Karlsruher Institut für Technologie

Diese Veranstaltung wir aufgezeichnet und als Medien-Cast über KIT - ILIAS bereit gestellt

Nur zur KIT-internen vorlesungsbegleitenden Nutzung, Weitergabe & anderweitige Verwendung ist untersagt

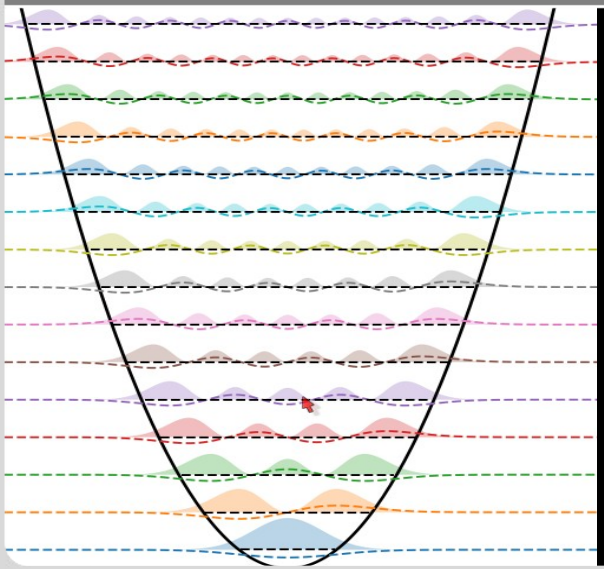
Vorlesung Moderne Physik (L)

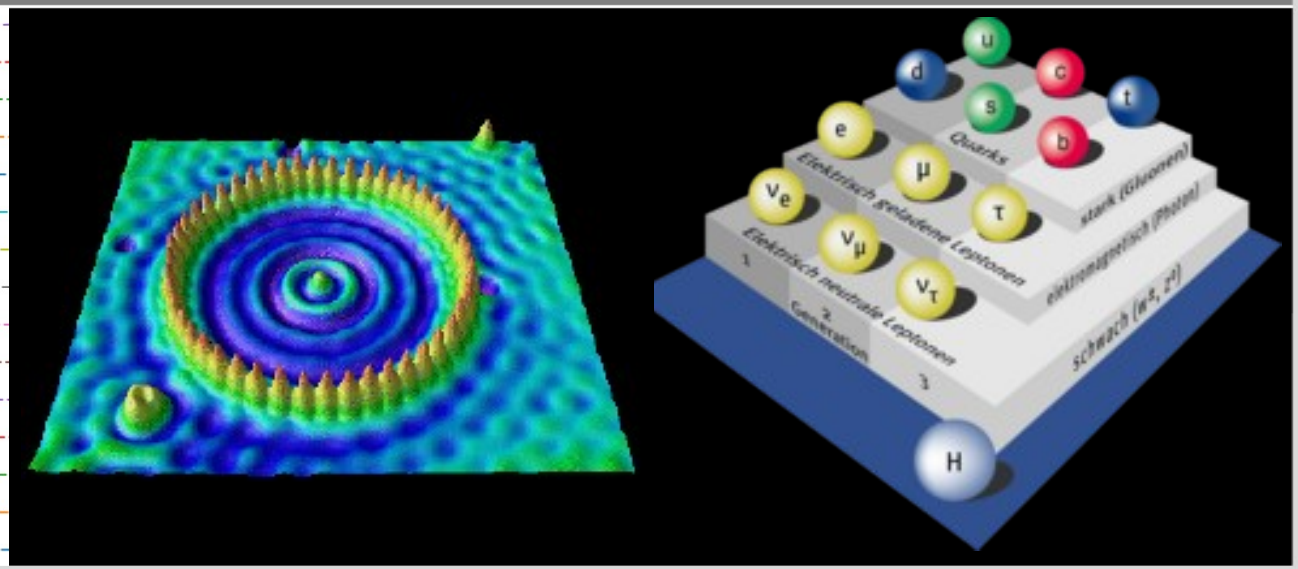
Kosmologie

Günter Quast

Fakultät für Physik
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

SS '20





Organisatorisches

Bitte beachten Sie die Ilias-Seite der Veranstaltung

https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?client_id=produktiv&target=crs_1105173

für Ankündigungen zu Prüfungen :

Hinweis: Termin für die Klausur Geo/Met: 5.08.2020. 9:00, R 3.1 und 6.1 im Physikhochhaus !
Nach Bestätigung der Vorleistung ist eine Anmeldung zur Prüfung über das Campus-System erforderlich.

Information zur Organisation der Klausur auf dieser ILIAS-Seite.

Hinweis 2: Eine Nachklausur ist für die erste oder zweite Woche im Oktober vorgesehen. Genauere Informationen an dieser Stelle und im Campus-System, sobald es möglich ist, Klausuren für den Herbst anzumelden.

Zusammenfassung Vorlesung 26

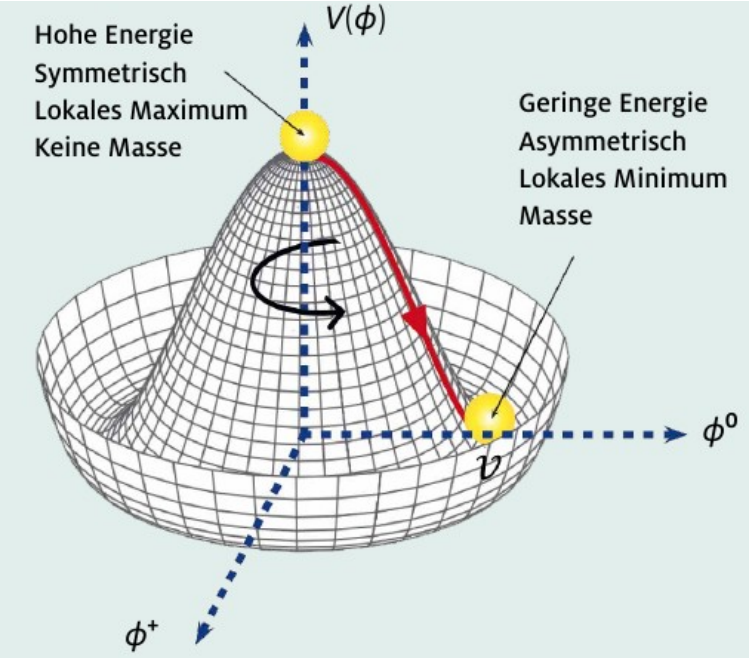
- **Standardmodell der Teilchenphysik** basiert auf "lokaler Eichinvarianz"
  Elektrodynamik kann vollständig aus diesem Prinzip hergeleitet werden !
  → Modell für schwache und starke Wechselwirkungen
  vereinfacht:
  el.-mag. Wechselwirkung: **eine** elektrische Ladung
  schwache Wechselwirkung: **zwei** schwache Ladungen (schwacher Isospin ↑↓)
  starke Wechselwirkung: **drei** (Farb-) Ladungen (r ↗ g ↖ b ↓)

Symmetriegruppe $U(1) \otimes SU(2)_L \otimes SU(3)$

- Problem:
  schwache Bosonen haben Masse,
  kann nicht „von Hand" hinzugefügt werden,
  weil Eichsymmetrie zerstört würde

Theoretische Lösung: Einführung eines skalaren, (komplexwertigen) Feldes, dessen Grundzustand die Eichsymmetrie bricht

„Higgs-Potential"



Inhaltsübersicht VL Moderne Physik

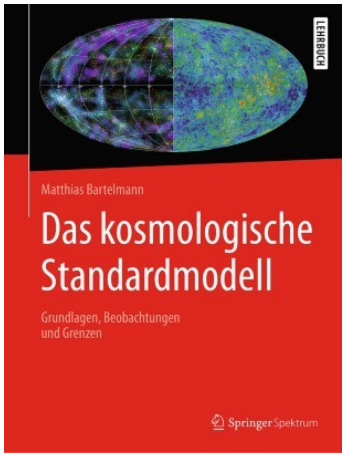
1) Einführung
2) Wiederholung wichtiger Konzepte der klassischen Physik
3) Spezielle Relativitätstheorie
4) Schlüsselexperimente und Grundlagen der Quantenphysik
5) Die Schrödingergleichung
6) Anwendungen der Schrödingergleichung
7) Das Wasserstoff-Atom
8) Atome mit mehreren Elektronen
9) Wechselwirkung von Licht und Materie
10) Grundlagen der Festkörperphysik
11) Kernphysik
12) Teilchenphysik
13) Kosmologie

Überblick

- Weltbilder
  - Von der Antike zur Neuzeit
  - Entfernungen
  - Newtons Universum
  - Expansion
  - Einsteins Universum

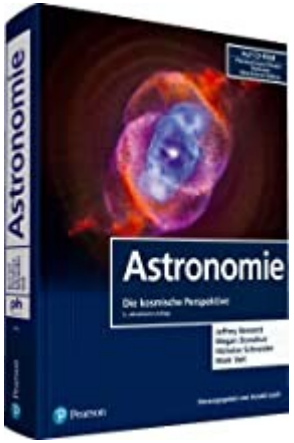
- Dunkle Materie, dunkle Energie
  und
  die Verbindung zur Teilchenphysik

Kosmologie: Literatur

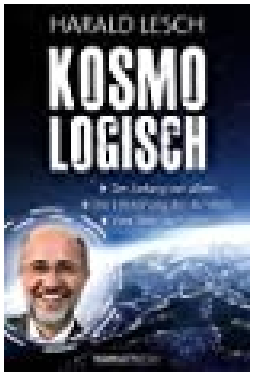


- M. Bartelmann, *Das Kosmologische Standardmodell*, Springer Spektrum, 2019

  als eBook über KIT-Bibliothek



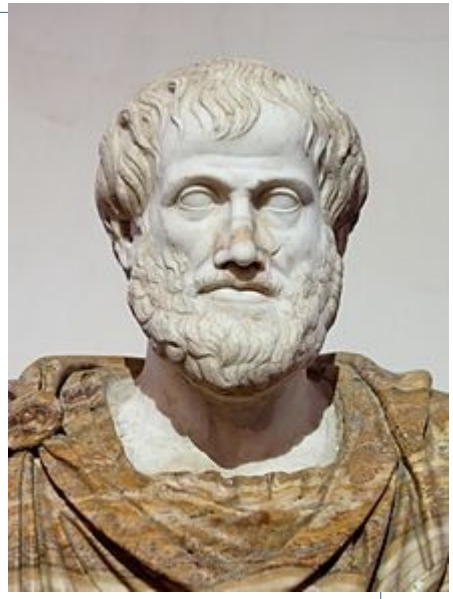
- J. Bennett, M. Donahue et al., *Astronomie: Die kosmische Perspektive* Pearson Studium – Physik, 2009



- H. Lesch, *Kosmologisch: Der Anfang von Allem, Die Entstehung des Himmels, Vom Stein zum Leben* Verlag Komplett-Media GmbH, München (2017)

Weltbilder

Kosmologie des Aristoteles (~ 350 v. Chr.)



Die Elemente des Aristoteles:

- 4 irdische Elemente: **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

Konzept von Kraft und Bewegung:

  - Bewegungen, die von der natürlichen Bewegung abweichen, müssen kontinuierlich von einer Kraft aufrecht erhalten werden.
- 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 Himmelssphäre

→ Himmelskörper können nicht aus den irdischen Elementen aufgebaut sein: **Äther** als 5. Element

- **Erdkugel im Zentrum des Universums, unvergänglicher Himmel**
- **Begrenzte / immer währende Bewegung auf der Erde / im Himmel spiegelt Unvollkommenheit / Vollkommenheit der Erde / des Himmels wider**

Antikes Weltbild

Ptolemäus (~100 n.Chr) setzt das Weltbild für die nächsten 1500 Jahre

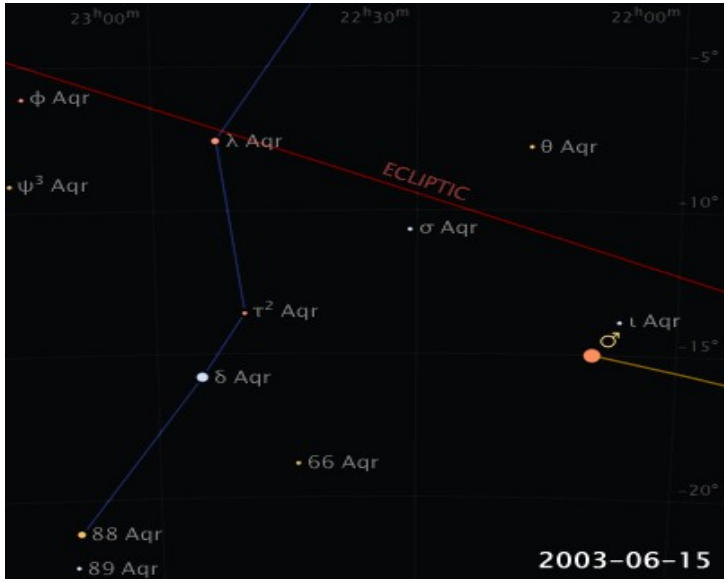
- Fasst astronomisches Wissen seiner Zeit zusammen
- Erweiterung und Verbesserung des Modells von Aristoteles unter teilweise Aufgabe seiner Einfachheit

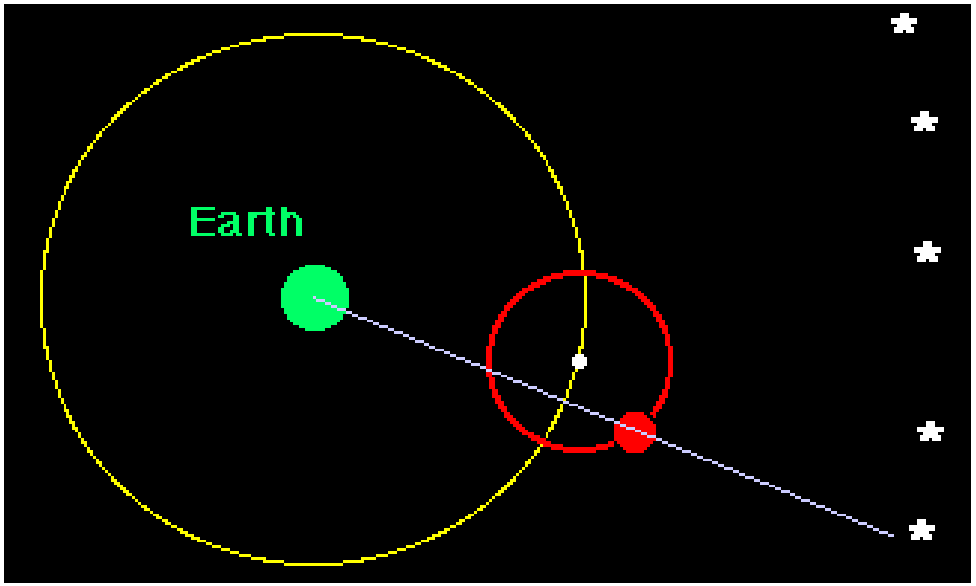
Antikes Weltbild

Ptolemäus (~100 n.Chr) setzt das Weltbild für die nächsten 1500 Jahre

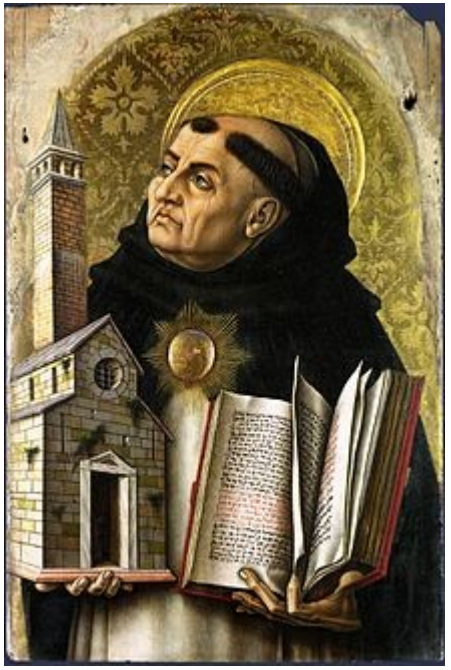
- Fasst astronomisches Wissen seiner Zeit zusammen
- Erweiterung und Verbesserung des Modells von Aristoteles unter teilweise Aufgabe seiner Einfachheit

Beschreibung der Bewegung der Mars erfordert Einführung von“Epizyklen“





Antikes Weltbild



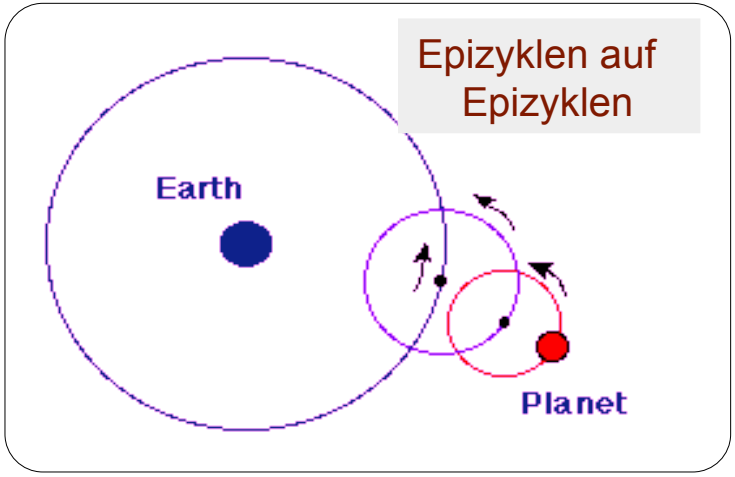
Thomas von Aquin (1225/26 – 1274)

übernimmt Ptolemäisches Weltbild als Grundstein der christlichen Doktrin

Auffassung, dass alles, was prinzipiell entdeckt werden kann, schon entdeckt worden ist.

Aber: Ptolemäisches Weltbild hat Probleme

- Modell zu ungenau, um Beobachtungen zu erklären
  (z.B. ungleichmäßige Bewegungen 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 ???



Kopernikanische Revolution (~1500 n.Chr.)

- Wiederentdeckung der griechischen Philosophie
- Größe und Gestalt der Erde bekannt

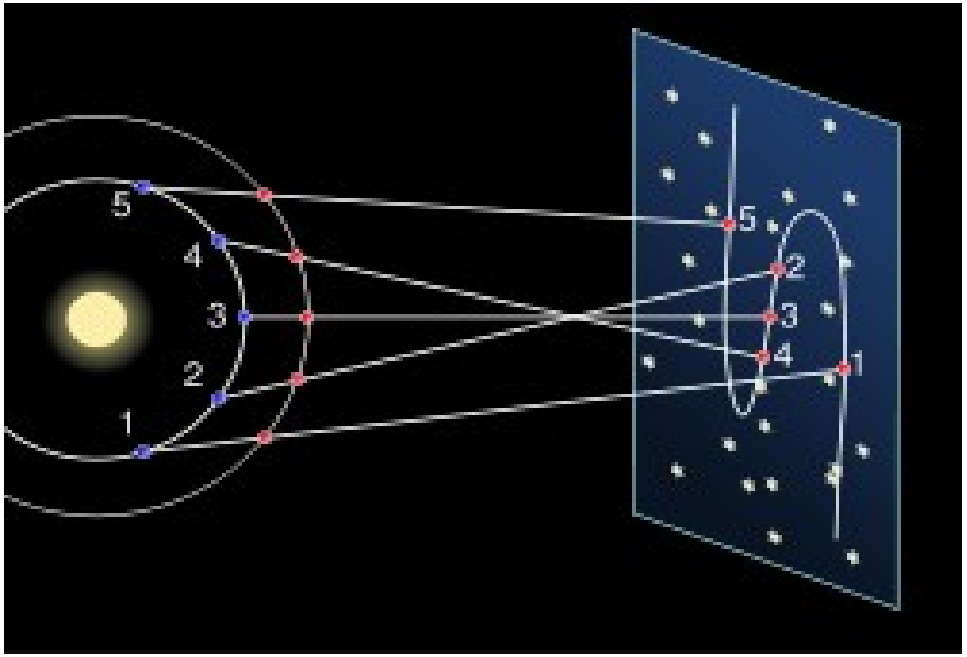
Nikolaus Kopernikus
De revolutionibus orbium coelestrium

Heliozentrisches Weltbild mit rotierender Erde

Auf dem Weg zum modernen 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



Aber:

- entgegen christlicher Doktrin
- als neues Modell noch weniger genau als das Ptolemäische

Auf dem Weg zum modernen Weltbild

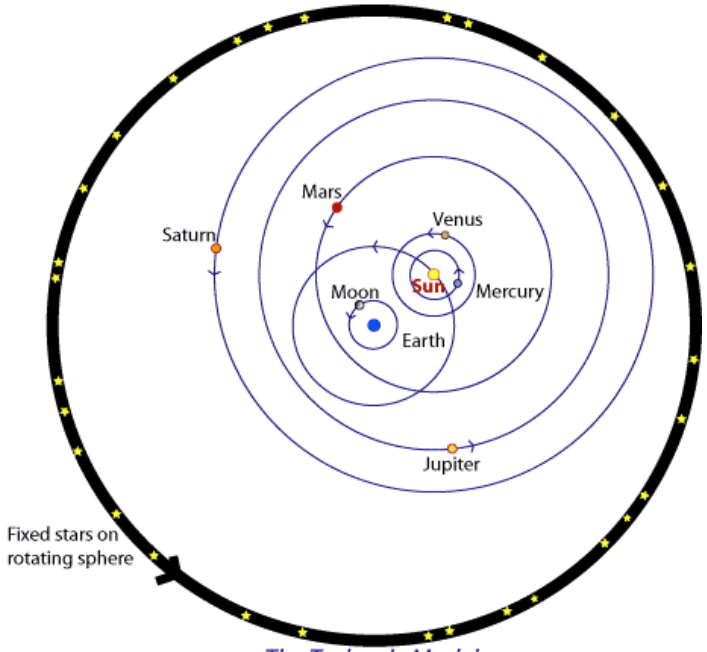
Weiterer Fortschritte:

- Bessere Daten zur Unterstützung des neuen Modells
  - Tycho Brahe
- Verbesserung durch Johannes Kepler
- „Vermarktung“ des neuen Weltmodells
  - Galileo Galilei
- ... und die Zusammenfassung durch

  Isaac Newton

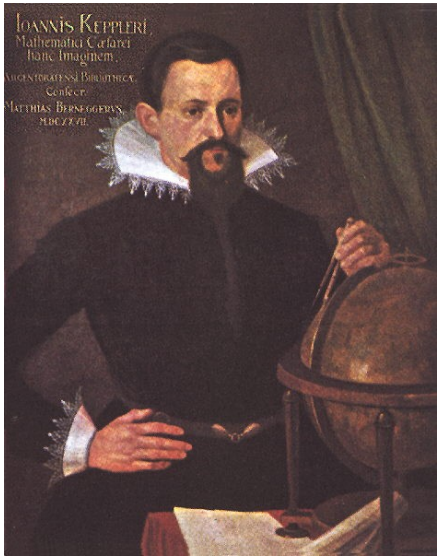
Tycho Brahe (1546-1601)

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



The Tychonic Model

Johannes Kepler (1571-1630)

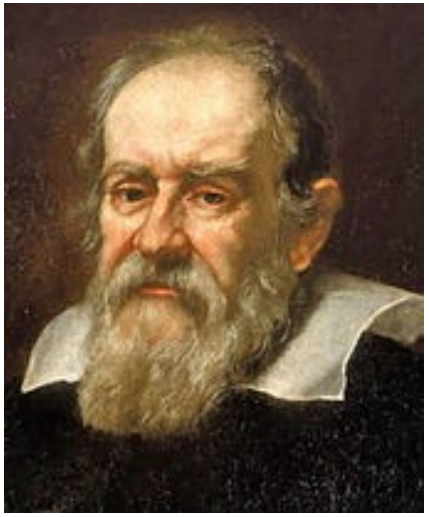


- Tycho Brahes Nachfolger in Prag
- Er fand heraus, dass
  - weder das Ptolemäische Modell
  - noch das Model von Tycho Brahe
  - noch das heliozentrische Modell die Bobachtungen mit hinreichender Genauigkeit reproduzieren können

Vorschlag

- Planeten bewegen sich auf Ellipsen, und nicht auf Kreisen

Galileo Galilei (1564-1642)

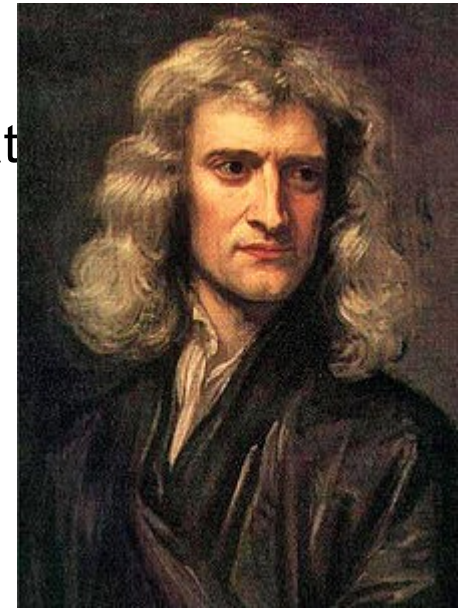


- war nicht der Erfinder des Fernrohrs
- war der Erste, der es gen Himmel richtete
- entwickelte Test für die Aristotelische Physik und verwarf sie
- Berühmt für seinen Ketzerei-Prozess 1633
- vom Vatikan rehabilitiert 1980 !

astronomische Entdeckungen

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

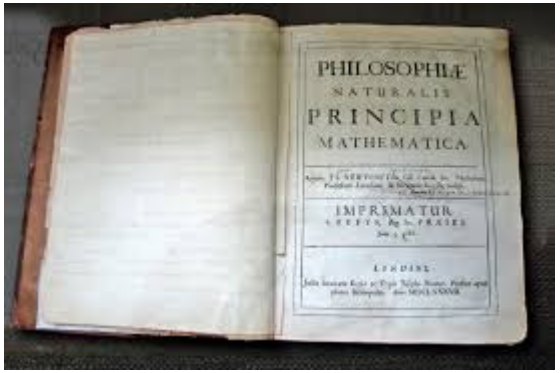
Auf dem Weg zum modernen Weltbild



Isaac Newton (1643-1727)

- Grundlegende Beiträge zur Optik, Physik und Mathemat
  - Erfinder der Infinitesimalrechung (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

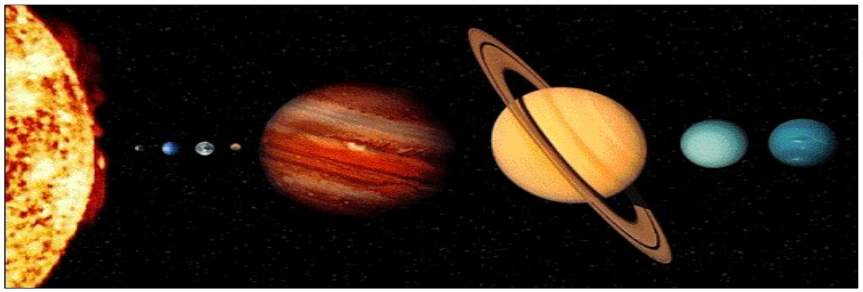
Vereinigung der „irdischen“ und „himmlischen“ Mechanik



Newtons PRINCIPIA

Newtons 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.

Entfernungen

Wie messen wir Entfernungen?

