



Teorie strun a vesmír

Rikard von Unge

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Masarykova univerzita

19.1.2021

Teorie strun a
vesmír

Rikard von Unge

Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

Pozorování a
struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr



Kosmologie

Standardní model Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové teorie

Proč čtyři dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie strunového plynu

Pozorování a struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr



Vesmír je

HOMOGENNÍ

Kosmologie

**Standardní model
Kosmologie**

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

Pozorování a
struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr



Vesmír je

HOMOGENNÍ a **IZOTROPNÍ**

Kosmologie

**Standardní model
Kosmologie**

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

Pozorování a
struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr



Vesmír je

HOMOGENNÍ a **IZOTROPNÍ**

homogenní = stejný všude

izotropní = stejný ve všech směrech

Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

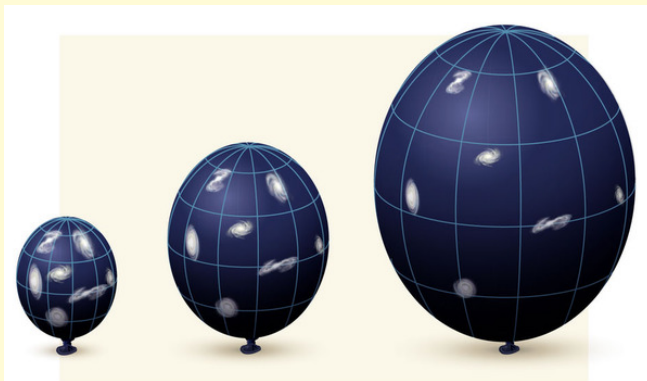
Pozorování a
struny

Inflace

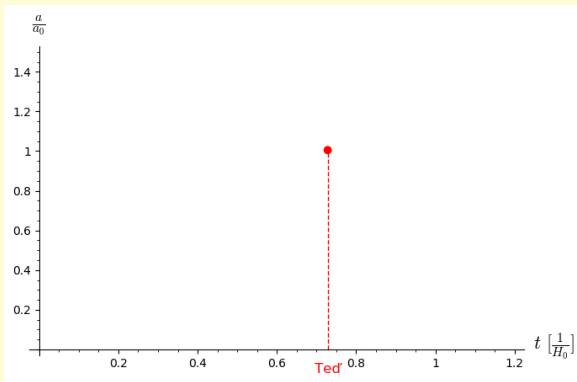
Nová fyzika

Závěr

Existuje jedna funkce, která řídí všechny vzdálenosti ve
vesmíru: $a(t)$



Můžeme $a(t)$ měřit



Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

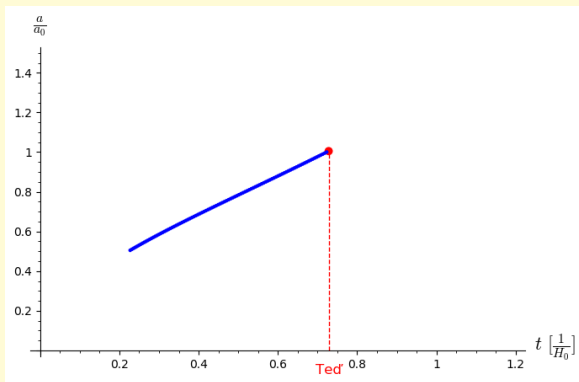
Pozorování a
struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr

Můžeme $a(t)$ měřit



Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

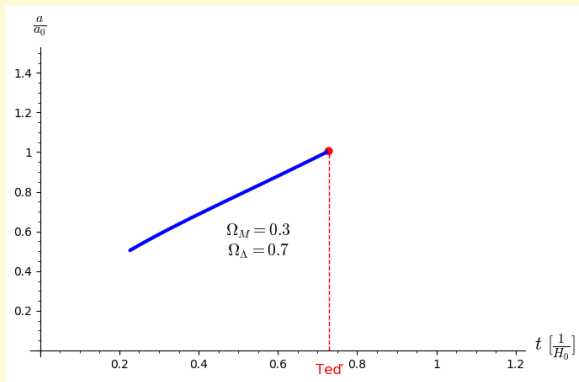
Pozorování a
struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr

