

HOGYAN BECSÜLHETJÜK MEG A LEGFORRÓBB ANYAG HŐMÉRSÉKLETÉT ÉS ENERGIASŰRŰSÉGÉT?

Kasza Gábor

Berze TÖK Tábor
Mátraszentimre
2018. július 12.

ÁTTEKINTÉS

- ▶ Tisztázzuk az energia fogalmát
- ▶ Mi történik a nehézion-ütközések során?
- ▶ Pontosan minek fogjuk megbecsülni az energiáját?
- ▶ Hogy használjuk a hidrodinamikát az ütközések utáni állapotok leírására?
- ▶ Ha a hidrodinamikát értjük, hogyan adható meg az sQGP kezdeti energiája?
- ▶ Szemléletesebb kép: az sQGP kezdeti hőmérsékletének számítása

MI AZ, HOGY ENERGIA?

- ▶ Sugárzások és anyagok egy fizikai tulajdonsága
- ▶ Átalakítható különböző megjelenési formákba
- ▶ Átadható a testek között a négy alapvető kh. által
- ▶ DE: soha nem jöhet létre újonnan és nem semmisülhet meg

Energiamegmaradás:

Egy zárt rendszer teljes energiája állandó marad.

- ▶ Példák: kinetikus energia, potenciális (rugó, helyzeti, stb.), súrlódási energia

MI AZ, HOGY ENERGIA?

- ▶ Két test között (klasszikusan) munkavégzéssel vagy hőközléssel adható át energia
- ▶ Ha a két testre, mint zárt rendszerre tekintünk, az energia mindig megmarad
- ▶ Lehetséges-e, hogy egy zárt rendszerben nem marad meg az energia?

MI AZ, HOGY ENERGIA?



- ▶ Két test között (klasszikusan) munkavégzéssel vagy hőközléssel adható át energia
- ▶ Ha a két testre, mint zárt rendszerre tekintünk, az energia mindig megmarad
- ▶ Lehetséges-e, hogy egy zárt rendszerben nem marad meg az energia?

Igen, a televíziós műsorokban rendszeresen előfordul.

MI AZ, HOGY ENERGIA?

- ▶ Két test között (klasszikusan) munkavégzéssel vagy hőközléssel adható át energia
- ▶ Ha a két testre, mint zárt rendszerre tekintünk, az energia mindig megmarad
- ▶ Lehetséges-e, hogy egy zárt rendszerben nem marad meg az energia?

A fizikai valóságban nem lehetséges!

MI AZ, HOGY ENERGIA?

- ▶ Energia, hőmérséklet és nyomás becsléséhez kell: termodinamika
- ▶ Belső energia: egy zárt rendszer összes energiatartalma

$$E = TS - pV + \mu N$$

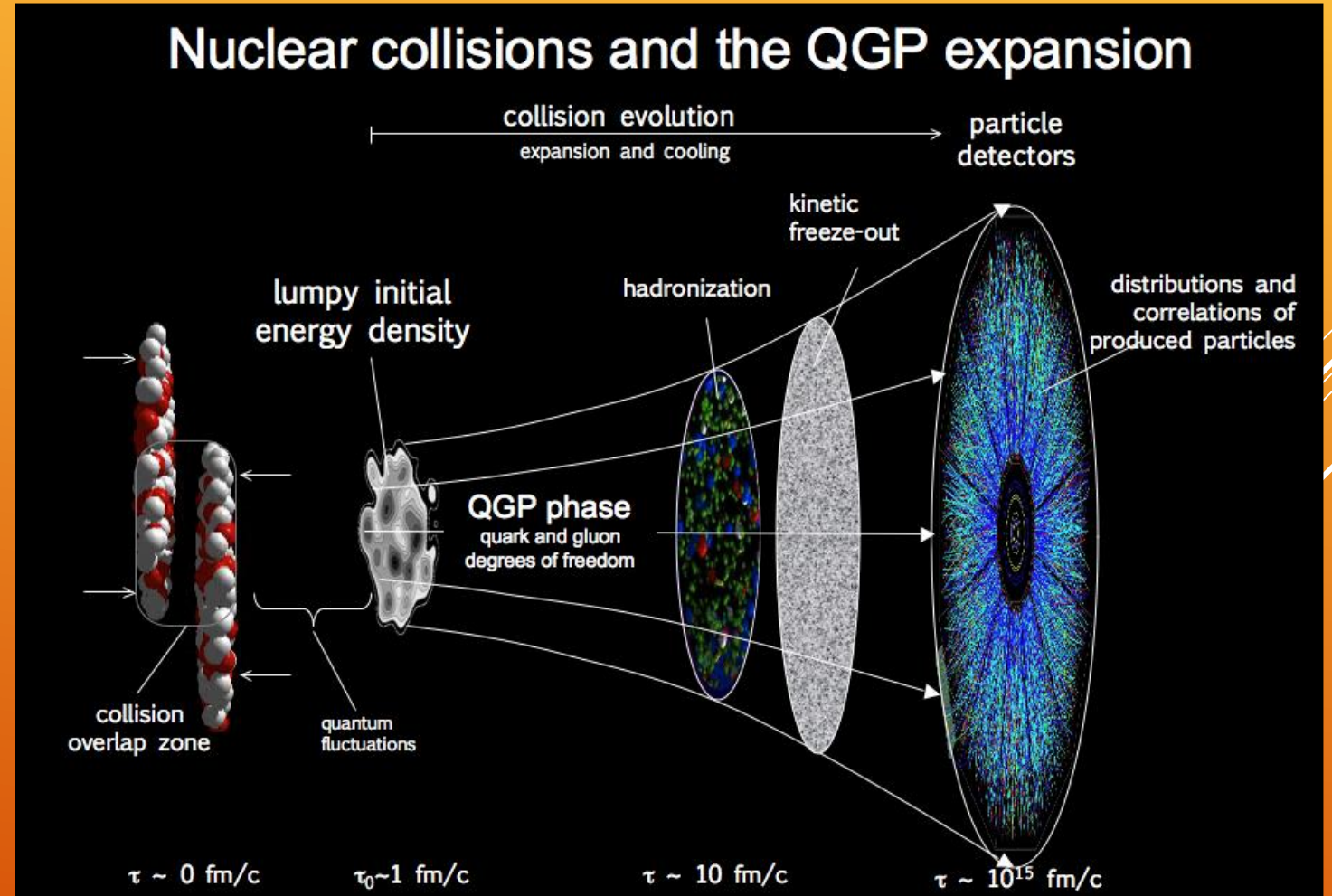
- ▶ Belső energia változása:

$$\Delta E = T\Delta S - p\Delta V + \mu\Delta N$$

- ▶ **$T\Delta S$** : hőenergia
- ▶ **$p\Delta V$** : munkavégzés
- ▶ **$\mu\Delta N$** : anyagmennyiség változása (~nyugalmi energia változása)

