

# **K počiatkom Vesmíru: cesta tam a späť**

**Okná CERN-u dokorán  
Košice, 28.5.2015**

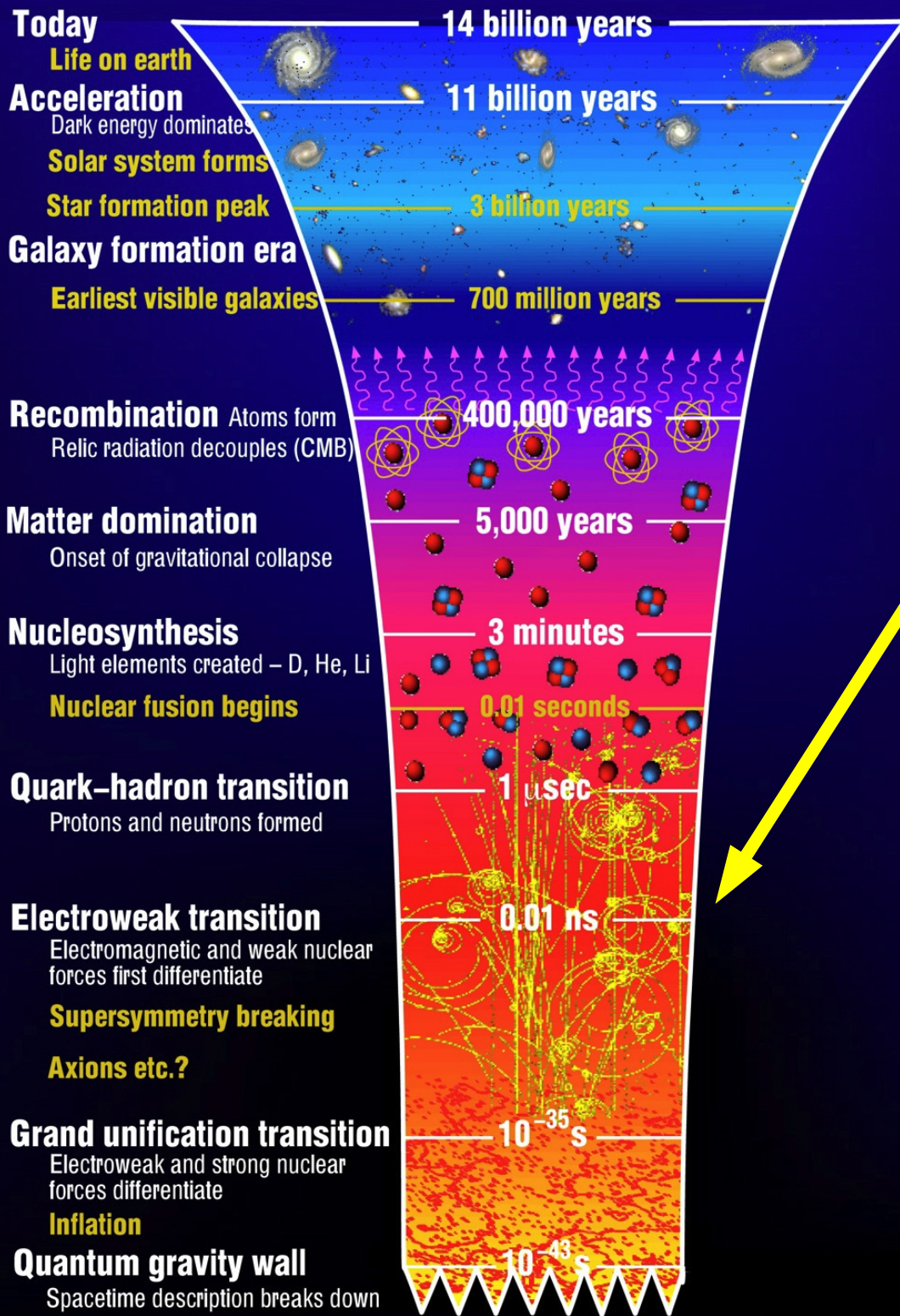
**Ivan Králik**

Ústav experimentálnej fyziky SAV  
Košice



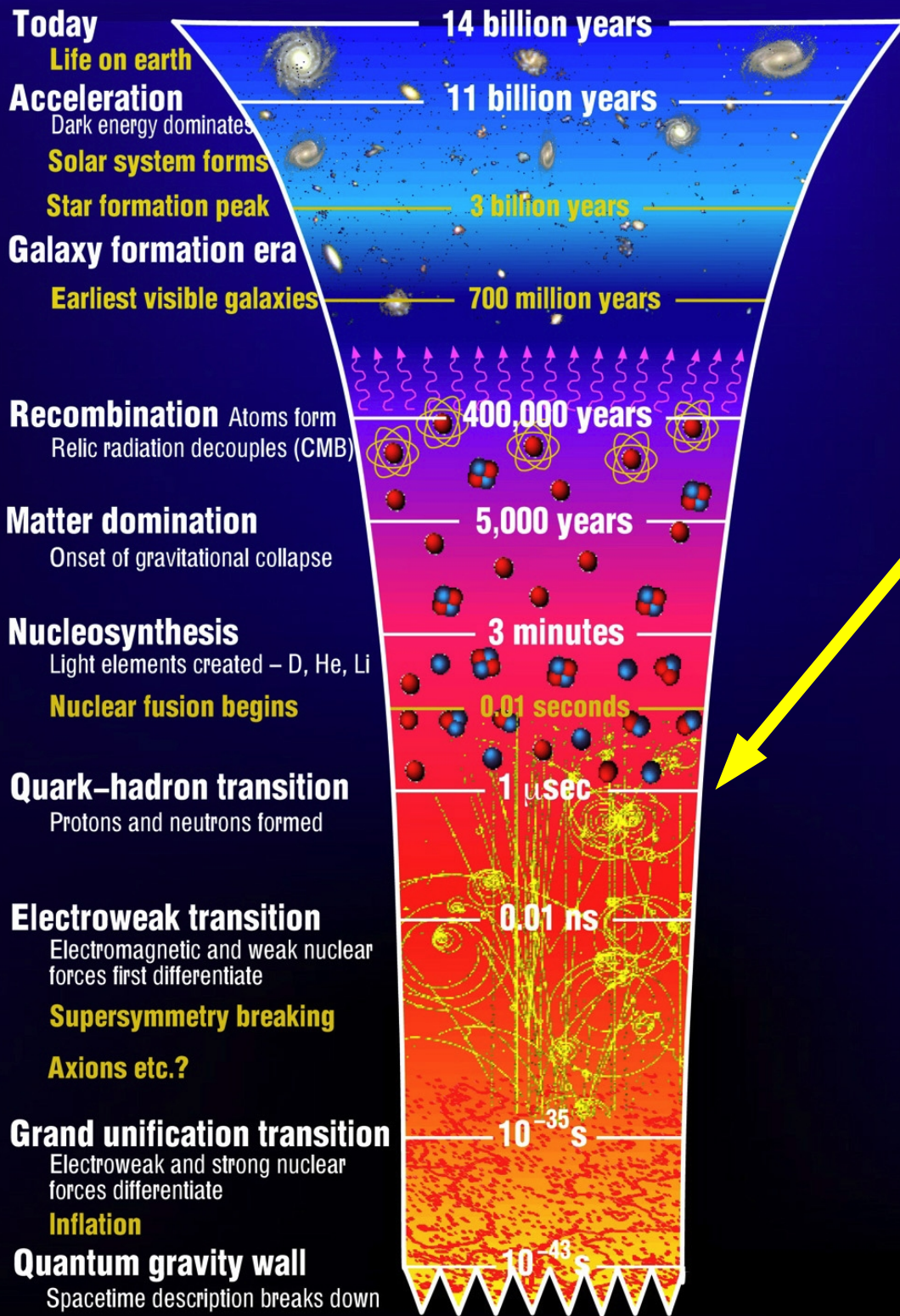
A large, bright explosion with a central yellow and white core, surrounded by orange and red flames and smoke. Numerous thin, bright lines radiate outwards from the center, creating a starburst effect. The background is dark, making the explosion stand out prominently.

**BANG !!!**



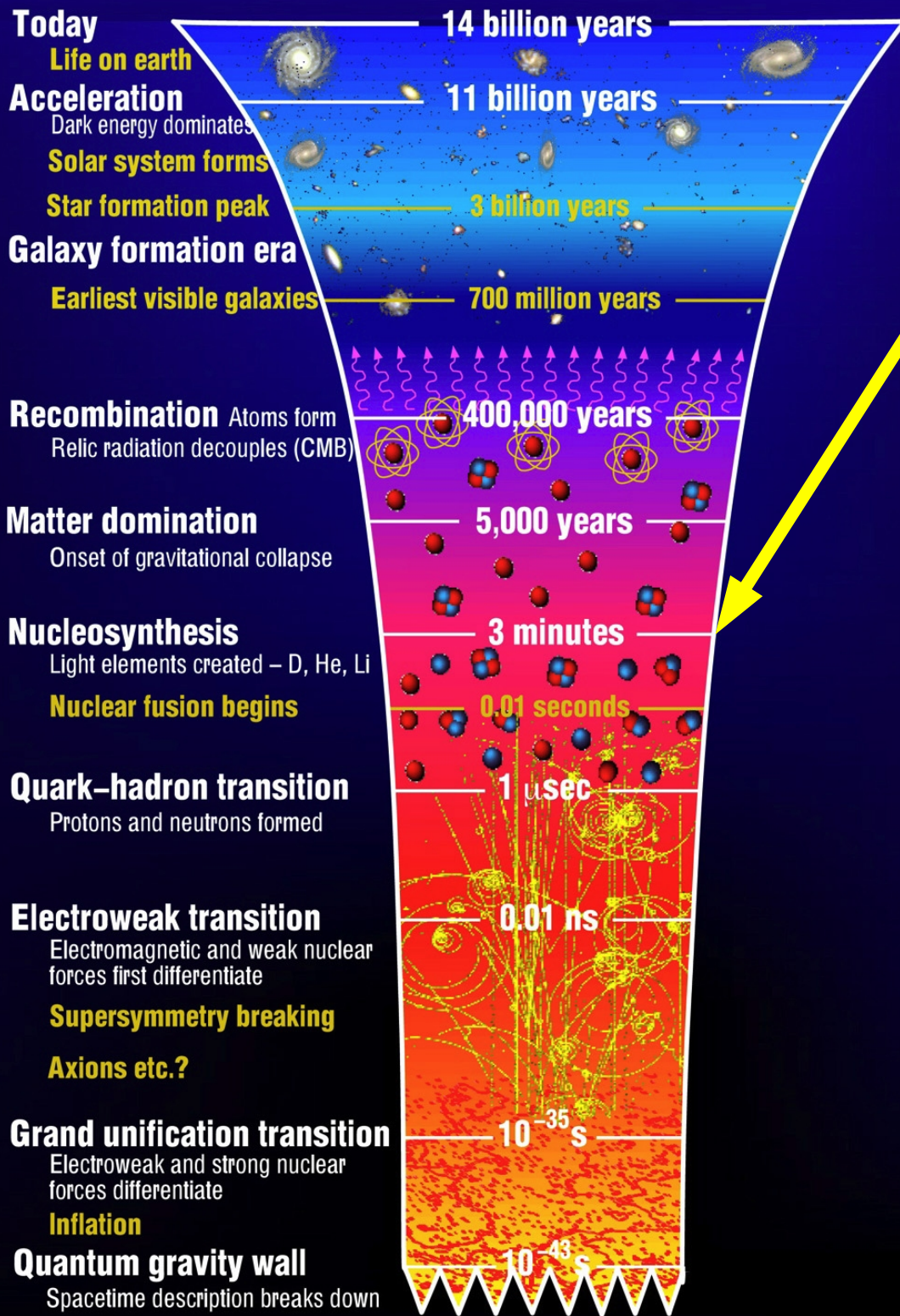
0.1 ns od počiatku  
Všehomíra sú  
fundamentálne sily  
prírody vzájomne  
oddelené  
a existujú v tej podobe  
ako ich poznáme...





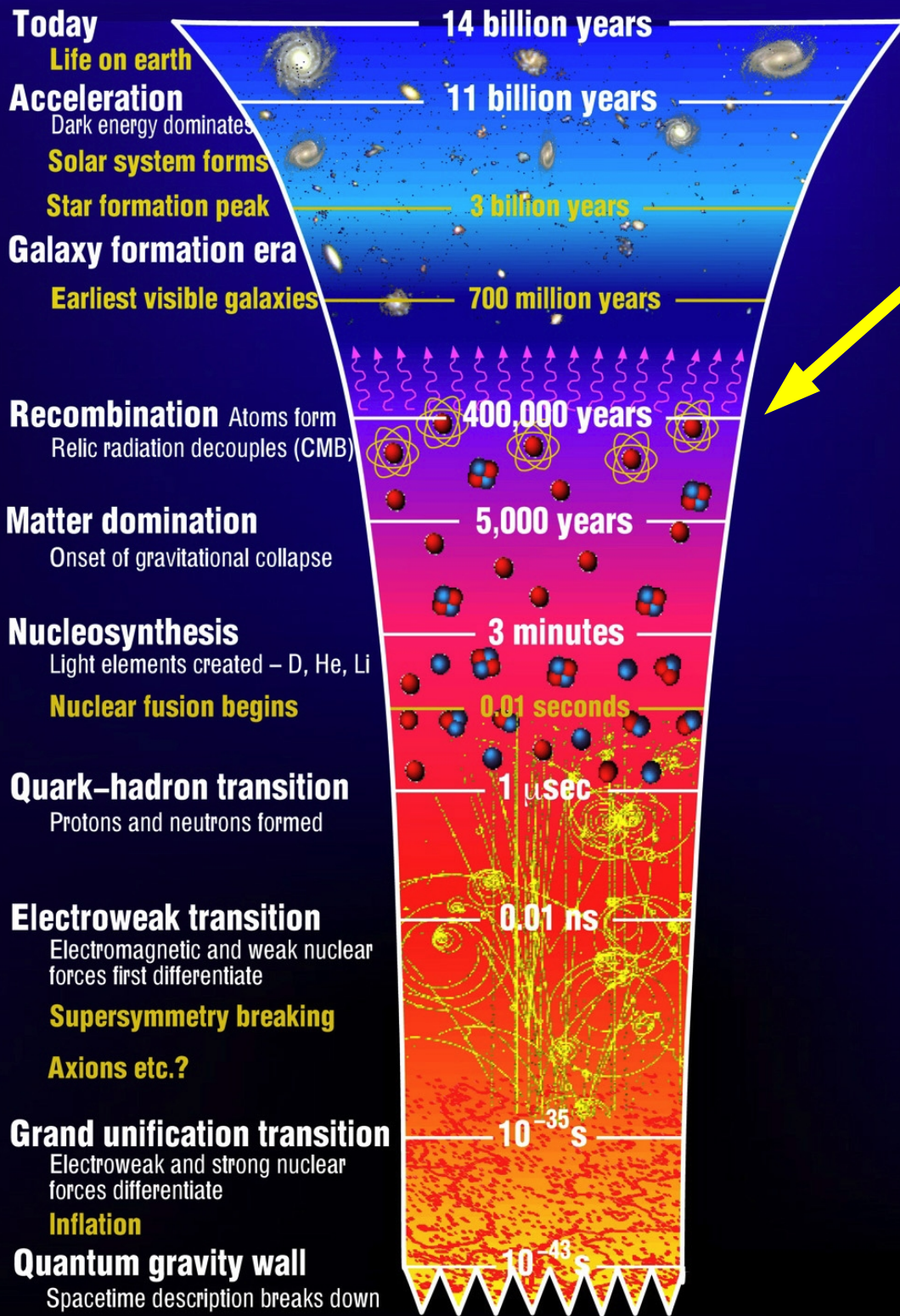
V čase  $1\mu\text{s}$  od počiatku Všehomíra teplota poklesla natoľko, že silne interagujúce kvarky a gluóny strácajú voľnosť pohybu a začínajú vytvárať viazané stavy (p, n, ...)



