

Dunkle Energie

Bruno Leibundgut





Die dunkle Seite des Universums

Aus was besteht das Universum?

Wie verstehen wir das Universum?

Was sind Dunkle Materie und Dunkle Energie?

Unser Ort im Universum



14. September 2022

02

Bruno Leibundgut

Unsere Heimat

Apollo 8



14. September 2022

Bruno Leibundgut

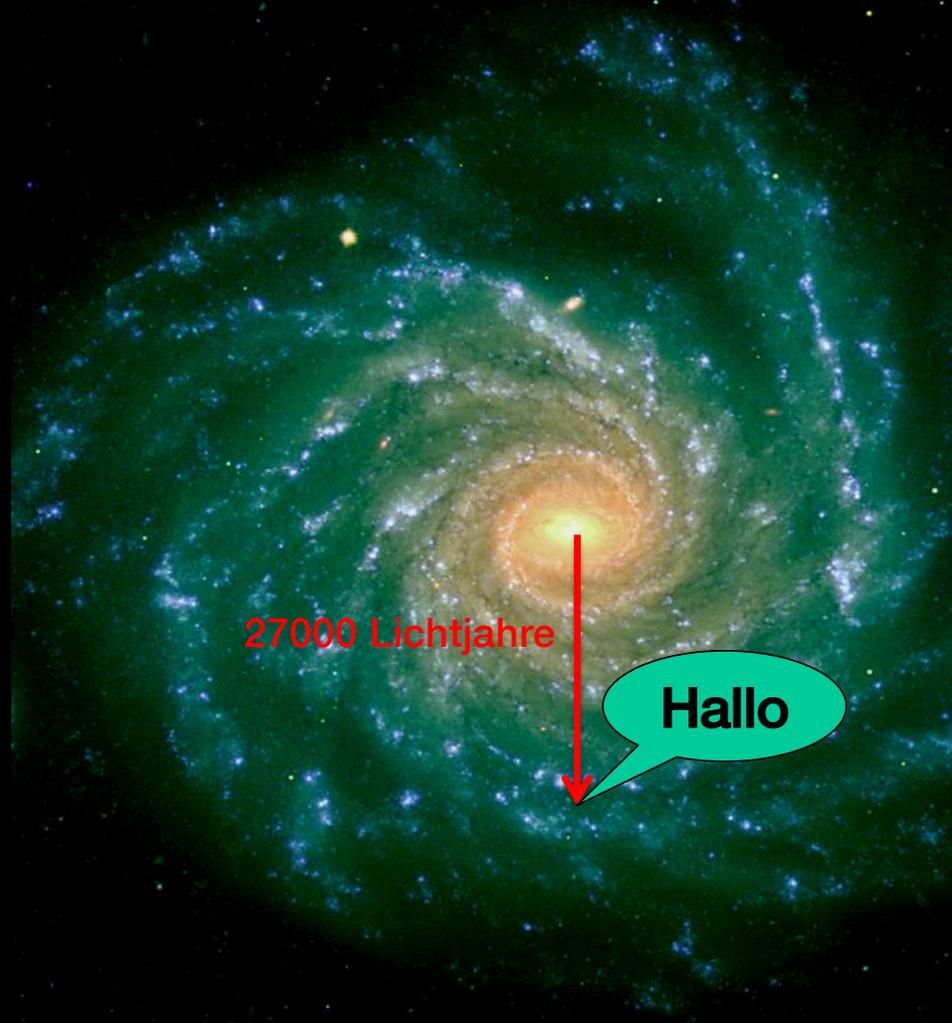


14. September 2022

© Cassini/NASA

Bruno Leibundgut

Unser Platz in der Milchstraße



27000 Lichtjahre

Hallo

1. Januar:
Urknall

Die Milchstraße
entsteht

Sonne und Planeten
entstehen

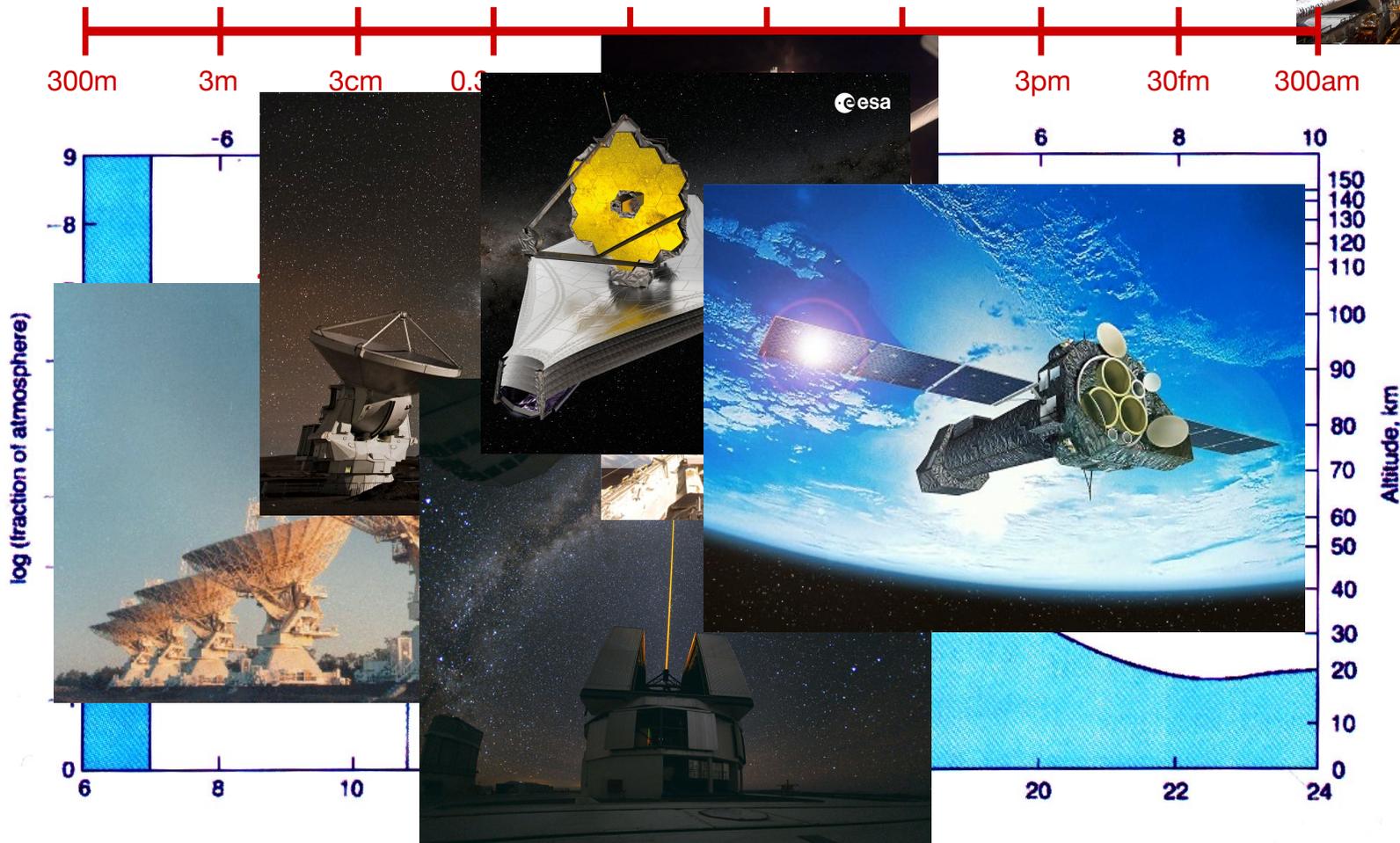
Erste
Einzeller

Erste mehrzellige
Lebewesen

Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November
Dezember										
1	2	3	4	5	6	7				
8	9	10	11	12	13	14				
15 Kambrische Explosion	16	17 Erste Wirbeltiere	18 Erste Land- pflanzen	19	20 Erste vierfüssige Tiere	21 Insekten entwickeln sich				
22	23	24 Erste Dinosaurier erscheinen	25 Die ersten Vorgänger der Säugetiere	26	27 Erste bekannte Vögel	28				
29 Dinosaurier sterben aus	30	31 23:54 Moderne Menschen (homo sapiens) erscheinen 23:59:45 Erfindung der Schrift 23:59:50 Pyramiden in Ägypten werden gebaut 23:59:59 Galileo beobachtet den Himmel mit einem Fernrohr								

