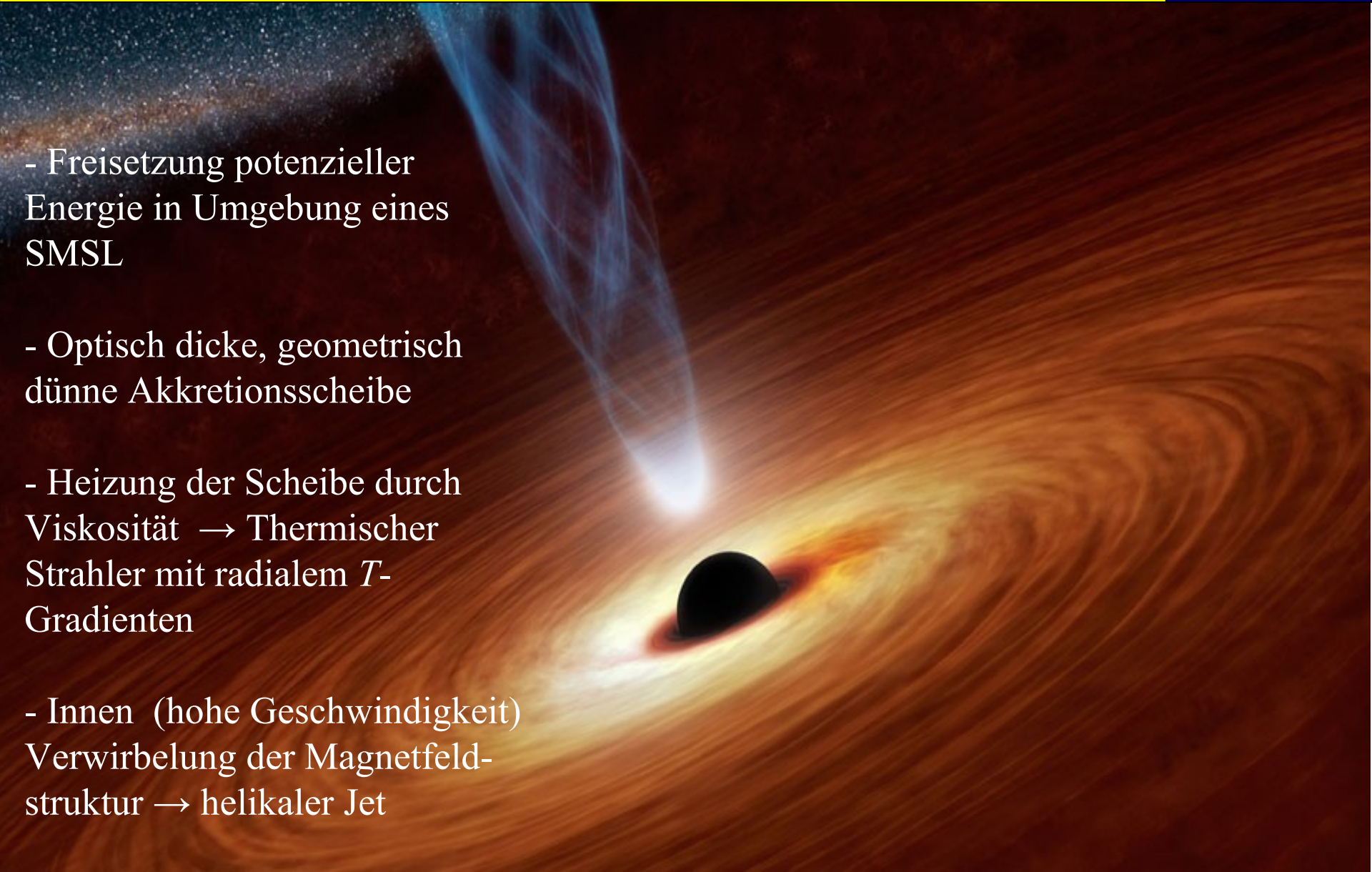


# AGN-Standardmodell

WH

- Freisetzung potenzieller Energie in Umgebung eines SML
- Optisch dicke, geometrisch dünne Akkretionsscheibe
- Heizung der Scheibe durch Viskosität → Thermischer Strahler mit radialem  $T$ -Gradienten
- Innen (hohe Geschwindigkeit) Verwirbelung der Magnetfeldstruktur → helikaler Jet



## 6.8 Der “Zoo” der AGN

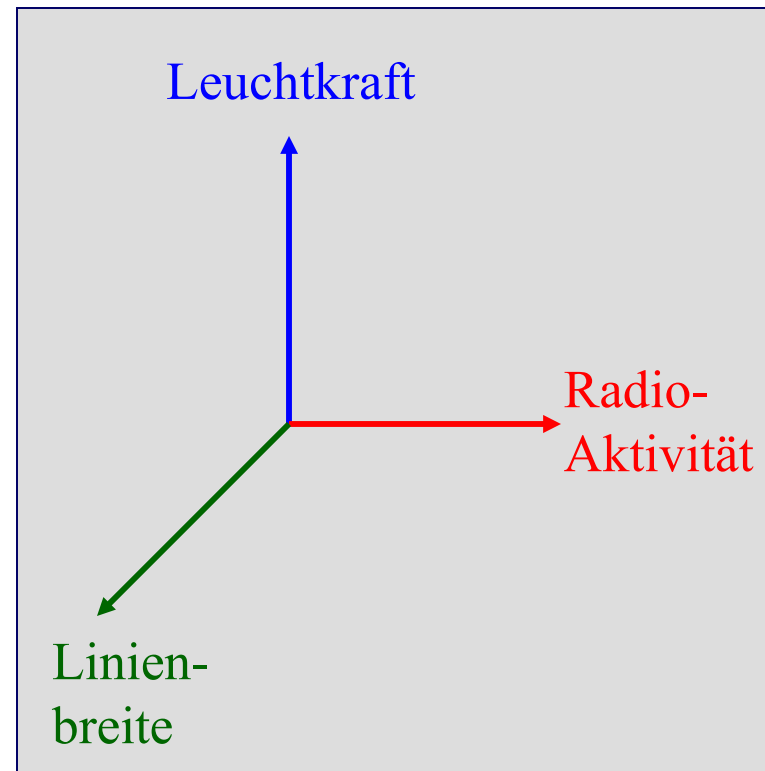
### Wichtigste Erscheinungsformen von AGN

(A) Hohe / geringe Leuchtkraft  
z.B. Quasar / Seyfert (per Def.!)

(B) Radio-laute / radio-leise

(C) Breite/schmale Emissionslinien:

- breite Linien vorhanden → Typ 1
- keine breiten Linien → Typ 2

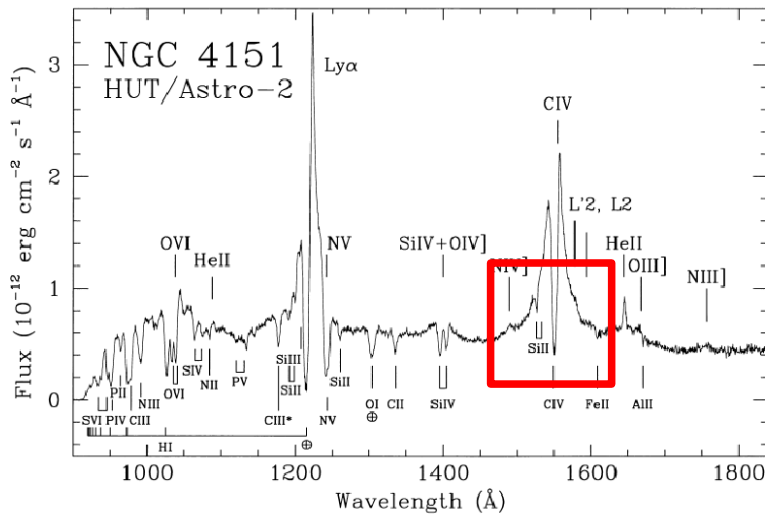


# 6.8 Der “Zoo” der AGN

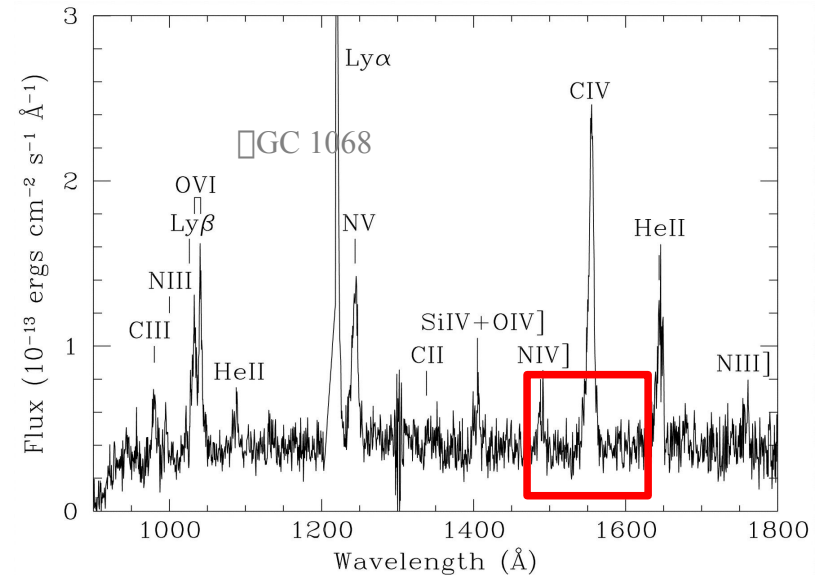
## Breite/schmale Emissionslinien:

- z.B. Seyfert Typ1 / Seyfert Typ2
- allgemein: AGN Typ 1 / AGN Typ 2

breite Linien vorhanden → Typ 1



keine breiten Linien → Typ 2



## 6.8 Der “Zoo” der AGN

---

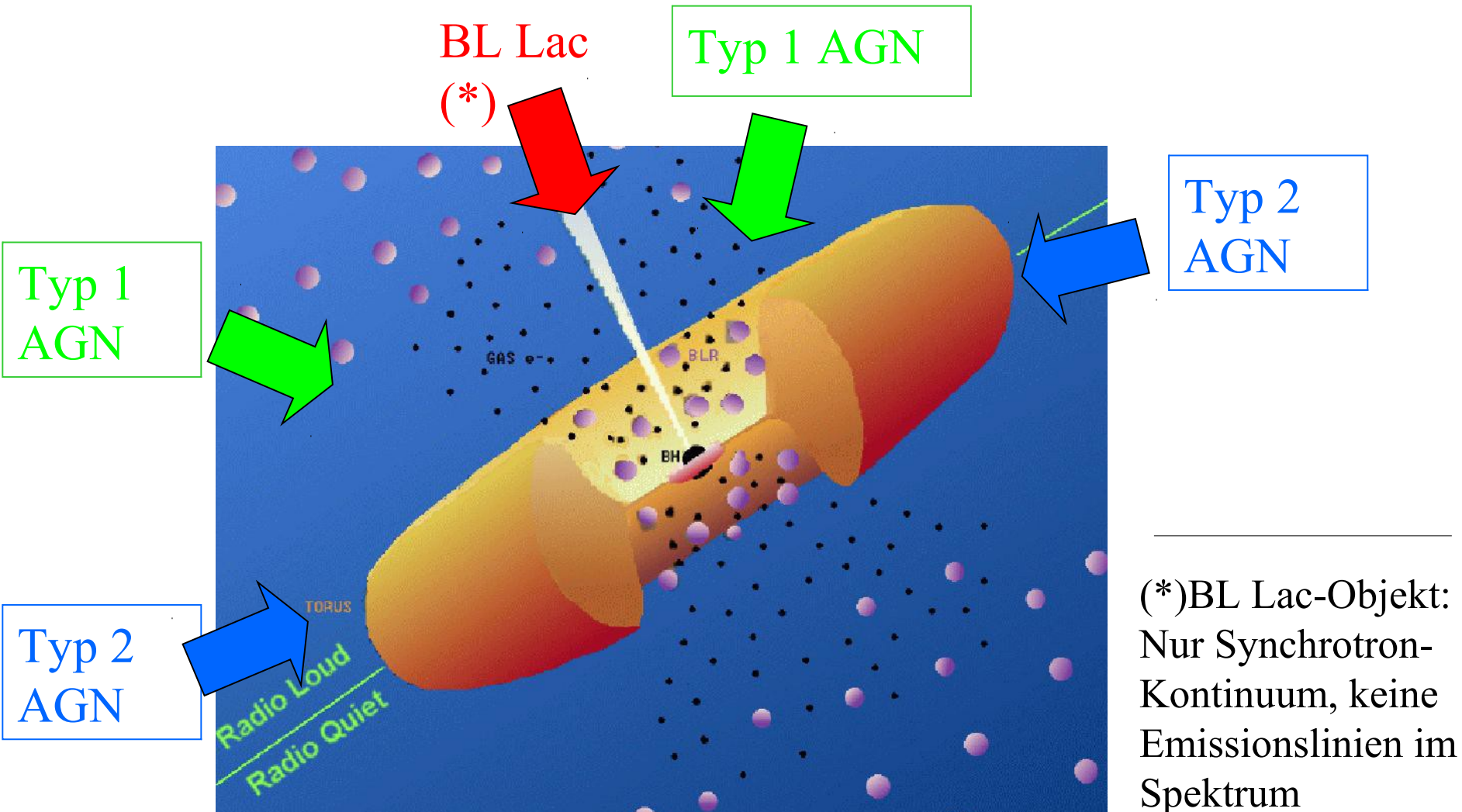
### Konsens Orientierungseffekte

- Orientierung zur Synchrotronquelle (Jets) ist *sicherlich* bedeutsam für *alle radio-lauten* Typen (Emission)
- Orientierung zum Molekülwolken/Staub-Torus ist *wahrscheinlich* bedeutsam für *alle* Typen (Absorption)

(Details unsicher...)

# 6.8 Der “Zoo” der AGN

Schema zur Vereinheitlichung von AGNs (Details unsicher)



## 6.8 Der “Zoo” der AGN

Schema zur Vereinheitlichung von AGNs (Details unsicher)

Sichtlinie:		Torus von der Seite	Torus von oben	direkt auf relativist. Jet
radio-leise	$L$ klein	Seyfert 2	Seyfert 1	---
	$L$ groß	QSO 2	klass. QSO	---
radio-laut	$L$ klein	FR I	BLRG	FSRG
	$L$ groß	FR II	RL-QSO	BL Lac

BLRG: *broad line radio galaxy* (Radiogalaxie mit breiten Em.linien im opt. Spektr.)

RL-QSO: *radio-laud* (=radio-heller) QSO

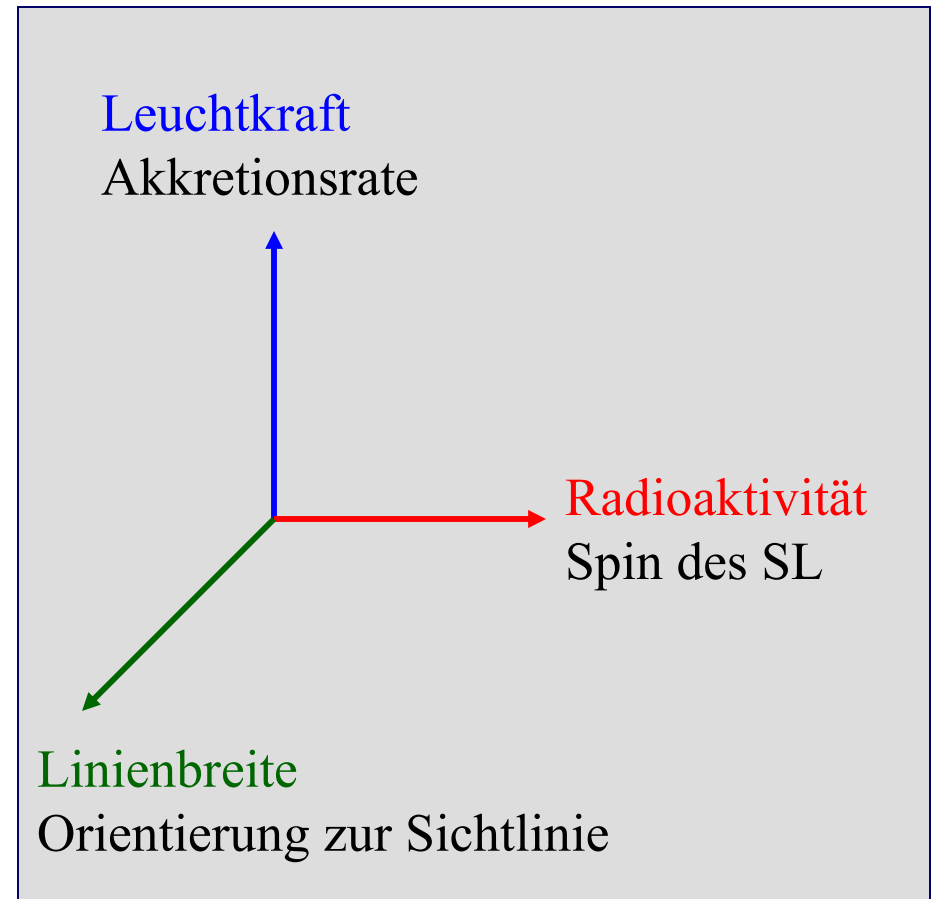
FSRG: *flat spectrum radio galaxy* (kompakte Radiogalaxie)

# 6.8 Der “Zoo” der AGN

## Vereinheitlichungsschema

Unterschiedliche  
Erscheinungsformen von  
AGN lassen sich gut auf der  
Grundlage des Standard-  
modells erklären mit  
Unterschieden hinsichtlich

- Akkretionsrate
- Drehimpuls des SL
- Orientierung zur Sichtlinie

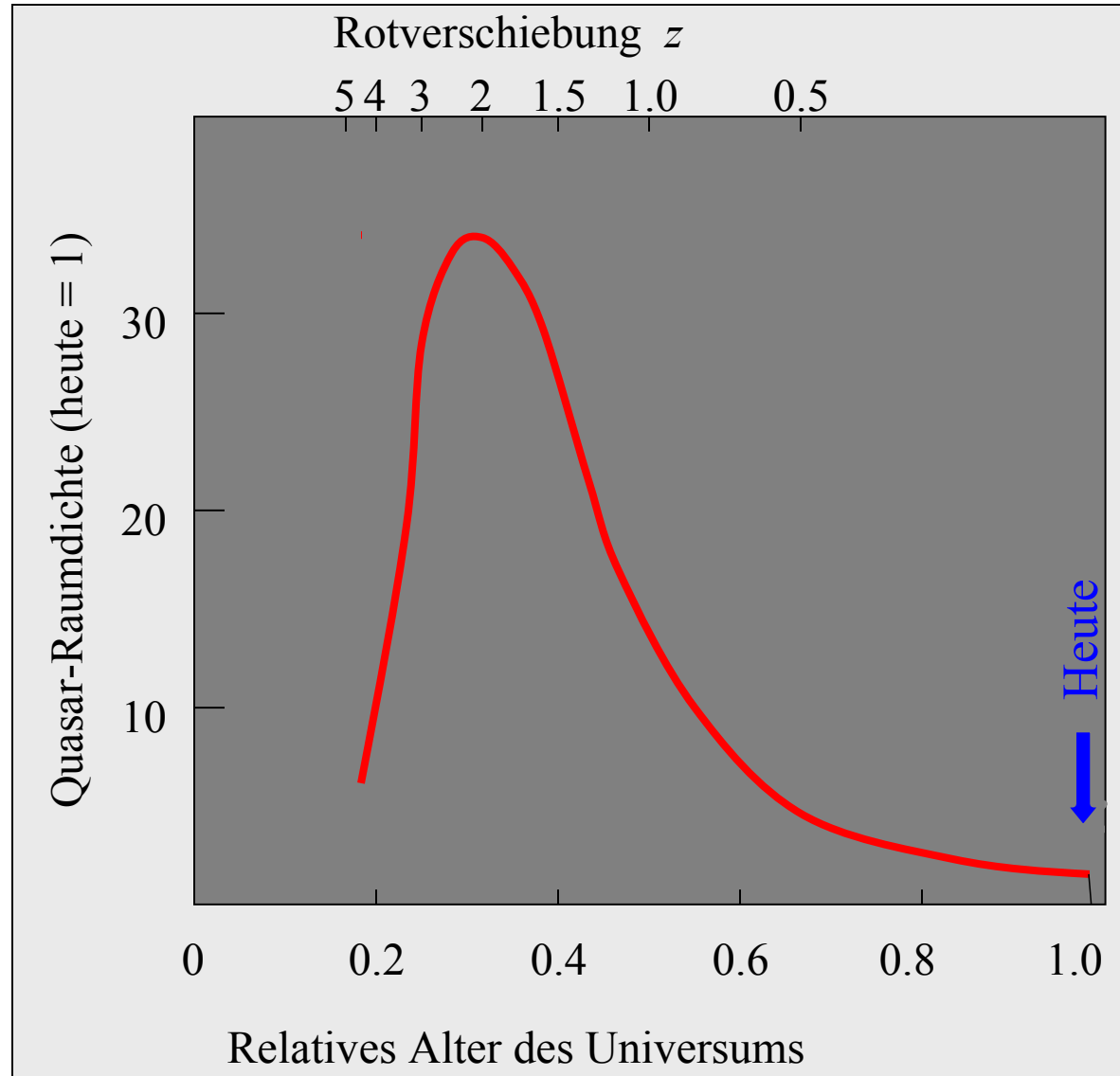




# 6.9 Entwicklung der Quasarpopulation

## Beobachtung:

- $> 10^5$  Quasare bekannt
- geringe Dichte in naher Umgebung ( $z < 0.3$ )
- ...  $< 1$  Quasar unter 1000 Riesengalaxien
- für  $z > 0.3$  nimmt Häufigkeit zu
- maximale Häufigkeit bei  $z \sim 2$





## 6.9 Entwicklung der Quasarpopulation

---

### Naheliegende Schlussfolgerung:

1. In der Vergangenheit gab es viele Quasare.
2. Heute gibt es nur noch wenige.

### Interpretation:

Mechanismus der Quasar-Anregung war früher effektiver.

