

# Kosmologie



ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

Christian Stegmann

Bad Honnef, Juli 2009

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg



ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

# Unser gemeinsame Zeit im Überblick

- Weltbilder I
  - Wo sind wir?
  - Entfernungen
  - Newtons Universum
  - Expansion
- Weltbilder II
  - Einsteins Universum
- Eine Reise durch Raum und Zeit

# Weltbilder



ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg



ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

# Aristoteles (~350 v. Chr)

- Die Erdkugel ist im Zentrum des Universums
- Alles Irdische ist aus 4 Elementen zusammengesetzt
  - Erde, Wasser, Luft und Feuer
- Jedes Element bewegt sich unterschiedlich
  - Erde: um Zentrum des Universums
  - Feuer: weg vom Zentrum des Universums
  - Wasser und Luft: dazwischen
- Gegenstände verschiedener Komposition fallen unterschiedlich
- Konzept der Kraft
  - Bewegungen, die von der natürlichen Bewegung abweichen, müssen kontinuierlich von einer Kraft aufrecht erhalten werden.

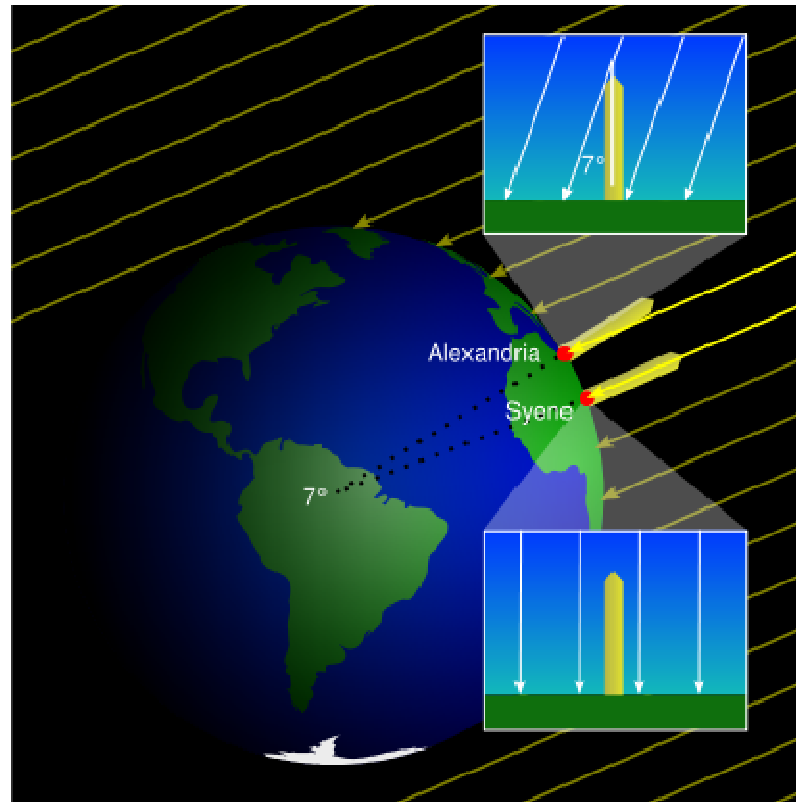


# Die Kosmologie des Aristoteles

- Bewegungen auf der Erde sind endlich
  - begrenzt, geradlinig auf das Zentrum der Erde zu bzw. von ihm weg
- Bewegungen am Himmel sind unendlich
  - immer während auf Kreisbahnen in der Himmelsphäre
- Himmelskörper können nicht aus den irdischen Elementen aufgebaut sein
  - Äther als 5. Element
- Begrenzte/immer währende Bewegung auf der Erde/im Himmel spiegelt die Unvollkommenheit/Vollkommenheit der Erde/des Himmels wider
- Immer währender und unvergänglicher Himmel
  - Universum ohne Anfang und Ende

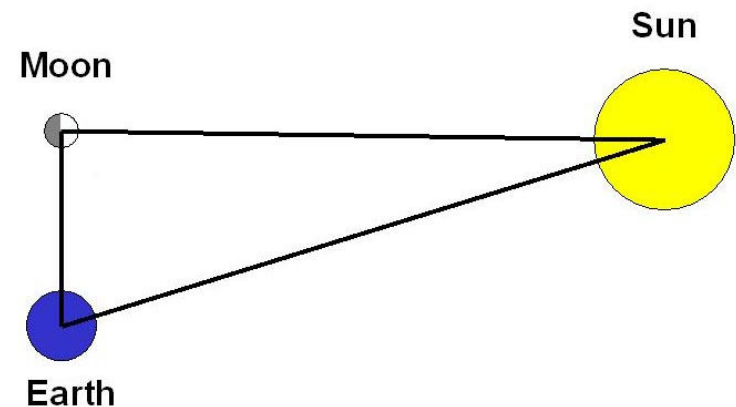
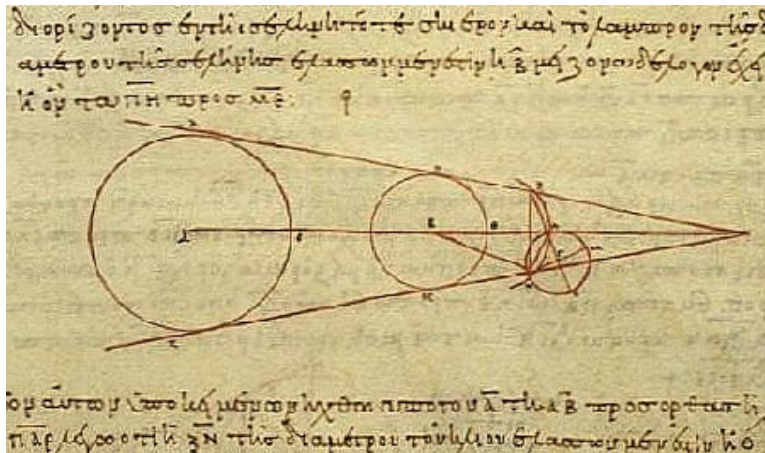
# Eratosthenes (~225 v.Chr)

- Die Erde ist eine Kugel



# Aristarch (~250 v. Chr)

- Er kannte in etwa die Größe der Erde
- Er kannte die Größe des Mondes und dessen Abstand zur Erde (Mondfinsternisse)
- Mittels elementarer Geometrie konnte er somit die Größe der Sonne und ihren Abstand zur Erde bestimmen



# Aristarch (~250 v. Chr.)

## Ergebnis

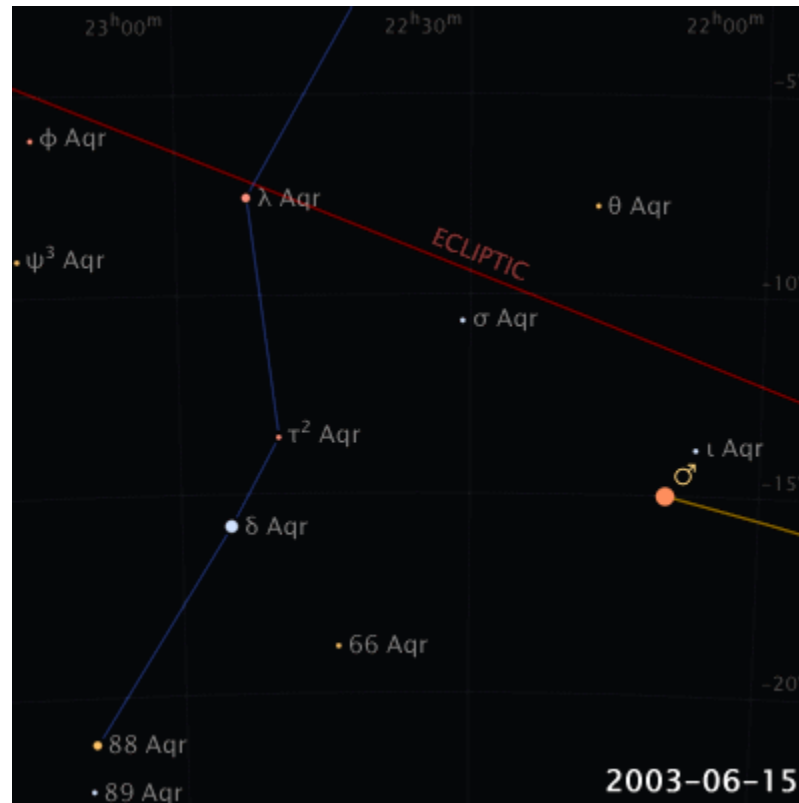
- Die Sonne ist 19mal (richtiger Wert 390 mal) weiter entfernt als der Mond.
- Da beide gleich groß erscheinen, ist die Sonne folglich 19 mal größer als der Mond und somit auch um ein vielfaches größer als die Erde
- Die Sonne (d.h. das größte Objekt) steht im Zentrum des Kosmos

# Ptolemäus (~100 n.Chr)

- Setzt das Weltbild für die nächsten 1500 Jahre
- Fasst das astronomische Wissen seiner Zeit zusammen
  - weitgehend Aristotelische Kosmologie und Beobachtungen des Hipparch
  - Almagest (das große System)
- Er erweiterte und verbesserte das Modell unter teilweise Aufgabe seiner Einfachheit
- Thomas von Aquin (1225/26 – 1274)
  - Grundstein der christlichen Doktrin
- Auffassung, dass alles, was prinzipiell entdeckt werden kann, schon entdeckt worden ist.



# Retrograde Bewegung des Mars

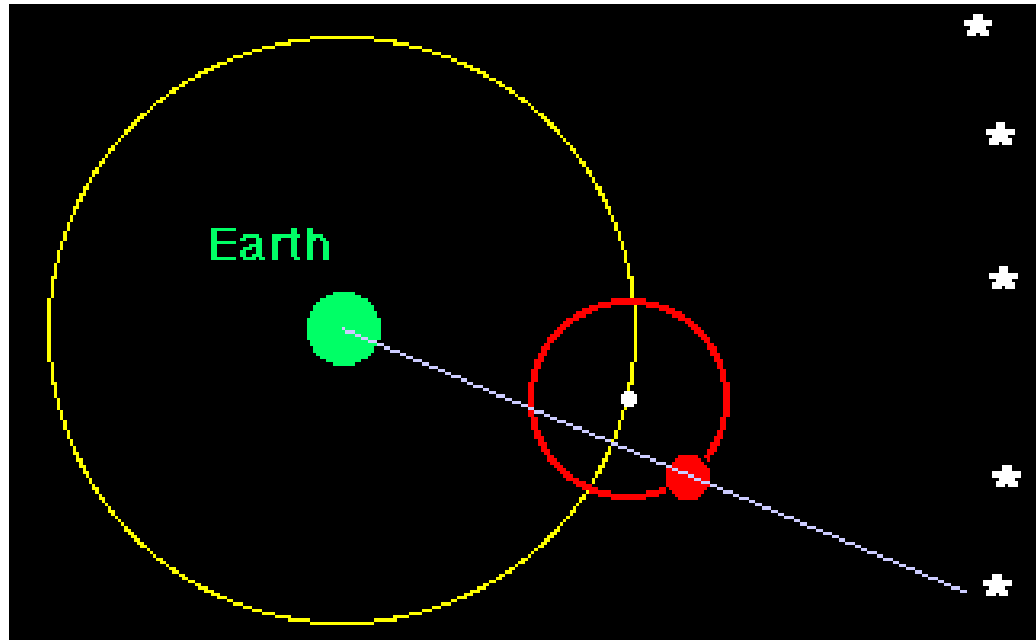


# Retrograde Bewegung des Mars



© 2005 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

# Epizyklen

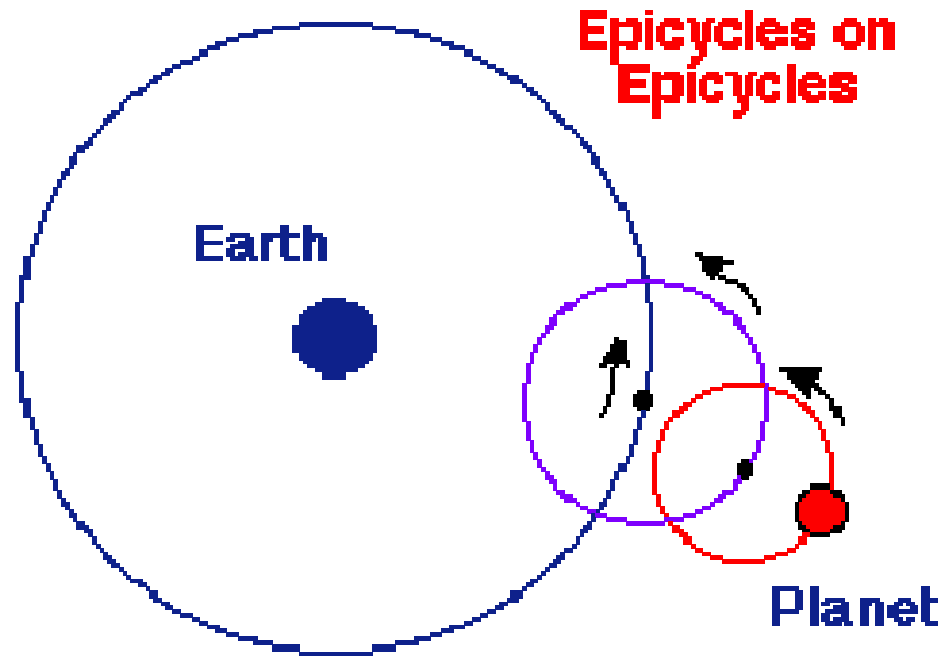




# Probleme des Ptolemäischen Weltbildes

- Modell zu ungenau, um Beobachtungen zu erklären (z.B. ungleichmäßige Bewegung von Sonne, Mond und Planeten)
- Alternative A
  - Erde ist etwas neben dem Zentrum positioniert (exzentrische Kreise)
- Alternative B
  - Epizykel auf Epizykel
- Ungenauigkeiten in den vorhergesagten Planetenpositionen hatten sich um 1400 n.Chr. auf mehrere Grad akkumuliert
  - weitere Epizykel

# Epizyklen von Epizyklen



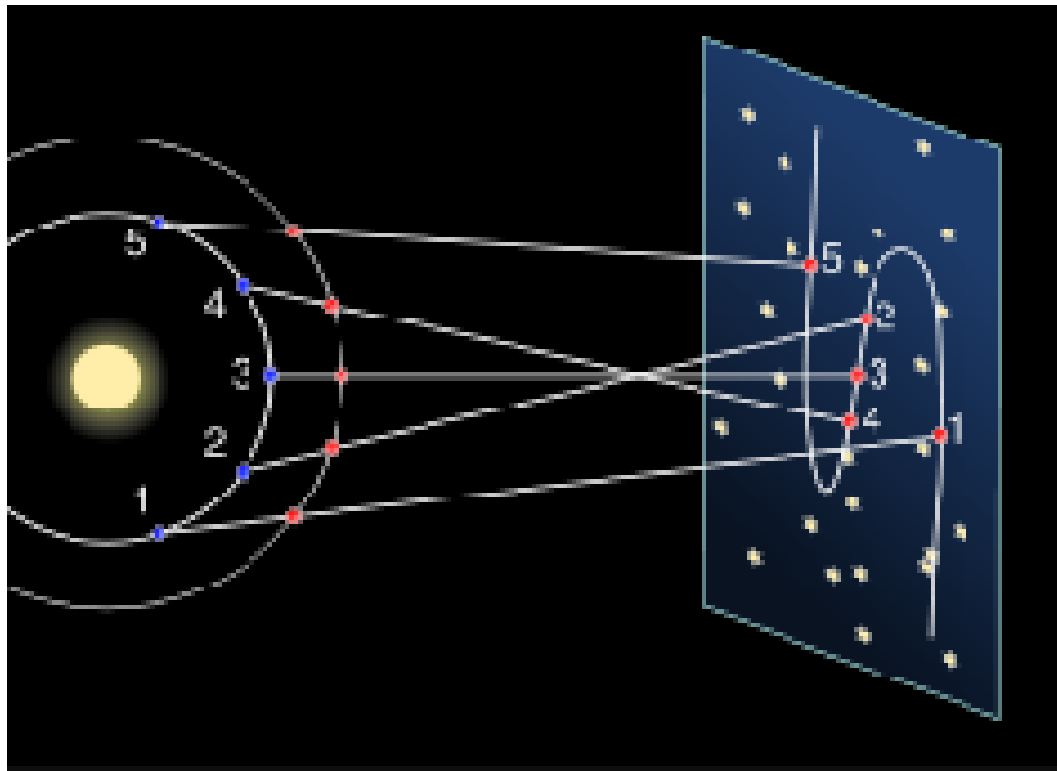
# Die Kopernikanische Revolution (~1500 n.Chr.)

- Wiederentdeckung der griechischen Philosophie
- Größe und Gestalt der Erde wohlbekannt (Kolumbus Mythos)
- Nikolaus Kopernikus
  - De revolutionibus orbium coelestrum
    - Sonne im Zentrum
    - inspiriert von den Arbeiten Aristarchs
- Heliozentrisches Weltbild

# Attraktivität des heliozentrischen Weltbildes

- es ist einfach
- es klärt einfach, warum die inneren Planeten (Merkur und Venus) nie weit (im Winkelabstand) von der Sonne entfernt sind
- Reproduziert die Helligkeitsentwicklung der Planeten
- Einfache Erklärung der Jahreszeiten
- Einfache Erklärung der retrograden Planetenbewegung ohne Epizykel

# Heliozentrisches Weltbild



# Probleme des heliozentrischen Weltbildes

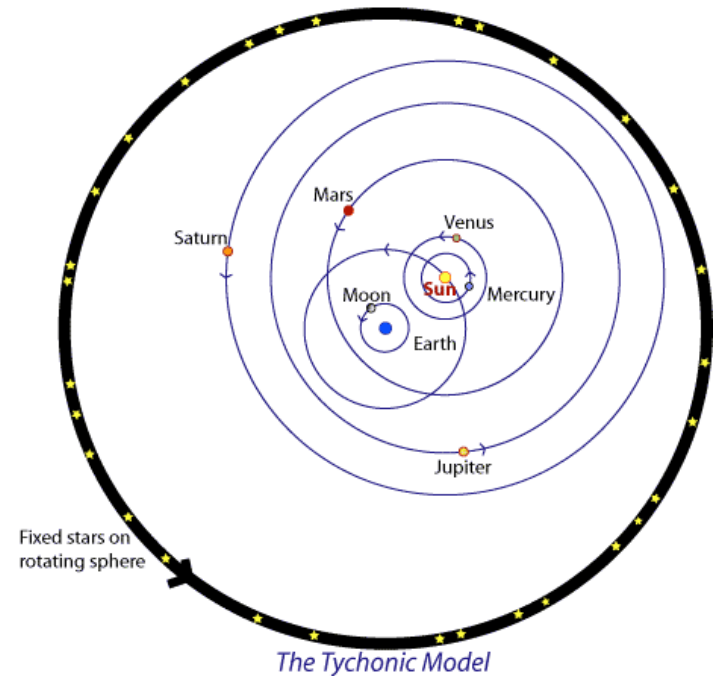
- Gegen die christliche Doktrin
- Neue Entdeckung
- Sagt Fixsternparallaxen vorher – im Widerspruch zur damaligen Beobachtung
- Rotierende Erde, im Widerspruch zur Aristotelischen Physik
- Weniger genau als das Ptolemäische Modell
- Frage: Warum publizierte Kopernikus sein Buch erst am Ende seines Lebens?

# Fortschritt

- Bessere Daten zur Unterstützung des neuen Modells
  - Tycho Brahe
- Verbesserung des Weltmodells
  - Johannes Kepler
- Vermarktung des neuen Weltmodells
  - Galileo Galilei
- ... und die Zusammenfassung zur modernen Physik
  - Isaac Newton

# Tycho Brahe (1546-1601)

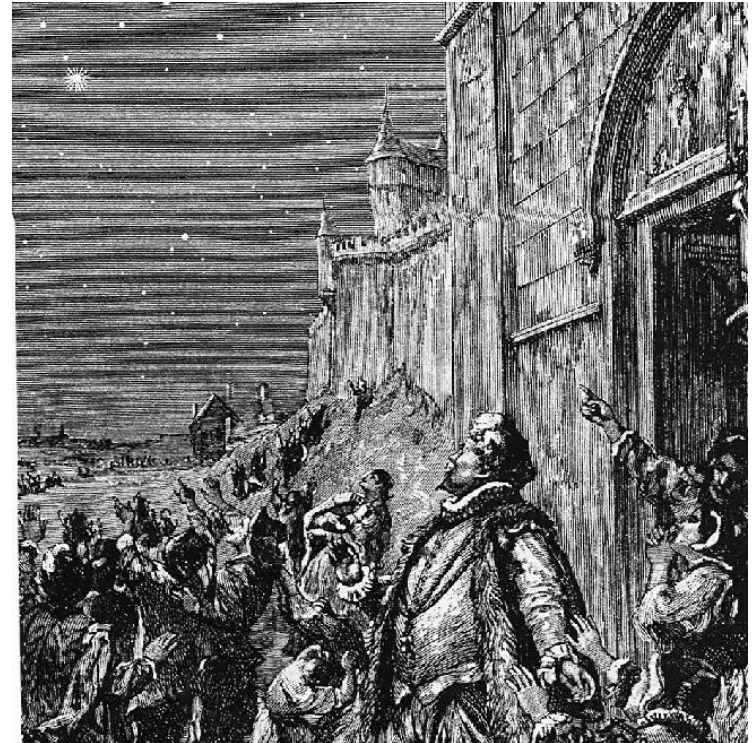
- Letzter großer Astronom ohne Fernrohr
- Außergewöhnlich sorgfältiger und systematischer Beobachter
  - erster moderner Wissenschaftler
- Brahesche Weltbild
  - Erde im Zentrum,
  - Planeten umkreisen die Sonne





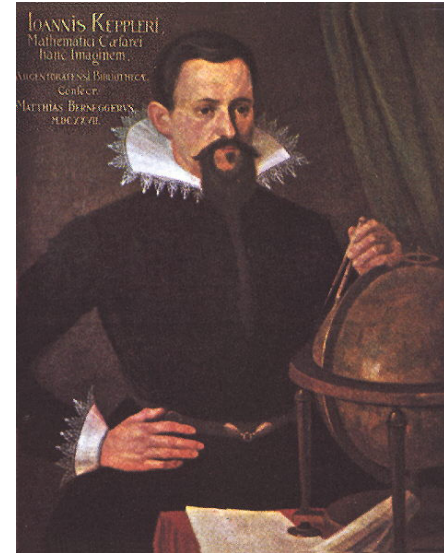
# Tycho Brahe (1546-1601)

- Bestimmte die Parallaxe von Kometen
  - Kometen ziehen ihre Bahnen jenseits des Mondes
- Beobachtete eine Supernova („neuer Stern“) im Sternbild Kassiopeia, konnte aber keine Parallaxe messen
  - Supernova ist ein Teil der Himmelsphäre
  - Erschütterung der Aristotelischen Idee eines ewigen und unveränderlichen Himmels



# Johannes Kepler (1571-1630)

- Tycho Brahes Nachfolger in Prag
- Er fand heraus, dass
  - weder das Ptolemäische Modell
  - noch das Brahes Modell
  - noch das heliozentrische Modell die Beobachtungen mit hinreichender Genauigkeit reproduzieren können
- Vorschlag
  - Planeten bewegen sich auf Ellipsen, nicht auf Kreisen

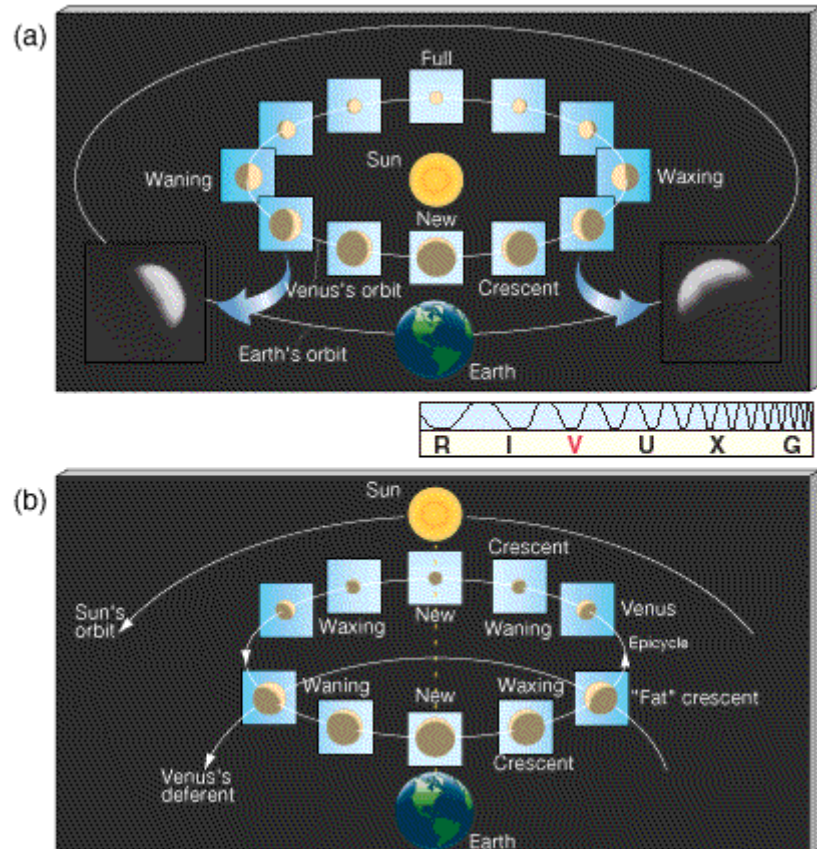


# Galileo Galilei (1564-1642)

- war nicht der Erfinder des Fernrohrs
- war der Erste, der es gen Himmel richtete
- entwickelte Test für die Aristotelische Physik und verwarf sie
- Berühmt für seinen Ketzerei-Prozess 1633
- vom Vatikan rehabilitiert 1980!