Die Erdatmosphäre

Schutzschild und Fenster zum All



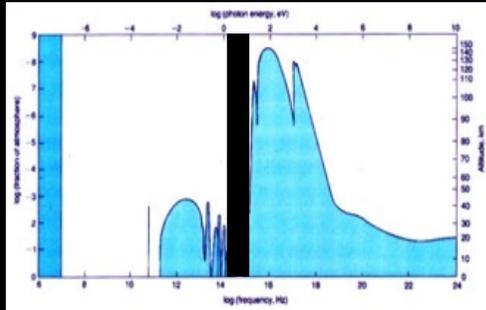
Die Milchstraße



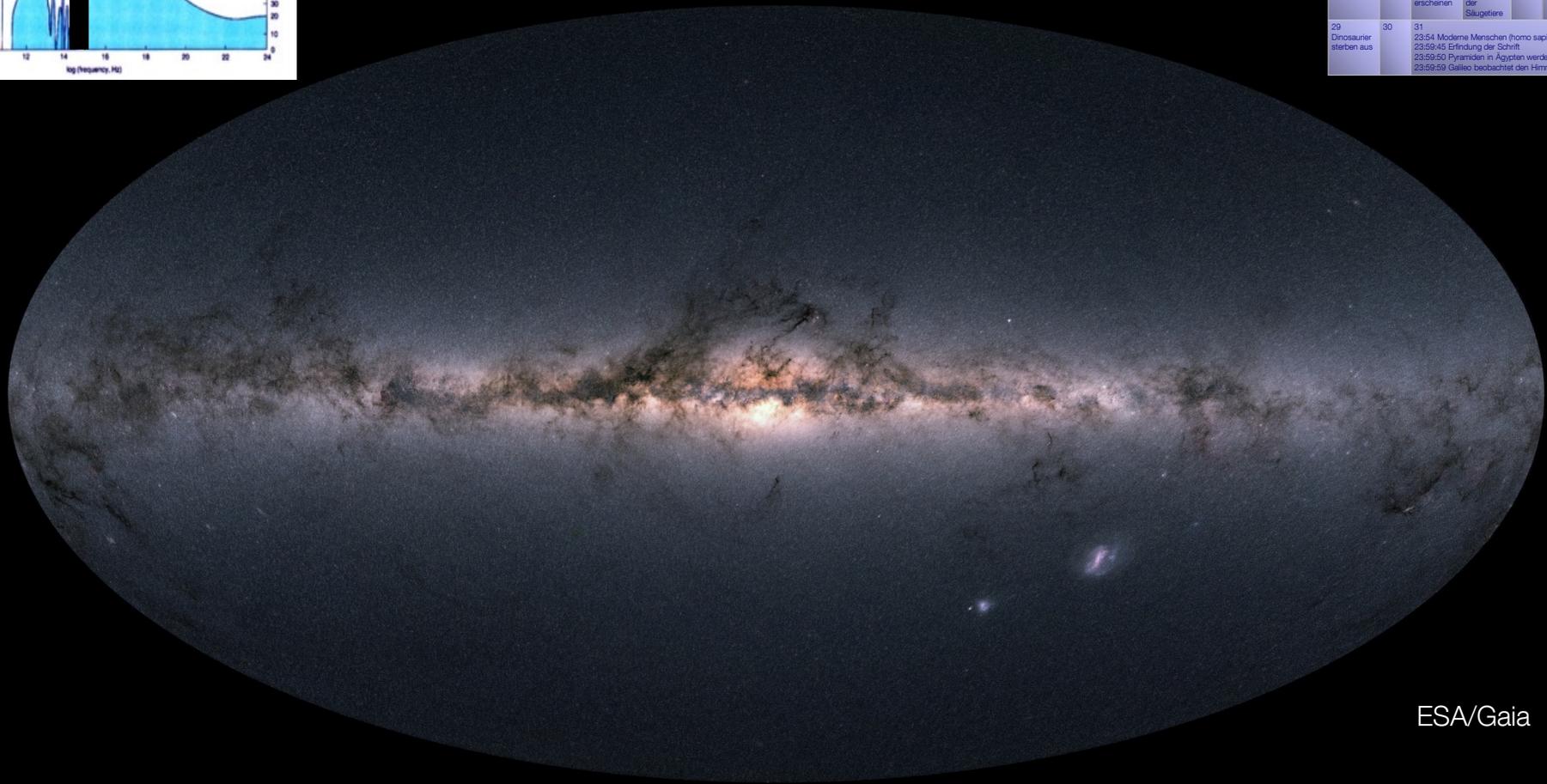
14. September 2022

Bruno Leibundgut

„Sichtbar“



1. Januar: Urknall	Die Milchstraße entsteht	Sonne und Planeten entstehen	Erste Erzster	Erste mehrzellige Lebewesen					
Januar	Februar	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November
Dezember									
1	2	3	4	5	6	7			
8	9	10	11	12	13	14			
15	16	17	18	19	20	21			
Kambrische Explosion		Erste Wirbeltiere	Erste Land- pflanzen	Erste vierfüßige Tiere		Insekten entwickeln sich			
22	23	24	25	26	27	28			
		Erste Dinosaurier erscheinen	Die ersten Vorgänger der Säugetiere		Erste bekannte Vögel				
29	30	31							
Dinosaurier sterben aus		23:54 Moderne Menschen (homo sapiens) erscheinen 23:59:45 Erfindung der Schrift 23:59:50 Pyramiden in Ägypten werden gebaut 23:59:59 Galileo beobachtet den Himmel mit einem Fernrohr							

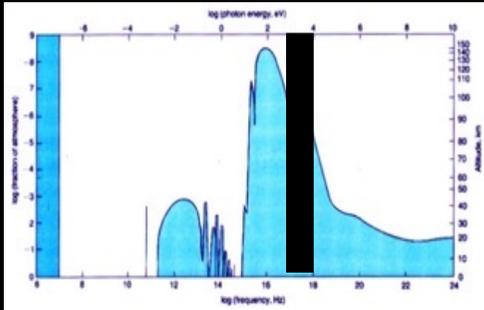


ESA/Gaia

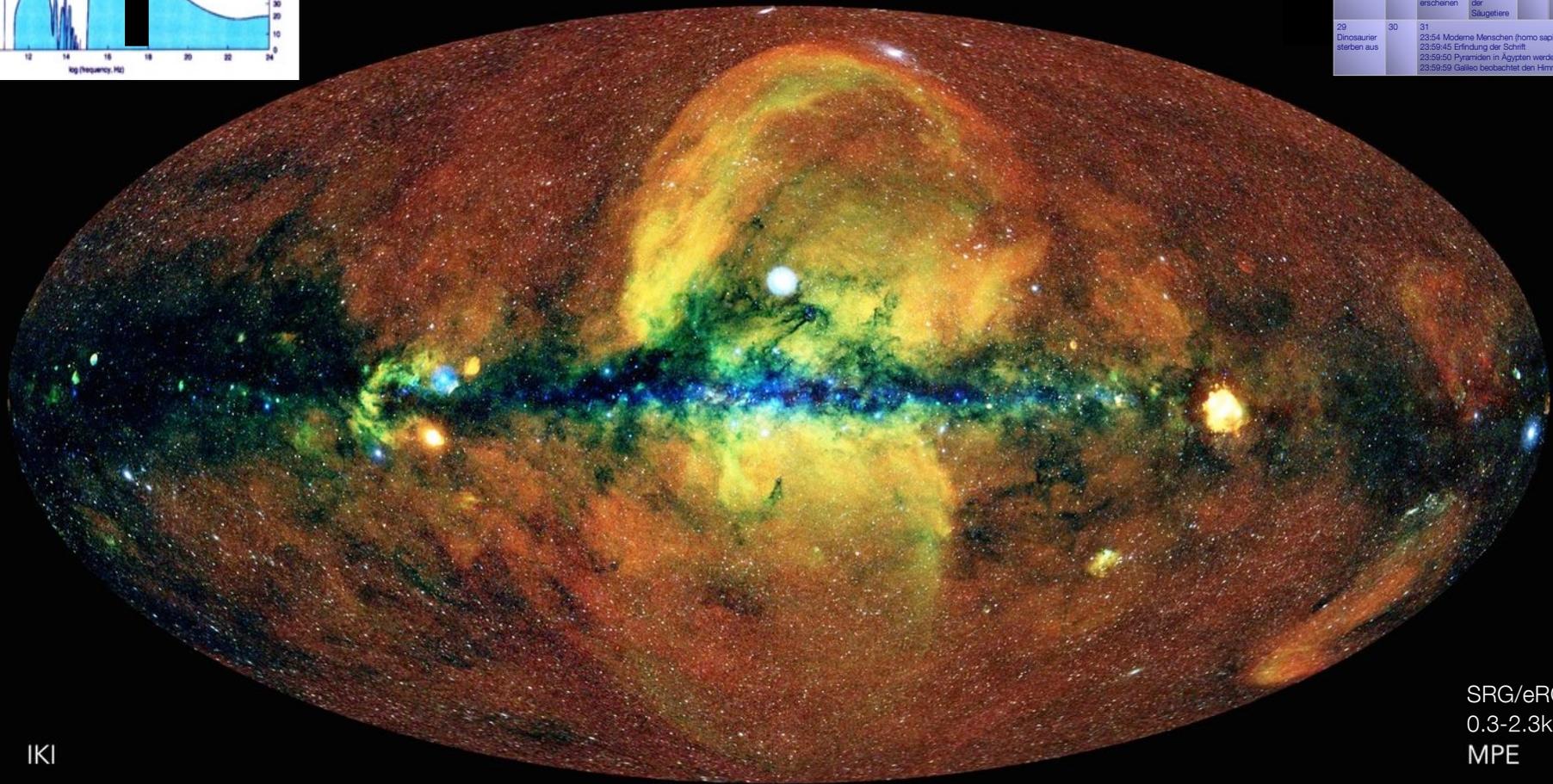
14. September 2022

Bruno Leibundgut

„Unsichtbar“



1. Januar: Uhrzeit	Die Michtretze entsteht	Sonne und Planeten entstehen	Erste Erzruher	Erste mehrzellige Lebewesen							
Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	
Dezember											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31					
Kambrische Explosion Erste Wirbeltiere Erste Landpflanzen Die ersten Vorgänger der Säugetiere Erste vierfüßige Tiere Insekten entwickeln sich Erste bekannte Vögel Moderne Menschen (homo sapiens) erscheinen Erfindung der Schrift Pyramiden in Ägypten werden gebaut Galileo beobachtet den Himmel mit einem Fernrohr											



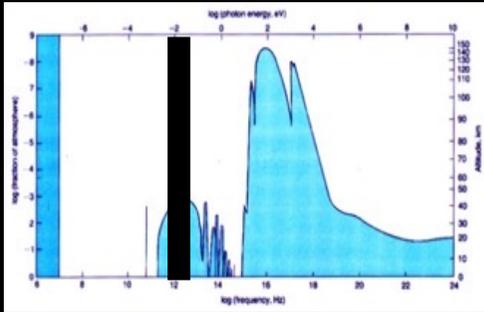
IKI

SRG/eROSITA
0.3-2.3keV
MPE

14. September 2022

Bruno Leibundgut

„Unsichtbar“



1. Januar: Uhrzeit	Die Michtretze entsteht	Sonne und Planeten entstehen	Erste Erzrufer	Erste mehrzellige Lebewesen					
Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November
1	2	3	4	5	6	7			
8	9	10	11	12	13	14			
15 Kambrische Explosion	16	17 Erste Wirbeltiere	18 Erste Land- pflanzen	19	20 Erste vierfüßige Tiere	21 Insekten entwickeln sich			
22	23	24 Erste Dinosaurier erscheinen	25 Die ersten Vorgänger der Säugetiere	26	27 Erste bekannte Vögel	28			
29 Dinosaurier sterben aus	30	31	23:54 Moderne Menschen (homo sapiens) erscheinen 23:59:45 Erfindung der Schrift 23:59:50 Pyramiden in Ägypten werden gebaut 23:59:59 Galileo beobachtet den Himmel mit einem Fernrohr						

Planck/ESA

14. September 2022

Bruno Leibundgut

Das „unsichtbare“ Universum

- Große Teile des Universums sind dunkel
- „Dunkle“ (nicht leuchtende) Materie ist überall
 - e.g. Planeten, Moleküle, Staub, kühles Gas
- Messungen durch indirekte Phänomene
 - ➔ Gravitation!
 - ➔ Model für die Entwicklung des Universums
 - ➔ Einsteins Relativitätstheorie



Einstein Gleichungen

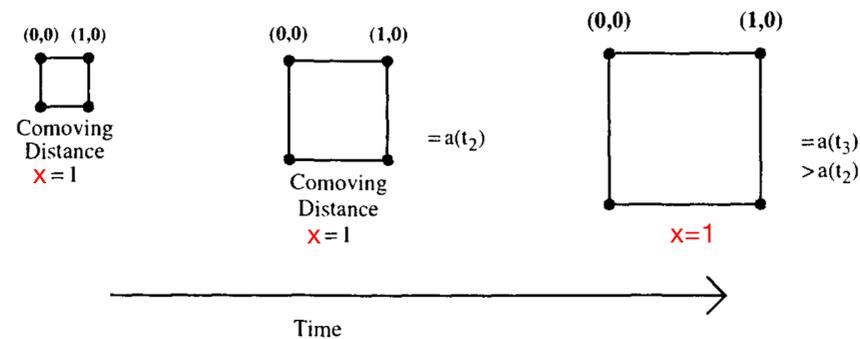


- Gravitation ist die dominierende Kraft im Universum
→ Allgemeine Relativitätstheorie
- Allgemeine Form der Metrik $g_{\mu\nu}$ → Transformationen zwischen Koordinatensystemen
 - ‘Invariante’ Parameter (e.g. Entfernung zwischen zwei Objekten oder gleichförmige Bewegung eines Teilchens ‚Geodäte‘)
- Gleichung für ein kraftfreies Teilchen ($\ddot{x} = 0$) in ART führt zu affinen Verbindungen
→ Ricci Tensor und Christoffel Symbole
- Geometrie $g_{\mu\nu}$ und der Energieinhalt $T_{\mu\nu}$ beeinflussen sich gegenseitig

Kosmische Entfernungen

Beobachtete Entfernung $r(t)$ wird in einen Expansionsfaktor $a(t)$ und einen festen Teil x (mitbewegte Entfernung) aufgeteilt.

$$r(t) = a(t)x$$



Friedmann Gleichung

Die Zeitentwicklung des Skalenfaktors wird durch die Einsteinschen Gleichungen beschrieben.

Mit der Metrik eines homogenen und isotropen Universums und dem einfachsten Energie-Impuls Tensor ergibt sich:

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho(t)$$

Was ist im Universum?

- Wir!



