

The Main LHC Experiments

Jovan Milošević and Damir Devetak
University of Belgrade, Faculty of Physics
and
Vinča Institute of Nuclear Sciences

Главни Експерименти на LHC-y

Јован Милошевић и Дамир Деветак
Универзитет у Београду, Физички
Факултет и ИНН "Винча"

LHC експерименти

Постоје 3 мала експеримента на LHC-у:

- ❖ TOTEM-детектори симетрично постављени у односу на CMS (еластично расејање протона)
- ❖ LHCf-детектори симетрично постављени у односу на ATLAS (космички зраци у лабораторијским условима)
- ❖ MoEDAL-детектори смештени близу LHCb (магнетни монополи и стабилне масивне честице)

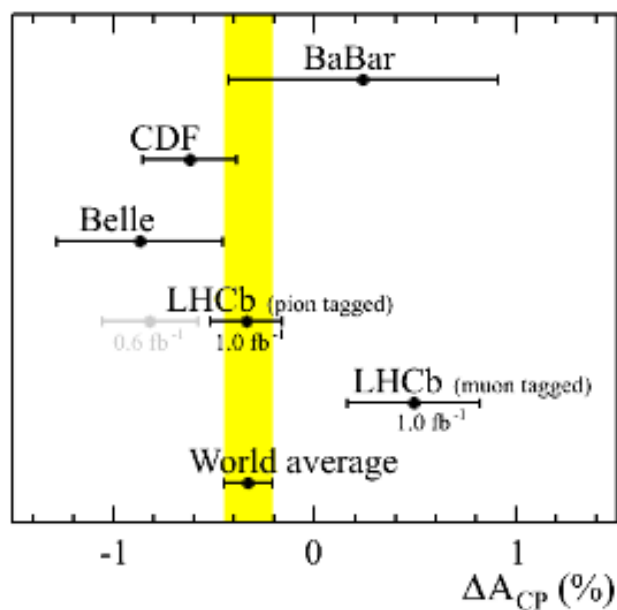
и 4 велика експеримента:

- ❖ LHCb-дизајниран да изучава разлику између материје и антиматерије проучавањем b кварка
- ❖ ALICE-дизајниран да изучава јако интерагујућу материју под екстремним условима
- ❖ ATLAS-детектор опште намене
- ❖ CMS-детектор опште намене

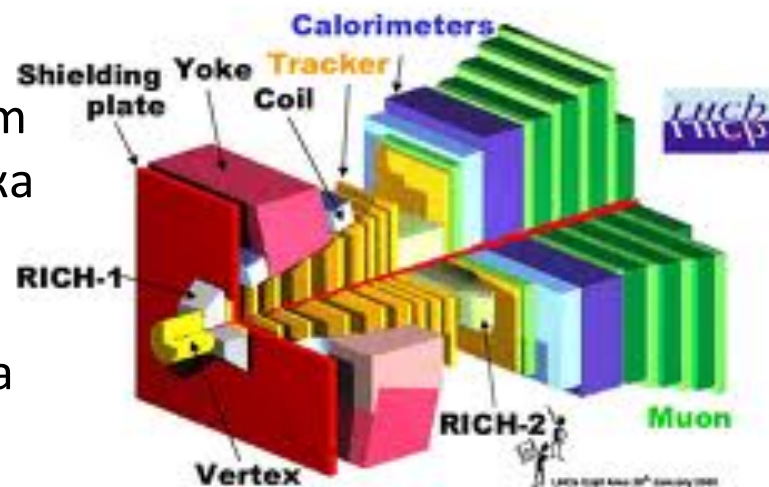


LHCb

- ❖ LHCb трага за одговором на питање зашто живимо у Васељени која је углавном изграђена од материје а не од антиматерије
- ❖ Уместо цилиндричне структуре око тачке судара, LHCb чини систем за детекцију честица емитованих у тзв. предњој области



маса: 4500t
 дужина: 20m
 820 научника
 из 62
 институције
 и 17 земаља

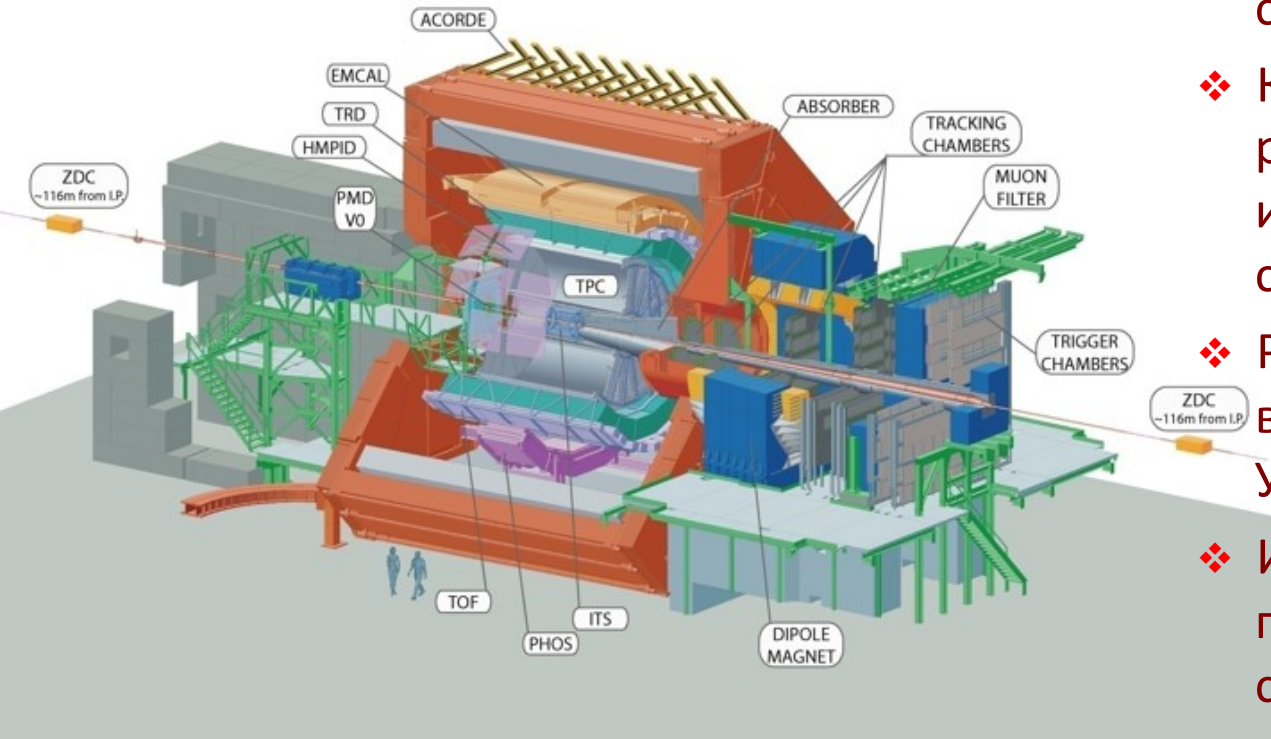




ALICE

A Large Ion Collider Experiment

маса: 10000t дужина: 26m пречник: 16m
Преко 1200 чланова из 132 институције и 36 земаља



- ❖ Дизајниран за изучавање јако интерагујуће материје при екстремним густинама енергије насталим у ултарелативистичким сударима тешких јона
- ❖ Кварк-глуонска плазма и разумевање confinement-а и рестаурације киралне симетрије
- ❖ Рекреира стање материје из веома ране фазе развоја Универзума
- ❖ Изучава и pp сударе првенствено због поређења са сударима тешких јона

TPC је главни ALICE детектор. Честице које настају у судару пролазећи кроз TPC јонизују дрифтни гас. Електростатичко поље присиљава настале електроне и јоне да се крећу ка цилиндричним плочама где стварају сигнал који се 'ишчитава' помоћу 570132 'рад-ова'. TPC је смештен у маг. пољу што омогућава мерење импулса. Додатно, TPC се користи за идентификацију честица.





ATLAS

A Toroidal LHC Apparatus

маса: 7000t дужина: 45m пречник: 25m

Преко 3000 чланова из 177 институције и 38 земаља



- ❖ Дизајниран за изучавање физике честица у pp сударима на екстремно високим енергијама
- ❖ Трага за новим открићима у вези основних сила које обликују наш Универзум:
 - Порекло масе
 - Екстра димензије
 - Унификација основних сила
 - Тамна материја
- ❖ Рекреира стање материје из веома ране фазе развоја Универзума
- ❖ Има и програм изучавања судара тешких јона

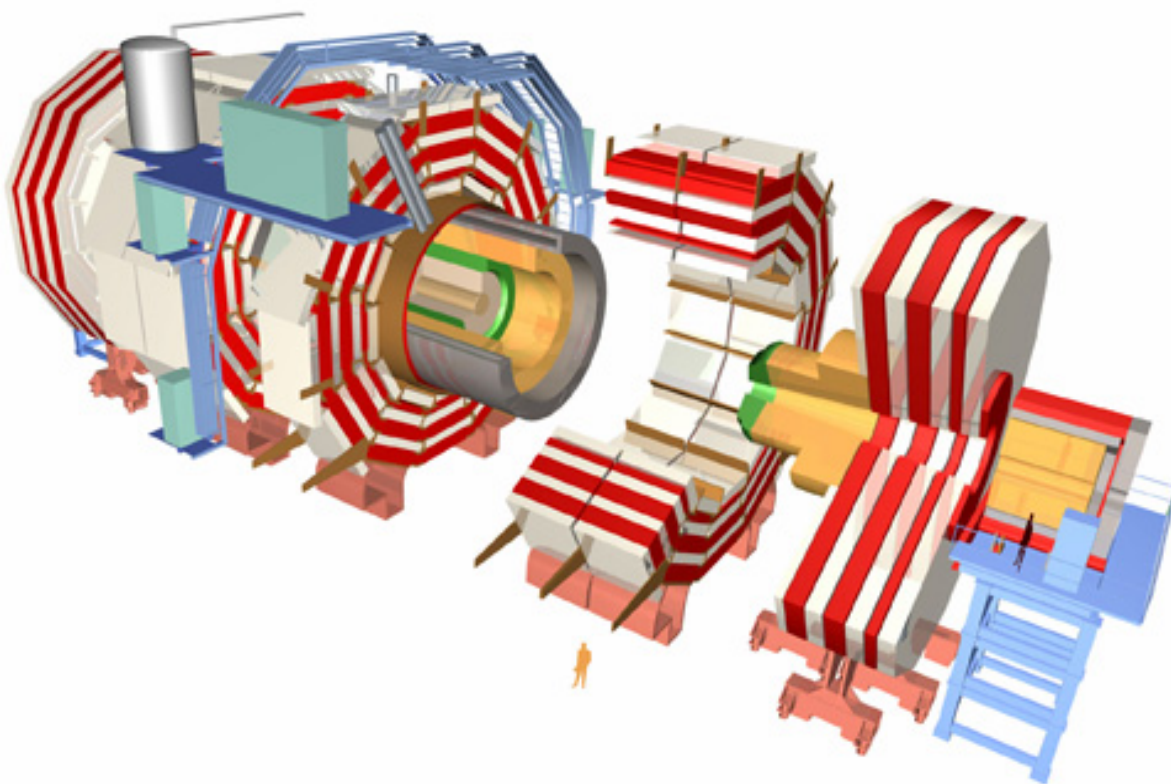
4 основна дела су **унутрашњи детектор, калориметар, мионски спектрометар и магнетски систем.** И овде се магнетско поље користи за мерење импулса емитованих честица.





CMS

Compact Muon Solenoid



- ❖ Димензије: 21m x 15m x 15m.
Маса: 14000t
- ❖ Преко 2500 научника (1740 PhD, 845 доктораната) и 790 инжењера из 172 институција из 40 земаља
- ❖ Вишенаменски детектор који укључује трагање за
 - ❖ Higgs бозоном
 - ❖ екстра димензијама
 - ❖ честицама тамне материје
 - ❖ суперсиметричним честицама
- ❖ Иако је CMS дизајниран за изучавање *pp* судара, његов детекторски систем има изузетне перформансе и за изучавање судара тешких јона па је тиме компетитиван и ALICE експерименту

