

A nagyenergiás magfizika kísérleti módszerei



ALICE

Vértési Róbert

Wigner Fizikai Kutatóközpont
MTA kiváló kutatóhely

vertesi.robert@wigner.mta.hu



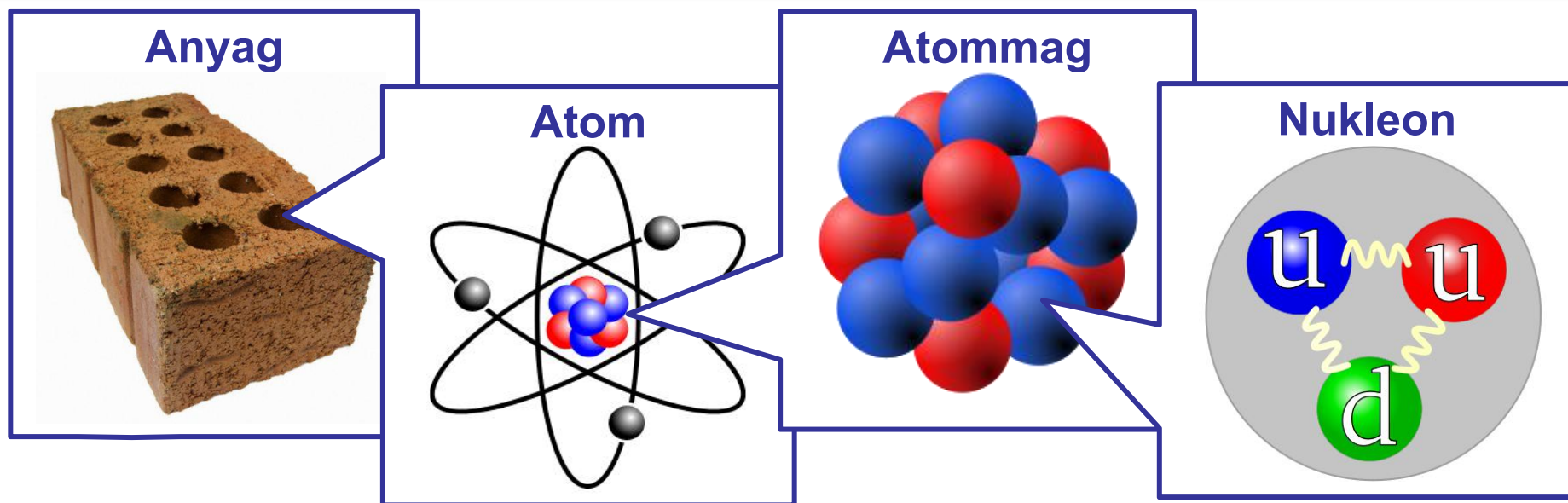
Tematika

- **Az erős kölcsönhatás és a kvark-gluon plazma**
 - Kvarfbezárás és aszimptotikus szabadság
 - A QCD fázisdiagramja
- **Kísérleti eszközök, módszerek, alapfogalmak**
 - Gyorsítók, kísérletek: RHIC, LHC
 - Pszeudorapiditás, azimut-aszimmetria, maganyag-módosulás
- **Jet-quenching: a nagy impulzusú részecskék elnyomása**
 - Maganyag-módosulási tényező forró maganyagban (R_{AA})
 - Kétjet-aszimmetria
- **A maganyag kollektív viselkedése**
 - A tökéletes folyadék (v_2 kvarkszám-skálázása, viszkozitás)
- **Nehéz kvarkok, kvarkónium**
 - A kvarkóniumok kötésienergia-függő disszociációja
 - A plazma hőmérséklete

Az erős kölcsönhatás és a kvark-gluon plazma

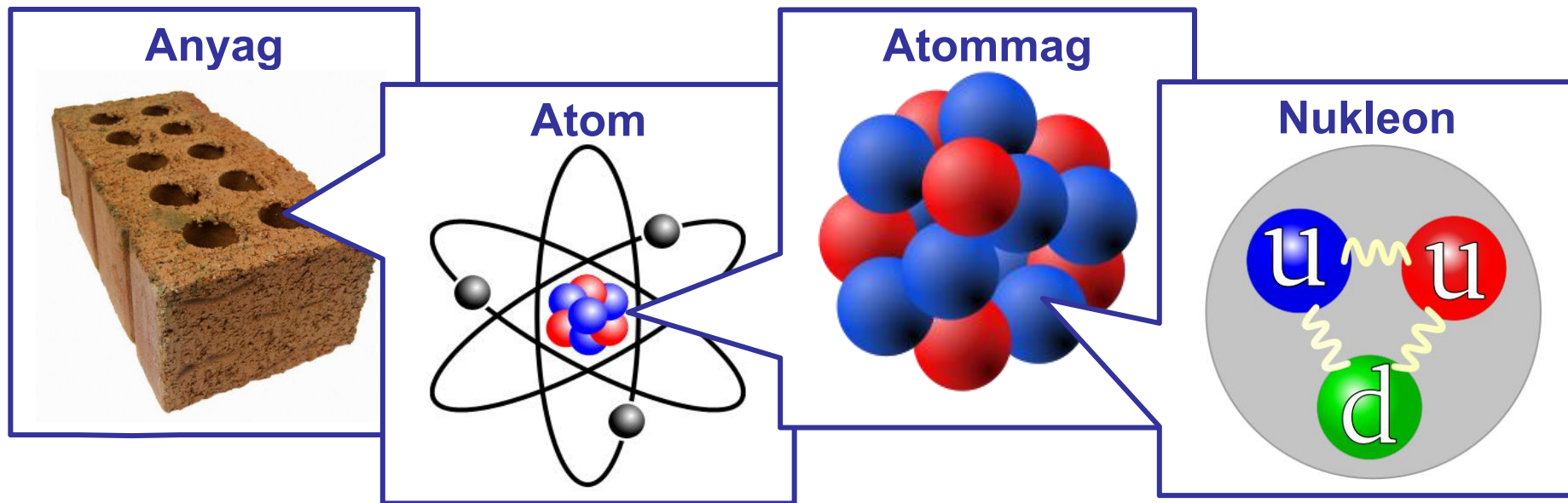
- Kvarkbezárás,
aszimptotikus szabadság
- A QCD fázisdiagramja

Világunk építőkövei



- **Kvarkok**: az atommag elemi részecskéi
- **Gluonok**: A magot összetartó **erős kölcsönhatás** közvetítői
- **Kvarkbezárás**: nincs magányos kvark! Hadronokat alkotnak
- **Kvantumszín dinamika**: az erős kölcsönhatás elmélete

Világunk építőkövei



- **Kvarkok**: az atommag elemi részecskéi
- **Gluonok**: A magot összetartó **erős kölcsönhatás** közvetítői
- **Kvarkbezárás**: nincs magányos kvark! Hadronokat alkotnak
- **Kvantumszín dinamika**: az erős kölcsönhatás elmélete

Hogyan tudhatunk meg többet róluk?

Elektromágneses és erős kölcsönhatás

▪ Kvantum-elektrodinamika (QED):

- Abeli U(1) mértékelmélet
- Generátor \sim foton

kölcsönhatás

tömeges tér (e)

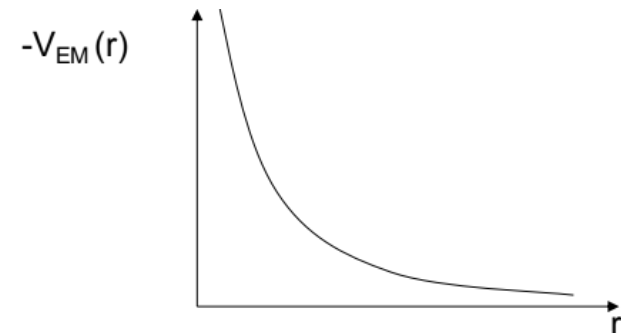
$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu + ieA_\mu$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

mértéktér (foton)

Effektív potenciál $V_{EM}(r) \sim -\alpha/r$



Elektromágneses és erős kölcsönhatás

■ Kvantum-elektrodinamika (QED):

- Abeli U(1) mértékelmélet
- Generátor \sim foton

kölcsönhatás

tömeges tér (e)

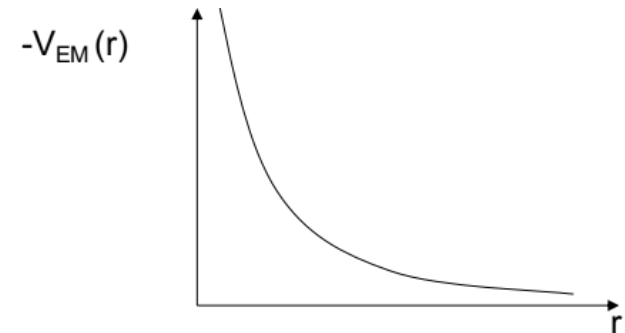
$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu + ieA_\mu$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

mértéktér (foton)

Effektív potenciál $V_{EM}(r) \sim -\alpha/r$



■ Kvantumszíndinamika (QCD):

- Nem-abeli SU(3) mértékelmélet
- 8 független generátor \sim 8 gluon
- **gluon: színtöltés, önkölcsönhatás**

$$\mathcal{L}_{QCD} = \bar{\psi}_i (i(\gamma^\mu D_\mu)_{ij} - m \delta_{ij}) \psi_j - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu}$$

$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf^{abc} A_\mu^b A_\nu^c,$$

Elektromágneses és erős kölcsönhatás

■ Kvantum-elektrodinamika (QED):

- Abeli U(1) mértékelmélet
- Generátor ~ foton

kölcsönhatás

tömeges tér (e)

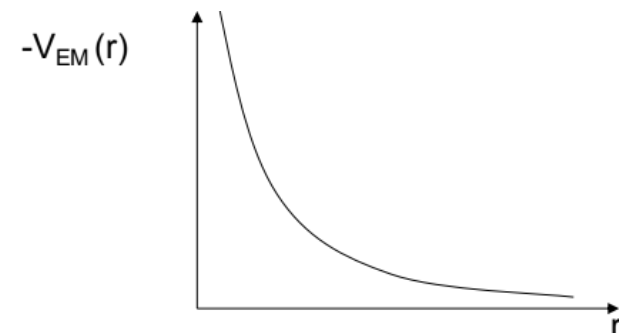
$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu + ieA_\mu$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

mértéktér (foton)

Effektív potenciál $V_{EM}(r) \sim -\alpha/r$



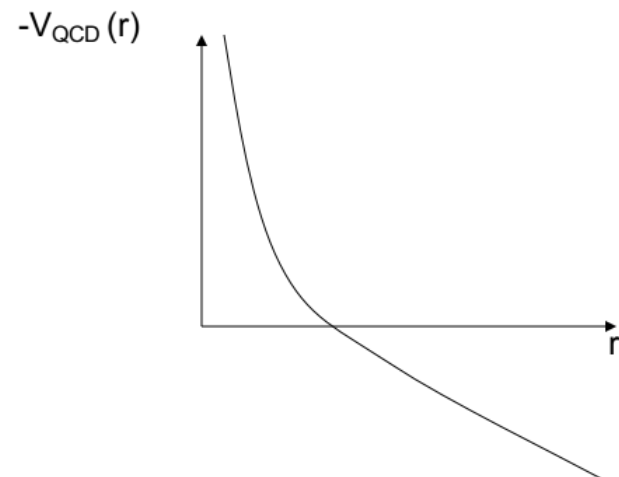
■ Kvantumszíndinamika (QCD):

- Nem-abeli SU(3) mértékelmélet
- 8 független generátor ~ 8 gluon
- gluon: színtöltés, **önkölcsönhatás**

$$\mathcal{L}_{QCD} = \bar{\psi}_i (i(\gamma^\mu D_\mu)_{ij} - m \delta_{ij}) \psi_j - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu}$$

$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf^{abc} A_\mu^b A_\nu^c,$$

Effektív potenciál $V_{QCD} \sim -\alpha/r + \sigma$

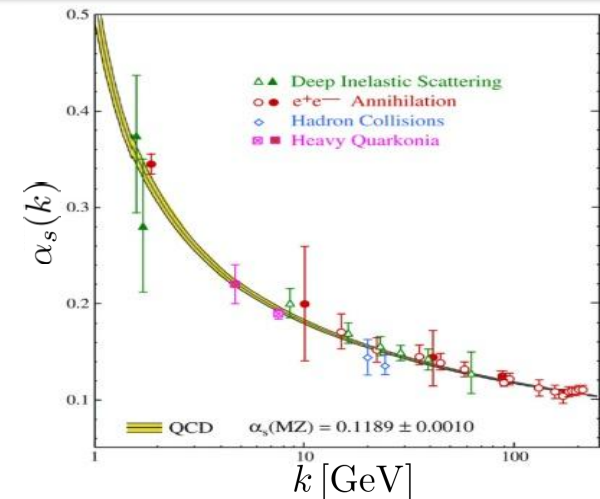


Az erős kölcsönhatás kettőssége

A futó csatolási állandó:

$$\alpha_s(k^2) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{g_s^2(k^2)}{4\pi} \approx \frac{1}{\beta_0 \ln\left(\frac{k^2}{\Lambda^2}\right)},$$

k: momentumátadás
 $\Lambda \sim 200$ MeV: QCD skálaparaméter

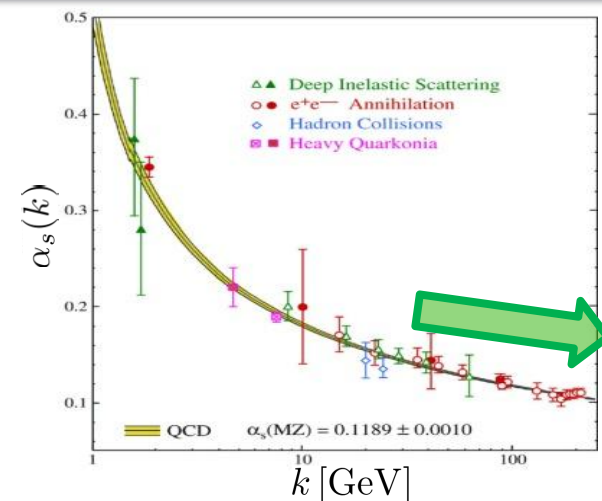


Az erős kölcsönhatás kettőssége

A futó csatolási állandó:

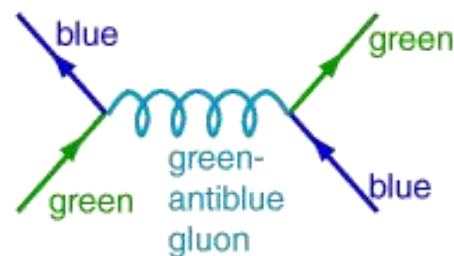
$$\alpha_s(k^2) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{g_s^2(k^2)}{4\pi} \approx \frac{1}{\beta_0 \ln\left(\frac{k^2}{\Lambda^2}\right)},$$

k: momentumátadás
 $\Lambda \sim 200$ MeV: QCD skálaparaméter



Aszimptotikus szabadság $k \gg \Lambda$

- "Kemény" partonok kölcsönhatása
- Perturbatíván számolható



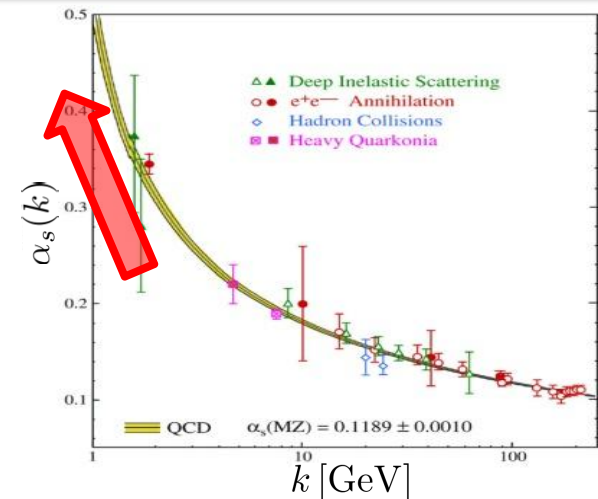
Gluon-mediated interaction between two quarks.

Az erős kölcsönhatás kettőssége

A futó csatolási állandó:

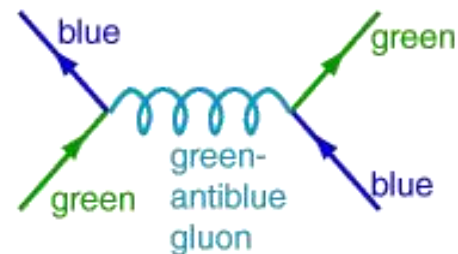
$$\alpha_s(k^2) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{g_s^2(k^2)}{4\pi} \approx \frac{1}{\beta_0 \ln\left(\frac{k^2}{\Lambda^2}\right)},$$

k: momentumátadás
 $\Lambda \sim 200$ MeV: QCD skálaparaméter



Aszimptotikus szabadság $k \gg \Lambda$

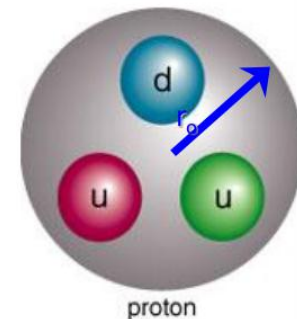
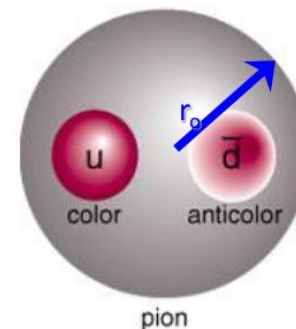
- "Kemény" partonok kölcsönhatása
- Perturbatíván számolható



Gluon-mediated interaction between two quarks.

Kvarkbezárás $k \lesssim \Lambda$

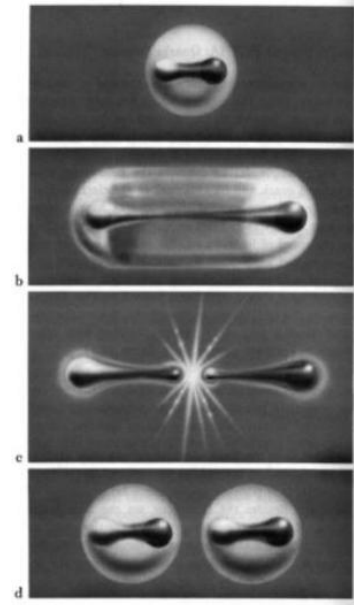
- mezon ($q\bar{q}$), barion (qqq)
- Analitikusan nem számolható**
- Rács-QCD
- Effektív modellek: zsák, húr, hidrodinamika



Hadronizáció, jet

Egymástól távolodó kvarkok

- Lineáris potenciál, "húr": $U \sim \sigma r$ ($\sigma \sim 1 \text{ GeV/fm}$)
- Halmozódó energia \rightarrow újabb $q\bar{q}$ pár keltése



[illustration from [Fritzsche](#)]

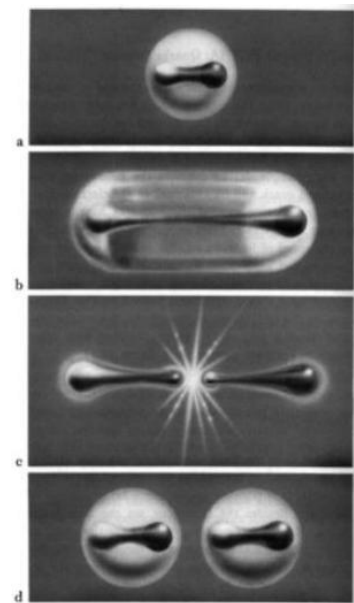
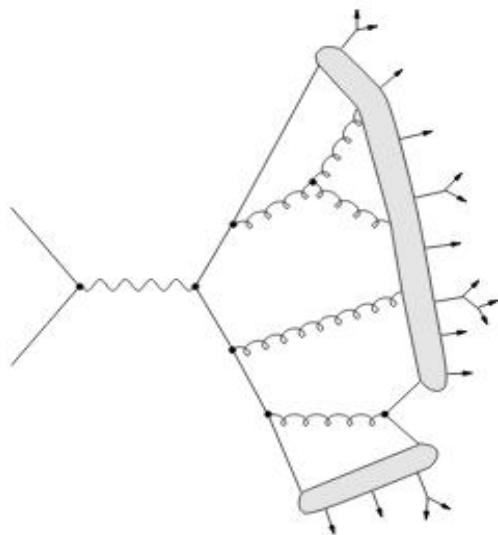
Hadronizáció, jet

Egymástól távolodó kvarkok

- Lineáris potenciál, "húr": $U \sim \sigma r$ ($\sigma \sim 1 \text{ GeV/fm}$)
- Halmozódó energia \rightarrow újabb $q\bar{q}$ pár keltése

Hadronizáció:

- QCD parton \leftrightarrow hadronok kollimált nyalábja



[illustration from [Fritzsche](#)]

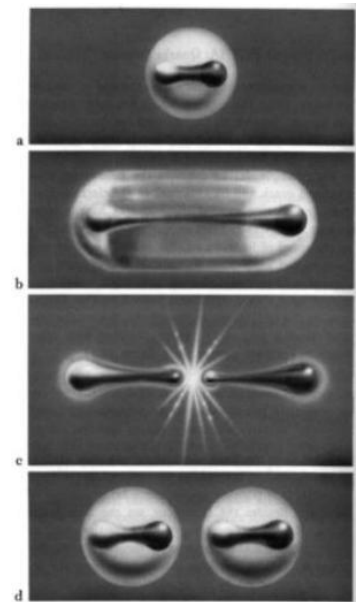
Hadronizáció, jet

Egymástól távolodó kvarkok

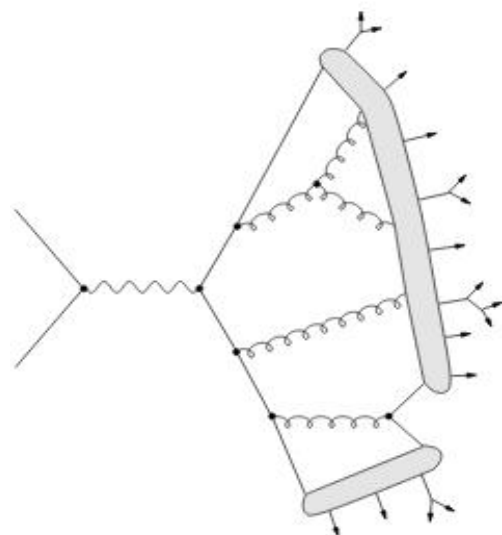
- Lineáris potenciál, "húr": $U \sim \sigma r$ ($\sigma \sim 1 \text{ GeV/fm}$)
- Halmozódó energia \rightarrow újabb $q\bar{q}$ pár keltése

Hadronizáció:

- QCD parton \leftrightarrow hadronok kollimált nyalábja

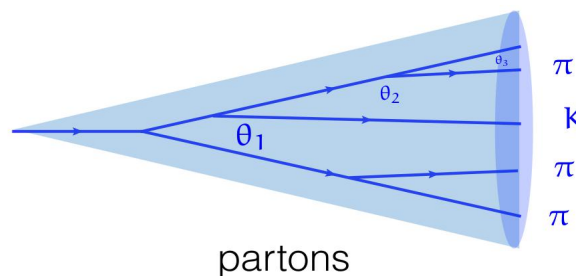


[illustration from Fritsch]



Jet virtuality

$$Q \equiv E \theta_{\text{jet}}$$



$$Q_0 \sim \Lambda_{\text{QCD}}$$

hadrons

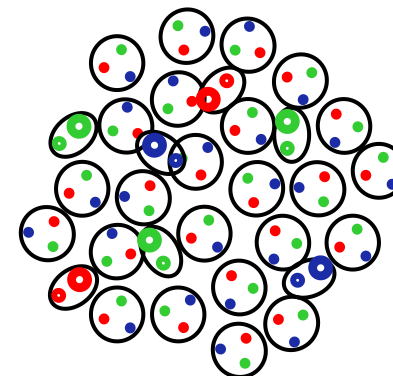
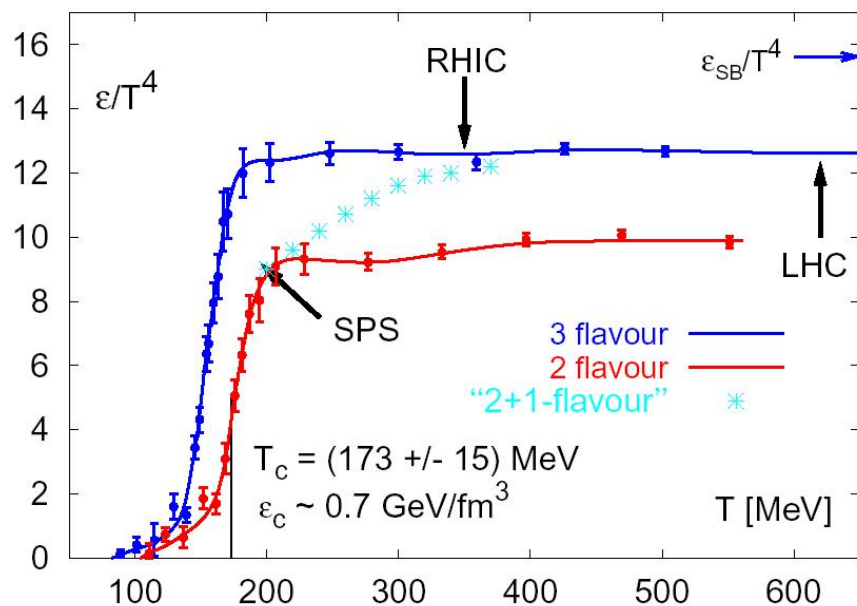
Jet: egyezményes definíció,
"kísérlet-elmélet interface"

Forró, sűrű maganyag: új fázis?

