Početni uslovi: kosmološka inflacija, 2. deo

25. 09. 2015.

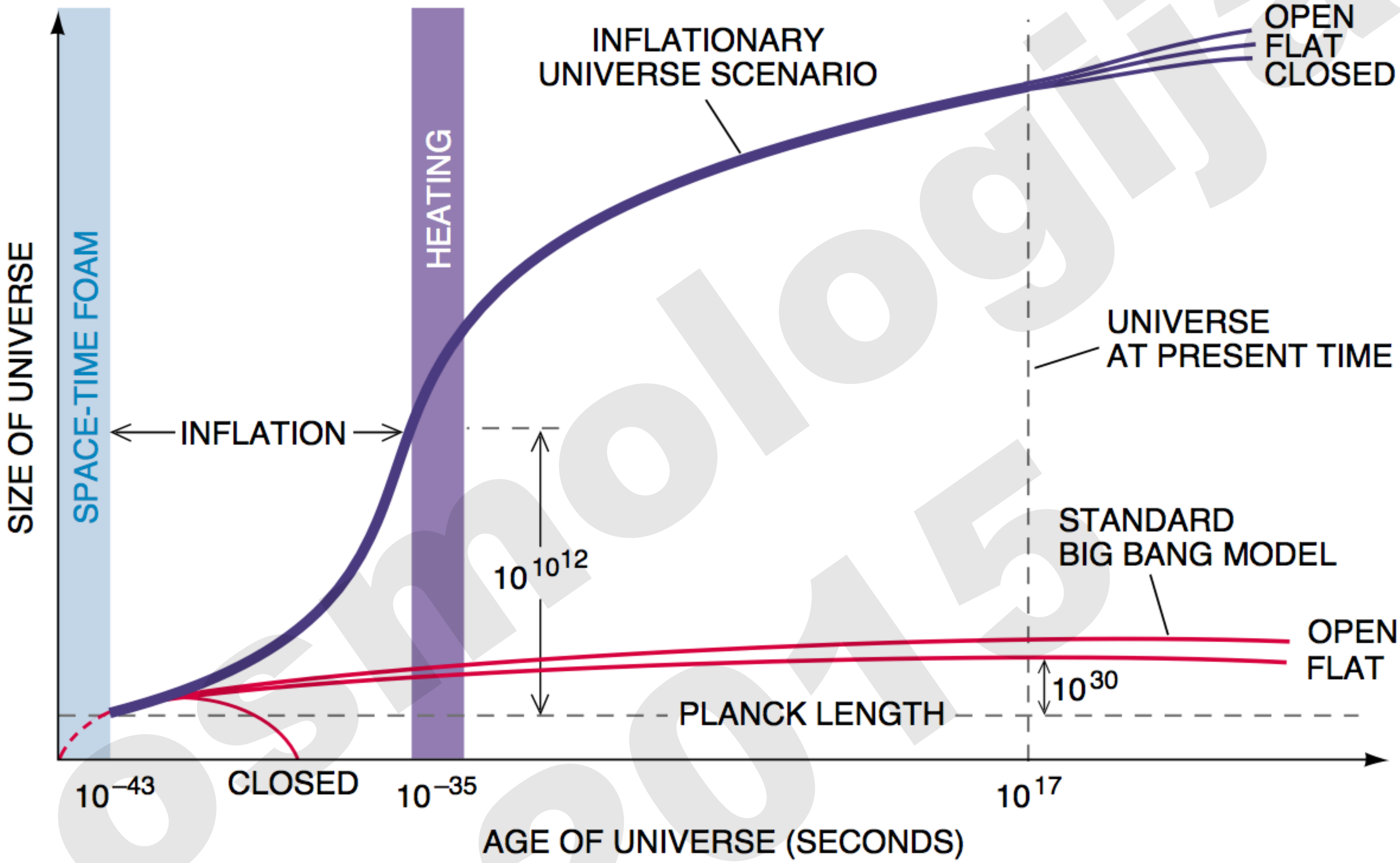

GRANDMA, PHYSICISTS HAVE DISCOVERED DEFINITIVE EVIDENCE OF INFLATION!
REALLY? DID THOSE SCIENTISTS FINALLY BUY THEIR GROCERIES?
BREAD 2.00 7.99
YOU SAY TOMATO I SAY 3.00 EACH
$$$
5.99 GUM
MILK 2.00 5.99
$
TORTILLAS 1.00 LB 2.00 EACH
PABLO STANLEY

Problemi klasične kosmologije

- Zašto je univerzum na velikoj skali homogen i izotropan? (**problem horizonta**)
- Zašto je univerzum na velikoj skali toliko blizu ravnog? (**problem ravnoće**)
- Zašto ne vidimo magnetne monopole (**problem monopola**)?

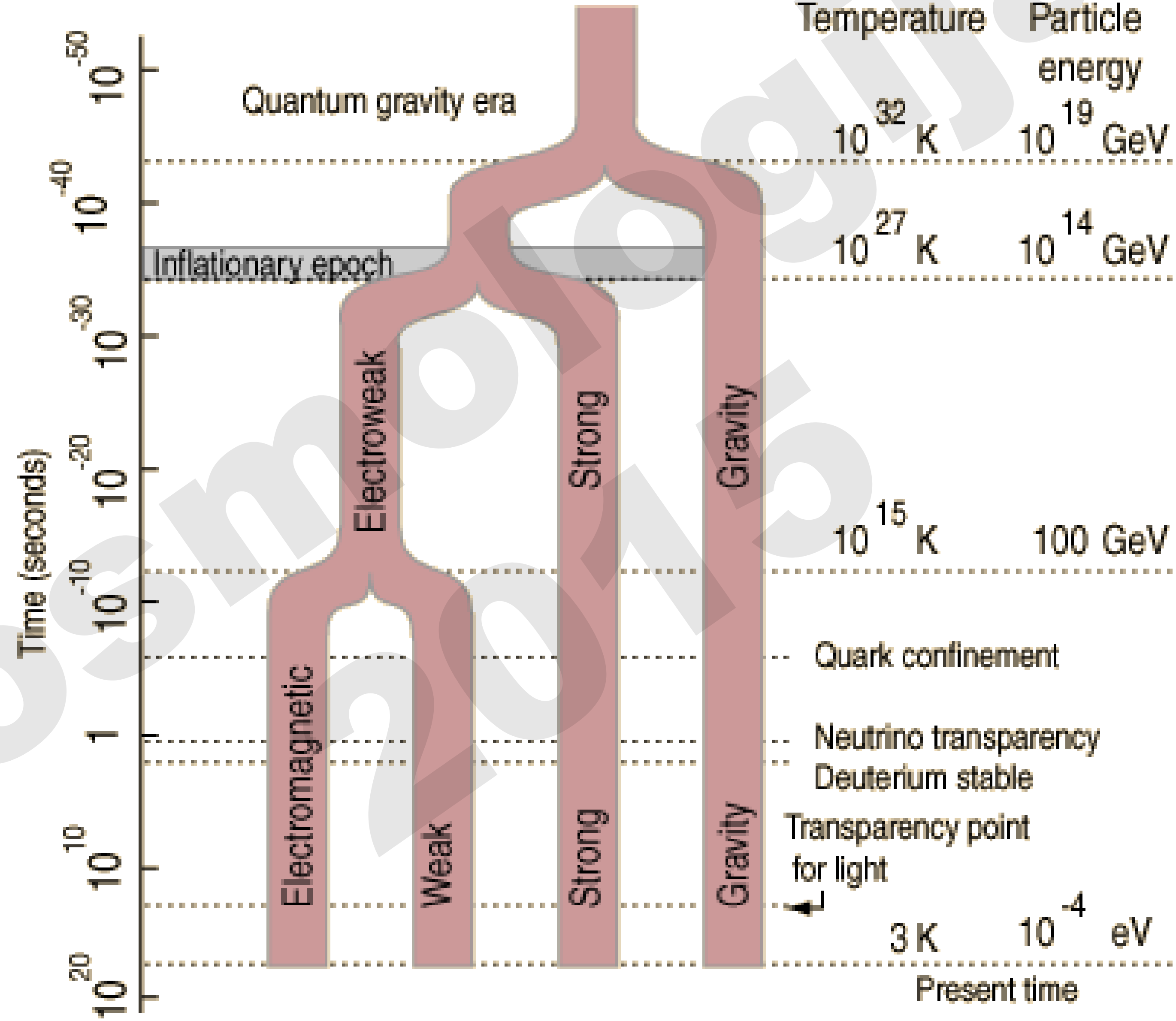
- + pojedina „filozofska“ pitanja:

- Gde je poreklo prvih odstupanja od homogenosti?
- Odakle potiče niska početna entropija svemira?
- Kako objasniti druga „fina podešavanja“ svemira za nastanjivost?
- Zašto imamo samo 3 „velike“ prostorne dimenzije?