Plausible Erklärung: Universum war weniger expandiert  
→ WW von Galaxien waren häufiger

# 7. Kosmischer Mikrowellenhintergrund CMB

## 7.1 Vorüberlegung

Expansionskosmos: Skalenfaktor  $R = R(t)$

Energiedichte der Materie (Massenerhaltung):

$$\rho_m \propto 1 / V \propto R^{-3}$$

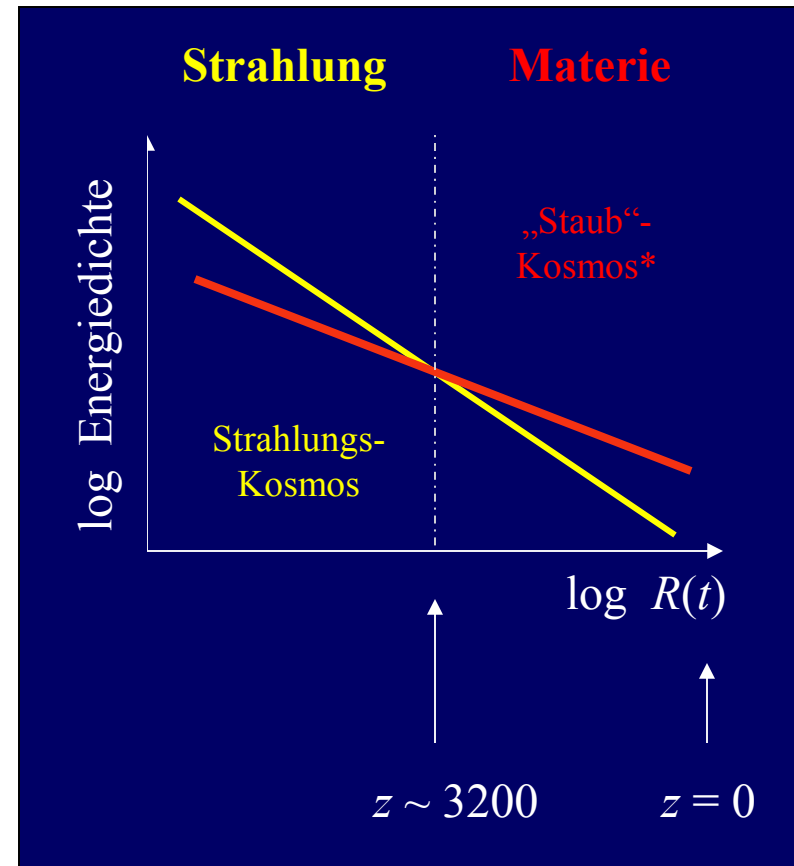
Energiedichte der Strahlung (Energieerhaltung):

$$\rho_s = n_p E_p$$

mit  $n_p \propto 1 / V$ : Anzahldichte der Photonen  
und  $E_p = h\nu \propto R^{-1}$

Somit

$$\rho_s \propto R^{-4}$$



\* Mit „Staub“ ist hier nicht der interstellare Staub gemeint sondern korpuskulare Materie

## 7.2 CMB: Entdeckung

**G. Gamov u.a. (Ende 1940er):**

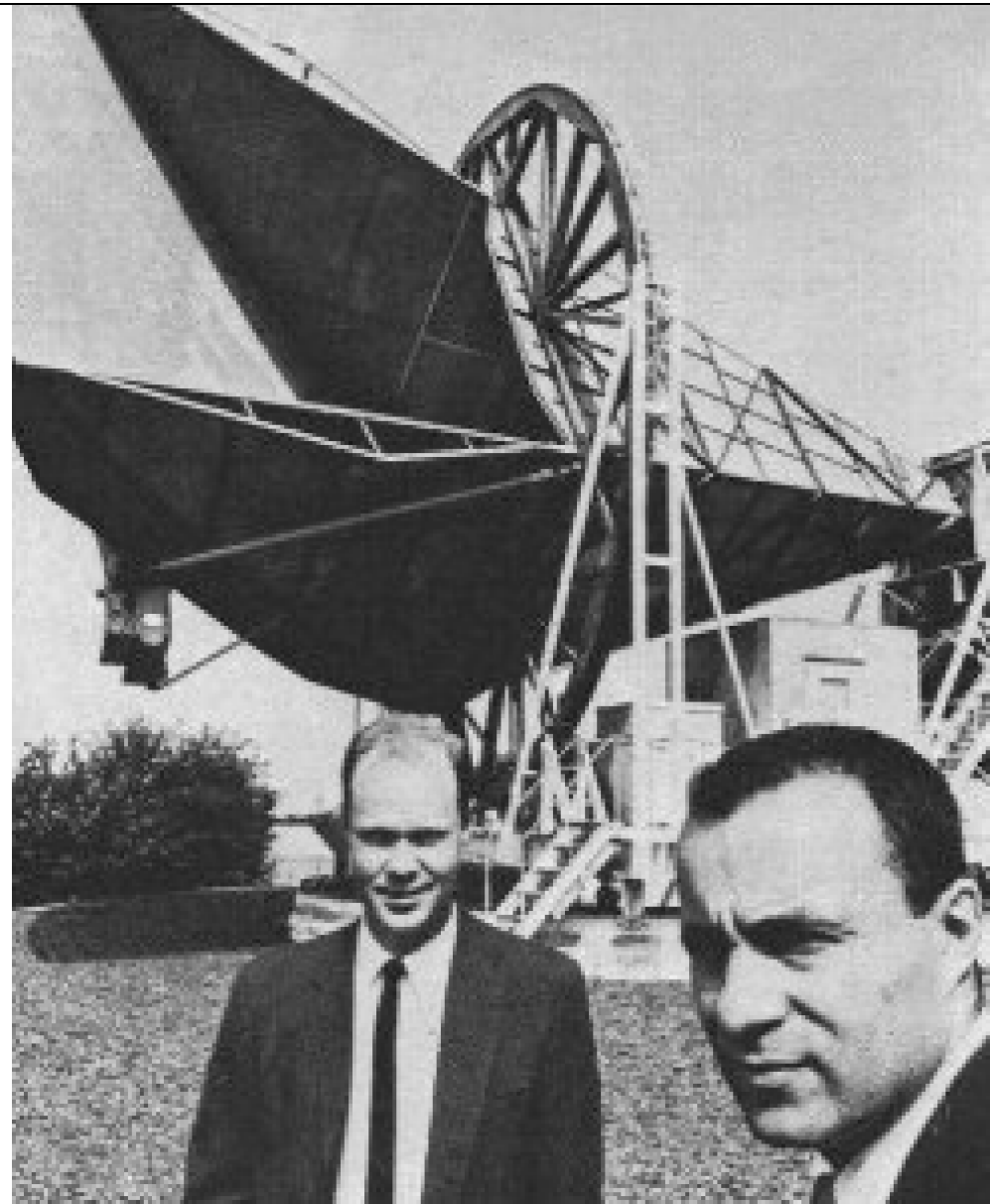
Der frühe Kosmos war dicht, heiß und „strahlungsdominiert“

→ Dieses Strahlungsfeld muss heute noch beobachtbar sein!

*Penzias und Wilson* (1964):  
zufällige Entdeckung eines isotropen Rauschens bei  $\lambda=7.35$  cm  
(Maximum bei  $\lambda \sim 1$  mm)

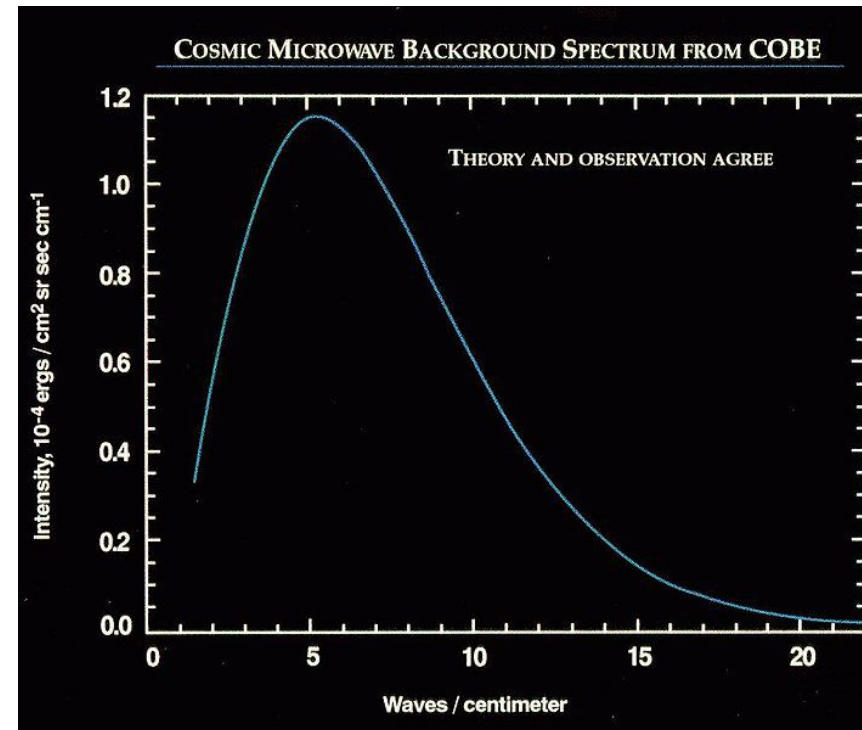
Deutung als *Gamov'sche* Reliktstrahlung durch *R. Dicke* (u.a.).

**WUMMS: Nobelpreis Physik 1978!**  
(für Penzias und Wilson)



## 7.3 CMB: allgemeine Eigenschaften

- spektrale Energieverteilung:  
Schwarzer Körper  $T = 2.726 \pm 0.020$  K
- großskalige Isotropie
- kleinskalige Strukturen  
enthalten Informationen über:
  - Keime der Strukturbildung
  - kosmologische Parameter

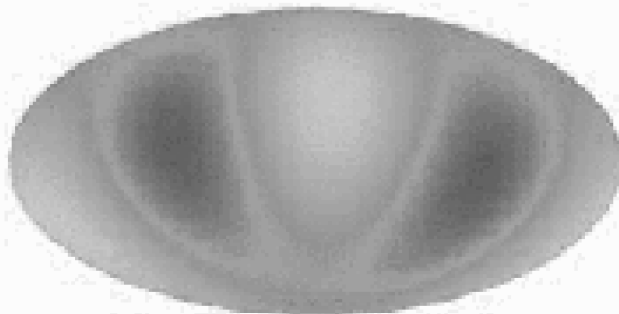


→ Grundpfeiler der modernen Kosmologie

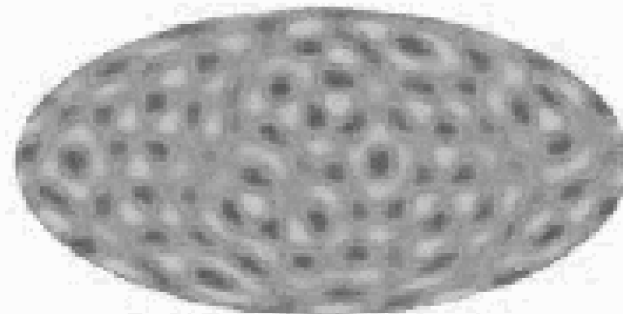
## 7.3 CMB: allgemeine Eigenschaften

### Prinzip der Beschreibung der Strukturen auf großen Winkelskalen:

Analyse der Verteilung der CMB-Temperatur (oder Intensität) am Himmel mittels Entwicklung in Kugelflächenfunktionen  $Y_{l,m}(\Theta, \Phi)$  \*



$l=2$



$l=16$

Schwankungs-Amplituden mit Skalen, die so groß sind, dass sie  $l$ -mal auf einen Großkreis passen

\* für Projektion auf die Sphäre Analogon zu Fourier-Moden im flachen Raum

## 7.3 CMB: allgemeine Eigenschaften

---

**Prinzip der Beschreibung der Strukturen auf kleinen Winkelskalen: (\*)**

Relative  $T$ -Fluktuation:  $\mathcal{T}(\theta) = [T(\vec{x}) - T_0] / T_0$

$\vec{x}$ : Einheitsvektor

$T_0$ : mittlere Temperatur

Zwei-Punkt-Korrelationsfunktion:

$$C(\theta) = \langle \mathcal{T}(\vec{x}) - \mathcal{T}(\vec{x}') \rangle$$

Leistungsspektrum:  $l(l+1) C_l$

beschreibt Amplitude der Fluktuation  
auf Winkelskala  $\theta = \pi / l = 180^\circ / l$

---

(\*) Bemerkung: auf kleinen Winkelskalen kann Leistungsspektrum als Fourier-Transformierte der Zwei-Punkt-Korrelationsfunktion beschrieben werden

# 7.3 CMB: allgemeine Eigenschaften

## Isotropie und Strukturen:

### 1. Dipol-Variation ( $l=1$ )

Yin-Yang-Muster wegen Bewegung des Beobachters (Doppler-Effekt)

- Dipol-Variation  $\Delta T / T \sim 0.001$
- Dominanter Anteil: Galaxis  $\rightarrow$  GA

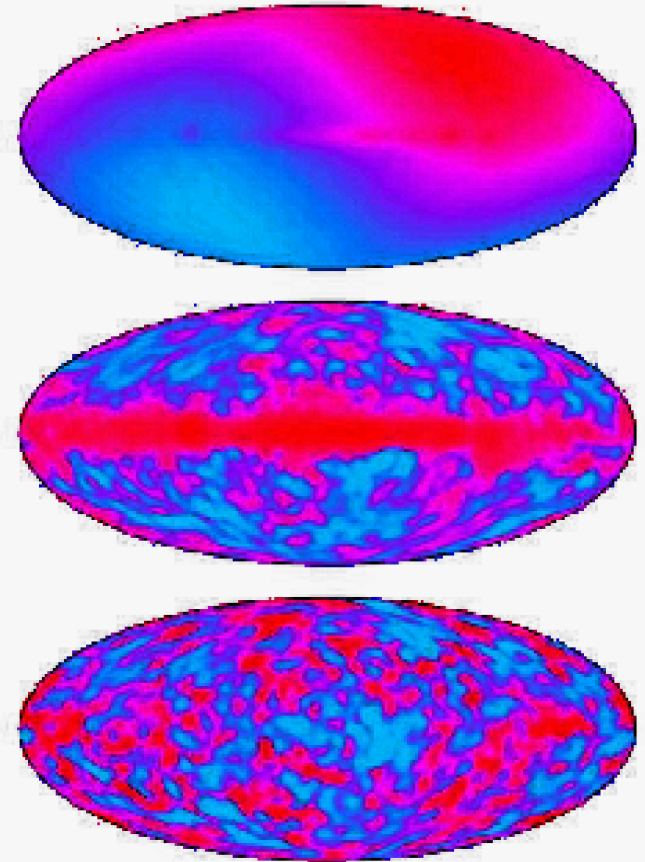
### 2. Vordergrundquellen (MSS,GCs)

Messungen bei verschiedenen Wellenlängen  
 $\rightarrow$  genaue Korrekturen möglich

### 3. Verbleibende Fluktuationen ( $l > 2$ )

- hochgradige Isotropie auf großen Skalen
- lokale Abweichungen auf kleinen Skalen ( $l > 100$ ):  $\Delta T / T = 10^{-5}$

Temperatur-Verteilung (COBE)



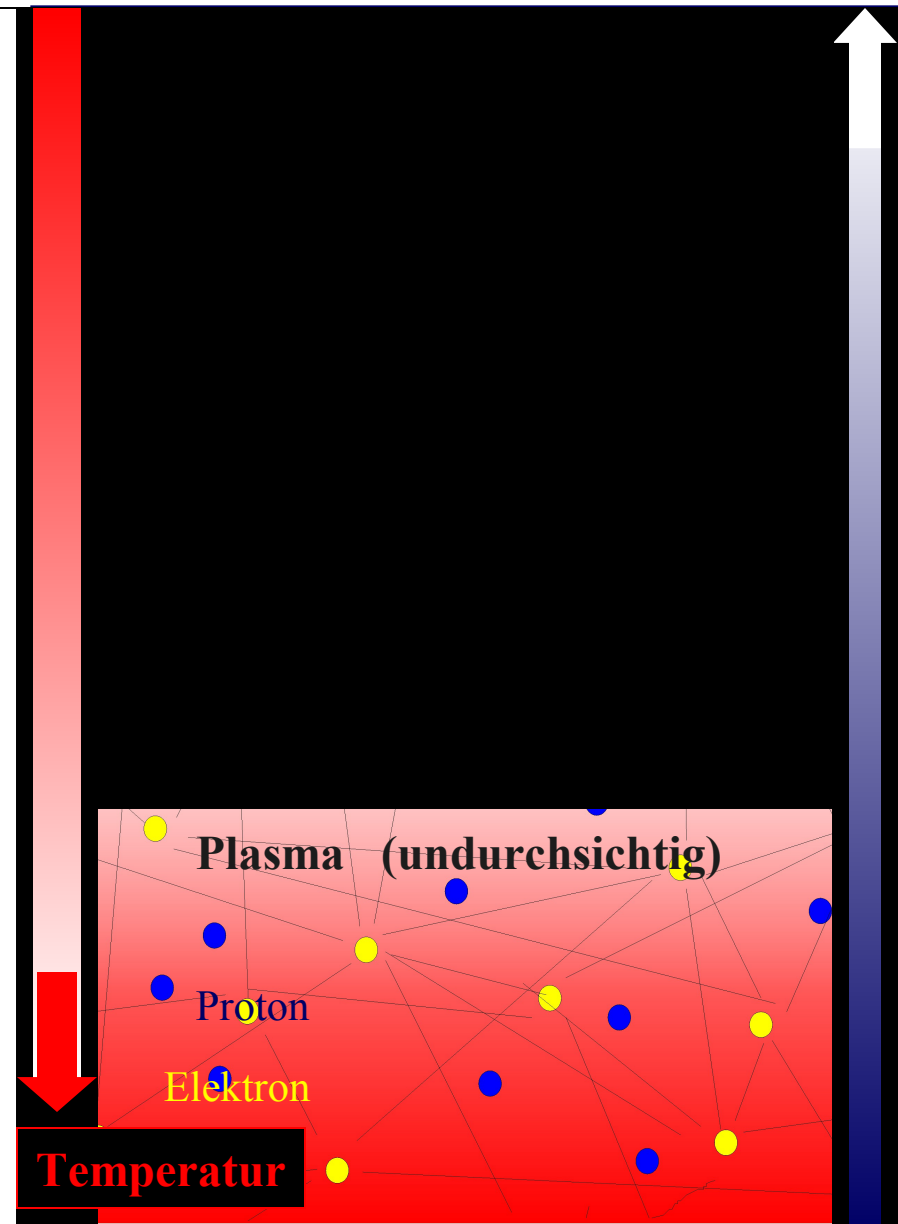


# 7.4 CMB: Entstehung

Zeit

## Bedingungen im frühen Universum:

- bereits Staubkosmos aber noch strahlungsdominiert (WW Baryonen  $\leftrightarrow$  Photonen)
- Strahlungsfeld und Baryonen im GG
- $\rightarrow$  idealer Schwarzer Strahler
- Opazität des Plasmas sehr groß

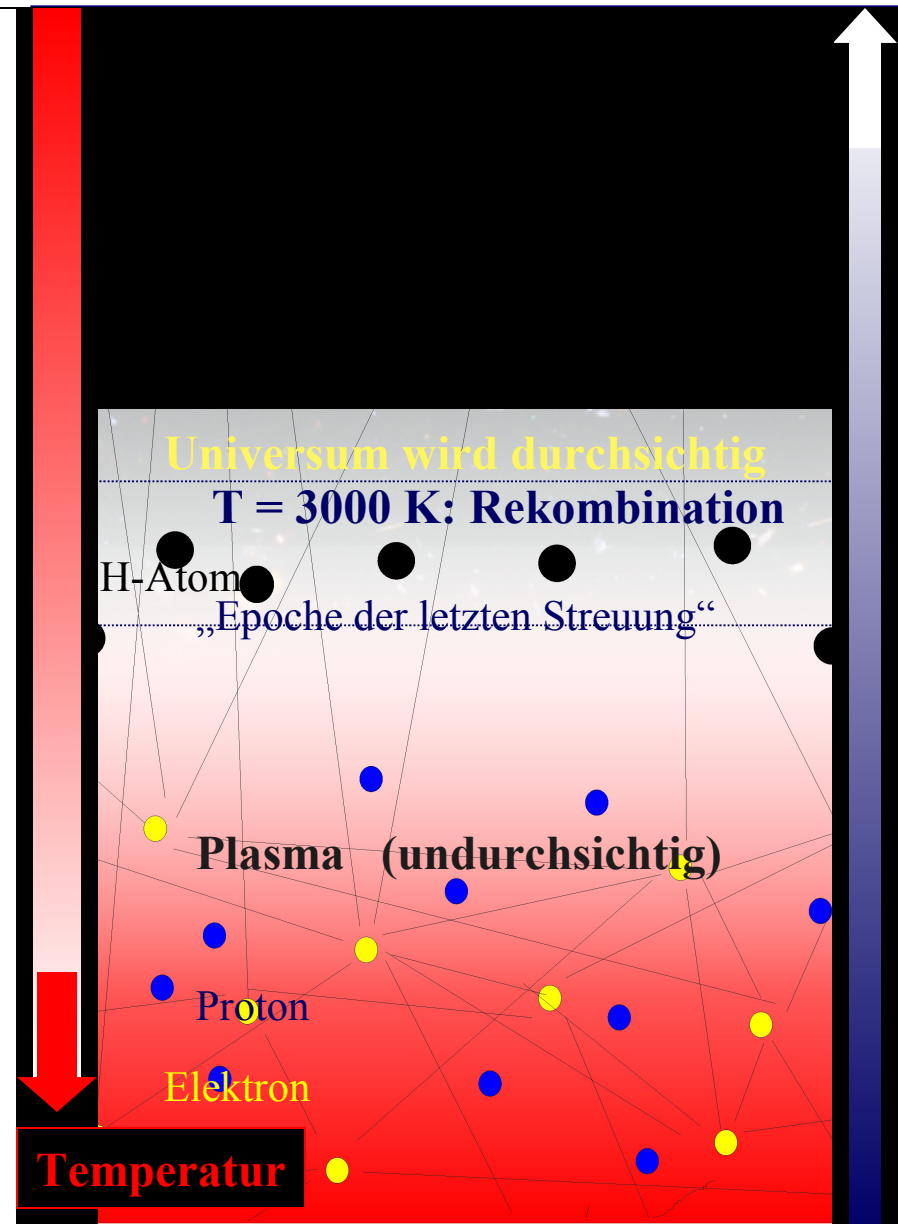


# 7.4 CMB: Entstehung

Zeit

## Konsequenzen der kosmischen Expansion:

- adiabatische Kühlung  $\rightarrow T \downarrow$
- bei  $z \approx 1000$  ( $t \approx 380\,000$  Jahre) wird  $T < 3\,000$  K  $\rightarrow$  H-Rekombination
- freie Weglänge der Photonen steigt  $\rightarrow$  Universum wird transparent
- Strahlungsfeld entkoppelt von Materie...
- ... bleibt aber als „Strahlungshintergrund“ erhalten