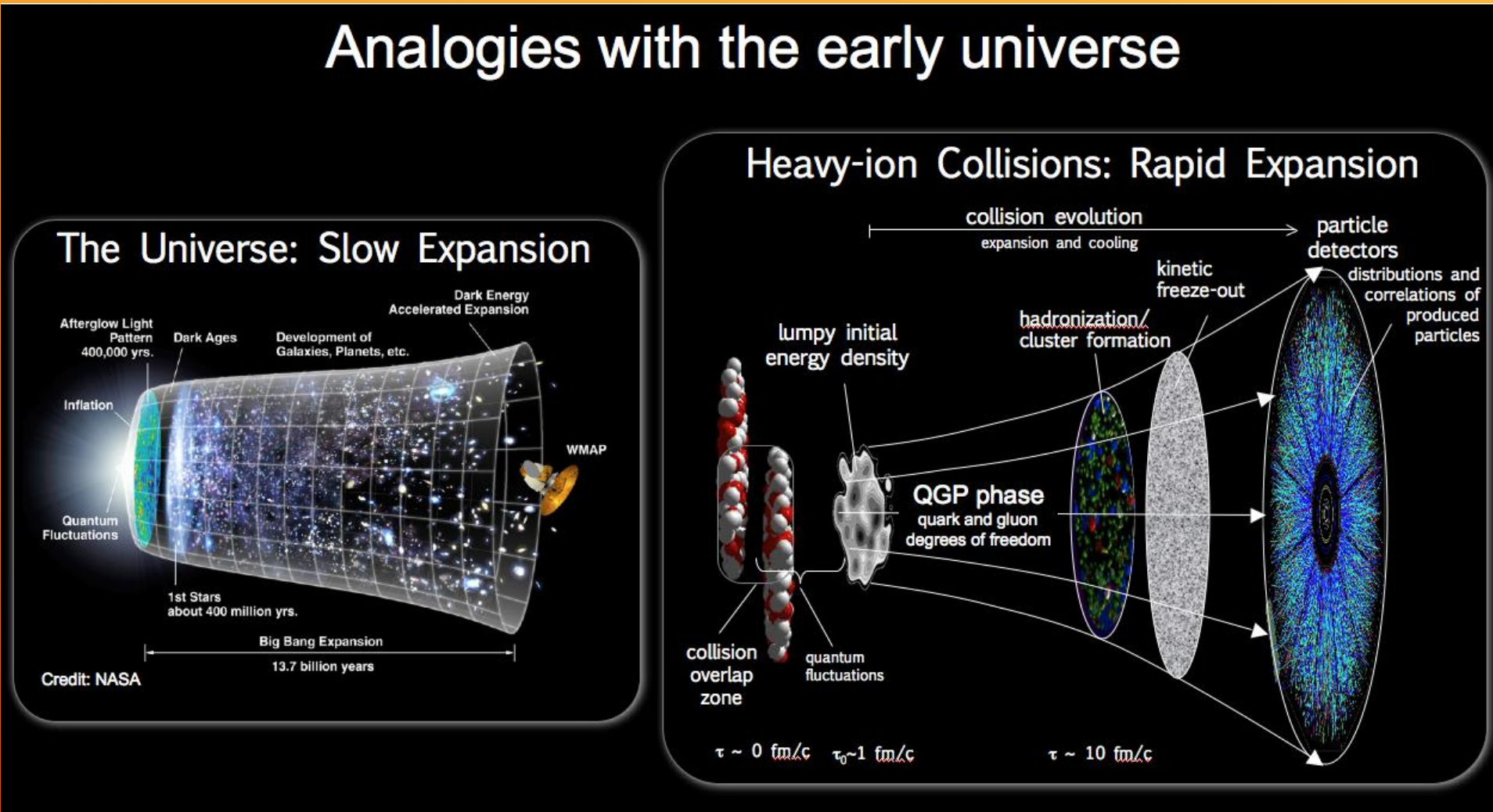
RÉSZECSCKE ÉS NEHÉZION ÜTKÖZÉSEK

- ▶ RHIC, LHC:
ultrarelativisztikus részecskék és atommagok ütköztetése
- ▶ Részecske: e^- , e^+
- ▶ Atommag, nehézion:
 p , d , Cu , Pb , Au , stb.
- ▶ Lehetővé válik az Univerzum korai szakaszának a modellezése



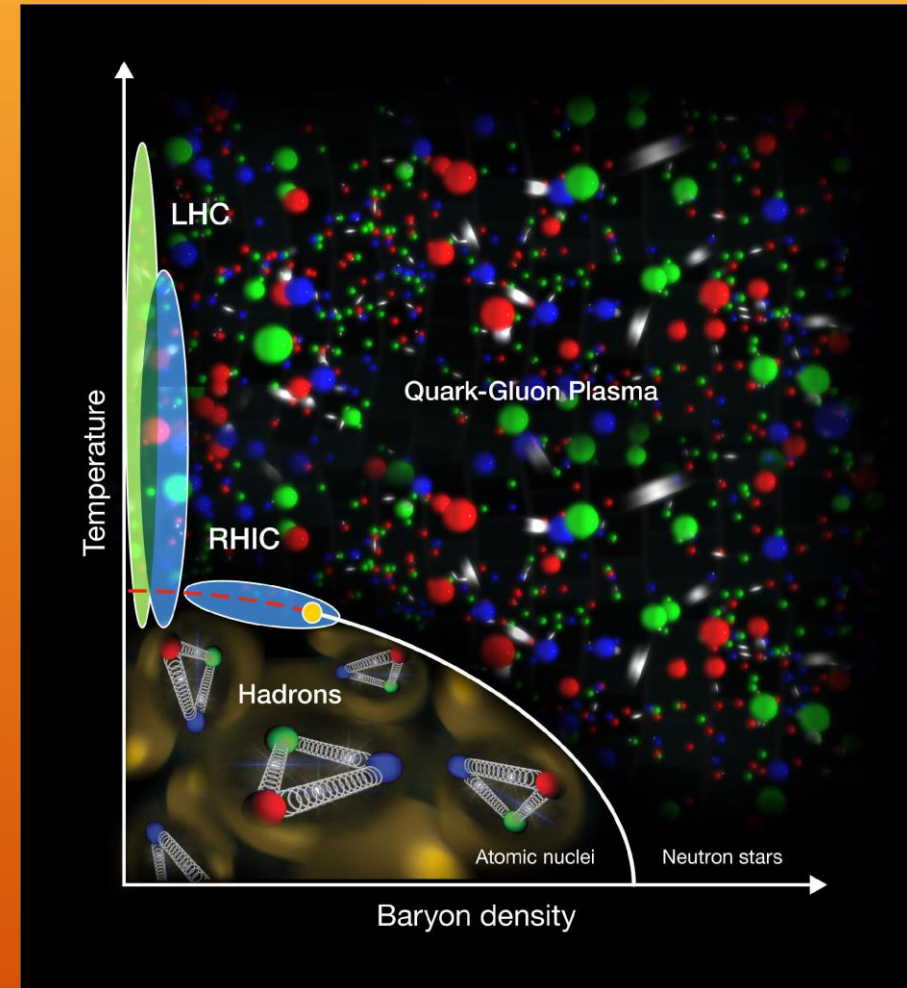
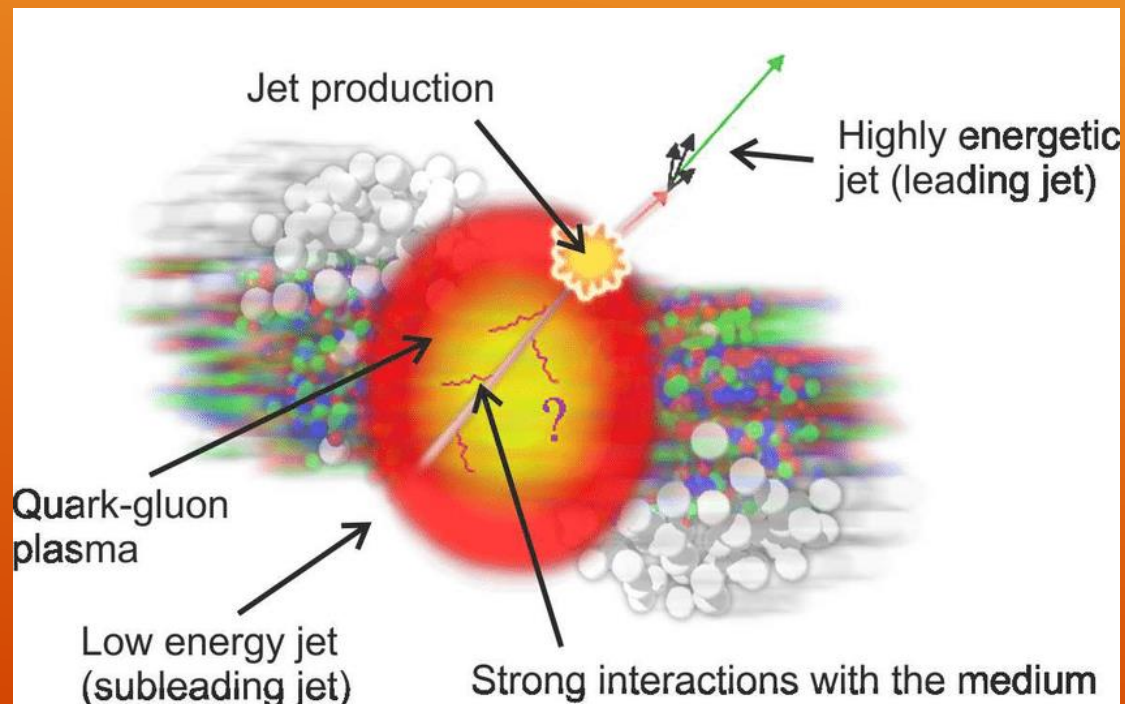
RÉSZECSKE ÉS NEHÉZION ÜTKÖZÉSEK