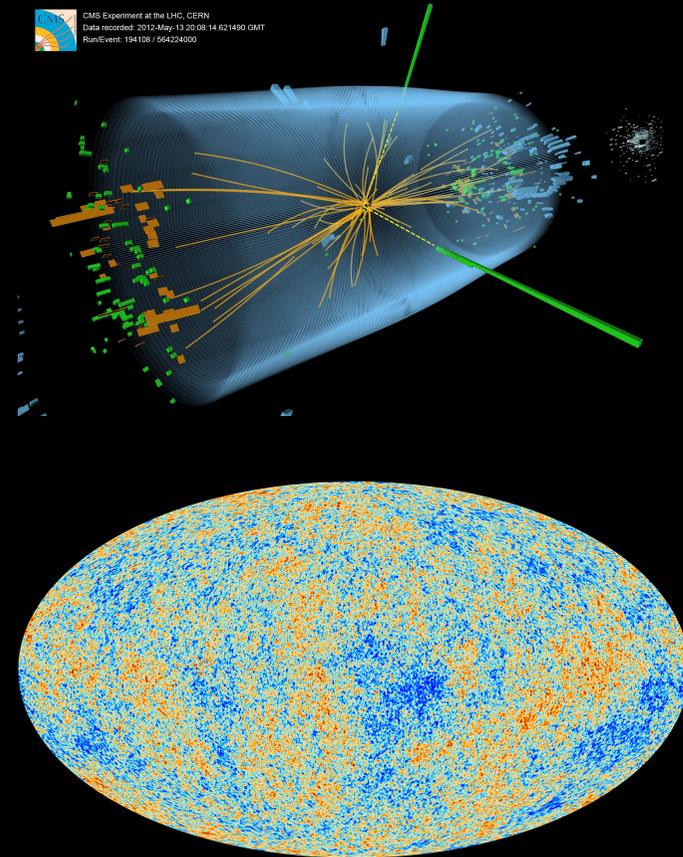
14. September 2022

Bruno Leibundgut

Was ist im Universum?

- Was sonst?
 - Elementarteilchen
 - Neutrinos
 - Higgs Teilchen
 - bisher unbekannte Teilchen
 - Andere Energieformen
 - Strahlung
 - Gravitationswellen
 - ?????

CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-05-19 20:08:14.621490 GMT
Run: 194105 / 66124000



Friedmann Gleichung

Mit den verschiedenen Dichten und dem Hubble Parameter:

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} = H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho(t) - \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}(\rho_M + \rho_\gamma + \rho_{vac}) - \frac{k}{a^2}$$

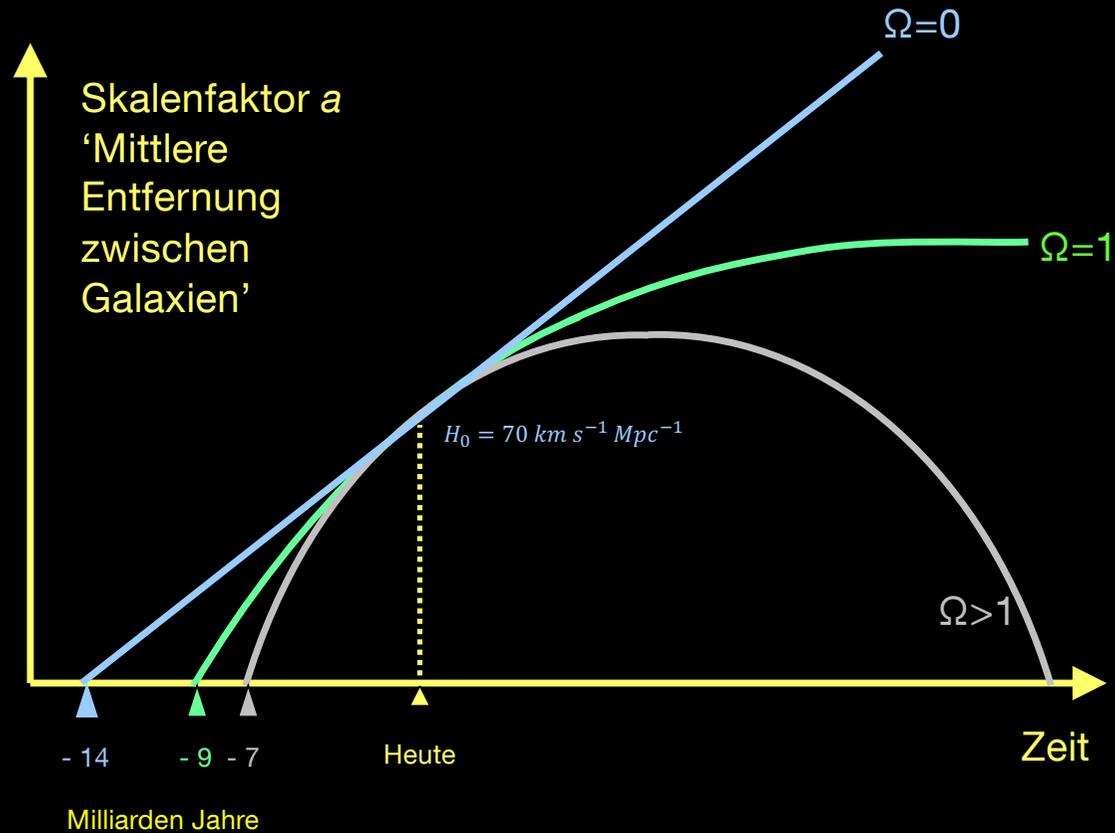
Mit der Definition der kritischen Dichte

$$\rho_{crit} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 2 \cdot 10^{-29} \text{ g cm}^{-3} \text{ (flaches Universum),}$$

ergibt sich ($\Omega = \frac{\rho}{\rho_{crit}}$):

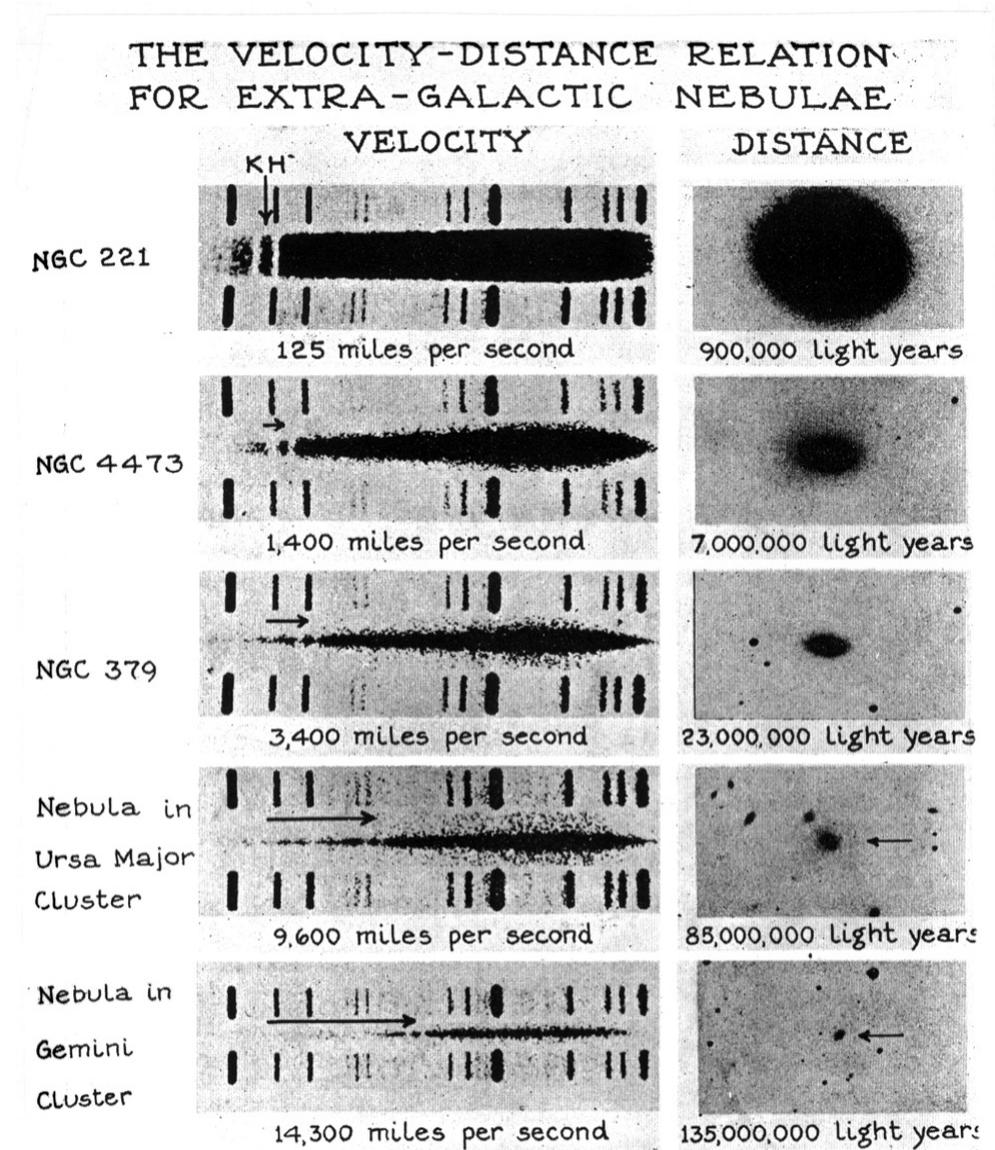
$$\rho = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \left[\Omega_M \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 + \Omega_\gamma \left(\frac{a_0}{a}\right)^4 + \Omega_\Lambda + \Omega_k \left(\frac{a_0}{a}\right)^2 \right]$$

