



# Vom Urknall zum Standardmodell der Kosmologie

Tristan Daus

Universität Heidelberg  
Institut für Theoretische Physik

28.02.2022

# Was ist Kosmologie?

# Was ist Kosmologie?

- Kosmos ↔ Altgriechisch κόσμος: “Ordnung”, “Weltordnung”
- Kosmologie ↔ Altgriechisch κοσμολογία: “die Lehre von der Welt(ordnung)”
- Gegensatz zu Chaos ↔ Altgriechisch χάος: “der weite leere Raum”, “gährende Leere”

# Worüber reden wir eigentlich?



Quelle: Ausschnitt aus YT-Video "Cosmic Eye — Zooming from Quarks to the Universe"

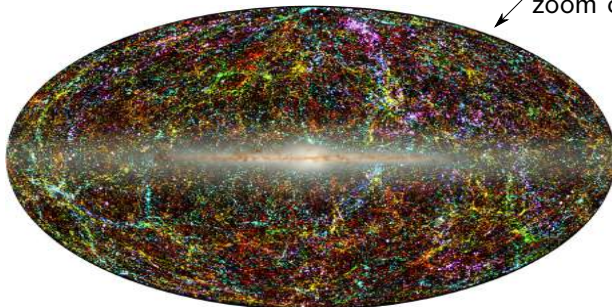
# Was sehen wir? Zoomen wir mal raus...



zoom out  
→

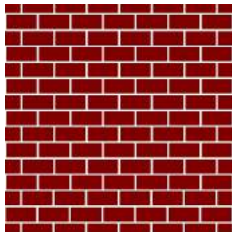


↙ zoom out



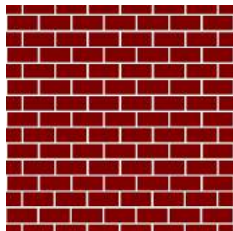
# Grundannahmen der Kosmologie

- Homogenität:



# Grundannahmen der Kosmologie

- Homogenität:

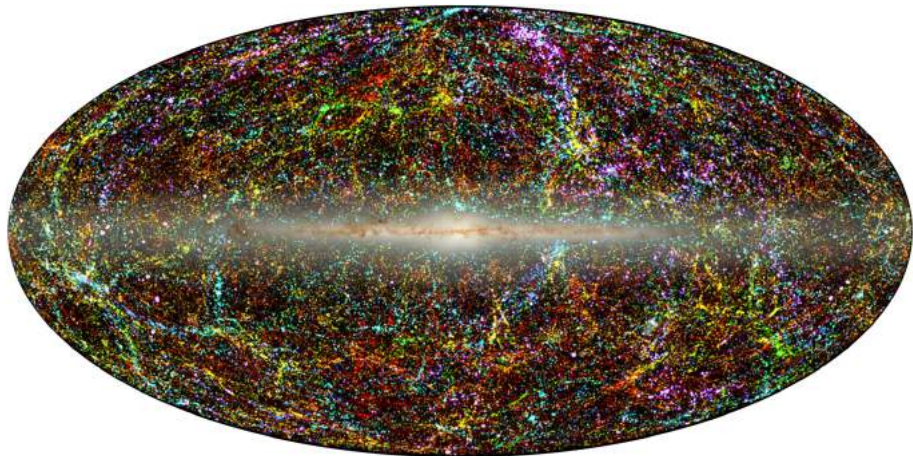


- Isotropie:



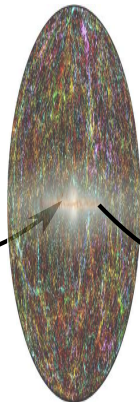


# Das Universum heute, ein Schnappschuss



# Wir wollen die zeitliche Entwicklung verstehen. 2 Fragen

Heute



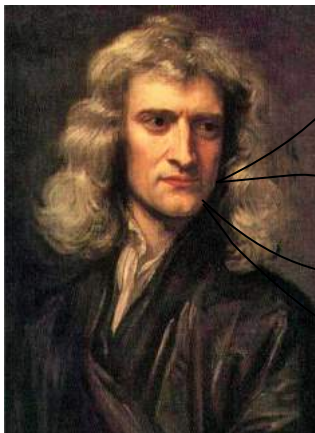
Wo kommen wir her?

Wo gehen wir hin?



Zeit →

# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?