Analogies with the early universe



RÉSZECSKE ÉS NEHÉZION ÜTKÖZÉSEK

- ▶ Ütközés utáni rendszer energiája: tűzgömb + jetek
- ▶ Csak az sQGP energiájára hajtunk
- ▶ sQGP: folyadék (2005, PHENIX)
- ▶ Számoljuk az energiát hidrodinamikával!



TŰZGÖMB HIDRODINAMIKA

- ▶ Tűzgömb idő és térbeli evolúciójának leírására hivatott
- ▶ Klasszikus elmélet, de relativisztikus kinematikát igényel
- ▶ Könnyebbség: sQGP tökéletes folyadék, nincs belső súrlódása → egyszerűsödik az elmélet
- ▶ Az alapvető törvényszerűségek még így is rendkívül bonyolult egyenletekkel írhatók fel
- ▶ Ezért legtöbbször numerikus megoldások születnek
- ▶ De olykor analitikus megoldások is születnek
- ▶ Mértékegység rendszer: $k_B=c=1$

TŰZGÖMB HIDRODINAMIKA

- ▶ Alapvető törvényekből indulunk ki

Részecskeszám megmaradása:

$$\Delta N = 0$$

Energia megmaradása:

$$\Delta E = 0$$

Newton II. törvénye:

$$F = ma$$

- ▶ A fenti törvények hadrongázra érvényesek
- ▶ A kvark-gluon plazmában a részecskeszám nem marad meg
- ▶ Azonban: adiabatikus tágulás \rightarrow entrópia (közel) állandó
- ▶ Tehát az sQGP hidrodinamikai leírásához szükséges törvények:

Entrópia megmaradása:

$$\Delta S = 0$$

Energia megmaradása:

$$\Delta E = 0$$

Newton II. törvénye:

$$F = ma$$

TŰZGÖMB HIDRODINAMIKA

- ▶ Alapvető törvényekből indulunk ki

Részecskeszám megmaradása:

Energia megmaradása:

Newton II. törvénye:

$$\Delta N = 0$$

$$\Delta E = 0$$

$$F = ma$$

Hidrodinamikában az Euler-egyenlettel ekvivalens

- ▶ A fenti törvények hadrongázra érvényesek
- ▶ A kvark-gluon plazmában a részecskeszám nem marad meg
- ▶ Azonban: adiabatikus tágulás \rightarrow entrópia (közel) állandó
- ▶ Tehát az sQGP hidrodinamikai leírásához szükséges törvények:

Entrópia megmaradása:

Energia megmaradása:

Newton II. törvénye:

$$\Delta S = 0$$

$$\Delta E = 0$$

$$F = ma$$

TŰZGÖMB HIDRODINAMIKA

- ▶ Tűzgömbön belüli energia és entrópia (hadrongáz esetén részecskeszám) eloszlása nem homogén
- ▶ Lokális törvényekre van szükség
- ▶ Intenzív mennyiségekre (sűrűségekre) váltunk:

$$E(\underline{r},t) \rightarrow \varepsilon(\underline{r},t)$$

$$S(\underline{r},t) \rightarrow \sigma(\underline{r},t)$$

$$N(\underline{r},t) \rightarrow n(\underline{r},t) \text{ (hadrongáz esete)}$$

- ▶ Belső energia:

$$E = TS - pV + \mu N$$

- ▶ Belső energiasűrűség:

$$\varepsilon = T\sigma - p + \mu n$$

TŰZGÖMB HIDRODINAMIKA

- ▶ Lokális törvények (nemrelativisztikus):

Entrópia megmaradása:

$$\partial_t \sigma + \underline{\nabla}(\underline{v}\sigma) = 0$$

Energia megmaradása:

$$\partial_t \varepsilon + \underline{\nabla}(\underline{v}\varepsilon) = -p\underline{\nabla}\underline{v}$$

Newton II. törvénye:

$$(\varepsilon + p)(\partial_t + \underline{v}\underline{\nabla})\underline{v} = -\underline{\nabla}p$$

- ▶ 5 egyenlet, 6 ismeretlen ($\sigma, \varepsilon, p, v_x, v_y, v_z$)
- ▶ Kell: állapotegyenlet \rightarrow kapcsolat két változó között

$$p = c_s^2 \varepsilon$$

- ▶ c_s : hangsebesség < 1

TŰZGÖMB HIDRODINAMIKA

- ▶ Lokális törvények (relativisztikus):

