

Einstein und der Kosmos –

Grundlagen zum kosmologischen Standardmodell

Vorträge im Einsteinjahr
im Museum am Schölerberg

Michael Kahnt

Didaktik der Physik

6. Oktober 2005

1. Größenordnungen

Entfernung Erde-Sonne: 150 Mio. Kilometer

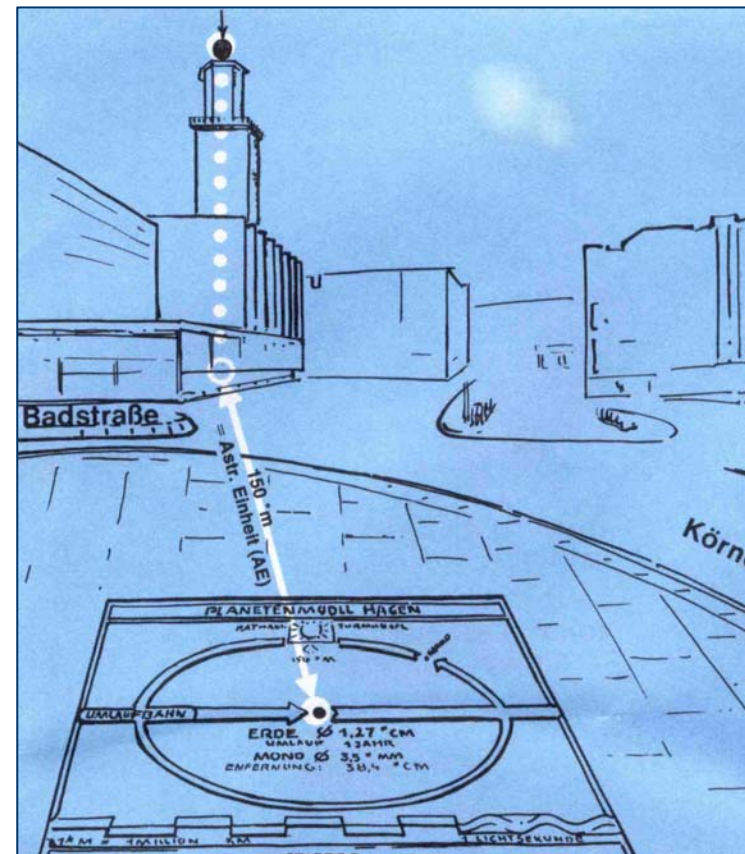
- Licht: ca. 8 Minuten
- Rakete: 3 Monate
- Auto: 85 Jahre

1. Größenordnungen

Entfernung Erde-Sonne: 150 Mio. Kilometer

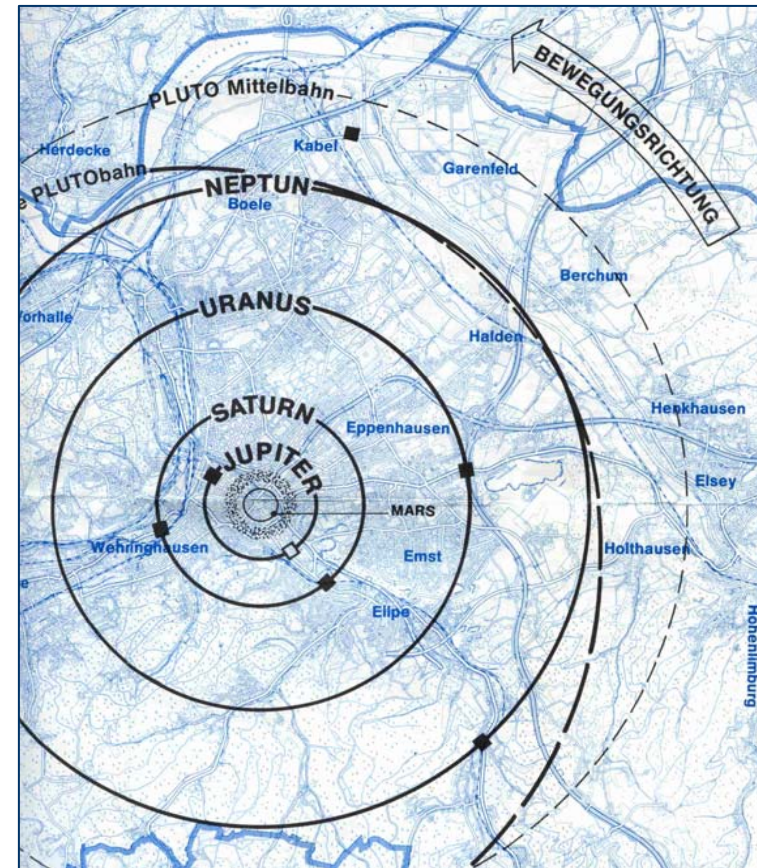
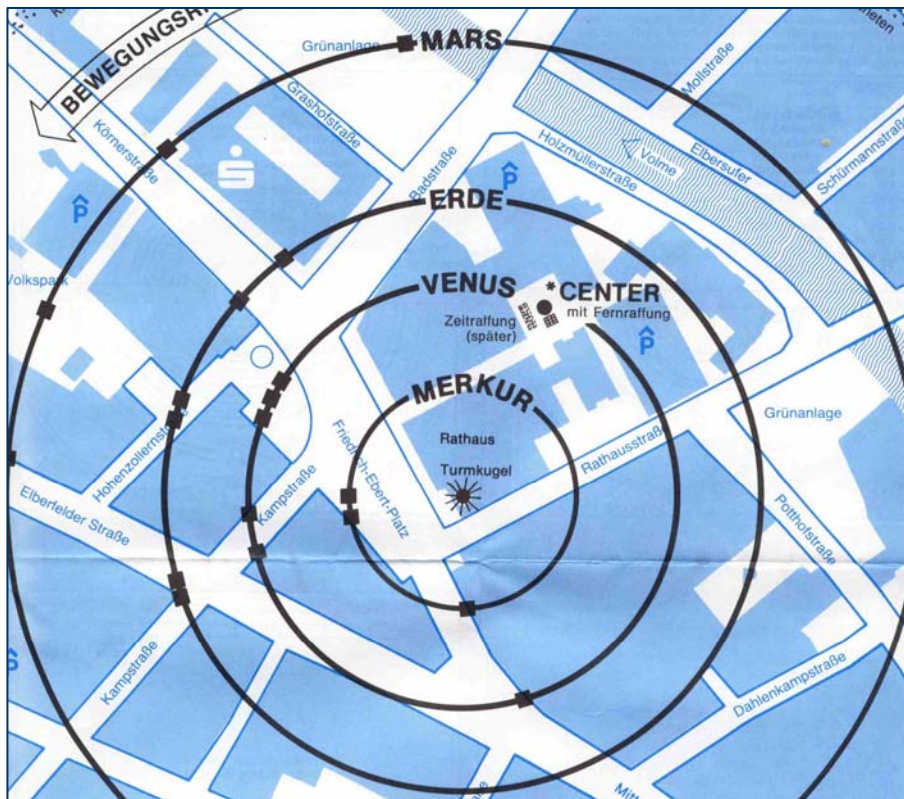
- Licht: ca. 8 Minuten
- Rakete: 3 Monate
- Auto: 85 Jahre

Gefühl für Größenordnungen
durch maßstabsgetreue
Verkleinerung



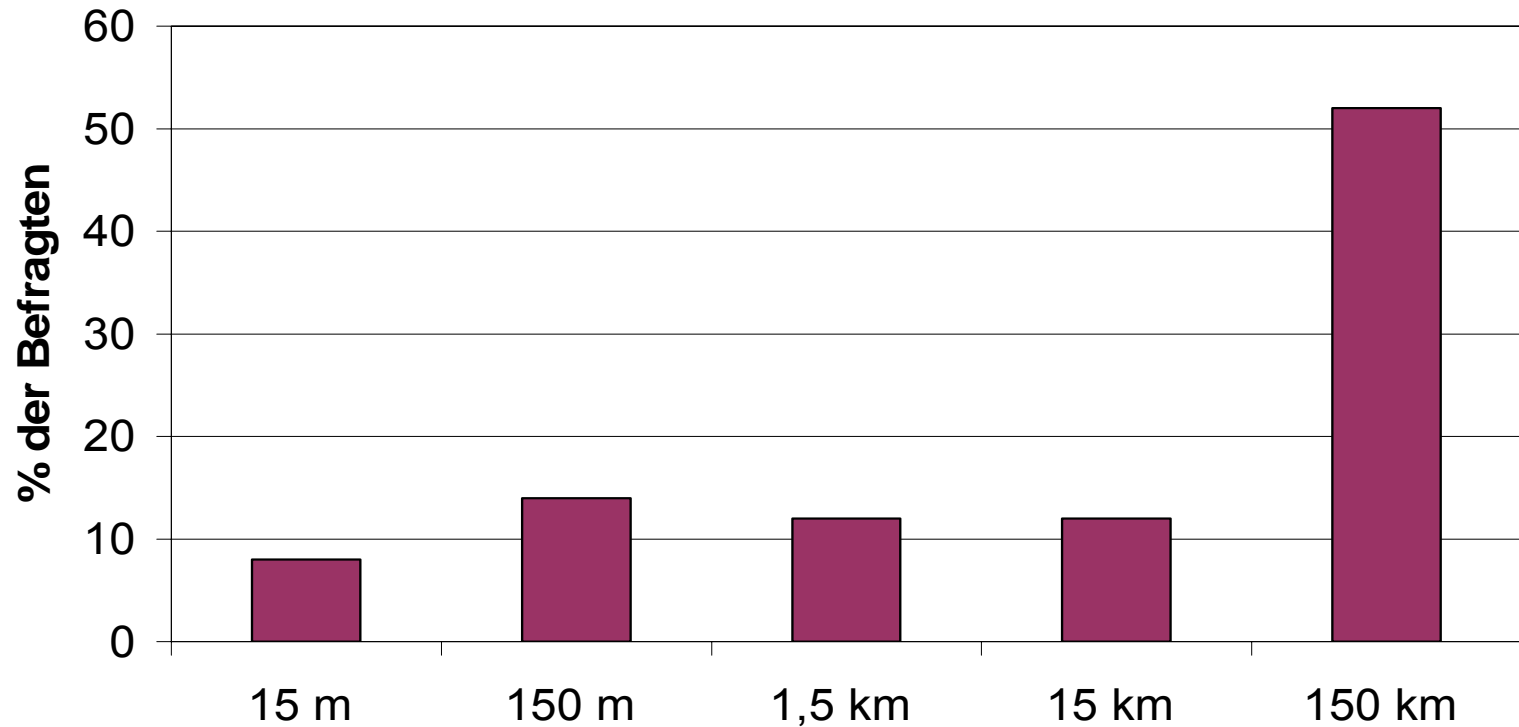
1. Größenordnungen

Maßstab 1m : 1 Mio. km

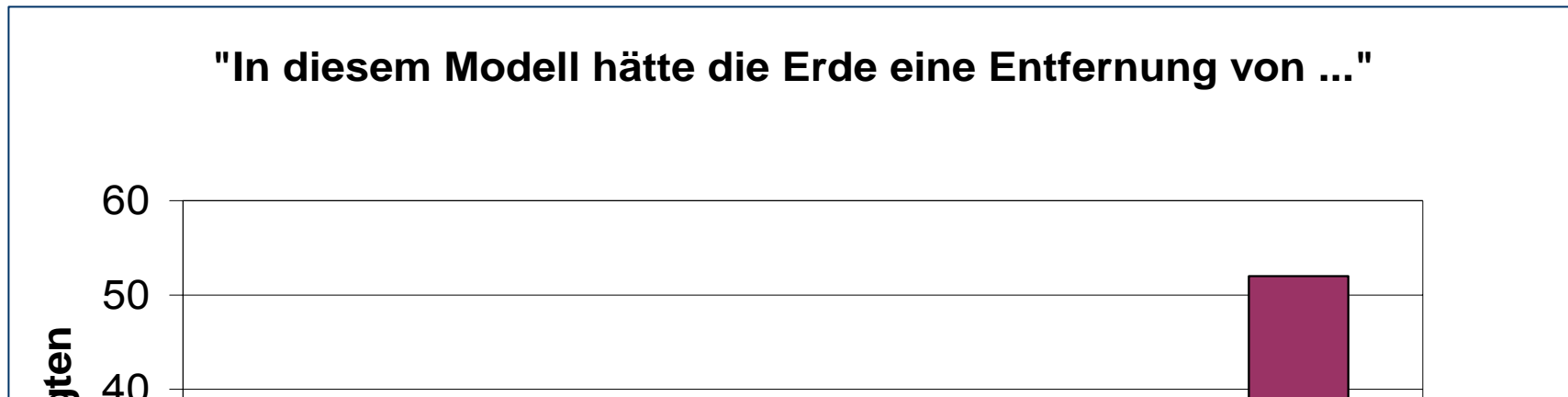


1. Größenordnungen

"In diesem Modell hätte die Erde eine Entfernung von ..."



1. Größenordnungen



Bei einem Sonnenmodell von 1,40 m Durchmesser hätte die Erde die Größe ...?

