

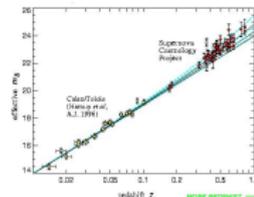
Der Physik-Nobelpreis 2011

Supernovae, Dunkle Energie und die Expansion des Universums

Matthias Blau

Albert Einstein Center for Fundamental Physics
Institut für Theoretische Physik, Universität Bern

Physik am Freitag, Bern, 24.02.2012





Der **Physik-Nobelpreis 2011** wurde an
Saul Perlmutter, Brian Schmidt und **Adam Riess** verliehen:



“für die Entdeckung der beschleunigten Ausdehnung des Universums durch die Beobachtung weit entfernter Supernovae”

Ziel dieses Vortrags ist, zu erklären

- worum es hier eigentlich geht
- was **Dunkle Energie** damit zu tun hat
- was das für unser **Verständis des Universums** bedeutet
- warum das ganze ziemlich **seltsam und kurios** ist und weit mehr Fragen aufwirft als beantwortet.

Zunächst aber ein paar einleitende Bemerkungen zu

- **Physik-Nobelpreis**
- **Kosmologie**
- **Entwicklung des Universums**
- **Kurze Geschichte der kosmologischen Konstante**

Der Physik-Nobelpreis



... ist natürlich die höchste und angesehenste wissenschaftliche Auszeichnung, die ein Physiker erhalten kann:



Der Physik-Nobelpreis



... ist natürlich die höchste und angesehenste wissenschaftliche Auszeichnung, die ein Physiker erhalten kann:

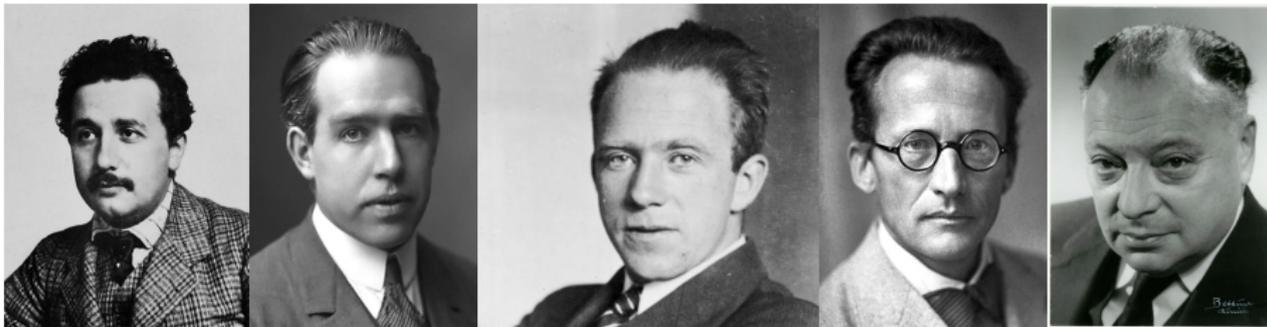


Wer ist wer?

Der Physik-Nobelpreis



... ist natürlich die höchste und angesehenste wissenschaftliche Auszeichnung, die ein Physiker erhalten kann:

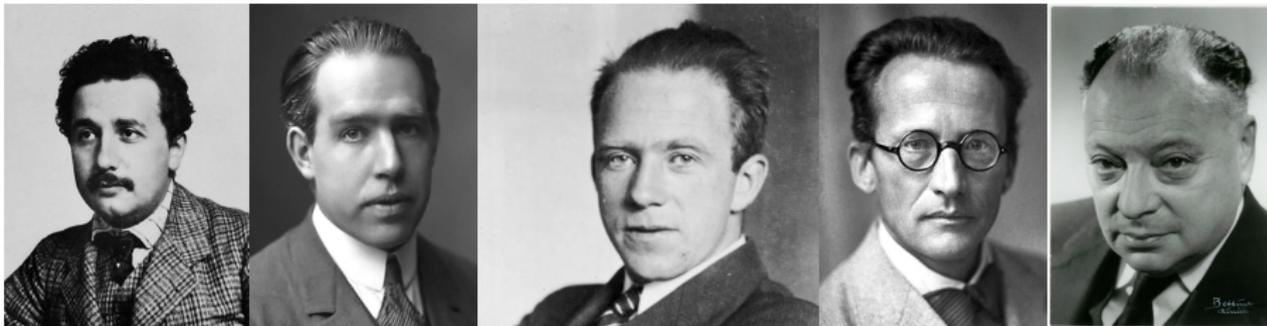


Wer ist wer?
Einstein(1921)

Der Physik-Nobelpreis



... ist natürlich die höchste und angesehenste wissenschaftliche Auszeichnung, die ein Physiker erhalten kann:



Wer ist wer?

Einstein(1921)Bohr(1922)

Der Physik-Nobelpreis



... ist natürlich die höchste und angesehenste wissenschaftliche Auszeichnung, die ein Physiker erhalten kann:



Wer ist wer?

Einstein(1921) Bohr(1922) Heisenberg(1932)

Der Physik-Nobelpreis



... ist natürlich die höchste und angesehenste wissenschaftliche Auszeichnung, die ein Physiker erhalten kann:



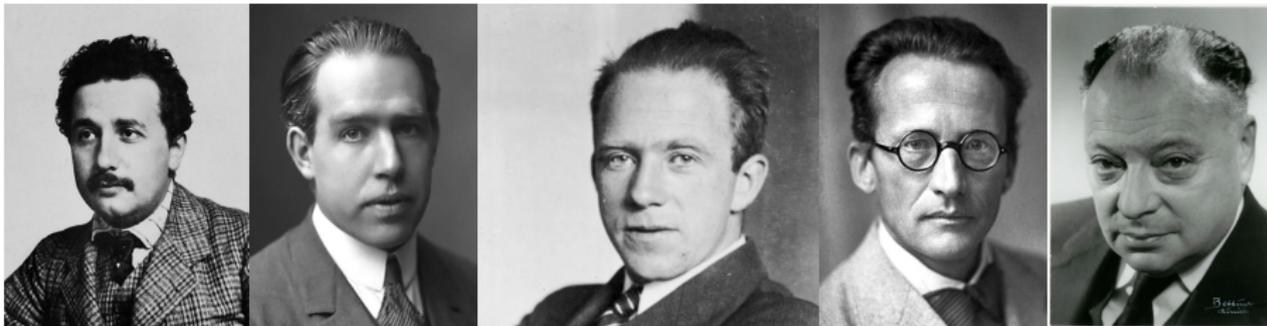
Wer ist wer?

Einstein(1921)Bohr(1922)Heisenberg(1932)Schrödinger(1933)

Der Physik-Nobelpreis



... ist natürlich die höchste und angesehenste wissenschaftliche Auszeichnung, die ein Physiker erhalten kann:



Wer ist wer?

Einstein(1921) Bohr(1922) Heisenberg(1932) Schrödinger(1933) Pauli(1945)

... auch wenn nicht alle Nobelpreisträger unser Verständnis der Physik und der Naturgesetze grundlegend revolutioniert haben:



Gustav Dalén (1912)

“for his invention of automatic regulators for use in conjunction with gas accumulators for illuminating lighthouses and buoys”



- **Kosmologie** ist der Teil der Physik der sich mit dem Studium des Universums im Ganzen beschäftigt, seinem **Ursprung**, seiner **Eigenschaften**, seiner **Entwicklung** und seiner **Zukunft**.

Kosmologie

- **Kosmologie** ist der Teil der Physik der sich mit dem Studium des Universums im Ganzen beschäftigt, seinem **Ursprung**, seiner **Eigenschaften**, seiner **Entwicklung** und seiner **Zukunft**.
- Fragen, mit denen sich die Menschheit auf die eine oder andere Art und Weise immer schon beschäftigt hat:



COSMOLOGY MARCHES ON

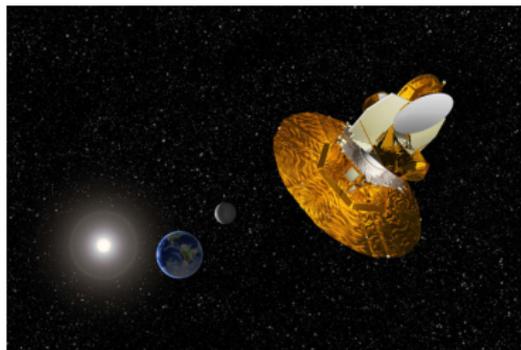
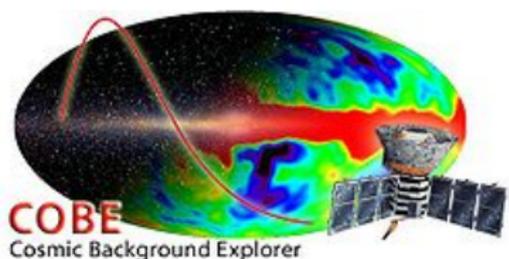