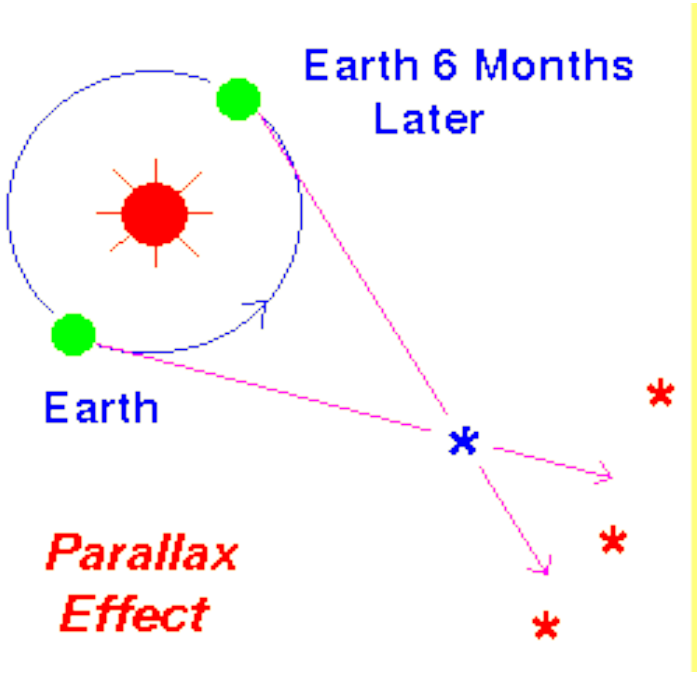
- Parallaxen
- Über die Helligkeit von Objekten:
  Vergleich mit „Standard-Kerzen“

Messen von Entfernungen im Kosmos

Parallaxen

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

  $d = D \cdot \Theta$
  - Gilt für kleine Winkel
  - Θ wird in rad gemessen

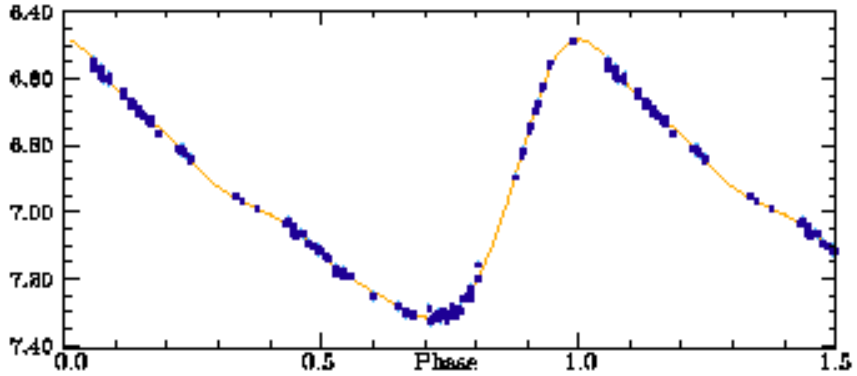


1 Parallaxensekunde = 1 Parsec = 1 pc ≈ 3.26 Ly

Messen von Entfernungen im Kosmos

Ceipheiden

Pulsierende Sterne



- Ändern Helligkeit mit der Pulsationsperiode

- $M = -2{,}81 \cdot \log(P/\text{Tage}) - 1{,}43\,.M = -2{,}81 \cdot \log(P/\text{Tage}) - 1{,}43\,.$

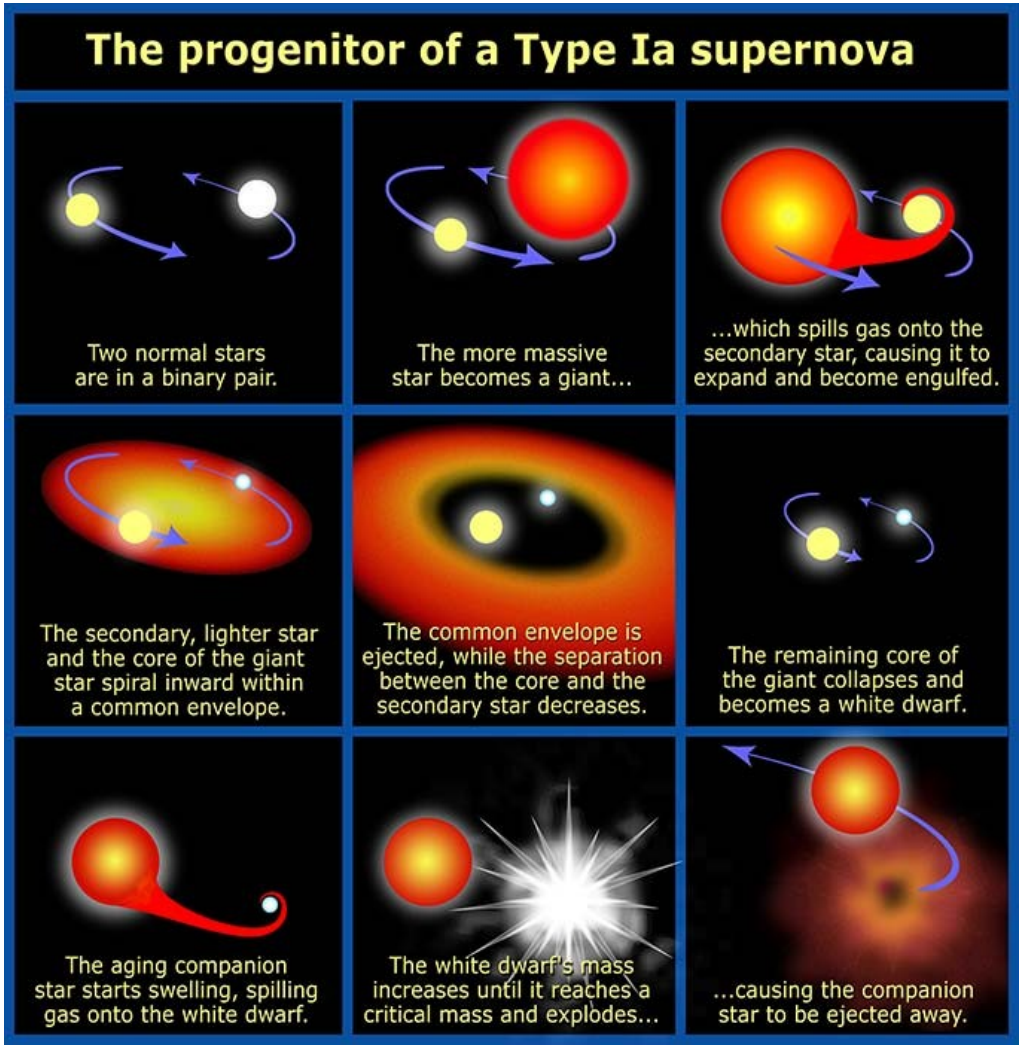
- Häufig und hell: sichtbar in nahen Galaxien

- Gut bis 20 Mpc

Supernovae vom Typ Ia

- Explodierender weißer Zwerg
- Sehr leuchtstark, können in großer Entfernung beobachtet werden
- Gut bis ~1 Gpc

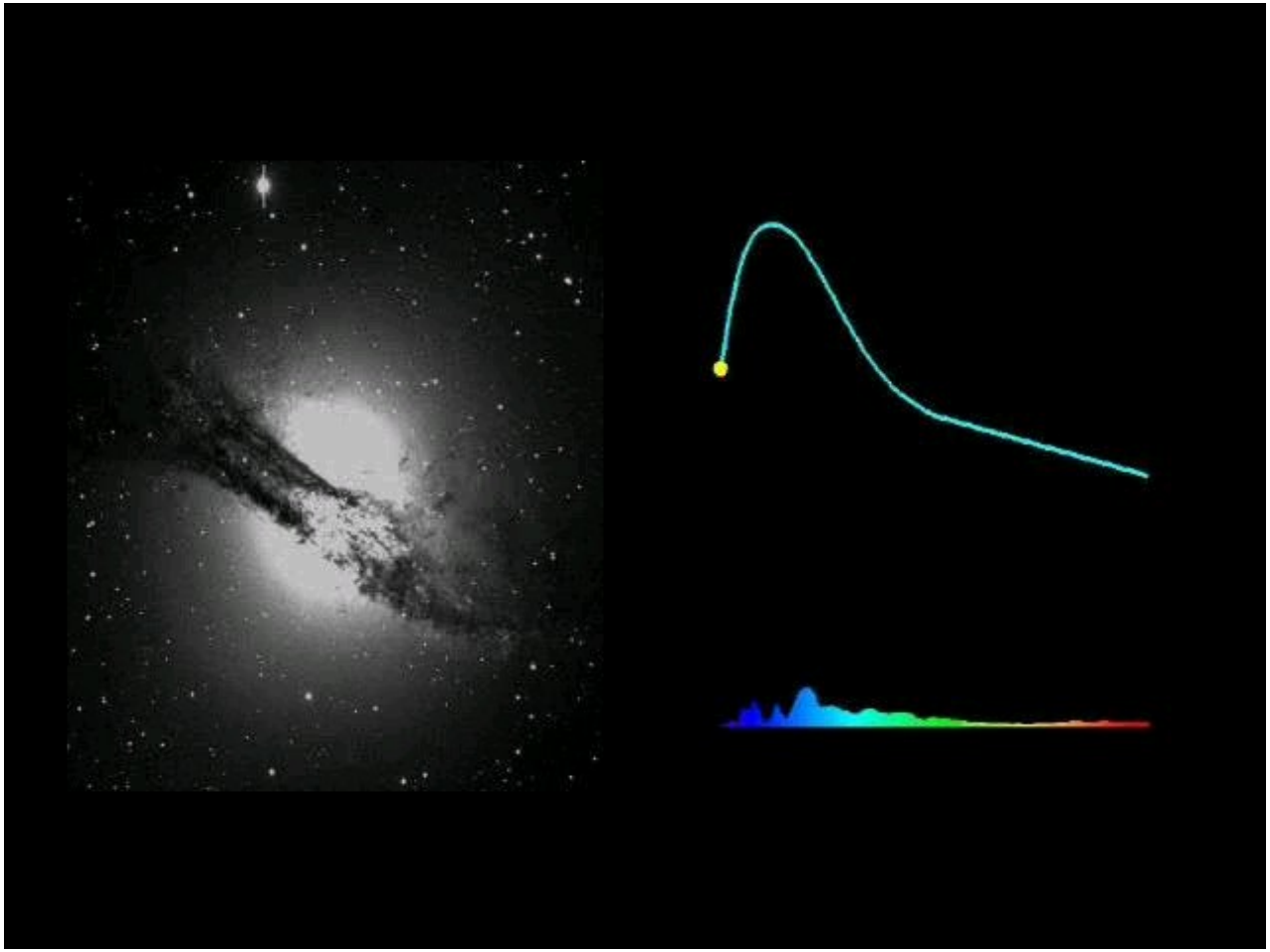
Was ist eine Supernova vom Typ 1a?



Messen von Entfernungen im Kosmos

- **Helligkeitsverlauf** und
- **Wellenlängenspektrum**

als Identifikationsmerkmale



Helligkeit
gegen Zeit
(ca. 50 Tage gezeigt)

Spektrum

Newtons Universum

Newtons Universum

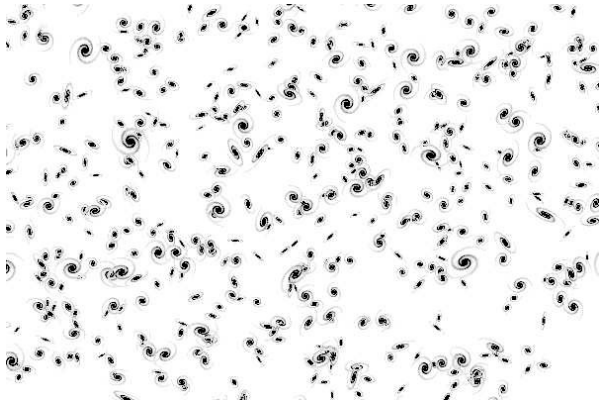
Um einen Kollaps zu verhindern
muss das Universum

- homogen sein
- isotrop sein
- unendlich groß sein
- kein Zentrum haben
- unendlich in der Zeit sein
  - war schon immer
  - wird immer sein

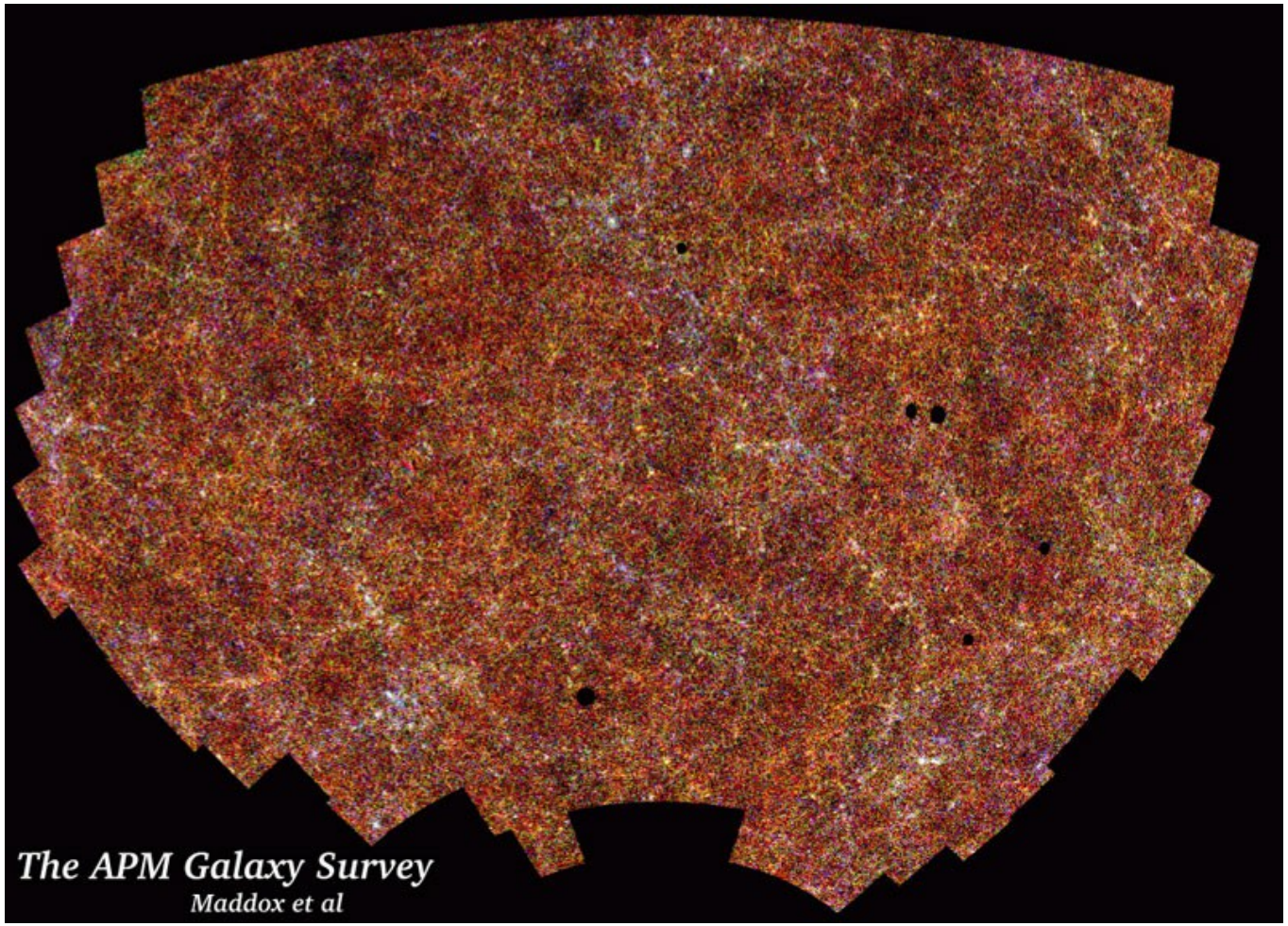
Das perfekte kosmologische Prinzip:
homogen, isotrop, zeitlich unveränderlich

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



Gilt das Kosmologische Prinzip?



http://www.starobserver.org/ap071007/

zwei Millionen Galaxien

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

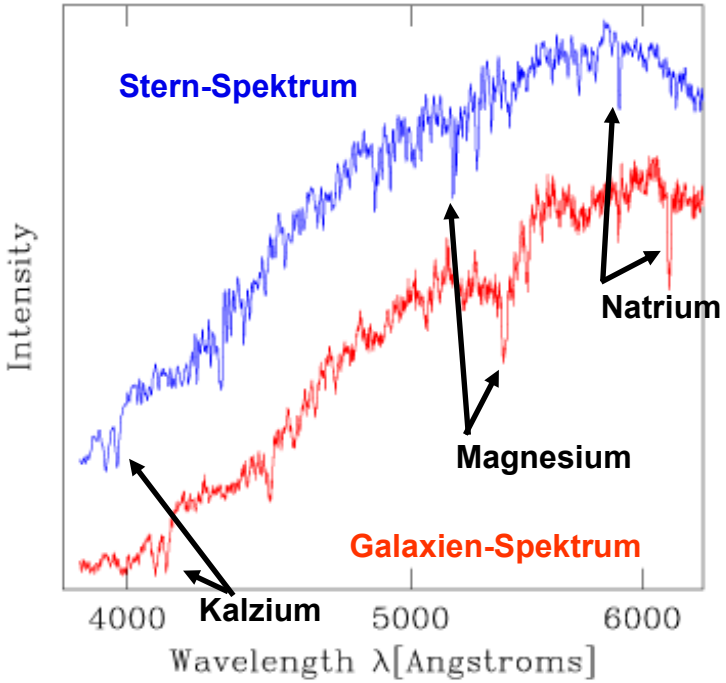
Anmerkung:

Für das Urknall-Modell sind alle Bedingungen erfüllt.

Expansion des Weltalls

Rotverschiebung

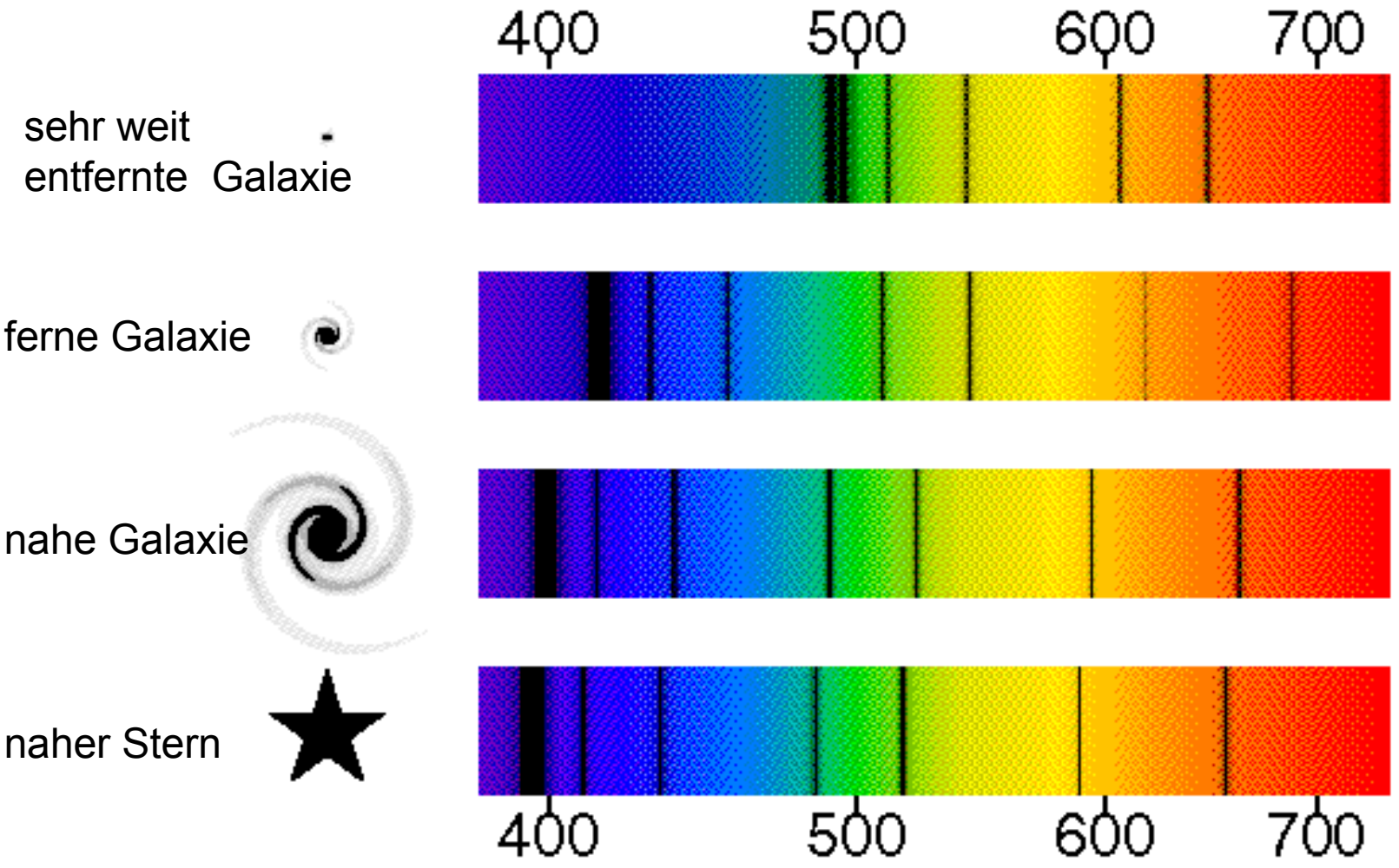
Beobachtung: Spektrallinien im Sternenlicht sind ins Rote verschoben



Schlussfolgerung:

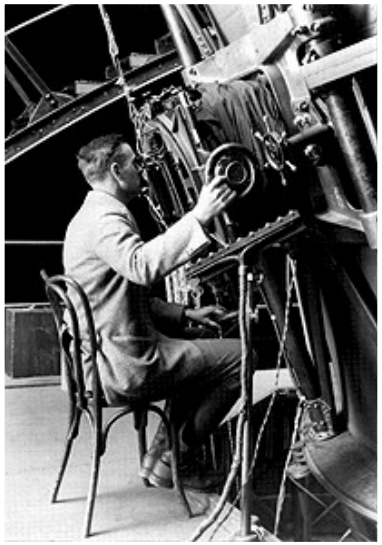
Galaxien bewegen sich von uns weg !

Rotverschiebung



Der Raum dehnt sich aus!

1920: Die Entdeckung der Galaxienflucht durch Edwin Hubble



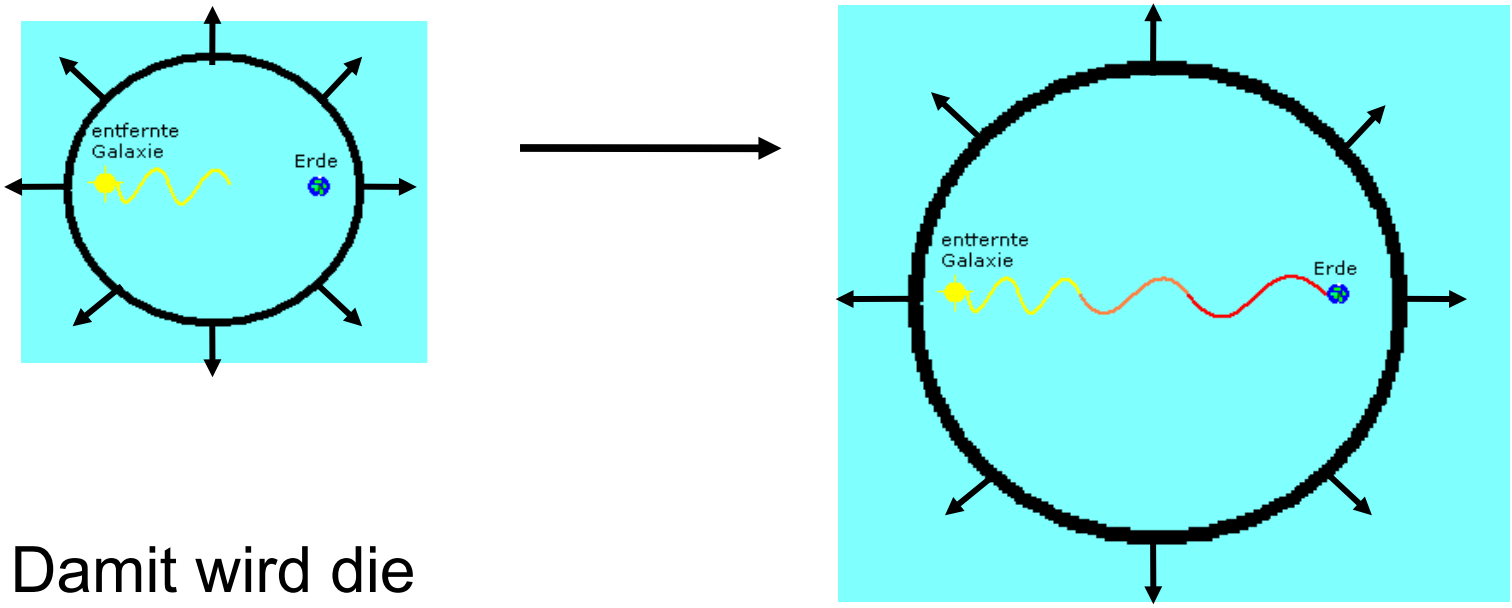
Das Hubble-Diagramm

Fluchtgeschwindigkeit ist proportional zum Abstand

Kosmologische Rotverschiebung

- Während ein Photon von einer entfernten Quelle zum Beobachter fliegt, dehnt sich das Universum von einer Größe

R_{damals} zu R_{jetzt} aus



- Damit wird die Wellenlänge λ des Photons größer:

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

Kosmologische Rotverschiebung (2)

- Definition der Rotverschiebung

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

- Für die kosmologische Rotverschiebung

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

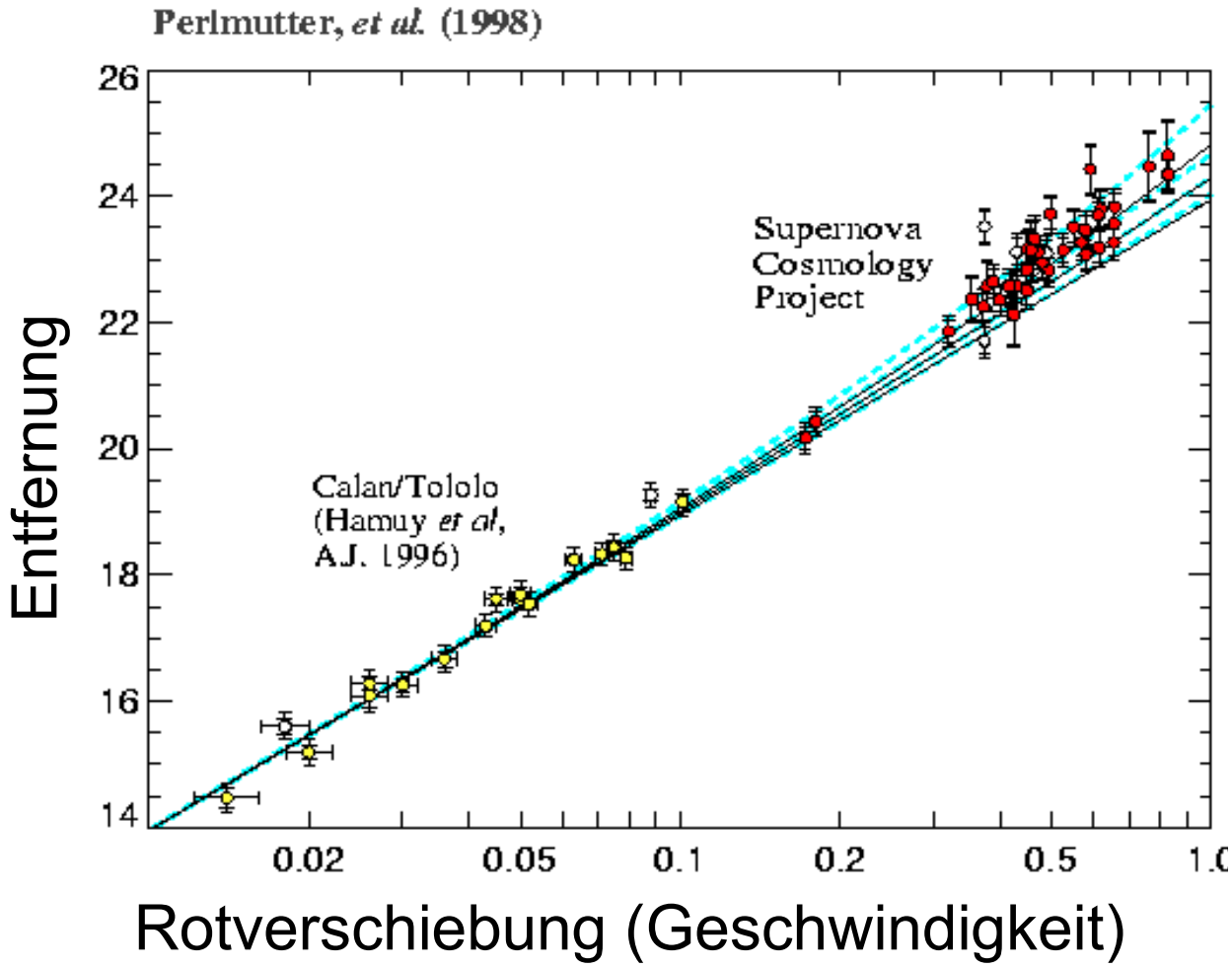
Größte bisher gesehene Rotverschiebung: z=6,4

(Licht war über $12 \cdot 10^9$ Jahre unterwegs)

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 hatte 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

Das Hubble-Diagramm heute



Hubble-Konstante $H_0 = 72\,\mathrm{km\,s^{-1}/Mpc}$

Erkenntnis:

- Das Weltall ist dynamisch und expandiert (sogar beschleunigt)!
- Das Weltall war früher kleiner als heute

- Das Weltall ist aus einer heißen Phase entstanden

dem Urknall

Einsteins Universum

Allgemeine Relativitätstheorie

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

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

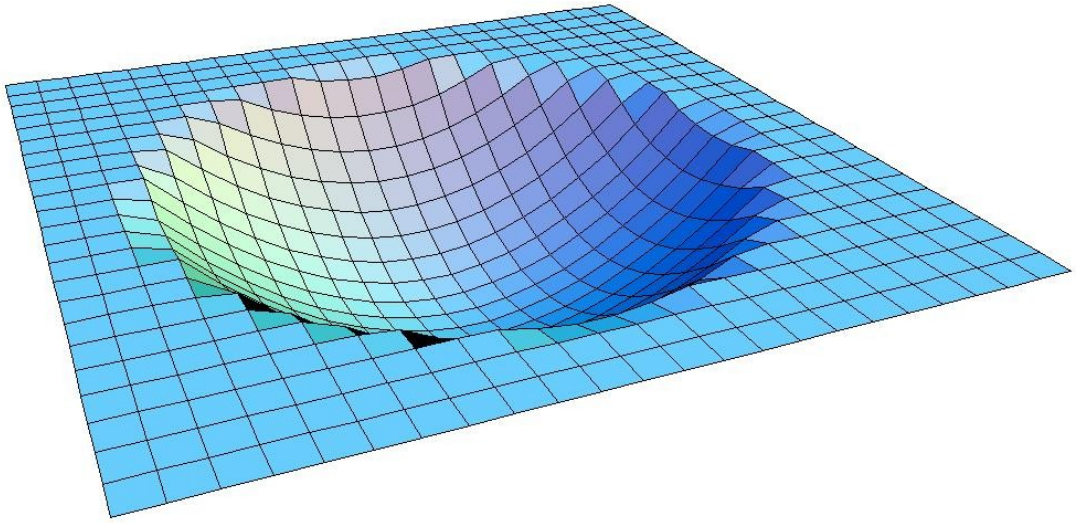
- Masse erzeugt eine Krümmung des Raumes
- Raumkrümmung sagt den Massen, wie sie sich bewegen müssen
  → Gravitationsbeschleunigung

