



Kovács Péter

Wigner FK RMI ELMO Nehézion fizika csoport

kovacs.peter@wigner.mta.hu

2014 október 16.

Simonyi-nap

Áttekintés

- 1 A FAIR és részei
 - Az intézet
 - Kísérletek
- 2 A hadronikus anyag fázisdiagramja
 - Megfigyelhetőség
 - Elméleti vizsgálatok
- 3 QCD: az erős kölcsönhatás elmélete
 - A QCD és szimmetriái
- 4 Effektív modellek
 - Válogatott eredmények
- 5 Egyéb modellek
 - Transzport
 - Hidrodinamika

Az intézet

A tervezett intézet...

Facility for Antiproton and Ion Research



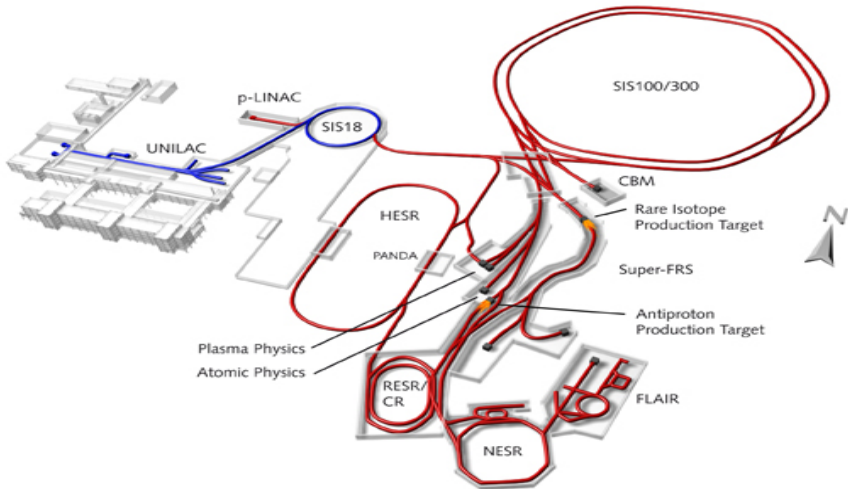
...és az aktuális állapot

Facility for Antiproton and Ion Research



első várható futás: 2018

Kísérleti összeállítás



Miért van szükség a FAIR-re?

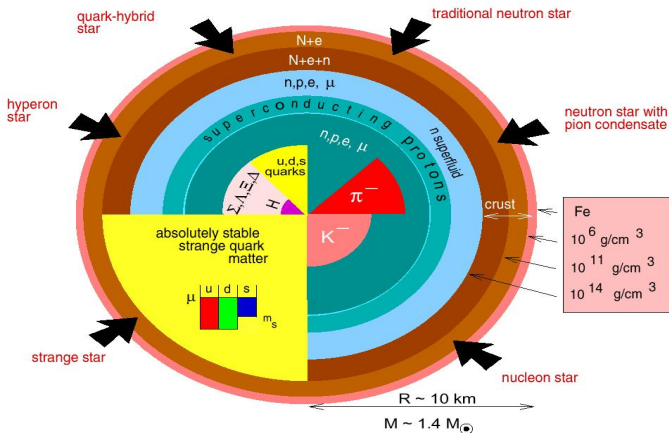
gyorsító	tkp. energia [AGeV]
SIS	1.95 – 2.7
AGS	3.3 – 5.8
FAIR	4.3 – 7.7
SPS	8.9 – 19
RHIC	20 – 200
LHC	5500

- Le nem fedett energiatartomány
- Eddigi legnagyobb földi barionsűrűség
- Fontos kutatási területek a részecskefizikától a biofizikáig