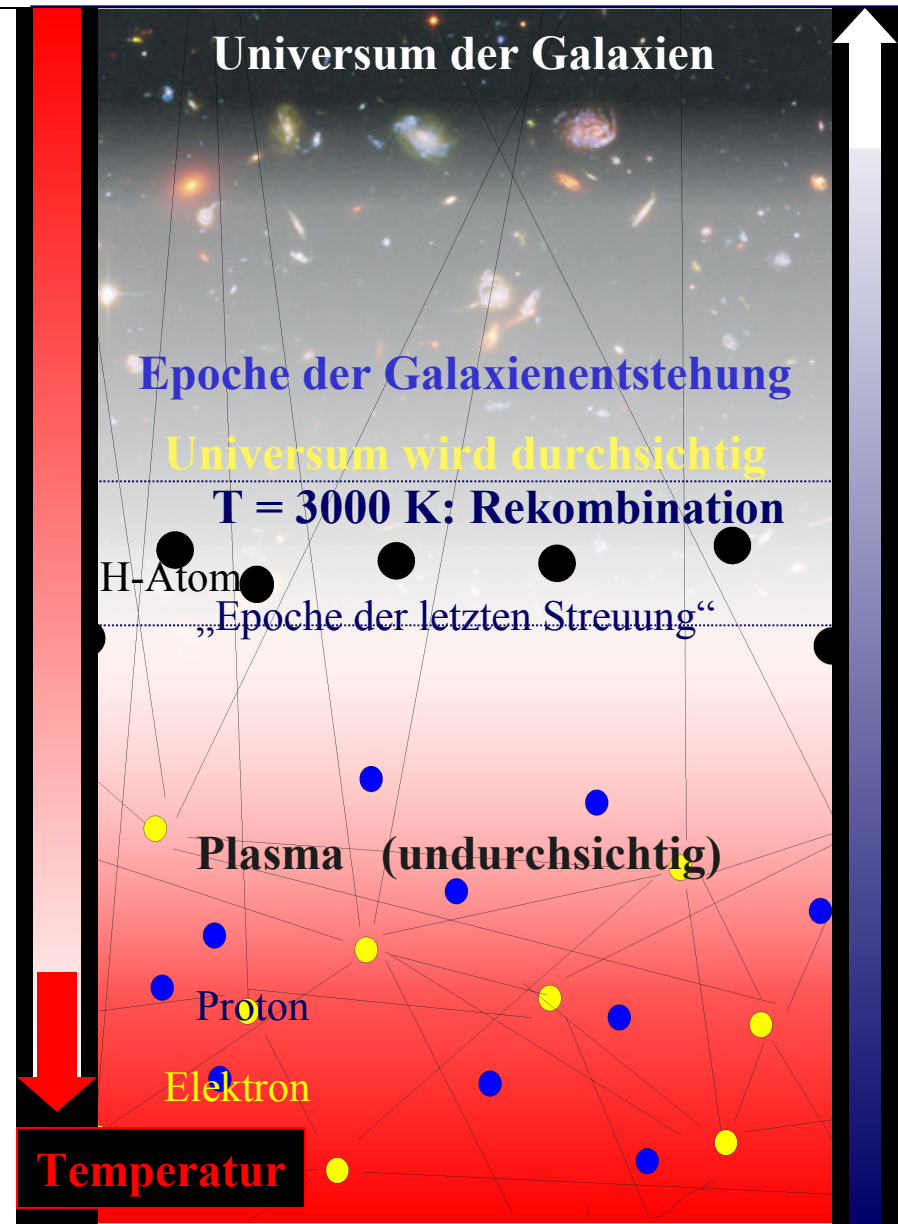


# 7.4 CMB: Entstehung

Zeit

## Weitere Entwicklung:

- Photonen erfahren extreme Rotverschiebung durch kosmische Expansion
- Das Spektrum der „Hintergrundstrahlung“ bleibt aber das eines Schwarzen Strahlers



# 7.4 CMB: Entstehung

## Gegenwärtige Temperatur des Strahlungsfelds

Wiensches Gesetz:  $T \propto \frac{1}{\lambda_{\max}}$

Kosmische Expansion:  $\lambda \propto R(t)$

Definition Rotverschiebung:  $1+z = \frac{\lambda^{(a)}}{\lambda^{(e)}} = \frac{R^{(a)}}{R^{(e)}} = \frac{1}{R}$  (für  $R^{(a)} \stackrel{\text{Def}}{=} 1$ )



$$T \propto (1+z)$$



$$T^{(a)} = T^{(e)} \frac{1+z^{(a)}}{1+z^{(e)}}$$

Mit  $z^{(a)} = 0$ ,  $z^{(e)} = 1000$ ,  $T^{(e)} \approx 3000$  K folgt:

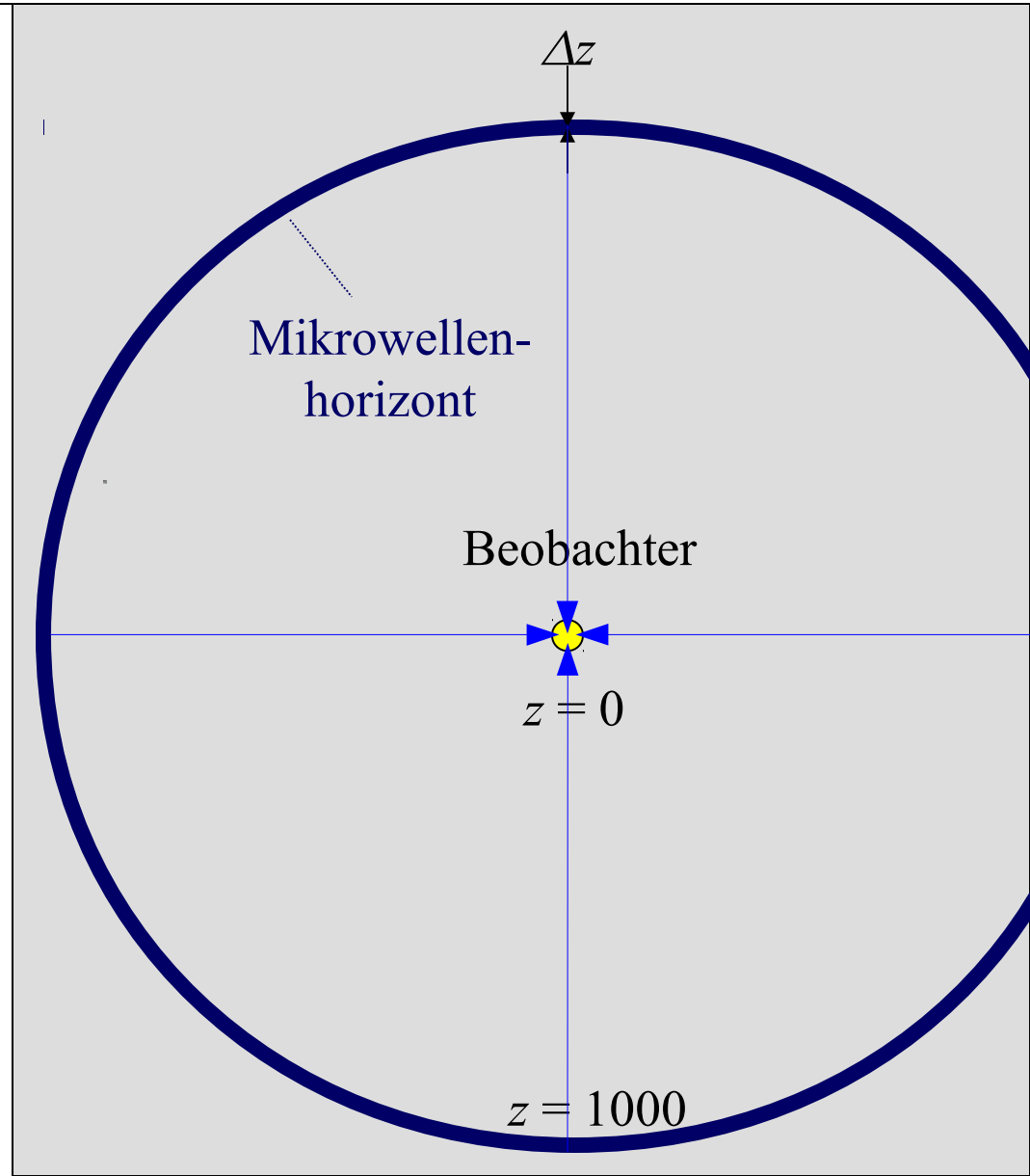
$T^{(a)} \approx \frac{T^{(e)}}{1000} \approx 3 \text{ K}$
--

$\lambda_{\max} \approx 1 \text{ mm}$  (Mikrowellenstrahlung)

## 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

Von dem bei  $z + \Delta z$  vorhandenen Strahlungsfeld erreicht einen Beobachter ( $z = 0$ ) nur die Strahlung aus einer dünnen Kugelschale  $z \dots z + \Delta z$

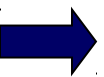
= Mikrowellenhorizont



# 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

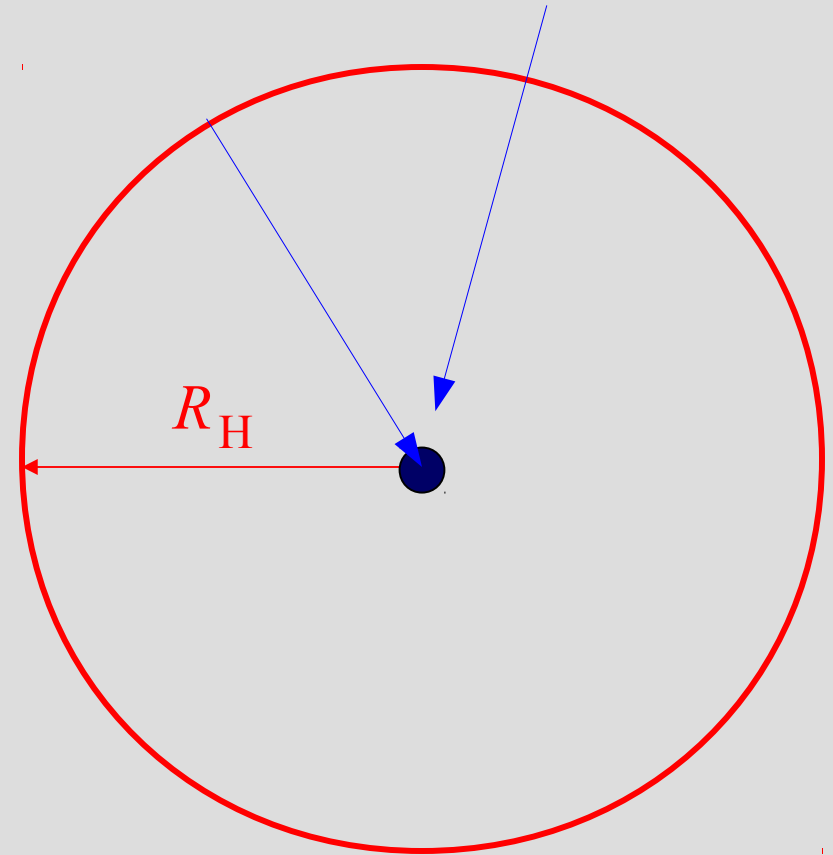
## Exkurs: Horizontproblem

1. Licht benötigt endliche Zeit, um Beobachter zu erreichen
2. Universum hat endliches Alter



Beobachtbares Universum ist räumlich begrenzt (\*)  
„Beobachtungshorizont“  $R_H$

(\*) Lösung für Olbers-Paradoxon  
(dunkler Nachthimmel)

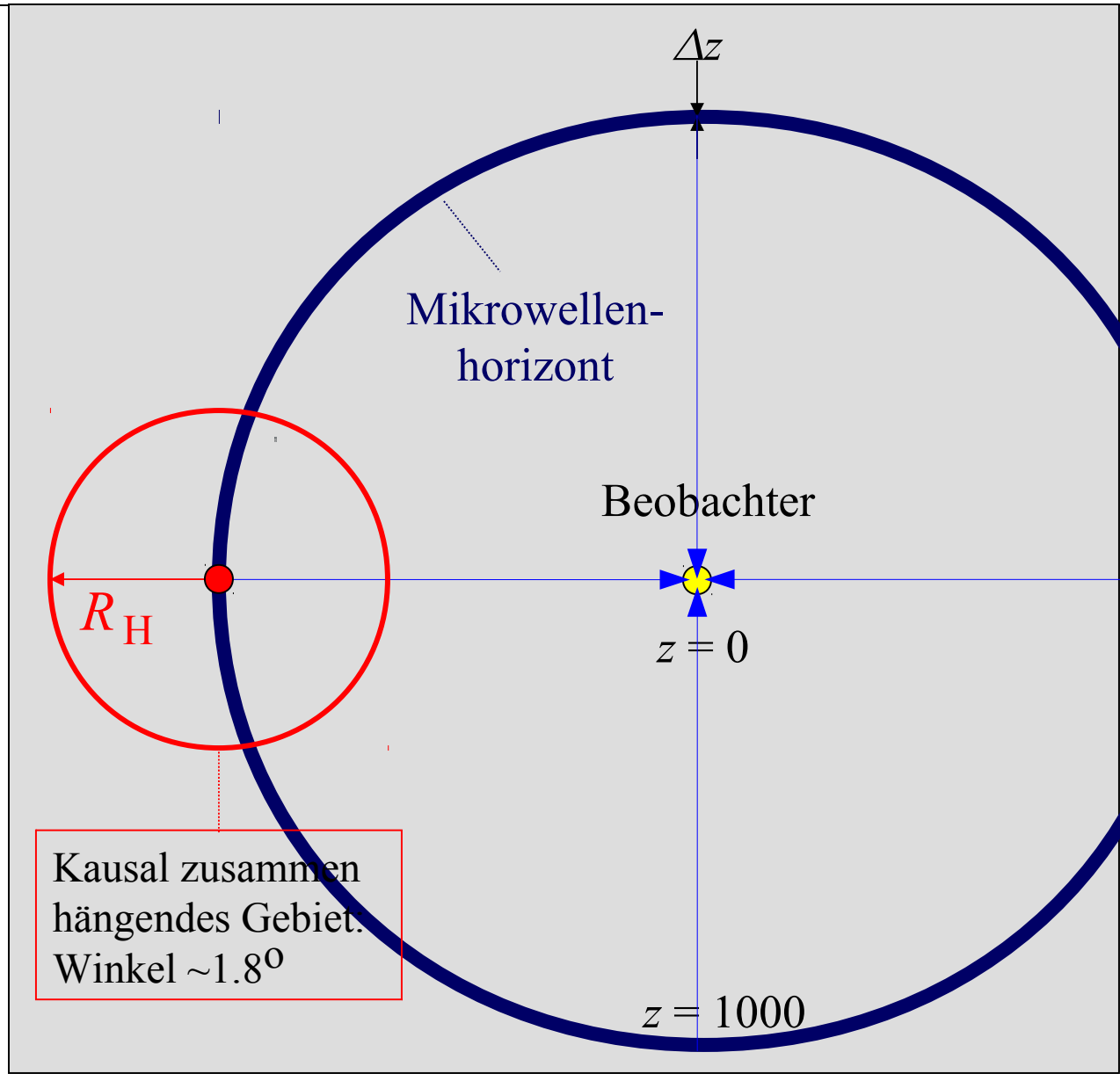


# 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

## Exkurs: Horizontproblem

Beobachtungshorizont existiert für jeden Punkt (auch auf dem Horizont des Beobachters)

Radius des Horizonts bei  $z = 1000$ :  $R_H \sim 1.8^\circ$   
= maximale Größe der kausal zusammenhängenden Gebiete





# 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

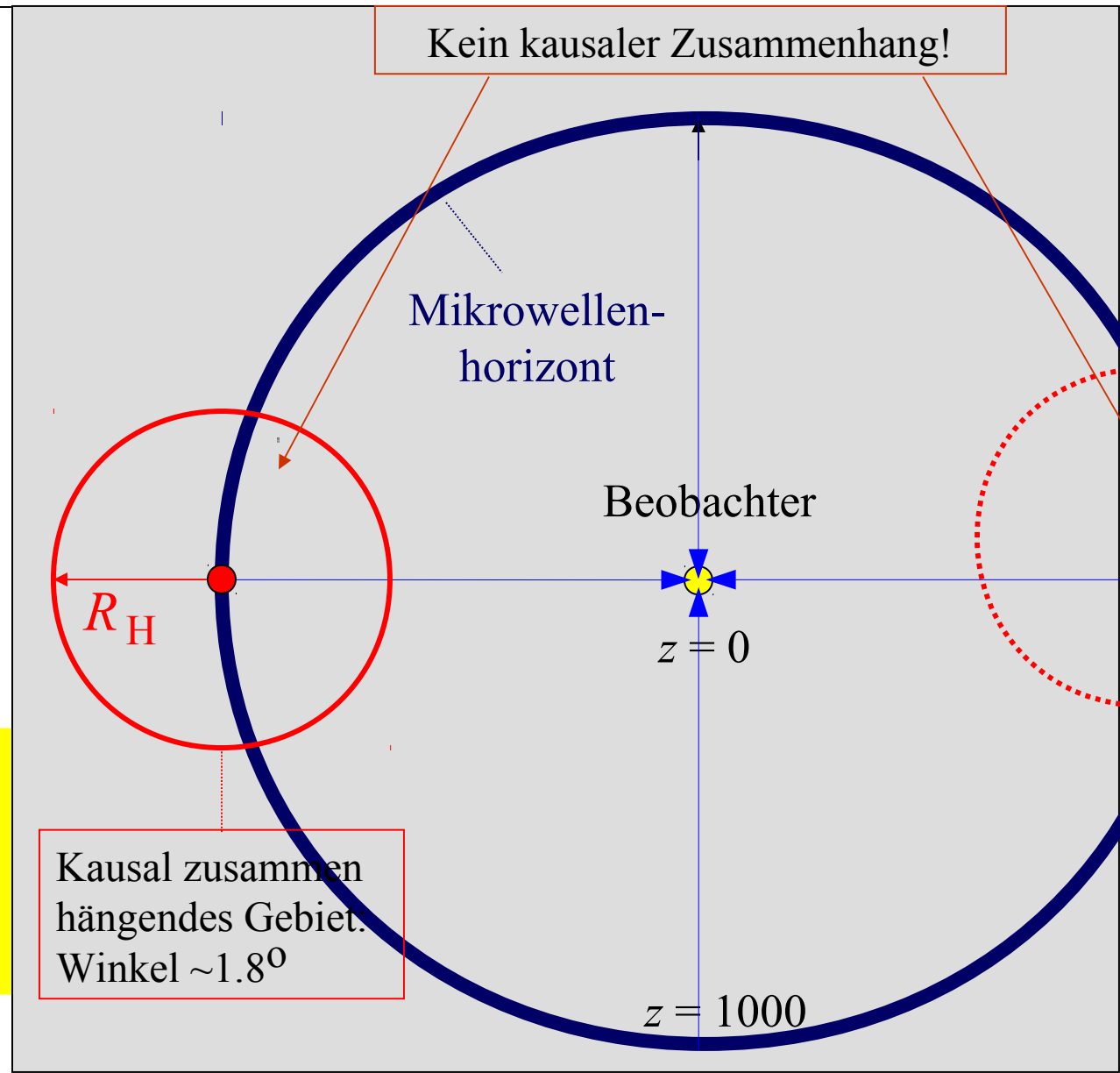
## Exkurs: Horizontproblem

Radius des Horizonts bei  $z = 1000$ :  $R_H \sim 1.8^\circ$

= maximale Größe der kausal zusammenhängenden Gebiete

→ Wie kann dann aber CMBR auf großen Skalen isotrop sein?

