



Zétényi Miklós

Hadronok, atommagok, kvarkok

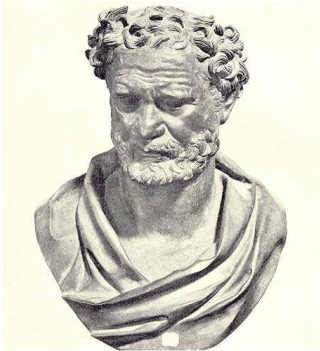
Teleki Blanka Gimnázium

Székesfehérvár, 2012. február 21.

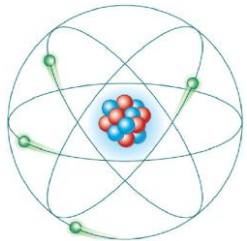
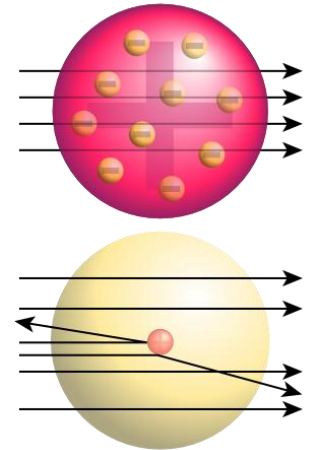
www.meetthescientist.hu



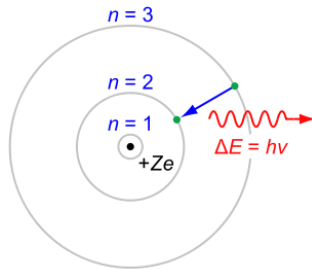
Atomok



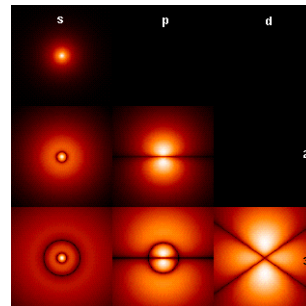
- **Démokritosz:** atom = legkisebb, oszthatatlan részecske
- **Rutherford szórás:** az atom pozitív töltésű atommagból és körülötte „elkent” elektronokból áll



Rutherford



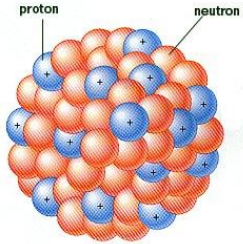
Bohr



Schrödinger

- **Atommodellek:**
atommag + körülötte keringő elektronok

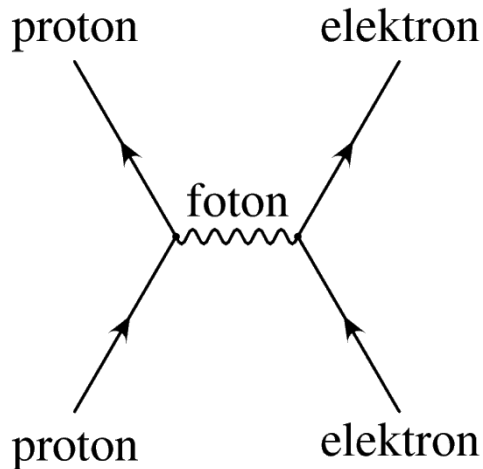
Atommagok



Atommag = protonok + neutronok
mi tartja össze? - Magerők

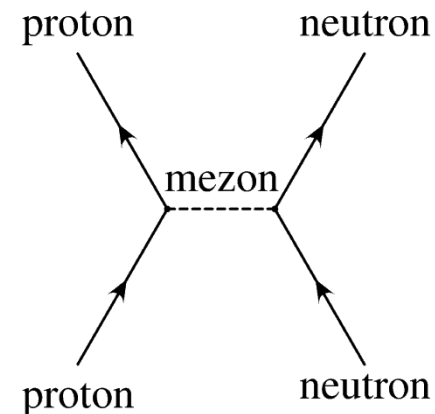
Kvantum-elektrodinamika:

Elektromágneses k.h. =
fotonok cseréje



Yukawa-elmélet:

Magerők = mezonok cseréje



π -mezonok (pionok) felfedezése
a kozmikus sugárzásban (1947)

Hadronok

- **Hadronok**: erős kölcsönhatásban részt vevő részecskék
proton, neutron, pion
- Új hadronok felfedezése (1947 – 60-as évek)
mezonok (közepesen nehéz részecskék): K , ρ , η , ...
barionok (nehéz részecskék): Λ , Δ , Σ , Ξ , ...
„Ritka” részecskék
- Részecskegyorsítók, proton-proton ütközések
- Miért van ilyen sokféle?
- Rendet kellene teremteni közöttük!

