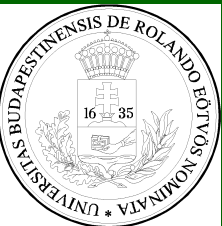
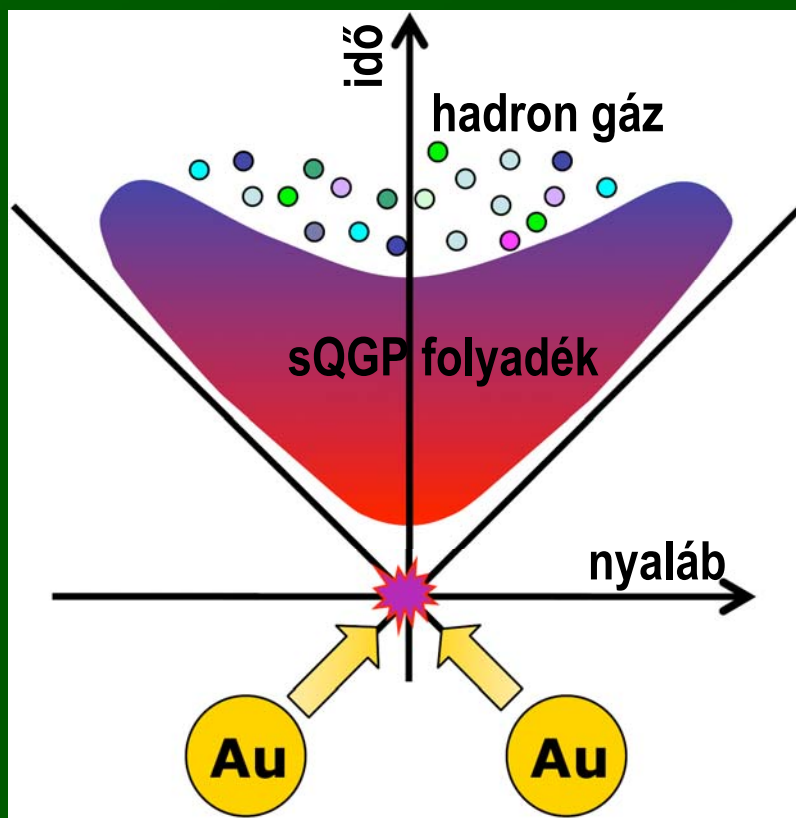


A tökéletes kvarkfolyadék

Csanád Máté
Atomfizikai Tanszék

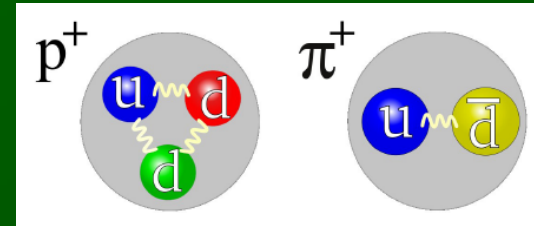


A kvarkanyag kutatásának mérföldkövei a RHIC gyorsítónál és annak PHENIX kísérleténél

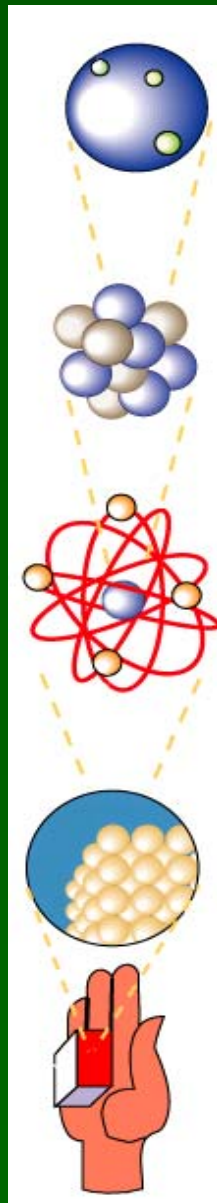


A részecskék Standard Modellje

- Elektron elemi részecske
- Proton, neutron, hadronok nem $\Rightarrow$ kvarkok
- Három kölcsönhatás, közvetítő bozonok



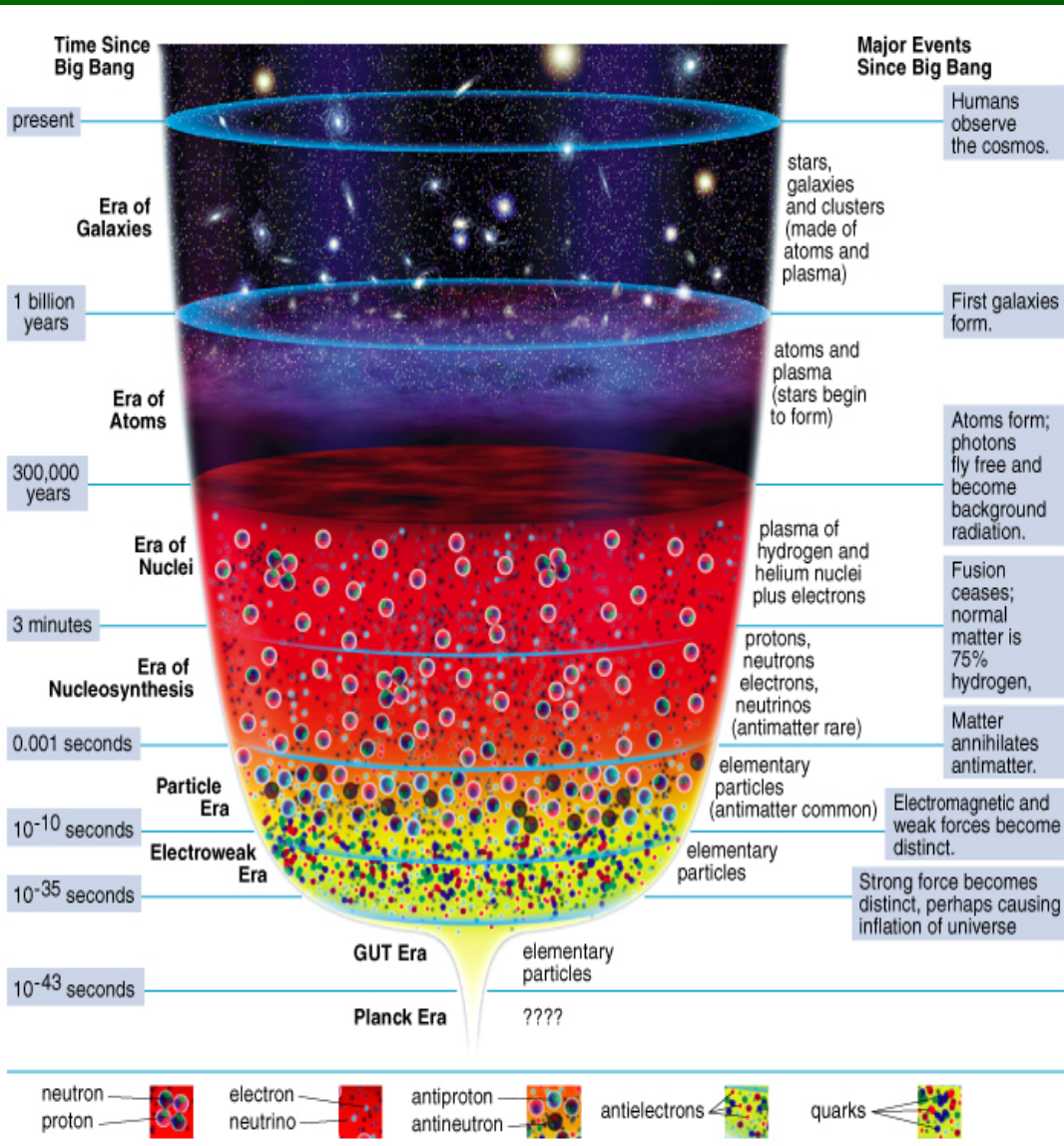
	fermionok			kölcsönh.	bozonok
kvarkok	u up	c charm	t top	erős	g gluon
	d down	s strange	b bottom		γ photon
leptonok	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	gyenge	Z Z boson
	e electron	μ muon	τ tau		W W boson



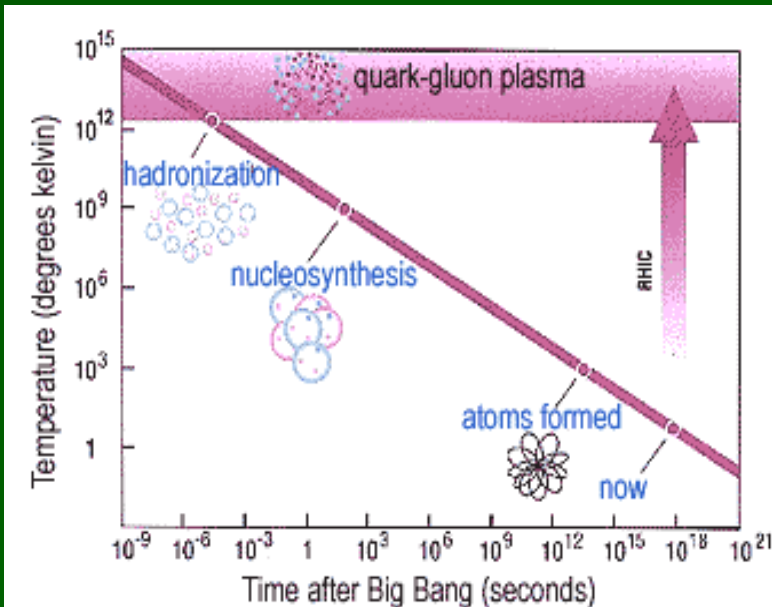
- Erős, gyenge, elektromágneses töltés
- Erős töltés: szín $\Rightarrow$ QCD: kvantum-szín-dinamika

„A tökéletes kvarfolyadék ...”

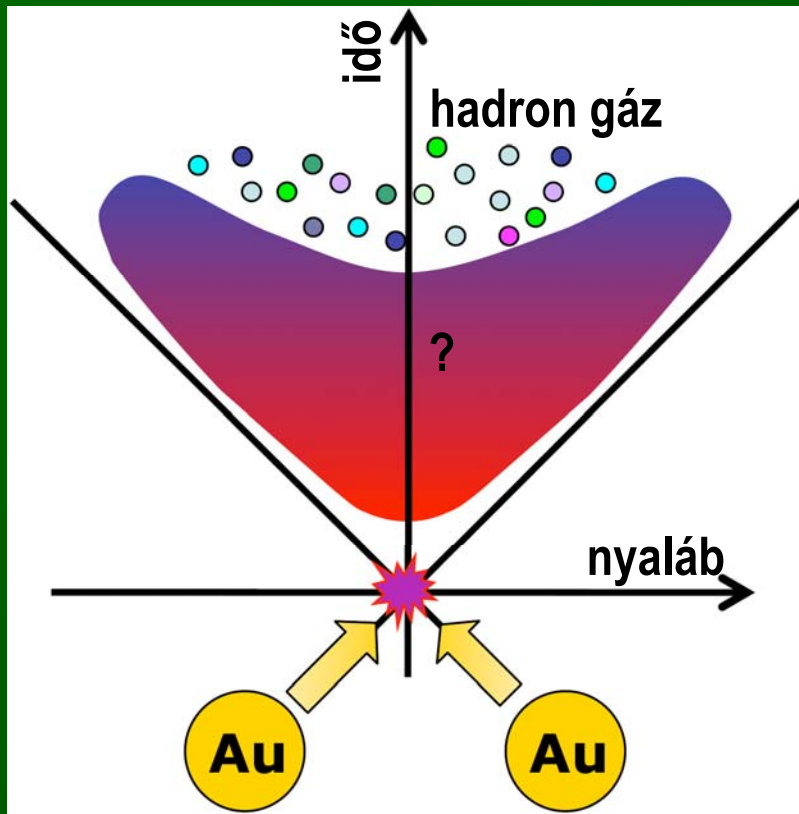
Kapcsolat az Ősrobbanással



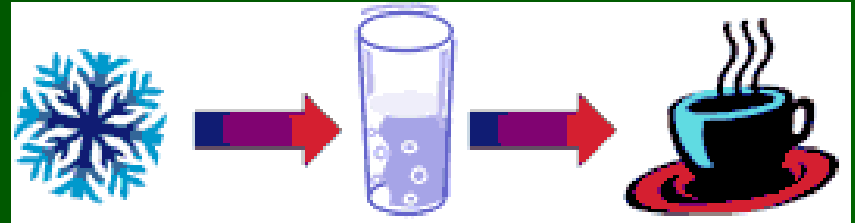
- Korai univerzum: forró, táguló rendszer
- Kvarkanyag, kvark-gluon plazma
- Protonok, neutronok kifagyása



Nehézion-ütközések: Kis Bumm



- Nukleon-olvasztás
- Kvarkok bezárása ill. kiszabadítása
- Hasonlat: jégből víz
- Nagy energiájú ütközéssel mindez elérhető?

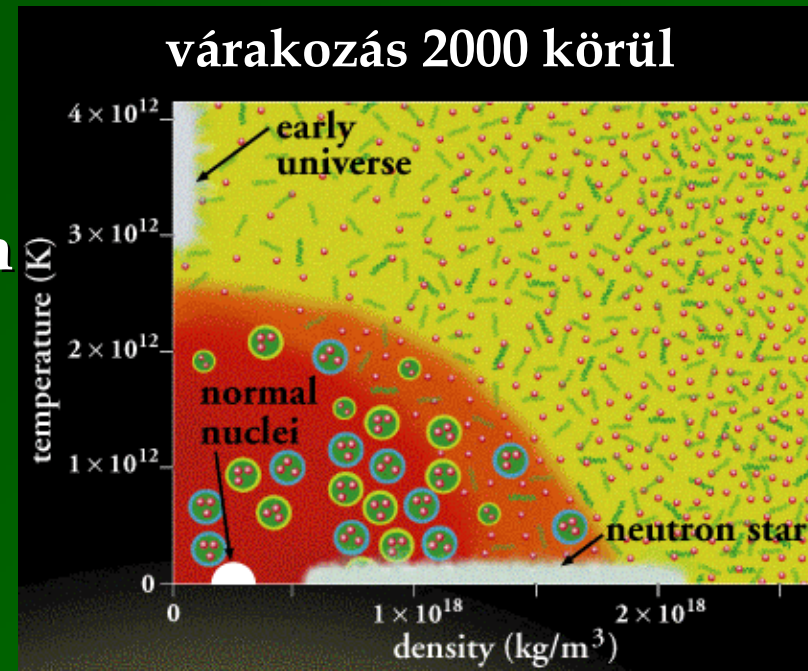


- Nehézionok ütközése: forró, táguló rendszer
- Elég forró? Régi-új anyag?



Mit, miért és hogyan?

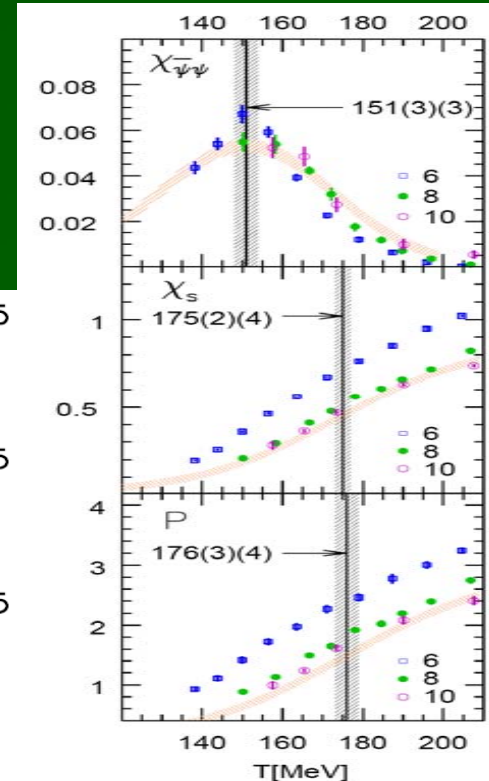
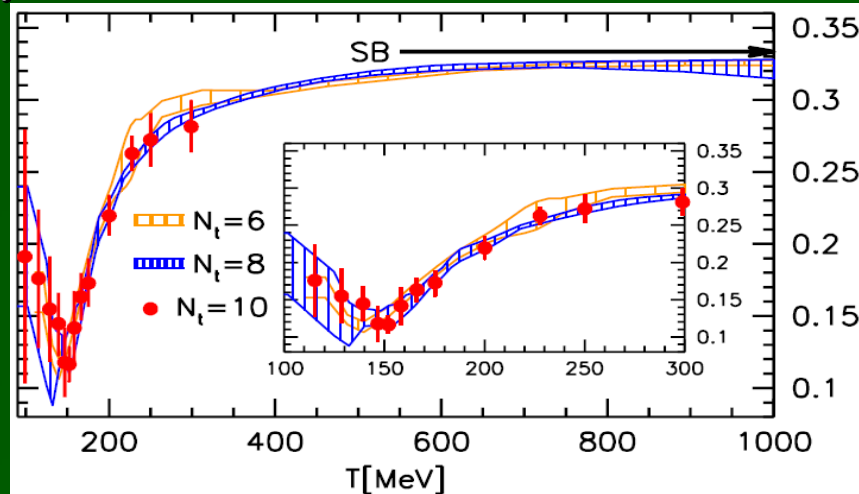
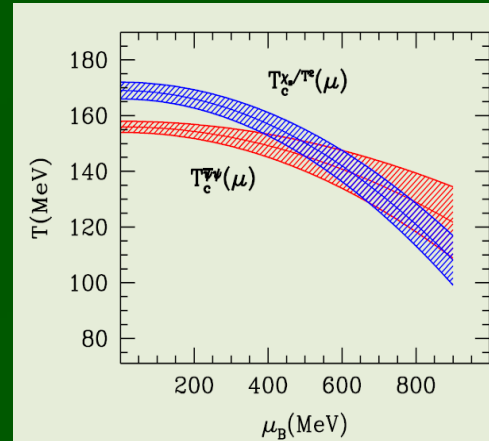
- Elméleti igény: QCD fázisszerkezete, az ősrobbanáshoz hasonló körülmények vizsgálata
 - A 2004-es fizikai Nobel-díj: QCD aszimptotikusan szabad $\Rightarrow$ nagy hőmérsékleten gáz plazma, kvarkok és gluonok?
 - Az elérhető legnagyobb hőmérséklet: nehézion ütközések!
- Kísérlet: nehézionok ütköztetése
 - LBNL (Berkeley)
Bevalac
 - BNL
Alternating Gradient Synchrotron
Relativistic Heavy Ion Collider
 - CERN
Large Hadron Collider (LHC)
Super Proton Synchrotron (SPS)



„A tökéletes kvarfolyadék ...”

Elméleti eredmények

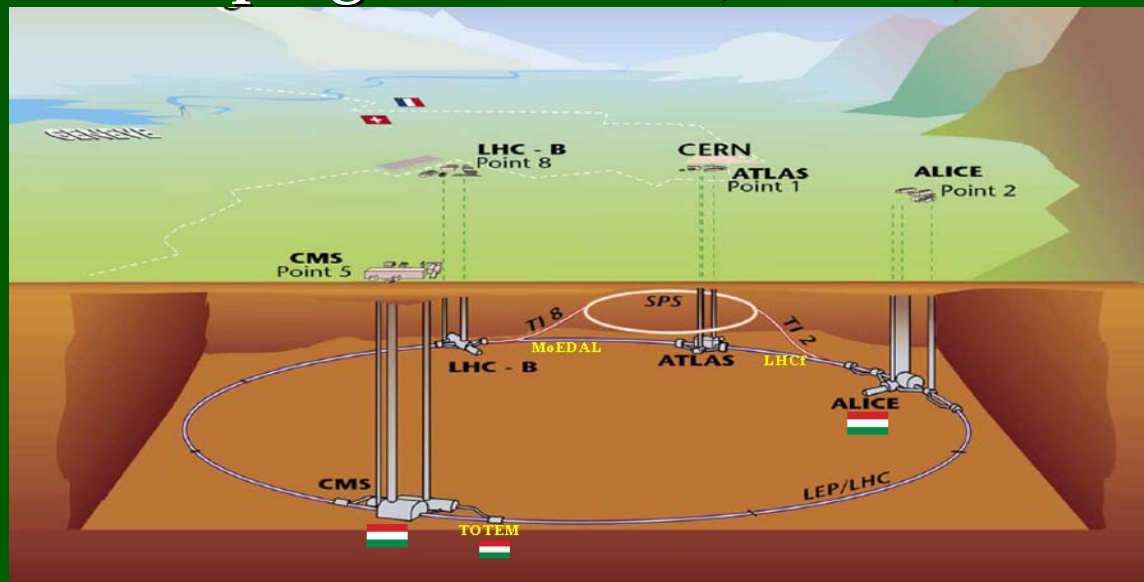
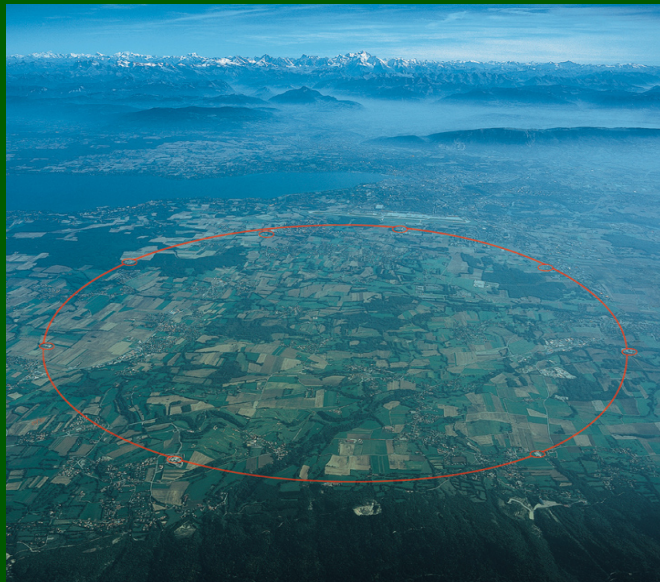
- Budapest-Wuppertal csoport
 - Katz, Fodor, Borsányi, Szabó, Csikor, Endrődi
- QCD átmeneti hőmérséklet?
- Folytonos átmenet (crossover)
 - Királis szuszeptibilitás: 151 ± 3 MeV
 - Kvarkszám szuszeptibilitás: 175 ± 2 MeV
 - Poljakov hurkok: 176 ± 2 MeV
- Kritikus pont?
 - Átmeneti görbék konvergálnak
- Állapotegyenlet?
 - Hangsebesség
 - $T > 1000$ MeV: ideális gáz ($\kappa \approx 3$)
 - $T \approx T_c$: $\kappa \approx 10$
- Kísérletileg?



„A tökéletes kvarfolyadék ...”

Kutatósi helyszínek: CERN

- SPS: Pb+Pb @ $E_{\text{cms}} = 17 \text{ GeV/nukleon}$
 - h+p, p+p, p+Pb, Pb+Pb ütközések
 - Kísérleti együttműködések: NA44, NA45, NA49, NA50, NA52, NA57, NA60, WA98, NA61
 - KFKI-ELTE részvétel az NA49 és az NA61 kísérletben
- LHC: p+p (14 TeV) és Pb+Pb (5,5 TeV/nukleon)
 - 2009. okt.: főleg p+p fizika; ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, LHCf, MoEDAL, TOTEM
 - 2010. nov.: nehézionfizika program is indul; ALICE, CMS



„A tökéletes kvarfolyadék ...”

Relativistic Heavy Ion Collider

- **RHIC: Brookhaven Nemzeti Laboratórium**
Au+Au, Cu+Cu, $p\uparrow\downarrow+p\uparrow\downarrow$, d+Au collisions
– 4 kísérleti együttműködés:
STAR, PHENIX, BRAHMS, PHOBOS (Veres G.@MIT),
- **Magyar intézményi tagság a PHENIX-ben:**
 - KFKI: Csörgő, Nagy, Ster, Sziklai, Vértesi, Zimányi†
 - ELTE: Kiss, Csanád, Vargyas
 - DE: *Dávid*, Tarján, Imrek

Elfogadott fejlesztési
programok:

RHIC II

eRHIC



A gyorsító és a kísérletek adatai

- **Különböző módusok**

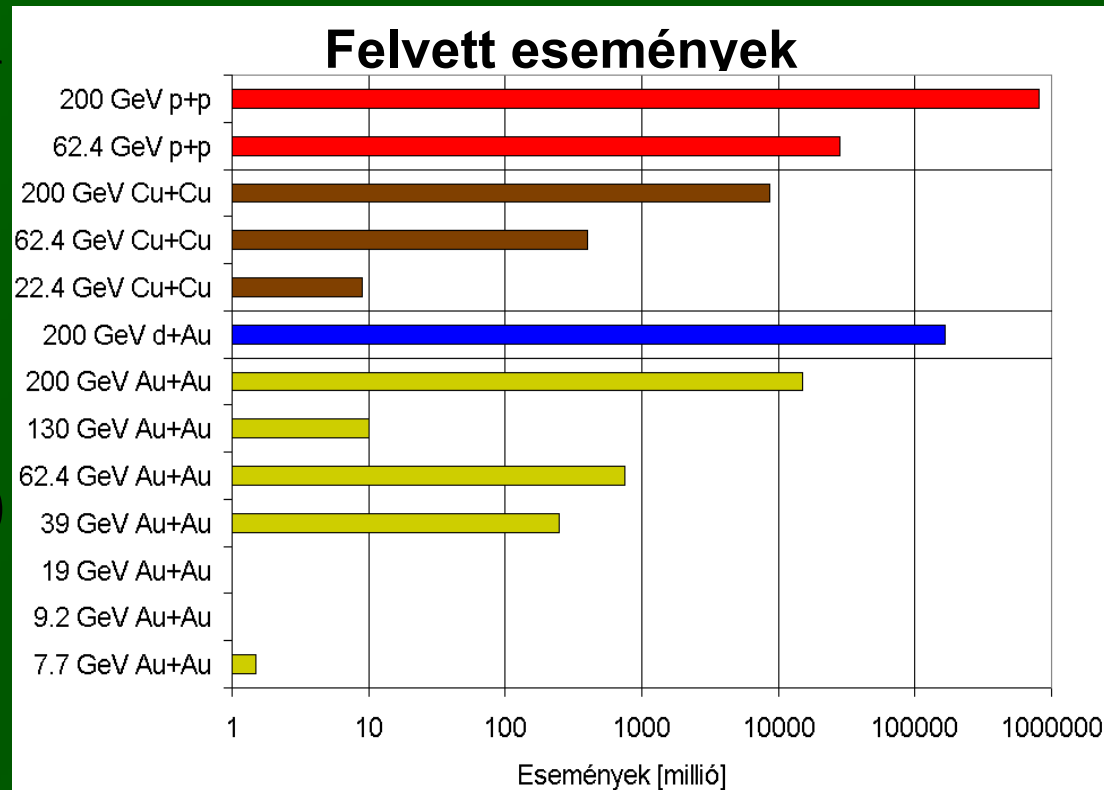
- 9.2 GeV/n (Au)
- 22 GeV/n (Au, Cu, p)
- 56 GeV/n (Au)
- 62 GeV/n (Au, Cu, p)
- 130 GeV/n (Au)
- 200 GeV/n (Au, Cu, p)
- 410 GeV/n (p)
- 500 GeV/n (p)

- **Tudomány**

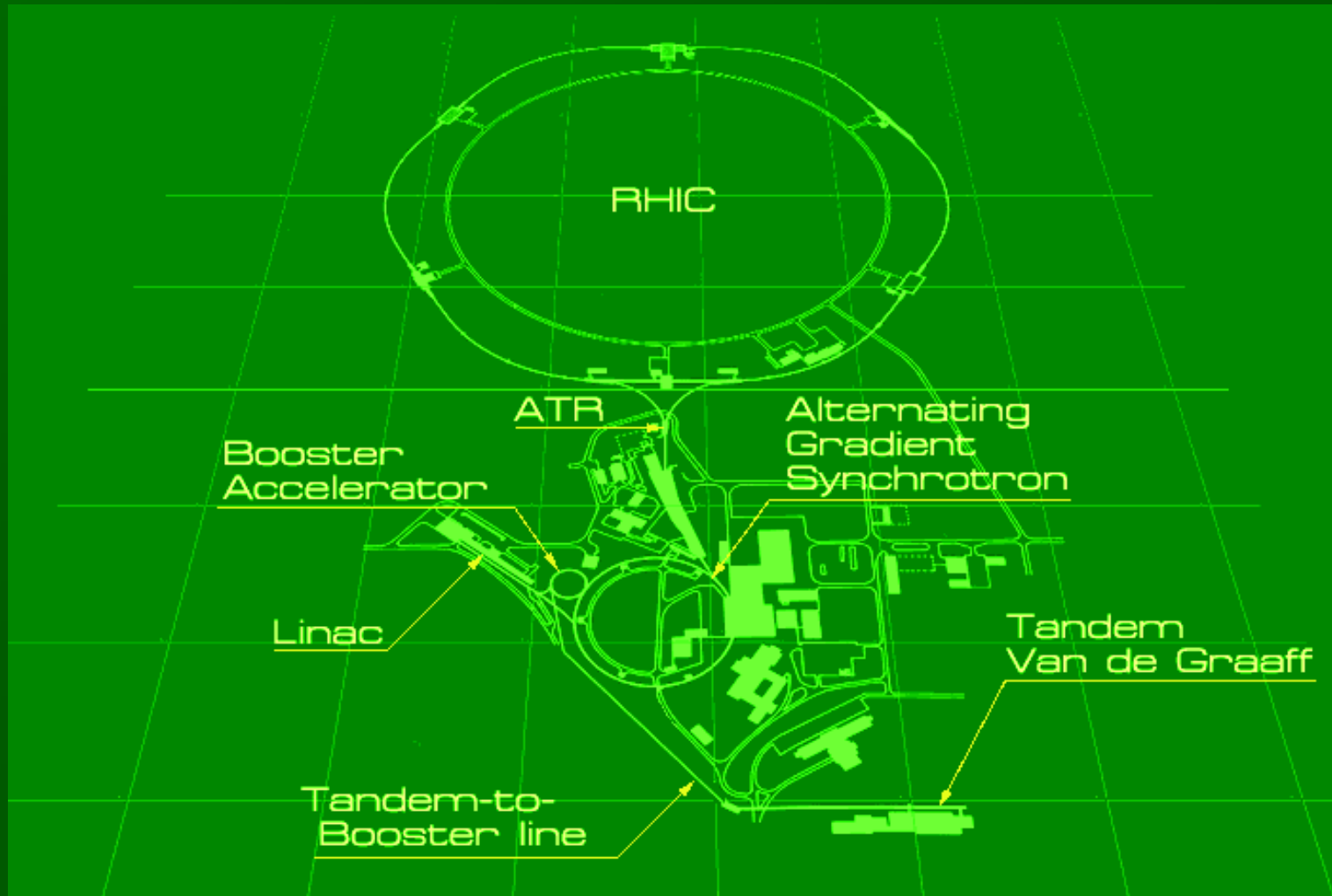
- >1000 referált cikk, >24000 független hivatkozás
- Felfedezések