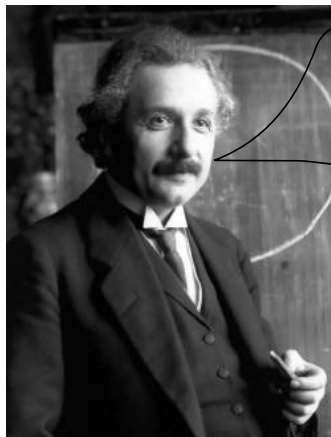


"Objekte bewegen sich unter dem Einfluss von Gravitation"

"Was ist Gravitation?!"

↖ Isaac Newton

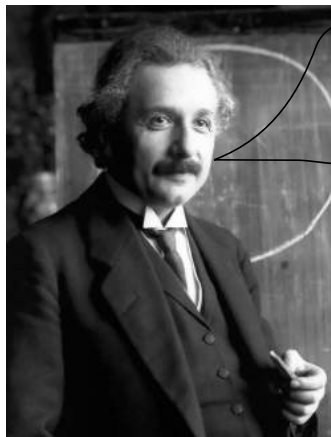
# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?



"Gravitation ist Folge von einer gekrümmten Raumzeit"

Albert Einstein

# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?



"Gravitation ist Folge von einer gekrümmten Raumzeit"

"Bewegte Massen beeinflussen Krümmung der Raumzeit"



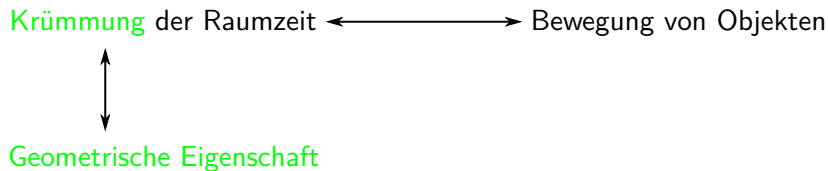
Albert Einstein

Auch Albert Einstein

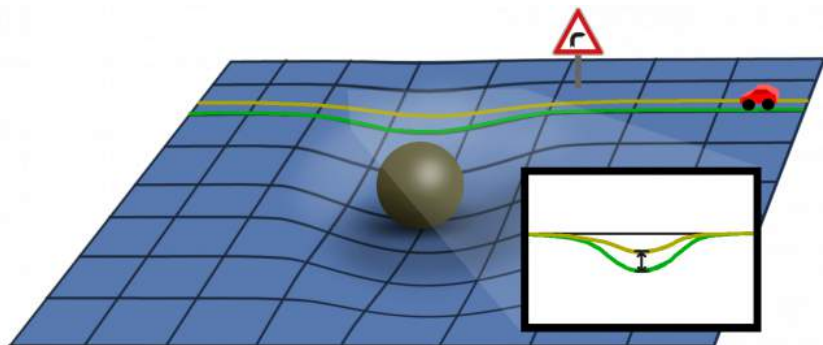
# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?

Krümmung der Raumzeit  $\longleftrightarrow$  Bewegung von Objekten

# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?

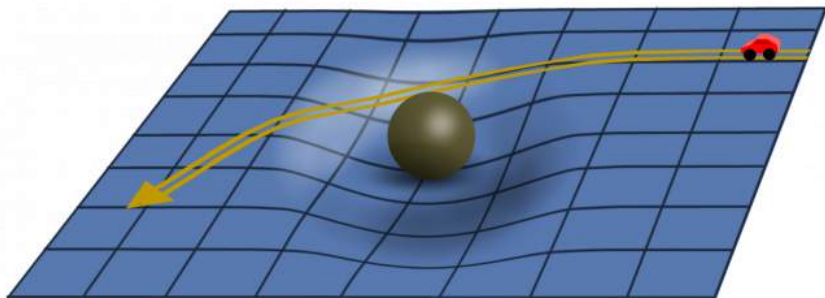


# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?



