



WESTFÄLISCHE
WILHELMS-UNIVERSITÄT
MÜNSTER

Wieviele Raumdimensionen hat das Universum?

Kosmologie aus Sicht der modernen Physik

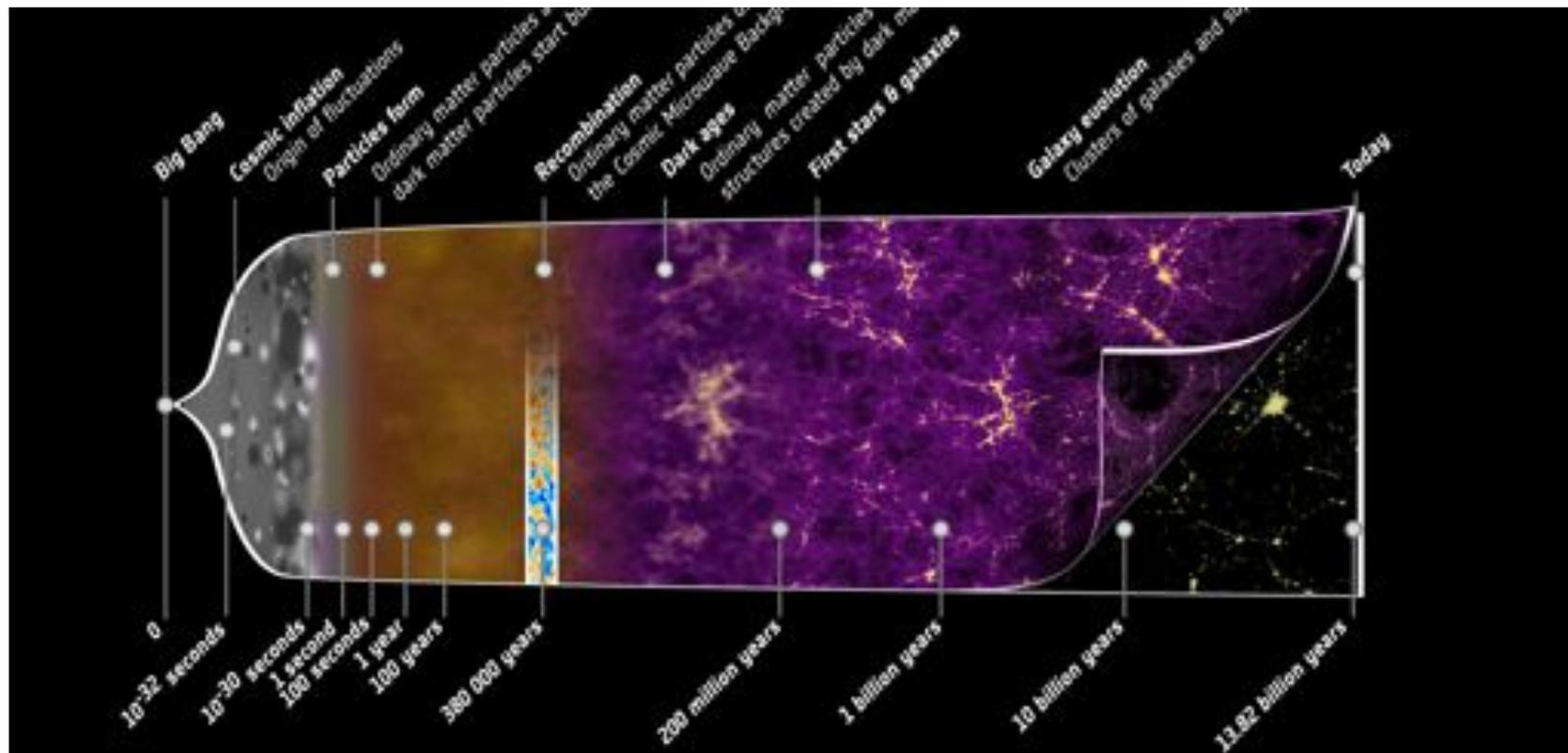
Schöpfungsgeschichte(n)



Schöpfungsgeschichte(n)