Tracker



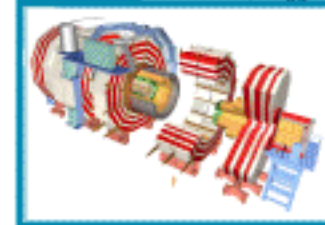
Construction Site



Full Detector



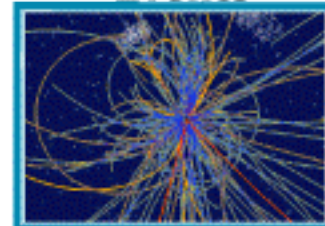
Detector drawings



ECAL



Events



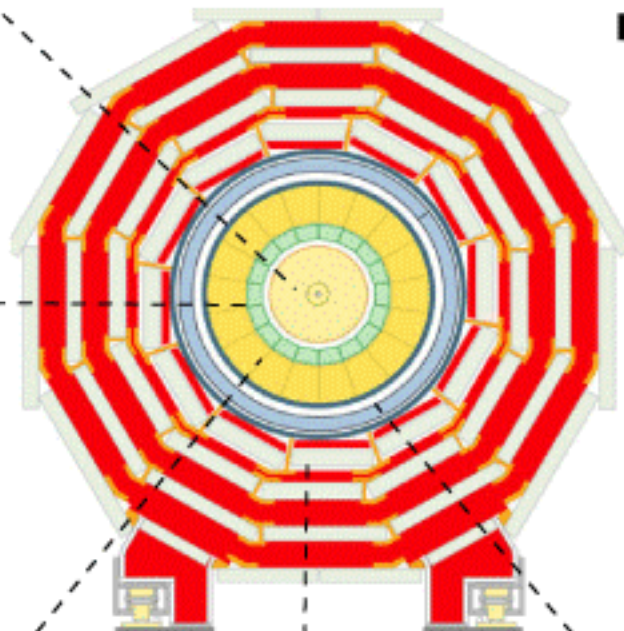
HCAL



Muons

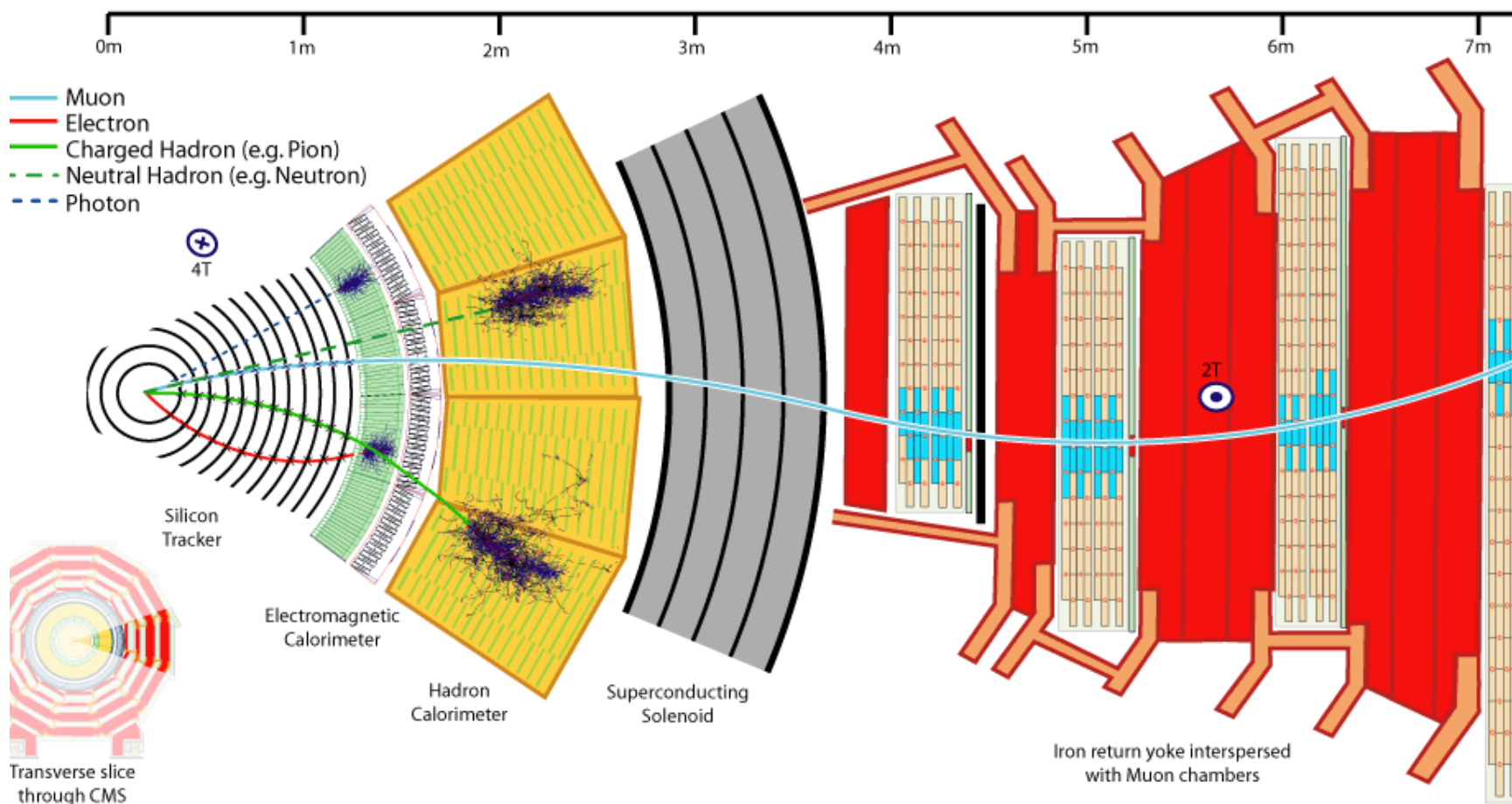


Solenoid

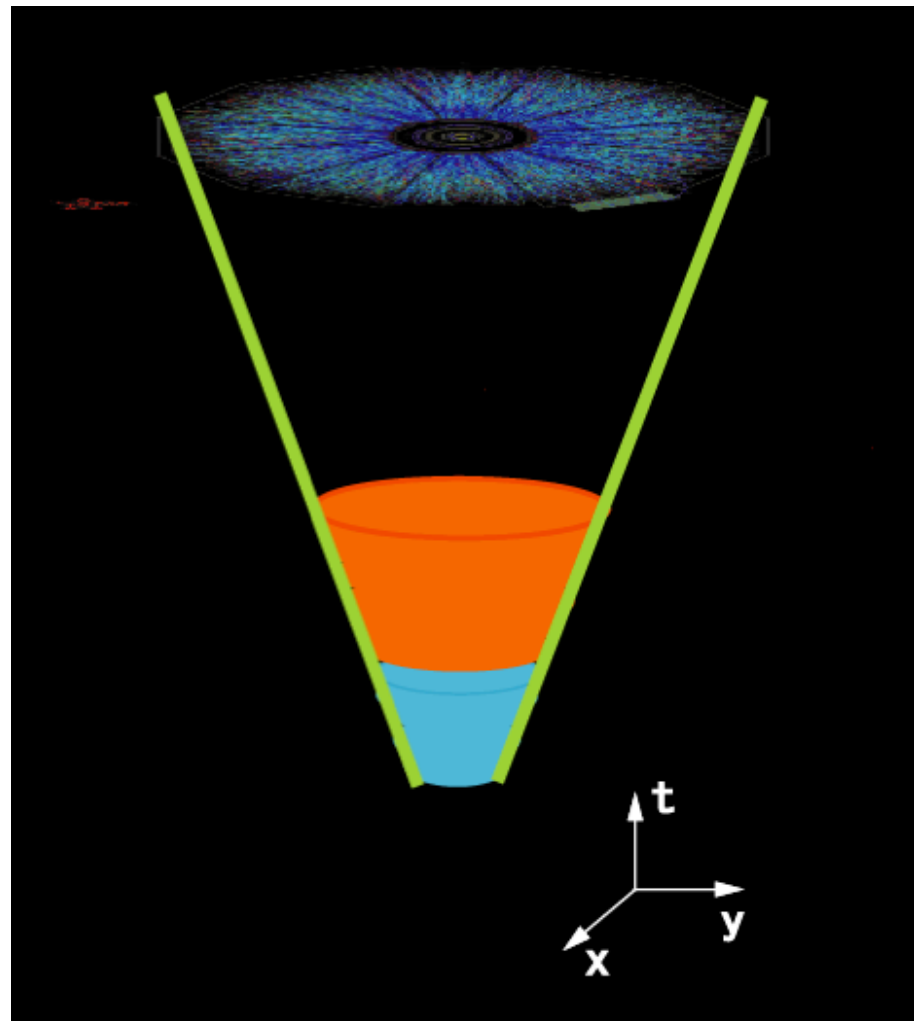
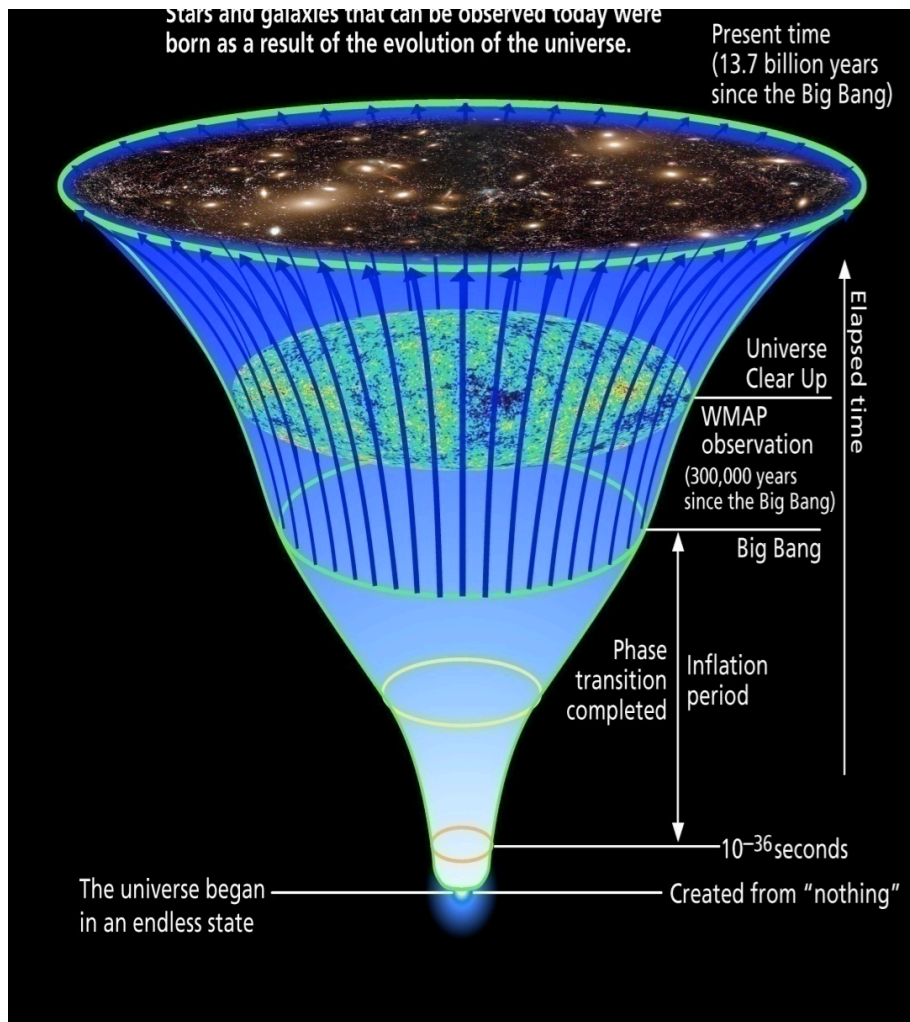


Исечак попречног пресека детекторског система CMS-а:

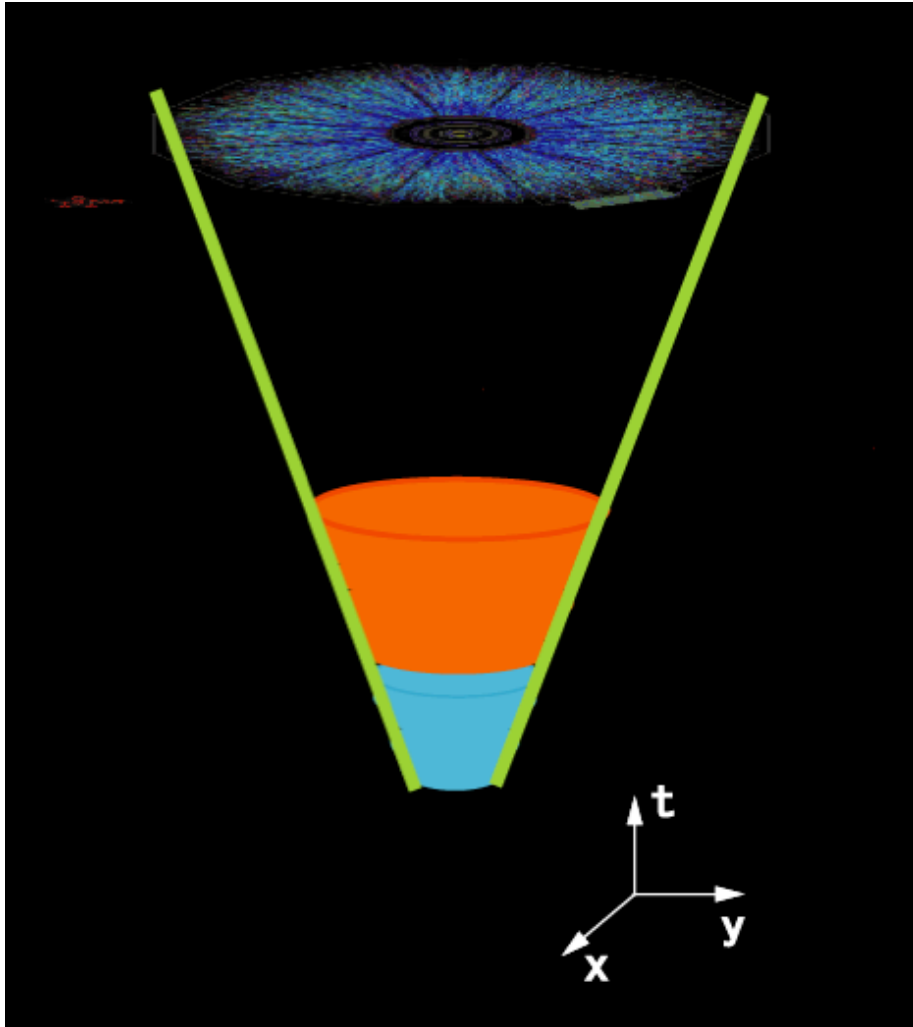
Силиконски трекер, електромагнетски и хадронски калориметар (ECAL и HCAL) налазе се унутар суперпроводног соленоида, док су мионске коморе изван



Велики и Мали Прасак



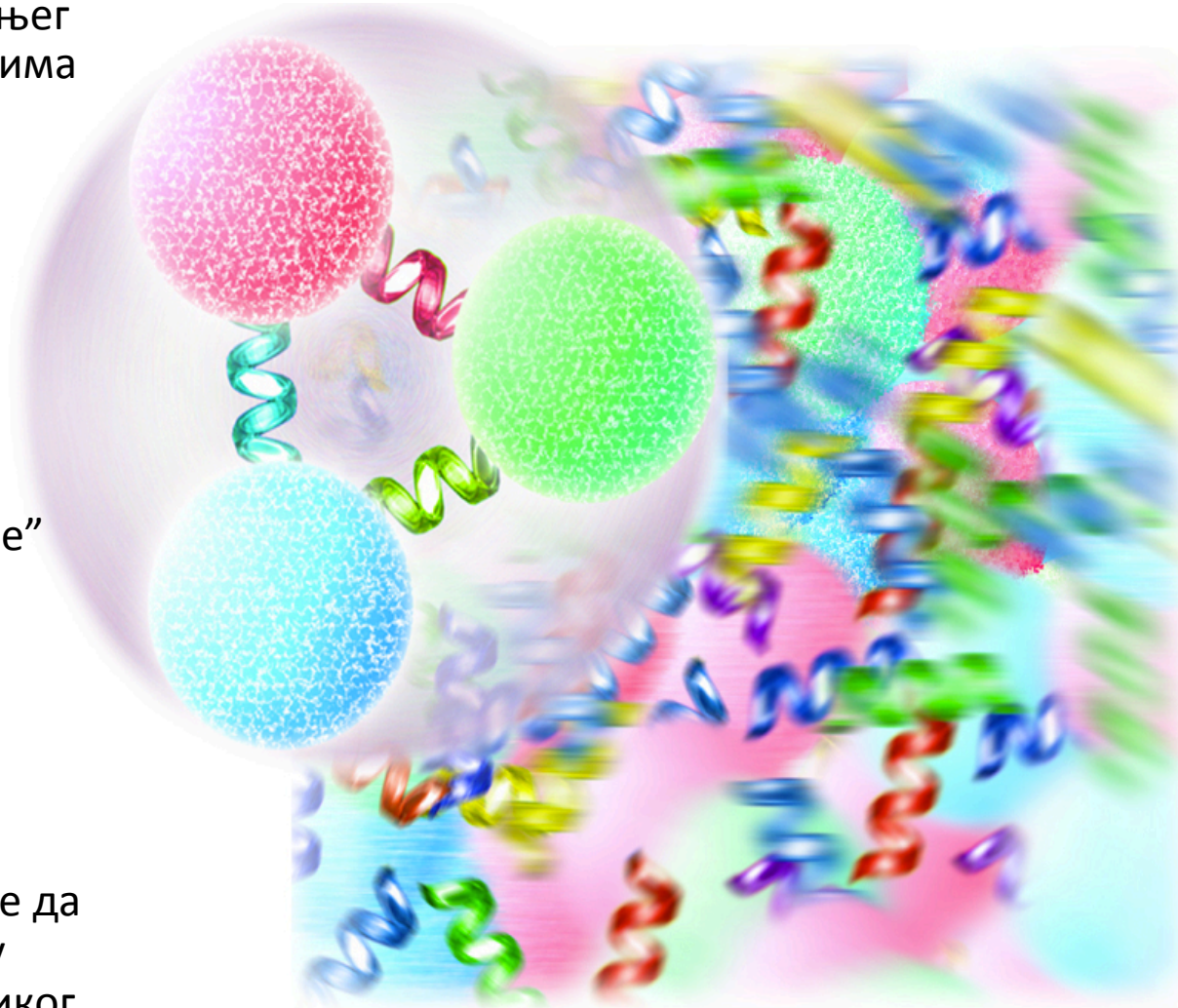
Мали Прасак - судар тешких јона



- ❖ Систем настао у судару тешких јона шири се брзином већом од $c/2$
- ❖ 99.9% емитованих честица су јако интерагујући хадрони
- ❖ Када се систем довољно разређи јаке интеракције престају. Долази до фазног прелаза ($T=170\text{MeV} \sim 2 \times 10^{12}\text{K}$)
- ❖ Тада се хадрони, емитовани са површине тог система, слободно крећу ка детекторима и тамо бивају детектовани
- ❖ Анализом њихових импулса могу се добити разноврсне информације (**вишенаменски експерименти**)
- ❖ Поред хадрона, емитују се и малобројни фотони и лептони који не интерагују јако па носе информације из фазе која претходи **QCD (Quantum Chromo Dynamics)** фазном прелазу

Деконфинација партона

- “Уметнички” приказ прелаза из хадронске у Кварк-Глуонску Плазму (QGP) фазу материје

