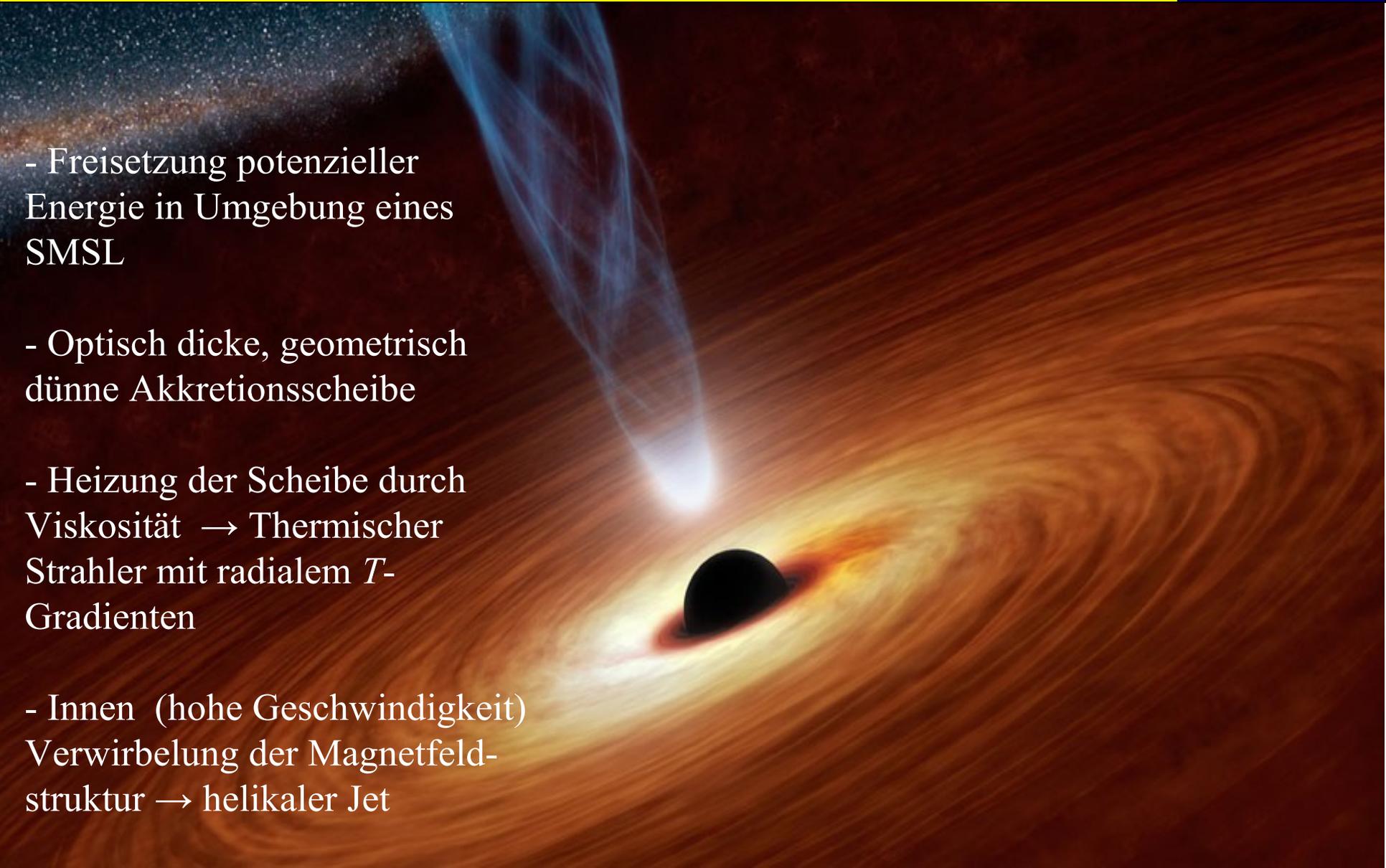


AGN-Standardmodell

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

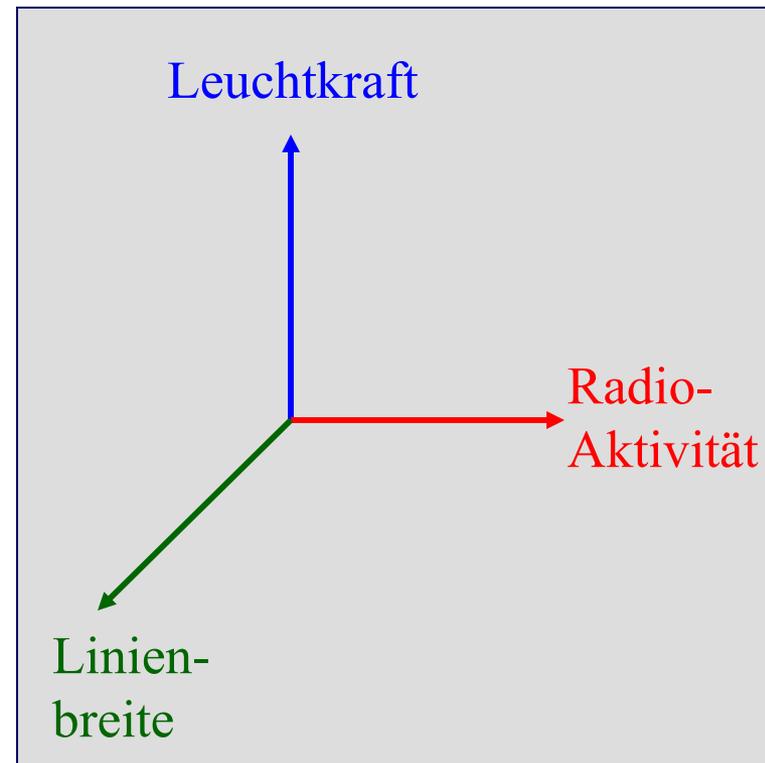
Wichtigste Erscheinungsformen von AGN

(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

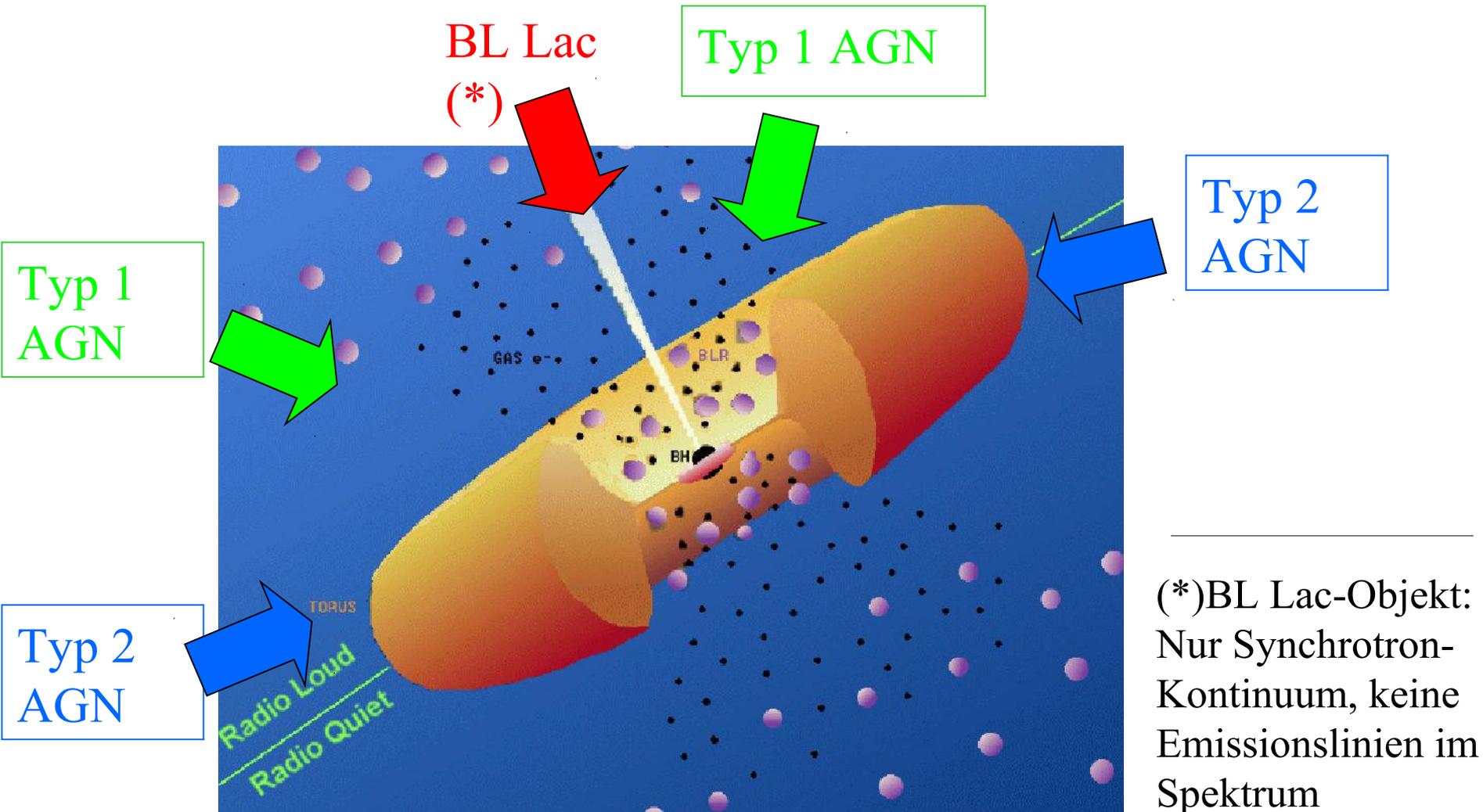
Konsens Orientierungseffekte

- 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

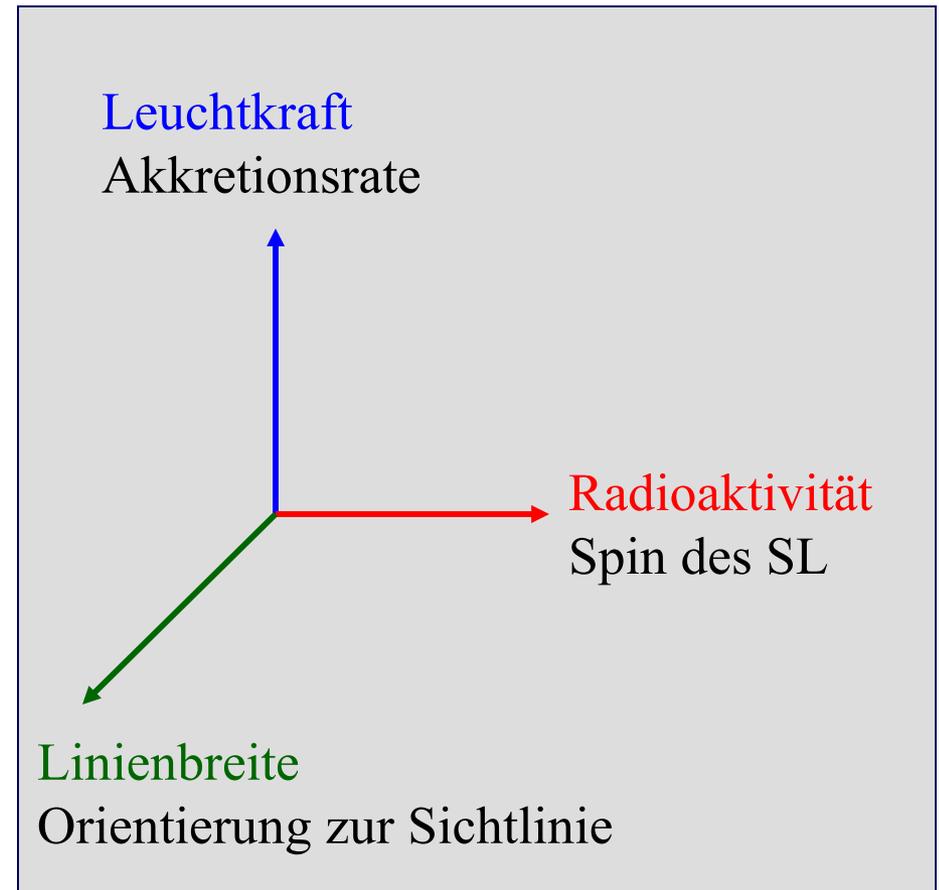
FSRG: *flat spectrum radio galaxy* (kompakte Radiogalaxie)

6.8 Der “Zoo” der AGN

Vereinheitlichungsschema

Unterschiedliche Erscheinungsformen von AGN lassen sich gut auf der Grundlage des Standardmodells erklären mit Unterschieden hinsichtlich

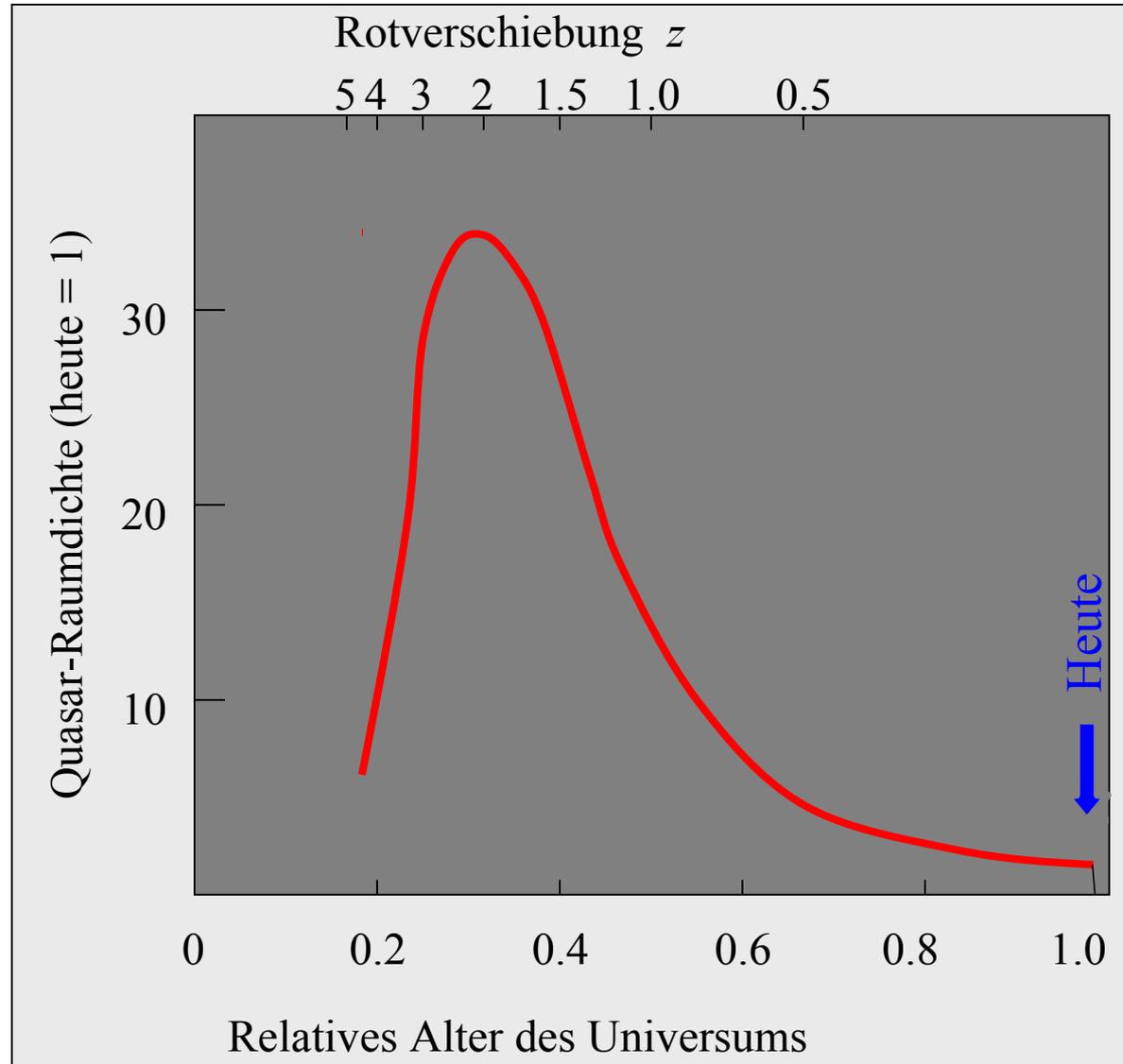
- Akkretionsrate
- Drehimpuls des SL
- Orientierung zur Sichtlinie