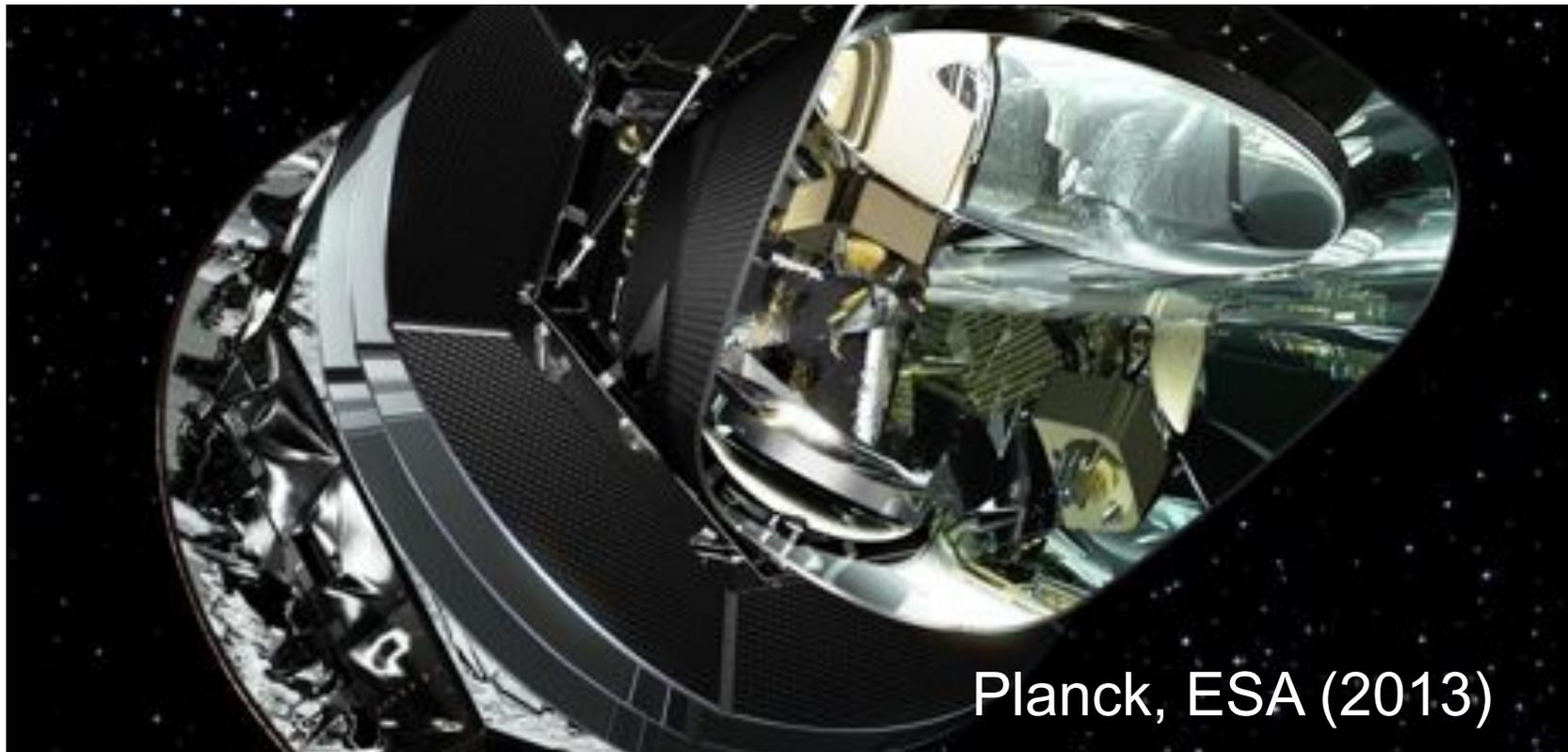
Das Standardmodell der Kosmologie



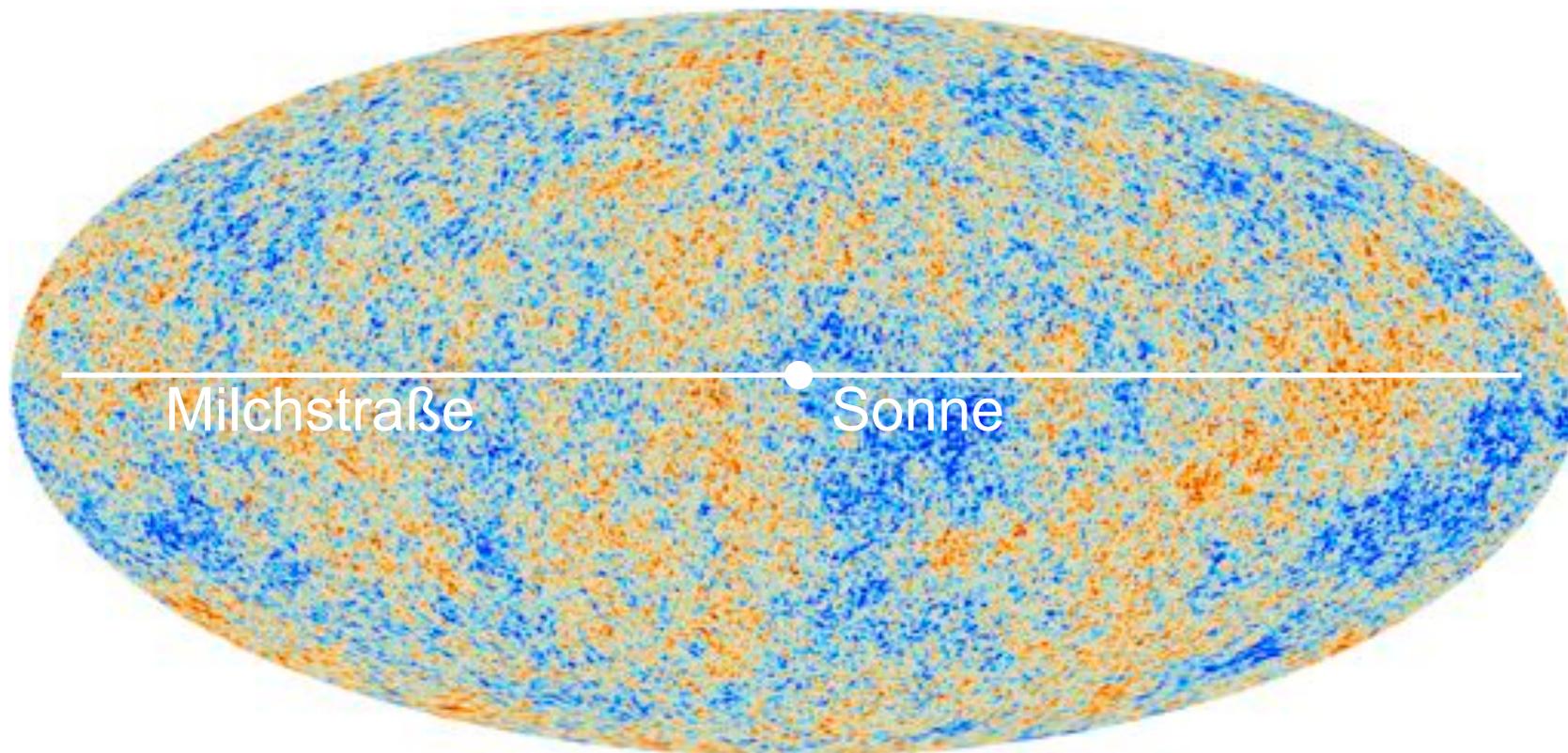
Woher wissen wir, dass es einen Urknall gab?



Und wie macht man das heute?



Das Echo des Urknalls



Spezielle Relativitätstheorie (1905)

Einsteins Postulate:

1. Die physikalischen Gesetze haben in allen Inertialsystemen dieselbe Form.
2. Die Lichtgeschwindigkeit $c = 299\,792\,458\text{ km/s}$ ist konstant und maximal.

Spezielle Relativitätstheorie (1905)

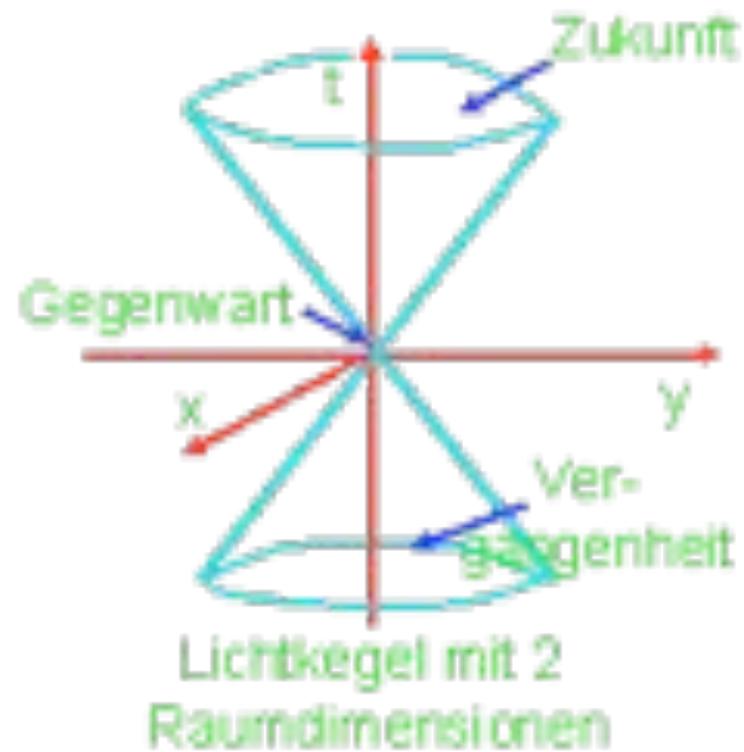
Einsteins Postulate:

1. Die physikalischen Gesetze haben in allen Inertialsystemen dieselbe Form.
2. Die Lichtgeschwindigkeit $c = 299\,792\,458\text{ km/s}$ ist konstant und maximal.

Folgerungen:

1. Raum **und Zeit** sind relativ, nicht absolut → Lorentz-Transformation.
2. Gleichzeitigkeit hängt vom Bezugssystem ab.
3. Kausalität ist nur definiert für zeit- und lichtartig getrennte Systeme.
4. Masse und Energie sind äquivalent: $E = mc^2$ [+ $mv^2/2$ + ...].

Spezielle Relativitätstheorie (1905)



Allgemeine Relativitätstheorie (1915)

Raumzeit:

- Riemannscher Raum (differenzierbare Mannigfaltigkeit), i.a. gekrümmt
- Krümmung wird hervorgerufen durch Anwesenheit von Masse und Energie

Allgemeine Relativitätstheorie (1915)

Raumzeit:

- Riemannscher Raum (differenzierbare Mannigfaltigkeit), i.a. gekrümmt
- Krümmung wird hervorgerufen durch Anwesenheit von Masse und Energie

Äquivalenzprinzip:

- Galilei (schwach): Alle Körper fallen gleich (schwere Masse = träge Masse)
- Einstein (stark): Schwereloses System = frei fallendes System (auch für Licht)

Allgemeine Relativitätstheorie (1915)

Raumzeit:

- Riemannscher Raum (differenzierbare Mannigfaltigkeit), i.a. gekrümmt
- Krümmung wird hervorgerufen durch Anwesenheit von Masse und Energie

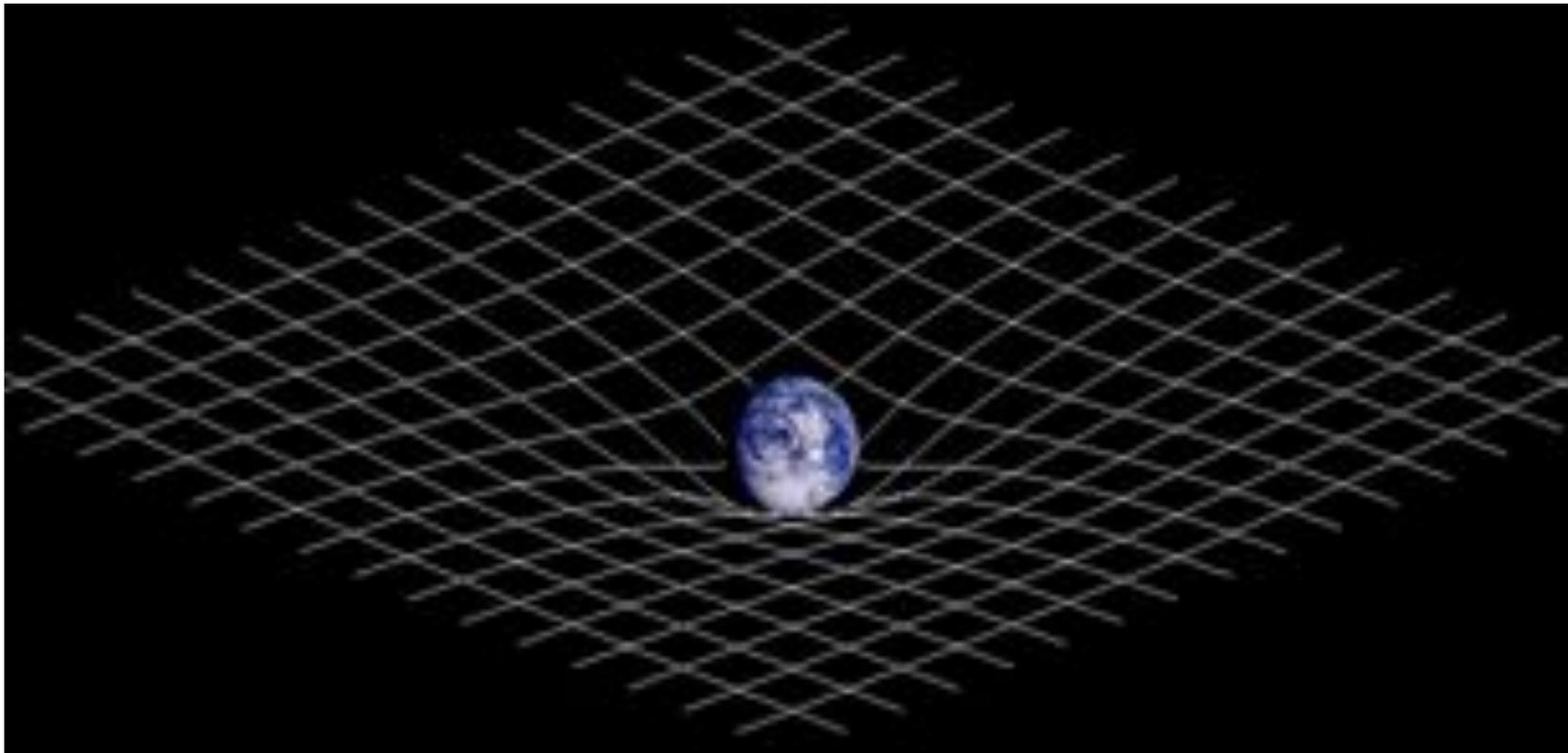
Äquivalenzprinzip:

- Galilei (schwach): Alle Körper fallen gleich (schwere Masse = träge Masse)
- Einstein (stark): Schwereloses System = frei fallendes System (auch für Licht)

Einstein-Gleichungen:
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

- Kosmologische Konstante $\Lambda =$ Vakuum-Energie $T_{\text{vac.}}$

Allgemeine Relativitätstheorie (1915)



Kosmologisches Prinzip

Das Universum ist homogen und isotrop.

