

# Auf dem Wege zum Urknall

– Das größte Experiment der Welt –

## I Neuere Erkenntnisse zum Universum

- Größenordnungen/Umrechnungen
- Sterne und ihre Entwicklungen (Supernovae, Neutronensterne, Schwarze Löcher)
- Expansion des Universums
- Hintergrundstrahlung
- Masse und Energieverteilung
  - Dunkle Materie
  - Dunkle Energie

## II Modell für zeitliche Entwicklung des Universums

## III Hochenergiephysik und Kosmologie

## IV Ausblick

(Dank an meinen Kollegen K. Goeke für die Überlassung von Folien)

# I Neuere Erkenntnisse zum Universum

## Passende Einheiten:

$$\underline{\text{km} \rightarrow \text{Lj, pc}}$$

$$1 \text{Lj} \approx 0.3 \text{ pc} \approx 80 \text{ Billionen km} = 80 \times 10^{12} \text{ km}$$

$$(1 \text{ Mpc} = 1.000.000 \text{ pc} = 10^6 \text{ pc})$$

$$\underline{\text{kWh} \rightarrow \text{eV (Gerichtete Bewegung)}}$$

$$\underline{\text{kWh} \rightarrow T [^\circ\text{K}] \text{ (Regellose Bewegung)}}$$

$$1 \text{ eV} = \underbrace{0.00 \dots 04}_{26 \text{ Stellen}} \text{ kWh} = 4 \times 10^{-26} \text{ kWh}$$

$$(1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}; 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}; 1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV})$$

$$1^\circ\text{K} \approx 0.0001 \text{ eV} = 10^{-4} \text{ eV}$$

# I Neuere Erkenntnisse zum Universum

## Größenordnungen:

Alter des Universums  $\approx 13.7 \times 10^9$  Jahre

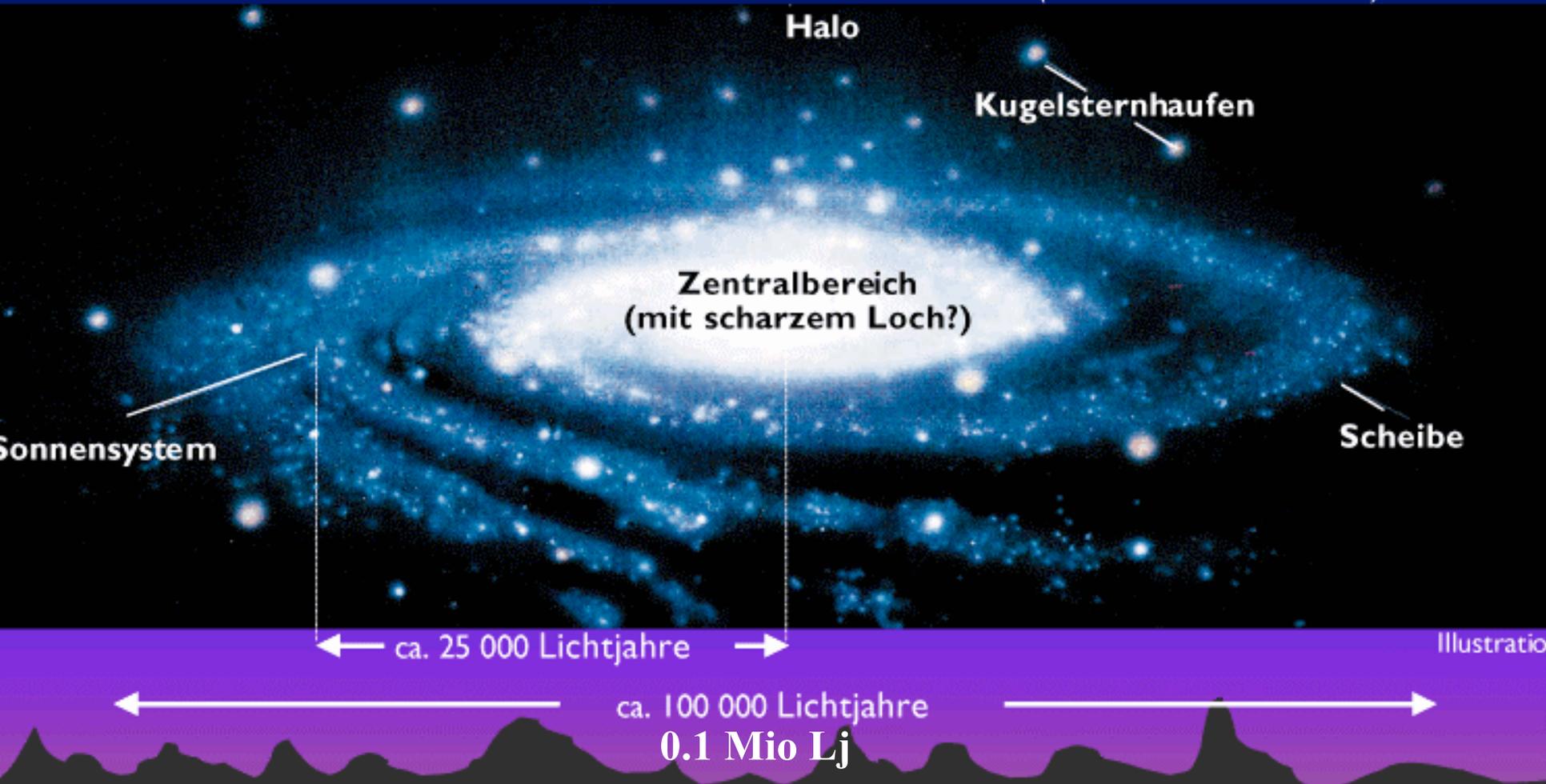
Durchmesser des sichtbaren Universums  $\approx 13.7 \times 10^9$  Lj

Heutige Temperatur des Universums  $\approx 2.7$  °K

10 TeV (LHC-Energie) entspricht einer Temperatur des Universums von  $10^{17}$  °K ( $10^{-12}$  sec nach Urknall)

# Kosmische Entfernungen (1)

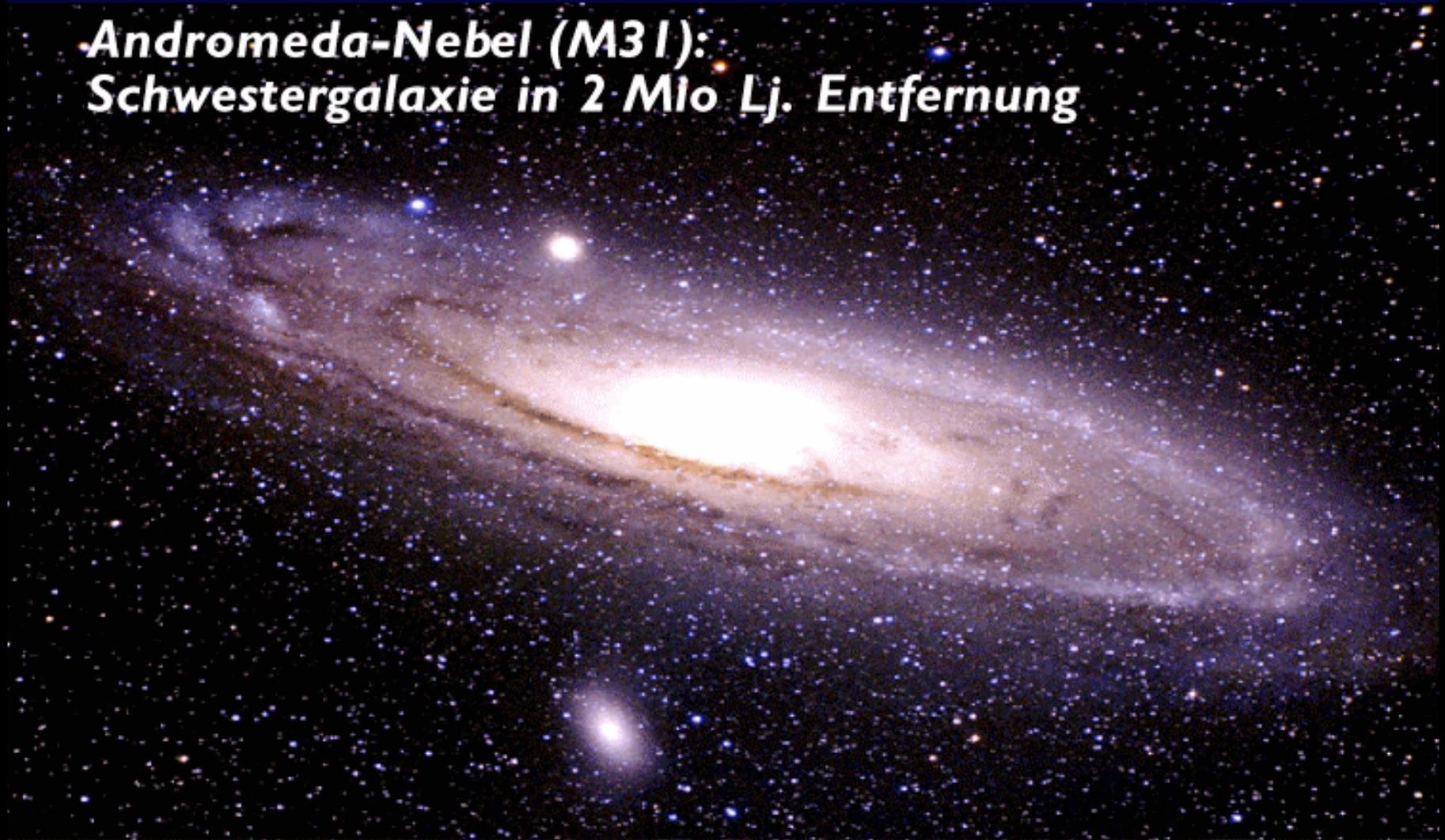
## Die Milchstraße - Unsere Galaxis (ca. 100 Mrd Sterne)



## **Kosmische Entfernungen (2)**

---

**Andromeda-Nebel (M31):  
Schwestergalaxie in 2 Mio Lj. Entfernung**



# Sterne und ihre Entwicklung

## (Supernovae, Neutronensterne, Schwarze Löcher)

**Sterne:** Heisses Plasma, Kernfusion im Sterninneren erzeugt Strahlungsenergie

$7 \times 10^{22}$  Sterne in 100 Millionen Galaxien im gesamten sichtbaren Universum.

Großer Teil der Sterne vor über 10 Milliarden Jahre entstanden

Massereiche Sterne leben kürzer als massearme Sterne. Sonne lebt noch 5 Milliarden Jahre.

$M < 8 M_s \rightarrow$  Weiße Zwerge, Rote Riesen, Supernova I (Doppelsterne, Standardkerze)

$M > 8 M_s \rightarrow$  Supernova II  $\begin{cases} \nearrow$  Neutronensterne ( $1.5 M_s < \text{Verbleibende Masse} < 2.5 M_s$ ) \\ \searrow Stellares Schwarzes Loch (Verbleibende Masse  $> 2.5 M_s$ )

**Supernovae:** Explodierende Sterne nach Beendigung der Fusionsreaktionen

(Fe-Brennen). Zunahme der Leuchtkraft für einige Tage um den Faktor  $10^6$ - $10^9$ , entspricht Leuchtkraft einer ganzen Galaxie (Galaxienhaufen).

# Sterne und ihre Entwicklung

## (Supernovae, Neutronensterne, Schwarze Löcher)

**Neutronensterne:** Astronomisches Objekt von sehr hoher Dichte ( $\approx 10^{11}$  kg/cm<sup>3</sup>), entspricht der Dichte eines Atomkerns.

Masse  $\approx (1.5-2.5) M_s$ ;  $\varnothing \approx 20$  km. Ende einer Sternentwicklung.

**Stellare Schwarze Löcher:** Astronomisches Objekt am Ende einer Sternentwicklung.

Masse  $\approx 10 M_s$ ,  $\varnothing \approx 30$  km. Unsichtbar. E.-M. Strahlung bleibt gefangen.  
(bei Rotation: Pulsar)

**Supermassive Schwarze Löcher:** ( $10^6-10^9$ )  $M_s$ . Vermutlich im Zentrum der meisten Galaxien.

# Expansion des Universums

## Hubble'sches Gesetz

$$\Delta v = H(t) d \quad \left[ \begin{array}{l} \Delta v = \text{Rotverschiebung von Spektrallinien} \\ d = \text{Abstand (longitudinal) zwischen Erde und Galaxie (Stern)} \end{array} \right]$$

H = Hubble-Parameter, zeitabh.

Zur Zeit:  $H = H_0 = 73 \text{ km/sec} \cdot \text{Mpc}$

Daraus Bestimmung von d für viele Sterne/Galaxien möglich

↳ Alle entfernen sich voneinander, Universum expandiert  
Gleichzeitig expandiert die Wellenlänge von Strahlung und  
das Universum kühlt sich ab

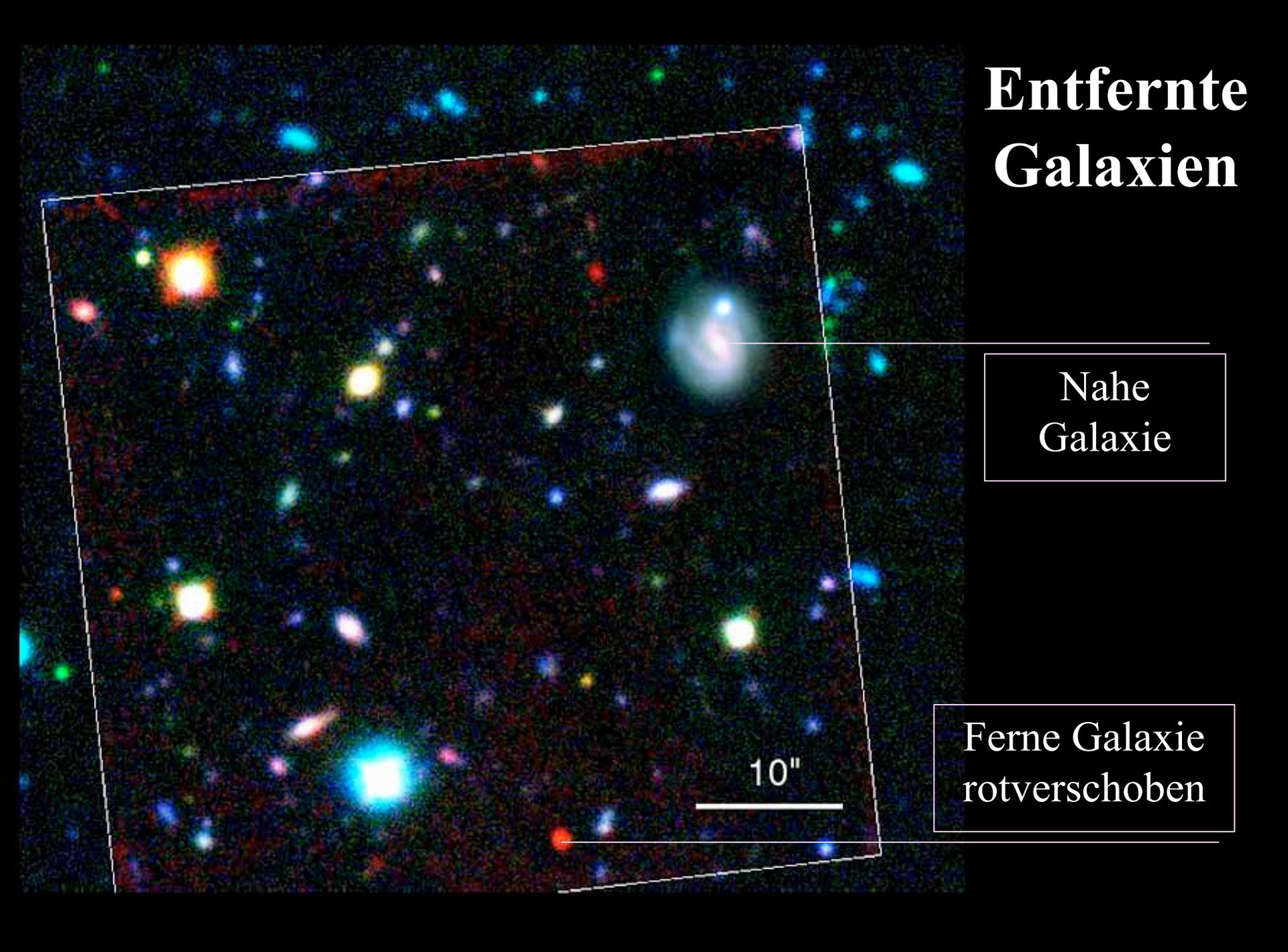
Neueste Erkenntnis: Expansion findet zur Zeit beschleunigt statt (!!)

# Entfernte Galaxien

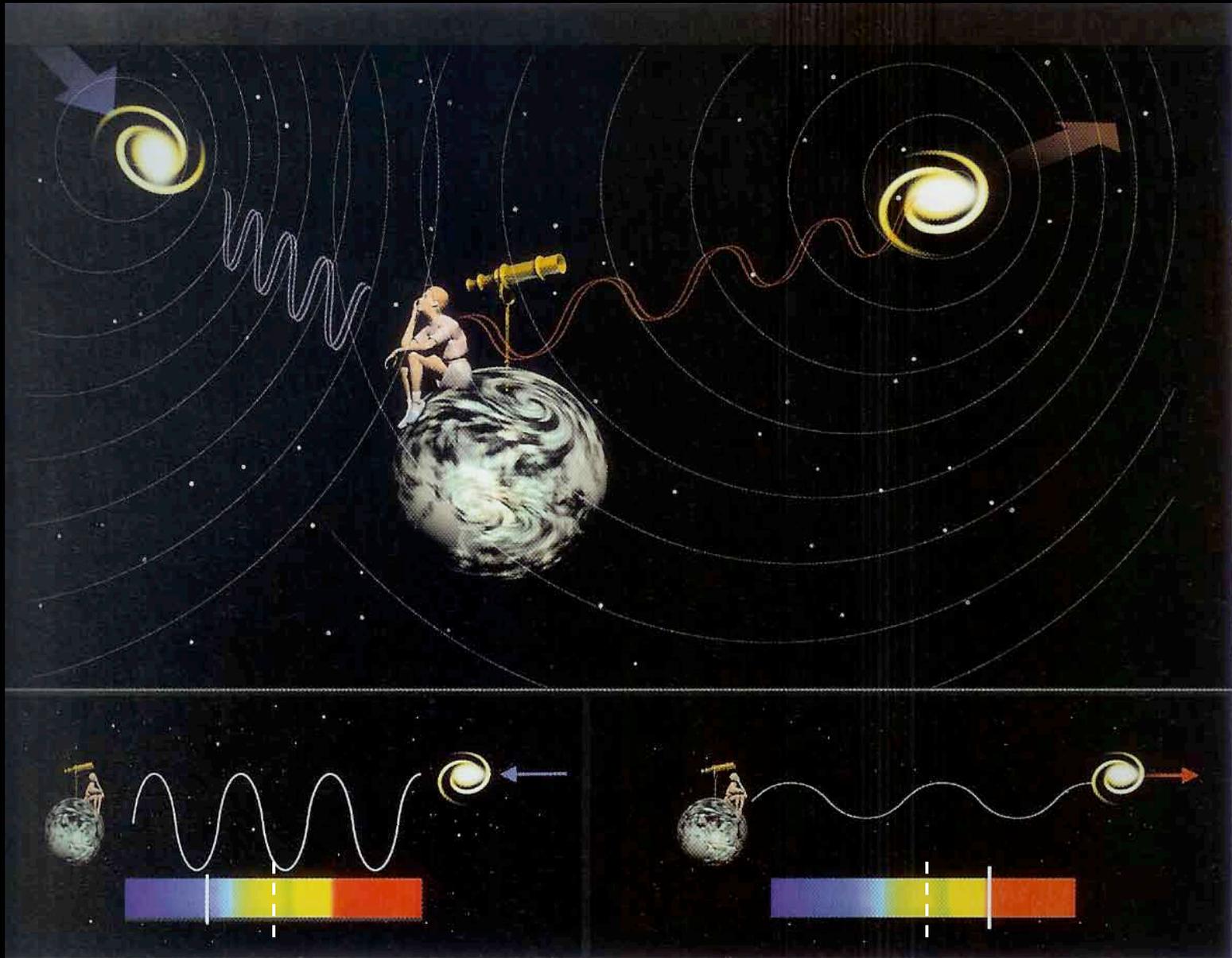
Nahe  
Galaxie

Ferne Galaxie  
rotverschoben

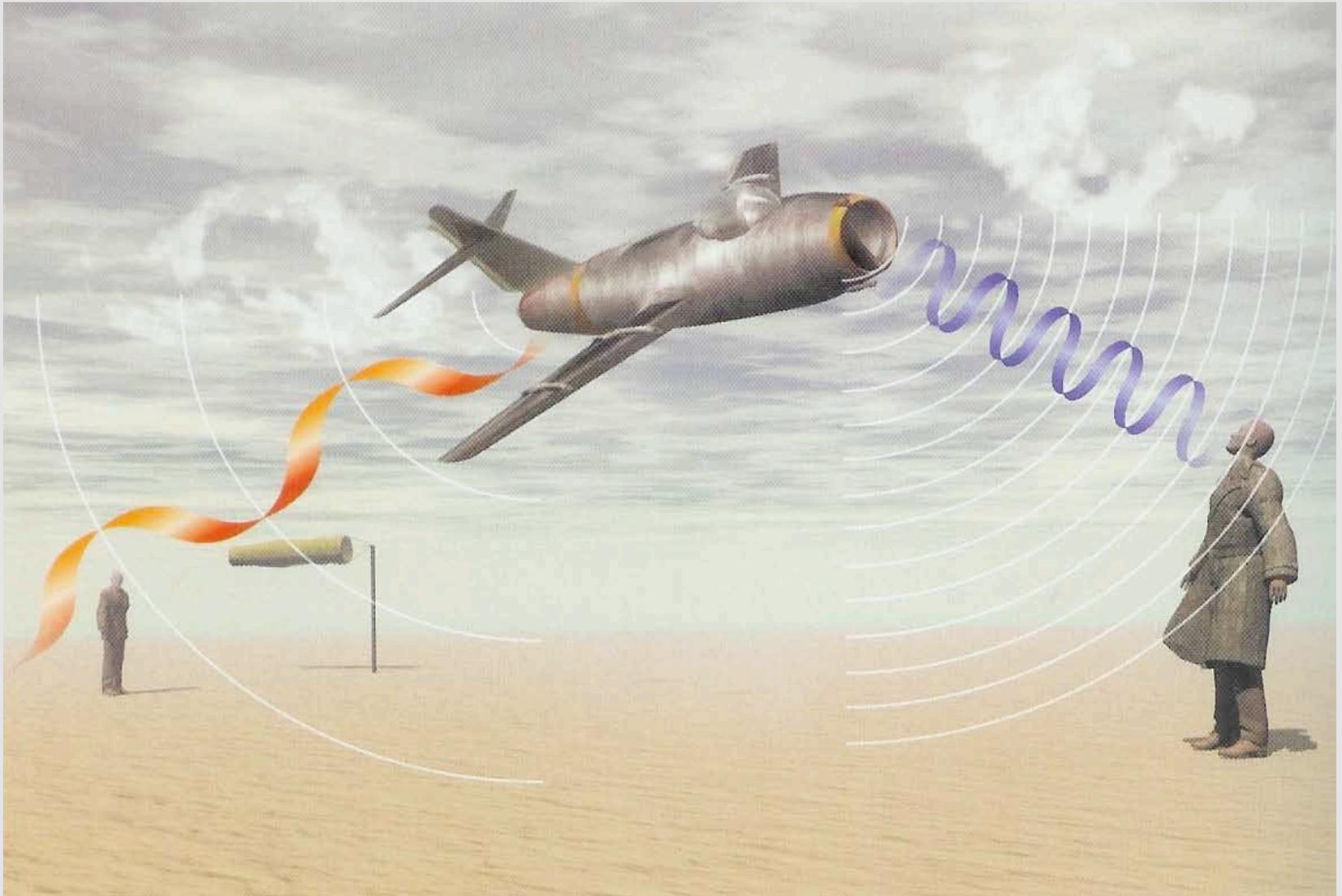
10"



