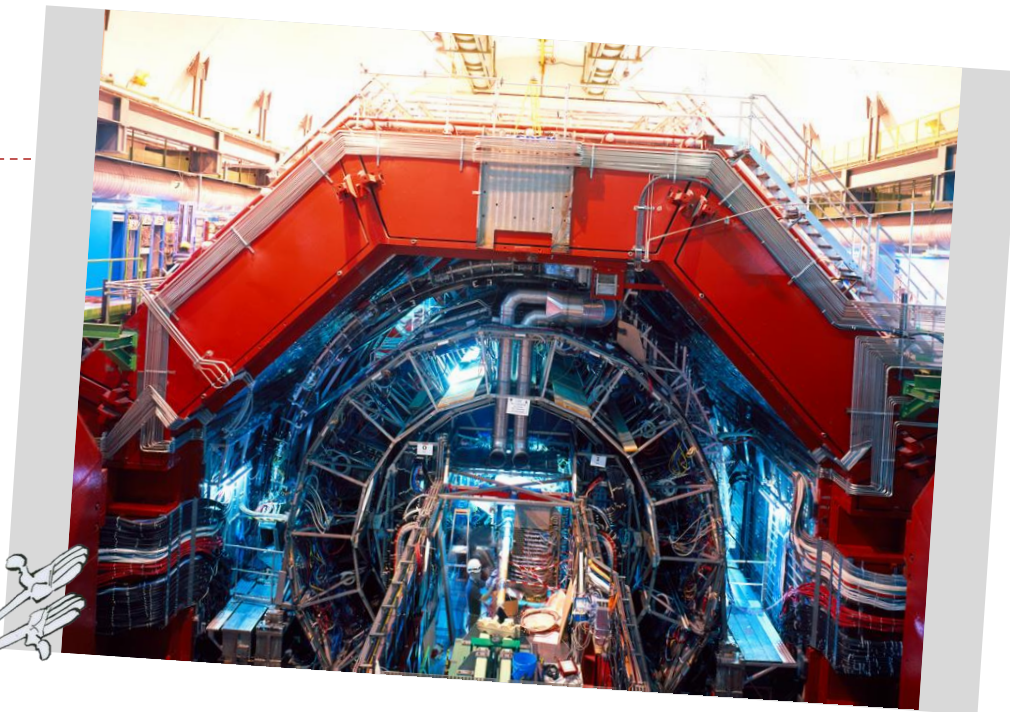


ALICE – експеримент с тежки йони

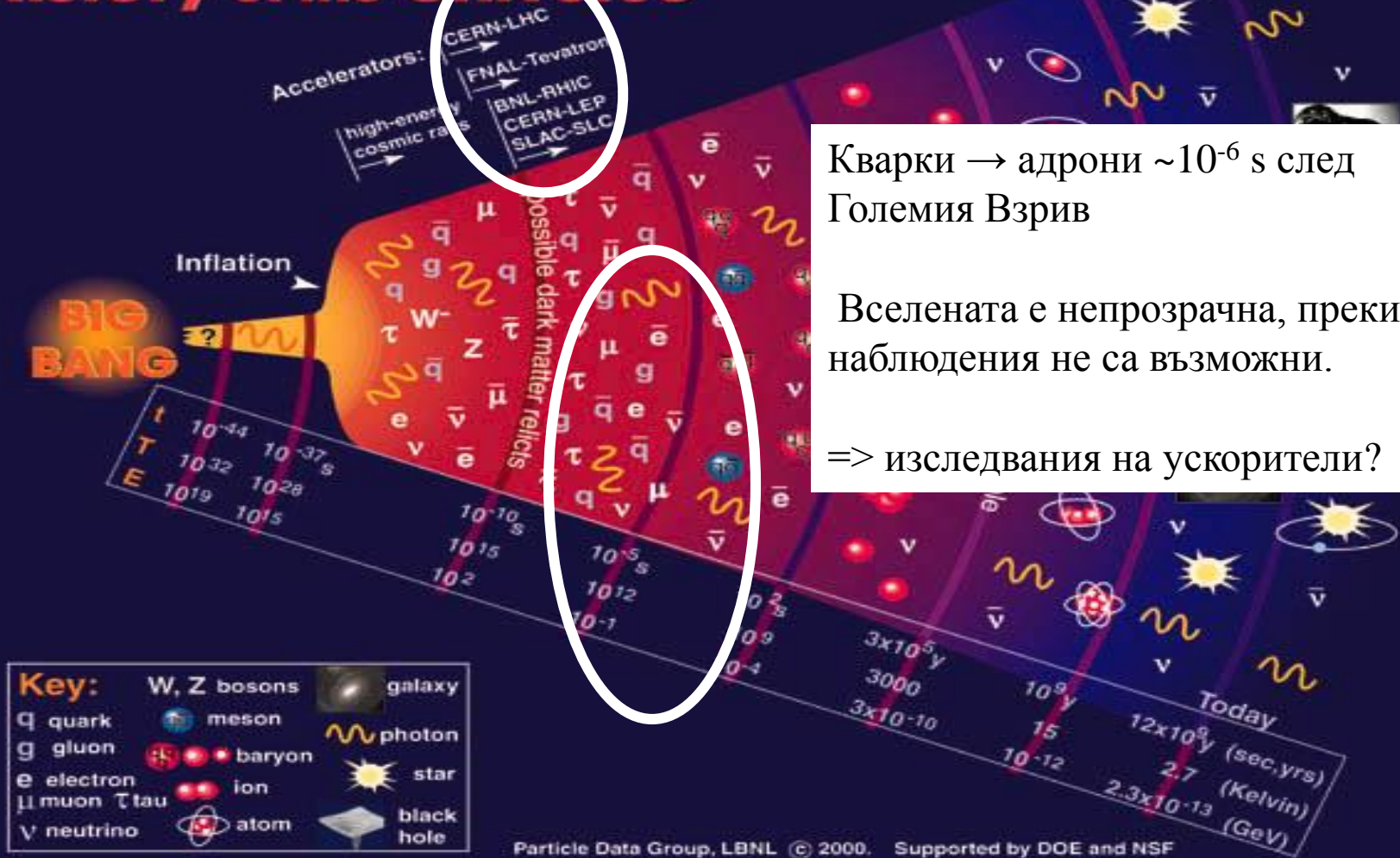
Петър Христов
25/07/2019



ALICE

Научна програма
Детектор
Съвременни методи за анализ
Резултати

History of the Universe



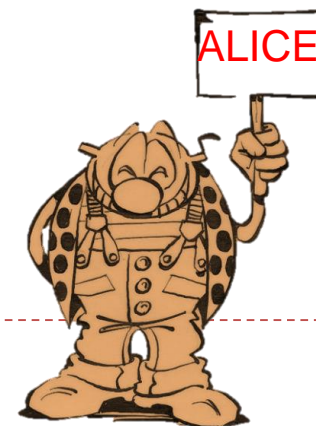
Кварки → адрони $\sim 10^{-6}$ s след Големия Взрив

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)
 - Участници – кварки и глюони
- ▶ Силното взаимодействие отговаря за следните 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?



- ▶ 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

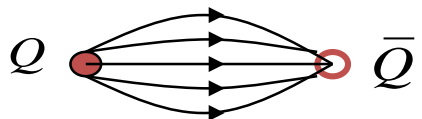
- ▶ Глуоните пренасят силното взаимодействие
 - ▶ Глуоните взаимодействат помежду си → **асимптотическа свобода, конфайнмент, спонтанно нарушаване на киралната симетрия**
- ▶ Глуонни (бозонни) степени на свобода
 - ▶ 8 варианта на цвят
 - ▶ 2 кирални състояния (проекции на спина върху импулса)



Квантова хромодинамика (КХД)

Асимптотическа
свобода

Удържане на
кварките



Gross



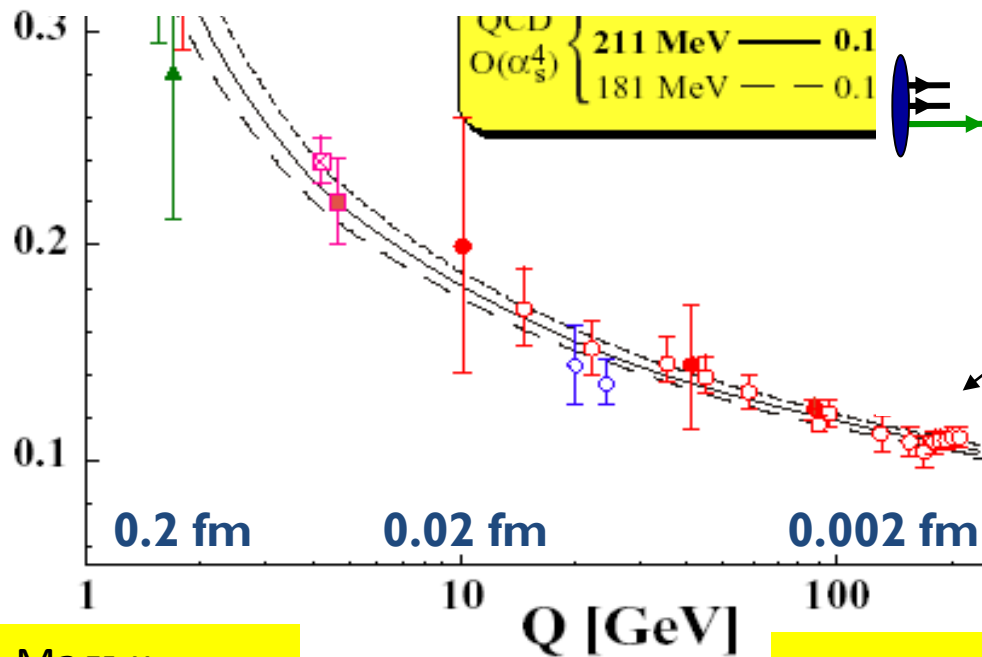
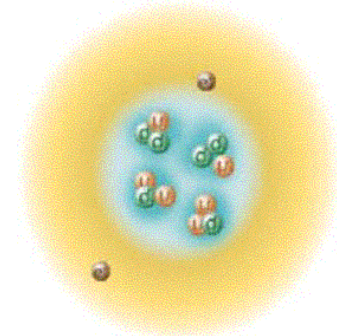
Politzer



Wilczek

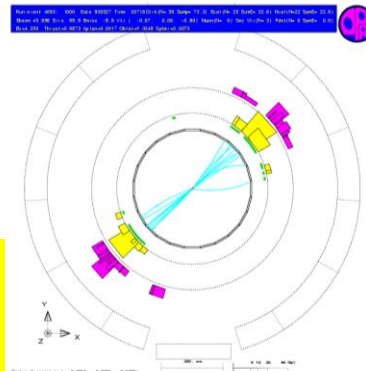
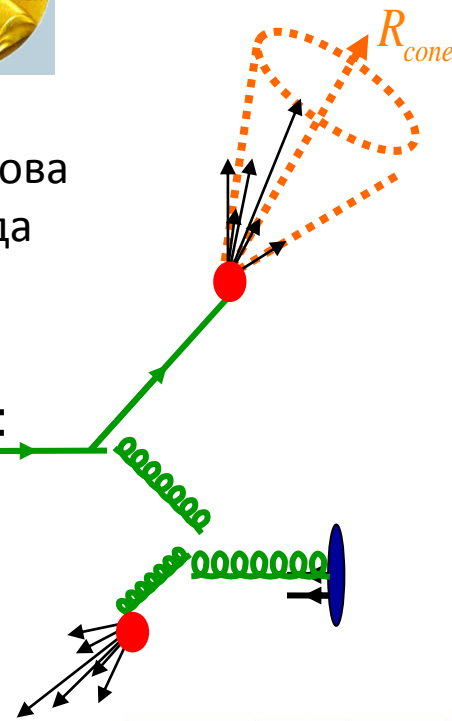


2004
Нобелова
награда



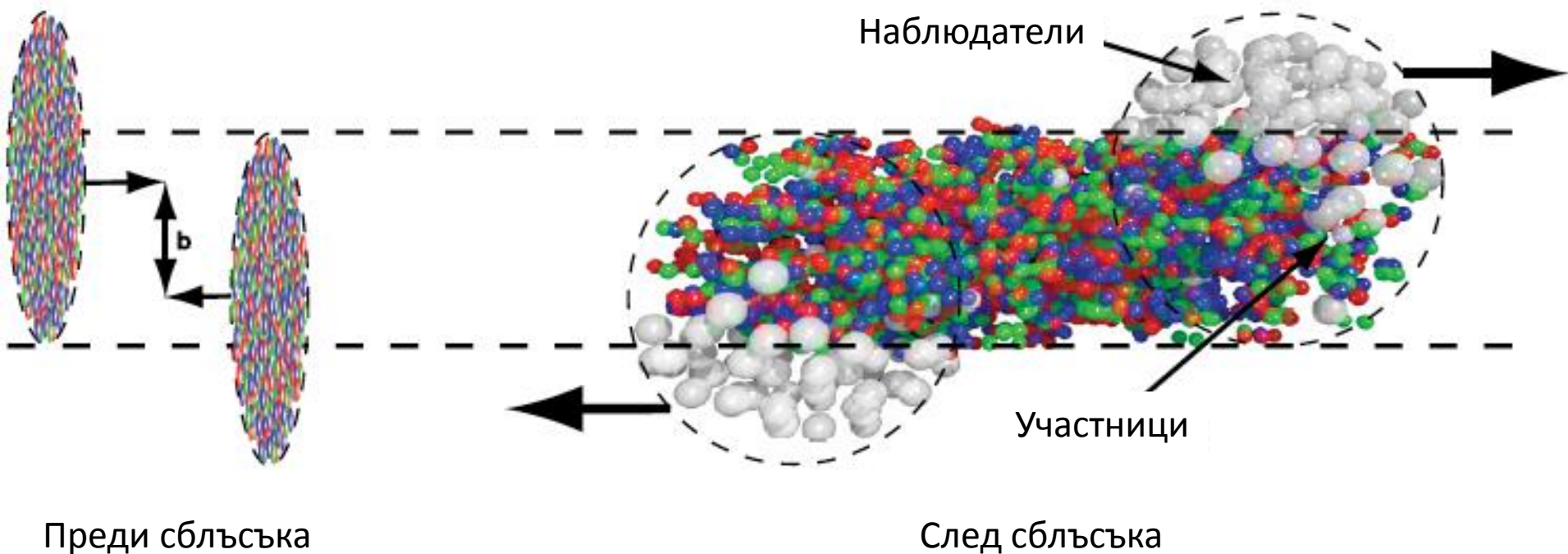
Малък
импулс

Голям
импулс

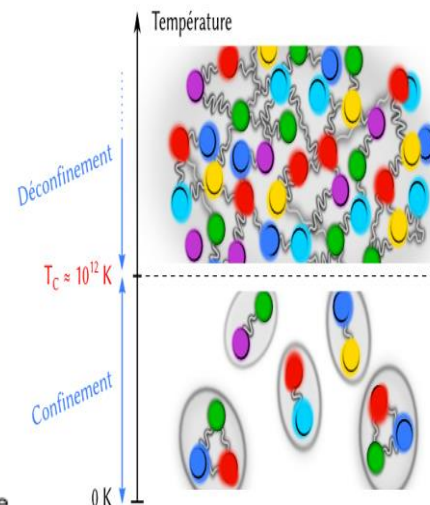
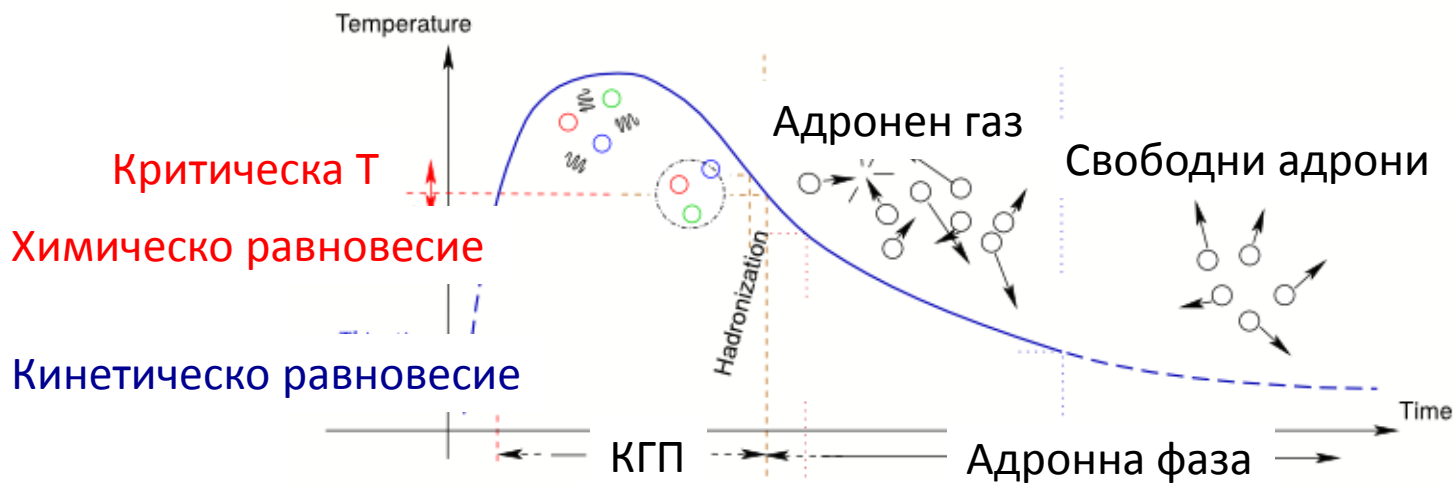
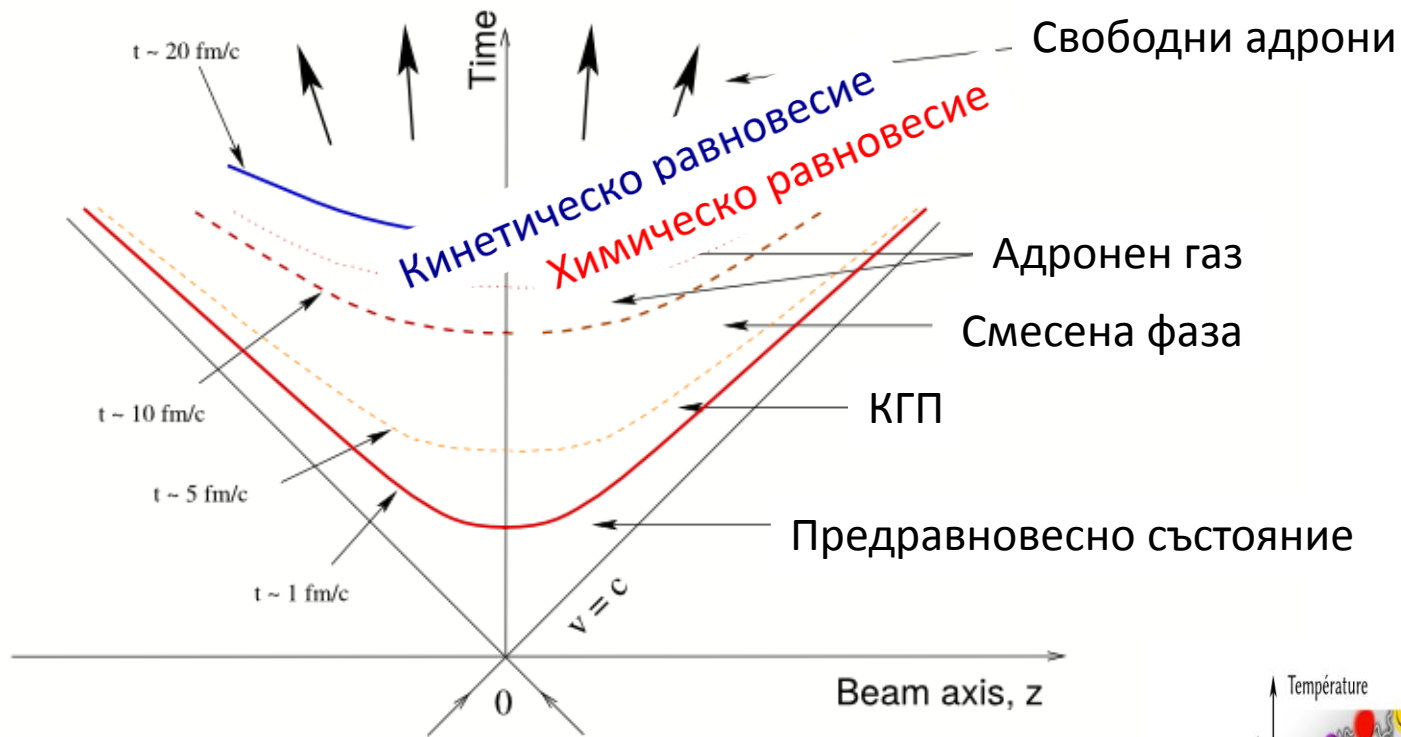


