

Milníky kosmologie IV

planetum

Petr Kulháněk

kulhanek@aldebaran.cz

www.aldebaran.cz



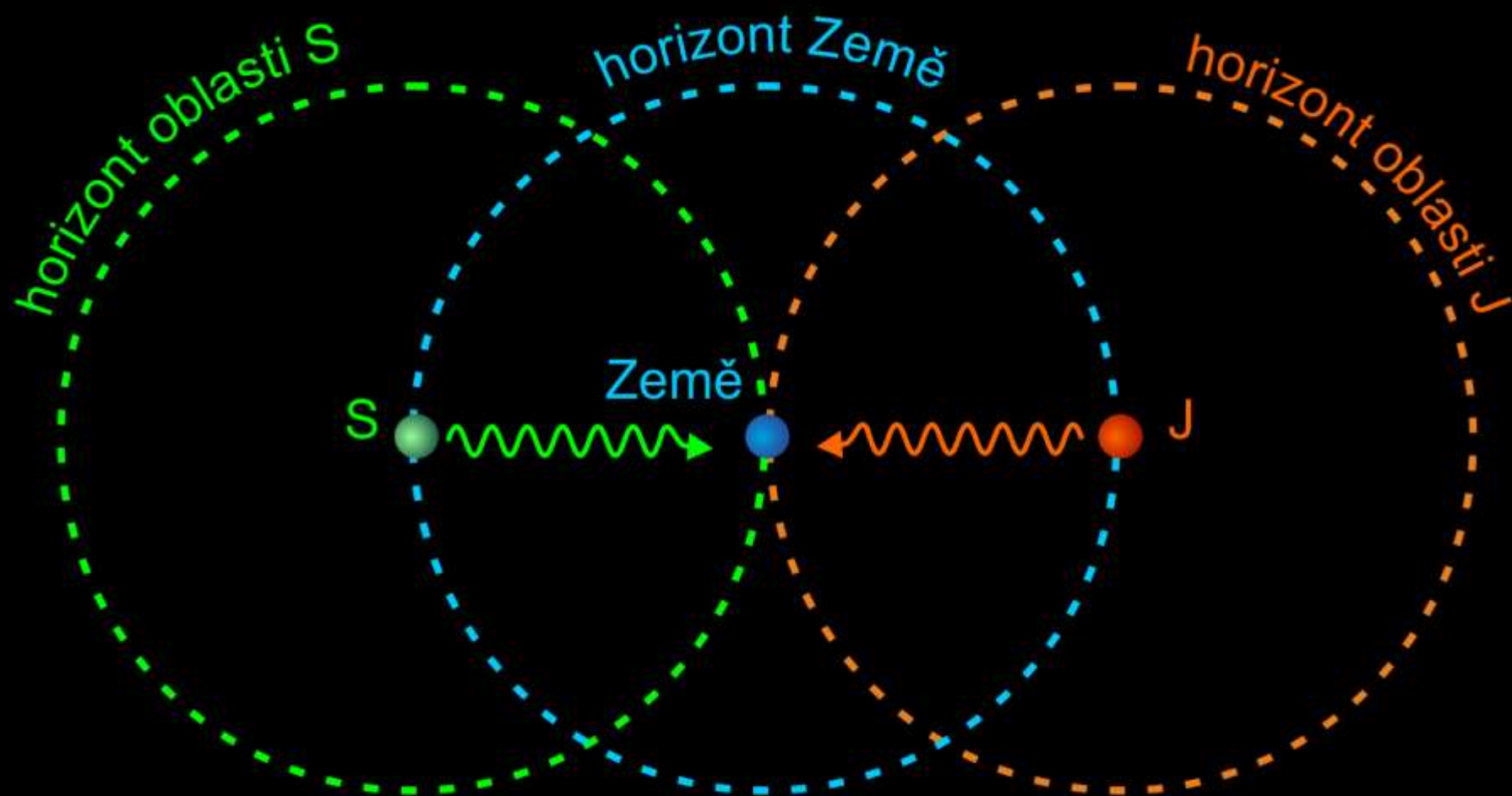
Inflace a další modely

Problémy standardního modelu

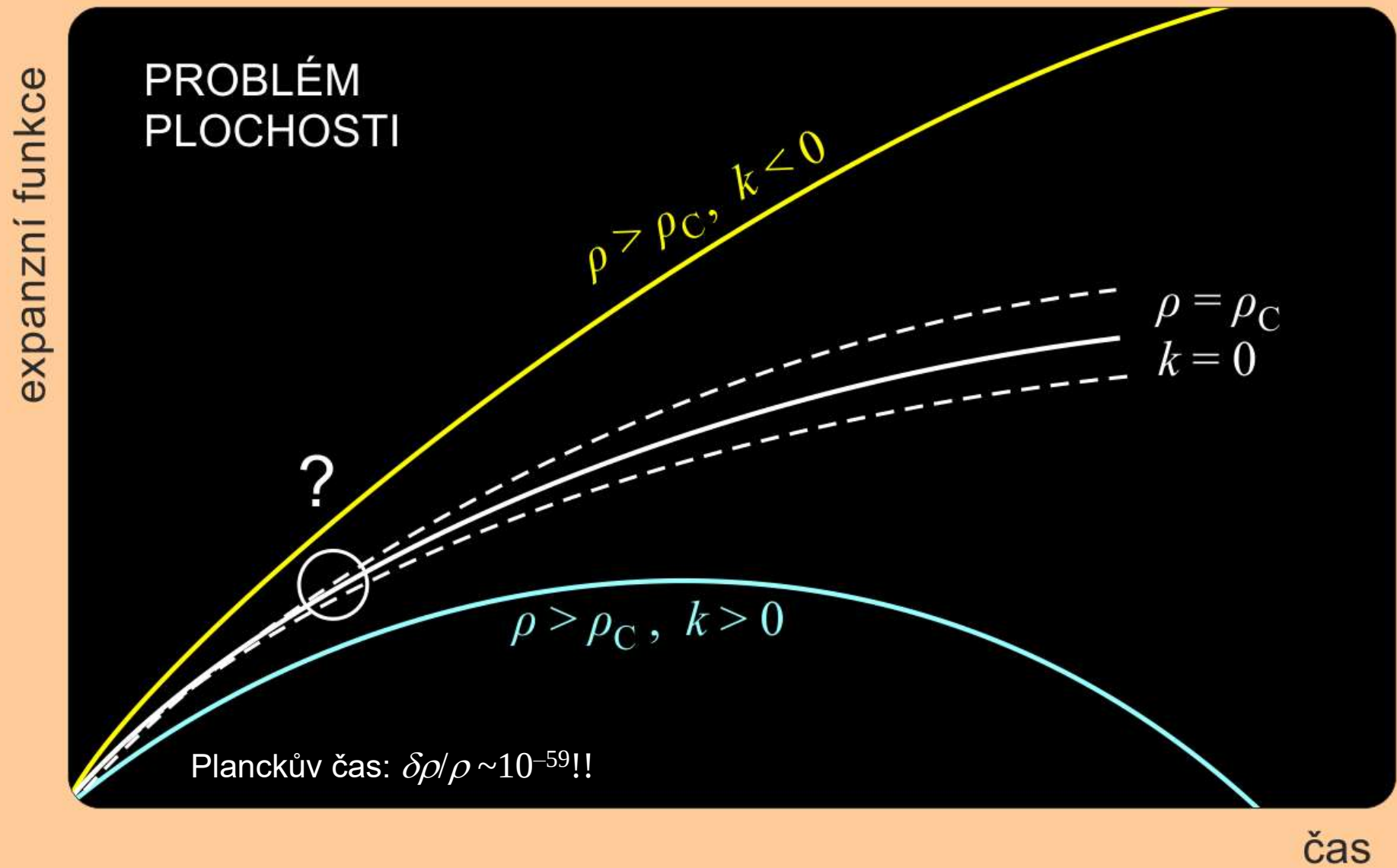
- problém počáteční singularity
- problém Planckových škál
- problém plochosti Vesmíru
- problém horizontu
- problém baryonové asymetrie
- problém magnetických monopolů
- problém počátečních fluktuací nutných k tvorbě galaxií