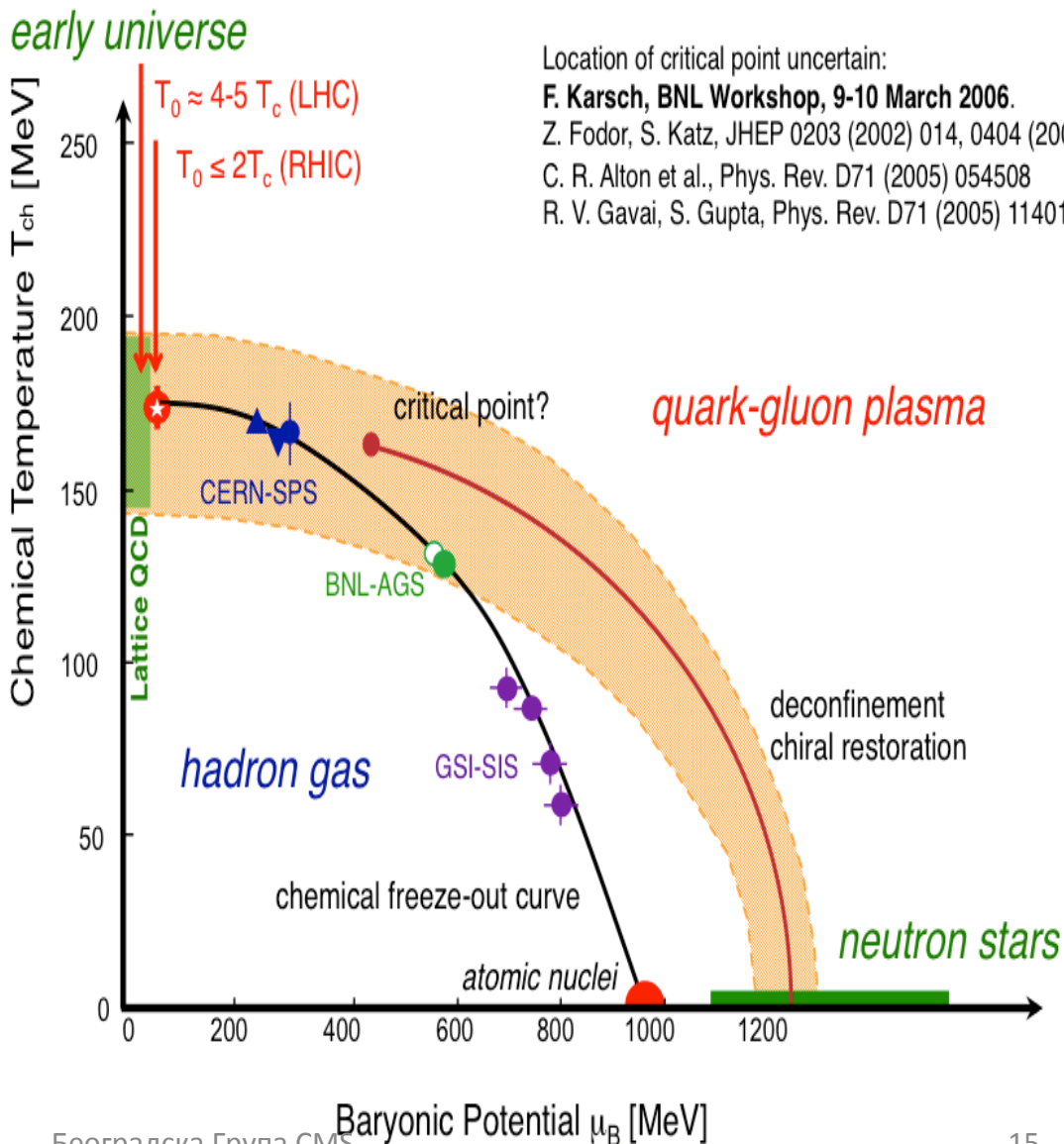


- ◆ У уобичајеној материји данашњег Универзума кваркови су глуонима везани унутар нуклеона
- ◆ Судари Pb језгара на LHC-у:
 - Температура преко 10^{12}K
 - $\rho \approx 10\rho_0$, $\rho_0 \approx 3 \times 10^{14} \text{g/cm}^3$
 - $V \approx 300 \text{fm}^3$ и $\tau \approx 10 \text{fm}/c \approx 3 \times 10^{-23} \text{s}$
 - $p \approx 300 \text{MeV/fm}^3$ ($1 \text{MeV/fm}^3 \approx 10^{28} \text{atm}$)
- ◆ Сматрамо да се нукелони “топе” ослобађајући кваркове од њихових веза са глуонима. Партони прелазе растојања знатно већа од димензија нуклеона
- ◆ Тиме се ствара ново стање материје, QGP, за које се верује да је постојало у раном стадијуму Универзума ($\sim 10^{-6} \text{s}$ након Великог Праска)

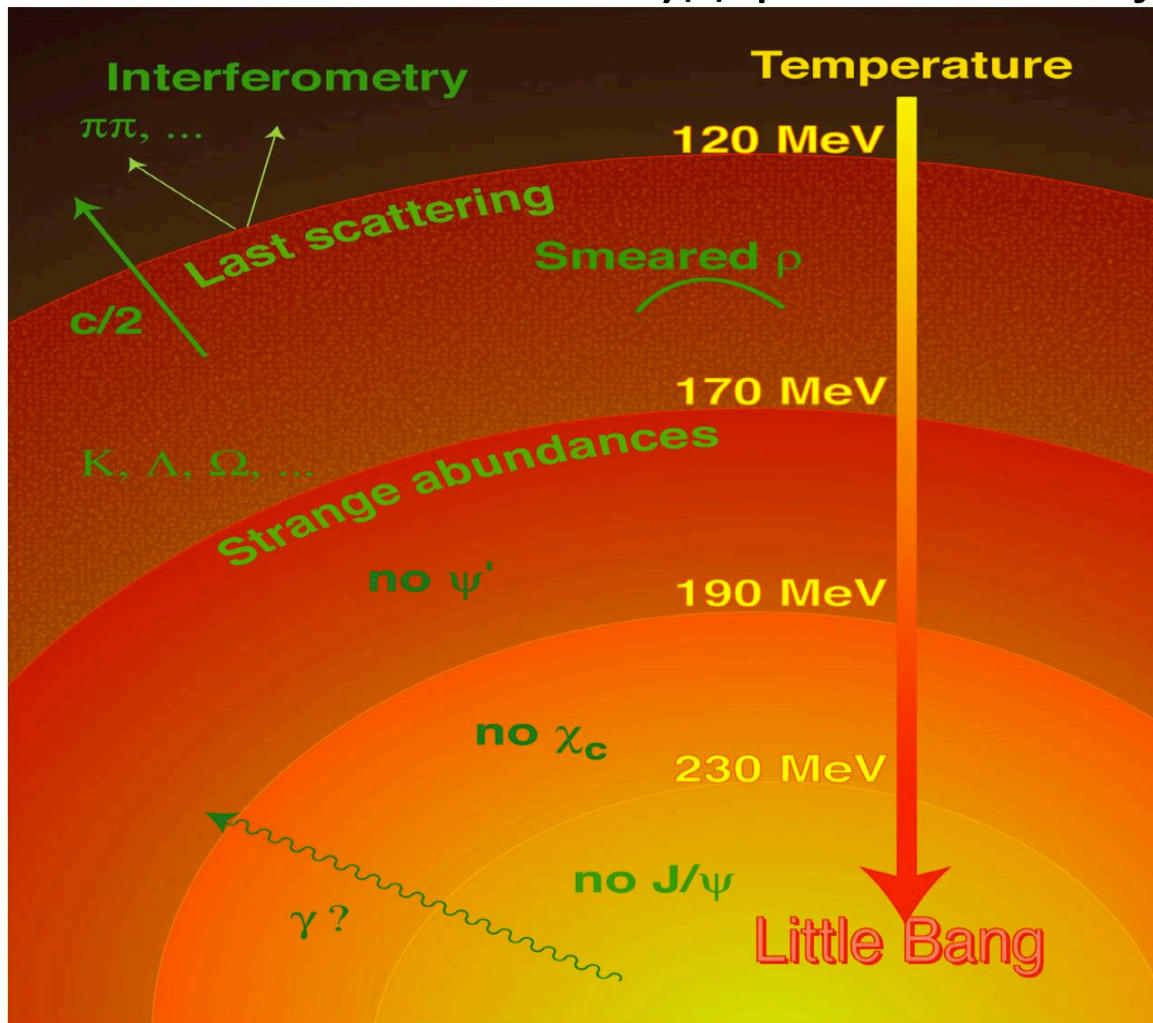
$T-\mu_B$ фазни дијаграм

- Циљ програма судара тешких јона је мапирање фазног дијаграма нуклеарне материје

- На нижим температурама и бариохемијским потенцијалима имамо хадронски гас (углавном пиони). На вишим T имамо QGP
- RHIC је показао да је QGP партонска течност (бар у делу фазног дијаграма). Интеракција међу партонима није, како је било предвиђано, занемарљива. Стога је бољи назив sQGP (јако интерагујућа QGP).
- Ово је аналогно сударању две ледене лоптице с циљем да се испита фазни дијаграм воде
- Дијаграм је апроксимација. Вероватно постоји богата структура са екстра фазама о којима не знамо ништа. LHC као и будући експерименти на нижим енергијама ће нам нешто од тога открити.



Опсервабле којима се испитују системи настали у сударима тешких јона

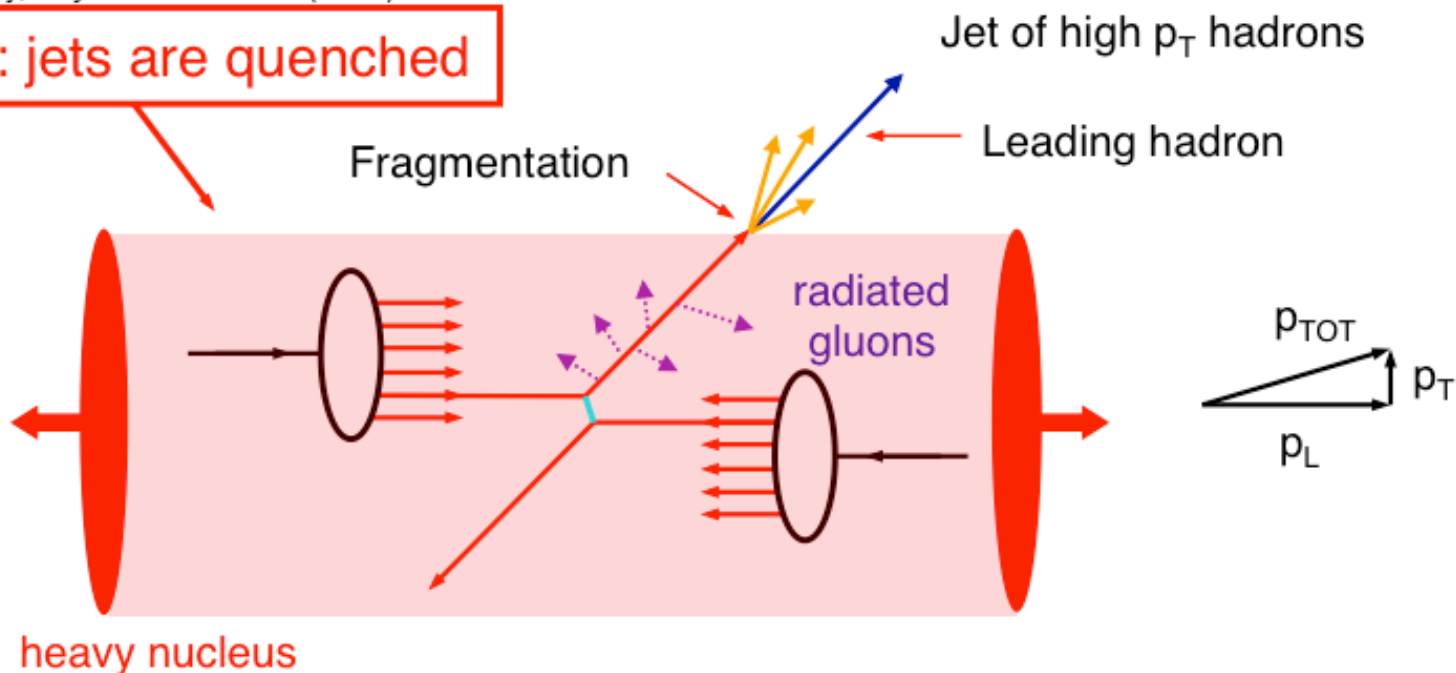


- ❖ Спектри честица
- ❖ Односи честица
- ❖ Честична интерферометрија (HBT - фемтоскопија)
- ❖ Пораст страности
- ❖ Разни облици колективног тока материје
- ❖ Флуктуације
- ❖ Пригушење млазева честица (jet-ова)
- ❖ Промена особина честица у медијуму (у односу на вакуум)
- ❖ Директни фотони
- ❖ Термални лептони
- ❖ Пригушена продукција Ψ' , χ_c и J/Ψ

Пригушење jet-ова у сударима тешких јона

X.-N. Wang and M. Gyulassy, *Phys. Rev. Lett.* **68** (1992) 1480

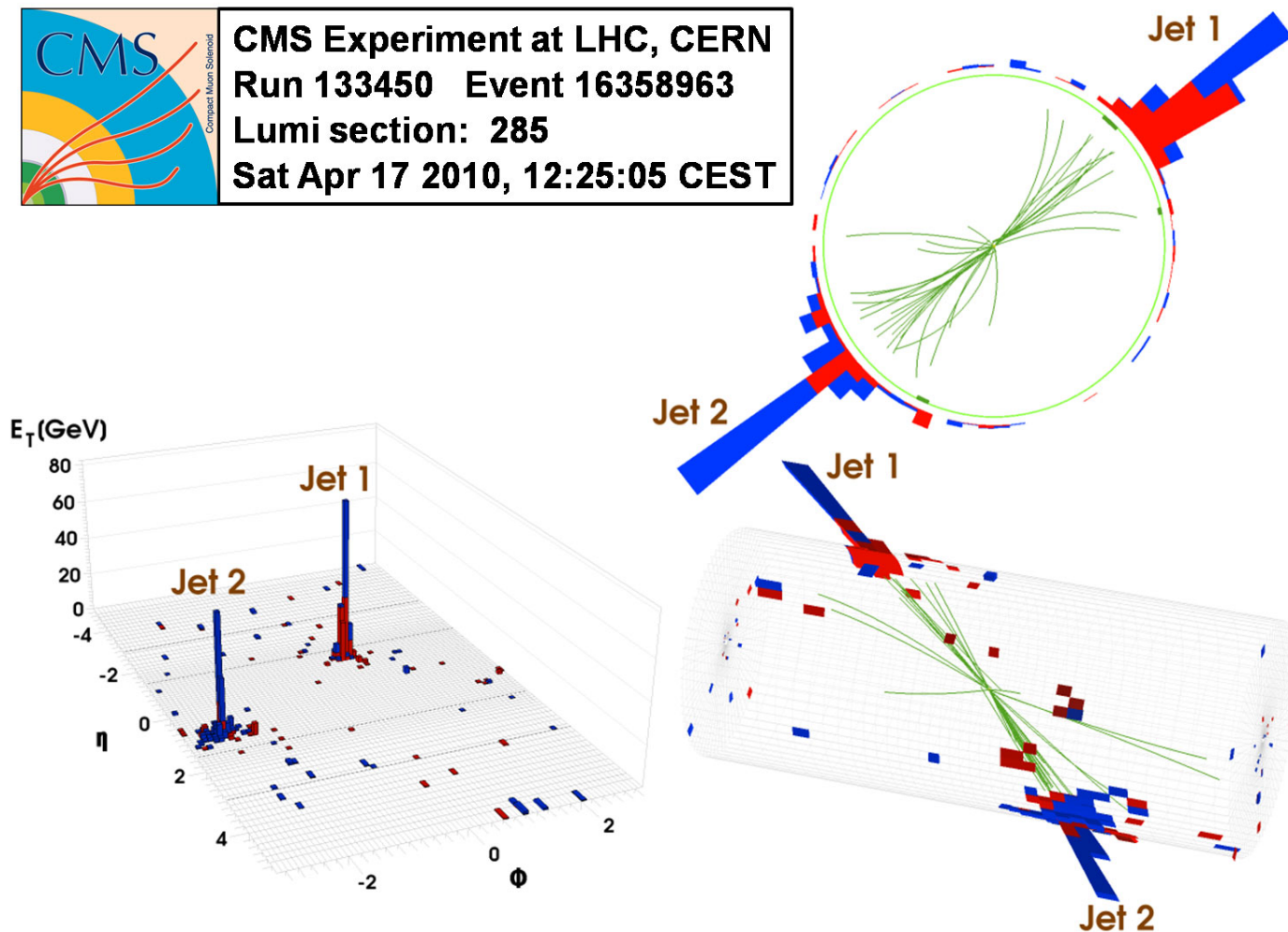
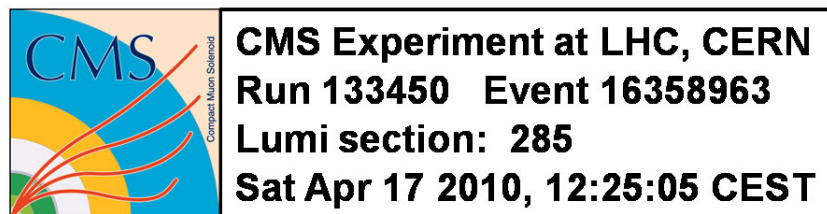
key prediction: jets are quenched