Сблъсък на тежки йони

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



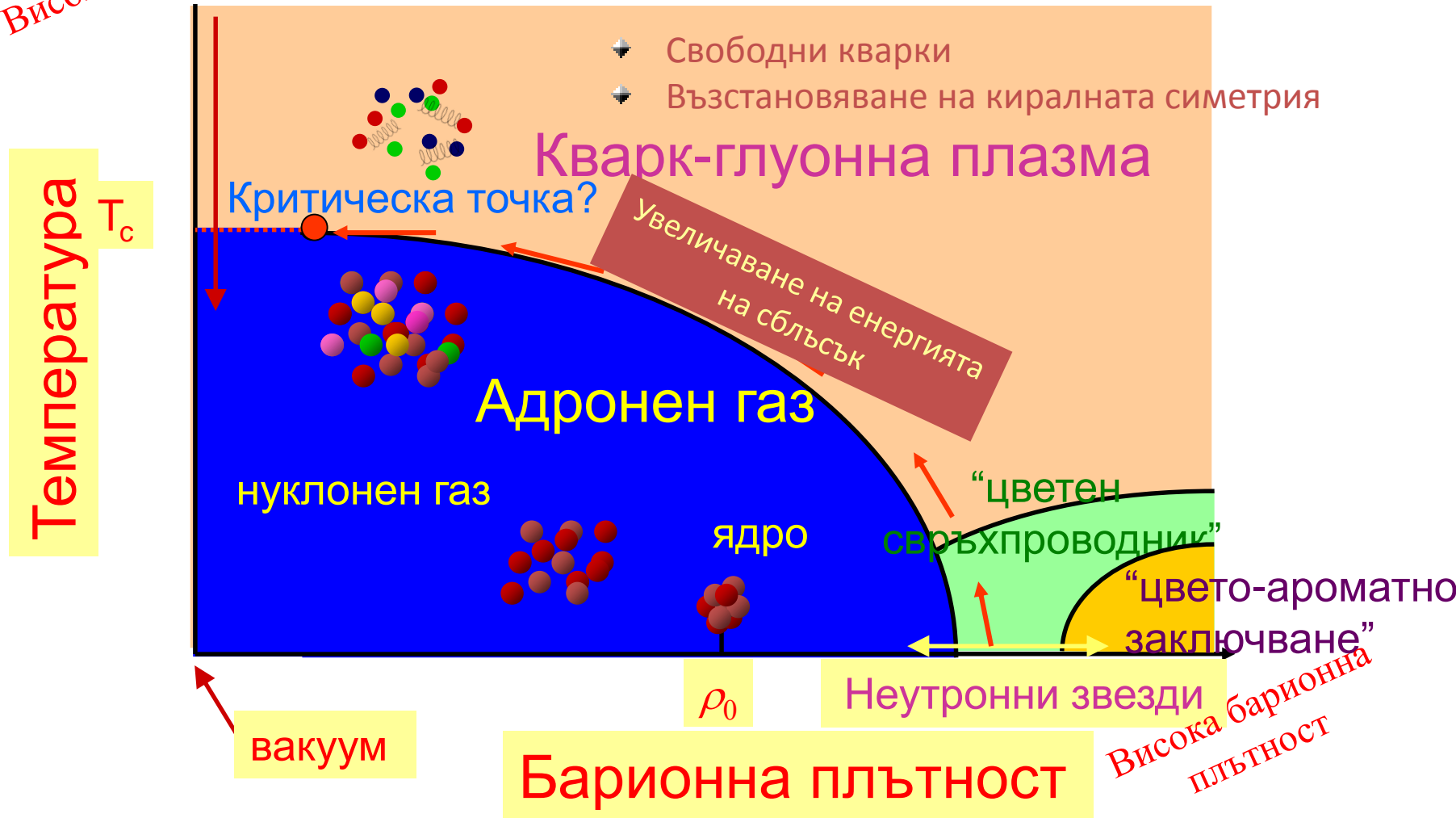
Равновесен брой
частици по типове

Равновесни импулси

Фазова диаграма на кварк-глюонната плазма

Висока температура

Ранна Вселена

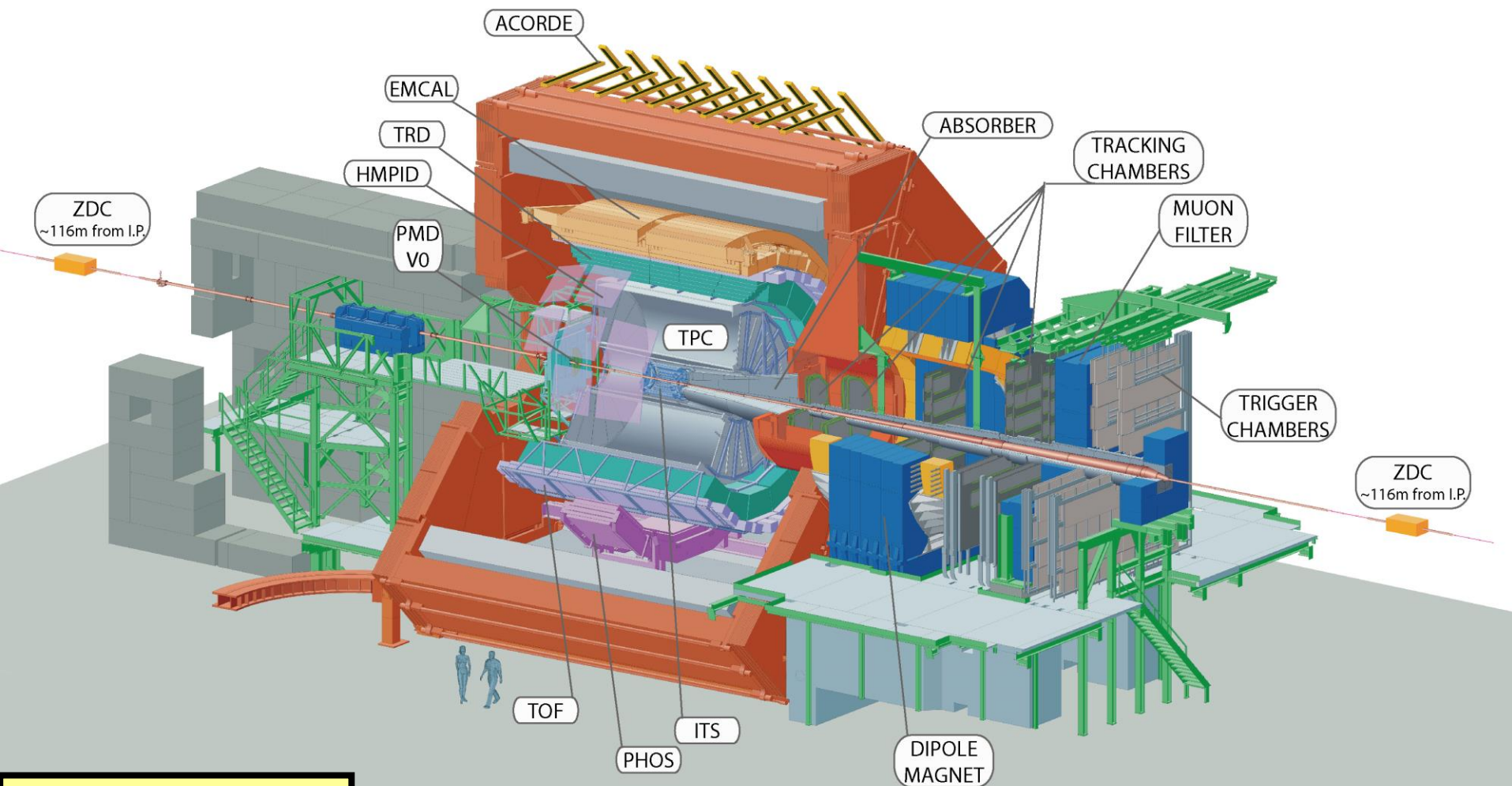


Изисквания към детектора ALICE

- ▶ 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



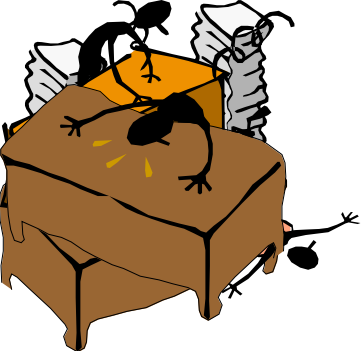
Детектор ALICE



Размери: 16 x 26 m
Тегло: 10,000 t

2018: 25 години от започването на експеримента ALICE



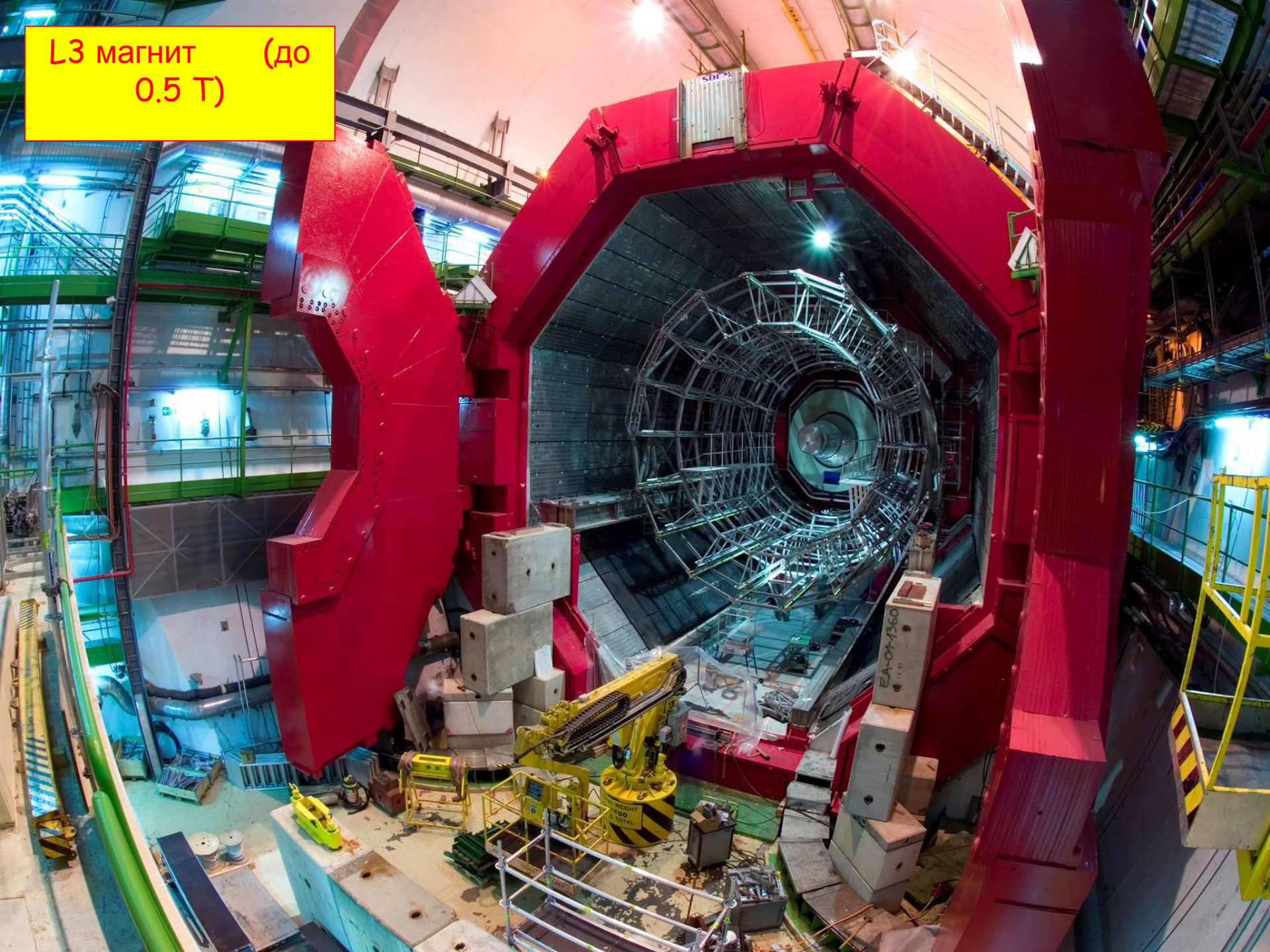


“План” за PbPb данни

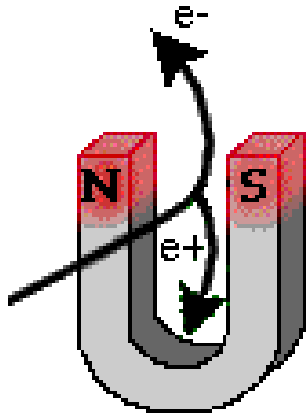
- Около 16,000 частици минават през детектора при всеки PbPb сблъсък; броят частици достига 90 на cm^2 в близост до точката на взаимодействие!
- Всяка частица се измерва индивидуално: траектория, идентификация, 4-импулс;
- Определяне точката на взаимодействие с точност няколко μm ;
- Идентификация на 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 ~1,000 физици в ~80 института от ~28 страни.



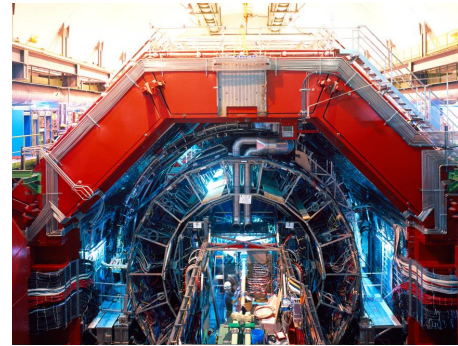
L3 магнит (до 0.5 Т)



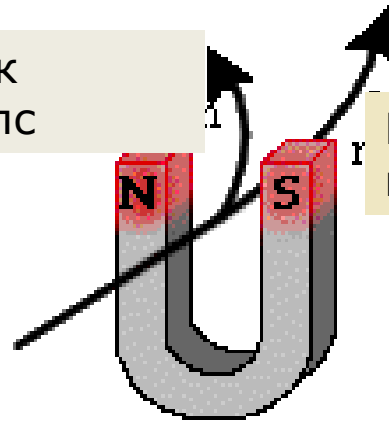
Магнитно поле



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**



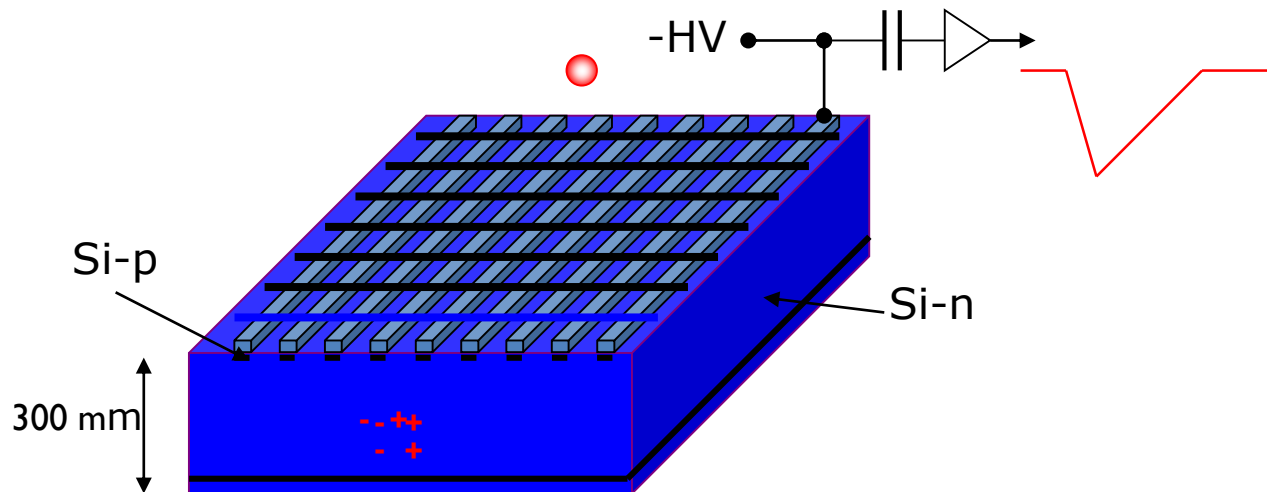
**Пикселен
SPD**



**Дрейфов
SDD**

Вътрешен тракер: принцип на работа

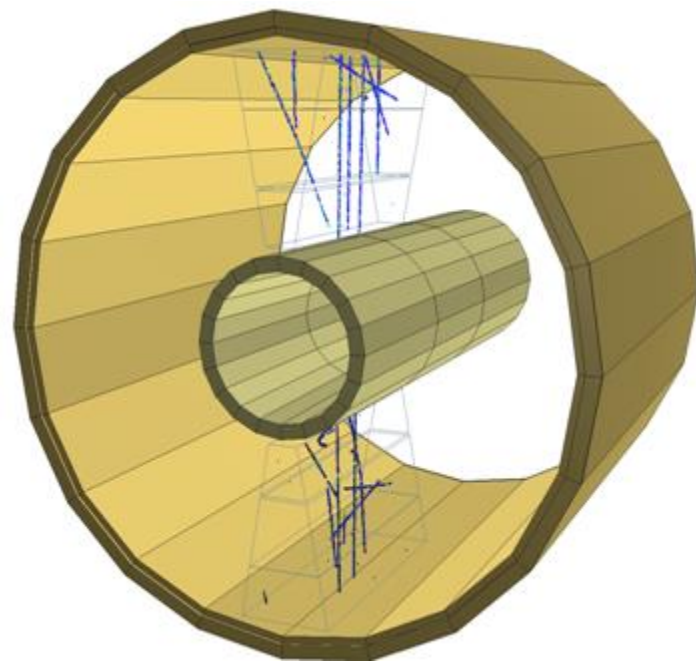
- ▶ ITS: 6 слоя Si диоди в затворено състояние, формират 2D структура
- ▶ При преминаване на заредена частица обеднената зона се йонизира и зарядите създават токов импулс
- ▶ Подобна технология има в съвременните цифрови фотоапарати