Problém horizontu

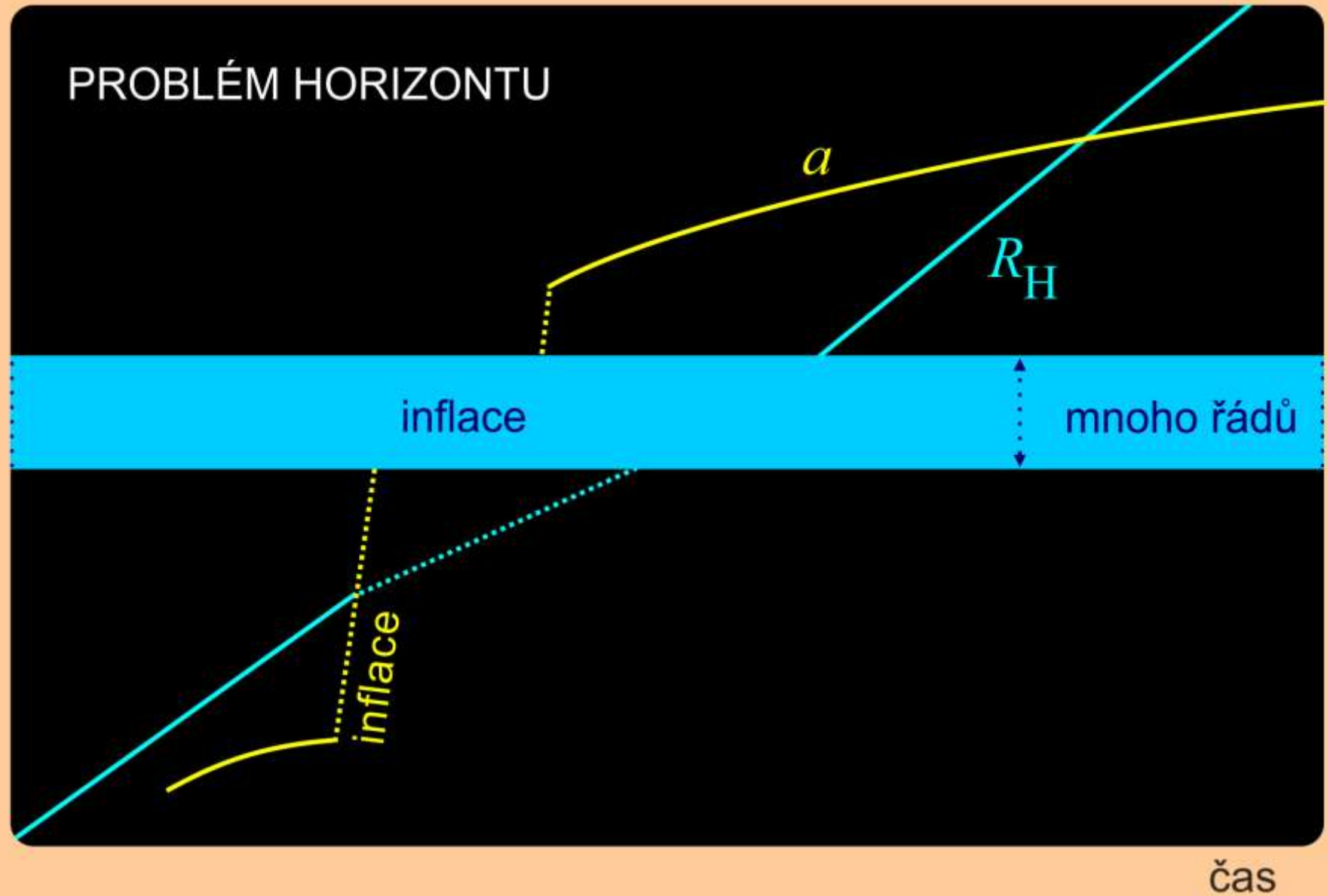


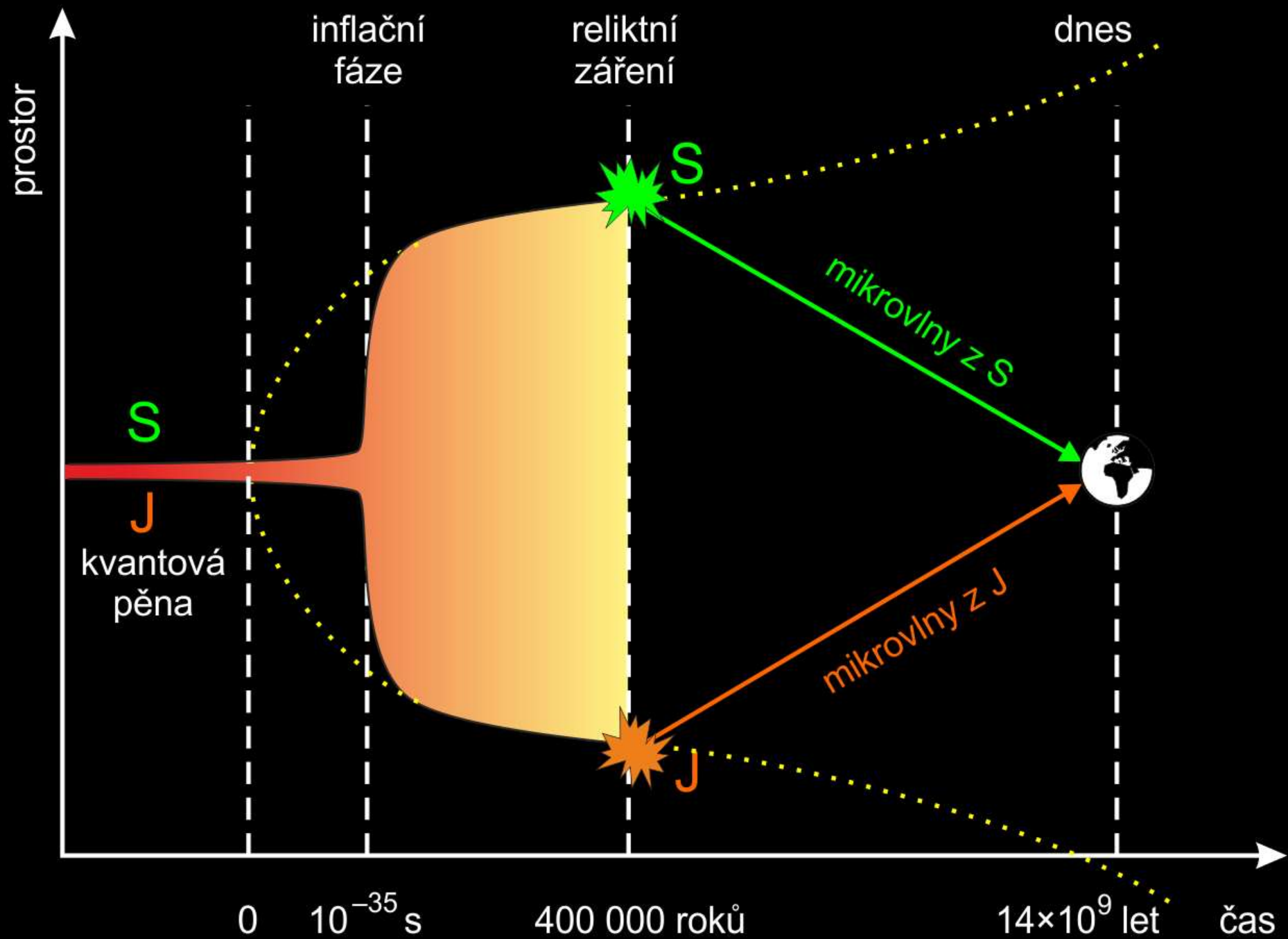
Problém plochosti

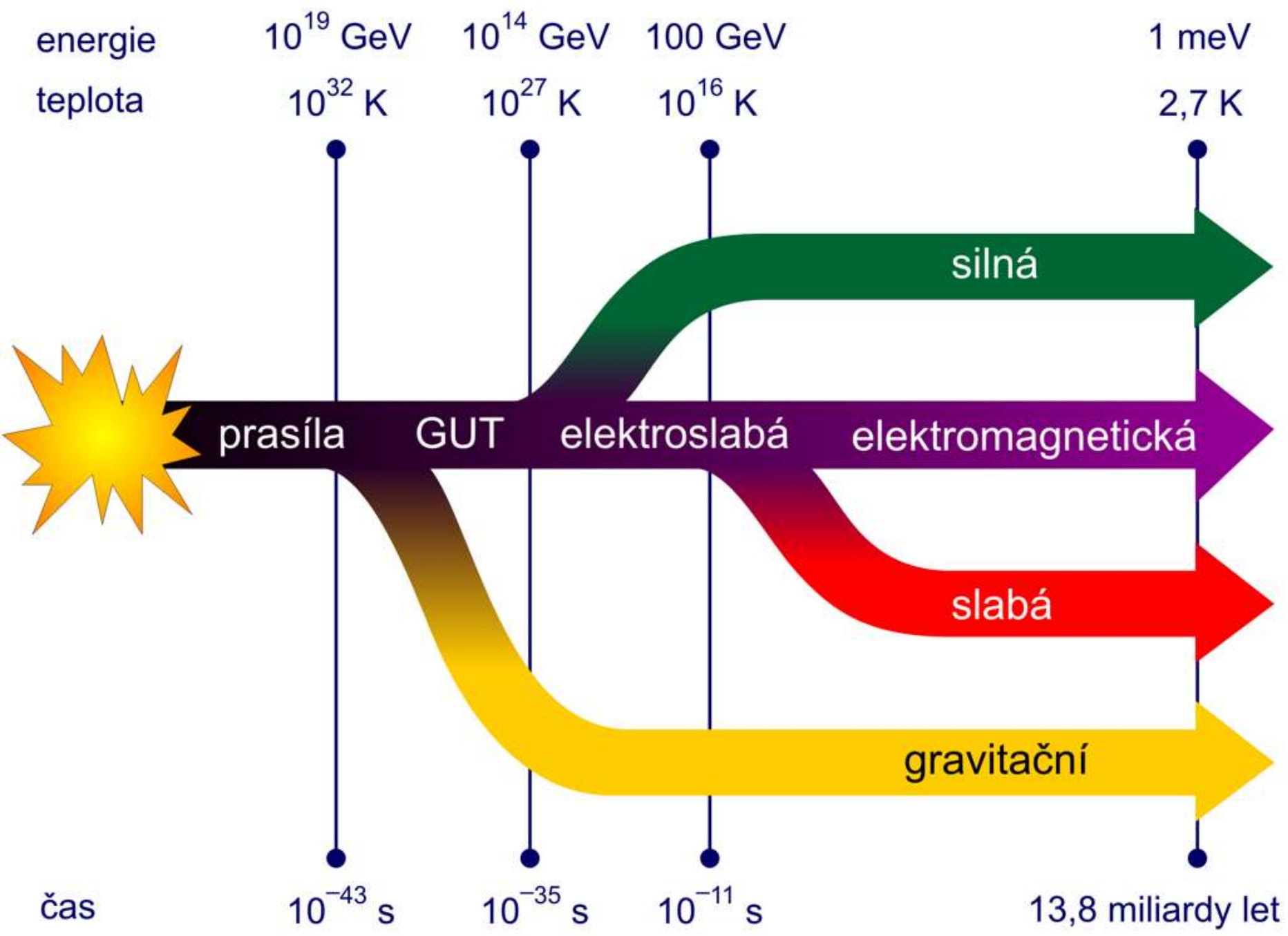


Problémy standardního modelu

expanzní funkce, horizont částic







Historie inflačního modelu

- Alan Guth, 1979, první inflační scénář
- Andrej Linde, Paul Steinhardt a Andreas Albrecht, 1982, nový inflační scénář
- Andrej Linde, Vilenkin, 1983, chaotická inflace
- Andrej Linde, 1986, chaotická inflace s kvantovými fluktuacemi



Alan H. Guth
MIT

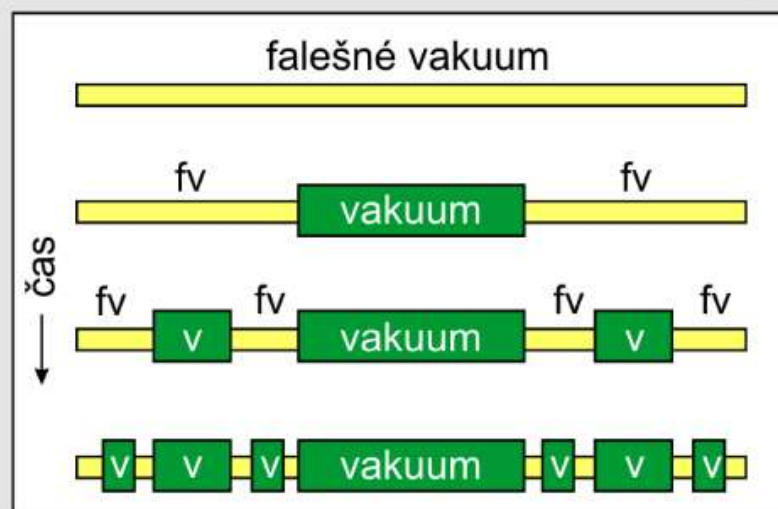
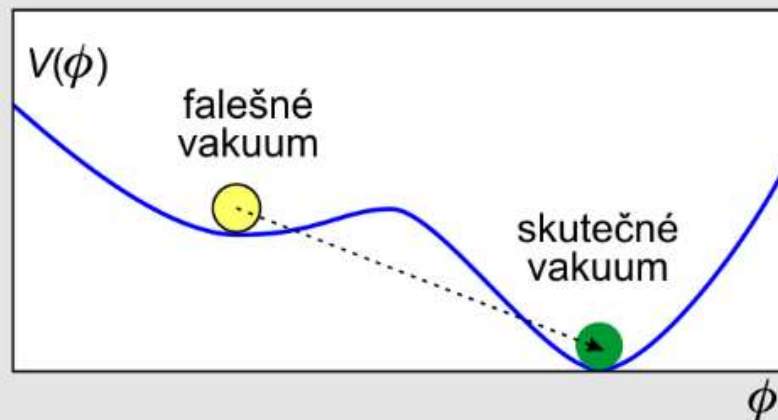


Andrej Linde



První inflační scénář

- konstantní hustota
- exponenciální expanze
- „záporný tlak“
- fázový přechod



- rozpad falešného vakua (skal. polí)
- oscilace ϕ kolem minima energie
- znovu ohřátí vesmíru
- vznik polévky elementárních částic
- standardní kosmologie začíná

Chaotická inflace

- Chaotické počáteční podmínky
- Nepotřebuje plató v potenciálu (netřeba falešné vakuum!)
- Postačí potenciál $V = C\phi^4$
- Co způsobuje inflaci? Inflatonové pole ??

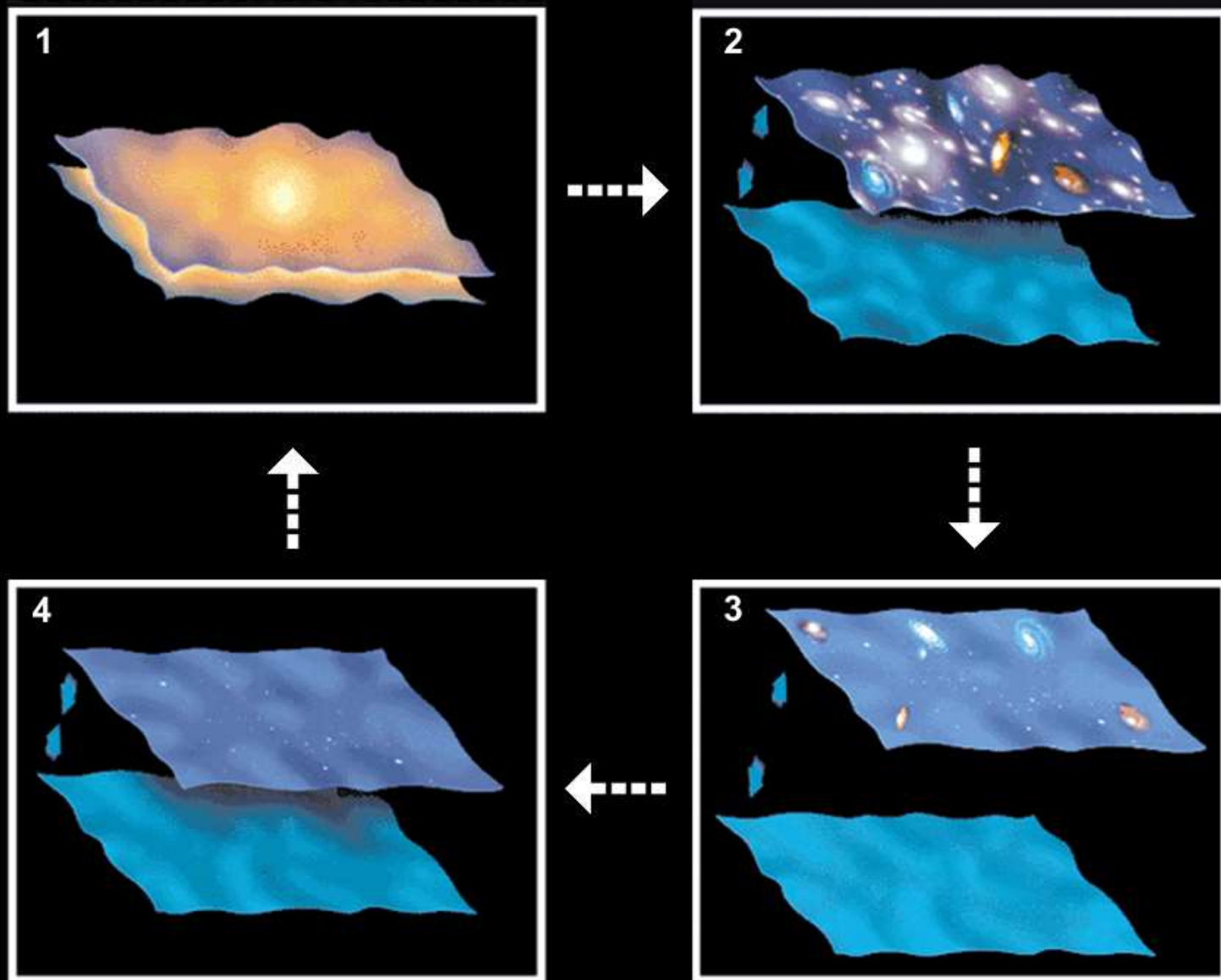


Chaotická inflace

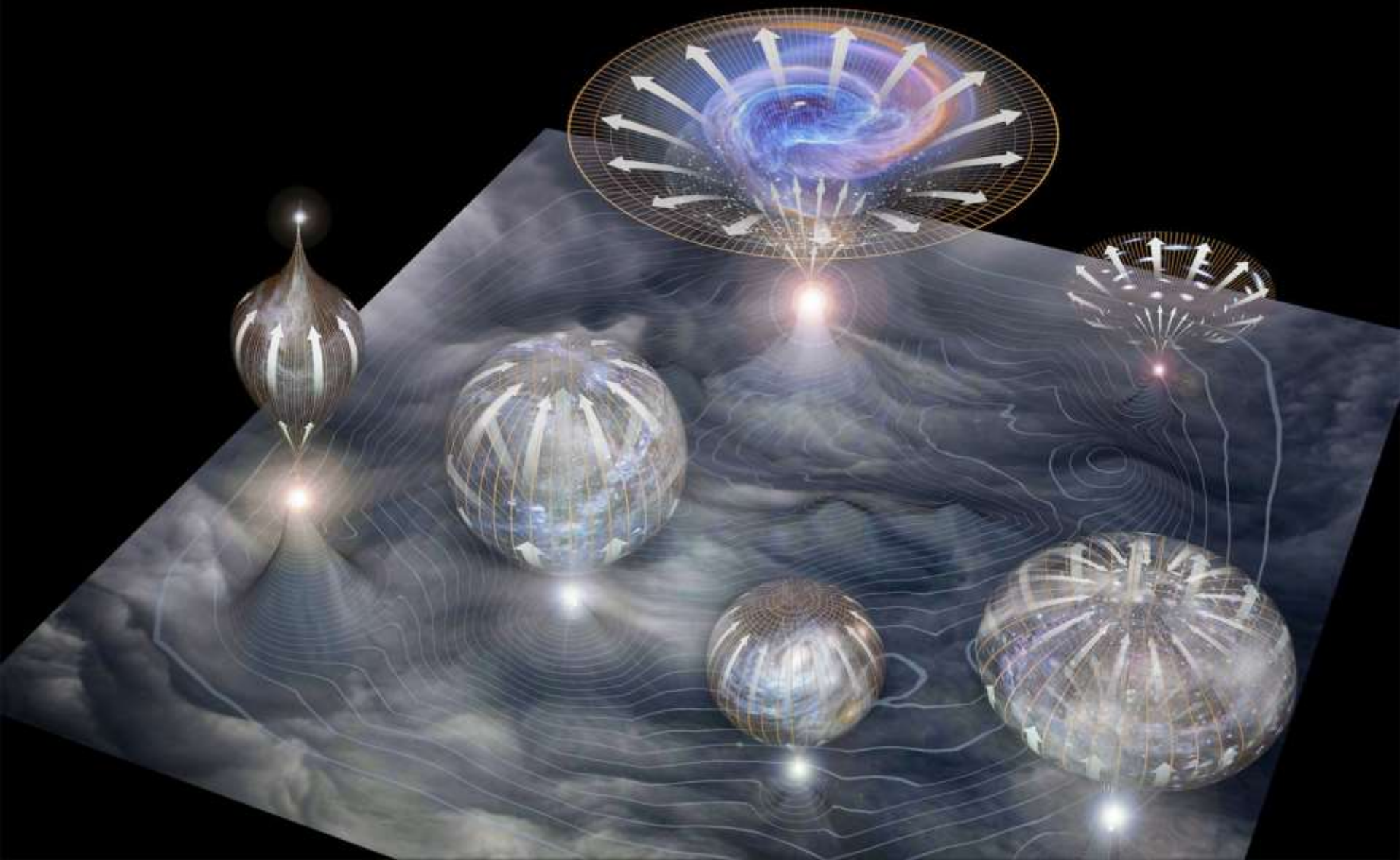


Ekpyrotický model

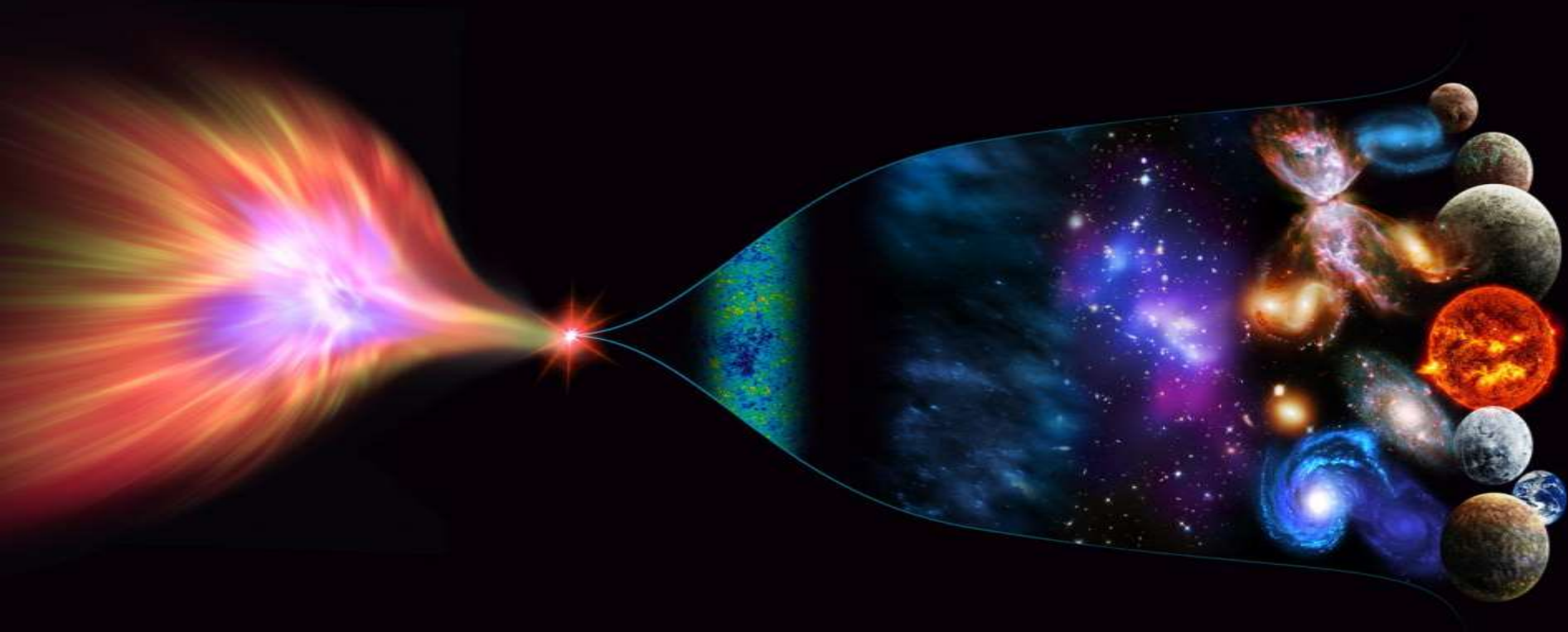
Neil Turok, Paul Steinhardt (2001)



Vesmír jako multiverzum



Vesmír z černé díry?