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):

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

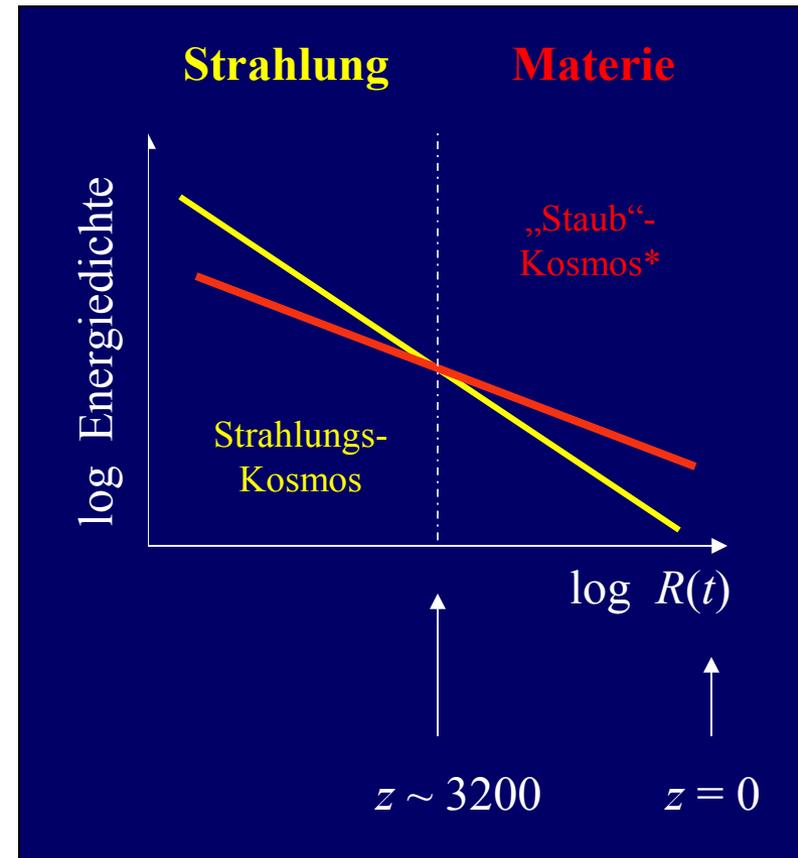
Energiedichte der Strahlung (Energieerhaltung):

$$\rho_s = n_p E_p$$

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):

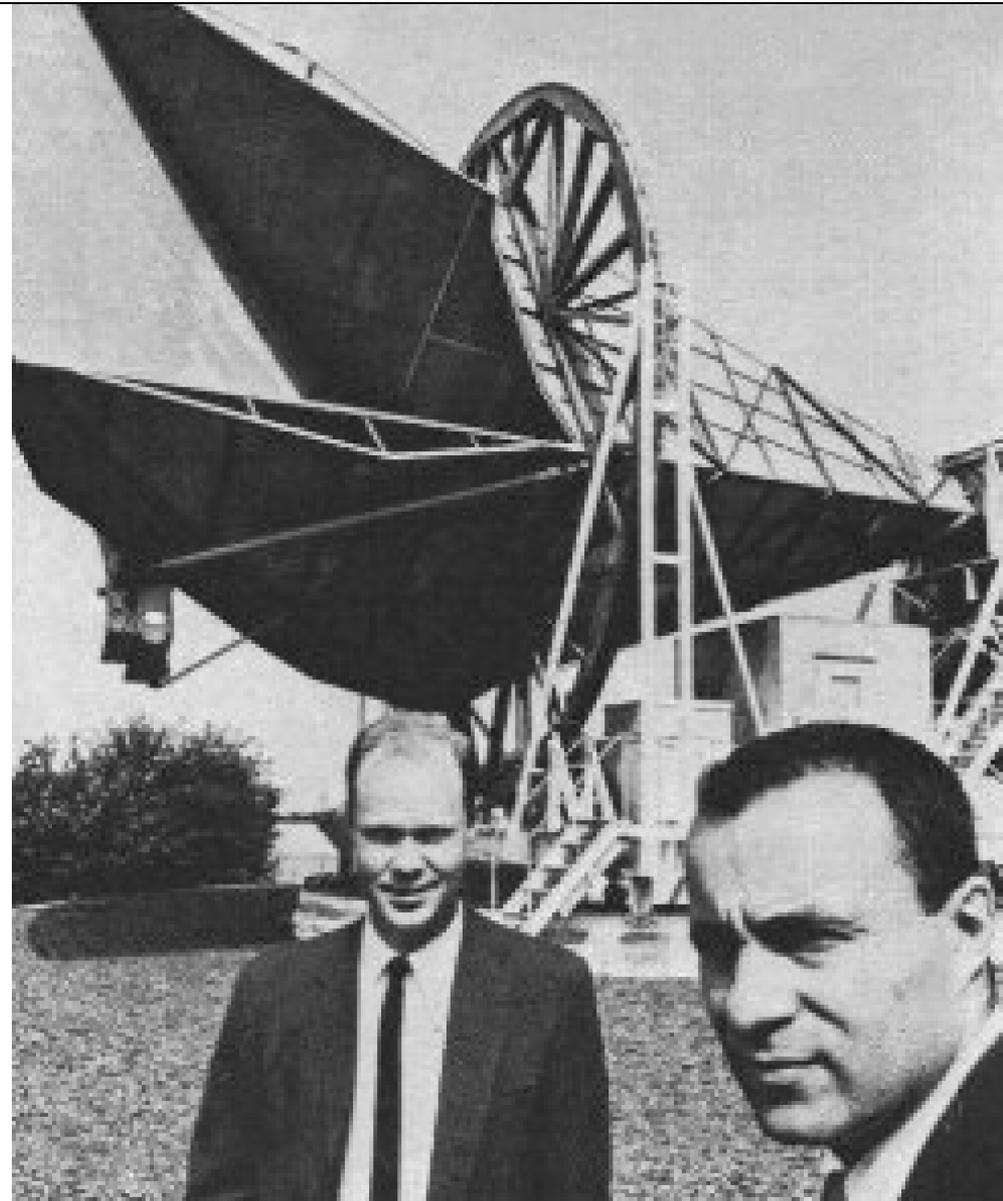
Der frühe Kosmos war dicht, heiß und „strahlungsdominiert“

→ 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)

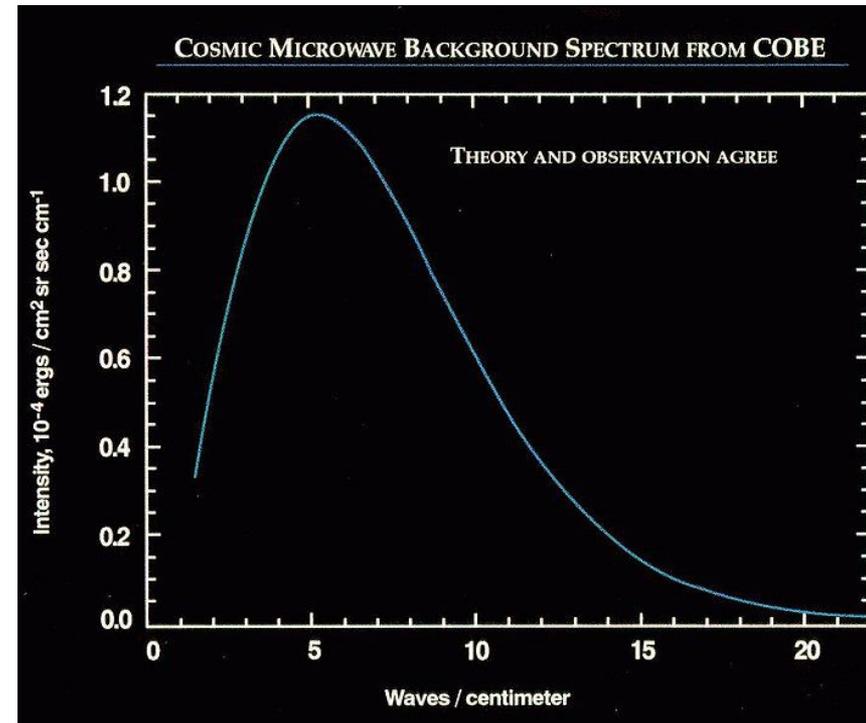
Deutung als *Gamov'sche* Reliktstrahlung durch *R. Dicke* (u.a.).

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

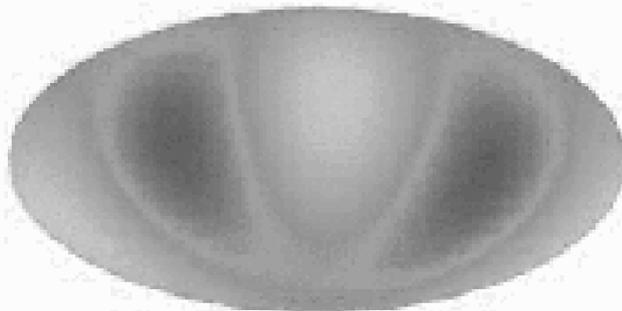


→ Grundpfeiler der modernen Kosmologie

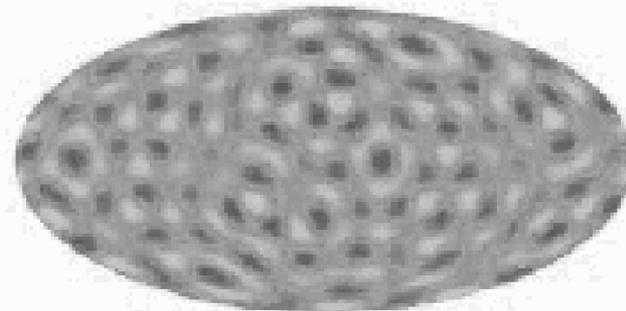
7.3 CMB: allgemeine Eigenschaften

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

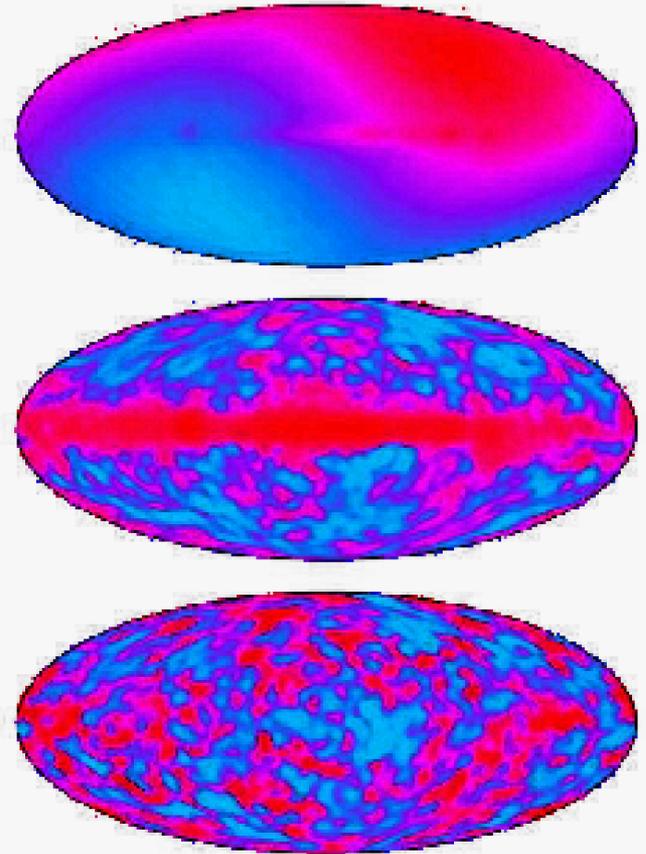
2. Vordergrundquellen (MSS,GCs)

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)

