

Prapolievka

Boris Tomášik

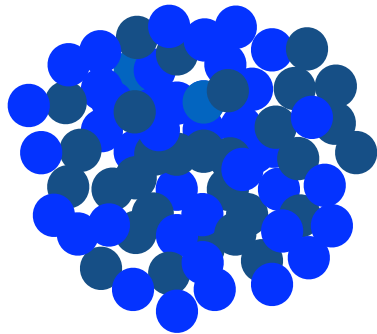
*Univerzita Mateja Bela, Banská Bystrica
Fakulta prírodných vied*

&

*České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská*

Atómové jadro v extrémnych podmienkach

Atómové jadro v extrémnych podmienkach



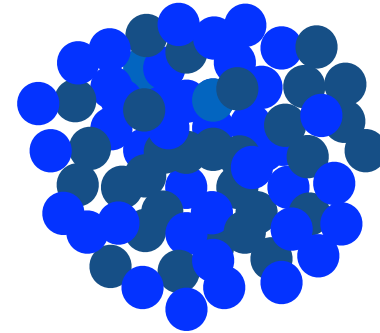
Atómové jadro v extrémnych podmienkach



extrémne vysoký tlak
extrémne vysoká hustota častíc
extrémne vysoká hustota energie

Kompaktné (neutrónové) hviezdy

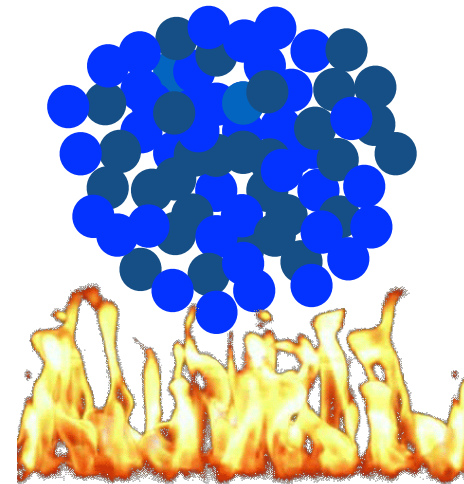
Atómové jadro v extrémnych podmienkach



extrémne vysoký tlak
extrémne vysoká hustota častíc
extrémne vysoká hustota energie

Kompaktné (neutrónové) hviezdy

Atómové jadro v extrémnych podmienkach



extrémne vysoký tlak
extrémne vysoká hustota častíc
extrémne vysoká hustota energie

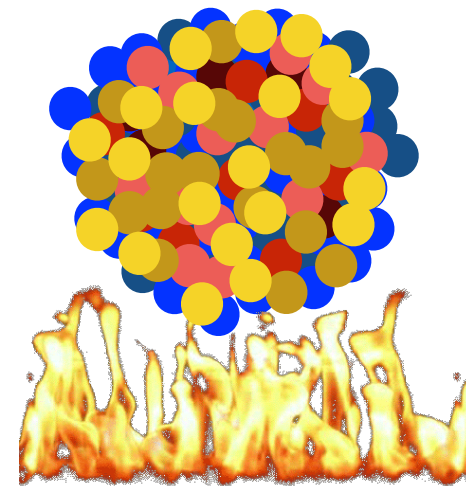
Kompaktné (neutrónové) hviezdy

Atómové jadro v extrémnych podmienkach



extrémne vysoký tlak
extrémne vysoká hustota častíc
extrémne vysoká hustota energie

Kompaktné (neutrónové) hviezdy



extrémne vysoká teplota
extrémne vysoká hustota (nových) častíc
extrémne vysoká hustota energie

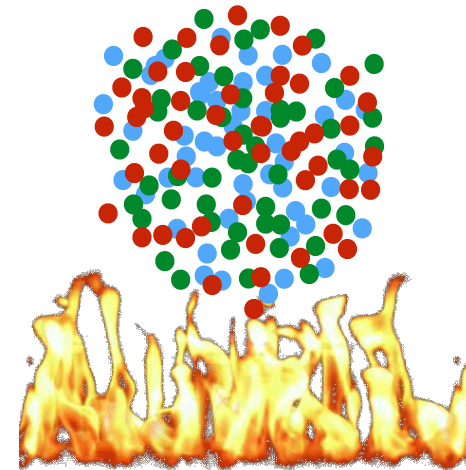
Raný vesmír

Atómové jadro v extrémnych podmienkach



extrémne vysoký tlak
extrémne vysoká hustota častíc
extrémne vysoká hustota energie

Kompaktné (neutrónové) hviezdy



extrémne vysoká teplota
extrémne vysoká hustota (nových) častíc
extrémne vysoká hustota energie

Raný vesmír
Kvarkovo-gluónová plazma

Kritické podmienky

kritická hustota energie: vnútro protónu

$$\varepsilon = \frac{mc^2}{V} = 10^{32} \text{ J.m}^{-3}$$

$$T_c = 2\,000\,000\,000\,000\,000 \text{ K}$$

QGP v laboratóriu: jadrové zrážky

Simulácia zrážky Au+Au pri 200 GeV na nukleón (urýchľovač RHIC v BNL)

kinetický výpočet: kaskádový generátor UrQMD (len hadrónová fáza, žiadna plazma)
animácia: Jeffery Mitchell (Brookhaven National Laboratory)

QGP v laboratóriu: jadrové zrážky



Simulácia zrážky Au+Au pri 200 GeV na nukleón (urýchľovač RHIC v BNL)

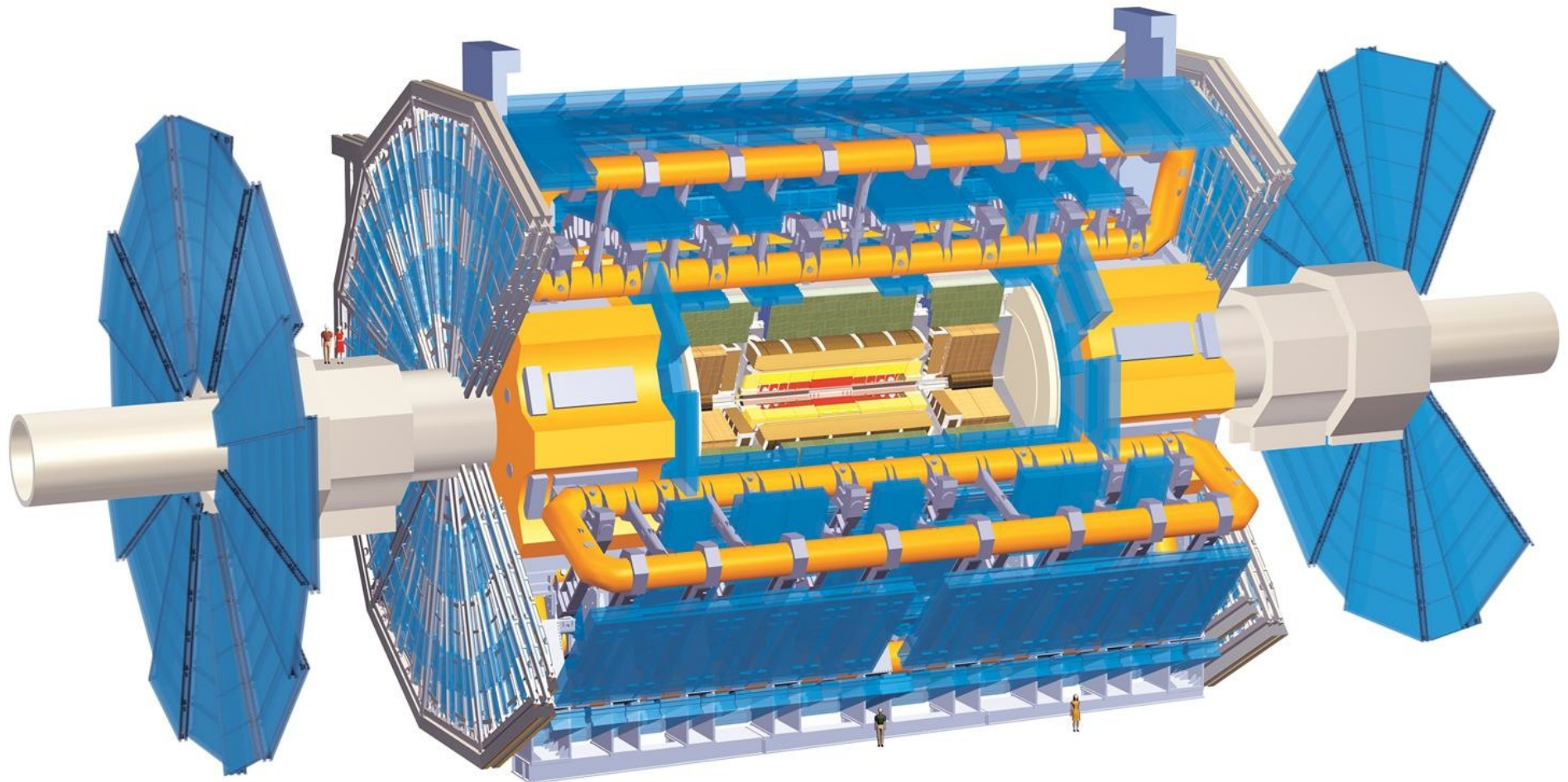
kinetický výpočet: kaskádový generátor UrQMD (len hadrónová fáza, žiadna plazma)
animácia: Jeffery Mitchell (Brookhaven National Laboratory)