Die Entwicklung des Universums





Die Expansion des Universums



Hubble/Humason 1936

Bruno Leibundgut

Das expandierende Universum

Hubbles Hubble-Lemaître Diagramm

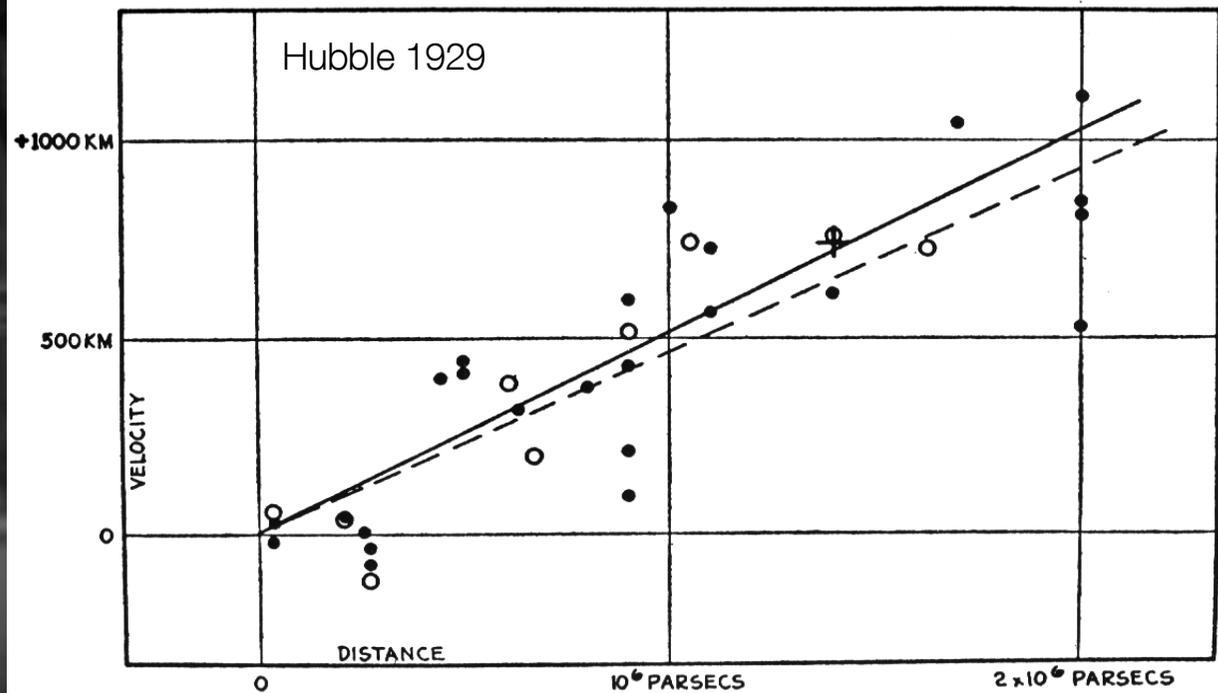


FIG. 9. *The Formulation of the Velocity-Distance Relation.*

Die Ausdehnung des Universums

Alle Galaxien starten am selben Punkt

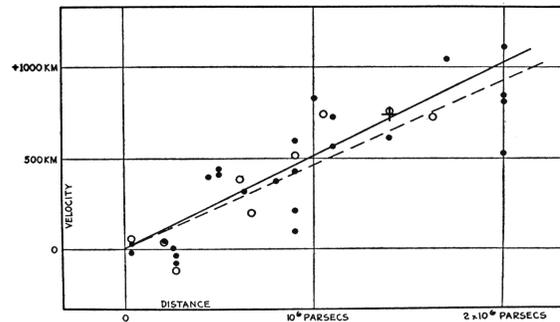
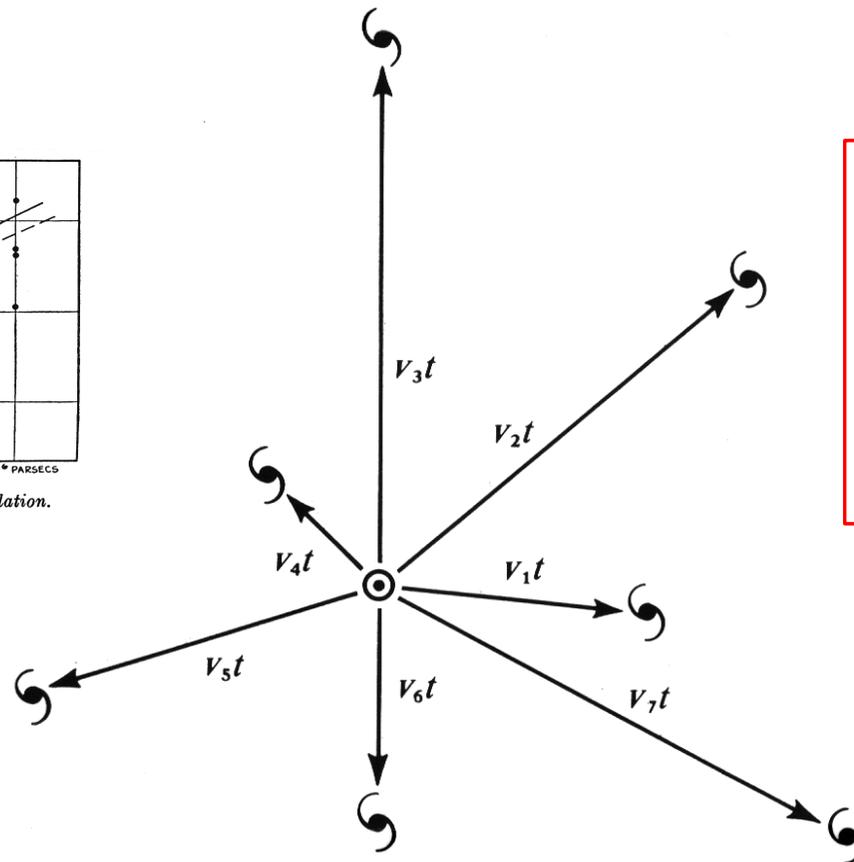


FIG. 9. The Formulation of the Velocity-Distance Relation.



Hubble-Lemaître Gesetz

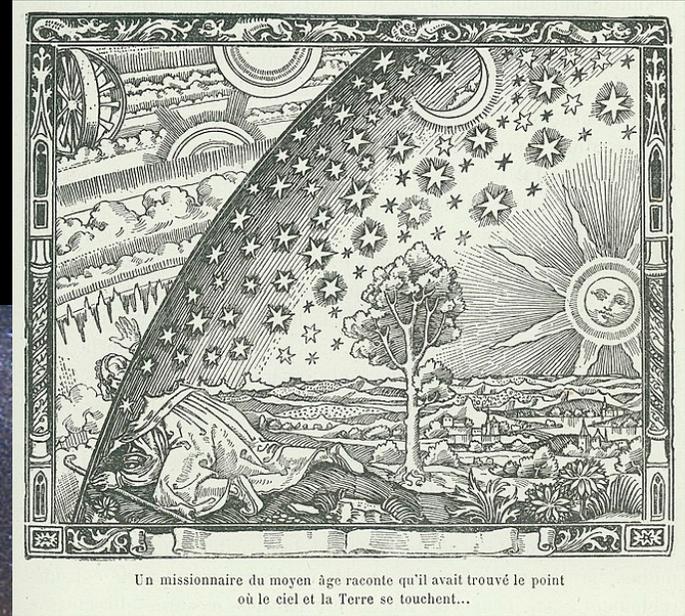
$$v = H_0 D$$

und damit die Expansion

$$H_0 = \frac{v}{D}$$

Weshalb ist das so schwer?

Entfernungen! → Himmelsphäre



Fiammarion 1888, Wikimedia

Weshalb ist das so schwer?

- Entfernungen
 - relativ → einfach
 - absolut



Suntzeff/High-z SN Search Team

14. September 2022

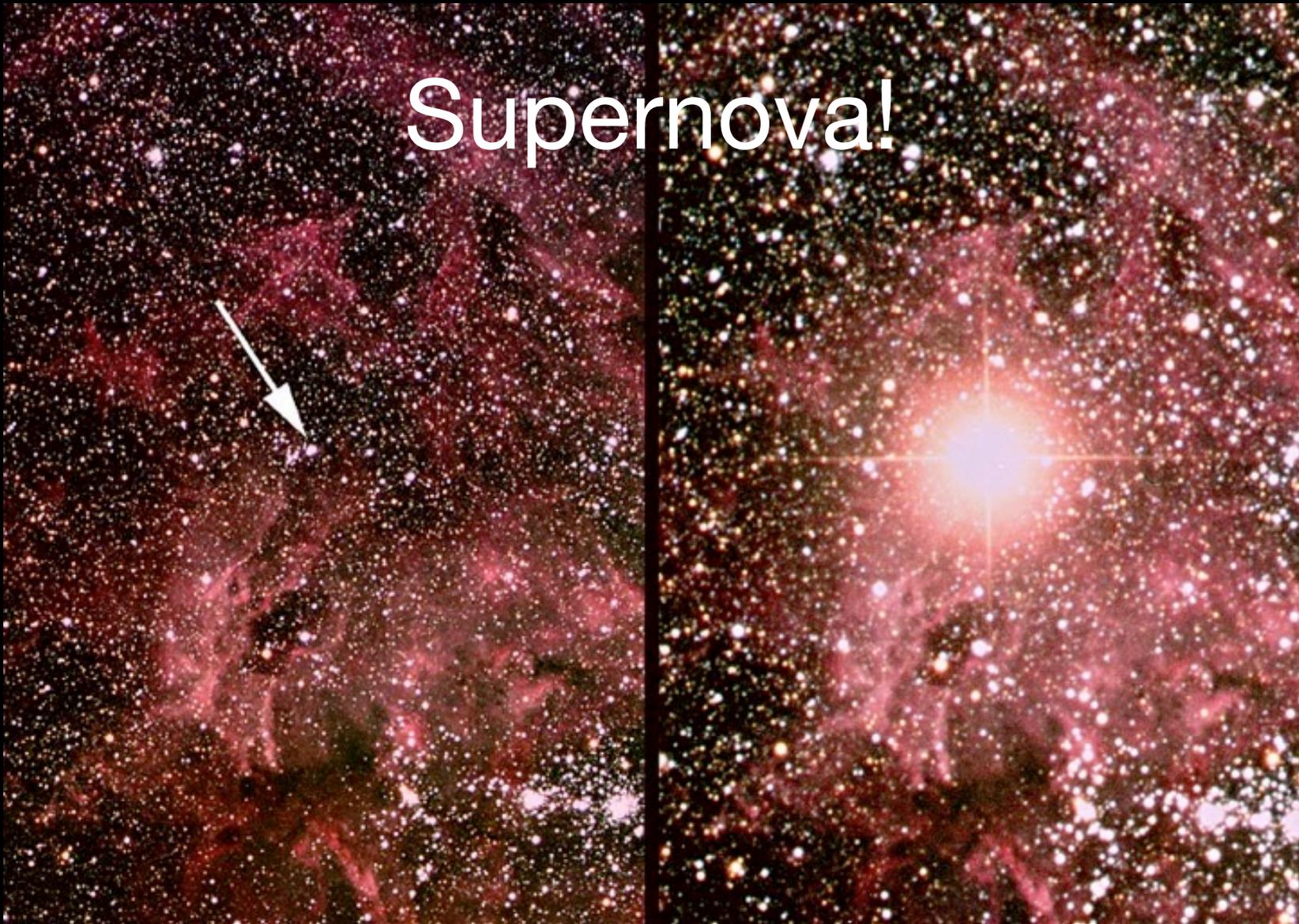


ESO



Bruno Leibundgut

Supernova!



14. September 2022

Bruno Leibundgut

Die Physik [der Supernovae] ist ziemlich gut verstanden und wir müssen uns nicht um die Einzelheiten kümmern.