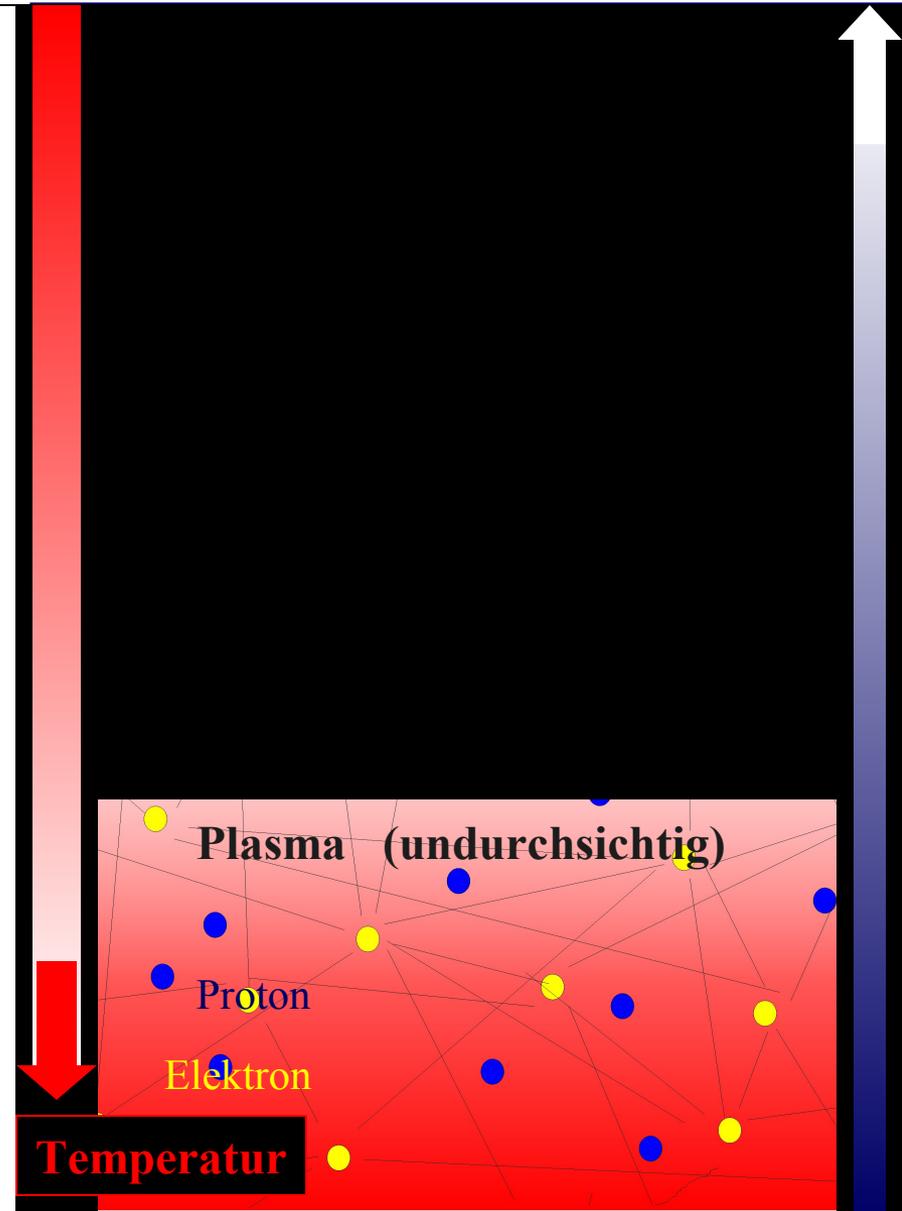


7.4 CMB: Entstehung

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

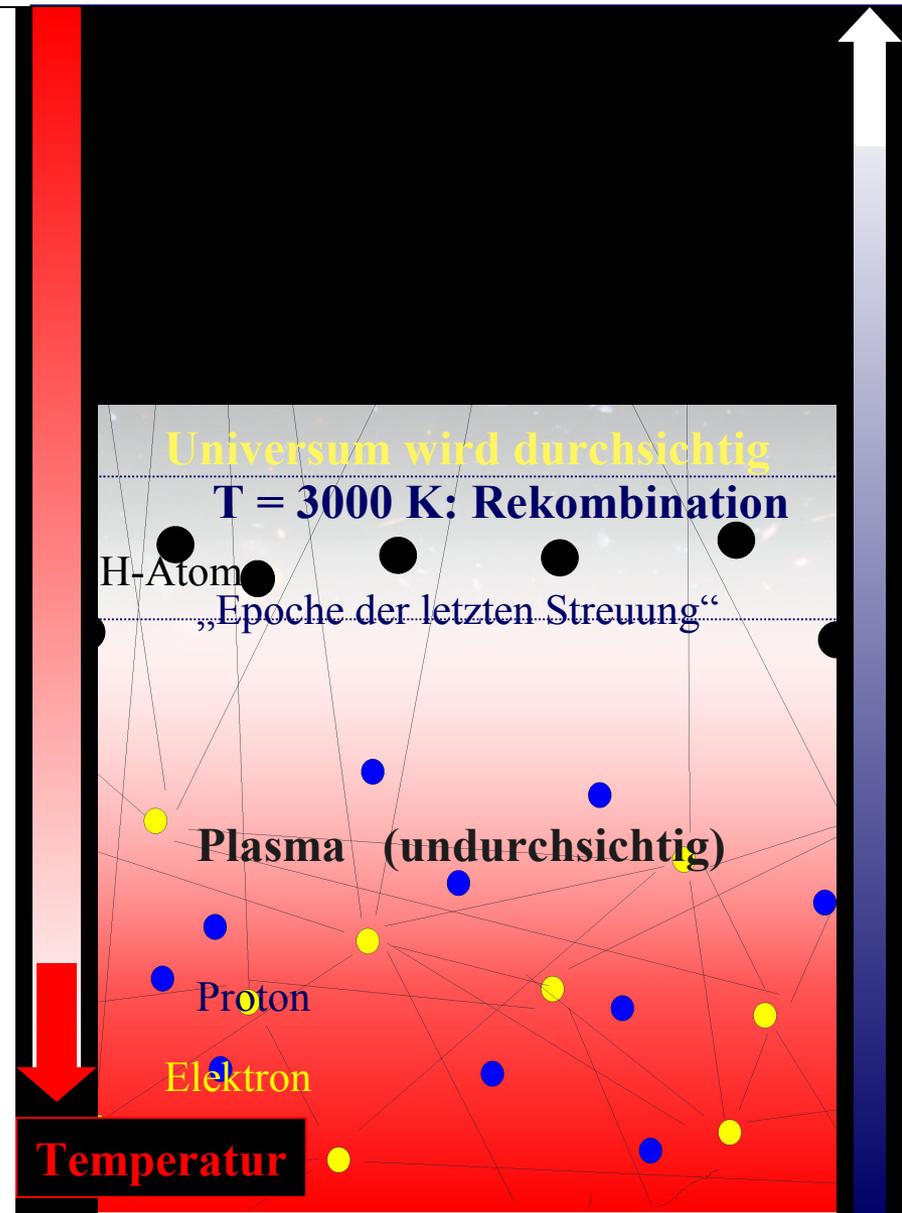


7.4 CMB: Entstehung

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

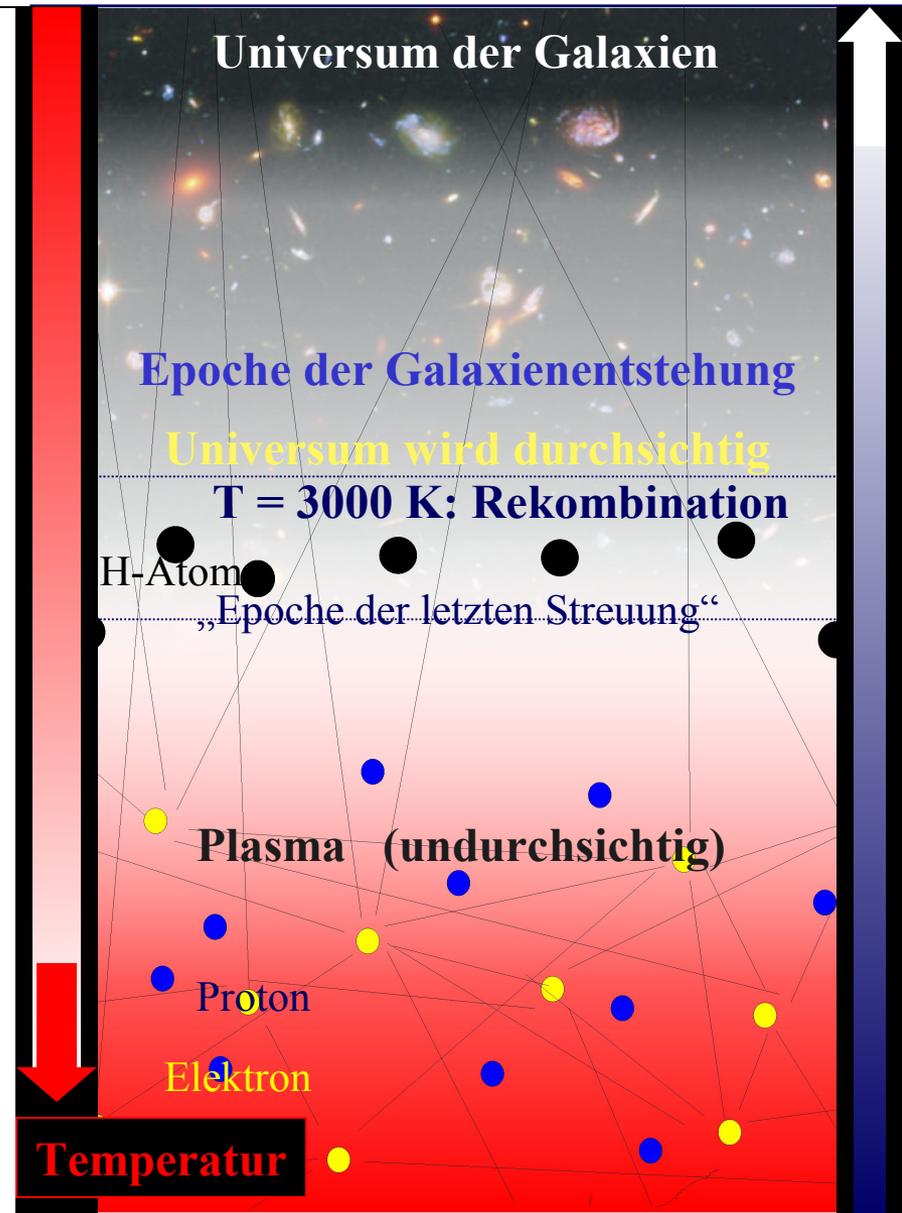


7.4 CMB: Entstehung

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:

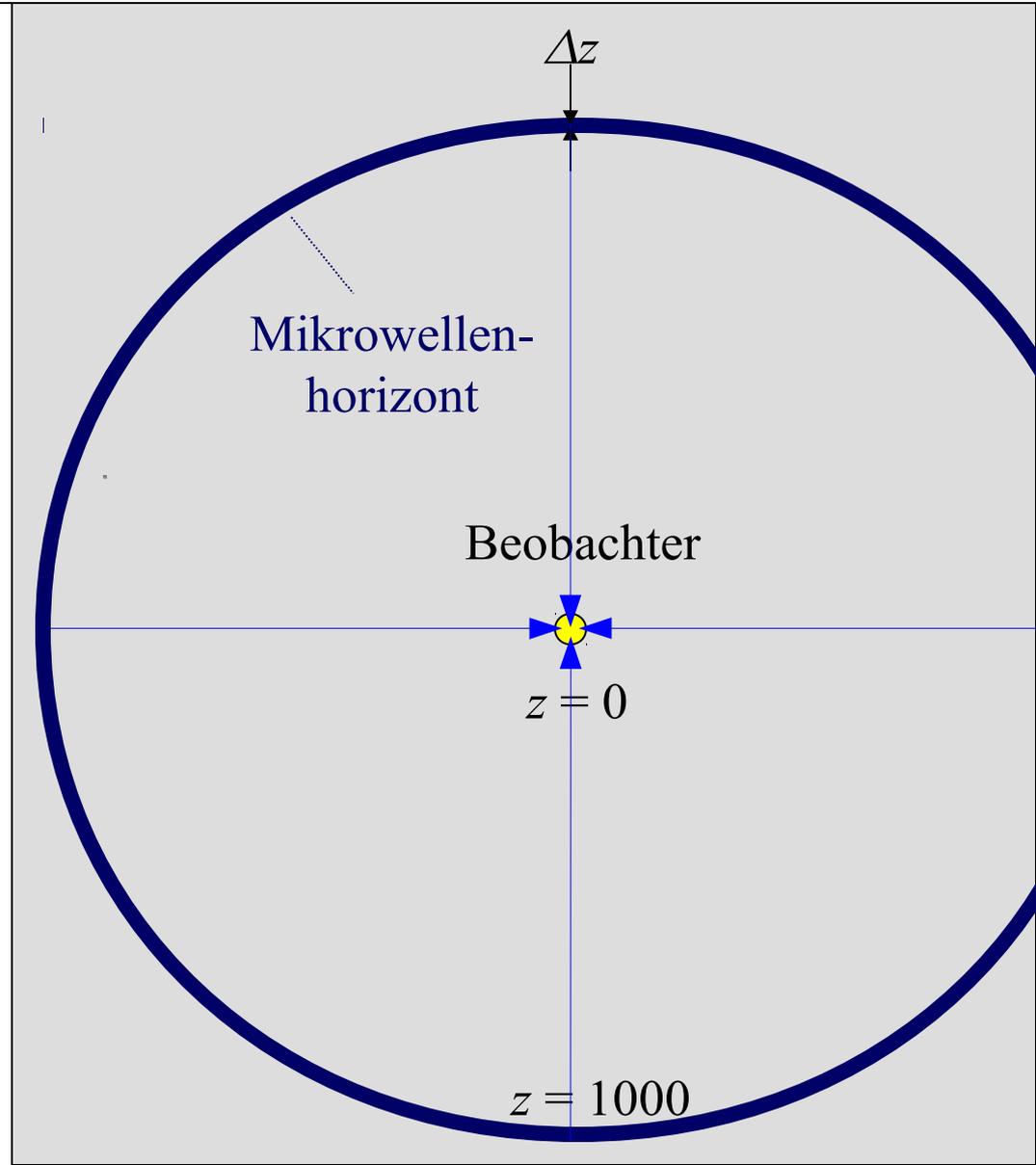
$$T^{(a)} \approx \frac{T^{(e)}}{1000} \approx 3 \text{ K}$$

$\lambda_{\max} \approx 1 \text{ mm}$ (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 $z \dots z + \Delta z$

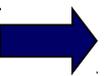
= Mikrowellenhorizont



7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

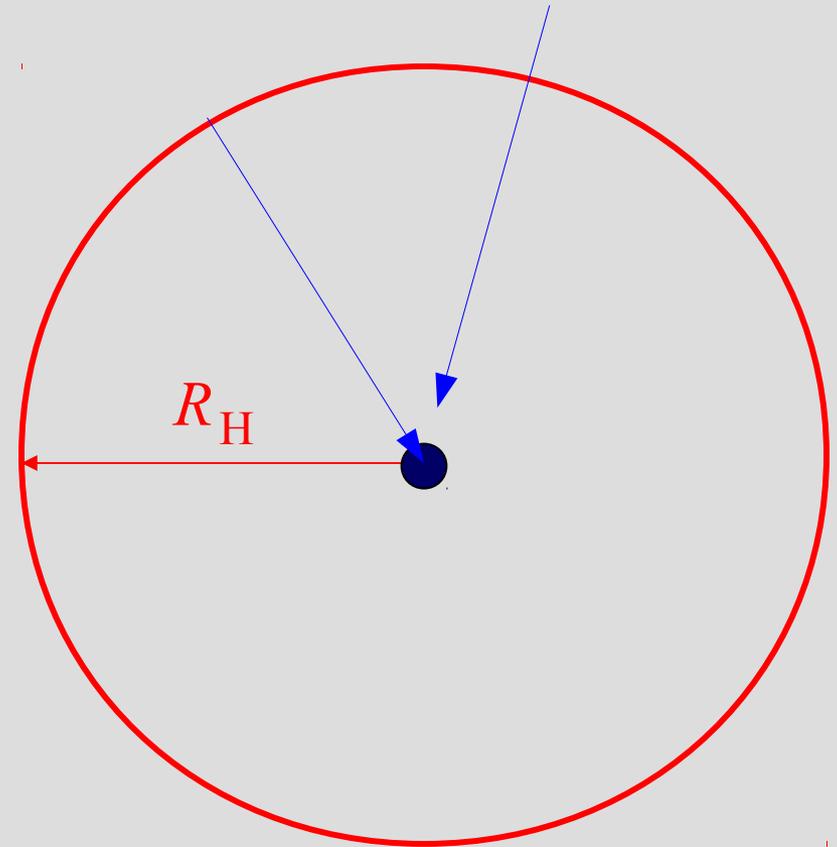
Exkurs: Horizontproblem

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)