CERN: zrážanie ťažkých iónov

CERN: zrážanie ťažkých iónov



Experiment ATLAS



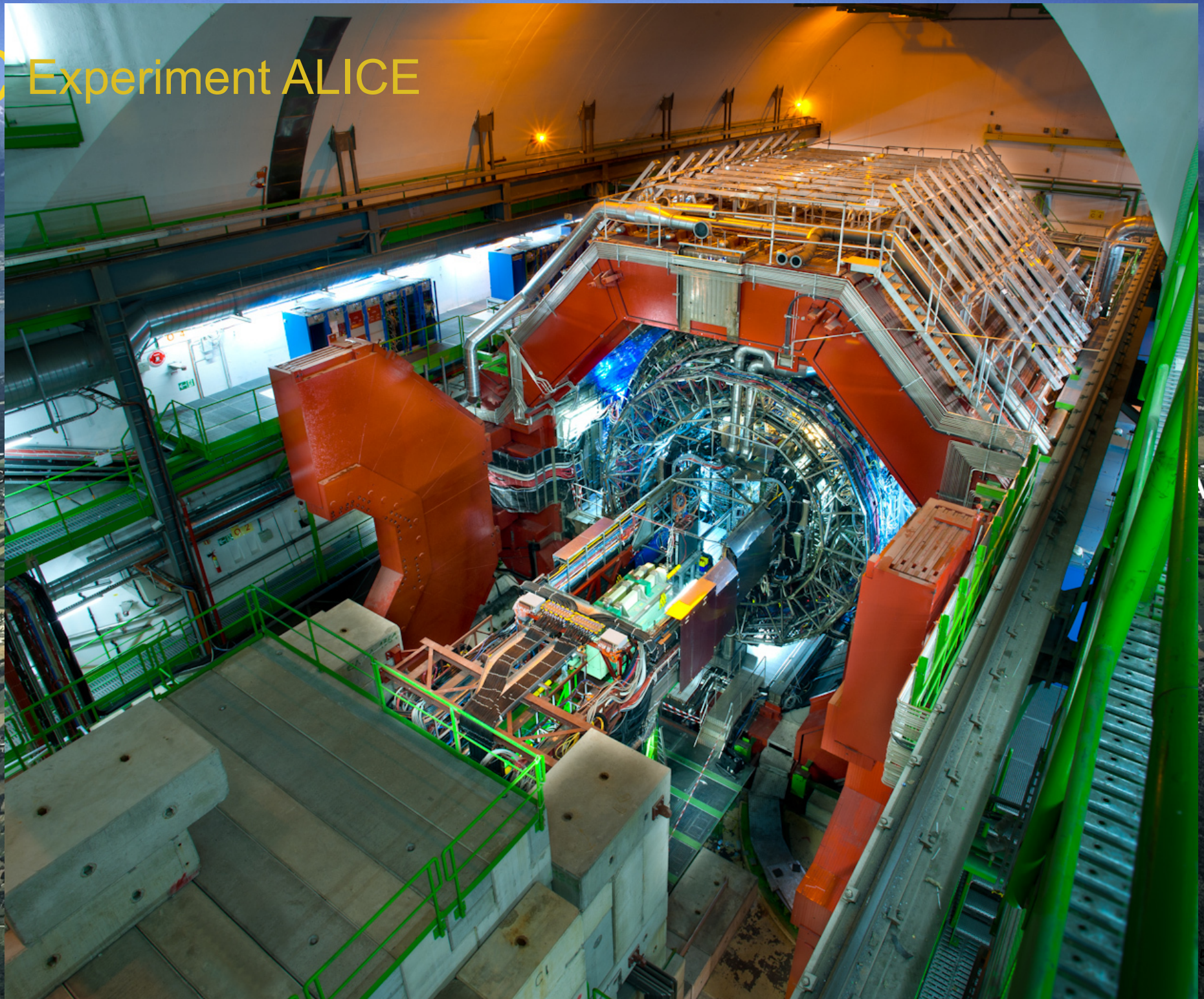
CERN: zrážanie ťažkých iónov



Experiment ALICE

SUISSE
FRANCE

ALICE



CERN: zrážanie ťažkých iónov



SUISSE
FRANCE

CMS

LHCb

ATLAS

CERN Meyrin

CERN Prévessin

SPS 7 km

ALICE

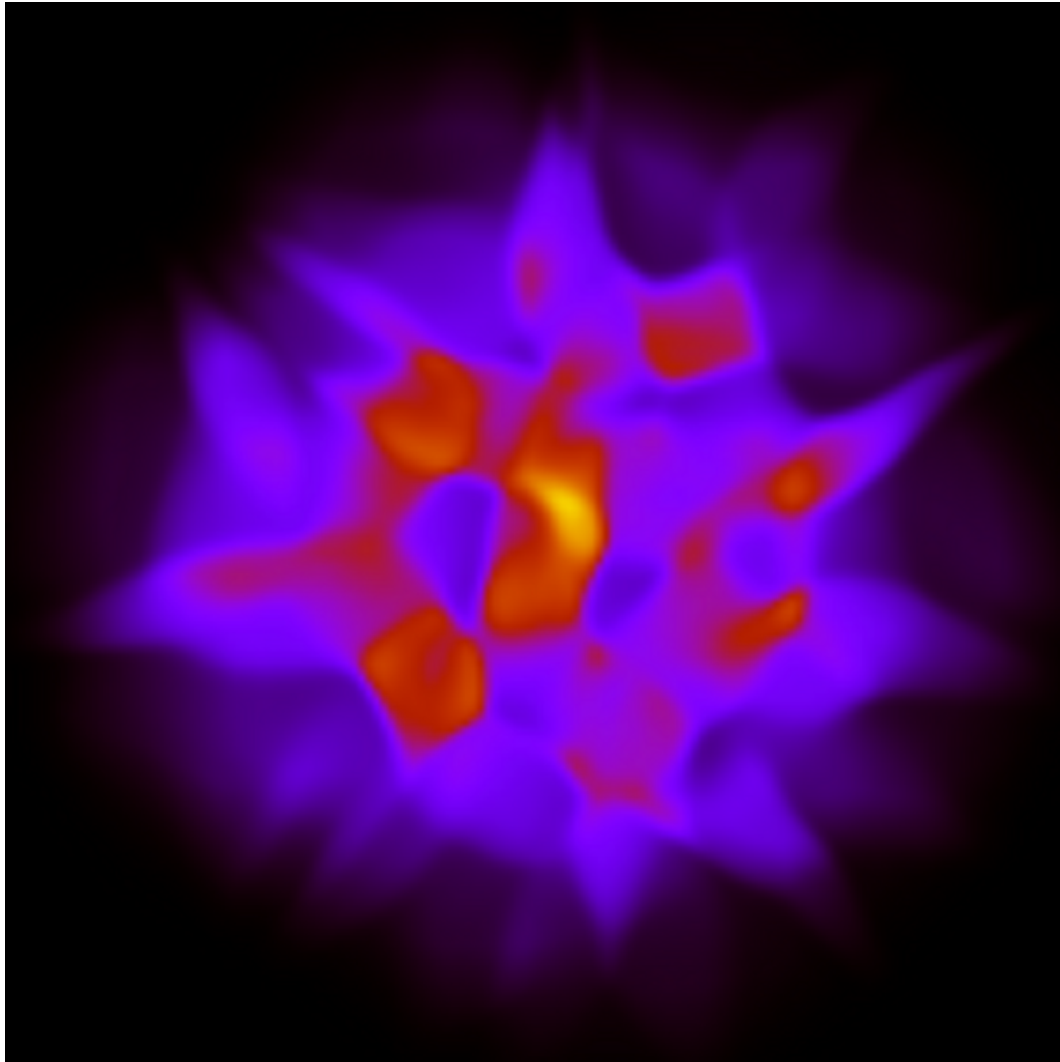
LHC 27 km

Vlastnosti kvarkovo-gluónovej plazmy

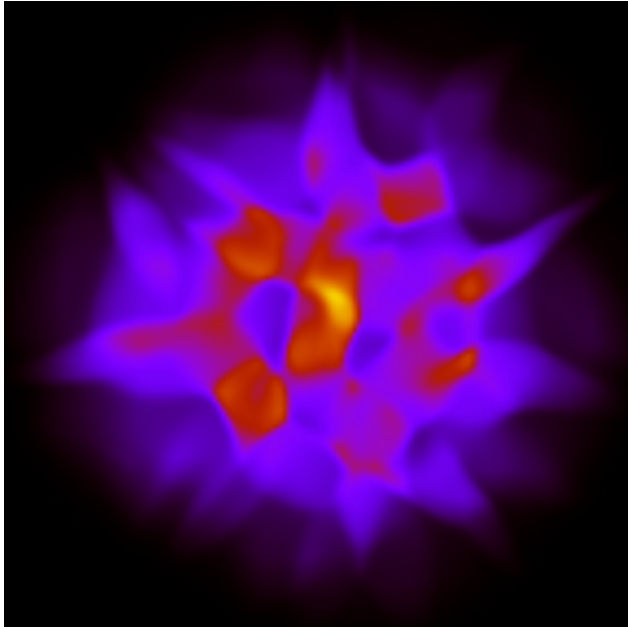
- Aký má tlak pri istej teplote?
- Akú má viskozitu?
- Ako sa sformuje?
- Akú teplotu dosiahne?

Rozpínanie kvarkovo-gluónovej plazmy

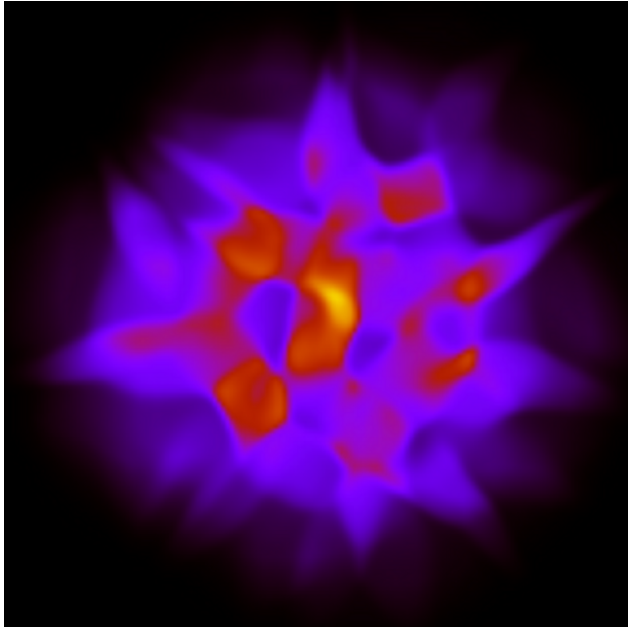
Rozpínanie kvarkovo-gluónovej plazmy



Rozpínanie kvarkovo-gluónovej plazmy



Rozpínanie kvarkovo-gluónovej plazmy



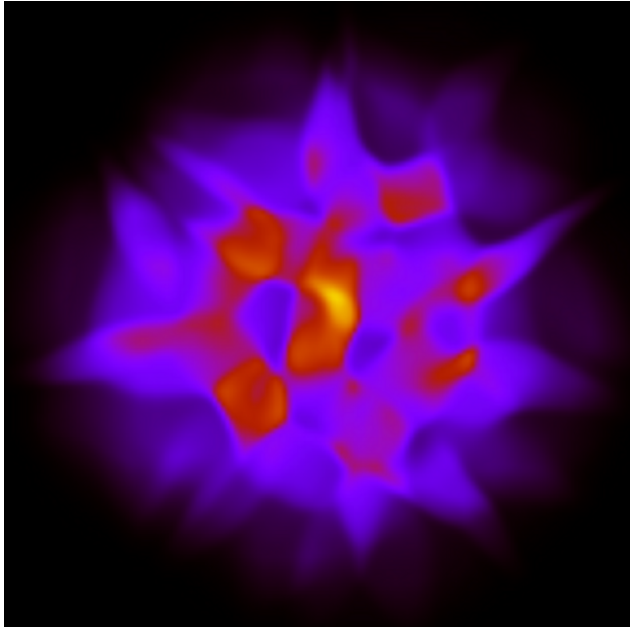
$$\partial_{\mu} T^{\mu\nu} = J^{\nu}$$

$$T^{\mu\nu} = T_0^{\mu\nu} + \Pi^{\mu\nu}$$

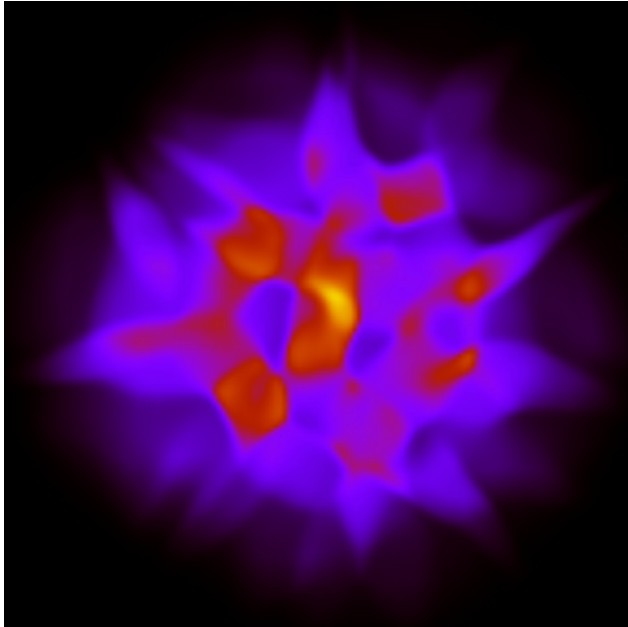
$$T_0^{\mu\nu} = (\varepsilon + p)u^{\mu}u^{\nu} - pg^{\mu\nu}$$

$$\Pi^{\mu\nu} = \Delta^{\mu\nu} \zeta \nabla_{\alpha} u^{\alpha} + \eta \nabla^{\langle\mu} u^{\nu\rangle}$$