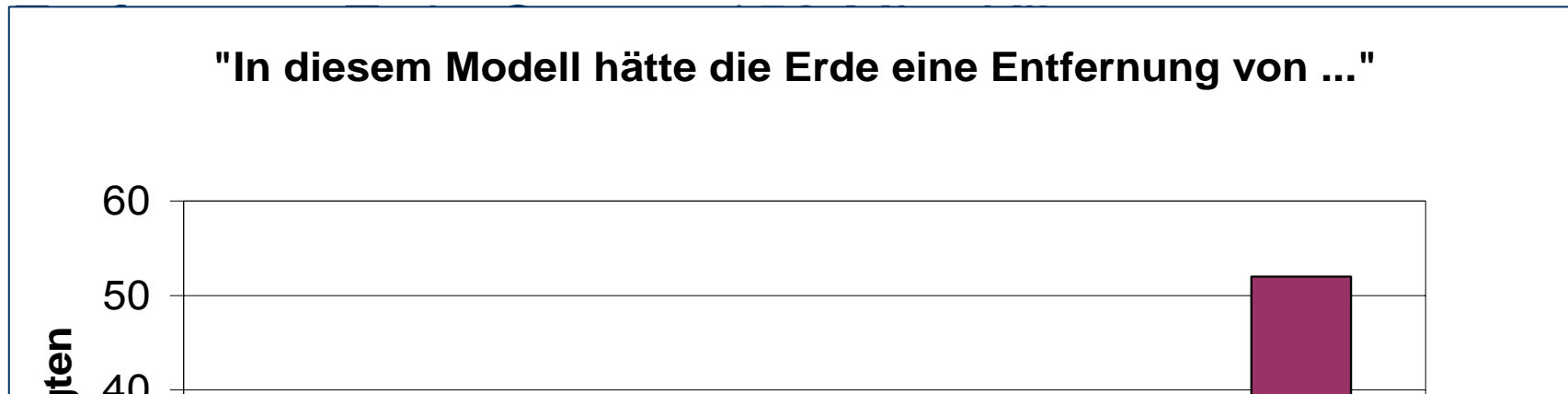
A: eines Fußballs

C: einer Haselnuss

B: einer Apfelsine

D: eines Stecknadelkopfs

1. Größenordnungen



Bei einem Sonnenmodell von 1,40 m Durchmesser hätte die Erde die Größe ...?

A: eines Fußballs

C: einer Haselnuss

B: einer Apfelsine

D: eines Stecknadelkopfs

Größenordnungen

Dieser Maßstab allerdings nur für kleine Entfernungen tauglich!

- ➔ Entfernung nächster Fixstern: 40 000 km
- Entfernung Andromedagalaxie: 25 Mrd. km

Größenordnungen

Dieser Maßstab allerdings nur für kleine Entfernungen tauglich!

➔ Entfernung nächster Fixstern: 40 000 km
Entfernung Andromedagalaxie: 25 Mrd. km

Anschaulicher Maßstab im Bereich der Fixsterne:
1m : 1 Billarde km ($1:10^{18}$)

➔ Entfernung Andromedagalaxie: 25 km
Planetensystem: 0,01 mm
weiteste Objekte: 100 000 km

2. Idee des statischen Universums

Seit jeher versuchen Menschen, sich das Universum in Zeit und Raum vorzustellen.

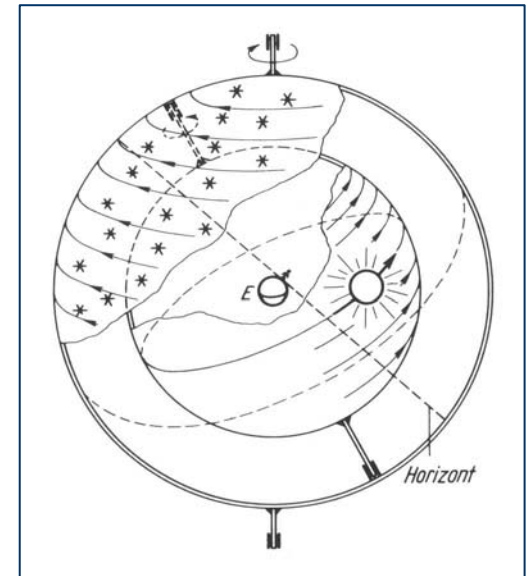
➔ **Begrenzung wie Unbegrenztheit gleichermaßen unvorstellbar.**

2. Idee des statischen Universums

Seit jeher versuchen Menschen, sich das Universum in Zeit und Raum vorzustellen.

➔ Begrenzung wie Unbegrenztheit gleichermaßen unvorstellbar.

Antike: Kosmos als göttliche Weltordnung – endlich, geschlossen und unveränderlich (statisch).



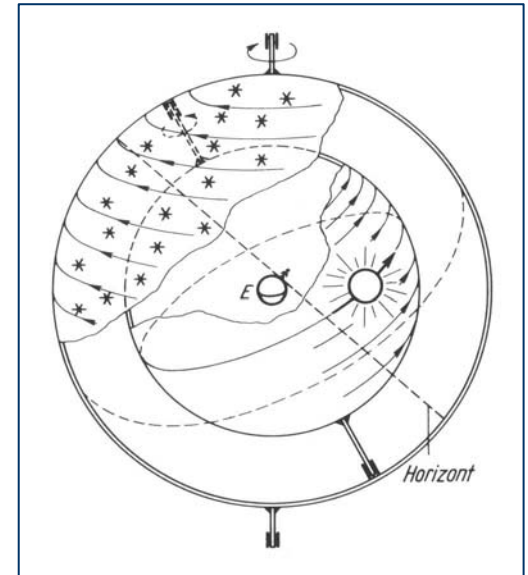
2. Idee des statischen Universums

Seit jeher versuchen Menschen, sich das Universum in Zeit und Raum vorzustellen.

➔ Begrenzung wie Unbegrenztheit gleichermaßen unvorstellbar.

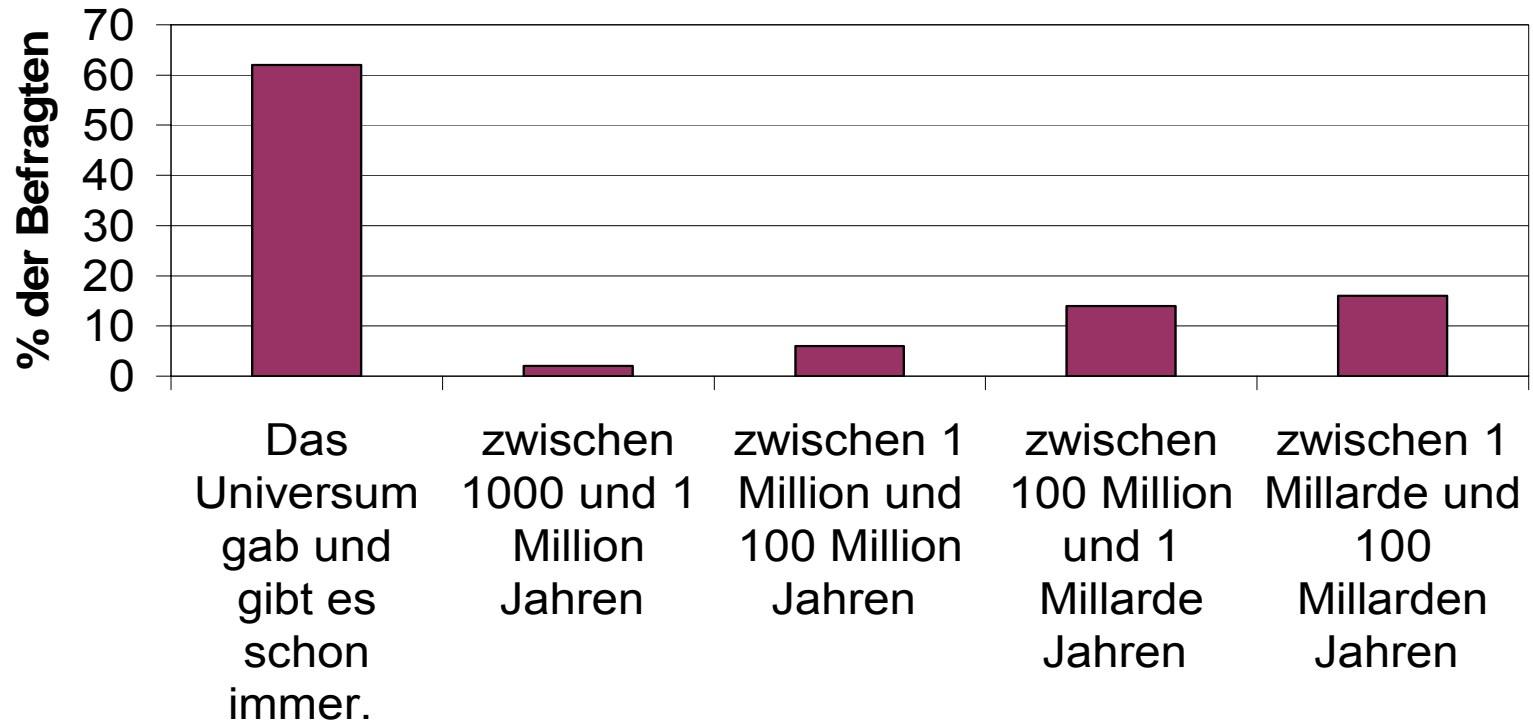
Antike: Kosmos als göttliche Weltordnung – endlich, geschlossen und unveränderlich (statisch).

Neuzeit: Erschütterungen, dennoch weiterhin statische Vorstellung.



2. Idee des statischen Universums

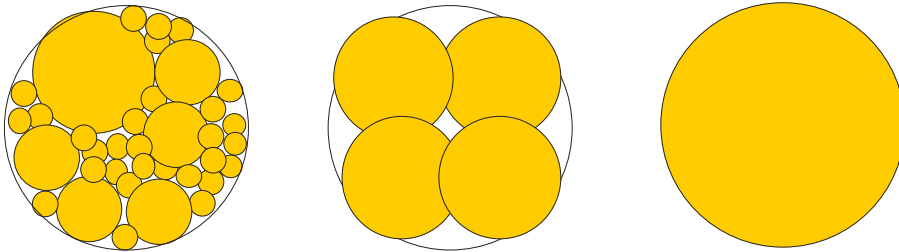
"Wie hoch schätzt du das Alter unseres Universums ein?"



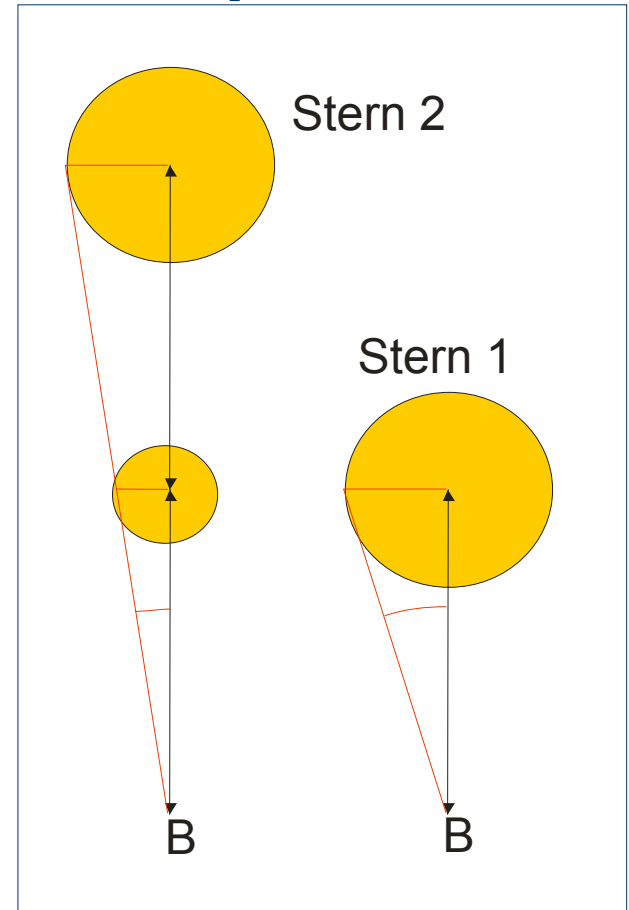
Das Olberssche Paradoxon

„Warum ist der Nachthimmel überhaupt dunkel?“

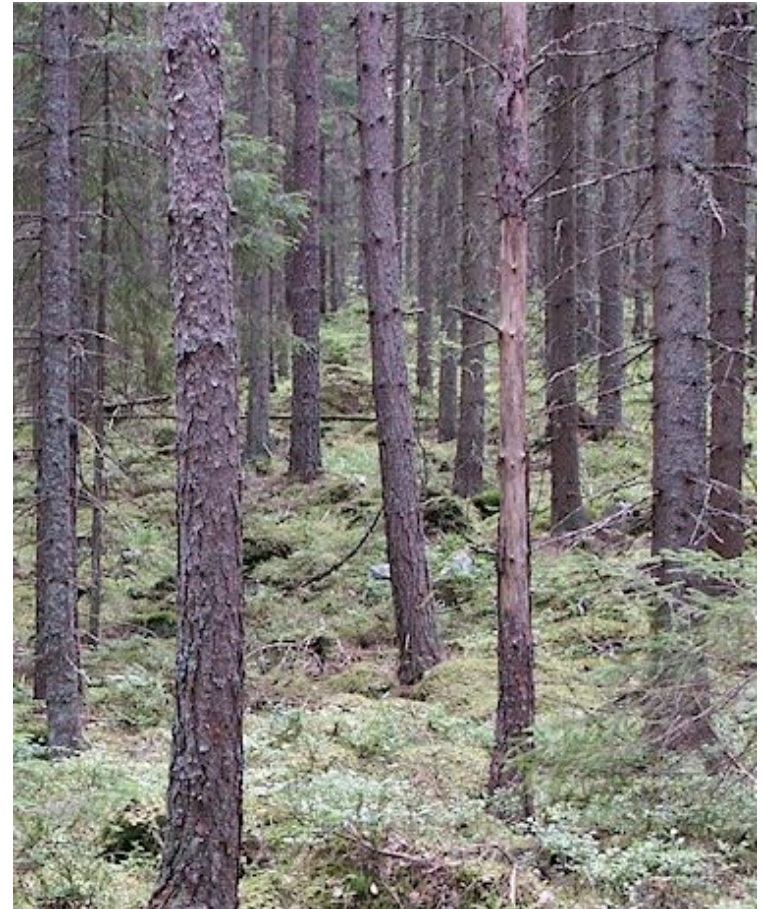
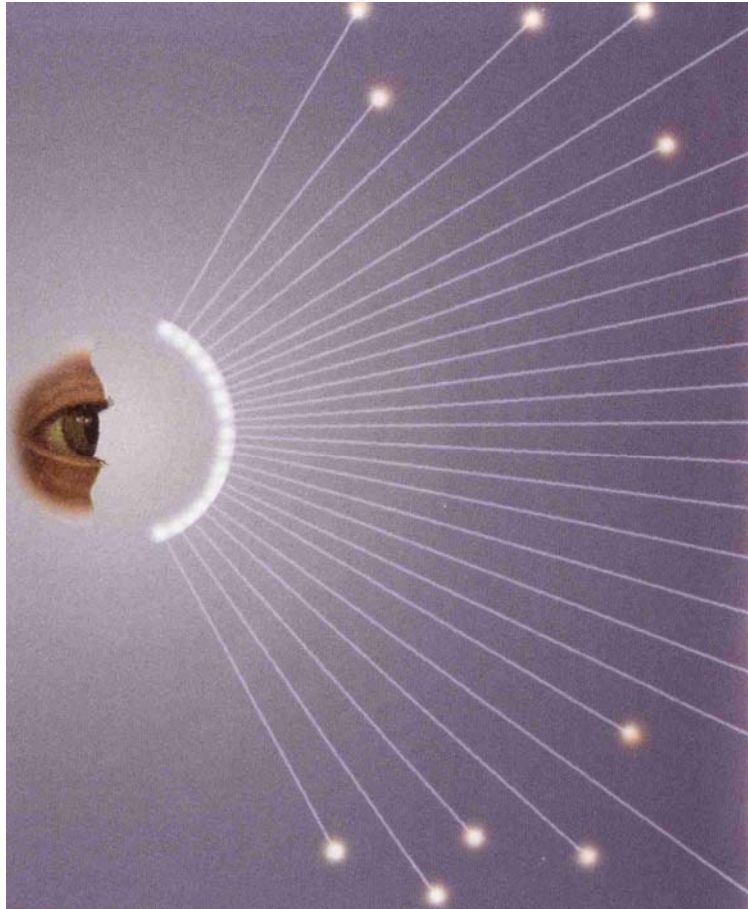
Betrachte Universum aus
„Durchschnittssterne“ mit
mittlerer Leuchtkraft und Größe