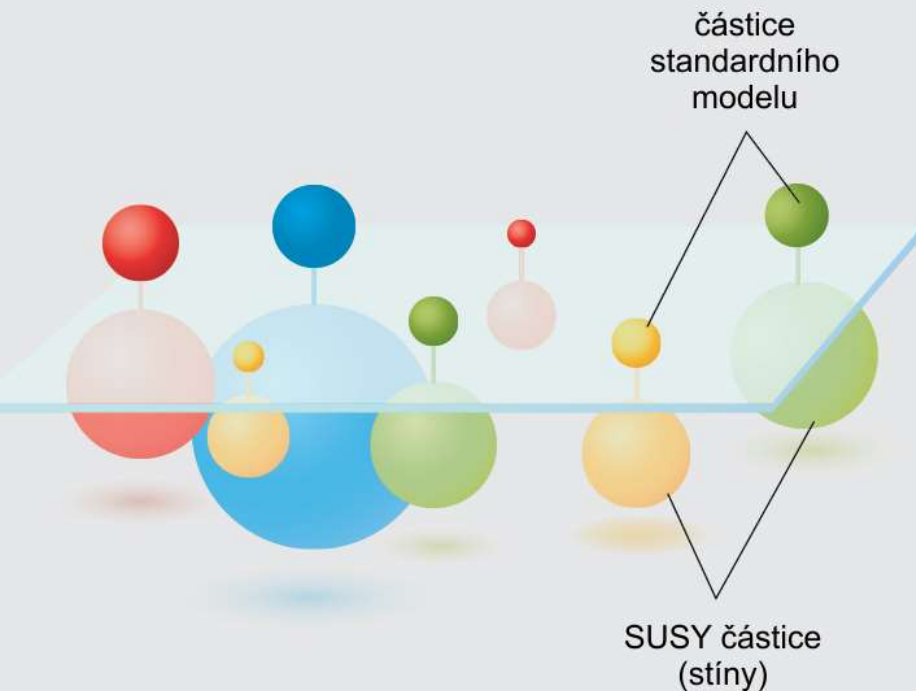




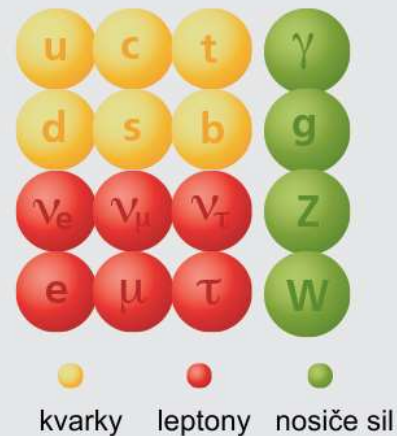
Životopis vesmíru

10^{-43} s: $T = 10^{32}$ K, $E = 10^{19}$ GeV, $\rho = 10^{94}$ g/cm³

- Planckův čas
- superpartneři (fotina, selektrony...)
- narušení SUSY symetrie
- oddělení gravitační interakce
- částice jsou struny v 10 (27?) dim?
- $R(t) \sim t^{1/2}$
- inflace?

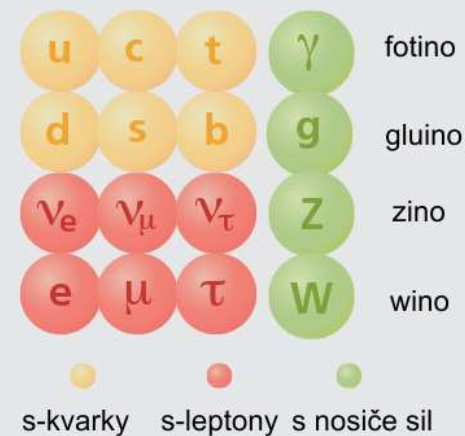


standardní model



Higgs

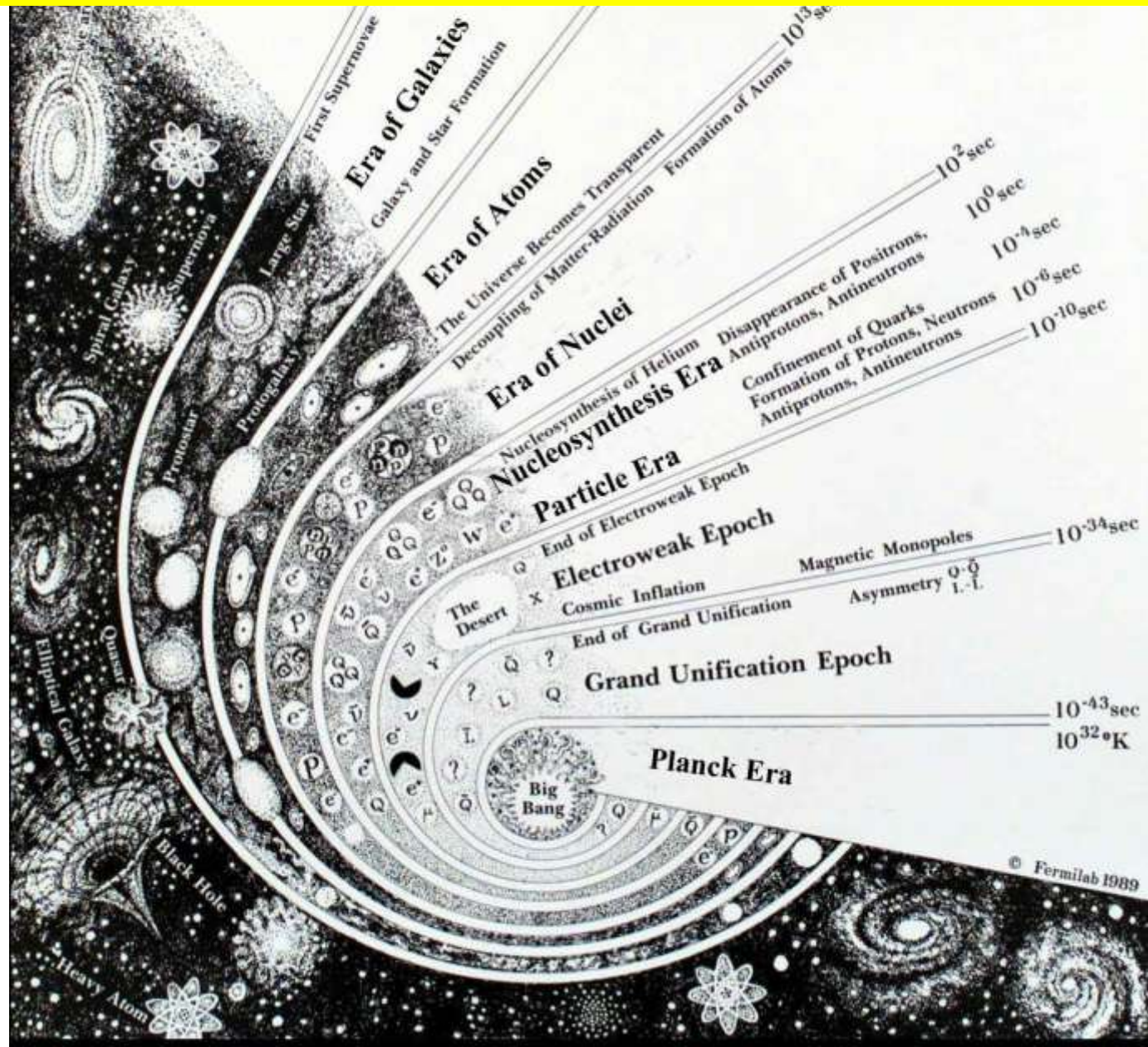
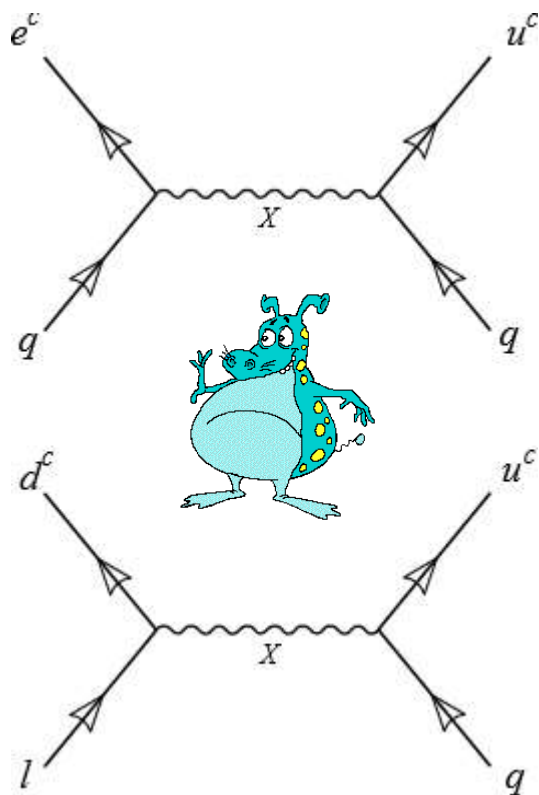
SUSY částice



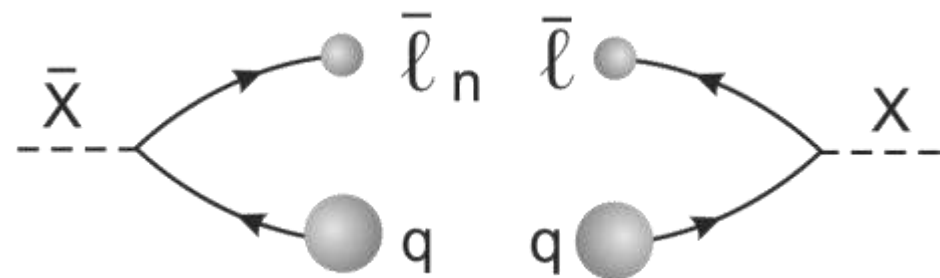
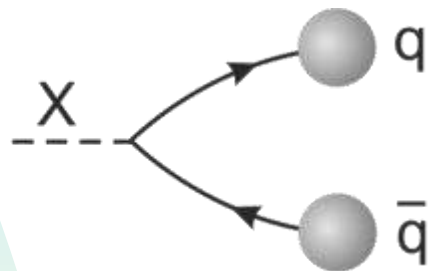
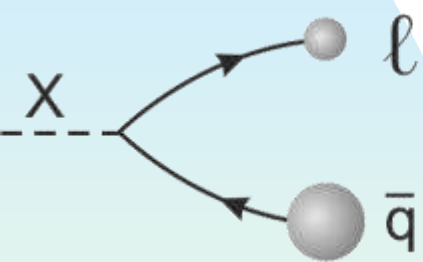
Higgsino

10^{-39} s: $T = 10^{29}$ K, $E = 10^{16}$ GeV, $\rho = 10^{84}$ g/cm³

- vznik bosonů X, Y
- rozpad protonu?
- éra GUT



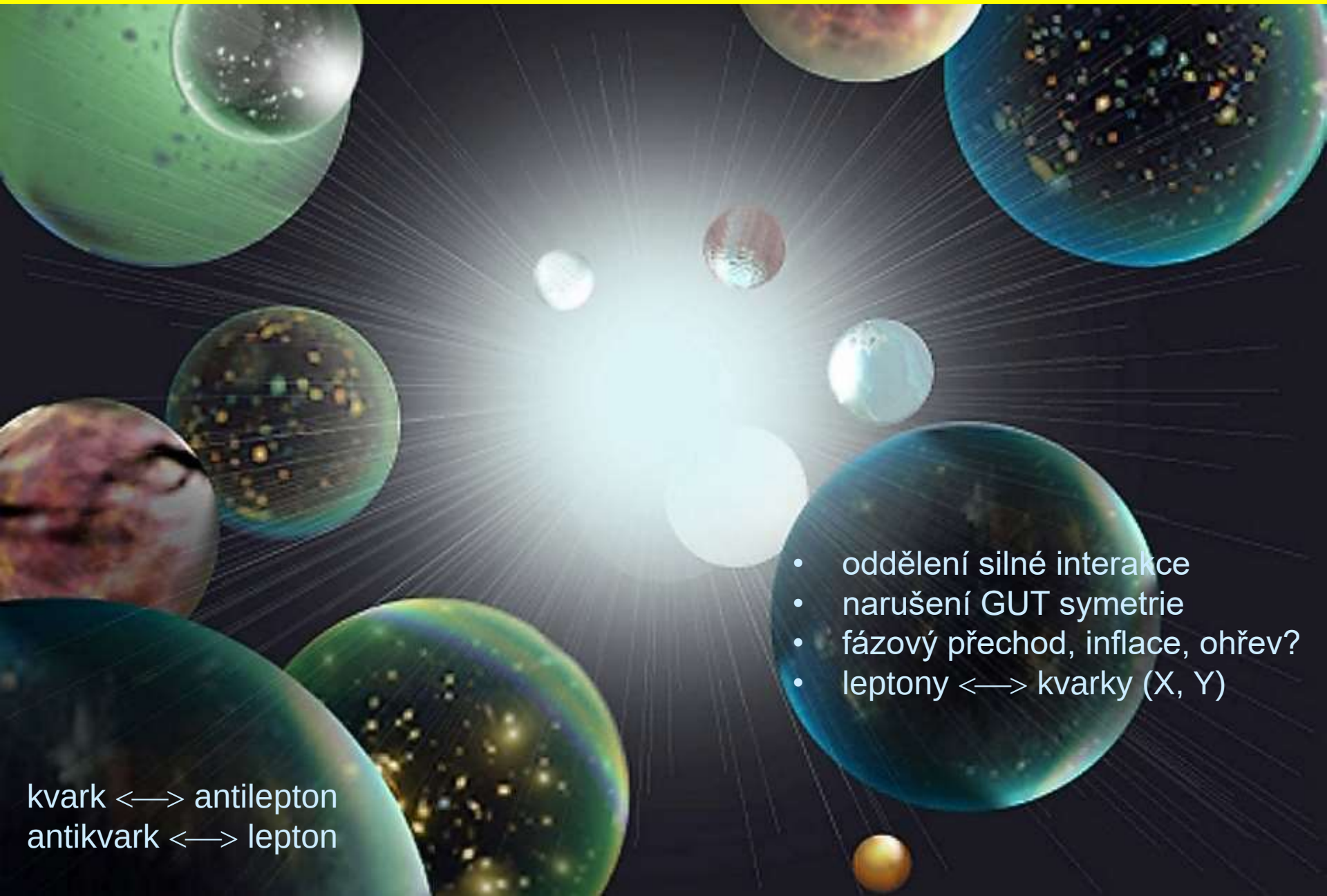
10^{-35} s: $T = 10^{27}$ K, $E = 10^{14}$ GeV



kvark $\longleftrightarrow$ antilepton
antikvark $\longleftrightarrow$ lepton

- oddělení silné interakce
- narušení GUT symetrie
- fázový přechod, inflace, ohřev?
- leptony $\longleftrightarrow$ kvarky (X, Y)

