

Jet quenching kísérleti felfedezése és kutatása

Lökös Sándor

Kísérleti részecskefizika szeminárium

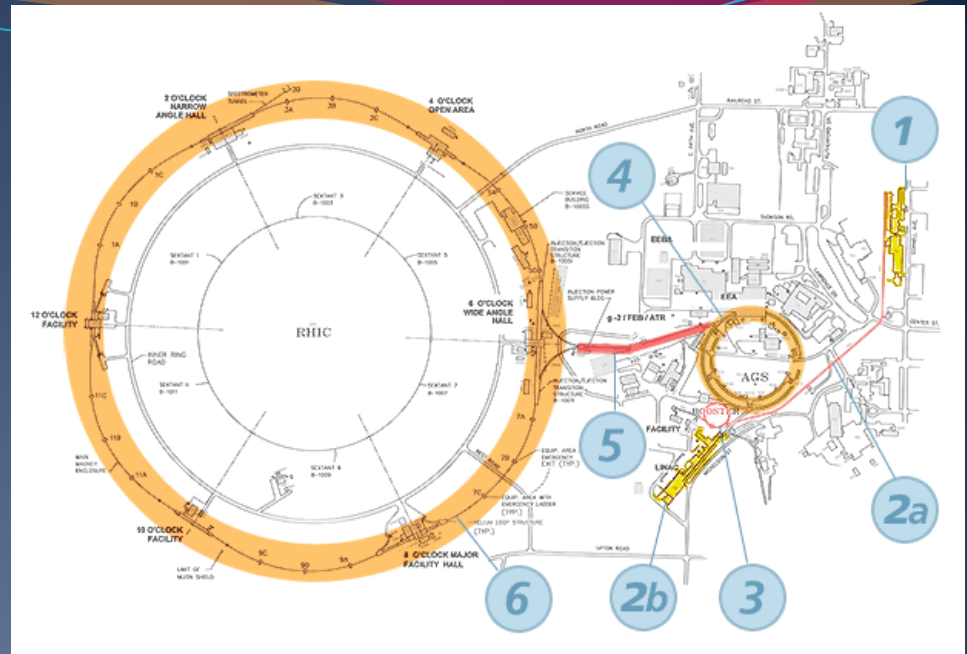
2013.

Tartalom

- RHIC bemutatása
 - Detektorok, kísérletek
- Egy kis jetfizika
 - Parton modell, jetek és egyéb állatfajták
- Jet quenching jelensége
- Megfigyelések és magyarázatok
- Ellenőrzés avagy a $d+Au$ ellenpróba
- Dráma végkifejlet

A RHIC részei [1]

1. Tandem Van der Graaf
(ez készíti az ionokat)
2. Út a Boosterbe
 1. Tandem-to-Booster line
 2. LINAC
3. Booster szinkrotron
4. Alternating Gradient Booster (itt elérik a $0.997c$ -t)
5. AGS-to-RHIC line (itt választják szét az ionokat két nyalábra és engedik a gyűrűkbe)
6. A gyűrűk hat ponton metszik egymást, amelyek közül négyhez telepítettek detektorokat



Relativistic Heavy Ion Collider

- BRAMHS & PHOBOS: speciális tulajdonságok vizsgálata
- STAR: a kifagyáskor keletkező hadronok számának és tulajdonságainak pontos mérése
- PHENIX: az ütközések korai szakaszában keletkező fotonokat és leptonokat vizsgálja, valamint a kifagyáskor keletkező hadronokat detektálja. Ezzel fogunk részletesebben megismerkedni



A PHENIX kísérlet

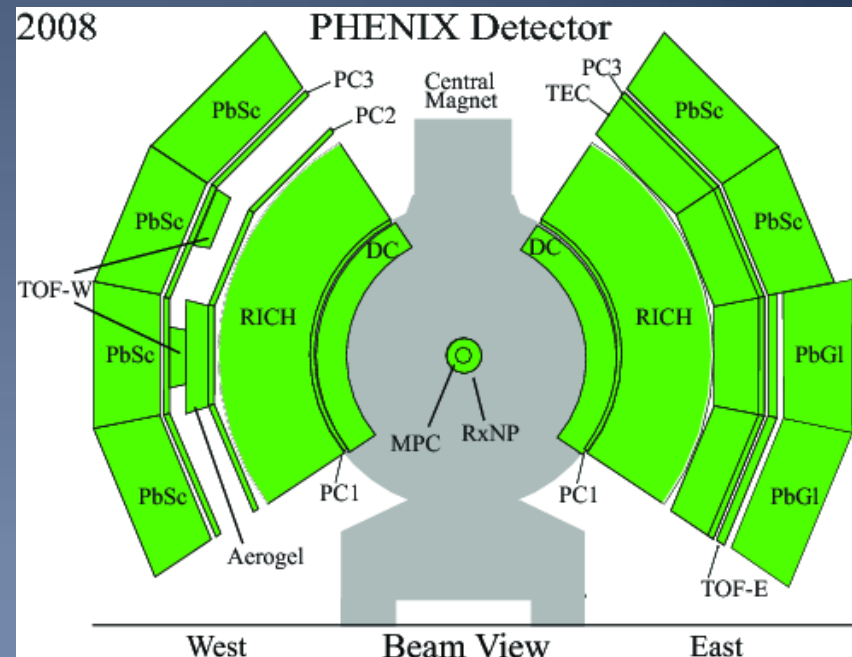
- Brookhaven National Laboratory [2]
- sQGP kutatása (és felfedezése)
- A QCD fázisdiagramjának feltérképezése
- Ősrobbanásszerű körülmények
- $p+p$, $d+X$, $X+X$, ... ütközések

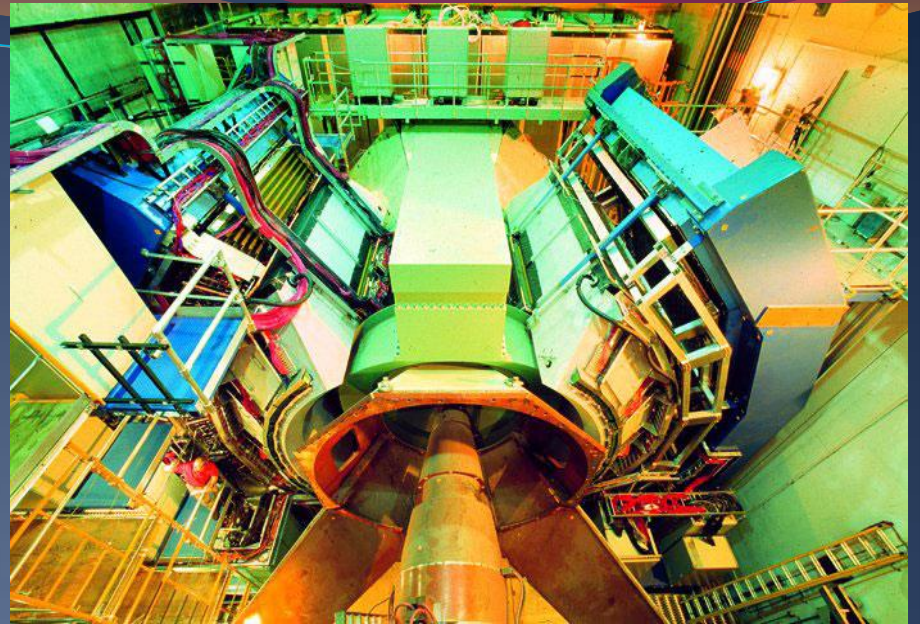


PHENIX esemény

PHENIX detektorok

- Kamrák (Drift, Pad, hely meghatározása)
- Kaloriméterek (PbSc, PbGI, EMCal, ZeroDegree)
(Energia meghatározás)
- Cserenkov-detektor
(sebesség meghatározás)
- ToF detektorok
(Time of Flight → sebesség)
- Beütésszámlálók (BBC)
- Müion detektorok