M. Rees (1999)



1000w

1000w



Gruber Cosmology Prize

Jeremy Mould
Wendy Freedman
Robert Kennicutt

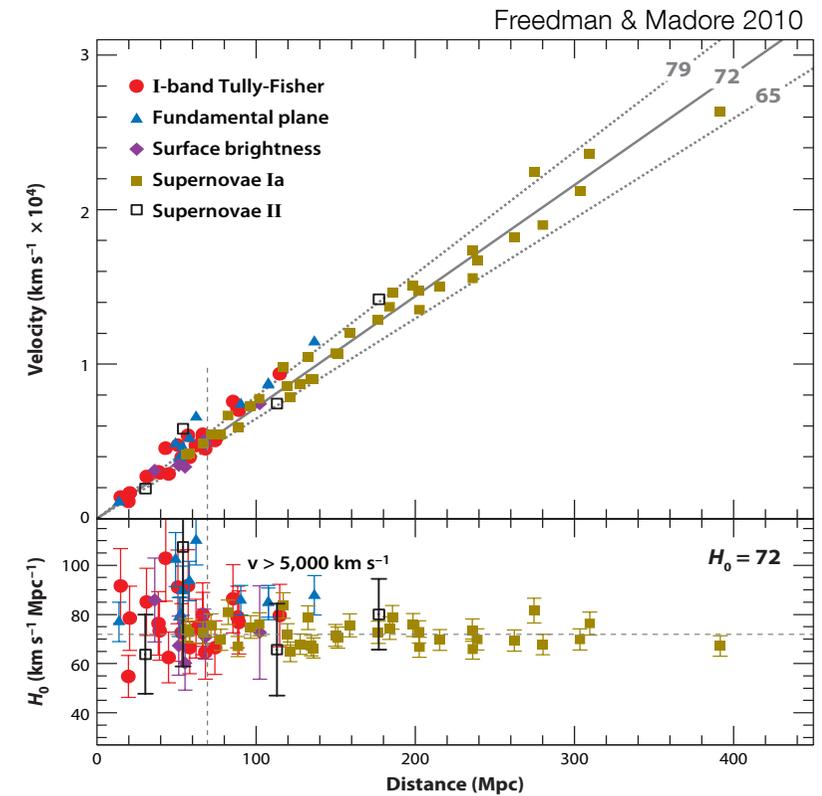
Hubble Key Project

Bestimmung von verschiedenen
Eichungen in der
Entfernungsleiter

- Galaxien
- Supernovae

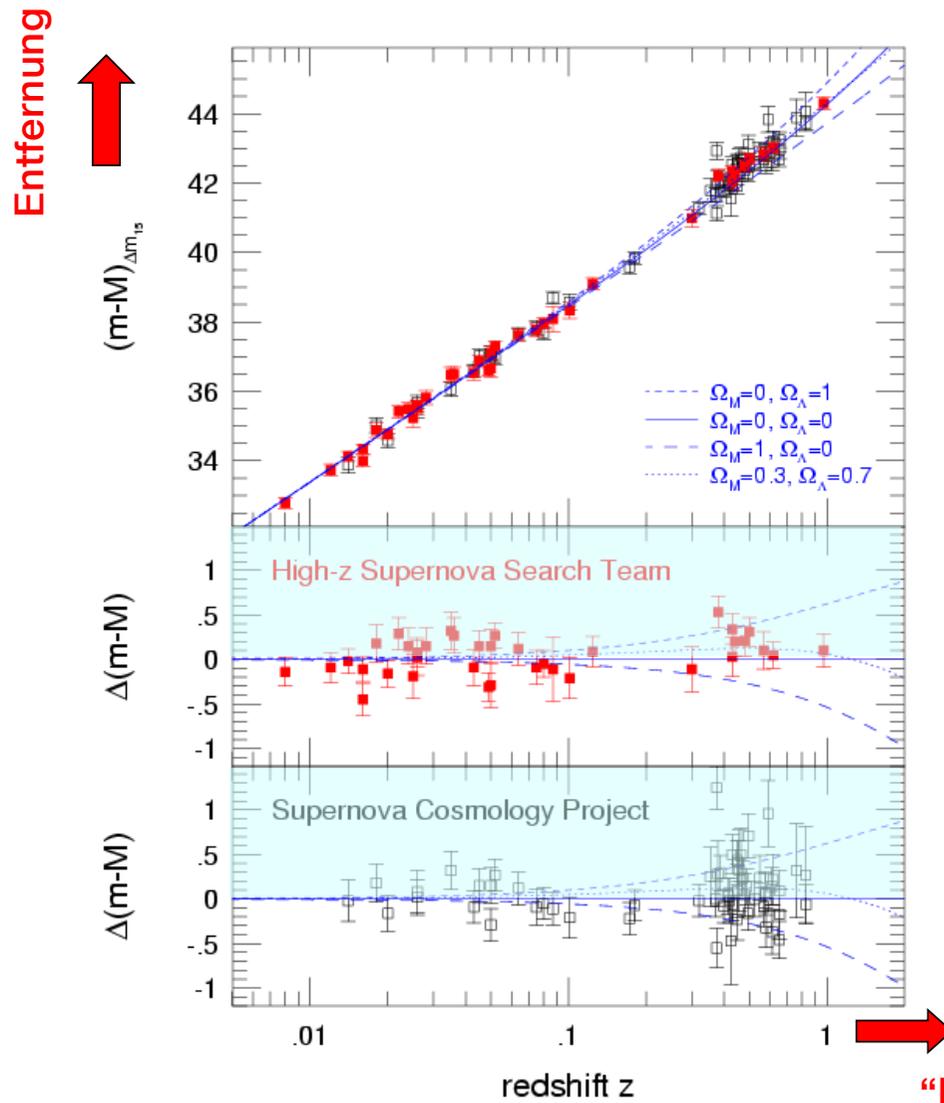


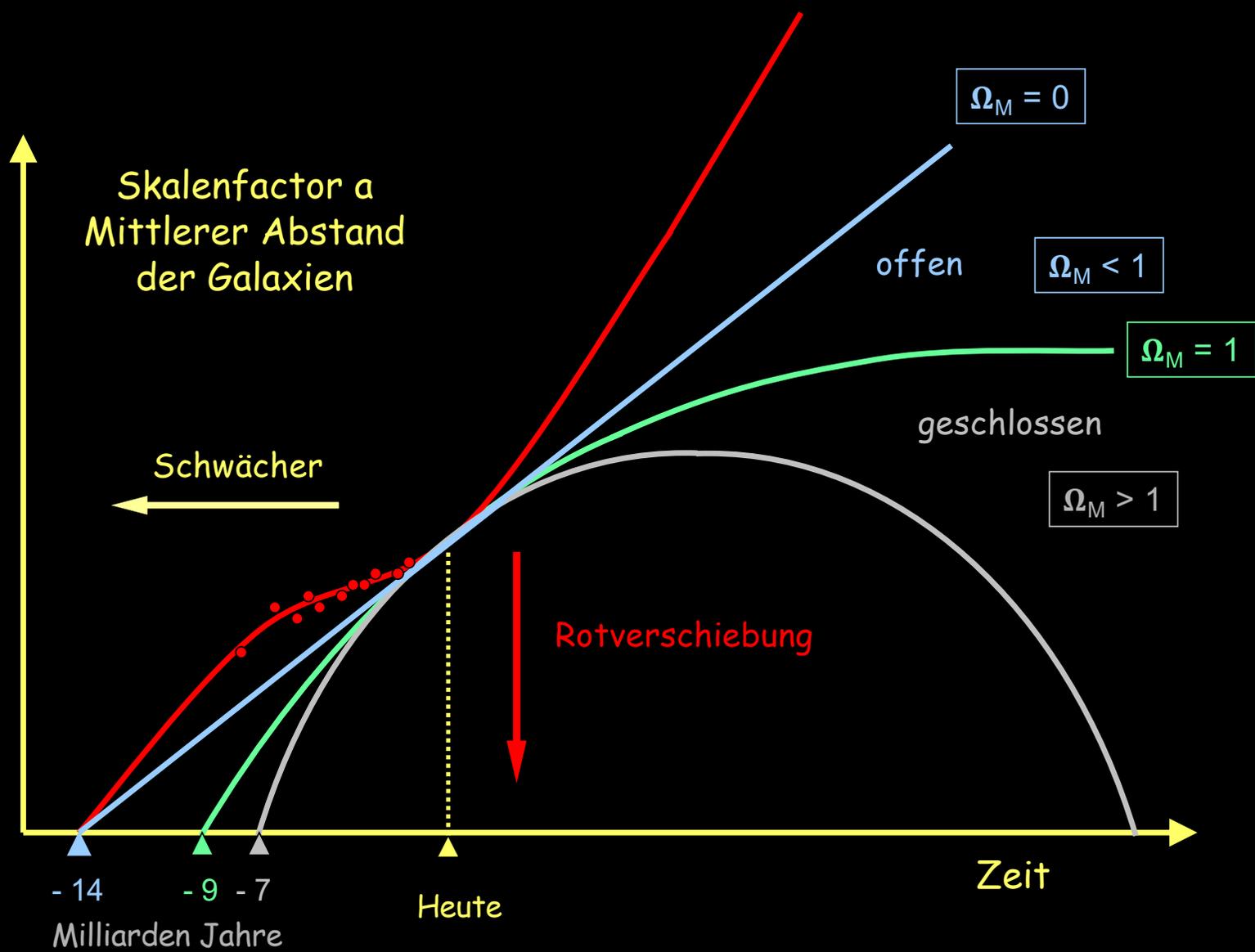
14. September 2022



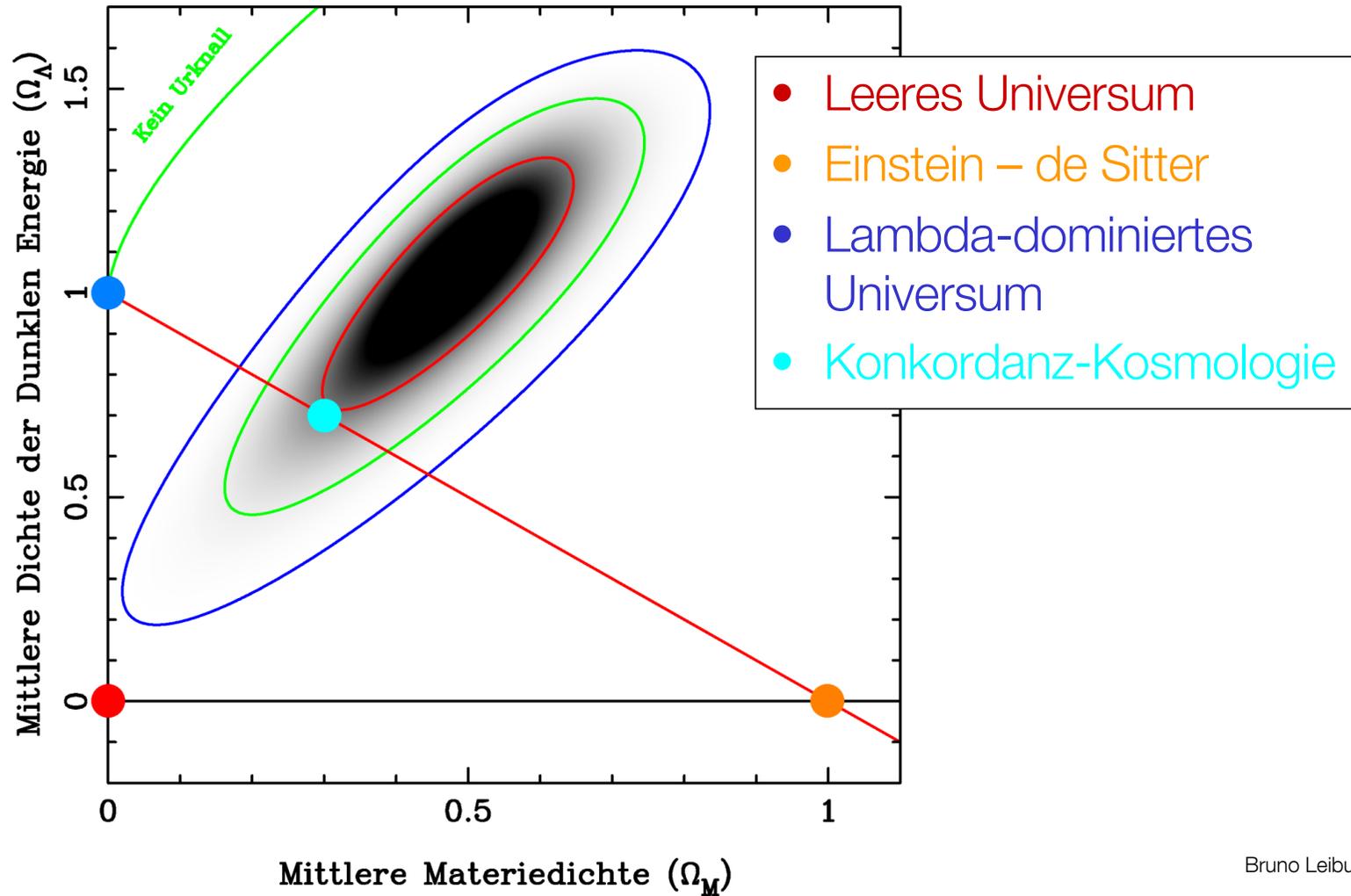
Bruno Leibundgut

Das SN Hubble Diagramm





Kosmologische Implikation



Physik Nobelpreis 2011



Saul Perlmutter



Brian Schmidt

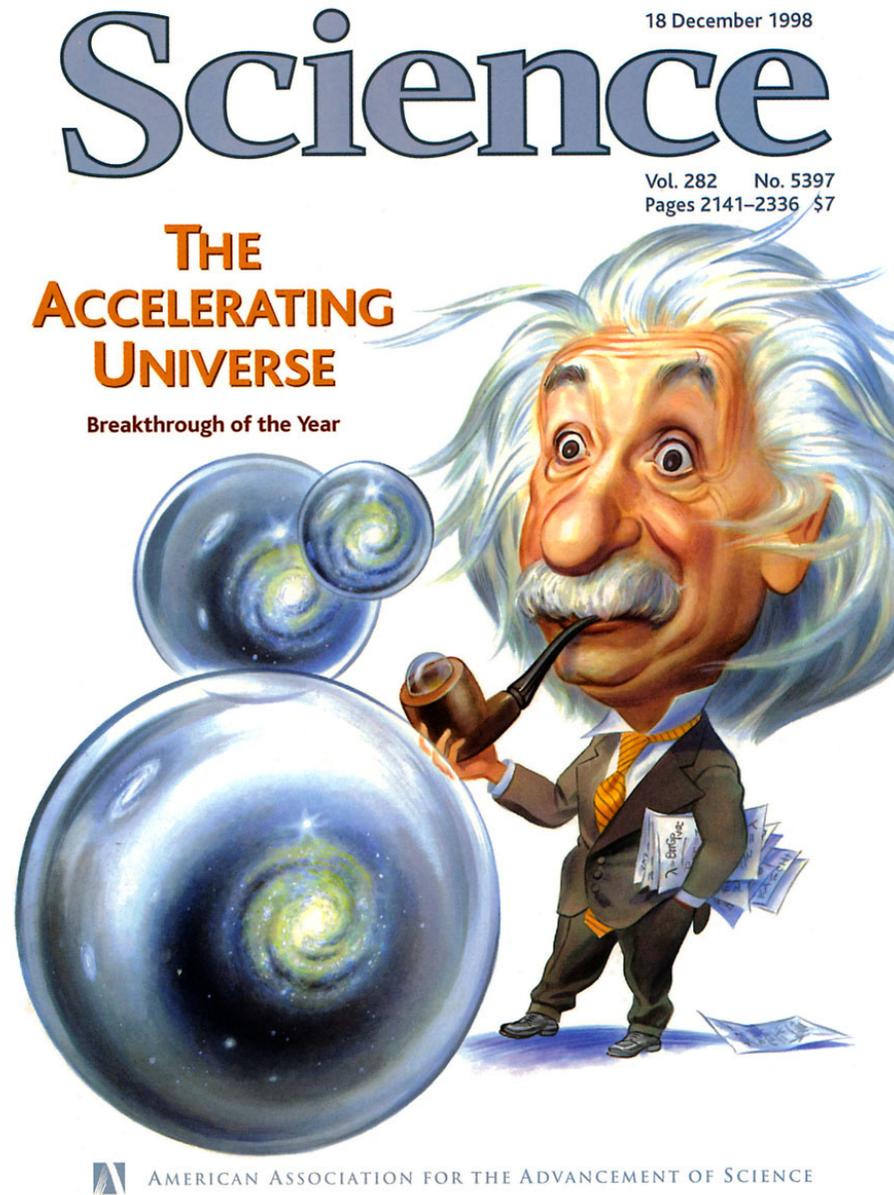


Adam Riess

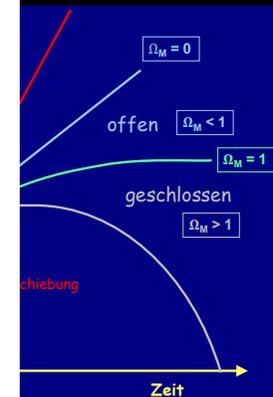
"for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"

Entfernte Super
expandierender
durch eine **abst**

14. September 2022



s in einem frei
Dies kann nur
werden.



runo Leibundgut

Einstein zur Kosmologischen Konstante

Wir geben hierfür zunächst einen Weg an, der an sich nicht beansprucht, ernst genommen zu werden; er dient nur dazu, das Folgende besser hervortreten zu lassen.

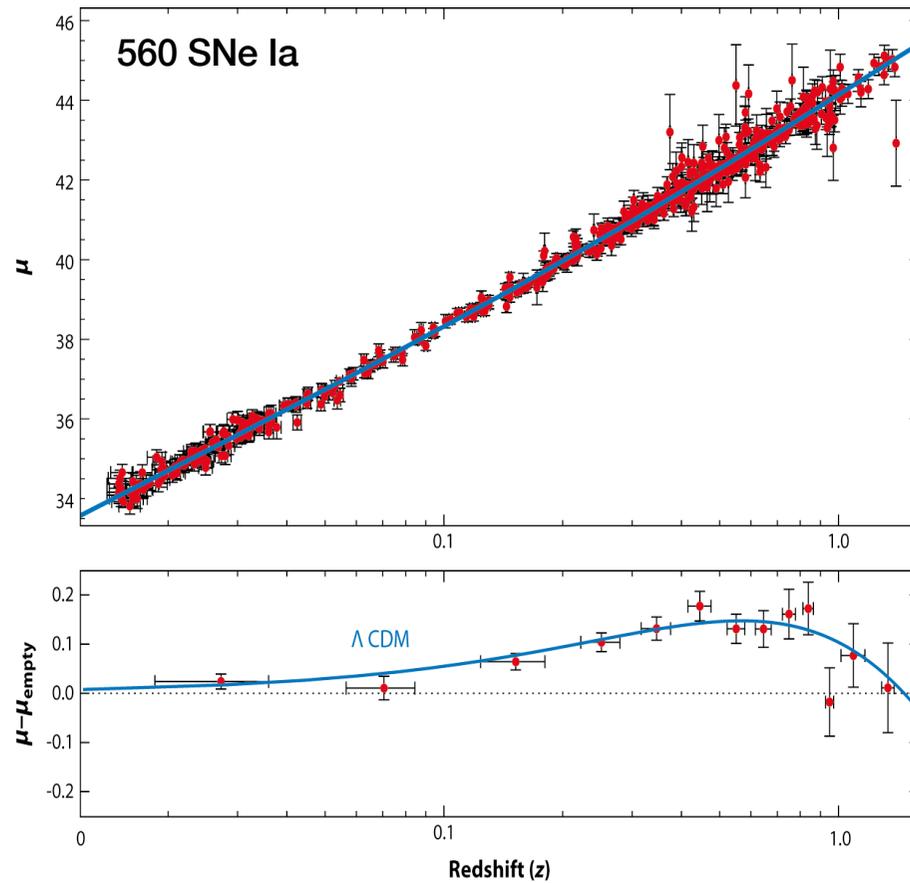