- Rács-QCD számítások: hadronos anyag csak bizonyos hőmérséklet, energiasűrűség alatt létezik

$$T_c \sim 170 \text{ MeV} \sim 1.5 \times 10^{12} \text{ K}$$

$$\varepsilon_c \sim 1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$$



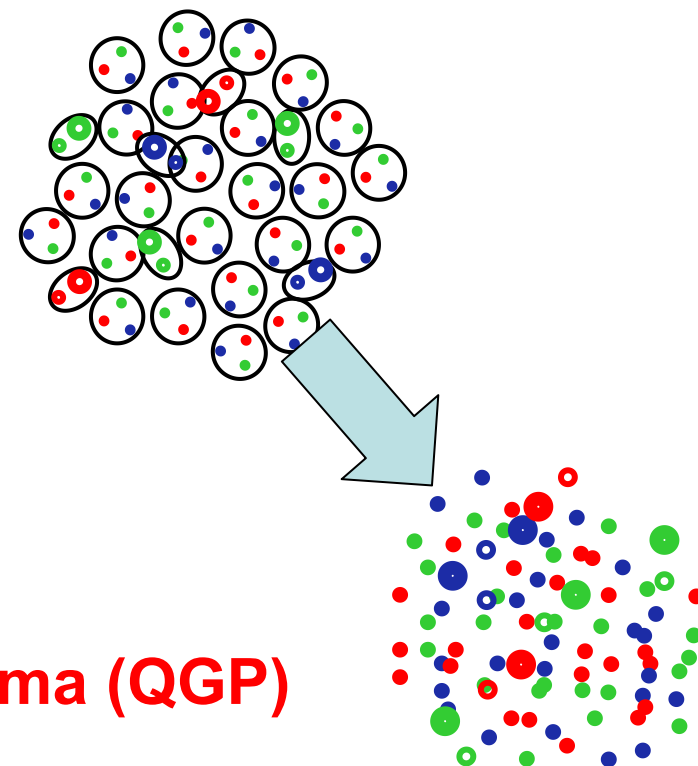
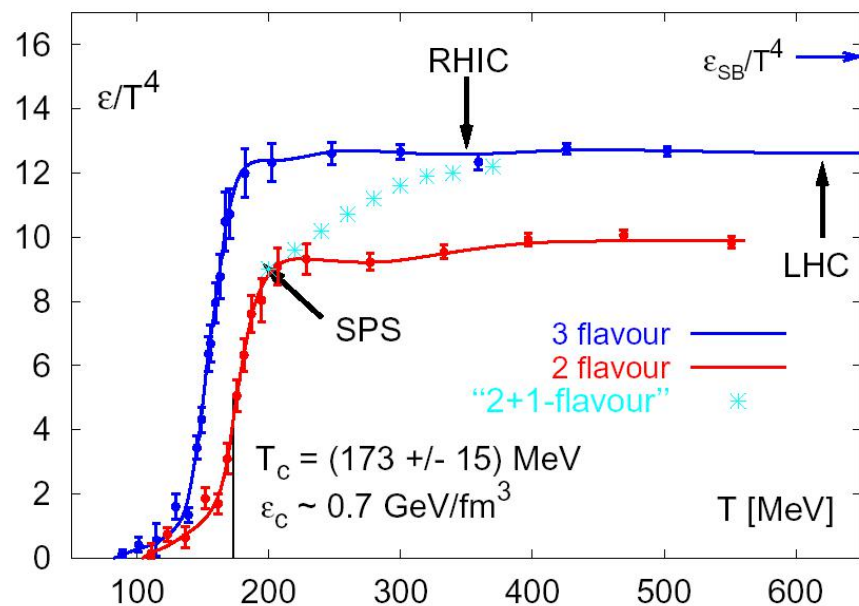
- Fázisátmenet

Forró, sűrű maganyag: új fázis?

- Rács-QCD számítások: hadronos anyag csak bizonyos hőmérséklet, energiasűrűség alatt létezik

$$T_c \sim 170 \text{ MeV} \sim 1.5 \times 10^{12} \text{ K}$$

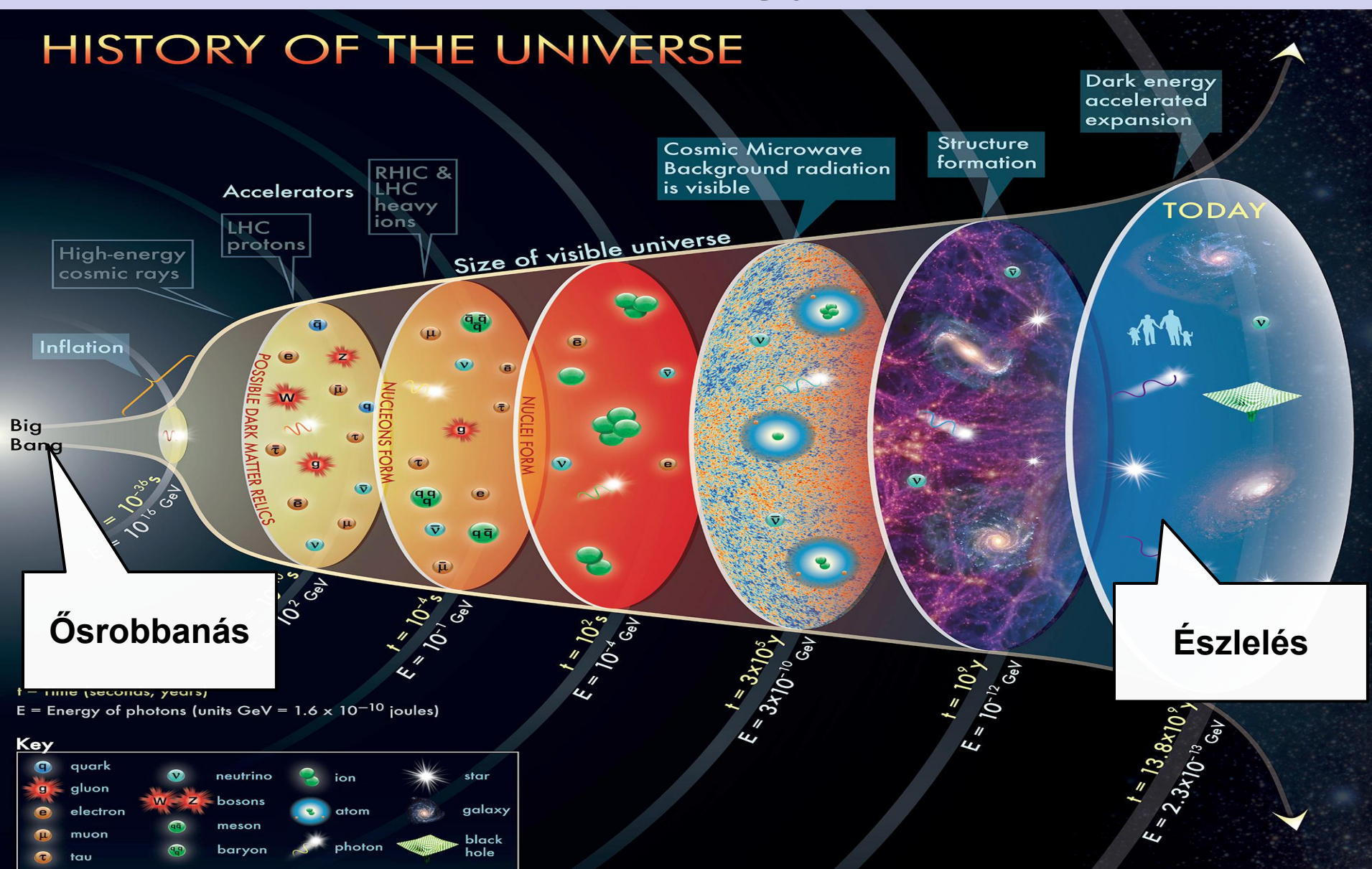
$$\varepsilon_c \sim 1 \text{ GeV/fm}^3$$



- Fázisátmenet \rightarrow **Kvark-gluon plazma (QGP)**
 - Létezik?
 - Mik a tulajdonságai?

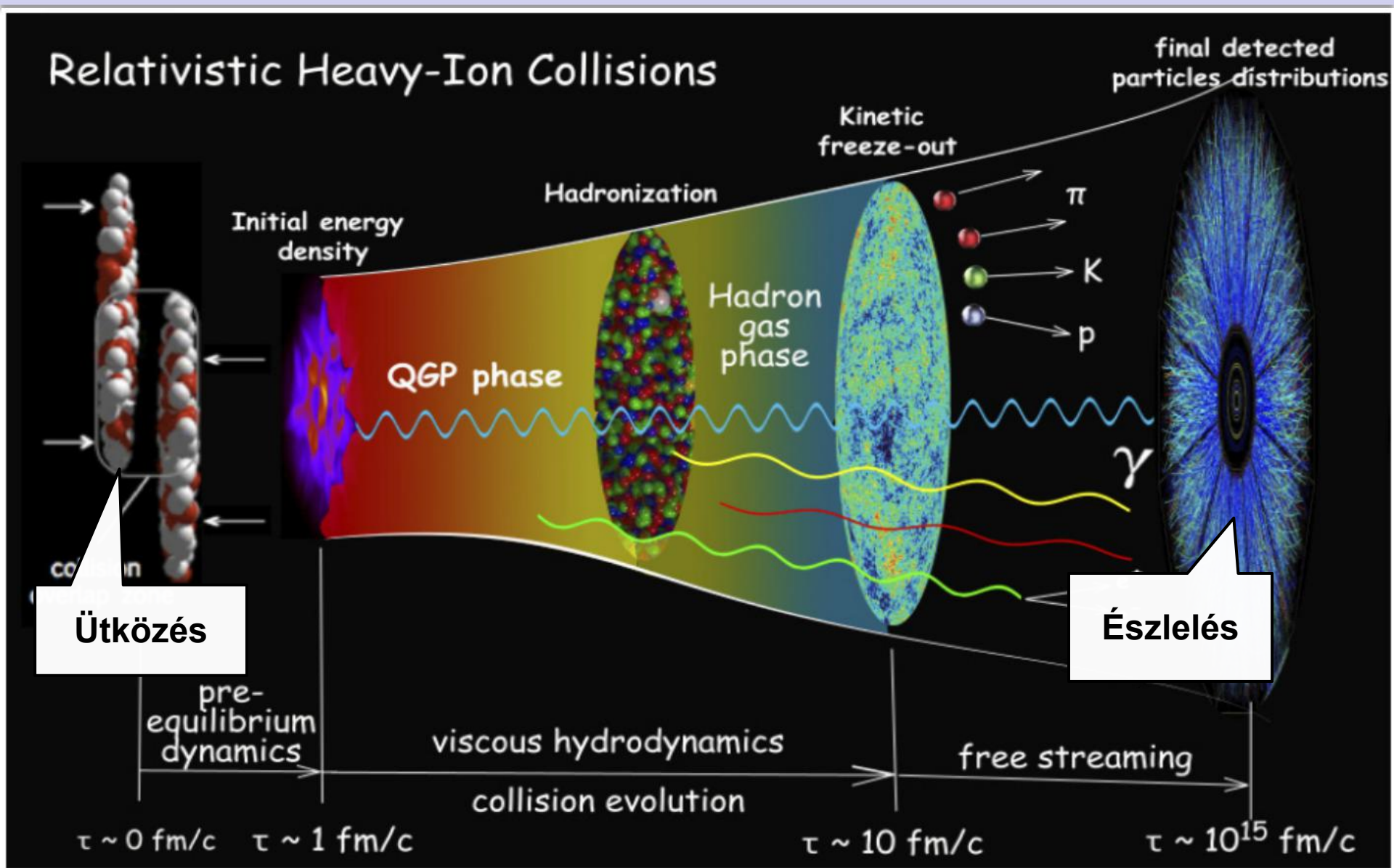
A kezdet: "nagy bummm"

HISTORY OF THE UNIVERSE



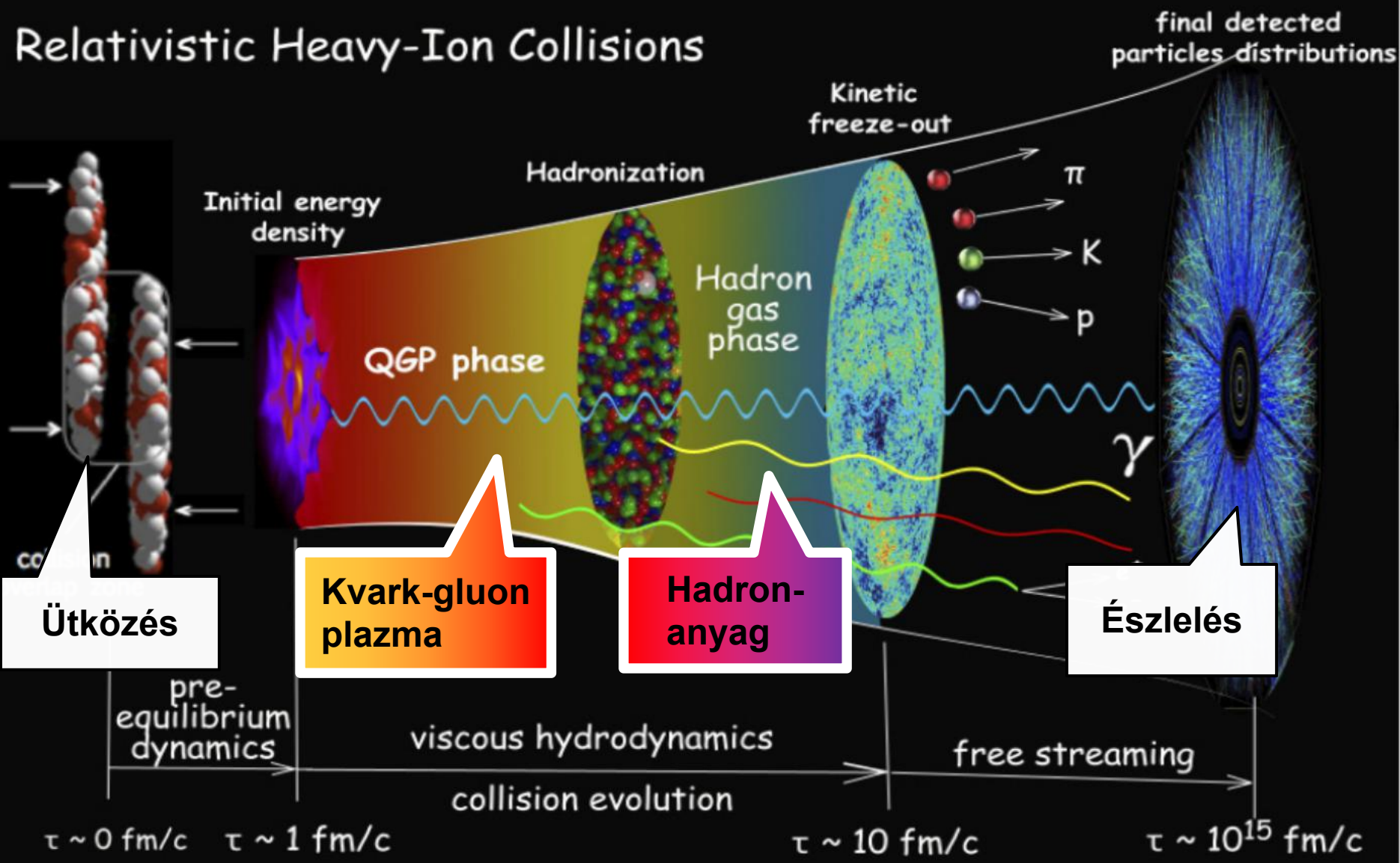
The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Nehézion-ütközések: "kis bumm"



Nehézion-ütközések: "kis bummm"

Relativistic Heavy-Ion Collisions



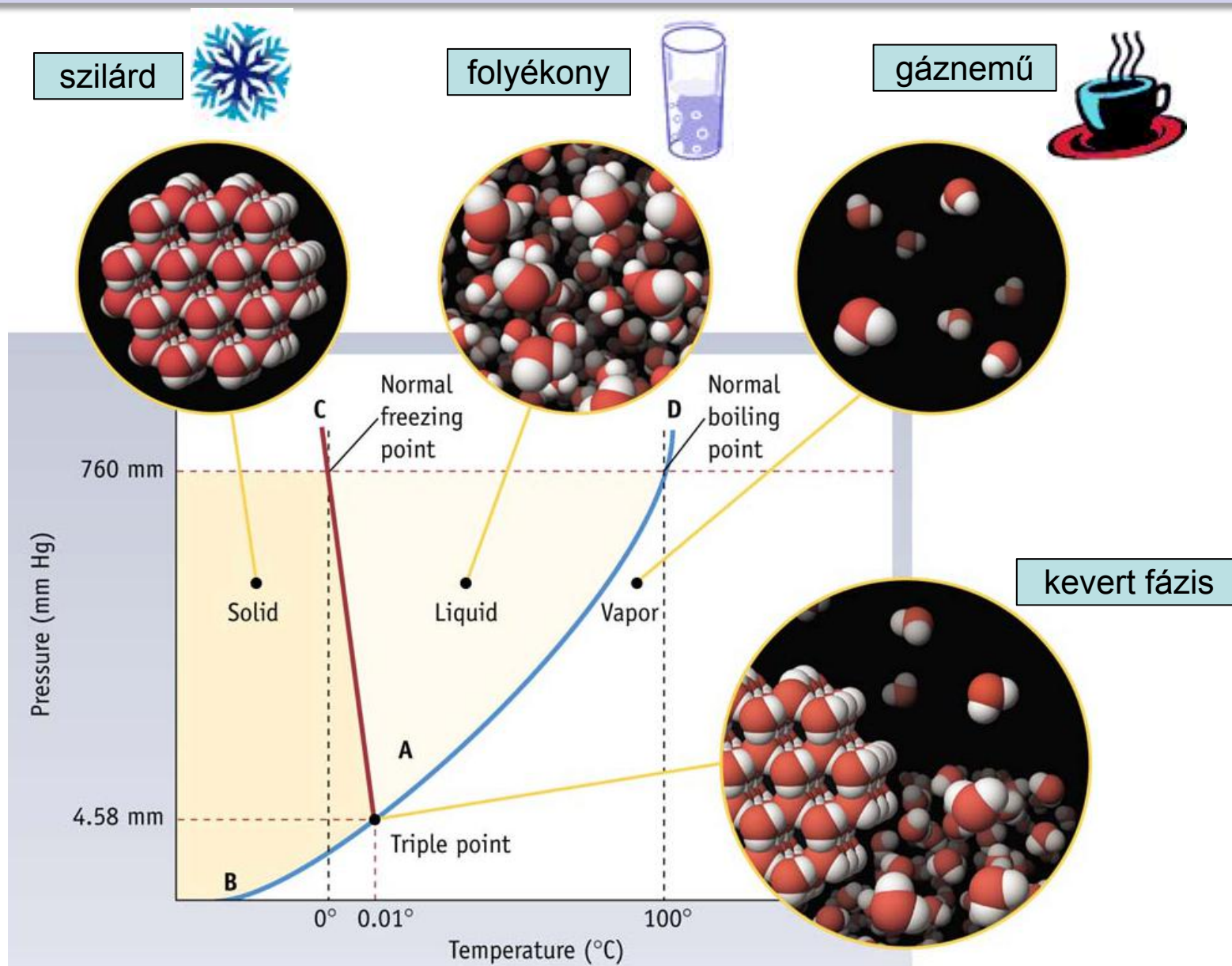
Ütközés

Kvark-gluon plazma

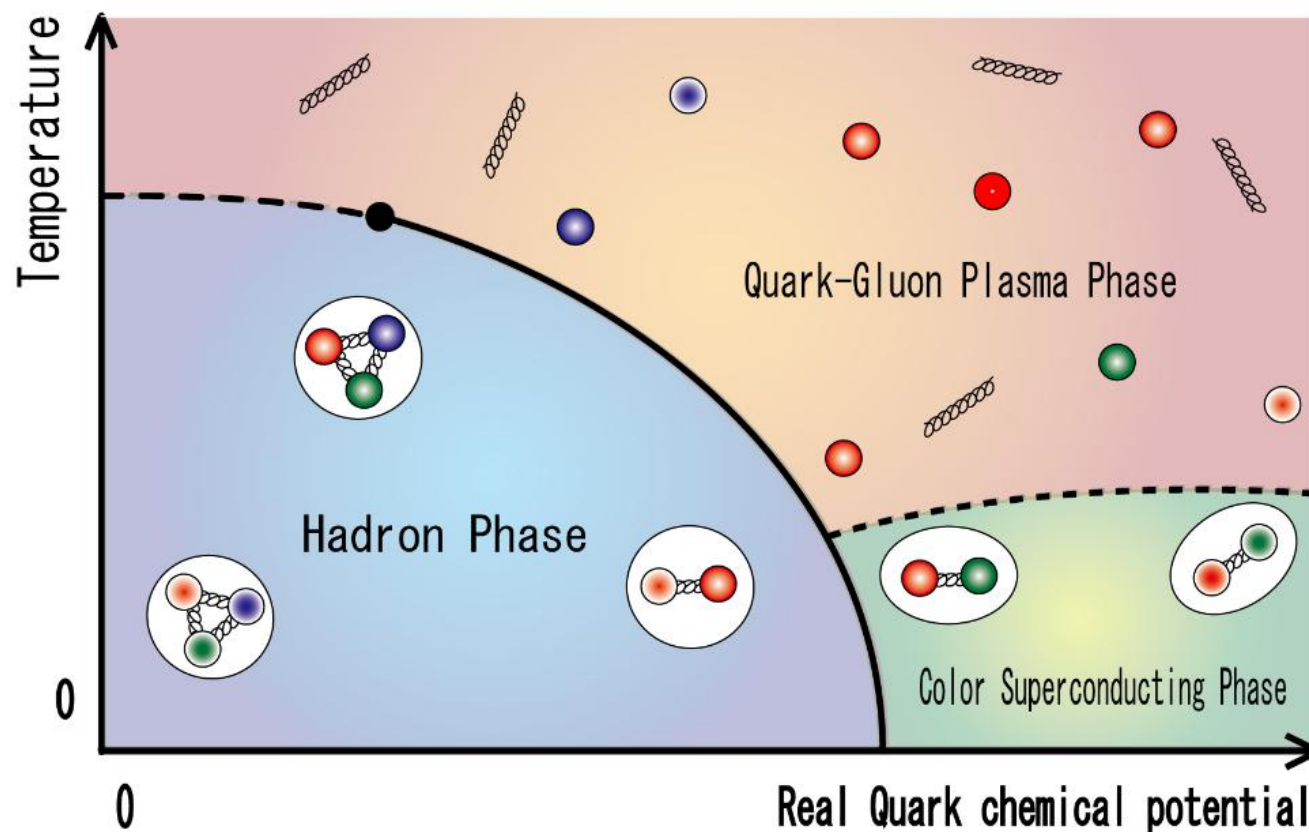
Hadron-anyag

Észlelés

A víz fázisdiagramja

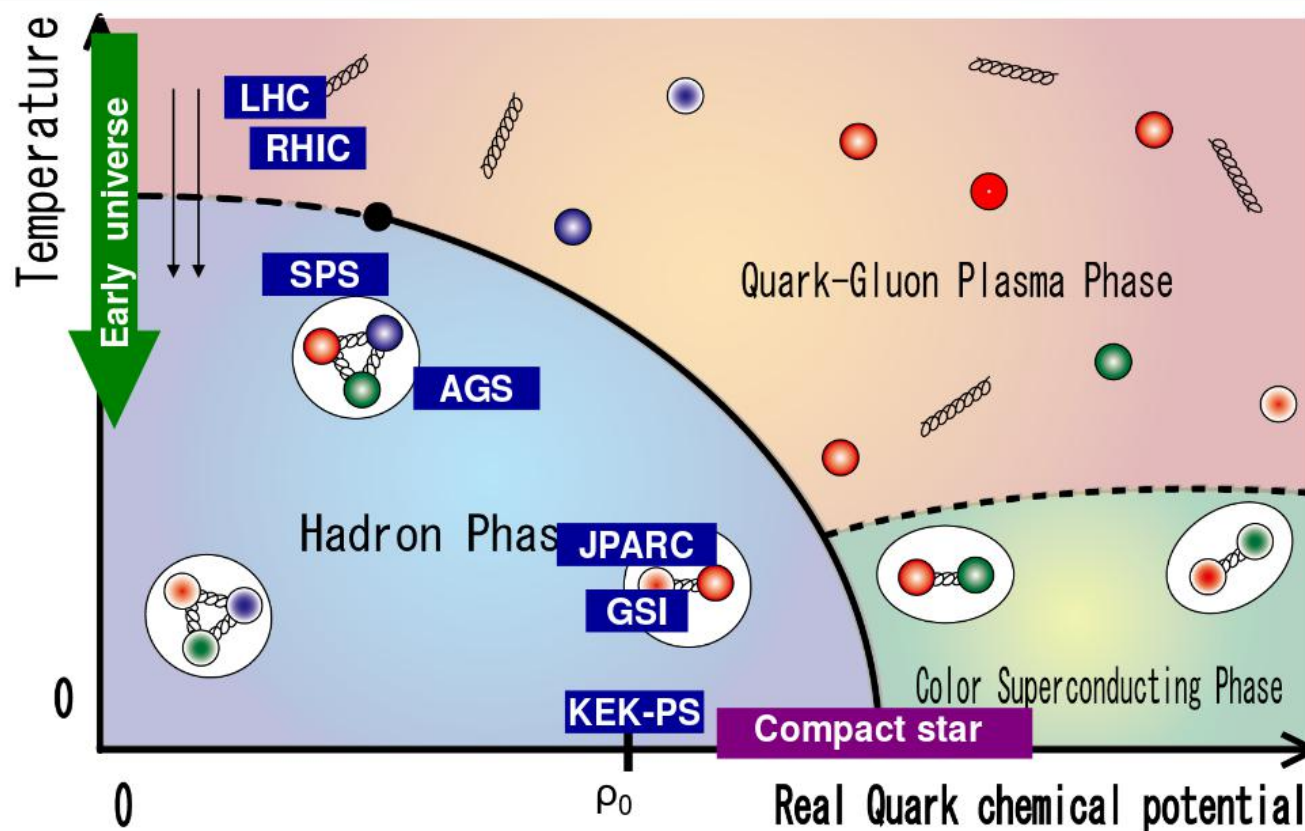


A QCD fázisdiagramja



- Cél: a QCD fázisainak feltérképezése, megértése

A QCD fázisdiagramja



- Cél: a QCD fázisainak feltérképezése, megértése
 - A kvark-gluon plazma megismerése
 - Látjuk-e a fázisátalakulást? Milyen a jellege?
 - Van-e kritikus pont?

