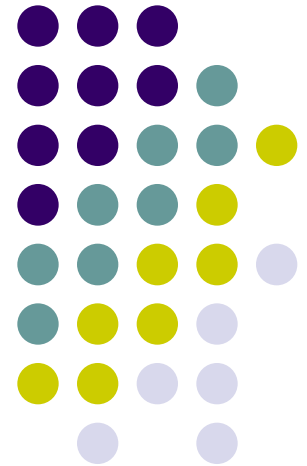


ALICE - експеримент с тежки йони

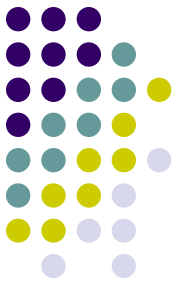
ЦЕРН, 18/09/2012

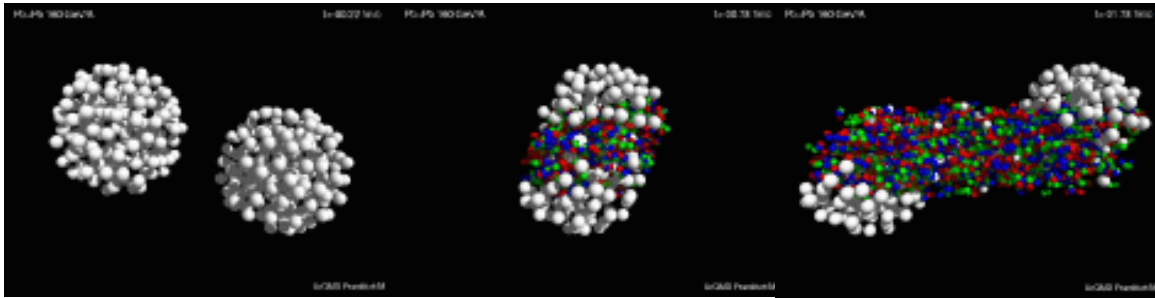
П.Христов



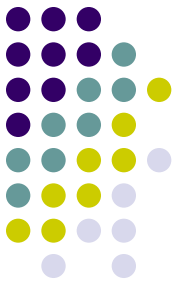
Съдържание

- Физическа обосновка
- Детекторът ALICE
- Сигнали и физически резултати





ALICE



- “A Large Ion Collider Experiment” за изследване на ядроядрени сблъсъци на LHC

- Защо ядро-ядрени сблъсъци?

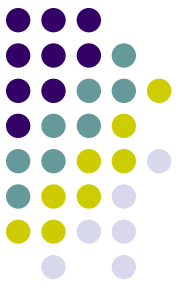
Загряване и сгъстяване на веществото...

- ...до температура около 100,000 пъти по висока от тази в центъра на Слънцето
- ...до плътност, при която Хеопсовата пирамида би се събрала в главата на карфица

Сравнено с протон-протонните взаимодействия по-голяма част от енергията ражда частици

- Каква е целта?

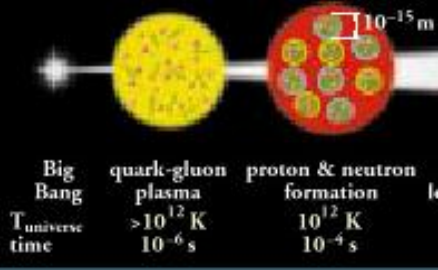
- Да се пресъздадат условията (плътност и налягане) съществували микросекунди след Големия взрив
- Да изследваме това състояние в лабораторни условия



Отворени въпроси



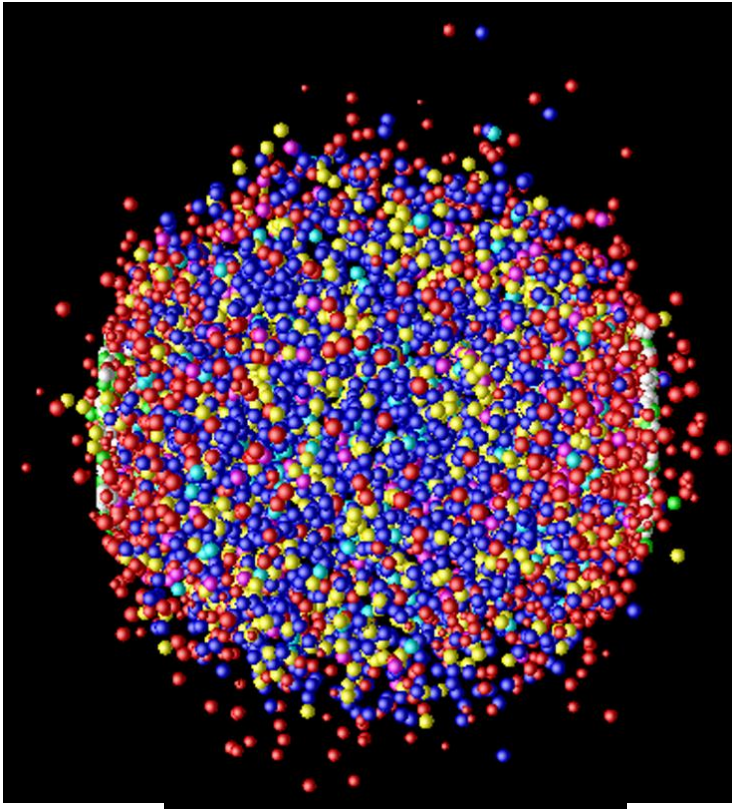
- Защо кварките са постоянно затворени в протоните, неутроните и другите адрони (нито един експеримент не е наблюдавал свободни кварки)?
- Защо масата на протона е на два порядъка по-голяма от масата на съставлящите го кварки? Каква е причината за такава голяма маса?
- Защо кварките имат различни маси? Какво нарушава киралната симетрия на фундаментално равнище?



Миниатюрен Голям Взрив



Лаборатория



1. Ускорените йони се сблъскват челно
2. Енергията на сблъскването се трансформира в кварки и глюони
3. Силно взаимодействие между кварките и глюоните: материята достига равновесно състояние
4. Системата се разширява и охлажда
5. Кварките и глюоните "кондензират" в адрони

$$v/c = 0,999999993$$

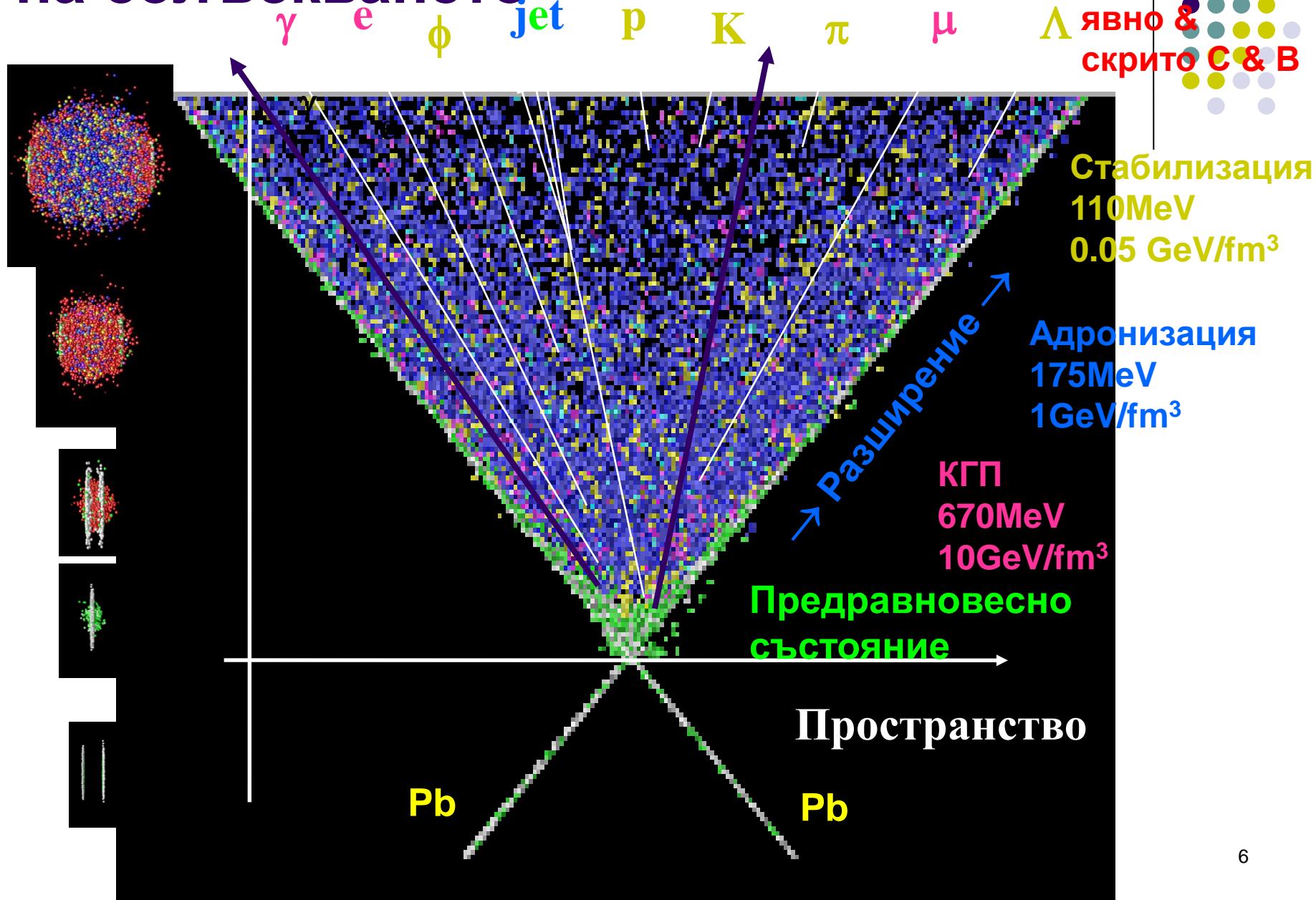
Лоренцово свиване : 7 fm \rightarrow 0,003 fm

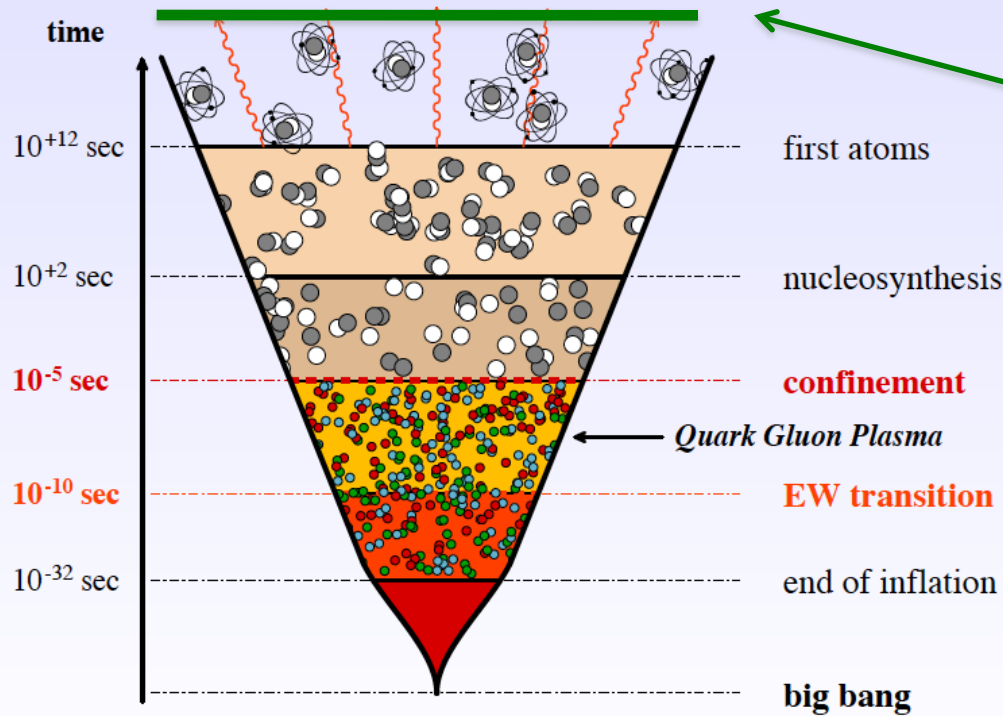
$$t \sim 10^{-23} \text{ s}$$

$$T \sim 10^{12} \text{ K}$$

К

Пространствено-временна еволюция на сблъскването



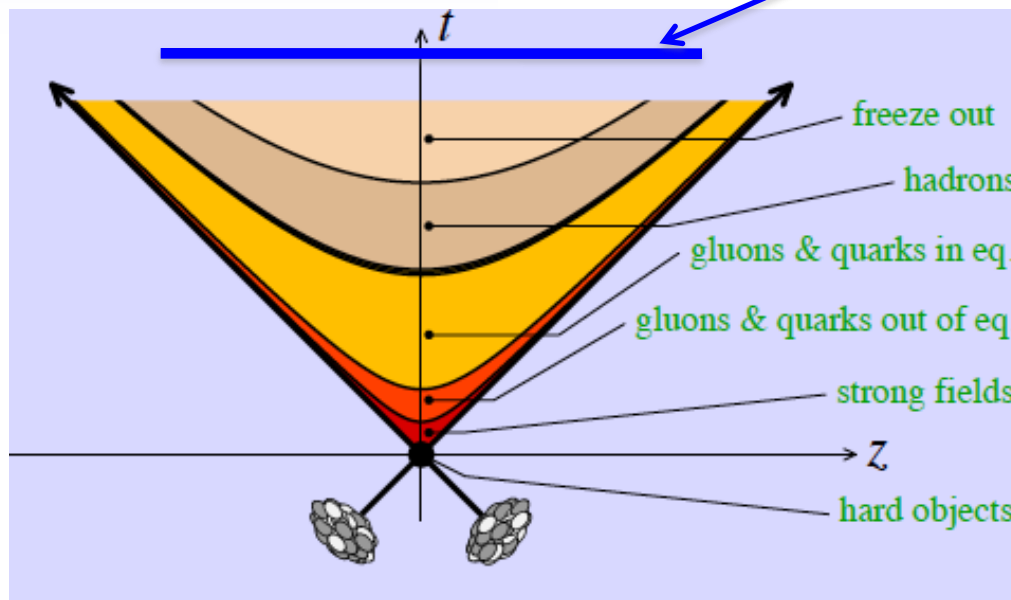


Измервания с
телескопи

Еволюция на ранната
Вселена: Големият
Взрив, конфайнмент

Измервания с
колайдери

Еволюция на
сблъскване с
тежки йони



кинетика

идеална хидрод.

вискозна хидрод.

насищане,
конденз. от цв. с

пертурбативна
КХД



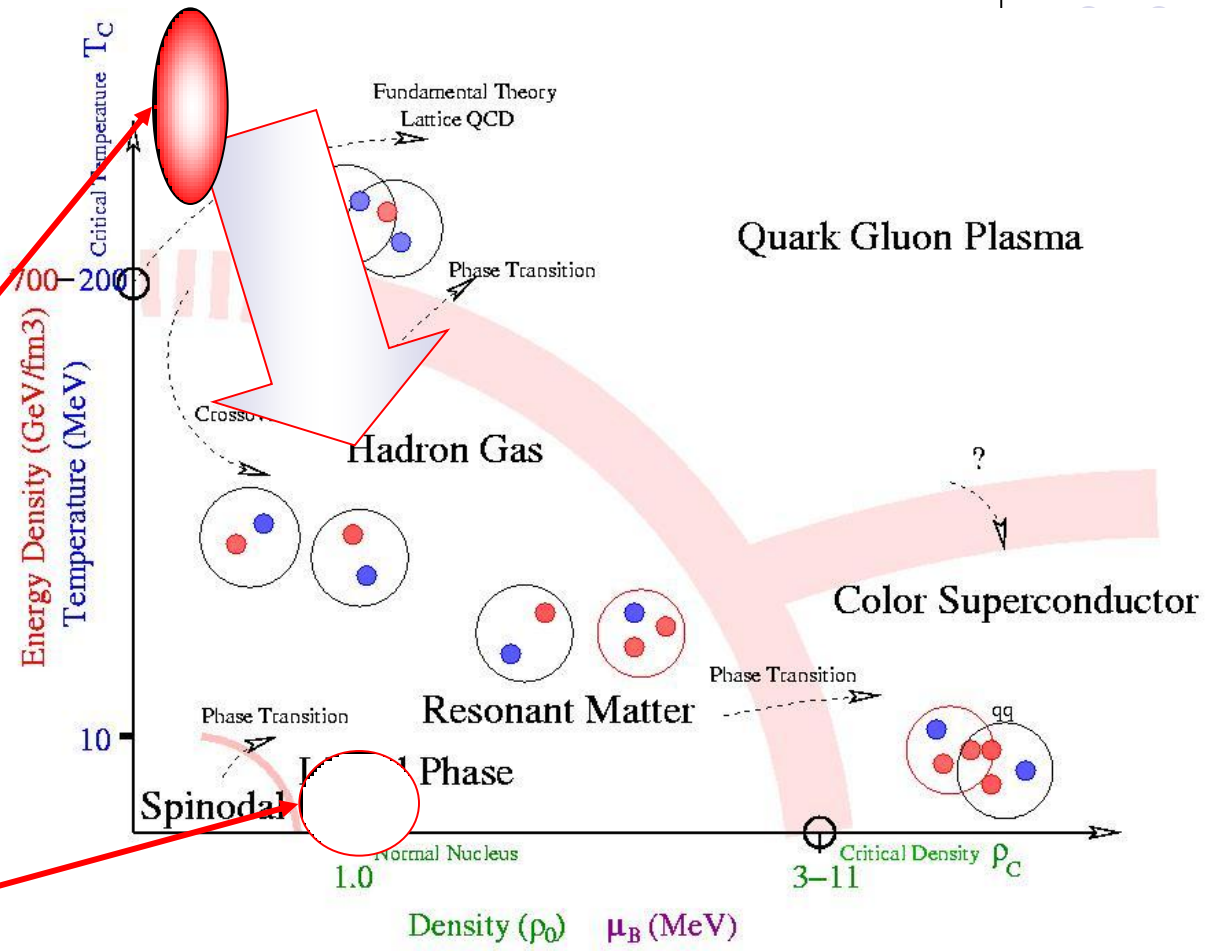
Термодинамика на КГП

Големият взрив започва тук

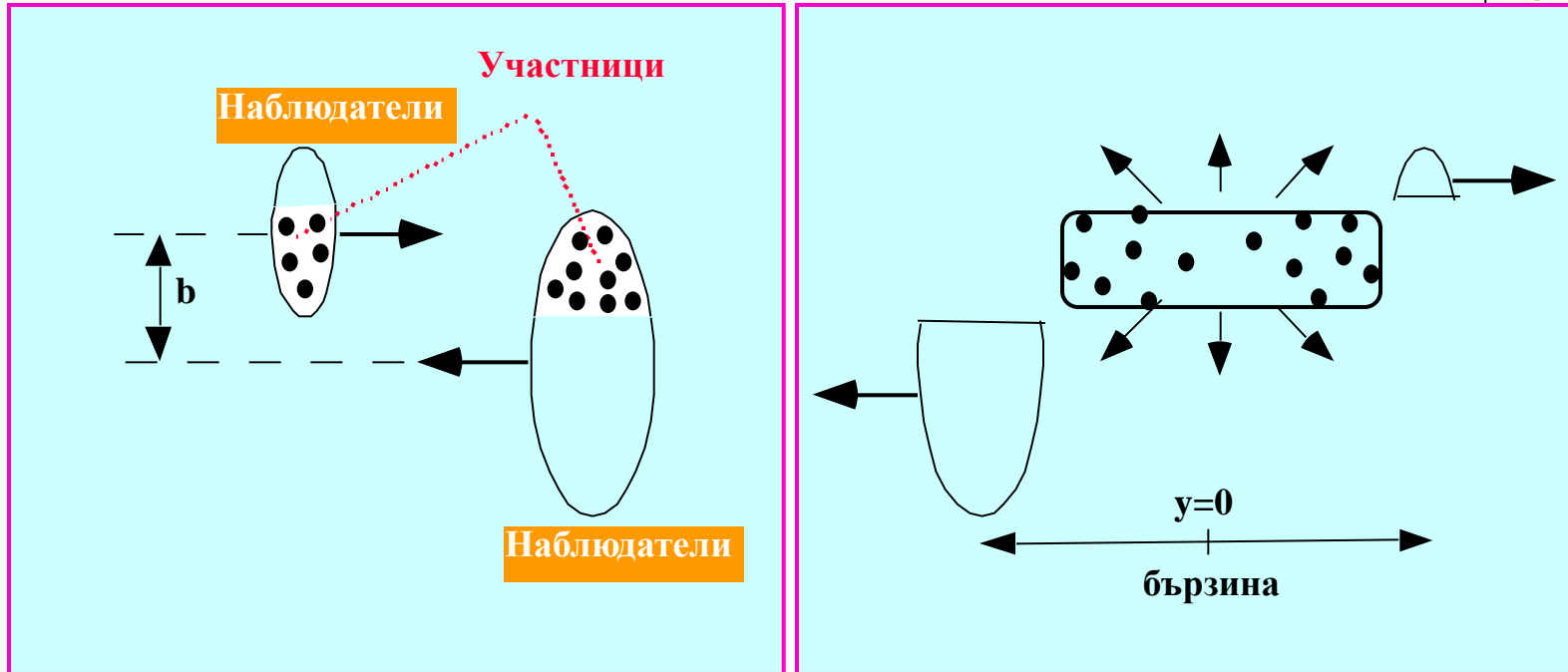
Pb сблъсък на LHC ще ни отведе тук

Ще изучаваме тази траектория

Ние сме тук



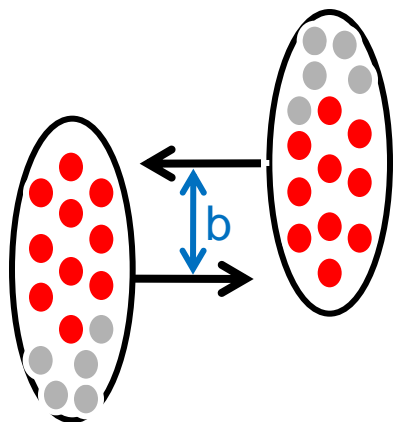
Геометрия на събитията: участници и наблюдатели