10^{-35} s: $T = 10^{27}$ K, $E = 10^{14}$ GeV



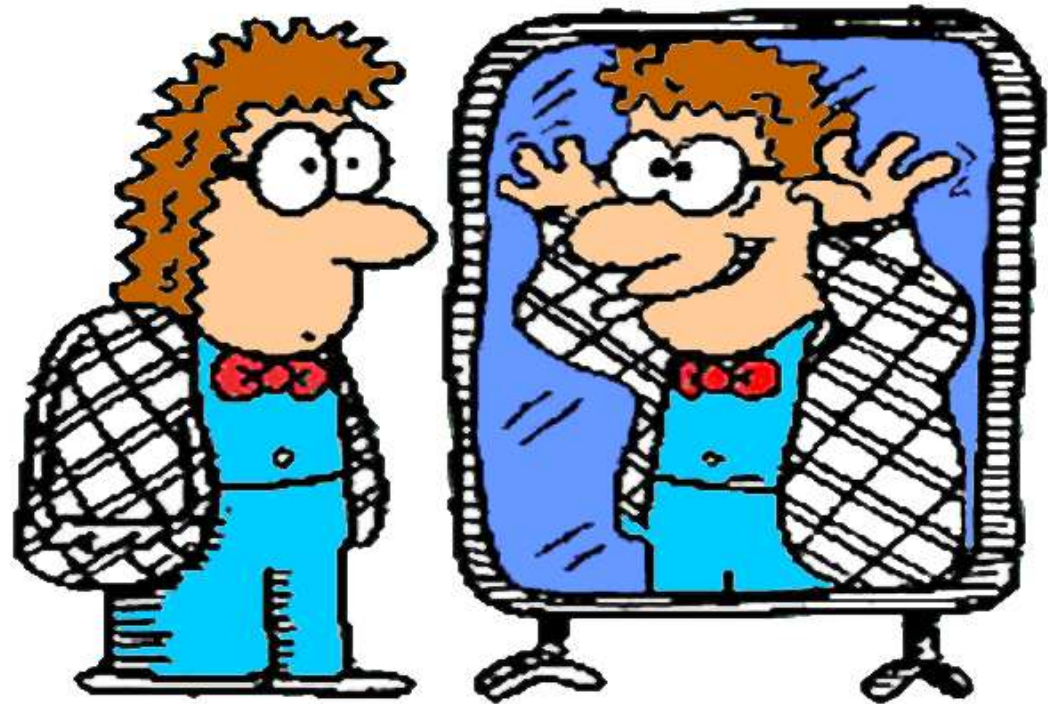
- oddělení silné interakce
- narušení GUT symetrie
- fázový přechod, inflace, ohřev?
- leptony $\longleftrightarrow$ kvarky (X, Y)

kvark $\longleftrightarrow$ antilepton
antikvark $\longleftrightarrow$ lepton

10^{-30} s: $T = 10^{25}$ K, $E = 10^{12}$ GeV

- prahová energie pro vznik X, Y
- narušení CP symetrie
- mírná asymetrie přechodů lq
- přechody lq ustávají
- nadvláda hmoty nad antihmotou
- 1 000 000 000 : 1 000 000 001

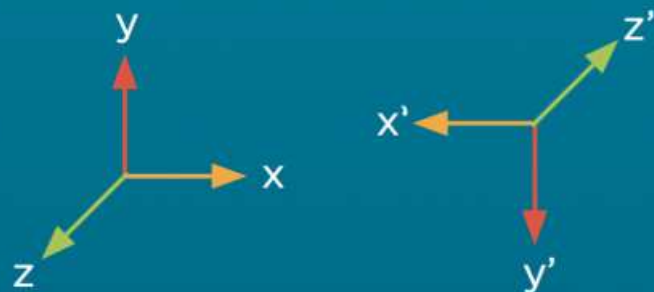
kvark $\leftrightarrow$ antilepton
antikvark $\leftrightarrow$ lepton



10^{-30} s: $T = 10^{25}$ K, $E = 10^{12}$ GeV

C
NÁBOJ

veškeré kvantové náboje
změní znaménko
(včetně elektrického)



zaměníme
levé a pravé,
horní a dolní,
přední a zadní

P
PARITA

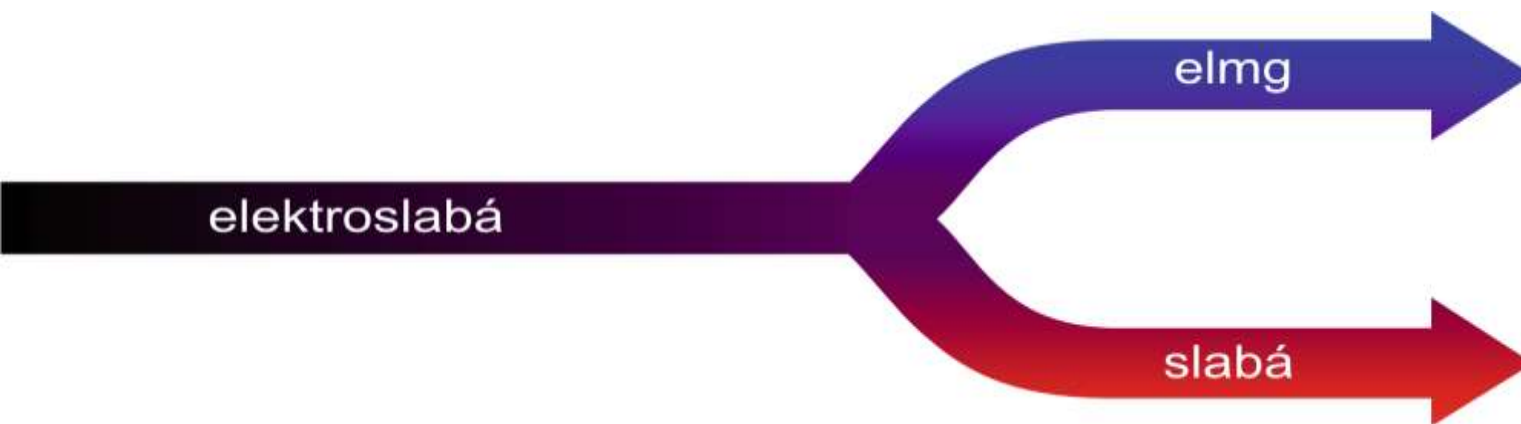
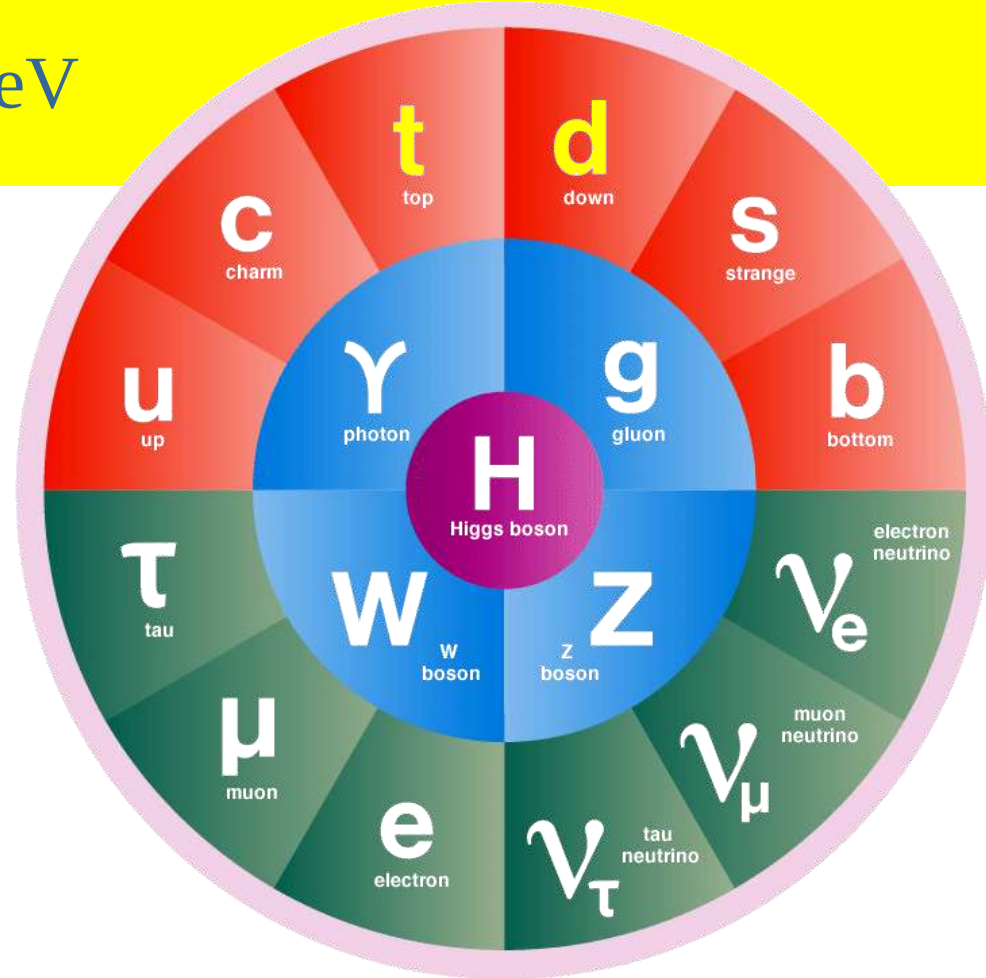
T
ČAS

zaměníme minulost
a budoucnost

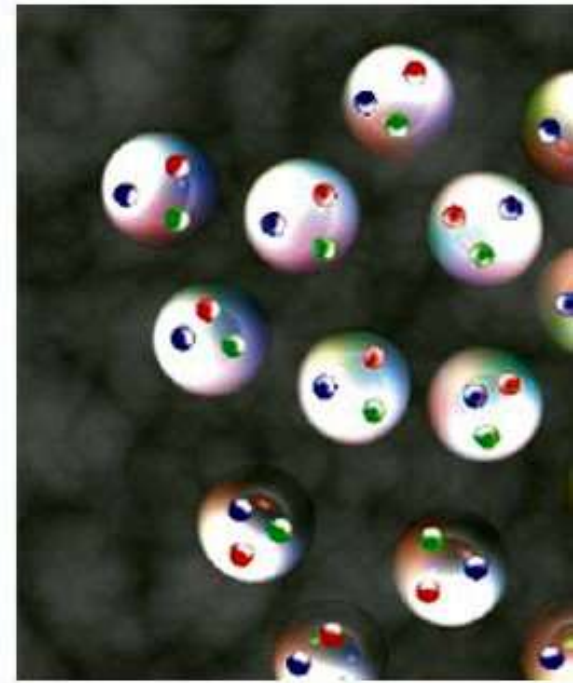
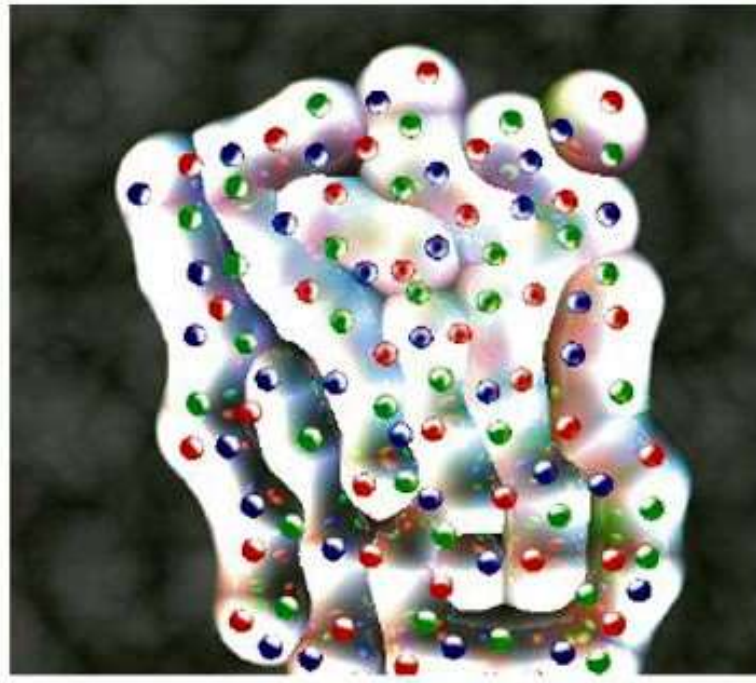
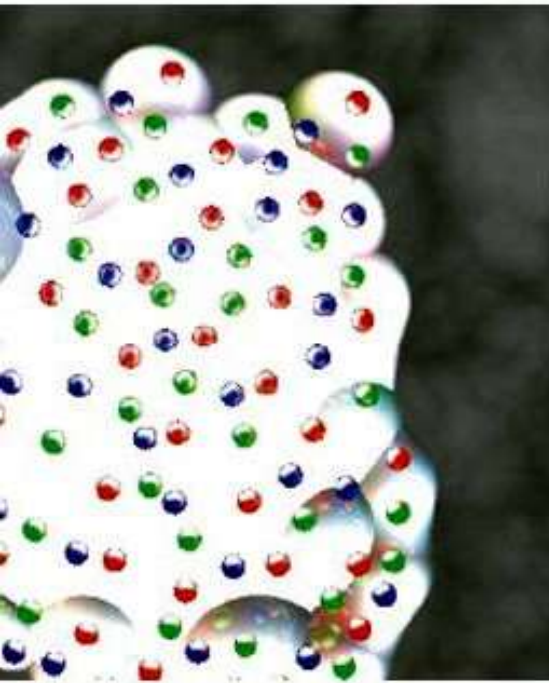


10^{-10} s: $T = 10^{15}$ K, $E = 10^2$ GeV

- narušení elektroslabé symetrie
- oddělení slabé interakce
- poprvé 4 interakce jaké známe