# Galileis astronomische Entdeckungen

- Jupitermonde  
„kleines Sonnensystem“
- Berge auf dem Mond,  
ähnlich denen auf der Erde  
keine perfekte Kugelgestalt
- Sterne punktförmig,  
Planeten sind Sphären
- Entdeckung der Phasen der  
Venus im Widerspruch zum  
Ptolemäischen Weltmodell



# Isaac Newton (1643-1727)

- Grundlegende Beiträge zur Optik, Physik und Mathematik
  - Erfinder der Infinitesimalrechnung (unabhängig auch von Leibniz)
  - Erfinder des Spiegelteleskops
  - entdeckt die Zusammensetzung von weißem Licht aus farbigem Licht
  - Theorie der Mechanik (3 Newtonsche Gesetze)
  - Theorie der Gravitation
  - Beweis, dass die keplerschen Gesetze Konsequenzen der Theorie der Mechanik und der Gravitation sind (Principia)

# Die Newtonsche Mechanik

- 1. Newtonsche Gesetz
  - Ein Körper beharrt im Zustand der Ruhe oder bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit auf einer Geraden, sofern er nicht einer äußeren Kraft unterworfen ist
- 2. Newtonsche Gesetz
  - Die zeitliche Änderung des Impulses eines Körpers ist proportional der Größe der äußeren Kraft, die auf ihn wirkt
- 3. Newtonsche Gesetz
  - Die Kräfte, die zwei Körper aufeinander ausüben, sind ihrer Größe nach gleich und entgegengesetzt gerichtet

# Das Newtonsche Gravitationsgesetz

$$F = -G \frac{Mm}{r^2}$$

# Die Entdeckung des Neptuns

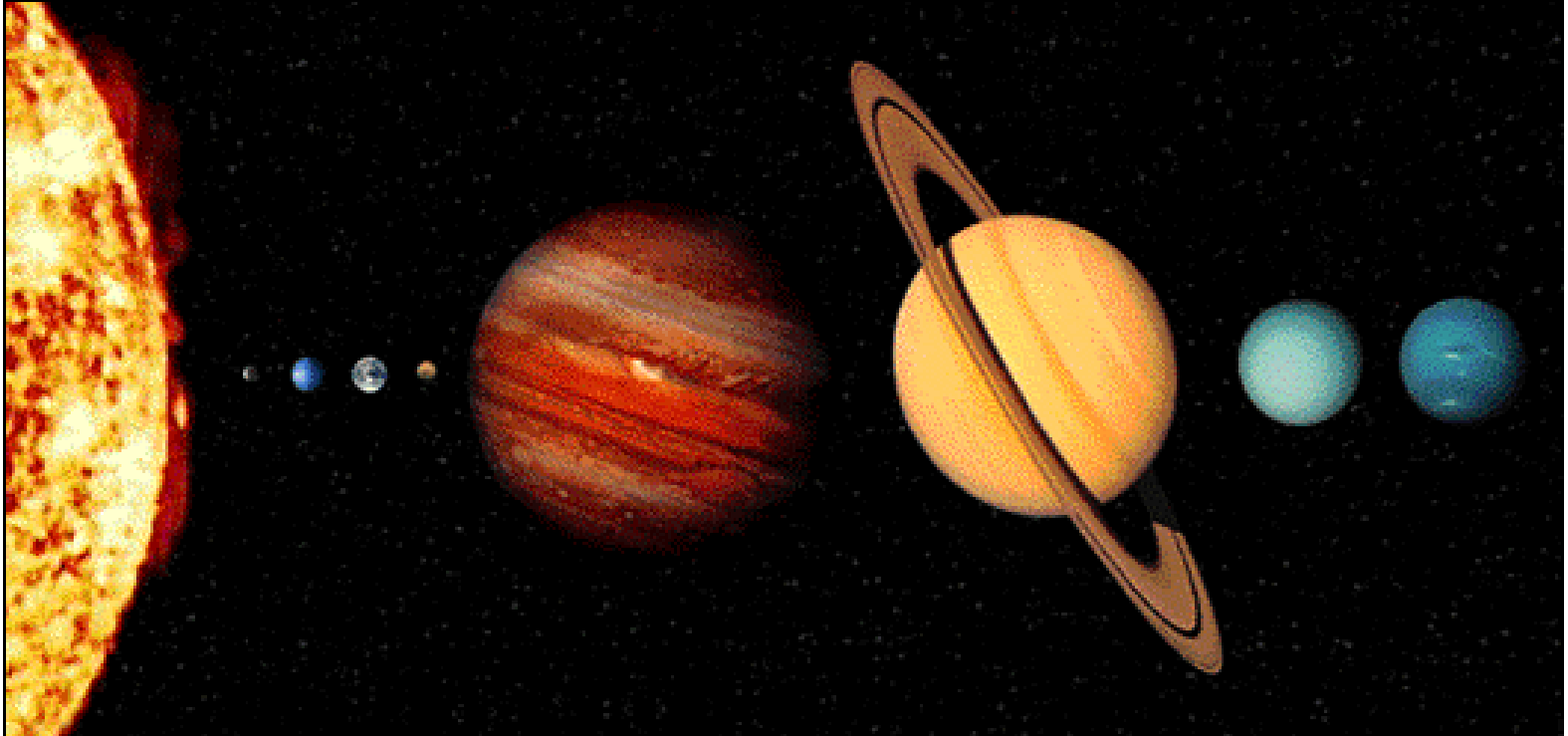
- 1781: W. Herschel entdeckt Uranus
- Messungen des Orbits von Uranus zeigen kleine Abweichungen von einer Ellipsenbahn
  - neuer Planet
- Leverrier und Adams berechnen die Position eines hypothetische Planeten
- Galle (1846) entdeckt Neptun nur  $1^\circ$  von der berechneten Position entfernt



# Newton's Gesetz und Kosmologie

- Problem
  - 1750 „Universum“ = Sonnensystem
  - Sterne sind weit weg. Aber wie weit?
- Wir brauchen empirische Daten über die Größe und das Alter des Universums, damit wir Modell-Vorhersagen mit Daten vergleichen können.

# Größe des Sonnensystems



# Entfernungen



ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg



ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

# Wie messen wir Entfernungen?

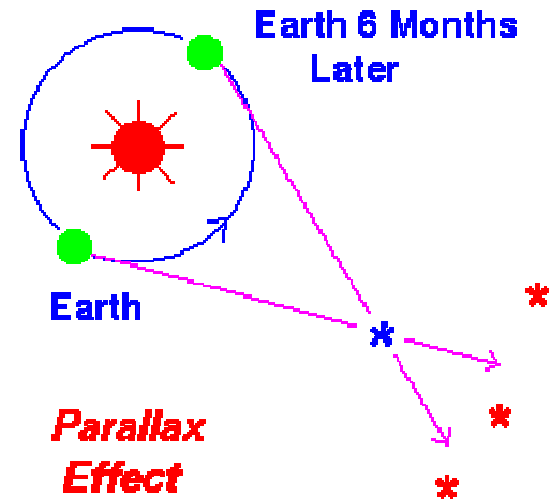
- Parallaxen
- Reisezeiten
- Über die Ausdehnung von Objekten: Vergleich mit Standard-Maßstäben
- Über die Helligkeit von Objekten: Vergleich mit Standard-Kerzen

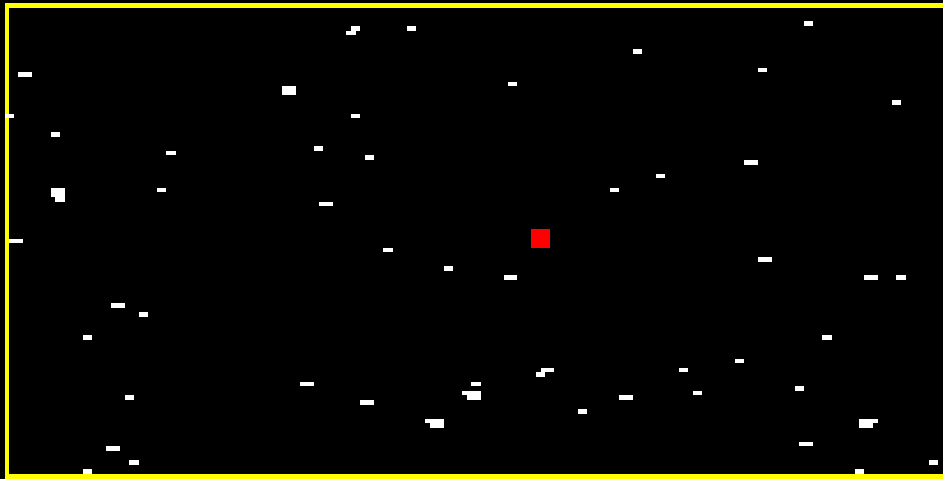
# Parallaxen

- Messe die Position eines Objekts relative zum Hintergrund
- Zusammenhang zwischen dem Parallaxen-Winkel  $\Theta$ , dem Abstand  $D$  und dem Erdorbit  $d$  ist

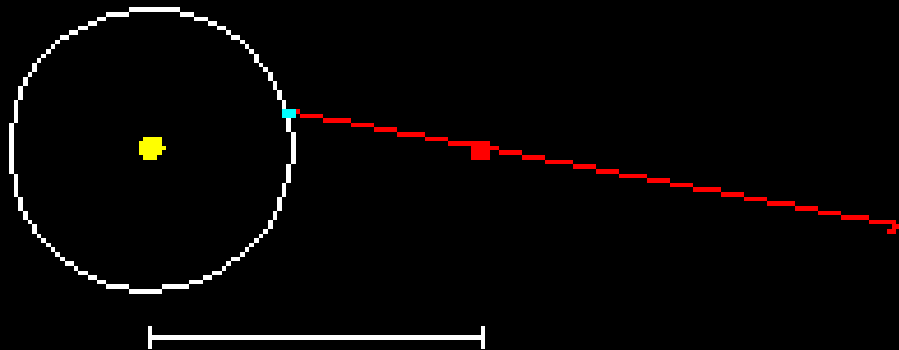
$$d = D \cdot \Theta$$

- Gilt für kleine Winkel
- $\Theta$  wird in rad gemessen
- 1 Parallaxensekunde = 1 Parsec  
= 1 pc  $\approx$  3.26 Ly



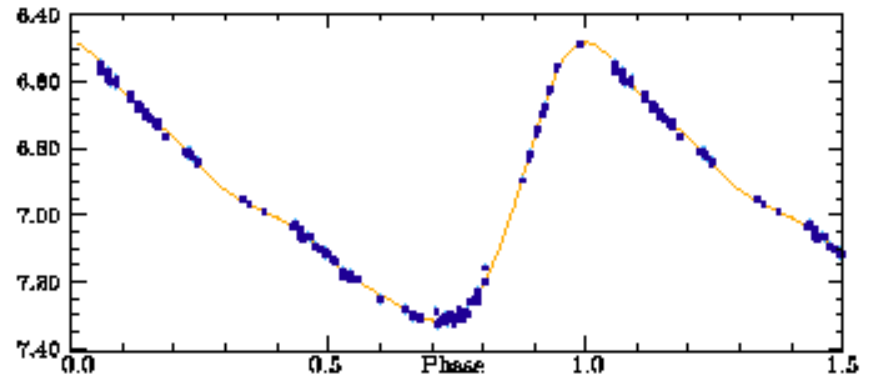
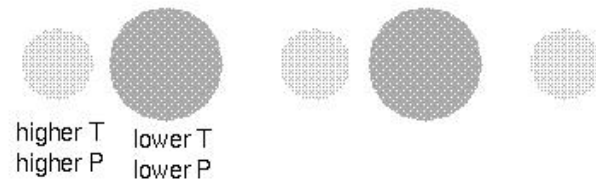
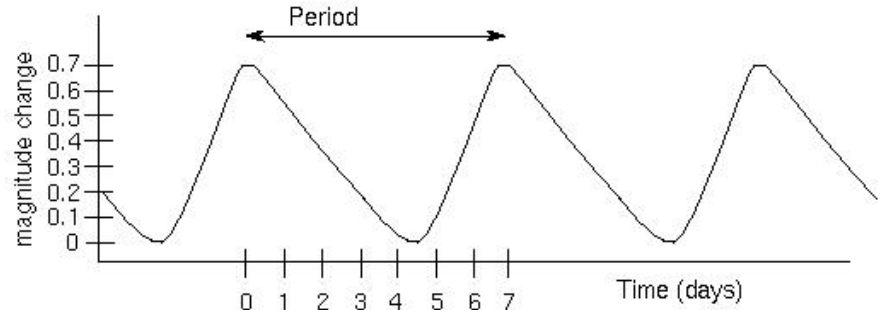


Jan



# Ceipheiden und RR-Lyrae

- Pulsierende Sterne
- Ändern Helligkeit mit der Pulsationsperiode
- Periode  $\sim$  Helligkeit
- Häufig und hell: sichtbar in nahen Galaxien
- Gut bis 20 Mpc



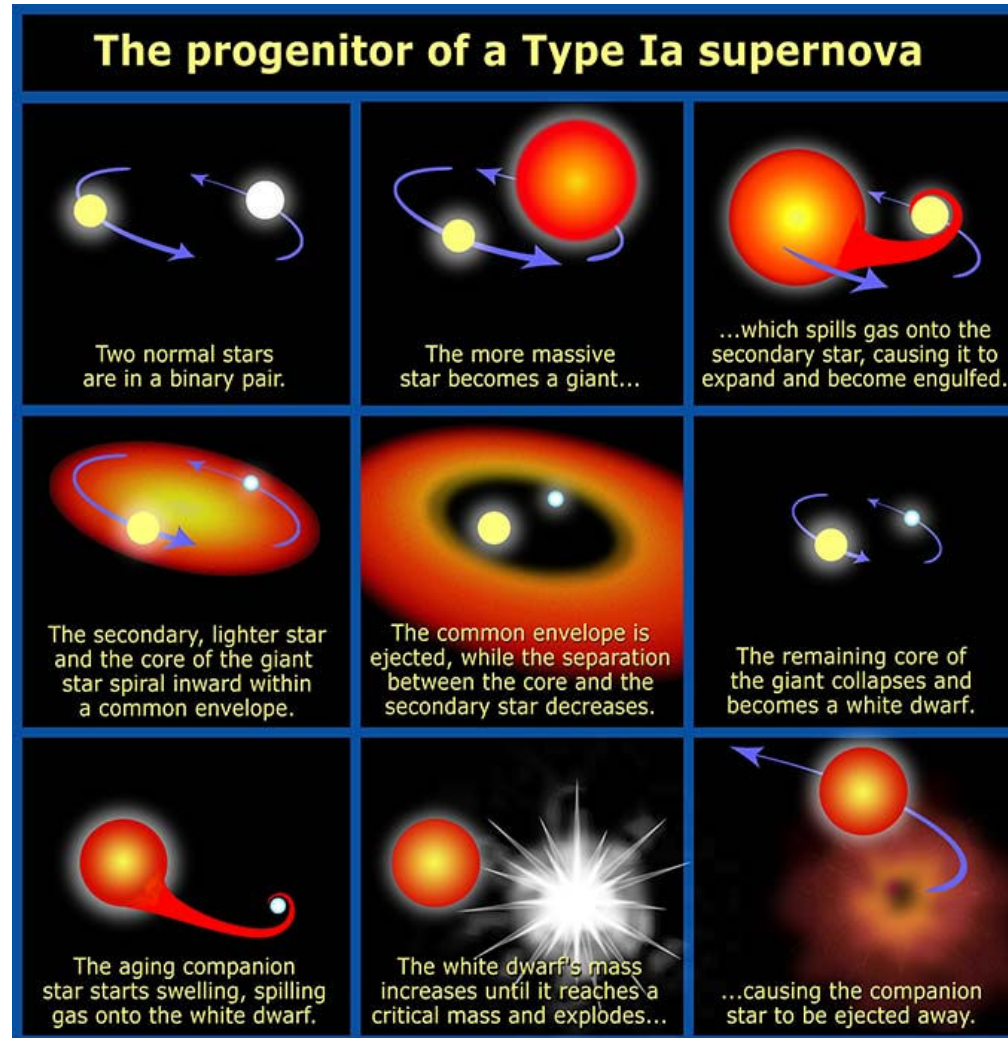
# Supernovae vom Typ Ia

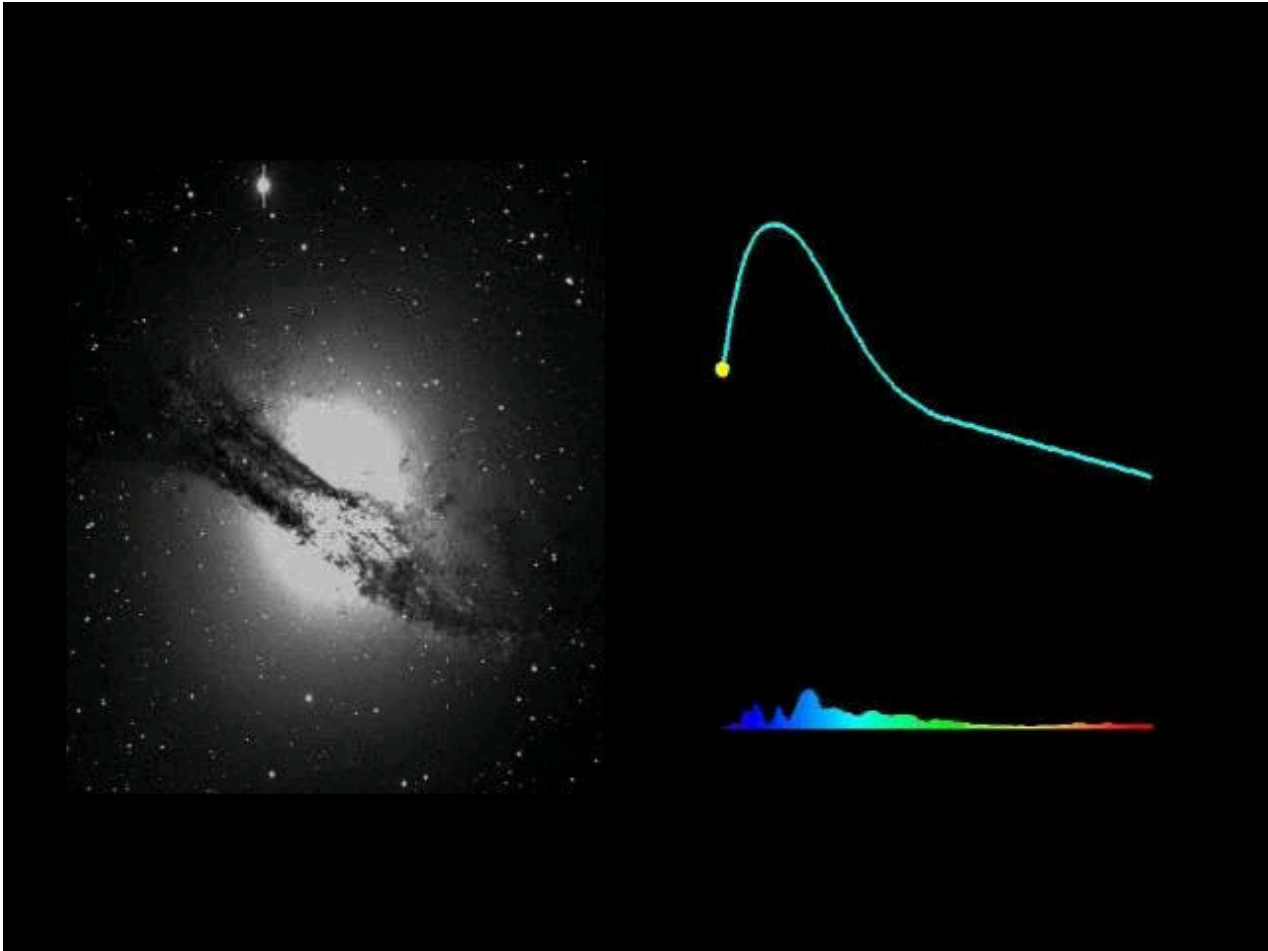
- Explodierender weißer Zwerg
- Sehr leuchtstark, können in großer Entfernung beobachtet werden
- Gut bis  $\sim 1$  Gpc,  $z \sim 1$



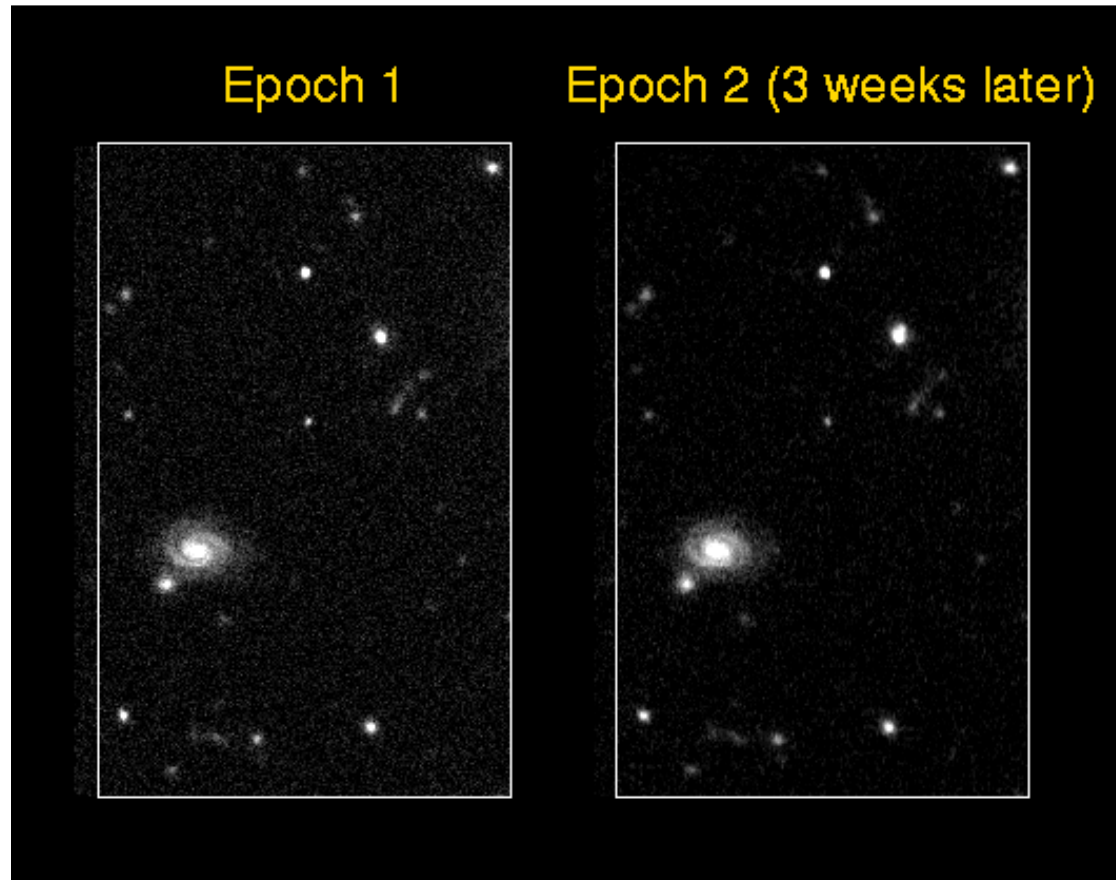


# Was ist eine Supernova vom Typ 1a?

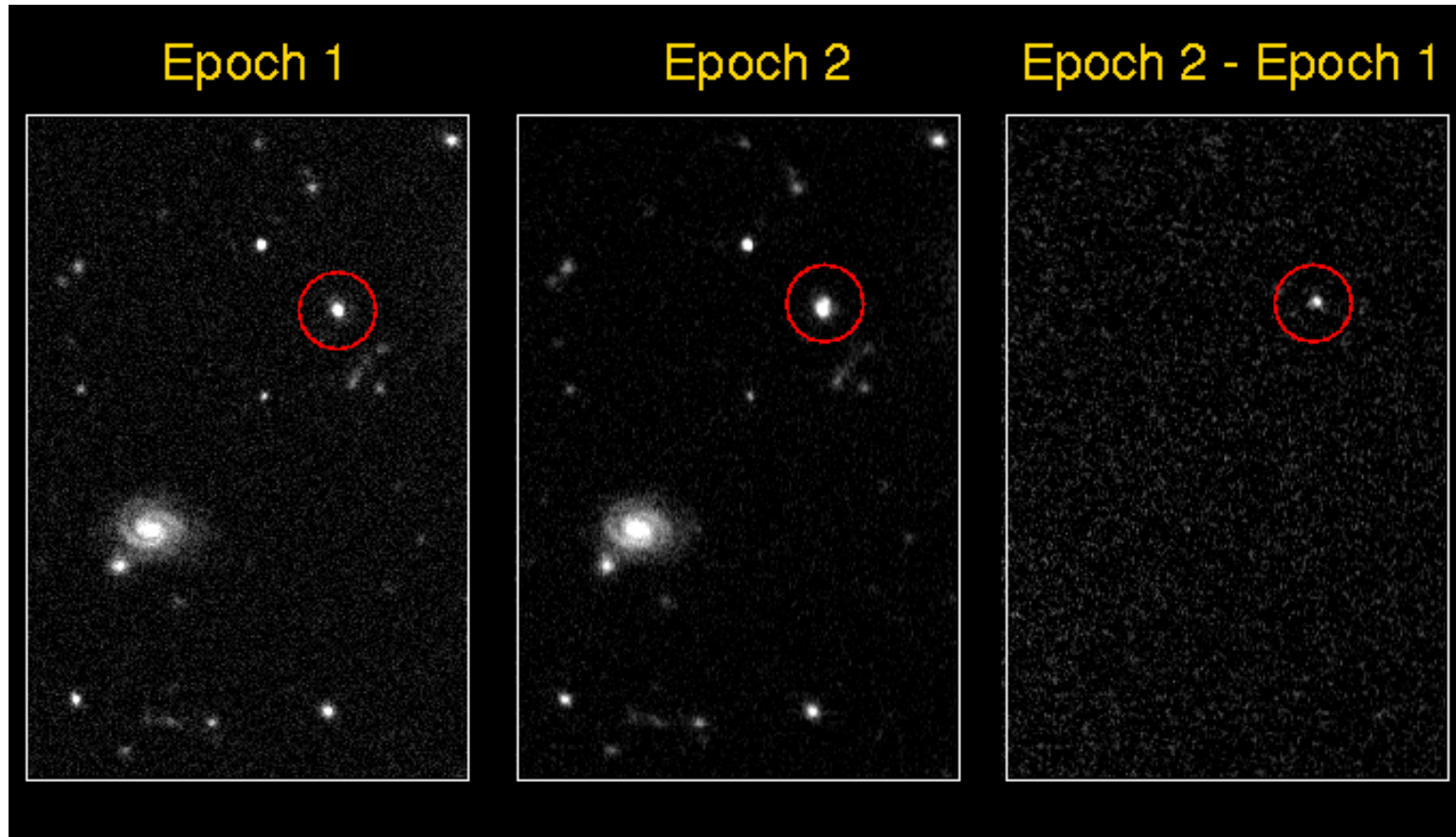




# Wo ist die Supernova?



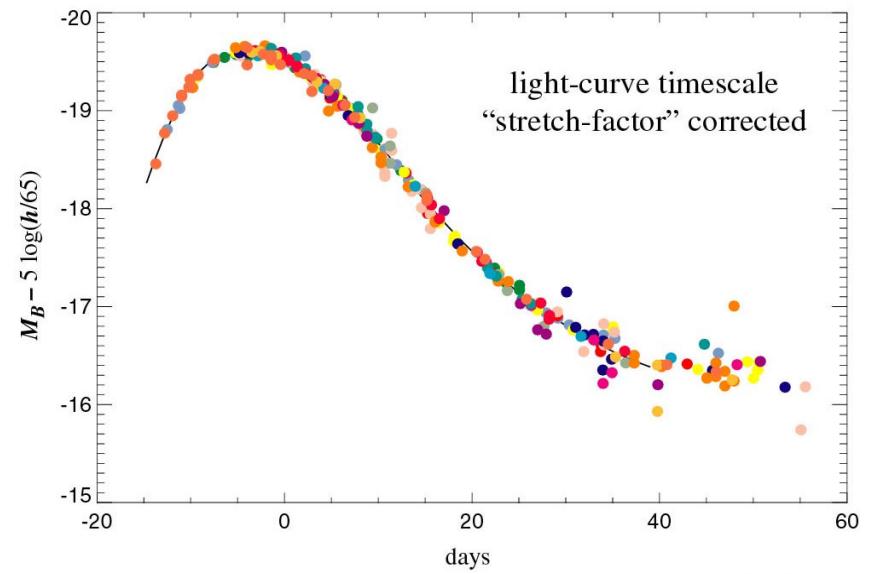
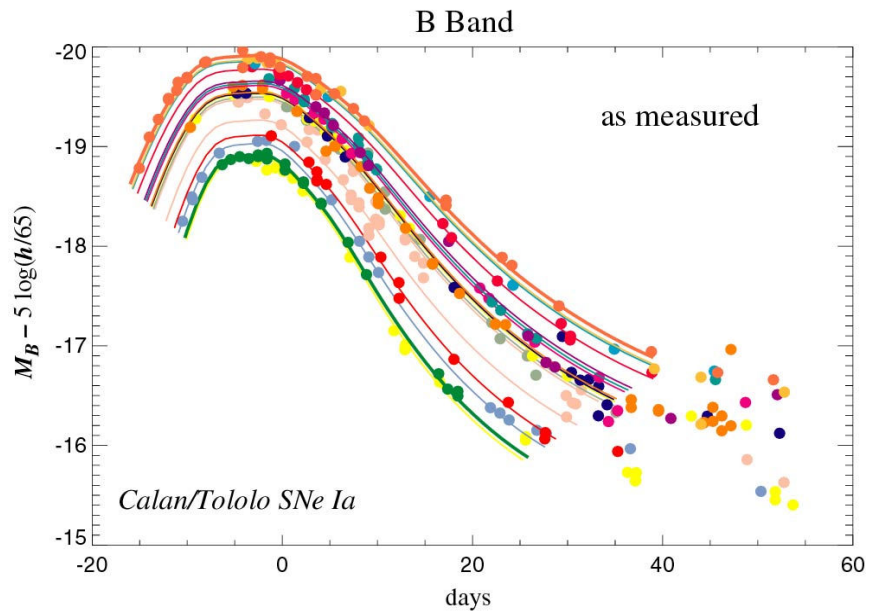
# Hier!



