

The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map, showing a complex pattern of red, orange, and blue colors representing temperature variations in the early universe. The map is centered on the sky, with a prominent bright yellowish-white region in the center, likely representing the galactic plane.

Der Urknall – der erste Tag der Schöpfungsgeschichte im Licht der modernen Physik

Wolfgang Wagner

Bergische Universität Wuppertal

16. Mai 2013

Pfarrgemeinde St. Marien

Zur Person



Geburtsort: Neuwied am Rhein



1992 – 1995 Physikstudium
Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn



1995 – 1996 Graduate School der Ohio
State University, Columbus, Ohio



1996 – 2000
Max-Planck-Institut für Physik
(Werner-Heisenberg-Institut)
in München



2008 – jetzt Bergische Universität
Wuppertal



2002 – 2003
Forschungsaufenthalt am
Fermi National Accelerator
Laboratory (Fermilab), USA



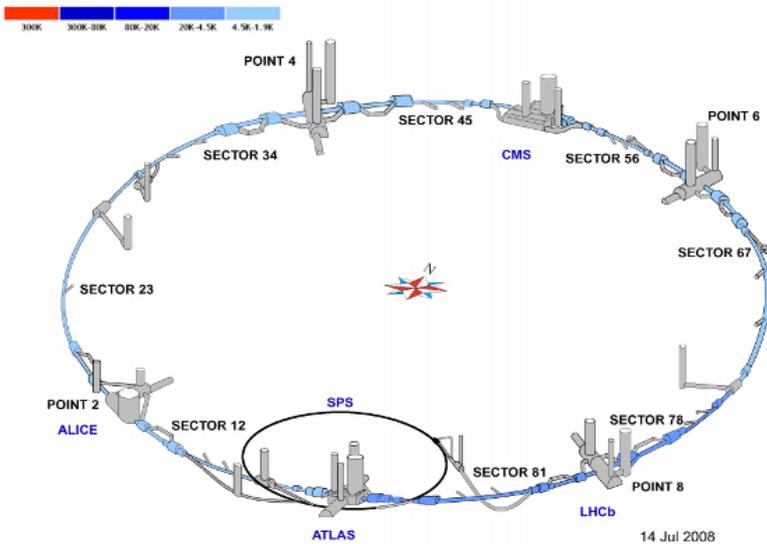
Institut für Experimentelle Kernphysik
Universität Karlsruhe
2000 – 2002 Wissenschaftlicher Angestellter
2003 – 2007 Wissenschaftlicher Assistent
seit 2005 als Privatdozent

CERN

An aerial photograph of the CERN particle accelerator complex. The image shows a vast landscape of agricultural fields and forests, with a large circular track (the LHC) and several smaller circular tracks (the SPS and PS) overlaid in white. The text 'CERN' is written in a large, white, italicized font at the top. Below it, a semi-transparent dark box contains the text 'das europäische Labor für Elementarteilchenphysik'. At the bottom, a black box contains the text 'Gegründet 1954' and 'eines von Europas ersten Gemeinschaftsprojekten'.

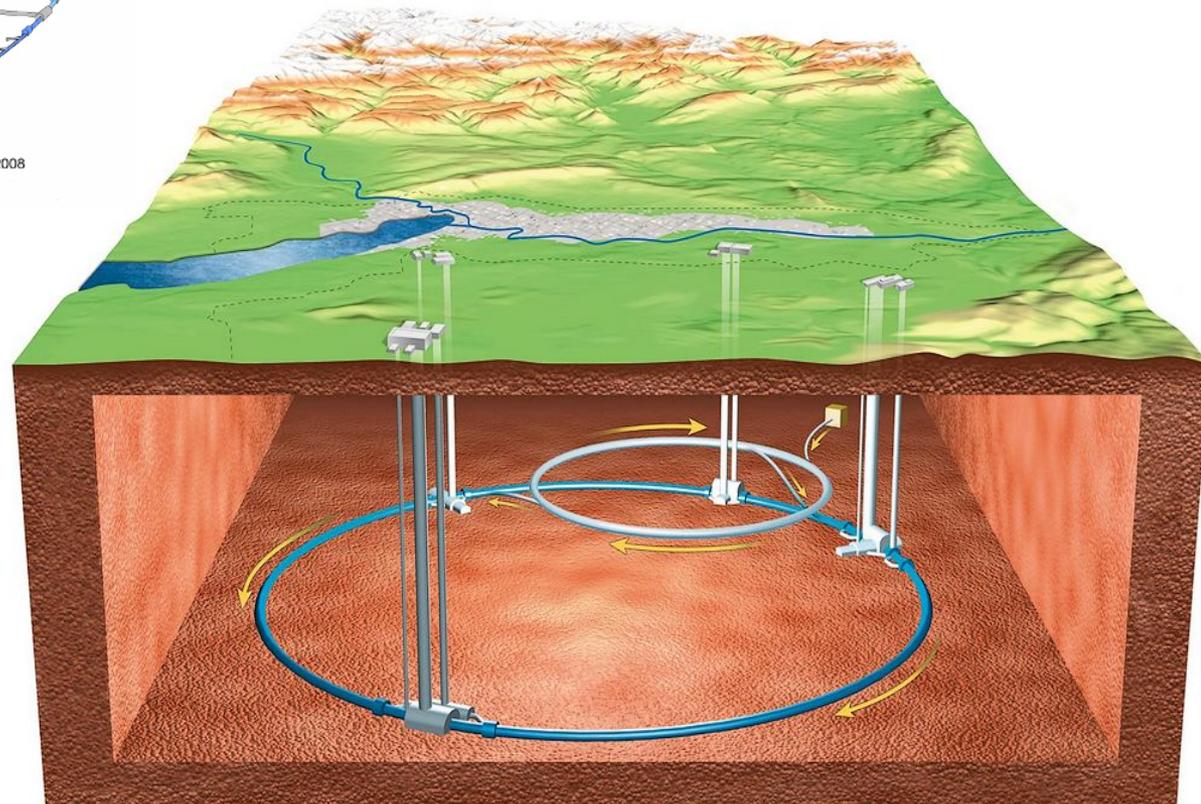
das europäische Labor für
Elementarteilchenphysik

Gegründet 1954
eines von Europas ersten Gemeinschaftsprojekten



Proton-Proton-Beschleuniger

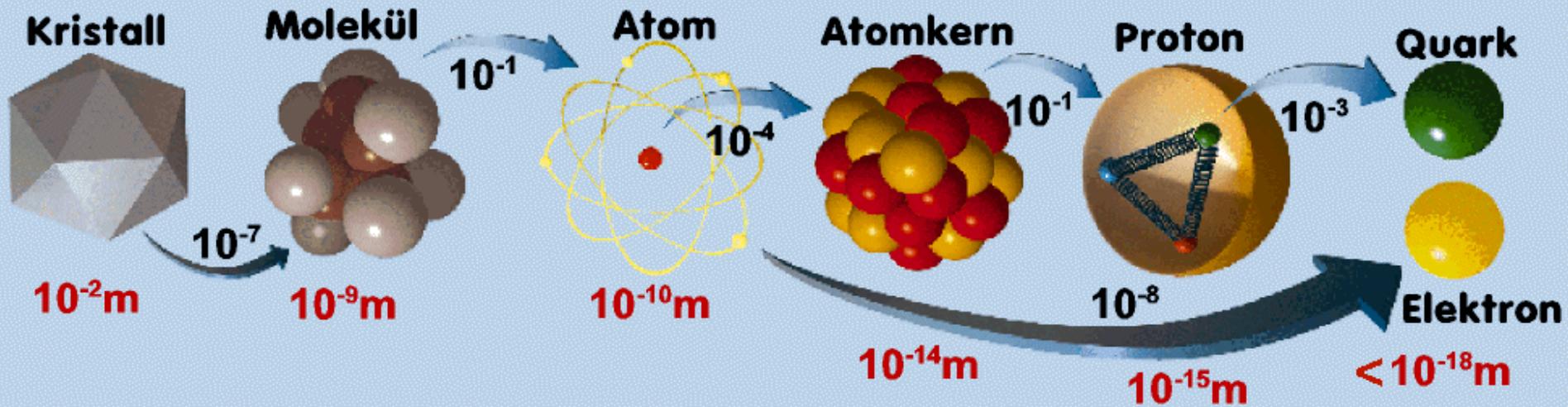
- in Tunnel am CERN mit 27 km Umfang
- Protonen machen 10000 Runden/Sekunde
- 7 TeV pro Kollision, d.h Bedingungen wie zu Zeiten 10^{-13} - 10^{-14} s nach dem Urknall, Abstände bis 10^{-19} m



Vier Teilchendetektoren:

- **ATLAS** (Wuppertaler Beteiligung)
- **ALICE**
Pb-Pb-Kollisionen
- **CMS**
- **LHC-B**
Physik der b-Quarks

Vom Kristall zum Quark





Woher
komme ich?

Wer bin
ich?

Die Schöpfungsgeschichte

Buch Genesis 1,1 - 2,4a

Im Anfang schuf Gott Himmel und Erde; die Erde aber war wüst und wirr, Finsternis lag über der Urflut, und Gottes Geist schwebte über dem Wasser.

Gott sprach: Es werde Licht. Und es wurde Licht. Gott sah, dass das Licht gut war. Gott schied das Licht von der Finsternis, und Gott nannte das Licht Tag, und die Finsternis nannte er Nacht. Es wurde Abend, und es wurde Morgen: erster Tag.

Dann sprach Gott: Ein Gewölbe entstehe mitten im Wasser und scheide Wasser von Wasser. Gott machte also das Gewölbe und schied das Wasser unterhalb des Gewölbes vom Wasser oberhalb des Gewölbes. So geschah es, und Gott nannte das Gewölbe Himmel. Es wurde Abend ...

... aus Sicht eines Physikers.

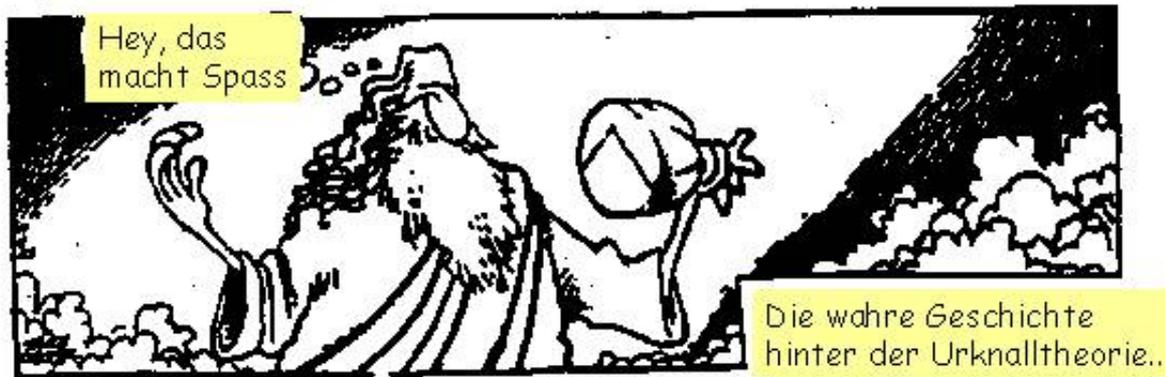
- Die Welt hat einen Anfang.
 - Im Gegensatz zu einer statischen Welt, die immer da war und sein wird.
- Die Welt hat eine Ursache, einen Urgrund, einen Schöpfer → Gott
 - Gott wird abstrakt dargestellt, nicht personal (Vater, Sohn).
- Gott erschafft die Welt durch sein Wort.
 - Abstrakter Schöpfungsakt, im Gegensatz zu Genesis 2,7 (Gott formt den Menschen aus Ackerboden).
 - Kein „Eingreifen“ oder „Hand-an-legen“.
- Zu Beginn ist die Erde wüst und wirr.
 - Im Schöpfungsakt gibt Gott der Welt Ordnung und Struktur.
 - Die Komplexität nimmt im Verlauf der Schöpfung zu.
- Die Schöpfung vollzieht sich in einer Abfolge einzelnen Schöpfungsakten.
 - Nicht alles auf einmal.
 - Keine passive Entwicklung / Evolution aus sich selbst heraus.
- Erster Schöpfungsakt: Licht.

Entstehung des Universums ...

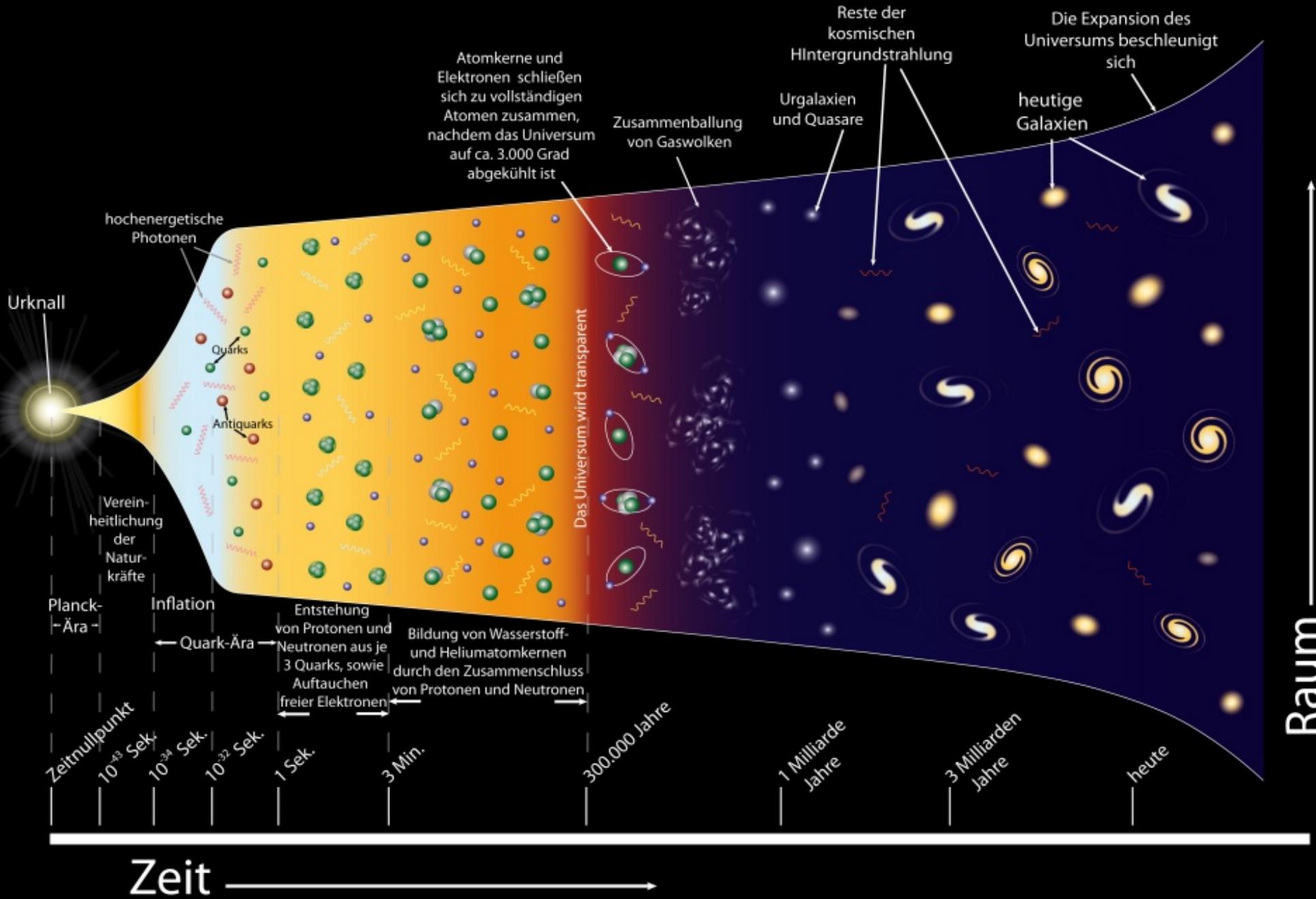
... gemäß der Erkenntnisse der modernen Physik /Kosmologie

**DAS UNIVERSUM IST VOR 13,7 MILLIARDEN JAHREN
IN EINEM URKNALL ENTSTANDEN ("BIG BANG") ***

...wie alles anfang



* Bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts bevorzugten Wissenschaftler statische Weltmodelle.

