Základy časticovej fyziky

1-FYZ-601 Jadrová fyzika

ZÁKLADY

Leptóny vs. hadróny

Prvá možnosť delenia je podľa interakcie častíc.

Gravitácia – pôsobí na všetky častice.

<u>Leptóny</u> – interagujú slabo a ak sú nabité tak elektromagneticky (e, μ, τ, ν_e, ν_μ, ν_τ). Považujeme ich aktuálne za bodové častice.

<u>Hadróny</u> – interagujú naviac aj silno. Majú štruktúru a nebodový rozmer (~ 1 fm). Hadróny samotné poznáme:

Dvojkvarkové (kvark – anti-kvark pár) – mezóny (π^+, π^-, π^0, K^+, K^-, K^0, η^0, ω^-, ρ^+, ρ^-, ρ^0...)

Trojkvarkové – baryóny (p, n, Λ^0, Σ^0, Σ^+, Σ^-...)

Bozóny vs. fermióny

Bozóny – riadia sa tzv. Bose-Einsteinovou štatistikou – v jednom stave môže byť ľubovoľný počet častíc. Majú celočíselný spin. Patria k ním mezóny a častice poľa (fotóny, gravitóny, gluóny...).

Fermióny – riadia sa Fermi-Dirac štatistikou – platí pre nich Pauliho vylučovací princíp. V jednom stave sa môže nachádzať iba jedna častica. Majú polčíslný spin.

Parita

Parita – každá elementárna častica ma intristickú paritu. Taktiež opisuje symetriu vlnovej funkcie voči zámene súradnic. Platí pritom $\psi(r) \rightarrow \psi(-r) = \pi\psi(r)$. Parita sa absolútne zachováva v silných a elektromagnetických interakciách. V slabých interakciách je možnosť jej narušenia.

Celková parita systému sa počíta ako súčin intristických parít častíc a ich relatívnej parity celého systému.

Baryónové a leptónové číslo

<u>Baryónové číslo</u> – baryóny majú B=1 a antibaryóny B = -1. Pre leptóny, mezóny a častice poľa sa zavádza B = 0.

Rozpady ako napr. $\overline{\Lambda^0} \rightarrow p + \pi^-$ sú zakázané pretože ľavá strana má B = -1 a pravá strana má B = 1 + 0.

<u>Leptónové číslo</u> – zavádza sa L = +1 pre leptóny a L = -1 pre antileptóny. Pre neleptónové častice máme L = 0. Príklad zachovanie je záchyt neutrína $\overline{\nu_\mu} + p \rightarrow \mu^+ + n$. Na ľavej aj pravej strane je L = -1 + 0.

Pritom sa zachováva extra leptónové číslo pre elektrónové, miónové aj tau neutrína.

Izospin

Pri atómových jadrách sa zavádza vzhľadom na nerozlíšiteľnosť protónov a neutrónov voči silnej interakcii. Ich zámena vedie na podobné stavy atómových jadier.

V časticovej fyzike spájame jednotlivé častice fo izospinových multipletov ako napr. (p, n); $(\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-)$, (π^+, π^0, π^-). Samotný izospin môžeme definovať ako $T_3 = \frac{Q}{e} - \frac{\bar{Q}}{e}$ kde Q je náboj častice a $\bar{Q}$ je priemerný náboj v izospine. Takže takto protón bude mať $T_3 = \frac{1}{2}$ a neutrón $T_3 = -\frac{1}{2}$.

Niektore multiplety môžu byť nábojovo asymetrické voči nule, napr. $(\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-)$ - baryón zložený z up (q = 2/3) a down (q=-1/3) kvarkov. $T_3(\Delta^{++}) = +\frac{3}{2}$; $T_3(\Delta^+) = +\frac{1}{2}$; $T_3(\Delta^0) = -\frac{1}{2}$; $T_3(\Delta^-) = -\frac{3}{2}$;

Podivnosť a šarm

V časticovaj fyzike nevystačíme už s klasickými kvantovými číslami ale zavádzame ďalšie, ako napr. podivnosť, šarm, farba a pod. Tieto opisujú jednotlivé procesy, aj ked nesúvisia s analógiou z klasického sveta.

Ako prvá veličina bola zavedená podivnosť (strangeness) *S* s tzv. podivnými časticami (časticami s nenulovou hodnotou podivnosti). Niektoré procesy v časticovej prebiehajú na časovej škále typickej pre silné interakcie (~ 10^{-22} s) a iné na časovej škále slabých interakcií (~ 10^{-10} s). Práve pomalšie procesy zahŕňajú rozpady častíc s nenulovou podivnosťou.

Podivnosť a šarm

Podivnosť sa zachováva pri silných a elektromagnetických interakciách, ale môže sa meniť o 1 pri slabých interakciách.

Takže napríklad neexistuje priamy rozpad hyperónu Xi $\Xi^- \rightarrow n + \pi^-$ ktorý má podivnosť -2. Produkty majú podivnosť 0. Prebieha dvojkrokovo cez produkciu Λ^0 s podivnosťou 1 $\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$ a $\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^0$

Podivnosť a šarm

Jednotlivé priradené kvantové čísla nie sú úplne nezávislé. Platí pre ne závislosť tzv. Gell-Mann-Nishijima vzťah

$$\frac{Q}{e} = T_3 + \frac{B+S}{2}$$

Podobne môžeme zaviesť aj kvantové číslo šarm (relevantné napr. pre D mezóny $\left(D^{\pm}, D^0, \overline{D^0}\right)$. Opäť sa zachováva v silných a elmag interakciách a mení sa o jedna v slabých. Aby sa zahrnul šarm, musí sa Gell-Mann-Nishijima vzťah upraviť

$$\frac{Q}{e} = T_3 + \frac{B+S+C}{2}$$

Rezonancie

- Okrem základných častíc rozoznávame aj niekoľko stovák rezonancií. Ide vo vzbudené stavy častíc, s krátkou dobou života (10^{-23} s) rozpadajúce sa silnou interakciou.
- Dajú sledovať napr. v rozptylových reakciách. Napríklad N^+ a N^0 sú vzbudené stavy nukleónov (protónu a neutrónu).