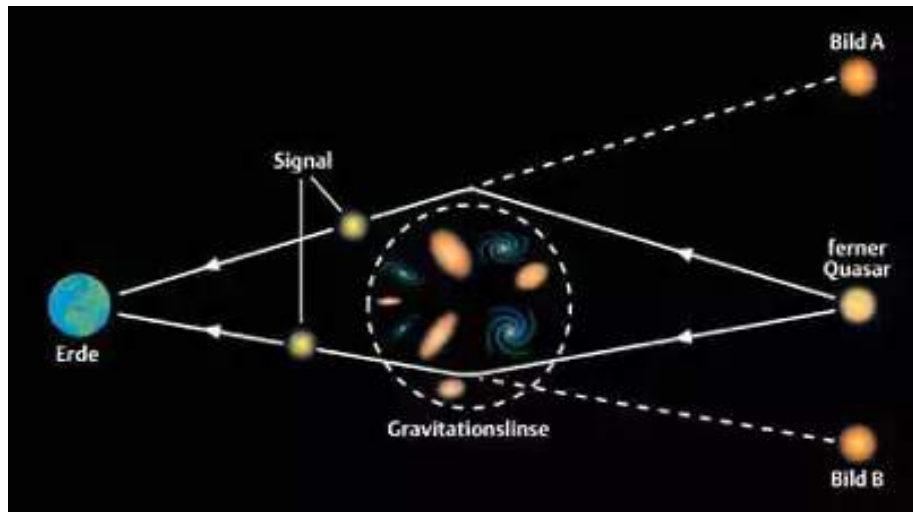


# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?

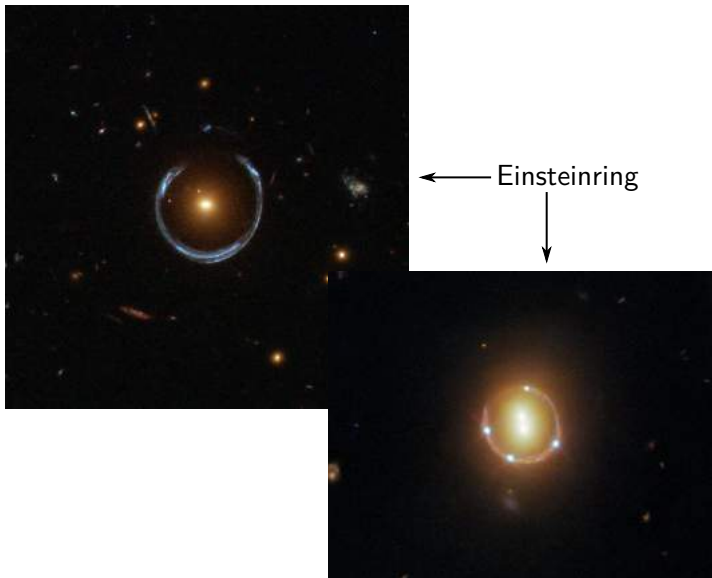


# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?

# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?



# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?



# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?

# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?

- Zusammengefasst in Einstein'schen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART):

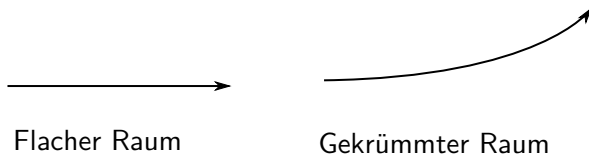
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?

- Zusammengefasst in Einstein'schen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

- Objekte bewegen sich entlang geodätischer Linien.



# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?

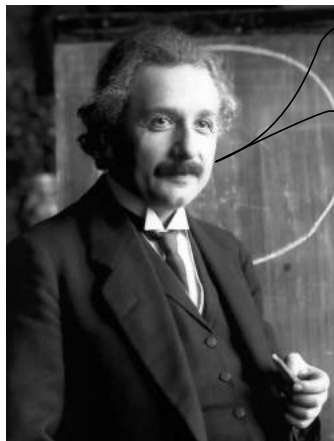


# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?

- ART liefert uns noch mehr: Bewegung des Raumes selbst.

# Wie beschreiben wir den Raum (und die Zeit)?

- ART liefert uns noch mehr: Bewegung des Raumes selbst.
- Weltbild des frühen 20. Jhdts.:



"Das Universum  
ist statisch!"