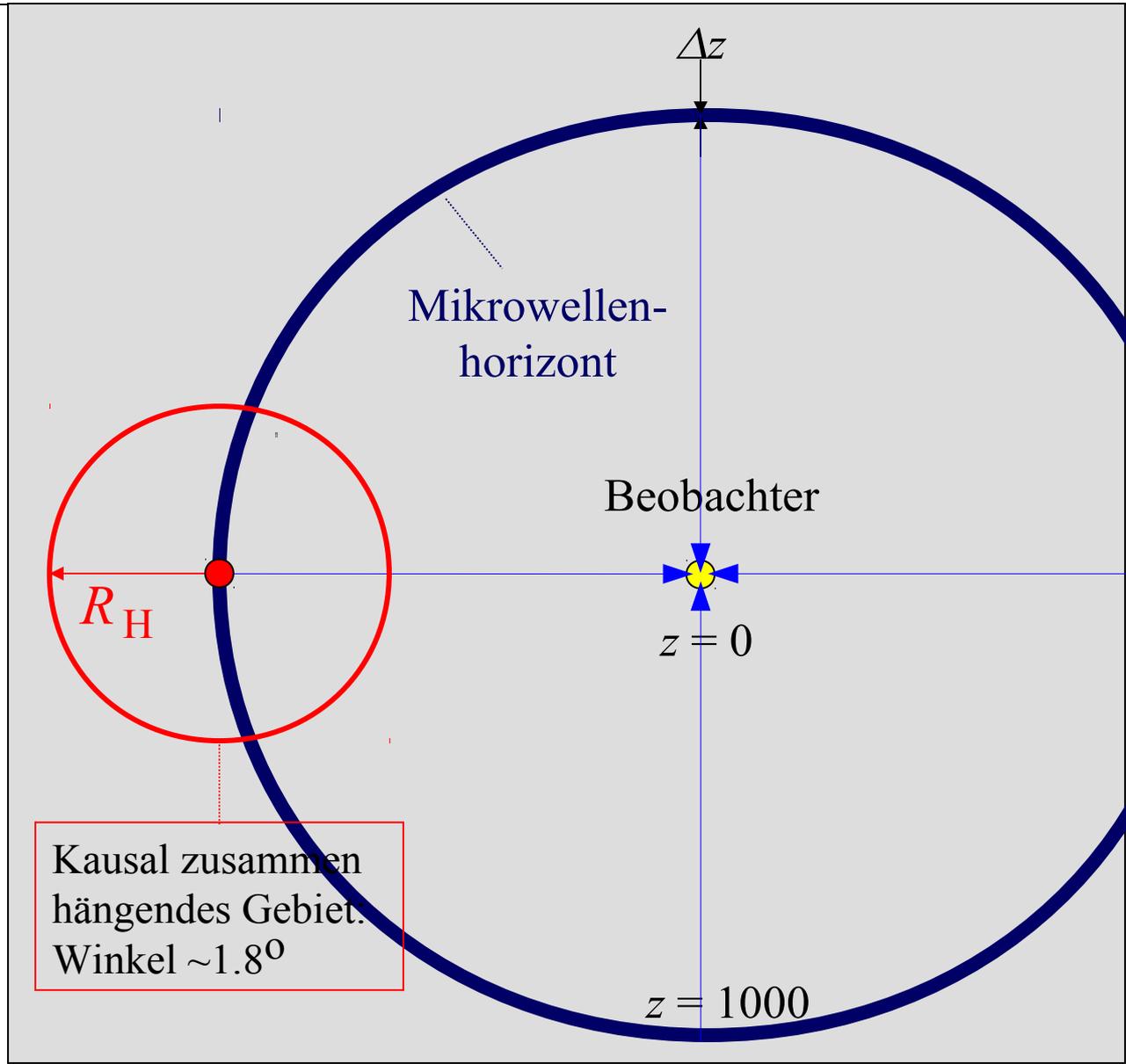


7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

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 $z = 1000$

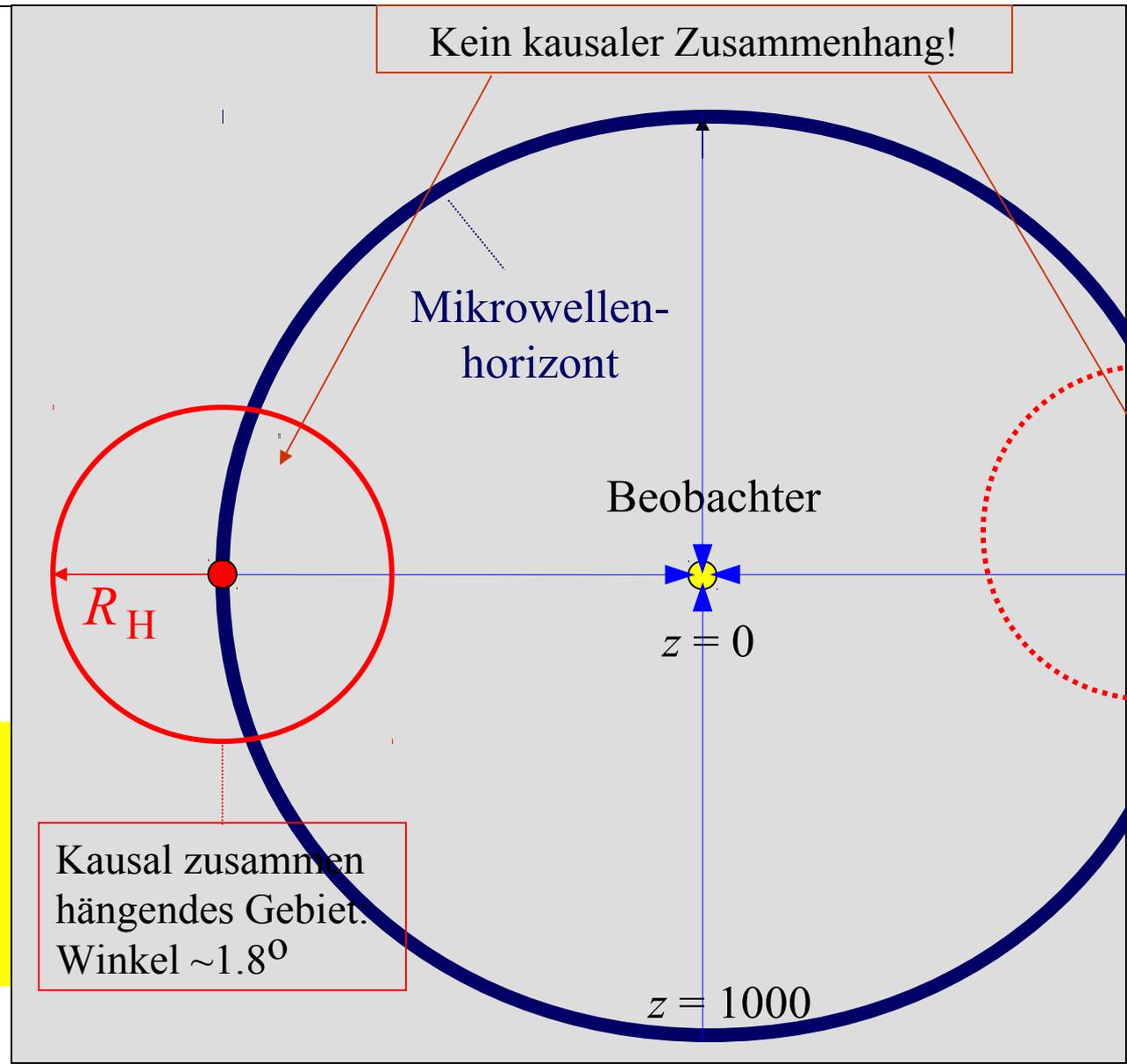
Exkurs: Horizontproblem

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)

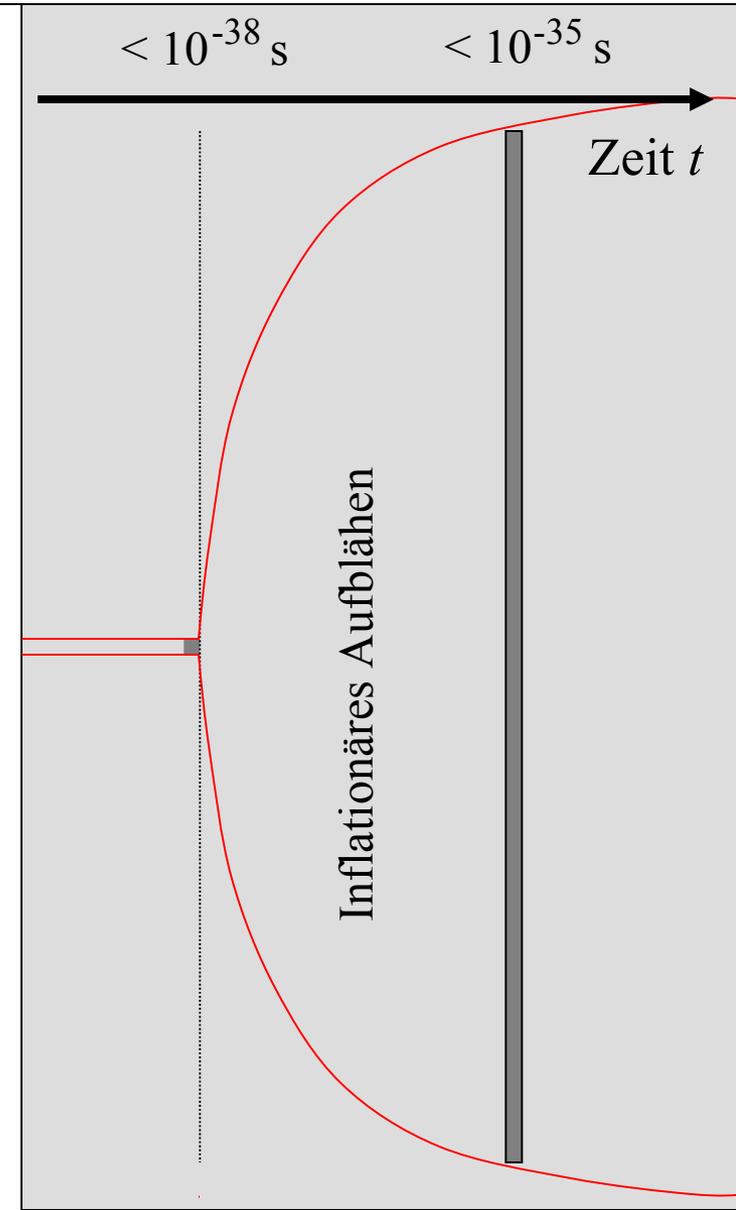


7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

Modell der Inflation aus GUT *

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

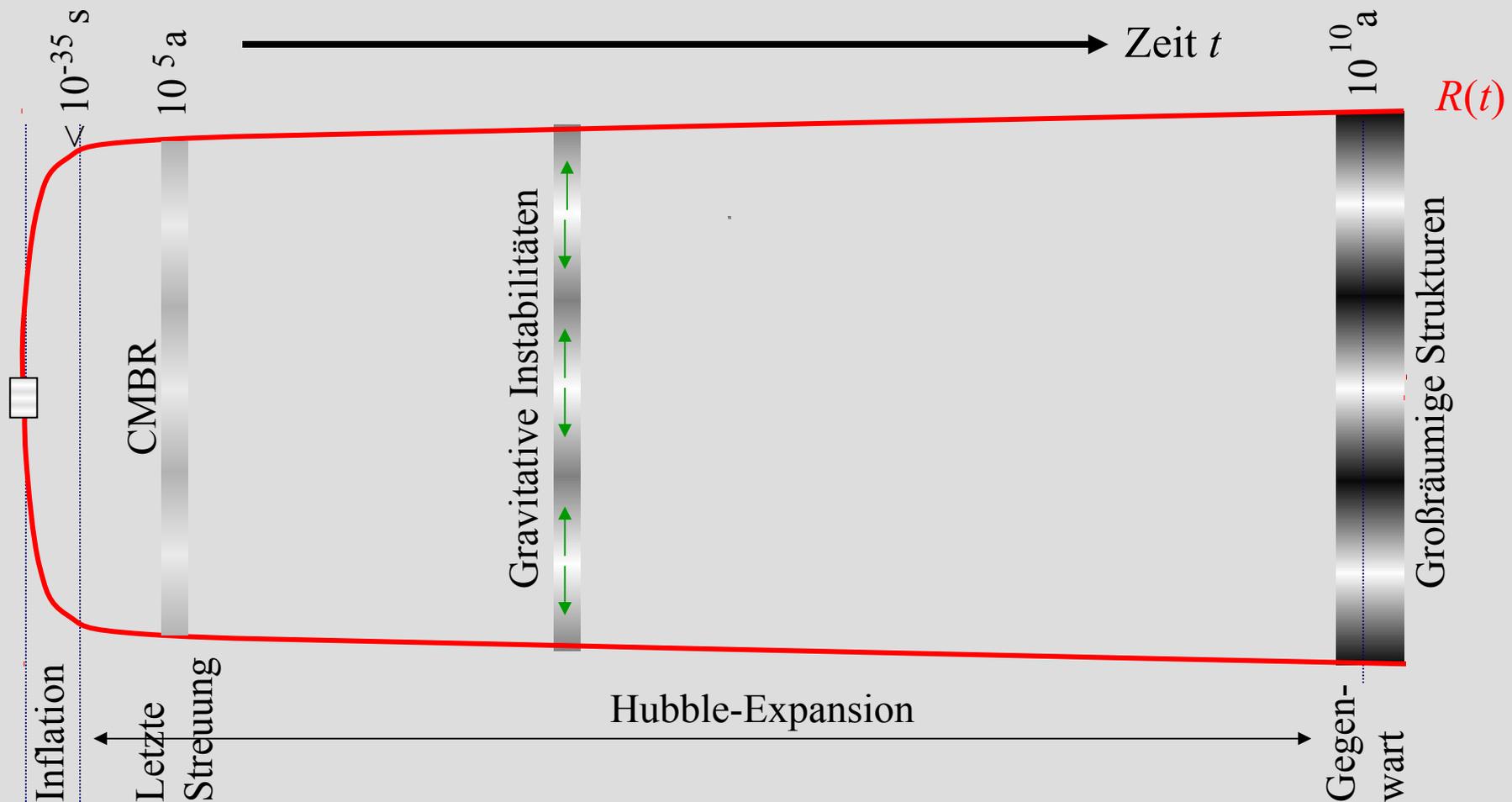
- Am Ende der GUT-Ära ($t \sim 10^{-38}$ s) findet Phasenübergang statt (Energiefreisetzung treibt exponentielle Expansion an)
- Innerhalb $< 10^{-36}$ s Ausdehnung um Faktor 10^{30} (Größe Atom → Sonnensystem)



* GUT: Grand Unification Theory (der Elementarkräfte)