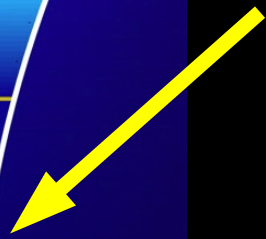


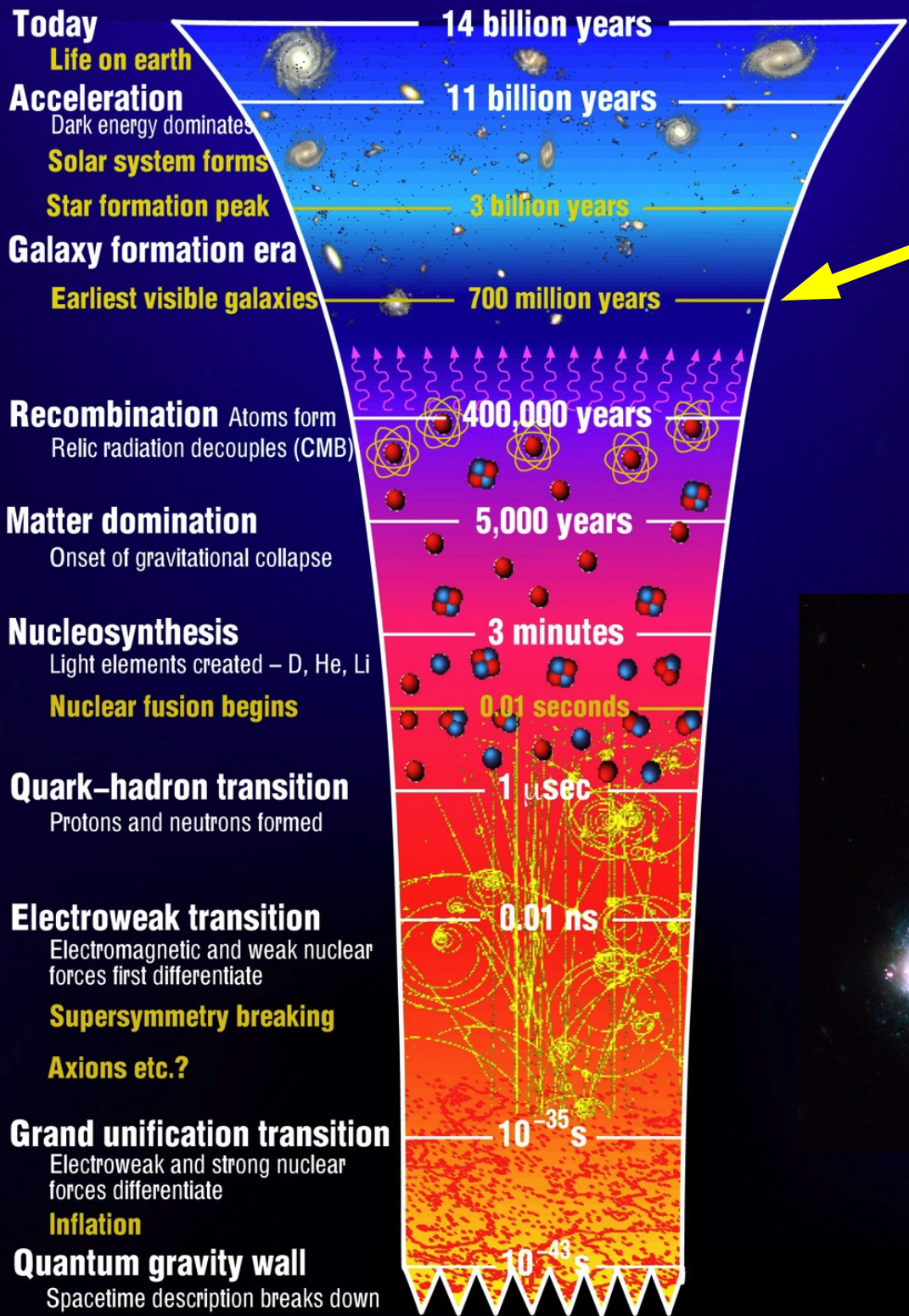
0.01s od počiatku  
Všehomíra  
sa naštartujú  
procesy  
nukleosyntézy  
(fúzie)

a od 3 minúty  
už sú prítomné  
najľahšie jadrá  
**d, He, Li**



Na prvé neutrálne atómy treba čakať 400 000 rokov

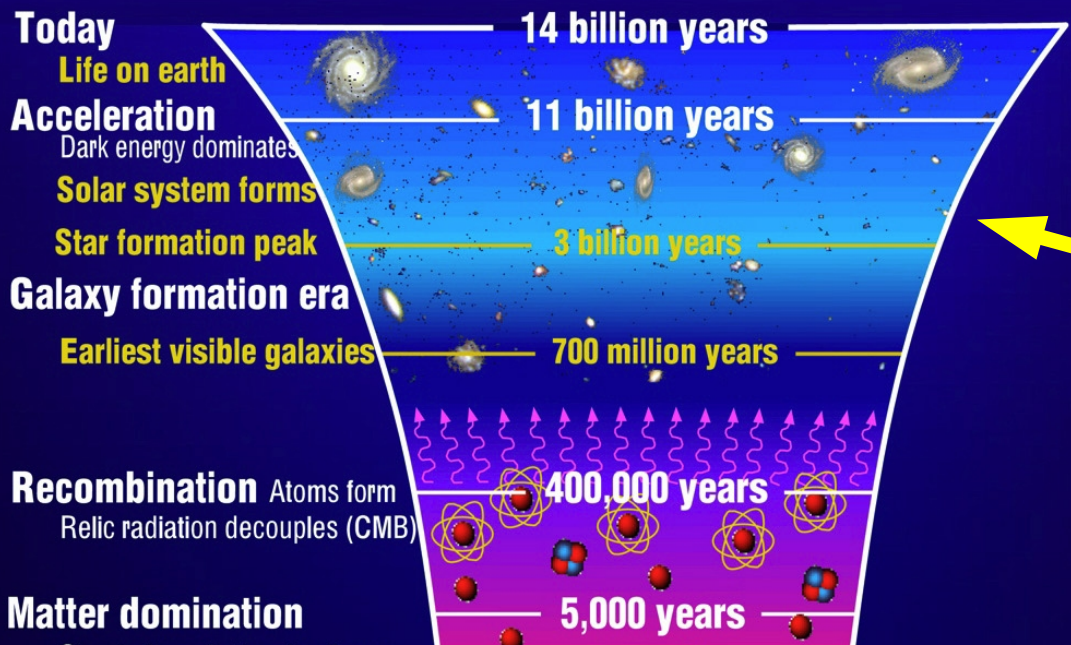




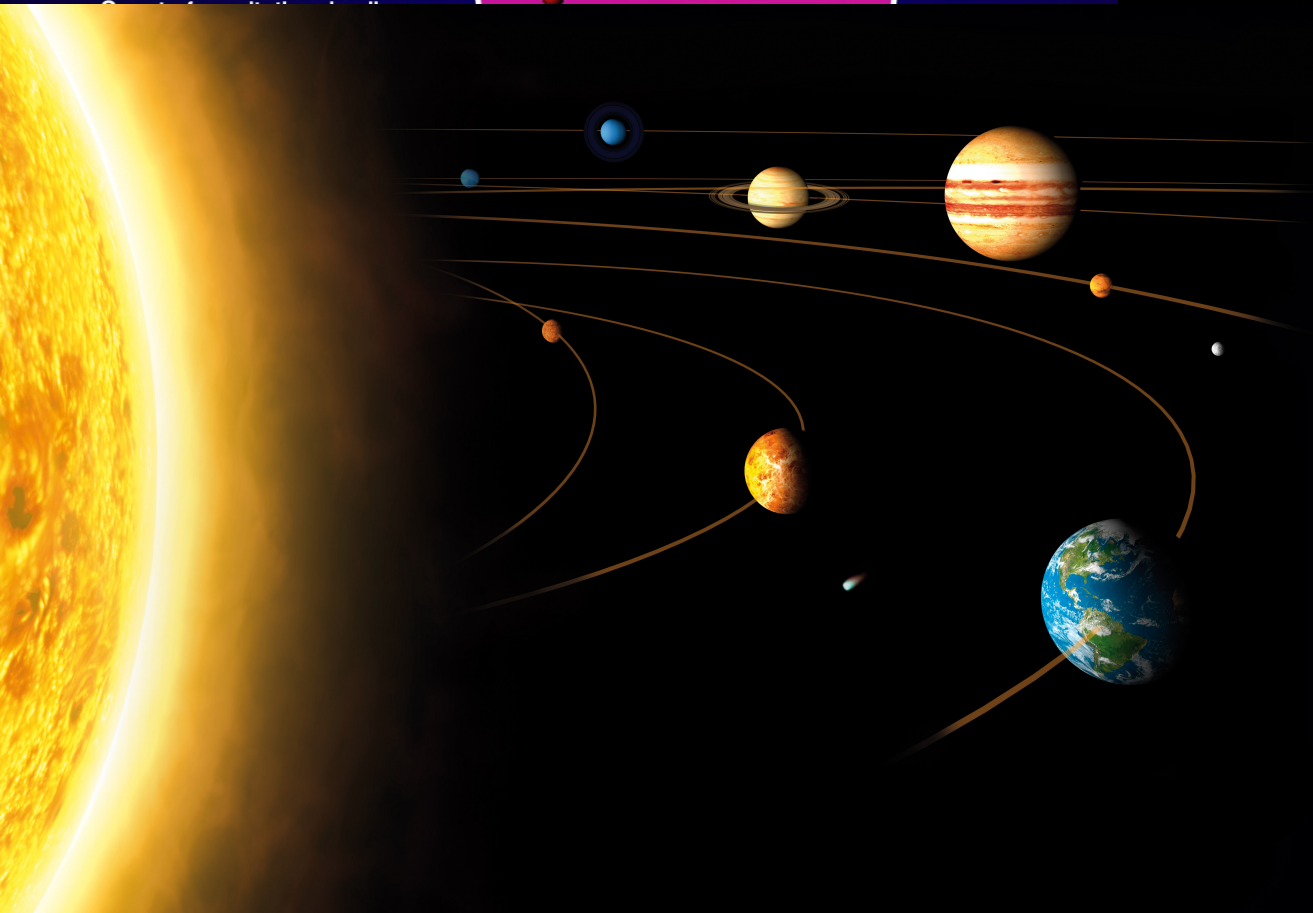
o 700 000 000 rokov  
si náhodný pozorovateľ  
môže všimnúť  
zrod  
prvých galaxií

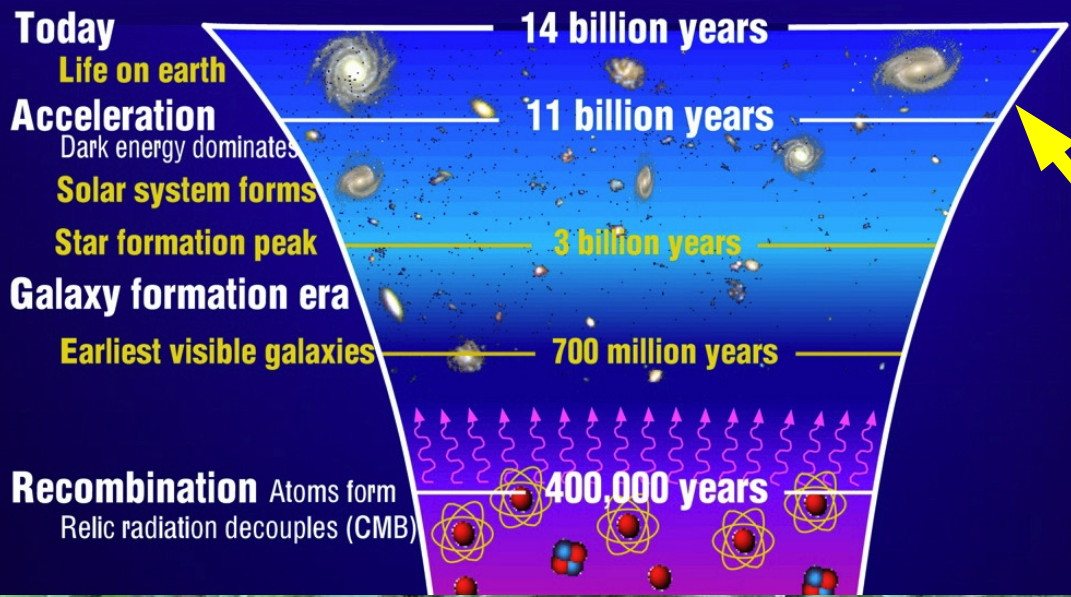






5 000 000 000 (miliárd)  
rokov  
po vzniku Vŕšehomíra  
sa formuje  
Slnečná sústava





o 10 000 000 000  
(miliárd)  
rokov od počiatku  
sa o svoje práva  
začínajú hlásiť  
živé tvory na Zemi



Today  
Life on earth  
Acceleration

14 billion years

11 billion years



a 13.5 000 000 000  
(miliardy)  
rokov od veľkého BANG!!!  
pozemšťania hľadajú  
odpovede na otázky:

**Kto sme?**

**Odkiaľ sme sa tu vzali?**

**Z čoho je zložený svet?**

**Ako toto všetko vzniklo?**

**A kde rastie sladký hrášok?**

**K počiatkom Vesmíru:  
Cesta tam a späť**

**Kvarkovo-gluónová plazma**

# Protón - etalón mier a váh mikrosveta

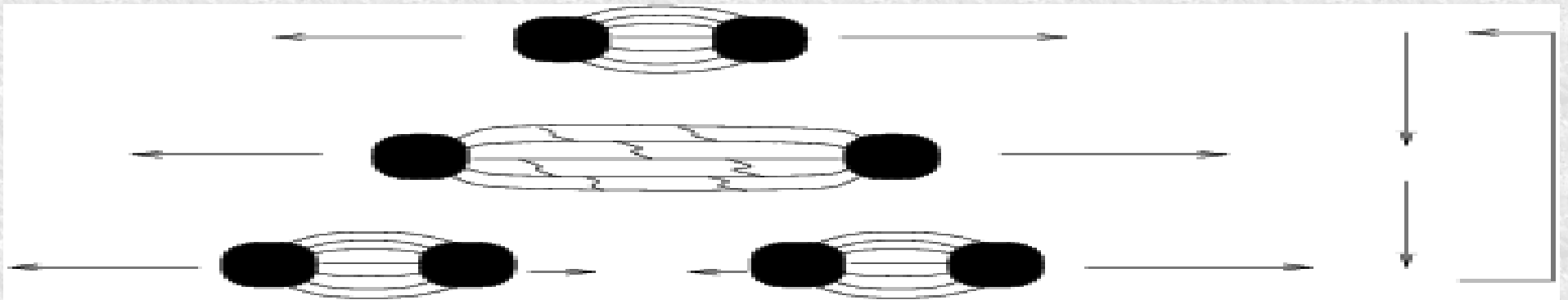
- **Dĺžka:**  $1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$  je približne polomer protónu,  
 $l = 1\text{fm}$
- **Čas:** doba potrebná na to, aby fotón (alebo čokoľvek, čo sa pohybuje rýchlosťou svetla) prekonala polomer protónu 1fm, t.j.  
 $t = 1\text{fm}/c = 3.3 \times 10^{-24}\text{ s}$
- **Energia:**  $1\text{eV}$  = energia ktorú získa nabitá častica s nábojom elektrónu ak preletí medzi doskami kondenzátora s napätím 1V,  
Kľudová energia protónu  
 $E_0 = m_p c^2 = 1.5 \times 10^{-10}\text{ J} = 0.94 \times 10^9\text{ eV} \sim 1\text{ GeV}$
- **Hmotnosť:**  $m = 1\text{GeV}/c^2$  zodpovedá kľudovej energii 1GeV