Můžeme $a(t)$ měřit



Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

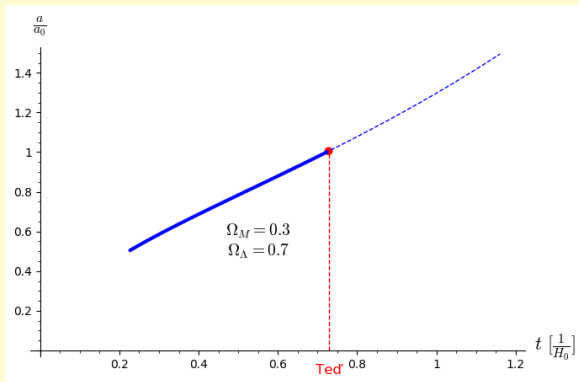
Pozorování a
struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr

Můžeme $a(t)$ měřit



a extrapolovat do budoucnosti

Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

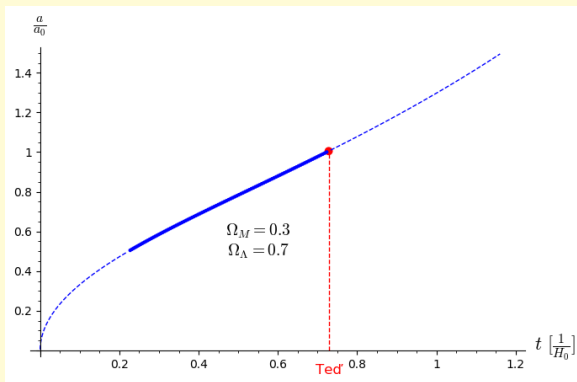
Pozorování a
struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr

Můžeme $a(t)$ měřit



a extrapolovat do budoucnosti a do minulosti.

Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

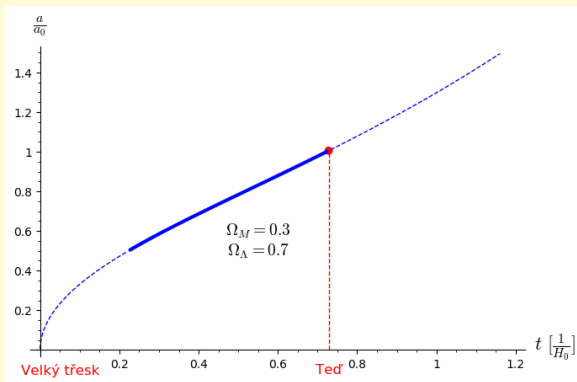
Pozorování a
struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr

Můžeme $a(t)$ měřit



a extrapolovat do budoucnosti a do minulosti.

Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

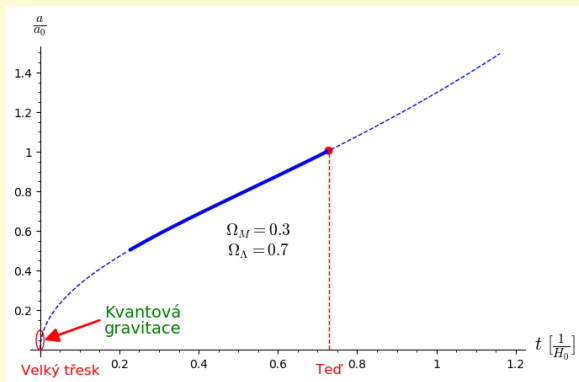
Pozorování a
struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr

Můžeme $a(t)$ měřit



a extrapolovat do budoucnosti a do minulosti.
Je třeba kvantová gravitace!

Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

Pozorování a
struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr

Moderní fyzika

Teorie strun a
vesmír

Rikard von Unge

Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

Pozorování a
struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr



Mikrosvět:
Kvantová fyzika

Makrosvět:
Obecná teorie
relativity



Rikard von Unge

Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

Pozorování a
struny

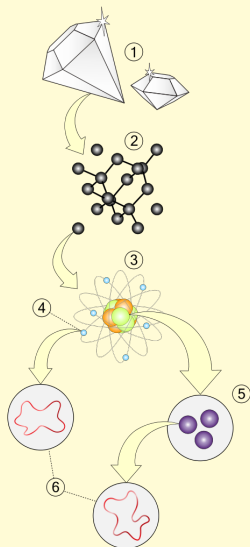
Inflace

Nová fyzika

Závěr

$\Delta x \Delta p \geq \hbar$

Struny



Teorie strun a
vesmír

Rikard von Unge

Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

Pozorování a
struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr

KM+struny → OTR



Teorie strun a vesmír

Rikard von Unge

Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

Předpovědi strunové
teorie

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

Pozorování a
struny

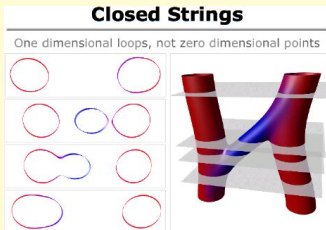
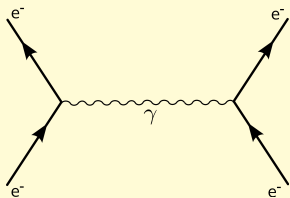
Inflace

Nová fyzika

Závěr



Proč struny



Jemnější rozptylové chování

Žádné divergence.



Předpovědi strunové teorie

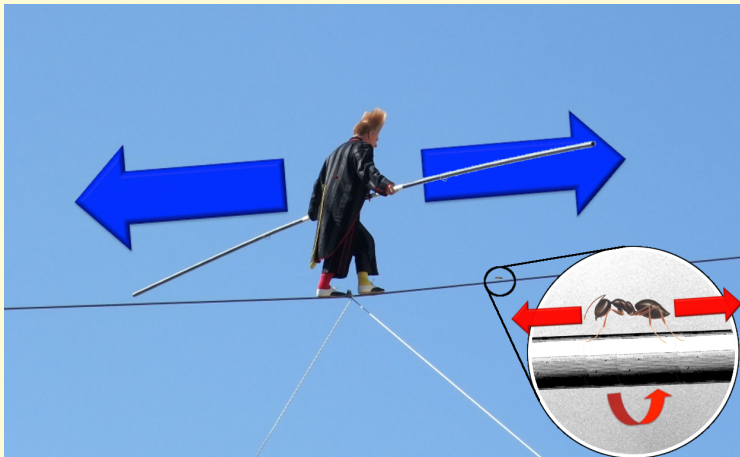
- ▶ Obecná teorie relativity + korekce
- ▶ 10 dimenzí
- ▶ Nejmenší délka
- ▶ Supersymetrie
- ▶ Jednoznačnost!

Jedina teorie, ale obrovské množství realizací



Extra dimenze

$$10 = \underbrace{4}_{\text{Náš svět}} + \underbrace{6}_{\text{Skryté}}$$



Teorie strun a vesmír

Rikard von Unge

Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

**Předpovědi strunové
teorie**

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

Pozorování a
struny

Inflace

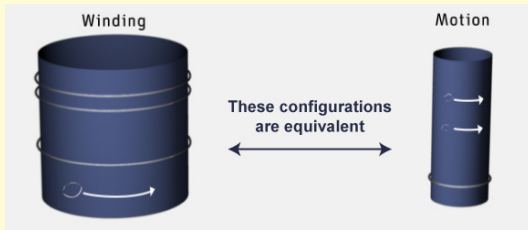
Nová fyzika

Závěr



Nejmenší délka

Struny jsou jiné



$$m^2 = \left(\frac{n^2}{R^2} + \frac{k^2 R^2}{l_s^4} \right) \frac{\hbar^2}{c^2}$$

$$\tilde{R} = \frac{l_s^2}{R}$$

$$m^2 = \left(\frac{k^2}{\tilde{R}^2} + \frac{n^2 \tilde{R}^2}{l_s^4} \right) \frac{\hbar^2}{c^2}$$