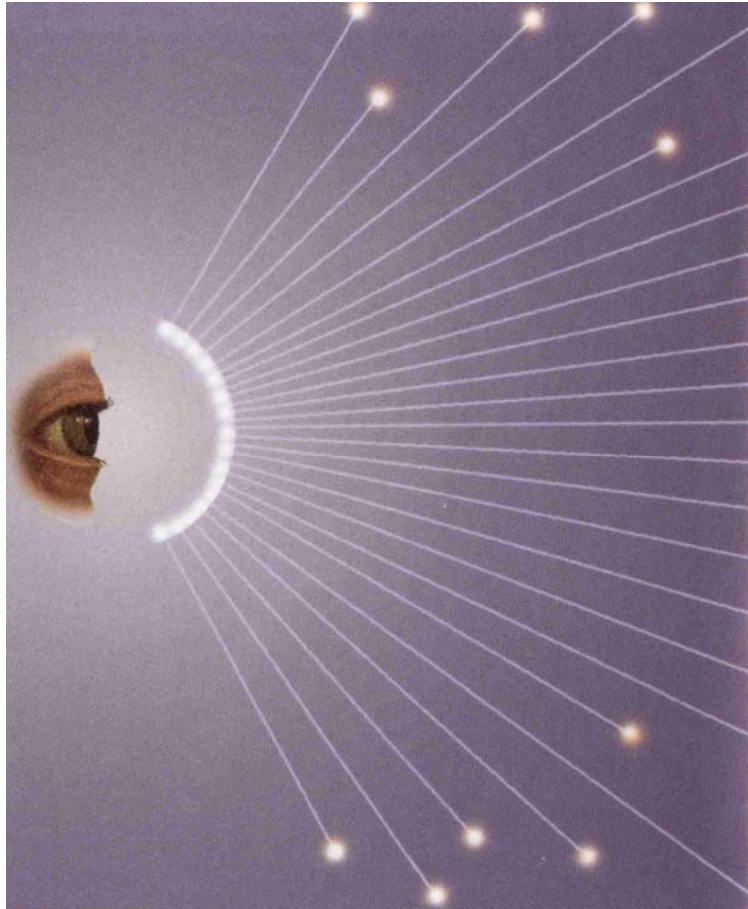
Kein Helligkeitsunterschied!



Das Olberssche Paradoxon



Das Olberssche Paradoxon



Jeder Himmelspunkt so hell wie die Sonne?

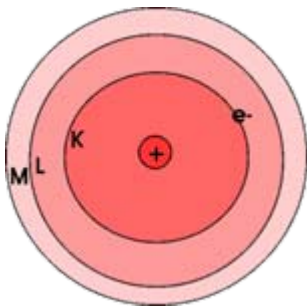
Abschätzung: $r_{\max} = 10^{23}$ ly

Lösungsvorschläge:

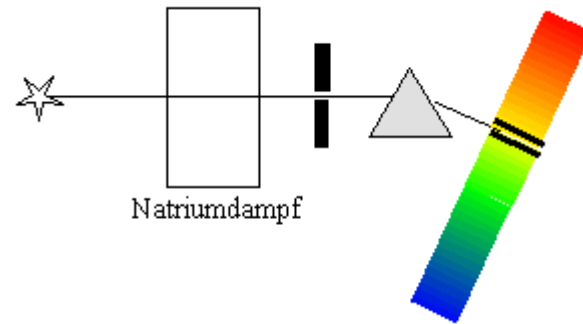
- Universum jünger als 10^{23} y
- Universum nicht unendlich
- Durchschnittliche Leuchtdauer eines Sterns viel kleiner als 10^{23} y

3. Hinweise für ein dynamisches Universum: Galaxienflucht

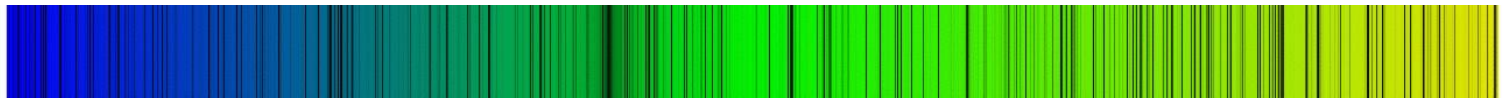
Physikalische Grundlagen I: Spektroskopische Untersuchung von Sternen



Atombau



Entstehung von
Absorptionsspektren



Spektrum der Sonne

Hinweise für ein dynamisches Universum: Galaxienflucht

Physikalische Grundlagen II:



Hinweise für ein dynamisches Universum: Galaxienflucht

Physikalische Grundlagen II:



**Unter welchem Namen ist dieses Phänomen
bekannt?**

A: Halbleiter-Versuch

C: Doppler-Effekt

B: Einfachspalt-
Experiment

D: Drei-Körper-Problem

Hinweise für ein dynamisches Universum: Galaxienflucht

Physikalische Grundlagen II:



Unter welchem Namen ist dieses Phänomen
bekannt?

A: Halbleiter-Versuch

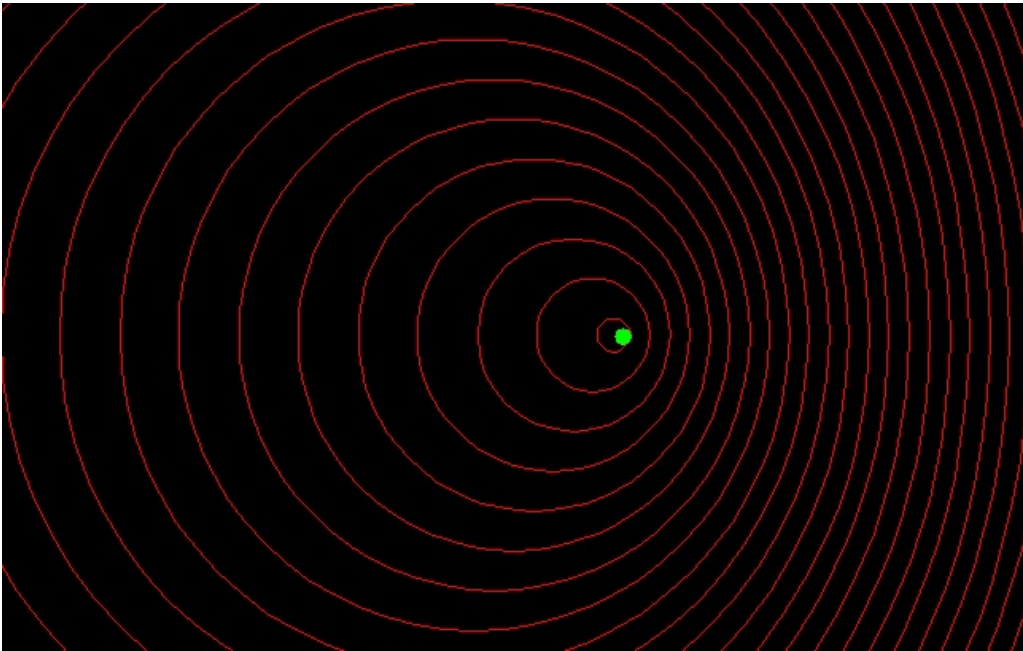
B: Einfachspalt-
Experiment

C: Doppler-Effekt

D: Drei-Körper-Problem

Hinweise für ein dynamisches Universum: Galaxienflucht

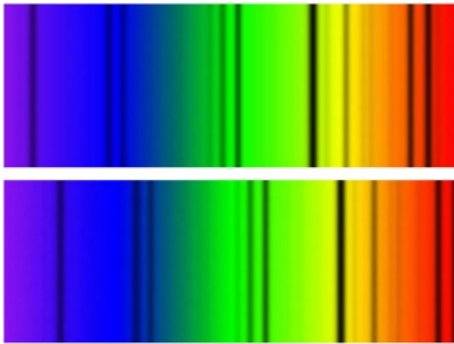
Physikalische Grundlagen II: Doppler-Effekt



Bewegung der Lichtquelle hat Auswirkung auf das von uns wahrgenommene Absorptionsspektrum!

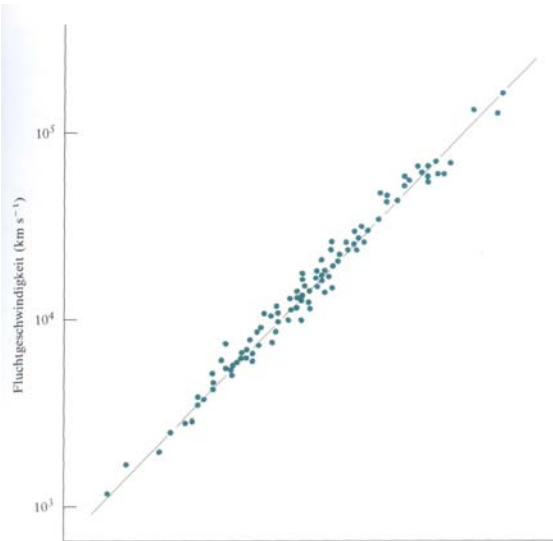
Hinweise für ein dynamisches Universum: Galaxienflucht

1910-1920 Spektroskopische Untersuchung von
Spiralnebeln



Hinweise für ein dynamisches Universum: Galaxienflucht

1910-1920 Spektroskopische Untersuchung von Spiralnebeln



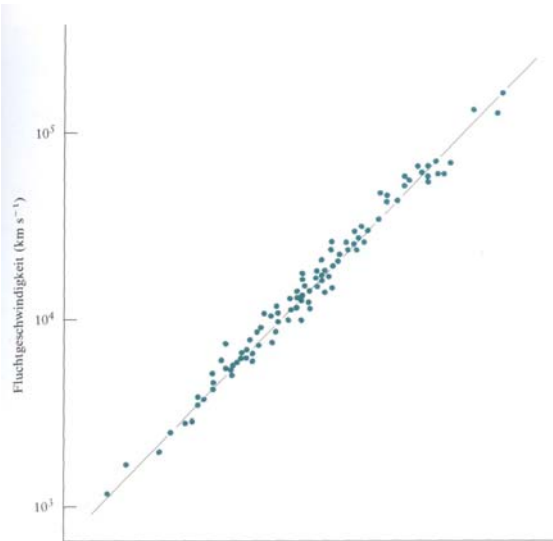
Hubble 1929:

Fluchtgeschwindigkeit \sim Abstand

$v = H \cdot r$ mit H: Hubble-Parameter

Hinweise für ein dynamisches Universum: Galaxienflucht

1910-1920 Spektroskopische Untersuchung von Spiralnebeln



Hubble 1929:

Fluchtgeschwindigkeit \sim Abstand

$v = H \cdot r$ mit H : Hubble-Parameter



Grundgedanke der **Urknall-Theorie** ("Big Bang")

Zeitabschätzung möglich: $t_{\text{Universum}} = 13$ Mrd. Jahre

Überlegungen zum expandierenden Universum

1. Erde Mittelpunkt des Weltalls?

➔ Kosmologisches Prinzip

2. Von wo hat die Expansion begonnen?

➔ Idee des gekrümmten Raums (2-dim. Modell:
Oberfläche eines Ballons)

Überlegungen zum expandierenden Universum

1. Erde Mittelpunkt des Weltalls?

➔ Kosmologisches Prinzip

2. Von wo hat die Expansion begonnen?

➔ Idee des gekrümmten Raums (2-dim. Modell:
Oberfläche eines Ballons)

- Aufblasen entspricht Expansion des 2-dim. Raums
- Kein Oberflächenpunkt ausgezeichnet
- Radius R nennt sich Skalenfaktor und ist Maß für die Ausdehnung des Raums (auch im 3-dim. Raum)
- 3-dim. gekrümmter Raum nicht mehr vorstellbar

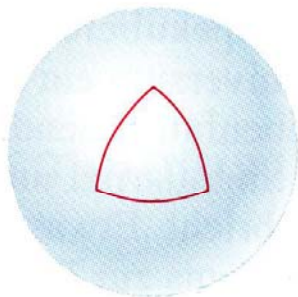
Überlegungen zum expandierenden Universum