- **A jövő: e-RHIC és RHIC II**

- Tudományos kulcskérdések azonosítása
- Fejlesztési programok elindulása



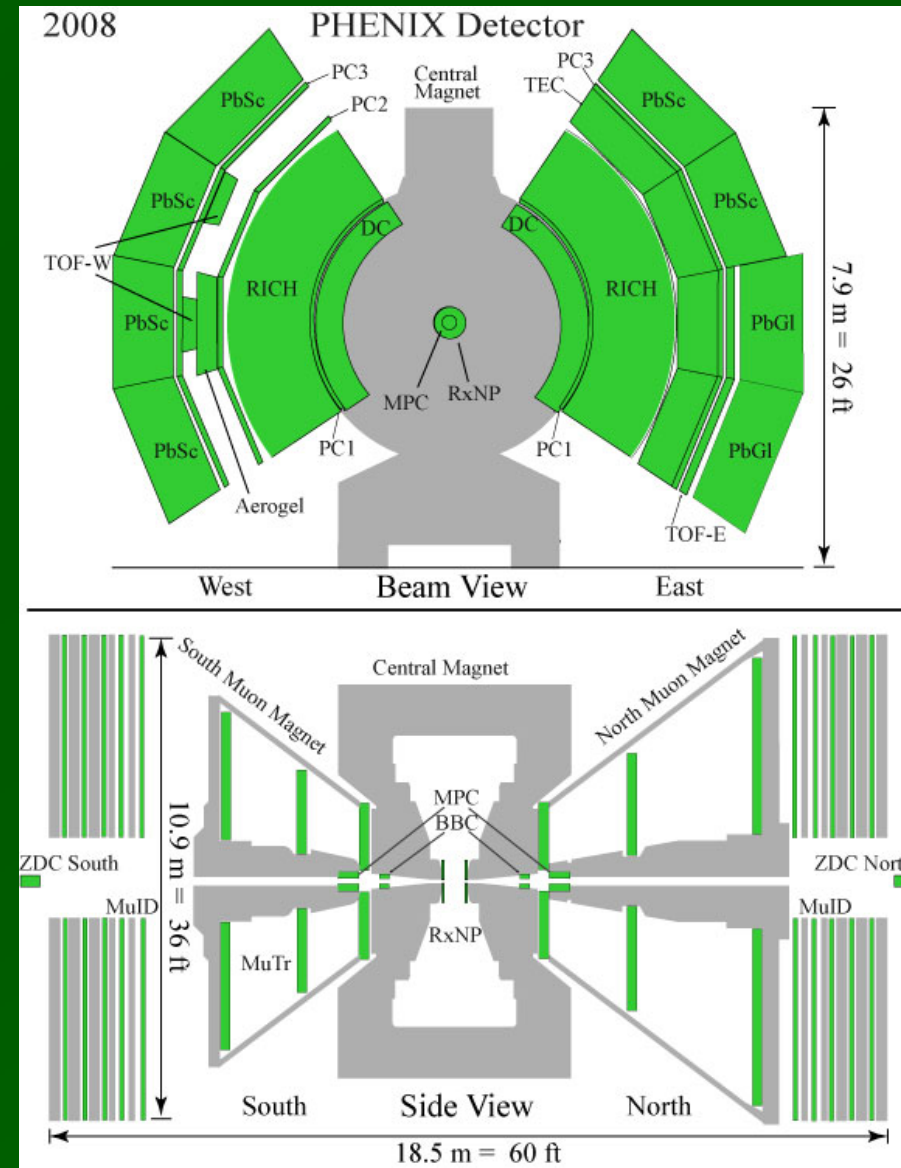
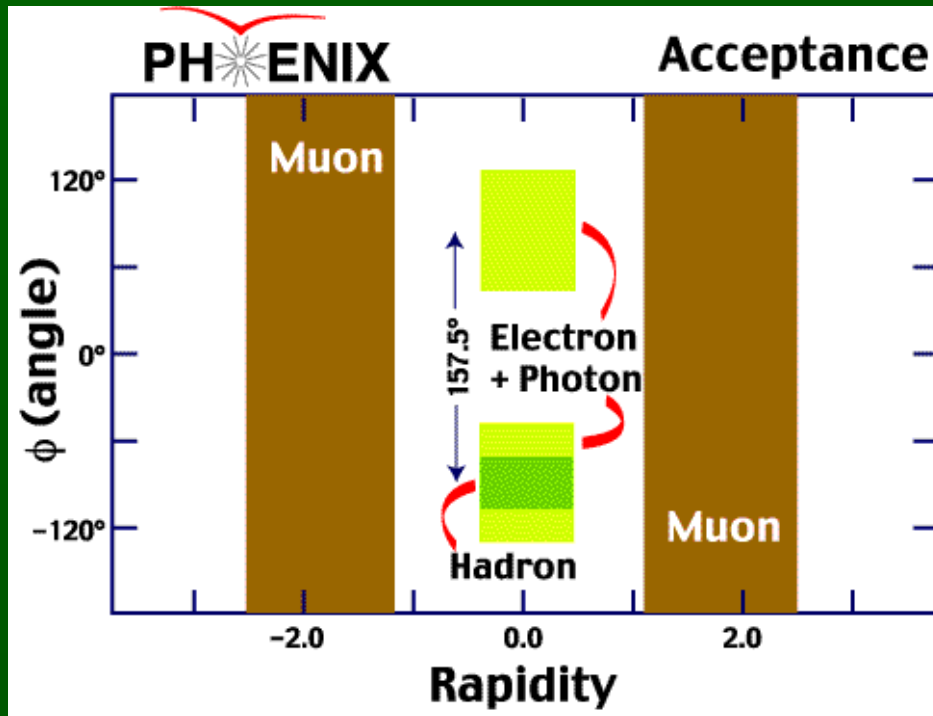
A RHIC gyorsító-együttes



- Tandem (1 MeV, +32)→Booster (95 MeV, +77)→AGS (9 GeV, +77)→RHIC
- Protons: Linac (200 MeV)→Booster (95 MeV)→AGS (9 GeV)→RHIC

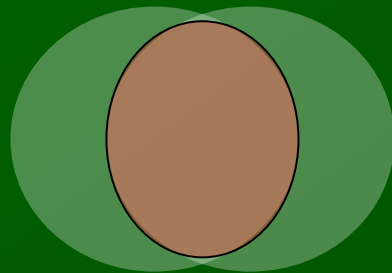
Jelenlegi felépítés

- Töltött hadronok ($\pi^\pm$, $K^\pm$, etc.)
- Fotonok (direkt v. bomlás)
- Könnyű mezonok ϕ , ω and η
- Leptonok (direkt v. bomlás)
- Nehéz kvarkok részecskéi (J/Ψ)

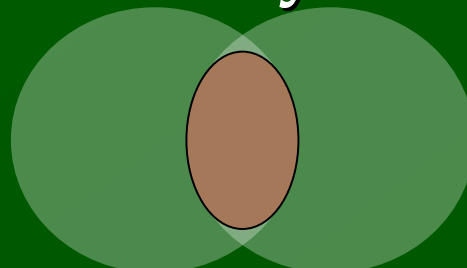


Az események jellemzése

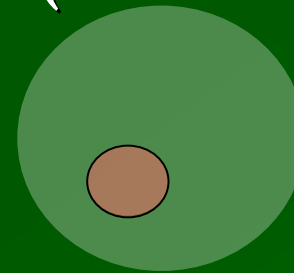
- Az esemény-geometria ellenőrzése:
 - Mikor (kezdeti idő) és hol (vertex)
 - Átfedés (centralitás), résztvevők száma (N_{part})
 - Az átfedő tartomány iránya (reakciósík)



Centrális Au+Au
 $N_{\text{part}} \sim 300$



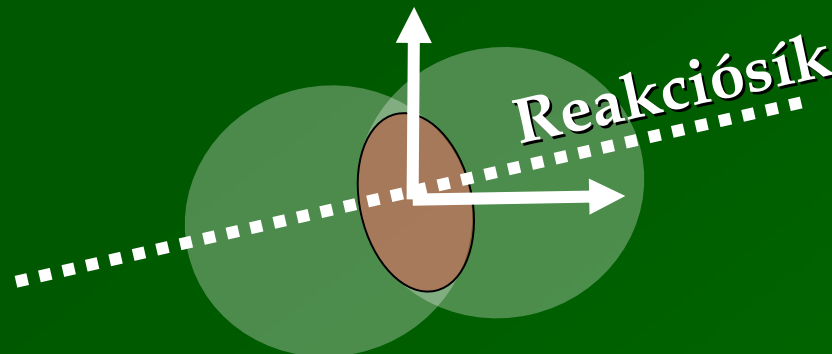
Periférikus Au+Au
 $N_{\text{part}} \sim 50$



d+Au



p+p



Egy PHENIX esemény



RHIC mérőkövek

- Nagyimpulzusú részecskék elnyelődése, új jelenség
 - Phys. Rev. Lett. 88, 022301 (2002) (címlap, >500 hiv.)
 - Phys. Rev. Lett. 91, 072301 (2003) (>400 hiv.)
- Elnyelődés hiánya d+Au ütközésekben: új anyag
 - Phys. Rev. Lett. 91, 072303 (2003) (címlap, >300 hiv.)
- Kollektív viselkedés: az anyag folyadék
 - Nucl. Phys. A 757, 184-283 (2005) (>900 hiv.)
- Skálaviselkedés: kvark szabadsági fokok!
 - Phys. Rev. Lett. 98, 162301 (2007) (140 hiv.)
- A viszkozitás az elméleti alsó határ közelében
 - Phys. Rev. Lett. 98, 172301 (2007) (254 hiv.)
- Kezdeti hőmérséklet messze a kritikus felett
 - Phys. Rev. Lett. 104, 132301 (2010) (72 hiv.)

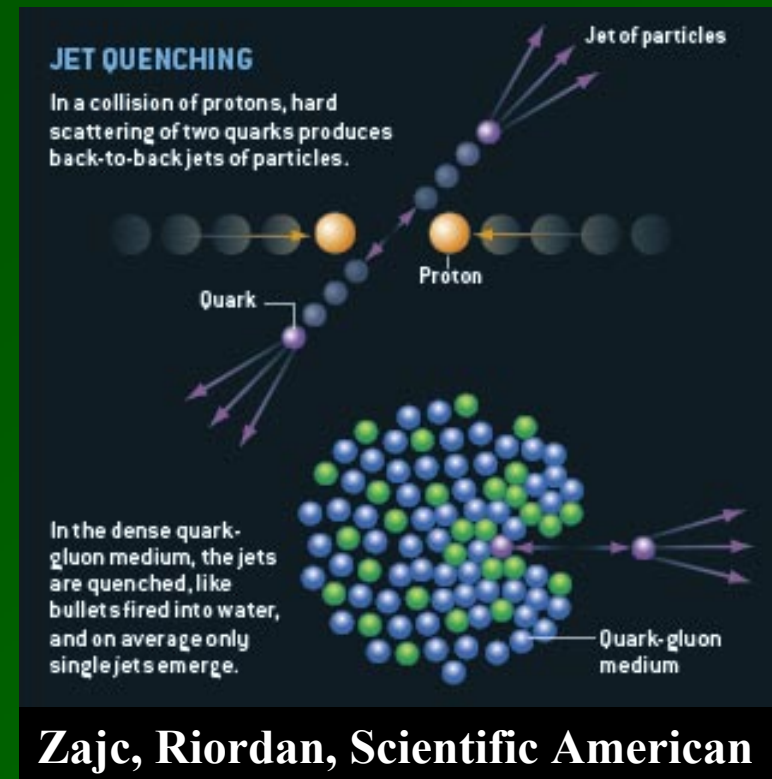
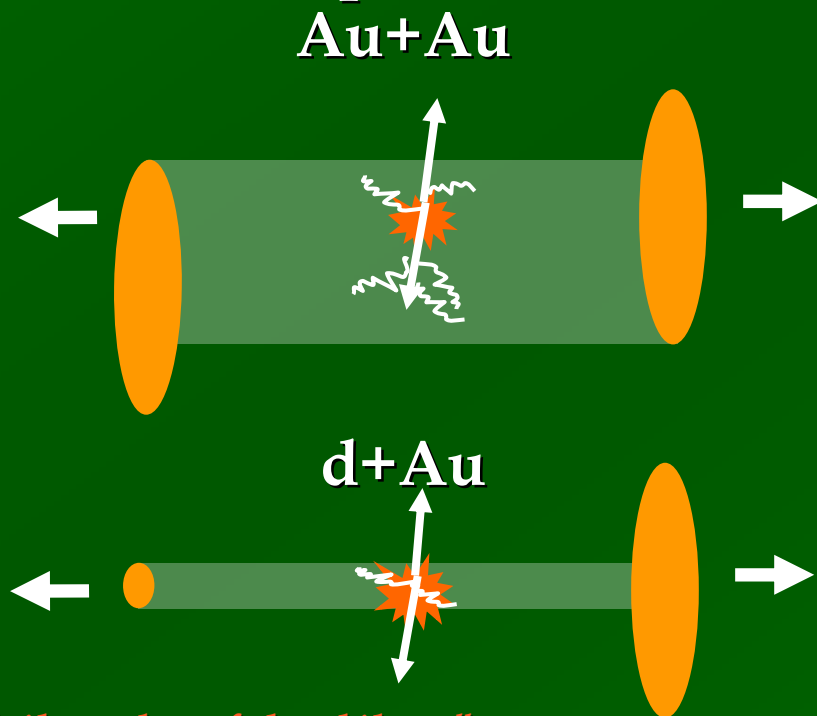
Nagyimpulzusú részecskék elnyelése

- Nukleáris modifikációs faktor:

Mérés Au+Au, referencia: p+p

$$R_{AB} = \frac{1}{\langle N_{\text{bin. ütk.}} \rangle_{AB}} \frac{\text{Hozam}_{AB}}{\text{Hozam}_{pp}}$$

- Nagyimpulzusú részecskék elnyelődnek (1. mérőldkő)!
 - Jet Quenching
- Ellenpróba: d+Au → Közeg hatása (2. mérőldkő)
- 2 PRL címlap

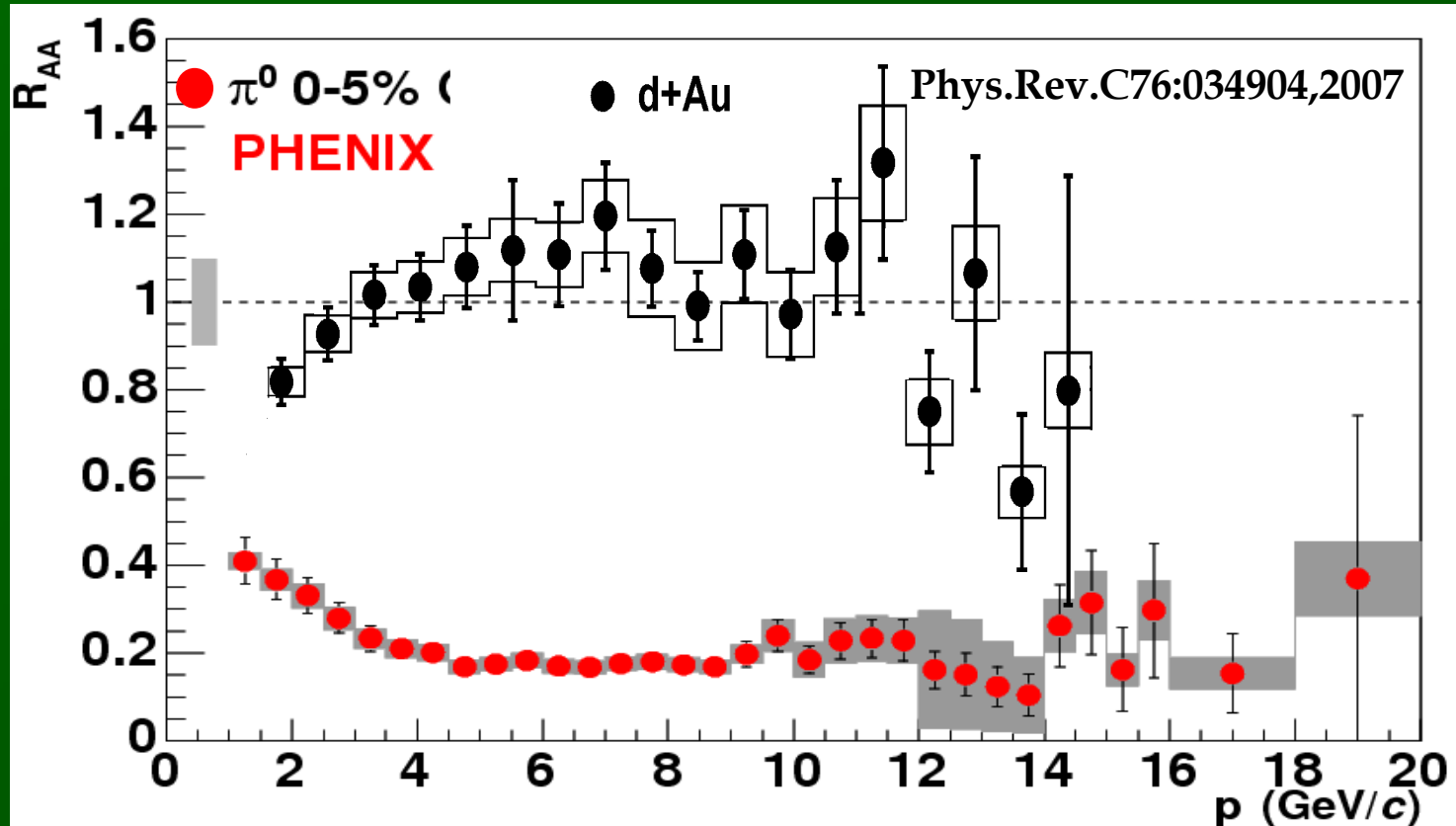


„A tökéletes kvarfolyadék ...”

Szisztematikus vizsgálat

- Centrális Au+Au: elnyelődés
- Periférikus Au+Au, d+Au: nincs elnyelődés

$$R_{AB} = \frac{1}{\langle N_{\text{bin. ütk.}} \rangle_{AB}} \frac{\text{Hozam}_{AB}}{\text{Hozam}_{pp}}$$

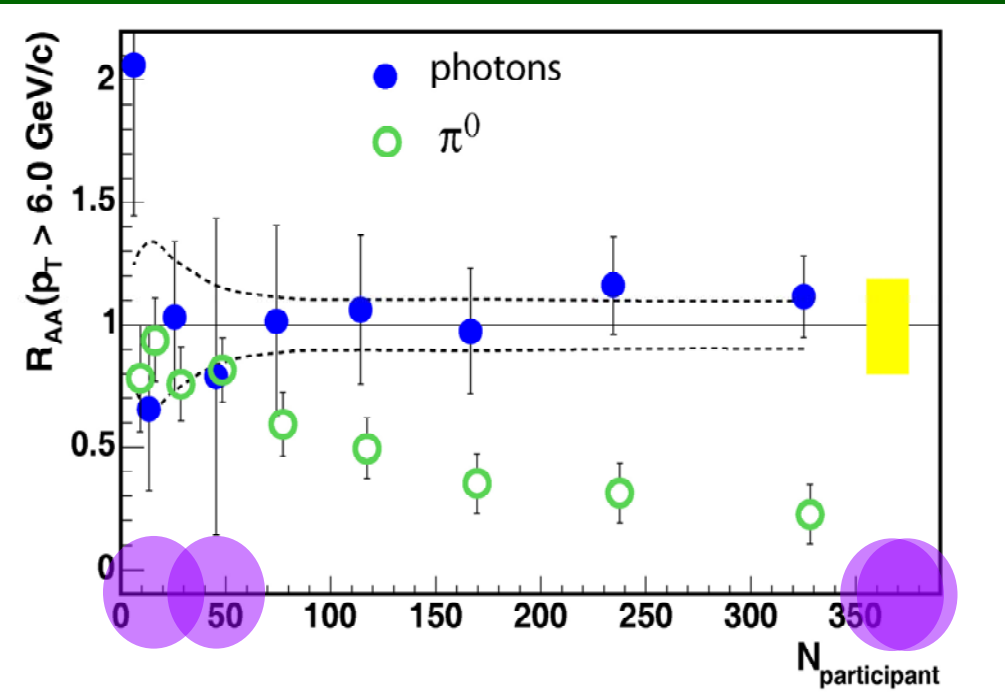


Enhanced

Suppressed

GLV formalizmus: Gyulassy, Lévai, Vitev
leírás pQCD segítségével

Csak a hadronok nyelődnek el!

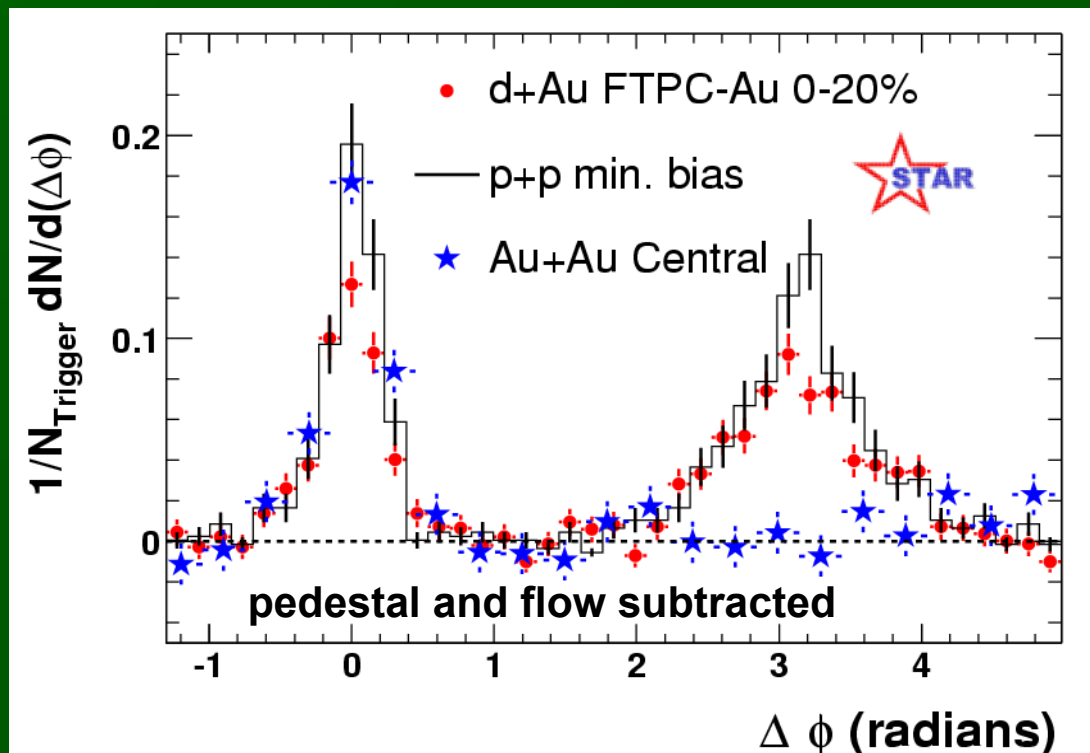
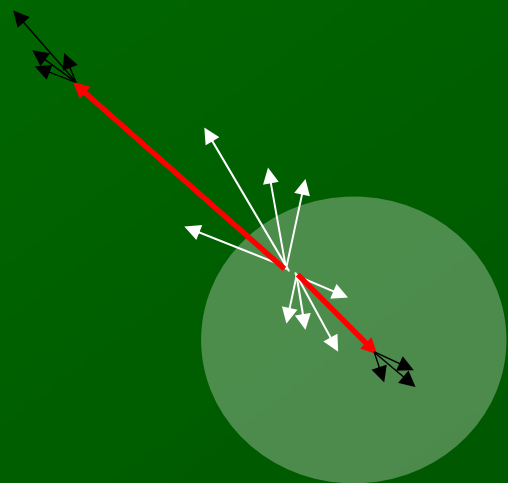


- Négy mérés:
 - Foton- és pion-spektrum
 - Au+Au és p+p
- Szisztematikus hibák ellenőrzése több nagyságrenden keresztül

- Direkt fotonok „átfénylenek” az anyagon
- A pionok elnyelődése változatlan 20 GeV-ig
- A közeg fotonok számára átlátszó, hadronoknak áthatolhatatlan

Szögeloszlások vizsgálata: STAR

- Nagyimpulzusú részecskék (jet) szögeloszlásának vizsgálata



- Kifelé menő jet: p+p, d+Au, Au+Au hasonló
- Befelé menő jet: elnyelődés csak Au+Au esetén
- Nincs elnyelődés p+p, d+Au esetén
- Erősen kölcsönható közeg, az anyag egy új formája
- 2. mérföldkő

„A tökéletes kvarfolyadék ...”

Az első két mérőföldkő

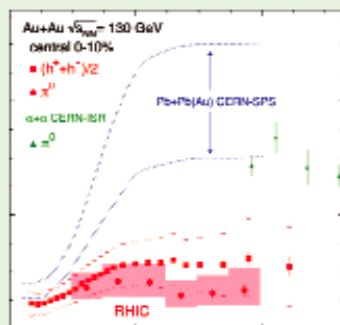
- Két Phys. Rev. Letter címlap, tudományos konszenzus
- Részvétel komoly anyagi ráfordítás nélkül (sok munkával)
- Lehetőség az újabb felfedezésekre

1. mérőföldkő

PHYSICAL REVIEW LETTERS

14 January 2002

Volume 88, Number 2



Member Subscription Copy
Library or Other Institutional Use Prohibited Until 2007



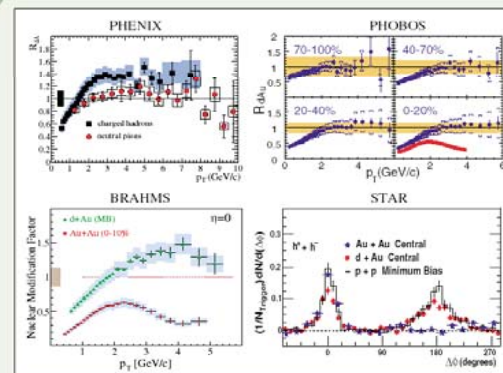
Published by The American Physical Society

2. mérőföldkő

PHYSICAL REVIEW LETTERS

Articles published week ending
15 AUGUST 2003

Volume 91, Number 7



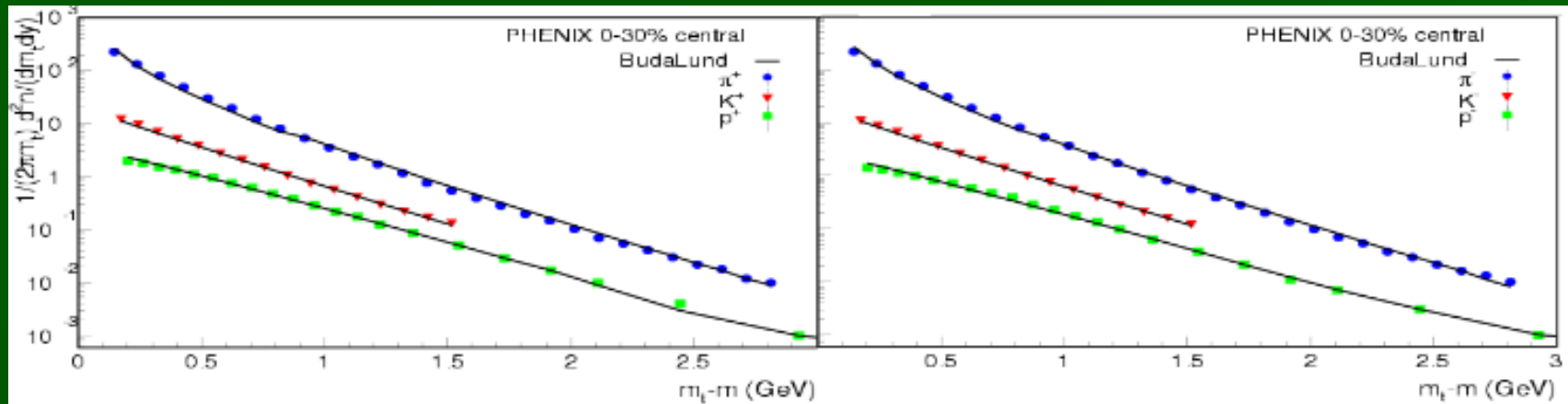
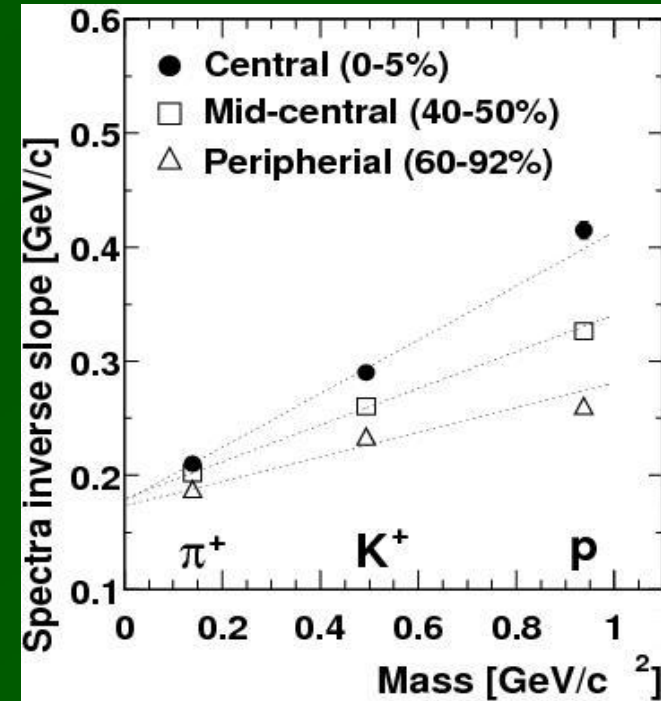
Member Subscription Copy
Library or Other Institutional Use Prohibited Until 2008



Published by The American Physical Society

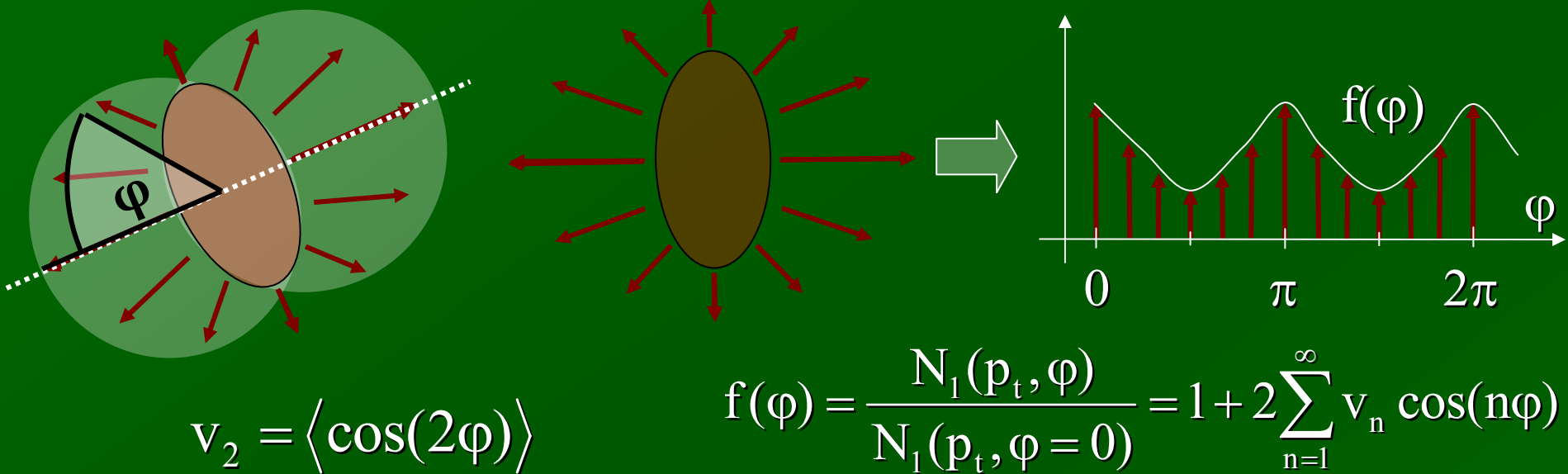
A kollektív dinamika jelei

- A hidrodinamika skálaviselkedést jelez
- Mit jelent a skálázás?
 - Példa: Reynolds szám, $\rho v r / \eta$
 - A paraméterek egy kombinációja számít
- Kollektív, termális viselkedés → Információ-veszteség
- Spektrumok: Boltzmann-eloszlás + folyás
 spektrum $\sim \exp[-p_t/T_{\text{eff}}]$, $T_{\text{eff}} = T_0 + mu^2$

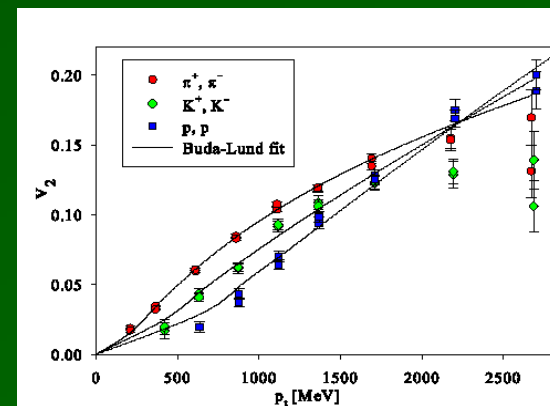


„A tökéletes kvarfolyadék ...”

Folyadék kép: a 3. mérőldkő



- Impulzuseloszlás: tengelyszimmetria?
- Összenyomódás és tágulás kapcsolata
- Elliptikus folyás, v_2 : azimut aszimmetria
 - Második Fourier-komponens
 - Kollektív viselkedés mérőszáma
 - Ritka gáz: $v_2 = 0$
 - Hidrodinamika: $v_2 > 0$



M. Cs. et al., Eur.Phys.J.A38:363-368,2008

„A tökéletes kvarfolyadék ...”