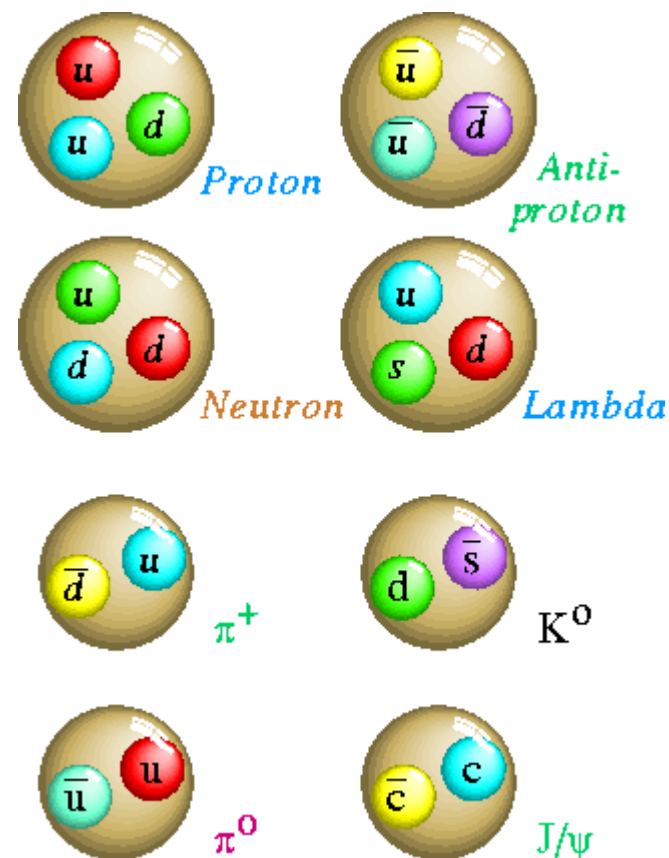
Kvarkok

- A hadronok nem elemi részecskék, hanem **kvark**okból állnak

Barion = 3 kvark

Mezon = kvark + antikvark

- Ritka részecskék: ritka (strange, s) kvarkot tartalmazznak



Elemi részecskék táblázata

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

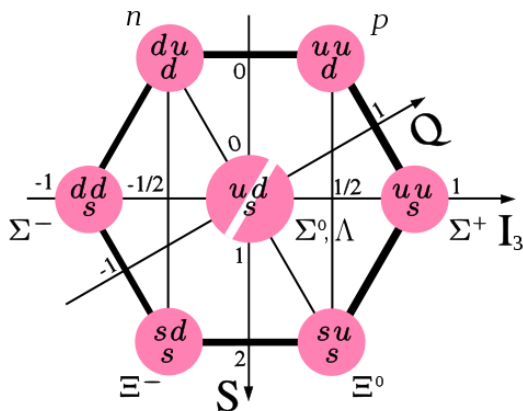
	I	II	III	
tömeg →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
töltés →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
név →	u up	c charm	t top	γ foton
Kvarkok	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$	104 MeV $-\frac{1}{3}$	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptonok	<2.2 eV 0	<0.17 MeV 0	<15.5 MeV 0	91.2 GeV 0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	ν_e elektron-neutrínó	ν_μ müon-neutrínó	ν_τ tau-neutrínó	Z Z-bozon
Bozonok (kölsönhatások)	0.511 MeV -1	105.7 MeV -1	1.777 GeV -1	80.4 GeV ± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e elektron	μ müon	τ tau	W W bozon

- A kvarkok **töltése törtszám** ($\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$)
- A tömegeket elektronvoltban (eV, MeV, GeV) mérjük
 - tömeg-energia ekvivalencia ($E=mc^2$)
 - **$c=1$ mértékegység rendszer**
 - $m_{\text{proton}} = 0.938 \text{ GeV}$
 - $m_{\text{pion}} = 0.138 \text{ GeV}$
- A nem ritka részecskéket u és d kvarkok alkotják
- A hadronok tömege sokkal nagyobb, mint az őket alkotó kvarkok össztömege

A hadronok rendszerezése

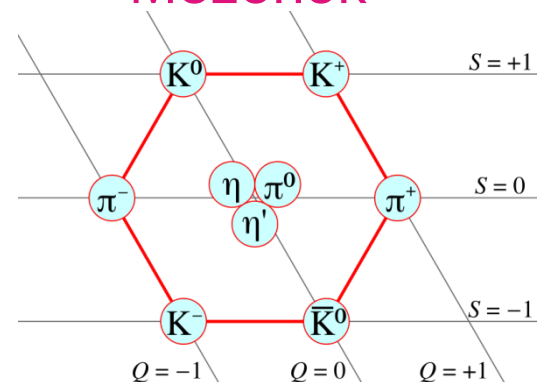
Barionok

1/2 spin

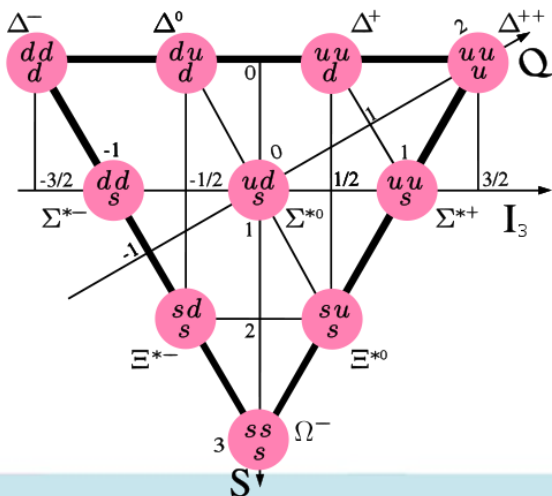


0 spin
(skalár)