Kísérleti eszközök, módszerek, alapfogalmak

- Gyorsítók, kísérletek: RHIC, LHC
- Pszeudorapiditás, azimut-
aszimmetria, maganyag-módosulás

RHIC relativisztikus nehézion-ütköztető

- Két 3,6 km hosszú szinkrotron-gyűrű
- Rendkívül sokoldalú
 - Au, Cu, U, d, ^3He , p
 - polarizált protonok (\rightarrow spinfizika)
 - Aszimmetrikus ütközések
- Széles energiatartomány
 - **p+p:**
 $\sqrt{s} = 62 - 500 \text{ GeV}$
 - **Au+Au:**
 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.5 - 200 \text{ GeV}$
(fix target: 2.7 GeV)
- Kísérletek: STAR, PHENIX (PHOBOS, BRAHMS)

BNL (NY, USA)

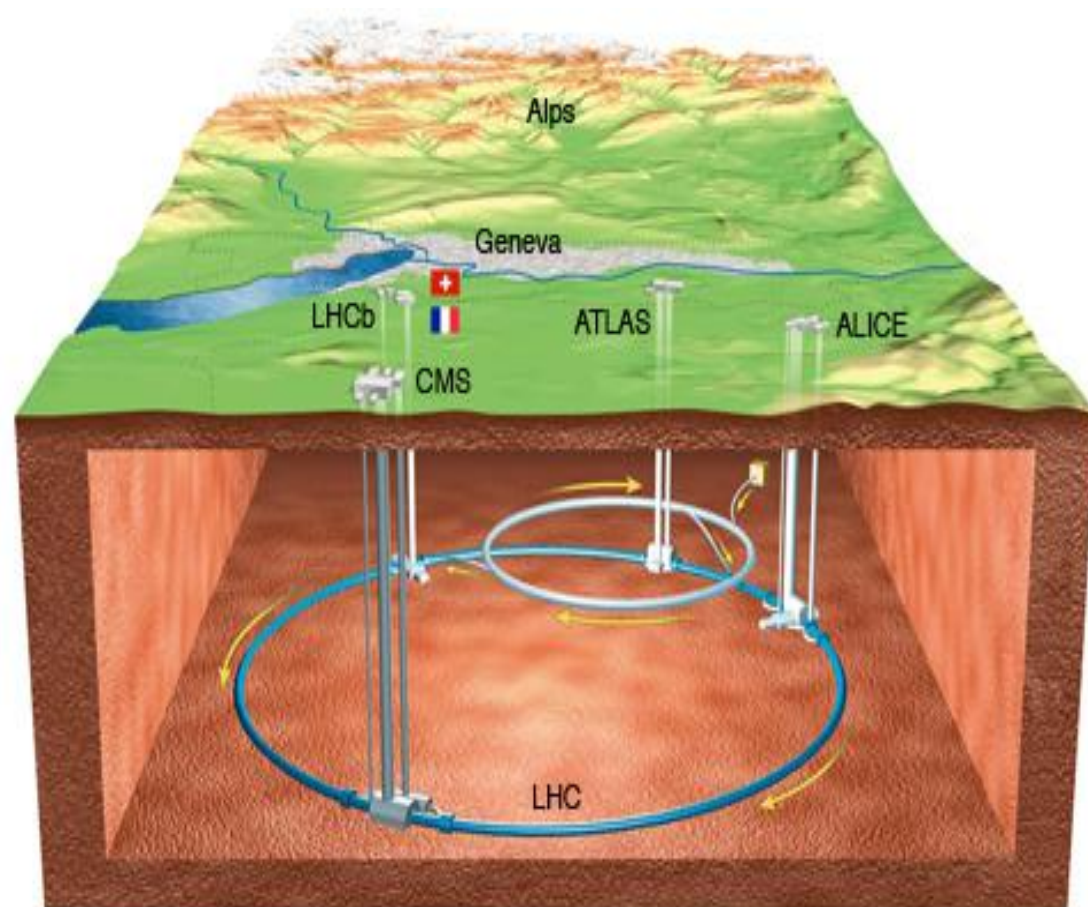


LHC: a Nagy Hadronütköztető

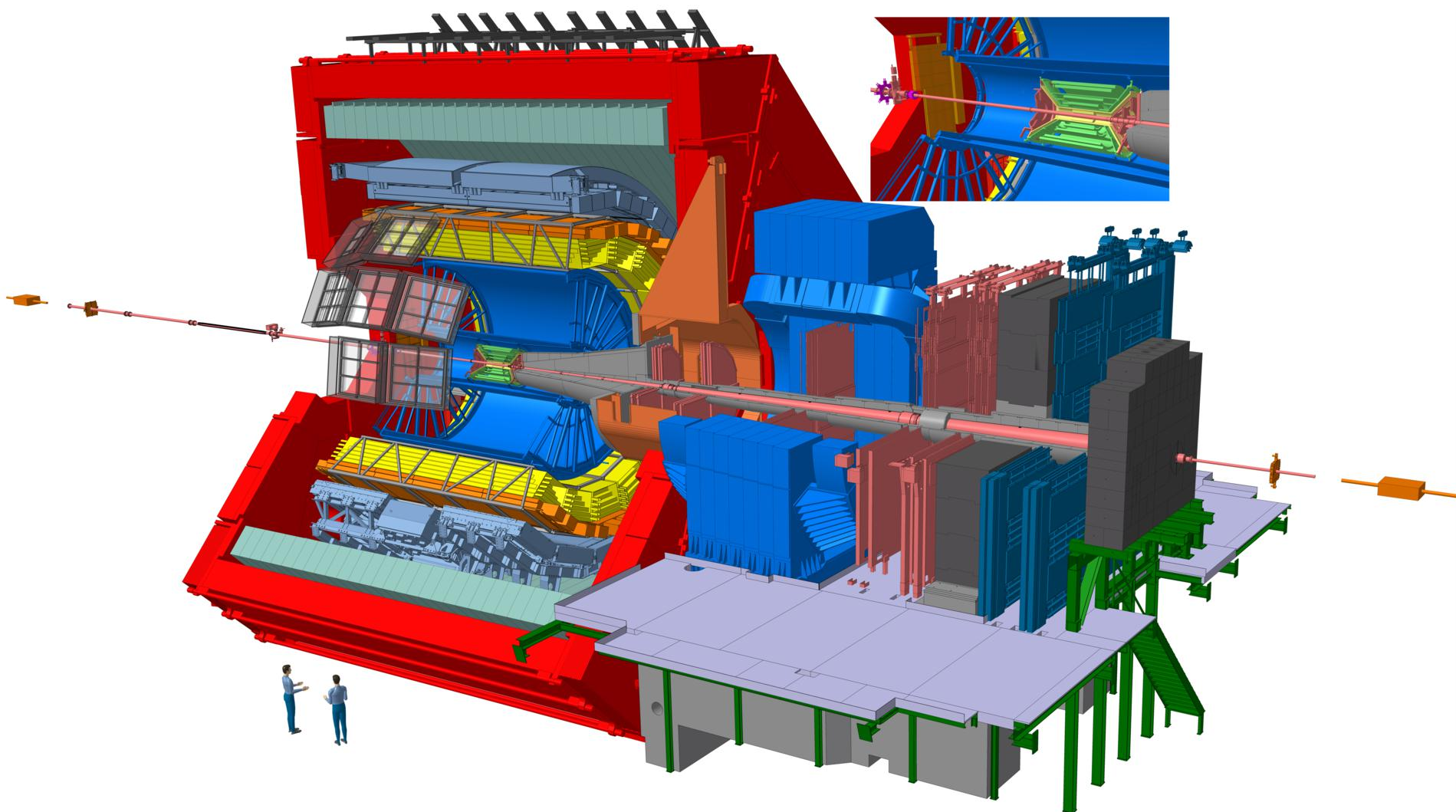


- CERN: Közös európai kutatóközpont
- 22 tagország együttműködése

- LHC: 27 km hosszú gyorsítógyűrű
- Legnagyobb energia
 - **p+p:** $\sqrt{s}=13$ TeV
 - **Pb+Pb:** $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV
- Kísérletek:
ALICE, CMS,
ATLAS, LHCb



Az ALICE kísérlet (példa)



- Kifejezetten nehézion-ütközések feldolgozására épült detektorrendszer
- Részecskék megbízható azonosítása széles impulzus-tartományban

Az ALICE kísérlet (példa)

EMCal: elektromágneses részecskék energiája

mágnes 0.5 T

HMPID: nagysebességű hadronok azonosítása

ITS: töltött részecskék azonosítása, nyomkövetése, másodlagos vertex

TPC: töltött részecskék azonosítása, nyomkövetése

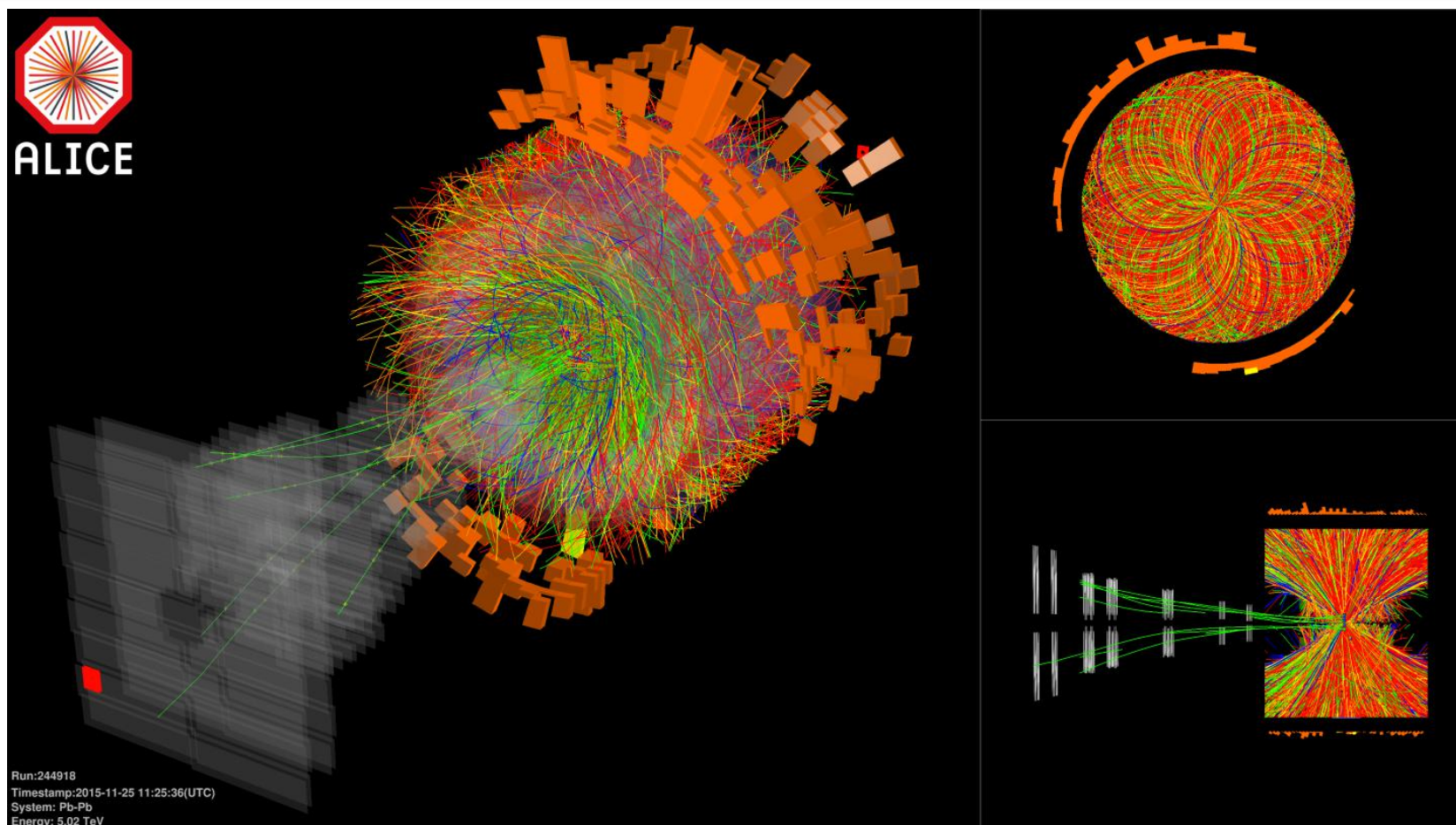
TOF: azonosítás a repülési idő mérésével

Müonspektrométer
(előreszórás): $-4 < \eta < -2.5$
műonok észlelése, nyomkövetése

központi kar: $|\eta| < 0.9$

- Kifejezetten nehézion-ütközések feldolgozására épült detektorrendszer
- Részecskék megbízható azonosítása széles impulzus-tartományban

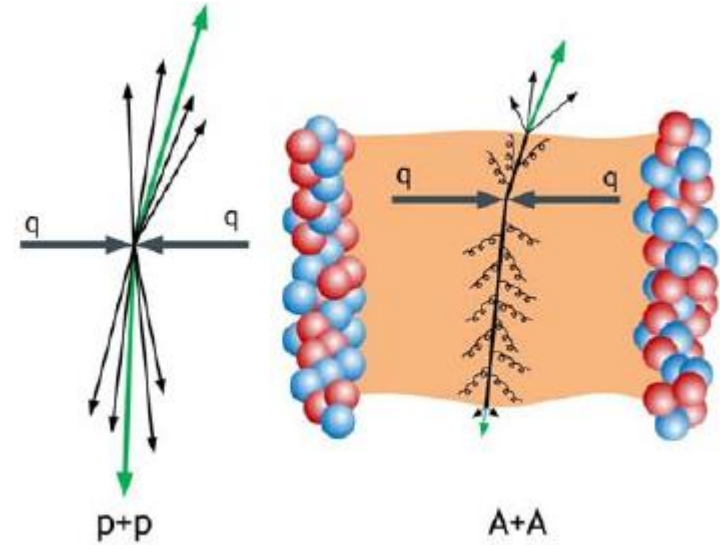
Rekonstruált nehézion-esemény



- Másodpercenként akár 600 millió ütközés
- Akár több ezer részecske jeleinek azonosítása, értelmezése, feldolgozása
- 2-4 GB adat másodpercenként

Mérési módszerek

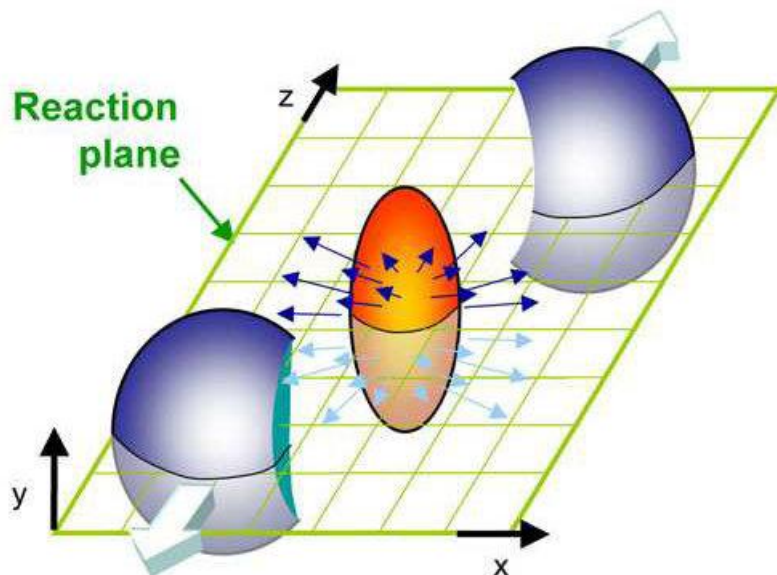
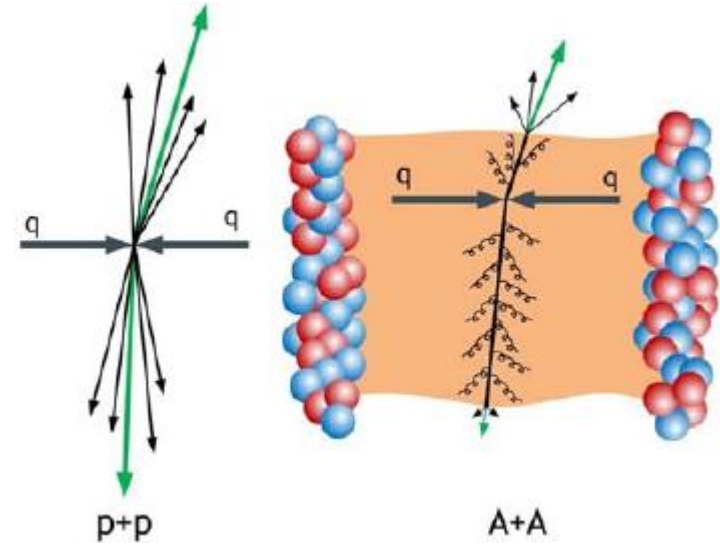
- **"Kemény" folyamatok**
 - kevés nagy impulzú részecske
 - korai keletkezés, jól ismert folyamatokban
 - nagy áthatolóképesség
 - **Plazma átvilágítása, Közegbeli módosulás vizsgálata**



Mérési módszerek

▪ "Kemény" folyamatok

- kevés nagy impulzú részecske
- korai keletkezés, jól ismert folyamatokban
- nagy áthatolóképesség
- **Plazma átvilágítása, Közegbeli módosulás vizsgálata**



▪ "Lágy" folyamatok

- Sok, kis impulzusú részecske
- késői állapotokból
- **Termikus viselkedés**
- **Kollektív dinamika ("folyás")**

Fogalmak

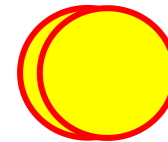
- Nukleononkénti ütközési energia (tkp.): $\sqrt{s_{NN}}$

- Centralitás

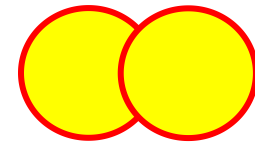
$$c(b) \cong \frac{\pi b^2}{\sigma_{inel}}$$

σ_{inel} : teljes rugalmatlan szórás hatáskm.
 $b < b_{max}$: ütközési paraméter

centrális



periférikus



Fogalmak

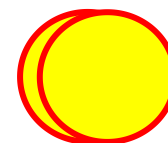
- Nukleononkénti ütközési energia (tkp.): $\sqrt{s_{NN}}$

- Centralitás

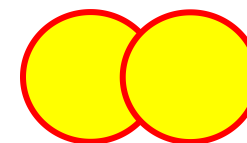
$$c(b) \cong \frac{\pi b^2}{\sigma_{inel}}$$

σ_{inel} : teljes rugalmatlan szórás hatáskm.
 $b < b_{max}$: ütközési paraméter

centrális



periférikus



- Kinematikai változók

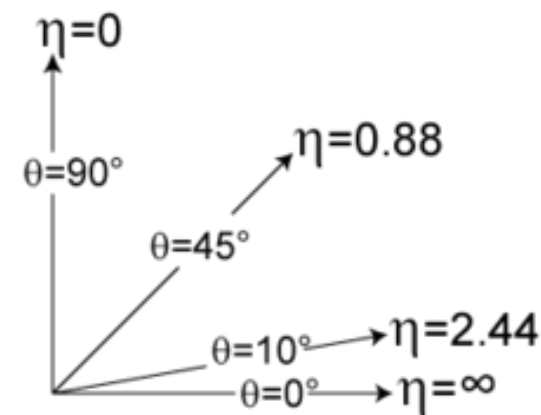
nyalábra merőleges (x,y) sík - "fizika":

- **Transzverzális impulzus:** $p_T = \sqrt{(p_x^2 + p_y^2)}$
- **Azimutszög, φ**

nyalábirányú (z) boost:

- **Rapidity:** $y = 0.5 \log \frac{E+p_z}{E-p_z}$
- **Pseudorapidity** (ha $m=0$, $\eta=y$):

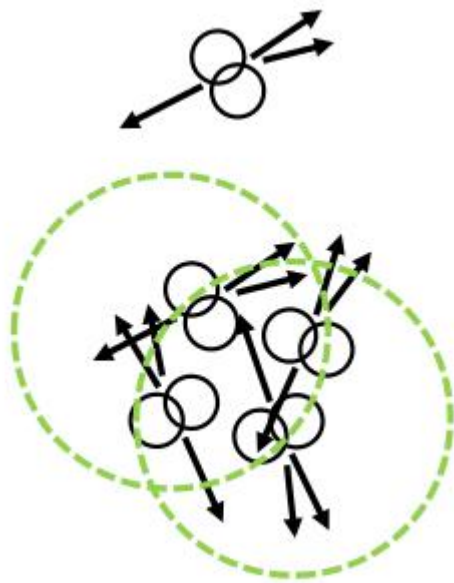
$$\eta = 0.5 \log \frac{p+p_z}{p-p_z} = -\ln \tanh \frac{\theta}{2}$$



Jet-quenching: a nagy impulzusú részecskék elnyomódása

- Maganyag-módosulási tényező a forró maganyagban (R_{AA})
- Kétjet-aszimmetria

Nukleáris módosulási tényező



Maganyag-
módosulási tényező

Hozam nehézion-
ütközésekben

$$R_{AA}(p_T) = \frac{1}{\langle N_{\text{coll}} \rangle} \frac{dN_{AA}/dp_T}{dN_{pp}/dp_T}$$