A 3. mérföldkő

- Az Amerikai Fizikai Intézet szerint 2005. legfontosabb eseménye: az erősen kölcsönható folyadék felfedezése a RHIC-nél
- Négy kísérlet öt éves munkája, egybehangzóan
- 3350 hivatkozás az összefoglaló cikkekre

Cím  <http://www.aip.org/pnu/2005/split/757-1.html>

AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS [advanced search](#) [home](#)

Physics News Update

The AIP Bulletin of Physics News

Number 757 #1, December 7, 2005 by Phil Schewe and Ben Stein

The Top Physics Stories for 2005

At the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) on Long Island, the four large detector groups agreed, for the first time, on a consensus interpretation of several year's worth of high-energy ion collisions: the fireball made in these collisions -- a sort of stand-in for the primordial universe only a few microseconds after the big bang -- was not a gas of weakly interacting quarks and gluons as earlier expected, but something more like a liquid of strongly interacting quarks and gluons ([PNU 728](#)).

Other top physics stories for 2005 include, in general chronological order of their appearance throughout the year, the following:

the arrival of the Cassini spacecraft at Saturn and the successful landing of the Huygens probe on the moon Titan ([PNU 716](#));

the development of lasing in silicon ([Nature 17 February](#));

[Subscribe to Physics News Update](#)

[Physics News Graphics](#)

[Physical Review Focus](#)

[Physics News Links](#)

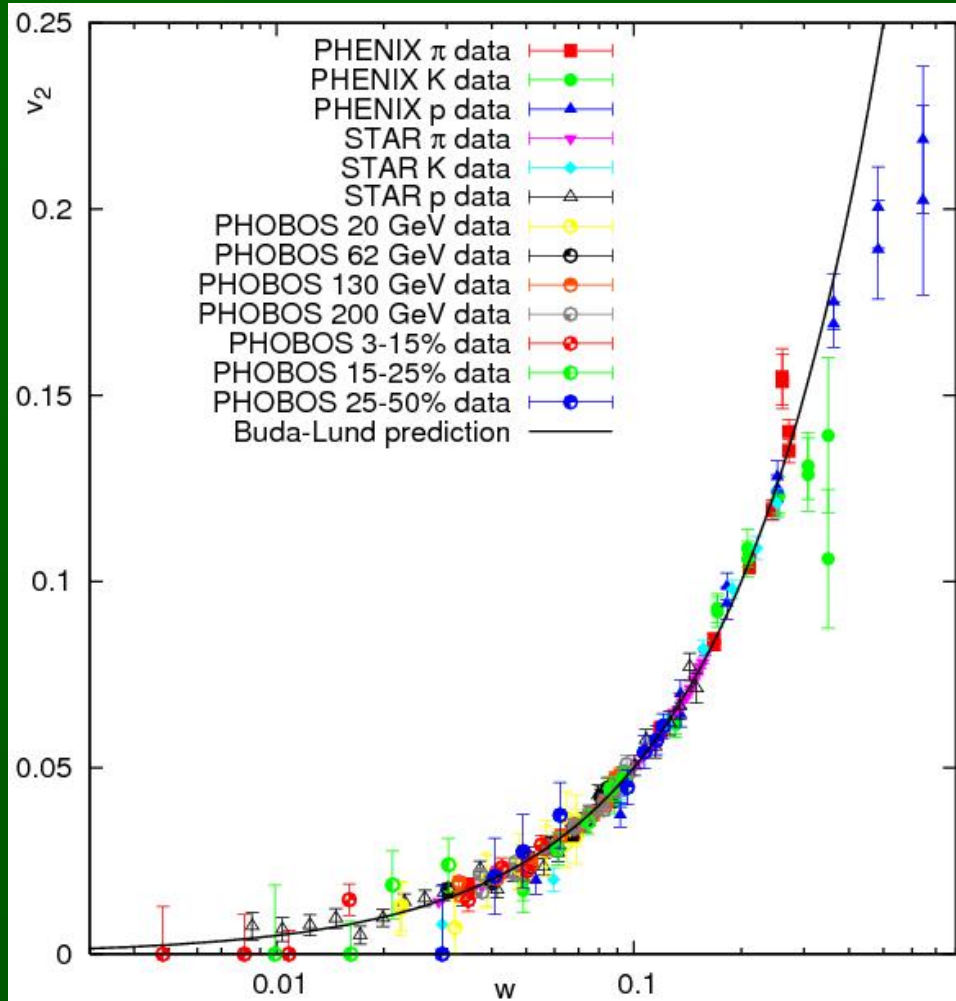
Archives

[2006](#)

[2005](#)

[2004](#)

A folyadék kép megerősítése



- Azimutális aszimmetria sokdimenziós függése:
 - Transzverz impulzus
 - Rapiditás
 - Ütköztetés energiája
 - Centralitás
 - Részecsketípus
- Hidrodinamikai előrejelzés: egy skálaváltozó, egy skálagörbe
- Az előrejelzés helyes!

Csörgő, Akkelin, Hama, Lukács, Sinyukov (Phys. Rev. C67, 034904, 2003)

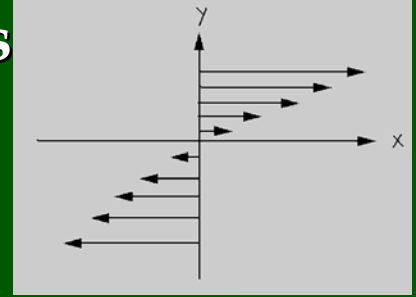
Csanád, Csörgő, Lörstad, Ster (Nucl. Phys. A742:80-94,2004)

Csanád, Csörgő, Lörstad, Ster et al. (Eur.Phys.J.A38:363-368,2008)

Milyen tökéletes folyadék ez?

- Tökéletes $\neq$ ideális, tökéletes $\neq$ nem ragadós

- Részecskeelnyelődés: egyfajta ragacsosság
- Tökéletes: elhanyagolható **viszkozitás** és hővezetés, nyíró erőknek nem áll ellen
- Ideális: összenyomhatatlan



- A nyíró erőknek való ellenállás η :

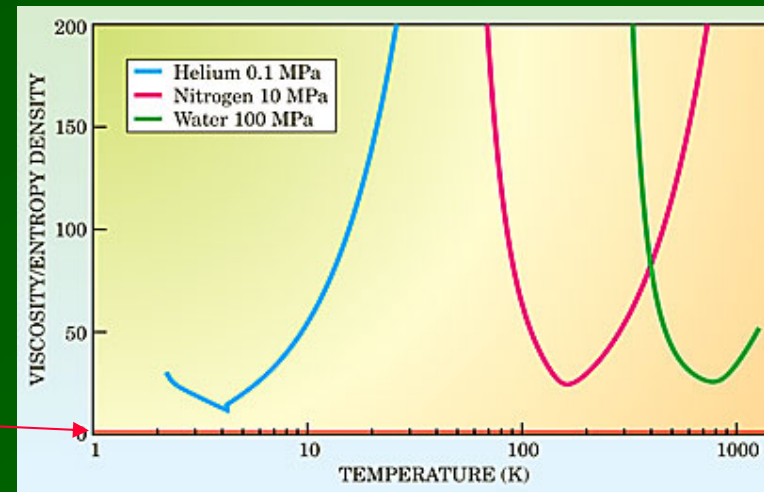
$$\frac{F_x}{A} = -\eta \frac{\partial v_x}{\partial y}$$

- Közelítés: $\eta \approx (\text{impulzussűrűség}) \times (\text{szabad úthossz}) \approx \frac{n\bar{p}}{n\sigma} = \frac{\bar{p}}{\sigma}$
- Alacsony viszkozitás $\Rightarrow$ nagy hatásk.m. $\Rightarrow$ erős csatolás

- Kinematikai viszkozitás: η/s

- Maldacena: $\text{CFT}_D \Leftrightarrow \text{AdS}_{D+1}$

- A fekete lyuk (brane) „felülete”
- $\eta = \text{„felület”}/16\pi G$, $s = \text{„felület”}/4G$
- $\eta/s = 1/4\pi$
- Gyanított alsó határ



„minden relativisztikus kvantumtérelméletre, véges hőmérsékletre és nulla kémiai potenciálra”

„A tökéletes kvarfolyadék ...”

4. mérföldkő: szinte tökéletes folyadék

- AdS/CFT alsó határ

- Maldacena et al.: Adv.Theor.Math.Phys.2:231-252,1998
- Kovtun et al.: Phys.Rev.Lett. 94 (2005) 111601

$$\frac{\eta}{s} \geq \frac{\hbar}{4\pi}$$

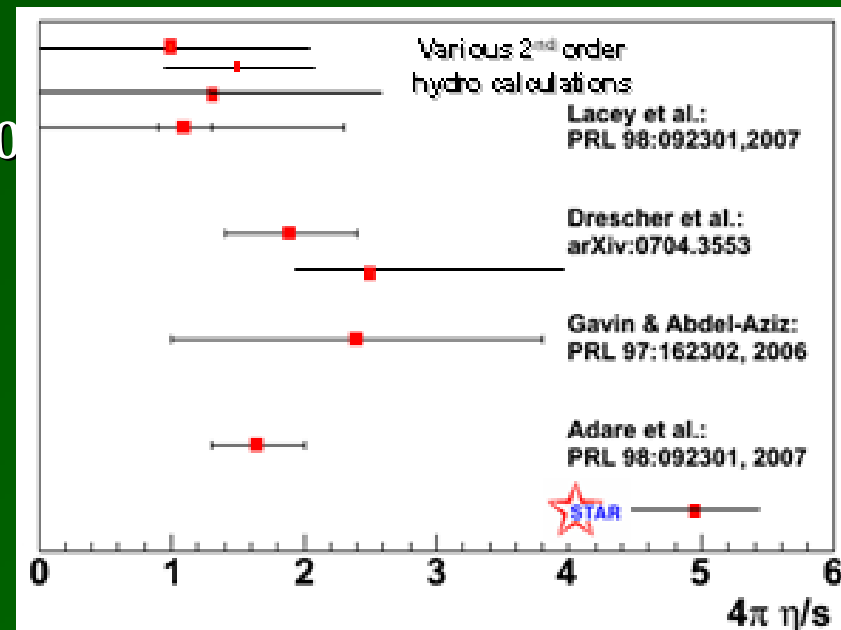
- Mérési eredmények

- R. Lacey et al., Phys.Rev.Lett.98:092301,2007 $\frac{\eta}{s} = (1.1 \pm 0.2 \pm 1.2) \frac{\hbar}{4\pi}$
- H.-J. Drescher et al., Phys.Rev.C76:024905,2007 $\frac{\eta}{s} = (1.9 - 2.5) \frac{\hbar}{4\pi}$
- S. Gavin, M. Abdel-Aziz, Phys.Rev.Lett. 97 (2006) 162302

$$\frac{\eta}{s} = (1.0 - 3.8) \frac{\hbar}{4\pi}$$

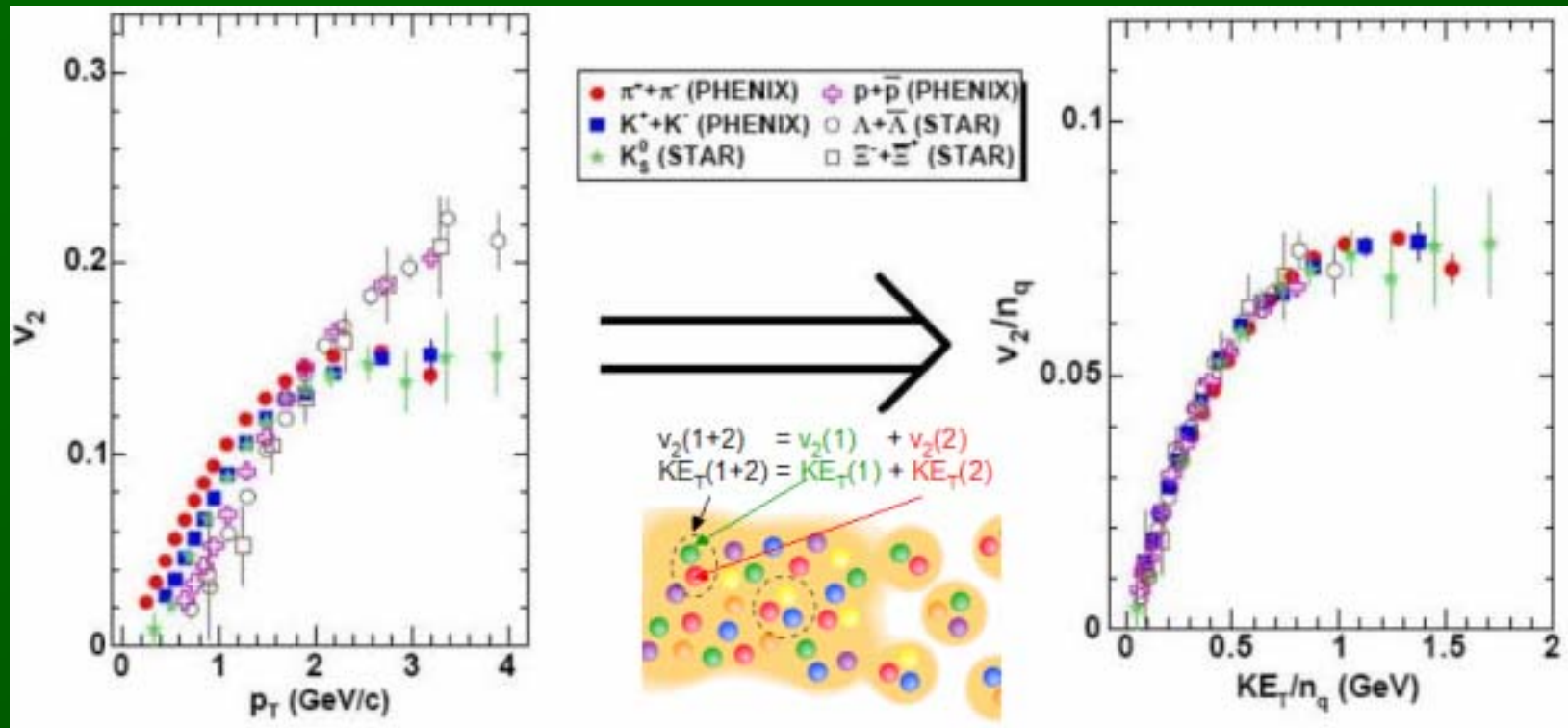
- PHENIX: Phys.Rev.Lett.98:172301,2007

$$\frac{\eta}{s} = (1.3 - 2.0) \frac{\hbar}{4\pi}$$



„A tökéletes kvarfolyadék ...”

5. mérőöldkő: kvarkok folyadéka



PHENIX Collaboration, Phys.Rev.Letters 98:162301, 2007

- Releváns változó: transzverz kinetikus energia, KE_t
- Az elliptikus folyás a konstituens kvarkok számával skáláz!
- Szabadsági fokok: kvarkok

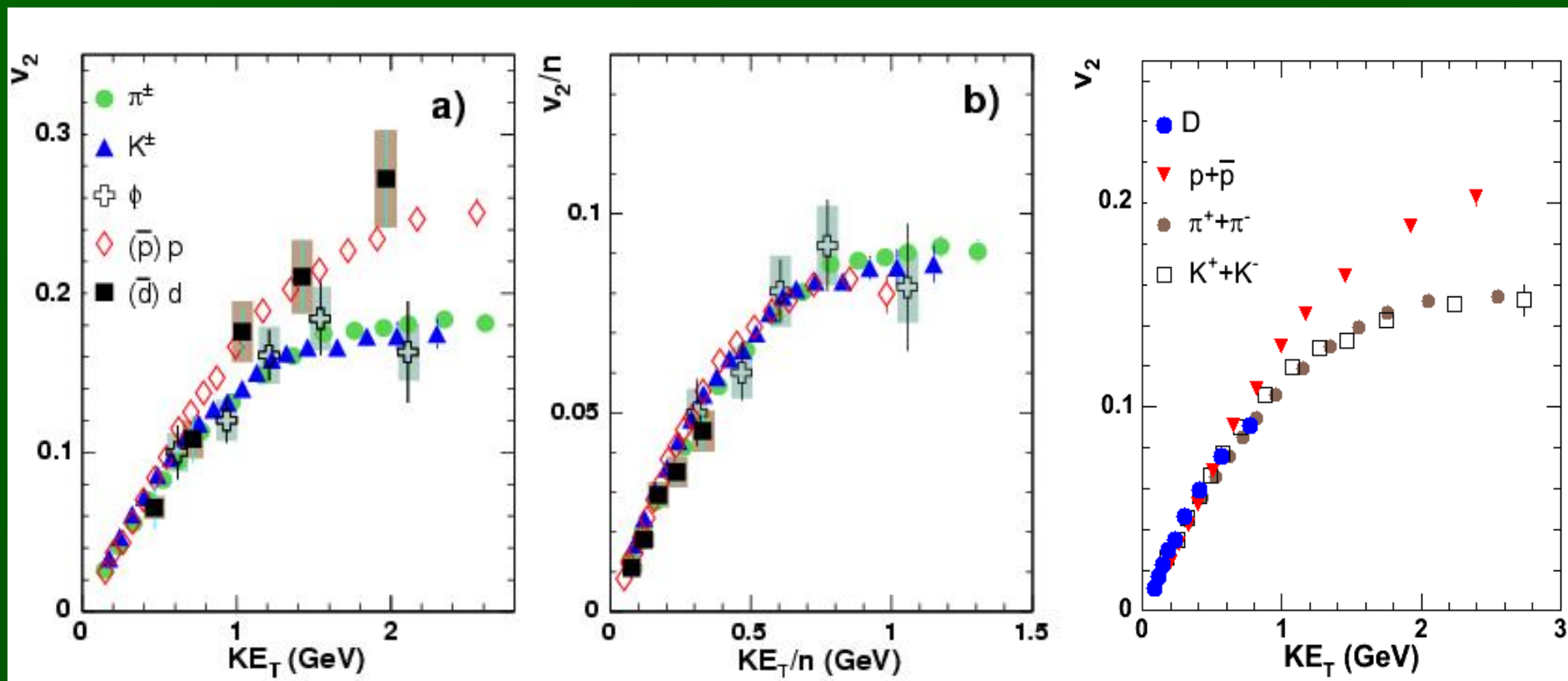
$$KE_T^{hadron} \approx n KE_T^{quark}$$

$$v_2^{hadron}(KE_T^{hadron}) \approx n v_2^{quark}(KE_T^{quark})$$

„A tökéletes kvarfolyadék ...”

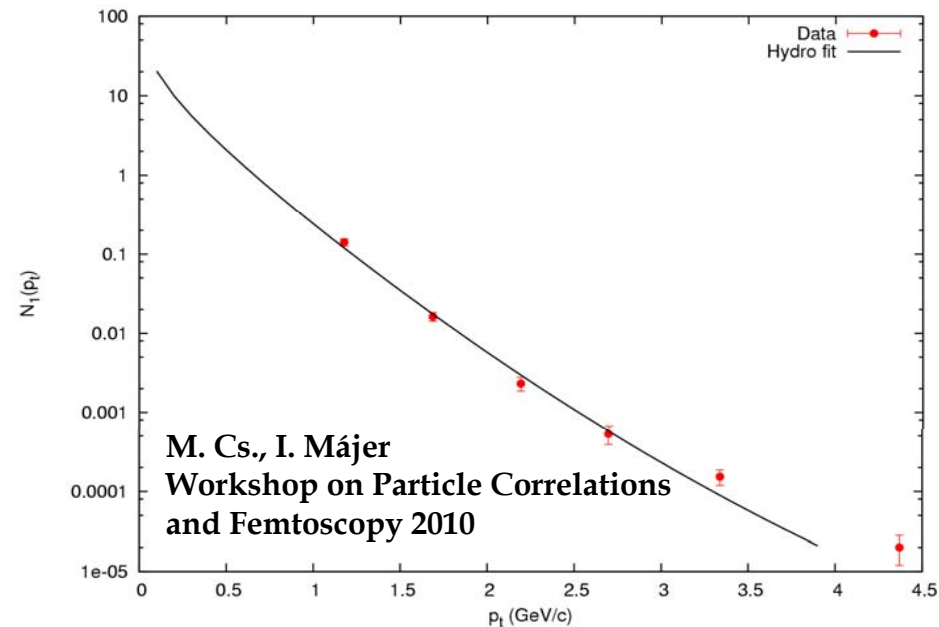
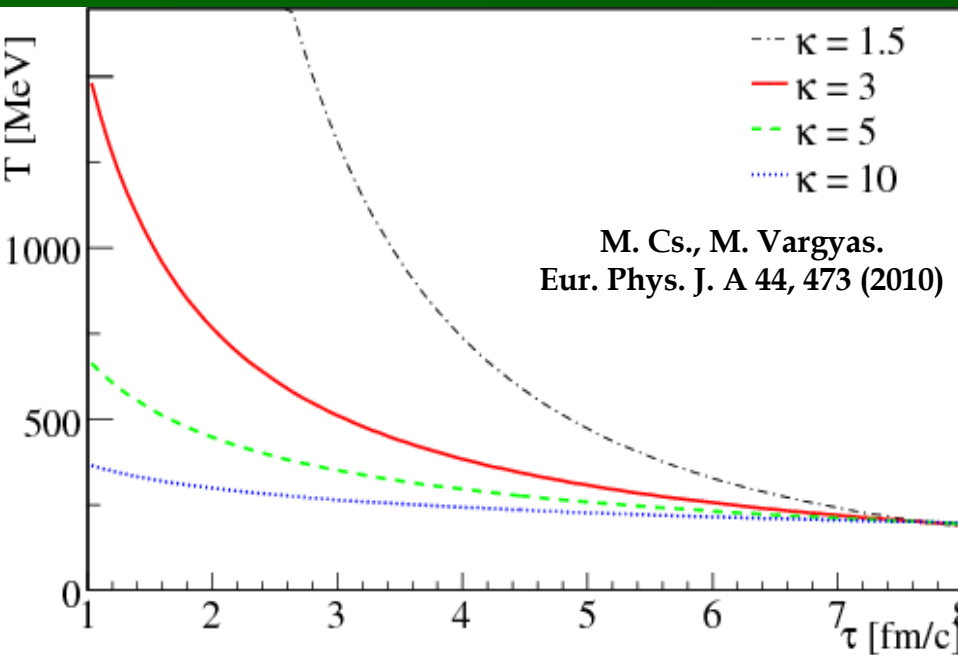
Skálázás igaz d, D és Φ esetére is

- A ritka és a bájos kvarkok is részei a folyási képnek
- D (bájos) és ϕ (ritka) esetén v_2 a mezonokkal
- deuteron esetén v_2 az $n_q = 6$ esetnek megfelelően



6. mérföldkő: a kezdeti hőmérséklet

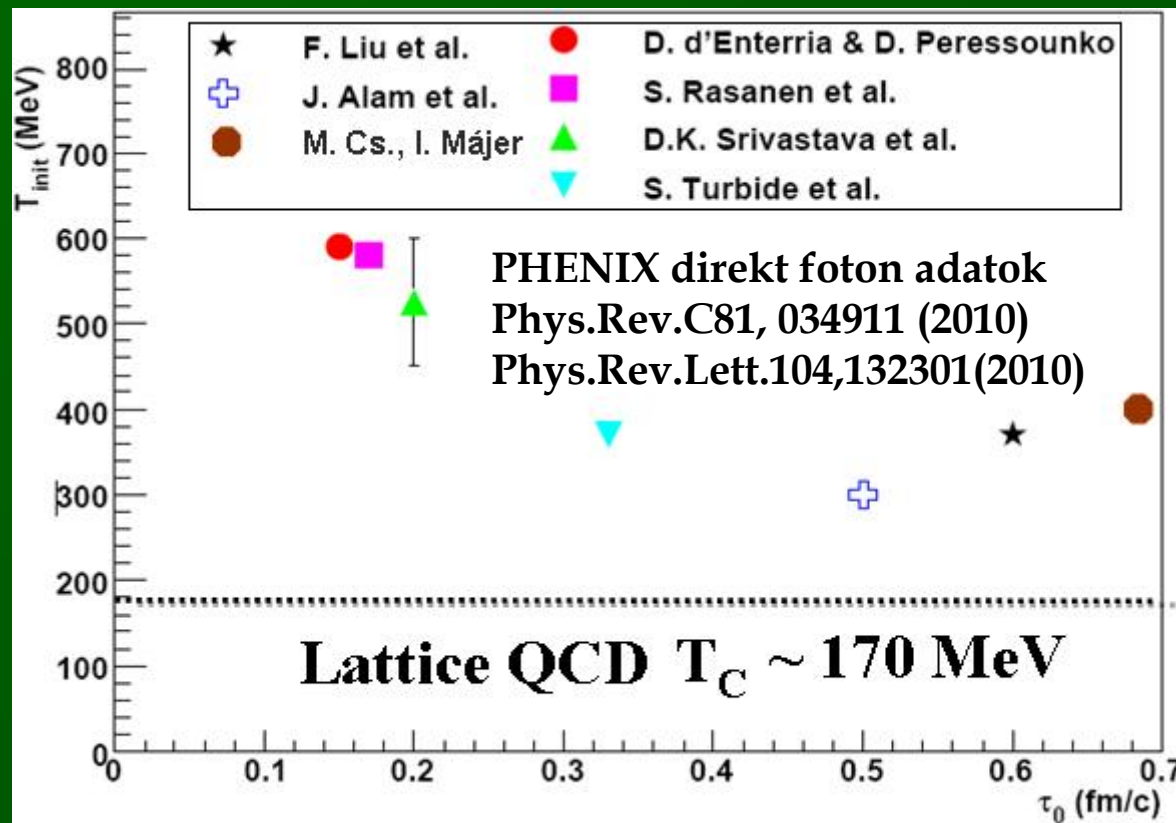
- Hadronok és fotonok spektruma együtt



- Állapotegyenlet a direkt foton spektrumból: $\kappa = 7.7 \pm 0.8$
- Kezdeti hőmérséklet ($\tau = 1$ fm/c)

$$T_i \approx 440 \text{ MeV}$$

6. mérőföldkő: magas kezdeti hőmérséklet



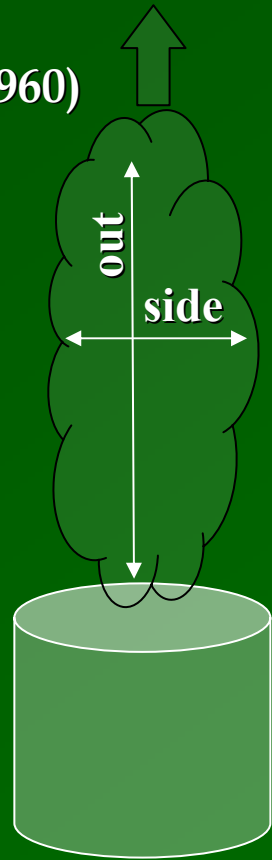
- Modell-számítások: $T_{ini} = 300 - 600$ MeV
- Rács QCD: $T_c \sim 170$ MeV

RHIC mérföldkövek mégegyszer

1. Részecskeelnyelés, Au+Au: új jelenség
 2. Nincs elnyelés, d+Au: erősen kölcsönható anyag
 3. Egybehangzó következtetés: folyadék
 4. Skálázási viselkedés: kvark szabadsági fokok
 5. Nehéz kvarkok viselkedése: tökéletes folyadék
 6. Foton spektrum: magas kezdeti hőmérséklet
- Σ Következtetés: kvarkok tökéletes folyadéka, sQGP!
- Fázisátalakulás, kritikus pont, királis átmenet?

Elsőrendű fázisátalakulás?

- Csillagok szögátmérője intenzitás-korrelációkkal
R. H. Brown, és R. Q. Twiss, Nature 178, 1046 (1956)
- Méret-megfigyelés impulzus-korrelációval
G. Goldhaber, S. Goldhaber, W. Y. Lee, A. Pais, Phys. Rev. 120, 300 (1960)
- Korrelációs sugár $\sim (\text{forrásméret})^{-1}$
- Pár-koordinátarendszerben:
 - **Out**: pár átlagos impulzusa
 - **Longitudinal**: nyalábirány
 - **Side**: előző kettőre merőleges
- Elsőrendű fázisátalakulás
 - látens hő, lassú átalakulás
 - **out** » **side**



Hanbury Brown Twiss jelenség

- Robert Hanbury Brown and Richard Q. Twiss
- Villamosmérnök végzettségű rádiócsillagászok
- Intenzitáskorrelációk felfedezése

– „Interference between two different photons can never occur.”

P. A. M. Dirac, The Principles of Quantum Mechanics, Oxford, 1930

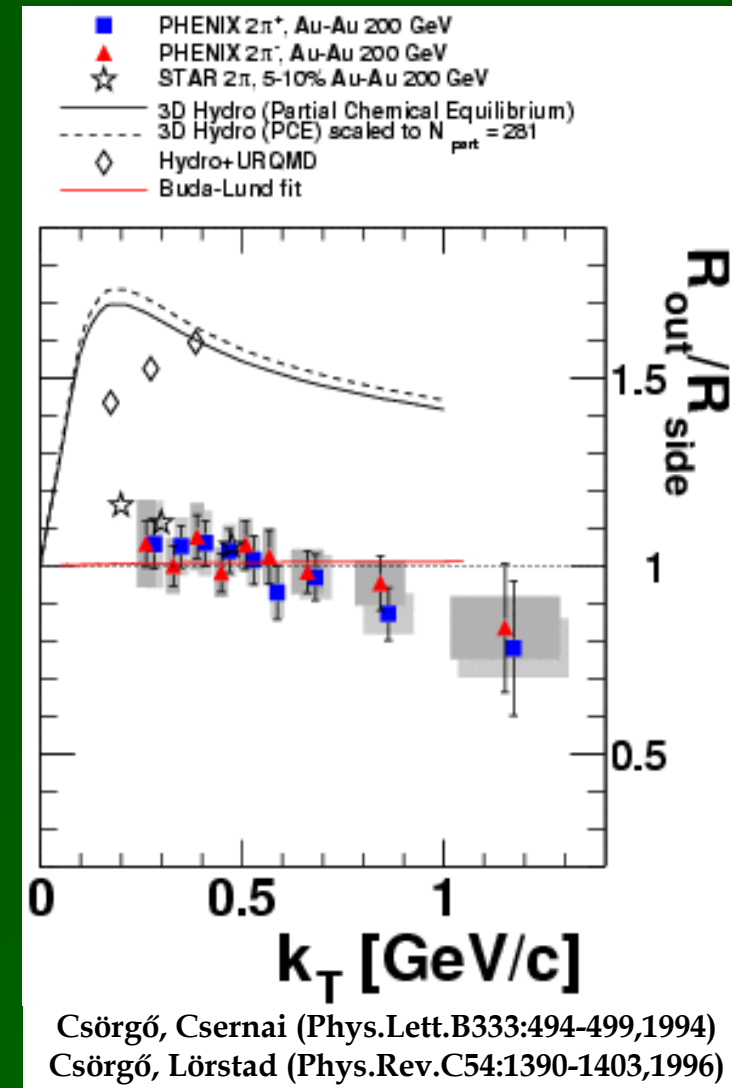
– „In fact to a surprising number of people the idea that the arrival of photons at two separated detectors can ever be correlated was not only heretical but patently absurd, and they told us so in no uncertain terms, in person, by letter, in print, and by publishing the results of laboratory experiments, which **claimed to show that we were wrong ...**”

“I was a long way from being able to calculate, whether it would be sensitive enough to measure a star. To do that one has to be familiar with photons and as an engineer my education in physics had stopped far short of the quantum theory. Perhaps just as well, otherwise like most physicists I would have come to the conclusion that the thing would not work – **ignorance is sometimes a bliss in science**”

R. H. Brown, Boffin: A Personal Story ..., Taylor and Francis, 1991

Elsőrendű fázisátalakulás kizárva!

- Elsőrendű fázisátalakulás:
Out » Side
- Hidrodinamikai jóslat:
Out $\approx$ Side
- ~50 modell rossz: „HBT rejtély”
- Sok hidrodinamikai model működik
- **Kísérlet: Out $\approx$ Side**
- Hol a kritikus pont?