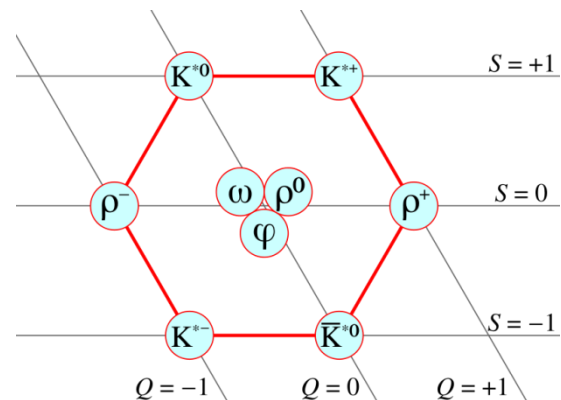
Mezonok



3/2 spin

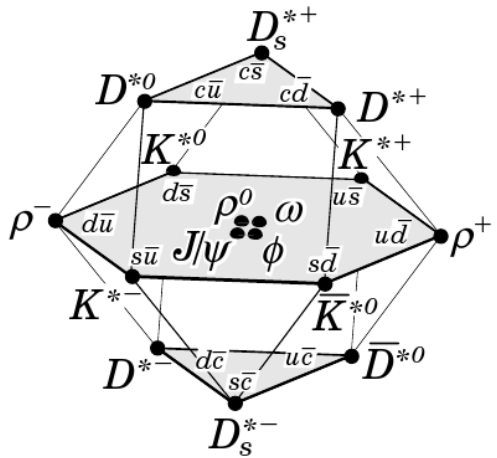
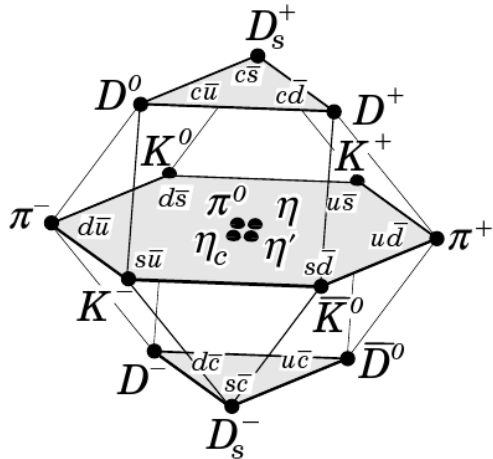


1 spin
(vektor)

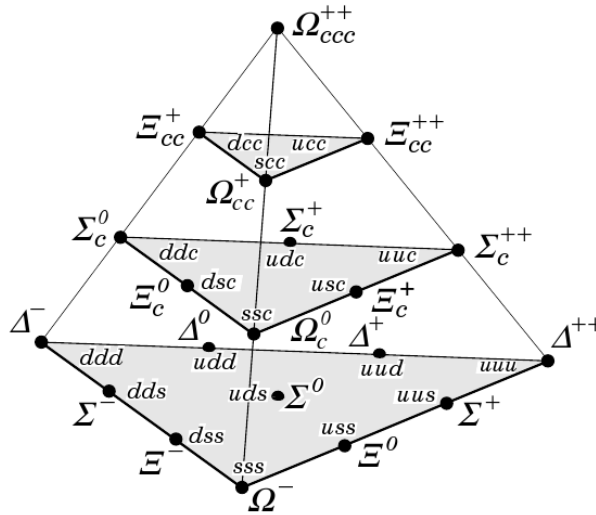
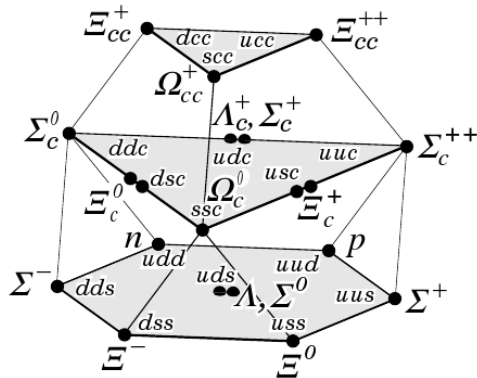


A hadronok rendszerezése

Mezonok



Barionok



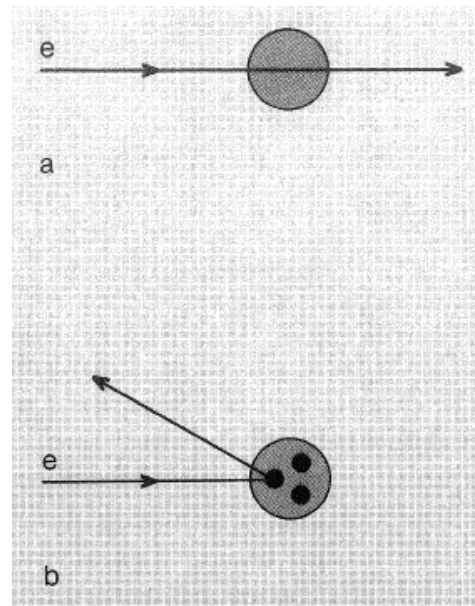
Bájos (charm, c)
kvarkot is tartalmazó
hadronok:
térbeli ábrák

Bizonyíték a kvarkok létezésére

Mélyen rugalmatlan elektron-proton szórás (1969, SLAC Kalifornia)

- 20 GeV-es elektronokat lőttek protonokba
- A proton belsejében kisebb szórócentrumok vannak
- Ezek töltése $2/3$ ill. $-1/3$

v.ö.: Rutherford szórás



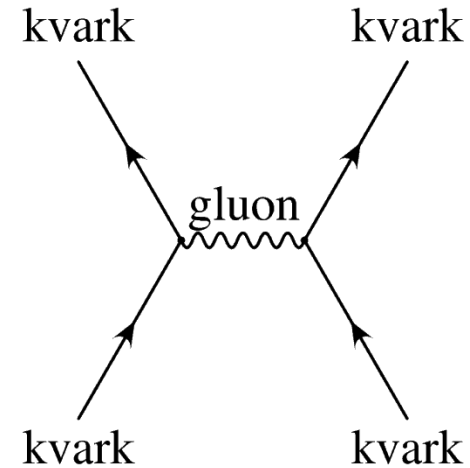
A kvarkok között ható erők

A kvantumszíndinamika szerint:

- A kvarkok közötti kölcsönhatást a **gluonok** közvetítik
- Háromféle „színtöltés”: **vörös**, **zöld**, **kék**
mindháromból van + és -, pl. **kék** – **antikék**
- Szabadon csak színtelen objektumok létezhetnek
- A természetben nem látunk $1/2$ és $1/3$ töltésű részecskéket → nincsenek szabad kvarkok

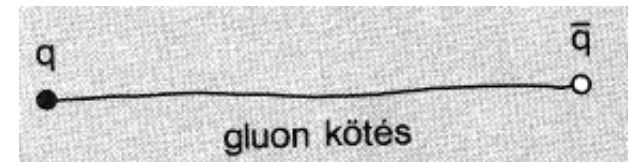
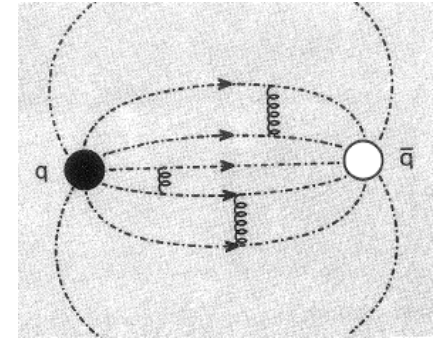


Kvarkbezárás - mi az oka?



A kvarkok között ható erők

- A gluonok is színesek → az erővonalak vonzzák egymást
- Erővonal kötegek (húrok) alakulnak ki
- A kvarkok közötti vonzóerő független a távolságtól (**1 tonna!!!**)
- Az eltávolításhoz szükséges munka $= F \cdot s$
- Az erővonalkötegben tárolt energia minden határon túl nő (?)



A kvarkok között ható erők

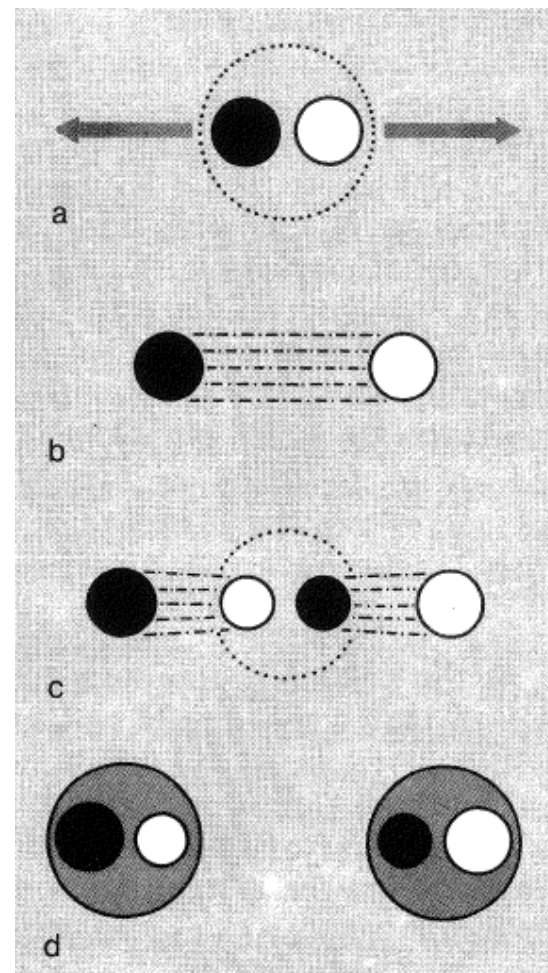
Ha a húrban tárolt energia eléri a kvarktömeg kétszeresét



Kvark-antikvark pár keletkezik

A húr elszakad

Két hadron jön létre

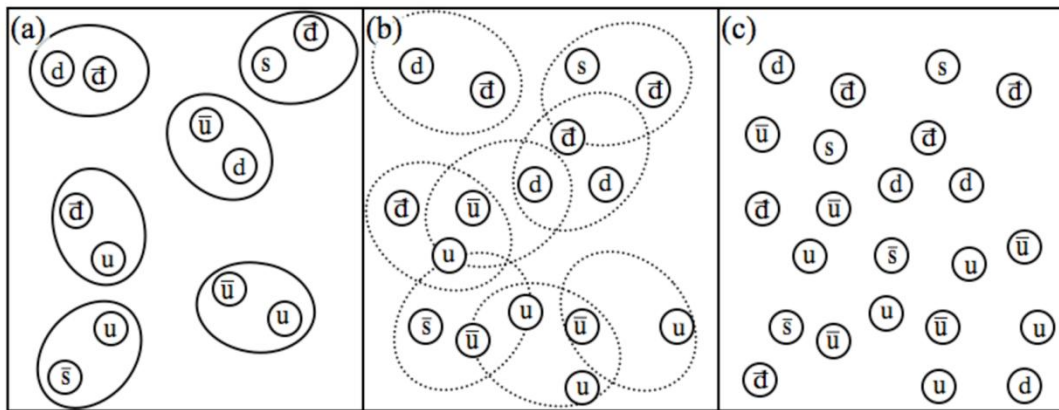


Hadronok zsákmodellje

- Nagyon kis távolságokon ($<10^{-15}\text{m}$) a kvarkok közötti vonzóerő lecsökken
→ aszimptotikus szabadság
- **Hadron = zsák**, melynek belsejében a kvarkok szabadon mozognak, de nem tudnak belőle kiszabadulni (potenciálgödör).