1. Erde Mittelpunkt des Weltalls?

➔ Kosmologisches Prinzip

2. Von wo hat die Expansion begonnen?

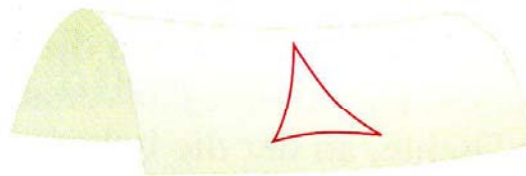
➔ Idee des gekrümmten Raums (2-dim. Modell:
Oberfläche eines Ballons)



positive
Krümmung



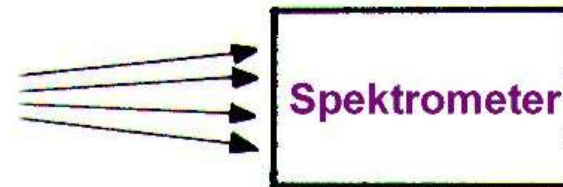
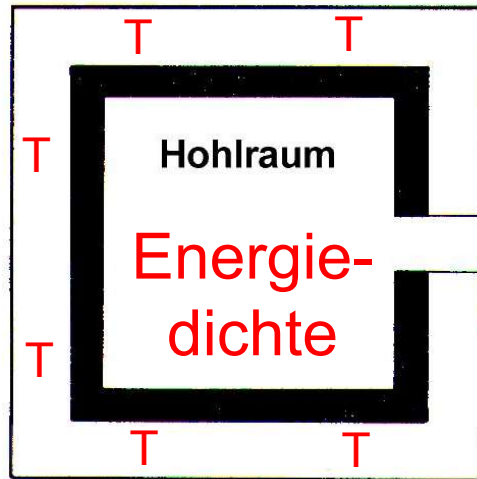
keine
Krümmung



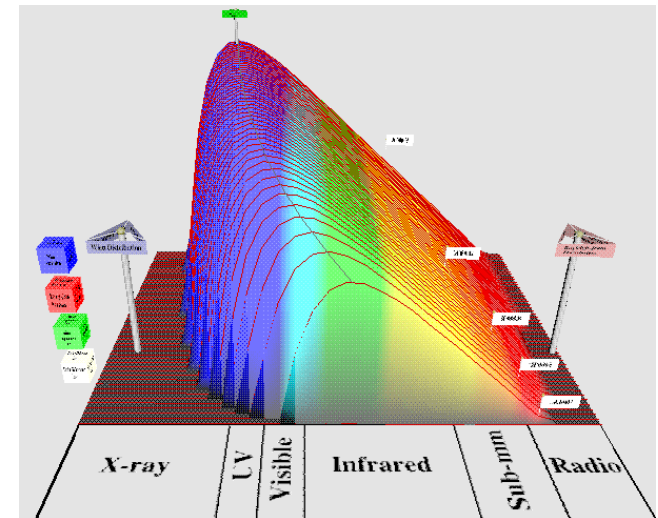
negative
Krümmung

Hinweise für ein dynamisches Universum: 3-K-Hintergrundstrahlung

Physikalische Grundlagen: Schwarzkörperstrahlung



Aus dem Strahlungsprofil ist die
Temperatur bestimmbar!

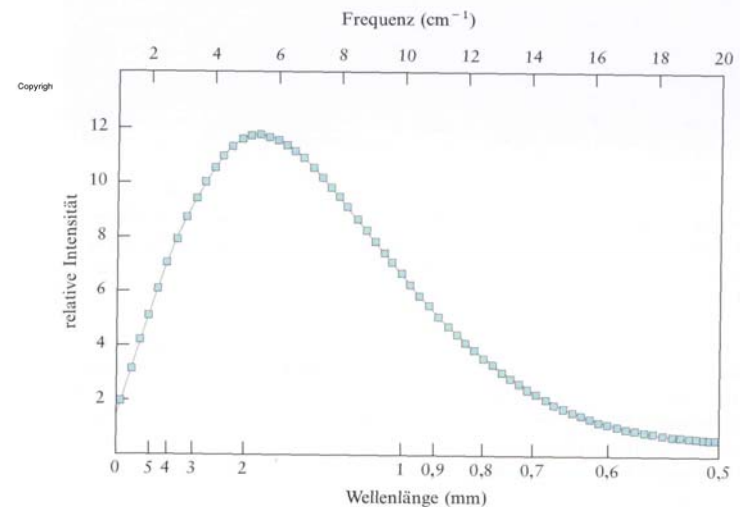
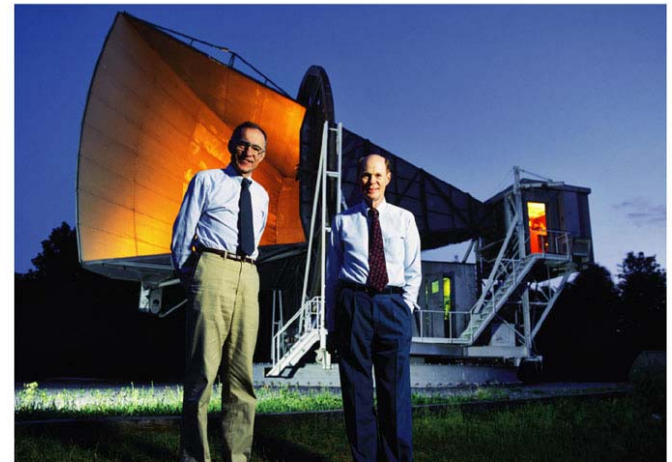


Hinweise für ein dynamisches Universum: 3-K-Hintergrundstrahlung

- Anfangsstadium des Universums mit hochenergetischer Strahlung
- Abnahme der Temperatur durch Expansion des Raums

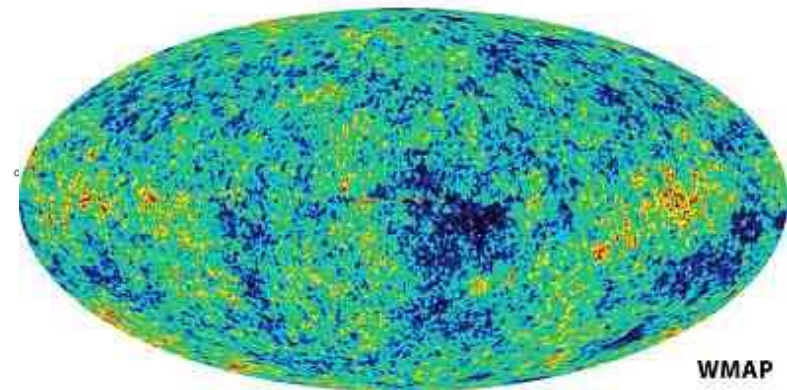
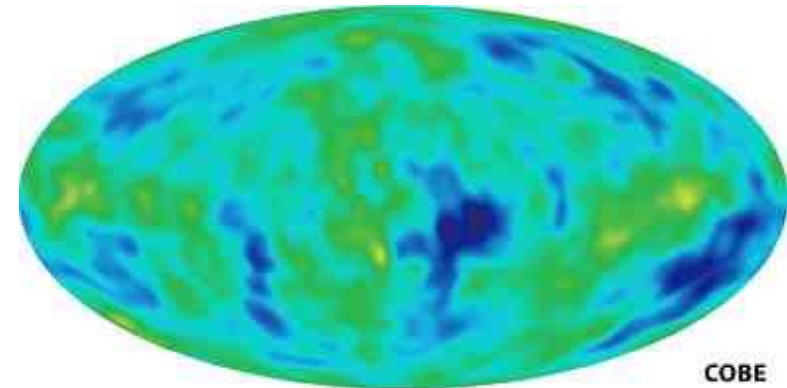
Hinweise für ein dynamisches Universum: 3-K-Hintergrundstrahlung

- Anfangsstadium des Universums mit hochenergetischer Strahlung
- Abnahme der Temperatur durch Expansion des Raums
- 1964 Entdeckung des Mikrowellenhintergrunds durch Penzias und Wilson



Hinweise für ein dynamisches Universum: 3-K-Hintergrundstrahlung

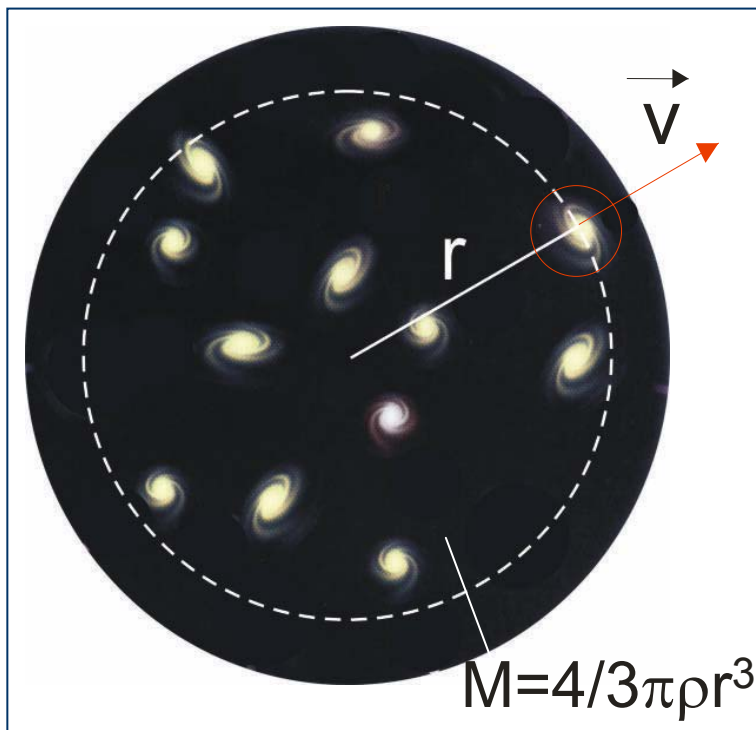
- Anfangsstadium des Universums mit hochenergetischer Strahlung
- Abnahme der Temperatur durch Expansion des Raums
- 1964 Entdeckung des Mikrowellenhintergrunds durch Penzias und Wilson
- Rückschlüsse auf Temperaturen in der Frühphase des Universums



4. Modelle des expandierenden Universums

Anschauliche Beschreibung in Newtonscher Theorie:

Fluchtbewegung einer Galaxie



Energiebetrachtung:

Lage-energie + Bewegungsenergie = **Konst**

— +

Möglichkeiten:

Konstante $<0, =0, >0$

4. Modelle des expandierenden Universums

Anschauliche Beschreibung in Newtonscher Theorie:



$$\begin{array}{l} \text{Lage-} \\ \text{energie} \\ - \\ \text{Bewegungs-} \\ \text{energie} \\ + \end{array} = \text{Konst}$$

Wie bewegt sich der mit einer Anfangsgeschwindigkeit abgeschossene Ball, wenn $K > 0$ ist?

A: Er erreicht eine bestimmte Höhe und verharrt dort in der Luft.

B: Er kann die Erdatmosphäre verlassen und bewegt sich immer weiter.

C: Er fällt zurück wie in Fall 1.

D: Soviel Kraft zum Werfen habe ich nicht!

4. Modelle des expandierenden Universums

Anschauliche Beschreibung in Newtonscher Theorie:



$$\begin{array}{l} \text{Lage-} \\ \text{energie} \\ - \\ \text{Bewegungs-} \\ \text{energie} \\ + \end{array} = \text{Konst}$$

Wie bewegt sich der mit einer Anfangsgeschwindigkeit abgeschossene Ball, wenn $K > 0$ ist?

A: Er erreicht eine bestimmte Höhe und verharrt dort in der Luft.

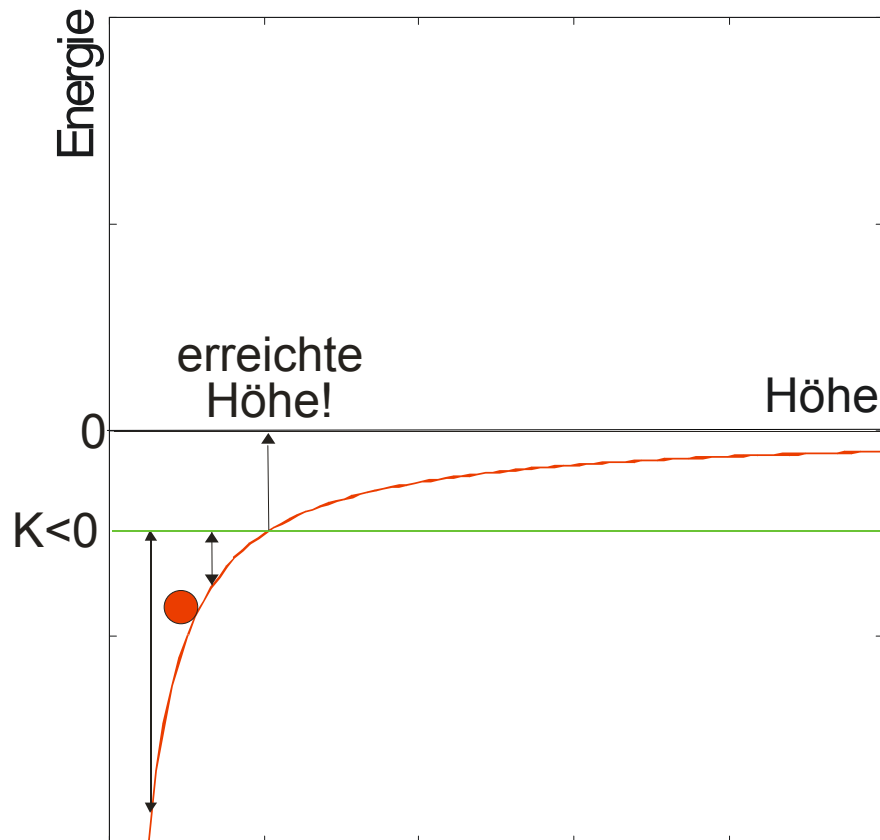
B: Er kann die Erdatmosphäre verlassen und bewegt sich immer weiter.

C: Er fällt zurück wie in Fall 1.

D: Soviel Kraft zum Werfen habe ich nicht!