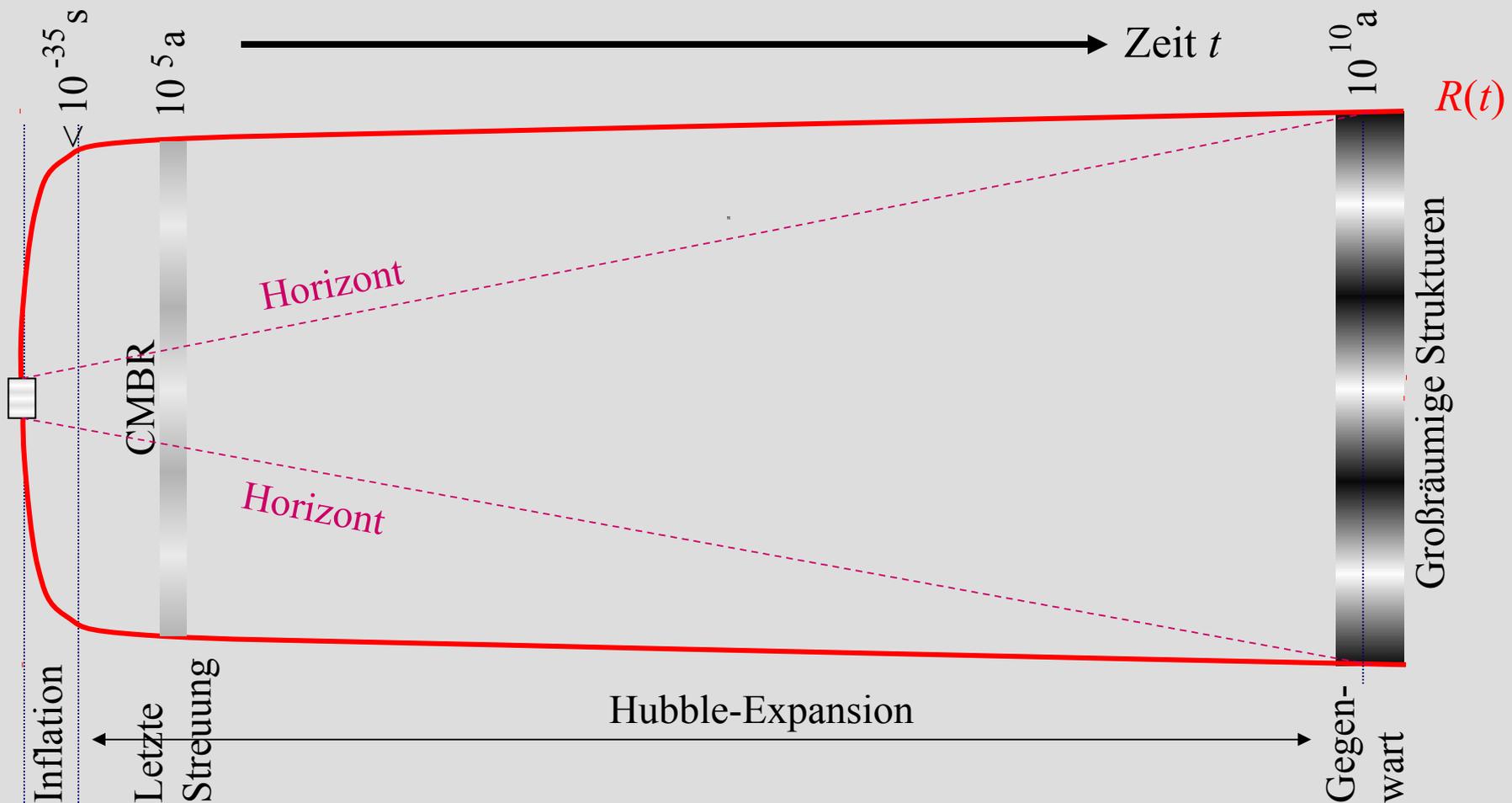
7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

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



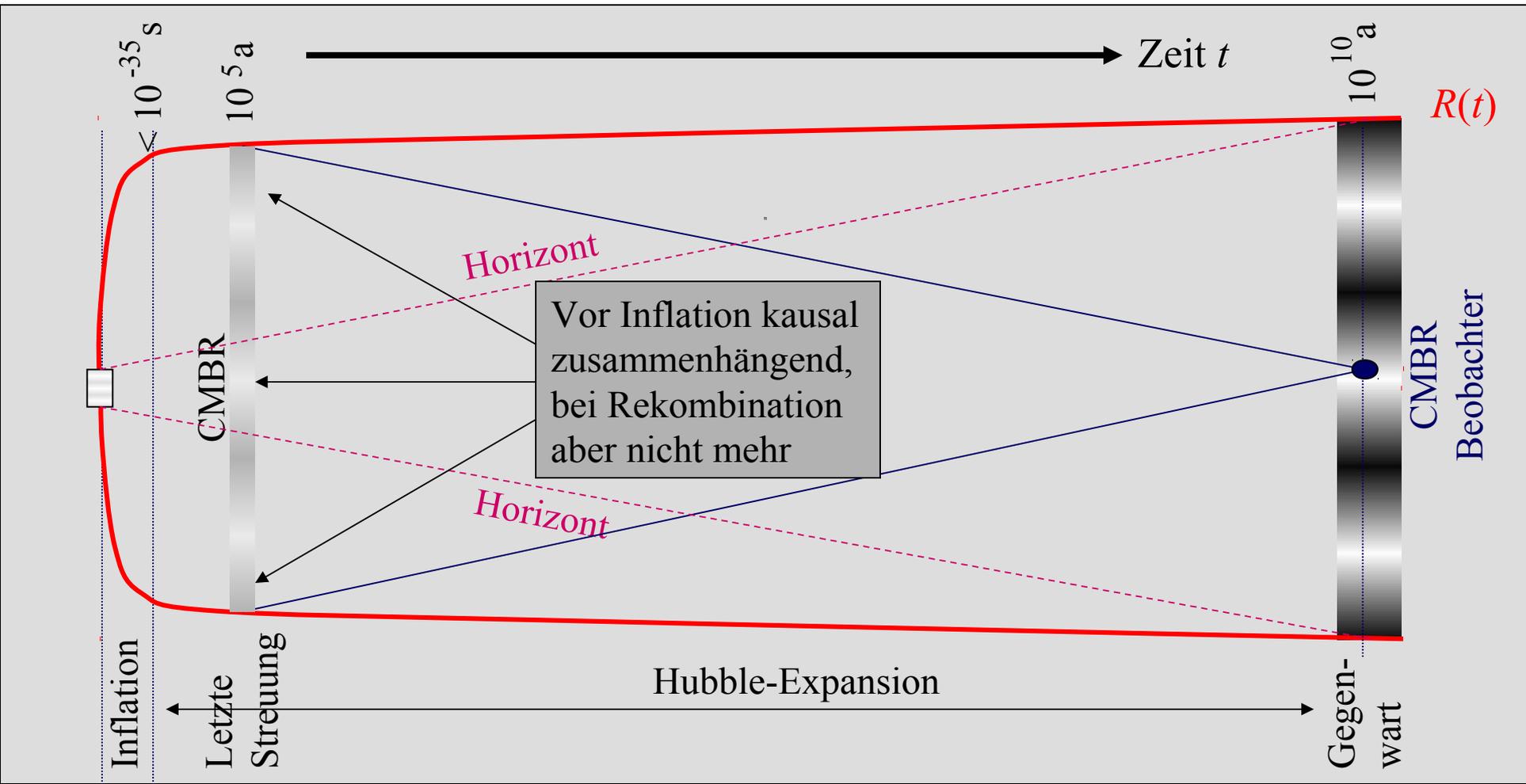
7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

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



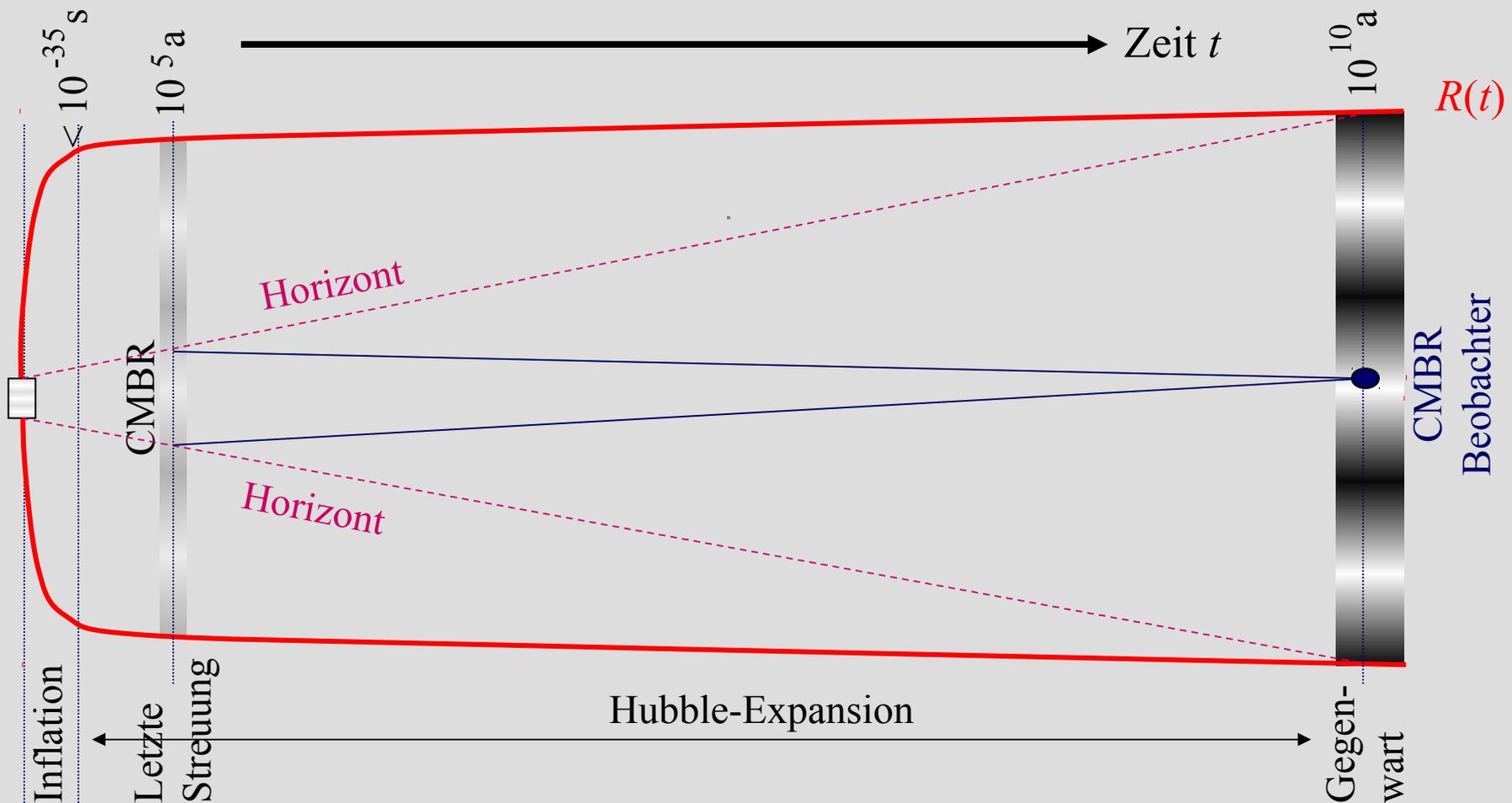
7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

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



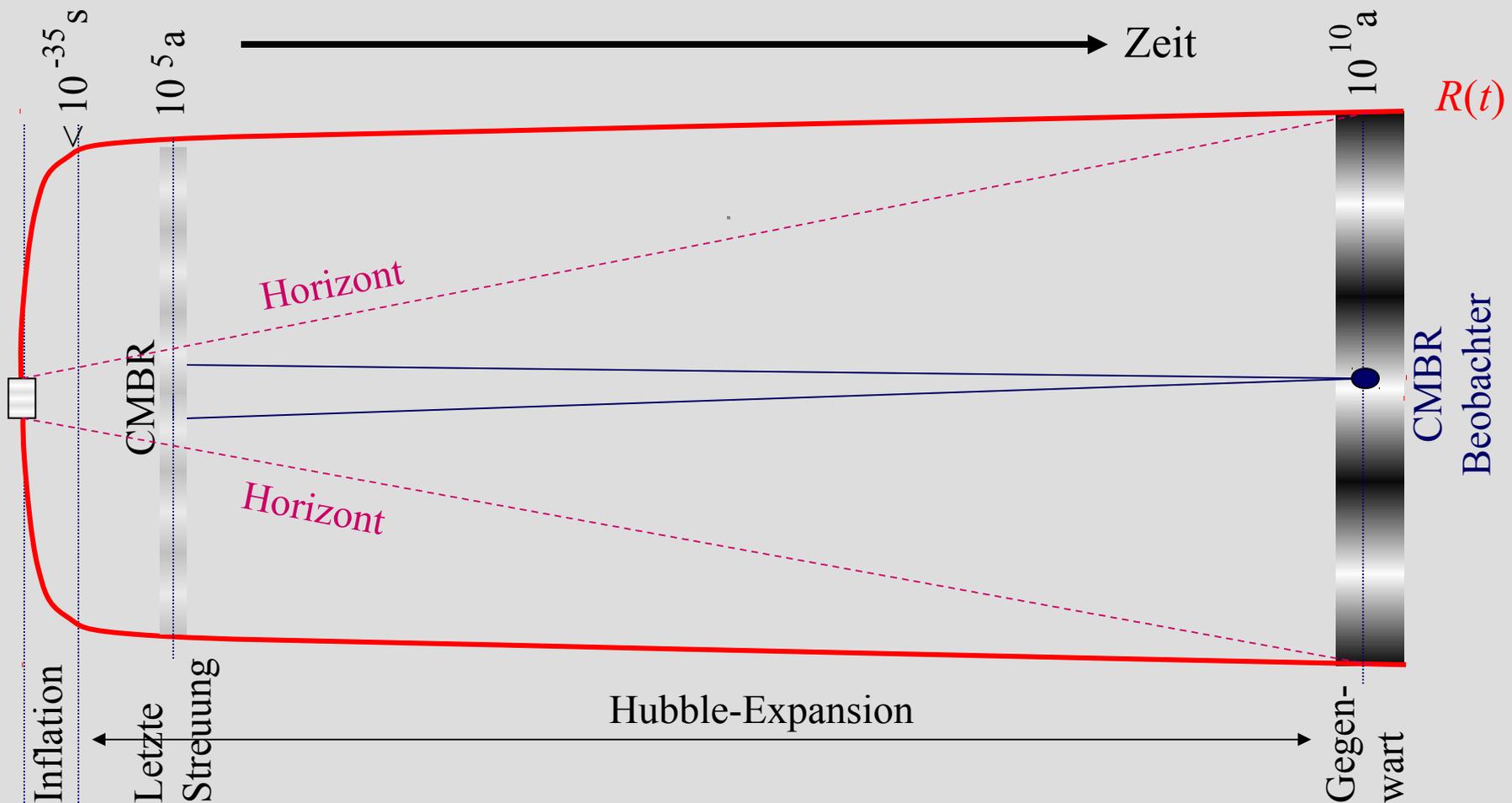
7.5 Räumliche Fluktuationen und Struktur bei $z = 1000$