Kvark-gluon plazma

- A kvarkok mégis kiszabadulhatnak a zsákból (=hadronból), ha a szomszédos zsákok összeérnek
 - nagy (barion)sűrűség – összepréseljük a hadronokat
 - magas hőmérséklet – rengeteg új hadron (főleg pion) keletkezik, melyek kitöltik a teret
- Közös nagy zsákban szabadon mozgó kvarkok, antikvarkok (és gluonok) = **kvark-gluon plazma**

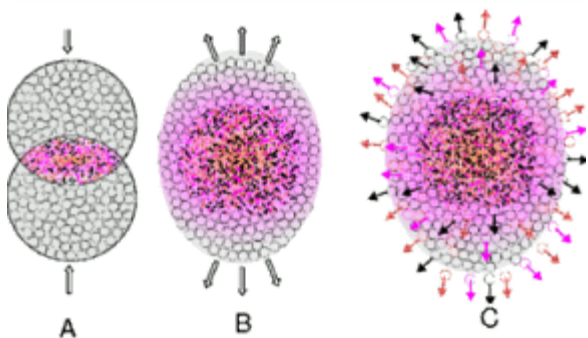


növekvő hőmérséklet →

Szabad kvarkot
továbbra sem látunk!

Nehézion ütközések

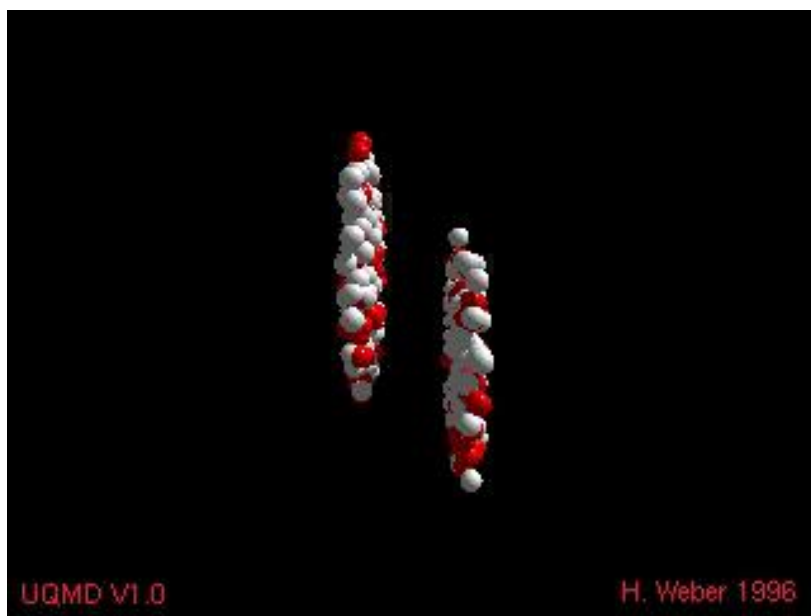
- Hogyan hozzunk létre kvark-gluon plazmát?
nagy tömegszámú atommagok (nehézionok)
ütköztetése



- Csak a szétrepülő hadronokat tudjuk detektálni
- Ezekből kell következtetni a kialakult sűrű/forró anyag tulajdonságaira

Nehézion ütközések

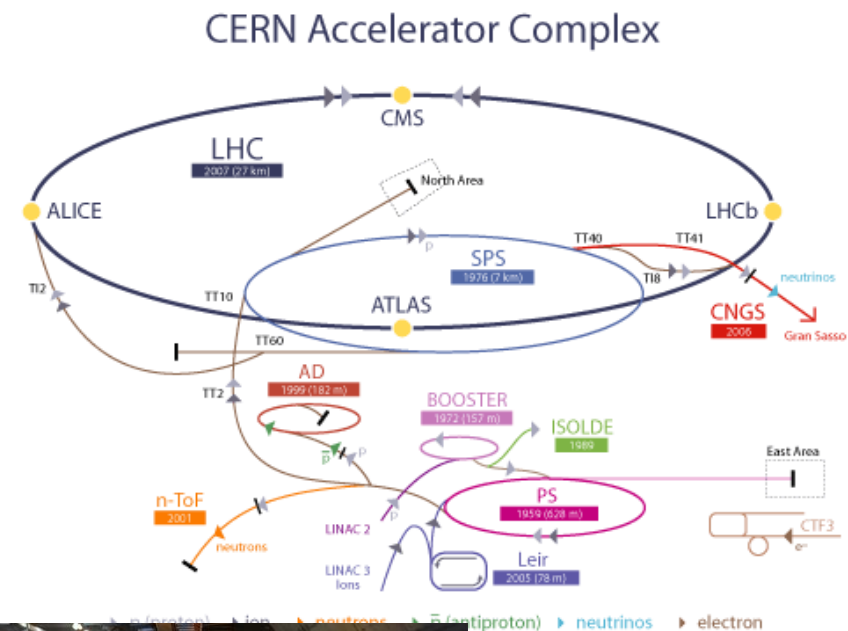
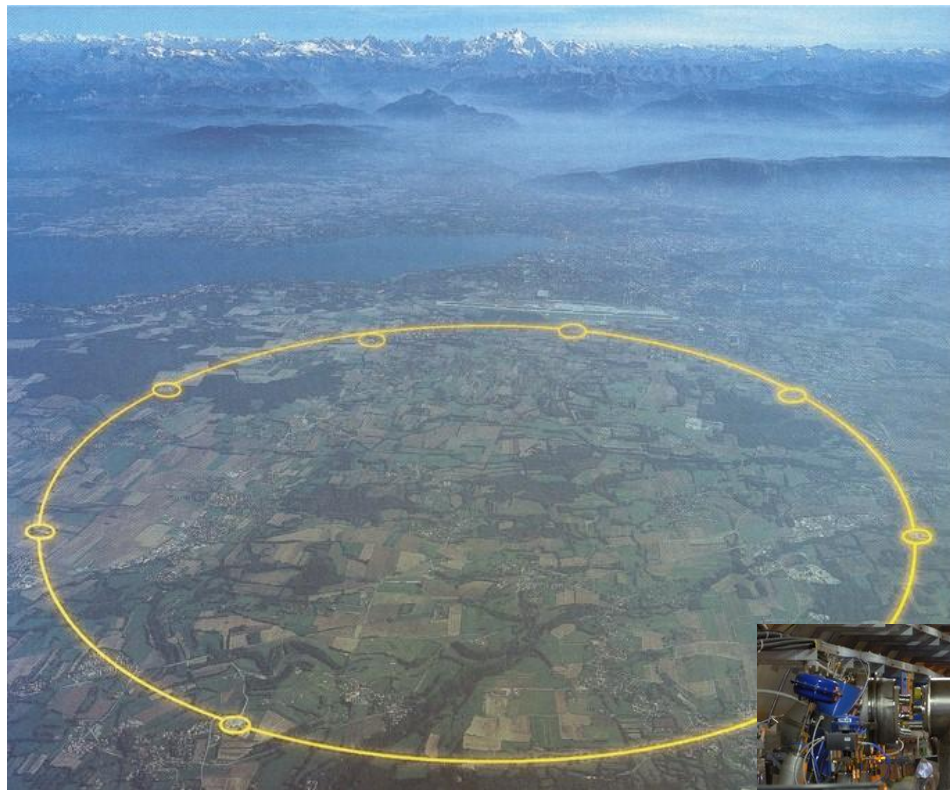
Au + Au ütközés, 200 GeV energián