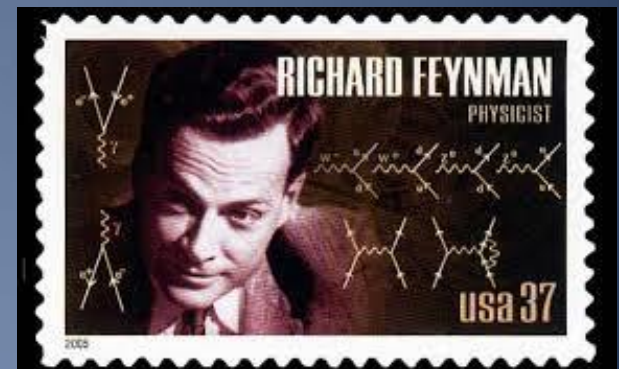
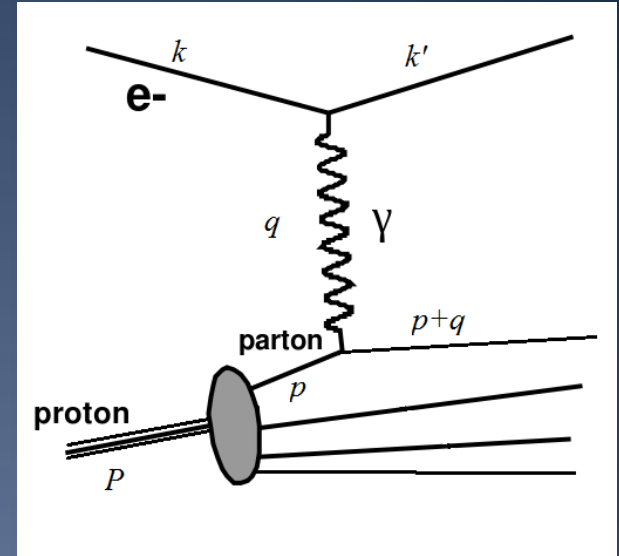




Parton modell

'60-as években Feynman és Bjorken [3]

- A protonok gyengén kötött részecskékből állnak
- Ezek kis számú és kvázi-pontszerű objektumok
- Fermionok elektromos töltéssel
- Nagy impulzuscserére nincs erős kölcsönhatás, csak elektromágneses
- Az ütközésben kilökött részecske erősen kölcsön hat a környezetével (protonokkal, egyébekkel)

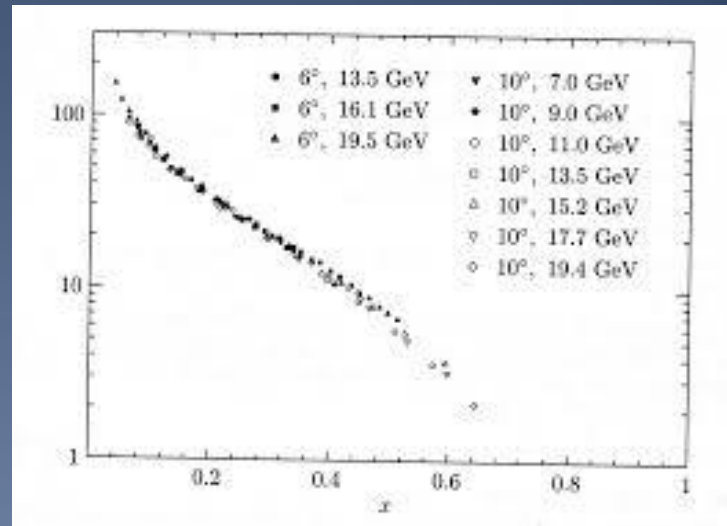


Parton modell – példafolyamat

- Fontos fogalom bevezetése miatt szükséges
- QED $\rightarrow \sum_{spin} |M|^2 = \frac{8e^4 Q_i^2}{\hat{t}^2} \left(\frac{\hat{s}^2 + \hat{u}^2}{4} \right)$, így a diff.hkm.
- $\frac{d\sigma}{d\hat{t}} = \frac{2\pi\alpha^2 Q_i^2}{\hat{s}^2} \left(\frac{\hat{s}^2 + (\hat{s} + \hat{t})^2}{\hat{t}^2} \right)$
- M az invariáns szórási amplitúdó, $\hat{s}, \hat{u}, \hat{t}$ Mandelstam-változók, α a finomszerkezeti állandó, Q_i az kimenő impulzusok
- Elegendő az elektron végállapotbeli impulzusát vizsgálni, nagyenergiás határesetben
- \hat{s} -re nehezebb, de kiszámolható
- Elasztikus $e^- + p^+$ ütközést feltéve: $\hat{s} = \frac{Q^2}{2Pq}s$
- q a kicserélt impulzus, P a proton teljes impulzusa, s az elektron-proton rendszer tömegközépponti energiájának négyzete

Parton eloszlásfüggvény

- Vegyük észre: skálázás! $x = \frac{Q^2}{2Pq}$ az ún. *Bjorken-skála!*
- Kísérlet: SLAC-MIT
- $1\text{GeV}^2 < Q^2 < 8\text{GeV}^2$
- 10% pontos!
- Mi van az ábrán?



$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \sum_i f_i(x) Q_i^2 \frac{2\pi\alpha^2}{Q^4} \left[1 + \left(1 - \frac{Q^2}{xs} \right)^2 \right]$$

Valami hasonló: egy x -függő normálás még van, hogy a kinematikai függéstől megszabaduljunk.

Parton eloszlásfüggvény

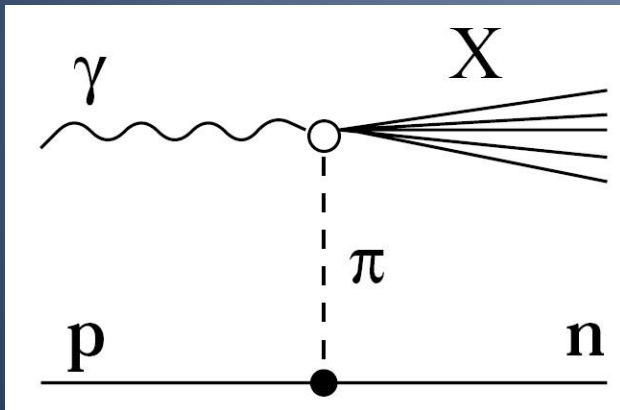
- $f_i(x)$ parton eloszlásfüggvény, vagy *struktúrafüggvény* [4]
- Egzaktul nem ismert, elméletileg nem származtatható explicit alakban. Függ a hadron *belső szerkezetétől!*
- Igazából a struktúrafüggvény innen jön:

$$E \frac{d\sigma}{d^3p} \sim \int dx_1 dx_2 f_{i/p}(x) f_{j/p}(x) \frac{d\sigma}{d\hat{t}}$$

- QCD improved parton model
- LO, NLO, NNLO, ... a gluon önkölcsönhatás felrobbantja
- A hatáskeresztmetszet mérésével lehet „mérni” a hadron belső szerkezetét
- Low-x physics: $x \ll 1 \rightarrow f_{i/p}(x, Q^2) \sim x^{-\Delta}$, ahol Δ egy szám

Példafolyamat – jetek [5]

- $\gamma p \rightarrow n X$ folyamat
- ZEUS collaboration in HERA
- Proton és neutron kaloriméterek mérik a mélyen rugalmatlan szórásból érkező *jeteket*, amelyek a struktúrafüggvényekről adnak számot (többek között)
- Összehasonlították NLO számolásokkal
- A tengerkvarkok a pion impulzusának 10-20%-át adják



Itt az X-nél lévő vonalakat, partonokat avagy *jetet* mérték a kaloriméterek.

Jetfizika

- Mi az a jet?

„At high energy the hadrons appear in *jets*, cluster of several hadrons all moving in approximately the same direction.”