Броят на участниците (N_{part}) намалява когато прицелният параметър b расте, а броят на наблюдателите (N_{spec}) намалява

$$A_{\text{proj}} = N_{\text{spec}} + N_{\text{part}}$$

Геометрия на събитията



Централни сблъсъци

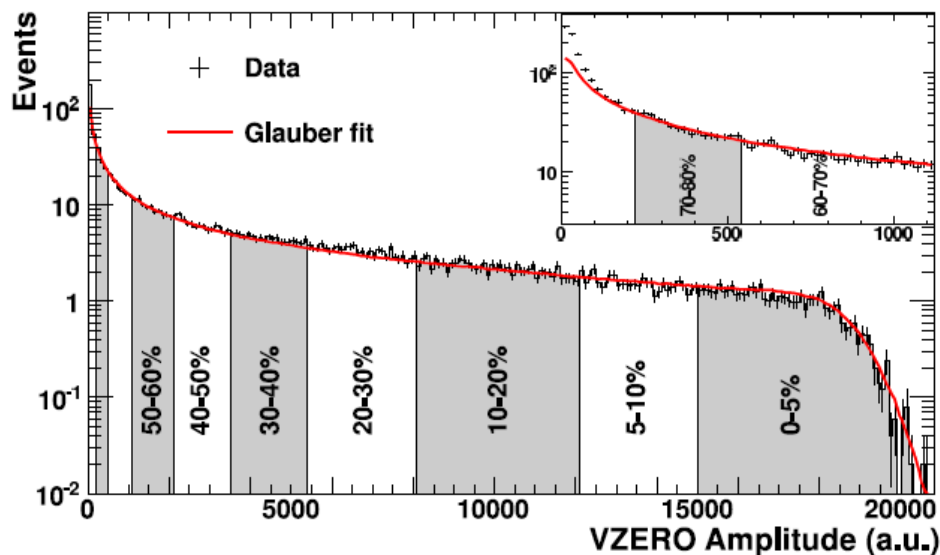
- малък импакт параметър
- много участници => голяма множественост

Периферни сблъсъци

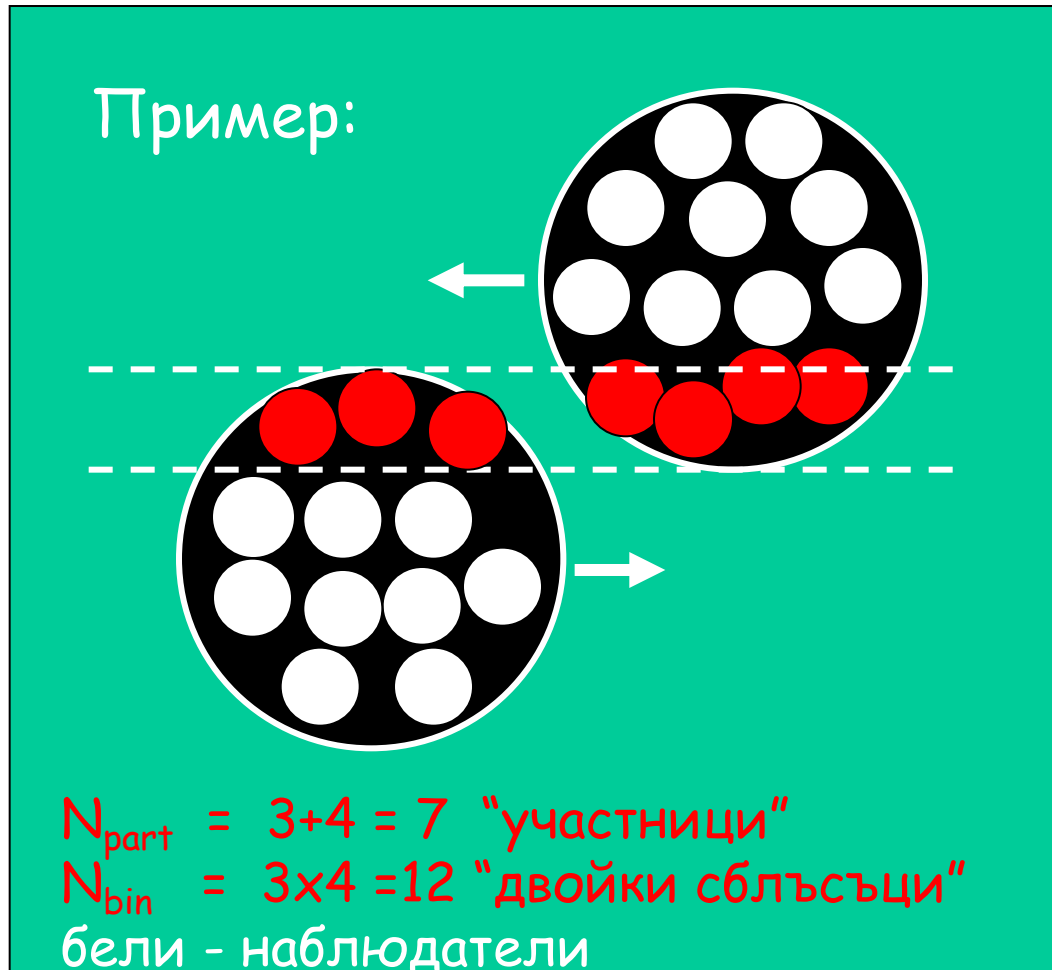
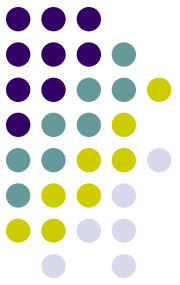
- голям импакт
- малко участници => малка множественост

Пример: сума от амплитудите в детектор V0 (сцинтилатори)

- случайно положение на нуклоните в ядрото
- ядрена плътност съгласно разпределението на Уудс – Саксън
- отклонение при малки амплитуди заради неядрени процеси (електромагнитен фон)



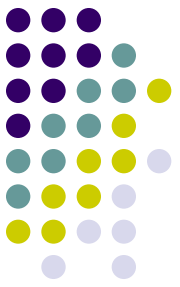
Участници, наблюдатели, двойки сблъсъци



“Меки” процеси с голямо сечение $\sim N_{\text{part}}$

“Твърди” процеси с малко сечение $\sim N_{\text{bin}}$

Метод за количествено сравняване на разпределения

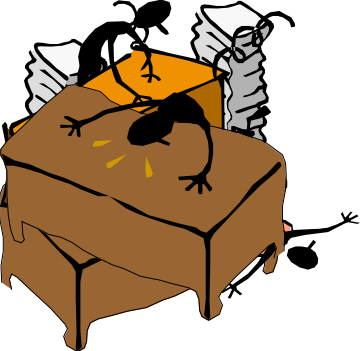


База за сравнение: pp $\rightarrow R_{AA}$

$$R_{AA} = \frac{\text{Yield}_{AA}}{\text{Yield}_{pp}} \cdot \frac{1}{\langle Nbin \rangle_{AA}}$$

База за сравнение: периферни AA $\rightarrow R_{cp}$
 (“централни към периферни събития”)

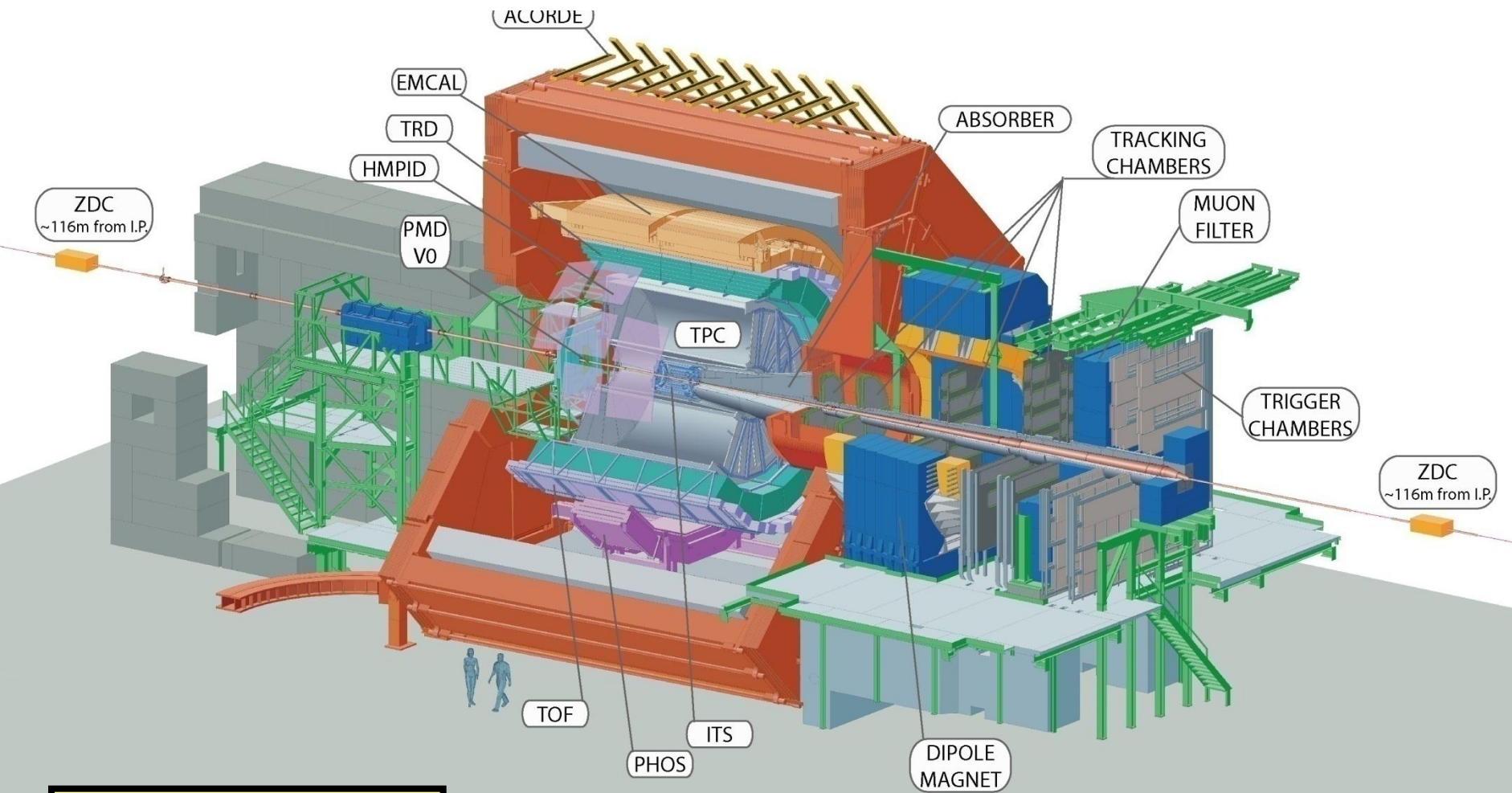
$$R_{cp} = \frac{\text{Yield}_{AA,central}}{\text{Yield}_{AA,periph}} \cdot \frac{\langle Nbin \rangle_{AA,periph}}{\langle Nbin \rangle_{AA,central}}$$



Програма за действие



- Около 16,000 частици минават през детектора при всеки сблъсък; броят частици достига 90 на cm^2 в близост до точката на взаимодействие!
- Всяка частица се измерва индивидуално: траектория, идентификация на типа, определяне на 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.



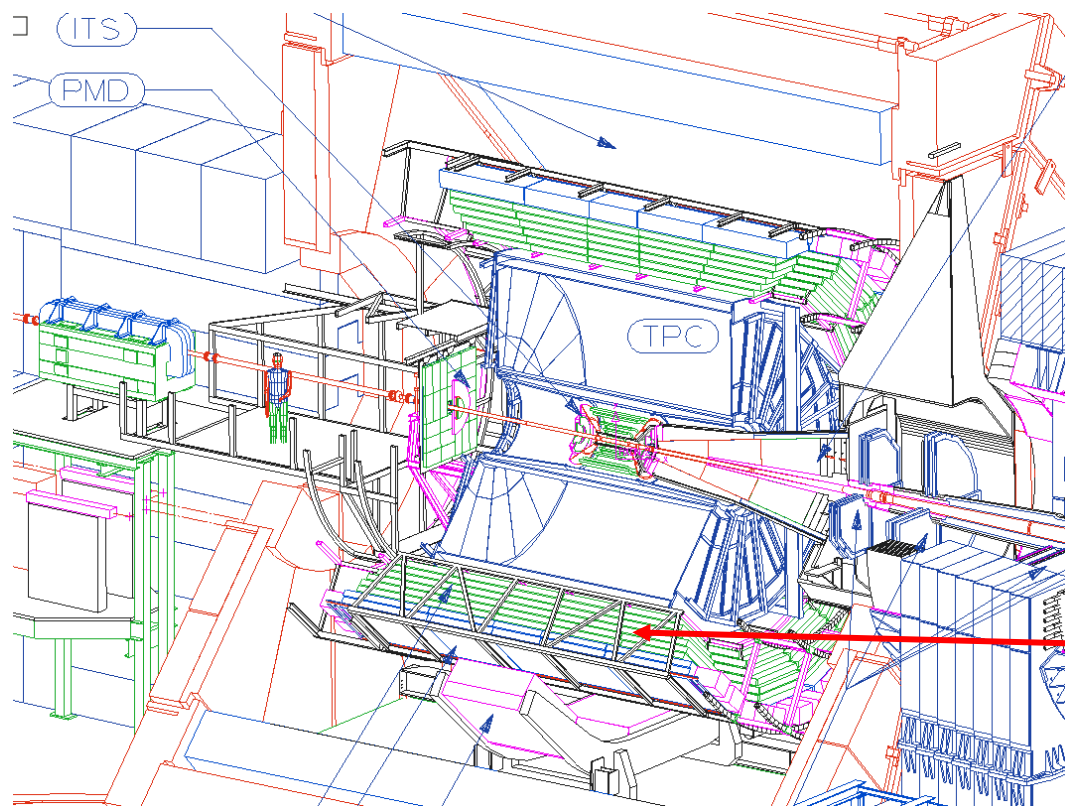
Size: 16 x 26 meters
Weight: 10,000 tonnes





ALICE : централна част

- За точно измерване на координатите системата е разделена на стотици милиони чувствителни клетки ;
- Точката на взаимодействие е обкръжена от детектори