# Rotverschiebung



# Dopplereffekt



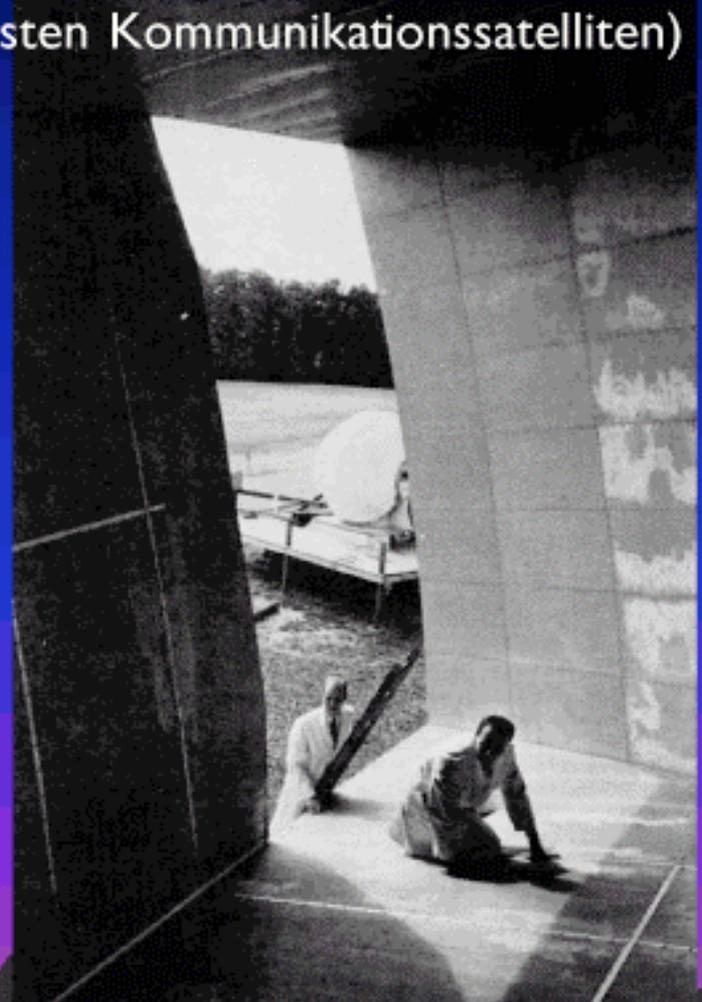
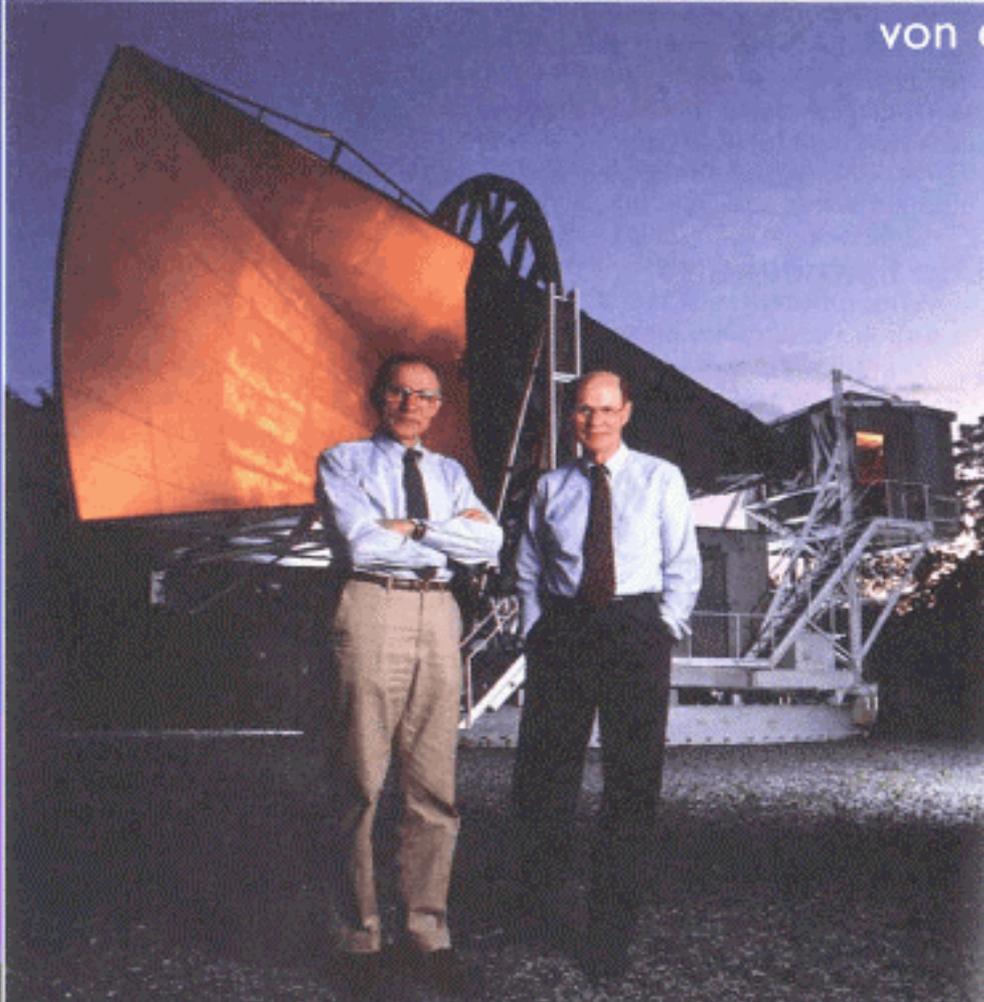
# Hintergrundstrahlung

Als das Universum eine Temperatur von ca.  $4000 \text{ }^{\circ}\text{K}$  hatte (400 000 Jahre nach Urknall) entstand eine homogene und isotrope Strahlung. Sie hat sich bis heute auf  $2.7 \text{ }^{\circ}\text{K}$  abgekühlt.

Ihrer Erforschung verdanken wir viele Informationen über die Entwicklung des Universums, so z. B., dass wir in einem flachen Universum leben (Winkelsumme im Dreieck ist  $180^{\circ}$ , nicht selbstverständlich in allgem. Relat.-Theorie)

# Mikrowellenhintergrundstrahlung

Entdeckung zufällig durch Penzias & Wilson 1964 (Radioteleskop für Signalempfang von ersten Kommunikationssatelliten)



Penzias und Wilson: Nobelpreis 1978

Mather und Smoot: Nobelpreis 2006

# Masse und Energieverteilung im Universum

## Masse/Energie im heutigen Universum

**Normale Materie** (Sterne/interstellare Materie/Planeten/Erde/Menschen) nur kleiner Anteil an Materie/Energie im Universum (4 %).

Entstehung:

Leichte Elemente (H, He, C, ...): Quarks vereinigen sich zu Protonen und Neutronen. He, ... -Kerne entstehen durch Fusion von Protonen und Neutronen (1-200 sec nach Urknall,  $10^{10}$  °K)

Schwerere Elemente: Neutroneneinfang in Riesensternen (s-Prozess) und in Supernovae (r-Prozess)

# Masse und Energieverteilung im Universum

## Dunkle, nicht strahlende Materie (23%)

Nur indirekte Evidenz:

- Rotation von Galaxien
- Lichtablenkung durch dunkle Materiewolken (Einstein)

Alle Galaxien sind von dunklen Materiewolken umgeben

Aus welchen Teilchen besteht die dunkle Materie? (LSP?, LHC-Experimente)

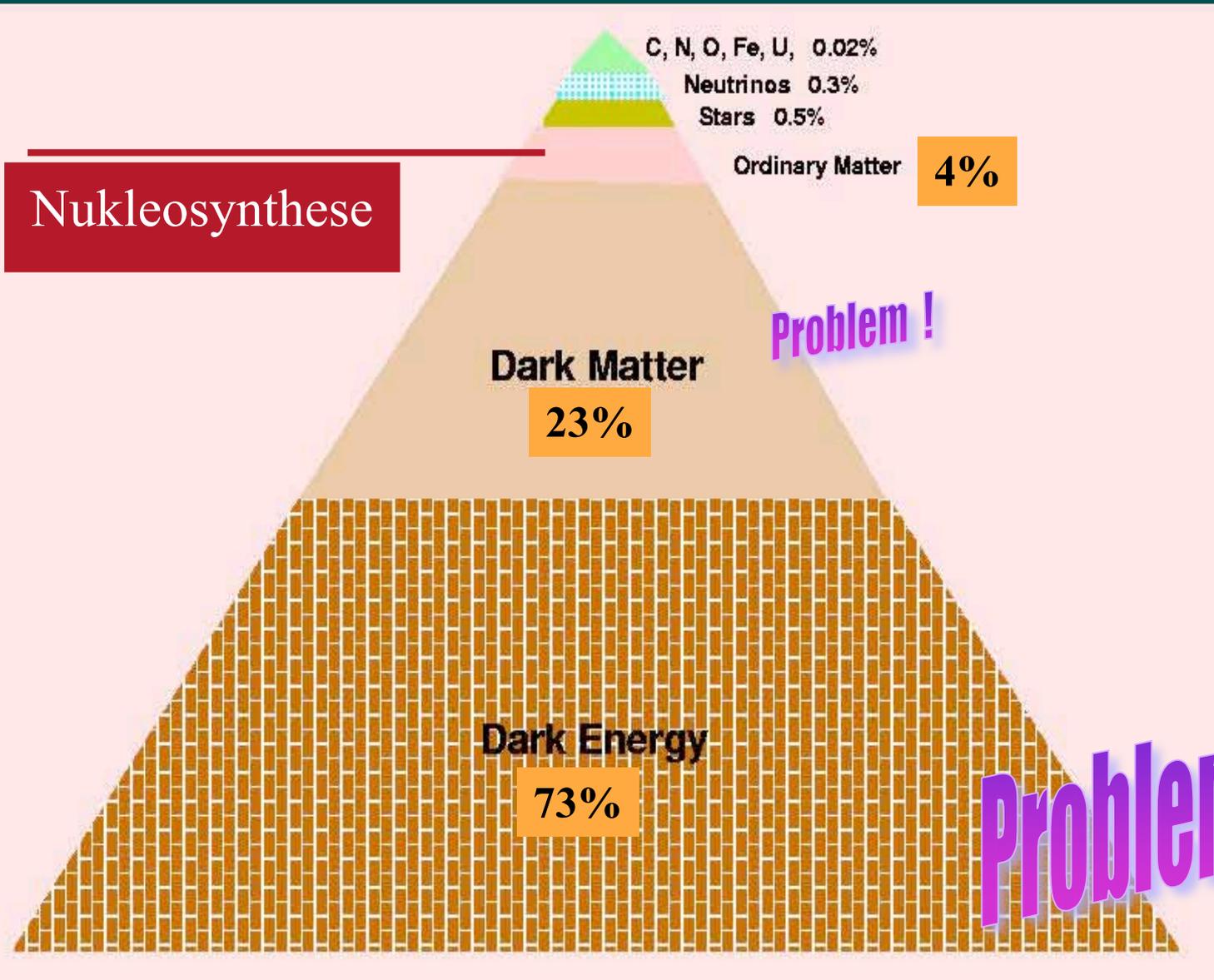
## Dunkle Energie (73%)

Indirekter Schluss aus Studium der Hintergrundstrahlung

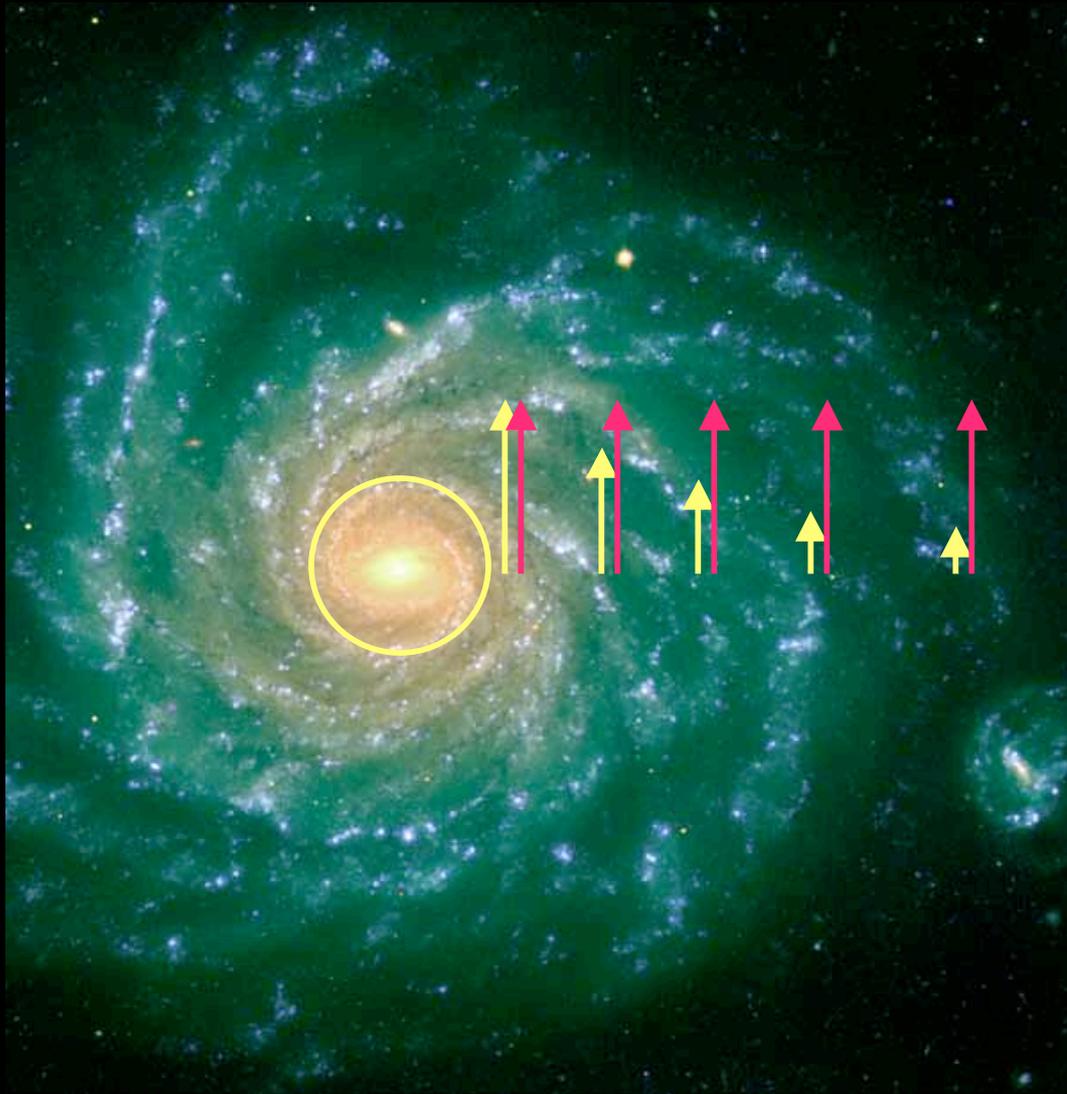
Beschleunigte Expansion nur verständlich durch neues Energiefeld in der Einstein'schen Gravitationstheorie (Historischer Hintergrund: Einstein's kosmologische Konstante = "Größte Eselei meines Lebens!")

Ursprung des Energiefeldes vollständig unklar, es gibt aber einige theoretische Ansätze (Quintessenz, 5. Kraft,...)

# Masse im heutigen Universum



# Rotation von Galaxien

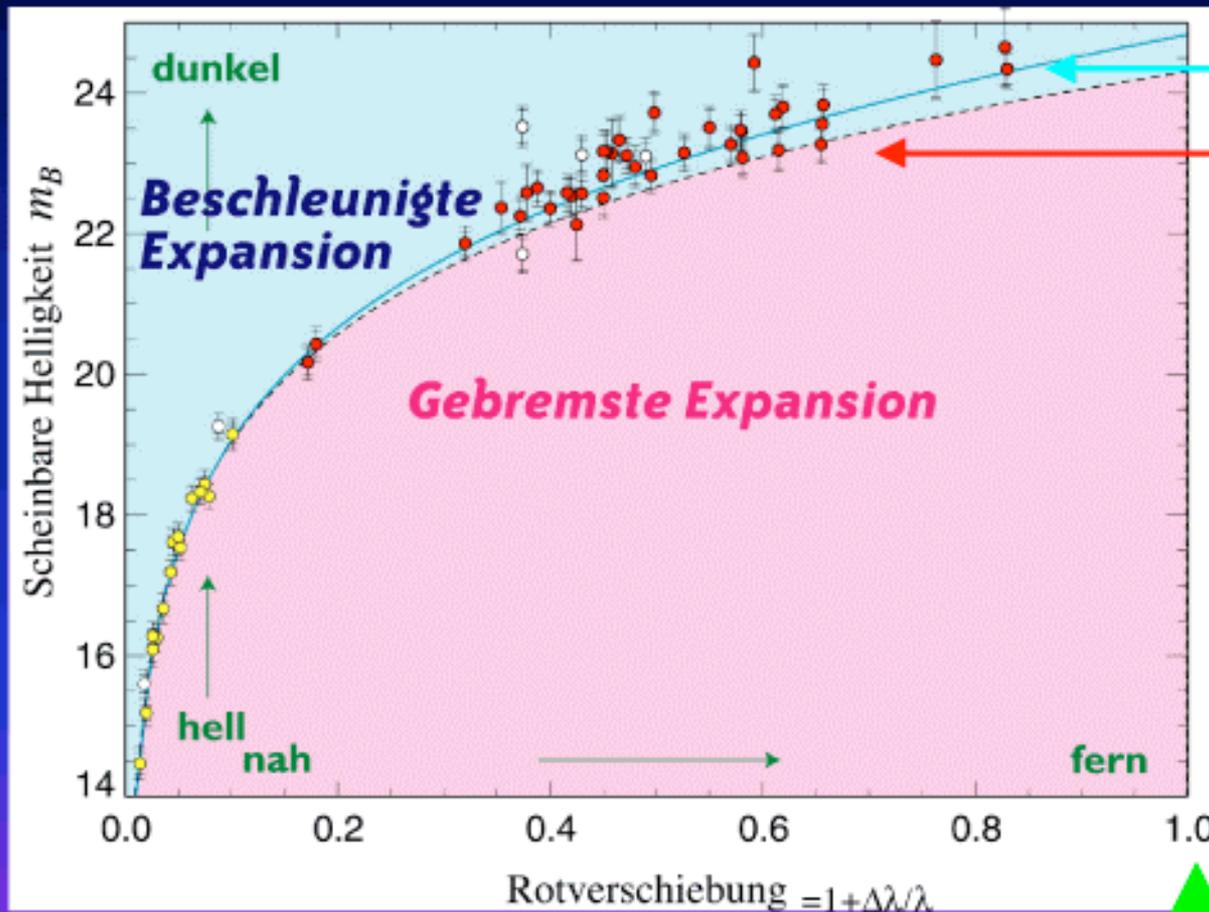


Differentielle Rotation



Planetenbewegung

# Helligkeitsverteilung als Fkt der Rotverschiebung...



**Beobachteter Verlauf**

**Erwarteter Verlauf  
für kritisches (flaches)  
Universum**

Exp. Befund:

Universum ist flach aber  
expandiert heute schneller  
als vor ~ 6 Mrd Jahren

Ursache: kosmologische  
Konstante (Abstoßung)

**Universum hatte zu dieser Zeit (vor ca. 10 Mrd J.,  
nur die halbe Größe von heute**

# II Modell für zeitliche Entwicklung des Universums

Aus der Teilchenphysik kennen wir die Bestandteile der Materie, die sich nach dem Urknall gebildet haben.

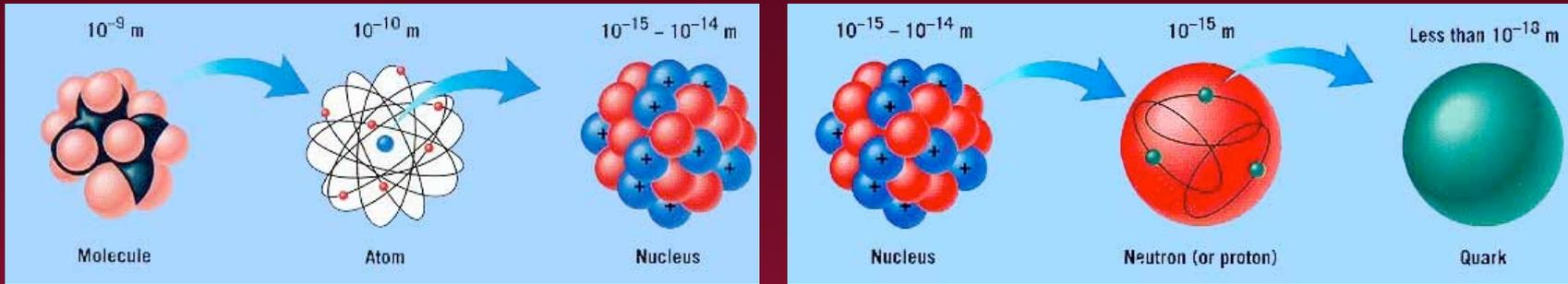
Ab Zeiten von  $10^{-10}$  sec (0.000 000 000 1 sec) nach dem Urknall ( $T \approx 10^{15}$  °K) ist dieses Szenario durch viele Forschungsergebnisse gesichert, in der Zeit davor gibt es große Unsicherheiten, z. B. bei der Postulierung einer inflationären Ausdehnung des Universums.

Die Experimente bei CERN (LHC) werden Aussagen bis herunter zu  $10^{-12}$  sec ( $T \approx 10^{16}$  °K) nach dem Urknall erlauben.

## Theorien:

Allgemeine Relativitätstheorie } Vereinigung noch nicht gelungen  
Quantenmechanik }  
Kern-/Teilchenphysik }  
Schleifen-Quanten-Gravitation, Super-String-Theorie, etc. ... (Höhere Dimensionen)

# Bestandteile der Materie (Teilchenphysik)



**Quarks: u, d, s, c, b, t**  
(Drittelzahlige Ladungen)

+ **Anti-Quarks:  $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}$**

Quarks kommen nur in Zweier ( $q\bar{q}$ ) und Dreier-Kombinationen ( $qqq$ ) vor (Hadronen)

Baryonen: $qqq$	} Hadronen	Proton = uud	Antiproton = $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$
Mesons : $q\bar{q}$		$\pi^+ = u\bar{d}$	$\pi^- = \bar{u}d$

Charakterisierung: Masse ( $m$ ), Lebensdauer ( $\tau$ ) oder Breite ( $\Gamma = \hbar/\tau$ ), Zerfalls-Moden,  
Quanten Zahlen ( $J^{PC}$ )

Radien der Hadronen:  $\approx 10^{-15}$  m

Nur Proton/Antiproton stabil, Neutron stabil im Kern

# Bestandteile der Materie (Teilchenphysik)

## Leptonen

Elektron-Neutrino ( $\nu_e$ )

Myon-Neutrino ( $\nu_\mu$ )

$\tau$ -Neutrino ( $\nu_\tau$ )

Elektron ( $e^-$ )

Myon ( $\mu^-$ )

$\tau$ -Lepton ( $\tau^-$ )

+ Anti-Teilchen ( $\bar{\nu}_e, e^+, \bar{\nu}_\mu, \mu^+, \bar{\nu}_\tau, \tau^+$ )

## Mittlerteilchen der vier elementaren Kräfte

Photonen ( $\gamma$ ) (Elektromagnetische Wechselwirkung)

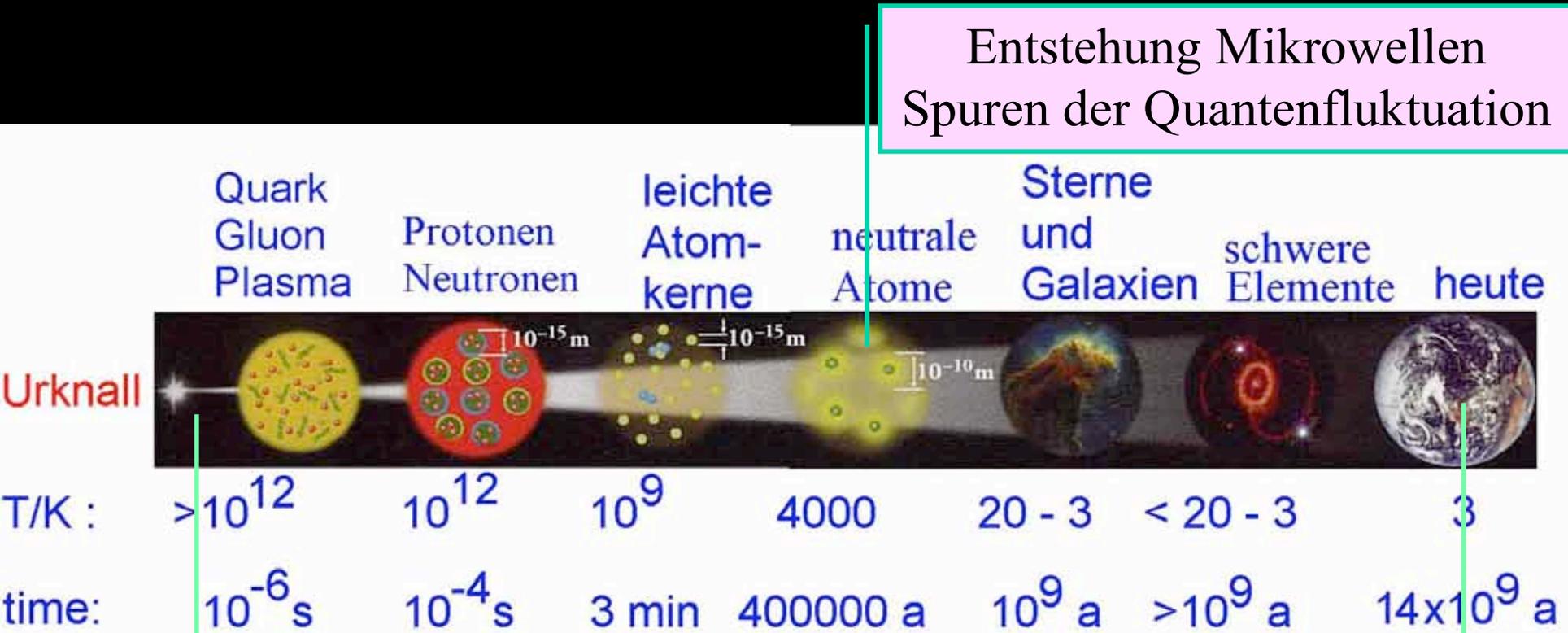
Intermediäre Bosonen ( $W^\pm, Z^0$ ) (Schwache Wechselwirkung)

Gluonen ( $g$ ) (Starke Wechselwirkung)

Gravitonen ( $G$ ) (Schwerkraft)

+ Higgs-Teilchen ( $H$ ) (Verantwortlich für Masse der Quarks)

# Geschichte des Universums



Entstehung Mikrowellen  
Spuren der Quantenfluktuation

Inflation Quantenfluktuationen

Verteilung der Galaxien  
Spuren der Quantenflukt.