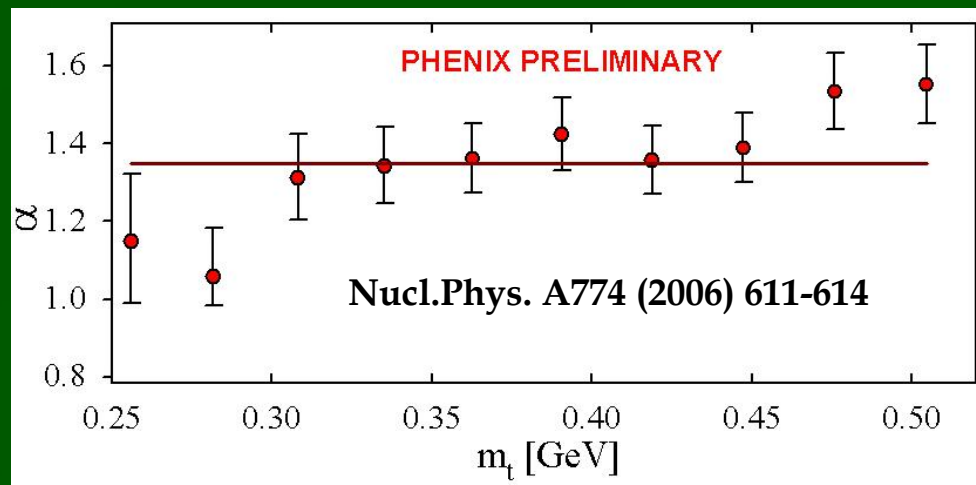
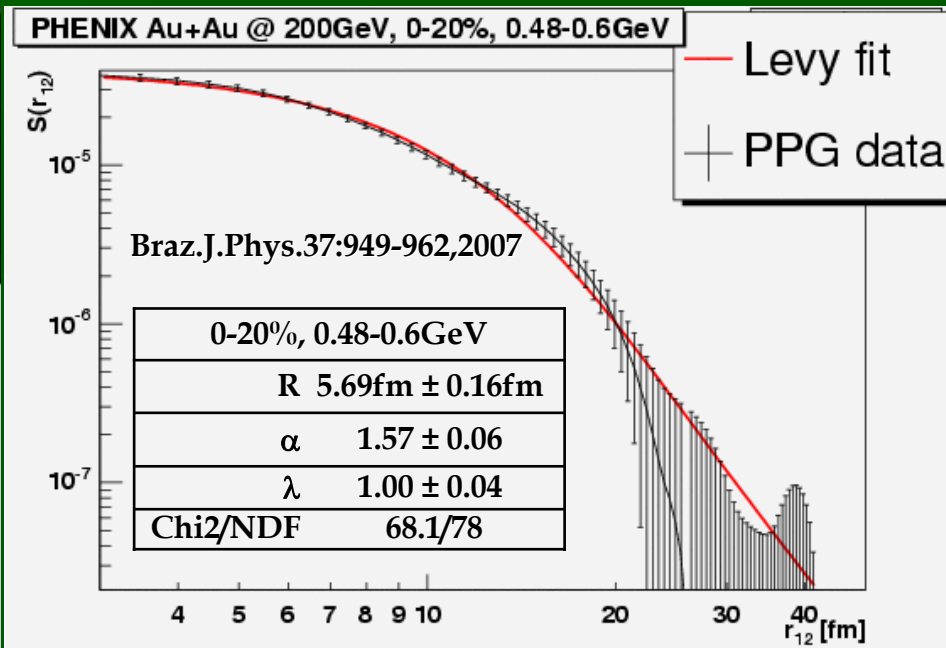
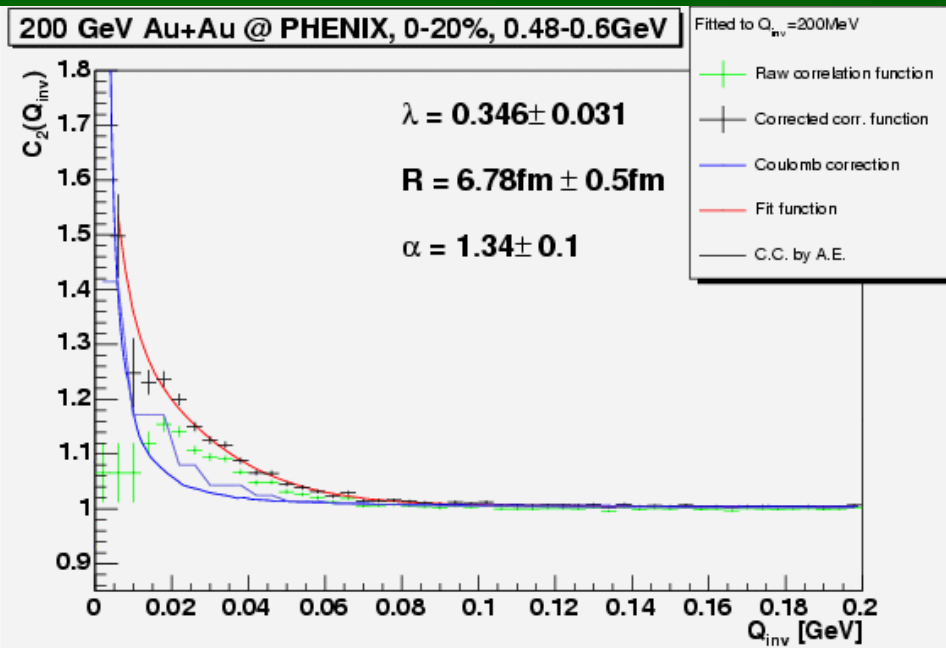
Másodrendű fázisátalakulás?

- Másodrendű fázisátalakulások esetén: kritikus exponensek
 - A kritikus pont környékén
 - Fajhő $\sim ((T-T_c)/T_c)^{-\alpha}$
 - Szuszeptibilitás $\sim ((T-T_c)/T_c)^{-\gamma}$
 - Korrelációs hossz $\sim ((T-T_c)/T_c)^{-\nu}$
 - A kritikus pontban
 - Térbeli korrelációs függvény $\sim r^{-d+d-\eta}$
 - Ginzburg-Landau: $\alpha=0, \gamma=1, \nu=0.5, \eta=0$
- QCD $\leftrightarrow$ 3D Ising modell, $\eta=0.05$
- Random tér hozzáadása esetén: $\eta=0.5$
- Ez az exponens mérhető!

A kritikus pont keresése

- Kétrészecske korreláció (térbeli)
 - Újraszórás $\leftrightarrow$ anomális diffúzió, széles eloszlás
 - Általánosított határeloszlás-tétel
 - Nem Gauss hanem Lévy eloszlás!
- Lévy(R, α): az $\exp(-|Rq|^\alpha)$ Fourier-transzformáltja
- Korrelációs exponens: Megegyezik a kétrészecske-eloszlások α Lévy-stabilitási indexével
 - $\eta = \alpha$, Csörgő *et. al.*, Eur. Phys. J. C36 (2004) 67-78
- A 200 GeV/n Au+Au adatok elemzéséből: $\alpha \approx 1.4$
- Másodrendű fázisátalakulás
- Fodor és Katz: cross-over!
- Kritikus hőmérséklet feletti hadronok is ezt jelzik

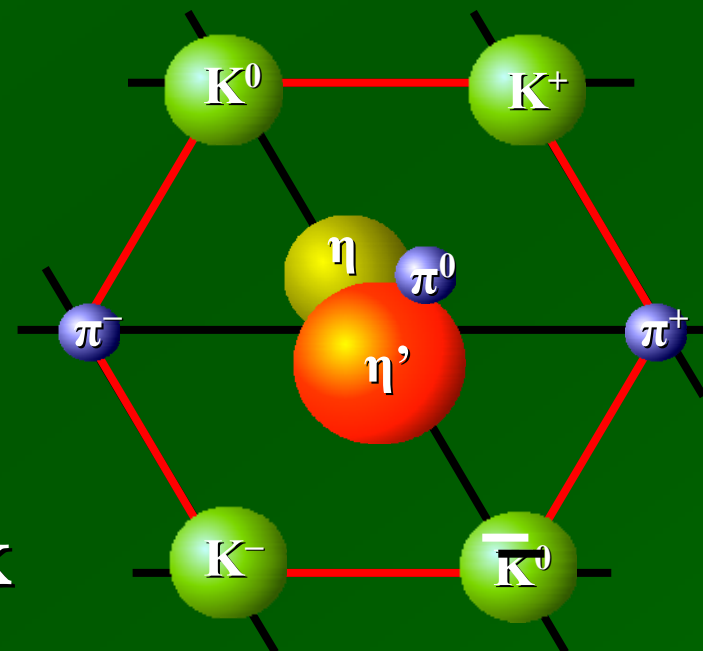
Kísérleti eredmények



A királis szimmetria

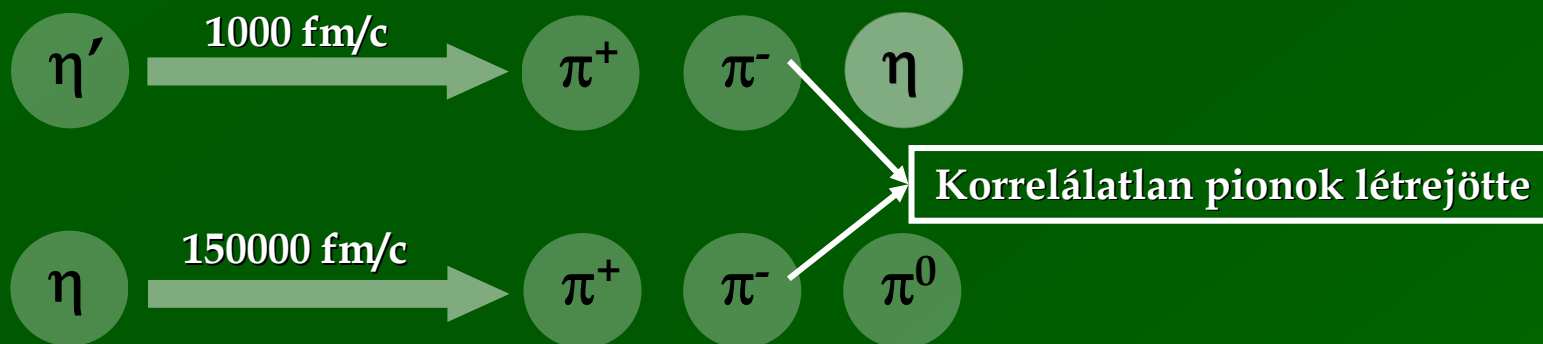
- $SU(3)$ íz-szimmetria sérül
 - Goldstone bozonok
 - Ezek a könnyű mezonok
 - Mezon-oktett: 8 db
- Kvarktömegek különböznek
 - Egzakt szimmetriasértés
 - $U_A(1)$ sérül: 9. tömeges mezon – η' (958 MeV)
- Szimmetria helyreállása: tömegcsökkenés

Alsó határ (Gell-Mann – Okubo): $m_{\eta'}^2 = (2m_K^2 + m_\pi^2)/3 \rightarrow 400 \text{ MeV}$
Felső határ (szinglet és nonszinglet áll.): $m_{\eta'}^2 = (2m_K^2 + m_\pi^2)/3 \rightarrow 700 \text{ MeV}$
J. I. Kapusta, D. Kharzeev, L. D. McLerran Phys.Rev.D53:5028-5033,1996.



A tömegcsökkenés jelei

- A kifagyás, a hadronok létrejötte
 - Hagedorn-modell: $\sigma \sim m^{3/2} e^{-m/T}$, ahol m a hadron tömege
 - A csökkent tömegű η' mezon nagyobb számban jön létre
 - Bomlás előtt tömeghéjra kerül, hosszú élettartammal
 - Kapusta, Kharzeev, McLerran Phys.Rev.D53:5028,1996.
Z. Huang, X-N. Wang, Phys.Rev.D53:5034,1996



- Átlagos pion-impulzus: 138 MeV
- Ötlet: korrelált pionok arányának mérése
 - Vance, Csörgő Kharzeev Phys.Rev.Lett.81:2205,1998
T. Hatsuda, T. Kunihiro Phys. Rept. 247:221,1994

A korrelációs függvény erőssége

A korrelált (Bose-Einstein) pionon számának aránya a korrelációs függvény erőssége, $\lambda(m_t)$:

Forró, sűrű közeg
 η' tömegcsökkenés



Megnövekedett η' tartalom

Bomlás (hosszú élettartam):

$\eta' \rightarrow \eta + \pi^+ + \pi^- \rightarrow (\pi^0 + \pi^+ + \pi^-) + \pi^+ + \pi^-$

Átlagos pion-impulzus alacsony

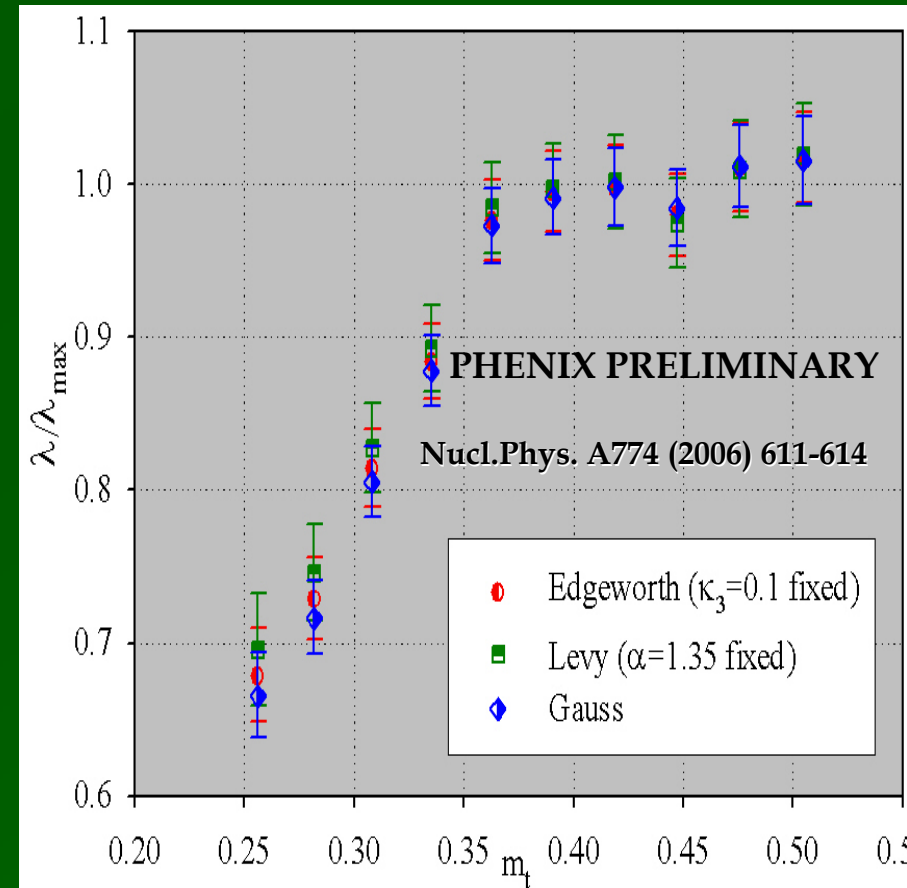


Több korrelálatlan pion-pár keletkezése

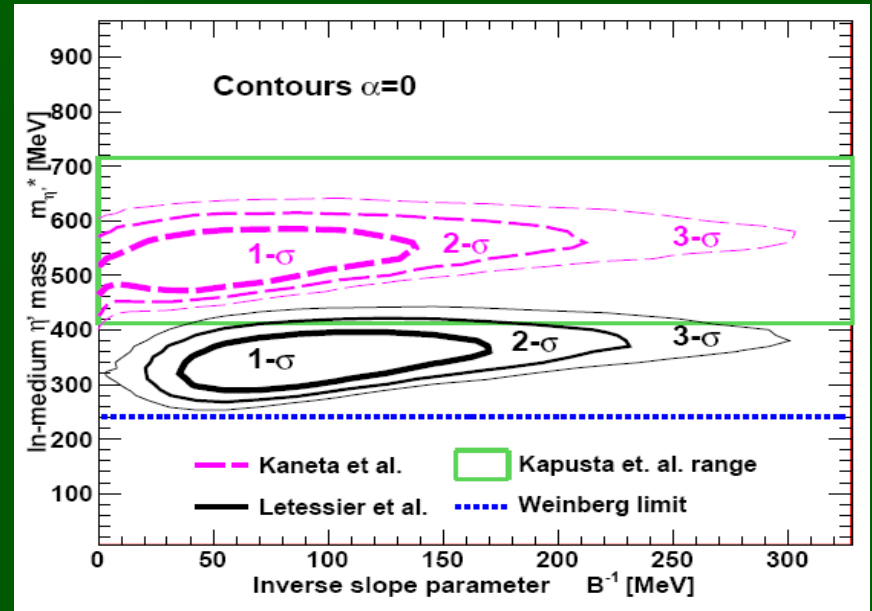
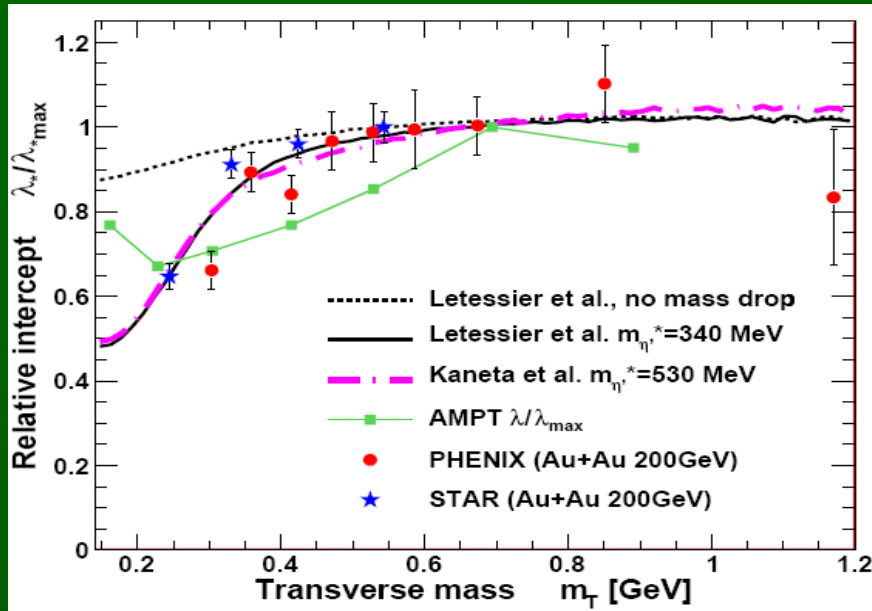


$\lambda(m_t)$ lecsökken alacsony impulzusnál

Ellenőrzés, más okok kizárása?



Tömegcsökkenés szimuláció



- Csörgő, Vértesi, Sziklai: arXiv:0912.0258, .5526
- Maximális tömeg 5 σ kontúrral: 730 MeV
- Legjobb illeszkedés 340-530 MeV
- Ellenőrzés: η' -ből származó pionok eldobása
- Kinematikai vágás lehetséges kísérleti analízisben!
 - M. Cs. és Kőfaragó M., Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy 2010
 - PHENIX mérés véglegesítéséhez fontos elem

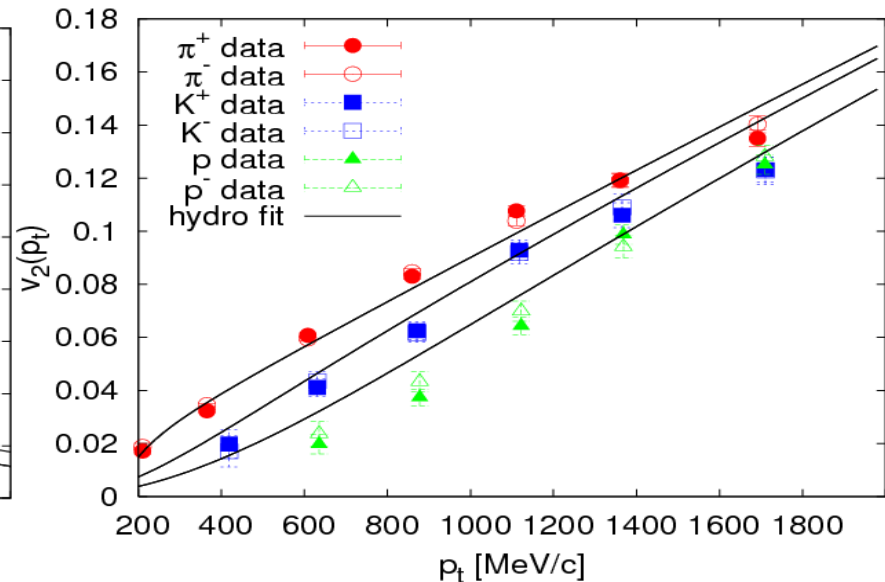
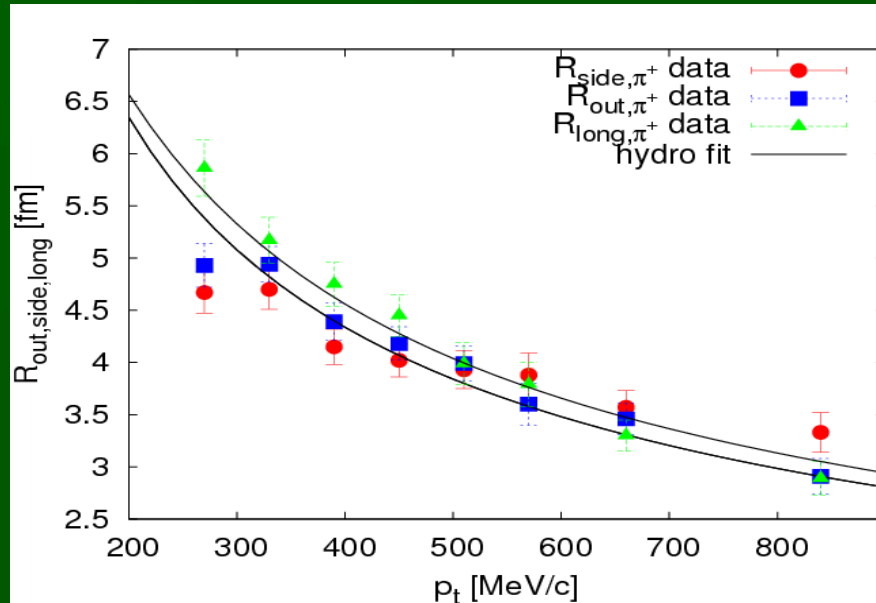
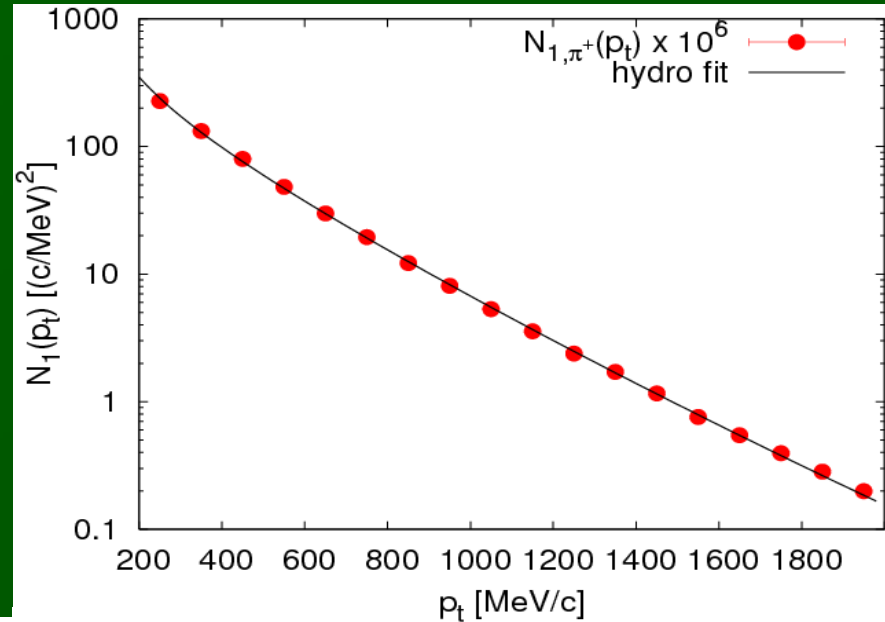
„A tökéletes kvarfolyadék ...”

Relativisztikus hidrodinamikai körkép

- Klasszikusok
 - L. D. Landau, Izv. Acad. Nauk SSSR 81 (1953)
 - I. M. Khalatnikov, Zhur. Eksp. Teor. Fiz. 27, 529 (1954)
 - R.C. Hwa, Phys.Rev.D10:2260,1974
 - J.D. Bjorken, Phys.Rev.D27:40,1983
- Felélénkült érdeklődés, új analitikus megoldások
 - Pratt, Phys.Rev.C75:024907,2007
 - Bialas et al.: Phys.Rev.C76:054901,2007
 - Borsch, Zhdanov: SIGMA 3:116,2007
 - Nagy et al.: Phys. Rev. C 77:024908,2008
 - Mizoguchi et al.: Eur.Phys.J.A40:99-108,2009
 - Beuf et al.: Phys.Rev.C78:064909,2008
 - Liao et al.: Phys.Rev.C80:034904,2009
 - Sinyukov, Karpenko, nucl-th/0505041
 - Csörgő et al.: Phys.Lett.B565:107-115,2003
- Megfigyelhető mennyiségek: kevés esetben vannak
- Amilyen megoldás még nincs:
 - Gyorsuló, relativisztikus, 1+3 dimenziós
 - Explicit, egyszerű, realisztikus adatokkal kompatibilis

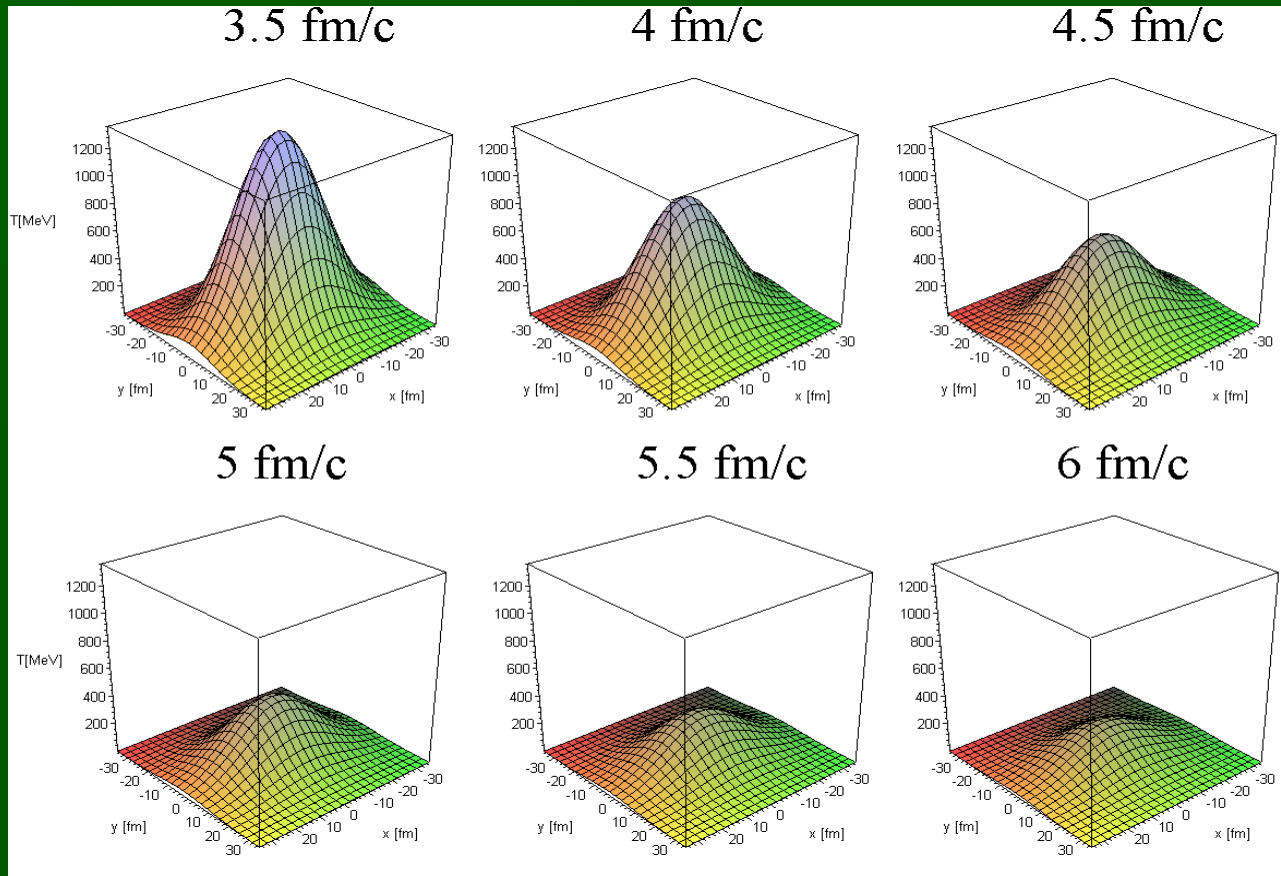
Egy 3D relativisztikus modell

- Modell: Csörgő et al.
 - Phys.Lett.B565:107-115,2003 &
 - Heavy Ion Phys.A21:73-84,2004
- Hubble-típusú folyási kép
- Számítások: Cs. M., Vargyas M.
 - Eur. Phys. J. A 44, 473–478 (2010)
- Kifagyás: 204 ± 7 MeV
- Kifagyási idő: $7,7 \pm 0,8$ fm/c



Hőmérsékleti eloszlás

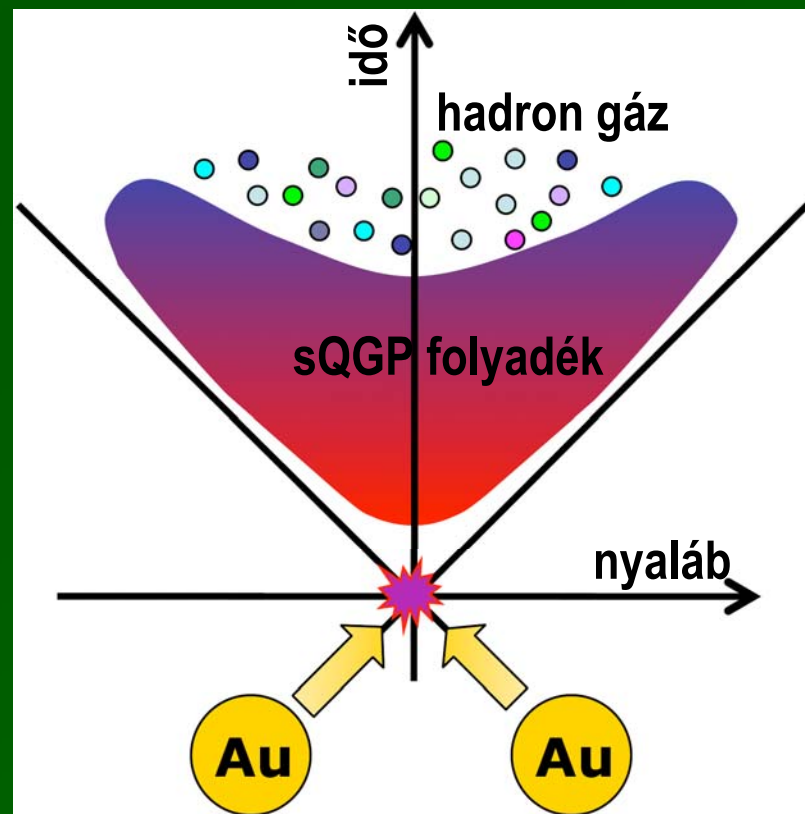
- A hőmérsékleti eloszlás az idő függvényében
- A középpontban a kritikus pont feletti hőmérséklet
- Cross-over típusú átmenet esetén!



„A tökéletes kvarfolyadék ...”

Az eredmények összegzése

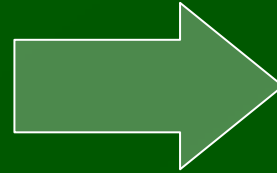
- Erősen kölcsönható anyag, részecskeelnyelés
- Szinte tökéletes folyadék
- Kvark szabadsági fokok
- Kritikus hőmérséklet felett
- Kritikus pont felett
- Királis dinamika jelei



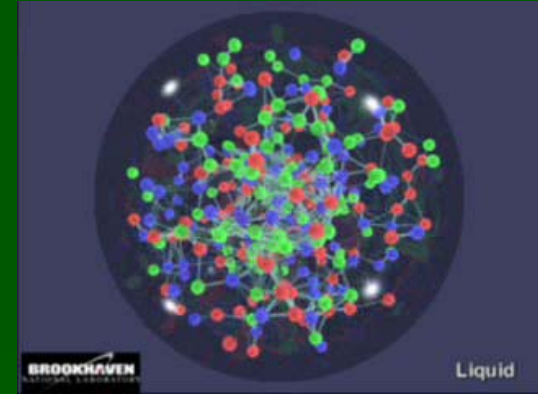
Tervek a jövőre

- PHENIX Next Decade Plan: 2011-2020
 - 2011-15: királis dinamika, nehéz kvarkok, kritikus pont keresés
 - 2016-20: kvarcsatolás skálafüggése, energialeadási mechanizmusok, kvázirészecskék, szín-árnyékolás, entrópia
- Detektor- és gyorsítófejlesztés!
- eRHIC, ePHENIX

Összegzés



SQGP!