Rozpínanie kvarkovo-gluónovej plazmy

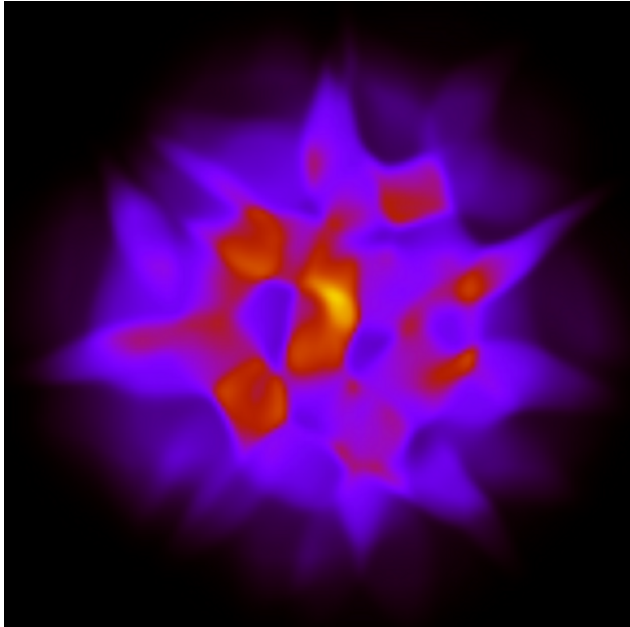


Rozpínanie kvarkovo-gluónovej plazmy

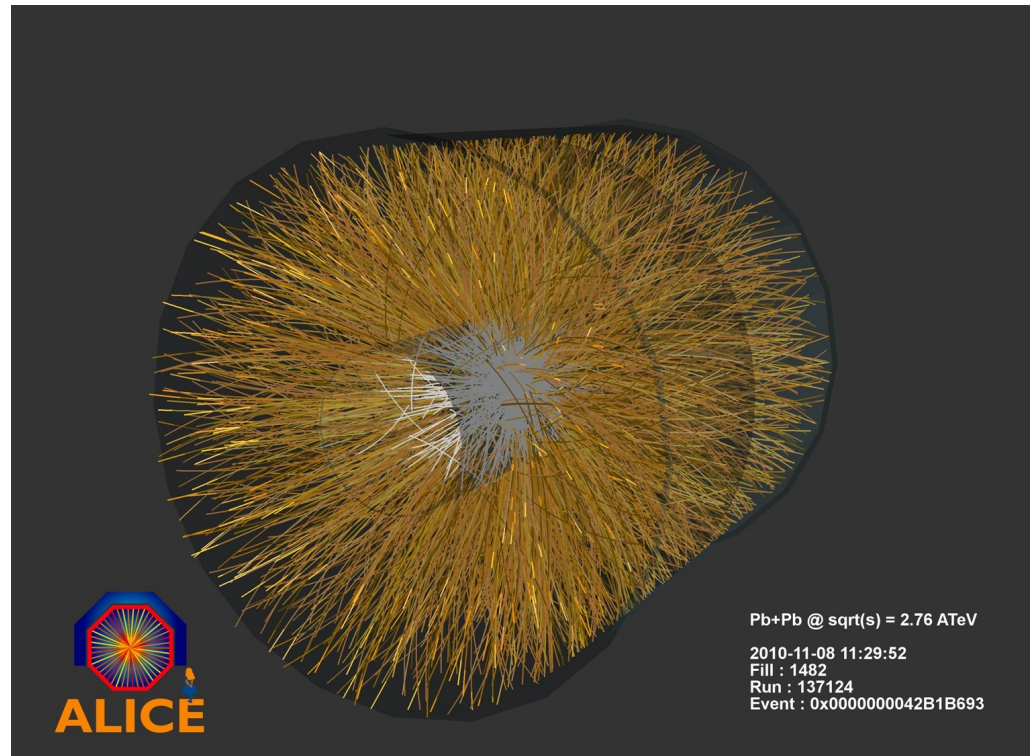
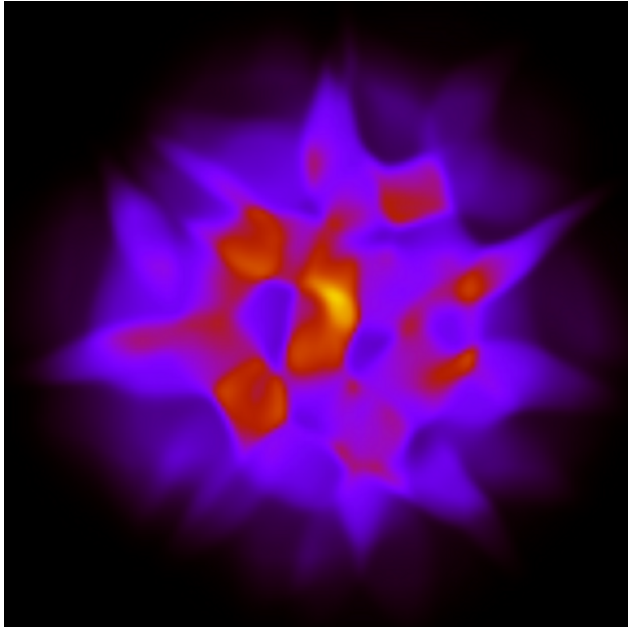


```
1fluid.f
[]
  if(over.eq.1 .and.under.eq.1)then
    call fillcube(i,j,k,hyperstep,e,elast,HyperCube)
    Ngp = COUNT(HyperCube.ge.CTParam(64))
    call Cornelius(CTParam(64),HyperCube,Ngp,dSigma,Nsurf,Vmid,
    & dthyper,dxh,dxh,dxh,Nambi,Ndisc)
  c hp interpolate values on hypersurface and write them to hypersurface array
  call fillcube(i,j,k,hyperstep,n,nlast,Hypern)
  call fillcube(i,j,k,hyperstep,vx,vxlast,Hypervx)
  call fillcube(i,j,k,hyperstep,vy,vylast,Hypervy)
  call fillcube(i,j,k,hyperstep,vz,vzlast,Hypervz)
  t0=t
  x0=(float(i)-float(ngr)*.5-.5)*sngl(dx)
  y0=(float(j)-float(ngr)*.5-.5)*sngl(dx)
  z0=(float(k)-float(ngr)*.5-.5)*sngl(dx)
  DO ii=1,Nsurf
    Hypert=t0+Vmid(0,ii)
    Hyperx=x0+Vmid(1,ii)
    Hypery=y0+Vmid(2,ii)
    Hyperz=z0+Vmid(3,ii)
    emid= Quadrilinear(Vmid(:,ii),HyperCube,dthyper,dxh,dxh,dxh)
    nmid = Quadrilinear(Vmid(:,ii),Hypern,dthyper,dxh,dxh,dxh)
    Vxmid = Quadrilinear(Vmid(:,ii),Hypervx,dthyper,dxh,dxh,dxh)
    Vymid = Quadrilinear(Vmid(:,ii),Hypervy,dthyper,dxh,dxh,dxh)
    Vzmid = Quadrilinear(Vmid(:,ii),Hypervz,dthyper,dxh,dxh,dxh)
    Tmid=Temp(emid,nmid)
    muqmid=chem(emid,nmid)
    musmid=schem(emid,nmid)
    pressmid=press(emid,nmid)
  c calculate net baryon density flow through surface
    gammid=1.d0/sqrt(1.d0-Vxmid**2-Vymid**2-Vzmid**2)
    umudsigmumid=gammid*(dSigma(0,ii)+Vxmid*dSigma(1,ii)
    & +Vymid*dSigma(2,ii)+Vzmid*dSigma(3,ii))
    bflow=nmid*umudsigmumid*n0
    tnn=(emid+pressmid)*gammid**2-pressmid
    tnx=(emid+pressmid)*Vxmid*gammid**2
    tny=(emid+pressmid)*Vymid*gammid**2
    tnz=(emid+pressmid)*Vzmid*gammid**2
    ene=(dSigma(0,ii)*tnn+dSigma(1,ii)*tnx
    & +dSigma(2,ii)*tny+dSigma(3,ii)*tnz)*e0/1.d3
    if((bflow).lt.0)then
      negbflow=negbflow+bflow
    else
      posbflow=posbflow+bflow
    endif
    if((ene).lt.0)then
      negene=negene+ene
    else
      posene=posene+ene
    endif
  END DO
  END IF
END SUBROUTINE
```

