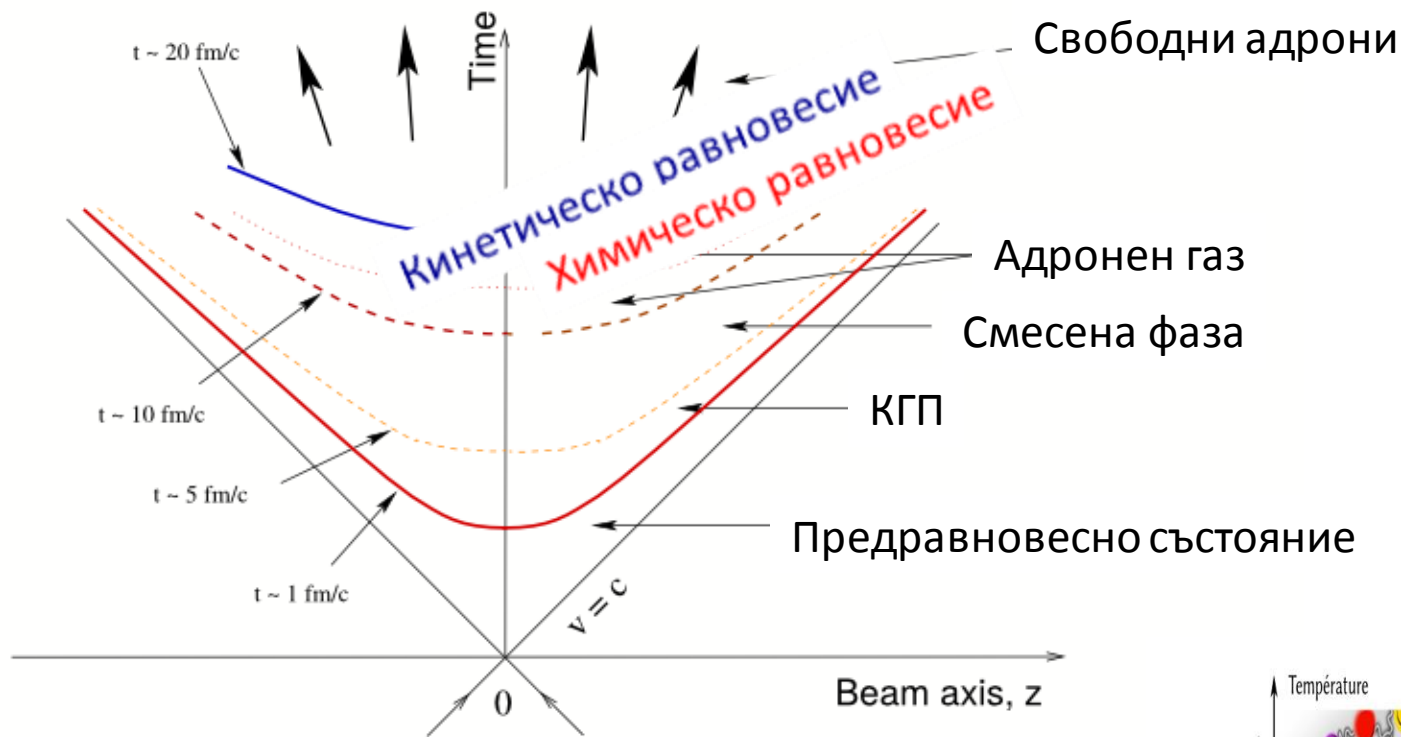


Сблъсък на тежки йони

UrQMD модел, PbPb - 160 GeV/A, $t=1.6$ fm/c



- ▶ Много гореща и плътна ядрена материя в централните сблъсъци докато в периферните имаме “просто” нуклонни взаимодействия
- ▶ Сравнено с протон-протонните сблъсъци по-голяма част от енергията ражда частици



Равновесен брой
частици по типове

Равновесни импулси

Фазова диаграма на кварк-глюонната плазма

Висока температура

Ранна Вселена

Температура T_c



- ◆ Свободни кварки
- ◆ Възстановяване на киралната симетрия

Кварк-глюонна плазма

Критическа точка?

увеличаване на енергията на сблъсък

Адронен газ

нуклонен газ

ядро

“цветен свръхпроводник”

“цвето-ароматно заключване”

вакуум

ρ_0

Неутронни звезди

Барионна плътност

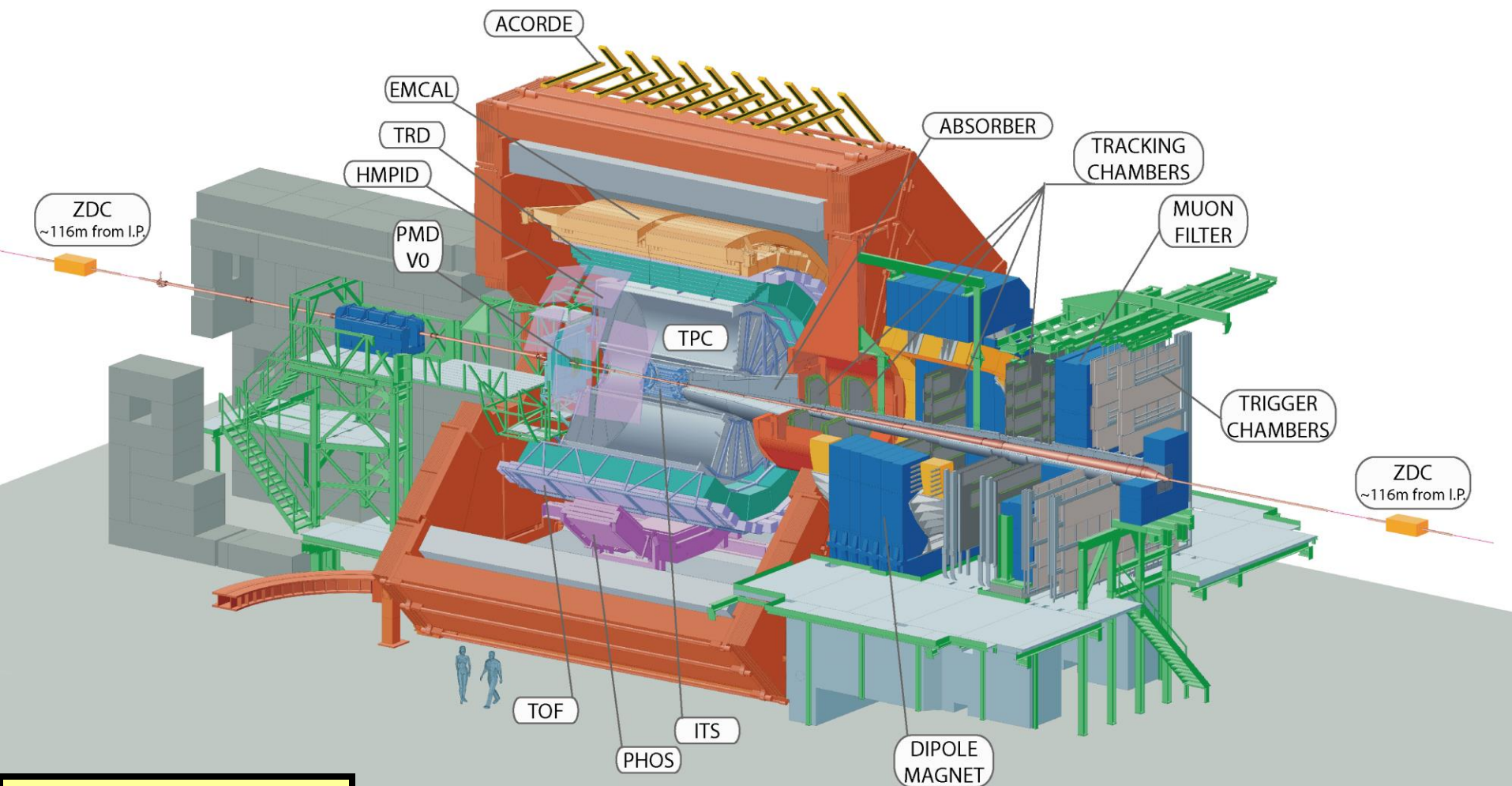
Висока барионна плътност

Изисквания към детектора ALICE

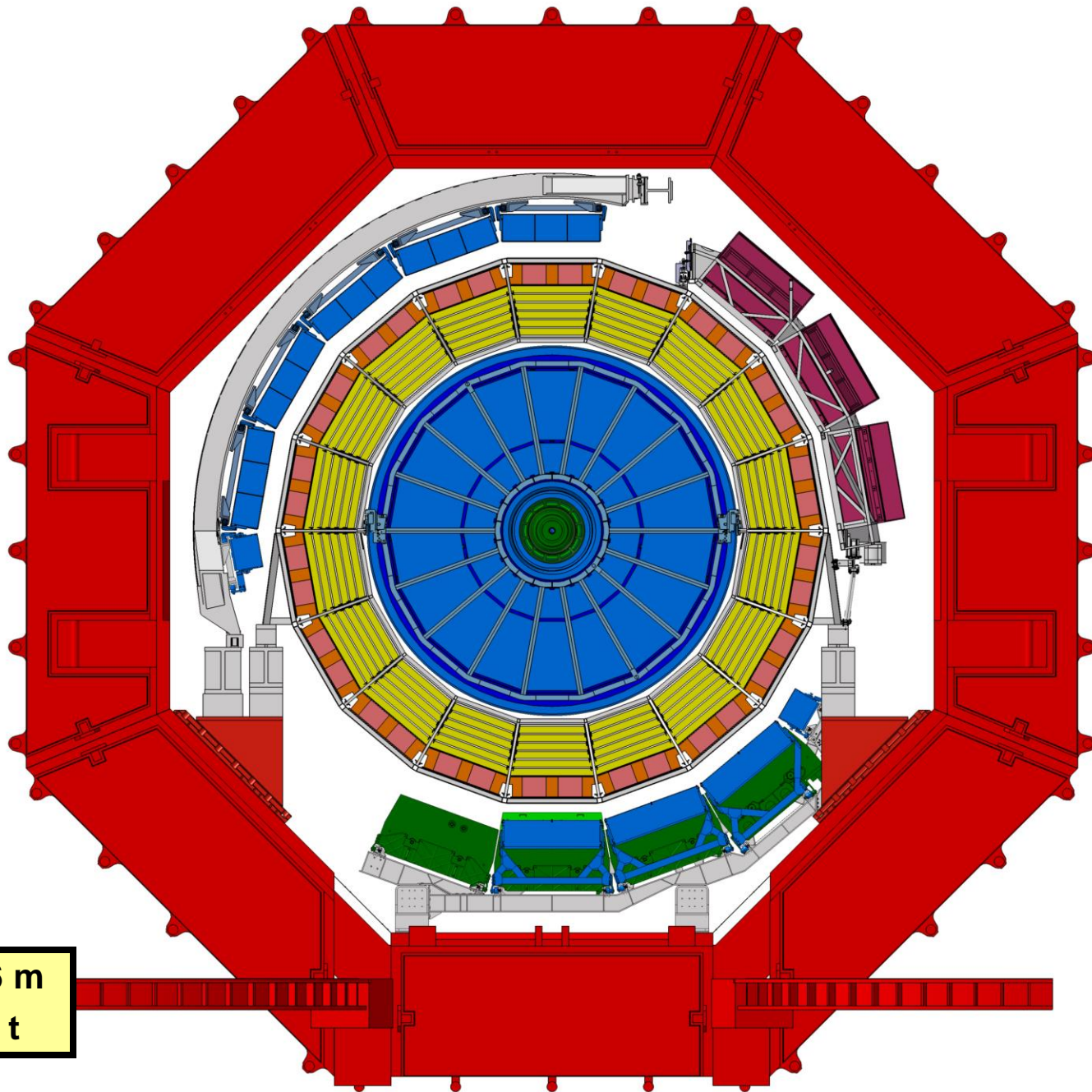
- ▶ Измерване импулсите на заредени частици в широк диапазон
- ▶ Идентификация на заредени частици
- ▶ Измерване енергията на фотони
- ▶ Регистрация на мюони и измерване на техния импулс
- ▶ Регистрация на разпадите на странни, очаровани и прелестни частици
- ▶ Възстановяване положението на всеки сблъсък
- ▶ Измерване на прицелния параметър на сблъсъците



Детектор ALICE



Размеры: 16 x 26 m
Тегло: 10,000 t



Височина: 16 m
Тегло: 10,000 t

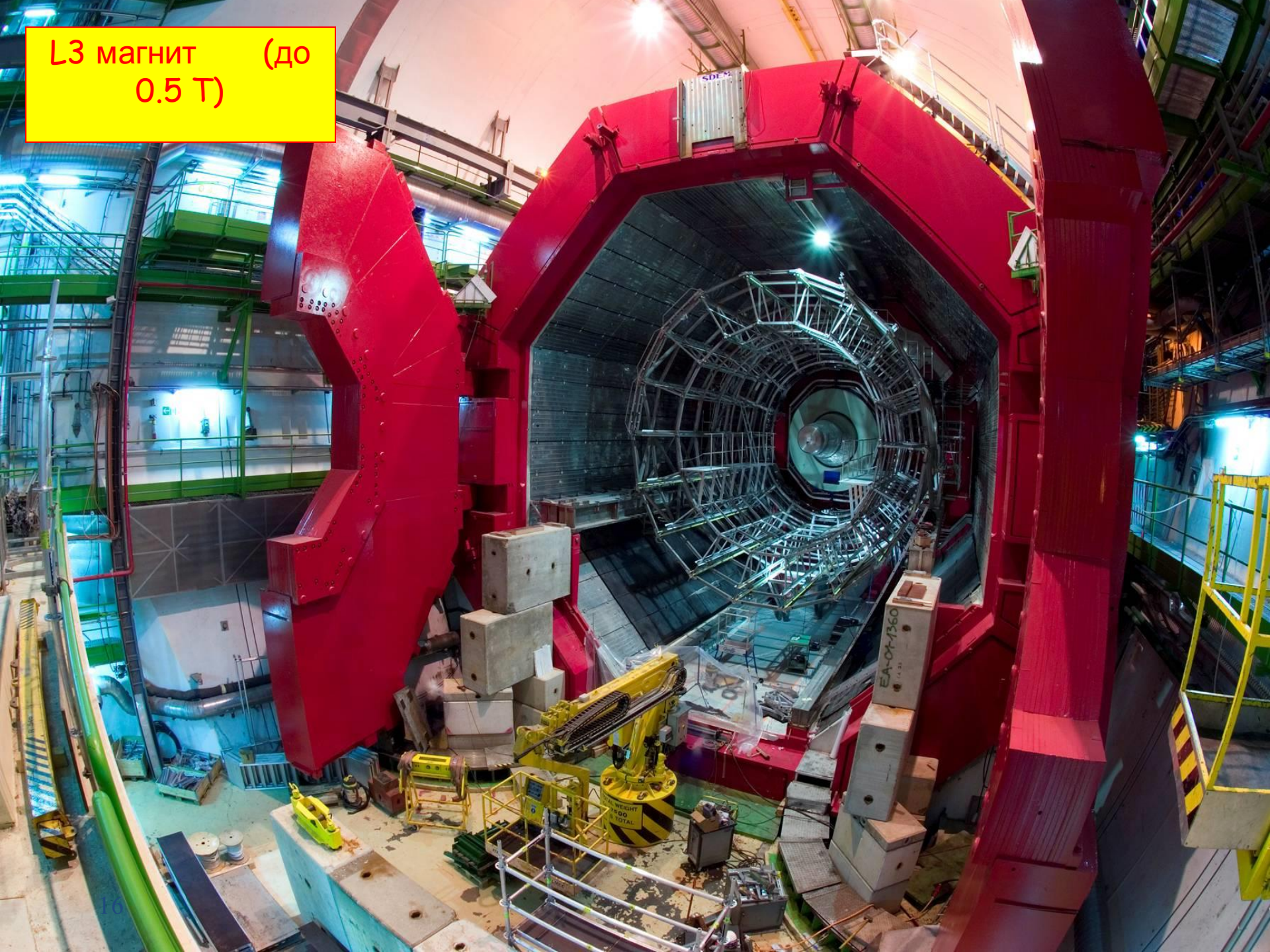




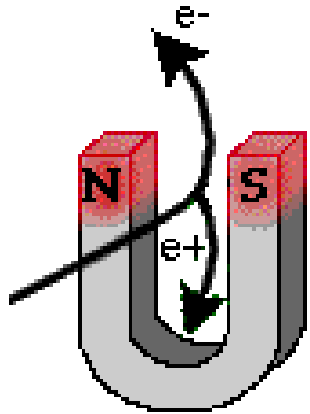
“План” за PbPb данни

- Около 16,000 частици минават през детектора при всеки PbPb сблъсък; броят частици достига 90 на cm^2 в близост до точката на взаимодействие!
- Всяка частица се измерва индивидуално: траектория, идентификация, 4-импулс;
- Определяне точката на взаимодействие с точност няколко μm ;
- Идентификация на интересни редки събития в рамките на 100 μs ;
- Запис на данни 1.2 Gb/s (2 CD/s) и 1 Pb/y (4 Km висок куп CD);
- Достъп до данните за $\sim 1,000$ физици в ~ 80 института от ~ 28 страни.

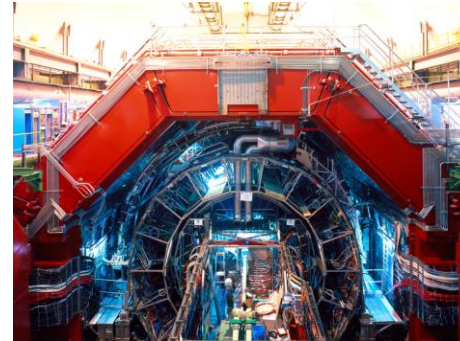
L3 магнит (до 0.5 Т)



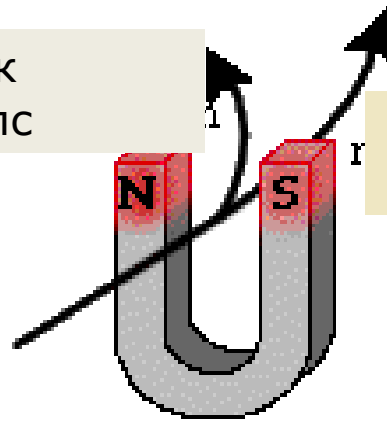
Магнитно поле



Определяне на заряда



Малък
импулс



Голям
импулс

Измерване на импулса

Вътрешен силициев тракер



Вътрешен тракер
~ 10 m² Si , 6 слоя: пикселен,
дрейфов, двустранен лентов

**Лентов
SSD**



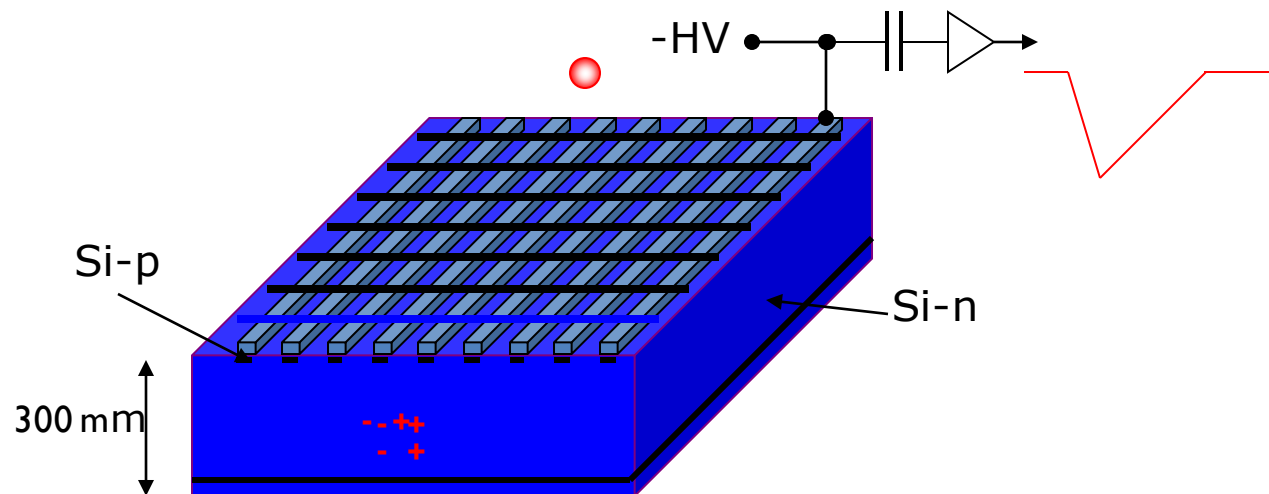
**Пикселен
SPD**



**Дрейфов
SDD**

Вътрешен тракер: принцип на работа

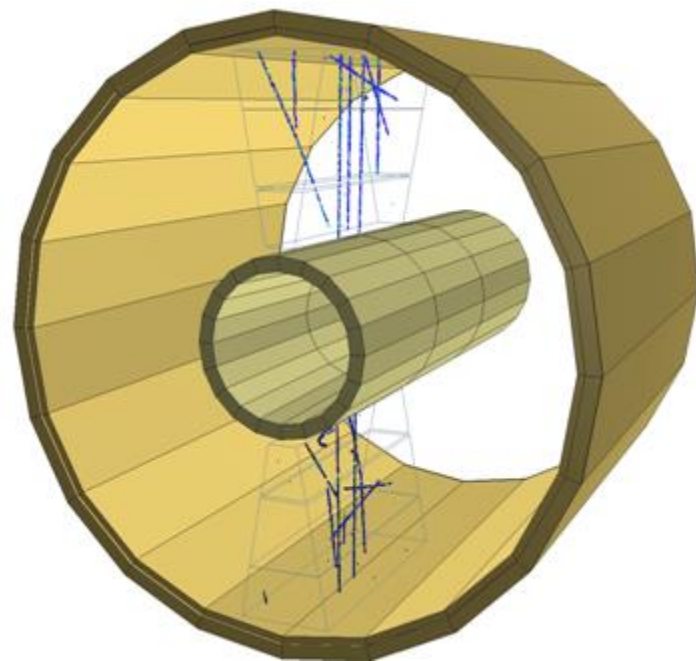
- ▶ ITS: 6 слоя Si диоди в затворено състояние, формират 2D структура
- ▶ При преминаване на заредена частица обеднената зона се йонизира и зарядите създават токов импулс
- ▶ Подобна технология има в съвременните цифрови фотоапарати