# Noch eine Supernova



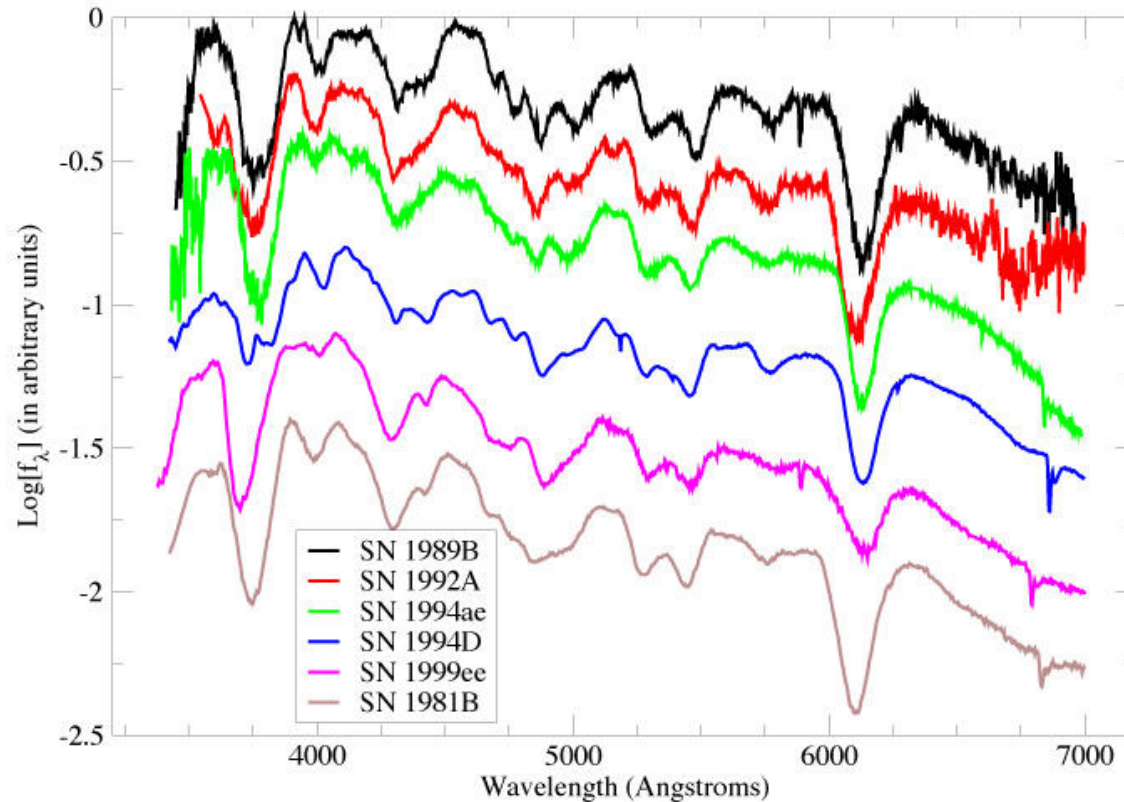
# Standardkerzen



Kim, *et al.* (1997)



# Spektren zur Identifikation



# Entfernungen

- Erde
  - Radius 6370 km
  - Eratosthenes (~250 v.Chr)
- Sonnensystem
  - Mehrere Milliarden Kilometer
  - erste Idee: Aristarch (~250 v.Chr)
  - Detaillierte Vermessung: 1750
- Entfernung zu den Sternen
  - bis 1838: sehr weit weg
  - 1838 erste Messung (Bessel)



# Newton's Universum



ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg



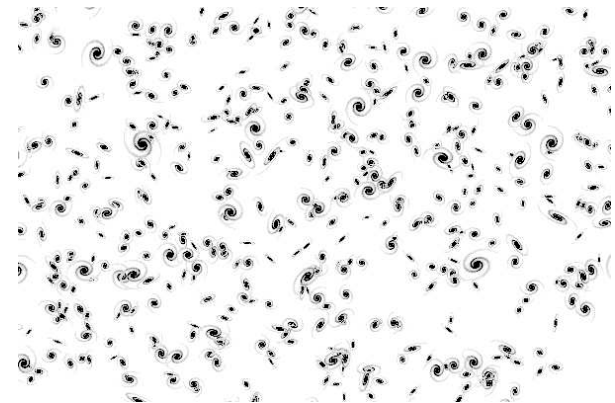
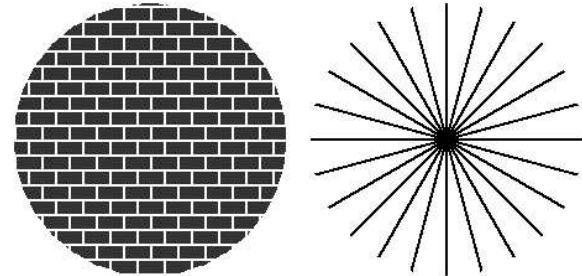
ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

# Newton's Universum

- Um einen Kollaps zu verhindern muss das Universum
  - homogen sein
  - isotrop sein
  - unendlich groß sein
  - kein Zentrum haben
- Unendlich in der Zeit
  - war schon immer
  - wird immer sein
- Das perfekte kosmologische Prinzip

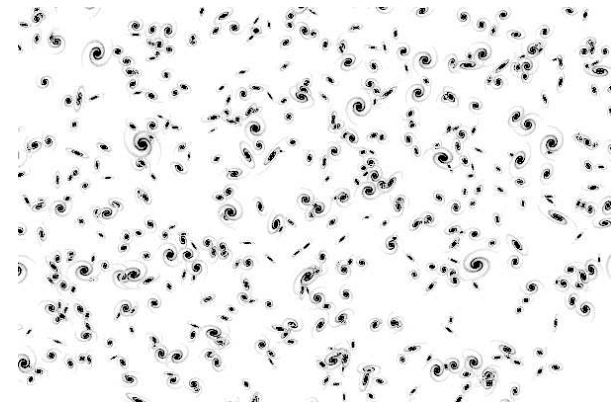
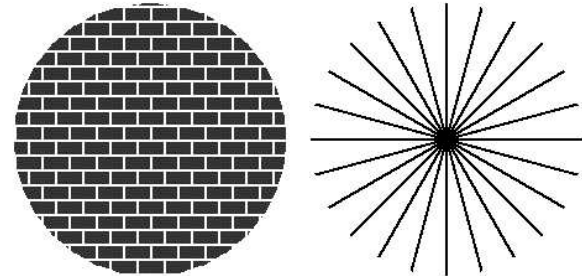
# Das Kosmologische Prinzip

- Homogenität
  - Das Universum sieht auf großen Skalen überall gleich aus
  - Es gibt kein Zentrum
- Isotropie
  - Das Universum sieht in allen Richtungen gleich aus
  - Es gibt keine ausgezeichnete Richtung

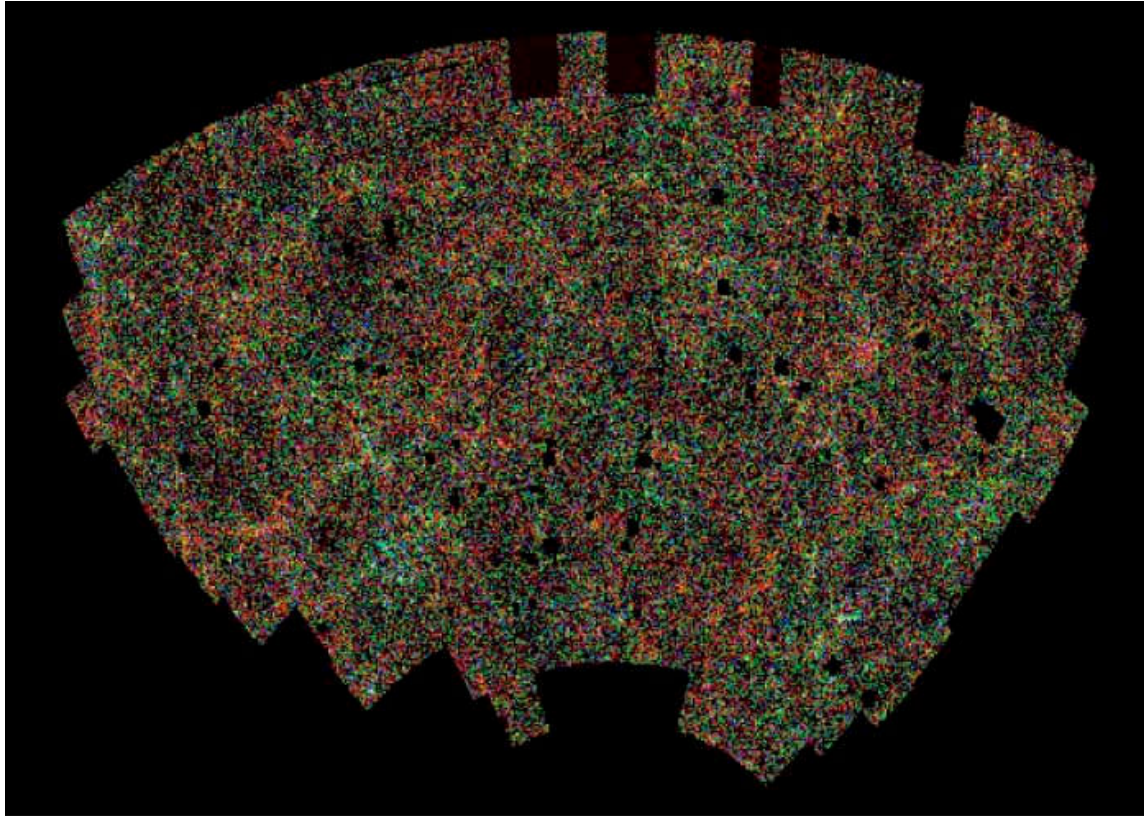


# Das perfekte Kosmologische Prinzip

- Homogenität
  - Das Universum sieht auf großen Skalen überall gleich aus
  - Es gibt kein Zentrum
- Isotropie
  - Das Universum sieht in allen Richtungen gleich aus
  - Es gibt keine ausgezeichnete Richtung
- Unveränderbar
  - Das Universum sieht zu allen Zeiten gleich aus
  - Es gibt keine ausgezeichnete Epoche



# Gilt das Kosmologische Prinzip?



APM Survey picture of a large part of the sky, about 30 degrees across, showing almost a million galaxies out to a distance of about 2 billion light years.

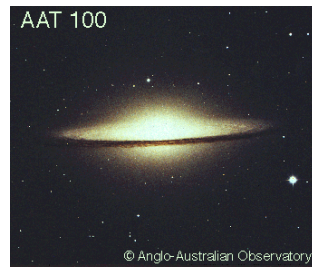
MAP990047



# Gilt das starke Kosmologische Prinzip?



M87 © Anglo-Australian Observatory  
Photo by David Malin



© Anglo-Australian Observatory



M83 © Anglo-Australian Observatory Photo by David Malin

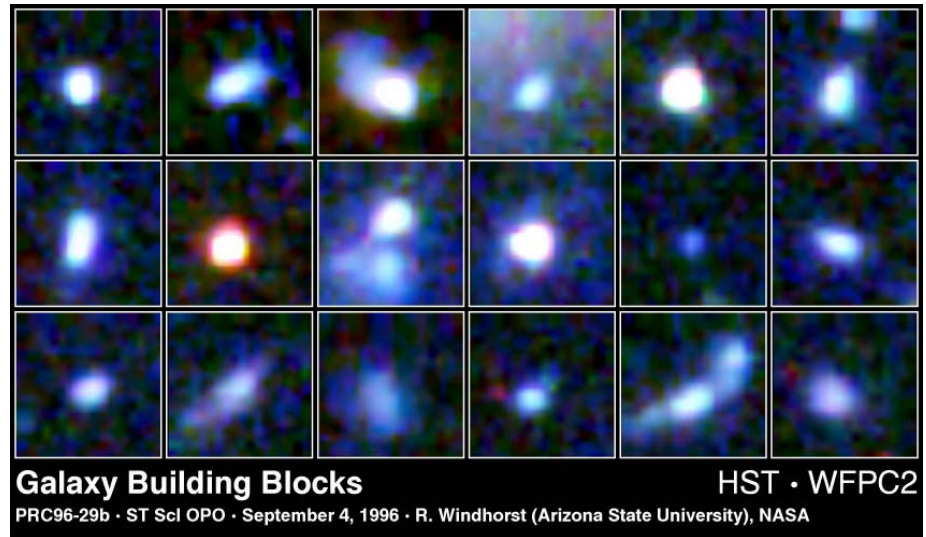


© IAC/IRGO/Malin



© Anglo-Australian Observatory

Galaxien heute



**Galaxy Building Blocks** HST · WFPC2  
PRC96-29b · ST ScI OPO · September 4, 1996 · R. Windhorst (Arizona State University), NASA

Galaxien vor 10 Milliarden Jahren

# Olber's Paradoxon

- Warum ist der Nachthimmel dunkel?

# Lösung

- Universum ist endlich
- Universum hat ein endliches Alter
- Die Verteilung der Sterne am Himmel ist nicht gleichmäßig
- Die Wellenlänge der Strahlung wird mit der Zeit größer
- Bemerkung: Für den Urknall sind alle Bedingungen erfüllt.



# Die Expansion des Weltalls



ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg



ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

# Der Raum dehnt sich aus!

1920: Die Entdeckung der Galaxienflucht durch Edwin Hubble

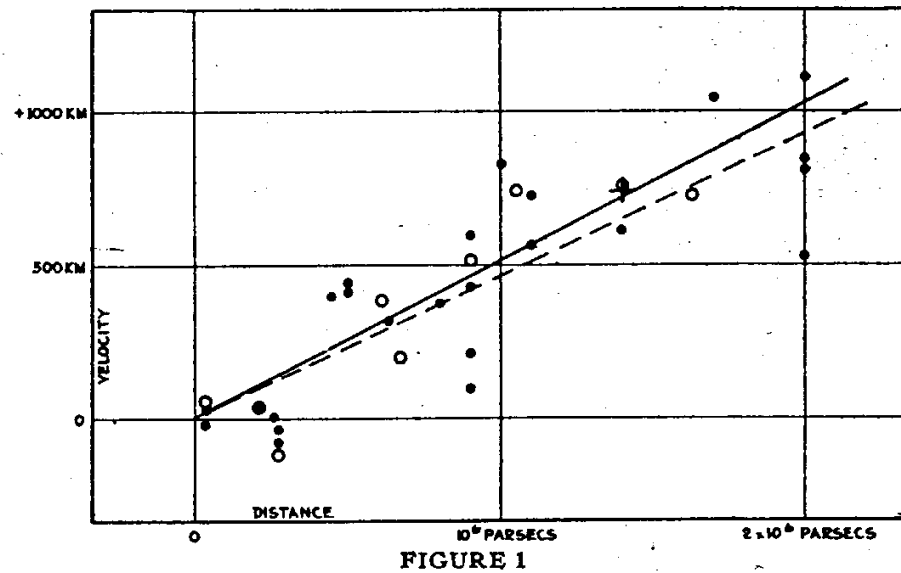
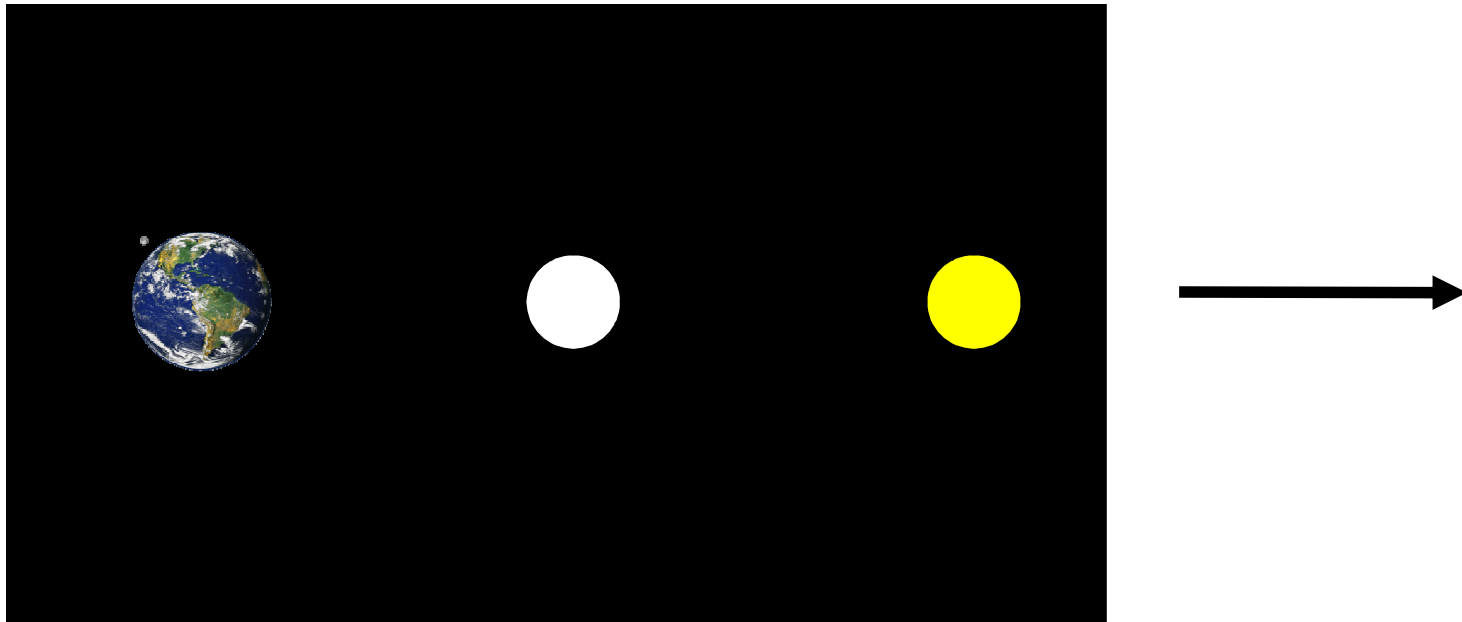
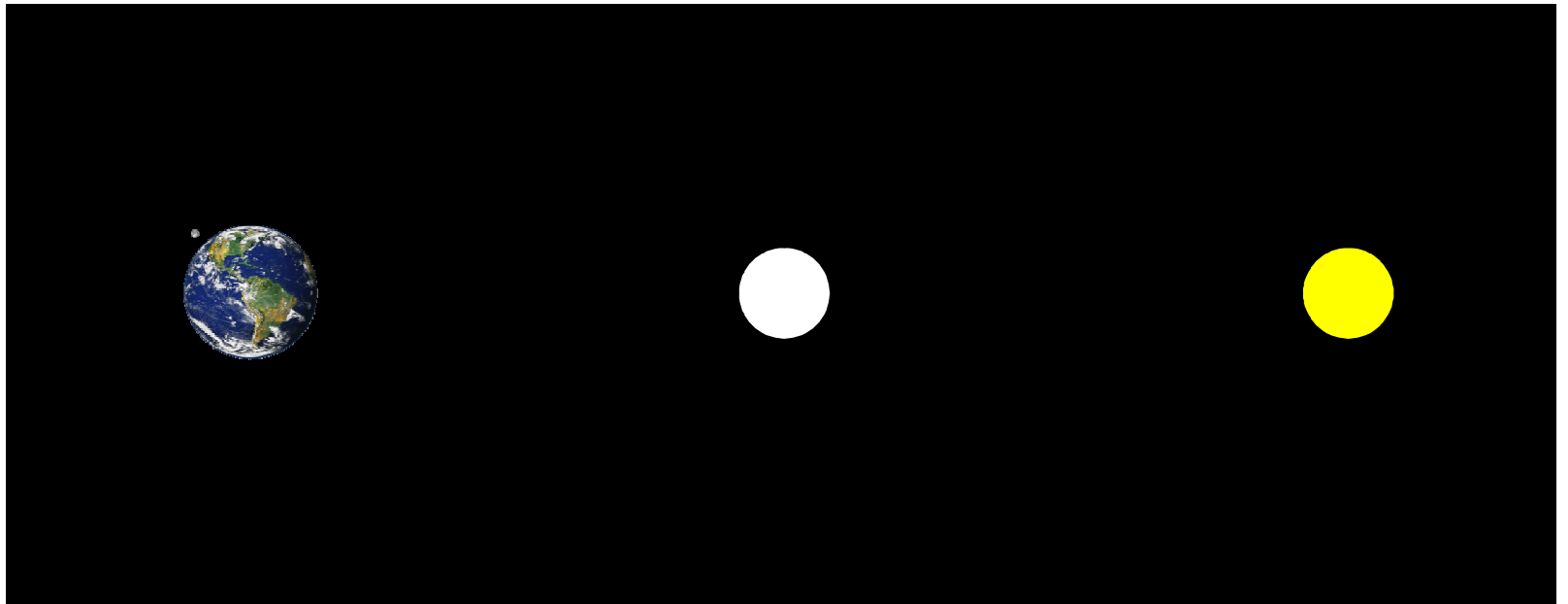


