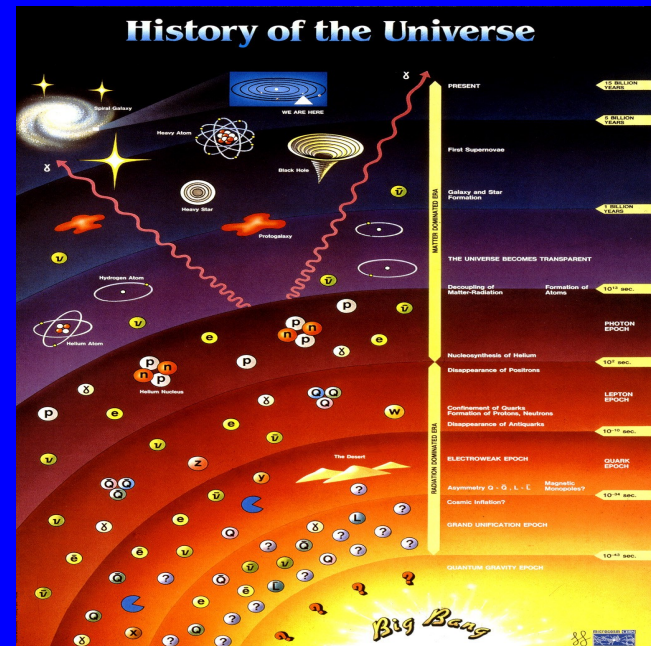


Wolf György (Wigner FK, Budapest)



Tartalom:

- Bevezetés kvantum színdinamikába
- Magfizika
- Folyadék-gáz átmenet
- Királis szimmetria, QGP, szín szupravezetés
- Javaslatok

Pre QCD

- Erősen kölcsönható “elemi” részecskék száma magas, hadronok: barionok: p, n, Δ, \dots , mezonok: π, ρ, η, \dots
- Multiplettek azonos spin-paritással, hasonló tömeggel
gyengén sérülő szimmetria degenerált állapotai
- Felépíthetjük a hadronokat 3 létező részecskéből: p, n, Λ
ez nem magyarázza a tömegeket, multipletteket
- Szimmetria csoport: $SU(3)_{\text{iz}} \supset SU(2)_{\text{izospin}} \otimes U(1)_{\text{ritka}}$
- Alaprepresentáció vektoraiból, nem megfigyelt kvarkokból: u, d, s .
Mezonok: $M \equiv q\bar{q}$, barionok: $B \equiv qqq$

Szimmetriák

- Szimmetriacsoportot Hilbert-téren unitér-operátorokkal ábrázoljuk
- Az egyrészecske-állapotok invaráns alteret feszítenek ki, sokrészecske-állapotok tenzorként transzformálódnak
- A szimmetria-csoport kommutál a Poincaré-csoporttal
- Mivel van 8 állapotból álló multipllett, így a csoportnak kell lennie 8-dim irreducibilis ábrázolásának
- A csoport tartalmazza az izospin csoportot és a ritkaságmegmaradást.

Kvark-modell

KVARK <i>Zamat, íz</i> <i>(Flavor)</i>	Jel	Tömeg M GeV	El. töltés q/e	Spin Par. J_π	Izospin T T_z	Ba- rion B	Stran- ge S	Cha- rm C	Top T*	Bott- om B*
Up	u	0,005	+2/3	½ +	½ +½	1/3	0	0	0	0
Down	d	0,009	-1/3	½ +	½ -½	1/3	0	0	0	0
Charm	c	1,350	+2/3	½ +	0 0	1/3	0	+1	0	0
Strange	s	0,170	-1/3	½ +	0 0	1/3	-1	0	0	0
Top	t	174,3	+2/3	½ +	0 0	1/3	0	0	+1	0
Bottom	b	4,4	-1/3	½ +	0 0	1/3	0	0	0	-1

- Új részecskék → új kvarkok: **c, b, t**
- Pszeudoskalár oktett: $\pi^+ = u\bar{d}$, $\pi^- = d\bar{u}$, $\pi^0 = (u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$,
 $K^+ = u\bar{s}$, $K^0 = s\bar{d}$, $\bar{K}^0 = d\bar{s}$, $K^- = s\bar{u}$, $\eta = (u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})/\sqrt{6}$
- Barion oktett: $p = uud$, $n = udd$, $\Xi^0 = uss$, $\Xi^- = dss$, $\Sigma^+ = uus$,
 $\Sigma^- = dds$, $\Sigma^0 = s(u\bar{d} + d\bar{u})/\sqrt{2}$, $\Lambda = s(u\bar{d} - d\bar{u})/\sqrt{2}$

Szín

Probléma:

összetett rendszer alapállapota általában $L=0$

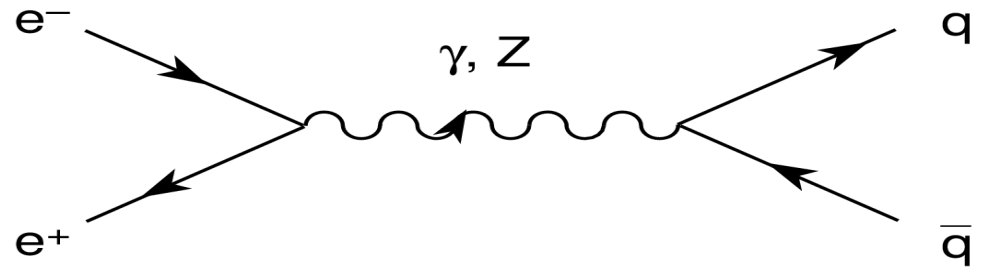
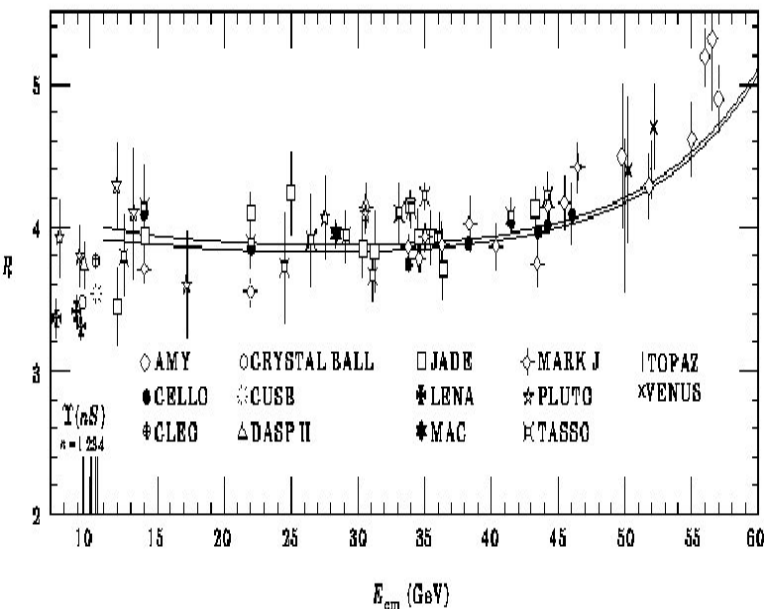
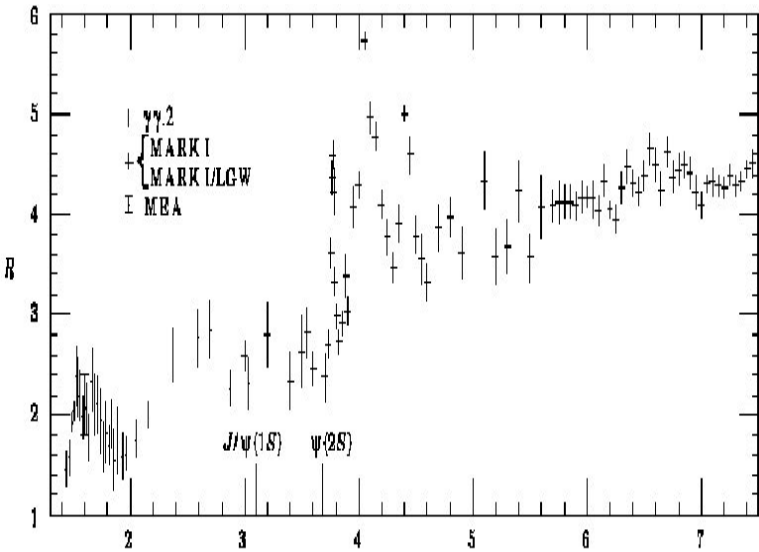
Δ^{++} barion állapota $u^\uparrow u^\uparrow u^\uparrow$, és relatív impulzusmomentum 0

Hullámfüggvény szimmetrikus, de a Δ^{++} fermion

Probléma megoldása egy új kvantumszám, a szín

- $\Delta^{++} = 1/\sqrt{6} \varepsilon^{\alpha\beta\gamma} |u^\uparrow_\alpha u^\uparrow_\beta u^\uparrow_\gamma\rangle$, $\alpha\beta\gamma$ 3 szín
- Legalább 3 színre van szükség, $N_c \geq 3$

Kvark szabadsági fokok



$$R_{e^+e^-} \equiv \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} \approx \frac{\sum_q \sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$

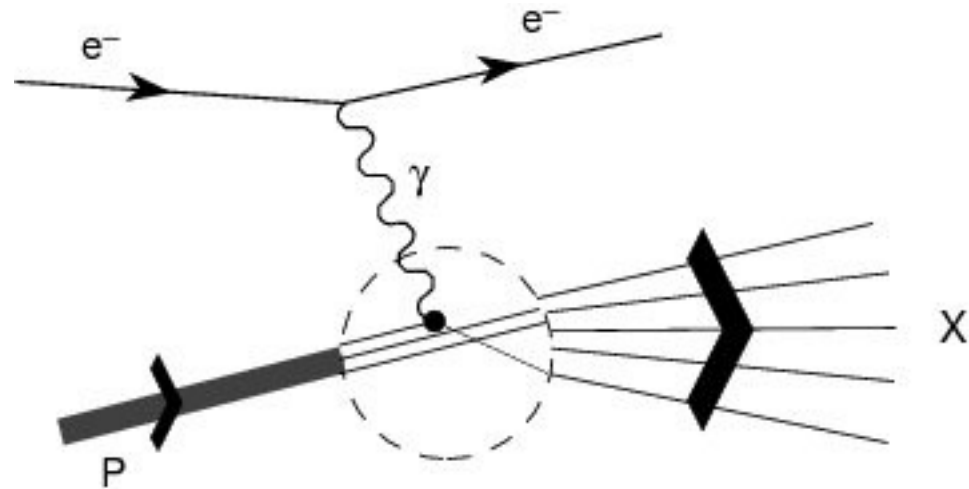
$$= N_C \sum_{f=1}^{N_f} Q_f^2 = N_C \sum_{f; 4m_q^2 \geq S} Q_f^2$$

$$= \begin{cases} \frac{2}{3} N_C = 2 & (N_f = 3 : u, d, s) \\ \frac{10}{9} N_C = \frac{10}{3} & (N_f = 4 : u, d, s, c) \\ \frac{11}{9} N_C = \frac{11}{3} & (N_f = 5 : u, d, s, c, b) \end{cases}$$

Erős kölcsönhatás

SLAC kísérlet

p alkotóelemei
nagyenergián
szabadon mozognak



Az erőskölcsönhatás ízfüggetlen

Légyen szín az erőskölcsönhatás töltése

- Szín egzakt szimmetria
- $N_c=3$. Kvarkok a triplet reprezentációhoz tartoznak
- Bezárási hipotézis: hadronikus állapotok szintelenek
- Aszimptotikus szabadság

A kvarkok közötti kölcsönhatást a gluonok biztosítják. A kvarkok 3 “színben” léteznek a gluonok is “színesek”, szín-antiszín párjuk van.



Csak színtelen állapotokat figyeltünk meg. 3 különböző színű kvark, vagy azonos színű-antiszínű kvark+antikvark pár színtelen lehet.

π^0



Proton



Neutron



K^0



B



J/ψ

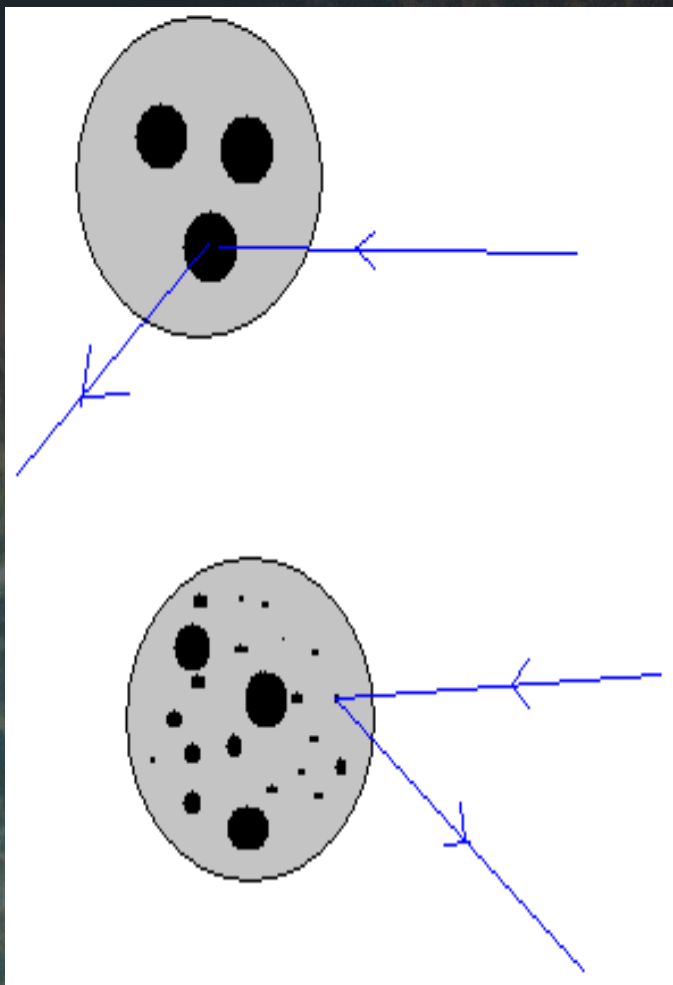


Lambda



MESONS

BARYONS



Alacsony energián csak a 3 valencia kvark látszik. Magasabb energián egyre több virtuális kvarkot, gluont látunk.

QCD Lagrange-függvény

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{QCD}} &\equiv -\frac{1}{4} G_a^{\mu\nu} G_{\mu\nu}^a + \sum_f \bar{q}_f (i\gamma^\mu D_\mu - m_f) q_f \\ &= -\frac{1}{4} (\partial^\mu G_a^\nu - \partial^\nu G_a^\mu)(\partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a) + \sum_f \bar{q}_f^\alpha (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f) q_f^\alpha \\ &\quad + g_s G_a^\mu \sum_f \bar{q}_f^\alpha \gamma_\mu \left(\frac{\lambda^a}{2}\right)_{\alpha\beta} q_f^\beta \\ &\quad - \frac{g_s}{2} f^{abc} (\partial^\mu G_a^\nu - \partial^\nu G_a^\mu) G_\mu^b G_\nu^c - \frac{g_s^2}{4} f^{abc} f_{ade} G_b^\mu G_c^\nu G_\mu^d G_\nu^e\end{aligned}$$

$$D_\mu = \partial_\mu - ig_s A_\mu, \quad A_\mu = \sum_{a=1}^8 A_\mu^a \lambda^a / 2, \quad G_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ig_s [A_\mu, A_\nu]$$