Im folgenden führe ich den Leser auf dem von mir selbst zurückgelegten, etwas indirekten und holperigen Wege, weil ich nur so hoffen kann, daß er dem Endergebnis Interesse entgegenbringe. Ich komme nämlich zu der Meinung, daß die von mir bisher vertretenen

[Die Kosmologische Konstante] haben wir nur nötig, um eine quasi-statische Verteilung der Materie zu ermöglichen, wie es der Tatsache der kleinen Sterngeschwindigkeiten entspricht.

charakter des Raumes ist nach Maßgabe der Verteilung der Materie zeitlich und örtlich variabel, läßt sich aber im großen durch einen sphärischen Raum approximieren. Jedenfalls ist diese Auffassung logisch widerspruchsfrei und vom Standpunkte der allgemeinen Relativitätstheorie die naheliegendste; ob sie, vom Standpunkt des heutigen astronomischen Wissens aus betrachtet, haltbar ist, soll hier nicht untersucht werden. Um zu dieser widerspruchsfreien Auffassung zu gelangen, mußten wir allerdings eine neue, durch unser tatsächliches Wissen von der Gravitation nicht gerechtfertigte Erweiterung der Feldgleichungen der Gravitation einführen.

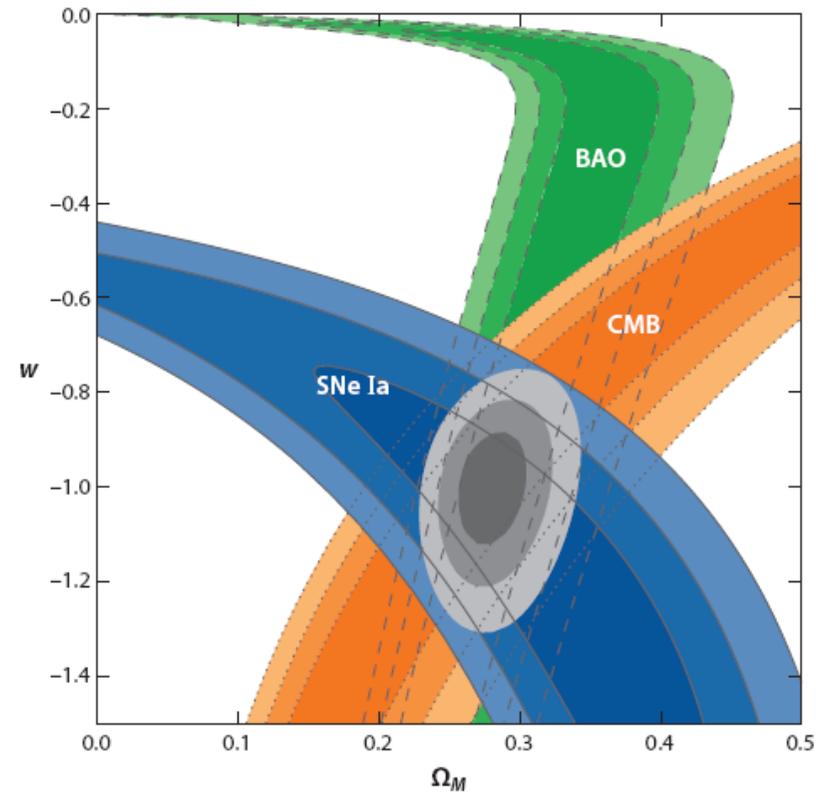
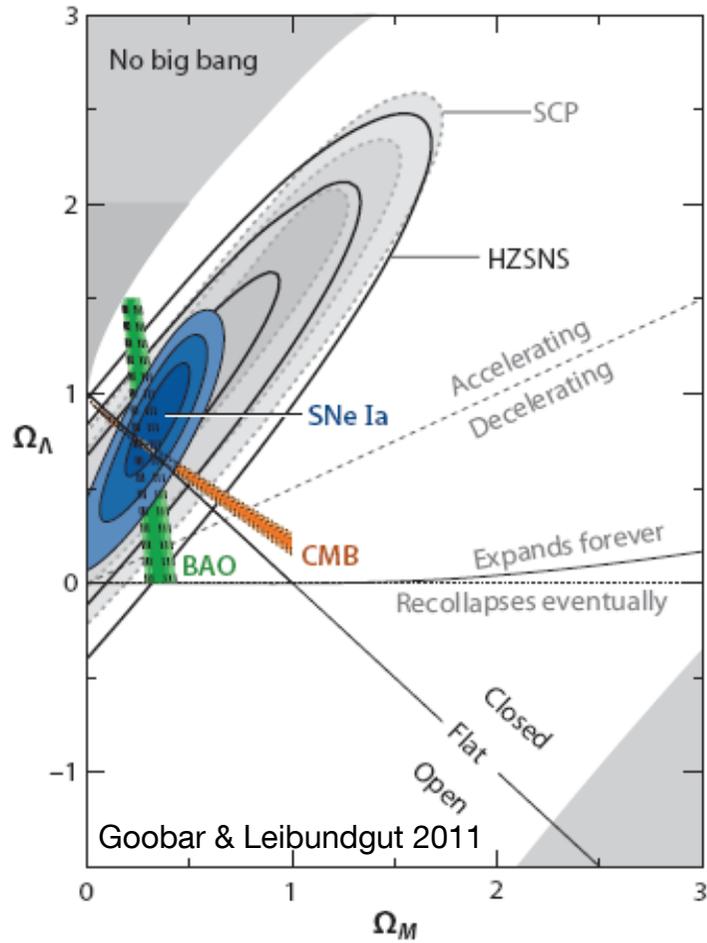
Einstein (1917)