# III Hochenergiephysik und Kosmologie

- Erforschung der Kräfte zwischen Elementarteilchen
- Suche nach neuen Teilchen
- Experimentelle Tests theoretischer Voraussagen (Standard-Modell, “Weltformel”)

Experimente der letzten 70 Jahre → Standardmodell der Teilchenphysik (SM)

6 Quark-Sorten (u, d, s, c, b, t)

6 Leptonen-Sorten  $e^-$ ,  $\nu_e$ ,  $\mu^-$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\tau^-$ ,  $\nu_\tau$

+ Feldteilchen: Photonen, Gluonen, Intermediäre Bosonen, Gravitonen

Higgs-Teilchen (noch nicht gefunden)

Nicht voll befriedigende Situation:

Parameter der Teilchen nicht erklärt

Gravitation nicht kompatibel mit SM

Wahrscheinlich noch nicht alle Teilchen gefunden,

z. B. die Teilchen der dunklen Materie

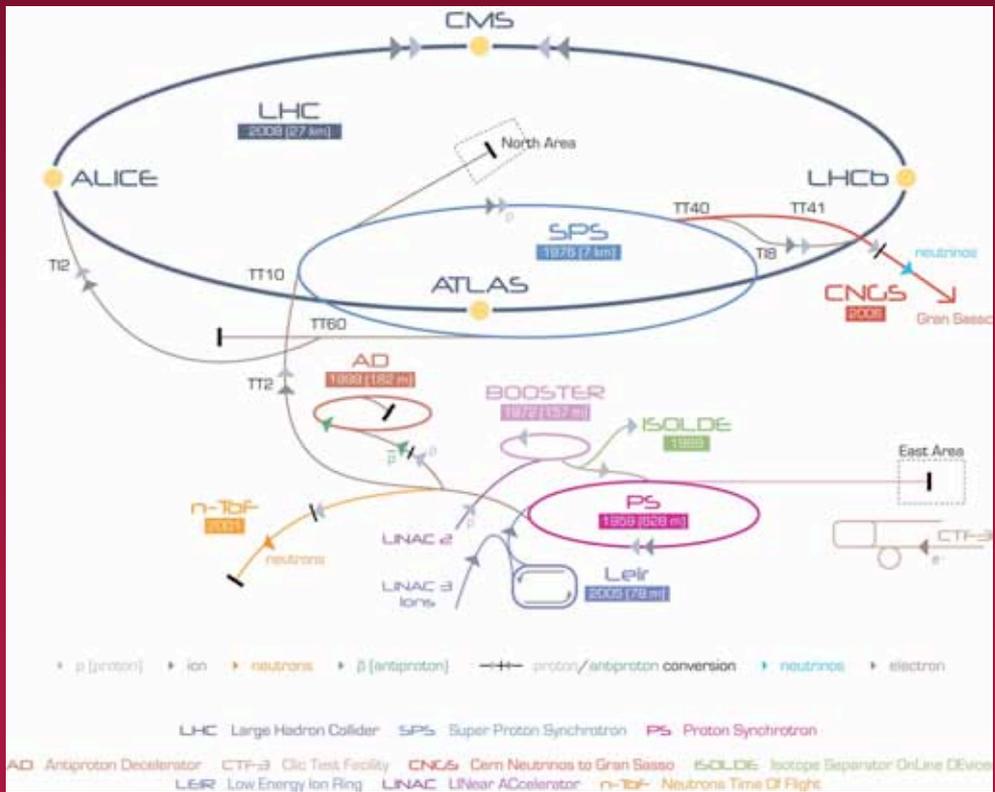
# Mathematische Darstellung des Standard-Modells(SM),“Weltformel“)

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} + \bar{\psi}_i \gamma_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

*Mathematical representation of the Standard Model of particle physics.*

# CERN (Centre de Recherche Nucleaire)

- Größtes, nicht-militärisches Forschungslabor in der Welt, seit 1954, stetig im Wachstum (4 Nobelpreise)
- Lage: Grenze Schweiz/Frankreich
- 20 europäische Mitgliedsstaaten + Assoziierte Mitglieder (USA, Russland, Japan, Indien, ...)
- 2500 permanente Mitarbeiter, überwiegend Physiker, Ingenieure, Techniker (Bau und Betrieb der Beschleuniger)
- 8000 Wissenschaftler aus aller Welt als Besucher (Bau und Betrieb der Detektoren/Datenauswertung)
- Jährliches Budget  $\approx 700$  Mio €



# Hochenergiephysik und Kosmologie

Prinzip der Erzeugung neuer Elementarteilchen:

Umwandlung von Energie in Masse ( $E = mc^2$ )

Proton (7 TeV) + Proton (7 TeV)  $\rightarrow$  Proton + Proton + Weitere leichte Teilchen  
(Häufiger Prozess)

Proton (7 TeV) + Proton (7 TeV)  $\rightarrow$  Proton + Proton + Higgs ( $150 \text{ GeV}/c^2$ )  
(Seltener Prozess)

# Der Large Hadron Collider (LHC)

- 27 km Umfang, ca. 100 m unter der Erde, 9300 Magnete
- Beschleunigung von Protonen in zwei gegenläufigen Strahlen bis 7 TeV, von Schwerionen bis 2.7 TeV/u
- Kollision dieser Strahlen und Detektion der Reaktionen an einigen Stellen (Atlas, CMS, Alice, LHCb, ...)
- Herzstück des Beschleunigers: Ca. 1600 supraleitende Magnete (Dipole + Quadrupole)  
Magnetfeld: 8.3 T, Stromstärke: 11700 A, Stromverbrauch: 120 MW  
10080 t flüssiger Stickstoff, 60 t flüssiges He ( $-271.3^{\circ}\text{C} = 1.9^{\circ}\text{K}$ )
- Vakuum (6500m<sup>3</sup> Volumen):  $10^{-13}$  atm
- Präzision bei Vermessung:  $\ll 1$  mm
- Kosten: 4,7 Milliarden CHF
- Beschleunigungszeit der Protonen bis zur Höchstenergie:  $\approx 20$  min
- Speicherzeit ca. 24 h
- 11245 Umläufe/s, 2800 Teilchenpakete ( $\approx 10^{11}$  Teilchen), Abstand zwischen Paketen:  $20 \times 10^{-9}$  s  
20 Kollisionen pro Paket, 600 Mio Kollisionen/s

LHC: Spitzentechnologie bei Supraleitung, Kühlung, Geodäsie, Datenverarbeitung

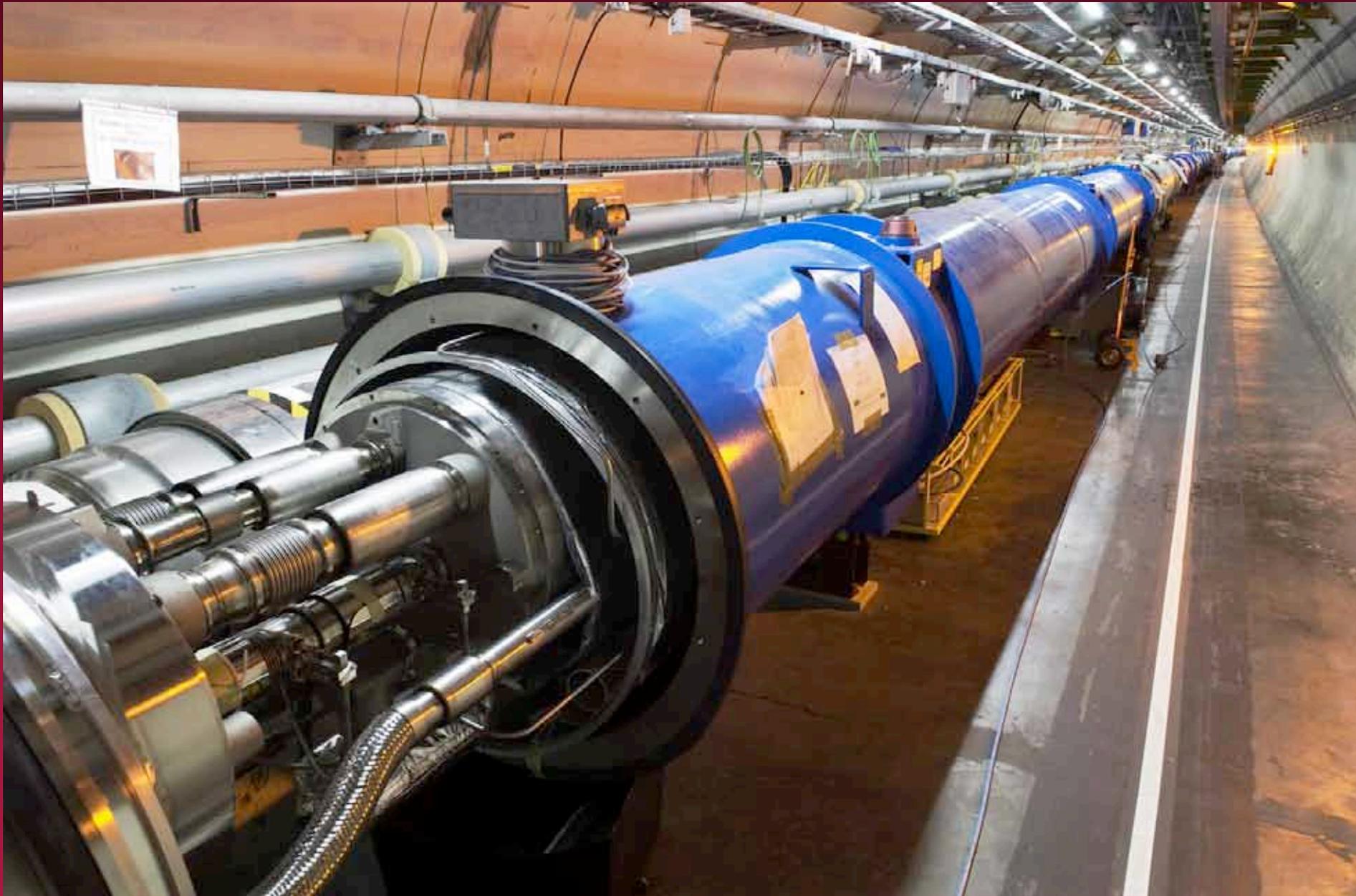
# CERN und LHC (CERN)



# CERN und LHC (CERN)



# CERN und LHC – Der Large Hadron Collider



# CERN und LHC – Der Large Hadron Collider

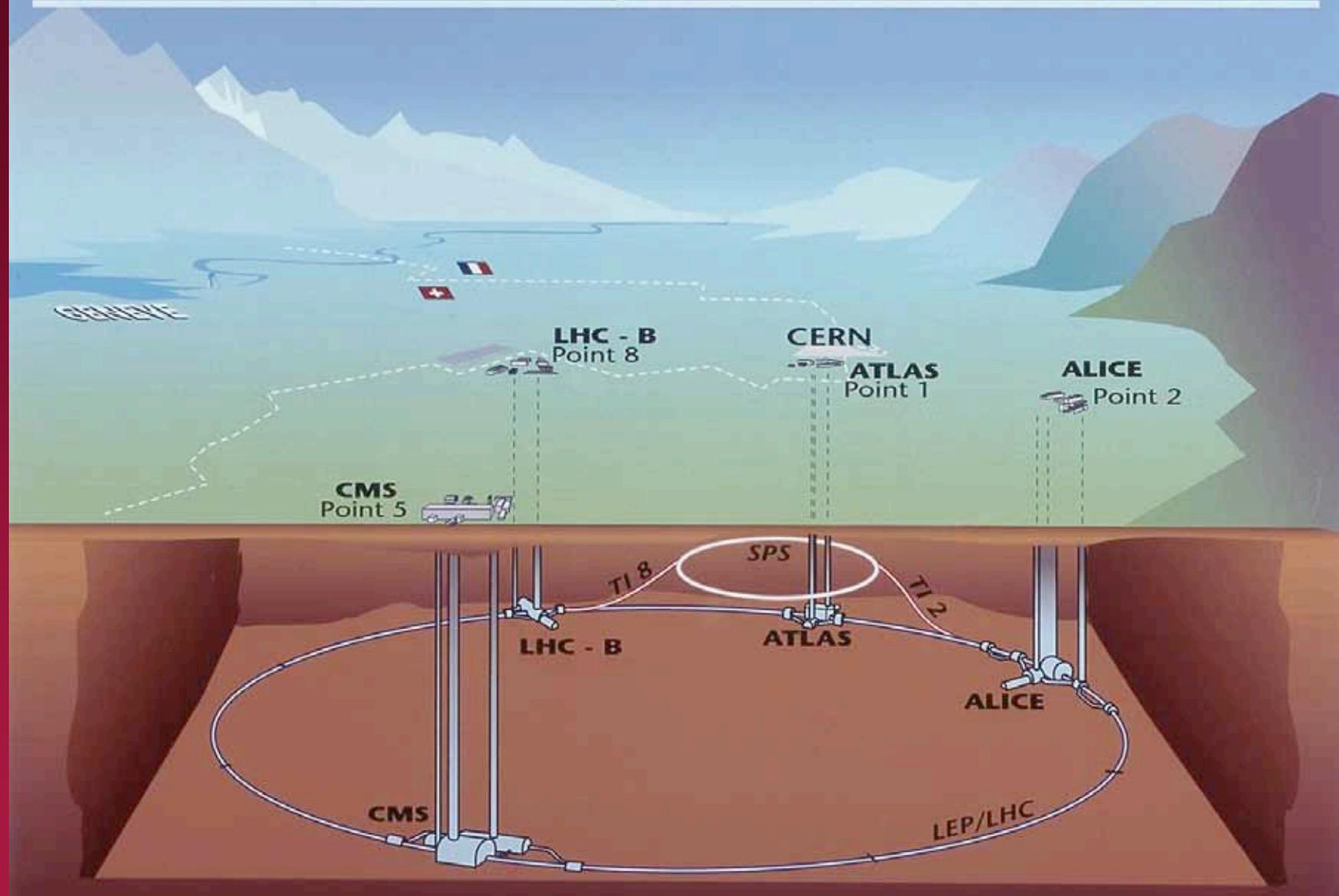


# CERN und LHC – Der Large Hadron Collider

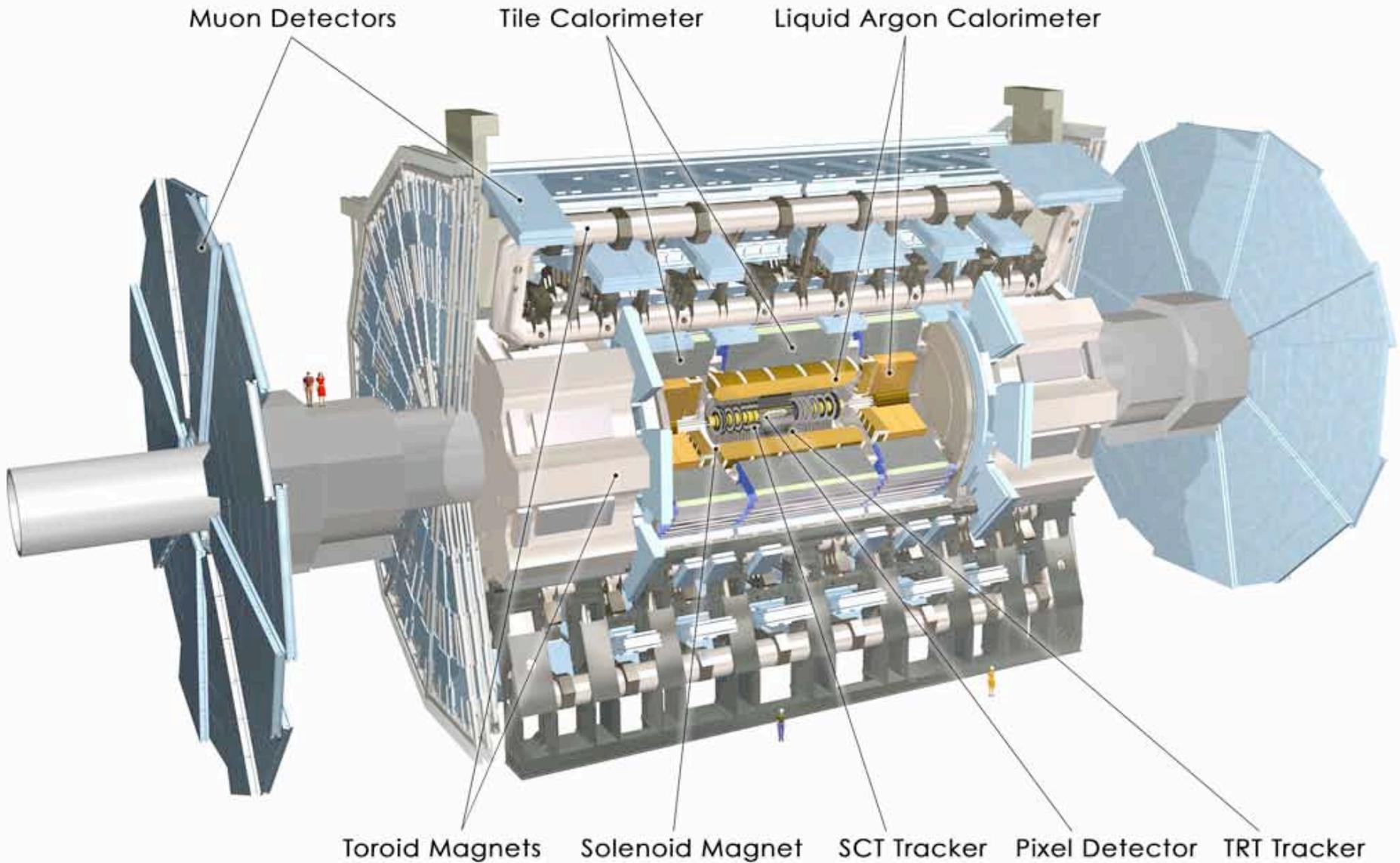


# CERN und LHC – Der Large Hadron Collider

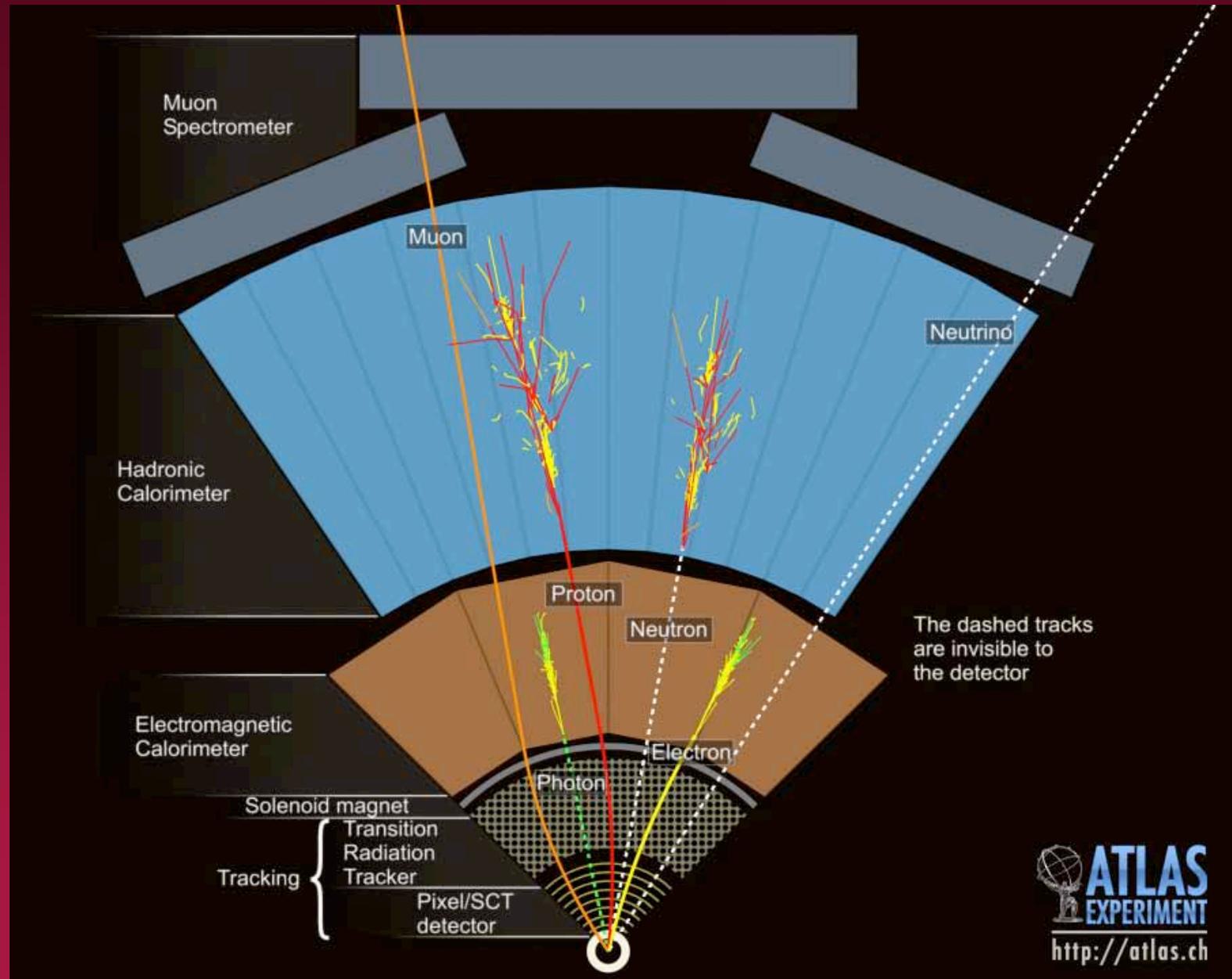
Overall view of the LHC experiments.



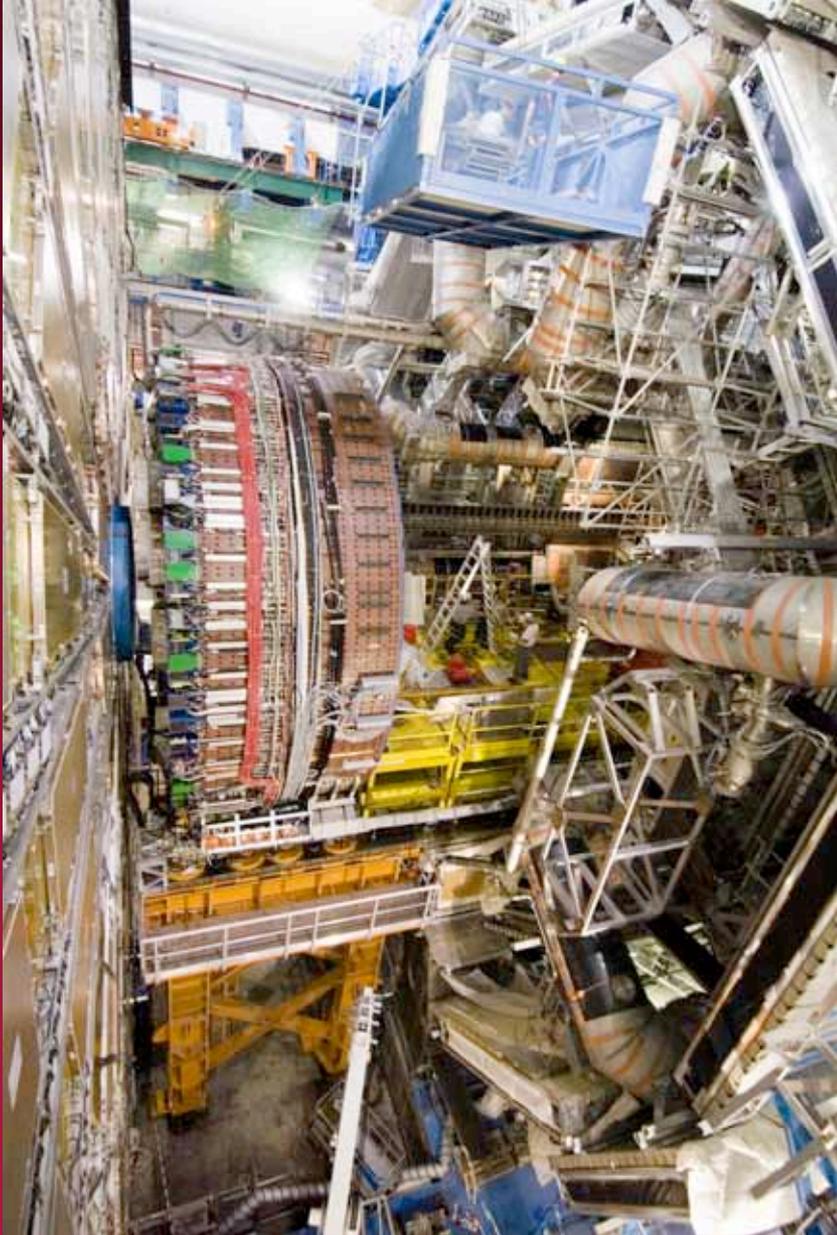
# CERN und LHC (ATLAS)



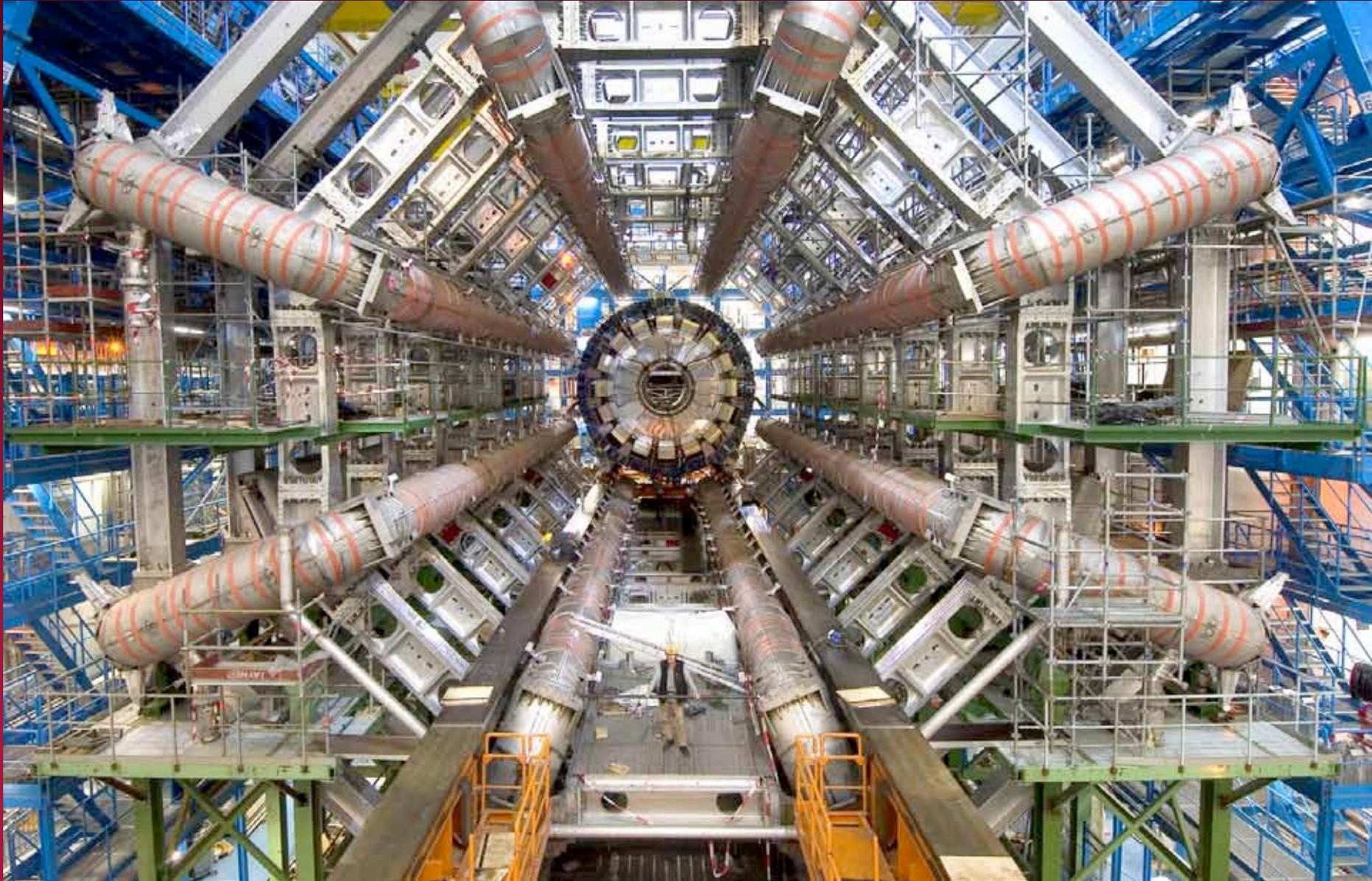
# CERN und LHC (ATLAS)



# CERN und LHC (ATLAS)



# CERN und LHC (ATLAS)



# Hochenergiephysik am LHC

Ziele der Experimente:

- Suche nach Higgs-Teilchen (Verantwortlich für Massen von Quarks)
- Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

Beispiele: – Supersymmetrische Teilchen

Kandidaten für dunkle Materie

- Suche nach dunkler Materie

(Fehlender Impuls in einem pp-Ereignis)

- Suche nach Extra-Dimensionen

(Verschieben von Gravitonen in andere Dimensionen/Fehlender Impuls)

- Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas

(<  $10^{-10}$  sec nach dem Urknall)

- Untersuchungen zur dunklen Energie/Baryon-Antibaryon-Verhältnis

Status: Maschine läuft seit ca. 1/2 Jahr. Ende 2011 erste, neue Ergebnisse erwartet.



# CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2010-Jul-09 02:25:58.839811 GMT(04:25:58 CEST)

Run / Event: 139779 / 4994190

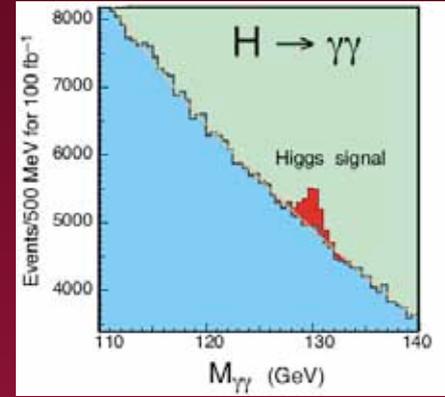
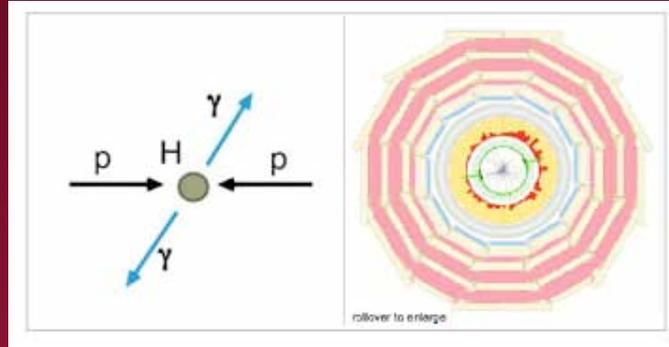


# CERN und LHC (Gesuchte Ereignisse [Simulationen])

## Gesuchte Ereignisse (Simulationen)

Suche nach Higgs-Teilchen:

$$m_{\text{Higgs}} < 140 \text{ GeV}/c^2 \quad : \quad H \rightarrow \gamma\gamma$$



$$150 \leq m_{\text{Higgs}} \leq 180 \text{ GeV}/c^2$$

$$: \quad H \rightarrow W^+W^-$$

$$140 \leq m_{\text{Higgs}} \leq 180 \text{ GeV}/c^2$$

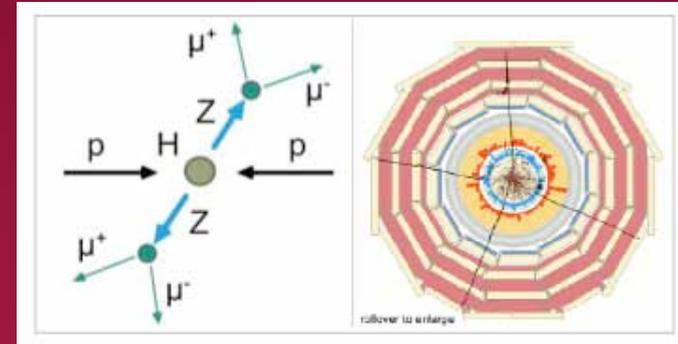
$$: \quad H \rightarrow ZZ$$

$$\hookrightarrow l^+l^-$$

$$m_{\text{Higgs}} > 500 \text{ GeV}/c^2$$

$$: \quad H \rightarrow Z + Z$$

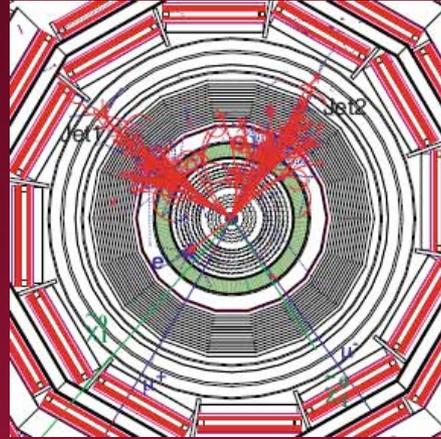
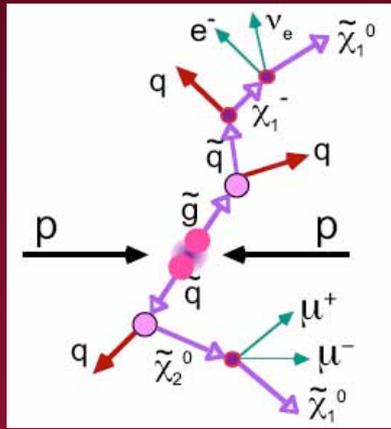
$$\hookrightarrow l^+l^- \quad \hookrightarrow q\bar{q}$$



# CERN und LHC (Gesuchte Ereignisse [Simulationen])

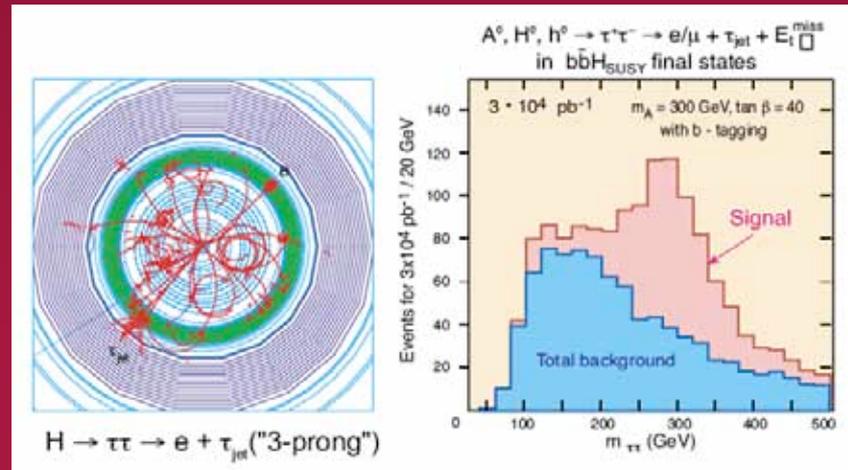
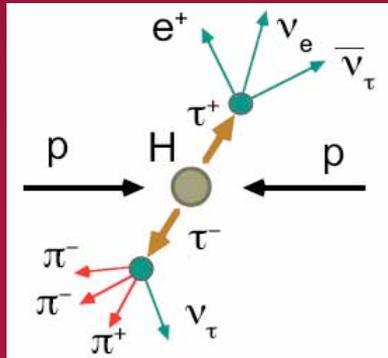
Suche nach supersymmetrischen Teilchen (SUSY):

$$pp \rightarrow \tilde{q}\tilde{g} \rightarrow 3 \text{ Leptonen} + 2 \text{ LSP}$$



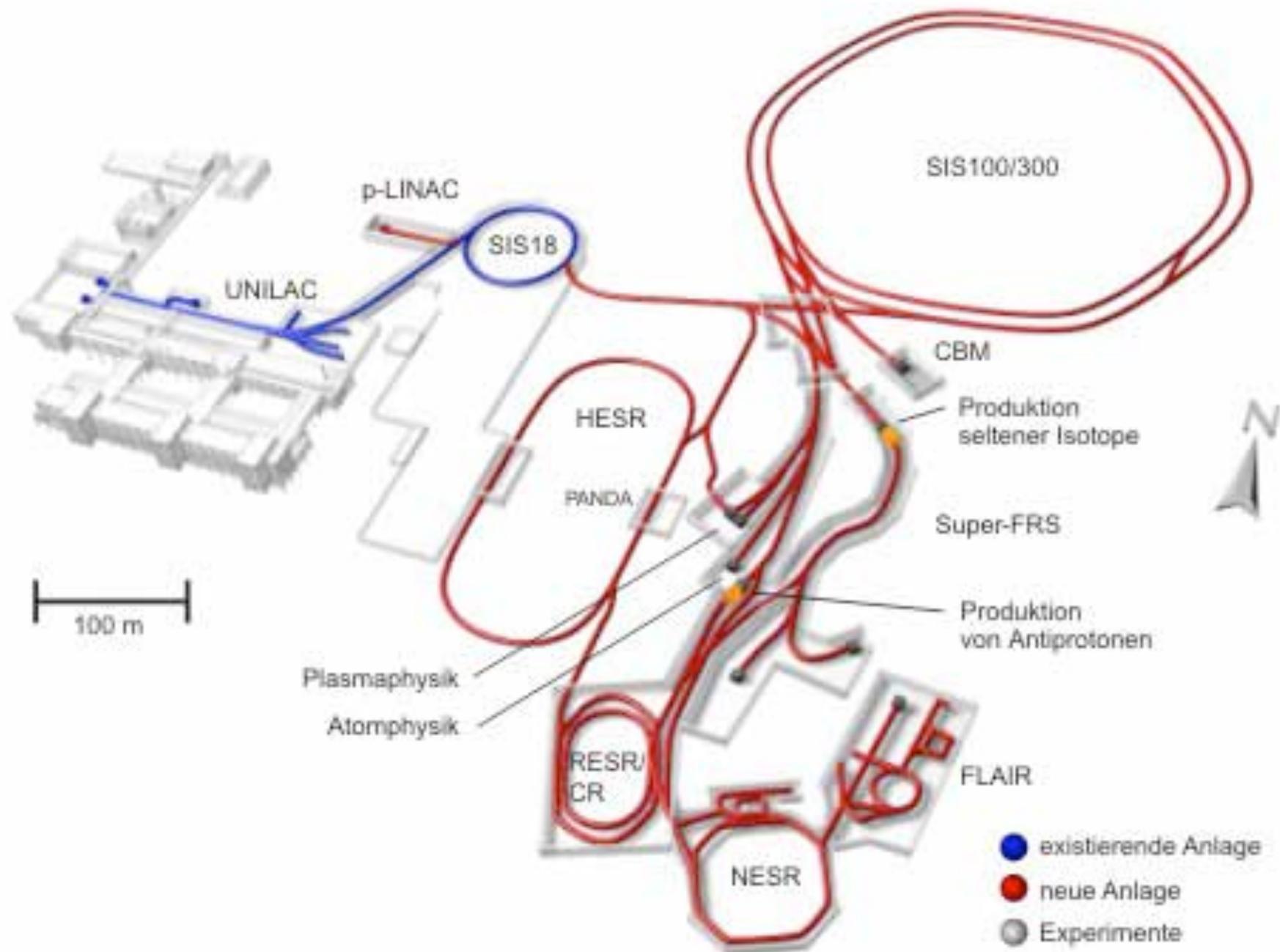
Suche nach supersymmetrischen Teilchen ( $H_{\text{SUSY}}$ ):

5  $H_{\text{SUSY}}$ -Teilchen vorhergesagt

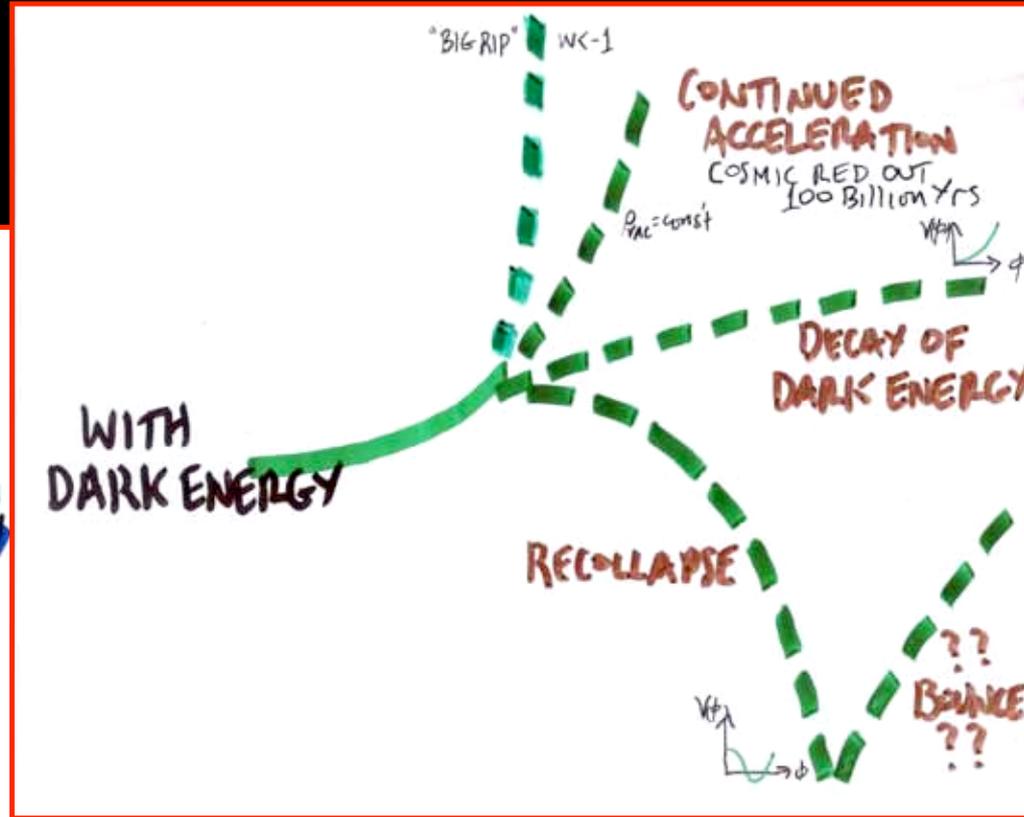
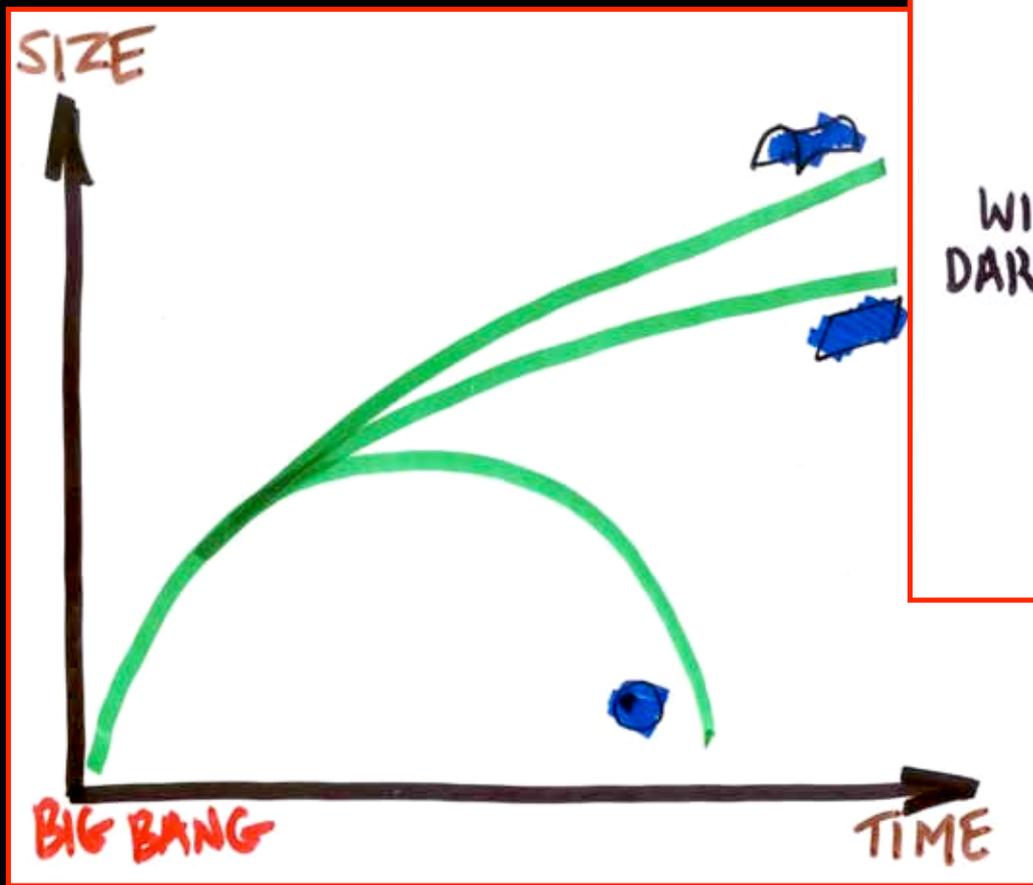


# IV. Ausblick





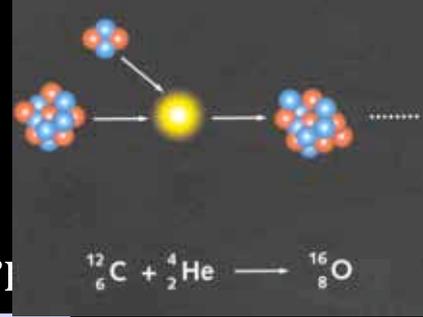
# Unsere kosmische Zukunft ?



Alles noch offen !

**Reserve**

# Supernova Typ Ia



Weißer Zwerg in Nachbarschaft von Riesenstern

Durch die akkreditierte Masse (H,He) wird das Material des weissen Zwerges gezündet: C, O.  
Schnelles Brennen → Supernova

Bisher 100 SN Ia gefunden

Alle 3 Wochen Himmel durchmustert

Weil Masse anwächst bis sie zündet, haben alle SN-Ia die gleiche Masse → alle SN-Ia haben die gleiche Leuchtkraft → helle Standardkerzen → Genaue Entfernungsmessung



# Sterne und ihre Entwicklung

## (Supernova, Neutronensterne, Schwarze Löcher)

**Sterne:** Heisses Plasma, Kernfusion im Sterninneren erzeugt Strahlungsenergie  
 $7 \times 10^{22}$  Sterne in 100 Millionen Galaxien im gesamten sichtbaren Universum.

Großer Teil der Sterne vor über 10 Milliarden entstanden

Massenreiche Sterne leben kürzer als massearme Sterne. Sonne lebt noch 5 Milliarden Jahre.

$M \leq 0.3 M_s$  → Weiße Zwerge → Schwarze Zwerge  
(Durchmesser  $\sim 1000$  km)

$0.3 M_s \leq M \leq 2.3 M_s$  → Rote Riesen (Durchmesser  $\sim 100$ x Durchmesser Sonne)  
→ Weiße Zwerge

$2.3 M_s \leq M \leq 8 M_s$  → Weiße Zwerge

$M \geq 8 M_s$  → **Supernova II**  $\begin{cases} \rightarrow \text{Neutronensterne (} 1.5 M_s \leq \text{Verbleibende Masse} \leq 2.5 M_s) \\ \rightarrow \text{Stellares Schwarzes Loch (Verbleibende Masse} > 2.5 M_s) \end{cases}$

Spezialfall: Doppelstern Weisser Zwerg / Roter Riese  
Supernova Ia, Standard Kerze

# Sterne und ihre Entwicklung

## (Supernova, Neutronensterne, Schwarze Löcher)

**Neutronenstern:** Durchmesser  $\approx 20$  km,  $1.44 M_s \leq M \leq 3 M_s$   
Bei Rotation : Pulsar (Radio-Bereich)

**Stellares Schwarzes Loch:** Durchmesser  $\sim 30$  km; Masse  $\sim 10 M_s$

Schwere Schwarze Löcher: Durchmesser  $\sim 150\,000$  km -  $1.5 \times 10^9$  km;  
 $M \sim 10^4 - 10^{10} M_s$   
Wahrscheinlich im Zentrum jeder Galaxie  
(Sagittarius Röntgenquelle in Milchstraße)  
Bei Akkretion von Materie: Quasar

# Expansion des Universums

## Hubble'sches Gesetz

$$\bar{v} = H(t) \bar{d} \quad \left[ \begin{array}{l} \bar{v} = \text{Rotverschiebung von Spektrallinien} \\ \bar{d} = \text{Abstand (longitudinal) zwischen Erde und Galaxie (Stern)} \end{array} \right]$$

H = Hubble-Parameter, zeitabh.

Zur Zeit:  $H = H_0 = 73 \text{ km/sec} \cdot \text{Mpc}$

Daraus Bestimmung von d für viele Sterne/Galaxien möglich

↳ Alle entfernen sich voneinander, Universum expandiert  
Gleichzeitig expandiert die Wellenlänge von Strahlung und  
das Universum kühlt sich ab

Neueste Erkenntnis: Expansion findet zur Zeit beschleunigt statt (!!)