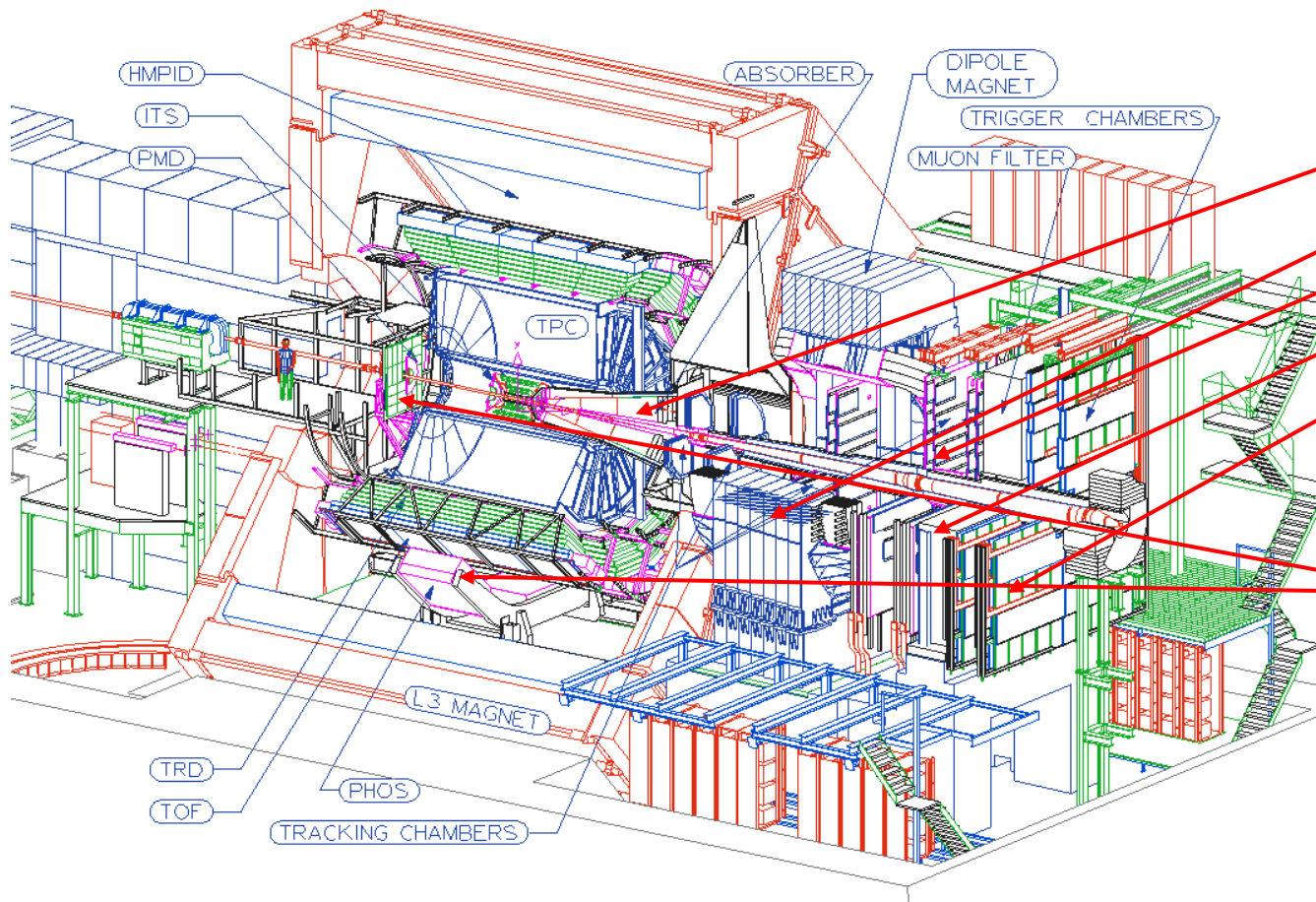


Вътрешен трекер
(ITS): p , id

Времепроекционна
камера (TPC) : p , id

Детектор на
преходно излъчване
(TRD): електрони

ALICE: специализирани детектори

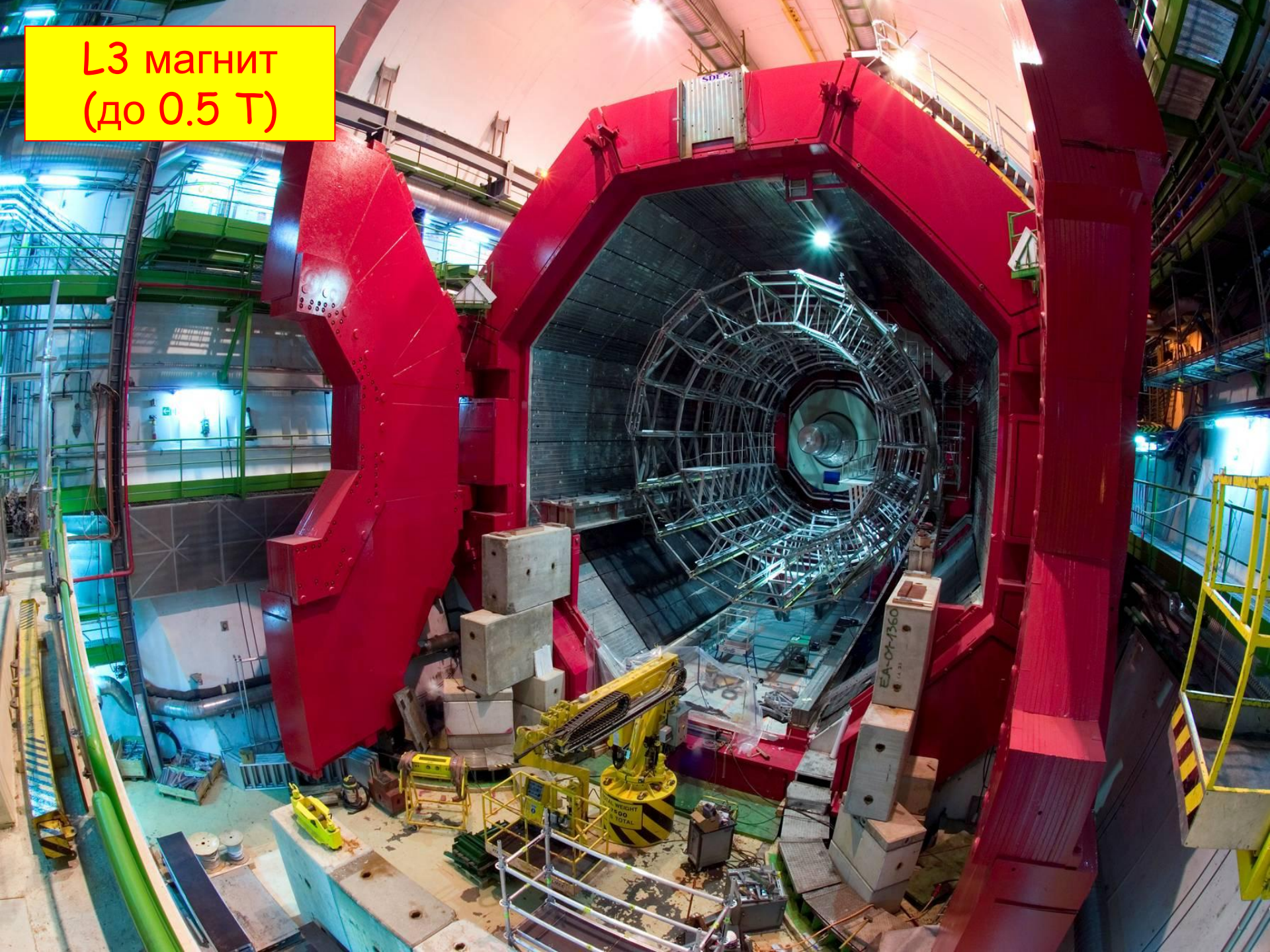


Мюонен спектрометър:

- Абсорбер
- Диполен магнит
- Тракер
- Филтър
- Тригер

ФОТОНИ

L3 магнит
(до 0.5 Т)



Вътрешен силициев тракер



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

**Лентов
SSD**



**Точков
SPD**

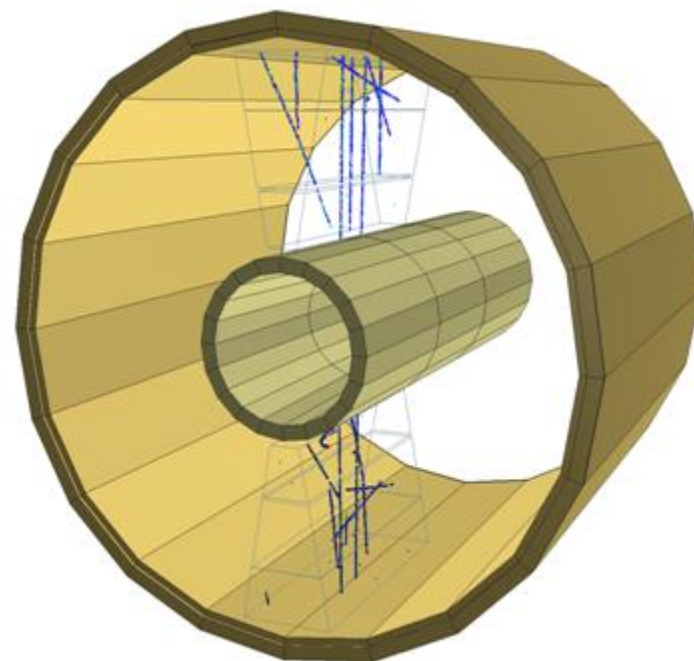


**Дрейфов
SSD**

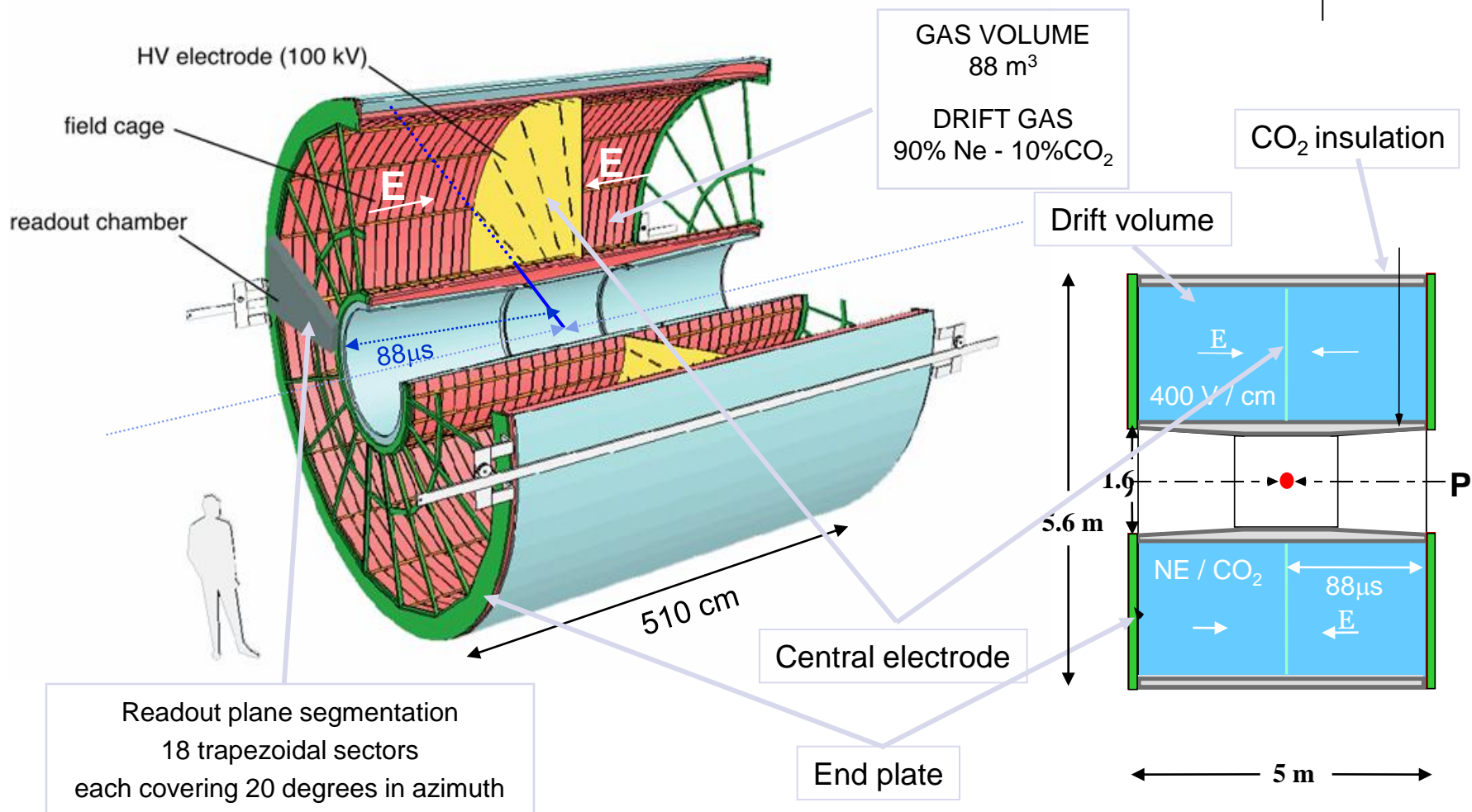
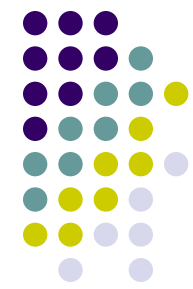
Тест на ТРС електрониката



Космически тест
12/2007



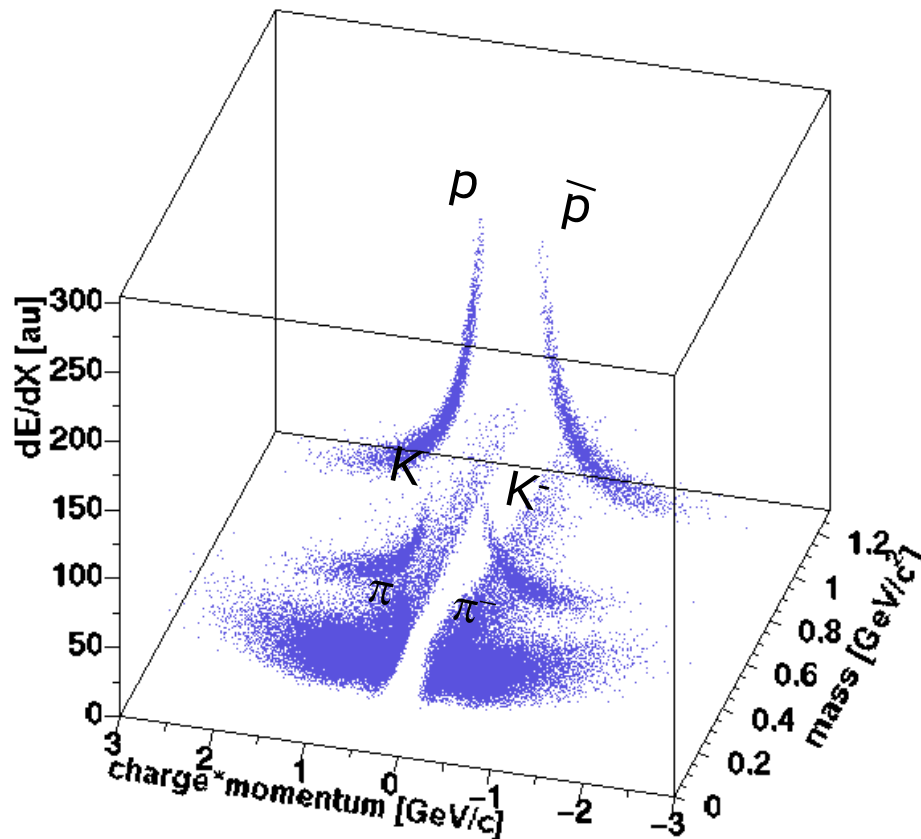
TPC ALICE



Идентификация на частиците



Измерване на йонизационните загуби



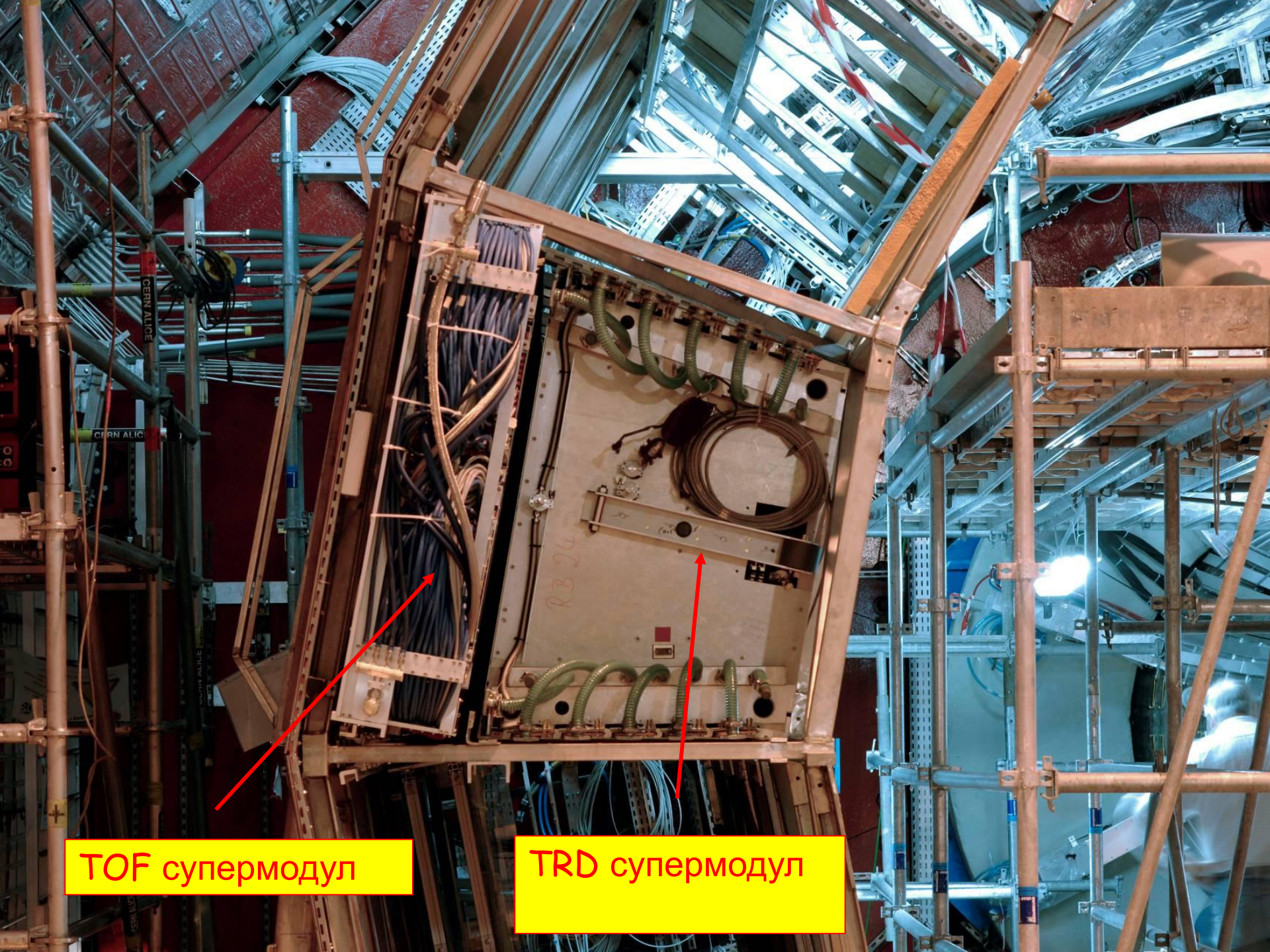
Измерване времето на полет

Реконструкция на следите: заряд и импулс

Детектор по време на прелитане (TOF)



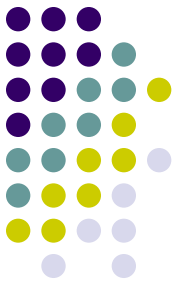
> 8000 канала/супермодул



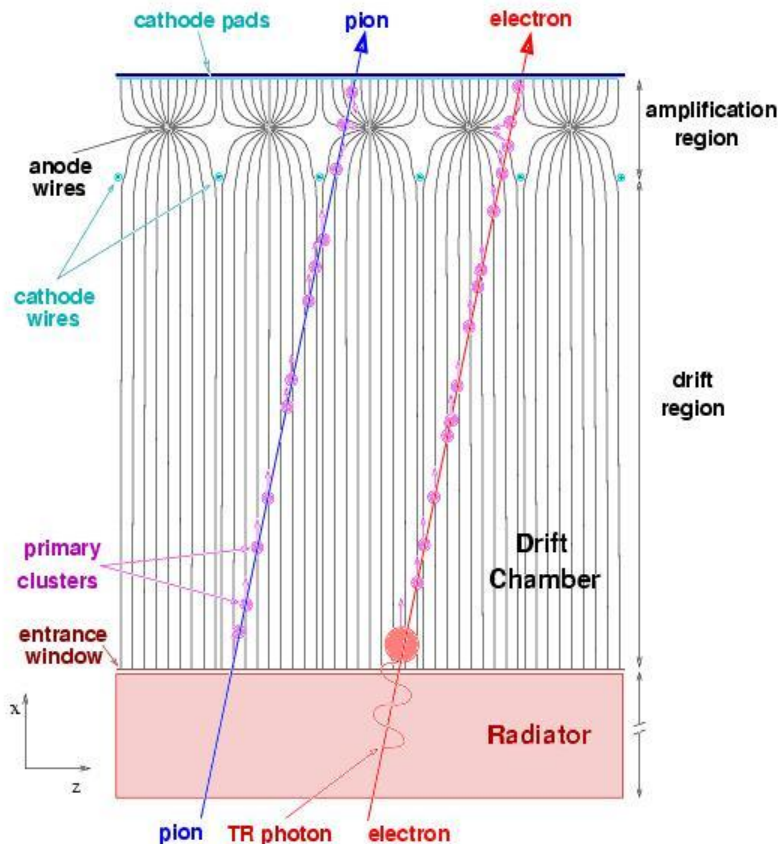
TOF супермодул

TRD супермодул

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)

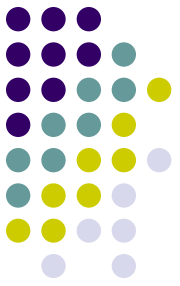
Фотонен спектрометър (PHOS)