Kvarkový model

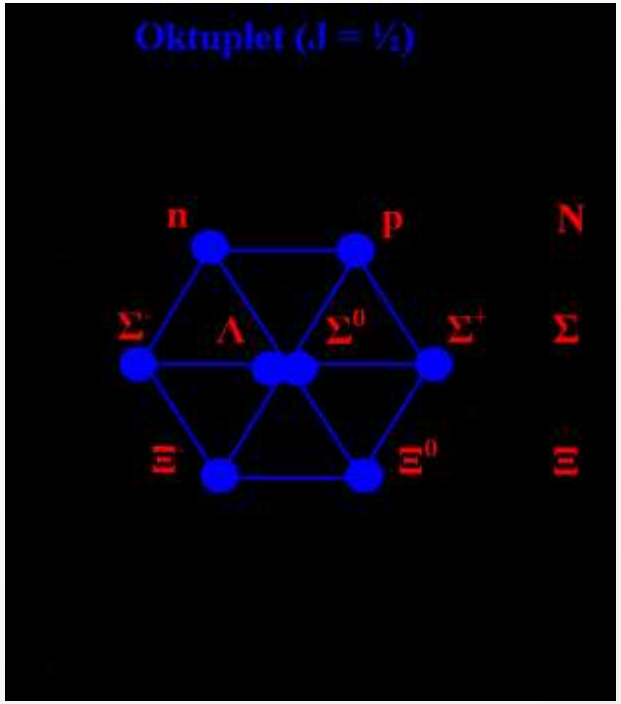
Pvý návrh z r. 1964 (Murray Gell-Man) zahŕňal iba tri kvarky (up, down a strange). Ako už bolo spomenuté baryóny sú tvorené tromi kvarkami a mezóny kvark antikvarkovým párom.

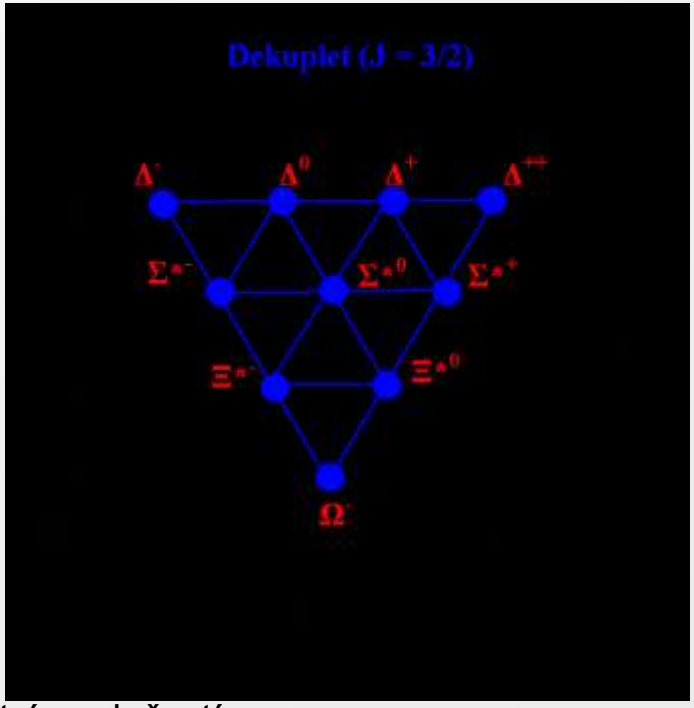
5-kvarkové častice – pentaquark – prvá indikácia 2003 – nepotvrdená. V r. 2015 LHCb kolaboráciav kanáli $\Lambda_b^0 \longrightarrow J/\Psi K^- p$ videla rozpad na K^- charmonium-pentaquark ($uud\bar{c}c$).

Jednotlivé kvarky majú rôzny náboj, hmotnosť, spin, podivnosť...

Častice s *u*,*d* a *s* kvarkom

S prvých troch kvarkov môžeme zostaviť jednoduché diagramy zobrazujúce systematické vlastnosti týchto častíc. Napríklad pre baryóny so spinom J=1/2 resp. J=3/2 možno zostaviť octuplet, prípadne dekuplet častíc, kde na osy X je izospin a Y je podivnosť.