# Expansion des Universums

Hubble - Gesetz :

$$\vec{v} = H\vec{d}$$

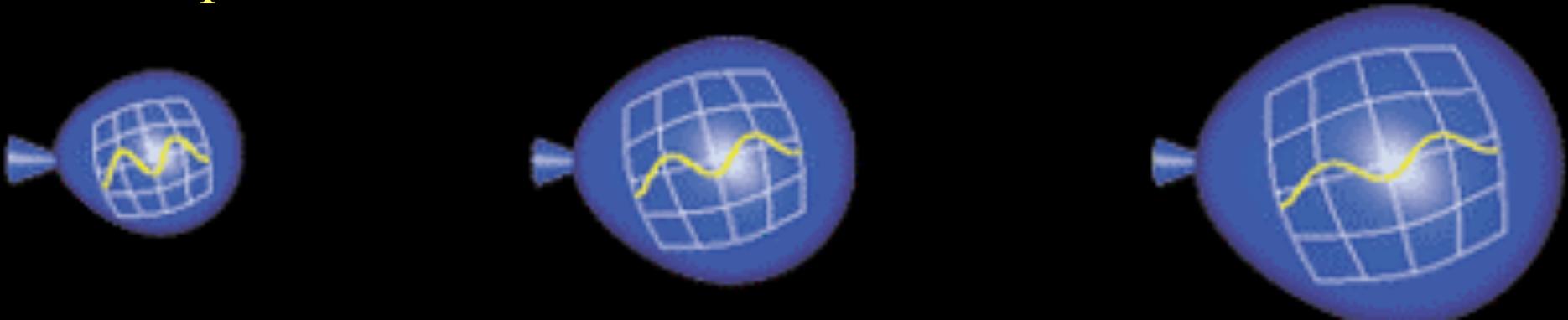
Hubble 1929/1933:

Expansion des Universums

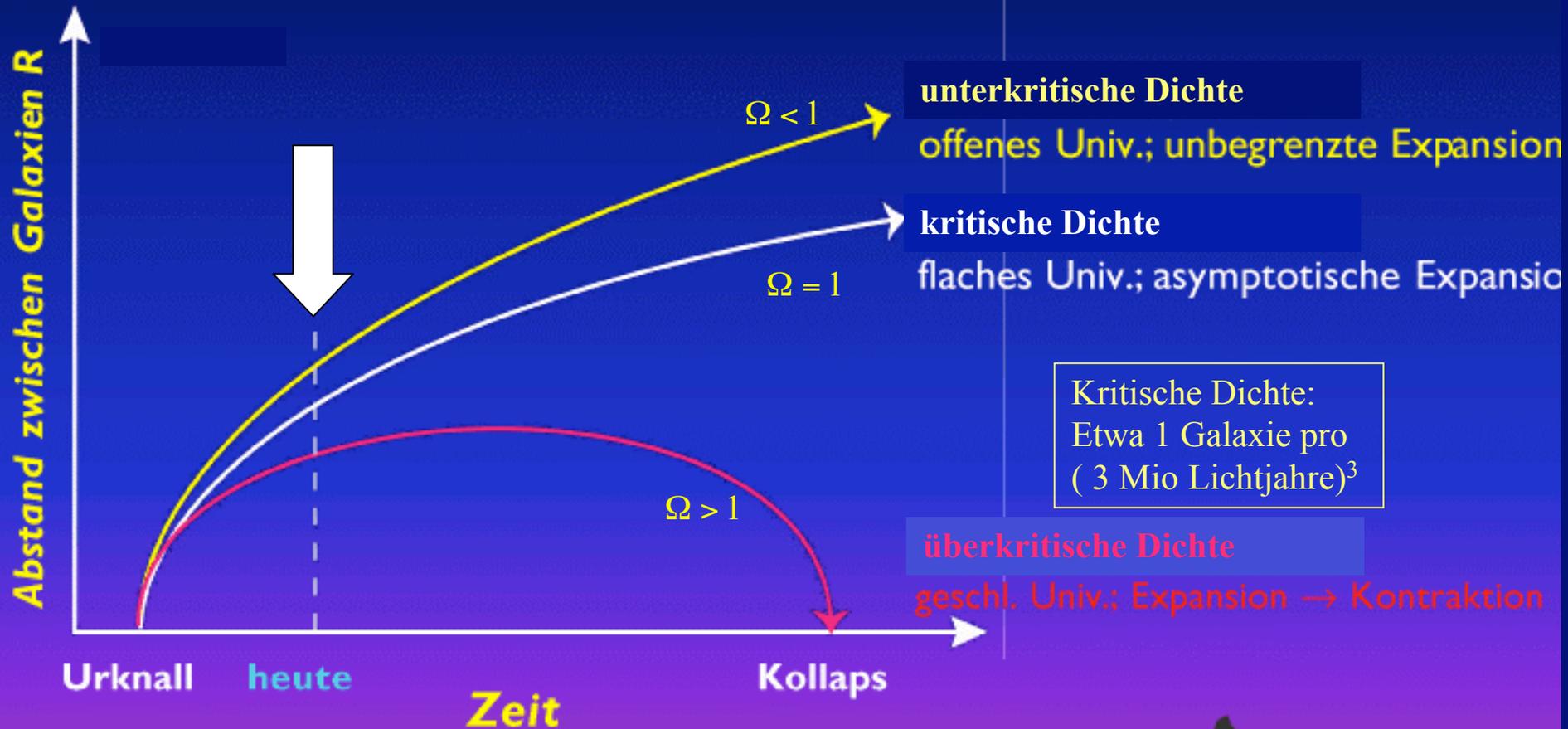


Wellenlänge des Lichts expandiert mit dem Universum

Ein expandierendes Universum kühlt sich ab



# Expansion → Krümmung des Raumes → Zukunft und Vergangenheit



$$\rho_{crit} = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

$$\Omega = \frac{\text{Dichte}}{\text{kritische Dichte}} = \frac{\rho}{\rho_{crit}}$$

# Masse und Energieverteilung im Universum

## Masse/Energie im heutigen Universum

Normale Materie (Sterne/Planeten/Erde/Menschen) nur kleiner Anteil an Materienanteil im Universum.

23% dunkle, nicht strahlende Materie:

Nur indirekte Evidenz:

- Rotation von Galaxien
- Lichtablenkung durch dunkle Materiewolken (Einstein)
- ↳ Galaxien sind von dunklen Materiewolken umgeben

Aus welchen Teilchen besteht die dunkle Materie? (s. Hadronenphysik-Experimente)

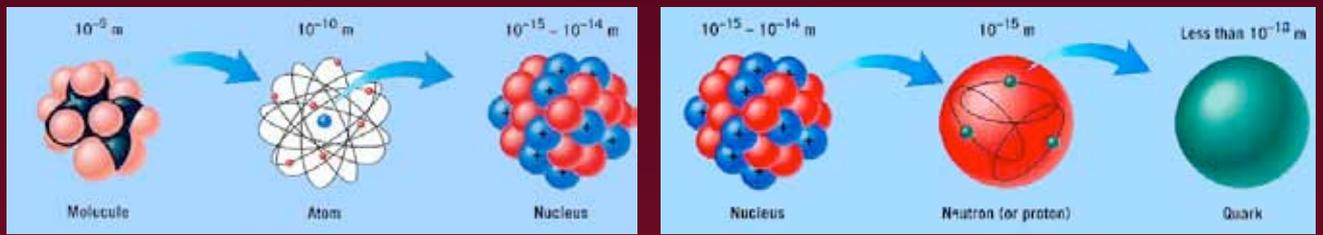
73% dunkle Energie !!

Indirekter Schluss aus Studium der Hintergrundstrahlung  
Beschleunigte Expansion nur verständlich durch neues Energiefeld  
in der Einstein'schen Gravitationstheorie

(Historischer Hintergrund: Einstein's kosmologische Konstante =  
"Größte Eselei meines Lebens!")

Ursprung des Energiefeldes vollständig unklar, einige theoretische Ansätze.

# Bestandteile der Materie



## Quarks

Quarks (q)	Masse [MeV/c <sup>2</sup> ]	Ladung/e	Radien [m]
u	5	+ 2/3	+ Anti-Teilchen ( $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}$ )
d	7	- 1/3	
s	95	- 1/3	
c	1250	+ 2/3	
b	4200	- 1/3	
t	174200	+ 2/3	

Quarks kommen nur in Zweier ( $q\bar{q}$ ) und Dreier-Kombinationen ( $qqq$ ) vor (Hadronen)

Baryonen:  $qqq$  } Hadronen      Proton = uud      Antiproton =  $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$   
 Mesons :  $q\bar{q}$  }       $\pi^+ = u\bar{d}$        $\pi^- = \bar{u}d$

Charakterisierung: Masse (m), Lebensdauer ( $\tau$ ) oder Breite ( $\Gamma = \hbar/\tau$ ), Zerfalls-Moden,  
 Quanten Zahlen ( $J^{PC}$ )

Radien der Hadronen:  $\approx 10^{-15}$ m

Nur Proton/Antiproton stabil, Neutron stabil im Kern

Leptonen	Masse	Ladung/e
Elektron Neutrino $\nu_e$	$< 17 \text{ eV}/c^2$	0
Elektron $e^-$	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1
Myon Neutrino $\nu_\mu$	$< 0.25 \text{ MeV}/c^2$	0
Myon $\mu^-$	$105 \text{ MeV}/c^2$	-1
$\tau$ -Neutrino $\nu_\tau$	$< 35 \text{ MeV}/c^2$	0
$\tau$ -Lepton $\tau^-$	$1784 \text{ MeV}/c^2$	-1

+ Anti-Teilchen  
 $(\bar{\nu}_e, e^+, \bar{\nu}_\mu, \mu^+, \bar{\nu}_\tau, \tau^+)$

Radien:  $< 10^{-19} \text{ m}$

Nur Elektron/Positron stabil (Neutrinos wandeln sich ineinander um)

### Mittlerteilchen

Photonen ( $\gamma$ ) (Elektromagnetische Wechselwirkung)

Intermediäre Bosonen ( $W^\pm, Z^0$ ) (Schwache Wechselwirkung)

Gluonen ( $g$ ) (Starke Wechselwirkung)

Gravitonen ( $G$ ) (Schwerkraft)

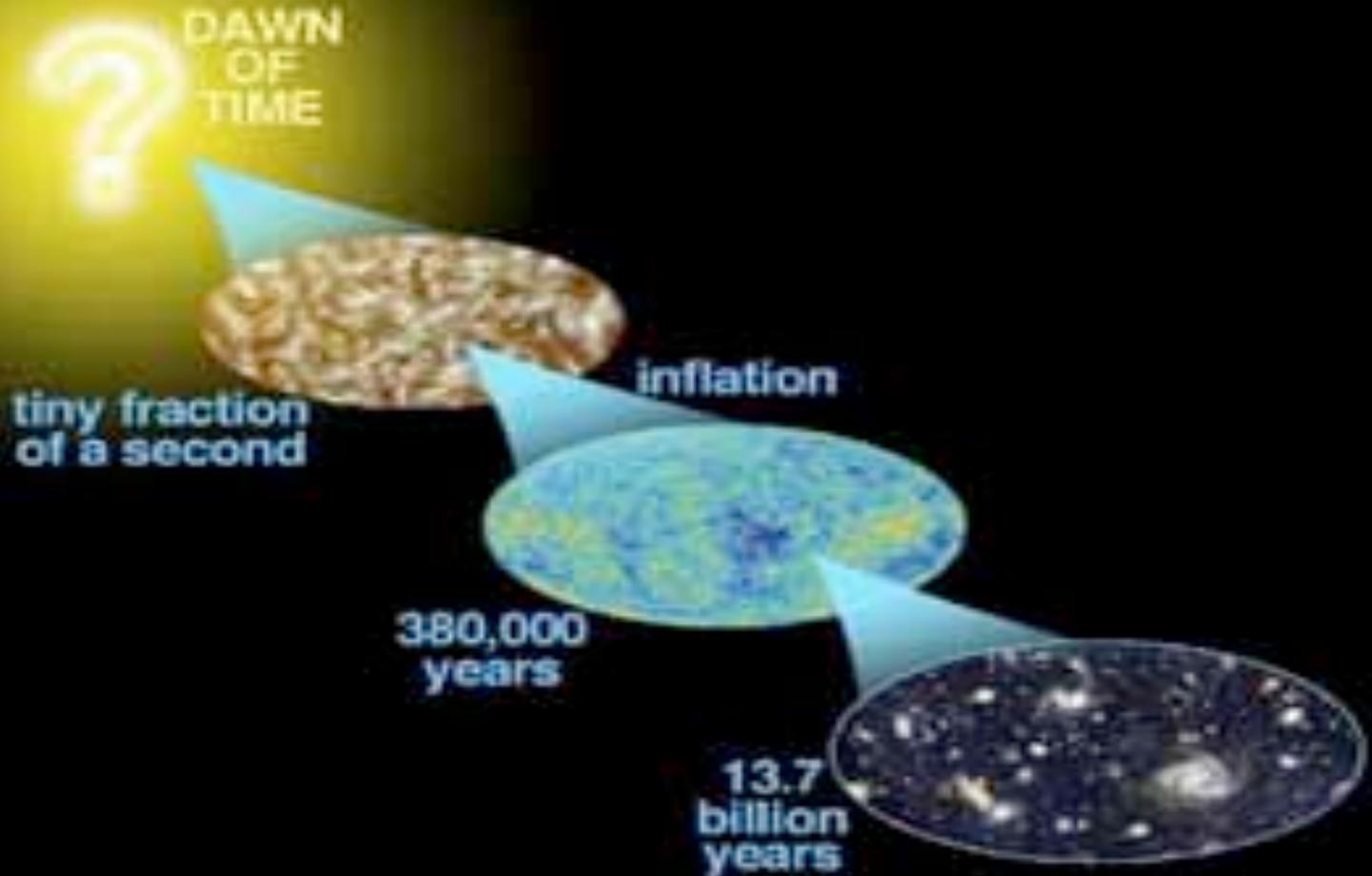
Higgs-Teilchen (H)

Verantwortlich für

Masse der Quarks

# Entwicklungsphasen des Universums

Urknall, inflationäre Ausdehnung,  
Entstehung des kosmischen Hintergrundstrahlung nach 400000 Jahren  
heute



# III Hochenergiephysik

- Erforschung der Kräfte zwischen Elementarteilchen
- Suche nach neuen Teilchen
- Experimentelle Tests theoretischer Voraussagen (Standard-Modell, “Weltformel”)

Experimente der letzten 70 Jahre → Standardmodell der Teilchenphysik (SM)

6 Quark-Sorten (u, d, s, c, b, t)

6 Leptonen-Sorten  $e^-$ ,  $\nu_e$ ,  $\mu^-$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\tau^-$ ,  $\nu_\tau$

+ Feldteilchen: Photonen, Gluonen, Intermediäre Bosonen,  
Higgs-Teilchen (Noch nicht gefunden)

Nicht voll befriedigende Situation:

Parameter der Teilchen nicht erklärt

Gravitation nicht kompatibel mit SM

Wahrscheinlich noch nicht alle Teilchen gefunden,

z. B. die Teilchen der dunklen Materie

# COBE-Mission 1992

## Cosmic Background Explorer

> 1000 Mitarbeiter

Planungen ab 1975

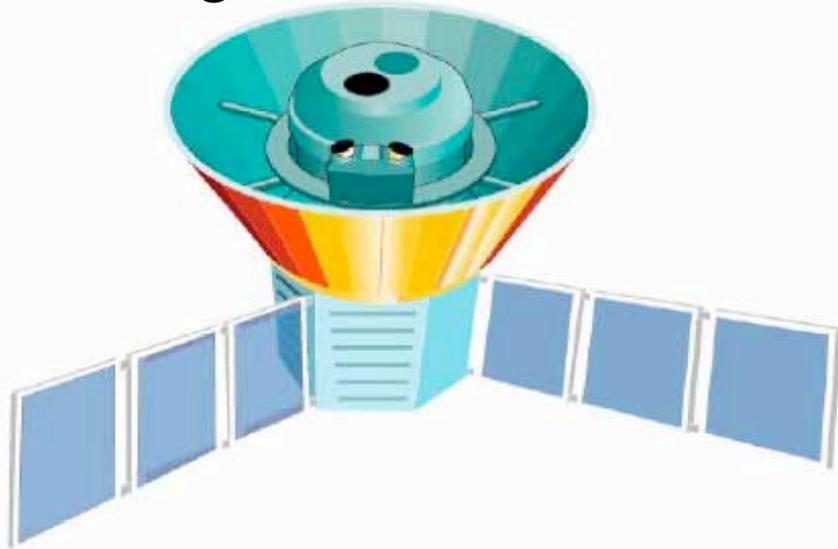


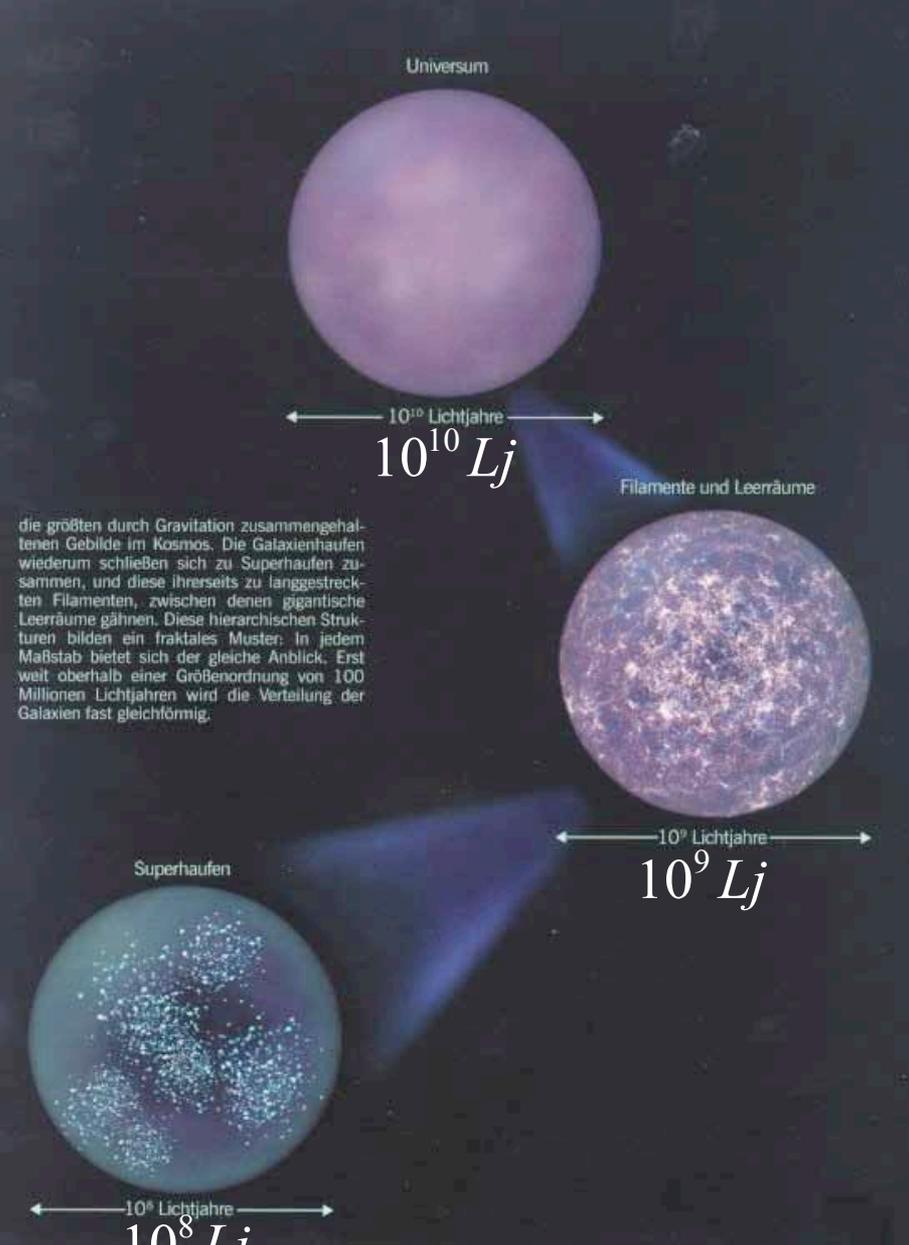
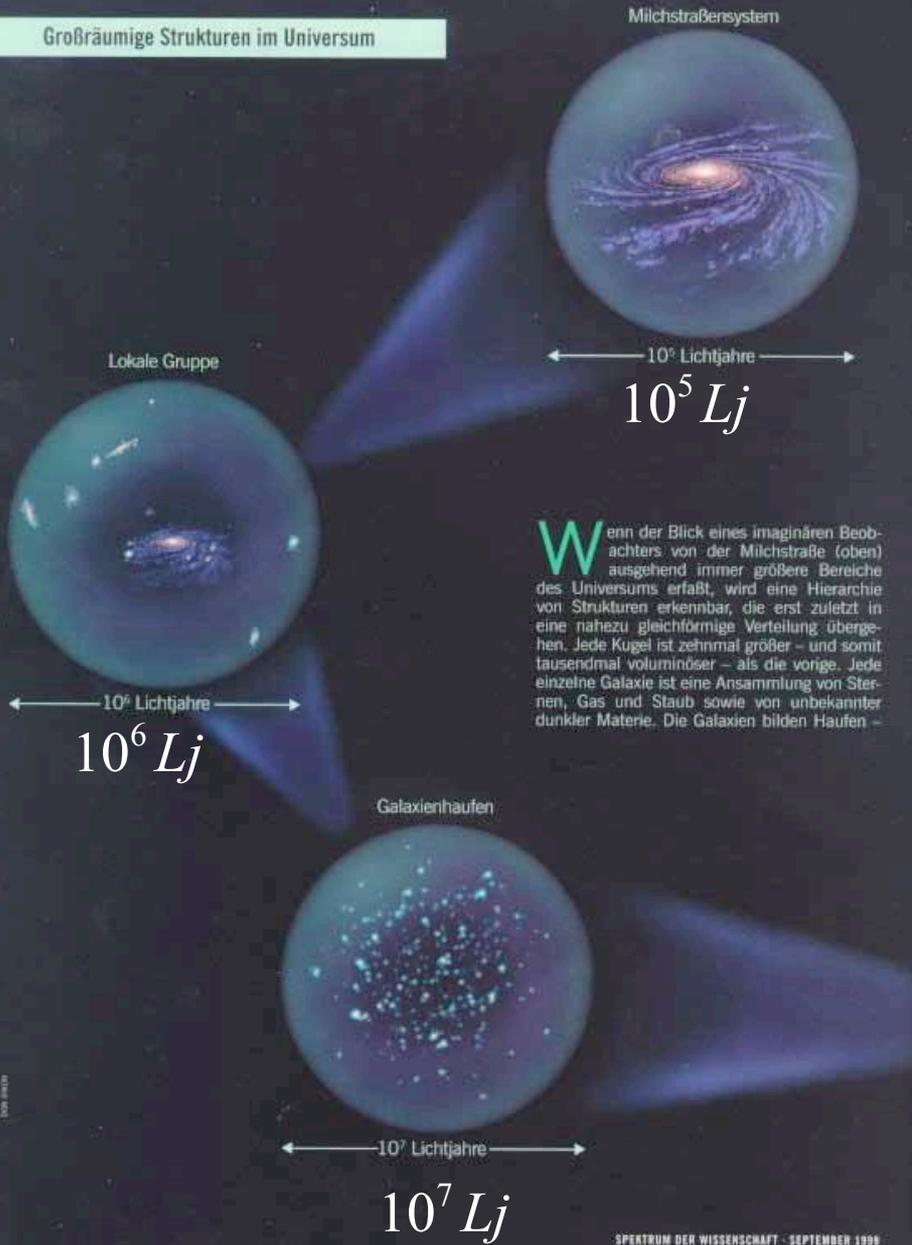
Figure 2. The COBE satellite enabled measurement of the cosmic microwave background in all directions.

## Cosmic Microwave Background (CMB)

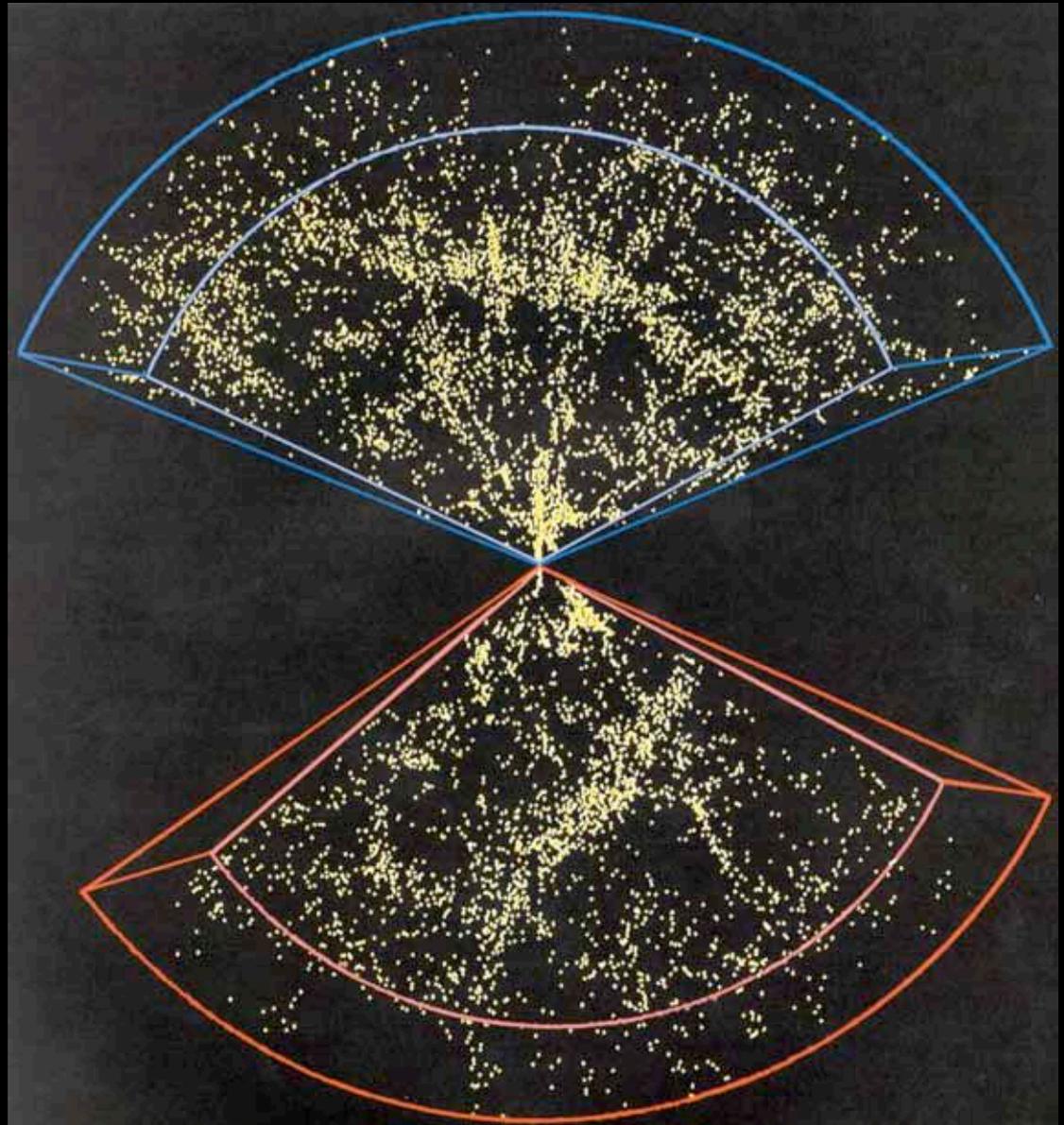
- Ziele:
- 1) Vermessung der Temperatur und Isotropie des CMB
  - 2) Vermessung der Anisotropie des CMB
  - 3) 360° Karte