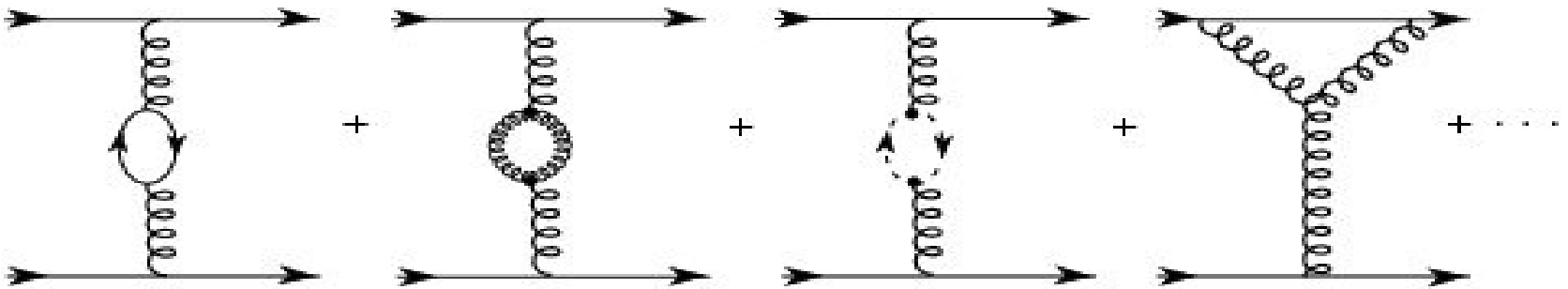
1. sor: kinetikus energiák

2. sor: kvark-gluon kölcsönhatás

3. sor: gluonok önkölcsönhatása

Futó csatolási állandó

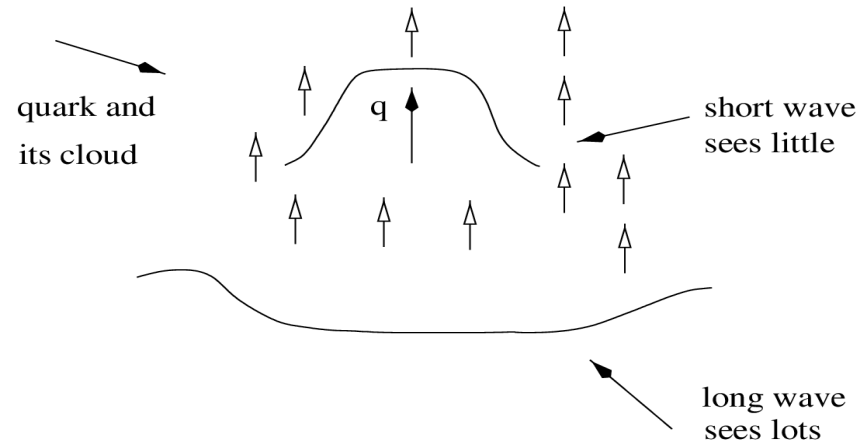
Kvark-kvark csatolási állandót renormáljuk



Gluonok önkölcsönhatása

antileárnyékolás

színtöltés eloszlás



Klasszikus Magfizika

Erőskölcsönhatás $T=0$, $\rho \approx \rho_0$ -nál

Kérdések:

- nukleon potenciálok
- magok szerkezete
- Big Bang nukleoszintézis, nap energiatermelése

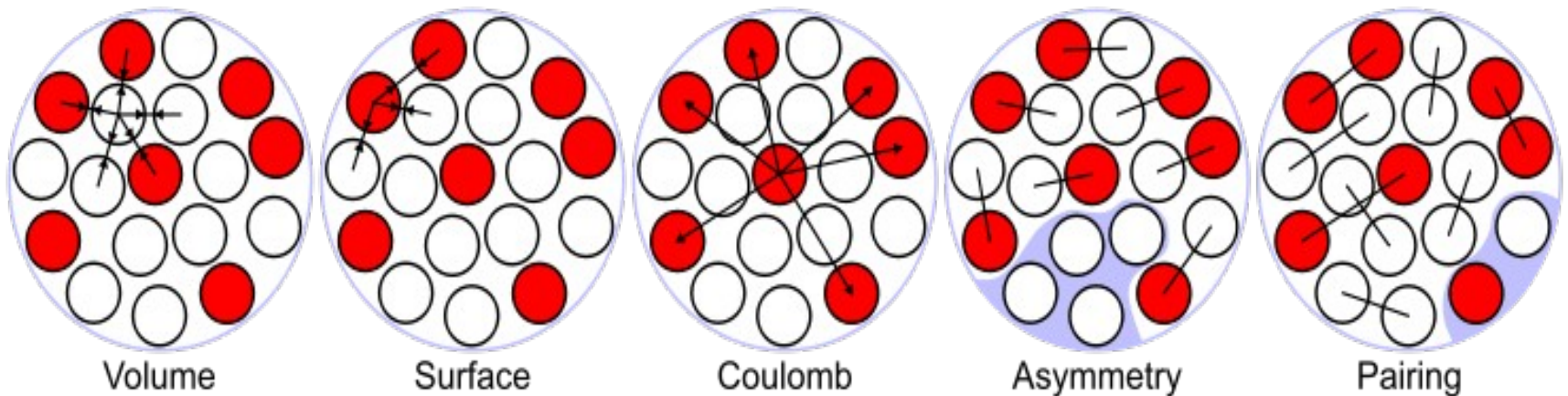
Színtelen nukleonok közötti Van der Waals erők

- Hosszú távú vonzás, rövid távú taszítás
- Fenomenológikus potenciálok
- Mezon kicserélődési (π , σ , ω , ρ) potenciálok

Atommagok

Bethe-Weizsäcker tömegformula

- $M = A m_N - E_B$

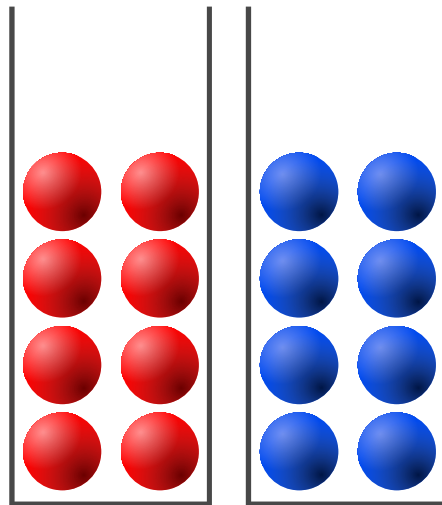


$$E_B = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A - 2Z)^2}{A} \pm \delta(A, Z)$$

Asszimetria

$$A = 16$$

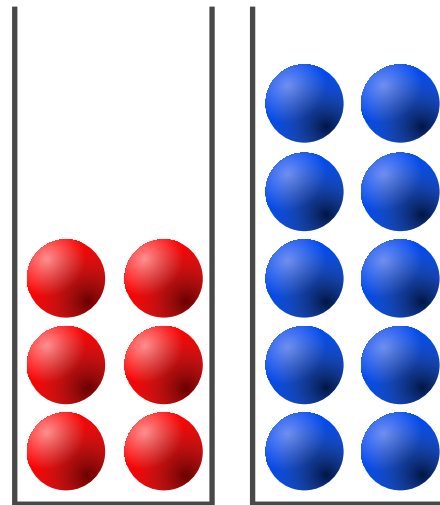
Lower energy



Protons Neutrons

$$|N - Z| = 0$$

Higher energy



Protons Neutrons

$$|N - Z| = 4$$

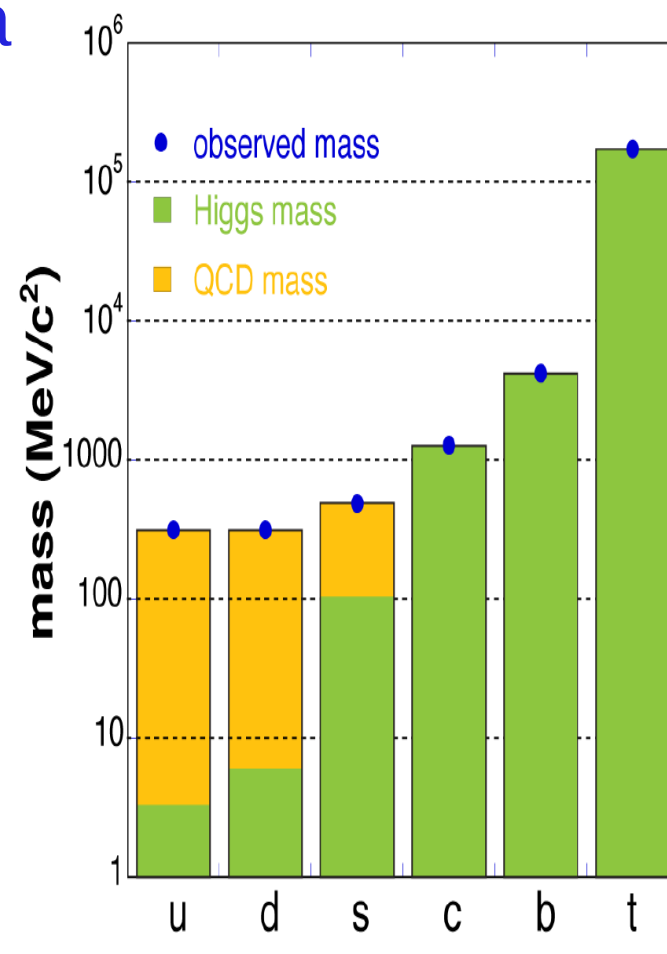
Erősen kölcsönható anyag

Az anyag alapvető tulajdonságai a hőmérséklet és sűrűség függvényében.

Fázisdiagramm

Hogyan keletkezik a hadron tömeg

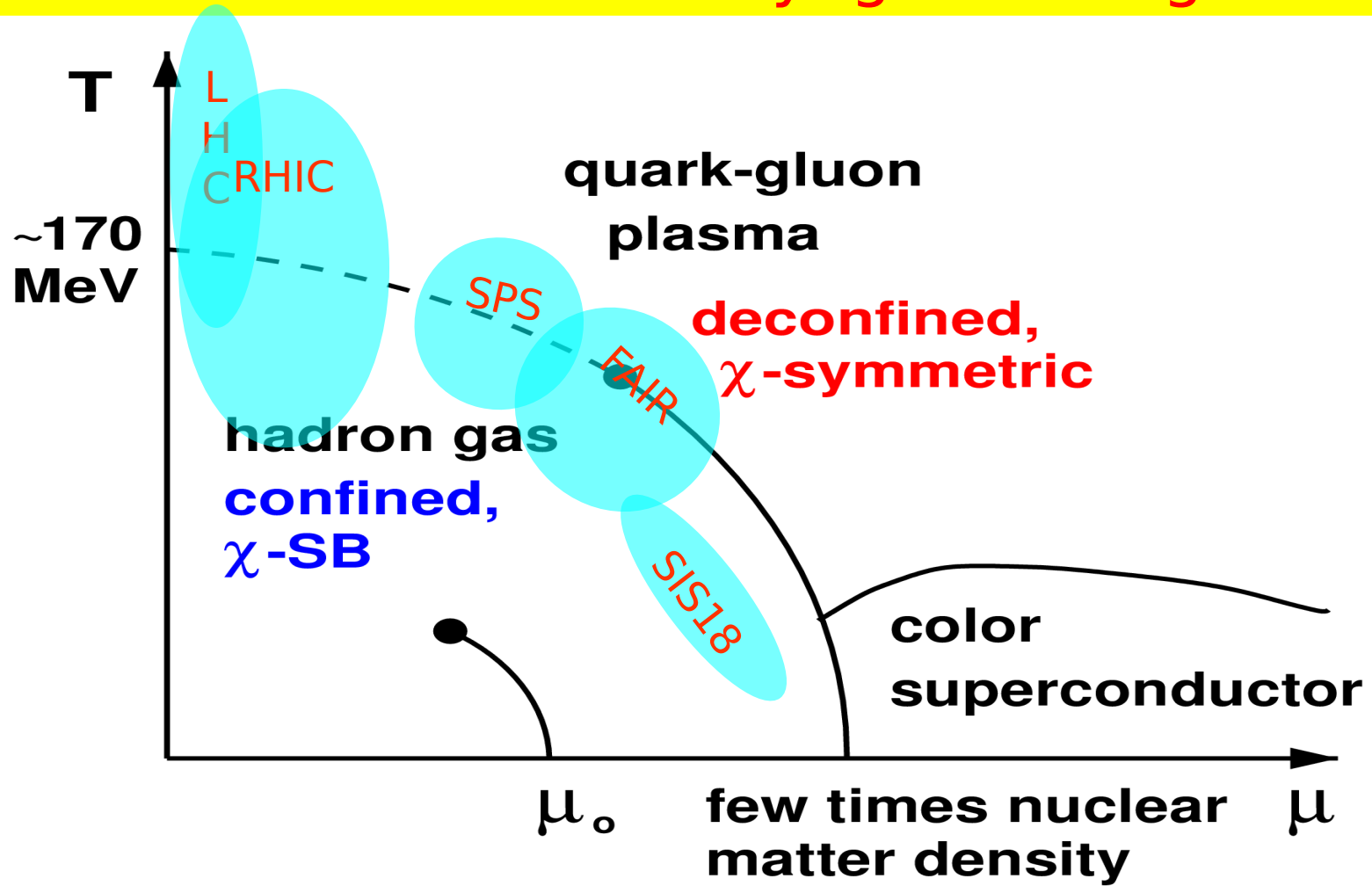
Milyen a nukleonok struktúrája az elérhető legkisebb skálán



Gyorsítók

gyorsító	cm energia(AGeV)	fázisdiagramm
SPIRAL	1.001-1.025 (.04-.1)	folyadék-gáz
SIS	1.025-1.4 (0.1-2.)	χ szimm
AGS	1.7-3 (4-16)	hozamok
FAIR	2.2-4.4 (8-35)	χ szimm, Krit. p
SPS	3.3-9 (20-160)	QGP
RHIC	20-200	QGP
LHC	5500	CGC

Az erősen kölcsönható anyag fázisdiagrammja



RHIC, LHC: nagy T -n és alacsony ρ -n folyamatos átmenet QGP-be

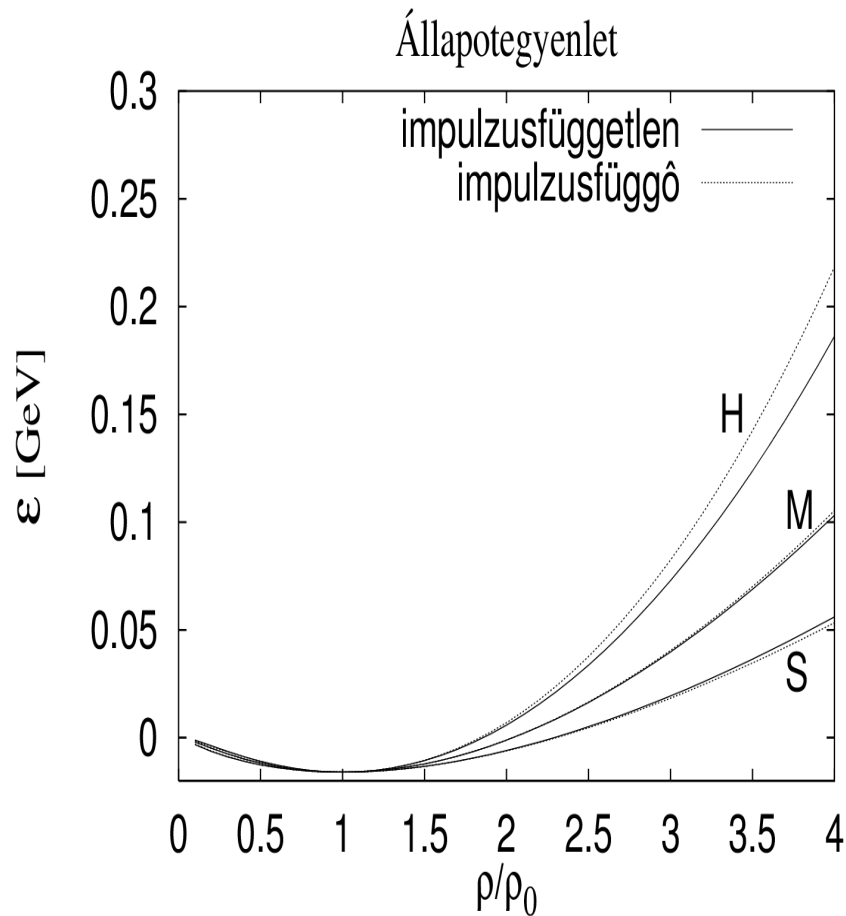
Alacsony-energiás RHIC: QCD-CP keresés térfogati jellemzőkkel

FAIR: teljes kutatási program ritka mennyiségekkel is

Nukleonok által dominált tartomány

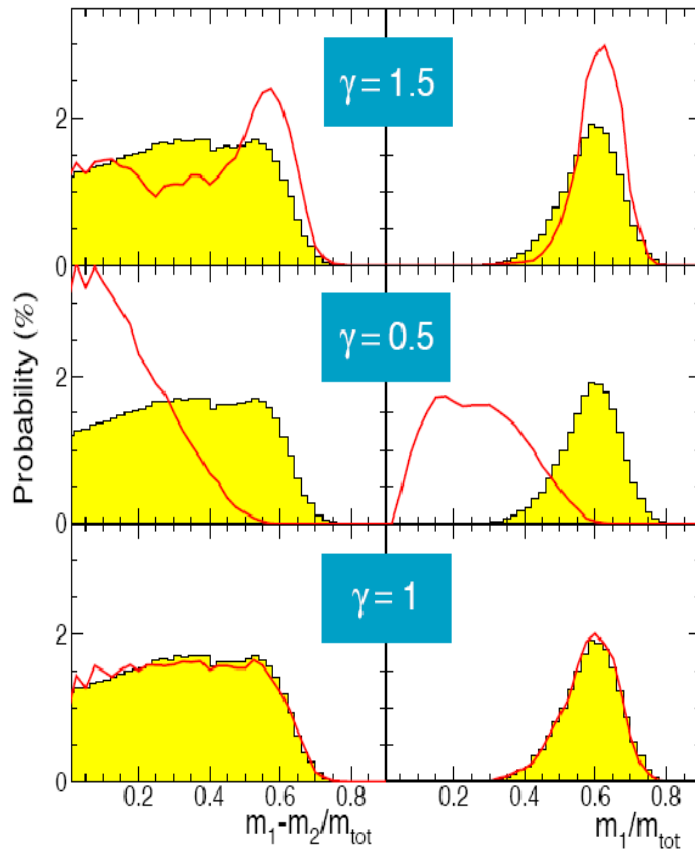
- Állapotegyenlet
- Aszimmetrikus anyag (nagy neutron arány)
- Folyadék-gáz fázisátalakulás
- Kompakt csillagok