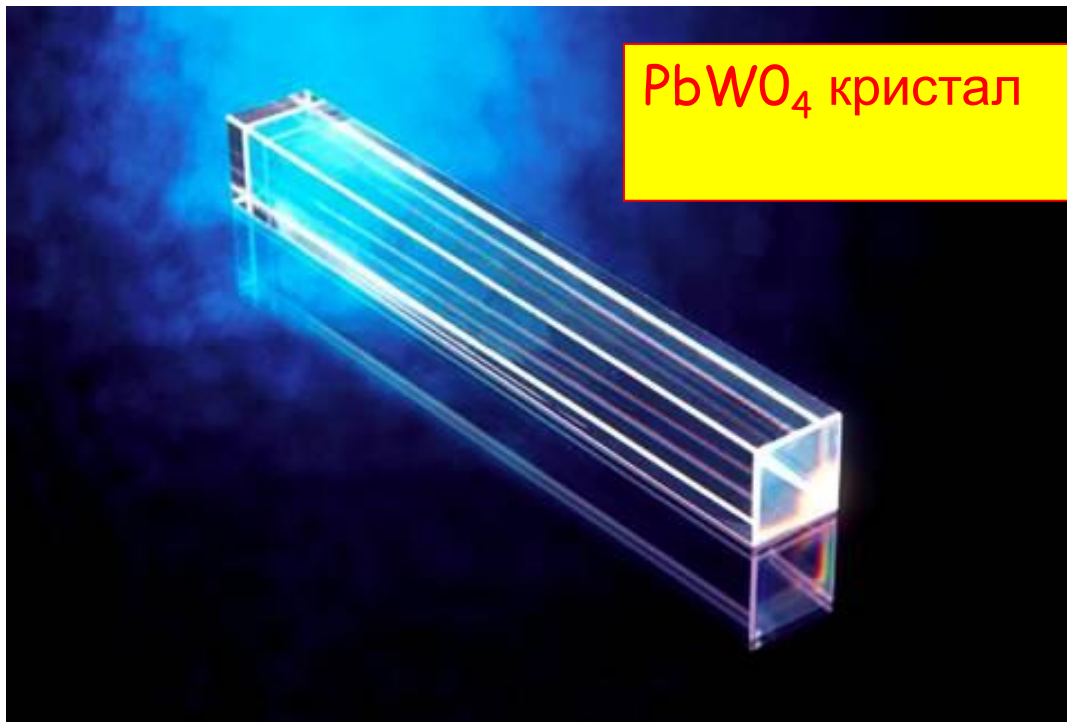
Първи супермодул



Фотонен спектрометър

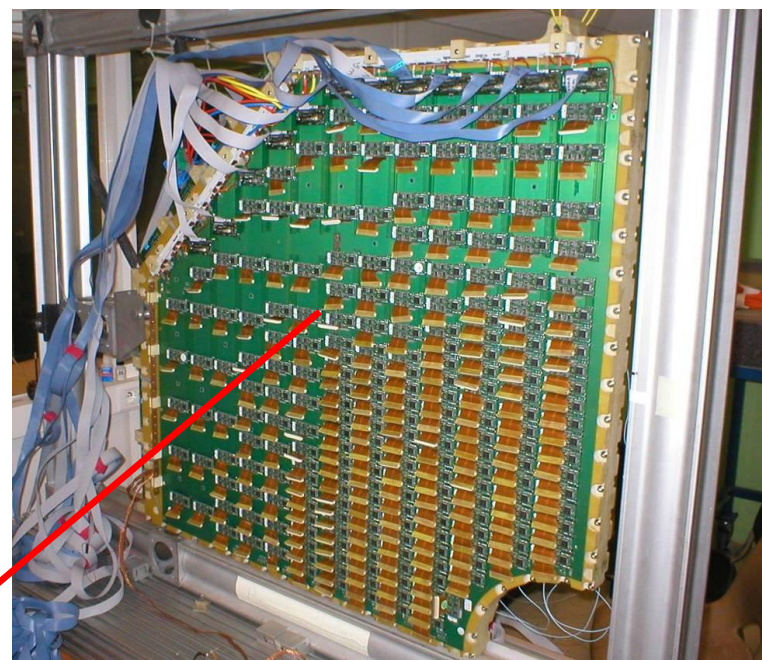


- Плътен като олово и прозрачен като кристал

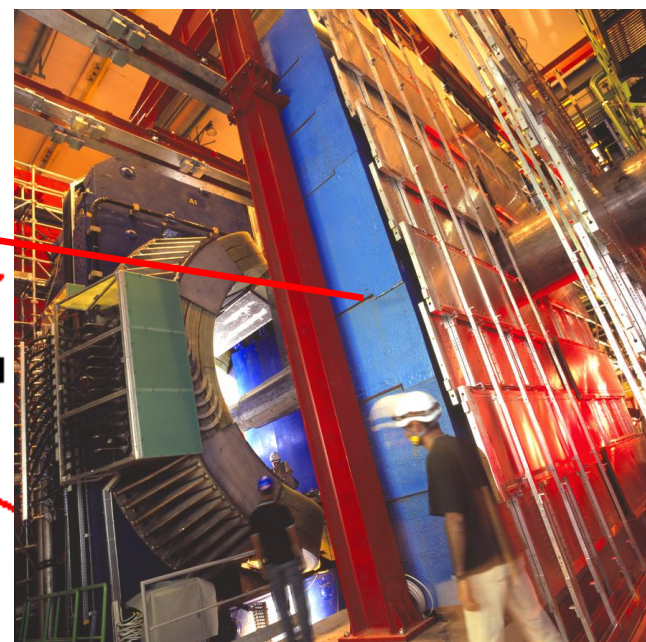
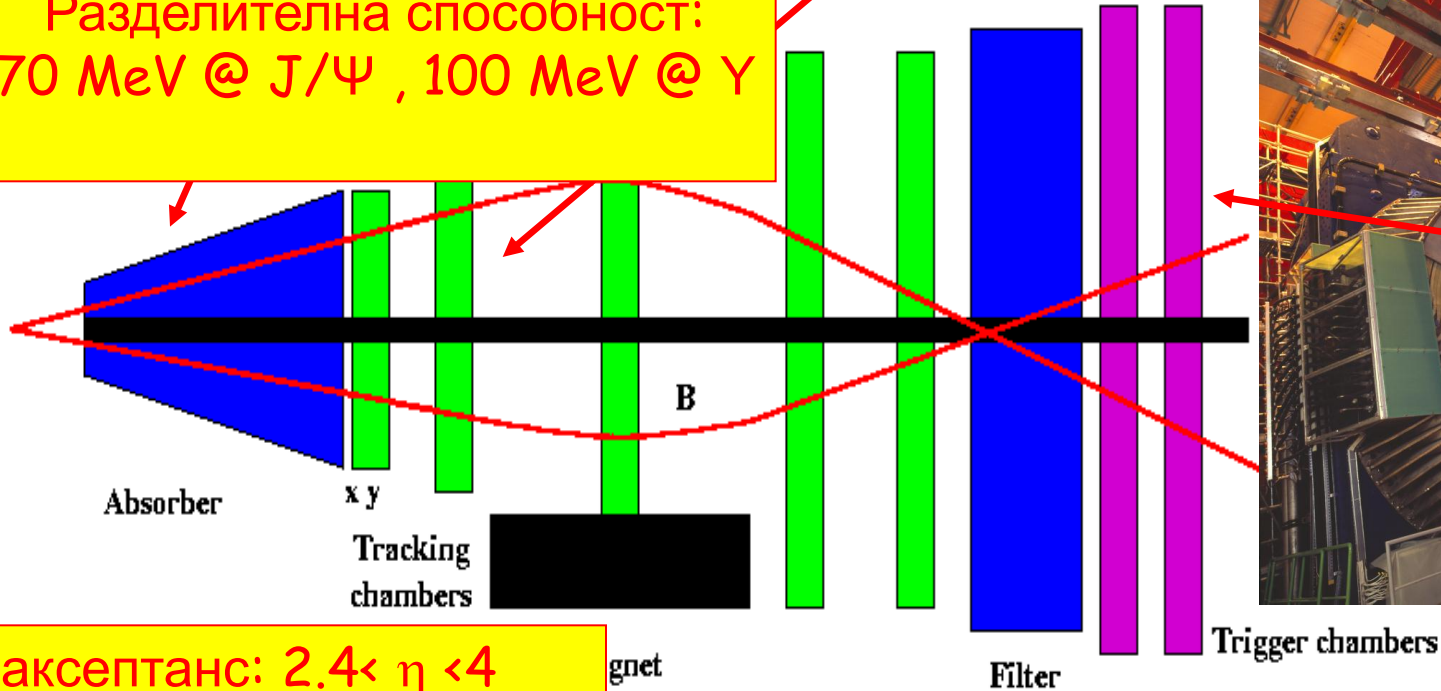


- Фотоните предизвикват каскади от електрони и позитрони
- Електроните възбуждат атомите на кристала
- Възбудените атоми излъчват в ултравиолетовия спектър
- Ултравиолетовото излъчване се регистрира от едната страна на кристала от фотодиод

(Дву)мюонен спектрометър



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



аксептанс: $2.4 < \eta < 4$

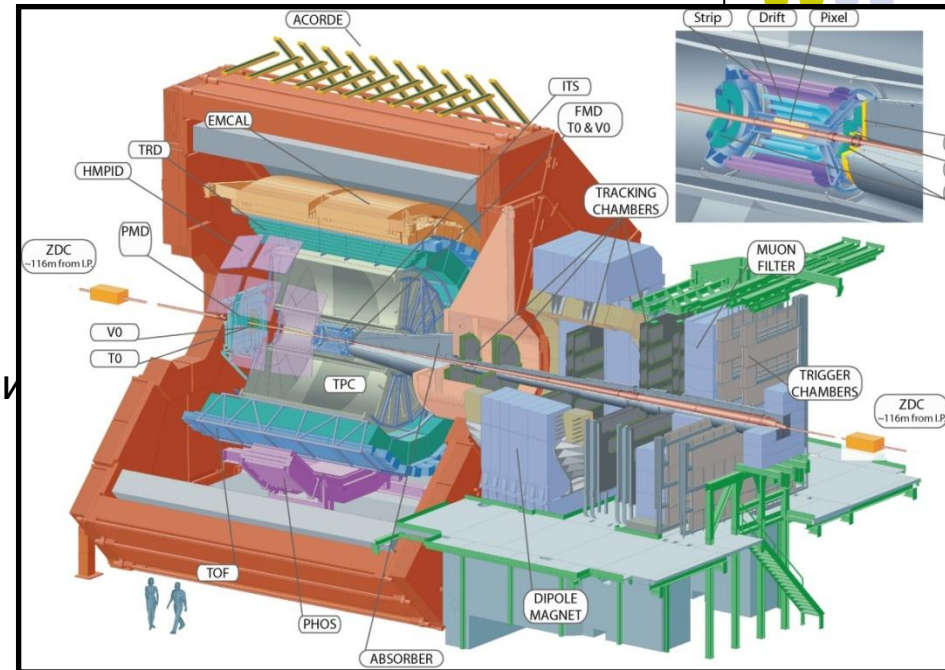
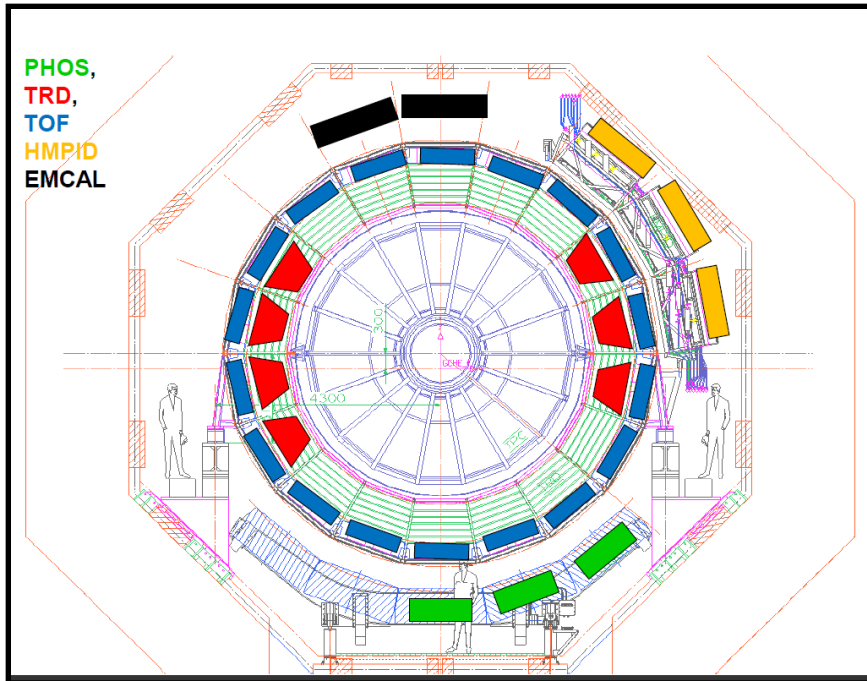
Детектори през 2010 (първи PbPb данни)

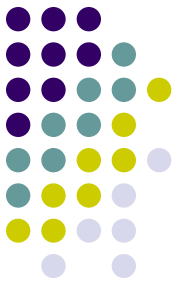
- ITS, TPC, TOF, HMPID, MUON, V0, T0, FMD, PMD, ZDC (100%)
- TRD (7/18)
- EMCAL (4/12)
- PHOS (3/5)
- HLT (60%)

100% централни и мюонни детектори

Частична регистрация на електрони и фотони

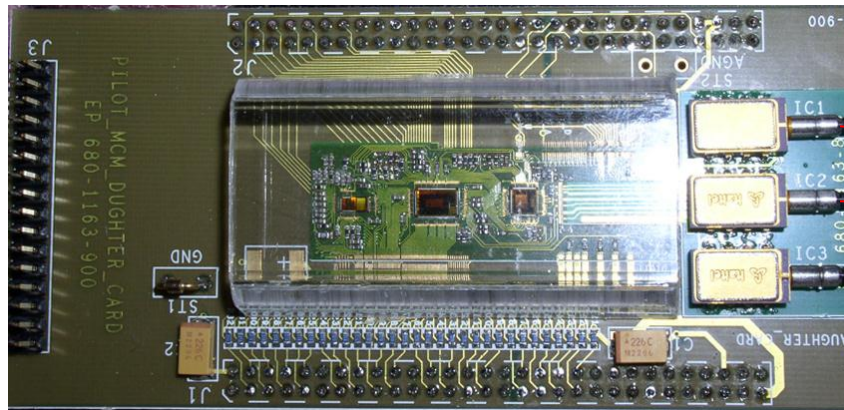
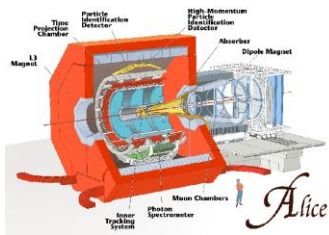
Без изменения от 2009 г.





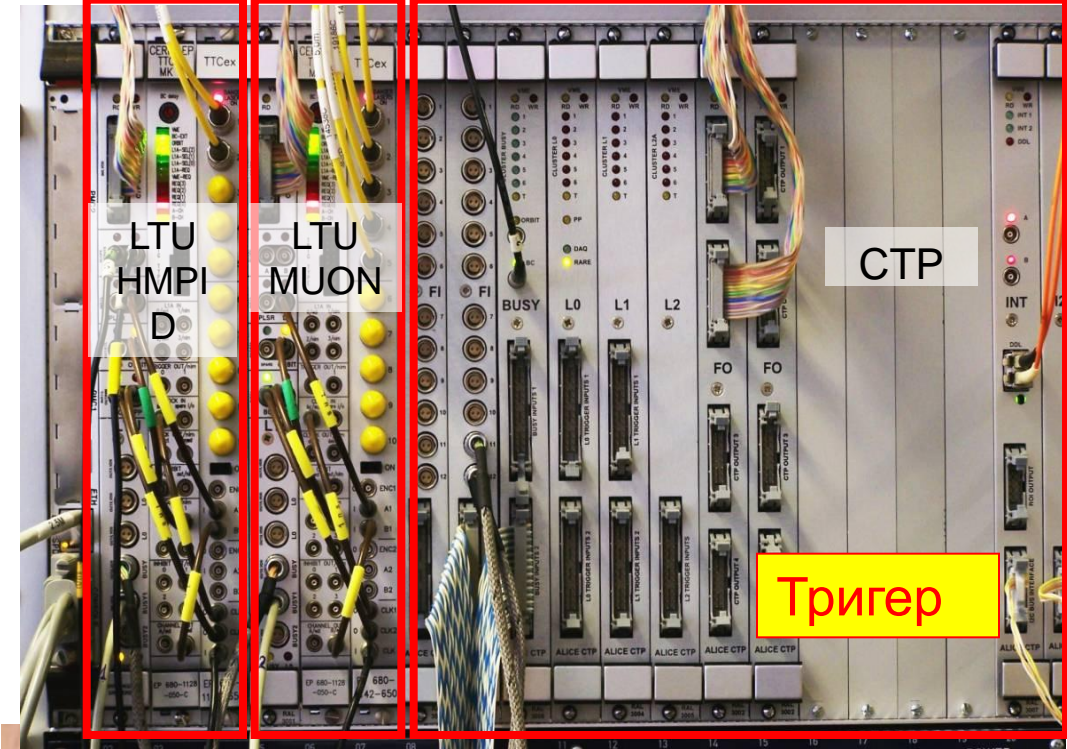
От волт към байт

- 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.



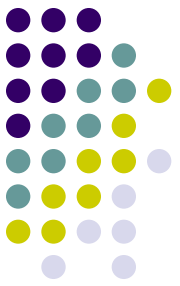


Система за събиране на данни



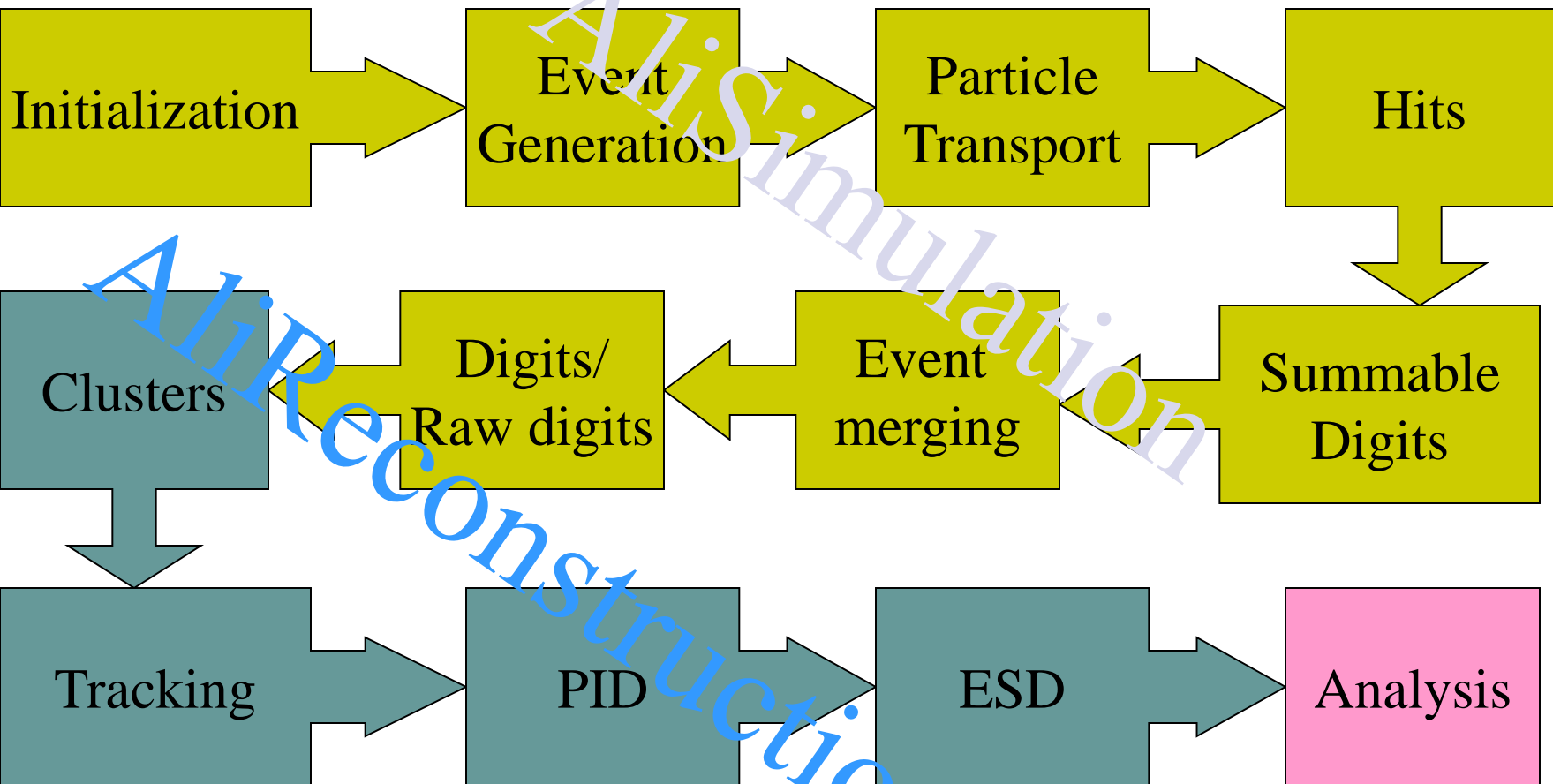
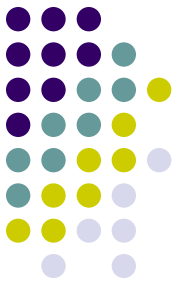
Тригер от високо ниво