# Großräumige Verteilung der Galaxien im Universum

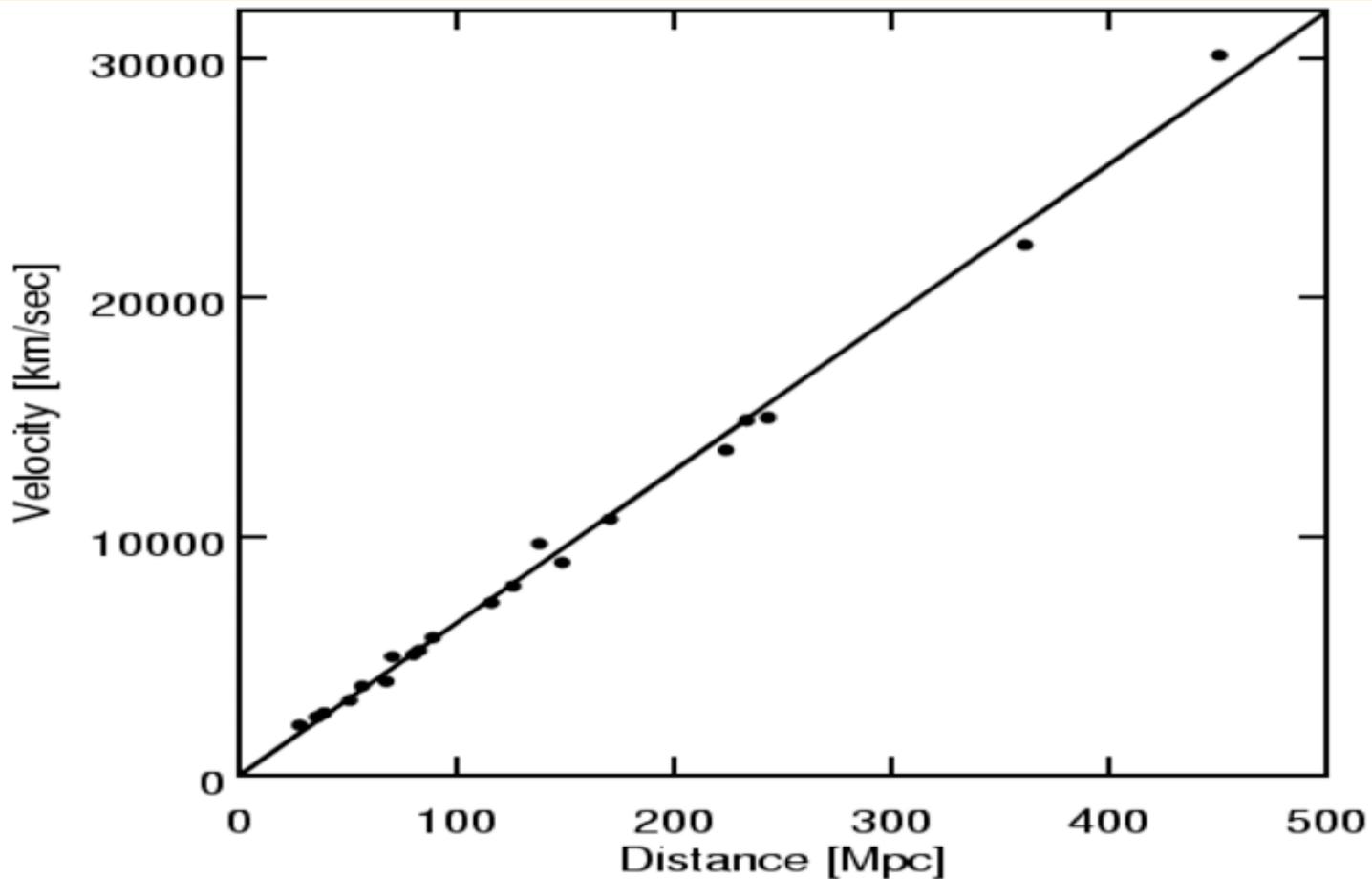
## Großräumige Strukturen im Universum



Computer  
generated  
distribution of  
galaxies  
based on  
observations



# Messungen: Hubble-Parameter



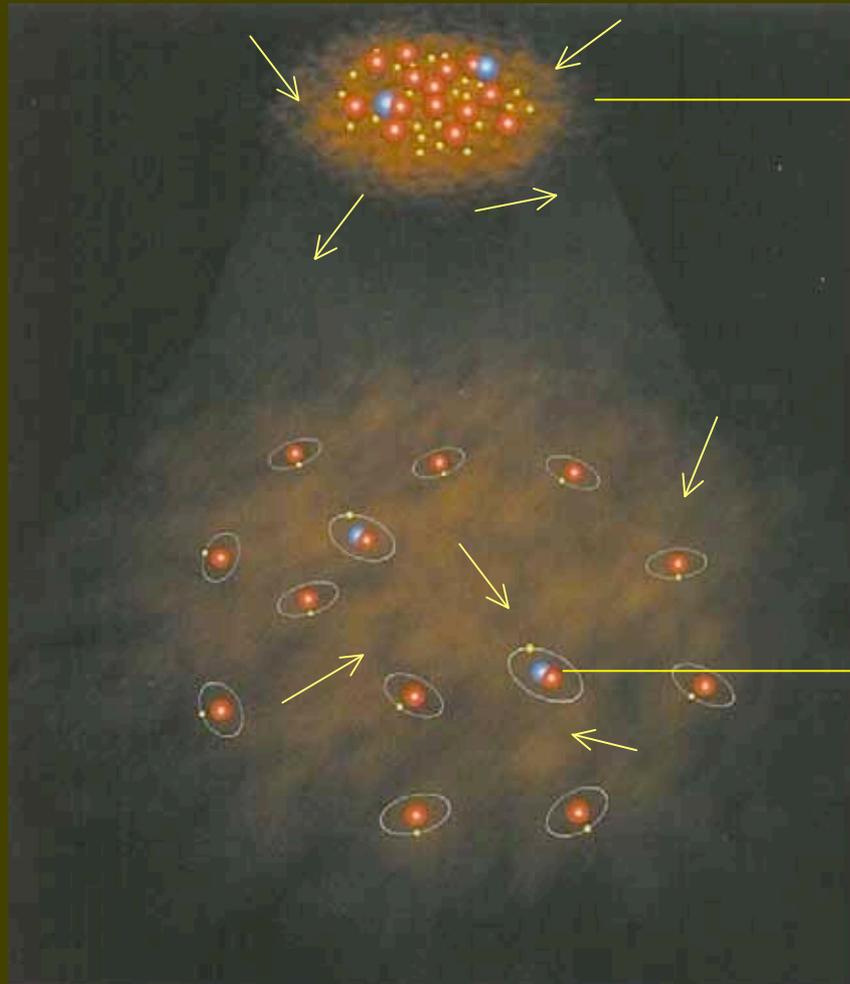
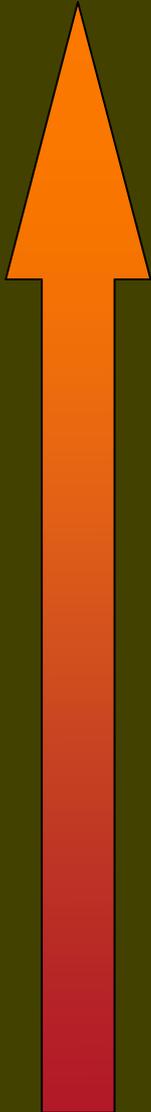
$$\vec{v} = H\vec{d}$$

$$\text{Heute: } H_0 = 71 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

# Dunkle Energie $\rightarrow \Lambda$

- Beschleunigte Expansion des Universums
- Kosmologische Konstante  $\Lambda$ 
  - Energie des Vakuums
  - zeitunabhängig
  - Heutiger Wert falsch um Faktor  $10^{128}$
  - Aber vielleicht Triebkraft der Inflation
- Quintessenz
  - Skalares zeitabhängiges Feld, Cosmon-Teilchen
  - Weitere elementare Kraft ( 5. Kraft)
  - Elementarladung zeitabhängig
- Phantom Energie
  - Stetig zunehmende Expansion
  - Big Rip: Universum wird auseinandergerissen
- Branes
  - Gekrümmte Extradimensionen expandieren

# 3000 K à Aufbrechen der Atome



Freie Atomkerne  
und Elektronen  
und Photonen

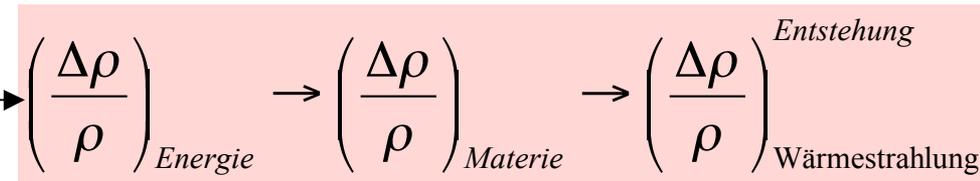
H- und He-  
Atome und  
Photonen

# Inhalt

- Galaxien, Galaxiengruppen
- Expansion des Universums
- Mikrowellenhintergrund
- Urknall (Big Bang)
- **Dunkle Materie**
- Frühe Phasen des Universums
- Spuren der frühen Phasen heute

# Fluktuationen → Beobachtung

Inflationäre  
Quanten  
Fluktuationen



$$\left(\frac{\Delta T}{T}\right)_{Licht}$$

$$\rightarrow \left(\frac{\Delta T}{T}\right)_{Mikrowellen}$$

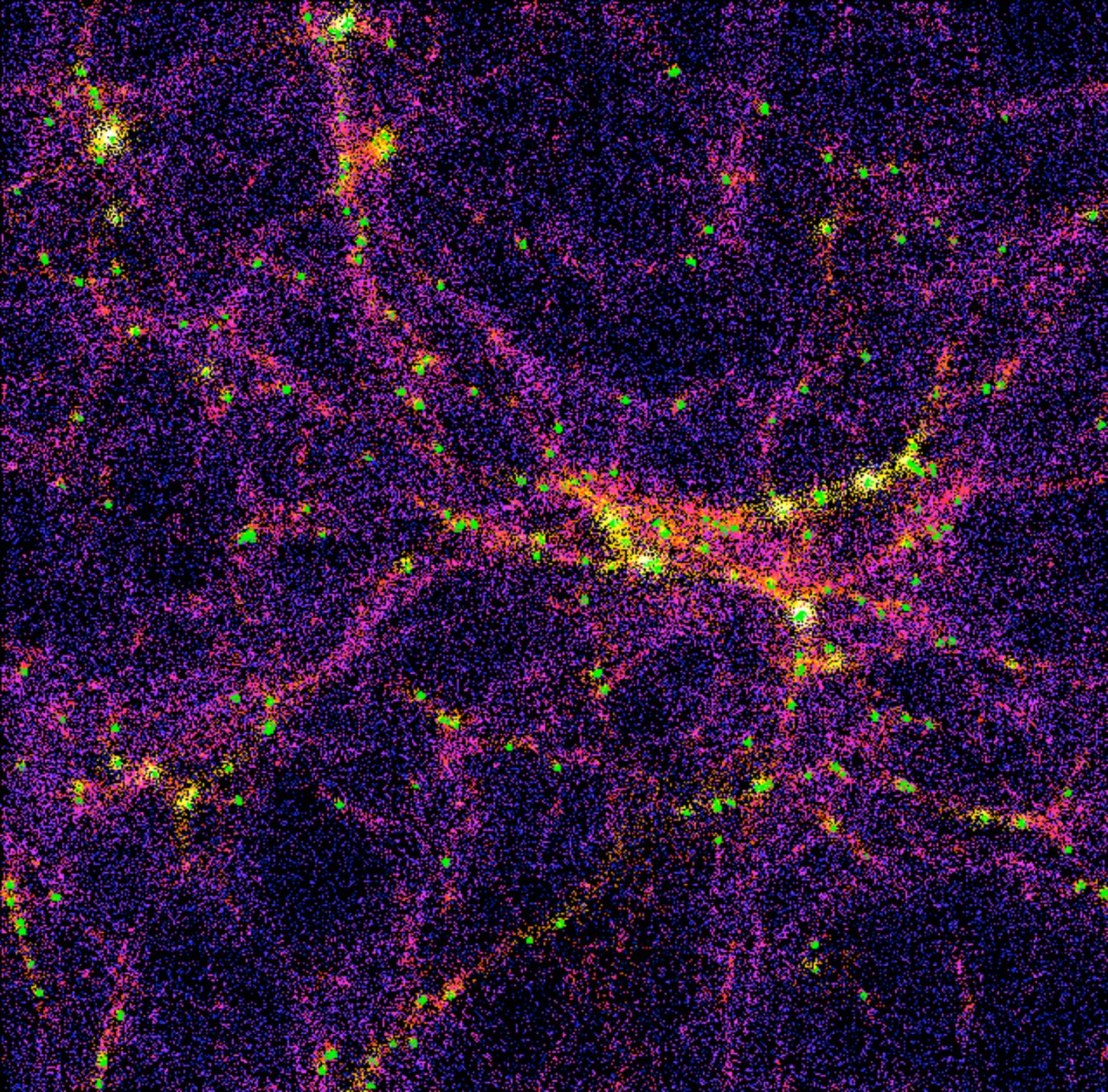
**Gravitative  
Struktur  
bildung**

$$\rightarrow \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{Galaxien}$$

**Zeit**



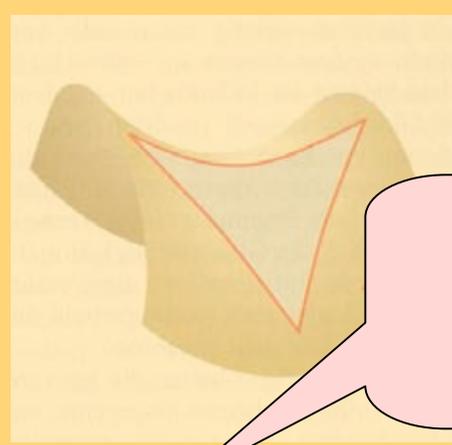
$z=1$



Computer  
Simulation



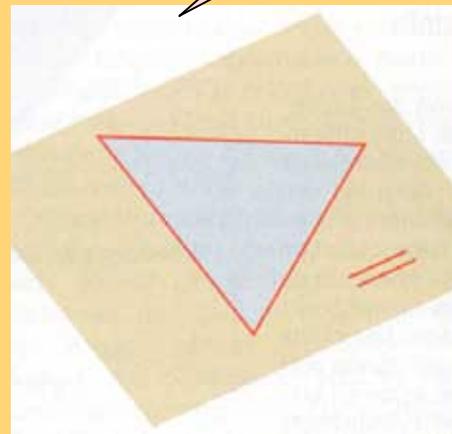
Resultate Satellit WMAP  
 $\Omega = 1.00$  mit Fehler 2%



$\Omega < 1$  offen

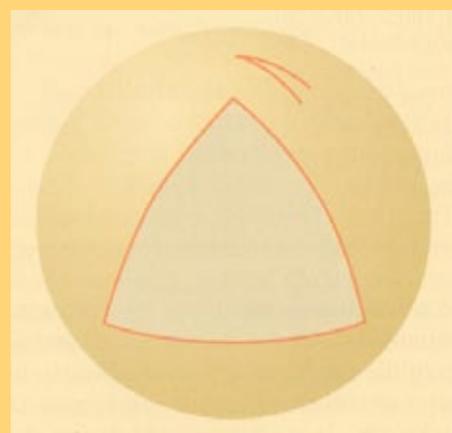
Winkelsumme:

Warum  
 $\Omega = 1$   
 ??



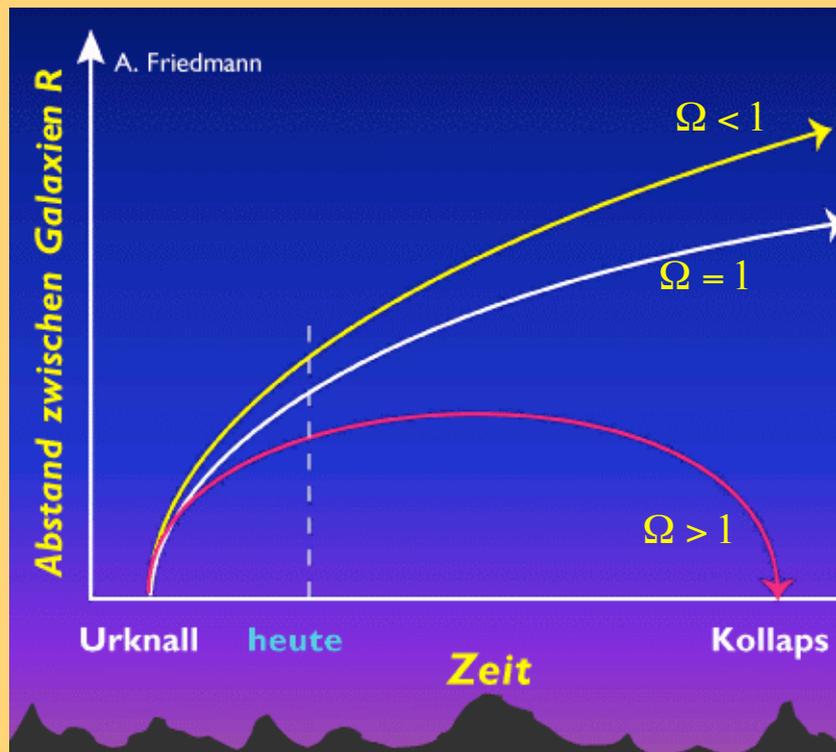
$\Omega = 1$  flach

Winkelsumme:  
 $= 180^\circ$



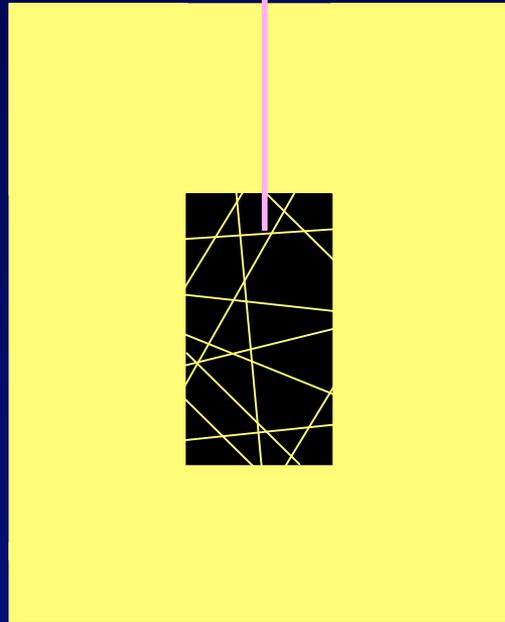
$\Omega > 1$  geschlossen

Winkelsumme:  
 $> 180^\circ$



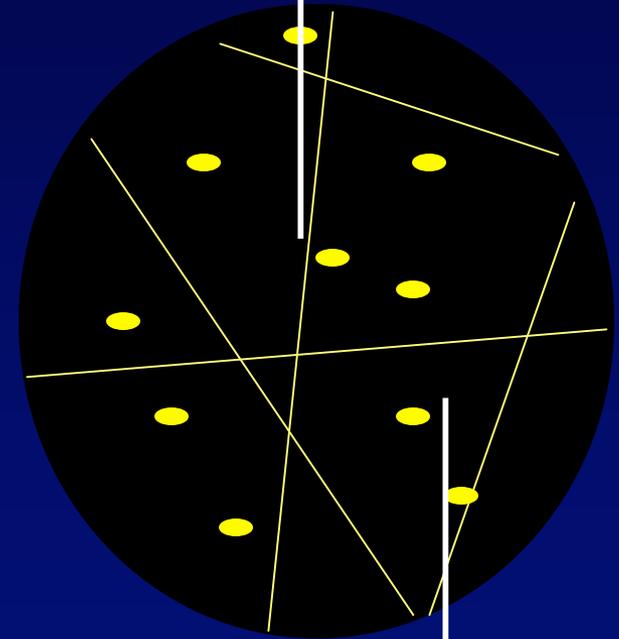
# Universum erfüllt von „Wärmestrahlung“

Ofen  
+220 °C



Mikrowellen-Hintergrund-Strahlung

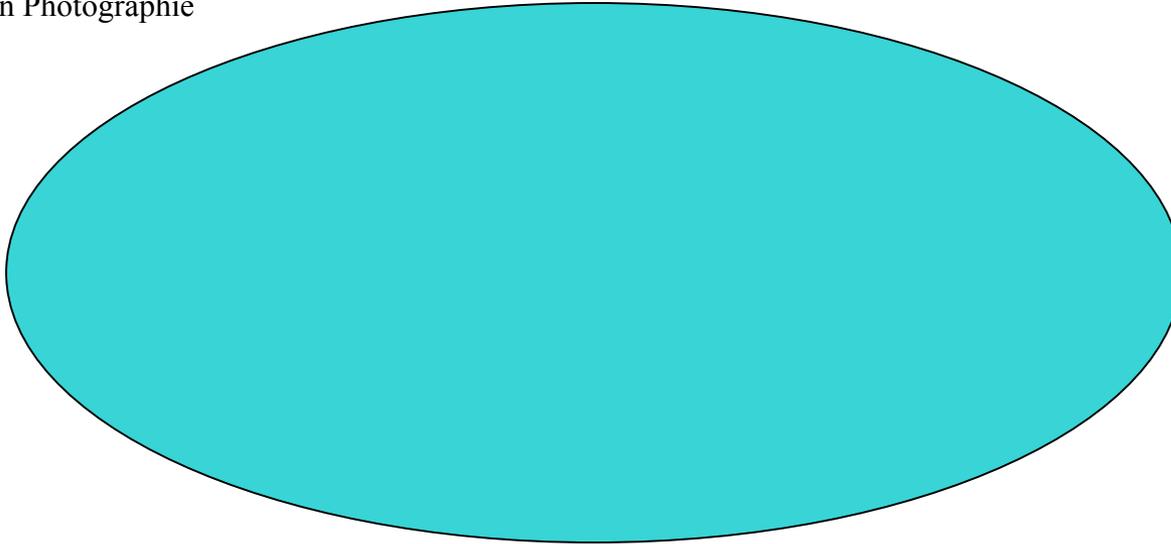
Universum  
-270 °C



Universum  
3 Kelvin

# Mikrowellen-Hintergrund-Strahlung

Falschfarben Photographie

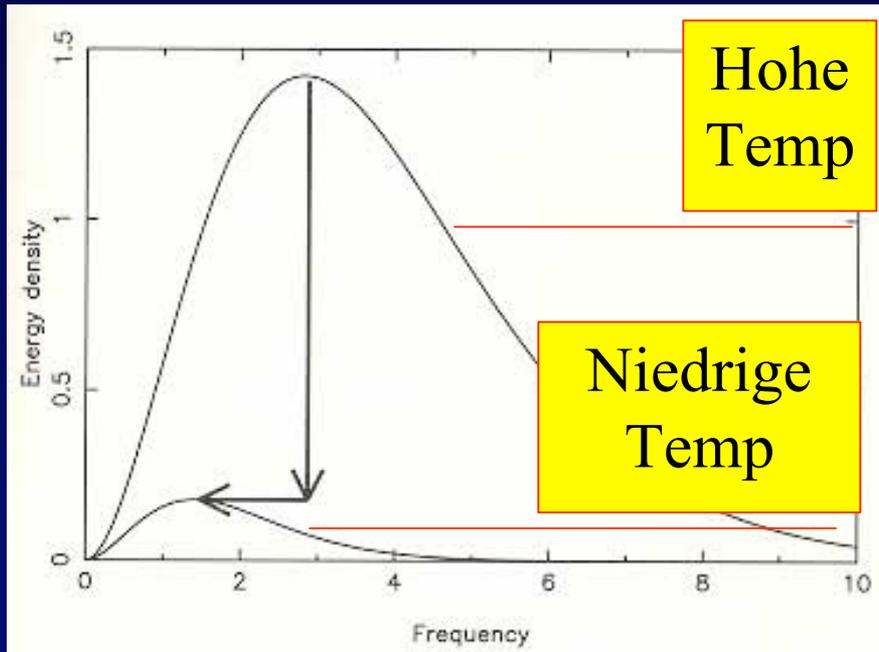


Penzias, Wilson:  
1965

COBE 1992

- Isotropie: in allen Richtungen gleich
- Temperatur: 2.7 Kelvin (-270 °C)
- Urknall-Modell des Universums (Big Bang)
- Entstand 400 000 Jahre nach Urknall
- Entstehungsprozess genau verstanden