**Lösung: Inflation**  
(inflationäres Aufblähen des frühen Universums)

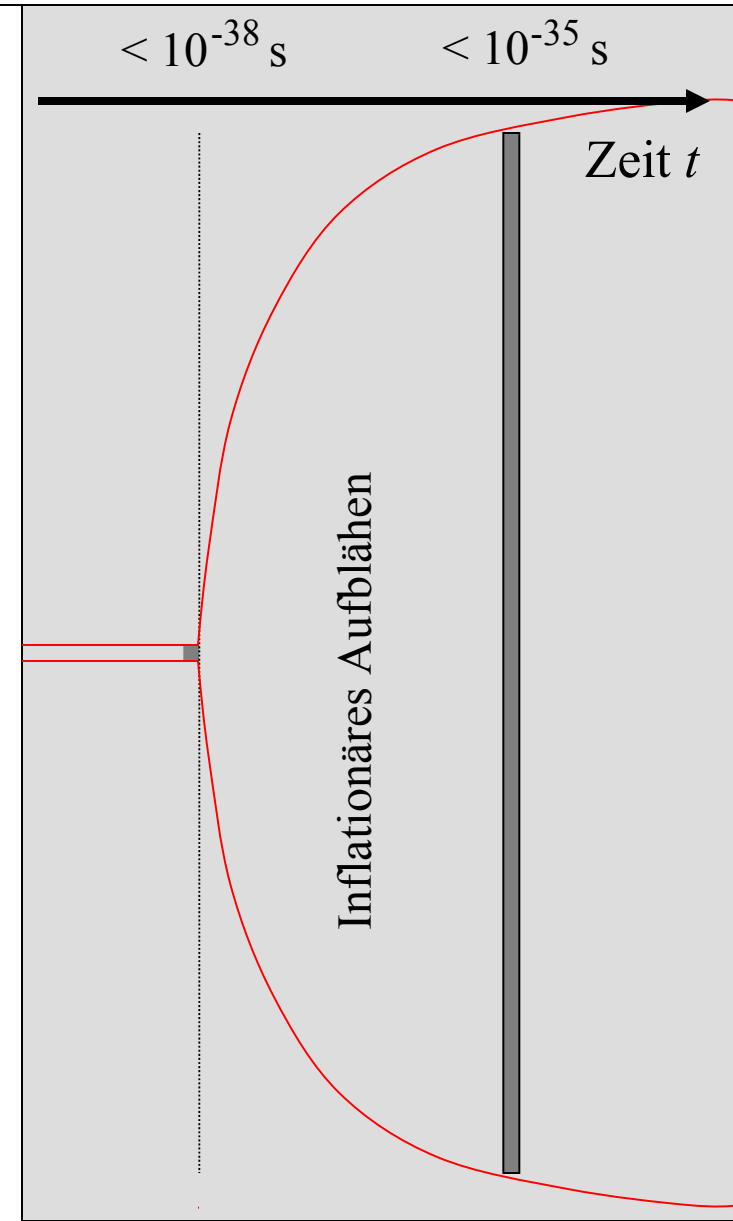


# 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

## Modell der Inflation aus GUT \*

A. Guth u.a. (1981,...):

- Am Ende der GUT-Ära ( $t \sim 10^{-38}$  s) findet Phasenübergang statt (Energiefreisetzung treibt exponentielle Expansion an)
- Innerhalb  $< 10^{-36}$  s Ausdehnung um Faktor  $10^{30}$  (Größe Atom → Sonnensystem)

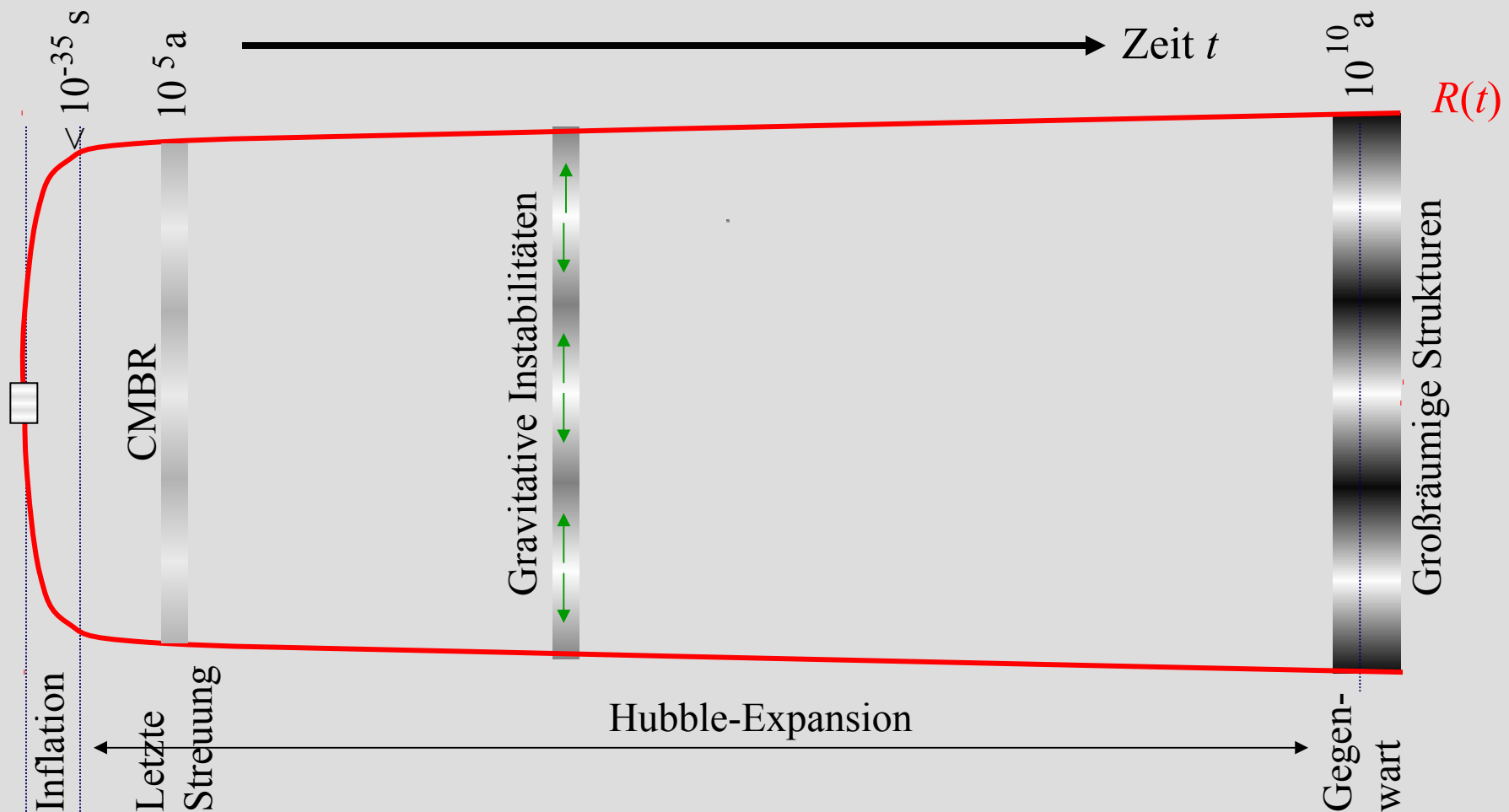


---

\* GUT: Grand Unification Theory (der Elementarkräfte)

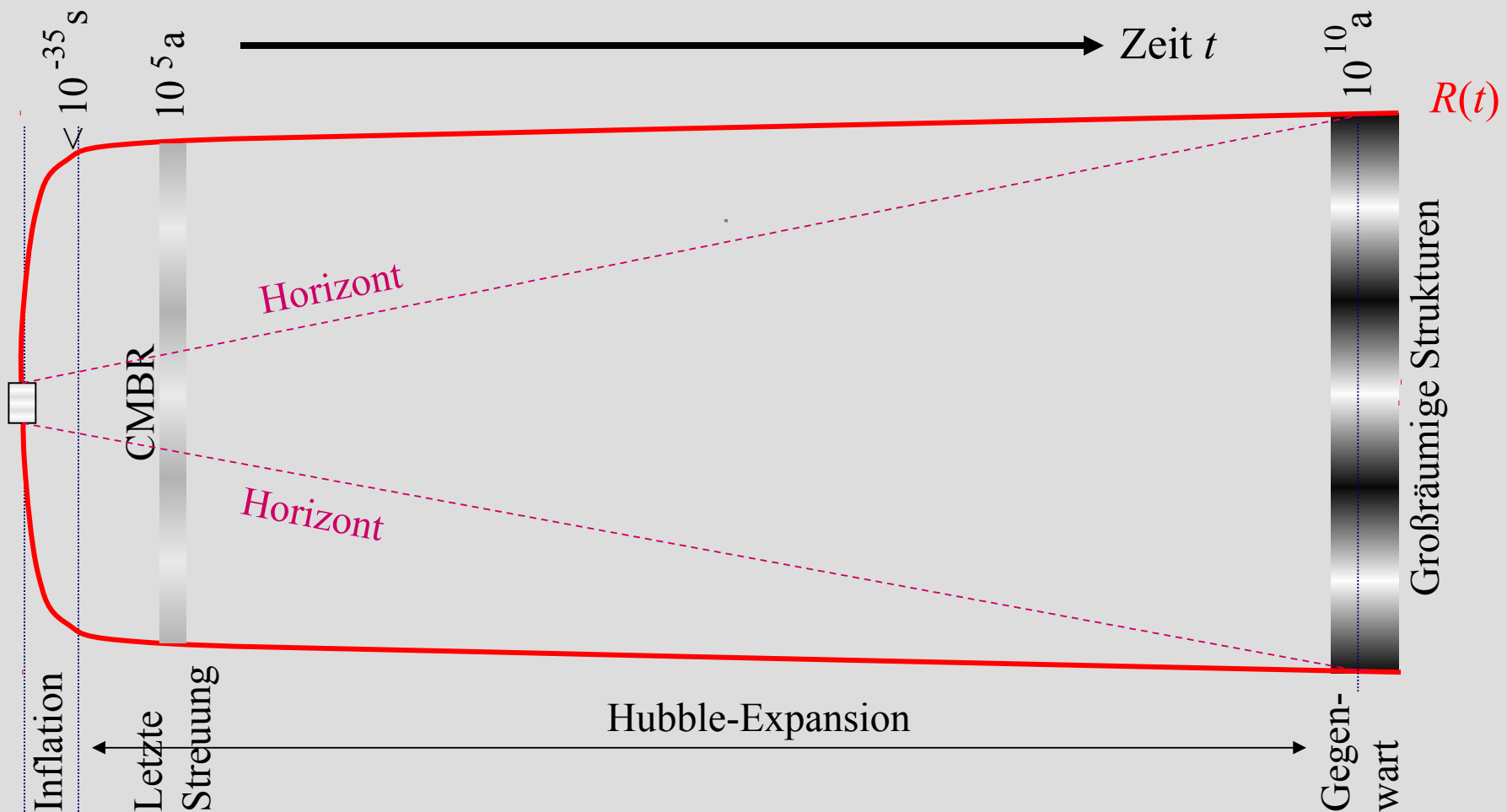
# 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

1. Inflation: exponentielles Aufblähen kleinster Strukturen (Quantenfluktuationen)
2. ... wachsen nach Reionisation gravitativ zu großen Strukturen ( $\rightarrow$  CMBR)
3. ...und werden durch gravitative Instabilitäten verstärkt.



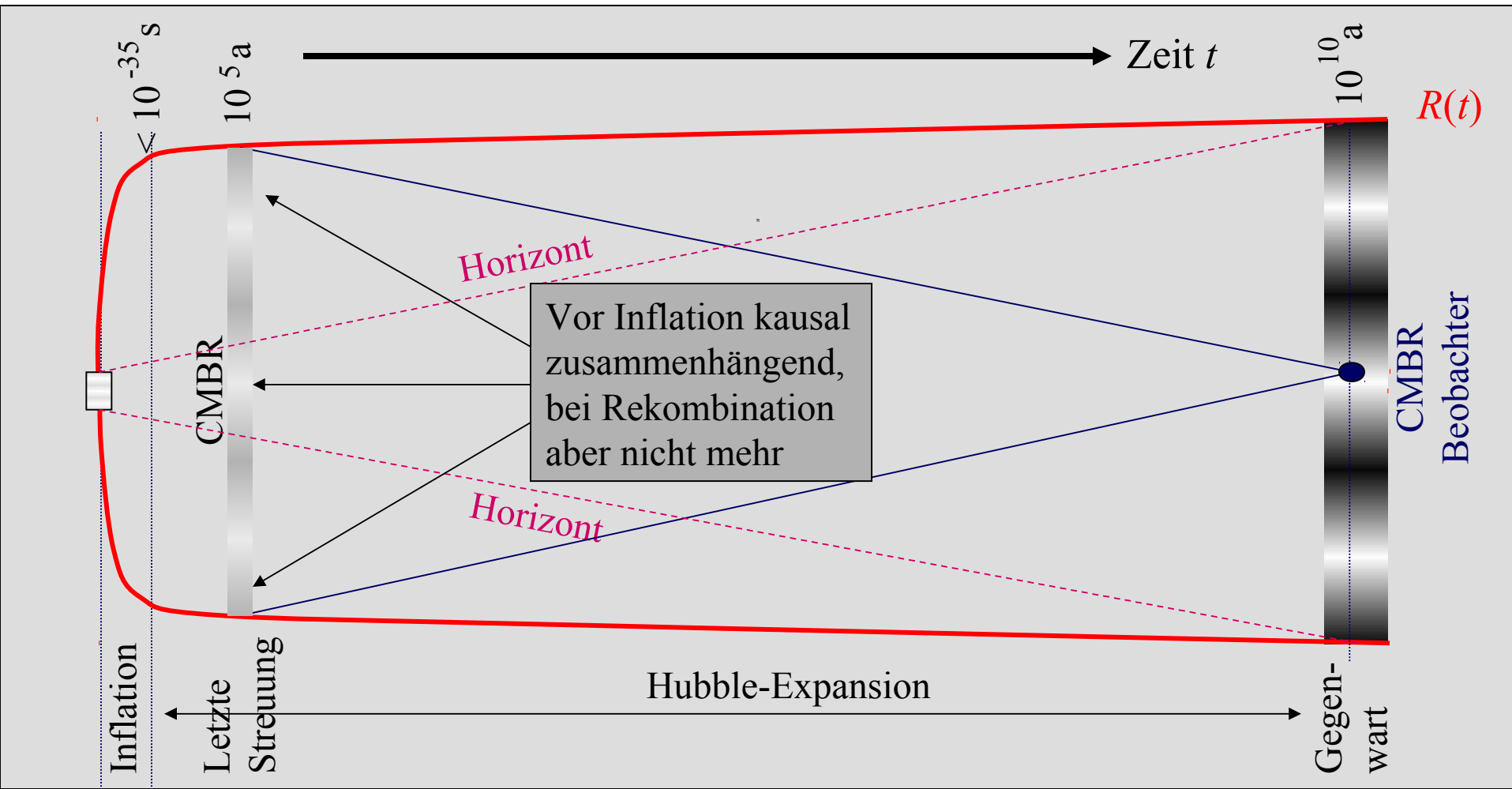
# 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

**Horizont:** Beobachter erhält Information nur aus dem Teil des Universums, aus dem Photonen zu ihm gelangen konnten (in endlicher Zeit!)  
= Größe kausal zusammenhängender Gebiete, wächst mit  $t$



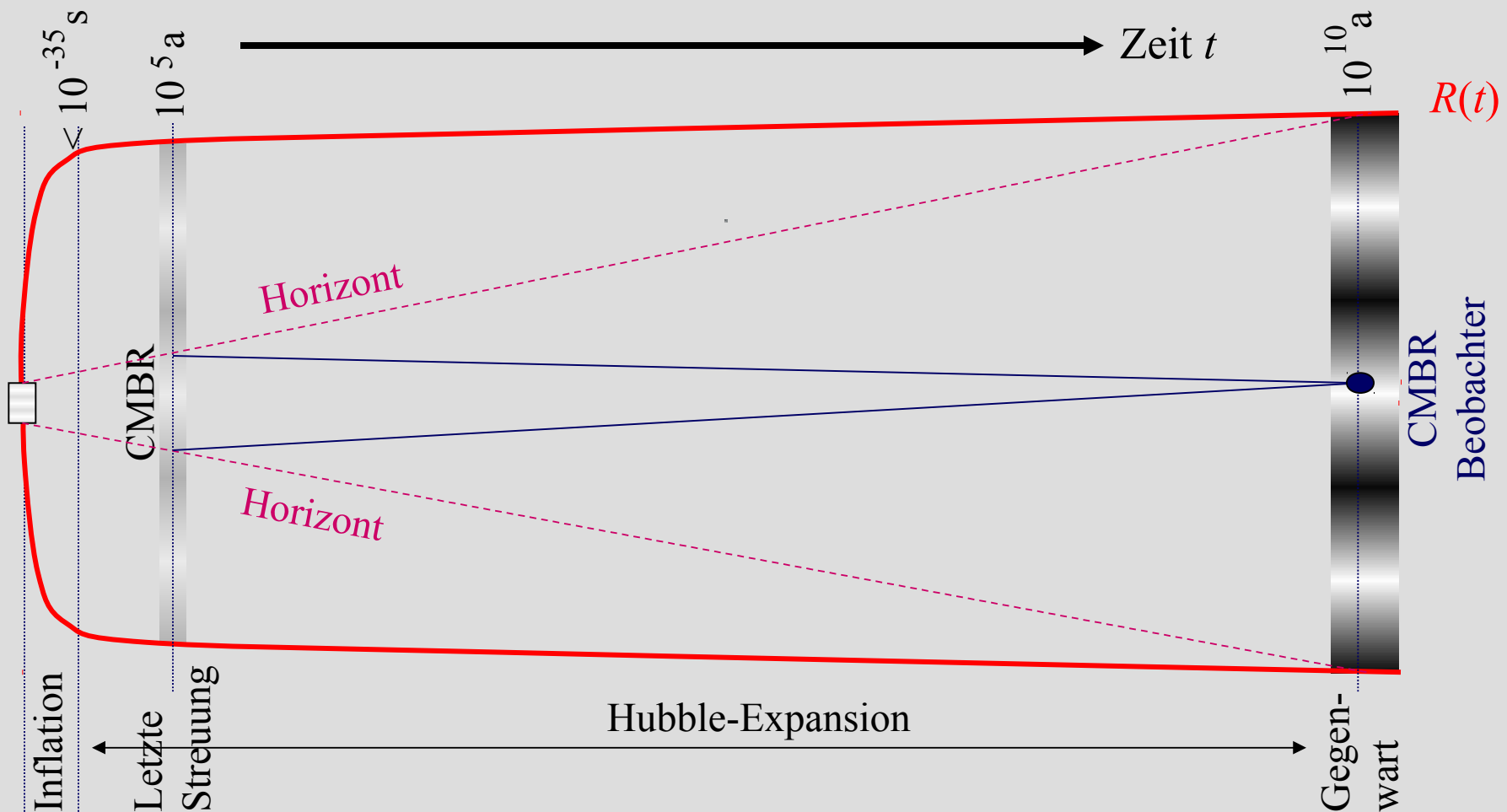
# 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

- Konsequenz:** 1. Beobachter sieht in CMB weit separierte Gebiete, die aber vor der Inflation kausal zusammen hingen



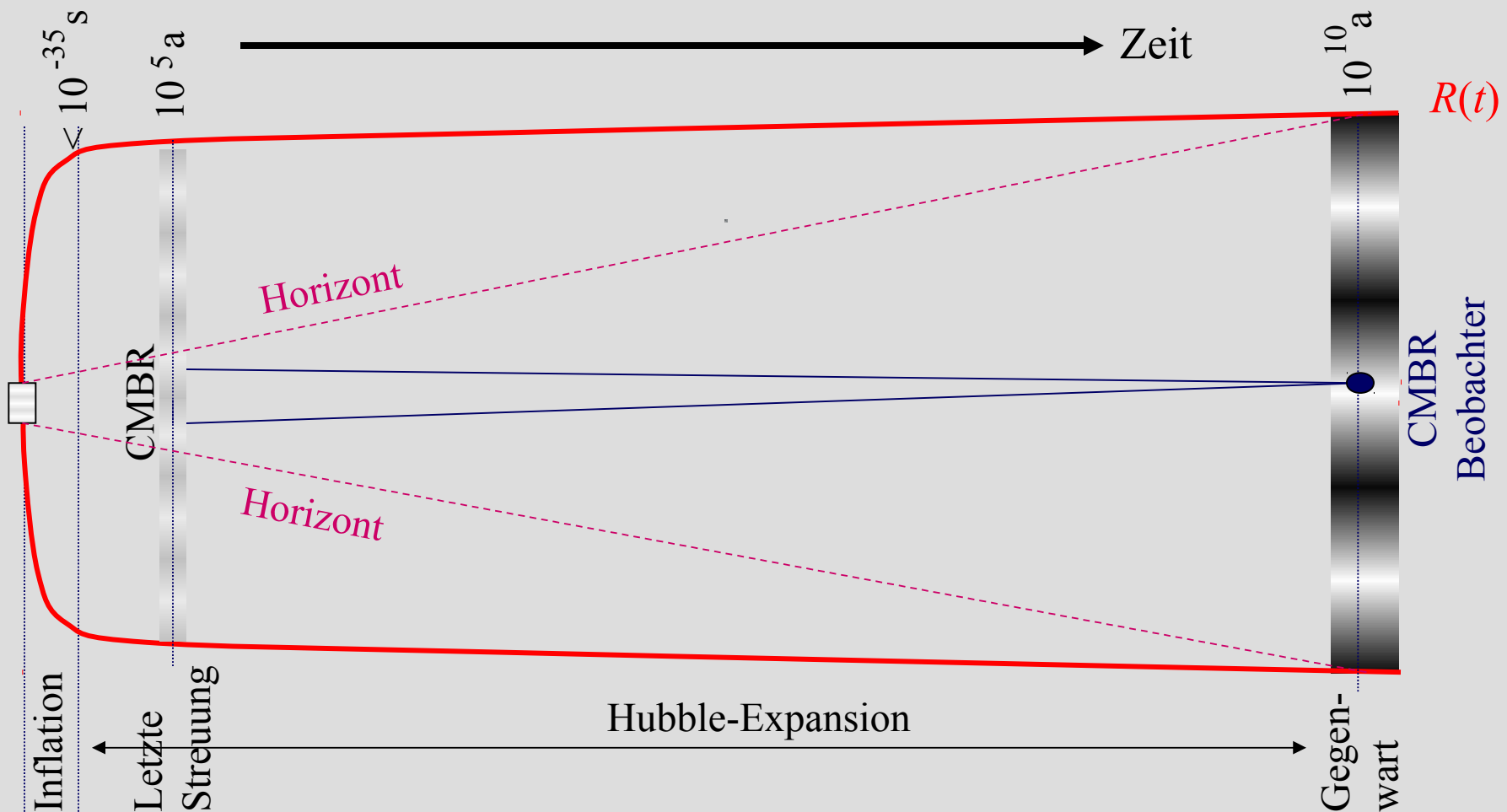
# 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

- Konsequenz:** 2. CMB-Horizont = größte mögliche (Wellen-)Länge einer Dichtekonzentration vor Beginn des Strukturwachstums  
= Fundamentalmode (Grundton) der Dichteschwankungen



# 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

- Konsequenz:** 3. außerdem gibt es Oberschwingungen;  
Theorie der Inflation: harmonische Reihe mit Freq.verhältnis 1:2:3:...





