

ALICE – експеримент с тежки йони

Петър Христов
20/07/2023

History of the Universe



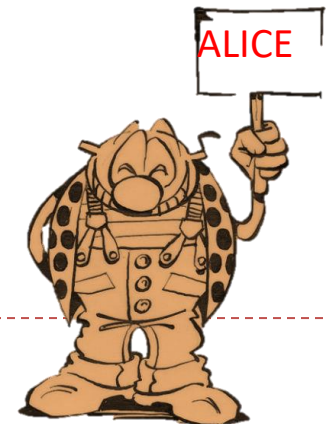
Кварки → адрони $\sim 10^{-5}$ s след
Големия Взрив

Вселената е непрозрачна, преки
наблюдения не са възможни.

=> изследвания на ускорители?

ALICE и физиката на тежките йони

- ▶ През 2023 ALICE има 30-годишен юбилей
- ▶ Научната програма на експеримента е посветена на **силното взаимодействие**
 - Теоретично описание – квантова хромодинамика (КХД)
 - Участници – кварки и глюони
- ▶ Силното взаимодействие обяснява
 - Защо масата на силно взаимодействащите частици (адрони) е много по голяма от масата на съставлящите ги кварки?
 - Какво удържа кварките в адроните?



КХД: Цвят

- ▶ Цветът (R, G, B) е зарядът на силното взаимодействие
 - ▶ Въведен, за да обясни съществуването на $\Omega^-(s\uparrow s\uparrow s\uparrow)$ въпреки принципа на Паули
 - ▶ 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

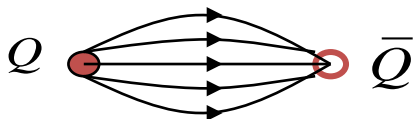
- ▶ Глуоните пренасят силното взаимодействие
 - ▶ Глуоните взаимодействат помежду си → **асимптотическа свобода, конфайнмент, спонтанно нарушаване на киралната симетрия**
- ▶ Глуонни (бозонни) степени на свобода
 - ▶ 8 варианта на цвят
 - ▶ 2 кирални състояния (проекции на спина върху импулса)



Квантова хромодинамика (КХД)

Асимптотическа
свобода

Удържане на
кварките



$\alpha(Q)$



Gross



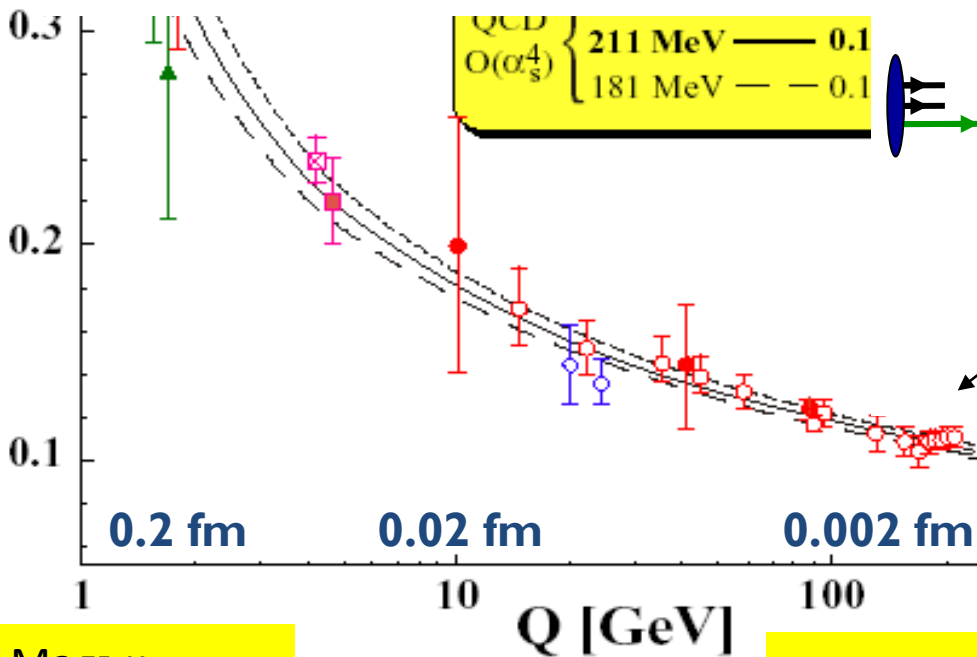
Politzer



Wilczek

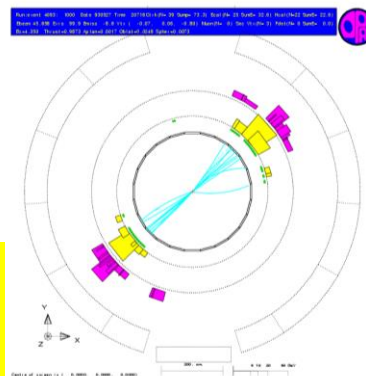
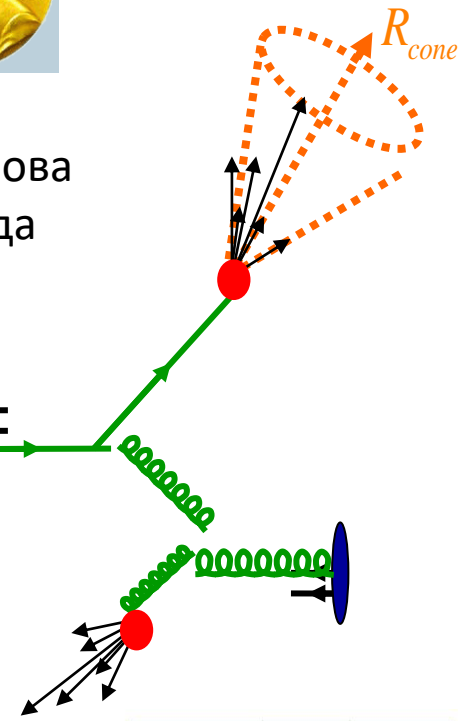


2004
Нобелова
награда



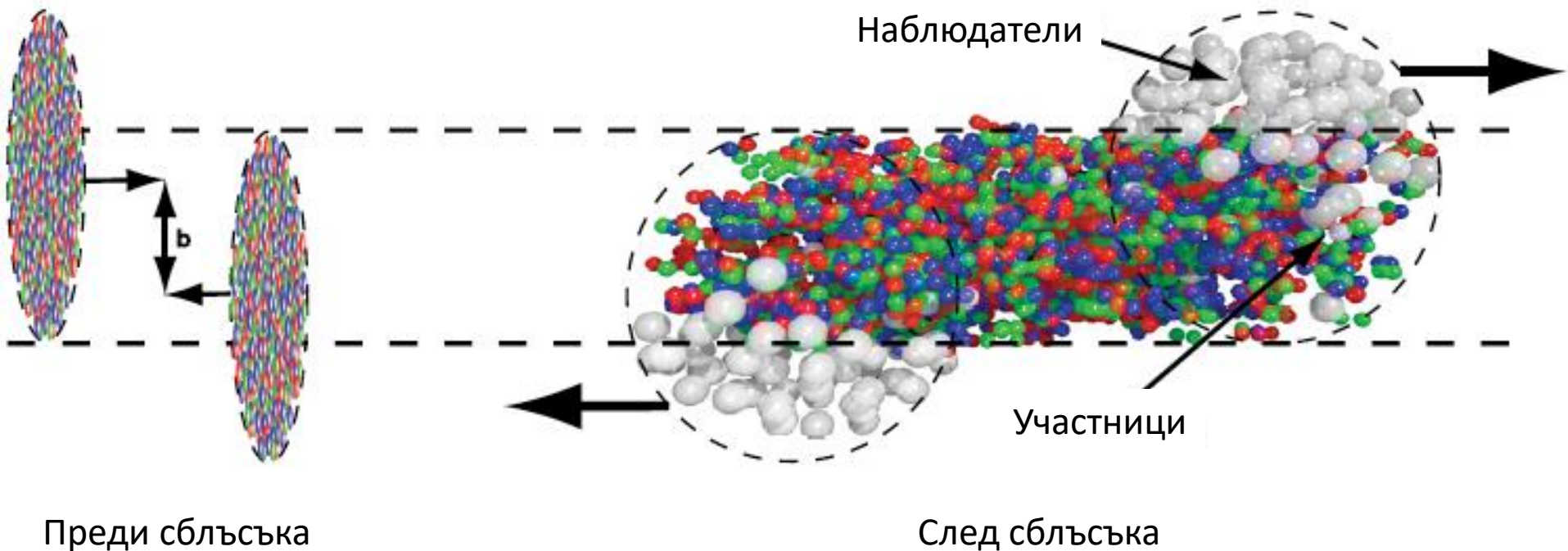
Малък
импулс

Голям
импулс

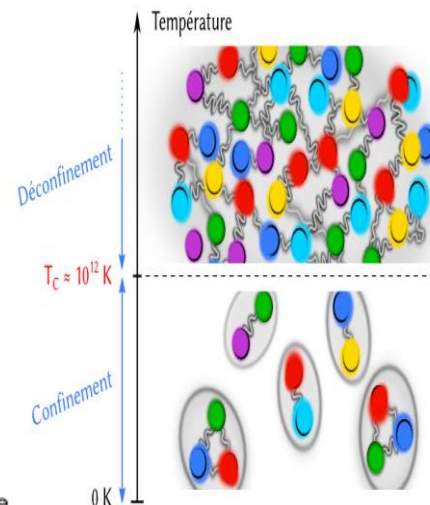
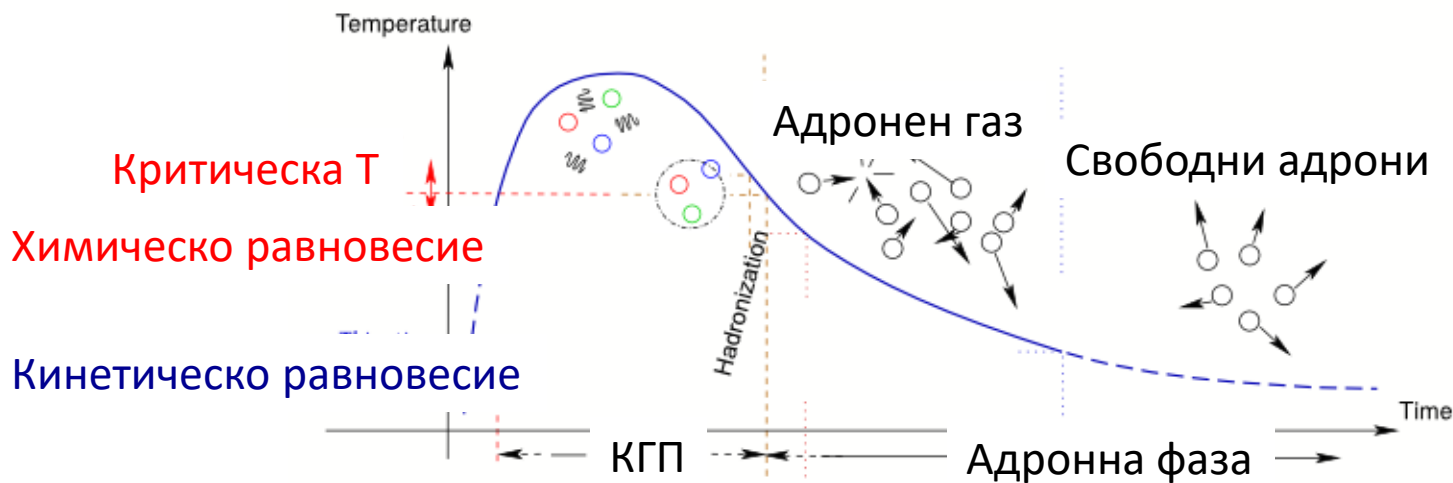
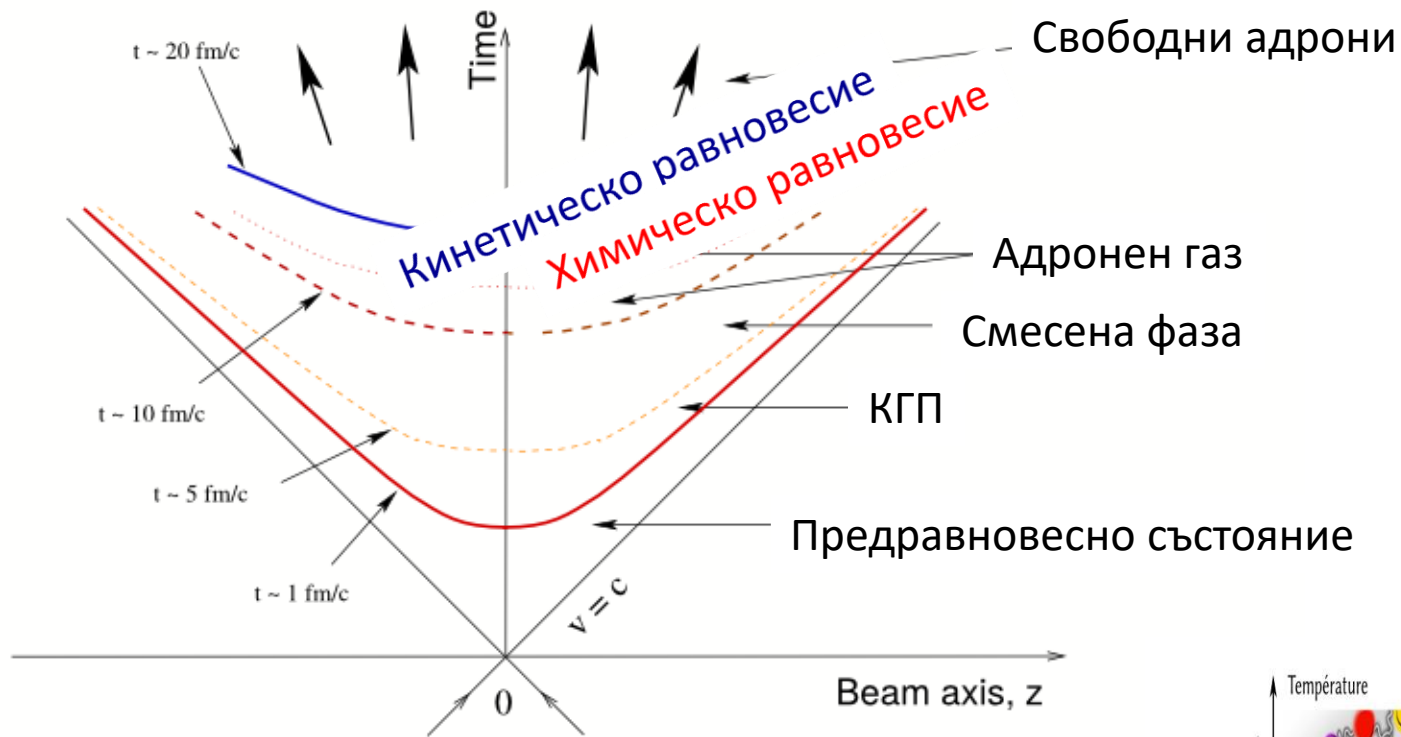