Allerdings gab es kaum jemals Physik-Nobelpreise für Kosmologie

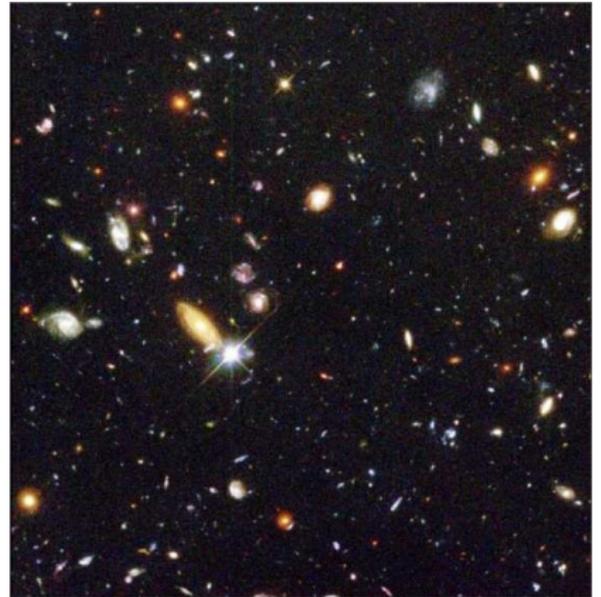
- Kosmologie galt lange Zeit nicht als exakte Wissenschaft (präzise Aussagen über Dinge die vor Milliarden von Jahren passiert sind oder Milliarden Lichtjahre entfernt sind, sind schwierig . . .)
- Keine praktische Anwendungen im Alltag (wie Halbleiter u.ä.)
- Den ersten und bis vor wenigen Jahren einzigen Nobelpreis gab es im Jahr 1978 für **Arno Penzias** und **Robert Wilson**
for their discovery of cosmic microwave background radiation (CMBR)
- Diese Situation hat sich erst in den letzten Jahrzehnten geändert, mit neuen hochpräzisen Beobachtungsmethoden:

- Der **COsmic Background Explorer (COBE) Satellit** (1989-1992) (Nobel-Komitee: “starting point for cosmology as a precision science”, läutet das **Goldene Zeitalter der Kosmologie** ein)
- und sein Nachfolger, der **Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Satellit** (2001-2010)

messen die kosmische Hintergrundstrahlung und erlauben uns so, um 13.7 Milliarden Jahre in die Vergangenheit des Weltalls zurückzuschauen.

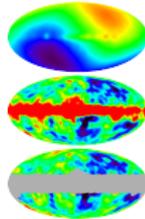


Das **Hubble Space Telescope (HST)** (Hubble Weltraum Teleskop, 1990 -) erlaubt es, extrem genaue und scharfe Aufnahmen des Weltalls zu machen (ohne störende Effekte durch Erdatmosphäre etc.), und zeigt selbst in einem engen Winkelbereich tausende von extrem weit entfernten Galaxien:



Dies führte in den letzten Jahren gleich zu 2 Nobelpreisen für Kosmologie:

1 2006: John C. Mather, George F. Smoot



"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"

2 2011: Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess



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

Expansion des Universums

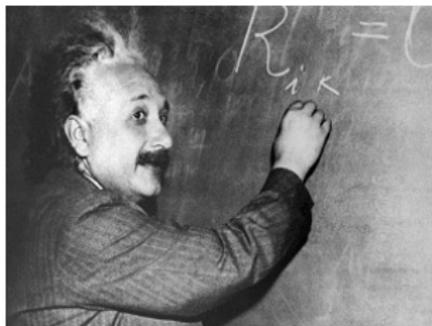
Um zu verstehen, was diese Herren und ihre teams entdeckt haben, müssen wir etwas ausholen:

- Das naive Bild das die Menschheit lange Zeit von unserem Universum hatte, nachdem sie die “**göttliche Kristallschalen**”-Phase überwunden hatte war vermutlich überwiegend, dass es **unendlich, zeitunabhängig, gleichmässig mit Sternen gefüllt** ist.
- Allerdings war schon **Isaac Newton** klar, dass das so nicht so einfach funktionieren kann, da ein solches Universum nach seiner Theorie unweigerlich unter der Wirkung seiner eigenen Anziehungskraft (Schwerkraft) in sich zusammenfallen müsste.



Expansion des Universums

- 1905-1915 entwickelte **Albert Einstein** seine neue relativistische Theorie der Schwerkraft, die **Allgemeine Relativitätstheorie (ART)**



- Nach der ART erzeugt Masse/Energie ein Gravitationsfeld (Schwerefeld), aber **Schwerkraft** ist nicht eine Kraft wie alle anderen sondern **Manifestation der Krümmung der Raum-Zeit**, und die Einsteinschen Feldgleichungen sind (schematisch)

$$\text{(Krümmung der Raum-Zeit)} = \text{(Energiedichte etc.)}$$

- Einstein machte sich sofort (1917) daran, diese auch auf die Kosmologie anzuwenden, und hatte das selbe Problem wie Newton: **er fand keine statischen (zeitunabhängigen) Lösungen.**

Expansion des Universums

- Aber Einstein war von einem statischen Universum überzeugt und erfand einen “Trick” um statische Lösungen zu finden: er fügte auf der rechten Seite seiner Gleichungen einen konstanten Term, entsprechend einer konstanten Energiedichte, hinzu,

$$(\text{Krümmung der Raum-Zeit}) = (\text{Energiedichte etc.}) + \Lambda$$

- Λ ist die berühmt-berüchtigte **Kosmologische Konstante**

Expansion des Universums

- Aber Einstein war von einem statischen Universum überzeugt und erfand einen “Trick” um statische Lösungen zu finden: er fügte auf der rechten Seite seiner Gleichungen einen konstanten Term, entsprechend einer konstanten Energiedichte, hinzu,

$$(\text{Krümmung der Raum-Zeit}) = (\text{Energiedichte etc.}) + \Lambda$$

- Λ ist die berühmt-berüchtigte **Kosmologische Konstante**

Wenn $\Lambda > 0$, entspricht dies einer gleichmässig im Raum verteilten abstossenden Kraft. Mit Λ (so gewählt dass es genau die Anziehung der Materie kompensiert) konnte Einstein jetzt eine Lösung seiner Gleichungen finden, die ein **statisches Universum** beschreibt, und Einstein war glücklich.

Expansion des Universums

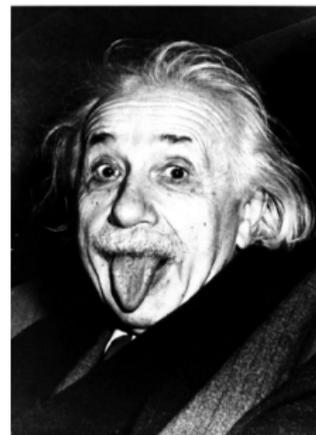
- Aber Einstein war von einem statischen Universum überzeugt und erfand einen “Trick” um statische Lösungen zu finden: er fügte auf der rechten Seite seiner Gleichungen einen konstanten Term, entsprechend einer konstanten Energiedichte, hinzu,

$$(\text{Krümmung der Raum-Zeit}) = (\text{Energiedichte etc.}) + \Lambda$$

- Λ ist die berühmt-berüchtigte **Kosmologische Konstante**

Wenn $\Lambda > 0$, entspricht dies einer gleichmässig im Raum verteilten abstossenden Kraft. Mit Λ (so gewählt dass es genau die Anziehung der Materie kompensiert) konnte Einstein jetzt eine Lösung seiner Gleichungen finden, die ein **statisches Universum** beschreibt, und Einstein war glücklich.

Aber sooo einfach sind die Dinge nicht ...