Kutatási programok

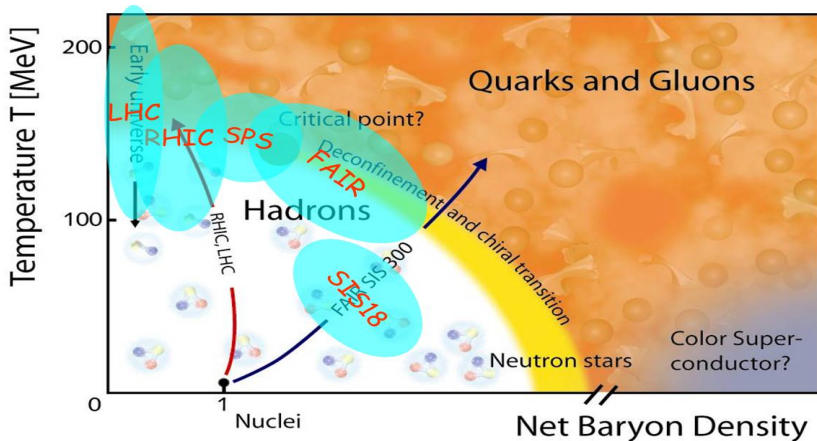
- APPA (Atomic, Plasma Physics and Applications)
Plazma (elektromosan töltött részecskék gáza) magas sűrűségen és alacsony hőmérsékleten (ami pl. nagy bolygók belsejében található)
- CBM (Compressed Baryonic Matter)
Nukleon-nukleon ütközésekben az eddigi legnagyobb sűrűség létrehozása, hadronikus anyag kvark-gluon plazma átmenet, kritikus végpont (CEP), hadronok közegbeli módosulásai
- NUSTAR (NUclear STructure, Astrophysics and Reactions)
Rádióaktív ion nyalábok (másodlagos intenzív ritka izotópok nyalábjai), a vasnál nehezebb elemek magerőinek vizsgálata; neutroncsillagok belseje
- PANDA (AntiProton ANnihilation at DArmstadt)
Hadron spektroszkópia: egzotikus részecskék (gluonikus anyag, charmonium, D mezon (open charm részecskék)), hadronok közegben, mag szerkezet, hipermagok (u,d helyett s kvark)

Neutroncsillag



Neutroncsillag állapotegyenletek → különböző elméleti modellek
(nemrég felfedezett $2 \cdot m_{\text{Nap}}$ tömegű csillagra nincs állapotegyenlet)

Az erősen kölcsönható anyag fázisdiagramja és a kísérletek

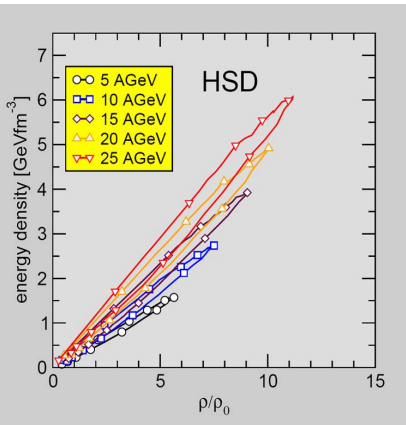
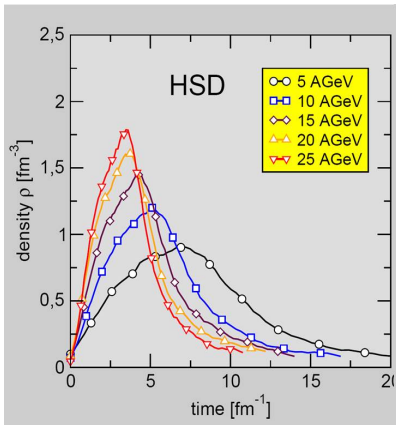


Elméletileg elérhető sűrűségek a FAIR-ben

Barion és energiasűrűség a centrális cellában ($Au + Au$), HSD transzport modellből (átlagtér, hadronok + húrok)