Rozpínanie kvarkovo-gluónovej plazmy

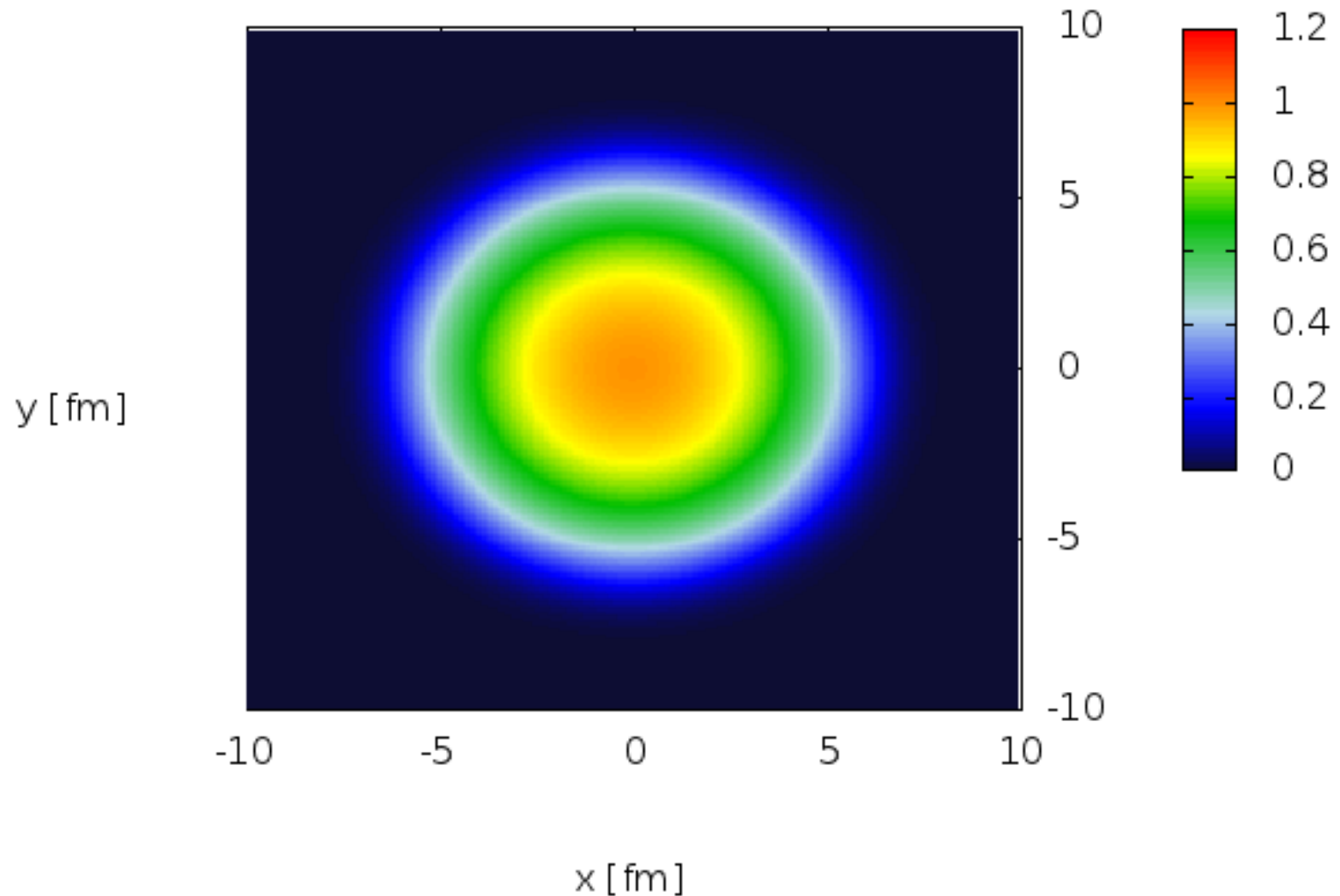


Rozpínanie kvarkovo-gluónovej plazmy



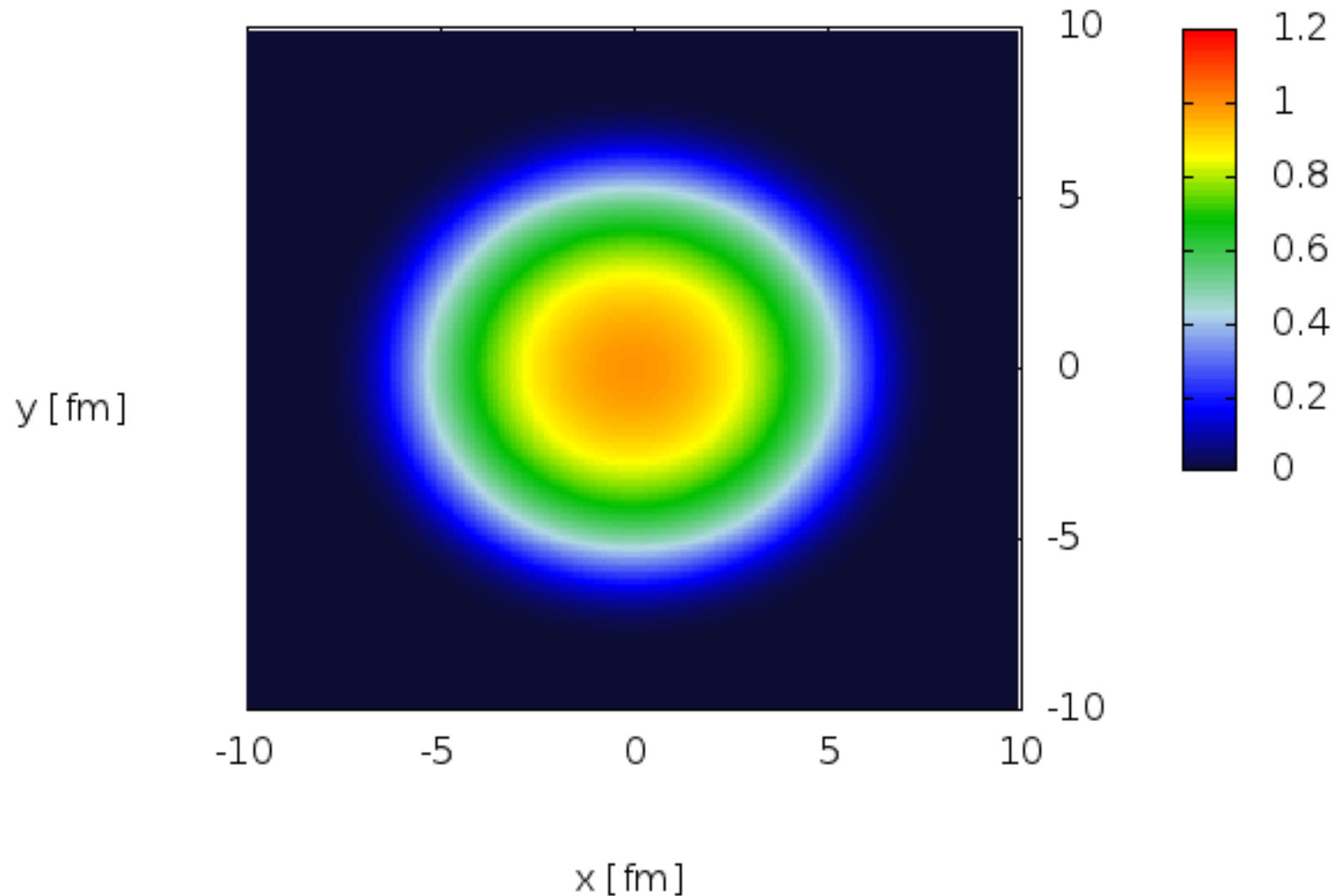
Čo robíme my

Cez plazmu prelietajú veľmi rýchle kvarky a gluóny a strhávajú ju za sebou



Čo robíme my

Cez plazmu prelietajú veľmi rýchle kvarky a gluóny a strhávajú ju za sebou



Štúdium kvarkovo-gluónovej plazmy

Štúdium kvarkovo-gluónovej plazmy

- na urýchľovači LHC dokážeme zrážaním jadier olova vyrobiť malé kvapky hmoty s roztopenými protónmi:
kvarkovo-gluónovú plazmu

Štúdium kvarkovo-gluónovej plazmy

- na urýchľovači LHC dokážeme zrážaním jadier olova vyrobiť malé kvapky hmoty s roztopenými protónmi:
kvarkovo-gluónovú plazmu
- kvarkovo-gluónová plazma vyplňala náš vesmír veľmi krátko po Veľkom tresku

Štúdium kvarkovo-gluónovej plazmy

- na urýchľovači LHC dokážeme zrážaním jadier olova vyrobiť malé kvapky hmoty s roztopenými protónmi:
kvarkovo-gluónovú plazmu
- kvarkovo-gluónová plazma vyplňala náš vesmír veľmi krátko po Veľkom tresku
- vieme merať vlastnosti takejto horúcej hmoty!!!