~~Fázisátmenet~~
~~Szabad Q-G plazma~~

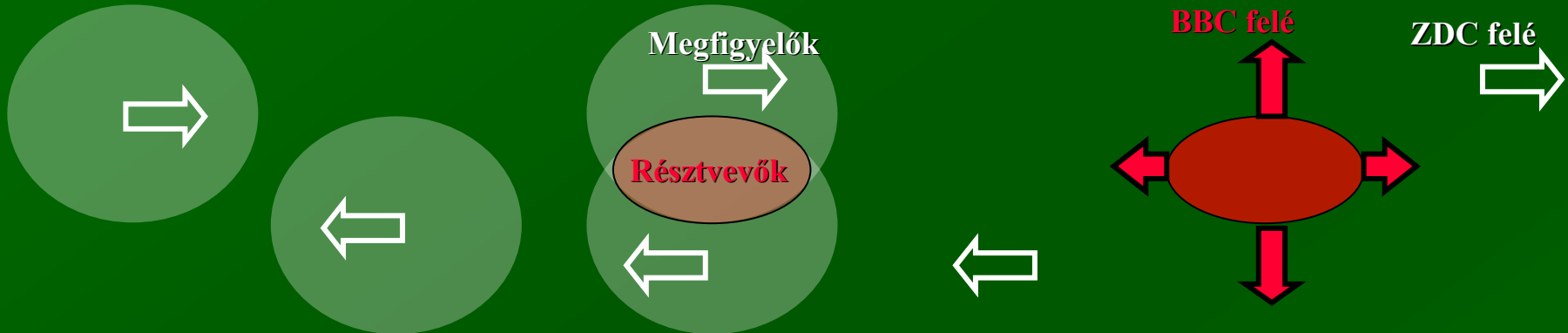


„A tökéletes kvarfolyadék ...”

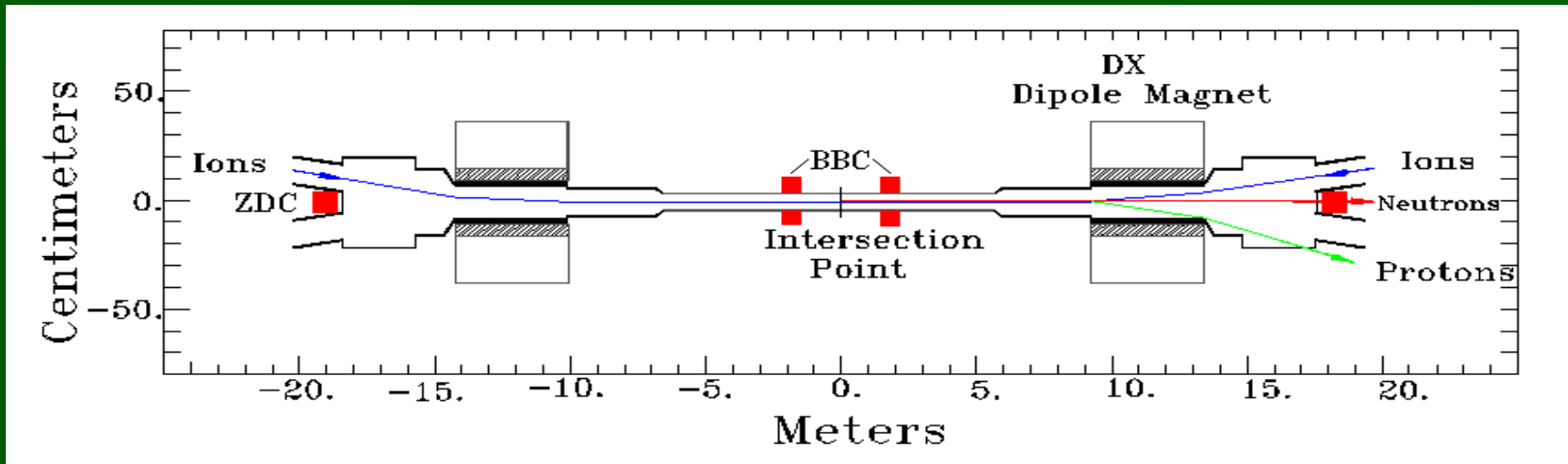
Backup slides

Centralitás-meghatározás

- Átfedő régió: résztvevők (participants)



- Lepárolgó neutronok: ZDC felé (töltött részecskék eltérülnek)
 - ZDC energiát mér (kaloriméter) ~ lepárolgó neutronok száma
- Résztevők: keletkezett részecskék a BBC felé



The four Collaborations

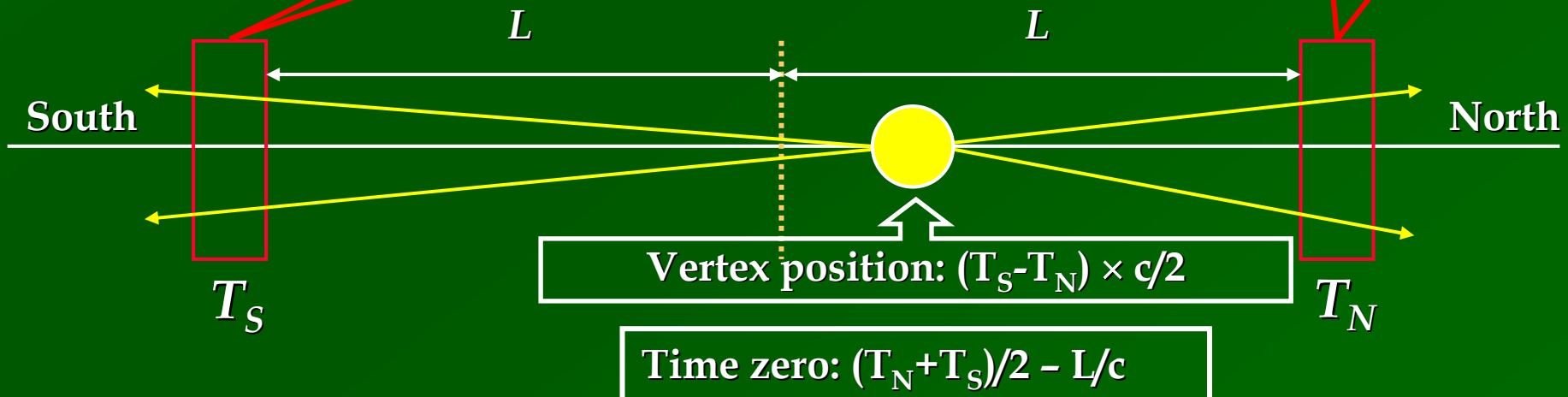
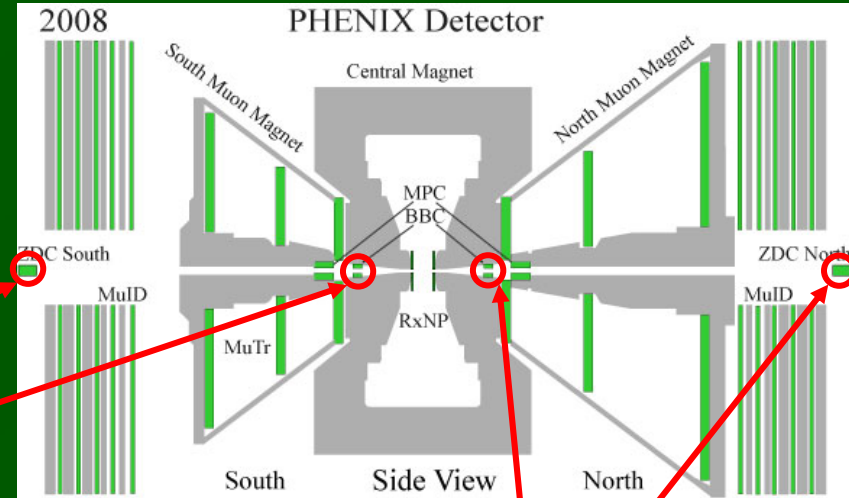
- **BRAHMS (Broad Range Hadron Magnetic Spectrometer)**
 - Two small but distant spectrometers, detect charged hadrons precisely
 - 4 countries, 14 institutions, 60 participants, until 2006
- **PHENIX (Pioneering High Energy Nuclear Interactions eXperiment)**
 - Many different detector-types, detect electrons, muons, photons, hadrons
 - 14 countries, 69 institutions, 600 participants
- **PHOBOS**
 - Small silicon detectors, broad rapidity range, look for rare events, fluctuations
 - 3 countries, 12 institutions, until 2006
- **STAR (Solenoidal Tracker At RHIC)**
 - Time Projection Chamber, detect all hadrons
 - 12 countries, 46 institutions, 550 participants, 1200 tons

What do we extract from the data?

- $p_x, p_y, p_z \rightarrow \eta$ or y, φ, p_t or m_t
- Transverse mom. spectrum for each particle
- Rapidity distributions
- Angular distributions
 - Elliptic flow
- All kinds of ratios
- Pair-correlations
 - Momentum, angle, etc
- Fluctuations
- Whatever tells us something...

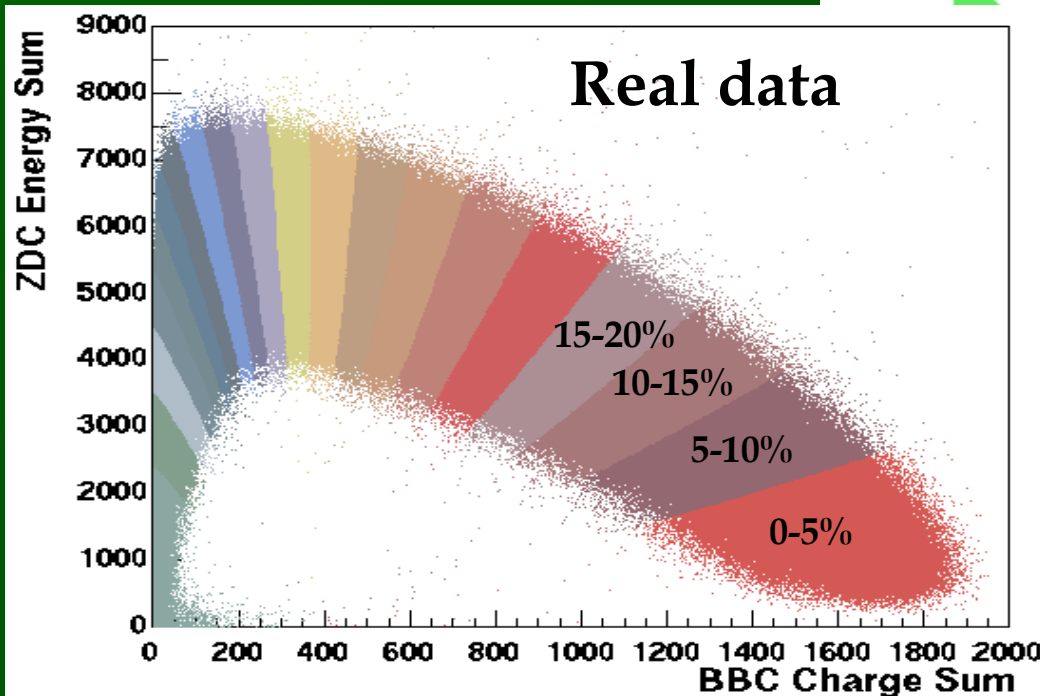
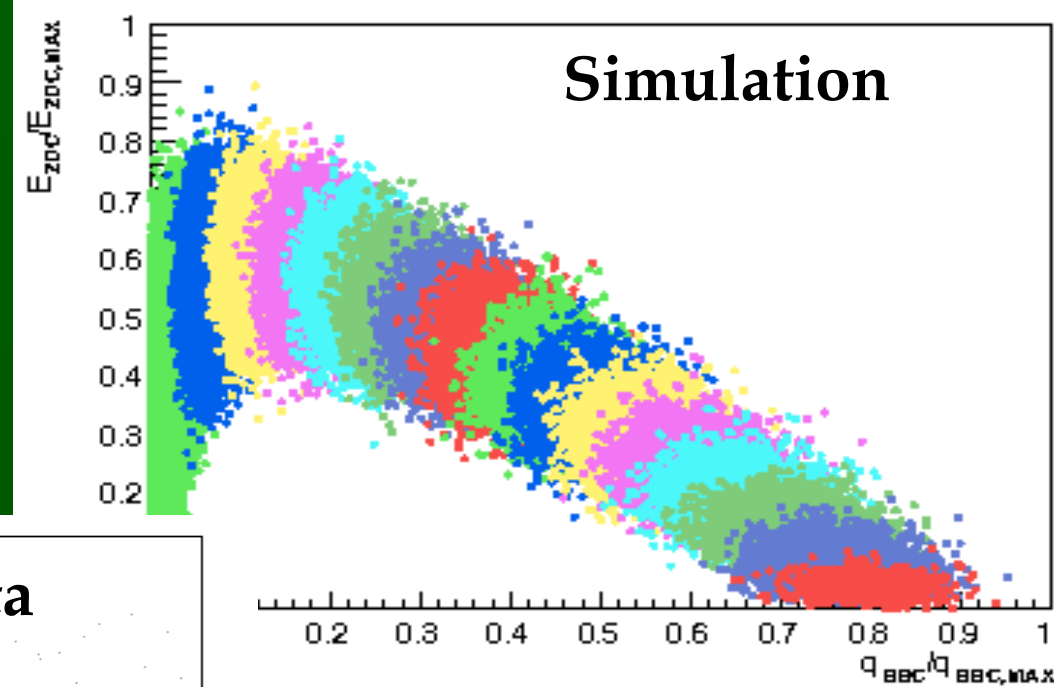
Time zero + vertex: BBC & ZDC

- BBC & ZDC south and north at high rapidity
- BBC at $\eta \approx 3-4$
 - particles from vertex
- ZDC at $\eta \approx \infty$
 - evaporating neutrons
- Time zero from $\langle T \rangle$
- Vertex from ΔT

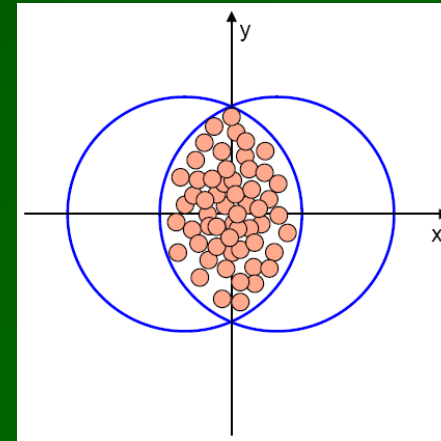


Centrality determination

- More central: more charge in BBC
- Very central or very peripheral: no energy in ZDC
- E_{ZDC} versus Q_{BBC}



Glauber model to simulate centrality vs physical parameters



Glauber-model

$$\rho(z, \mathbf{b}) = \frac{\rho_0}{1 + \exp \frac{r - R}{a}} \rightarrow \text{nuclear density, } r = \sqrt{z^2 - s^2}, R = 6.38 \text{ fm}, a = 0.54 \text{ fm}$$

$$T_A(\mathbf{b}) = \int dz \rho(z, \mathbf{b}) \rightarrow \text{z-profile (surface density)}$$

$$\int d^2\mathbf{b} T_A(\mathbf{b}) = A \rightarrow \text{mass number}$$

$$N_{coll} = AB \int d^2\mathbf{s} T_A(\mathbf{s}) T_B(\mathbf{s} - \mathbf{b}) \sigma_{NN} \rightarrow \text{number of binary collisions}$$

$$T_{AB}(\mathbf{b}) = \int d^2\mathbf{s} T_A(\mathbf{s}) T_B(\mathbf{s} - \mathbf{b}) = \frac{N_{coll}}{\sigma_{NN}} \rightarrow \text{nuclear overlap}$$

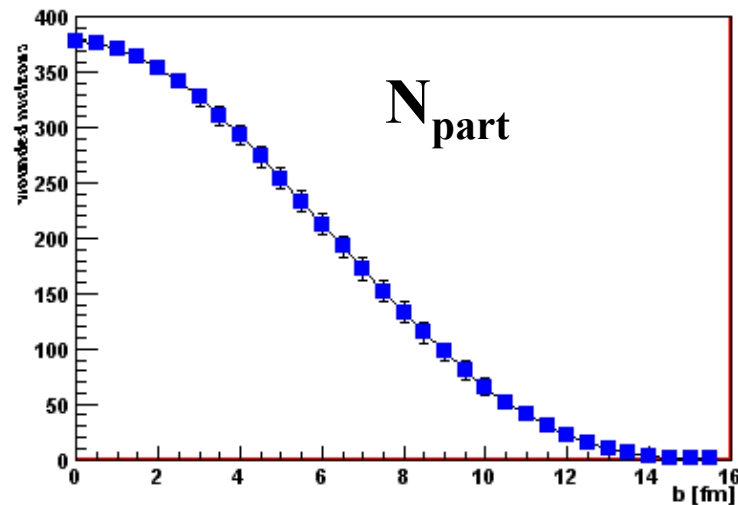
$$\sigma_{AB} = \int d^2\mathbf{b} \left\{ 1 - [1 - \sigma_{NN} T_{AB}(\mathbf{b})]^{AB} \right\} \rightarrow \text{total cross-section}$$

$$N_{part} = A \int d^2\mathbf{s} T_A(\mathbf{s}) \left\{ 1 - [1 - \sigma_{NN} T_B(\mathbf{s} - \mathbf{b})]^B \right\} + (A \leftrightarrow B) \rightarrow \text{number of participants}$$

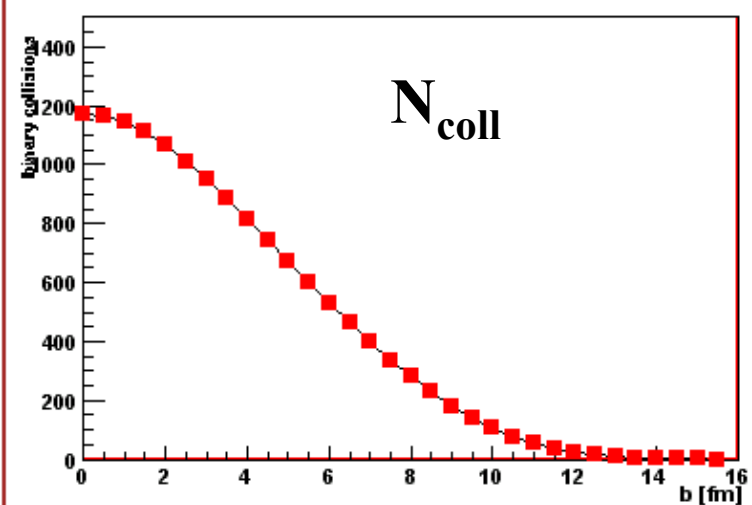
$$\varepsilon = \frac{\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle}$$

Results from Glauber Monte Carlo

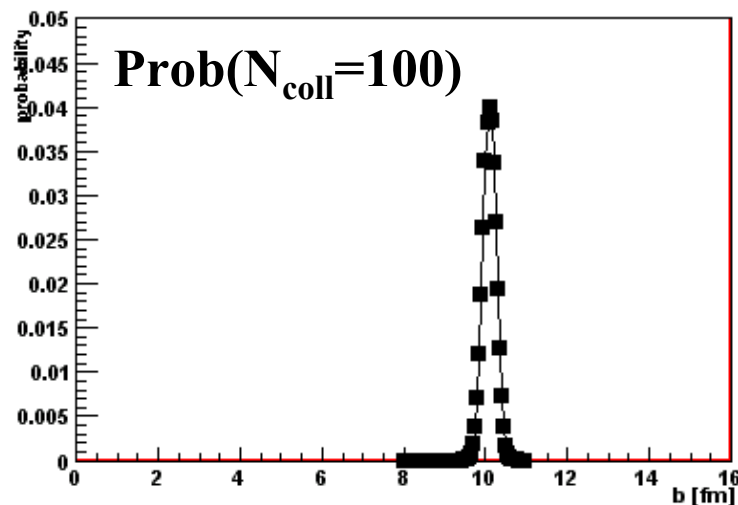
Au+Au wounded nucleons



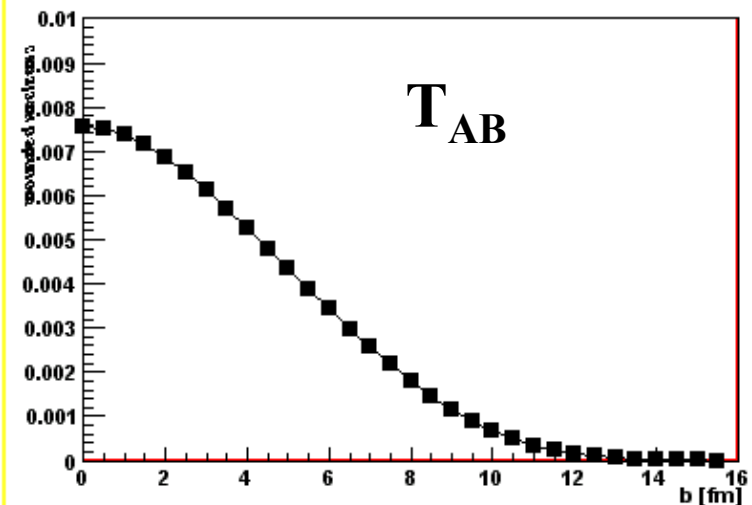
Au+Au binary collisions



Au+Au $P(N_{\text{coll}} = 100)$



T_{AB} for Au+Au

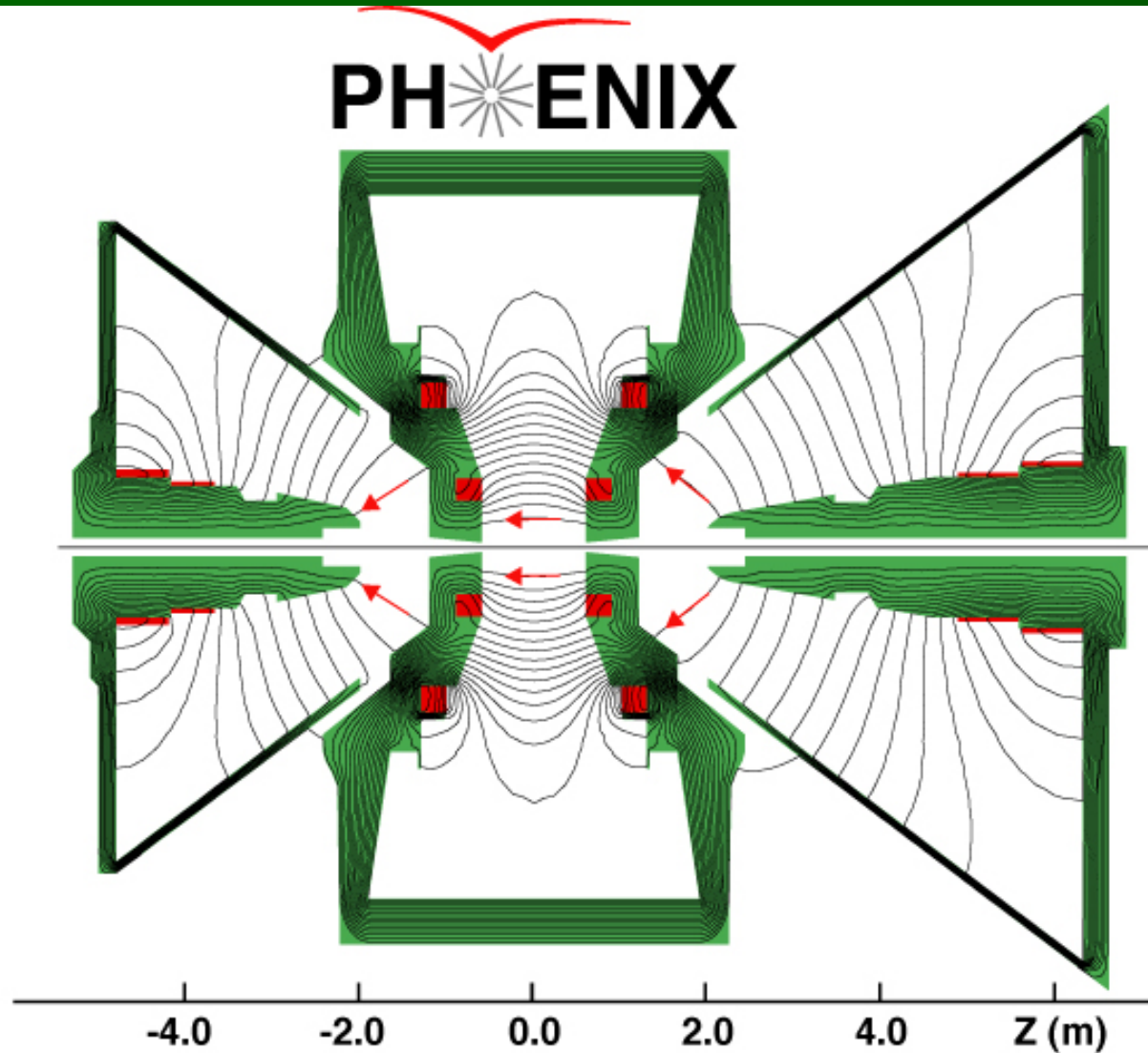


Results from a Glauber Monte Carlo

$\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV/nAu+Au simulation in various centrality

class	$\langle N_{part} \rangle$	sys. err.	$\langle N_{coll} \rangle$	sys. err.	T_{AB} (mb ⁻¹)	sys. err.	$\langle b \rangle$ (fm)	sys. err.	$\langle eccen. \rangle$	sys. err.
0- 5%	351.4	2.9	1065.4	105.3	25.37	1.77	2.3	0.1	0.027	0.007
5- 10%	299.0	3.8	845.4	82.1	20.13	1.36	4.1	0.2	0.086	0.011
10- 15%	253.9	4.3	672.4	66.8	16.01	1.15	5.2	0.3	0.140	0.023
15- 20%	215.3	5.3	532.7	52.1	12.68	0.86	6.2	0.2	0.182	0.020
20 -25%	181.6	5.6	421.8	46.8	10.04	0.85	7.0	0.4	0.224	0.031
25- 30%	151.5	4.9	325.6	32.4	7.75	0.58	7.8	0.3	0.257	0.022
30- 35%	125.7	4.9	251.0	25.9	5.98	0.48	8.4	0.4	0.287	0.025
35- 40%	102.7	4.3	188.6	20.6	4.49	0.43	9.1	0.4	0.315	0.032
40- 45%	82.9	4.3	139.4	15.4	3.32	0.31	9.7	0.4	0.337	0.039
45- 50%	65.9	3.4	101.3	12.1	2.41	0.25	10.2	0.4	0.360	0.046
50- 55%	51.6	3.2	72.1	10.5	1.72	0.23	10.7	0.4	0.372	0.048
55- 60%	39.4	3.5	49.9	9.6	1.19	0.23	11.2	0.4	0.383	0.069
60- 65%	29.8	4.1	34.4	8.7	0.82	0.21	11.7	0.5	0.397	0.052
65- 70%	21.5	3.8	22.6	6.6	0.54	0.16	12.1	0.5	0.399	0.054
70- 75%	15.5	3.4	14.8	5.1	0.35	0.12	12.6	0.5	0.392	0.075
75- 80%	11.3	2.6	9.9	3.3	0.24	0.08	13.0	0.6	0.381	0.115
80-92.2%	6.3	1.2	4.9	1.2	0.12	0.03	14.1	0.6	0.261	0.082

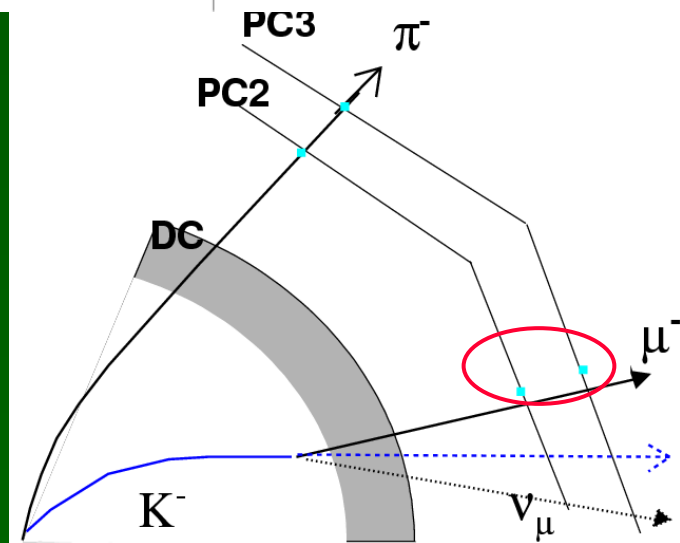
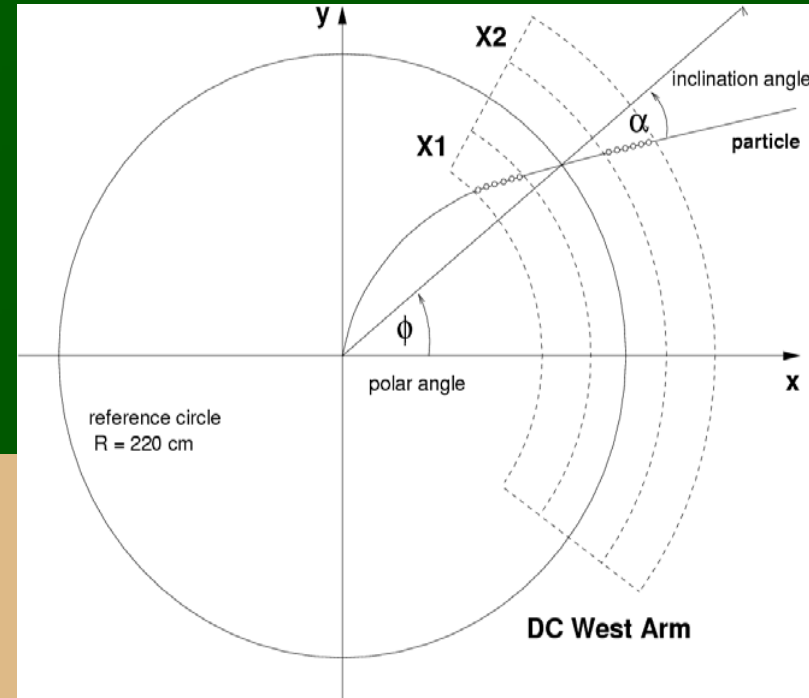
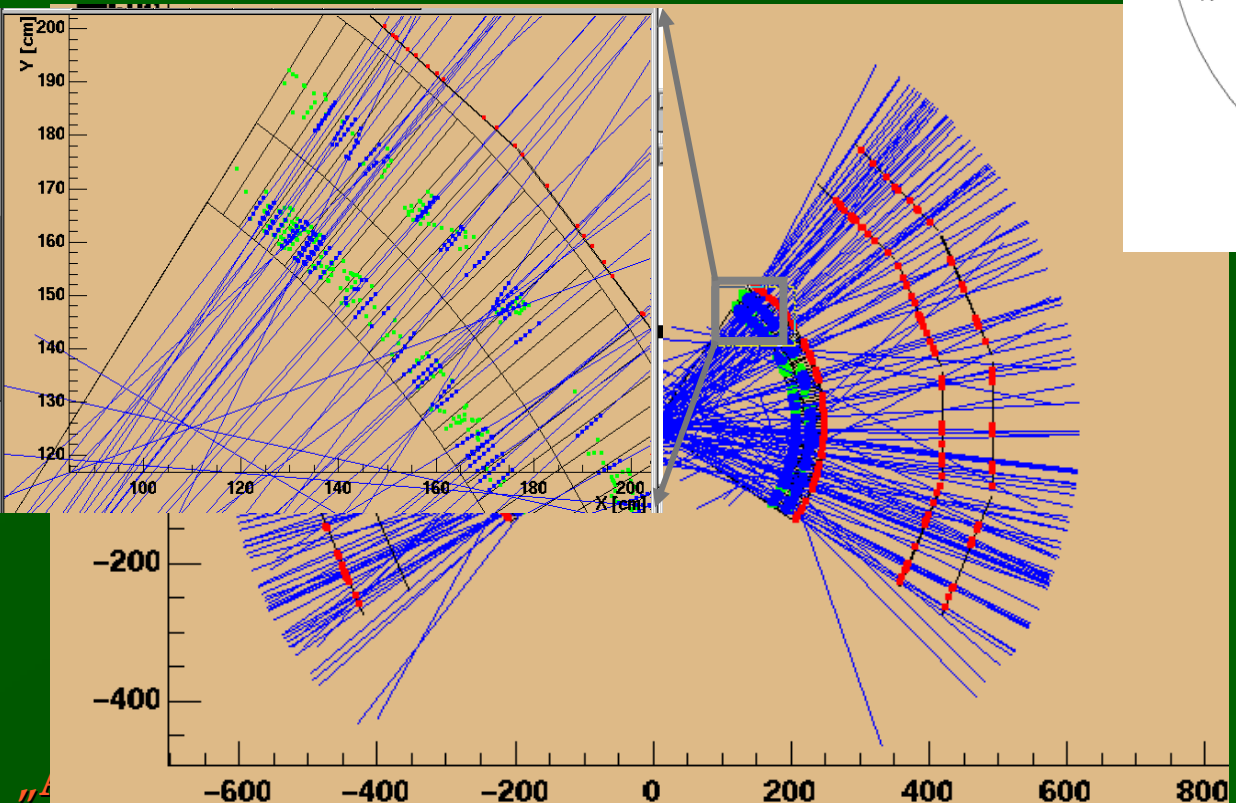
Magnetic field for tracking