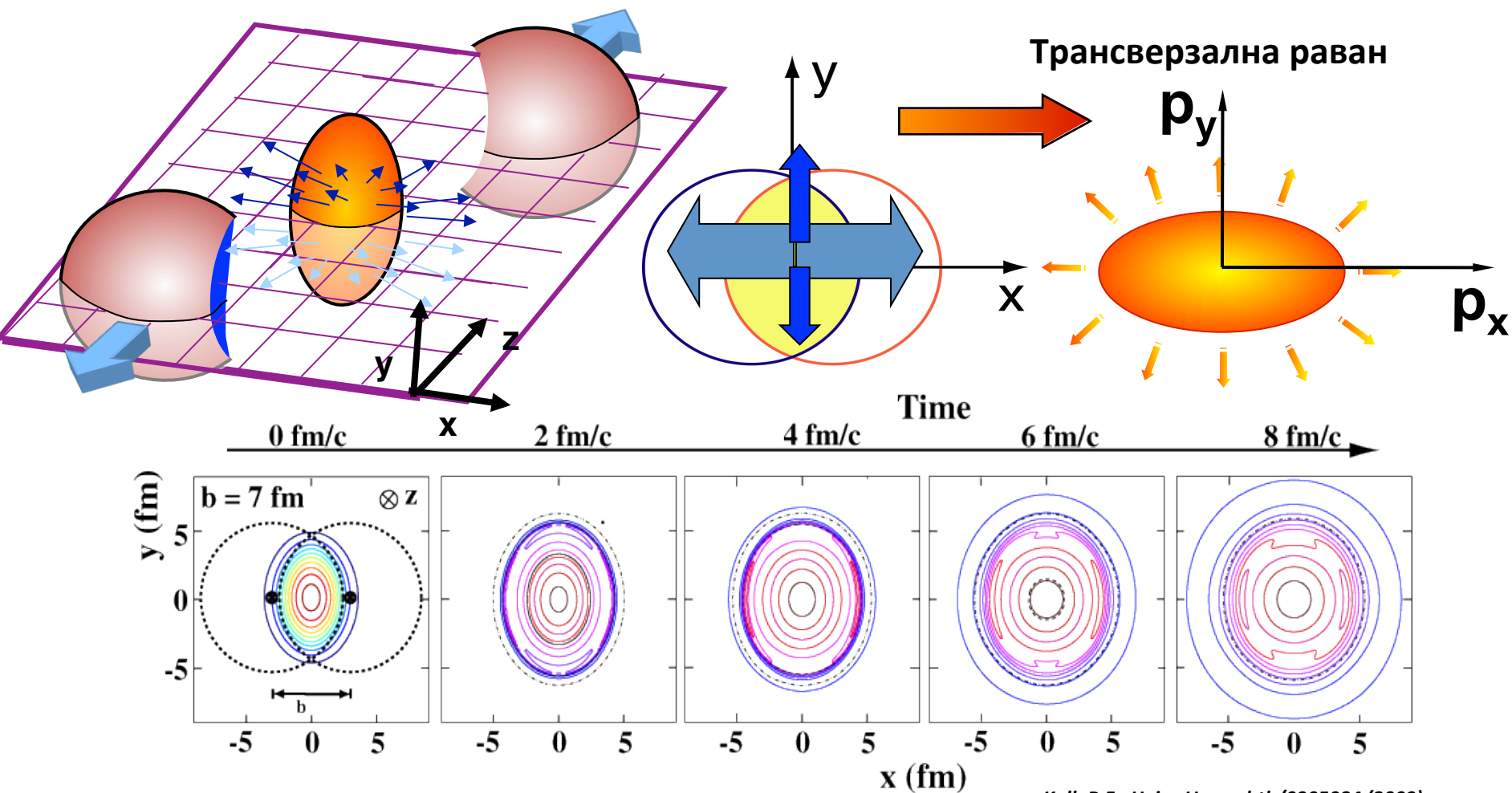
Особине jet-ова (број честица у jet-у као и његова ширина) се могу добити статистички анализирањем расподела корелације водеће (trigger) честице и придружених (associated) честица по разлици азимуталних углова.

Догађај са два изражена млаза честица у ϕ - η , r - ϕ и у тродимензионалном приказу ($pp@3.5\text{TeV}$)

Депонована трансверзална енергија је приказана у плавој (HCAL) и у црвеној (ECAL) боји, док су трагови наелектрисаних честица приказани у зеленој боји



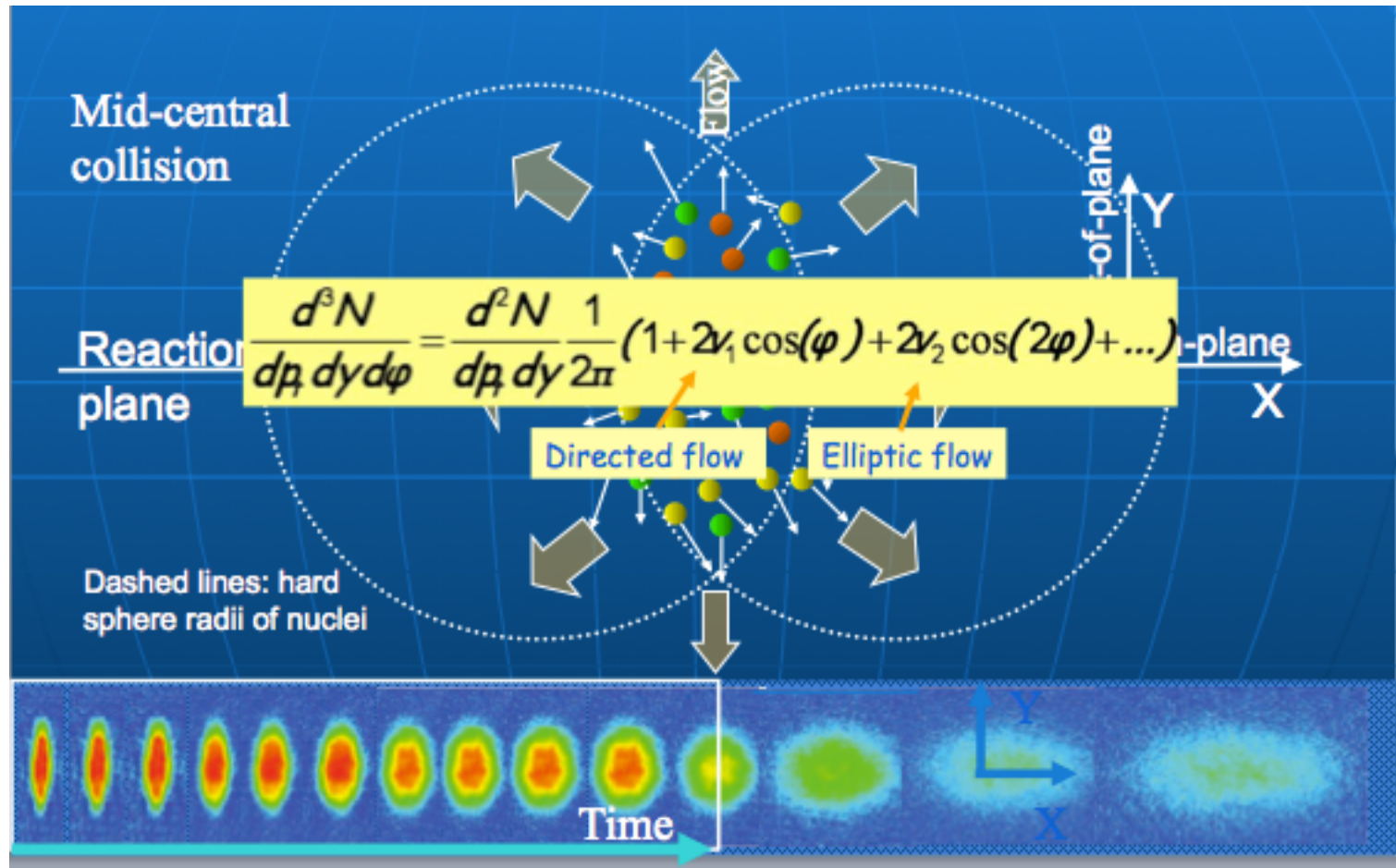
Нецентрални судар



Kolb P.F., Heinz U., nucl-th/0305084 (2003).

Почетна просторна анизотропија се трансформише у импулсну анизотропију.

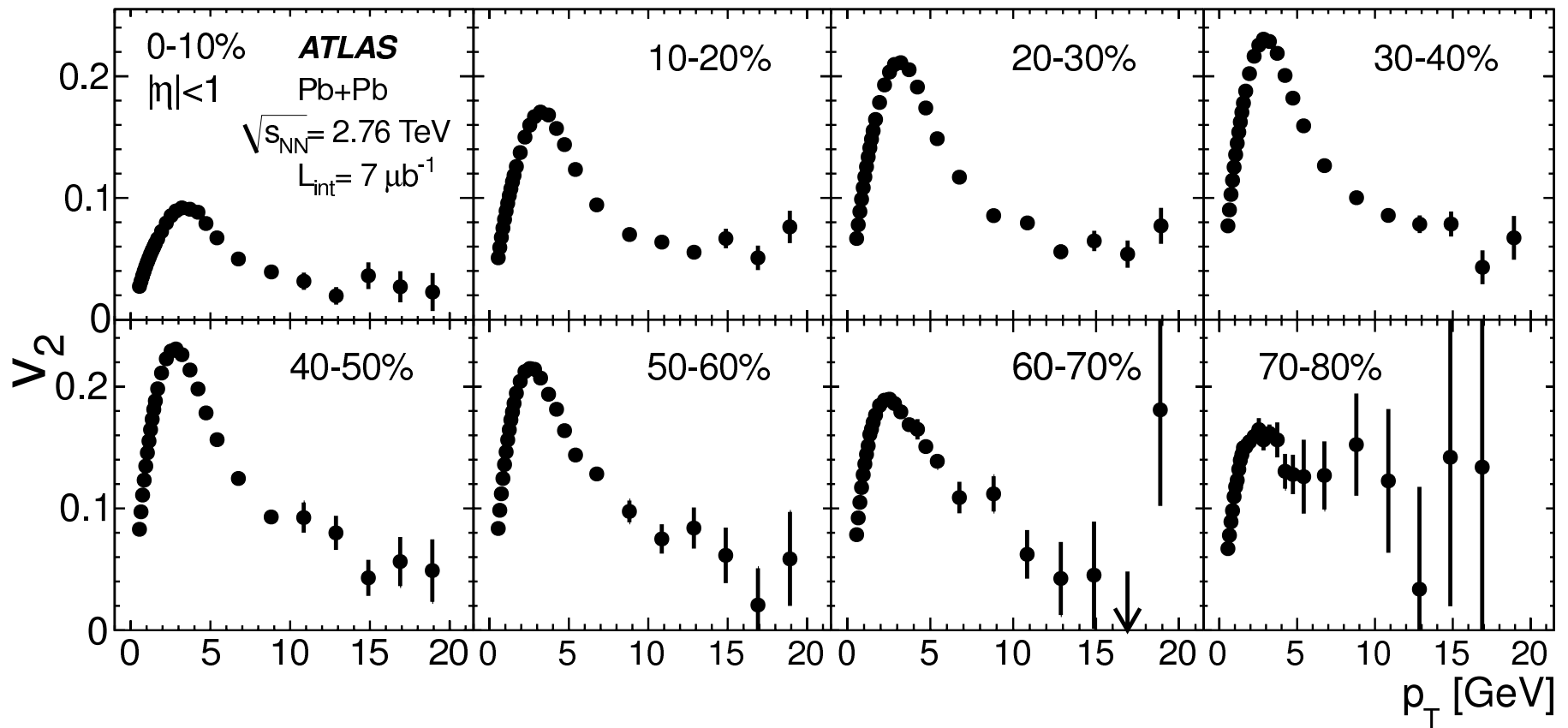
Колективни ток честица у нецентралном судару два језгра



Поред прва два горе наведена хармоника постоје и виши ненулти хармоници у Fourier-овом развоју расподеле честица по азимуталном углу мереном у односу на положај реакционе равни (**b**-z: **b**- вектор параметра судара, z- оса снопа)

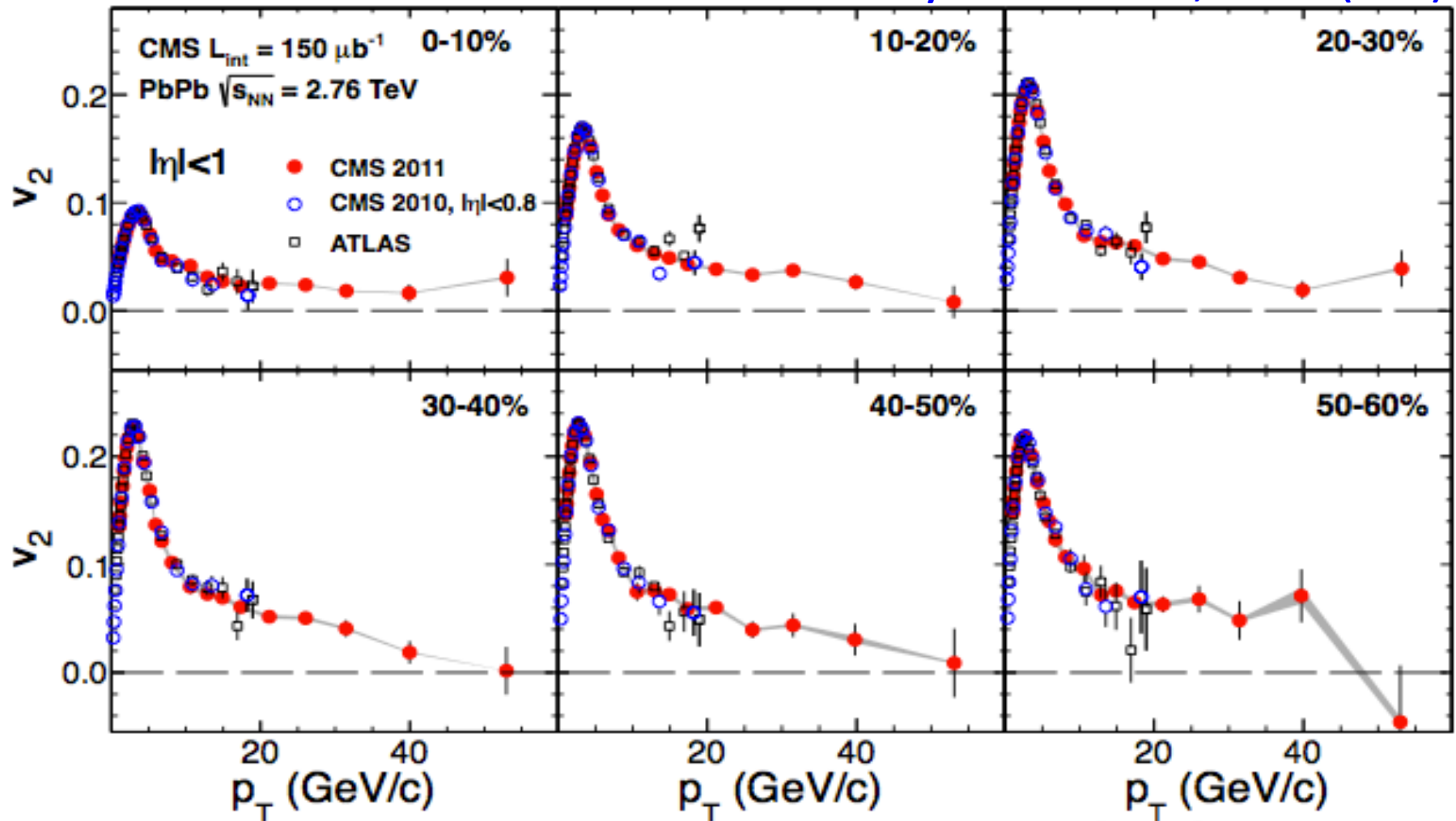
- ❖ Мерење експеримента ATLAS у PbPb сударима на енергији од 2.76 TeV по нуклеону у систему центра масе: реконструисани интензитет елиптичког тока (v_2) у ϕ -ји трансверзалног импулса (p_T) за различите централности судара у централној области рапидитета.