Velké jsou malé

Teorie strun a
vesmír

Rikard von Unge

Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

**Předpovědi strunové
teorie**

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

Pozorování a
struny

Inflace

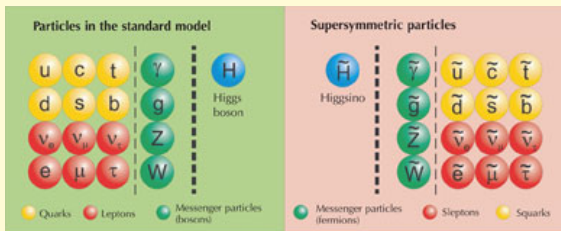
Nová fyzika

Závěr



Supersymetrie

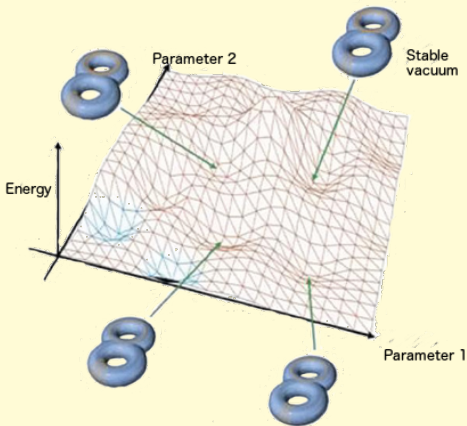
Každá částice má sourozence opačné statistiky (Boson/Fermion)



Aktivně se hledají v urychlovači v CERNu.



Krajina strunových vakuí



10^{500} vesmírů, který je náš?

Teorie strun a
vesmír

Rikard von Unge

Kosmologie

Standardní model
Kosmologie

Moderní fyzika

KM a OTR

Teorie strun

Motivace

**Předpovědi strunové
teorie**

Proč čtyři
dimenze?

Struny jsou jiné

Kosmologie
strunového plynu

Pozorování a
struny

Inflace

Nová fyzika

Závěr



$4 \neq 10$?

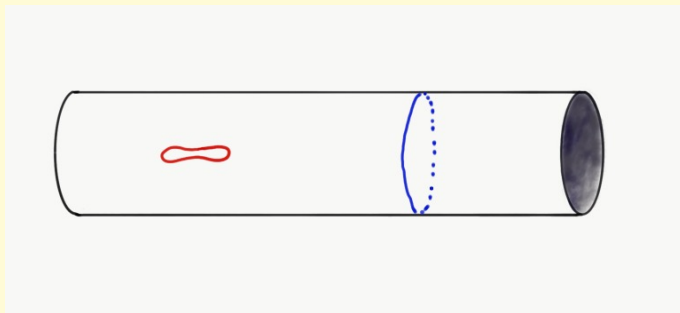
Rozpor?

Když teorie strun předpovídá 10 rozměrů, jak se vysvětluje, že vidíme jenom 4 kolem sebe?

Ne, $4 = 2 + 2$

Zkusme se podívat na mechanismus, který by vysvětlil, proč zrovna čtyři rozměry jsou makroskopické a šest mikroskopických.