FIGURE 1

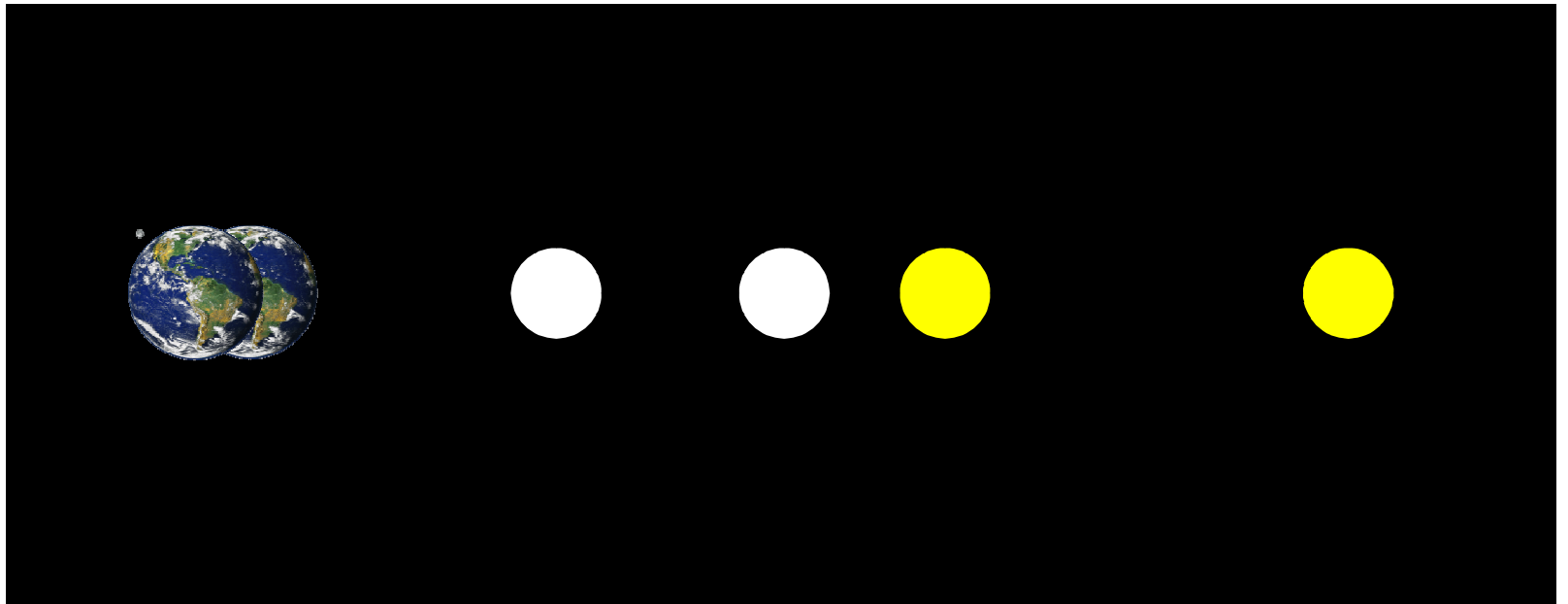
# Galaxienflucht



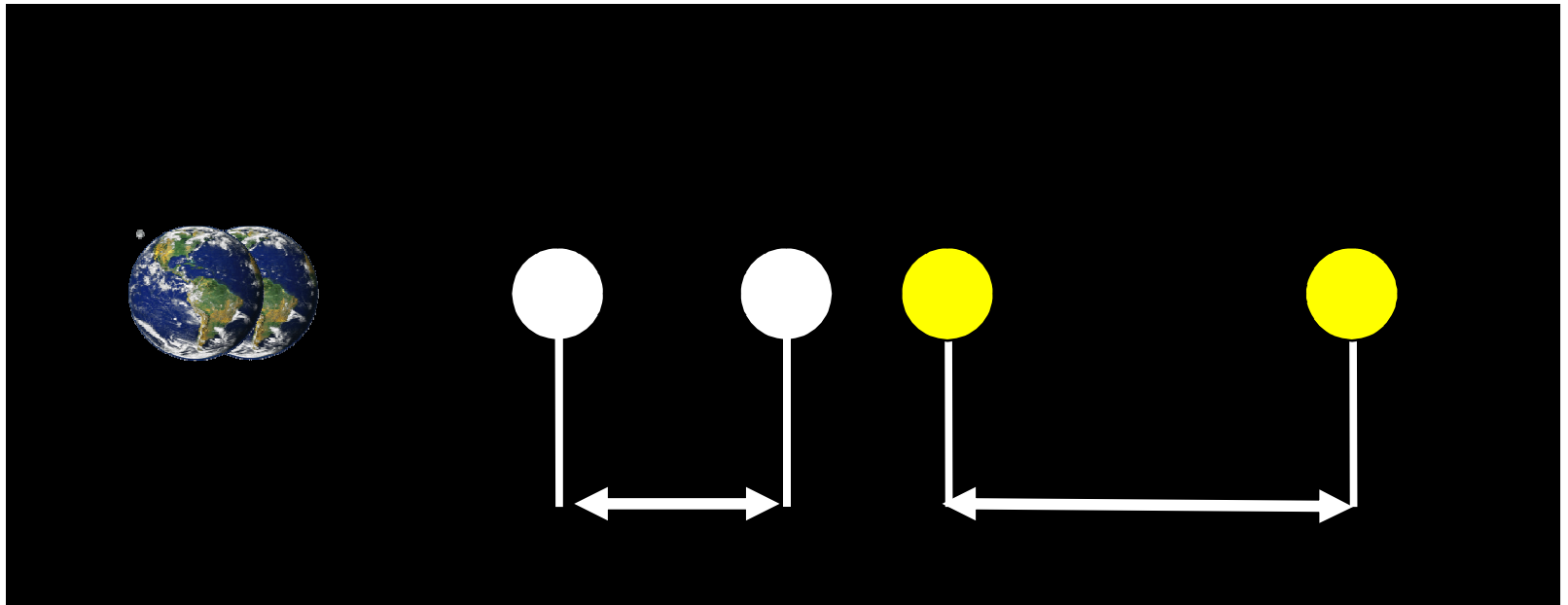
# Galaxienflucht



# Galaxienflucht



# Galaxienflucht



# Das Hubble-Diagramm

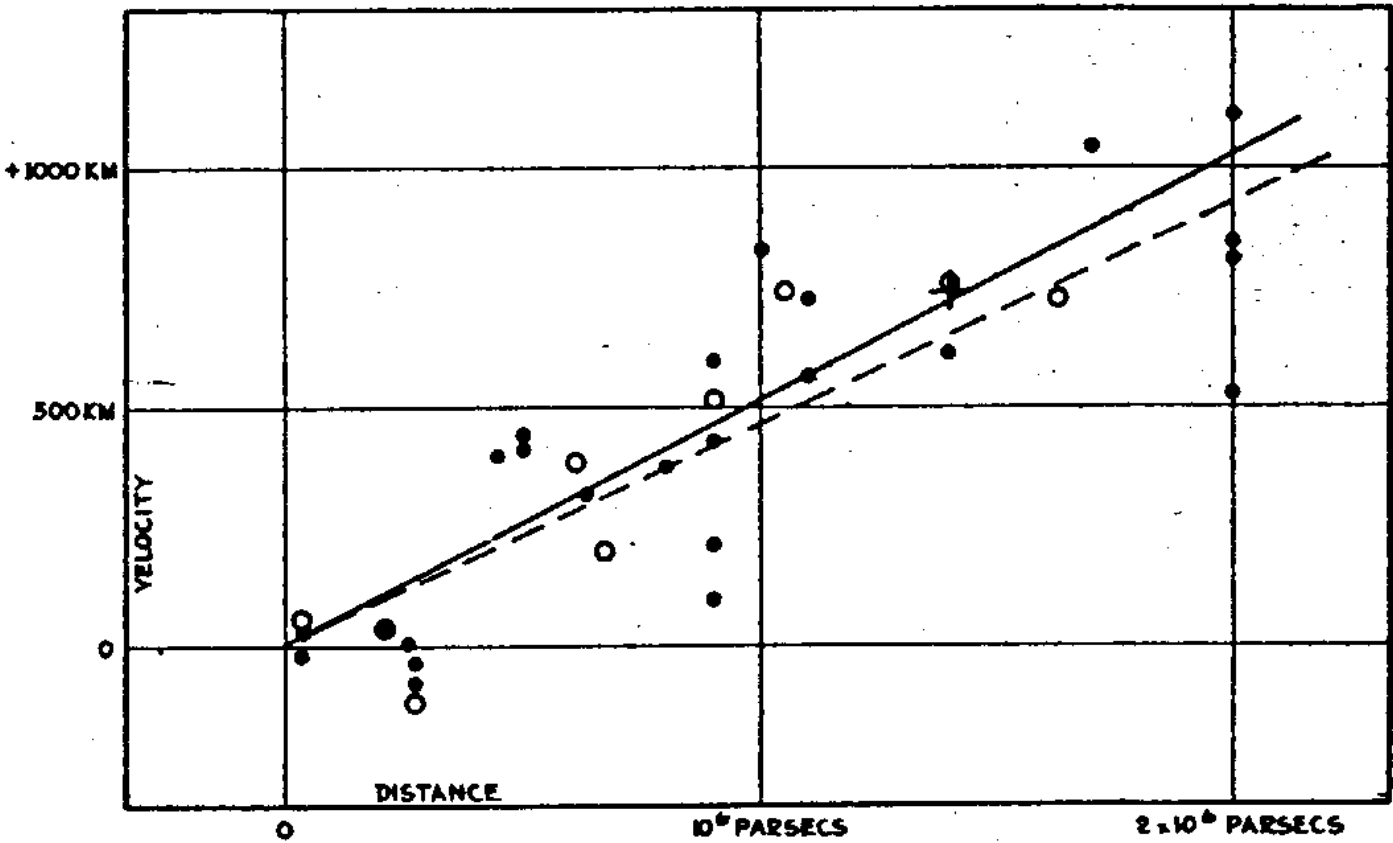
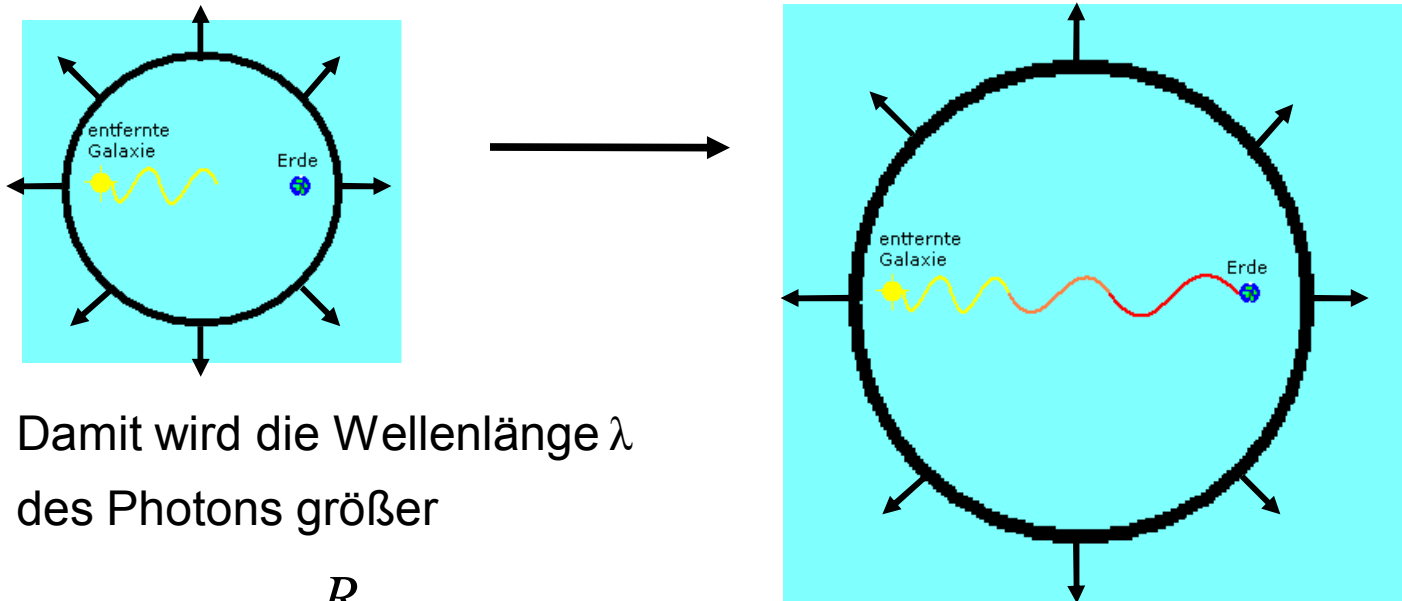


FIGURE 1

# Kosmologische Rotverschiebung

- Während ein Photon von einer entfernten Quelle zum Beobachter fliegt, dehnt sich das Universum von einer Größe  $R_{\text{damals}}$  zu  $R_{\text{jetzt}}$  aus



- Damit wird die Wellenlänge  $\lambda$  des Photons größer

$$\lambda_{\text{empfangen}} = \frac{R_{\text{damals}}}{R_{\text{jetzt}}} \cdot \lambda_{\text{gesendet}}$$



# Kosmologische Rotverschiebung

- Definition der Rotverschiebung

$$z = \frac{\lambda_{\text{empfangen}} - \lambda_{\text{gesendet}}}{\lambda_{\text{gesendet}}}$$

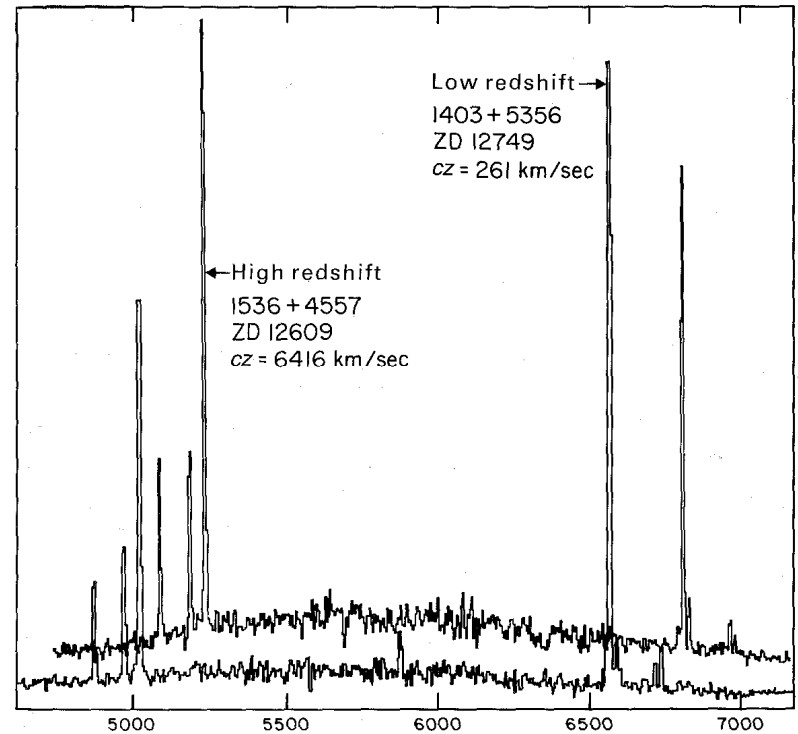
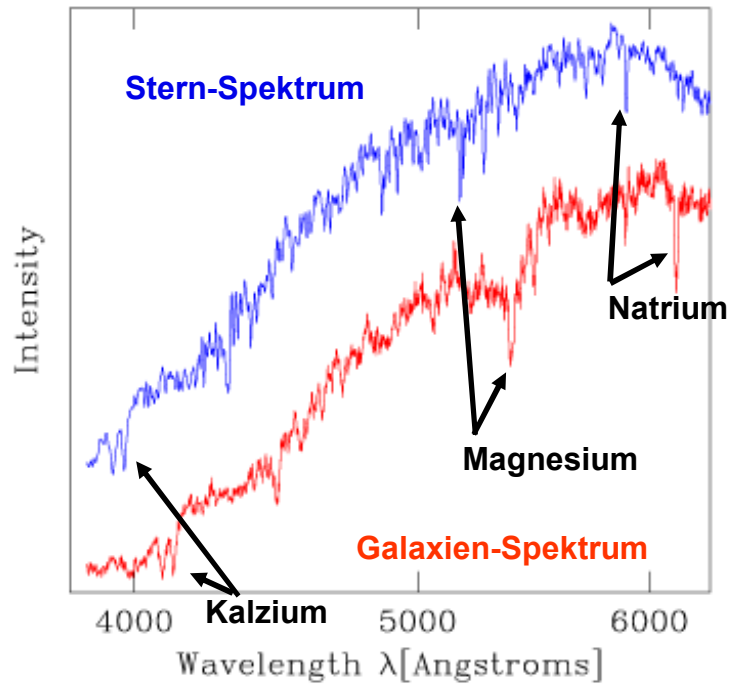
- Für die kosmologische Rotverschiebung

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{empfangen}}}{\lambda_{\text{gesendet}}} = \frac{R_{\text{jetzt}}}{R_{\text{damals}}}$$

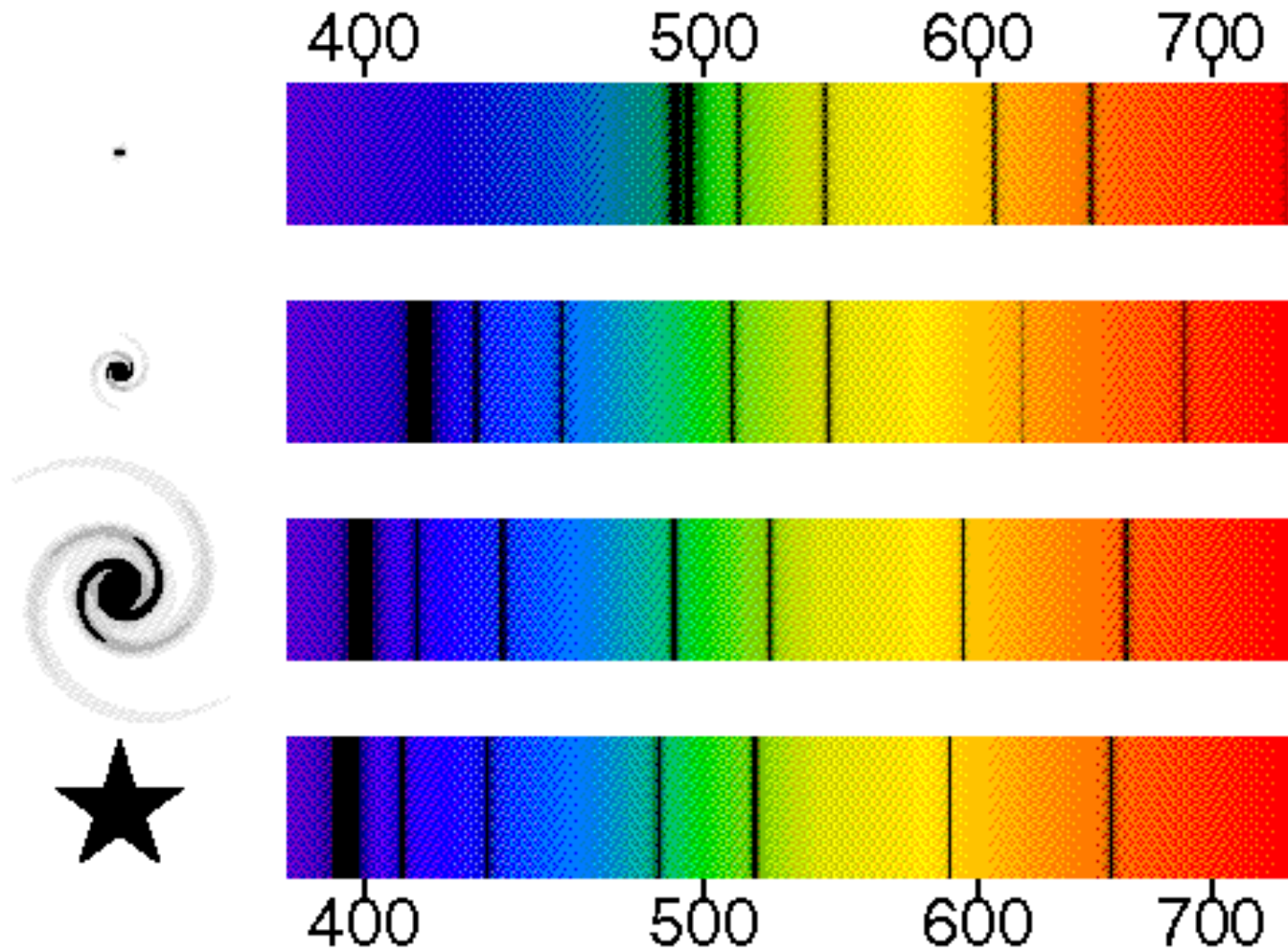
# Beispiele

- $z = 1 \Rightarrow R_{\text{damals}} / R_{\text{jetzt}} = 0,5$ 
  - bei  $z=1$  hat das Universum 50% der heutigen Ausdehnung
  - blaues Licht (400 nm) ist durch das gesamte optische Spektrum verschoben und wird als rotes Licht (800 nm) empfangen
- $z = 4 \Rightarrow R_{\text{damals}} / R_{\text{jetzt}} = 0,2$ 
  - bei  $z=4$  hatt das Universum 20% der heutigen Ausdehnung
  - blaues Licht (400 nm) ist tief ins Infrarote verschoben und wird mit 2000 nm empfangen
- das am weitesten entfernte Objekt (bisher):  $z=6.4$

# Rotverschiebung



# Rotverschiebung



# Hubble-Diagramm

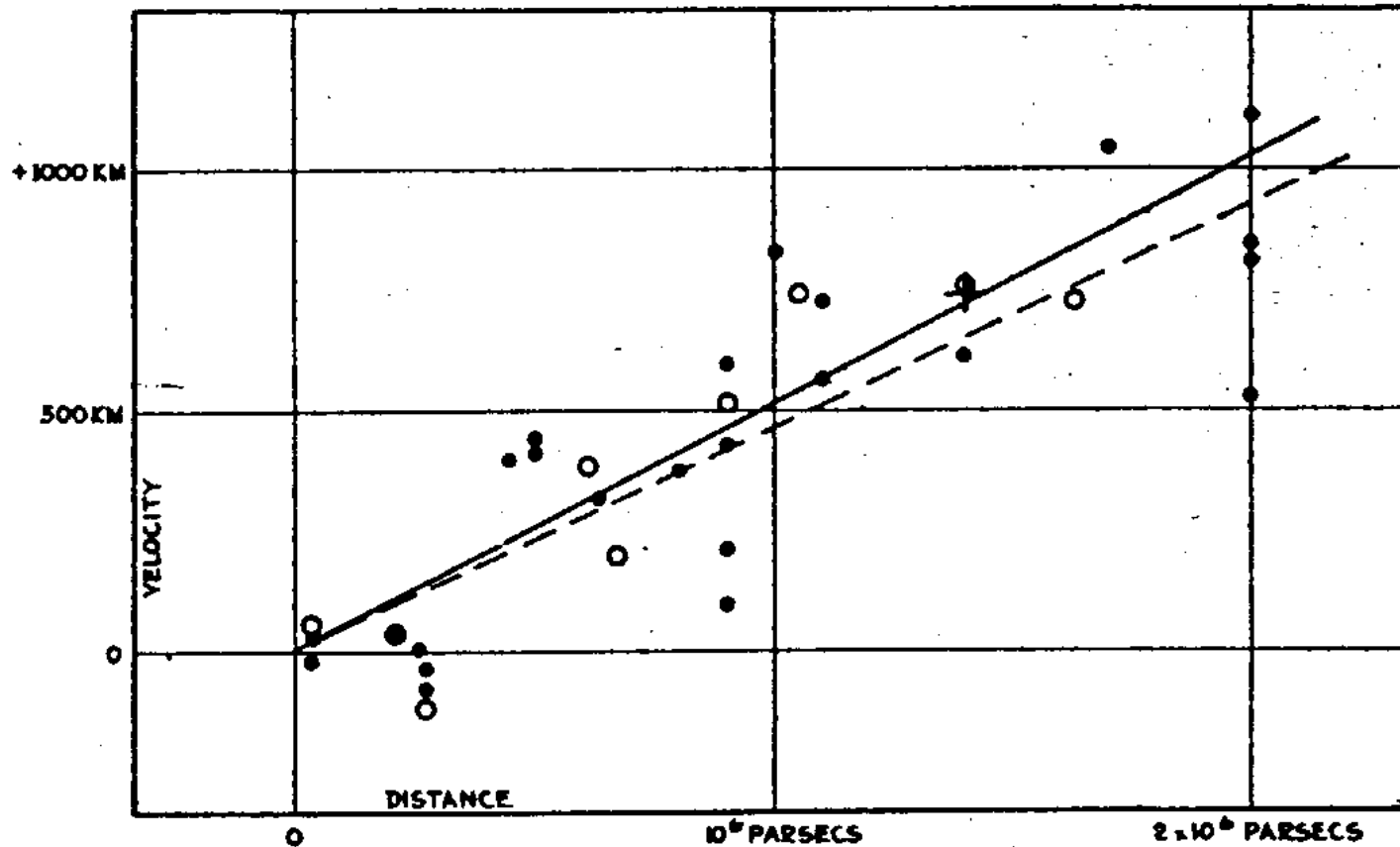
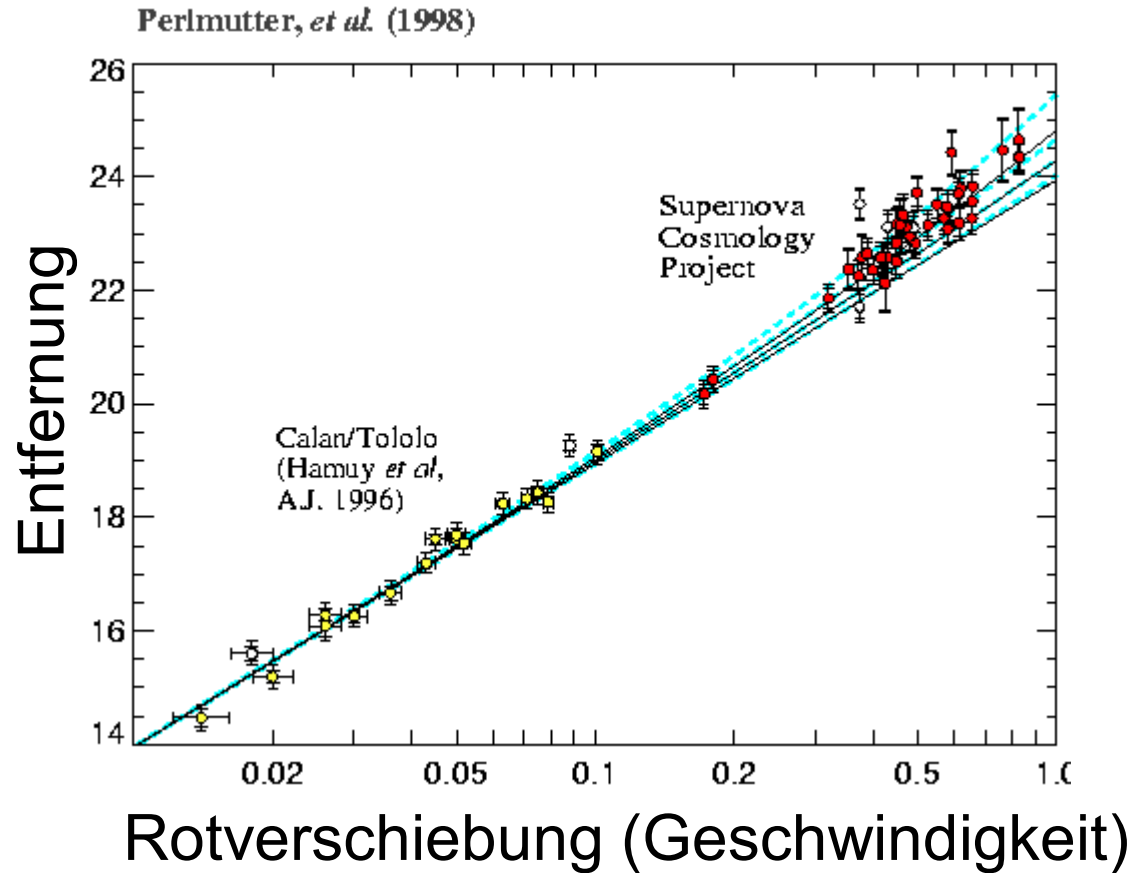


FIGURE 1

# Das Hubble-Diagramm heute



# Ergebnis

- Das Weltall ist dynamisch und expandiert (sogar beschleunigt)!
- Das Weltall war früher kleiner als heute
- Das Weltall ist aus einer heißen Phase entstanden

## Der Urknall

# Einsteins Universum



ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg



ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS



# Allgemeine Relativitätstheorie

- Einstein 1916
- Beschreibt alle gravitativen System
  - Planetensysteme
  - Schwarze Löcher
  - Das Universum

$$\mathbf{G}_{\mu\nu} - \Lambda \mathbf{g}_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{T}_{\mu\nu}$$

- Masse erzeugt eine Krümmung des Raumes
- Raumkrümmung sagt den Massen, wie sie sich bewegen müssen  
→ Gravitationsbeschleunigung