Wieder Albert Einstein

# Ist das Universum statisch?

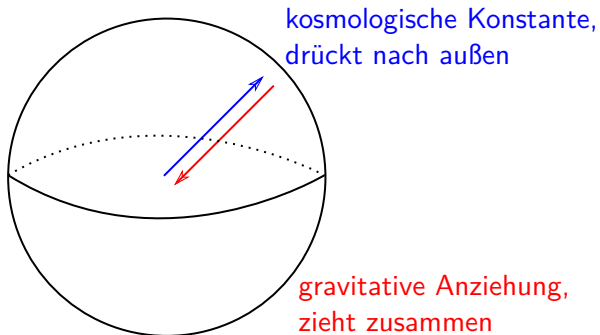
- Ja, es ist möglich ein statisches Universum zu haben, aber

# Ist das Universum statisch?

- Ja, es ist möglich ein statisches Universum zu haben, aber

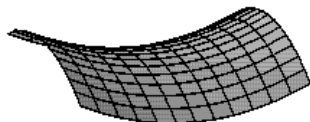
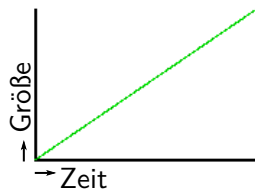


# Ist das Universum statisch?

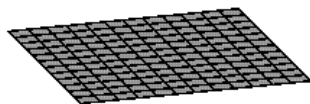
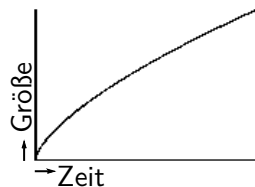




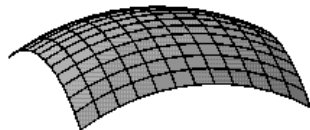
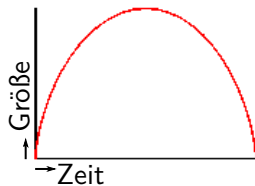
# Dynamische Lösungen



negative Krümmung

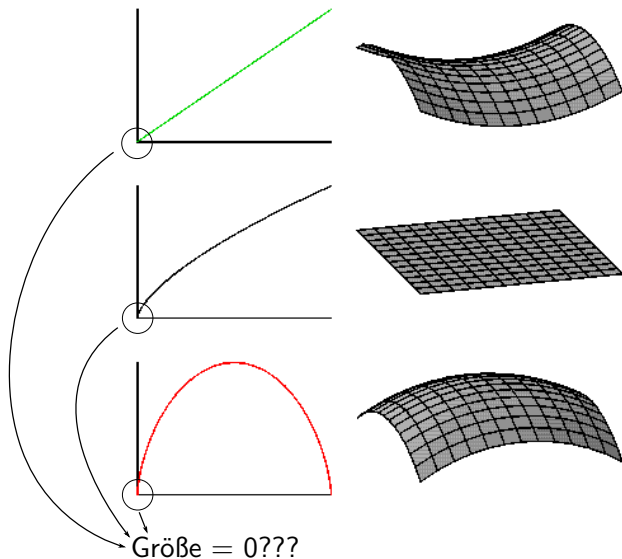


flach



positive Krümmung

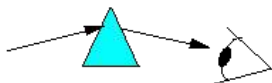
# Gab es einen Urknall?



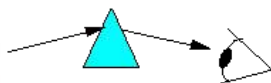


# Was spricht für einen Urknall? - Rotverschiebung

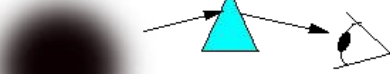
# Was spricht für einen Urknall? - Rotverschiebung