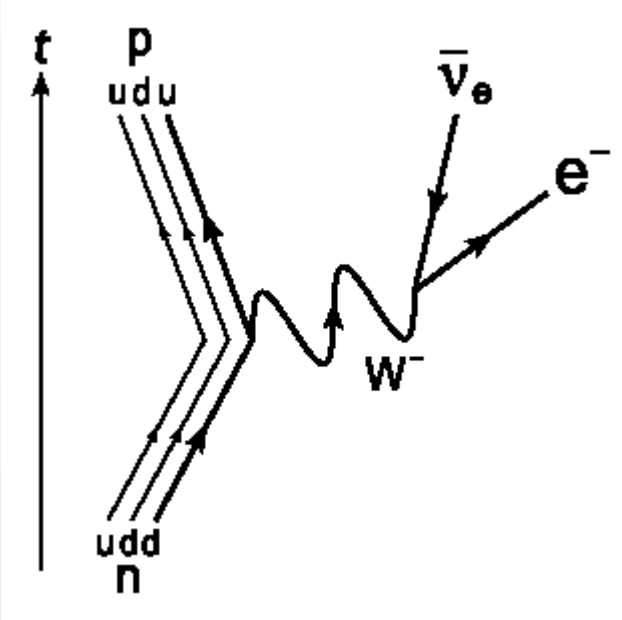




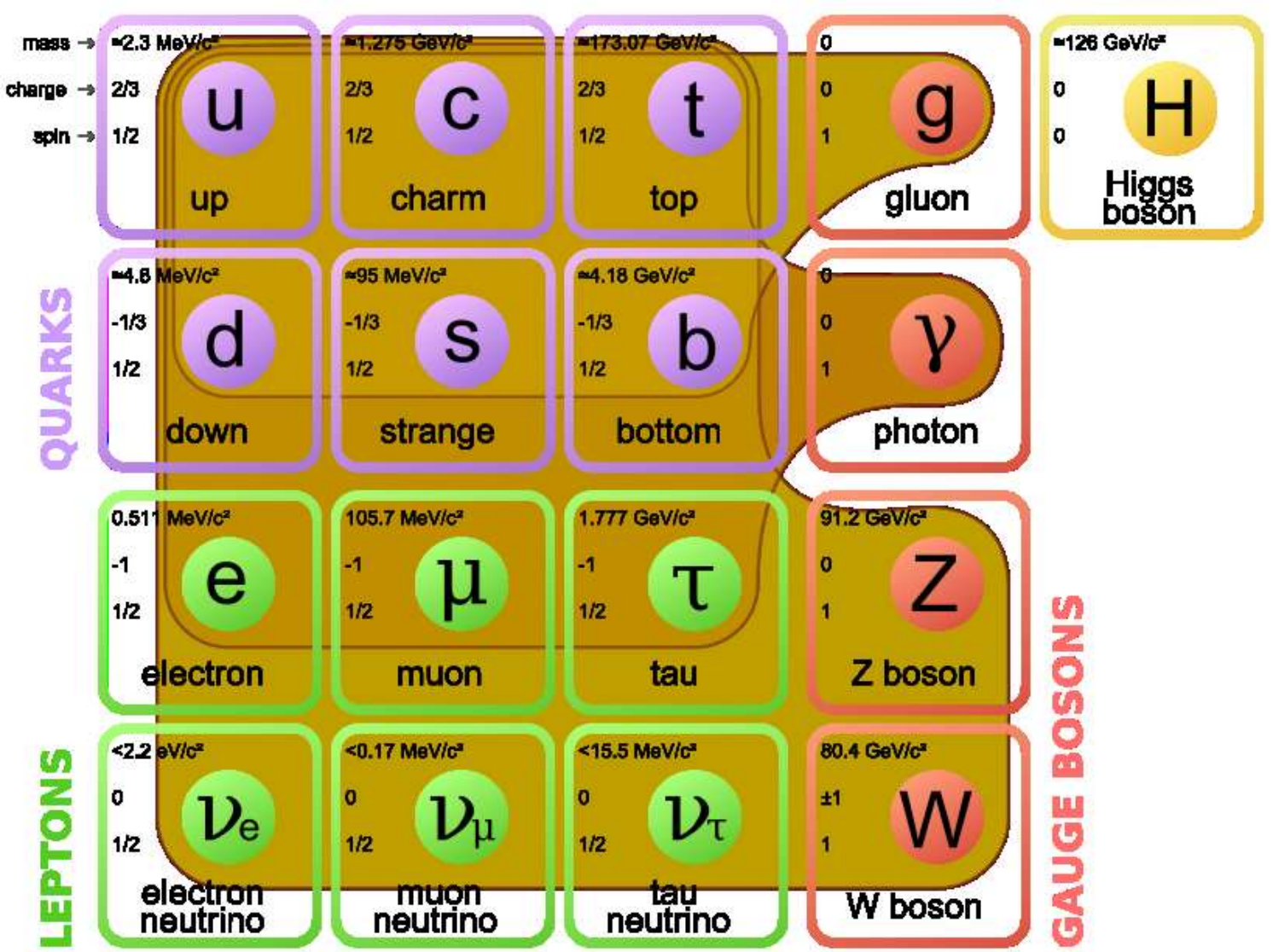
Štandartný model

Teória spájajúca silnú, slabú a elektromagnetickú interakciu. Samotné interakcie sú reprezentované neustálou výmenou častíc.

V prípade elektromagnetickej interakcie sa prenáša fotón, pri slabej interakcii W a Z bozóny. Silná interakcia je prenášaná gluónmi.



Štandartný model



Zoznam kvarkov

Kvark	Q [e]	$I(J^P)$	I_z	S	C	B	T
u	+2/3	$1/2(1/2^+)$	+1/2	0	0	0	0
d	-1/3	$1/2(1/2^+)$	-1/2	0	0	0	0
s	-1/3	0(1/2+)	0	-1	0	0	0
c	+2/3	0(1/2+)	0	0	+1	0	0
b	-1/3	0(1/2+)	0	0	0	-1	0
t	+2/3	0(1/2+)	0	0	0	0	+1

Fermióny - leptóny

Názov	Náboj	Zloženie	spin	hmotnosť	$T_{1/2}$	Antičastica
elektrón,e-	$-e$	-	1/2	0.511 MeV	stab	e+
pozitrón,e+	$+e$	-	1/2	0.511 MeV	stab	e-
mión, μ-	$-e$	-	1/2	105.7 MeV	2.2 μs	μ+
antimión, μ+	$+e$	-	1/2	105.7 MeV	2.2 μs	μ-
tau, τ-	$-e$	-	1/2	1.78 GeV	3×10^{-13}s	τ+
antitau, τ-	$+e$	-	1/2	1.78 GeV	3×10^{-13}s	τ-
ν_e	0	-	1/2	< 2 eV	stab	$\overline{\nu_e}$
$\overline{\nu_e}$	0	-	1/2	< 2 eV	stab	ν_e
ν_μ	0	-	1/2	< 170 keV	stab	$\overline{\nu_\mu}$
$\overline{\nu_\mu}$	0	-	1/2	< 170 keV	stab	ν_μ
ν_τ	0	-	1/2	< 15 MeV	stab	$\overline{\nu_\tau}$
$\overline{\nu_\tau}$	0	-	1/2	< 15 MeV	stab	ν_τ

Fermióny – baryóny

Názov	Náboj	Zloženie	spin	hmotnosť	$T_{1/2}$	Antičastica
protón, p	$+e$	uud	1/2	938.3 MeV	stab	p-
antiprotón	$-e$	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	1/2	938.3 MeV	stab	p
neutrón	0	udd	1/2	939.5 MeV	8 min	$\bar{n}$
antineutrón	0	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$	1/2	939.5 MeV	8 min	n
lambda, Λ^0	0	uds	1/2	1115 MeV	2×10^{-10}s	τ+
...						