Maganyag állapotegyenlete



- Nehézion ütközésekből:
K=170-250 MeV
- Nagy sűrűségen?
- Asztrofizikai vonatkozás:
**neutroncsillag,
szupernóva robbanás**

Szimmetria energia



$^{40}\text{Ca} + ^{48}\text{Ca}$ 25 AMeV

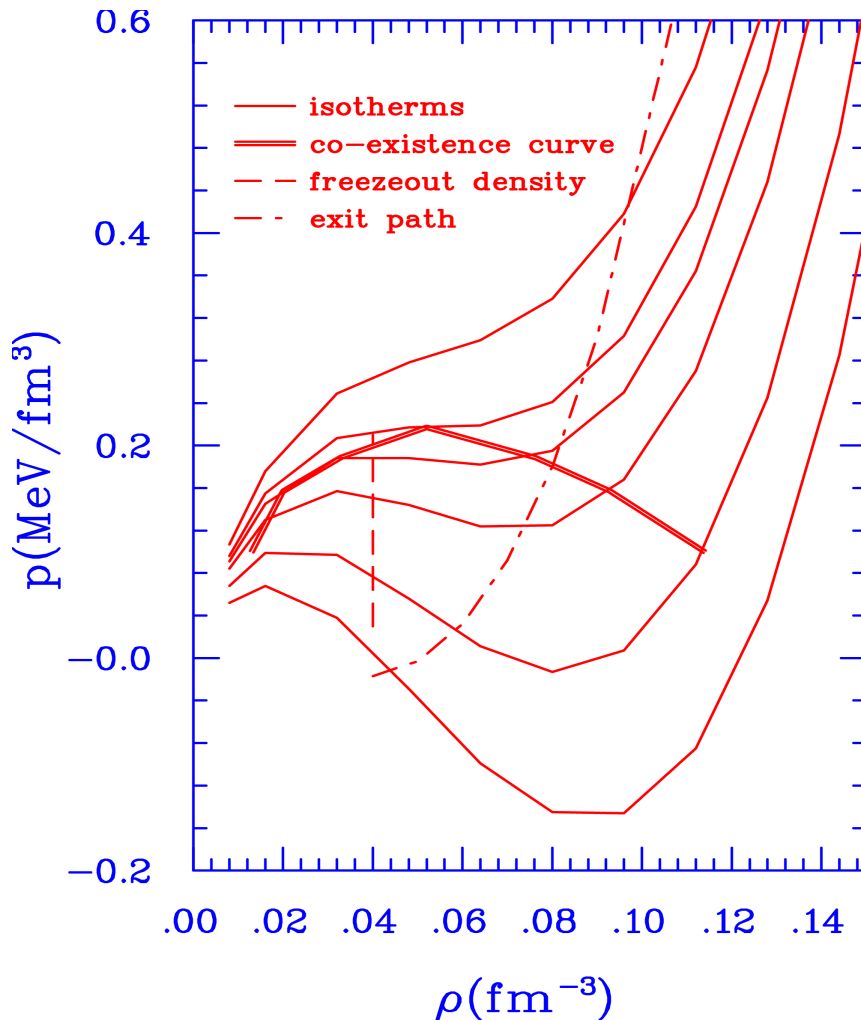
legnagyobb fragmens
eloszlása

$$C_{\text{sym}} \propto |\rho_n - \rho_p|^\gamma$$

transzport modell:

$$\gamma \approx 1$$

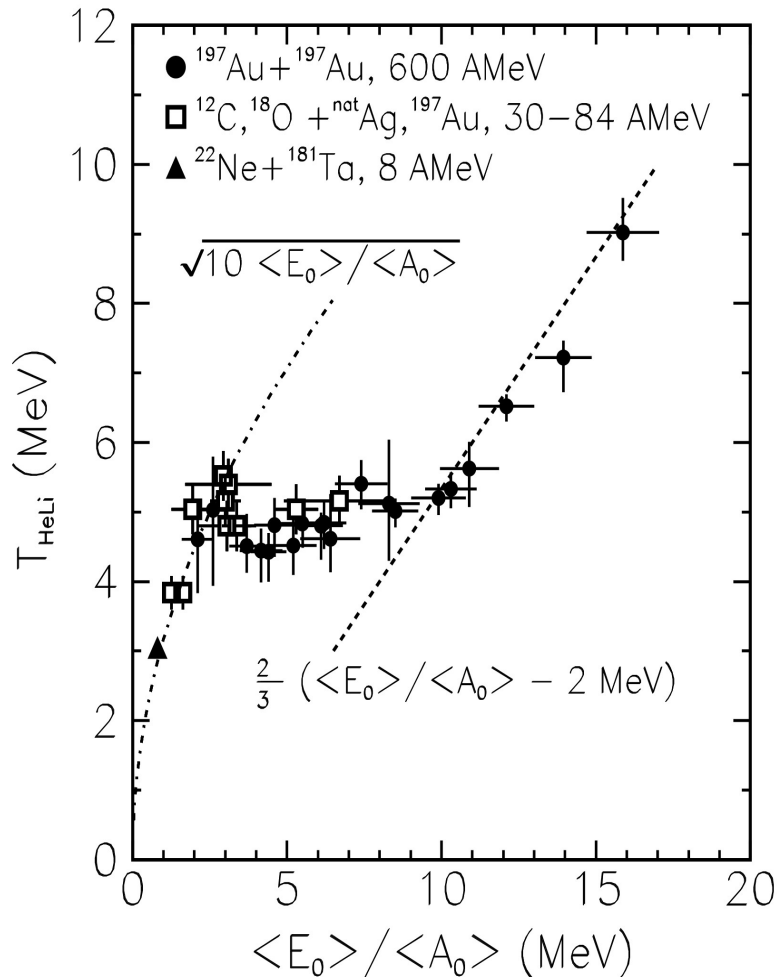
Folyadék-gáz fázisátalakulás



Van der Waals erők
nukleonok között

véges méret
Coulomb-hatás

Kalorikus görbe



**Spektátor fragmentáció
Aladinnal**

gerjesztési energia:

$$E^* = \sum_i (m_i + K_i) - (m_0 + K_0)$$

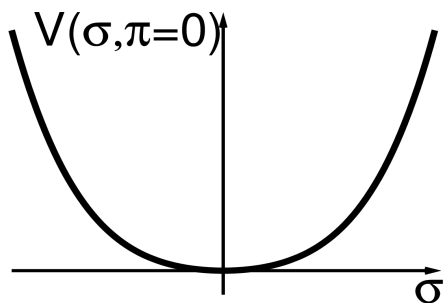
Izotóp hőmérséklet:

$$T_{\text{heLi}} = \gamma / \ln(\Delta B Y_{6\text{Li}} / Y_{7\text{Li}} / Y_{3\text{He}} / Y_{4\text{He}})$$

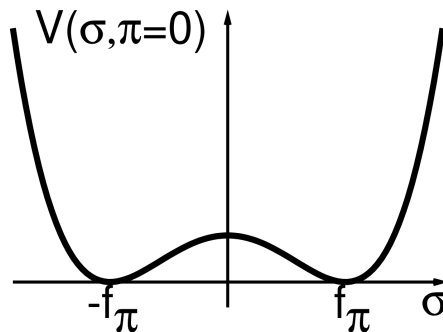
Konstans a nyomás?

Királis szimmetria

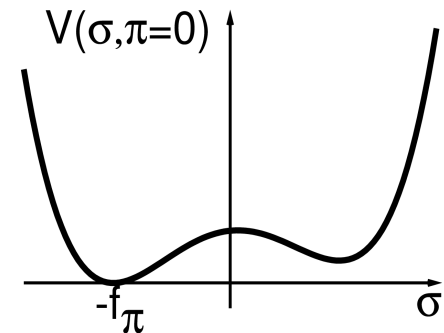
- Tömegnélküli fermionokra: helicitás, jobb- vagy balkezes részecske spin ugyanolyan, vagy ellentétes irányú az impulzussal
- $m_u \approx 3 \text{ MeV}$, $m_d \approx 6 \text{ MeV}$, $m_s \approx 95 \text{ MeV}$
ha a tömegek 0-k, akkor $U_{\text{QCD}} = SU_V(3) \otimes SU_A(3) \otimes U_A(1) \otimes U_V(1)$ szimm.
 $m_q \ll m_p$, QCD közel királisan szimmetrikus
- Ha vákuum szimmetrikus, paritás dublettek nem szimmetrikus \Rightarrow spontán szimmetriasértés



szimmetrikus



spontán sértett

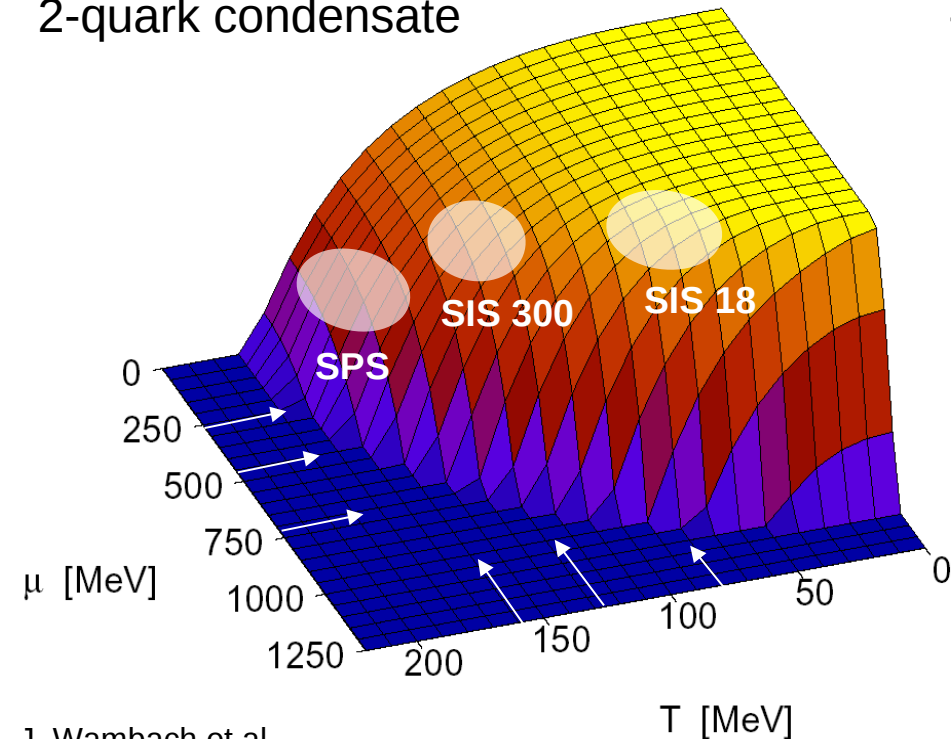


explicit sértés is

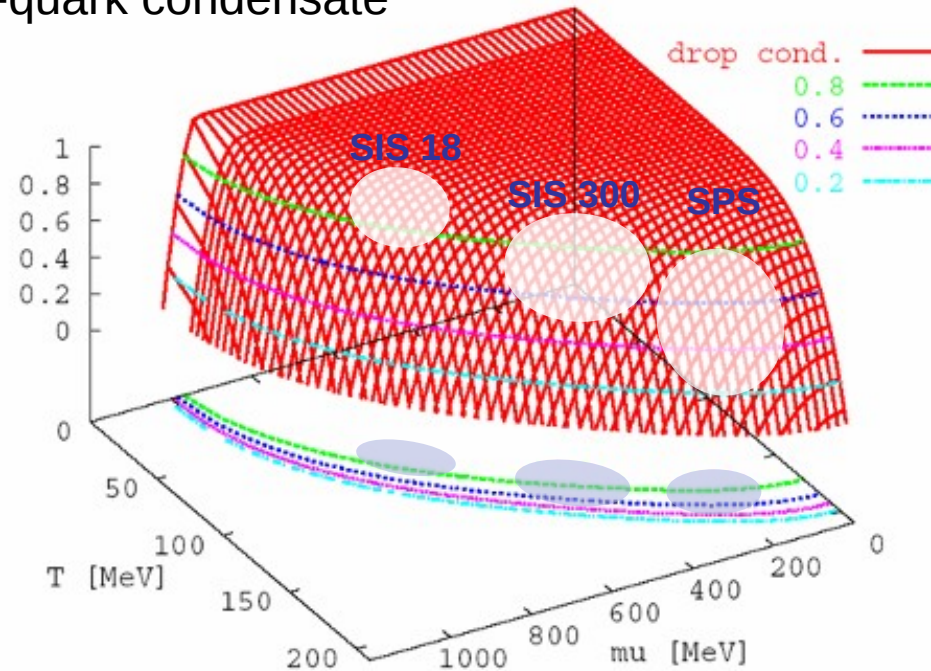
Királis Szimmetria Helyreállása

- Királis fázisátalakulás rendparamétere: $\langle \bar{q}q \rangle$
- Javasolt jelek:
- Hadron tömegváltozás ($\sigma, \rho, \omega, \phi$)
- diszorientált királis kondenzátum (DCC)
- Hadron spektrálfüggvény változás

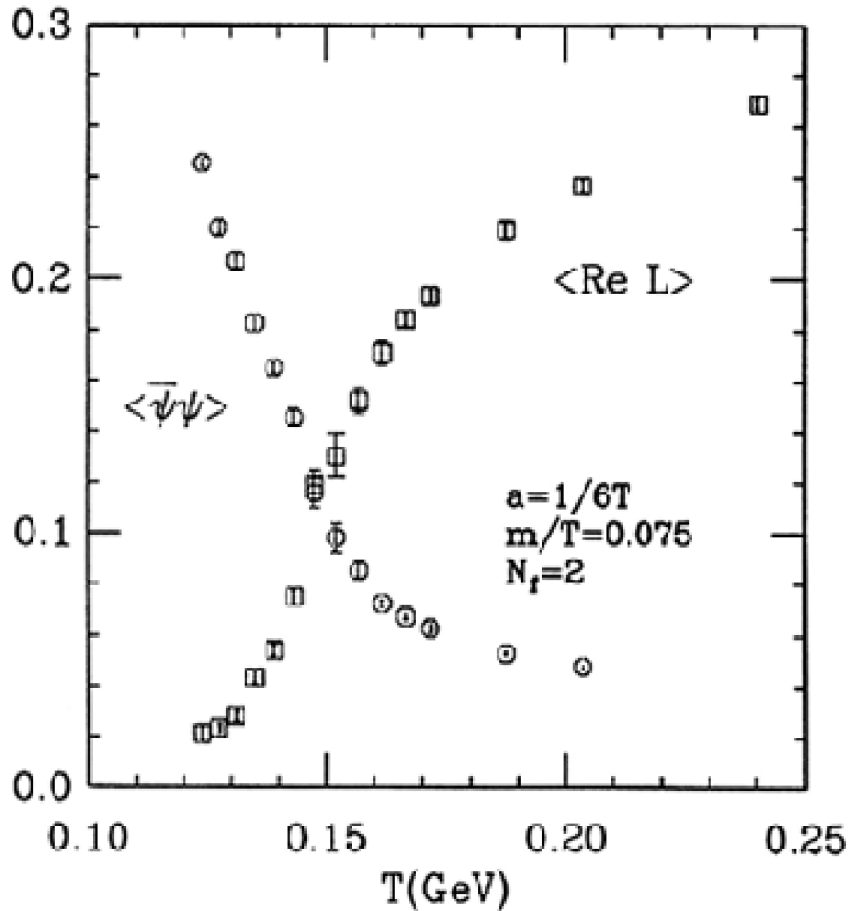
2-quark condensate



4-quark condensate



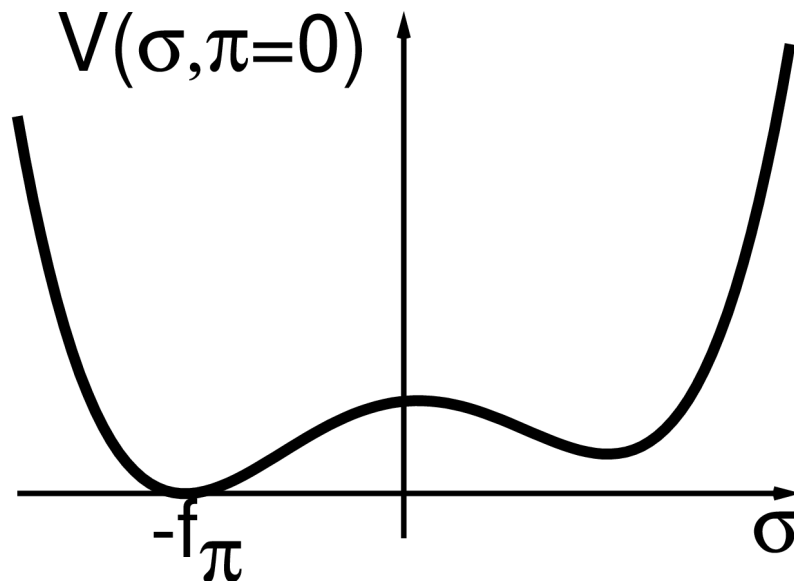
Rács szimuláció



- A királis szimmetria helyre áll hasonló hőmérsékleten mint a QGP átalakulás (van-e dinamikai oka?)