Offenes und geschlossenes Universum

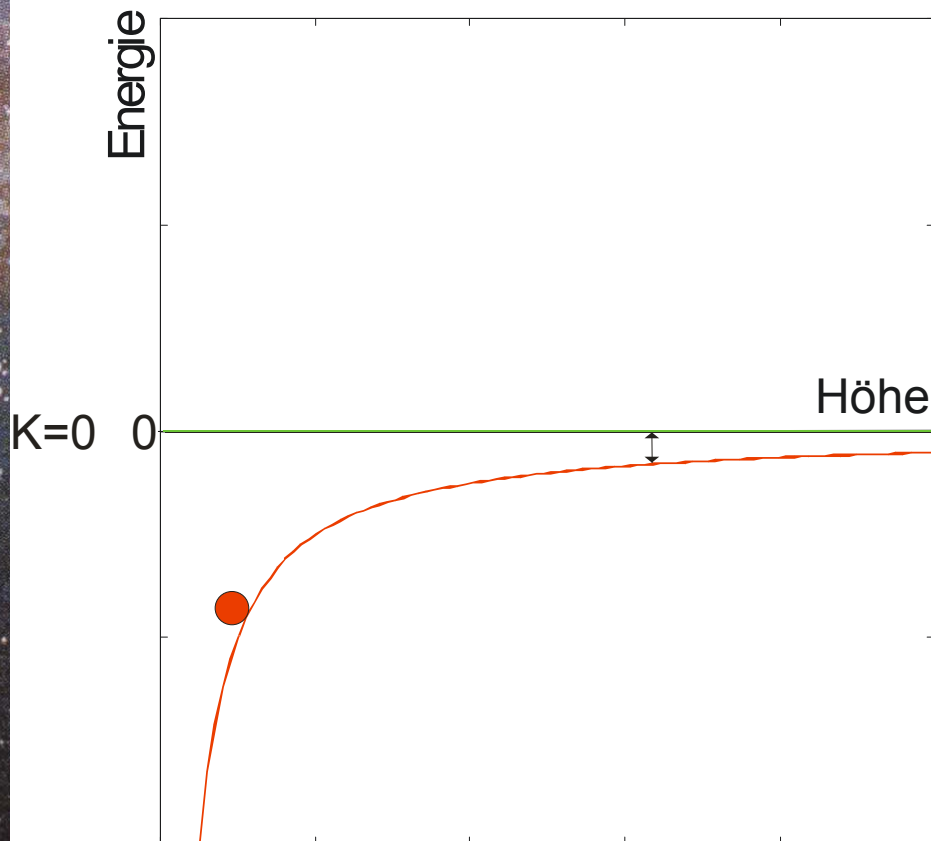
Bei der Fluchtbewegung:
Lageenergie nimmt zu, Bewegungsenergie nimmt ab.



1. $K < 0$: „Geschlossenes Universum“

Offenes und geschlossenes Universum

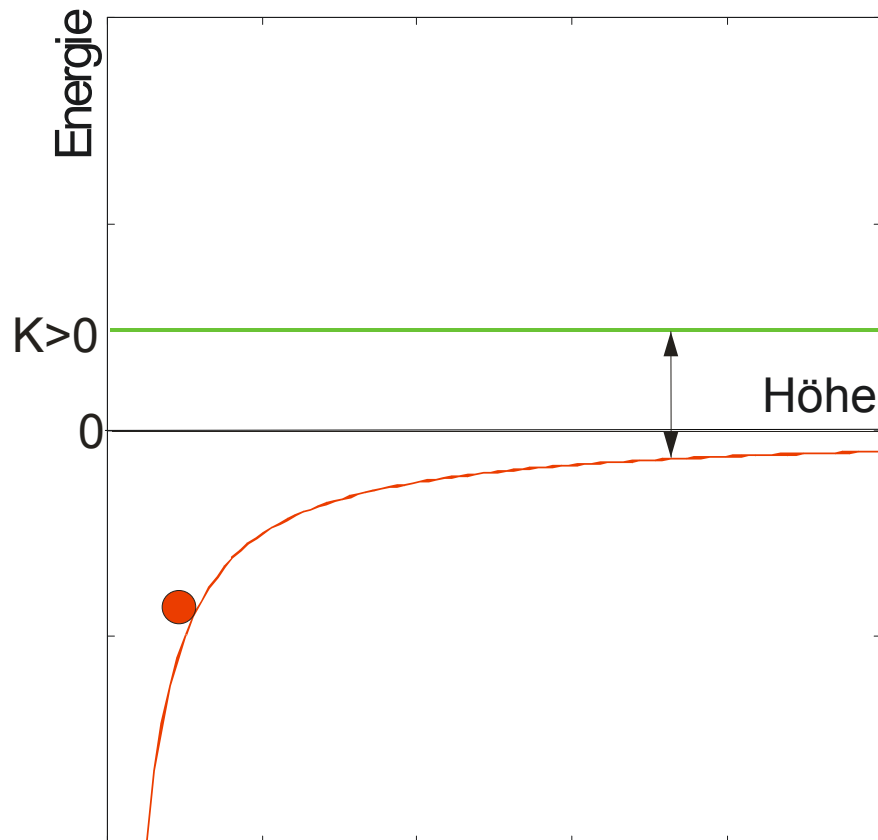
Bei der Fluchtbewegung:
Lageenergie nimmt zu, Bewegungsenergie nimmt ab.



1. $K < 0$: „Geschlossenes Universum“
2. $K = 0$: „Einstein-de-Sitter-Modell“

Offenes und geschlossenes Universum

Bei der Fluchtbewegung:
Lageenergie nimmt zu, Bewegungsenergie nimmt ab.



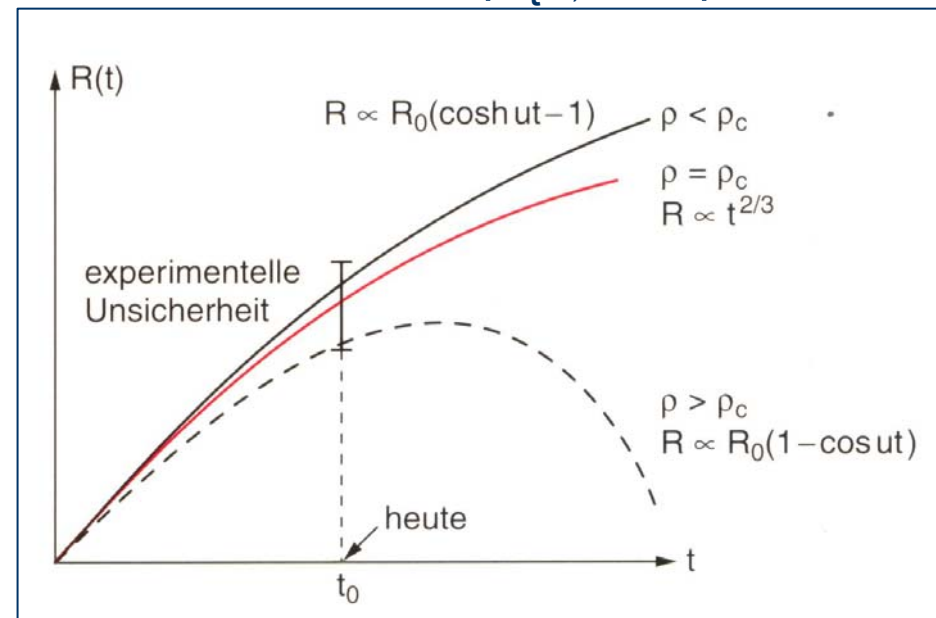
1. $K < 0$: „Geschlossenes Universum“
2. $K = 0$: „Einstein-de-Sitter-Modell“
3. $K > 0$: „Offenes Universum“

Offenes und geschlossenes Universum

Masse im Universum für das Schicksal verantwortlich!

1. $\rho < \rho_{\text{krit}}$: Expansion unendlicher Dauer
2. $\rho = \rho_{\text{krit}}$: Expansion unendlicher Dauer ($v_{t \rightarrow \infty} = 0$)
3. $\rho > \rho_{\text{krit}}$: kollabierendes Universum („Big Crunch“)

Experimentelle Unsicherheit?



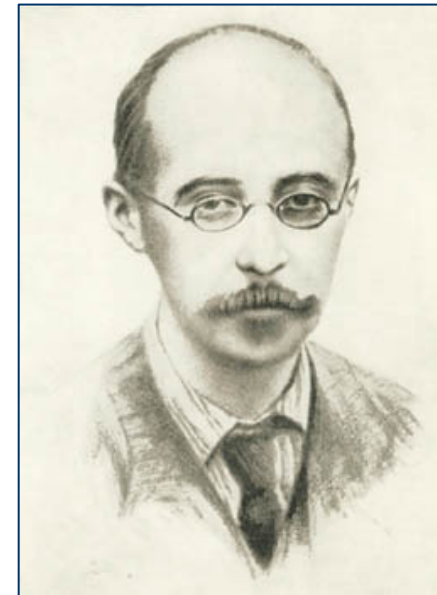
Friedmann-Weltmodelle

„Friedmann-Gleichung“:

$$\frac{M}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{GM^2}{R} = -kC$$

Bewegungs-
energie + Lage-
energie = Konst.

$k = -1$: negative
 $k = 0$: keine
 $k = +1$: positive
Raumkrümmung

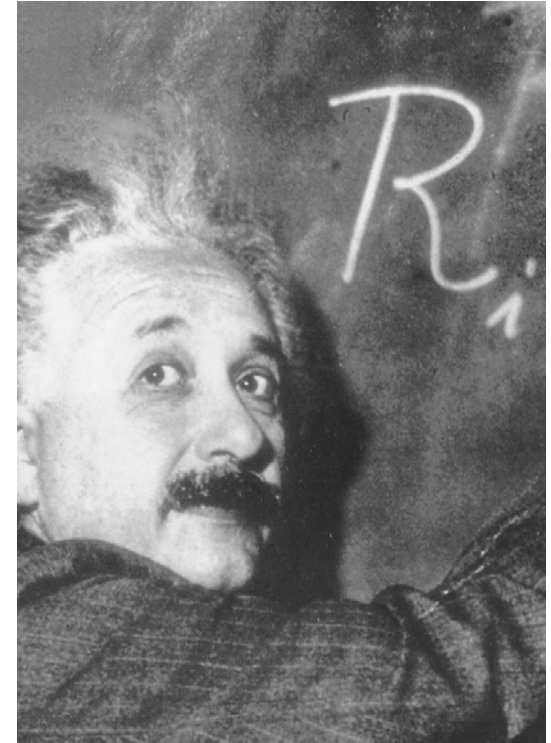


Die „Eselei“ des Einstein

$$\frac{M}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{GM^2}{R} - \frac{1}{2} C \Lambda R^2 = -kC$$

mit $k = +1, 0, -1$

Λ : Kosmologische
Konstante



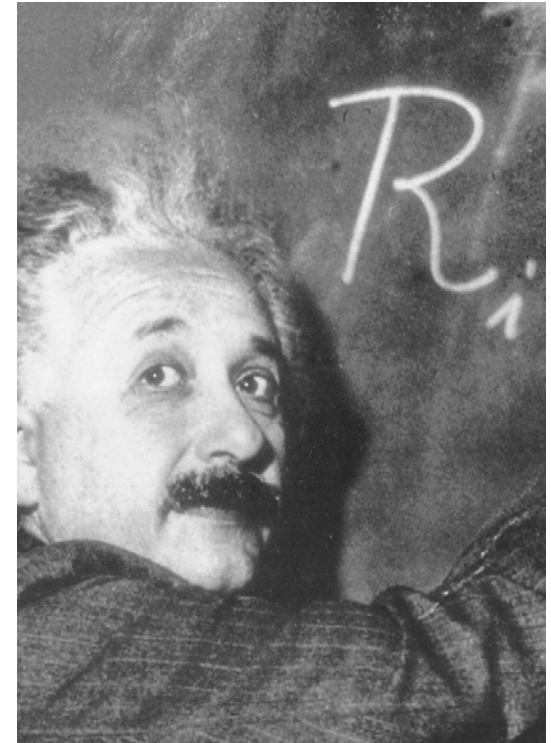
Die „Eselei“ des Einstein

$$\frac{M}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{GM^2}{R} - \frac{1}{2} C \Lambda R^2 = -kC$$

mit $k = +1, 0, -1$

Λ : Kosmologische
Konstante

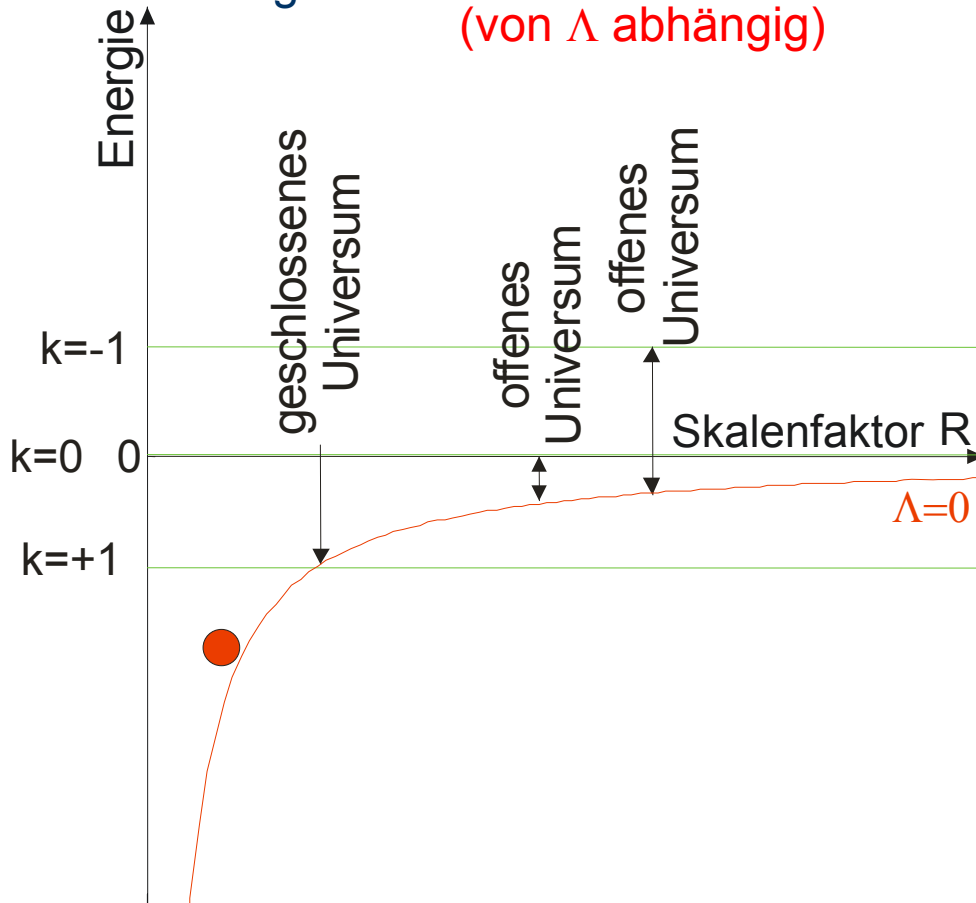
Bewegungs-
energie + „Effektive Lage-
energie“ = $-kC$
(von Λ abhängig)