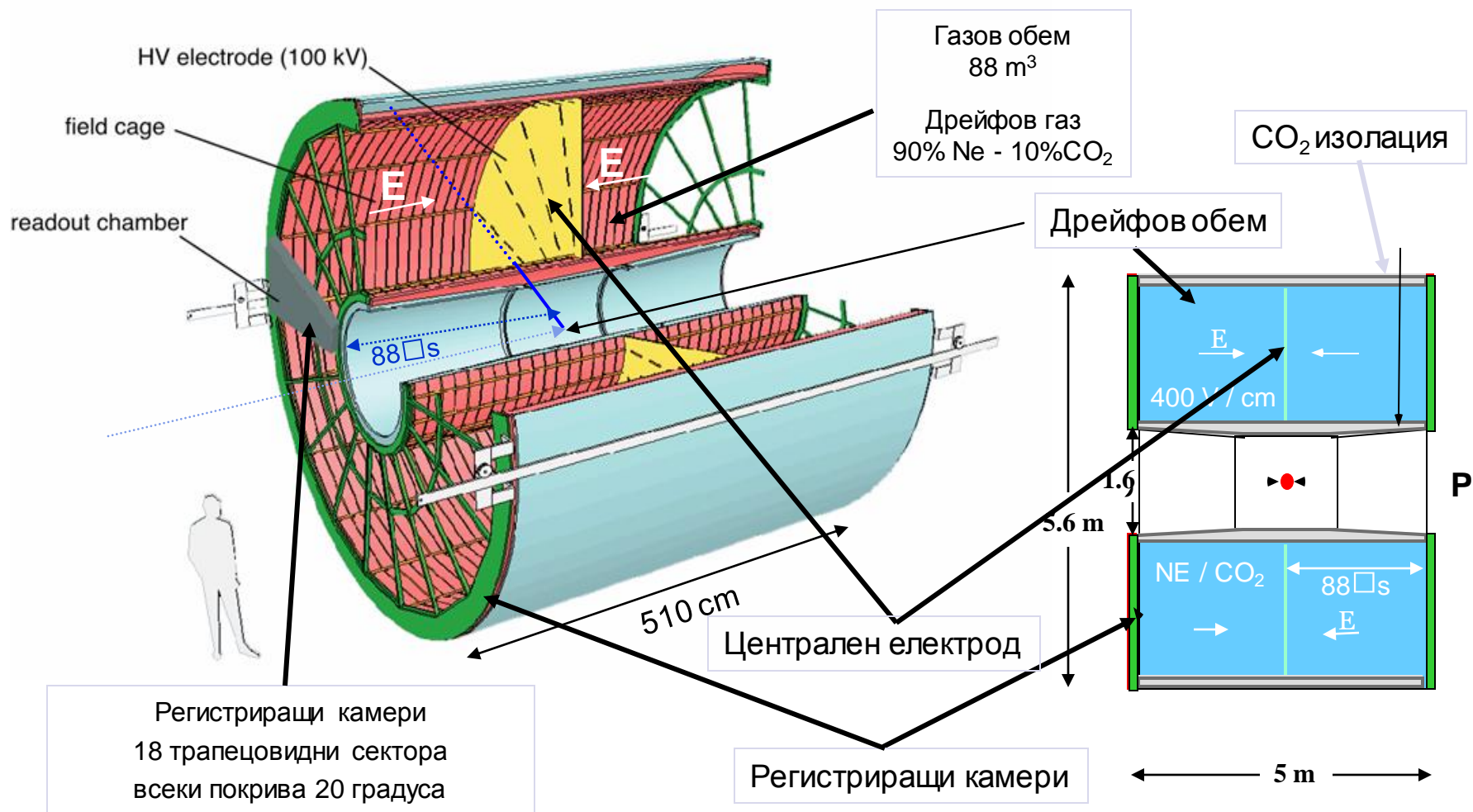
Тест на ТРС електрониката



Космически тест
12/2007

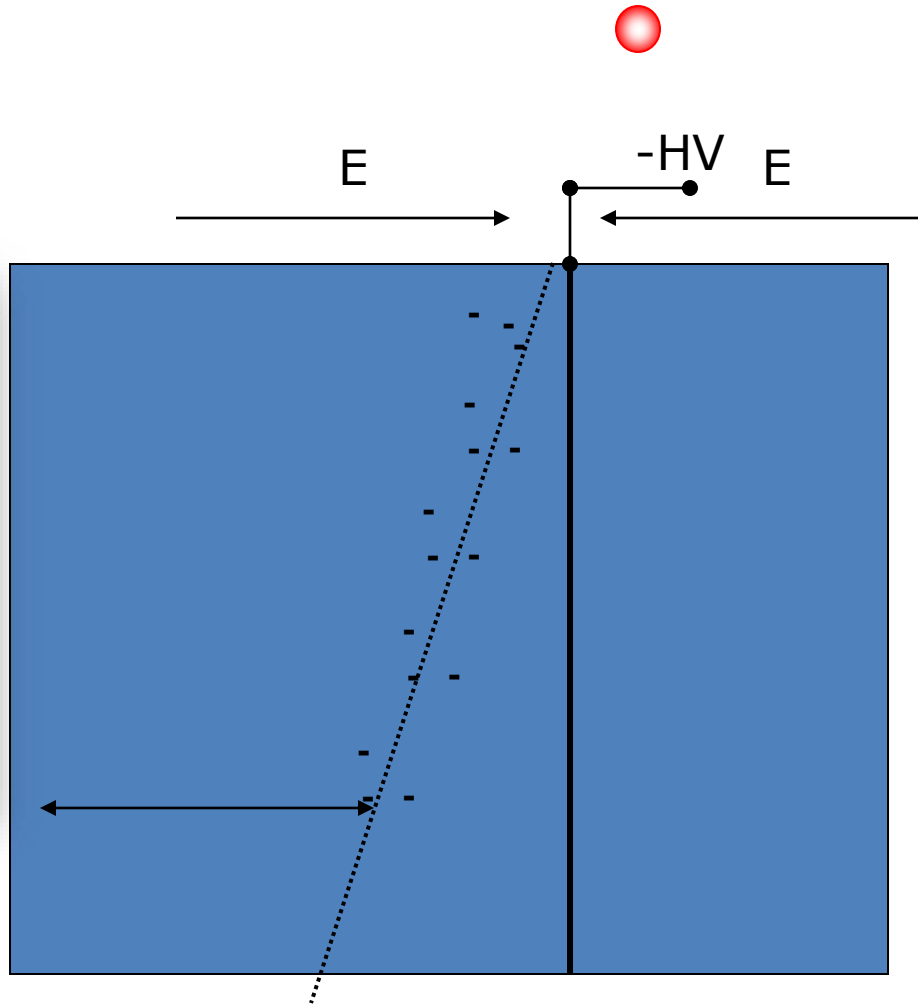
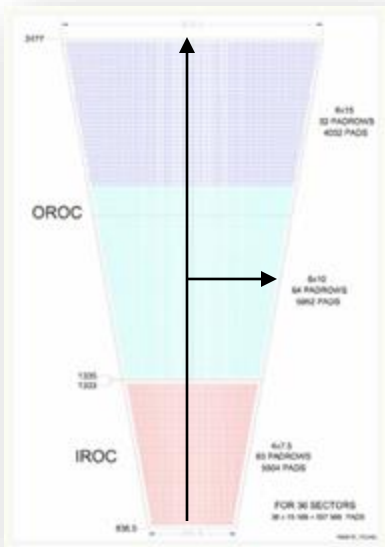


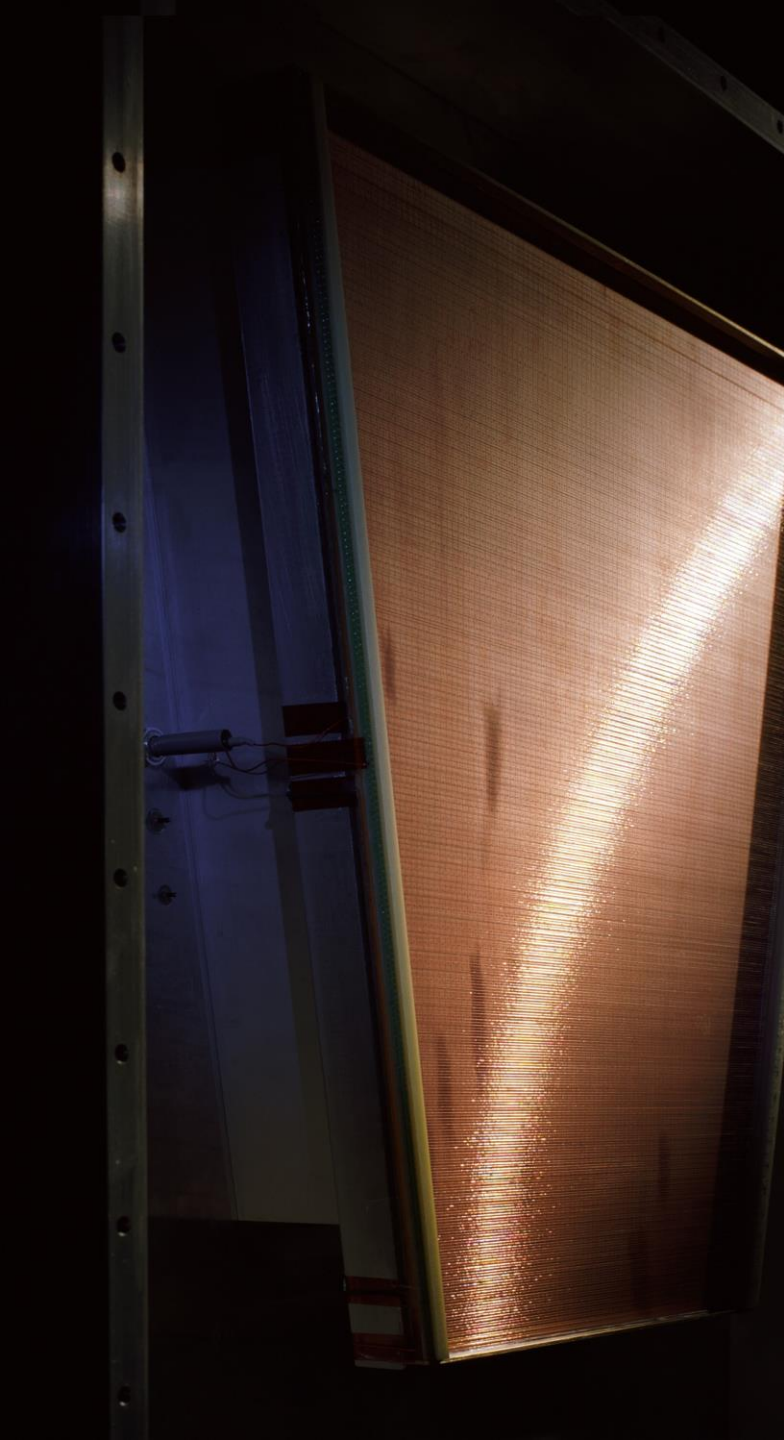
TPC ALICE



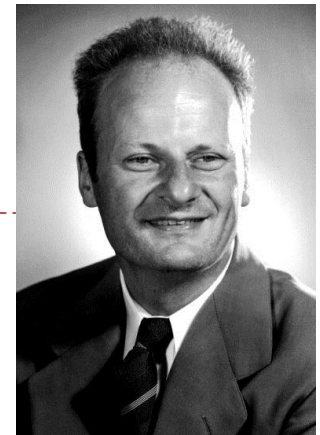
TPC: принцип на работа

- 1 камера

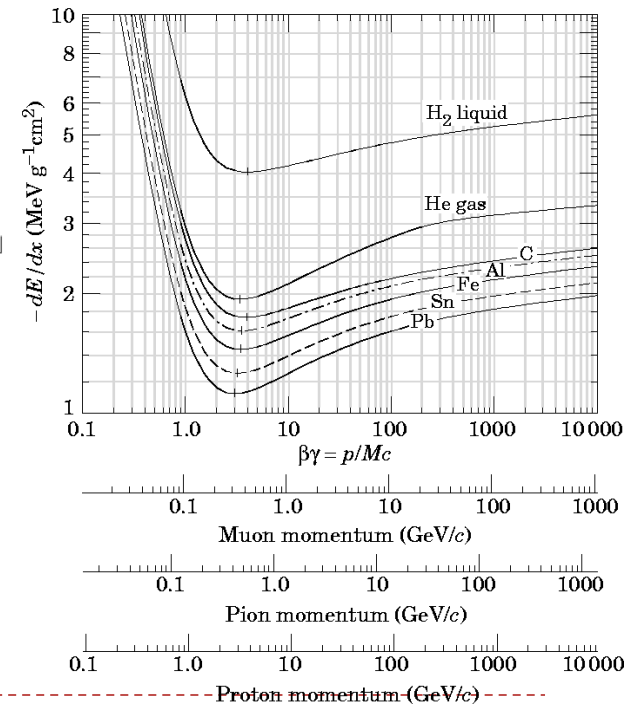
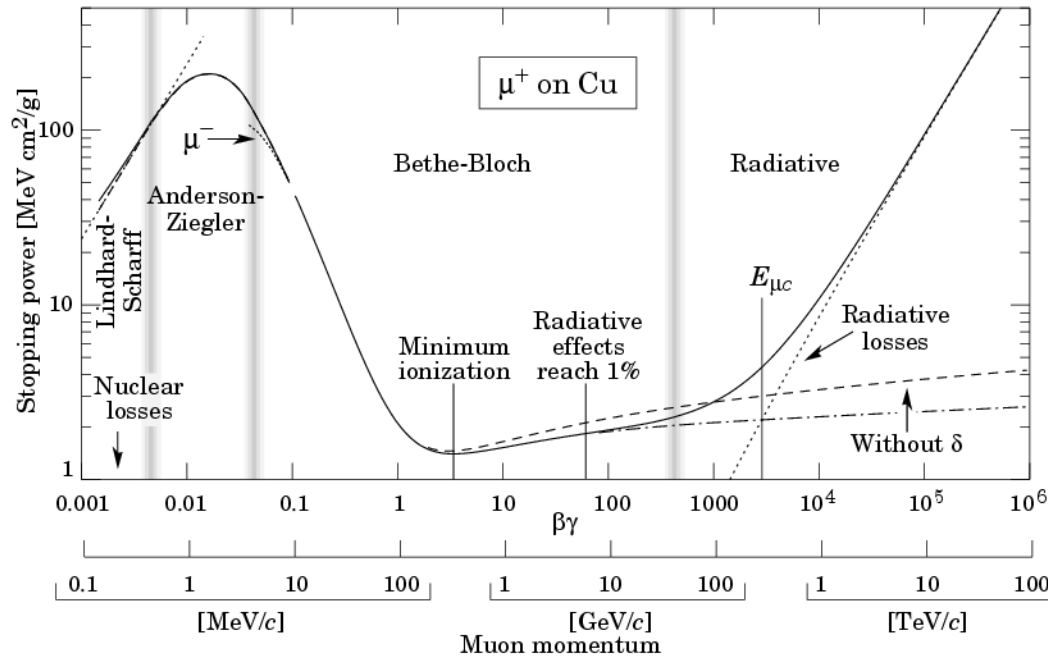




Идентификация на частиците по техните йонизационни загуби



Ханс Бете (1906-2005)



$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

K $4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$

Z Atomic number of absorber

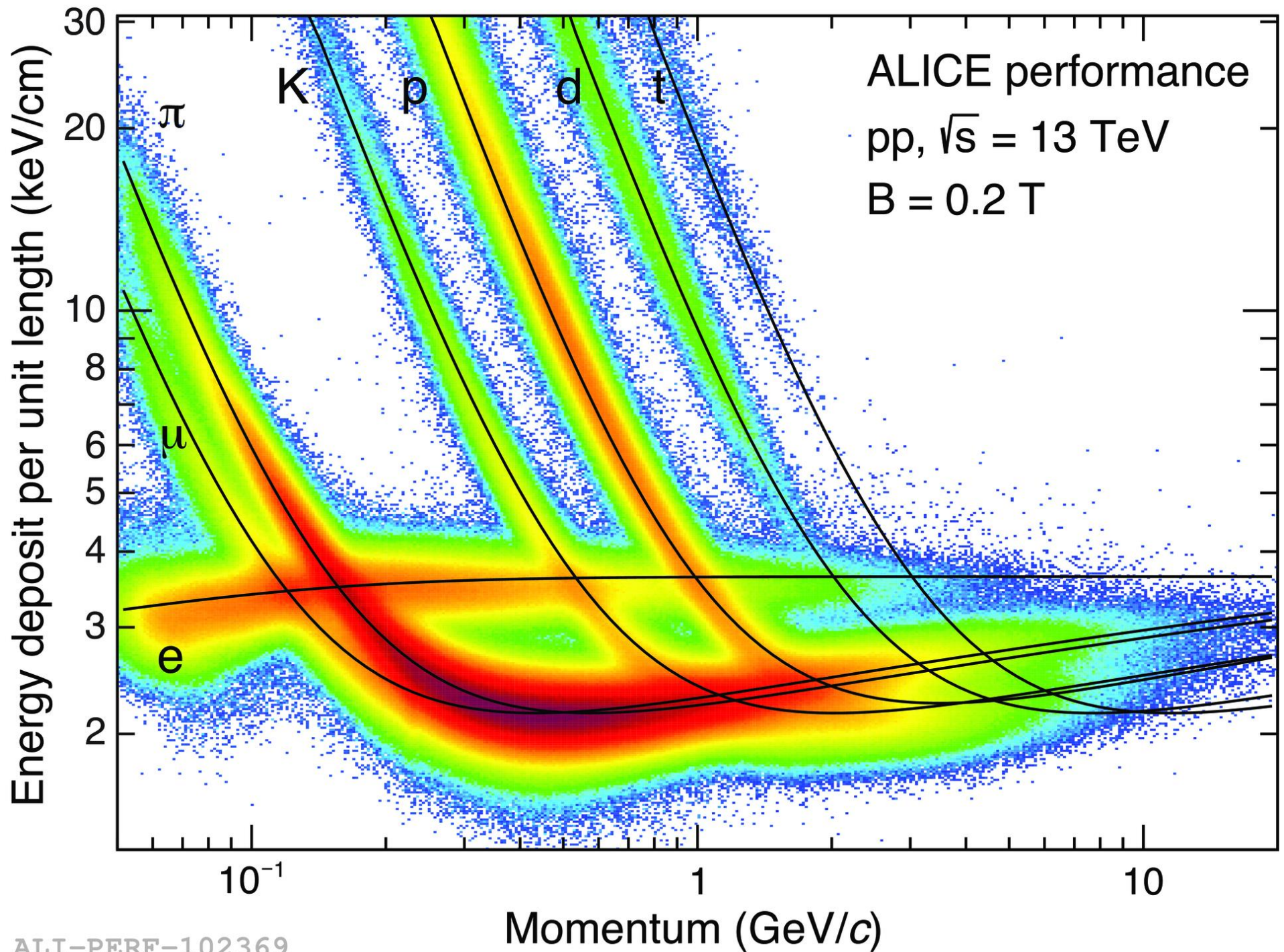
A Atomic mass of absorber

m_e Mass of an electron

r_e Classical radius of an electron

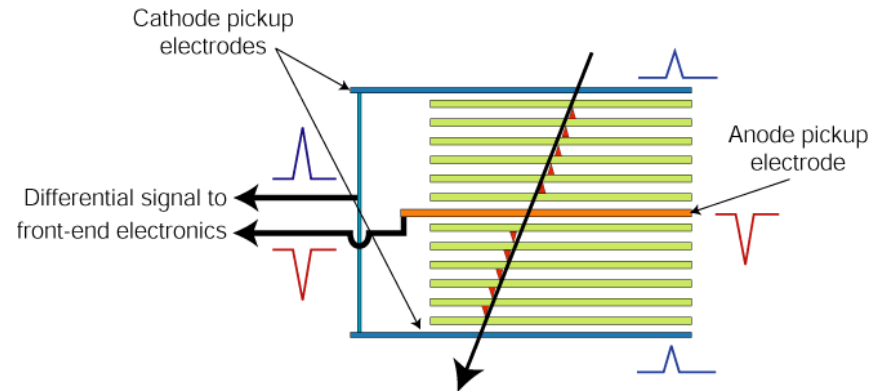
I Mean excitation energy

T_{max} Maximum Kinetic energy which can be imparted to a free electron in one collision

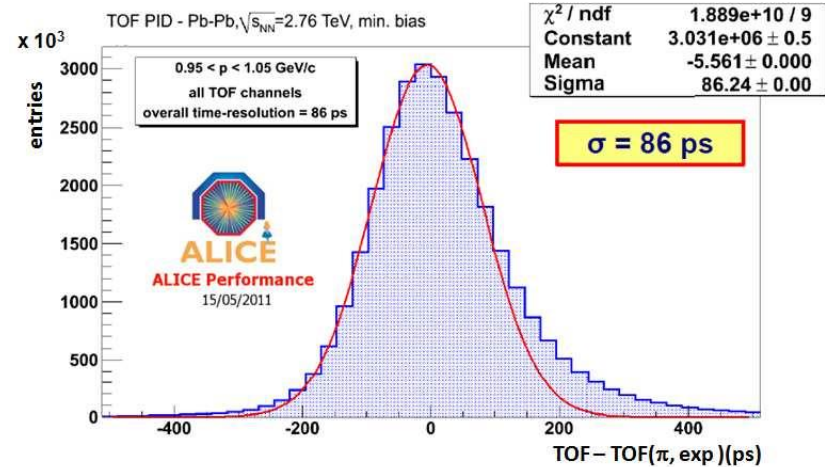
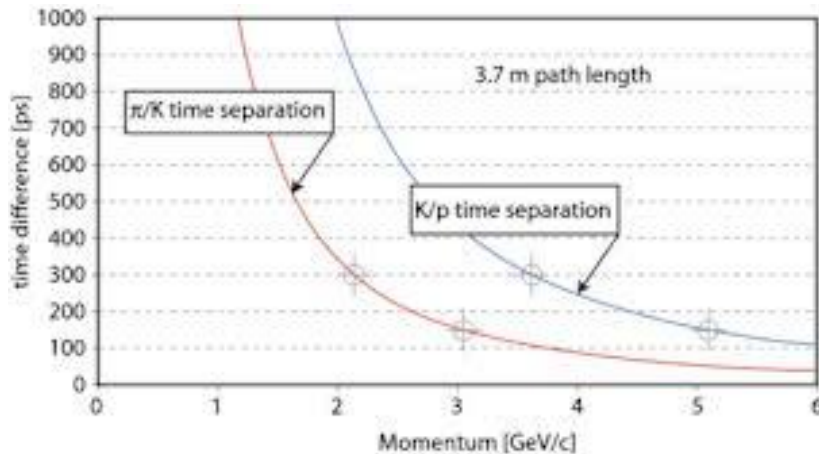


Детектор по време на прелитане (TOF)

Камери с резистивни плоскости

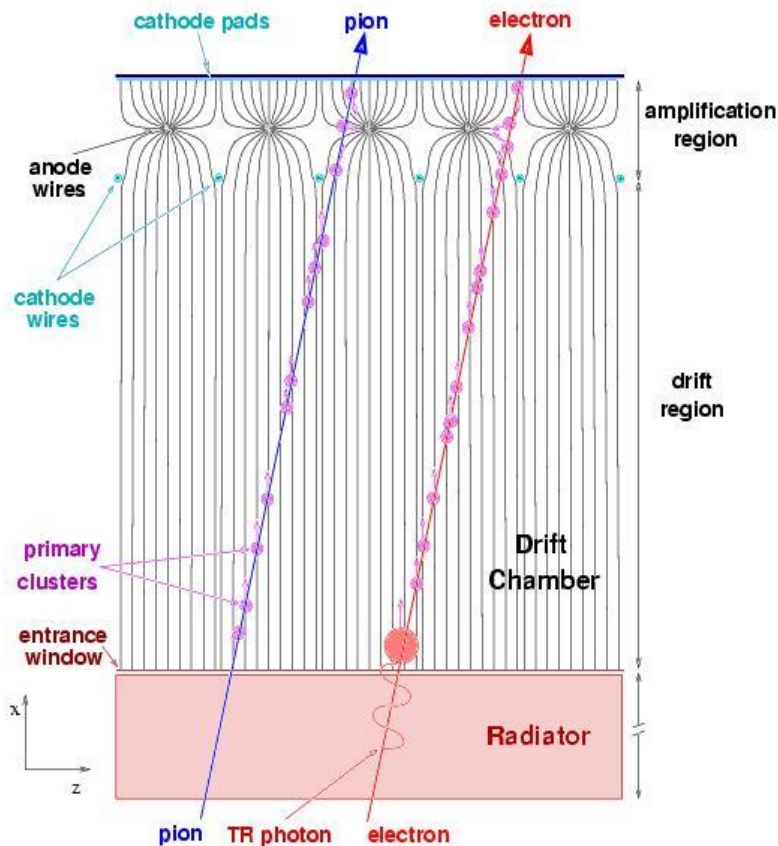


Измерва времето на прелитане от точката на сблъсък до детектора: $\sim 4 \text{ m} = 13 \text{ ns}$ (скорост = c)