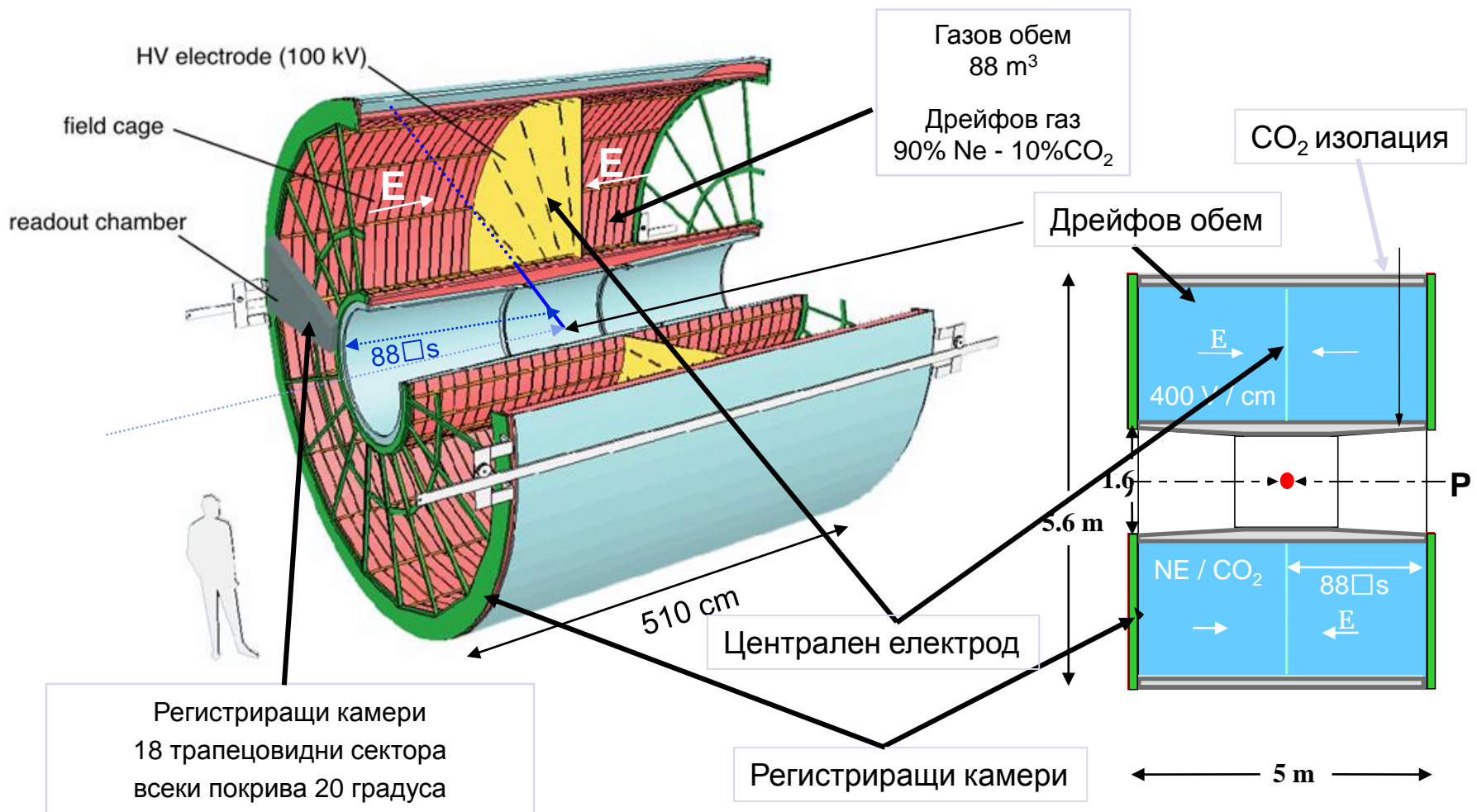
Тест на ТРС електрониката



Космически тест
12/2007



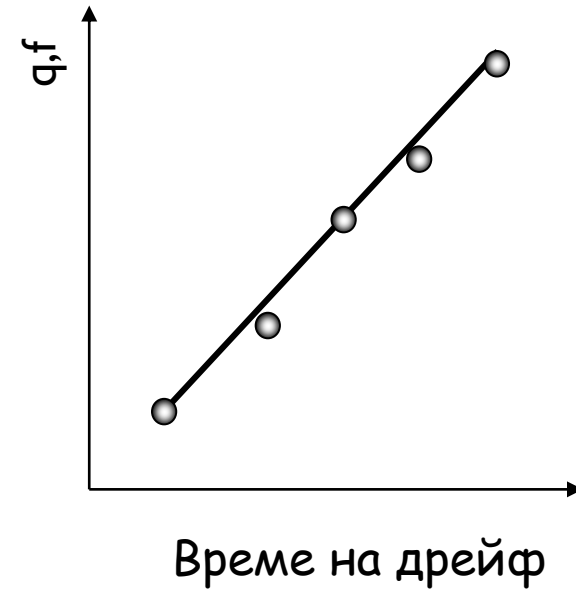
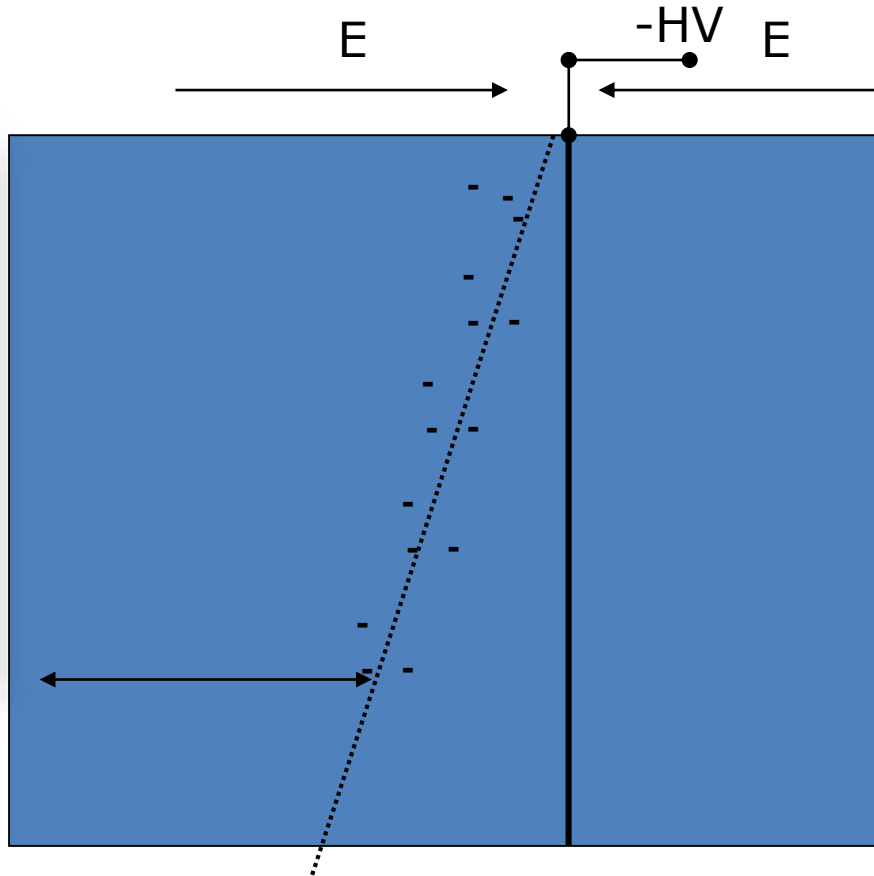
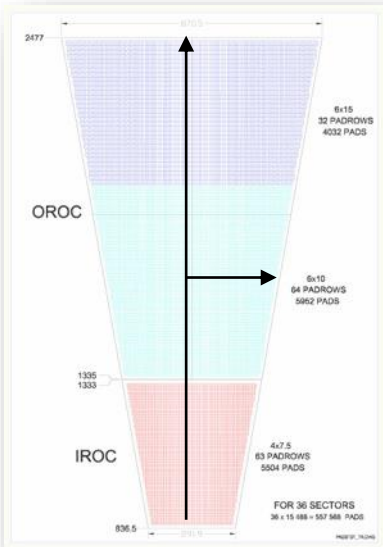
TPC ALICE

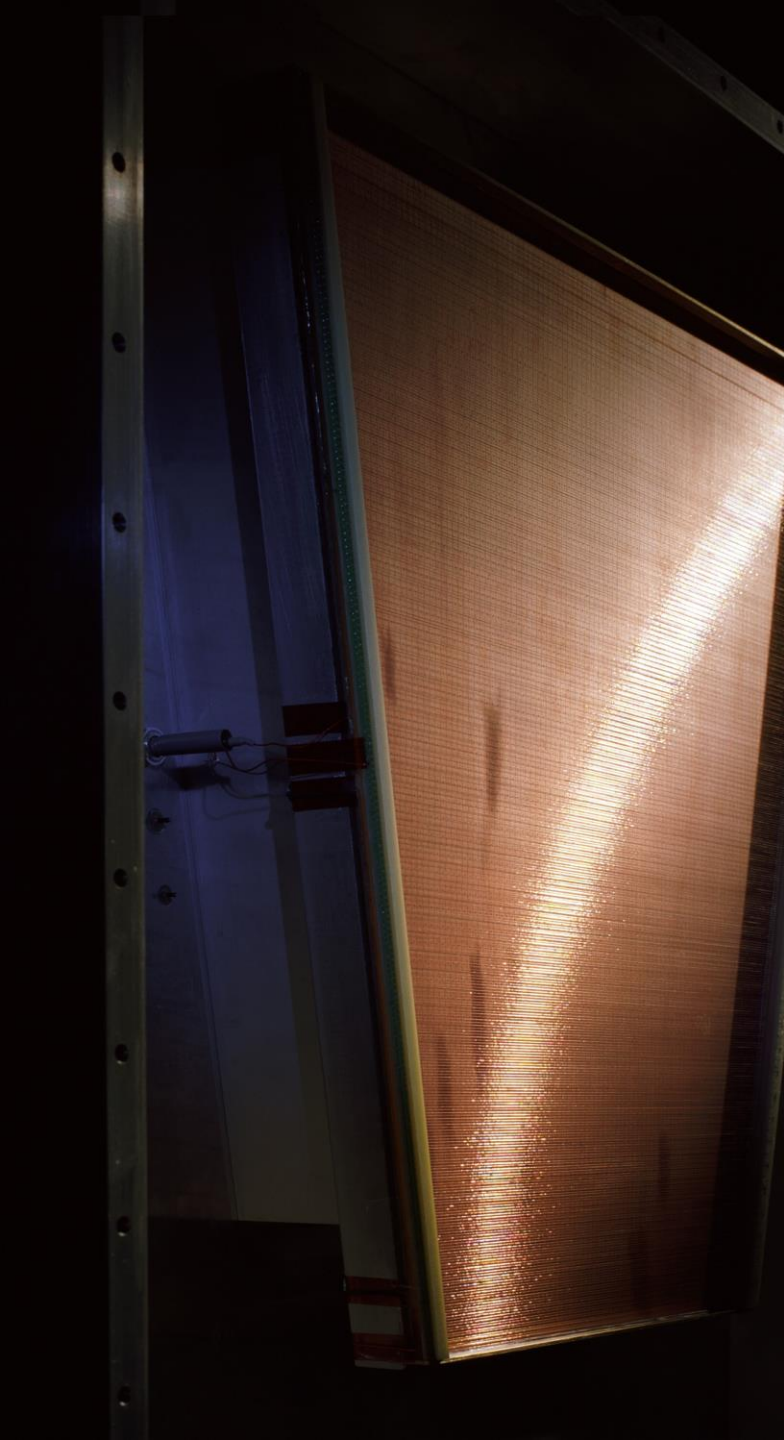


TPC: принцип на работа



- 1 камера

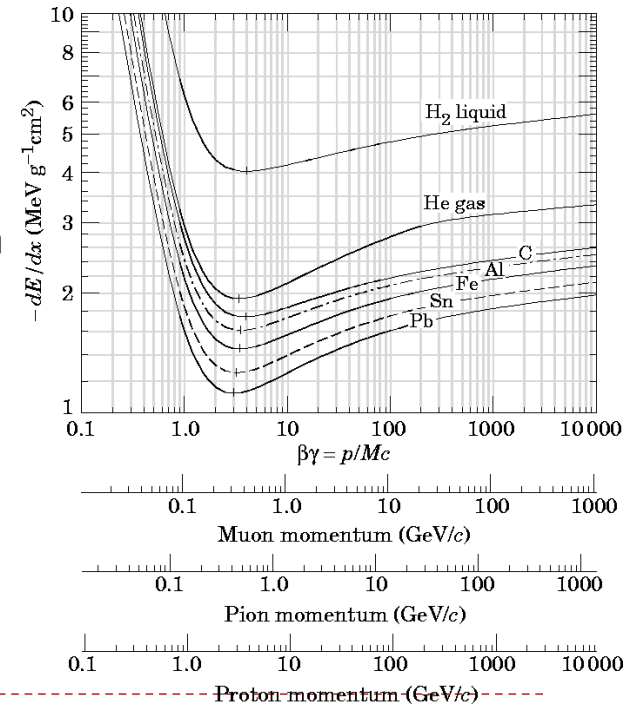
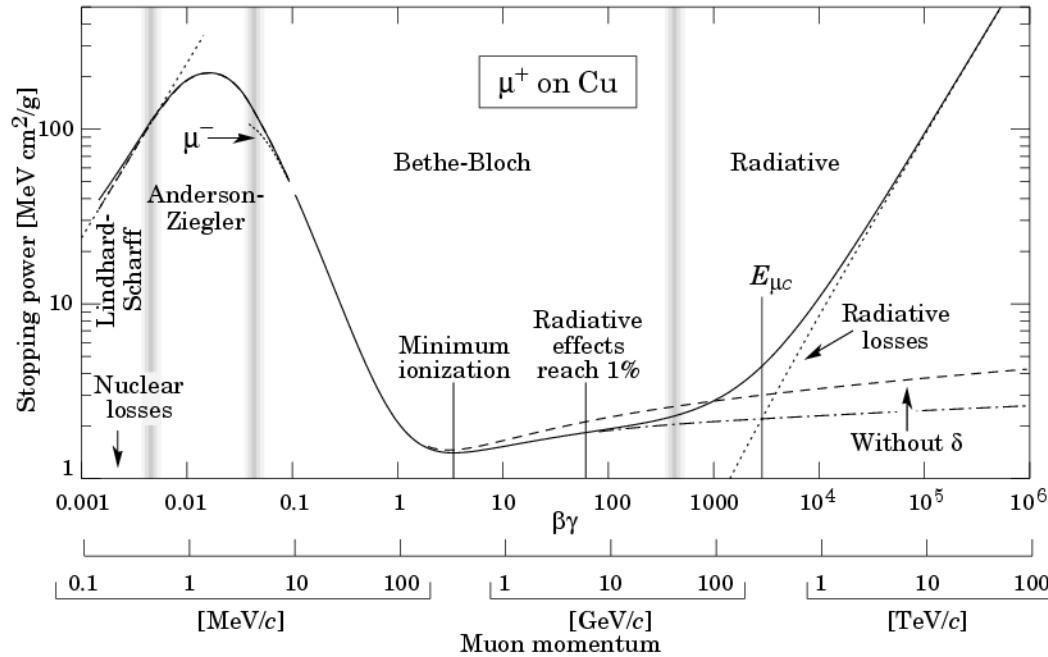




Идентификация на частиците по техните йонизационни загуби



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

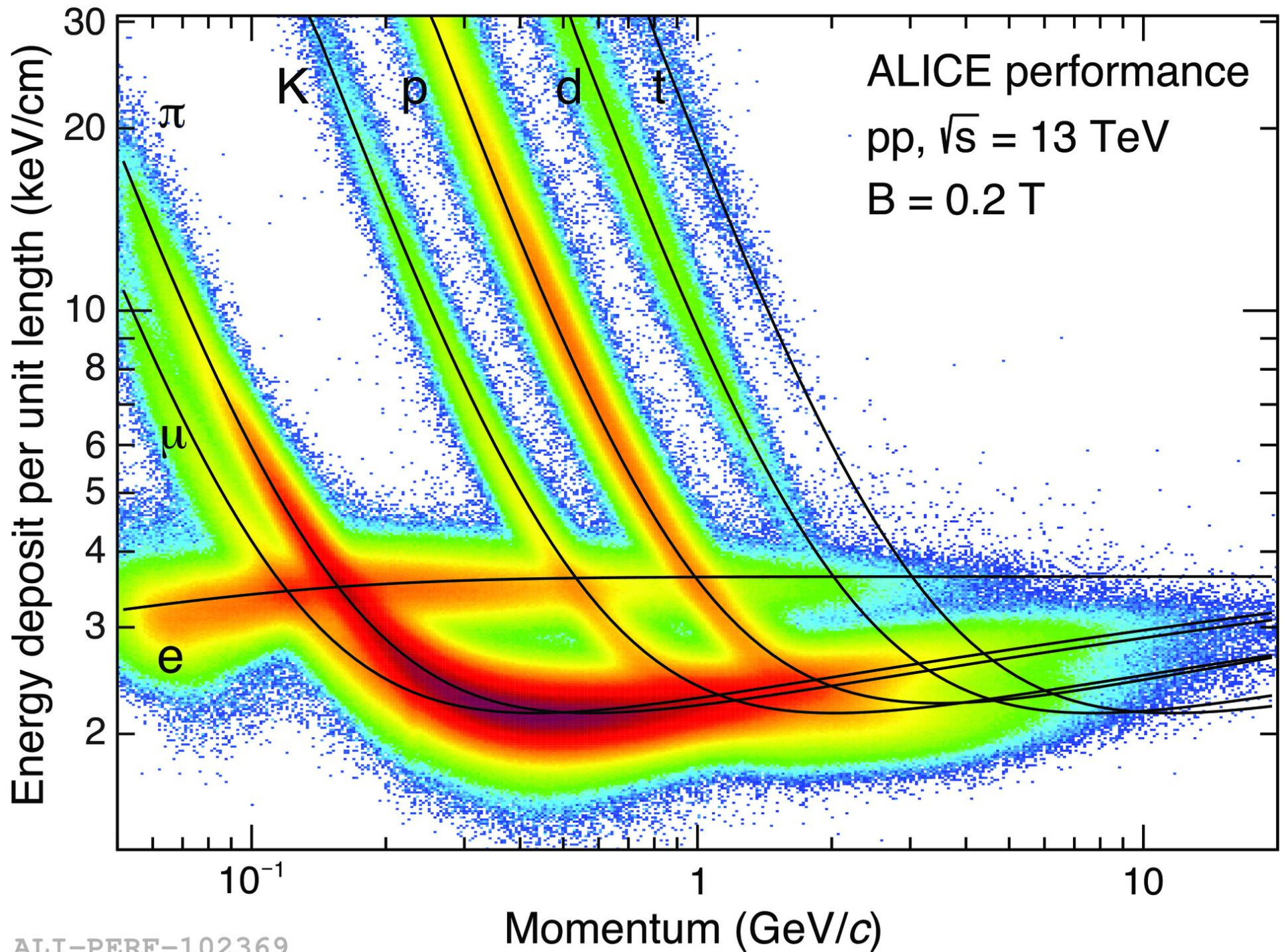
m_e Mass of an electron

r_e Classical radius of an electron

I Mean excitation energy

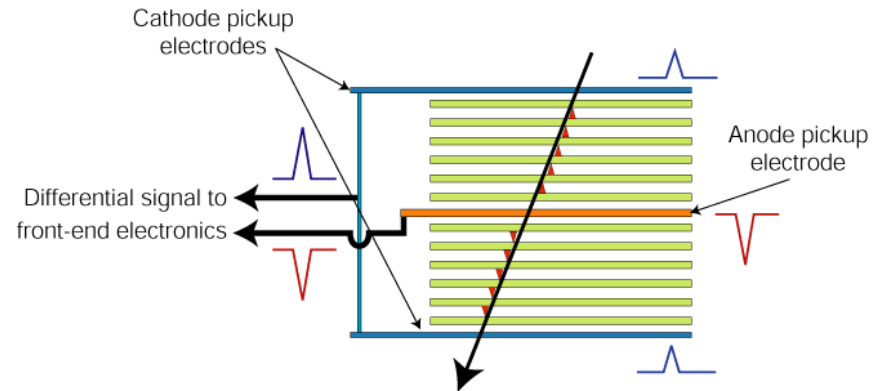
T_{max} Maximum Kinetic energy which can be imparted to a free electron in one collision



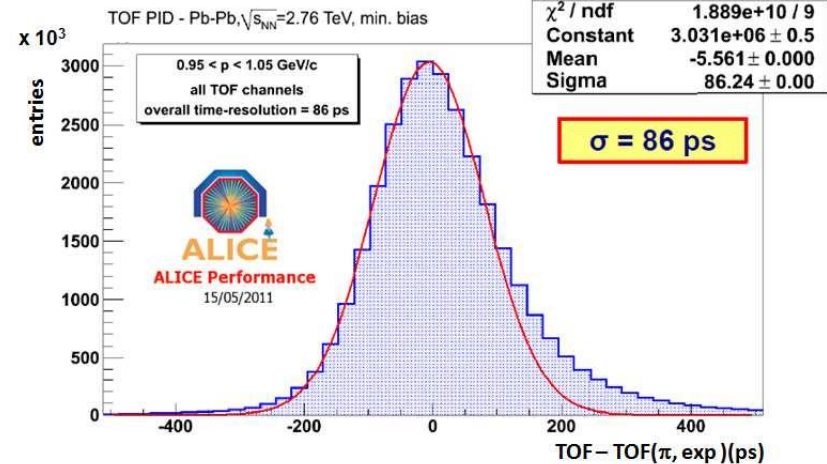
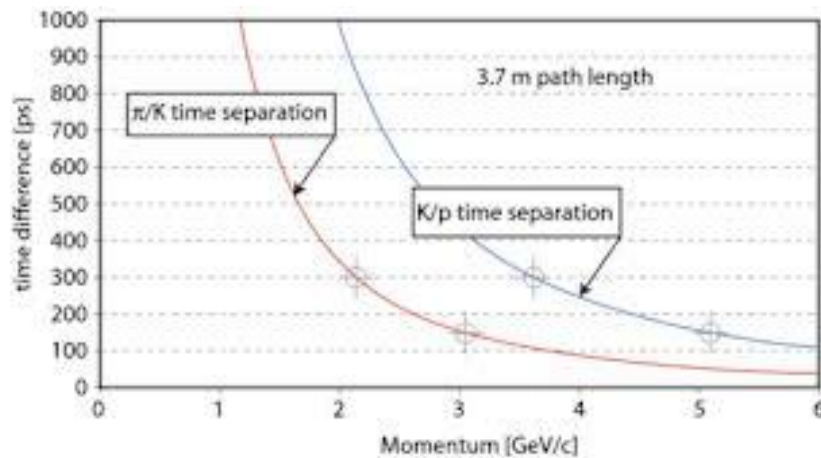


Детектор по време на прелитане (TOF)