- 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:

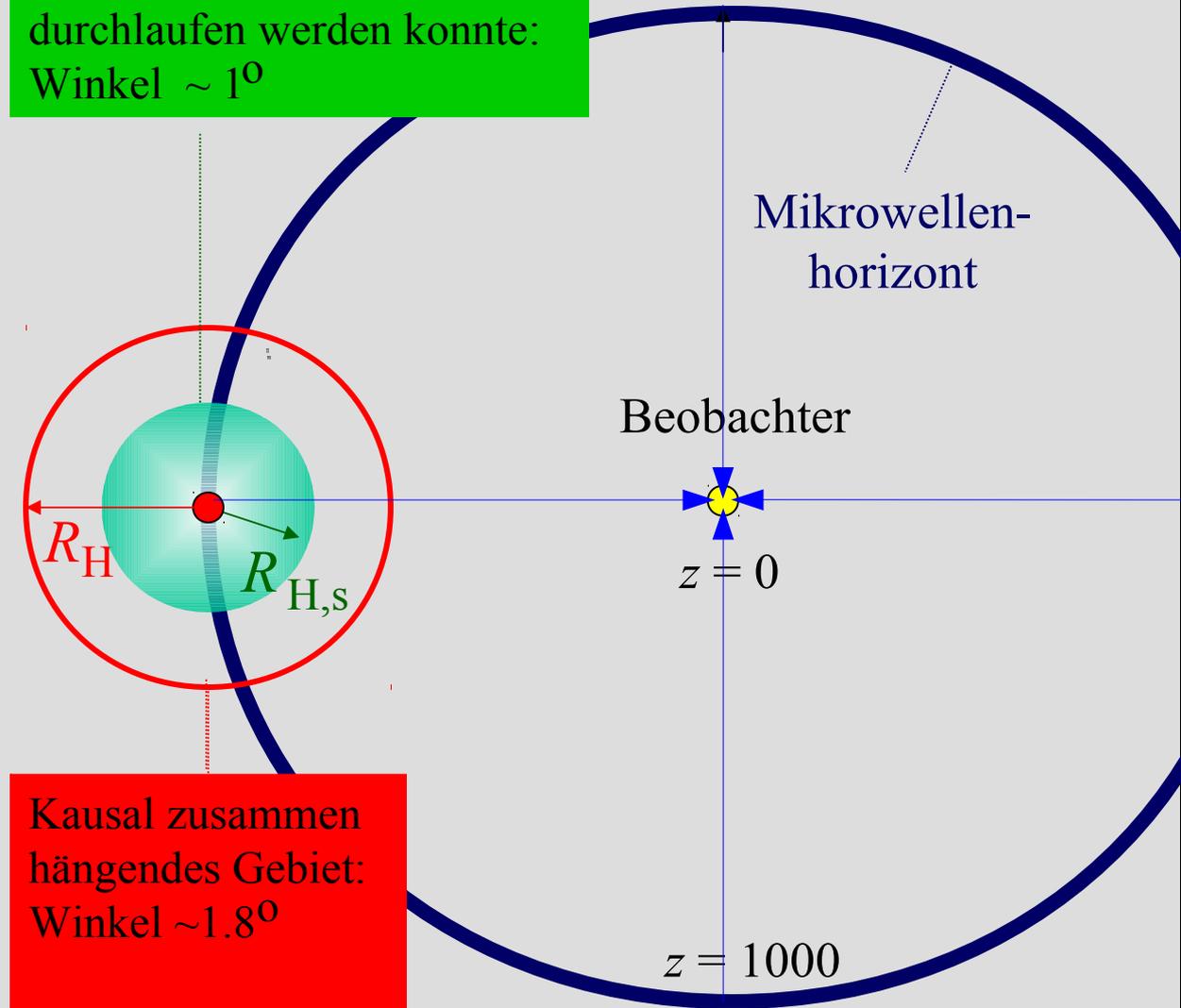
$$\lambda_{\text{max}} = R_H / \sqrt{3}$$

→ $R_{H,s} = R_H / \sqrt{3}$

„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 $z = 1000$

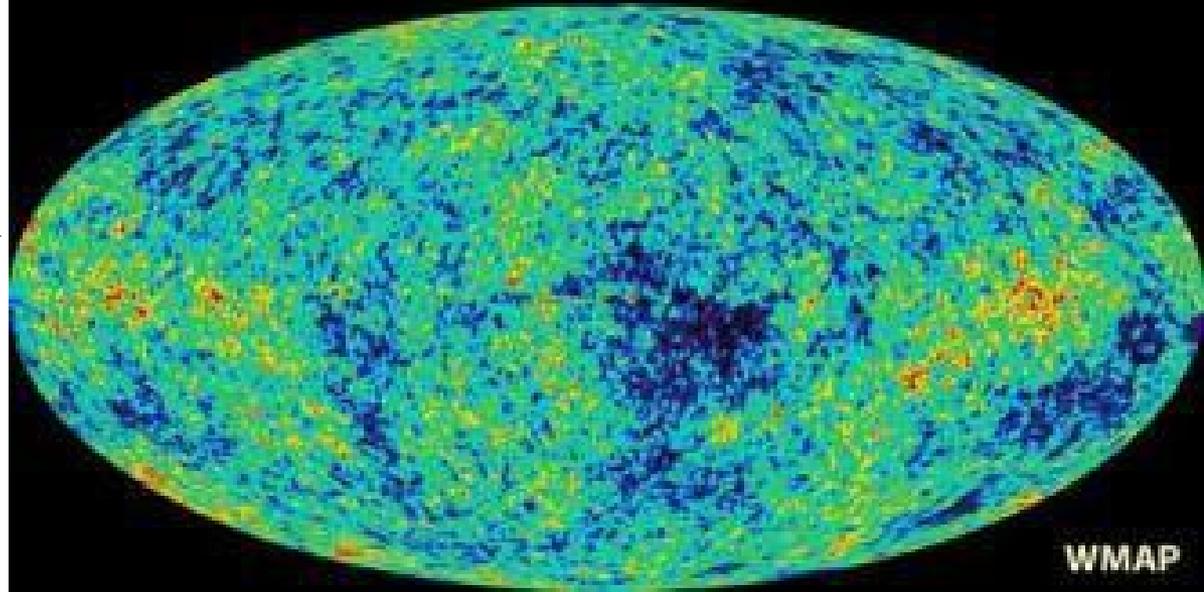
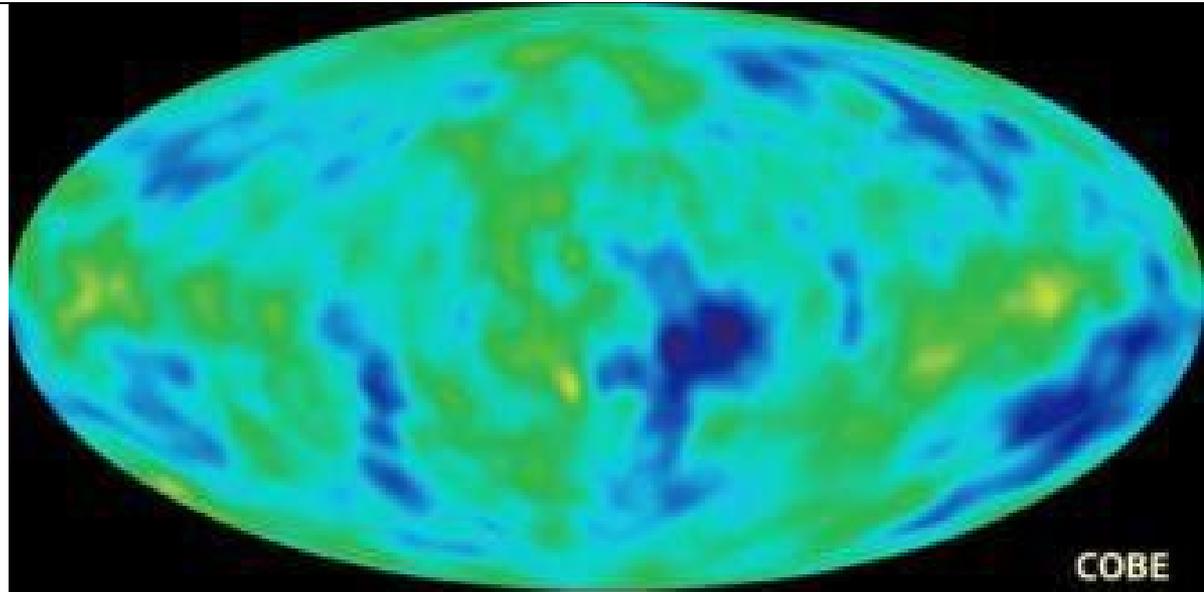
Konsequenzen für erwartete Strukturen (Anisotropie) in CMB:

- ➔ 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:

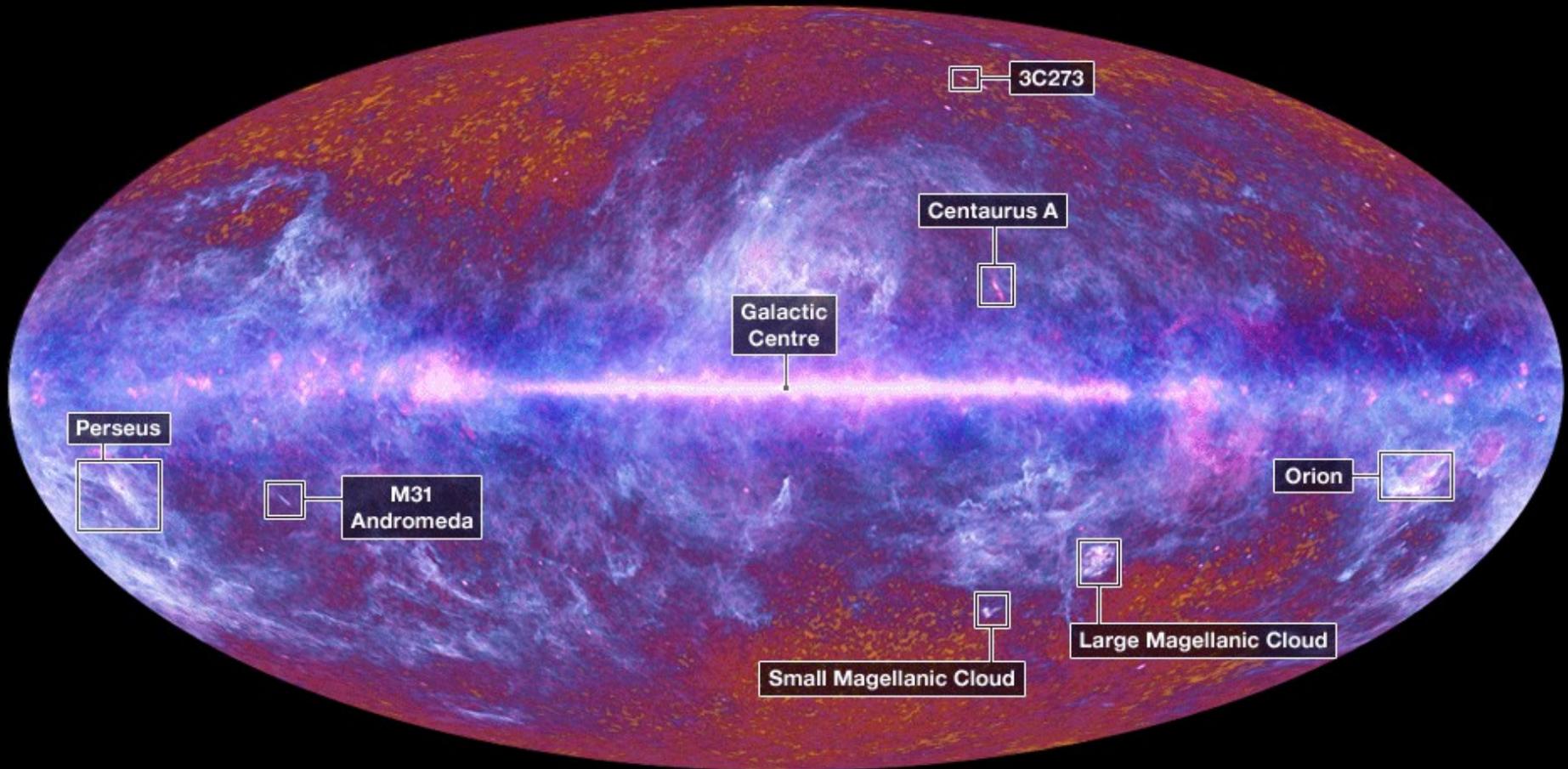
WMAP (2003) (*)
...und andere Experimente



(*) 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

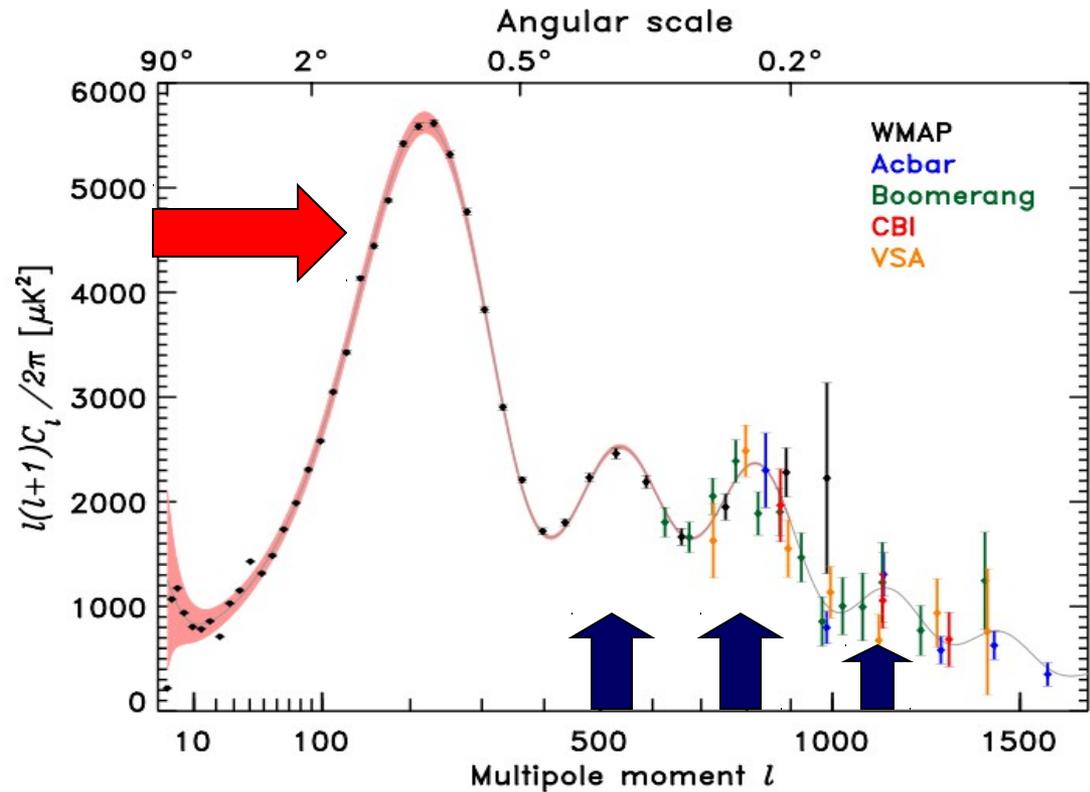
Leistungsspektrum: T - Fluktuationen auf Skala $360^\circ/2l$