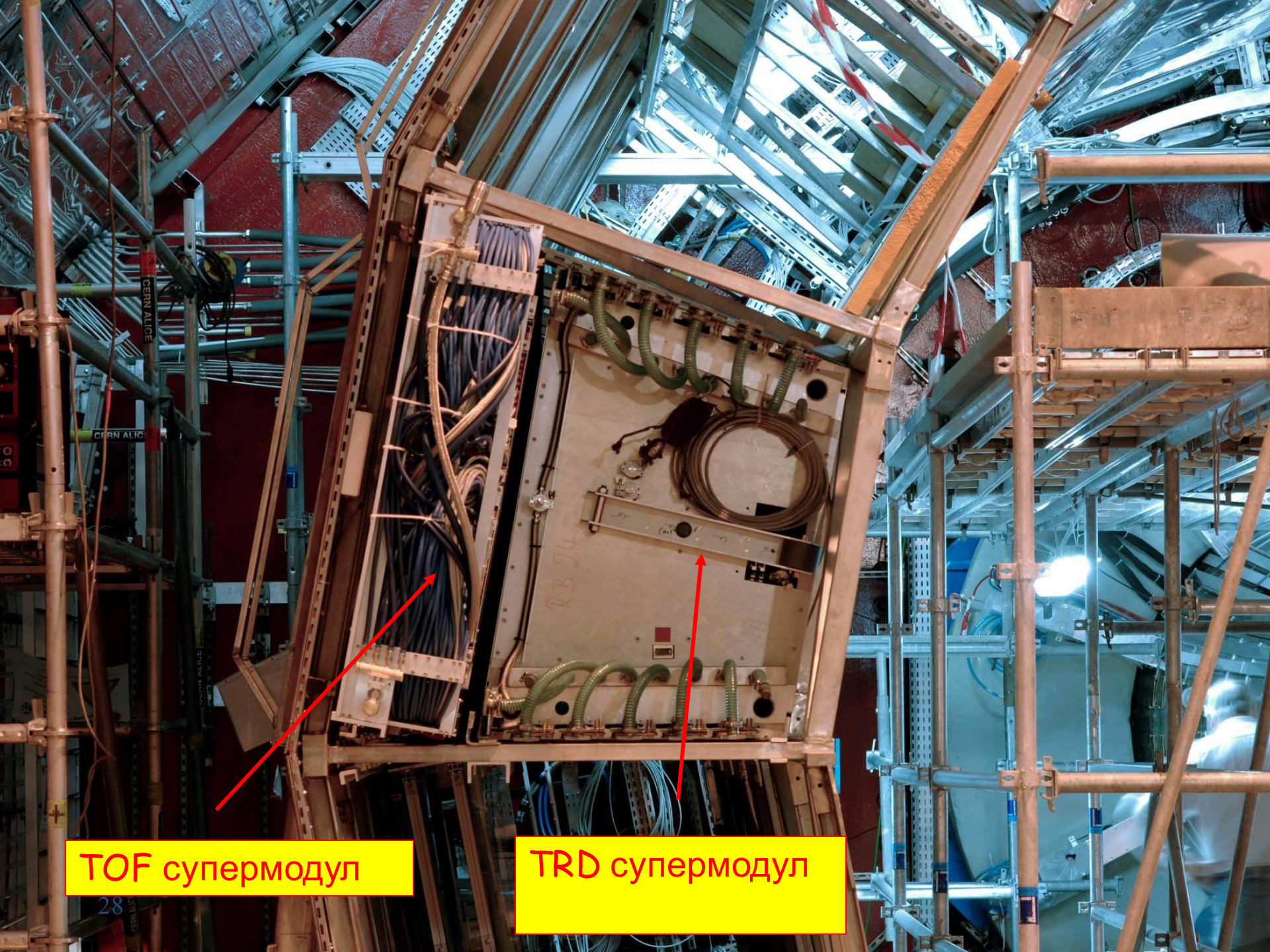


Детектор на преходно излъчване

- Разделяне на релативистки електрони и пиони



- Когато релативистка заредена частица преминава през неоднородна среда, тя излъчва фотон
- Средата е избрана така, че само електроните създават преходно излъчване
- Регистрират се едновременно заредената частица и фотонът
- Дрейфова камера запълнена с тежък газ (Xe)

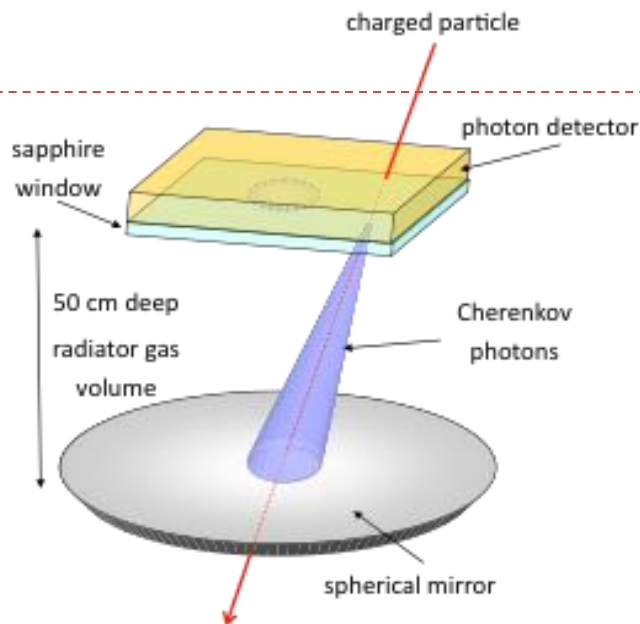


TOF супермодул

TRD супермодул

Идентификация на частици по черенково излъчване (HMPID)

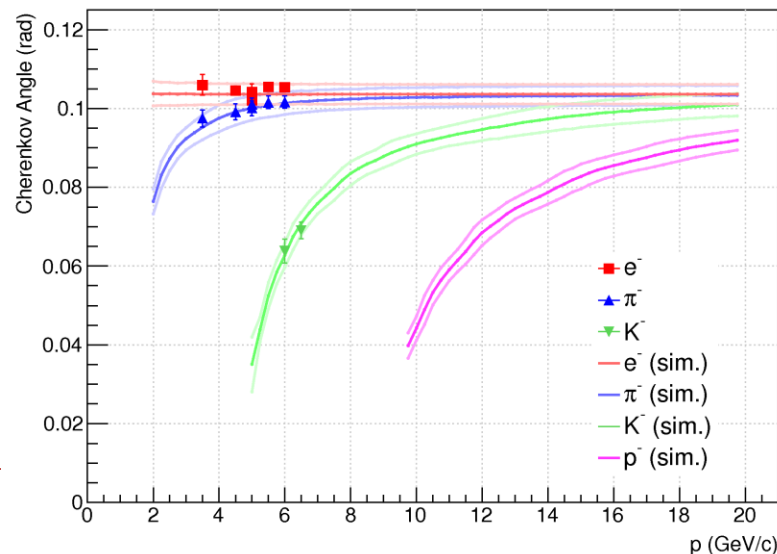
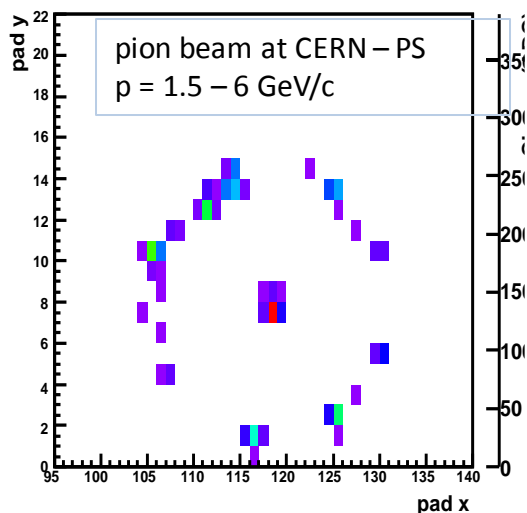
Черенково излъчване:
Заредена частица,
движеща се с $v > c$
в локална среда

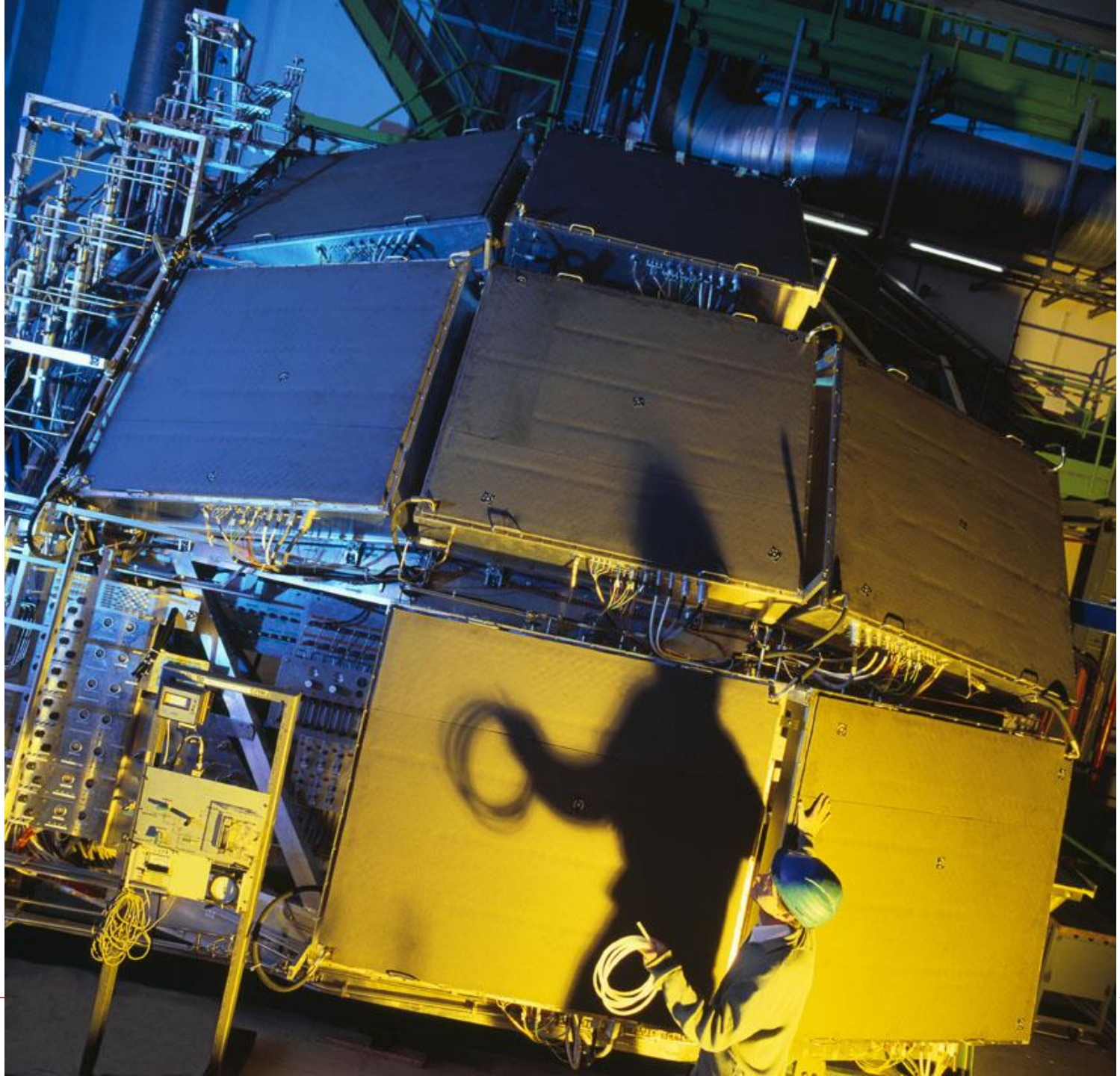


Павел Черенков (1904-1990)

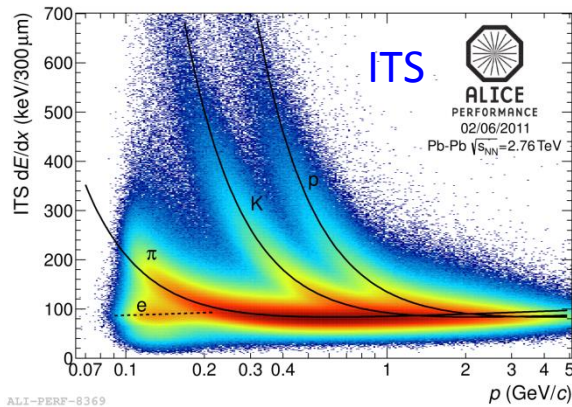
Газът на радиатора определя дължината на вълната, радиуса на кръга (ъгъл на Ч.), броя фотони

Event display subevent: 10

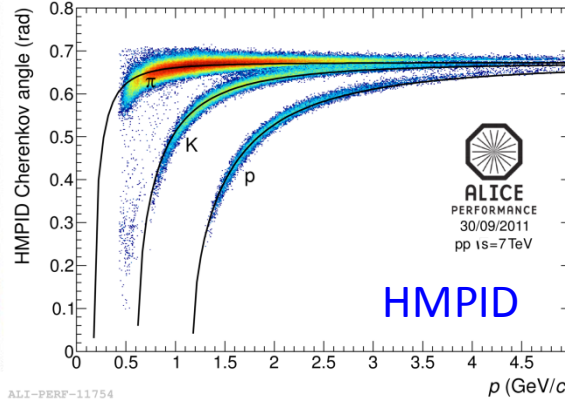




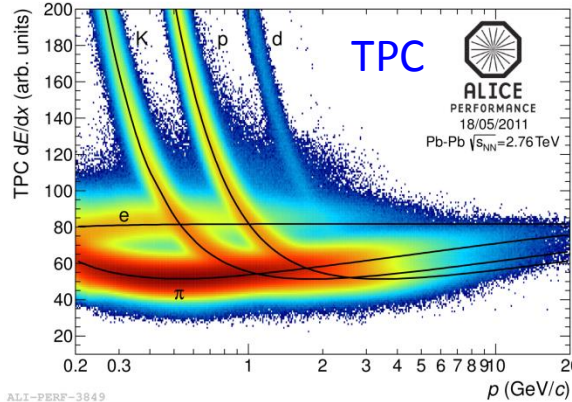
Идентификация на заредени частици: 5 независими детектора



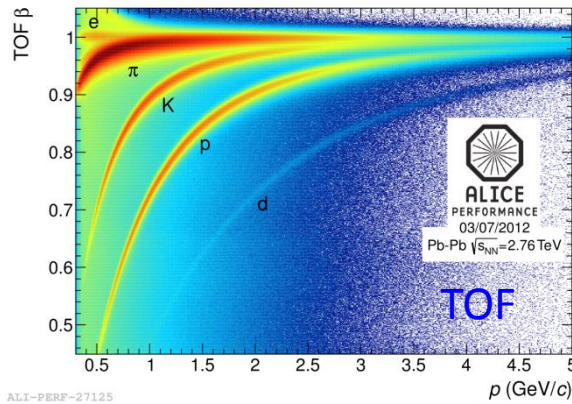
ALI-PERF-8369



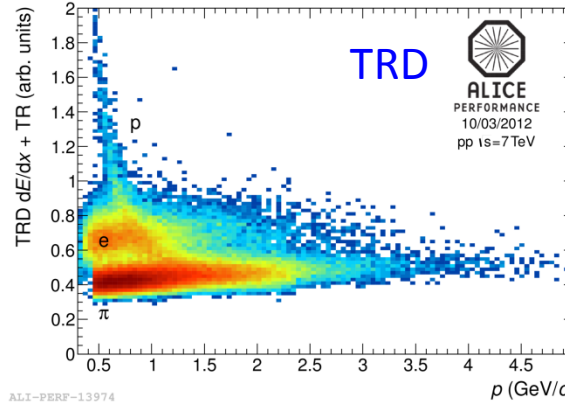
ALI-PERF-11754



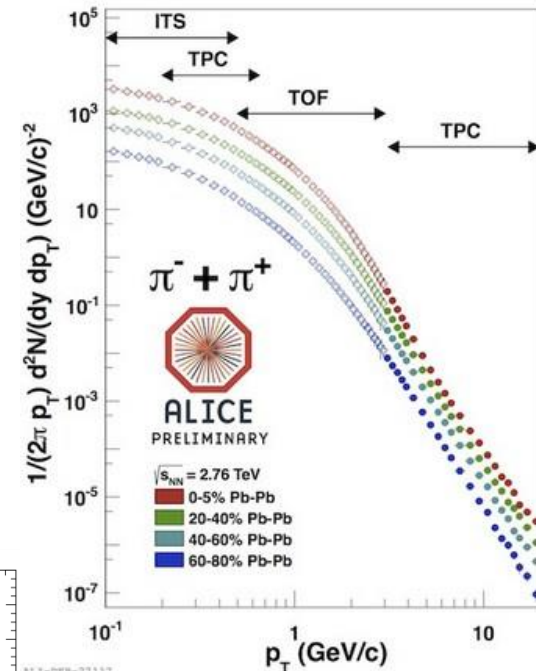
ALI-PERF-3849



ALI-PERF-27125

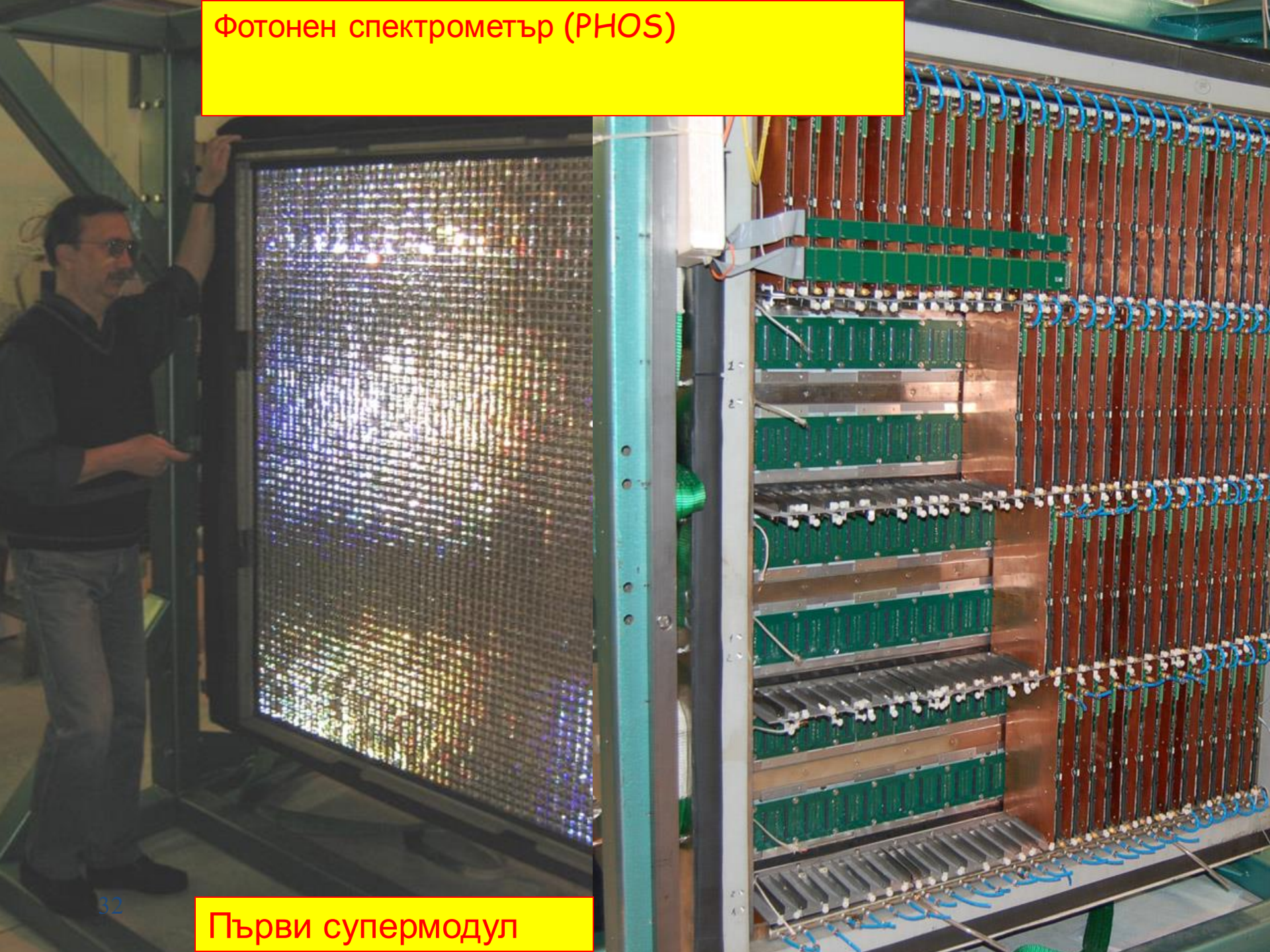


ALI-PERF-13974



ALI-PERF-27117

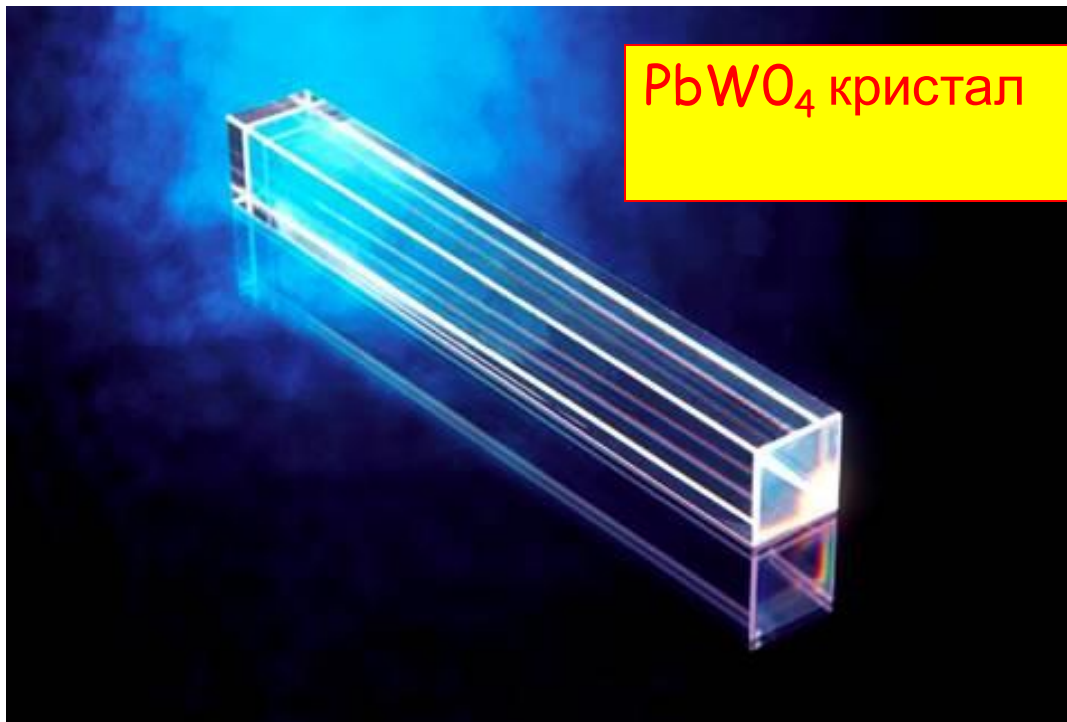
Фотонен спектрометър (PHOS)