Kosmologisches Prinzip

Das Universum ist homogen und isotrop.

Robertson-Walker-Metrik:

- $ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 \cdot \left(\frac{dx^2}{1 - kx^2} + x^2 d\Omega^2 \right)$

- $a(t)$ = Skalenfaktor
- k = Krümmung (+1, 0 oder -1)

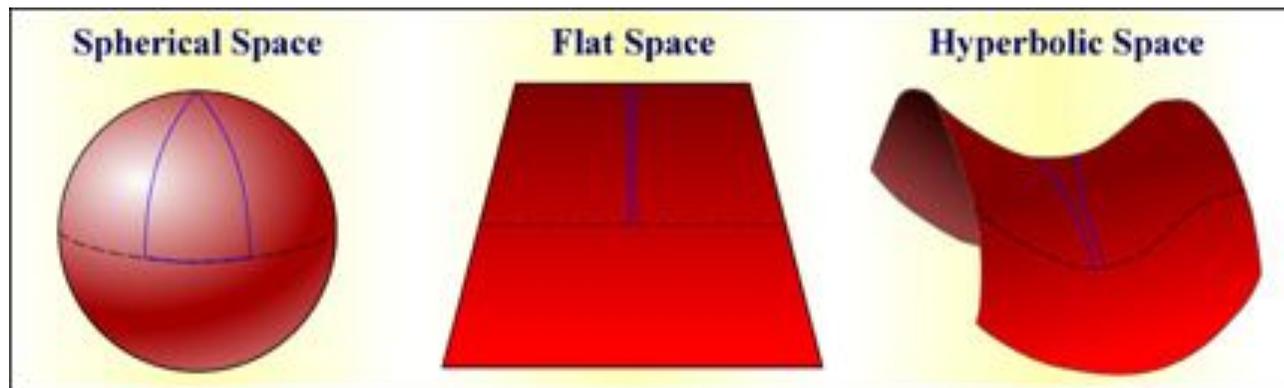
Kosmologisches Prinzip

Das Universum ist homogen und isotrop.

Robertson-Walker-Metrik:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 \cdot \left(\frac{dx^2}{1 - kx^2} + x^2 d\Omega^2 \right),$$

- $a(t)$ = Skalenfaktor
- k = Krümmung (+1, 0 oder -1)



Friedmann-Gleichungen (1922)

Friedmann-Gleichungen (für $\Lambda = 0$):

$$\dot{H} + H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2} (\rho c^2 + 3p)$$

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2}$$

Friedmann-Gleichungen (1922)

Friedmann-Gleichungen (für $\Lambda = 0$):

$$\dot{H} + H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2} (\rho c^2 + 3p)$$

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2}$$

$\Rightarrow a' = H a$ (falls $k = 0$, also $H = \text{const.}$)

Friedmann-Gleichungen (1922)

Friedmann-Gleichungen (für $\Lambda = 0$):

$$\dot{H} + H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2} (\rho c^2 + 3p)$$

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2}$$

$\Rightarrow \dot{a} = H a$ (falls $k = 0$, also $H = \text{const.}$)

Hubble-Konstante:

- $H_0 = 67.80 \pm 0.77 \text{ km/s Mpc}^{-1} \approx 0.7 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$

Friedmann-Gleichungen (1922)

Friedmann-Gleichungen (für $\Lambda = 0$):

$$\dot{H} + H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2} (\rho c^2 + 3p)$$

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2}$$

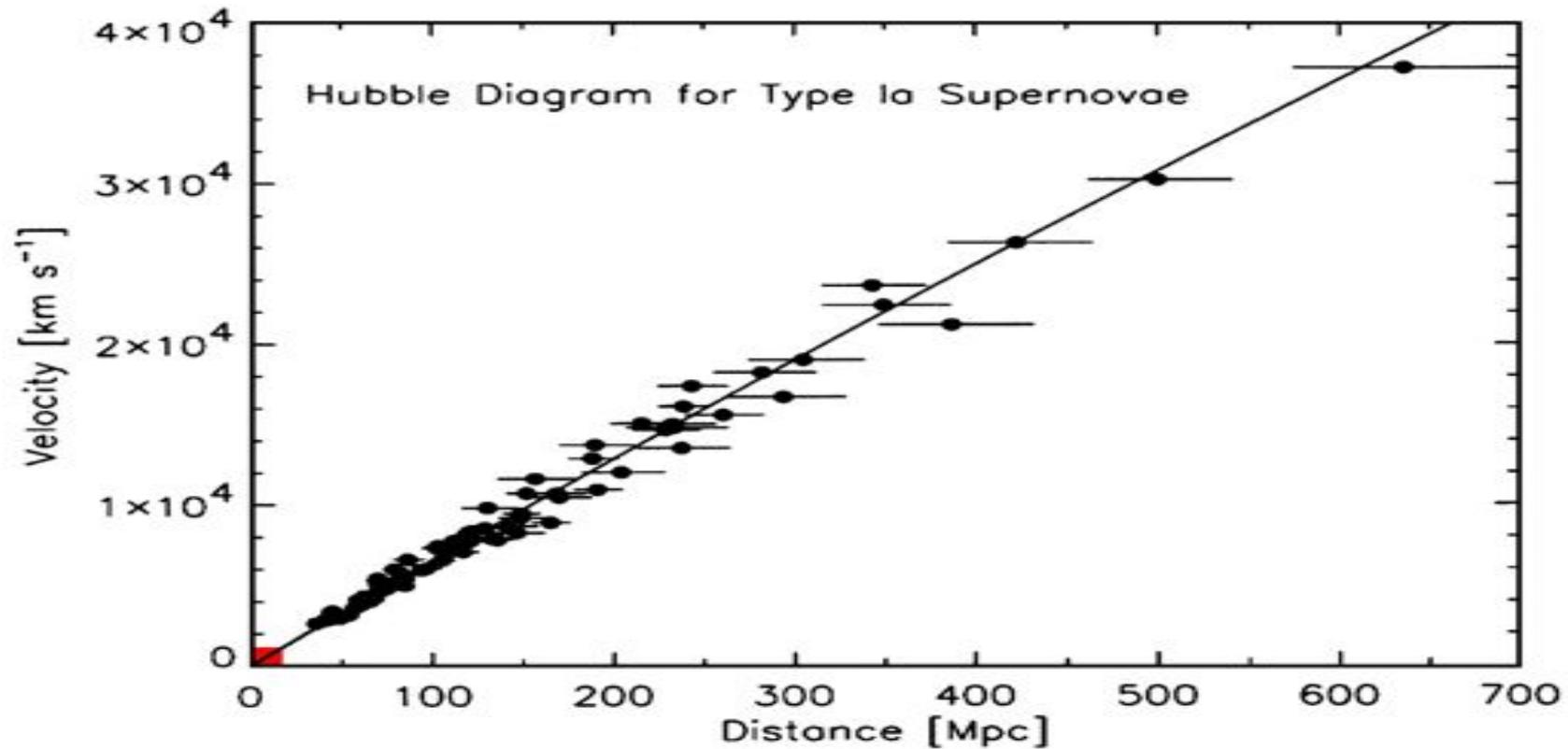
$\Rightarrow a' = H a$ (falls $k = 0$, also $H = \text{const.}$)

Hubble-Konstante:

- $H_0 = 67.80 \pm 0.77 \text{ km/s Mpc}^{-1} \approx 0.7 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$

Alter des Universums: $t_0 = 1/H_0 \approx 14 \text{ Gyr}$

Hubble-Diagramm (1929)



HE 1523-0901 – ältester Stern der Milchstraße (2007)



✧ Sternentstehung:

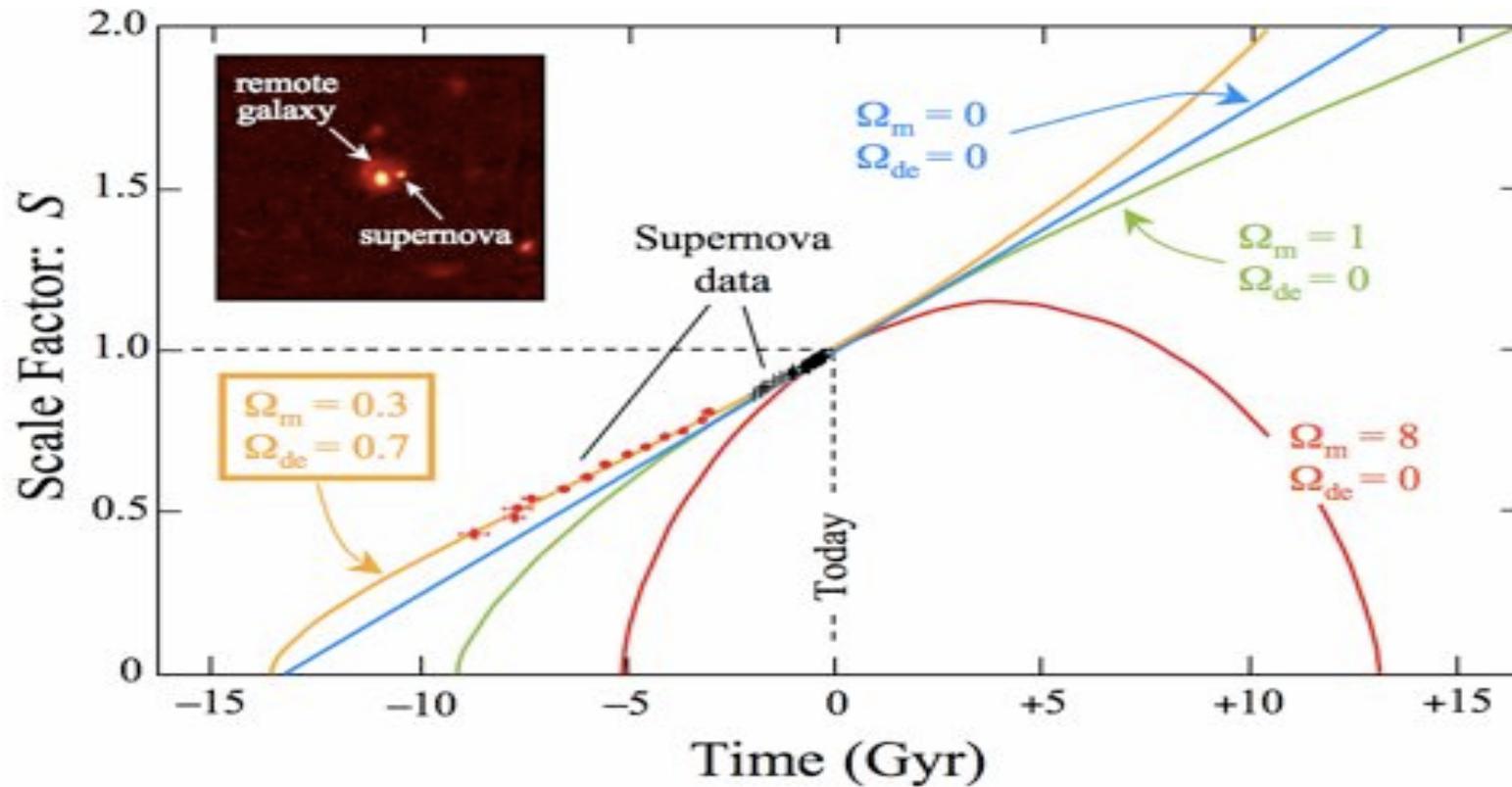
✧ ^1H - ^2He - ^3Li (Metalle)

✧ Altersbestimmung:

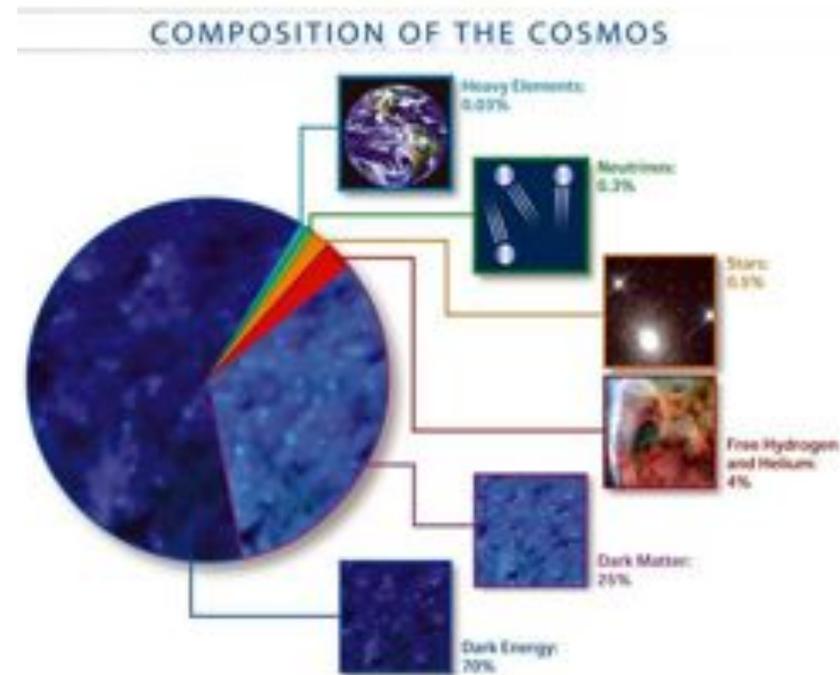
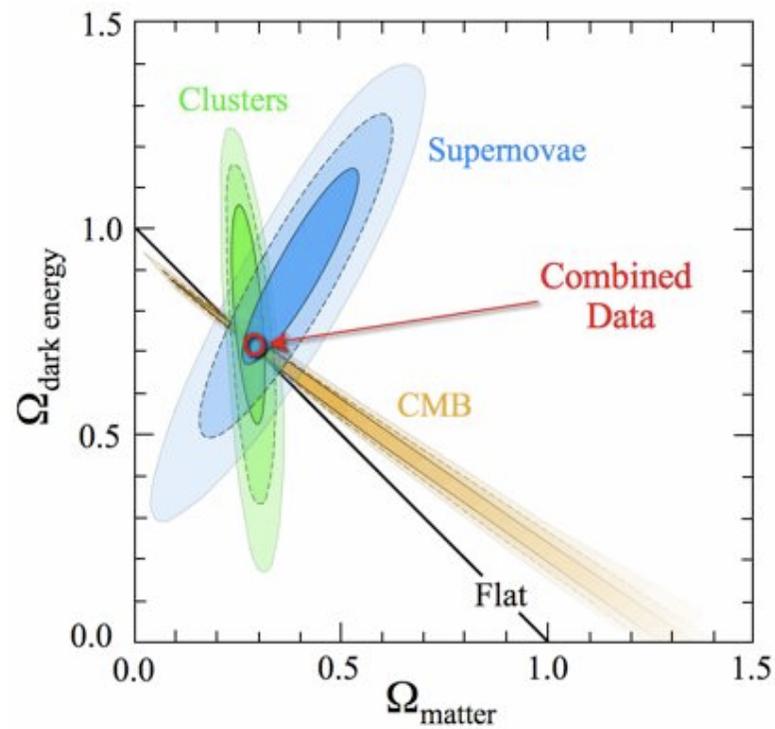
✧ Zerfall von ^{92}U , ^{90}Th

✧ Alter: **13.2 ± 0.2 Gyr**

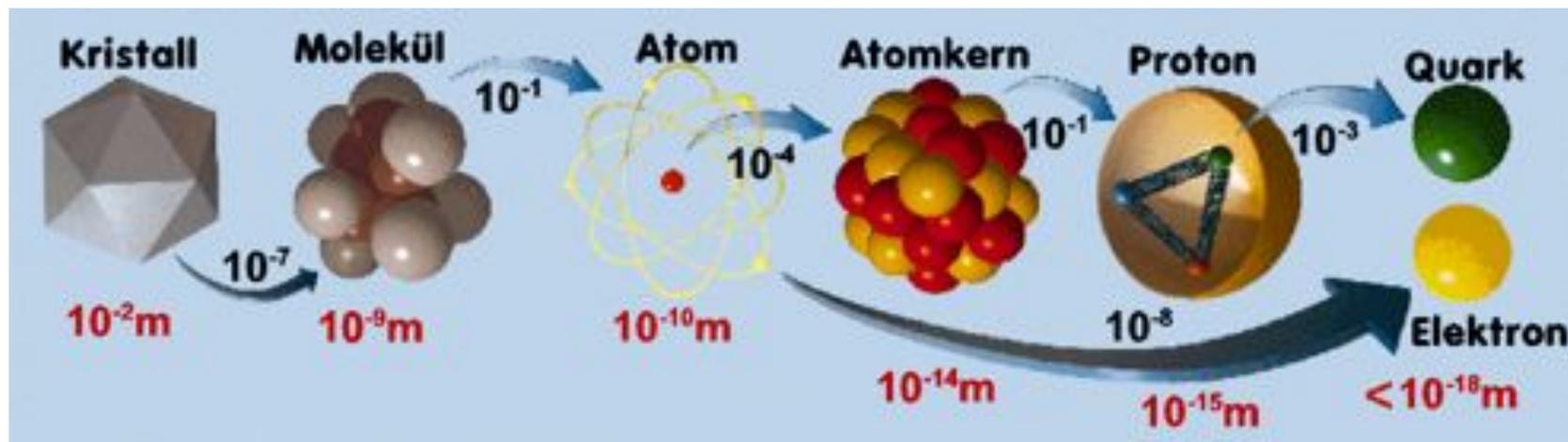
Friedmann-Modelle des Universums (Nobelpreis 2011)



Das kosmologische Standardmodell (Konkordanzmodell)