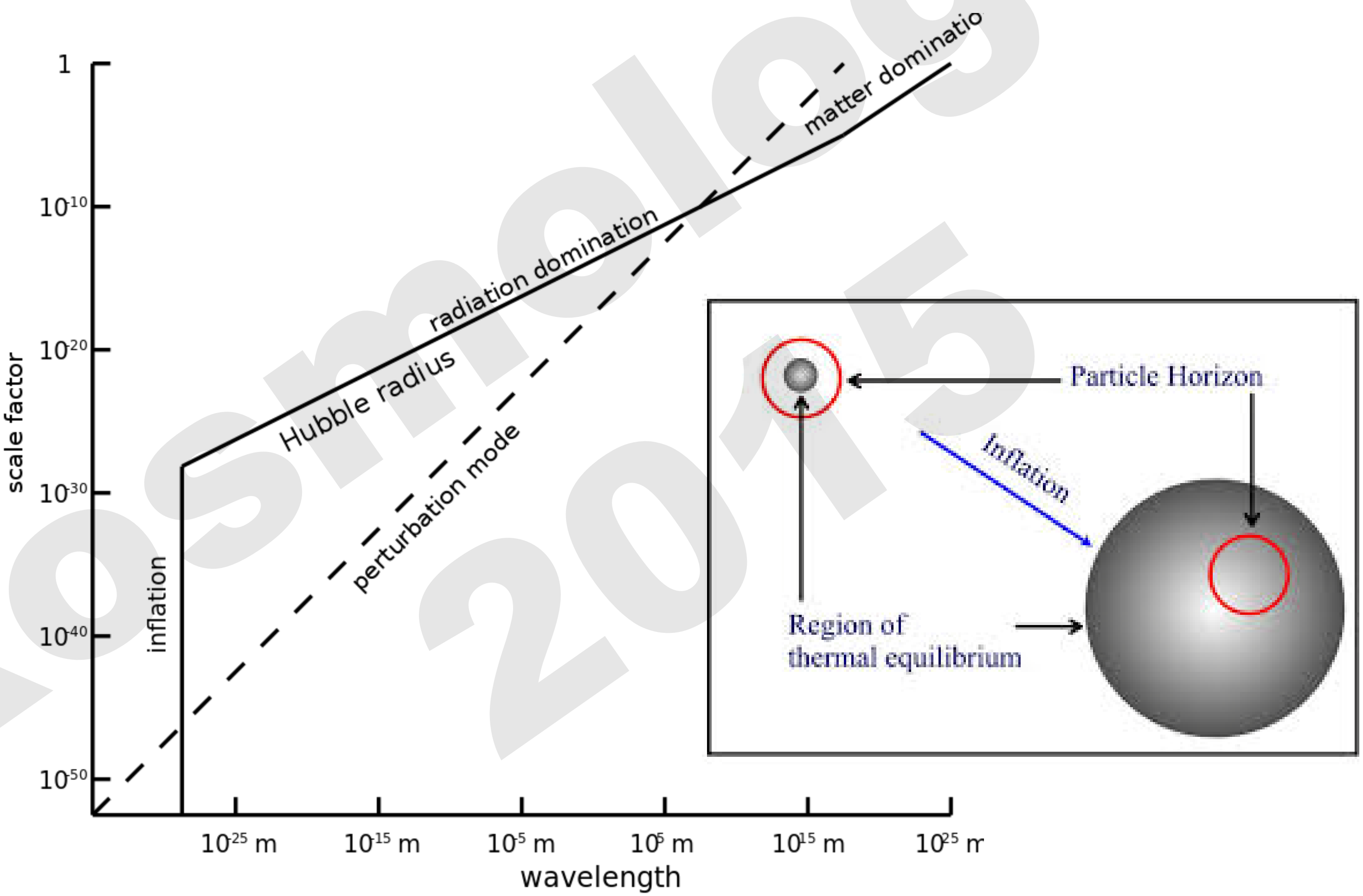


Kosmološka inflacija je eksponencijalno širenje svemira u veoma, veoma ranoj fazi:

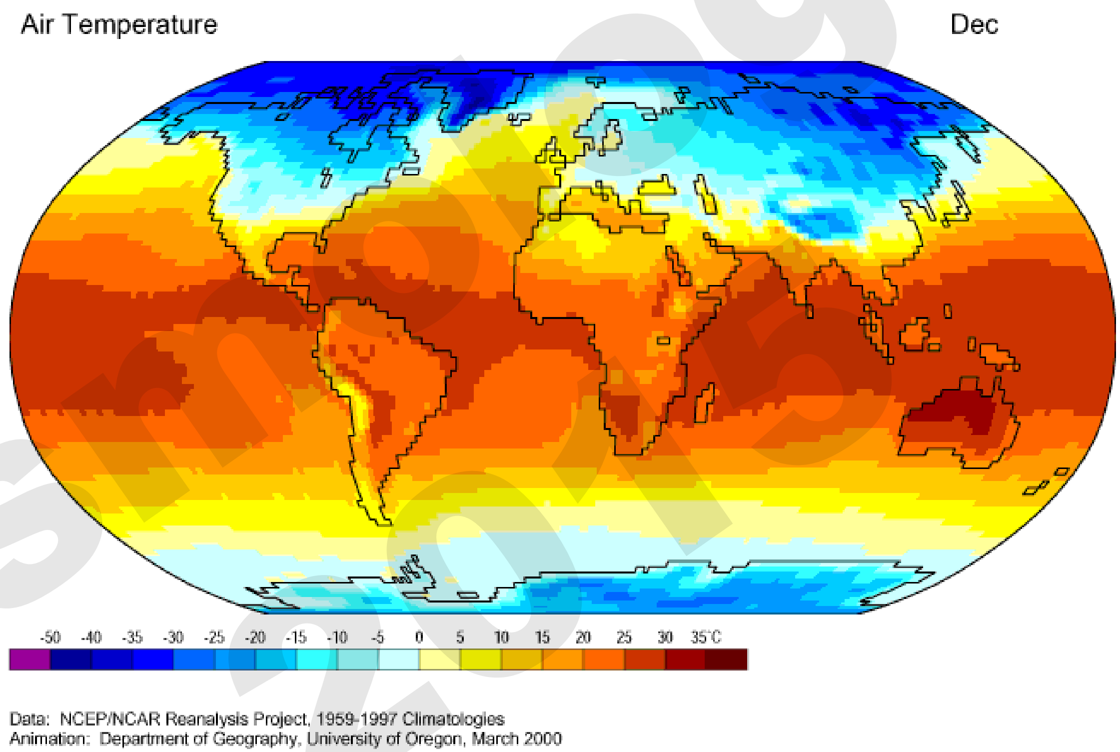
$$a \sim e^{Ht}$$


Temperature
Particle energy
Quantum gravity era
10^{32} K
10^{19} GeV
10^{27} K
10^{14} GeV
Inflationary epoch
10^{15} K
100 GeV
Quark confinement
Neutrino transparency
Deuterium stable
Transparency point for light
3 K
10^{-4} eV
Present time
Time (seconds)
10^{-50}
10^{-40}
10^{-30}
10^{-20}
10^{-10}
1
10^{10}
10^{20}
Electroweak
Strong
Gravity
Electromagnetic
Weak
Strong
Gravity

Homogenost, perturbacije



Šta je neophodno za inflaciju?



SKALARNO POLJE!!!

Skalarno polje manifestuje

SNS

(Spontano Narušenje Simetrije!)

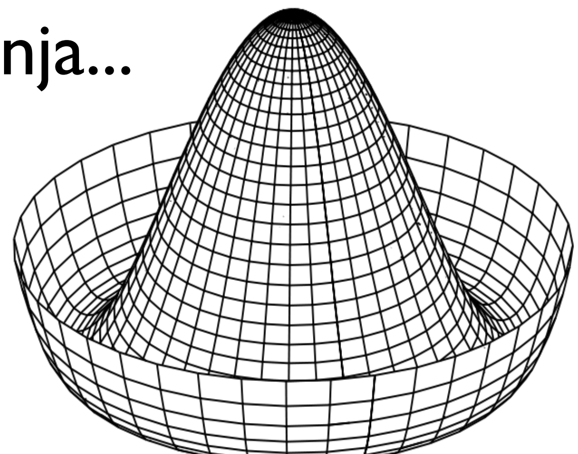
- Lagranžijan skalarnog polja ϕ: $L = \partial^{\mu}\phi\,\partial_{\mu}\phi - V(\phi)$
- Goldstonov „meksički šešir" potencijal:

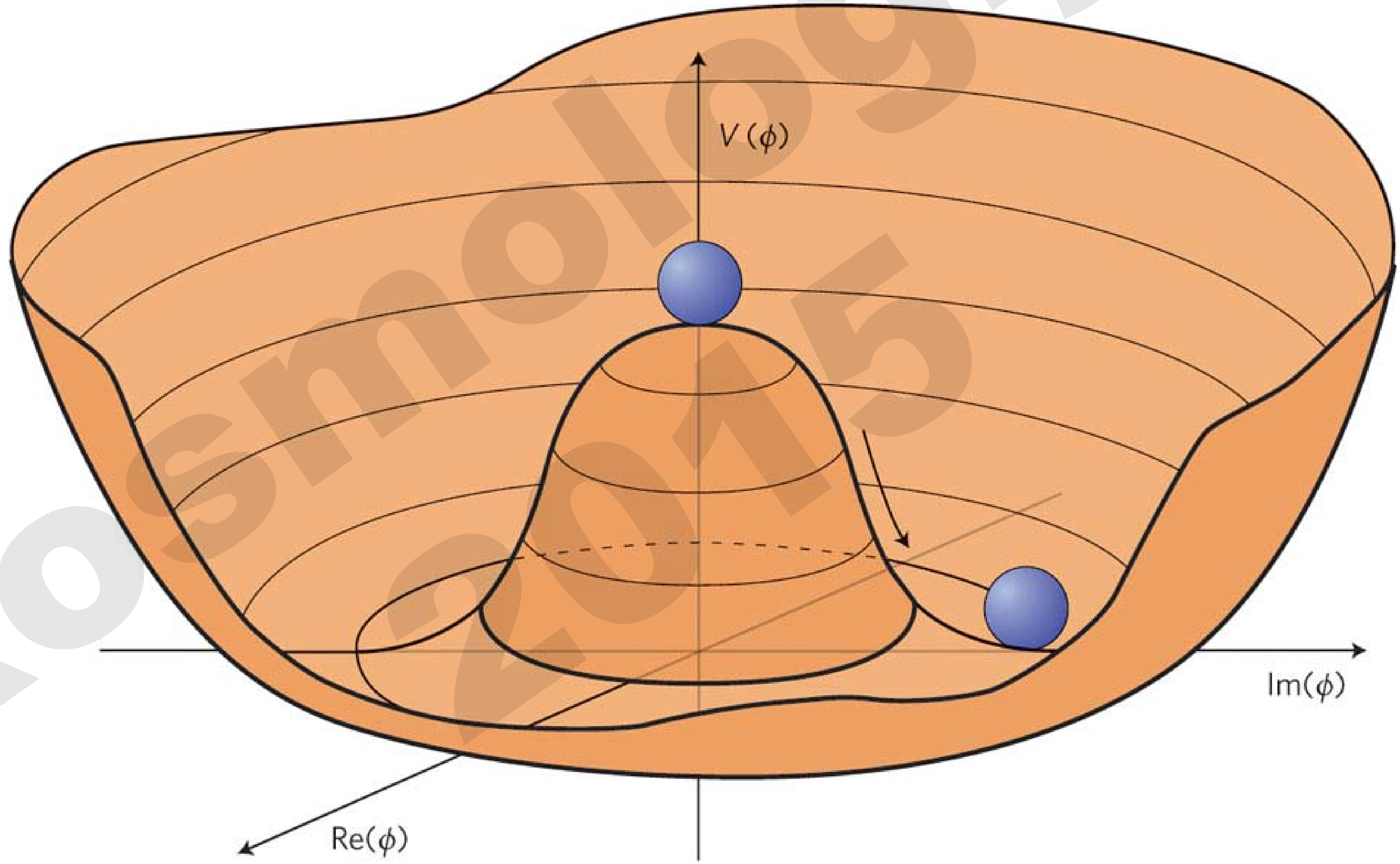
$$V(\phi) = |\phi|^4 - 10|\phi|^2$$

- Beskonačan broj vakuumskih stanja...

$$\phi = \sqrt{5}\,e^{i\theta}, \qquad \theta \in [0, 2\pi]$$

- ...i jedno nestabilno vakuumsko stanje ϕ = 0 sa U(1) simetrijom koja je spontano narušena!

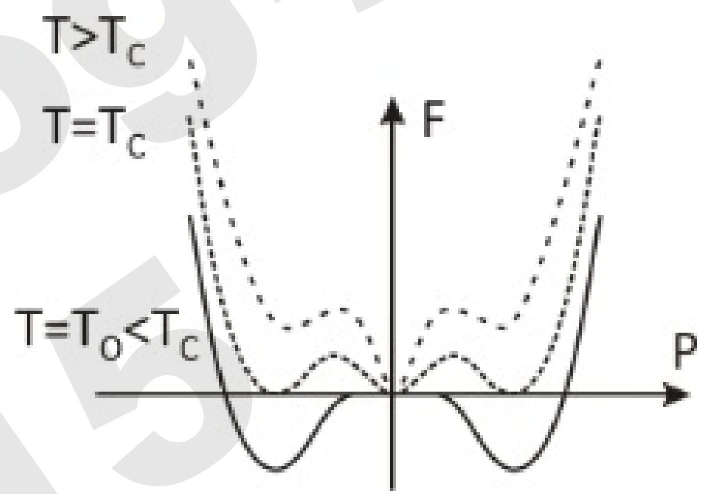


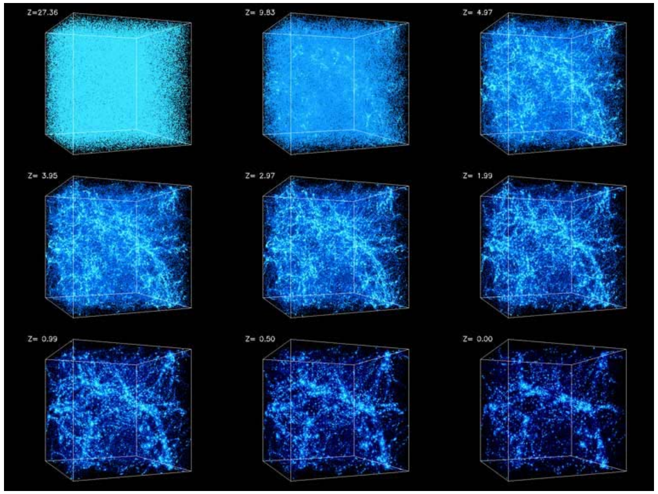


V (ϕ)
Im(ϕ)
Re(ϕ)

SNS je svuda oko nas!

- Feromagnetizam (zavisno od T!)
- Superprovodljivost, superfluidnost
- Ekscitacije u plazmi („plazmoni“)
- Nastanak strukture na velikoj skali (narušenje simetrije homogenosti i izotropije!)

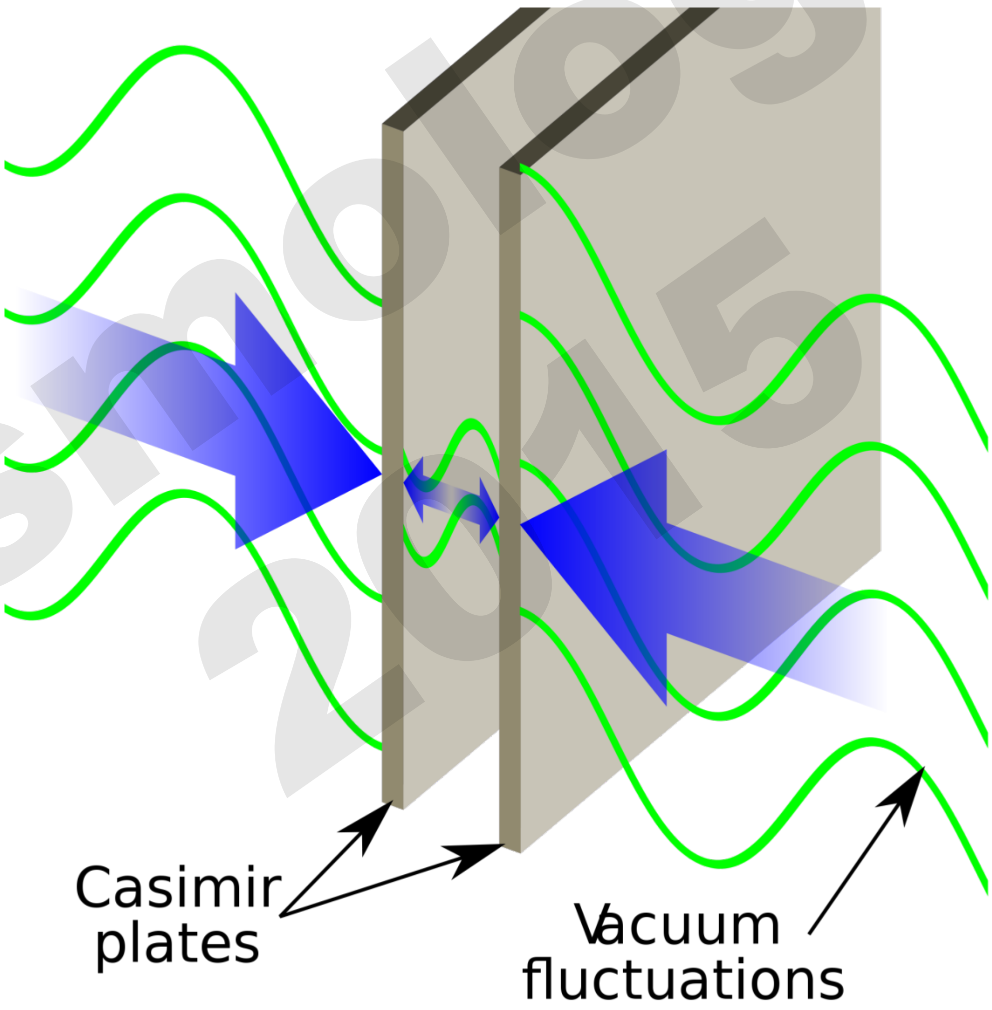




Ali koje skalarno polje je **inflatonsko** polje?

- „Mali“ problem – u prirodi imamo
  - elektromagnetsko (+ slabo, nuklearno) **vektorsko** polje ☹
  - gravitaciono **tenzorsko** polje ☹
- Nigde skalarnog polja... bar ne do 2012!
  - Higgsovo **skalarno** polje ☺
- Dugo vremena nada kosmologa...
- Međutim, danas izgleda da Higgsovo polje ne može da bude inflatonsko – ostaje da ga tražimo.
- Većina teoretičara se ne uzbuđuje oko ovoga (supersimetrične teorije, npr. M-teorija, predviđaju još gomilu skalarnih polja).

Uzgred, da je vakuum ispunjen raznim kvantnim poljima znamo odavno...



Različite vrste inflacije...