Първи супермодул

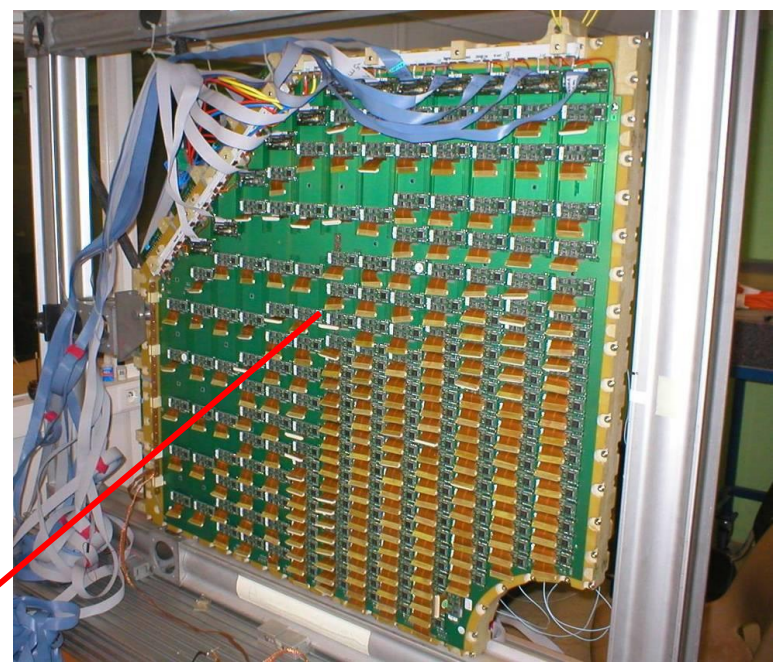
Фотонен спектрометър

- Плътен като олово и прозрачен като кристал

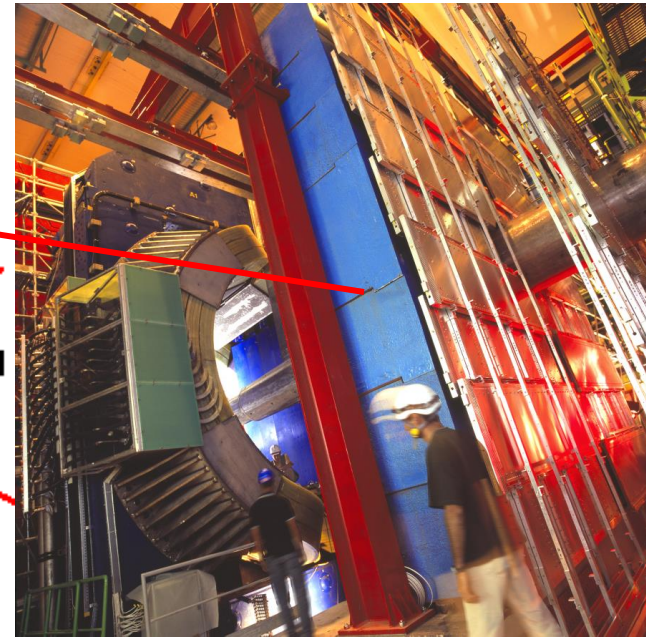
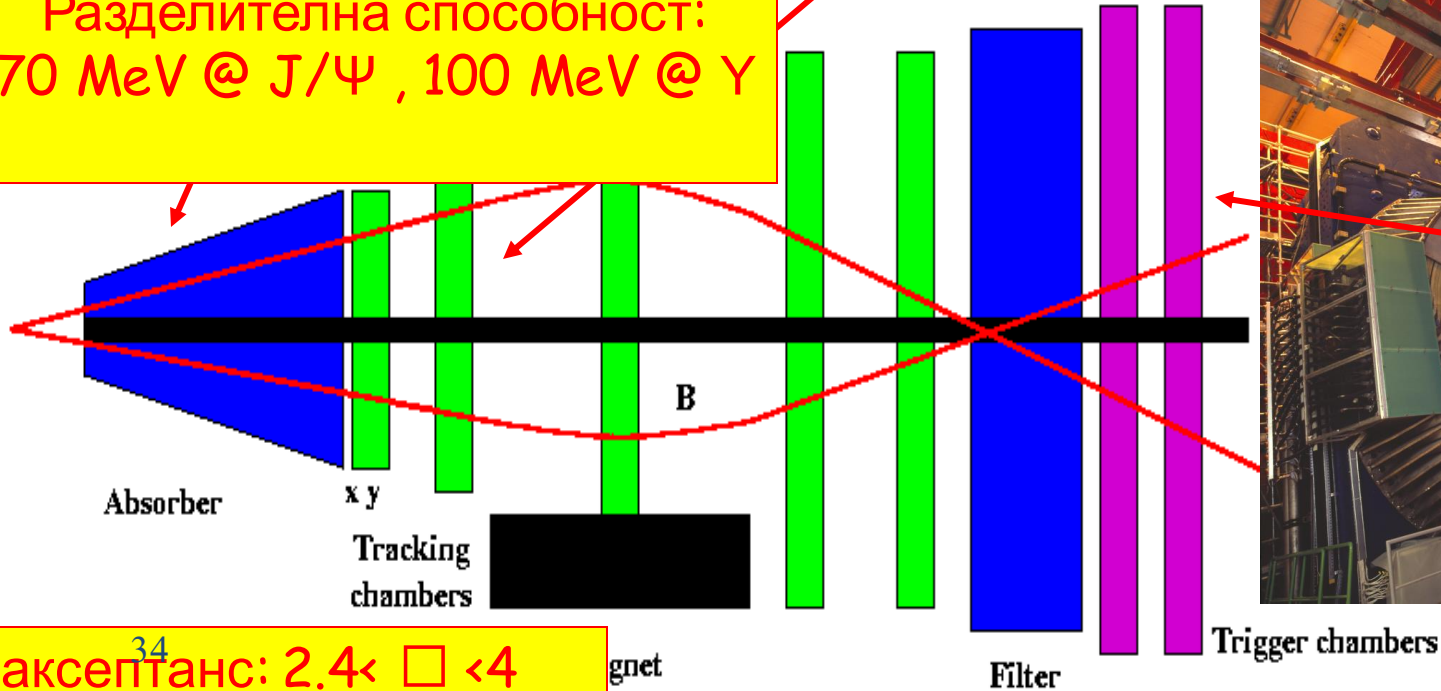


- Фотоните предизвикват каскади от електрони и позитрони
- Електроните възбуждат атомите на кристала
- Възбудените атоми излъчват в ултравиолетовия спектър
- Ултравиолетовото излъчване се регистрира от едната страна на кристала от фотодиод

(Дву)мюонен спектрометър



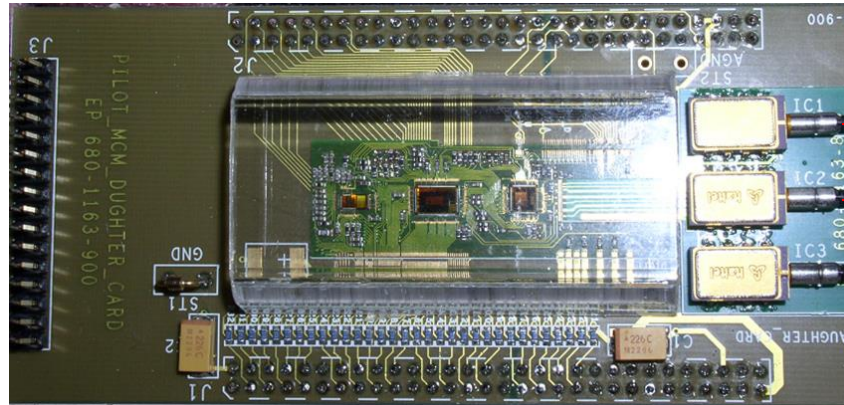
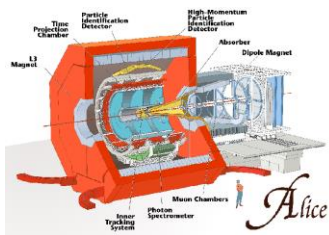
Разделителна способност:
70 MeV @ J/ψ , 100 MeV @ Υ



аксептанс: $2.4 < \square < 4$

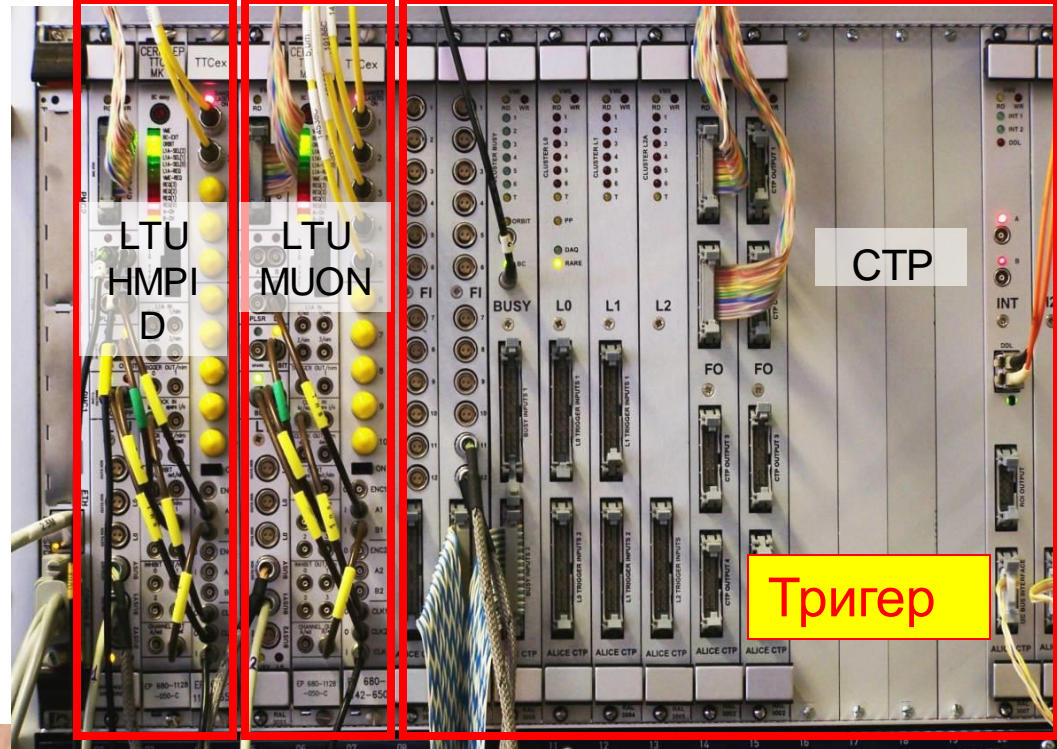
От волт към байт

- Сигналят от всяка клетка (~16 милиона) се обработва от високо интегрирана електроника;
- Електрическият сигнал се оцифрова, за да се обработи след това от компютър;
- Информацията се предава по оптически кабели.



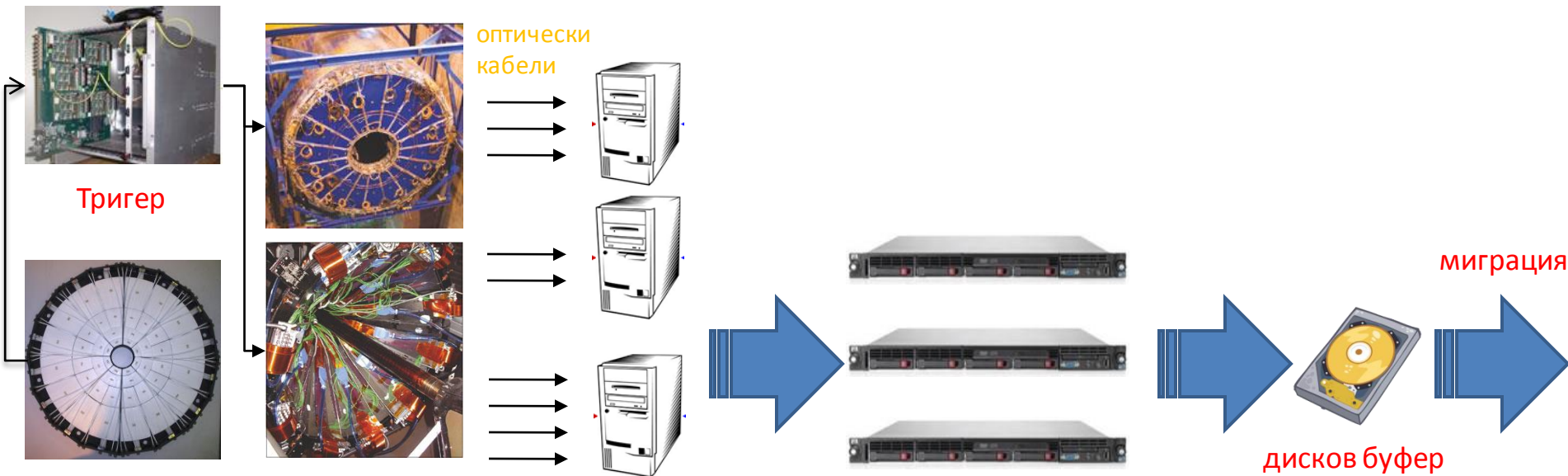


Система за събиране на данни



Тригер от високо ниво

Поток от данни



Детектор V0

Детектори

Части от събития

композиране на пълни събития

дискос буфер

миграция



Бърза реконструкция
Компресиране
Тригер от високо ниво



Реконструкция
Моделиране
Анализ



Обработка на данни

▶ Реконструкция

- Обединяване на сработилите канали в кълстери и след това в следи от заредени частици
- За всяка следа: импулс и идентификация

▶ Анализ

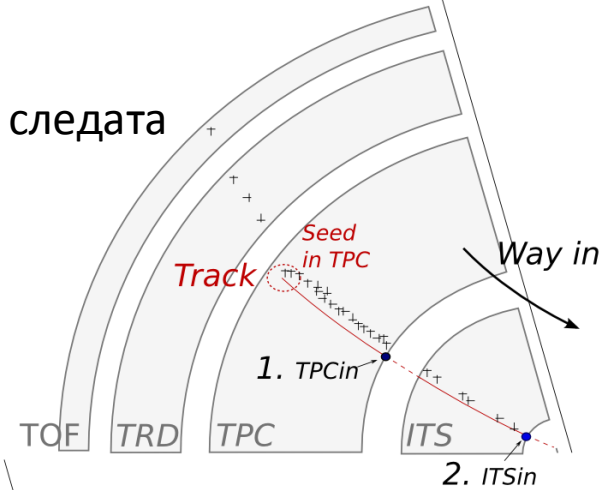
- Получаване на физическа информация

▶ **GRID:**

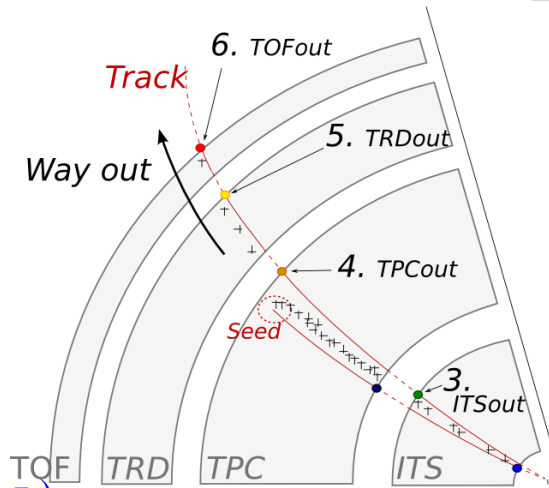
- Разпределни изчисления: T_0, T_1, T_2, \dots

Добавяне на кълъстери и
уточняване параметрите на следата

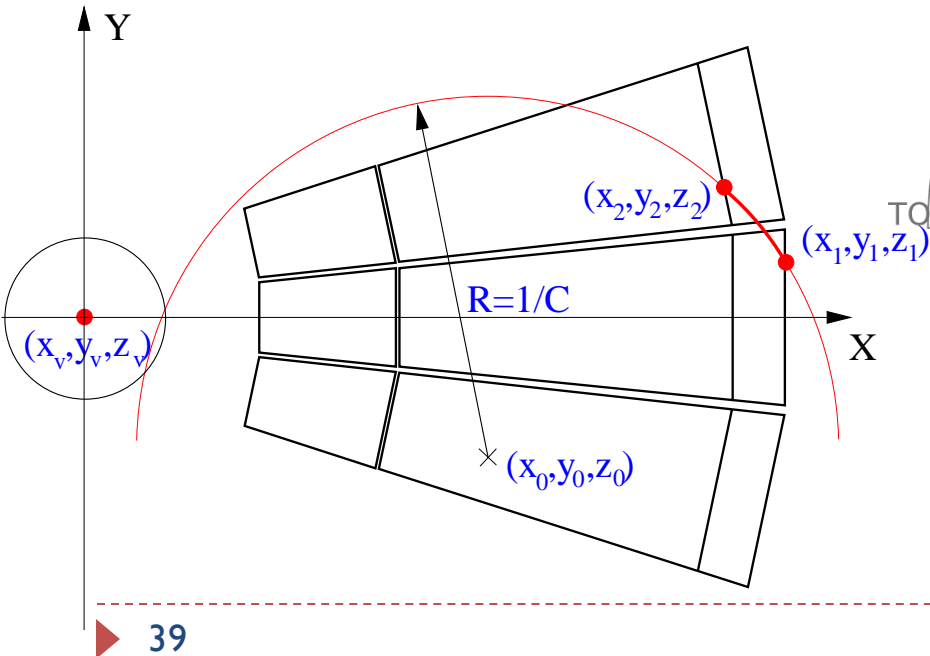
1st path



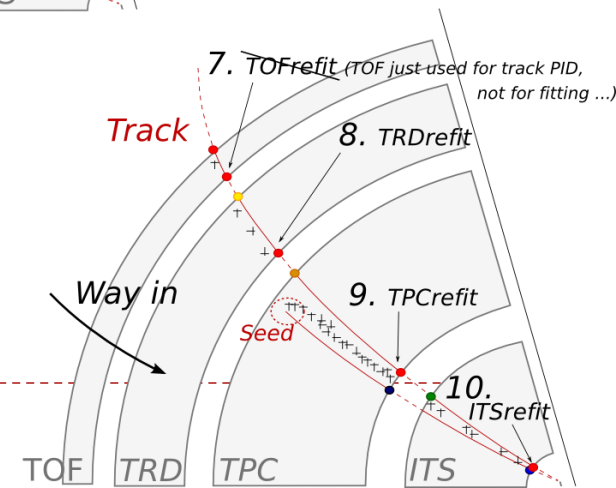
2nd path



Кандидати за следи



3rd path





Отчитане на детекторните ефекти

▶ Моделиране :

- Генерация на физически събития съгласно най-съвременните теоретически представи
- Конструирание на “виртуален детектор” и симулация на неговия отклик според нашите знания за взаимодействията на частиците с веществото

▶ Средства :

- Обектно-ориентирано програмиране (C++)
- Големи масиви данни и изчислителни мощности: разпределени изчисления

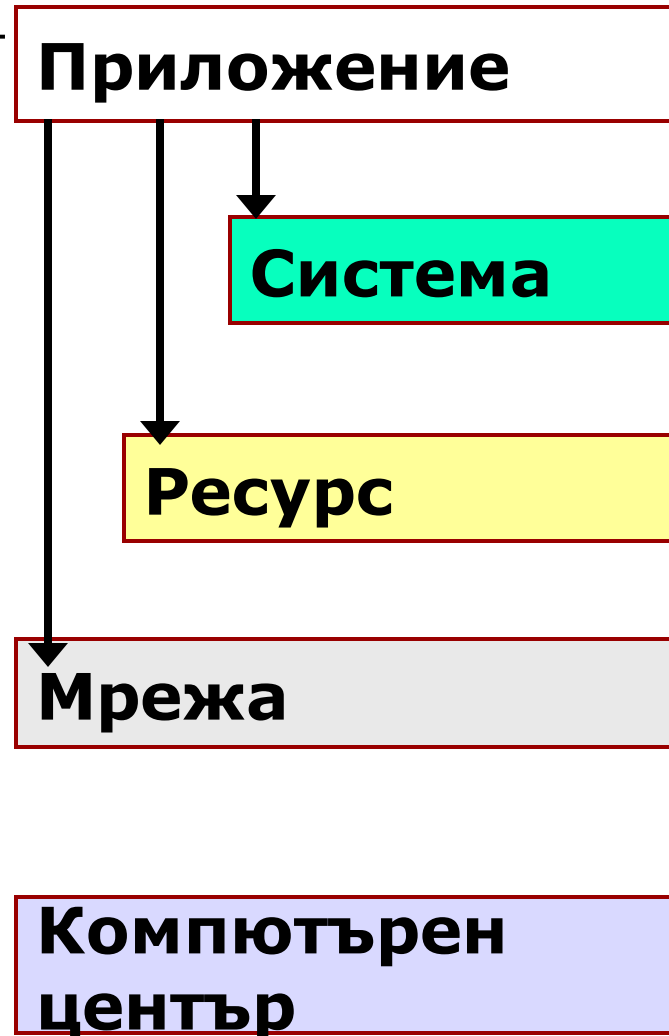
Архитектура на GRID

“Координация на множество от разпределени ресурси”

“Разпределяне на ресурси”:
Предоставяне на достъп,
контрол на използването

“Комуникация и безопасност”