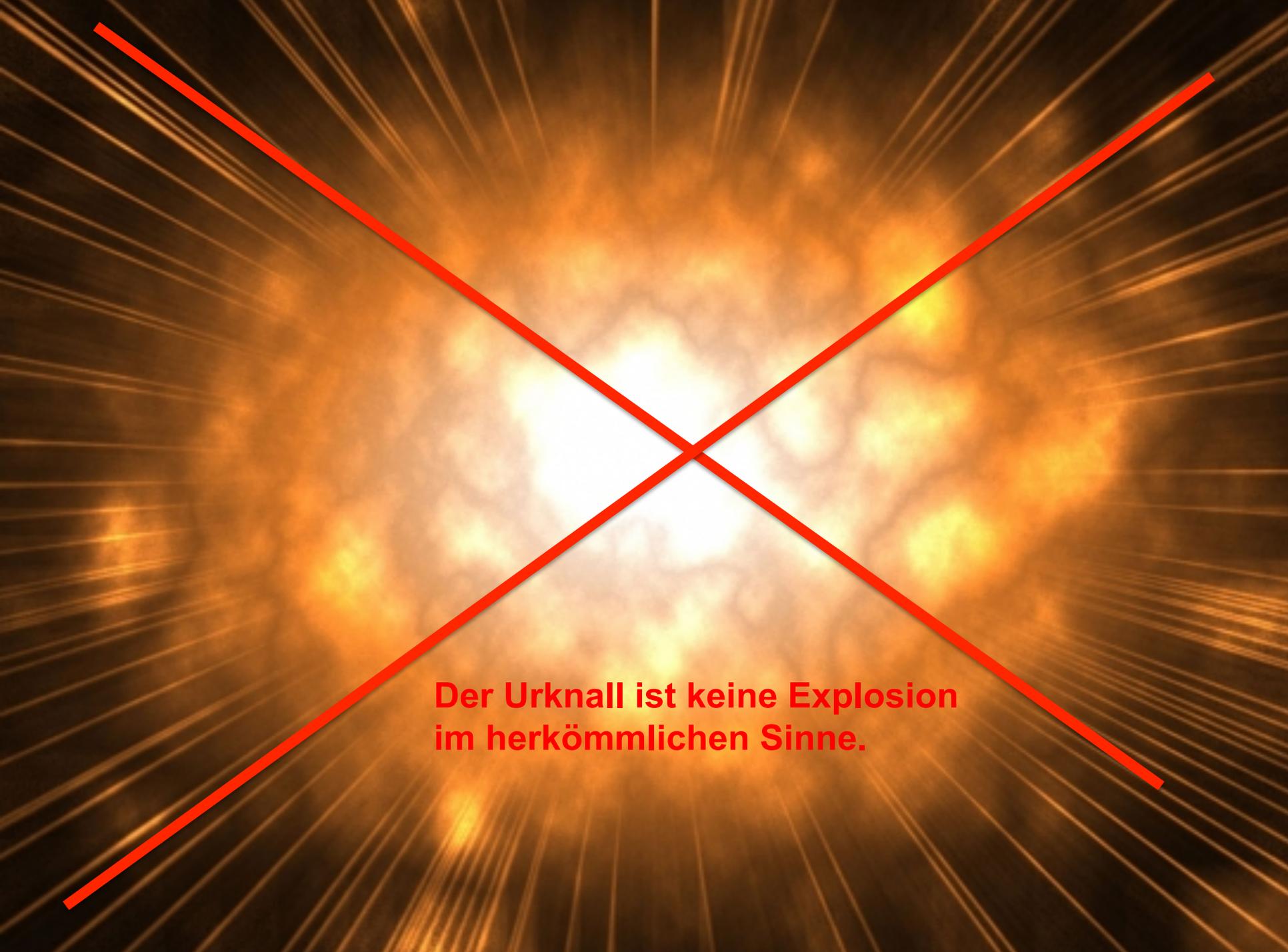


Zeit

Raum



- Universum beginnt in einem singulären Punkt in Raum und Zeit.
- Es gibt kein Vorher.
- Allgemein ist Zeit nur messbar als Veränderung im Raum.
- Raum und Zeit gehören zusammen → **Raumzeit**
- Der Urknall ist keine Explosion in einen bereits existierenden Raum.

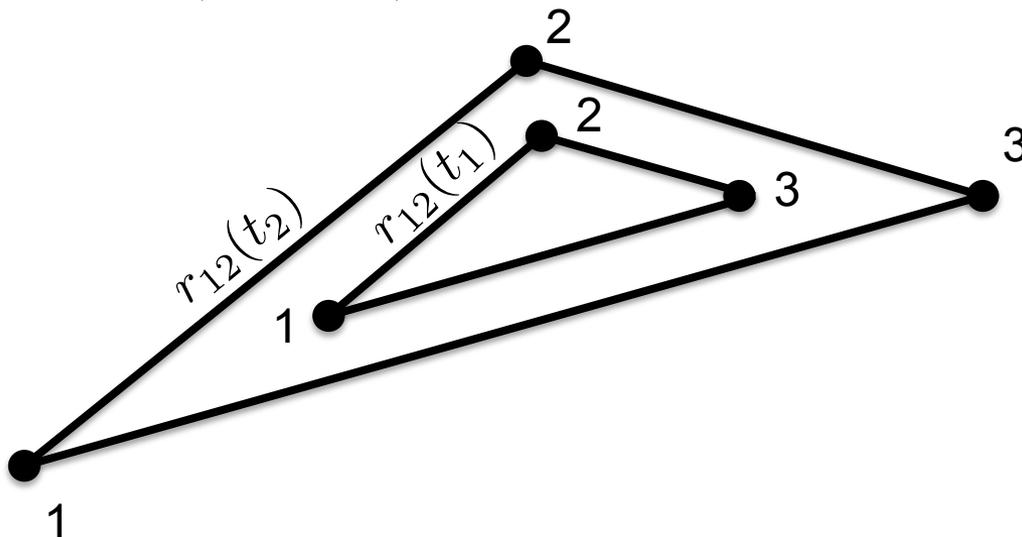
The image features a central, bright, glowing orange and yellow explosion or fireburst. The light radiates outwards, creating a starburst effect with numerous thin, parallel lines extending from the center to the edges. A large, thick red 'X' is overlaid on the entire scene, crossing at the center of the explosion. The background is dark, making the bright explosion stand out prominently.

**Der Urknall ist keine Explosion
im herkömmlichen Sinne.**

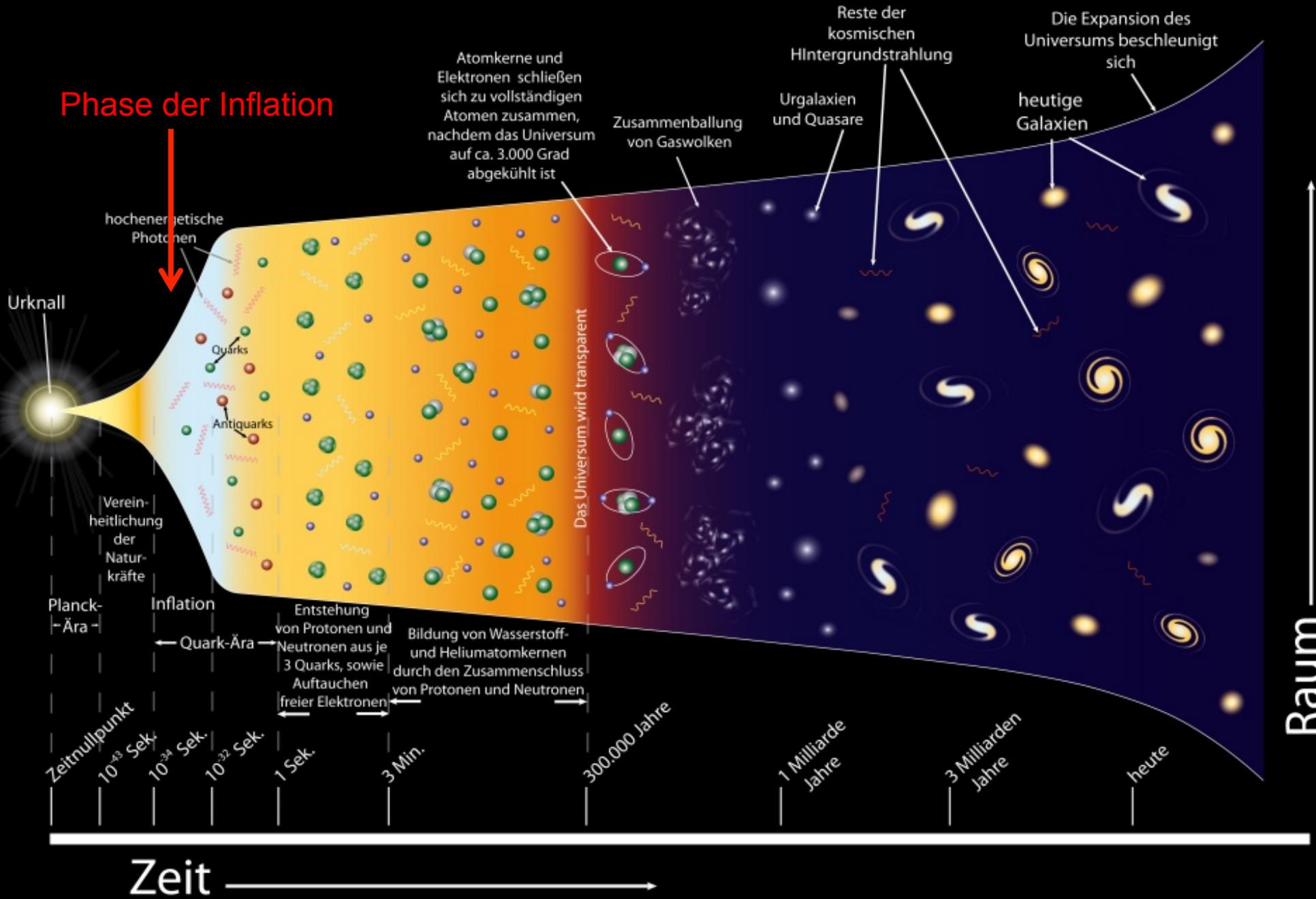
- Es ist der Raum der sich ausdehnt.
→ Aufblasen eines Ballons
- Die Expansion ist homogen und isotrop.
→ **relative Abstände bleiben erhalten**



$$r_{12} \equiv |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|$$



- Abstände werden mit einem gemeinsamen Faktor **a** skaliert.
- Skalenfaktor **a** hängt von der Zeit ab
→ **a(t)**



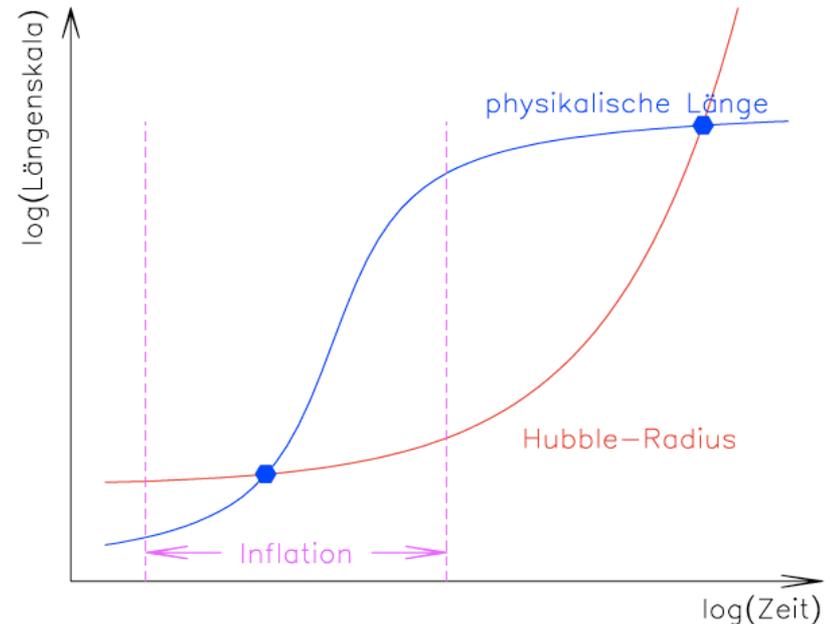
- Extrem starke, beschleunigte Ausdehnung des Universums:
→ **exponentieller Anstieg des Skalenfaktors a**

$$\ddot{a} > 0$$

- Dauerte von ca. 10^{-36} s **abb*** bis 10^{-34} s.
- Verschiedene Modelle, verschiedene Zeiten.
- Skalenfaktor steigt immens:
 $\sim 10^{40}$ bis 10^{50}
- Größe des für uns heute sichtbaren Universums nach Ende der Inflation:

~ 1 m

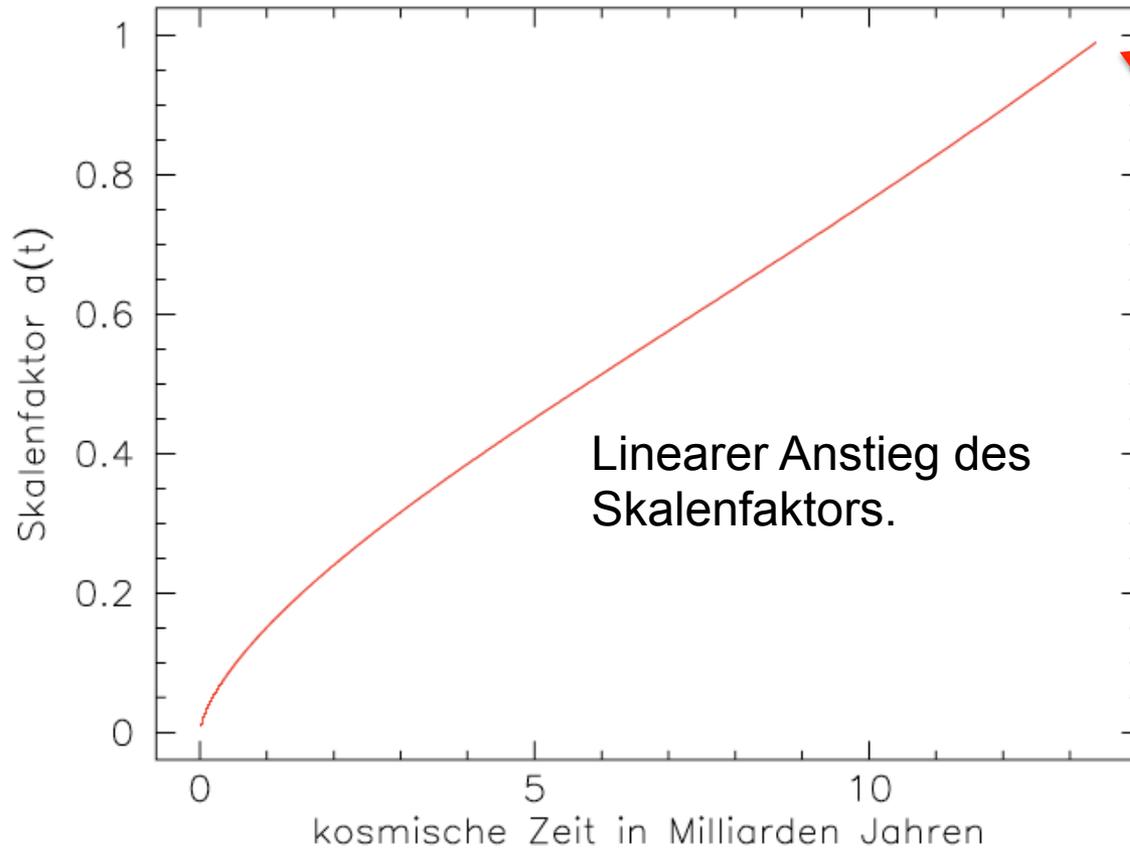
- Hypothese 1981 von Alan Guth vorgeschlagen.