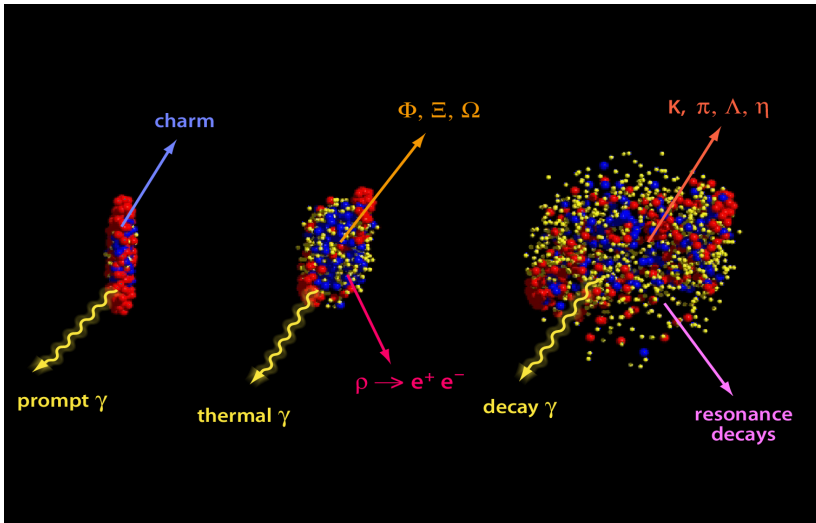
barionsűrűség

energiasűrűség



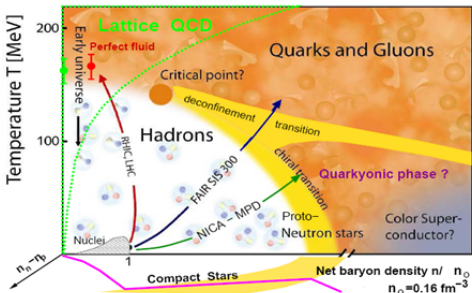
Diagnosztikai eszközök

$U + U$ 23 AGeV



A fázisdiagramja tulajdonságai

Fázisdiagram a $T - \mu_B - \mu_I$ térben



- At $\mu_B = 0$
 $T_c = 151(3)$ MeV
- Létezik-e kritikus végpont?
- $T = 0$ -n μ_B -ben hol a fázishatár?
- μ_I/μ_S szerinti viselkedés?

A fázisdiagram tulajdonságainak vizsgálata:
elméletileg \rightarrow rács, EFT, hidro, transzport modellek
kísérletileg \rightarrow RHIC, LHC, FAIR, NICA

QCD Lagrange függvénye

$$\mathcal{L}_{QCD} = \sum_{j=1}^{N_f} \bar{q}_j (i\gamma_\mu D^\mu - m_j) q_j - \sum_{a=1}^8 G_{\mu\nu}^a G^{\mu\nu,a}$$

- A szereplő terek:

- kvarkok: $q_i = \begin{pmatrix} q_i^R \\ q_i^G \\ q_i^B \end{pmatrix}$; $i = u, d, s$ és c, b, t
- gluonok: A_μ^a ; $a = 1 \dots 8$ (8 színes gluon)

- Lokális nem-Ábeli ($SU(3)_{\text{color}}$) mértékelmélet
- csupasz kvarktömegek: $m_u \approx 4 \text{ MeV}$ $m_d \approx 7 \text{ MeV}$,
 $m_s \approx 150 \text{ MeV} \implies m_q \ll m_{\text{proton}}$
 \implies QCD közelítőleg királisan szimmetrikus
- **Kvarkbezárás (confinement)**

Királis szimmetria

Amennyiben $m_q \approx 0$ (királis határeset) \implies QCD invariáns a következő globális transzformációra (**királis szimmetria**):

$$U(3)_L \times U(3)_R \simeq U(3)_V \times U(3)_A = SU(3)_V \times SU(3)_A \times U(1)_V \times U(1)_A$$

$U(1)_V$ tag \rightarrow barionszám megmaradás

$U(1)_A$ tag \rightarrow sérül az axiálanomálián keresztül

$SU(3)_A$ tag \rightarrow sérül a kvarktömegek miatt

$SU(3)_V$ tag \rightarrow $SU(2)_V$ -re sérül, ha $m_u = m_d \neq m_s$ (izospin szimmetria)
 \rightarrow teljesen lesérül, ha $m_u \neq m_d \neq m_s$ (ez valósul meg a természetben)

Mivel a QCD-t nagyon nehéz megoldani \rightarrow **alacsony energiás effektív modellek** \rightarrow a QCD globális szimmetriáit tükrözik \rightarrow