Einsteins Raumzeit

klassische Mechanik Relativitätstheorie

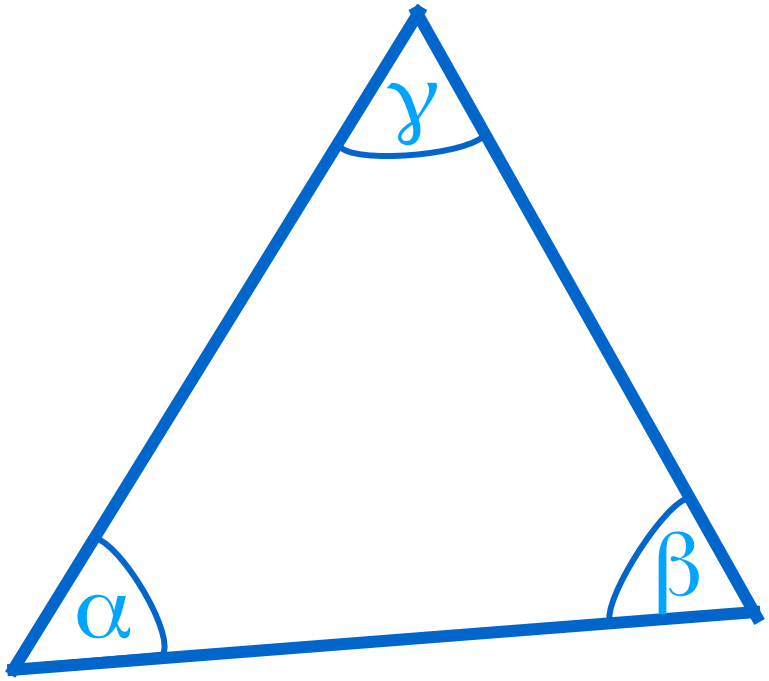
Raum + Zeit = Raumzeit

3 + 1 = 4



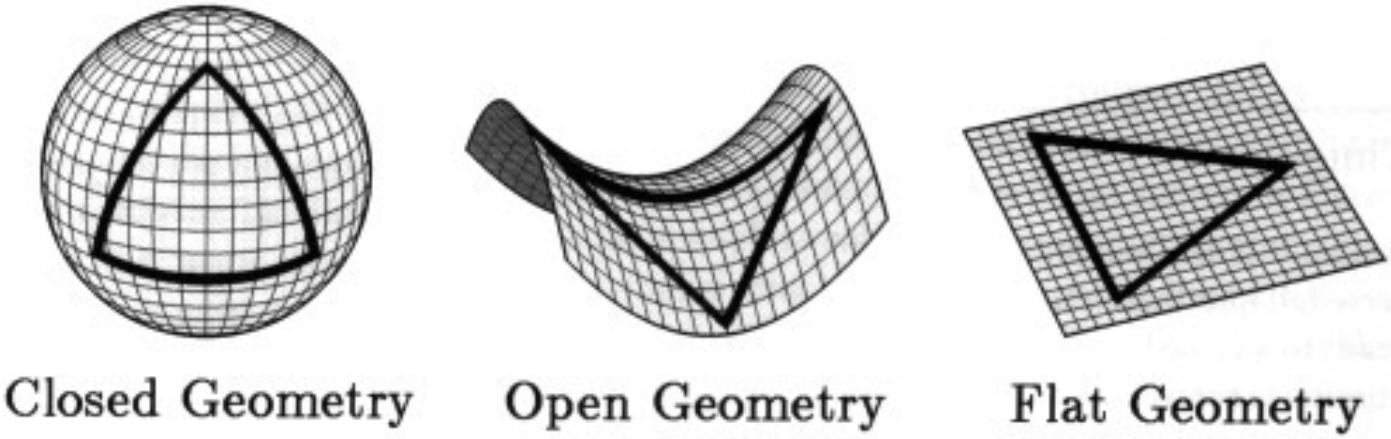
Messung der Raumkrümmung

In einem flachen Raum



$$\alpha+\beta+\gamma = 180^{o}$$

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

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

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

Das Einstein'sche Universum

Ergebnis:

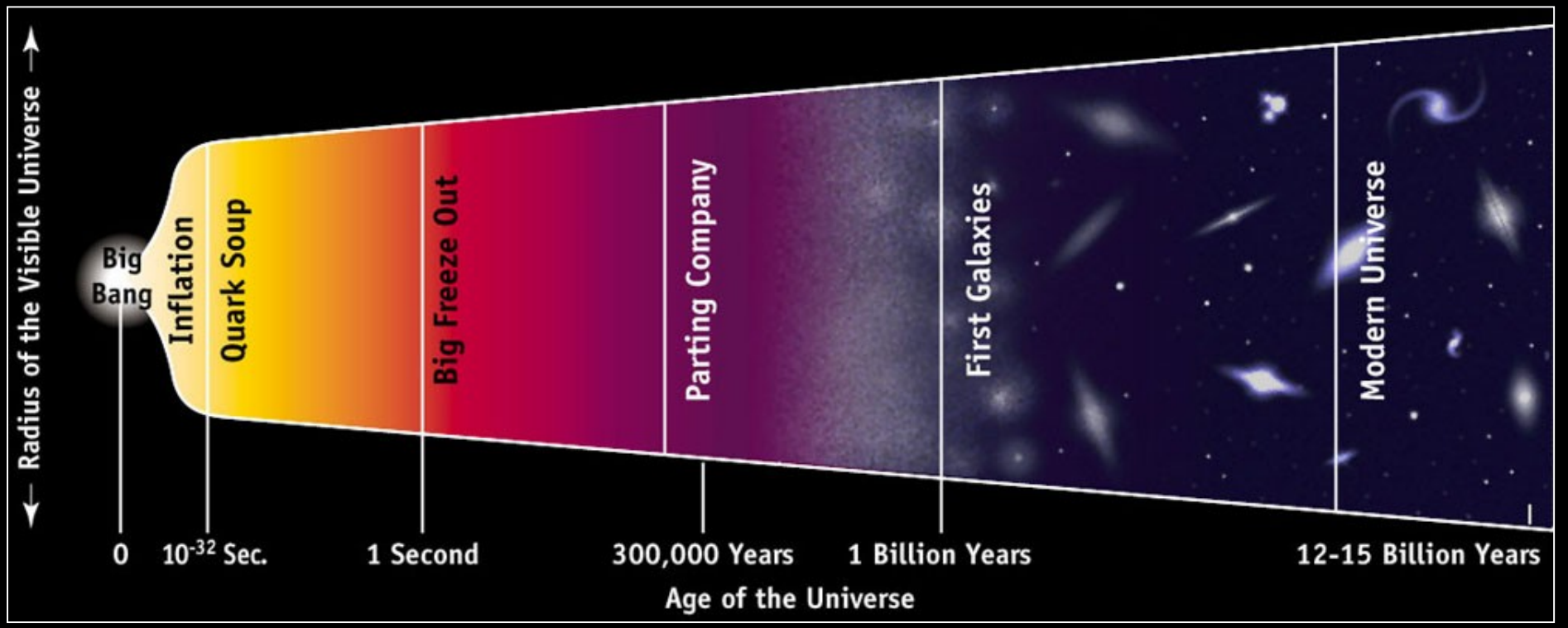
- Das Weltall ist dynamisch und expandiert (sogar beschleunigt)!
- Das Weltall war früher kleiner als heute
- Das Weltall ist aus einer heißen Phase (Urknall) entstanden

- 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

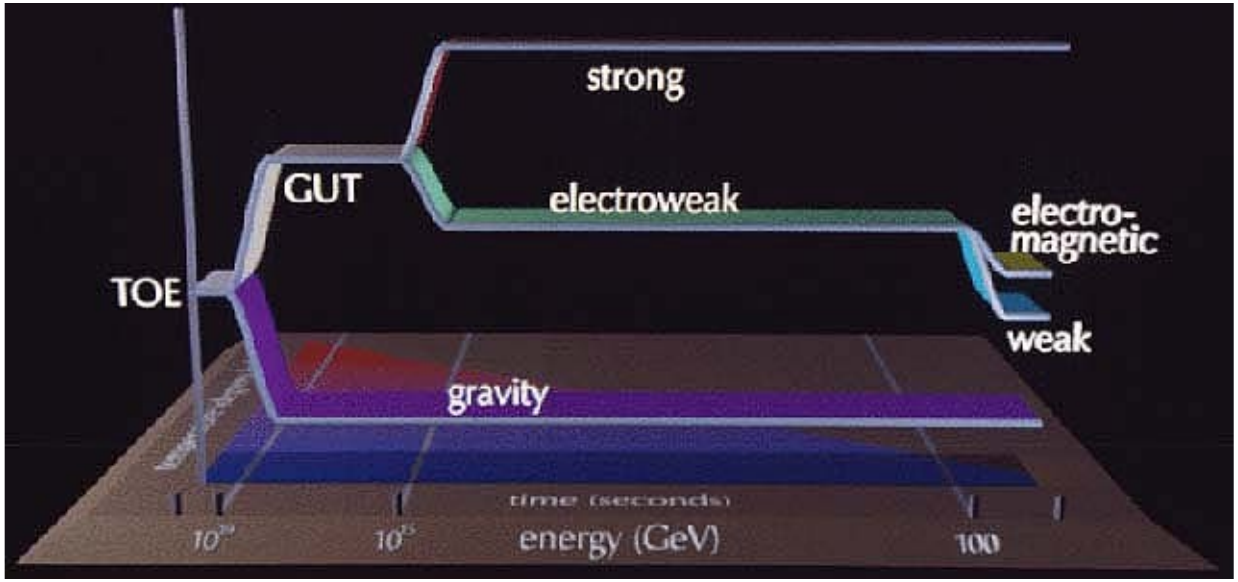
Reise durch Raum **und** Zeit

Vom Urknall bis Heute



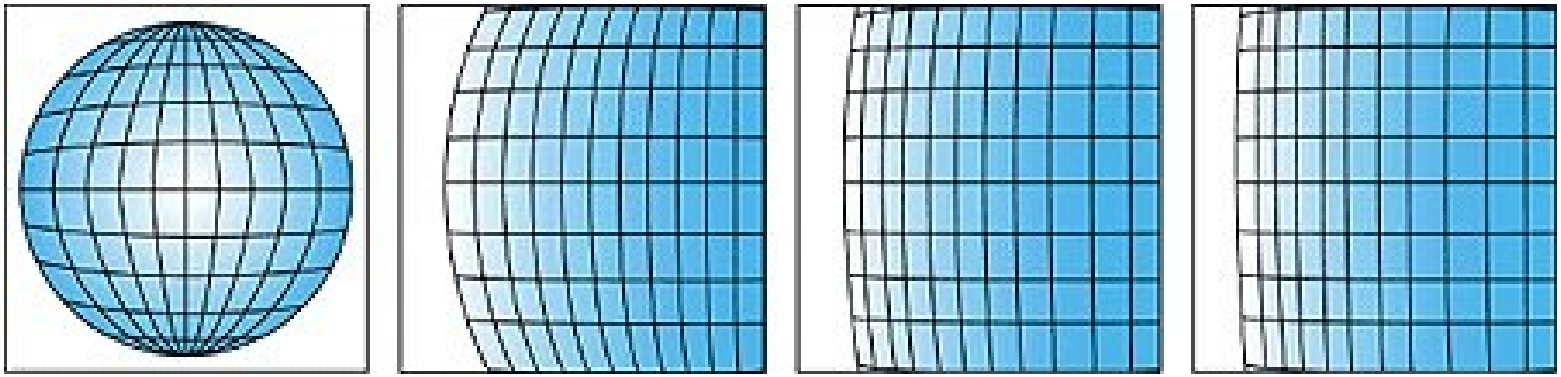
Eine Zeitreise

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



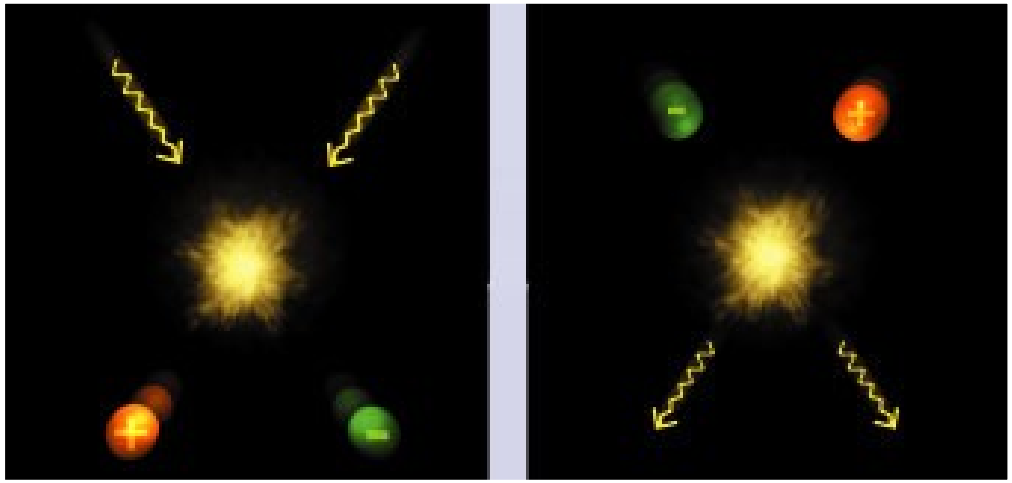
Die Inflation

- 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
    1 000 000 001 : 1 000 000 000



Im abkühlenden Universum haben sich Materie und Antimaterie gegenseitig vernichtet → Photonen

Aber: ein kleiner Materie-Überschuss hat überlebt:

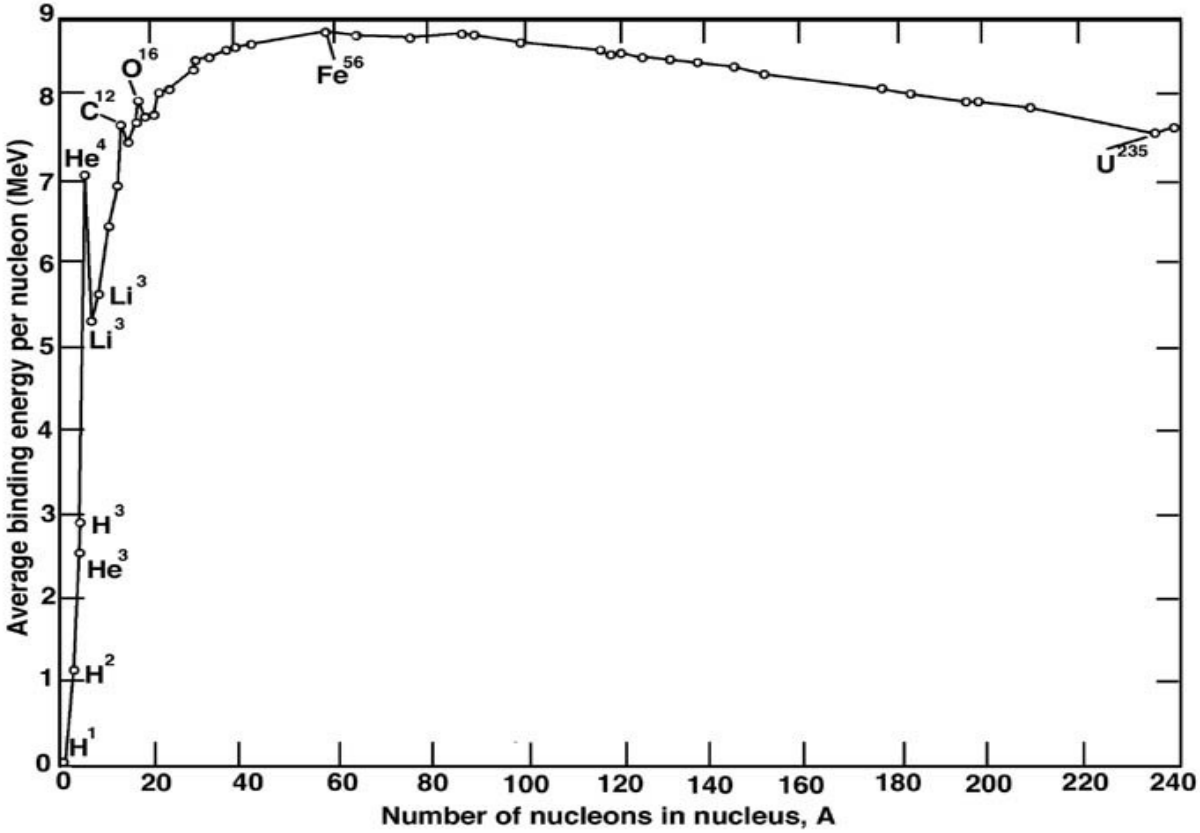
Photon-Proton-Verhältnis heute:
1 : 1 000 000 000

Nukleonsynthese

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

  Erzeugung leichter Elemente

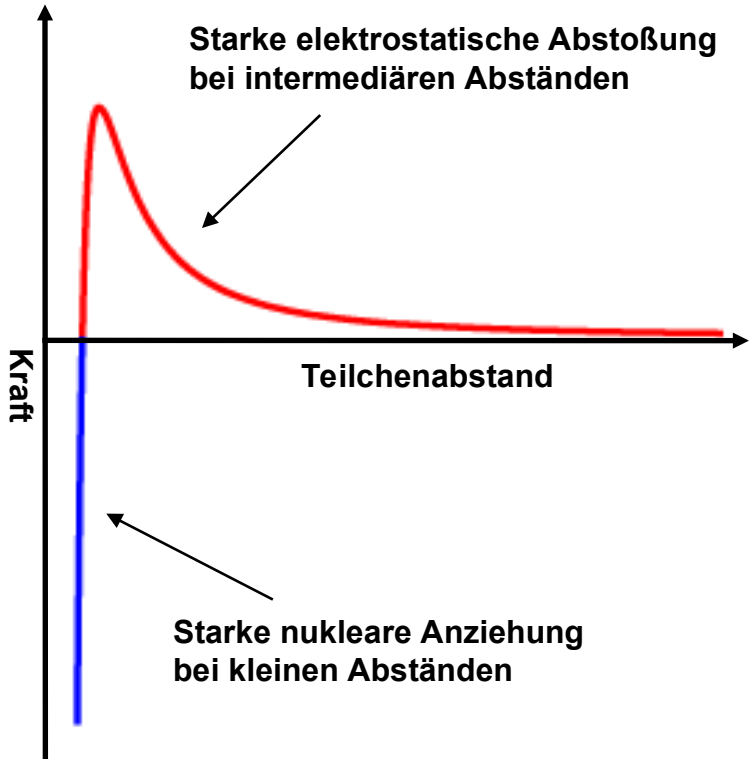
  Wasserstoff, Deuterium, Helium, Lithium



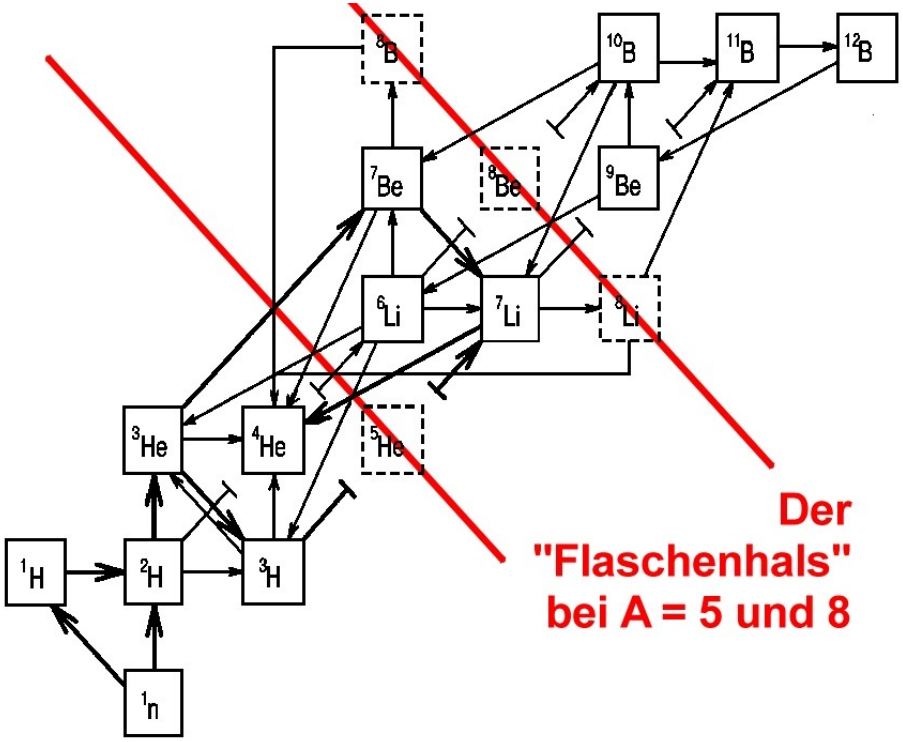
Kernfusion

- Fusion leichter Kerne zu Schwereren bei Teilchenkollisionen

  benötigt hohe Temperaturen und große Teilchendichten



Primordiale Nukleosynthese

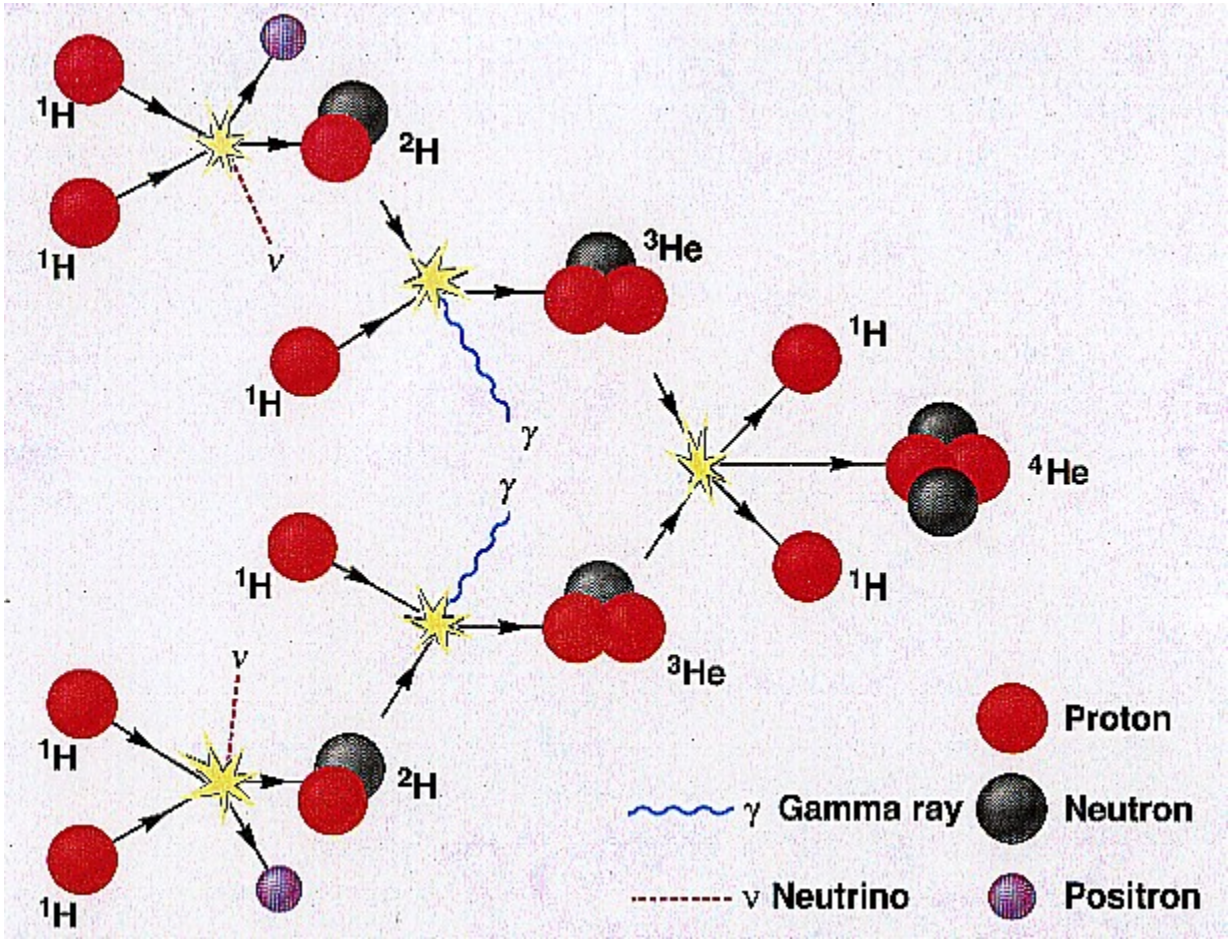


Primordiale Nukleosynthese

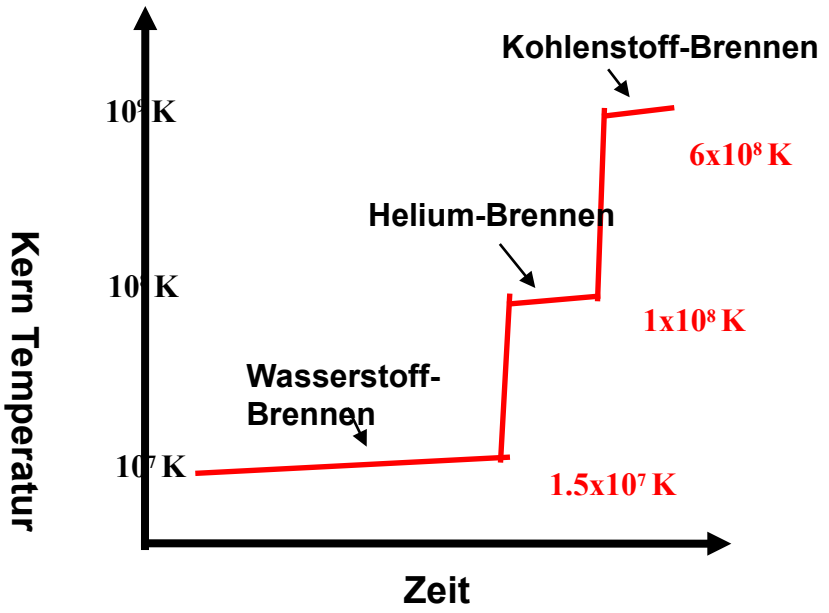
- Erklärt die Häufigkeit der leichten Elemente
  - 74% Wasserstoff
  - 25 %Helium
  - 1% Rest

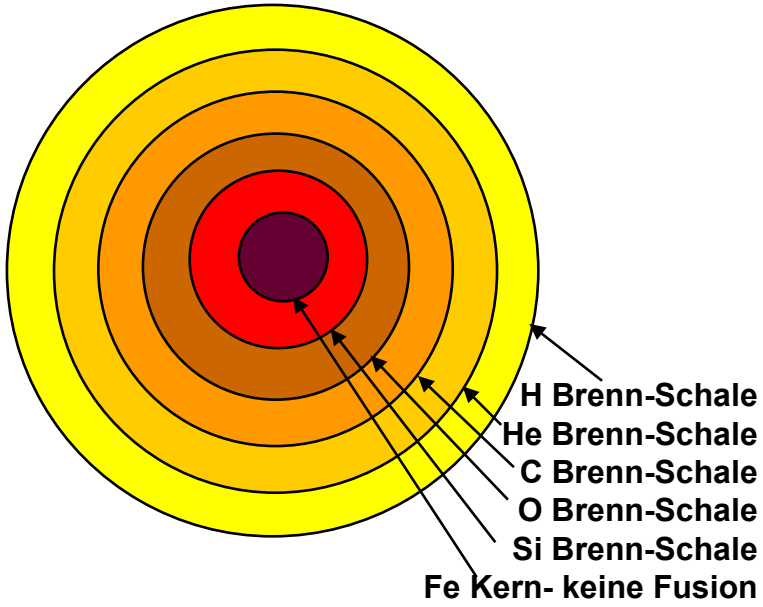
- Baryonische Dichte
  - $3{,}5 \cdot 10^{-31}$ g/cm^3 oder
  - 0,2 Wasserstoffatome/m^3

Warum nicht in Sternen?



Fusion in Sternen





- Erwarten ungefähr genauso viel Helium wie andere Elemente mit großer Masse:

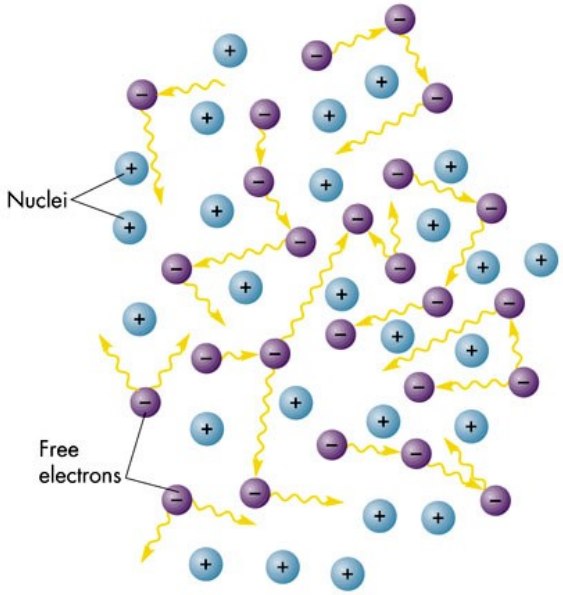
  Verhältnis: 75% H, 13% He, 12% Rest

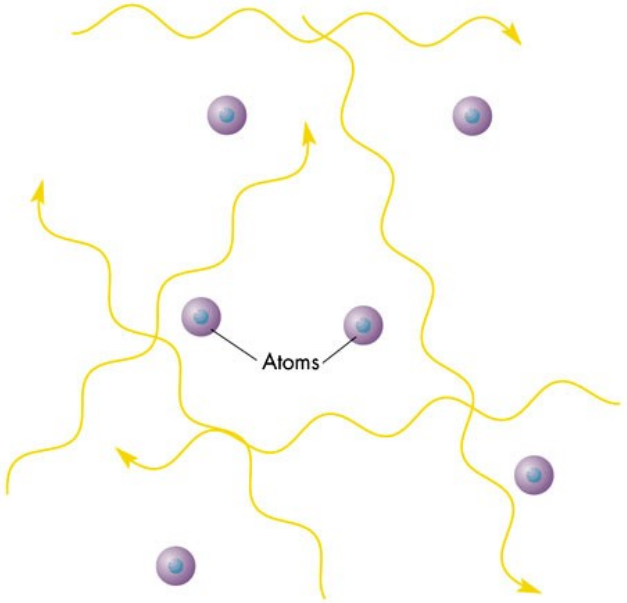
aber

Primordiale Nukleosynthese: 74% H, 25 %He, 1% Rest

Bildung von Atomen

- Alter = 380000 Jahre, T = 3000 Kelvin
  - Erste Atome bilden sich
  - Das Universum wird transparent



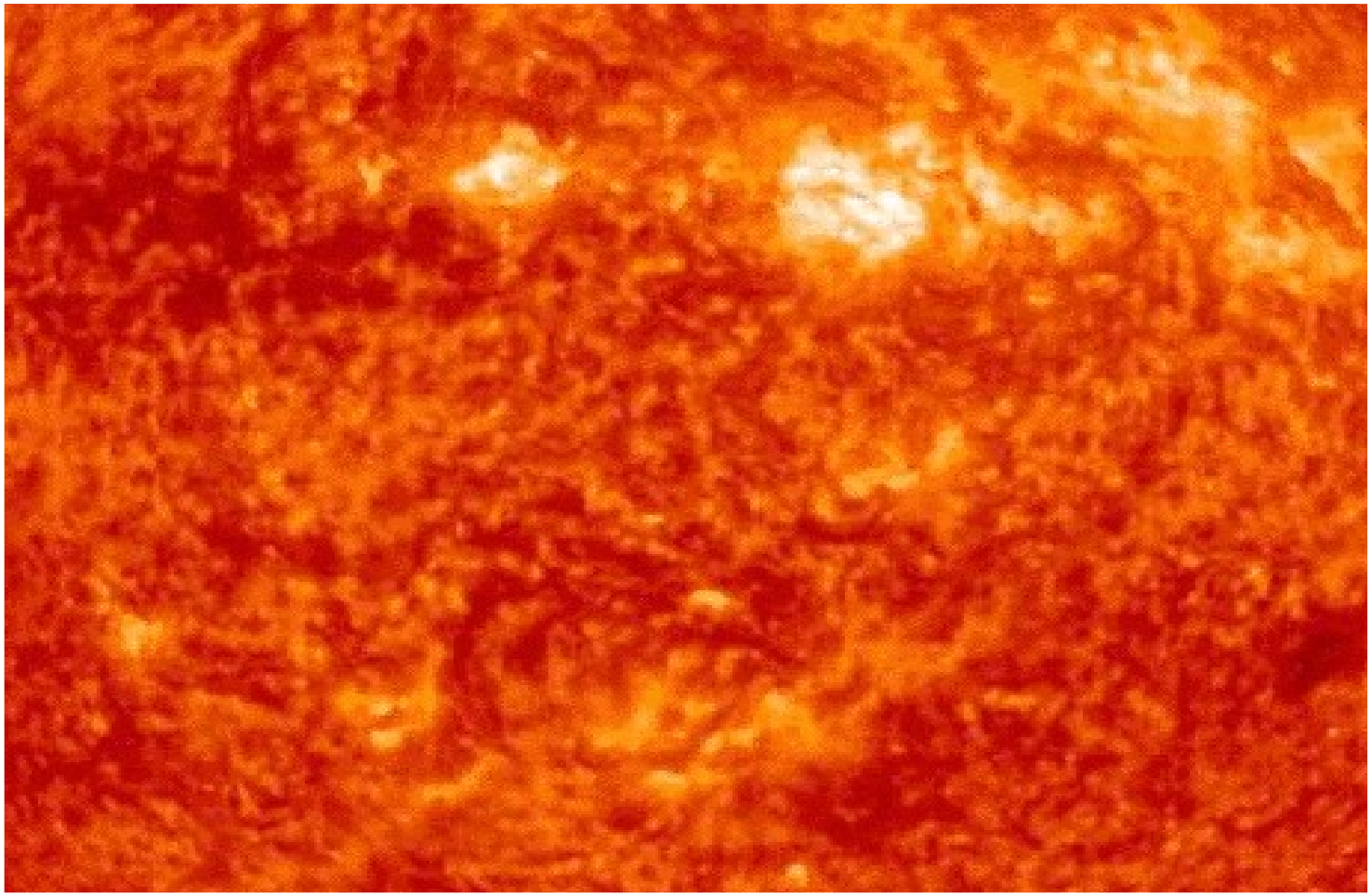


Können wir den Urknall sehen?