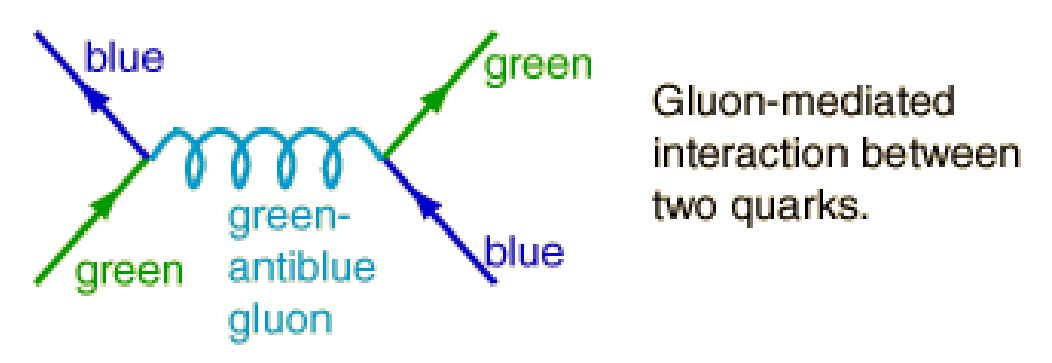
bozóny - mezóny

Názov	Náboj	Zloženie	spin	hmotnosť	$T_{1/2}$	Antičastica
π^+	$+e$	$u\bar{d}$	0	139.5 MeV	3×10^{-8}s	π^-
π^-	$-e$	$d\bar{u}$	0	139.5 MeV	8×10^{-17}s	π^+
π^0	0	$u\bar{u}\ d\bar{d}$	0	134.9 MeV	8×10^{-17}s	π^0
K^+	$+e$	$u\bar{s}$	0	493.7 MeV	1×10^{-8}s	K^-
K^0	0	$d\bar{s}$	0	497.6MeV	K_L, K_S	
...						

Farebný náboj

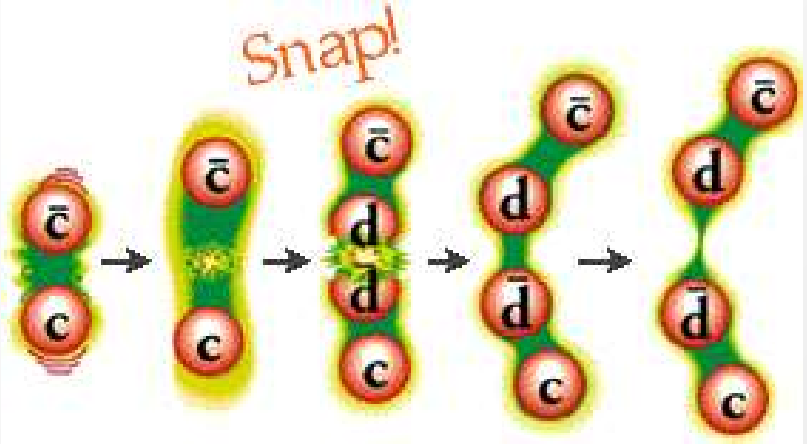
Problémom bolo objavenie hyperónu Ω^-s tromi *s* kvarkami a spinom 3/2 (problém s Pauliho vylučovacím princípom, kvarky sú fermióny). Podobný problém bol s Δ^{++} s tromi up kvarkami. Bolo potrebné zaviesť nové kvantové číslo.
Kvarkom sú pritom v časticiach priradené farby a celá častica by mala byť pritom bezfarebná (kvantová chronodynamika).

Gluóny reprezentujú prenášanie farieb. V rámci teórie máme 8 druhov gluónov prenášajúcej príslušné farby a antifarby (napr. červený-antizelený).



Quark confinement

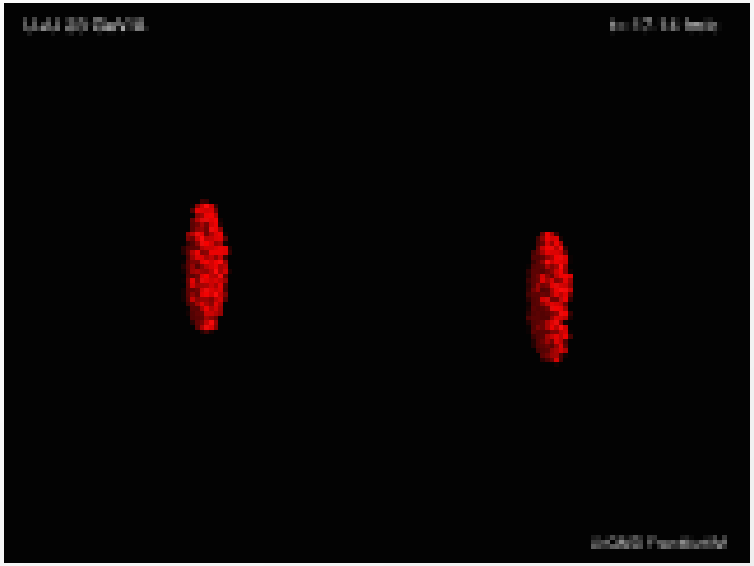
V rámci QCD teórie sú kvarky uväznené (confinement), keď separovaní kvarkov narastá energia väzby až dosiahne úroveň vytvorenia nového kvark-antikvark páru. Confinement sa narúša v kvark-gluónovej plazme.



VYSOKOENERGETICKÉ REAKCIE

Zrážky pri vysokých energiách

- Pri energii menšej ako 10 MeV/u jedoba zrážky výrazne dlhšia ako prechod nukleónu cez jadro. V reakcii sú dôležité kolektívne interakcie.
- Pri energii 1 GeV/u dominujú už individuálne zrážky nukleónov. Doba zrážky je porovnateľná s dobou prechodu nukleónu jadrom. Jepotrebný nový pohľad na jadrové reakcie.