# Silná interakcia a kvarkový model

- Hlavné ingrediencie
  - **kvarky** -  $1/3$  alebo  $2/3$  náboja elektrónu, **spin**  $1/2$ , kombinácia ich kvantových čísel určuje kvantové čísla výsledných hadrónov.
  - **gluóny** - výmenné častice sprostredkujúce interakciu, **spin**  $1$ , elektricky neutrálne, nesú náboj silnej interakcie (farba, 8 rôznych stavov), nulová kludová energia
  - **farba** - náboj silnej interakcie, názov motivovaný rozkladom svetla: biela = **červená** + **modrá** + **zelená** alebo biela = farba + antifarba
  - náboj gluónu kombinuje **farbu**+**antifarbu**

- **Nabité gluóny**

- na malých vzdialenostiach (menej ako 1fm)  $V \sim 1/r$
- na veľkých vzdialenostiach  $V \sim r$  (dôsledok interakcií medzi gluónmi)



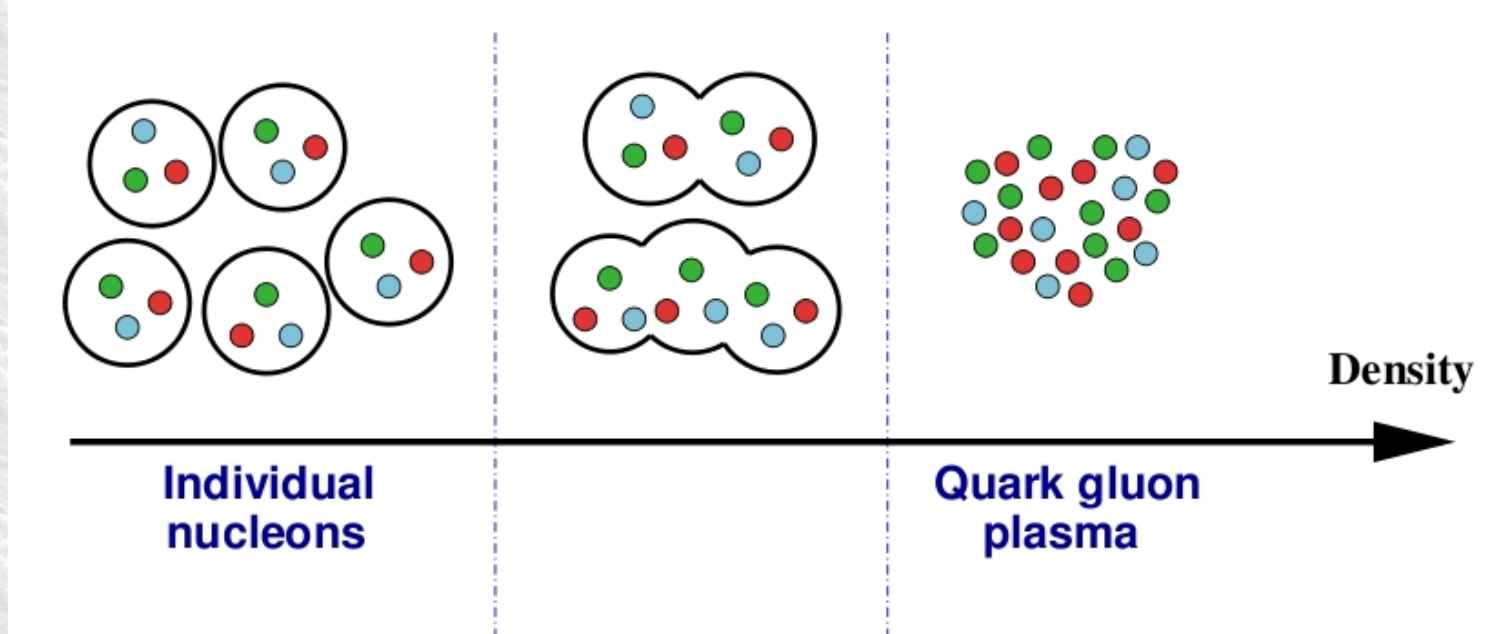
- ak energia v poli medzi vzd'alujúcimi kvarkami prevýši klúdovú energiu páru kvark-antikvark, premení sa energia na hmotu - základ mnohočasticovej produkcie
- “struna” - konce sú kvarky, pružinka je pole gluónov - ak ju roztrhnem dostanem dve struny s dvoma kvarkami na koncoch - osamotený kvark z nej nevytrhnem

# Uväznenie kvarkov - confinement

- Kvarky sú uväznené v „bezfarebných” objektoch - hadrónoch
  - zo všetkých farebných kombinácií je iba jedna povolená
- Kvark je lokalizovateľný v **konečnom objeme**
  - polomer  $\sim 1\text{fm}$
- Voľné kvarky existovať nemôžu
  - V prírode sú pozorované iba farebne neutrálne objekty - dobrá “výhovorka” pre to, že žiaden voľný kvark nenašli

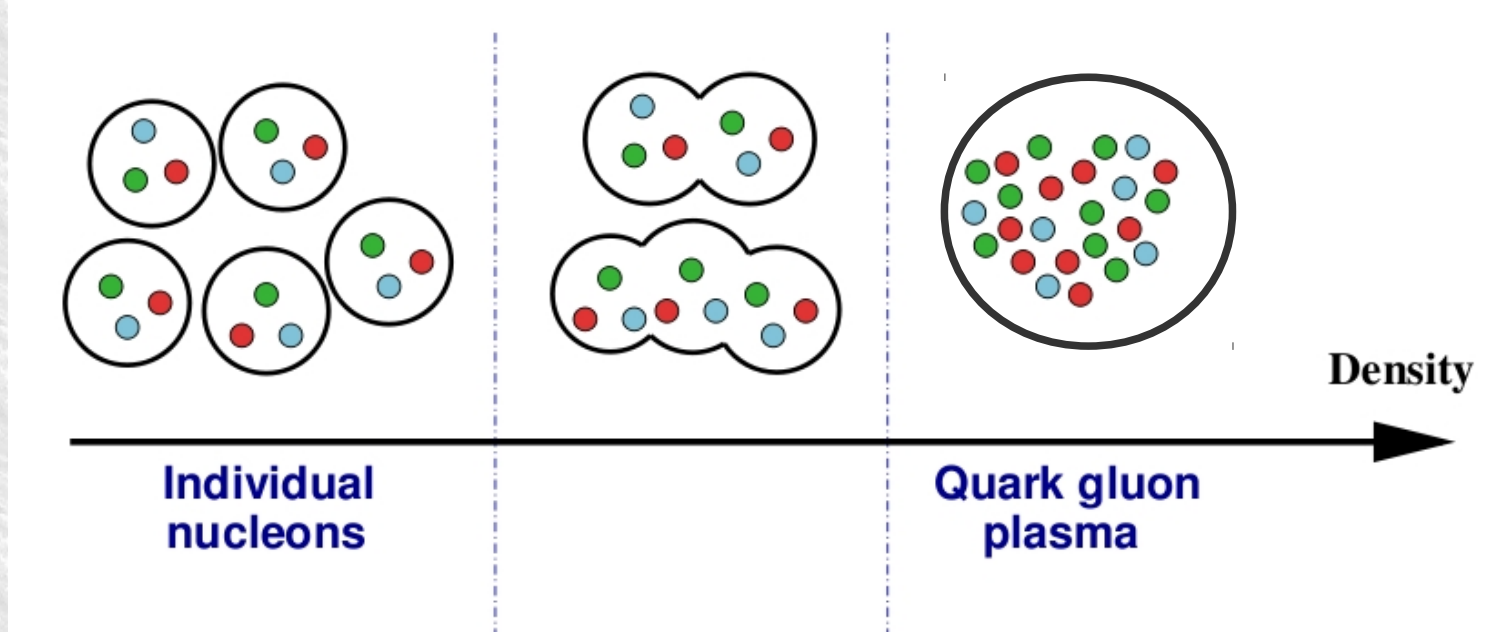


# Oslobodenie kvarkov - deconfinement



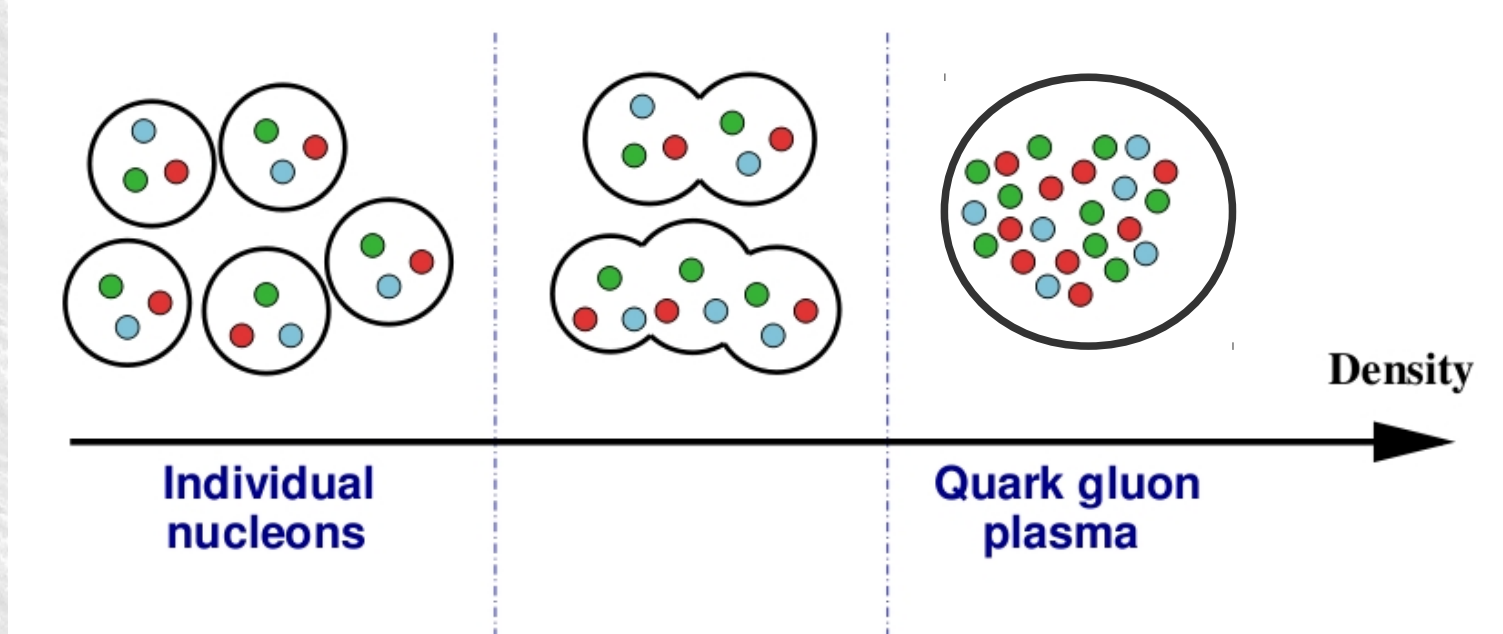
- Pri normálnej hustote jadrovej hmoty (3 kvarky v objeme protónu) je každý kvark presne lokalizovaný v svojom hadróne
- Zvyšovaním hustoty nukleónov, vlnové funkcie kvarkov jedného nukleónu (p, n) „zablúdia“ do objemu patriacemu druhému - kvarky začínajú zabúdať, kde majú domček
- Ďalším zvyšovaním hustoty sa nukleóny rozpustia, spoločný objem vyplnia voľné kvarky a gluóny

# Oslobodenie kvarkov - deconfinement



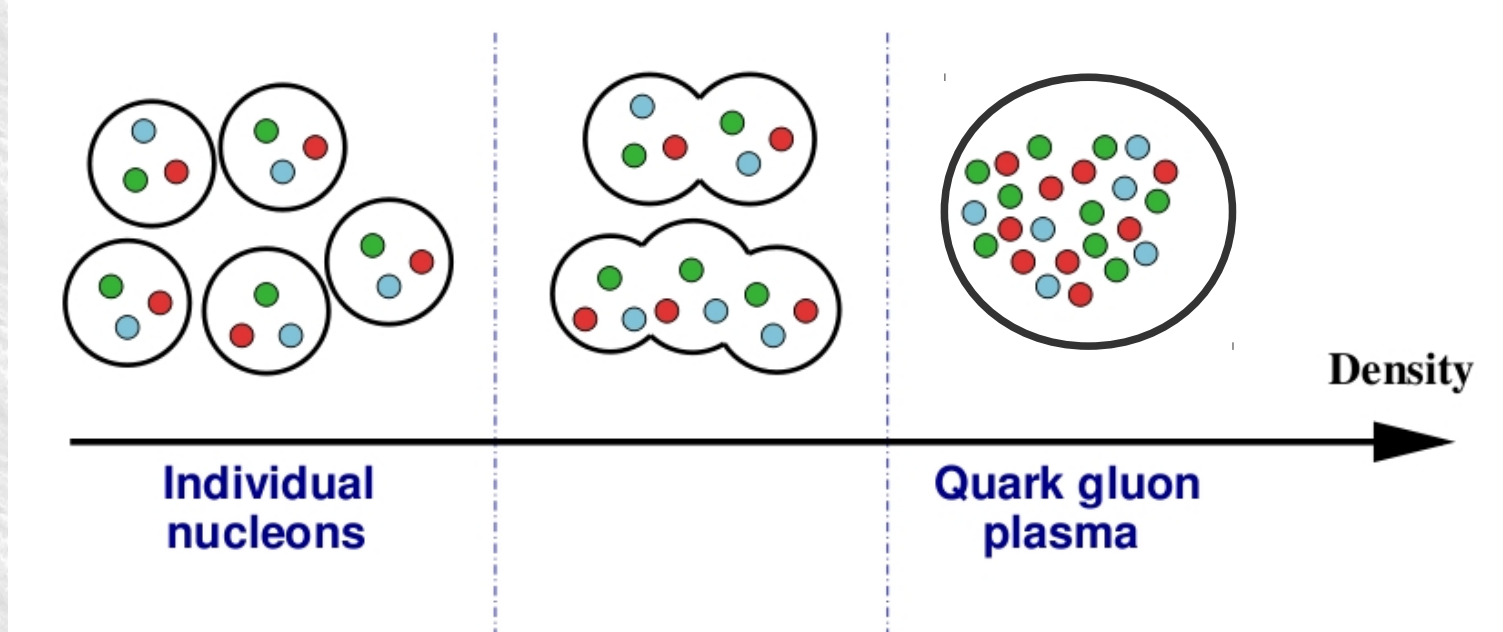
- Kvarky a gluóny sú voľné vnútri objemu omnoho väčšieho, ako je objem protónu
- nosiče silného náboja (farby) - kvarky a gluóny - sa voľne pohybujú, silný náboj môže prúdiť → **farebná vodivosť**
- analógia s **plazmou**: neutrálny plyn → excitácia a ionizácia → ióny a elektróny (nosiče náboja) sa voľne pohybujú, elektrický prúd tečie