Typické energie, velikosti a časy

Energia zrážky

LHC: 1 144 TeV \approx 0,2 mJ

Typické energie, veľkosti a časy


Energia zrážky

LHC: 1 144 TeV \approx 0,2 mJ

Typický rozmer: 10^{-14} m

jablko

10^{-1} m

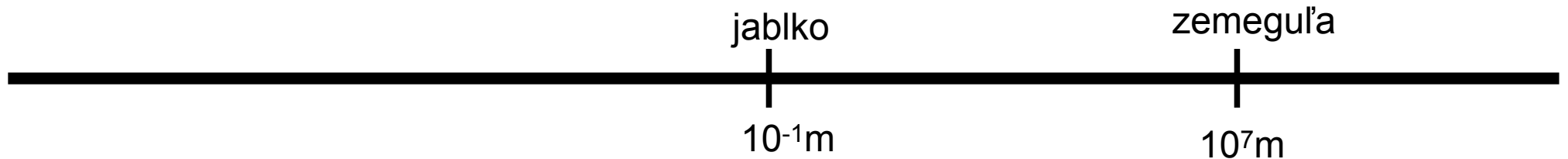


Typické energie, veľkosti a časy

Energia zrážky

LHC: 1 144 TeV \approx 0,2 mJ

Typický rozmer: 10^{-14} m

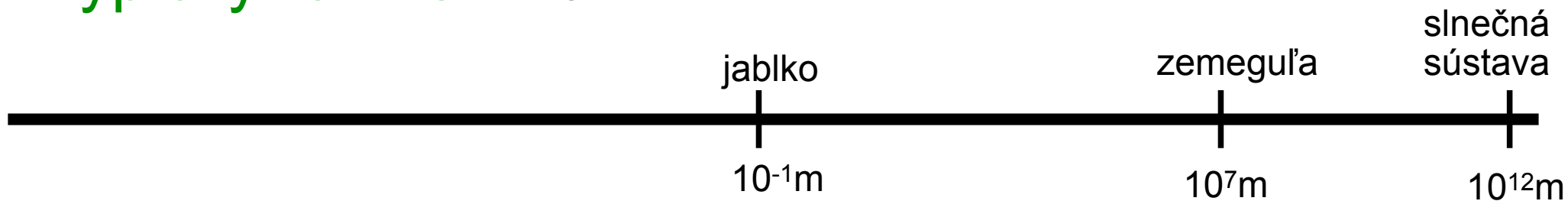


Typické energie, veľkosti a časy

Energia zrážky

LHC: 1 144 TeV \approx 0,2 mJ

Typický rozmer: 10^{-14} m

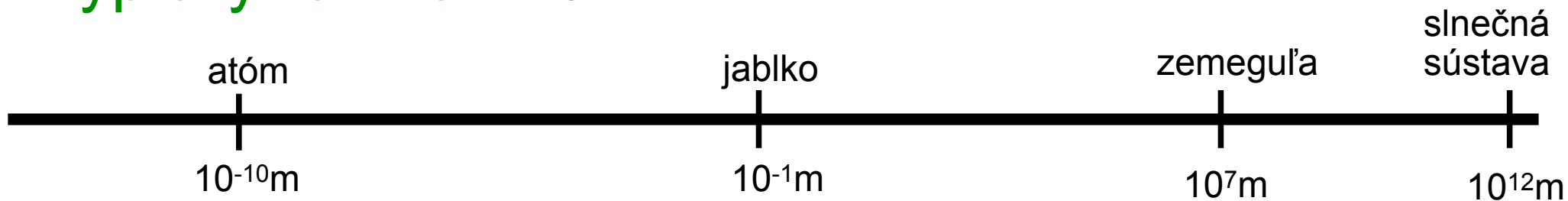


Typické energie, veľkosti a časy

Energia zrážky

LHC: 1 144 TeV \approx 0,2 mJ

Typický rozmer: 10^{-14} m

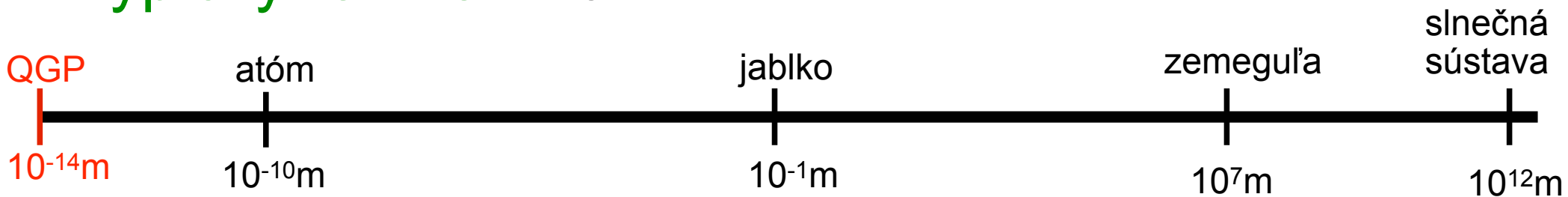


Typické energie, veľkosti a časy

Energia zrážky

LHC: 1 144 TeV \approx 0,2 mJ

Typický rozmer: 10^{-14} m

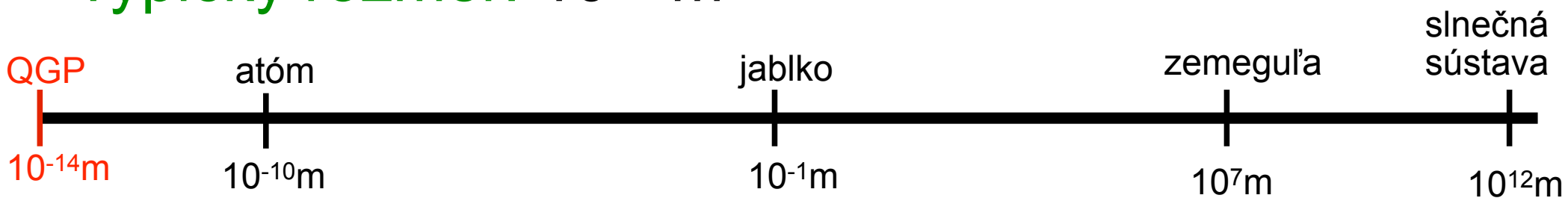


Typické energie, veľkosti a časy

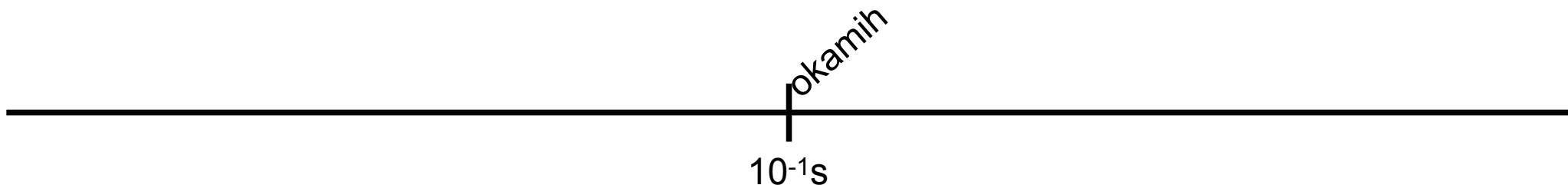
Energia zrážky

LHC: 1 144 TeV \approx 0,2 mJ

Typický rozmer: 10^{-14} m



Typická doba života: 10^{-22} s

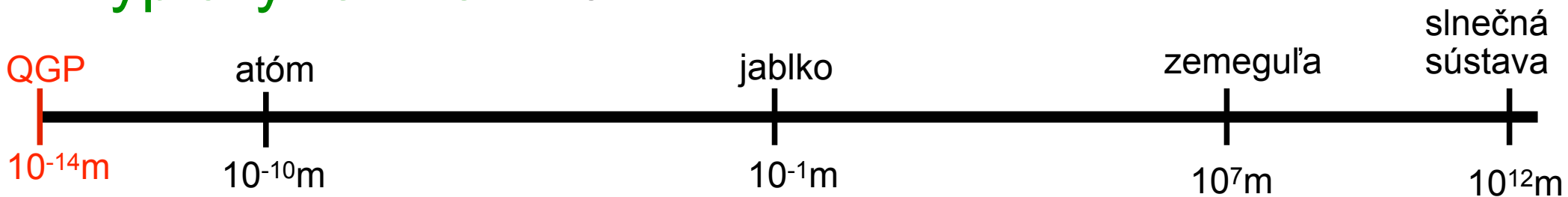


Typické energie, veľkosti a časy

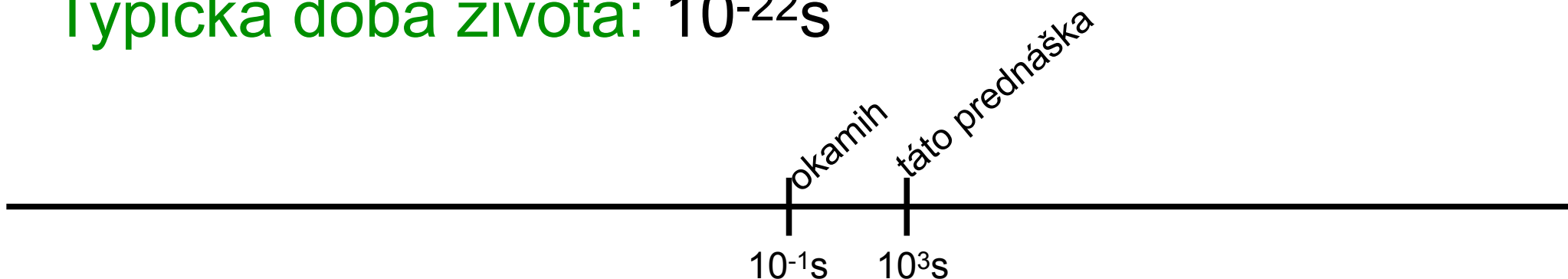
Energia zrážky

LHC: 1 144 TeV \approx 0,2 mJ