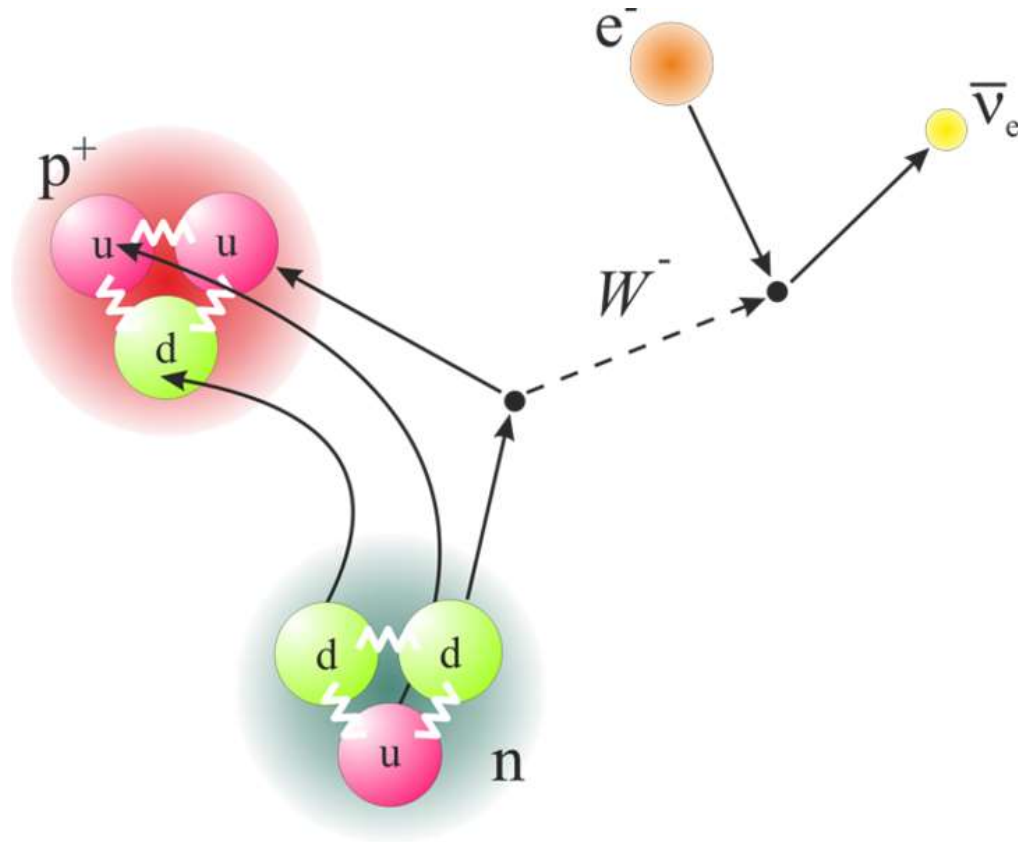
10^{-5} s: $T = 10^{13}$ K, $E = 1$ GeV



- hadronizace hmoty
- vznik baryonů a mezonů
- první protony a neutrony

1 s: $T = 10^{10}$ K, $E = 1$ MeV

- oddělení neutrin od ostatní látky
- narušení termodynamické rovnováhy s látkou
- reliktní neutrina: 2 K, 300 neutrin na cm^3
- rozpad volných neutronů (rychlejší než tvorba)



$$\nu\nu \rightarrow \nu\nu$$

$$\nu\bar{\nu} \rightarrow \nu\bar{\nu}$$

$$\nu e \rightarrow \nu e$$

$$\nu\bar{\nu} \rightarrow e^+e^-$$



1 s: $T = 10^{10}$ K, $E = 1$ MeV

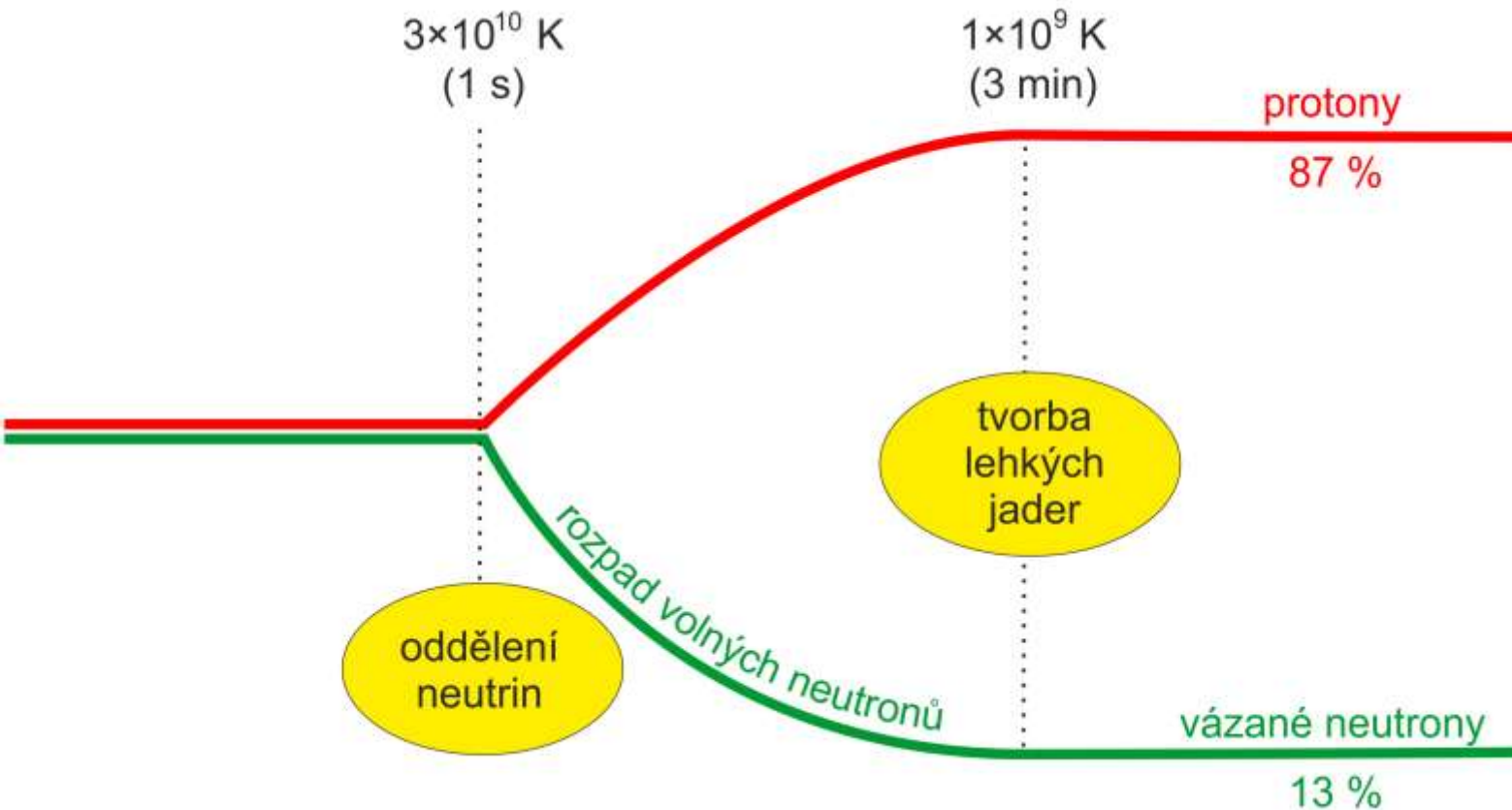
- oddělení neutrin od ostatní látky
- narušení termodynamické rovnováhy s látkou
- reliktní neutrina: 2 K, 300 neutrin na cm^3
- rozpad volných neutronů (rychlejší než tvorba)