# Oslobodenie kvarkov - deconfinement



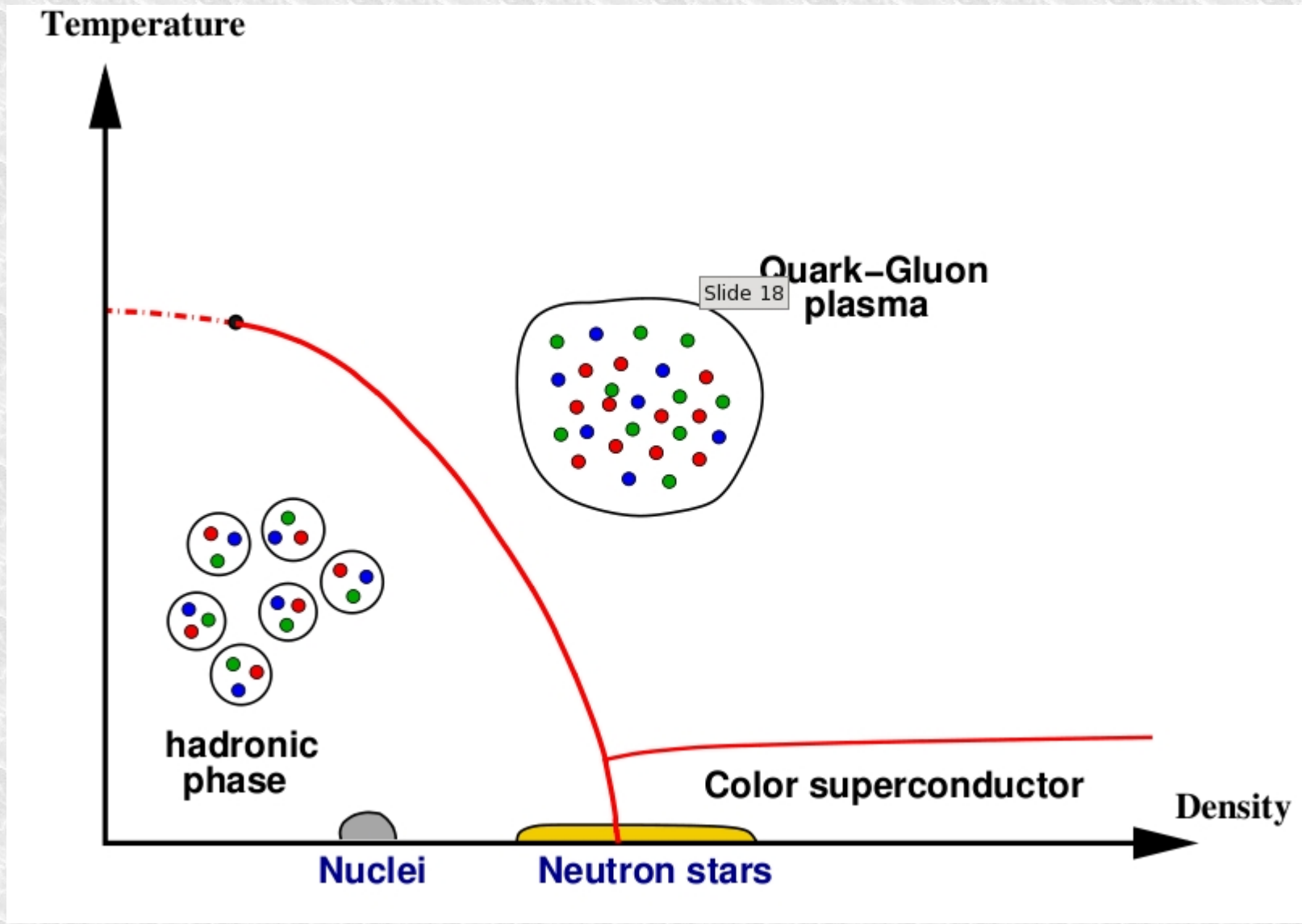
- Úplne na slobodu tie kvarky nevypustia
- ale aspoň im dajú možnosť sa poprechádzať po veeeel'mi veľkom väzeňskom dvore
- okolo  $1\mu\text{s}$  po Veľkom Tresku bol tým "dvorom" celý Vesmír

# Oslobodenie kvarkov - deconfinement



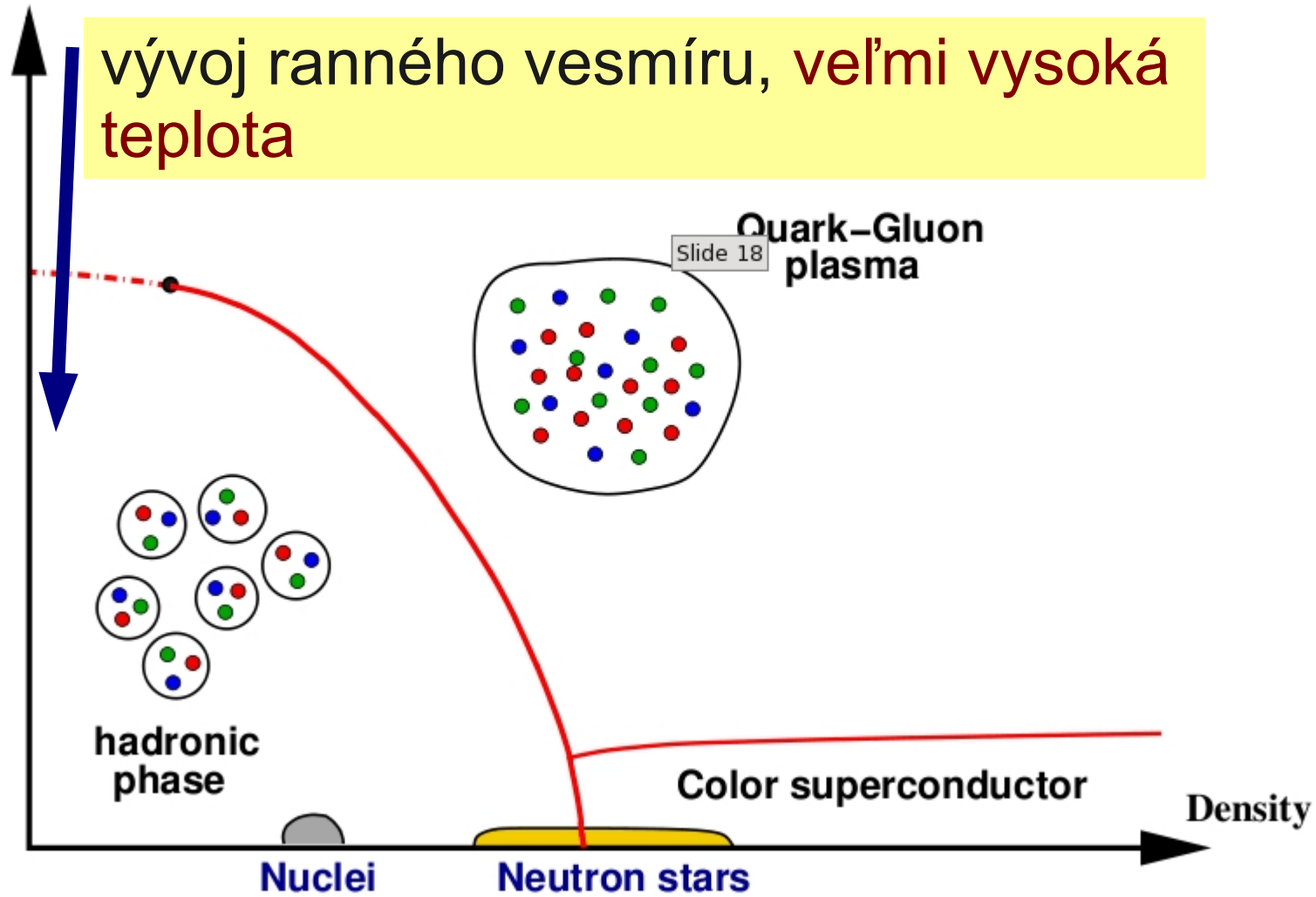
- **Kvarkovo-gluónová plazma (QGP)**
  - **Môžeme ju nájsť niekde v prírode?**
  - **Dá sa niečo také vyrobiť v laboratóriu?**
  - **Ako to aj vyrobíme, ako sa pozrieme na to, čo sme vyrobili (našli v prírode)?**

# Fázový diagram QGP



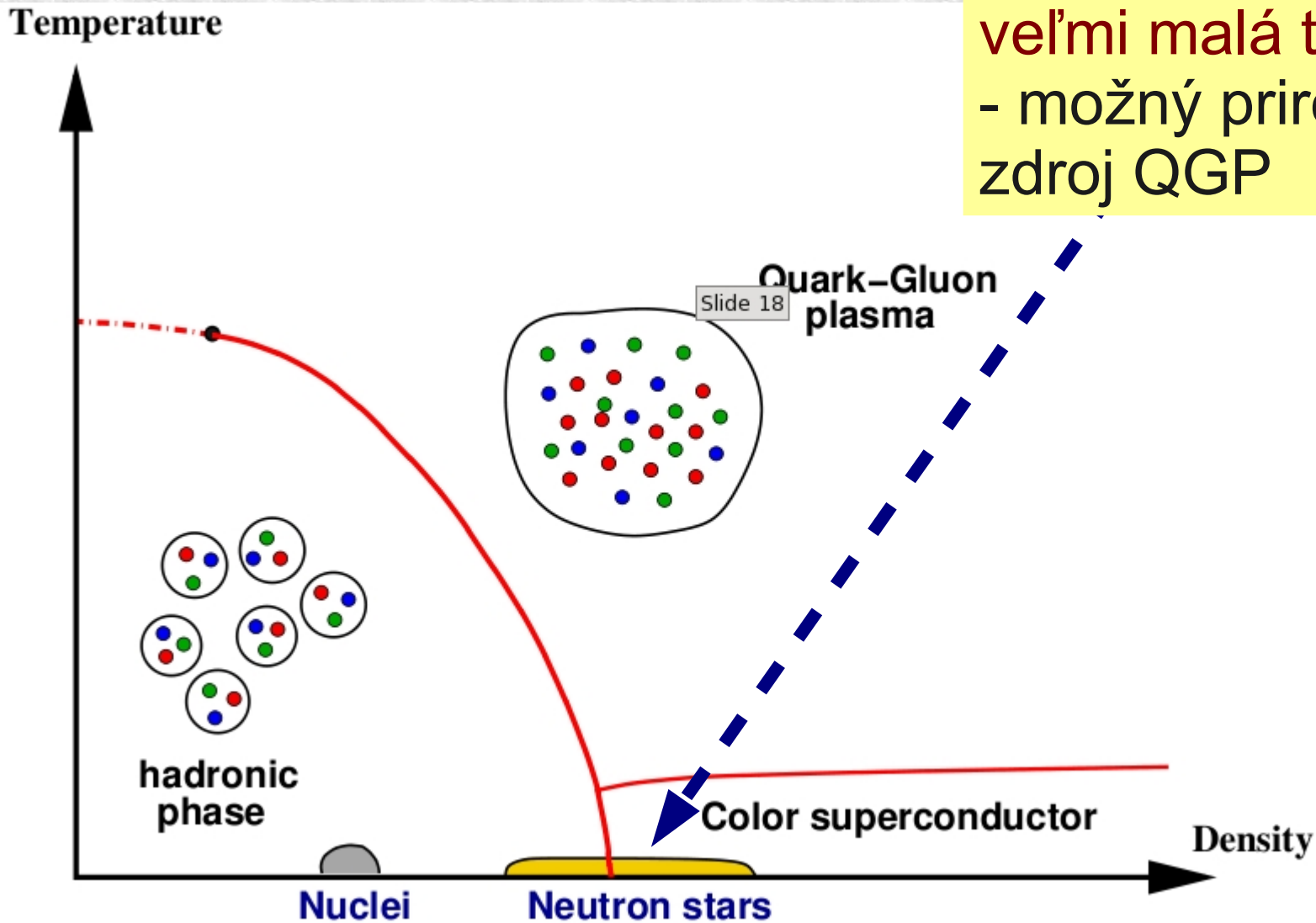
# Fázový diagram QGP

Temperature



# Fázový diagram QGP

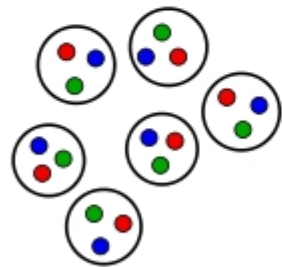
Jadrá neutrónových hviezd = vysoká hustota, veľmi malá teplota  
- možný prirodzený zdroj QGP



# Fázový diagram QGP

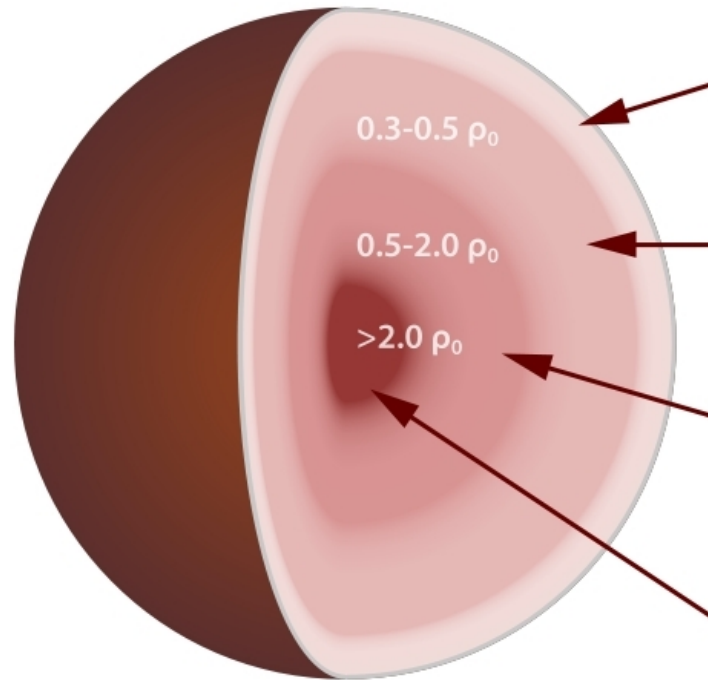
Jadrá neutronových hviezd - možný prirodzený zdroj QGP

Temperature



hadronic phase

Nuclei



outer crust 0.3-0.5 km  
ions, electrons

inner crust 1-2 km  
electrons, neutrons, nuclei

outer core ~ 9 km  
neutron-proton Fermi liquid  
few % electron Fermi gas

inner core 0-3 km  
quark gluon plasma?

Color superconductor

Density

Neutron stars



**To je všetko pekné,  
ale ranné štádium vesmíru sme nestihli  
a neutrónové hviezdy  
ani cez telešoping nekúpime**

# **Výroba a pozorovanie QGP v laboratóriu**

## **Zrážky ultrarelativistických t'azkých iónov**

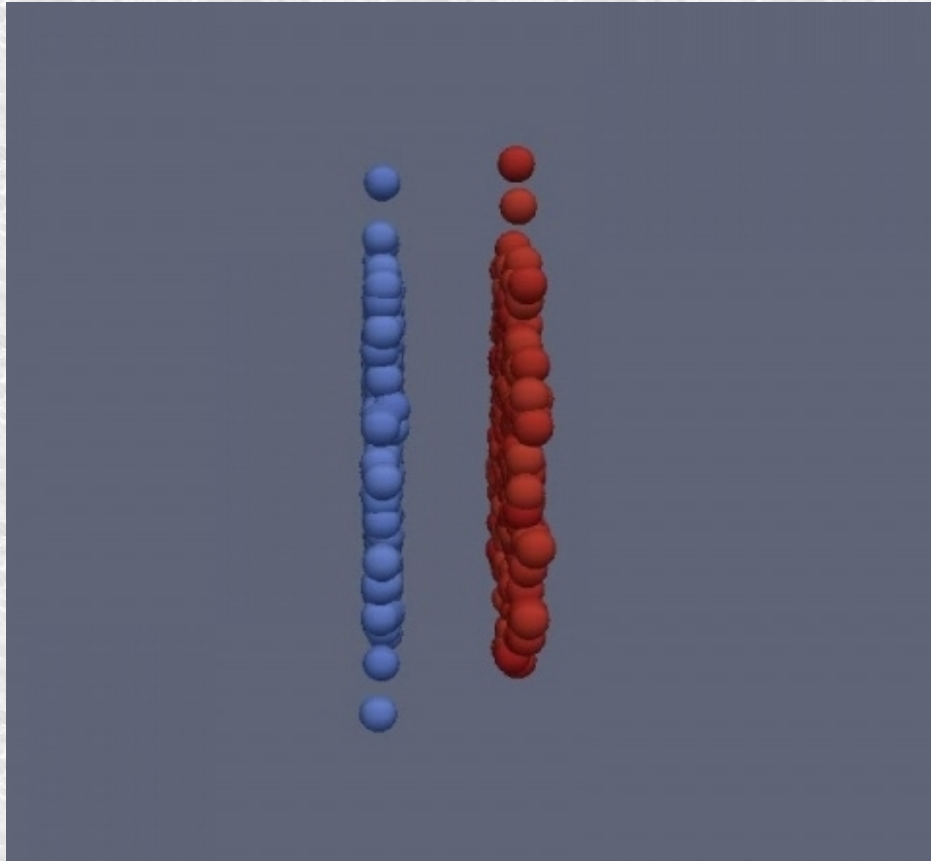
# Ingredienty k výrobe QGP

- **čo najviac jadrovej hmoty v kompaktnom balení** - tu nič lepšie ako **jadro** nejakého ťažkého, stabilného **atómu** nenájdeme
- **nahrievadlo a stláčadlo** - urýchliť a zraziť
  - v dlhodobej perspektíve chceme preskúmať čo najviac z fázového diagramu
  - väčšia energia → väčšia teplota, menšia baryónová hustota
  - menšia energia → menšia teplota, väčšia baryónová hustota
  - zraziť treba tak, aby čo najviac jadrovej hmoty pocítilo zrážku
    - alebo nájsť spôsob, ako zo všetkých prípadov vybrať tie správne zrazené