## 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

---

### Überlegung zu Strukturen bei $z = 1000$

1. Gegenläufige Prozesse:

- Dichteschwankungen in DM wirken gravitativ auf Baryonen
- Aber: Wegen enger Kopplung an Strahlungsfeld werden Dichteschwankungen der baryonischen Materie „sofort“ zerstört.

→ führt zu Oszillationen der Dichte

2. Verdichtung im Plasma erfolgt mit Schallgeschwindigkeit

3. Maximale Größe des Gebietes, das von  $t = 0$  bis  $t = 380\,000$  yr von einer Schallwelle durchquert werden konnte, ist begrenzt (wegen endlicher Schallgeschwindigkeit)

# 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

Schall-Horizont bei  $z = 1000$

Plasma durch Druck der Photonen dominiert

→ „relativistisches Gas“

$$v_{\text{schall}} = c / \sqrt{3}$$

→ max. Wellenlänge der Schallwellen:

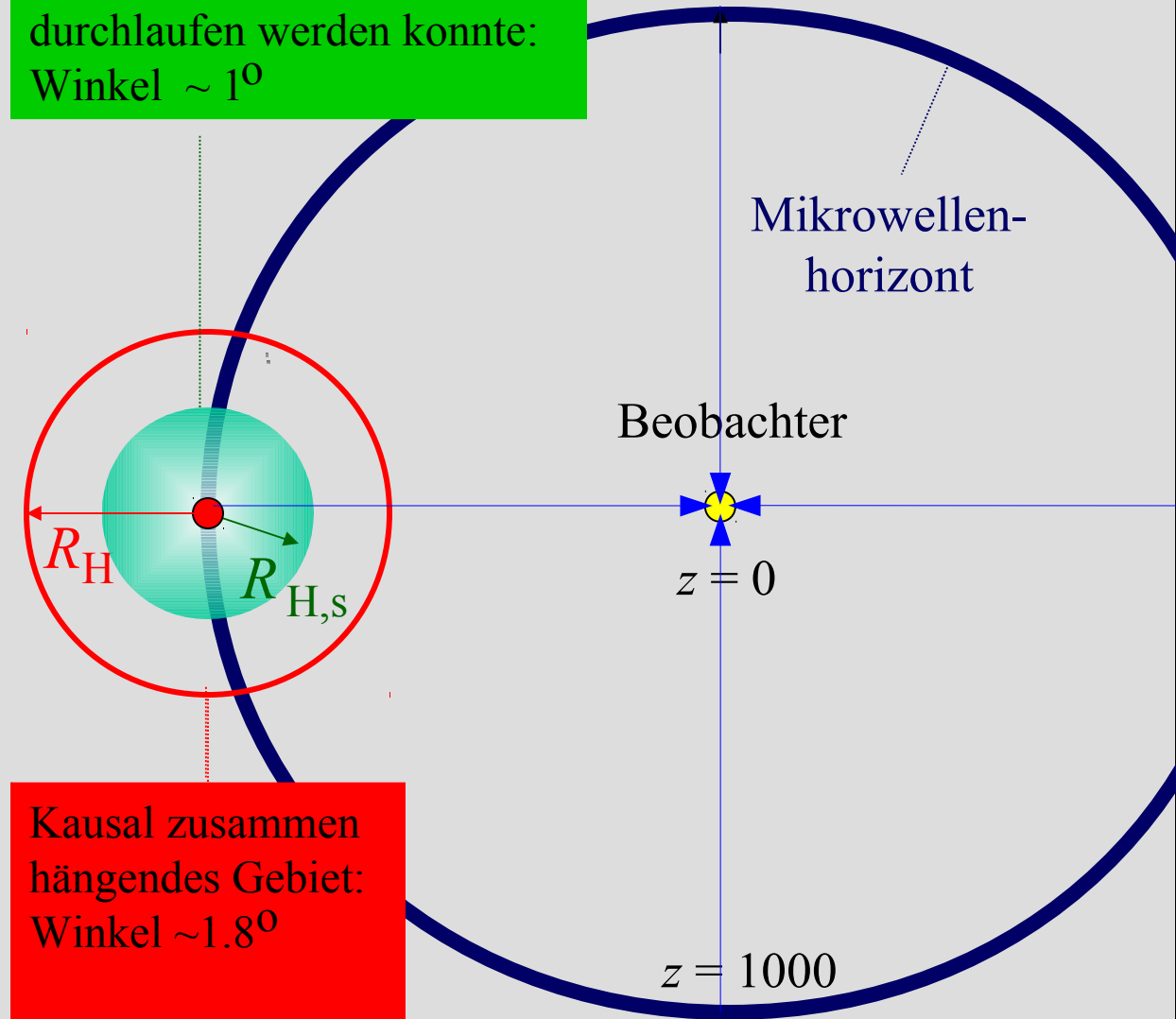
$$\lambda_{\text{max}} = R_H / \sqrt{3}$$

→  $R_{H,s} = R_H / \sqrt{3}$

„Schall-Horizont“ =  
Skala der räumlich  
größten Dichtestörung

Gebiet, das von Schallwellen durchlaufen werden konnte:  
Winkel  $\sim 1^\circ$

Kausal zusammenhängendes Gebiet:  
Winkel  $\sim 1.8^\circ$



## 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

---

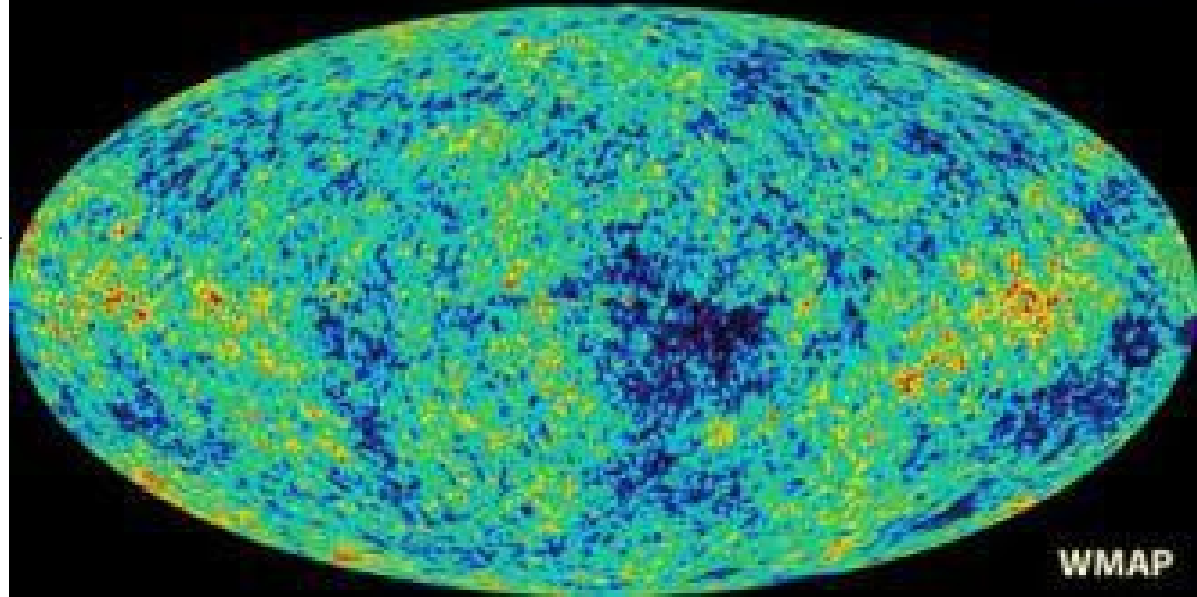
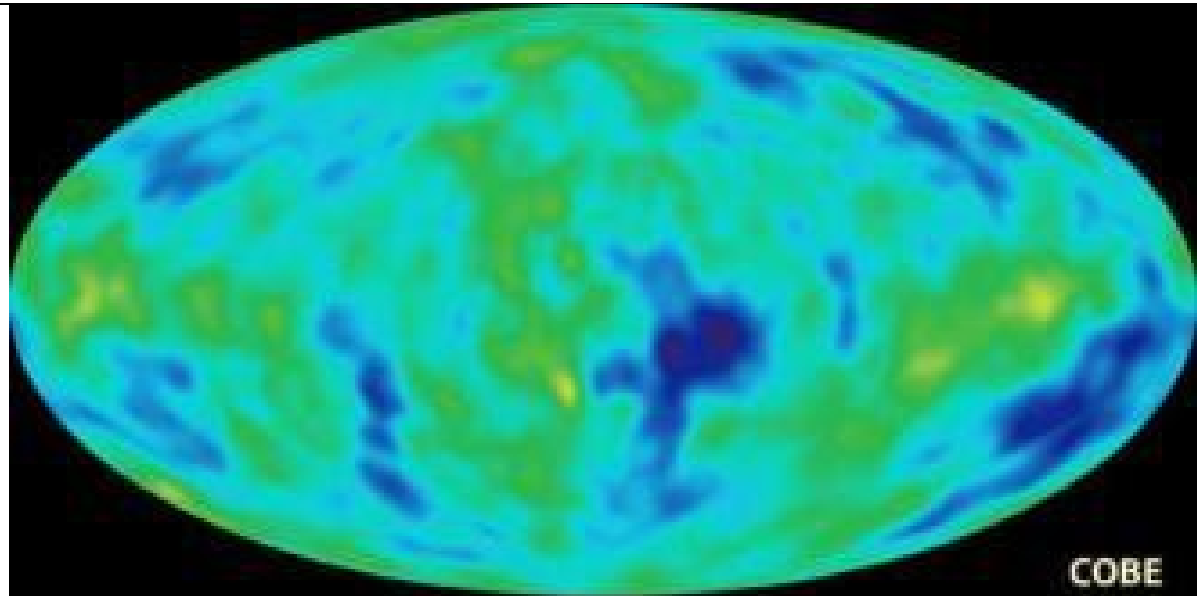
### Konsequenzen für erwartete Strukturen (Anisotropie) in CMB:

- ➔ Es gibt eine maximale Winkelskala  $\sim 1^\circ$  für Dichteunterschiede („Schall-Horizont“) und Oberschwingungen (kleinere Skalen).
- ➔ Den Dichtemaxima entsprechen  $T$ -Maxima.
- ➔ Dichteunterschiede machen sich als Maxima („Akkustische Peaks“) im Leistungsspektrum der  $T$ -Verteilung der CMBR bemerkbar.

## 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

Verbesserung des  
Auflösungsvermögens  
nach COBE:

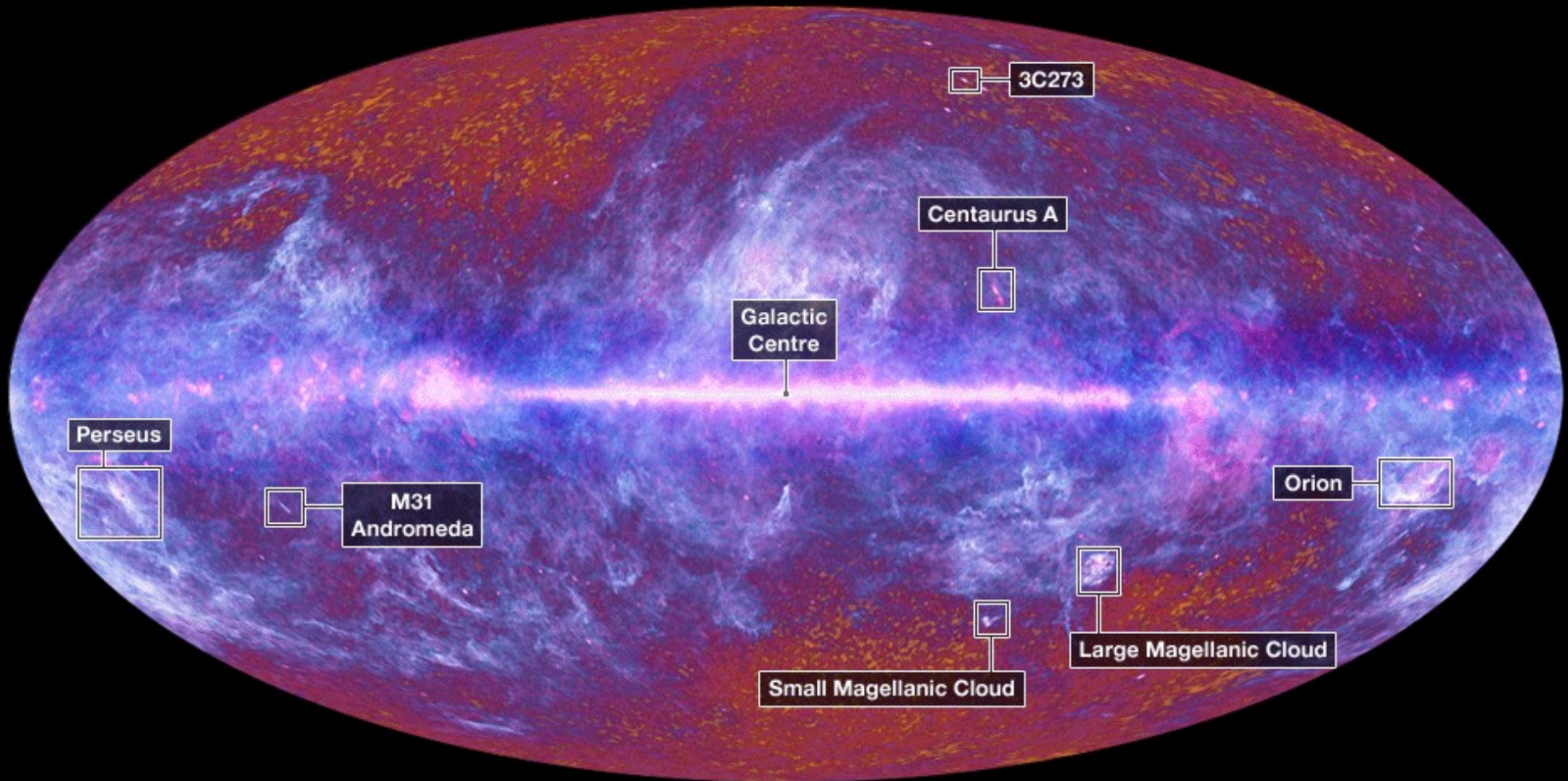
WMAP (2003) (\*)  
...und andere Experimente



(\*) WMAP  
= *Wilkinson Microwave  
Anisotropy Probe*  
(Kosten: 1 Md \$)

# 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

PLANCK



ESA, HFI AND LFI CONSORTIA

Verbesserung des Auflösungsvermögens nach COBE:

PLANCK (Start 2009, erste Karte 2010, Ergebnisse: ~2012)

# 7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

Ergebnis

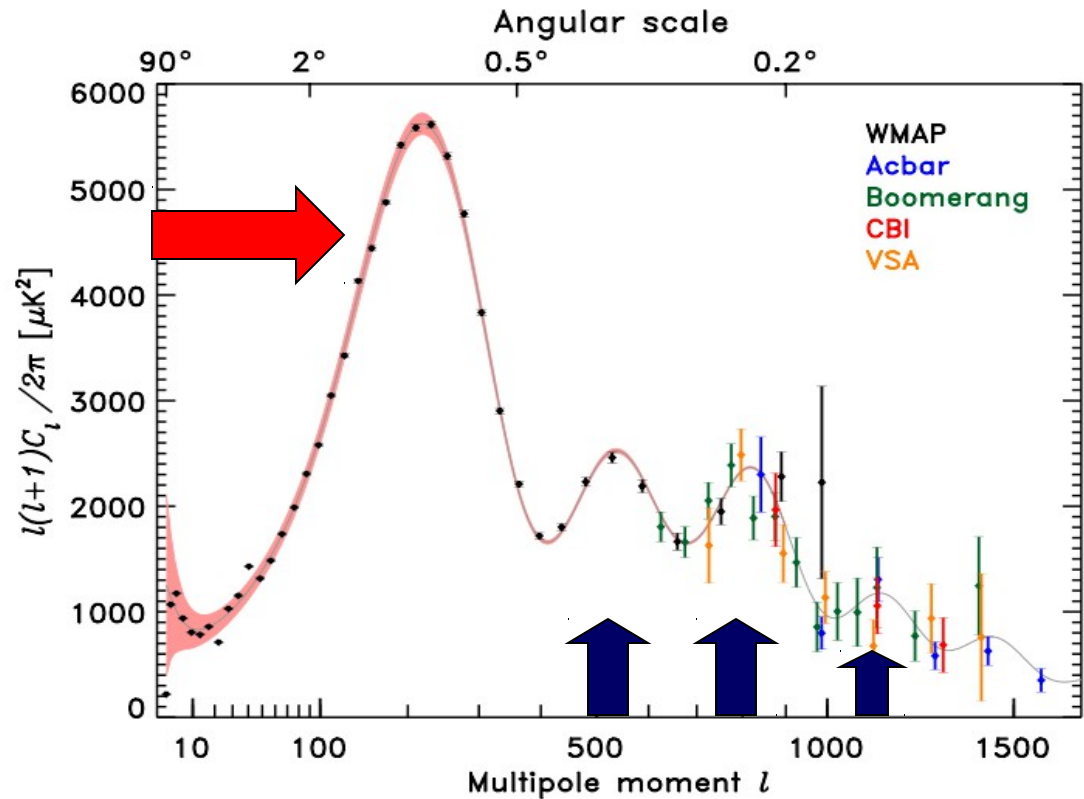
Leistungsspektrum:  $T$  - Fluktuationen auf Skala  $360^\circ/2l$

## Grundschiwingung

Wellenlänge der Grundwelle, die Plasma verdichtet oder verdünnt (=Schall-Horizont) entspricht  $0.6^\circ$

$\sim 1$  Mpc bei  $z \sim 1000$  für „kritisches“ (flaches) Universum

**Wichtig:** Winkelskalen und Amplitudenverhältnisse der Peaks enthalten Informationen über kosmologische Parameter



Oberschwingungen

# 7.6 CMB und kosmologische Parameter

---

## Exkurs: kosmologische Parameter

$H_0$  : Hubble-Konstante

$\Omega_M = \rho_{M,0} / \rho_{\text{crit}}$  : relative Energiedichte der Materie (baryonisch und DM)

$\Omega_b = \rho_{b,0} / \rho_{\text{crit}}$  : relative Energiedichte der baryonischen Materie

$\Omega_\Lambda = \rho_{\Lambda,0} / \rho_{\text{crit}}$  : relative Dichte der Dunklen Energie

$\Omega = \rho_0 / \rho_{\text{crit}} = \Omega_M + \Omega_\Lambda$  :: relative Gesamtdichte

Wobei  $\rho = \rho_{\text{crit}}$  (kritische Dichte) bzw.  $\Omega = 1$  dem Grenzfall eines „flachen“ Universums (Raumkrümmung = Null) entspricht

---

Strukturen im CMB erfordern:

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

$$\Omega_b = 0.04$$

$$H_0 = 67.3 \text{ km/ s Mpc}$$



# 7.6 CMB und kosmologische Parameter

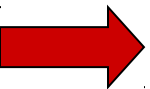
Zusammenfassung der drei wichtigsten „kosmologischen Tests“

CMB:  $\Omega_{\Lambda} = 1 - \Omega_M$

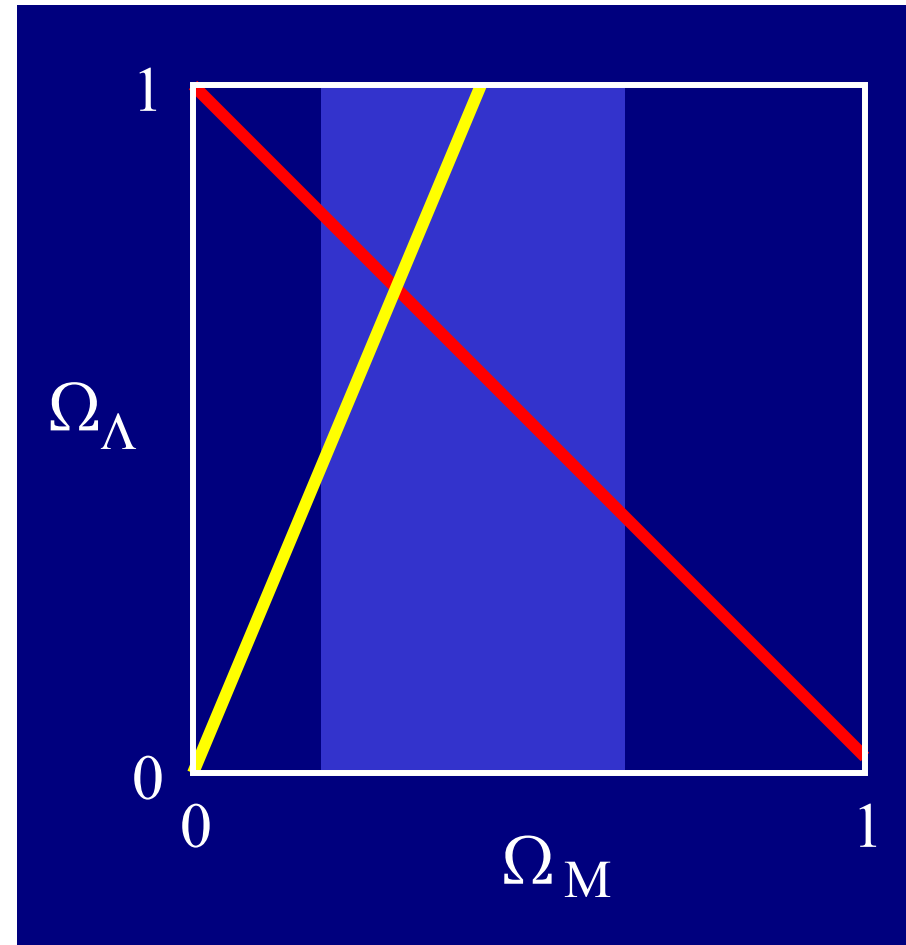
Galaxienhaufen:  $\Omega_M = 0.2 \dots 0.65$