Friedmann-Weltmodelle

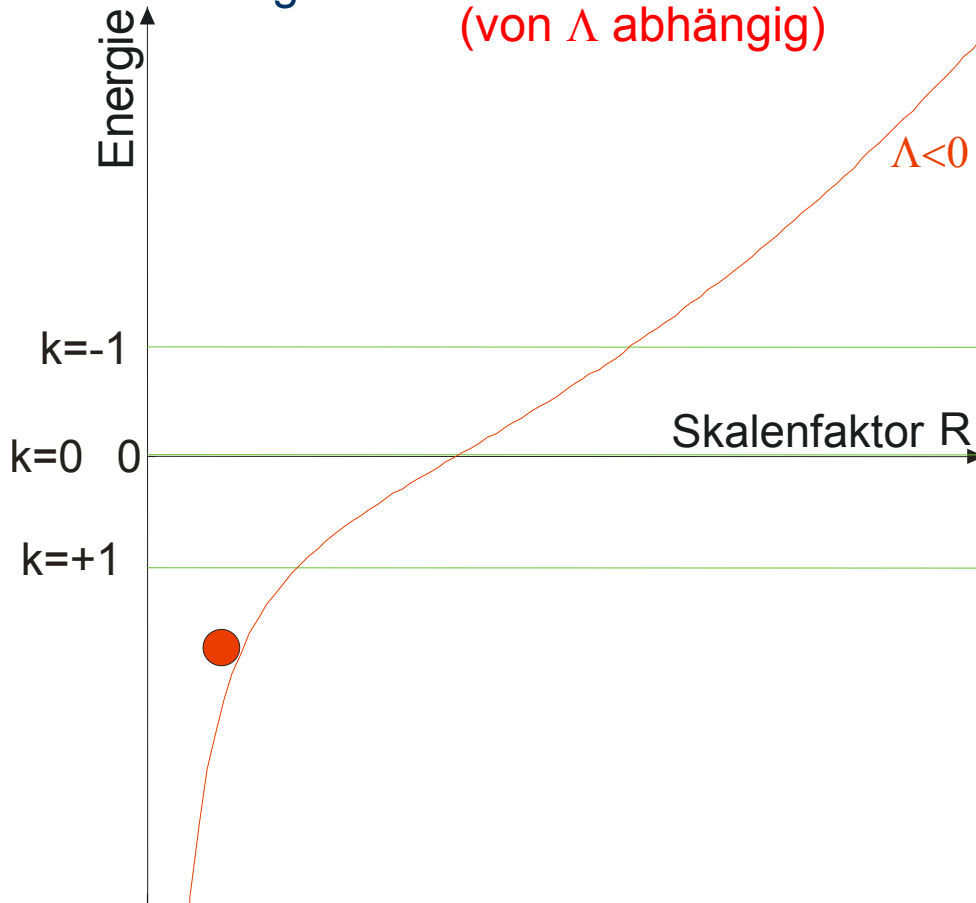
$$\text{Bewegungsenergie} + \text{„Effektive Lageenergie“ (von } \Lambda \text{ abhängig)} = -kC$$

1. $\Lambda=0$: offene und geschlossene Universen



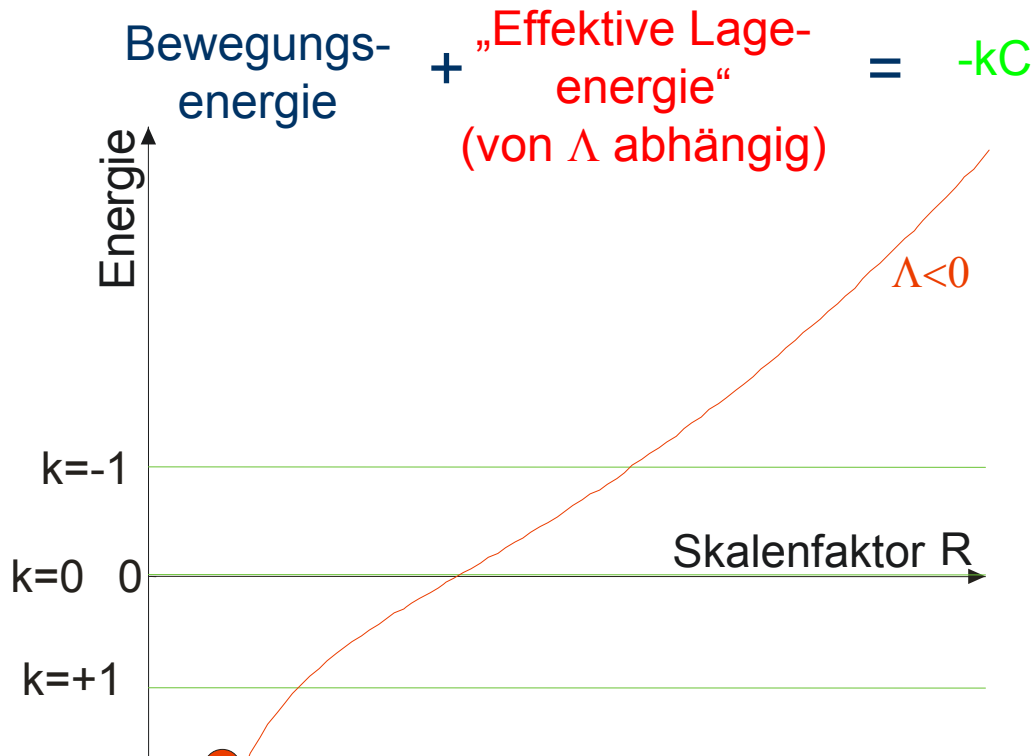
Friedmann-Weltmodelle

$$\text{Bewegungsenergie} + \text{„Effektive Lageenergie“ (von } \Lambda \text{ abhängig)} = -kC$$



1. $\Lambda=0$: offene und geschlossene Universen

Friedmann-Weltmodelle



1. $\Lambda=0$: offene und geschlossene Universen

Welche Universen gibt es für $\Lambda < 0$?

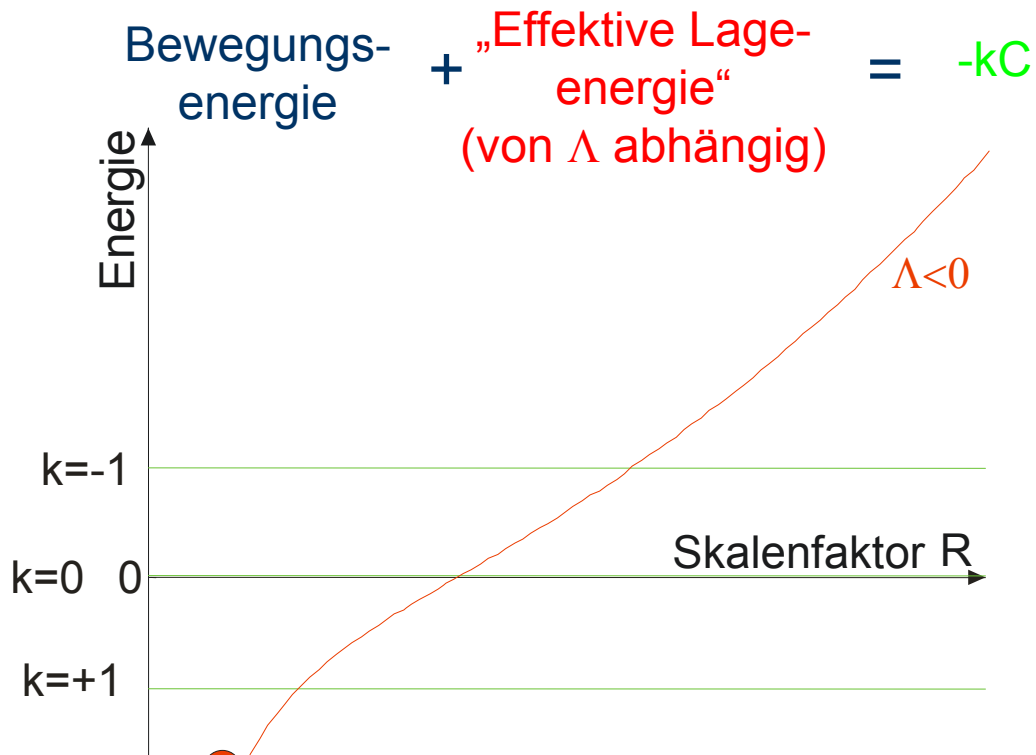
A: drei geschlossene

B: zwei geschlossene, ein offenes

C: ein geschlossenes, zwei offene

D: drei offene

Friedmann-Weltmodelle



1. $\Lambda=0$: offene und geschlossene Universen

Welche Universen gibt es für $\Lambda < 0$?