- **Ultrarelativistická energia**

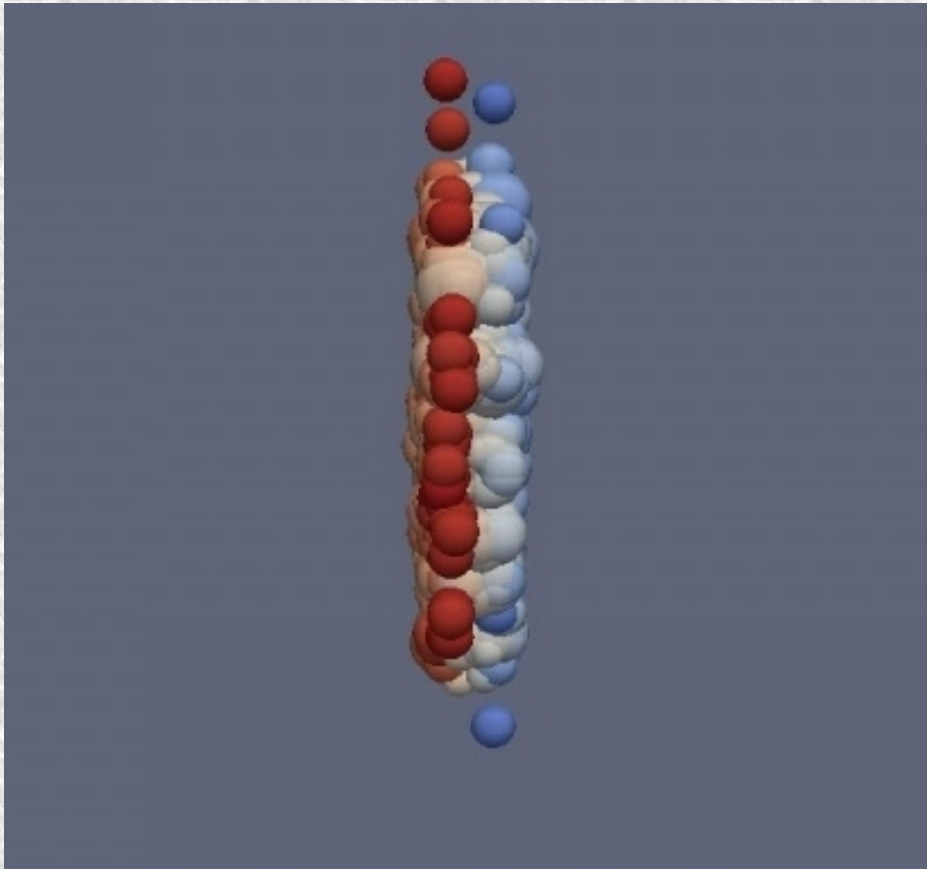
- **ultrarelativistická energia** = kludová energia je zanedbateľná v porovnaní s celkovou energiou objektu
- **RHIC:** 200 GeV/nn v c.m.s. (100 GeV/A zväzok)
- **LHC:** 2760 GeV/nn , dosiahnuté  
5500 GeV/nn , plánované
- Čím vyššia energia zrážky, tým viac sa môžeme priblížiť k podmienkam panujúcim v rannom vesmíre
- **Ťažké ióny** = najťažšie jadrá, ktoré dokážeme urýchliť na *ultrarelativistické energie*
  - **RHIC:** Au+Au
  - **LHC:** Pb+Pb

# Zrážka ťažkých iónov - pred zrážkou



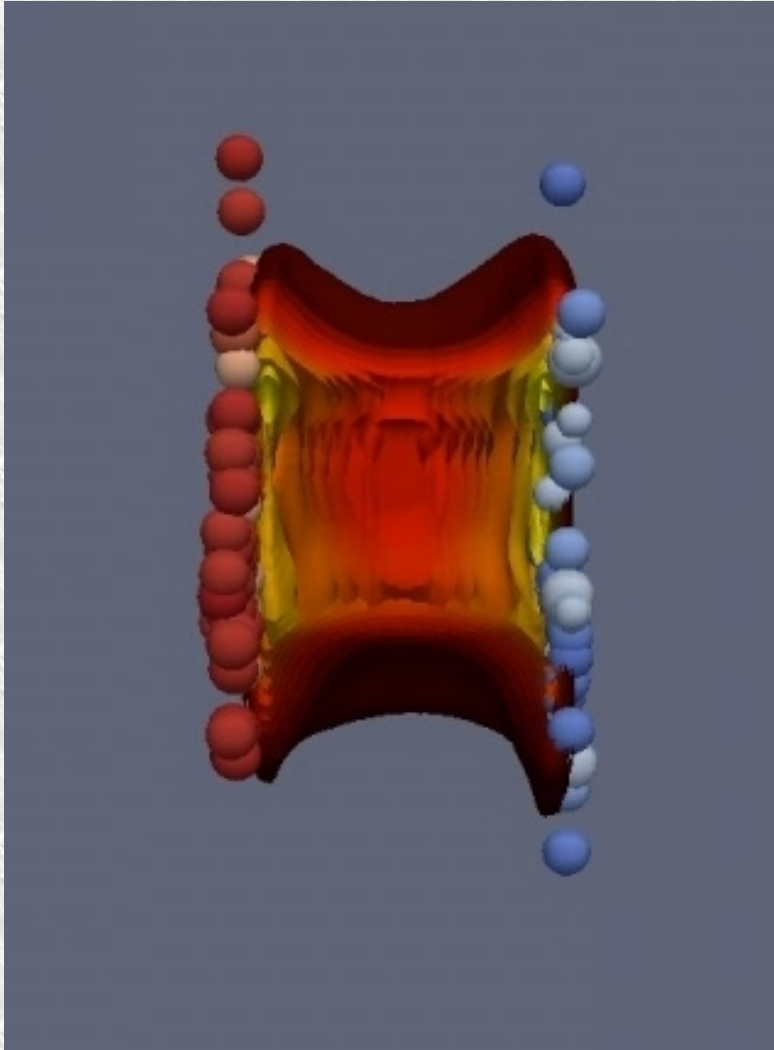
- **lorentzovsky kontrahované jadrá**
  - preto sú placaté
- letia si spokojne proti sebe a zatiaľ sa nič nedeje

# Zrážka ťažkých iónov - kontakt



- jadrá sa zrazili
- veľké množstvo **individuálnych** zrážok p-p, p-n, n-p, n-n
- v každej sa produkujú nové častice
- **obmedzený priestor - stláčanie jadrovej hmoty**
- **časť energie pôvodných jadier sa uvoľní do malého priestoru - nahrievanie**

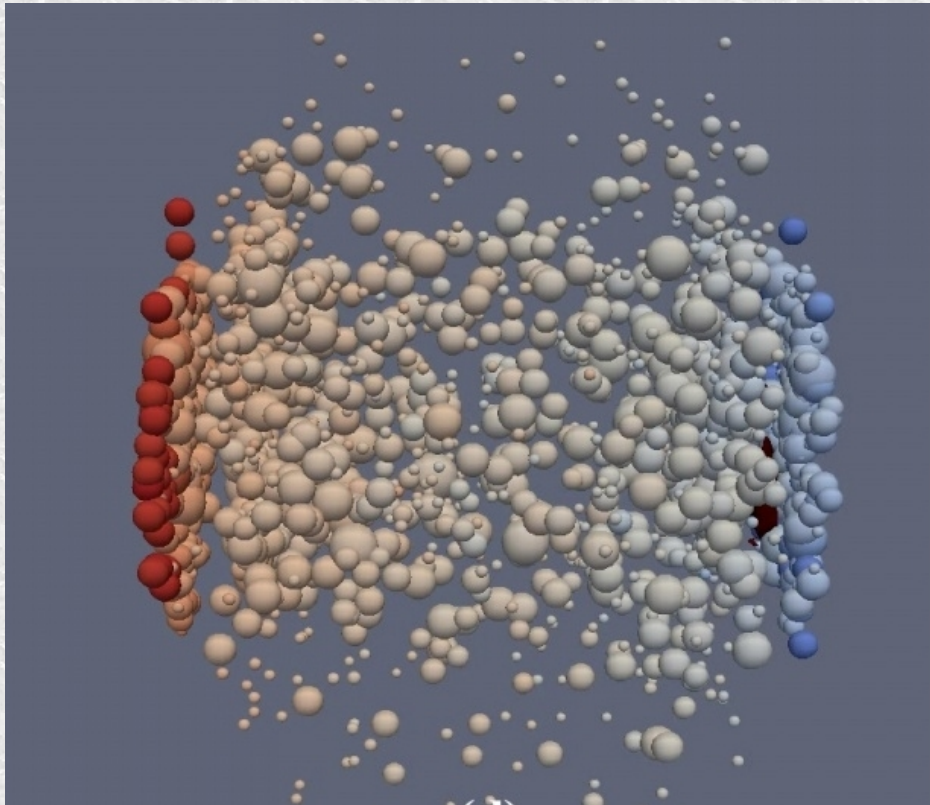
# Zrážka ťažkých iónov - horúca fáza



V tejto fáze sa vytvárajú kvantové čísla - podivnosť - neprítomné v pôvodných jadrách

- niekoľko pôvodných nukleónov sa vyhlo zrážke - **spektátory**
- ostatné - **participanti** - mnohonásobnými zrážkami vytvorili hustú a horúcu kvapku vysoko excitovanej jadrovej hmoty
- horúci objem expanduje
- ak boli dosiahnuté potrebné podmienky, tu mohlo dôjsť k fázovému prechodu na QGP
- mnohonásobné zrážky - kolektívny pohyb
- ustanovená chemická a tepelná rovnováha

# Zrážka ťažkých iónov - zamrznutie



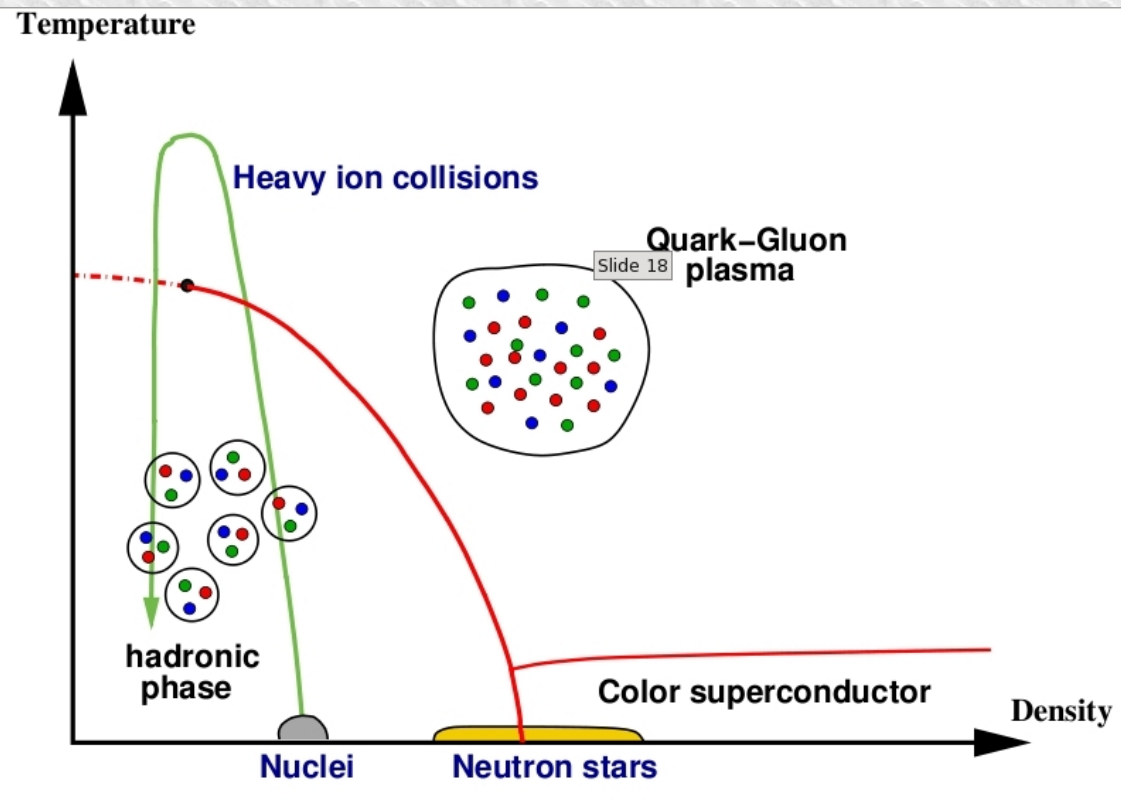
**Kinematické charakteristiky hadrónov odrážajú parametre (T, ...) tepelného zmrznutia**

- nabudená hustá a horúca kvapka expanduje a ochladzuje sa
- prípadné voľné kvarky a gluóny kondenzujú na hadróny
- chemické zloženie systému (početnosti jednotlivých druhov hadrónov) sa už nemení
- tepelný pohyb pokračuje pokým sa systém nestane natoľko riedkym, že kolektívny pohyb ustane a každý si letí kam chce - **tepelné zmrznutie**



# Zrážka na fázovom diagrame

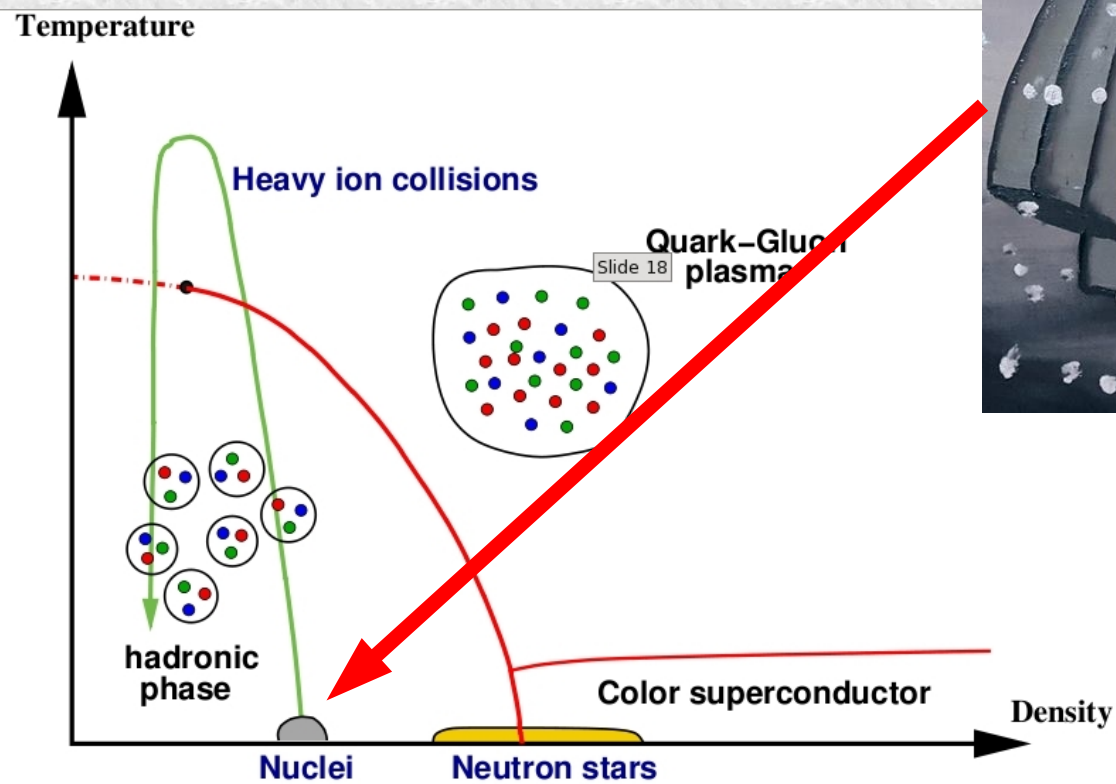
- Cieľom zrážky je prekročiť hranicu fázového prechodu a udržať kvapku hustej a horúcej jadrovej hmoty **dostatočne dlho na to, aby sa QGP stihla prejavit'**