Камери с резистивни плоскости

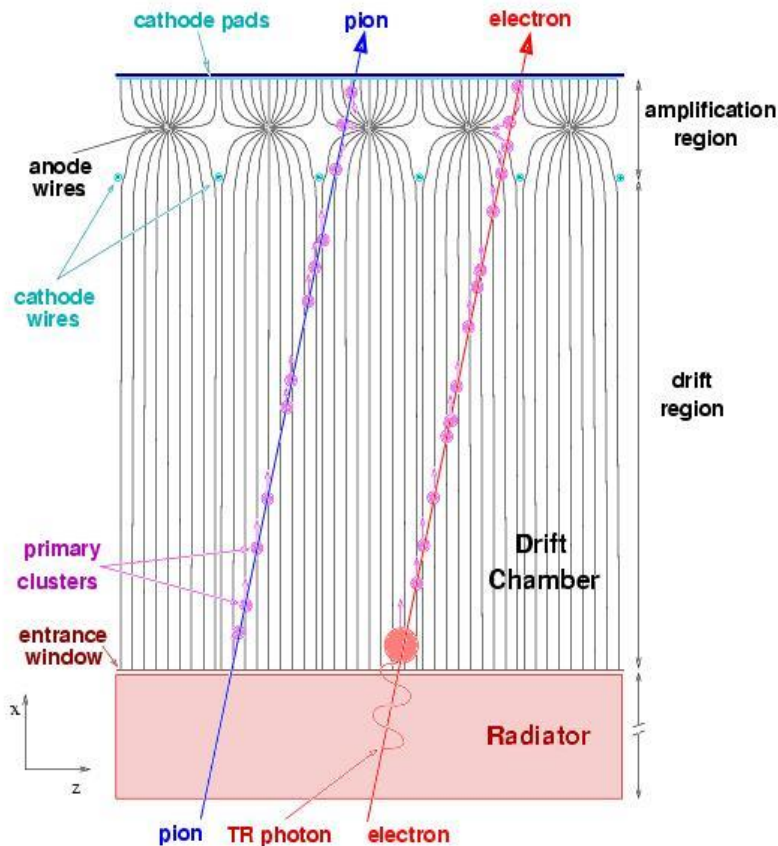


Измерва времето на прелитане от точката на сблъсък до детектора: $\sim 4 \text{ m} = 13 \text{ ns}$ (скорост = c)

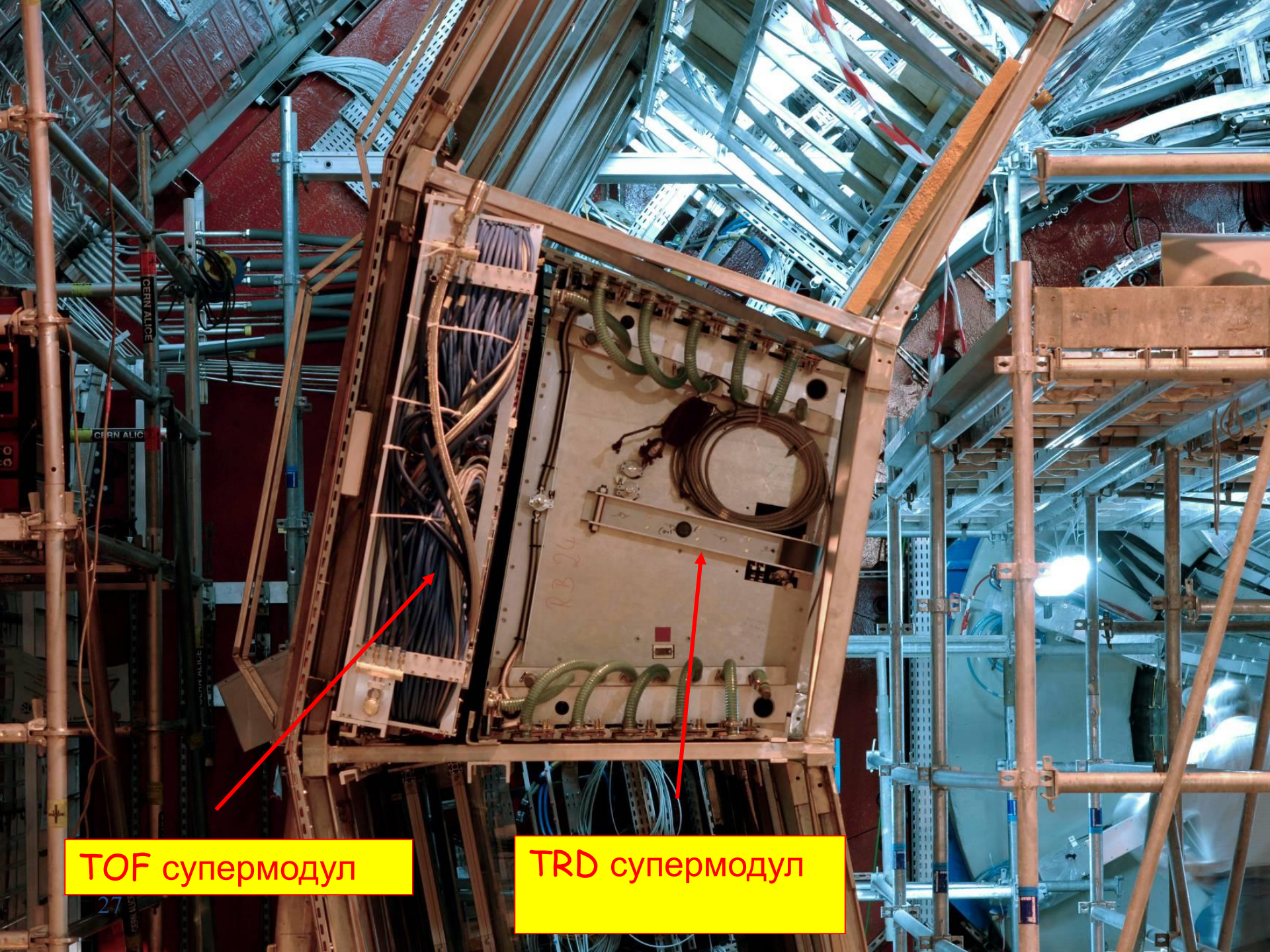


Детектор на преходно излъчване

- Разделяне на релативистки електрони и пиони



- Когато релативистка заредена частица преминава през нееднородна 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)

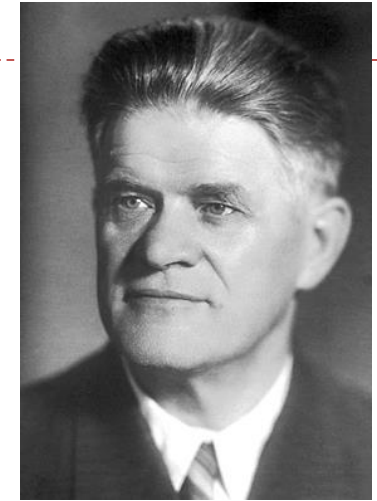
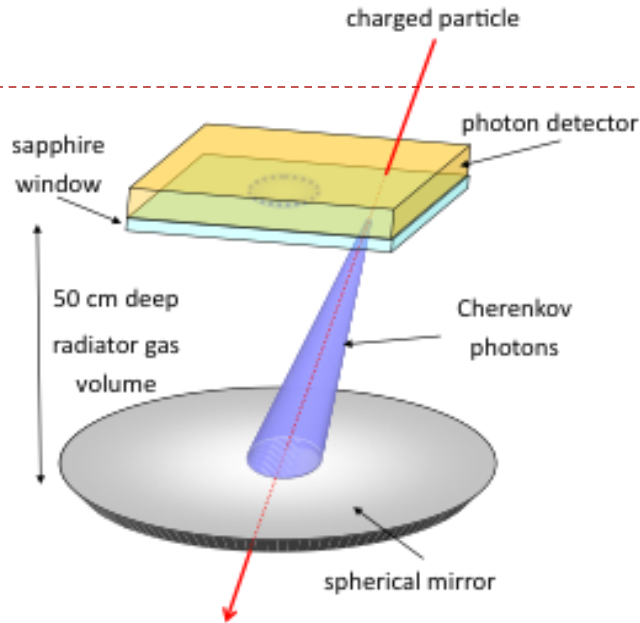


TOF супермодул

TRD супермодул

Идентификация на частици по черенково излъчване (HMPID)

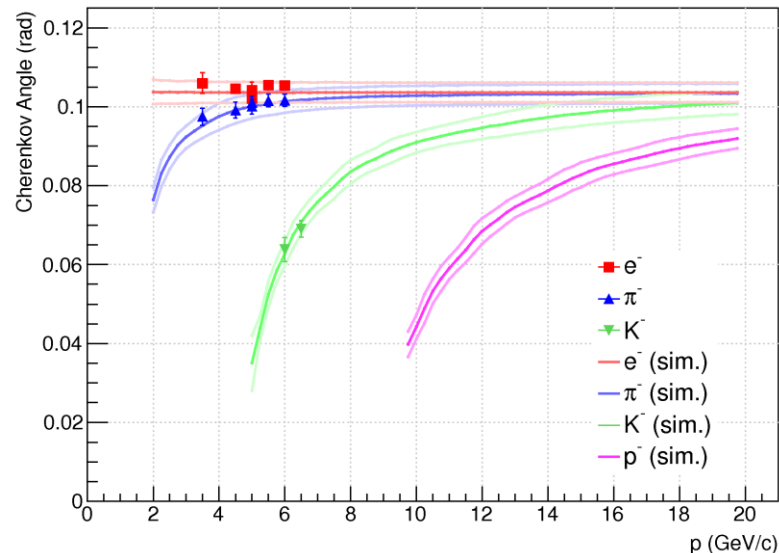
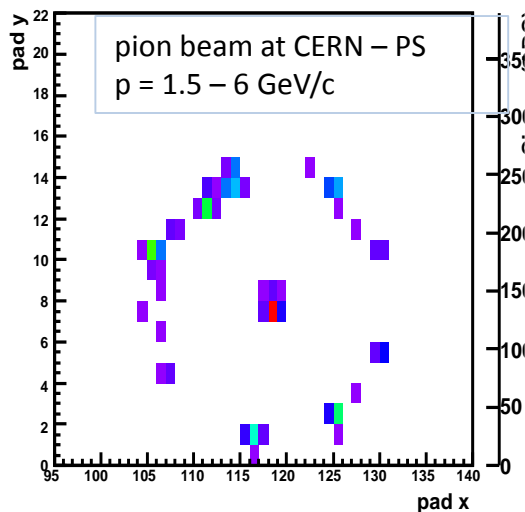
Черенково излъчване:
Заредена частица,
движеща се с $v > c$
в локална среда

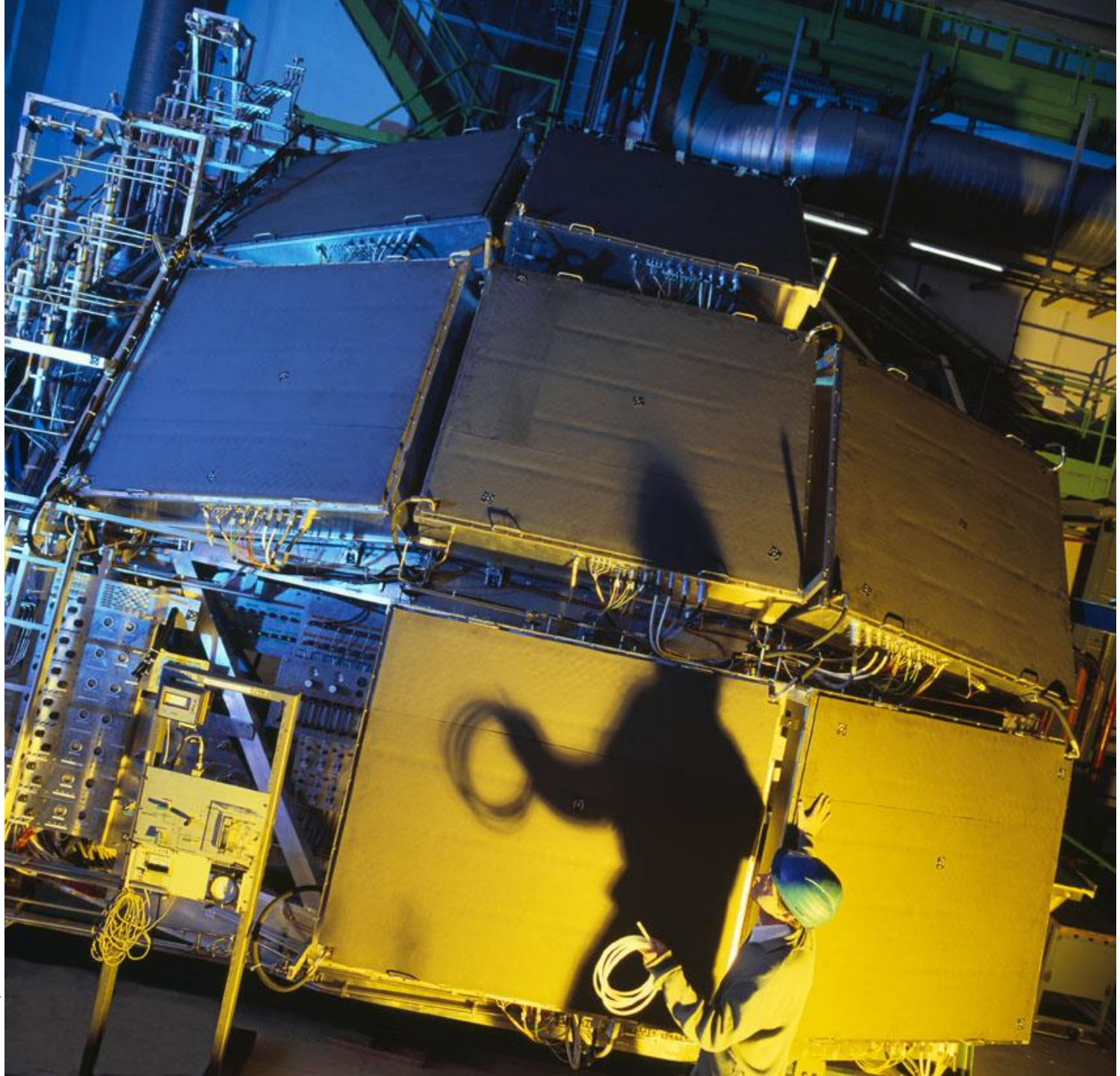


Павел Черенков (1904-1990)

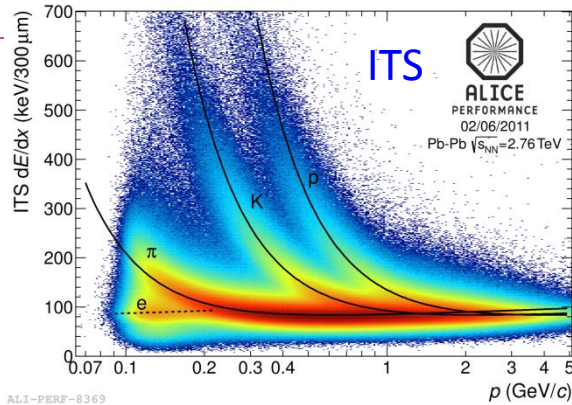
Газът на радиатора определя дължината на вълната, радиуса на кръга (ъгъл на Ч.), броя фотони

Event display subevent: 10

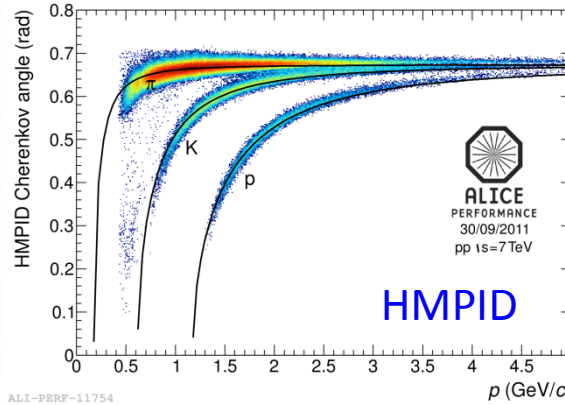




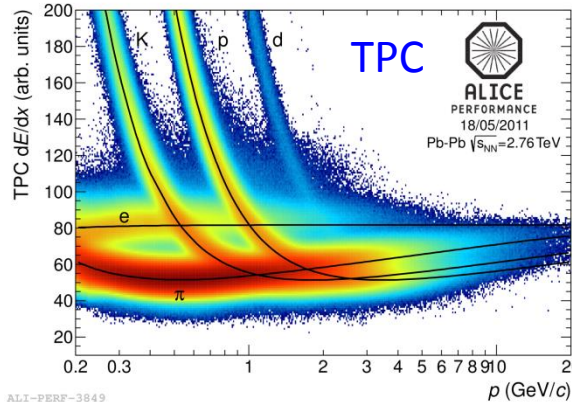
Идентификация на заредени частици: 5 независими детектора



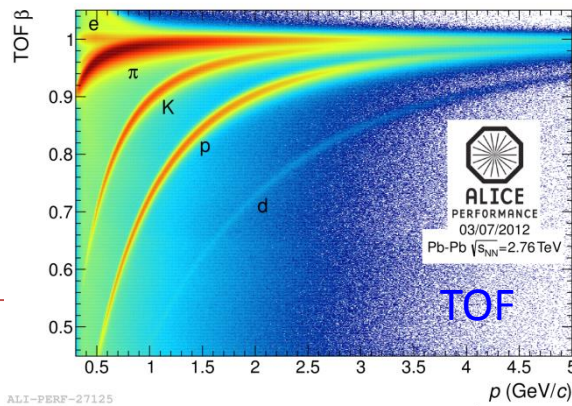
ALI-PERF-8369



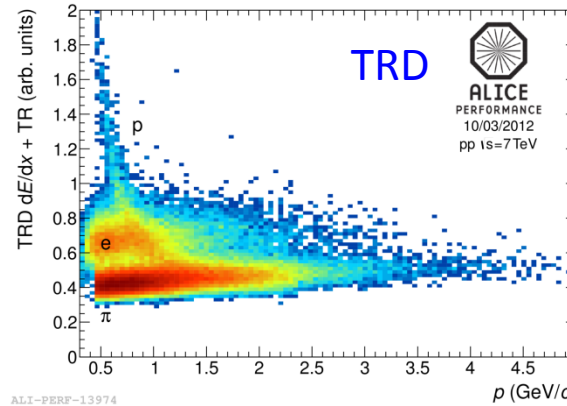
ALI-PERF-11754



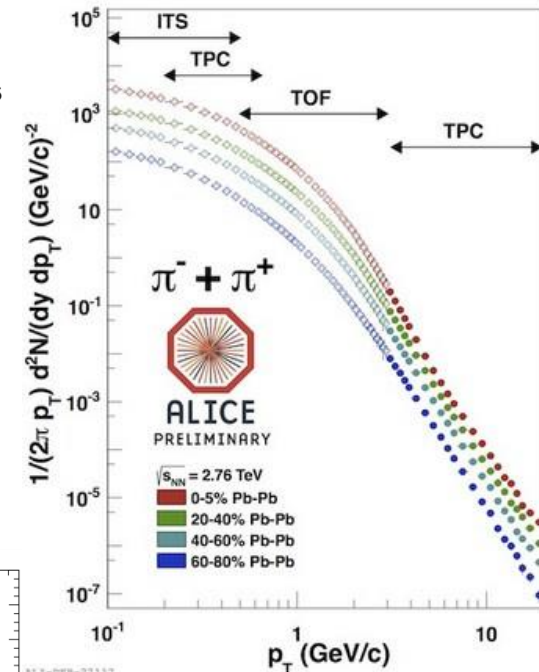
ALI-PERF-3849



ALI-PERF-27125



ALI-PERF-13974



ALI-SHR-27117



Фотонен спектрометър (PHOS)