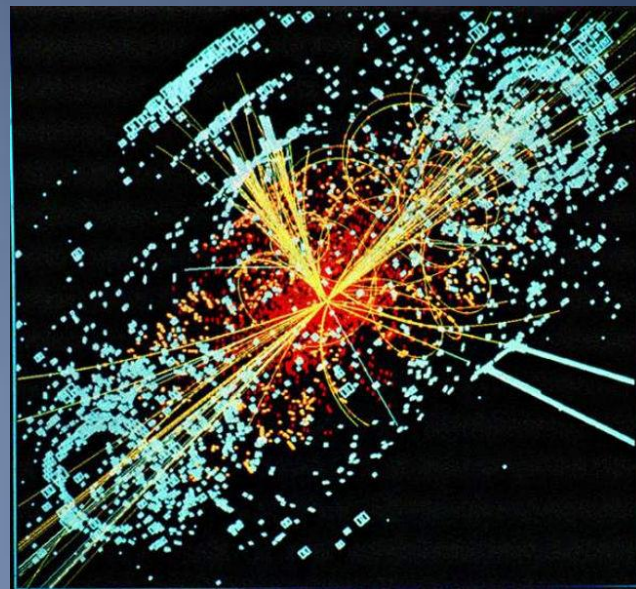
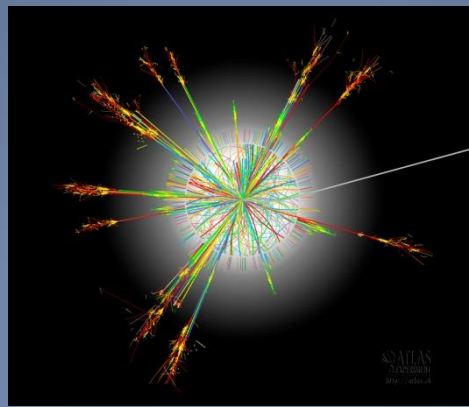
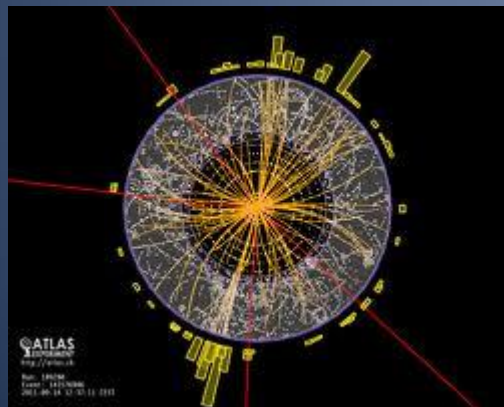
-- Peskin&Schroeder --

Egy részecske fragmentumainak α nyílásszögű kúpja.

- Hogyan figyelhető meg?

Nehezen. A jet alkotója definíció kérdése.

- → Detektálási / adatfeldolgozási technikák.



Jet meghatározási eljárások

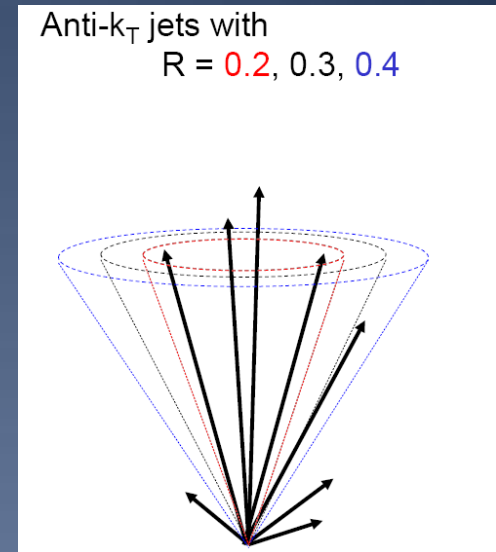
- *High p_T* : kiveszem a legnagyobb impulzusú részecskét és aköré rajzolok egy α nyílásszögű kúpot
- *(anti-) k_T algoritmus*:

- $d_{ij} = \min(k_{T_i}^{2p}, k_{T_j}^{2p}) \frac{\Delta_{ij}}{R^2}$

- $\Delta_{ij}^2 = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$
- ha anti, akkor $p = -1$

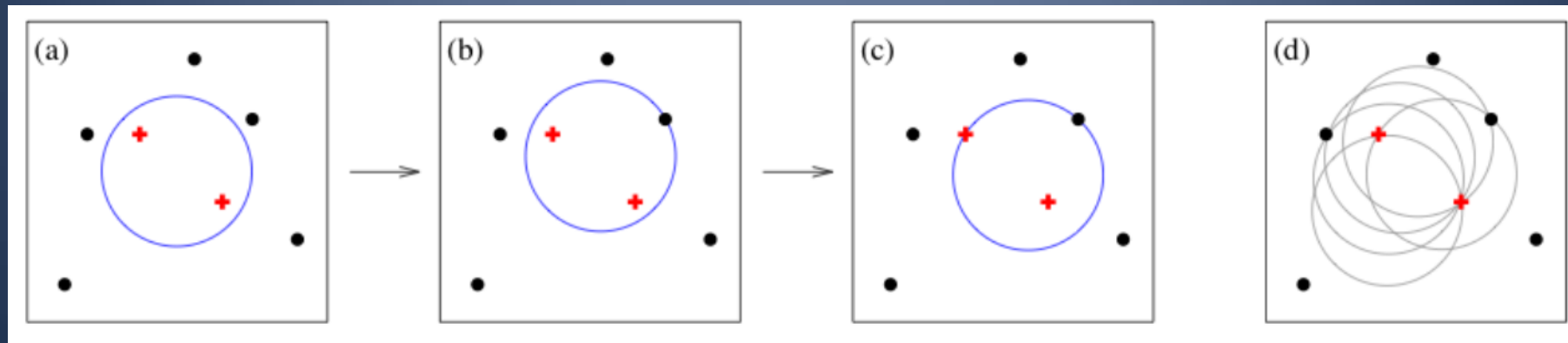
- $d_{iB} = k_{T_i}^{2p}$

- Kiszámítani az mindkét d -t, megtalálni a kegykisebbet
 - Ha a d_{ij} a kisebb, újra kell értelmezni a távolságot
 - Ha a d_{iB} a kisebb, eltávolítjuk a részecskét és hozzácsapjuk a jethez, mint járulék



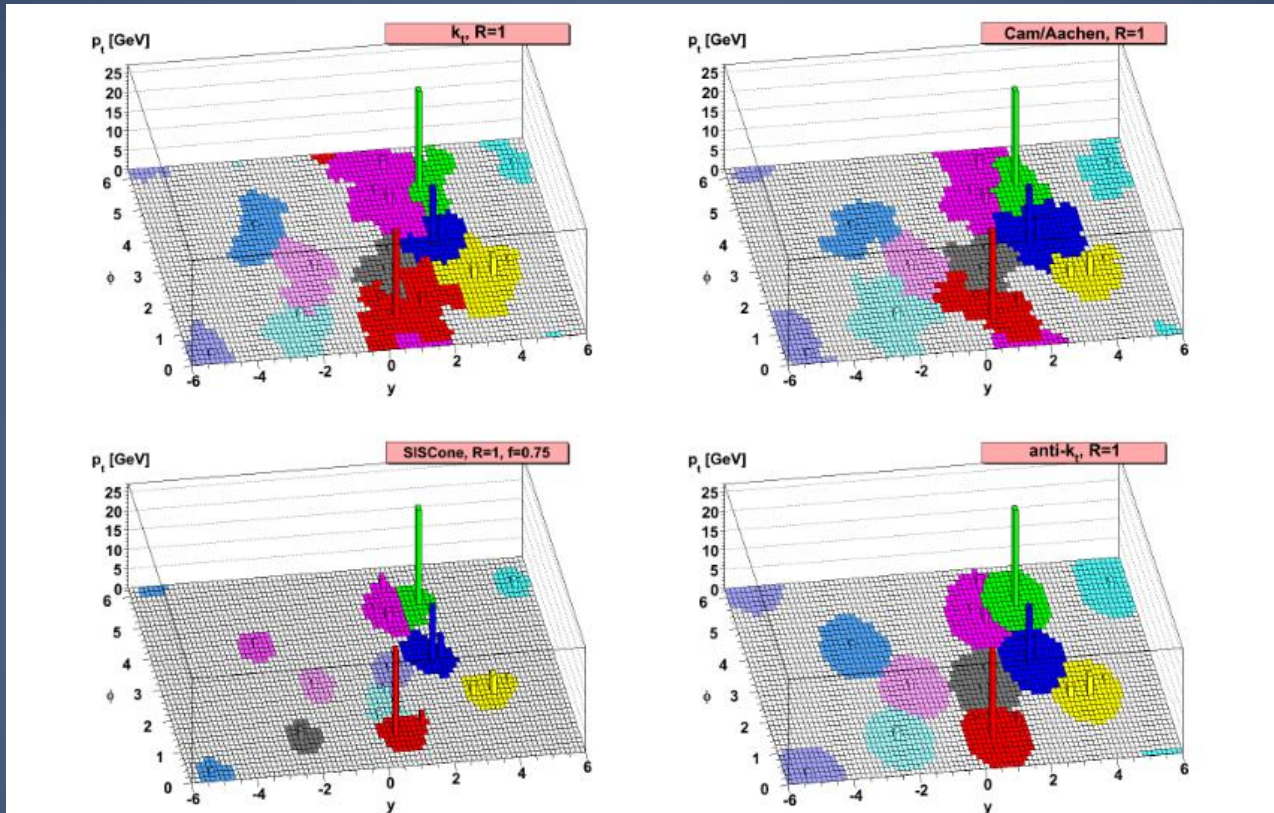
Jet meghatározási eljárások

- SIScone algoritmus
 - Rajzolunk egy kört, úgy, hogy két pont beleessen
 - Addig mozgatjuk, míg egy harmadikat nem érintünk
 - Addig mozgatjuk míg egy másikat nem érintünk
 - Minden így definiált kör egy stabil jet