Софтуер за обработка на данните: AliRoot

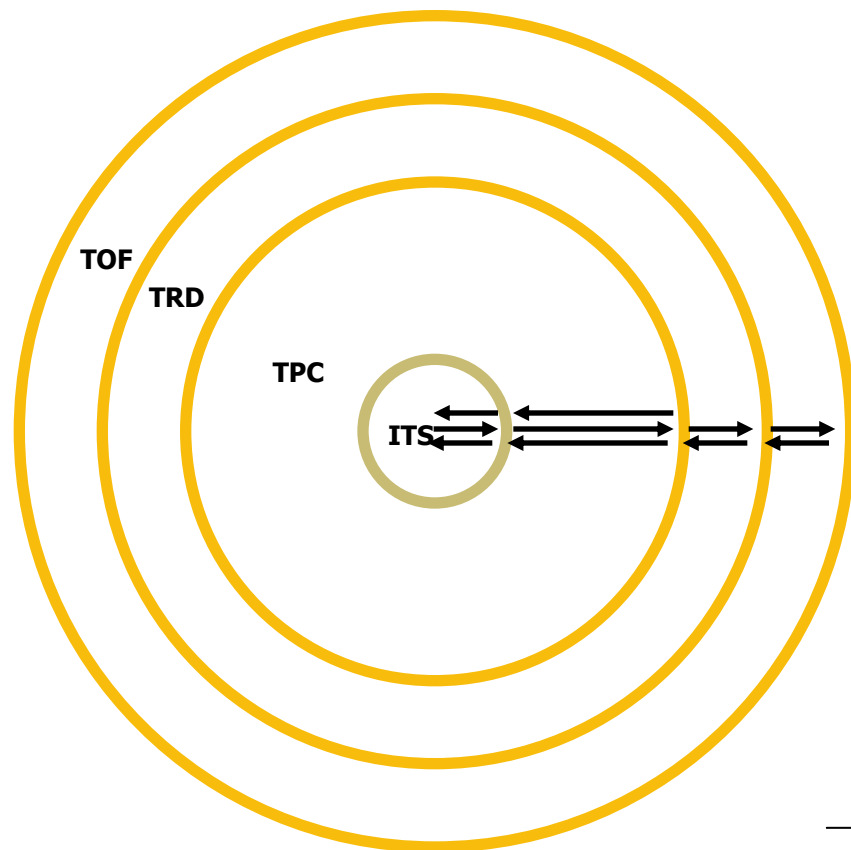


- Описание на детекторите в експеримента (геометрия, физически процеси, отклик)
- Множество генератори на събития, възможност за добавяне на нови
- Възможност за използване на различни транспортни пакети
- Устойчива IO-система
- “Удобни” класове за моделиране и реконструкция
- Ефективно разпознаване на следи в централната част и в мюонната система
- Детайлна реконструкция на неутрални частици
- Реконструкция на V0
- Комбинирана (бейсова) идентификация на частици
- ESD класове, подходящи за анализ
- Подробни примери за анализ
- Възможност за изследване на широк спектър от задачи (PbPb и pp)

ALiRoot: функционална схема



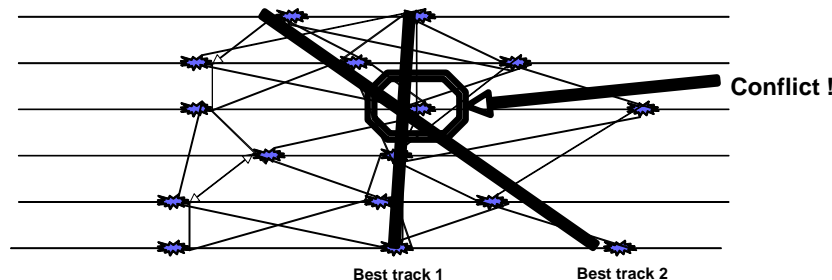
Реконструкция



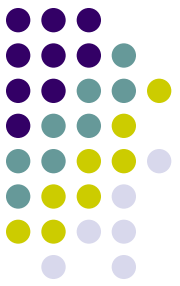
Последователен процес:
Проследяване към точката на взаимодействие
TPC \Rightarrow ITS
Проследяване в радиална посока
ITS \Rightarrow TPC \Rightarrow TRD \Rightarrow TOF
Проследяване към точката на взаимодействие
TOF \Rightarrow TRD \Rightarrow TPC \Rightarrow ITS

Постоянно добавяне на кандидати
Намиране на части от следата във всеки детектор

Комбинаторно разпознаване в ITS
Пресмятане на χ^2 за две следи
Вероятност за общи кластери
Вероятност вторичните частици да не стигнат до даден слой



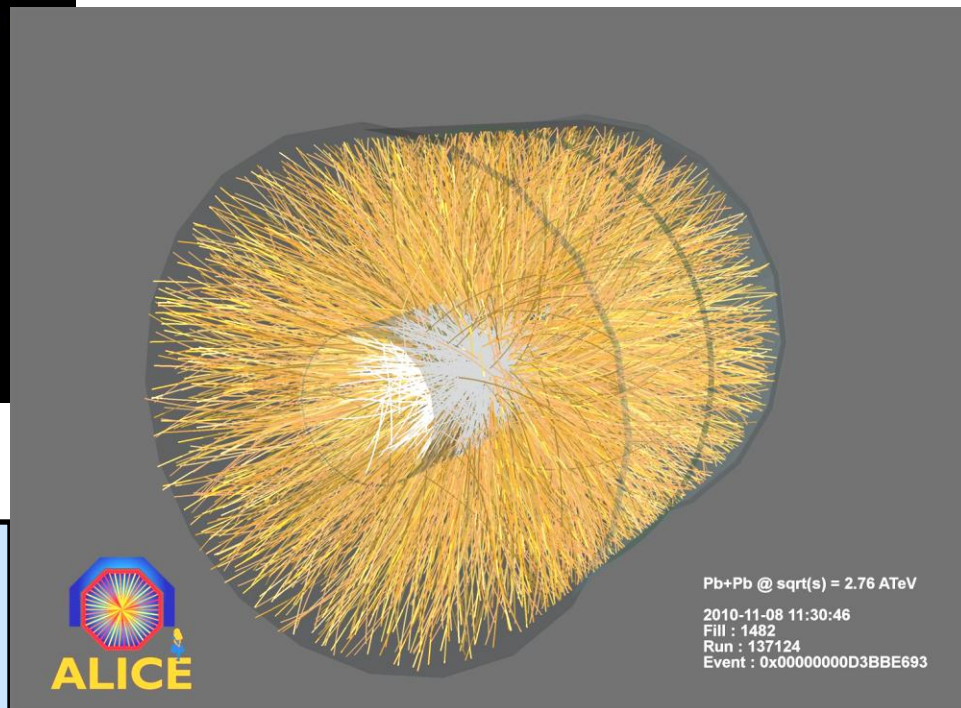
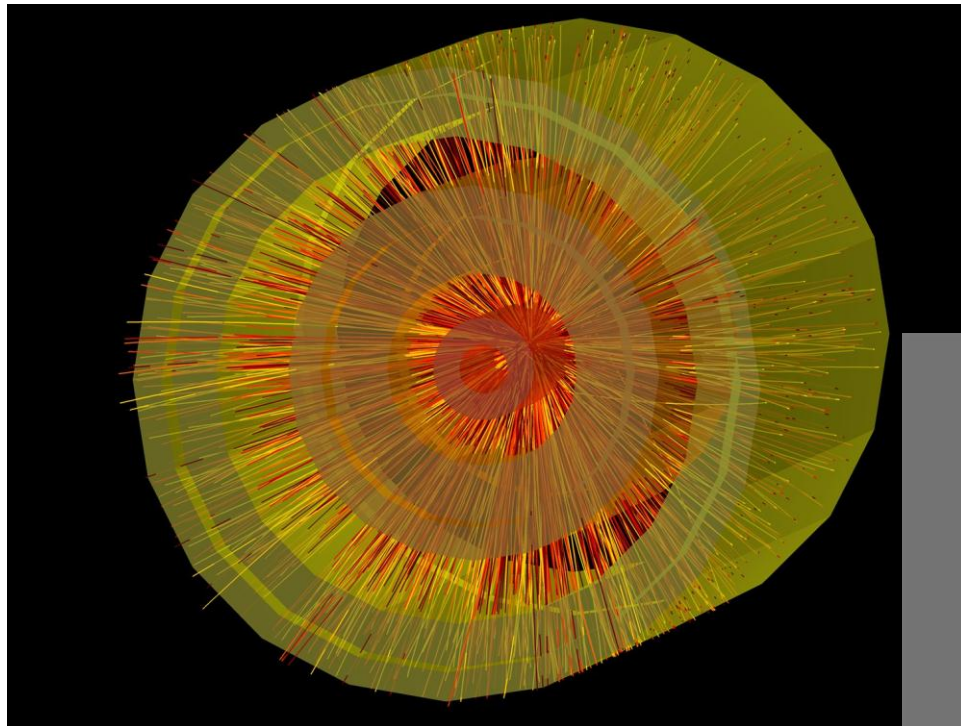
Какви са
резултатите?



Събития

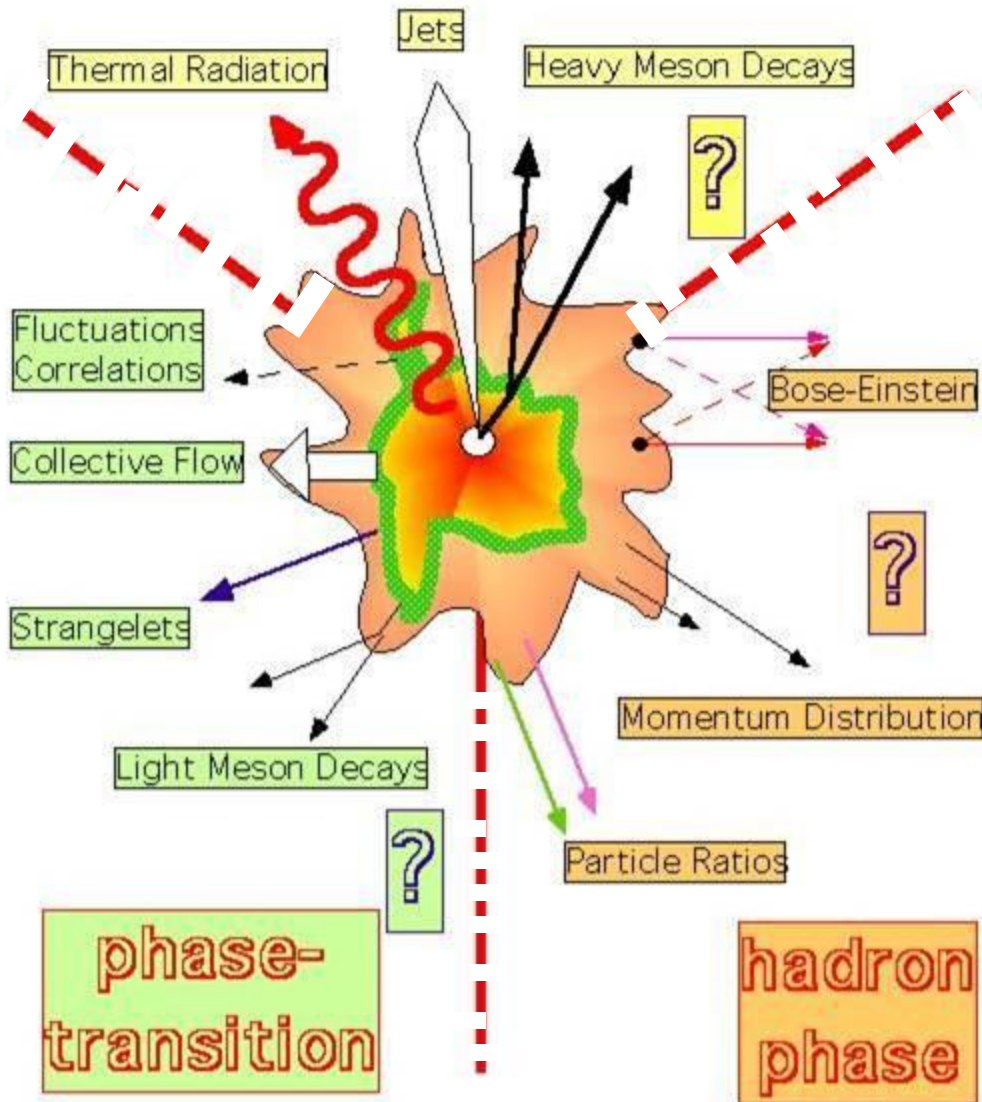


Първи олово-оловни събития при 2.76 TeV на нуклон



Ноември 2010
Над 50 милиона набрани събития
Ноември 2011
Още над 150 милиона събития

QGP



“Мека” физика

- Засилено раждане на странност: $\Omega, \Xi, \Lambda, \Sigma$
- Кинематични спектри: $p_T, dN/dy, dE_T/dy$
- Форма и положение на резонанси: ρ, ω, ϕ, K^*

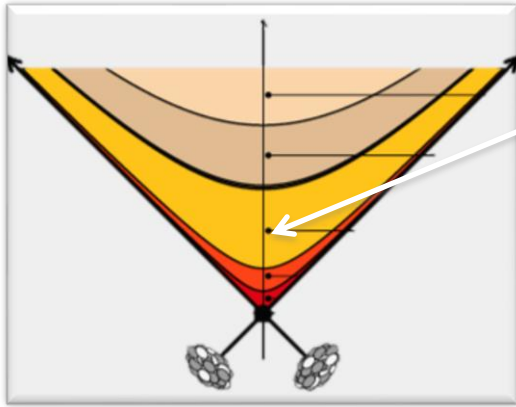
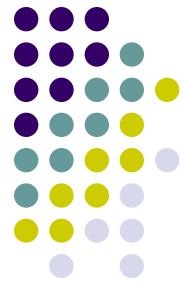
Тежки кварки & $c\bar{c}, b\bar{b}$ -резонанси

- Намалено раждане на $J/\psi, \psi_c, \Upsilon$

“Твърди” проби

- Модифицирани струи
- Електромагнитни сигнали: γ, e^+e^-

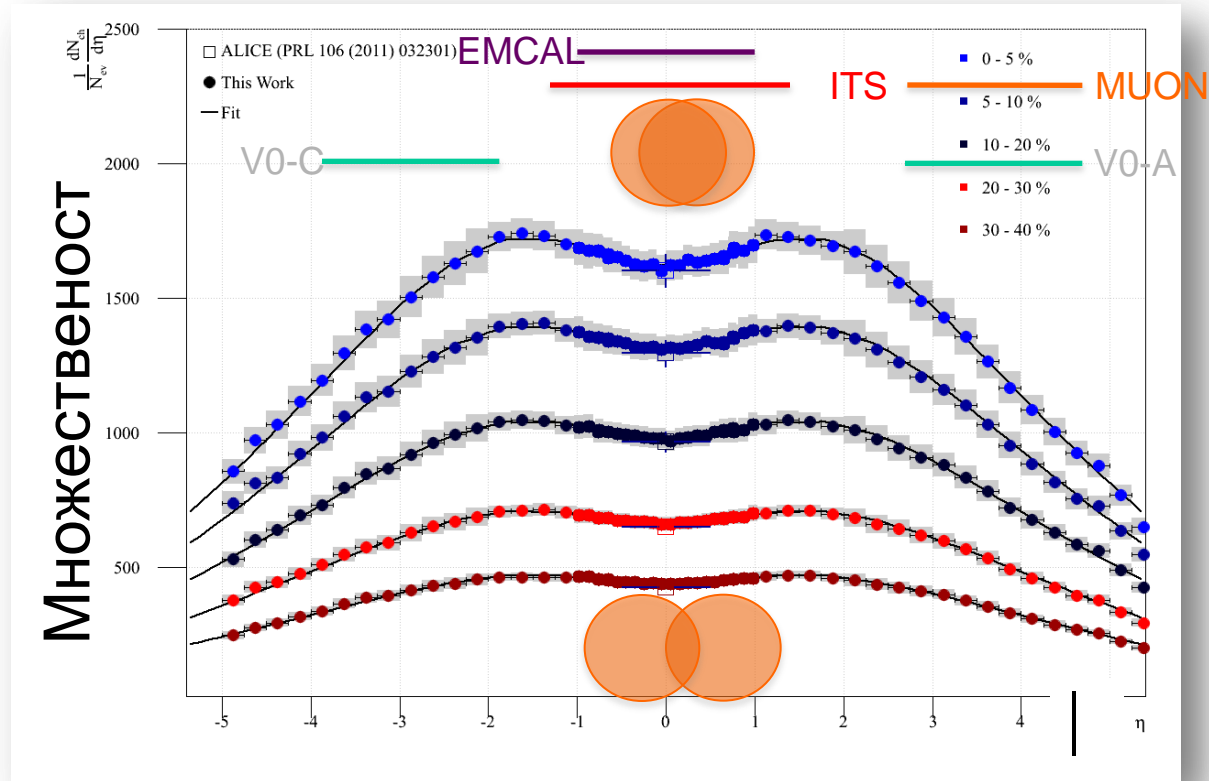
Термализирана партонна фаза



$$\delta N_{ch}/\delta|\eta|_{\eta=0} = 1600 \pm 76$$

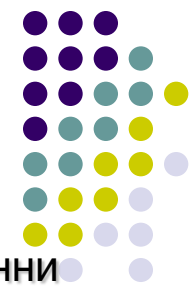
$\Sigma > 10 \text{ GeV}/\text{fm}^3$
 $T > 3 T_c$

Повече от достатъчно
 за деконфайнмент!