Typický rozmer: 10^{-14} m



Typická doba života: 10^{-22} s

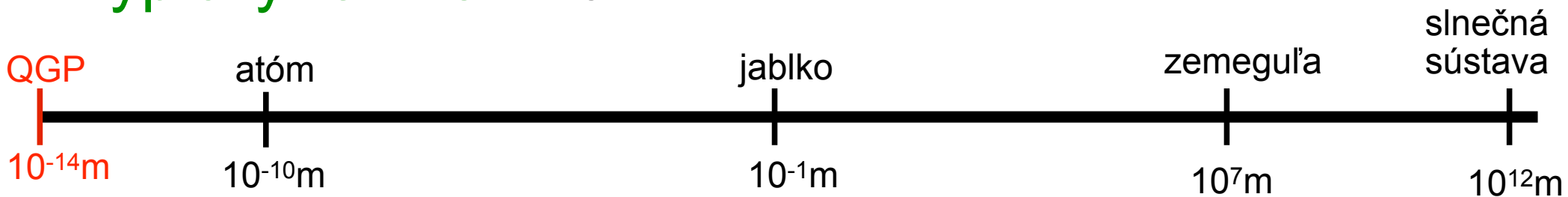


Typické energie, veľkosti a časy

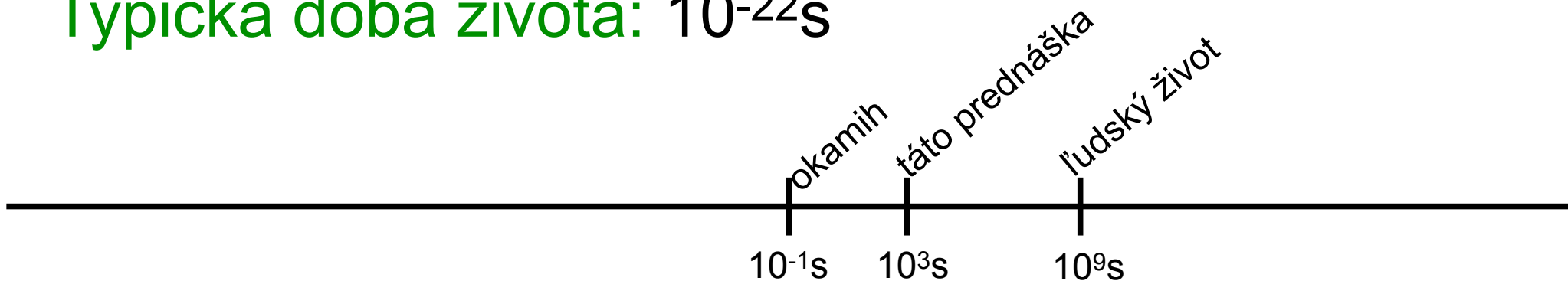
Energia zrážky

LHC: 1 144 TeV \approx 0,2 mJ

Typický rozmer: 10^{-14} m



Typická doba života: 10^{-22} s

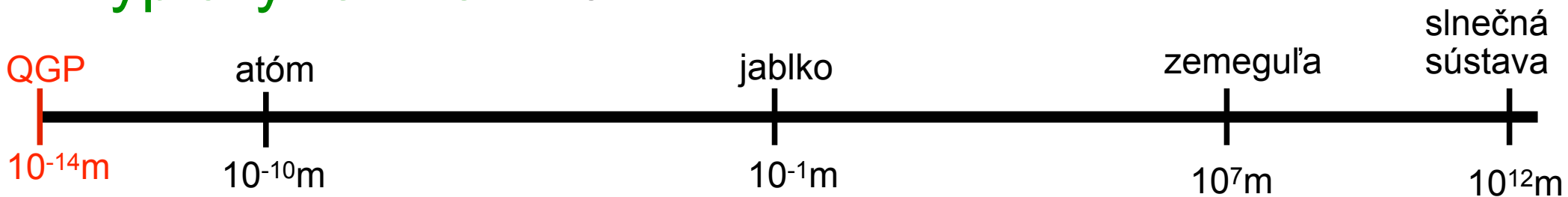


Typické energie, veľkosti a časy

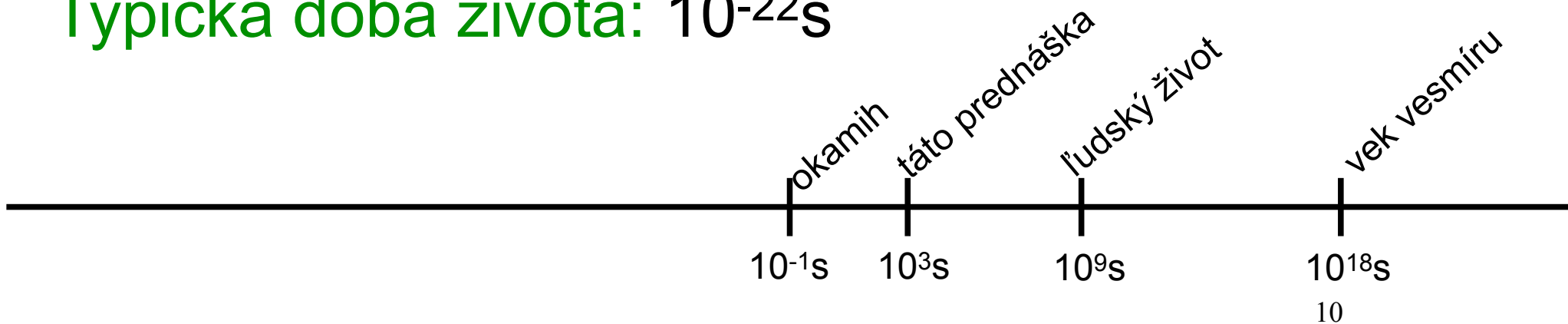
Energia zrážky

LHC: 1 144 TeV \approx 0,2 mJ

Typický rozmer: 10^{-14} m



Typická doba života: 10^{-22} s

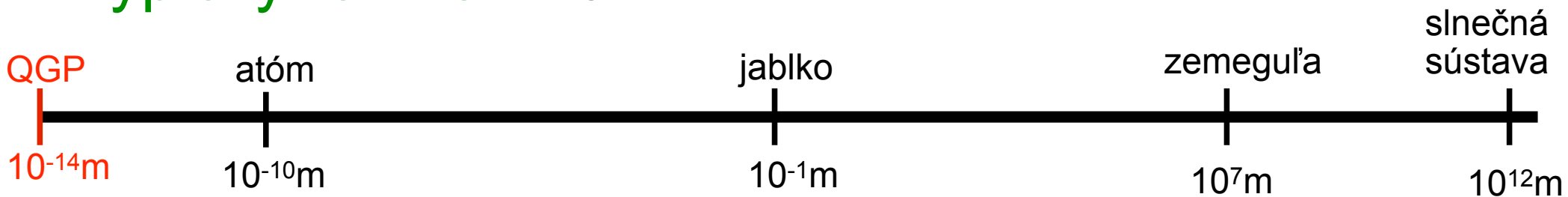


Typické energie, veľkosti a časy

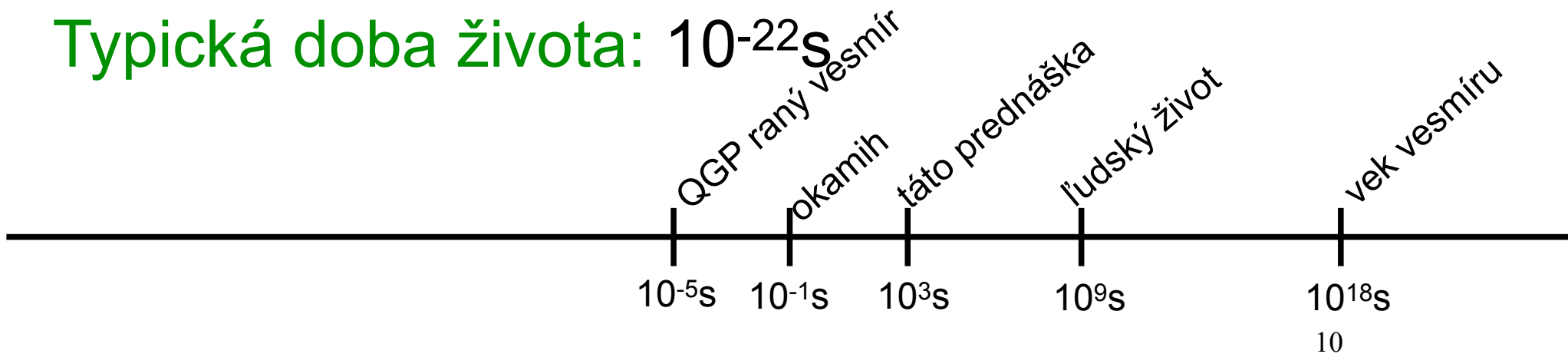
Energia zrážky

LHC: 1 144 TeV \approx 0,2 mJ

Typický rozmer: 10^{-14} m



Typická doba života: 10^{-22} s

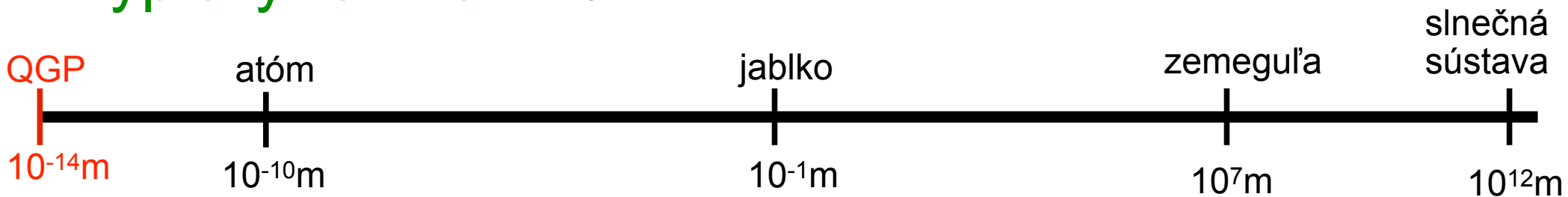


Typické energie, veľkosti a časy

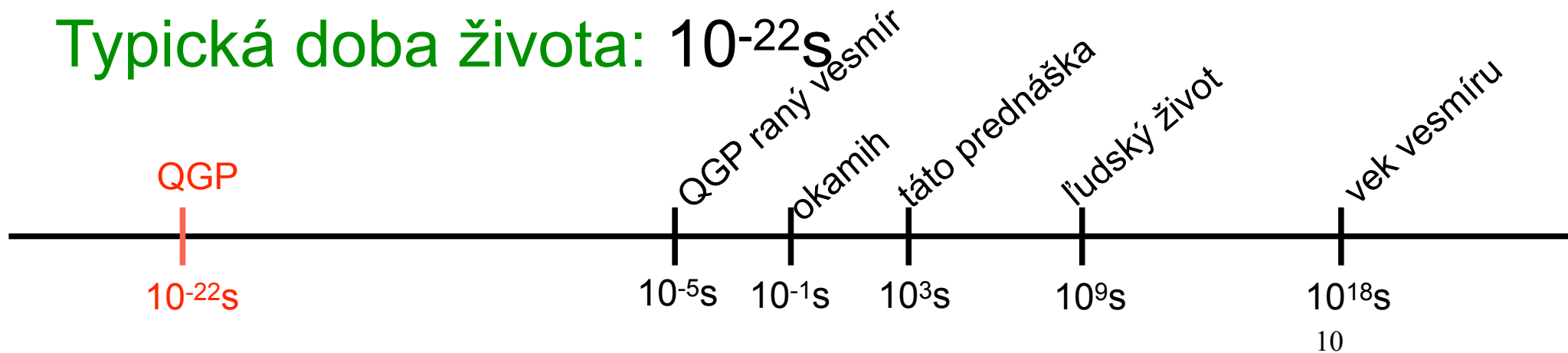
Energia zrážky

LHC: 1 144 TeV \approx 0,2 mJ

Typický rozmer: 10^{-14} m

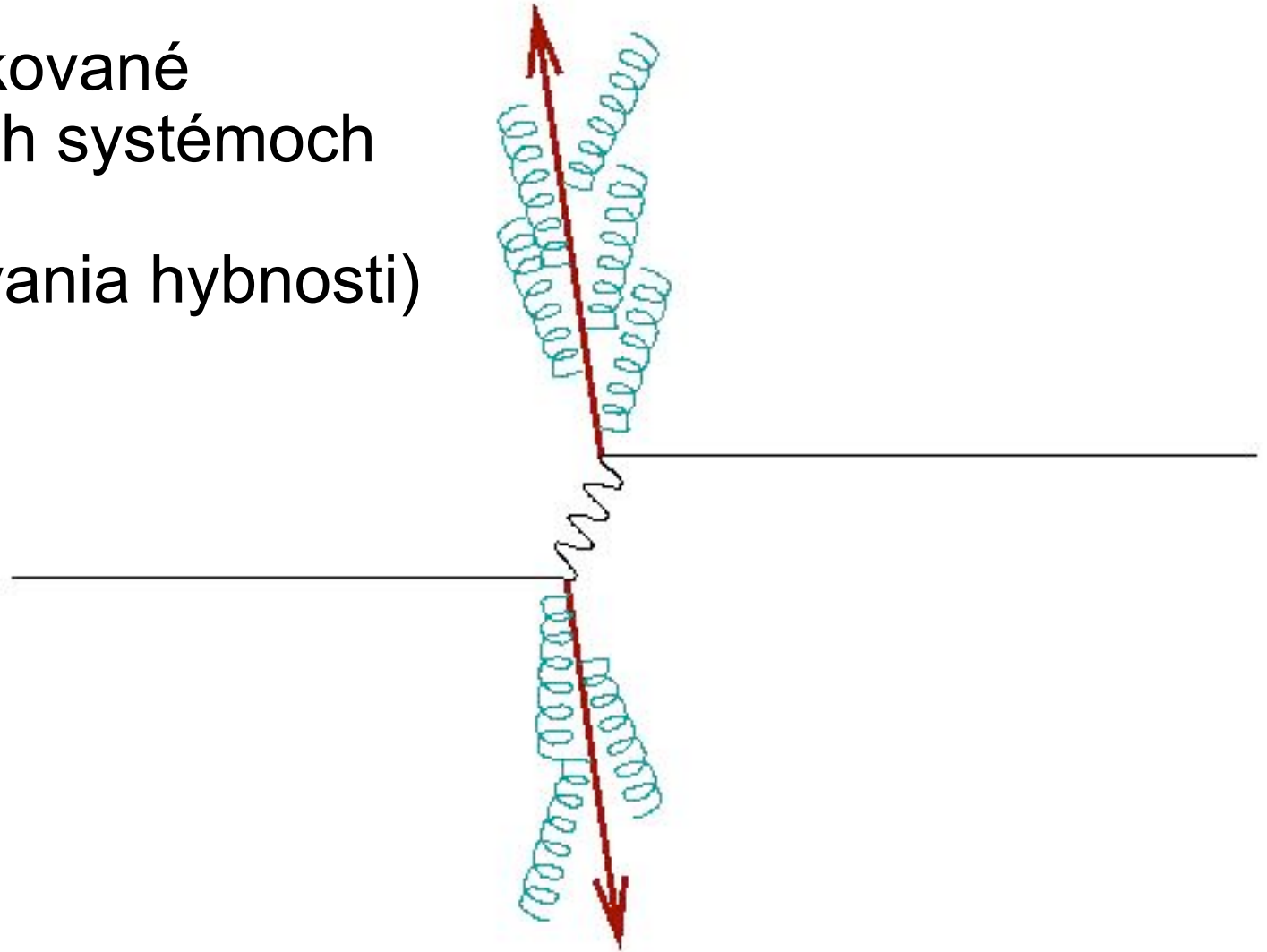


Typická doba života: 10^{-22} s

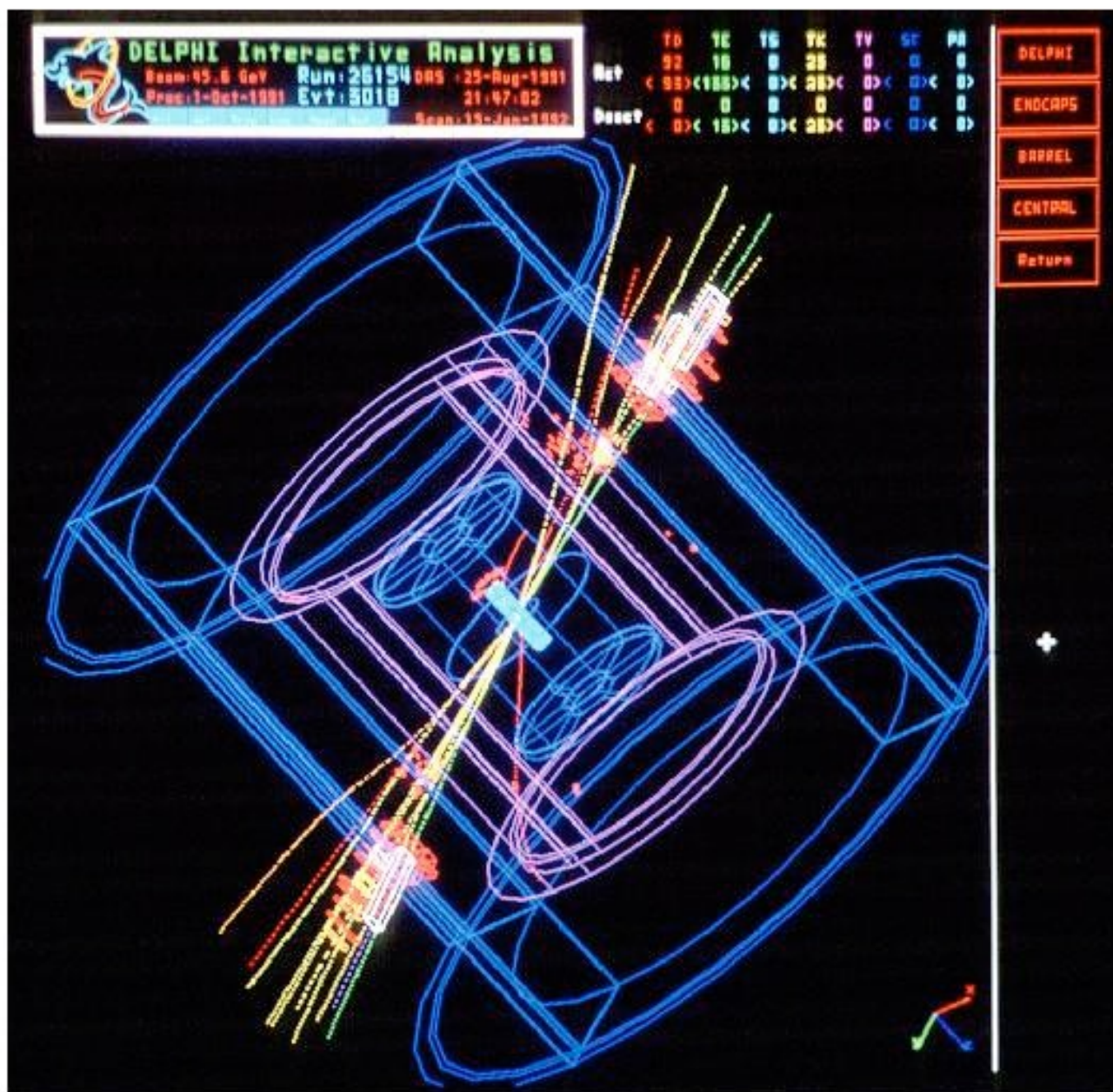


Potlačenie jetov

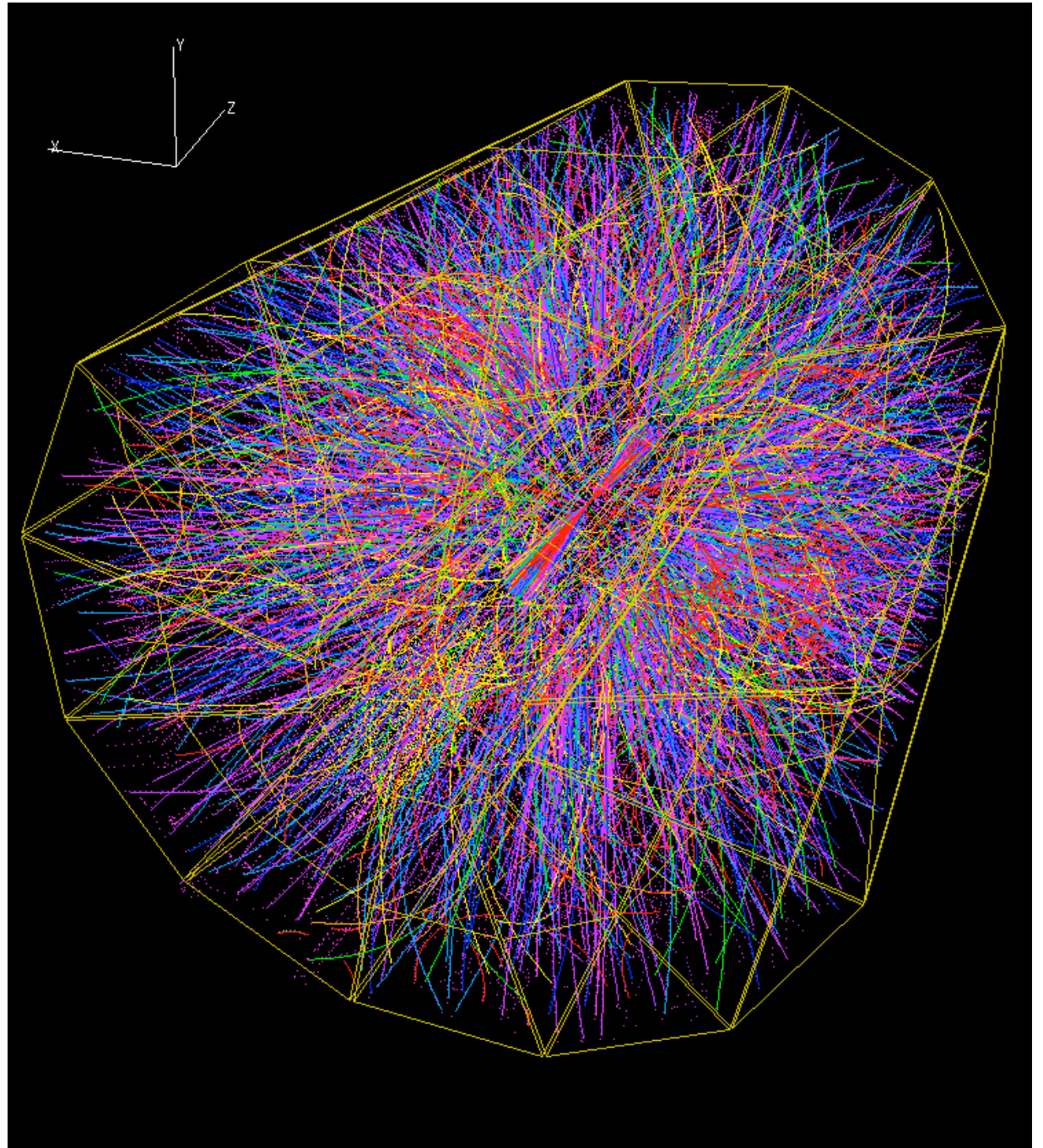
Jety sú produkované
v jednoduchých systémoch
vždy vo dvojici
(zákon zachovania hybnosti)