Der Aufbau der Materie

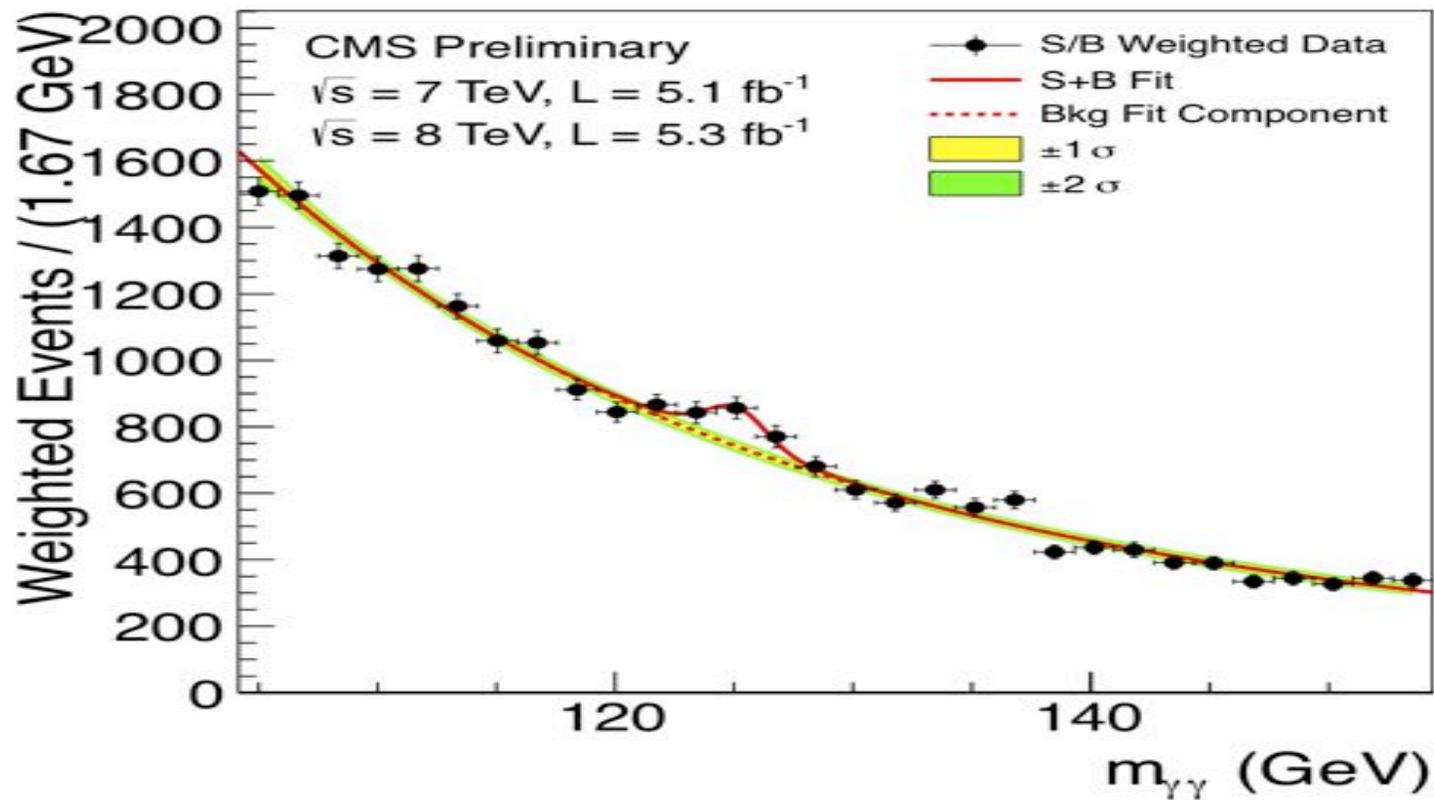


Warum hat Masse Masse?



wissen.leben
WWU Münster

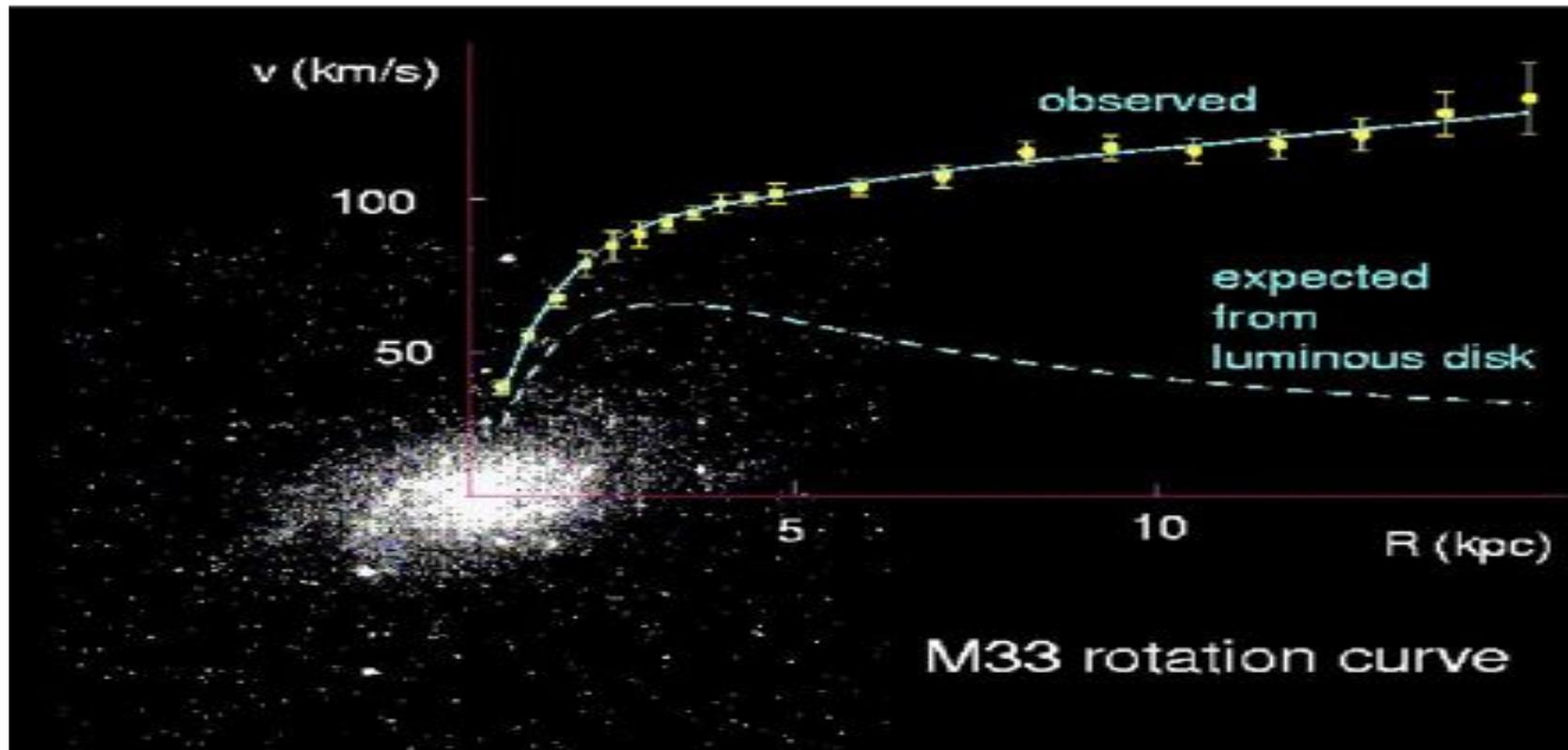
Die Entdeckung des Higgs-Bosons (CERN, 2012)