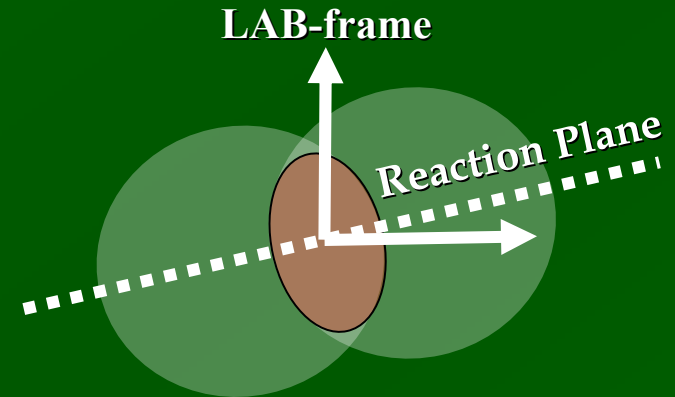
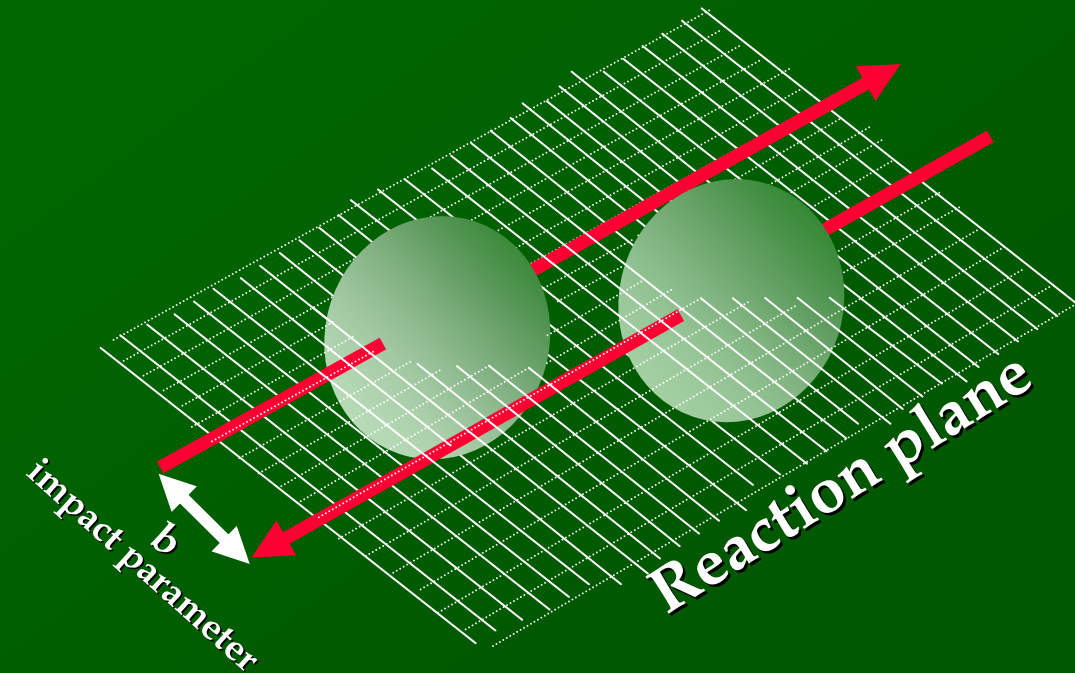
Magnetic field lines for the two Central Magnet coils in combined (++) mode

Tracking process

- DC + PC1 $\rightarrow$ Track model
- Inclination $\rightarrow$ momentum
- PC2 + PC3: matching
 - Reduces background



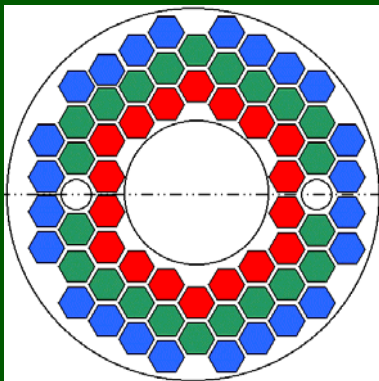
Reaction plane determination



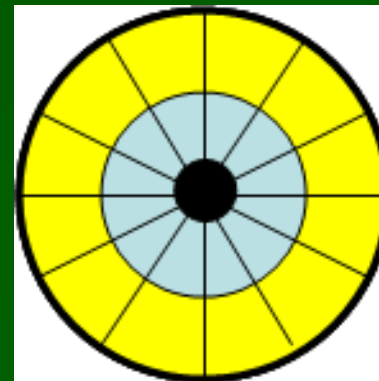
reaction plane (Ψ) by BBC or RxNP

$$\tan(n\Psi) = \frac{\sum_{i \in \text{segments}} Q_i \sin(n\phi_i)}{\sum_{i \in \text{segments}} Q_i \cos(n\phi_i)}$$

BBC

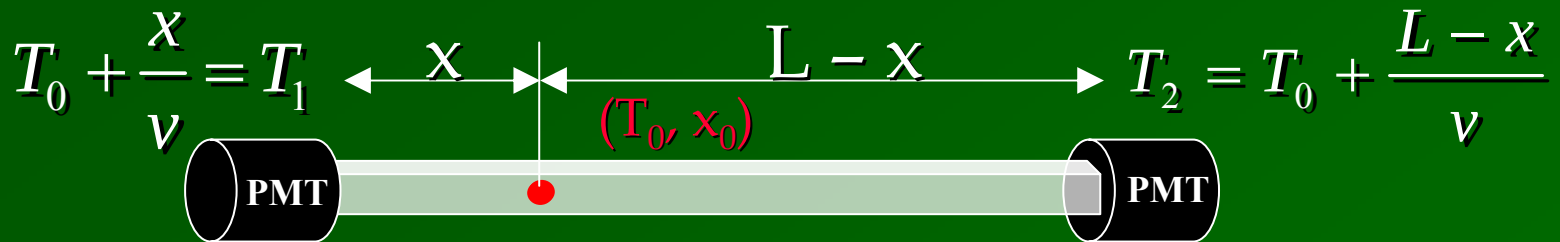
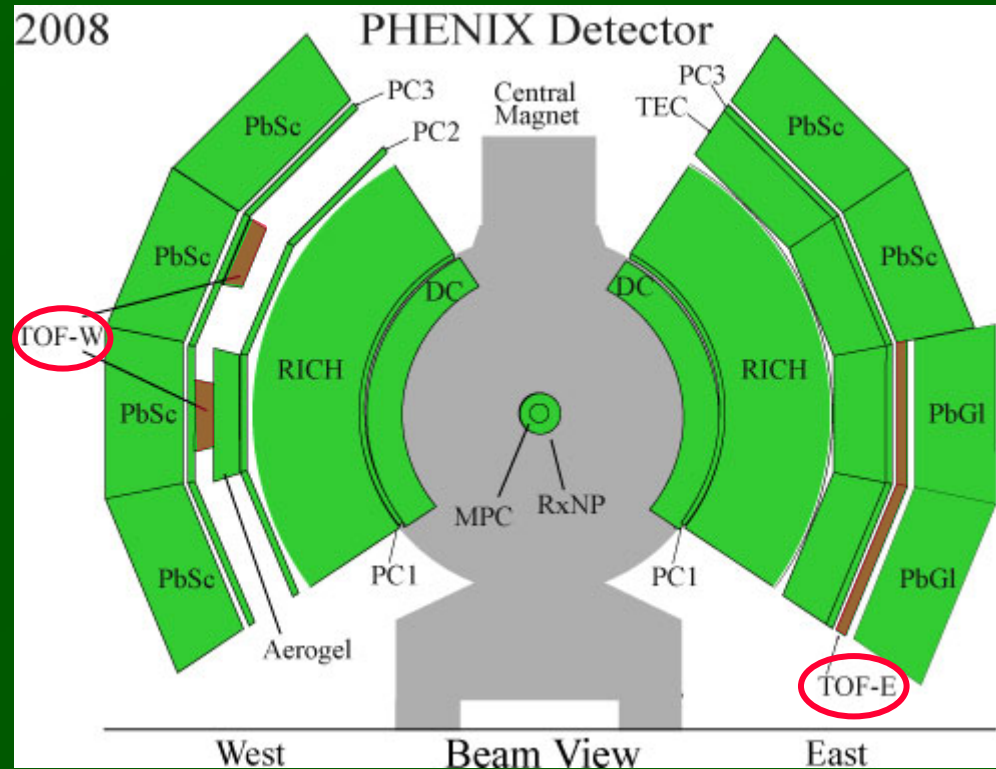


RxNP



Hadron identification by TOF

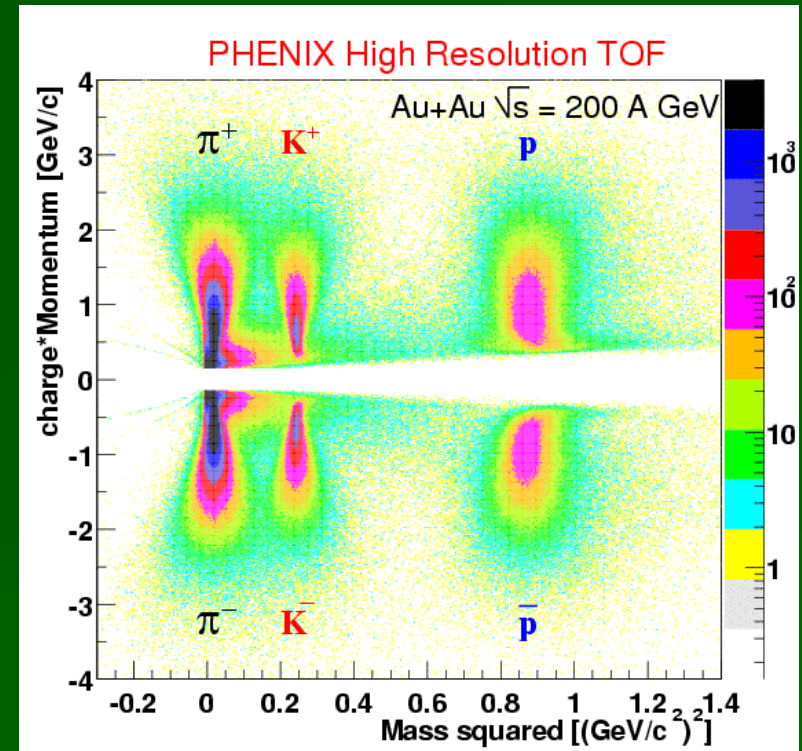
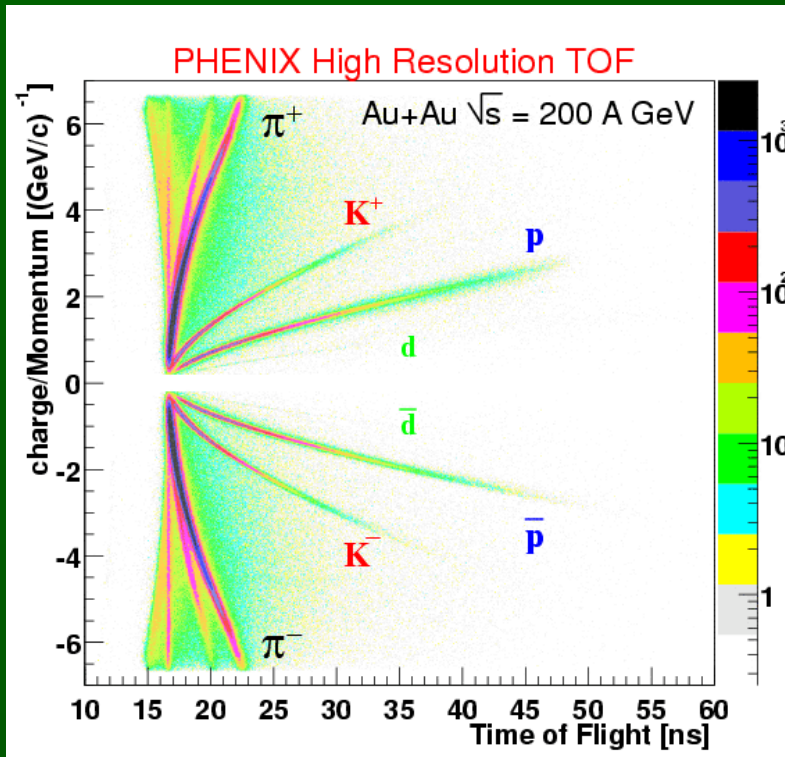
- Time Of Flight detector
 - time measurement
 - 120 ps resolution
- Acceptance
 - $\Delta\phi = \pi/4$
 - $|\eta| < 0.35$
- East and West arm
 - 1472 PMTs
- Same principle as BBC



Hadron identification by TOF

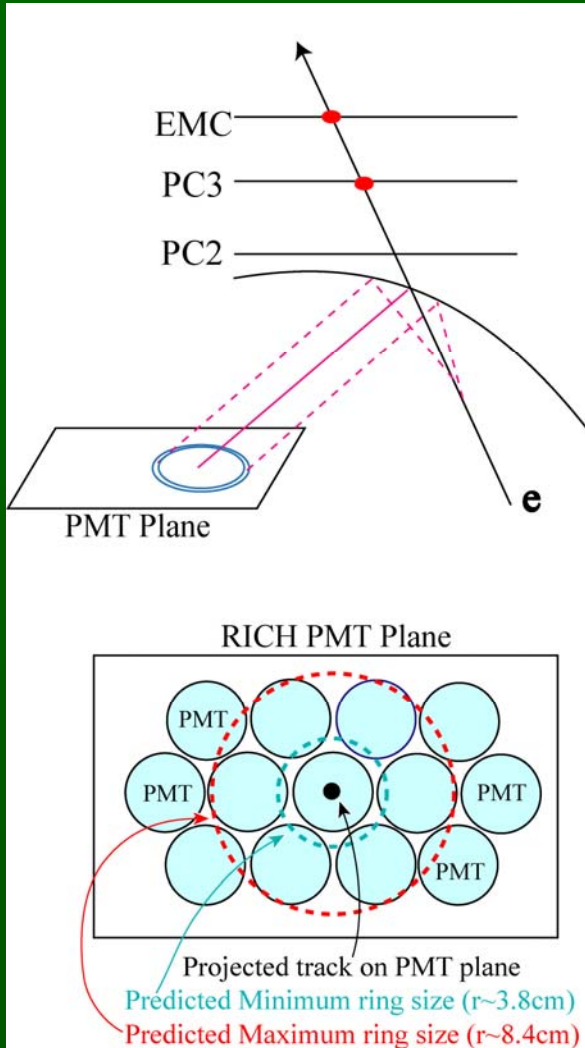
- Velocity + momentum $\rightarrow$ mass

$$t = \frac{L}{c\beta} = \frac{L}{c} \frac{\sqrt{p^2 + m^2}}{p} \longrightarrow m^2 = p^2 \left\{ \left(\frac{t^2}{L^2} \right) - 1 \right\}$$



Electron identification by RICH

Ring Imaging CHerenkov counter

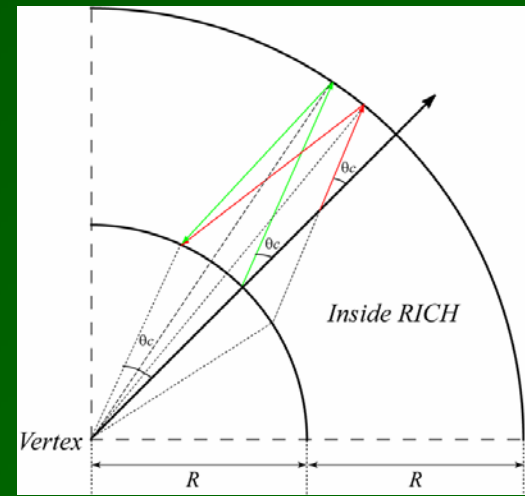
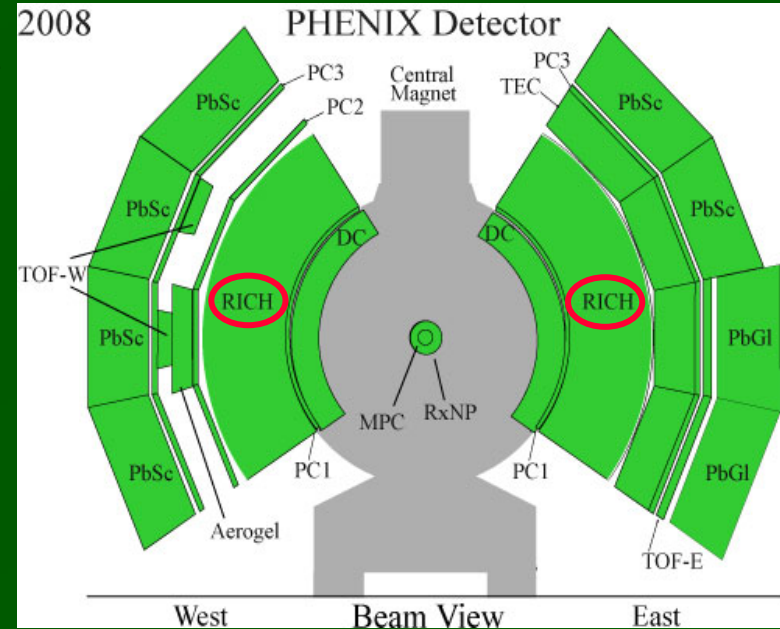
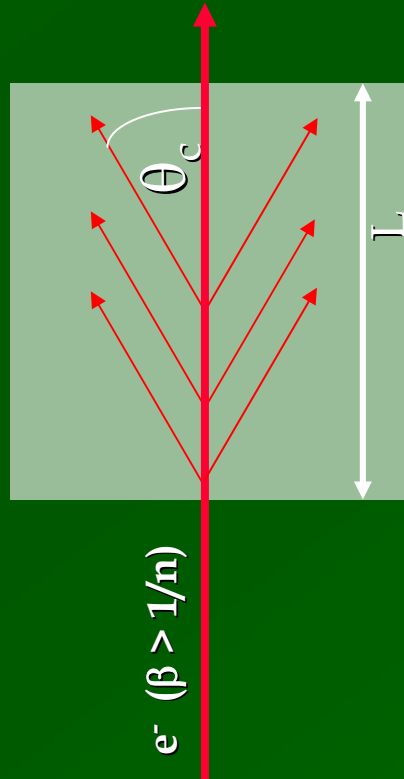


Čerenkov radiation

$$\beta > 1/n$$

$$\cos\theta = 1/n\beta$$

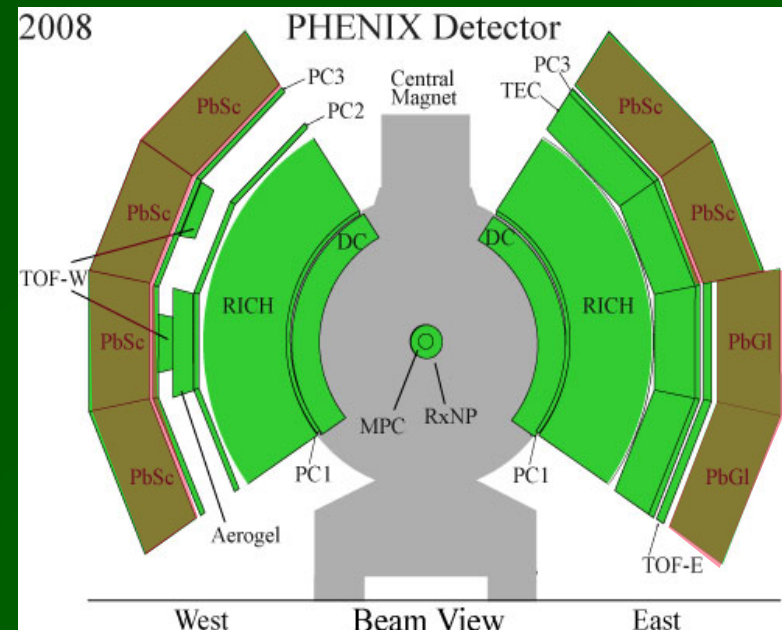
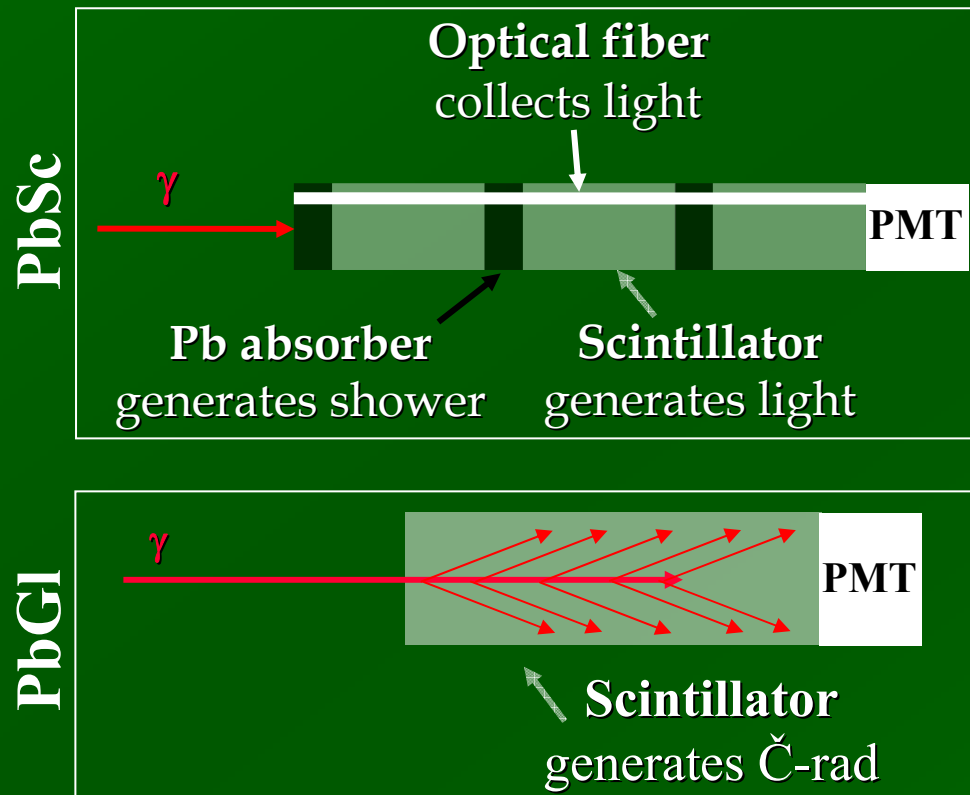
$$e^-: 0.02 - 4.9 \text{ GeV}/c$$



„A tökéletes kvarfolyadék ...“

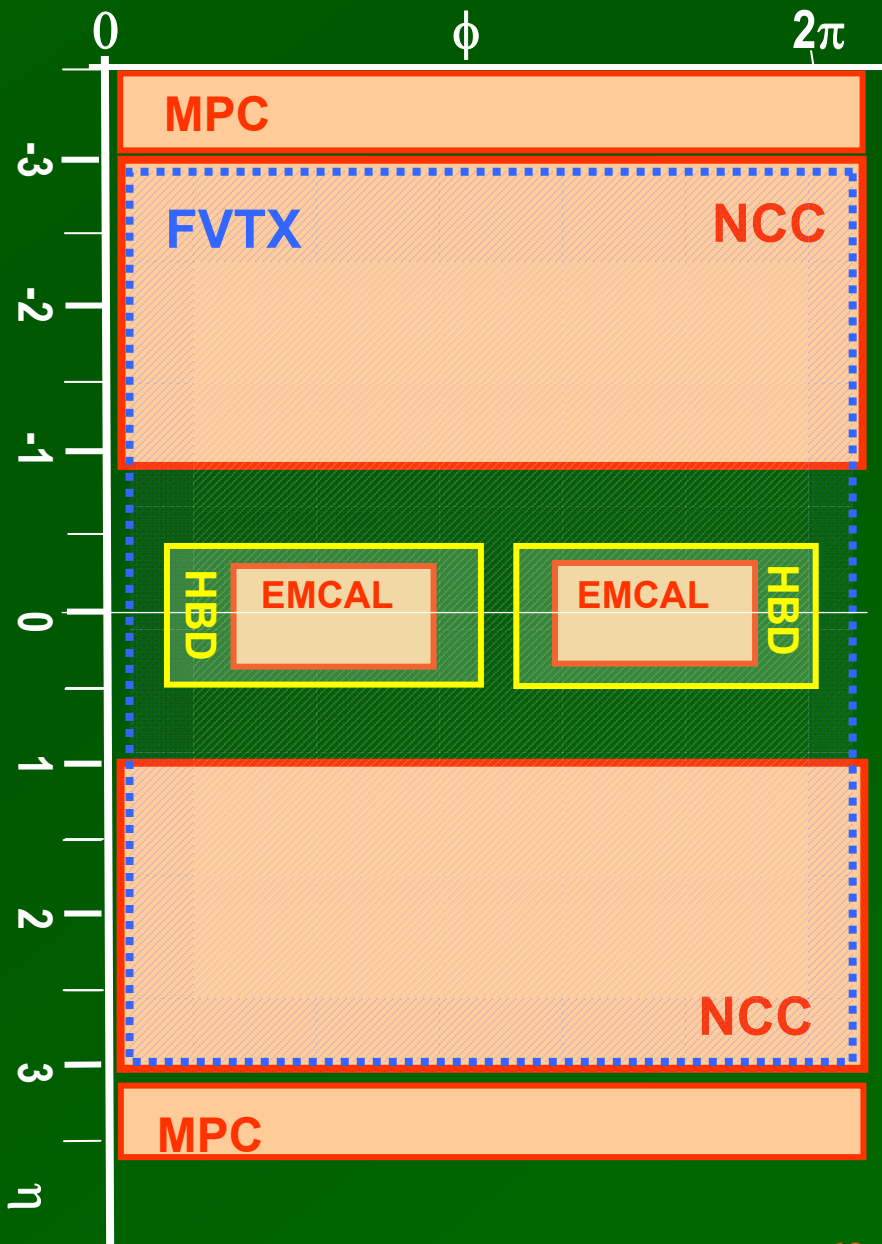
Lepton+ photon ID by EMCal

- Energy + momentum $\rightarrow$ mass
- Leptons and photons to deposit all their energy in EMCal
- Lead Scintillator and Lead Glass: light $\sim$ energy
- Hadrons: additional recalibration needed



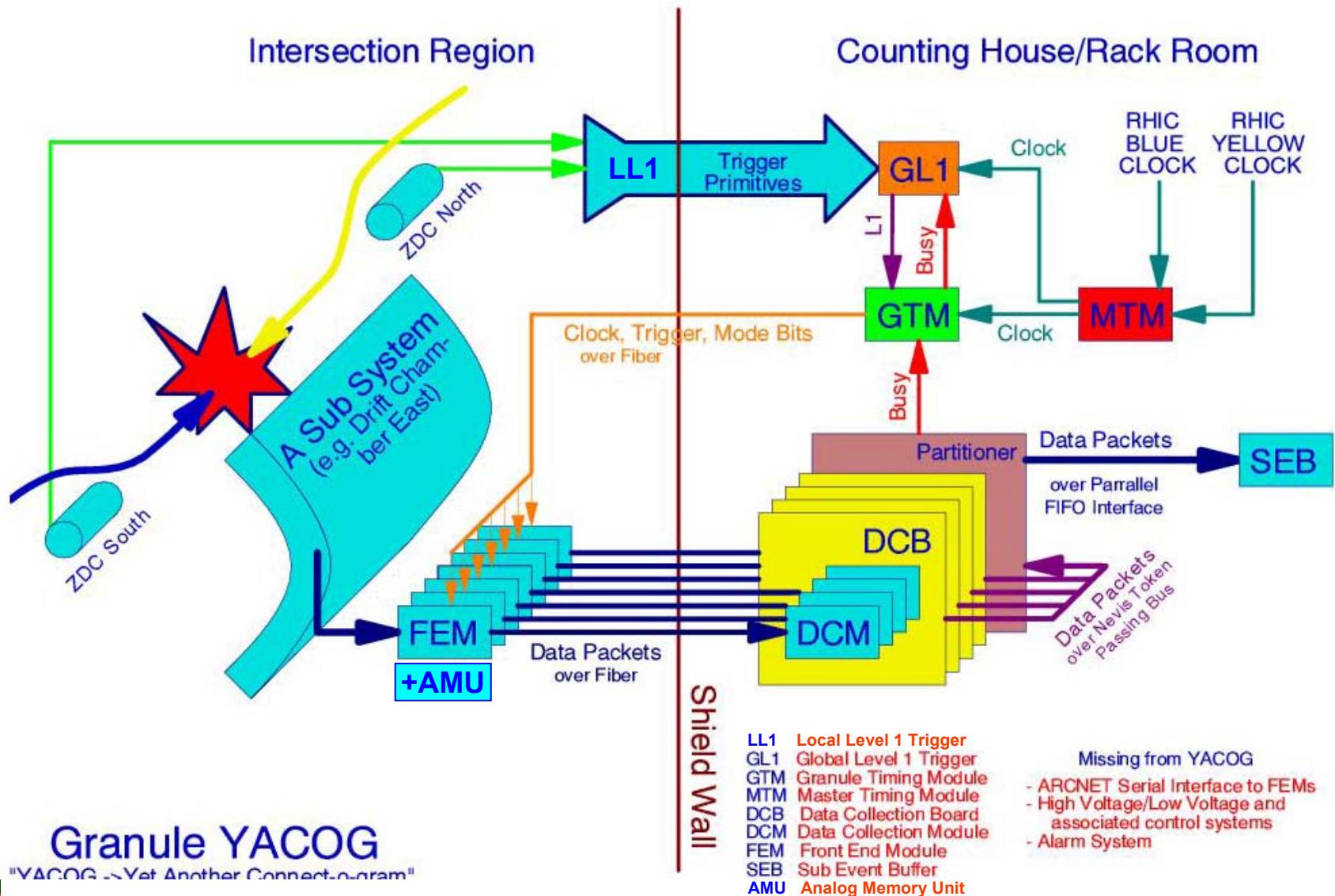
The ones left out ...