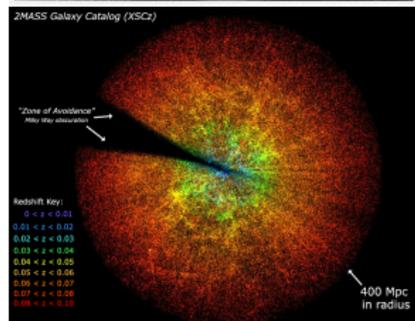
Expansion des Universums: die Hubble-Rotverschiebung

In den 1920ern bemerkte der amerikanische Astronom **Edwin Hubble**, dass das Licht und die Spektrallinien von fernen Objekten (später als andere Galaxien identifiziert) systematisch rotverschoben ist,

Rotverschiebung \sim Abstand

$$z \equiv \Delta\lambda/\lambda = H_0 D$$

- λ : Wellenlänge
- H_0 : Hubble Konstante
- D : Abstand (*D*istanz)
- z : Rotverschiebungsfaktor
($z = 0$: keine Rotverschiebung,
 $z = 1$: Wellenlänge verdoppelt)



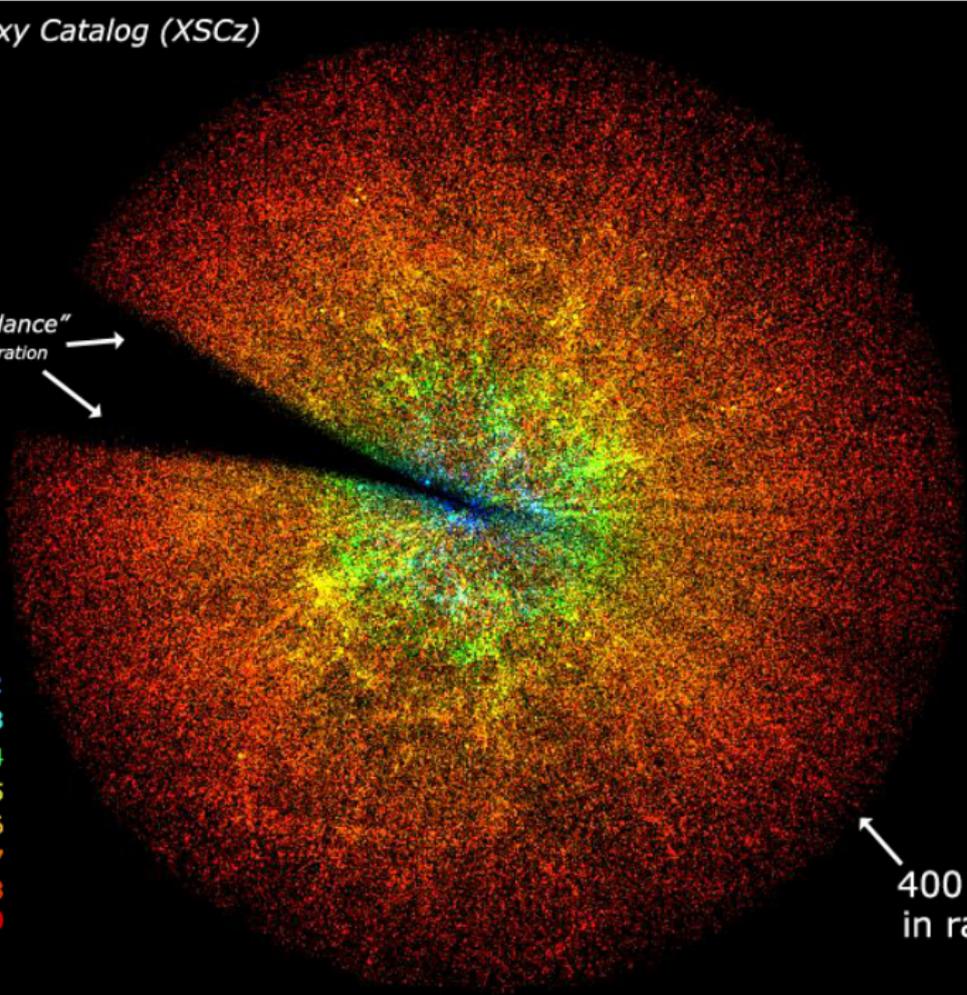
2MASS Galaxy Catalog (XSCz)

"Zone of Avoidance"
Milky Way obscuration

Redshift Key:

$0 < z < 0.01$
 $0.01 < z < 0.02$
 $0.02 < z < 0.03$
 $0.03 < z < 0.04$
 $0.04 < z < 0.05$
 $0.05 < z < 0.06$
 $0.06 < z < 0.07$
 $0.07 < z < 0.08$
 $0.08 < z < 0.10$

400 Mpc
in radius



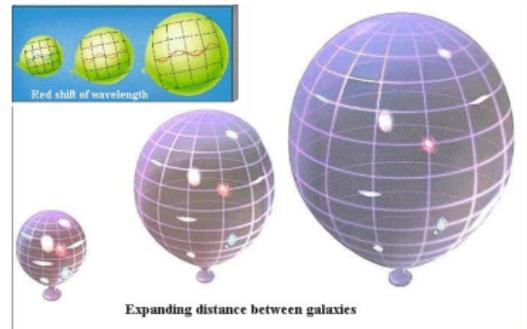
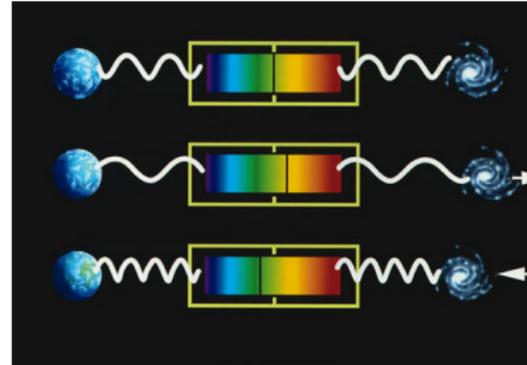
Expansion des Universums: die Hubble-Rotverschiebung

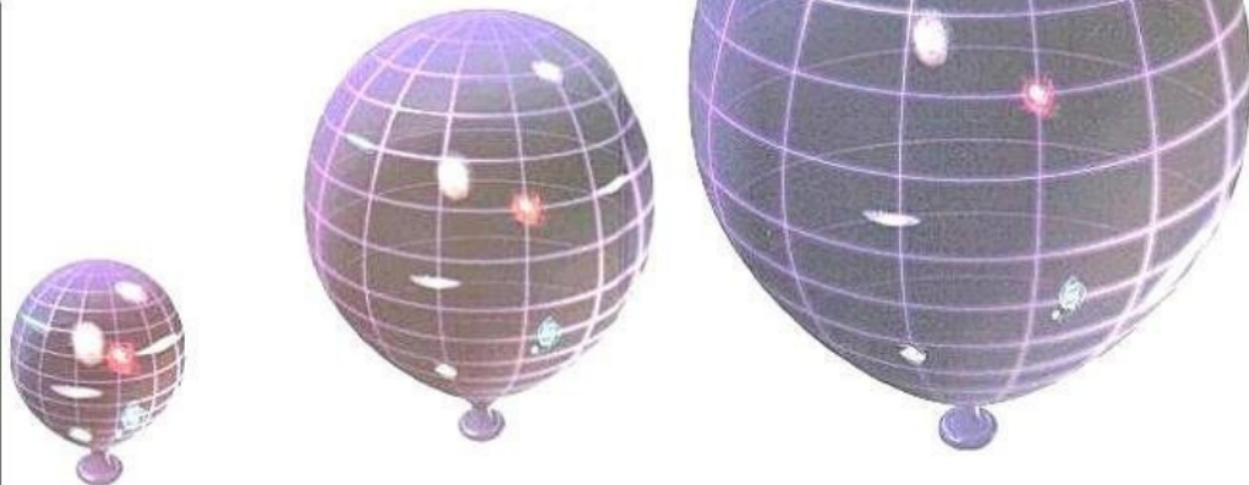
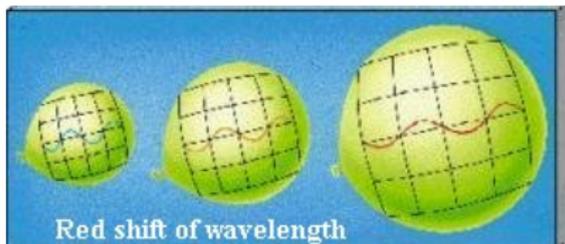
Interpretiert man diese Rotverschiebung traditionell als **Doppler-Effekt**, kommt man zu dem Schluss:

Alle Galaxien entfernen sich von uns, um so schneller je weiter sie entfernt sind.

Damit entsteht vielleicht der Eindruck dass “wir” im Zentrum des Universums sind, und alles sich von “uns” entfernt, aber das ist höchst ego/geo-zentrisch und irreführend. Es ist besser sich vorzustellen

Der Raum dehnt sich aus und alles entfernt sich gleichmässig von allem





Expanding distance between galaxies

Expansion des Universums: Lemaitre und der Urknall

Zur gleichen Zeit zeigte der **Jesuitenpater Georges Lemaitre** (1894 - 1966), dass eine solche

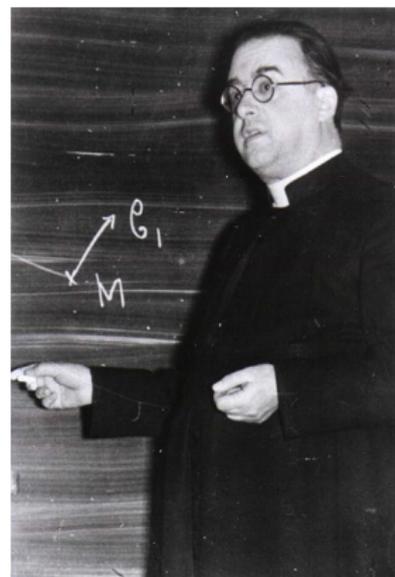
Expansion des Universum

durch die Allgemeine Relativitätstheorie vorhergesagt wird. Er entwickelte auch die