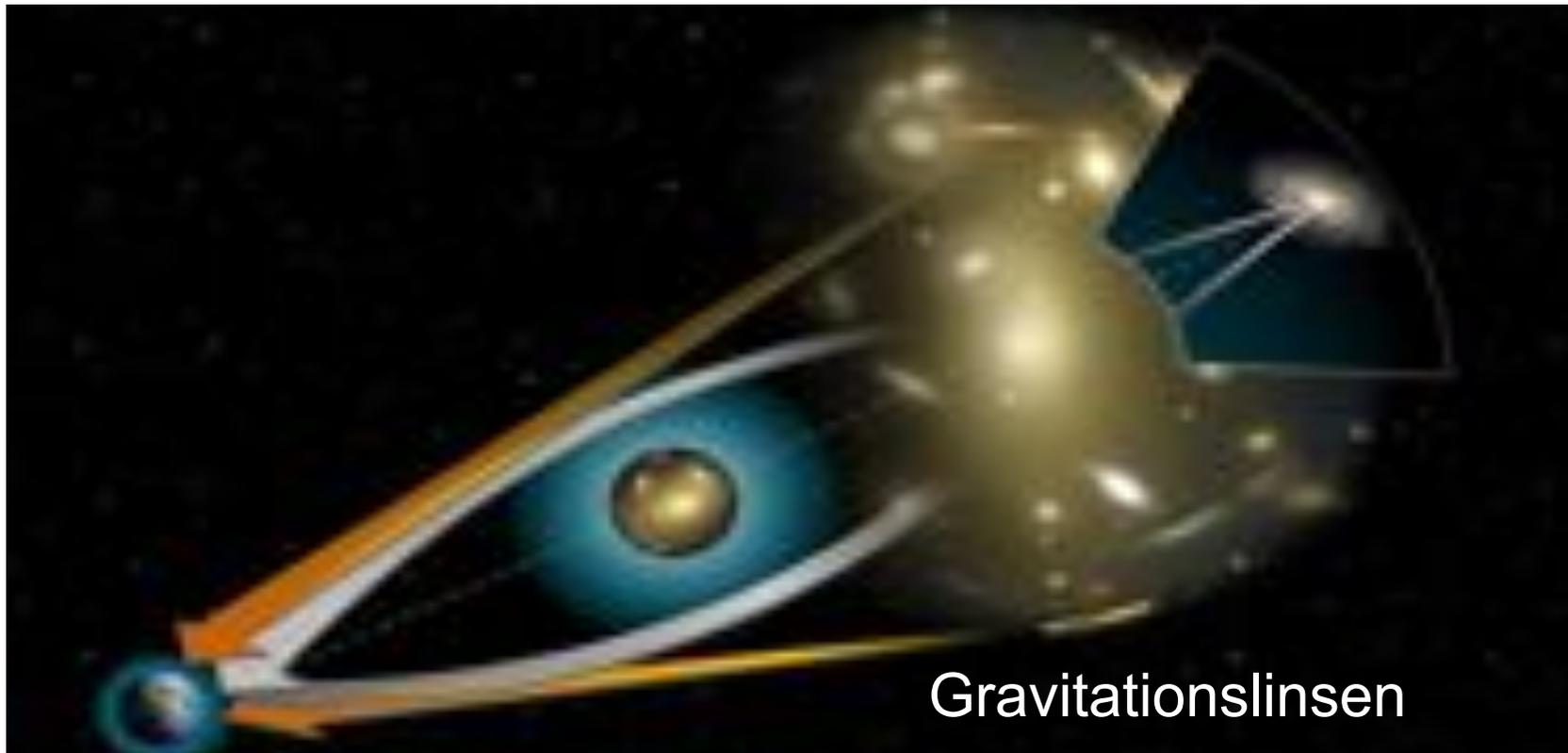
Evidenz für dunkle Materie



Evidenz für dunkle Materie



Evidenz für dunkle Materie



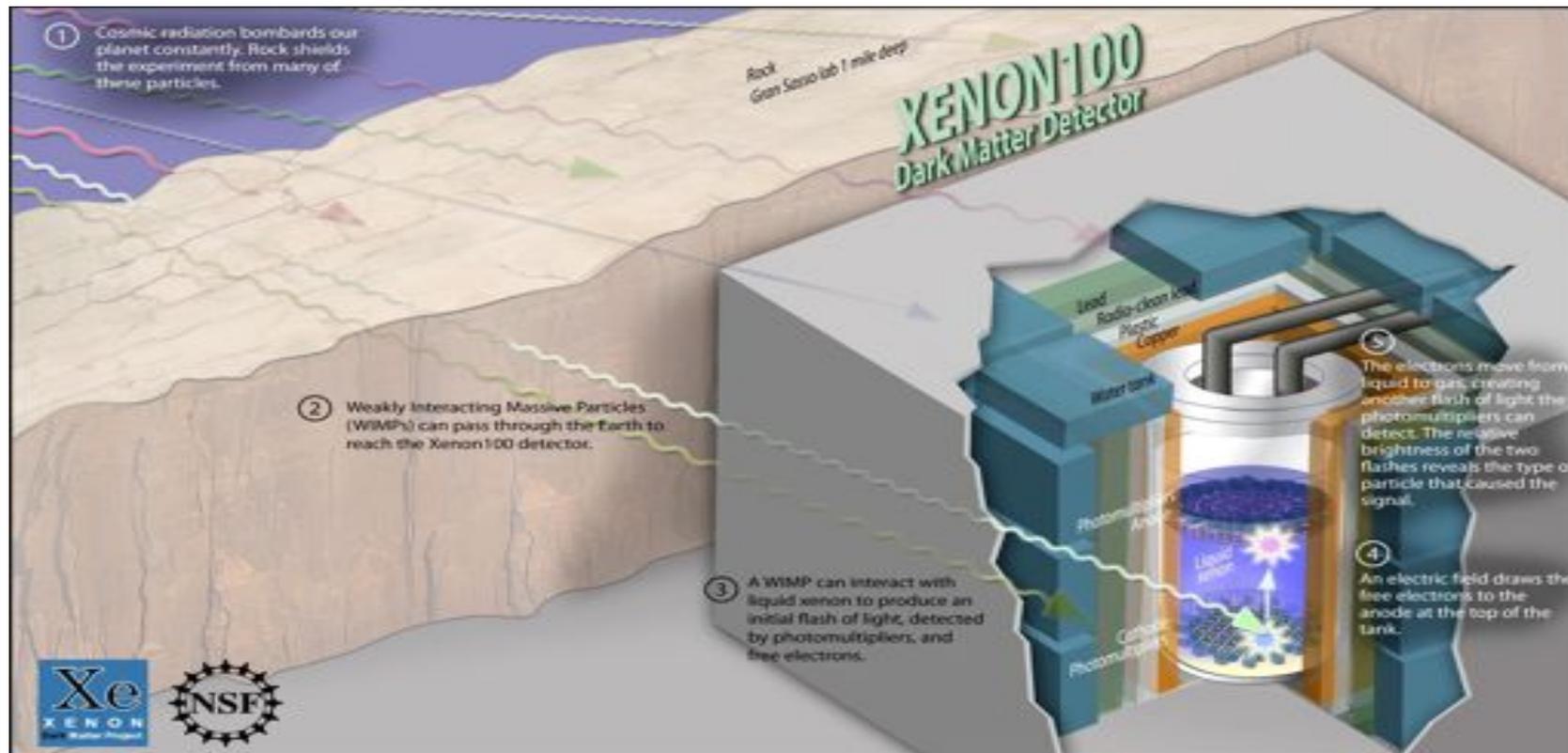
Evidenz für dunkle Materie



Supersymmetrische Teilchen

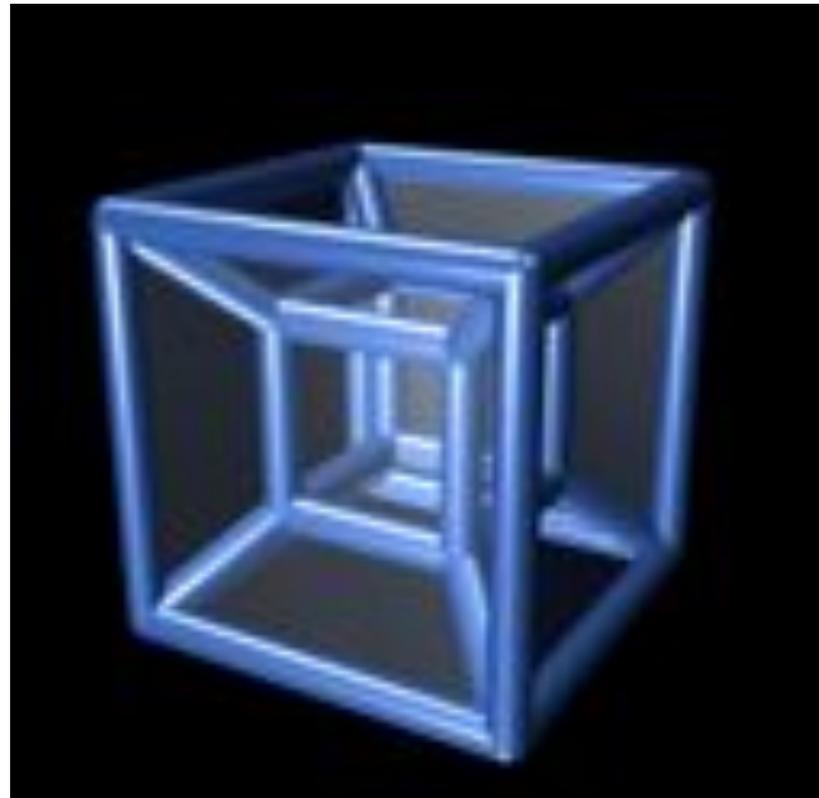
FERMIONS			BOSONS		
spin	Name	Symbols	Name	Symbols	spin
$\frac{1}{2}$	leptons	e, ν_{eL} $\mu, \nu_{\mu L}$ $\tau, \nu_{\tau L}$	sleptons	$\tilde{e}_L, \tilde{e}_R, \tilde{\nu}_{eL}$ $\tilde{\mu}_L, \tilde{\mu}_R, \tilde{\nu}_{\mu L}$ $\tilde{\tau}_L, \tilde{\tau}_R, \tilde{\nu}_{\tau L}$	0
$\frac{1}{2}$	quarks	u, d c, s t, b	squarks	$\tilde{u}_L, \tilde{d}_L, \tilde{u}_R, \tilde{d}_R$ $\tilde{c}_L, \tilde{s}_L, \tilde{c}_R, \tilde{s}_R$ $\tilde{t}_L, \tilde{b}_L, \tilde{t}_R, \tilde{b}_R$	0
$\frac{1}{2}$	gluinos	\tilde{g}	gluons	g	1
$\frac{1}{2}$	charginos	$\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_2^{\pm}$	EW bosons	γ, Z^0, W^{\pm}	1
$\frac{1}{2}$	neutralinos	$\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0$	higgs	h^0, H^0, A^0, H^{\pm}	0
SM particles (observed)		SM particles (not yet observed)		Super Partners (not yet observed)	