Bildquelle: M. Bartelmann, Kosmologie Inflation, Physikalische Blätter, 2001

* **abb** = after big bang

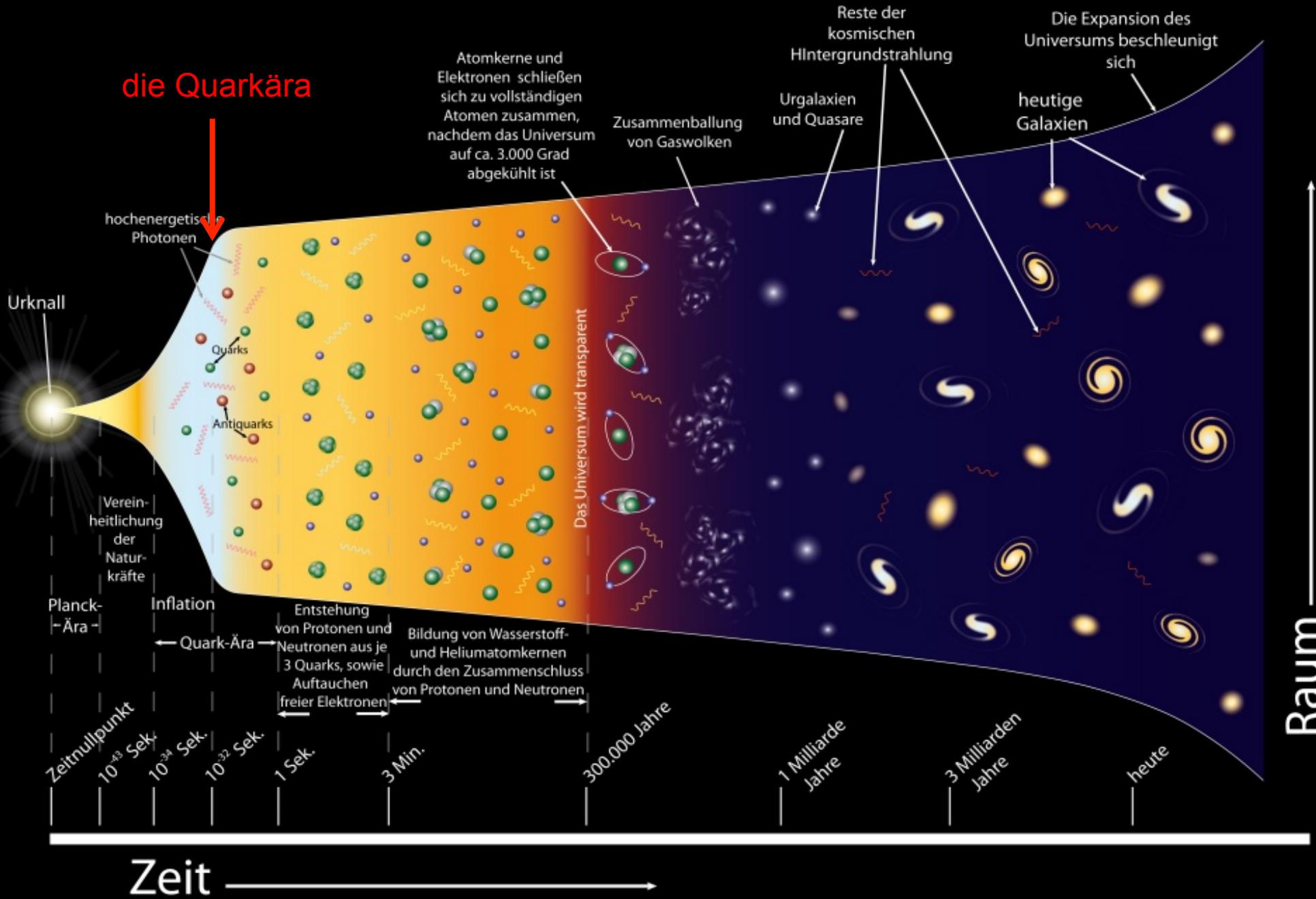
Expansion nach der Inflation



heute gilt:

$$a(t) = 1$$

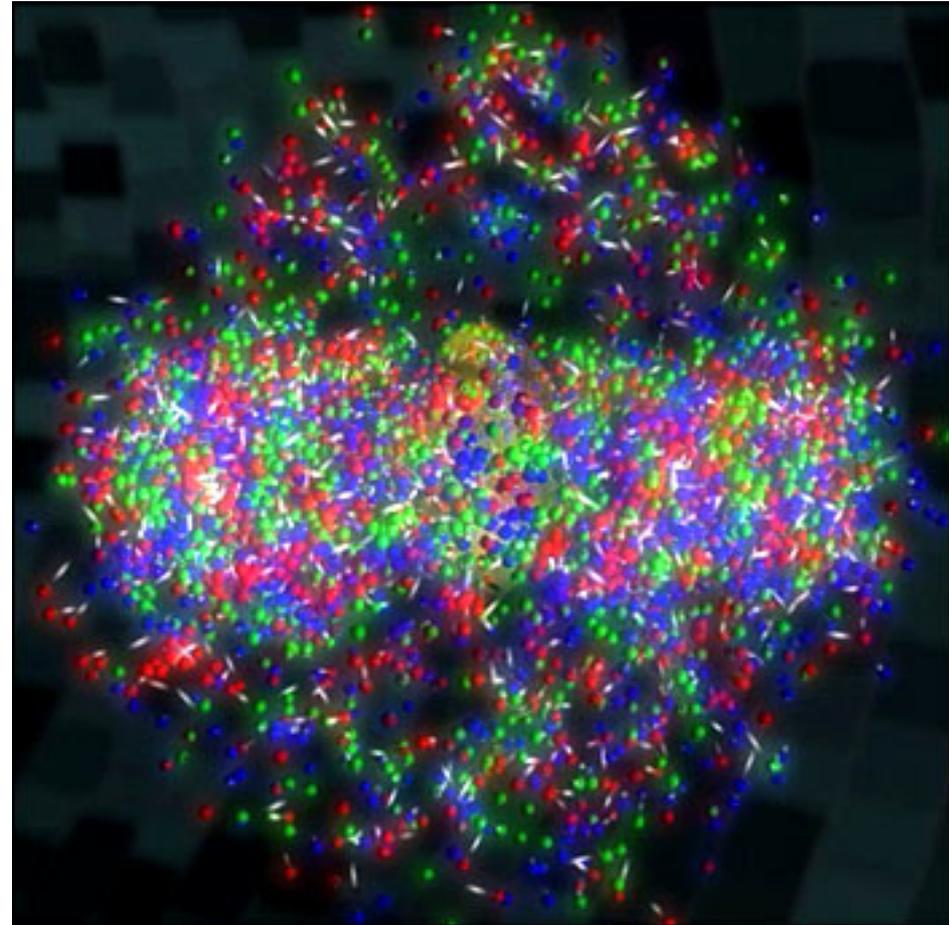
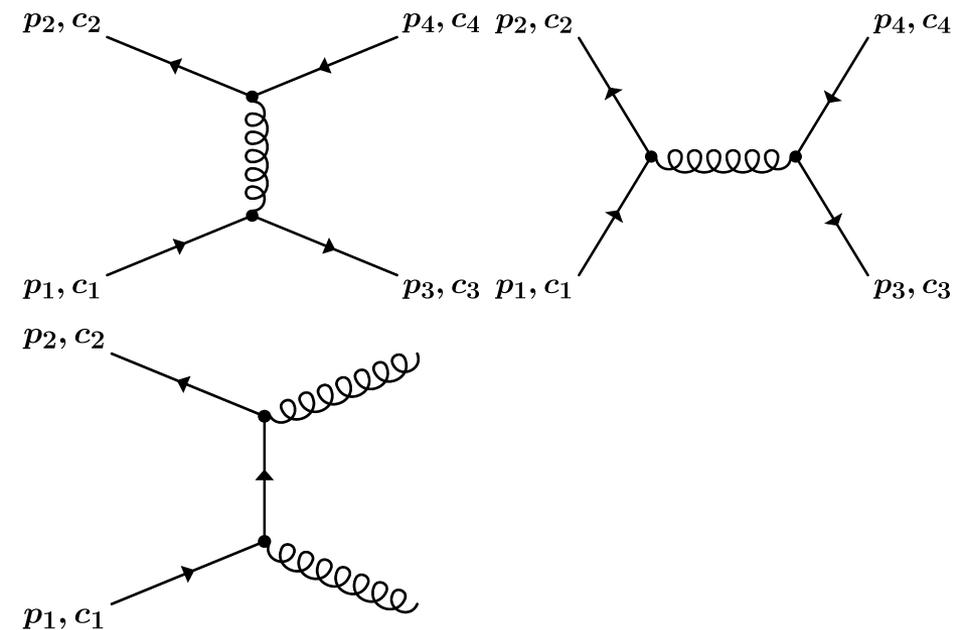
per Konstruktion



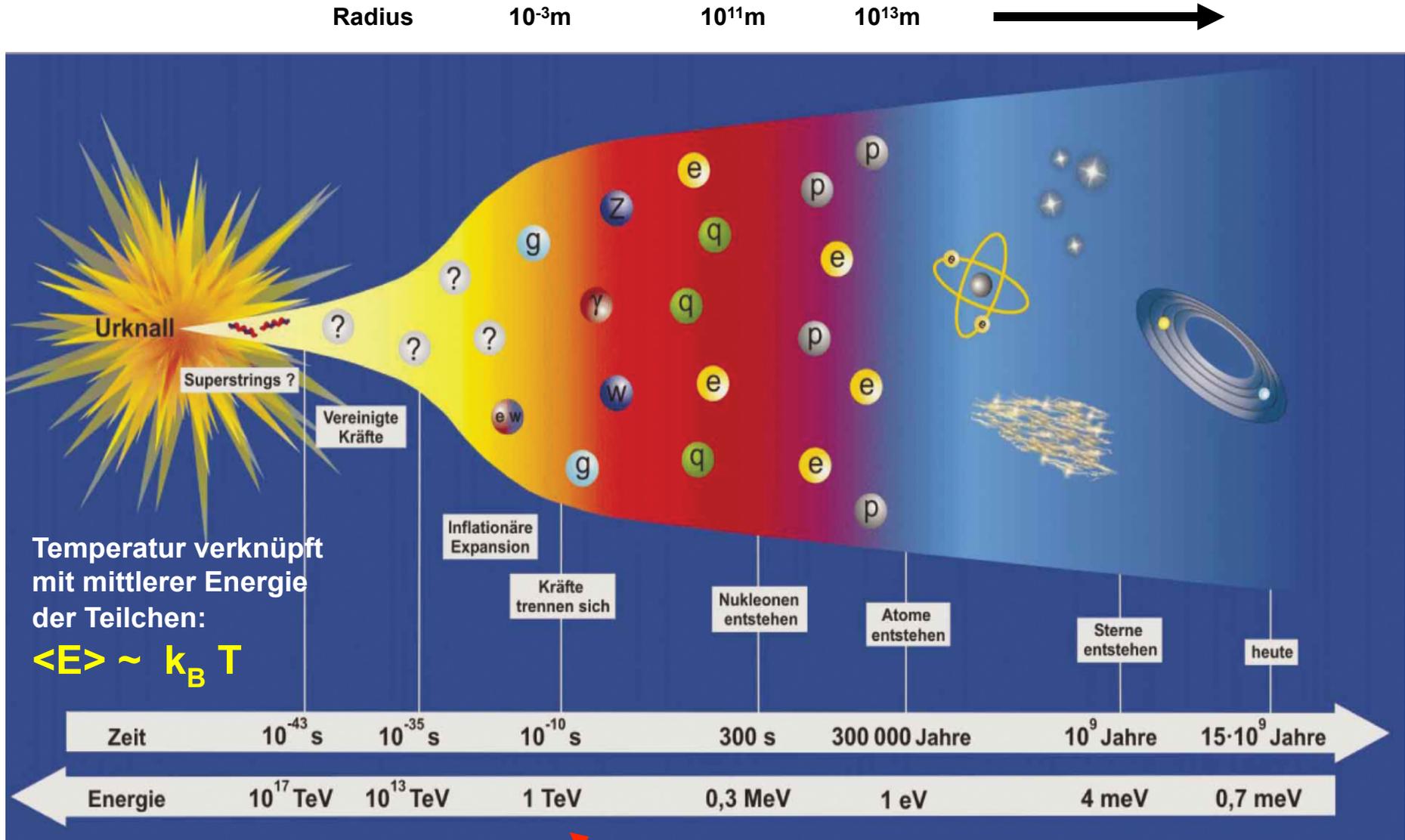
Zeit

Raum

- Das Universum besteht aus einem Plasma (Suppe) von Quarks und Gluonen.
→ Ursuppe
- Quarks und Gluonen wechselwirken ständig miteinander.



Teilchenphysik = Reise in die Vergangenheit des Universums



↖ **Teilchenbeschleuniger**

ZWEI FUNDAMENTALE FRAGEN :

WIE IST DAS UNIVERSUM ENTSTANDEN ?

WORAUS BESTEHT DIE MATERIE MIT IHREN KRÄFTEN ?

BEIDE FRAGEN SIND MITEINANDER VERKNÜPFT :

VERSTÄNDNIS VON DER STRUKTUR DER MATERIE UND IHRER KRÄFTE

<==> BESSERES WISSEN ÜBER IHREN URSPRUNG

FÜR DIE SUCHE NACH DIESEM VERSTÄNDNIS :

SCHAFFE ZUSTÄNDE WIE IN DEN ERSTEN ANFÄNGEN DES UNIVERSUMS

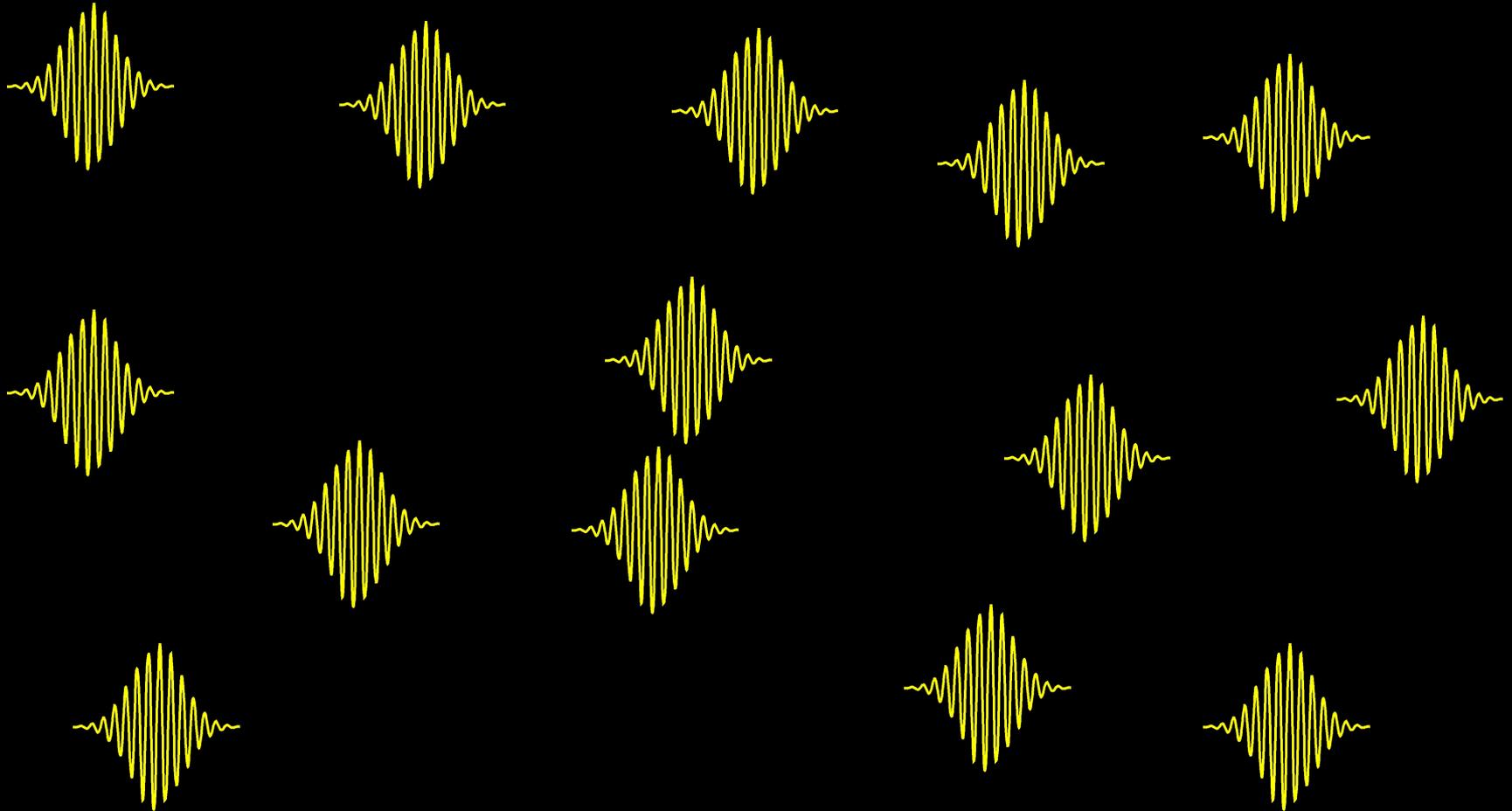
Vernichtung von Materie und Anti-Materie

Was passiert,
wenn Materie



auf
Anti-Materie trifft ?