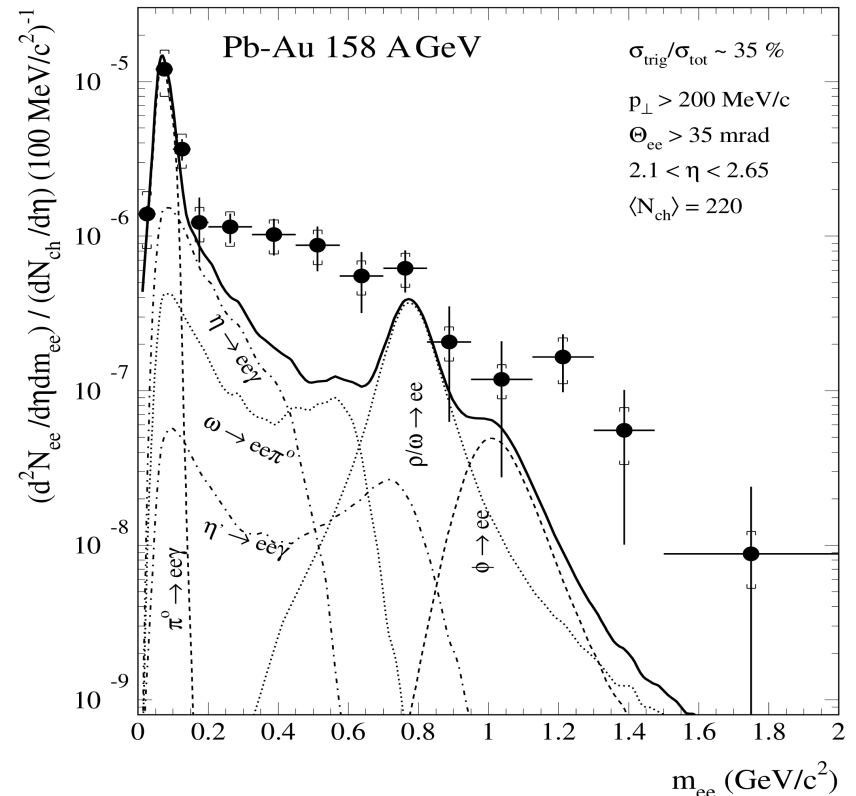
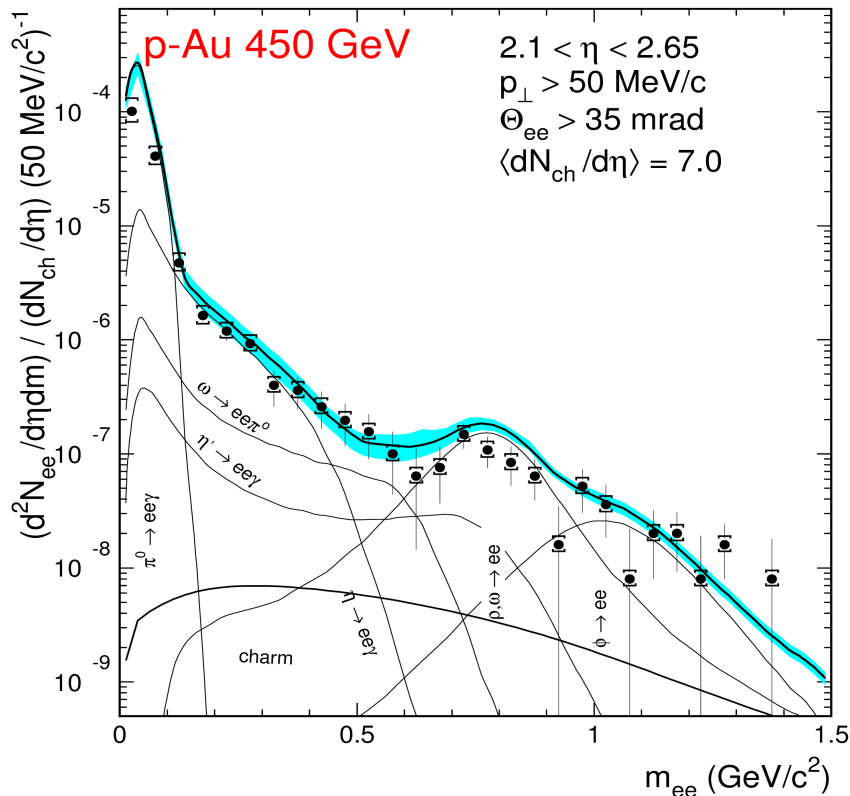
Diszorientált királis kondenzátum

- Szimmetrikus állapotban (σ, π) degenerált. Ha a rendszer hűl ki, akkor lehet, hogy nem az igazi vákuumban kerül, hanem egy elforgatott vákuumba.
- Hamis vákuum bomlása adott töltésű pionok nagy száma
- Nehézion ütközésben: töltött pionok nagy fluktuációja



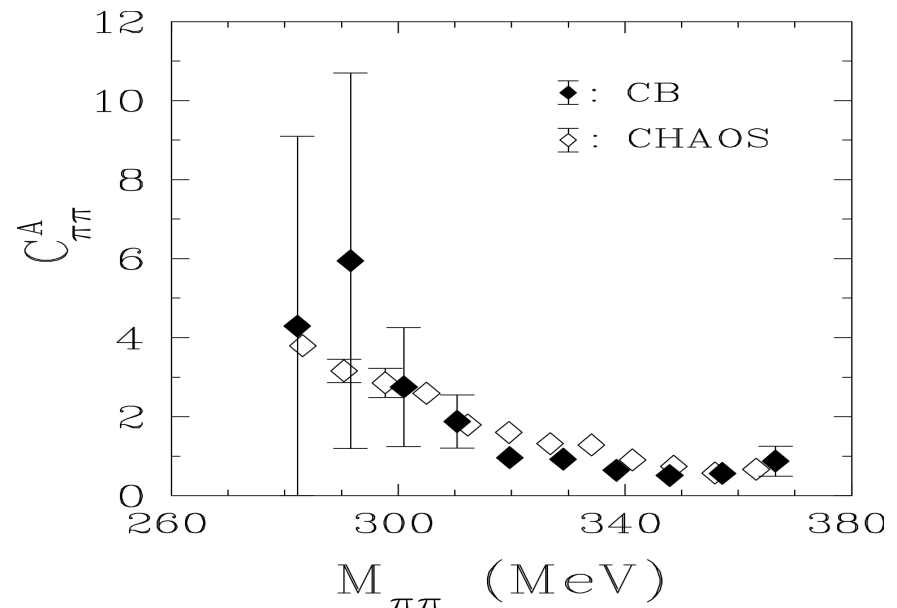
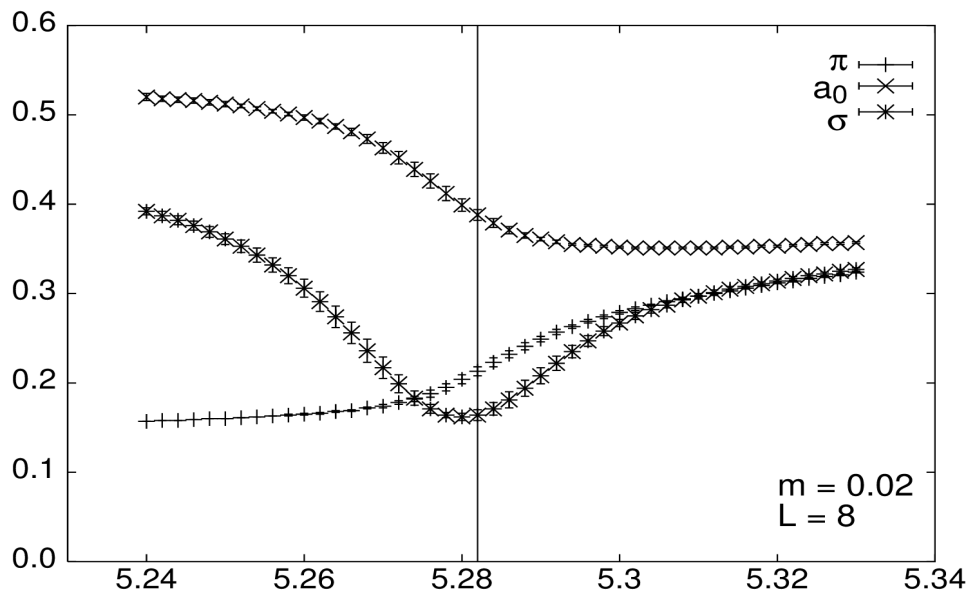
Vektormezon tömegek

- Összegszabály (Hatsuda-Lee)
- $$m_\rho^*/m_\rho = m_\omega^*/m_\omega = (\langle \bar{q}q \rangle^*/\langle \bar{q}q \rangle)^{0.5}$$
- Vektormezonok tömege mérhető dileptonokkal



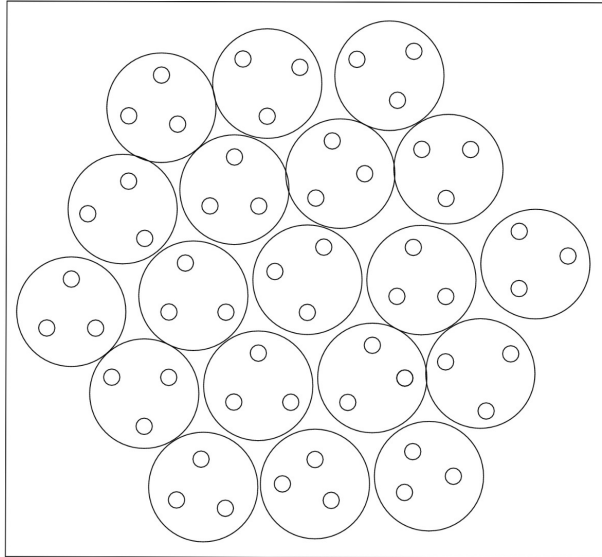
σ -mezon tömege

- A helyreállt fázisban a σ és π tömege megegyezik
- Ha $m_\sigma < 2 m_\pi$ a σ stabilá válik
- Királis szimmetria részlegesen helyreáll, σ tömege kisebb és keskenyebb
- $(\pi, 2\pi)$ reakció: $C_{\pi\pi}^a = \sigma_{\pi\pi}^A / \sigma_{\text{tot}}^A / \sigma_{\pi\pi}^N / \sigma_{\text{tot}}^N$

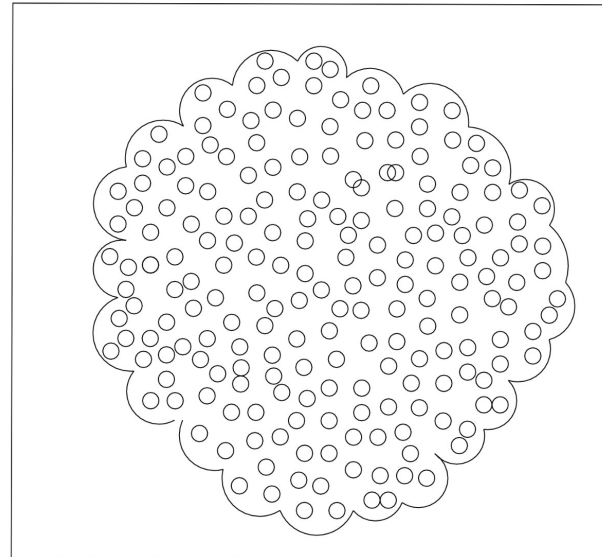


“Kvark-gluon plazma”

- 1951. Pomeranchuk: hadron méret végeességéből következik egy kritikus sűrűség
- 1965. Hagedorn: tömeggel exp. növekvő hadron állapotok számából következik maximális hőmérséklet $T_{\max} \approx 200 \text{ MeV}$
- 1967. asszimptotikus szabadság, SLAC kísérlet



a

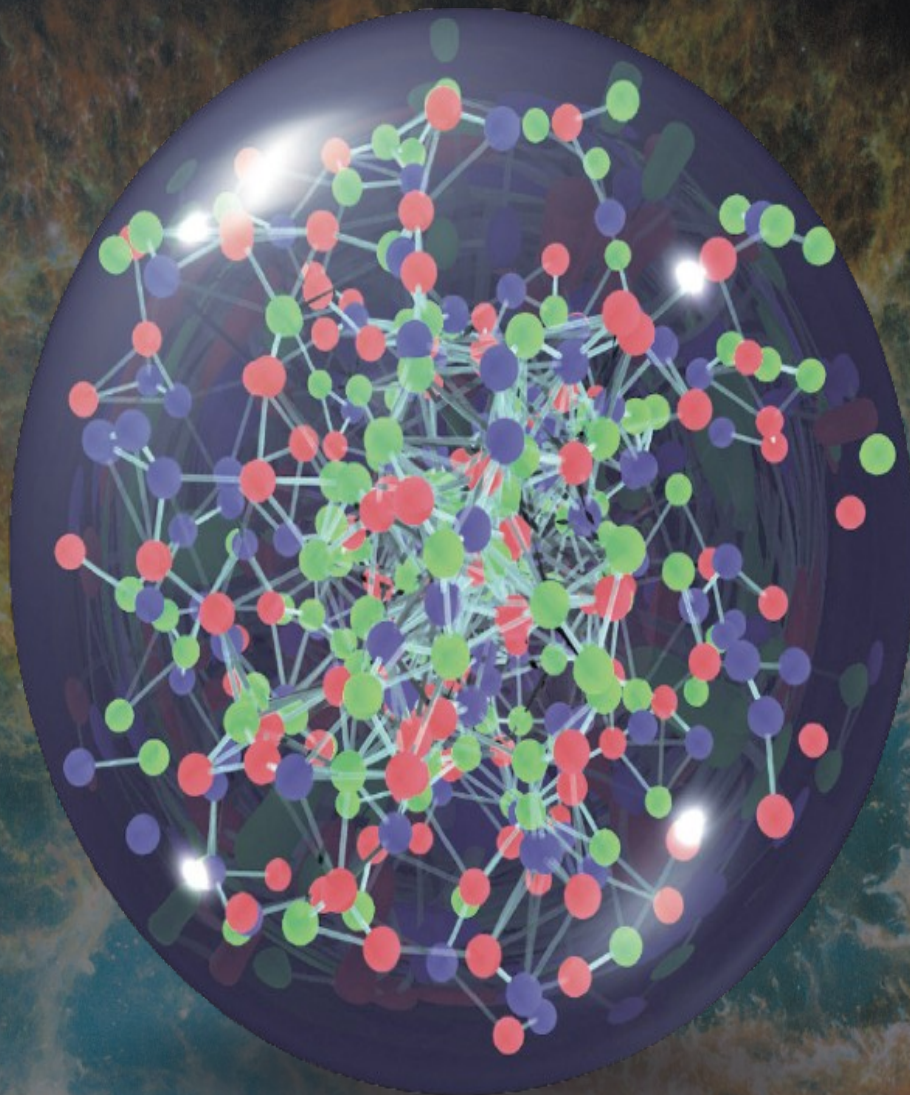


b

QGP átmenet

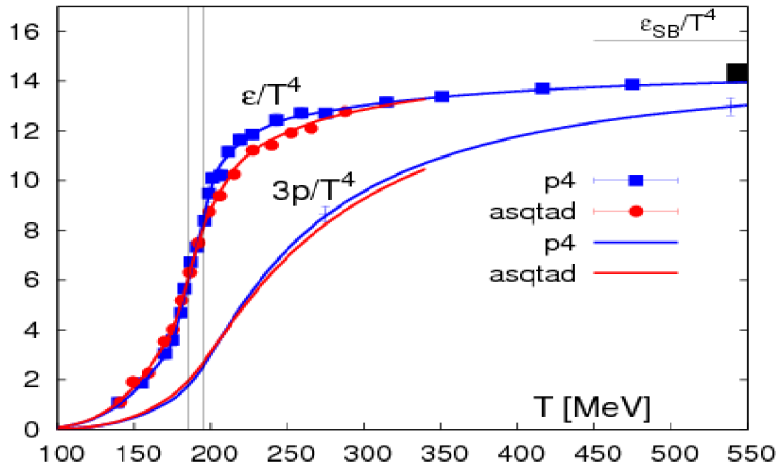
Alapvető kérdések

- Van-e első rendű fázisátmenet hadronikus és partonikus anyag között?
- Van-e kritikus, vagy hármass pont a fázisdiagrammon?
- Ha igen, hol vannak?
- Egybe esik-e a királis és QGP átmenet?
- Léteznek-e más fázisok?