Suche nach dunkler Materie in Untergrundlabors

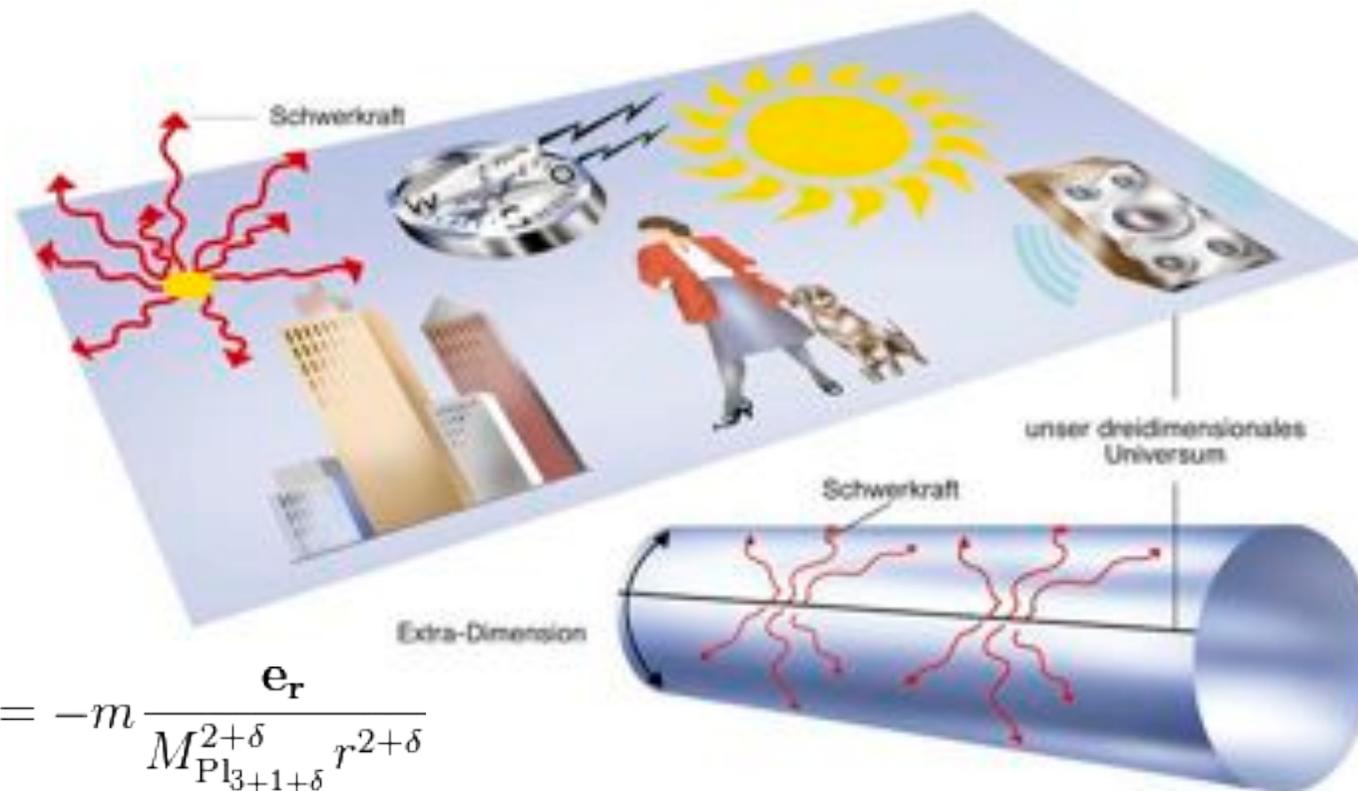


Wieviele Raumdimensionen gibt es?

<u>Dim.</u>	<u>Name</u>	<u>Beispiel</u>
0	Punkt	Elementarteilchen
1	Linie	String
2	Fläche	(Mem-)brane
3	Körper	Kugel, Torus, ...
4	Hyperk.	Tesserakt, ...
...

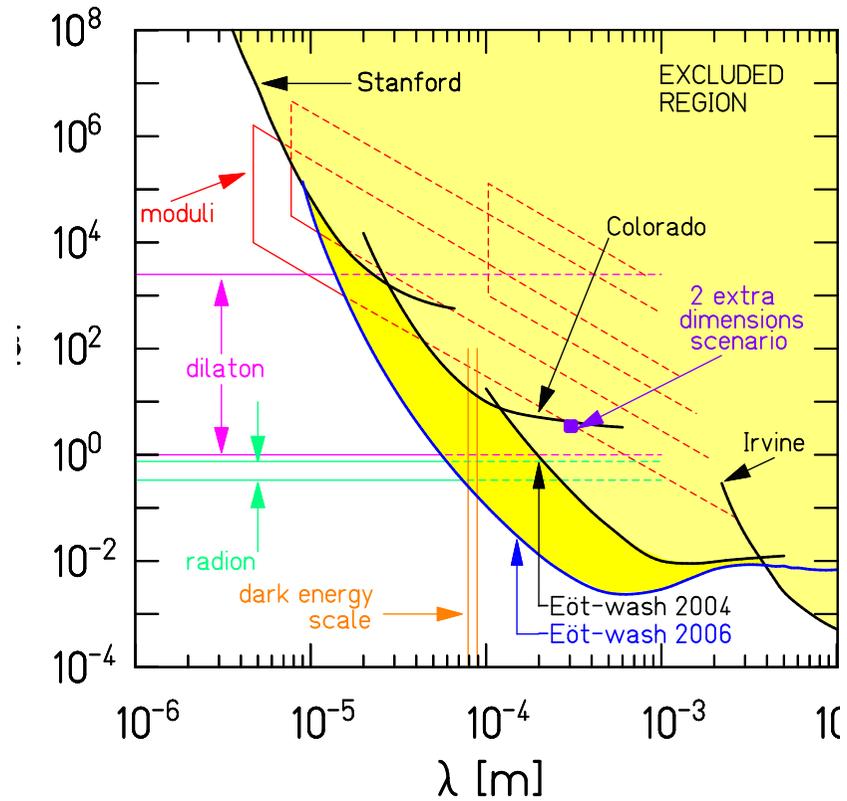
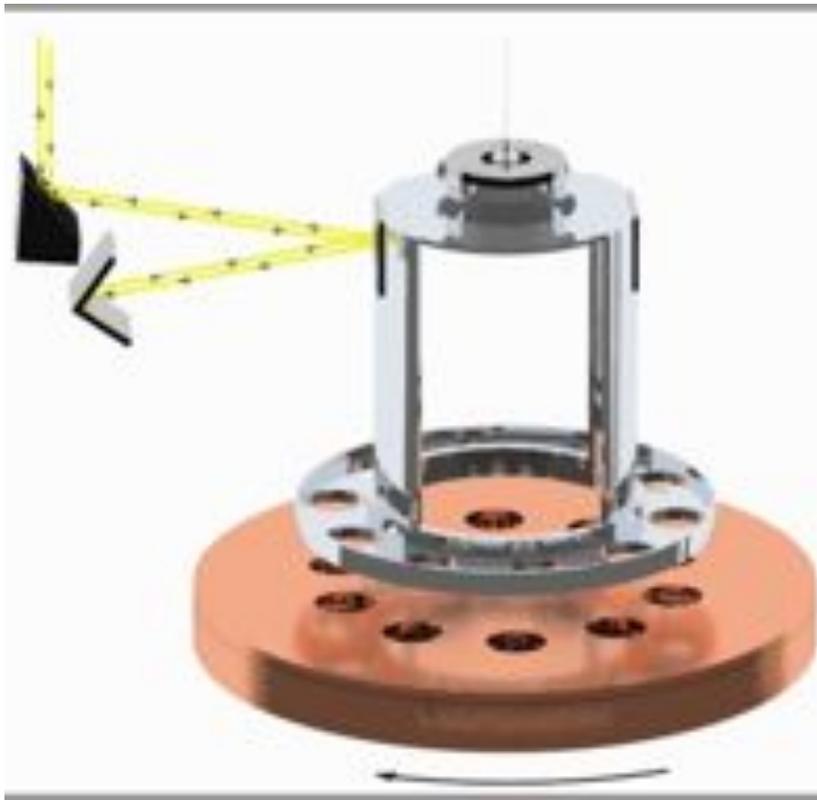


Was bewirken zusätzliche Raumdimensionen?



$$\mathbf{g}(\mathbf{r}) = -m \frac{\mathbf{e}_r}{M_{\text{Pl}}^{2+\delta} r^{2+\delta}}$$

Das Eöt-Wash-Experiment



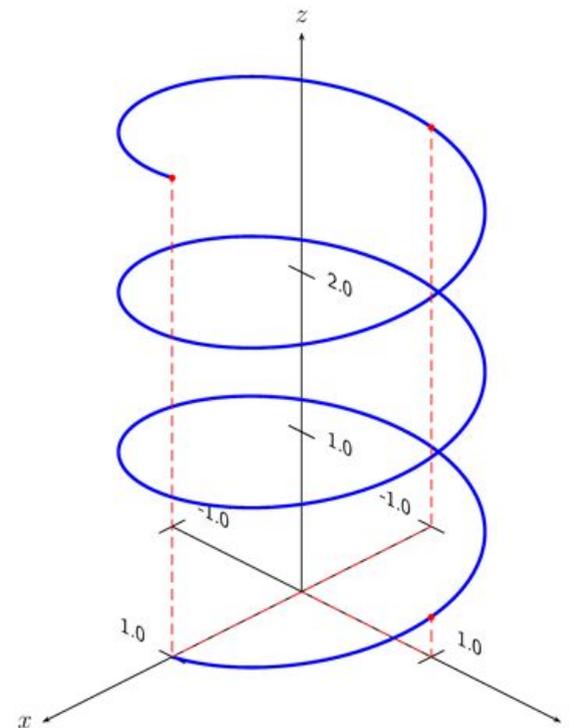
Warum gibt es nur eine Zeitdimension?

Zeit t = Parameter (auch in der QM!)