- Egy nukleon energiája 100 GeV
(egy NN páré 200 GeV)
v.ö.: $m_N \approx 1 \text{ GeV}$
- majdnem fénysebességgel mozognak
- Lorentz kontrakció,
„palacsinták” ütközése

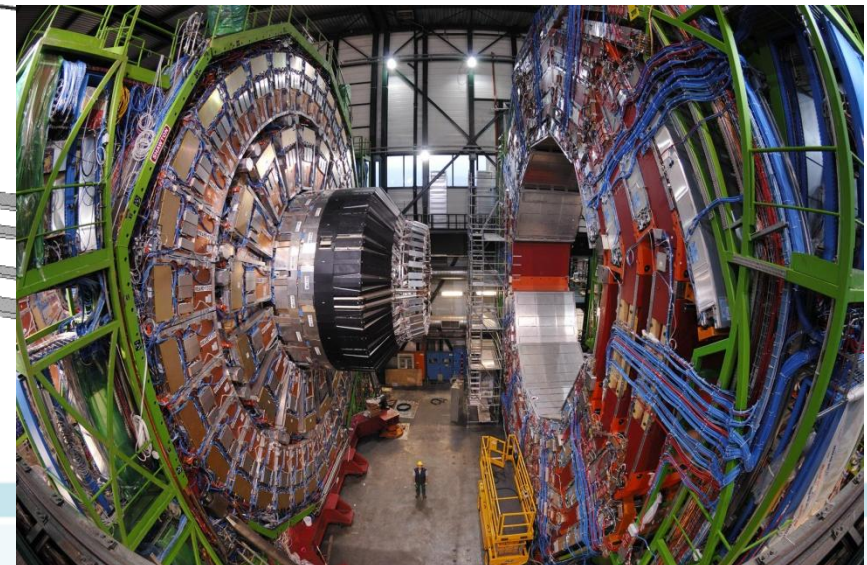
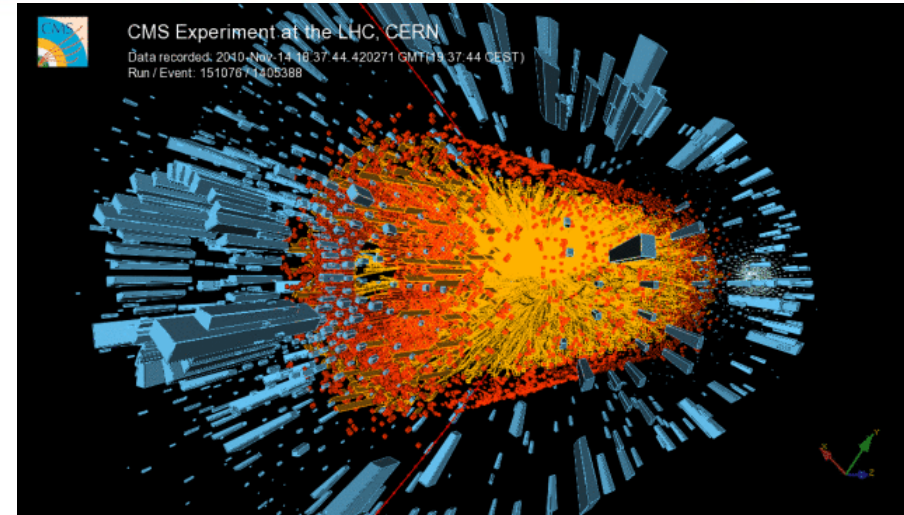
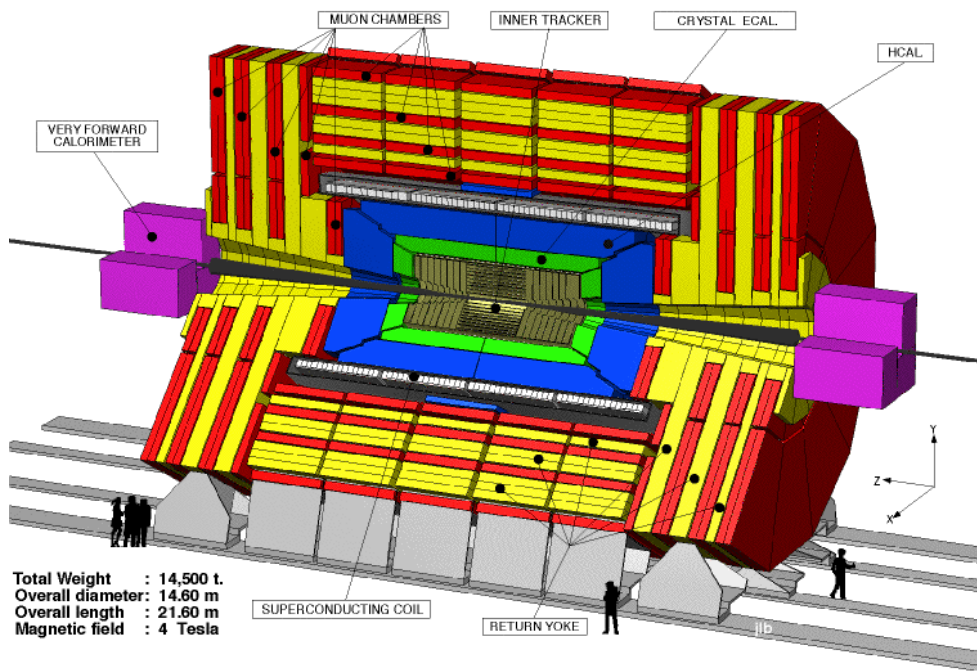
Large Hadron Collider (LHC)