Blick in die Vergangenheit

Hubble Deep Field scan

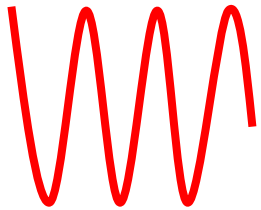
Das Licht der entferntesten Objekte
war ~12 Milliarden Lichtjahre unterwegs (z=6)



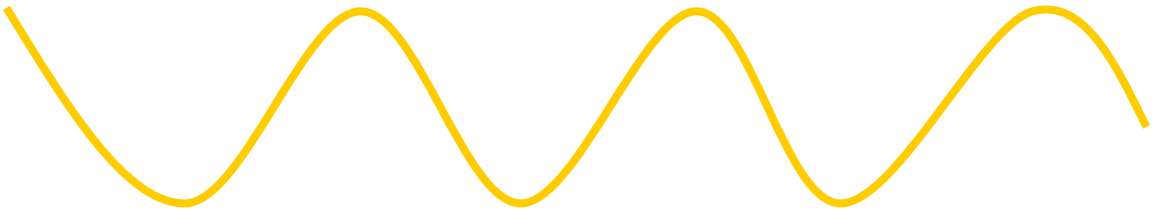
Hypothetischer Blick in das ganz frühe, heiße Universum ... geht das ?

Der Urknall damals – heute

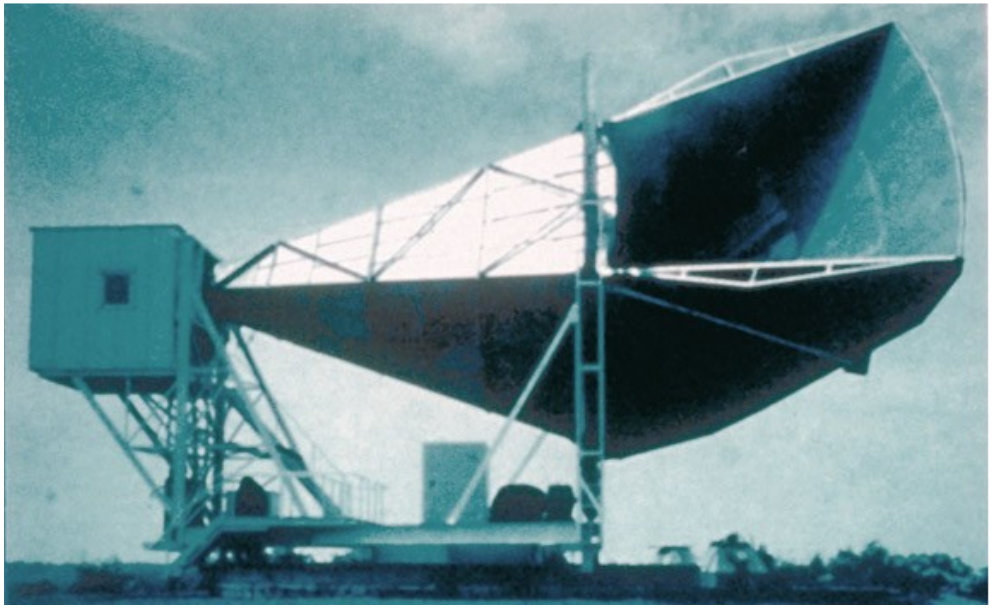
- Damals: Licht 3000 K

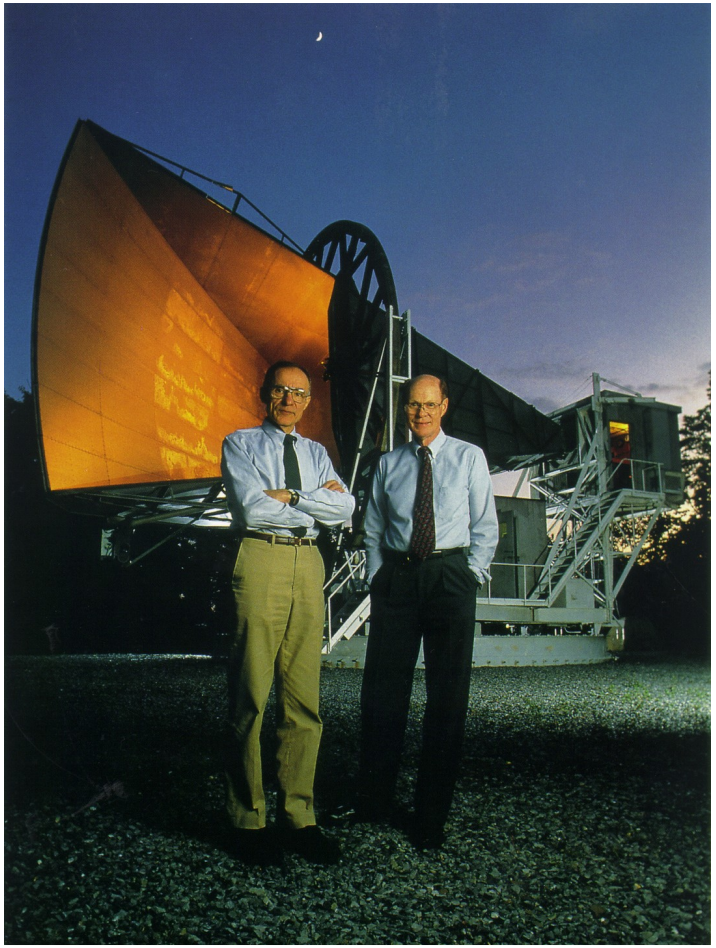


- Heute: Mikrowellen 3 K



Die Entdeckung: 1965

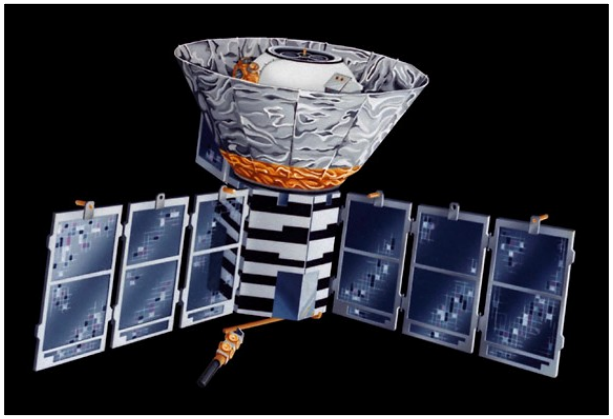




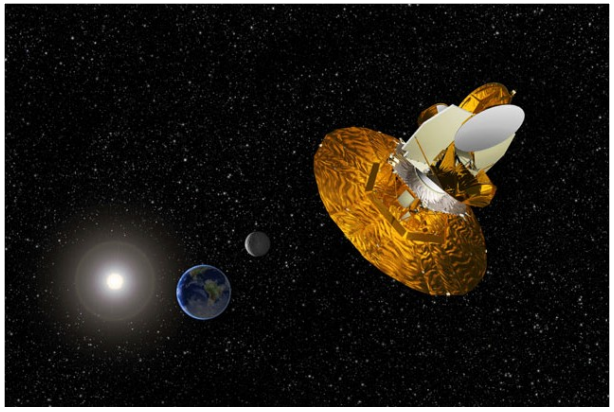
Die Entdecker der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung:
Arno Penzias und Robert W. Wilson

COBE, WMAP und Planck

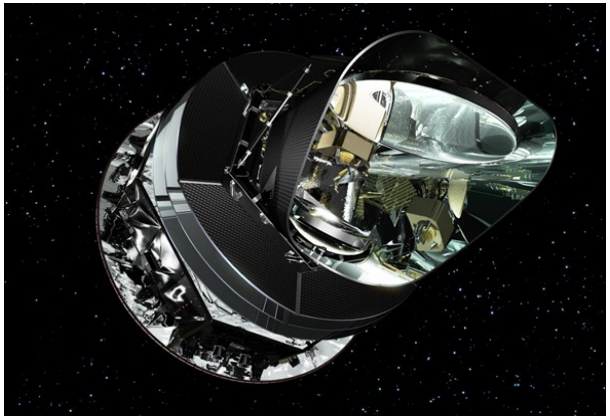
- COBE
  - COsmic Background Explorer
  - 1989 – 1993
  - Nobelpreis 2006
    (G. Smoot, J. Mather)



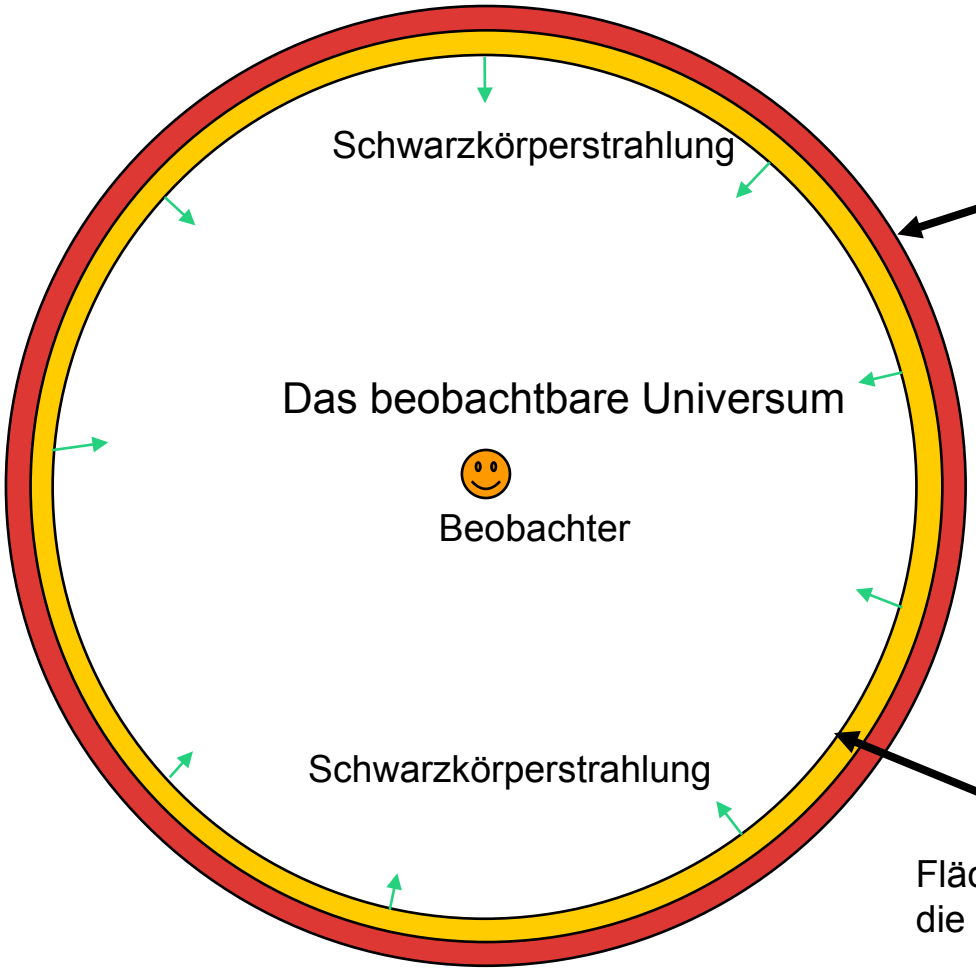
- WMAP
  - Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
  - Start 2001



- Planck (ESA)
  - Start 14.5.2009



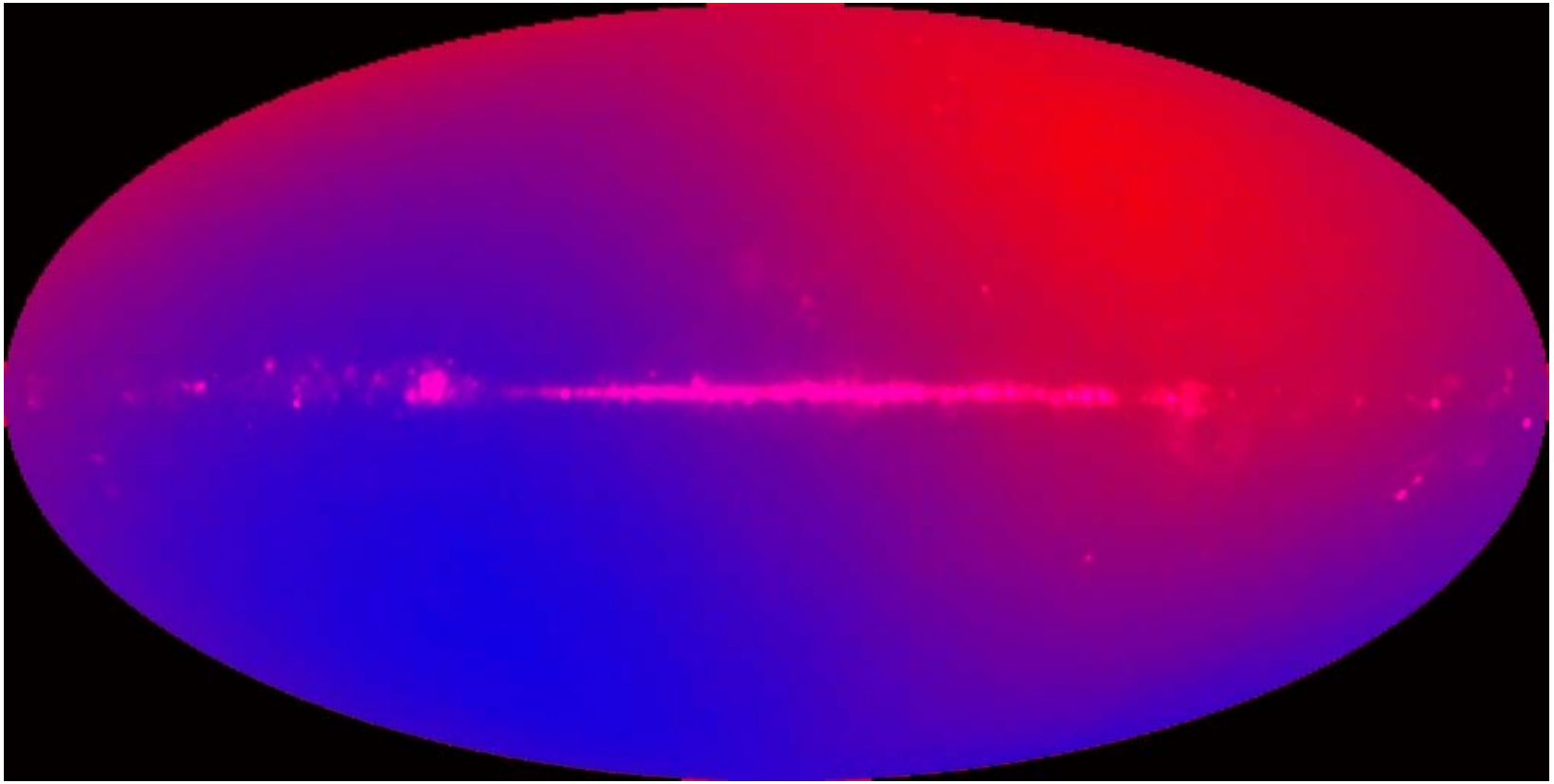
Die Geschichte der kosmischen Hintergrundstrahlung



Rand des beobachtbaren Universum – Distanz, die Licht im Alter des Universums fliegen konnte.

Fläche der letzten Streuung, wo die Bildung der Atome stattfand.

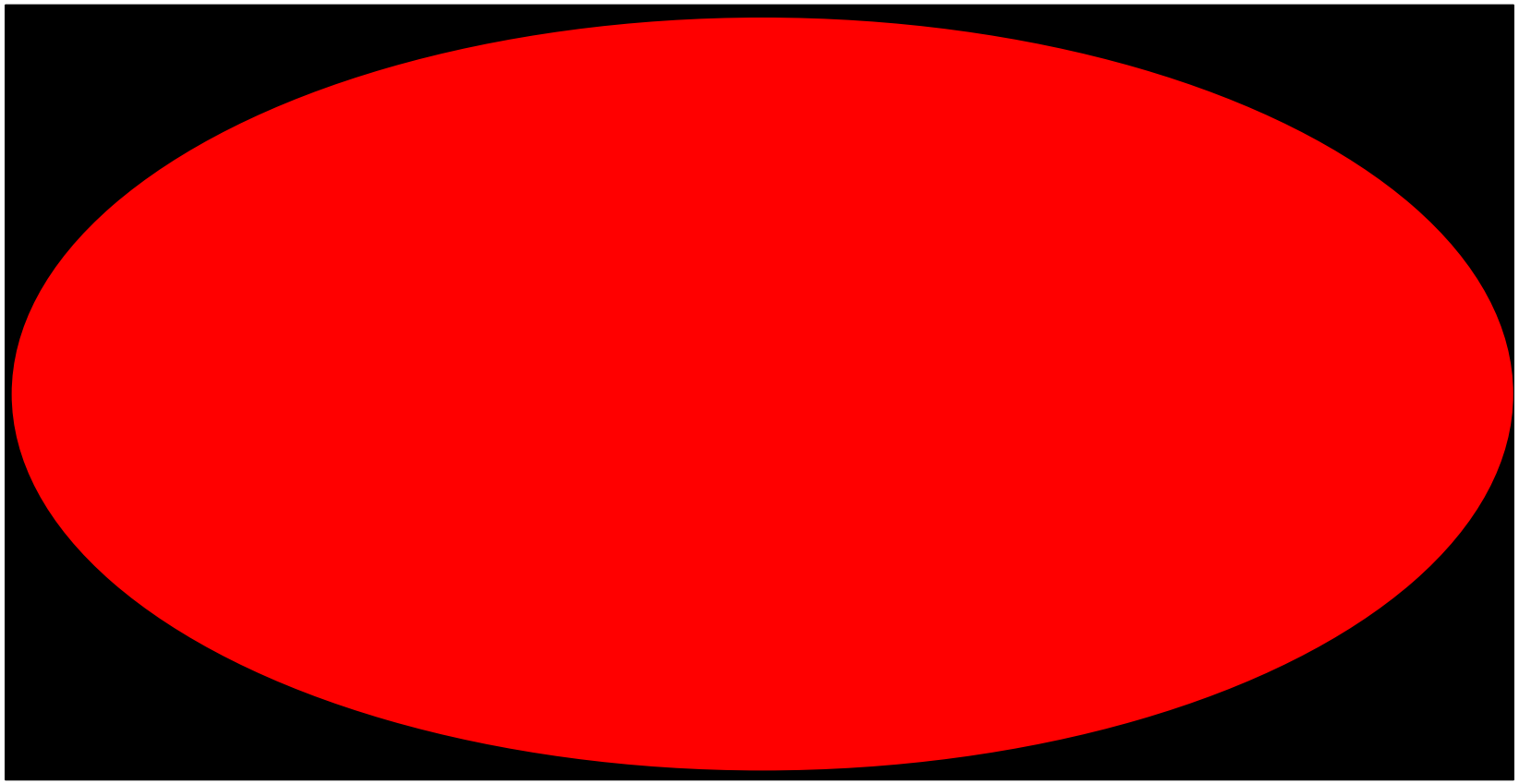
Die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung



... zeigt die Bewegung der Erde → Korrektur notwendig

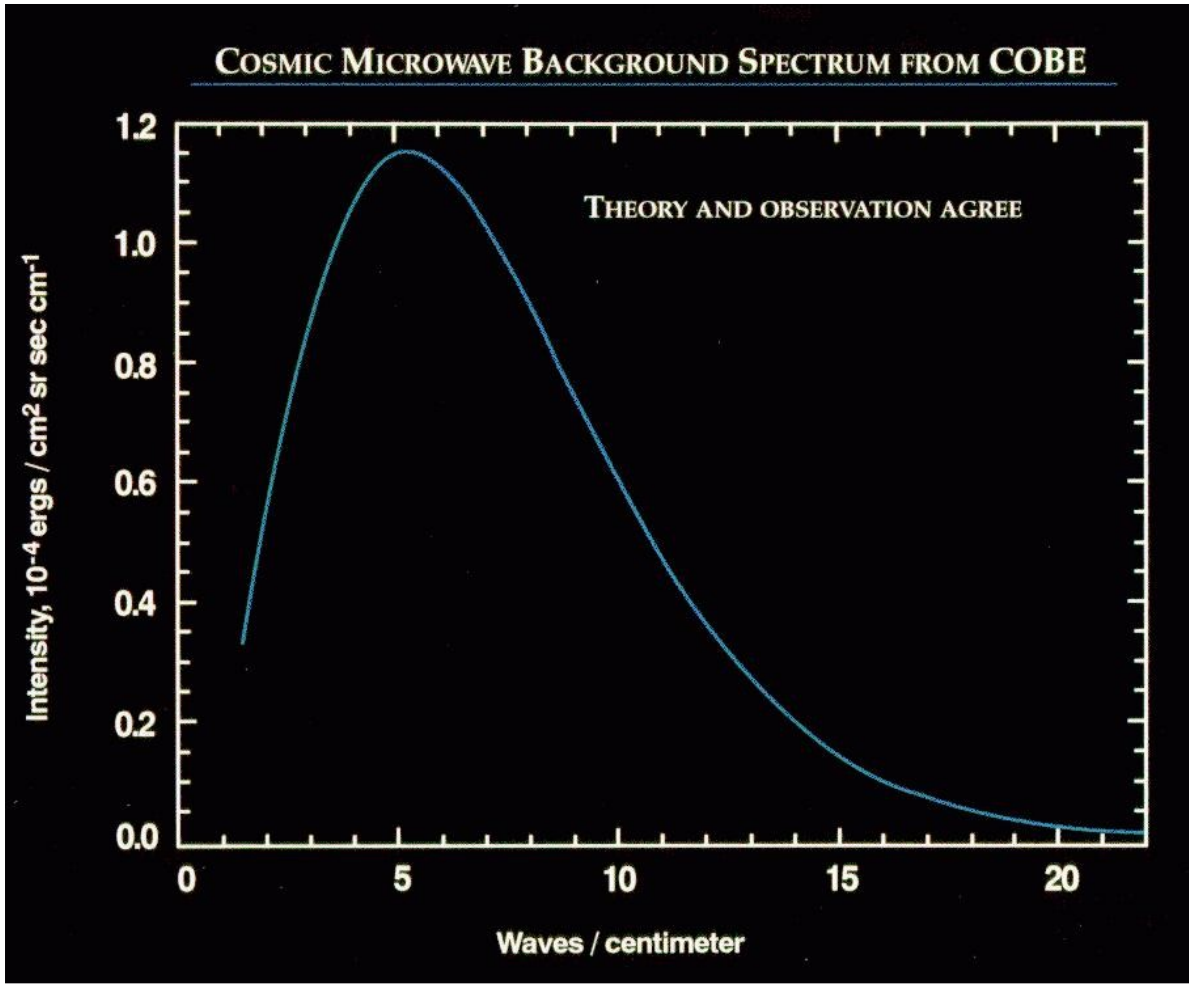
Vermessung der Kosmischen Hintergrundstrahlung

Mikrowellenhintergrund



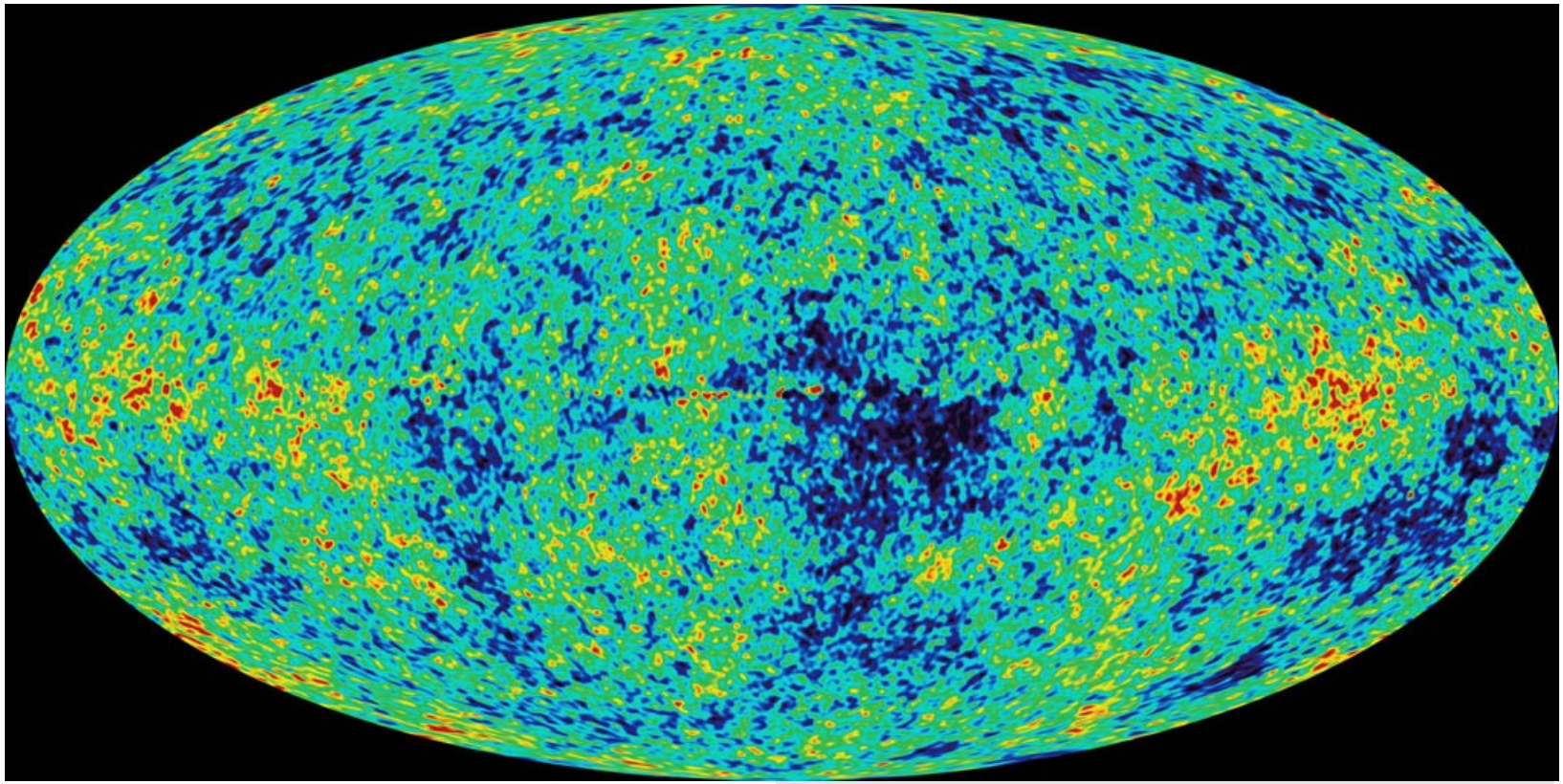
… ist isotrop

Das Spektrum



... ist das eines schwarzen Strahlers

Bei genauem Hinsehen (WMAP-Daten) …

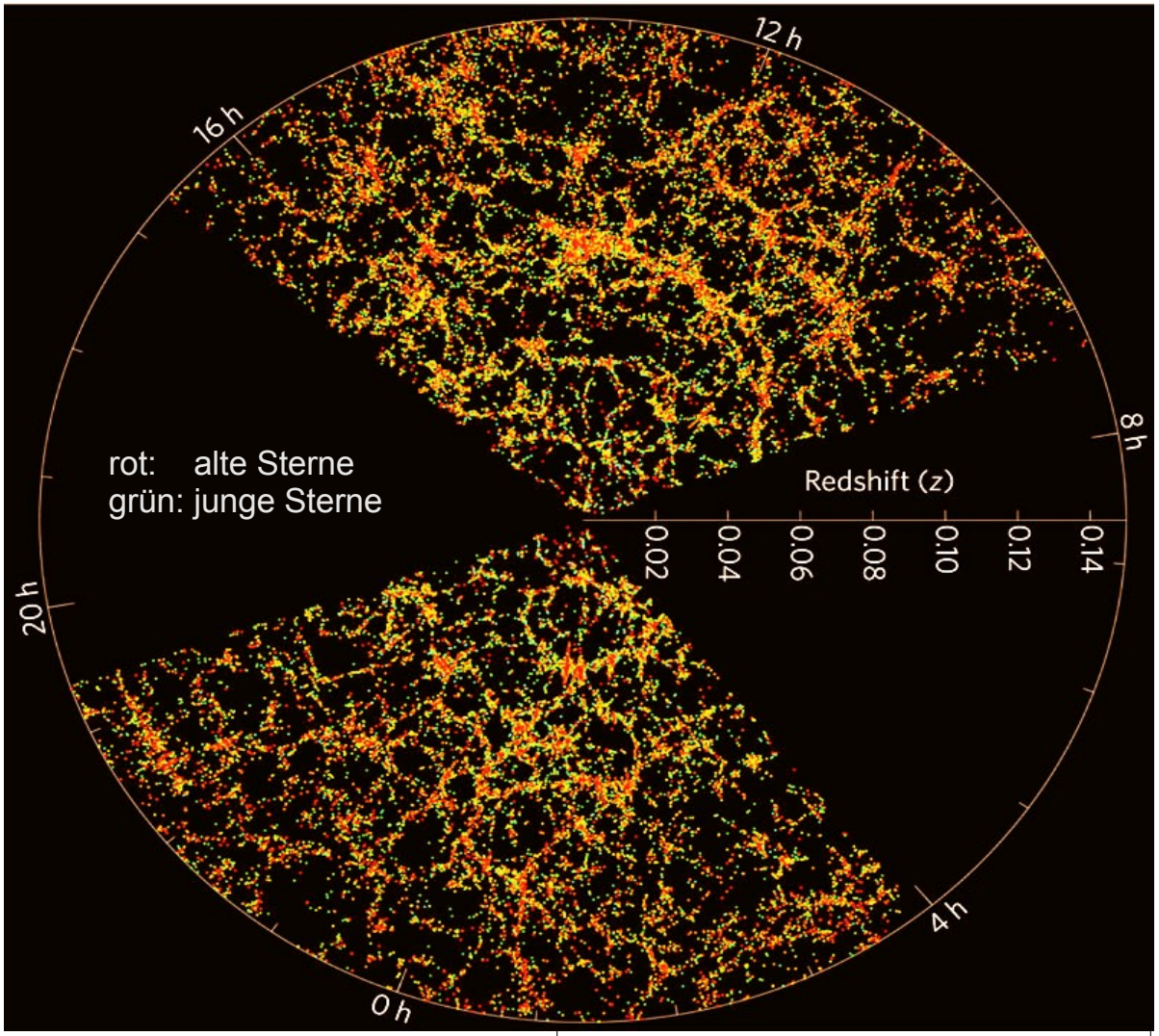


Mittlere Temperatur: 2,725 K
ΔT blau-rot: 0,0002 K !!!