Fázový diagram slúži ako cestovná mapa

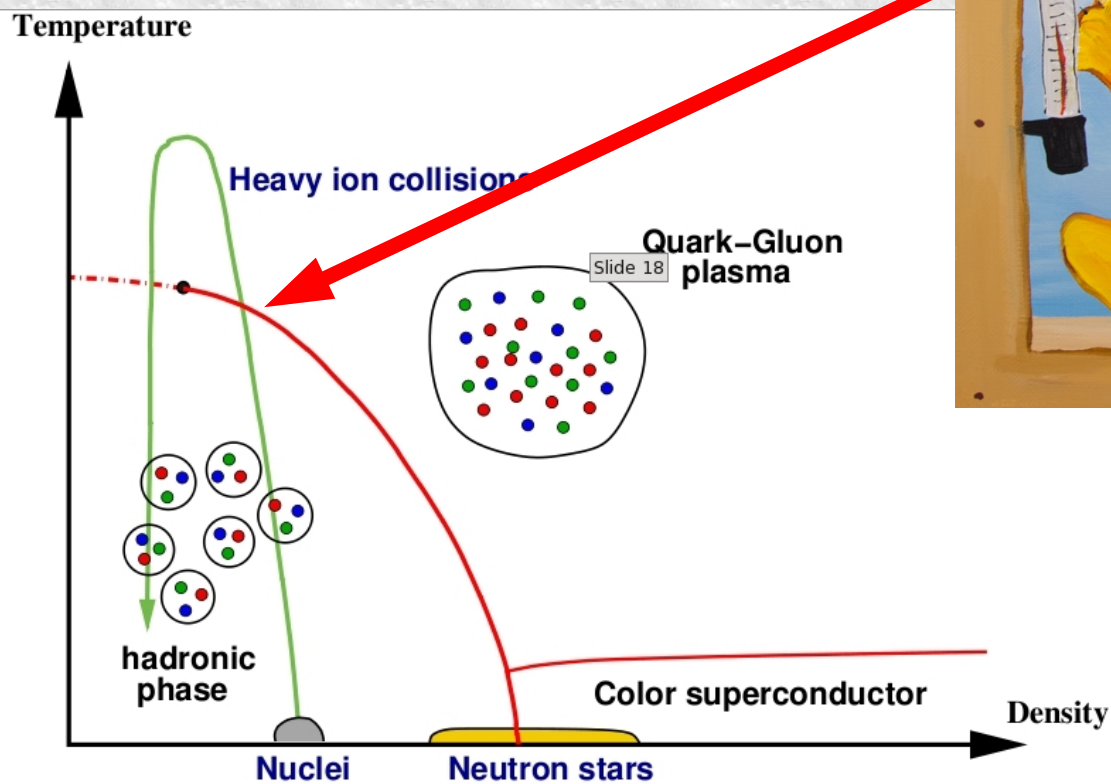
# Zrážka na fázovom diagrame

Pred zrážkou sú všetky kvarky viazané v **protónoch** a **neutrónoch** tvoriacich zrážajúce sa jadrá



# Zrážka na fázovom diagrame

V početných p-p, p-n, n-n zrážkach sa uvoľní veľké množstvo energie vďaka čomu dôjde k zahriatiu jadrovej hmoty

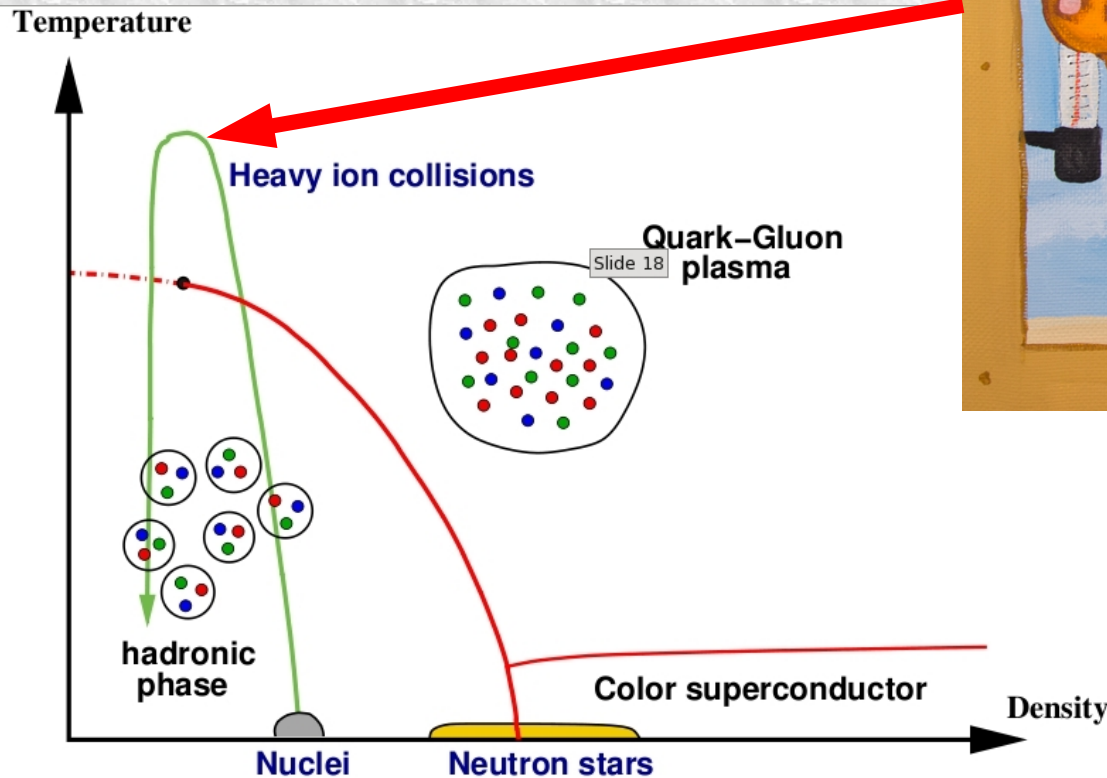


Teplota je dostatočne vysoká na to, aby sa individuálne kvarky "oslobodili" a vydali sa na cestu v čase späť k počiatku Všetomíra

# Zrážka na fázovom diagrame

Husté kvarkovo-gluónové médium sa ďalej zahrieva a expanduje

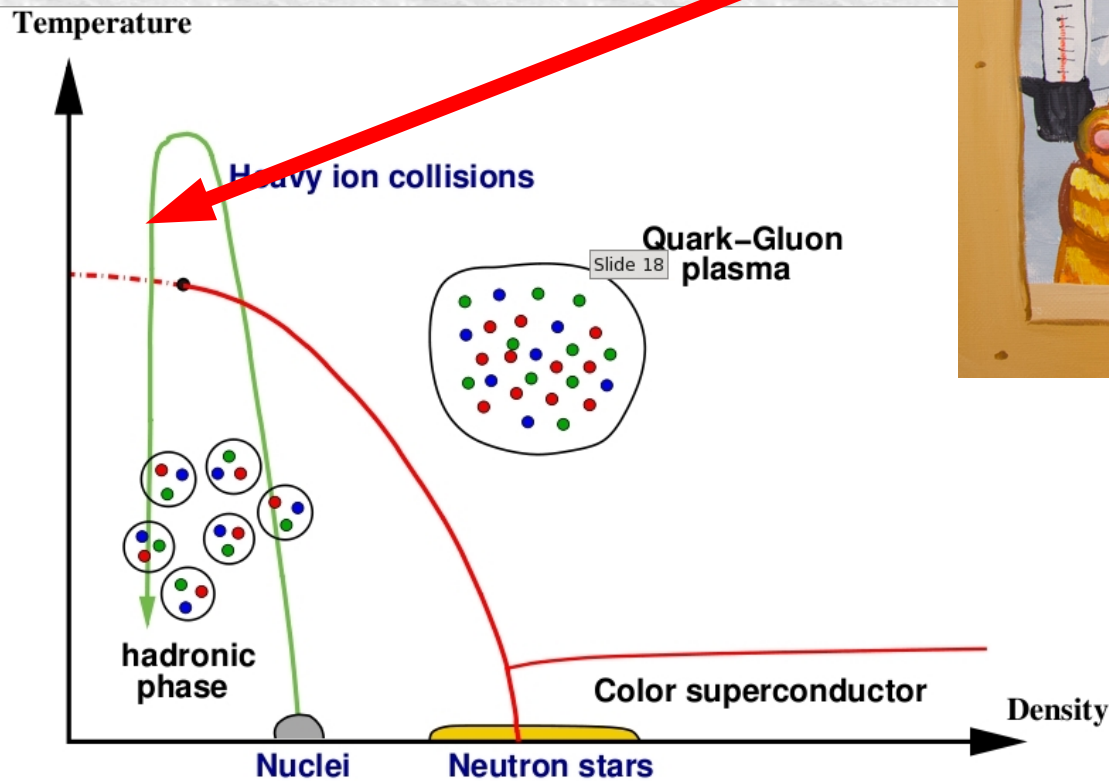
Približujeme sa prostrediu asi 1 $\mu$ s starého Vesmíru



Kvarky a gluóny v hustom horúcom prostredí silne interagujú

# Zrážka na fázovom diagrame

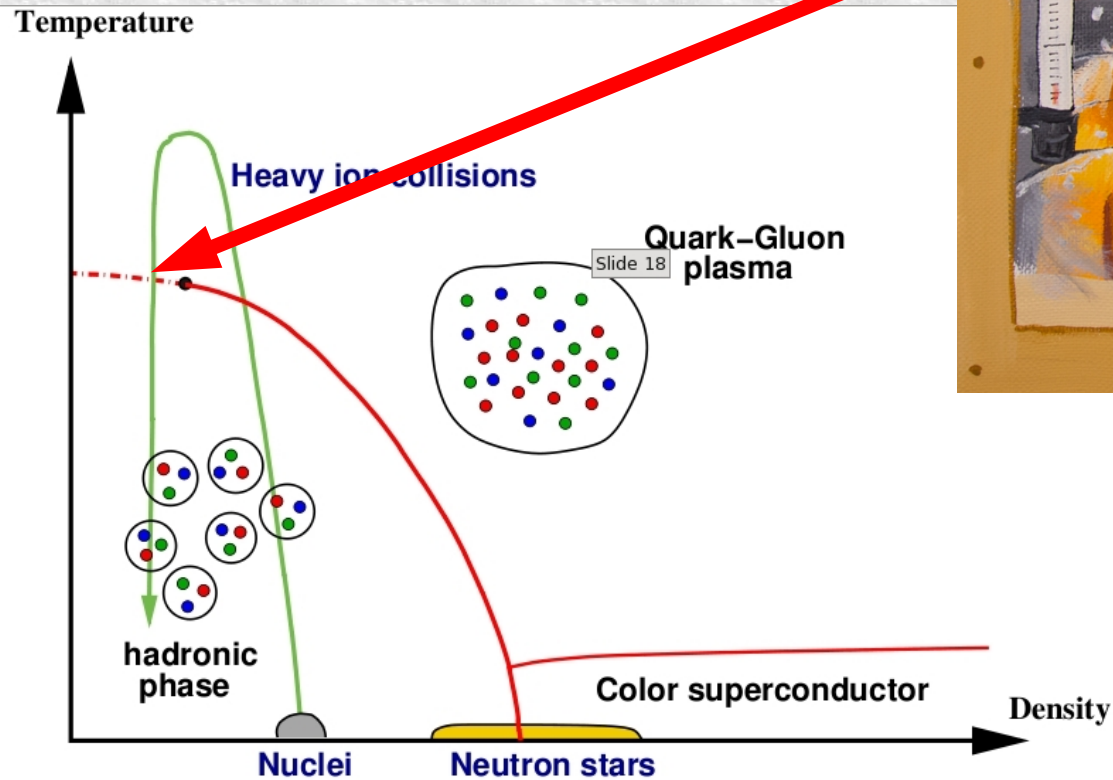
Husté kvarkovo-gluónové prostredie expanduje a ochladzuje sa



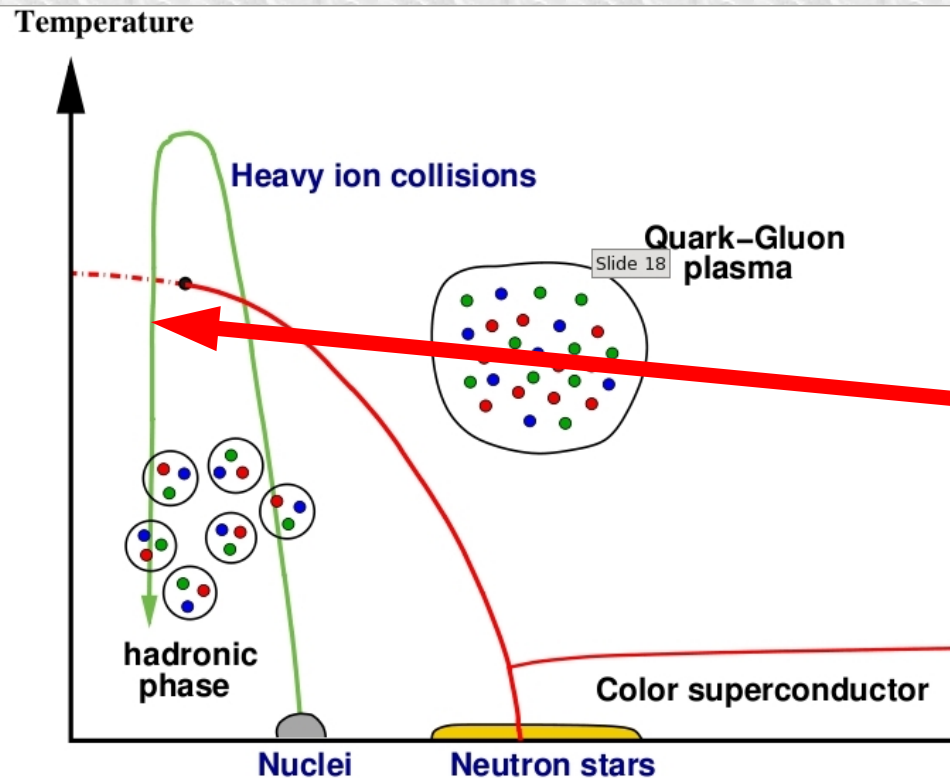
Hustota prostredia je menšia, počet vzájomných inerakcií kvarkov a gluónov klesá

# Zrážka na fázovom diagrame

Ďalšia expanzia ďalej znižuje teplotu.  
Pôvodne veľmi horúci systém sa opäť ochladí natoľko, že existencia voľných kvarkov je nemožná