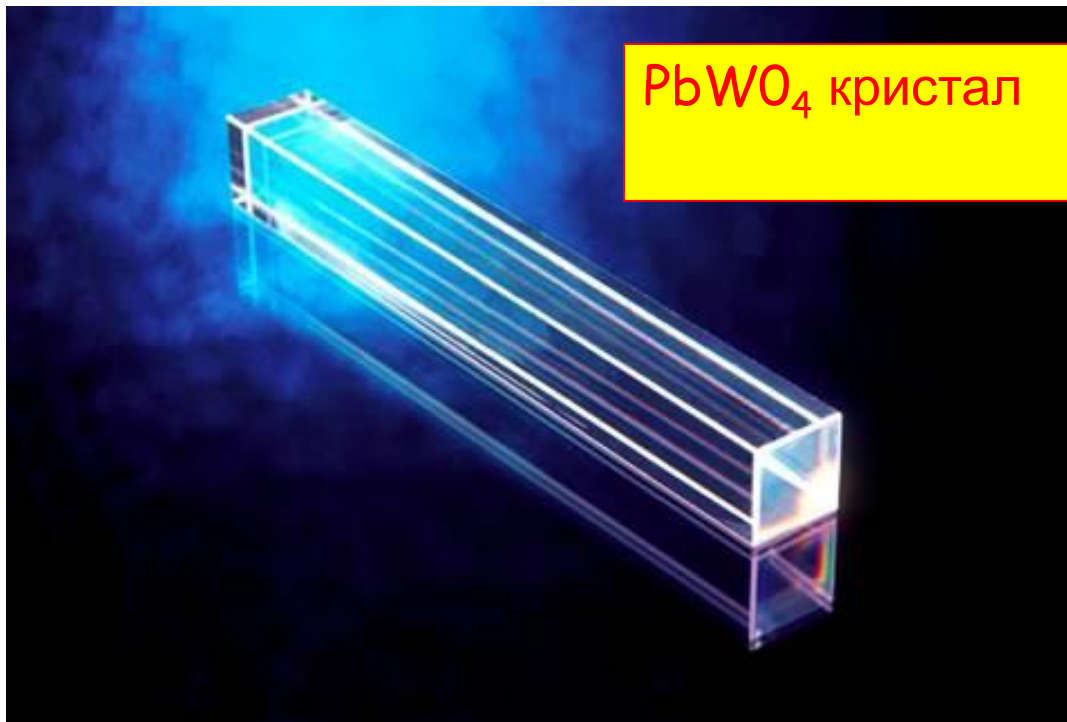


Първи супермодул



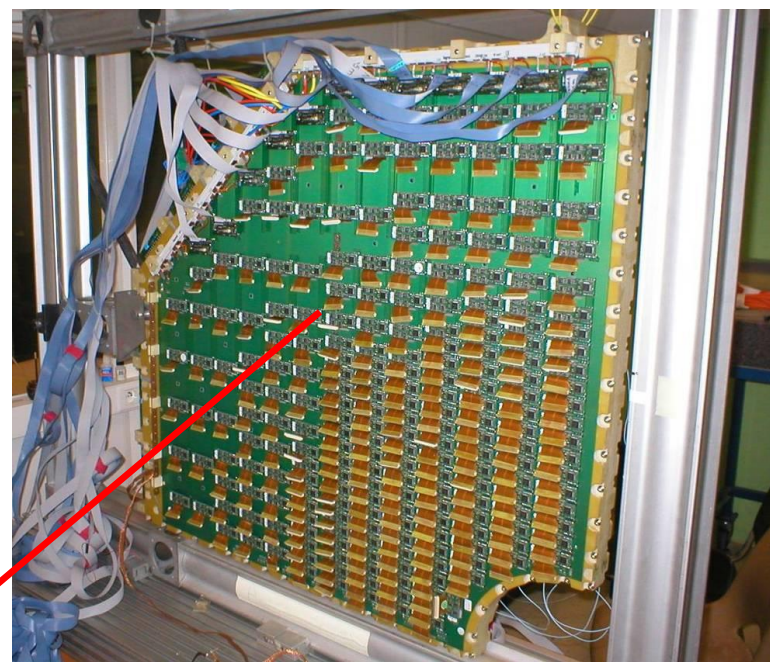
Фотонен спектрометър

- Плътен като олово и прозрачен като кристал

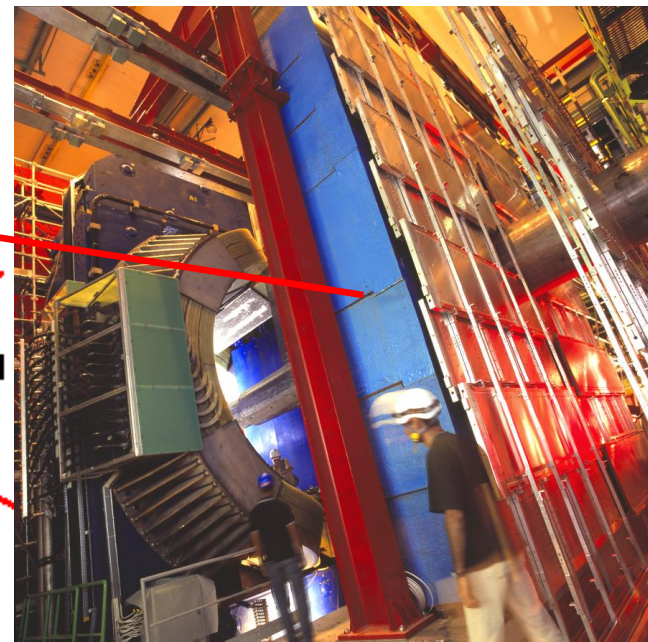
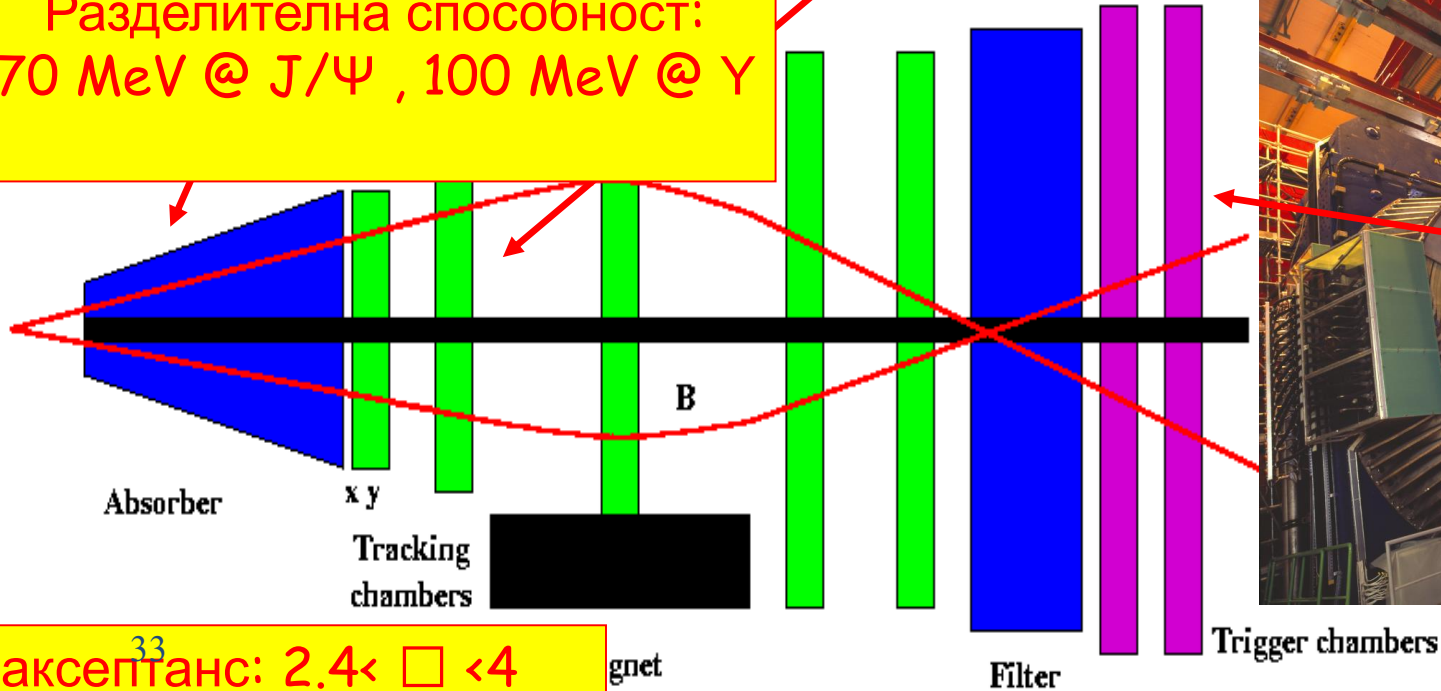


- Фотоните предизвикват каскади от електрони и позитрони
- Електроните възбуждат атомите на кристала
- Възбудените атоми излъчват в ултравиолетовия спектър
- Ултравиолетовото излъчване се регистрира от едната страна на кристала от фотодиод

(Дву)мюонен спектрометър



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



акцептанс: $2.4 < \square < 4$

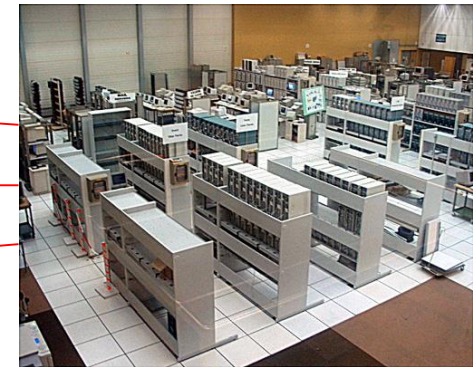
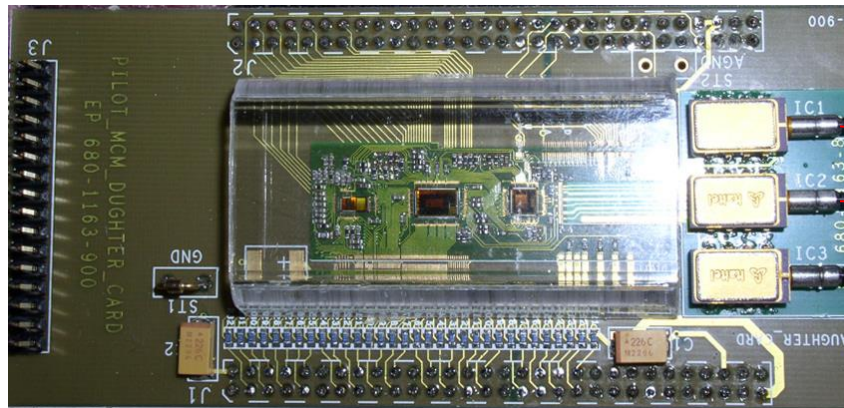
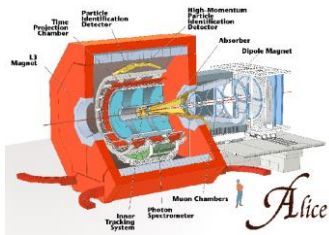
agnet

Filter

Trigger chambers

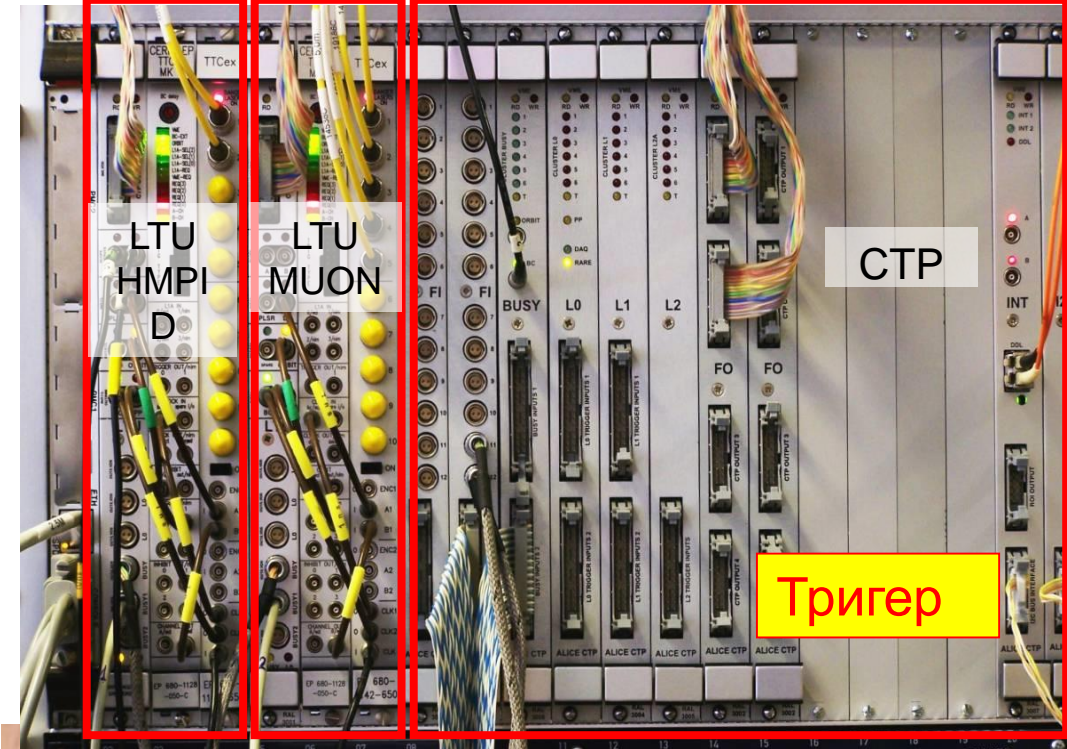
От волт към байт

- 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.



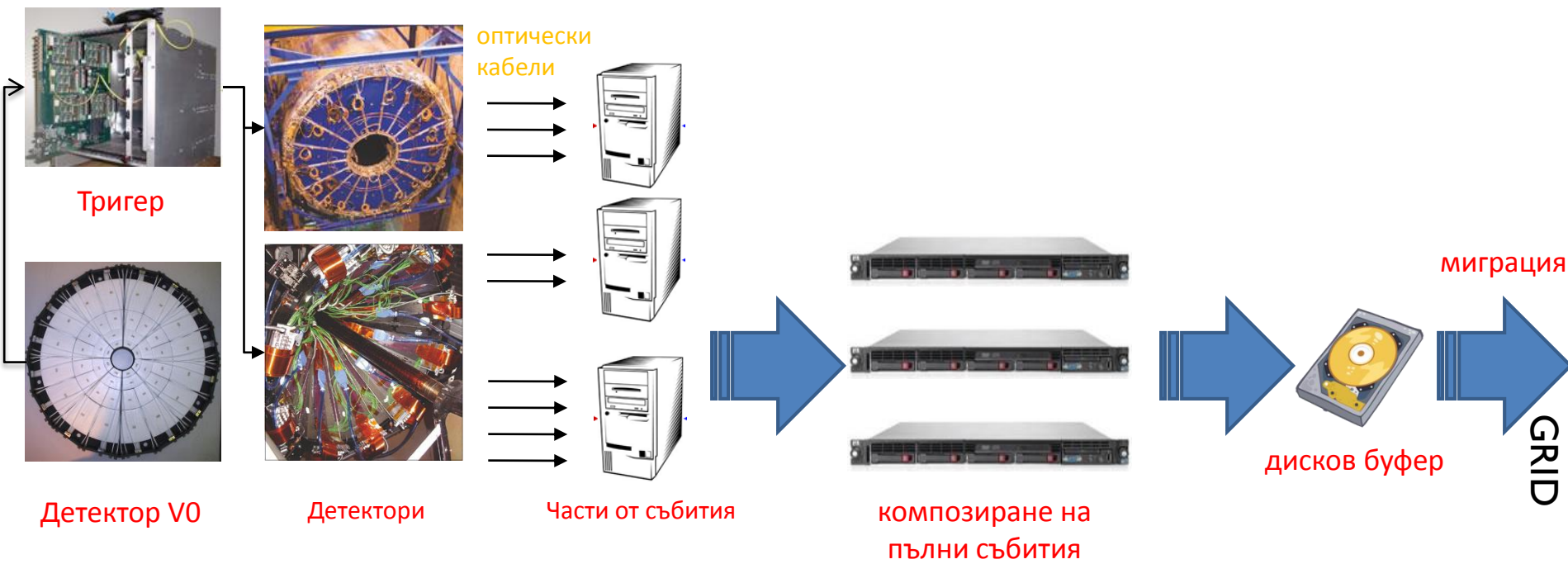


Система за събиране на данни

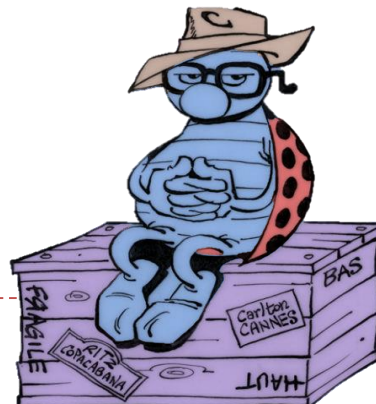


Тригер от високо ниво

Поток от данни



Бърза реконструкция
Компресиране
Тригер от високо ниво



Реконструкция
Моделиране
Анализ

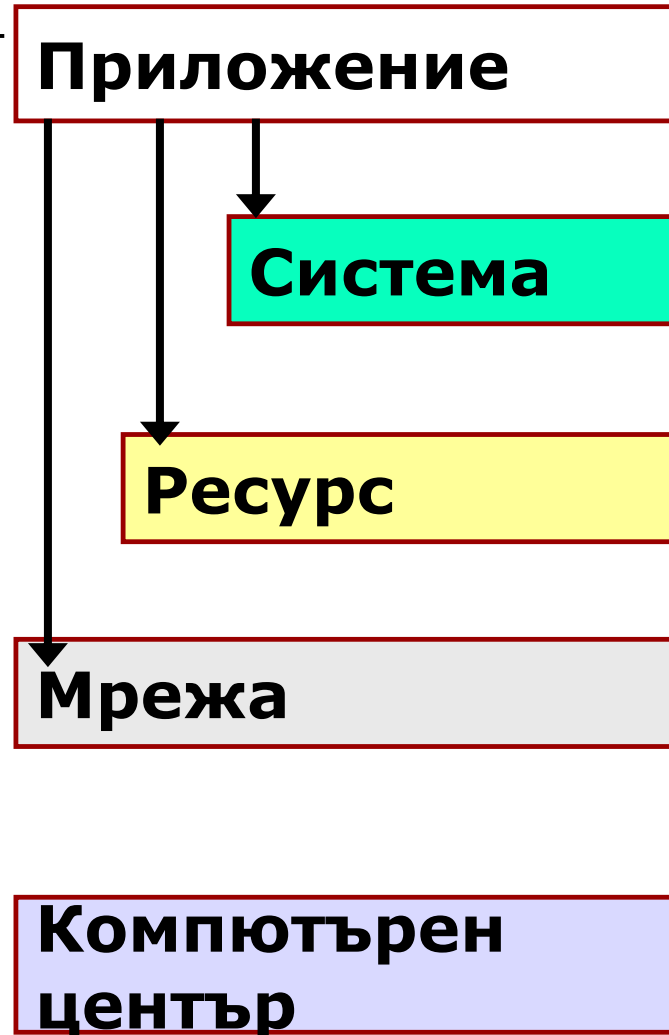
Архитектура на GRID

“Координация на множество от разпределени ресурси”

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

“Комуникация и безопасност”

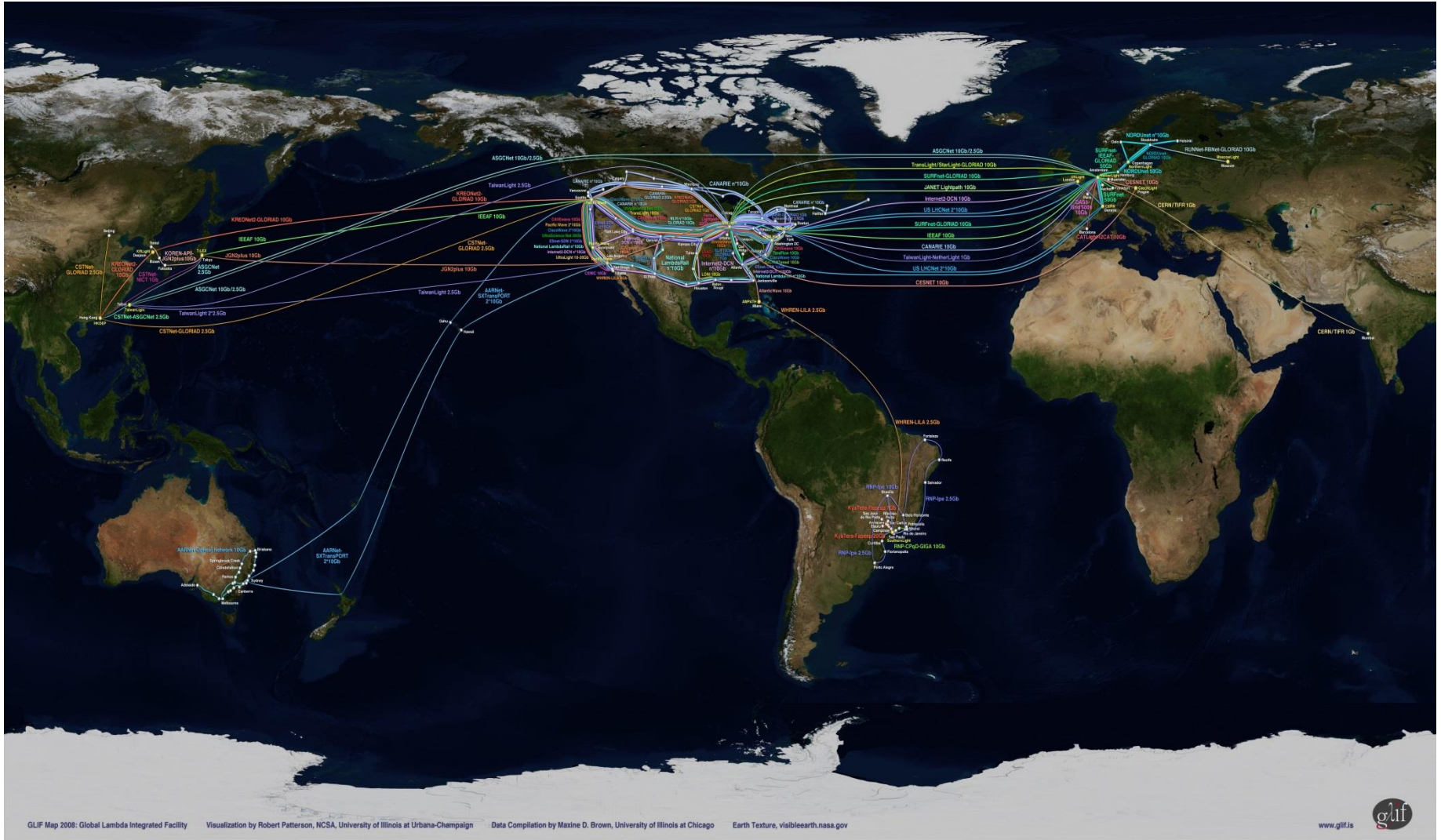
“Локален контрол”: Локален
достъп и контрол над
ресурсите



Компютърен Център

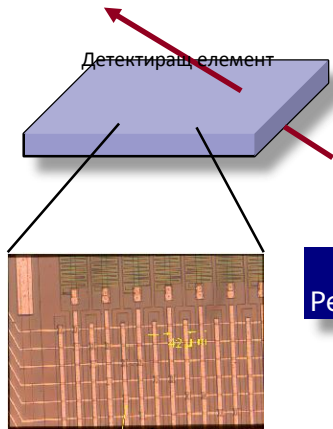


Мрежова инфраструктура

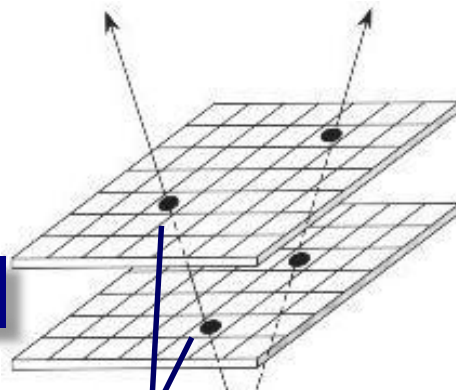


Обработка на данни

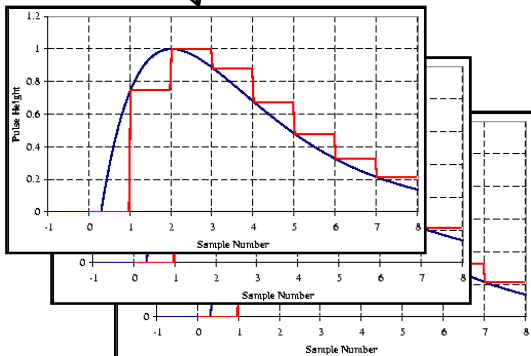
Частица



Оцифроване/
Реконструкция --->



Търсене на следи +
Оценка на параметрите --->



Сработили

каналы

(x_1, y_1, z_1, t_1)

(x_2, y_2, z_2, t_2)

...