Počítačová simulácia dvoch jadier uránu pri maximálnych energiách experimentov v rámci FAIR (niekoľko 10 GeV/u) [*www.gsi.de*]

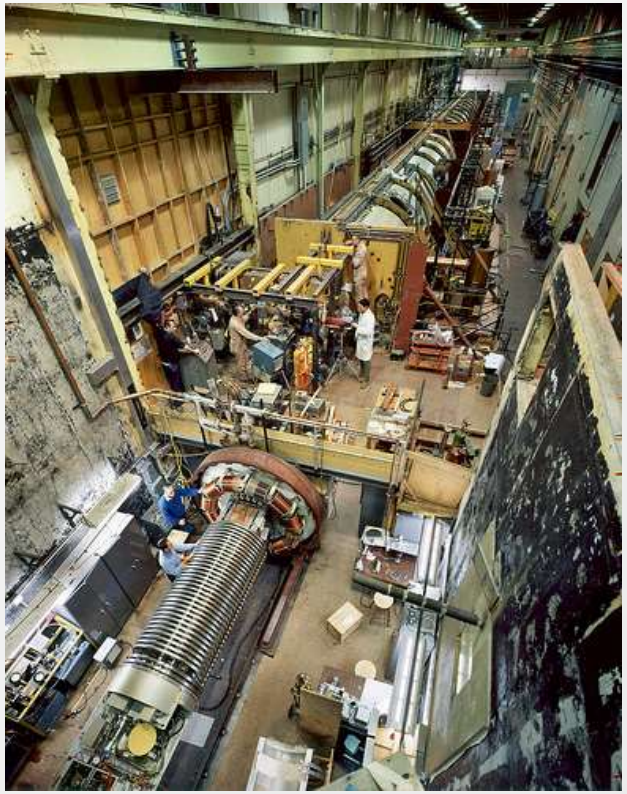
- Prechodná oblasť 100 MeV/u ešte umožňuje oddelenie dvoch jadier po interakcii.

Špecifické vlastnosti rel. reakcií

- Pri ultrarelativistických energiách zavádzame nové termíny požičané z termodynamiky akonapr. Efektívna teplota systému, fázové prechody hmoty a pod.

Prvé merania

Dosiahnutie energií 1 GeV/u v Berkeley na urýchľovači Bevalac (1984). Bevalac je kombinácia dvoch starších urýchľovačov, konkr. Bevatron (1954) a SuperHILAC (1972).



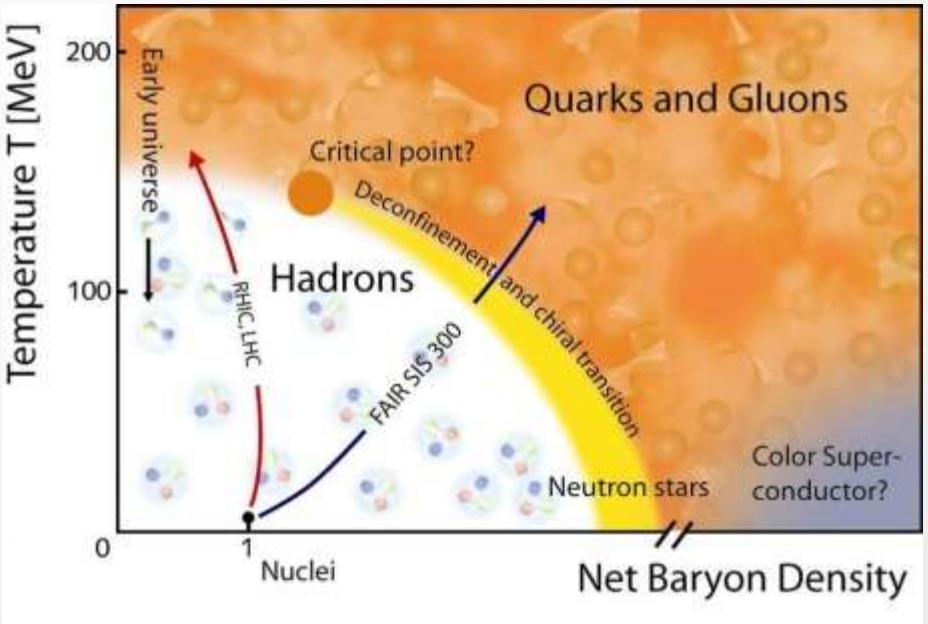
Možnosť urýchľovať akýkoľvek stabilný izotop na relativistické energie.

Ambiciózny cieľ – hľadanie kvark-gluónovej plazmy. Prvý výskum ako vyzerá veľmi stlačená horúca jadrová hmota.