[*Phys.Lett. B707 \(2012\) 330-348*](#)



- ❖ Интензитет елиптичког тока (v_2) у ф-ји трансверзалног импулса (p_T) за наелектрисане хадроне при различитим централностима судара [PbPb@2.76TeV](#). CMS (2010 и 2011) подаци упоређени са ATLAS подацима. CMS (2011) по први пут мери v_2 до 60GeV/c

Phys. Rev. Lett. 109, 022301 (2012)



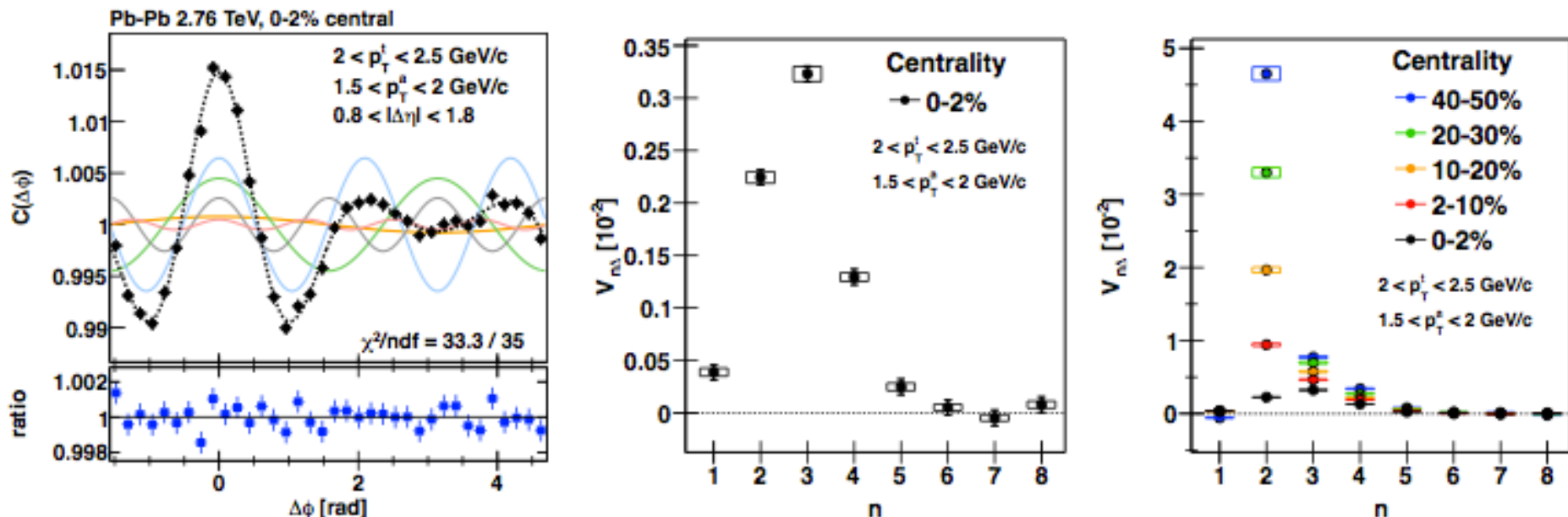
2-честична расподела по азимуталној разлици пара честица

Екстраховани Fourier коефицијенти у ϕ -ји њиховог реда

ALICE

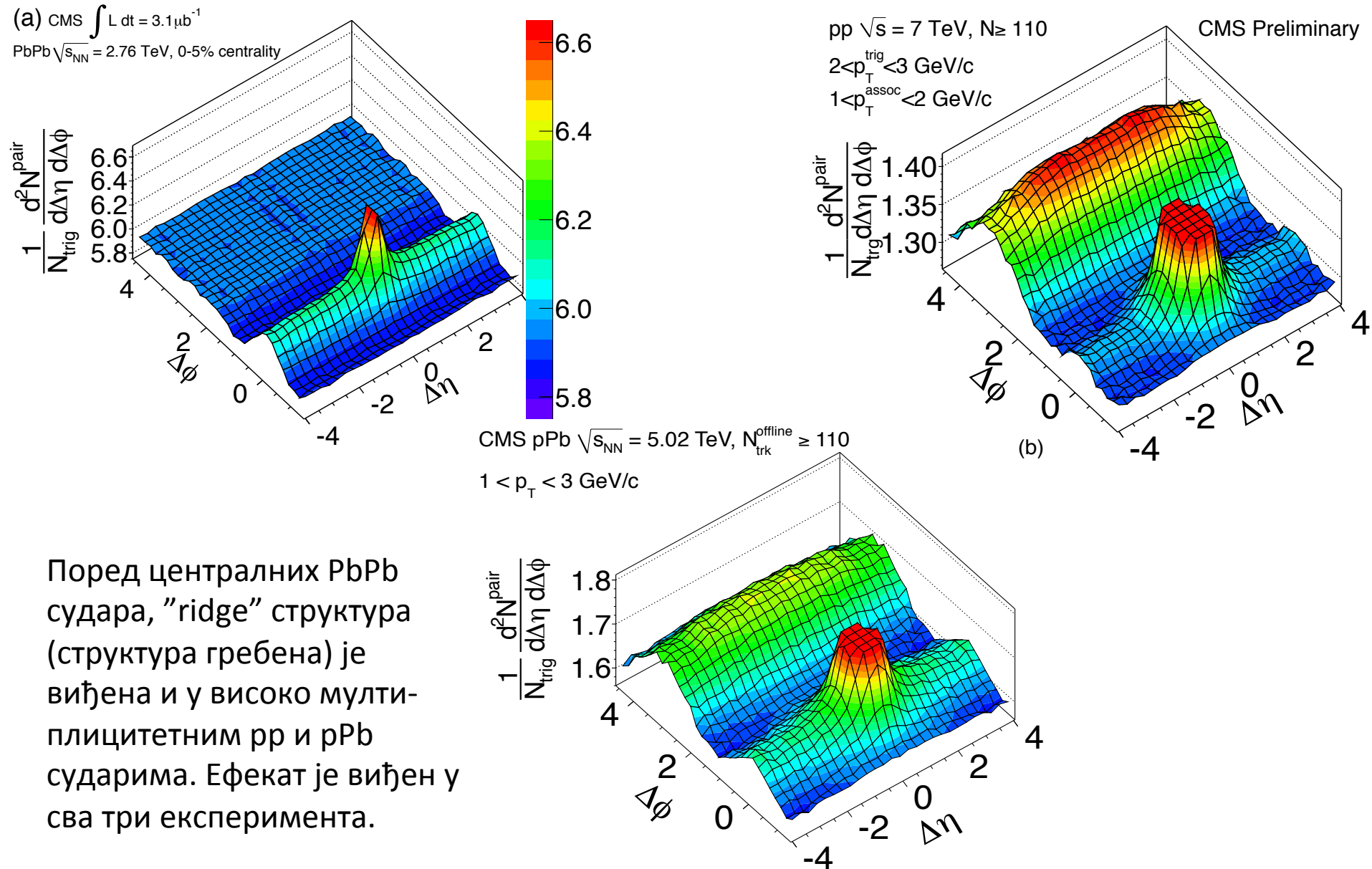
[arXiv:1109.2501v1 \[nucl-ex\]; CERN Courier Oct. 2011](https://arxiv.org/abs/1109.2501v1)

[PRL 107 032301 \(2011\)](https://arxiv.org/abs/1109.2501v1)



Подаци са детектора ALICE за PbPb сударе на $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$. Централност 0-2%. Добијени Fourier-ови коефицијенти су у веома добром слагању са истим добијеним веома различитим методама. Овај метод показује и низ предности (мала стат. грешка и симултано добијање карактеристика јет-ова са истих података)

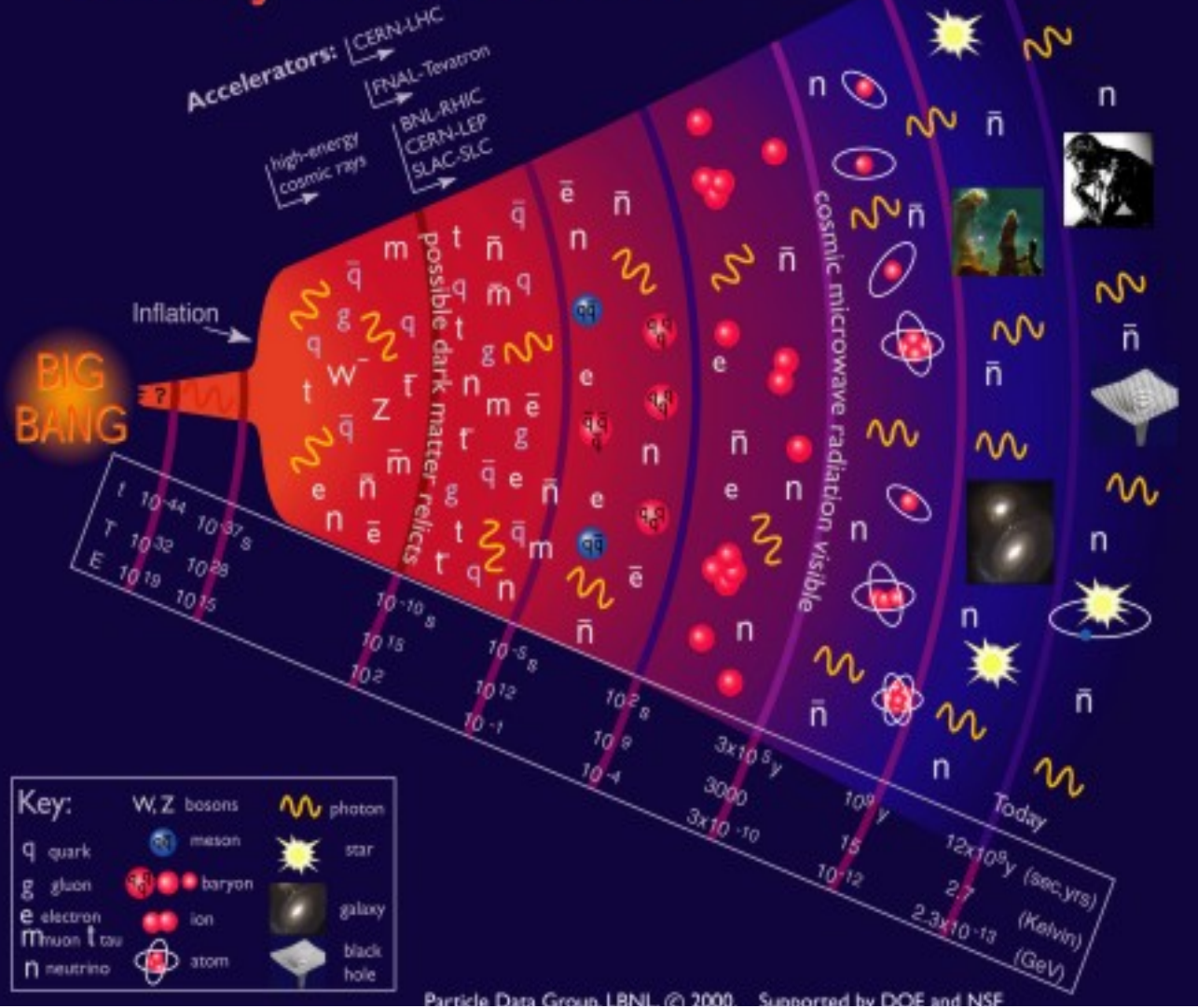
2-честична расподела у 2-димензионалној $\Delta\phi$ - $\Delta\eta$ презентацији



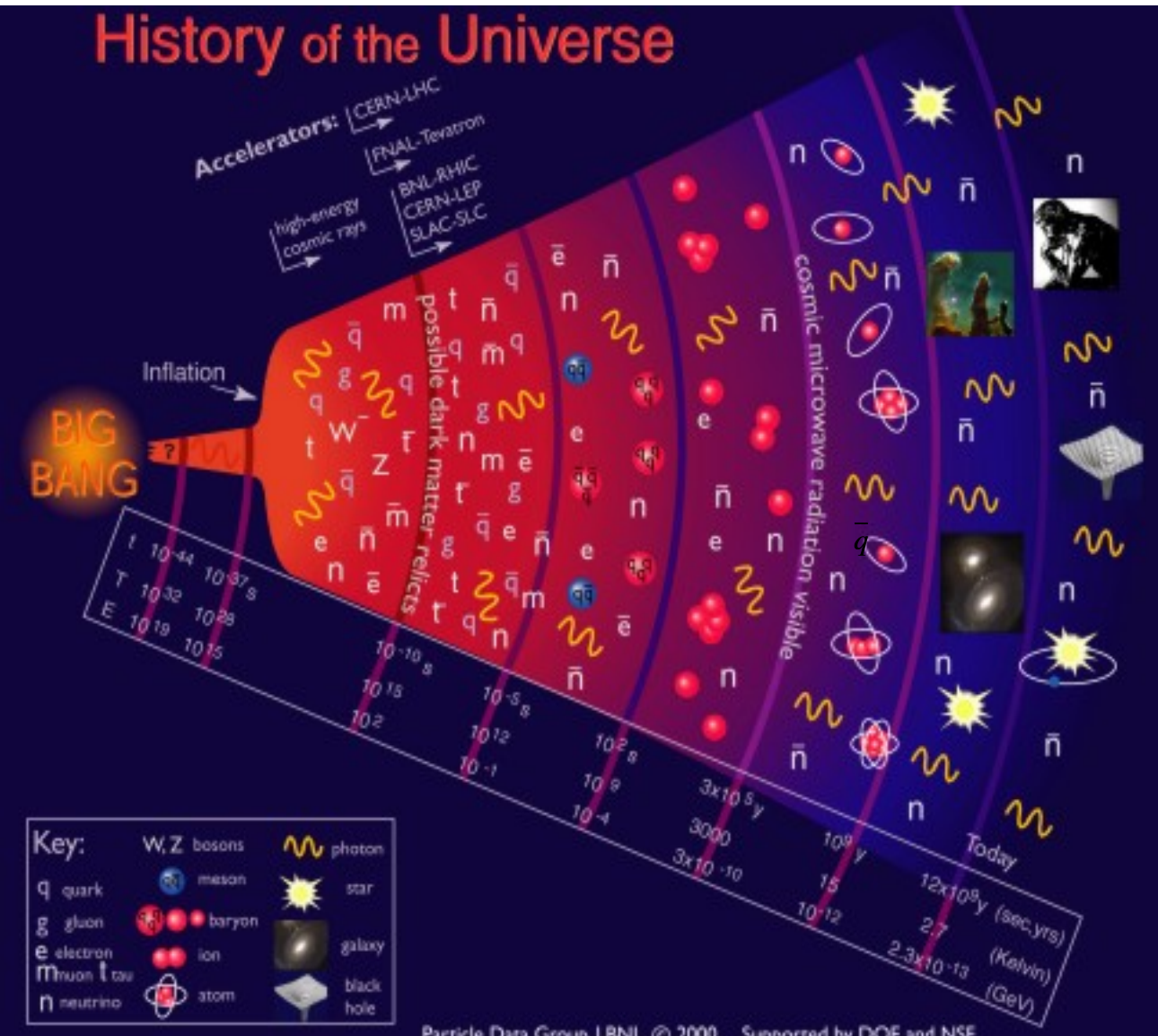
Поред централних PbPb судара, "ridge" структура (структура гребена) је виђена и у високо мултиплицитетним pp и pPb сударима. Ефекат је виђен у сва три експеримента.