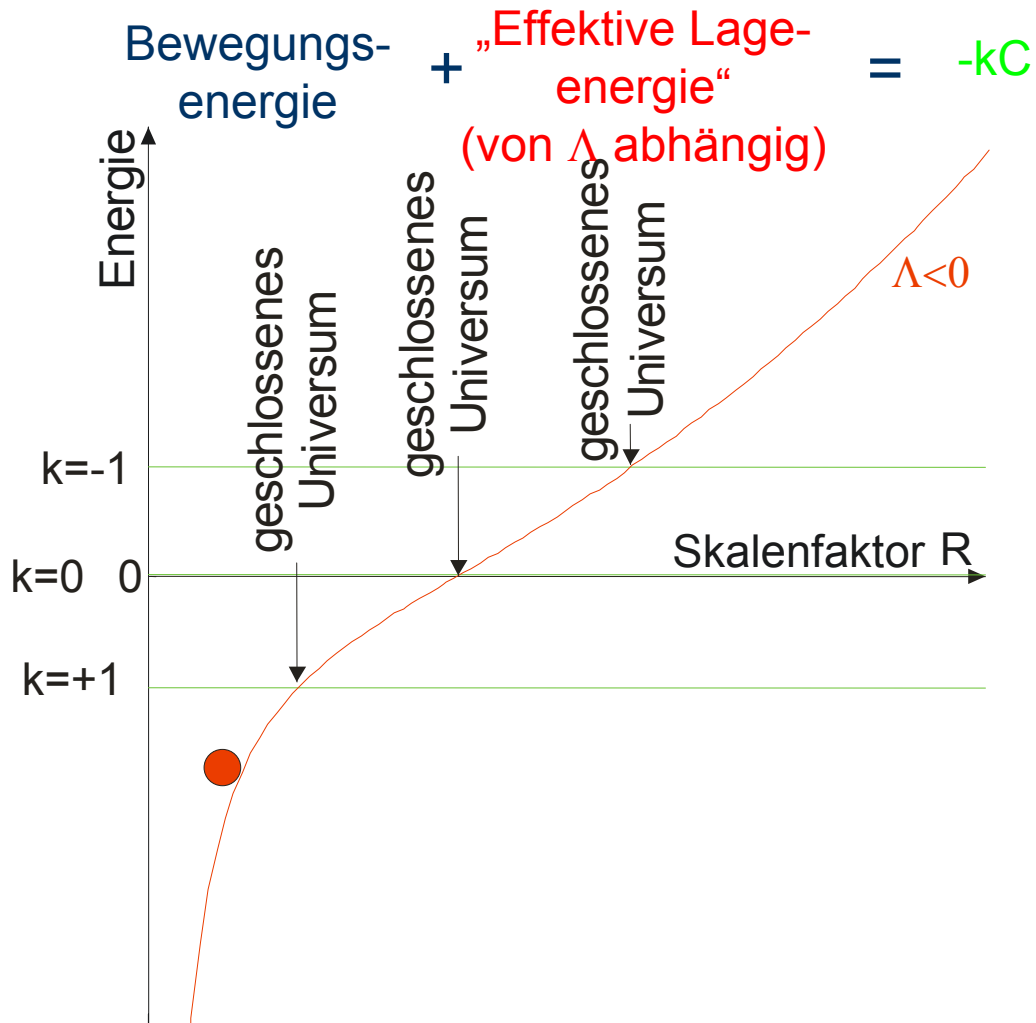
A: drei geschlossene

B: zwei geschlossene, ein offenes

C: ein geschlossenes, zwei offene

D: drei offene

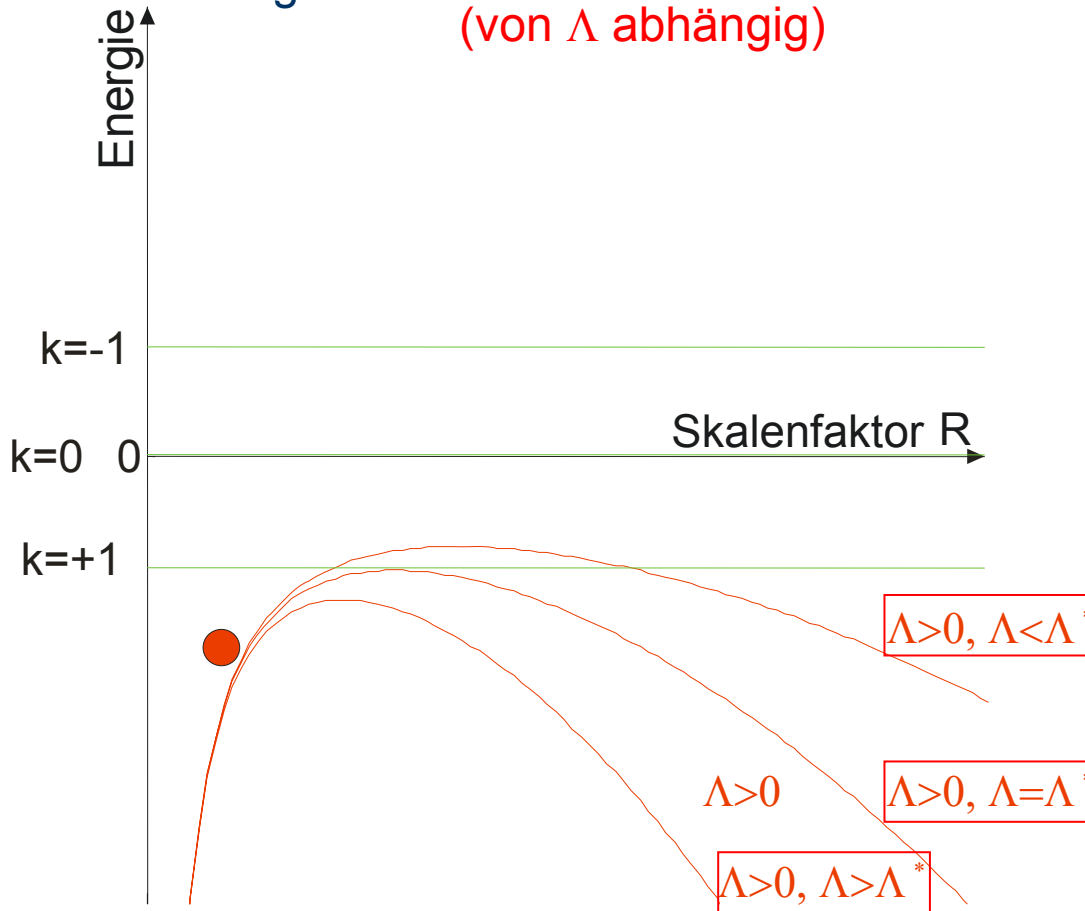
Friedmann-Weltmodelle



1. $\Lambda=0$: offene und geschlossene Universen
2. $\Lambda < 0$: nur geschlossene Universen

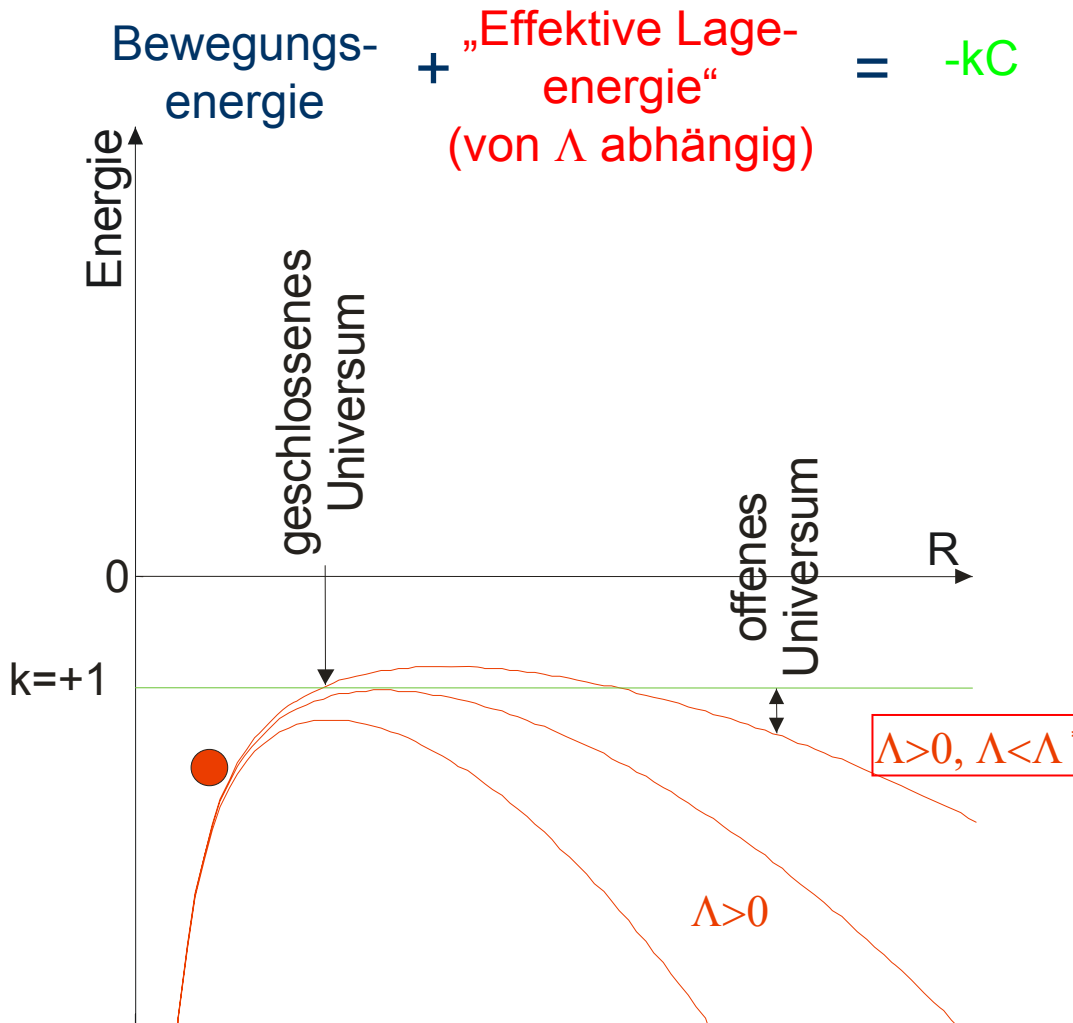
Friedmann-Weltmodelle

$$\text{Bewegungsenergie} + \text{„Effektive Lageenergie“ (von } \Lambda \text{ abhängig)} = -kC$$



1. $\Lambda=0$: offene und geschlossene Universen
2. $\Lambda < 0$: nur geschlossene Universen

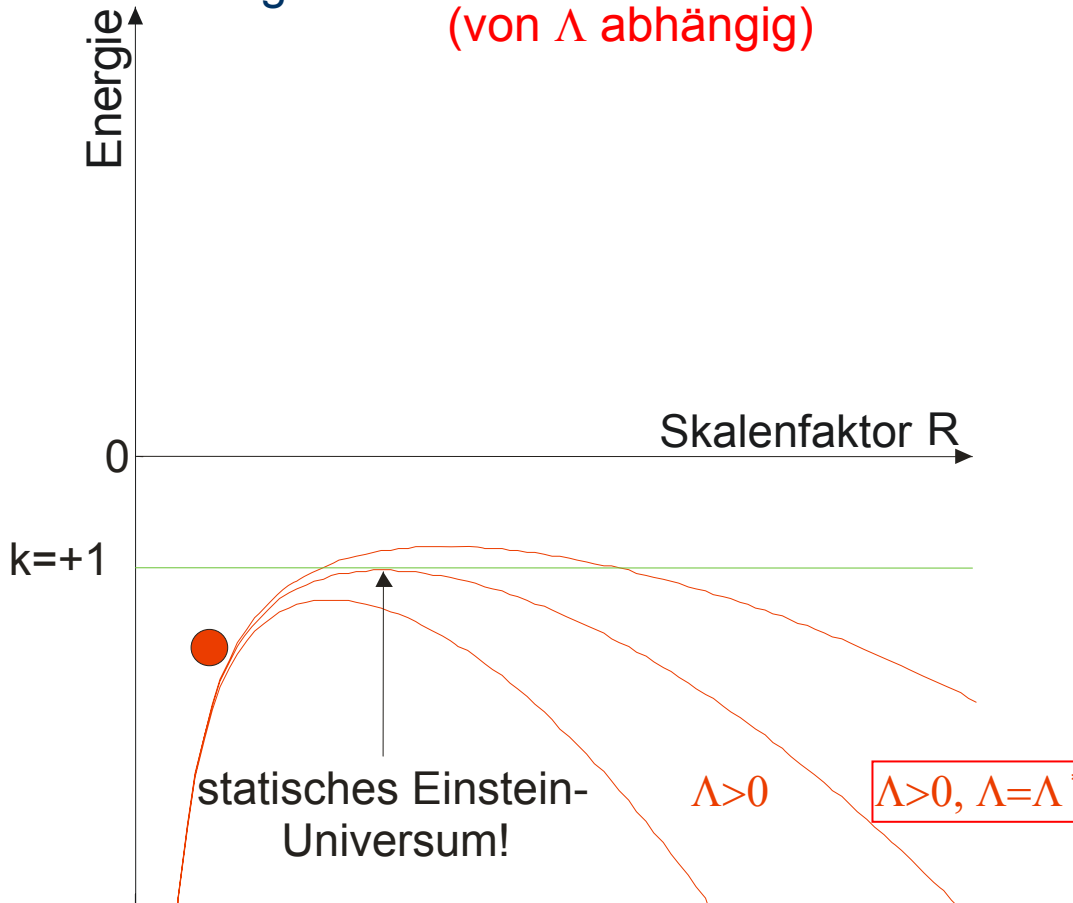
Friedmann-Weltmodelle



1. $\Lambda=0$: offene und geschlossene Universen
2. $\Lambda < 0$: nur geschlossene Universen

Friedmann-Weltmodelle

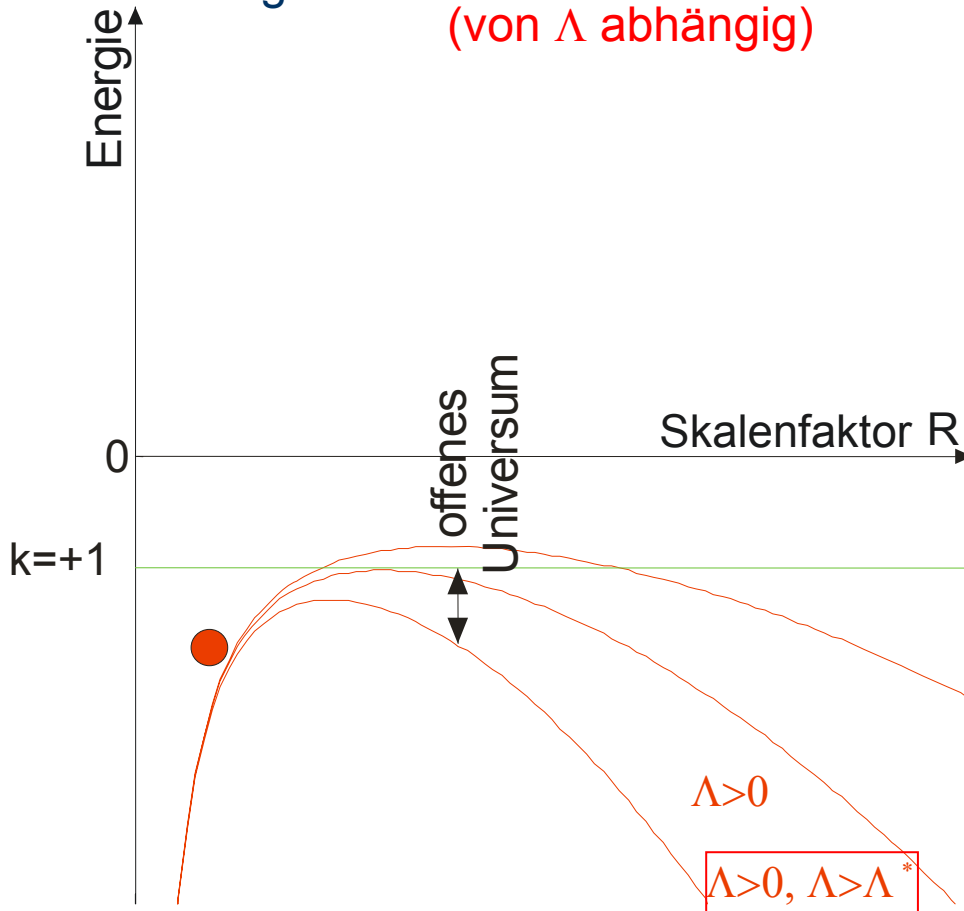
$$\text{Bewegungsenergie} + \text{„Effektive Lageenergie“ (von } \Lambda \text{ abhängig)} = -kC$$



1. $\Lambda=0$: offene und geschlossene Universen
2. $\Lambda < 0$: nur geschlossene Universen