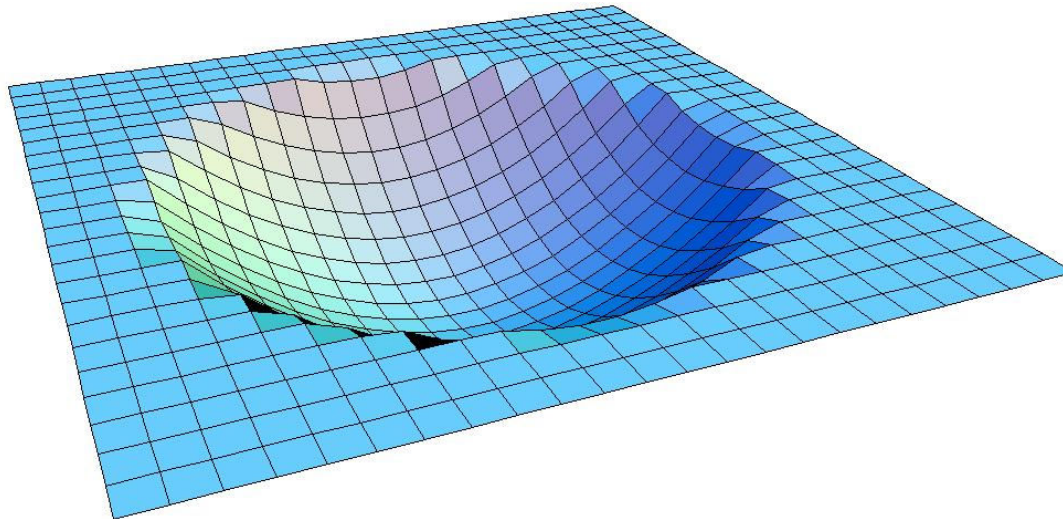
# Einsteins Raumzeit

klassische Mechanik

Relativitätstheorie

Raum + Zeit = Raumzeit

$$3 + 1 = 4$$



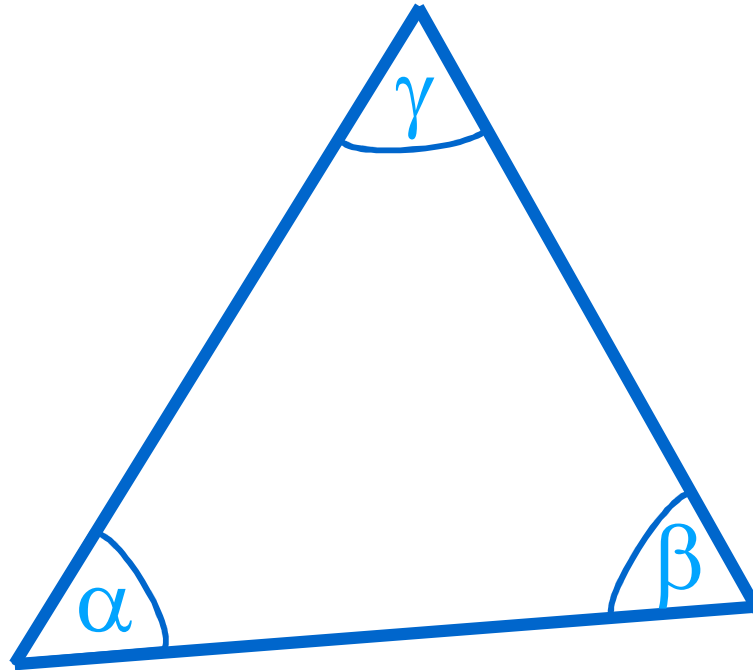
# Messung der Raumkrümmung



# Messung der Raumkrümmung

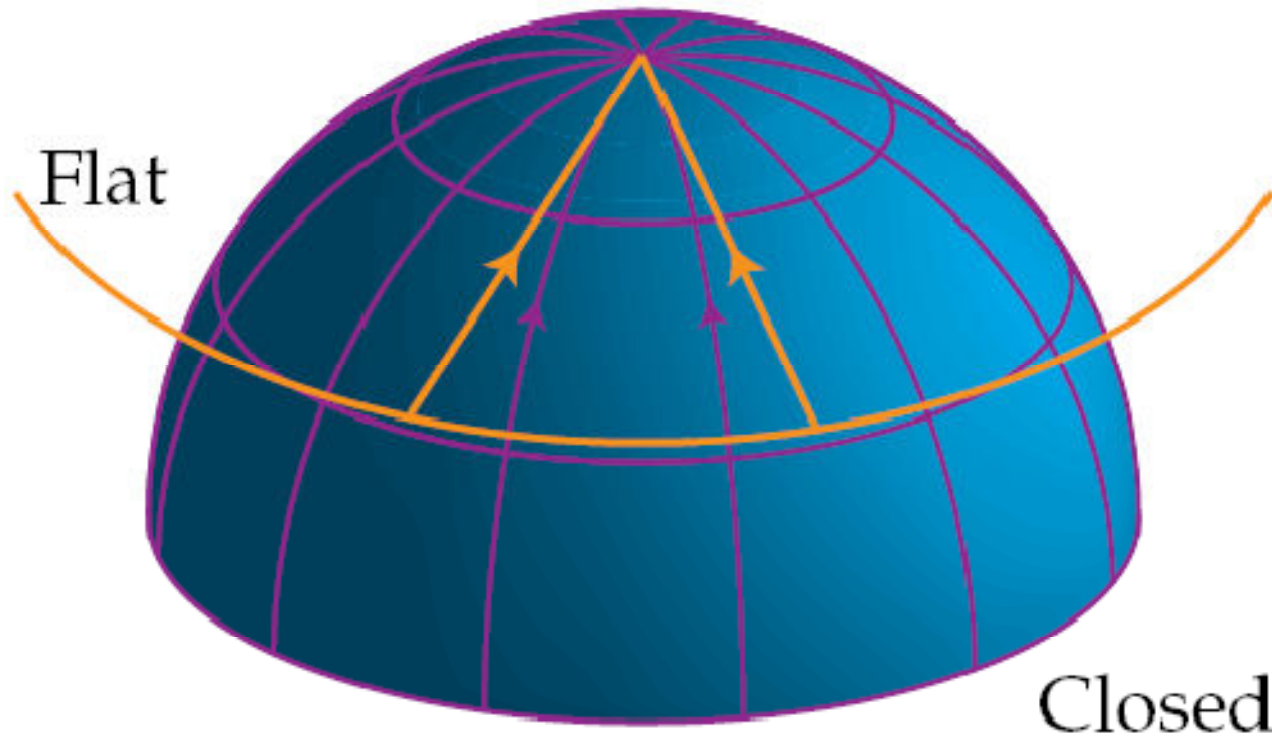


## In einem flachen Raum

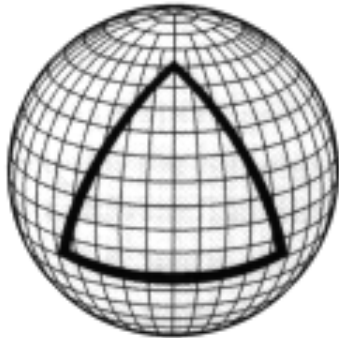


$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$$

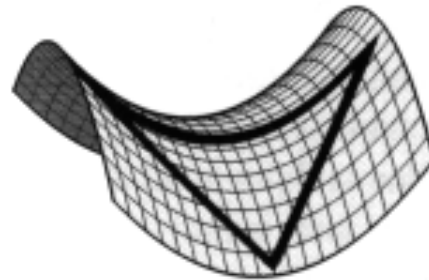
# Raumkrümmung



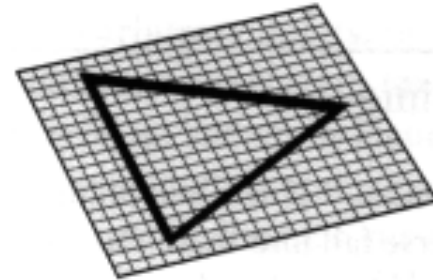
# Geometrie des Universums



Closed Geometry



Open Geometry

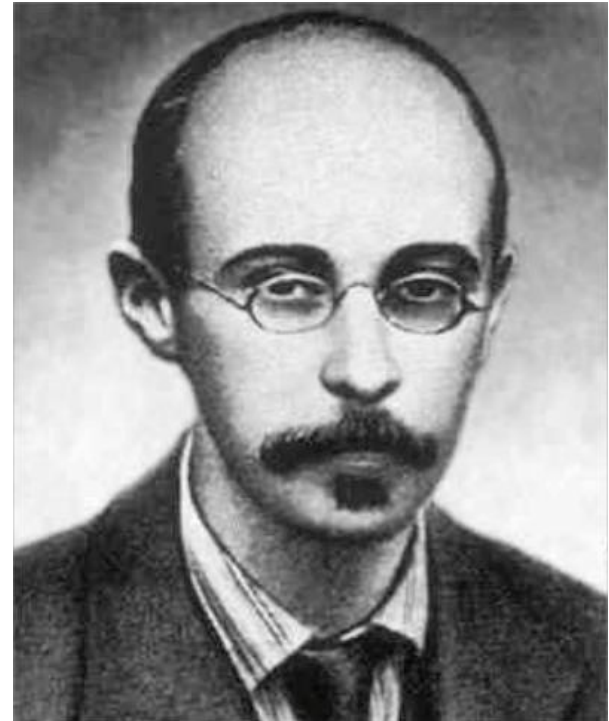


Flat Geometry

# Friedmann-Universen

- Friedmann 1922
- Kosmologische Prinzip
  - Wir sehen das, was jeder andere auch sehen würde
  - Isotropes und homogenes Universum
- Weltmodelle hängen ab von
  - Expansion
  - Gravitationsanziehung
  - Kosmologischen Konstanten
- Friedmann-Gleichung

$$1 = \Omega_0 + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$





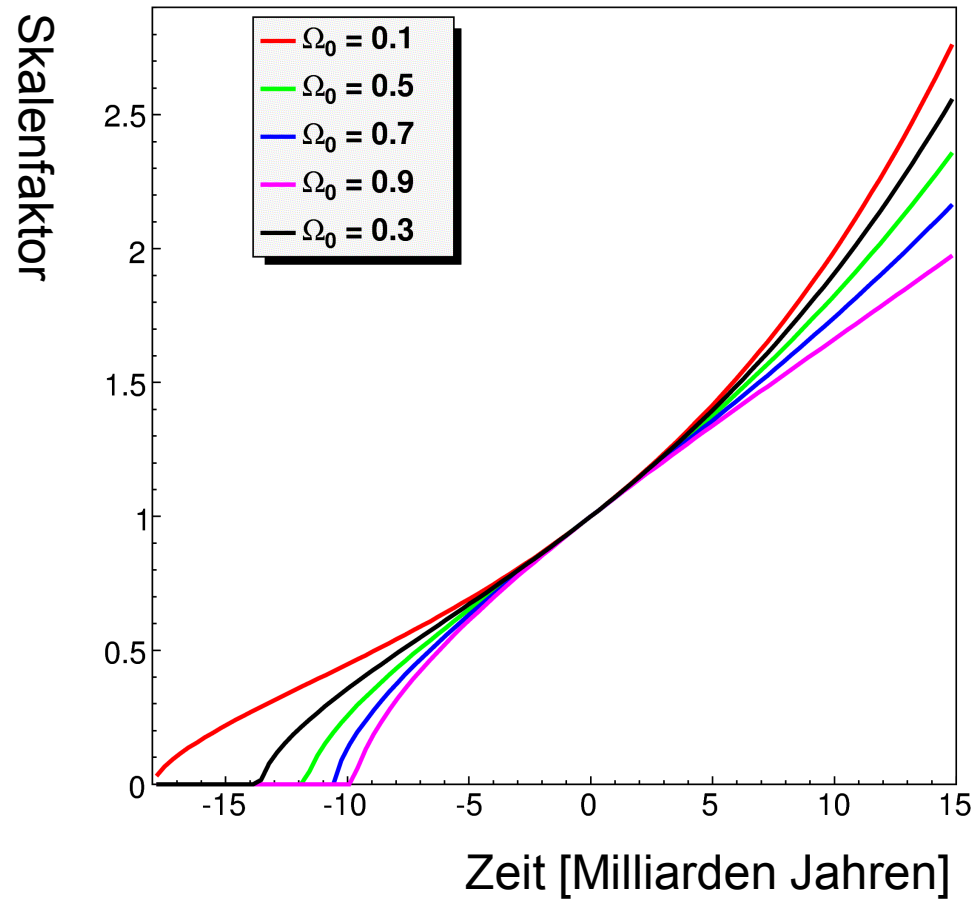
# Kosmologie für die Schule

- Herleitung der Friedmann-Gleichung aus der Newtonschen Gravitationstheorie
- Siehe „Grundlagen der Kosmologie“, T. Kühnel, M. Bartelmann, Sterne und Weltraum, Mai 2003

# Zusammenfassung Teil 1

- Das Weltall ist dynamisch und expandiert (sogar beschleunigt)!
- Das Weltall war früher kleiner als heute
- Das Weltall ist aus einer heißen Phase (Urknall) entstanden
- Es gilt das kosmologische Prinzip, d.h. das Weltall ist homogen und isotrop
- Einsteins allgemeine Relativitätstheorie
- Newton (mit ein wenig Einstein) beschreibt ein dynamisches Weltall

# Die Ausdehnung des Weltalls



# Eine Reise durch Raum und Zeit



ecap

ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg



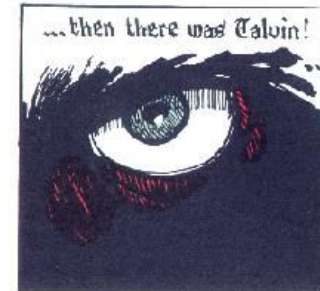
ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

# Der Anfang

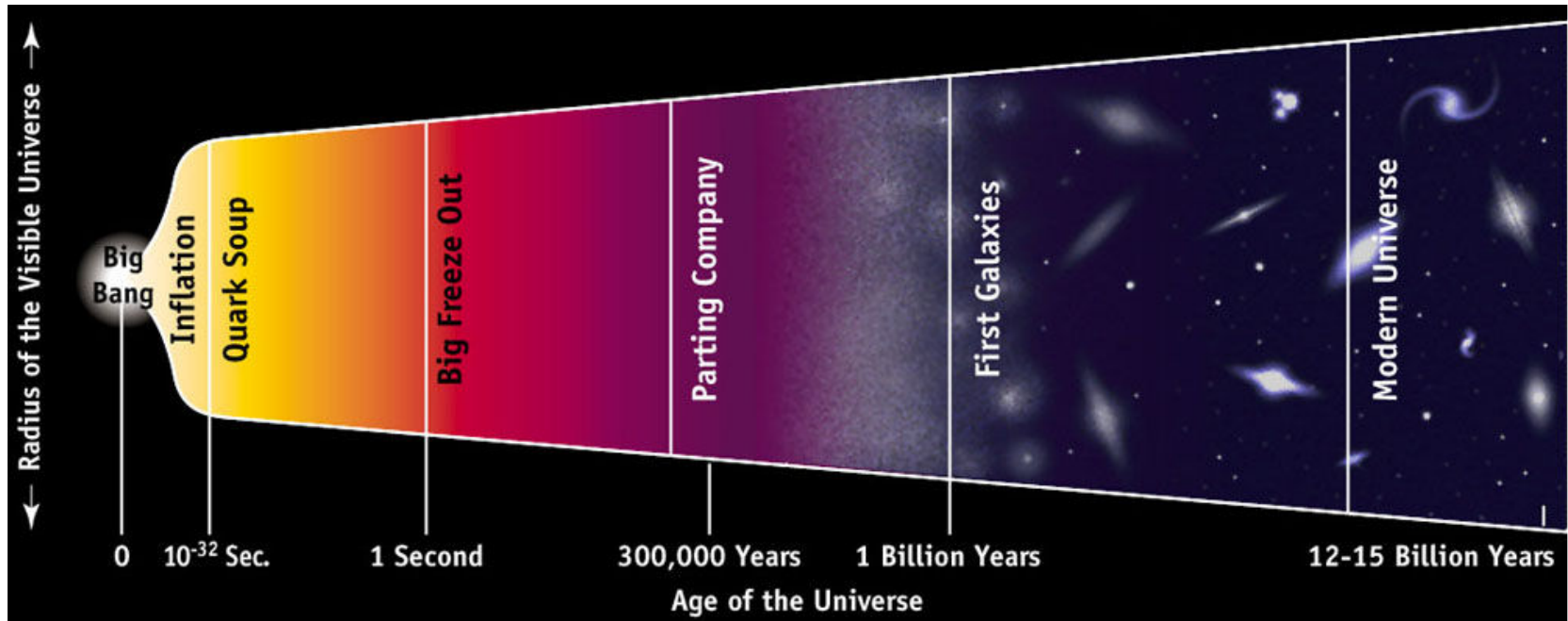


calvin and HOBBS by WATSON

First there was nothing...

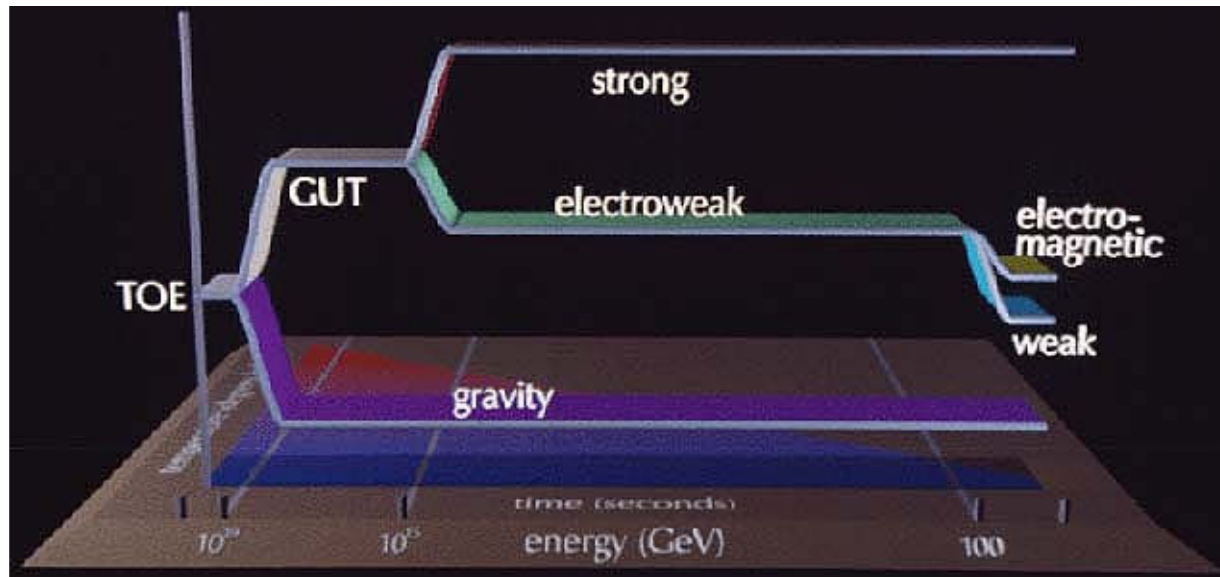


# Vom Urknall bis Heute



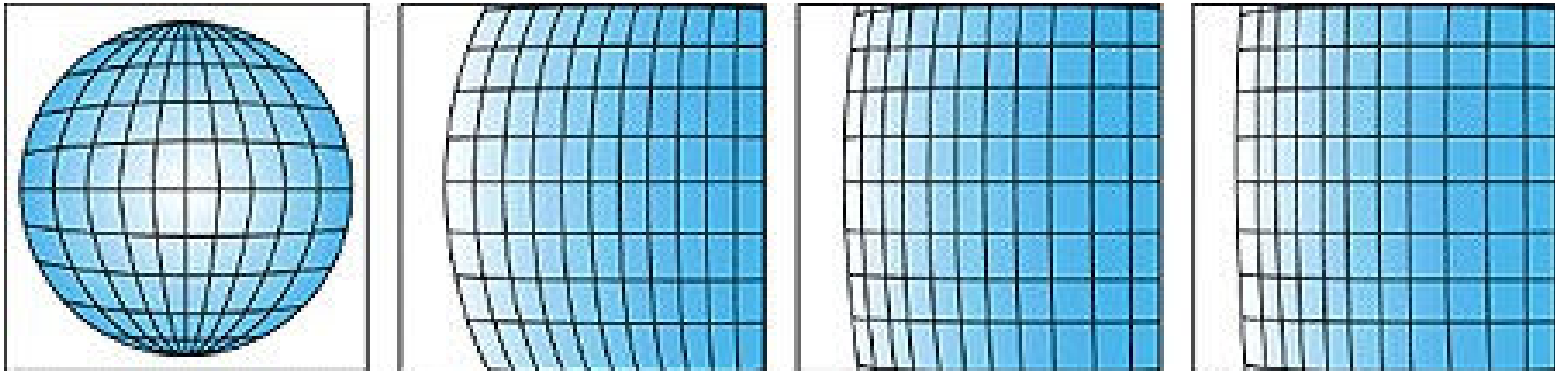
# Eine Zeitreise

- Alter =  $10^{-42}$  s
  - Der Anfang unserer Physik
- Alter =  $10^{-36}$  s,  $T = 10^{27}$  K
  - Starke und elektro-schwache Kraft trennen sich



# Die Inflation

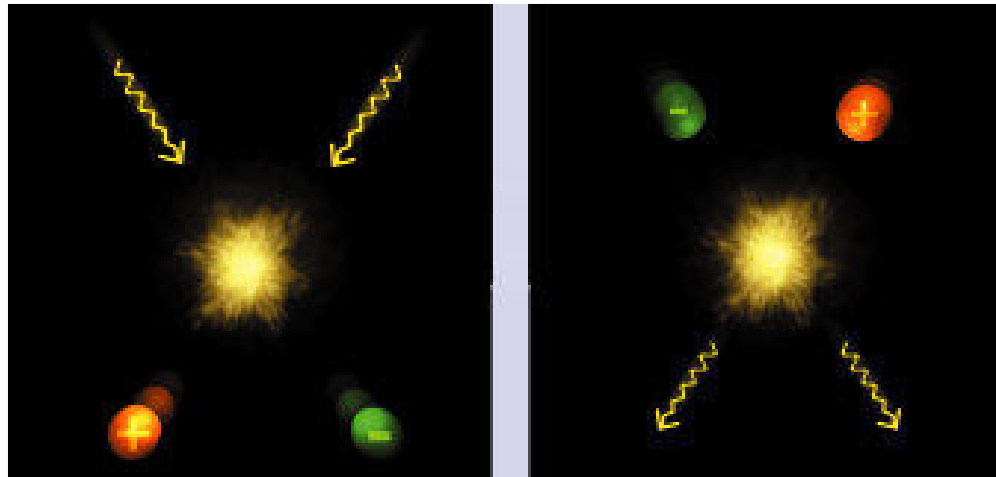
- Alter =  $10^{-36}$  s,  $T = 10^{21}$  K
  - Plötzliche Expansion des Universums um einen Faktor  $10^{20} - 10^{30}$
  - Das Universum wird flach!





# Der Sieg der Materie

- Alter =  $10^{-6}$  s,  $T = 10^{12}$  Kelvin
  - Vorher: Materie-Antimaterie-Verhältnis  
100000001 : 100000000
  - Nachher Materie-Photon-Verhältnis  
1 : 200000000

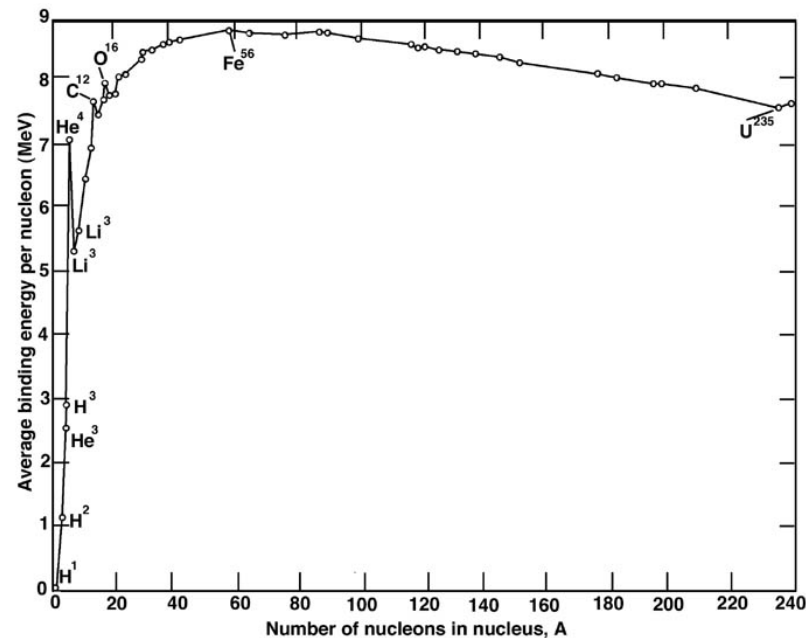


# Nukleonsynthese

- Alter = 1 min,  $T = 10^9$  K

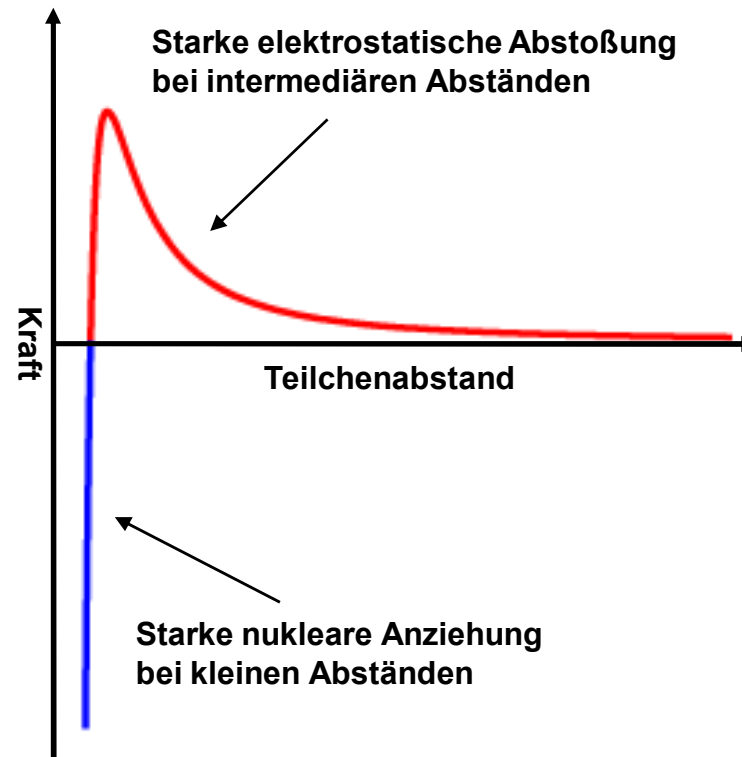
Erzeugung leichter Elemente

Wasserstoff, Deuterium, Helium, Lithium

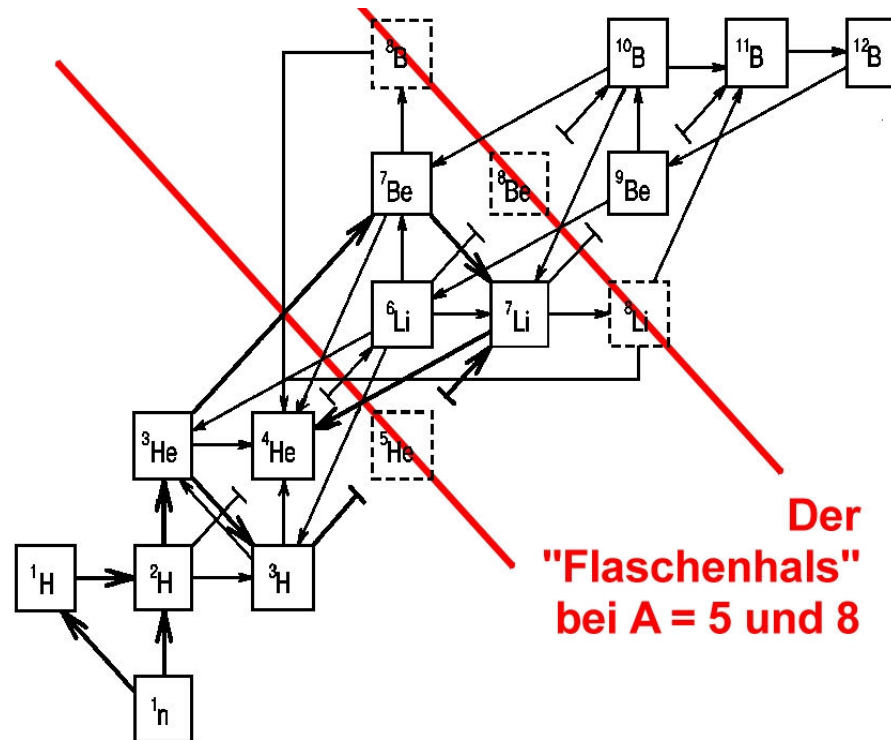


# Kernfusion

- Fusion bei Teilchenkollisionen
- Fusion benötigt hohe Temperaturen und große Teilchendichten