Elemi nukleon-nukleon
ütközések száma
nehézion- reakcióban

Hozam p-p
ütközésekben

- A+A hozam összevetése a p+p ütközésekével
- $R_{AA} = 1$: a maganyagnak nincs hatása
- $R_{AA} < 1$: elnyomódás (impulzusvesztés a maganyagban)

N_{coll} : centralitásfüggő, Glauber (geometriai) modellből

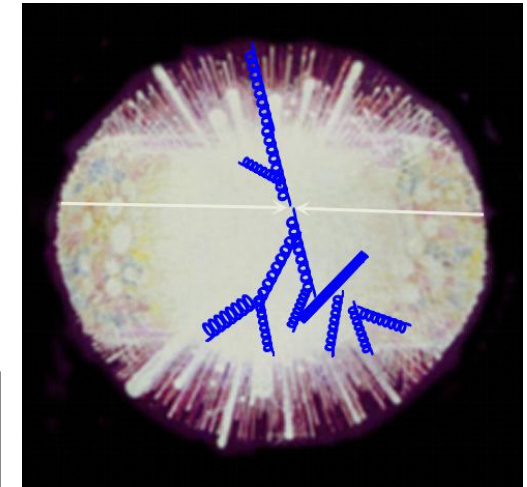
"Öngenerált" kemény próbák

■ Kvark és gluon

- Erősen kölcsönható ("színes") plazmával a jetek kölcsönhatnak, energiát vesztenek sugárzás illetve ütközés útján
- Kellően nagy úthossz esetén teljesen elnyelődnek
- **Gyulassy-Lévai-Vitev modell:**

$$\Delta E \sim \frac{L^2 \mu^2}{\lambda_g} \log(E/\mu)$$

E: "jet" energiája
 L: "jet" teljes úthossza a plazmában
 $\lambda_g \sim 1$ fm : átlagos gluon szabad úthossz
 $\mu \sim 0.5$ GeV : színárnyékolási skála



- **"jet quenching"** (jet-elnyomás) jelensége
- Várákozás: $R_{AA} < 1$

"Öngenerált" kemény próbák

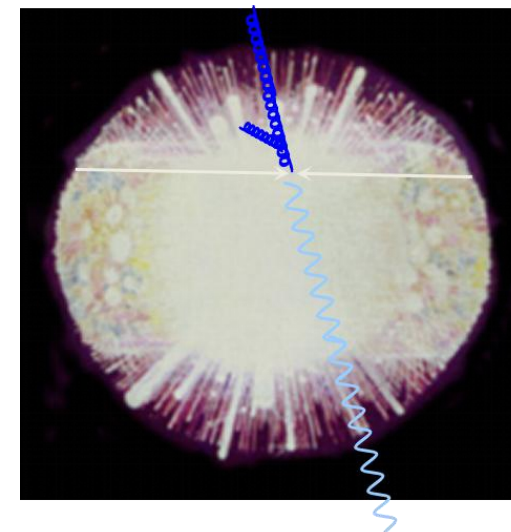
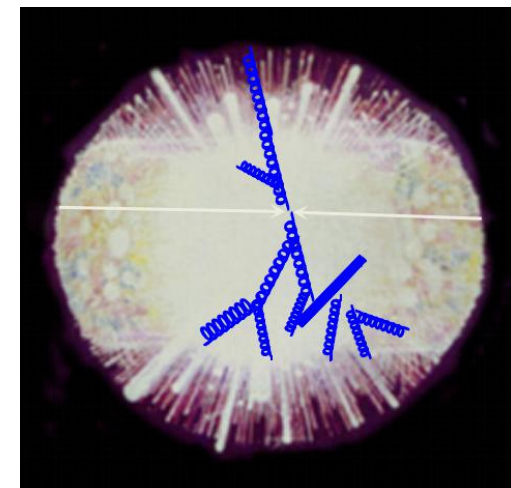
■ Kvark és gluon

- Erősen kölcsönható ("színes") plazmával a jetek kölcsönhatnak, energiát vesztenek sugárzás illetve ütközés útján
- Kellően nagy úthossz esetén teljesen elnyelődnek
- **Gyulassy-Lévai-Vitev modell:**

$$\Delta E \sim \frac{L^2 \mu^2}{\lambda_g} \log(E/\mu)$$

E: "jet" energiája
 L: "jet" teljes úthossza a plazmában
 $\lambda_g \sim 1$ fm : átlagos gluon szabad úthossz
 $\mu \sim 0.5$ GeV : színárnyékolási skála

- **"jet quenching"** (jet-elnyomás) jelensége
- Várákozás: $R_{AA} < 1$



"Öngenerált" kemény próbák

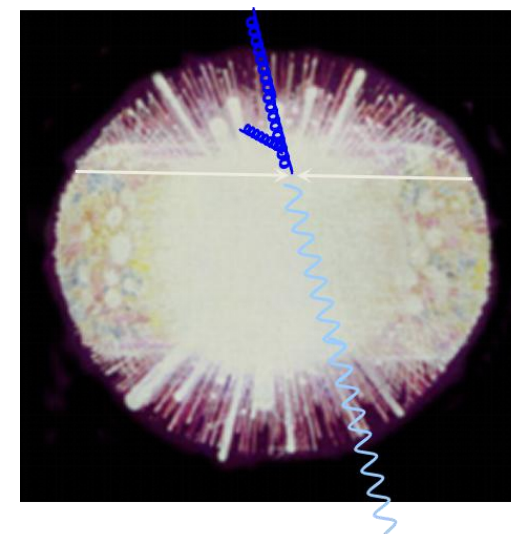
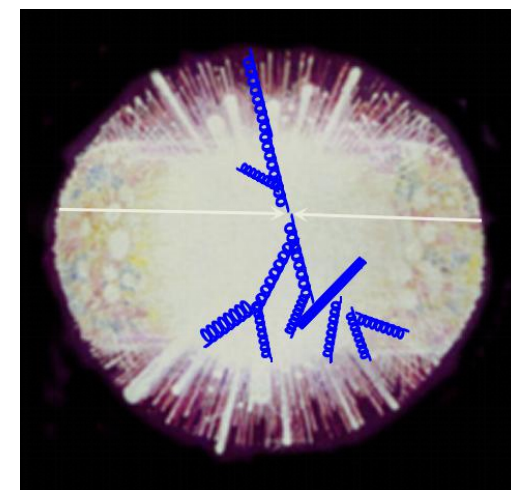
■ Kvark és gluon

- Erősen kölcsönható ("színes") plazmával a jetek kölcsönhatnak, energiát vesztenek sugárzás illetve ütközés útján
- Kellően nagy úthossz esetén teljesen elnyelődnek
- **Gyulassy-Lévai-Vitev modell:**

$$\Delta E \sim \frac{L^2 \mu^2}{\lambda_g} \log(E/\mu)$$

E: "jet" energiája
 L: "jet" teljes úthossza a plazmában
 $\lambda_g \sim 1$ fm : átlagos gluon szabad úthossz
 $\mu \sim 0.5$ GeV : színárnyékolási skála

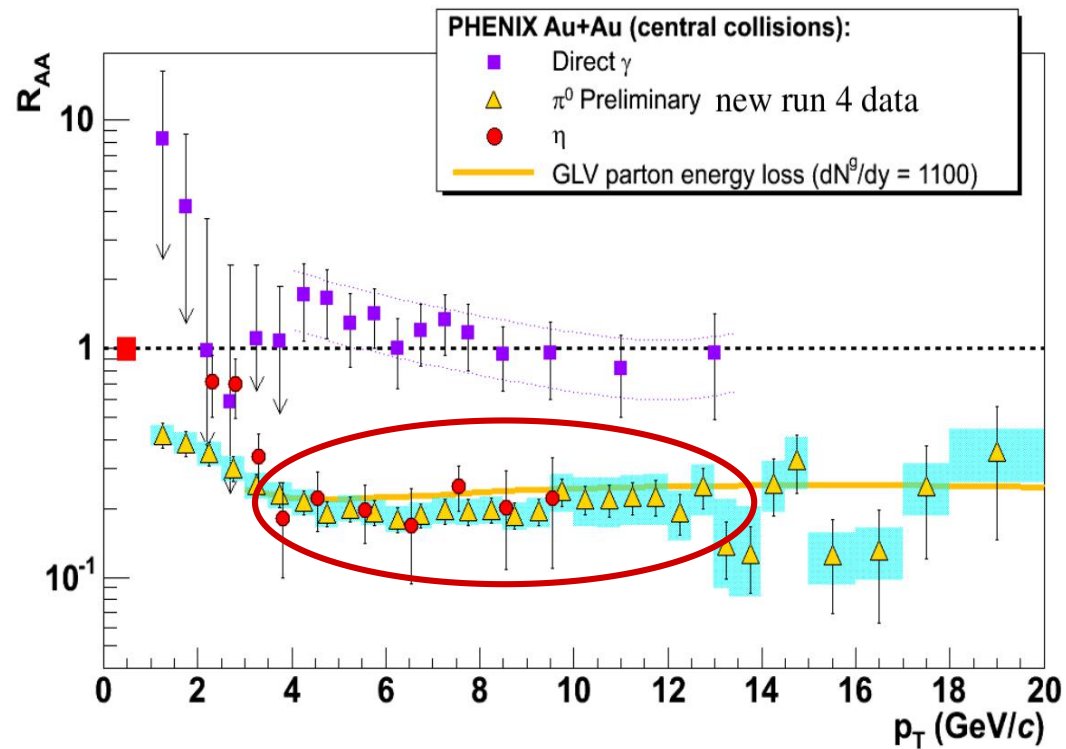
- **"jet quenching"** (jet-elnyomás) jelensége
- Várákozás: $R_{AA} < 1$



52

Mit mutatnak a kísérletek?

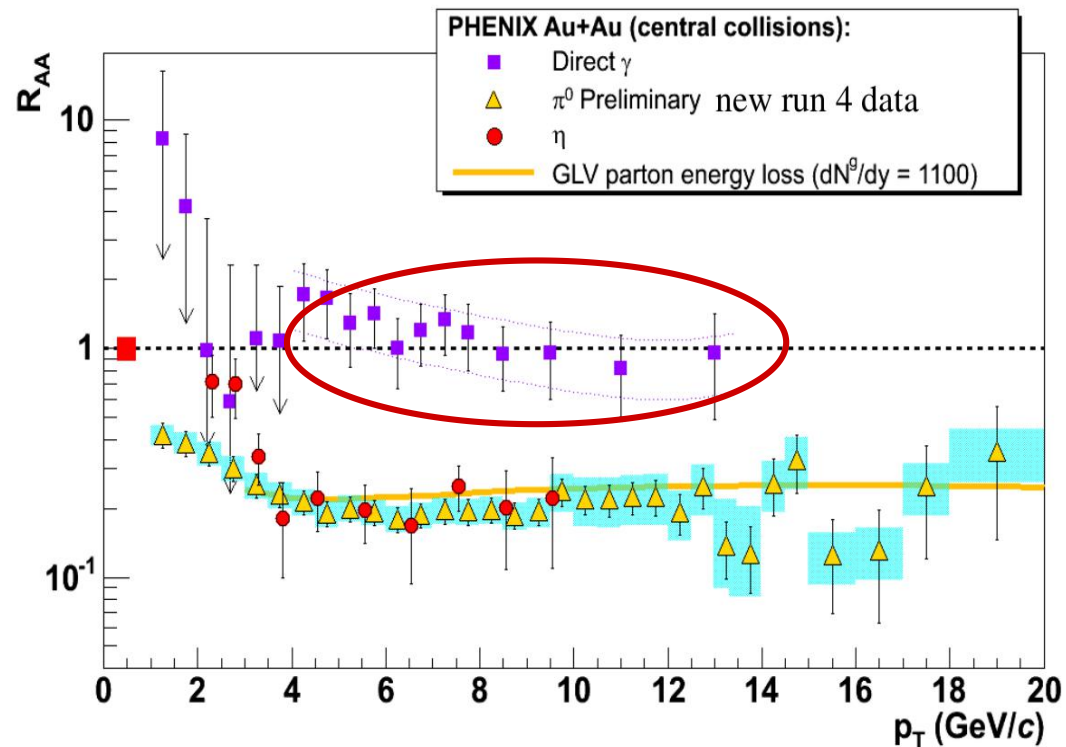
RHIC 2002 : Jet-elnyomás



RHIC
white papers:
NPA 757 (2005)

- Könnyű hadronok kb. azonos mértékben nyomódnak el (200 GeV-es centrális ütközésekben $R_{AA}^{h \sim 0.2}$)

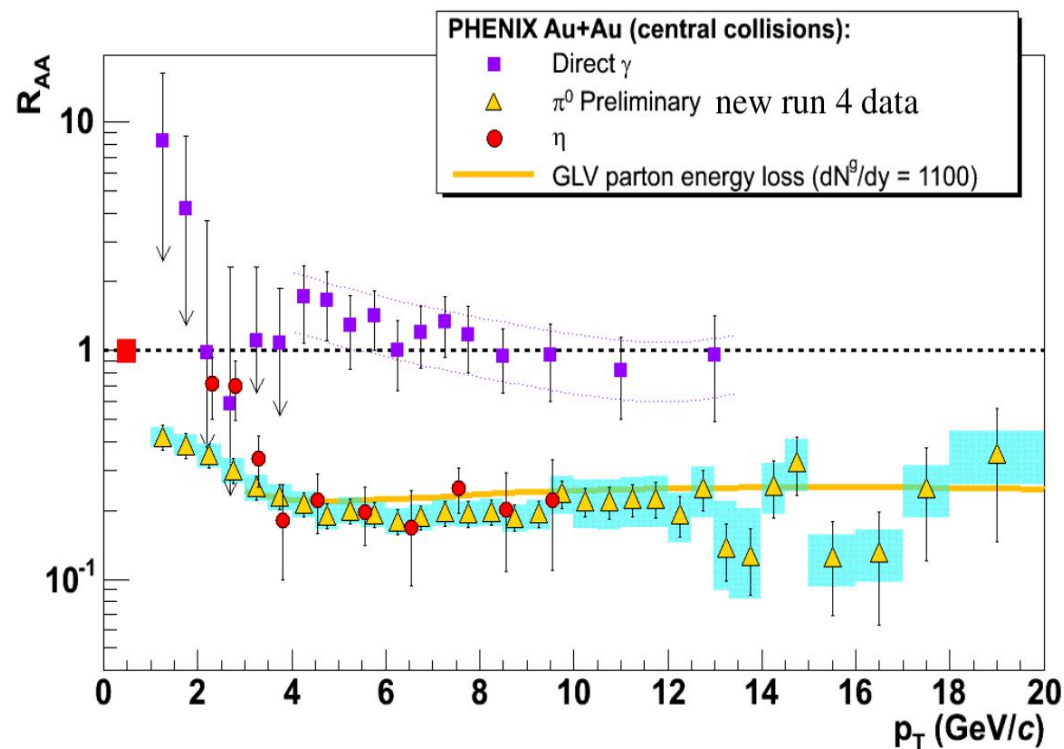
RHIC 2002 : Jet-elnyomás



RHIC
white papers:
NPA 757 (2005)

- Könnyű hadronok kb. azonos mértékben nyomódnak el (200 GeV-es centrális ütközésekben $R_{AA}^h \sim 0.2$)
- Ellenpróba: Foton-elnyomódás nem tapasztalható ($R_{AA}^\gamma \sim 1$)

RHIC 2002 : Jet-elnyomás



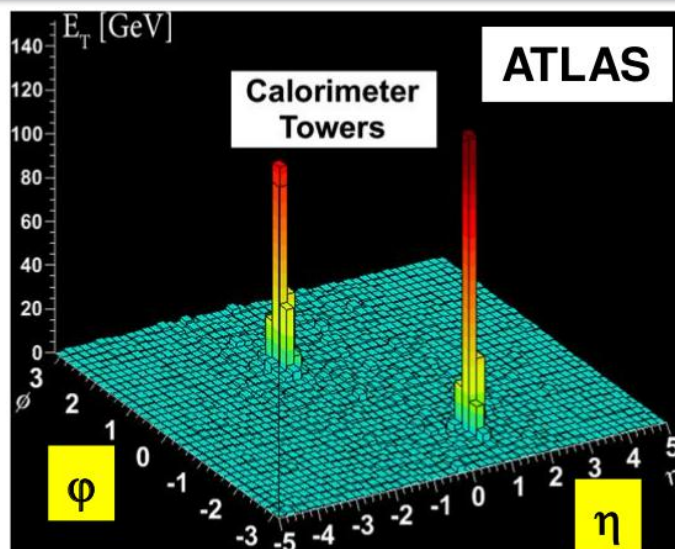
RHIC
white papers:
NPA 757 (2005)

- Könnyű hadronok kb. azonos mértékben nyomódnak el (200 GeV-es centrális ütközésekben $R_{AA}^h \sim 0.2$)
- Ellenpróba: Foton-elnyomódás nem tapasztalható ($R_{AA}^\gamma \sim 1$)

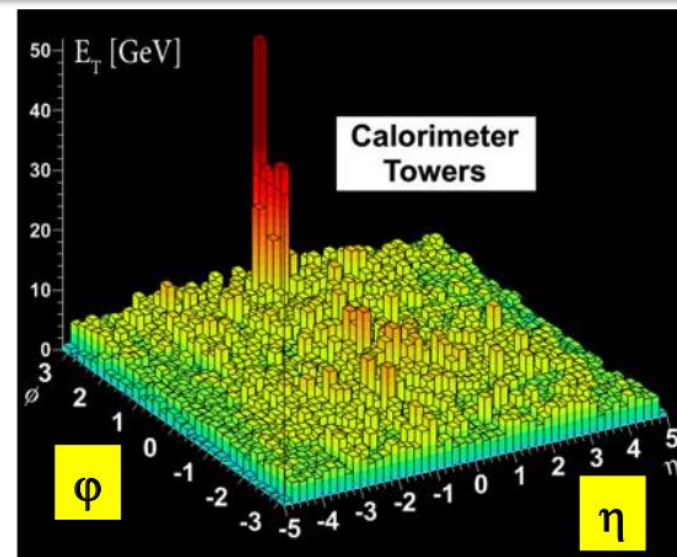
Az erősen kölcsönható QGP első meggyőző bizonyítéka

Kétjet-aszimmetria (LHC)

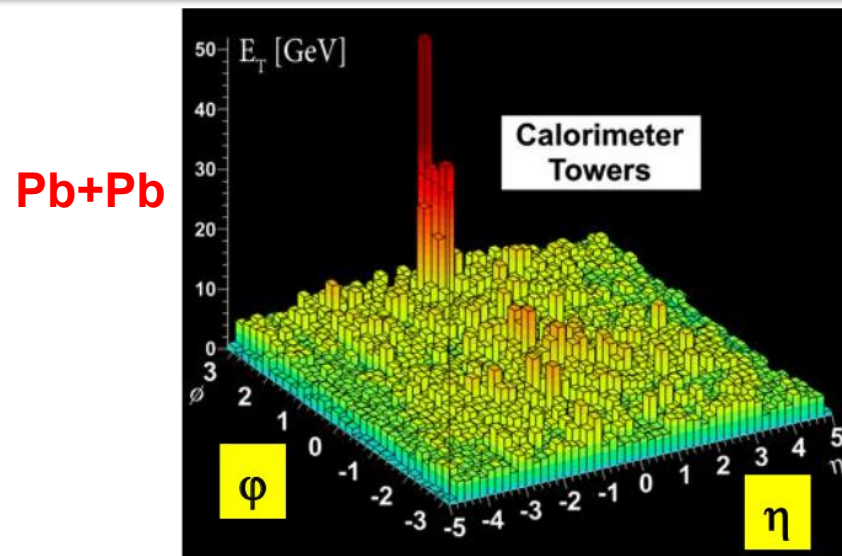
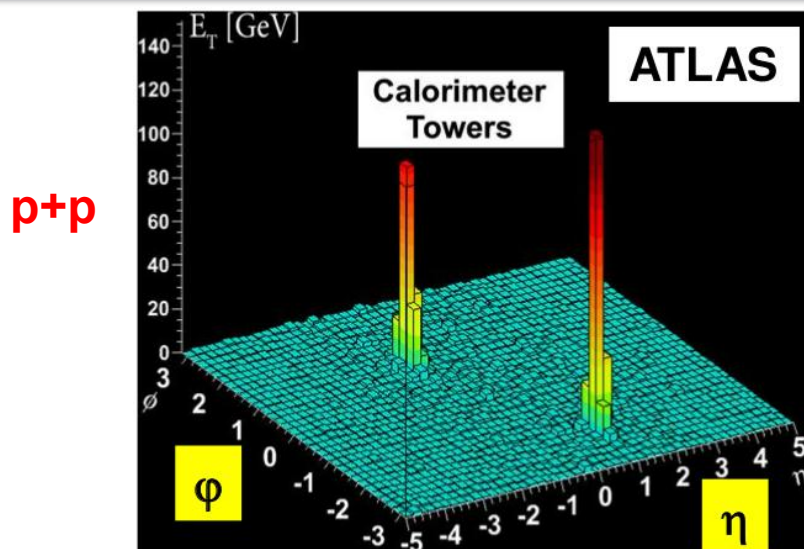
p+p



Pb+Pb



Kétjet-aszimmetria (LHC)



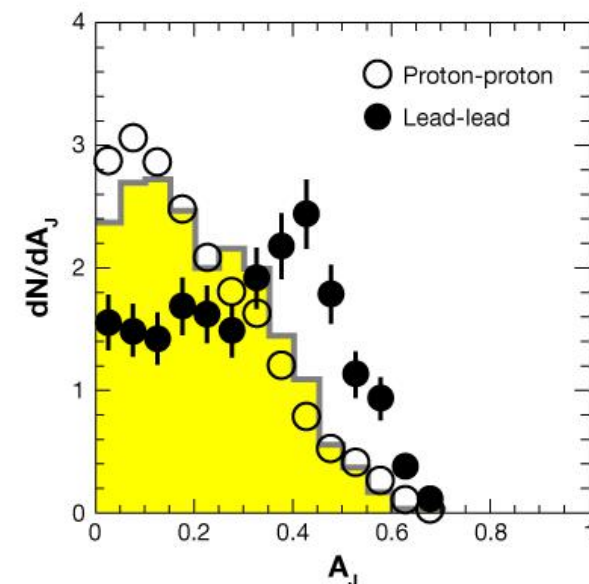
■ Kétjet-aszimmetria

$$A_J = \frac{E_{T1} - E_{T2}}{E_{T1} + E_{T2}}, \quad \Delta\phi > \frac{\pi}{2}$$

eseményenkénti információt ad

- p+p ütközések: kis aszimmetria
- Centrális Pb+Pb: erős aszimmetria

PRL 105 (2010) 252303

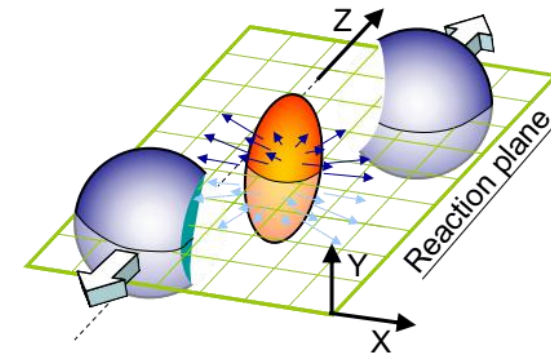


A maganyag kollektív viselkedése: a tökéletes folyadék

- A v_2 kvarkszám-skálázása
- viszkozitás

Azimutális anizotrópia

- Az ütközési régióban térben anizotróp QGP
 - Nyomáskülönbség:
 $R_x < R_y \implies P_x > P_y$



Azimutális anizotrópia

- Az ütközési régióban térben anizotróp QGP

- Nyomáskülönbség:

$$R_x < R_y \implies P_x > P_y$$

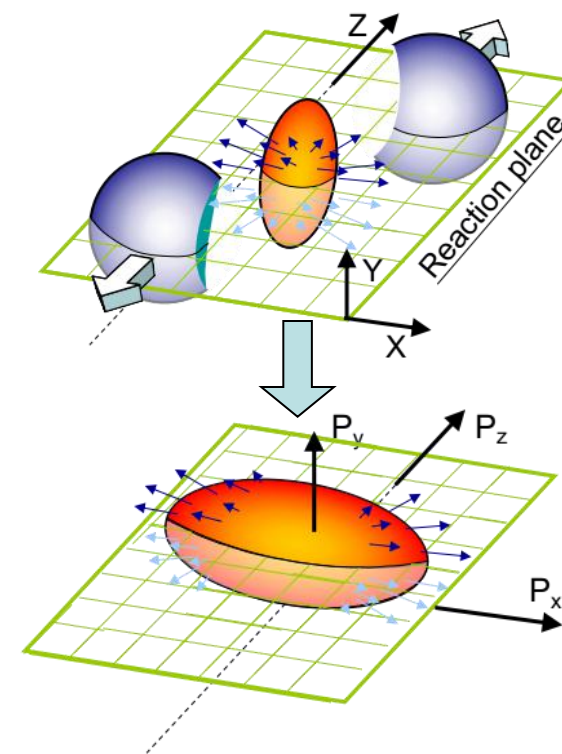
- Az időfejlődés során a térbeli anizotrópia impulzusbeli anizotrópiává alakul