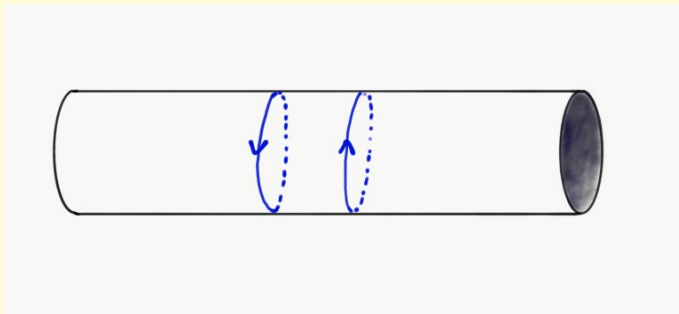
Struny jsou jiné



Nenavinuté struny
se chovají jako částice
a vyvíjejí tlak,
aby prostor rozpí-
nal.

Navinuté struny se
naopak snaží držet
rozměry malé. Vy-
víjejí záporný tlak.

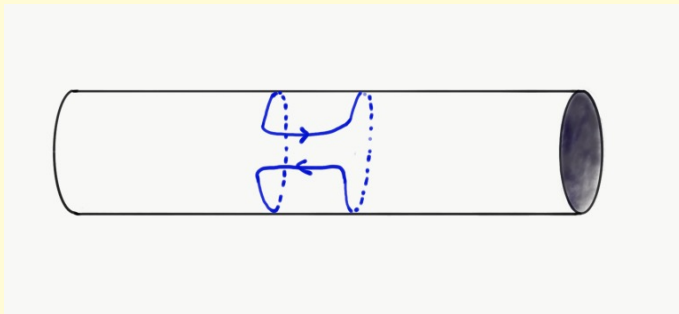
Struny jsou jiné



Když se setkají dvě navinuté struny s opačnou orientací,
mohou se odvinout.

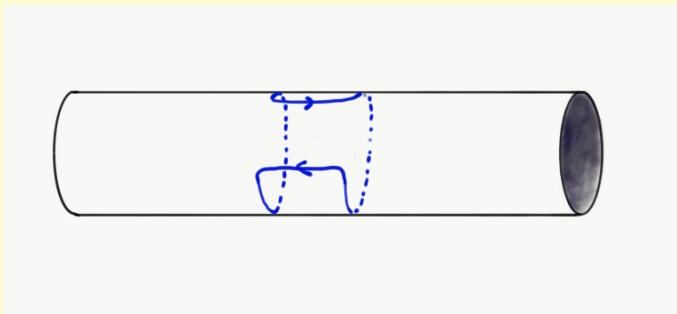


Struny jsou jiné



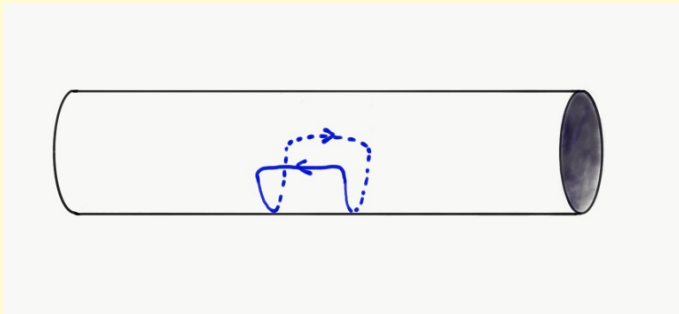
Když se setkají dvě navinuté struny s opačnou orientací,
mohou se odvinout.

Struny jsou jiné



Když se setkají dvě navinuté struny s opačnou orientací,
mohou se odvinout.

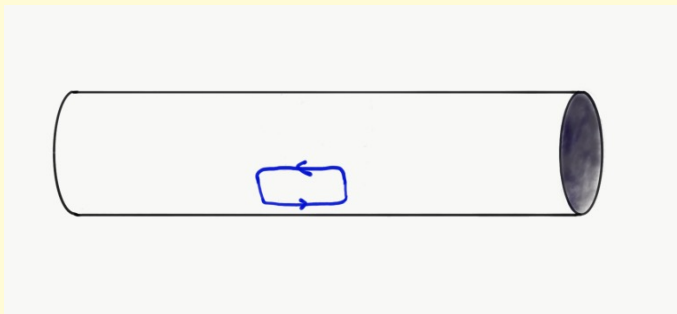
Struny jsou jiné



Když se setkají dvě navinuté struny s opačnou orientací,
mohou se odvinout.