- ...uglavnom se razlikuju samo po potencijalu skalarnog polja $V(\phi)$!
- **„Stara“ inflacija**: Guth (1981)
  - fazni prelaz/tuneliranje u vakuumu
- **„Nova“ inflacija**: Linde, Albreht, Steinhart (1983)
  - „sporo kotrljajući“ ϕ^4 potencijal
- **„Haotična“/„večna“ inflacija**: Linde (1984)
  - „haotični“ ϕ^2 potencijal

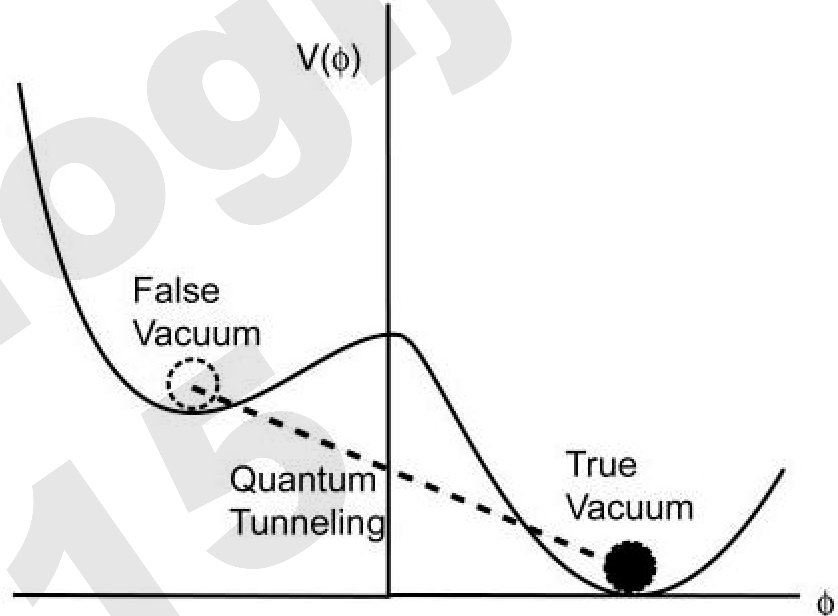
\+

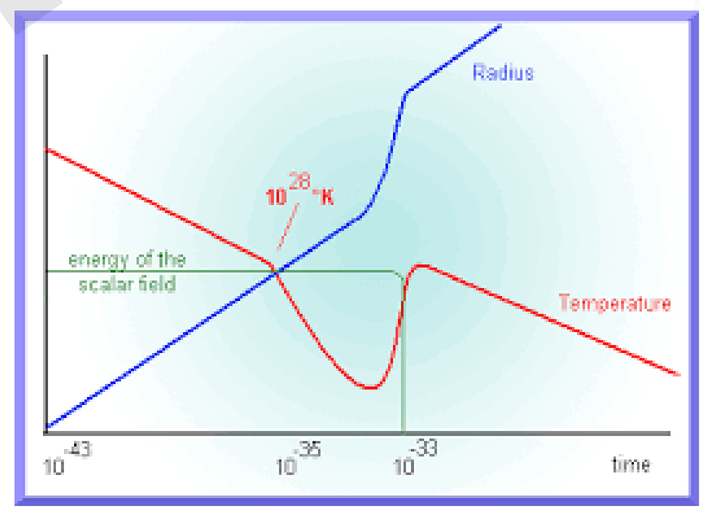
- otvorena, hibridna, topla, mlaka (!), blablabla...

Vreme za pauzu!

Stara inflacija

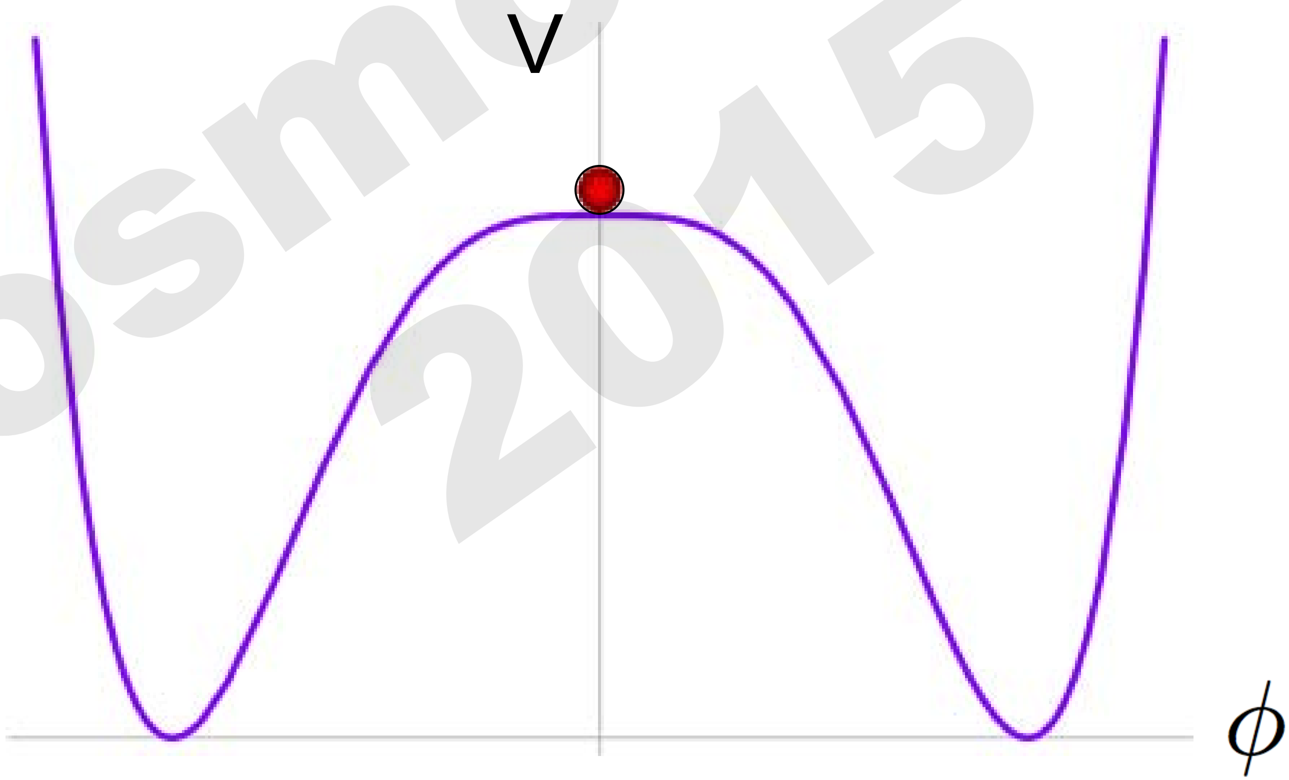
- Sa opadajućom T, svemir se našao zarobljen u lažnom vakuumu.
- Tuneliranje u pravi vakuum obezbedilo energiju za inflatorno širenje.
- Nukleacija mehurića pravog vakuuma...
- **Ne radi!** nukleacija proizvodi nehomogenosti na kraju inflacije koje bi se videle i danas. ☹





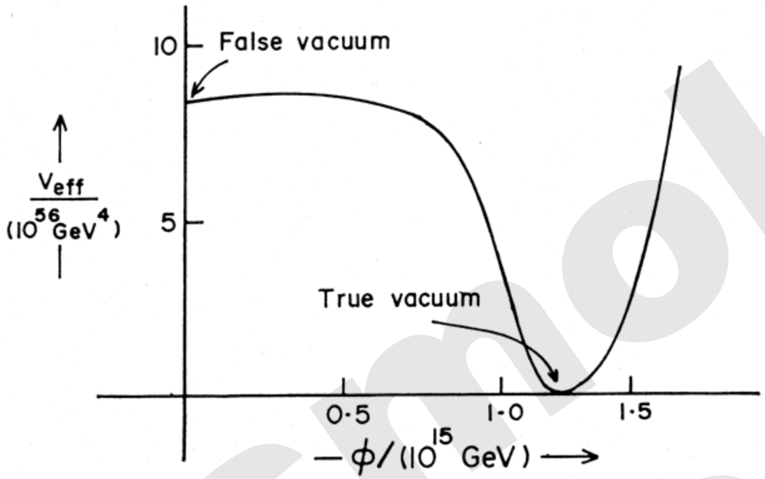
„Nova inflacija“ (1982-83)

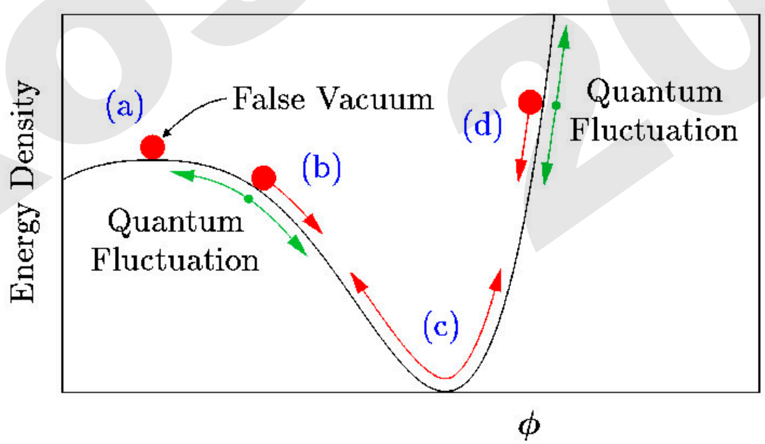
$$V = g^4 \left(\phi^4 \ln \phi - \phi^4/4 + 1/4\right)$$



$$m_{Pl} \equiv \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 1.2\times 10^{19}\ \mathrm{GeV}/c^2$$

„Sporo kotrljanje"





- Jednačine kretanja:

$$H^2 = \frac{8\pi}{3m_{Pl}^2}\left[V(\phi) + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2\right]$$

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -\frac{dV(\phi)}{d\phi}$$

- Videli smo da važi

$$\ddot{a} > 0 \Rightarrow p < -\frac{\rho}{3} \Leftrightarrow \dot{\phi}^2 < V(\phi)$$

- **Do inflacije dolazi kadgod i gdegod potencijalna energija dominira!**

Parametri sporog kotrljanja

- Uobičajene aproksimacije jednačina kretanja:

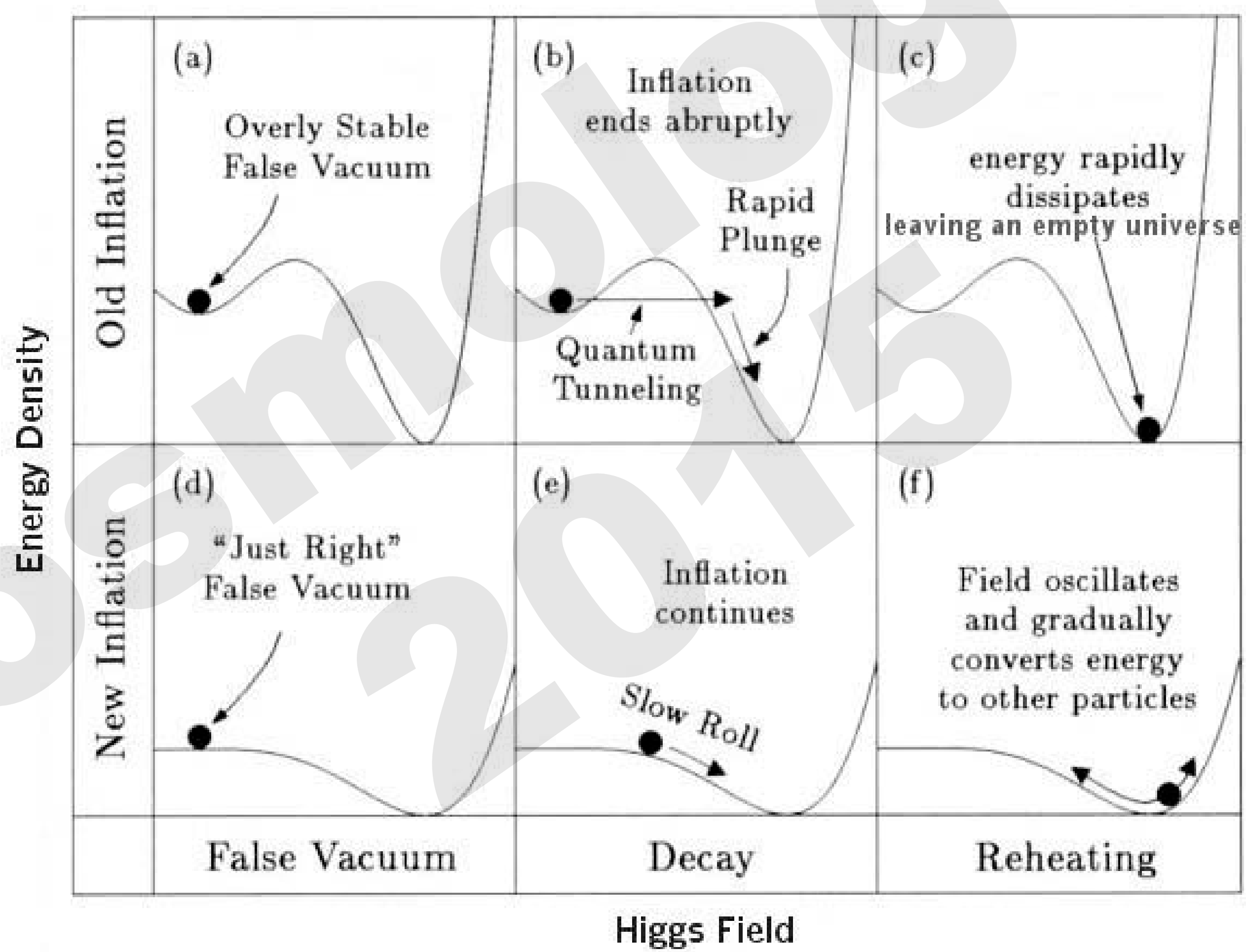
$$H^2 \approx \frac{8\pi}{3m_{Pl}^2} V(\phi) \quad ; \quad 3H\dot{\phi} \approx -\frac{dV}{d\phi}$$

- Uvode se parametri sporog kotrljanja:

$$\varepsilon(\phi) \equiv \frac{m_{Pl}^2}{16\pi}\left(\frac{V'}{V}\right)^2 \quad ; \quad \eta(\phi) \equiv \frac{m_{Pl}^2}{8\pi}\frac{V''}{V}$$

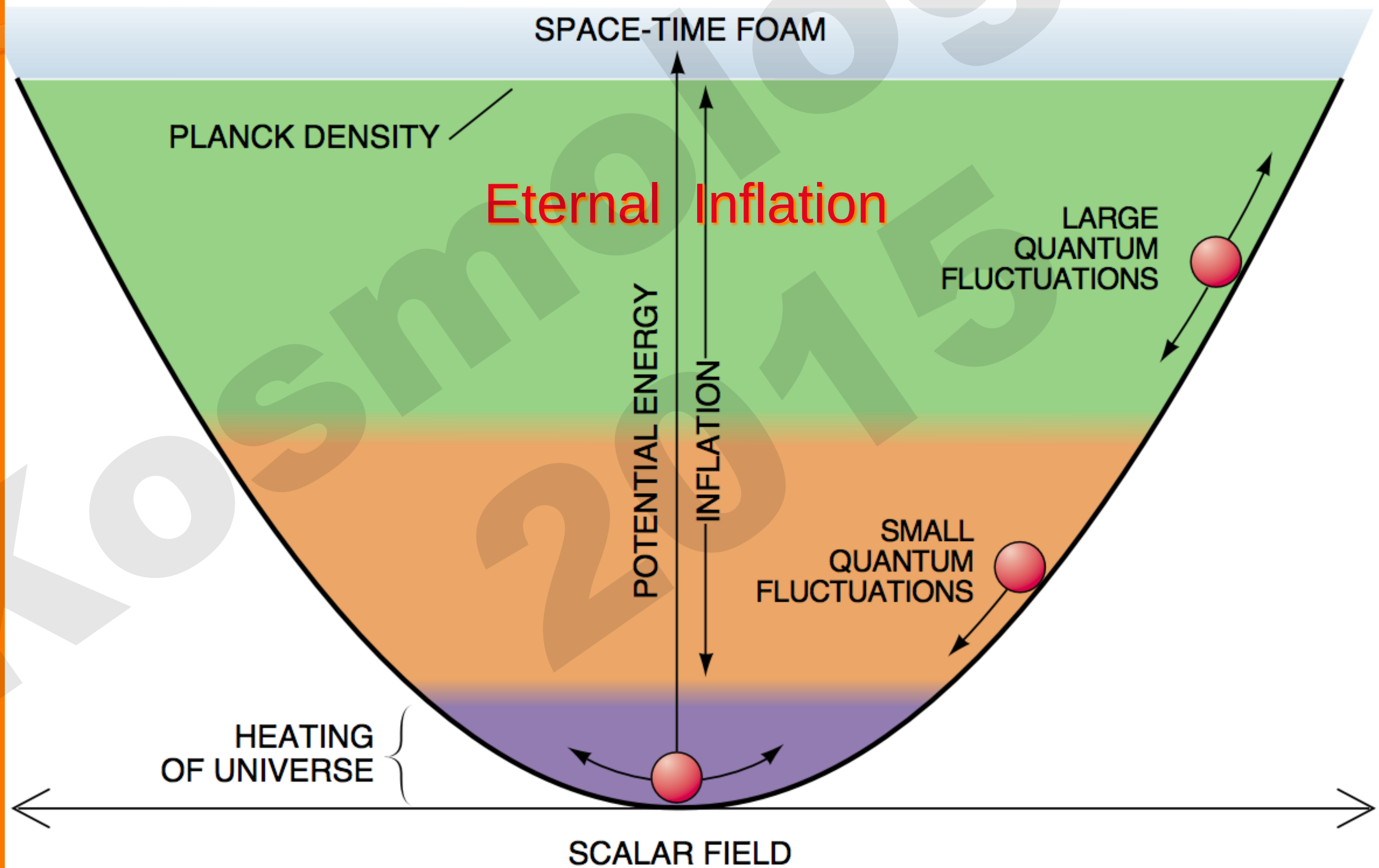
- (prvi meri nagib potencijala, drugi zakrivljenosti)
- Do inflacije dolazi za $\varepsilon \ll 1; |\eta| \ll 1$

Stara vs. nova inflacija

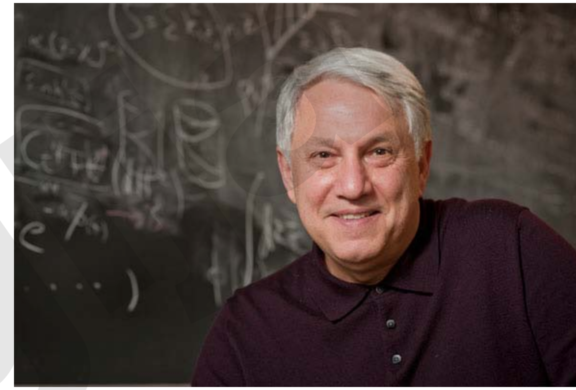


Haotična inflacija (1984)