kontinuierliches Emissionsspektrum



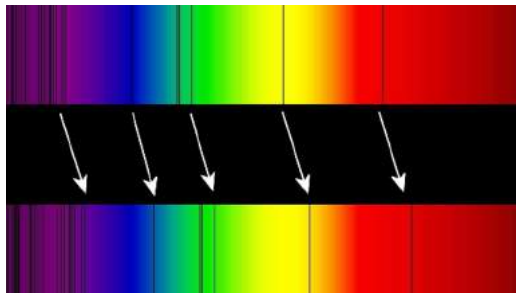
diskretes Emissionsspektrum



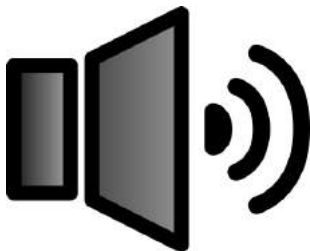
diskretes Absorptionsspektrum



# Was spricht für einen Urknall? - Rotverschiebung

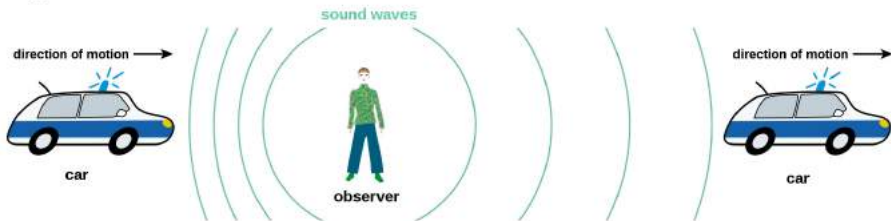


# Was spricht für einen Urknall? - Rotverschiebung

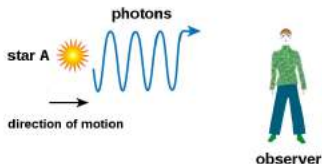


# Was spricht für einen Urknall? - Rotverschiebung

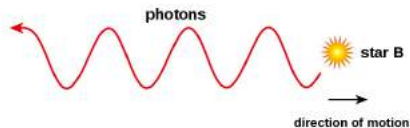
Doppler red- or blueshift



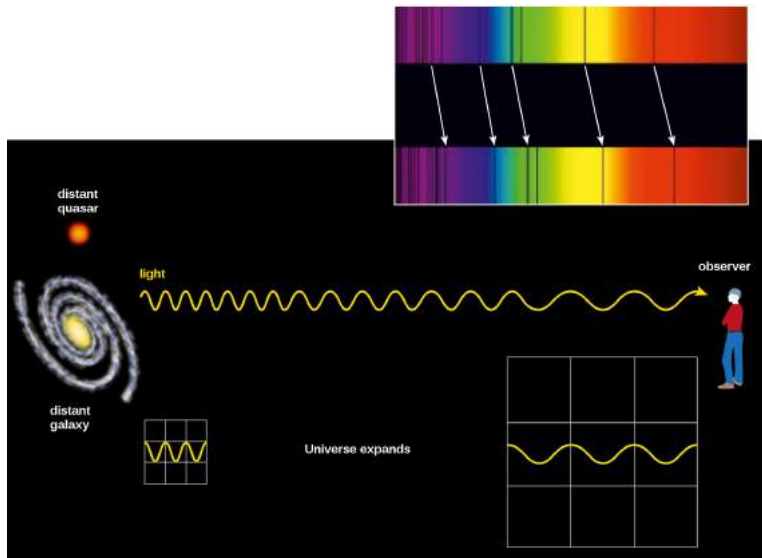
blueshift



redshift



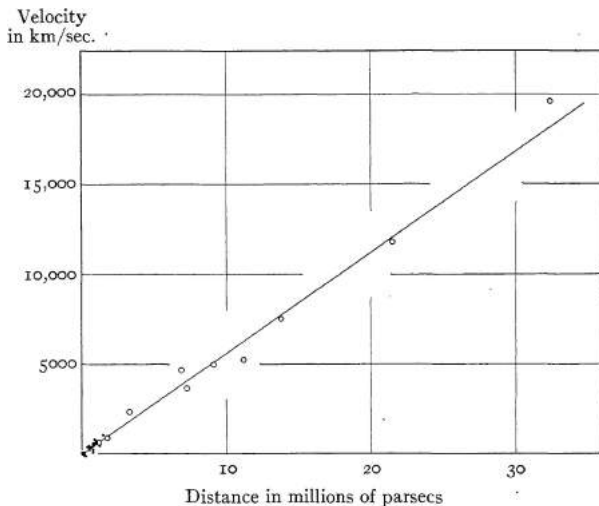
# Was spricht für einen Urknall? - Rotverschiebung



# Was spricht für einen Urknall? - Rotverschiebung

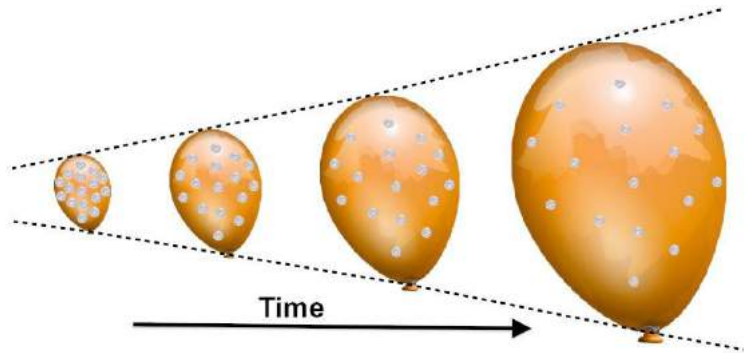


↑  
Edwin Hubble  
Georges Lemaître  
↓



$$v = H_0 \cdot D,$$
$$H_0 = 67,80 \pm 0,77 \frac{\text{km}}{\text{Mpc} \cdot \text{s}}$$