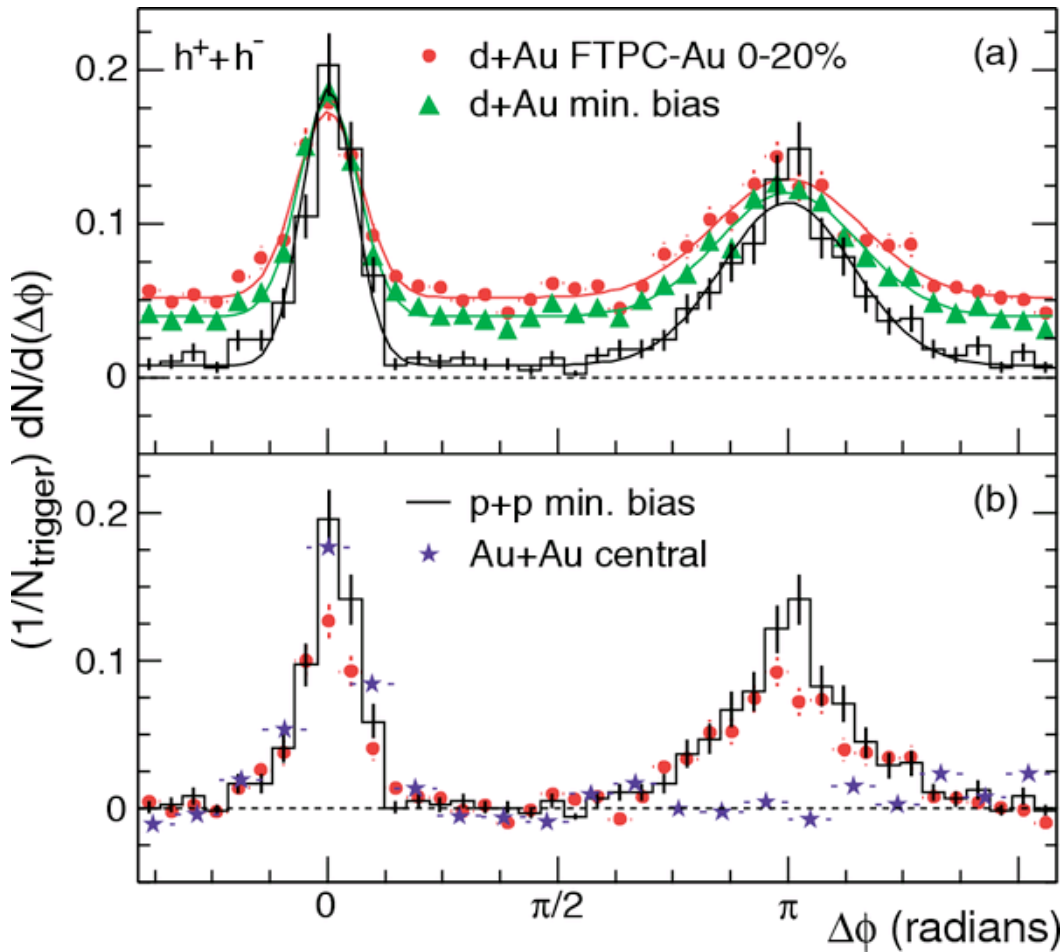
Jety v zrážce e^+e^-



Jety v zrážce Au+Au?

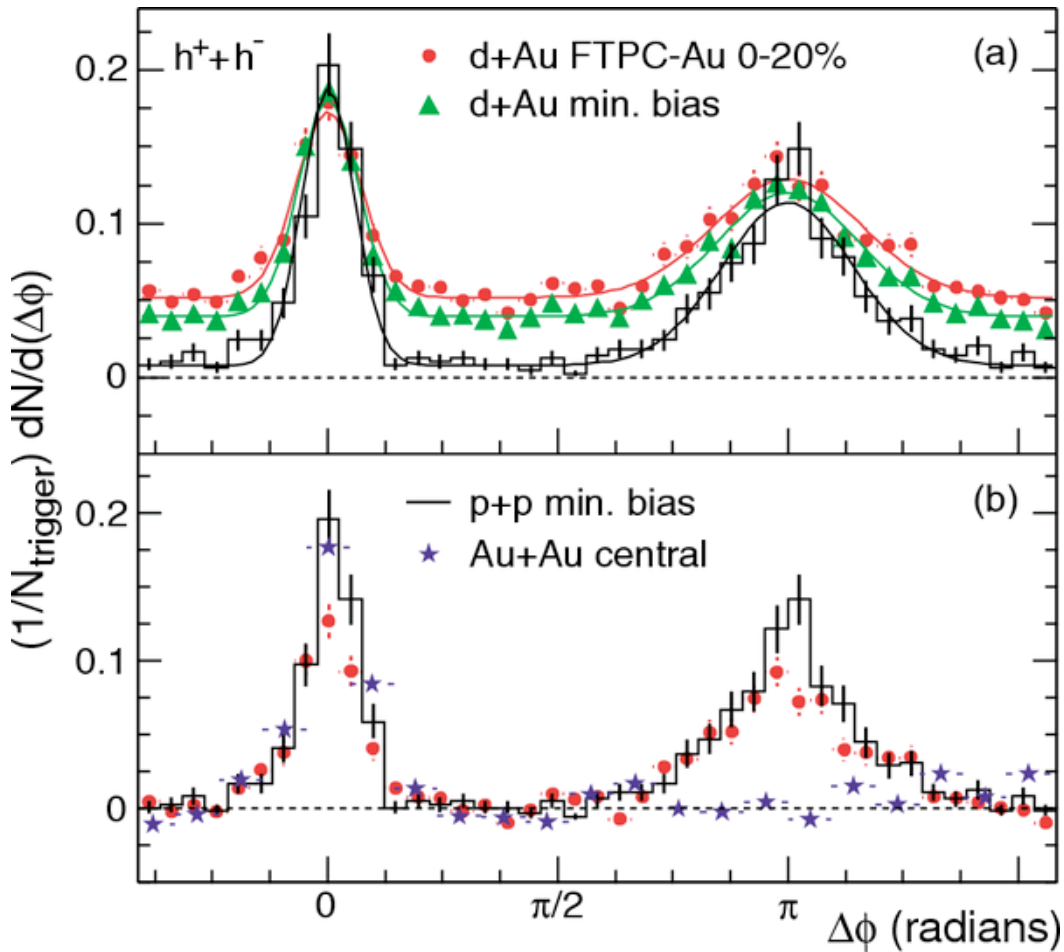


Vyhasnutie jetu na druhej strane

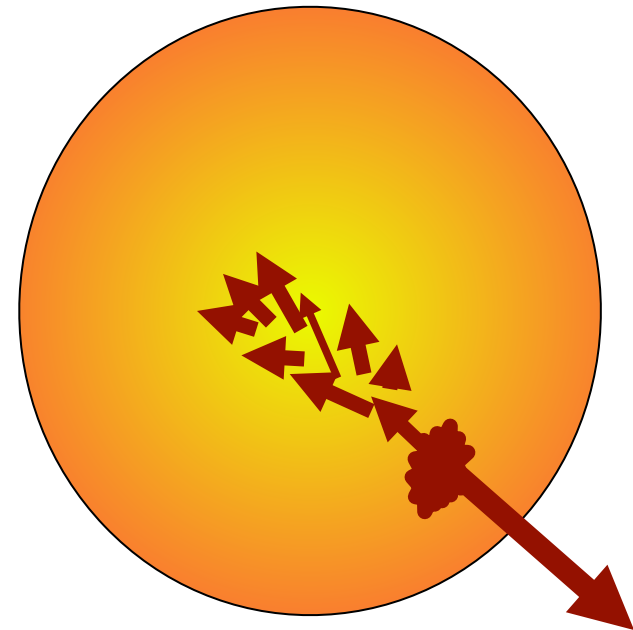


[STAR Collaboration, PRL **91** (2003) 072304]

Vyhasnutie jetu na druhej strane

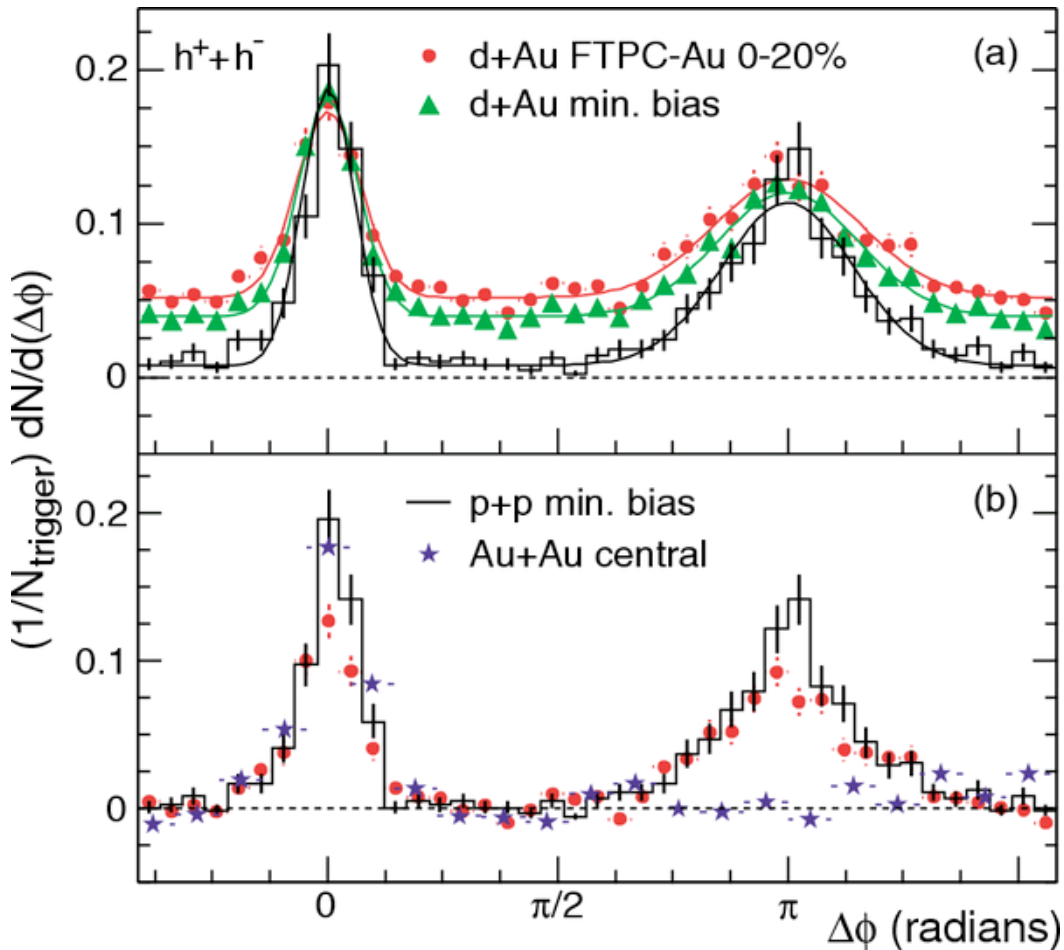


[STAR Collaboration, PRL **91** (2003) 072304]