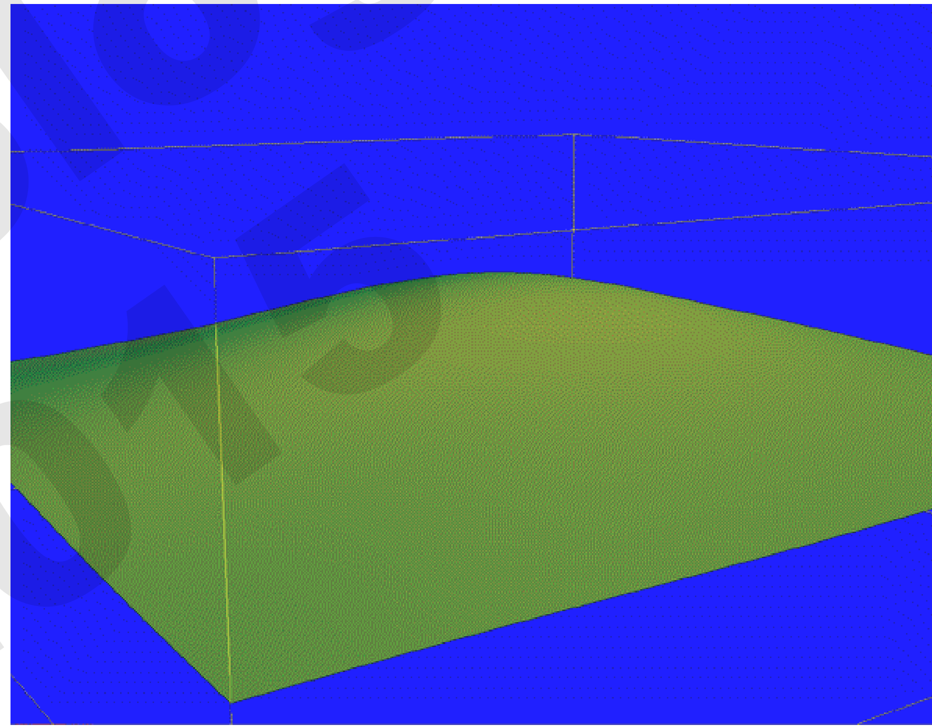
$$V(\phi) = \frac{m^2}{2}\phi^2$$



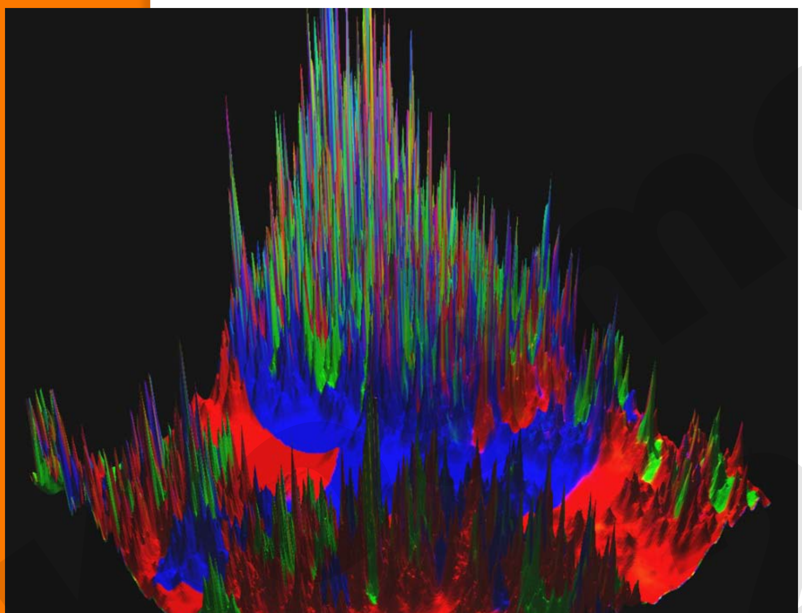
Lindeov ključni uvid

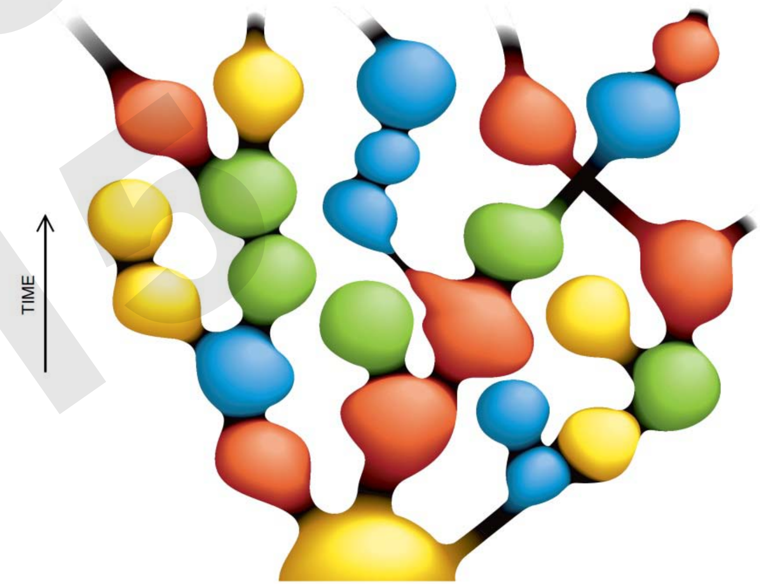


- Uslovi za inflaciju su **uvek** zadovoljeni... **negde**!
- Regioni koji inflatiraju rastu na račun ostatka prostora...
- ...povećavajući verovatnoću da je slučajno izabrana tačka u regionu inflacije!
- $\Rightarrow$ dovodi do fraktalnog **multiverzuma**!



Haotična/večna inflacija je **generičko** rešenje jednačina kretanja...





...čime se otvara perspektiva objašnjenja **finih podešavanja**!

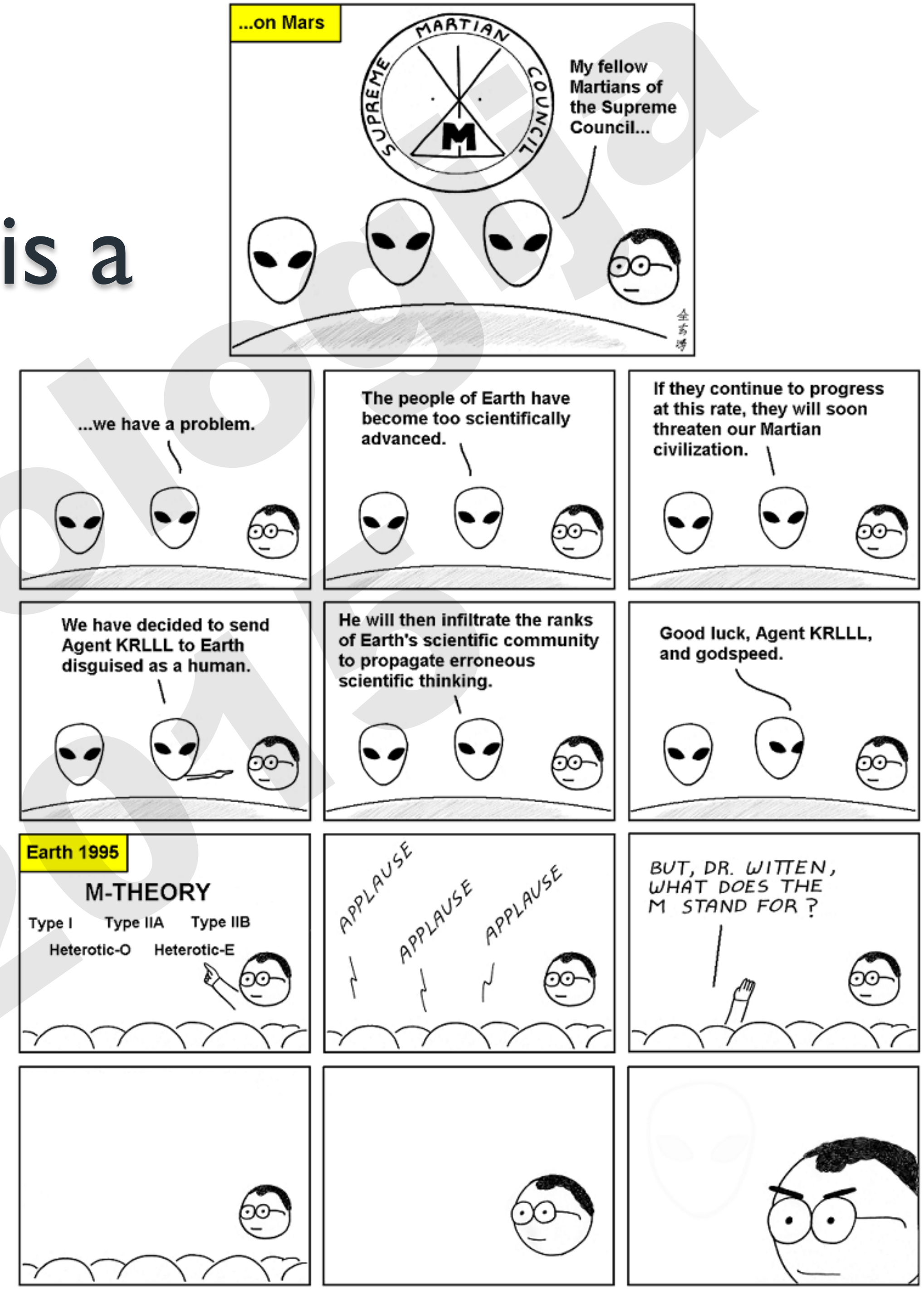
Glavna predviđanja inflacije

1. $\Omega = 1$ (do na 10^{-3} danas) - POTVRĐENO
2. spektar perturbacija skoro linearan (za male *k*) – Harison-Zeljdovičev spektar – POTVRĐENO ($n_s = 0.963 \pm 0.012$)
3. perturbacije su gausijanske – DONEKLE POTVRĐENO (SDSS)
4. nema monopola, domenskih zidova, kosmičkih struna (?) – POTVRĐENO (ali, ali...)