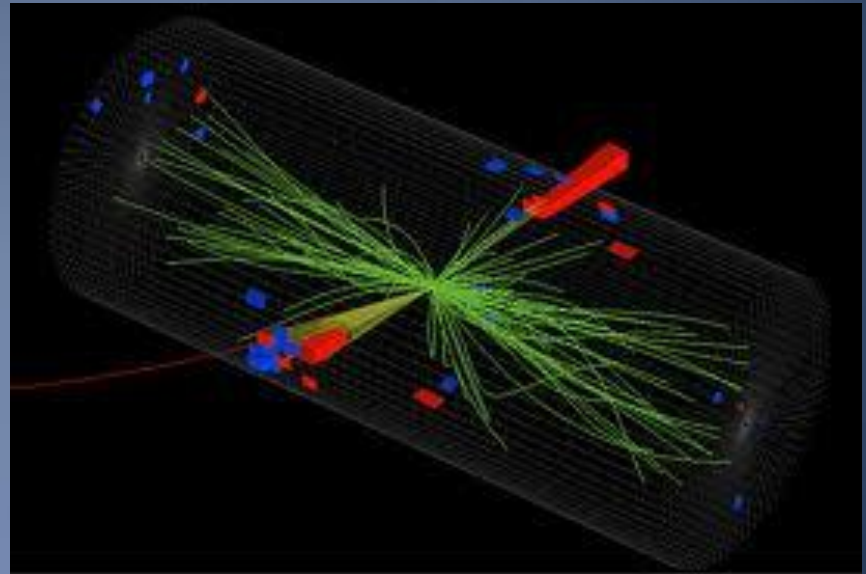
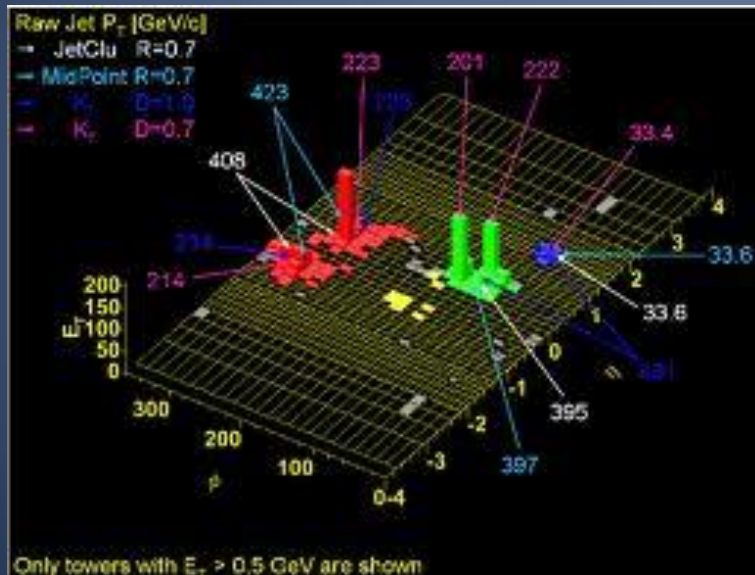
Jet meghatározási eljárások

- Cambridge/Aachen egy pusztán geometriai alapon nyugvó eljárás (lényegében, ha $p=0$)
- Összehasonlítva:



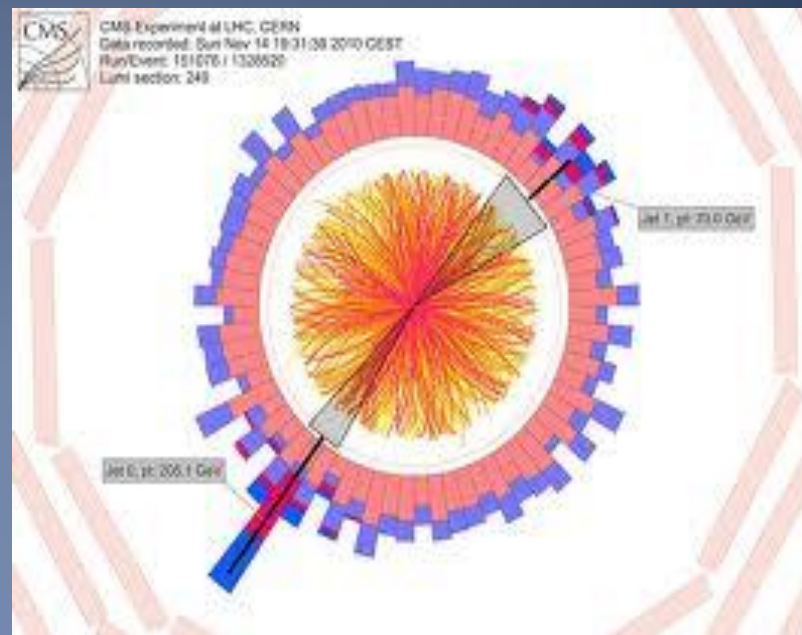
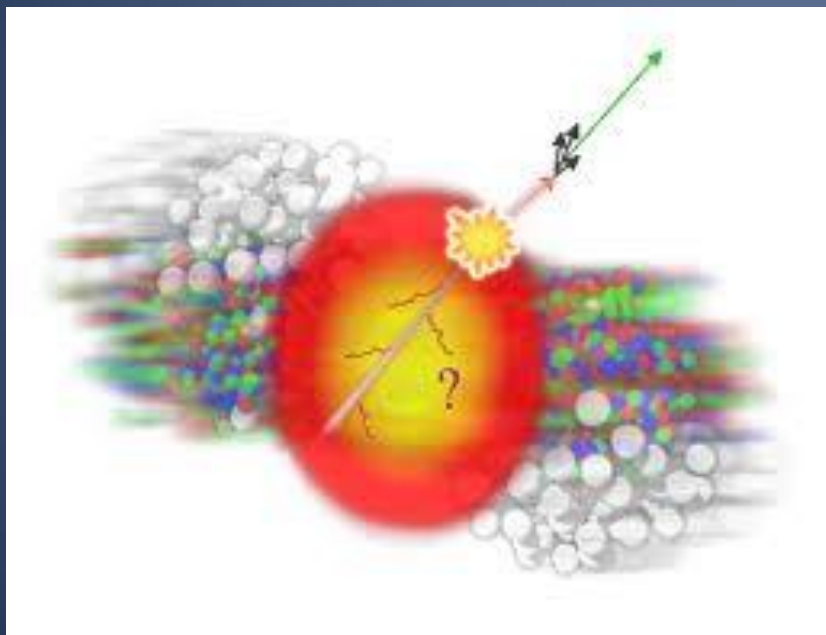
Jetfizika

- Mire „jók” a jetek? Miért érdemes velük foglalkozni?
 - Magukról a „részecskékről” is sokat tanulhatunk
 - Belső szerkezet felderítése
 - Struktúrafüggvények, Parton eloszlásfüggvények (PDF)
 - Sok információ az anyagról/közegről, amiből érkeznek→ az előadás lényege: jetquenching



Jet quenching – jelenség

- Jet quenching = jet elnyomás. Mi nyom el mit?
- Valami új elnyomja a nagyimpulzusú részecskéket
- Várakozás: szimmetrikus impulzuseloszlás (későbbi mérés)
- Ehelyett: aszimmetria (későbbi mérés)!