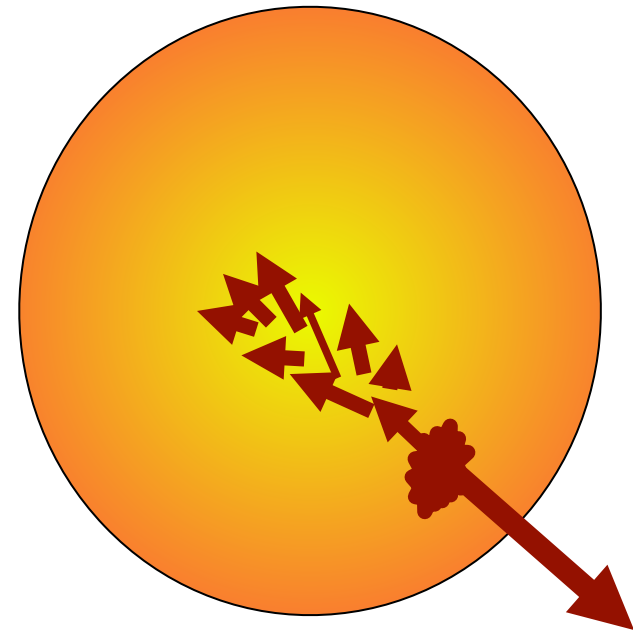


Druhý jet je pohltený v médiu

Vyhasnutie jetu na druhej strane



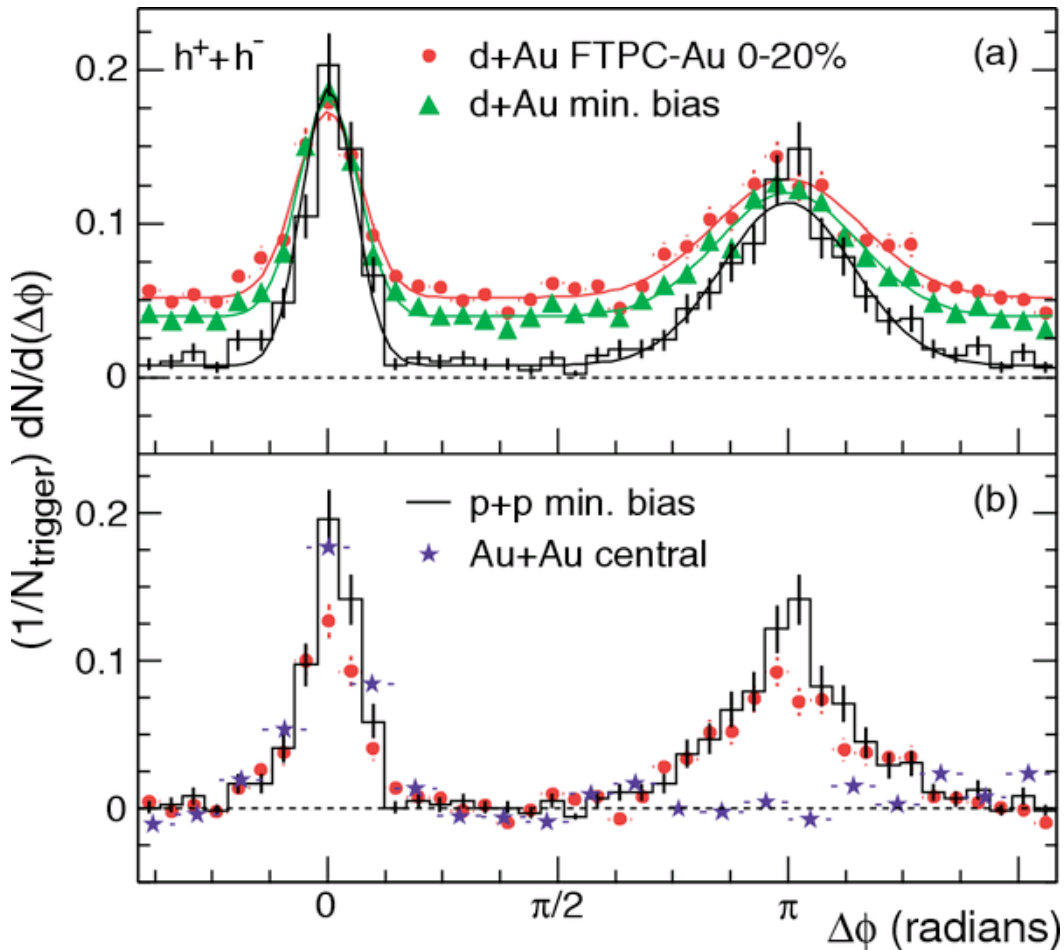
[STAR Collaboration, PRL **91** (2003) 072304]



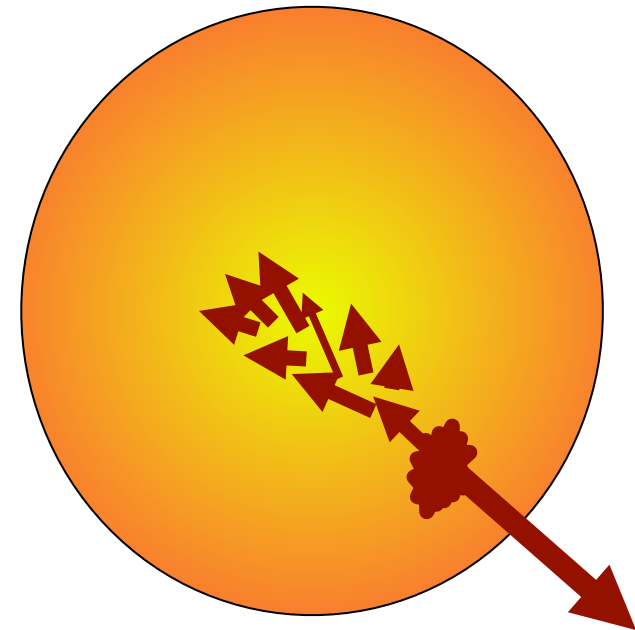
Druhý jet je pohltенý v médiu

V zrážke sa produkuje médium požierajúce jety!

Vyhasnutie jetu na druhej strane



[STAR Collaboration, PRL **91** (2003) 072304]

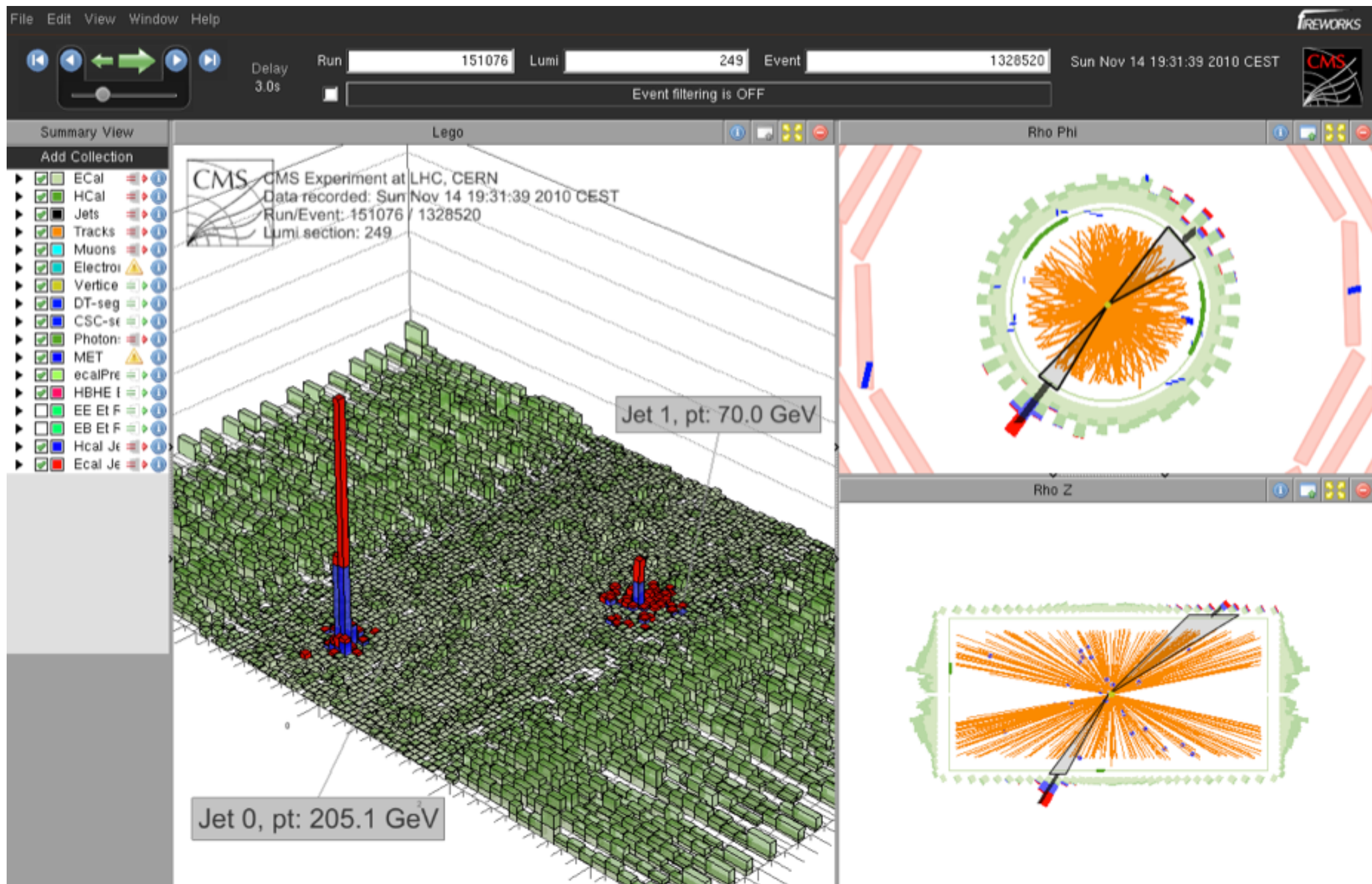


Druhý jet je pohltený v médiu

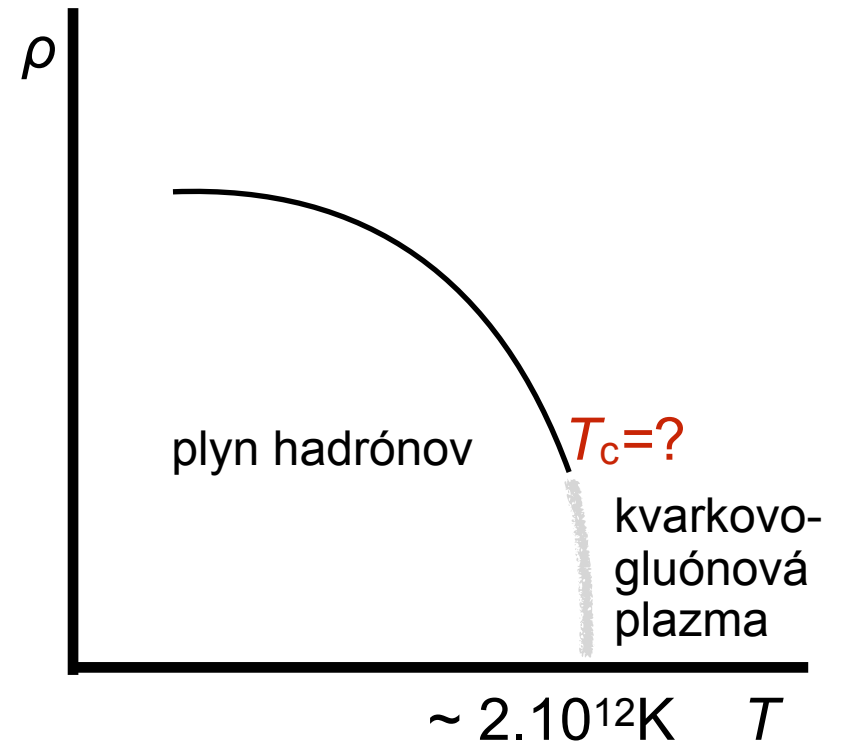
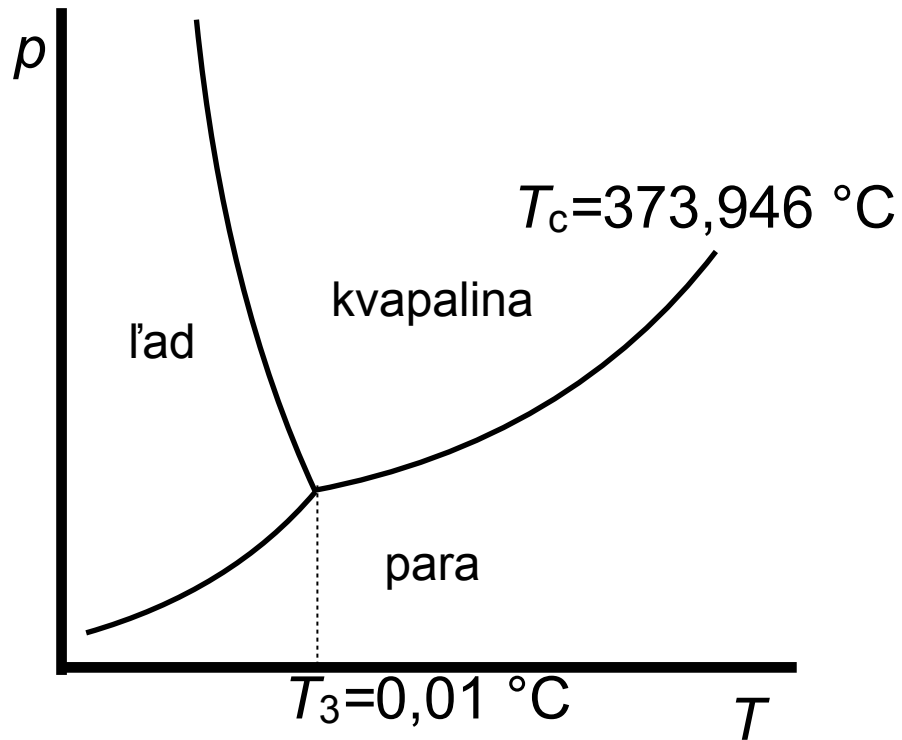
V zrážke sa produkuje médium požierajúce jety!

Jediné také známe médium je **kvarkovo-gluónová plazma.**

Výsledky LHC/CMS: silné potlačenie jetov



Fázový diagram



Zhrnutie

- protóny a neutróny sa pri vysokých teplotách roztopia na kvarky, vznikne kvarkovo-gluónová plazma
- kvarkovo-gluónovú plazmu dokážeme vyrobiť a študovať v CERNe
- teoreticky dokážeme simulovať vlastnosti kvarkovo-gluónovej plazmy