# Black Body Radiation and Expansion



$$\lambda(t) \sim a(t) \sim \frac{1}{\nu(t)}$$

$$T \sim \frac{1}{a}$$

Expansion bedeutet Temperaturerniedrigung

Wärmestrahlung bleibt Wärmestrahlung

# Mikrowellen:

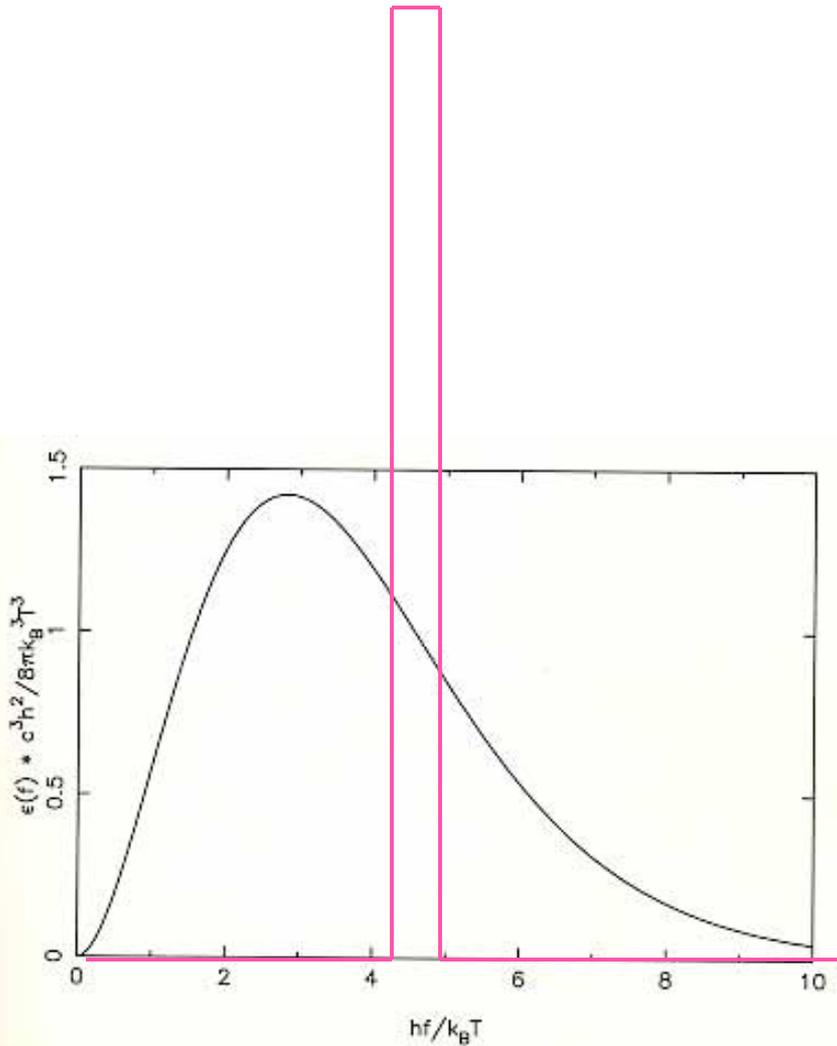
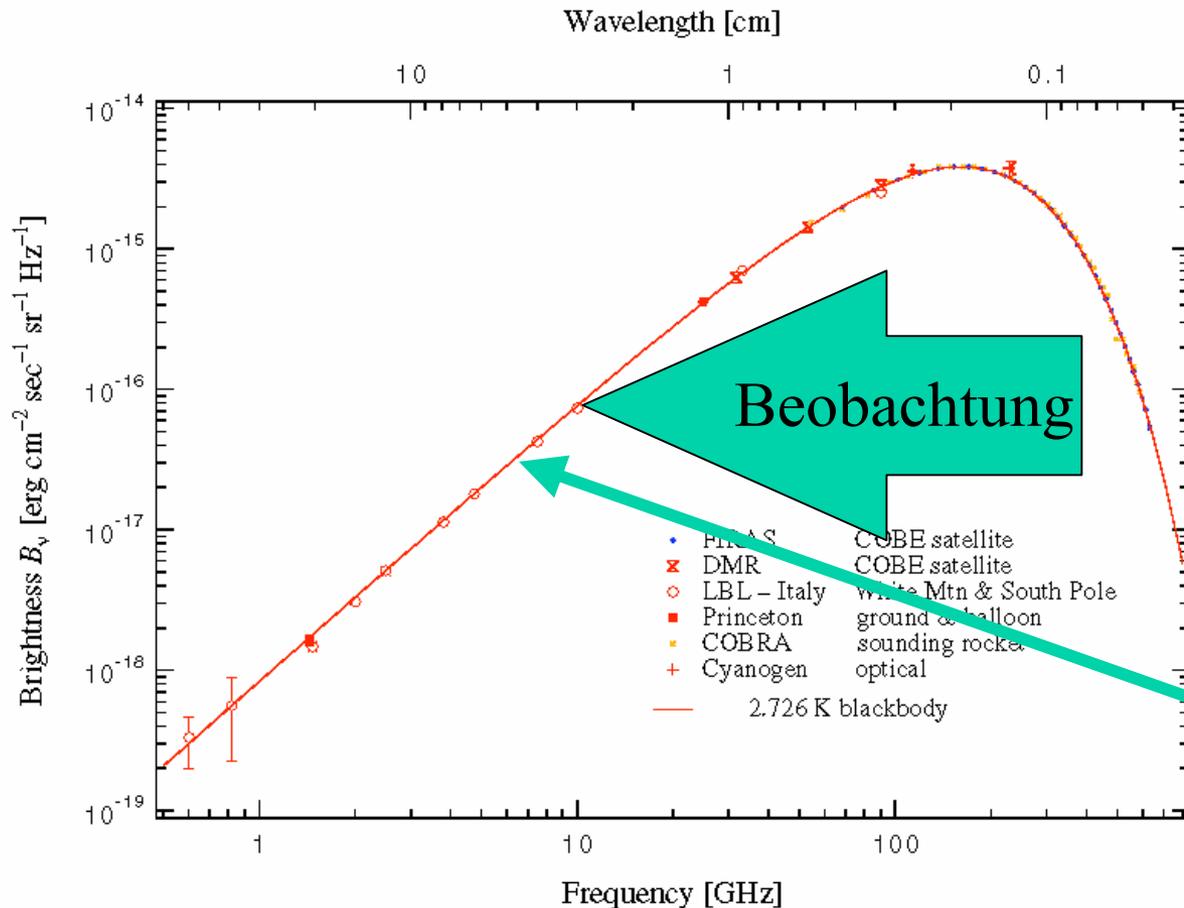


Figure 2.5 The energy density distribution of a black-body spectrum, given by equation (3.8). Most of the energy is contributed by photons of energy  $hf \sim k_B T$ .

**Mikrowellen aus dem Mikrowellen-Herd haben eine andere Energieverteilung über die Frequenzen als die kosmische Hintergrundstrahlung.**

# Mikrowellenhintergrundstrahlung



Strahlung ist die eines Schwarzen Körpers:  
Wärmestrahlung

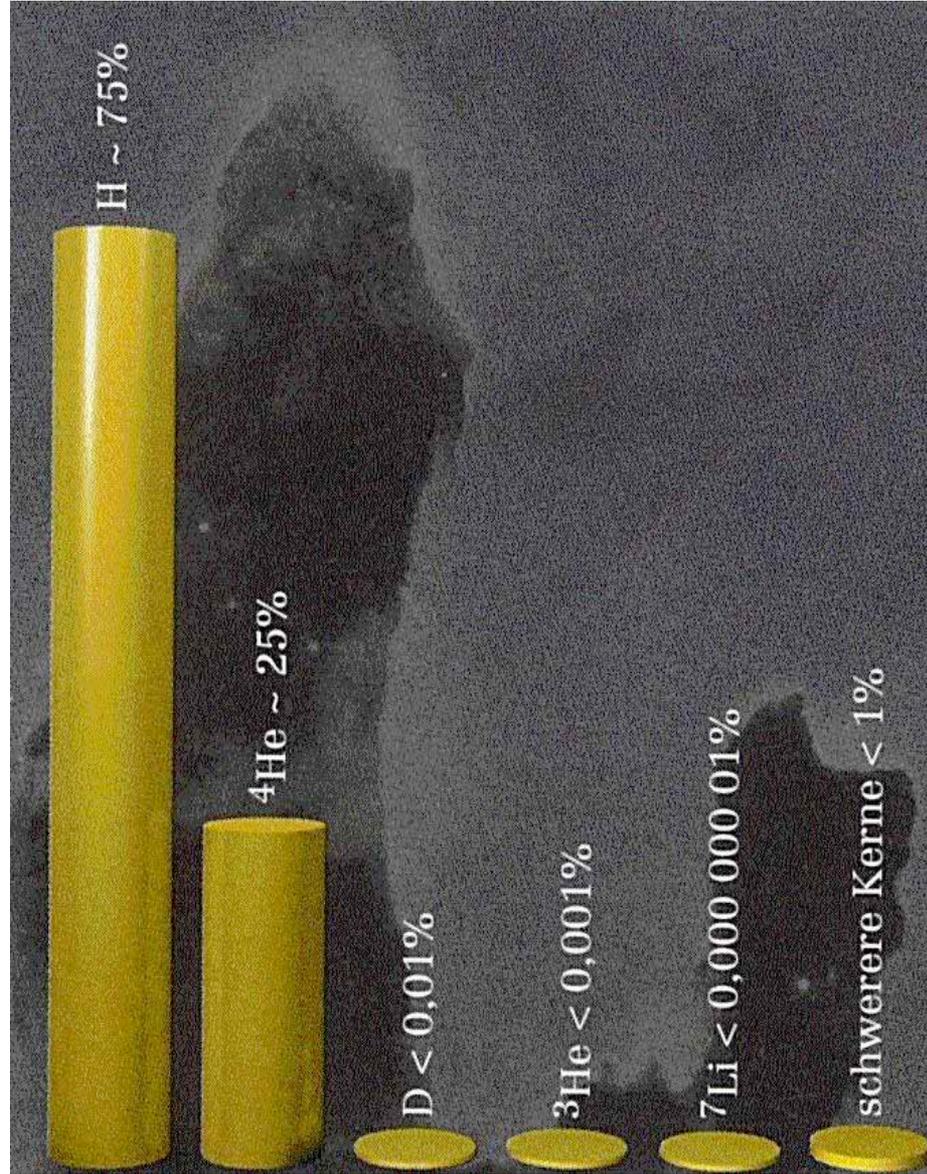
Schwarzkörperstrahlung mit  $T=2.7 \text{ K}$

$$T = 2.726 \pm 0.004 \text{ Kelvin}$$

# Elementhäufigkeit

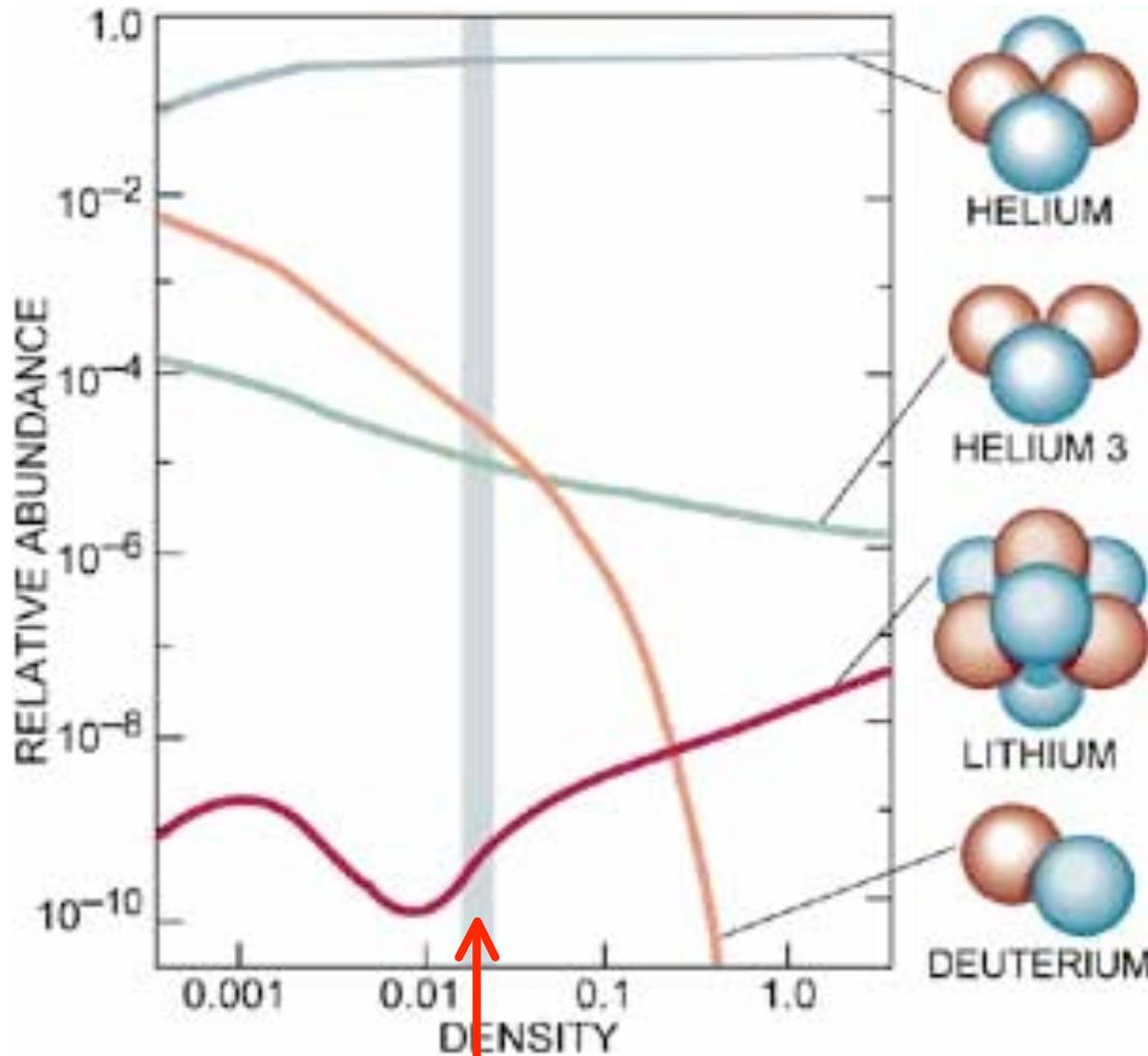
Wasserstoff 75%

Helium 25%



Deuterium  
 $^3\text{He}$   
 $^7\text{Li}$

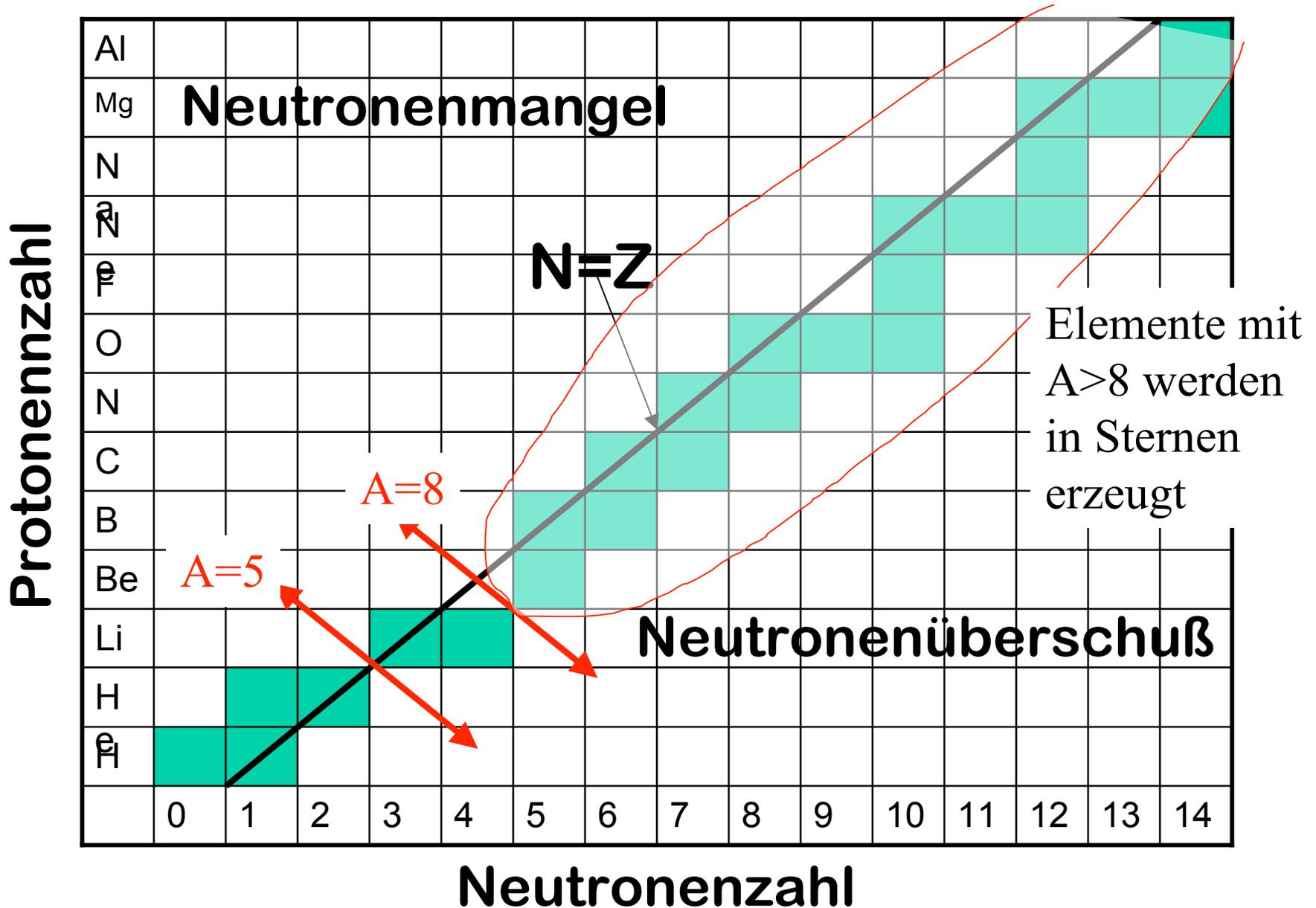
# Big Bang Synthese leichter Atomkerne



*The predicted abundance of elements heavier than hydrogen, as a function of the density of baryons in the universe (expressed in terms of the fraction of critical density in baryons,  $\Omega_B$ ).*

4%

# Stabile Isotope (leichte Kerne)



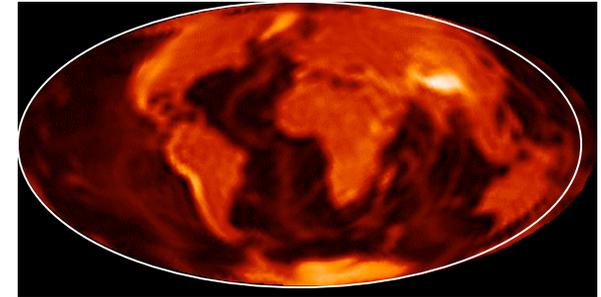
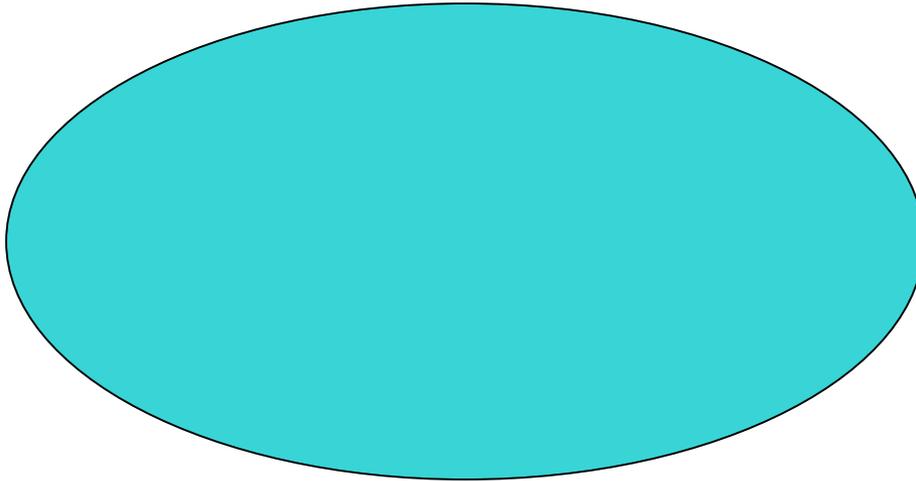
# Dunkle Materie

- Nukleosynthese: 4% des Energieinhalts
- Universum gefüllt mit dunkler Materie
- Nicht sichtbar, ungeladene Teilchen
- Emittiert oder absorbiert keine Strahlung
- Nur gravitative Wechselwirkung vermutlich
- Noch keine einzelnen Teilchen der DM entdeckt
- Normale Materie: Masse von 5 Protonen pro  $\text{m}^3$
- Dunkle Materie: 6 mal mehr Massendichte
- Dunkle Materie klumpt an und Galaxien
- Klumpt an Galaxien-Clustern
- Bildet große Filament-Strukturen im Universum

# Mikrowellen-Hintergrund-Strahlung



Falschfarben Photographie



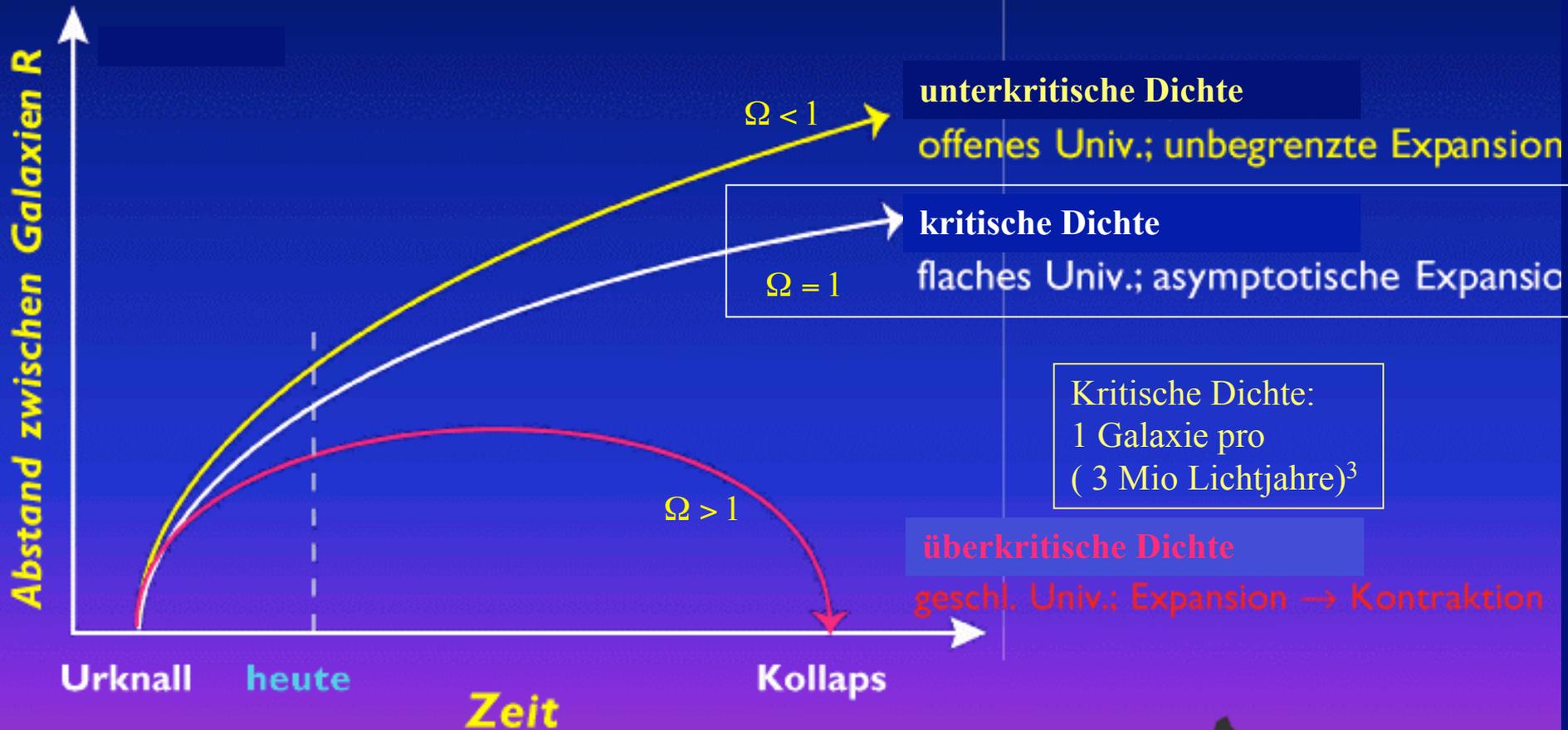
Penzias, Wilson:

1965

Smoot, Mather, 1992

- Isotropie: in allen Richtungen gleich
- Temperatur: 2.7 Kelvin (-270 °C)
- Urknall-Modell des Universums (Big Bang)
- Entstand 400 000 Jahre nach Urknall
- Entstehungsprozess genau verstanden

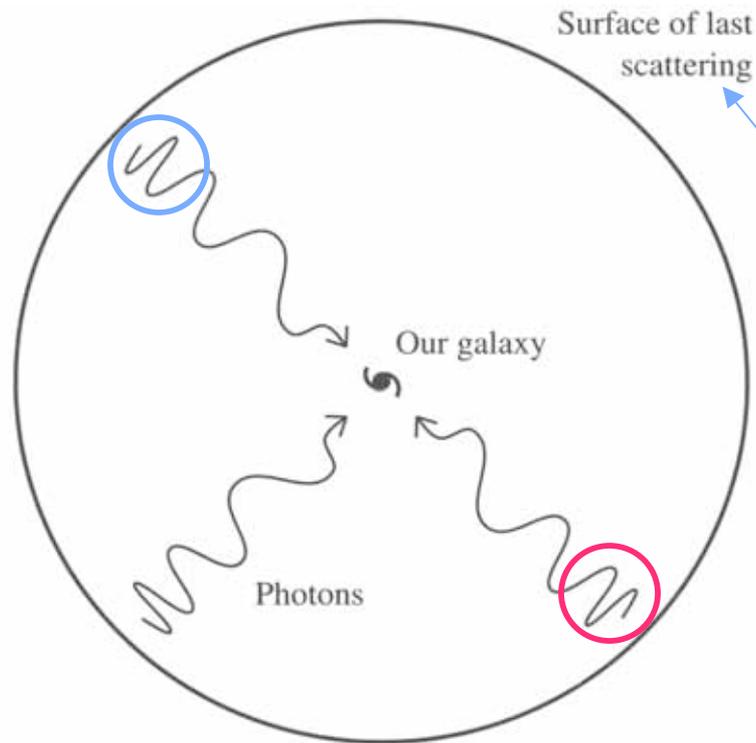
# Warum Omega=1 ??