Jet quenching – megfigyelések

- PHENIX kísérlet, $\sqrt{s_{NN}} = 130\text{GeV}$
- Maganyag \rightarrow Quark Gluon Plasma
- Nukleáris modifikációs faktor:

$$R_{AA}(p_T) = \frac{\left(\frac{1}{N_{evt}}\right) d^2 N^{A+A}}{dp_T d\eta} \frac{1}{\left(\frac{\langle N_{binary} \rangle}{\sigma_{inel}^{N+N}}\right) d^2 \sigma^{N+N} / dp_T d\eta}$$

- Egyszerűbben:

rész.szám A+A ütközésekben

(rész.szám p+p ütközésekben) \times (p+p ütközések száma az A+A ütközésekben)

- Ha létrejön QGP, akkor $R_{AA} < 1$, ha nem akkor $R_{AA} \approx 1$

A kísérleti megvalósítás

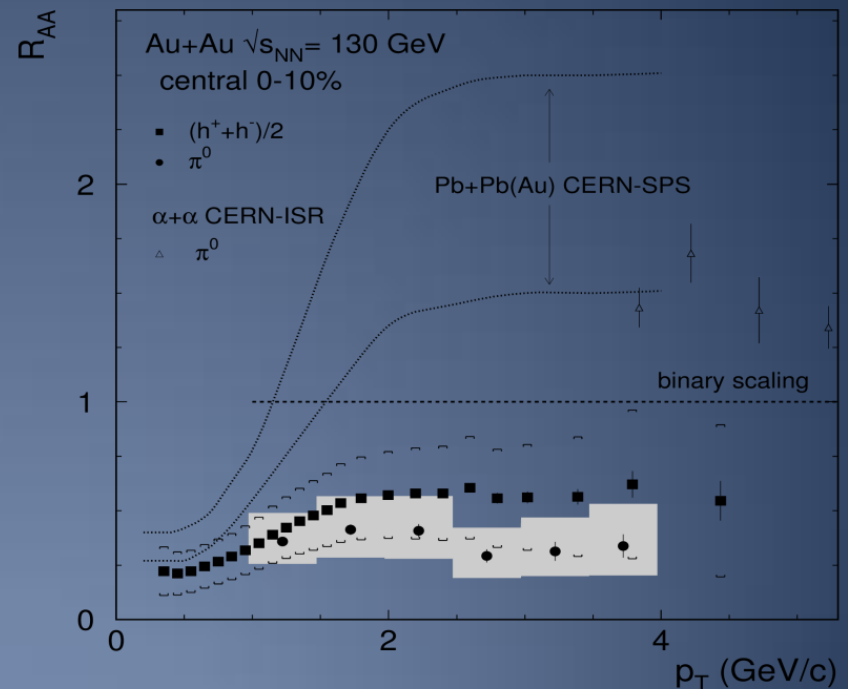
- Töltött hadronok és π^0 megfigyelések
- Au+Au centrális és periferikus ütközések
- Detektorok
 - Töltött részecskékhez
 - Drift kamra (részecsketrack 2.0-2.4m-ig)
 - Multi-wired proporcionális kamrák pad kiolvasóval (PC1 ~2.5m, PC3 megerősíti ~ 5m)
 - Semleges pionhoz
 - $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ bomlással
 - Ólom szcintillátor (PbSc)
 - Ólomüveg Cserenkov kaloriméter (PbGl)
 - Foton tömegközépponti rendszerében binnelik a foton párokat
- Szimuláció a zaj csökkentésére, impulzusfelbontás, visszakövetési hatékonyság javítására : GEANT
 - Periferikus ütközésekben a visszakövetés 98 %-os hatékonysággal működik
 - Centrális ütközéseknél ez 68 %

A kísérleti megvalósítás

- Az események osztályozása
 - Beütésszámlálók (BBC)
 - Hadronkaloriméterek (ZDC)
- Glauber-modell
 - Csak a lényeg: Au+Au ütközés olyan mintha csak a nukleonok bináris ütközései lennének
- Glauber-modell + szimuláció BBC, ZDC-re
 - $\langle N_{binary} \rangle_{central} = 905 \pm 96$
 - $\langle N_{binary} \rangle_{peripheral} = 20 \pm 6$
 - $\frac{\langle N_{binary} \rangle_{central}}{\langle N_{binary} \rangle_{peripheral}} = 45 \pm 13$

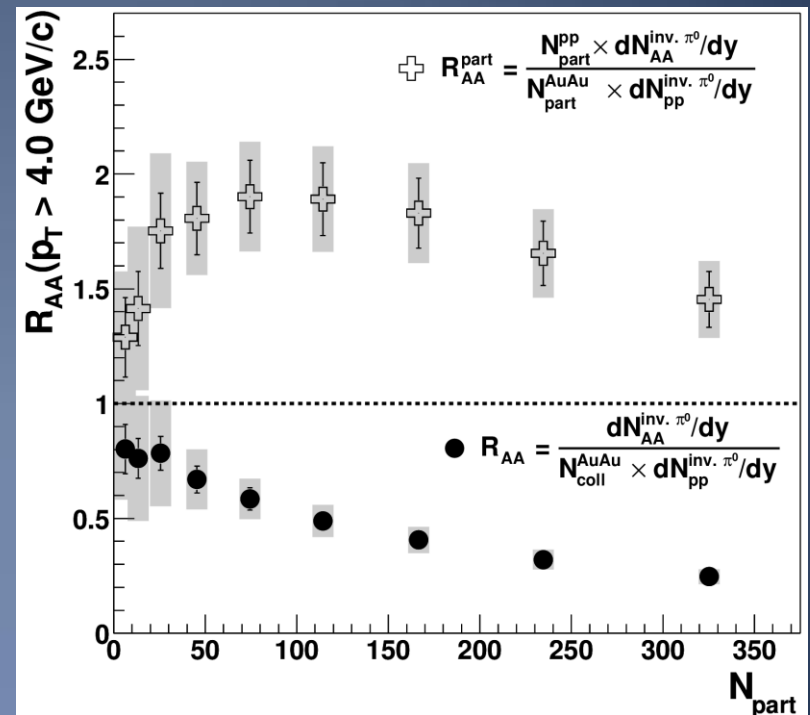
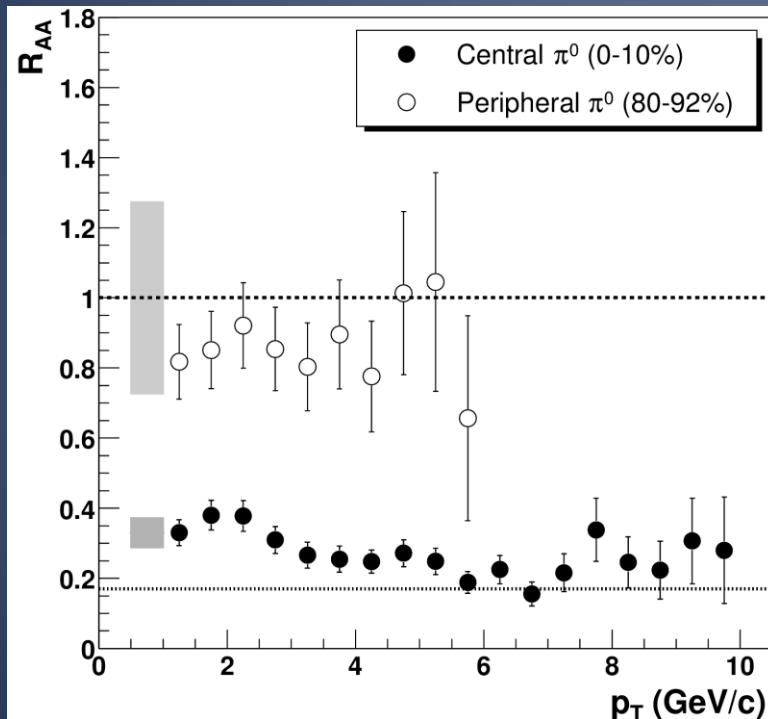
A kísérletek eredménye