Kvark-gluon folyadék

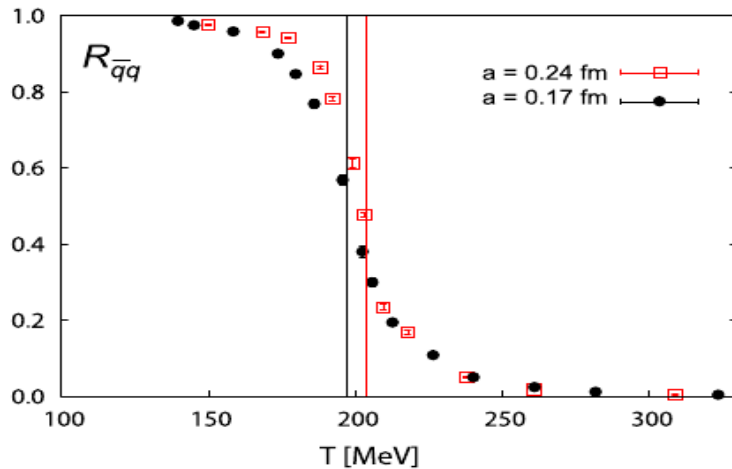
Rácsszámítások



2+1 rácsszámolás

Kölcsönhatás: E-3p

Csak $T_c \ll T$ -re éri el a Stefan-Boltzmann limitet



Normalizált kvark kondenzátum

Együtt a QGP átalakulással?

Plazma átmenet jelei

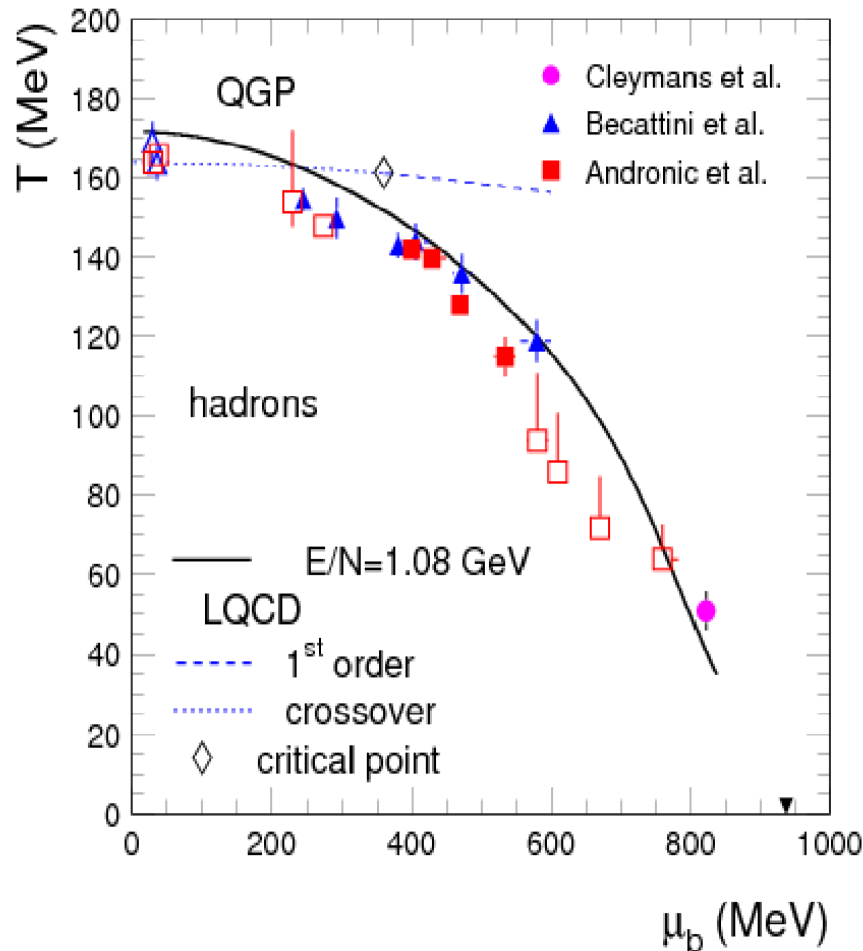
S/T^3 hirtelen növekedése T-ben, szabadsági fokok számának gyors növekedése

Leptonpárok a plazmából (Drell-Yan $q\bar{q} \rightarrow e^+e^-$)

Ritkaság rohamos növekedése $m_s \ll m_K$

Kvarkónium elnyomás, pl. $J/\psi = c\bar{c}$. Debye-árnyékolás

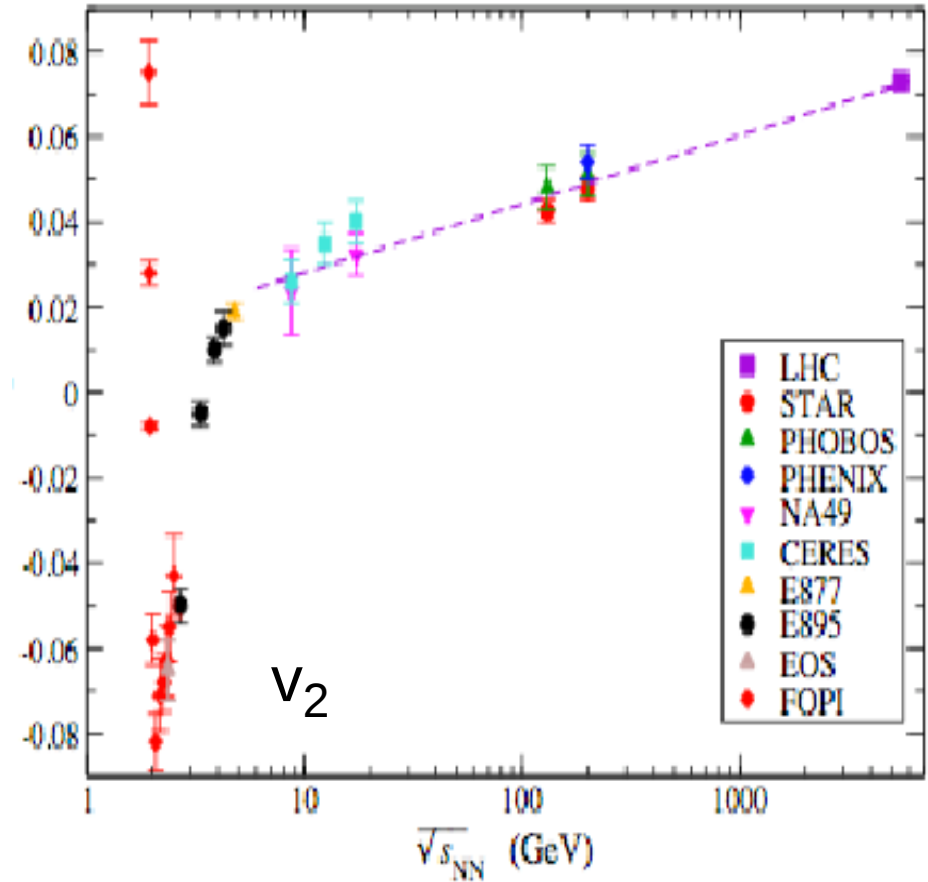
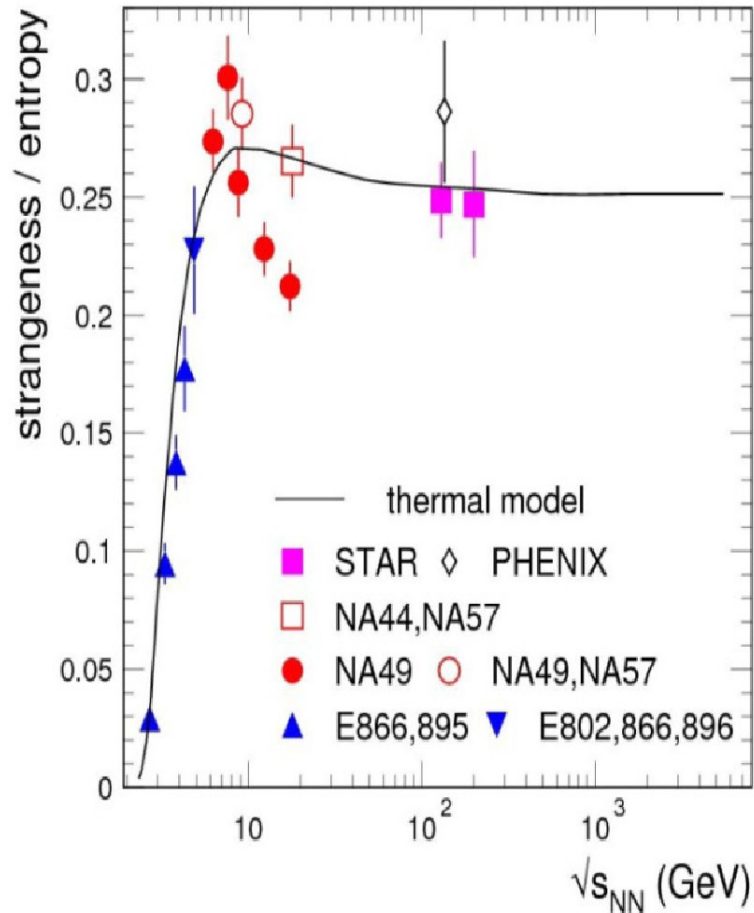
Termális modellek



Kifagyás a T- μ síkon

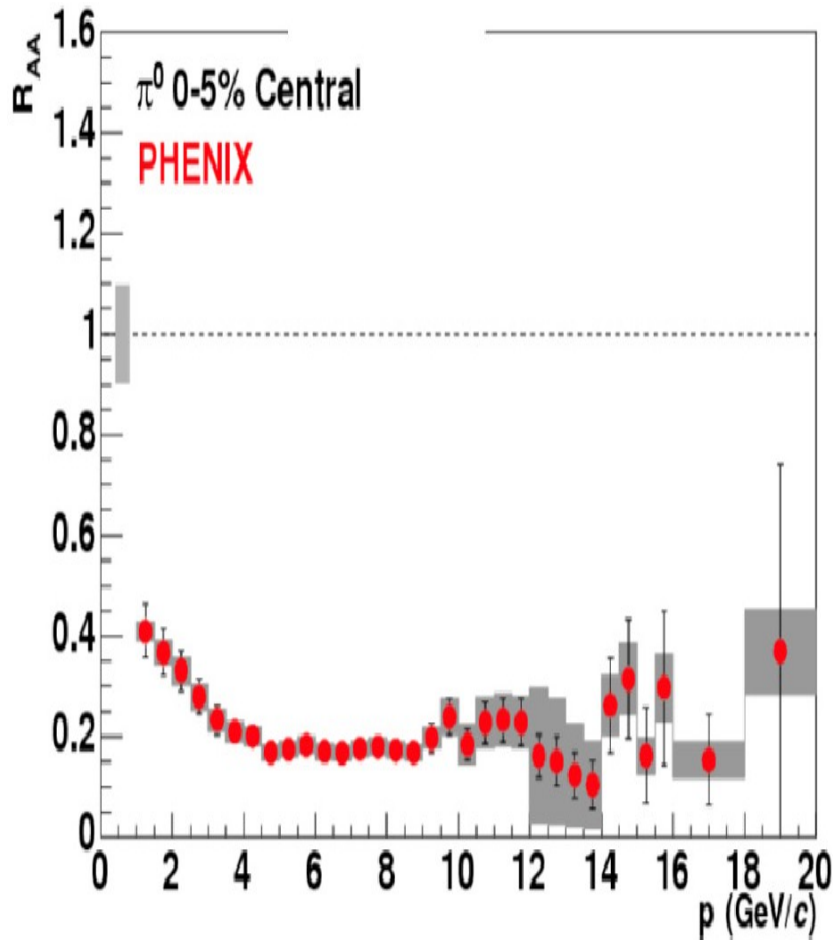
Az alacsony energiás pontok (SIS) biztosan nem írják le a termális egyensúlyt.

Gerjesztési függvények



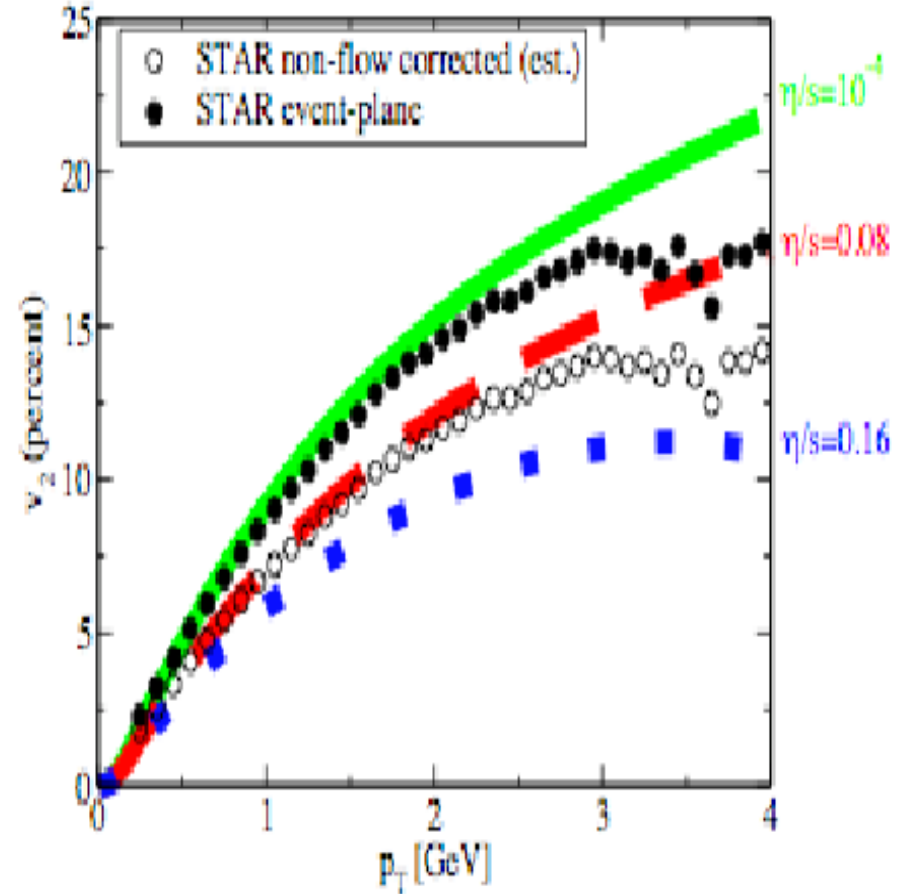
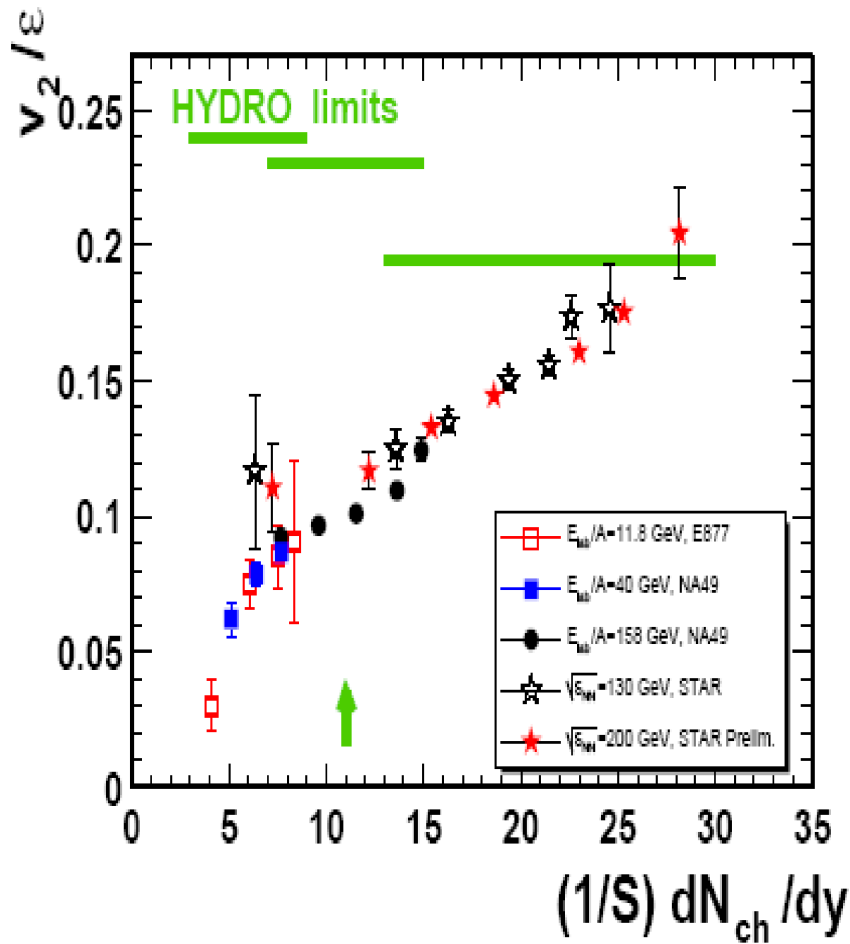
Barion dominanciából mezon dominancia, vagy QGP átmenet?