$$\nu\nu \rightarrow \nu\nu$$

$$\nu\bar{\nu} \rightarrow \nu\bar{\nu}$$

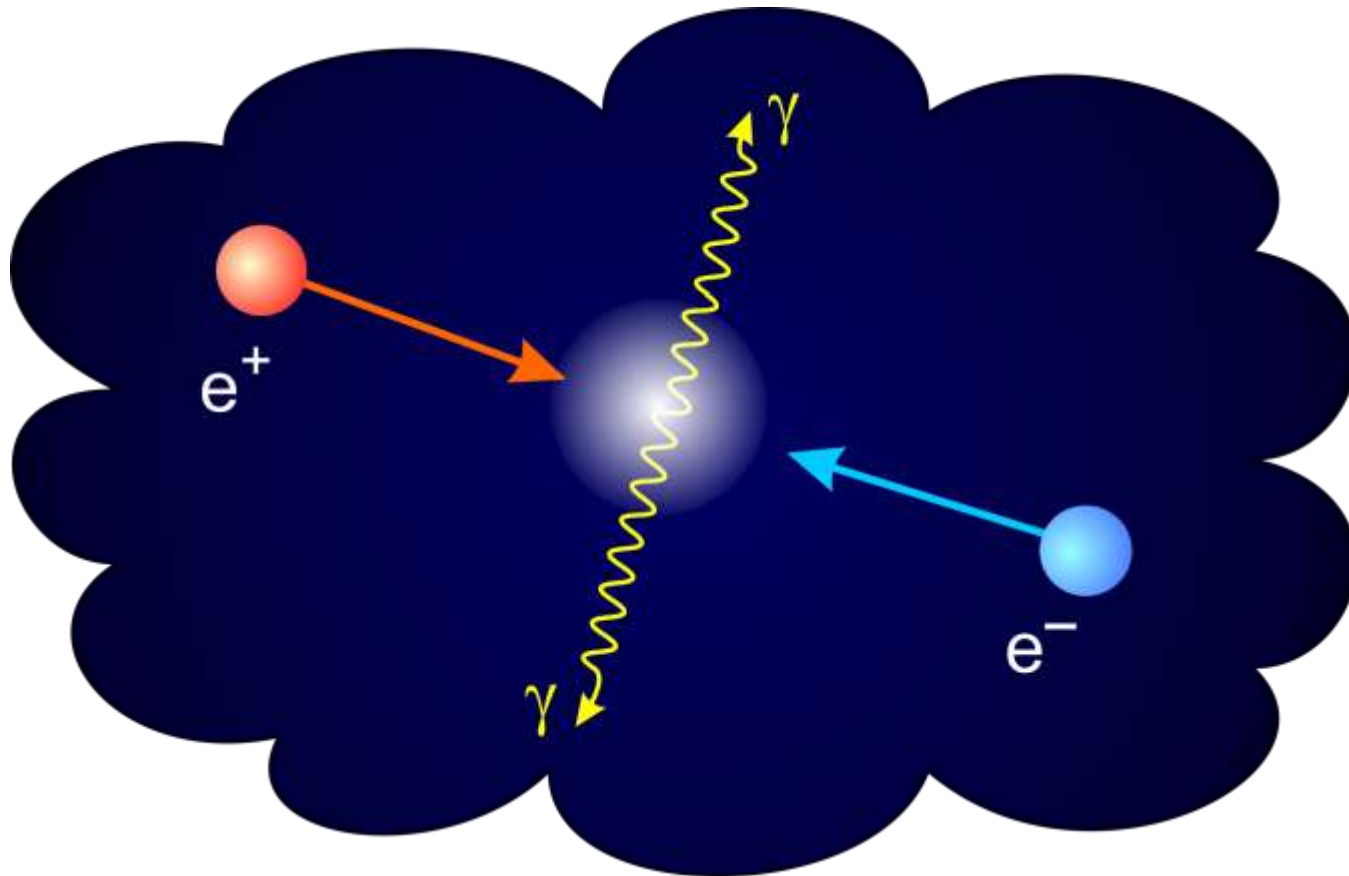
$$\nu e \rightarrow \nu e$$

$$\nu\bar{\nu} \rightarrow e^+e^-$$

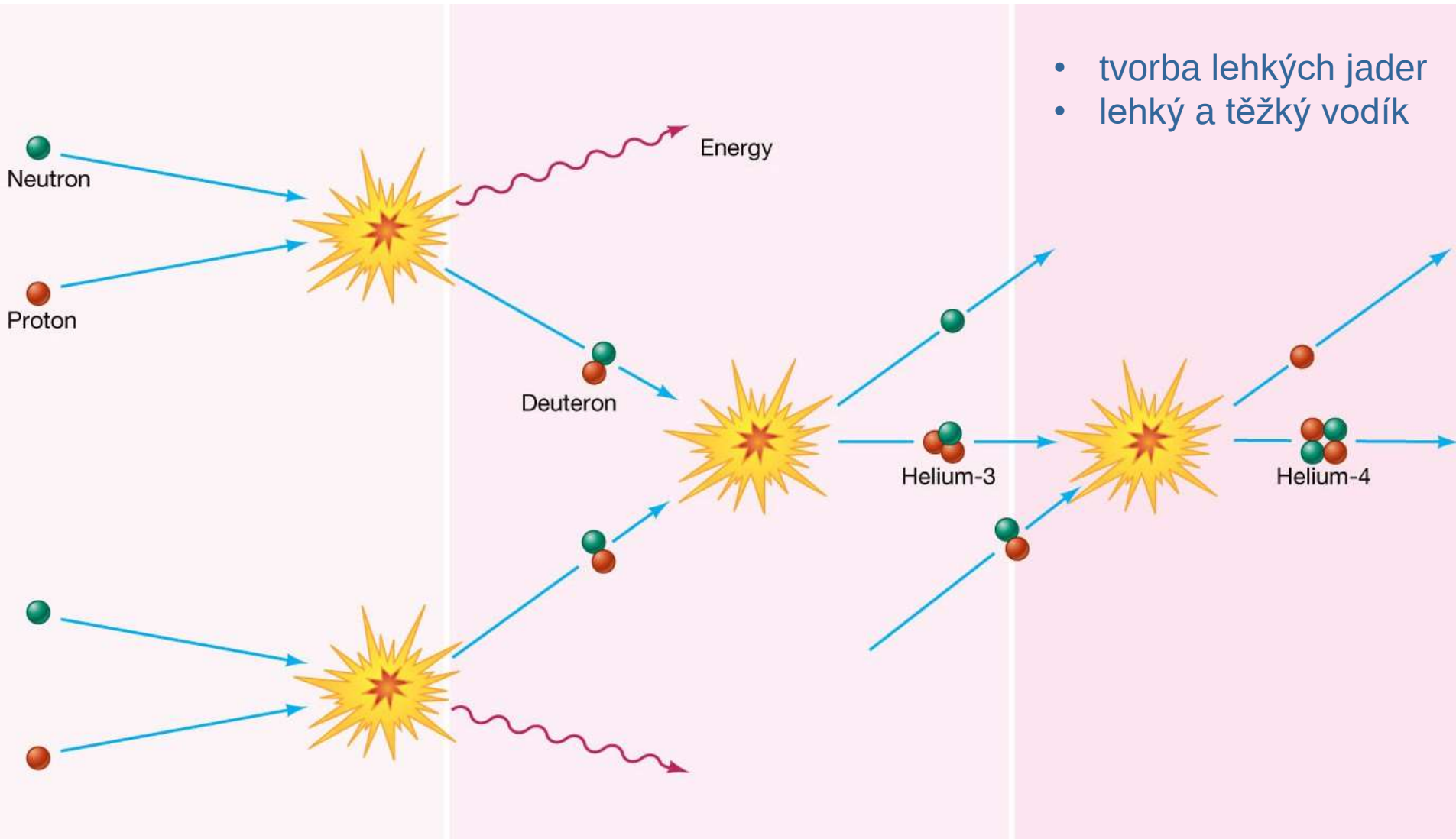


3 s: $T = 6 \times 10^9 \text{ K}$, $E = 500 \text{ keV}$

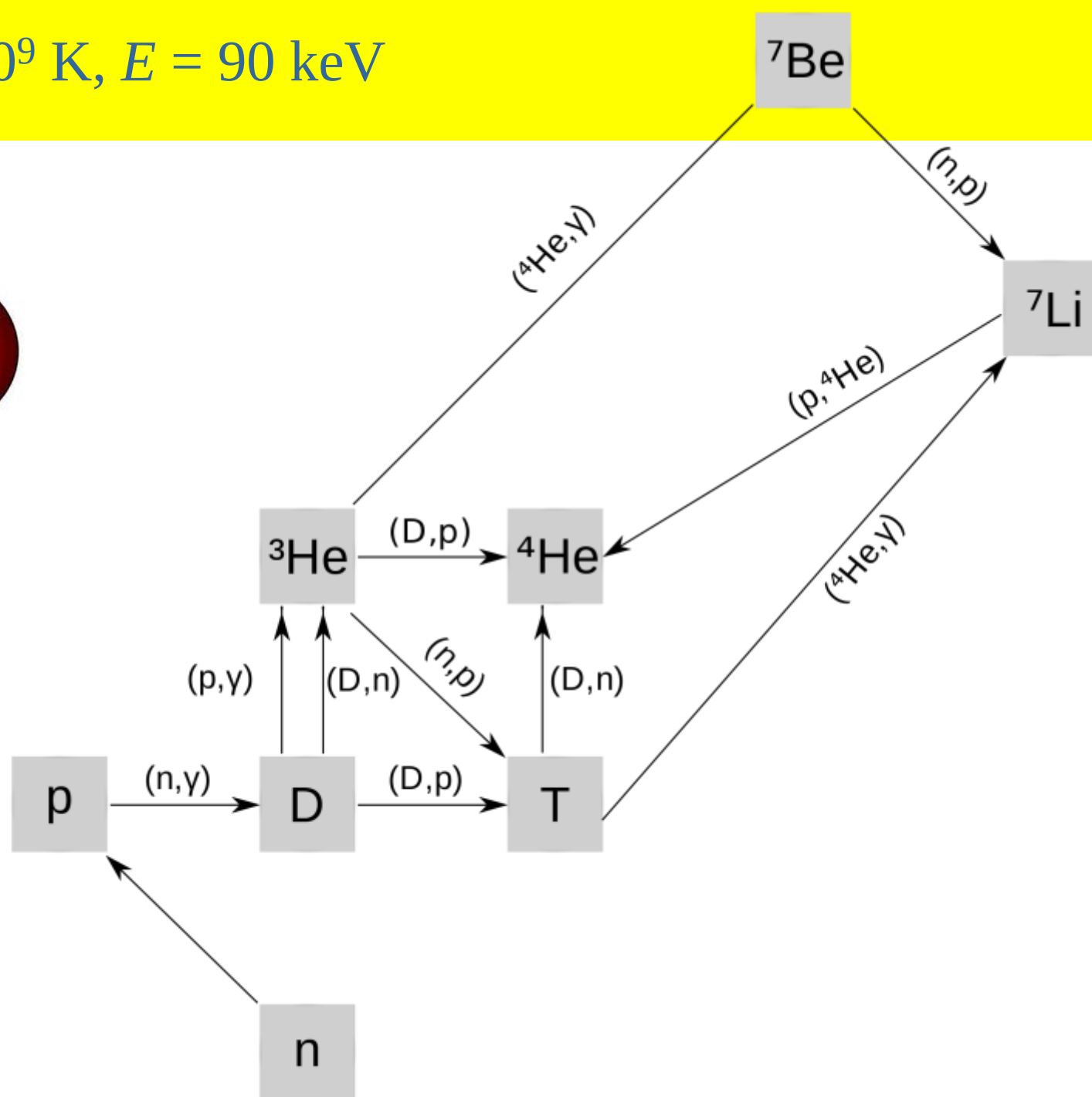
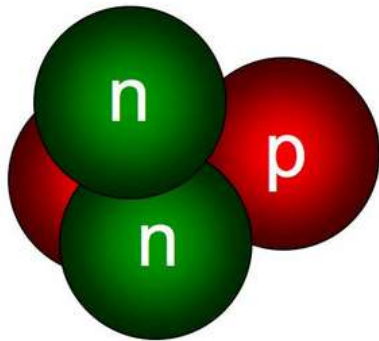
- prahová teplota rovnováhy $e + e^+ \leftrightarrow \text{záření}$ ($kT \sim m_e c^2$)
- převládá anihilace
- zahřátí vesmíru o 40 % (netýká se už neutrin)
- narušení CP symetrie $1:10^9$
- zbylé elektrony se později použijí pro stavbu obalů