- Eredmény:
 - Periferikus ütközéseknél a jóslt eredmények
 - Centrális ütközéseknél lényegesen alacsonyabb a modifikációs faktor értéke a vártnál
- Meglepő, mert a p+A ütközéseknél a várt bináris skálázás tapasztalható
- „Bináris kép” → 4 GeV-nél $R_{AA} \cong 1.3$



A kísérletek eredménye

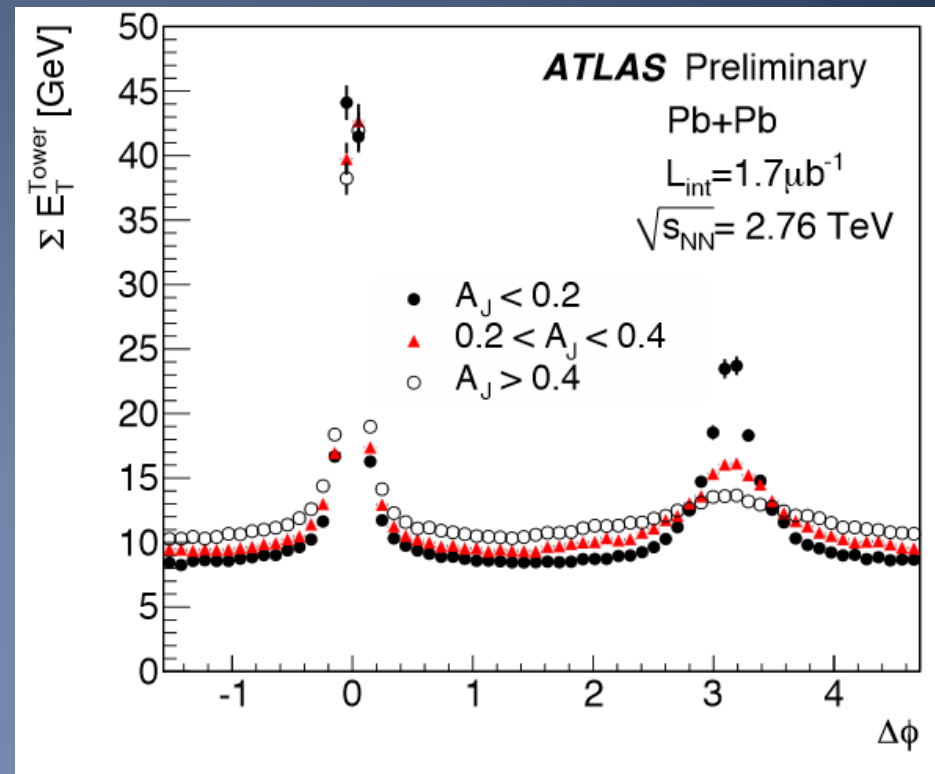
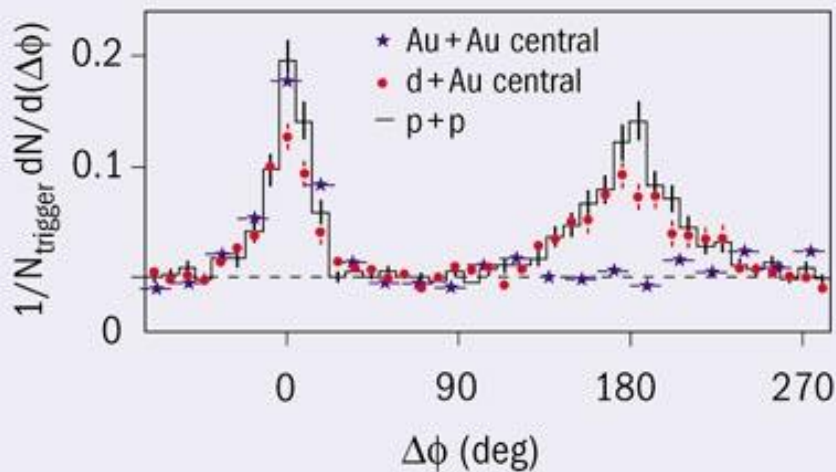
- Megmérték ugyanezt a modifikációs faktor π^0 -ra külön Au+Au ütközésekben $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ esetén $1\text{GeV} < p_T < 10\text{ GeV}$ tartományban
- A jelenség továbbra is fennáll



Szögeloszlás mérése

- Ezt az ATLAS mérte
- Alátámasztják a dijet elnyomás elképzelést
- Lényeg, hogy az elnyomott jetnek van „párja”

Ami fontos és látszik a bal alsó képen, hogy csak A+A ütközésekben jelenik az elnyomás



Jet quenching – Lehetséges magyarázatok

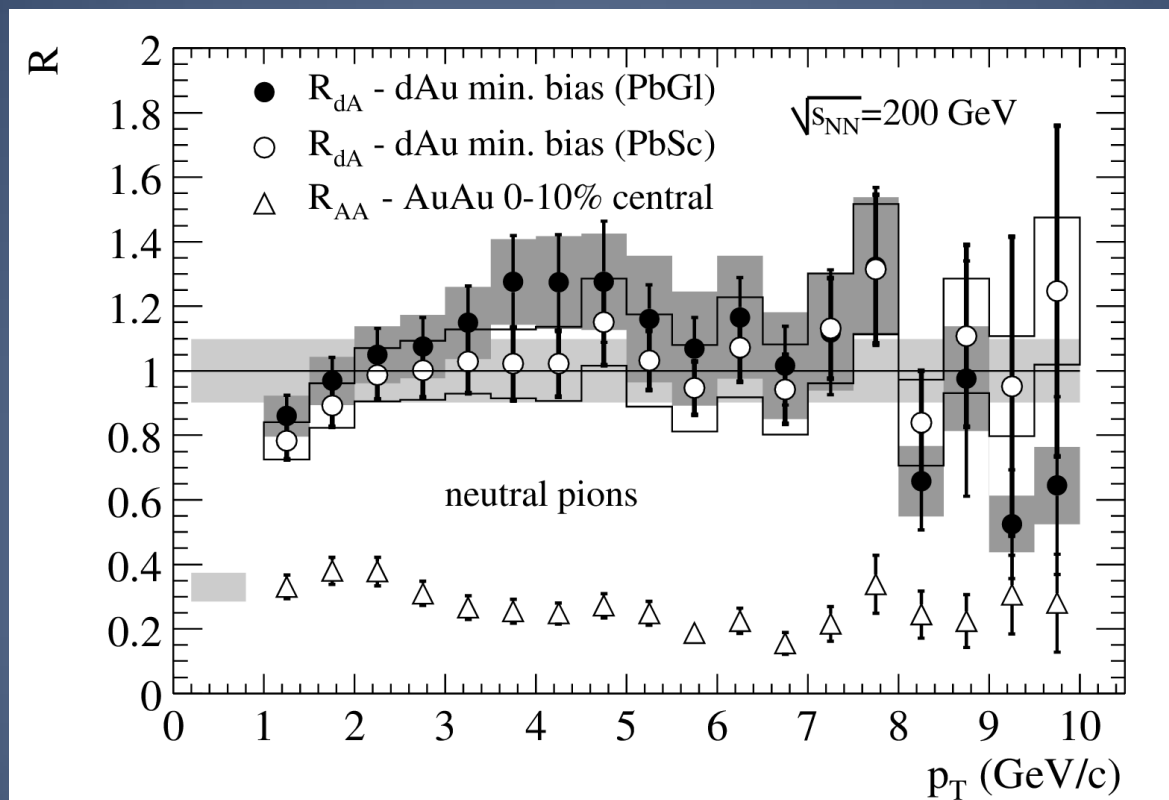
- QGP (Quark Gluon Plasma)
 - Az anyag egy eddig nem ismert, csupán feltételezett formája jön létre
 - A nagy energián és nyomáson az aszimptotikus szabadság megengedi, hogy a kvarkok és a gluonok szabadon létezzenek
 - Ezen az anyagon áthaladva, a jet lelassul
 - Érdekes lenne, mert az Univerzum is ilyen lehetett pár mikroszekundumos korában

Jet quenching – Lehetséges magyarázatok

- CGC (Colour Glass Condensate)
 - A magok Lorentz kontrakciója
 - Az összenyomódott magban a gluonok „falba tömörülnek” álló megfigyelő számára
 - Magas energián a gluonok sűrűsége nagyon megnő ebben a „falban”
 - Ez a glasma
 - Később kiderül, hogy ez nem magyarázza a jelenséget. Ellenpróbaként végezték el a $d+Au$ kísérletet

Jet quenching – ellenpróba

- Döntő kísérlet: deuteron ellenpróba: d+Au
- Ha a mag szerkezete módosul, azt most is látni kell
- Ha nem, akkor a szokásos bináris skálázás



Jet quenching - s QGP

- Láthattuk, hogy a semleges és a töltött pion is lefékeződik
- Feltételezhető, hogy erősen kölcsönható az anyag
- Mérjük meg! De hogyan?
- Olyan részecskét detektáljunk, amely nem vesz részt az erős kölcsönhatásban: foton!
- Nehéz, mert a semleges piont is így detektáljuk
- Azért megoldható

Azért megoldható – de hogyan?