QUARK GLUÓNOVÁ PLAZMA

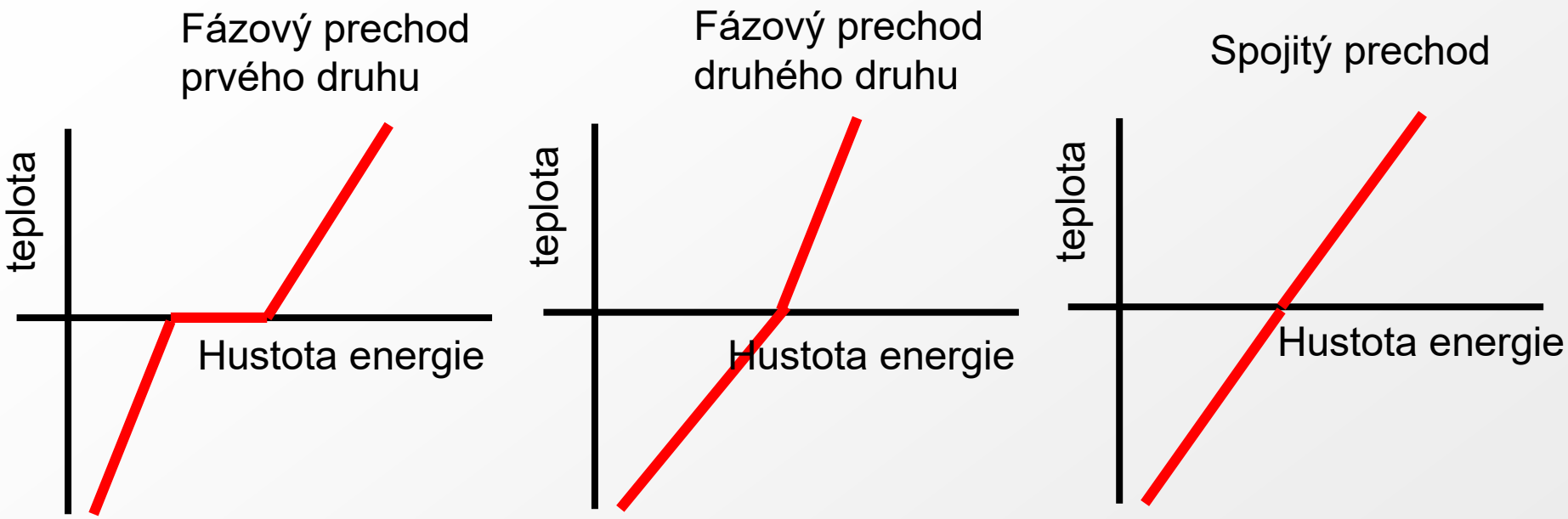
Zmena jadrovej hmoty

- Zvyšujúce sa energie zväzkov umožnili študovať jadrovú hmotu pri rôznych hustotách a teplotách. Pripostupne sa zvyšujúcej energii sa objavili postupne:
  - Excitácie nukleónov na rezonancie Δ (*uuu, uud, udd, ddd)* a N*
  - Fázový prechod od hadrónovej kvapaliny k hadrónovému plynu
  - Fázový prechod ku kvark-gluónovej plazme



Čo je to fázový prechod

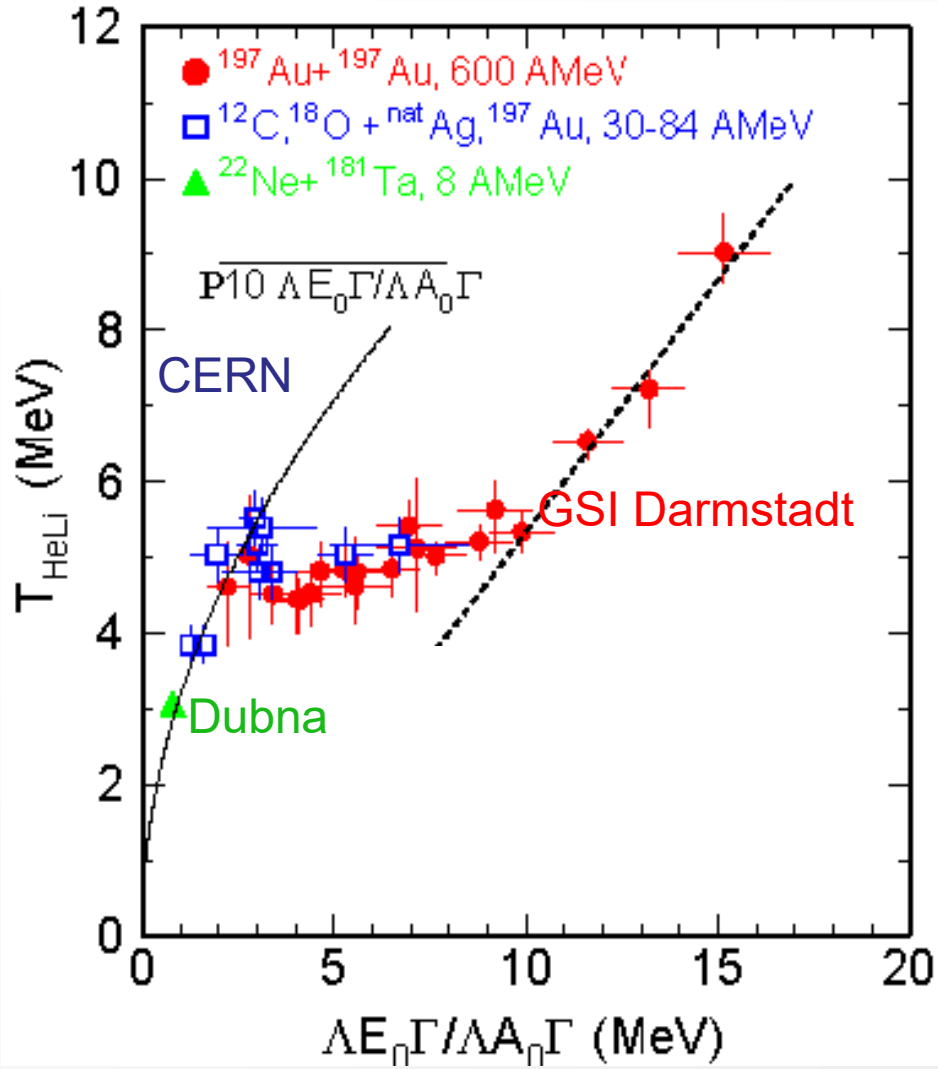
- Možné sú tri druhy fázových prechodov



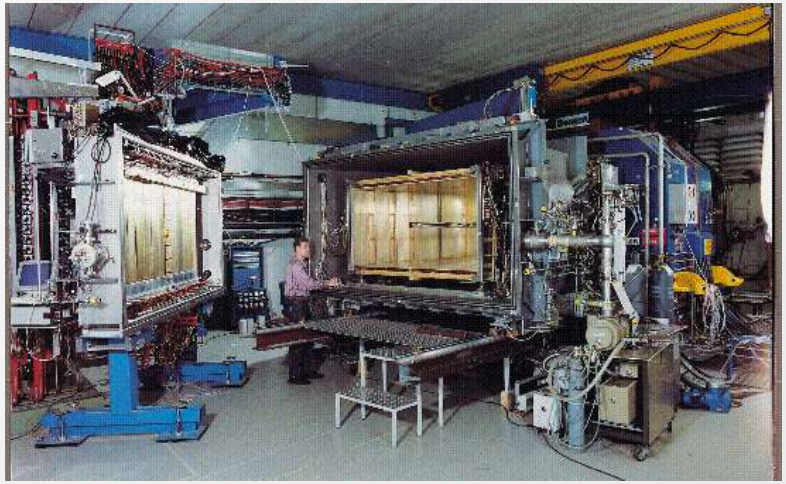
Fázový prechod prvého rádu: Napr. var vody, či topenie ľadu. Možnosť koexistencie rôznych skupenstiev alebo existencia prehriateho či podchladeného materiálu

Fázový prechod druhého druhu: Napr. vyparovanie vody. Spojitá premena jednej fáze na druhú. Existuje kritický bod, za ktorým sú obe fázy nerozlíšiteľné (rozdiel hustôt je nulový).