Backup slides

History of the Universe

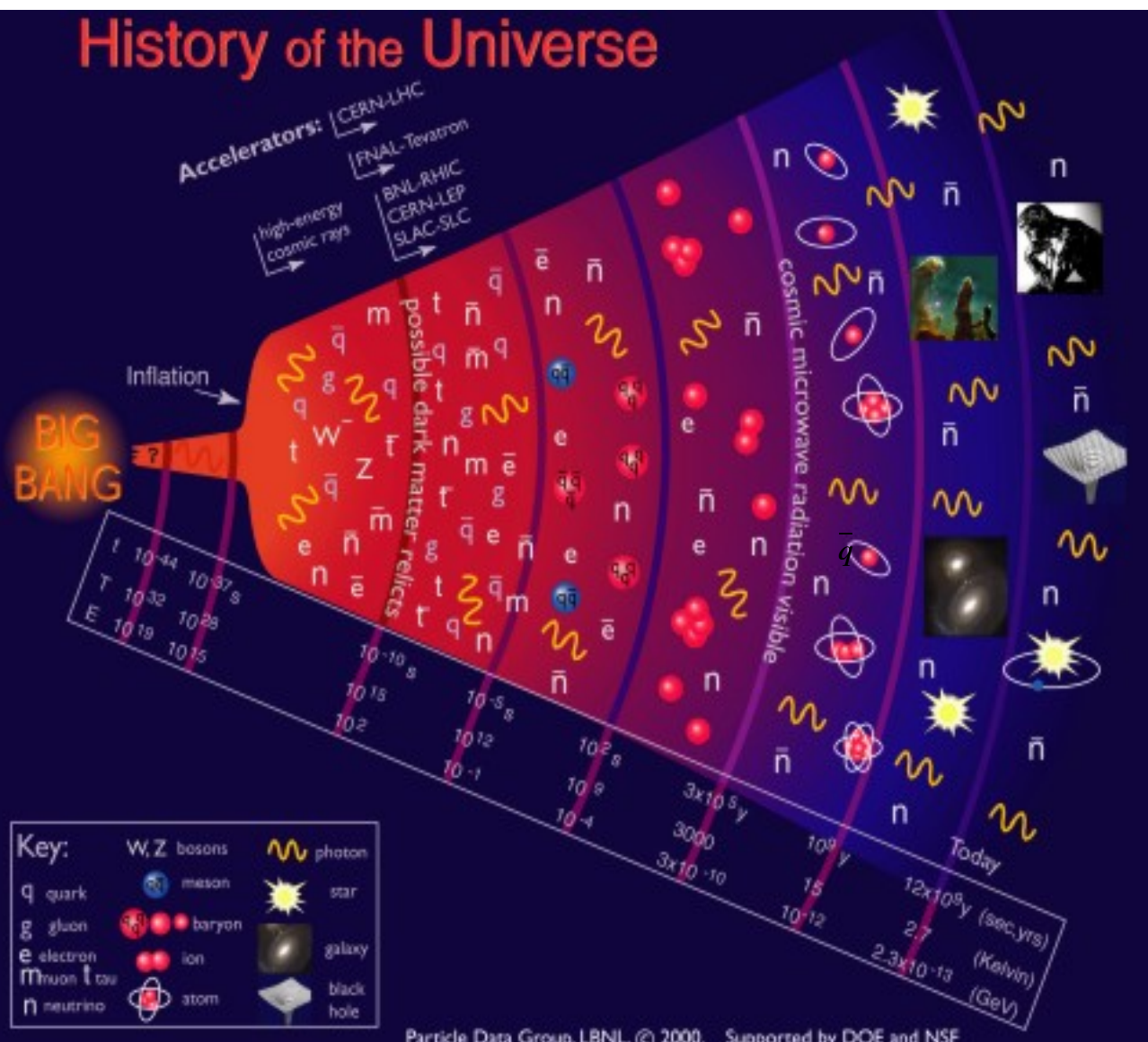


Кратка историја Универзума



- ❖ Могући остаци тамне материје су из периода када је Космос био стар $t=10^{-10}$ s и при густини енергије од $T=10^3$ GeV
- ❖ У тој епохи па све до $t \sim 1 \mu$ s материја се састојала од кваркова (q), анти-кваркова ($\bar{q}$) и глуона (g) (једним именом партонa) који су у слободном стању формирали кварк-глуонску плазму (**QGP**)
- ❖ Када је T пала на $170 \text{ MeV} \sim 2 \times 10^{12} \text{ K}$ партони су се везали у нове објекте – хадроне (QCD прелаз)
- ❖ Неких 3 m После Великог Праска формирају се прва језгра (H и He). Нестабилне честице (π , K , $W^\pm$,...) су се већ распале.

History of the Universe

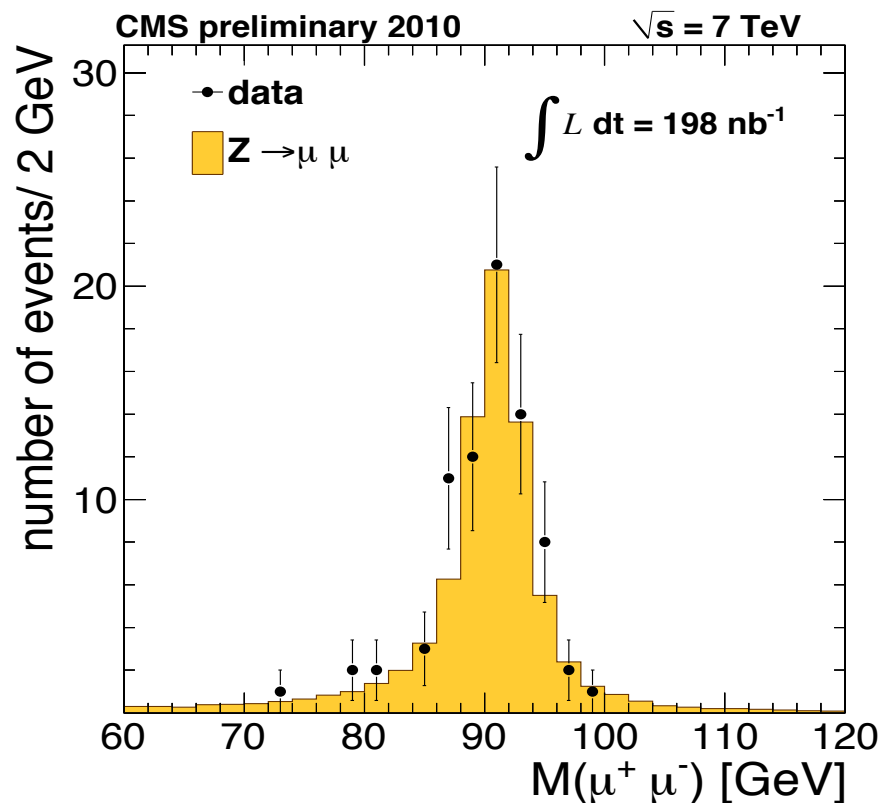


Кратка историја Универзума

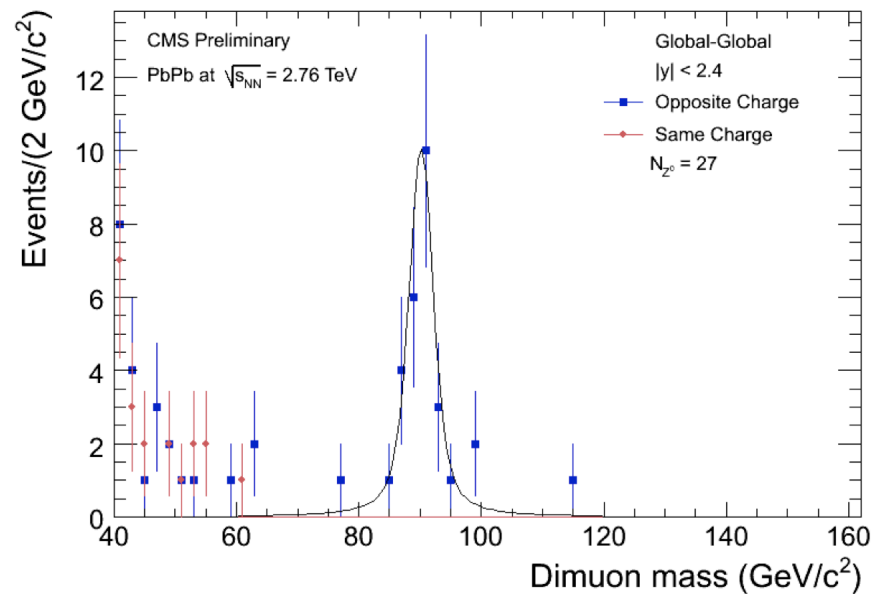
- ❖ Материја се анихилира са антиматеријом. Услед мале разлике (10^{-10}) нешто материје преостаје и од ње је сачињен данашњи Космос
- ❖ 3×10^5 у након Великог Праска T је опала на 3000K . Формирају се први атоми
- ❖ Универзум је постао транспарентан тако да је електромагнетно зрачење могло да буде емитовано на велика растојања
- ❖ Сматра се да експерименти на **Large Hadron Collider**-у имају могућност рекреирања раних фаза Универзума све до електро-слабе фазе

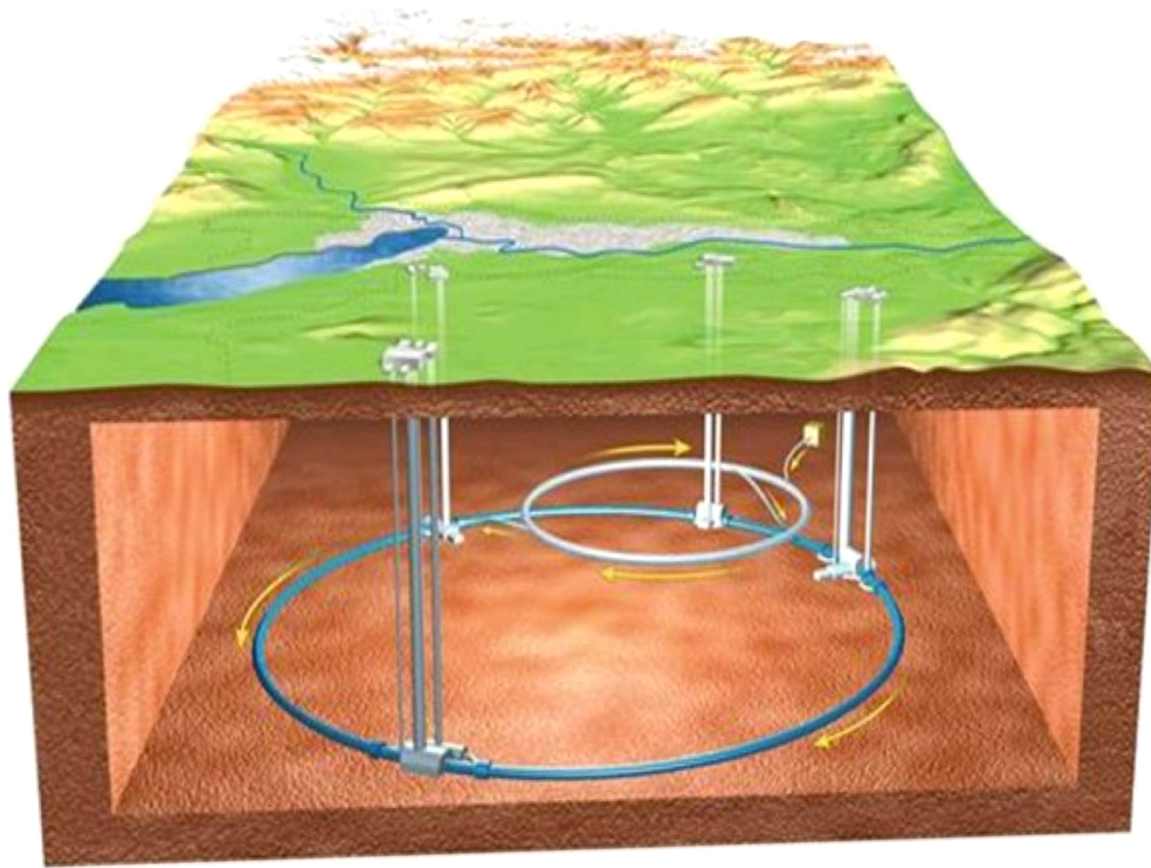
Реконструкција Z бозона у pp сударима на 7TeV (лево) и $PbPb$ сударима на 2.76TeV (десно).

$$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



$$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$





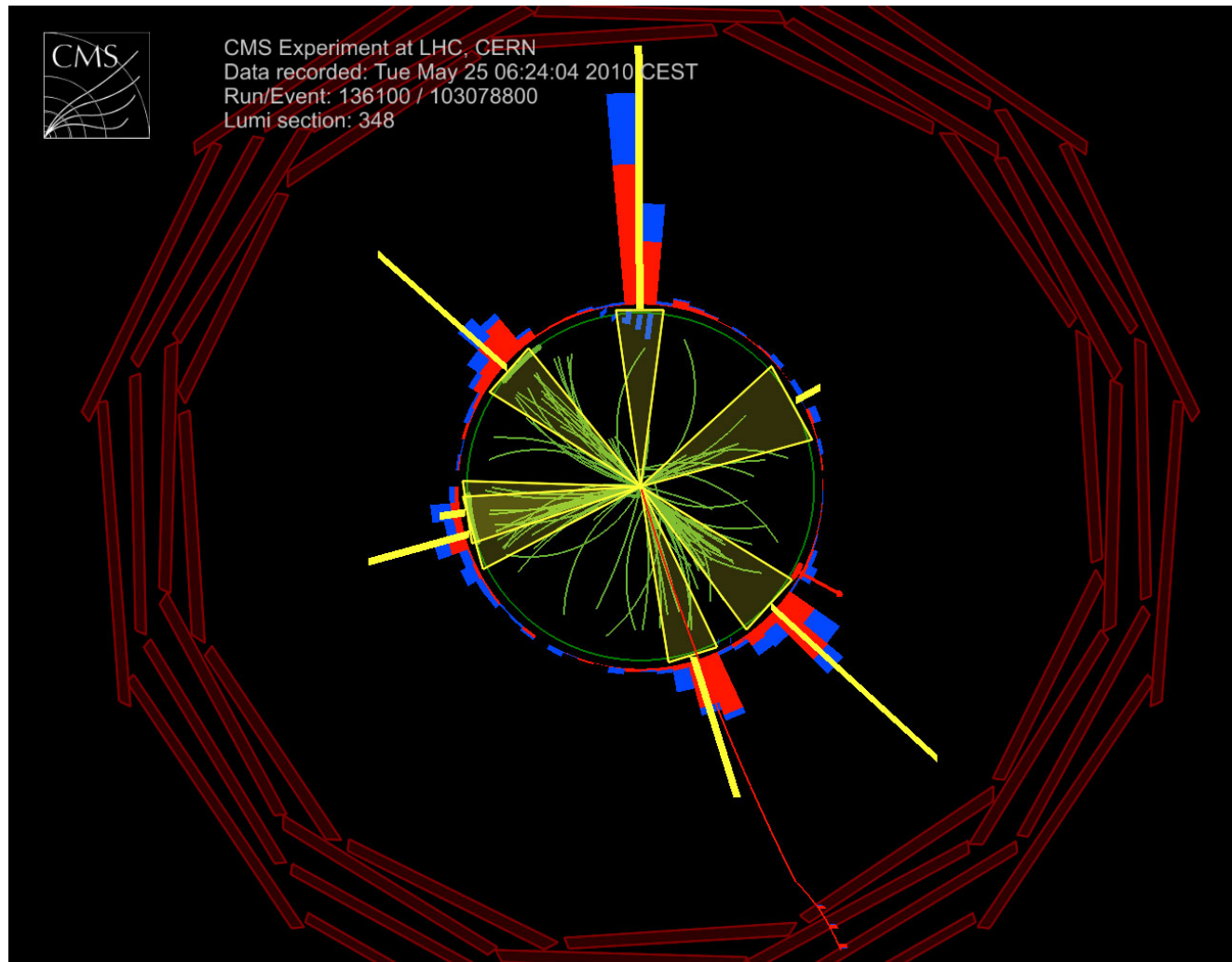
LHC

Large Hadron Collider

- ❖ Мањи Super Proton Synchrotron прстен служи за убризгавање протона (p) или језгара олова (Pb) у већи LHC прстен где се пројектил – мета додатно убрзају до готово брзине светлости
- ❖ Пројектил и мета се крећу у супротним смеровима и сударају се на местима где се налазе 4 главна LHC експеримента: ATLAS, ALICE, CMS и LHCb
- ❖ Наелектрисане честице настале у тим сударима се региструју детекторским системима поменутих експеримената