Supernovae Ia:  $\Omega_{\Lambda} = 0.7 (\Omega_M + \Omega_{\Lambda})$   
 $\Omega_{\Lambda} = 2.3 \Omega_M$

... liefern konsistente Ergebnisse



**Parameter des kosmologischen „Standardmodells“**



# 7.6 CMB und kosmologische Parameter

Zusammenfassung der drei wichtigsten „kosmologischen Tests“

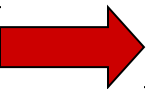
CMB:  $\Omega_{\Lambda} = 1 - \Omega_M$

Galaxienhaufen:  $\Omega_M = 0.2 \dots 0.65$

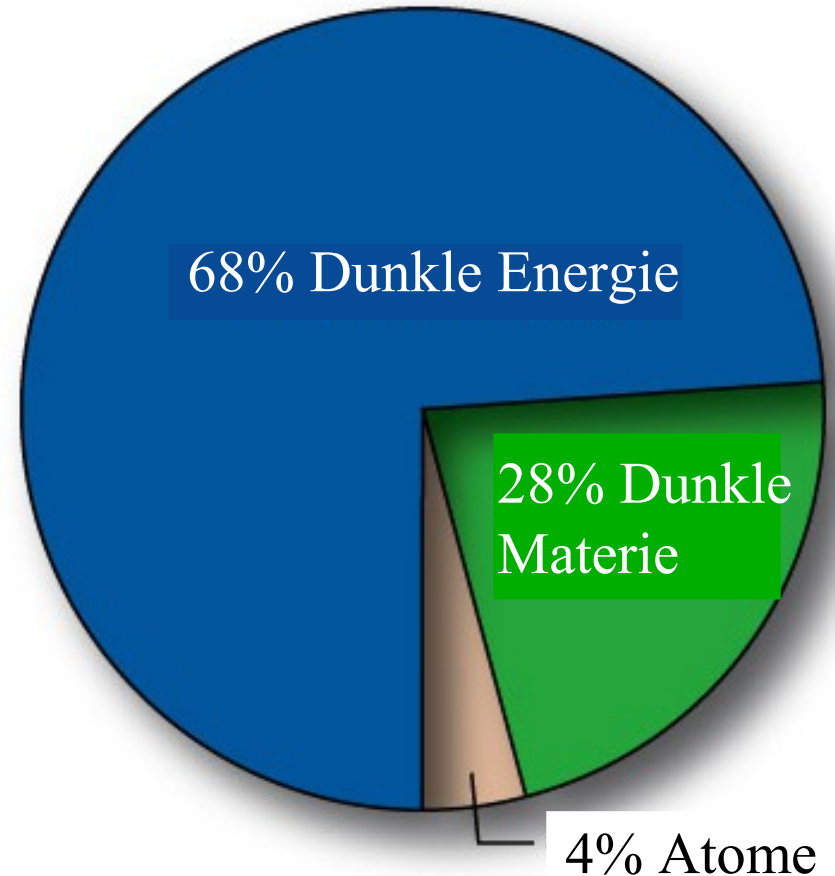
Supernovae Ia:  $\Omega_{\Lambda} = 0.7 (\Omega_M + \Omega_{\Lambda})$

$\Omega_{\Lambda} = 2.3 \Omega_M$

... liefern konsistente Ergebnisse



**Parameter (\*) des kosmologischen „Standardmodells“**



(\*) Bemerkung: Es gibt noch weitere (insgesamt 6) Parameter des Standardmodells

## 7.7 Zusammenfassung

---

- CMB bestätigt Modell der heißen kosmischen Frühphase
- CMB auf großen Skalen isotrop, auf kleinen Skalen ( $\leq 1^\circ$ ) strukturiert
- Strukturen in CMB (d.h.  $T$ -Fluktuationen) beschreiben Dichte-inhomogenitäten zum Zeitpunkt der Rekombination ( $z \sim 1000$ )  
= „Keime“ der heutigen großräumigen Struktur
- Leistungsspektrum der  $T$ -Fluktuationen ermöglicht Test kosmologischer Modelle (Bestimmung kosmologischer Parameter) ... bestätigt kosmologisches Standardmodell ( $\Lambda$ CDM)

## 8. Galaxienentstehung

---

- „Klassisches“ Szenario der Entstehung des MSS
- Grundproblem der Galaxienentstehung
- Beobachtung von Galaxien im jungen Universum
- Wann ging das Licht an im Universum?

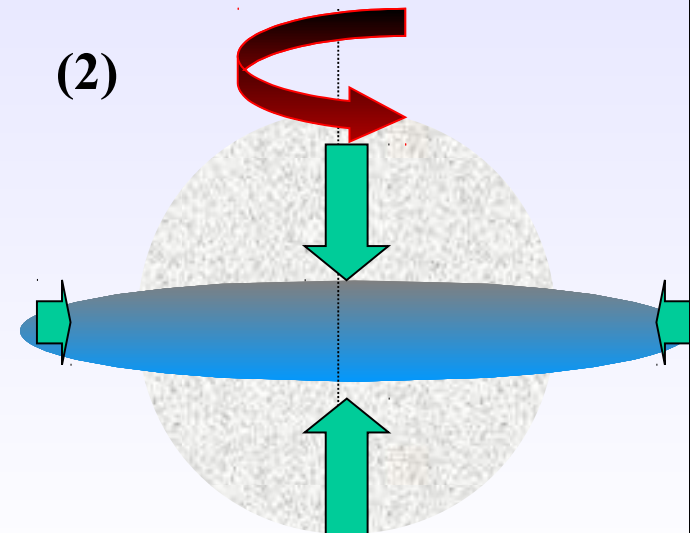
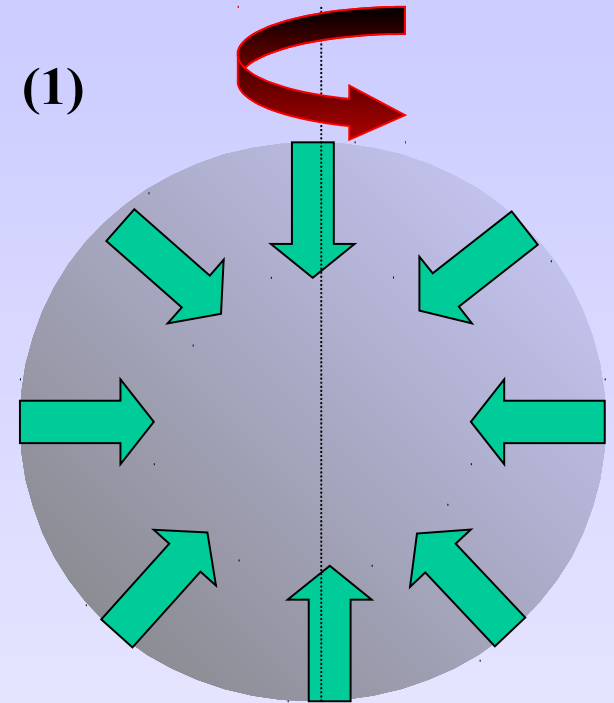
# 8.1 „Klassisches“ Szenario

## Erstes, einfaches Modell (\*):

(basierend auf Daten zu Kinematik und Metallgehalt der nahen Sterne)

- Halo in kurzer Phase ( $< 2 \cdot 10^8$  yr) entstanden (= protogalaktischer *Frei-Fall-Kollaps*)
- Protogalaxie war etwa sphärisch
- zuerst (1) nahezu kugelsymmetrischer Kollaps
- dann (2) zunehmende Fliehkraft  $\rightarrow$  flaches Untersystem (Scheibe)

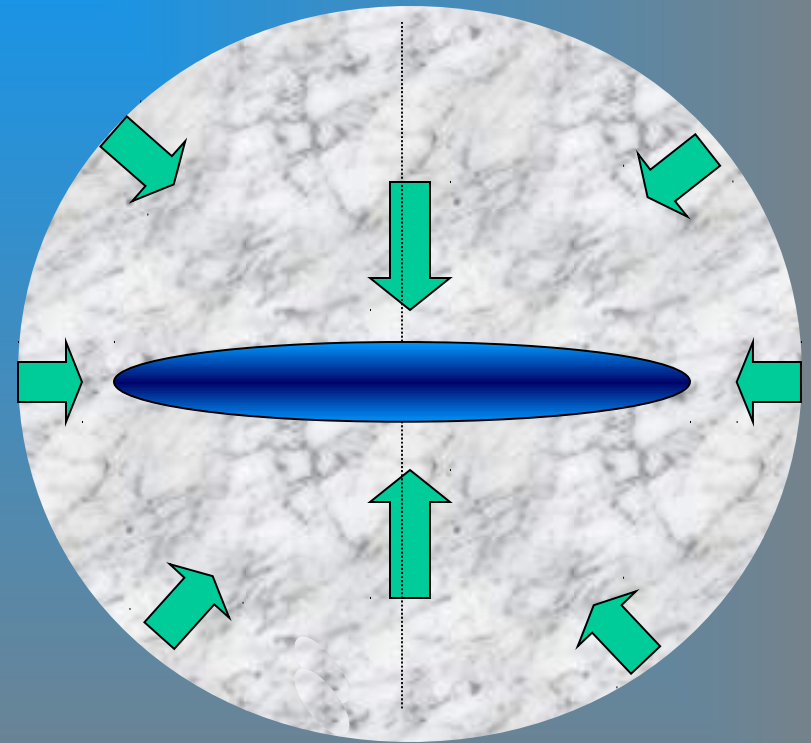
(\* ) Eggen, Lynden-Bell & Sandage (1962)



# 8.1 „Klassisches“ Szenario

## Spätere Modifikationen

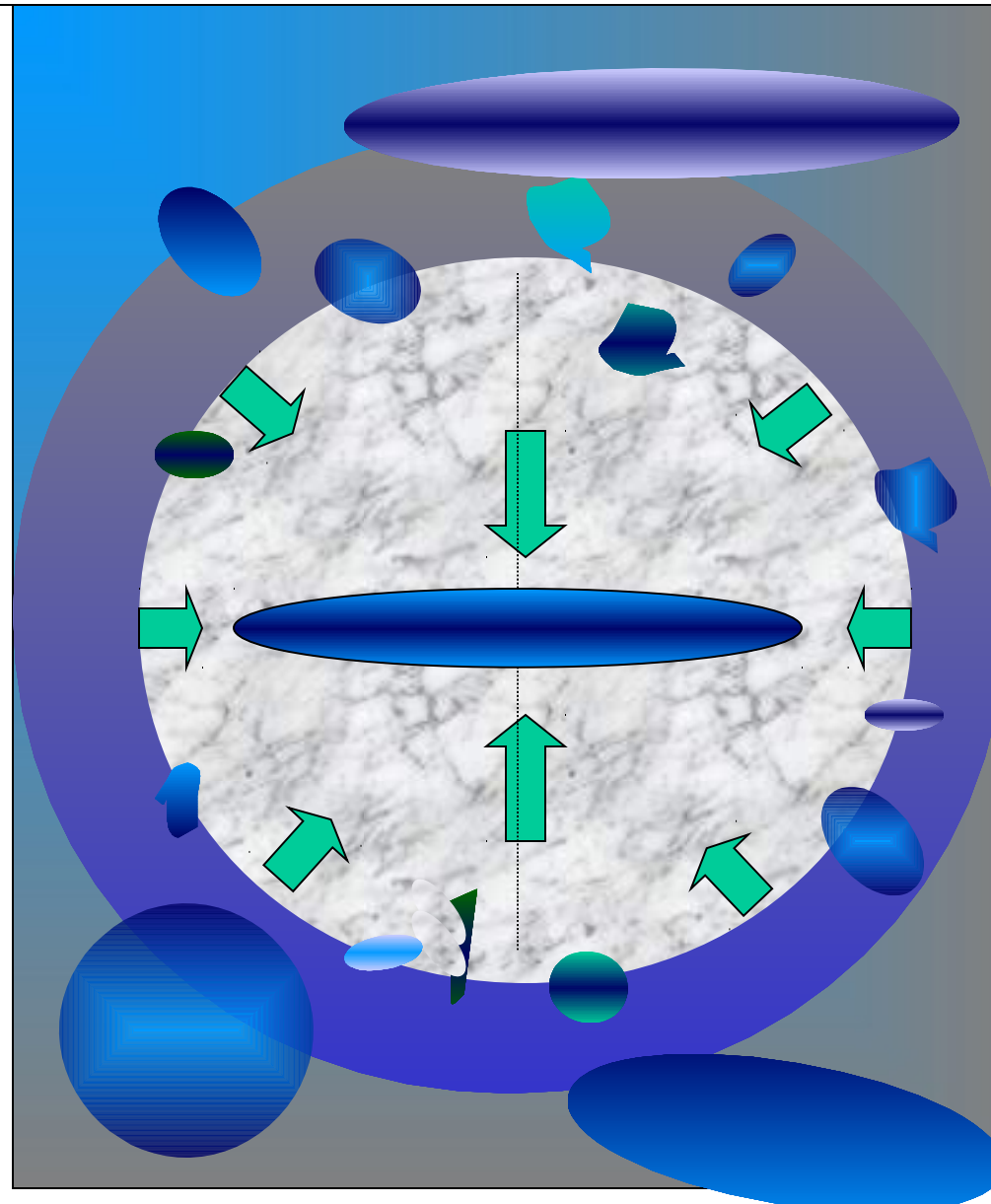
1. Innere Struktur (Wolken) kann Kollaps verzögern (dissipative Kontraktion anstatt freier Fall)



# 8.1 „Klassisches“ Szenario

## Spätere Modifikationen

1. Innere Struktur (Wolken) kann Kollaps verzögern (dissipative Kontraktion anstatt freier Fall)
2. Einfang von Zwerggalaxien („Kannibalismus“; Bedeutung von *Galaxien-merging*)



## 8.2 Grundprobleme der Galaxienentstehung

---

**Grundidee:** Statistische Fluktuationen in der Materieverteilung führen zum Kollaps von Protogalaxien (= Halos)

- Probleme:**
1. Im **statischen Medium** wachsen Fluktuationen exponentiell mit der Zeit an (*Jeans*-Instabilität).  
**Aber:** im **expandierenden Medium** (kosmische Expansion) wachsen Fluktuationen langsamer (maximal linear mit  $t$ )  
  
→ Keime der Strukturbildung müssen sich bereits sehr früh herausgebildet haben
  2. **Aber:** Vor Rekombination bei  $z = 1000$   
starke Kopplung Materie -Strahlung  
→ Dichtefluktuationen in baryonischer Materie wurden „sofort“ durch Strahlungsfeld zerstört



## 8.2 Grundprobleme der Galaxienentstehung

---

Gegenwärtiger Dichtekontrast Galaxien-Umgebung erfordert anfänglichen Dichtekontrast  $\delta\rho/\rho = 1/1000$  bei  $z = 1000$

→ erwarteter Dichtekontrast in Hintergrundstrahlung  $\sim 1/1000$

Aber: Beobachtung liefert lediglich  $1/100000$  !

**→ Offenbar keine Galaxienbildung möglich!  
Oder???**

**Doch: Wegen DM!**

- Dichtefluktuationen können bereits vor der Rekombination anwachsen, nämlich in der Dunklen Materie ( nicht an Strahlung gekoppelt)!
- Baryonische Materie reagiert darauf erst nach Rekombination

## 8.3 Galaxien im jungen Universum (Beobachtung)

---

Prinzip: Untersuchung von Galaxien bei großem  $z$

Methoden:

1. Schwache Galaxien in sehr tiefen Aufnahmen
2. Quasare
3. Gamma Ray Bursts
4. Verschwinden der 21cm-wegen Linie HI-Re-Ionisation

## 8.3.1 Schwache Galaxien im HUDF

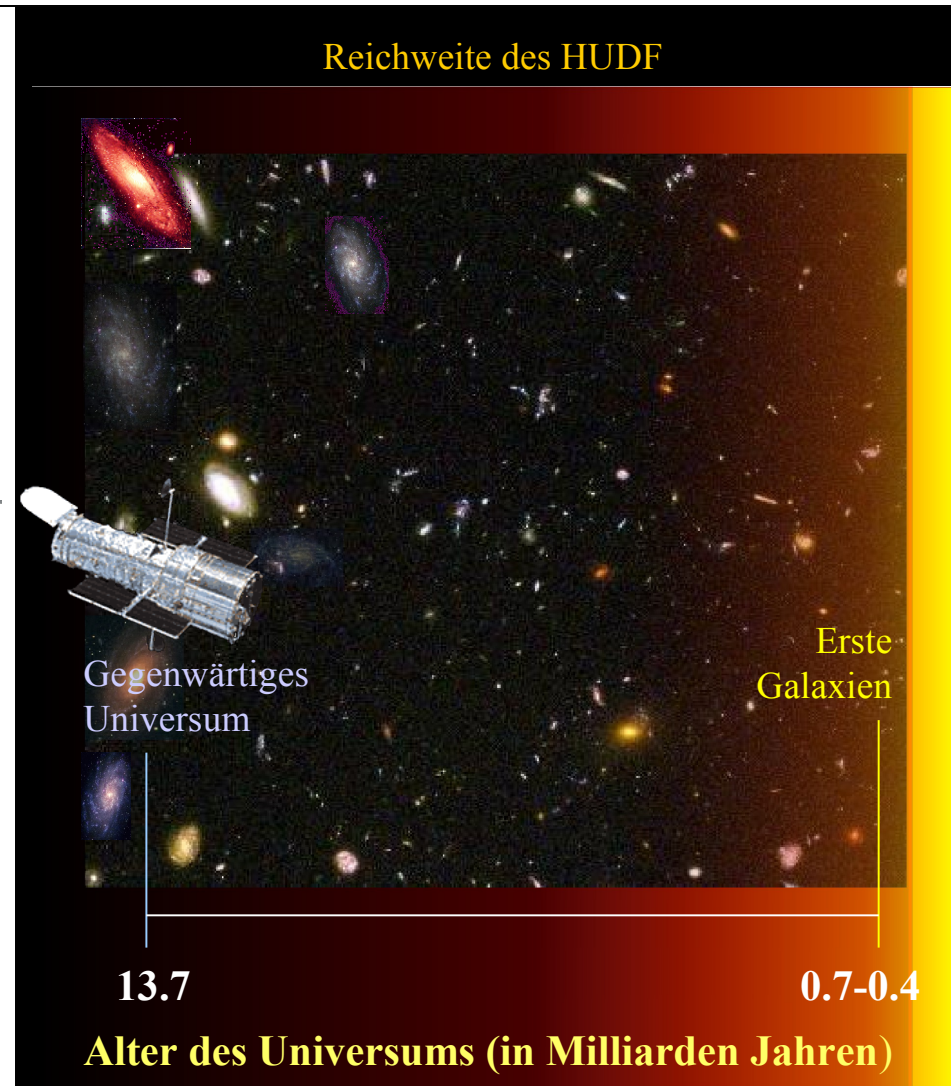
### Problem:

Leuchtkraftfunktion der Galaxien  
→ Die meisten nahen Galaxien sind leuchtschwach.

→ Nur ein sehr kleiner Anteil der schwachen Galaxien im HUDF befindet sich bei großem  $z$ .

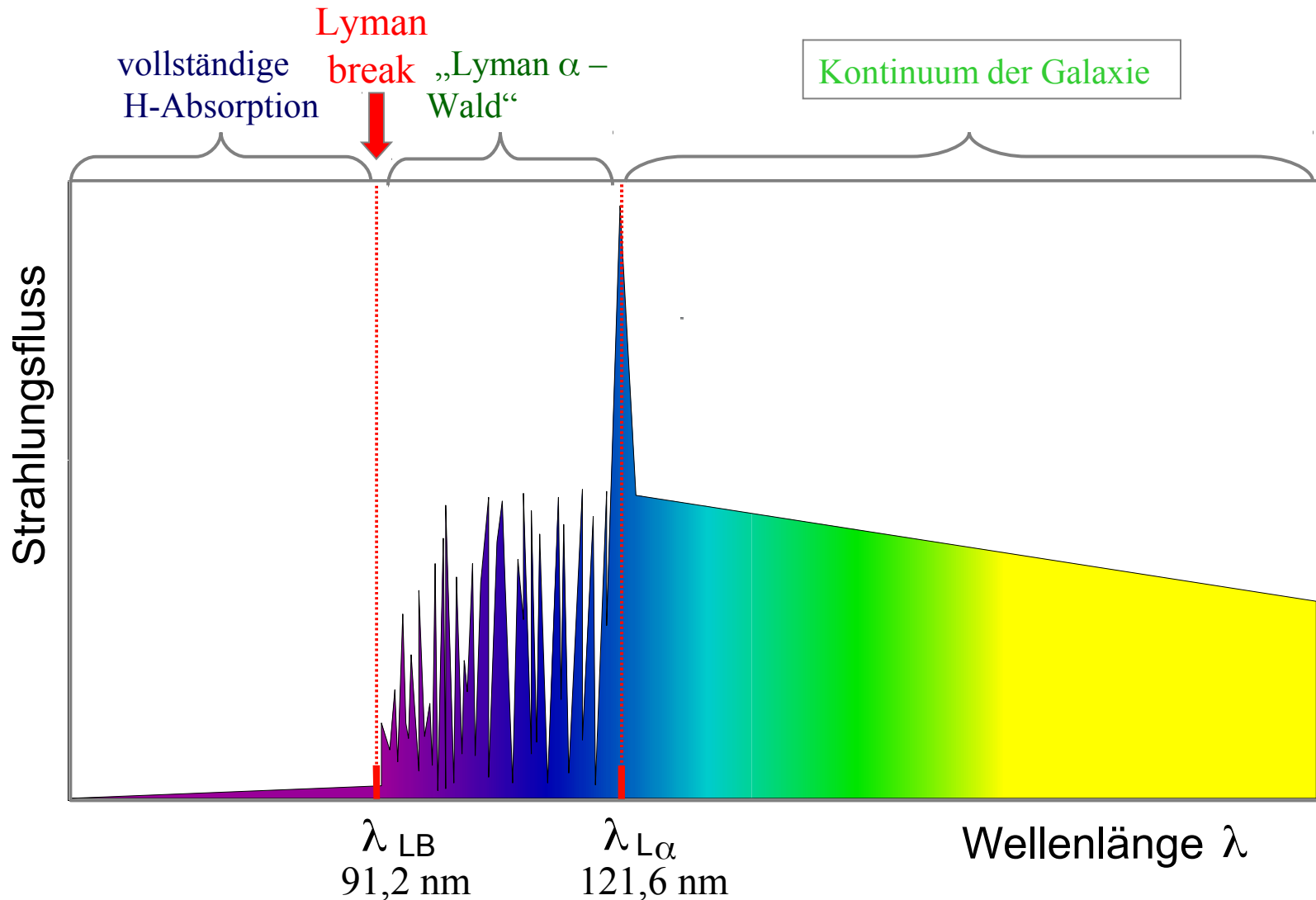
→ Bestätigung erfordert Spektroskopie an Großteleskopen (zeitaufwändig!)