“Локален контрол”: Локален
достъп и контрол над
ресурсите



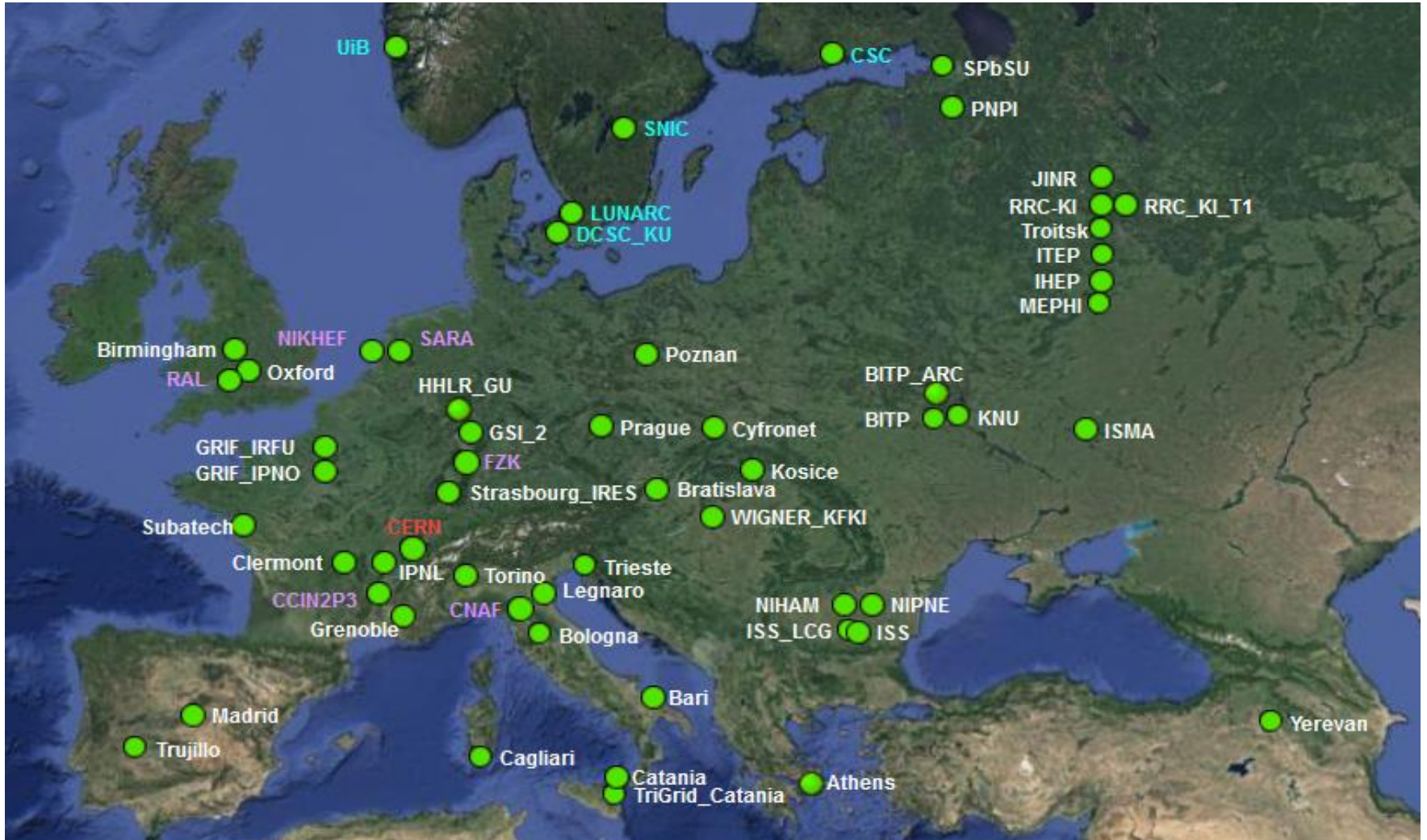
Компютърен Център



ALICE GRID

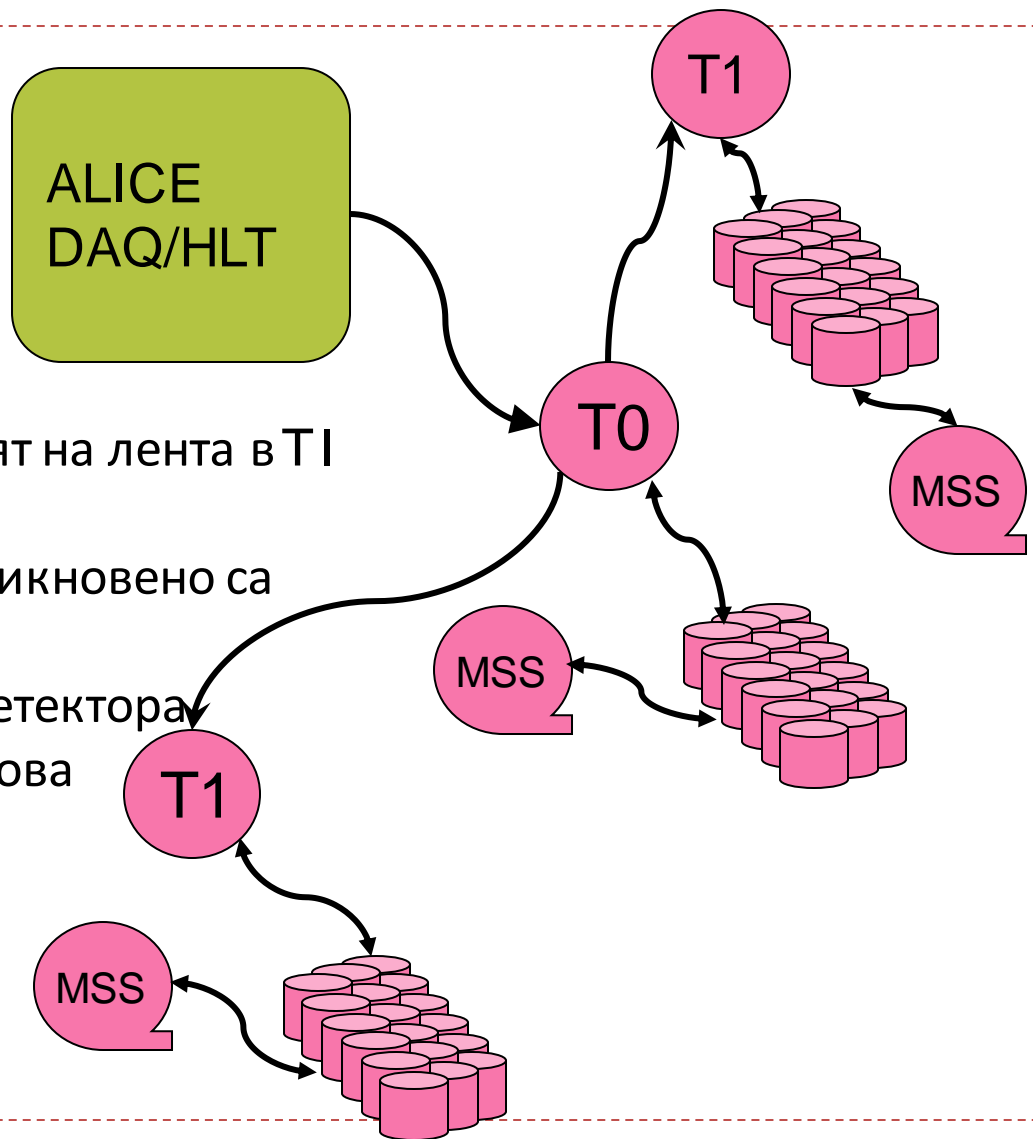


Центрове в Европа



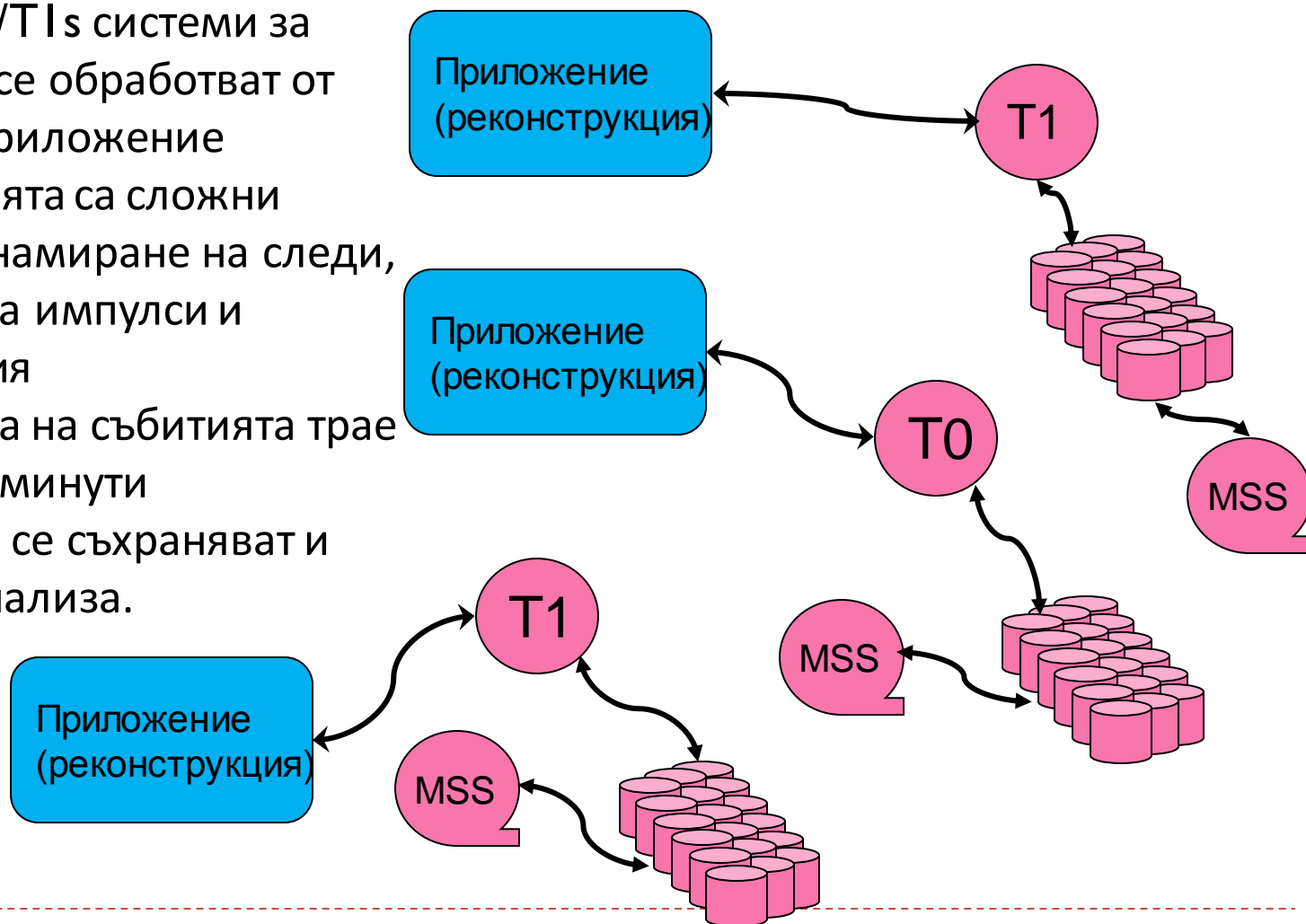
Копиране на данни

- Необработените данни се изпращат в T0 център (CERN)
- Едно или две копия се правят на лента в T1 извън ЦЕРН
- Лентовите (MSS) системи обикновено са по-икономични от дисковите
- Необработените данни от детектора не могат да се възстановят, затова има няколко копия



Обработка на данни

- Необработените данни се четат локално от T0/T1 системи за съхранение и се обработват от съответното приложение
- Приложенията са сложни алгоритми за намиране на следи, изчисляване на импулси и идентификация
- Обработката на събитията трае от секунди до минути
- Резултатите се съхраняват и използват в анализа.

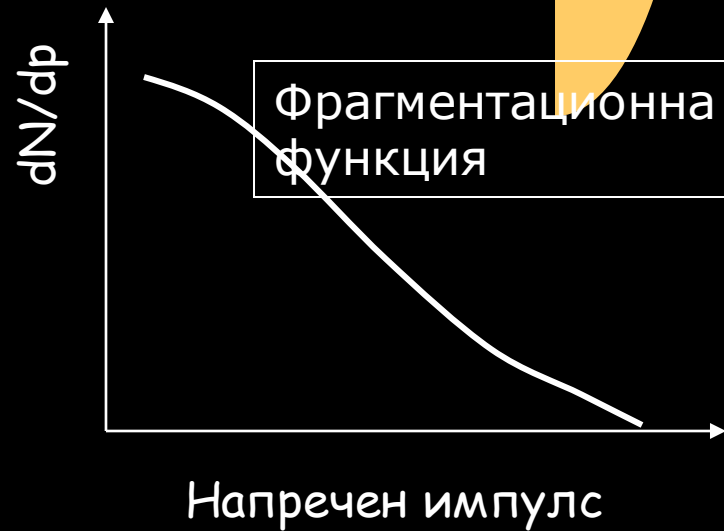
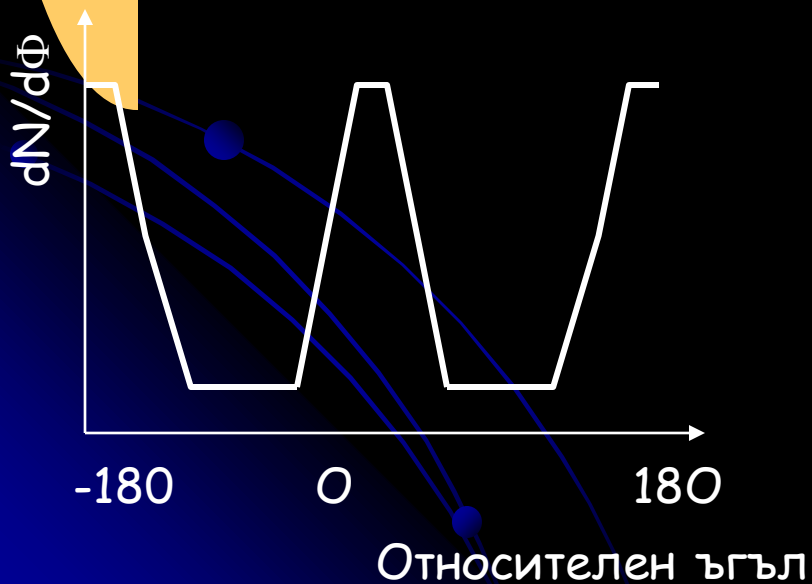
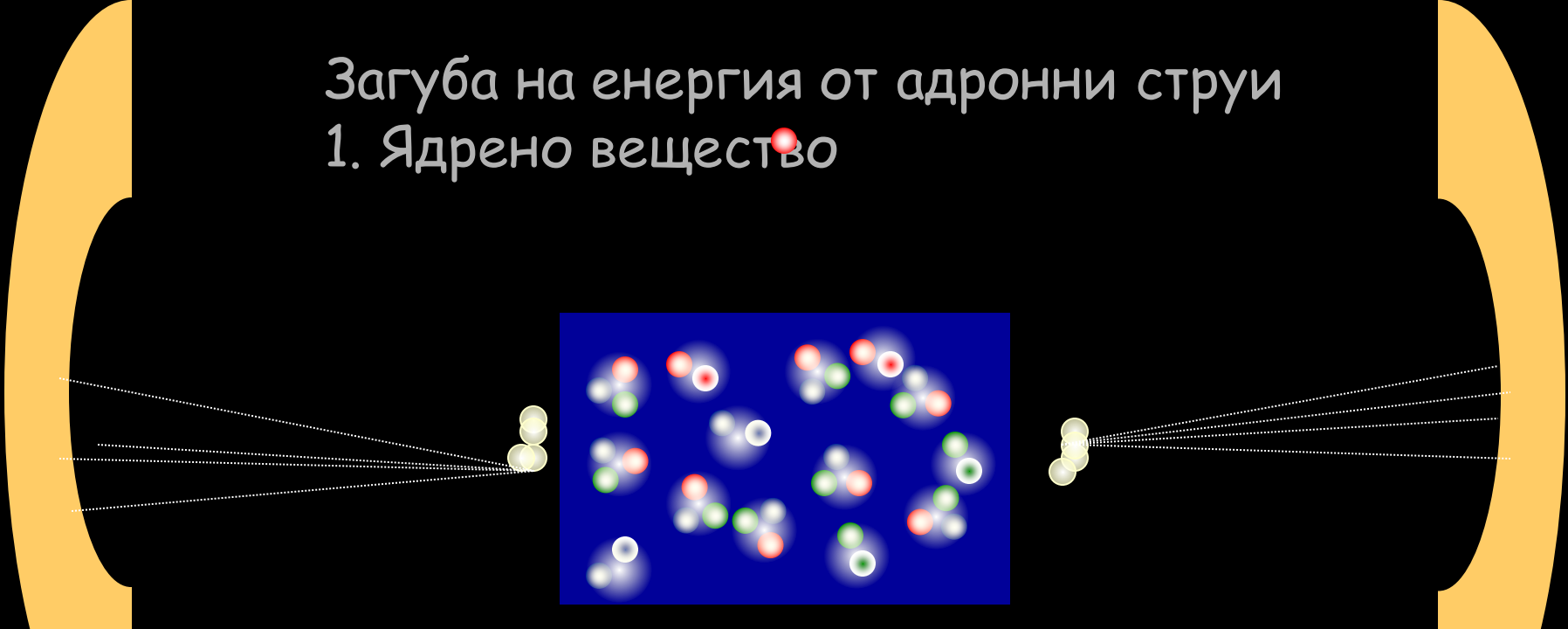


Избрани резултати



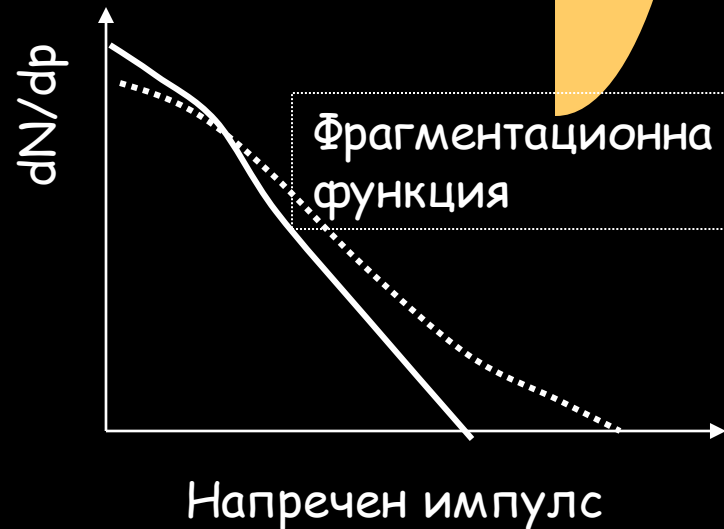
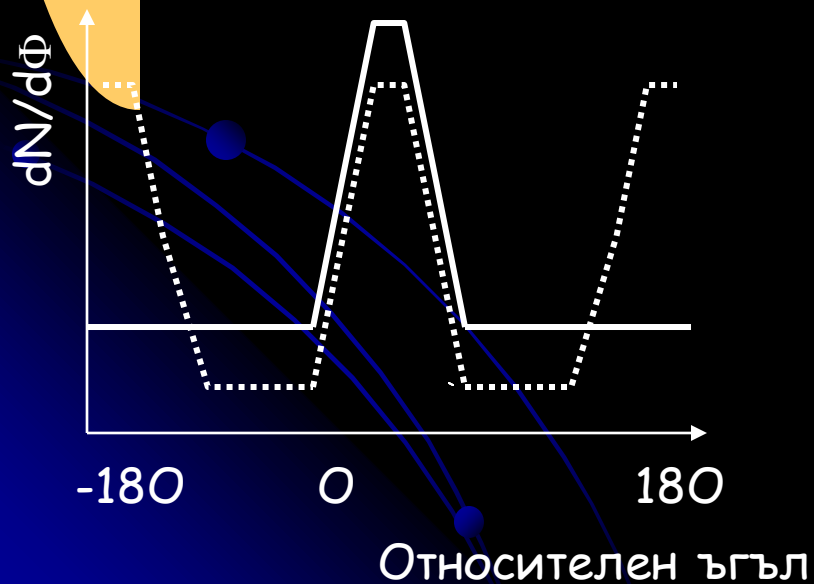
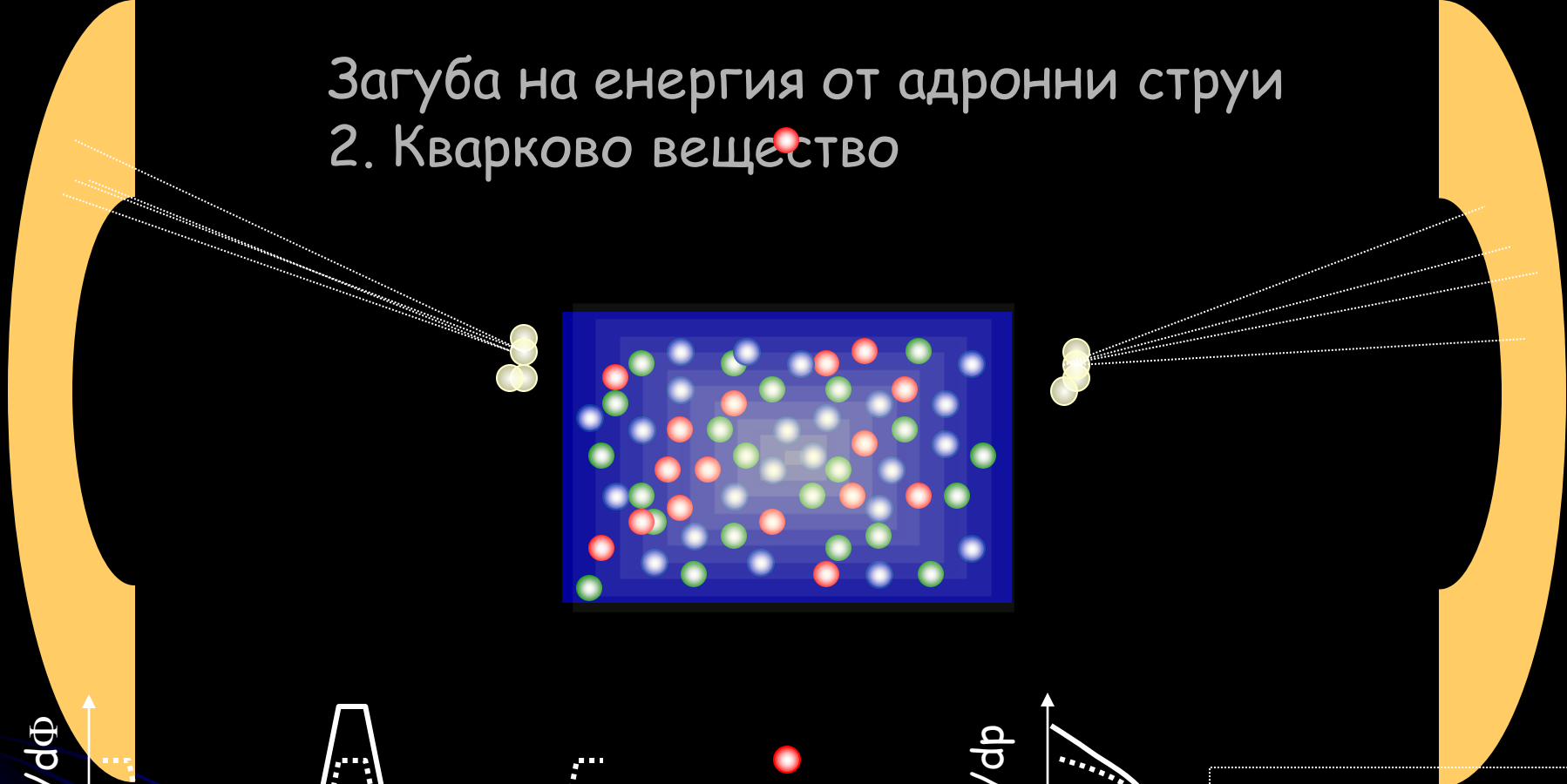
Загуба на енергия от адронни струи

1. Ядрено вещество

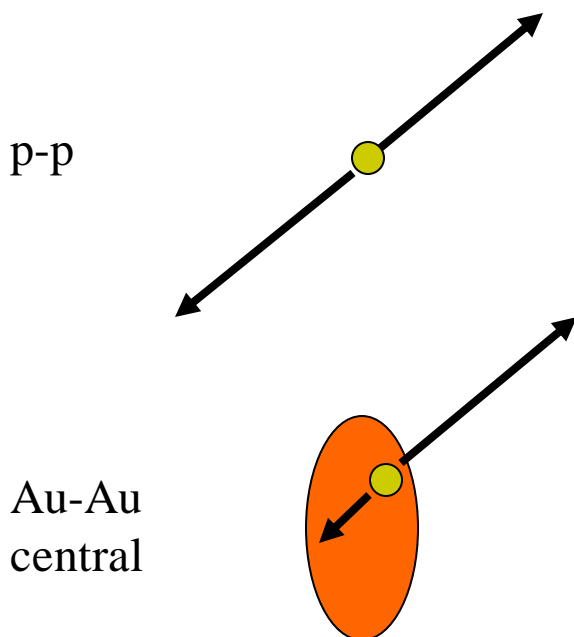


Загуба на енергия от адронни струи

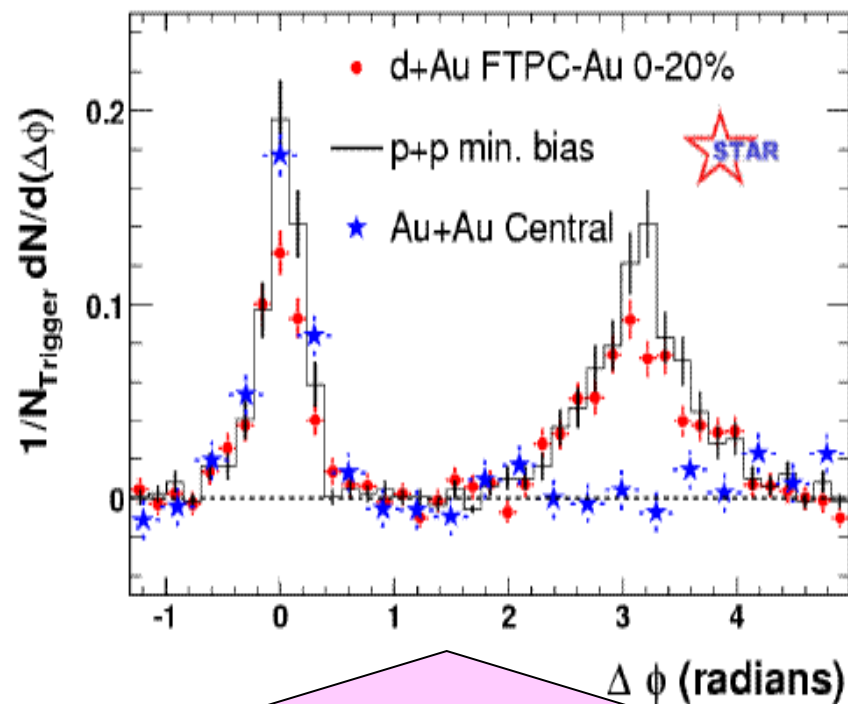
2. Кварково вещество



Струи: азимутални корелации @ RHIC



Phys. Rev. Lett. 91, 072304 (2003).