Event 1

Event 2

Следа 1

Следа 2

Съхраняване на информацията
За всяко събитие и следа

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

Импулс на
частицата

Аналогов
сигнал



Обработка на данни

▶ Реконструкция

- Заредени частици: обединяване на сработилите канали в следи
 - За всяка следа: импулс и идентификация
- Неутрални частици: енергия в калориметрите

▶ Моделиране: характеристики на детектора

▶ Анализ

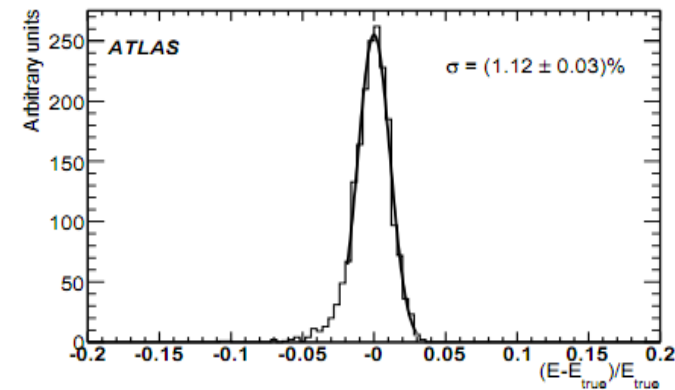
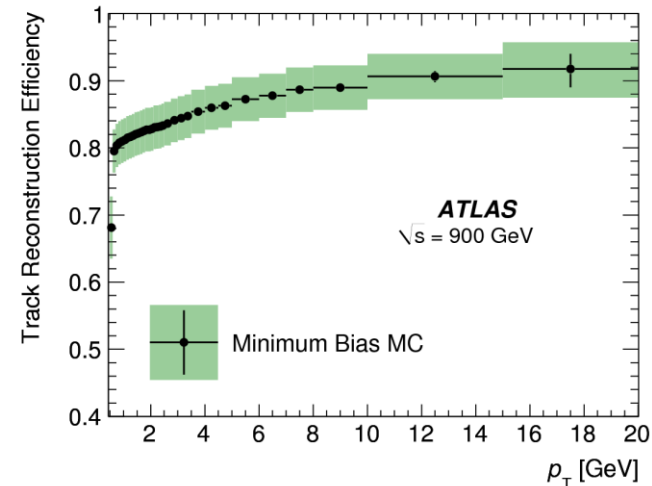
- Получаване на физическа информация

▶ GRID:

- Разпределни изчисления: T0, T1, T2,...

Характеристики на реконструкцията

- ▶ **Ефективност** = (Брой реконструирани частици) / (Брой на всички частици)
- ▶ **Разрешение** = (Измерено значение – Истинско значение) / Истинско значение
 - ▶ Точност на реконструкцията
- ▶ **Процент фалшиви** = (Брой каони реконструирани като пиони) / (Брой каони)
- ▶ Колко често един реконструиран обект изглежда като друг обект



Важно за физическия анализ

i) Висока ефективност, добро разрешение, нисък процент фалшиви

ii) ~~Добра оценка на ефективността, разрешението и процента фалшиви~~

Какво е “пълен анализ”?

Съвкупност от изследвания, които заедно дават съгласувано и цялостно описание на определено множество от данни

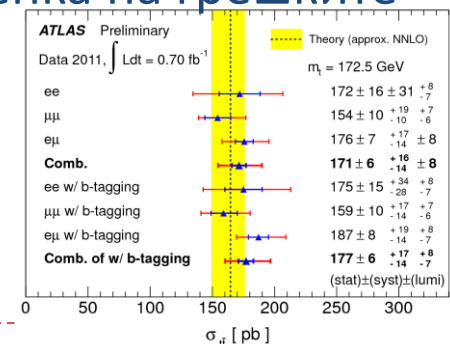
- ▶ Покрива всички аспекти, нужни за разбиране и характеристика на данните
- ▶ Достатъчна документация
- ▶ Независима проверка

Основи на анализа

- ▶ **Обща информация за всички анализи**
 - ▶ Оценка на пълната ефективност за сигнала след всички критерии за отбор
 - ▶ Оценка на очаквания брой фонове събития след всички критерии за отбор
 - ▶ Оценка на статистическите и систематични грешки
- ▶ **Основни типове анализ**
 - ▶ Преброяване на събития (вероятности на процеси и разпади)
 - ▶ Измерване на характеристики (маса, време на живот, импулсни спектри, разпределение по азимутален ъгъл)
 - ▶ Търсене на нещо ново (забранени разпади, нова физика)
- ▶ **Трябват ни данни и моделиране!**

Етапи на физически анализ

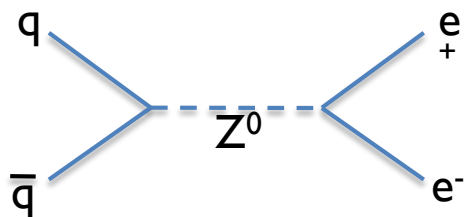
- ▶ Използваме резултатите на реконструкцията
- ▶ Избираме събития на базата на реконструираните характеристики
 - ▶ Често изчисляваме нови величини, например масата на комбинация от частици
 - ▶ Селекцията на събития цели да подобри например отношението сигнал/фон
- ▶ Оценки
 - ▶ Ефективност на селекцията
 - ▶ Количество фонови събития след селекцията
 - ▶ Може да използваме симулация и данни за оценка на грешките
- ▶ Окончателната фигура показва
 - ▶ Сравнение с теорията
 - ▶ Корекция за ефективност и фон
 - ▶ Статистически и систематически грешки



Пример за моделиране (Geant4)

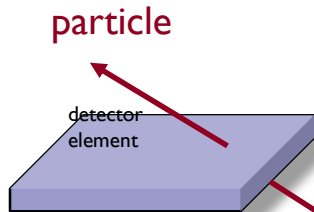
Моделиране на физически процес

-Резултатът е енергия и импулс на родените частици, в случая на електрон-позитронната двойка от разпада на Z^0 .



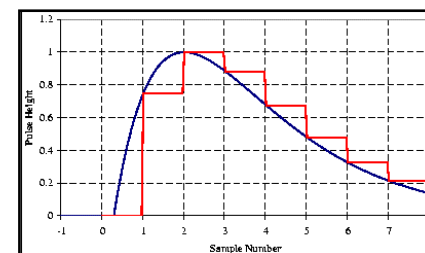
Моделиране на детектора

- Моделиране на преминаването на електрони през детектора;
- Отклоняване на траекторията в магнитно поле;
- Йонизация на чувствителните елементи;
- Взаимодействие с веществото на детектора;
- Електромагнитни лавини.



Моделиране на електрониката

- Отклик на чувствителните елементи в резултат на йонизацията.
- Моделиране на EM импулс и електронните елементи.
- Резултатът е подобен на истинските данни + MC истина.



ROOT: система за анализ на данни

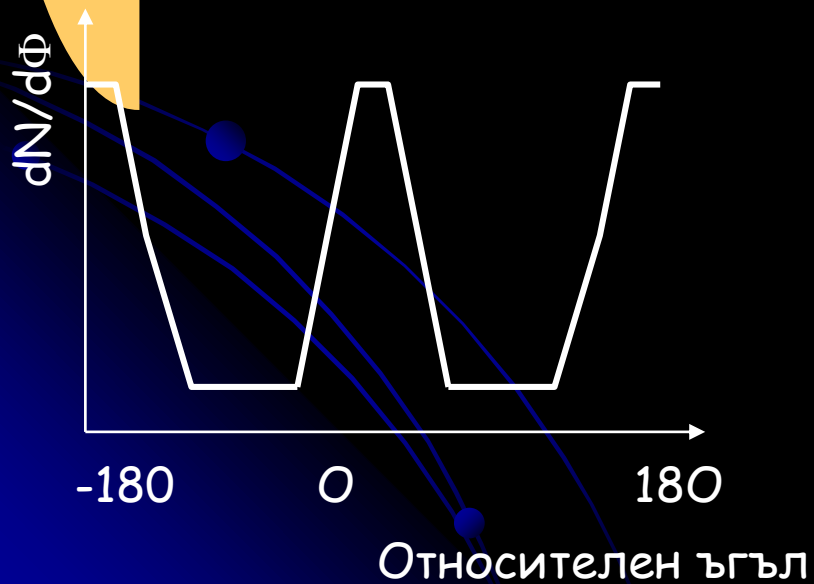
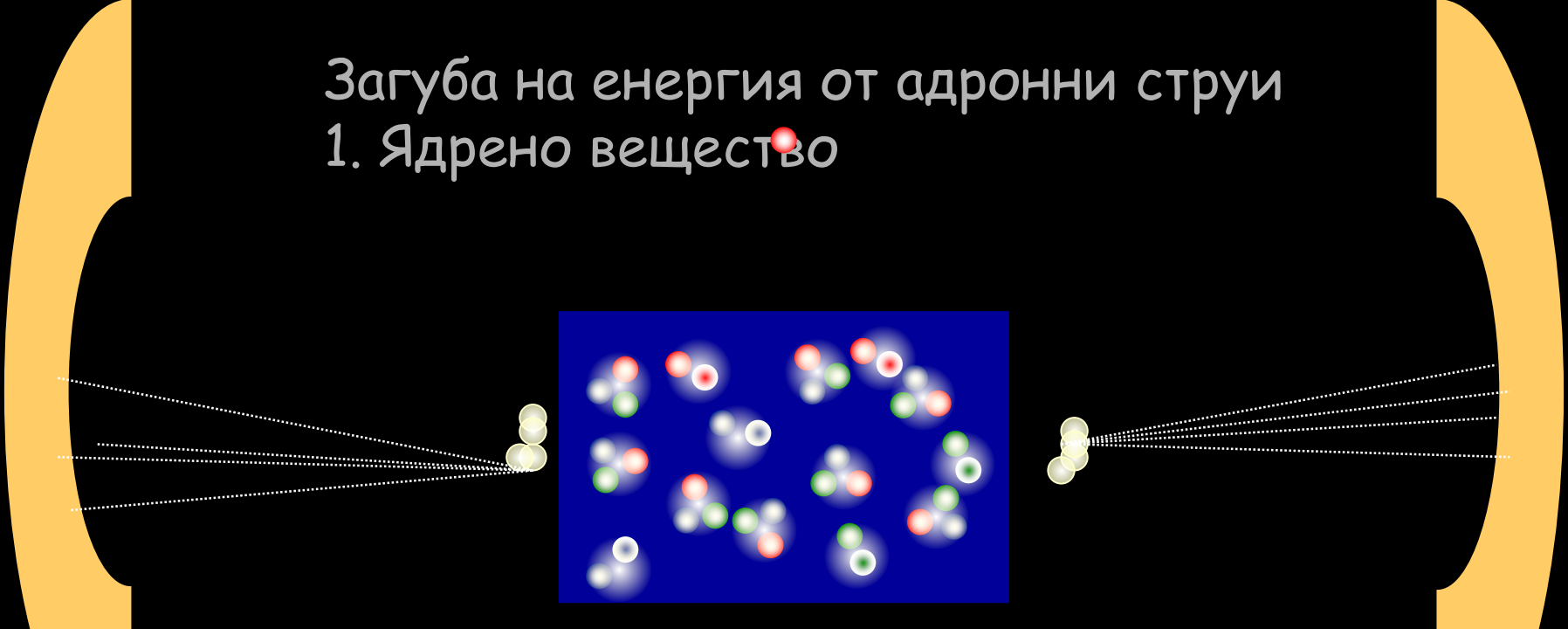
- ▶ Съхранение на данни. Сериализация/десериализация на C++ обекти в ефективни структури от данни, оптимизирани за бързо четене.
- ▶ Достъп до данни. Самоописателни структури от данни (ROOT файлове) с възможност да бъдат организирани във вериги.
- ▶ Обработка на данни. Хистограми, апроксимация на функции, минимизация, мат. функции, статистика.
- ▶ Визуализация на резултати. Добре развита графична (GUI) подсистема.
- ▶ Интерактивна разработка на приложения. C++ интерпретатор, бързо и лесно създаване на прототипи (C++ макроси) и тяхното компилиране.
- ▶ Геометрически пакет, псевдослучайни числа и др.

Избрани резултати



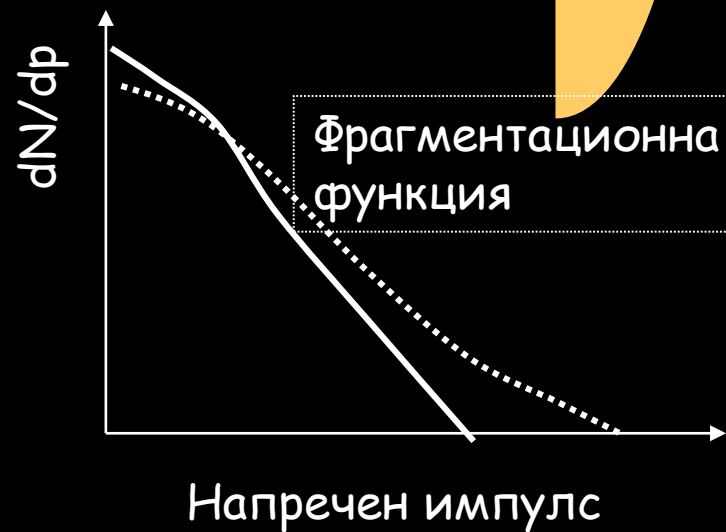
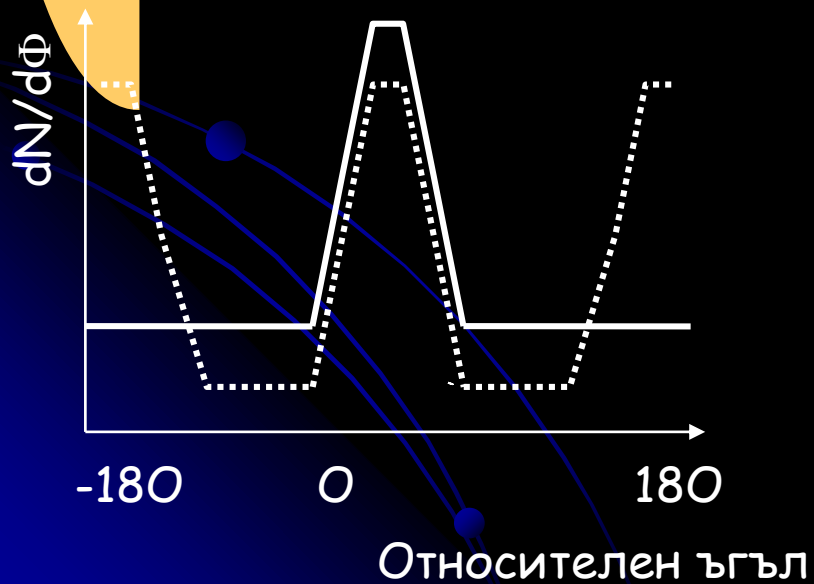
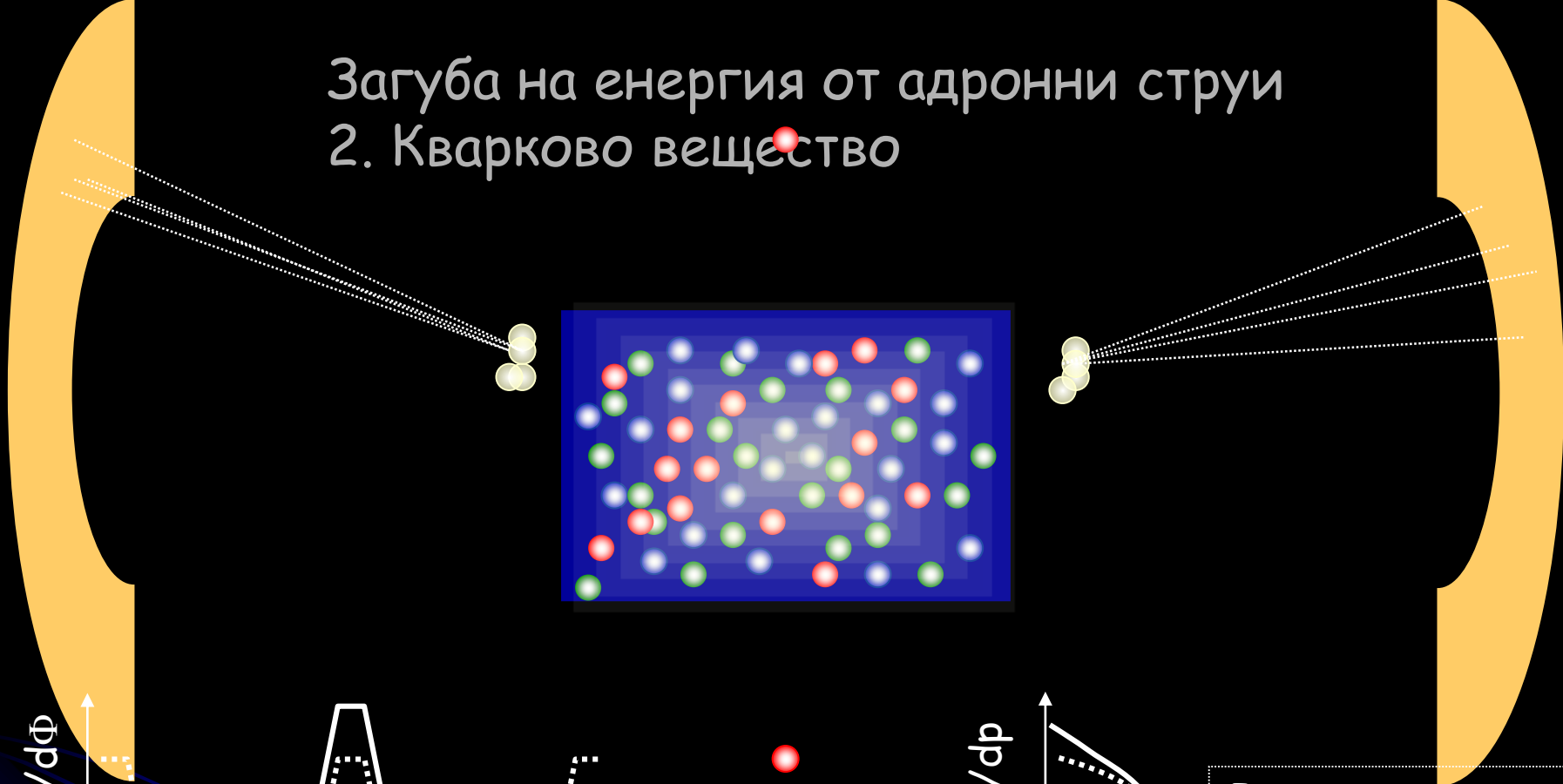
Загуба на енергия от адронни струи