- History:
 - small acceptance
 - high rate
 - rare probes
 - lepton, γ , hadron
- Muon Tracker
- Muon ID
- Muon Piston Calorimeter
- Hadron Blind Detector
- Silicon Vertex Detector
- Nose Cone Calorimeter
- Forward Vertex Detector
- +Aerogel: high p_t hadrons $\rightarrow$

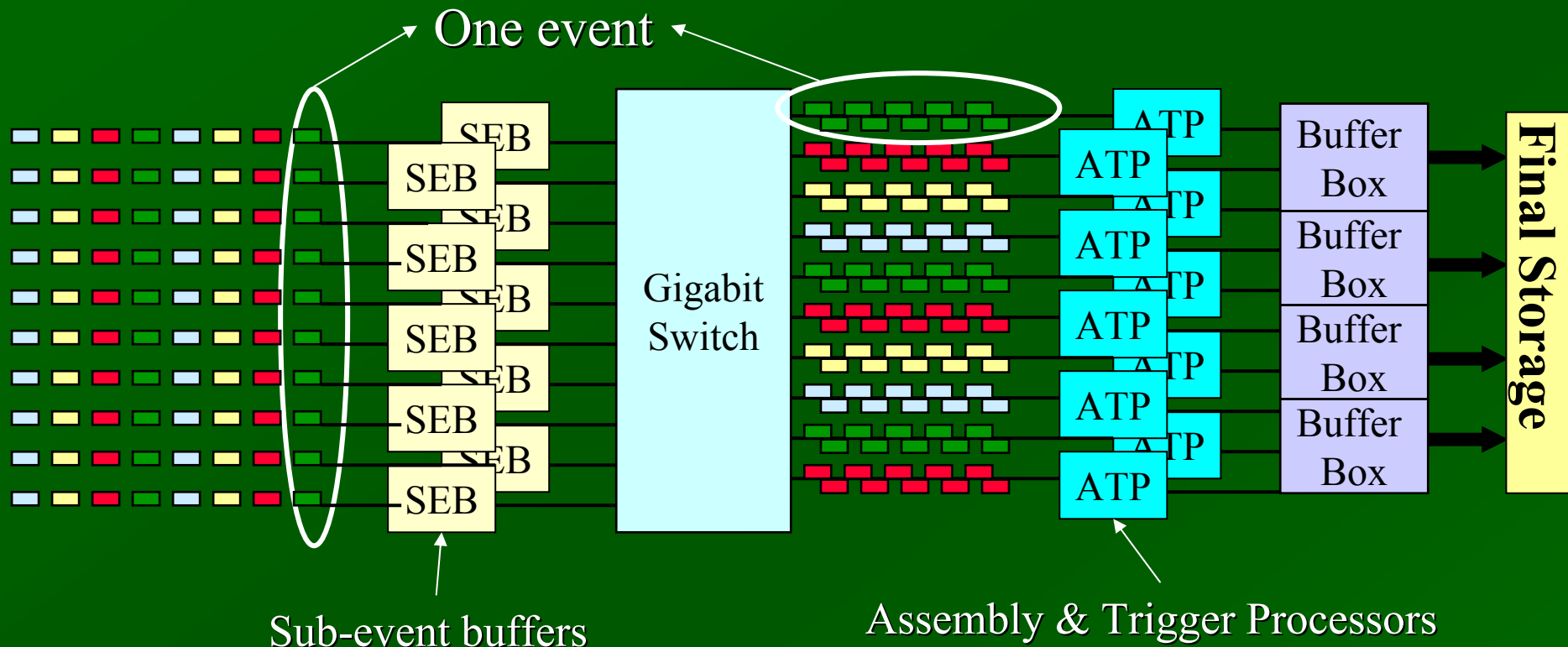


The DAQ

The Hardware Components of A Granule



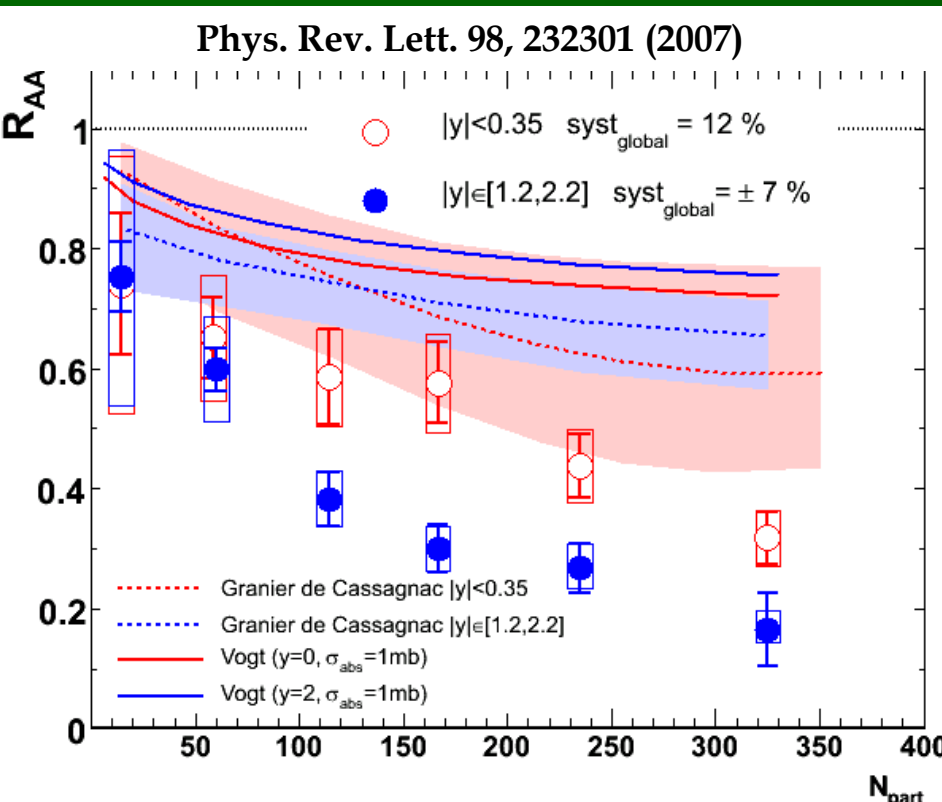
Event Builder



Okay, but what did we learn yet?

- Jet suppression
 - Hadrons „stick” into the medium
 - Even J/Ψ etc..., but photons/leptons don't
 - No suppression in d+Au
- Nearly perfect fluid of quarks
 - Collective dynamics, it's a medium
 - Quark degrees of freedom
 - Nearly perfect fluid
- Chiral dynamics seen, symmetry restoration
- Where is the critical point?

J/Ψ suppression in Au+Au



- Even J/Ψ suppressed!
 - beyond extrapolations from cold nuclear matter effects
- $R_{AA} \sim 0.3$ for central collisions
- Larger suppression at $|y| > 1.2$

How analytic hydro works

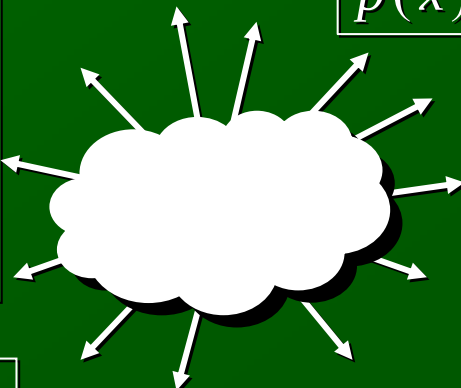
Hydro equations + EoS

PLB505:64-70,2001
hep-ph/0012127

Self-similar solution:

$$p(x), n(x), T(x), \vec{v}(x)$$

$$\begin{aligned} (\partial_t + \nabla \vec{v})n &= 0 \\ (\partial_t + \nabla \vec{v})T &= -p \nabla \vec{v} \\ (\partial_t + \vec{v} \nabla) \vec{v} &= -(1/n) \nabla p \\ T &= \frac{3}{2} p \end{aligned}$$

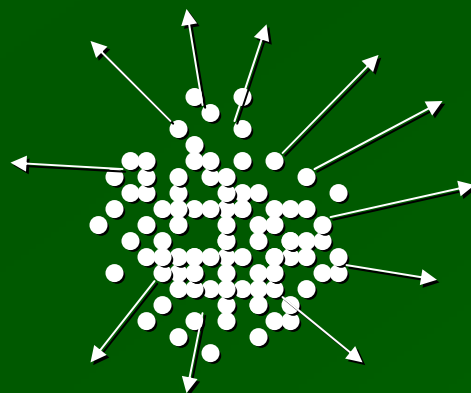


Phase-space distribution
Boltzmann-equation

PRC67:034904,2003
hep-ph/0108067

Source
 $S(x,p)$

$$\begin{aligned} f(x, p) &\sim n(x) \exp \left\{ -\frac{(p - mv)^2}{kT} \right\} \\ (\partial_t + \vec{v} \nabla) f(x, p) &= S(x, p) \end{aligned}$$



PRC54:1390-1403,1996
hep-ph/9509213

Observables

$$N_1(p), C_2(p_1, p_2), v_2(p)$$

Scheme works also backwards

Famous solutions

- Landau's solution (1D, developed for p+p):
 - Accelerating, implicit, complicated, 1D
 - L.D. Landau, Izv. Acad. Nauk SSSR 81 (1953) 51
 - I.M. Khalatnikov, Zhur. Eksp. Teor. Fiz. 27 (1954) 529
 - L.D. Landau and S.Z. Belenkij, Usp. Fiz. Nauk 56 (1955) 309
- Hwa-Bjorken solution:
 - Non-accelerating, explicit, simple, 1D, boost-invariant
 - R.C. Hwa, Phys. Rev. D10, 2260 (1974)
 - J.D. Bjorken, Phys. Rev. D27, 40 (1983)
- Others
 - Chiu, Sudarshan and Wang
 - Baym, Friman, Blaizot, Soyeur and Czyz
 - Srivastava, Alam, Chakrabarty, Raha and Sinha

Relativistic solutions

Solution	Basic prop's	EoS	Observables
Csörgő, Nagy, Csanád Phys.Lett.B 663:306-311, 2008 Phys.Rev.C77:024908,2008	Ellipsoidal, 1D accelerating	$\varepsilon - B = \kappa(p + B)$	$dn/dy, \varepsilon$
Landau Izv. Acad. Nauk SSSR 81 (1953) 51	Cylindr., 1D, accelerating	$\varepsilon = \kappa n T$	none
Hwa-Björken R.C. Hwa, PRD10, 2260,1974 J.D. Bjorken, PRD27, 40(1983)	Cylindr., 1D, non-accelerating	$\varepsilon = \kappa n T$	$dn/dy, \varepsilon$
Bialas et al. A. Bialas, R. A. Janik, and R. B. Peschanski, Phys. Rev. C76, 054901 (2007).	1D, between Landau and Hwa-Björken	$\varepsilon = \kappa n T$	dn/dy
Csörgő, Csernai, Hama, Kodama Heavy Ion Phys. A 21, 73 (2004))	Ellipsoidal, 3D, non-accelerating	$\varepsilon = \kappa n T$	This work does the calculation

How can we use this?

- Now the invariant correlation function
 - Depends on relative and average momenta

$$C_2(p_1, p_2) = \frac{N_2(p_1, p_2)}{N_1(p_1)N_1(p_2)} \simeq 1 + \left| \frac{\tilde{S}(q, K)}{\tilde{S}(0, K)} \right|^2$$

$$q = p_1 - p_2, \quad K = 0.5(p_1 + p_2)$$

- Uses Fourier-transformed of the source, if momenta nearly identical

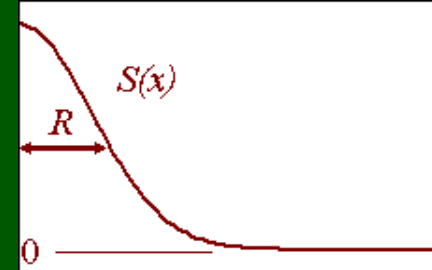
$$\tilde{S}(q, K) = \int S(r, K) e^{ikr}, \quad p_1 \approx p_2 \Leftrightarrow q \ll K$$

- We can figure out something about the source!
 - The ONLY tool for geometrical shape/size information
- Drop the average momentum dependence

Again, what brings us all this?

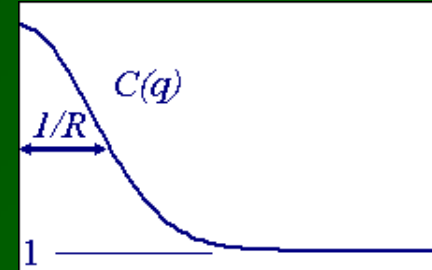
- If the source is approximated with Gaussian:

$$S(r) \sim \exp\left(-\frac{x^2}{2R_x^2} - \frac{y^2}{2R_y^2} - \frac{z^2}{2R_z^2}\right)$$

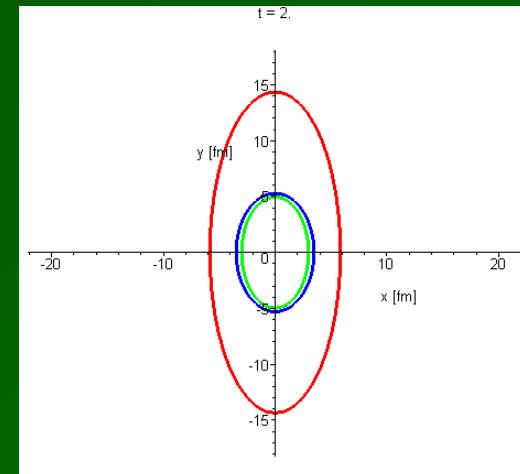


- Then the correlation function is also Gaussian

$$C_2(q) = 1 + \lambda \exp\left(-R_x^2 q_x^2 - R_y^2 q_y^2 - R_z^2 q_z^2\right)$$



- Core-halo model: $\lambda = f_c^2$
- These are the so-called HBT radii
 - Transformed to the out-side-long system:
 - Out: mean p_t of the pair
 - Long: beam direction
 - Side: orthogonal to both
- Not reflecting the geometrical size
 - Hydro model of an expanding ellipsoid:

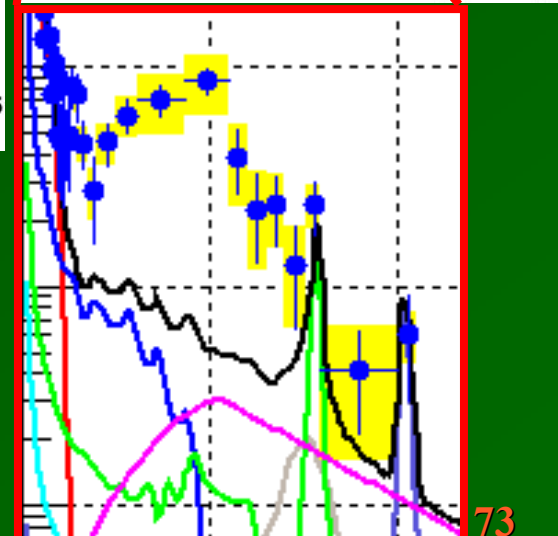
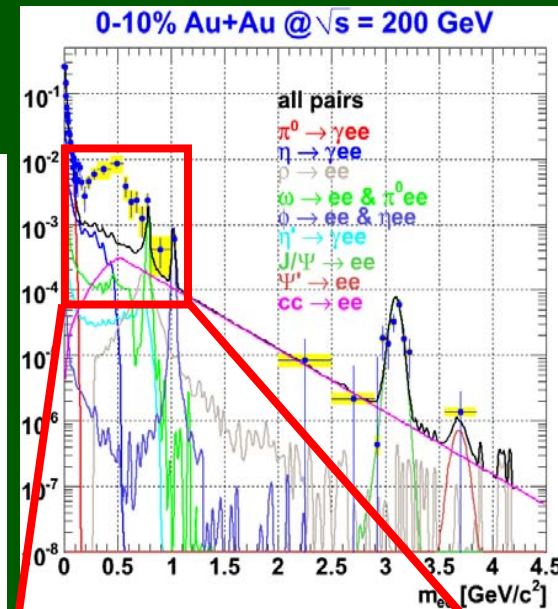
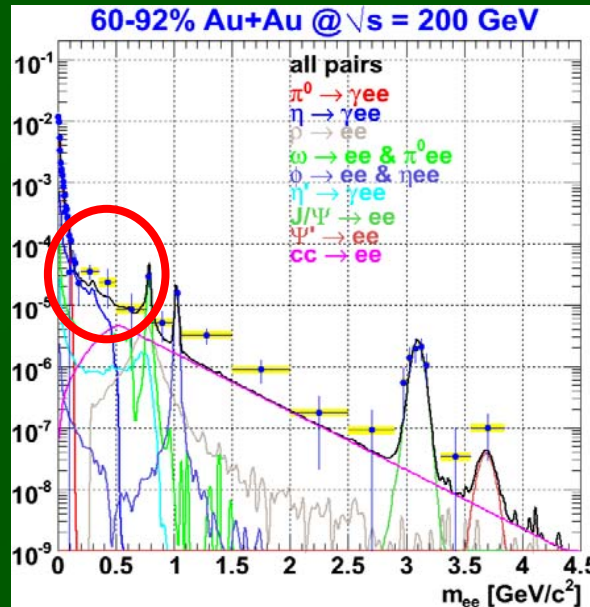
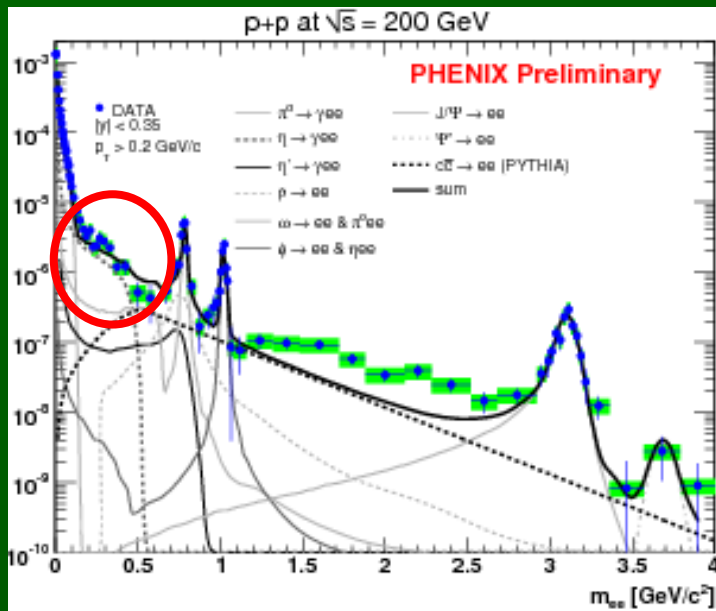


Signal of chiral dynamics

- Study electron pair distribution versus invariant mass

$$m_{inv} = \sqrt{(p_1 + p_2)^2}$$

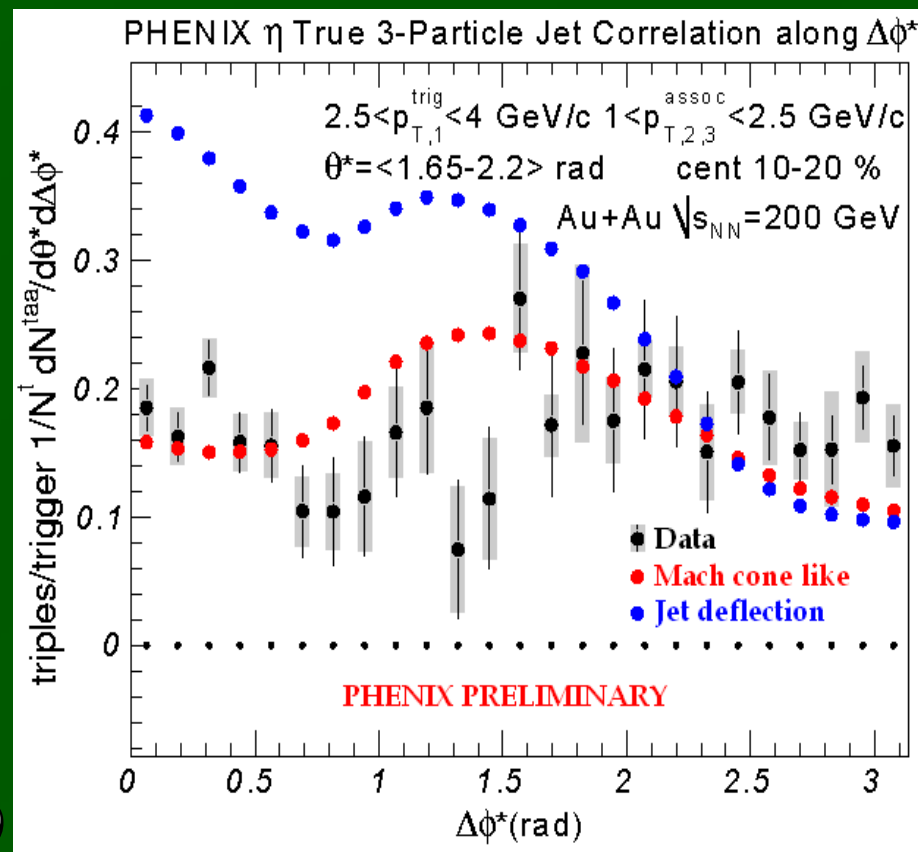
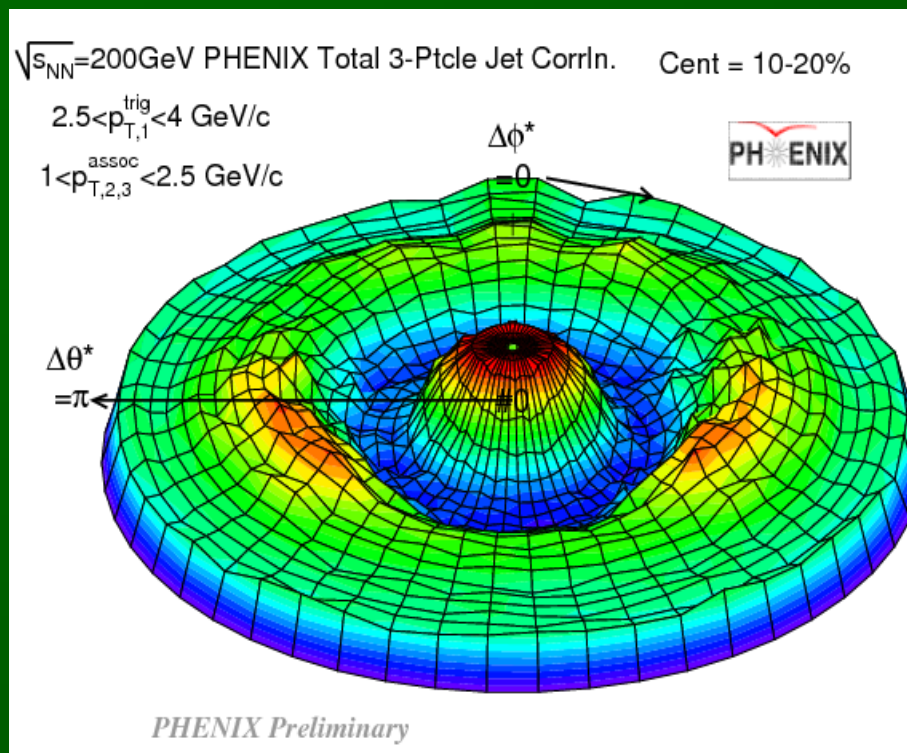
- If hadron $\rightarrow e + e$: $m_{inv} = m_{hadron}$



- Significant excess central Au+Au
- Not in p+p or Au+Au
- Region: 0.2-0.9 GeV
- In-medium enhancement of η' , η , ω ?

„A tökéletes kvarfolyadék ...”

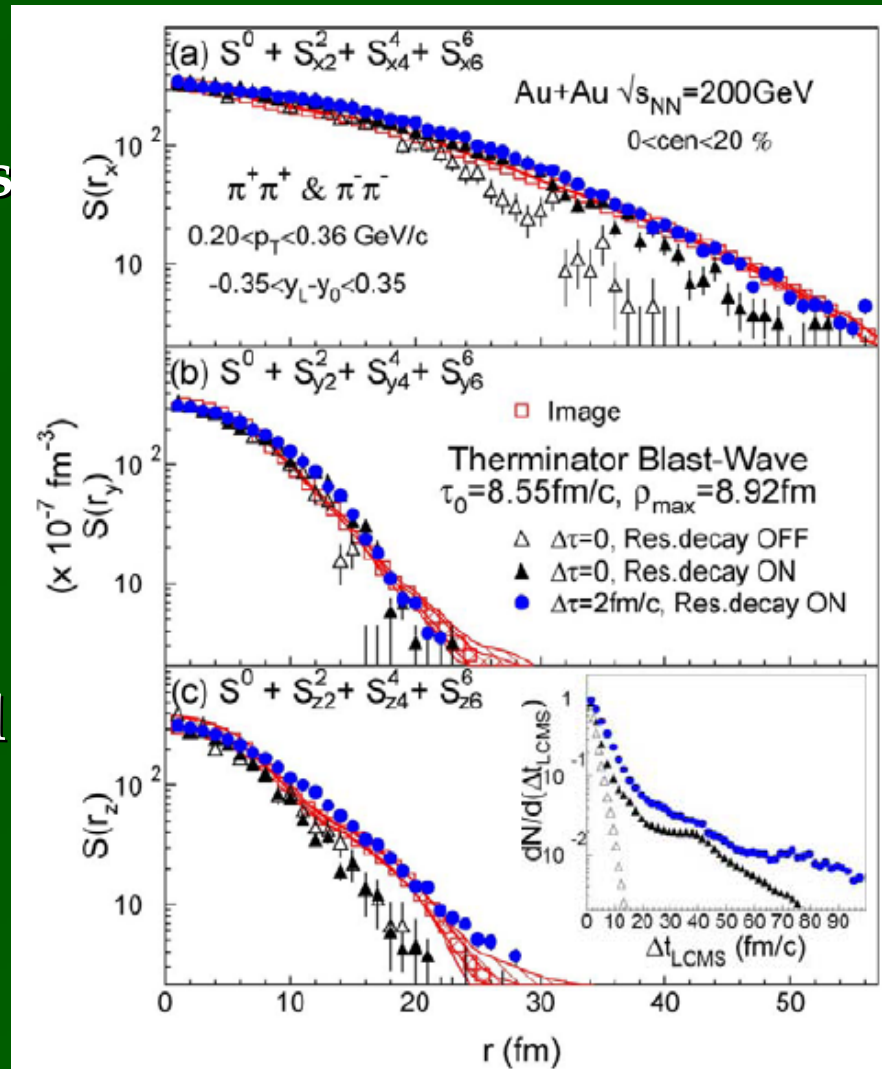
Three particle correlations



- Two angles: $\Delta\Phi$ and $\Delta\Theta$
- Simulations: jet deflection and Mach structures
- Data: compatible with Mach cone like structure
- Underlying v_2 contribution not subtracted yet

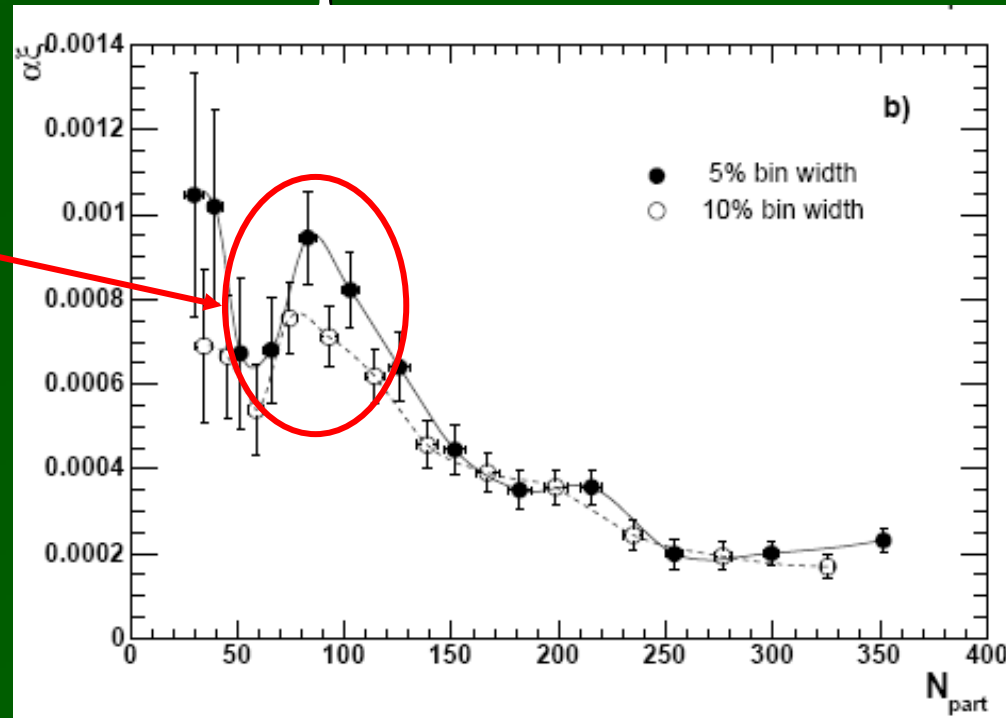
3D two-pion source imaging

- A new technique successfully applied
- Two-pion correlation functions $\leftrightarrow$ source functions
- Distribution of pair separation measured
- Information on hadronization
- In LCMS: expected elongation in out (x) direction
- Excess: elongation on the x and z axis; why?
- Model-dependent answer: Resonance decays and $\Delta\tau=2\text{fm}/c$



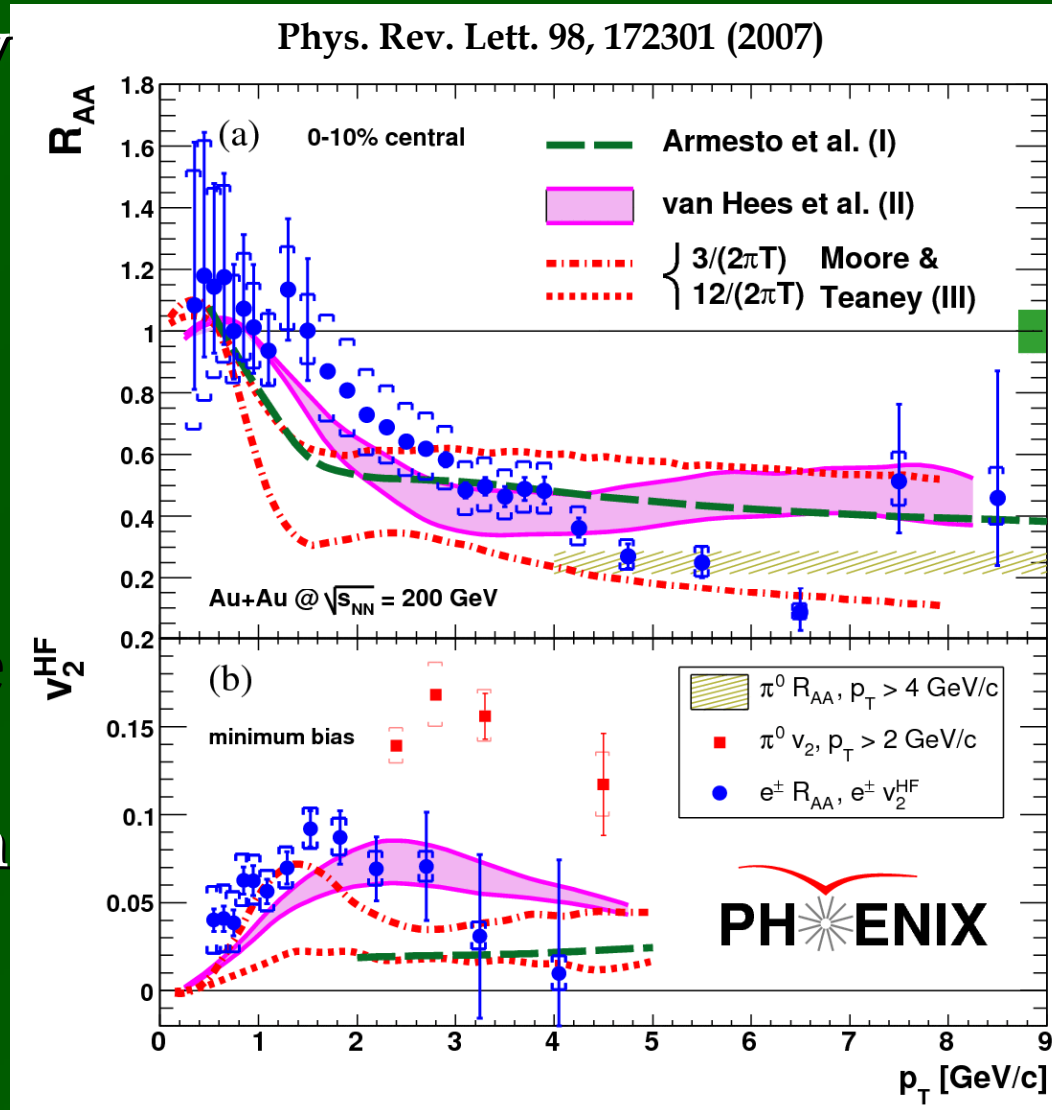
Critical phenomena

- Density correlations measured
 - Well described by Negative Binomial Distributions
 - Interpolating between Bose-Einstein and Poisson
 - Basic parameter $k \leftrightarrow \alpha\xi \leftrightarrow \text{susceptibility } \chi_{\omega=0} \sim |T-T_c|^{-1}$
- Parameter $\alpha\xi$ monotonical in temperature
- Not at the critical point!
- Local max. at $N_{\text{part}} \approx 90$
- Critical phenomenon?
in Landau-Ginzberg
framework