Urknalltheorie

Universum war in Vergangenheit viel kleiner als heute. Es gab eine

Anfangssingularität





Expansion des Universums: Lemaitre und der Urknall

Zur gleichen Zeit zeigte der **Jesuitenpater Georges Lemaitre** (1894 - 1966), dass eine solche

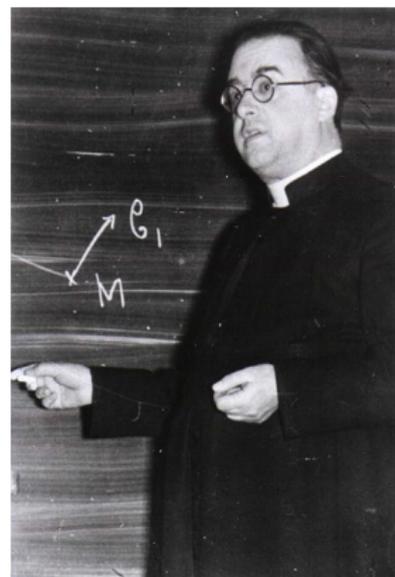
Expansion des Universum

durch die Allgemeine Relativitätstheorie vorhergesagt wird. Er entwickelte auch die

Urknalltheorie

Universum war in Vergangenheit viel kleiner als heute. Es gab eine

Anfangssingularität



Expansion des Universums: Lemaitre und der Urknall

Zur gleichen Zeit zeigte der **Jesuitenpater Georges Lemaitre** (1894 - 1966), dass eine solche

Expansion des Universum

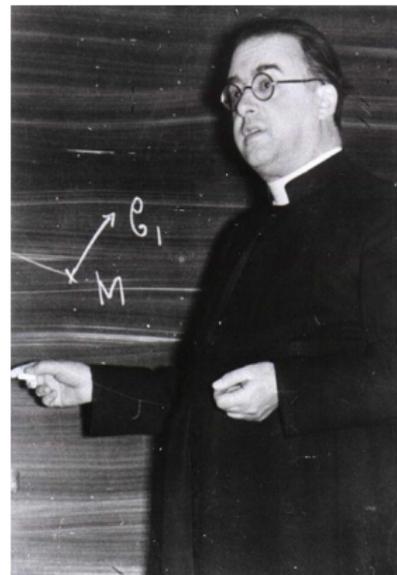
durch die Allgemeine Relativitätstheorie vorhergesagt wird. Er entwickelte auch die

Urknalltheorie

Universum war in Vergangenheit viel kleiner als heute. Es gab eine

Anfangssingularität

[dass er dafür nicht exkommuniziert wurde hat er wohl nur der Tatsache zu verdanken dass fast niemand seine Arbeiten gelesen und verstanden hat]



Expansion des Universums: Lemaitre, Einstein und Λ

Einstein wehrte sich noch eine gewisse Zeit gegen Lemaitres kosmologische Lösungen seiner Feldgleichungen, und gegen diese Interpretation der Hubble Rotverschiebung. So soll er noch 1927 (Solvay-Kongress in Brüssel) zu Lemaitre gesagt haben

Vos calculs sont corrects,
mais votre physique est abominable!

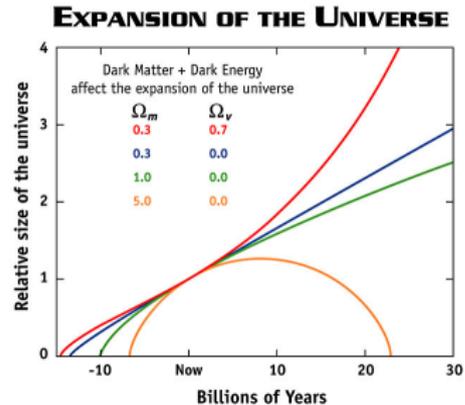
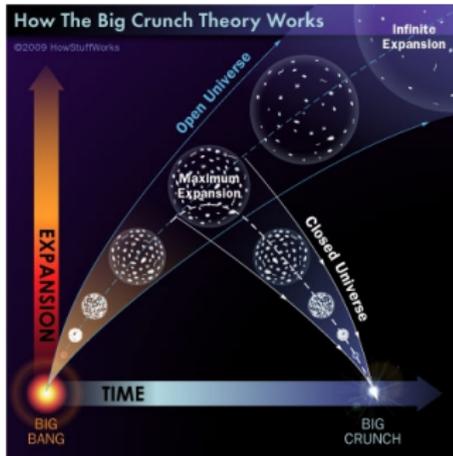


Schliesslich setzte sich (auch bei Einstein) Lemaitres Erklärung durch, und Einstein soll später die Einführung von Λ als seine grösste "Eselei" bezeichnet habe. Aber die Geister die man rief ...

Expansion des Universums

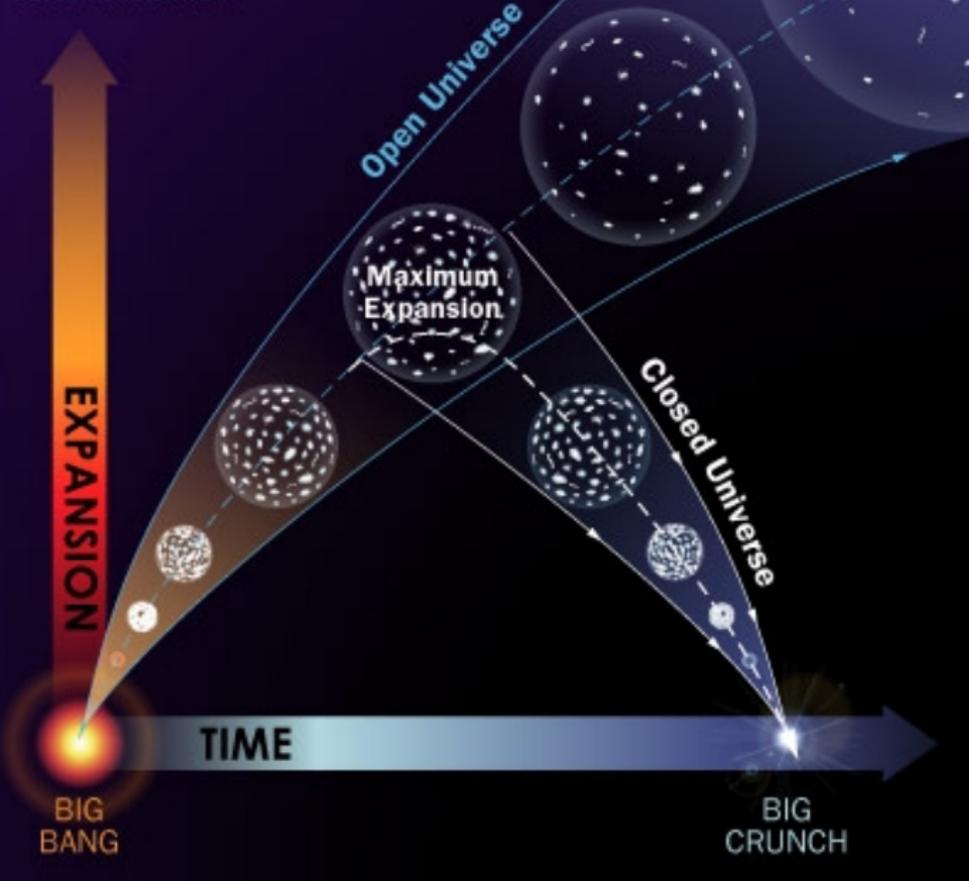
Ganz wichtig für uns wird sein:

- Die zeitliche Entwicklung des Universums (sein Radius $R(t)$) ist abhängig von der Gesamtenergie und der Zusammensetzung des Universums.
- Es kann sich entweder ewig ausdehnen (gebremst oder beschleunigt) oder schliesslich wieder in sich zusammenstürzen.



How The Big Crunch Theory Works

©2009 HowStuffWorks



Rotverschiebung und Zusammensetzung des Universums

- Die **Rotverschiebung** z eines Objekts mit Abstand D hängt von $R(t)$, und daher von Gesamtenergie und der Zusammensetzung des Universums ab.
- ⇒ Messung von z als Funktion des Abstands erlaubt Rückschlüsse auf Zusammensetzung des Universums.
- Für “kleine” Distanzen ist der Zusammenhang, unabhängig von der Zusammensetzung, ungefähr linear (das **Hubble Gesetz** $z = H_0 D$).
- Achtung:** wenn Kosmologen von “kleinen” Distanzen reden, meinen sie Abstände kleiner als ungefähr **1 Milliarde Lichtjahre!**
- Unterschiede (und Abweichungen vom Hubble Gesetz) tauchen erst bei grösseren (also wirklich riesigen) Distanzen auf.
- ⇒ **Ziel muss sein, z von sehr weit entfernten Objekten möglichst genau als Funktion des Abstands zu bestimmen.**

Supernovae?