Szabadsági fokok: megfigyelhető részecskék, kvarkok és gluonok helyett

A szimmetria lineáris megvalósítása \rightarrow **lineáris σ -modell**

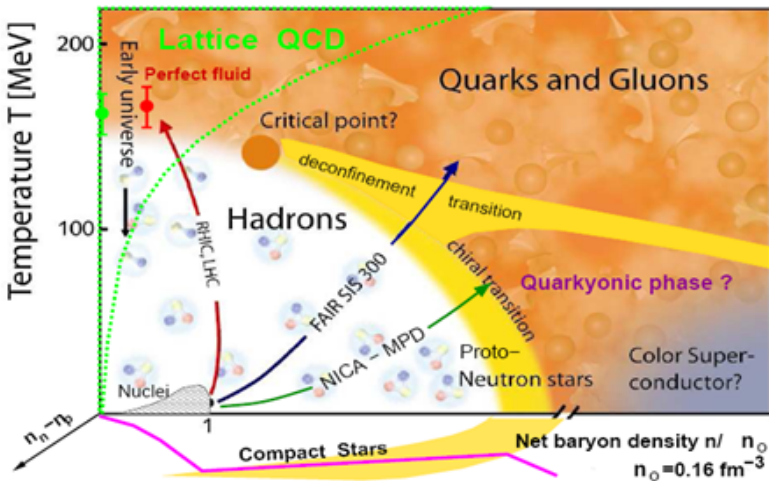
(nemlineáris reprezentáció \rightarrow királis perturbációszámítás (ChPT))

(Axiál-)vektormezonokkal kiterjesztett lineáris σ -modell

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{\text{eLSM}} = & \text{Tr}[(D_\mu \Phi)^\dagger (D_\mu \Phi)] - m_0^2 \text{Tr}(\Phi^\dagger \Phi) - \lambda_1 [\text{Tr}(\Phi^\dagger \Phi)]^2 - \lambda_2 \text{Tr}(\Phi^\dagger \Phi)^2 \\
 & - \frac{1}{4} \text{Tr}(L_{\mu\nu}^2 + R_{\mu\nu}^2) + \text{Tr} \left[\left(\frac{m_1^2}{2} + \Delta \right) (L_\mu^2 + R_\mu^2) \right] + \text{Tr}[H(\Phi + \Phi^\dagger)] \\
 & + c_1 (\det \Phi + \det \Phi^\dagger) + i \frac{g_2}{2} (\text{Tr}\{L_{\mu\nu}[L^\mu, L^\nu]\} + \text{Tr}\{R_{\mu\nu}[R^\mu, R^\nu]\}) \\
 & + \frac{h_1}{2} \text{Tr}(\Phi^\dagger \Phi) \text{Tr}(L_\mu^2 + R_\mu^2) + h_2 \text{Tr}[(L_\mu \Phi)^2 + (\Phi R_\mu)^2] + 2h_3 \text{Tr}(L_\mu \Phi R^\mu \Phi^\dagger) \\
 & + g_3 [\text{Tr}(L_\mu L_\nu L^\mu L^\nu) + \text{Tr}(R_\mu R_\nu R^\mu R^\nu)] + g_4 [\text{Tr}(L_\mu L^\mu L_\nu L^\nu) \\
 & + \text{Tr}(R_\mu R^\mu R_\nu R^\nu)] + g_5 \text{Tr}(L_\mu L^\mu) \text{Tr}(R_\nu R^\nu) + g_6 [\text{Tr}(L_\mu L^\mu) \text{Tr}(L_\nu L^\nu) \\
 & + \text{Tr}(R_\mu R^\mu) \text{Tr}(R_\nu R^\nu)] + \bar{\Psi} i \not{\partial} \Psi - g_F \bar{\Psi} (\Phi_S + i\gamma_5 \Phi_{PS}) \Psi \\
 & + g_V \bar{\Psi} \gamma^\mu \left(V_\mu + \frac{g_A}{g_V} \gamma_5 A_\mu \right) \Psi
 \end{aligned}$$

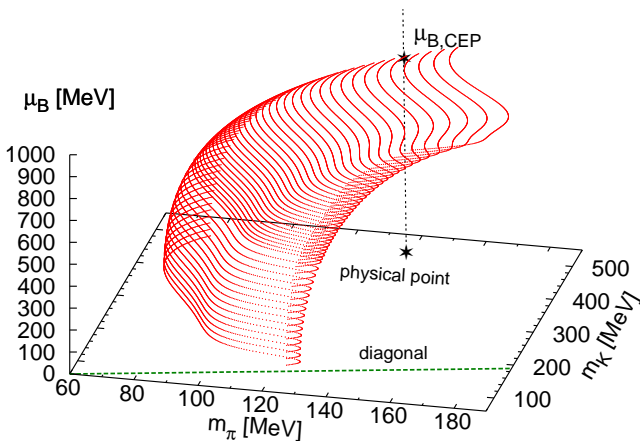
Részecsketartalom: 16 mezon + 3 konsztituens kvark