# Zrážka na fázovom diagrame

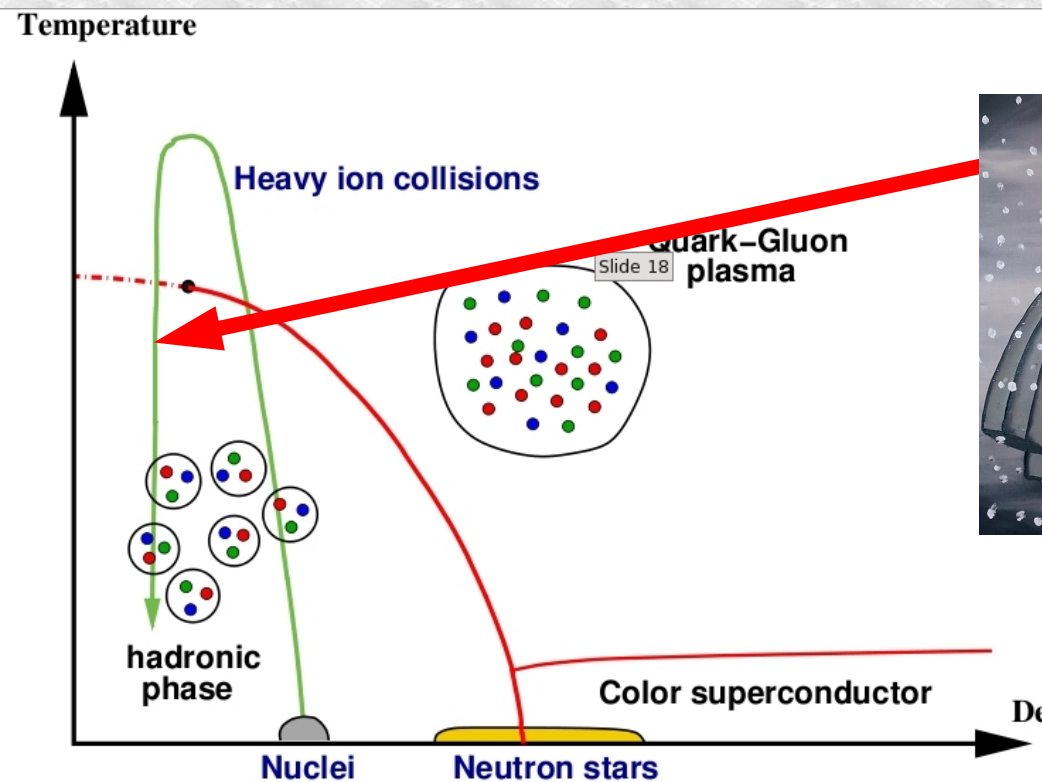


Teplota poklesla pod kritickú hodnotu. Kvarky a gluóny ďalej nemôžu existovať ako voľné častice

Nejaký čas ešte bezfarebné hadróny vzájomne interagujú, systém ďalej expanduje, až kým vzájomné zrážky neustanú



# Zrážka na fázovom diagrame

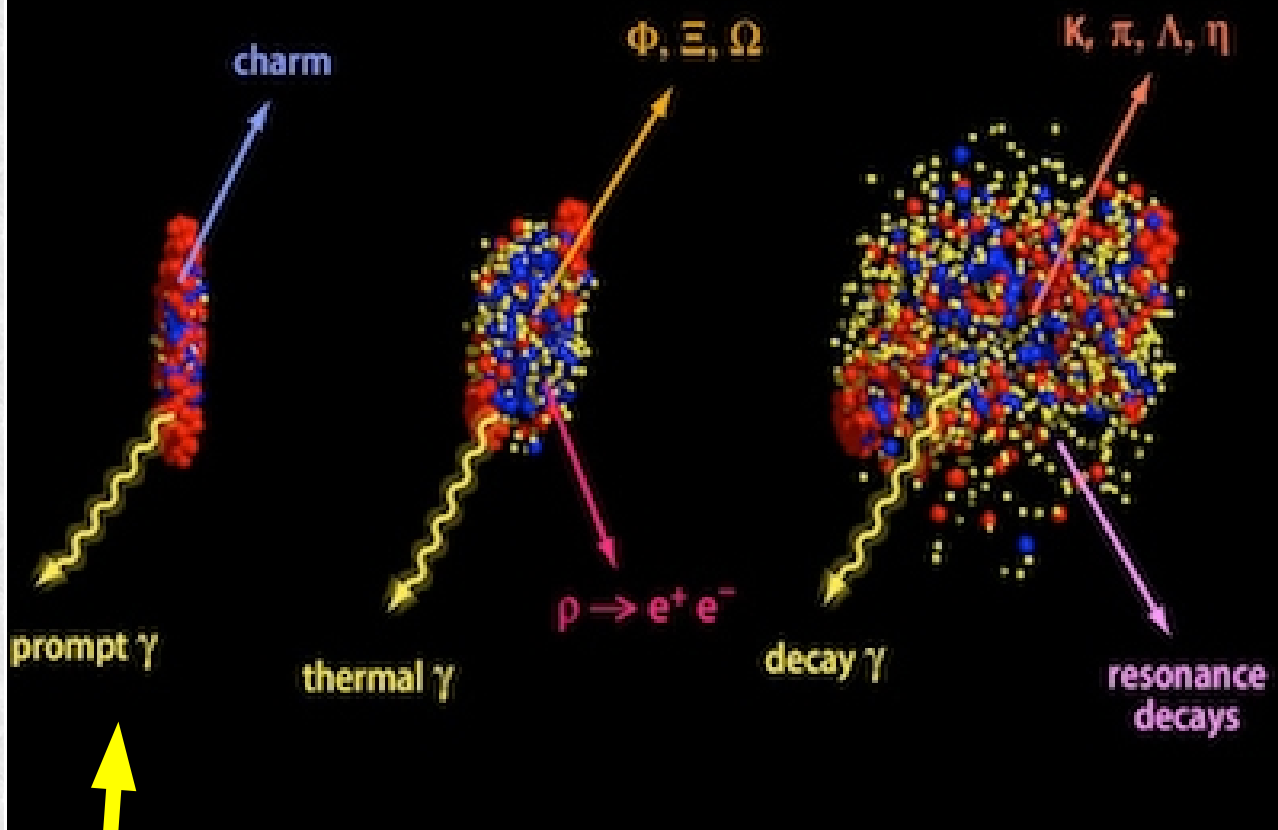


Keď všetky vzájomné zrážky ustanú, každá z tisícok rôznych elementárnych častíc zrodených v zrážke si odnáša svoje jedinečné spomienky na cestu k počiatkom Vesmíru a späť



- Celý proces zrážky dvoch ťažkých jadier, pri ktorých dôjde k fázovému prechodu do QGP + následné ochladenie a hadronizácia trvá rádovo iba niekoľko **fm/c** ( $\sim 10^{-23}$  s), takže priamo pozorovať nič nemôžeme
- V 80-tych rokoch XX storočia boli navrhnuté vhodne zvolené “**znamenia**” (*signatúry*), ktoré môžu vydať svedectvo o fázovom prechode a o vlastnostiach hmoty na “druhej strane”
- Rôzne druhy častíc si pamätajú časť spoločného príbehu - spolu pomôžu zrekonštruovať históriu zrážky dvoch ultrarelativistických ťažkých iónov

# Signatúry QGP



Spomienky si zachovajú ťažké kvarky,  
energetické fotóny...

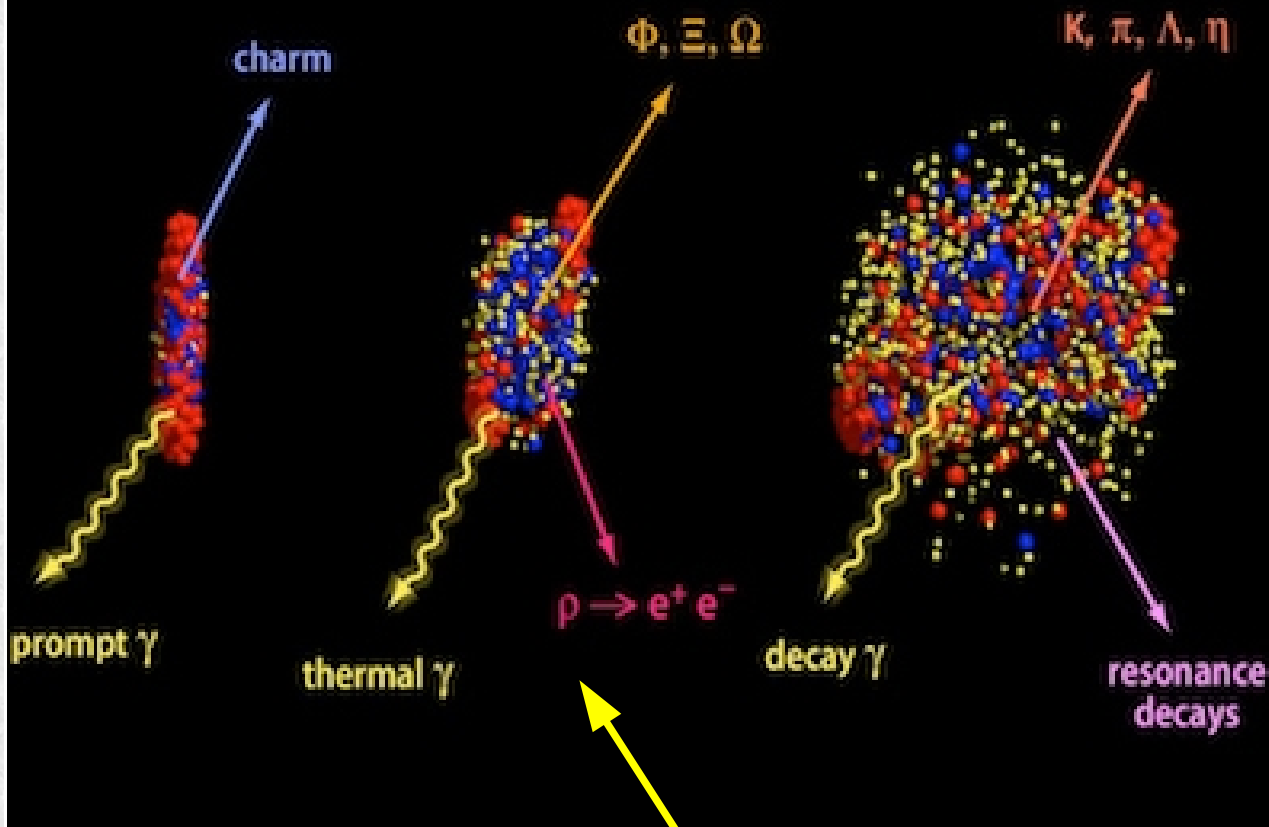
Kontakt jadier,  
individuálne  
zrážky nukleónov  
pri energii projektilov

# Signatúry QGP

Spomienky na hustú QGP si odnášajú elektromagnetické častice  
 $e$ ,  $\mu$ , fotóny...

QGP a rannú fázu kolektívneho pohybu si pamätajú ťažké hadróny obsahujúce niekoľko podivných kvarkov

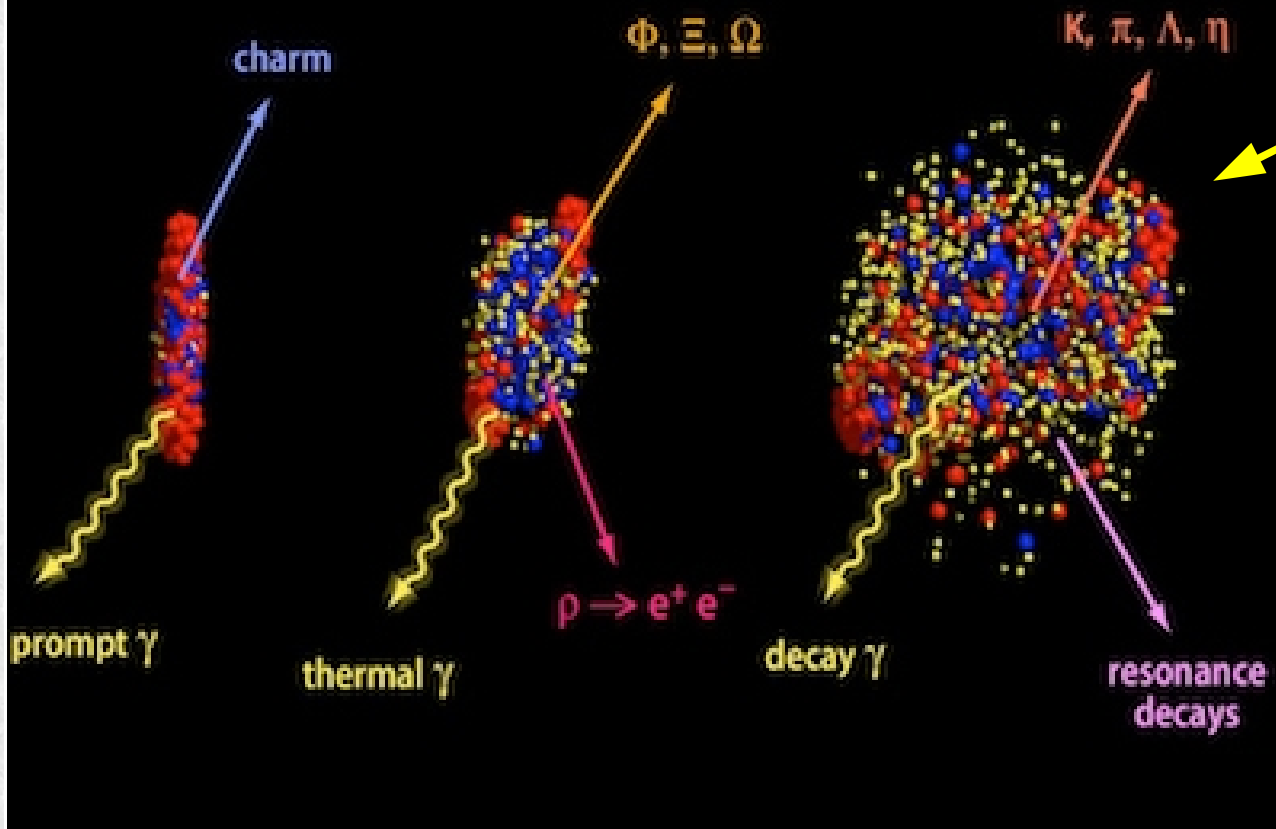
Chemické zloženie koncového stavu určené v tejto fáze



Hustá a horúca fáza, kolektívny pohyb,  
**tepelná** a **chemická** rovnováha,  
QGP (elektromagnetické signály), alebo  
ranná hustá hadrónová fáza  
(energia zrážok daná teplotou  $\ll E_{proj}$ )

# Signatúry QGP

Záverečné fázy  
kolektívnych procesov  
**Kinematika častíc**  
daná teplotou  
vymrznutia  
a rozvinutým  
kolektívnym pohybom



V tejto fáze sa chemické zloženie koncového stavu už nemení

- Na pochytanie svedkov zrážky potrebujeme optimálny detekčný aparát
- V súčasnosti je najvhodnejším nástrojom na skúmanie QGP experiment na LHC v CERN
- **A Large Ion Collider Experiment**

# **Experient ALICE na LHC**

## **VIDEO**

**Keby video nefungovalo....**



Ženevské jazero

Letisko

CERN

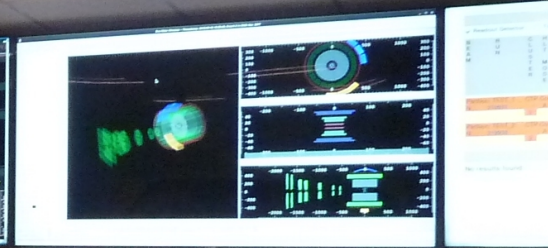
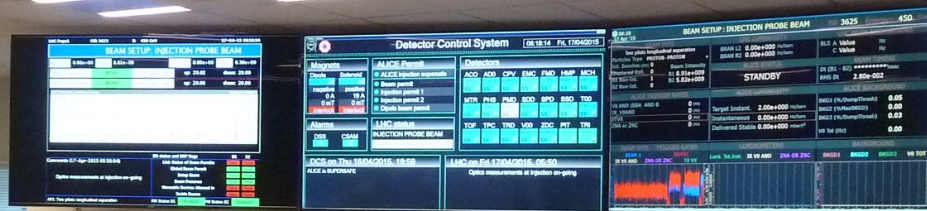
LHC