Jet elnyomás



- dA-ban nincs elnyomás
így ezt nem kezdeti
állapot okozza
- Nagyon nagy sűrűségű
anyag (felszabadított
anyag)

V_2



Charmonium

J/ ψ elnyomás

Bájos kvark párok kemény parton ütközésben keletkeznek

Felszabadító fázisban Debye-árnyékolás

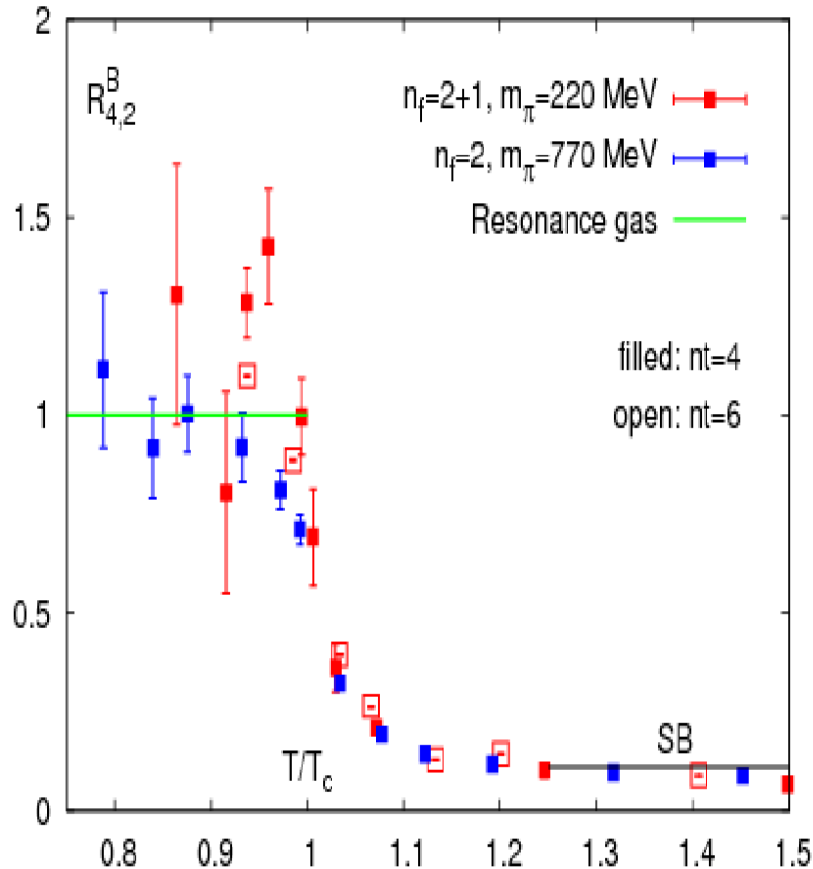
Hideg maganyagban is van elnyomás

A két effektus elkülönítéséhez:

D-mezon keltés mérése

Precíz, több dimenziós charmonium és nyilt bájoság hatáskeresztmetszetek pp, pA és AA-ban

Kritikus fluktuációk



- Megmaradó töltés fluktuáció arányos a töltésnégyzettel
- Nincs jele RHIC-nél és SPS-nél

Nagyenergiájú ütközés képe

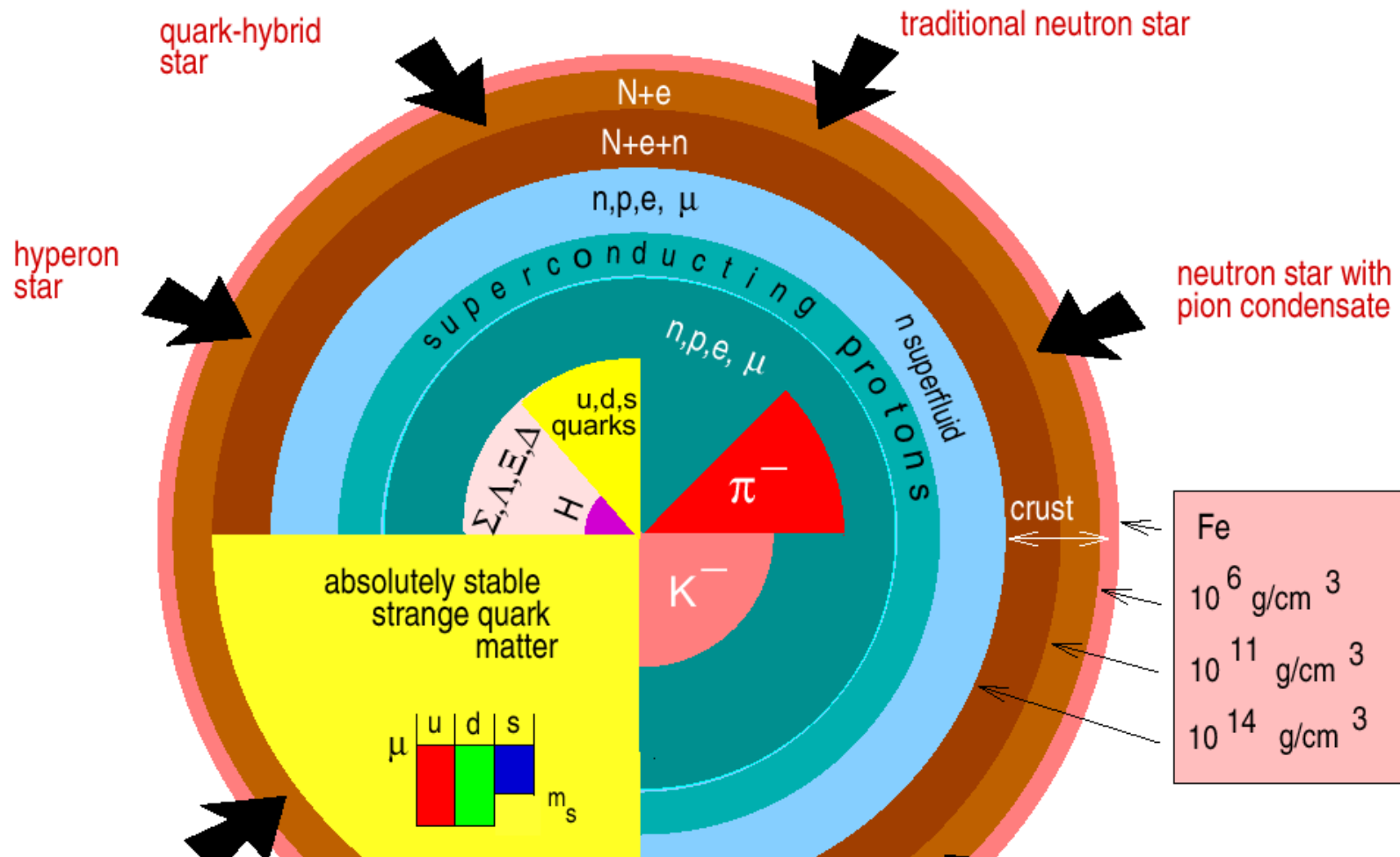
- Nagyenergiájú ütközésben korai egyensúly
 v_2 majdnem eléri a hidrodinamikai limitet
 v_2 skálázik a kvark számmal,
 v_2 a partonfázisban kelezkezett
- Először kémiai, majd termális kifagyás
- Kollektív radiális folyás
részecskespektrumokat fittelni v -vel s T -vel
- A kezdeti nyomás anizotrópia elliptikus folyást eredményez
- QGP: sűrű, elhanyagolható nyíró viszkozitású folyadék

Szín szupravezetés

- Szín szupravezetés feltétele, hogy vonzó kölcsönhatás legyen a kvarkok között a Fermi-felületen nagy sűrűségen ($g(\mu_q) \ll 1$) az egy gluon-csere dominálja a kölcsönhatást, amely bizonyos kvark-kvantumszám kombinációk mellett vonzó
- Cooper-párok kondenzációja lesz a rendszer új alapállapota
- Gyorsító energiákon vagy neutron csillagokban a μ_q lehet, hogy nem elég magas
- Természetben nem biztos, hogy létrejön, de végtelen sűrűségen ez a rendszer alapállapota

- QED szupravezetés fémekben:
 - kölcsönhatás nem egyszerű (fonon kicserélődés)
 - egyszerű kondenzátum
- QCD szín szupravezetés:
 - kölcsönhatás egyszerű (egy gluon csere)
 - sok kvantumszám, sok lehetséges kondenzátum
- Az igazi alapállapotot csak konkrét számításokkal lehet megtalálni. Úgy tűnik, hogy a fázis diagrammon legalább 2 különböző szupravezető fázis jelenik meg.

Szupersűrű anyag a természetben: neutroncsillag



Ritka szabadsági fokok?
 Hadronok közegbeli változása?
 Maganyag kompresszibilitása?
 kvarkfelszabadulás nagy sűrűségen?

Hadronok sűrű anyagban

Kaonok

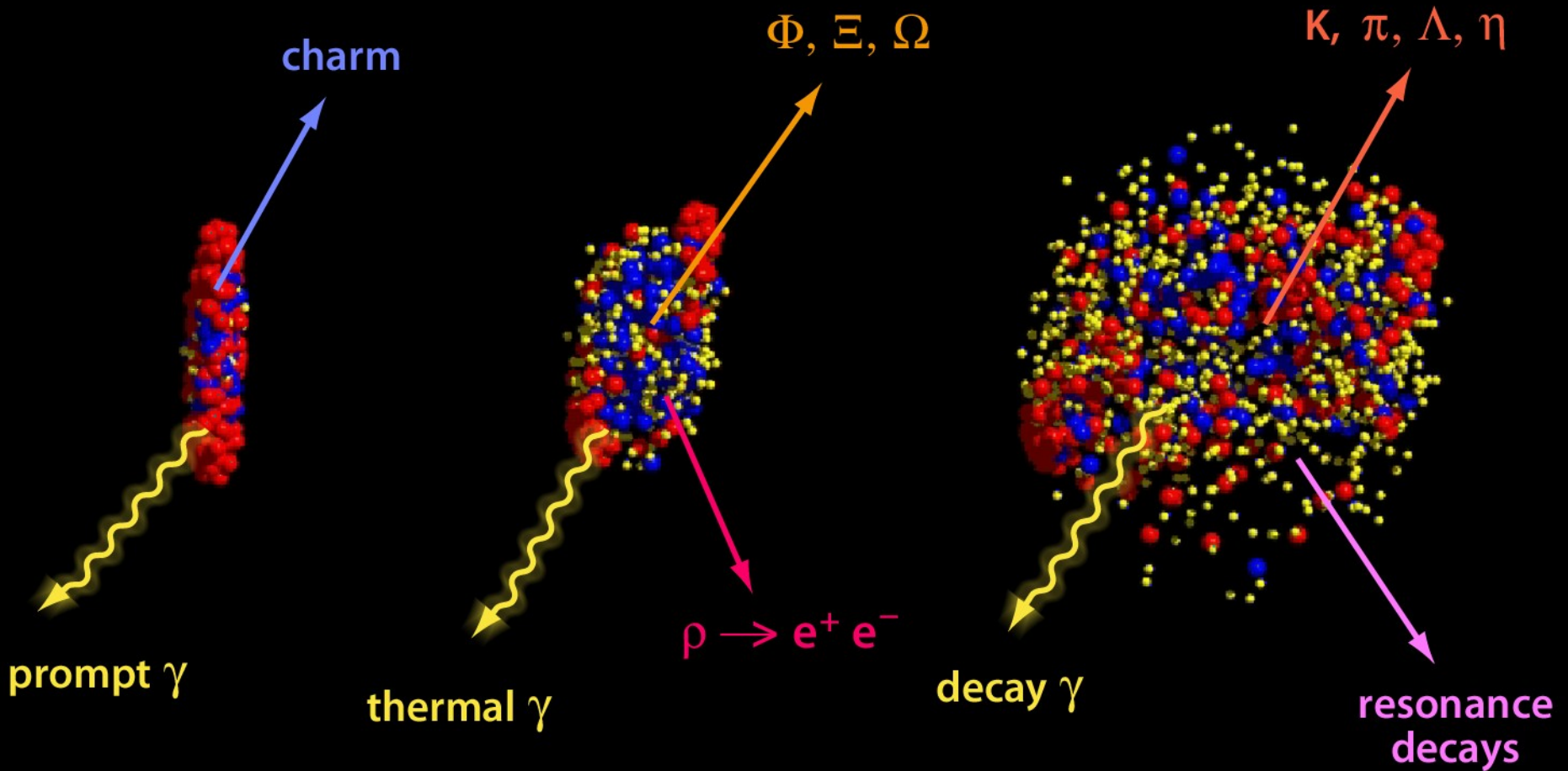
- K^+ taszító potenciált érez
- K^- erős vonzó potenciált
- Szükséges jó transzportmodell (spektrál fv)

Dileptonok

- ρ , η' közegben

Diagnosztikus eszközök

U+U 23 AGeV



Elméleti módszerek

- **Termális modellek**
 - kémiai, valamint termikus egyensúly kifagyáskor
 - főleg kísérletiek módszere
- **3-D hidrodinamika:**
 - kezdeti és végállapot nem kezelhető
- **Transzport modellek**
 - melyek a releváns szabadsági fokok
 - nagy nemzetközi együttműködés: lényegében az összes európai műhely összefog egy kód kidolgozására (Frankfurt, Giessen, Nantes, Catania, Budapest)

Compressed Baryonic Matter (sűrű barion anyag): fizikai problémák és megfigyelhető mennyiségek

Állapotegyenlet nagy ρ_B -nél

- hadronok kollektív folyása
- részecskekeltés küszöbenergiákon (nyilt bájosság)

Felszabadító fázisátalakulás nagy ρ_B -n

- ritkaság gerjesztési függvénye, folyása ($K, \Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$)
- bájosság gerjesztési függvénye, folyása ($J/\psi, \psi', D, D^\pm, \Lambda$)
- J/ψ és ψ' elolvadása, charmonium elnyomás

QCD kritikus végpont

- eseményenkénti fluktuációk (K/π , töltés, ...)