Fázový prechod v jadrovej hmote



Identifikovaný fázový prechod medzi hadronovou kvapalinou a hadrónovým plynom.

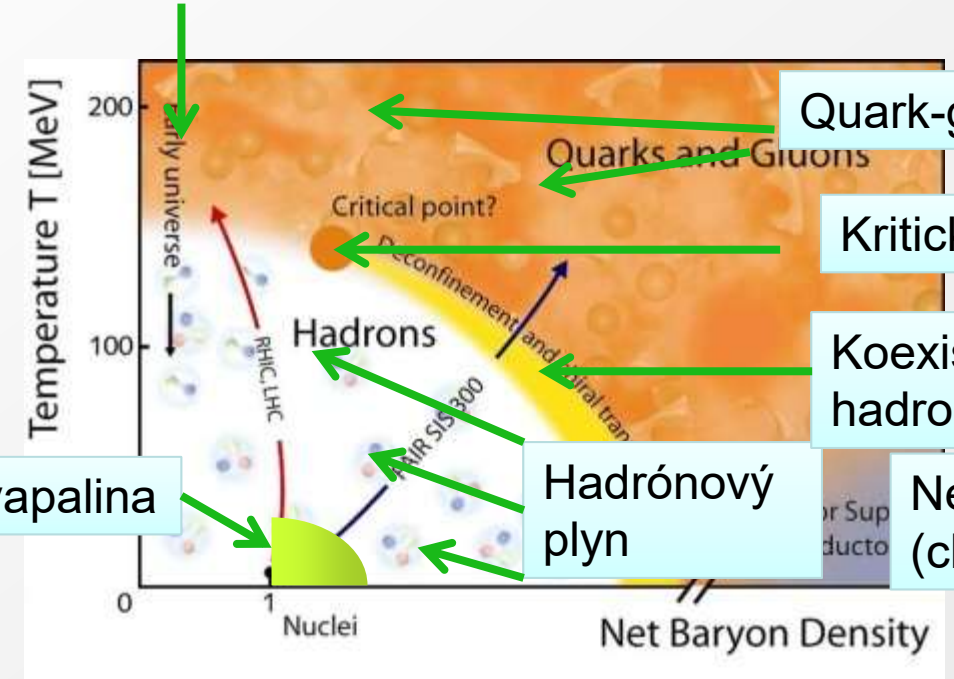


Experiment ALADIN (A Large Dipol magNet), ktorý umožnil identifikáciu fázového prechodu.

Fázový diagram prejadrovú hmotu

- Jadrová kvapalina do teploty ~ 5 MeV. Do teploty ~150 – 200 MeV hadrónový plyn. Nad 150 – 200 MeV kvark-gluónová plazma.
- Závislosť od čistej baryónovej hustoty.

Počiatočný vesmír - horúci s nízkym prebytkom baryónov (voči anti-baryónom)