- Paraméterezés: Fourier-sor

$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{\pi} d^2 \frac{N}{dp_T^2 dy} [1 + 2v_1 \cos(\varphi - \Psi_R) + 2v_2 \cos(2[\varphi - \Psi_R]) + \dots]$$

- **Elliptikus folyás:**

$$v_2 = \langle \cos(2[\varphi - \Psi_R]) \rangle$$



Azimutális anizotrópia

- Az ütközési régióban térben anizotróp QGP

- Nyomáskülönbség:

$$R_x < R_y \implies P_x > P_y$$

- Az időfejlődés során a térbeli anizotrópia impulzusbeli anizotrópiává alakul

- Paraméterezés: Fourier-sor

$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{\pi} d^2 \frac{N}{dp_T^2 dy} [1 + 2v_1 \cos(\varphi - \Psi_R) + 2v_2 (2[\varphi - \Psi_R]) + \dots]$$

- **Elliptikus folyás:**

$$v_2 = \langle \cos(2[\varphi - \Psi_R]) \rangle$$

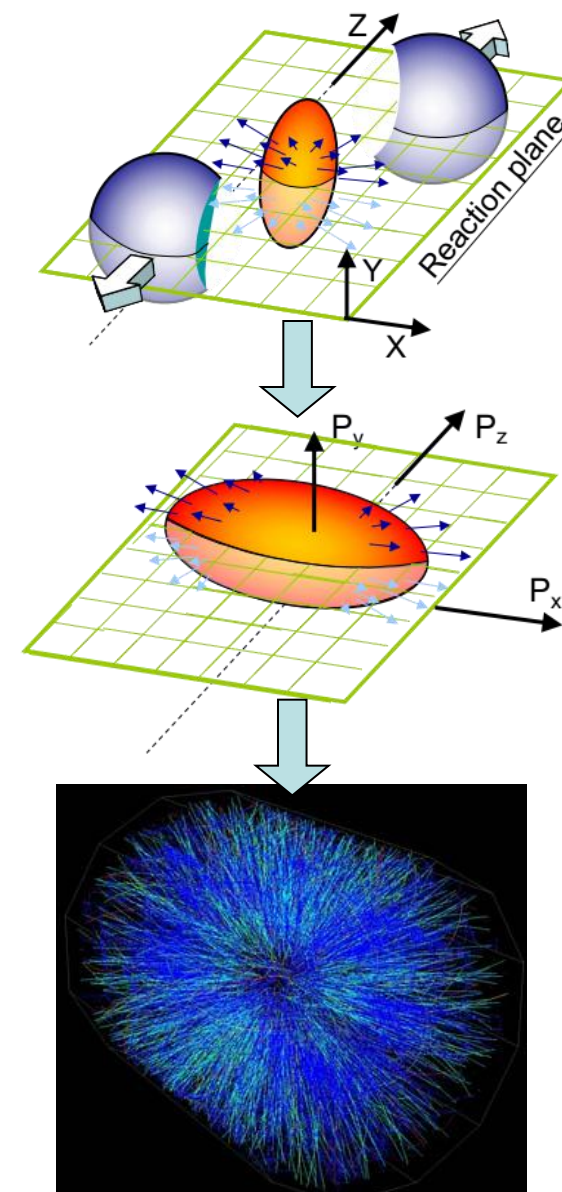
- Kollektivitás észlelése:

- harmonikus együtthatók meghatározása ($v_1 \dots v_6$)

jelentős $v_2 \leftrightarrow$ erős csatolás a részecskék között

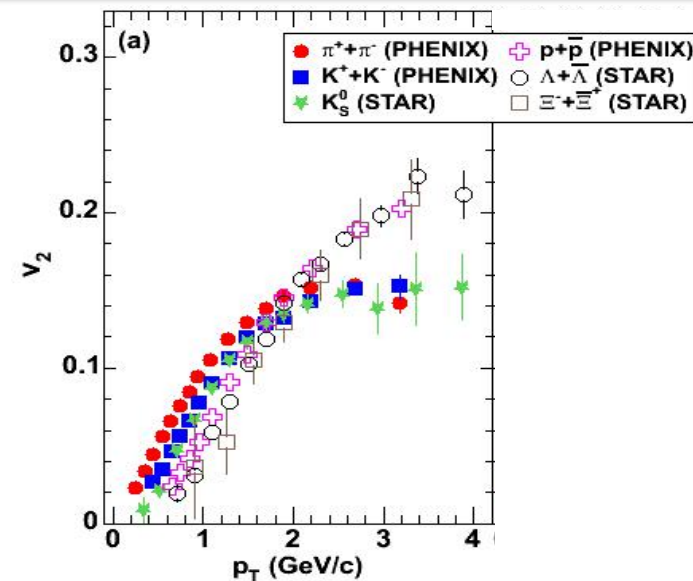
$$\lambda \ll \bar{R}$$

λ : részecske szabad úthossza
 R : a forrás jellemző mérete



Hogyan folyik a maganyag?

- Rendkívül erős kollektivitás!
→ **Erősen csatolt forró közeg**
Aszimptotikus szabadság???



Hogyan folyik a maganyag?

- Rendkívül erős kollektivitás!
→ **Erősen csatolt forró közeg**
Aszimptotikus szabadság???
- Viskozitásmentes hidrodinamikai modellek jól leírják
→ **~Tökéletes folyadék**

$$\partial_\nu T^{\mu\nu} = 0$$

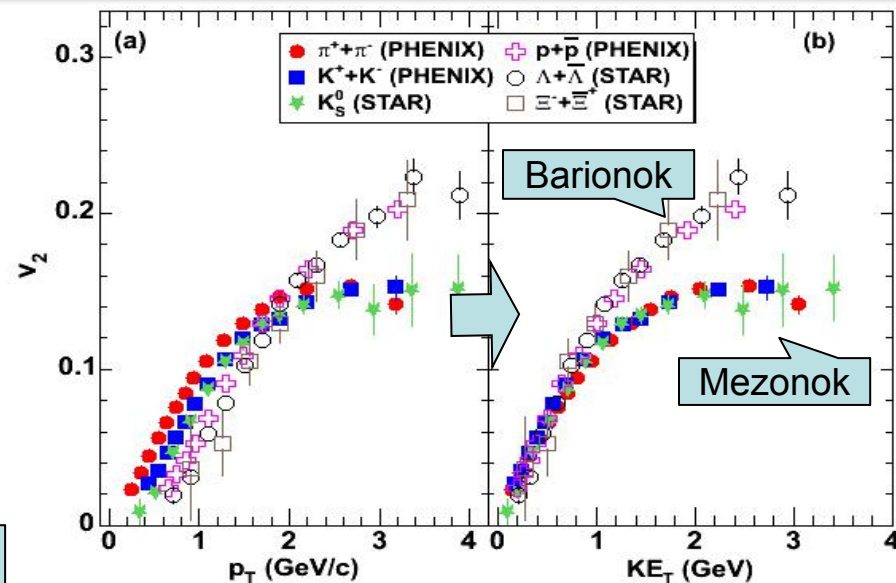
Lokális energia-és
impulzusmegmaradás

$$KE_T = \sqrt{m^2 + p_T^2}$$

Transzverzális
kinetikus energia

$$\int_V \nabla P d^3x \approx \Delta KE_T$$

Munkatétel



Hogyan folyik a maganyag?

- Rendkívül erős kollektivitás!
→ **Erősen csatolt forró közeg**
Aszimptotikus szabadság???

- Viskozitásmentes hidrodinamikai modellek jól leírják
→ **~Tökéletes folyadék**

$$\partial_\nu T^{\mu\nu} = 0$$

Lokális energia-és
impulzusmegmaradás

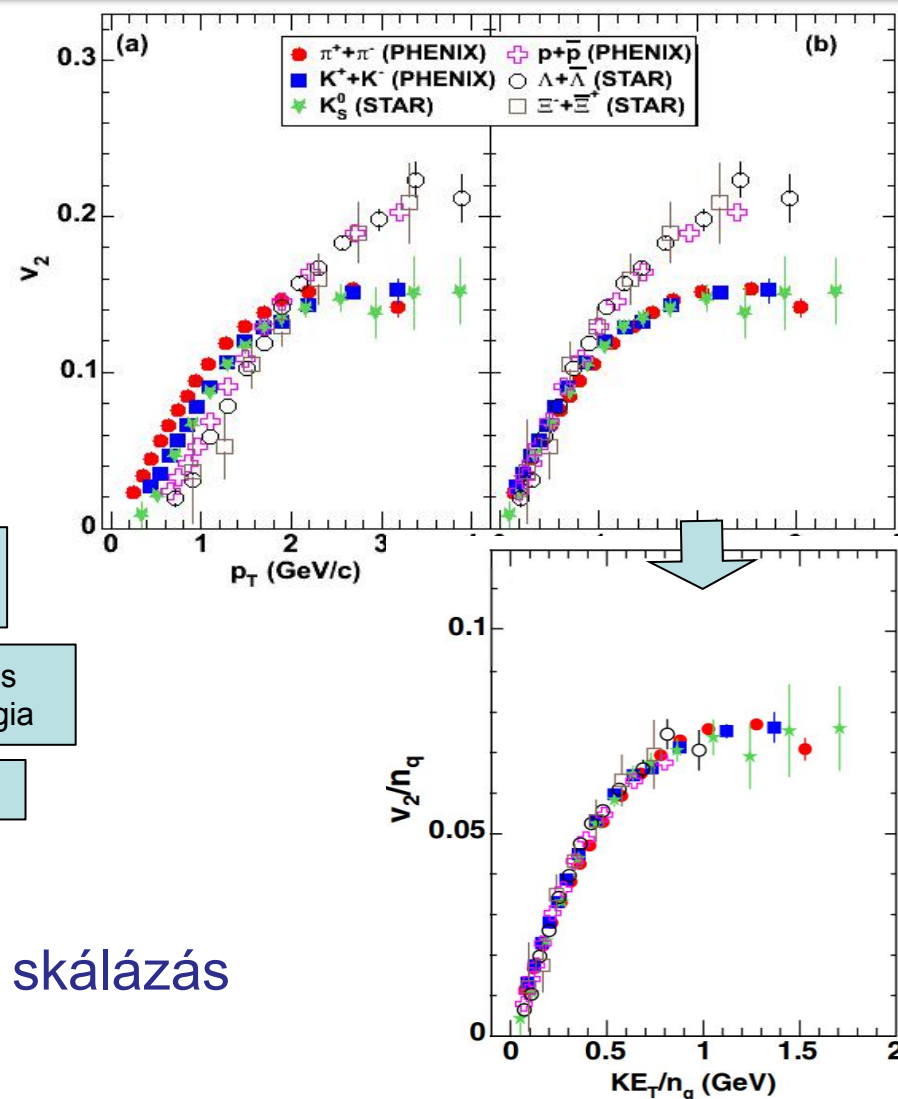
$$KE_T = \sqrt{m^2 + p_T^2}$$

Transzverzális
kinetikus energia

$$\int_V \nabla P d^3x \approx \Delta KE_T$$

Munkatétel

- Konstituens kvarkok számával való skálázás
→ **Szabadsági fokok: kvarkok**



Hogyan folyik a maganyag?

- Rendkívül erős kollektivitás!
→ **Erősen csatolt forró közeg**
Aszimptotikus szabadság???

- Viskozitásmentes hidrodinamikai modellek jól leírják
→ **~Tökéletes folyadék**

$$\partial_\nu T^{\mu\nu} = 0$$

Lokális energia-és
impulzusmegmaradás

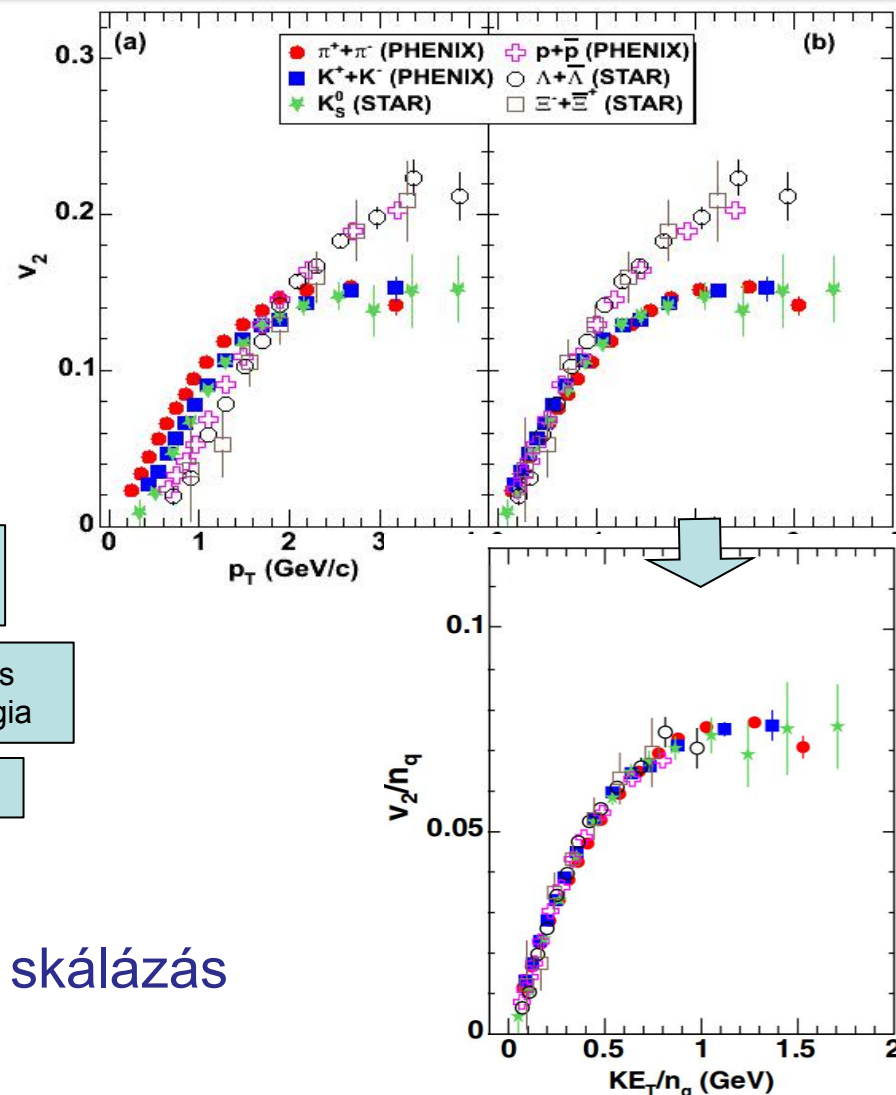
$$KE_T = \sqrt{m^2 + p_T^2}$$

Transzverzális
kinetikus energia

$$\int_V \nabla P d^3x \approx \Delta KE_T$$

Munkatétel

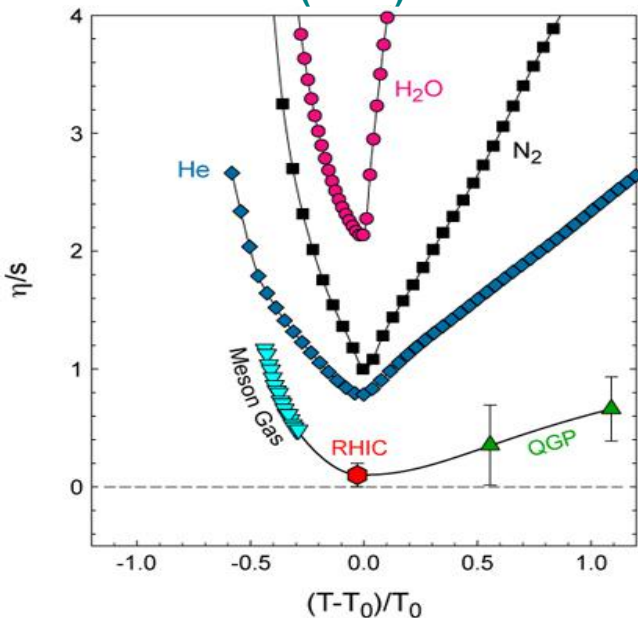
- Konstituens kvarkok számával való skálázás
→ **Szabadsági fokok: kvarkok**



sQGP a RHIC-nél: kvarkok tökéletes folyadéka

Mennyire tökéletes a kvarkfolyadék?

PRL 98 (2007) 092301



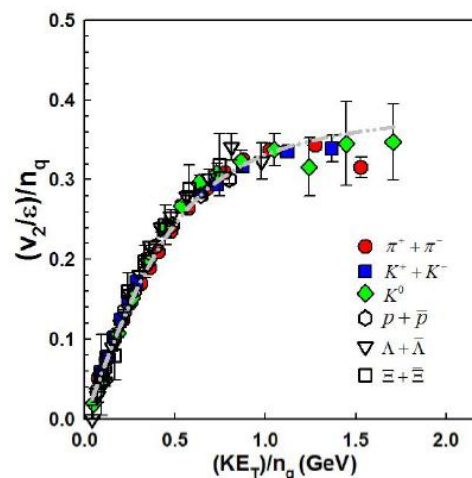
- Feltételezett kvantummechanikai limit

$$\frac{\eta}{s} \geq \frac{\hbar}{4\pi k_B} \frac{1}{s}$$

- **RHIC 200 GeV Au+Au: Rendkívül közel a limithez**
 - $4\pi\eta/s \sim 1 - 1.5$ (modelfüggő)
 - Valaha volt legkisebb viszkozitású folyadék

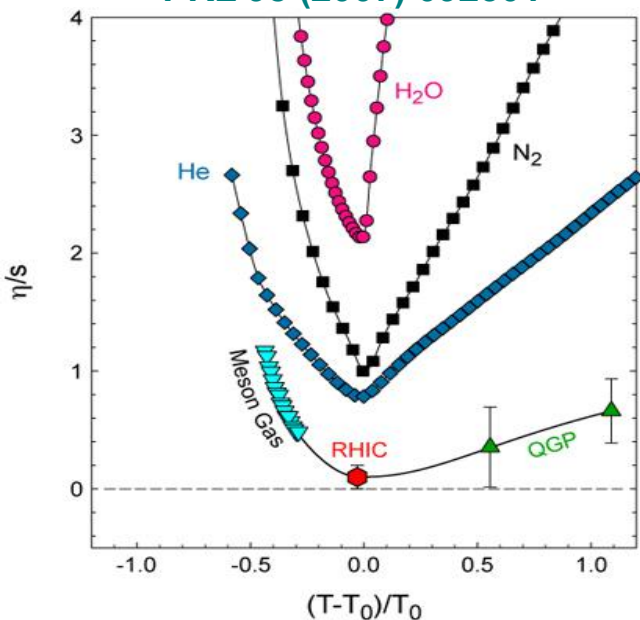
$$\frac{\eta}{s} \sim T\lambda_f c_s$$

η : viszkozitás
 s : entrópiasűrűség
 λ_f : szabad úthossz
 c_s : hangsebesség



Mennyire tökéletes a kvarkfolyadék?

PRL 98 (2007) 092301



- Feltételezett kvantummechanikai limit

$$\frac{\eta}{s} \geq \frac{\hbar}{4\pi k_B} \frac{1}{s}$$

- **RHIC 200 GeV Au+Au: Rendkívül közel a limithez**

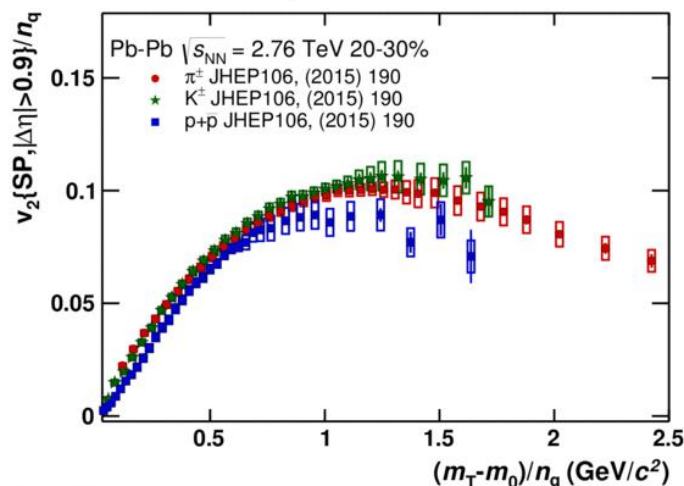
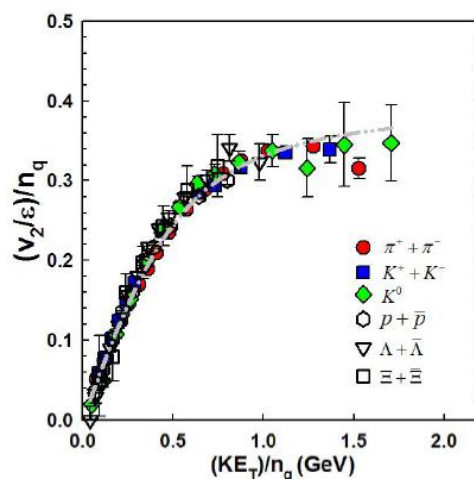
- $4\pi\eta/s \sim 1 - 1.5$ (modelfüggő)
- Valaha volt legkisebb viszkozitású folyadék

- **LHC 2.76 TeV Pb+Pb: A skálázás nem tökéletes**

- $4\pi\eta/s \sim 2$ (modelfüggő)

$$\frac{\eta}{s} \sim T\lambda_f c_s$$

η : viszkozitás
 s : entrópiasűrűség
 λ_f : szabad úthossz
 c_s : hangsebesség

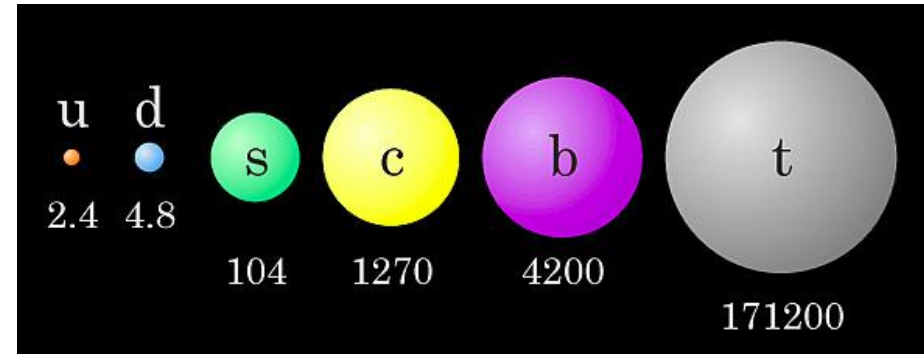


Nehéz kvarkok fizikája, kvarkónium

- A kvarkónium kötésienergia-függő disszociációja
- A kvark-gluon plazma hőmérséklete

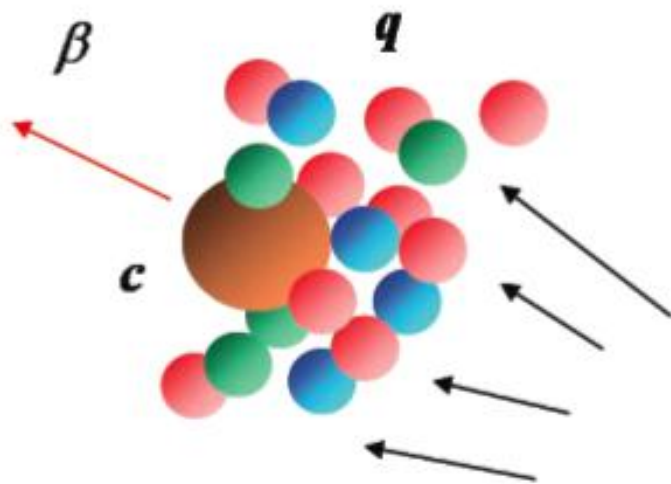
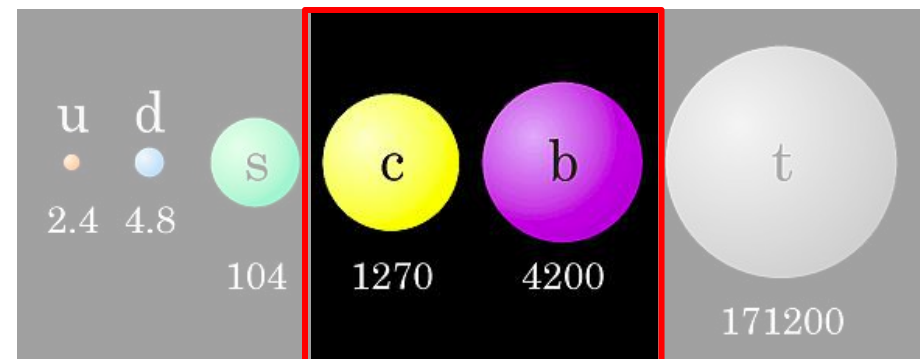
Mire jók a nehéz kvarkok?