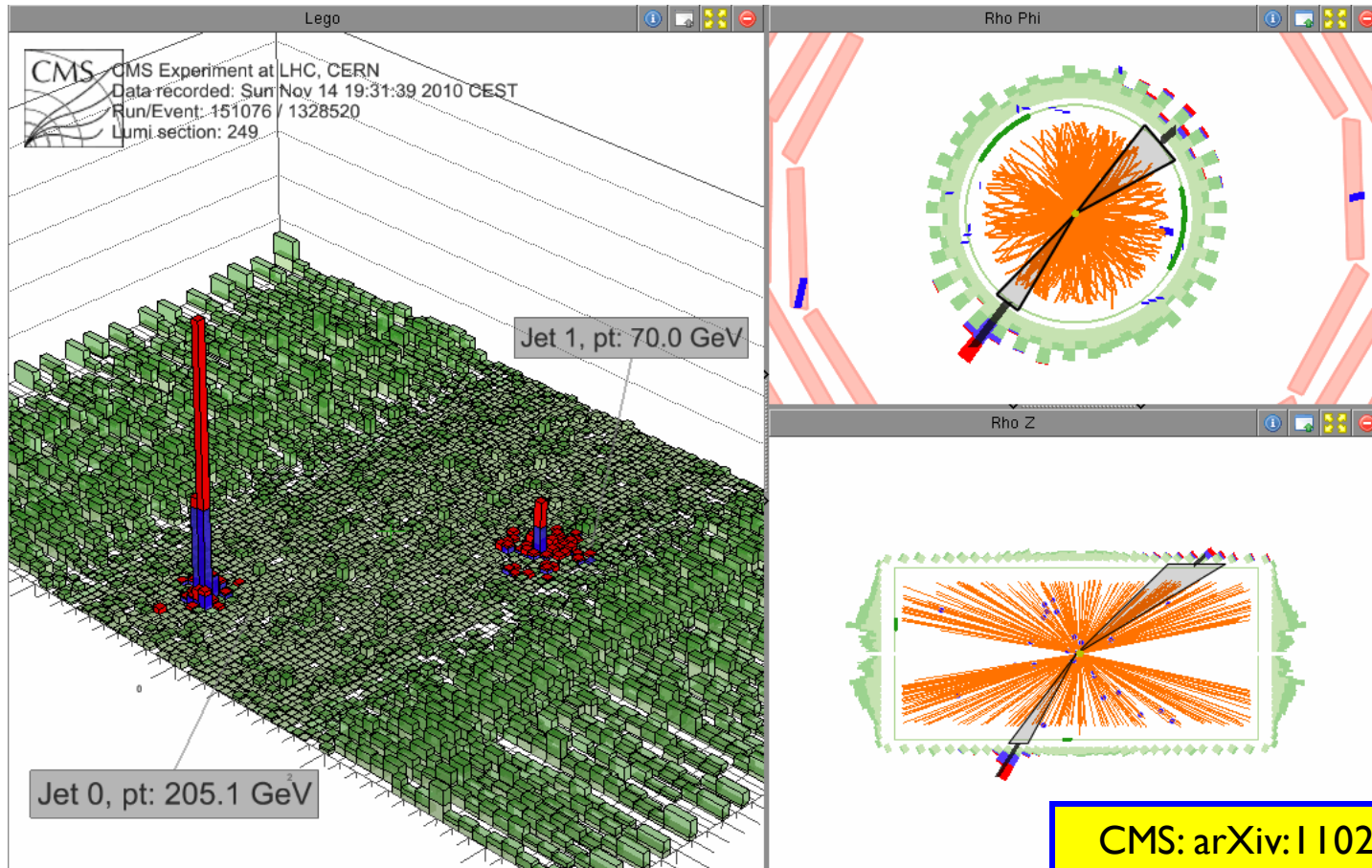
Струята-партньор минава през веществото на КГП и може да загуби много енергия, ако то е плътно

→ азимуталната корелация се развива

Плътно вещество!

Струи @ LHC

► Рb-Рb събитие с голяма енергетическа асиметрия

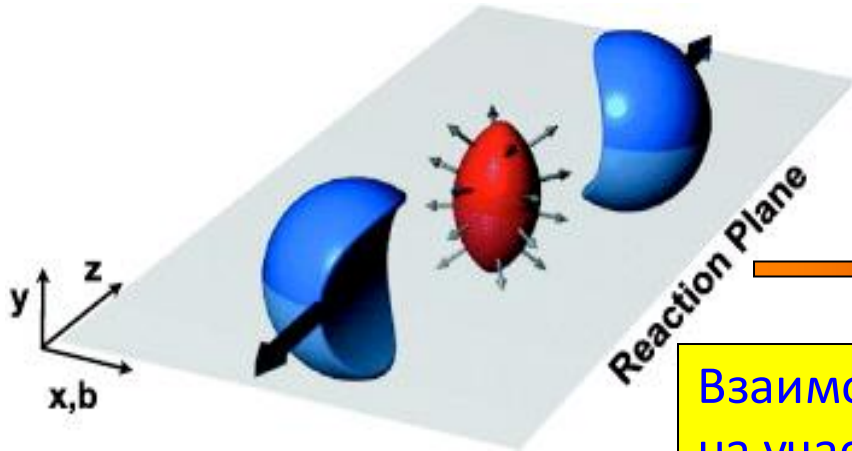


→ струята-партньор губи много енергия, но е в очакваната посока!

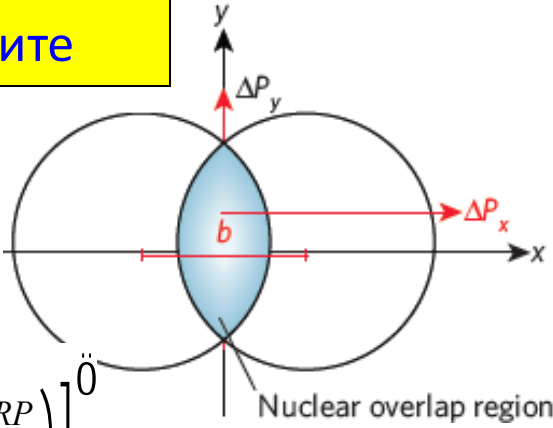
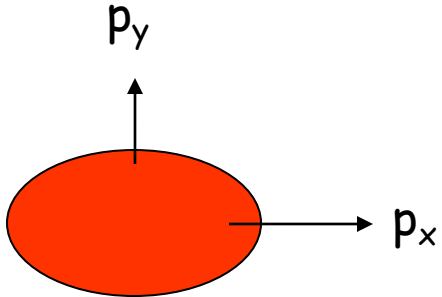
Азимутален поток от частици

Начална пространствена анизотропия

Анизотропия на импулсите след сблъсък



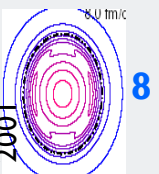
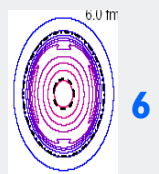
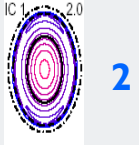
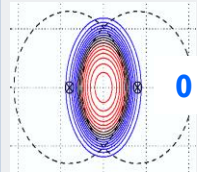
Взаимодействие на участниците



- ▶ Анизотропен градиент на налягане => анизотропни импулси
- ▶ Силна връзка + малък вискозитет => хидродинамичен поток

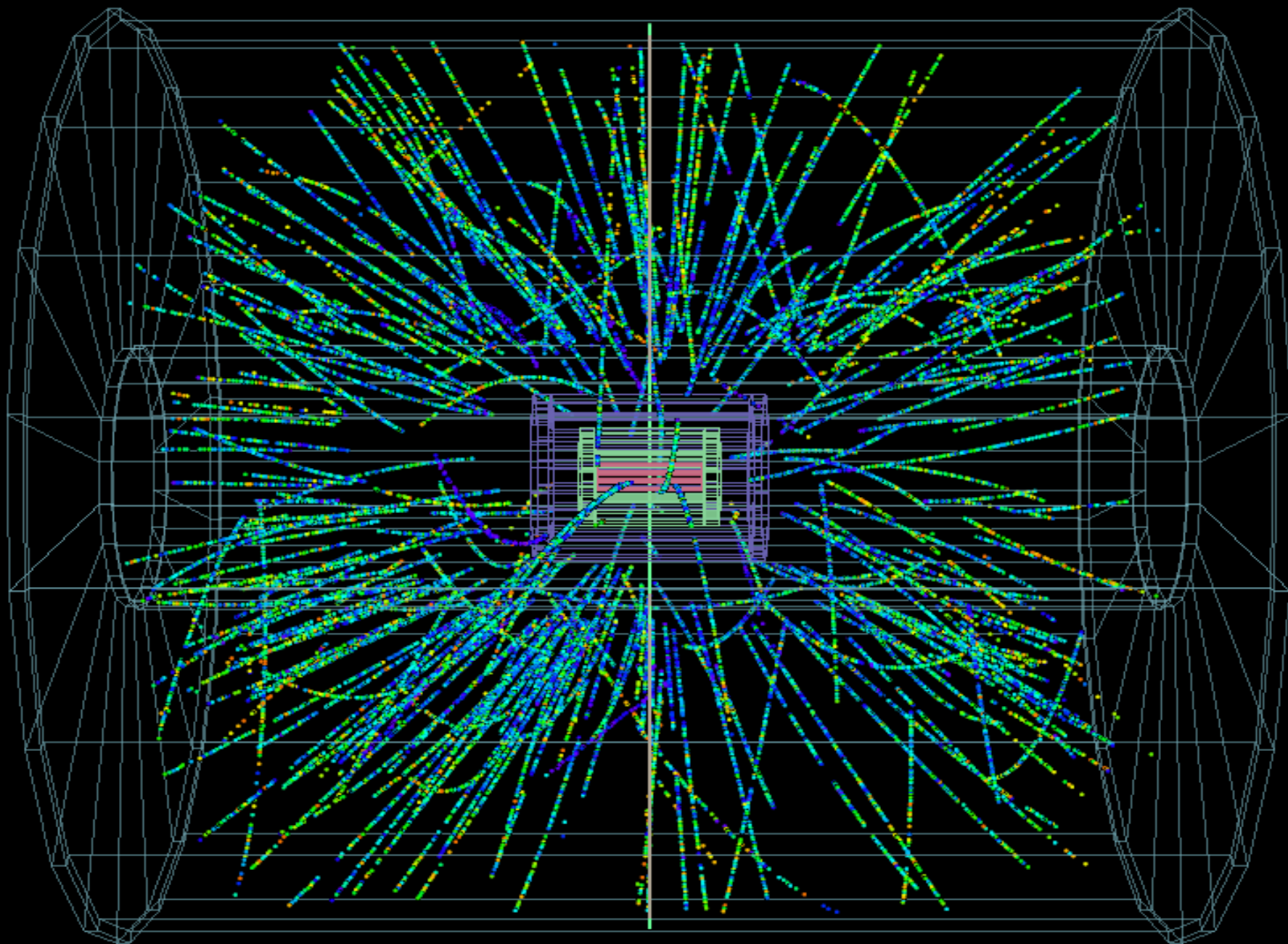
$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{2\rho} \frac{d^2 N}{p_T dp_T dy} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{v_n}{v_n} \cos[n(\phi - \Psi_n^{RP})] \right]$$

хидродинамика

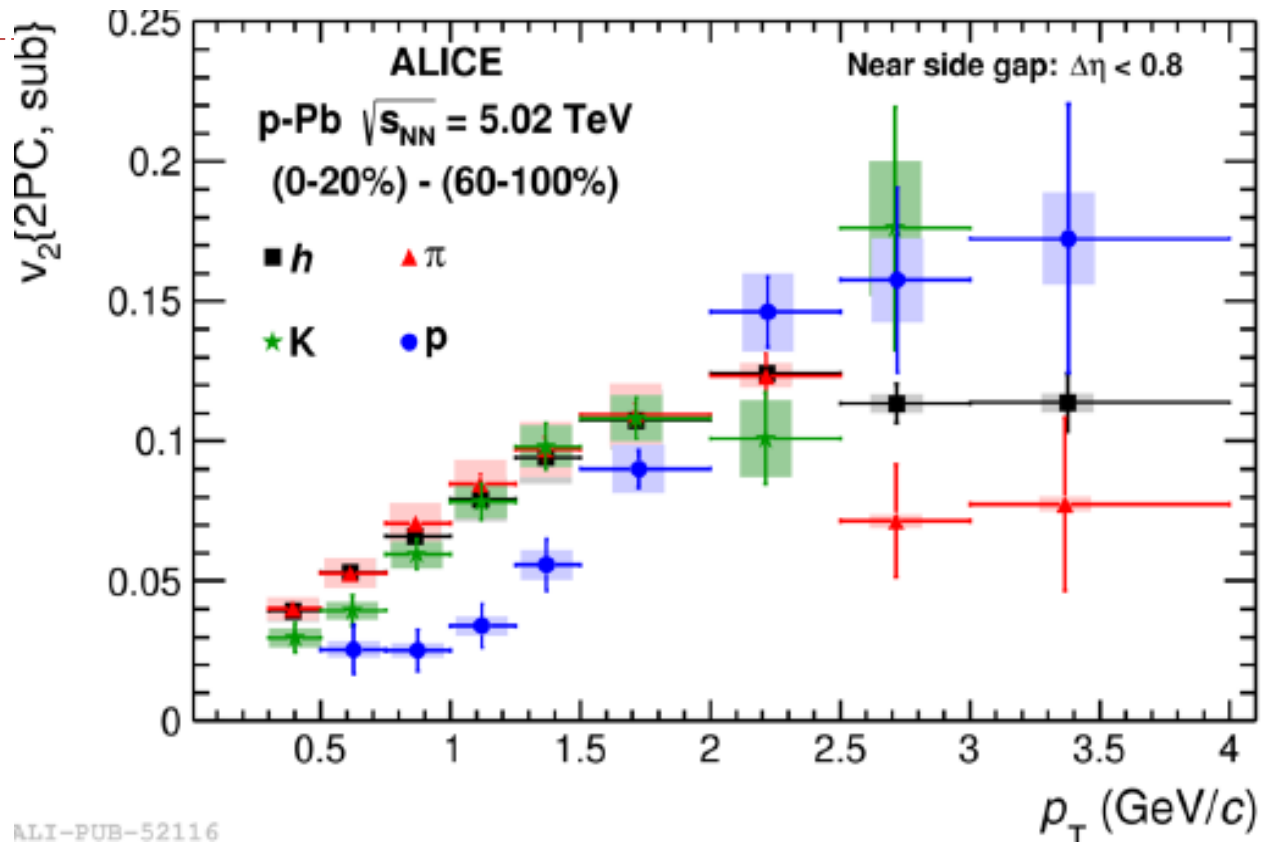


Kolb & Heinz 2001

fm/c



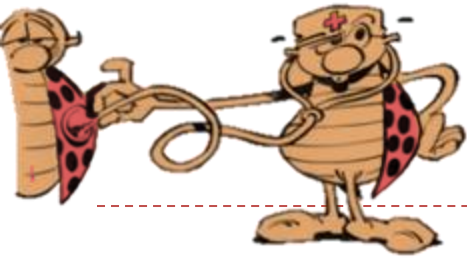
Измерване на v_2 в p-Pb



ALI-PUB-52116

- Частиците с различна маса имат различно поведение в p-Pb събития
- Картината е подобна на тази в Pb-Pb
- В системата се наблюдава колективно поведение!





Заклучение

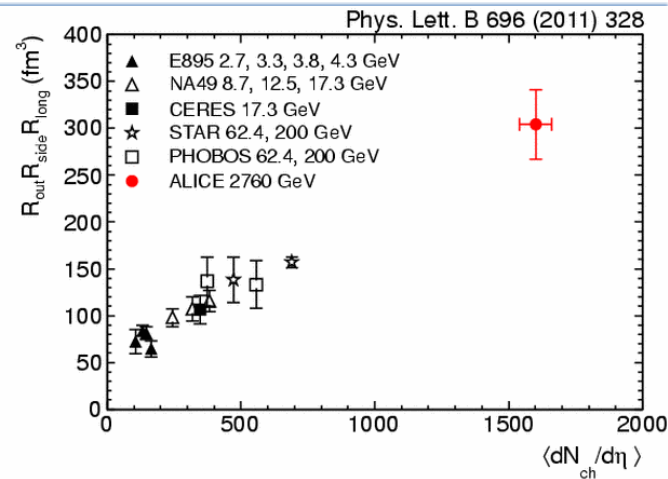
- Изследвания преди и на SPS => указания за създаване на КГП
- Изследвания на RHIC: загуба на енергия в адронни струи, елиптичен поток => **КГП е гореща плътна материя, подобна на идеална течност**
- LHC: акцент върху свойствата на “горещата плътна материя”, процесите с голям предаден импулс и точните измервания
- Неочаквани резултати в p-Pb събития: указания за колективно поведение в “малки” системи



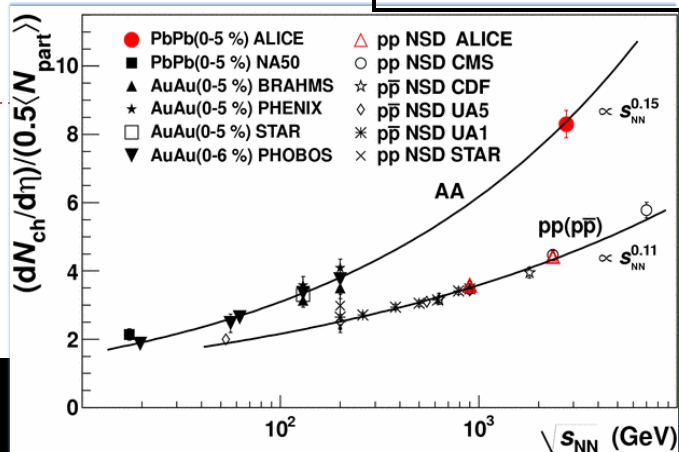
Допълнителна информация

Глобални характеристики

PRL 105, 252301 (2010)



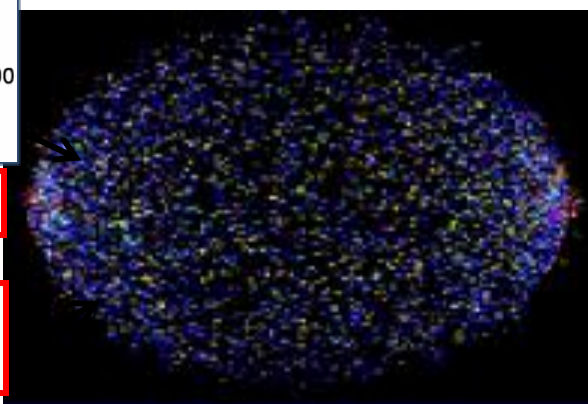
$$\varepsilon(\tau) = \frac{E}{V} = \frac{1}{\tau_0 A} \frac{dN}{dy} \langle m_t \rangle$$



ALI-PUB-174

Обем ~ 2 x RHIC ($R^3 \sim 300 \text{ fm}^3$)

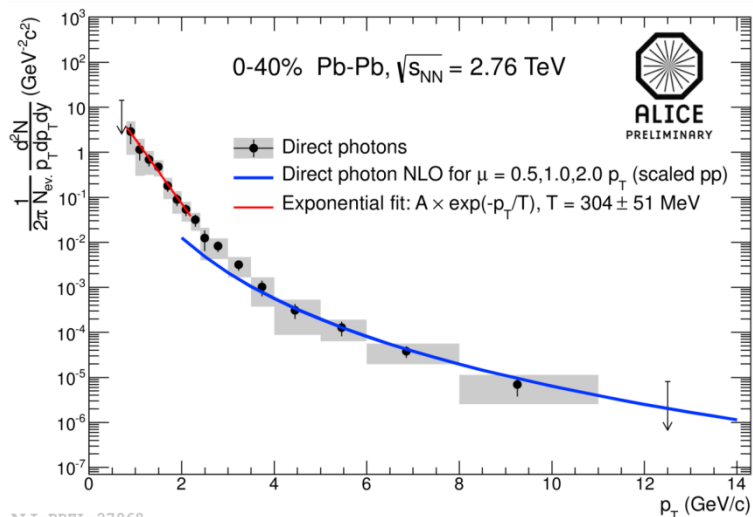
Температура $T = 304 \pm 51 \text{ MeV} \sim 1.4 \times T_{\text{RHIC}}$



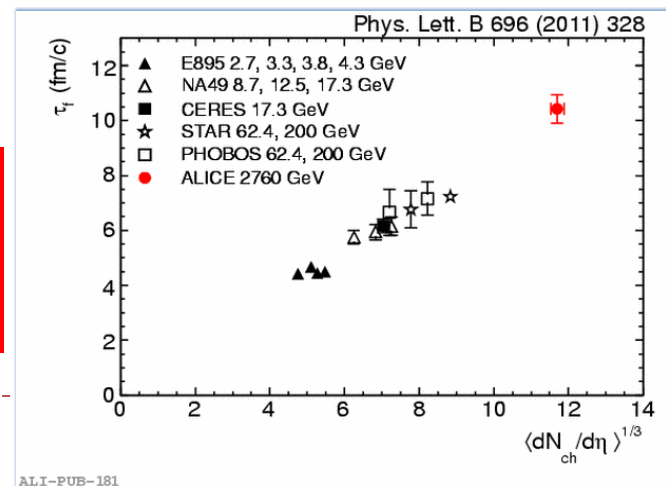
ALI-PUB-15

**Плътност на енергията ~ 3 x RHIC
~ 10 GeV/fm³**

**Време на живот: +20% wrt RHIC
(~ 10 fm/c)**



@LHC: по висока температура, по-голяма област, по-дълъг живот



ALI-PREL-27968

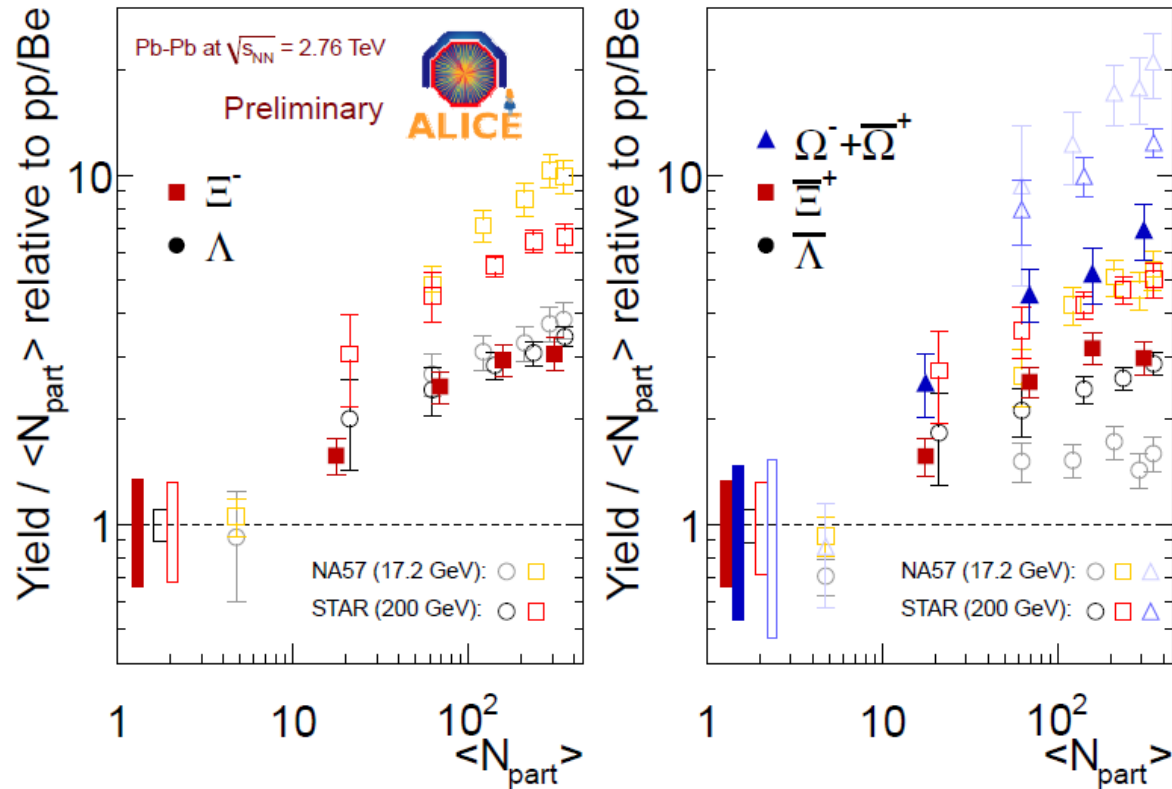
ALI-PUB-181

“Класически сигнал”: странност @SPS,RHIC,LHC

- ▶ Увеличено раждане на странни частици в КГП (Rafelski'82):

- ▶ Възстановяване на киралната симетрия => намаляване на масата на странния кварк до токовото значение ~ 150 MeV
- ▶ Принцип на Паули (малко свободни състояния за u, d кварки)

- ▶ Канали на разпад



Алтернативно обяснение: не увеличено раждане в AA, а намалено в pp поради локално съхраняване на странността => малък фазов обем/канонично разпределение за двойки странни кварки.