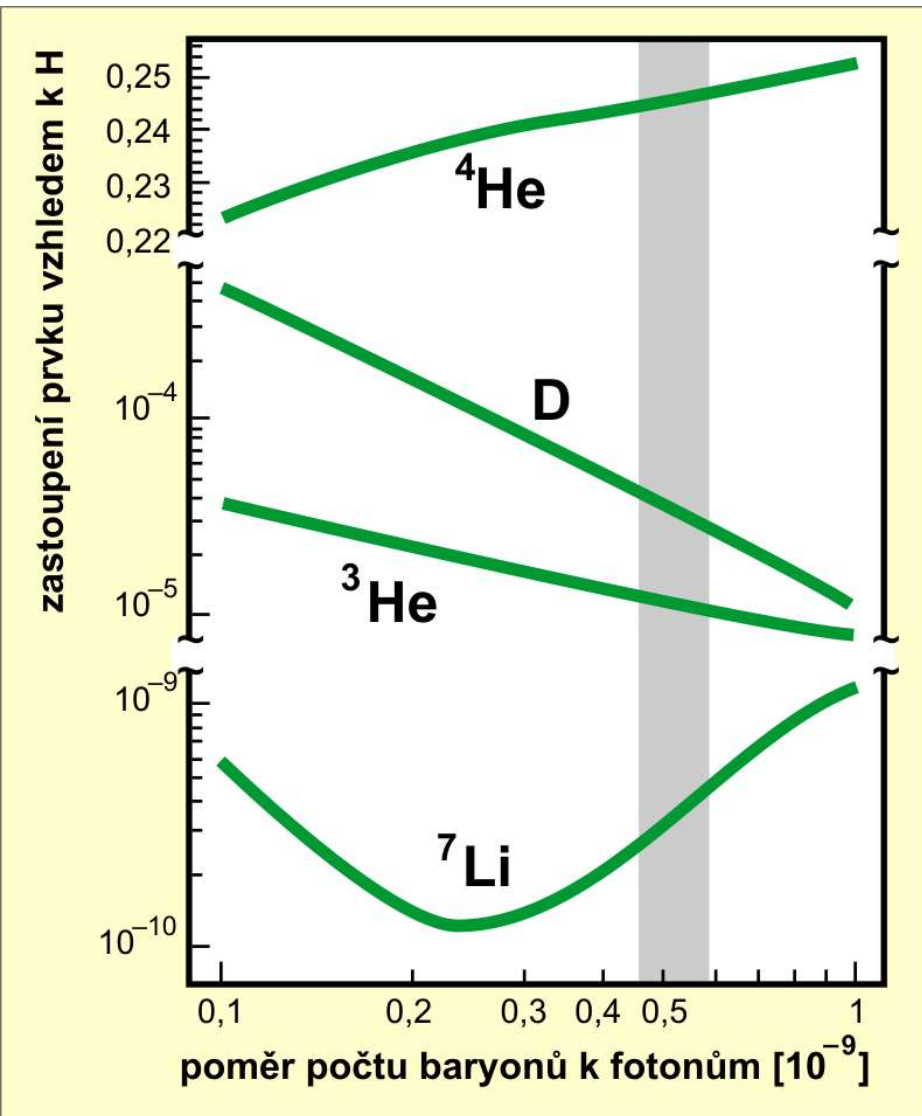
4 minuty: $T = 10^9$ K, $E = 90$ keV



4 minuty: $T = 10^9$ K, $E = 90$ keV



4 minuty: $T = 10^9$ K, $E = 90$ keV

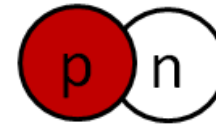


Hydrogen



Proton

Deuterium

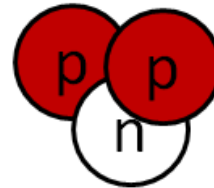


Deuteron

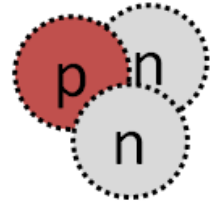


Neutron

Helium-3

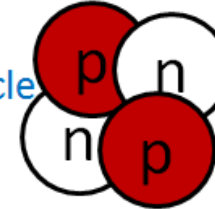


Tritium

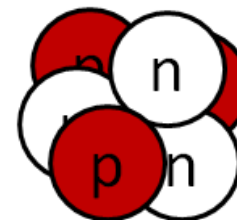


Helium-4

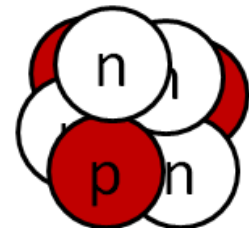
α particle



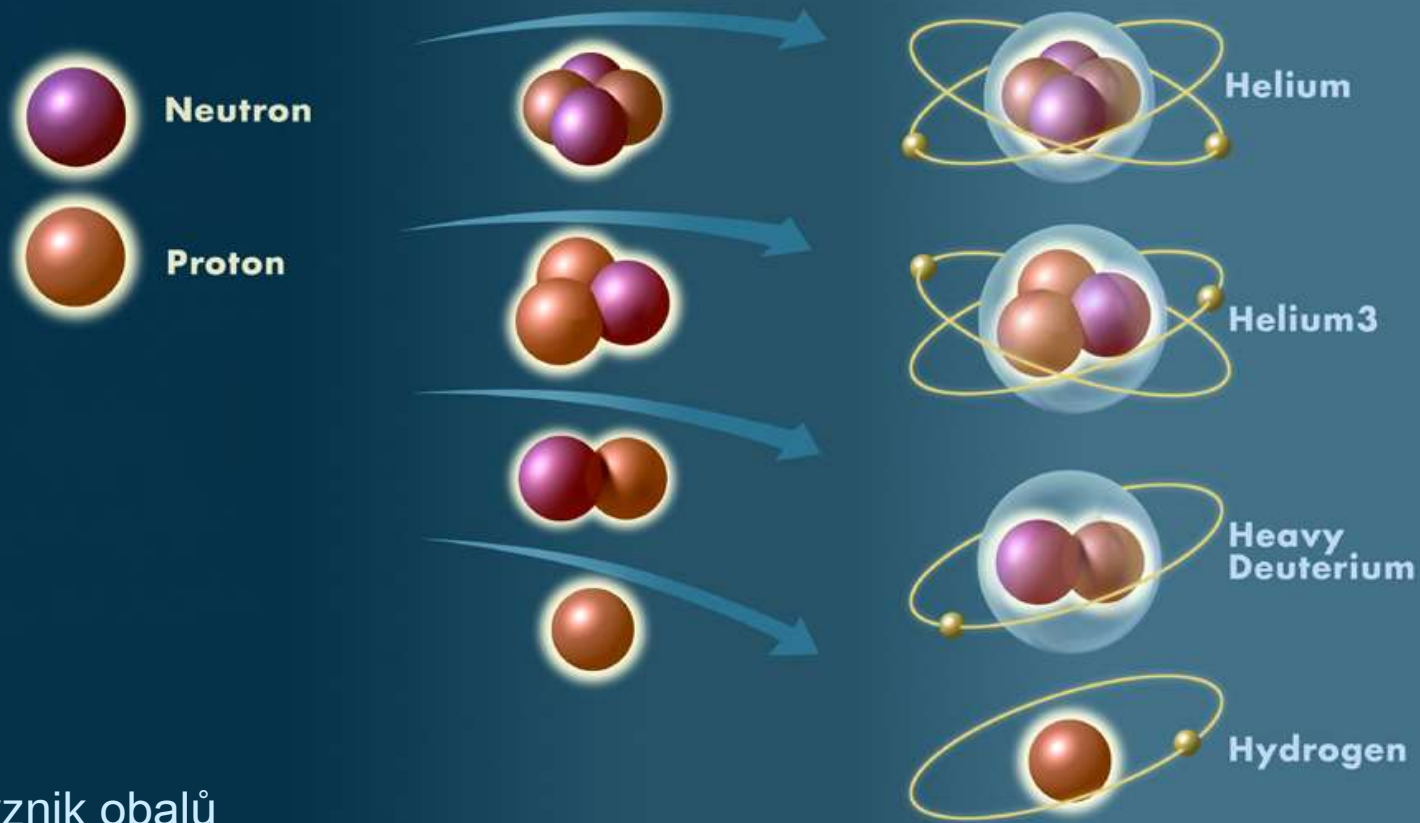
Lithium-6



Lithium-7

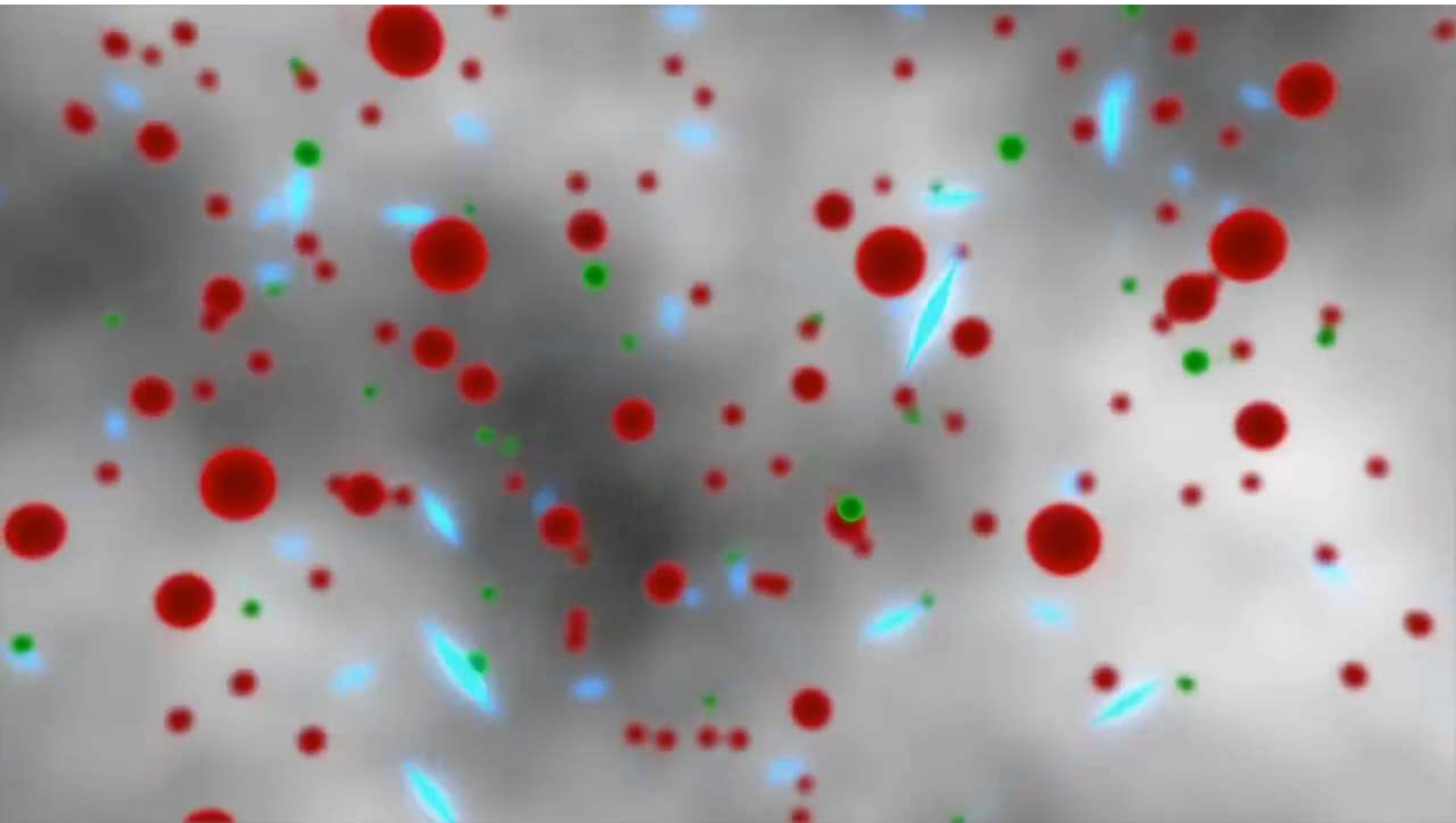


400 000 let: $T = 5\,000\text{ K}$, $E = 0,4\text{ eV}$

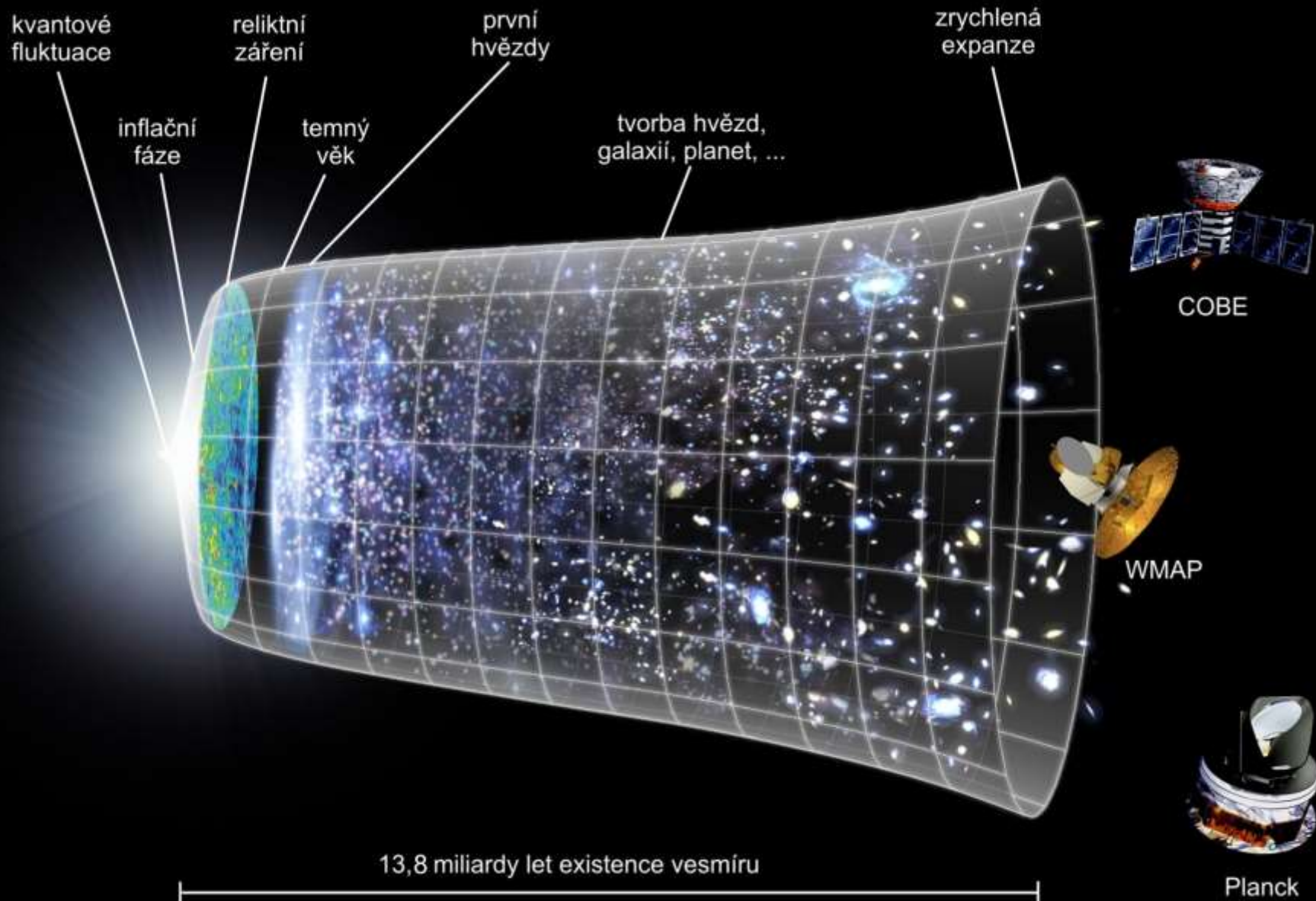


- vznik obalů
- konečně první atomy!
- zánik volných elektronů

400 000 let: $T = 5\,000\text{ K}$, $E = 0,4\text{ eV}$



400 000 let: $T = 5\,000\text{ K}$, $E = 0,4\text{ eV}$

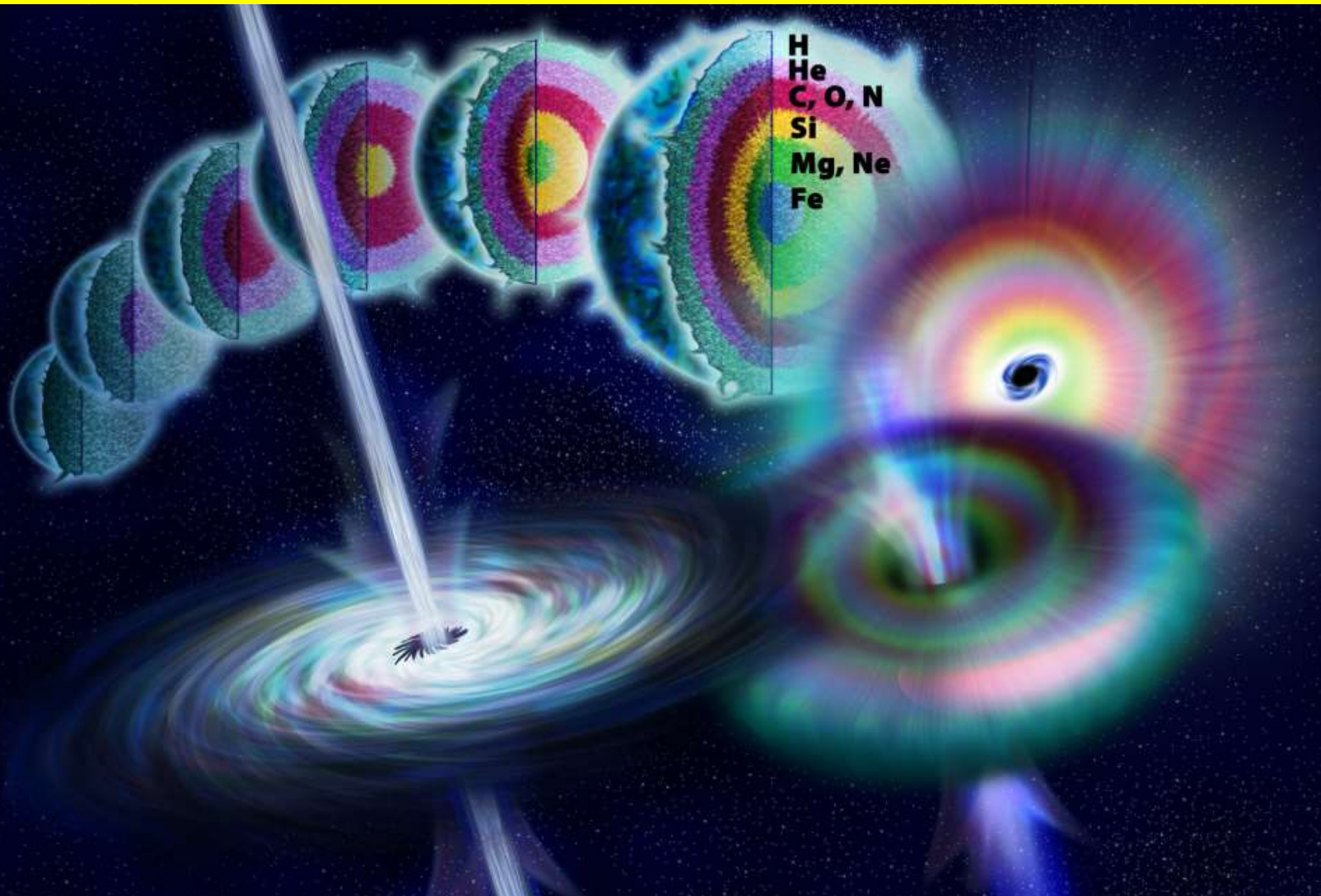


550 000 000 let: $T < 200$ K, $E < 20$ meV

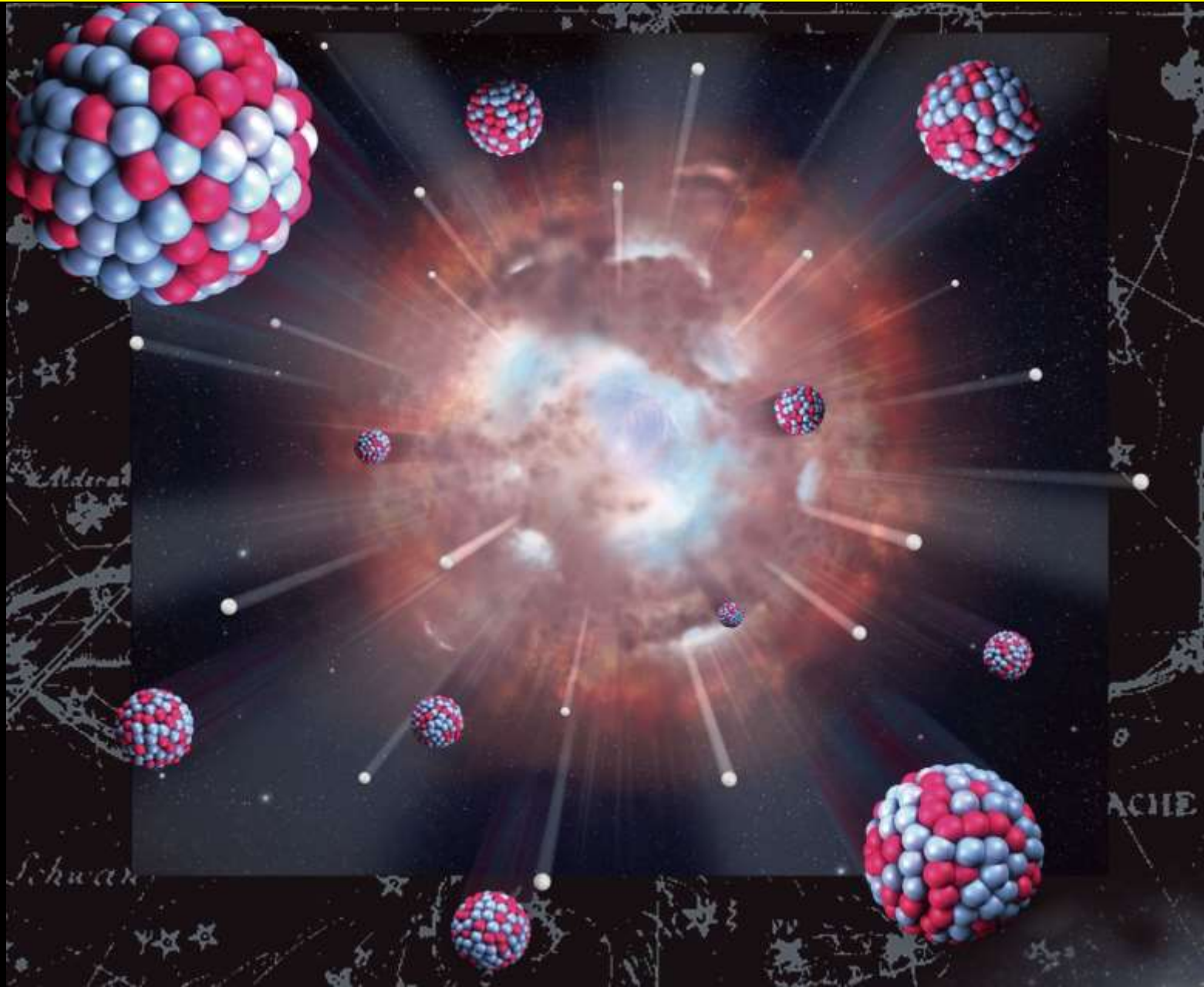


- první velmi hmotné hvězdy
- reionizace vesmíru (konec temného věku)
- tvorba těžkých jader
- exploze hypernov
- další generace hvězd s těžkými prvky

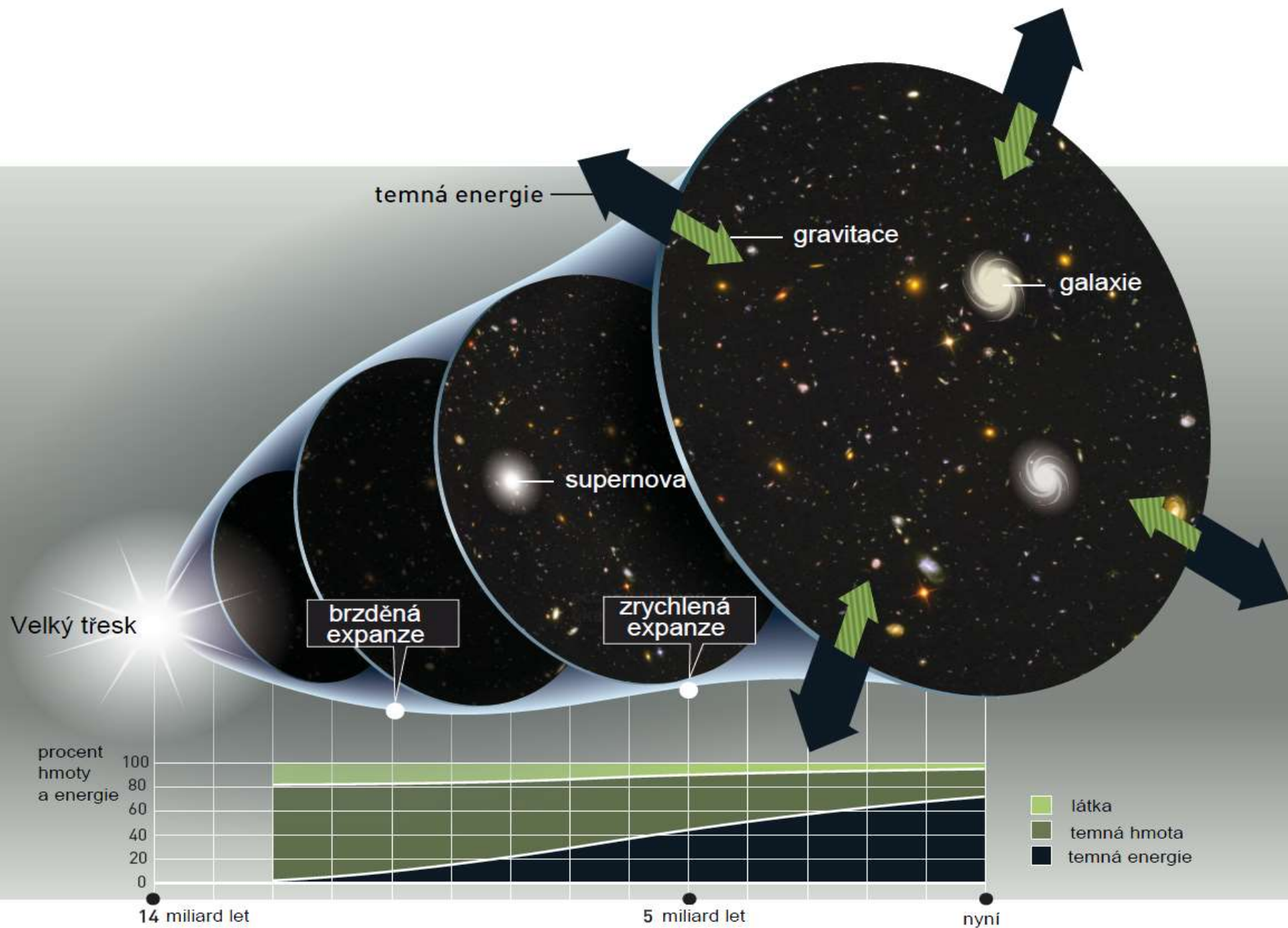
550 000 000 let: $T = 200$ K, $E = 20$ meV