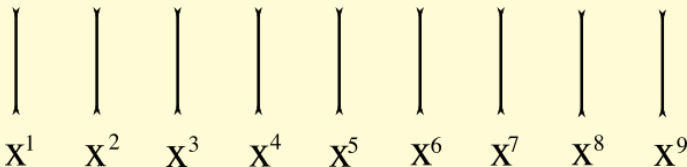
Struny jsou jiné



Když se setkají dvě navinuté struny s opačnou orientací,
mohou se odvinout.

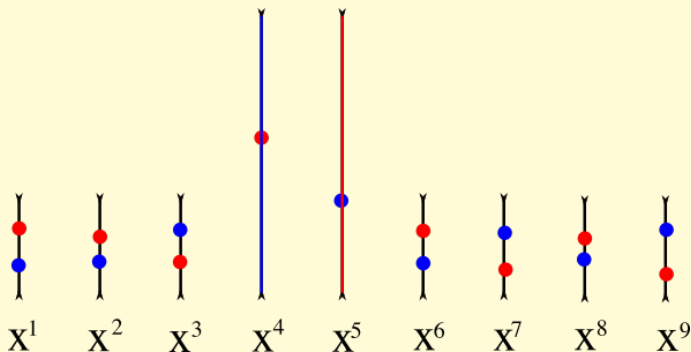
Kosmologie strunového plynu

Na začátku je vesmír malý a všech 9 prostorupodobných rozměrů je kružnicových.



Vesmír je plný strun, z nichž některé jsou navinuté a tím pádem zabrání navinutým rozměrům aby začaly růst. Stále probíhá reakce, kde struny odvinují a navinují. Kladný a záporný tlak je v termodynamické rovnováze. Při termodynamické fluktuaci se odvinují struny navinuté kolem rozměrů x^4 a x^5 a tyto rozměry se začínají rozpínat.

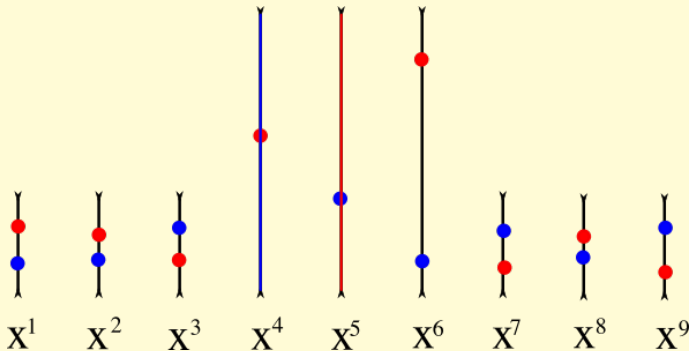
Kosmologie strunového plynu



Aby mohla expanze pokračovat, musí být struny schopné se potkat a interagovat.

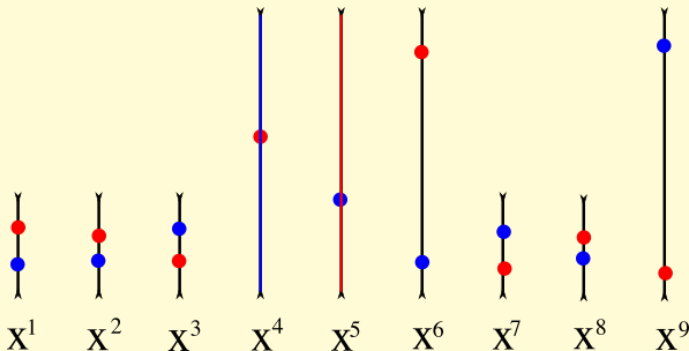


Kosmologie strunového plynu



To je stále možné, i když jsou tři rozměry velké.