→ Zusätzliche Selektionskriterien erforderlich



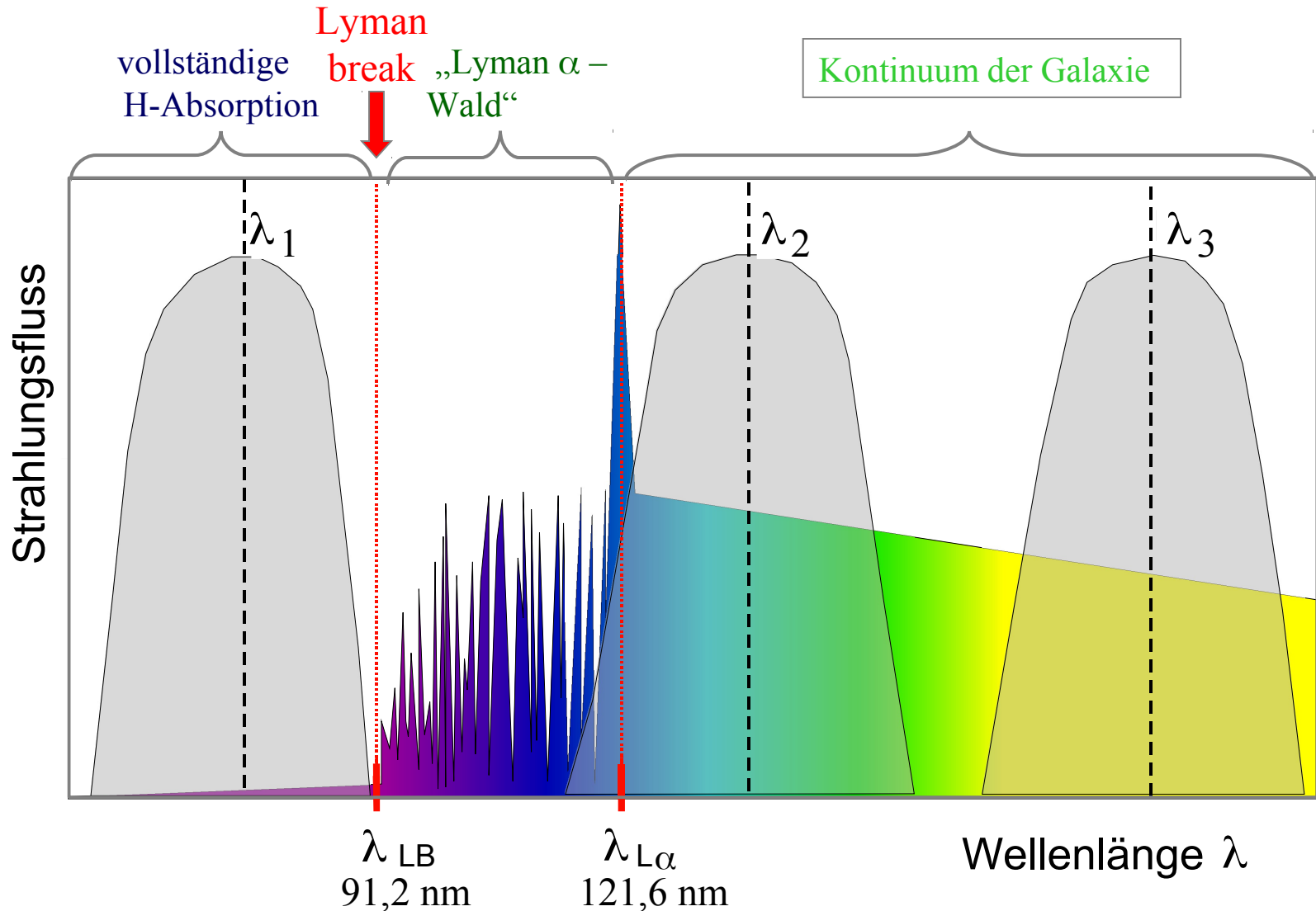
## 8.3.1 Schwache Galaxien im HUDF

Suche nach Galaxien, die im kurzwelligen Filterbereich herausfallen (*dropout galaxies*)

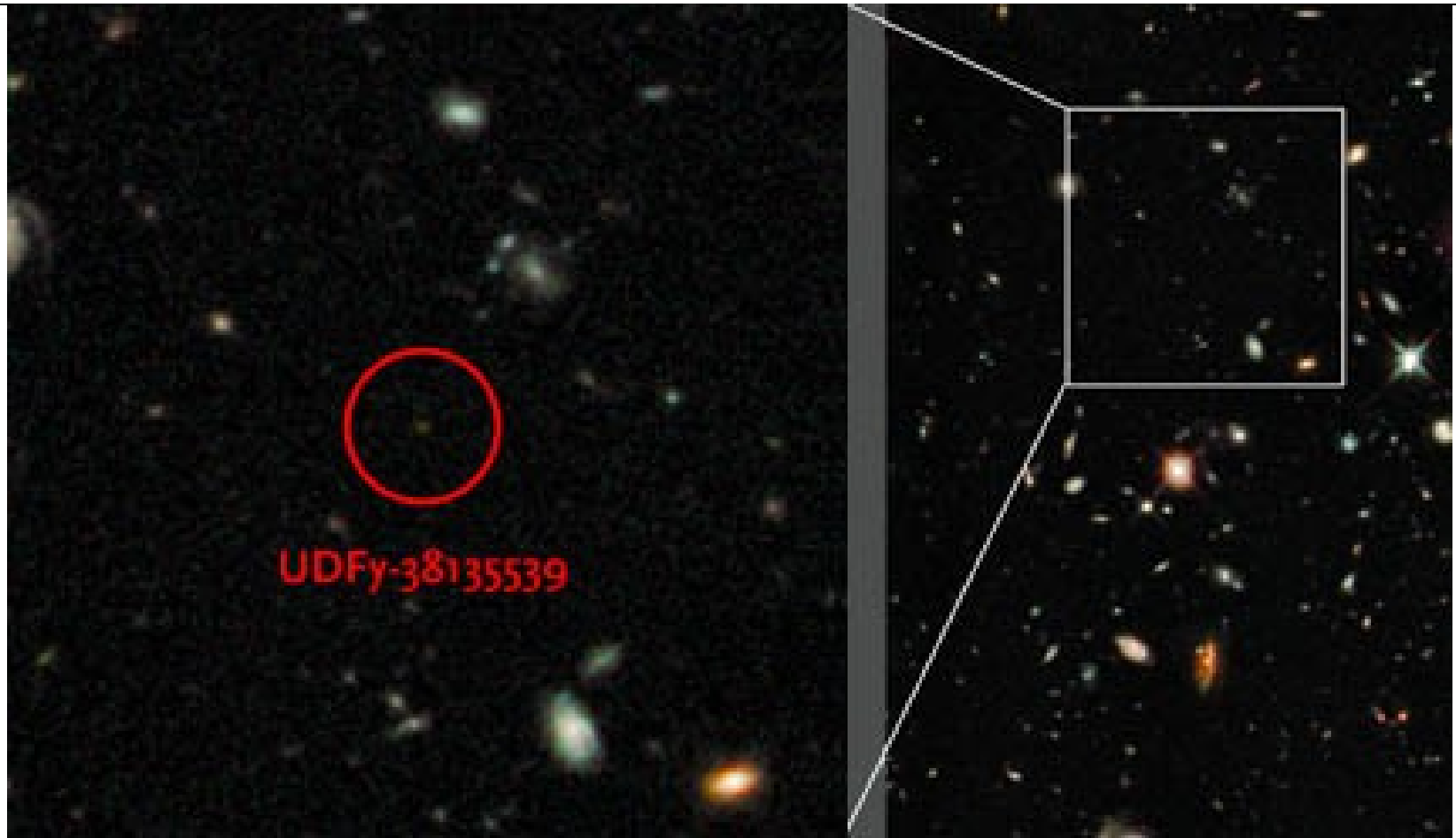


## 8.3.1 Schwache Galaxien im HUDF

Suche nach Galaxien, die im kurzwelligen Filterbereich herausfallen (*dropout galaxies*)



## 8.3.1 Schwache Galaxien im HUDF



Beispiel für Galaxie in großer Entfernung: UDFy-38135539  
( $z = 8.6$ , 0.6 Gyr nach BB)

## 8.3.1 Schwache Galaxien im HUDF

### Kosmische Entwicklung der Sternbildungsdicht

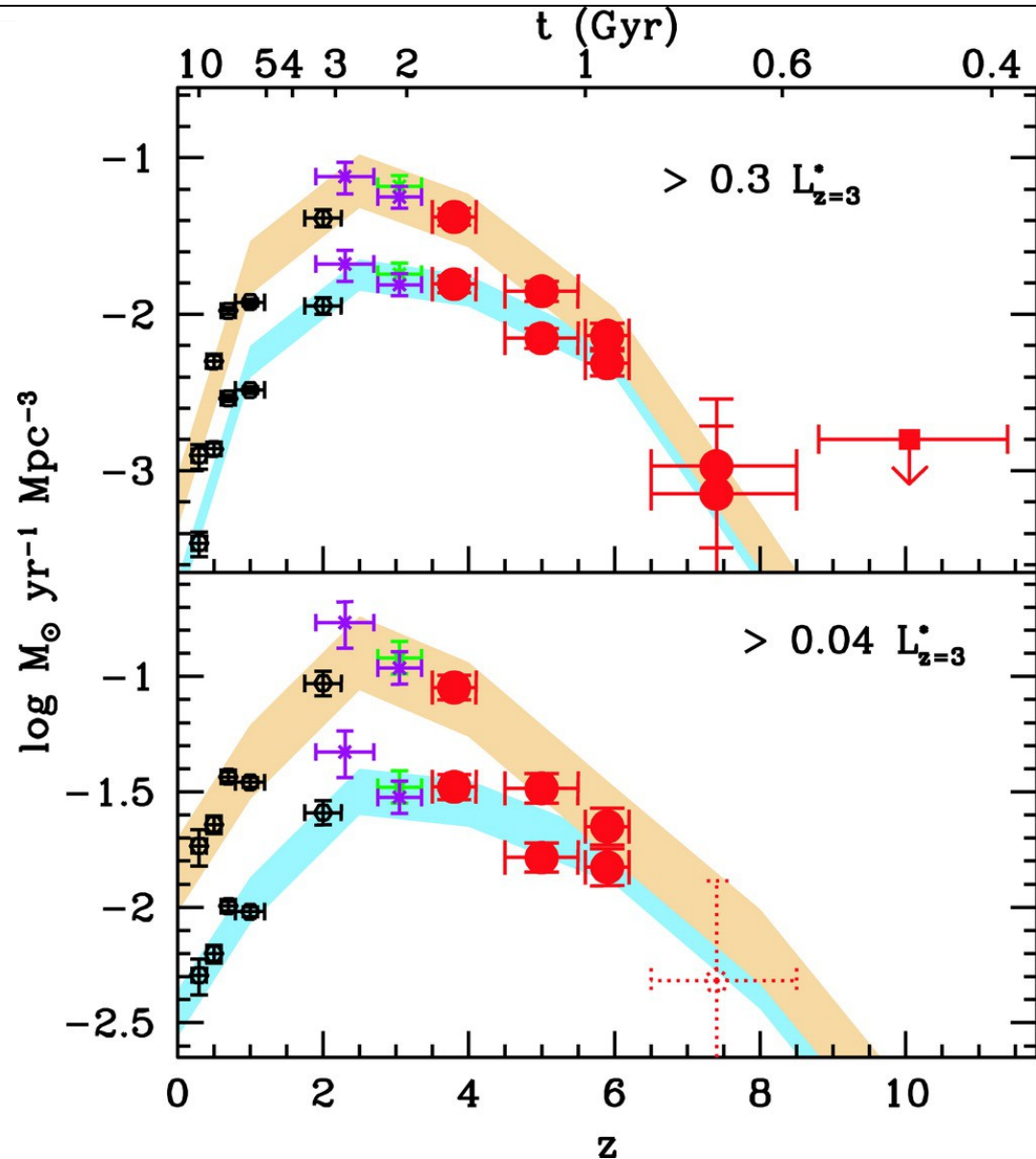
aus Dropout-Galaxien in  
HUDF u.a. tiefen Feldern

( $L^*$  Schechter-Leuchtkraft  
bei  $z=3$ )

**Rot:** Korrektur bzgl.  
Staubextinktion

**Blau:** keine Korrektur bzgl.  
Staubextinktion

(Bouwens et al. 2007)

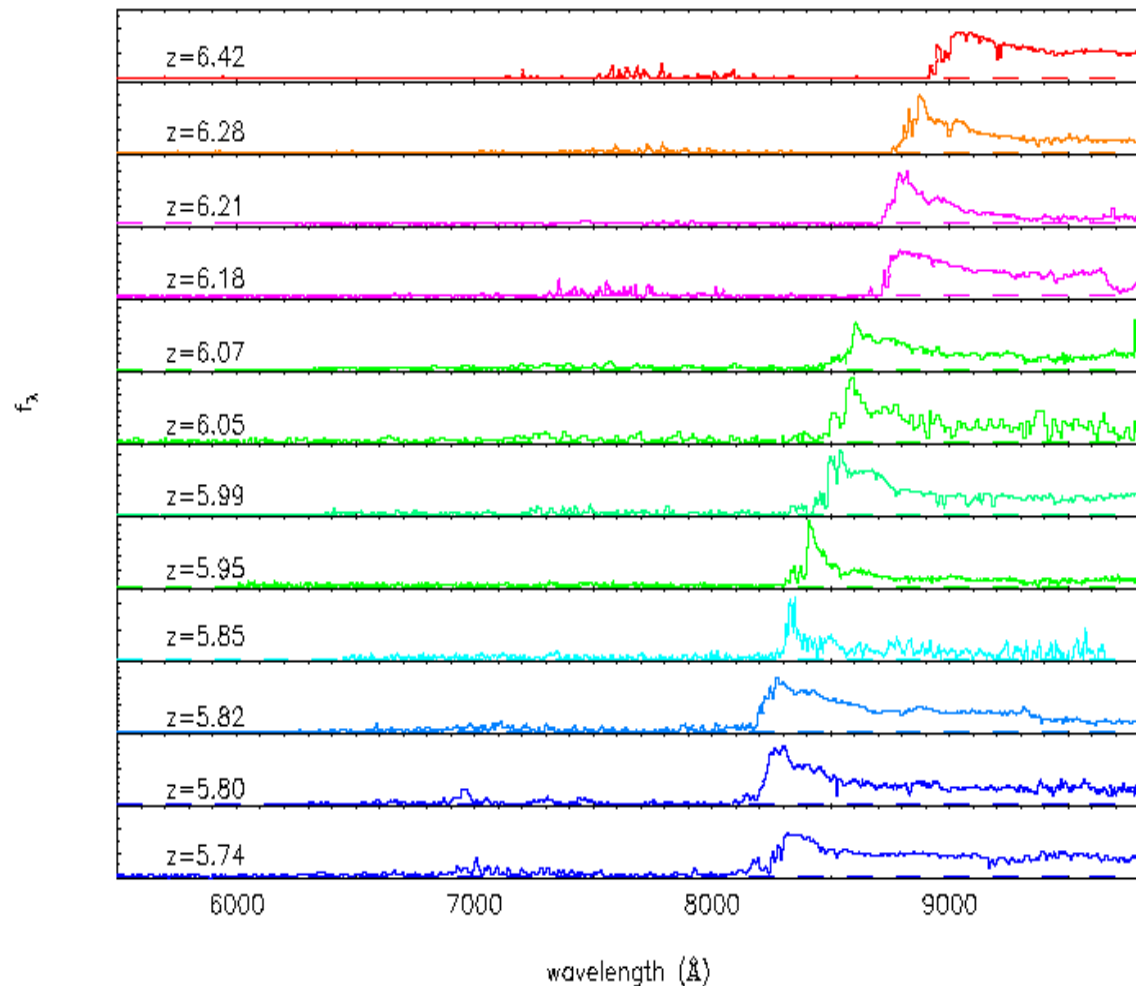


## 8.3.2 Quasare bei großem $z$

Quasare relativ einfach anhand ihrer Farbe (abhängig von  $z$ ) zu finden

Optische Suchmethoden reichen nur bis  $z \sim 6.5$   
(Ly $\alpha$  bei 950 nm!)

→ Suche im NIR erforderlich  
(z.Z. im Gang)

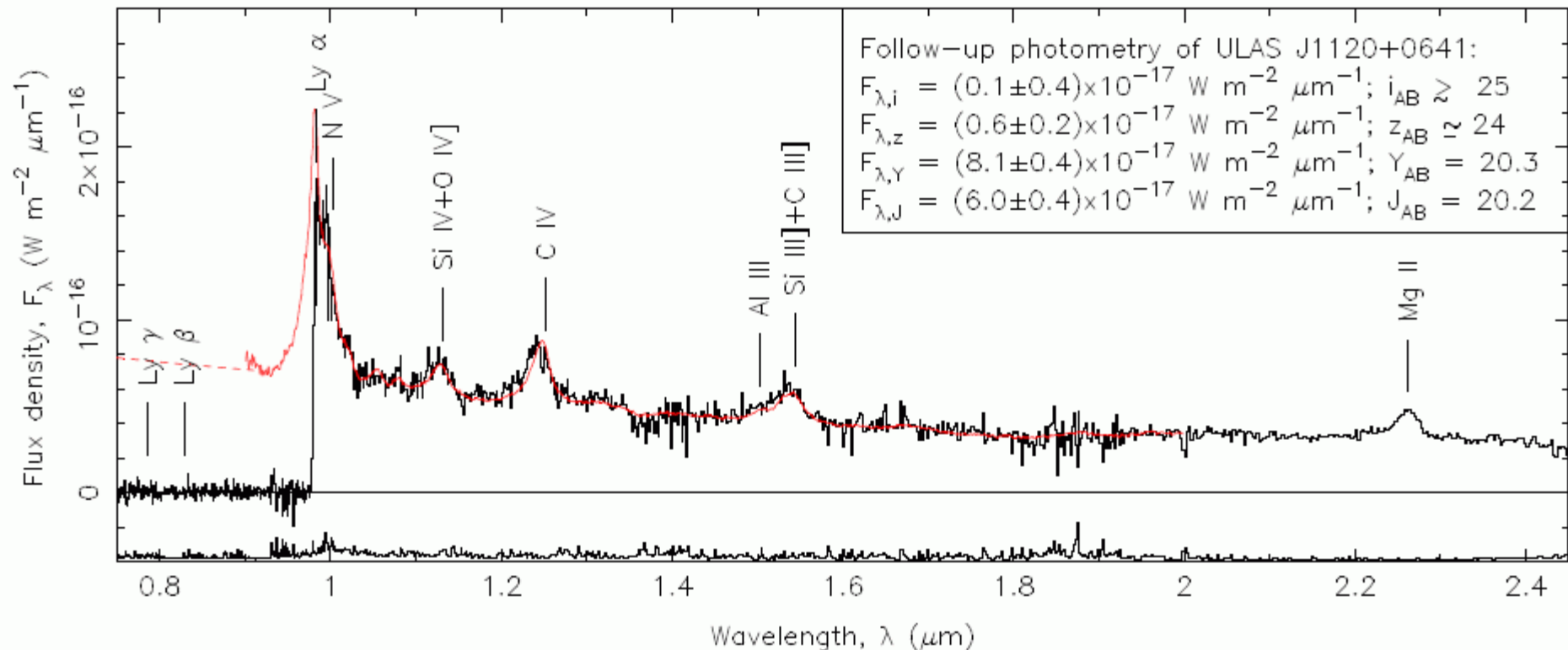




## 8.3.2 Quasare bei großem $z$

Beispiel für Quasar in großer Entfernung:

ULAS J1120+0641 mit  $z = 7.085$   
(Matlock et al. 2011)