Beispiel: Helix

- $x = R \cos(\omega t)$
- $y = R \sin(\omega t)$
- $z = v_z t$

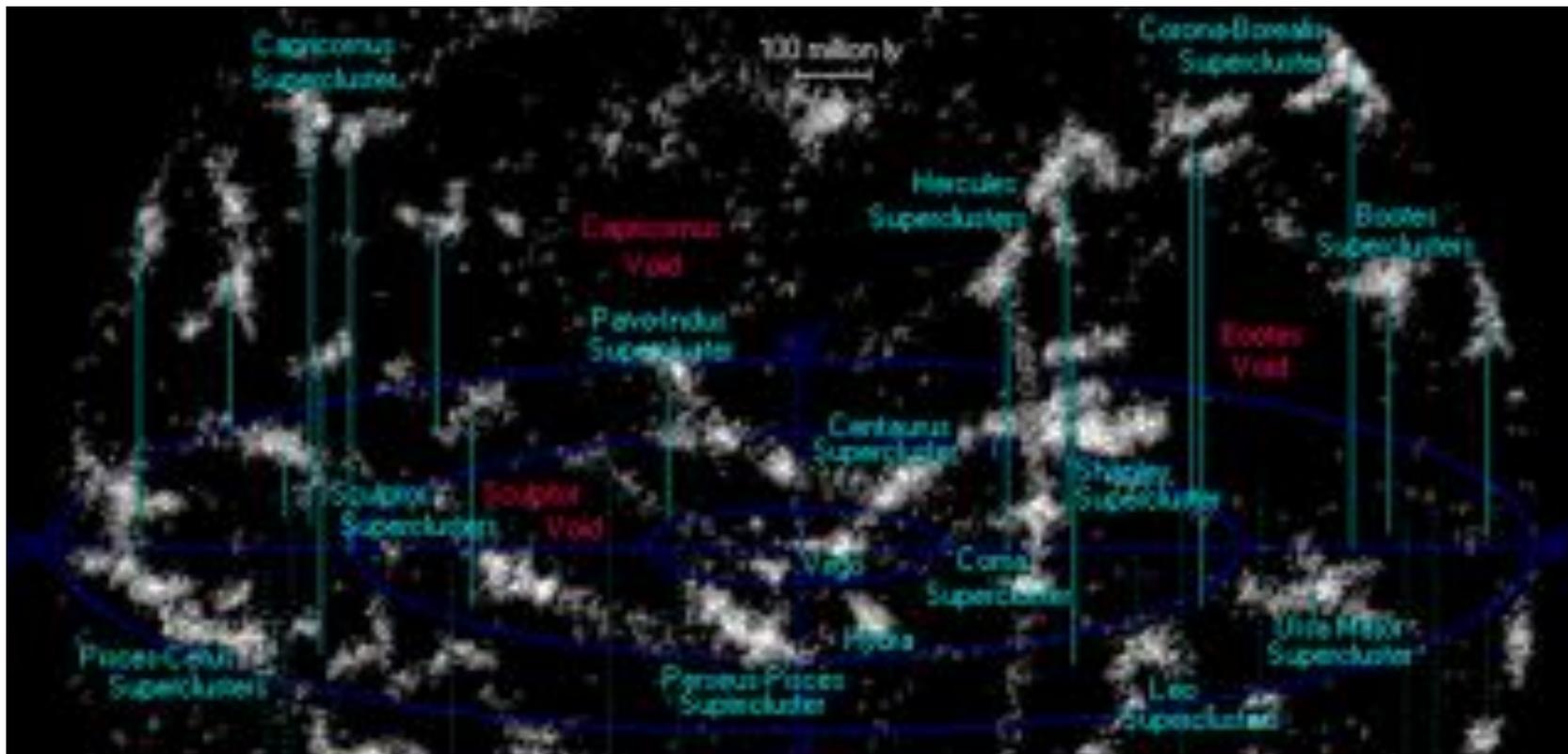
Eindeutige Beschreibung!



Probleme des kosmologischen Standardmodells ...

- Flachheitsproblem:
 - Warum ist das heutige Universum so flach?
- Horizontproblem:
 - Warum haben raumartig getrennte Regionen gleiche Eigenschaften?
- Fehlen magnetischer Monopole:
 - Wo sind die topologischen Monopole der großen Symmetriebrechung?
- Dichtefluktuationen:
 - Warum schwankt die Dichte von Galaxien und -haufen so stark?

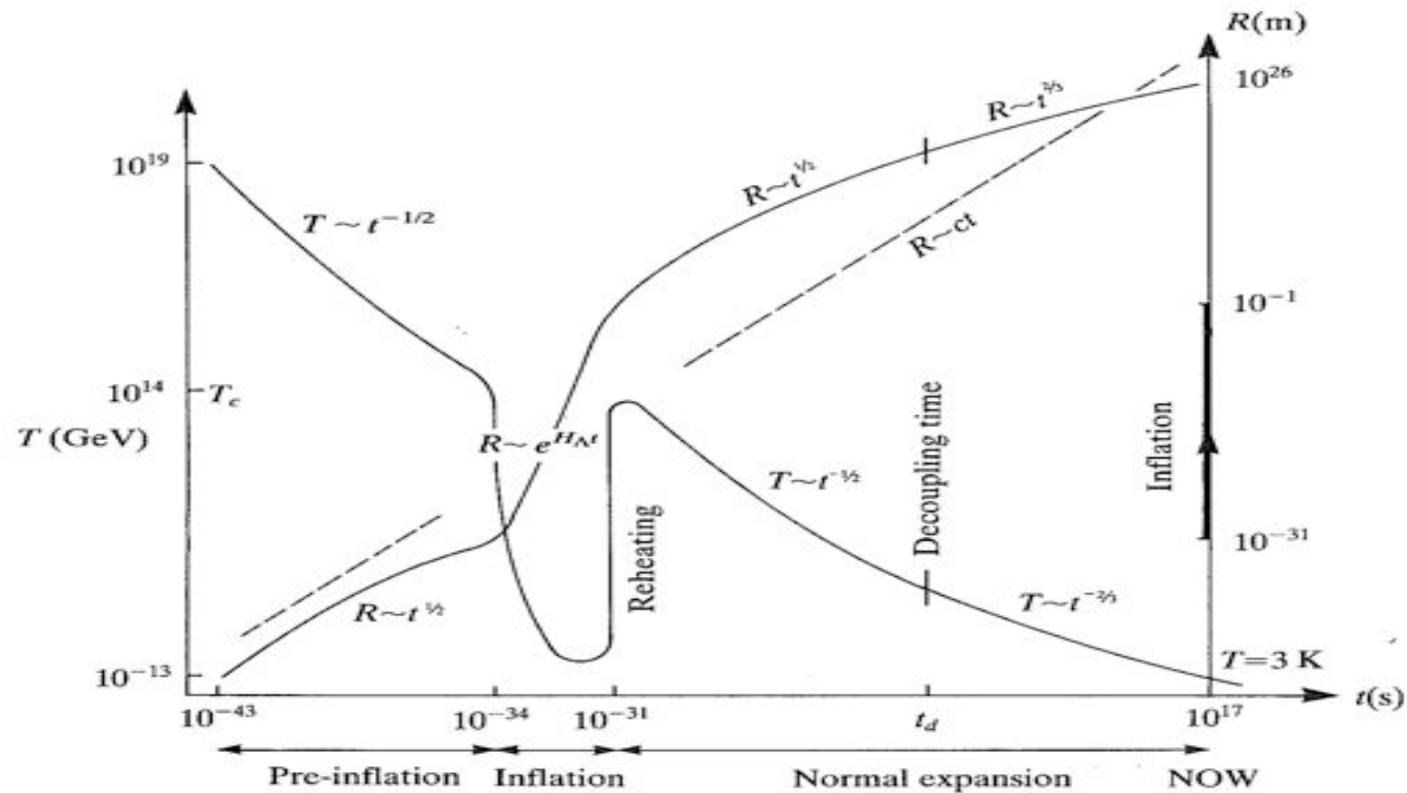
Probleme des kosmologischen Standardmodells ...



... und ihre Beantwortung durch Inflation

- Flachheitsproblem:
 - Eine sehr große gekrümmte Fläche erscheint lokal immer flach.
- Horizontproblem:
 - Alle Bereiche des Universums standen ursprünglich in Kontakt.
- Fehlen magnetischer Monopole:
 - Teilchenzahldichte ist heute extrem ausgedünnt.
- Dichteflukuationen:
 - Galaxienverteilung spiegelt primordiale Quantenfluktuationen wider.

Inflation



Parallel-Universen

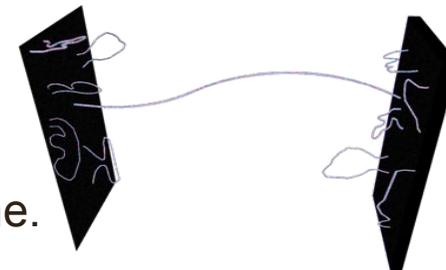
Vielwelten-Interpretation der Quantenmechanik:

- Ein einzelnes Messergebnis ist nicht voraussagbar.
- Jedes Messergebnis entspricht einer anderen Welt.



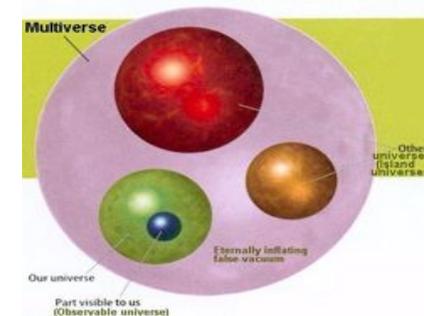
Stringtheorie:

- Die Welt ist nicht vier-, sondern zehndimensional.
- Jedes Universum entspricht vierdimensionaler (Mem-)brane.



Chaotische Inflation:

- Großteil des Universums expandiert ewig
- Inflation endet in Teilräumen
- Unterschiedliche Naturkonstanten



Parallel-Universen

Aporien der Schöpfung:

- Die anderen quantenmechanischen Welten sind prinzipiell unbeobachtbar.
- Relativistisch raumartig entfernte Gebiete sind prinzipiell unbeobachtbar.

Ockhams Rasiermesser:

- Die einfachste Erklärung ist komplizierteren vorzuziehen.
- Beschränkung auf ein Minimum an Variablen und Hypothesen.

Anthropisches Prinzip:

- Unser Universum ist nur deshalb beobachtbar, weil in ihm Leben möglich ist.
- Naturgesetze, Anfangsbedingungen, ... durch unsere Existenz ausgewählt.

Zusammenfassung

Was wir wissen:

- Das Universum ist homogen und isotrop; der Raum ist flach.
- Inhalt: 68.3% dunkle Energie, 26.8% dunkle Materie, 4.9% normale Materie
- Es gibt ein leichtes, skalares Higgs-Boson mit $m_H = 125.5$ GeV.

Was wir (noch) nicht wissen:

- Warum ist das Higgs-Boson so viel leichter als die Planck-Masse (10^{19} GeV)?
- Was sind dunkle Materie, dunkle Energie, Inflation?
- Gibt es zusätzliche Symmetrien, Raumdimensionen?

Was wir nicht wissen können:

- Gibt es mehr als ein Universum?



Was sich überhaupt sagen läßt,
läßt sich klar sagen;
und wovon man nicht reden kann,
darüber muß man schweigen.