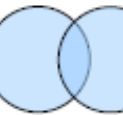
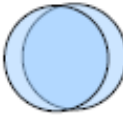
Импулсни спектри за идентифицирани частици

- ▶ Радиален поток => апроксимация с ударна вълна; хидродинамични модели

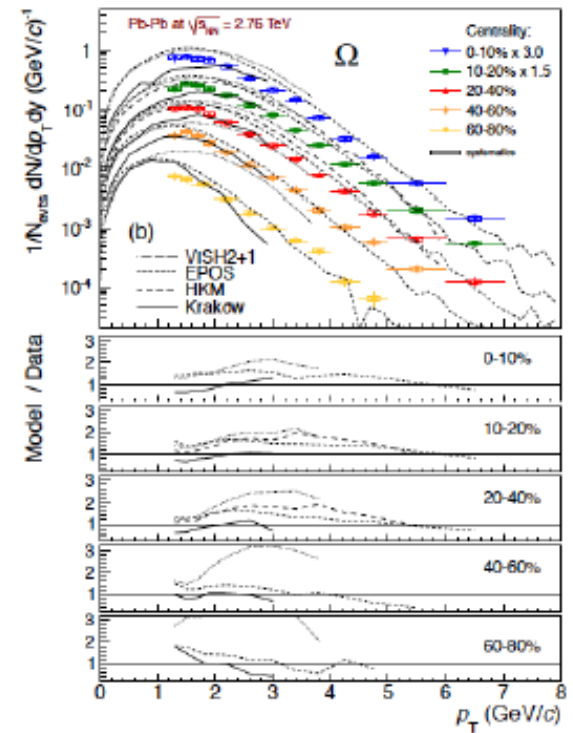
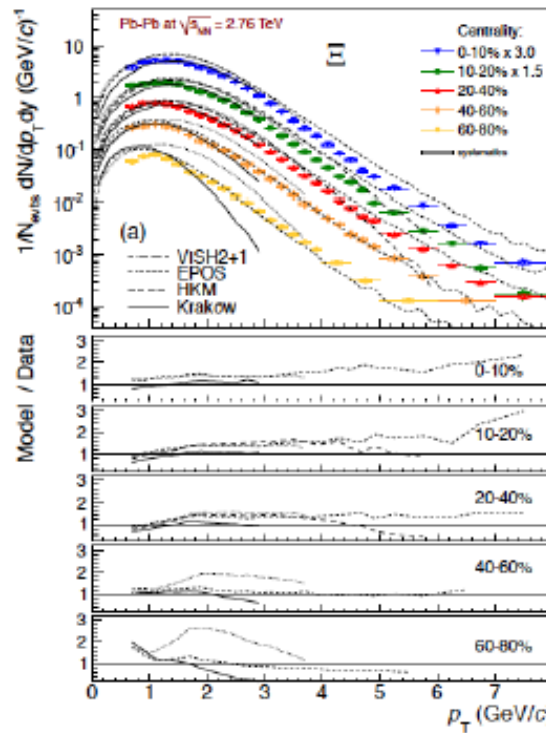
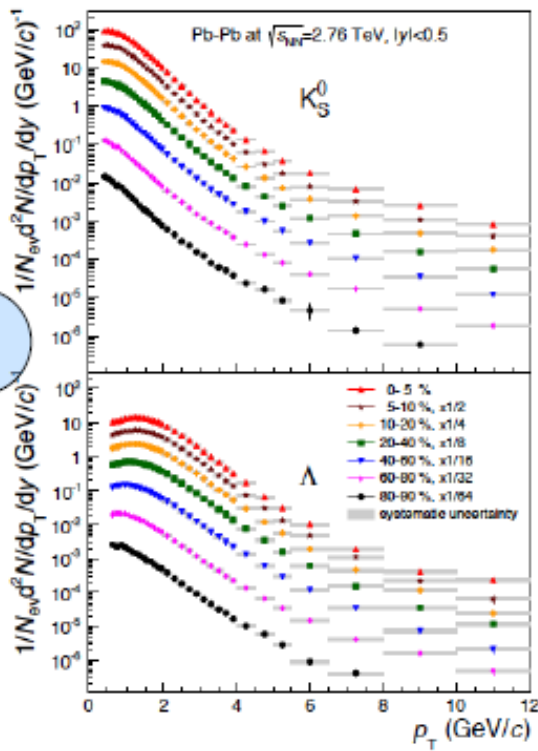
K^0_S , Λ , Ξ , Ω : topological reconstruction + particle identification



ALICE

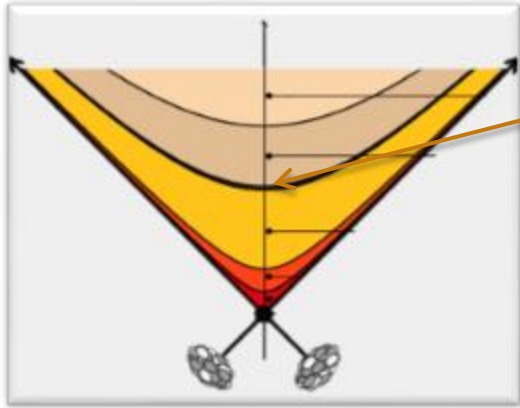


arXiv submit/0764109



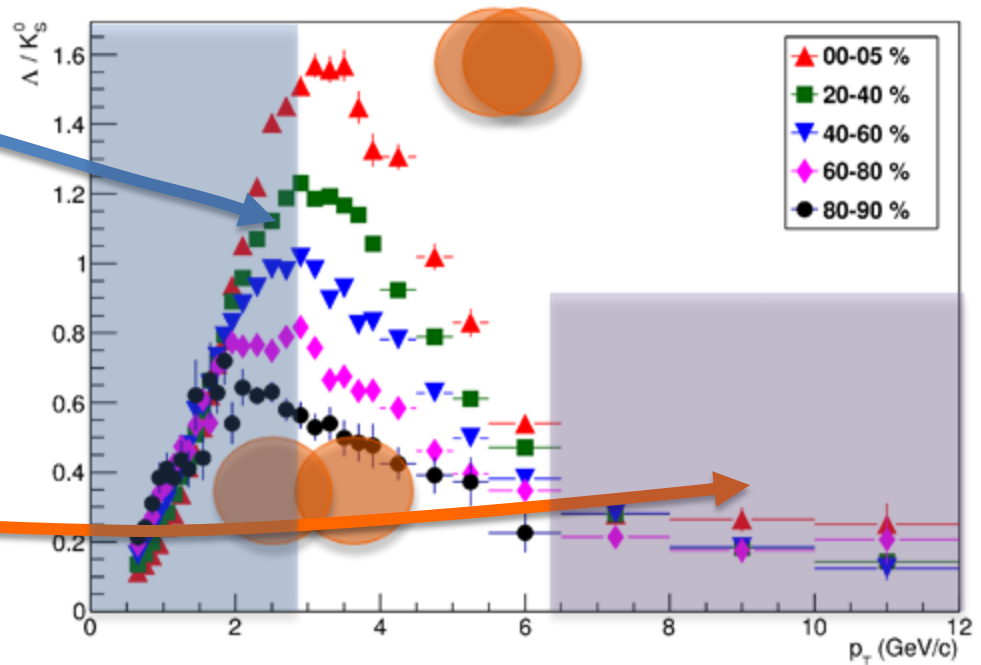
arXiv submit/0764130

Адронизация



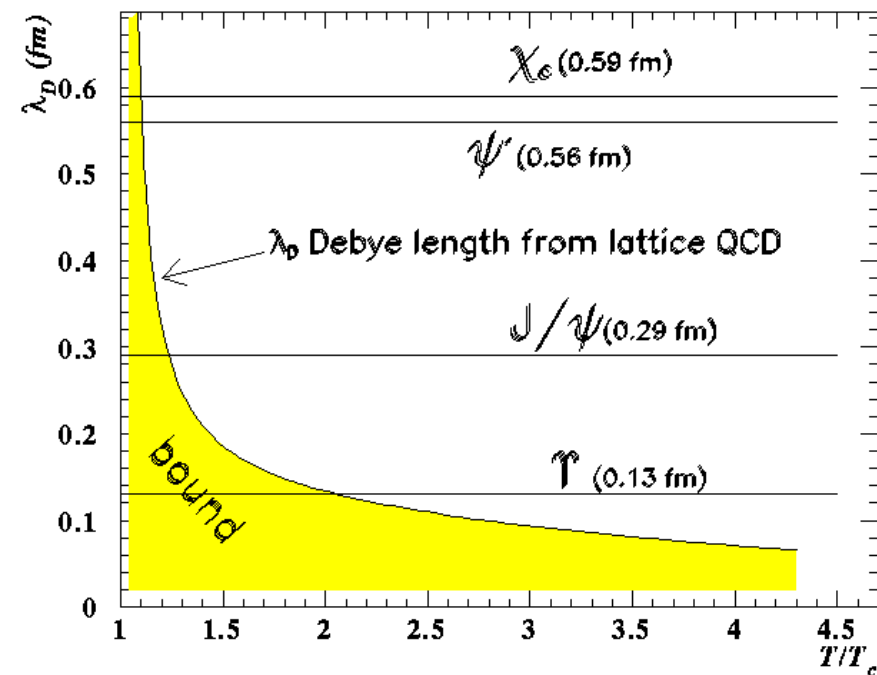
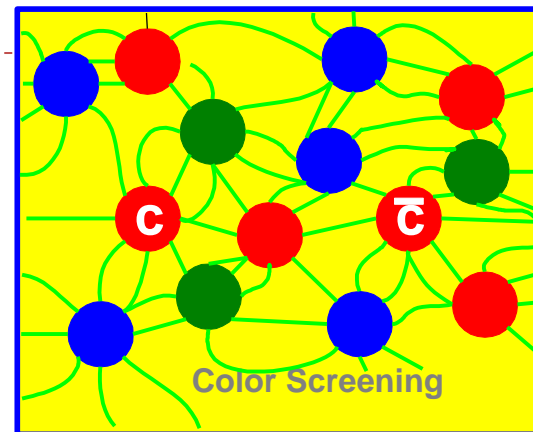
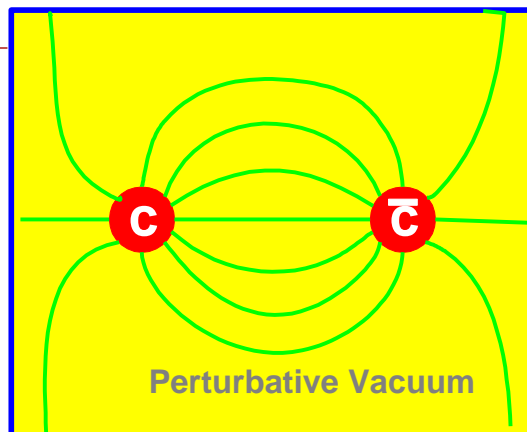
Аномалия барион/мезон:
много повече бариони в PbPb
в сравнение с e+e- на LEP

- Радиален поток
- Фрагментация
- Рекомбинация

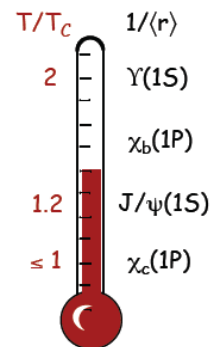


Изчезване на резонанси

Екраниране на
силното взаимодействие
в КГП

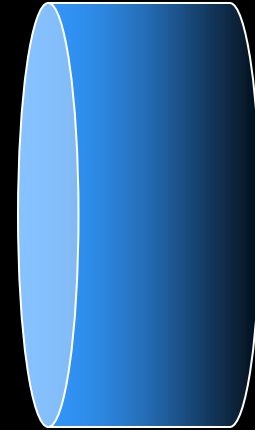
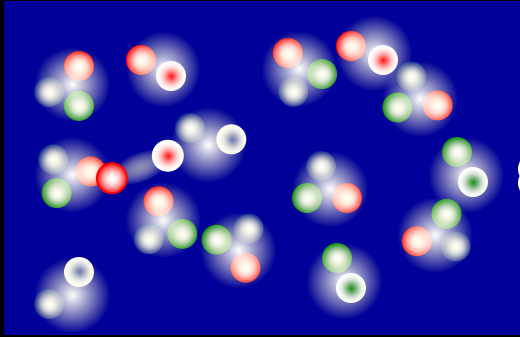


- ▶ Екранирането расте с T
- ▶ $\square_D \Rightarrow$ размерът на свързаното състояние намалява с T
- ▶ Различните резонанси имат различен размер
- ▶ “Разтапяне” на резонанси
- ▶ \Rightarrow термометър за КГП

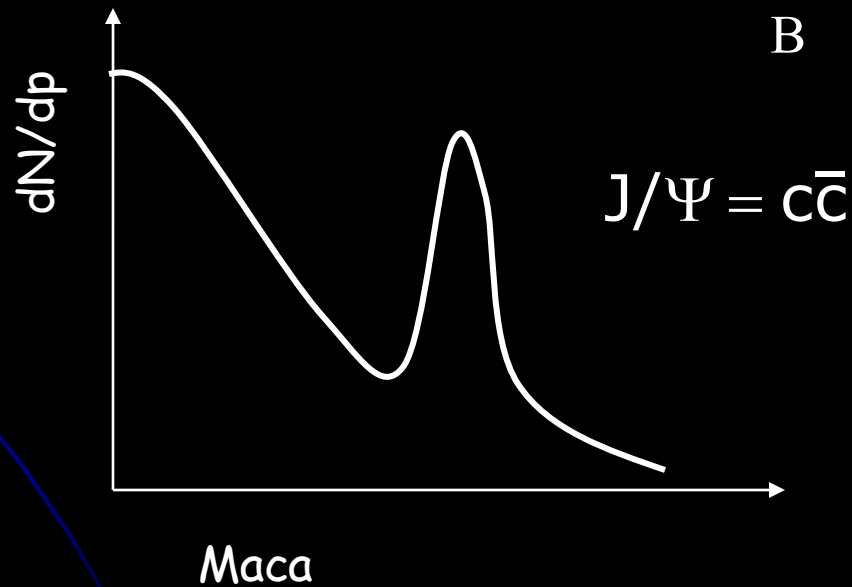
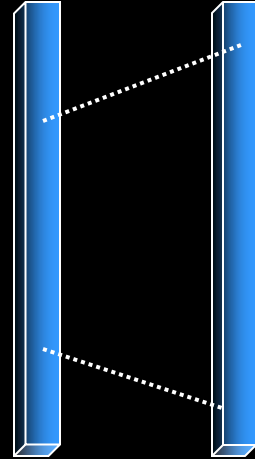


"Изчезване" на резонанси с тежки кварки

1. Ядрена материя

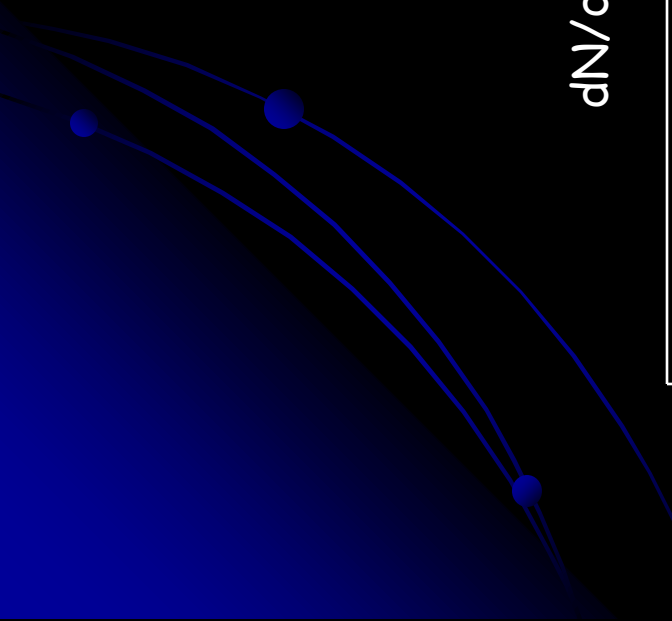
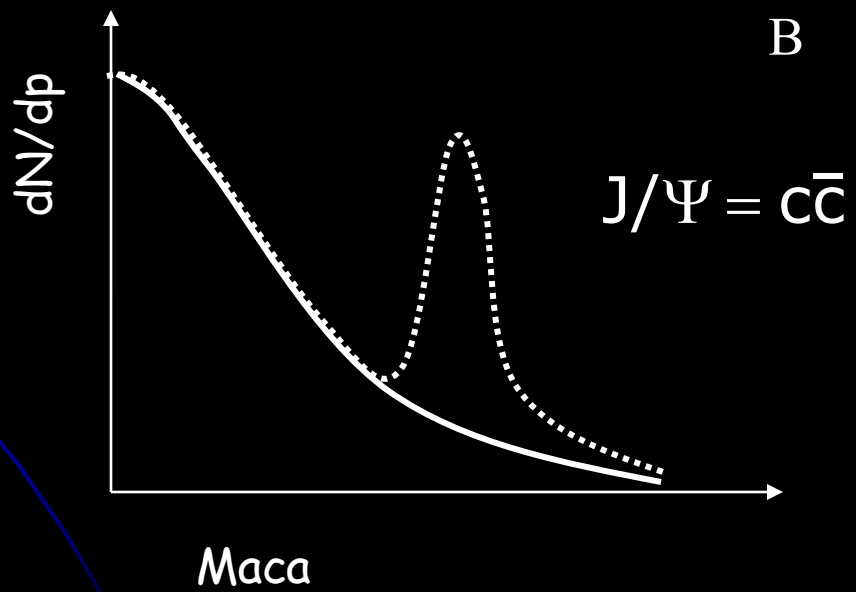
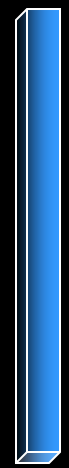
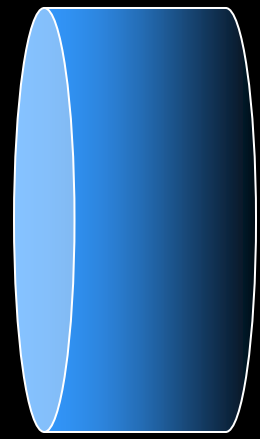
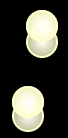
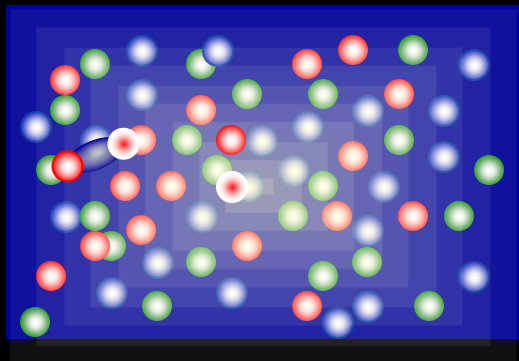


B



"Изчезване" на резонанси с тежки кварки

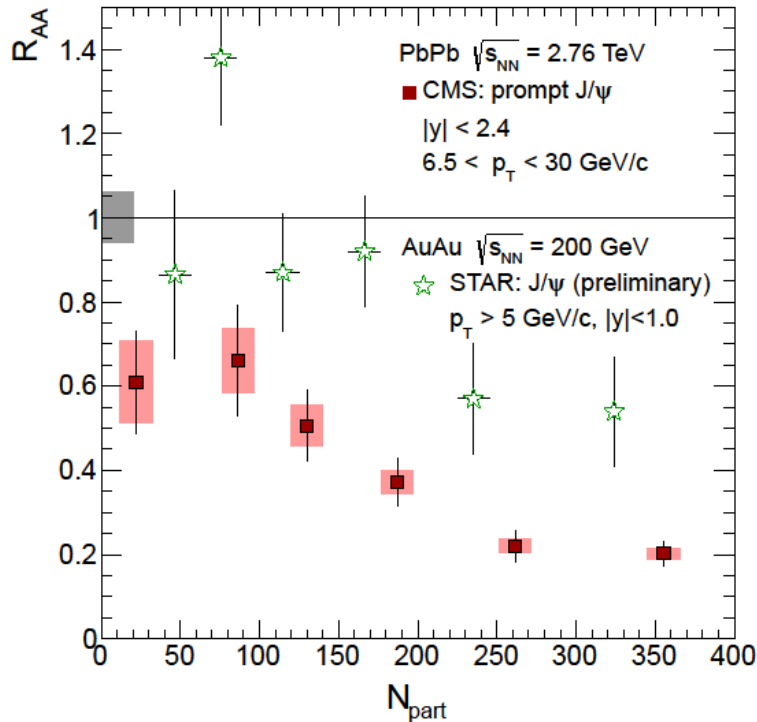
2. Кваркова материя



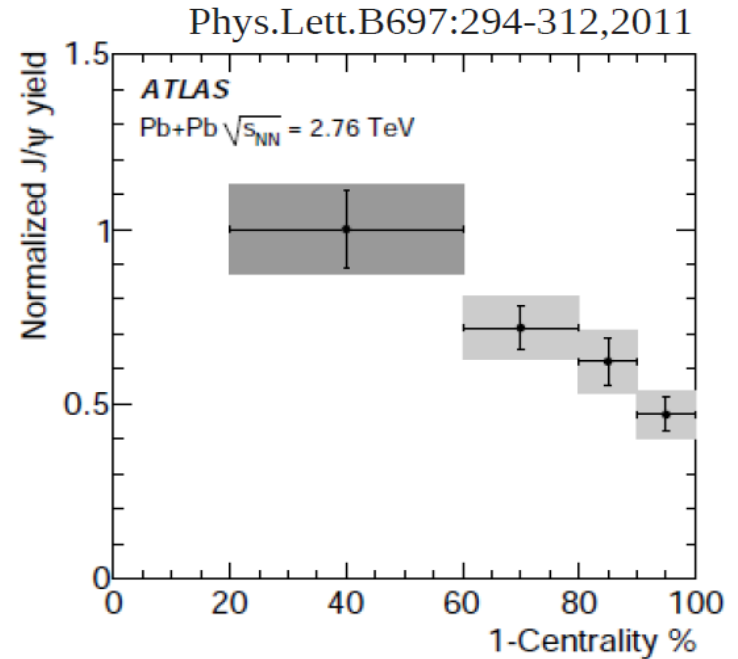
J/ψ @ LHC vs RHIC: високи p_T

▶ LHC: $|y| < 2.4$, $p_T > 6.5$ GeV/c (CMS)