“Класически сигнали”

Странност @ SPS, RHIC, LHC



- Образуването на КГП се очаква да предизвика разширено раждане на странични частици (Rafelsky, 1982) поради:
 - Принципа на Паули (има малко свободни състояния за u,d кварки)
 - Намаляване масата на s кварките

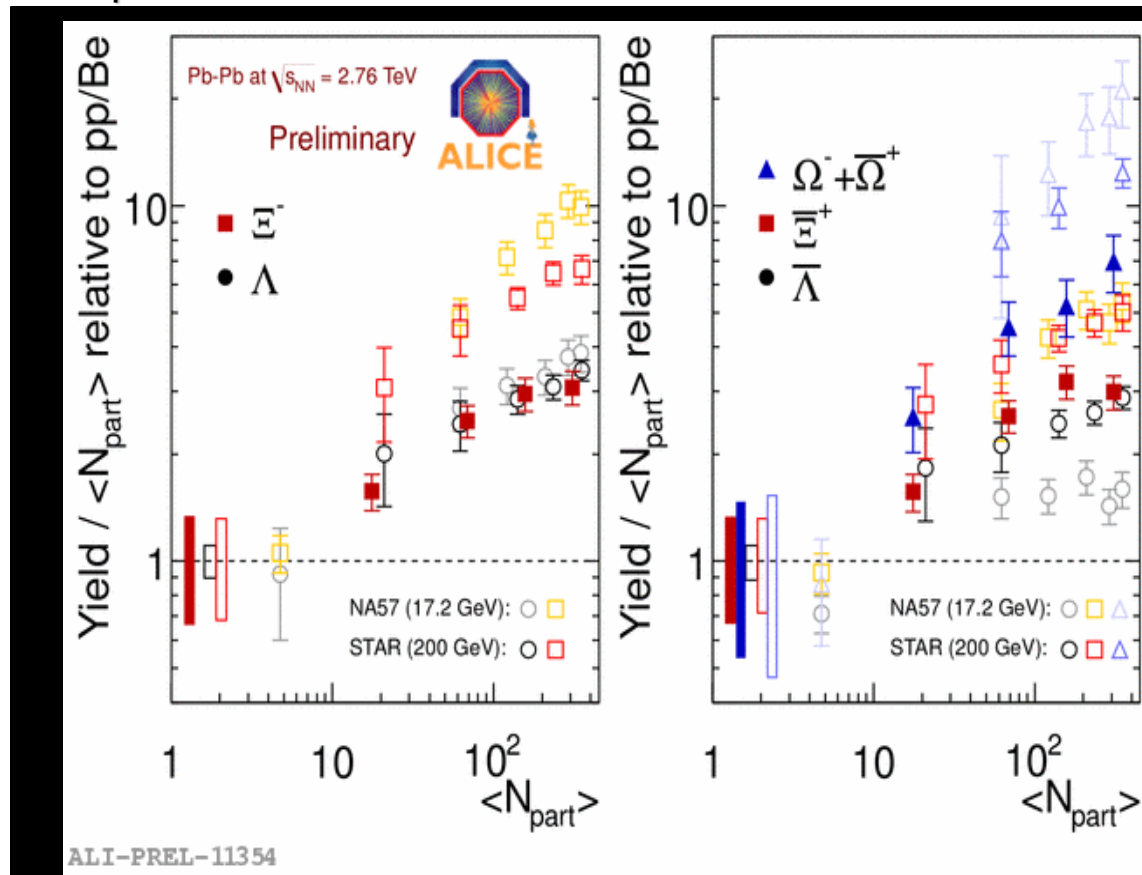
Изследвани са следните канали на разпад (и съответните канали за античастиците)

$$\Lambda \rightarrow \pi p$$

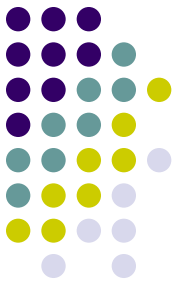
$$\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^- \text{ (with } \Lambda \rightarrow \pi p \text{)}$$

$$\Omega^- \rightarrow \Lambda K^- \text{ (with } \Lambda \rightarrow \pi p \text{)}$$

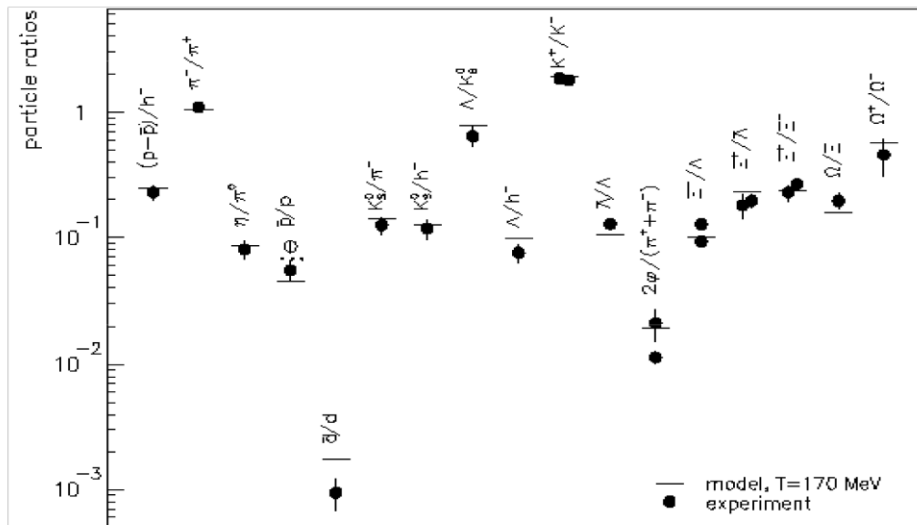
Използвани са кинематични критерии



Химическо равновесие



Отношенията на средния брой частици от даден тип родени в АА-сблъсък могат да се апроксимират с термодимично разпределение. Два параметъра: температура T и химически потенциал μ



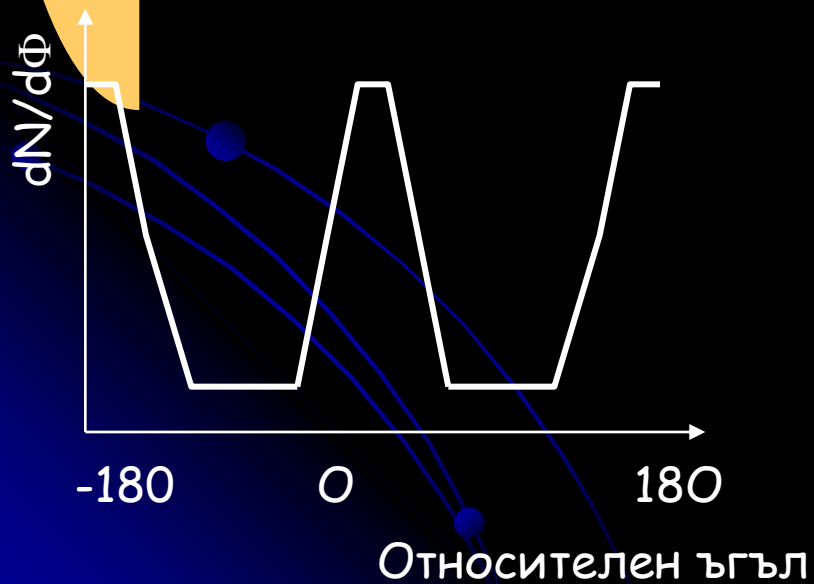
Указание за статистическа адронизация на независими кварки

“Химическо замразяване”
момент, в който спират
нееластичните
взаимодействия

FIG. 3. Comparison between model and experimental particle ratios. Errors are statistical.

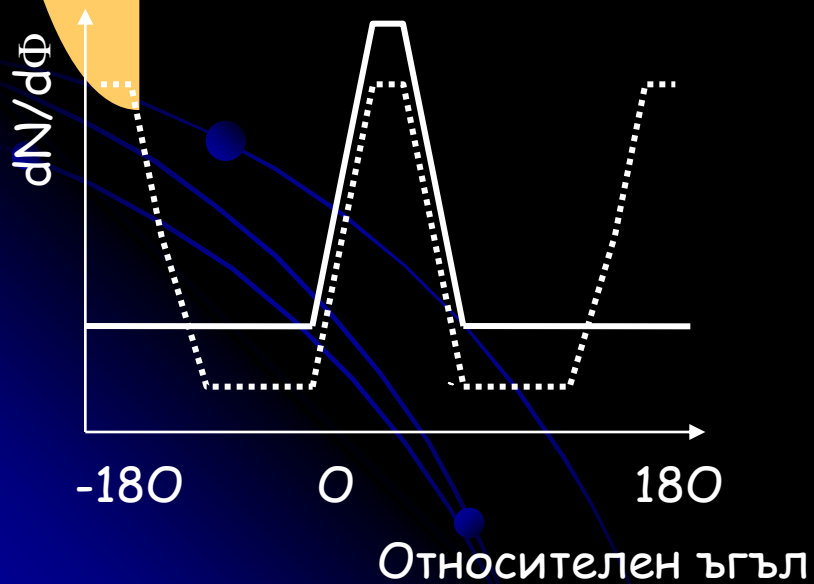
Загуба на енергия от адронни струи

1. Обикновено вещество

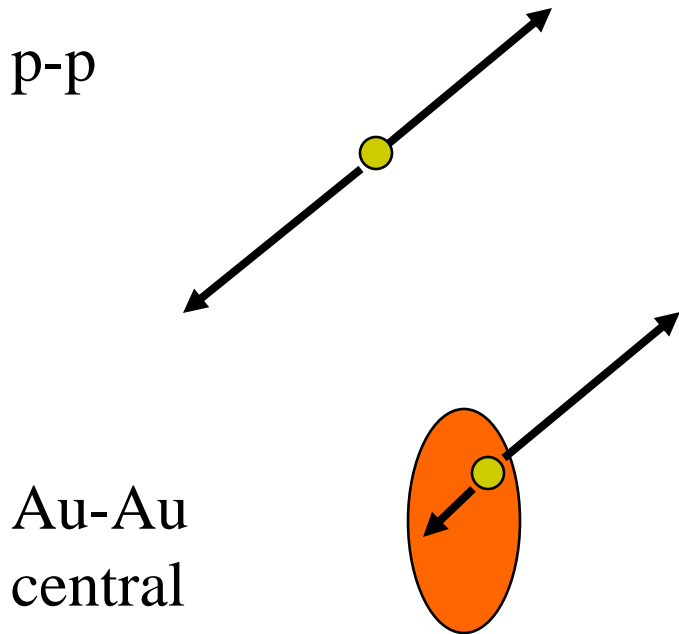
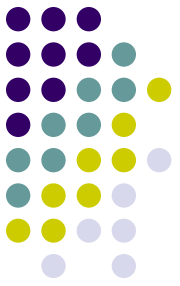


Загуба на енергия от адронни струи

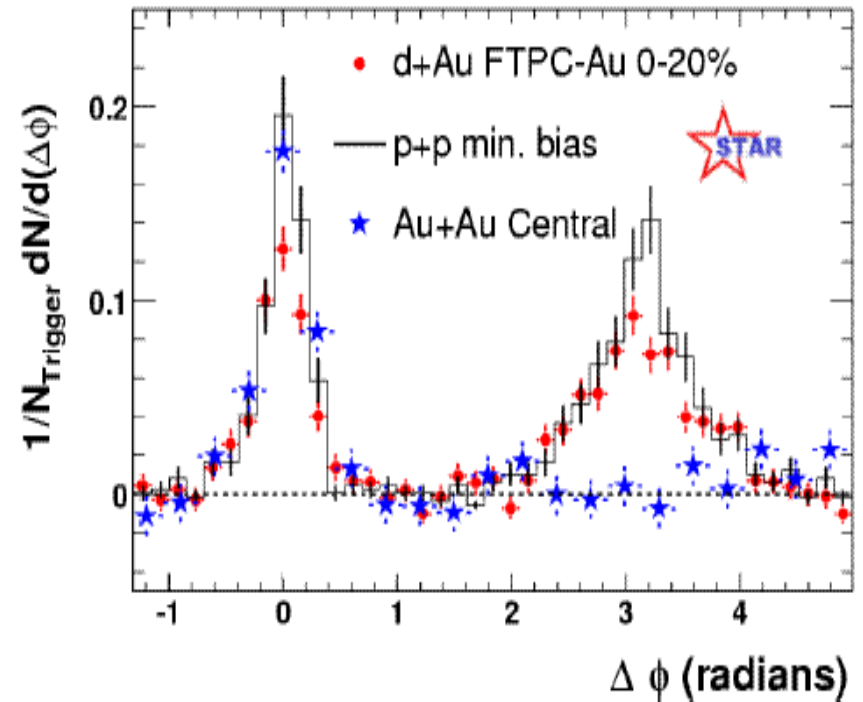
2. Кварково вещество



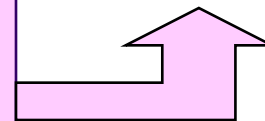
Азимутална корелация



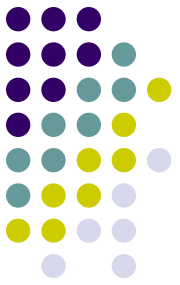
Phys. Rev. Lett. 91, 072304 (2003).



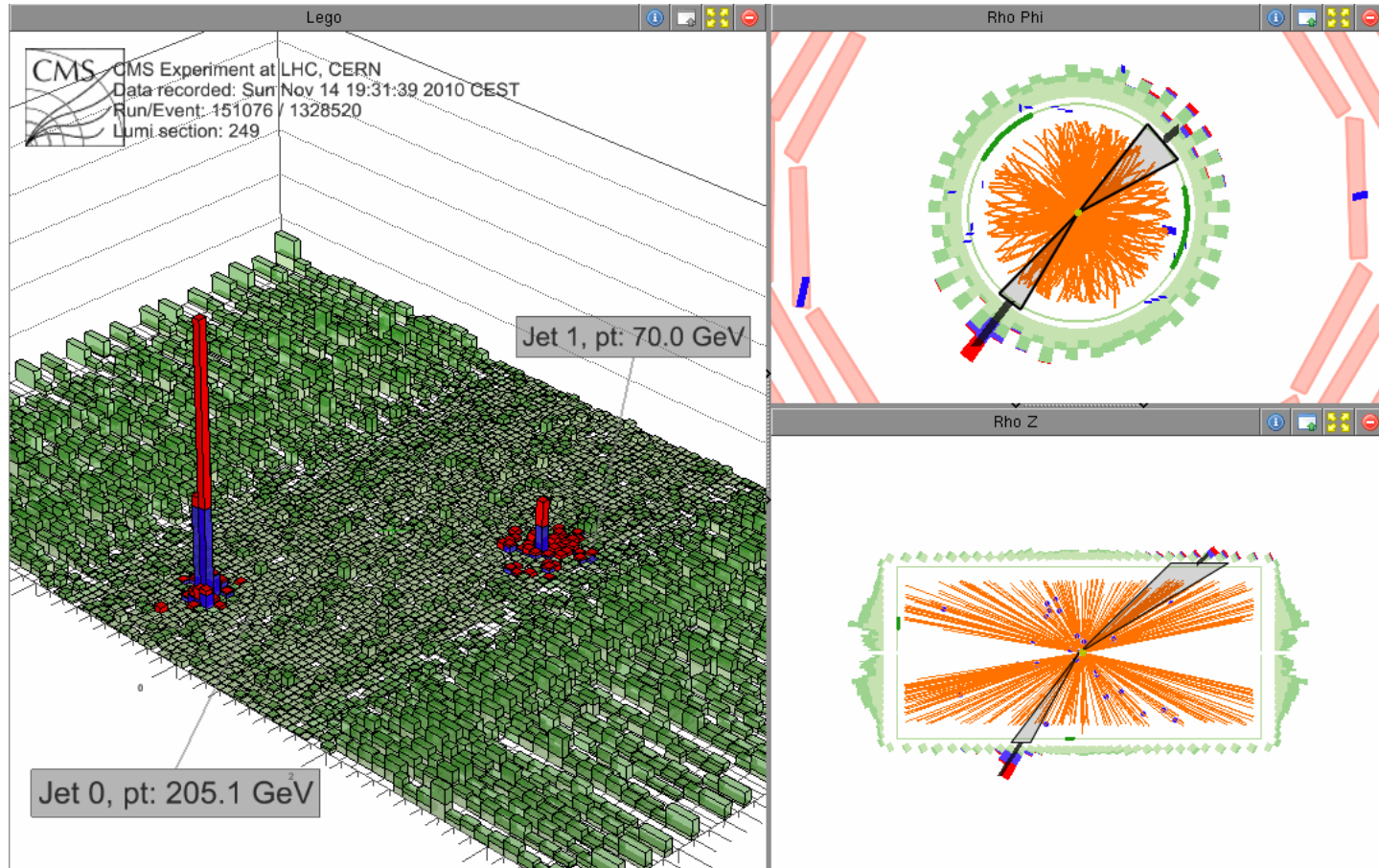
Струята-партньор може да загуби много енергия \rightarrow азимуталната корелация се размива



Резултати от LHC



Pb-Pb събитие с голяма енергетическа асиметрия

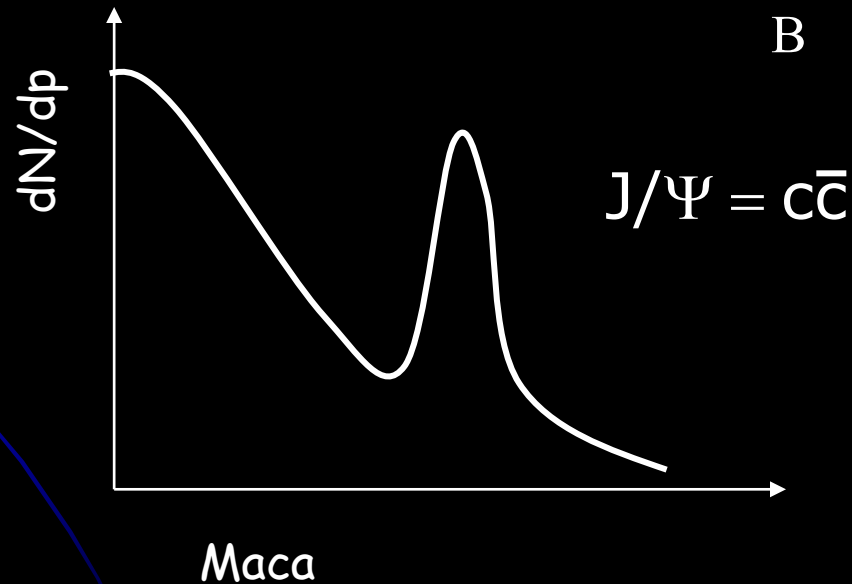
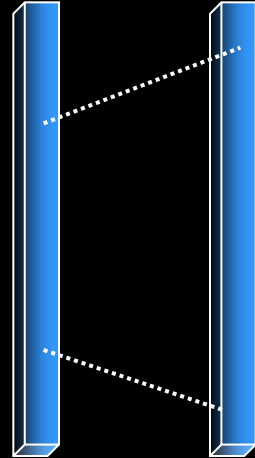
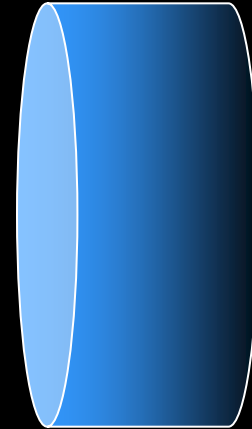
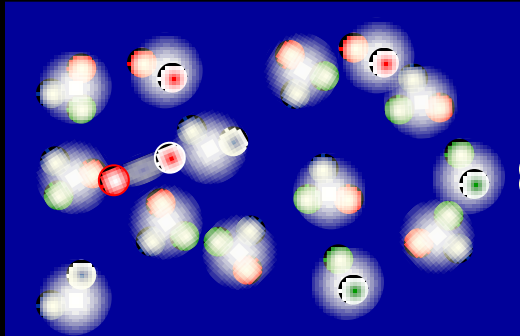


CMS: arXiv:1102.1957

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

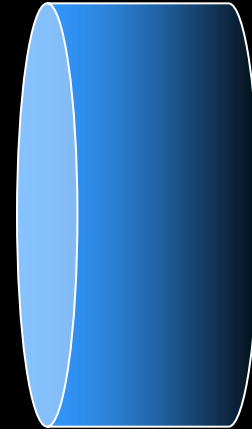
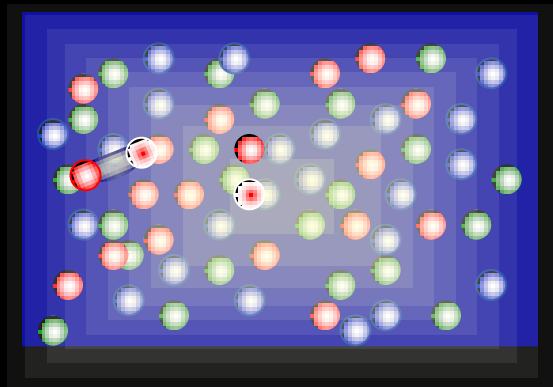
"Изчезване" на резонанси с тежки кварки