Grundschwingung

Wellenlänge der Grundwelle, die Plasma verdichtet oder verdünnt (=Schall-Horizont) entspricht 0.6°

~ 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

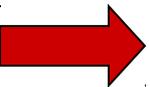
Zusammenfassung der drei wichtigsten „kosmologischen Tests“

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

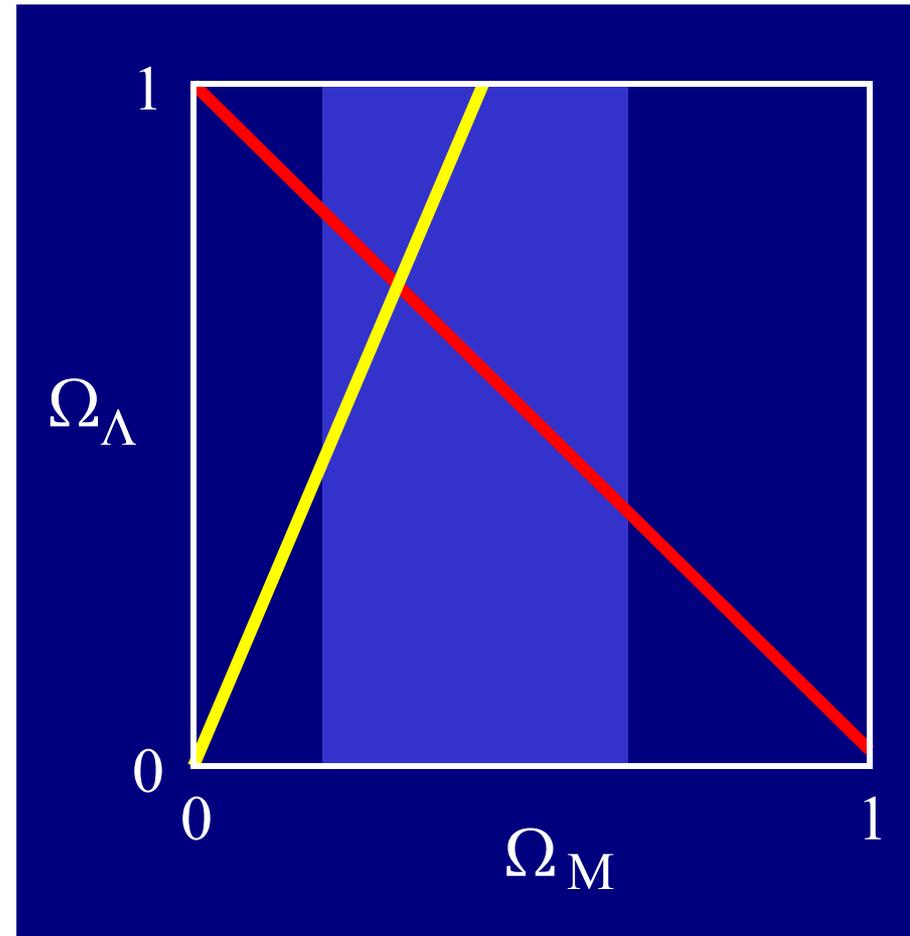
Galaxienhaufen: $\Omega_M = 0.2 \dots 0.65$

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“

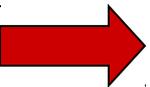
CMB: $\Omega_{\Lambda} = 1 - \Omega_M$

Galaxienhaufen: $\Omega_M = 0.2 \dots 0.65$

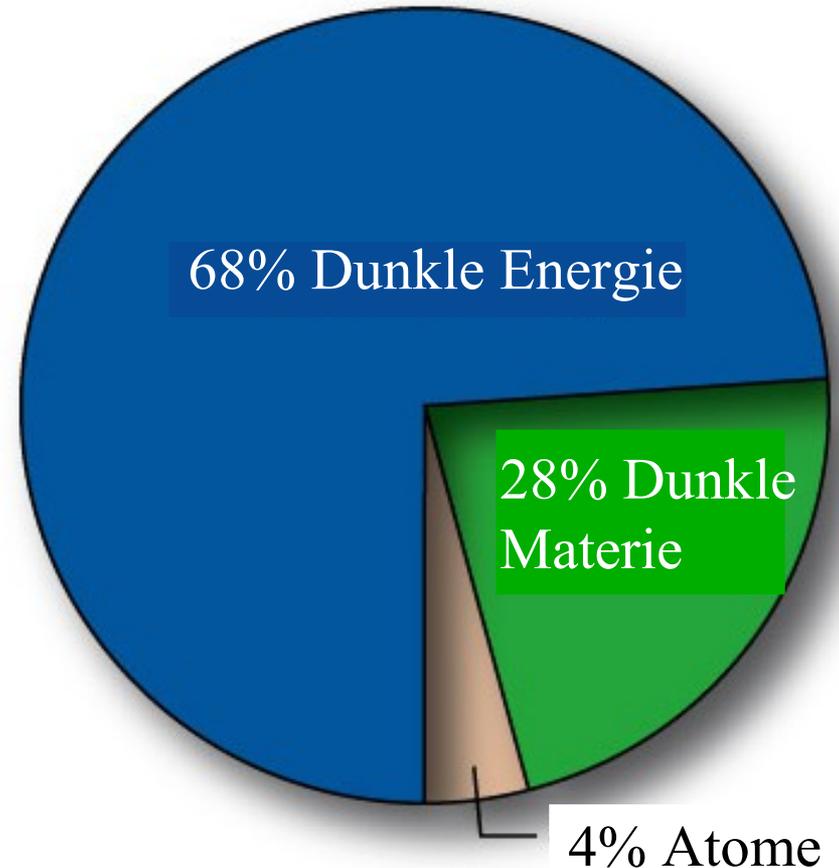
Supernovae Ia: $\Omega_{\Lambda} = 0.7 (\Omega_M + \Omega_{\Lambda})$

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

... 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 Dichteinhomogenitäten 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 (Λ 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?

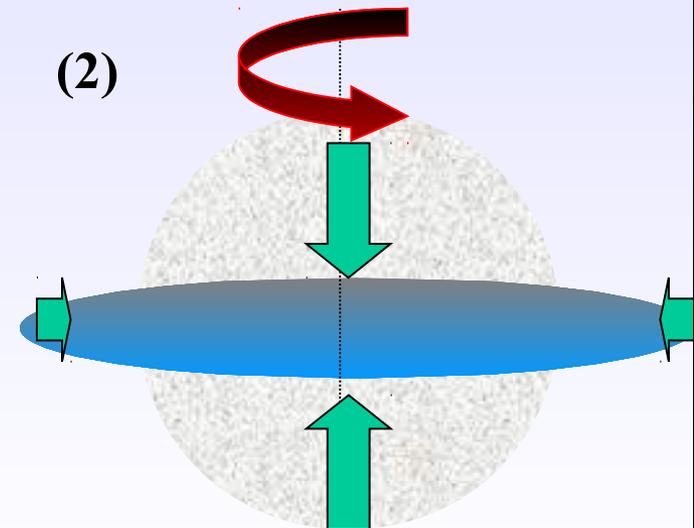
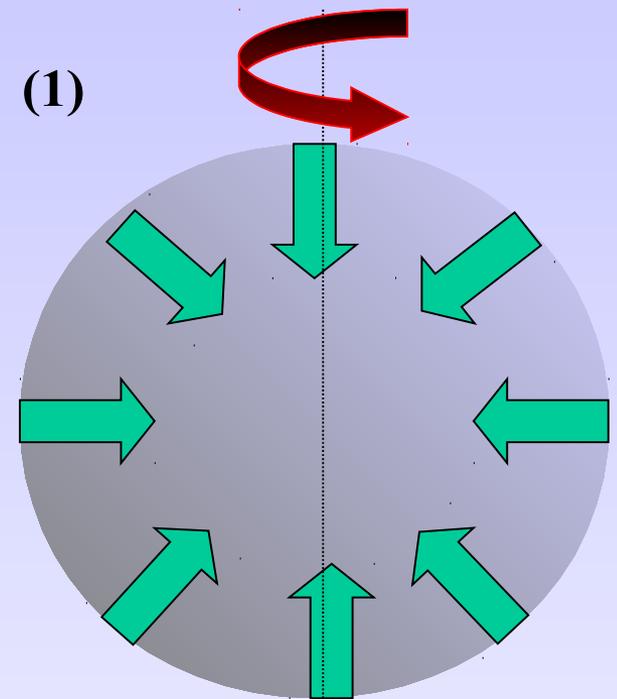
8.1 „Klassisches“ Szenario

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)

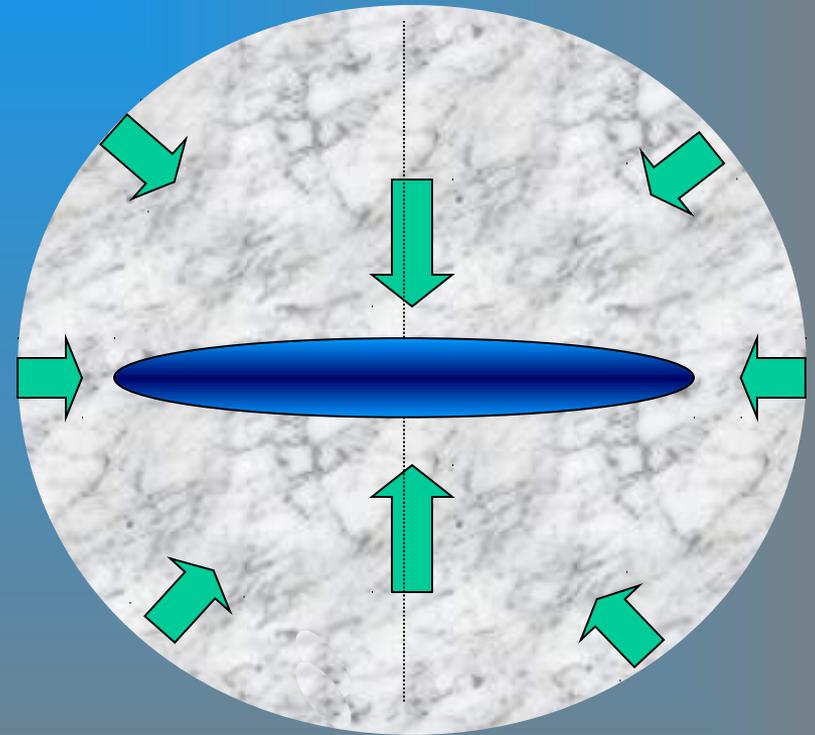
(*) Eggen, Lynden-Bell & Sandage (1962)



8.1 „Klassisches“ Szenario

Spätere Modifikationen

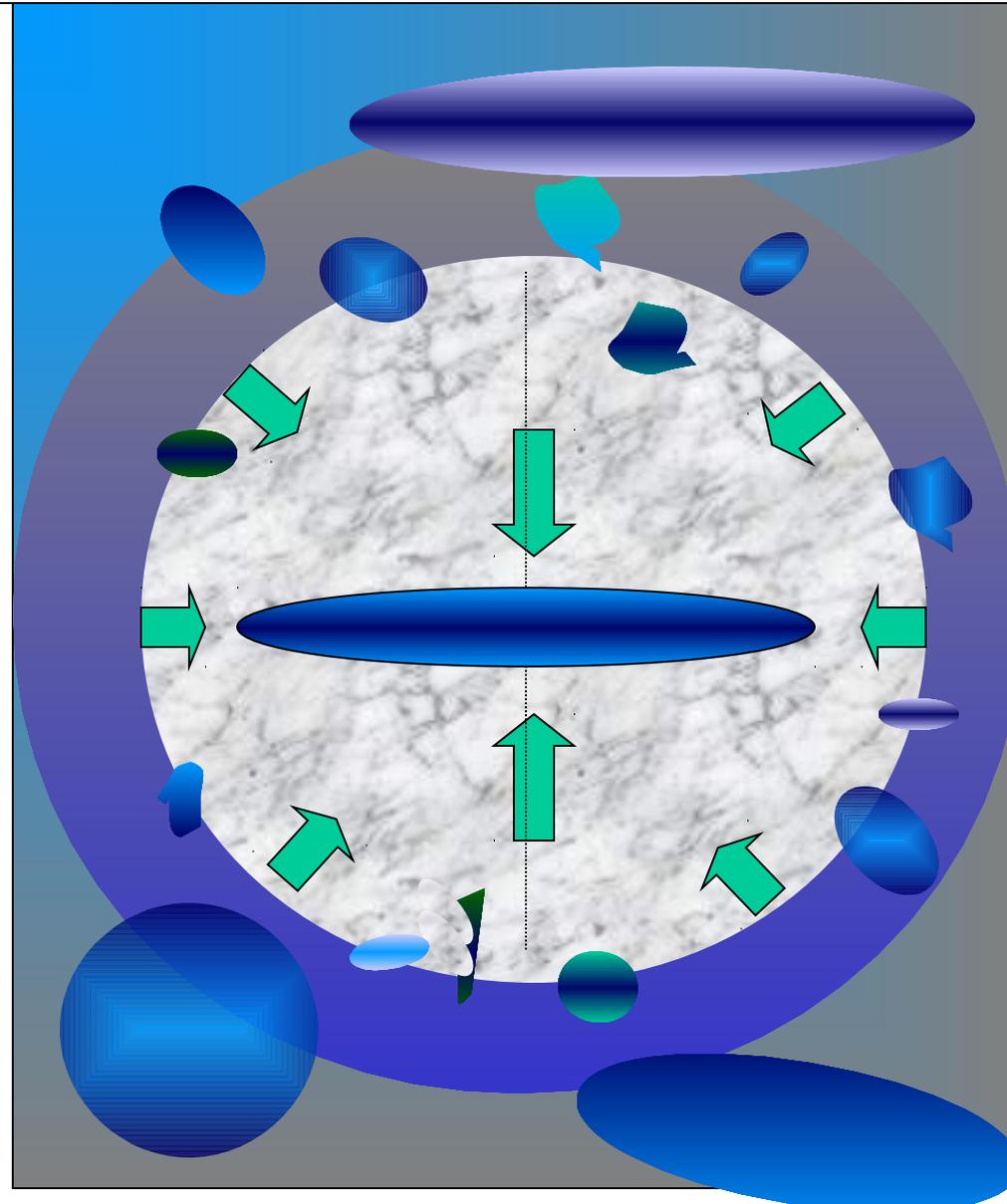
1. Innere Struktur (Wolken) kann Kollaps verzögern (dissipative Kontraktion anstatt freier Fall)