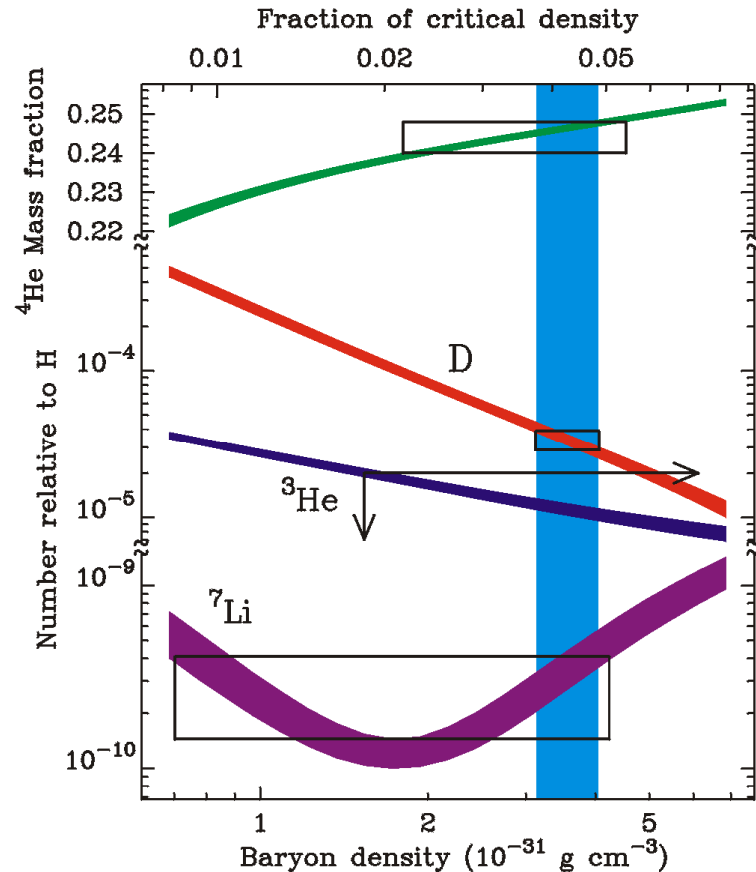


# Primordiale Nukleosynthese

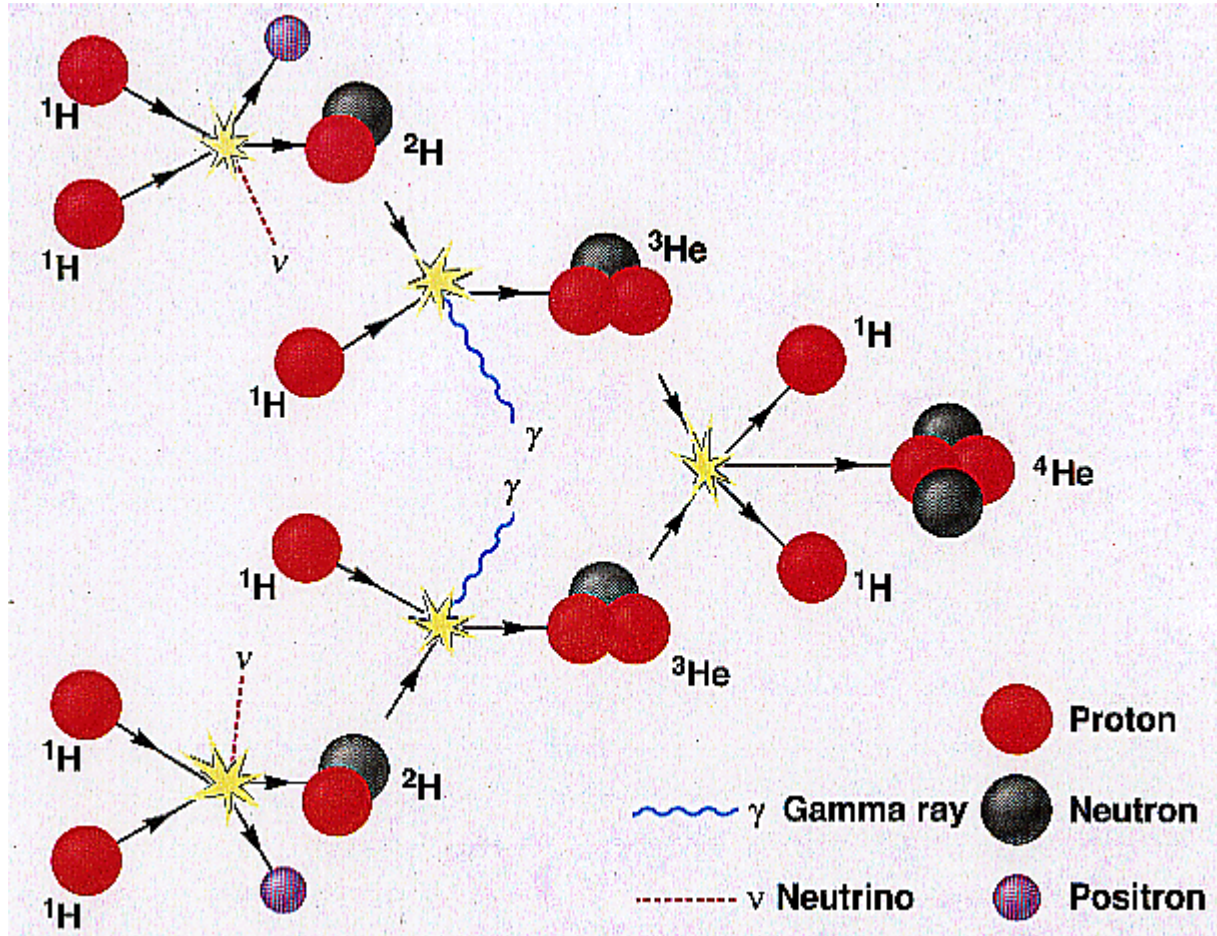


# Primordiale Nukleosynthese

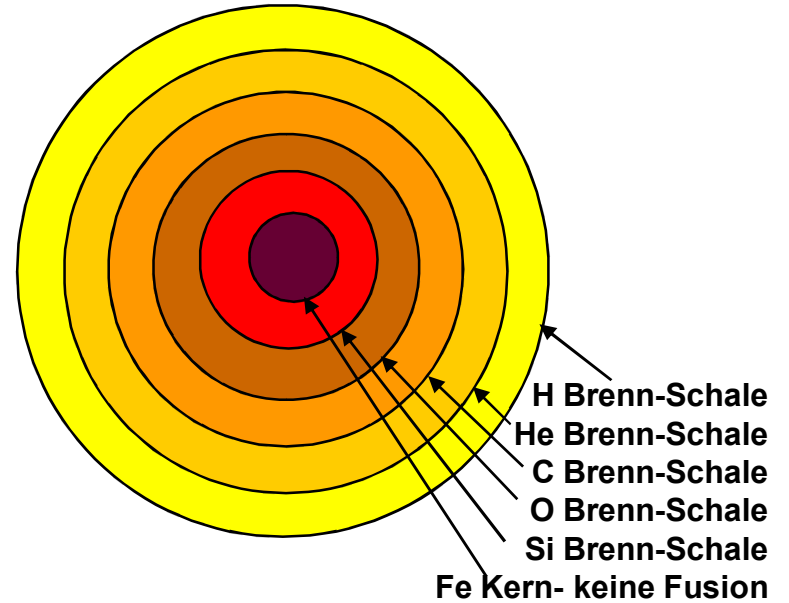
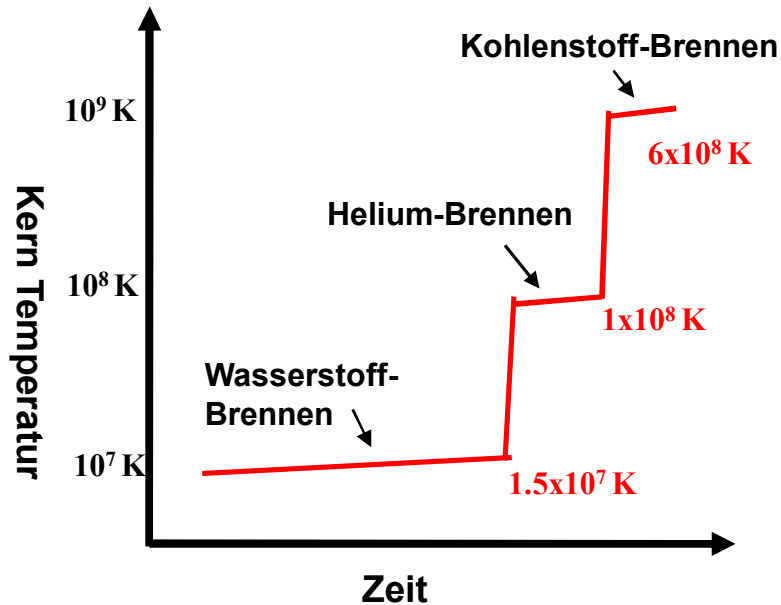
- Erklärt die Häufigkeit der leichten Elemente
  - 74% Wasserstoff
  - 25 % Helium
  - 1% Rest
- Baryonische Dichte
  - $3,5 \cdot 10^{-31} \text{ g/cm}^3$  oder
  - 0,2 Wasserstoffatome/m<sup>3</sup>



# Warum nicht in Sternen?



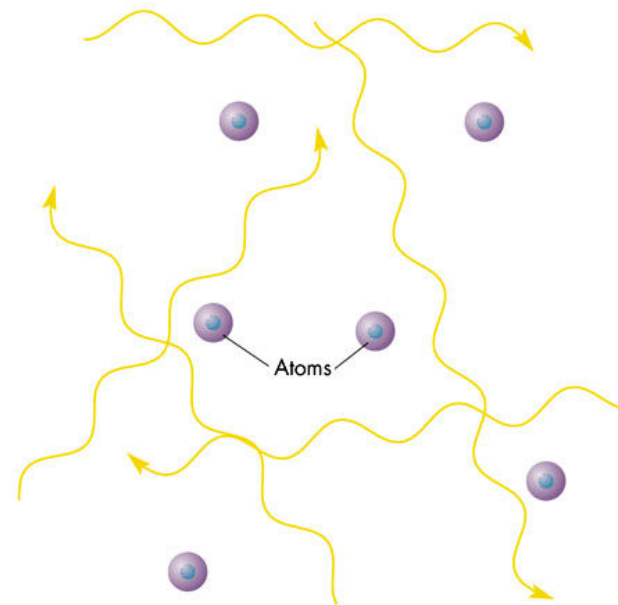
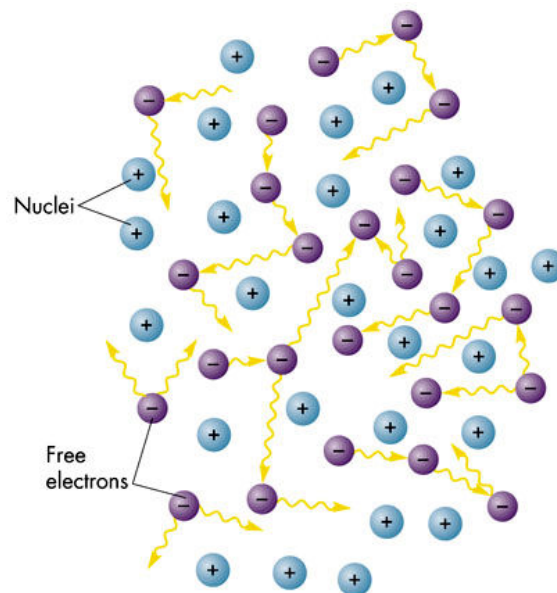
# Fusion in Sternen



- Erwarte ungefähr genauso viel Helium wie andere Elemente mit großer Masse
- Verhältnis: 75% H, 13% He, 12% Rest
- Primordiale Nukleosynthese: 74% H, 25 %He, 1% Rest

# Bildung von Atomen

- Alter = 370000 Jahre,  $T = 3000$  Kelvin
  - Erste Atome bilden sich
  - Das Universum wird transparent





# Können wir den Urknall sehen?

# Blick in die Vergangenheit



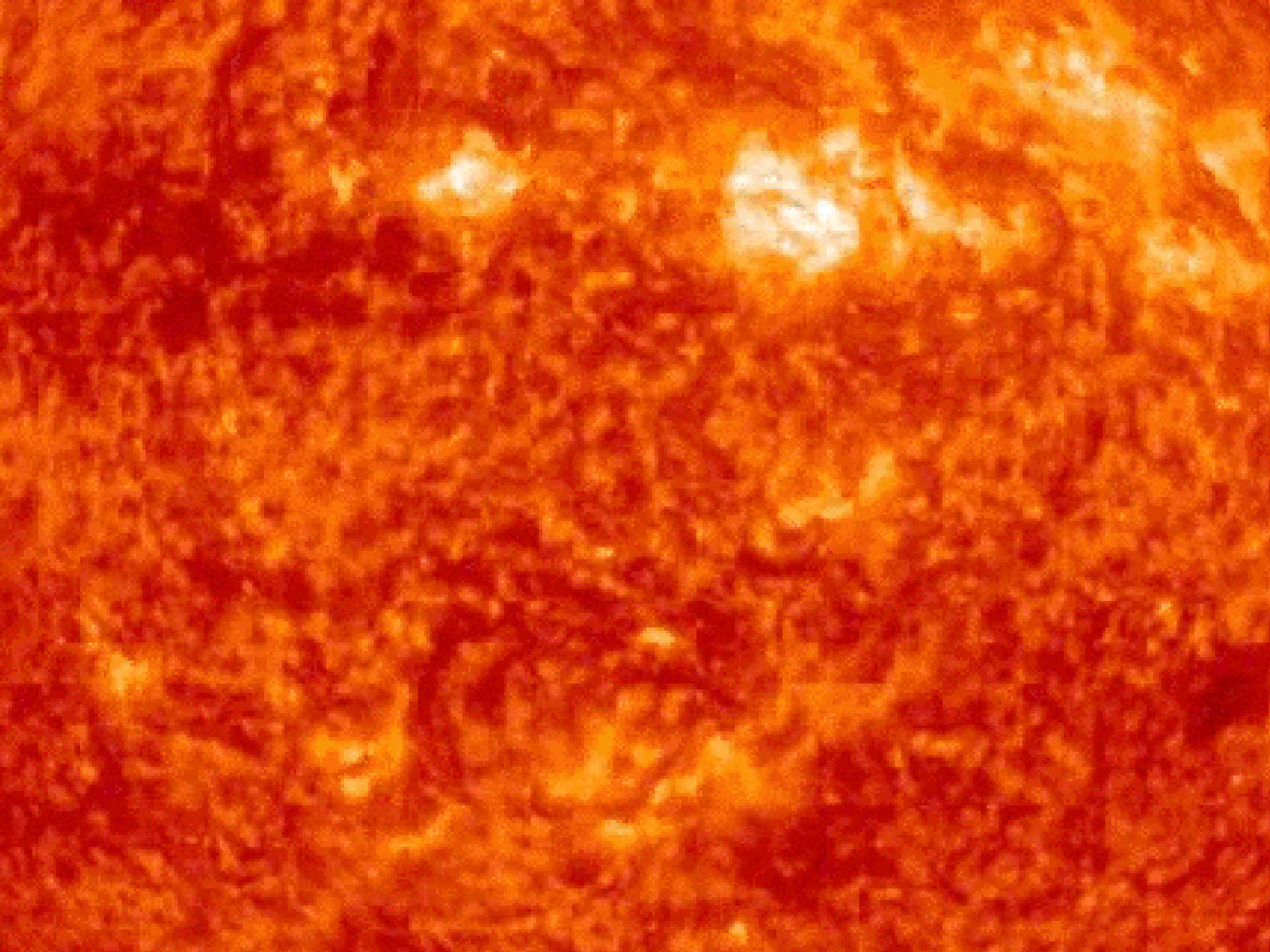


# Blick in die Vergangenheit



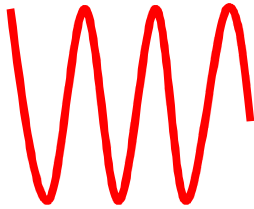
# Blick in die Vergangenheit



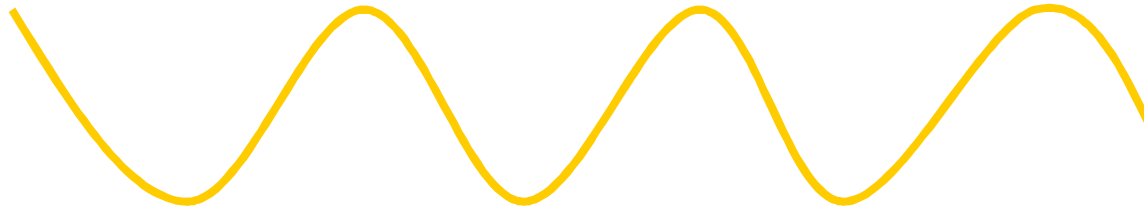


# Der Urknall damals – heute

- Damals: Licht 3000 K

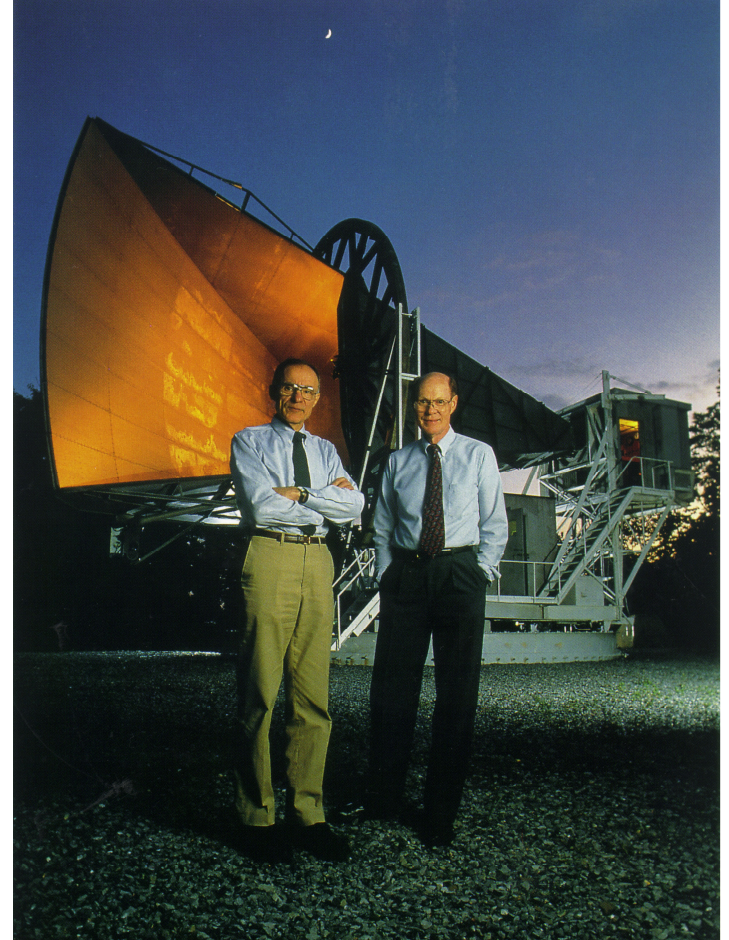
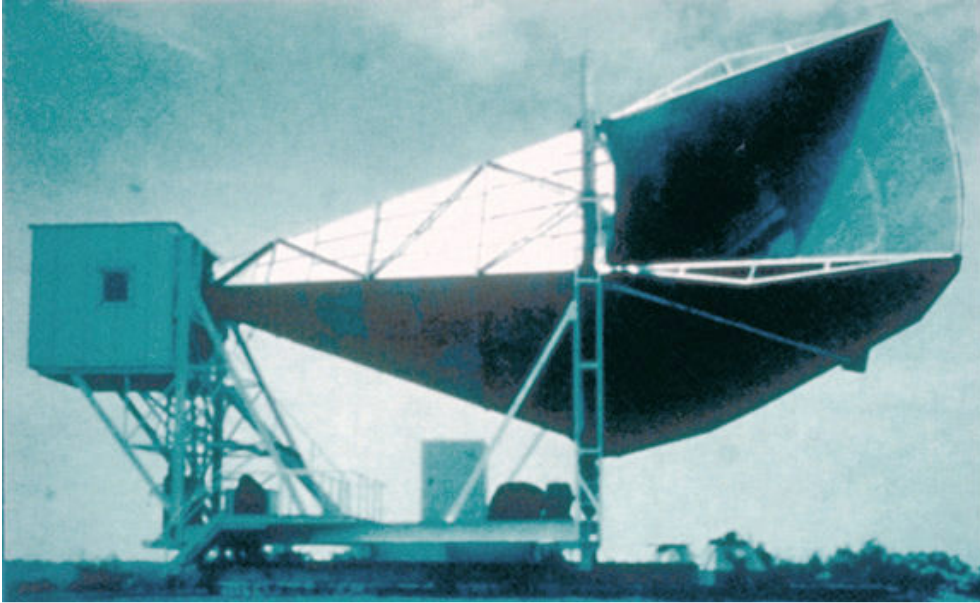


- Heute: Mikrowellen 3 K



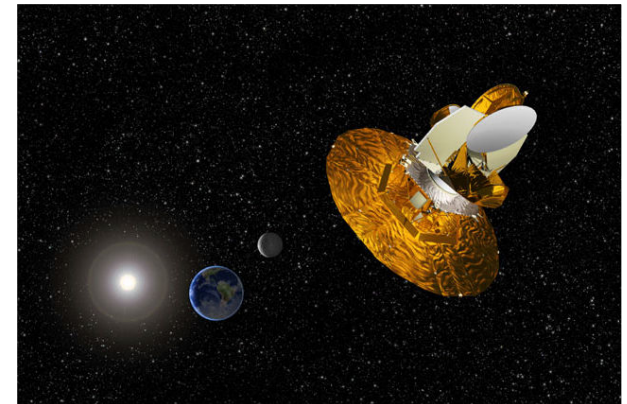
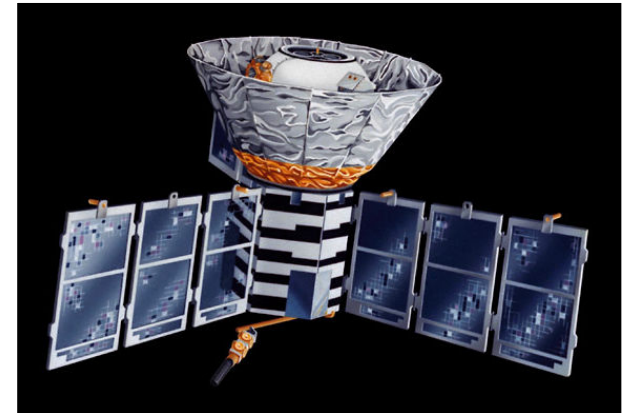


# Die Entdeckung: 1965



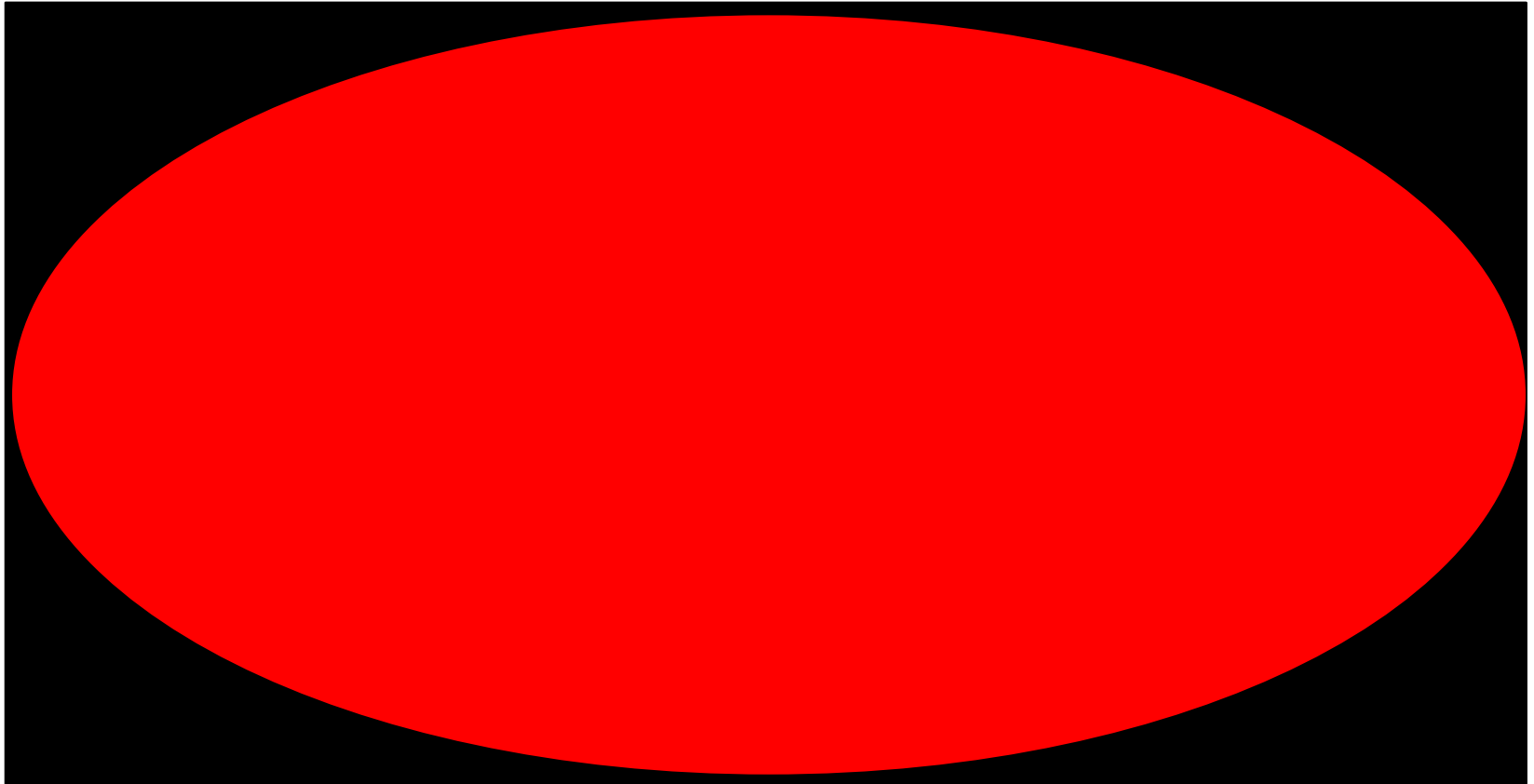
# COBE and WMAP

- COBE
  - COsmic Background Explorer
  - 1989 – 1993
  - Nobelpreis 2006  
(G. Smoot, J. Mather)
- WMAP
  - Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
  - Start 2001
- Planck (ESA)
  - Start 14.5.2009