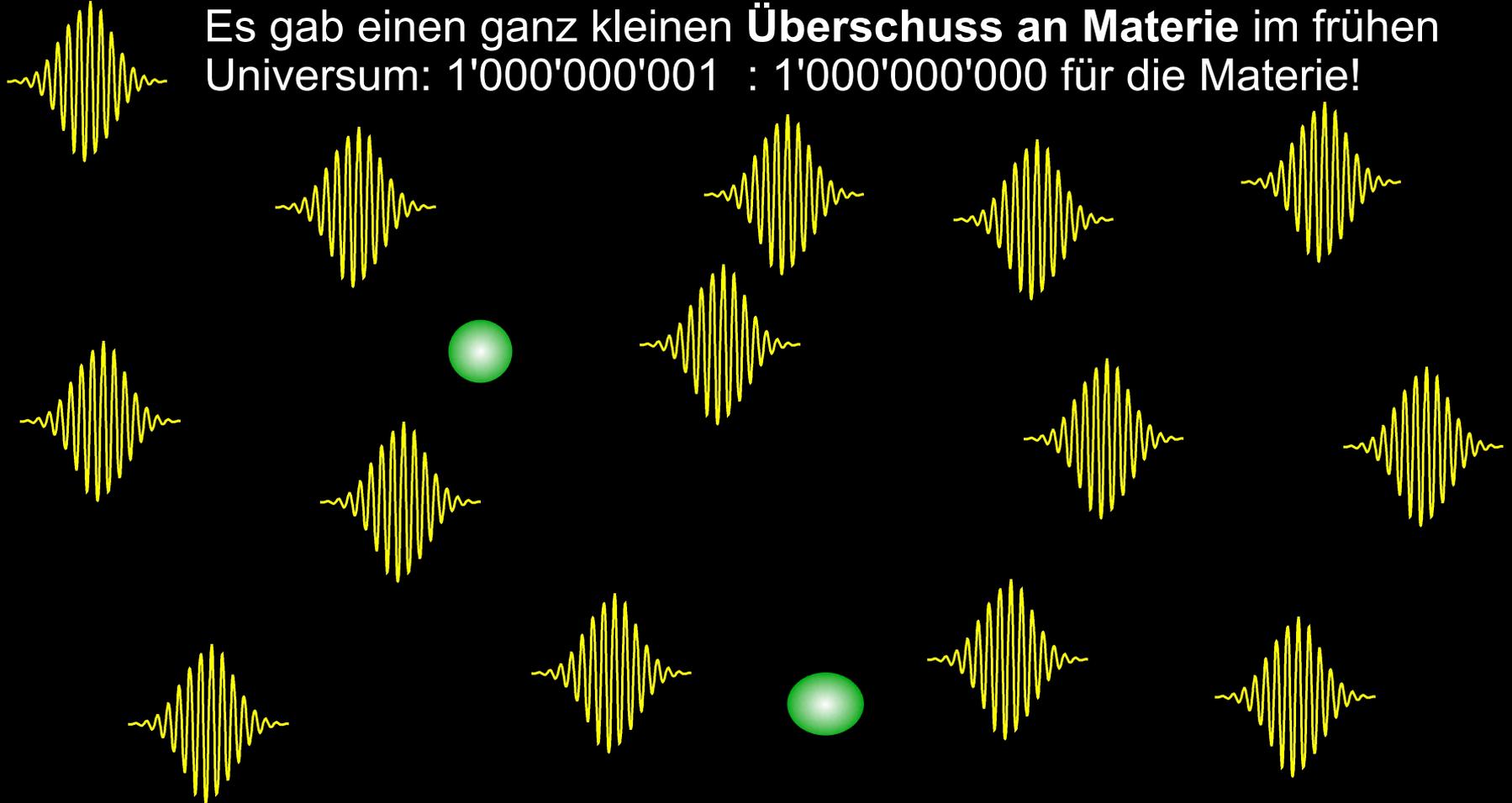
Warum gibt es überhaupt noch Materie ?



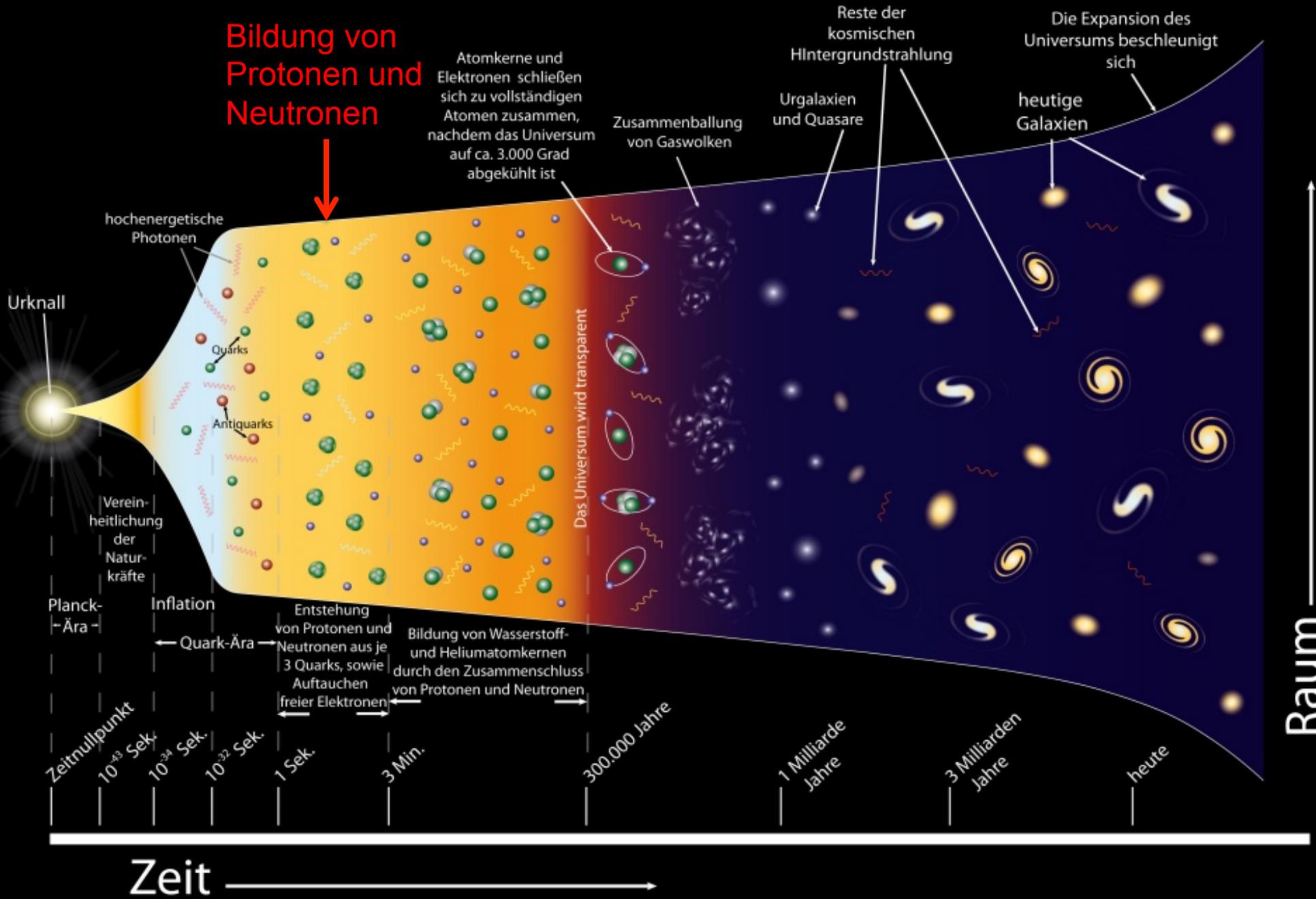
Wenn Materie und Anti-Materie genau gleich wären,
gäbe es im Universum nur noch Licht (=Photonen) !

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!

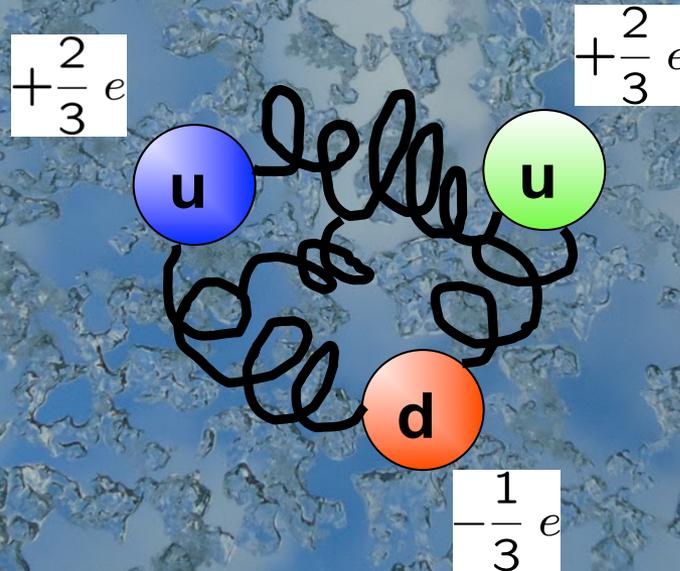


Etwas Materie hat überlebt, aus diesem Rest bestehen wir !!!



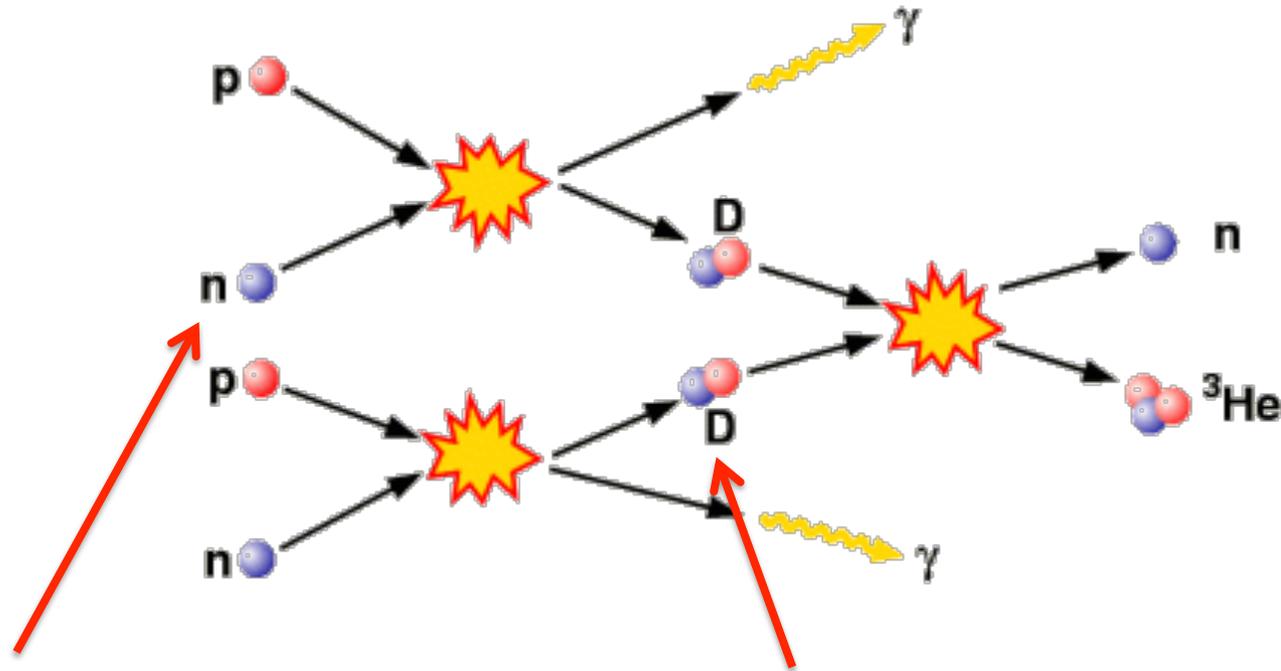
- Ausdehnung des Universums → Abkühlung
- Nach Absinken der Temperatur unter eine bestimmte Schwelle (ca. $2 \cdot 10^6$ K) kondensieren die Quarks zu Protonen und Neutronen.

→ Ausfrieren



Primordiale Nukleosynthese

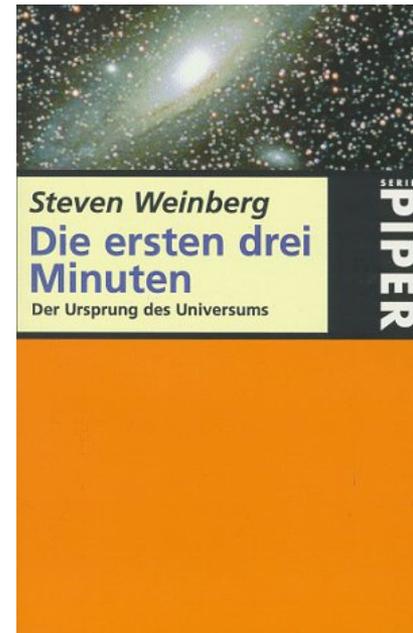
Entstehung von Helium



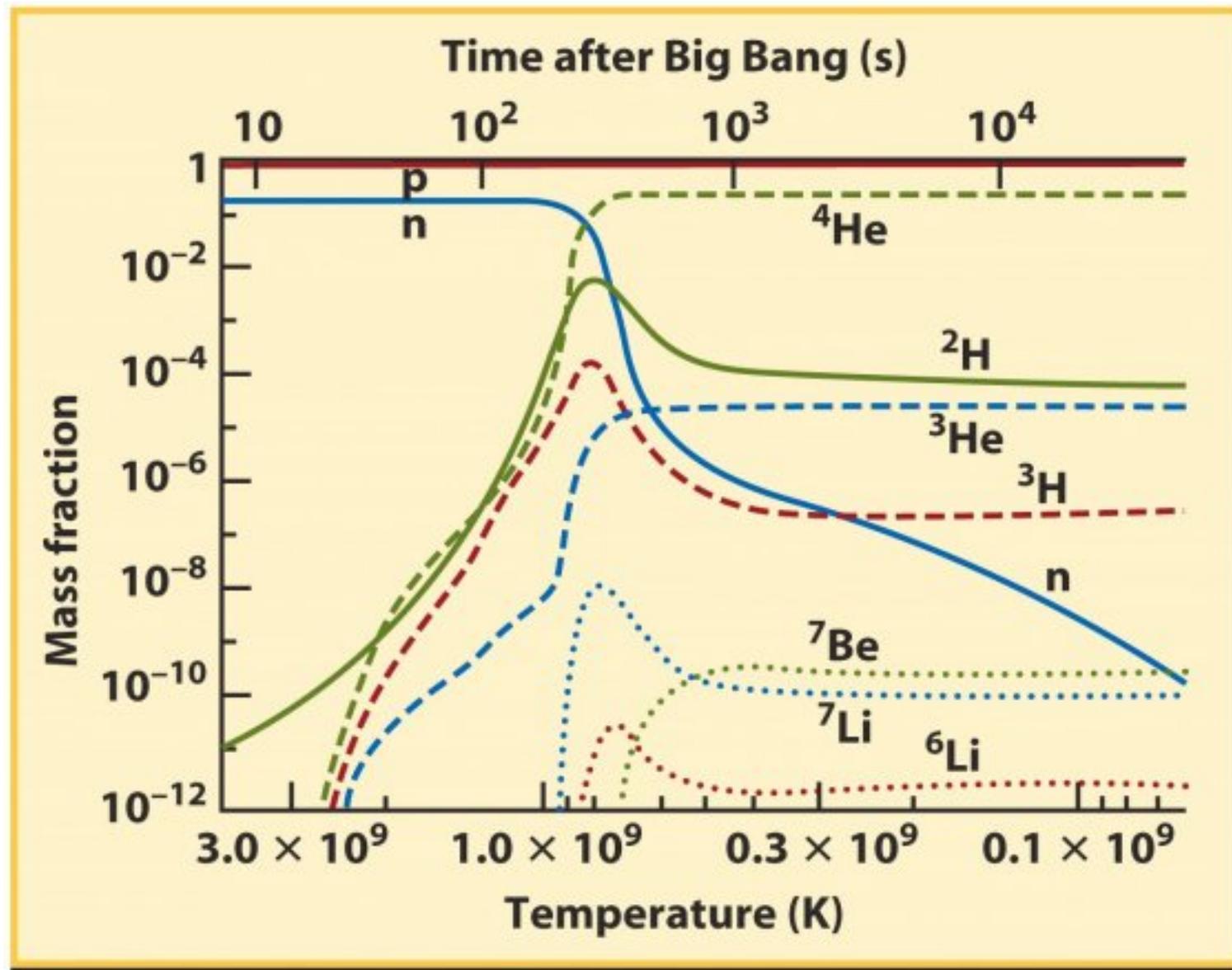
Anzahl der Protonen und Neutronen wird ca. zur Zeit $t = 1$ s abb eingefroren.