Entrópia megmaradása:

$$\partial_\mu(\sigma u^\mu) = 0$$

Energia megmaradása:

$$\partial_\mu(\varepsilon u^\mu) = -p \partial_\mu u^\mu$$

Newton II. törvénye:

$$(\varepsilon + p) u^\nu \partial_\nu u^\mu = (g^{\mu\rho} - u^\mu u^\rho) \partial_\rho p$$

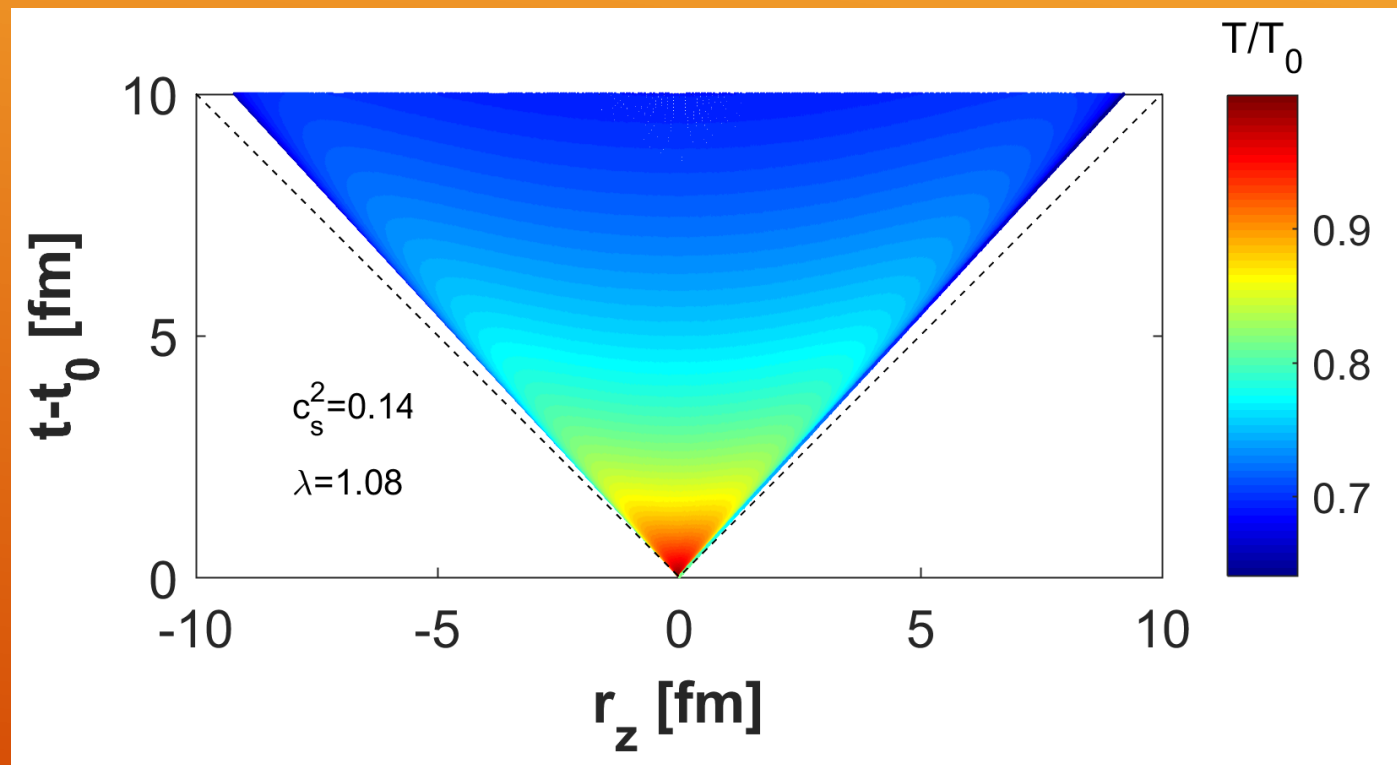
- ▶ 5 egyenlet, 6 ismeretlen ($\sigma, \varepsilon, p, v_x, v_y, v_z$)
- ▶ Kell: állapotegyenlet \rightarrow kapcsolat két változó között

$$p = c_s^2 \varepsilon$$

- ▶ c_s : hangsebesség < 1

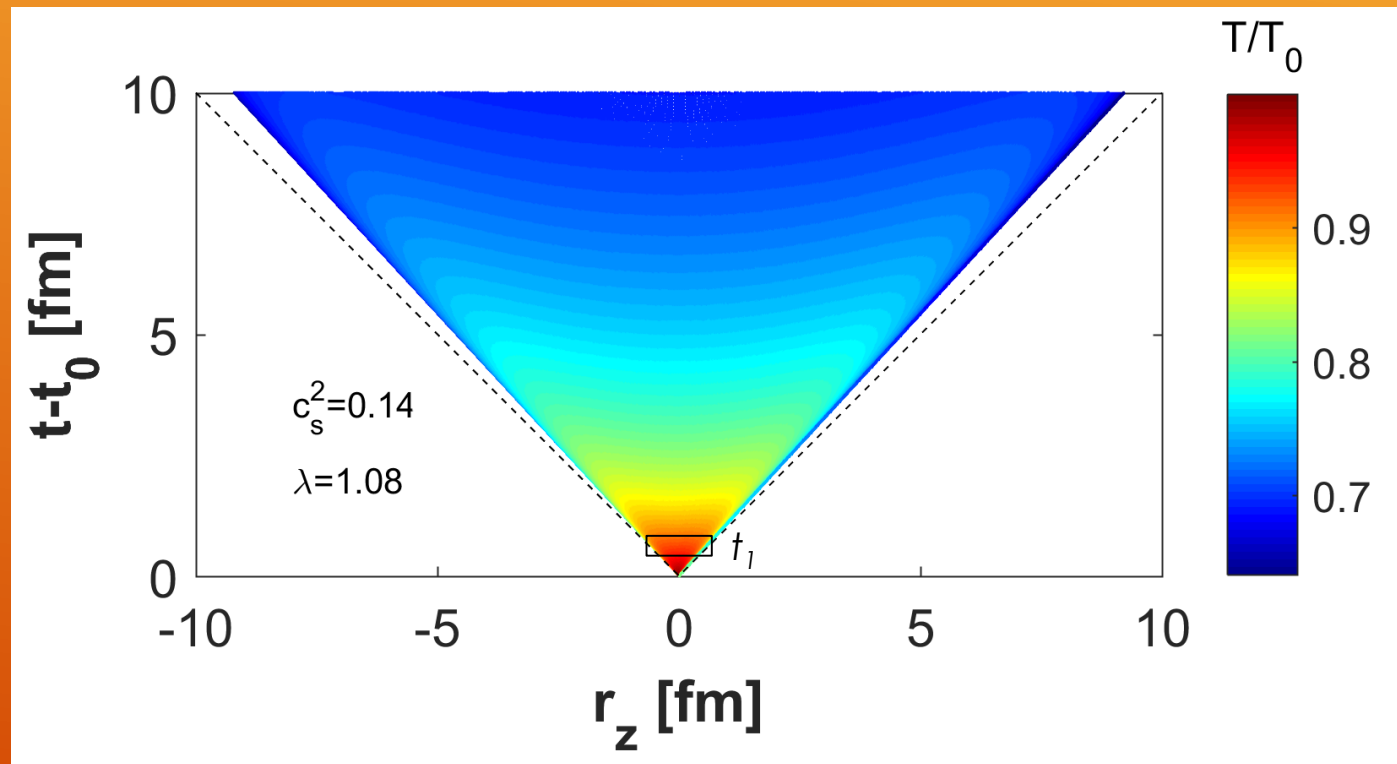
TŰZGÖMB HIDRODINAMIKA

- ▶ Egy új 1+1 dimenziós (t, r_z) megoldásunk hőmérséklet térképe:



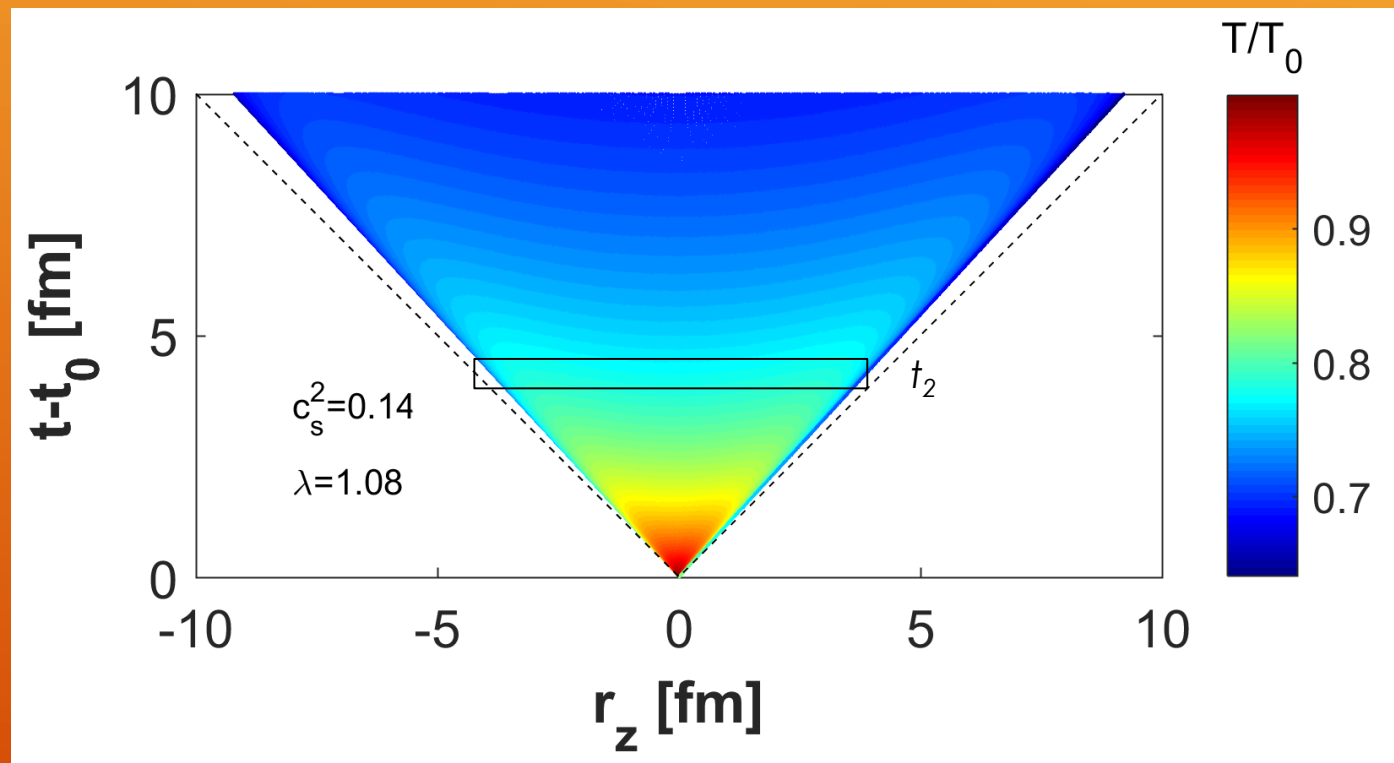
TŰZGÖMB HIDRODINAMIKA

- ▶ Egy új 1+1 dimenziós (t, r_z) megoldásunk hőmérséklet térképe:



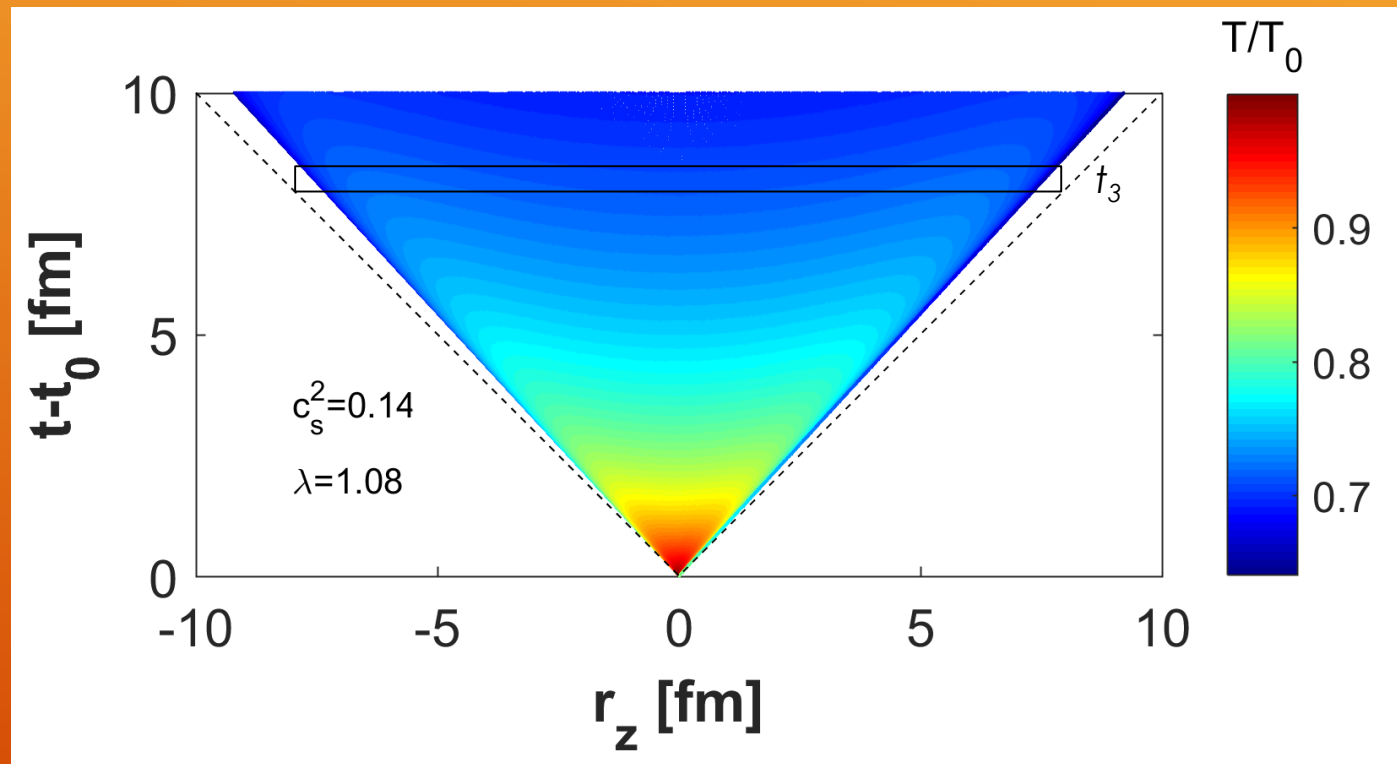
TŰZGÖMB HIDRODINAMIKA

- ▶ Egy új 1+1 dimenziós (t, r_z) megoldásunk hőmérséklet térképe:



TŰZGÖMB HIDRODINAMIKA

- ▶ Egy új 1+1 dimenziós (t, r_z) megoldásunk hőmérséklet térképe:



A KEZDETI ENERGIASŰRŰSÉG BECSLÉSE

- ▶ 70-es és 80-as évek: Hwa-Bjorken 1+1D hidro megoldás
- ▶ Relativisztikus, egyszerű, de nem gyorsuló megoldás
- ▶ Bjorken: fenomenologikus formula a kezdeti energiasűrűségre
- ▶ Egy lebutított formula lebutított verziója:

$$\varepsilon_0^{Bj} = \frac{E}{V} = \frac{E}{R^2 \pi r_z} = \frac{\bar{E} N}{R^2 \pi r_z} = \frac{\bar{E}}{R^2 \pi} n$$

- ▶ n valójában nem egyszerű részecskesűrűség, hanem a részecskék rapiditás sűrűsége
- ▶ Ezt a mennyiséget kell hidrodinamikával számolni
- ▶ Ez általában függ a részecskék energiájától és z irányú impulzusától, ám Bjorken megoldásában ez állandó

A KEZDETI ENERGIASŰRŰSÉG BECSLÉSE

- ▶ Bjorken becslés nem pontos!
- ▶ Mérésekből tudjuk: a folyadék gyorsulva tágul $\rightarrow n$ nem állandó
- ▶ A gyorsuláshoz többlet energiára van szükség
- ▶ Bjorken becslését korrigálni kell ezzel a többlettel:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_0^{Bj} \cdot \text{gyorsulás járuléka} = \varepsilon_0^{Bj} \cdot \left(\frac{\tau_f}{\tau_i} \right)^\alpha$$

- ▶ τ_f : kifagyás pillanata
- ▶ τ_i : hidrodinamikai evolúció kezdete
- ▶ Értelemszerűen minél hosszabb ideig tart az evolúció, annál nagyobb a korrekció

A KEZDETI ENERGIASŰRŰSÉG BECSLÉSE

- ▶ Létezik még egy elfeledett, de triviális korrekció
- ▶ Bjorken: fenomenologikus formula (~dimenzió analízis)
- ▶ Tamás & Gábor: új megoldással egzakt számolás (legtisztább módszer)
- ▶ Új megoldás: gyorsuló \rightarrow gyorsulás korrekciója automatikusan megjelenik
- ▶ Találtunk mást is:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_0^{Bj} \cdot \text{gyorsulás járuléka} \cdot \left(\frac{\tau_f}{\tau_i} \right)^{c_s^2}$$

A KEZDETI ENERGIASŰRŰSÉG BECSLÉSE

- ▶ Létezik még egy elfeledett, de triviális korrekció
- ▶ Bjorken: fenomenologikus formula (~dimenzió analízis)
- ▶ Tamás & Gábor: új megoldással egzakt számolás (legtisztább módszer)
- ▶ Új megoldás: gyorsuló \rightarrow gyorsulás korrekciója automatikusan megjelenik
- ▶ Találtunk mást is:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_0^{Bj} \cdot \text{gyorsulás járuléka} \cdot \left(\frac{\tau_f}{\tau_i} \right)^{c_s^2}$$

Ez micsoda és miért van itt?

A KEZDETI ENERGIASŰRŰSÉG BECSLÉSE

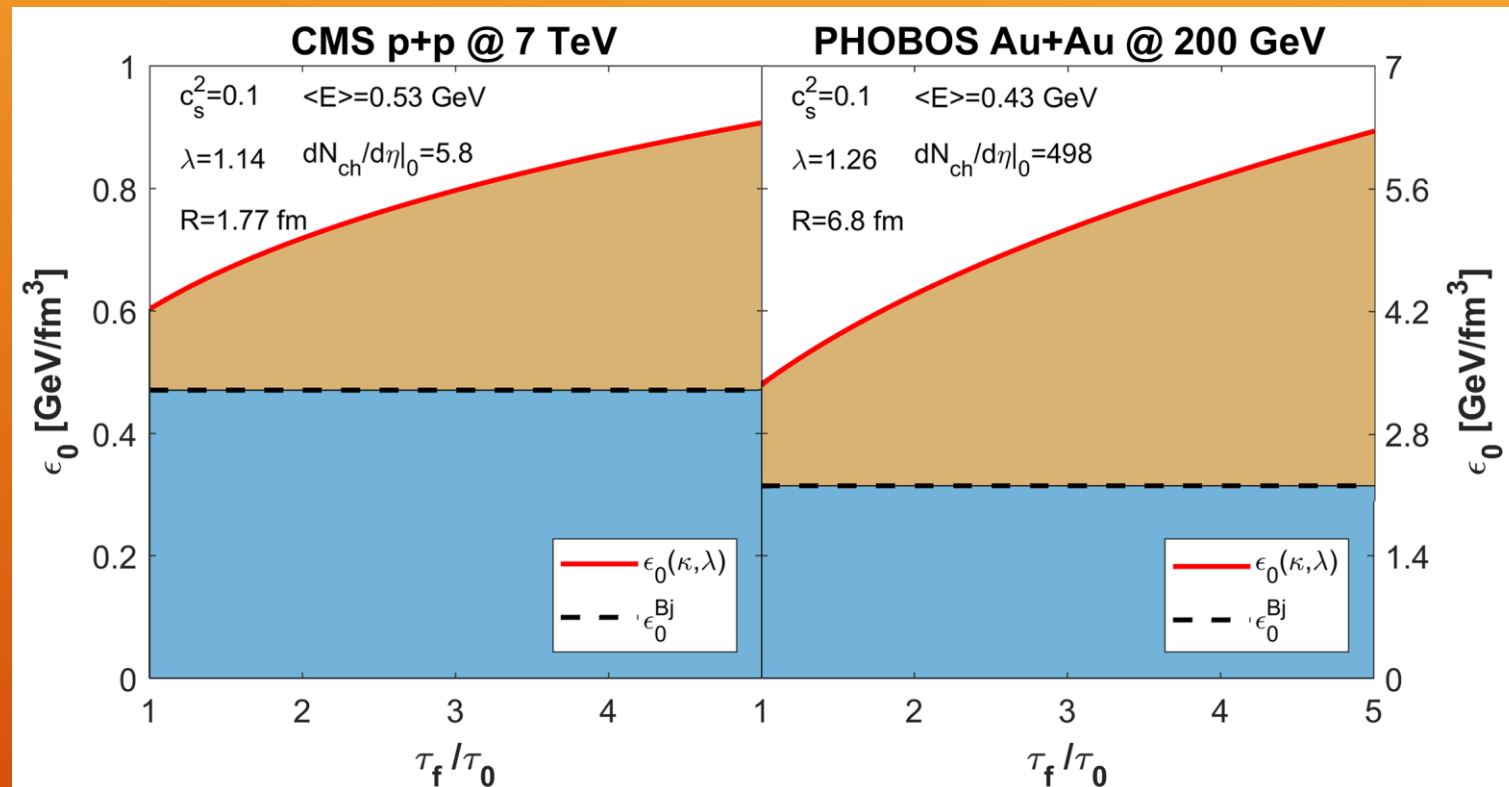
- ▶ Mit jelenthet a $\left(\frac{\tau_f}{\tau_i}\right)^{c_s^2}$ tag?
- ▶ Emlékezzünk az állapotegyenletre: $p = c_s^2 \varepsilon$
- ▶ Ha $c_s=0$, az új tag eltűnik és $p=0$ lesz
- ▶ A $p=0$ az Univerzum állapotegyenlete (por)
- ▶ Bjorken megoldásában viszont a nyomás nem 0
- ▶ Ellentmondás? Igen.