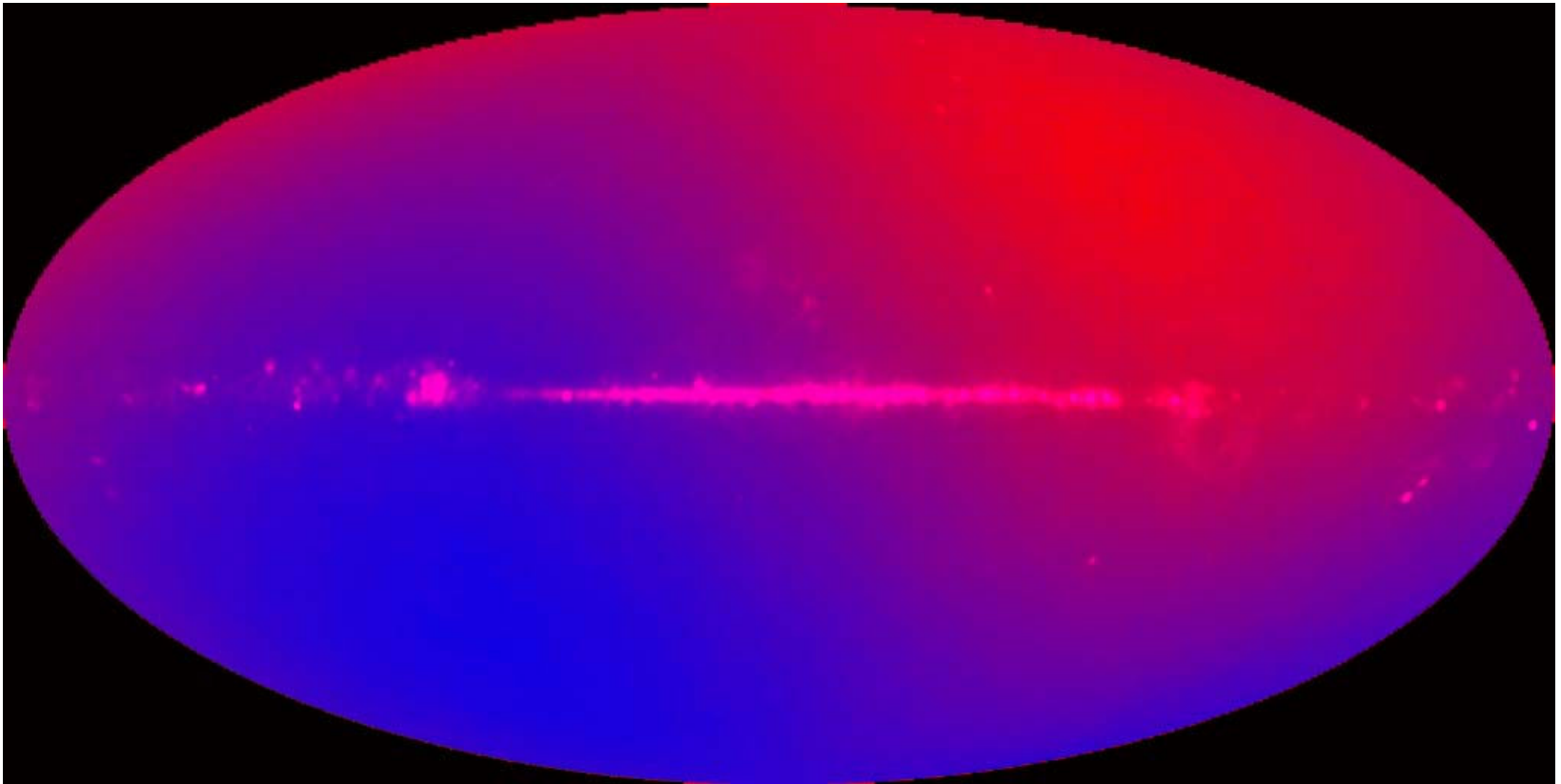




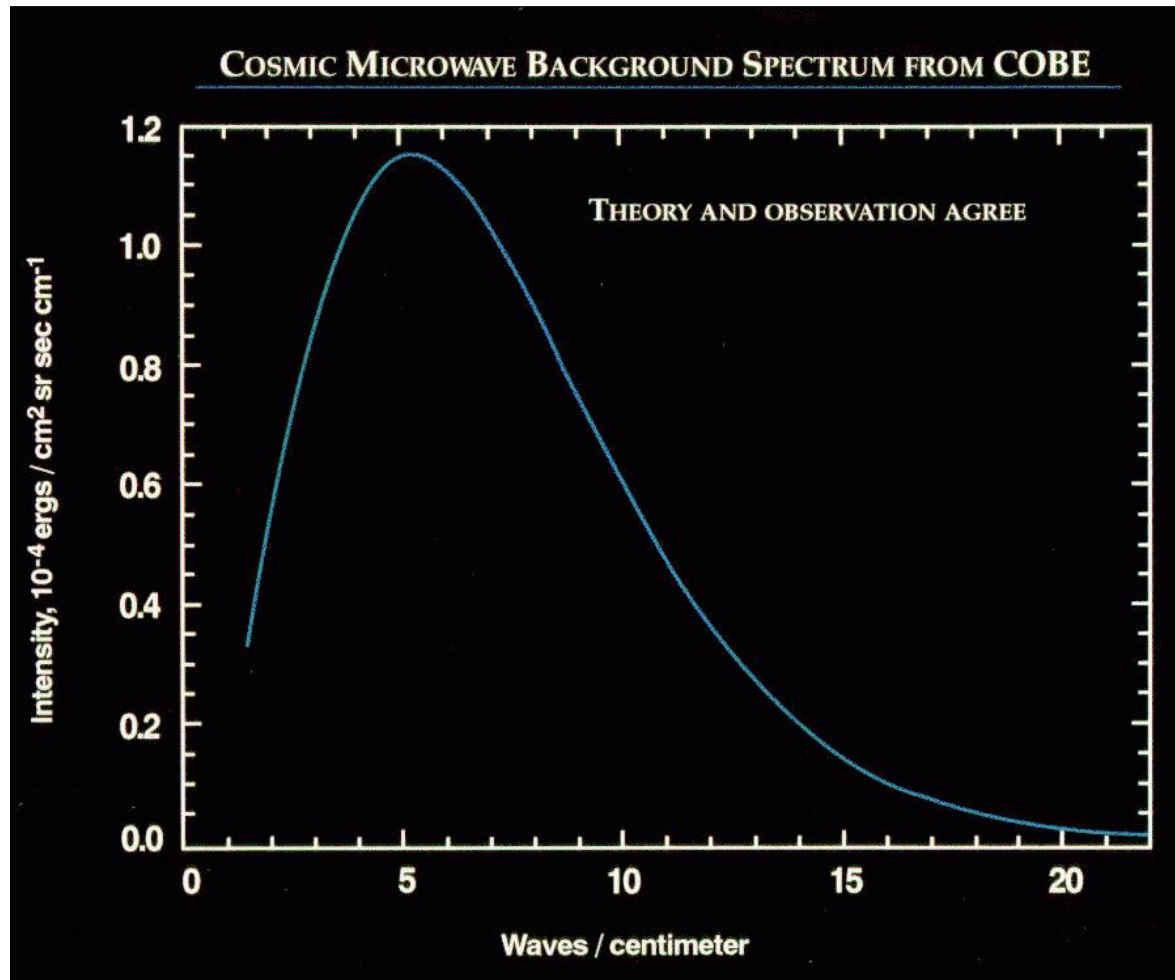
# Der Mikrowellenhintergrund



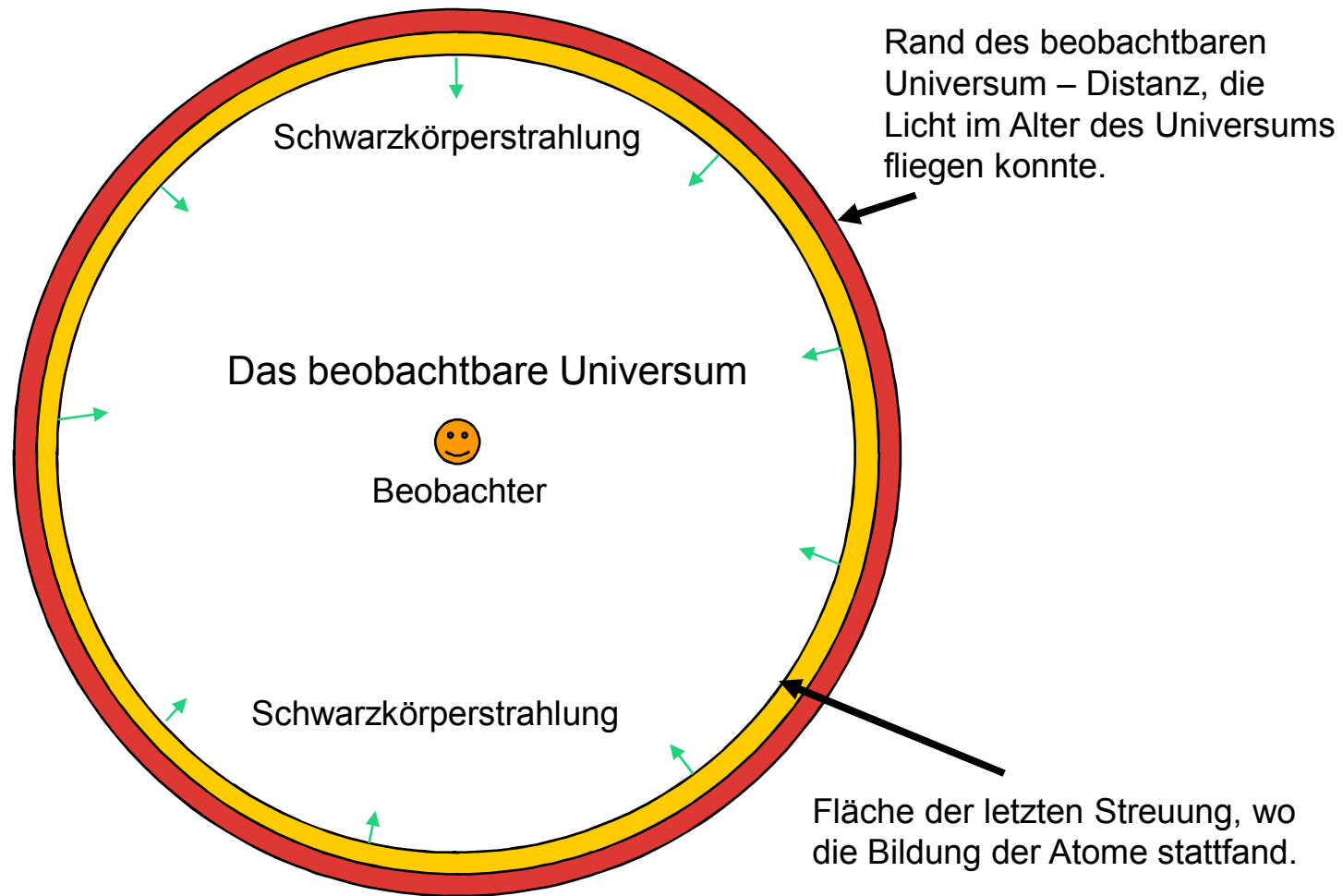
# Die Erde bewegt sich



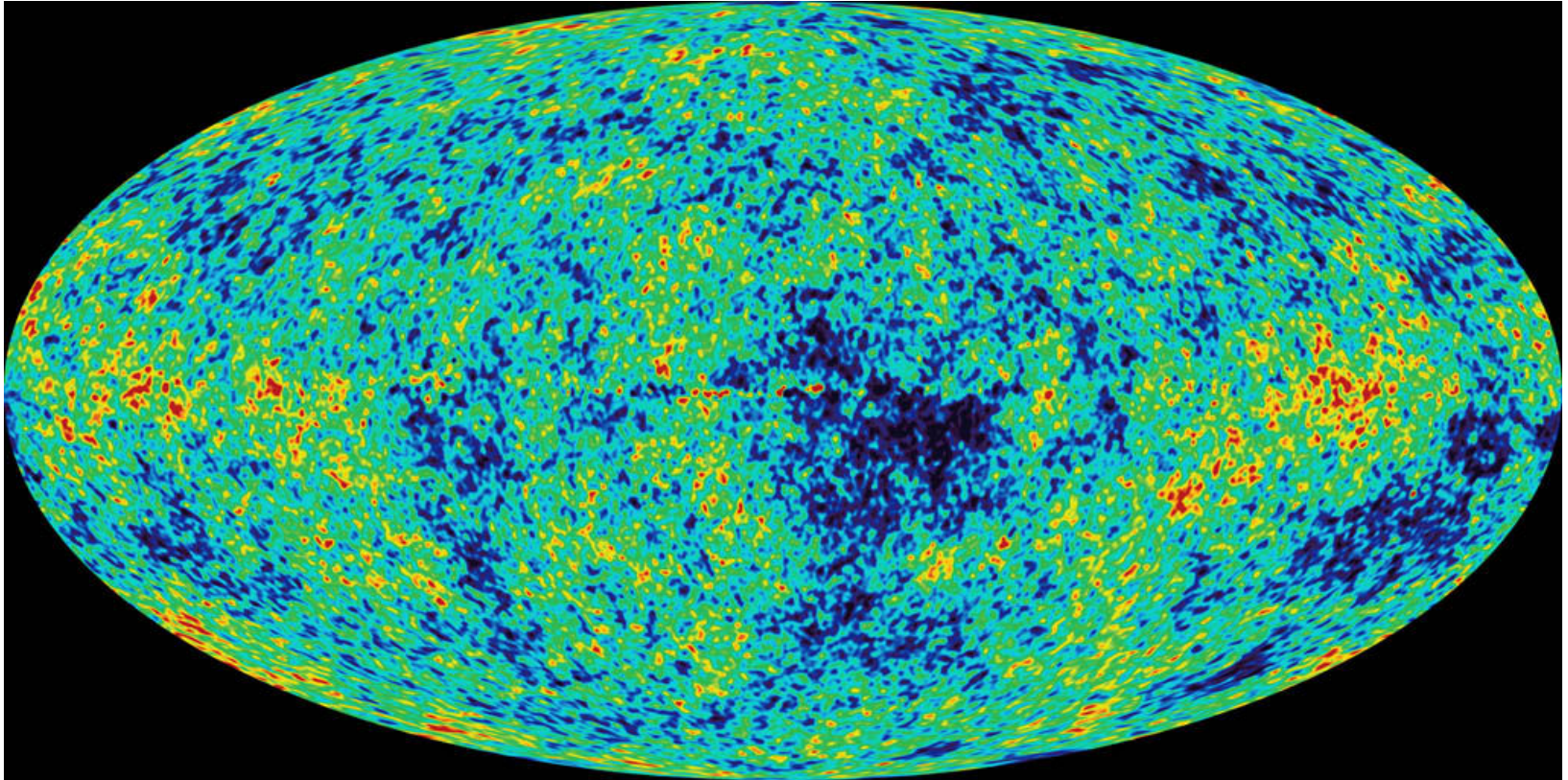
# Das Spektrum



# Die Geschichte der kosmischen Hintergrundstrahlung

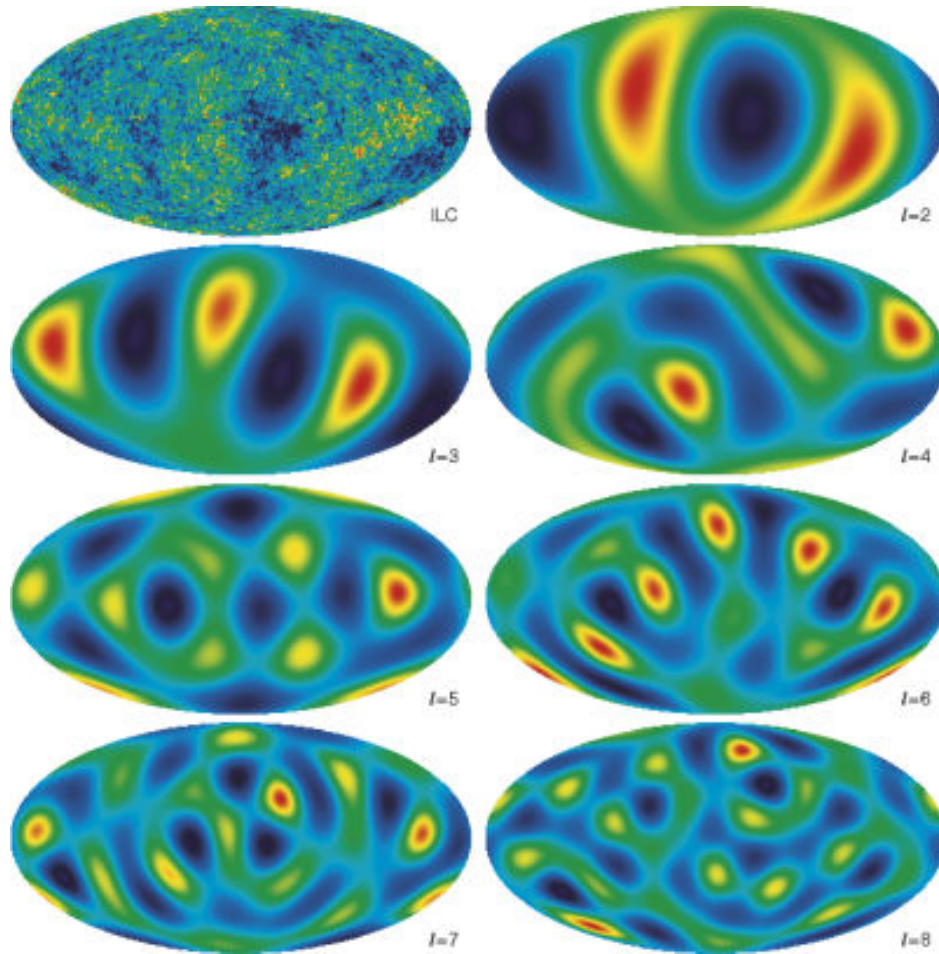


# Das Echo des Urknalls

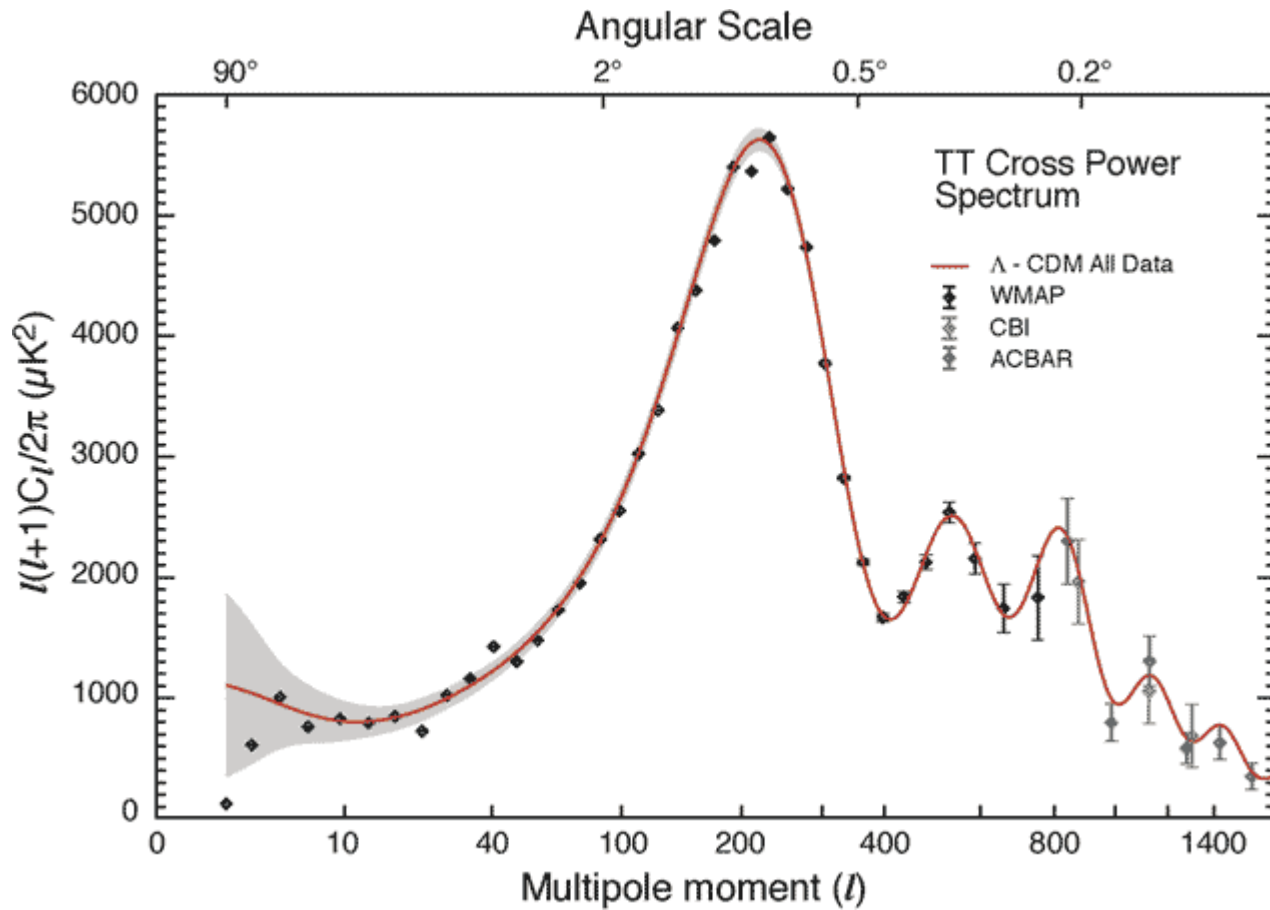




# Multipolentwicklung

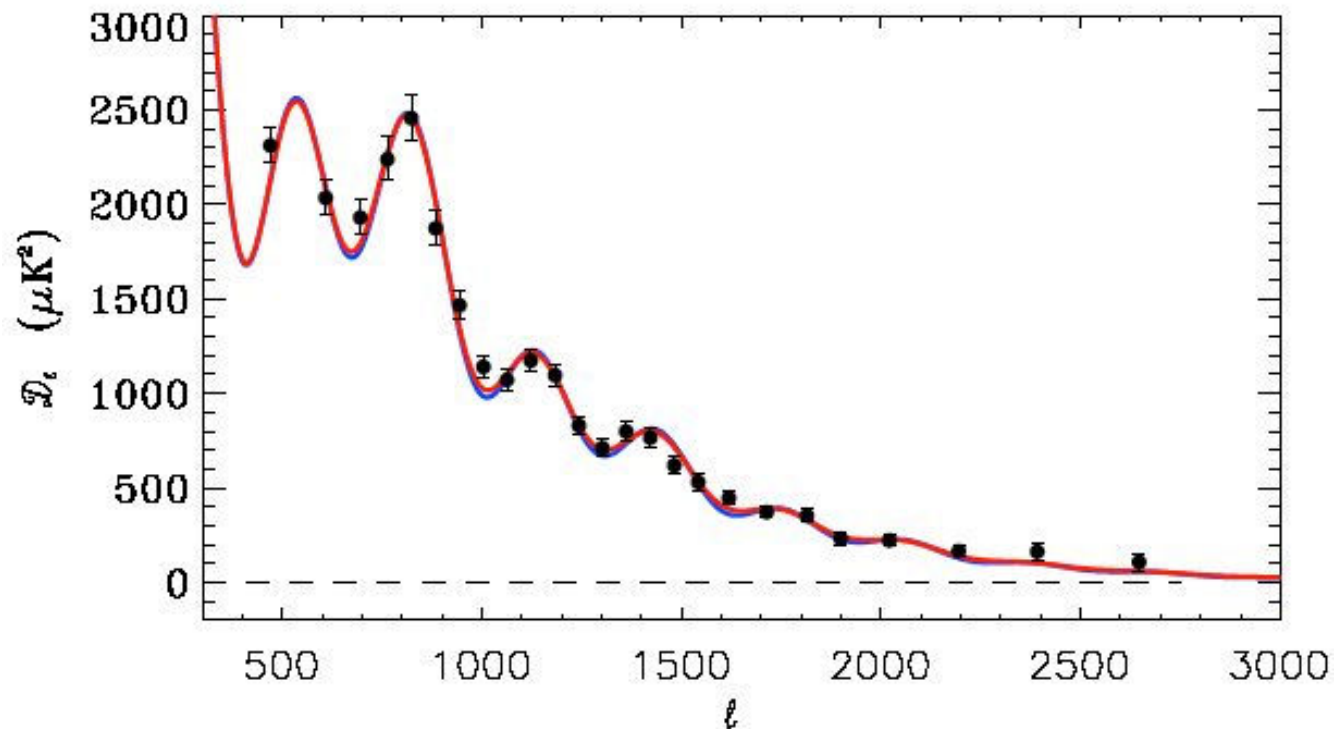


# Das Leistungsspektrum

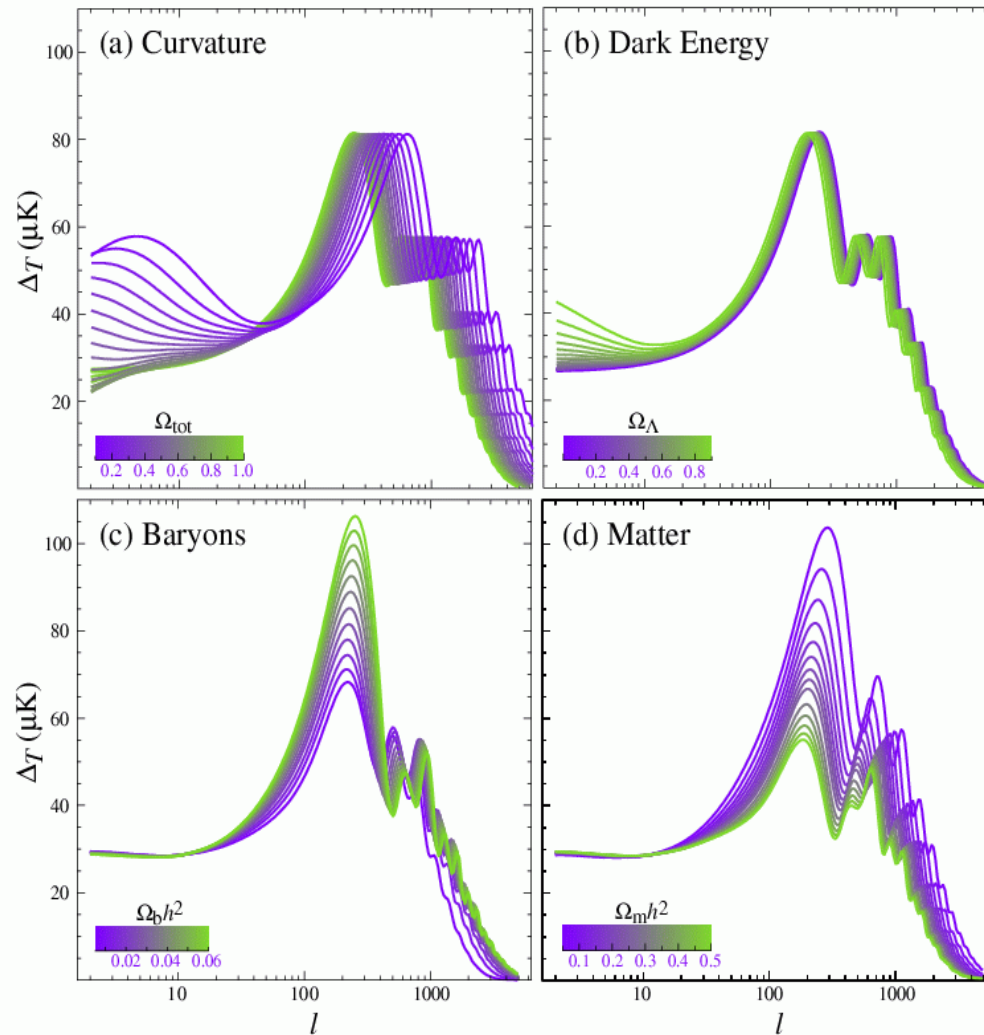


# Hohe Multipole

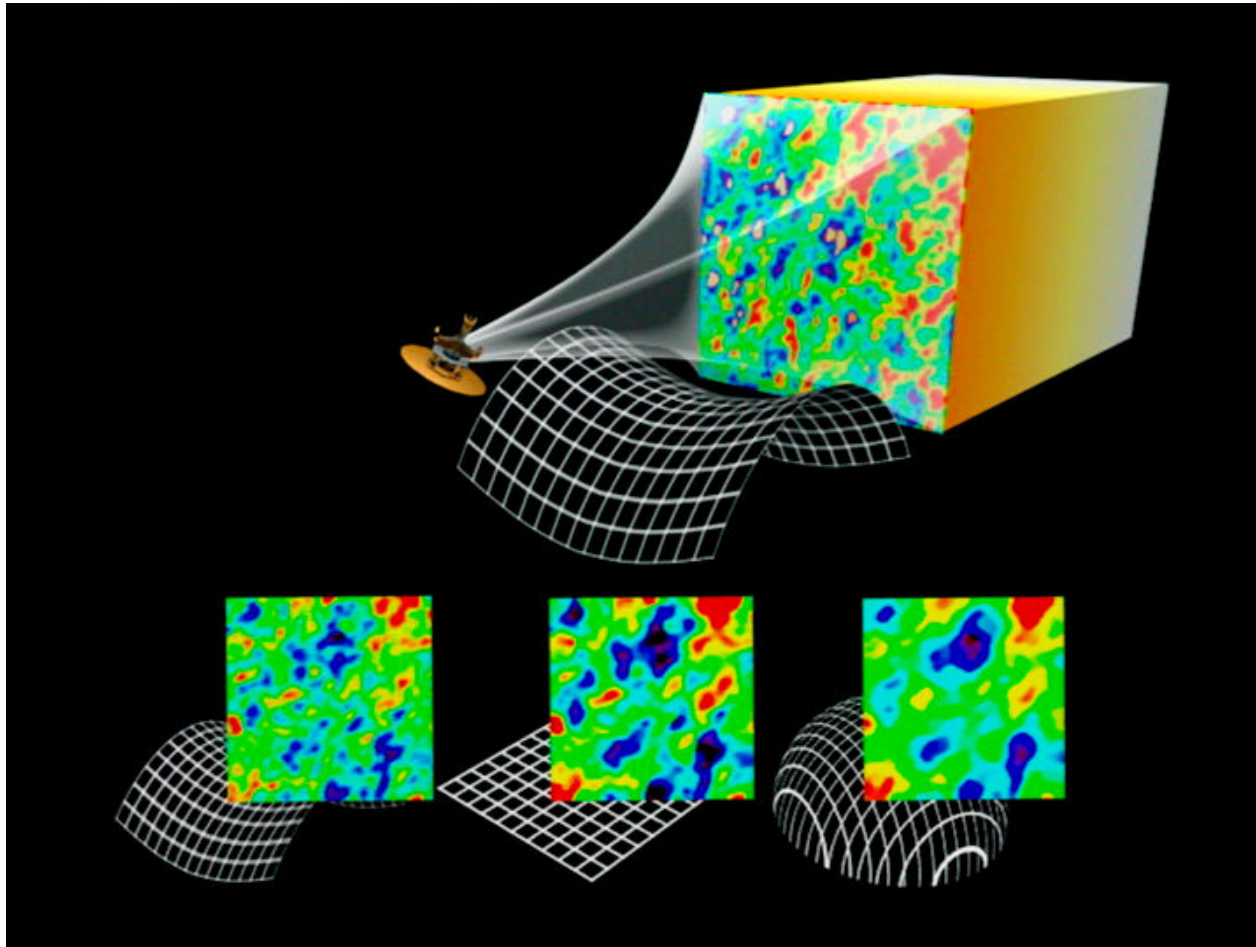
- ACBAR (Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver)