Сблъсък на тежки йони

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



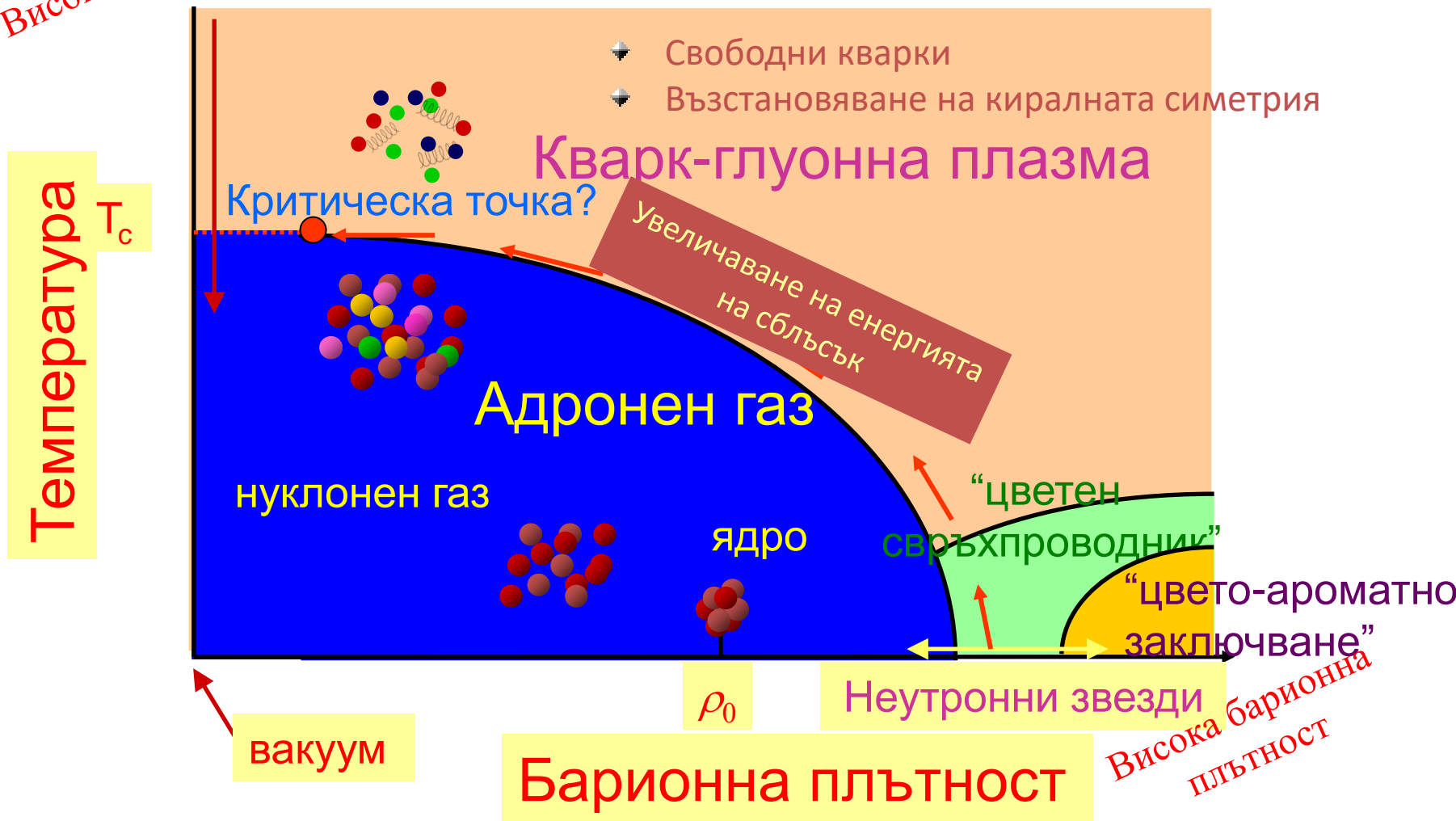
Равновесен брой
частици по типове

Равновесни импулси

Фазова диаграма на кварк-глюонната плазма

Висока температура

Ранна Вселена

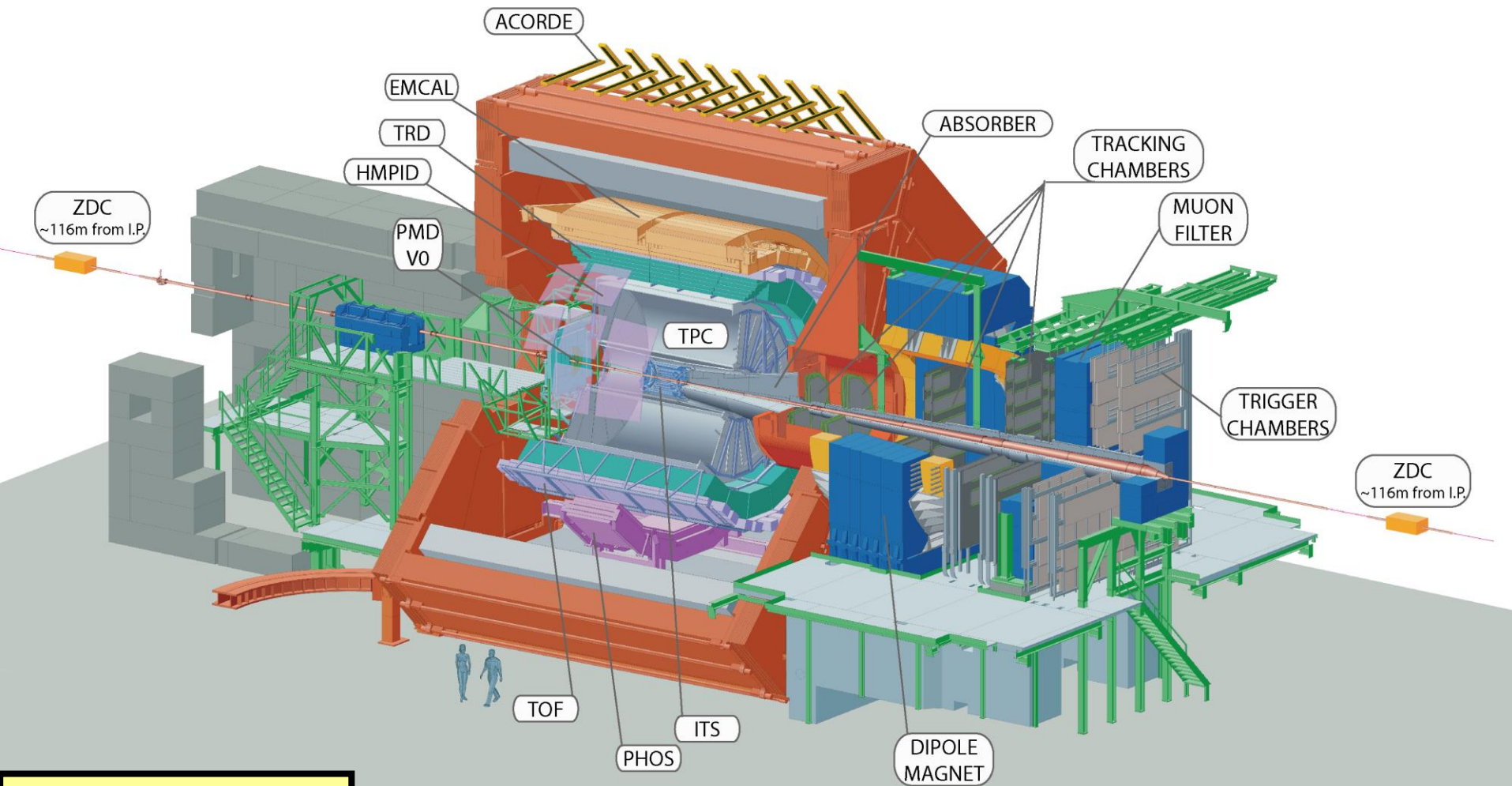


Изисквания към детектора ALICE

- ▶ 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



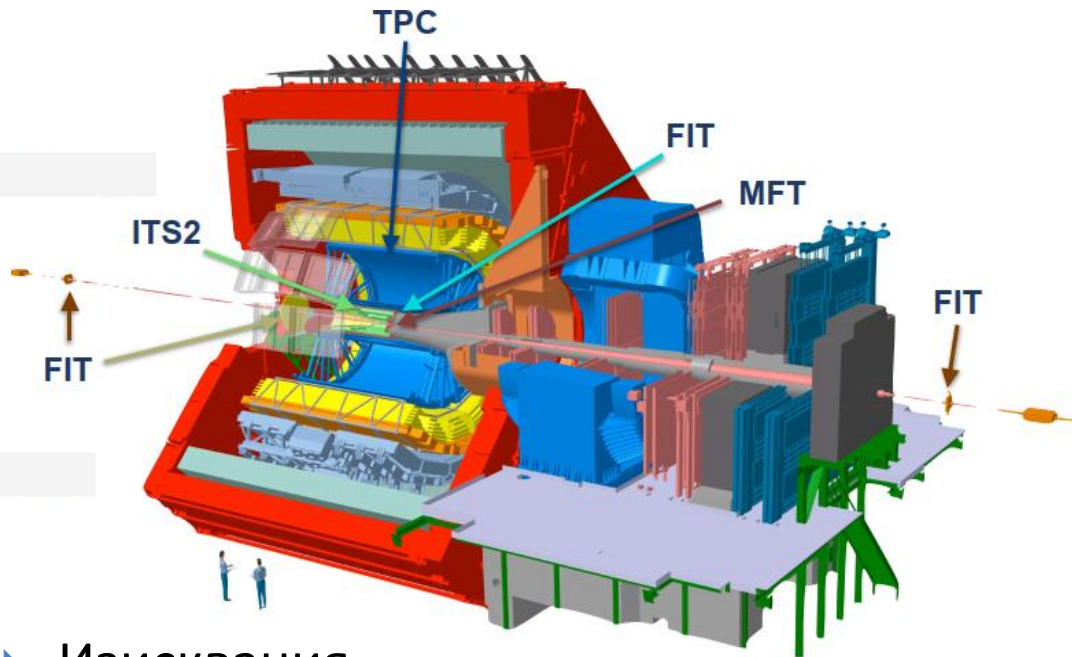
ALICE: Run 1&2, 1kHz PbPb с триггер



Размери: 16 x 26 m
Тегло: 10,000 t



ALICE: Run3 50 kHz PbPb непрекъснато отчитане на данните (без тригер)



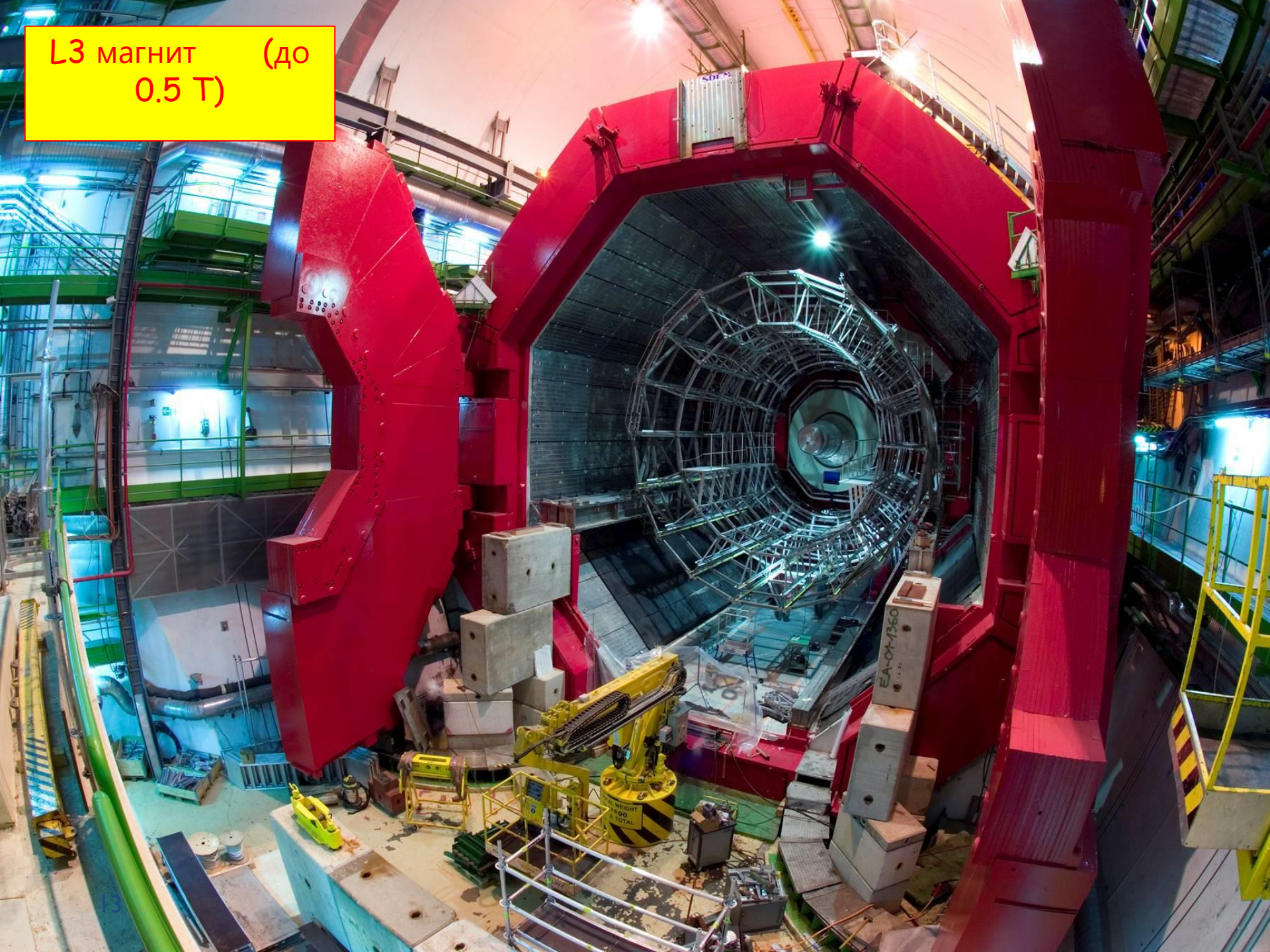
► Изисквания

- Голям обем данни за регистрация на интересни събития без възможност за тригер
- Съхраняване на добрата идентификация и разрешение по импулс

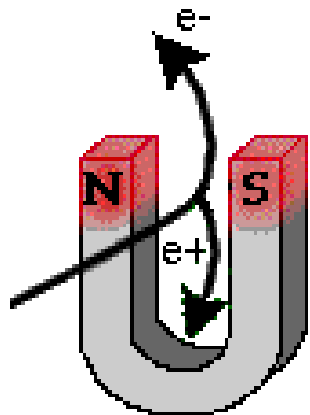
► Обновяване за изследване на:

- Очаровани и прелестни частици с малък импулс
- Състояния на "Чармоний"
- Термални ди-лептони
- Ди-лептони от разпади на леки векторни бозони
- Леки ядра
- Хиперядра

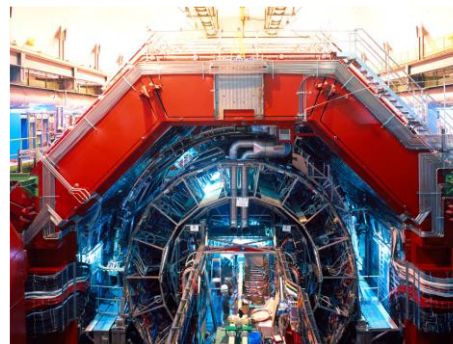
L3 магнит (до 0.5 Т)



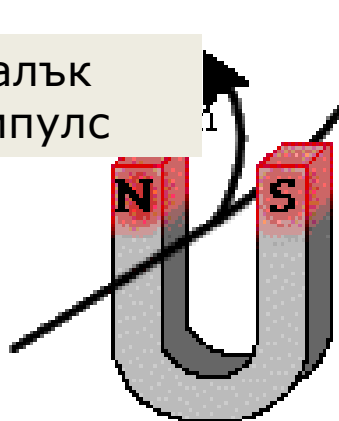
Магнитно поле



Определяне на заряда по посоката на отклонение в магнитното поле



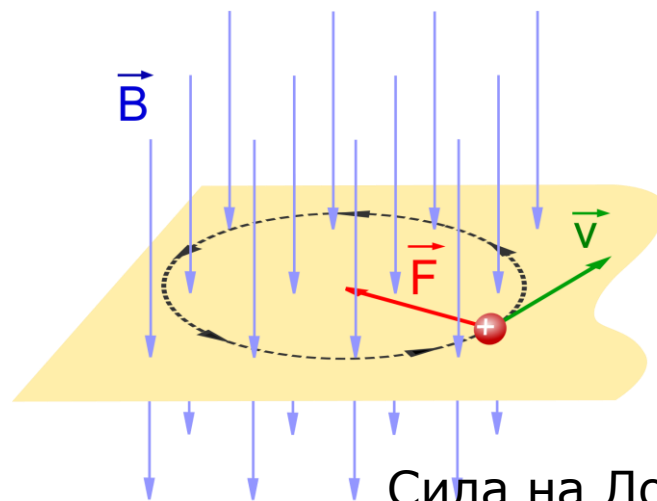
Малък импулс



Голям импулс

Измерване на импулса

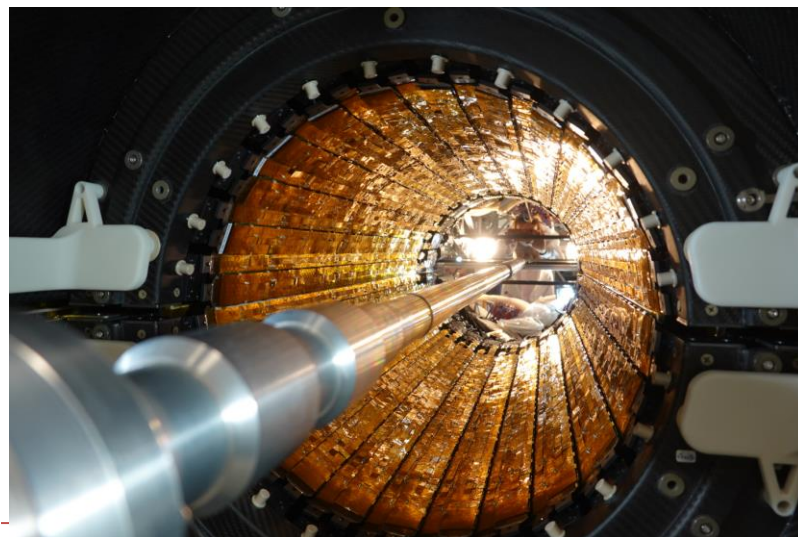
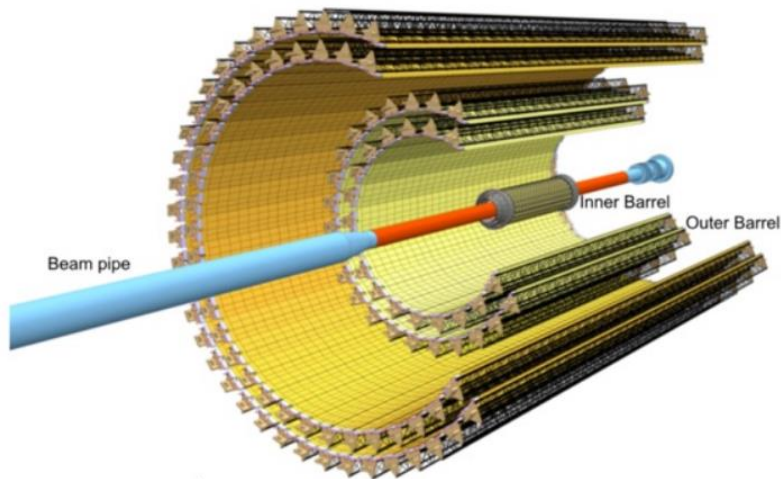
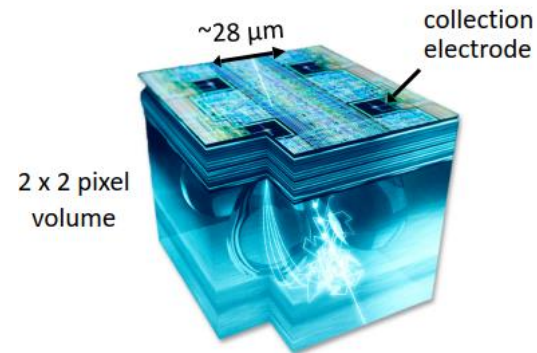
$B \parallel z, p_{xy} = 0.3qBR$
 p_{xy} - импулс [GeV/c]
 B - поле [T], q - заряд,
 R - радиус [m]



Сила на Лоренц
 $\mathbf{F} = q[\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}]$
 при $\mathbf{E} = 0$

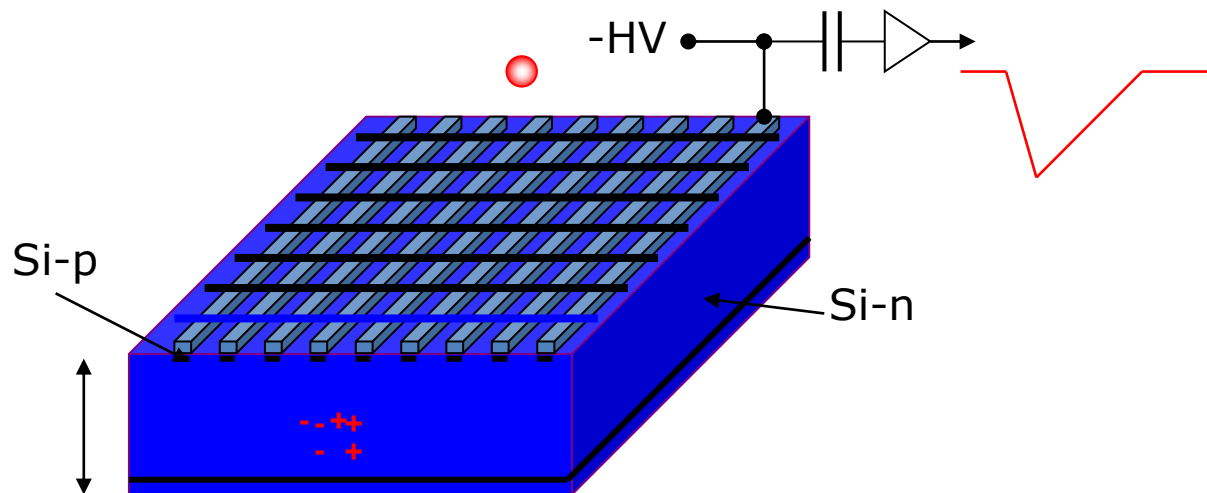
Вътрешен силициев тракер ITS2

- Специализиран Si монолитен активен сензорен чип (ALPIDE)
- За всеки пиксел: усилване, формиране, дискриминация, буфери
- 7 слоя около тръбата на 20 мм от снопа (10 m², 12.5 G пиксели)
- Висока ефективност: >99 % случайно сработване
~10⁻¹⁰/pixel/event
- Радиационна устойчивост (>270 krad обща доза)
- Малко вещество 0.35% X₀ от 1.14% в вътрешния цилиндър
- Изчитане на данните 100 kHz
- 3× по-добро разрешение по импакт параметър при ниски p_T