↔ a PDG (Particle Data Group) legalább ~ 150 mezont listáz



Néhány eredmény lin. σ -modellből

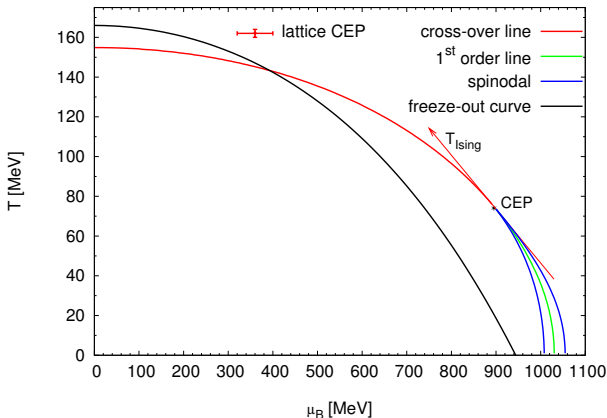
Kritikus felület a lineáris σ -modellből



A felület a fizikai pont felé hajlik \implies a CEP létezik

Válogatott eredmények

A kritikus végpont a lineáris σ -modellből



effektív modell

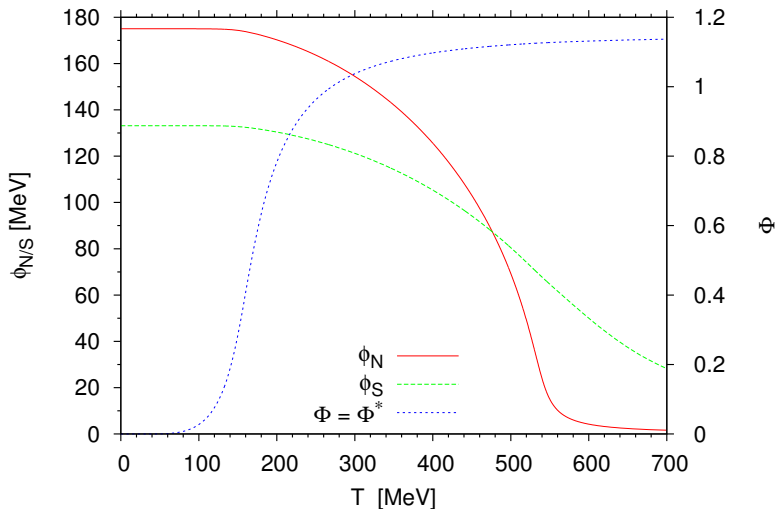
- $T_c(\mu_B = 0) = 154.84$ MeV
 $\Delta T_c(x\chi) = 15.5$ MeV
- $T_{CEP} = 74.83$ MeV
 $\mu_{B,CEP} = 895.38$ MeV

rácstérelmélet

- $T_c(\mu_B = 0) = 151(3)$ MeV
 $\Delta T_c(\chi_{\bar{\psi}\psi}) = 28(5)$ MeV
Y. Aoki, et al., PLB **643**, 46 (2006)
- $T_{CEP} = 162(2)$ MeV
 $\mu_{B,CEP} = 360(40)$ MeV

Rendparaméterek hőmérsékletfüggése eLSM-ből

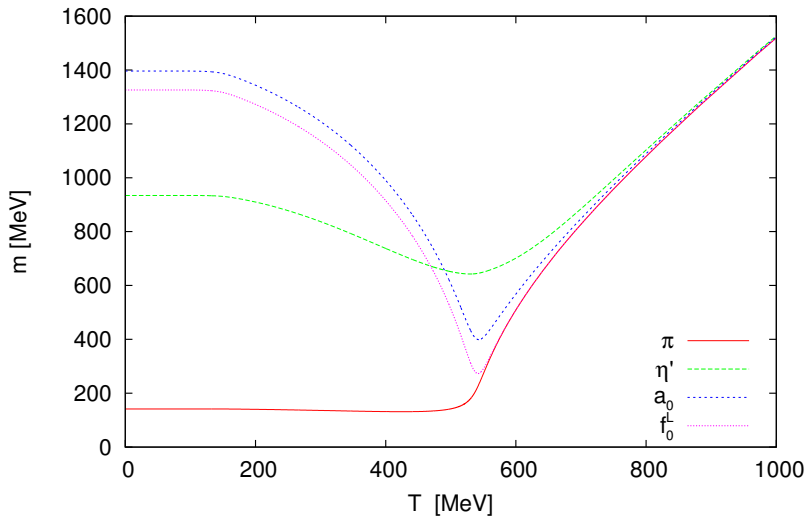
Condensates and Polyakov loop variables with vacuum fluctuations