zeigt sich eine fleckige Struktur: das Echo des Urknalls

Dichtere Bereiche wuchsen im Laufe der Zeit durch die Gravitation und wurden so zu Keimzellen für Galaxienhaufen

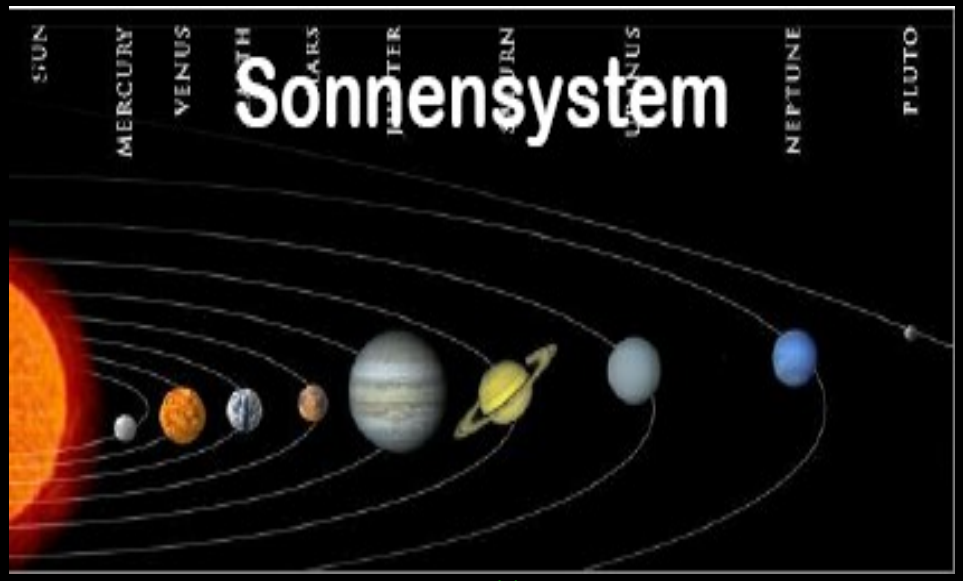
heute beobachtete Strukturen im Universum



Quelle: Sloan Digital Sky Survey

Dunkle Materie

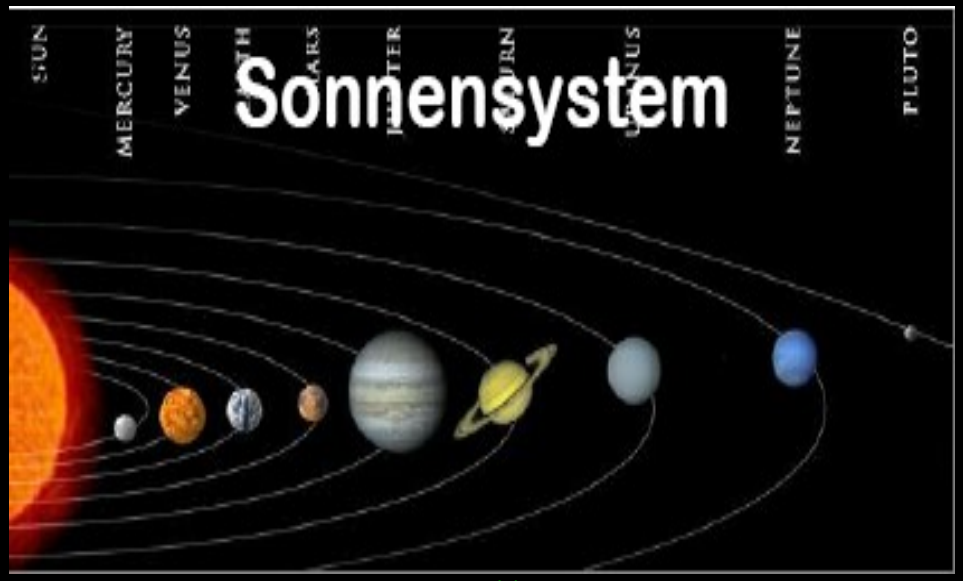
Unbekannte Form(en) von Materie !?



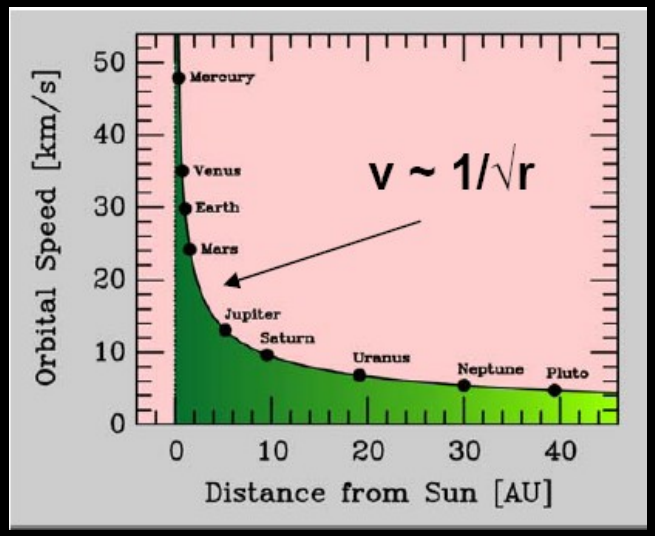
Im Sonnensystem gilt
Keplers Gesetz

dunkle Materie = keine elektromagnetische oder starke Wechselwirkung

Unbekannte Form(en) von Materie !?

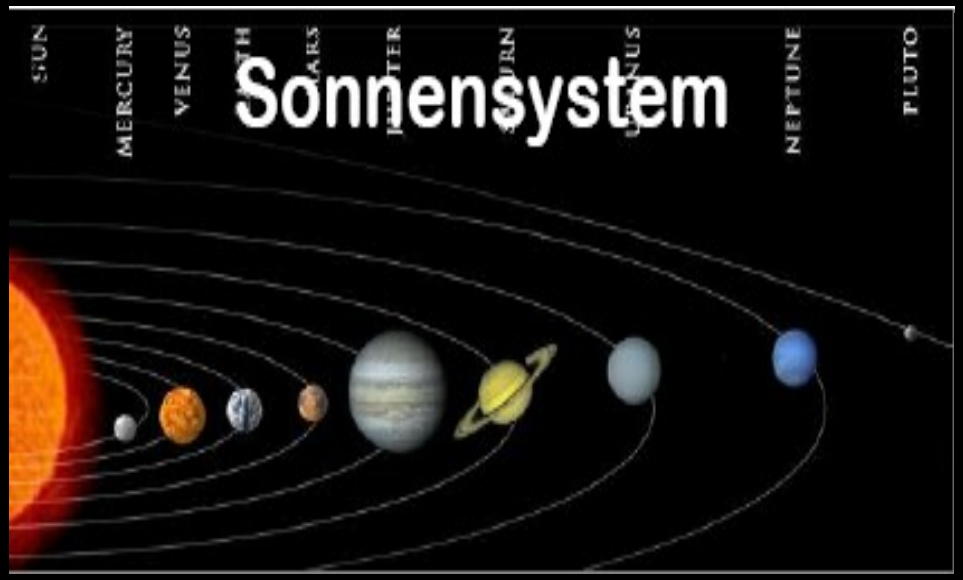


Im Sonnensystem gilt
Keplers Gesetz

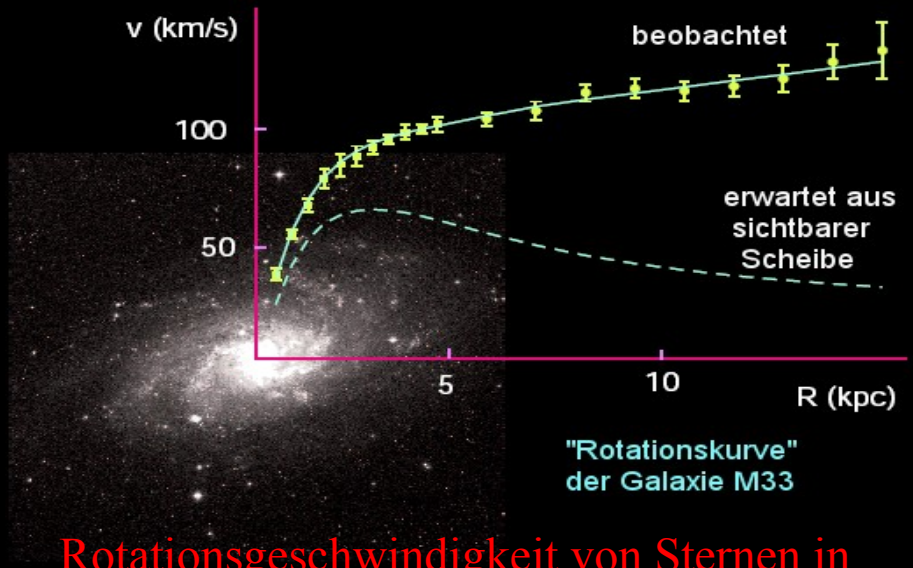


dunkle Materie = keine elektromagnetische oder starke Wechselwirkung

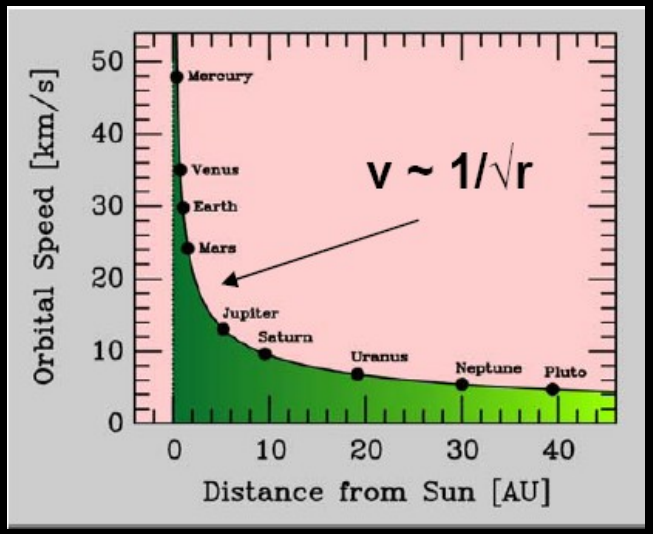
Unbekannte Form(en) von Materie !?



Im Sonnensystem gilt Keplers Gesetz

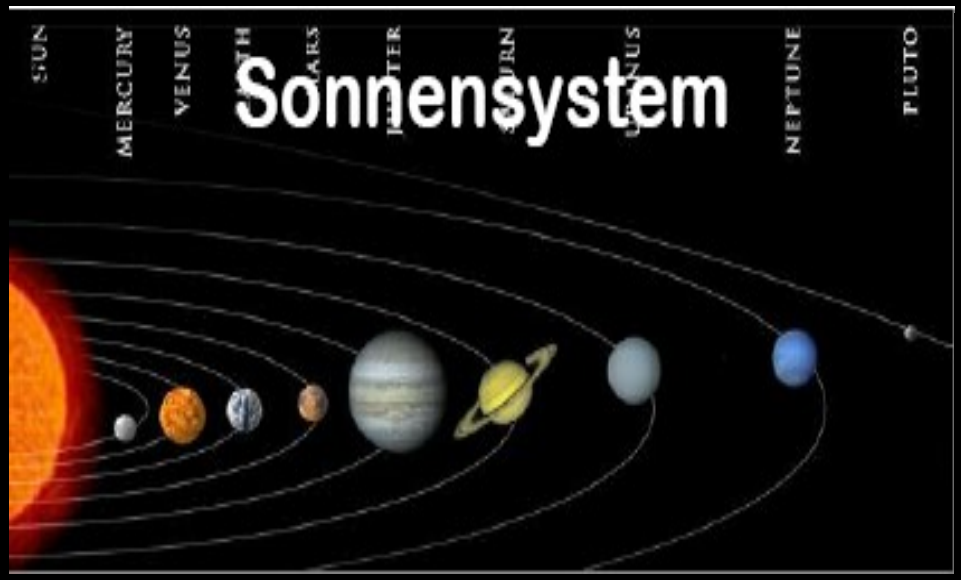


Rotationsgeschwindigkeit von Sternen in Galaxien **nicht** durch „sichtbare“ Materie erklärbar ⇒ **dunkle Materie !**

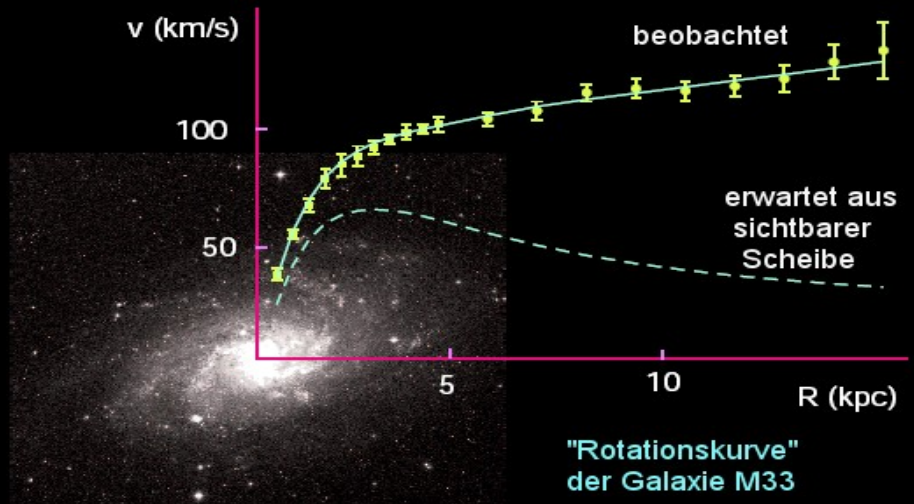


dunkle Materie = keine elektromagnetische oder starke Wechselwirkung

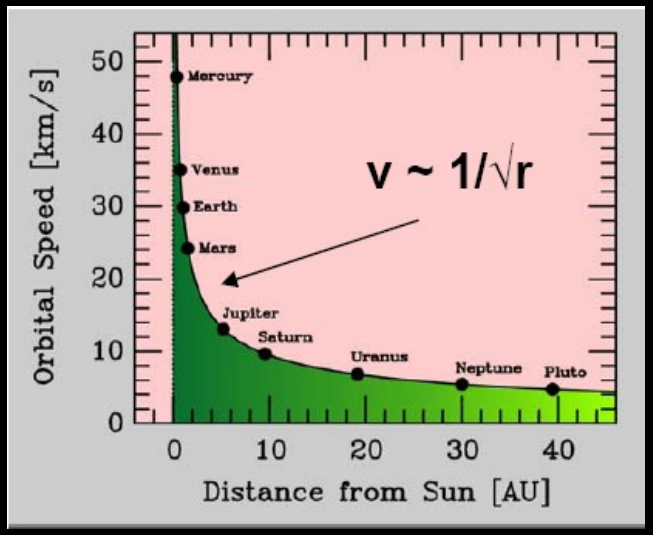
Unbekannte Form(en) von Materie !?

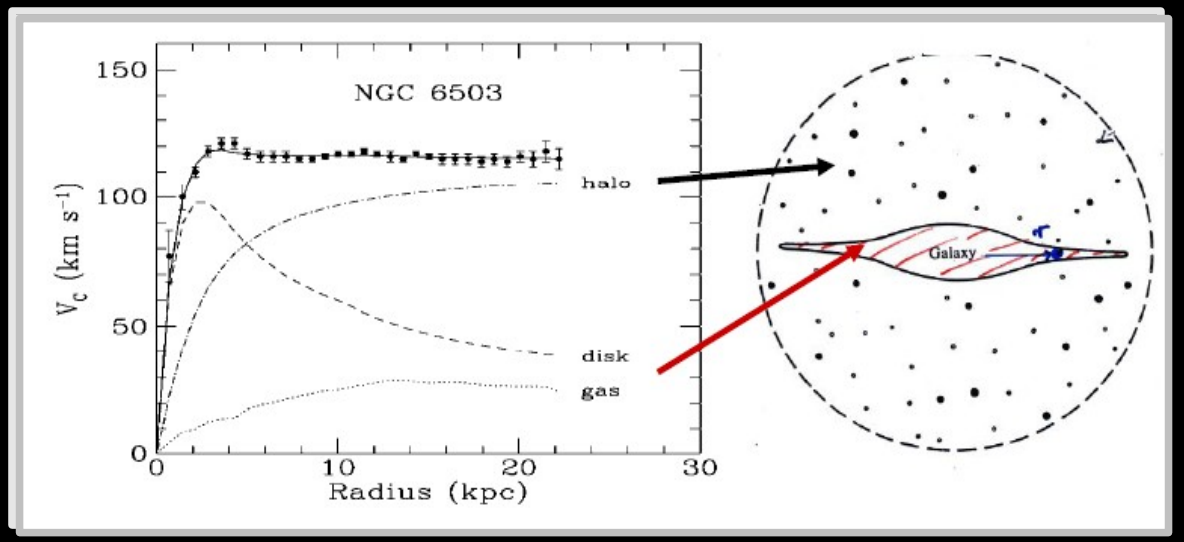


Im Sonnensystem gilt Keplers Gesetz



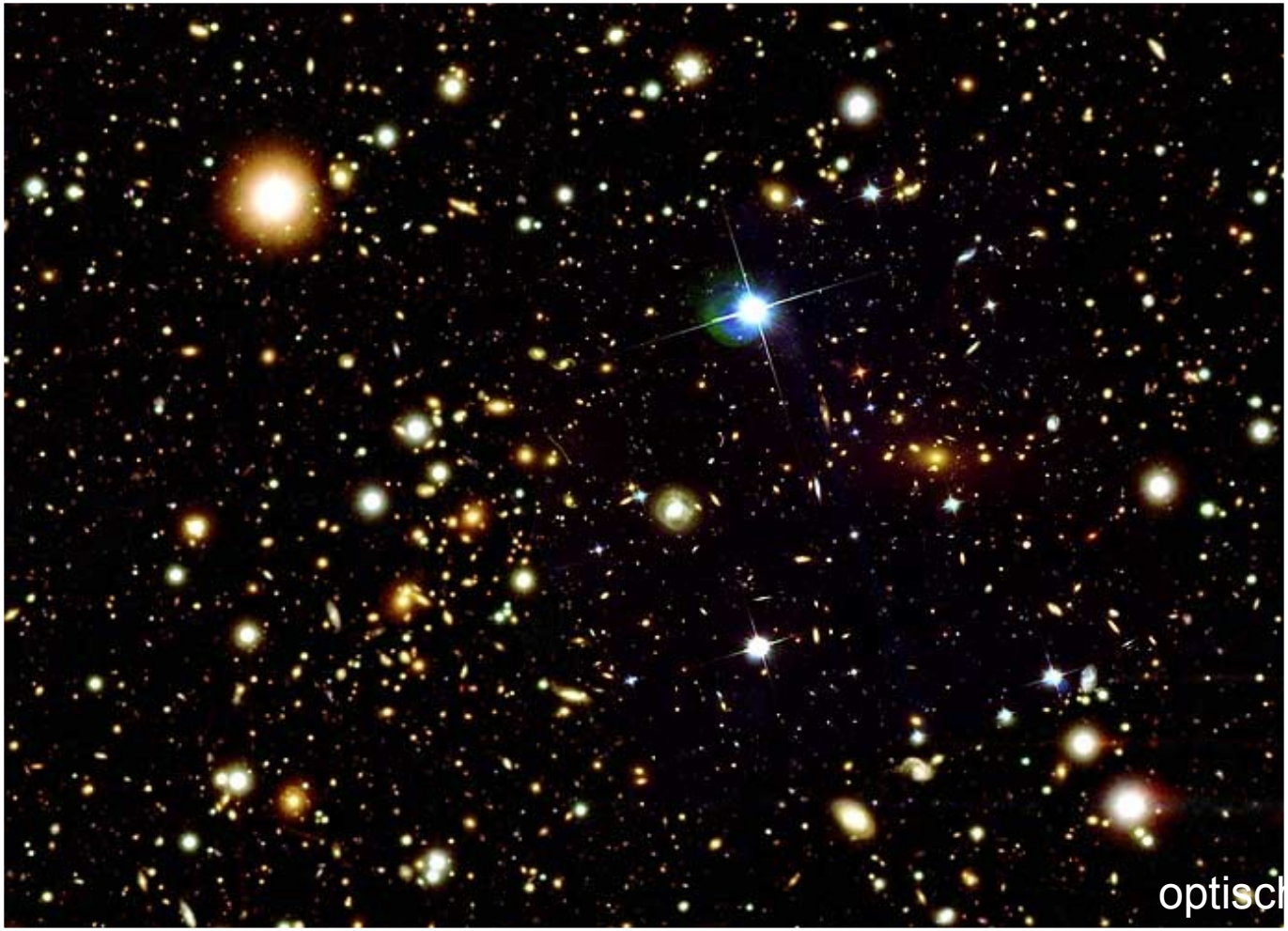
Rotationsgeschwindigkeit von Sternen in Galaxien **nicht** durch „sichtbare“ Materie erklärbar ⇒ **dunkle Materie !**