- Foton detektálással gond, hogy a π^0 -t is így detektáljuk
- Lehetőség: ismert bomlásból származó háttér, azon megjelenő többletre illesztünk. Bonyolult! Alig 10% a direkt foton hozam.
- Milyen folyamatok eredményezik a direkt fotonokat?

$$q + g \rightarrow q + \gamma^* \rightarrow q + e^+ + e^-$$

$$\eta \rightarrow \gamma + \gamma \rightarrow \gamma + e^+ + e^-$$

$$\omega \rightarrow \gamma + \pi^0 \rightarrow \gamma + e^+ + e^-$$

- A folyamat leírható egy bonyolult képlettel [6]
- Figyeljük az elektron – pozitron párokat
- $\pi^+ + \pi^- \rightarrow e^+ + e^-$ is jönnek ilyen párok, de azzal számolhatunk már, mert nem jelentős
- Ráadásul ezek az $m_{ee} \geq 2M_\pi$ tartományban vannak

Direkt fotonok mérése

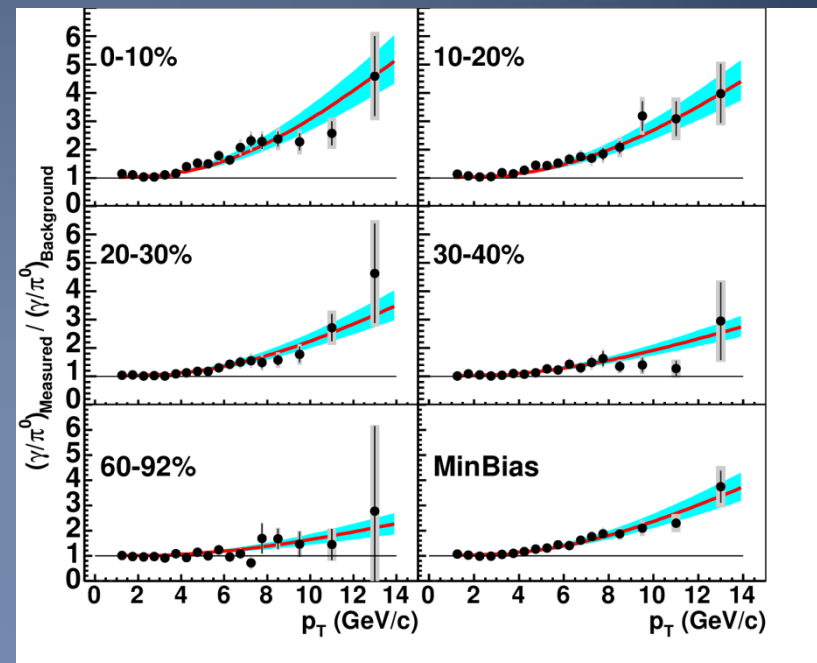
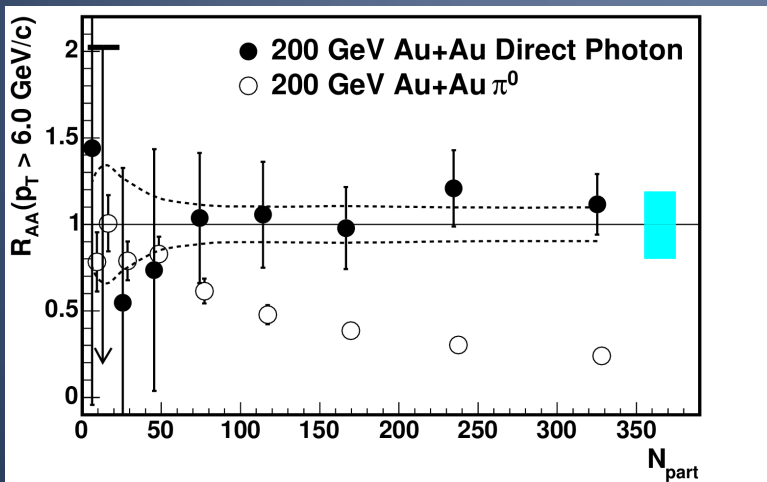
- Ötlet: a direkt fotonokra nincs hatással a környező anyag
- Az előző trükk alapján megfigyelhetjük
- BBC és ZDC a triggereléshez
- EMCal a γ , π^0 , η hozam meghatározásához
- Centralitás vizsgálata a BBC és ZDC töltött részecskés jeleinek vizsgálatával
- Glauber-modell Monte Carlo + ZDC&BBC szimuláció
 - Bináris ütközések száma
 - Résztvevő nukleonok száma
 - Minden centralitás „binre”

Direkt fotonos eredmények

- Itt is definiálható a modifikációs faktor

$$R_{AA}(p_T) = \frac{1/N_{evt} \times d^2 N_{AA} / dp_T dy}{\langle N_{coll} \rangle / \sigma_{pp}^{inel} \times d^2 \sigma_{pp} / dy dp_T}$$