Wir brauchen also Objekte

- 1 die sehr(!) weit entfernt sind,
- 2 die trotzdem hell genug sind dass wir (d.h. sehr empfindliche Teleskope) die Verschiebung der Spektrallinien messen können
- 3 deren Abstand wir trotz der Entfernung genau bestimmen können.

Supernovae?

Wir brauchen also Objekte

- 1 die sehr(!) weit entfernt sind,
- 2 die trotzdem hell genug sind dass wir (d.h. sehr empfindliche Teleskope) die Verschiebung der Spektrallinien messen können
- 3 deren Abstand wir trotz der Entfernung genau bestimmen können.

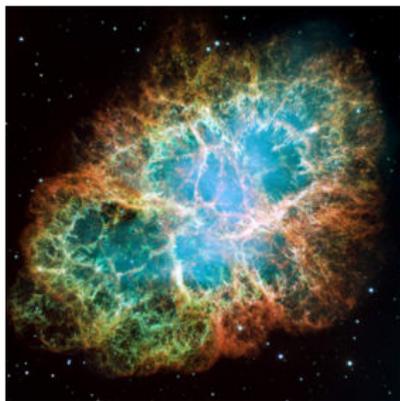
Ideale Kandidaten dafür sind **Supernovae**

- 1 Explosion eines Sterns am Ende seiner Lebenszeit (Stern vernichtet!)
- 2 Kann so hell leuchten wie eine ganze Galaxie (Milliarden von Sternen)
- 3 Für Supernovae einer bestimmten Art (Typ Ia: thermonukleare Explosion eines **Weissen Zwergs**) lässt sich aus dem Verlauf der Supernova ihre **absolute Helligkeit** bestimmen.
- 4 Wir beobachten ihre **scheinbare Helligkeit**.
- 5 Aus diesen beiden Grössen lässt sich der Abstand bestimmen!

Supernovae!

Supernovae sind leider sehr selten - in einer typischen Galaxie (Milliarden Sterne) alle paar hundert Jahre eine.

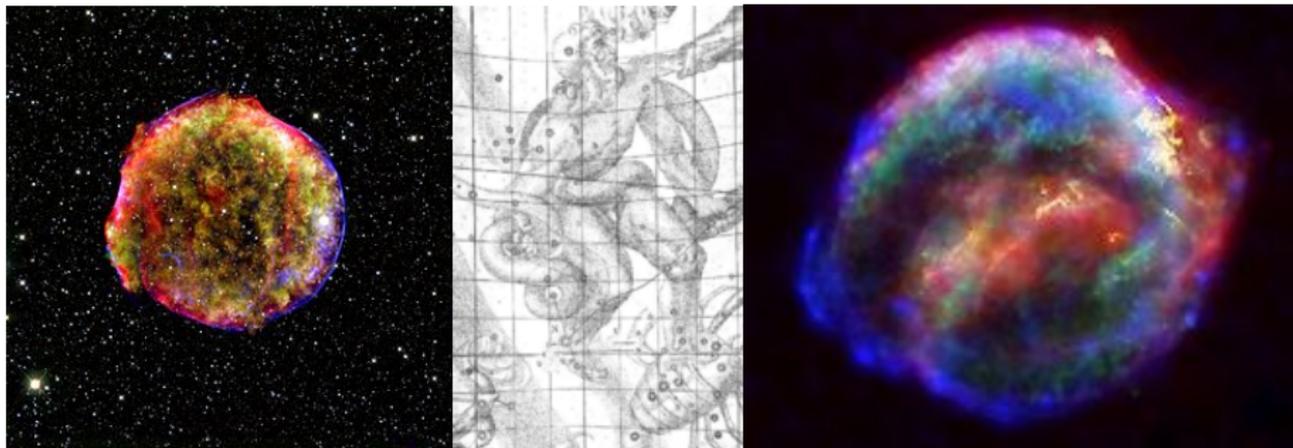
Hier die Überreste einer 1054 von chinesischen Astronomen beobachteten Supernova, SN1054, in unserer Galaxie (Milchstrasse), ungefähr 6500 Lichtjahre von uns entfernt:



Supernovae!

Und hier die ersten von europäischen Astronomen beobachteten Supernovae, so wie sie heute aussehen:

SN1572 (**Tycho Brahe**, Milchstrasse, 8000 Lj) und SN1604 (**Johannes Kepler**, Milchstrasse, 14 000 Lj)



Wichtig für Astronomie: klassische Auffassung von Unveränderlichkeit der Fixsternsphäre endgültig widerlegt!

Supernovae, Rotverschiebung und Dunkle Energie

Mit modernen Such- und Aufnahmemethoden möglich, Dutzende Supernovae jährlich zu entdecken, viele in weit entfernten Galaxien.
(zur Erinnerung, d.h.: Abstand \gg 1 Milliarde Lj!)

Derartige Supernovae Entfernungs- und Rotverschiebungsmessungen wurden von zwei Forschungsgruppen durchgeführt:

- dem HZT: High-z Supernova Search Team unter Leitung von Adam Riess und Brian Schmidt,
- dem SCP: Supernova Cosmology Project unter Leitung von Saul Perlmutter

Sie veröffentlichten (nahezu zeitgleich aber unabhängig voneinander) ihre Erkenntnisse 1998 in den Arbeiten:

- HZT: Observational Evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant
- SCP: Measurement of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae

Erwartung

Wenn unser Universum nur, oder überwiegend, mit normaler Materie und Energie gefüllt ist (Sterne und Galaxien, Atome, Strahlung, ...), dann verlangsamt sich notwendigerweise die Expansionsgeschwindigkeit des Universums (wegen der Anziehungskraft der Materie):

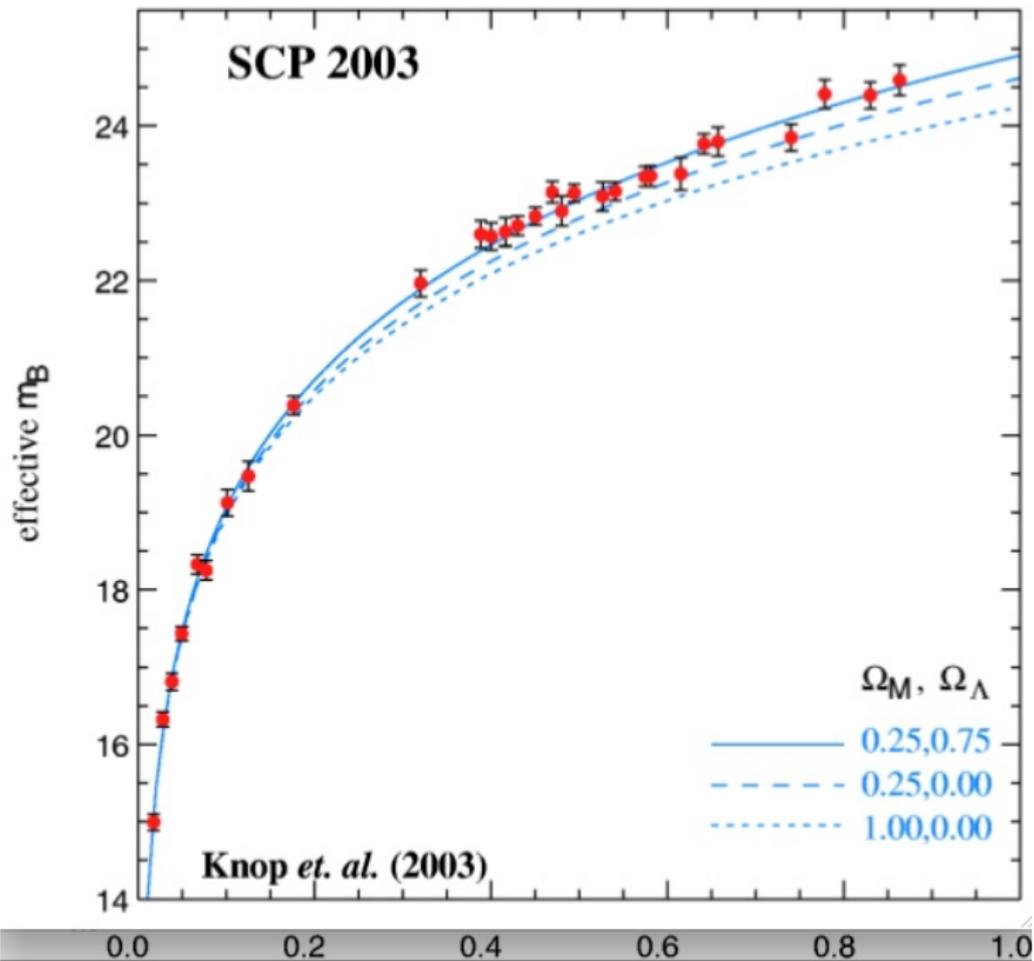
Normale Materie \Rightarrow Abbremsung (Entschleunigung): $\ddot{R}(t) < 0$

\Rightarrow Spezifische Vorhersagen für $z = z(D)$

Was aber haben HZT und SCP entdeckt?