1. Обикновена материя

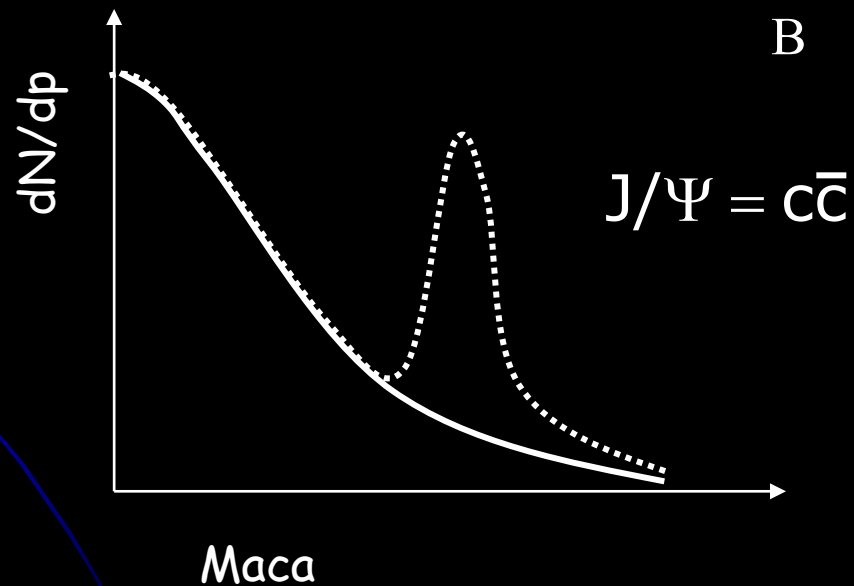


"Ичезване" на резонанси с тежки кварки

2. Кваркова материя



B

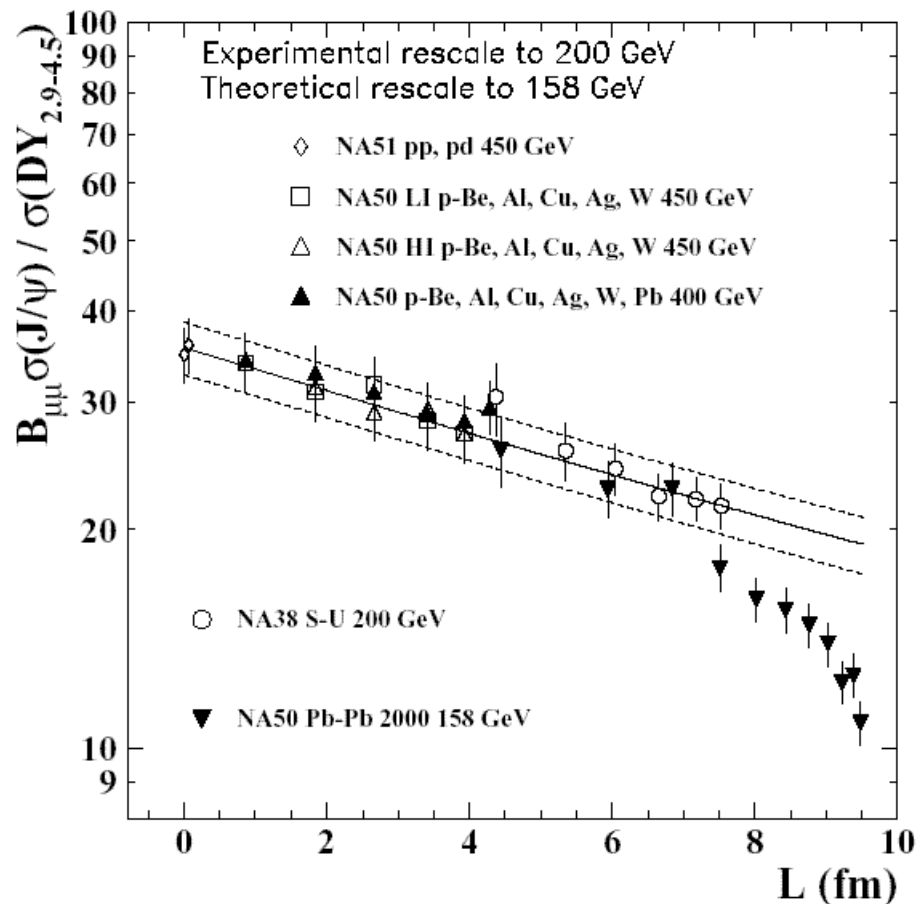
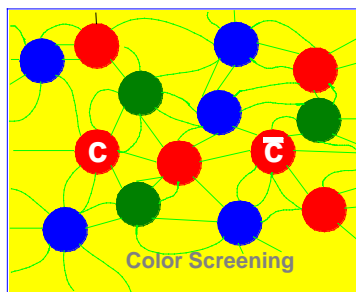


“Нормално” поглъщане на J/ψ : SPS

- В p-p, S-U и периферни Pb-Pb събития:

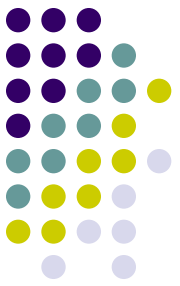
$$\frac{\sigma(J/\psi)}{\sigma(DY)} \propto e^{-\rho\sigma_{cc}L}$$

- L - среден път, изминат от c-c_{bar} в ядрената материя
- Този ефект на поглъщане съществува в p-A и не е резултат на КГП!!

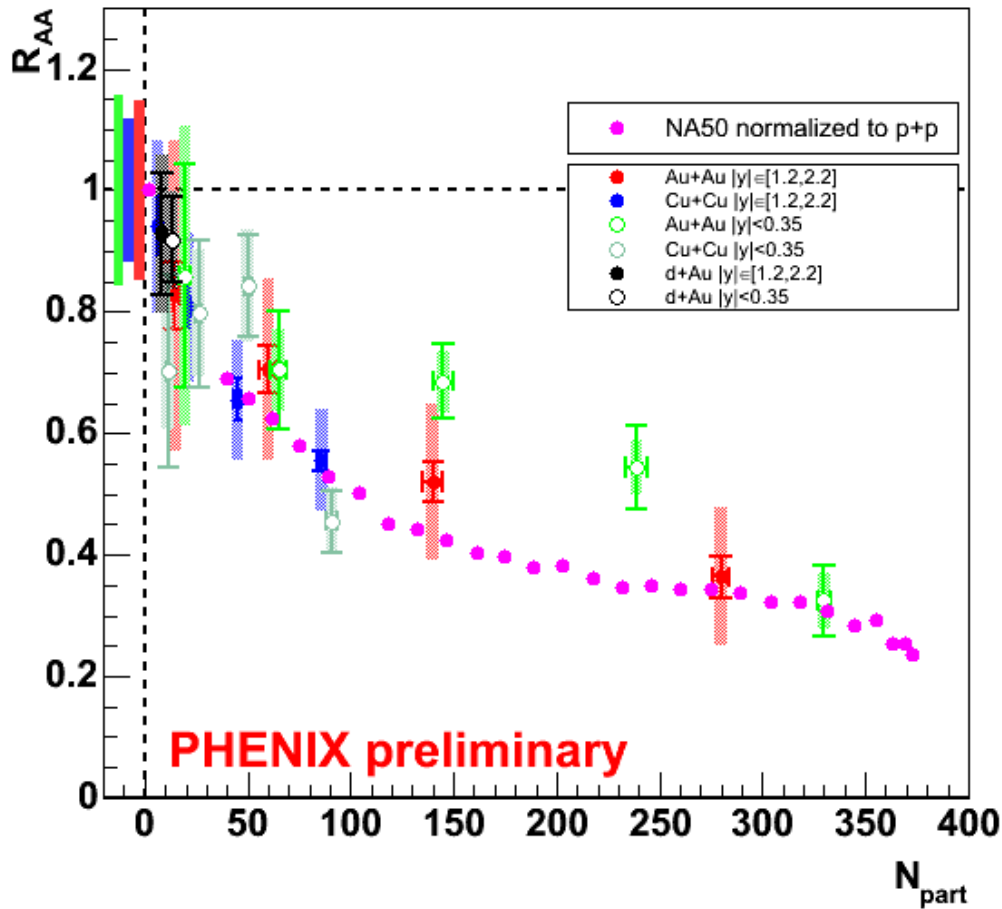


Ясно отклонение от кривата на нормално поглъщане при $L \approx 8$ fm (централни Pb-Pb събития)

Поглъщане на J/ψ @ RHIC



J/ψ nuclear modification factor R_{AA}



J/ψ ~ подобно на
результатите от SPS (NA50)

[Hugo Pereira (PHENIX), QM05]

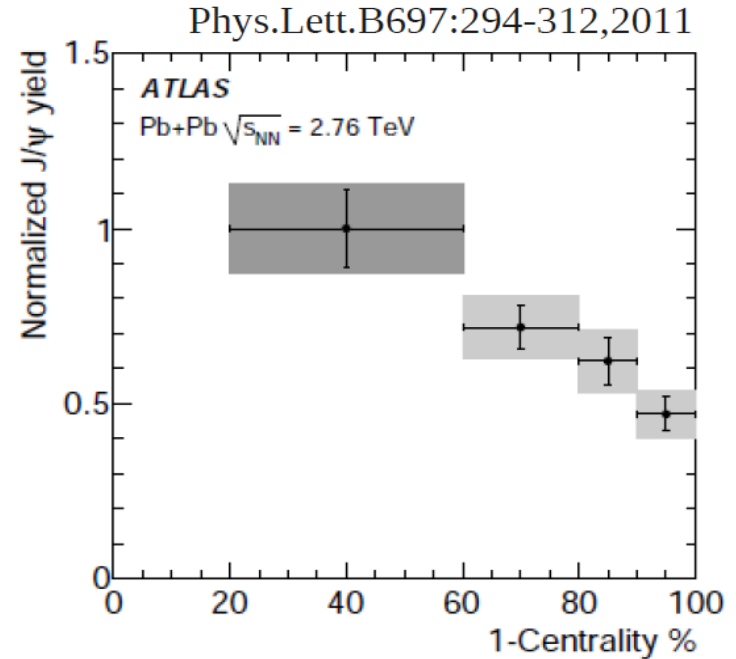
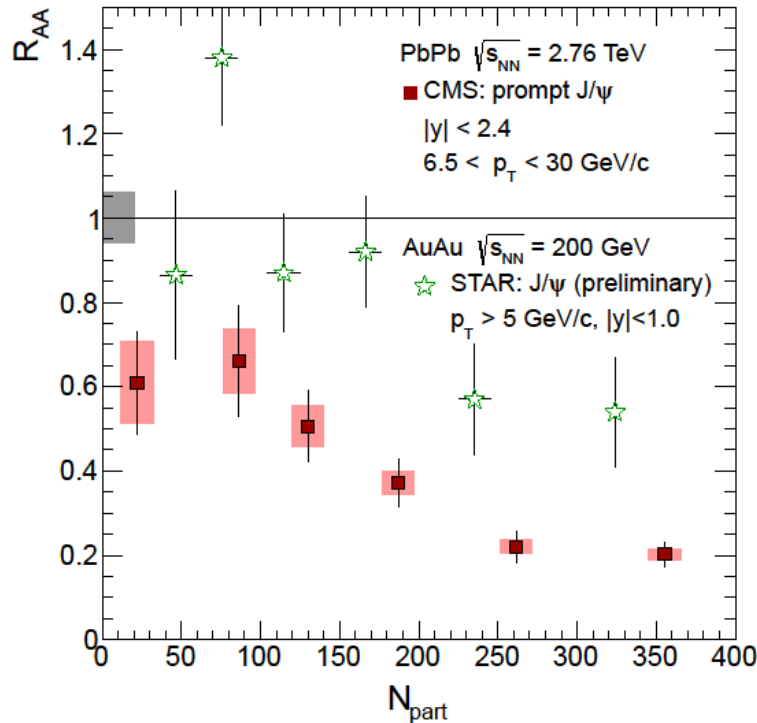
J/ψ @ LHC: високи p_T



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

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

prompt J/ψ



CMS: arXiv:1201.5069

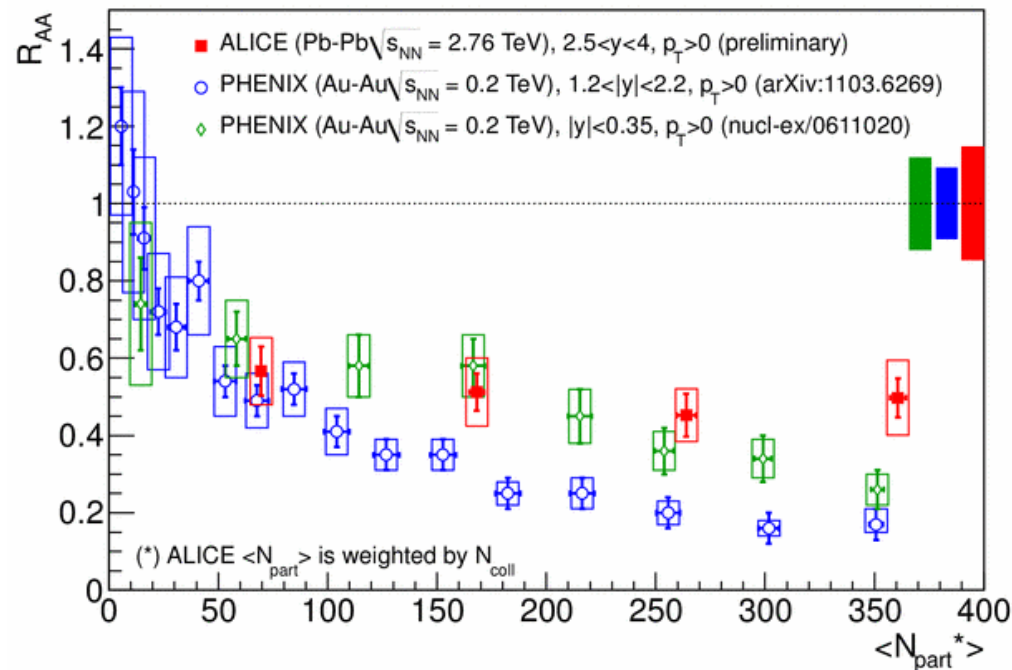
ATLAS: PLB 697 (2011) 294

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

J/ψ @ LHC: малки p_T



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



→ по-малко поглъщане сравнено с

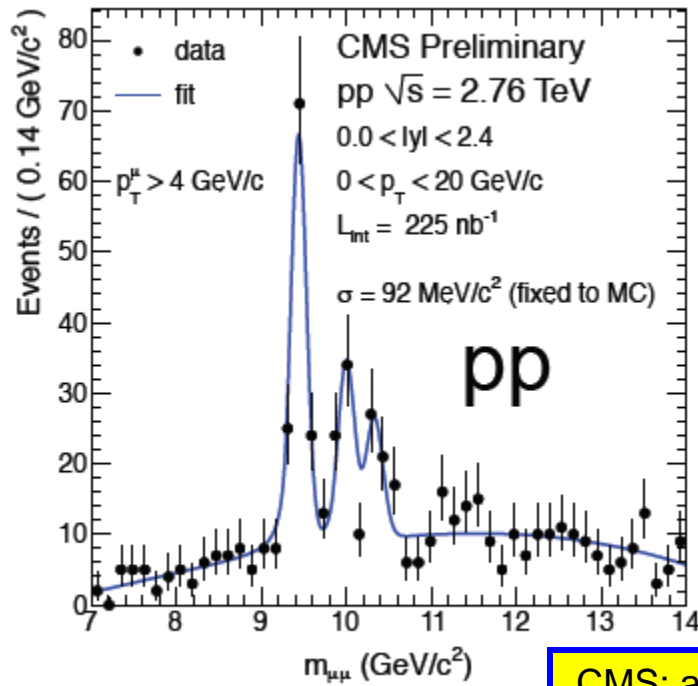
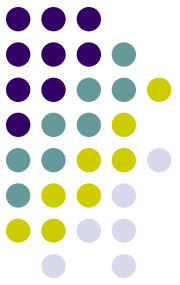
RHIC: $1.2 < y < 2.2, p_T > 0$ (PHENIX)

→ ~ подобно поглъщане

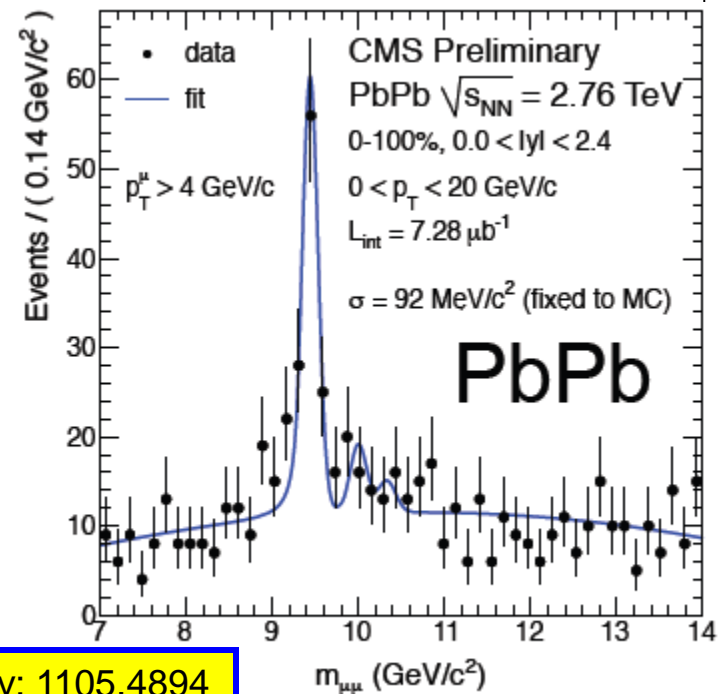
RHIC: $|y| < 0.35, p_T > 0$ (PHENIX)

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

$\Upsilon(2S+3S)$ поглъщане!



CMS: arXiv: 1105.4894



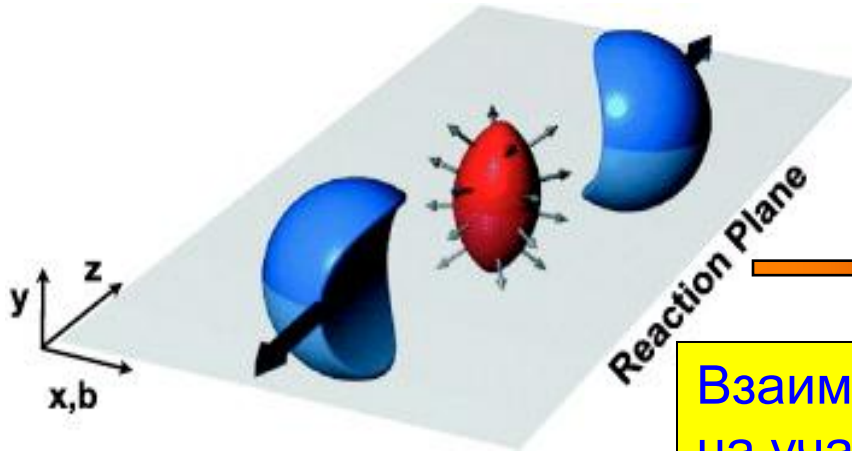
усилено поглъщане на $\Upsilon(2S+3S)$ сравнено с $\Upsilon(1S)$?