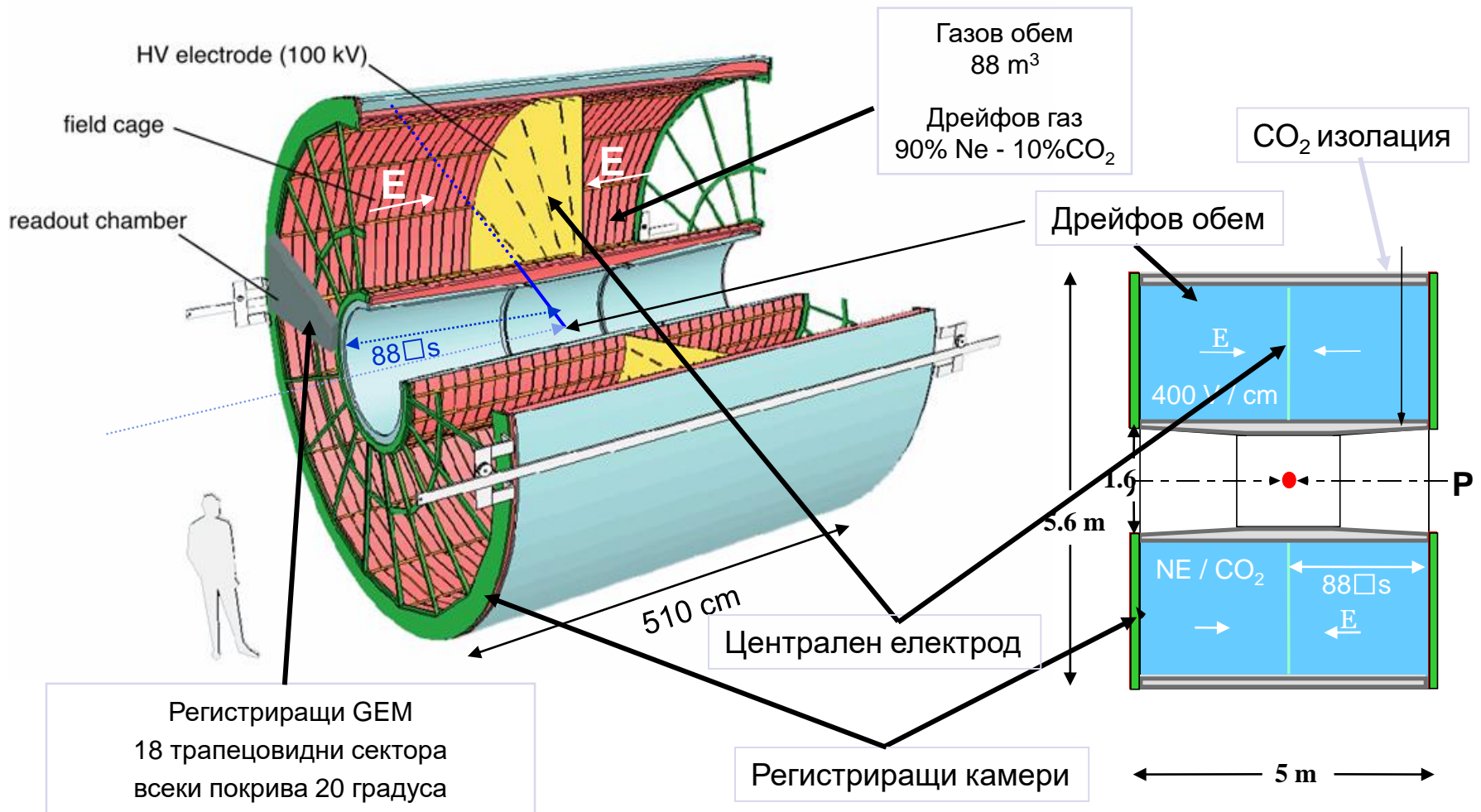


Вътрешен тракер: принцип на работа

- ▶ ITS: 7 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



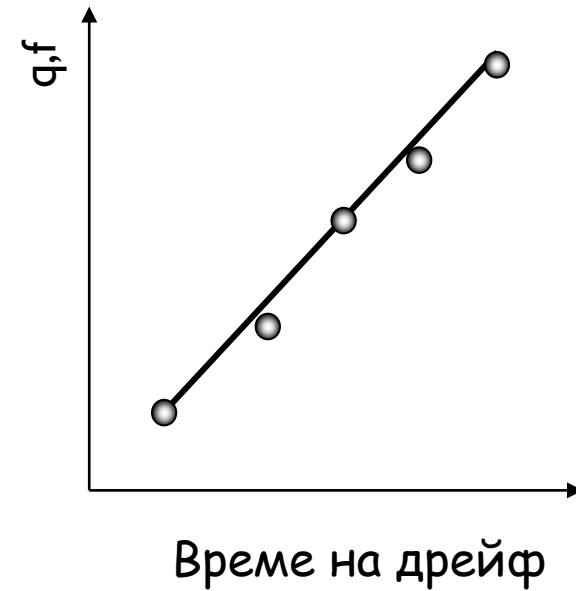
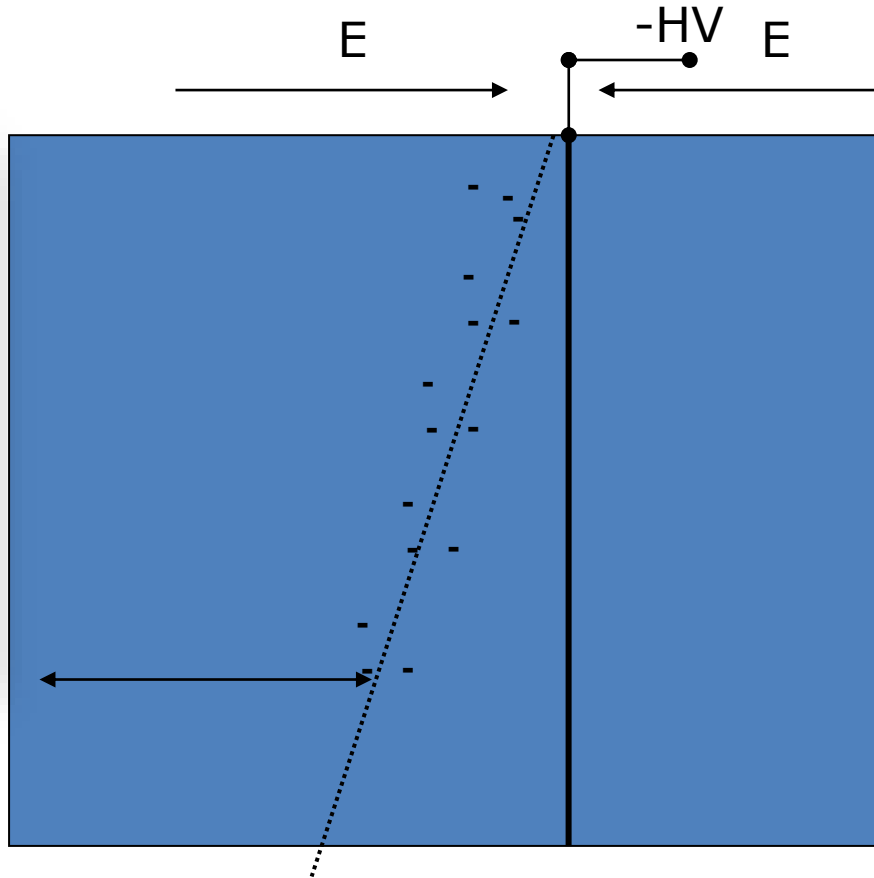
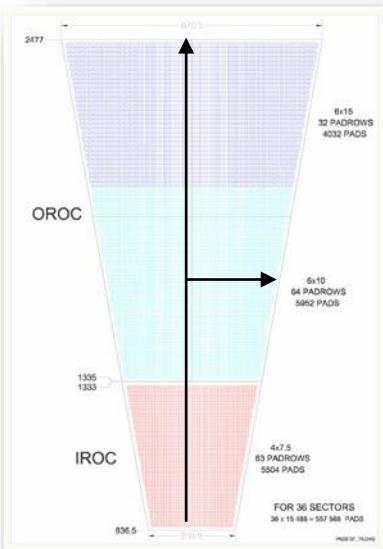
Времпоекционна камера TRC



TPC: принцип на работа

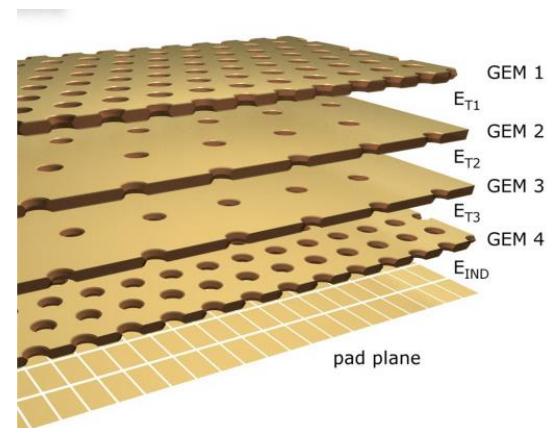
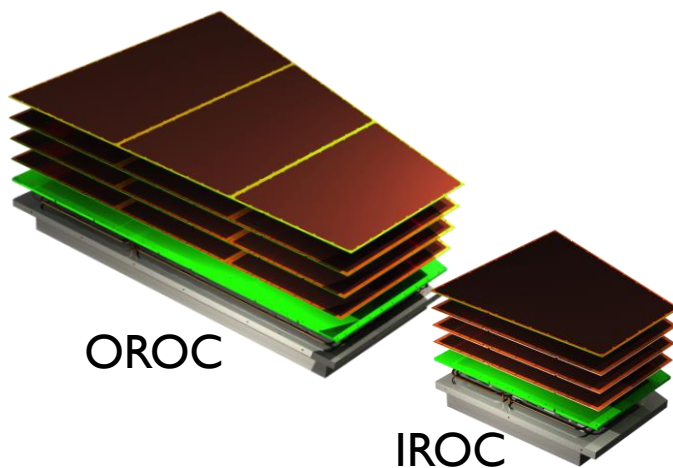
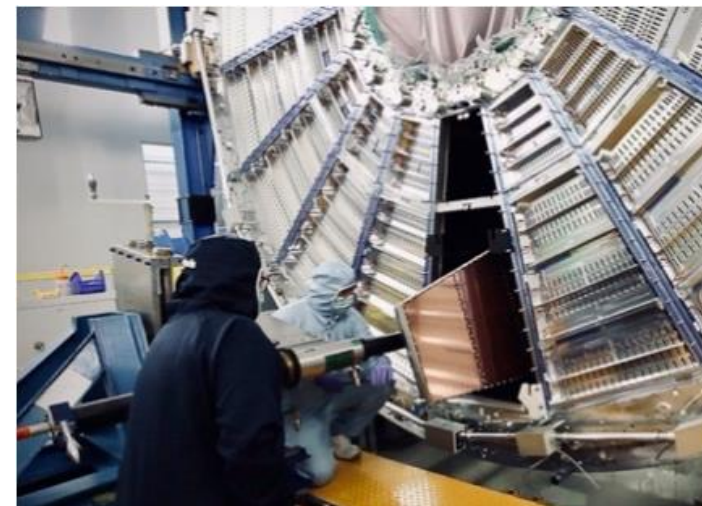


- 1 камера

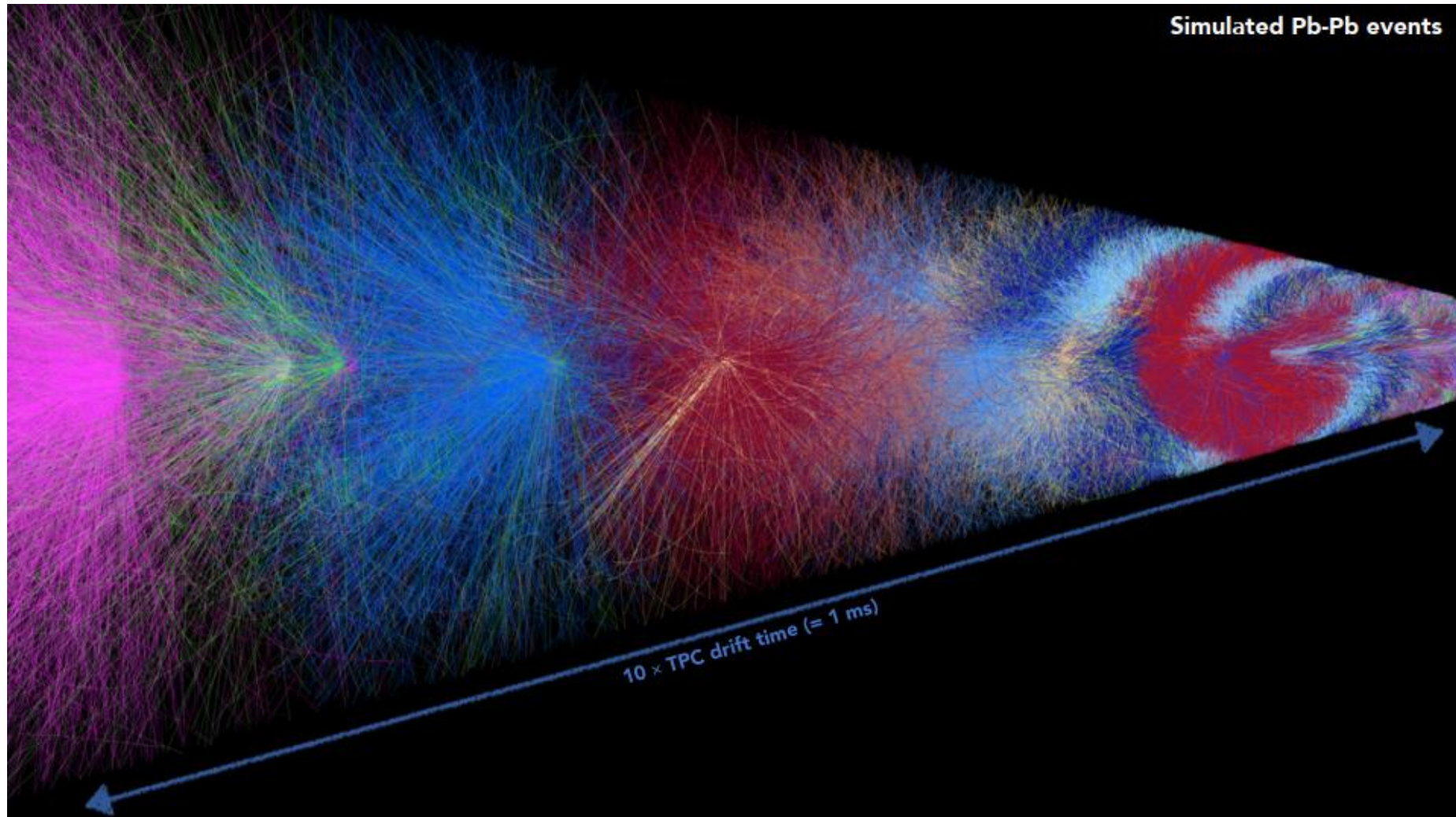


Времепроекционна камера ТРС

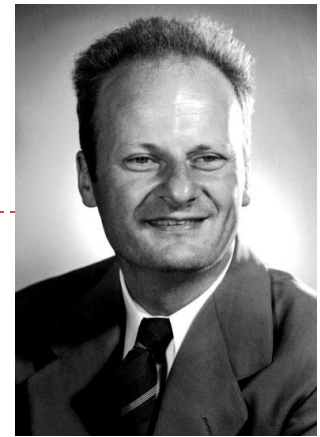
- ▶ Използва 4 слоя газове-електронни умножители вместо пропорционални камери
- ▶ Обновена електроника, поддържаща поток данни до 3 Тб/с



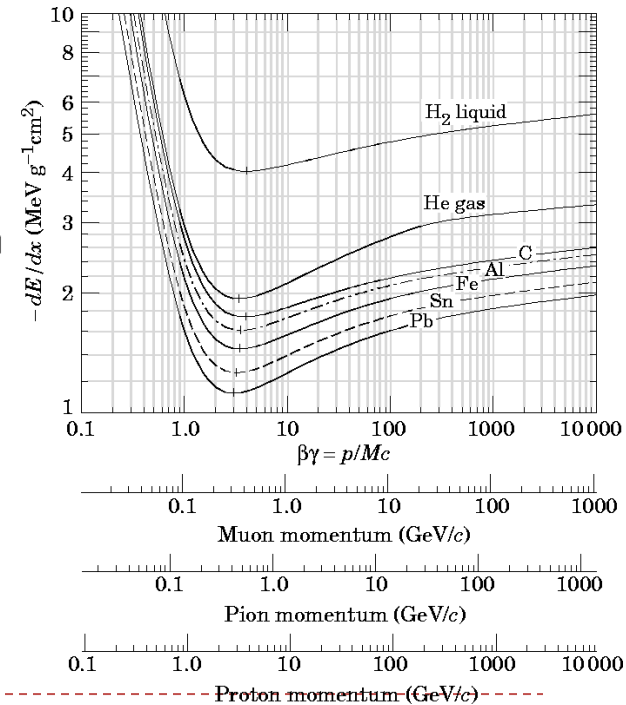
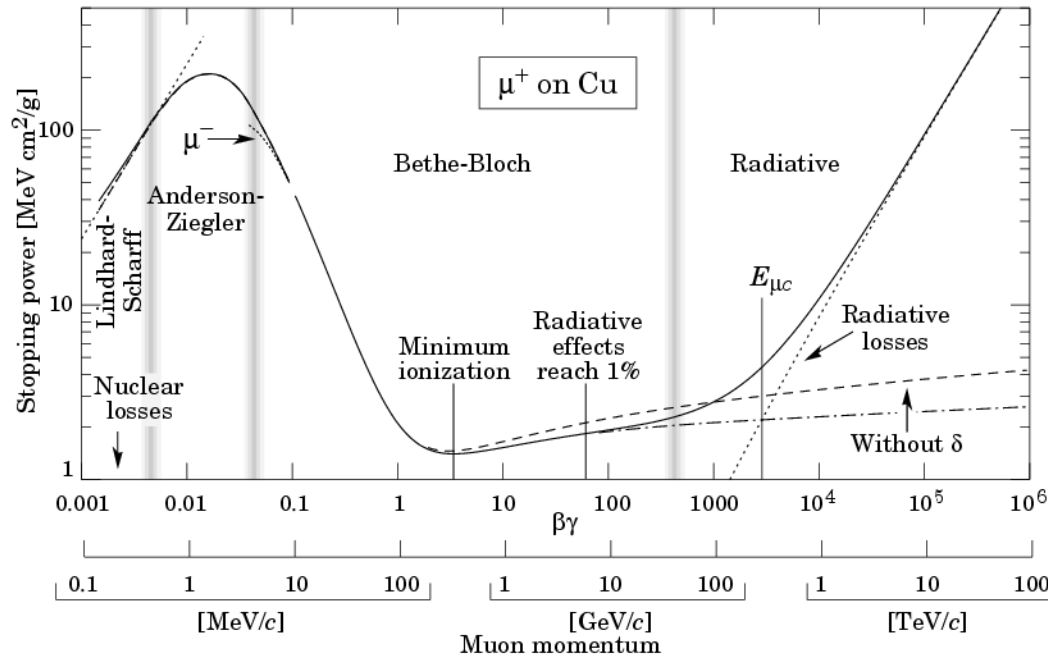
Как изглеждат събитията в ТРС?