$$\rho_{crit} = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

$$\Omega = \frac{\text{Dichte}}{\text{kritische Dichte}} = \frac{\rho}{\rho_{crit}}$$

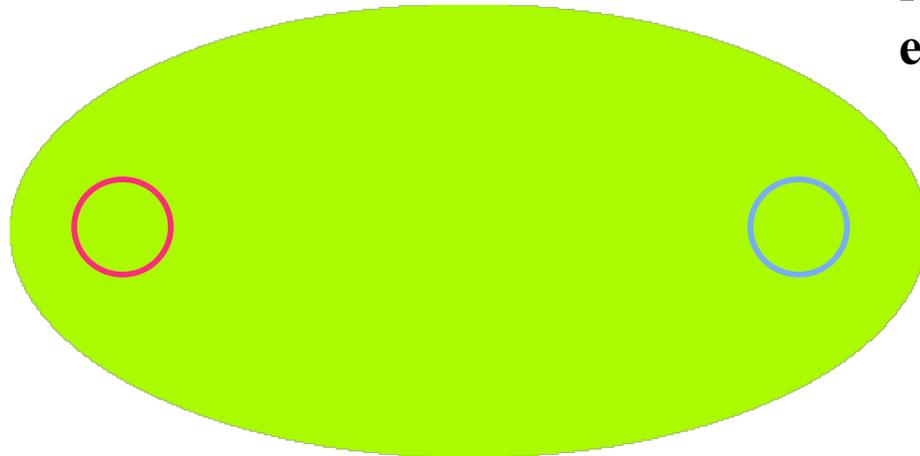
# Horizont- Problem



**Surface of last scattering: 4000  
Megaparsec oder 13 Mrd Lichtjahre**

**Alter des Universums, etwa 13 Mrd.  
Jahre**

**Warum Isotropie des  
Mikrowellenhintergrundes, wenn  
rote und blaue Bereiche kausal  
entkoppelt ?**

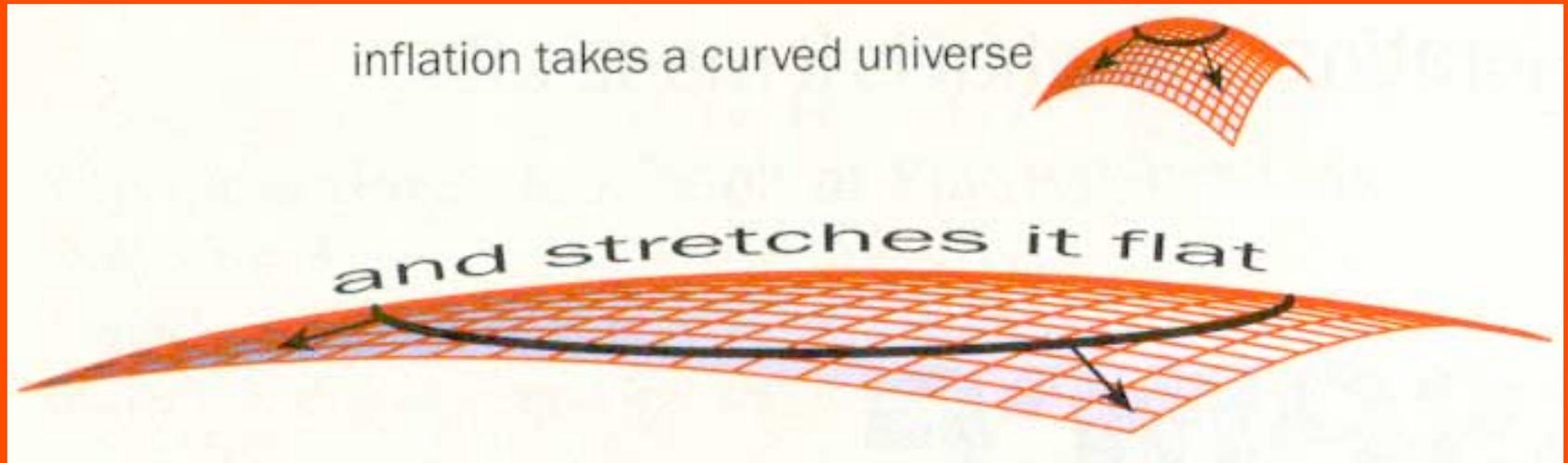


**Idee: Bereiche waren  
ursprünglich kausal  
gekoppelt. Inflation  
hat sie entkoppelt**

# Inflationäre Phase des Universums

- Idee:
- Im frühen Universum gab es zwischen  $10^{**}(-42)$  sec und  $10^{**}(-36)$  sec eine Phase exponentieller Expansion
- Alle  $10^{**}(-42)$  sec verdoppelte sich der Skalenparameter des Universums
- Skalenparameter dehnte sich um  $10^{**}50$  aus
- Anschließend: Normale Expansion

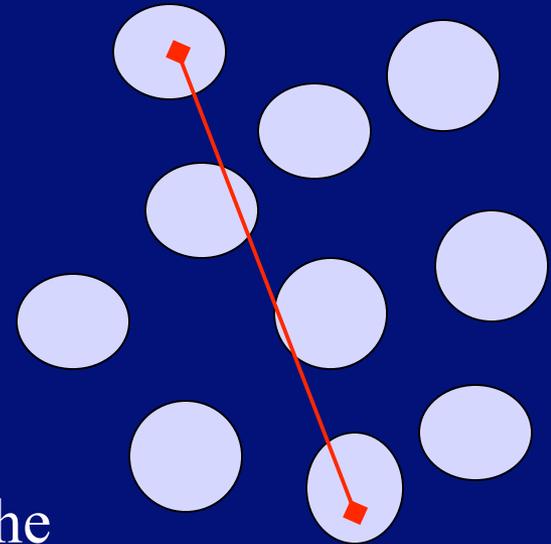
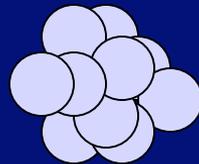
# Krümmung, Magn. Monopole



Magnetische Monopole:

Dichte nimmt stark ab durch inflationäre Expansion

# Inflation: Kausal gekoppelte Bereiche werden auseinandergerissen



Thermalisierung kausal gekoppelter Bereiche  
Inflation: Auseinanderreißen der thermalisierten Bereiche

# Quantenfluktuationen vor Inflation

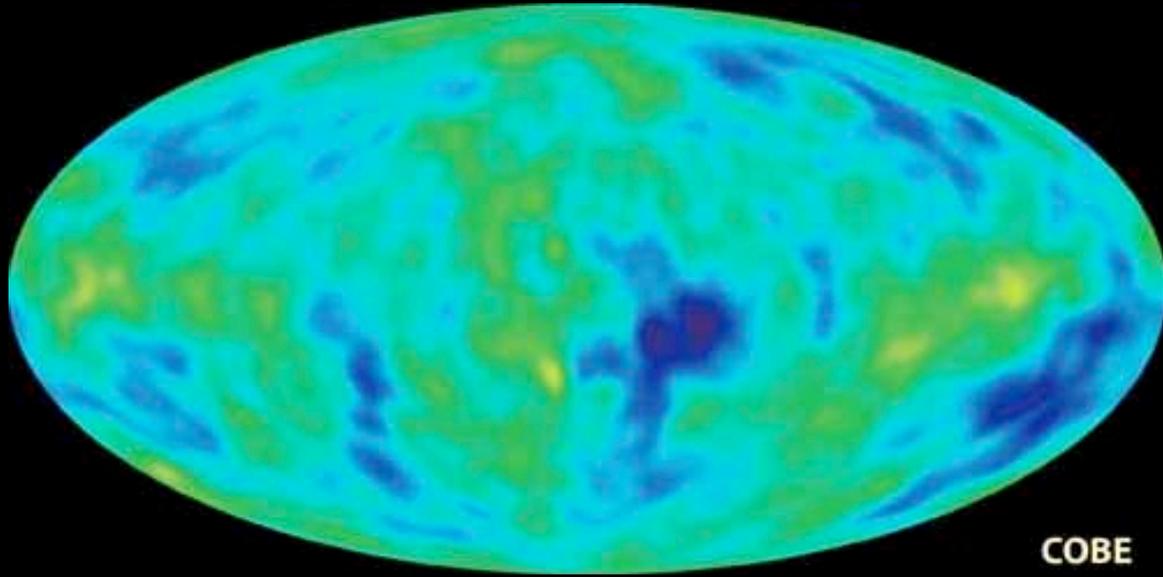


Heisenbergs Unschärferelation der Quantenphysik

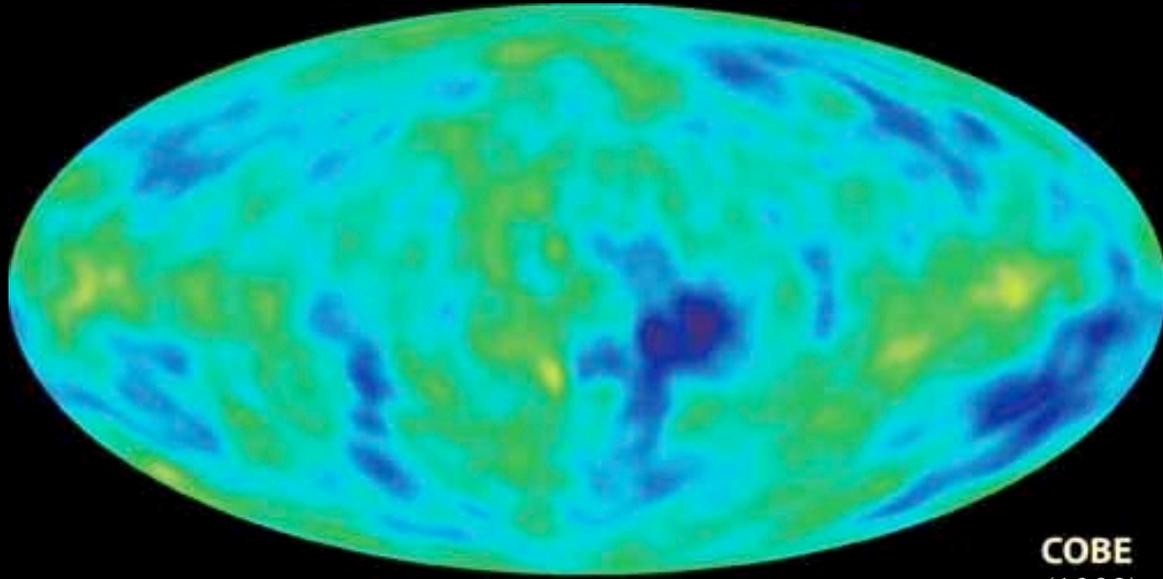
# Entkopplung von Licht und Materie

- Universum expandiert und kühlt sich ab:  $a(t) \sim 1/T(t)$
- $T < 3000$  Kelvin,  $t > 400000$  Jahre: Photonen sind nicht mehr energiereich genug, um Bildung von H-Atome zu verhindern
- H-Atome: neutral, keine freien geladenen Teilchen mehr
- Photonen finden keine Wechselwirkungspartner mehr
- Universum wird für Photonen (Licht) durchsichtig
- Mittlere freie Weglänge: unendlich
- Vorgang: Entkopplung von Licht und Materie, dauert 30000 Jahre
- Photonen wandern frei durch das Universum bis heute
- Dichteschwankungen der Materie haben sich abgebildet auf Temperaturschwankungen

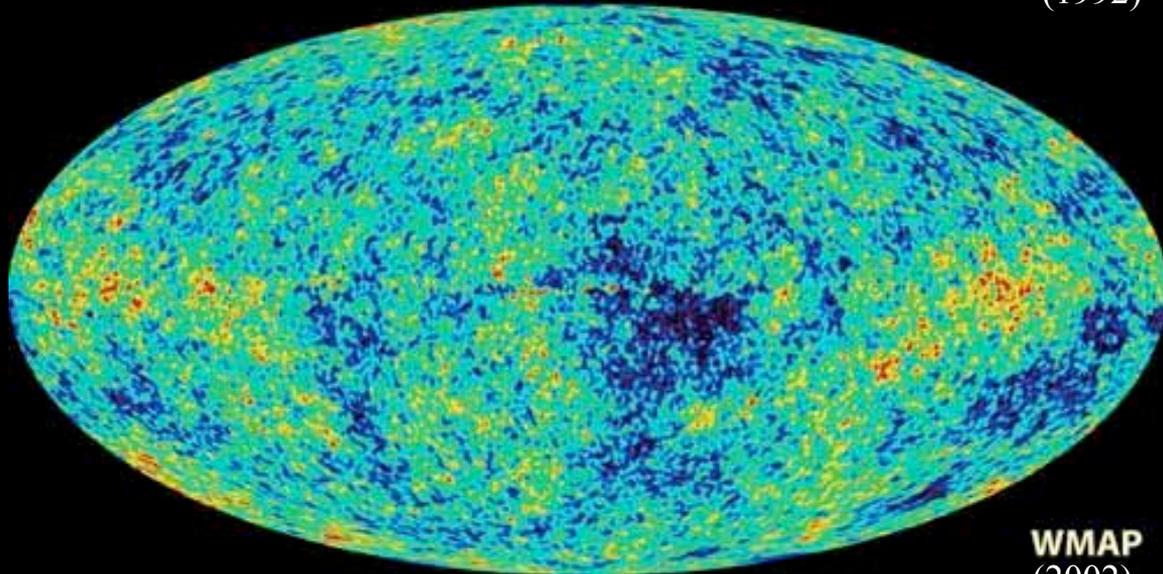
# Fluktuationen des Mikrow.-Hintergrundes



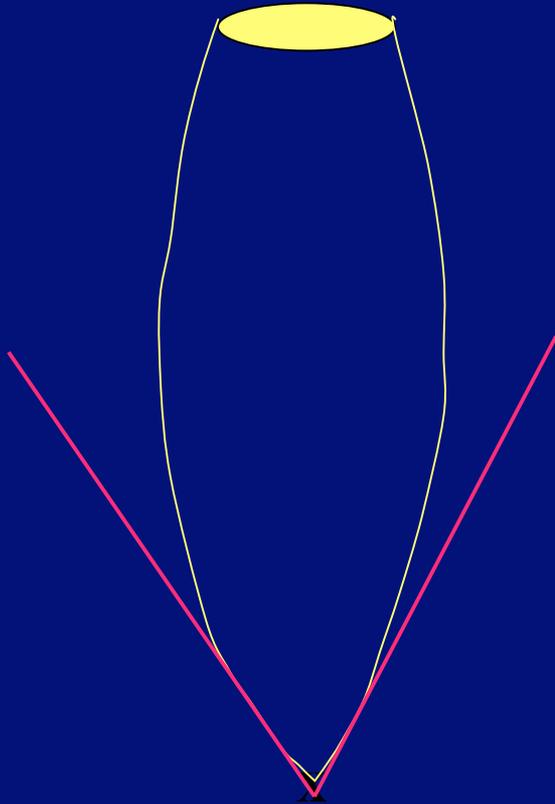
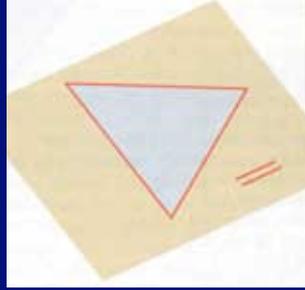
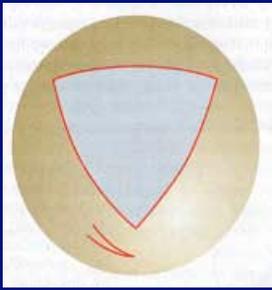
# Fluktuationen des Mikrow.-Hintergrundes



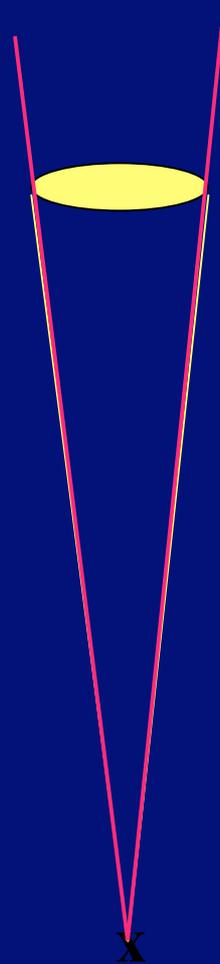
**COBE**  
(1992)



**WMAP**  
(2002)



$\Omega > 1$



$\Omega = 1$



$\Omega < 1$

Ausdehnung  
bekannt

Krümmung des  
Universums

WMAP 2002 :  
 $\Omega = 1.00 \pm 0.02$

25°

**Beobachtete Fluktuationen**

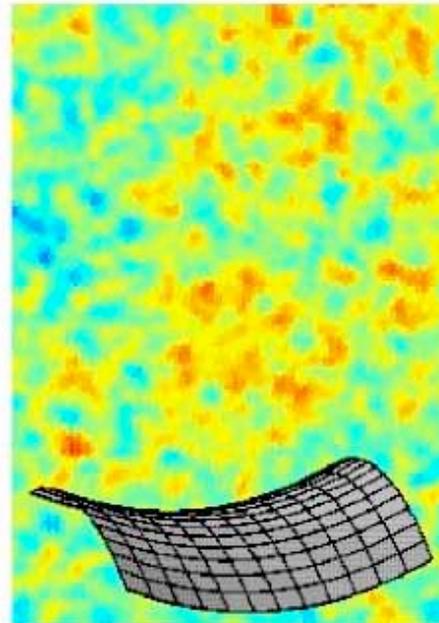
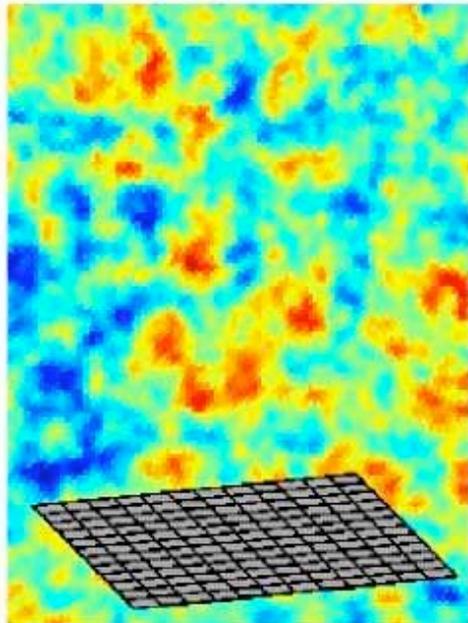
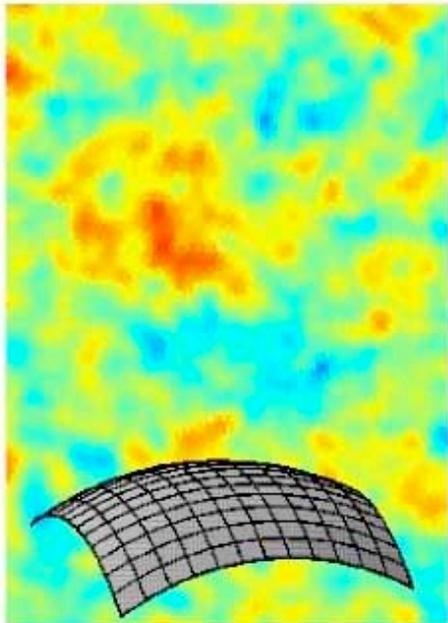
**Anisotropie  
und  
Krümmung**

WMAP :

$\Omega = 0.98 \rightarrow 1.02$

**Schluß:**

**Das Universum  
ist flach !**



# Universum: Struktur

- Krümmung: Flach
- Ausdehnung: Unendlich
- Baryonische Materie 5%
- Dunkle Materie 25%
- Dunkle Energie 70%
- Expansion: für immer, vermutlich beschleunigt
- Fluktuationen im Mikrowellenhintergrund und in Galaxienverteilung hängen zusammen
- Vermutlich: Quanteneffekte von Inflationsphase



# Die kosmologischen Gleichungen mit kosmologischer Konstante

Friedmann:  
modifiziert

$$H(t)^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda_0}{3}$$

Strömung:  
ungeändert

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) = 0$$

(Beschleunigung:  
modifiziert sich)

$$\frac{1}{a} \frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda_0}{3}$$

Zustandsgleichung:  
ungeändert

$$p = p(\rho)$$

# Planck-Größen

$$\text{Masse } M_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 10^{-5} \text{ g}$$

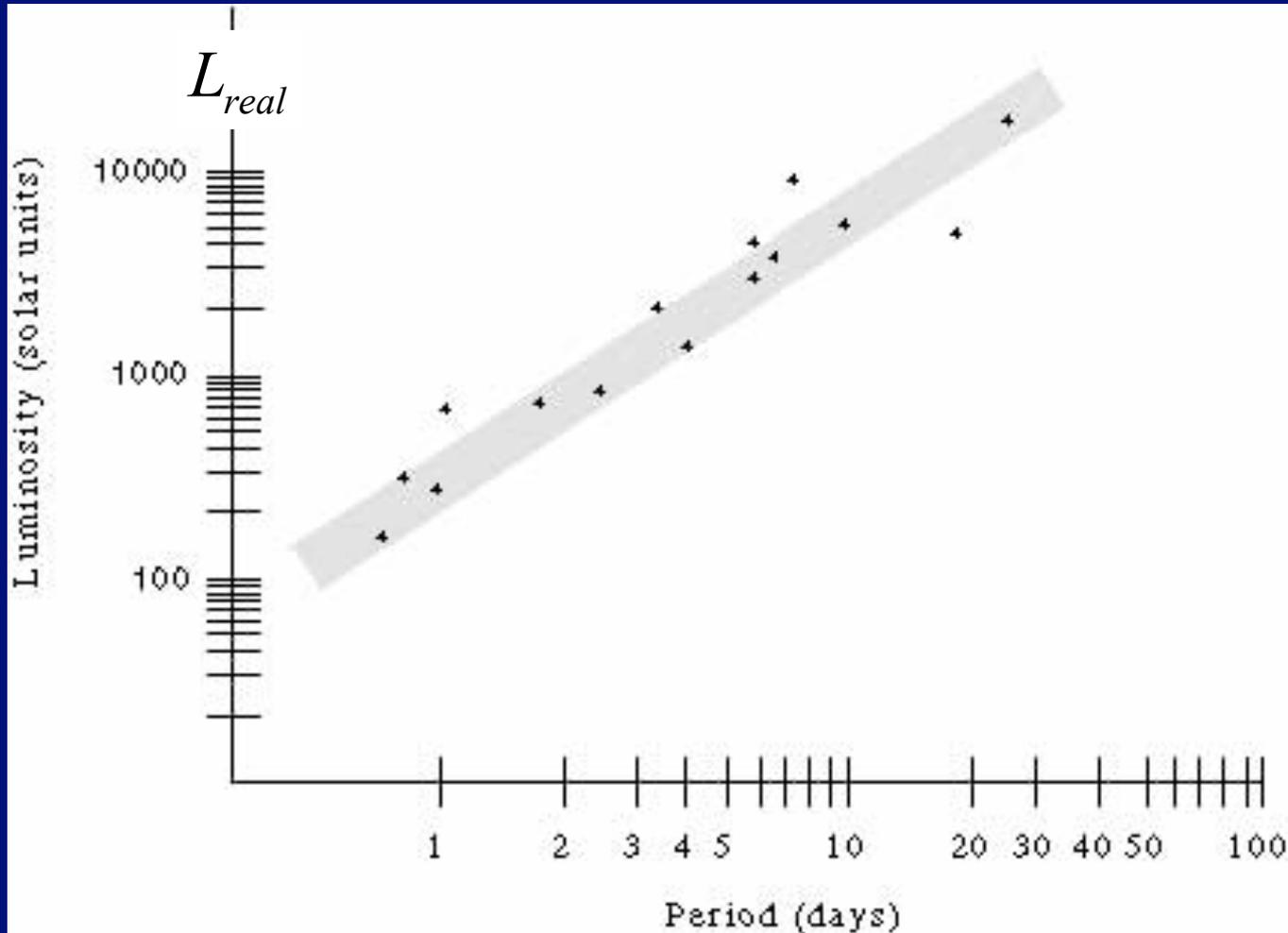
$$\text{Länge } L_{Pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = 1.6 * 10^{-35} \text{ m}$$

$$\text{Zeit } T_{Pl} = \frac{L_{Pl}}{c} = 5.4 * 10^{-44} \text{ sec}$$

$$\text{Energie } E_{Pl} = c^2 M_{Pl} = 1.2 * 10^{19} \text{ GeV}$$

$$\text{Temperatur} = E_{Pl} / k_B = 1.4 * 10^{32} \text{ Kelvin}$$

# Cepheiden-Veränderliche



$$L_{scheinbar} = L_{real} / R^2$$

# Allgemeine Relativitätstheorie



- 1915: Formulierung der Einsteinschen Gl.
- 1915: Lichtablenkung im Gravitationsfeld
- 1916: Gravitationswellen
- 1916: Schwarze Löcher (Schwarzschild)
- 1917: de Sitter: Statisches Universum ohne Materie
- 1917: Einstein wollte statisches Universum mit Materie. Philosophische-ästhetische Gründe
- Preis: kosmologische Konstante  $\Lambda$
- 1922: Friedman, de Sitter: Expandierendes bzw. kollabierendes Universum mit Materie, ohne  $\Lambda$
- 1929: Hubble, Beobachtung: Expansion
- 1933: Einstein  $\rightarrow$  „ $\Lambda$  größte Eselei meines Lebens“
- Ab 1933  $\Lambda$  nicht mehr verwendet
- 2002: beschleunigte Expansion, erfordert kosm. Konst. .