... = Nagy Hadronütköztető (CERN)

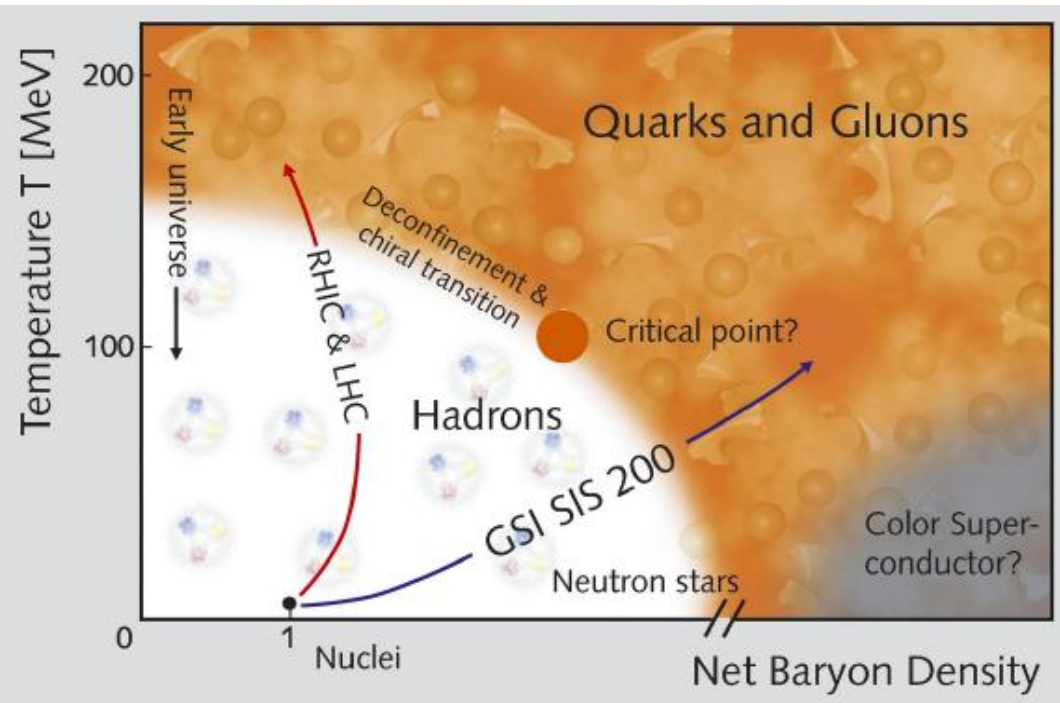


CMS detektor

... = Compact Muon Solenoid



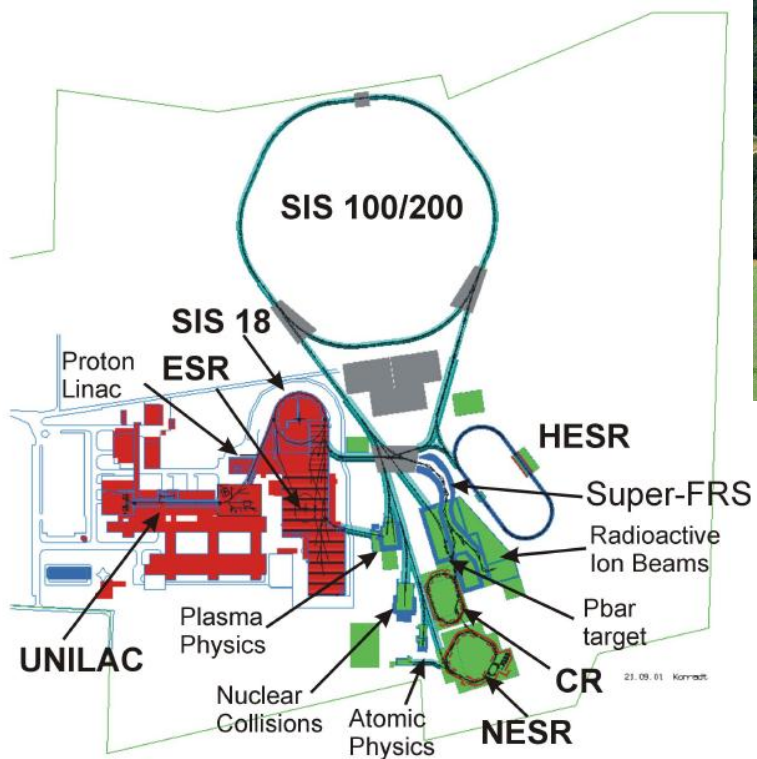
Az erősen kölcsönható anyag fázisdiagramja