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

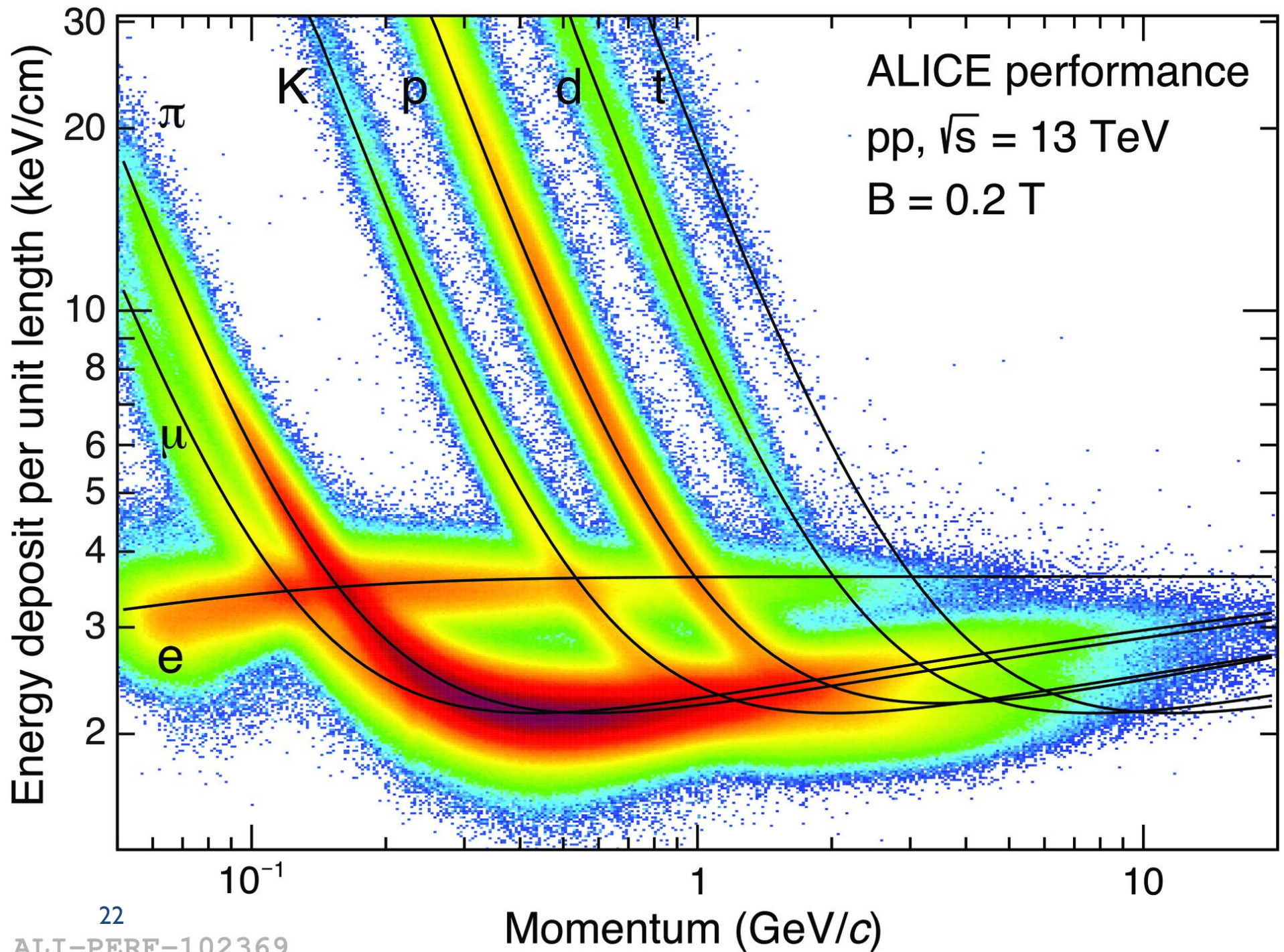
A Atomic mass of absorber

m_e Mass of an electron

r_e Classical radius of an electron

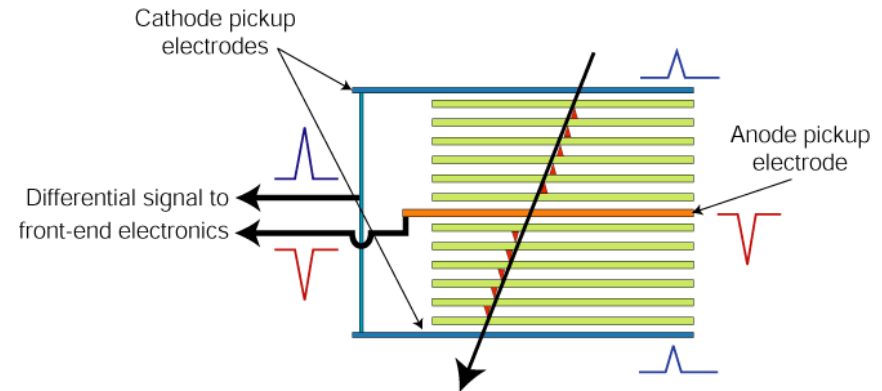
I Mean excitation energy

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

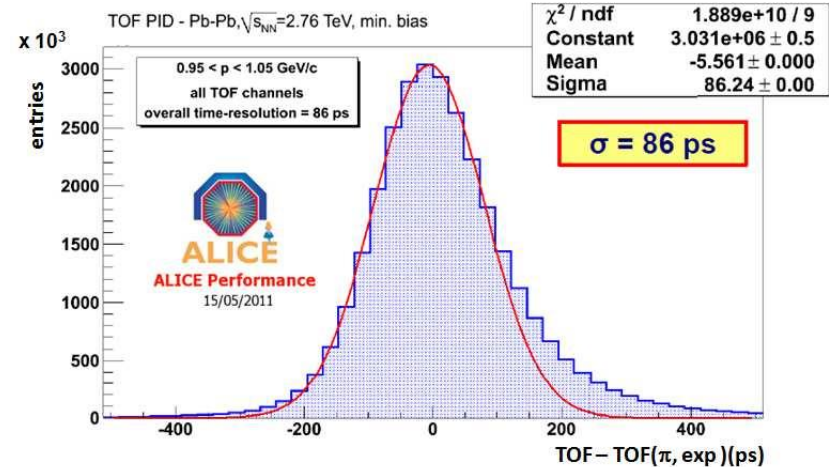
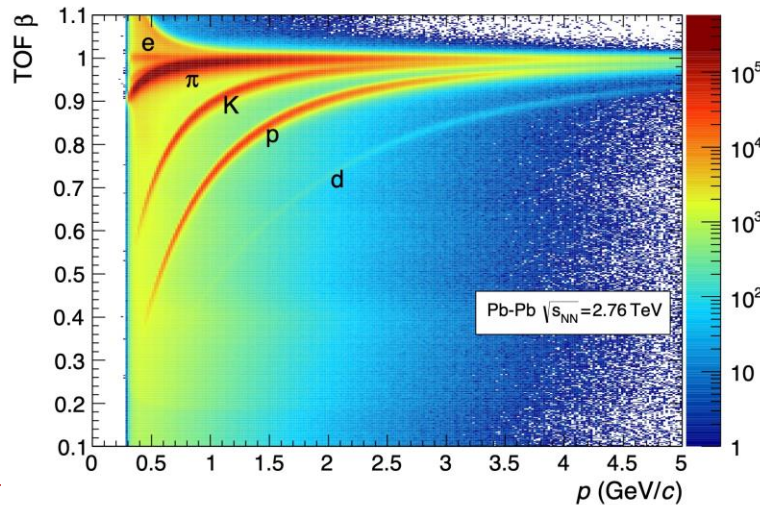


Детектор по време на прелитане (TOF)

Камери със съпротивителни плоскости

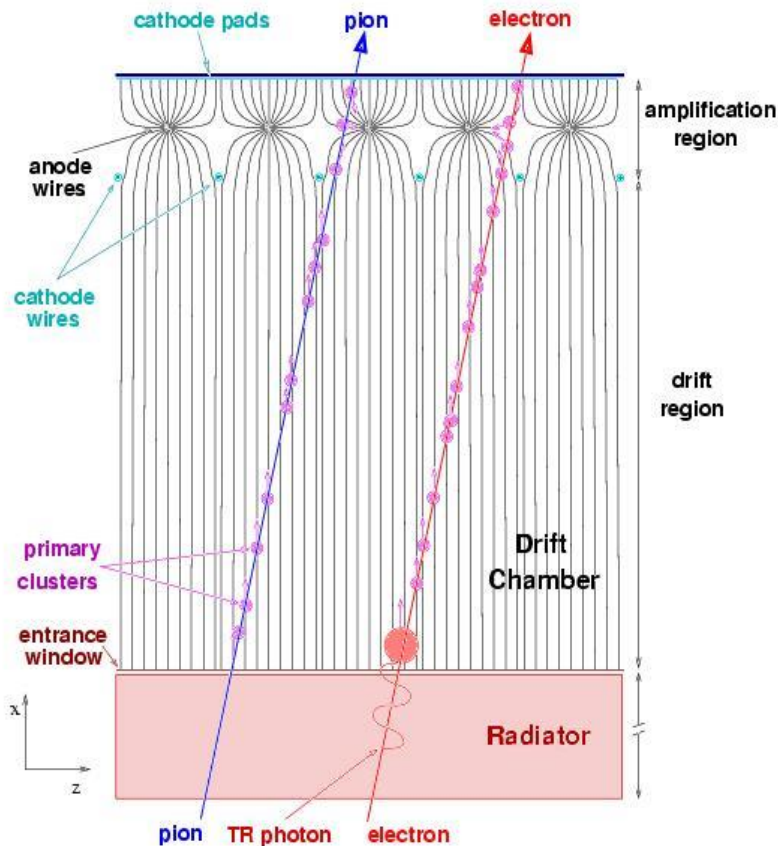


Измерва времето на прелитане от точката на сблъсък до детектора: $\sim 4 \text{ m} = 13 \text{ ns}$ (скорост = c)

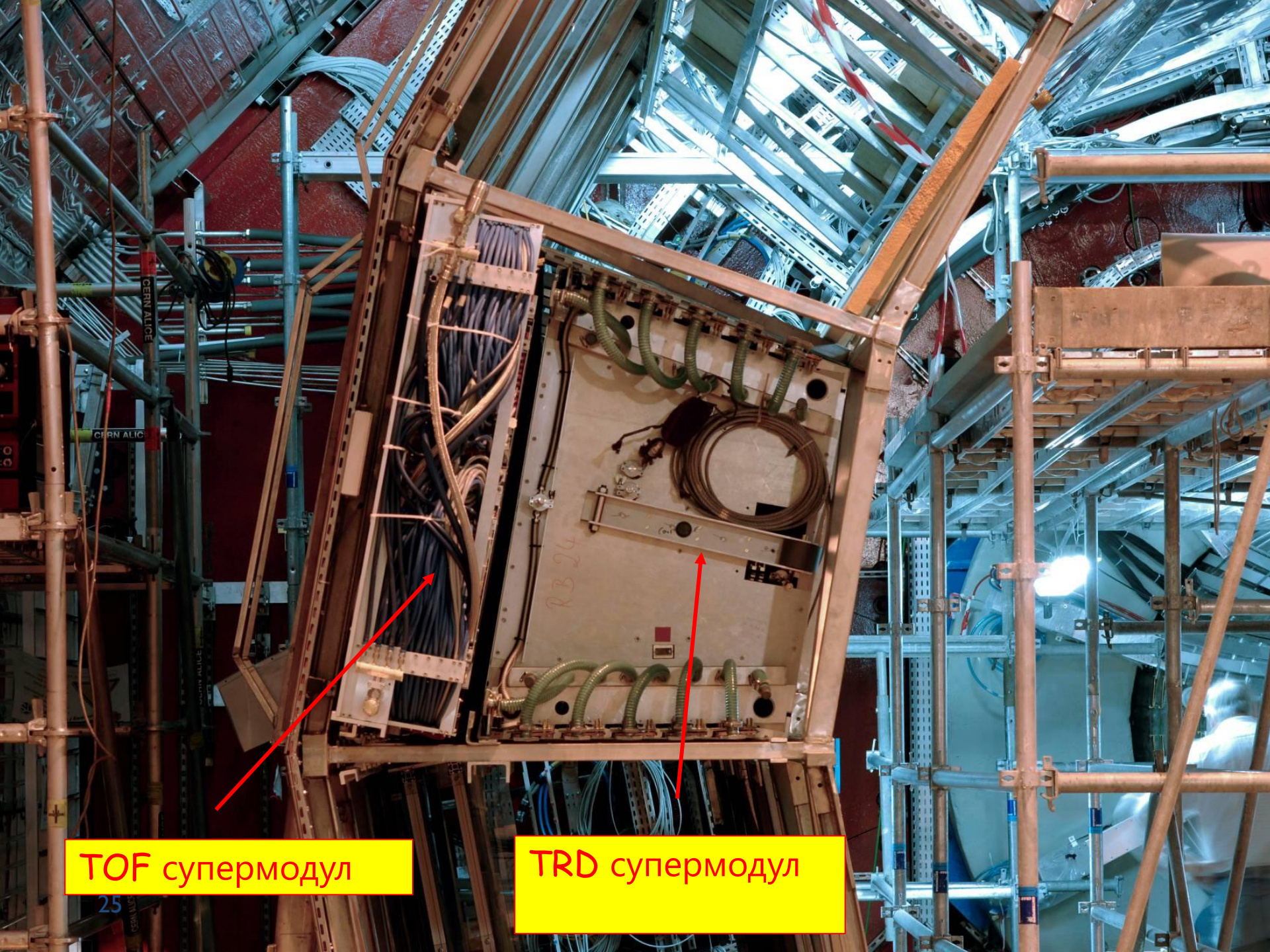


Детектор на преходно излъчване

- 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)

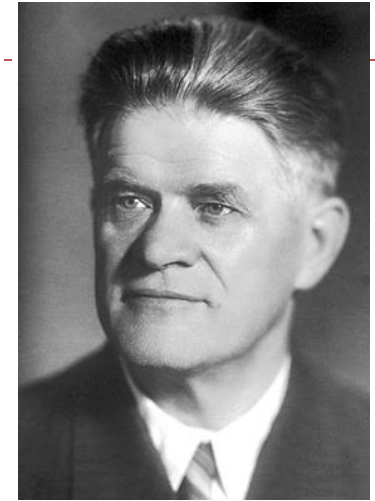
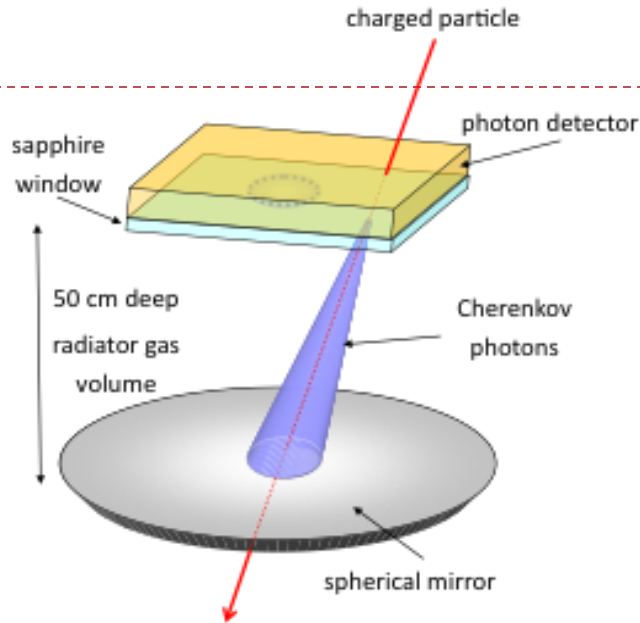


TOF супермодул

TRD супермодул

Идентификация на частици по черенково излъчване (HMPID)

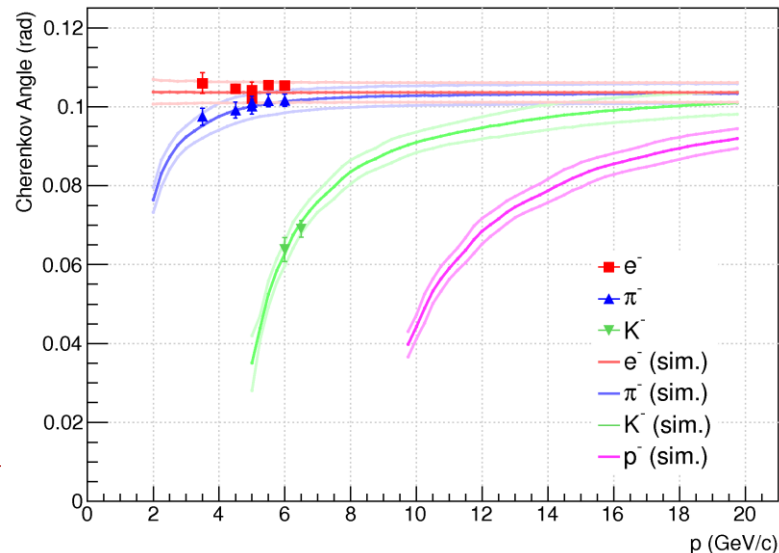
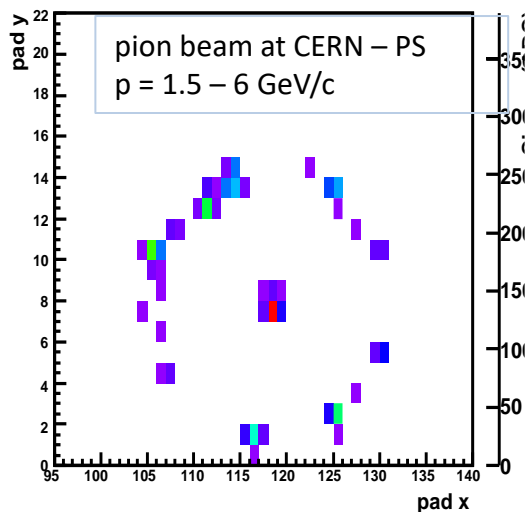
Черенково излъчване:
Заредена частица,
движеща се с $v > c$
в локална среда



Павел Черенков (1904-1990)

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

Event display subevent: 10



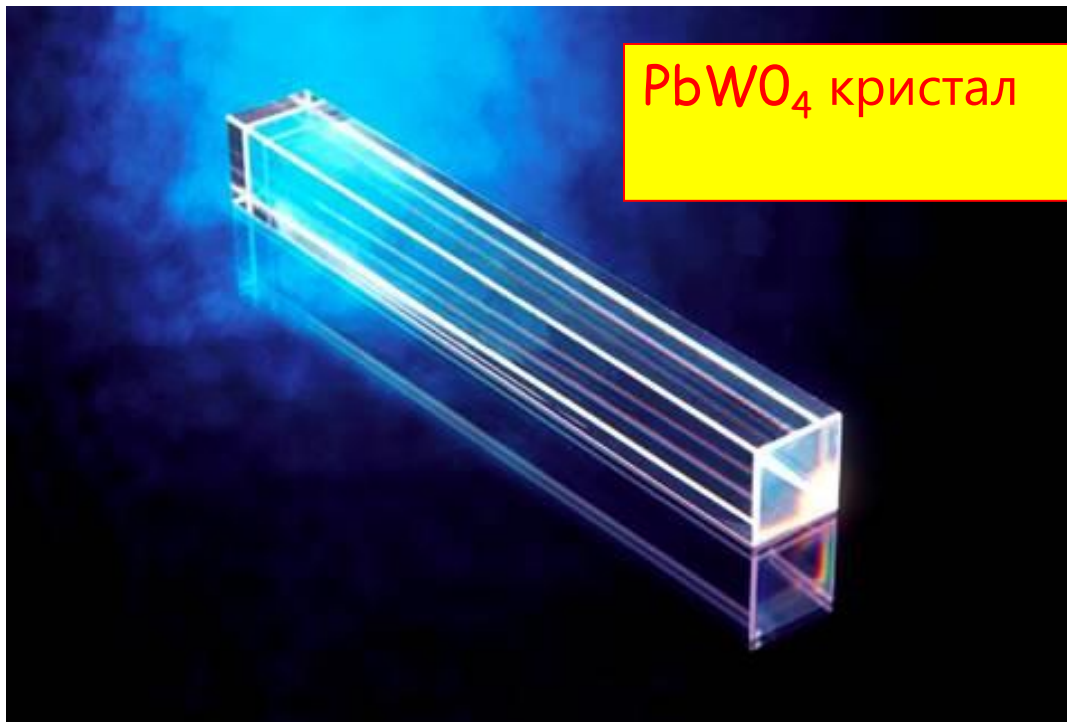


Фотонен спектрометър (PHOS)