- Az összes hagyományos anyagot a két könnyű kvark alkotja
- Nehéz kvarkok csak instabil részecskékben fordulnak elő
 - nehezebb kelteni
 - hamar elbomlik



Mire jók a nehéz kvarkok?

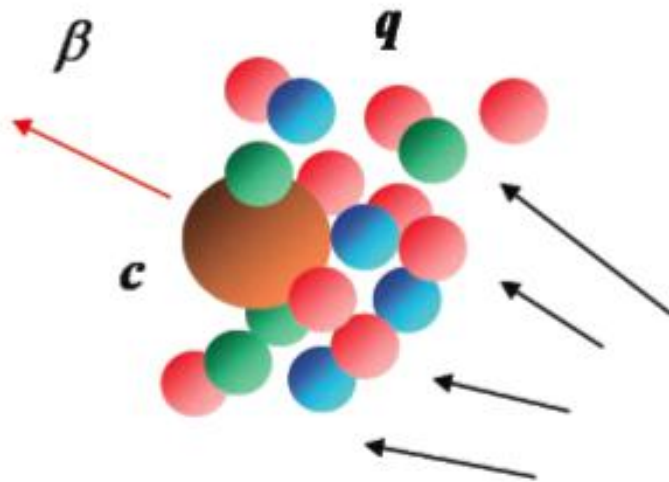
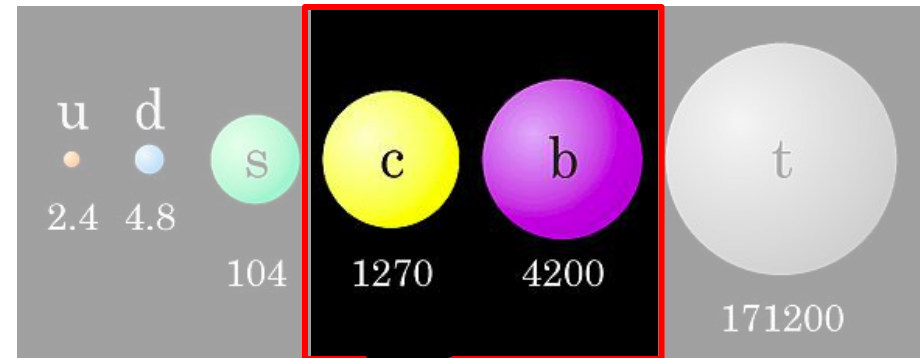
- Az összes hagyományos anyagot a két könnyű kvark alkotja
- Nehéz kvarkok csak instabil részecskékben fordulnak elő
 - nehezebb kelteni
 - hamar elbomlik



- **Charm, bottom:** "pont jó" tömeg
- Kezdeti, kemény folyamatokban keletkeznek
- A reakció során mindvégig megmaradnak
 - **Momentumtól függetlenül**
- Közben kölcsönhatnak a plazmával
 - **Kinematika, transzport, hőmérséklet**

Mire jók a nehéz kvarkok?

- Az összes hagyományos anyagot a két könnyű kvark alkotja
- Nehéz kvarkok csak instabil részecskékben fordulnak elő
 - nehezebb kelteni
 - hamar elbomlik



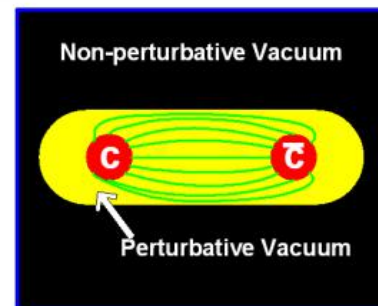
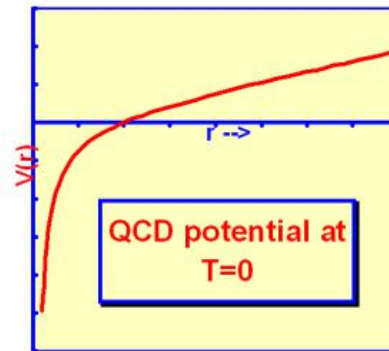
- **Charm, bottom:** "pont jó" tömeg
- Kezdeti, kemény folyamatokban keletkeznek
- A reakció során mindvégig megmaradnak
 - Momentumtól függetlenül
- Közben kölcsönhatnak a plazmával
 - Kinematika, transzport, hőmérséklet

Ideális eszköz a QGP megértésére (csak legyen elég sok!)

Kvarkónium a QGP-ban

- Kvarkónium: kötött nehézkvark-pár
 - Charmonium ($c\bar{c}$): J/Ψ , Ψ' , χ_c
 - Bottomonium ($b\bar{b}$): $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$, χ_B

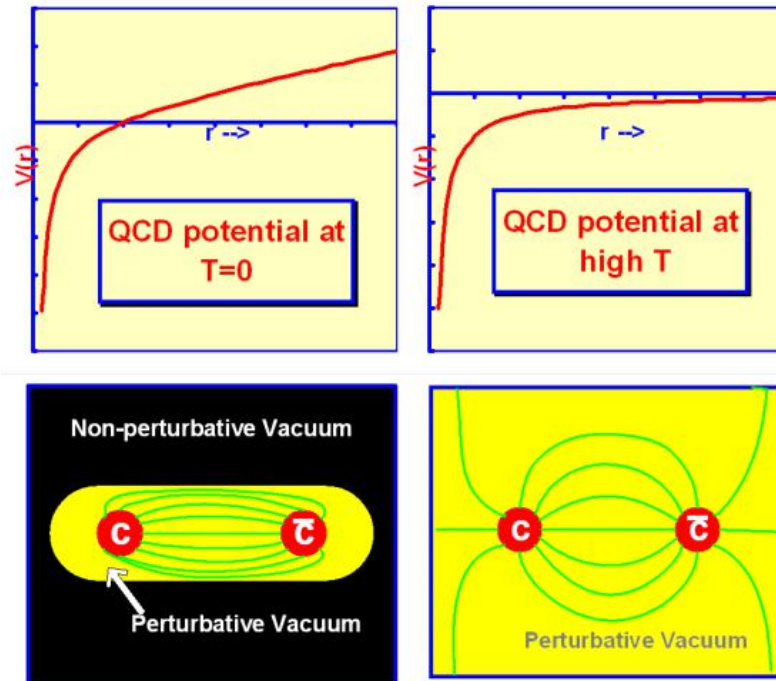
$$V = -\frac{\alpha_s(r)}{r}$$



Kvarkónium a QGP-ban

- Kvarkónium: kötött nehézkvark-pár
 - Charmonium ($c\bar{c}$): J/Ψ , Ψ' , χ_c
 - Bottomonium ($b\bar{b}$): $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$, χ_B
- Hőmérsékletfüggő potenciál

$$V = -\frac{\alpha_s(r)}{r}$$



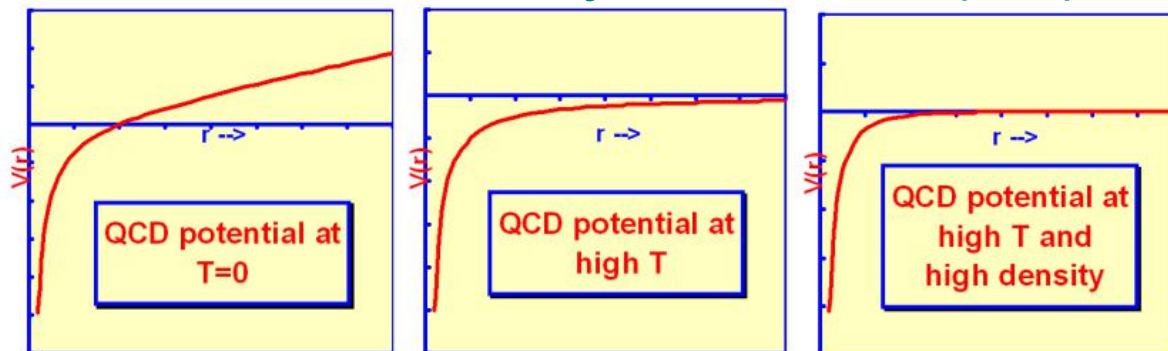
Kvarkónium a QGP-ban

- Kvarkónium: kötött nehézkvark-pár
 - Charmonium ($c\bar{c}$): J/Ψ , Ψ' , χ_c
 - Bottomonium ($b\bar{b}$): $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$, χ_B
- Hőmérsékletfüggő potenciál
- Debye-árnyékolás \rightarrow disszociáció a plazmában

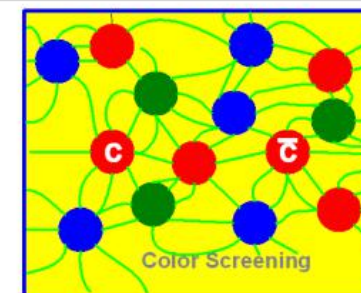
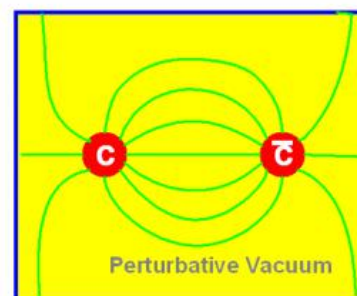
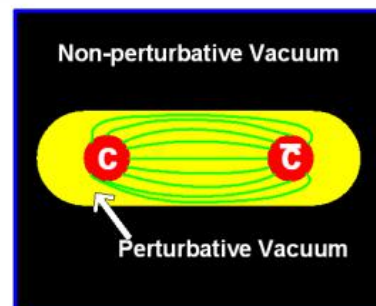
T. Matsui, H. Satz, Phys.Lett. B178, 416 (1986)

Debye-árnyékolás

$$V = -\frac{\alpha_s(r)}{r} \exp\left(\frac{-r}{r_D}\right)$$

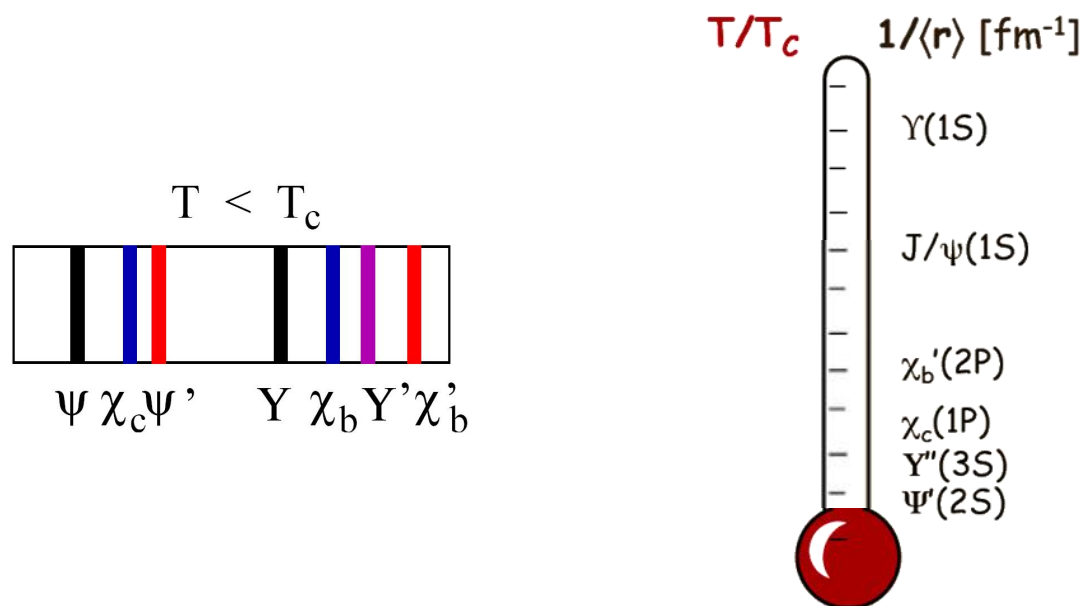


$$r_D \propto \frac{1}{\sqrt[3]{n}}$$



A kvarkónium-hőmérő

- Szekvenciális disszociáció:
Az egyes kvarkónium-állapotok "olvadási" hőmérséklete a kötési energiától függ

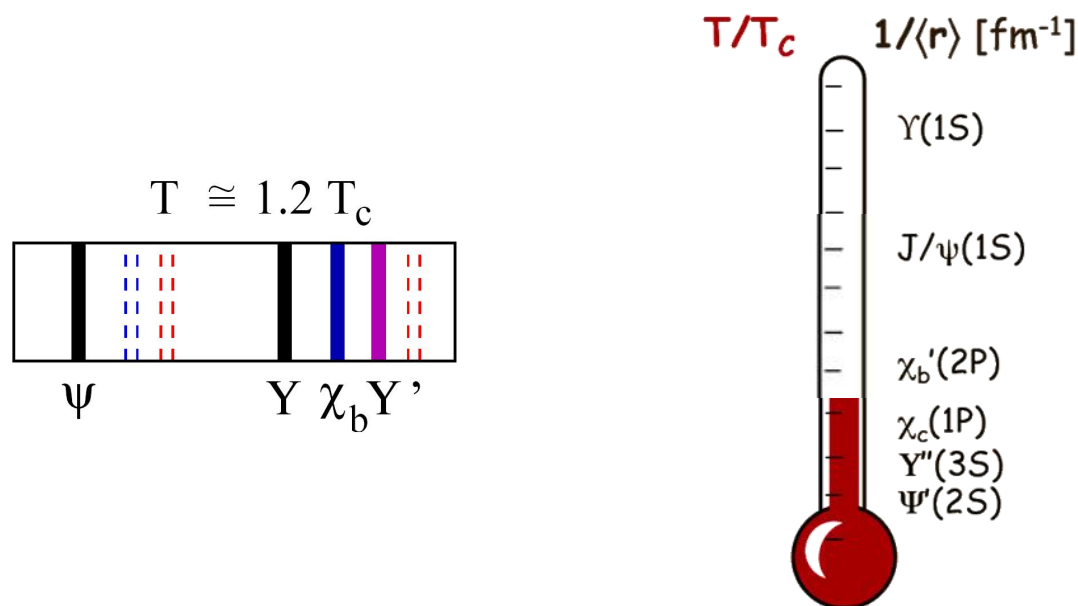


→ A kvarkónium a plazma hőmérőjeként használható

Á. Mócsy, P. Petreczky, Phys. Rev. D77, 014501 (2008)

A kvarkónium-hőmérő

- Szekvenciális disszociáció:
Az egyes kvarkónium-állapotok "olvadási" hőmérséklete a kötési energiától függ

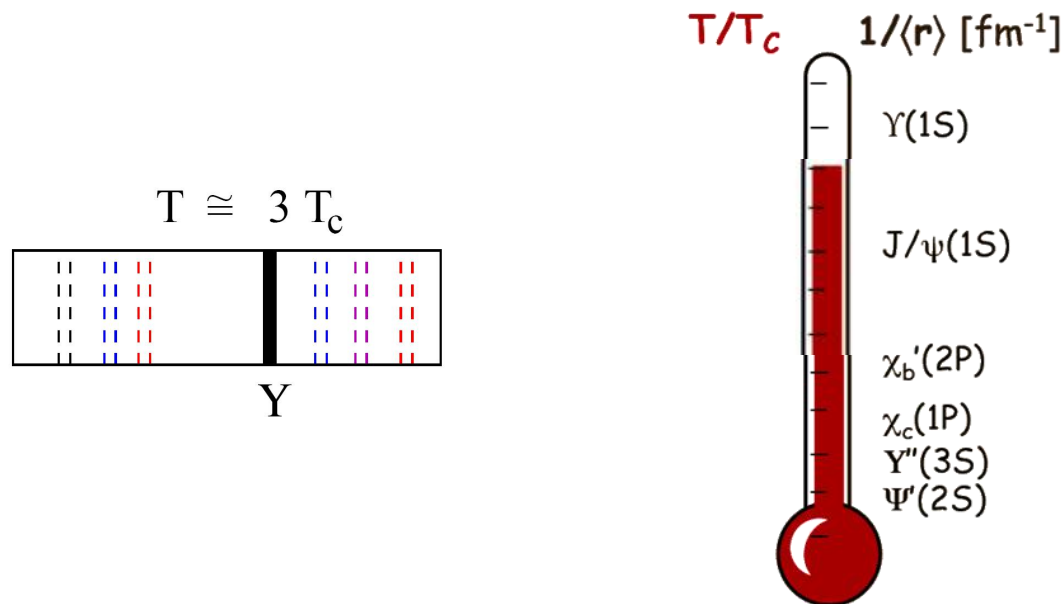


→ A kvarkónium a plazma hőmérőjeként használható

Á. Mócsy, P. Petreczky, Phys. Rev. D77, 014501 (2008)

A kvarkónium-hőmérő

- Szekvenciális disszociáció:
Az egyes kvarkónium-állapotok "olvadási" hőmérséklete a kötési energiától függ



→ A kvarkónium a plazma hőmérőjeként használható

Á. Mócsy, P. Petreczky, Phys. Rev. D77, 014501 (2008)

A hőmérsékletmérés komplikációi

- Kvar-k-antikvar-k pár kötésének erőssége
- Kezdeti állapottól való függés
- Hideg maganyag hatása
- Plazma időfejlődése
- Rekombináció ($q\bar{q}$ párok a QGP-ben)
A charmoniumnál jelentős effektus!
- Láncbomlások $\Upsilon(2S) \rightarrow \Upsilon(1S)$ stb.

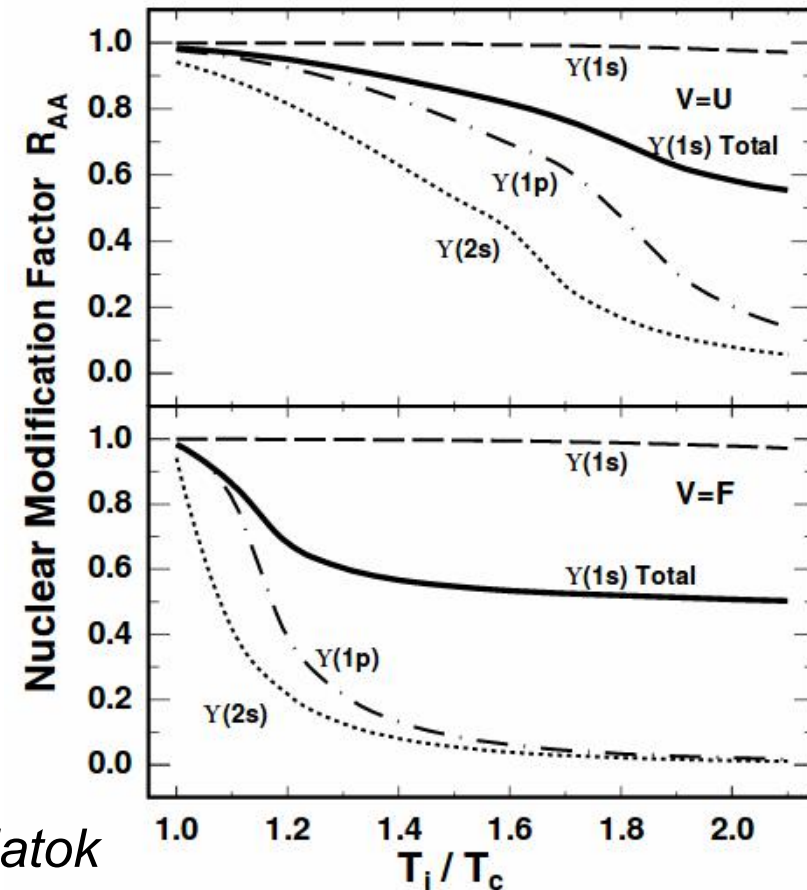
A hőmérsékletmérés komplikációi

- Kvar-antikvar pár kötésének erőssége
- Kezdeti állapottól való függés
- Hideg maganyag hatása
- Plazma időfejlődése
- Rekombináció ($q\bar{q}$ párok a QGP-ben)
A charmoniumnál jelentős effektus!
- Láncbomlások $\Upsilon(2S) \rightarrow \Upsilon(1S)$ stb.
- Számos modell, valamelyest eltérő jóslatok

Strickland-Bazow, NPA 879 (2012), 25

Emerick-Zhao-Rapp, Eur.Phys.J A48 (2012) 72

Liu-Chen, PLB 697 (2011) 32

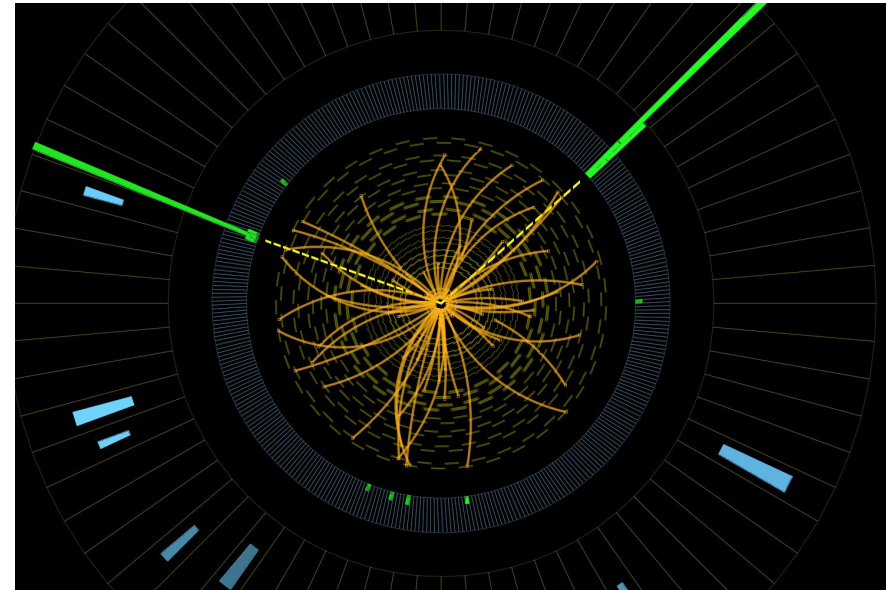


Üpszilon mezonok mérése (LHC)

- $\Upsilon \rightarrow \mu^+\mu^-$ bomlás megfigyelése
 - Energetikus müonpár keresése