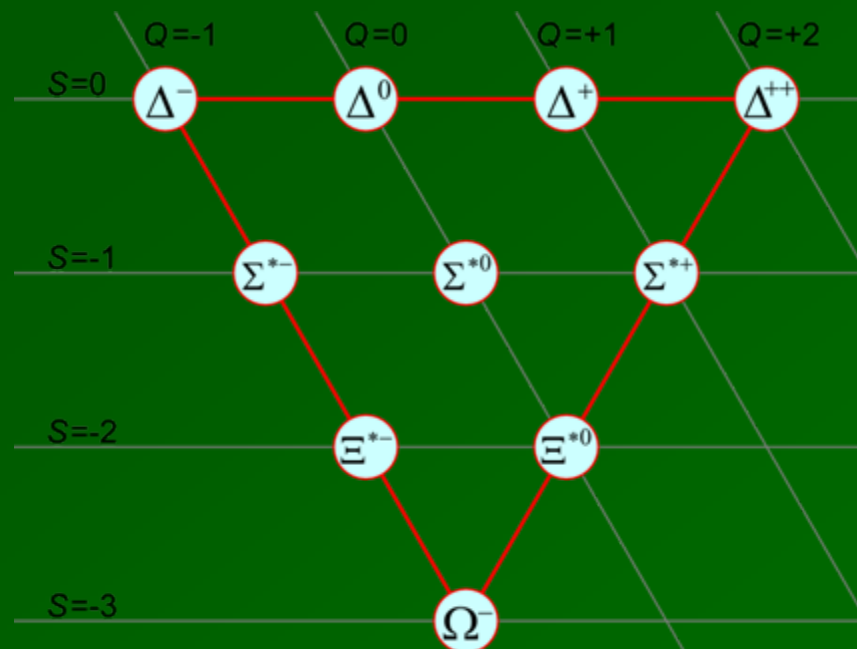
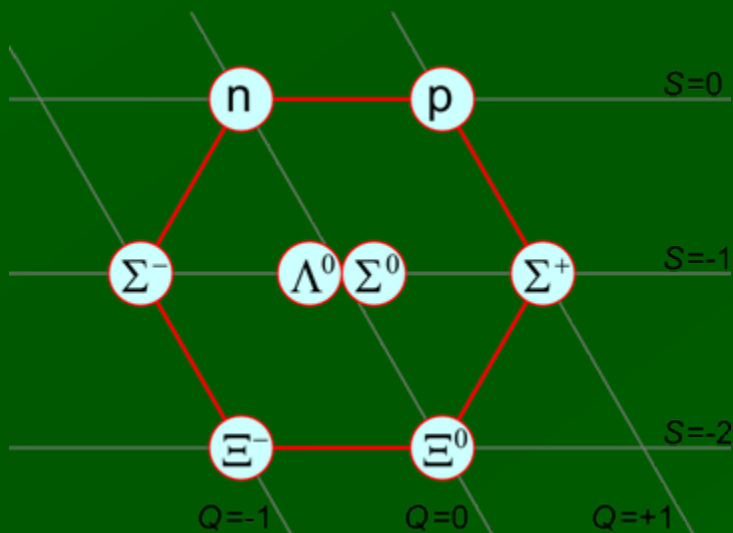
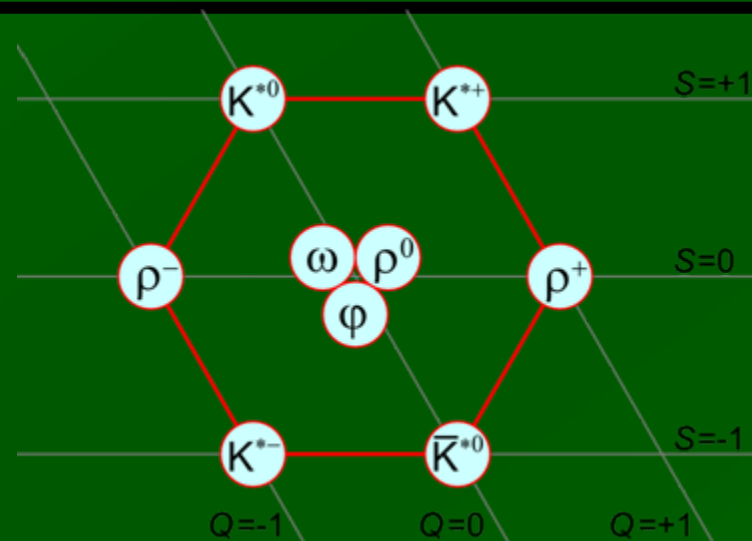
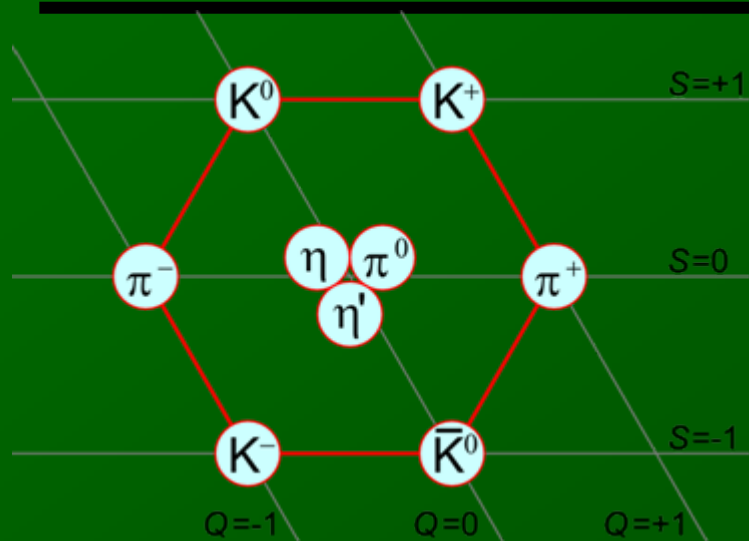


Even heavy flavour flow!

- Electrons from heavy flavour measured
- Even heavy flavour is suppressed
- Even heavy flavour flows
- Strong coupling of charm+bottom to the medium
- Small charm+bottom relaxation time in medium and *small viscosity*



Ismert mezonok és barionok



„Discovering new laws of Nature”

„In general we look for a new law by the following process.

First we guess it.

Then we compare the consequences of the guess to see what would be implied if this law that we guessed is right.

Then we compare the result of the computation to Nature, with experiment or experience, compare it directly with observation, to see if it works.

If it disagrees with experiment it is wrong.

In that simple statement is the key to science.

It does not make any difference how beautiful your guess is.

It does not make any difference how smart you are, who made the guess, or what his name is — if it disagrees with experiment it is wrong.”

/R.P. Feynman/

RHIC adatok

parameter	unit	enhanced design	achieved 2010	next upgrade ≥ 2012	achieved 2009	enhanced design ≥ 2012	next upgrade ≥ 2014
Au-Au operation				polarized p-p operation			
particle energy E	GeV/n	— 100 —			100 / 250	100 / 250	250
no of bunches N	...	— 111 —			— 109 —		
bunch intensity N_b	...	1.1	1.1	1.0×10^9	1.3 / 1.1	1.3 / 1.5	2.0×10^{11}
IP envelope function β^*	m	1.0	0.75	0.5	0.7 / 0.7	0.85 / 0.5	0.5
norm. rms emittance ϵ_n	mm·mrad	2.5	2.8	2.5	3.0 / 2.5	2.5	2.5
rms bunch length σ_s	m	0.3	0.3	0.3	0.8 / 0.6	0.55	0.3
hourglass factor h	...	0.96	0.93	0.88	0.72 / 0.80	0.86 / 0.88	0.88
beam-beam parameter ξ/IP	10^{-3}	1.6	1.5	1.5	6.5 / 4.7	6.5 / 7.2	10
peak luminosity L_{peak}	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	36	40	55×10^{26}	50 / 85	50 / 250	500×10^{30}
average luminosity L_{avg}	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	8	20	40×10^{26}	28 / 55	$30^\dagger$ / 150	300×10^{30}
average polarization P	%	————			55 / 34	70	70
calendar time in store	%	60	53	55	60 / 53	55	55
integrated L per week	...	300	650	$1300 \mu\text{b}$	8.3 / 18	10 / 50	100 pb^{-1}

Bose-Einstein correlations

- **Two plane-waves:**

$$\Psi_1 = e^{-ik_1 r_1}, \quad \Psi_2 = e^{-ik_2 r_2}$$

- **Bosons: need for symmetrization**

$$\Psi_{1,2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(e^{-ik_1 r_1} e^{-ik_2 r_2} + e^{-ik_1 r_2} e^{-ik_2 r_1} \right)$$

- **Spectrum:**

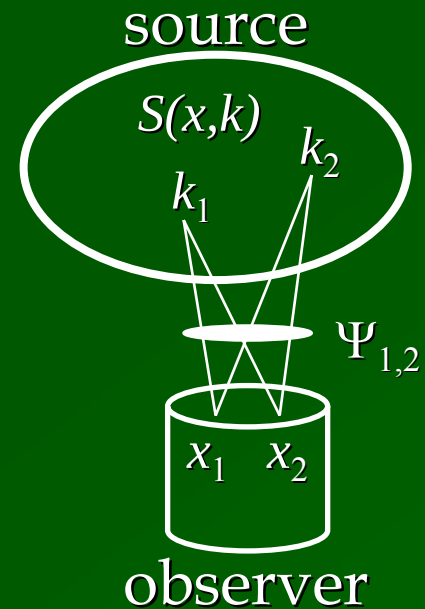
$$N_1(p) = \int S(r, p) |\Psi_1|^2 d^4 r$$

- **Two-particle spectrum (momentum-distribution):**

$$N_2(p_1, p_2) = \int S(r_1, p_1) S(r_2, p_2) |\Psi_{1,2}|^2 d^4 r_1 d^4 r_2$$

- **Correlation function: Gaussian**

$$C_2(q) = 1 + \lambda \exp\left(-R_x^2 q_x^2 - R_y^2 q_y^2 - R_z^2 q_z^2\right)$$



Approximations: Plane-wave, no multiparticle symmetrization, thermalization ...

Signature: Particle Abundancy

- Hagedorn-model

- Production of light mesons:

$$\sigma_i \sim \left(m / 2\pi\right)^{3/2} e^{-m/T_H} \quad T_H \sim 160 \text{ MeV Hagedorn-temperature}$$

- In case of a possible mass drop:

- Number of η' 's would be small: $N_{\eta'} / N_{\pi^0} \sim 2 \times 10^{-2}$

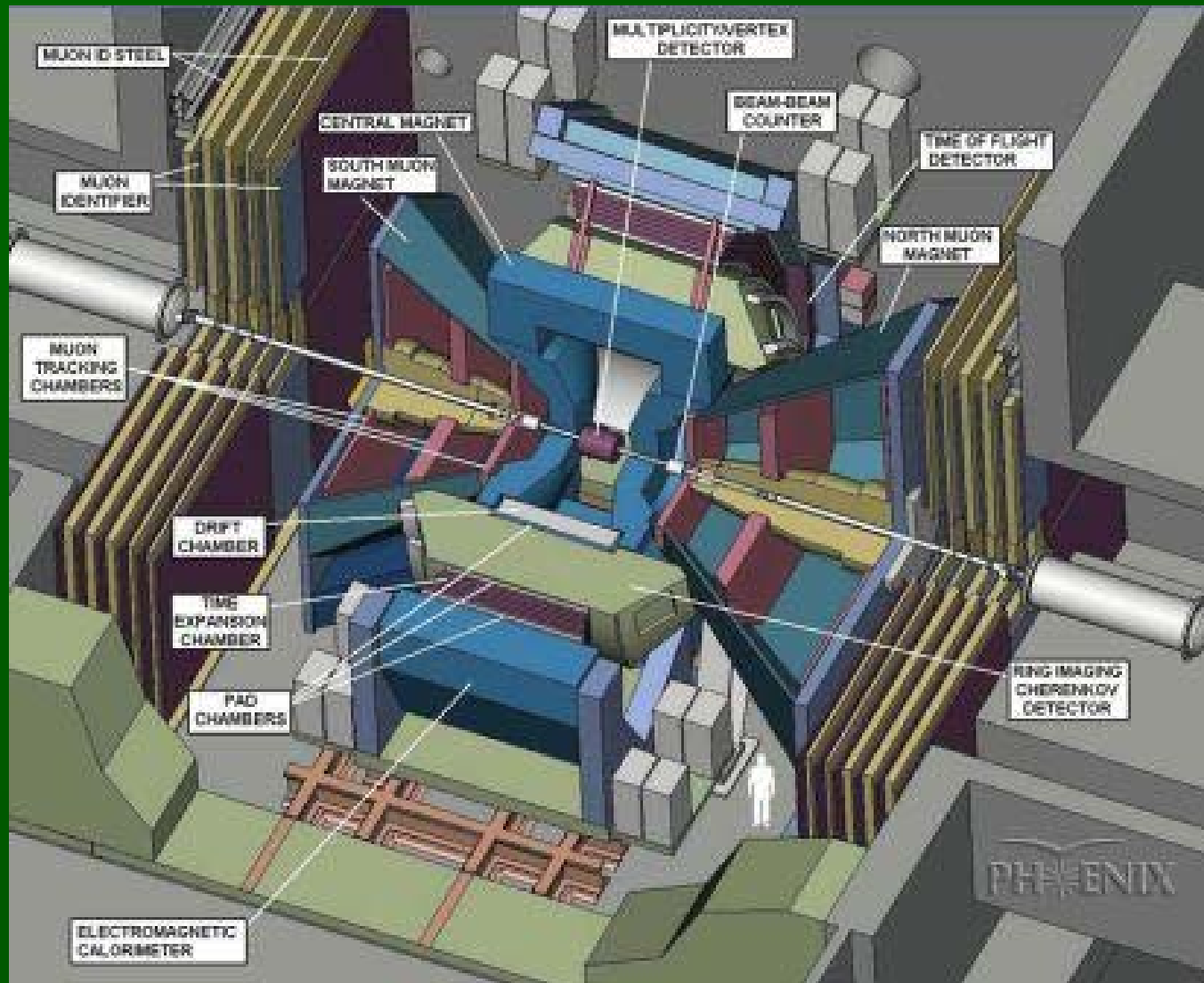
- With a strongly reduced η' mass: $N_{\eta'} / N_{\pi^0} \sim 1$

- An enhancement of a factor of 50 at maximum
 - Increased weight of strange states, rather 3 to 16

- Consequence of the reduced mass:

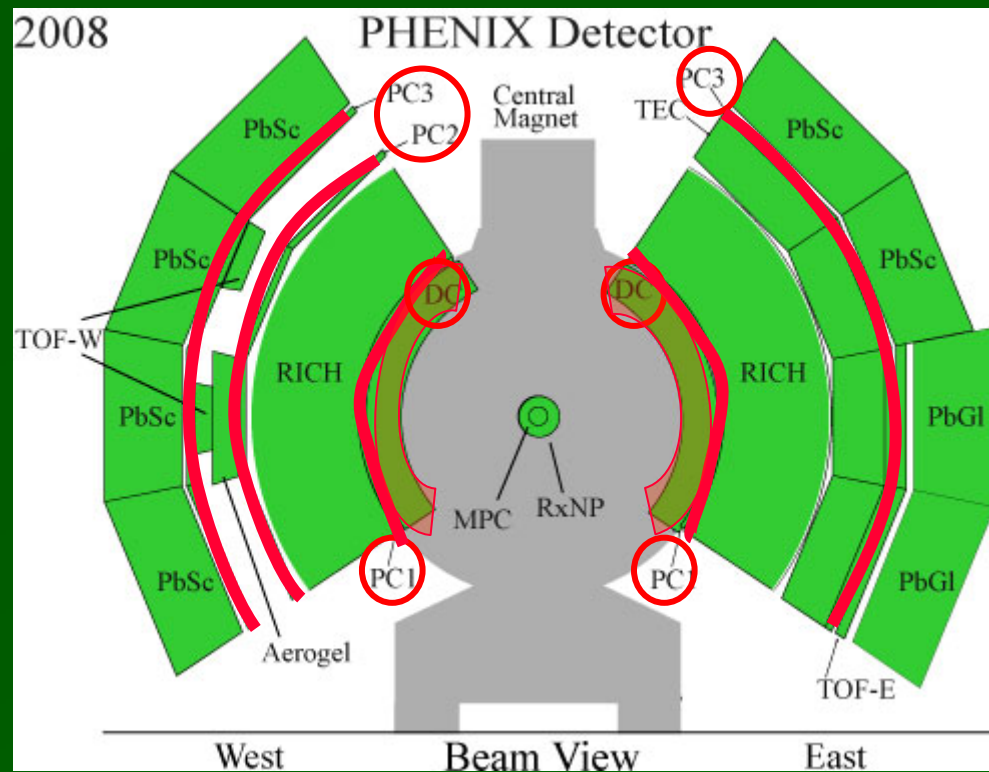
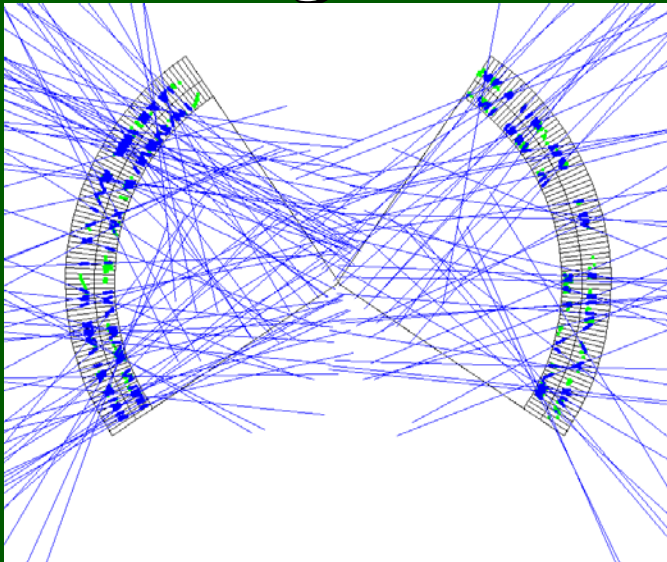
An increased abundancy of η' mesons

A 3D picture of PHENIX



Tracking: DC+PC

- Track particles, measure momentum
 - Hit $\rightarrow$ Track $\rightarrow$ Curvature $\rightarrow$ Momentum
- Wire chambers
- Track reco: DC+PC1
- Matching: PC2-3

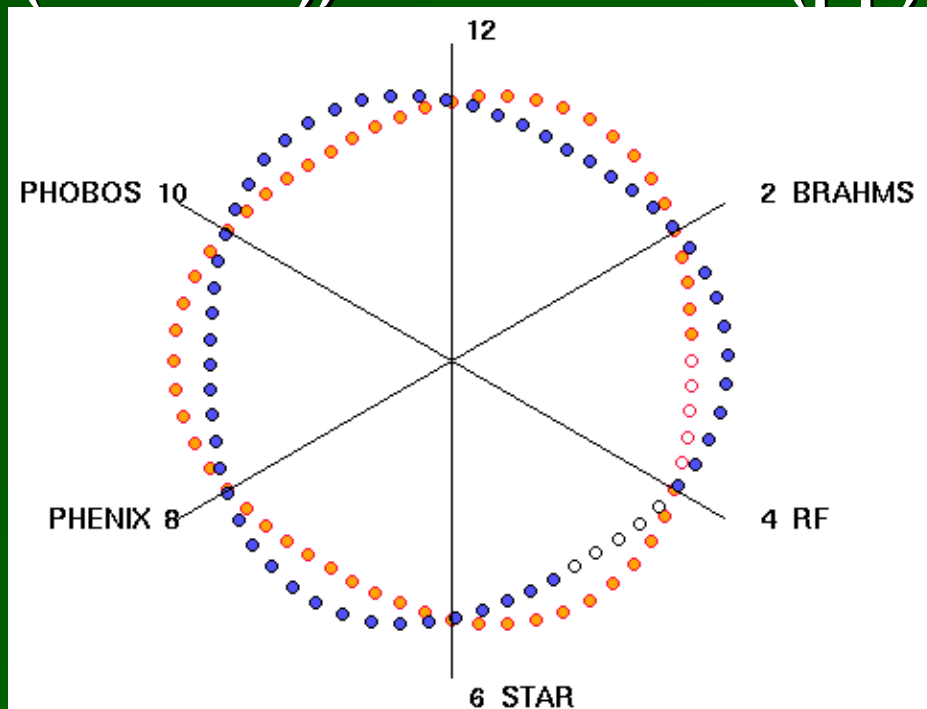
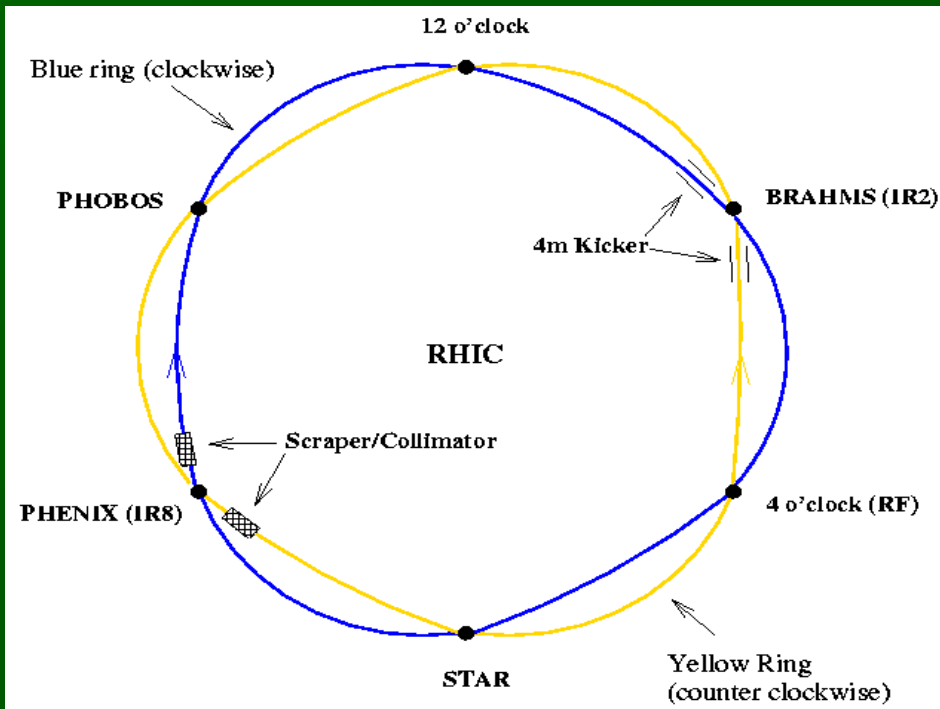


The PHENIX group



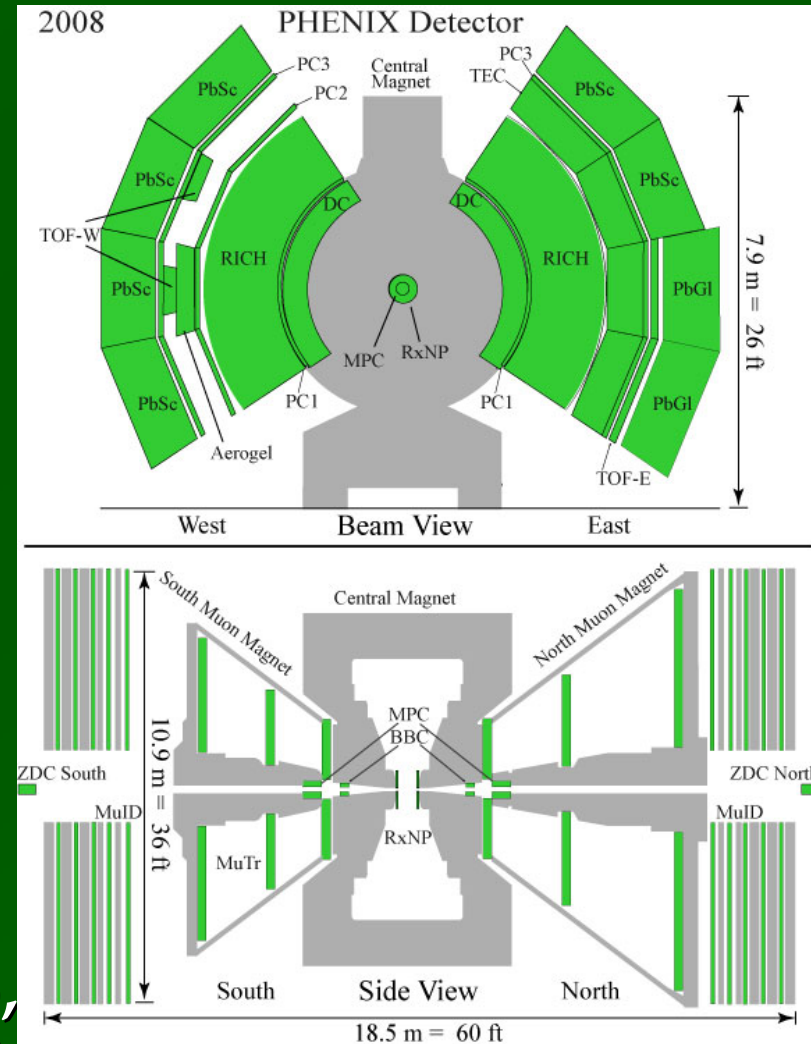
RHIC geometria és számok

- Két gyűrű (kék és sárga) 3,9 km egyenként
- Hat kereszteződés, négy/két kísérlet
- 57 ion-csomag, egyenként 30 cm, 10^{11} ion, 10^9 proton
- 1740 szupravezető mágnes 4 K hőmérsékleten
- 15 MW felvett teljesítmény ~ 300 TJ/év (30 hét alatt)
- Luminozitás: $\sim 10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Au+Au), $\sim 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (pp)



Detektorok

- Nyomkövetés (impulzusmérés)
 - Drift Chamber (DC), Pad Chamber (PC)
- Kalorimetria (energiamérés, azonosítás)
 - PbSc, PbGl (EMCal)
- Sebességmérés (azonosítás)
 - Cerenkov-counters RICH, Aerogel, Time Of Flight (TOF), Hadron Blind Detector (HBD)
- Esemény-karakterizáció
 - Beam-Beam Counter (BBC), Zero Degree Calorimeter (ZDC), Reaction Plane Detector (RxNP)

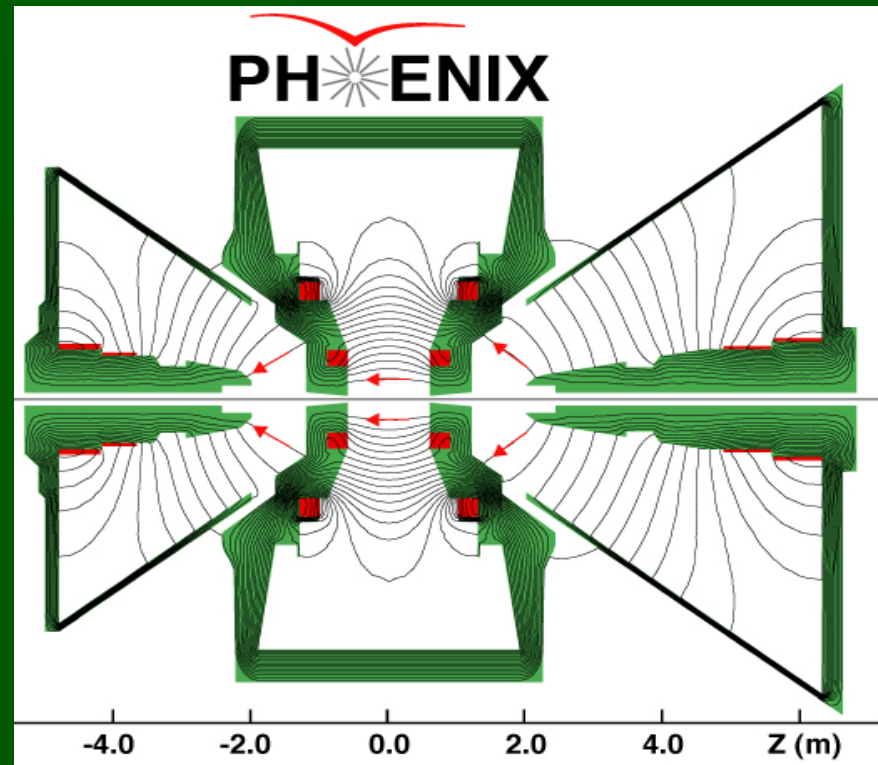
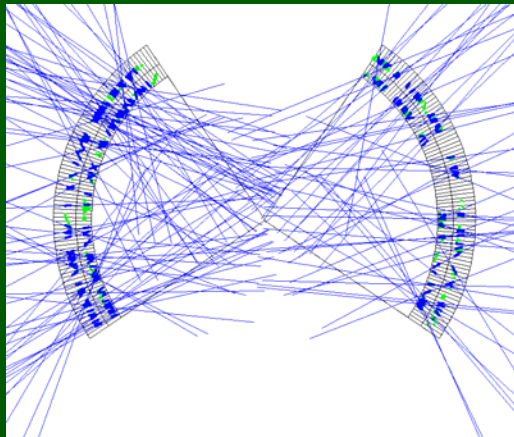


Részecskék azonosítása

- Részecske: térbeli pálya
 - Beütések több detektorban

- **Impulzus** mérése

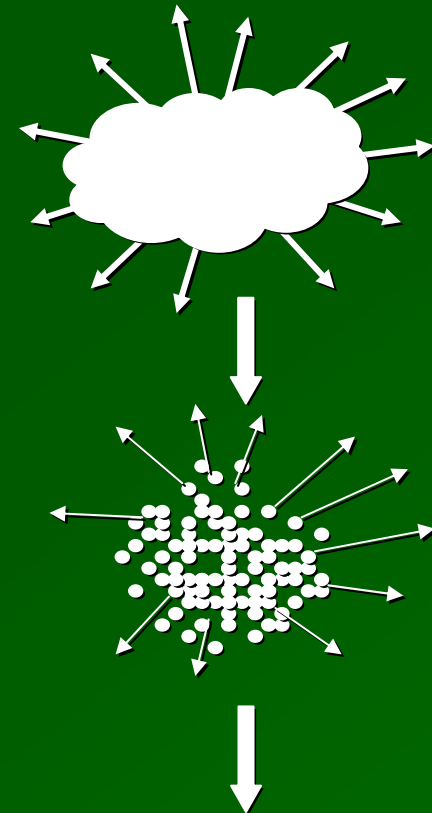
- görbület



- Részecsketípus: **tömeg & töltés**
 - Töltés: görbület iránya
 - Tömeg: impulzus & (**sebesség** vagy **energia**)
- Fotonokra, hadronokra, leptonokra

How analytic hydro works

- Take hydro equations and EoS
- Find a solution
 - Will contain parameters (like Friedmann, Schwarzschild etc.)
 - Will use a possible set of initial conditions
- Use a freeze-out condition
 - Eg fixed proper time or fixed temperature
 - Generally a hyper-surface
- Calculate the hadron source function
- Calculate observables
 - E.g. spectra, flow, correlations
 - Straightforward calculation
- Hydrodynamics: Initial conditions $\otimes$
dynamical equations $\otimes$ freeze-out conditions



$$N_1(p_t, \varphi, \eta)$$

$$\text{HBT}(p_t, \varphi, \eta)$$

Little vocabulary of hydrodynamics

- Exact/parametric solution
 - Solution of hydro equations analytically, without approximation
 - Usually has free parameters
- Hydro inspired parameterization
 - Distribution determined at freeze-out only, their time dependence is not considered
- Numerical solution
 - Solution of hydro equations numerically
 - Start from arbitrary initial state

Equations of relativistic hydro

- Basic equations: $\partial_\mu (nu_\mu) = 0$, $\partial_\mu T^{\mu\nu} = 0$
- Assuming local thermal equilibrium
- For a perfect fluid: $T^{\mu\nu} = wu^\mu u^\nu - pg^{\mu\nu}$, $w = \varepsilon + p \Rightarrow \partial_\nu T^{\mu\nu} = 0$
- Equations in four-vector form and nonrelativistic notation

- Euler equation:

$$wu^\nu \partial_\nu u^\mu = (g^{\mu\eta} - u^\mu u^\eta) \partial_\eta p \quad \frac{w}{1-v^2} \frac{d\mathbf{v}}{dt} = - \left(\nabla p + \mathbf{v} \frac{\partial p}{\partial t} \right)$$

- Energy conservation:

$$w \partial_\nu u^\nu + u^\nu \partial_\nu \varepsilon = 0 \quad \frac{1}{w} \frac{d\varepsilon}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{v} - \frac{1}{1-v^2} \frac{d}{dt} \frac{v^2}{2}$$

- Charge conservation:

$$\partial_\mu (nu^\mu) = 0 \quad \frac{d}{dt} \ln \frac{n}{\sqrt{1-v^2}} = -\nabla \cdot \mathbf{v}$$

$$u^\mu \partial_\mu = \frac{d}{d\tau} \quad \text{comoving proper-time derivative}$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \quad \text{comoving derivative}$$