Válogatott eredmények

π, η', a_0, f_0^L tömegek hőmérsékletfüggése eLSM-ből

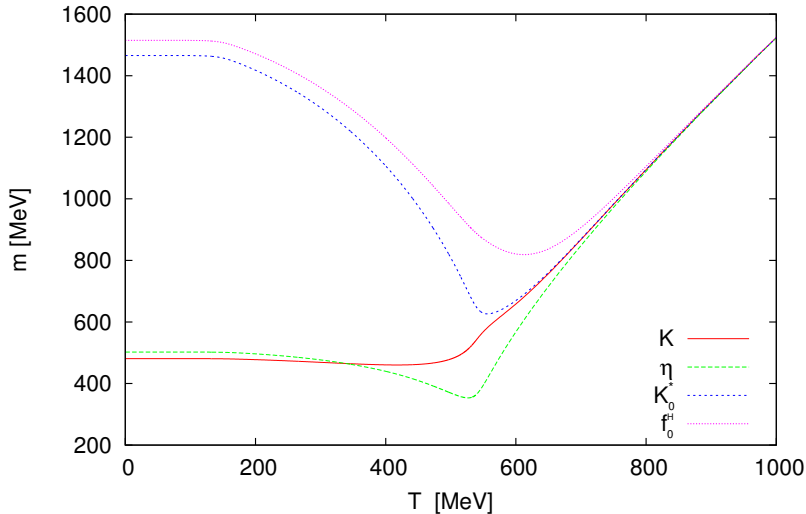
Masses with vacuum fluctuation



Válogatott eredmények

K, η, K^*, f_0^H tömegek hőmérsékletfüggése eLSM-ből

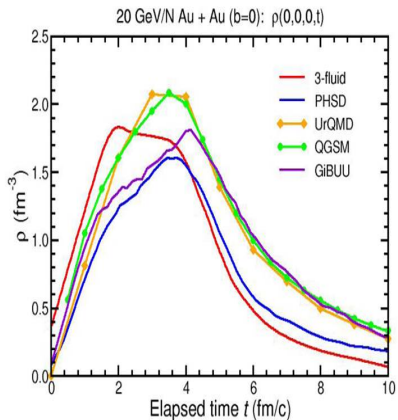
Masses with vacuum fluctuation



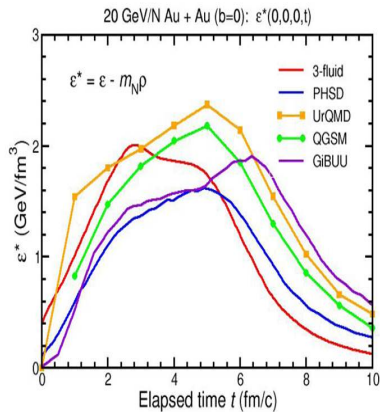
Néhány eredmény más modellekből

Sűrűségek transzport modellekből

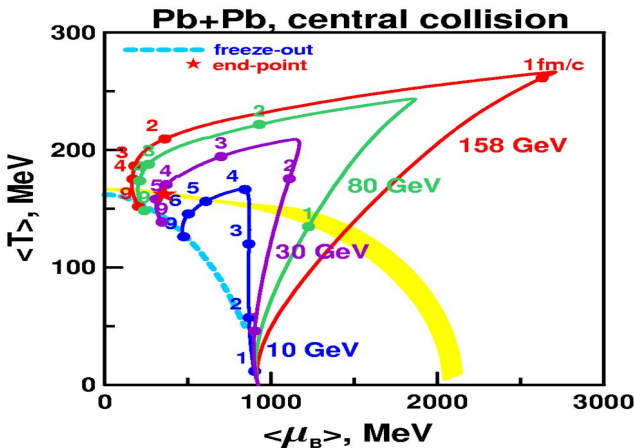
barionsűrűség



energiasűrűség



3-folyadék hidrodinamika



A FAIR és részei
○○○○○

A hadronikus anyag fázisdiagramja
○○○○○

QCD: az erős kölcsönhatás elmélete
○○

Effektív modellek
○○○○○

Egyéb modellek
○○●

Hidrodinamika

U + U 23 AGeV ütközés szimuláció UrQMD