Friedmann-Weltmodelle

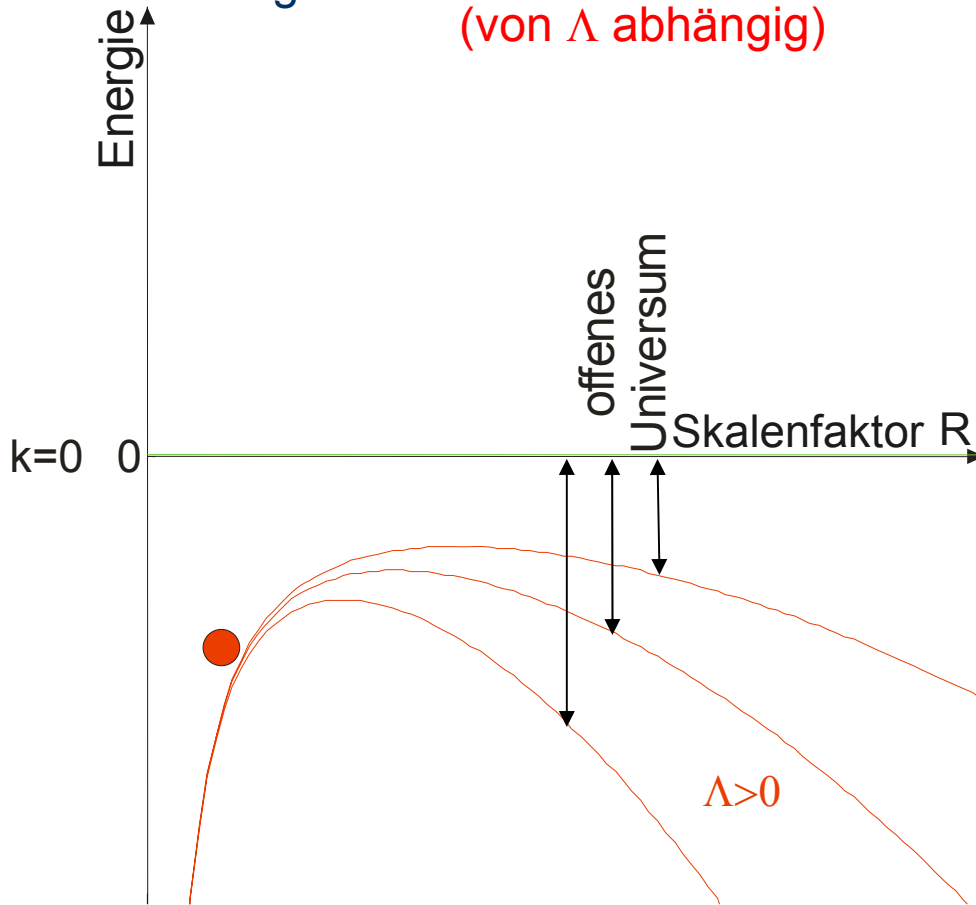
$$\text{Bewegungsenergie} + \text{„Effektive Lageenergie“ (von } \Lambda \text{ abhängig)} = -kC$$



1. $\Lambda=0$: offene und geschlossene Universen
2. $\Lambda < 0$: nur geschlossene Universen

Friedmann-Weltmodelle

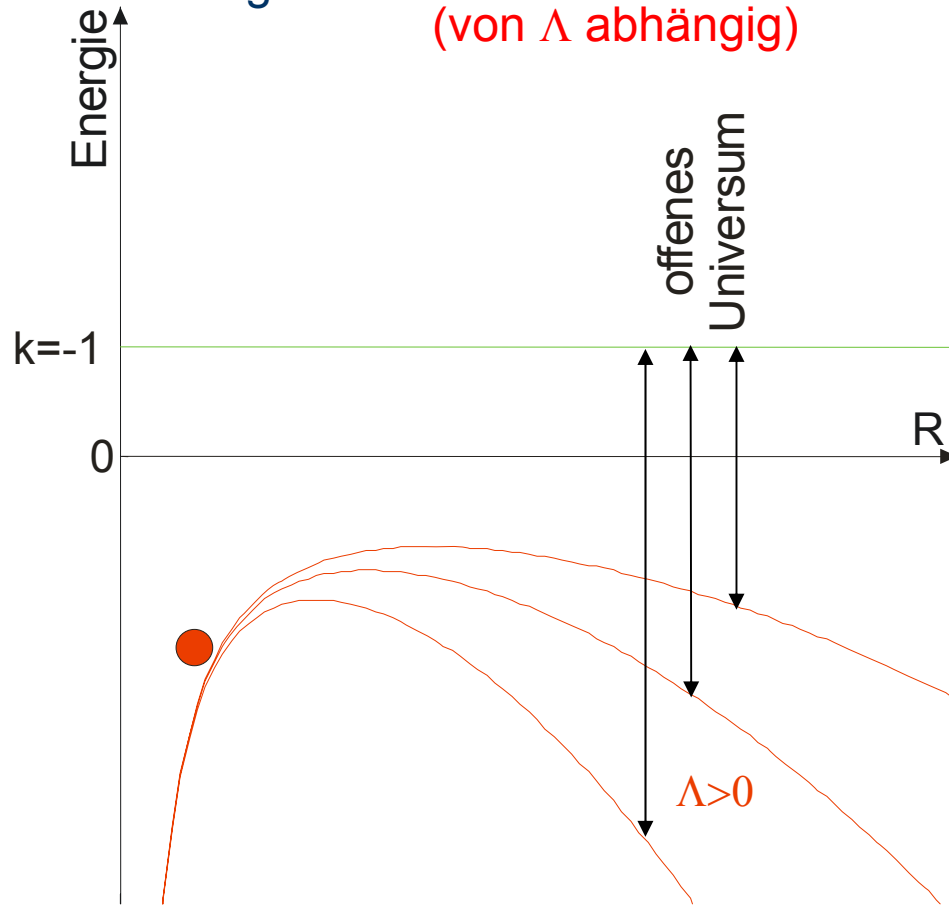
$$\text{Bewegungsenergie} + \text{„Effektive Lageenergie“ (von } \Lambda \text{ abhängig)} = -kC$$



1. $\Lambda=0$: offene und geschlossene Universen
2. $\Lambda < 0$: nur geschlossene Universen

Friedmann-Weltmodelle

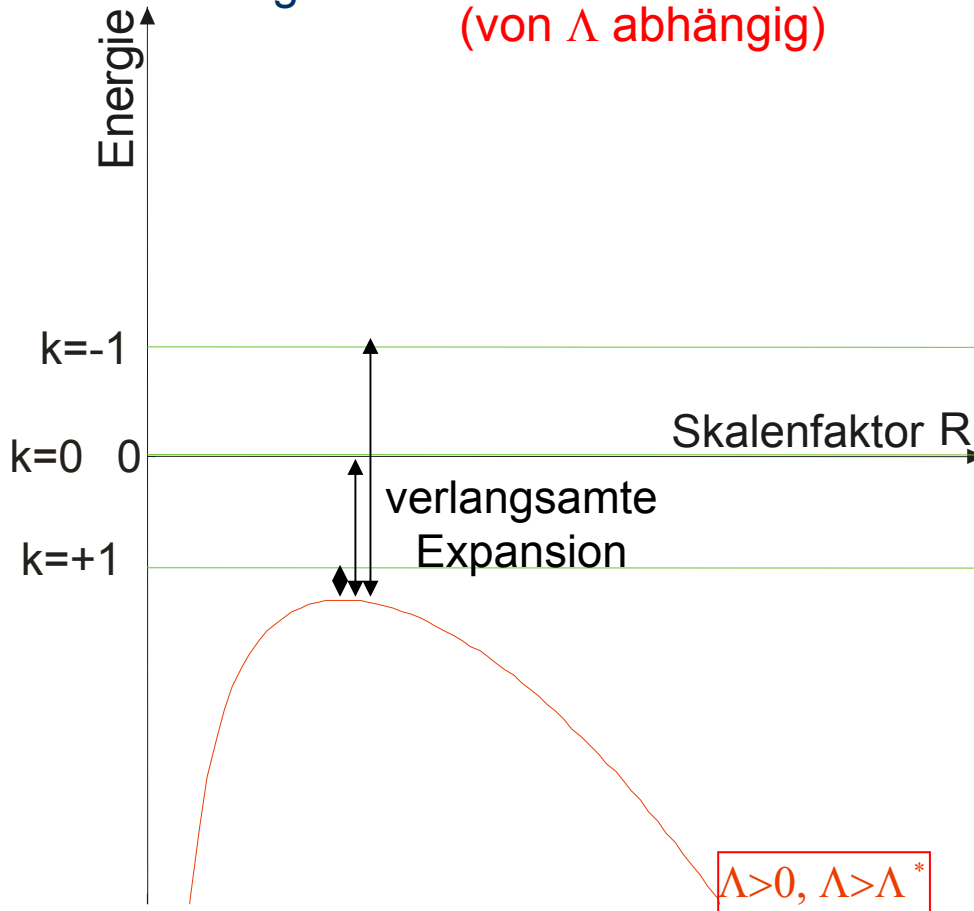
$$\text{Bewegungsenergie} + \text{„Effektive Lageenergie“ (von } \Lambda \text{ abhängig)} = -kC$$



1. $\Lambda=0$: offene und geschlossene Universen
2. $\Lambda < 0$: nur geschlossene Universen

Friedmann-Weltmodelle

$$\text{Bewegungsenergie} + \text{„Effektive Lageenergie“ (von } \Lambda \text{ abhängig)} = -kC$$

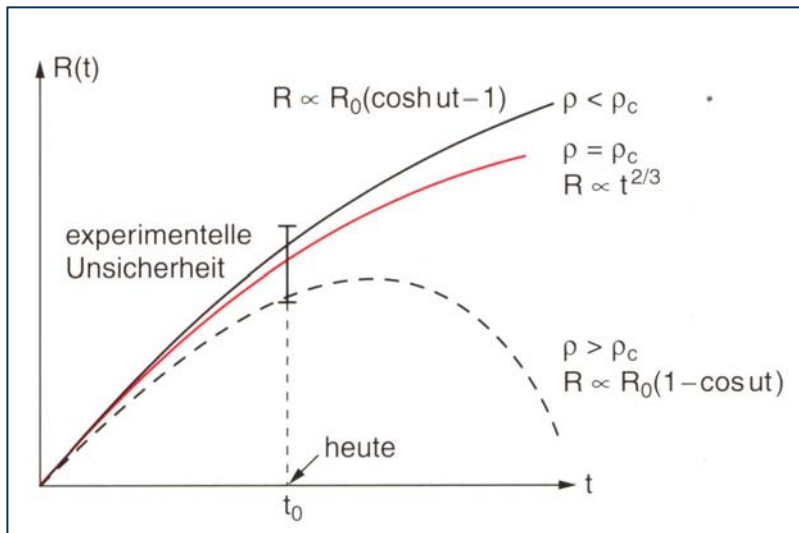


1. $\Lambda=0$: offene und geschlossene Universen
2. $\Lambda<0$: nur geschlossene Universen
3. $\Lambda>0$: statische, offene und geschlossene Universen

Heutige Aussichten

Bis etwa 1997:
Favorisierung von $\Lambda=0$

Zeitliche Entwicklung:



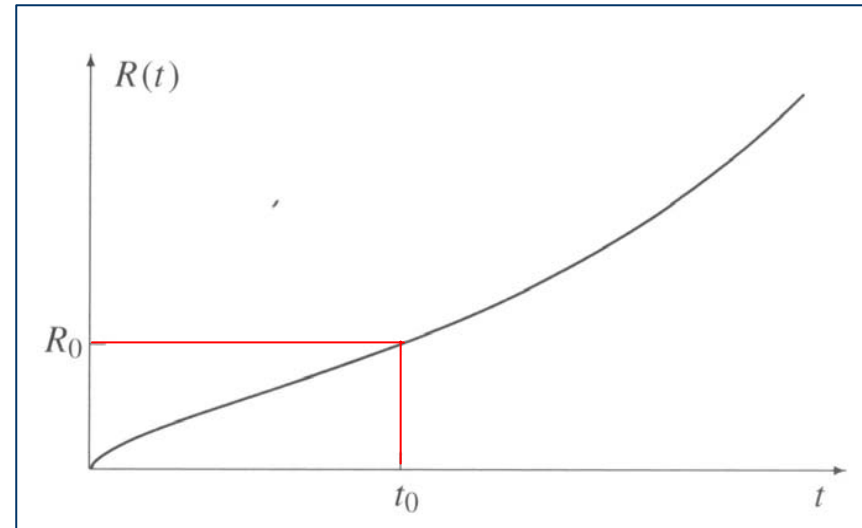
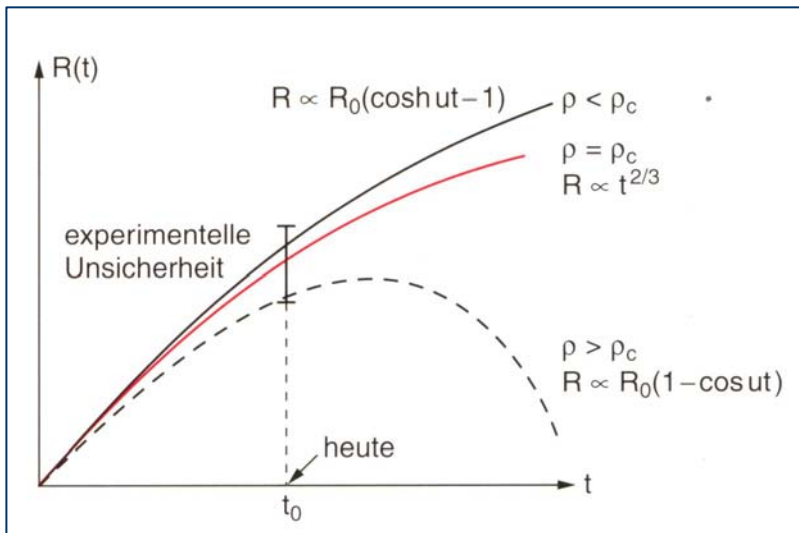
Heutige Aussichten

Bis etwa 1997:
Favorisierung von $\Lambda=0$

Heutiger Parameter:

$$\frac{1}{3} \frac{\Lambda c^2}{H_0^2} = 0,7 \pm 0,1 \quad [\Omega_k = 0 \pm 0,06]$$

Zeitliche Entwicklung:



Zusammenfassung

Die Standard-Urknall-Theorie ...

- beschreibt eine Expansion des Universums,
- datiert das Alter der Welt auf 13 Mrd. Jahre,
- trifft eine Aussage über die Zukunft des Universums (beschleunigte Expansion),
- erklärt die empirischen Befunde Rotverschiebung extragalaktischen Lichts und 3-K-Hintergrundstrahlung.

Zusammenfassung

Sie wirft aber auch Fragen auf:

- Welche Bedeutung hat die Kosmologische Konstante?
- Wie verhält es sich mit der Existenz dunkler Materie? ($\frac{\rho}{\rho_{krit}} = 0,3 \pm 0,1$, davon aber nur etwa 15 % sichtbar!)
- Wie verhält es sich mit der Existenz dunkler Energie?
- **Gab es ein „vor“ dem Urknall?
Kann diese Frage überhaupt gestellt werden?**

Ein ganz herzliches Dankeschön an ...

- ... Prof. Dr. Heinz-Jürgen Schmidt
- ... Prof. Dr. Roland Berger
- ... Daniel Schwarz

**... und natürlich an Sie für Ihr
Kommen und Ihre Aufmerksamkeit!!!**