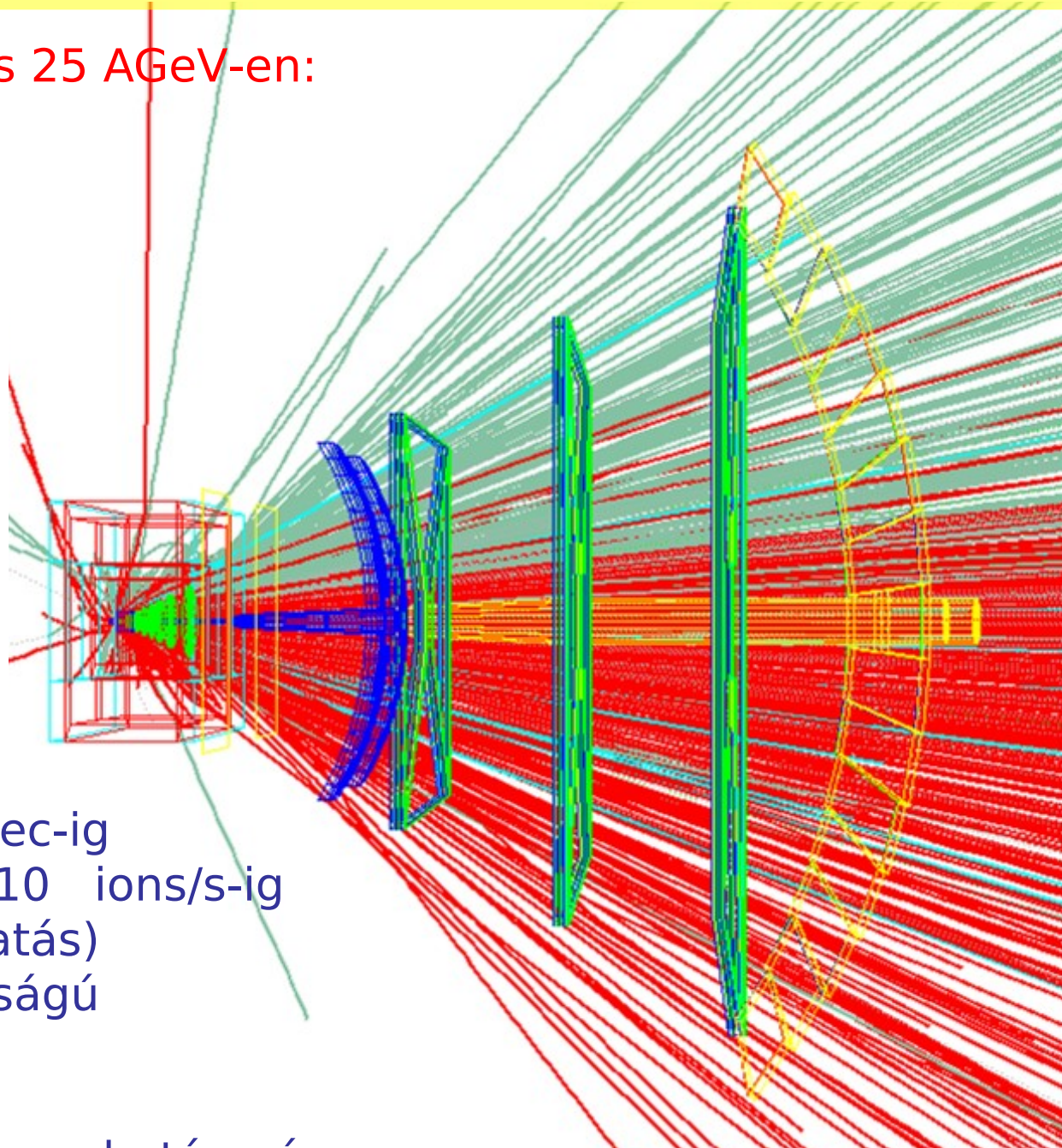
A királis szimmetria helyreállításának folyamata nagy ρ_B -n

- hadronok közegbeli módosulása ($\rho, \omega, \phi \rightarrow e^+e^-(\mu^+\mu^-), D$)

Kísérleti kihívások

Centrális Au+Au ütközés 25 AGeV-en:
URQMD + GEANT4

160 p
400 π^-
400 π^+
44 K^+
13 K^-



- 10 Au+Au reakció/sec-ig
(nyaláb intenzitások 10 ions/s-ig
1 % target kölcsönhatás)
- vertexek nagy pontosságú meghatározása
($\approx 50 \mu\text{m}$)

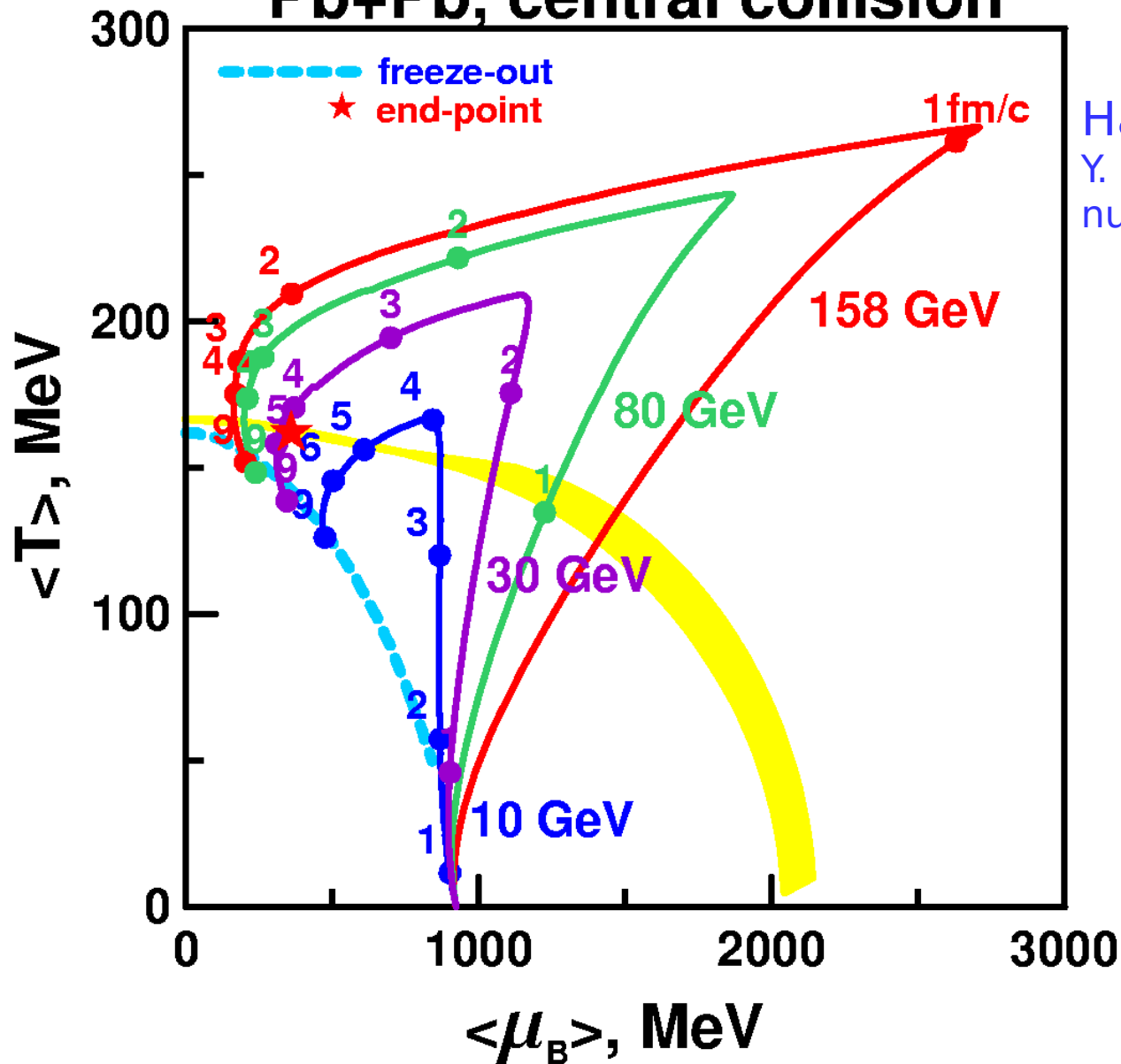


FAIR project ára: ~ 1.1 milliárd € (25% külföldi partnerektől).

14 FAIR tag (2007):

3-folyadék hidrodinamika

Pb+Pb, central collision

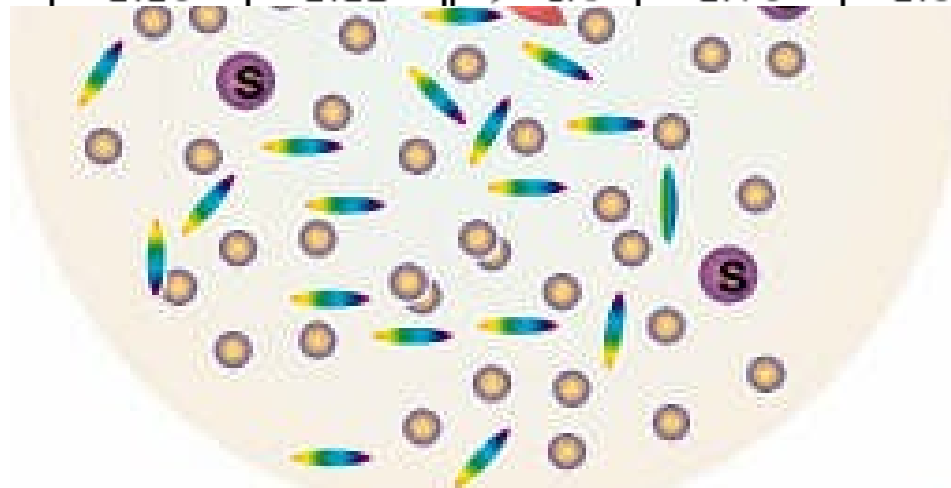


Hadron gas EOS:
Y. Ivanov, V. Russkikh, V. Toneev
nucl-th/0503088

QGP vizsgálata charmoniummal

Kvarkonium disszociációs hőmérsékletek – Digal, Karsch, Satz

state	$J/\psi(1S)$	$\chi_c(1P)$	$\psi'(2S)$	$\Upsilon(1S)$	$\chi_b(1P)$	$\Upsilon(2S)$	$\chi_b(2P)$	$\Upsilon(3S)$
T_d/T_c	2.10	1.16	1.12	> 4.0	1.76	1.60	1.19	1.17



Bájosság:

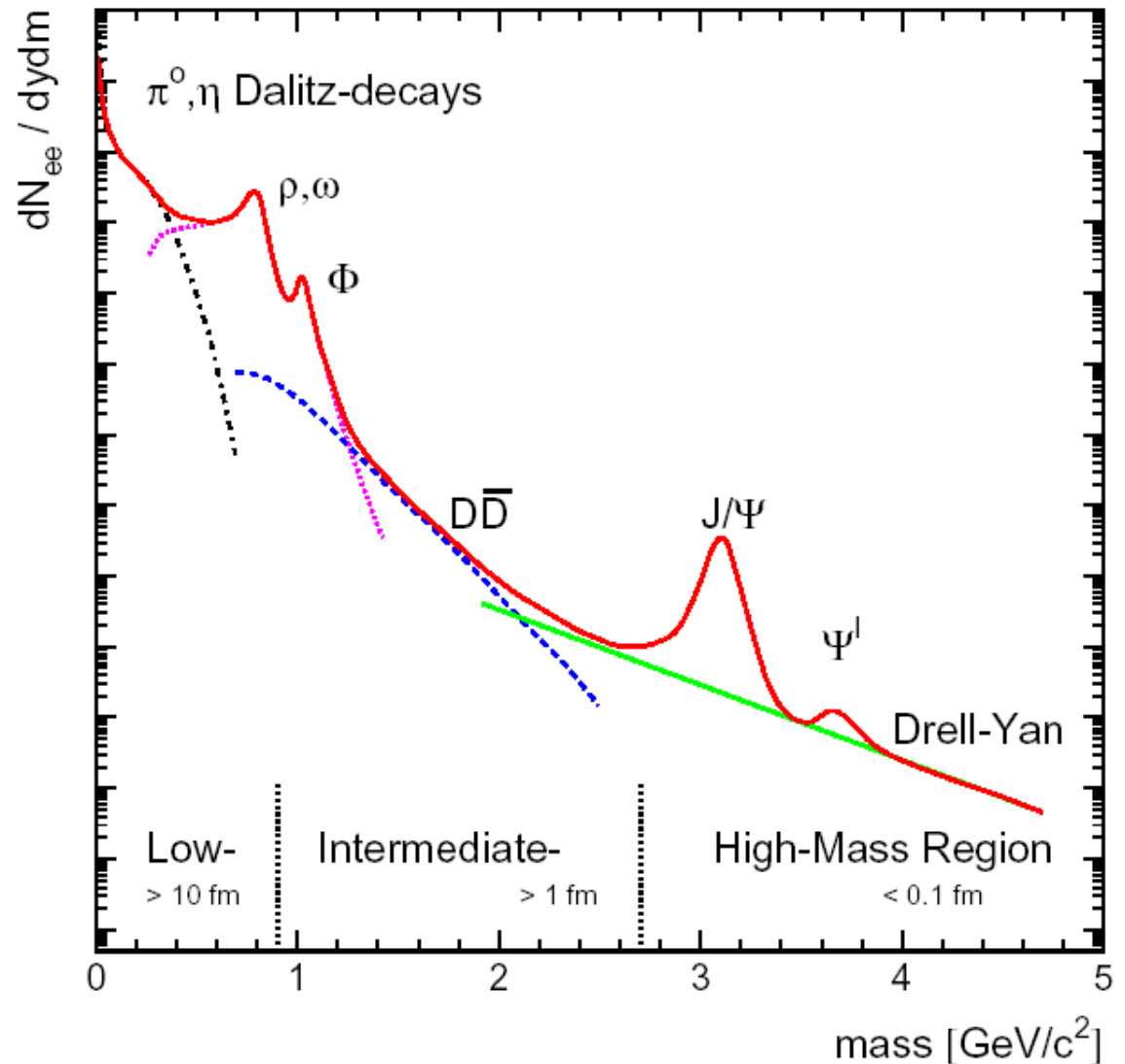
- bájosság a QGP biztató szignatúrája
- szükséges: gerjesztési függvény J/ψ , ψ' , D , Λ_c keltésre $p+A$ és $A+A$ ütközésekben (p_T -spectrum, folyás)

Dileptons

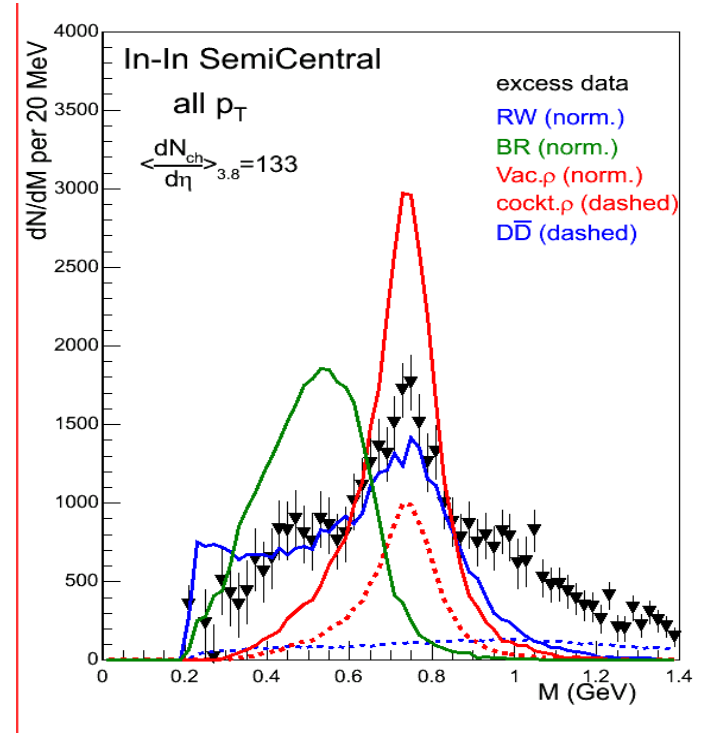
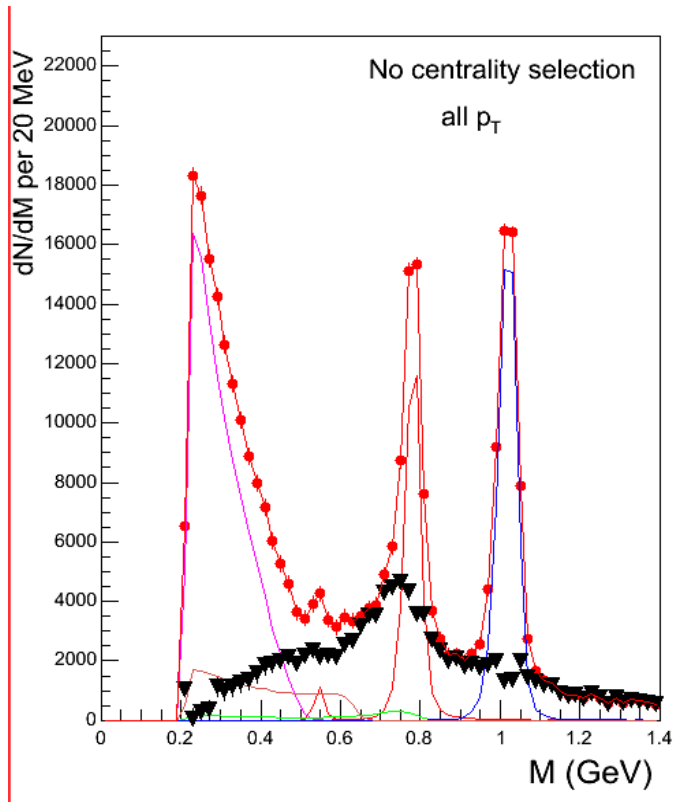
- nincs végállapotú kölcsönhatás