## 8.3.2 Quasare bei großem $z$

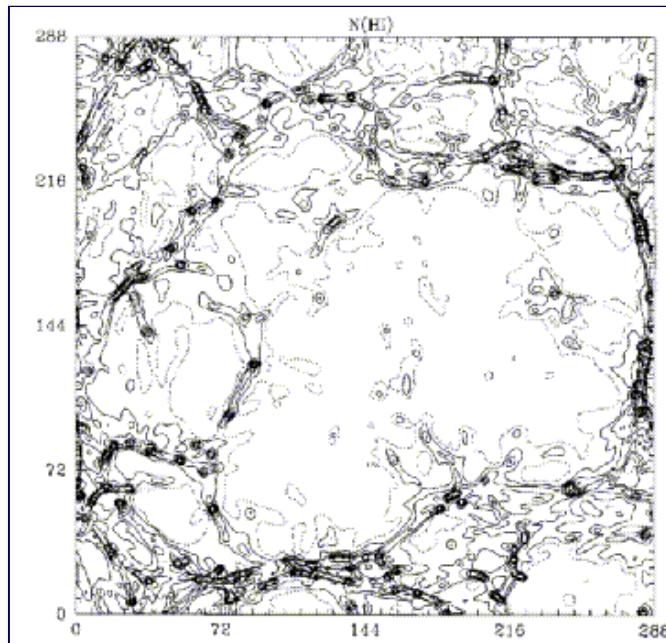
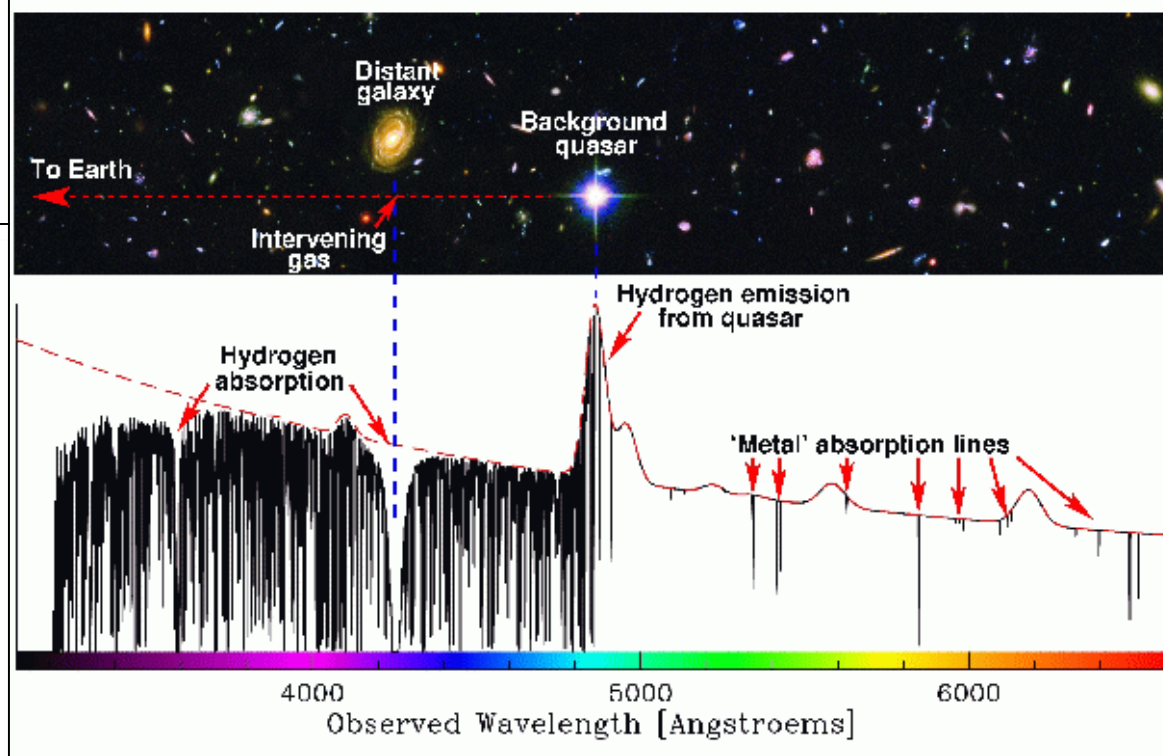
### Quasare als Tiefensonden:

Absorption durch Galaxien auf Sichtlinie (“Metall”-Linien)

Absorption durch HI-Gas (vor allem Ly  $\alpha$ -Linie)

→ Vielzahl von Abs.linien (“Lyman  $\alpha$ -Wald”)

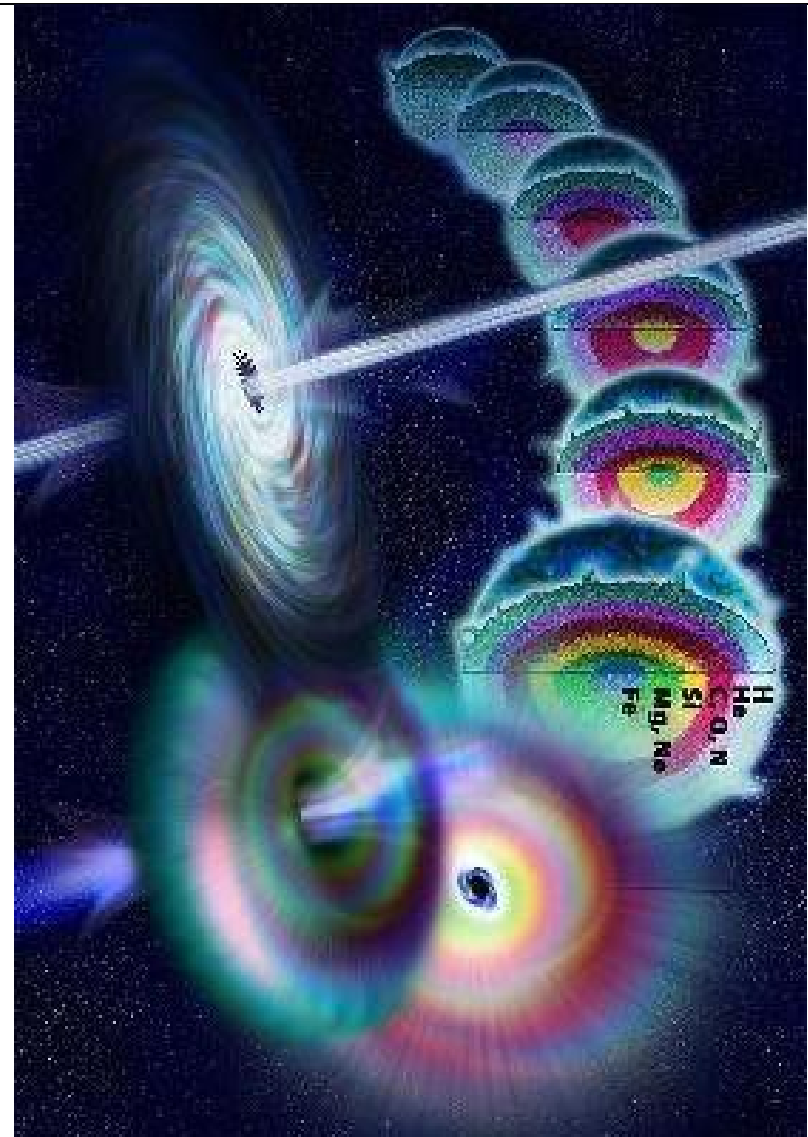
→ Großskalige Struktur des IGM aus Quasar-Spektren



Simulation räumliche Verteilung HI bei  $z=4$

## 8.3.3 Gamma Ray Bursts bei großen $z$

- kurzzeitiger (s bis min) Ausbruch von Strahlung im Gamma-Bereich
- Gesamtenergie ähnlich Supernova, aber: bei SN wird meiste Energie in Form von Neutrinos freigesetzt
- Modell:
  - Kollaps eines massereichen ( $>20 m_{\odot}$ ) Sterns in Hypernova
  - schnell rotierendes SL
  - äußere Schichten fallen auf SL und bilden Akkretionsscheibe
  - Entstehung von 2 Jets



Credit: US National Science Foundation

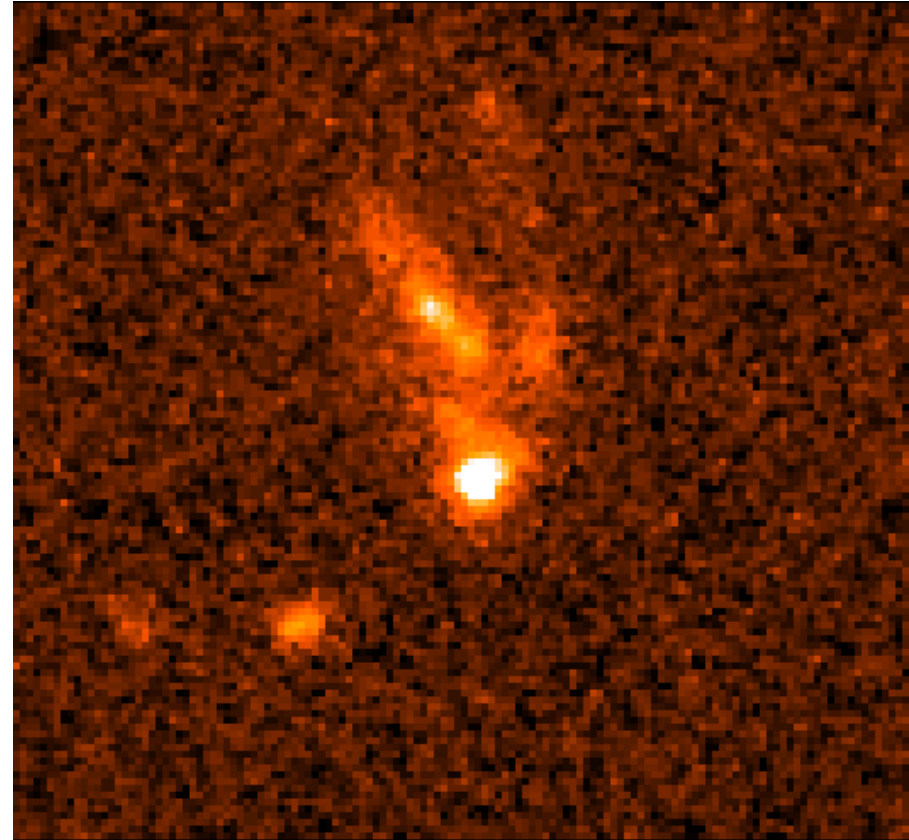
## 8.3.3 Gamma Ray Bursts bei großen $z$

Im Röntgen...Optisch...IR wird ein relativ langanhaltendes „Nachglühen“ (*Afterglow*) beobachtet ...

... wenn Jet auf umgebende Materie trifft

→ Möglichkeit der Lokalisierung und  
Entfernungsbestimmung  
(spektroskopisch oder photometrisch)

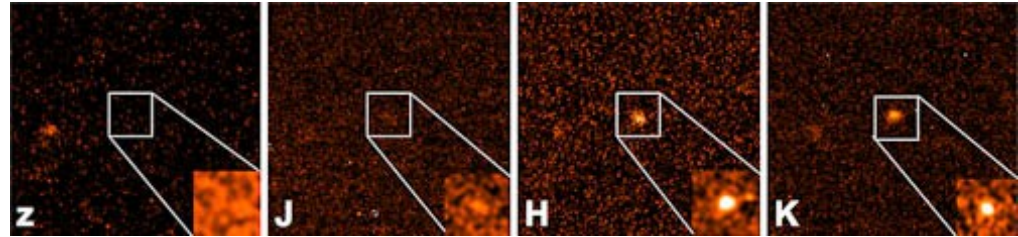
→ Spekulation, dass damit Sternent-  
stehung bei sehr großem  $z$  beobachtbar



HST-Aufnahmen des *Optical Afterglow*  
von GRB990123 an den Tagen 16, 59 und  
380 nach dem Burst

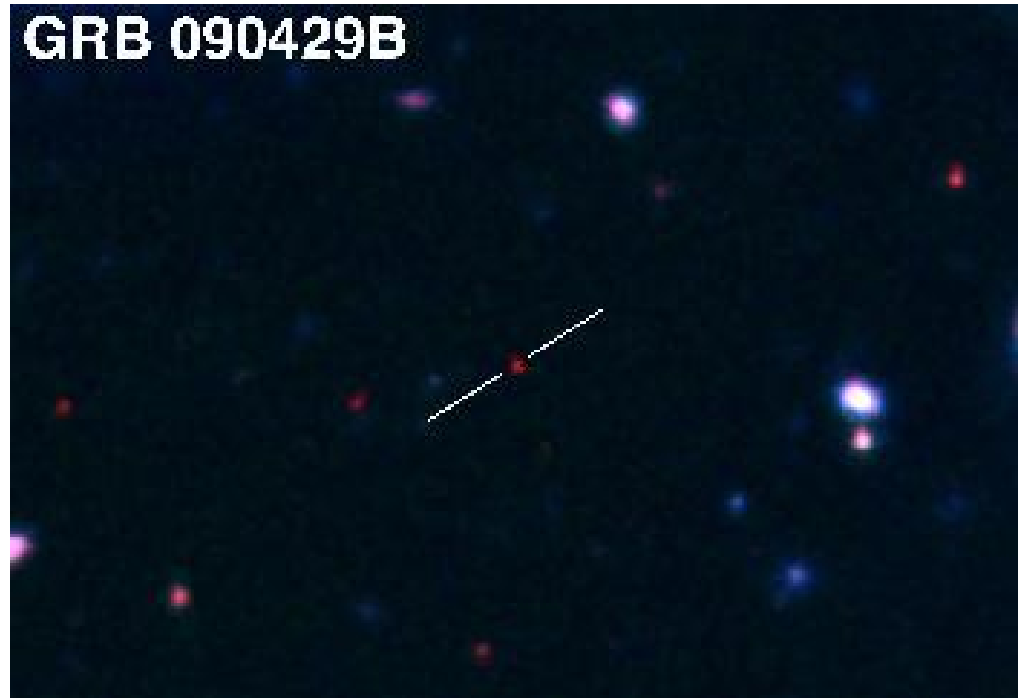
## 8.3.3 Gamma Ray Bursts bei großen $z$

Beispiel für GRB in großer Entfernung:



GRB 090429B bei  $z \sim 9.4$   
(photometrische Bestimmung)

Nachfolgebeobachtung mit HST  
und VLT: nach dem Afterglow  
keine Galaxie beobachtbar



Optischer *Afterglow* von GRB 090429B

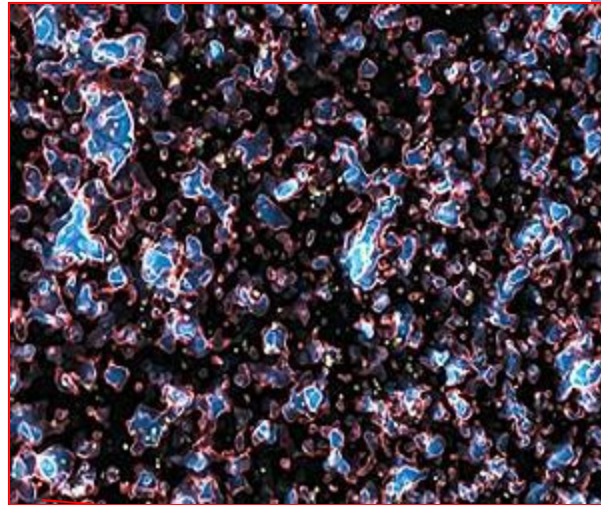
Credit: Gemini Observatory/AURA/Levan et al.



## 8.3.4 Wann ging das Licht an im Universum?

### Ära der Re-ionisation:

- zunächst keine Quellen von UV-Strahlung (Dark Age), Universum noch dominiert durch H-Atome
- Erste Quellen von UV-Strahlung entstehen (Sterne/Quasare)
- schrittweise Ionisation des HI



## 8.3.4 Wann ging das Licht an im Universum?

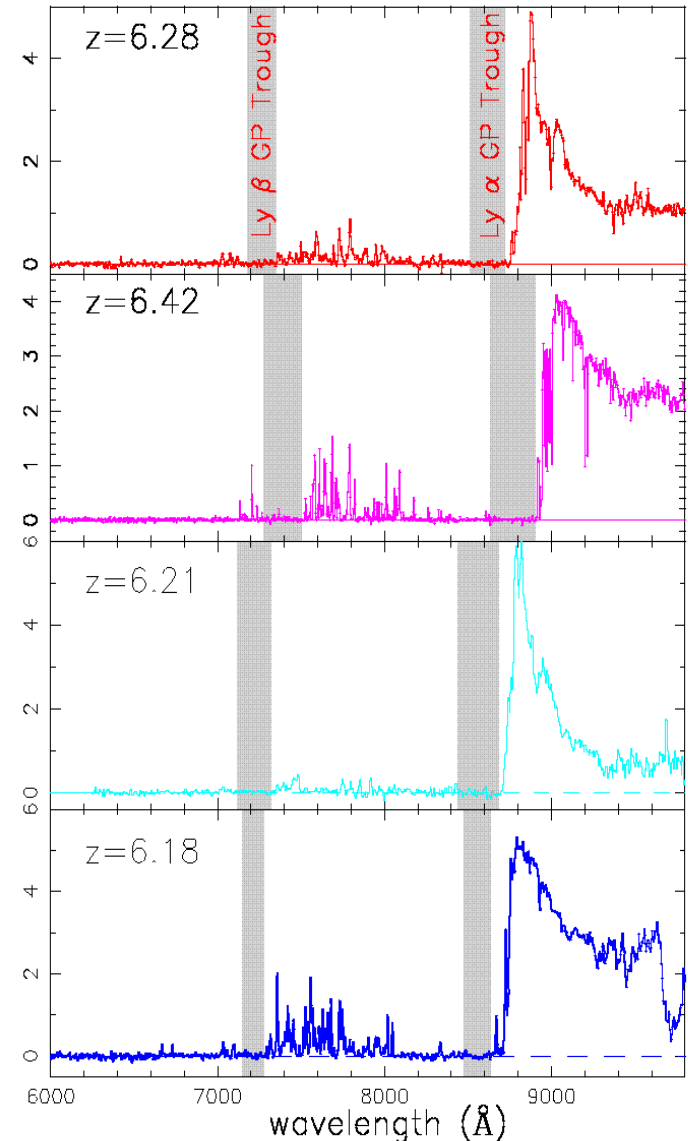
### Quasare mit $z > 6$ :

Spektren: Vollständige Absorption unmittelbar kurzwellig von Ly $\alpha$ -Linie

- Bei  $z \approx z_Q$  gibt es H-Atome
- Umgebung des Quasars noch nicht vollständig ionisiert  
(*Gunn-Peterson-Effekt*)

**Ende der Re-Ionisation bei  $z \sim 6$  (?)  
... aber wann war der Anfang?**

Anmerkung: In Quasarspektren mit  $z \sim 6$  sind schwere chemische Elemente (stellarer Ursprung) bereits prominent vertreten!



## 8.3.4 Wann ging das Licht an im Universum?

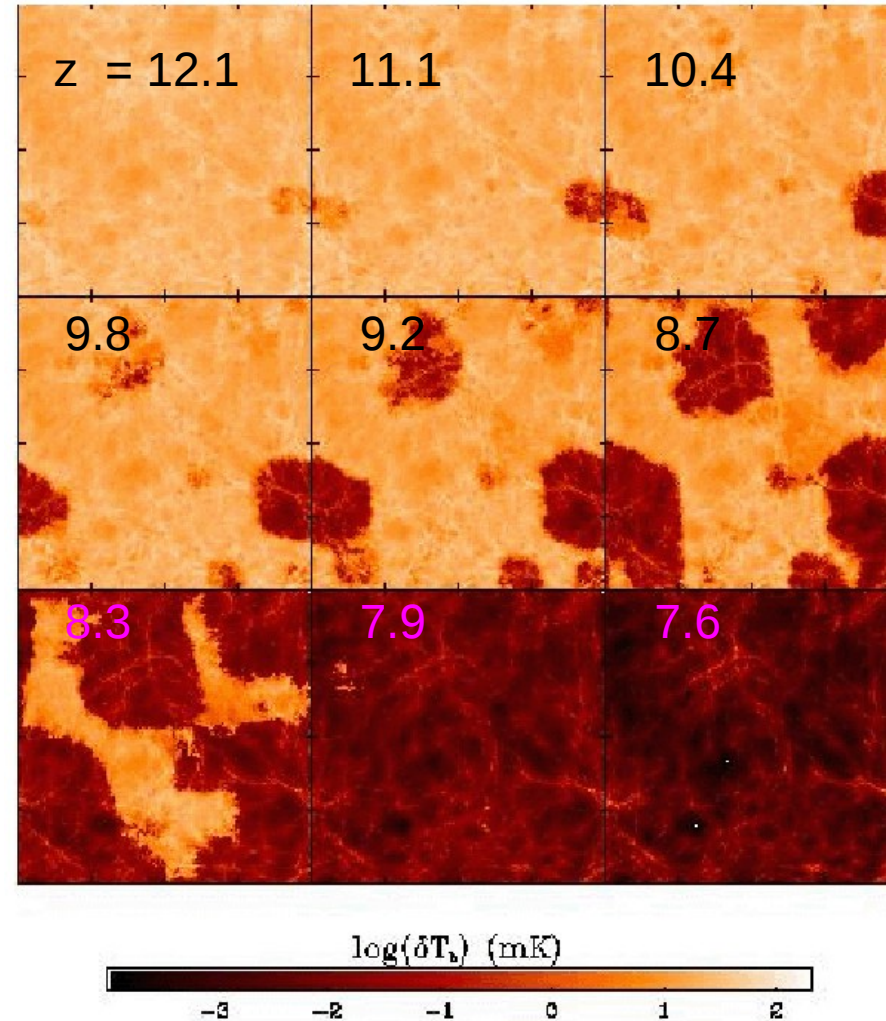
### Beobachtung der Re-Ionisation mit Radioteleskopen?

Simulation von Radiobildern bei  
 $\lambda = 21\text{cm} * (1+z)$

hell: hohe Flussdichte  
(d.h. HI wird beobachtet)

dunkel: geringe Flussdichte  
(d.h. H ist ionisiert)

Erwartung:  
beobachtbar mit LOFAR, SKA



Credit: Furlanetto et al. (2004)



## 8.4 Zusammenfassung

---

- Entstehung großer Strukturen erfordert DM-Dominanz
- Protogalaktischer Kollaps infolge gravitativer Instabilität (in expandierendem Medium!)
- Kosmische Sternbildungsaktivität hat in letzten  $\sim 10$  Gyr kontinuierlich abgenommen.
- Erste Entstehung von (massereichen) Sternen wahrscheinlich bei  $z \sim 10 \dots 20$  ( $\text{Ly}\alpha$ -Galaxien, Re-Ionisation)
- ... noch viele Unklarheiten ...

# 8.4 Zusammenfassung

... viel zu tun für zukünftige Teleskope  
... und Astronomen ...