Азимутален поток от частици

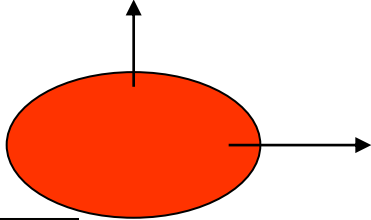


Начална пространствена анизотропия

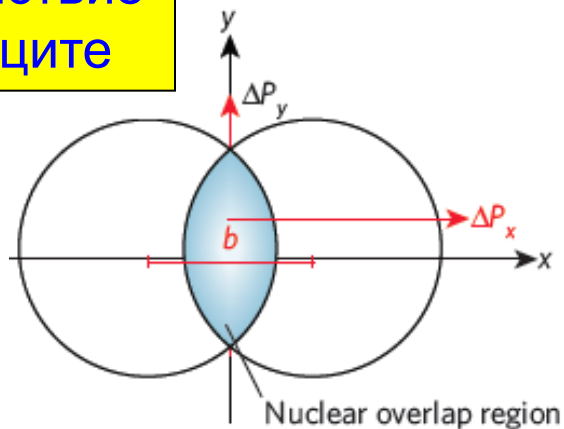
Крайна анизотропия на импулсите



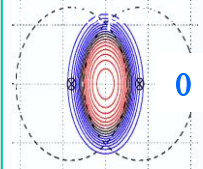
Взаимодействие на участниците



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



хидродинамика



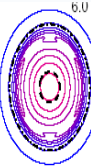
IC 1



2



4



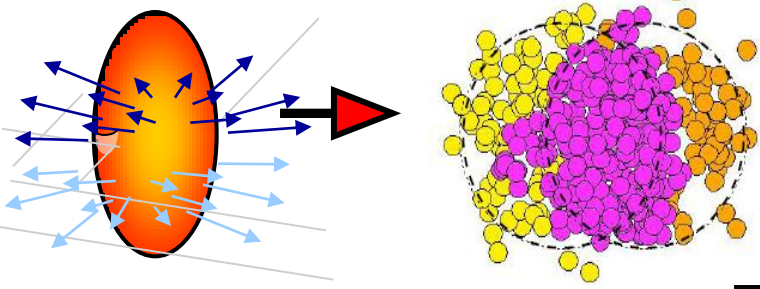
6



8

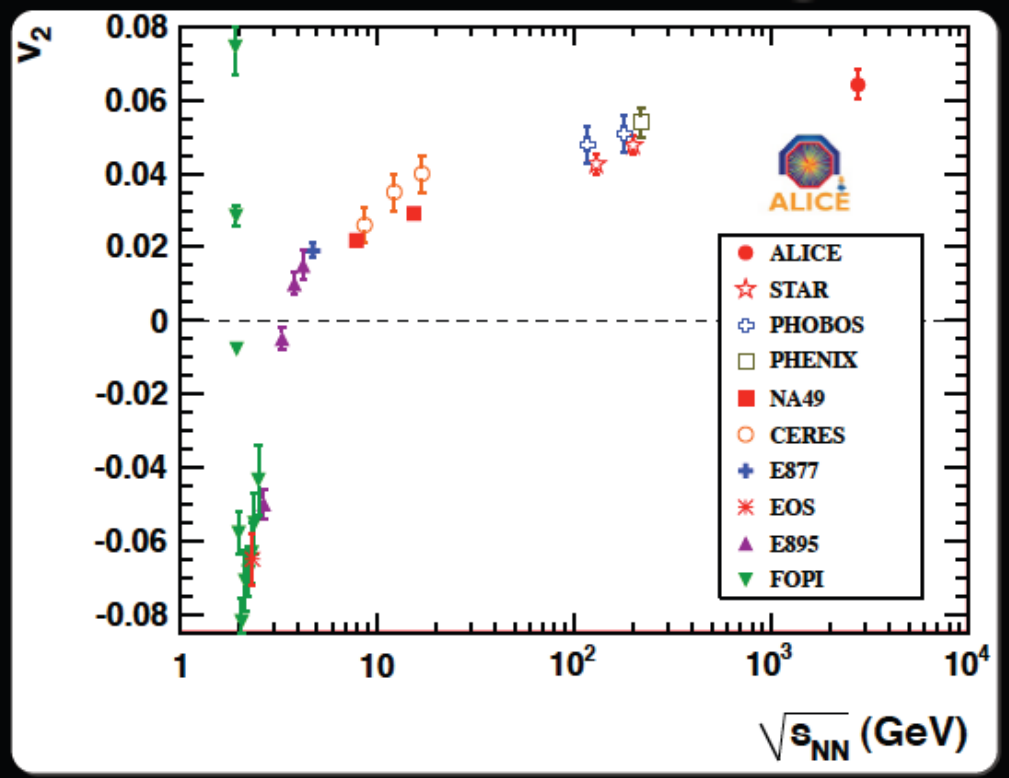
fm/
c

Азимутален поток на заредени 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)

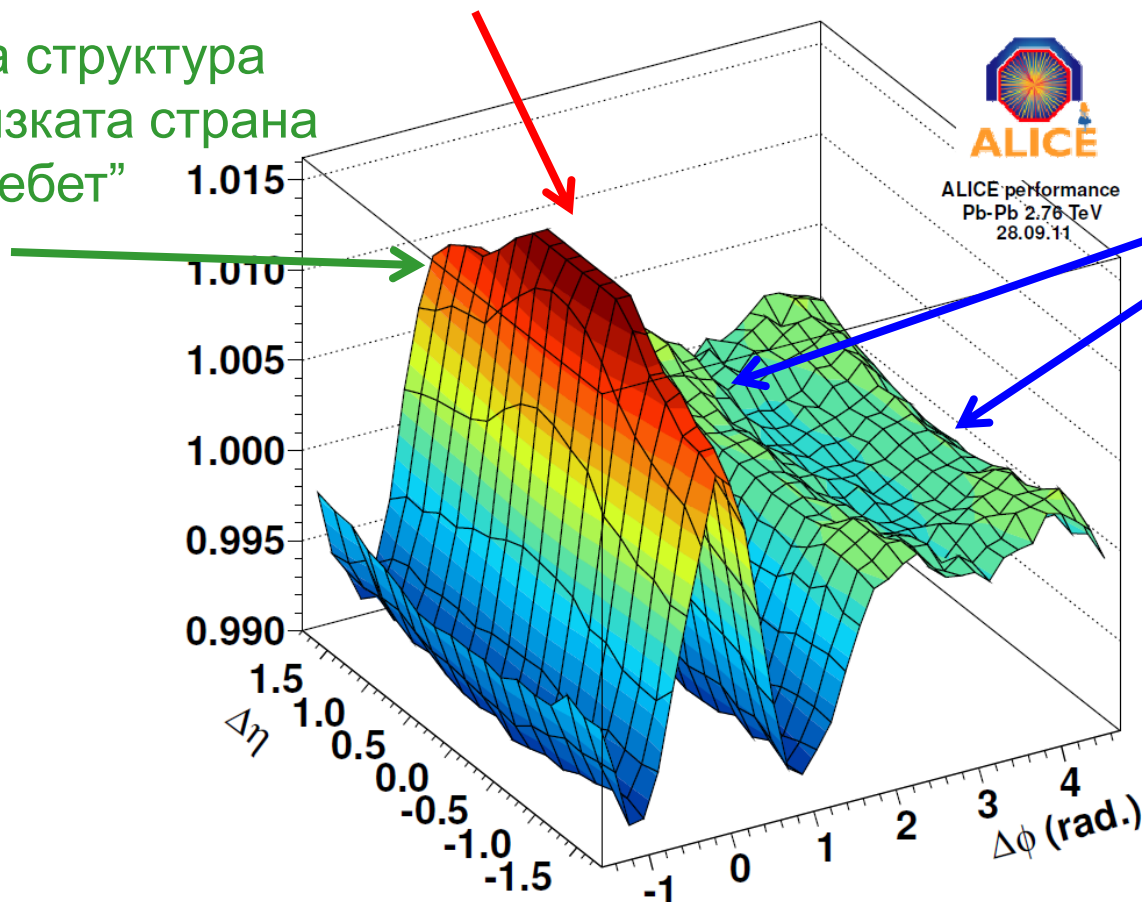
The system produced at the LHC behaves as a very low viscosity fluid (a perfect fluid)

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



пик от адронни струи

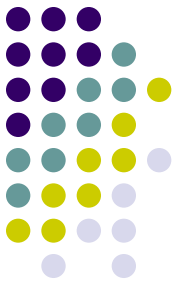
удължена структура
по η от близката страна
“хребет”



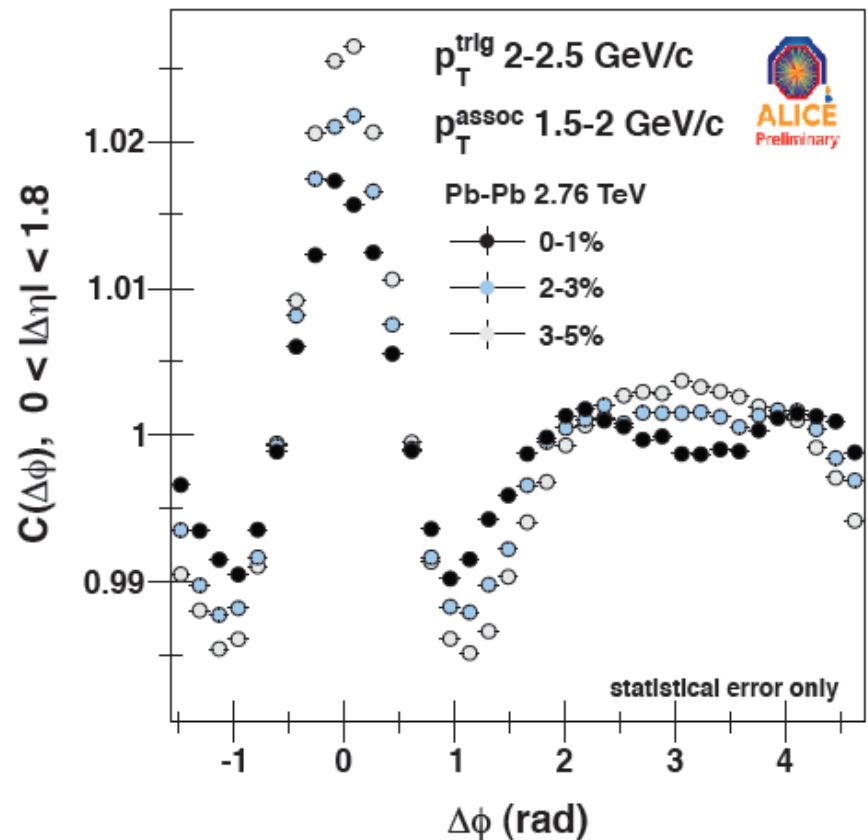
две “рамена” от
далечната страна
(на 120° и 240°)
“конус на Мах”

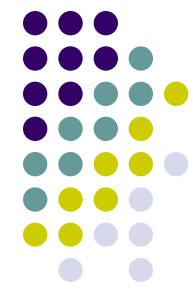


Резултати: азимутална корелация

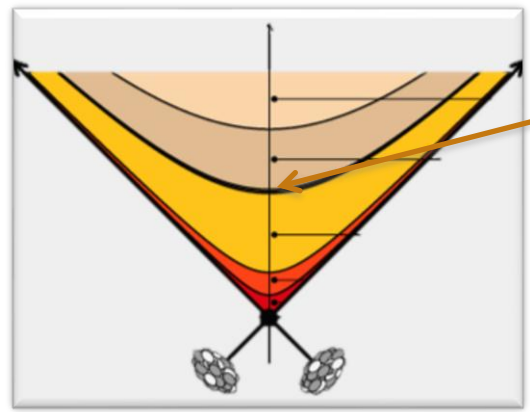


- Наблюдава се не само размиване на 'класическата' азимутална корелация, но и появата на ансамбъл от корелации от по-висок порядък
- Данните са изследвани с помощта на Фурие-разлагане
- Нечетни ненулеви компоненти – резултат от **флуктуации на плътността**
- Първите 5 компоненти са достатъчни да опишат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



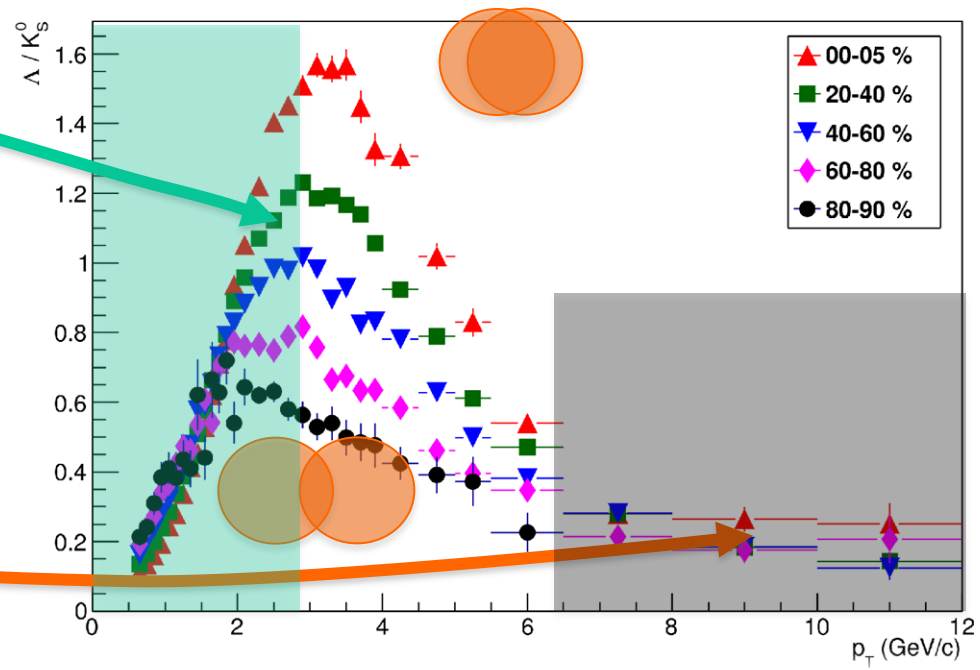


Адронизация

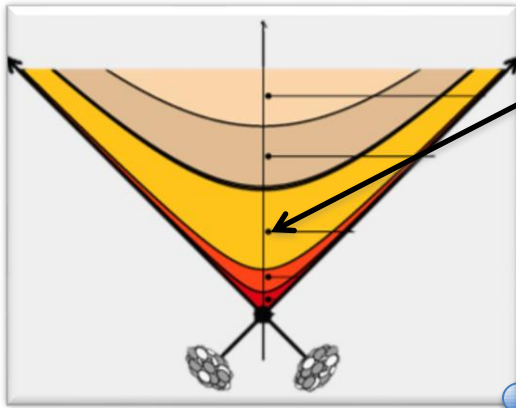
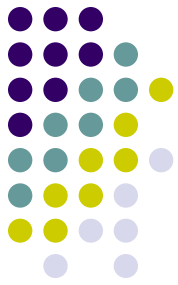


Аномалия барион/мезон
много повече барионы в PbPb
в сравнение с e+e- на LEP

- Радиален поток
- Фрагментация
- Коалесценция (?)

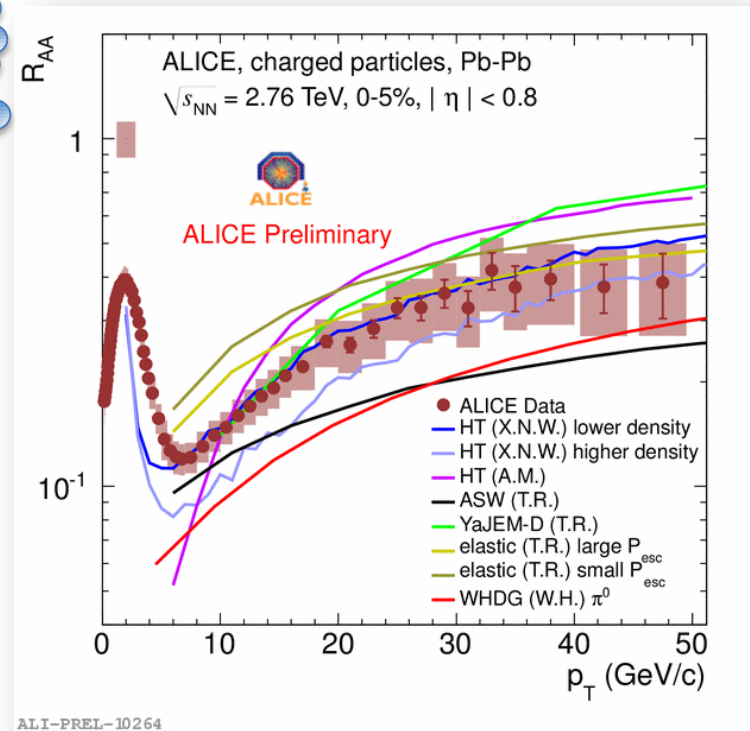
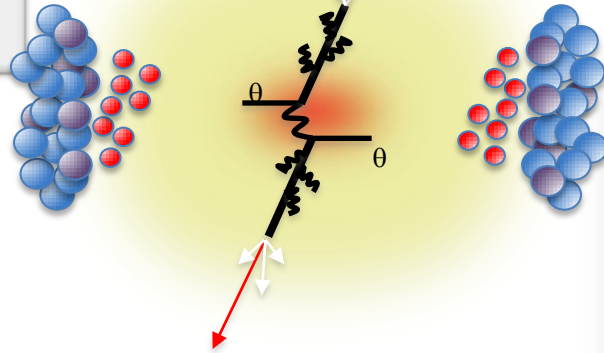


Динамика на партоните в КГП

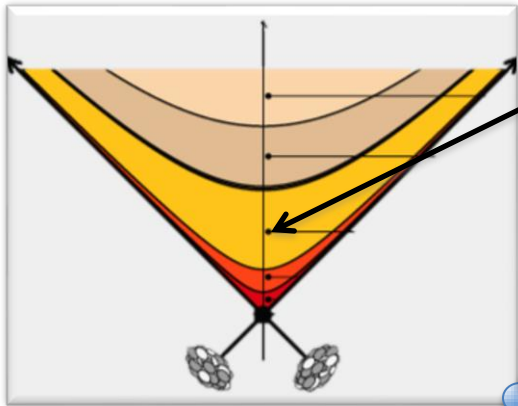


Загуба на енергия

- механизъм (радиация, сблъсък)?
- термализация ?

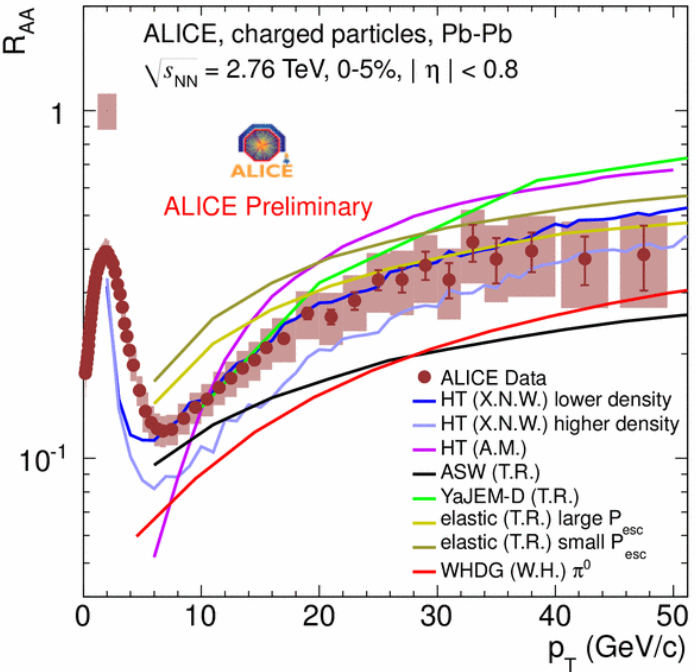
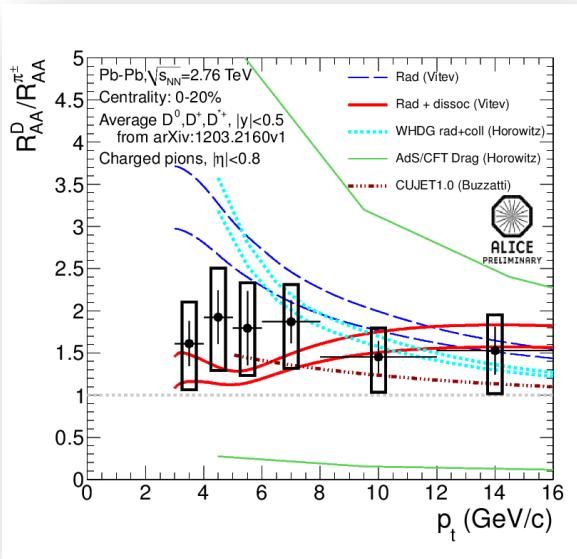
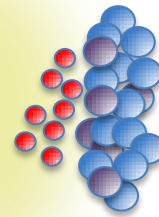
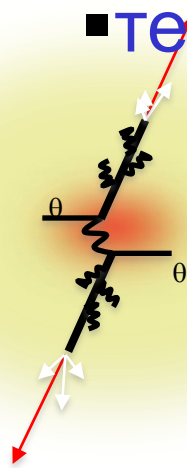
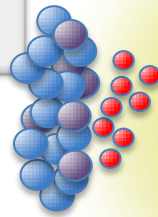


Динамика на партоните в КГП



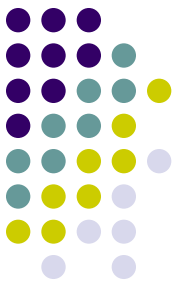
Загуба на енергия

- механизъм (радиация, сблъсък)?
- термализация ?



ALI-PREL-10264

Заклучение



- Изследвания преди и на SPS: странност, поглъщане на J/ψ и др. => 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”, “твърдите” процеси и точните измервания