Фотонен спектрометър

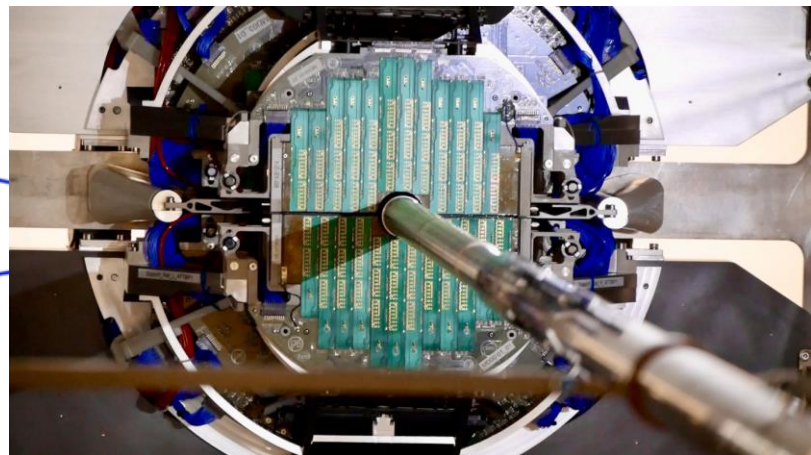
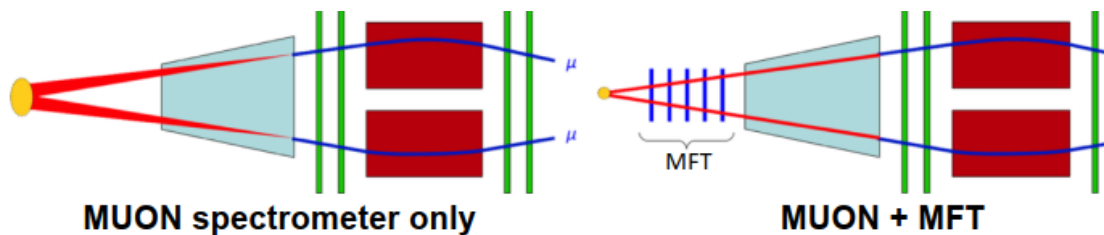
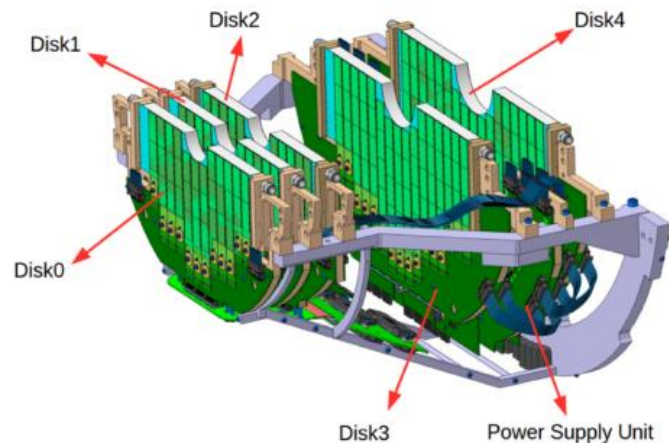
- Плътен като олово и прозрачен като кристал



- 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

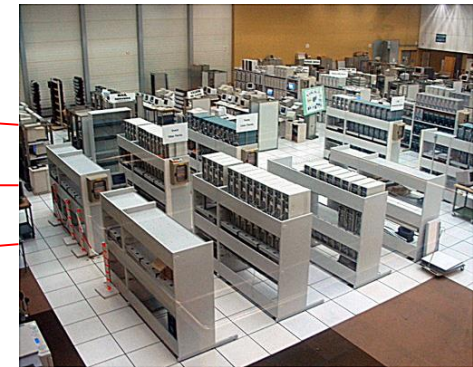
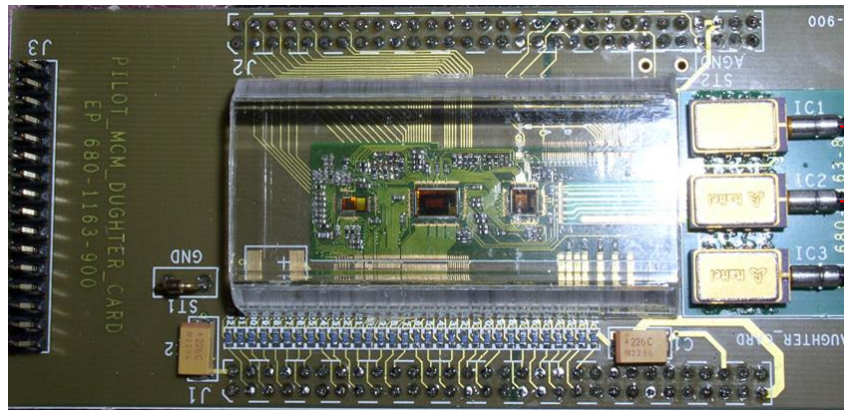
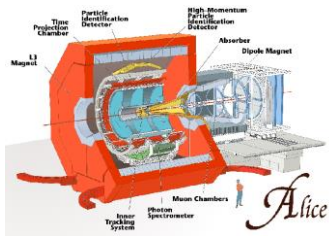
Мюонен спектрометър и преден тракер (MFT)

- 93 Si чипа ALIPDE 0.4 m²
- Si тракер за предната полусфера ($-3.6 < \eta < -2.5$)
- Реконструкция на мюонни следи заедно с мюонния спектрометър
 - Прецизно определяне на точката на разпад
 - Възстановяване на вторични вертекси от разпади на очаровани и прелестни частици

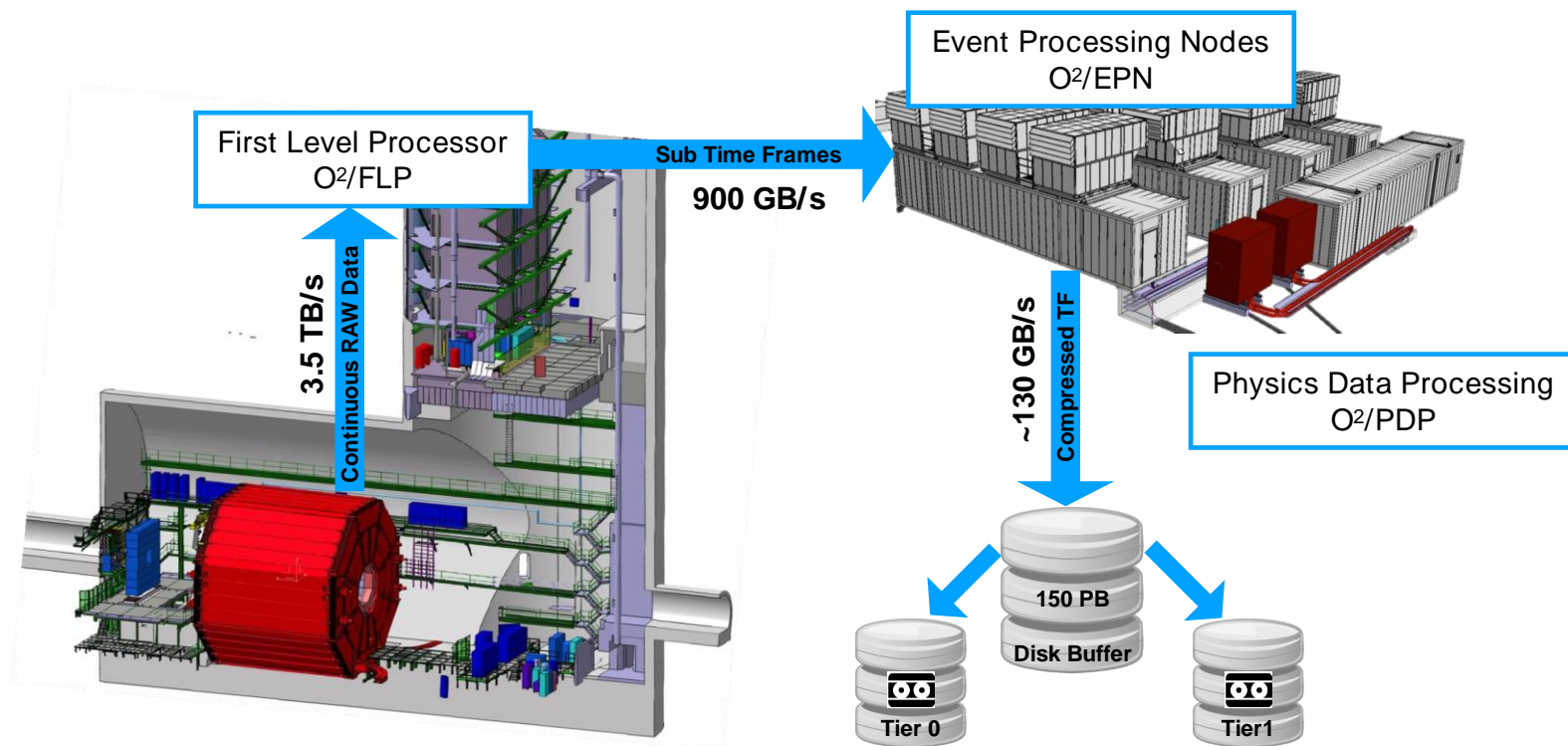


От волт към байт

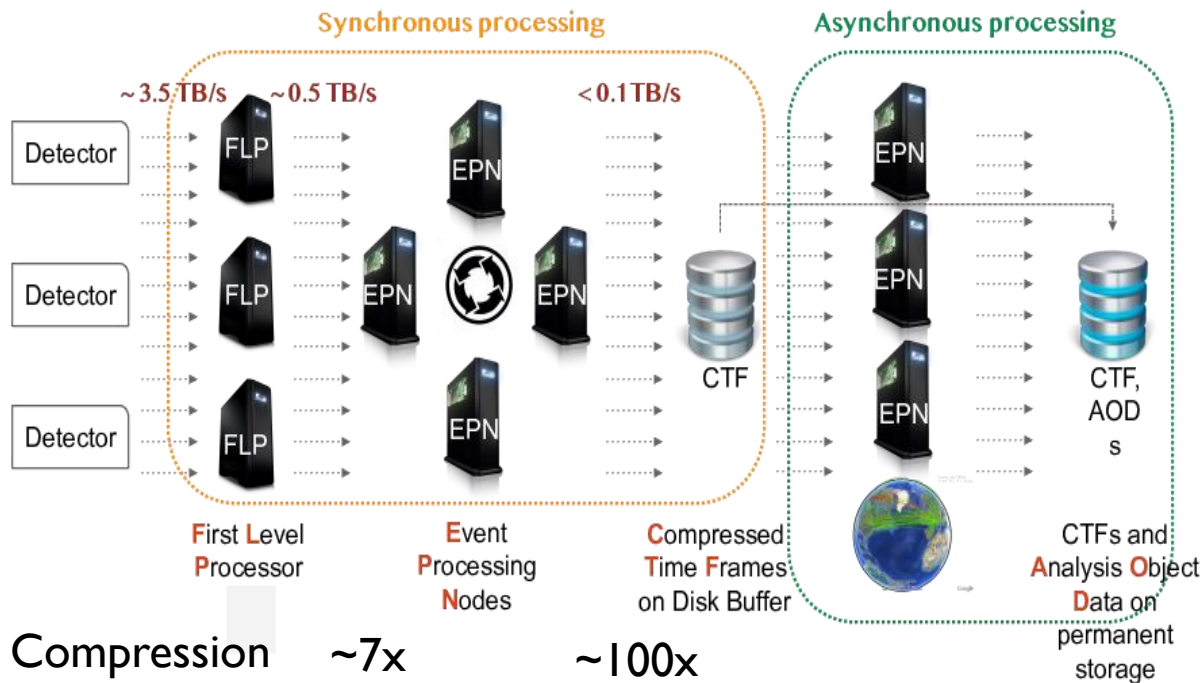
- Сигналът от всяка клетка се обработва от високо интегрирана електроника;
- Електрическият сигнал се оцифрова, за да се обработи след това от компютър;
- Информацията се предава по оптически кабели.



Поток от данни



Обработка на данните



Процесори от първо ниво (FLP):

- 200 компютъра
- Първична обработка
 - Форматиране
 - Корекции
 - Компресия

Обработващи процесори (EPN):

- 250 dual core AMD Rome
- 8 AMD MI 50 GPUs
- Сглобяване на данните
- Синхронна реконструкция
 - Къстеризация
 - Следи в детектор
 - Обединяване на следите
 - Окончателна компресия
- Асинхронна калибровка

[PoS ICHEP2020 \(2021\) 929](#)

[PoS ICHEP2020 \(2021\) 929](#)

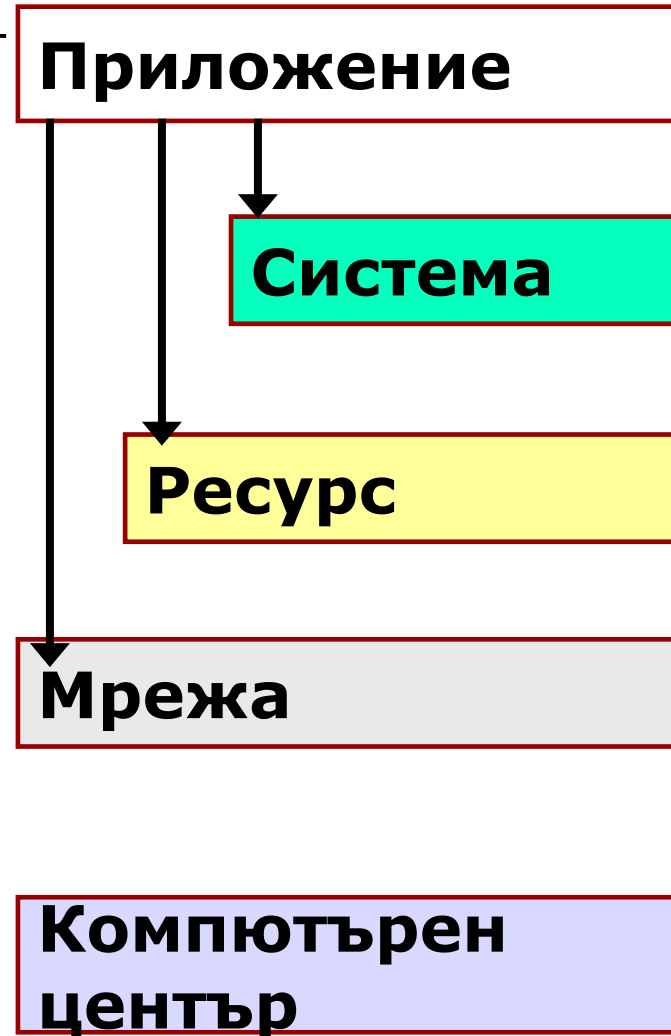
Архитектура на GRID

“Координация на множество от разпределени ресурси”

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

“Комуникация и безопасност”

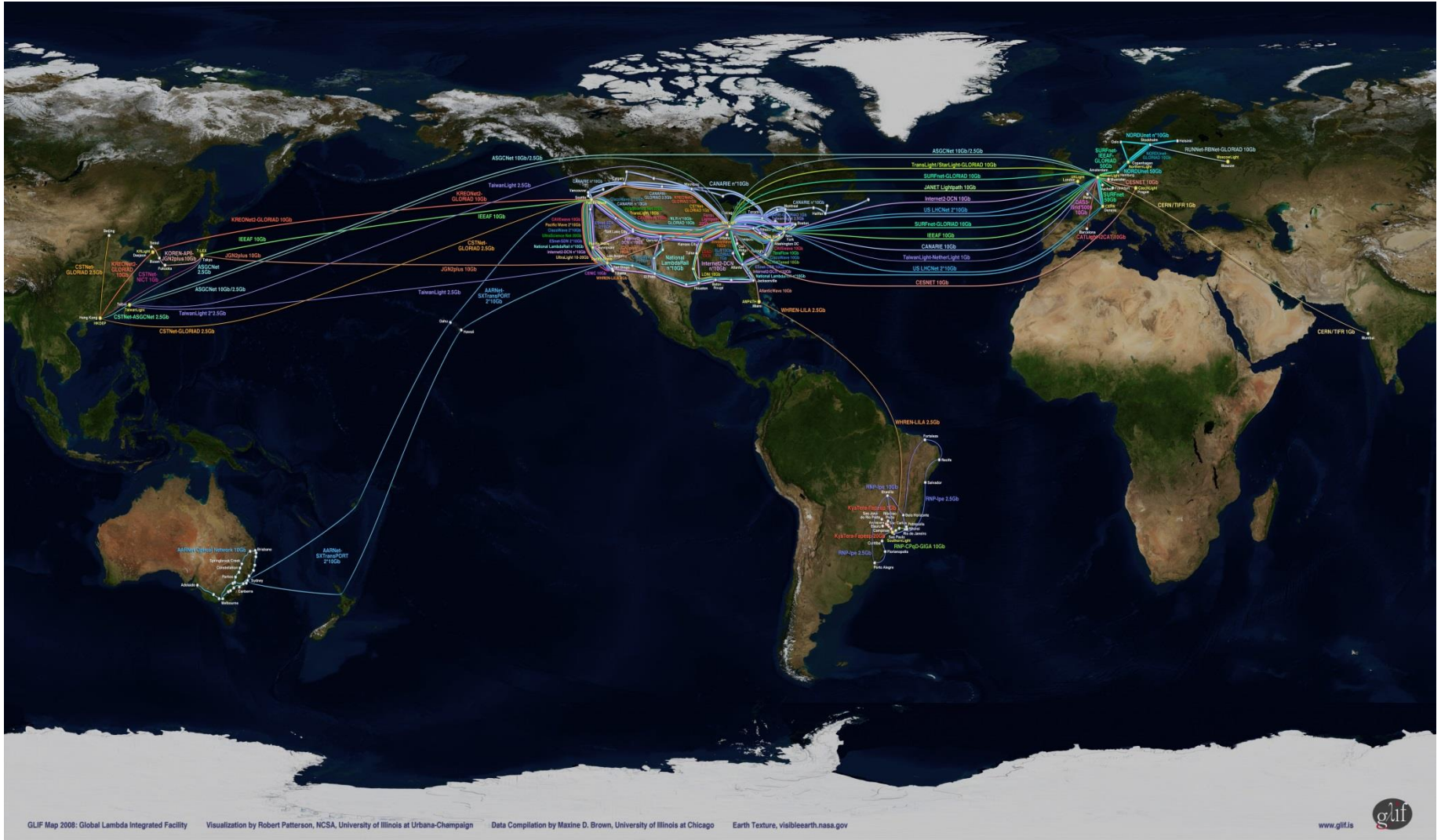
“Локален контрол”: Локален
достъп и контрол над
ресурсите