Feloldás:

Bjorken kihagyta a fenomenologikus képletből a tágulási munka járulékát!

A KEZDETI ENERGIASŰRŰSÉG BECSLÉSE

- ▶ A korrekció mértéke messze nem elhanyagolható!



A KEZDETI HŐMÉRSÉKLET BECSLÉSE

- ▶ A hidrodinamikai megoldásunk alapján: $T_0 \leftrightarrow \varepsilon_0$ megfeleltetés

$$T_0 = T_f \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_f} \right)^{\frac{1}{1+c_s^2}} = T_f \left(\frac{\tau_f}{\tau_i} \right)^{\lambda(1+c_s^2)}$$

- ▶ Az evolúció időtartamára jó becslés: $\frac{\tau_f}{\tau_i} = 2$
- ▶ Kísérletekből megállapítható: λ, T_f, c_s
- ▶ Kísérlettől függően más és más értékek figyelhetők meg

A KEZDETI HŐMÉRSÉKLET BECSLÉSE

- ▶ Az eredményt MeV mértékegységben kapjuk meg
- ▶ Ezt át kell alakítanunk K-re, hogy többet mondjon az eredmény!
- ▶ Lépések:

q : elemi töltés mérőszáma

k_B : Boltzmann állandó mérőszáma

$$\text{eV} \rightarrow \text{MeV} \cdot 10^6$$

$$\text{J} \rightarrow \text{eV} \cdot q = \text{eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$$

$$\text{K} \rightarrow \text{J} / k_B = \text{J} / (1,38 \cdot 10^{-23})$$

A KEZDETI HŐMÉRSÉKLET BECSLÉSE

- ▶ RHIC adatok alapján (Au+Au @ 200 GeV)

$$\lambda = 1,25$$

$$T_f = 170 \text{ MeV}$$

$$c_s^2 = 0.1$$

- ▶ Behelyettesítve T_0 képletébe:

$$T_0 = 170 \text{ MeV} \cdot 2^{1,25(1+0,1)} = 441 \text{ MeV}$$

$$T_0 = 441 \cdot 10^6 \text{ eV} \rightarrow 705,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} \rightarrow 5,1 \cdot 10^{12} \text{ K} = \mathbf{5,1 \text{ TK}}$$

A KEZDETI HŐMÉRSÉKLET BECSLÉSE

- ▶ LHC adatok alapján (p+p @ 7 TeV)

$$\lambda = 1,14$$

$$T_f = 140 \text{ MeV}$$

$$c_s^2 = 0.1$$

- ▶ Behelyettesítve T_0 képletébe:

$$T_0 = 140 \text{ MeV} \cdot 2^{1,14(1+0,1)} = 333 \text{ MeV}$$

$$T_0 = 333 \cdot 10^6 \text{ eV} \rightarrow 532,8 \cdot 10^{-13} \text{ J} \rightarrow 3,9 \cdot 10^{12} \text{ K} = \mathbf{3,9 \text{ TK}}$$

GUINNESS RECORD

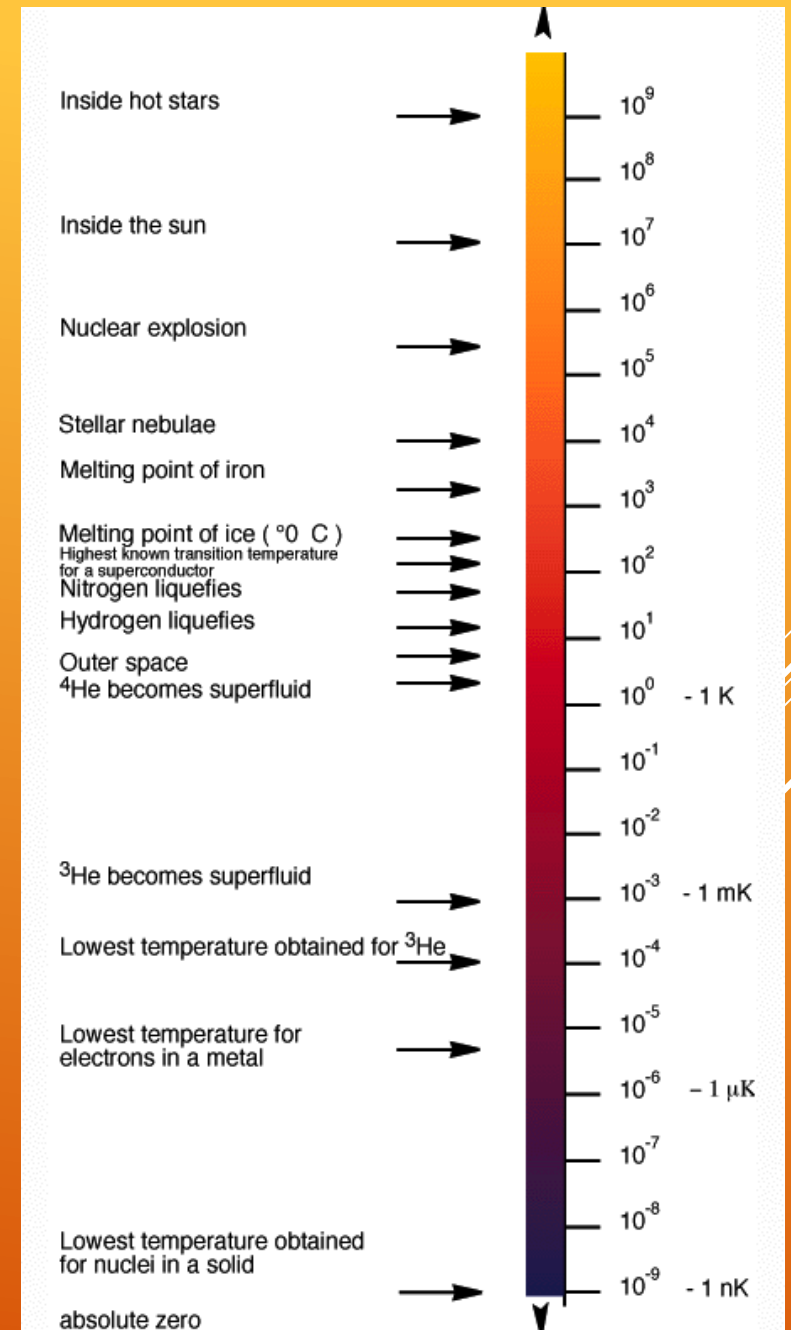
- ▶ Az ember által létrehozott legmagasabb hőmérsékletet (~5,5 TK) az LHC-ban valósították meg
- ▶ Mennyire magas ez a hőmérséklet? Magasabb, mint...