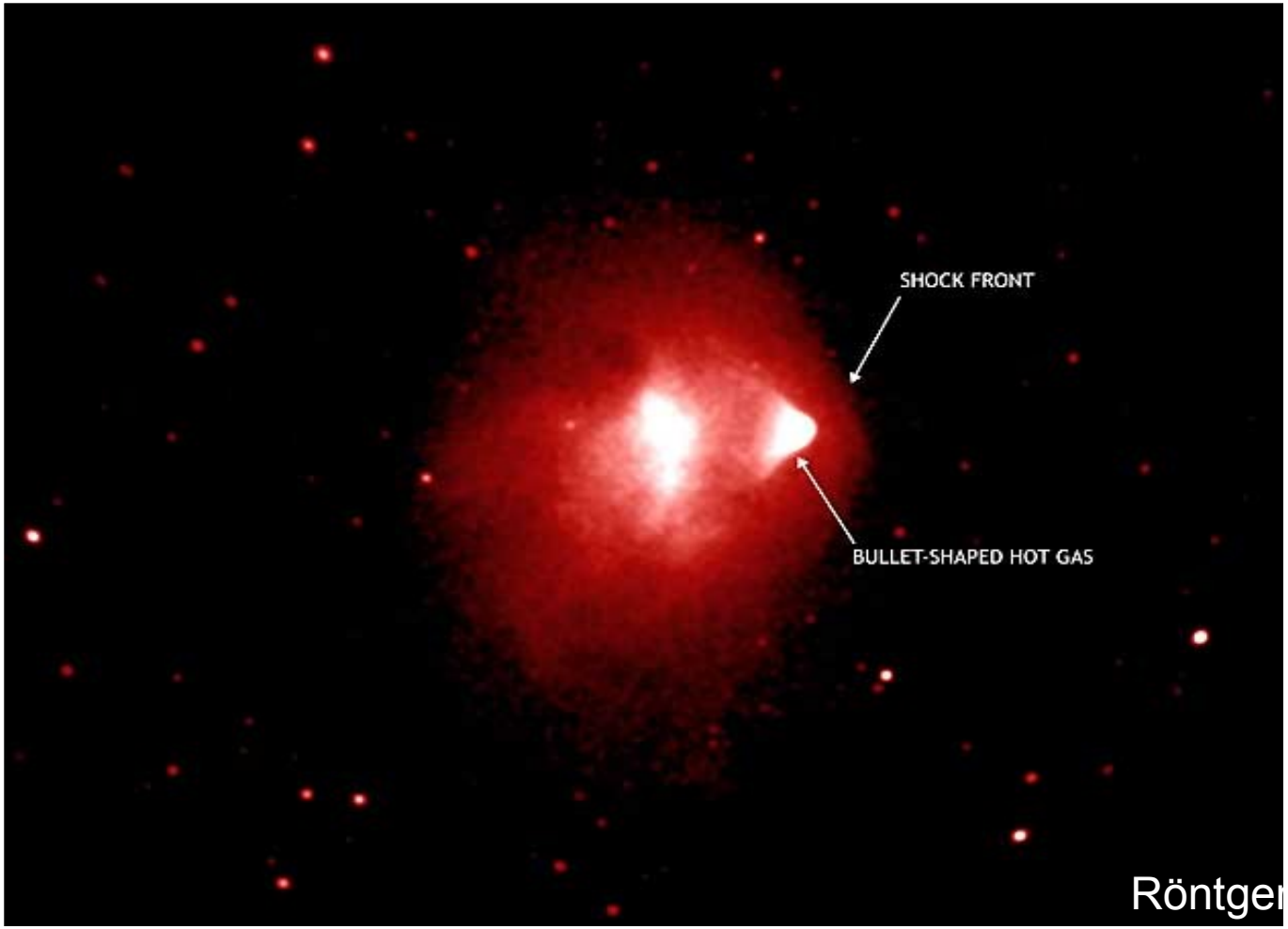


dunkle Materie = keine elektromagnetische oder starke Wechselwirkung

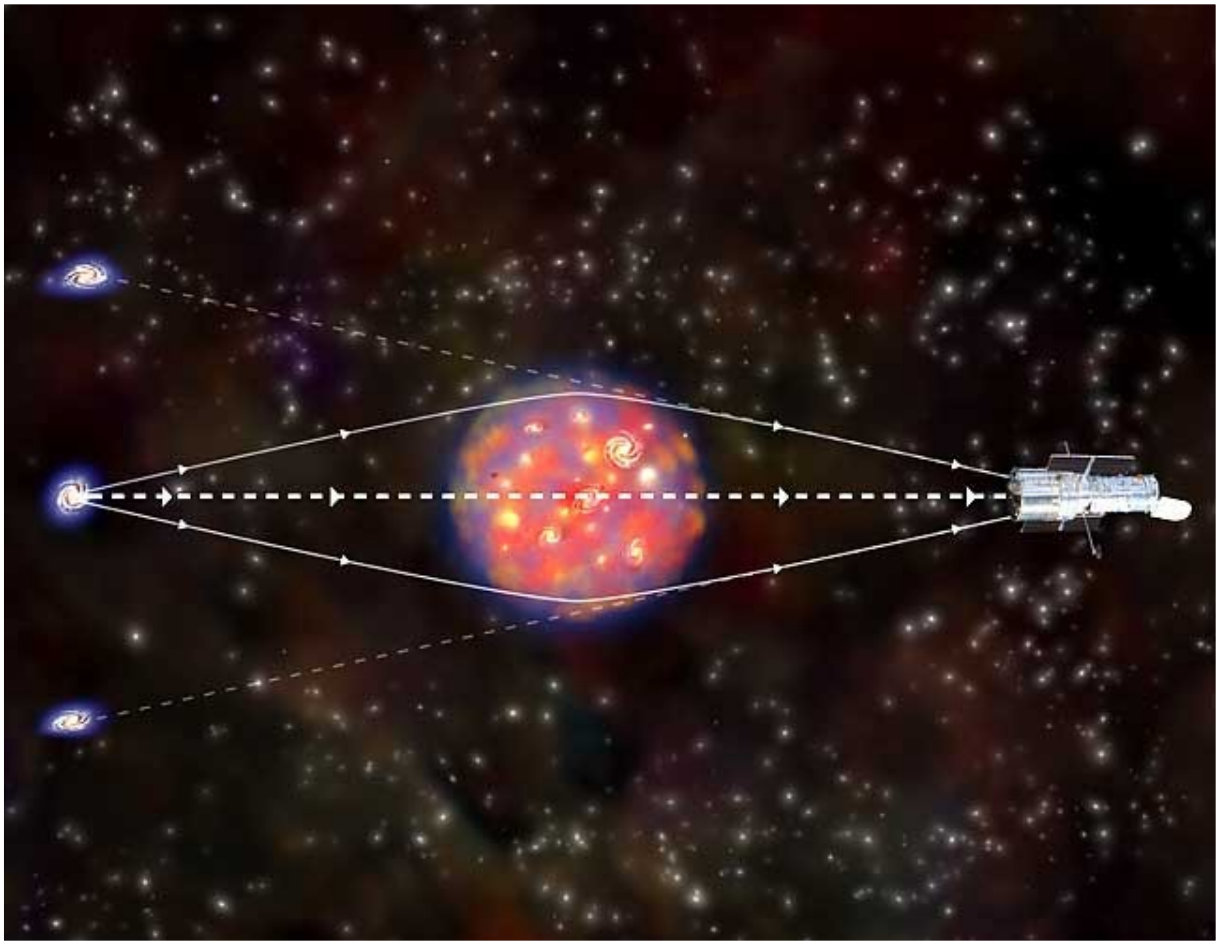
Galaxien-Cluster 1E 0657-56



Galaxien-Cluster 1E 0657-56 im Röntgenlicht

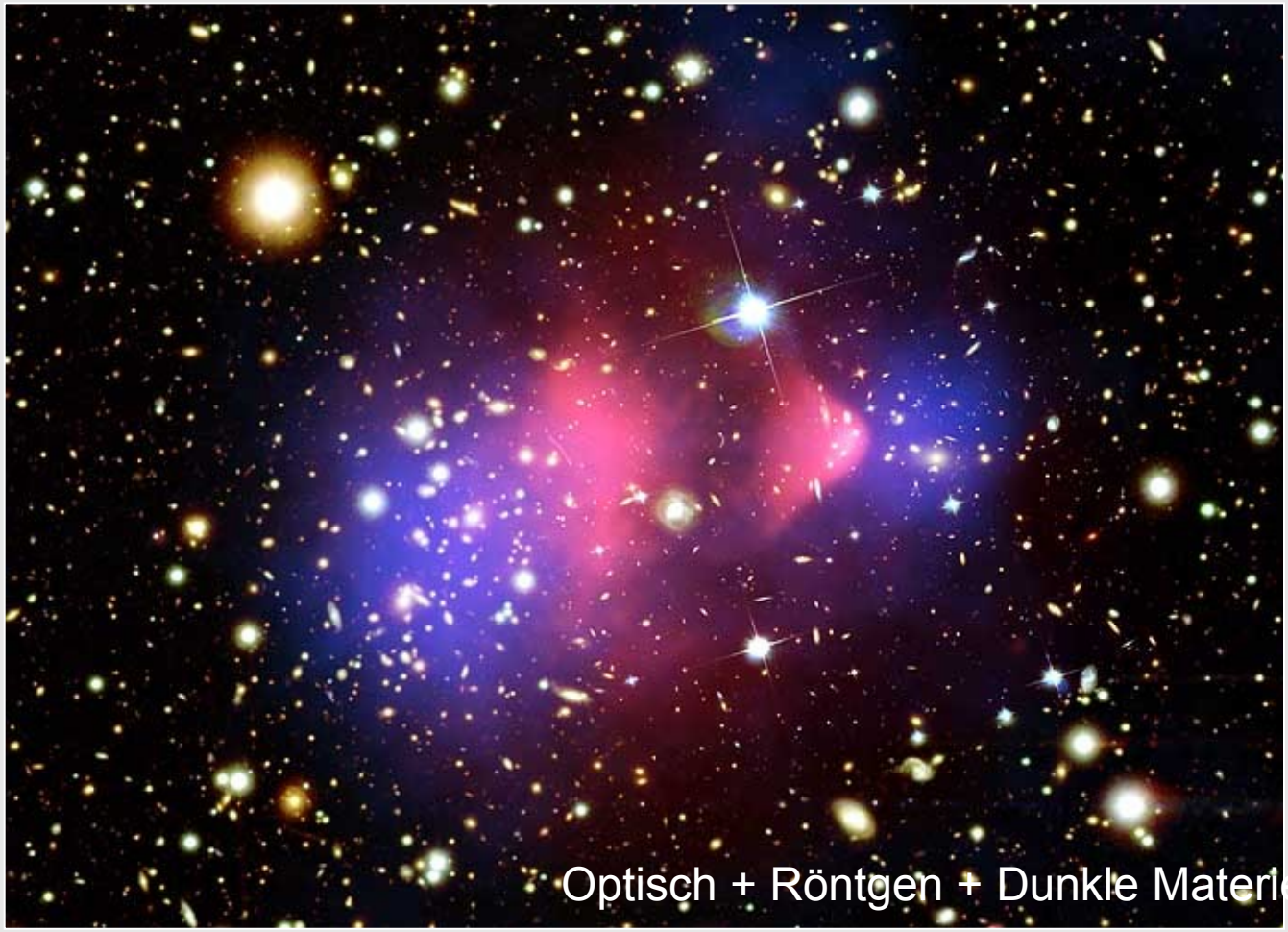


Gravitationslinseneffekt



… erlaubt Nachweis von Materie durch Gravitationswechselwirkung

Galaxien-Cluster 1E 0657-56 = „Bullet-Cluster“

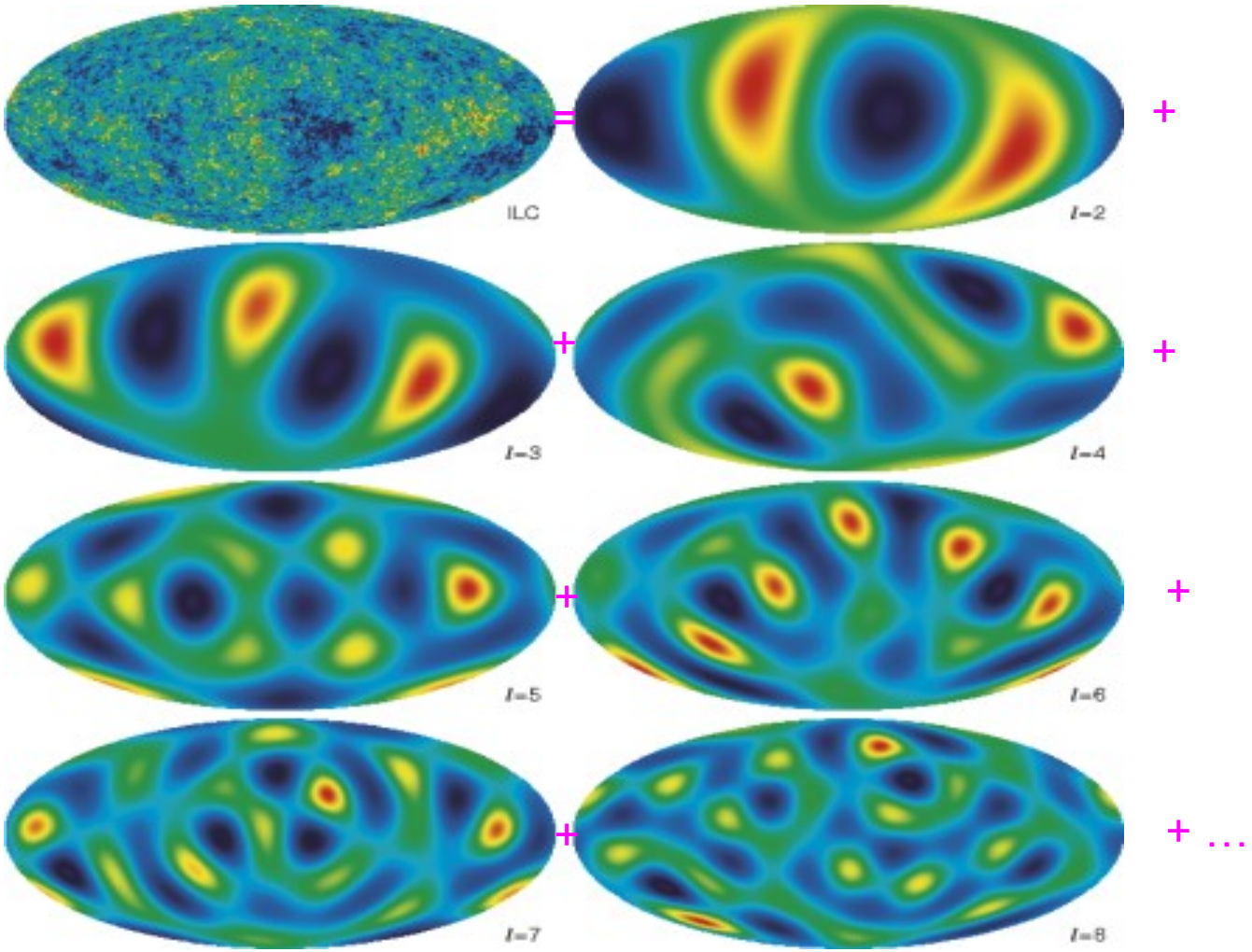


Bei der Kollision von zwei Galaxien trennen sich
sichtbare Materie (rot) und dunkle Materie (blau):

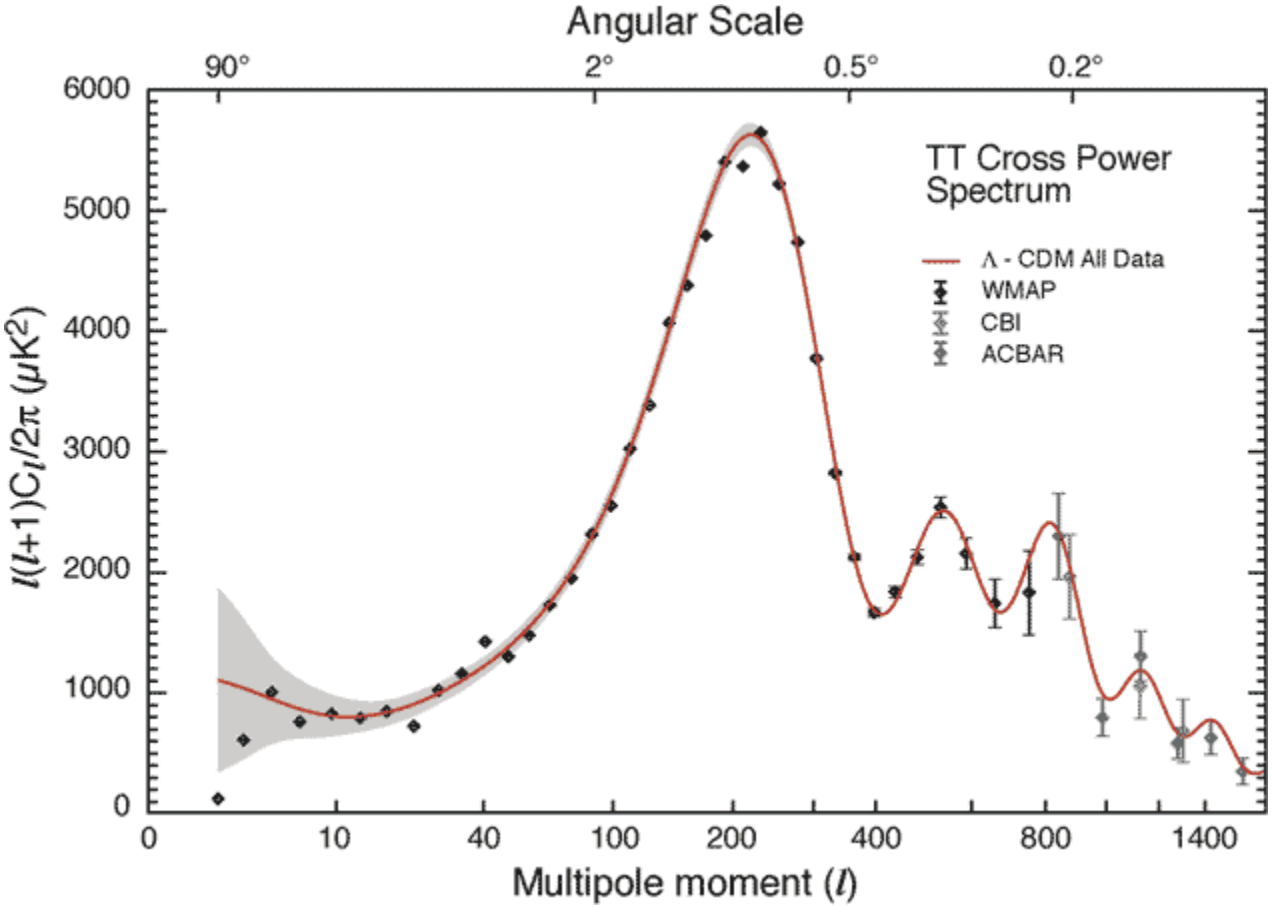
- Materie wird abgebremst
- Anteile aus dunkler Materie durchdringen sich ohne Wechselwirkung

Dunkle Energie

Analyse der Hintergrundstahlung: Multipolentwicklung



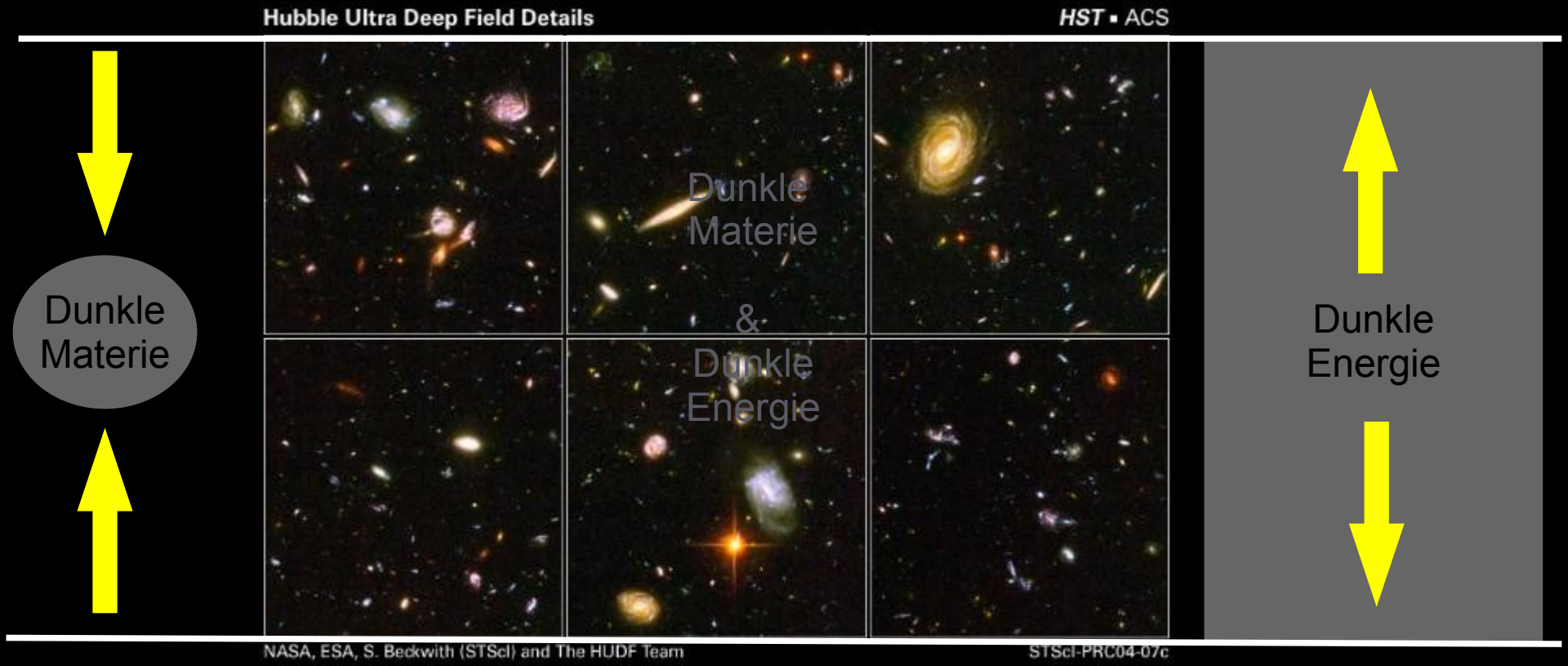
Das Leistungsspektrum



… erlaubt Rückschlüsse auf Inhomogenitäten der Materiedichte im frühen Universum

Analyse dieser und anderer Daten:

Unser Universum dehnt sich aus –
und zwar mit **zunehmendem Alter immer schneller** !

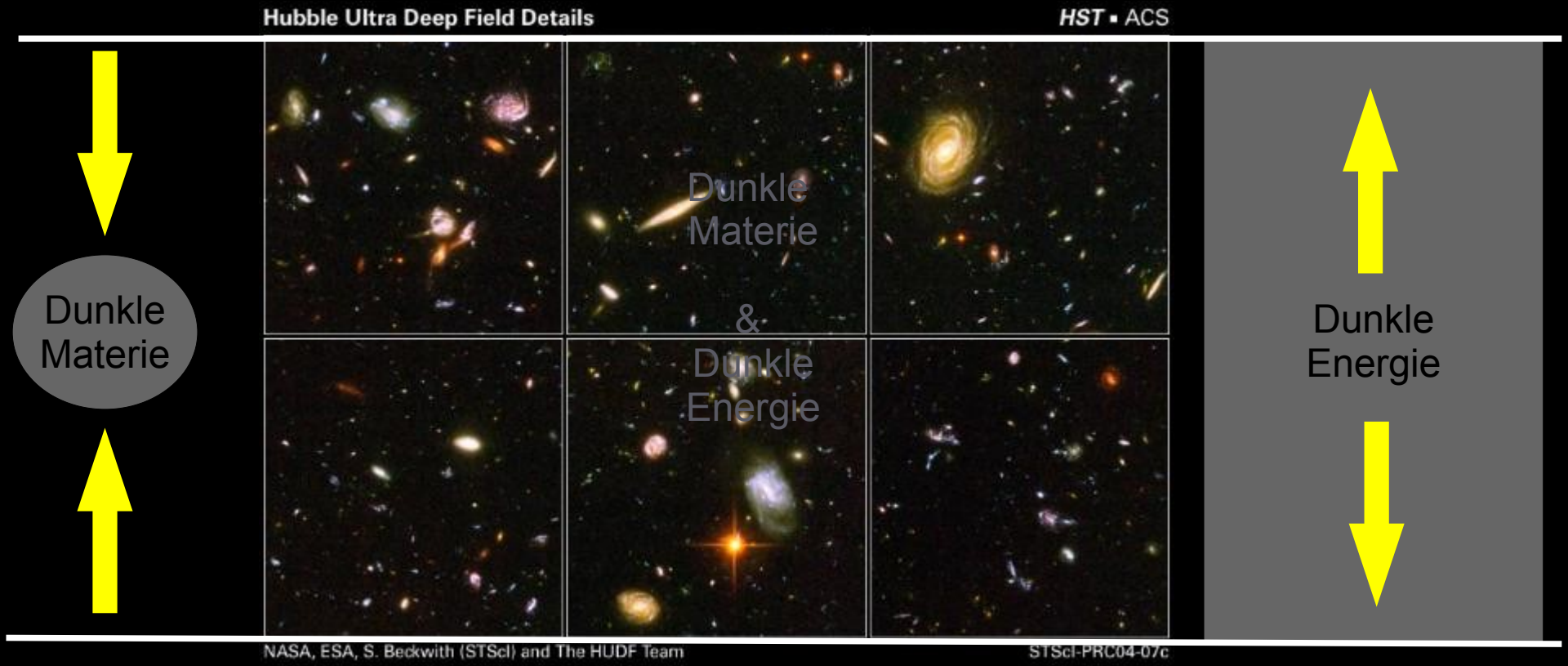


“Dunkle Energie(*)“ treibt es auseinander !

(*) dunkle Energie = die Konstante Λ in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie

Analyse dieser und anderer Daten:

Unser Universum dehnt sich aus –
und zwar mit **zunehmendem Alter immer schneller** !

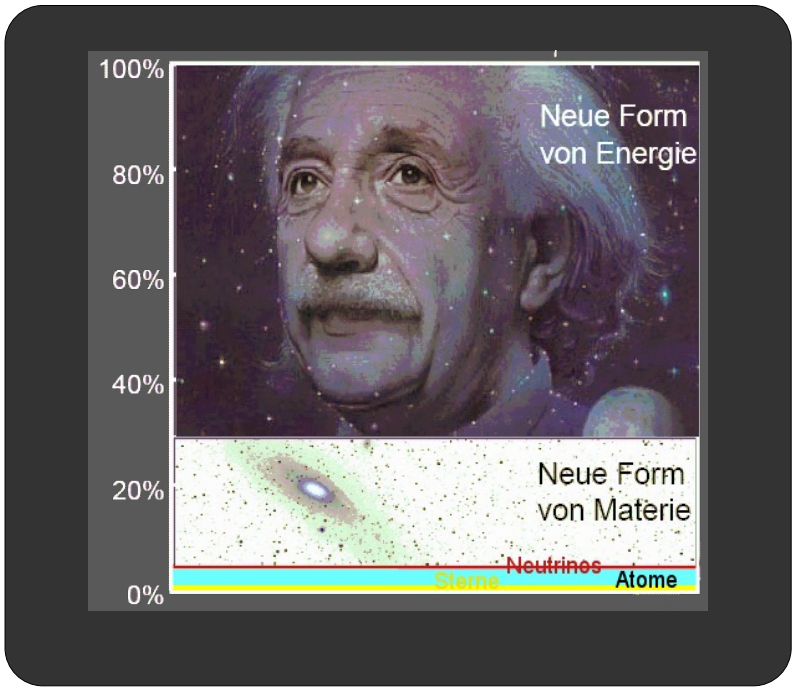


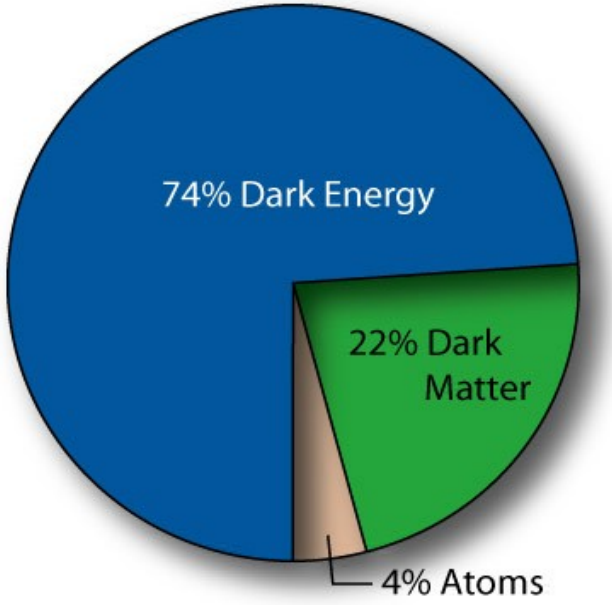
"Dunkle Energie(*)" treibt es auseinander !

(*) dunkle Energie = die Konstante Λ in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie

Was steckt teilchenphysikalisch dahinter ?

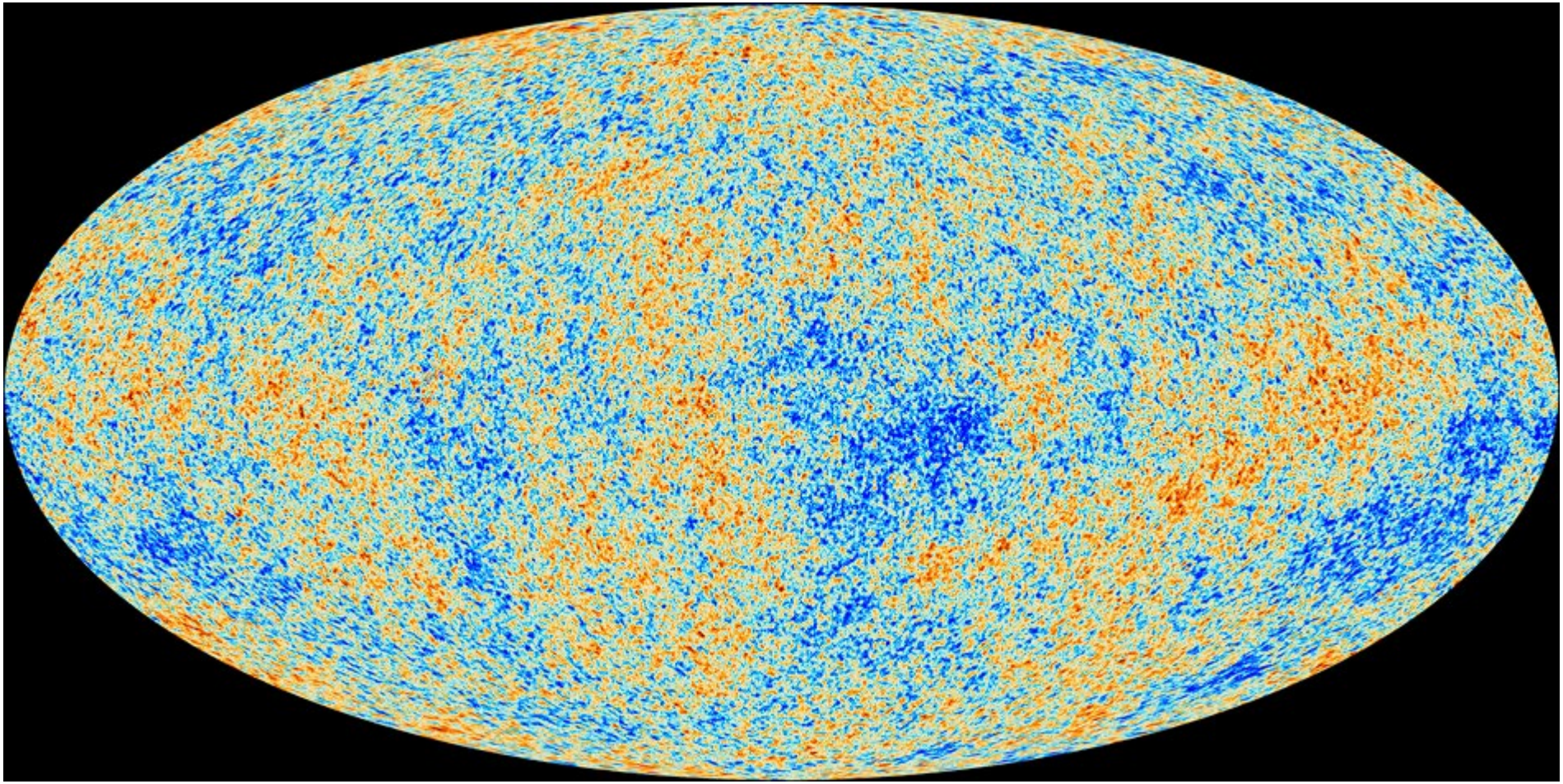
Kosmologische Parameter





Gesamtenergiedichte	1.003 ± 0.015
Materiedichte	0.24 ± 0.04
Baryonendichte	0.042 ± 0.004
Vakuumenergiedichte	0.76 ± 0.05
Neutrinodichte	< 0.014
Alter des Universums	13.7 ± 0.2 Gyr
Hubble-Parameter	0.73 ± 0.0

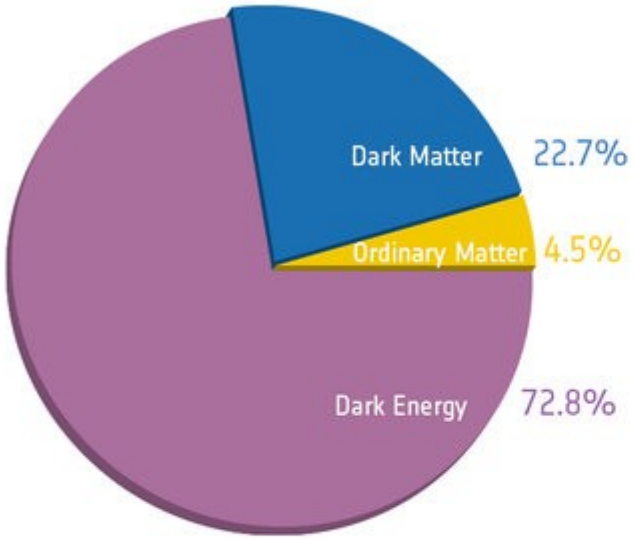
Erste Ergebnisse des Planck-Satelliten



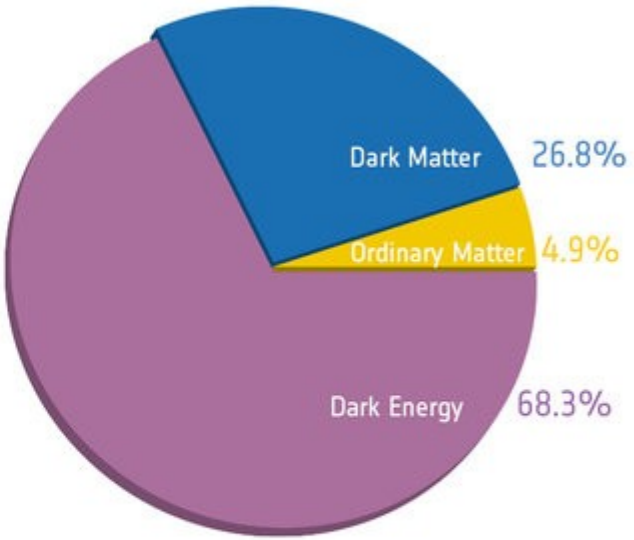
Messung der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung des Planck-Satelliten