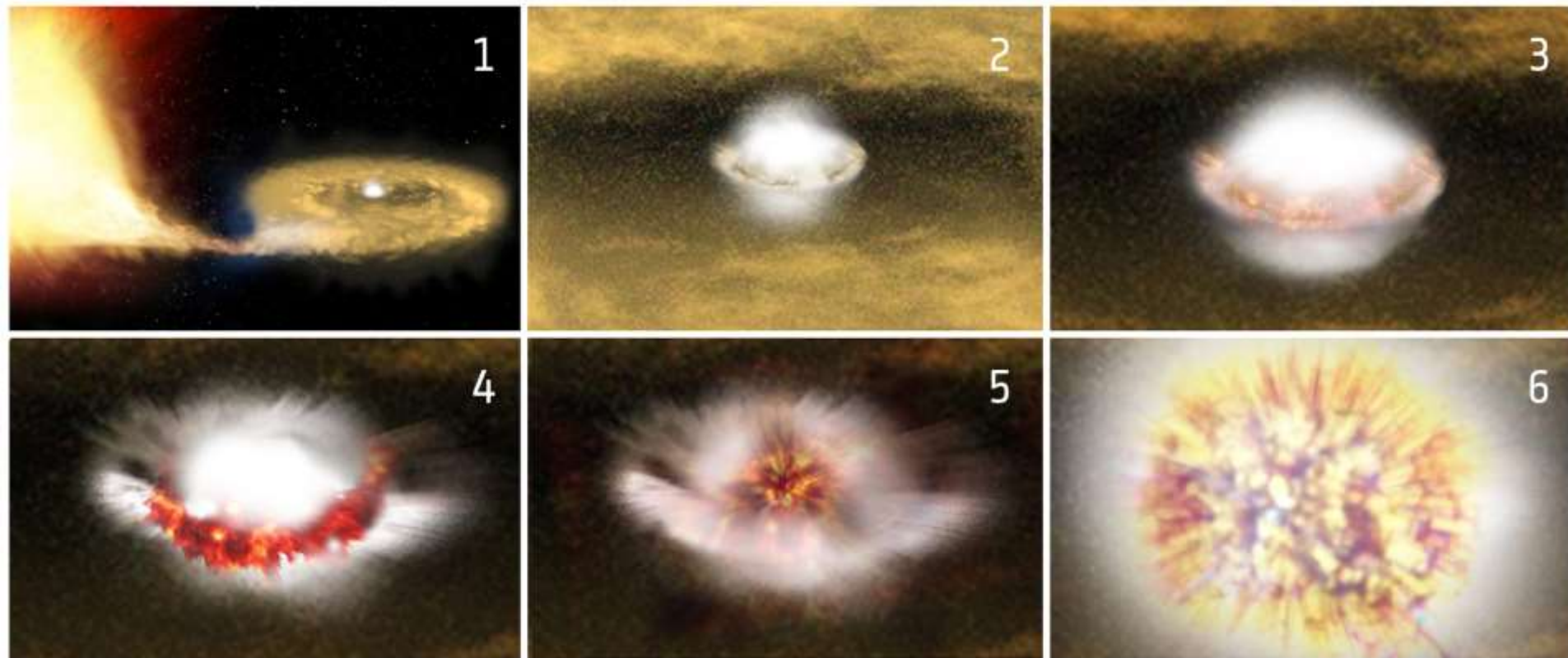
550 000 000 let: $T < 200$ K, $E < 20$ meV



7 000 000 000 let: zrychlená expanze

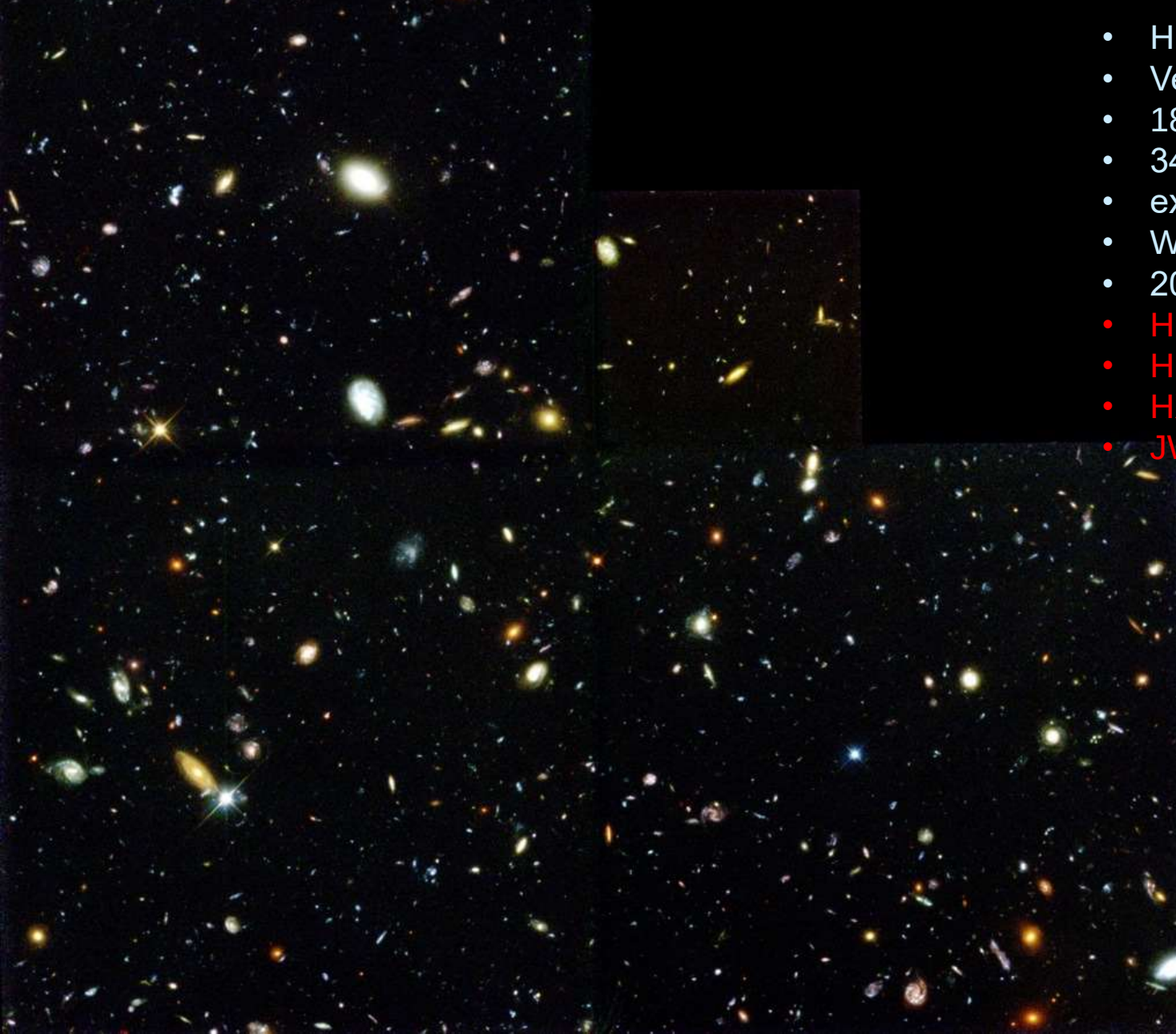


7 000 000 000 let: zrychlená expanze



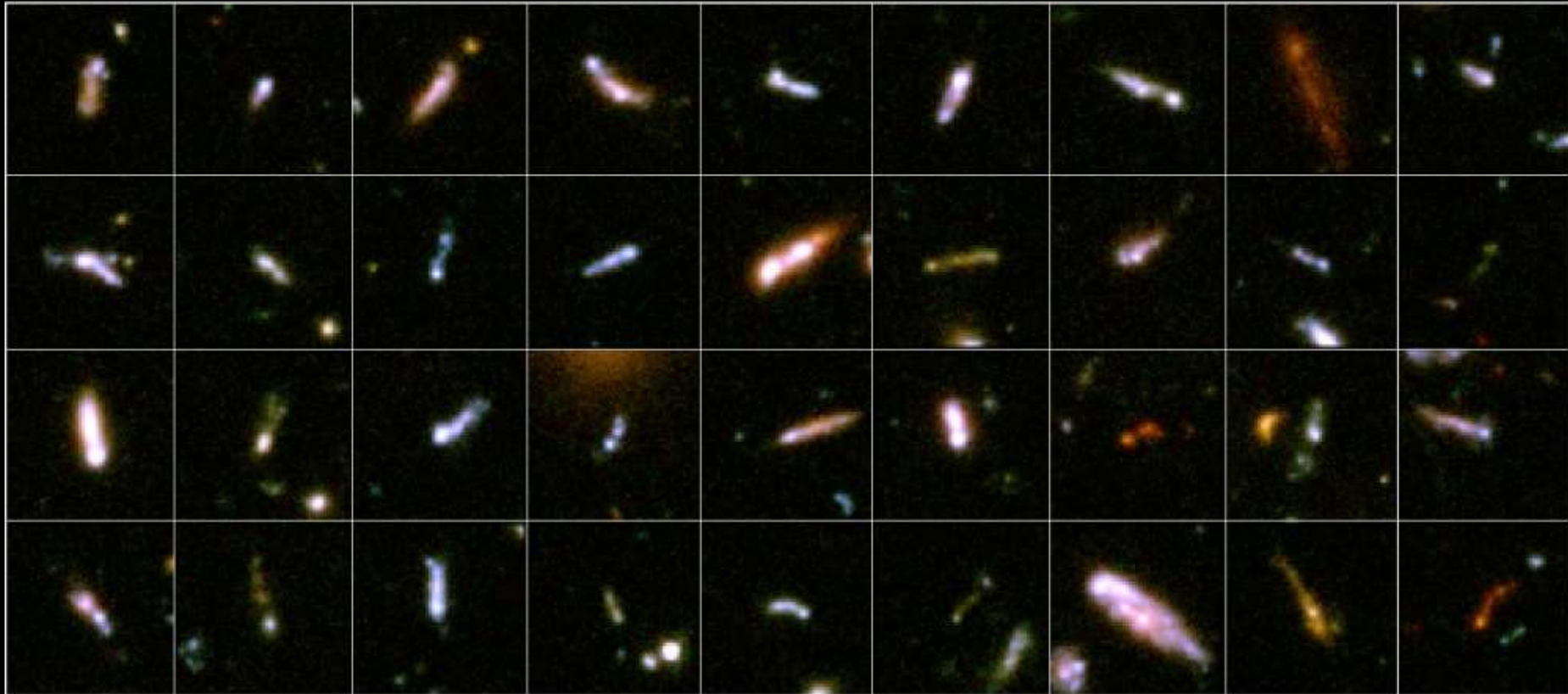
Supernovy Ia, které umožnily objev zrychlené expanze

14 000 000 000 let: současnost

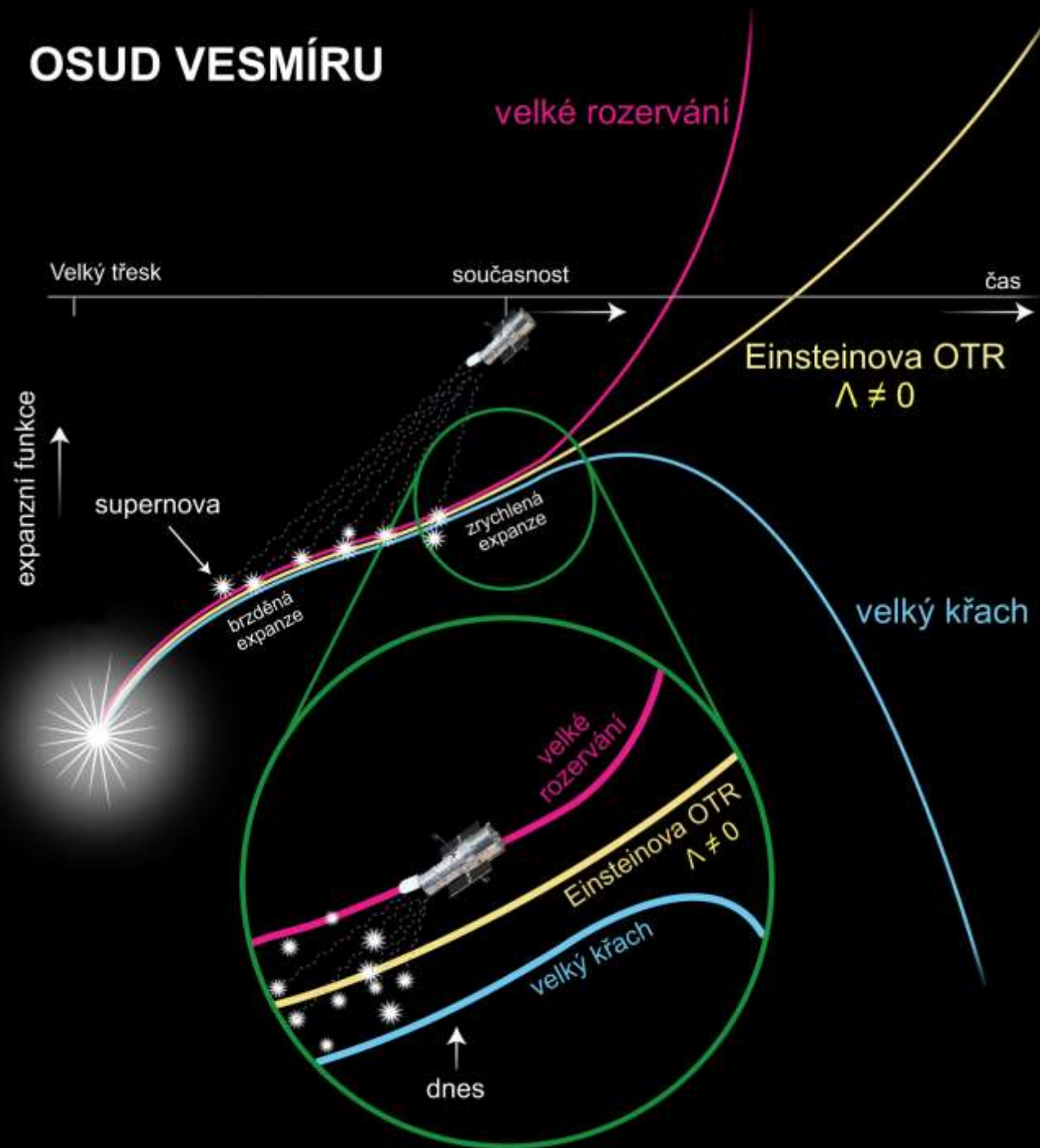


- Hubblevo hluboké pole
- Velká medvědice: 2,5"
- 18. – 28. 12. 1995
- 342 snímků
- expozice 15 až 40 minut
- WFPC2
- 2000 galaxií!
- HDFS (1998)
- HUDF (2004)
- HXDF (2012)
- JWDF (2023)

Galaktičtí pulci (HUDF)



OSUD VESMÍRU



Tabulka kosmologických parametrů (WMAP, CBI, ACBAR, 2dF, Planck)

parametr	označení	hodnota	poznámka
Hubbleova konstanta	H	$70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$	
čas rekombinace	z_{rec}	$z \sim 1\,100$	$\sim 400\,000 \text{ let}$
čas reionizace	z_{ion}	$z \sim 20$	$t_{\text{ion}} \sim 550 \times 10^6 \text{ let}$
podíl tlak/hustota pro temnou energii	w	~ -1	
podíl baryonové hmoty	Ω_B	5 %	
podíl temné hmoty	Ω_{DM}	27 %	
podíl temné energie	Ω_Λ	68 %	
podíl záření	Ω_R	0,046 %	
podíl hmotných neutrin	Ω_N	$\sim 0,1 \%$	dolní hranice
celková hmota-energie	Ω_{TOT}	~ 1	snad plochý (1)
stáří vesmíru	t	$13,8 \times 10^9 \text{ let}$	

Tabulka kosmologických parametrů (WMAP, CBI, ACBAR, 2dF, Planck)

parametr	označení	hodnota	poznámka
Hubbleova konstanta	H	$\sim 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$	
čas rekombinace	z_{rec}	$z \sim 1\,100$	$\sim 400\,000 \text{ let}$
čas reionizace	z_{ion}	$z \sim 20$	$t_{\text{ion}} \sim 550 \times 10^6 \text{ let}$
podíl tlak/hustota pro temnou energii	w	~ -1	
podíl baryonové hmoty	Ω_{B}	5 %	
podíl temné hmoty	Ω_{DM}	27 %	
podíl temné energie	Ω_{Λ}	68 %	
podíl záření	Ω_{R}	0,046 %	
podíl hmotných neutrin	Ω_{N}	$\sim 0,1 \%$	dolní hranice
celková hmota-energie	Ω_{TOT}	~ 1	snad plochý (1)
stáří vesmíru	t	$13,8 \times 10^9 \text{ let}$	