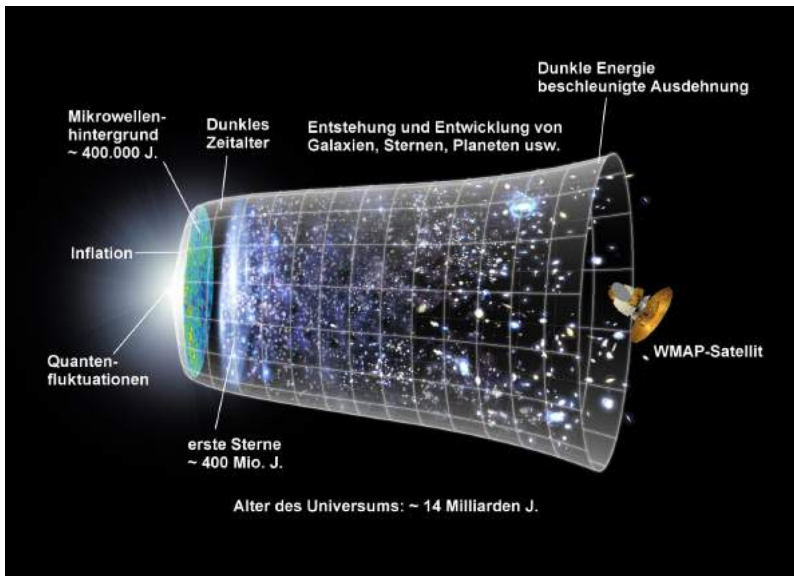
# Was spricht für einen Urknall? - Rotverschiebung