Deuterium ($d = np$) entsteht zur Zeit $t = 300$ s abb.

Literatur: Steven Weinberg, Die ersten drei Minuten



Elementhäufigkeit im frühen Universum



Elementsynthese im Universum

1. BEOBACHTUNG:

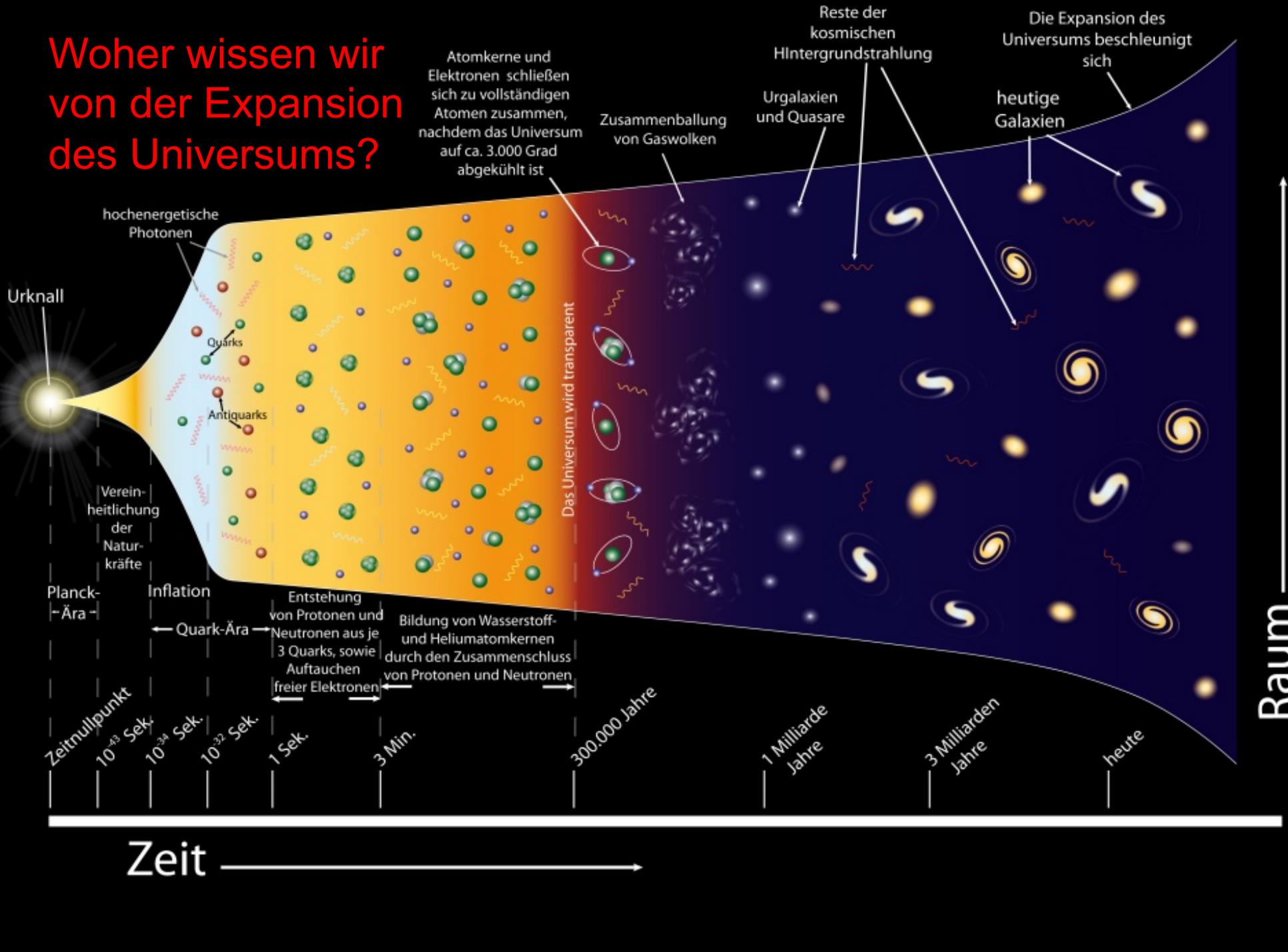
PRIMORDIALE HÄUFIGKEIT DER ELEMENTE 75% H, 24% He, <1% Li, ...

→ ELEMENTSYNTHESE IN DEN ERSTEN DREI MINUTEN



Messung der Zusammensetzung
mit Spektralanalyse,
z.B. in Zwerggalaxien

Woher wissen wir von der Expansion des Universums?



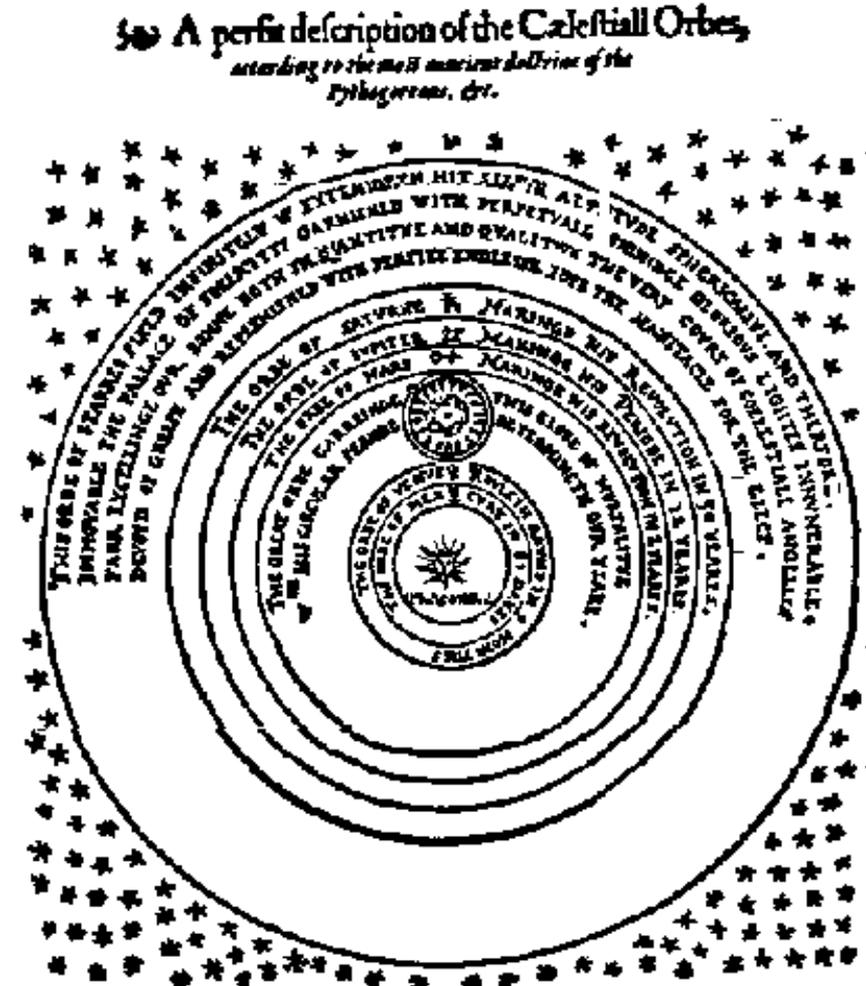
2. Beobachtung:

Der Nachthimmel ist dunkel!

Das olberssche Paradoxon

- 1826 von Heinrich Wilhelm Olbers formuliert
- geht zurück auf Vorstellung eines
 - unendlichen Universums,
 - mit unendlich vielen Sternen,
 - homogen verteilt,
 - statisch
- wurde bereits früh nach der kopernikanischen Wende formuliert:
 - Thomas Digges (1546 – 1595)
 - Giordano Bruno (1548 – 1600)
 - Galileo Galliei (um 1610)

A Perfit Description of the Caelestiall Orbes
by Thomas Digges



Analogie zum olbersschen Paradox:

- Wald ist so dicht, es gibt keine lichten Bereiche.
- In jeder horizontalen Blickrichtung steht ein Baum.



Rotverschiebung ferner Galaxien

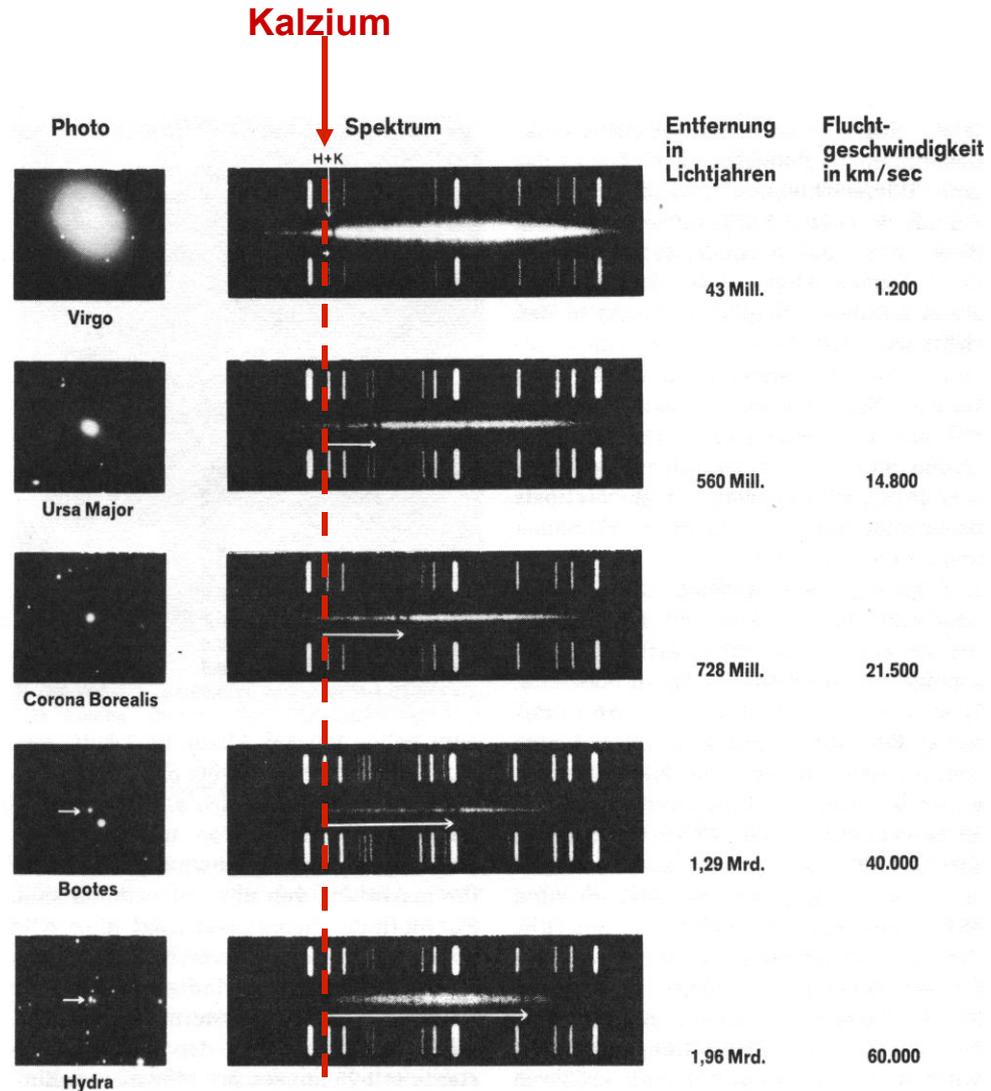
3. BEOBACHTUNG:

DIE GALAXIEN ENTFERNEN SICH
VON EINANDER (Hubble 1929)

JE GRÖßER DIE ENTFERNUNG
DESTO SCHNELLER

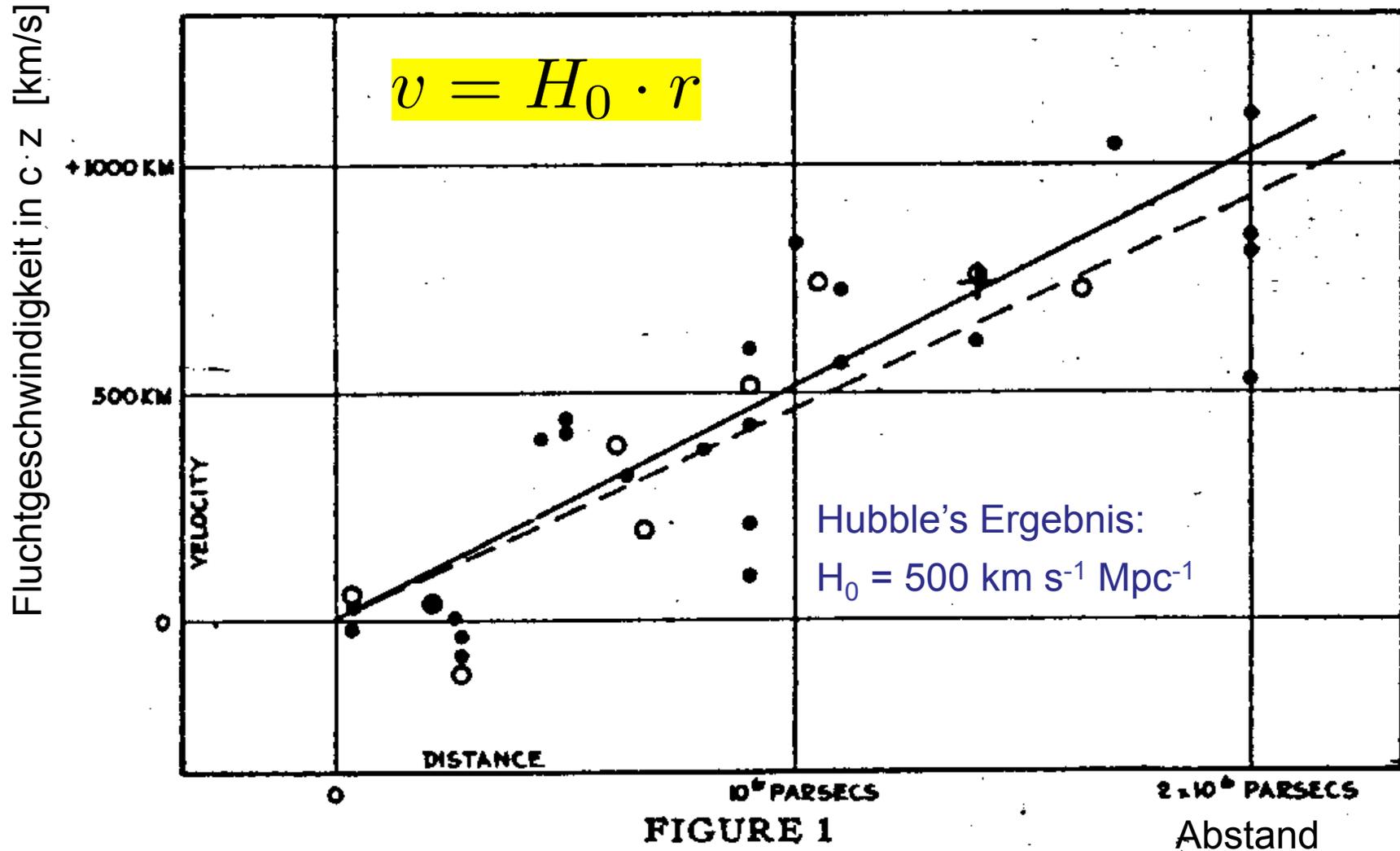


Edwin Hubble



Hubble's Gesetz

Je weiter die Galaxien entfernt sind, desto schneller bewegen sie sich von uns weg.