1. Ядрено вещество

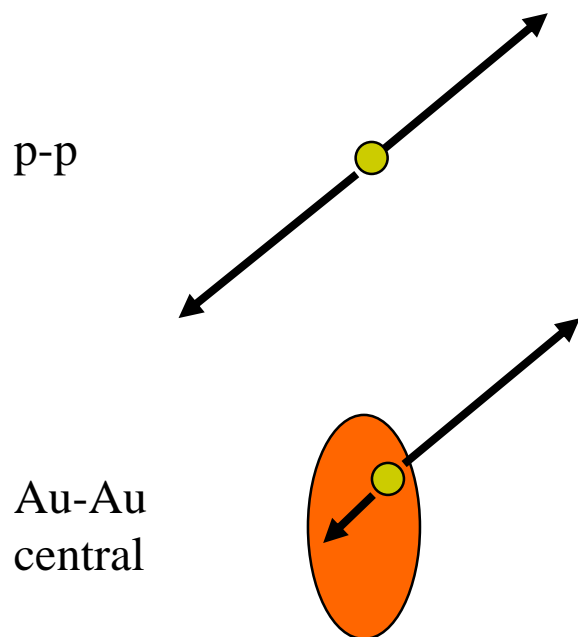


Загуба на енергия от адронни струи

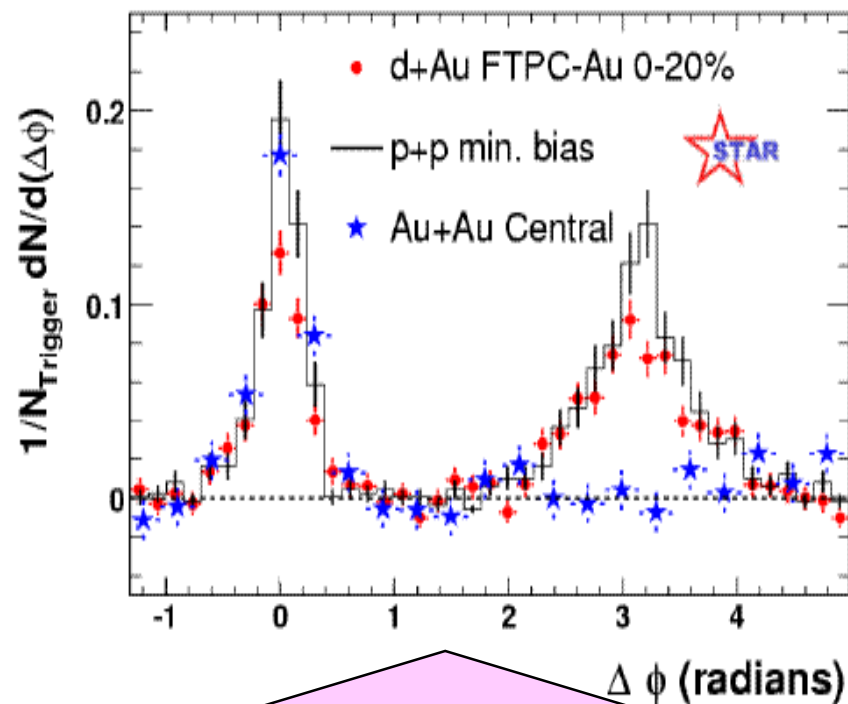
2. Кварково вещество



Струи: азимутални корелации @ RHIC



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



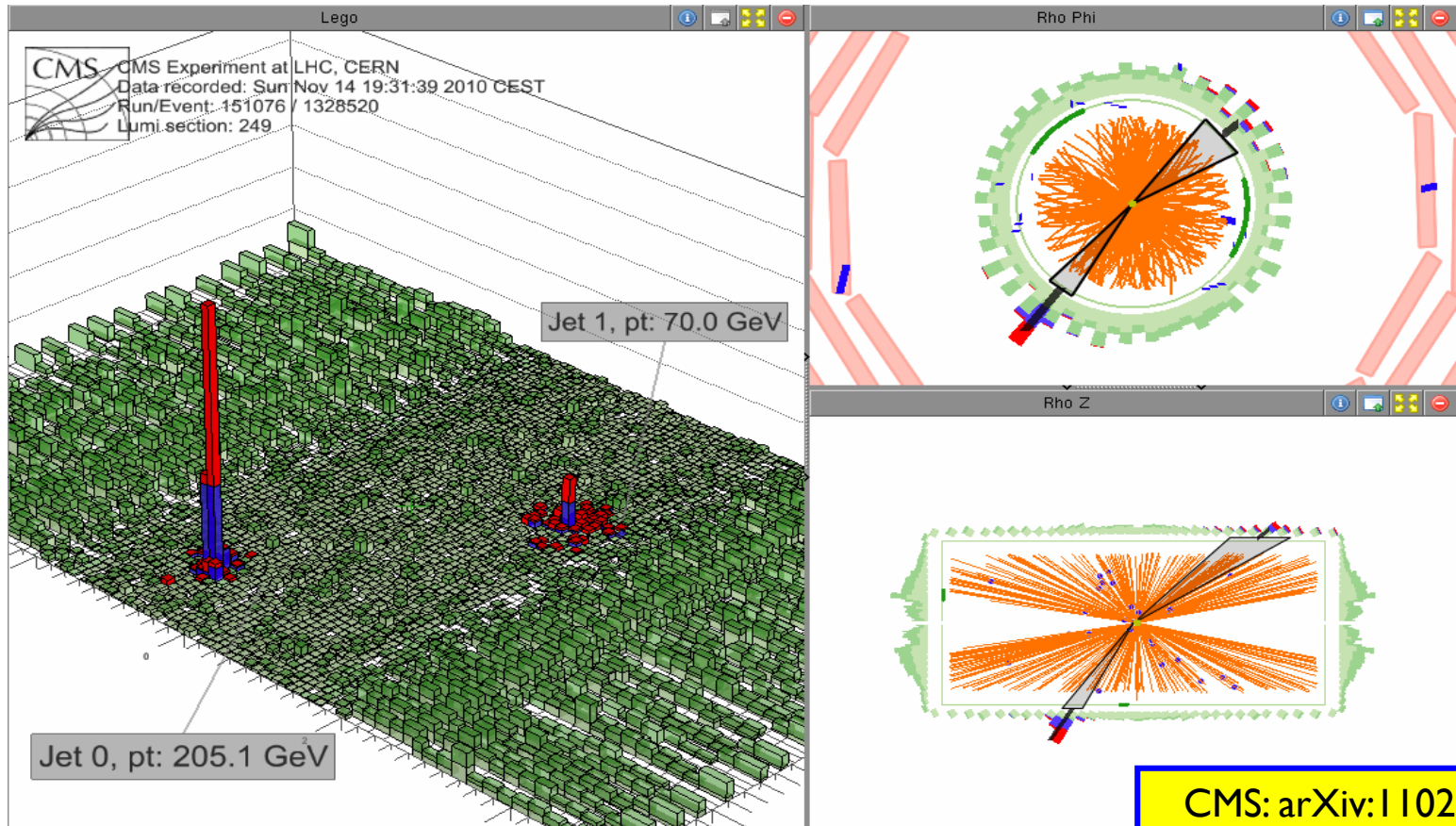
Струята-партньор минава през веществото на КГП и може да загуби много енергия, ако то е плътно

→ азимуталната корелация се развива

Плътно вещество!

Струи @ LHC

► Pb-Pb събитие с голяма енергетическа асиметрия

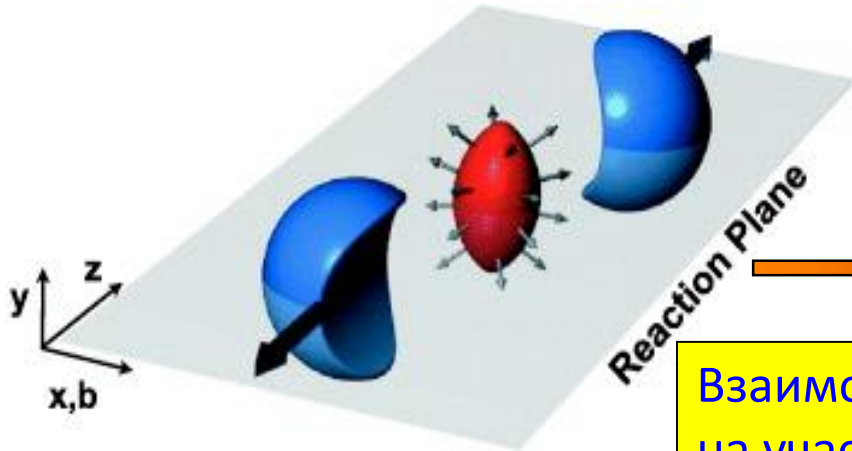


- струята-партньор губи много енергия, но е в очакваната посока!
- голям брой частици с импулси $\sim 1 \text{ GeV}/c$ съпровождат струята-партньор

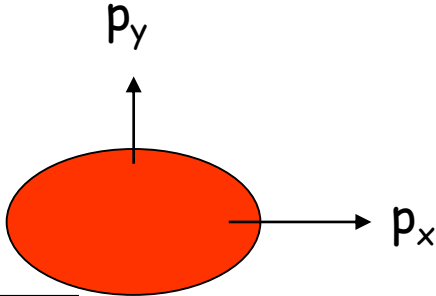
Азимутален поток от частици

Начална пространствена анизотропия

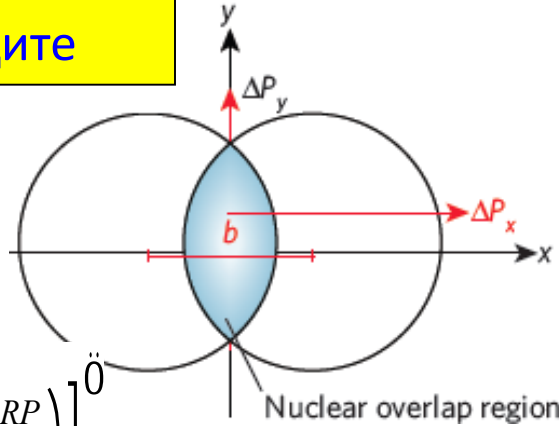
Анизотропия на импулсите след сблъсък



Взаимодействие на участниците



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



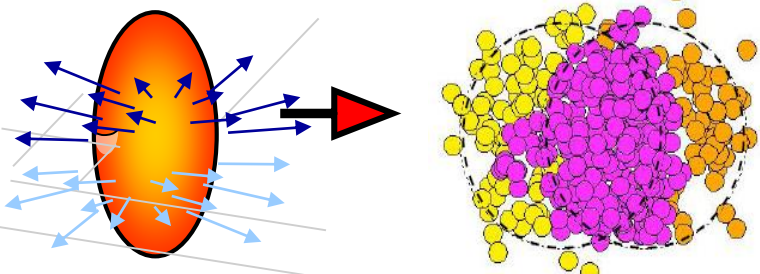
$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{2\rho} \frac{d^2 N}{p_T dp_T dy} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{v_n}{v_n} \cos[n(\phi - \psi_n^{RP})] \right]$$

хидродинамика

Koib & Heinz 2001

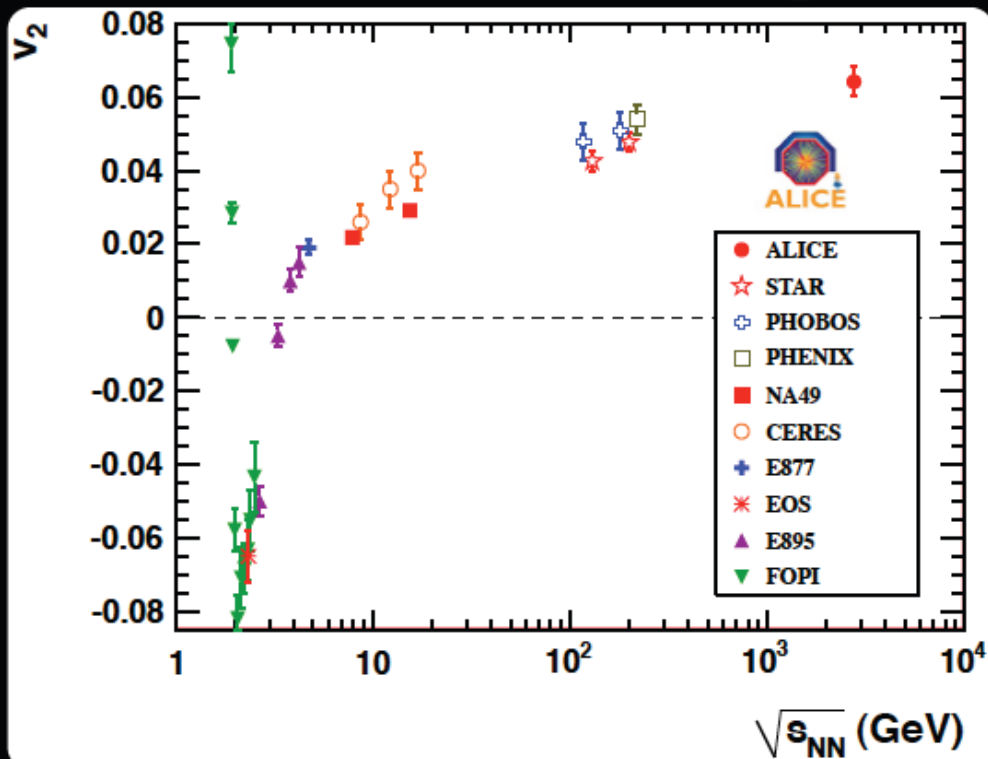
fm/c

Азимутален поток от частици

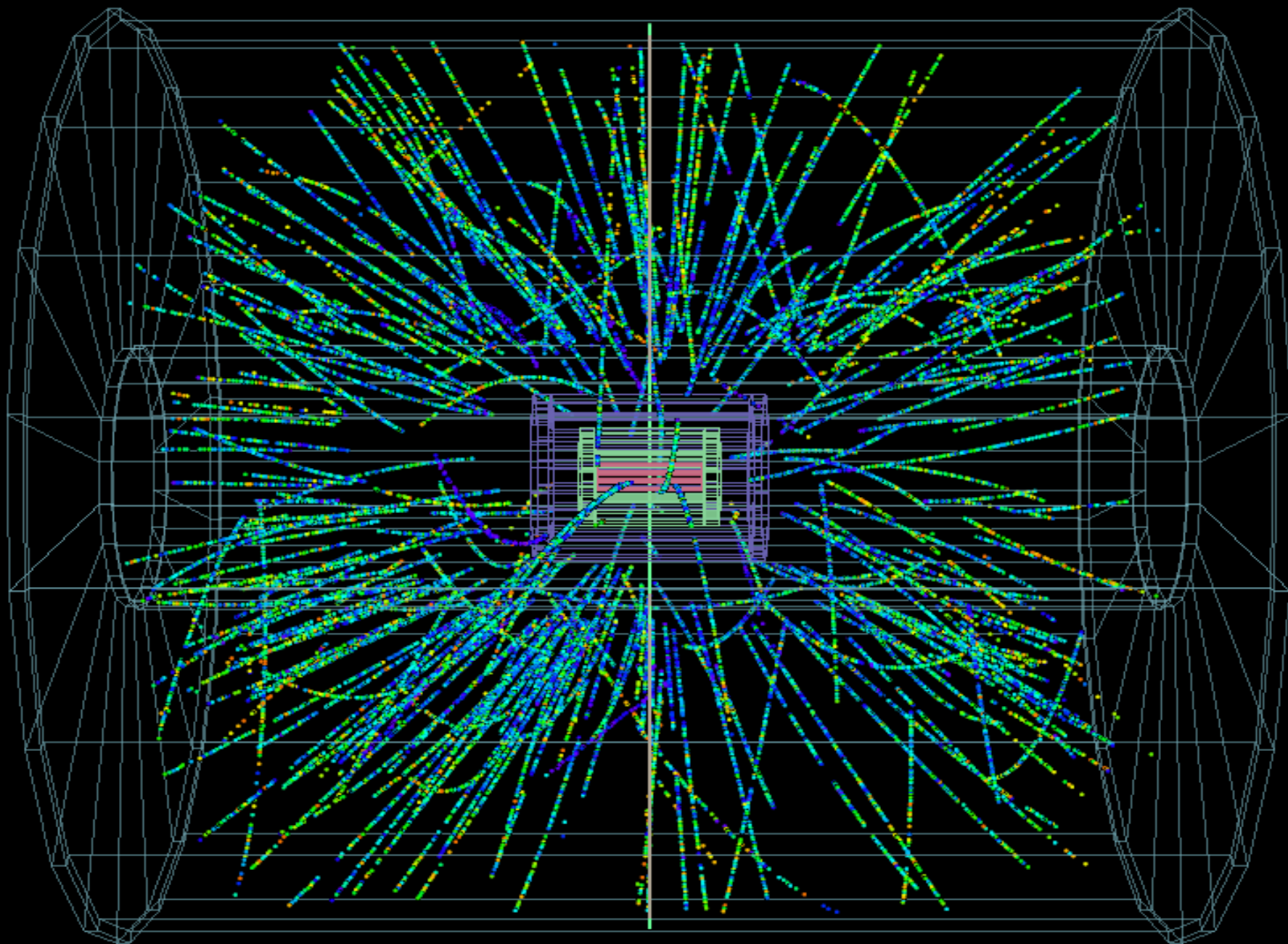


- v_2 е мярка за азимуталната анизотропия на потока частици родени при взаимодействието (втори Фурие-коефициент)
- Позволява да се изследва ранното състояние на системата, когато пространствената анизотропия е най-голяма
- v_n + хидродинамични модели => вискозитет
- Малък вискозитет => **идеална течност**

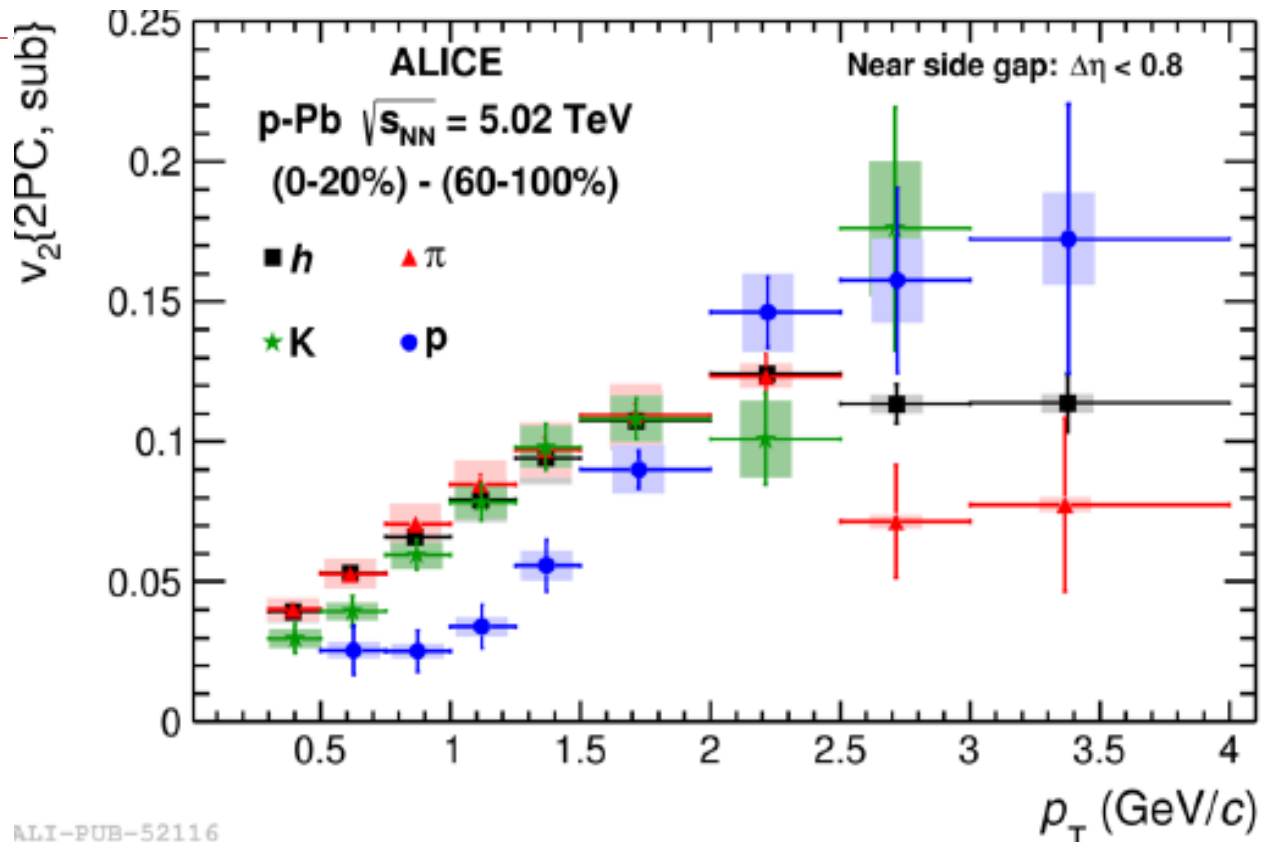
The Perfect Liquid



The system produced at the LHC behaves as a very low viscosity fluid (a perfect fluid)



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!