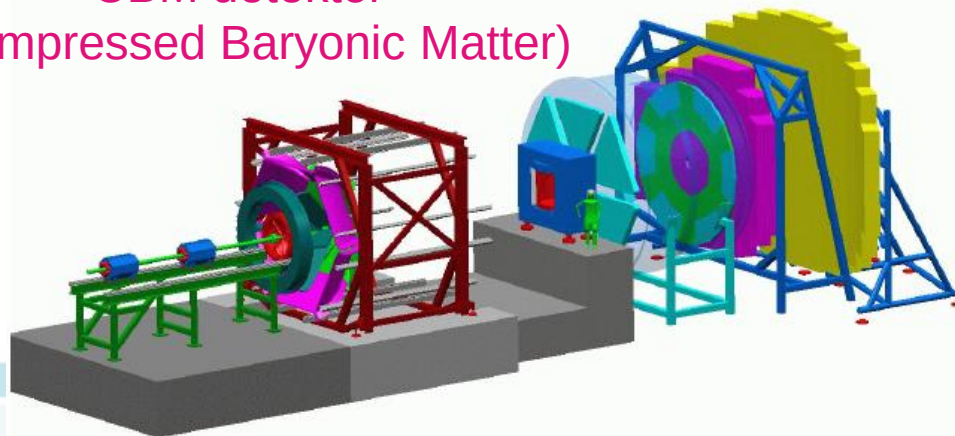
- Legnagyobb energiájú nehézion ütközések ($\sim \text{TeV}$, LHC):
magas hőmérséklet, de kis barionsűrűség
- A legnagyobb barionsűrűség kisebb ütközési energiával érhető el ($\sim 10 \text{ GeV}$) $\rightarrow$ új gyorsító: SIS 200 (=FAIR), GSI, Németország

FAIR gyorsító (GSI, Darmstadt)

FAIR = Facility for Antiproton
and Ion Research



CBM detektor
(Compressed Baryonic Matter)



Ha nem keletkezik kvark-gluon plazma ...

Kisebb energiájú nehézion ütközések (1-2 GeV)

- Hadronok keveréke keletkezik
- A hadronok tulajdonságai megváltoznak
- pl. ρ -mezon tömege – mérhető!

A ρ -mezon elektron-pozitron párra (is) bomlik

Az elektron és pozitron nem hat kölcsön a hadronokkal → megőrzi az energiáját és impulzusát (impulzus = lendület)

$$m^2c^4 = E^2 + p^2c^2$$

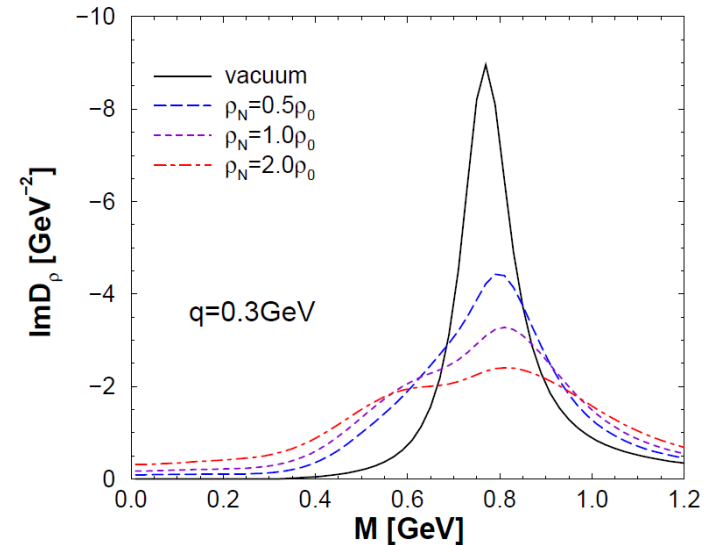
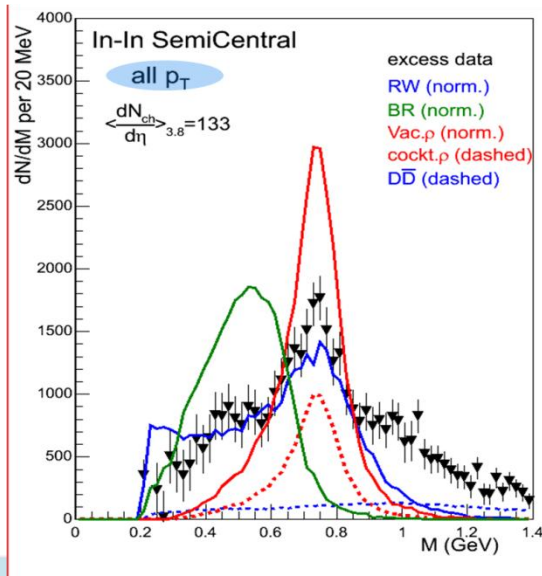
→ A ρ -mezon tömege kiszámítható

ρ -mezon tömege

Jóslatok:

- A) A tömeg lecsökken
- B) A tömegeloszlás módosul

Mérés (CERN, NA60, 2005):



- 158 GeV/nukleon, In+In
- müon párokat detektáltak
(müon $\approx$ nagyobb tömegű elektron)



Köszönöm!

www.meetthescientist.hu