... ist große Herausforderung bei der Bestimmung der Hubble-Konstanten H_0 .

Entfernung kann aus dem auf der Erde gemessenen Fluss f berechnet werden, wenn die Leuchtkraft L bekannt ist.

→ Standardkerzen

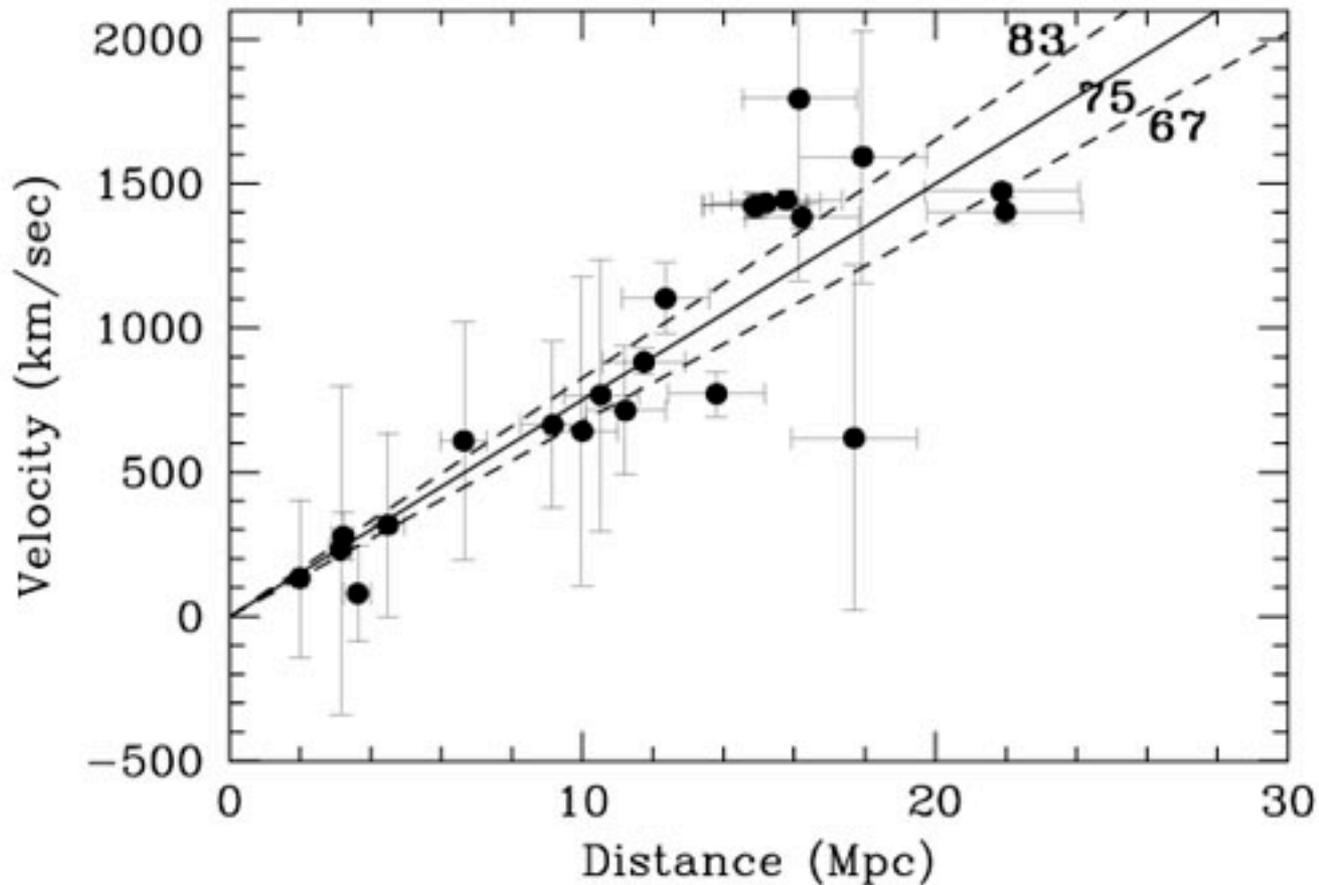
$$f = \frac{L}{4\pi d^2}$$

Beobachter



Der beobachtete Fluss f nimmt mit dem Quadrat des Abstandes der Standardkerze ab.

Hubble Diagram for Cepheids (flow-corrected)

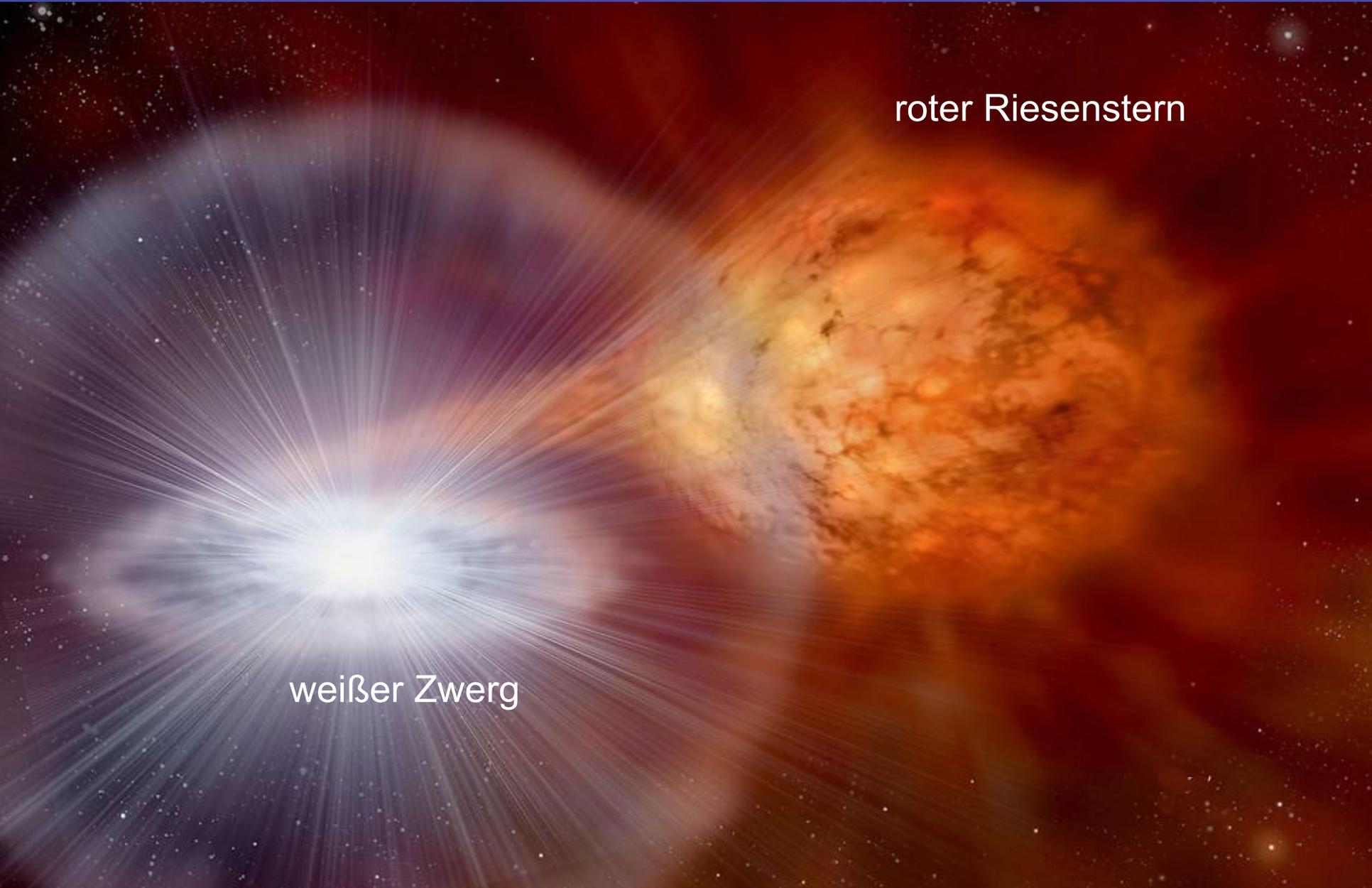


extrahiert aus Cepheiden-Daten: $H_0 = 75 \pm 10 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