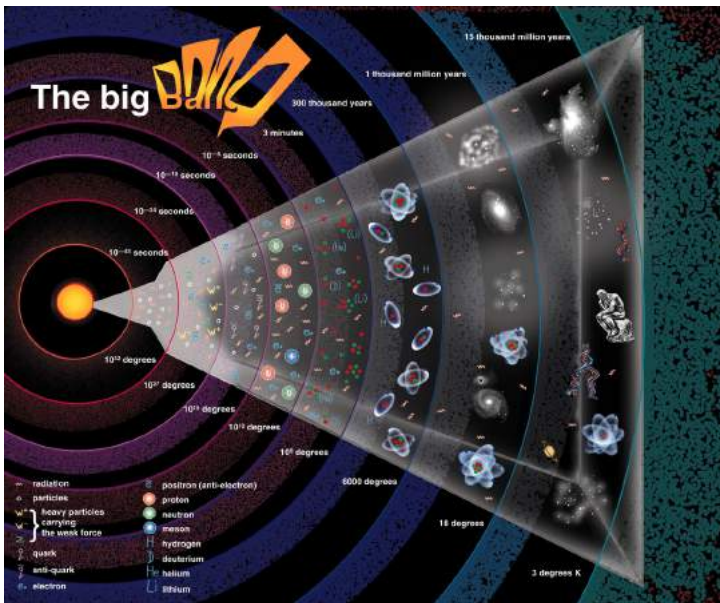


# Das Standardmodell der Kosmologie

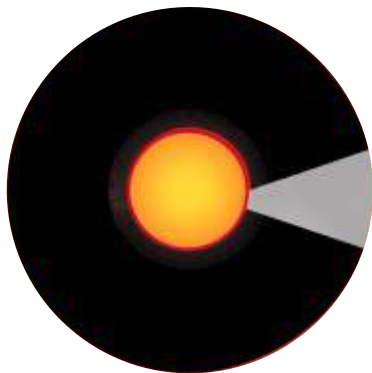
# Das Standardmodell der Kosmologie



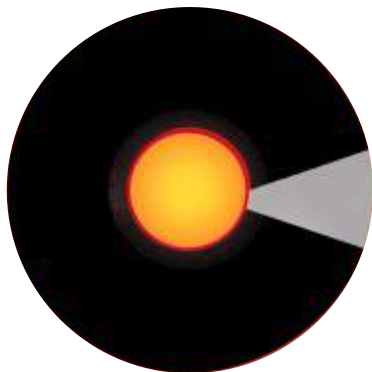
# Das Standardmodell der Kosmologie



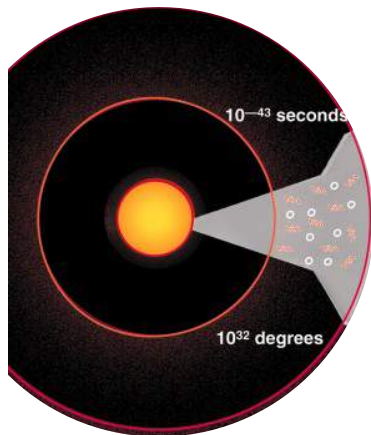
# Was bisher geschah... Der Urknall



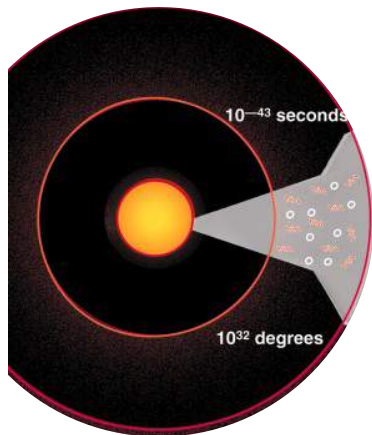
# Was bisher geschah... Der Urknall



# Was bisher geschah... Inflation



# Was bisher geschah... Inflation



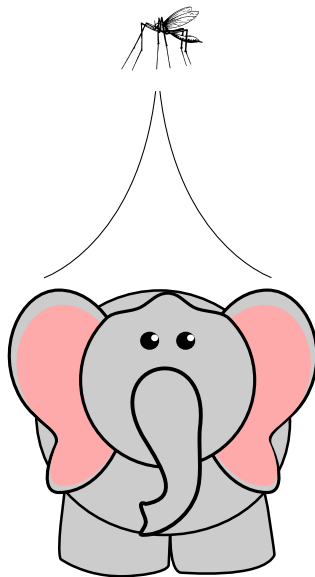
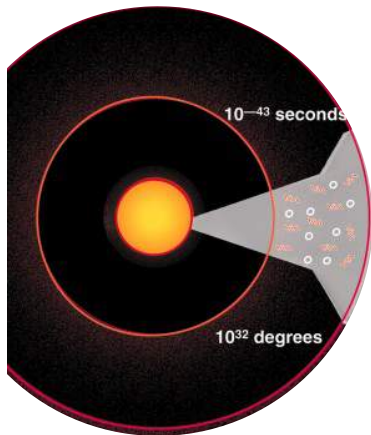
Alan Guth



Andrei Linde

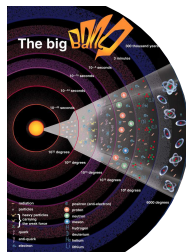
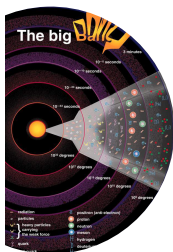
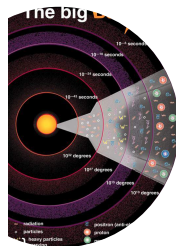
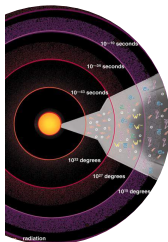
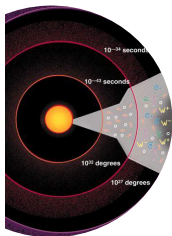