- vektormezonok megváltozása közegben

CERES, NA50, NA60, HADES



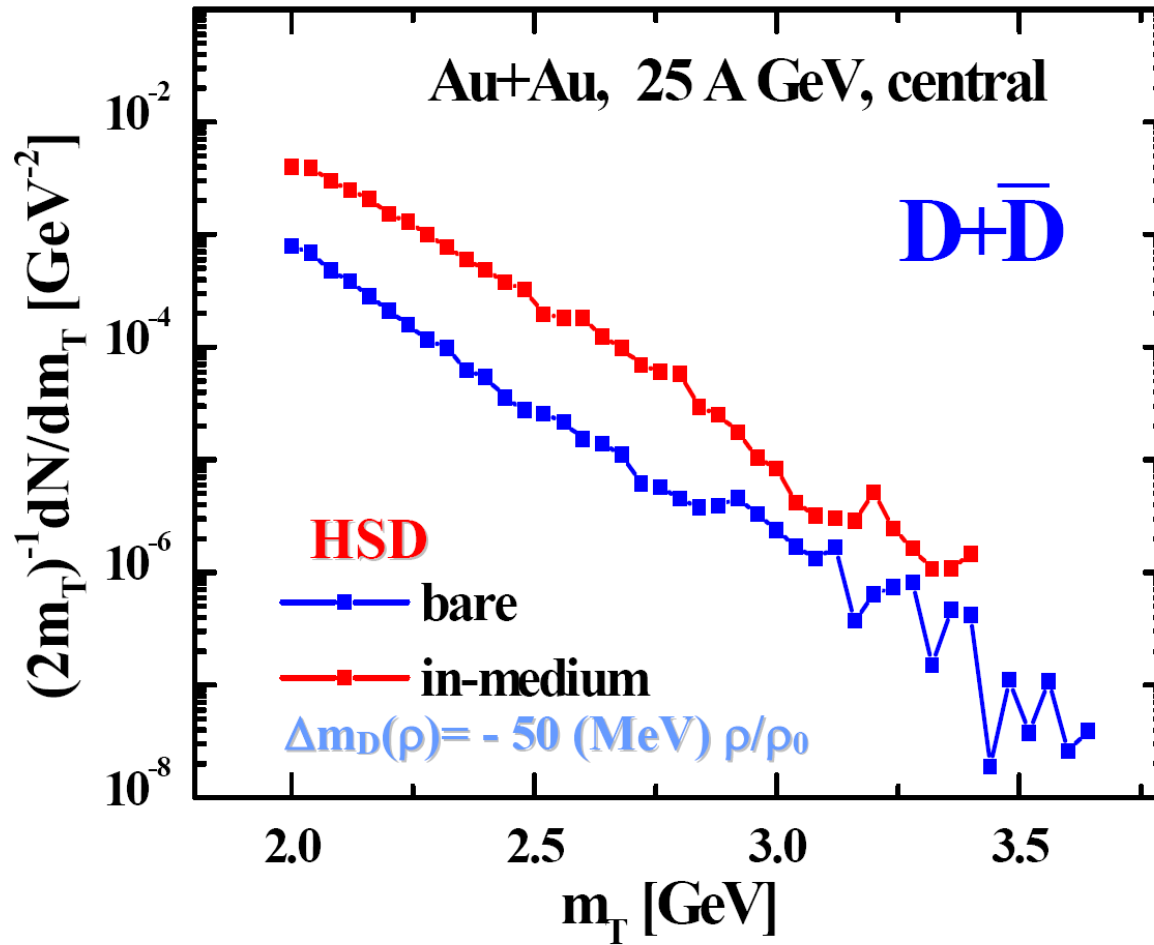
Dileptonok (In+In 160 AGeV)



NA60 preciz mérései kizárnak modelleket!

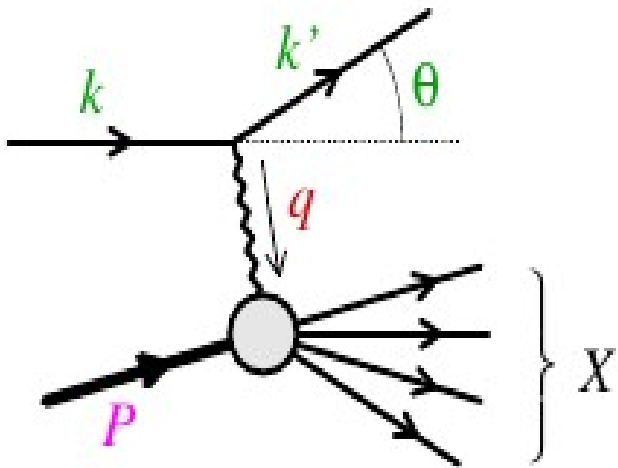
Végre egy bizonyíték ρ spektrálfüggvény szélesedésére!

D-mezonok közegbeli módosulása



E. Bratkovskaya,
W. Cassing

Mélyen rugalmatlan szórás



$$s \equiv (P + k)^2 \quad y = (E_e - E_e')/E_e$$

$$Q^2 \equiv -q^2$$

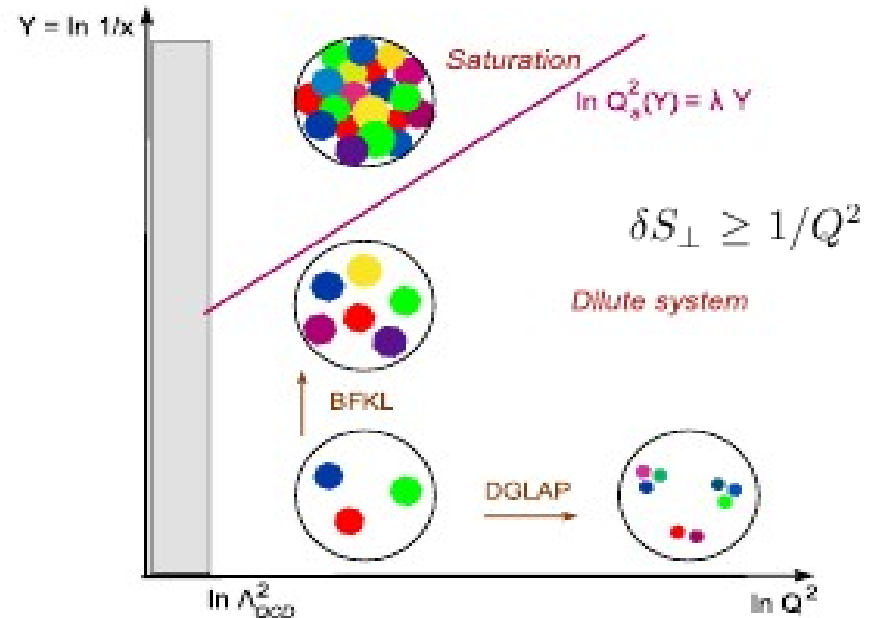
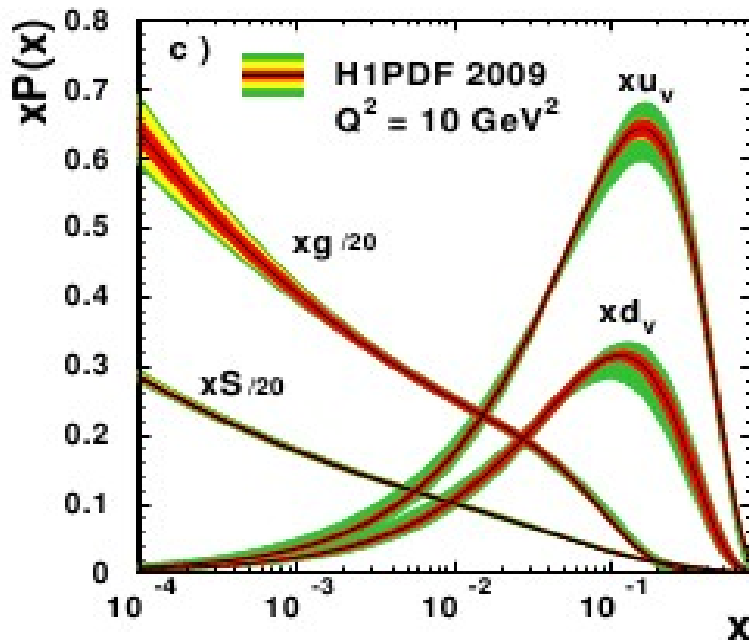
$$x \equiv Q^2 / 2P \cdot q$$

$$xy \equiv Q^2 / s$$

Bjorken határeset: x, y rögzített $Q, s \rightarrow \infty$ (DGLAP)

Regge-Gribov határeset: y, Q rögzített, $s \rightarrow \infty, x \rightarrow 0$
(BFKL-egyenlet)

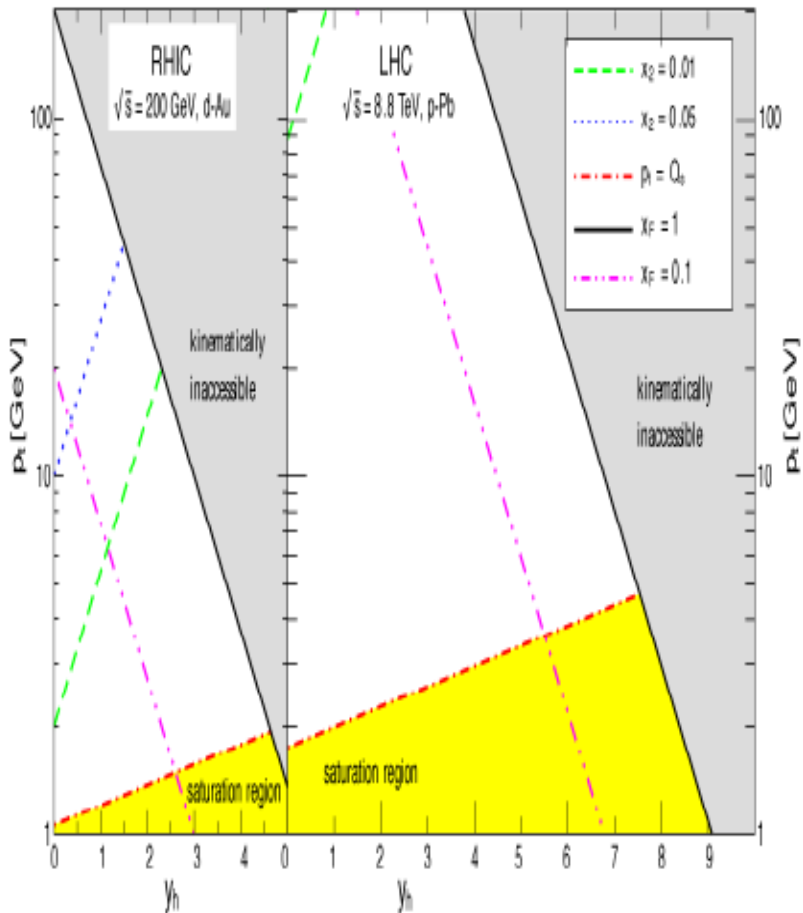
Color Glass Condensate



Szaturáció: gluon pdf nem nőhet végtelenségig
 $Q_s(x)$ szaturációs skála (nő, ha x csökken)

CGC szaturált klasszikus gluon-tér, végtelen impulzusú rendszerben a Regge-Gribov határesetben

Kísérleti megfigyelés



- Nagy p_T (perturbatív)
- Adott p_T -re a kisebb az x , ha nő a nyalábenergia és a longitudinális impulzus

Szignálok

- Inkluzív hadron hozam elnyomása, ahol a parton szórás dominálna
- Jetek azimutális correlációjának csökkenése

RHIC-nél megfigyelték, de kis fázistér miatt nem szignifikáns

Fázisátalakulás véges rendszerben

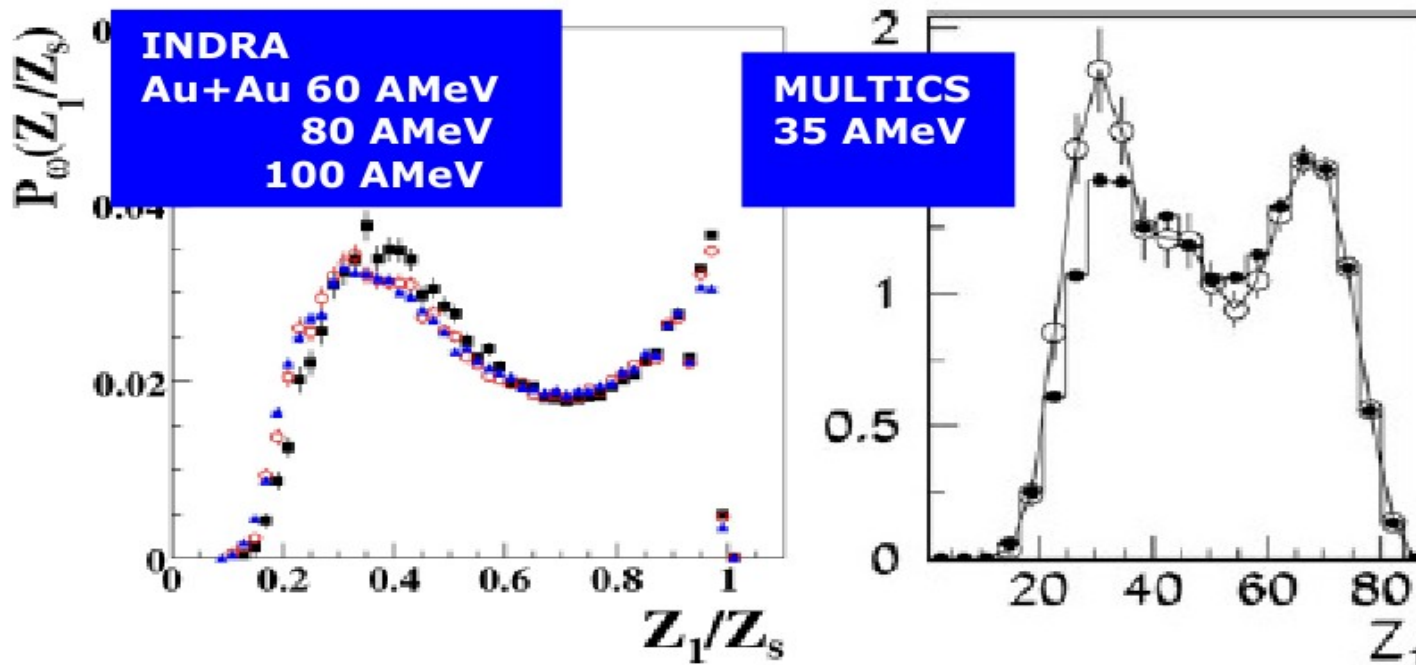
Fázisátalakulás definíciók

- Negatív hőkapacitás
- Speciális eloszlása a kanonikus partíciós fv. gyökeinek
- Termodinamikai potenciál konvexitása, változó a rendparaméter

Megmaradnak-e a termodinamikai limeszben?

- Eloszlásfüggvény bimodalitása
változó a rendparaméter
Konzisztens a Yang-Lee tétellel

Folyadék-gáz átmenet

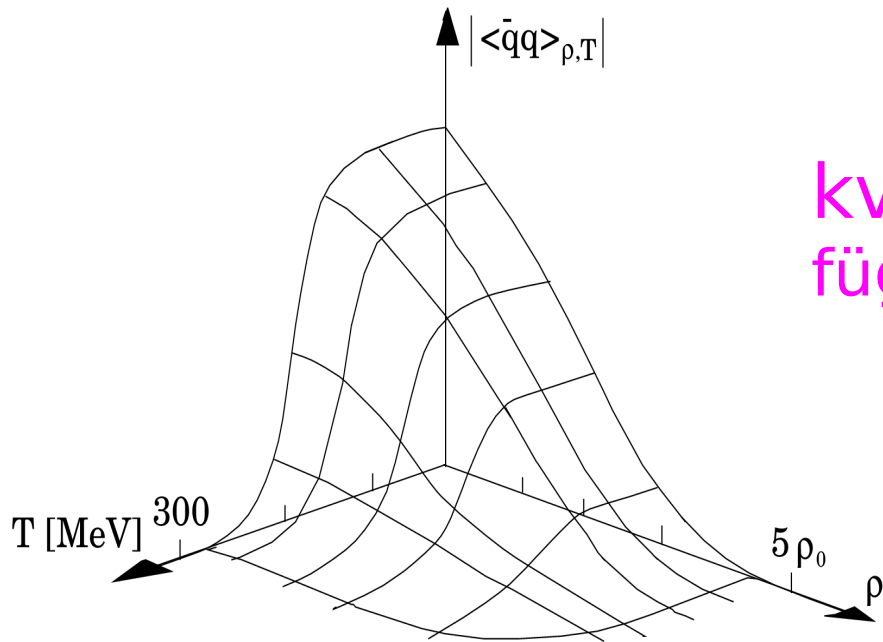


Gerjesztett lövedék (Au) legnagyobb fragmensének eloszlása,

Z_1 a rendparaméter

Kvark kondenzátum

- Királis fázisátalakulás rendparamétere: $\langle \bar{q}q \rangle$



kvark kondenzátum T és ρ függvényében

Javasolt jelek:

- Hadron tömegváltozás ($\sigma, \rho, \omega, \phi$)
- diszorientált királis kondenzátum (DCC)
- Hadron spektrálfüggvény változás

Dileptonok