Beobachtungen weichen deutlich von diesen Erwartungen ab!

- Supernovae mit grossen Werten von z erscheinen deutlich weniger hell (sind weiter weg) als sie nach obigem Modell erscheinen (sein) sollten.
- selbst die Vorhersagen für ein leeres Universum würden eher den Beobachtungen entsprechen!
- Es sieht so aus als gäbe es etwas das die **Anziehungskraft der Materie kompensiert** (oder gar über-kompensiert)



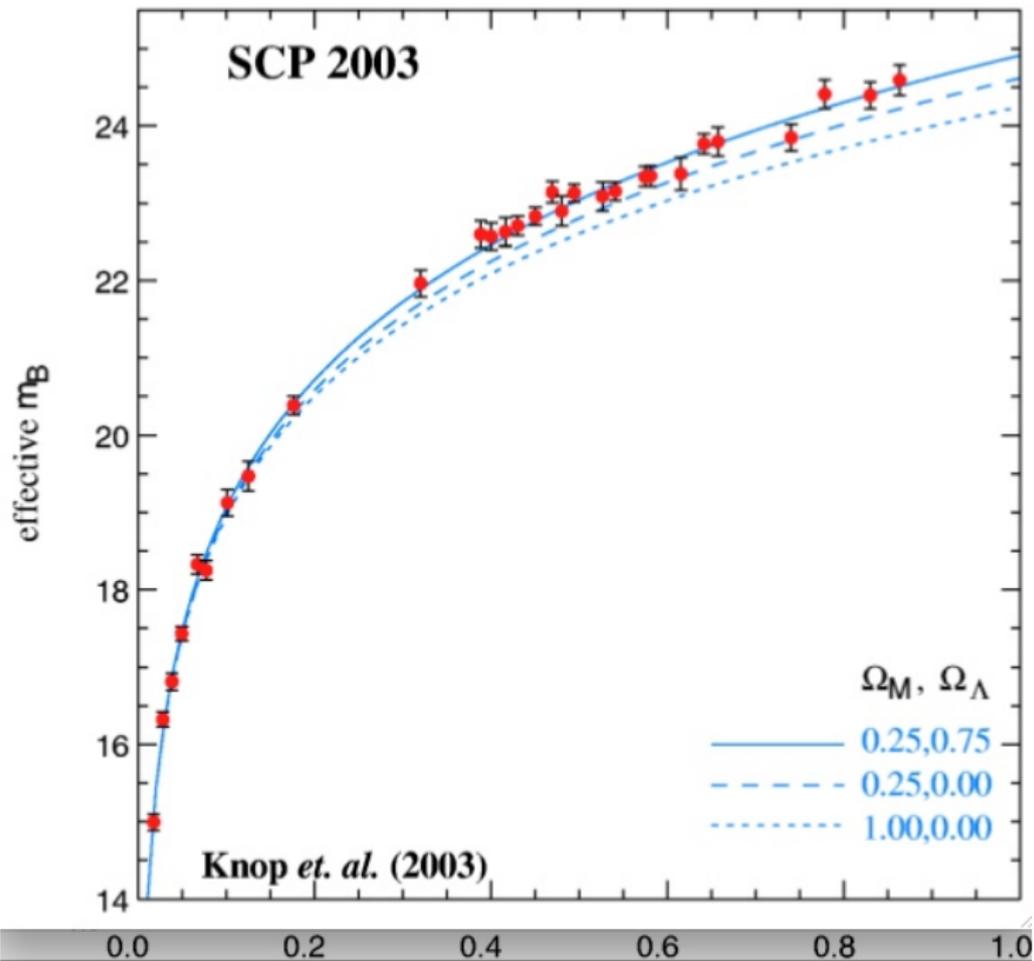
Wie lassen sich diese Beobachtungen erklären / interpretieren?

- 1 Beobachtungen können dadurch erklärt werden, dass man eine **Dunkle Energie** postuliert, die zu einer Art abstossender Kraft führt, d.h. zu einer **beschleunigten Ausdehnung des Universums**:

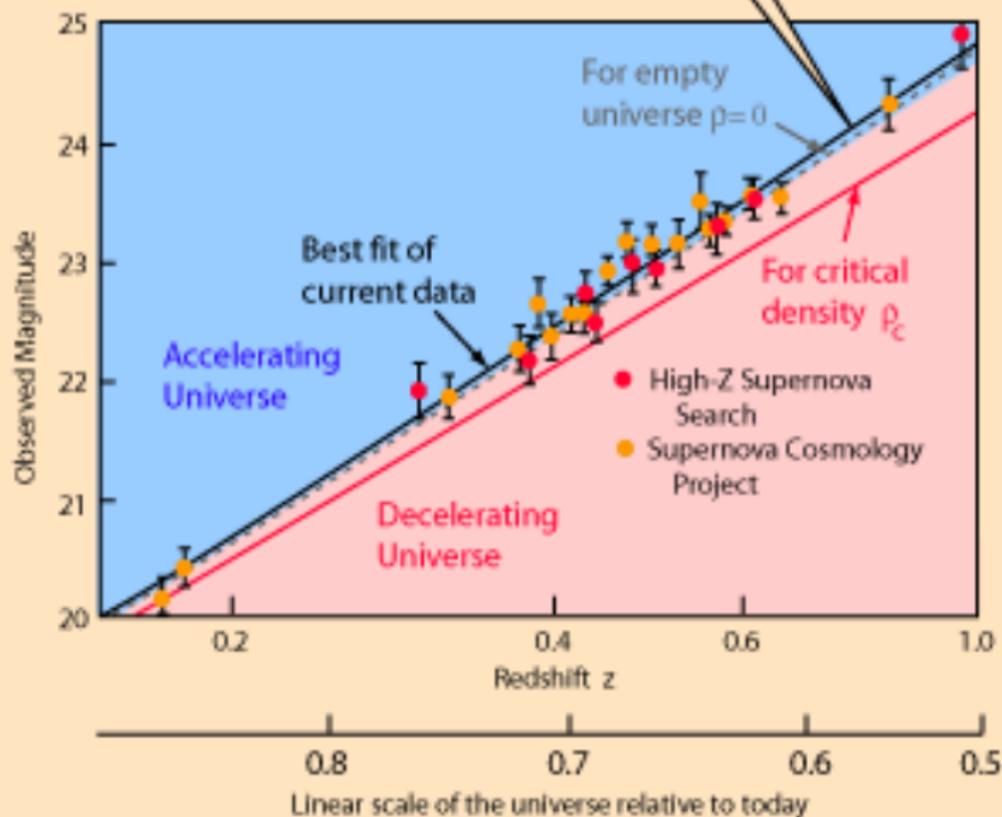
Normale Materie + Dunkle Energie \Rightarrow Beschleunigung: $\ddot{R}(t) > 0$

- 2 Diese **Dunkle Energie** muss sich sehr ähnlich verhalten wie eine **positive kosmologische Konstante $\Lambda > 0$** (genau das Objekt das Einstein eingeführt hatte um der Anziehungskraft entgegenzuwirken)
- 3 Die beste Übereinstimmung mit Beobachtungen wird erreicht, wenn für den Materieanteil Ω_M und den Λ -Anteil Ω_Λ an der Gesamtenergiedichte des Universums ungefähr gilt:

$$\Omega_M \approx 0.3 \quad , \quad \Omega_\Lambda \approx 0.7$$



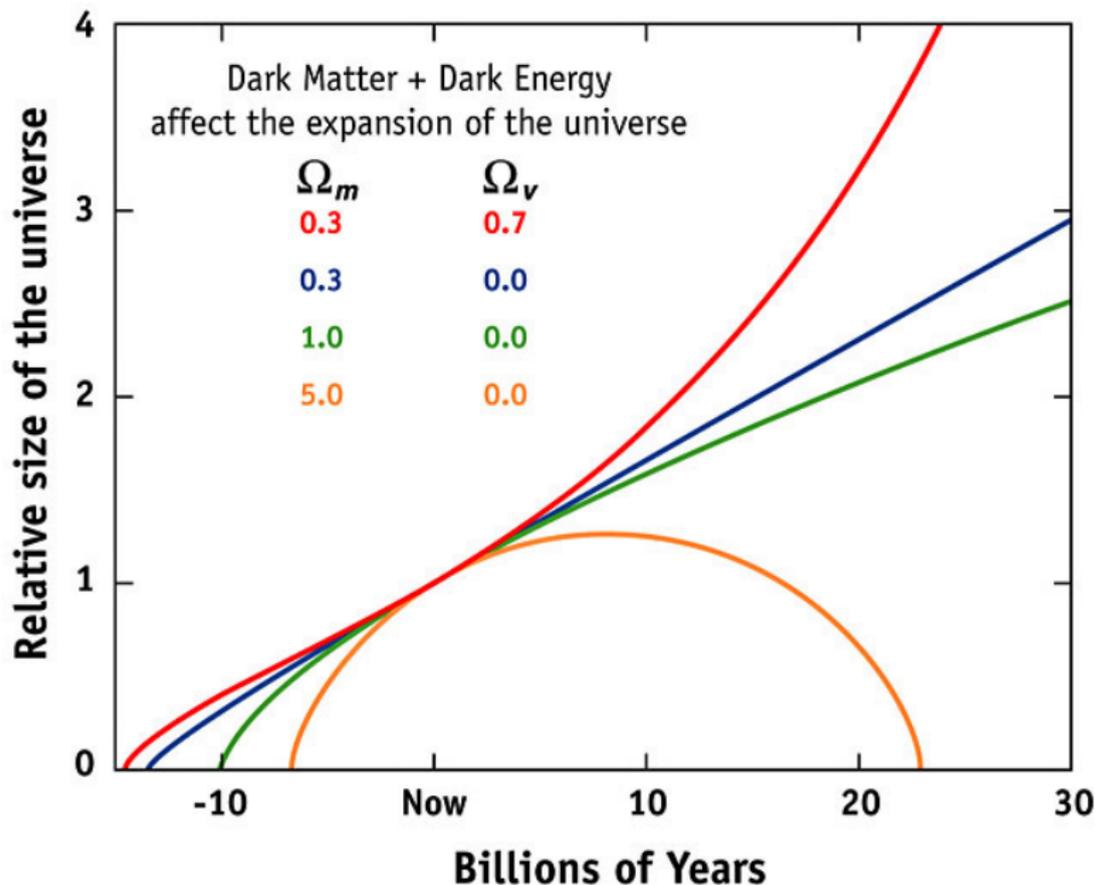
Type Ia Supernovae
data shows acceleration

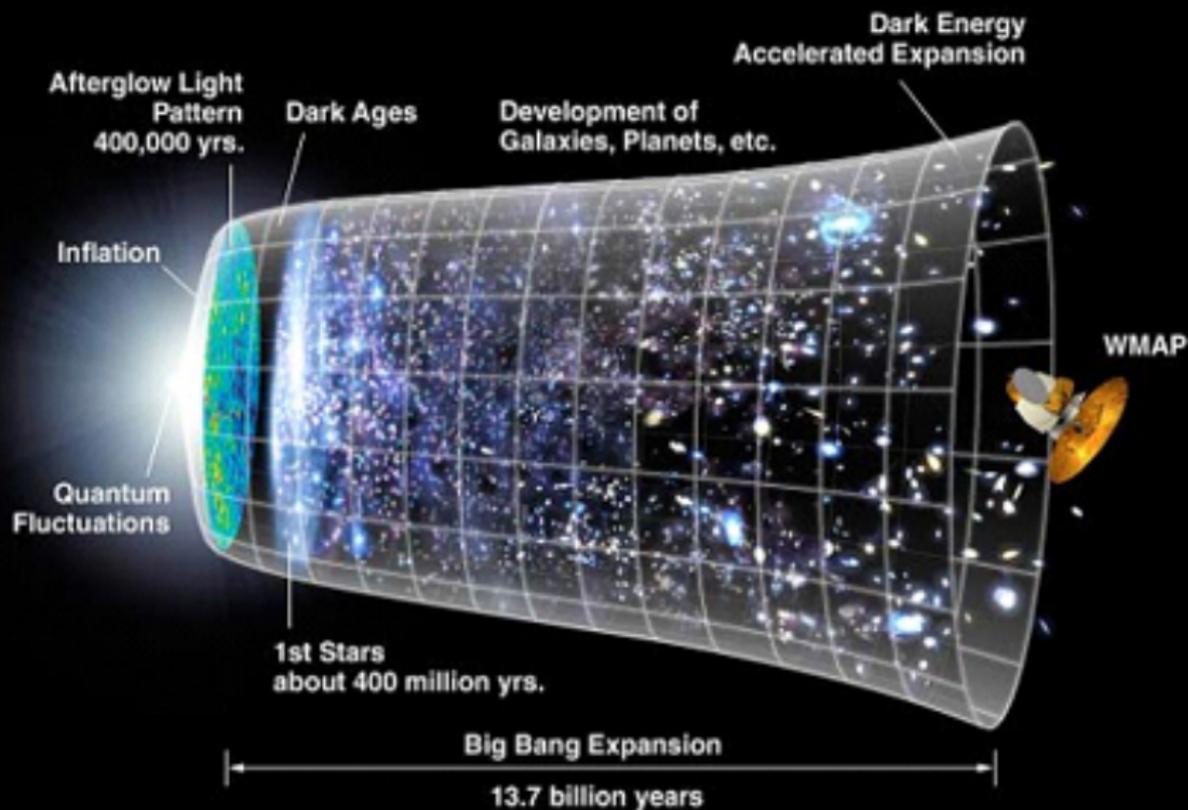


Konsequenzen der Dunklen Energie

- Wir wissen bereits seit längerem, dass das Universum sich seit dem Urknall vor 13.7 Milliarden Jahren ausdehnt,
- Wir wissen jetzt, dass es gegenwärtig sogar beschleunigt.
- Wenn es sich bei der dunklen Energie um eine kosmologische Konstante handelt, dann wird sich das Universum auch in aller Zukunft ständig weiter beschleunigend ausdehnen ...
- und unsere Galaxie wird mehr und mehr vereinsamen ...

EXPANSION OF THE UNIVERSE





Der Nobelpreis für Dunkle Energie

- Die Entdeckung dass $\Omega_\Lambda \neq 0$, sogar $\Omega_\Lambda \approx \Omega_M$, war eine unerwartete und spektakuläre Entdeckung, mit weitreichenden Konsequenzen und vielen offenen Fragen für die Grundlagen der Physik.

⇒ Nobelpreis hochverdient (und erwartet)

- Trotzdem war die Vergabe des 2011 Nobelpreises für Nobelpreis-Komitee Verhältnisse fast eine Schnellschuss-Entscheidung,



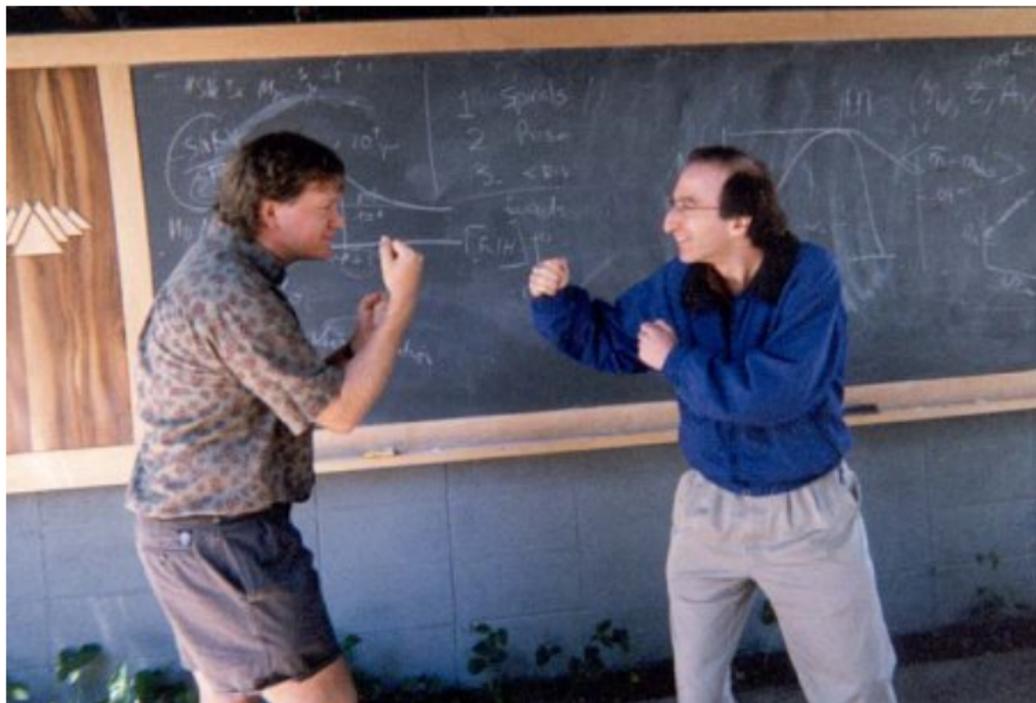
“nur” 13 Jahre nach Erscheinen der entscheidenden Arbeiten 1998. (oft warten sie mit einer solchen Entscheidung bis kurz vor dem Ableben, oder noch etwas länger ...).