• LHC $|y| < 2.5$, $p_T > 3$ GeV/c (ATLAS)



CMS: arXiv:1201.5069

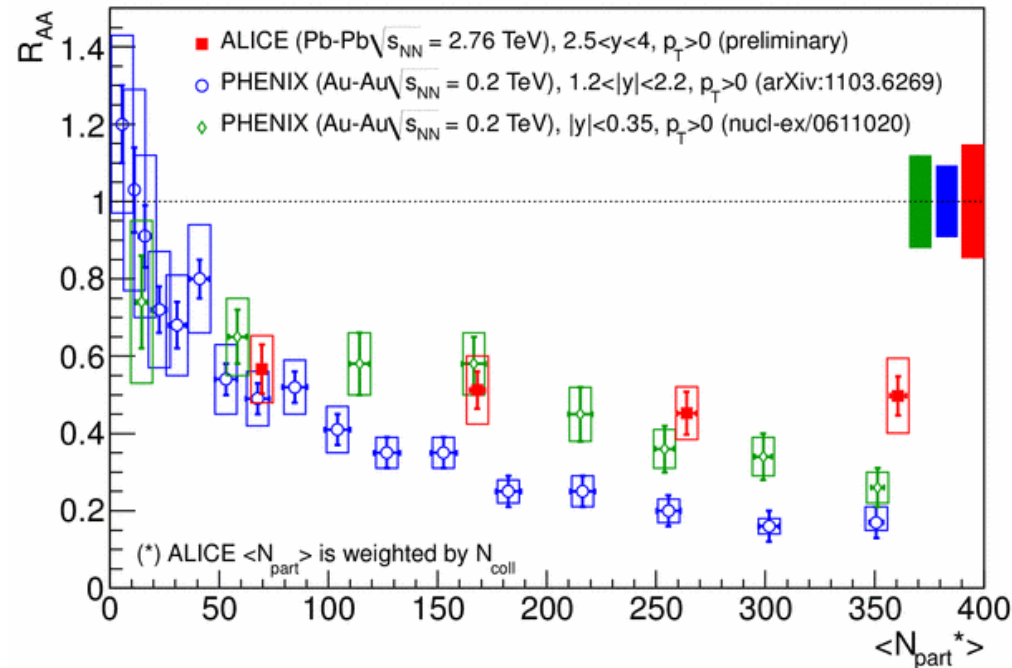


ATLAS: PLB 697 (2011) 294

→ по-голямо поглъщане от това на
RHIC: $|y| < 1$, $p_T > 5$ GeV/c (STAR)

J/ψ @ LHC vs RHIC: малки p_T

- LHC: 2.5 < y < 4, p_T > 0 (ALICE)

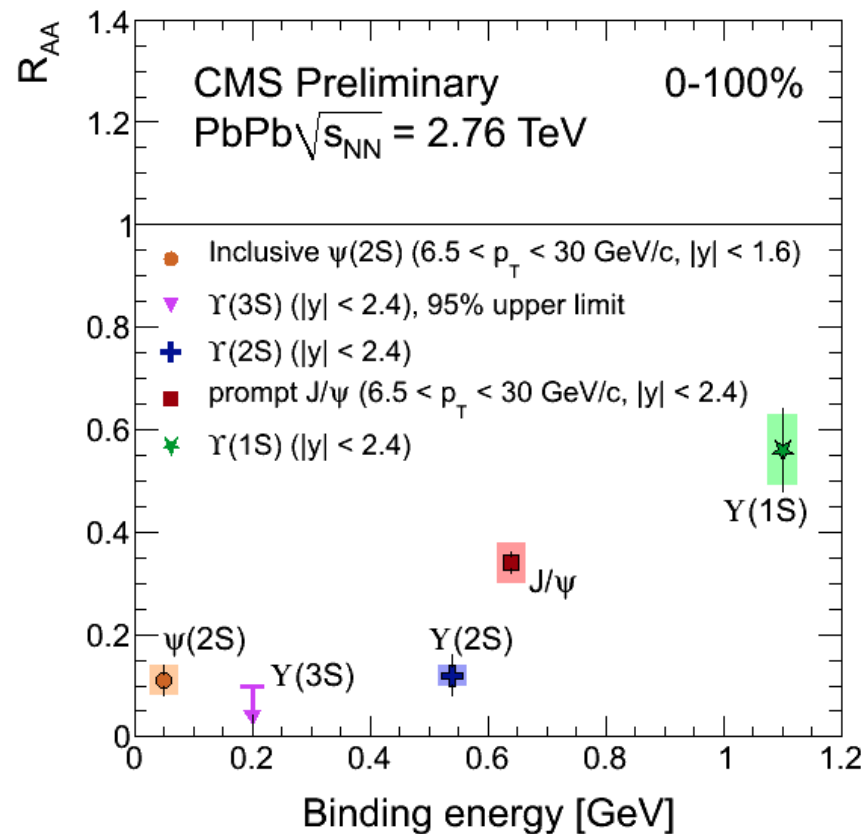
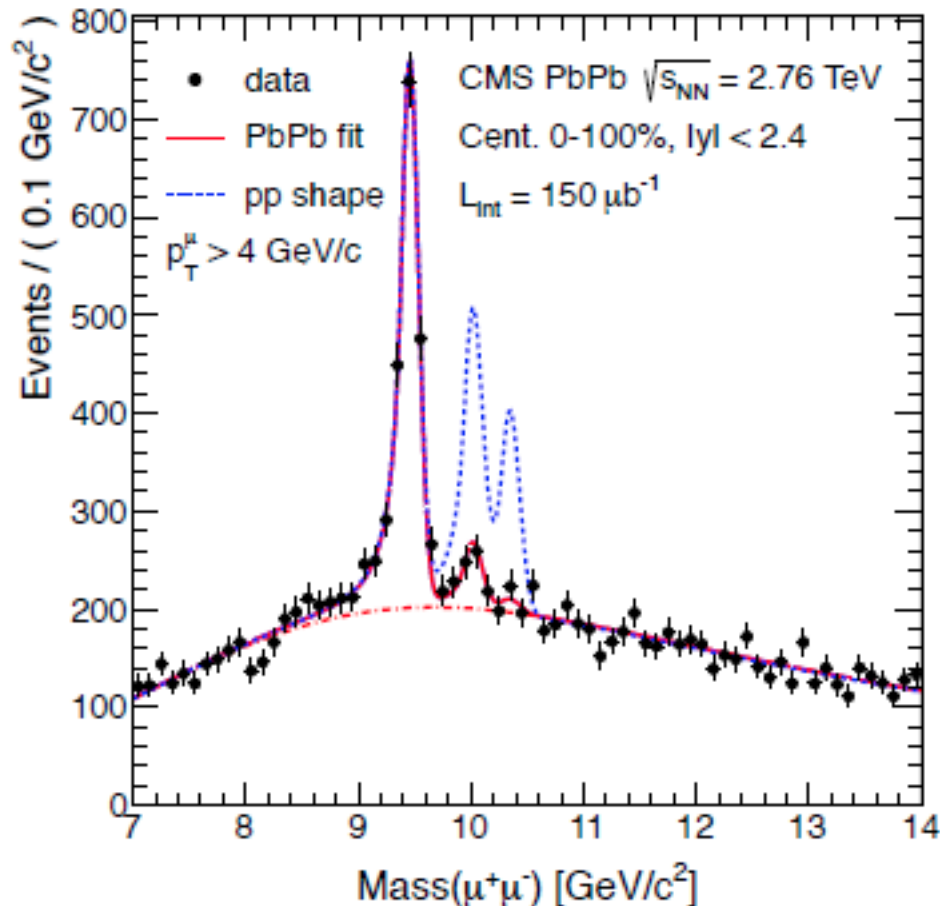


- по-малко поглъщане сравнено с
RHIC: 1.2 < y < 2.2, p_T > 0 (PHENIX)
- ~ подобно поглъщане
RHIC: |y| < 0.35, p_T > 0 (PHENIX)

- Дисоциация при голям p_T
- Регенерация при висока плътност на с-кварки
 - y = 0
 - b = 0

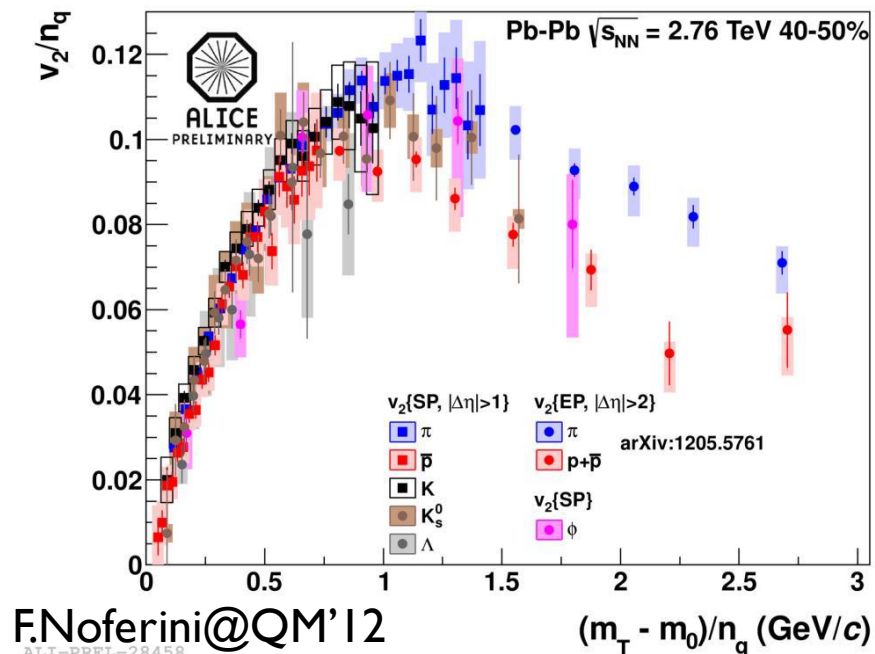
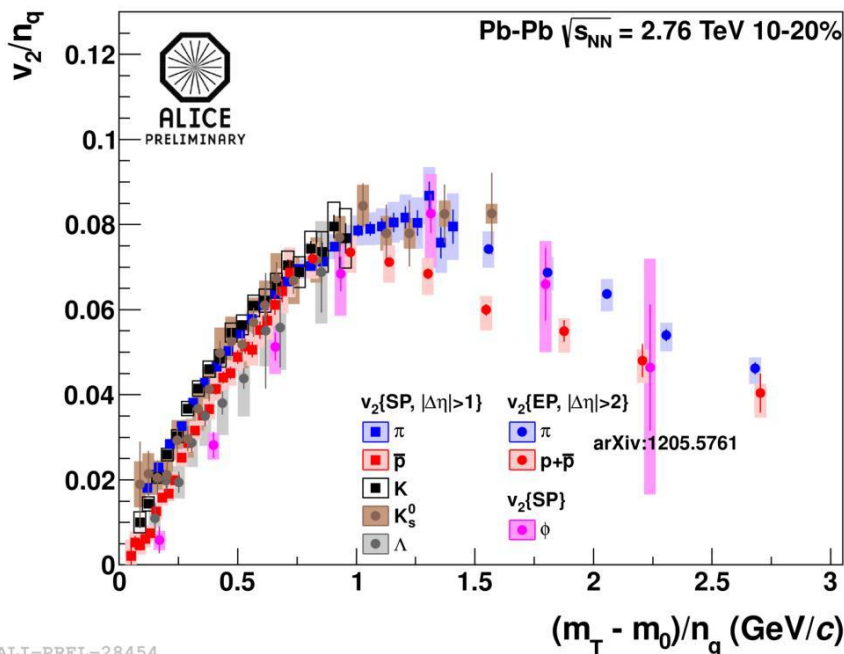
ALI-PREL-5537

Начална температура: последователно “разтапяне” на тежки резонанси



▶ $T > 1.5T_c \sim 300$ MeV PRL 109 (2012) 2223

Мащабиране на v_2 по брой на валентните кварки vs. напречна кинетична енергия



F.Noferini@QM'12

$$m_T = \sqrt{m_0^2 + p_T^2}, \quad KE_T = m_T - m_0$$

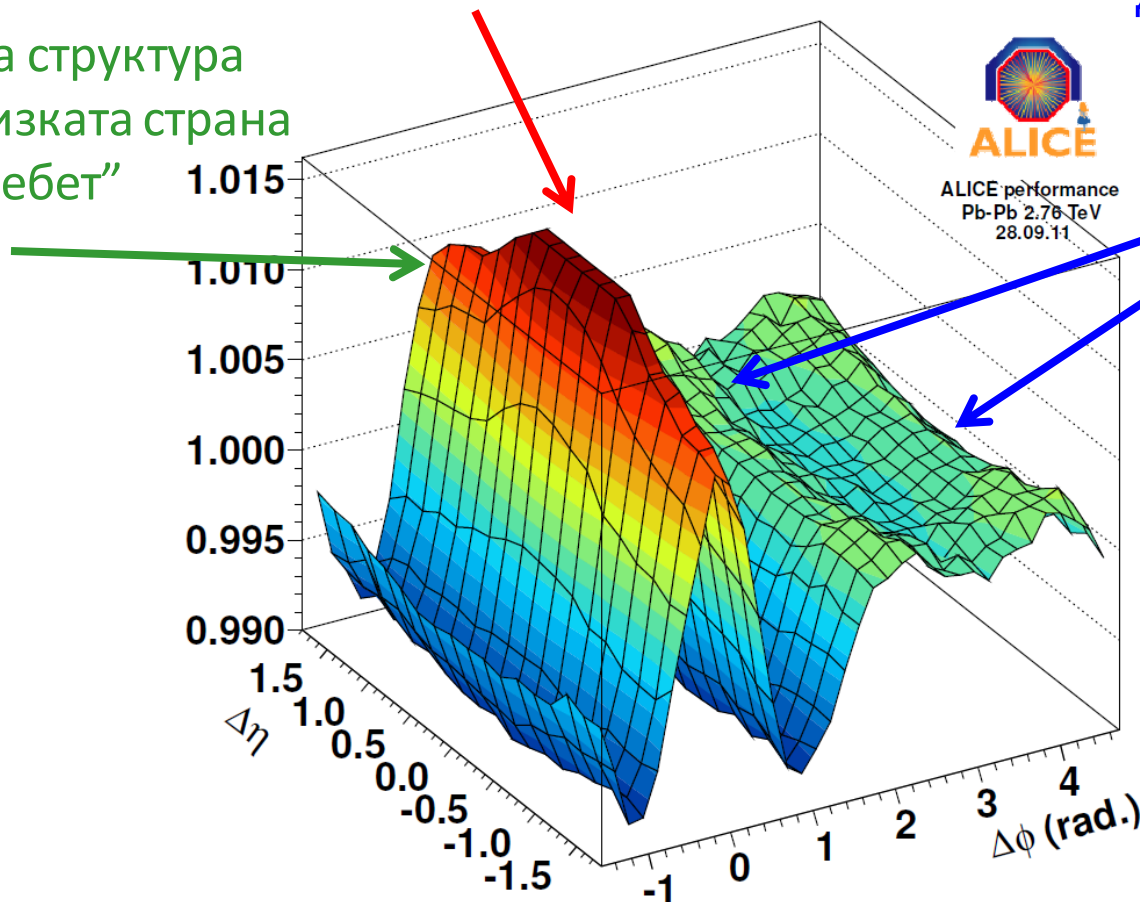
- ▶ Най-добро съвпадение на мащабираните разпределения за идентифицирани частици
- ▶ При ниски p_T : v_2/n_q и KE_T мащабирането се нарушава на LHC
- ▶ За $KE_T/n_q > 1$ GeV/c антипротони v_2 е по-ниско от това за пионите
- ▶ Мащабирането по брой на валентни кварки се нарушава например за \square -мезони

Структури в $(\Delta\eta, \Delta\phi)$

пик от адронни струи

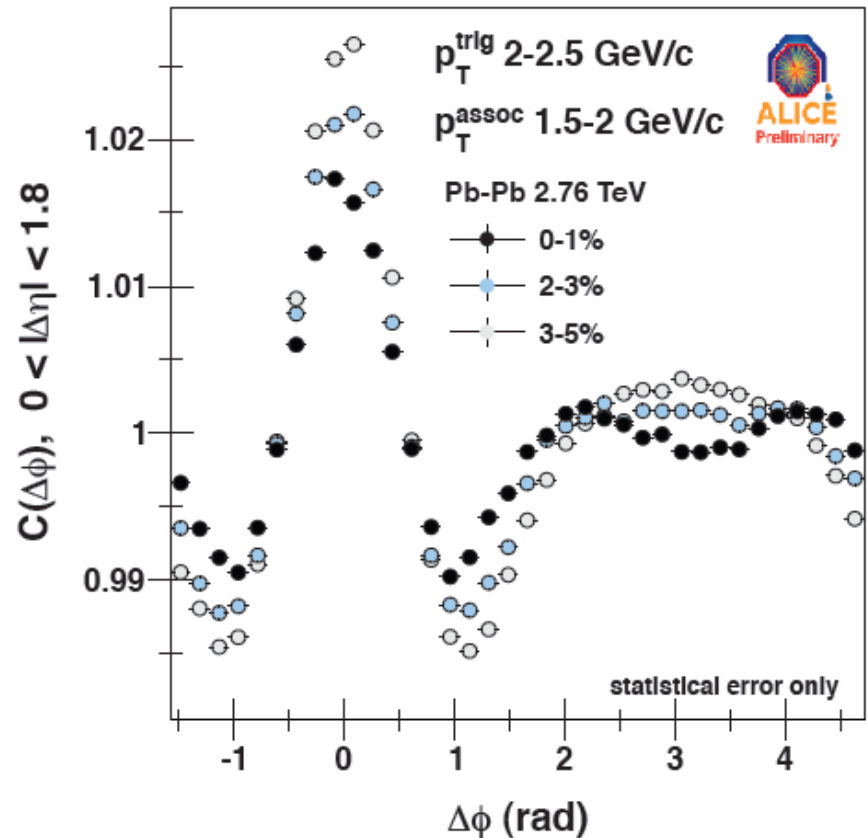
удължена структура
по η от близката страна
“хребет”

две “рамена” от
далечната страна
(на 120° и 240°)
“конус на Мах”

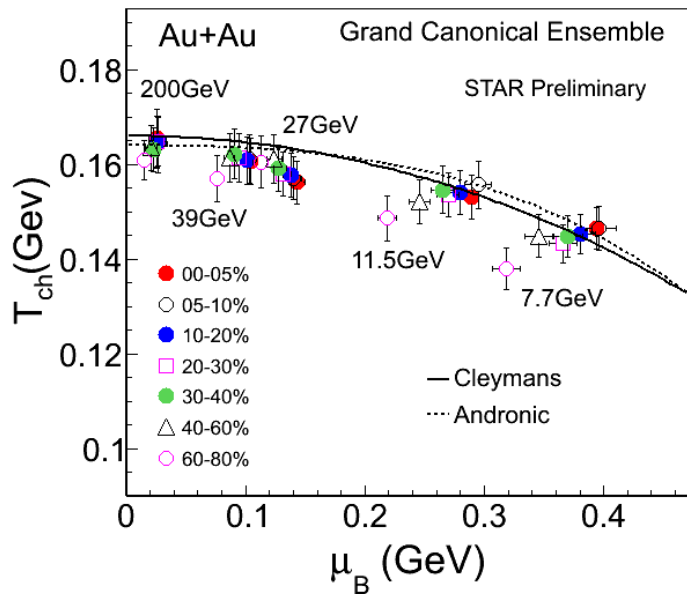


Резултати: азимутална корелация

- ▶ Наблюдава се не само размиване на 'класическата' азимутална корелация, но и появата на ансамбъл от корелации от по-висок порядък
- ▶ Данните са изследвани с помощта на Фурие-разлагане
- ▶ Нечетни ненулеви компоненти – резултат от **флуктуации на плътността**
- ▶ Първите 5 компоненти са достатъчни да опишат разпределението по $\Delta\phi$ с точност 10^{-3} , включително “хребета” и “конуса на Мах”



RHIC: Сканиране на фазовия преход при различни енергии на ускорените снопове



✓ Частици:

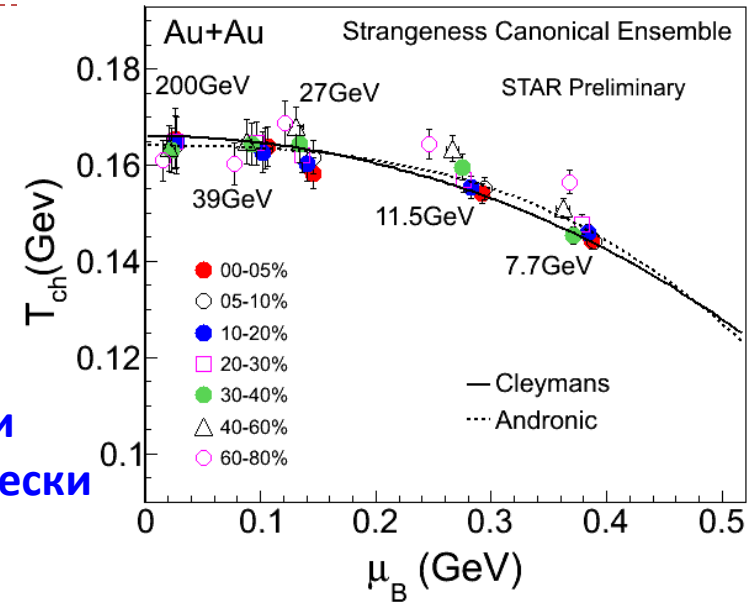
□, K, p, φ, ε
и K⁰_s

✓ Статистически ансамбли:

голям канонически
и странен канонически

✓ Параметри:

T_{ch} , \int_{V_s} , \int_{V_s} and \mathcal{C}_s
(фактор за насищане на странността)



Andronic: NPA 834 (2010) 237
 Cleymans: PRC 73 (2006) 034905
 Au+Au 200 GeV : Phys. Rev.C **83** (2011) 24901

- ▶ Параметрите (T_{ch} , μ_B) зависят от централността при ниски енергии
- ▶ Двата статистически ансамбъла дават подобни резултати в централните събития, но се различават в периферните

Библиография

- ▶ Лекции на F.Antinori, Y.Schutz, P.Jacobs, R.Bellwied, M. van Leuven, Yu.Velkovska, C.Cheshkov
- ▶ Доклад на F. Noferini @ QM2012
- ▶ Доклад на J.F. Grosse-Oetringhaus, PH seminar 2013
- ▶ Доклади на A.Dainese, H.Caines @ SQM2013
- ▶ Доклади @ QM2014