Quark-gluónová plazma

Kritický bod fázový prechod

Koexistencia QGP a hadronového plynu

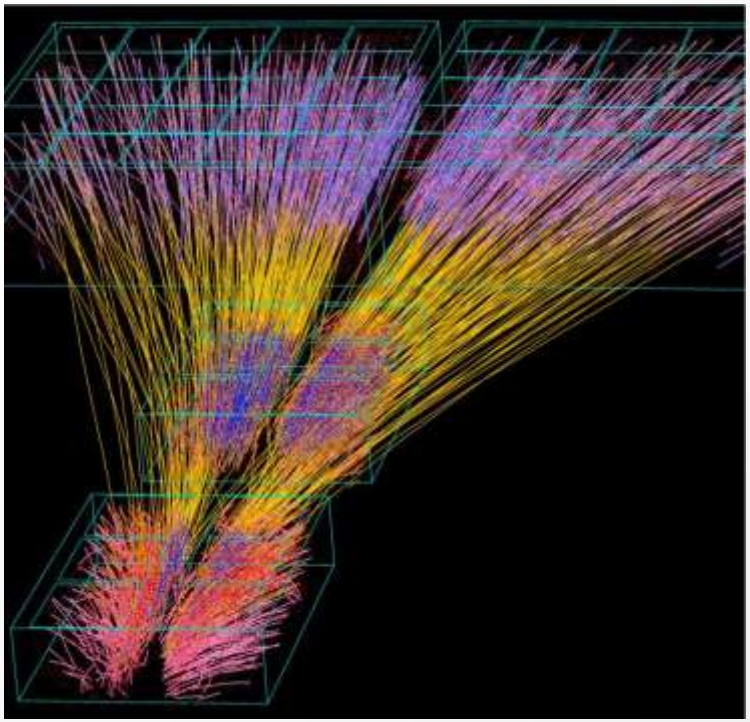
Jadrová kvapalina

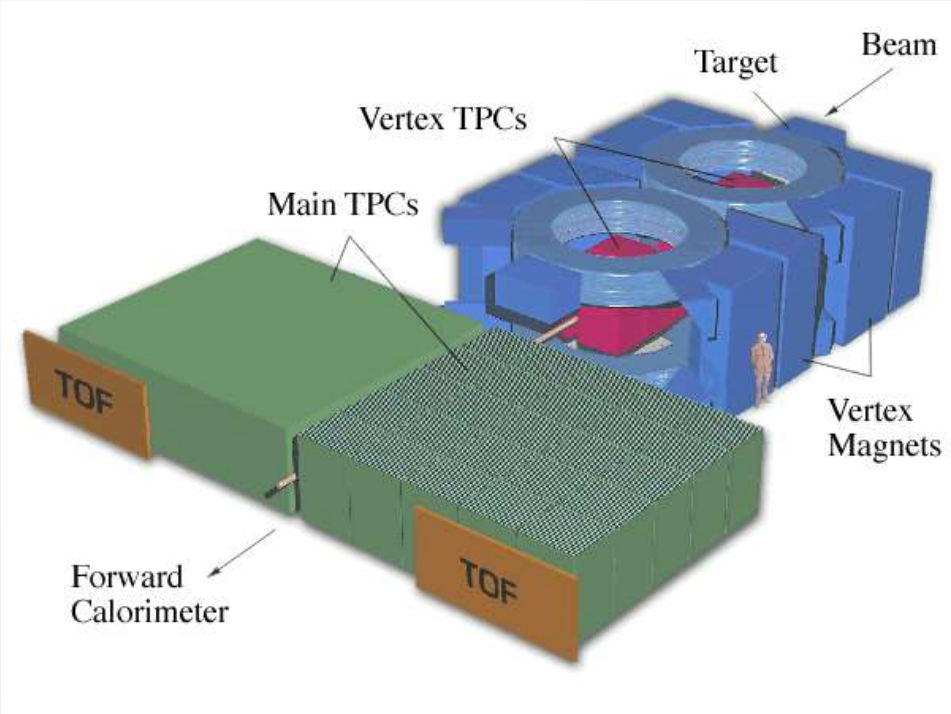
Hadrónový plyn

Neutrónové hviezdy (chladné a vysoko husté)

Prvá indikácia QGP

- Experiment NA49 (1991 – 2002). Cieľ Pb+Pb zrážky pri 149 GeV/u.
- Prvé indikácie o formujúcej sa novej fáze jadrovej hmoty (r. 2000).
- Ďalšie experimenty WA98, NA57...

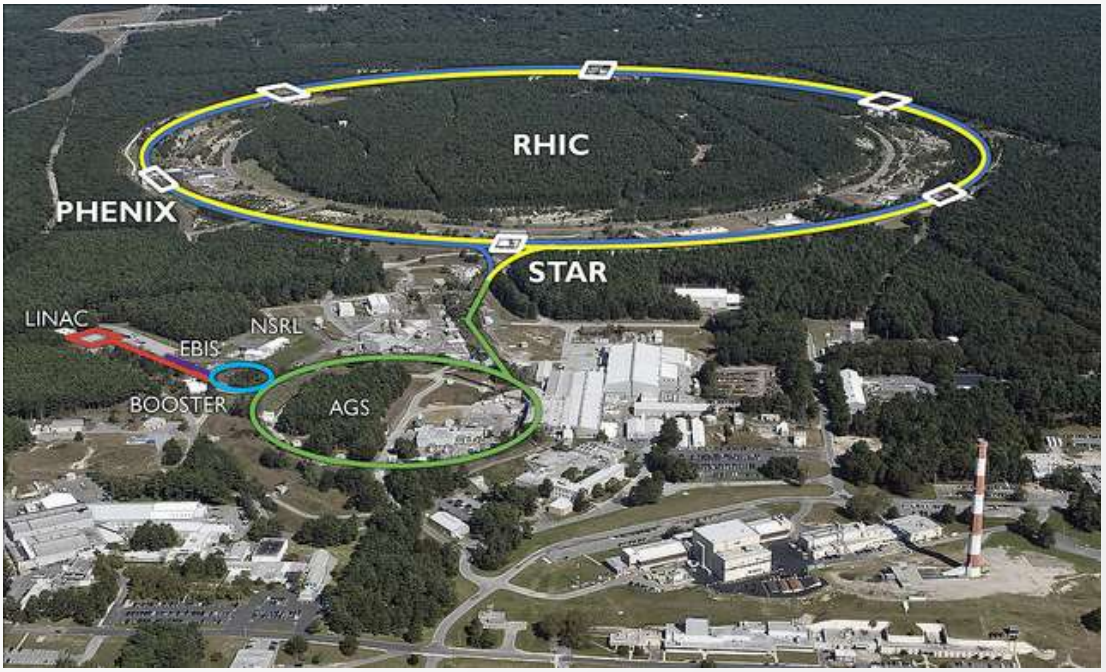


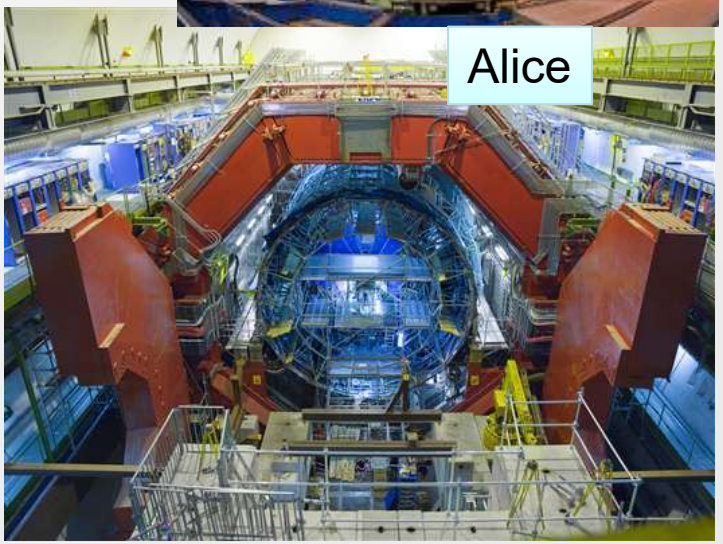


(http://na49info.web.cern.ch/na49info/)

Oficiálny (možný) objav QGP

- RHIC (Brookhaven National Laboratory)
- Zrážky rôznych projektilov (napr. Au+Au) do 200 GeV/u.
  LHC (Pb+Pb) niekoľko TeV/u.
- RHIC v r. 2010 dosiahol teploty 4×10^{12} °Ca LHC (ALICE) 5.5×10^{12} °C
- Charakter viskóznej vysoko-interagujúcej kvapaliny





Projekty vo výstavbe

- Projekt FAIR v GSI Darmstadt
- Experiment CBM – cieľ najvyšších baryónových hustôt.