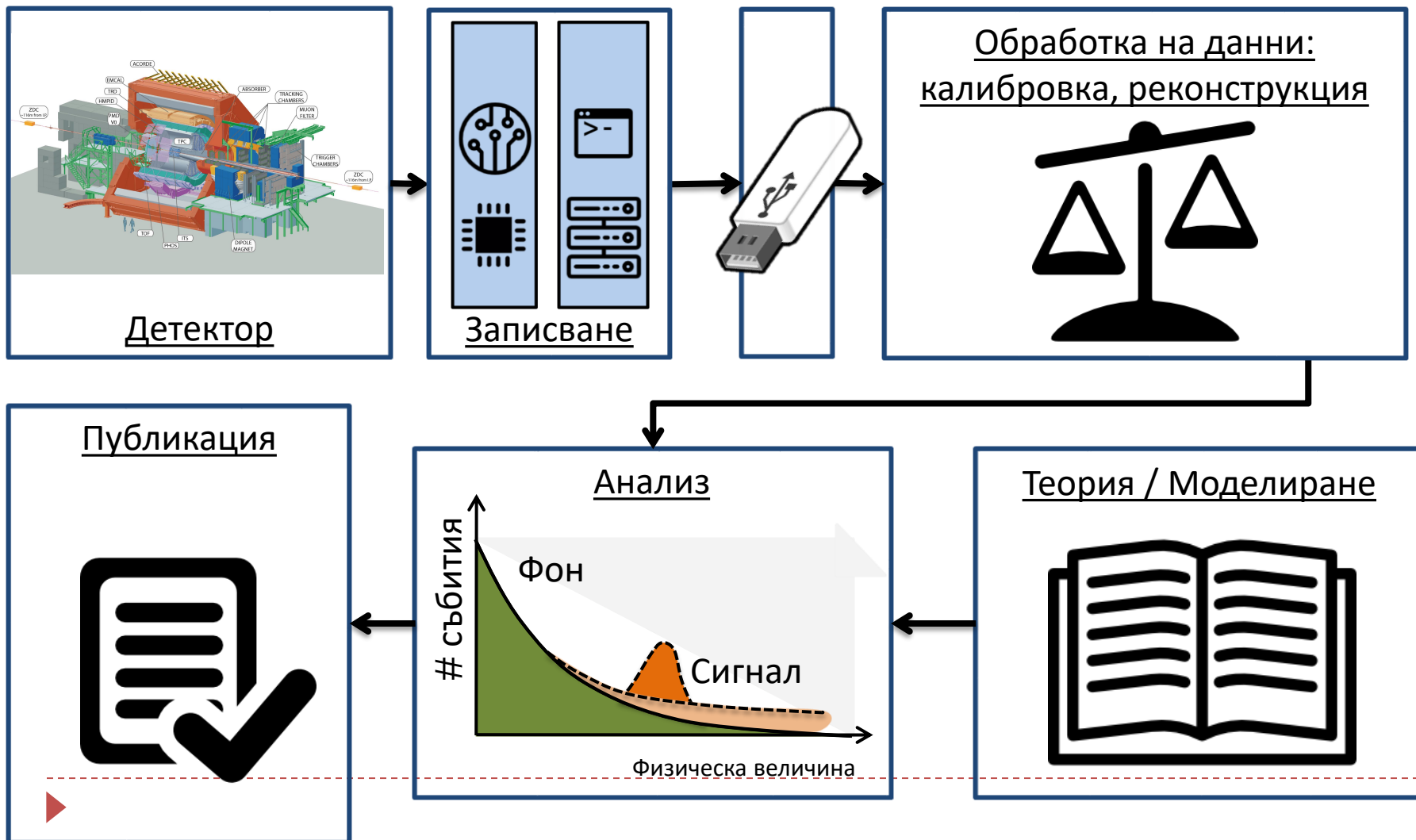
Компютърен Център



Мрежова инфраструктура

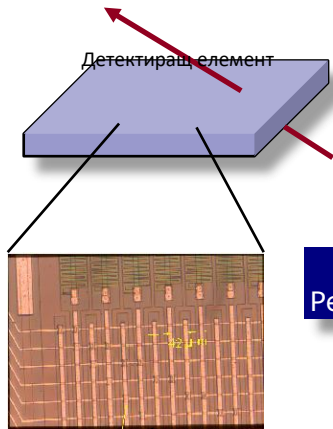


От данни към физически резултати

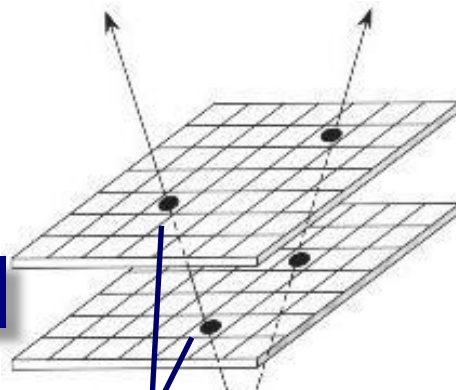


Обработка на данни

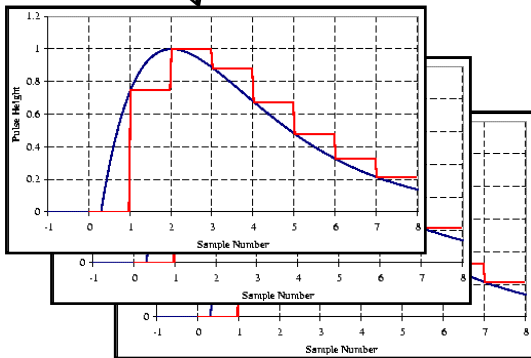
Частица



Оцифроване/
Реконструкция --->



Търсене на следи +
Оценка на параметрите --->



Аналогов
сигнал

37

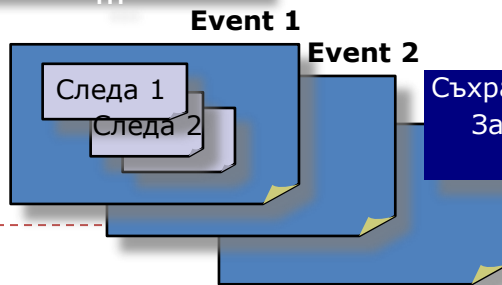
Сработили
каналы
(x_1, y_1, z_1, t_1)
(x_2, y_2, z_2, t_2)
...

Магнитно поле B:

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

Импулс на частицата

Съхраняване на информацията
За всяко събитие и следа
←-----





Обработка на данни

▶ Реконструкция

- Заредени частици: обединяване на сработилите канали в кълстери, а кълстерите в следи

- За всяка следа: импулс и идентификация

- Неутрални частици: енергия в калориметрите

▶ Моделиране: характеристики на детектора

▶ Анализ

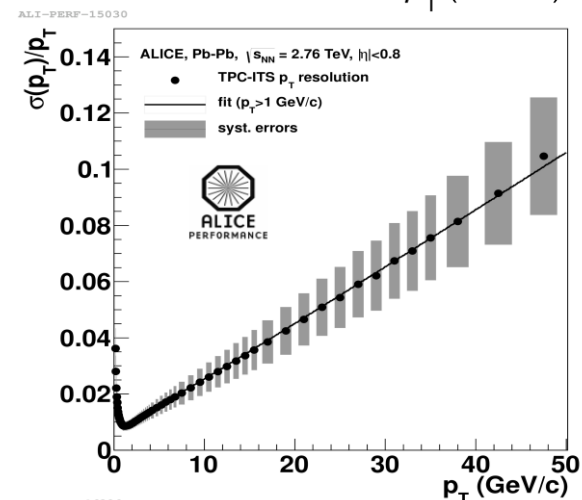
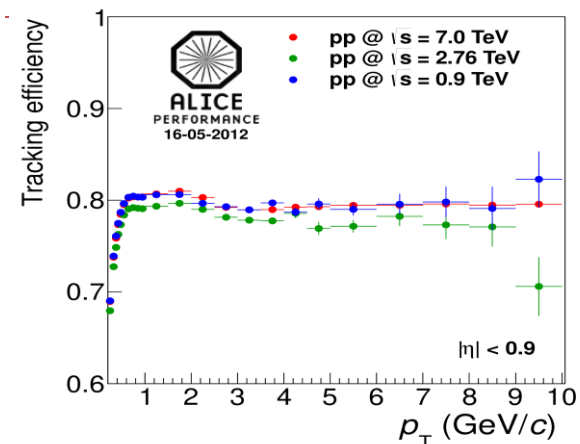
- Получаване на физическа информация

▶ 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



ALI-PERF-16396

Важно за физическия анализ

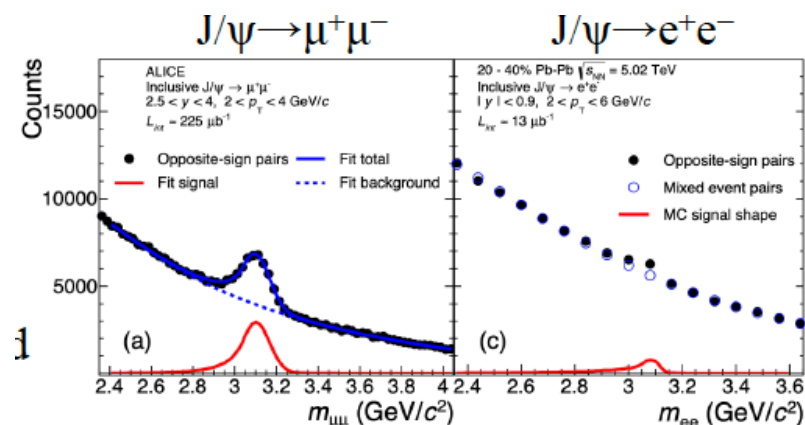
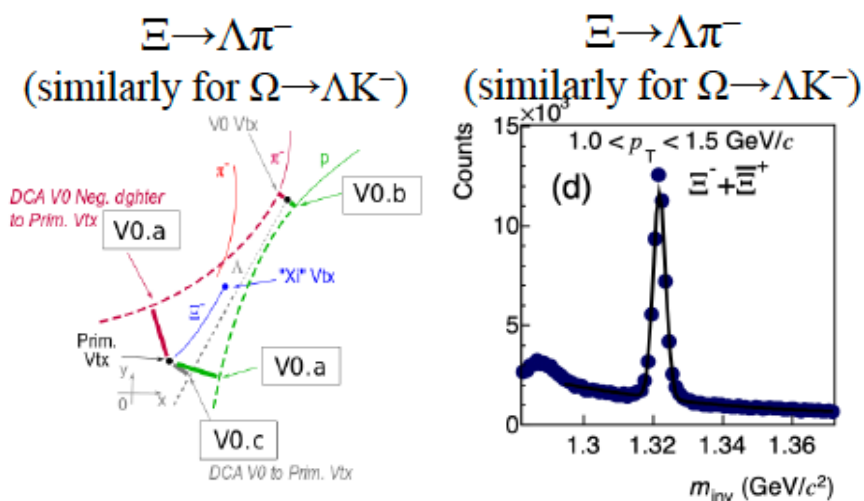
i) Висока ефективност, добро разрешение, нисък процент фалшиви

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

Какво е “пълен анализ”?

Изследвания, които дават съгласувано и цялостно описание на определено множество от данни

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

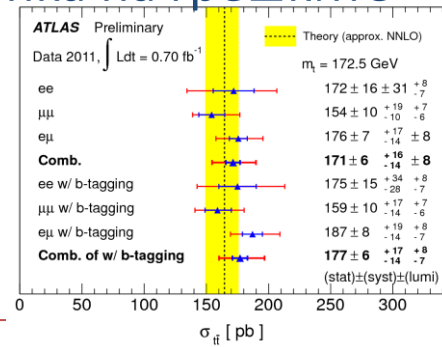


Основи на анализа

- ▶ **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!**

~PB Етапи на физически анализ

- ▶ Използваме резултатите на реконструкцията
- ▶ Избираме събития на базата на реконструирани 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

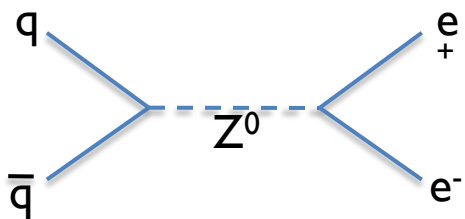


~PB
~kB

Пример за моделиране (Geant4)

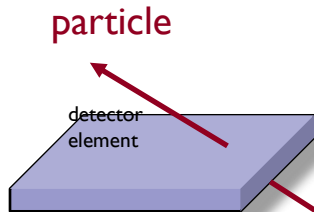
Моделиране на физически процес

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



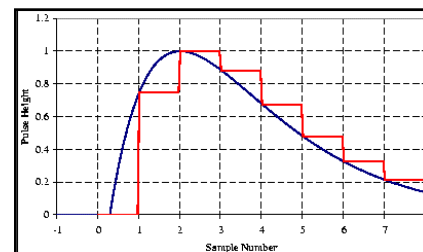
Моделиране на детектора

- 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

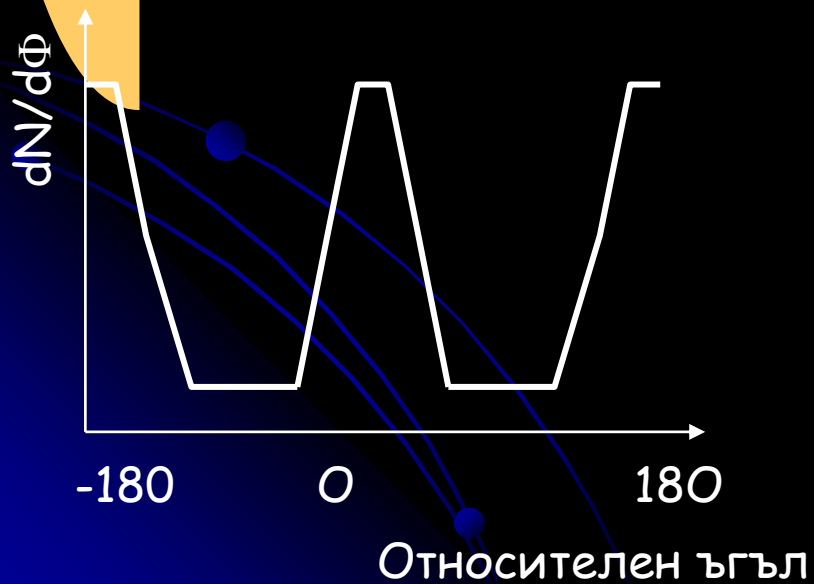
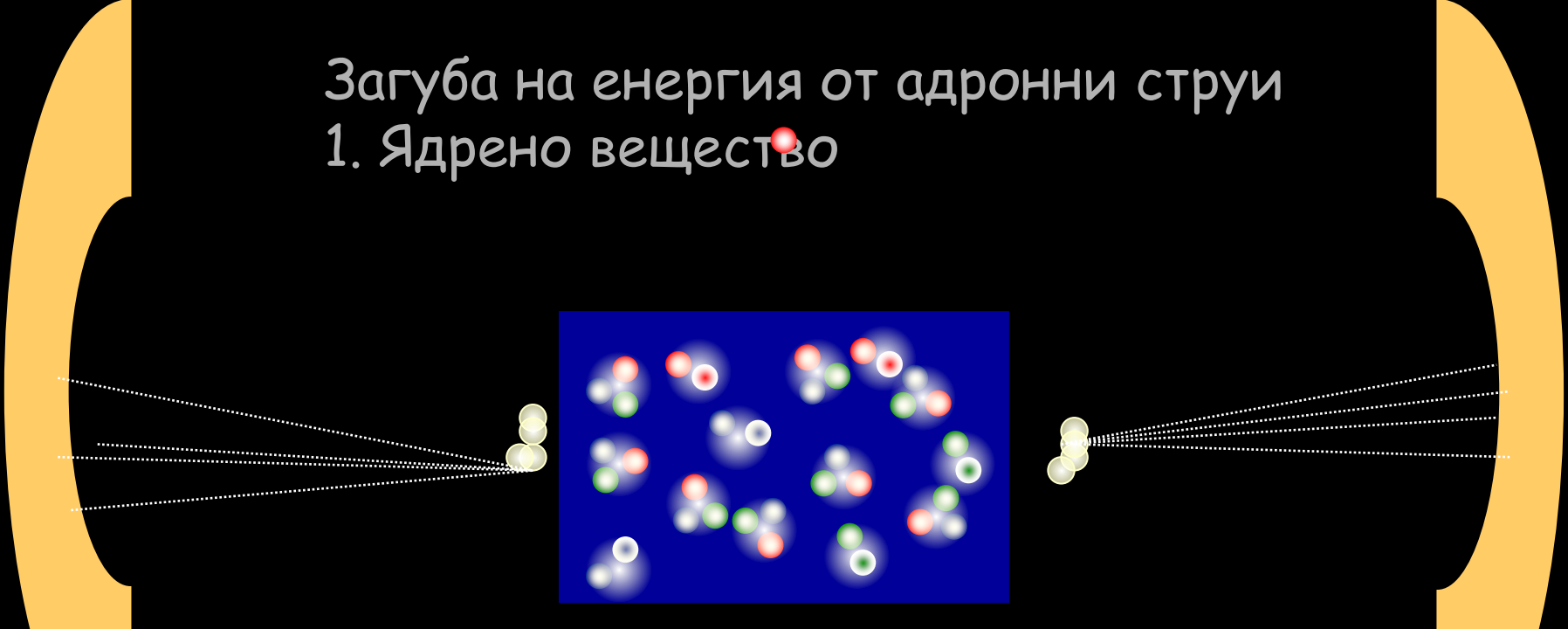
- ▶ Съхранение на данни. Сериализация/десериализация на C++ обекти в ефективни структури от данни, оптимизирани за бързо четене.
- ▶ Достъп до данни. Самоописателни структури от данни (ROOT файлове) с възможност да бъдат организирани във вериги.
- ▶ Обработка на данни. Хистограми, апроксимация на функции, 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.