Räumliche Auflösung höher als die von WMAP

Planck-Messungen



Before Planck



After Planck

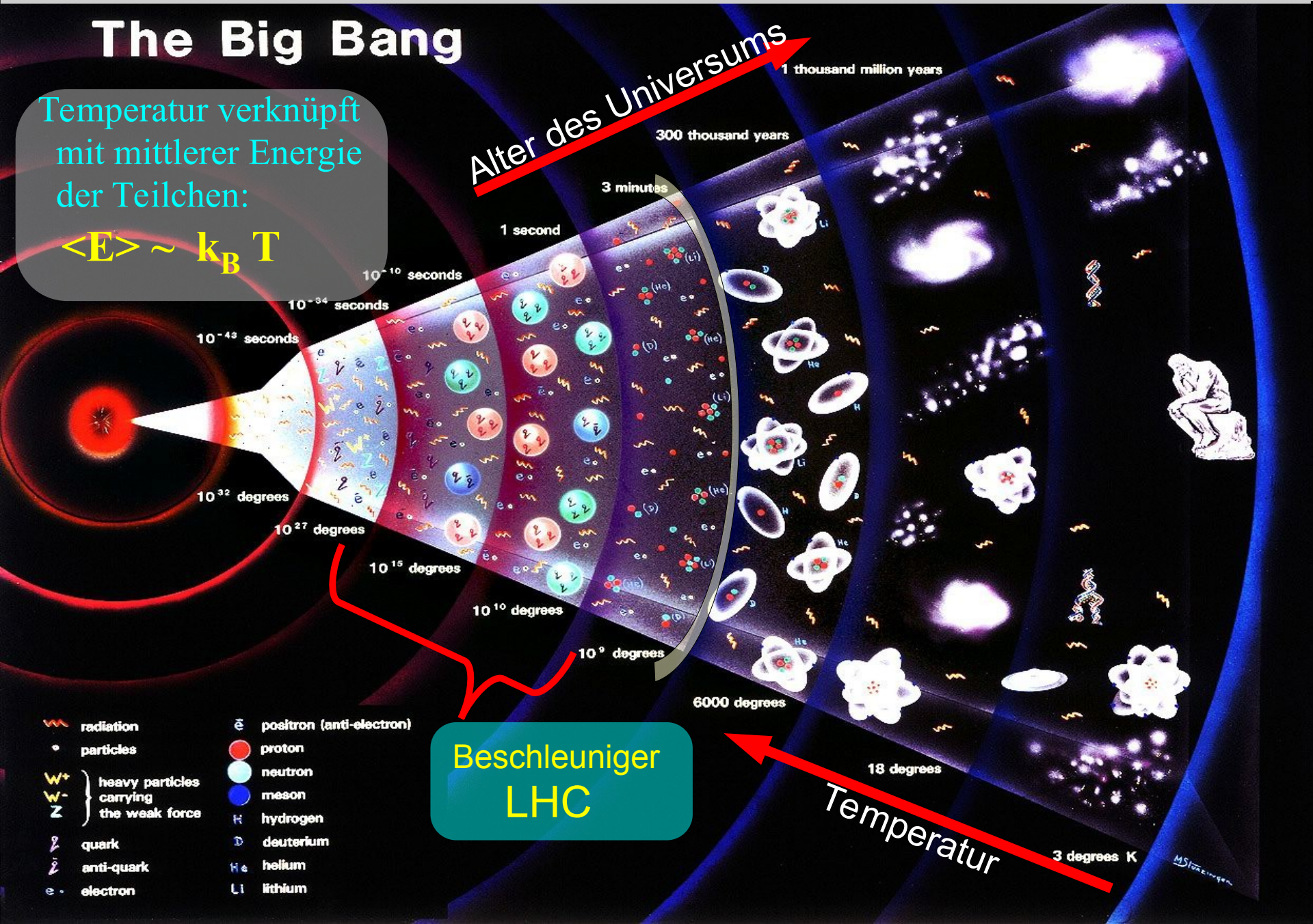
… bestätigen das Bild, führen aber zu leicht anderen Anteilen

- **95% der Energiedichte des Universums sind unbekannt!**

Teilchenphysik
&
Kosmologie

Die Saat für unser Universum
ist im
Mikrokosmos der Elementarteilchen
gelegt

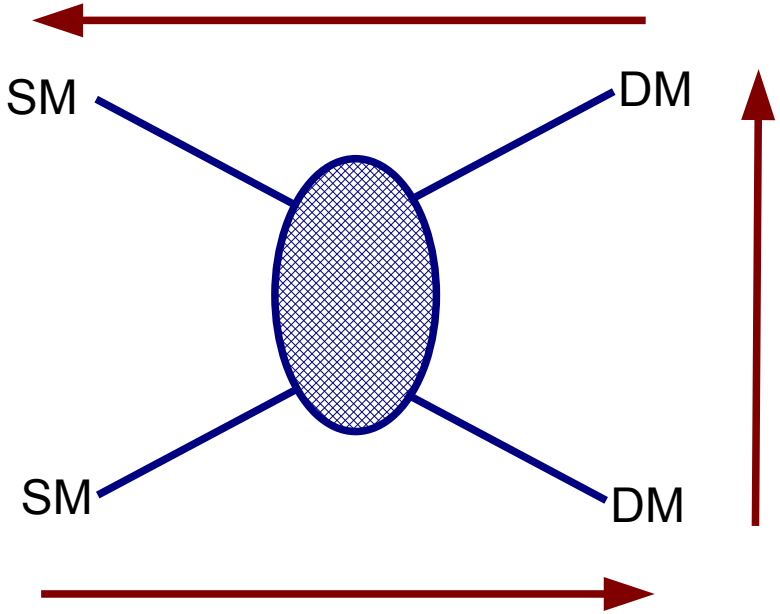
Reise in die Vergangenheit des Universums: Teilchenphysik



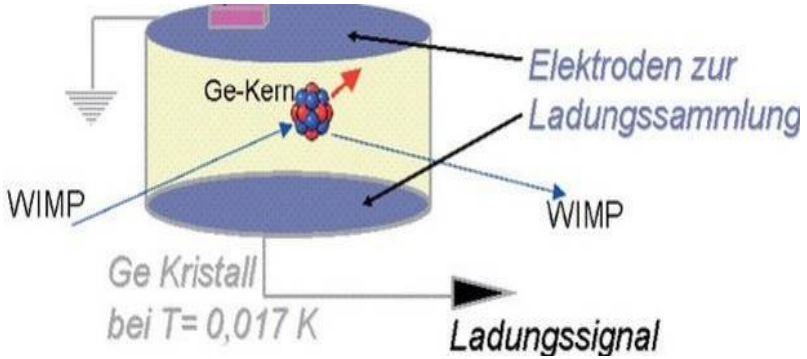
Drei Wege zur Suche nach der dunklen Materie

Beispiel:
AMS-Spektrometer
auf der ISS

Astro-Teilchenphysik:
Signale von *DM-Annihilation*

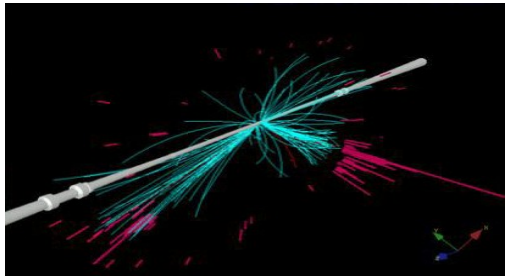


Beispiel:
EDELWEISS



Direkte Suche
DM-Streuung an Materie

Teilchenphysik:
Erzeugung von DM Teilchenkollisionen



Beispiel:
Simulation im
CMS-Detektor

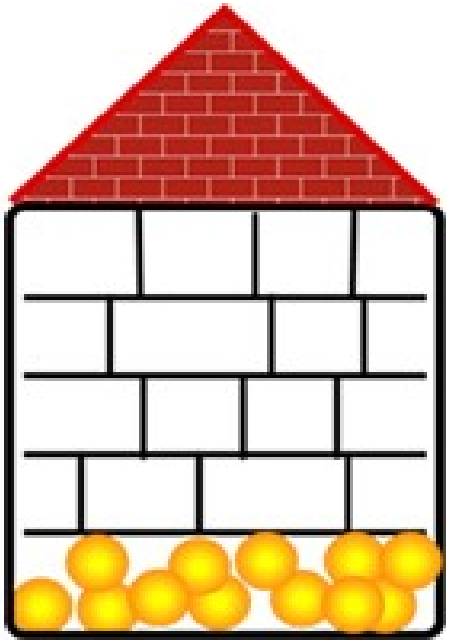
Dunkle Materie in Telchenreaktionen ?

fehlende Teilchen auf dieser Seite deuten auf dunkle Materie !

Simulation eines Ereignisses mit „dunkler Materie“ im CMS-Detektor

DM ist auch im Detektor „dunkel“ !

Supersymmetrie zwischen „*Bosonen*“ und „*Fermionen*“



Bosonen sind „*sozial*“, alle eng zusammen

z.B. Laser-Licht

Zwei Teilchensorten:

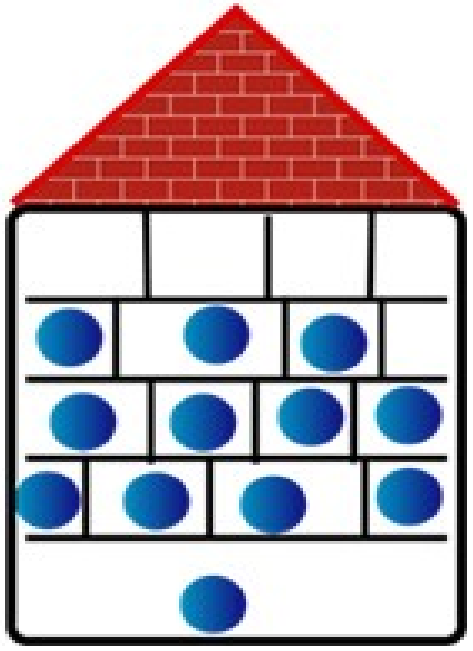
Fermionen= Materieteilchen

(Elektron, Proton, Neutron, Myon, Neutrinos, ...)

Bosonen

(Photon, Gluon, W, Z, [Graviton], Higgs, ...)

Gibt es auch „soziale“ Materieteilchen, z.B. Elektron, das nicht dem Pauli-Prinzip gehorcht ?



Fermionen sind „*anti-sozial*“, nie zwei im gleichen Raum

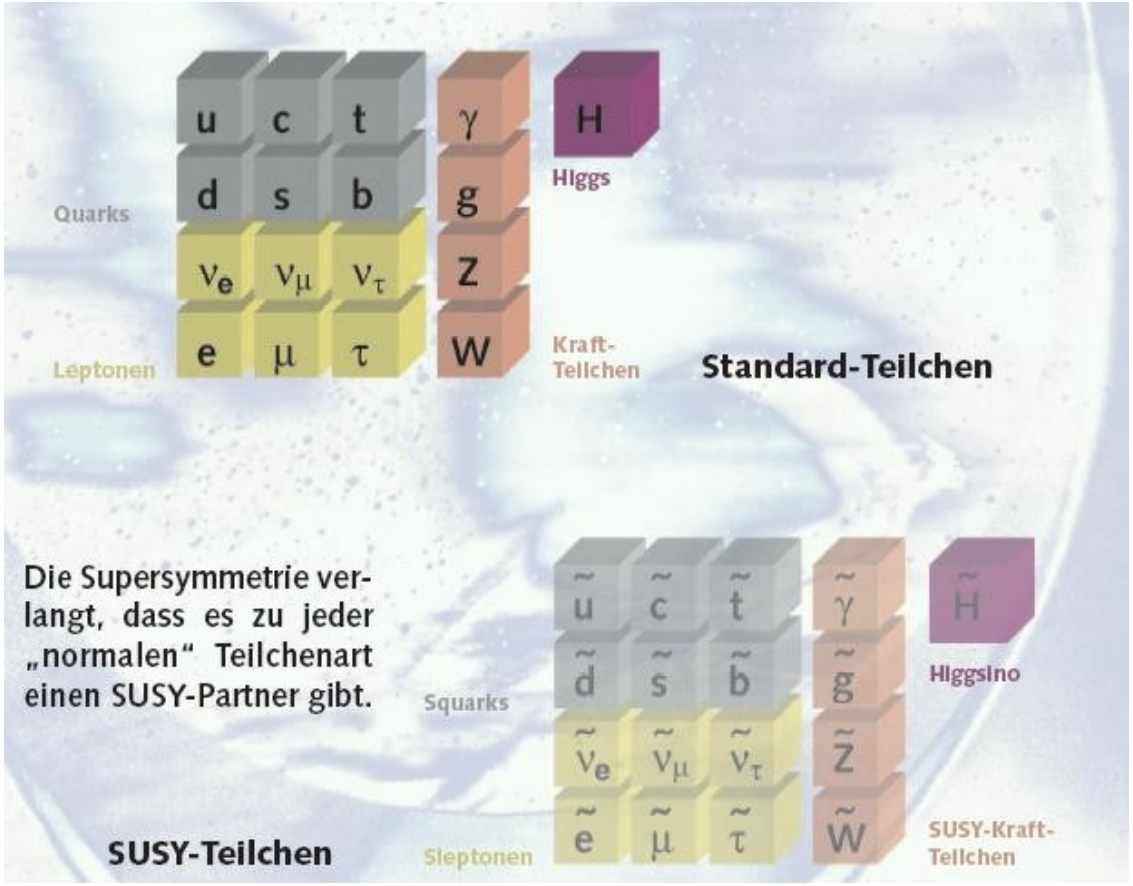
→

„Pauli-Prinzip“

Ist Supersymmetrie die Lösung ?

Supersymmetrie ordnet jedem Teilchen einen Partner zu:

Boson ↔ Fermion



Leichtestes supersymmetrisches Teilchen ist

- **stabil**
- **elektrisch neutral**
- **nicht stark-wechselwirkend?**

Dunkle Materie !?

SuSy kann weitere Probleme des Standarmodells lösen:

- Verbindung zur Gravitation
- Brücke zur „Urkraft"

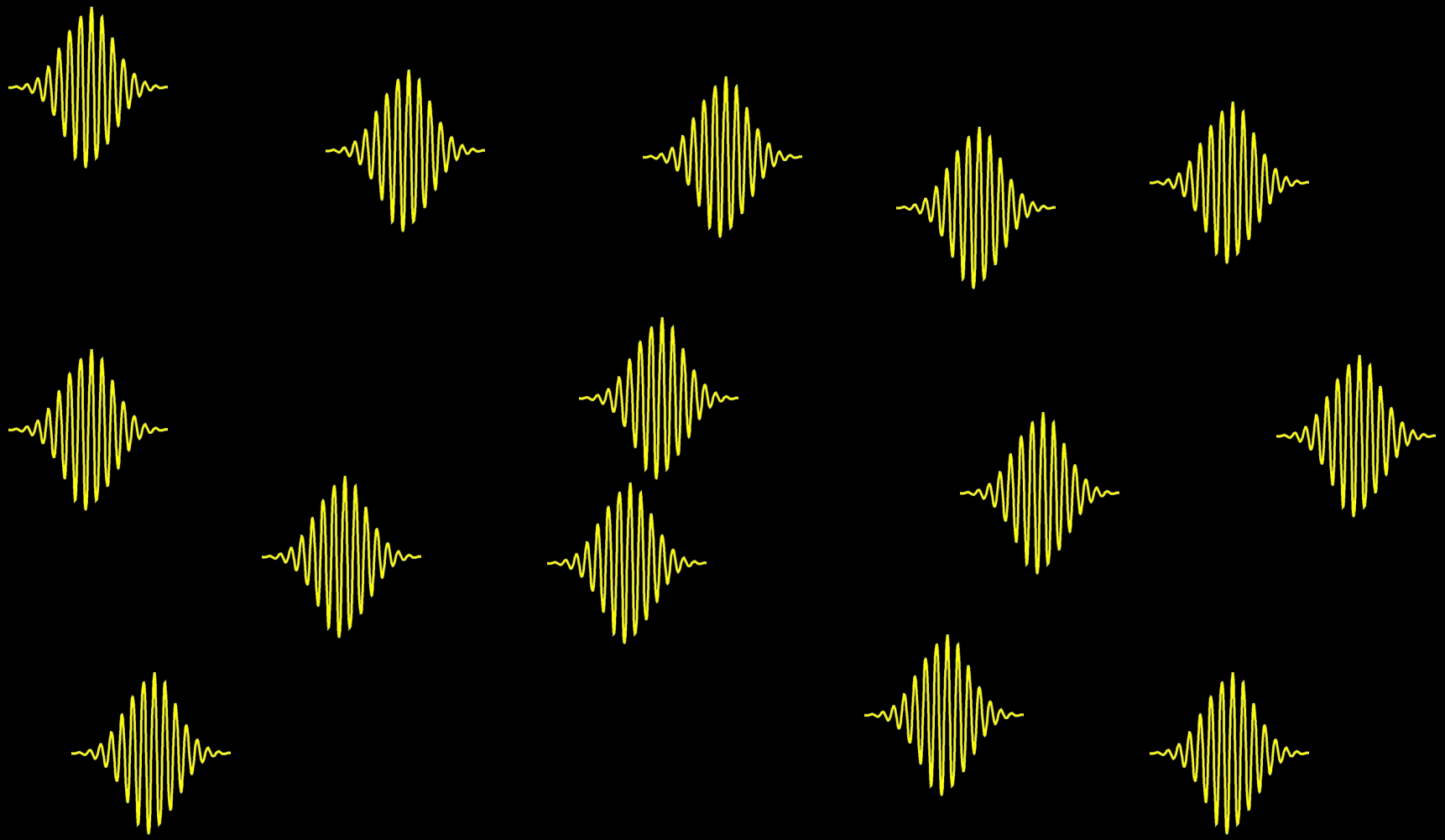
Was passiert,
wenn Materie

auf
Anti-Materie trifft ?

Materie und Anti-Materie

Sie zerstrahlen !
(in zwei Photonen)

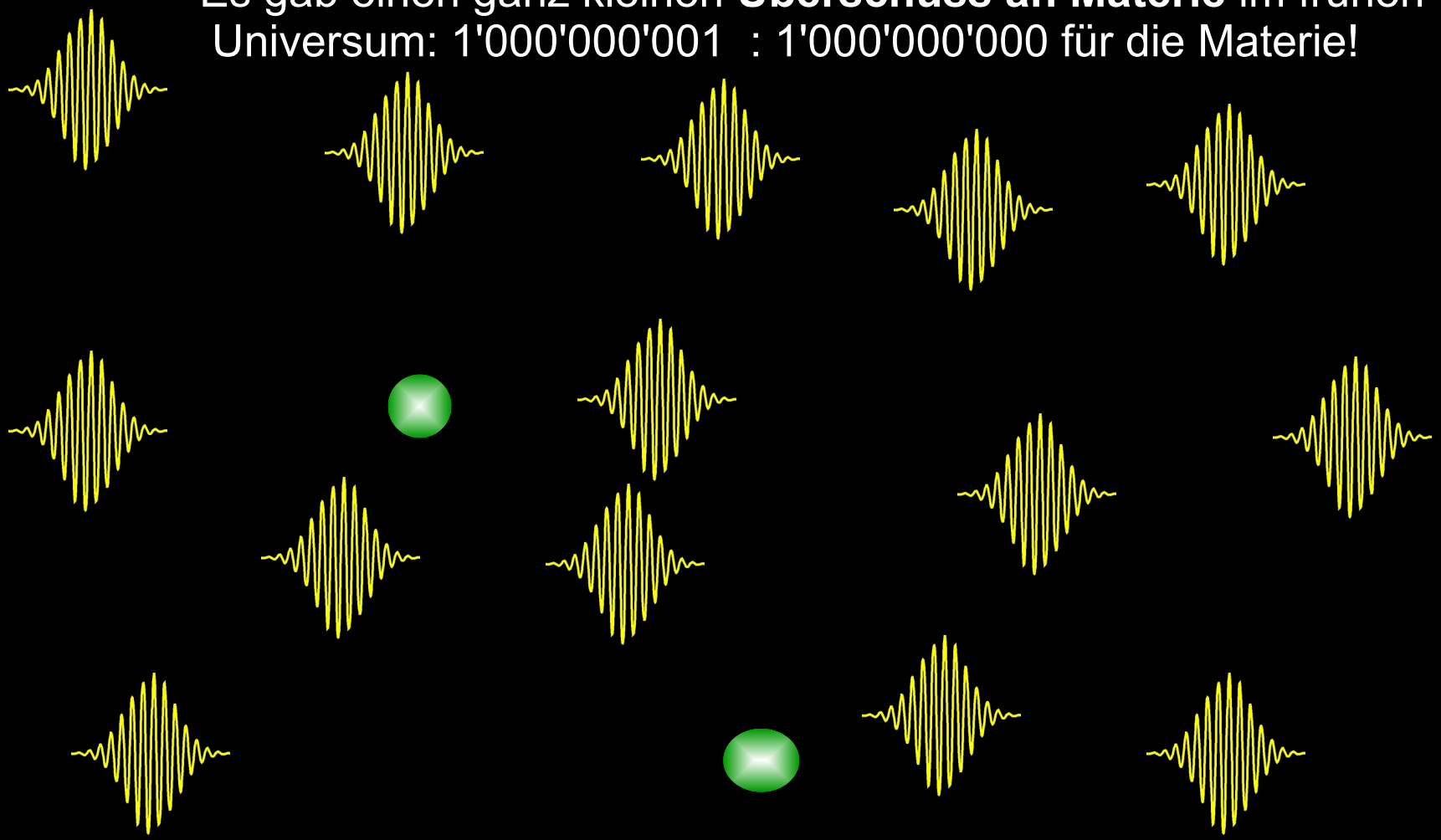
Warum gibt es überhaupt noch Materie ?



Wenn Materie und Anti-Materie genau gleich wären,
gäbe es im Universum nur noch Licht (=Photonen) !

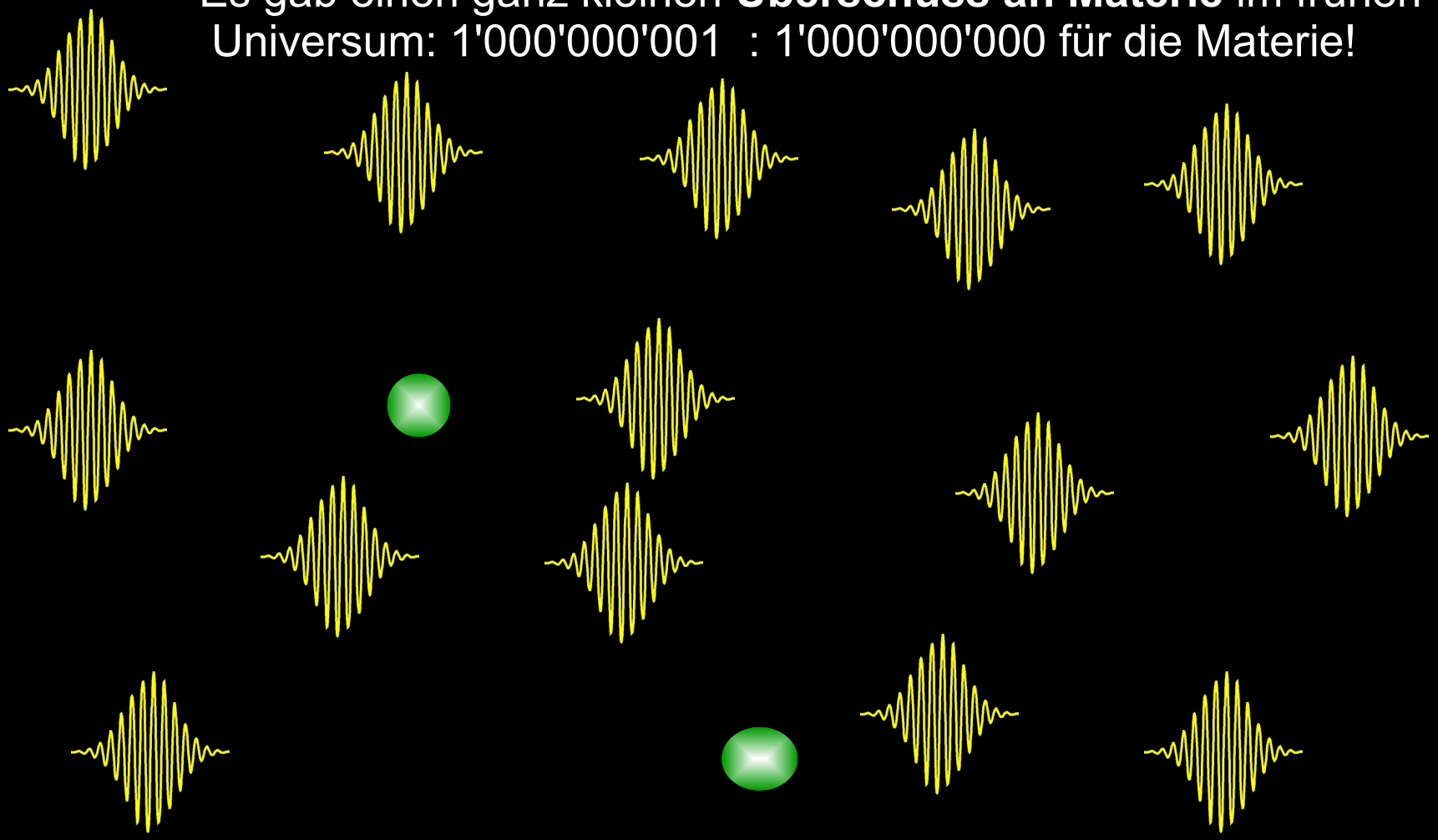
Warum gibt es überhaupt noch Materie ?

Es gab einen ganz kleinen **Überschuss an Materie** im frühen Universum: 1'000'000'001 : 1'000'000'000 für die Materie!



Warum gibt es überhaupt noch Materie ?

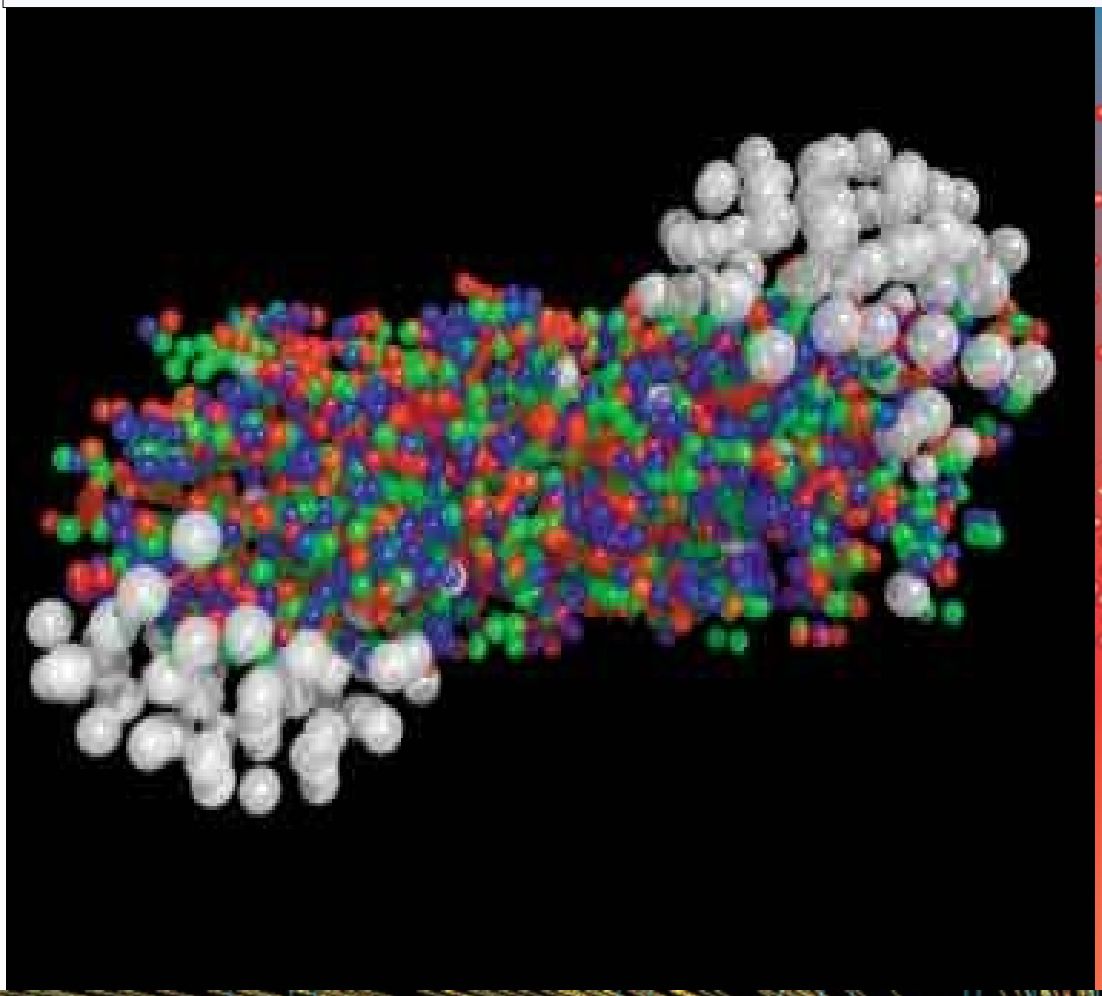
Es gab einen ganz kleinen **Überschuss an Materie** im frühen Universum: 1'000'000'001 : 1'000'000'000 für die Materie!

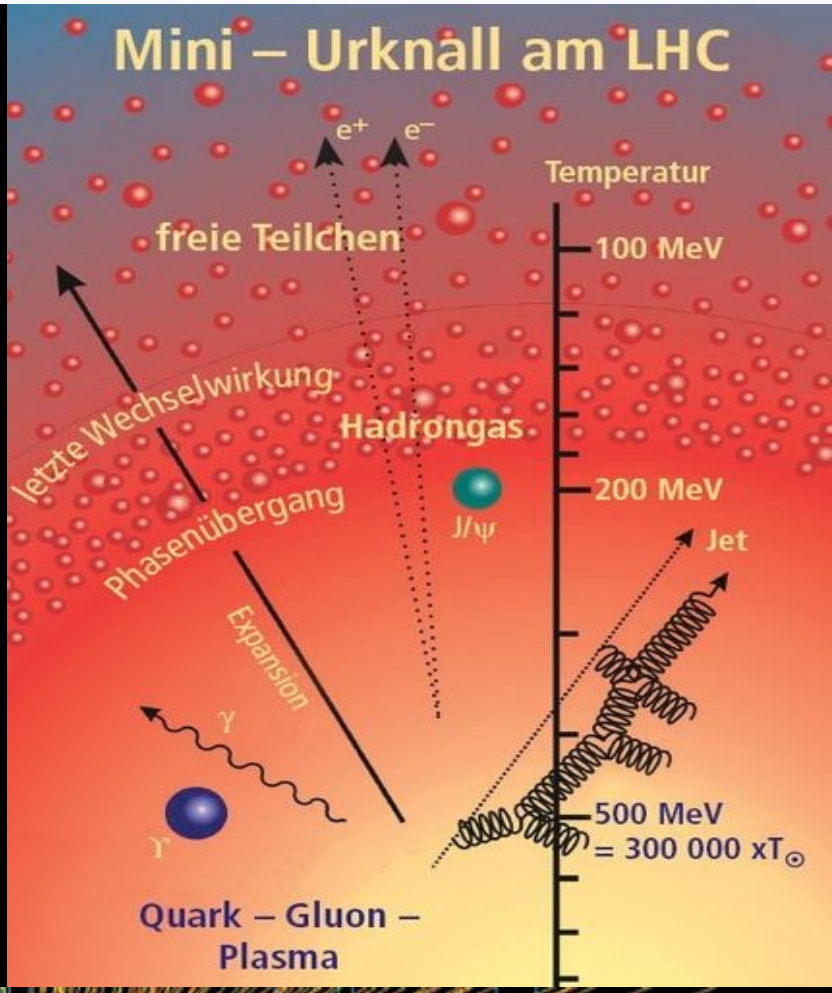


Etwas Materie hat überlebt, aus diesem Rest bestehen wir !!