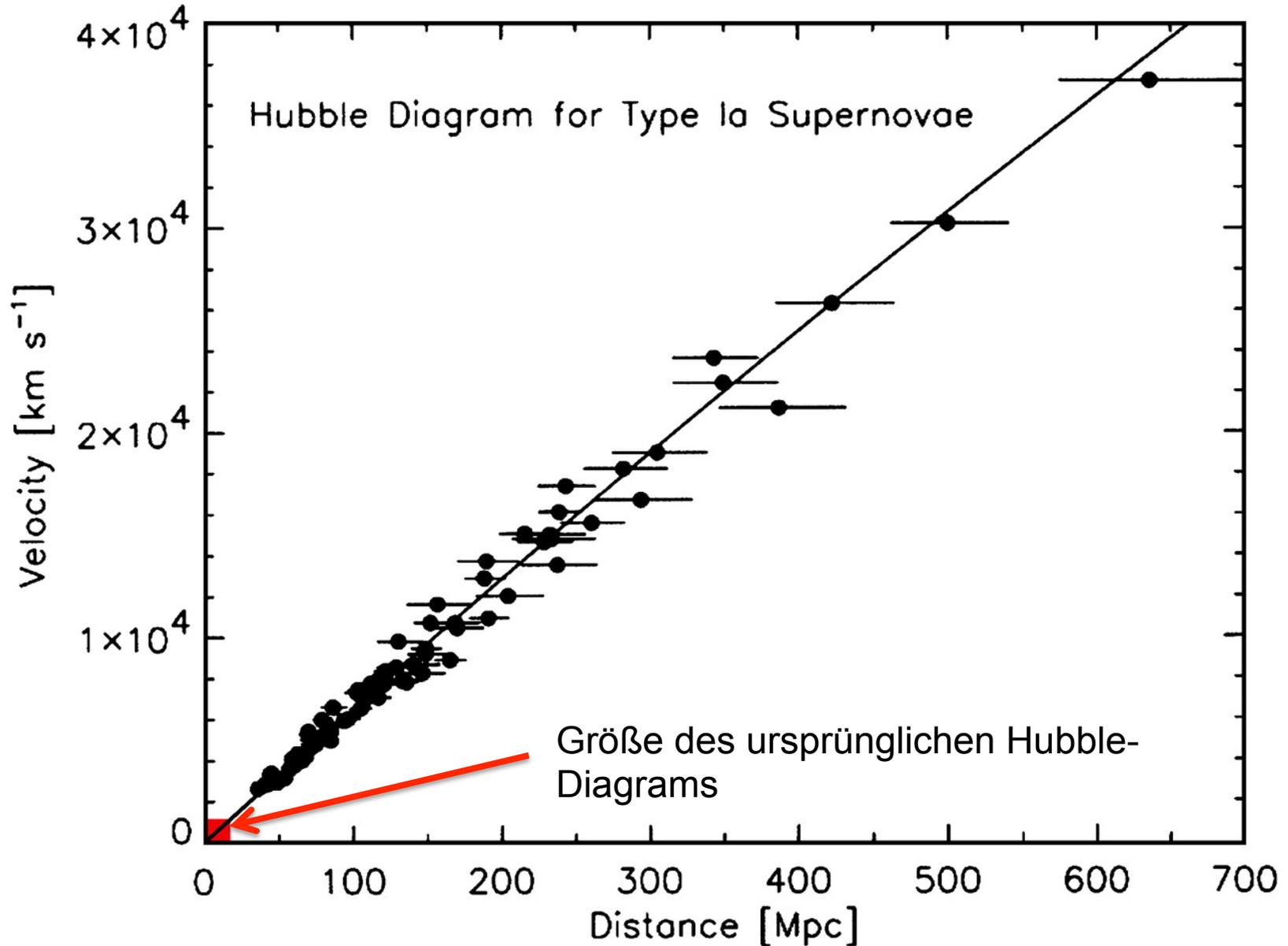
Typ 1a Supernovae

roter Riesenstern

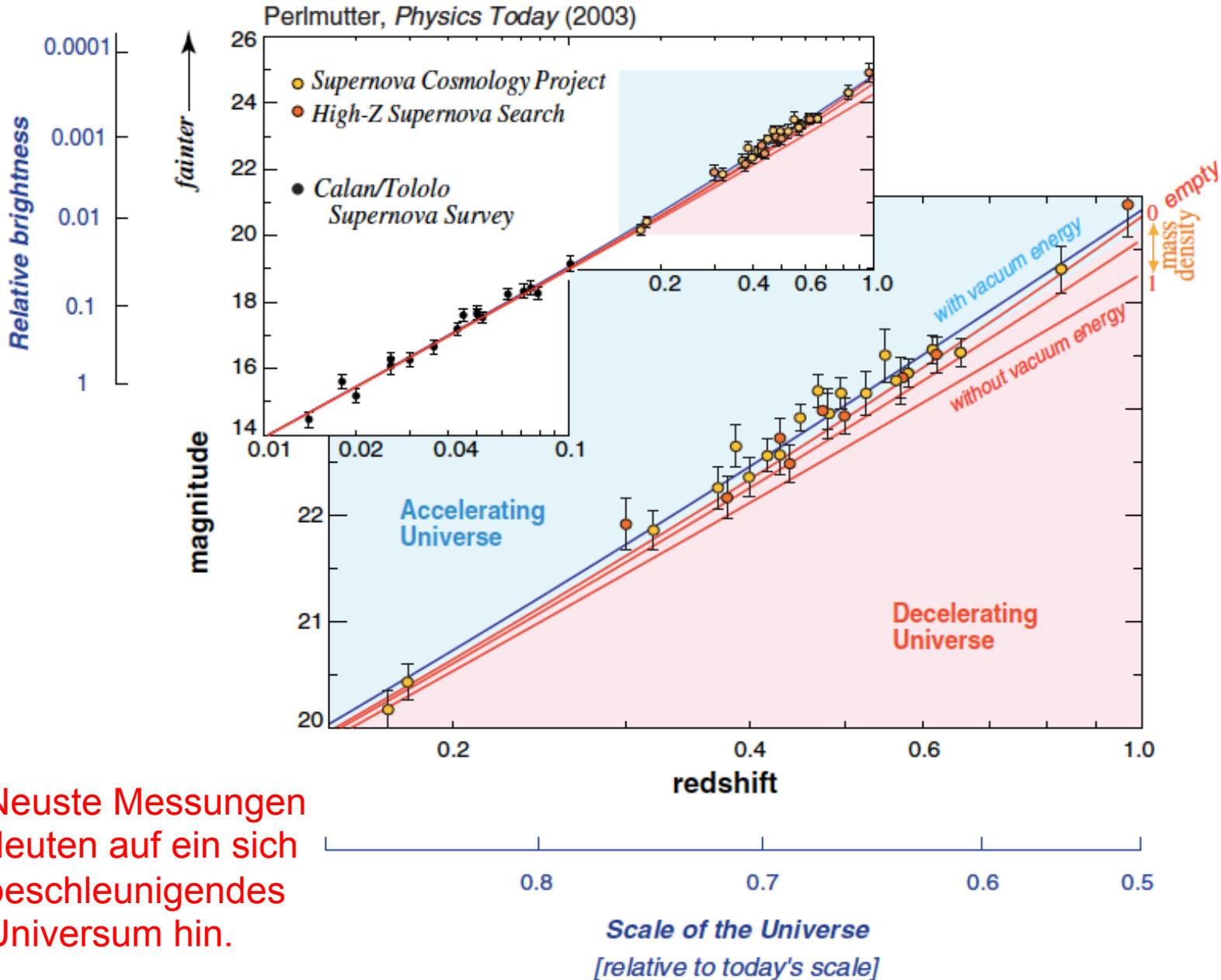
weißer Zwerg



Moderne Version des Hubble-Diagramms



Type Ia Supernovae

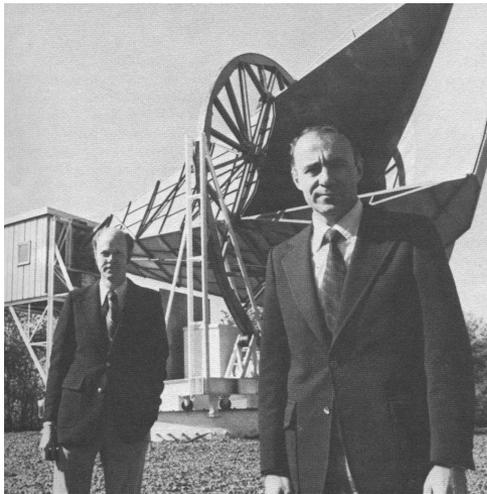


Neuste Messungen
deuten auf ein sich
beschleunigendes
Universum hin.

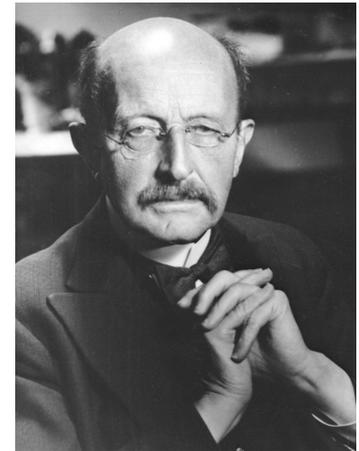
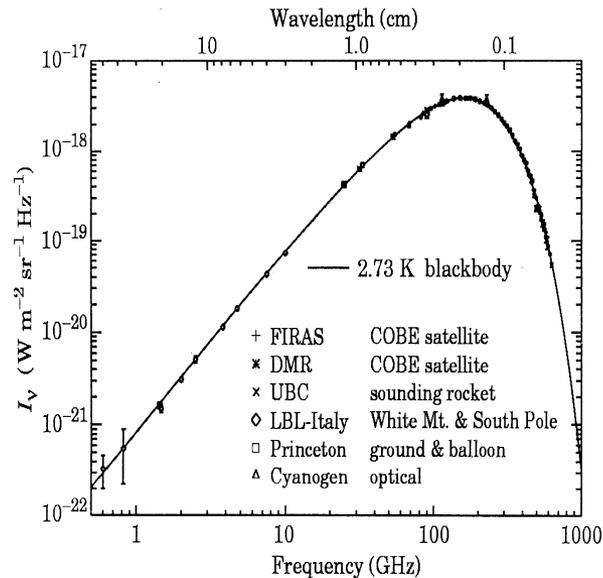
4. BEOBACHTUNG:

KOSMISCHE HINTERGRUNDSTRAHLUNG (Penzias, Wilson 1956)

2.7 K TEMPERATURSTRAHLUNG → LICHTBLITZ DES URKNALLS

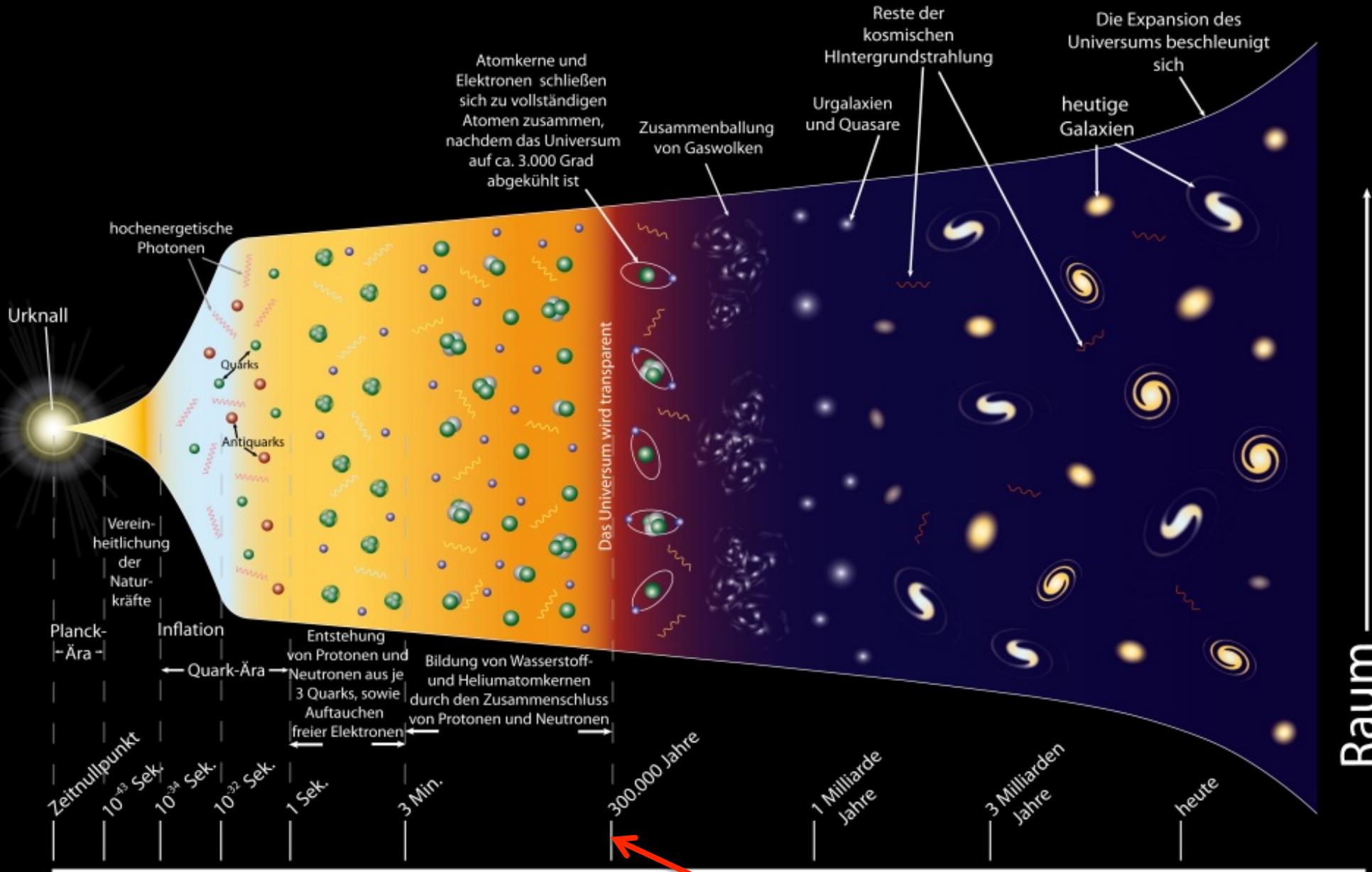


**Hornantenne der Bell
Telephone Laboratories**



**Max Planck als
Professor in Berlin**

Körper mit Temperatur T [K] strahlen mit Frequenzverteilung ν



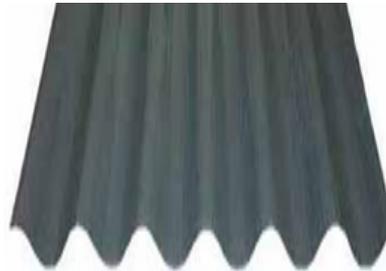
Zeit

Universum wird transparent für Lichtteilchen
 Temperatur ca. 2700 °C

Wellplatten-Analogon

Expansion des Raumes glättet die Lichtwellen
(Wellplatte wird auseinander gezogen)

- **größere Wellenlänge**
- = niedrigere Temperatur
- = kleinere Energie der Lichtteilchen



Wellenlänge zu
 $t = 370.000$ abb

Wellenlänge des kosmischen Hintergrundstrahlung heute

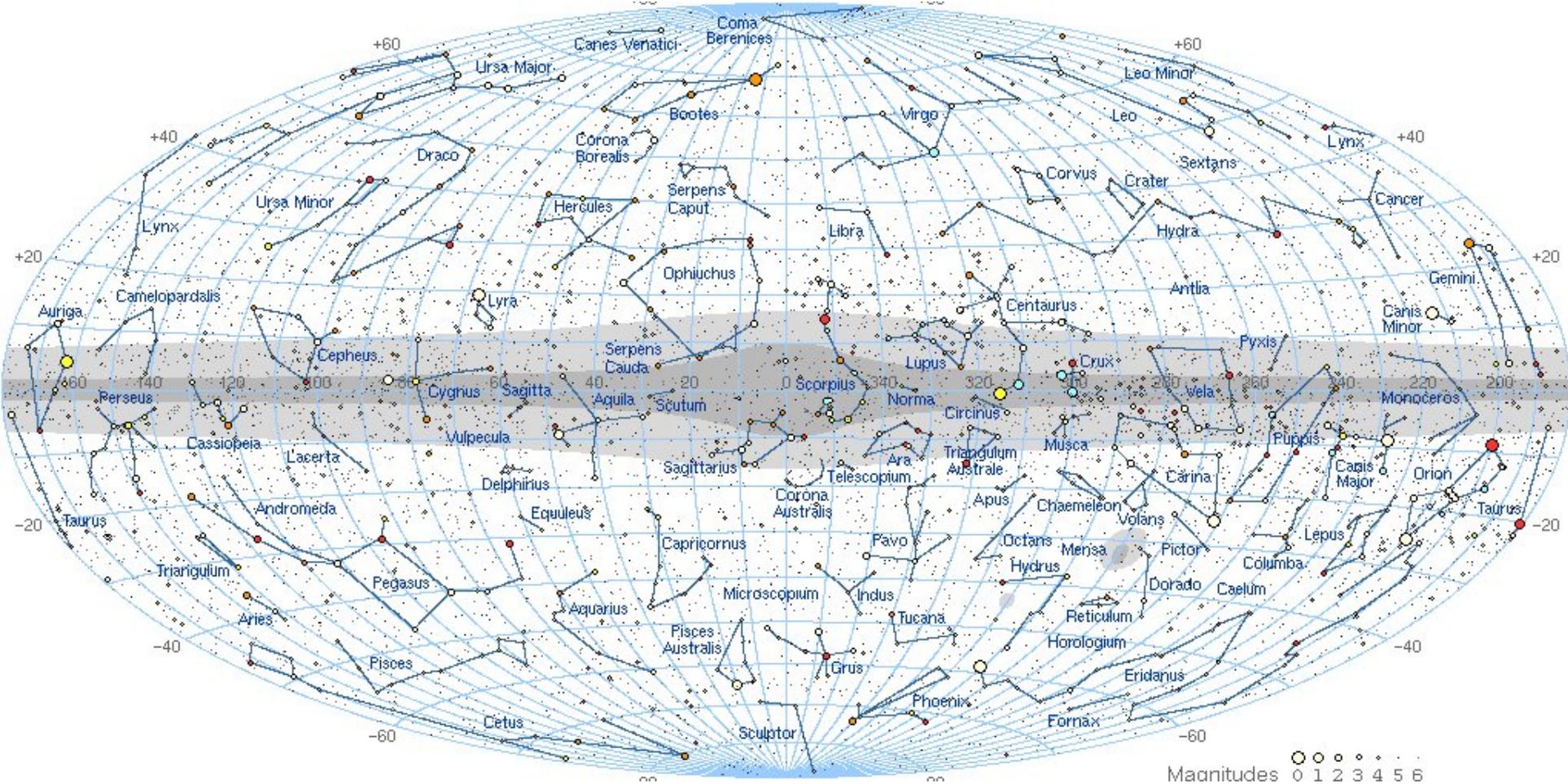


Mikrowellen werden von Wassermolekülen in der Atmosphäre absorbiert

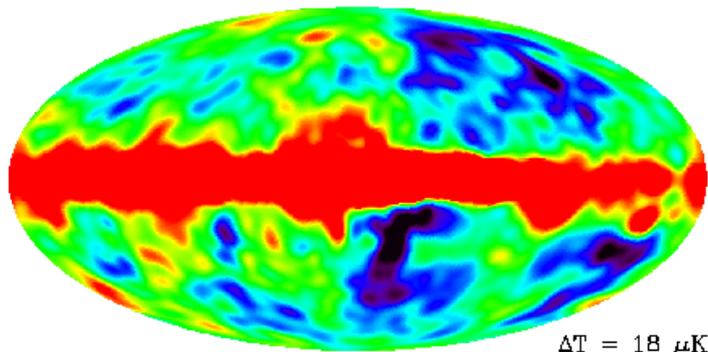
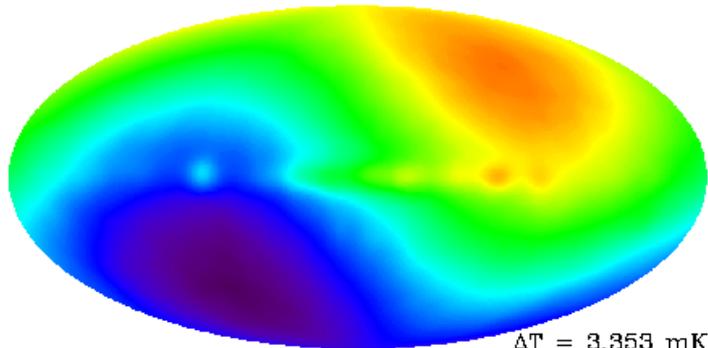
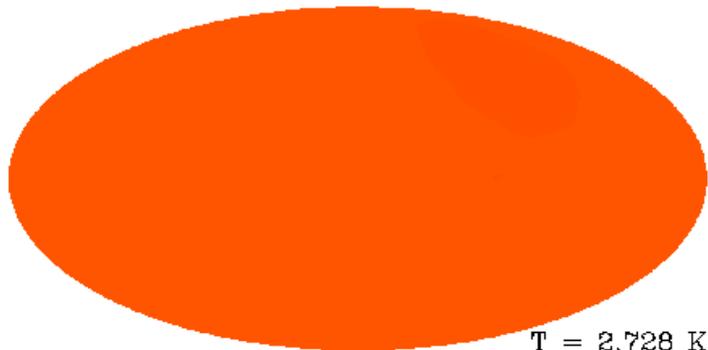
→ Messung besser mit Satelliten

- COBE Satellit der NASA
- Start 1989
- Flughöhe: 900 km über dem Erdboden

Klassische Himmelskarte mit Sternbildern



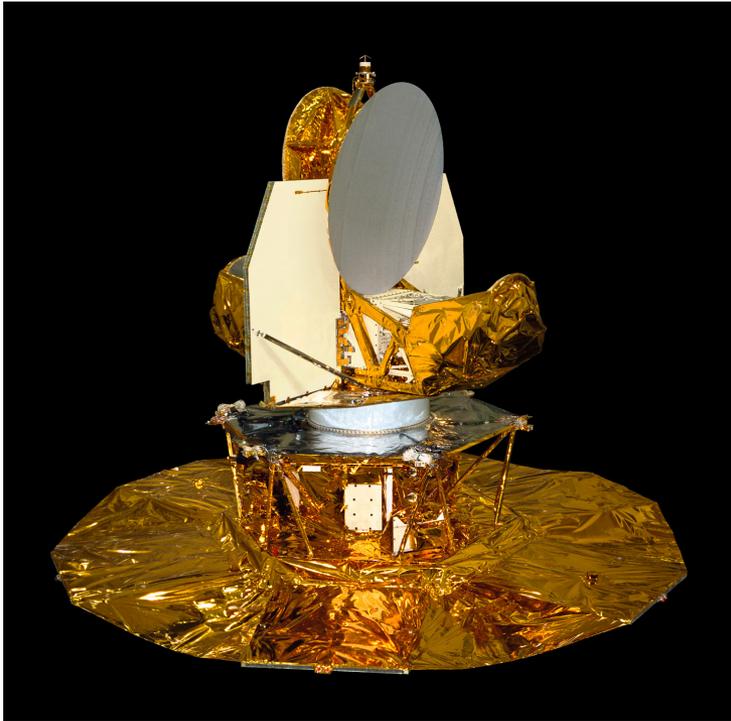
Die Messungen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds werden ebenfalls als Himmelskarte dargestellt, abhängig von Azimuthwinkel ϕ und Polarwinkel θ .