SPS

PS









08:19  
17 Apr '15

# BEAM SETUP : INJECTION PROBE BEAM

Fill 3625 Energy= 450 (GeV)

BEAM INFO	
Two pilots longitudinal separation	
Particles Type	PROTON - PROTON P
Int. Bunches (IP2)	0
Displaced Coll.	0
B1 Non-Int.	1
B2 Non-Int.	0
Beam Intensity	
B1	9.77e+009
B2	5.20e+009

LHC LUMINOSITY	
BRAN L2	0.00e+000 Hz/barn
BRAN R2	0.00e+000 Hz/barn
ALICE STATUS	
<b>STANDBY</b>	

LHC BEAM BACKGROUND	
BLS A Value	Hz
C Value	Hz
BEAM TIMING	
Dt (B1 - B2)	*****nsec
RMS Dt	2.80e-002

ALICE TRIGGER RATES	
V0 AND (BBA AND B	0 (Hz)
IR_V0AND	0 (Hz)
OTVX	0 (Hz)
ZNA or ZNC	0 (Hz)

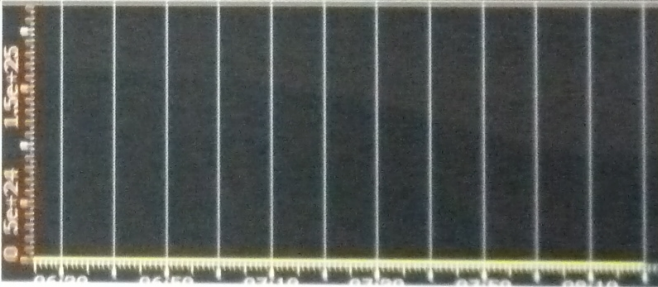
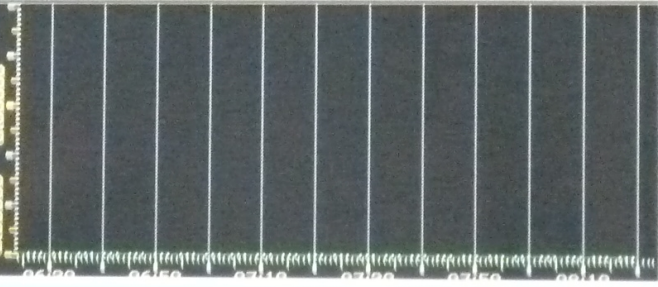
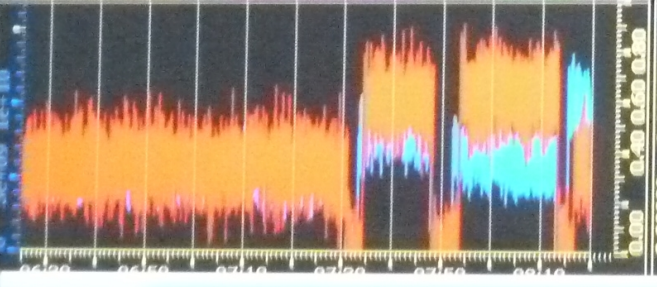
ALICE LUMINOSITY	
Target Instant.	2.00e+000 Hz/barn
Instantaneous	0.00e+000 Hz/barn
Delivered Stable	0.00e+000 mbarr <sup>1</sup>

ALICE BACKGROUND	
BKG1 (%/DumpThresh)	0.03
BKG2 (%MaxBKGD)	0.00
BKG3 (%/DumpThresh)	0.01
V0 Tot (Hz)	0.00

BEAM INTS. - TRIGGER RATES		
BEAM 1	BEAM2	
IR V0 AND	ZNA OR ZNC	T0 VX

LUMINOMETERS		
Lumi. Tot.Inst.	IR V0 AND	ZNA OR ZNC

BACKGROUND			
BKGD1	BKGD2	BKGD3	V0 TOT

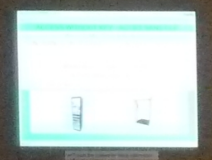


YCA01  
PX24

YYACS01=PX24

ACCESS MODE - MODELS ACCESS

RESTRICTED	RESTREINT
PATROL	PATROILLE
GENERAL	GENERAL



YCAPG01=PX24



IONIZATION

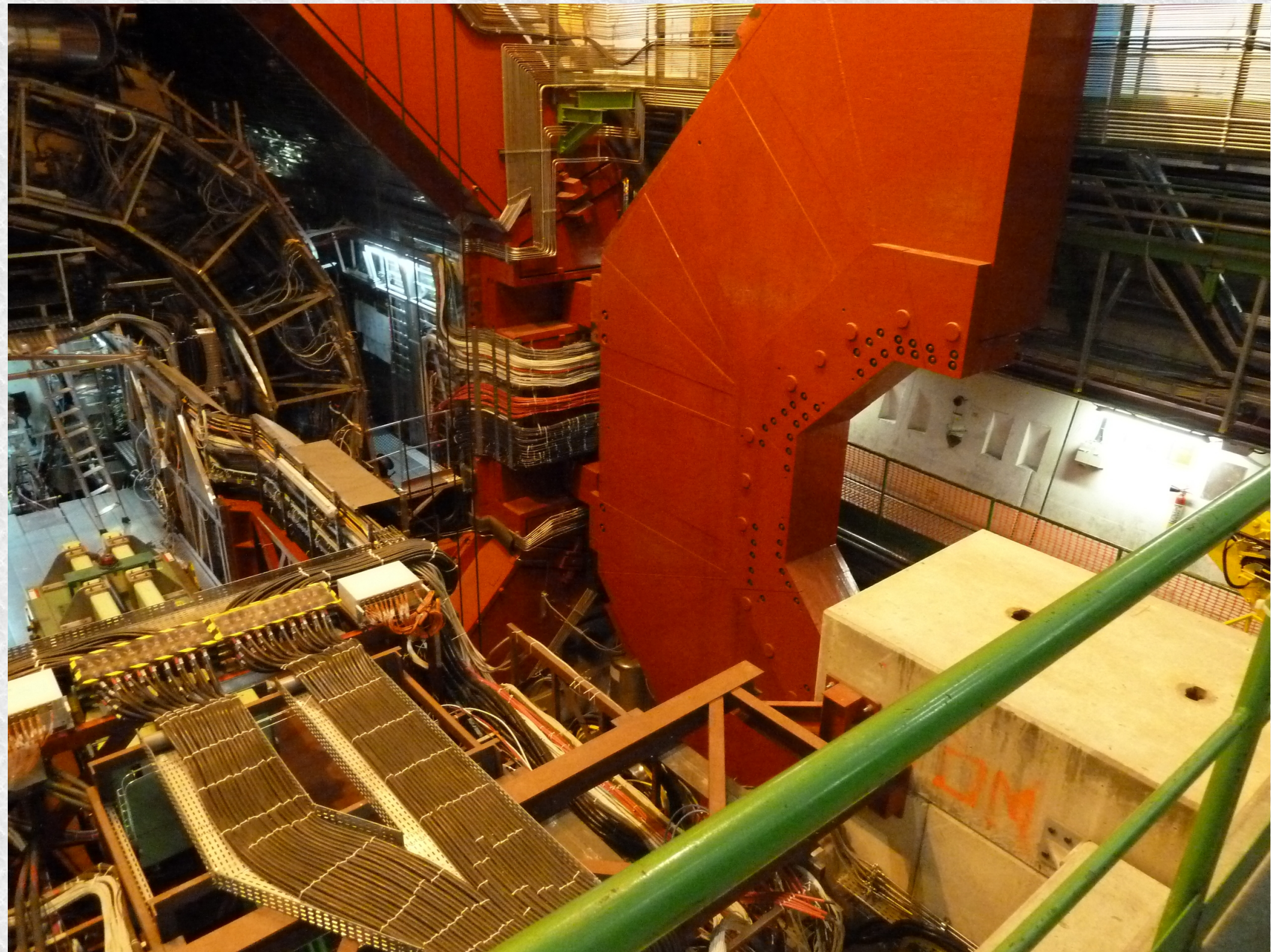
PASSAGE INTERDIT  
PORTE INTERLOCKEE

FORBIDDEN ACCESS  
INTERLOCKED DOOR

YCPZ01  
PX24





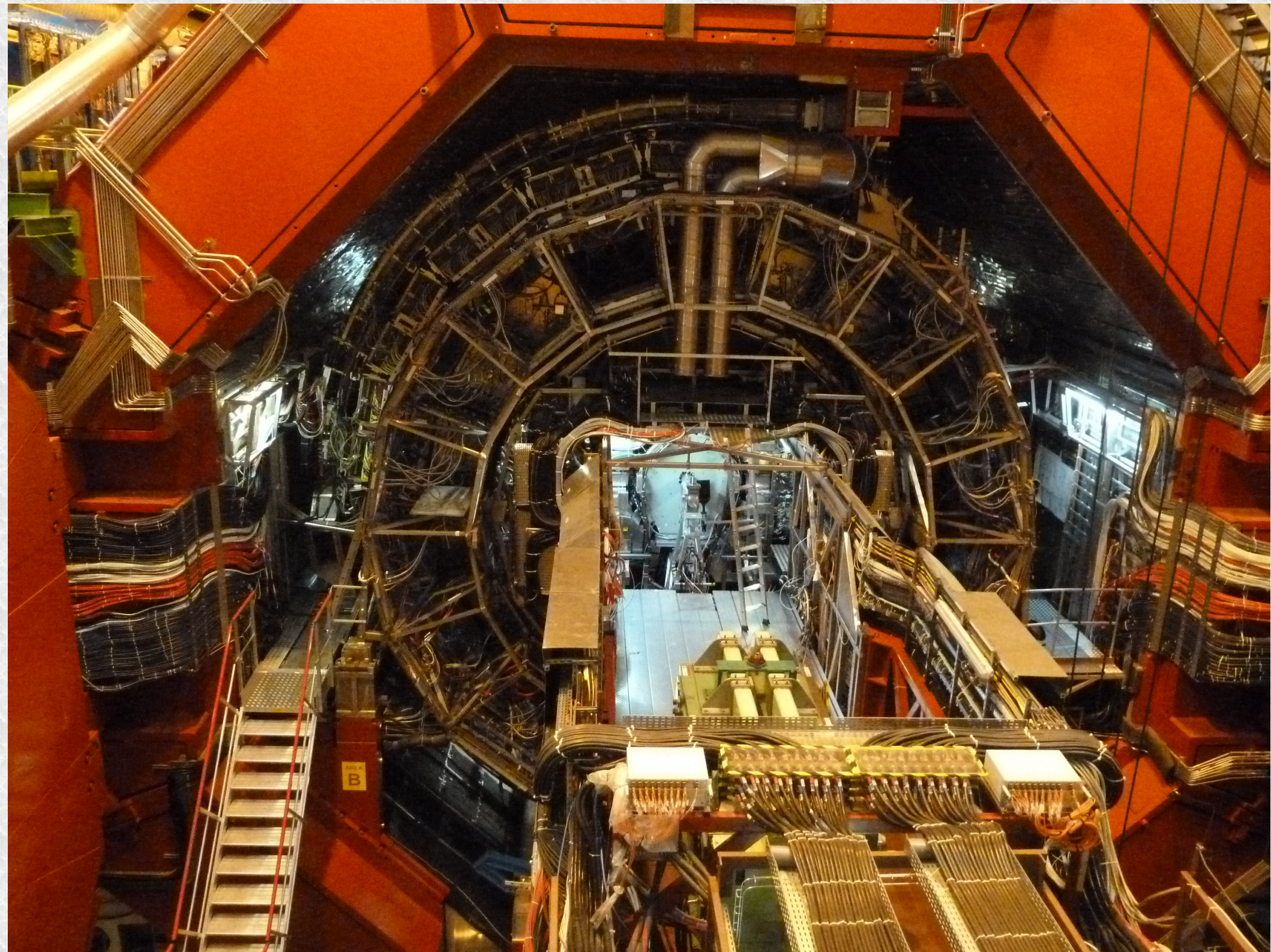


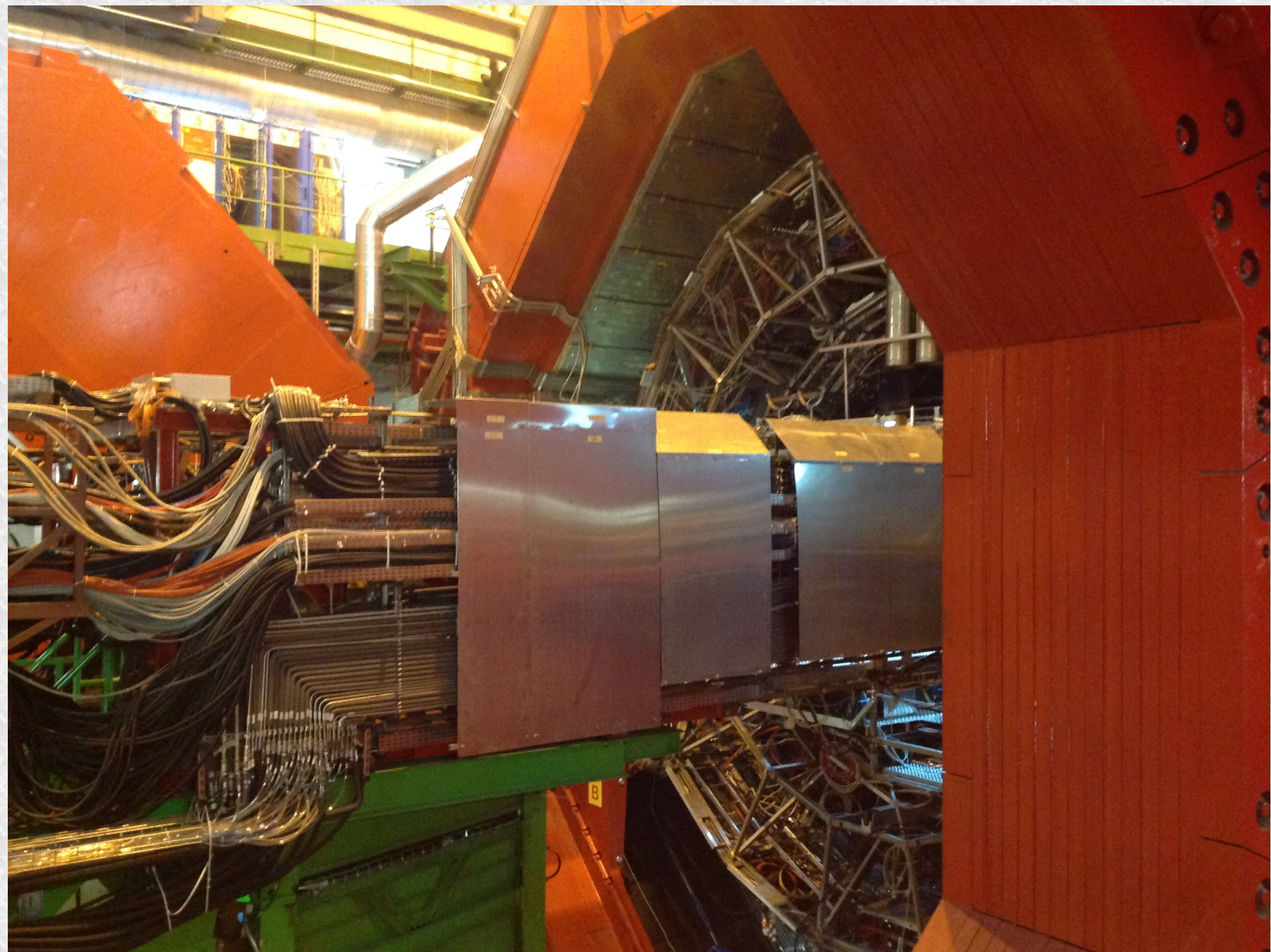




BRUNNHUBER  
krantechnik

201  
201  
51





# Zdroje grafiky

- Вася Ложкин, <http://vasya-lozhkin.ru/>
- NASA
- CERN
- I. Králik
- J. Vrláková
- Wikipedia...