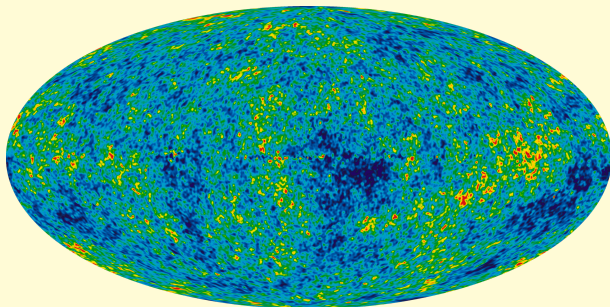
Kosmologie strunového plynu



Ale když jsou velké čtyři rozměry, už se navinuté struny nemusejí potkat a rozpínání se zastaví.

CMB

Reliktní záření se vytvořilo za podmínek, kde důležitou roli hrála kvantová gravitace. Zkoumání reliktního záření poskytuje okénko do vesmíru, jak vypadal 10^{-36} sekund po velkém třesku.

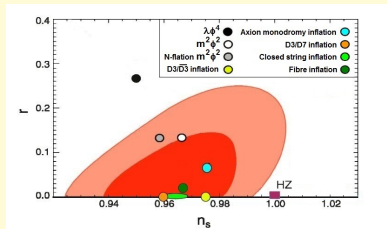
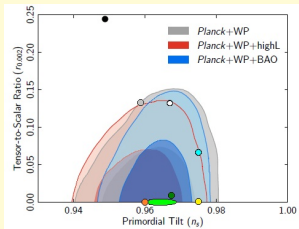


$$T = 2.7 \text{ K}$$

$$\Delta T = 18 \mu\text{K}$$



Během inflace se prostor exponenciálně rozpíná. Rozdíly v teplotě reliktního záření pocházejí z kvantové fluktuace gravitačního pole předtím, než inflace začala. Měření se dá porovnat s predikcemi strunových modelů.



r tady odpovídá poměru mezi skalárními a tensorovými módy n_s udává spektrum skalárních módů: $P(k) = k^{n_s-1}$

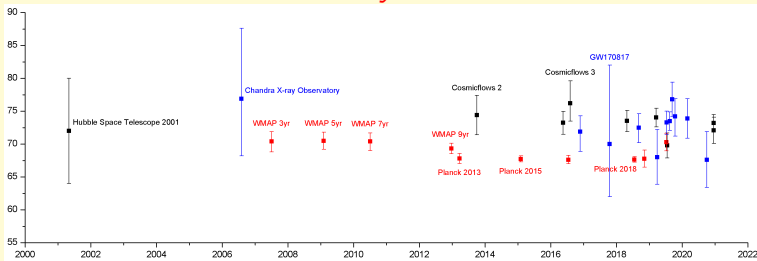
C. P. Burgess, M. Cicoli and F. Quevedo, "String Inflation After Planck 2013," JCAP 11 (2013), 003



Kde se skrývá nová fyzika?

V roce 2013 byla z reliktního záření (raný vesmír) s použitím sondy Planck určena hodnota Hubbleovy konstanty $67,15 \pm 1,2$ (km/s)/Mpc. Tato hodnota se neshoduje s měřenou hodnotou pomocí cefeid (pozdní vesmír), která v roce 2016 byla přímo určena na 73 (km/s)/Mpc. Neshoda je statisticky signifikantní.

Nová fyzika?



- ▶ Musíme mít kvantovou gravitaci, abychom pochopili vývoj vesmíru od začátku do konce.
- ▶ KM a OTR nejsou kompatibilní. Musíme najít rozšířenou teorii, která současně popisuje KM i OTR.
- ▶ Teorie strun je nejkonzervativnější možnost.
- ▶ Problémy s kladnou kosmologickou konstantou.

- ▶ Spousta zajímavé fyziky je ještě před námi.