Концептуални резултати за КГП



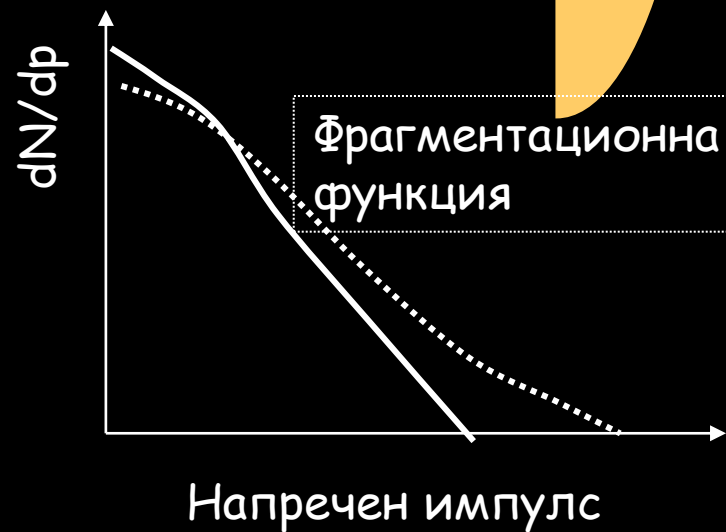
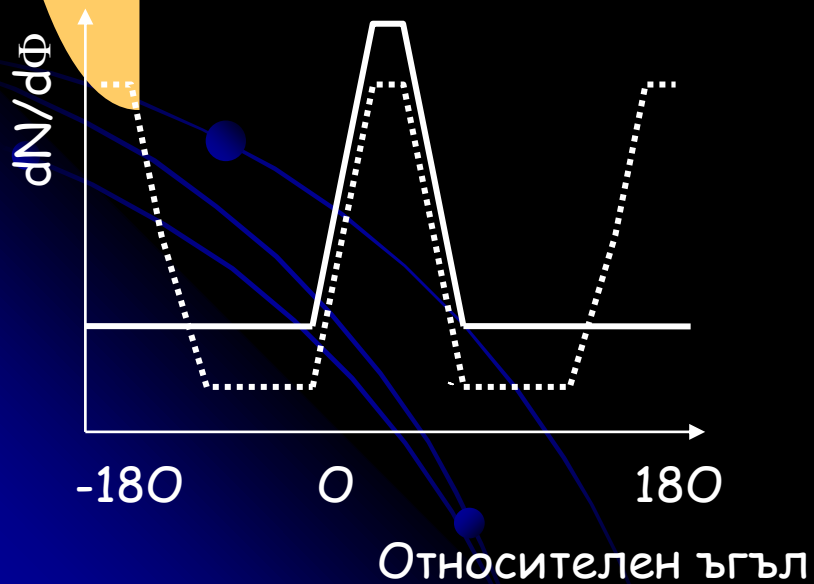
Загуба на енергия от адронни струи

1. Ядрено вещество

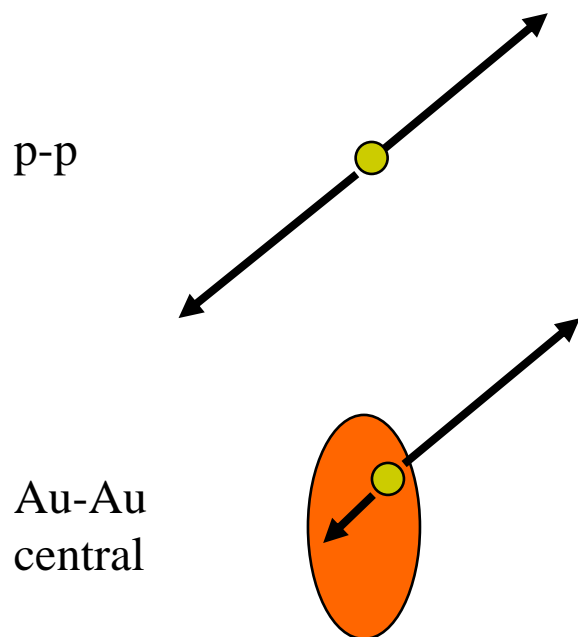


Загуба на енергия от адронни струи

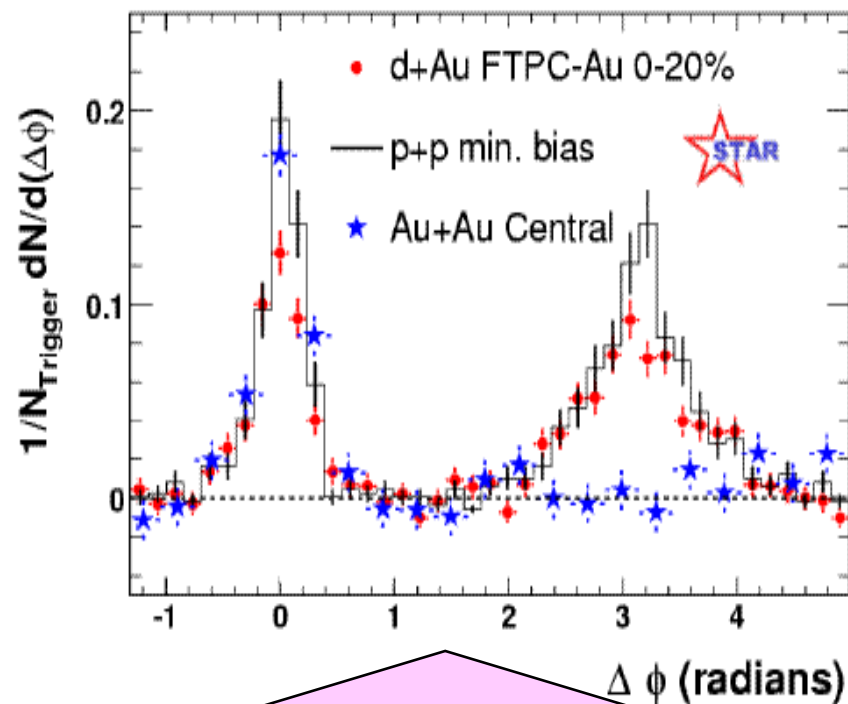
2. Кварково вещество



Струи: азимутални корелации @ RHIC



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



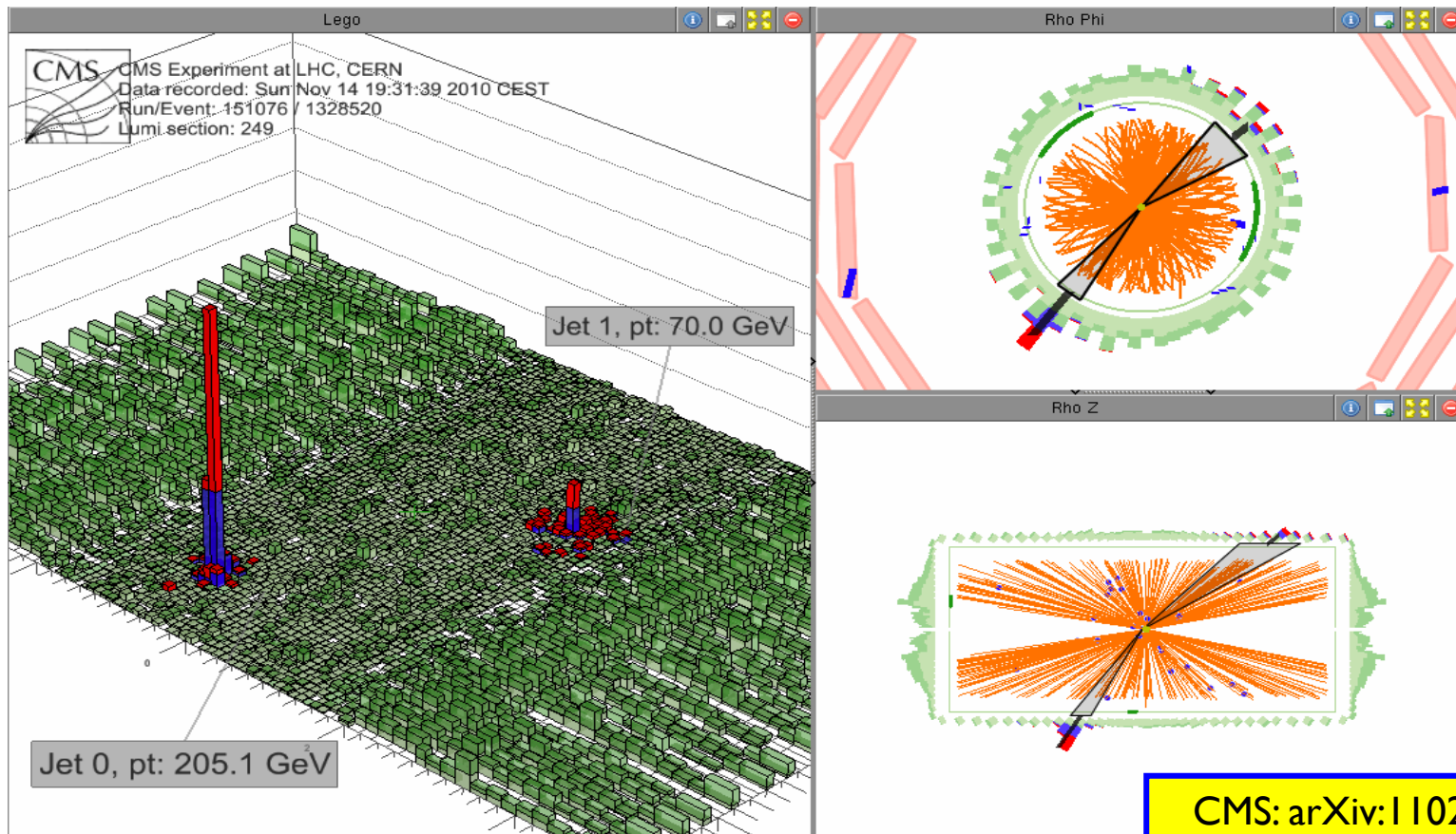
Струята-партньор минава през веществото на КГП и може да загуби много енергия, ако то е плътно

→ азимуталната корелация се развива

Плътно вещество!

Струи @ LHC

► Pb-Pb събитие с голяма енергетическа асиметрия

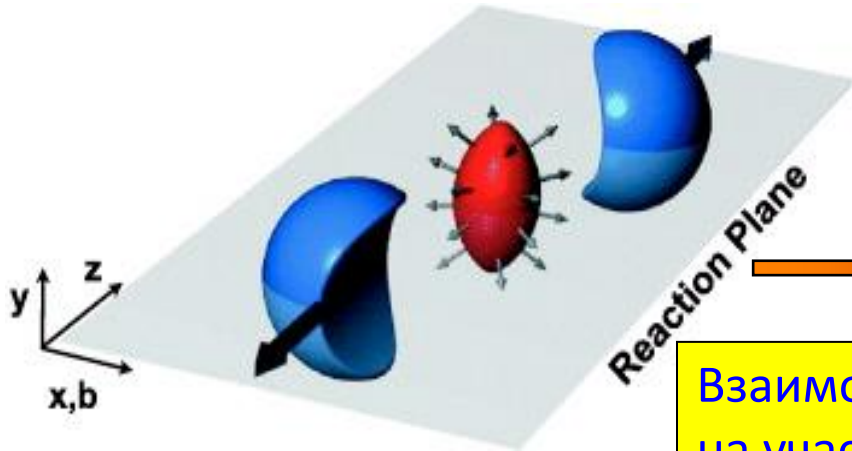


- струята-партньор губи много енергия, но е в очакваната посока!
- голям брой частици с импулси $\sim 1 \text{ GeV}/c$ съпровождат струята-партньор

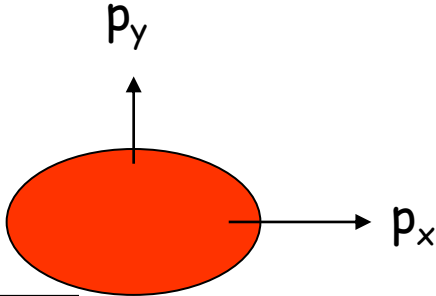
Азимутален поток от частици

Начална пространствена анизотропия

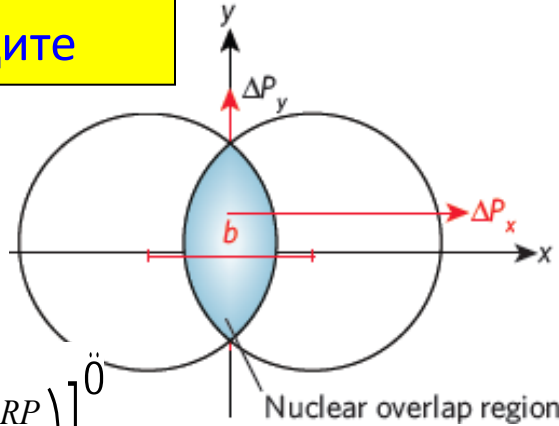
Анизотропия на импулсите след сблъсъка



Взаимодействие на участниците



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



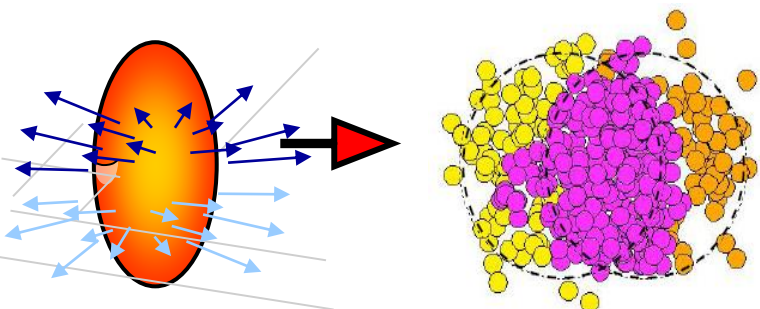
$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} \stackrel{50}{=} \frac{1}{2\rho} \frac{d^2 N}{p_T dp_T dy} \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \tilde{a}_n v_n \cos \left[n \left(\phi - \psi_n^{RP} \right) \right] \right] \frac{\partial}{\partial \theta}$$

хидродинамика

Koib & Heinz 2001

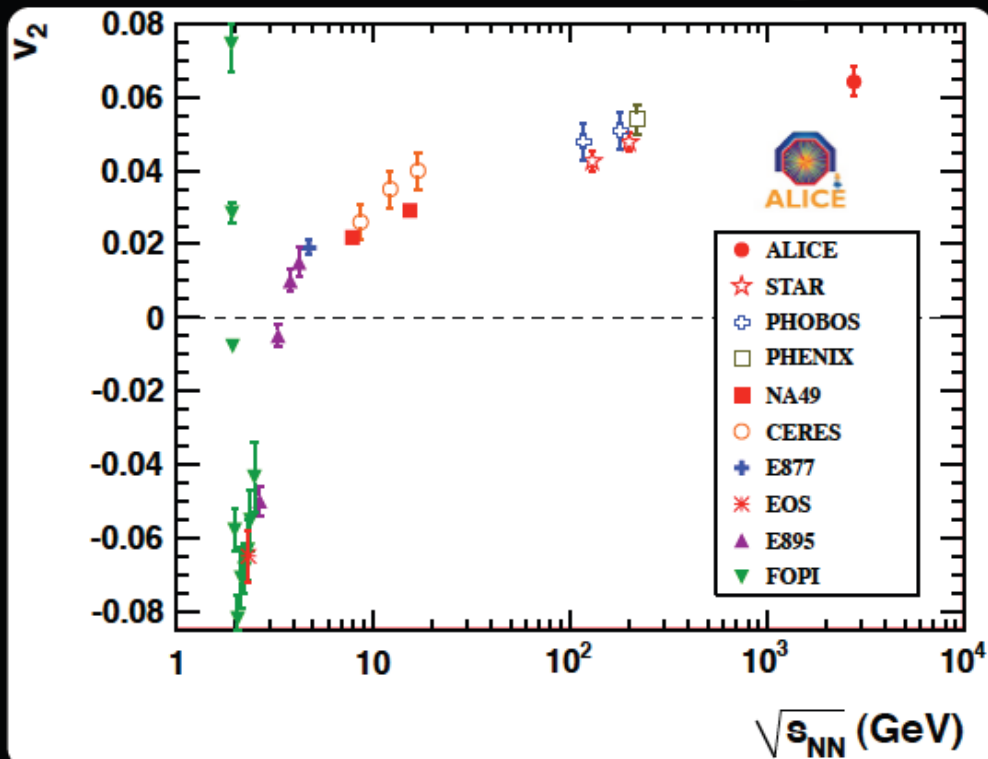
fm/c

Азимутален поток от частици



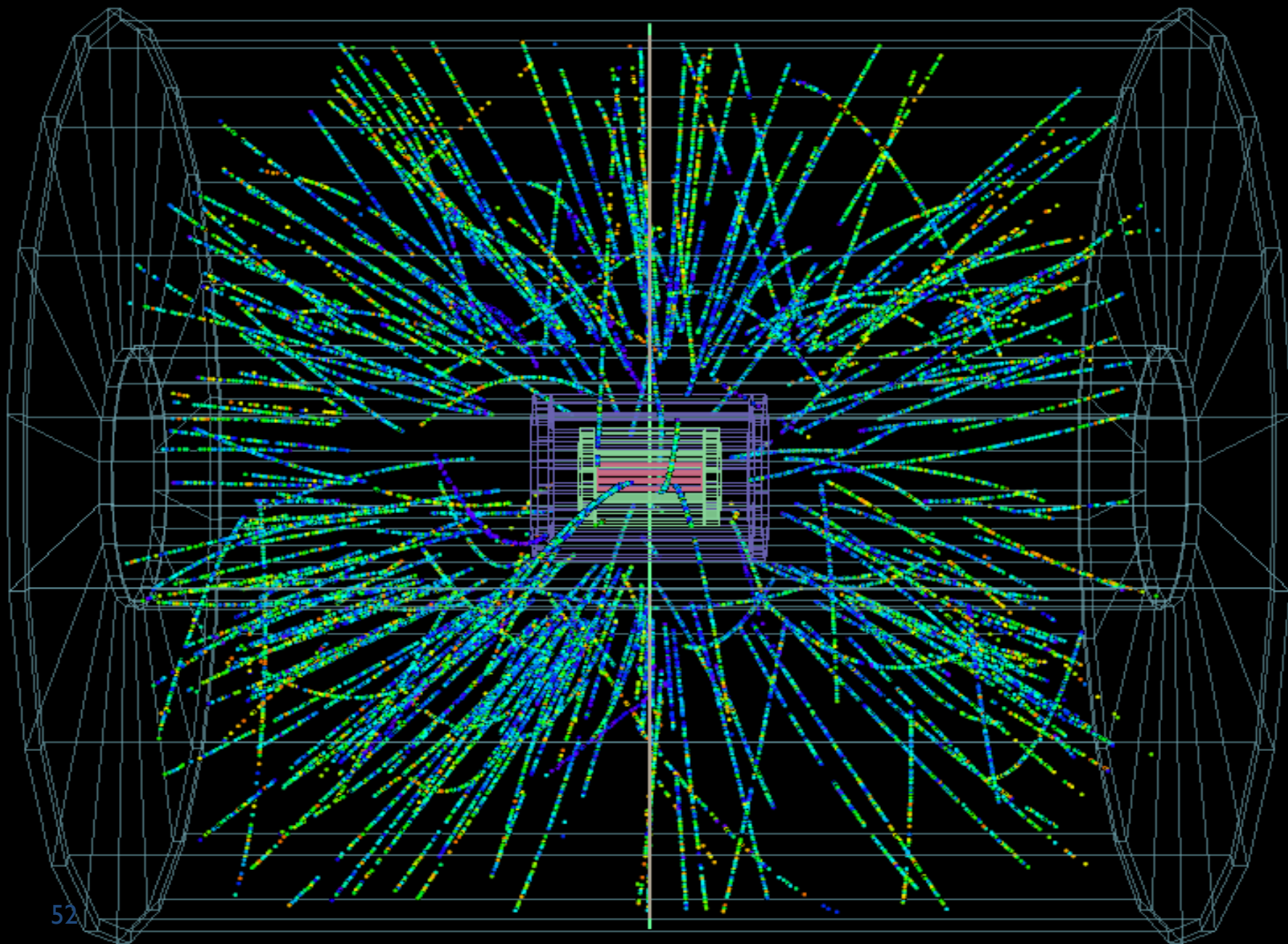
- v_2 е мярка за азимуталната анизотропия на потока частици родени при взаимодействието (втори Фурие-коефициент)
- Позволява да се изследва ранното състояние на системата, когато пространствената анизотропия е най-голяма
- v_n + хидродинамични модели => вискозитет
- Малък вискозитет => идеална течност