- Jó egyezés a NLO pQCD számolásokkal

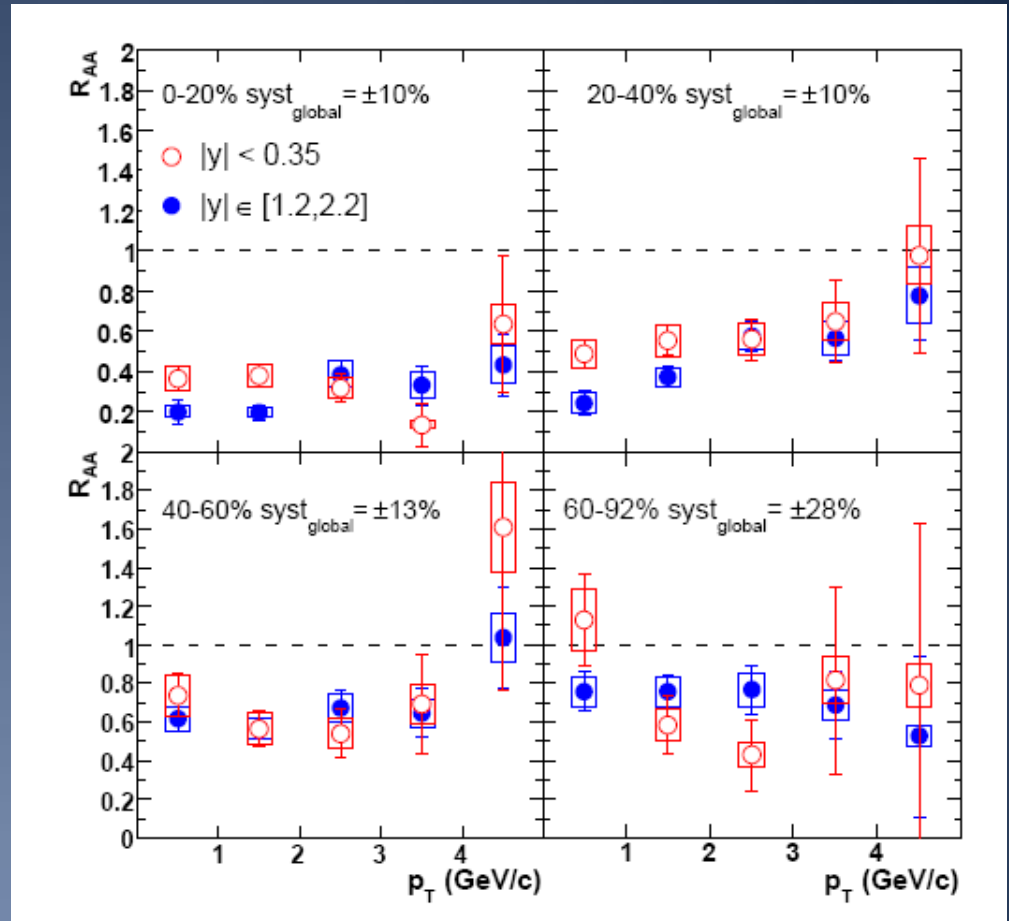


Mérések nehéz kvarkokra

- J/Ψ részecske elnyomását vizsgálták [7]
- $c\bar{c}$ kötött állapot
- Az elnyomás függ az állapot kötési energiájától és a környező anyag hőmérsékletétől
- IQCD számolások szerint a J/Ψ nem disszociál a kritikus hőmérséklet alatt
- Sok effektus befolyásolja a hozamot (nem térünk ki)
- e^+e^- és $\mu^+\mu^-$ párokkal vizsgálták
 - MuTr, MuID
 - EMCal
 - RICH

Mérések nehéz kvarkokra

- Kimérték a modifikációs faktort a centralitás függvényében
- A nehéz részecskék is „el vannak nyomva”



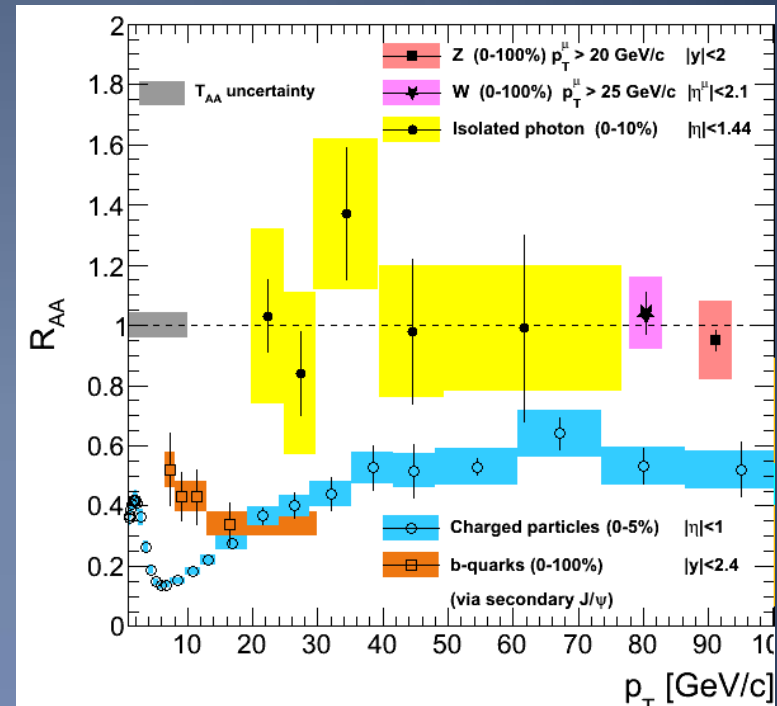
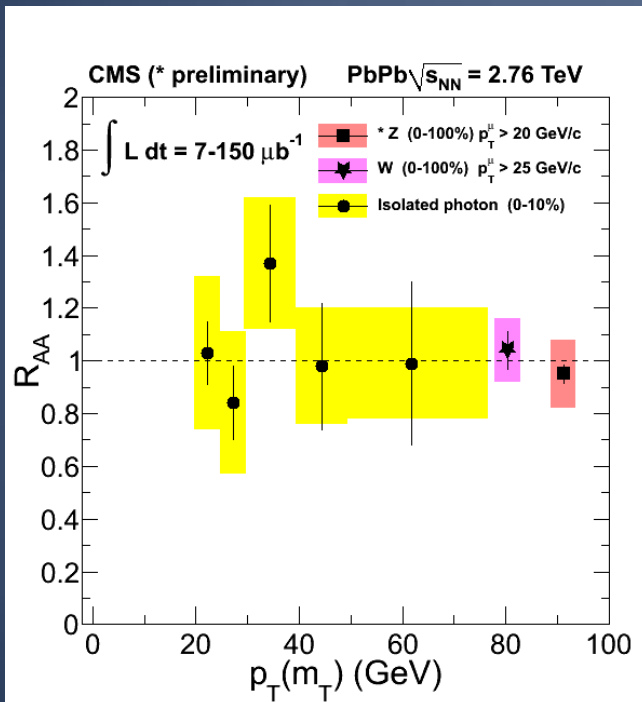
Mérések egyéb „színtelen” részecskékre

- Megmérték a modifikációs faktor Z^0 -ra

$$Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$

- Megmérték a modifikációs faktort W -re

$$W \rightarrow \mu + \nu$$

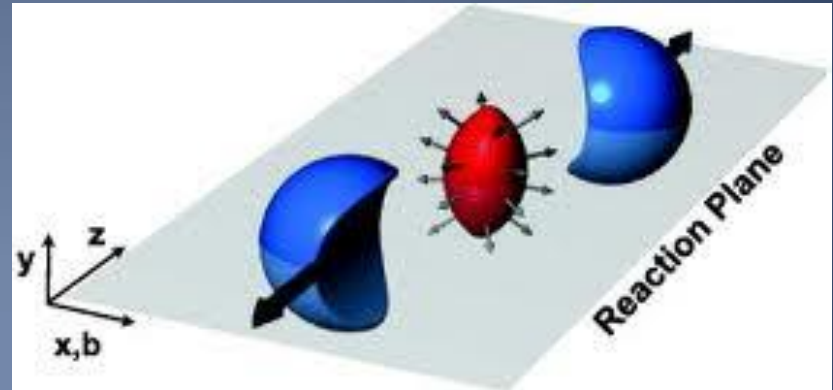


Drámai végkifejlet I.

- A felfedezett erősen kölcsönható anyag sűrű, forró plazma ($11600K = 1eV \rightarrow 170MeV \approx 2 \times 10^{10}K$)
- „Szabad” kvarkok és gluonok alkotják
- Rövid ideig létezik: $\tau = 2.7 \times 10^{-23}s$
- Az Univerzum is ilyen lehetett pár mikromásodperces korában
- (Hadronizáció folyamatának megértése)
- (QCD fázisdiagram megértése)

Drámai végkifejlet II.

- További kísérletekből több részlet is kiderül:
 - Majdnem tökéletes folyadék
 - A viszkozitás az elméleti minimum környékén van
 - Az elméleti minimum az AdS-CFT korrespondencia elmélet által jóslott, de nem bizonyított $\hbar/4\pi$
 - Ellipszoidális szimmetriája van
 - Az ütközés geometriájából fakadó szimmetria
 - Robbanásszerűen tágul
 - Egyszerű Hubble-szerű sebességprofillal leírható



Köszönöm a figyelmet!

Hivatkozások, források

- [1] www.bnl.gov/rhic/complex
- [2] <https://www.phenix.bnl.gov/>
- [3] P&Sch:Ch.14, Invitation
- [4] <http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/rpp2011-rev-structure-functions.pdf> főleg a 16.2.1
- [5] arXiv:hep-ph/0107011
- [6] arXiv:hep-ph/08044168
- [7] <http://arxiv.org/abs/nucl-ex/0611020>

A QGP felfedezésének mérföldköveit jelentő cikkek:

- Jet quenching: Phys. Rev. Lett. 88, 022301 (2002), Phys. Rev. Lett. 91, 072301 (2003)
- Deuteron ellenpróba: Phys. Rev. Lett. 91, 072303 (2003)
- Kollektív viselkedés, folyadék jelleg: Nucl. Phys. A 757, 184-283 (2005)
- Skálaviselkedés: Phys. Rev. Lett. 98, 162301 (2007)
- Viskozitás: Phys. Rev. Lett. 98, 172301 (2007)
- Kezdeti hőmérséklet: Phys. Rev. Lett. 104, 132301 (2010)