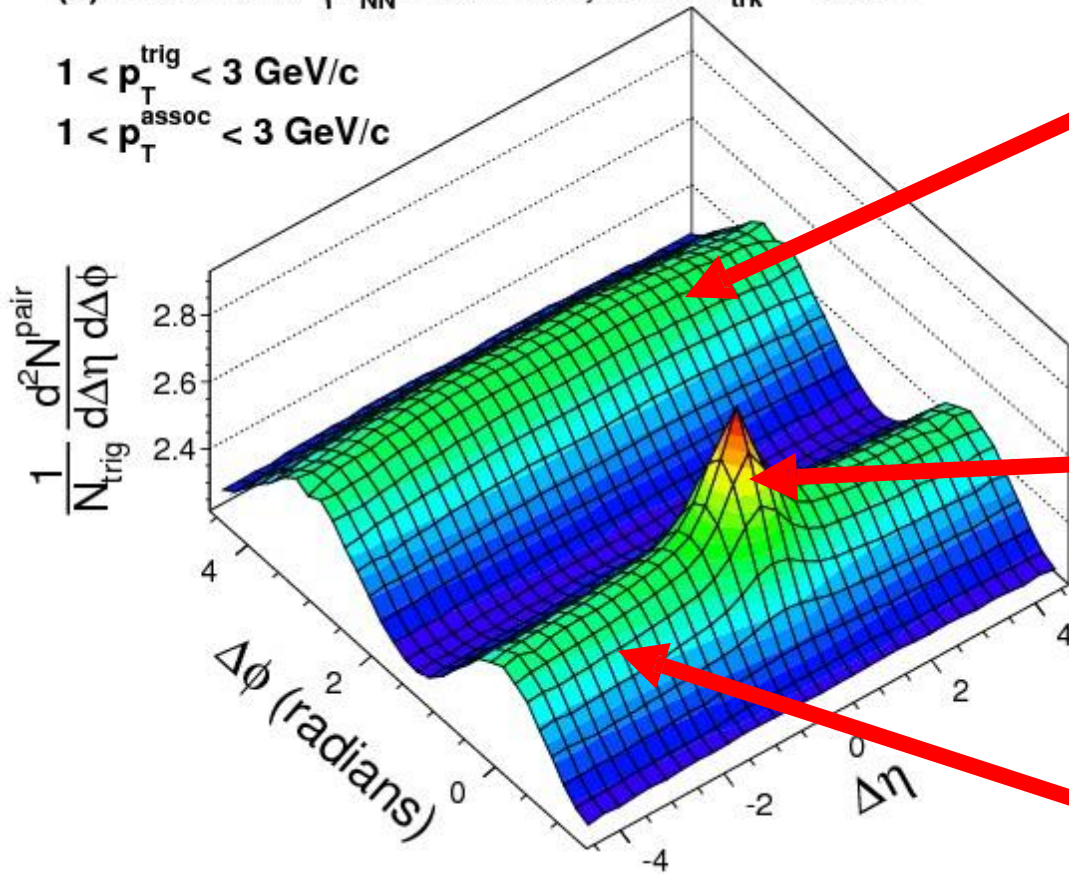


Двумерни двучастични корелации: $\Delta\phi$ и $\Delta\eta$

(a) CMS PbPb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, $220 \leq N_{\text{trk}}^{\text{offline}} < 260$

$1 < p_{\text{T}}^{\text{trig}} < 3$ GeV/c

$1 < p_{\text{T}}^{\text{assoc}} < 3$ GeV/c



Далечна страна:
Струя + поток (хребет)
($\Delta\phi \sim \pi$, дълга по $\Delta\eta$)

Близка страна:
Струя +
резонанси, ...
($\Delta\phi \sim 0$, $\Delta\eta \sim 0$)

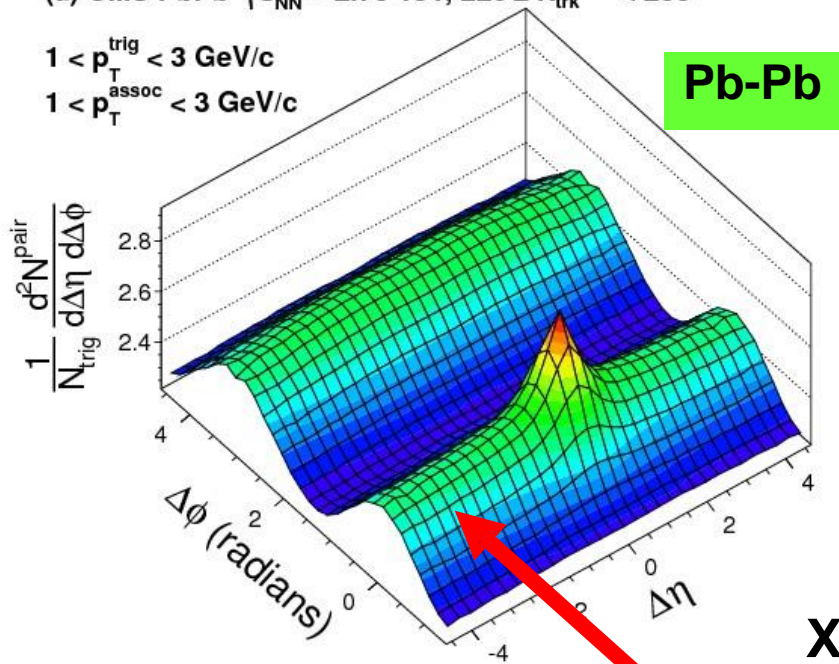
Близка страна:
Поток (хребет)
($\Delta\phi \sim 0$, дълга по $\Delta\eta$)



Pb-Pb vs. pp

(a) CMS PbPb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, $220 \leq N_{trk}^{offline} < 260$

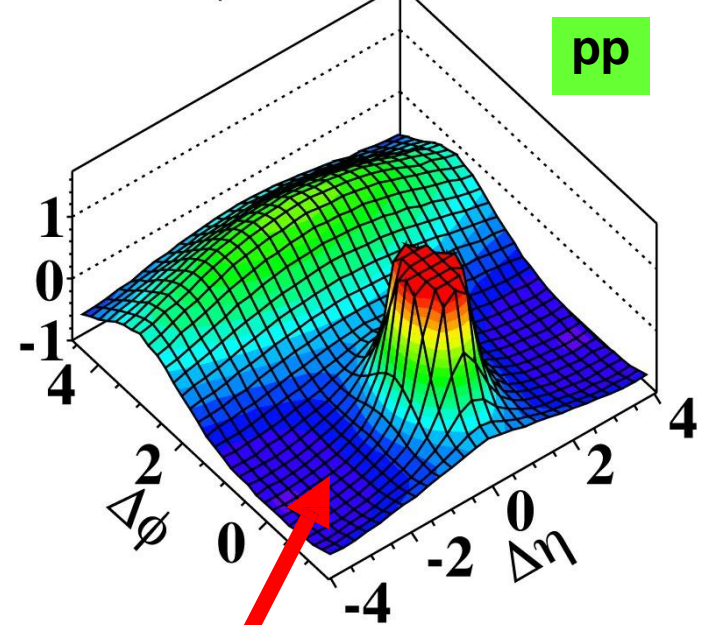
$1 < p_T^{trig} < 3$ GeV/c
 $1 < p_T^{assoc} < 3$ GeV/c



Pb-Pb

CMS 2010, $\sqrt{s} = 7$ TeV
 MinBias, $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$

$R(\Delta\eta, \Delta\phi)$



pp

Хребет от
 близката страна
 (поток) само в
 Pb-Pb

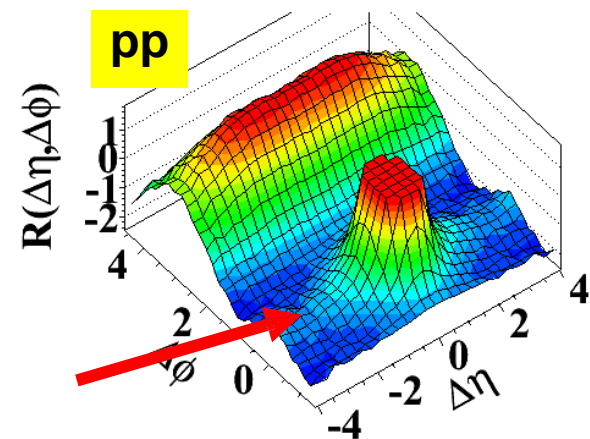
поне така си мислехме дълго време...

CMS: Хребет от близката страна

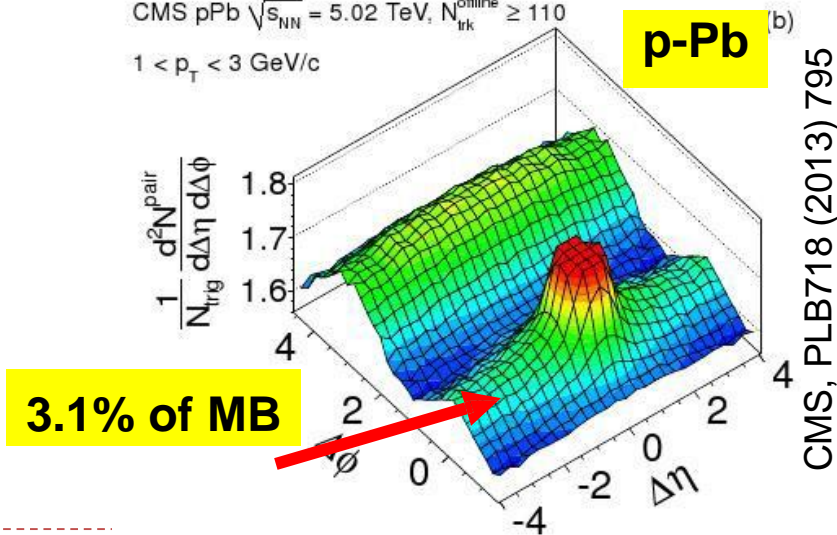
Тук: $\eta = \eta_{lab}$

- ...наблюдава се в pp сблъсъци с голяма множественост
 - 0.005% събития с най-голяма множественост
- ...наблюдава се в p-Pb с голяма множественост
 - ~40% събития с най-голяма множественост
 - Учудващо голям ефект

0.0005% of MB
 (d) CMS $N \geq 110$, $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$



$N_{\text{offline, trk}} > 110$
 CMS pPb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$, $N_{\text{trk}}^{\text{offline}} \geq 110$
 $1 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$



3.1% of MB

CMS, JHEP09(2010)091

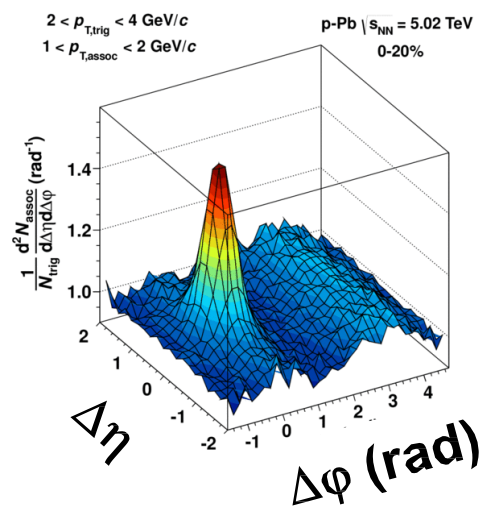
CMS, PLB718 (2013) 795

ALICE: Двоен хребет в pPb

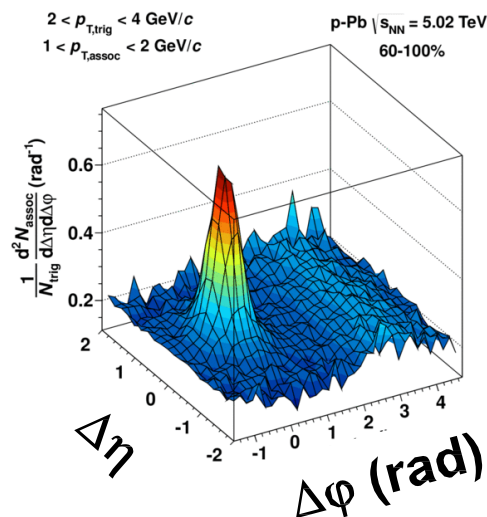
- Процедура за изваждане на корелациите от струи
 - При 60-100% централност нама хребет подобно на pp

0-20%

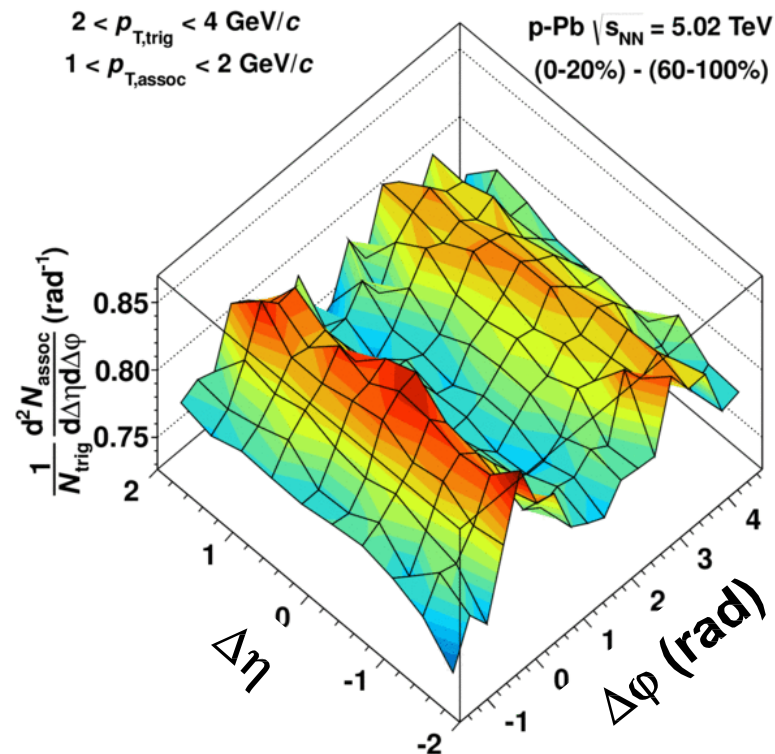
60-100%



—



==



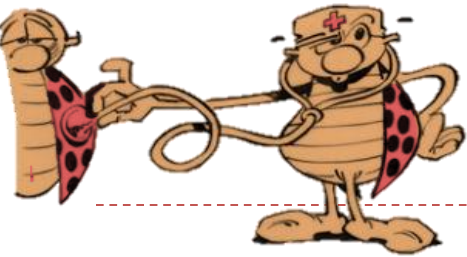
Два хребета !

Колективно поведение в “малки” системи

- Характерни за Pb-Pb ефекти в pp and p-Pb събития
- Нова парадигма при интерпретацията на резултатите?
- Указания за КГП в сблъсъци на p-Pb и pp с голяма множественост?)

LHC	pp	p-Pb	Pb-Pb
Площ на сблъсъка (fm^2)	2	12	150
Обем при равновесие (fm^3)	25	160	5000
Плътност на енергията (GeV/fm^3)	$>1(?)$	3 (?)	10

- Дискусия за влиянието на началното състояние и многократното разсейване върху колективното поведение системата



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

Нови идеи

- ▶ Наблюдението на колективно поведение и азимутален поток в rr и $rR\dot{r}$ налага преразглеждане на хидродинамичното описание на системата
- ▶ Хидродинамиката и транспортната теория предполагат взаимодействия в крайно състояние
- ▶ Взаимодействията в крайно състояние обаче водят до загуба на енергия от струите, която не се наблюдава в “малки” системи
- ▶ Две възможности:
 - ▶ Загубите на енергия са прекалено малки, за да се видят
 - ▶ Колективно поведение е възможно и без взаимодействия в крайно състояние => квантова интерференция?
- ▶ Активни теоретични изследвания (Boris Block & Urs Wiedemann)



Хидродинамика

- ▶ Хидродинамиката е макроскопична ефективна теория която описва възбуждания с голяма дължина на вълната в система
 - ▶ Микроскопичните степени на свобода са интегрирани
- ▶ Уравненията на хидродинамиката са законите за съхранение на:
 - ▶ Енергия-импулс: $\nabla_m T^{mn} = 0; \quad T^{mn} = (e + P)u^m u^n - P g^{mn}$
 - ▶ Заряди: $\nabla_m N_i^m = 0; \quad N_i^m = n_i u^m$
 - ▶ Тези уравненията са за идеален флуид. В случай на вискозитет дисипативната компонента $\Pi^{\mu\nu}$ се добавя към тензора на ен.-импулс
- ▶ Пълната система уравнения включва още
 - ▶ Начални условия
 - ▶ Уравнения на състоянието
 - ▶ Уравнения за еволюцията на дисипативната компонента (например на Израел и Стюарт)
- ▶ Дисипативна релативистка теория: причинност и стабилност

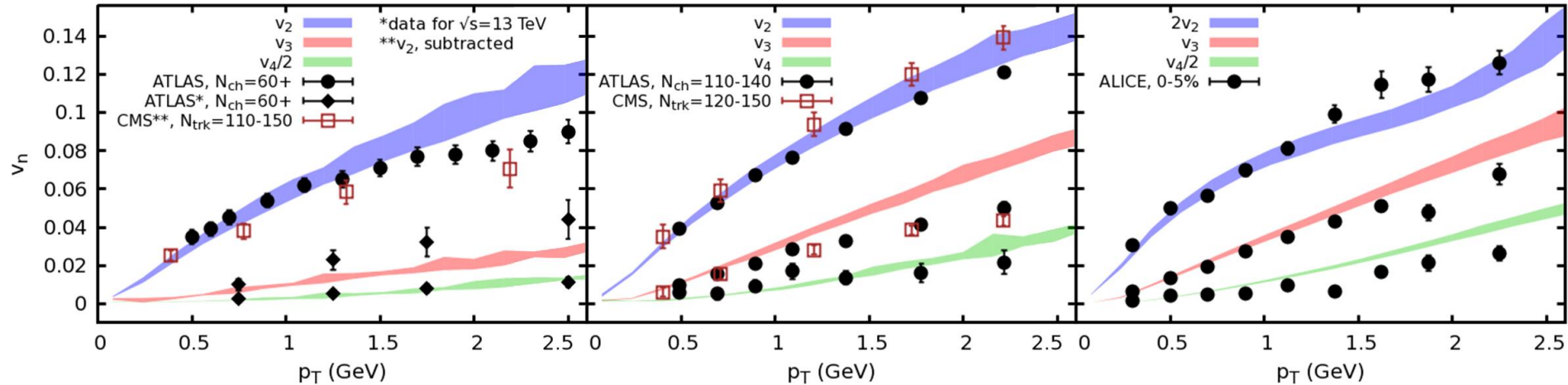
Хидродинамичен анализ на различни с-ми

R.Weller, P.Romatschke PLB 774 (2017) 351

superSONIC for p+p, $\sqrt{s}=5.02$ TeV, 0-1%

superSONIC for p+Pb, $\sqrt{s}=5.02$ TeV, 0-5%

superSONIC for Pb+Pb, $\sqrt{s}=5.02$ TeV, 0-5%



- ▶ Заглавието казва всичко: “One fluid to rule them all: Viscous hydrodynamic description of event-by-event central p+p, p+Pb and Pb+Pb collisions at 5.02 TeV”

Наблюдения

- ▶ Колективно поведение в малки силно-взаимодействащи системи
- ▶ Успешно хидродинамично описание
 - ▶ В подобни малки системи няма термализация => приложимостта на хидродинамиката не изисква термализация и не е доказателство за термализация
 - ▶ Такива силно-свързани системи изпитват релаксация към универсален атрактор (see arXiv:1707.02282)
- ▶ Началните условия допускат множество описания: кондензат от цветно стъкло, „глазма“, сблъсъци на струни, мини-струи, партонни каскади
 - ▶ Различни имена за едно и също нещо?

Бъдещето на ALICE: сезон 3 на LHC

- ▶ ALICE ще изследва редки събития, за които няма подходящ тригер (например разпади на очаровани частици с малък импулс)
- ▶ ALICE ще използва система с непрекъснато снемане на данни
- ▶ ALICE ще записва около 100 пъти повече PbPb взаимодействия
- ▶ Вътрешният трекер и времепроекционната камера ще са напълно обновени
- ▶ Обработката на събитията ще се извършва в специализирана компютърна ферма