The Perfect Liquid

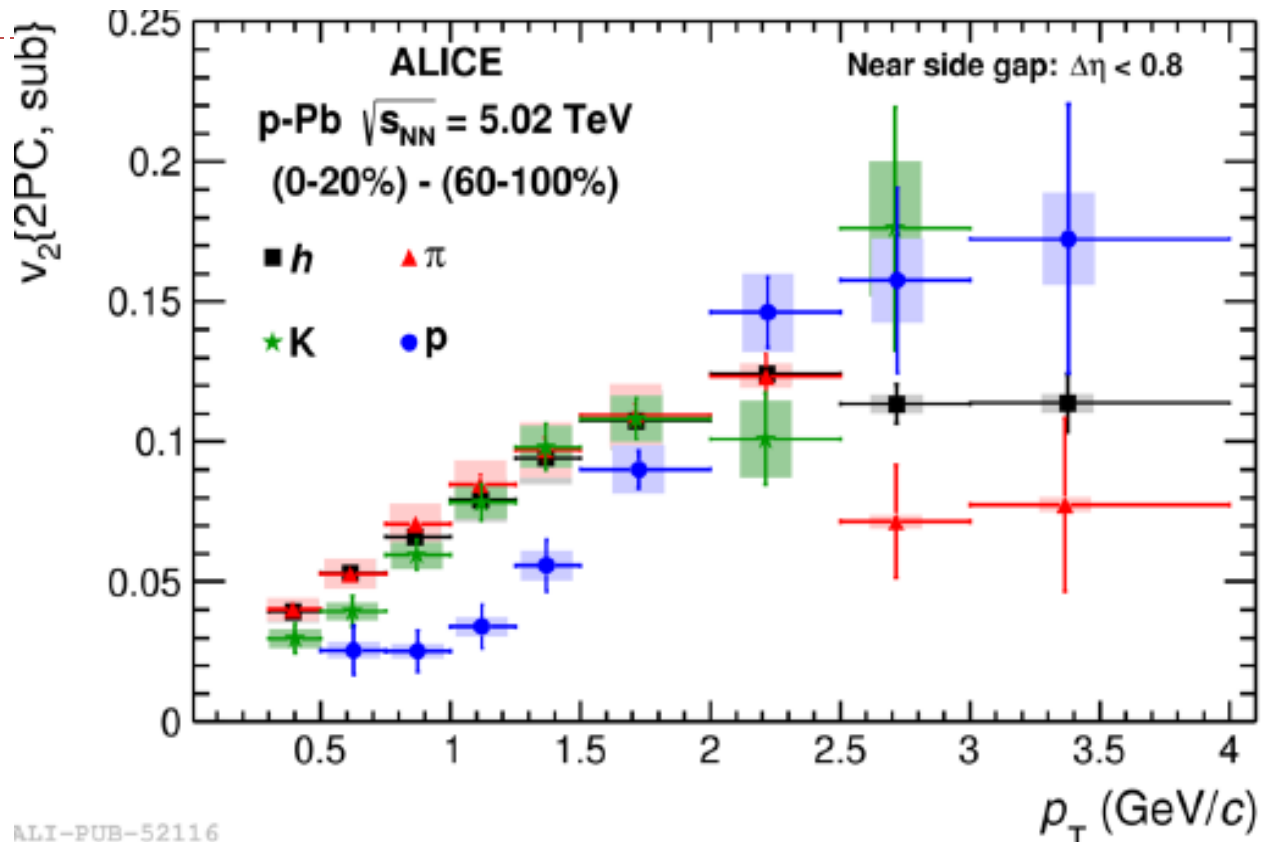


K. Aamodt et al. (ALICE Collaboration)
PRL 105, 252302 (2010)

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!

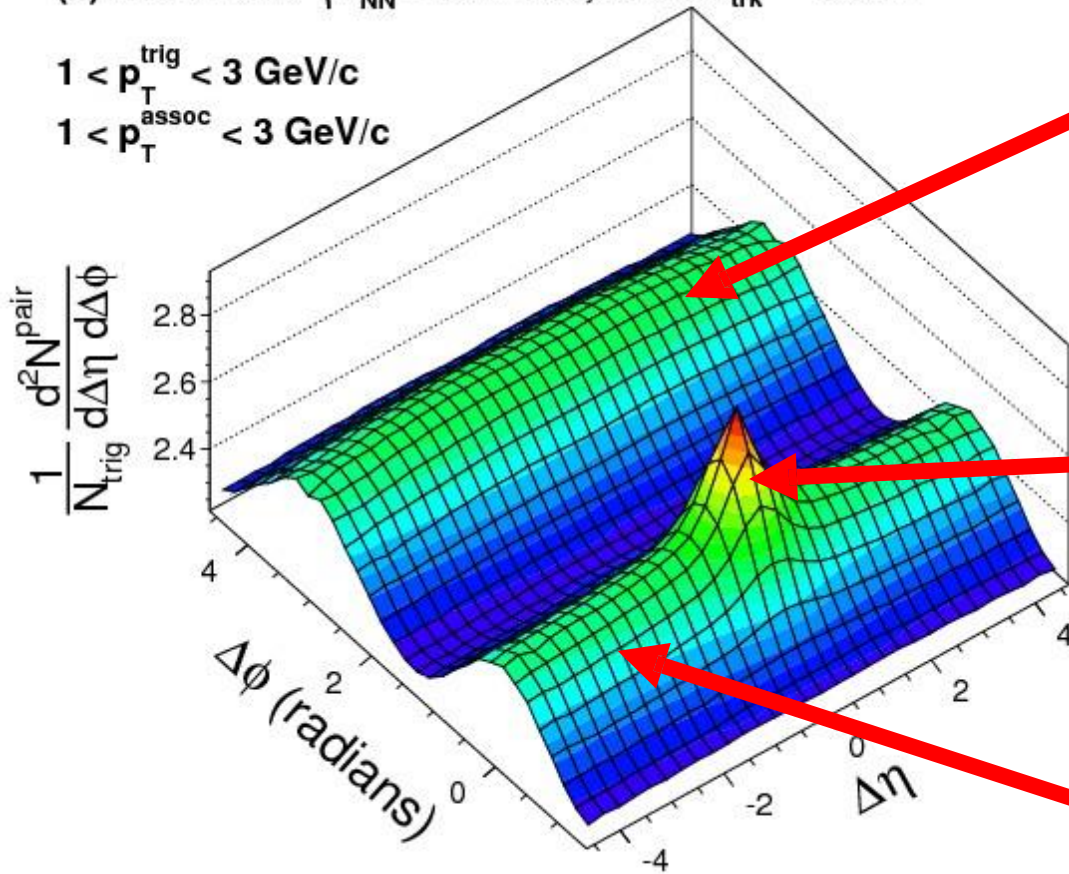


Двумерни двучастични корелации: $\Delta\phi$ и $\Delta\eta$

(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, ...
($\Delta\phi \sim 0$, $\Delta\eta \sim 0$)

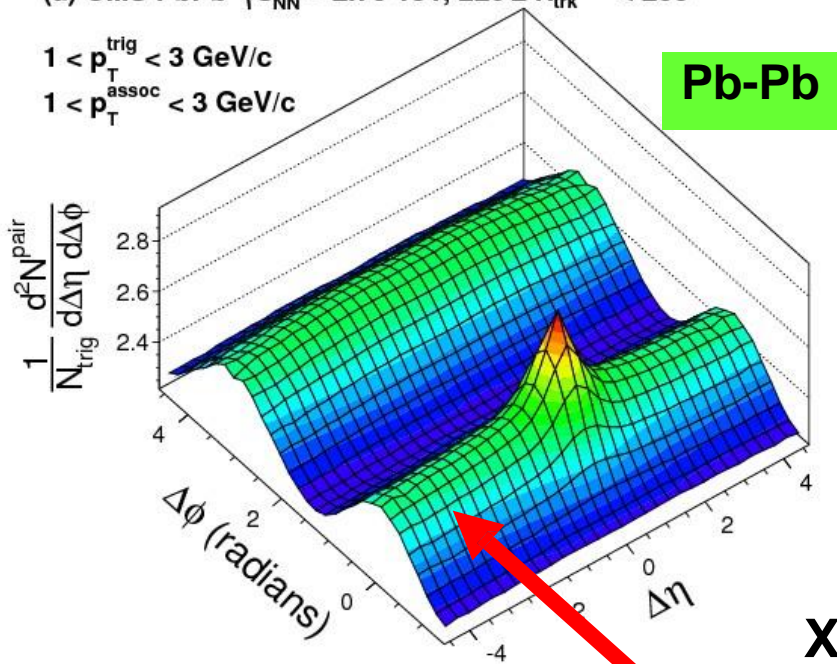
Близка страна:
Поток (хребет)
($\Delta\phi \sim 0$, дълга по $\Delta\eta$)



Pb-Pb vs. pp

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

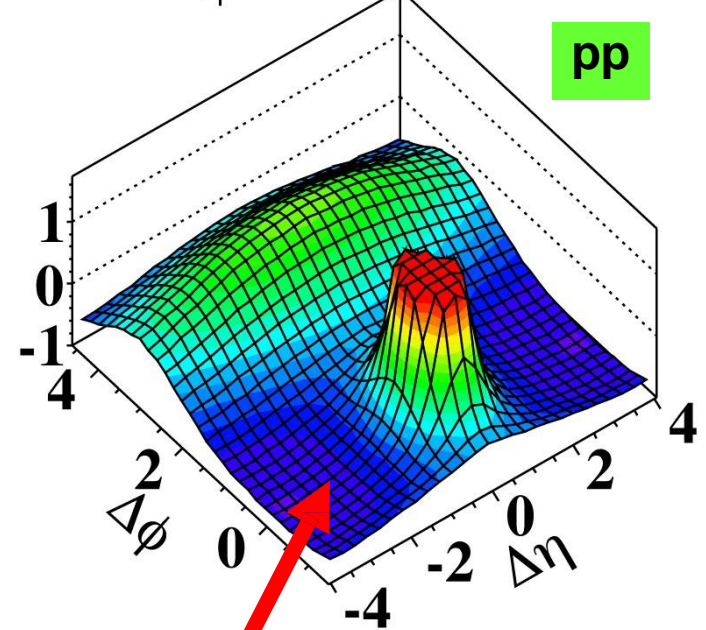
$1 < p_T^{trig} < 3$ GeV/c
 $1 < p_T^{assoc} < 3$ GeV/c



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...

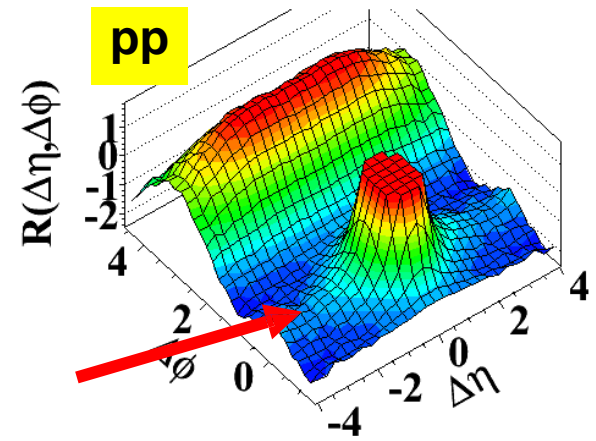


CMS: Хребет от близката страна

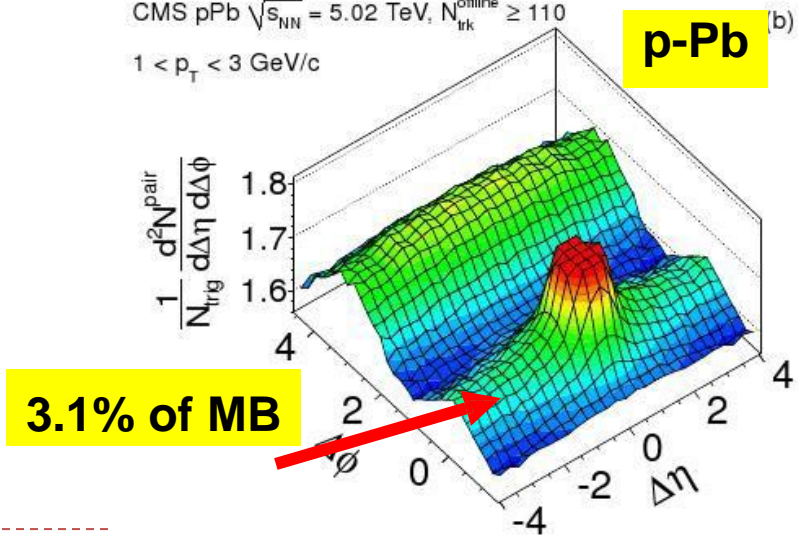
Тук: $\eta = \eta_{\text{lab}}$

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



3.1% of MB

CMS, JHEP09(2010)091

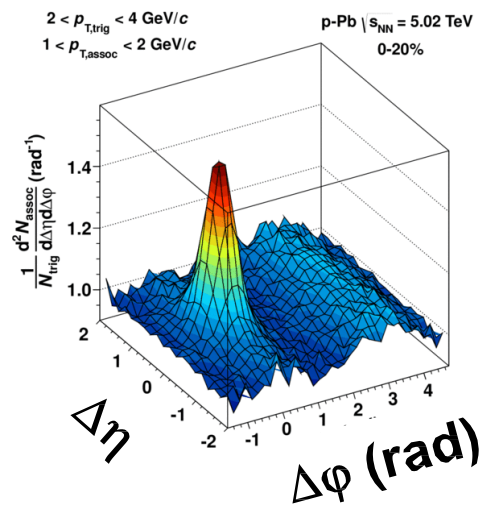
CMS, PLB718 (2013) 795

ALICE: Двоен хребет в pPb

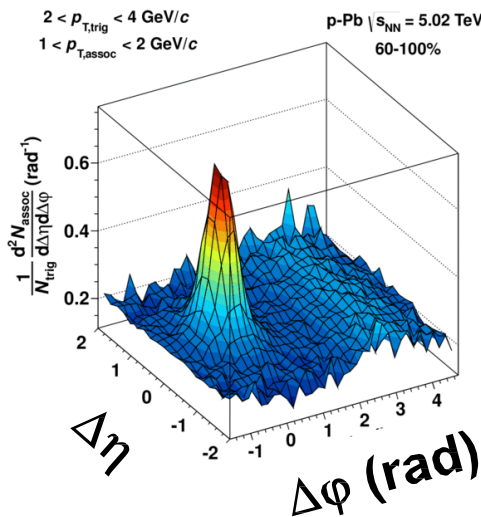
- Процедура за изваждане на корелациите от струи
 - При 60-100% централност нама хребет подобно на pp

0-20%

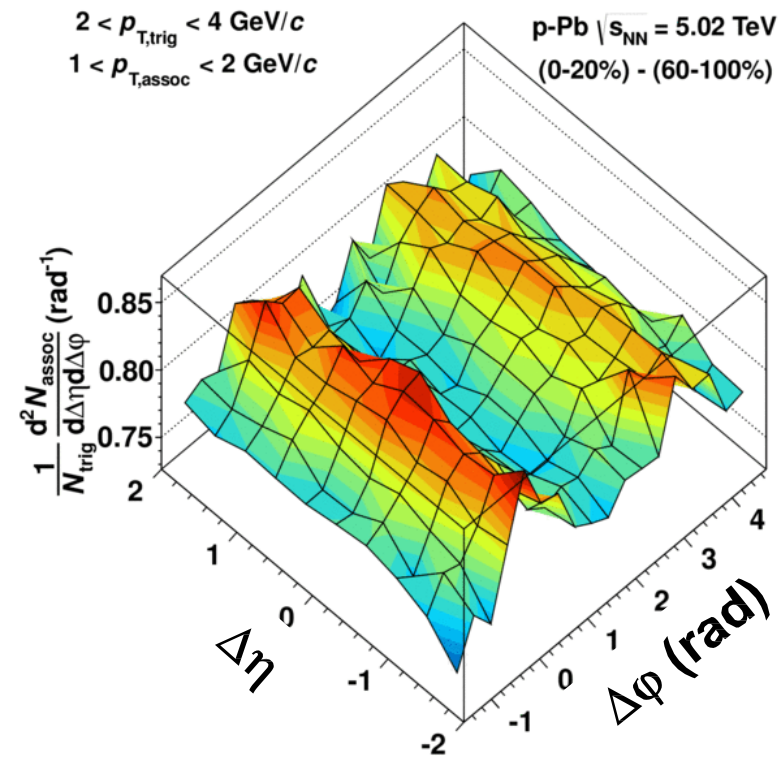
60-100%



—



==



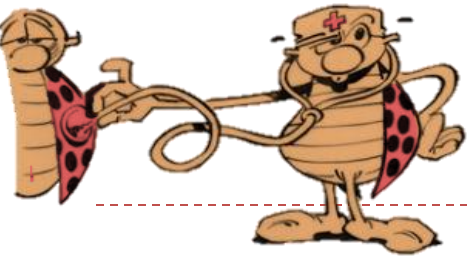
Два хребета !

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 pp и p-Pb събития: указания за колективно поведение в “малки” системи



Нови идеи

- ▶ Наблюдението на колективно поведение и азимутален поток в rr и $r\mathbf{R}\mathbf{v}$ 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



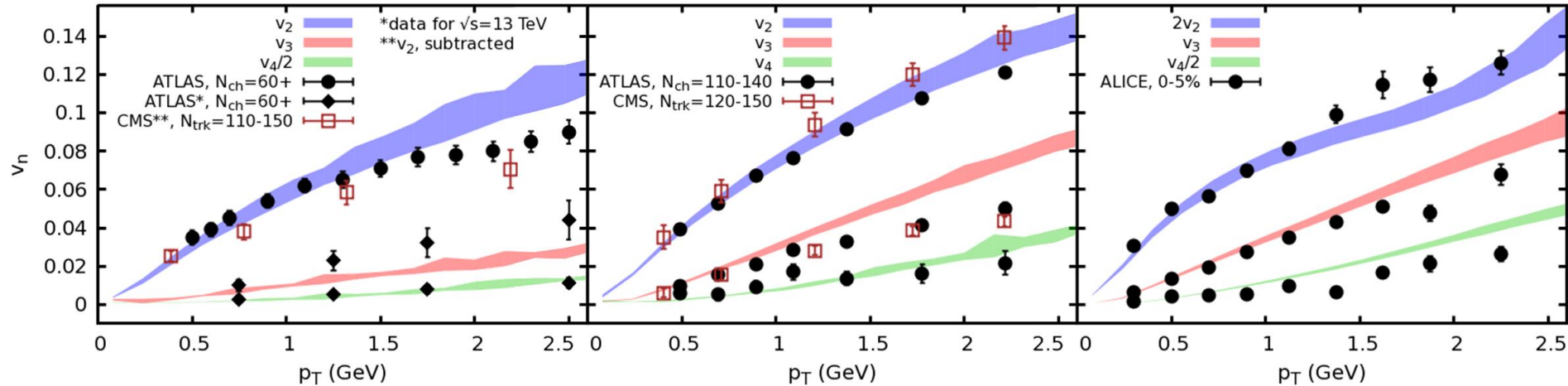
Хидродинамичен анализ на различни с-ми

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%



- ▶ 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 (arXiv:1707.02282)