- Invariáns tömeg rekonstrukciója

$$m^2 = E^2 - \mathbf{p}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2$$

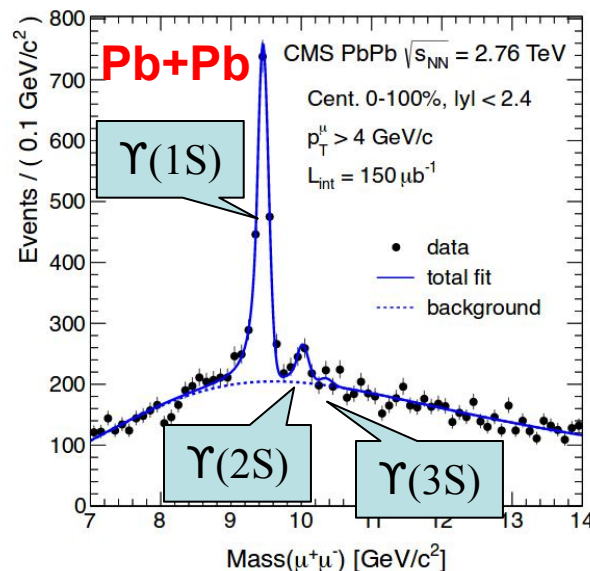
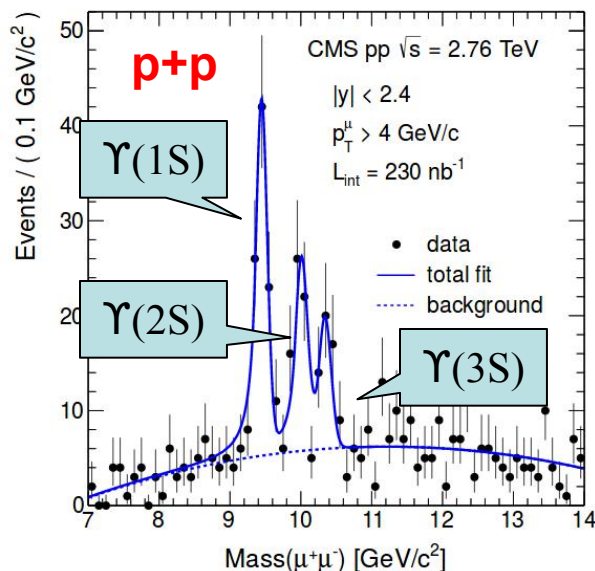
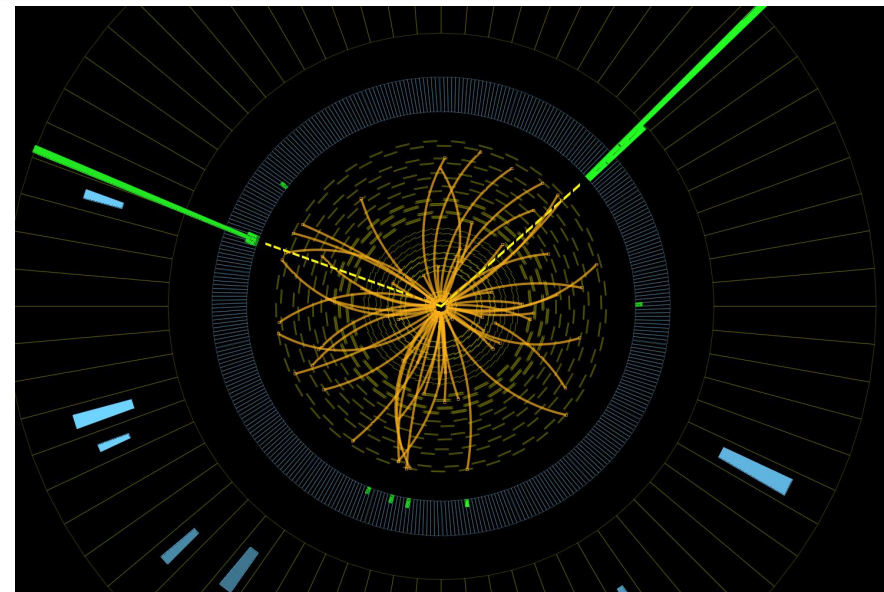


Üpszilon mezonok mérése (LHC)

- $\Upsilon \rightarrow \mu^+\mu^-$ bomlás megfigyelése
 - Energetikus müonpár keresése

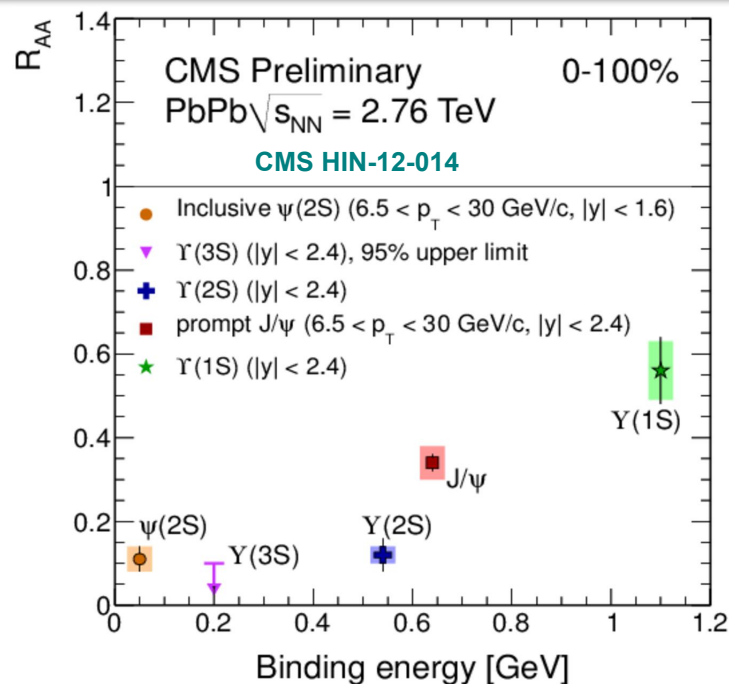
- Invariáns tömeg rekonstrukciója

$$m^2 = E^2 - \mathbf{p}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2$$

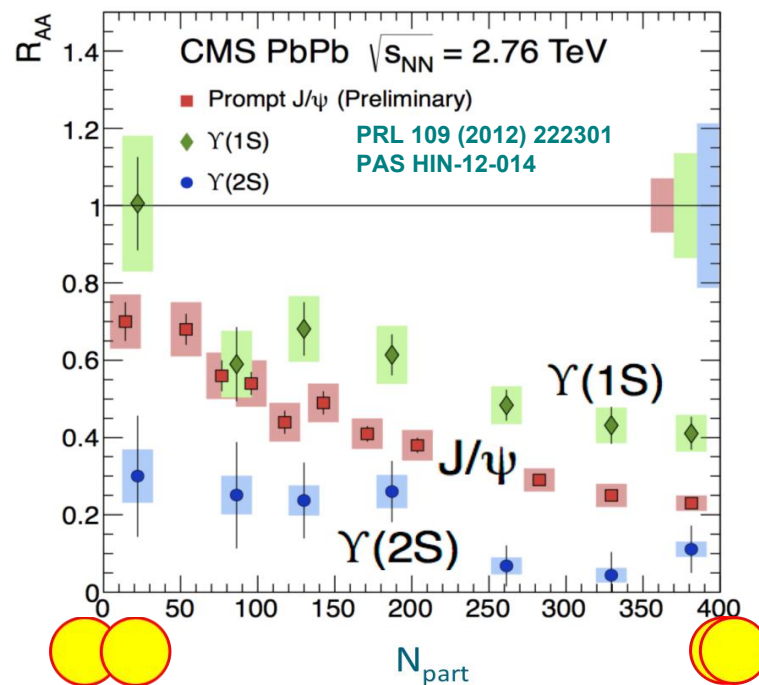


- Hozam kiszámítása (p+p és Pb+Pb)
 - Háttér meghatározása, leválasztása
 - Csúcsterület meghatározása
 - Normálás az ütközések számával

R_{AA} és hőmérséklet (LHC)

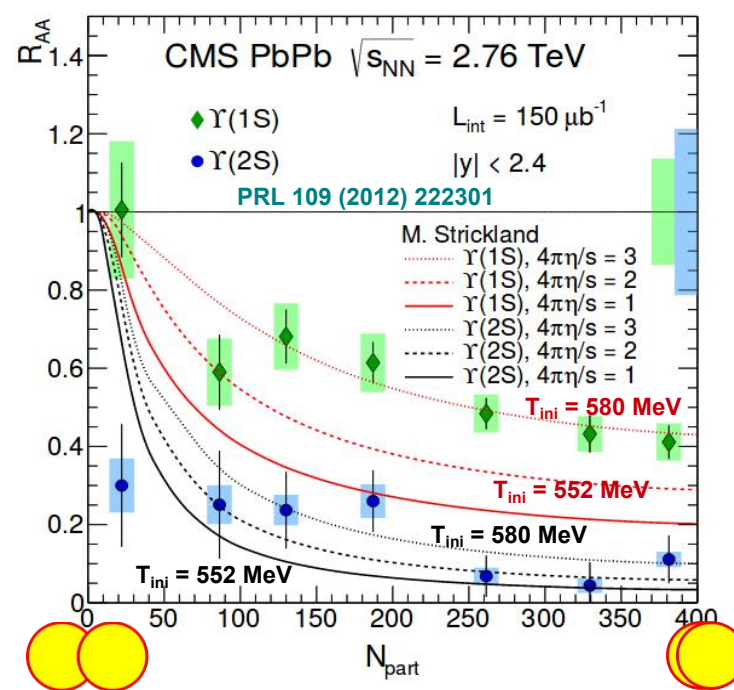
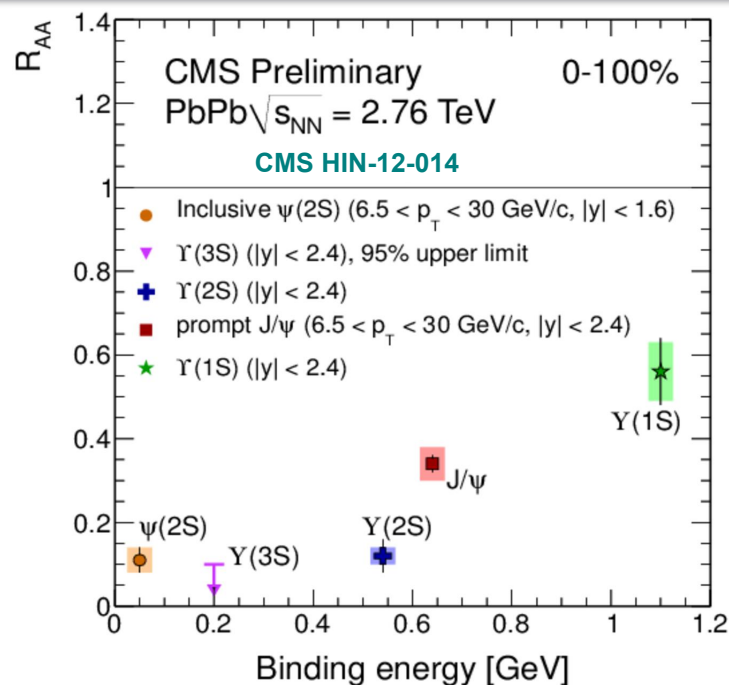


- Kisebb kötési energia
→ erősebb mag-módosulás



- Centrális ütközések
→ erősebb mag-módosulás

R_{AA} és hőmérséklet (LHC)



- Kisebb kötési energia
→ erősebb mag-módosulás

- Centrális ütközések
→ erősebb mag-módosulás

- A QGP kezdeti hőmérséklete különböző modellszámítások szerint:

- RHIC $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au: $T_{ini} \sim 300 - 440$ MeV
- LHC $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV Pb+Pb: $T_{ini} \sim 500 - 610$ MeV
- LHC $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV Pb+Pb: $T_{ini} \sim 600 - 700$ MeV

NPA 879 (2012), 25
Eur.Phys.J A48 (2012) 72
PLB 697 (2011) 32
Universe 2 (2016) no.3, 16

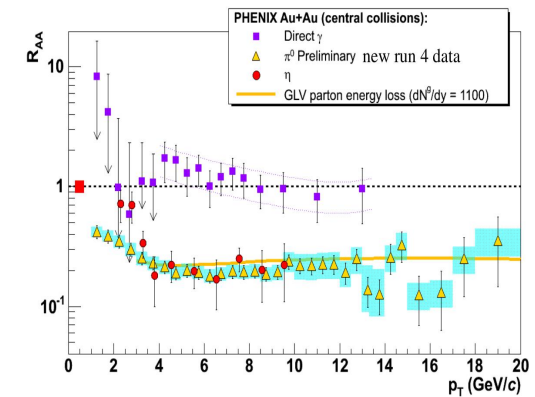
Összefoglalás és kitekintés

A kvark-gluon plazma - összefoglalás

Jet-elnyomás:

- Hadron $R_{AA}^h \sim 0.2$ a RHIC $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV/ c^2 -es centrális nehézion-ütközéseiben
- Foton $R_{AA}^\gamma \sim 1$

→ **sűrű színes közeg jön létre**

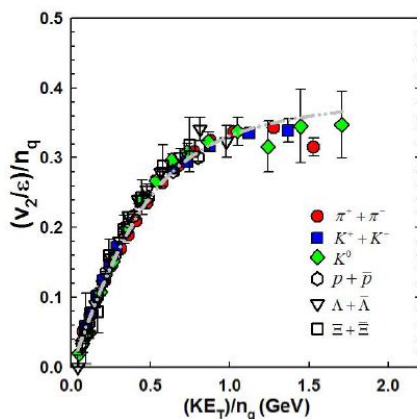


A kvark-gluon plazma - összefoglalás

Jet-elnyomás:

- Hadron $R_{AA}^h \sim 0.2$ a RHIC $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV/ c^2 -es centrális nehézion-ütközéseiben
- Foton $R_{AA}^\gamma \sim 1$

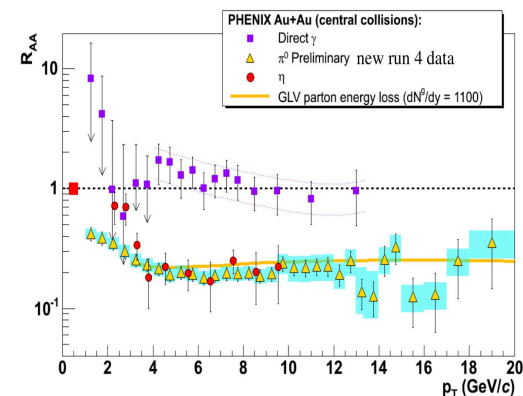
→ **sűrű színes közeg jön létre**



Erős kollektivitás:

- Hadronok erős elliptikus folyást mutatnak - v_2
- Kvarkszám-skálázás (RHIC energián pontos!)
- Rendkívül alacsony viszkozitás

→ **kvarkok közel tökéletes folyadék**

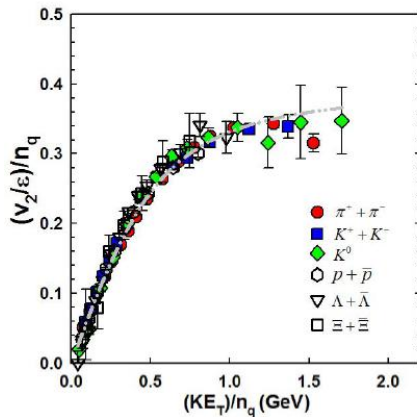


A kvark-gluon plazma - összefoglalás

Jet-elnyomás:

- Hadron $R_{AA}^h \sim 0.2$ a RHIC $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV/ c^2 -es centrális nehézion-ütközéseiben
- Foton $R_{AA}^\gamma \sim 1$

→ **sűrű színes közeg jön létre**



Erős kollektivitás:

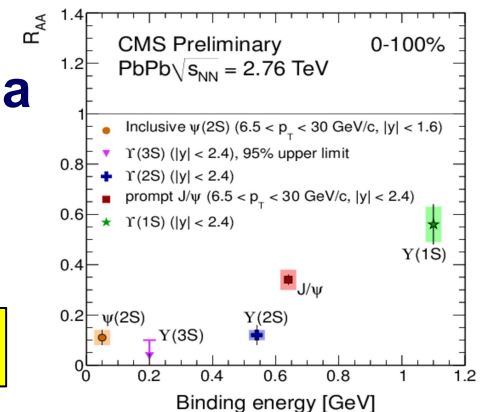
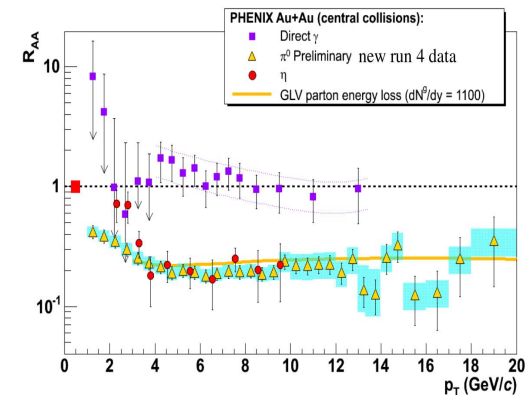
- Hadronok erős elliptikus folyást mutatnak - v_2
- Kvarkszám-skálázás (RHIC energián pontos!)
- Rendkívül alacsony viszkozitás

→ **kvarkok közel tökéletes folyadék**

Kvarkónium-állapotok szekvenciális elnyomása

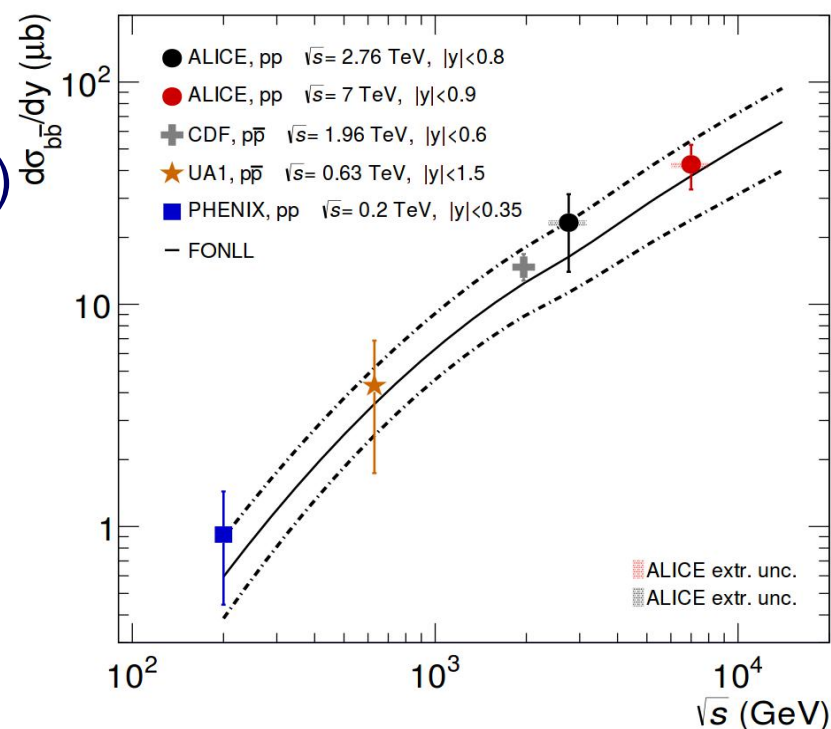
- Kötési energia szerint rendezett elnyomódás
- $T_{ini} \sim 500$ MeV $\gg T_c$ az LHC $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV-es centrális Pb+Pb ütközéseiben

→ **a kvarkanyag valóban forró ==> sQGP**



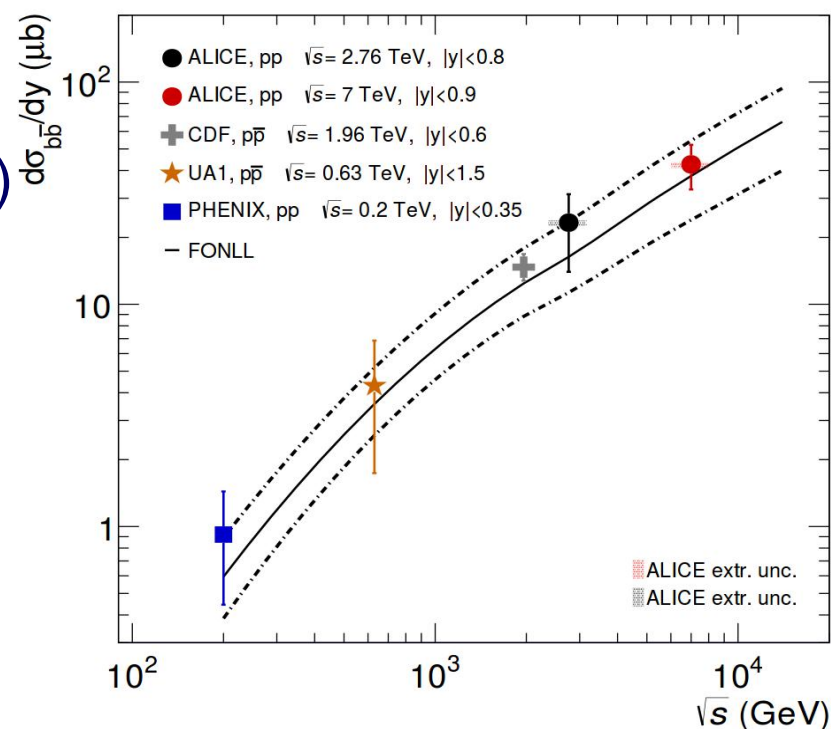
Kitekintés

- A RHIC-korszak (2000-)
 - A kvark-gluon plazma létének bebizonyítása
 - Alapvető tulajdonságainak megértése
 - Precíziós könnyűkvark-mérések
 - Nehézkvark-mérések kezdete
- A RHIC-II/korai LHC korszak (2010-)
 - Nagyobb energia
 - Magasabb ütközési gyakoriság
 - Precíziós charm-mérések
 - Alapvető beauty-mérések
- A LHC Run-3 korszaka (2020-)
 - Detektor- és gyorsítófejlesztések
 - Kb. 100-szoros ütközésszám
 - Részletgazdag beauty-mérések



Kitekintés

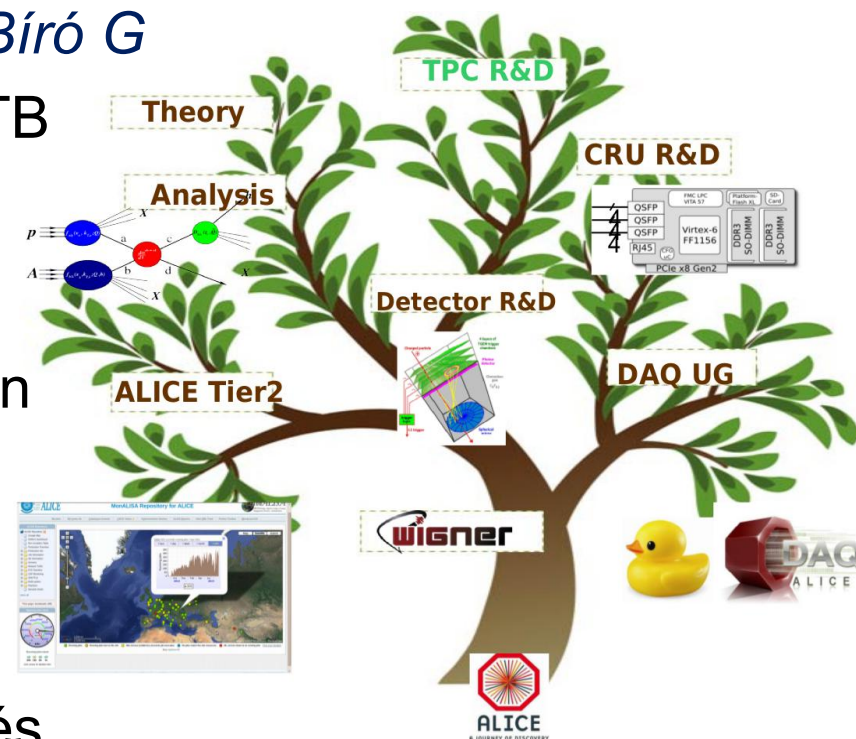
- A RHIC-korszak (2000-)
 - A kvark-gluon plazma létének bebizonyítása
 - Alapvető tulajdonságainak megértése
 - Precíziós könnyűkvark-mérések
 - **Nehézkvark-mérések kezdete**
- A RHIC-II/korai LHC korszak (2010-)
 - Nagyobb energia
 - Magasabb ütközési gyakoriság
 - **Precíziós charm-mérések**
 - **Alapvető beauty-mérések**
- A LHC Run-3 korszaka (2020-)
 - Detektor- és gyorsítófejlesztések
 - Kb. 100-szoros ütközésszám
 - **Részletgazdag beauty-mérések**



A nehéz kvarkok korszaka

Az ALICE-Budapest csoport

- **Physics/Analysis:** *Barnaföldi GG, Lévai P, Varga-Kőfaragó M, Vértési R, Bencédi Gy, Varga Z, Frajna E, Szigeti B, Sudár Á, Misák A, Gyulai L*
 - Charged hadrons, heavy-flavor, correlations, small systems
 - proton-CT development
- **Computing/Grid:** *Barnaföldi GG, Bíró G*
 - T2 Budapest, 1000 cores, 500 TB
- **DAQ UG/service:** *Kiss T, Dávid E, T M Nguyen*
 - Development of the DAQ: design and manufacturing of the CRU
- **Detector Development:** *Varga D, Boldizsár L, Hamar G, Gera Á*
 - Gázdetektor R&D, TPC fejlesztés



Köszönöm a figyelmet!