...egy atombomba robbanás során

...a Nap belsejében

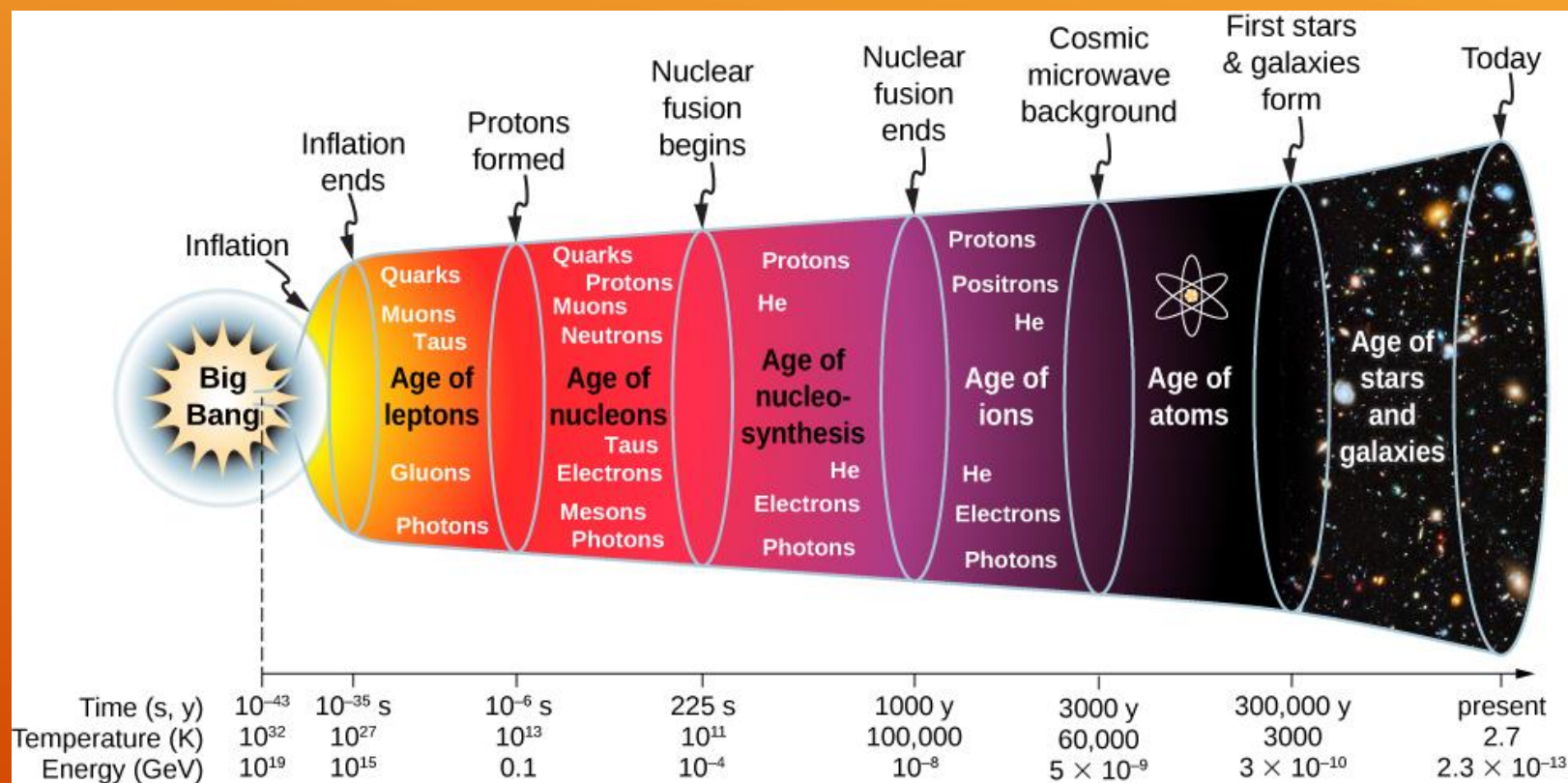
...egy O színeképtípusú csillag belsejében

...egy szupernóva robbanás során



IDŐJÁRÁS „HÁTRAJELZÉS”

- ▶ Ekkora hőmérséklet az Univerzum keletkezésének első mikromásodpercében fordult elő
- ▶ ... valamint 13,7 milliárd évvel később ☺



ÖSSZEFOGLALÁS: RECEPT AZ ENERGIABECSLÉSHEZ

- ▶ Iratkozunk be egy egyetemre
- ▶ Tanulmányozzuk a nehézion-fizikát és a hidrodinamikát
- ▶ Keressünk az eddigieknél (valamilyen szempontból) relevánsabb megoldást
- ▶ Az új megoldásból kiszámolható a kezdeti energia
- ▶ Az esetleges újabb korrekcióknak megkeressük a fizikai értelmezését

ÖSSZEFOGLALÁS: RECEPT AZ ENERGIABECSLÉSHEZ

- ▶ Iratkozunk be egy egyetemre
- ▶ Tanulmányozzuk a nehézion-fizikát és a hidrodinamikát
- ▶ Keressünk az eddigieknél (valamilyen szempontból) relevánsabb megoldást
- ▶ Az új megoldásból kiszámolható a kezdeti energia
- ▶ Az esetleges újabb korrekcióknak megkeressük a fizikai értelmezését
- ▶ A jobb és korrektebb eredményt a többi fizikus orra alá dörgöljük

(De csak finoman! 😊)

ÖSSZEFOGLALÁS: RECEPT AZ ENERGIABECSLÉSHEZ

- ▶ Iratkozunk be egy egyetemre
- ▶ Tanulmányozzuk a nehézion-fizikát és a hidrodinamikát
- ▶ Keressünk az eddigieknél (valamilyen szempontból) relevánsabb megoldást
- ▶ Az új megoldásból kiszámolható a kezdeti energia
- ▶ Az esetleges újabb korrekcióknak megkeressük a fizikai értelmezését
- ▶ A jobb és korrektebb eredményt a többi fizikus orra alá dörgöljük

(De csak finoman! 😊)

Köszönöm a figyelmet!