\+

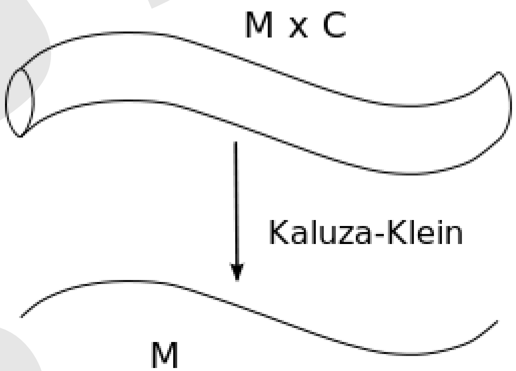
neke spekulativnije stavke...

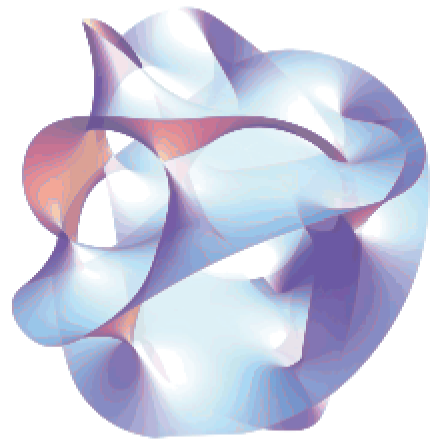
„The theory is a lie...“



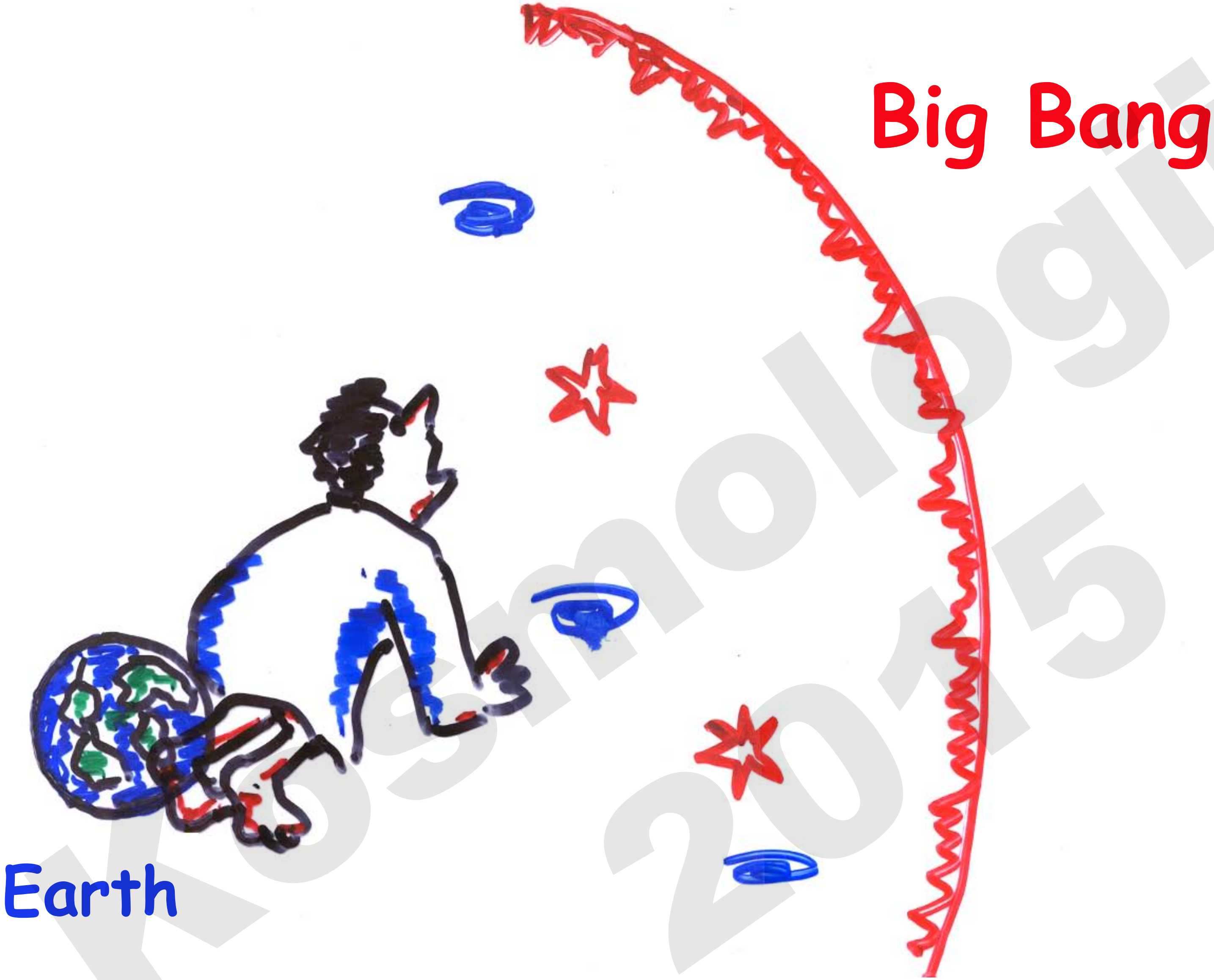
Šta se desilo sa 7 ekstra dimenzija?

- M-teorija predviđa 10+1 dimenzionalnu prostorno vremensku mnogostrukost.
- Gde je 7 preostalih prostornih dimenzija?
- **Kompaktifikacija**...
- ...se desila tokom inflacije!
- Ekstra dimenzije su ostale „zakržljale“ na Plankovoj skali.



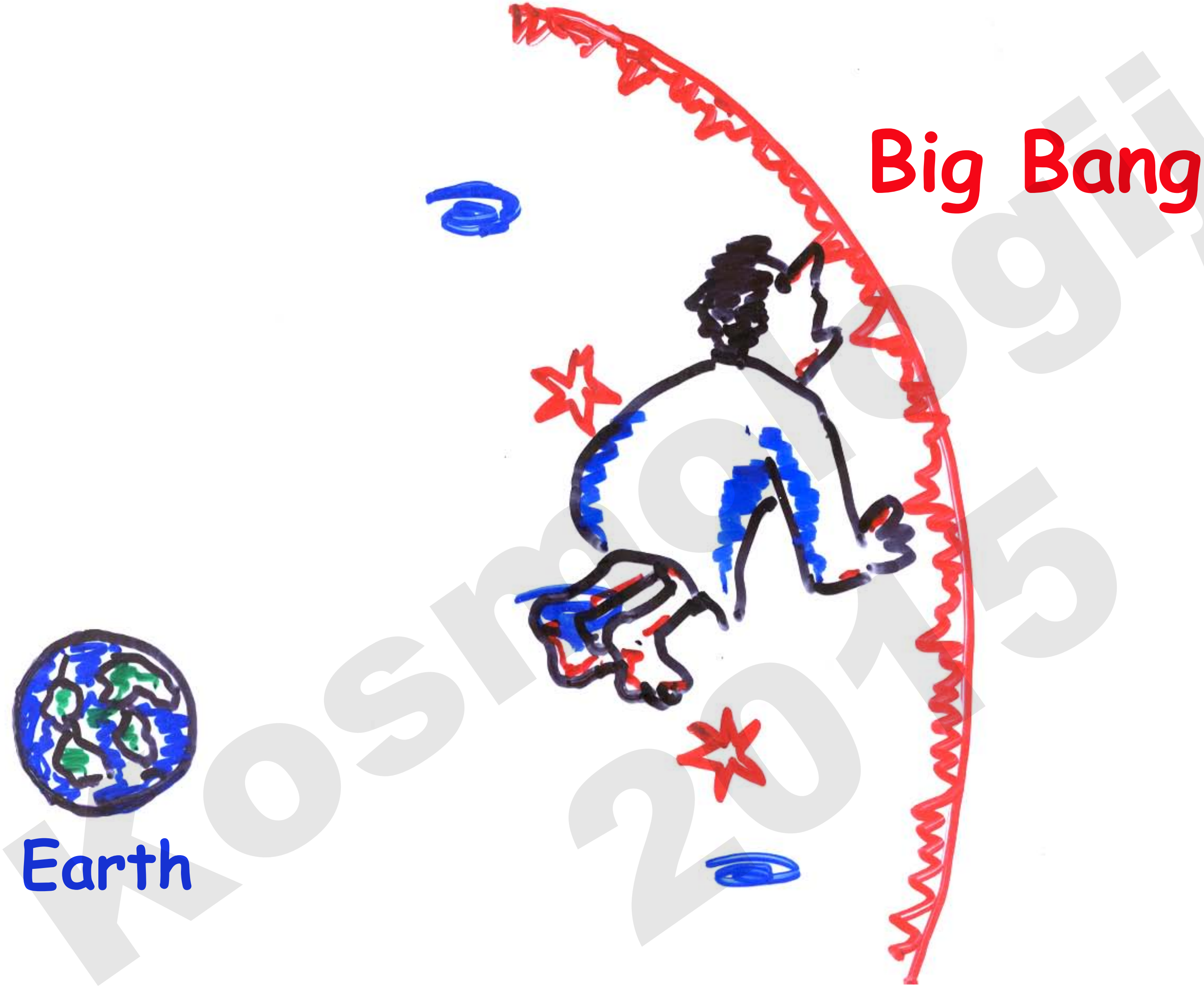


Par Lindeovih originalnih crteža i komentara...