Vértesi Róbert

vertesi.robert@wigner.mta.hu

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont
Részecske- és Magfizikai Intézete

ALICE-Budapest csoport

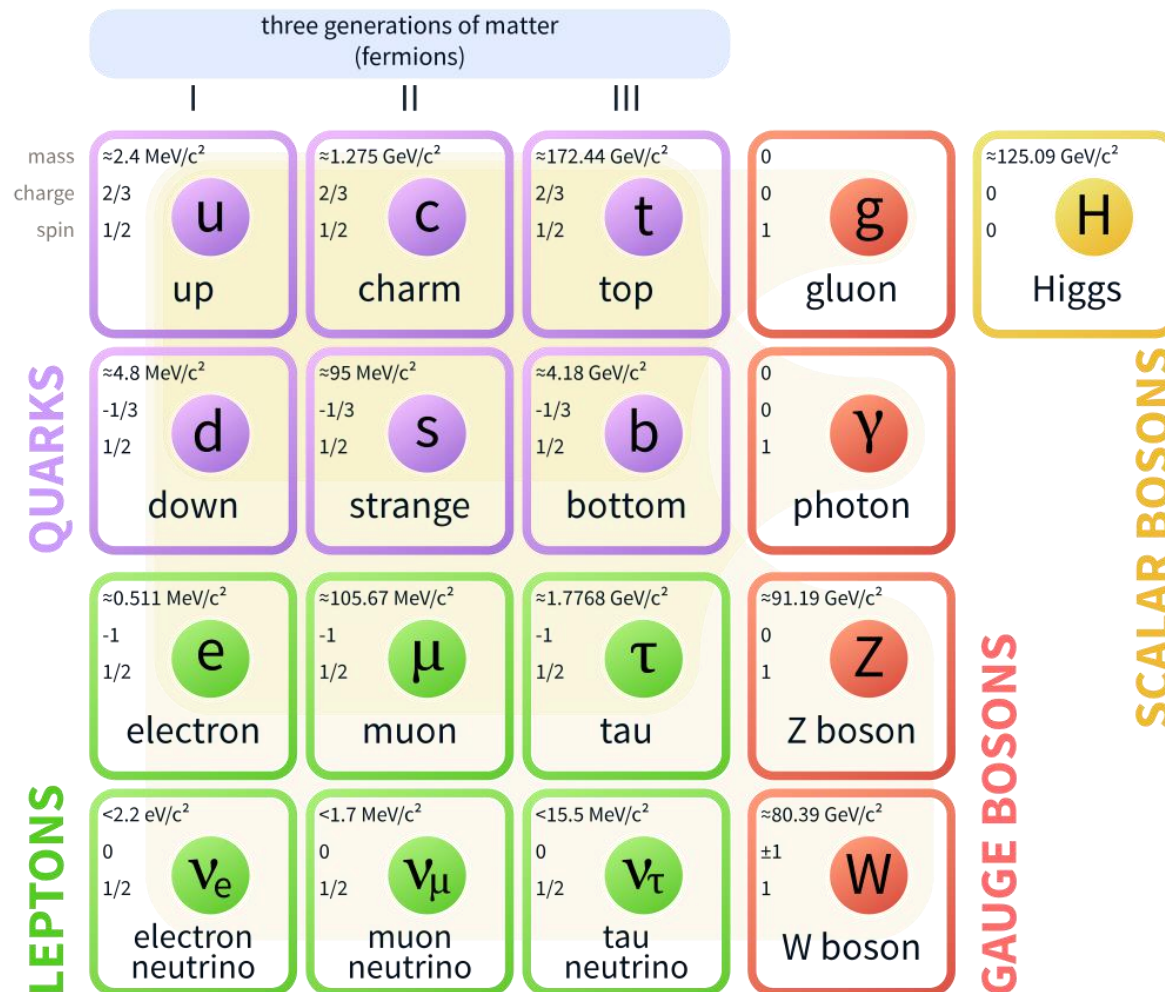
<http://alice.wigner.mta.hu>



ALICE

Elemi részecskék

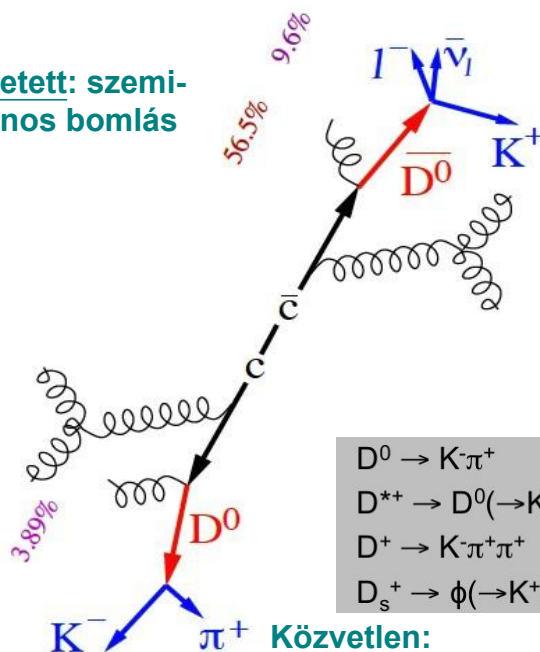
Standard Model of Elementary Particles



A nehéz kvarkok észlelése

- Kvarkbezárás: **c** és **b** közvetett kimutatás lehetséges csak
- Hadronizáció során mezonokká (**D**, **B**) alakul
- Kimutatás:
bomlástermékek azonosítása

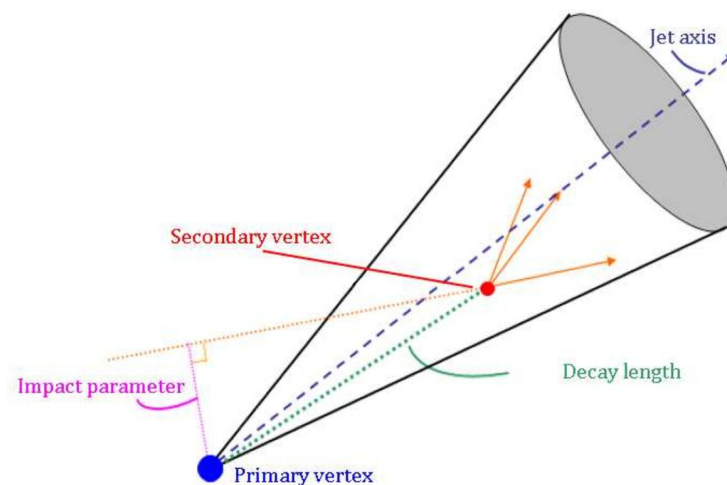
Közvetett: szemi-leptonos bomlás



$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$	BR: 3.88%
$D^{*+} \rightarrow D^0 (\rightarrow K^- \pi^+) \pi^+$	BR: 2.63%
$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$	BR: 9.13%
$D_s^+ \rightarrow \phi (\rightarrow K^+ K^-) \pi^+$	BR: 2.24%

Közvetlen:
hadronos csatorna

a bomlás helyének visszakövetése
(másodlagos vertex rekonstrukciója)

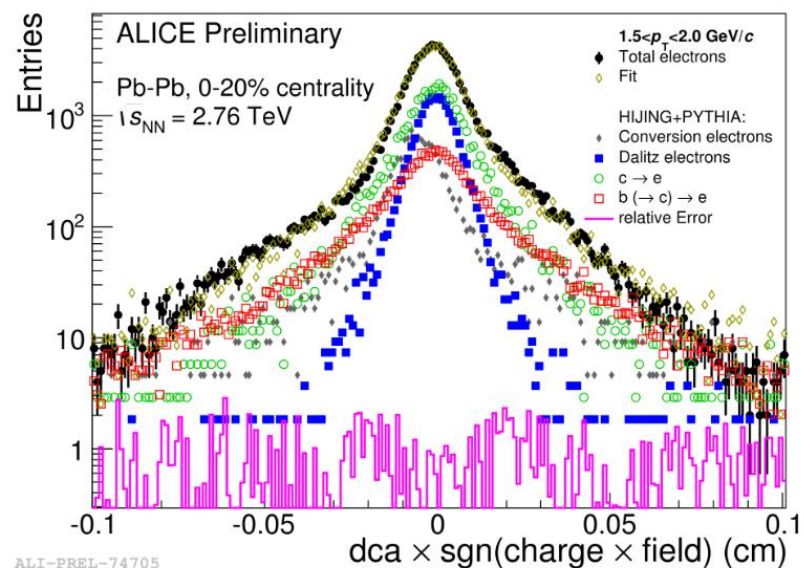
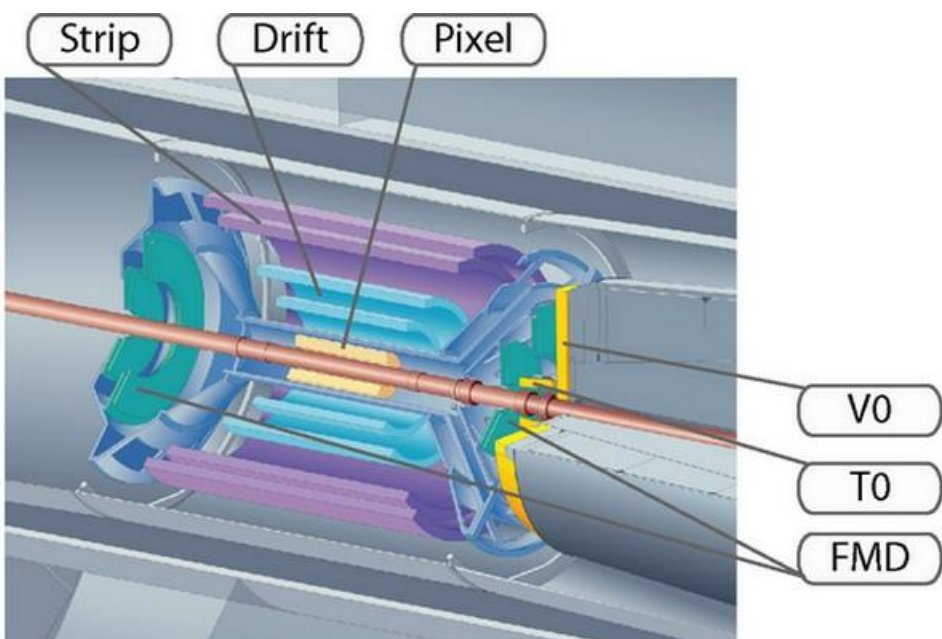


Nehéz kvarkok élettartama: $c\tau(D) \sim 100\text{-}300 \mu\text{m}$
 $c\tau(B) \sim 400\text{-}500 \mu\text{m}$
 Másodlagos vertex felbontása: $<100 \mu\text{m}$

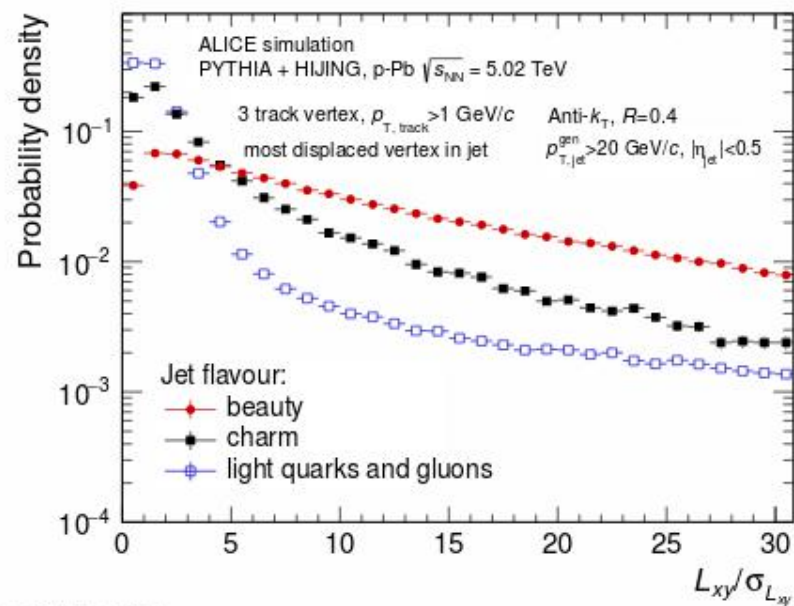
Másodlagos vertex keresése - ITS

- Félvezető technológia
- Másodlagos vertex észlelése

Nehéz kvarkok élettartama: $c\tau(D) \sim 100\text{-}300 \mu\text{m}$
 $c\tau(B) \sim 400\text{-}500 \mu\text{m}$
 Másodlagos vertex felbontása: $<100 \mu\text{m}$



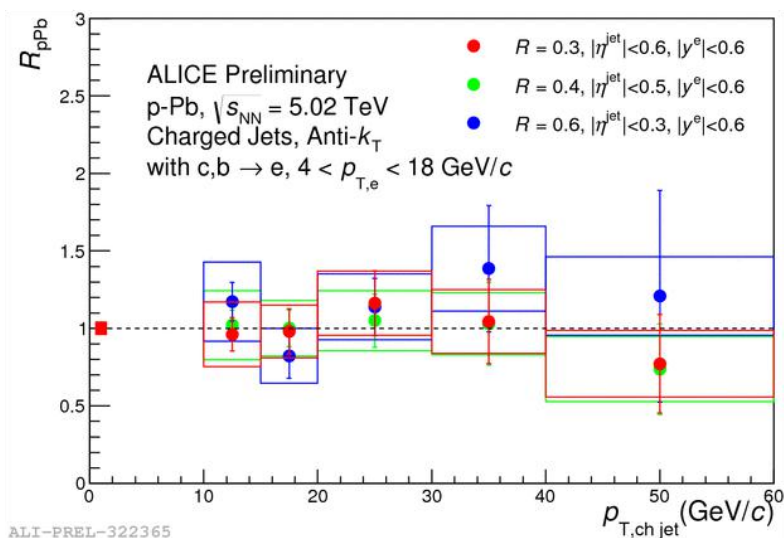
ALI-PREL-74705



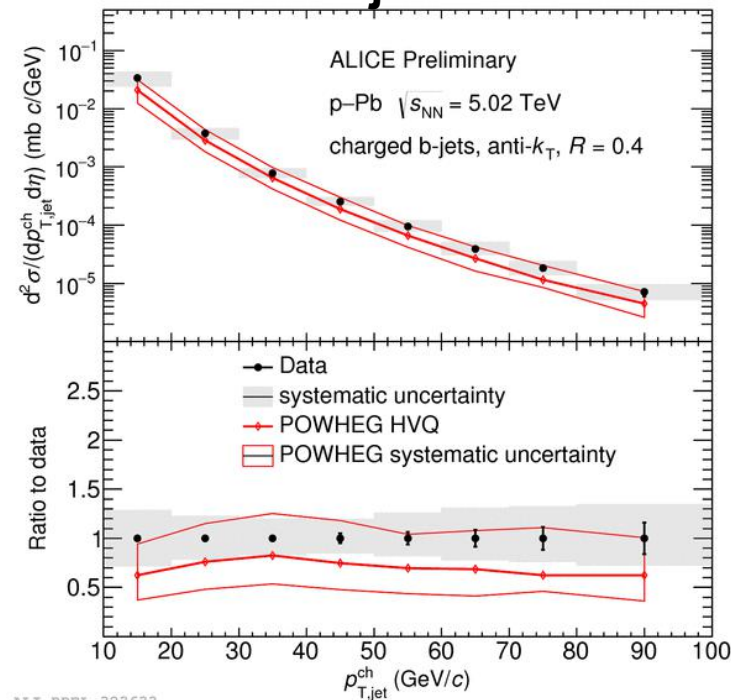
ALI-SIMUL-95610

Nehézkvark-jetek

jets with HFE

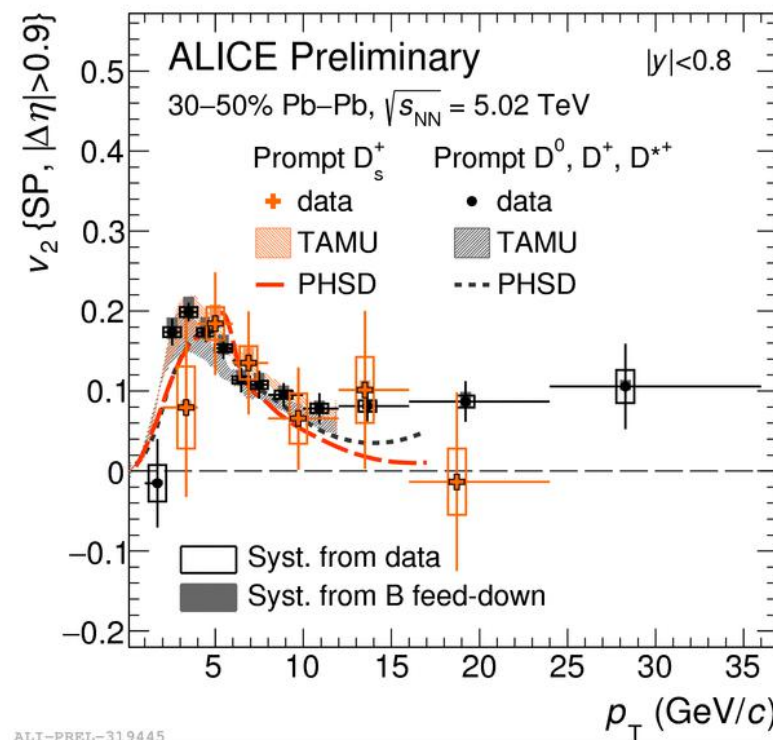
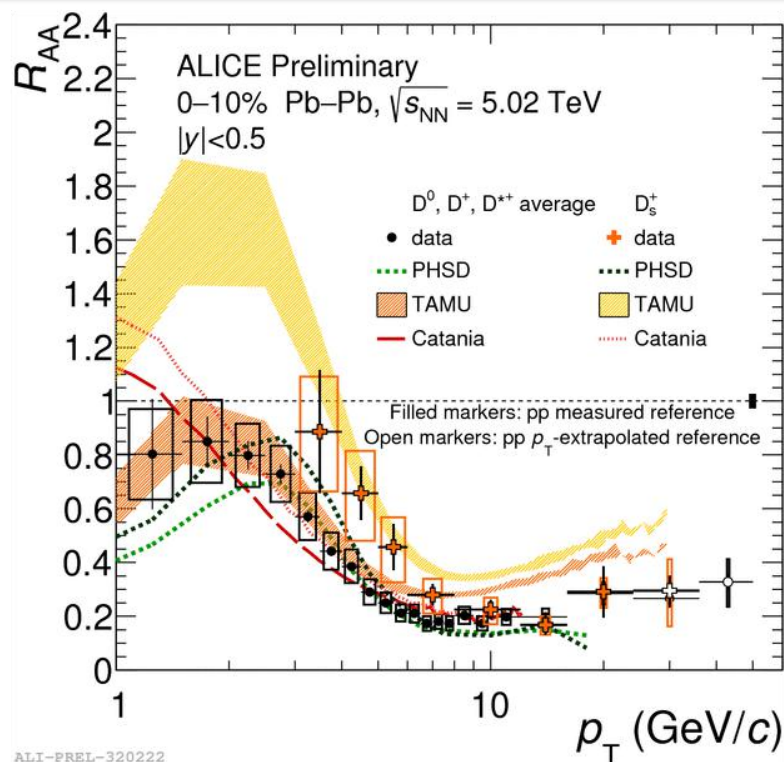


b-jets



- Nehézkvark-jetek alacsony impulzusokig: $p_T = 10$ GeV/c
- **A HFE jetek nem módosulnak szignifikánsan mid-rapiditysnál**
 - Függetlenül a jet-átmérőtől
- A másodlagos vertexekkel azonosított **beauty jetek hatáskeresztmetszetét leírja a POWHEG HVQ x A (pp)**

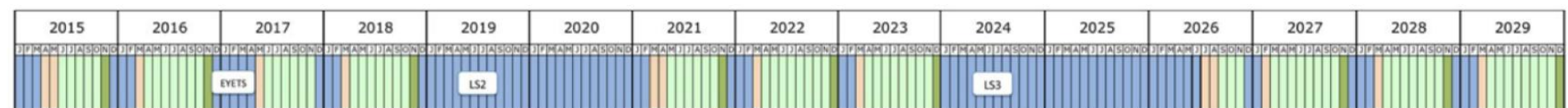
Kollektív viselkedés: charm



TAMU: PLB 735,445-450(2014)
PHSD: PRC 92, 014910 (2015)
Catania: EPJC (2018) 78, 348

- Új kis p_T -s adatok: erős megszorítás a modellekre
 - Feladat: **D** és **D_s** R_{AA} és v_2 szimultán leírása
 - **Charm és könnyű kvarkok koaleszcenciája** árnyékolással és ütközési/sugárzási energiaveszteséggel

ALICE Upgrade for Run-3 and Run-4



Run 2: $\mathcal{L}_{\text{Pb-Pb}} = 1.0 \text{ nb}^{-1}$

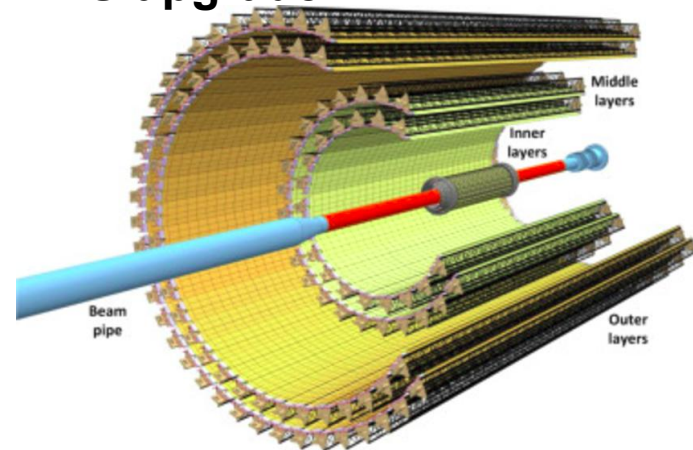
Run 3: $\mathcal{L}_{\text{Pb-Pb}} = 6.0 \text{ nb}^{-1}$

Run 4: $\mathcal{L}_{\text{Pb-Pb}} = 7.0 \text{ nb}^{-1}$

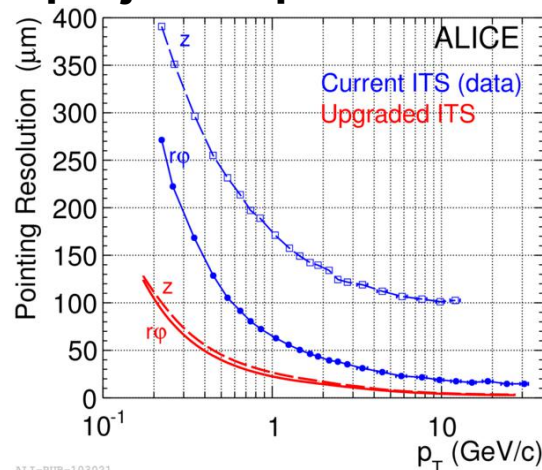


- Up to 50 kHz Pb-Pb interaction rate
- Requested Pb-Pb luminosity: 13 nb⁻¹ (50-100x Run2 Pb-Pb)
- Improved tracking efficiency and resolution at low p_T
- Detector upgrades: ITS, TPC, MFT, FIT
- Faster, continuous readout

ITS upgrade

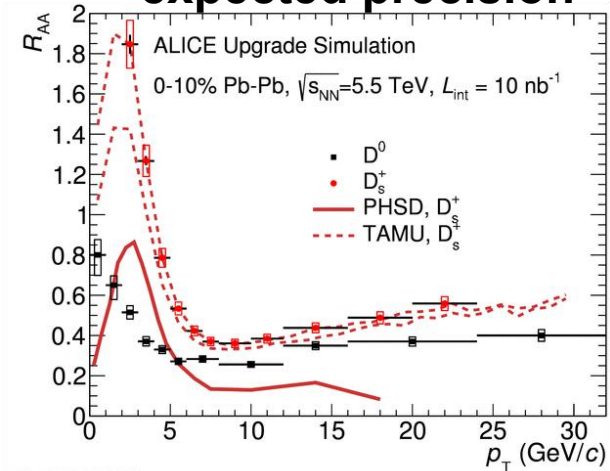


projected performance



ALI-PUB-103021

expected precision



ALI-SIMUL-308773

Relativisztikus hidrodinamika

- Energia-impulzus tenzor: $T_{\mu\nu} = wu_\mu u_\nu - pg_{\mu\nu}$
 - Entalpia: $w = \varepsilon + p$
 - E,p megmaradása: $\partial_\nu T^{\mu\nu} = 0$

--> $wu^\nu \partial_\nu u^\mu = (g^{\mu\rho} - u^\mu u^\rho) \partial_\rho p.$

- Relativisztikus...
 - Euler-egyenlet: $w\partial_\mu u^\mu = -u^\mu \partial_\mu \varepsilon.$
 - Energiamegmaradás: $\sum \mu_i \partial_\mu (n_i u^\mu) = 0.$
 - Töltésmegmaradás: $\partial_\mu (\sigma u^\mu) = 0.$