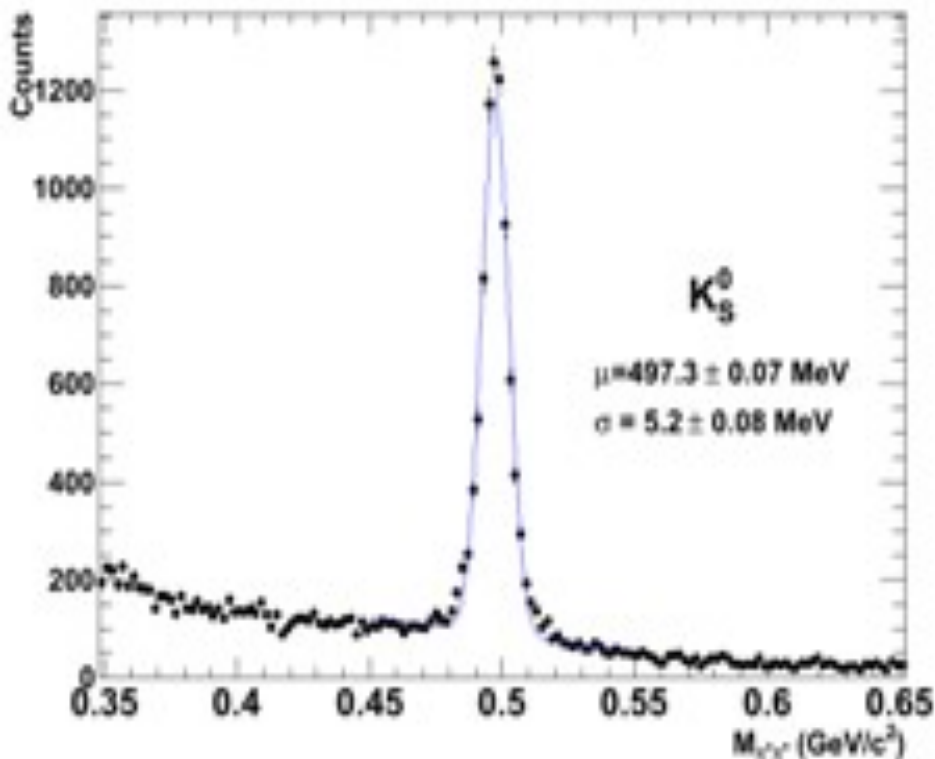
Тзв. Multijet event, догађај са неколико изражених млазева честица у r - ϕ приказу ($pp@3.5\text{TeV}$)

Депонована трансверзална енергија је приказана у плавој (HCAL) и у црвеној (ECAL) боји, док су трагови наелектрисаних честица приказани у зеленој боји

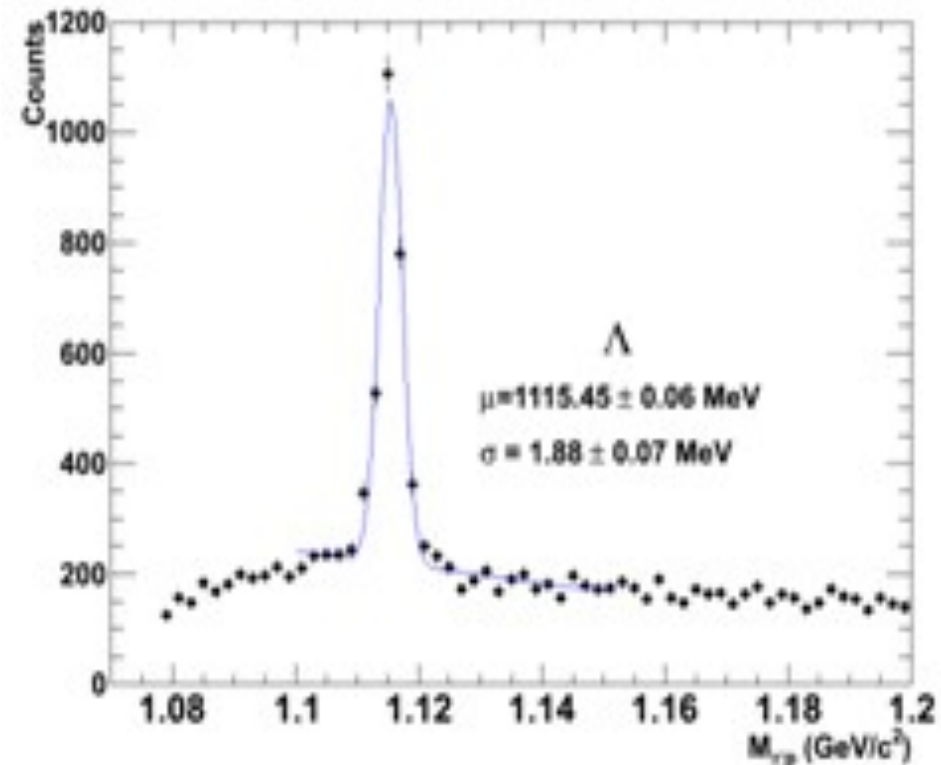


Стране честице су хадрони које садрже бар један страни кварк
 Иницијално, страних квакова нема у хладној нуклеарној материји коју сударамо
 Дакле, страни кваркови су продуковани из кинетичке енергије убрзаних језгара
 Њихова бројност је повезана са енергијом на којој су нуклеони разложени на
 кваркове и добија се реконструкцијом инваријантне масе страног хадрона

$$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$



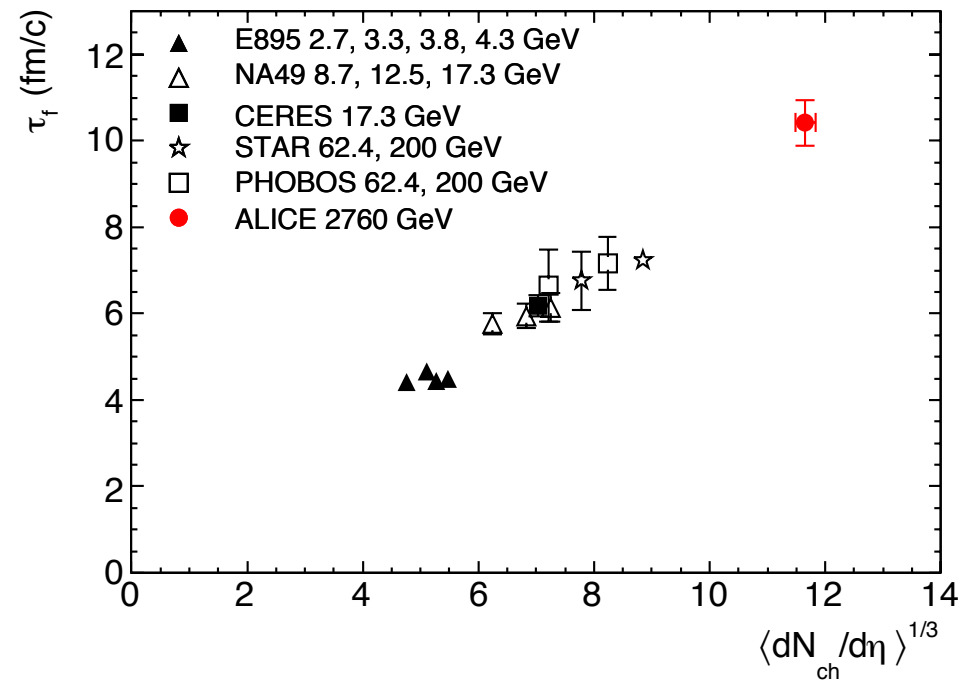
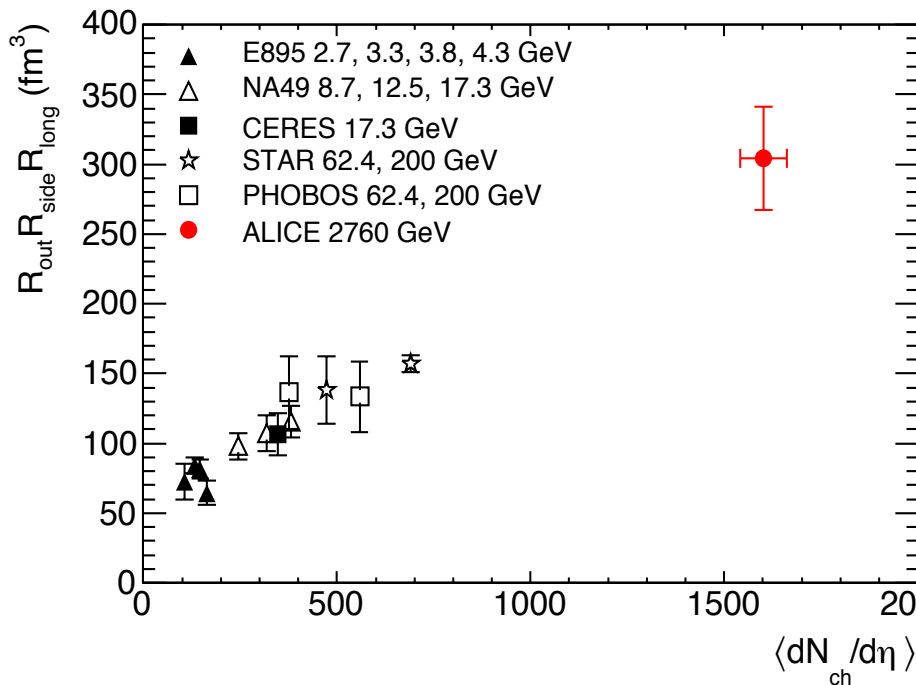
$$\Lambda \rightarrow p \pi^-$$



Двопионске Bose-Einstein корелације у $PbPb$ сударима на 2.76TeV :

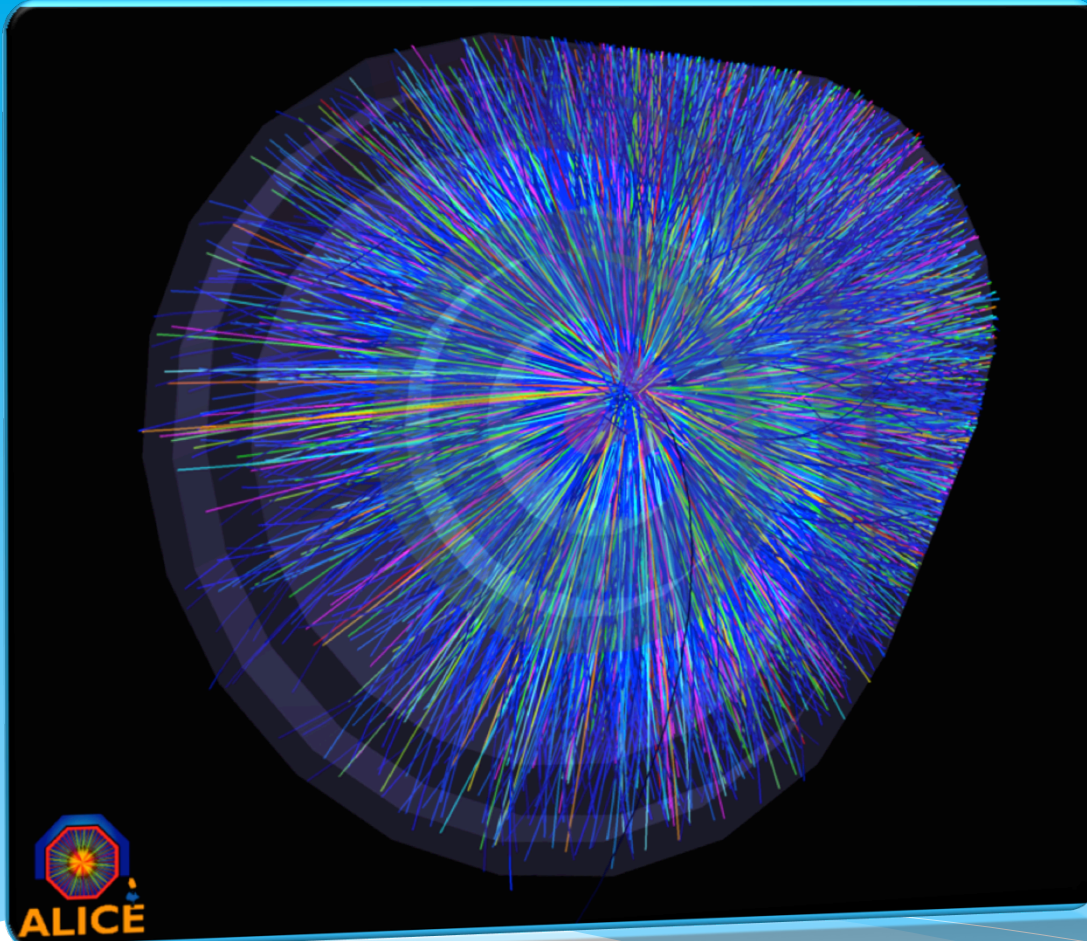
-Бозонска интерферометрија (HBT корелације; фемтоскопија) омогућује мерење димензија система насталог у судару (тешких јона; протона) као и трајање таквог система

-Са порастом упадне енергије (овде мерене густином произукованих наелектрисаних честица по јединици псевдорapidитета) обе величине расту