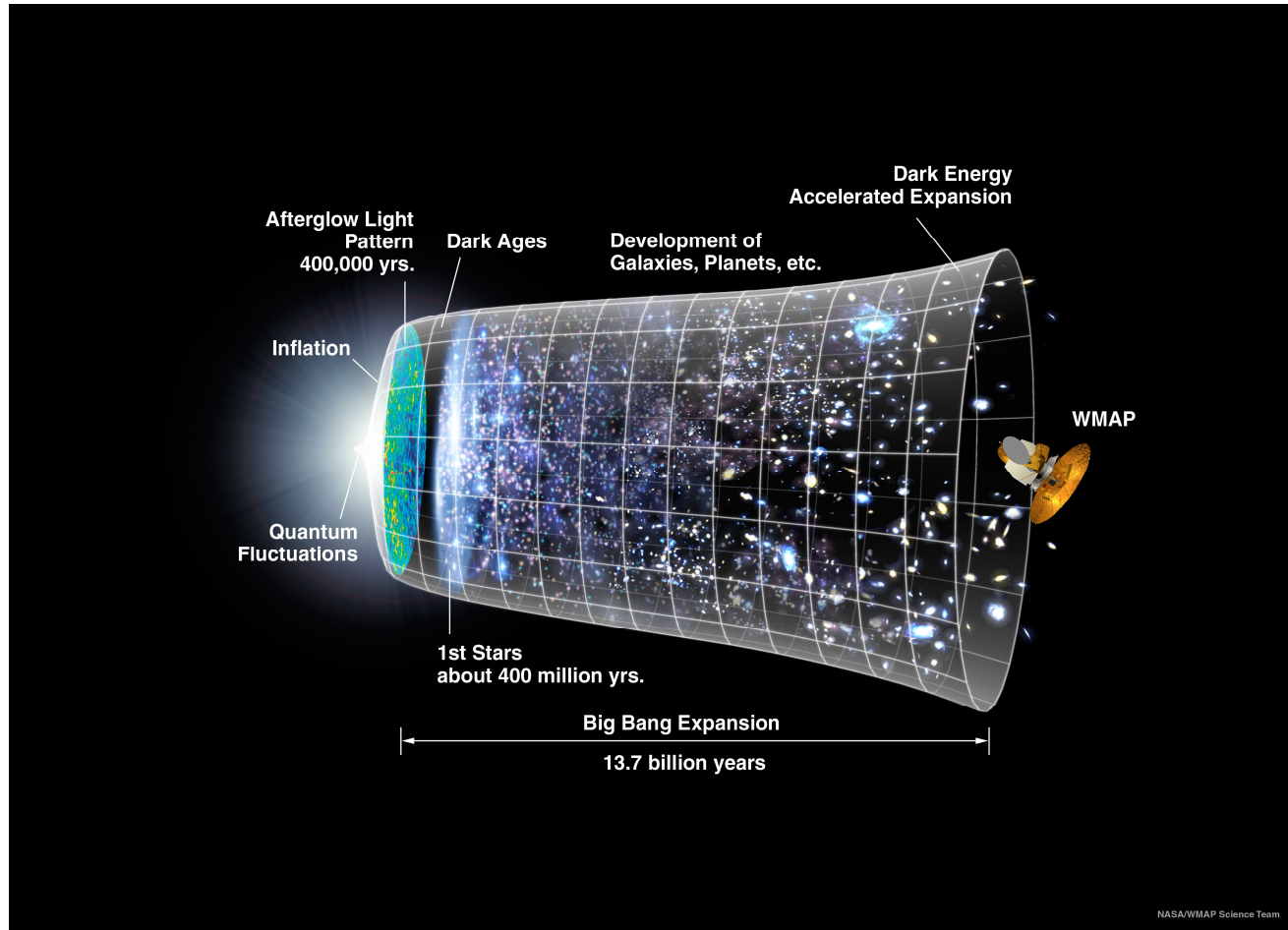




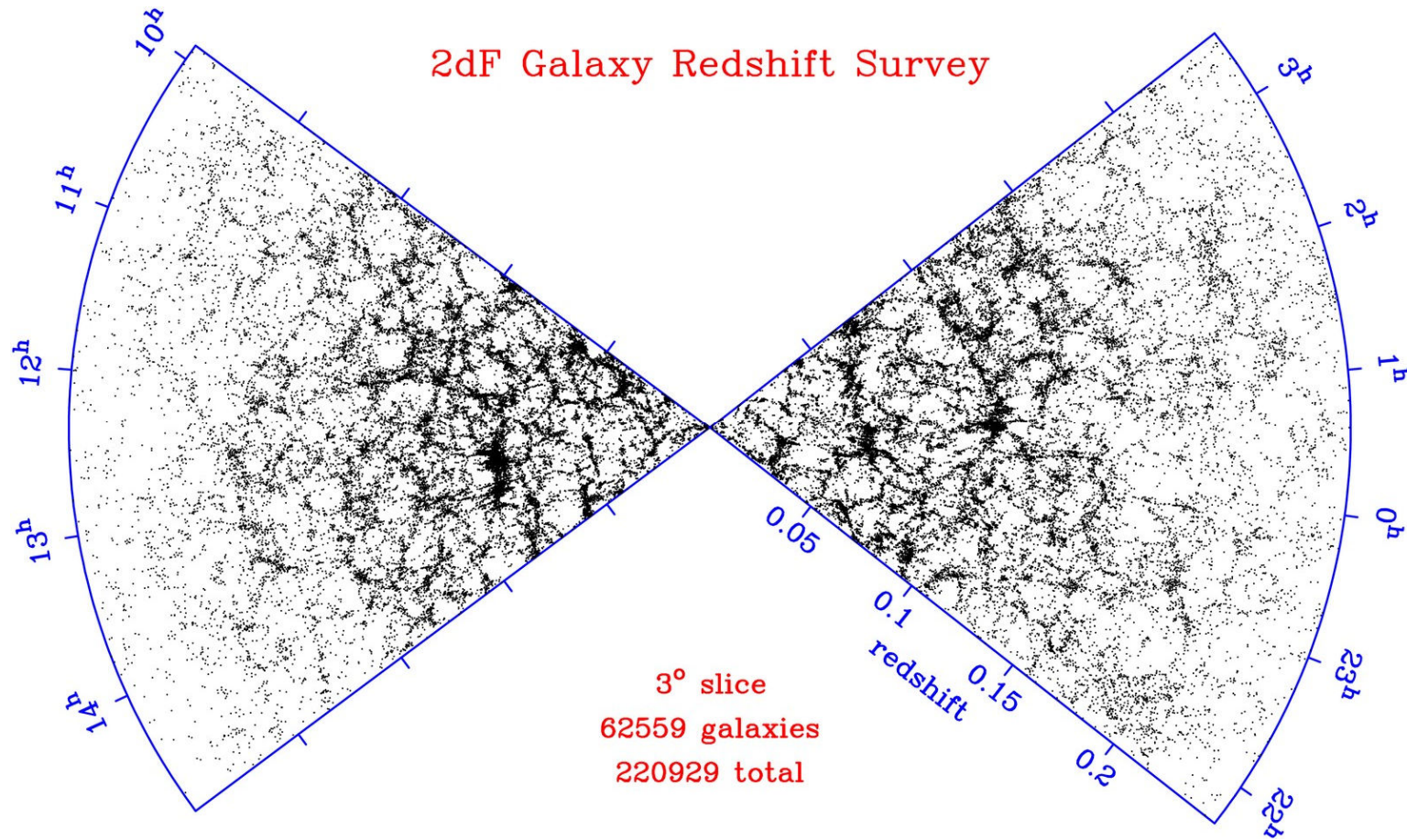
# Die Krümmung des Universums



# Die Entwicklung des Universums



# Strukturen im Universum



# Dunkle Materie

Rotationskurven von Galaxien

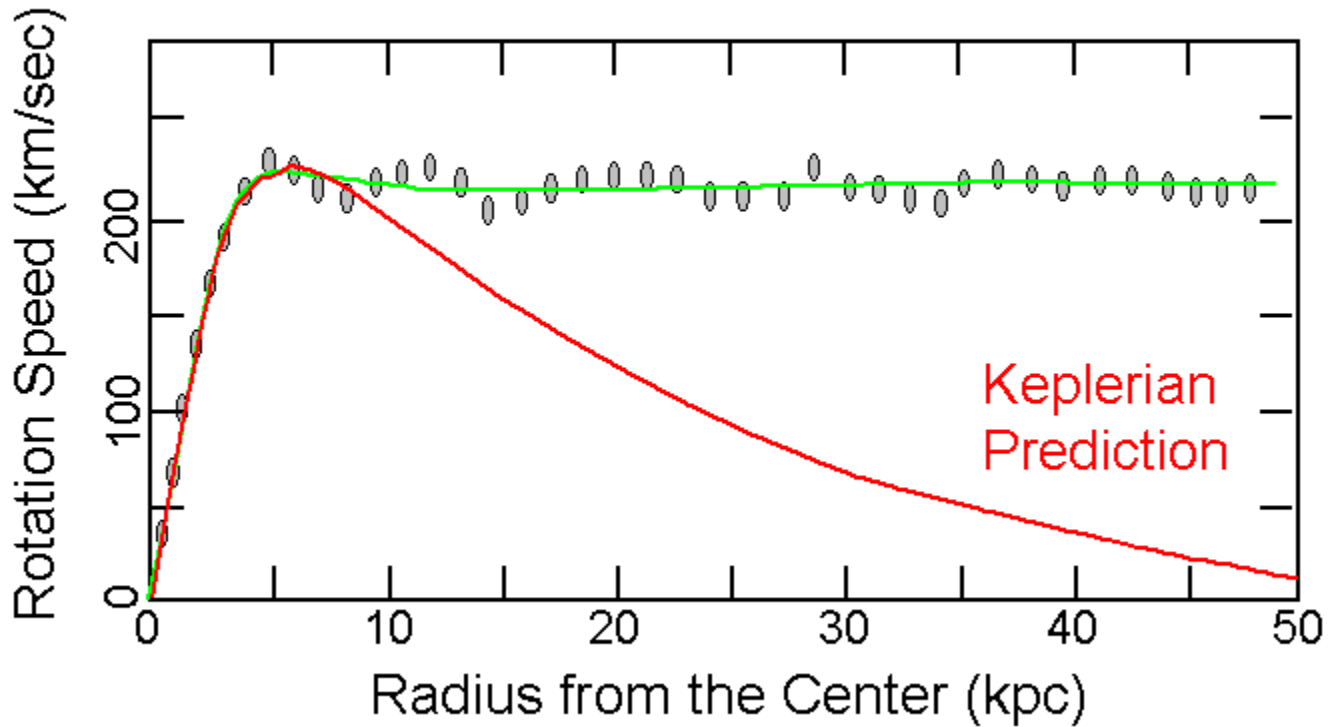
Elliptische Galaxien

Gravitationslinsen

Mikrowellen-Hintergrund

# Rotationskurven

## Observed vs. Predicted Keplerian

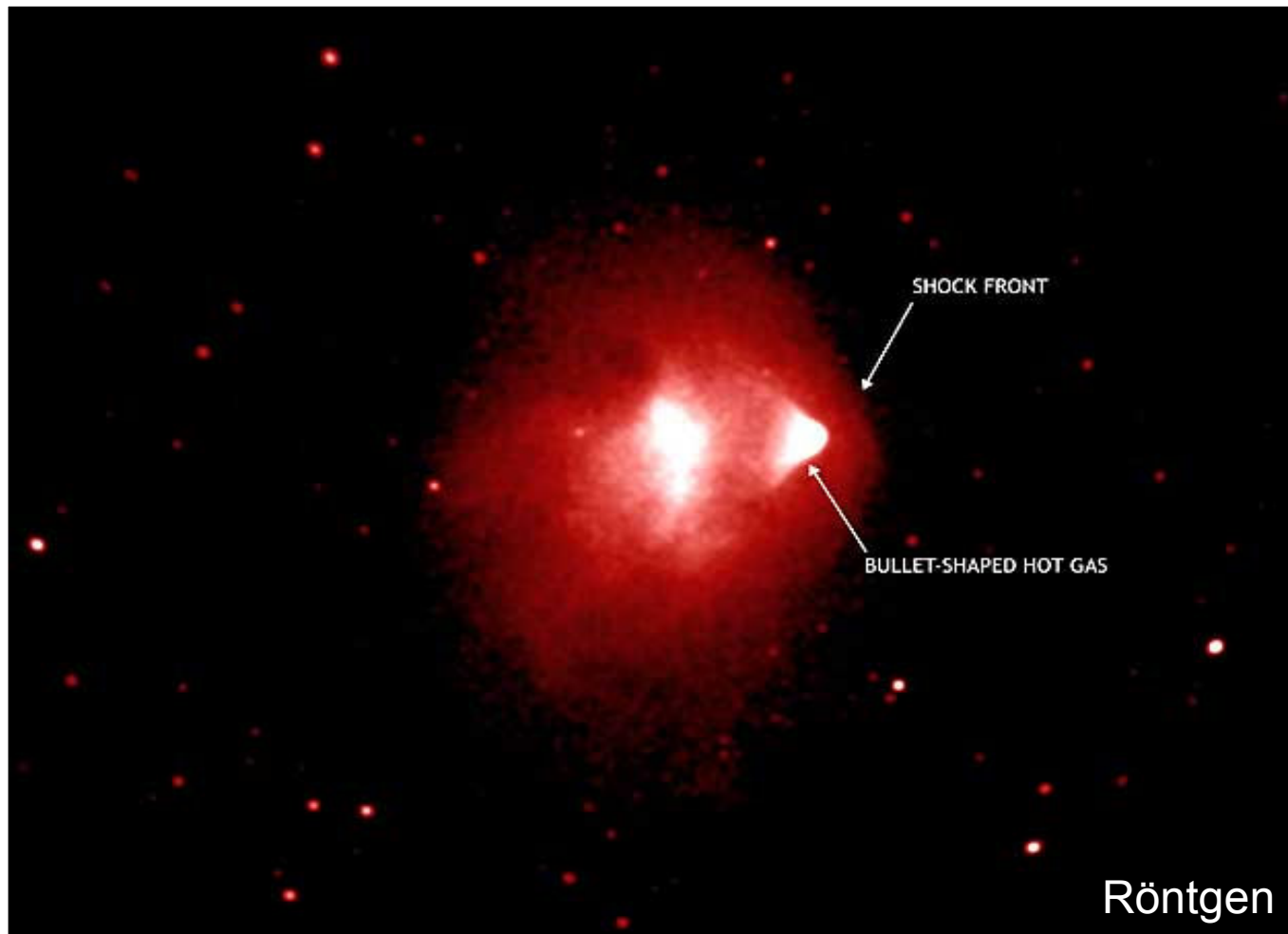




# Galaxien-Cluster 1E 0657-56

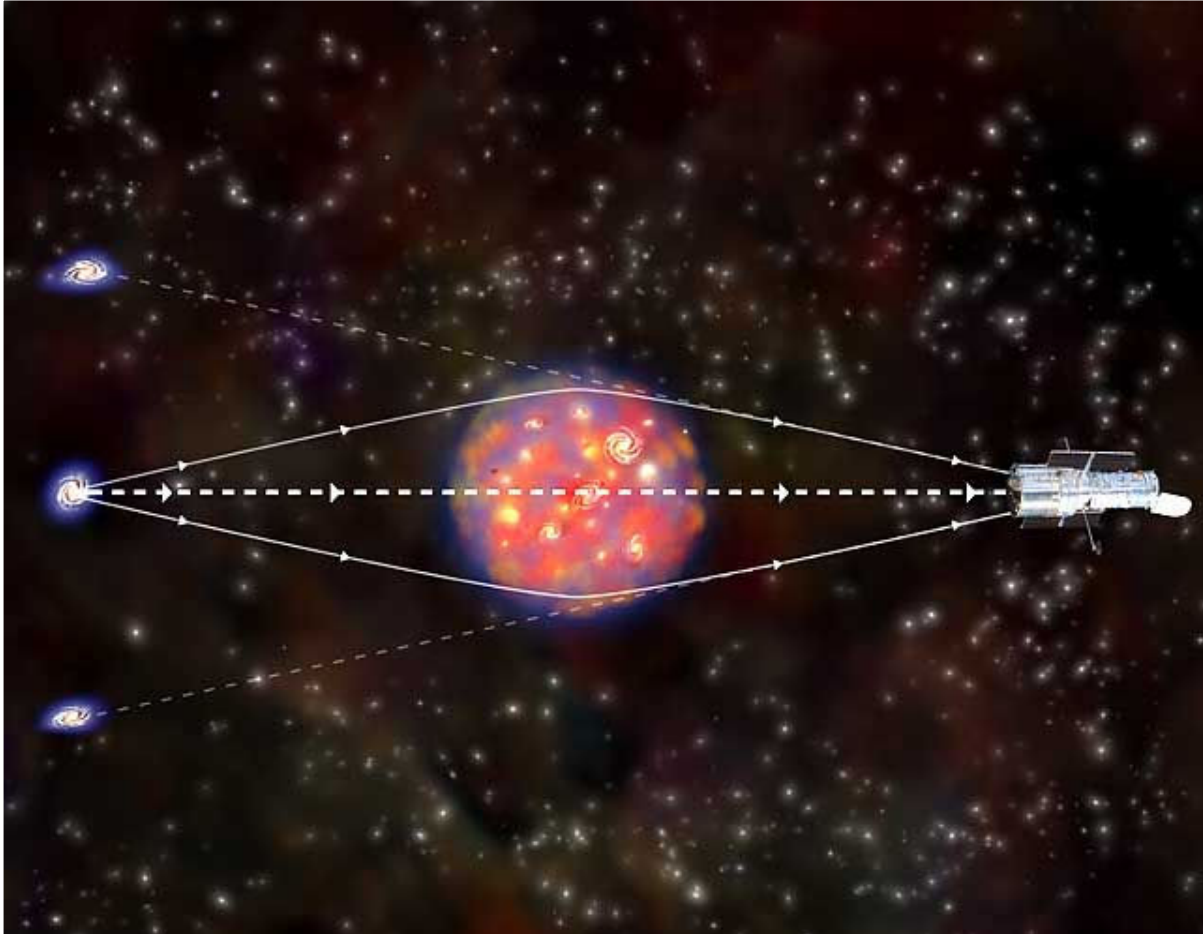


# Galaxien-Cluster 1E 0657-56





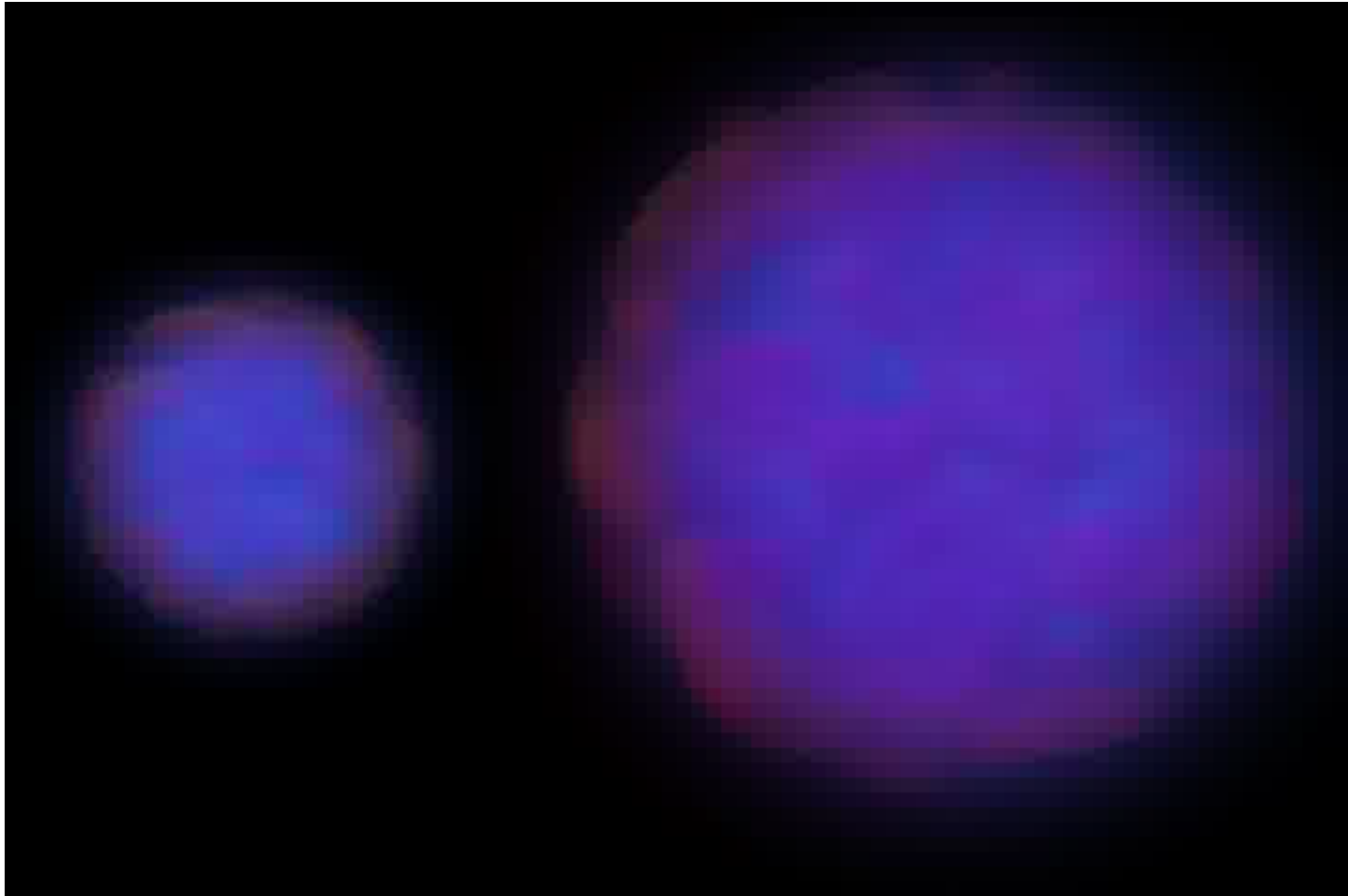
# Gravitationslinsen





Optisch + Röntgen + Dunkle Materie

# Was ist passiert?

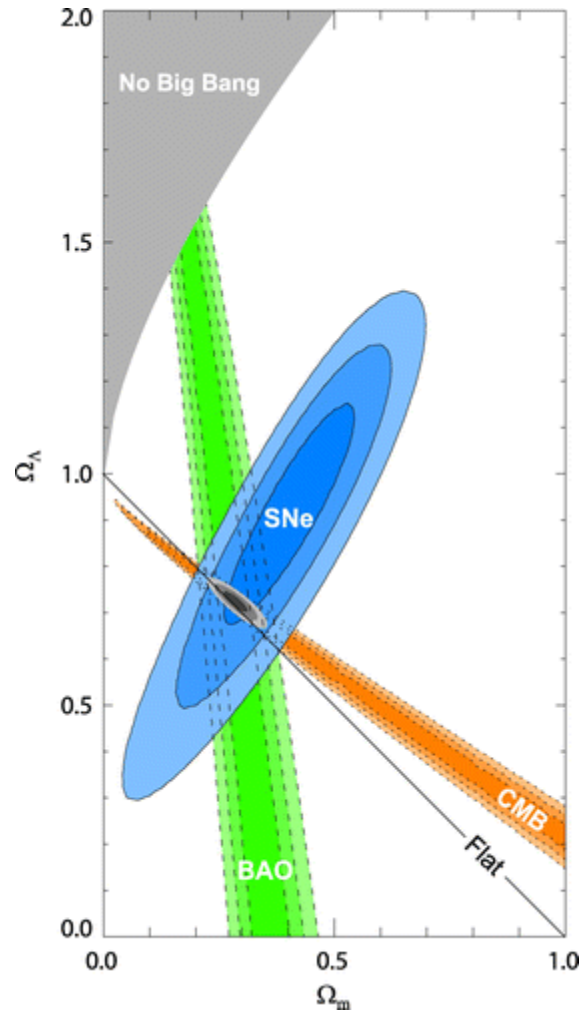


# Galaxien Cluster CL0024 17



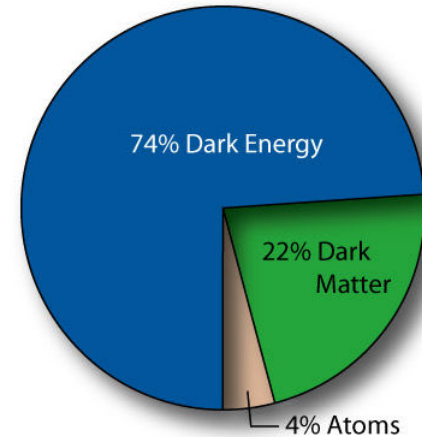


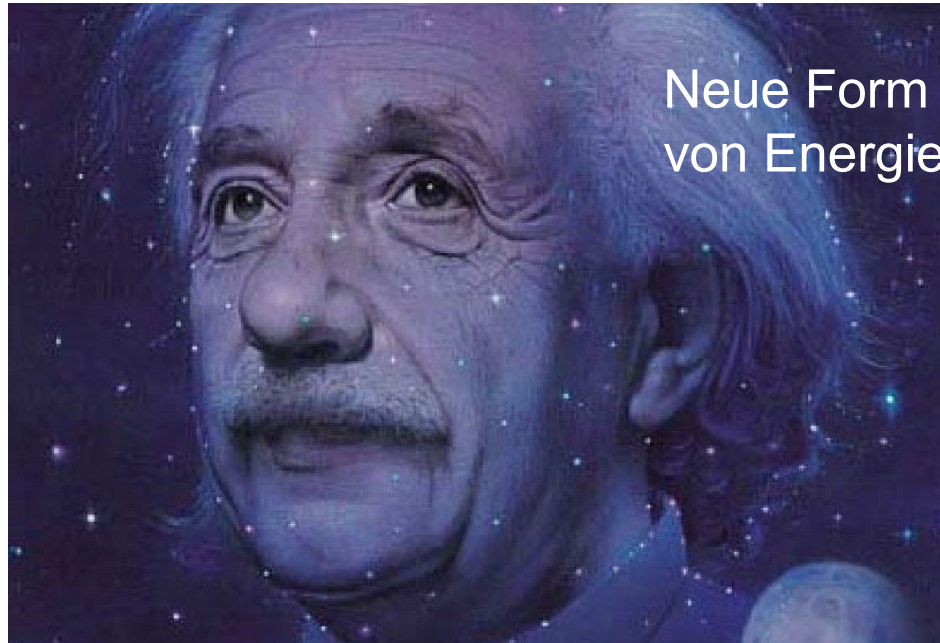
# Was wissen wir heute?



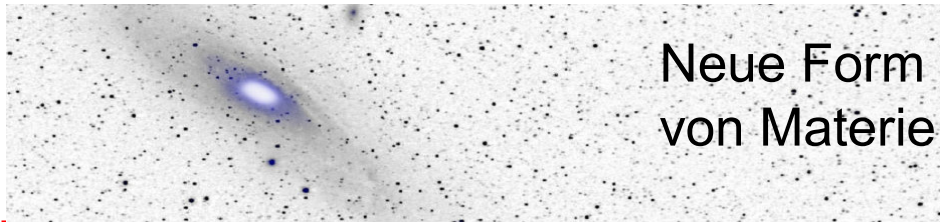
# Kosmologische Parameter

Gesamtenergiedichte	$1.003 \pm 0.015$
Materiedichte	$0.24 \pm 0.04$
Baryondichte	$0.042 \pm 0.004$
Vakuumenergiedichte	$0.76 \pm 0.05$
Neutrindichte	$< 0.014$
Alter des Universums	$13.7 \pm 0.2$ Gyr
Hubble-Parameter	$0.73 \pm 0.03$





Neue Form  
von Energie



Neue Form  
von Materie

Neutrinos

Materie

Sterne



ERLANGEN CENTRE  
FOR ASTROPARTICLE  
PHYSICS

# Zusammenfassung

Unser Universum ist aus einem Urknall entstanden

- Galaxienflucht
- Häufigkeit leichter Elemente
- Die Kosmische Hintergrundstrahlung

97% der Energiedichte des Universums sind unbekannt!