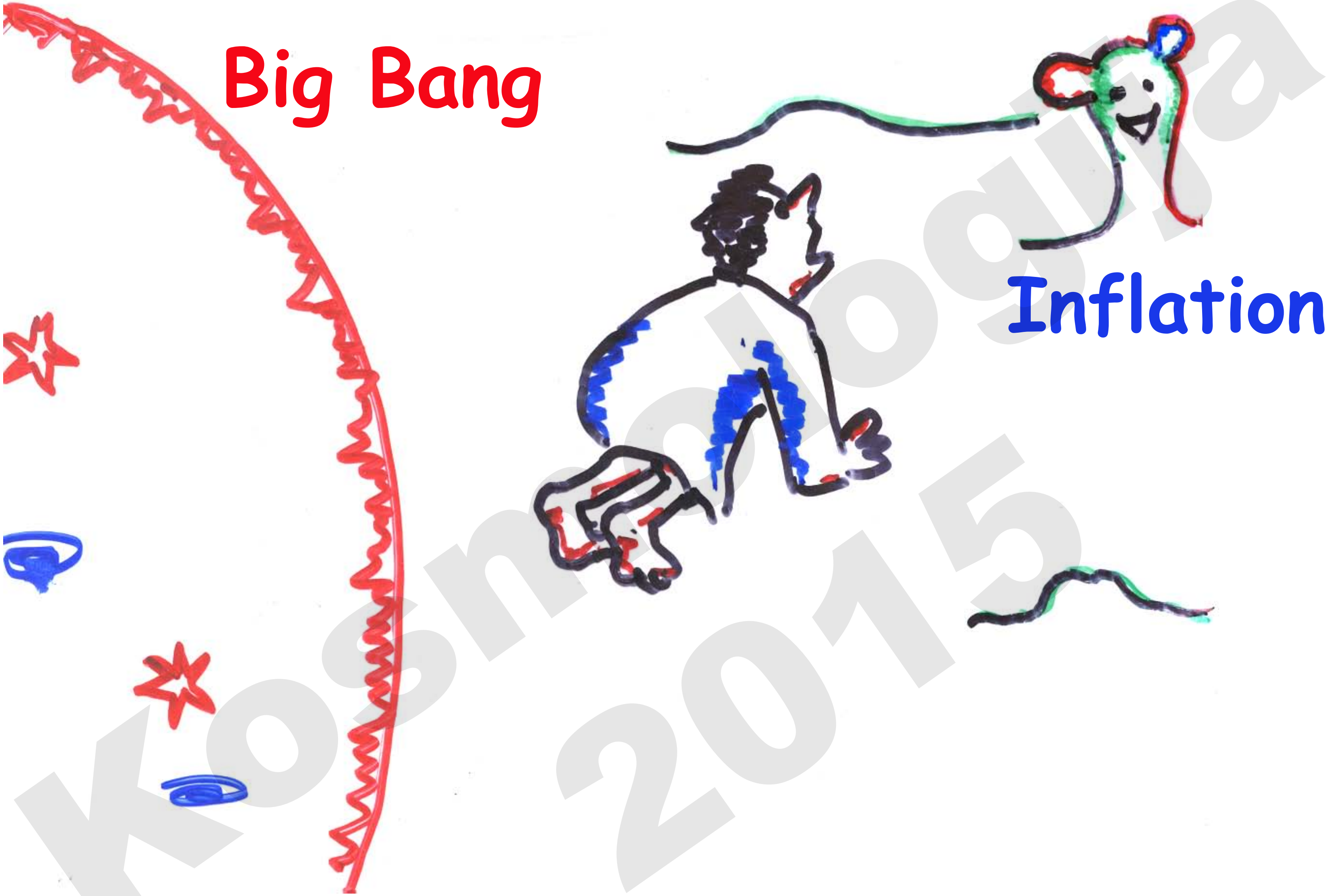
Astronomers use our universe as a “time machine”. By looking at the stars close to us, we see them as they were several hundreds years ago.

The light from distant galaxies travel to us for billions of years, so we see them in the form they had billions of years ago.



Looking even further, we can detect photons emitted 400000 years after the Big Bang. But 30 years ago everyone believed that there is nothing beyond the cosmic fire created in the Big Bang at the time t = 0.

Inflationary theory tells us that this cosmic fire was created not at the time t = 0, but after inflation. If we look beyond the circle of fire surrounding us, we will see enormously large empty space filled only by a scalar field.



If we look there very carefully, we will see small perturbations of space, which are responsible for galaxy formation. And if we look even further, we will see how new parts of inflationary universe are created by quantum fluctuations.

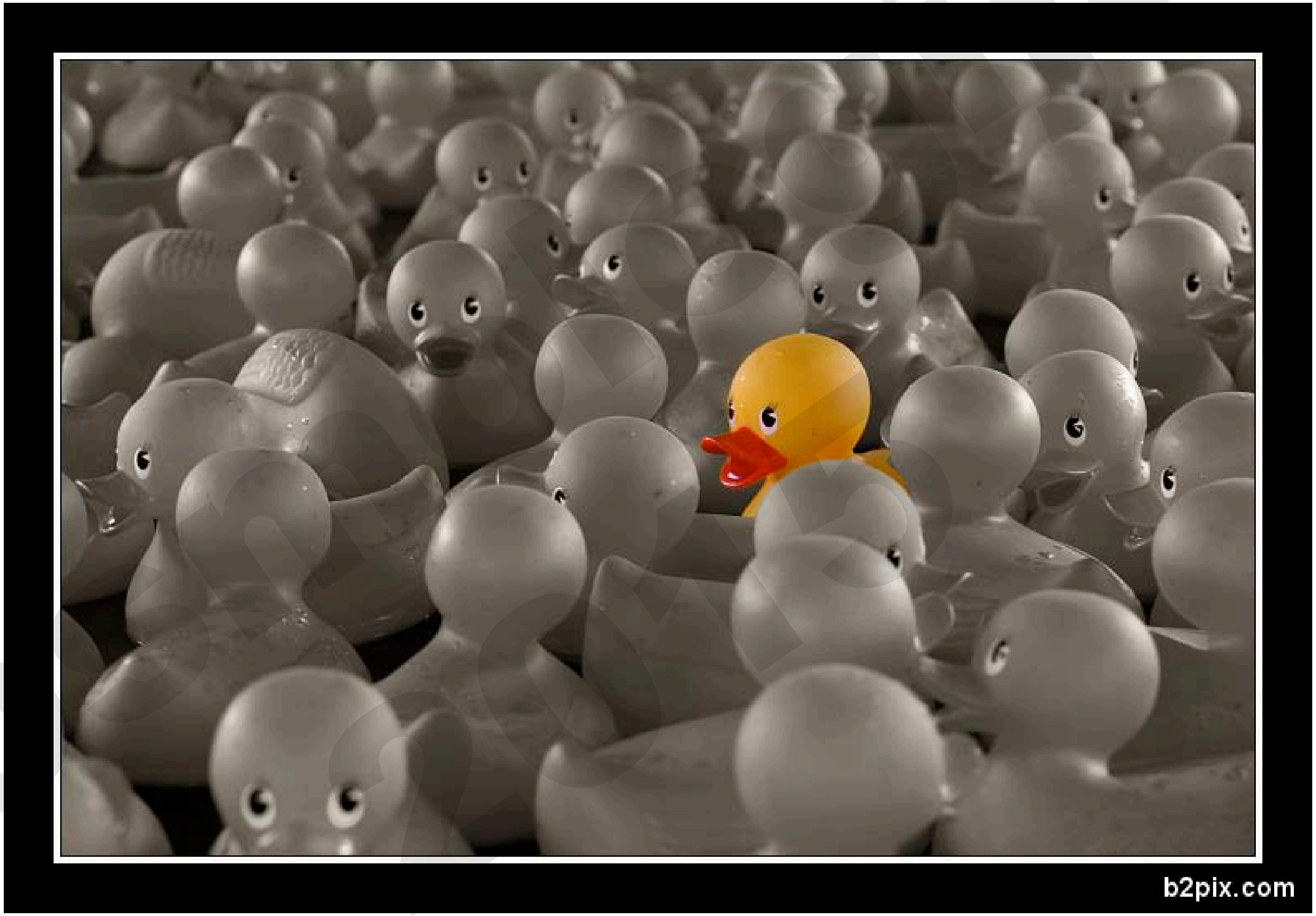
Multiverzum...

- ...se pojavljuje i u kosmološkoj inflaciji i u teoriji struna (M-teoriji).
- Usaglasiti ta dva nije lako (Linde, Susskind, Bousso et al.)!
- Ironično, multiverzum u M-teoriji je **manji** od onog kojeg predviđa inflacija (multiplicitet)!
- Problem različitih efektivnih „fizika“!

Možda oko 10^{500} različitih vakuuma!

Bousso, Polchinski 2000; Susskind 2003; Douglas, Denef 2003

Šta je posebno u vezi sa našim svemirom?



<u>**Problem:**</u> Haotična inflacija stvara beskonačno mnogo različitih univerzuma, tako da moramo da upoređujemo beskonačnosti...

"Master" jednačina za antropički pristup

- Verovatnoća da neki posmatrač bilo gde u multiverzumu izmeri karakteristiku X :

$$p(X) = \frac{\sum_n \sigma_n(X) V_n \rho_n^{\mathrm{obs}}}{\sum_n V_n \rho_n^{\mathrm{obs}}}$$

- V_n je prostovremenska zapremina, ρ_n^{obs} gustina posmatrača i

$$\sigma_n = \begin{cases} 1, & \text{if universe } n \text{ has property } X \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Pitanje: Kako odrediti ρ_n^{obs} za neku konkretnu niskoenergetsku fiziku?

Odgovor: Kroz istraživanja u astrobiologiji!

Razumevanje inflacije dovodi do ideje o stvaranju univerzuma u laboratoriji...