Bestätigung mit mehr Supernovae

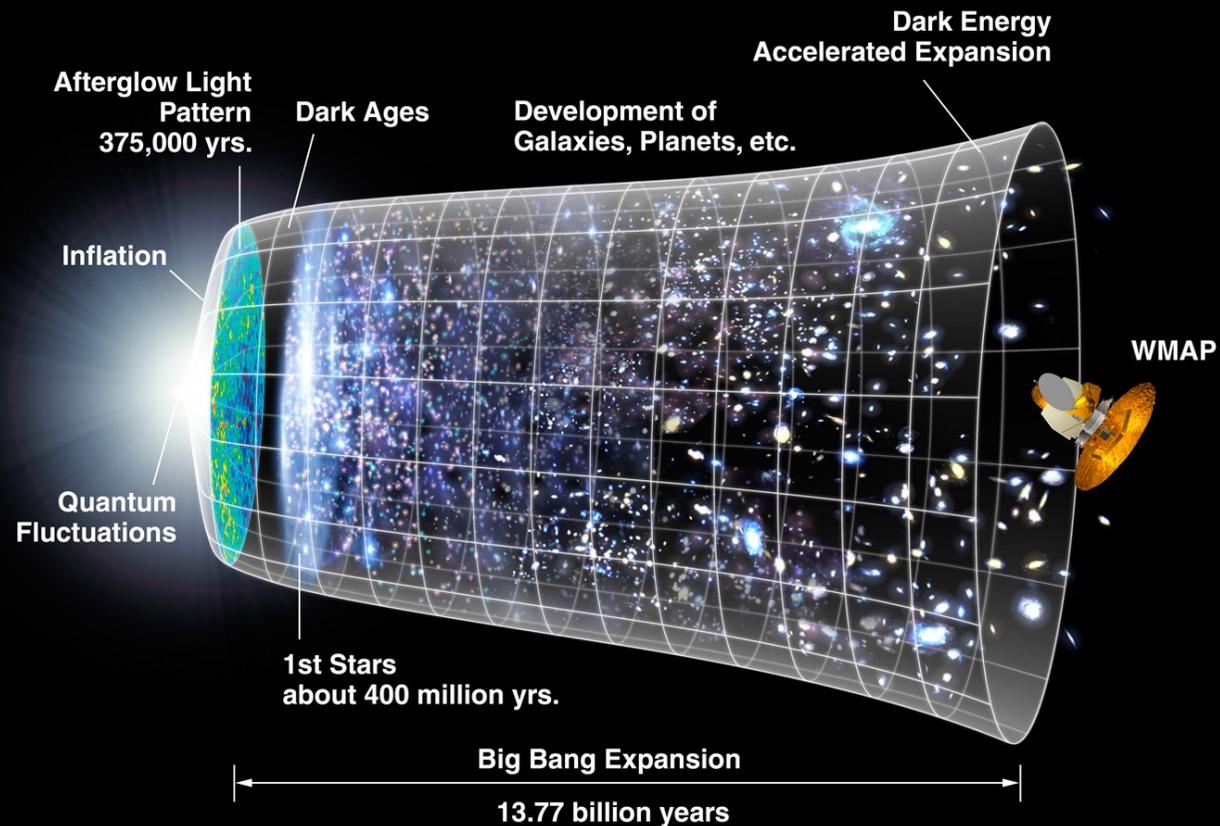


 Goobar A, Leibundgut B. 2011.
Annu Rev. Nucl. Part. Sci. 61:251–79

Bestätigung mit mehr Supernovae



Kosmischer Mikrowellenhintergrund

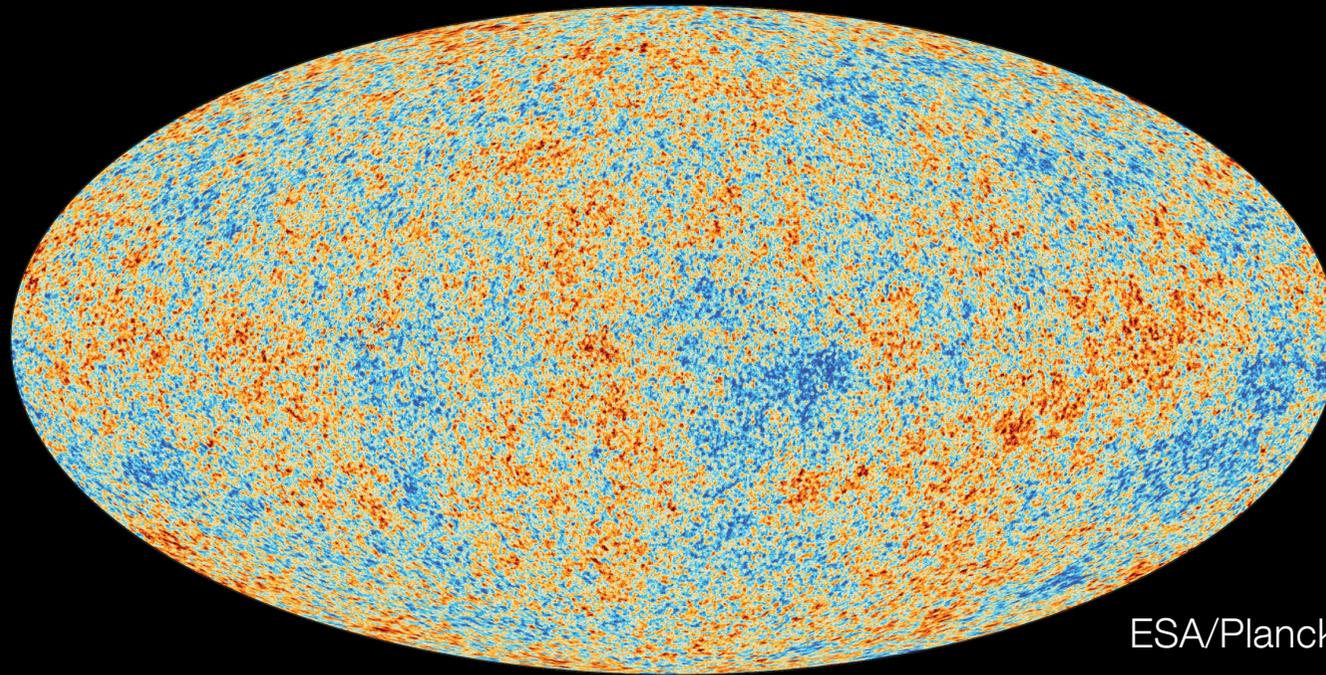


NASA/WMAP Science Team

Kosmischer Mikrowellenhintergrund

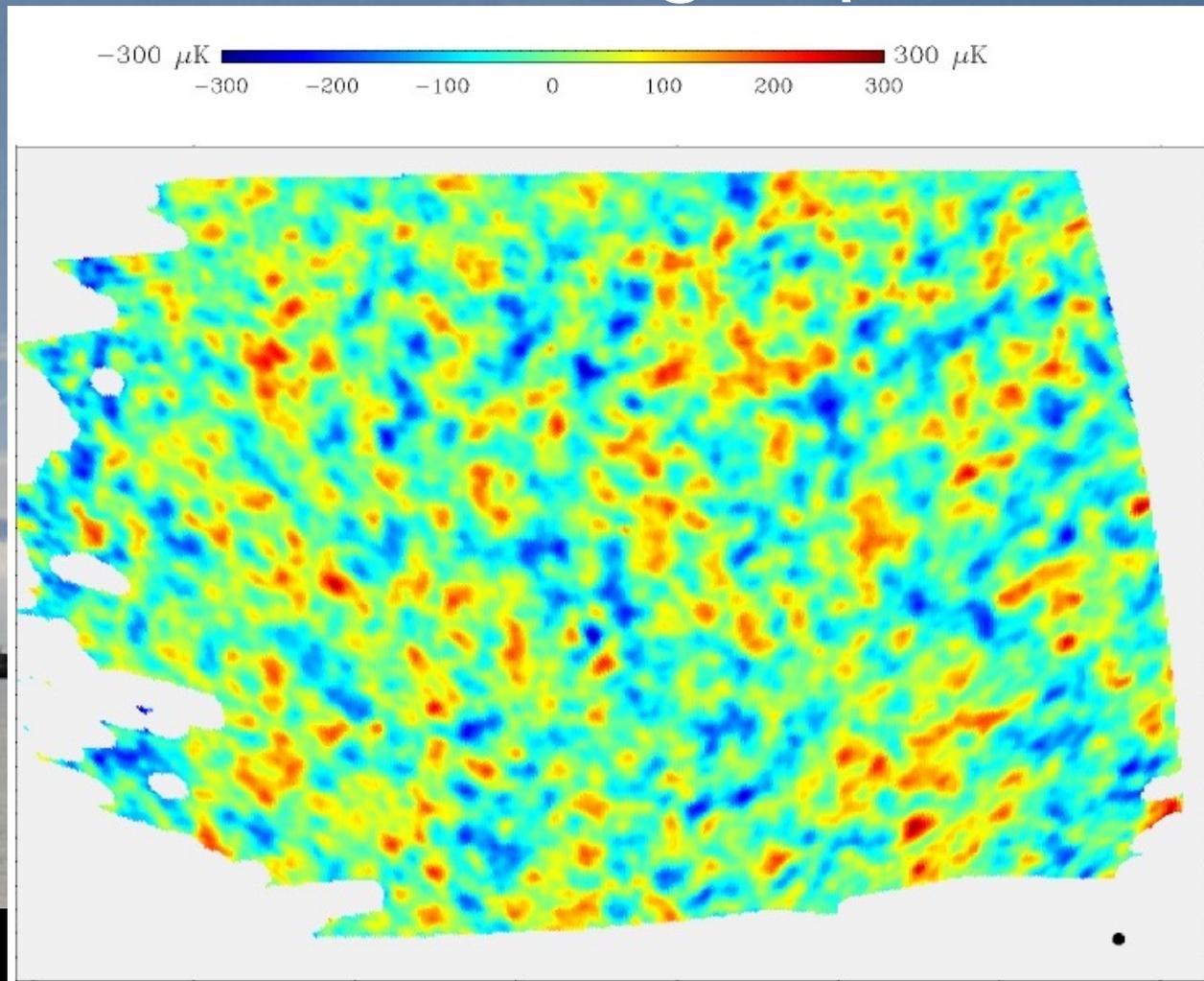
Strahlungsüberreste des Urknalls

- Schwarzkörper-Strahlung mit $T=2.73$ K
- 370000 Jahre nach dem Urknall abgestrahlt