- Aber es gab gute Gründe für diese rasche Entscheidung:

Der Nobelpreis für Dunkle Energie

- 1 2 völlig unabhängige Forschungsgruppen, mit ganz unterschiedlichen Methoden aber gleichem Ergebnis
- 2 Kleinere Meinungsverschiedenheiten wer was wann zuerst oder besser gemacht hat konnten vorher schon rasch und freundschaftlich bereinigt werden ...

Der Nobelpreis für Dunkle Energie



(l. Schmidt, r. Perlmutter)

Der Nobelpreis für Dunkle Energie

- 1 2 völlig unabhängige Forschungsgruppen, mit ganz unterschiedlichen Methoden aber gleichem Ergebnis
- 2 Kleinere Meinungsverschiedenheiten wer was wann zuerst oder besser gemacht hat konnten vorher schon rasch und freundschaftlich bereinigt werden ...

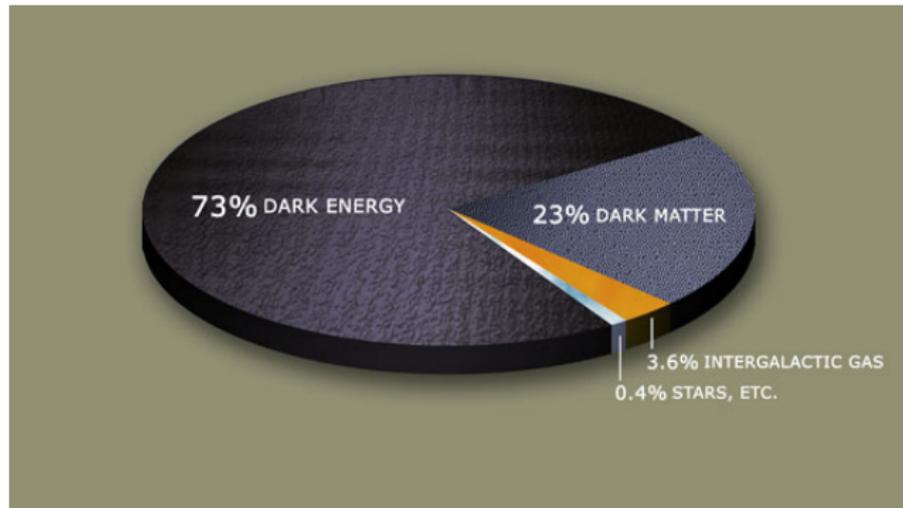
Der Nobelpreis für Dunkle Energie

- 1 2 völlig unabhängige Forschungsgruppen, mit ganz unterschiedlichen Methoden aber gleichem Ergebnis
- 2 Kleinere Meinungsverschiedenheiten wer was wann zuerst oder besser gemacht hat konnten vorher schon rasch und freundschaftlich bereinigt werden ...
- 3 Ergebnisse waren kompatibel mit Beobachtungen von COBE/WMAP
- 4 ⇒ schnelle Akzeptanz in der “scientific community”, die sonst oft tendenziell (in dieser Hinsicht) eher konservativ ist:

Eine neue wissenschaftliche Wahrheit pflegt sich nicht in der Weise durchzusetzen, dass ihre Gegner überzeugt werden und sich als belehrt erklären, sondern vielmehr dadurch, dass ihre Gegner allmählich aussterben [...] (Max Planck)

- 5 in der Zwischenzeit mehrfach durch verfeinerte Messungen bestätigt

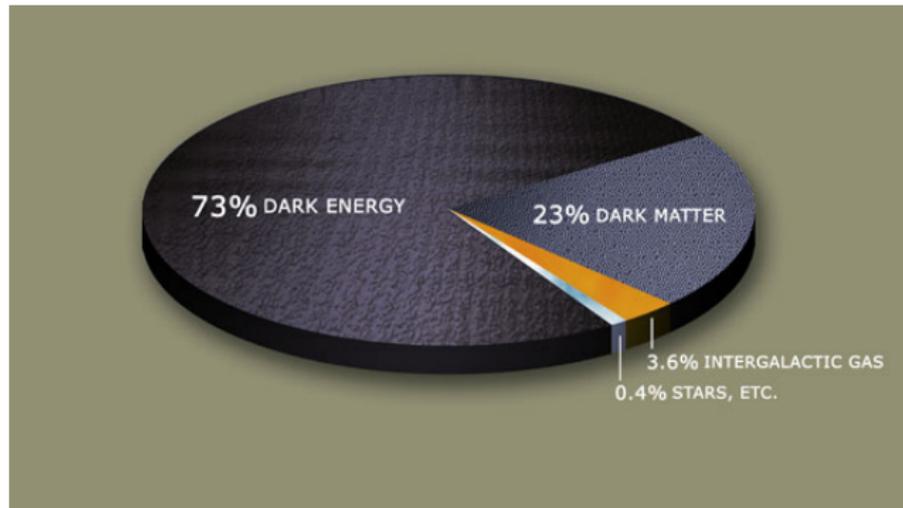
Neuere Erkenntnisse



Anteile der Gesamtenergie des Universums:

- 4 %: normale Materie (sichtbare uns bekannte Form von Materie)
- 23 %: dunkle Materie (Was ist das???)
- 73 %: Dunkle Energie (Was ist das???)

Neuere Erkenntnisse



Anteile der Gesamtenergie des Universums:

- 4 %: normale Materie (sichtbare uns bekannte Form von Materie)
- 23 %: dunkle Materie (Was ist das???)
- 73 %: Dunkle Energie (Was ist das???)

Peinlich: Wir verstehen 96 % der Materie/Energie im Weltall nicht!!!

Einige offene Fragen

- **Woraus besteht Dunkle Materie?**
(Antworten am LHC / CERN?)
- **Was ist Dunkle Energie?**
(kosmologische Konstante, Vakuumenergie?, ...)
- **Warum ist Ω_Λ z.B. nicht $\gg 1$?**
(hoffentlich ist die Antwort darauf nicht ein unbefriedigendes “dann gäbe es kein komplexes intelligentes Wesen das diese “warum“-Frage stellen könnte”? (**anthropisches Prinzip**))
- **Warum ist heutzutage $\Omega_\Lambda \approx \Omega_M$**
(Energiedichte von Λ ist konstant, die von normaler Materie nimmt natürlich wie $1/\text{Volumen}$, also wie $1/R(t)^3$ ab; d.h. in der Vergangenheit war $\Omega_\Lambda \ll \Omega_M$, in der nicht all zu fernen Zukunft wird $\Omega_\Lambda \gg \Omega_M$ sein).

Einige offene Fragen

- **Woraus besteht Dunkle Materie?**
(Antworten am LHC / CERN?)
 - **Was ist Dunkle Energie?**
(kosmologische Konstante, Vakuumenergie?, ...)
 - **Warum ist Ω_Λ z.B. nicht $\gg 1$?**
(hoffentlich ist die Antwort darauf nicht ein unbefriedigendes “dann gäbe es kein komplexes intelligentes Wesen das diese “warum“-Frage stellen könnte”? (**anthropisches Prinzip**))
 - **Warum ist heutzutage $\Omega_\Lambda \approx \Omega_M$**
(Energiedichte von Λ ist konstant, die von normaler Materie nimmt natürlich wie $1/\text{Volumen}$, also wie $1/R(t)^3$ ab; d.h. in der Vergangenheit war $\Omega_\Lambda \ll \Omega_M$, in der nicht all zu fernen Zukunft wird $\Omega_\Lambda \gg \Omega_M$ sein).
- ⇒ **Raum für viele Überraschungen, genug offene Fragen für zukünftige Forscher, und viel Material für weitere “Physik am Freitag” Vorträge!**

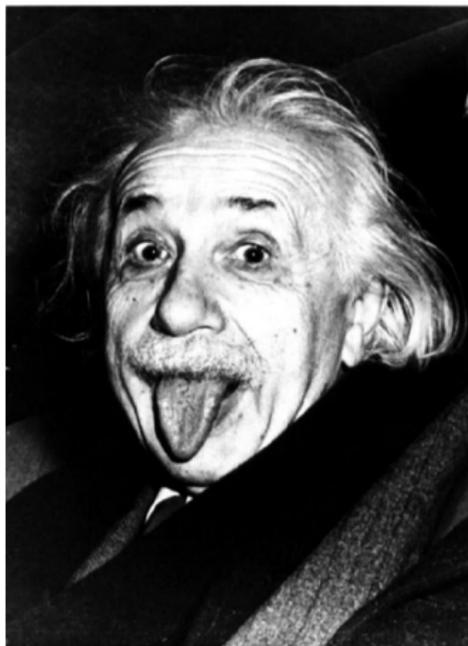
Wenn Euch das interessiert, dann studiert doch

Physik oder Physik & Astronomie bei uns in Bern!

Wir bieten zu diesem Thema z.B. Vorlesungen an über

- Astrophysik und Kosmologie
- Kosmologie und Teilchenphysik
- Allgemeine Relativitätstheorie
- ...

Wir freuen uns auf Euch



Herzlichen Dank für Ihre/Eure Aufmerksamkeit