Materie-Antimaterie-Asymmetrie ist Spezialität von **LHCb**

Woraus entstanden die ersten Protonen?

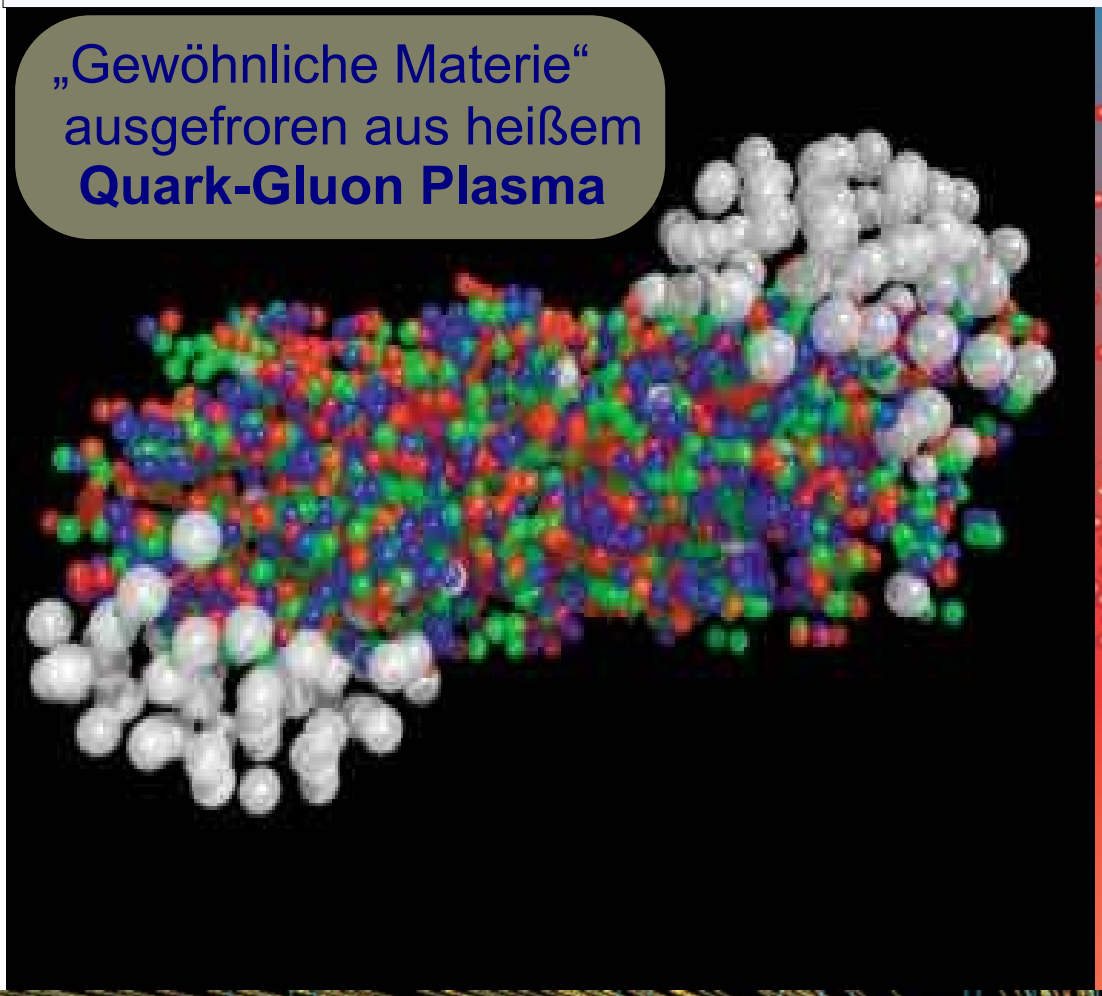


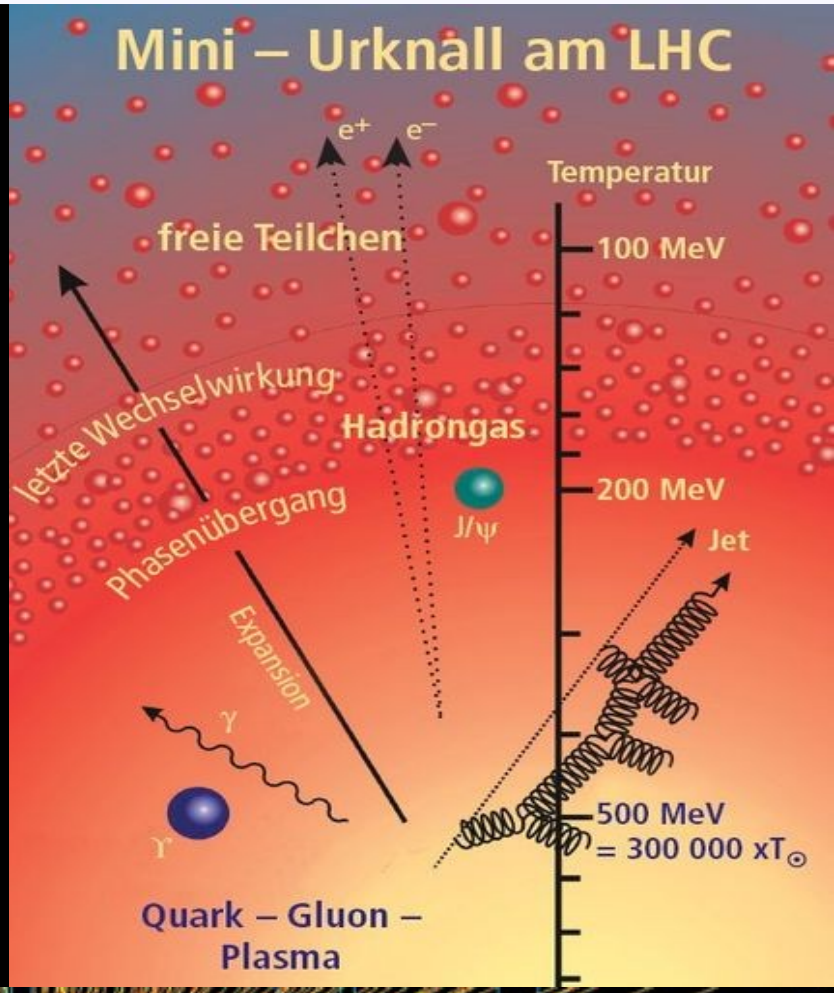


Blei-Blei Kollision am LHC mit Tausenden von Teilchenspuren in **ALICE**

Woraus entstanden die ersten Protonen?

„Gewöhnliche Materie“
ausgefroren aus heißem
Quark-Gluon Plasma

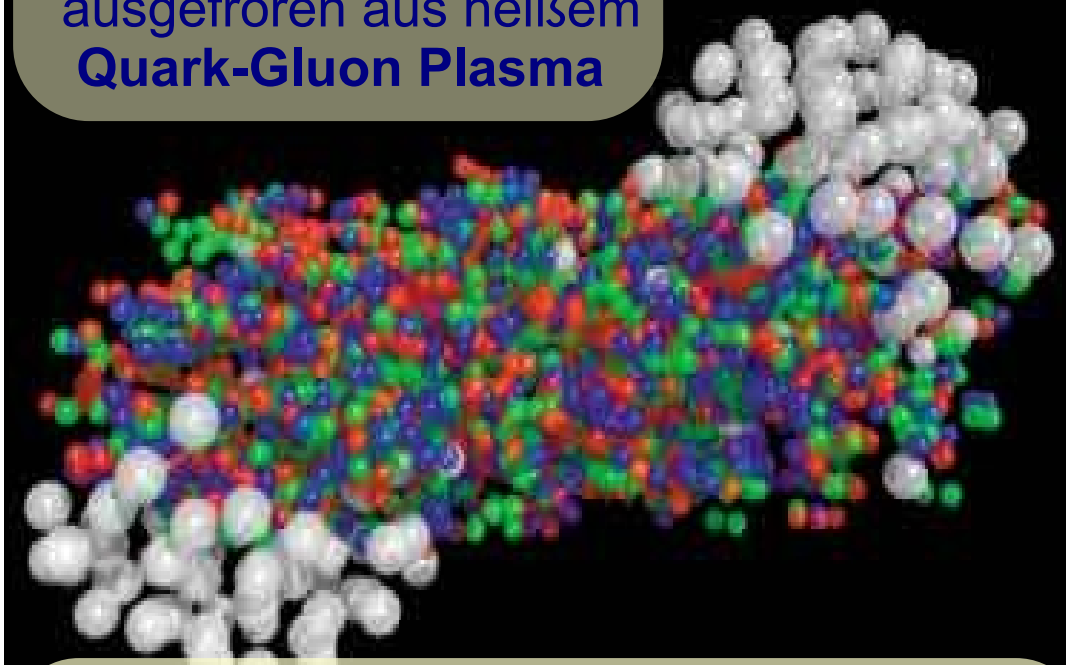




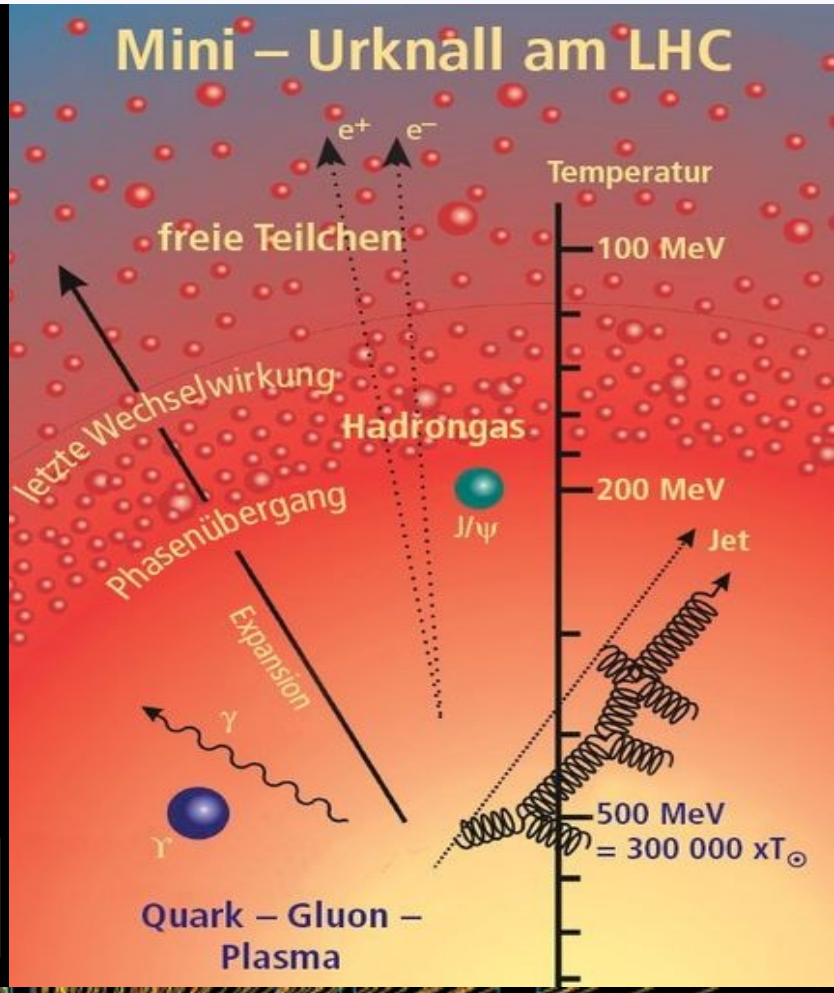
Blei-Blei Kollision am LHC mit Tausenden von Teilchenspuren in **ALICE**

Woraus entstanden die ersten Protonen?

„Gewöhnliche Materie“ ausgefroren aus heißem **Quark-Gluon Plasma**

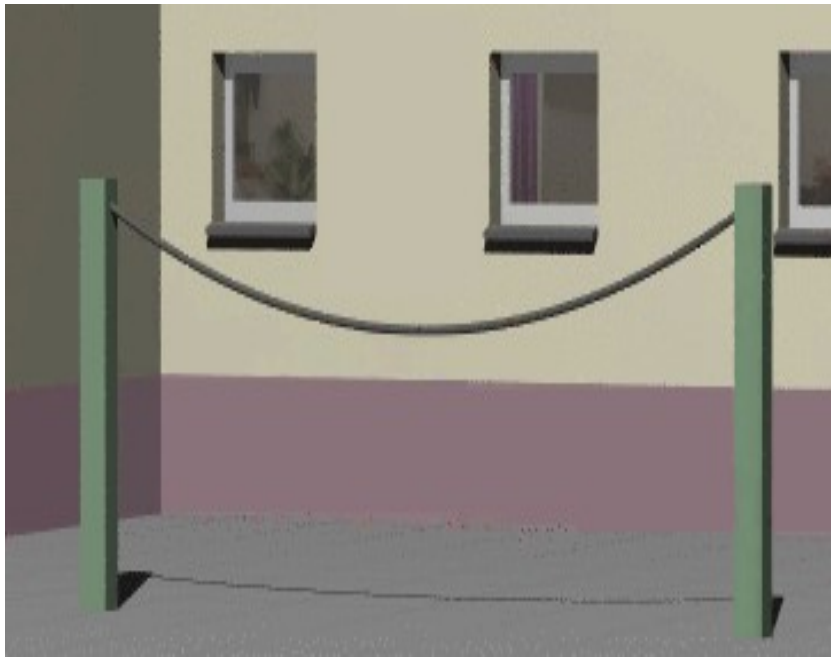


Könnte heute noch im **Inneren von Neutronen-sternen** existieren, oder entsteht am LHC in **Kollision von Blei-Kernen zur Erzeugung hoher Teilchendichte bei $T \approx 10^{12}$ K**

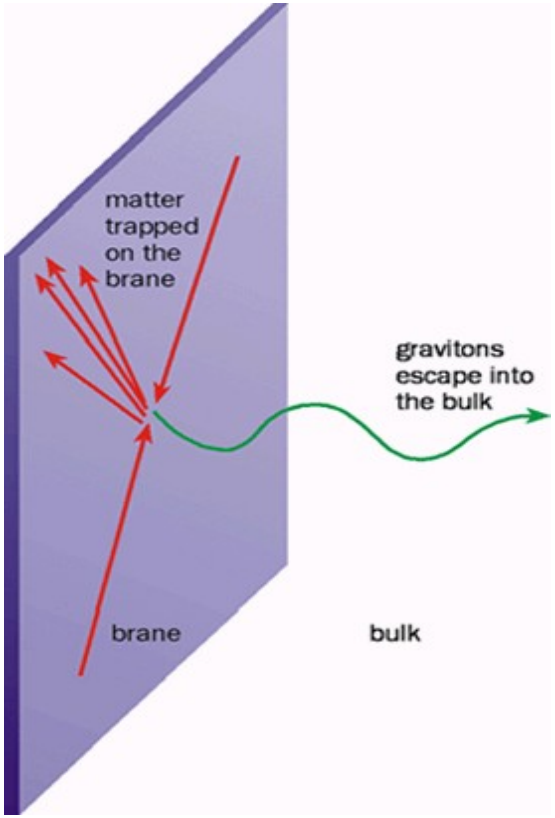


Blei-Blei Kollision am LHC mit Tausenden von Teilchenspuren in **ALICE**

Verborgene Raumdimensionen ?



- Aus der Ferne: Seil ist 1-dim Objekt
- Ameise nimmt es als Oberfläche wahr – 2. Dimension ist „aufgerollt“
- Struktur bei hoher Vergrößerung deutet auf dritte Dimension hin



Unser dreidimensionaler Raum eingebettet in höherdimensionalen Raum ?
Brane-Modell: Gravitation breitet sich in allen Dimensionen aus - wird bei kleinen Abständen schnell stärker ($\sim r^{1-n}$)

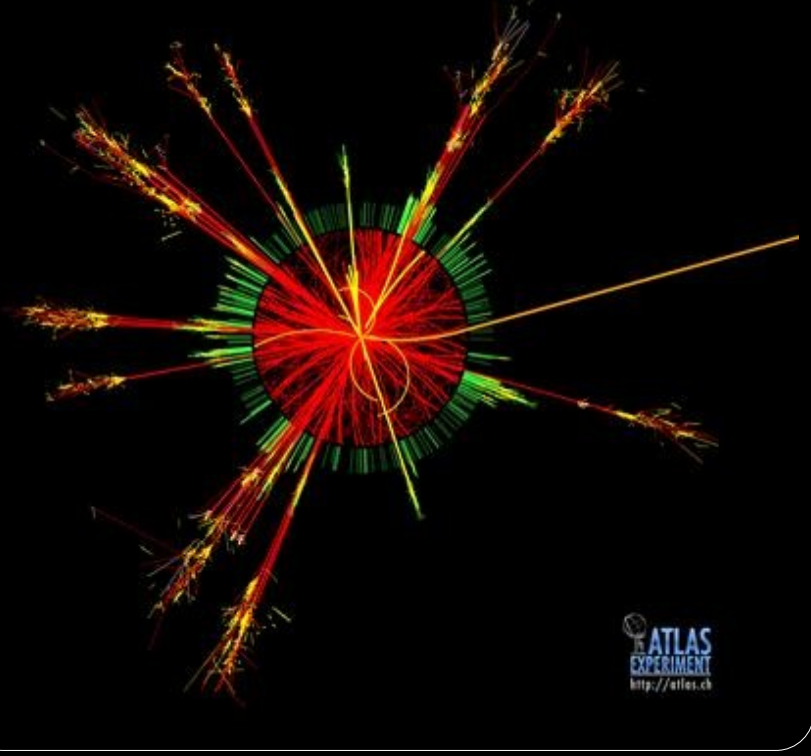
Ist unser Raum auch bei Abständen von 10^{-19} m noch dreidimensional? Werden wir „starke“ Gravitation (=Grativon-Produktion) sehen ? . . .

Schwarze Löcher am LHC ?

... oder noch Spektakuläreres ?

Schematische Darstellung eines schwarzen Lochs mit Milliarden Sonnenmassen, das einen Stern verschluckt.

Simulierter Zerfall eines schwarzen Lochs im ATLAS-Detektor



Am LHC höchstens
„mikroskopische“ Schwarze Löcher“
Erzeugung nur mittels „neuer Physik“, z.B. Existenz zusätzlicher Raumdimensionen

- sie sind instabil („Hawking-Strahlung“)
- Prozesse wie am LHC auf Grund der kosmischen Strahlung seit Milliarden Jahren, ohne Gefahr für die Erde
- Gefahr durch stabile, mikroskopische schwarze Löcher durch kosmische Beobachtungen ausgeschlossen: würden z.B. in Sternen gestoppt !

Keine Materie-fressenden Monster am LHC möglich!

Die Brücke zur Teilchenphysik: Offene Fragen

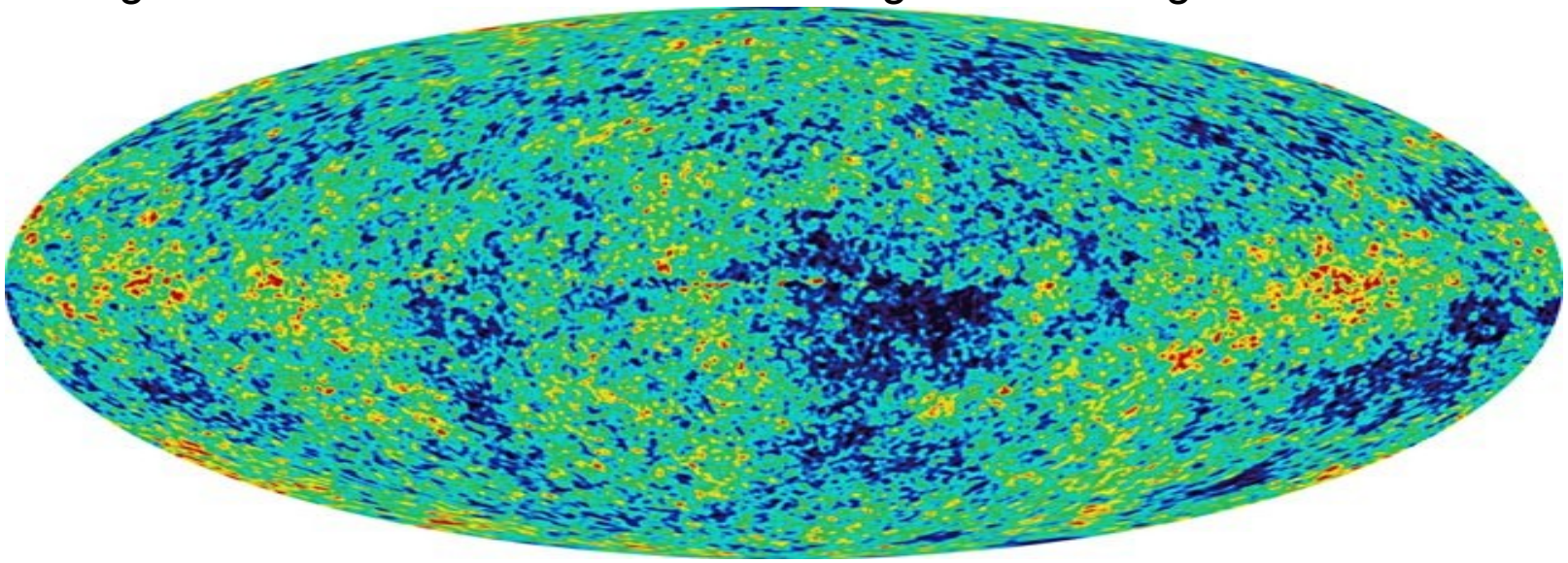
Ende

vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Zusatz - Material

"Licht" vom Urknall

Messung der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung



"Echo des Urknalls"

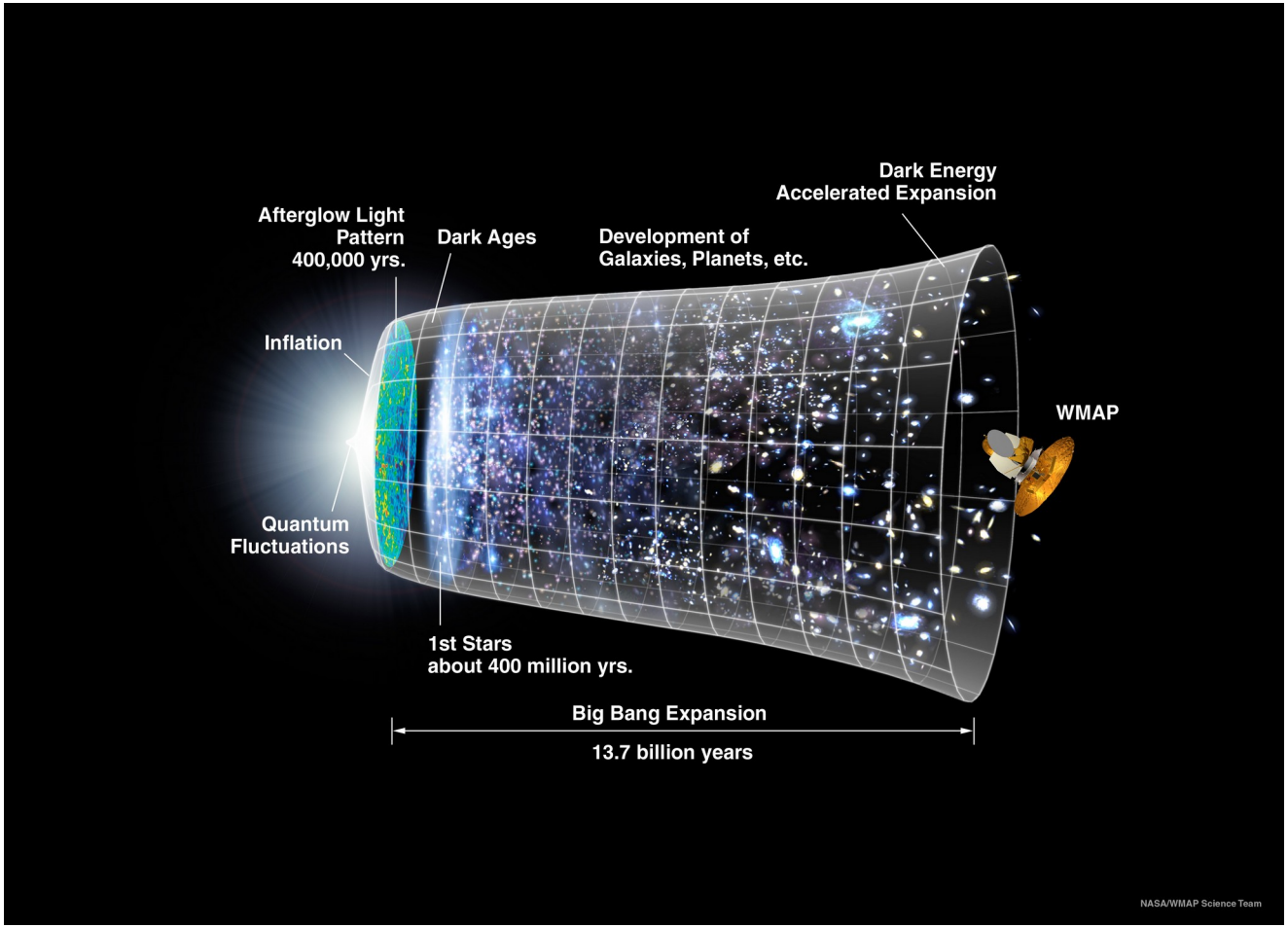
Blick zurück in die Zeit, als das Universum druchsichtig wurde
(Alter 380'000 Jahre, Temperatur 3000 K)

Kleinste Temperaturschwankungen der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung von 2,7 K geben Hinweis auf Inhomogenität des frühen Universums →

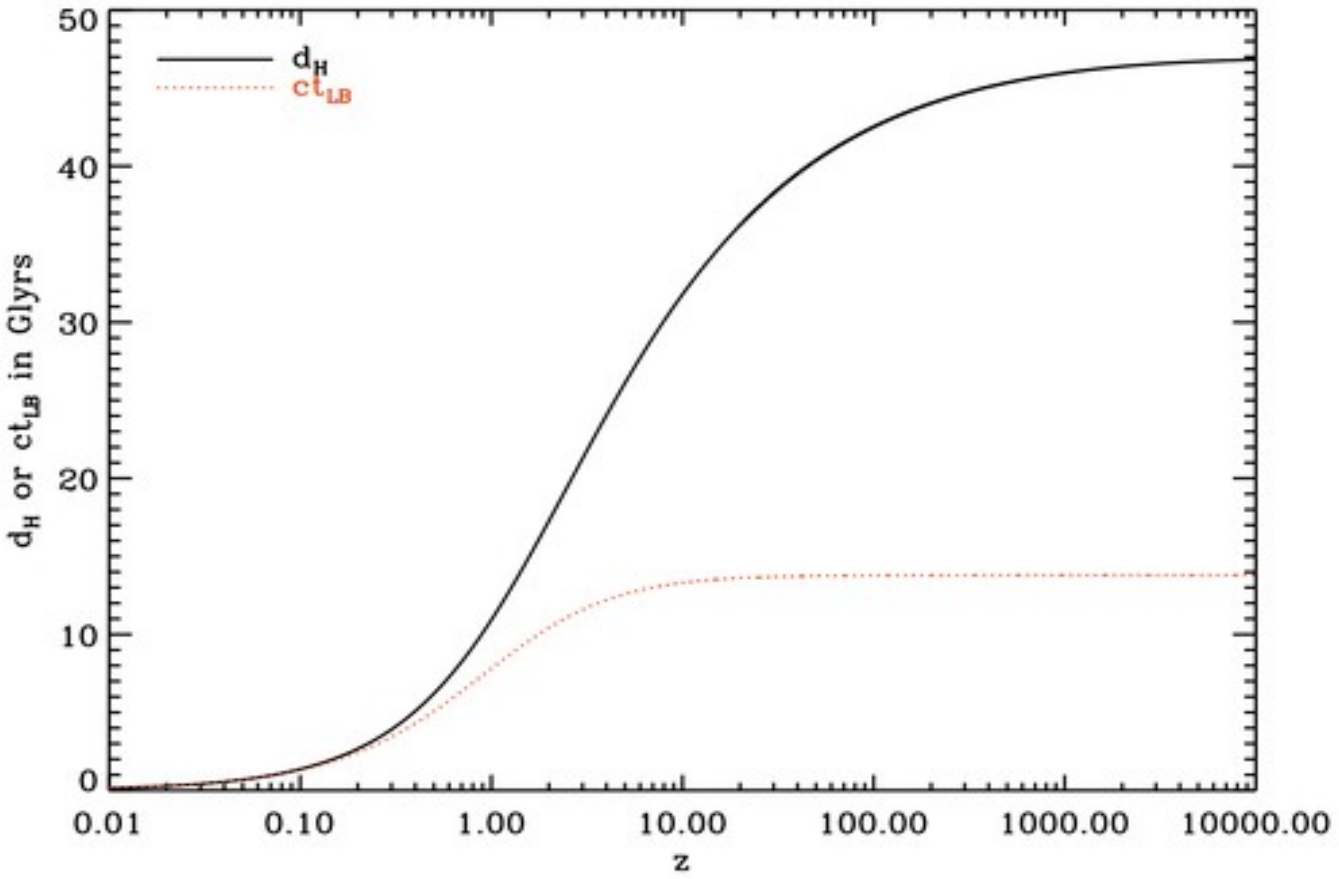
Zusammen mit anderen Messungen →

Existenz von ~25% dunkler Materie und 70% „dunkler Energie"*

Die Entwicklung des Universums



Entfernung als Funktion der Rotverschiebung z



Pause

und Zeit für Fragen ?

Ende Vorlesung 27

und Zeit für Fragen ?