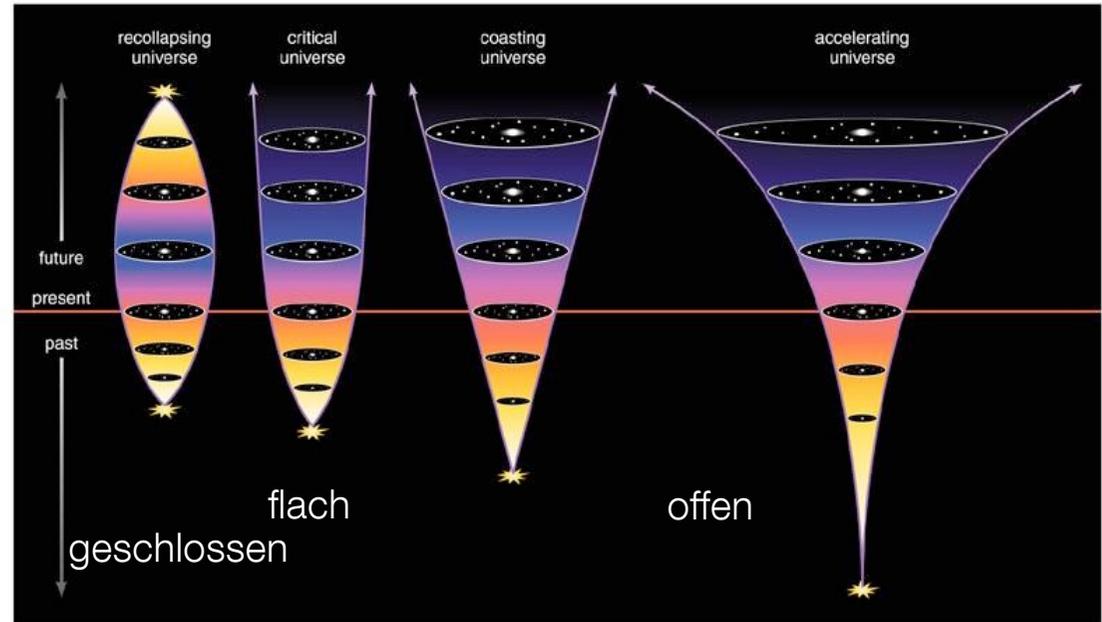
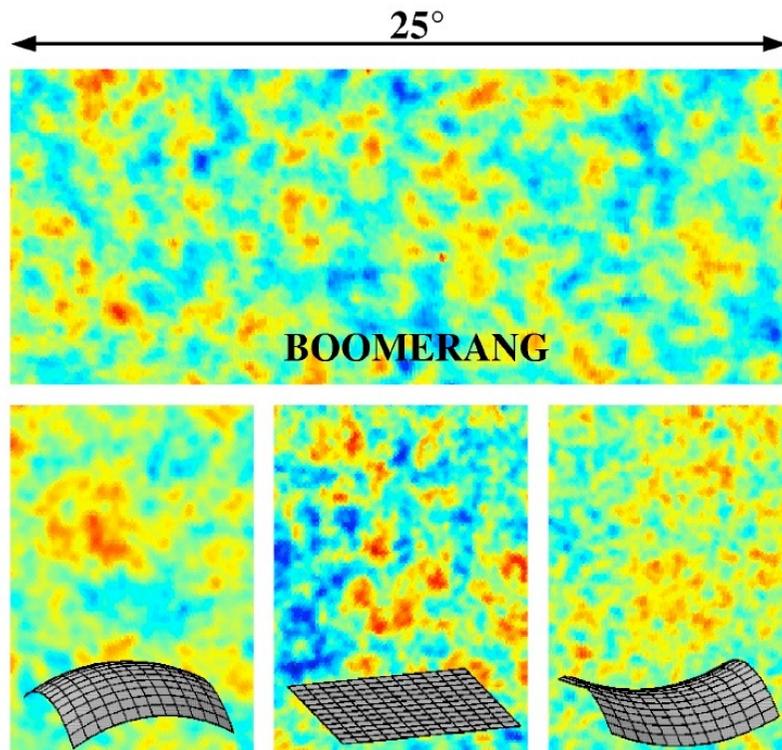
ESA/Planck

Das Boomerang Experiment



Raumkrümmung

Lichtstrahlen folgen dem kürzesten Weg (Geodäten)

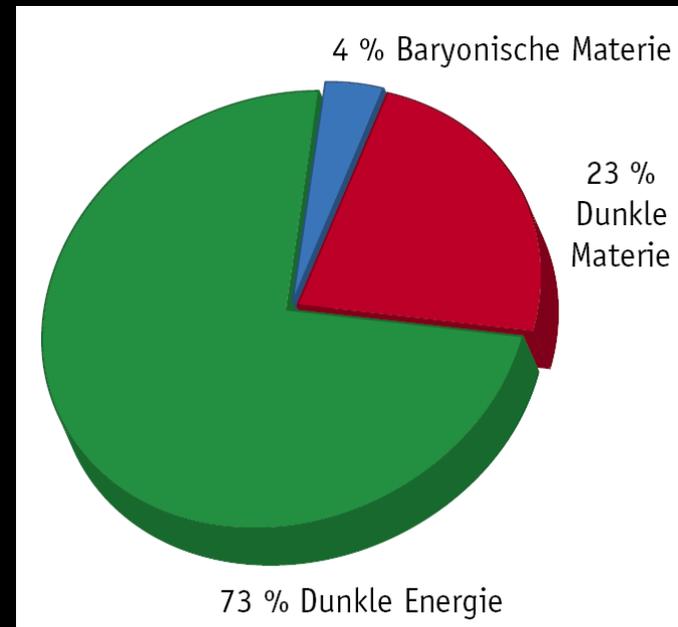


Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

Der Inhalt des Universums

Dunkle Materie und Dunkle Energie sind die bestimmenden Energiebeiträge des Universums.

Was sind sie?



Was bedeutet das?

Das Universum besteht im wesentlichen aus
nichts.

Das Universum expandiert für immer.

Im Moment existiert keine überzeugende physikalische
Interpretation der Vakuumsenergie (**Dunkle Energie**).

Nur 4% des Universums sind aus demselben „Stoff“ wie wir
(und alles, das wir kennen).

Interpretationen/Spekulationen

Einsteins Kosmologische Konstante

Bisher kein "Platz" im Standard Model der Teilchenphysik

Quintessence

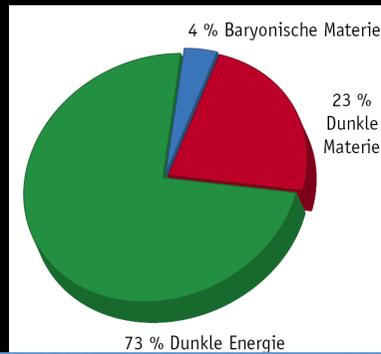
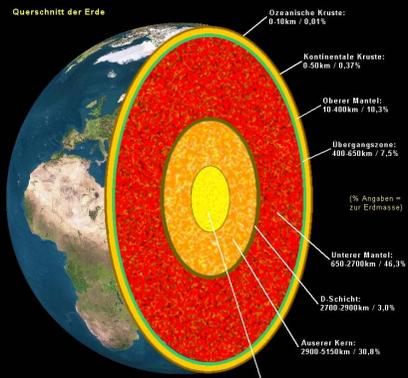
Quantenmechanisches Teilchenfeld, das Energie in das Universum entlässt

Anzeichen einer höheren Dimension

Gravitation ist am besten beschrieben in einer Theorie mit mehr als vier Dimensionen

Phantom Energie

Die Dunkle Energie ist so stark, dass das Universum auseinander fällt (Big Rip)



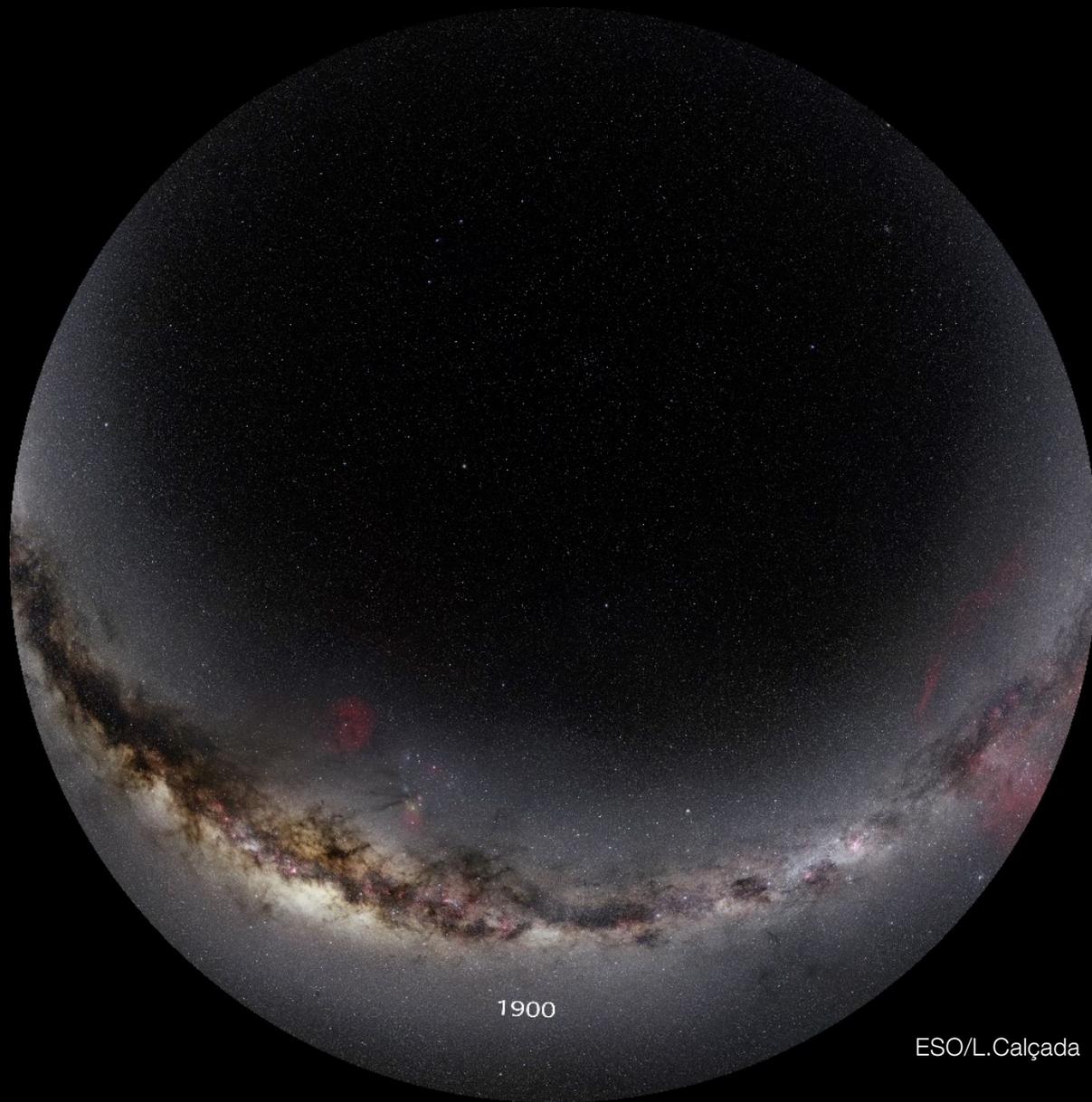
Unser Universum Unsere Welt





Zwei Dinge erfüllen das Gemüt mit immer neuer und zunehmender Bewunderung und Ehrfurcht, je öfter und anhaltender sich das Nachdenken damit beschäftigt: Der bestirnte Himmel über mir und das moralische Gesetz in mir. Ich sehe sie beide vor mir und verknüpfe sie unmittelbar mit dem Bewusstsein meiner Existenz.

Immanuel Kant
Kritik der praktischen Vernunft



14. September 2022

ESO/L. Calçada

Bruno Leibundgut