- Mikrowellenhintergrund ist in alle Richtung gleich
 - **Isotropie**
- mittlere Temperatur:
 $T = 2.725 \pm 0.001 \text{ K}$
- Bewegung des Satelliten in Bezug auf den Mikrowellenhintergrund (Satellit um Erde, Erde um Sonne, Sonne um galaktisches Zentrum, Galaxie um lokale Gruppe von Galaxien)
 - erzeugt Dipol-Verzerrung
 - muss korrigiert werden
- Auf dem Niveau von **millionstel** Grad gibt es Schwankungen
 - **Anisotropie**

Präzisionsmessung der Anisotropie

Präzisionsmessung der kosmischen Hintergrundstrahlung mit Satellitenexperimenten



WMAP-Mission

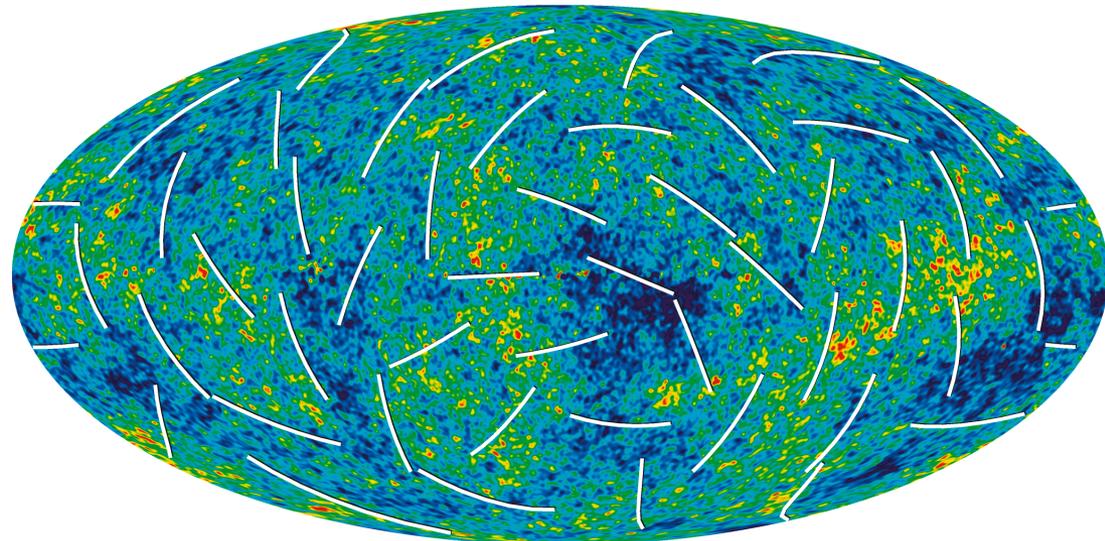
Wilkinson Microwave
Anisotropy Probe

Start im Juni 2001

Himmelskarte der Differenzen

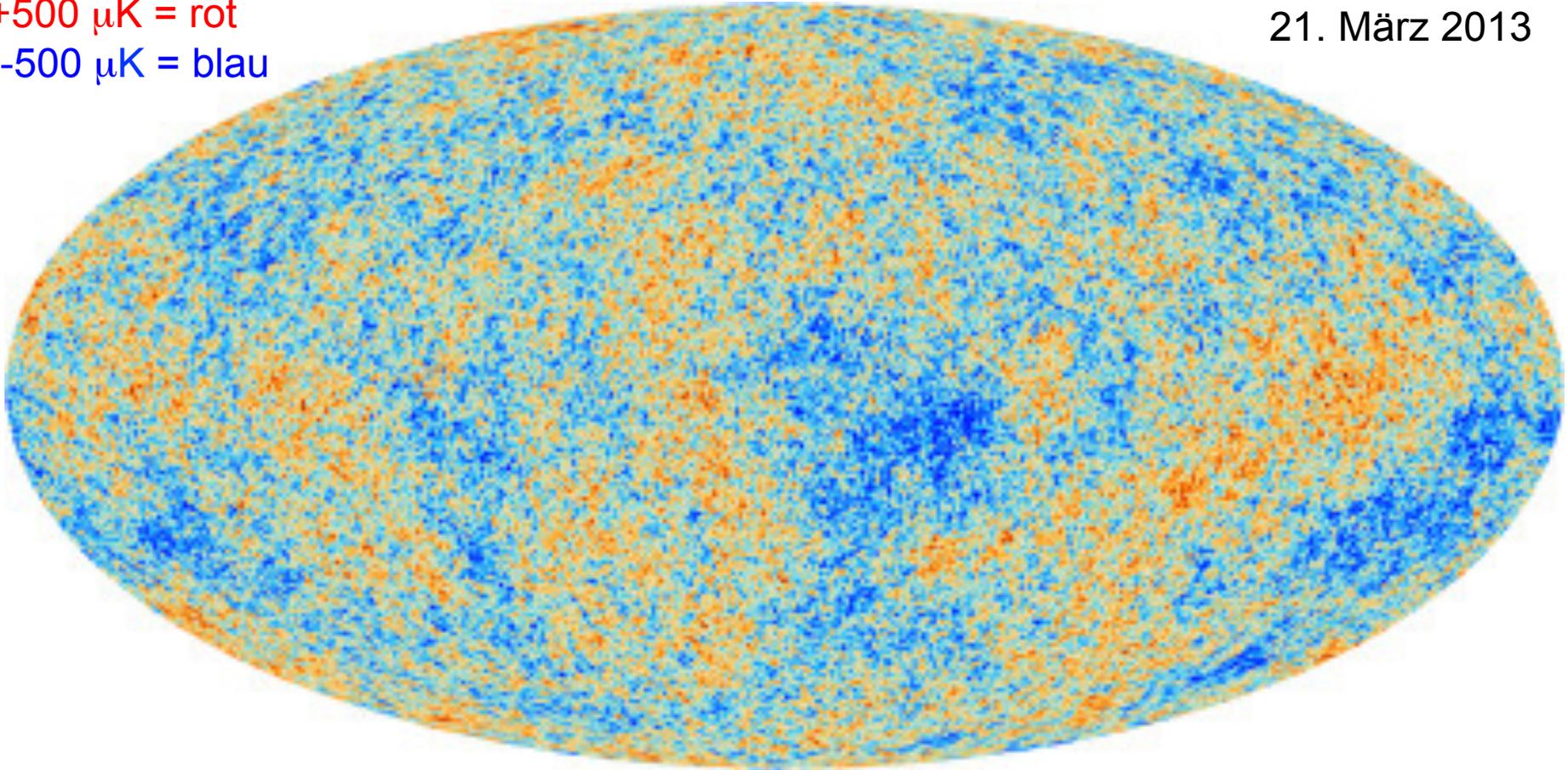


$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \phi) \equiv \frac{T(\theta, \phi) - \langle T \rangle}{\langle T \rangle}$$



+500 μK = rot
-500 μK = blau

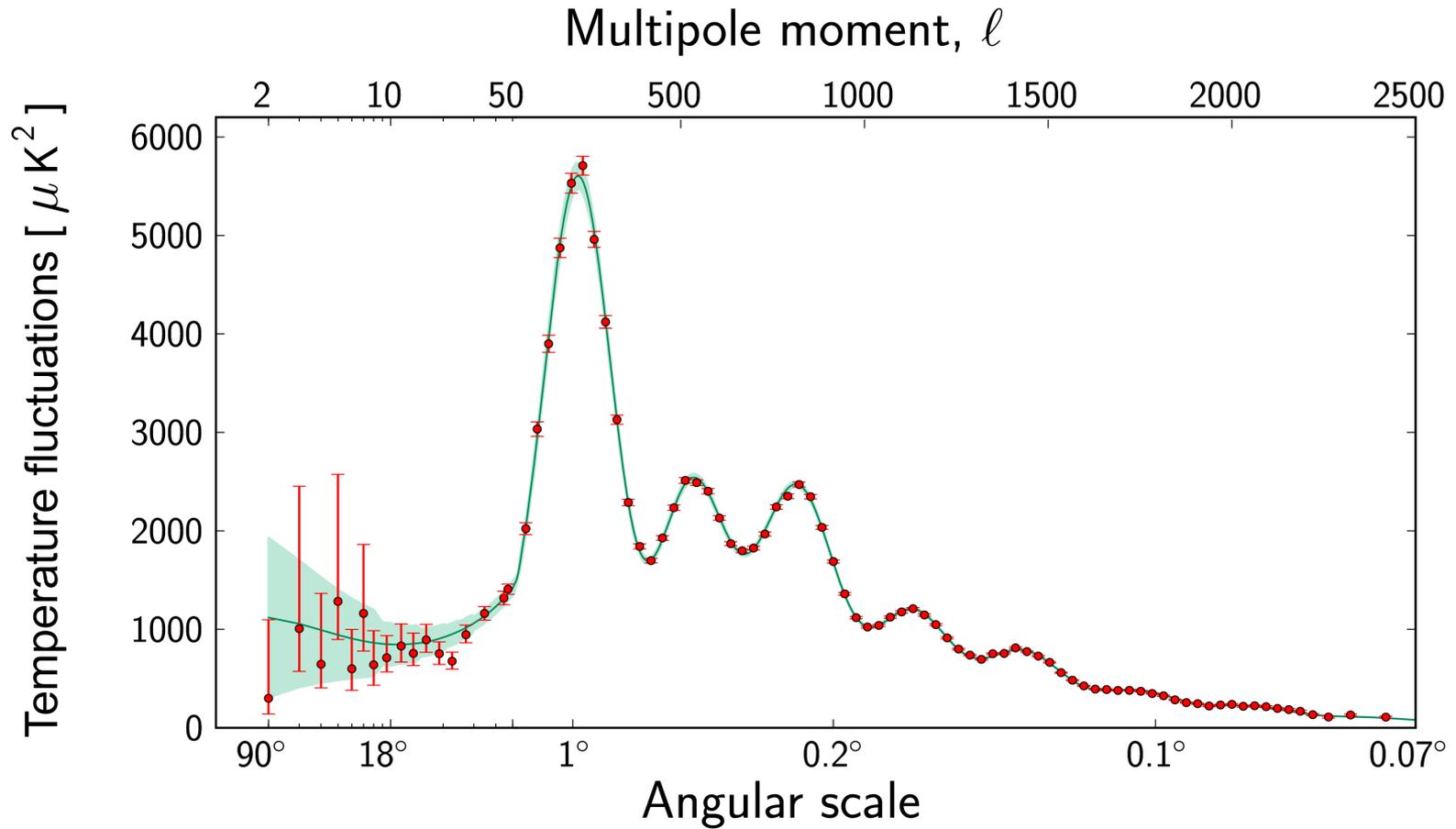
21. März 2013



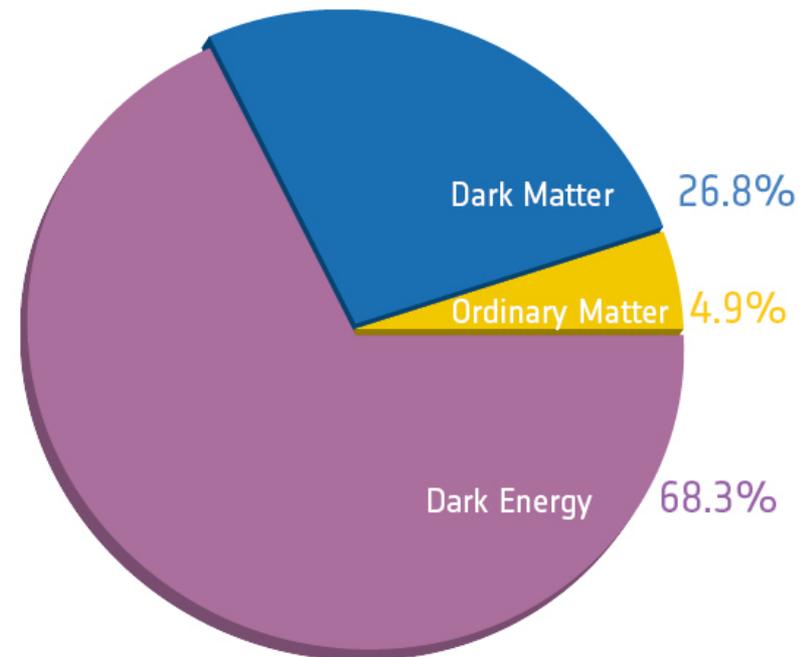
Warum sind Temperaturunterschiede interessant?

- Zeigen Dichteschwankungen des Universums zum Zeitpunkt $t = 380.000$ Jahre abb.

Winkelanalyse der Fluktuationen



- Alter des Universums: $13,81 \pm 0.05$ Milliarden Jahre
- Hubble-Konstante: $H_0 = 67,0 \pm 1,2 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- Anteile an der Energiedichte des Universums:
 - “normale” sichtbare Materie: 4,9%
 - “dunkle” unsichtbare Materie: 26,8%
 - dunkle Energie: 68,3%



Die moderne Kosmologie hat die Urknall-Hypothese als die Theorie der Entstehung unserer Welt etabliert.

Das Universum

- hat einen zeitlichen Anfang,
- geht aus einem heißen Anfangszustand hervor,
- war zu Beginn auf einen kleinen räumlichen Bereich konzentriert,
- dehnt sich von Anbeginn an aus (Expansion des Raumes),
- durchlief kurz nach dem Urknall eine Phase exponentieller Expansion (Inflation).

Experimentelle Grundlagen:

- 1) Häufigkeiten der Elemente (H, He, Li),
- 2) Nachthimmel ist dunkel,
- 3) Galaxien entfernen sich voneinander (Hubble-Konstante),
- 4) Kosmische Hintergrundstrahlung (Isotropie; Anisotropie auf niedrigem Niveau)

- Die moderne Wissenschaft hat eine genaue Vorstellung davon entwickelt, **wie** sich das Universum von einem Zeitnullpunkt an entwickelt hat.
- Trotzdem gibt es noch viele offene Fragen.
 - Dunkel Materie, dunkle Energie
 - Fein-Einstellung von Naturkonstanten
- Keine Aussage zu dem Warum.
- Bewunderung und Faszination von der Komplexität und Schönheit unserer Welt und der zugrunde liegenden Naturgesetze.
- Es ist nicht Aufgabe der Naturwissenschaft Gott zu beweisen oder zu widerlegen. Sie kann es auch nicht.
- Einordnung und Bewertung bleibt Aufgabe des Einzelnen.