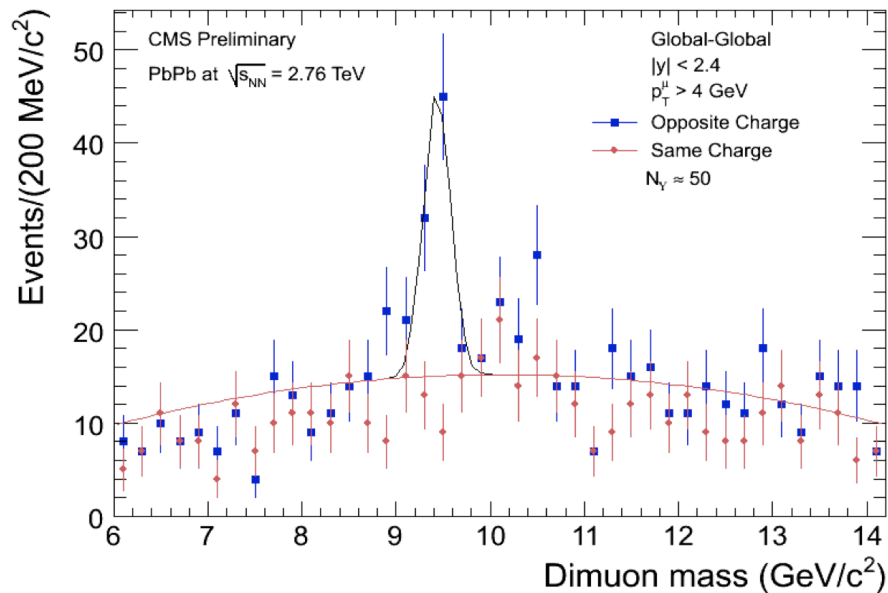
$PbPb$ судар на енергији од 5TeV

- ❖ Визуализација трагова наелектрисаних честица у систему ALICE детектора
- ❖ Главни, **Time Projection Chamber** детектор је пројектован да мери импулсе и реконструише трагове до 8000 наелектрисаних честица по јединици рапидитета у једном $PbPb$ судару
- ❖ У ALICE експерименту, поред TPC-а, постоји десетак других детектора са специјализованим наменама

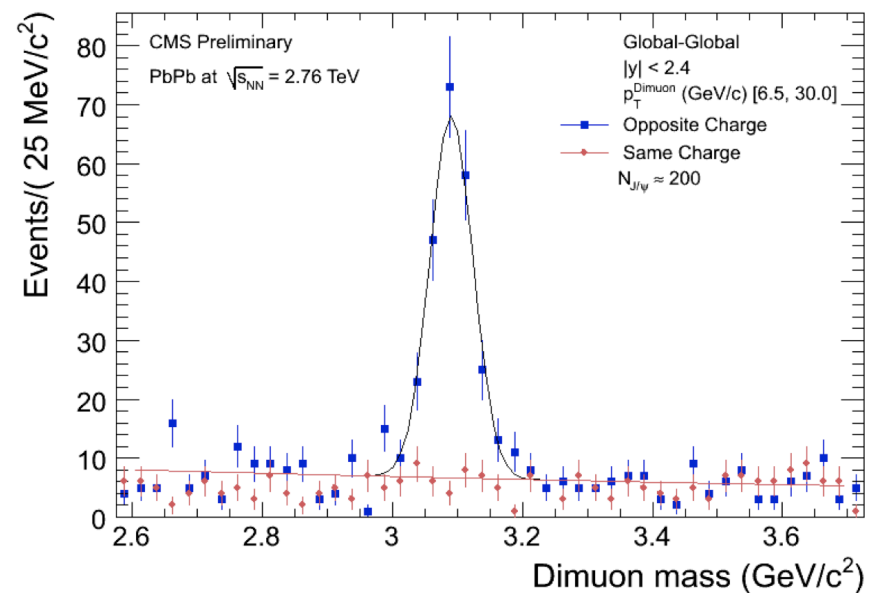


Формирање Кварк-глуонске плазме утиче на фреквенцију појављивања мезона начињених од тешких (s и b) кваркова. Да QGP није формирана, кваркови би остали затворени (конфинирани) унутар честица 'домаћина' које би се слободно кретале према детектору и тамо бивале детектоване преко мионског пара на који се распадају. У супротном, ти мезони се разлажу на конституентне кваркове и фреквенција њиховог појављивања се знатно смањује.

$$\Upsilon(b\bar{b})$$

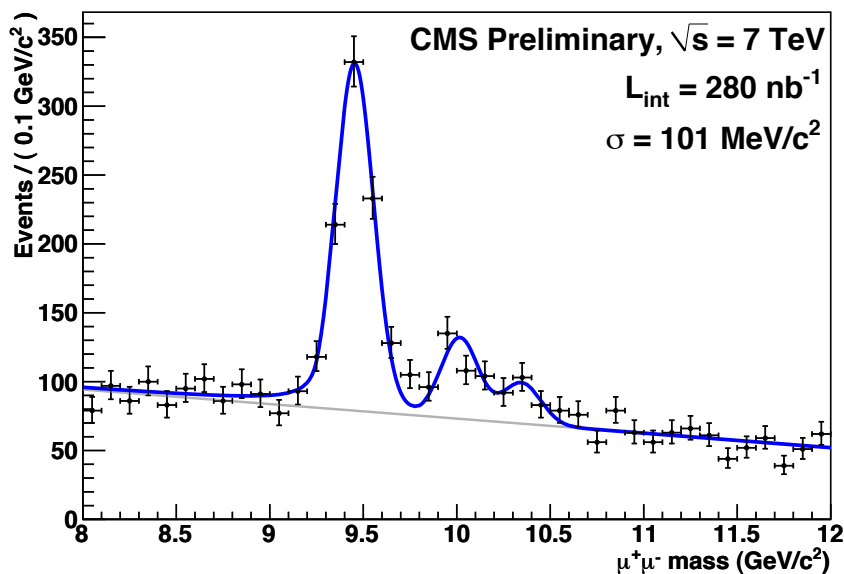


$$J/\Psi(c\bar{c})$$

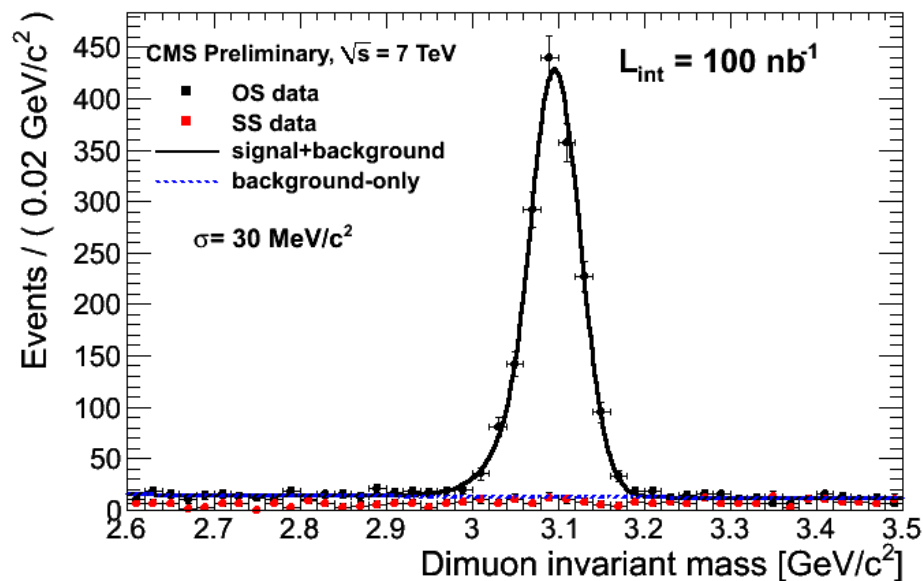


Реконструкција Υ и J/Ψ мезона у pp сударима на 7TeV : Велика статистика прикупљених догађаја као и мали мултиплицитет трагова у њима омогућило је знатно лакшу реконструкцију ових мезона.

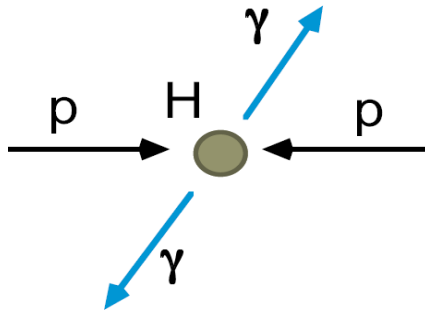
$$\Upsilon(b\bar{b})$$



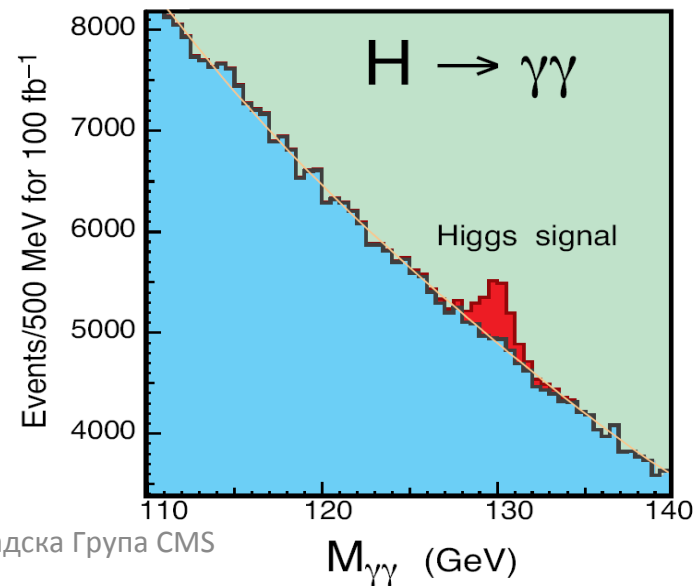
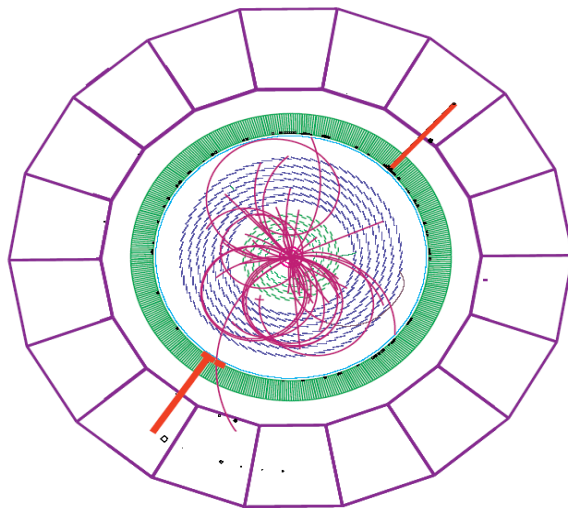
$$J/\Psi(c\bar{c})$$



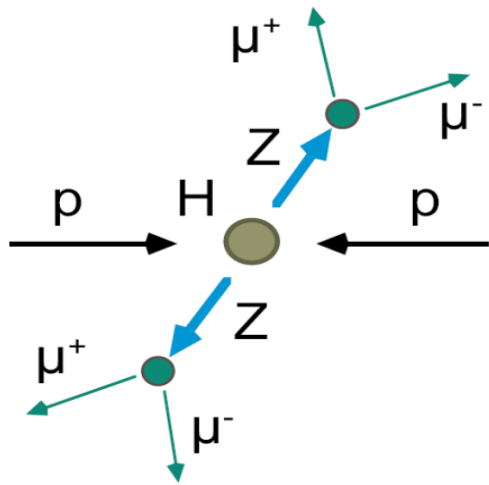
Higgs to 2 photons ($M_H < 140$ GeV)



$H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ is the most promising channel if M_H is in the range 80 – 140 GeV. The high performance PbWO_4 crystal electromagnetic calorimeter in CMS has been optimized for this search. The $\gamma\gamma$ mass resolution at $M_{\gamma\gamma} \sim 100$ GeV is better than 1%, resulting in a S/B of $\approx 1/20$

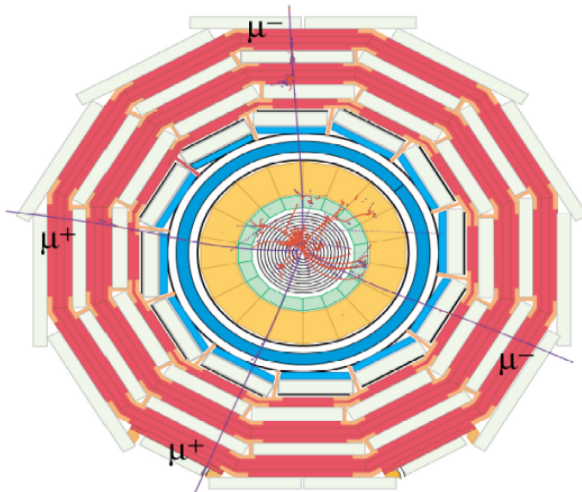


Higgs to 4 leptons ($140 < M_H < 700$ GeV)

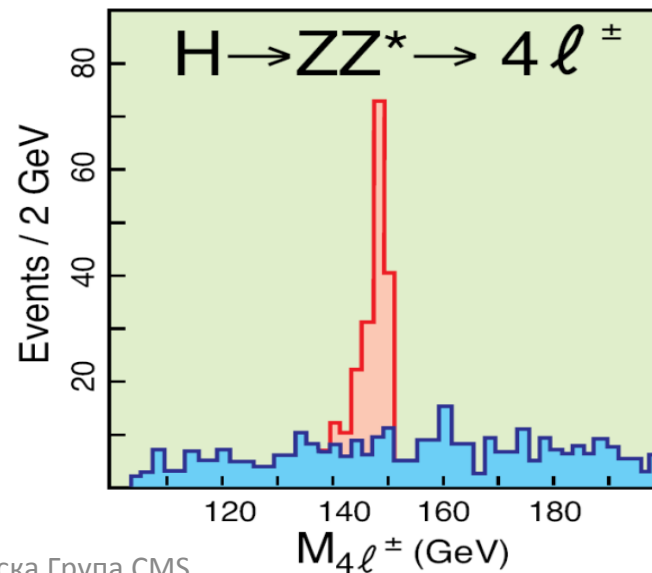


In the M_H range 130 - 700 GeV the most promising channel is $H^0 \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2,^+ 2,-$ or $H^0 \rightarrow ZZ \rightarrow 2,^+ 2,-$. The detection relies on the excellent performance of the muon chambers, the tracker and the electromagnetic calorimeter.

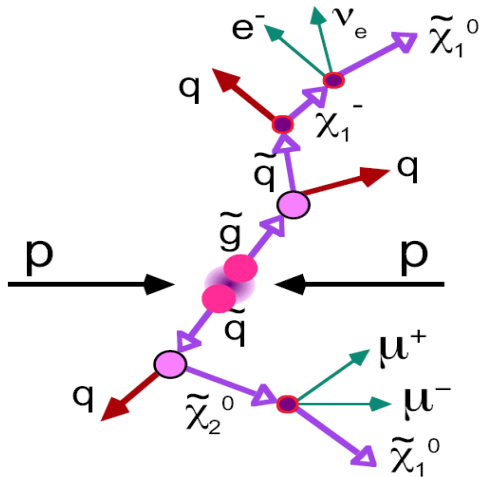
For $M_H \leq 170$ GeV a mass resolution of ~ 1 GeV should be achieved with the combination of the 4 Tesla magnetic field and the high resolution of the crystal calorimeter



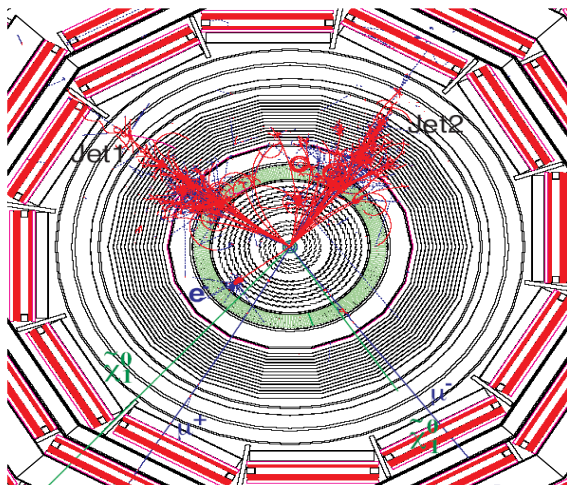
$M_{\text{Higgs}} = 150$ GeV



Sparticles



Production of sparticles may reveal itself through some spectacular kinematical spectra, with a pronounced "edge" in the $\chi_1^{+, -}$ mass spectrum reflecting $\chi_2^0 \rightarrow \chi_1^{+, -} \chi_1^0$ production and decay. An example of such a spectrum in inclusive $\chi_1^{+, -} + E_t^{\text{miss}}$ and of a $3\chi_1^{\pm}$ production event are shown below



SUSY event with
3 leptons + 2 Jets signature

Inclusive $e^+e^- + E_t^{\text{miss}}$ final states