# Was bisher geschah... Inflation



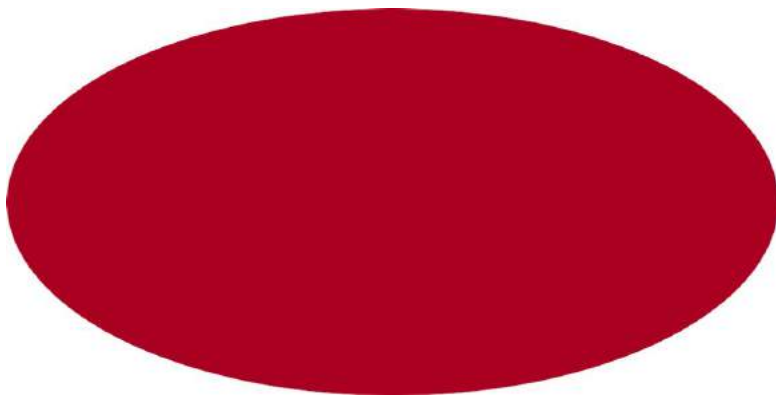


# Was bisher geschah... Der Weg zum ersten Bild



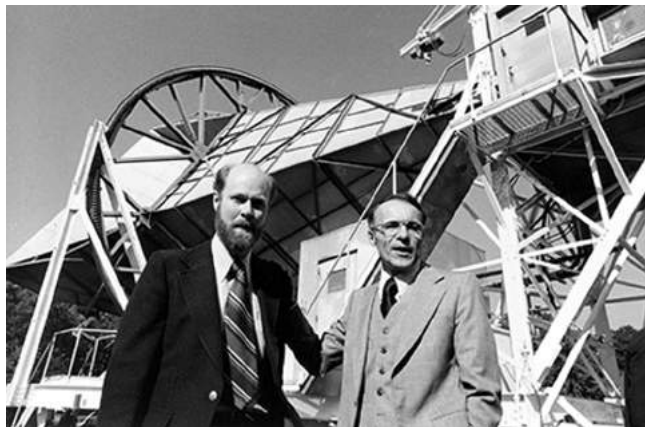
# Das erste Babybild des Universums

# Das erste Babybild des Universums



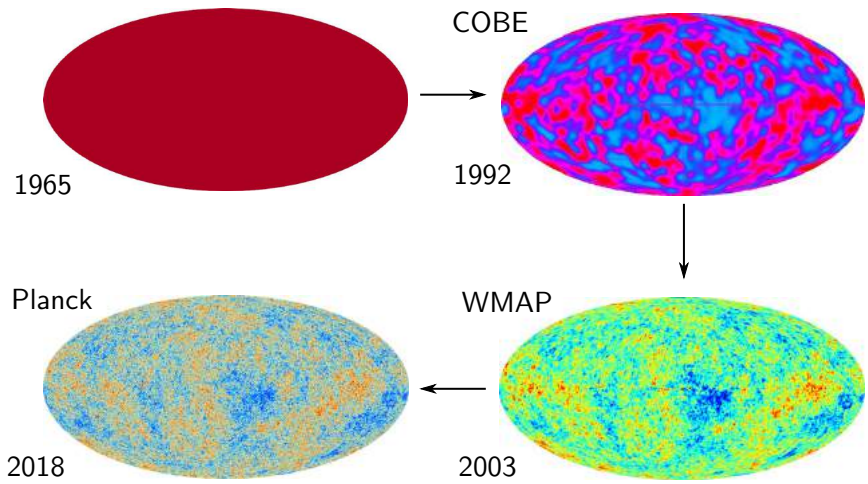
$T = 2,728 \text{ K}$

# Die Fotografen:

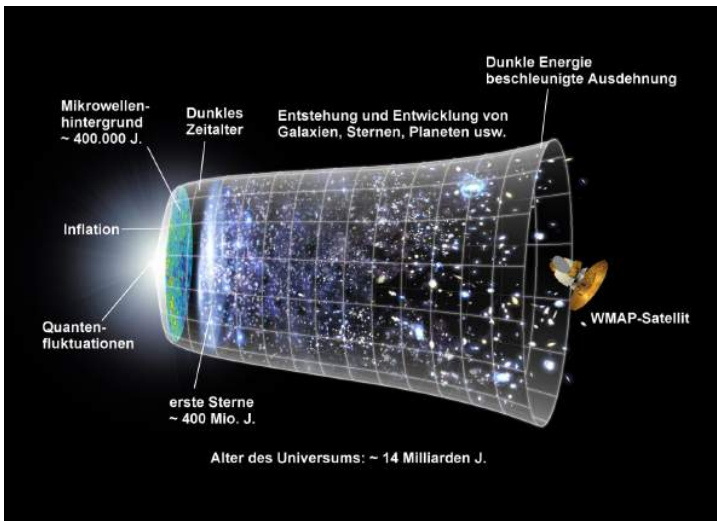


Robert Wilson und Arno Penzias, Nobelpreis 1978

# Mehr Details!



# Das Standardmodell der Kosmologie



# Problem: Dunkle Materie