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

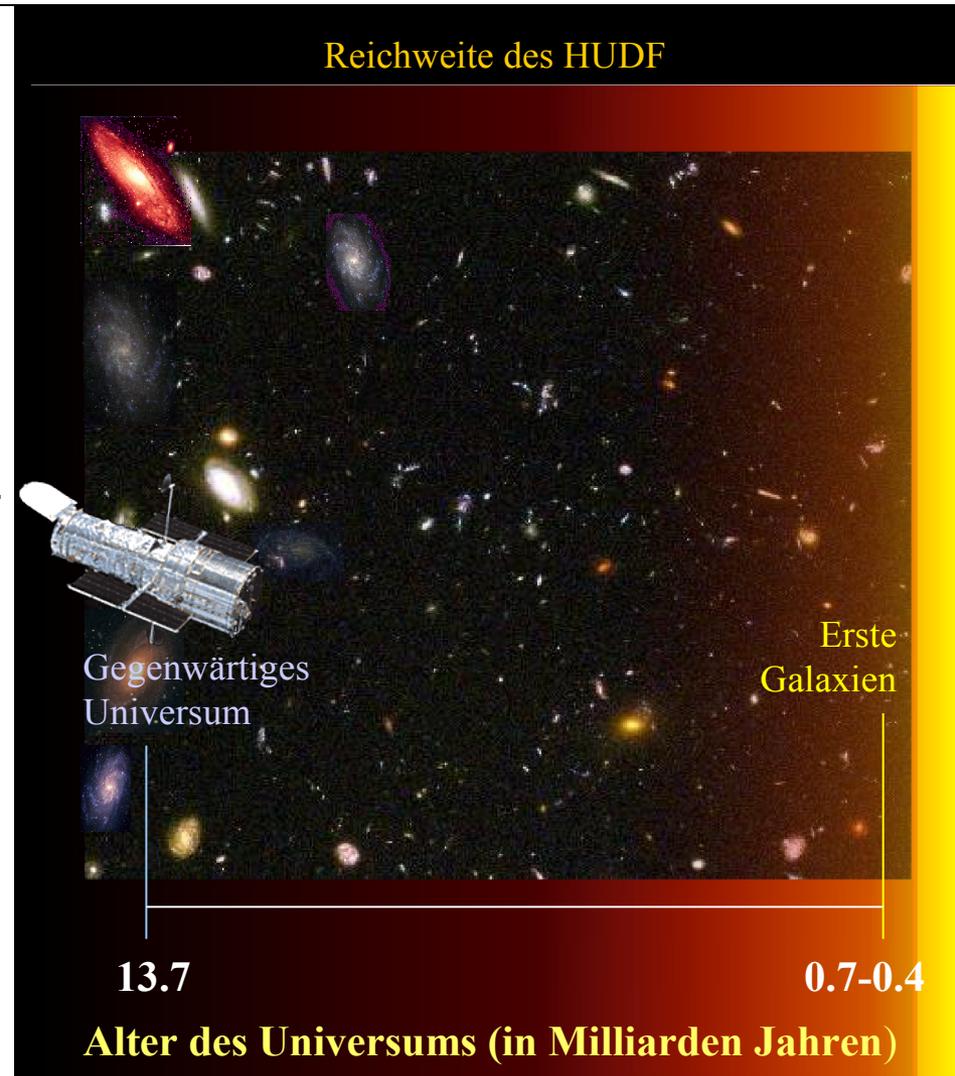
Problem:

Leuchtkraftfunktion der Galaxien
→ Die meisten nahen Galaxien sind leuchtschwach.

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

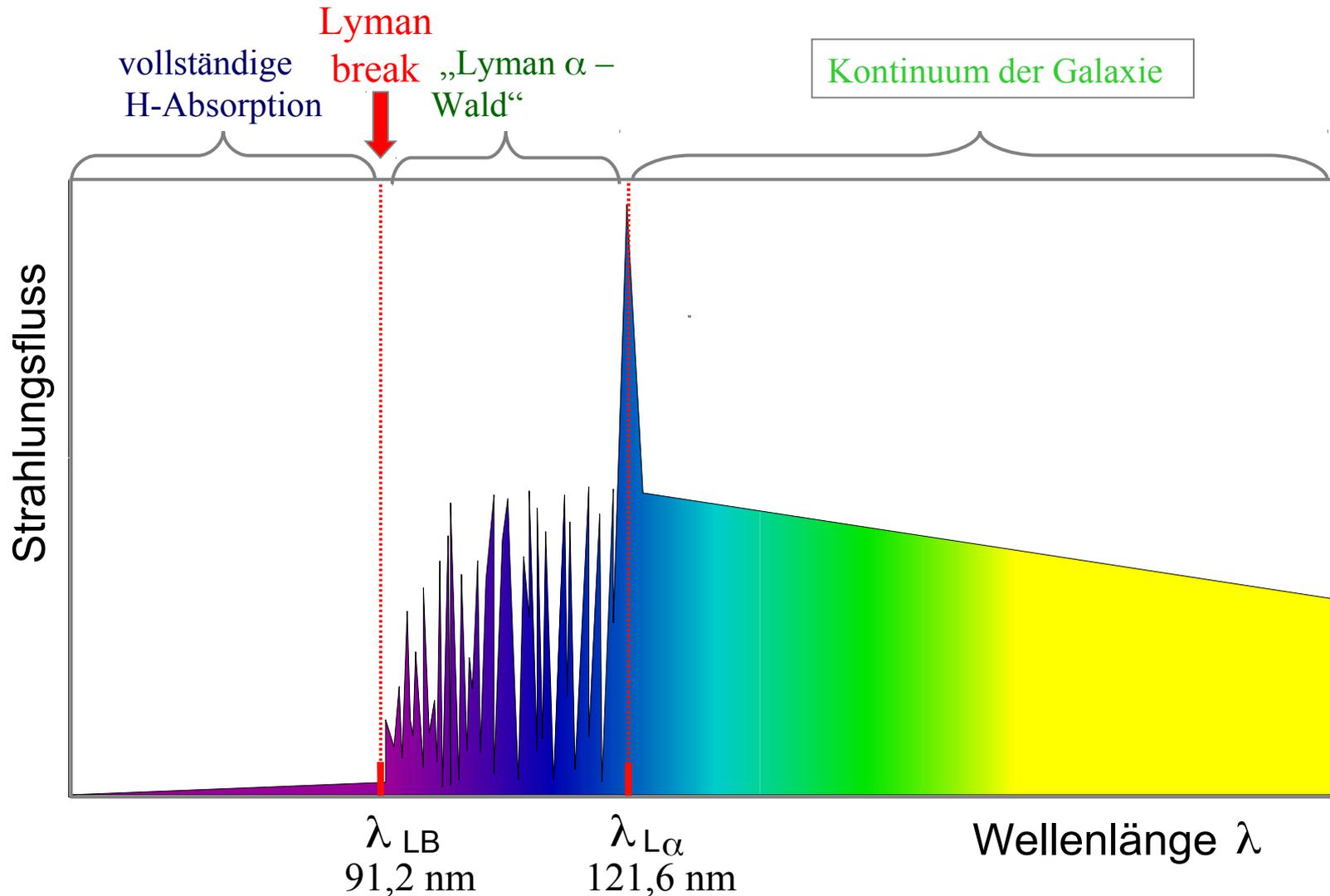
→ Bestätigung erfordert Spektroskopie an Großteleskopen (zeitaufwändig!)

→ Zusätzliche Selektionskriterien erforderlich



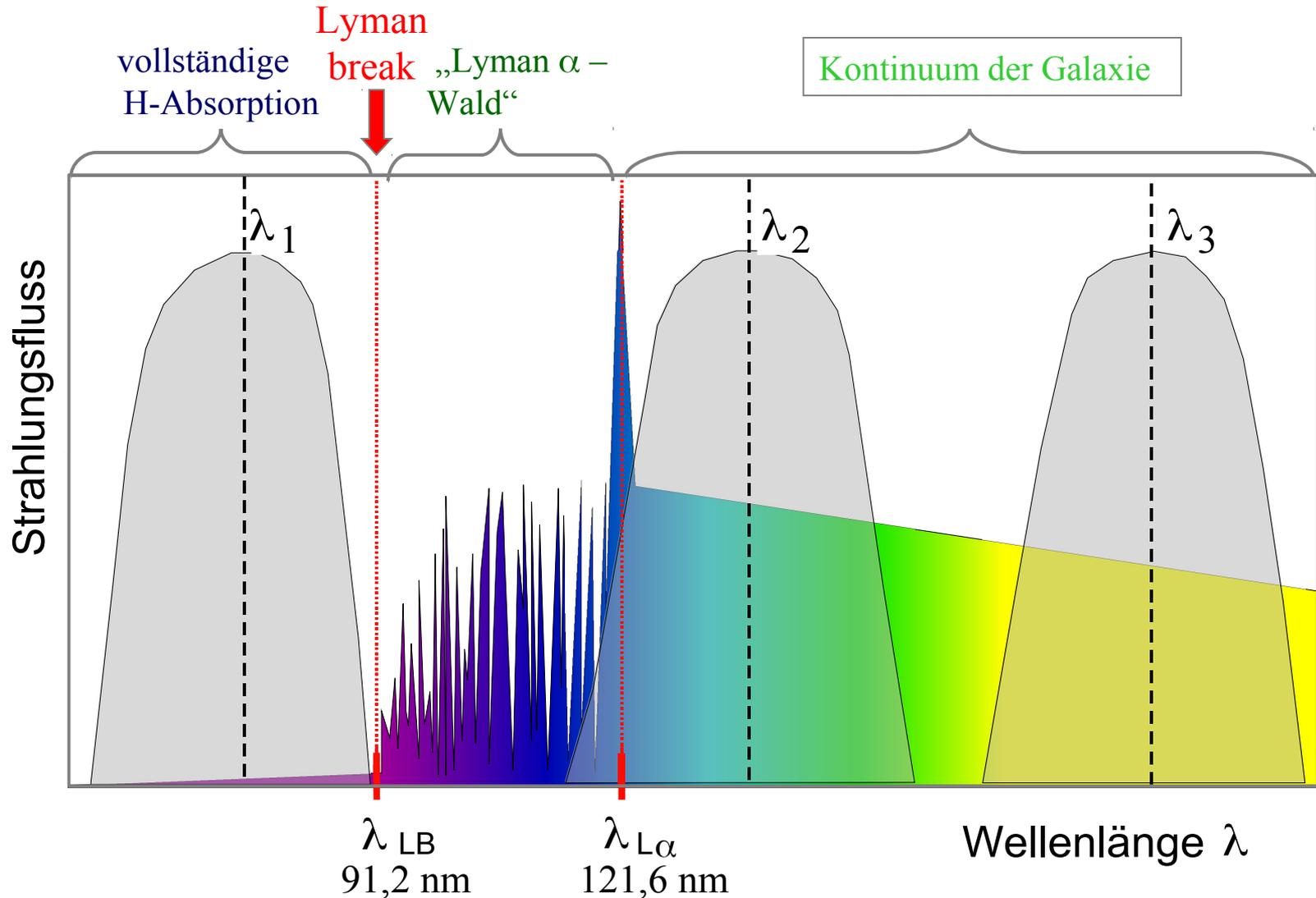
8.3.1 Schwache Galaxien im HUDF

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

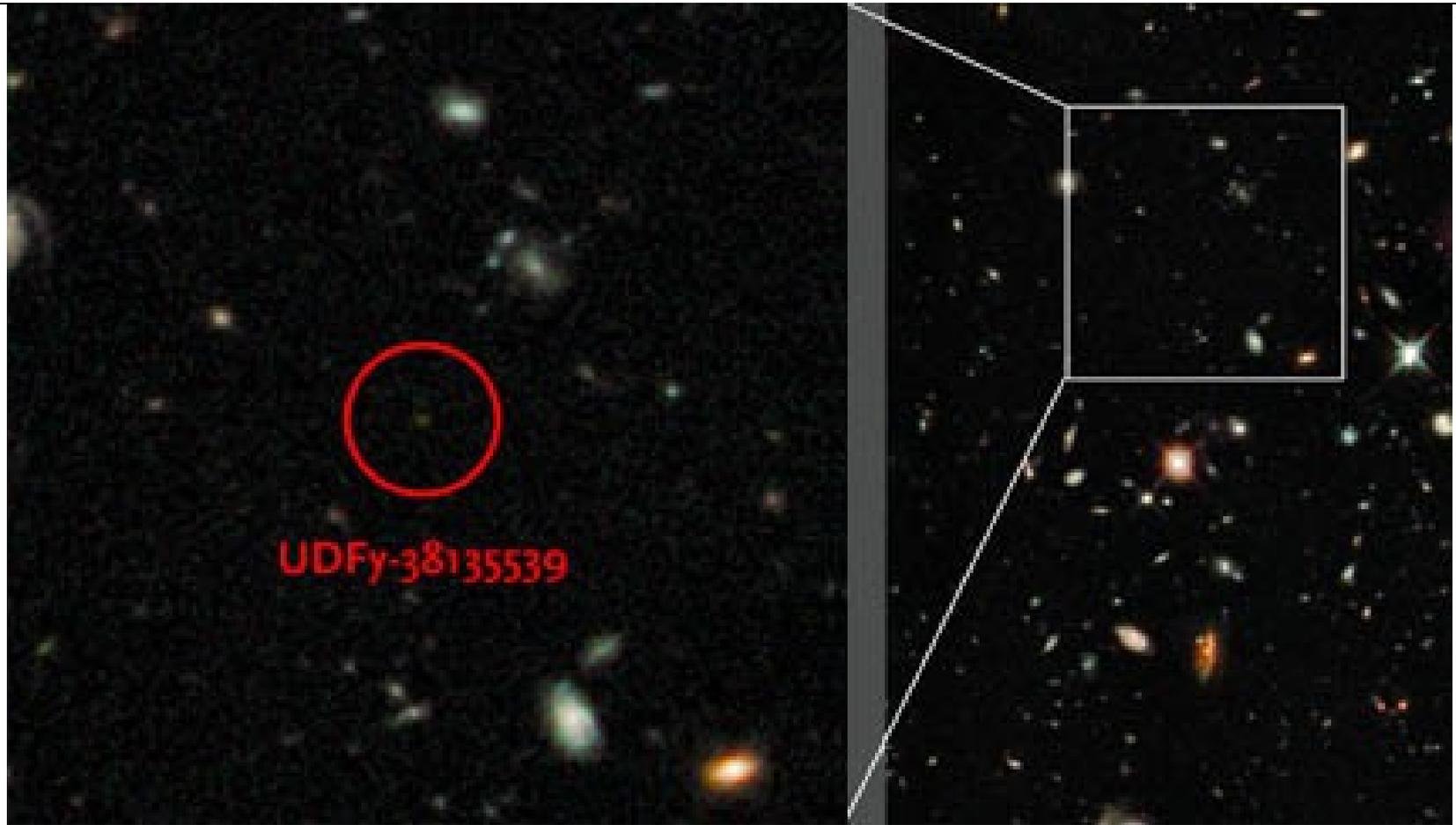


8.3.1 Schwache Galaxien im HUDF

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

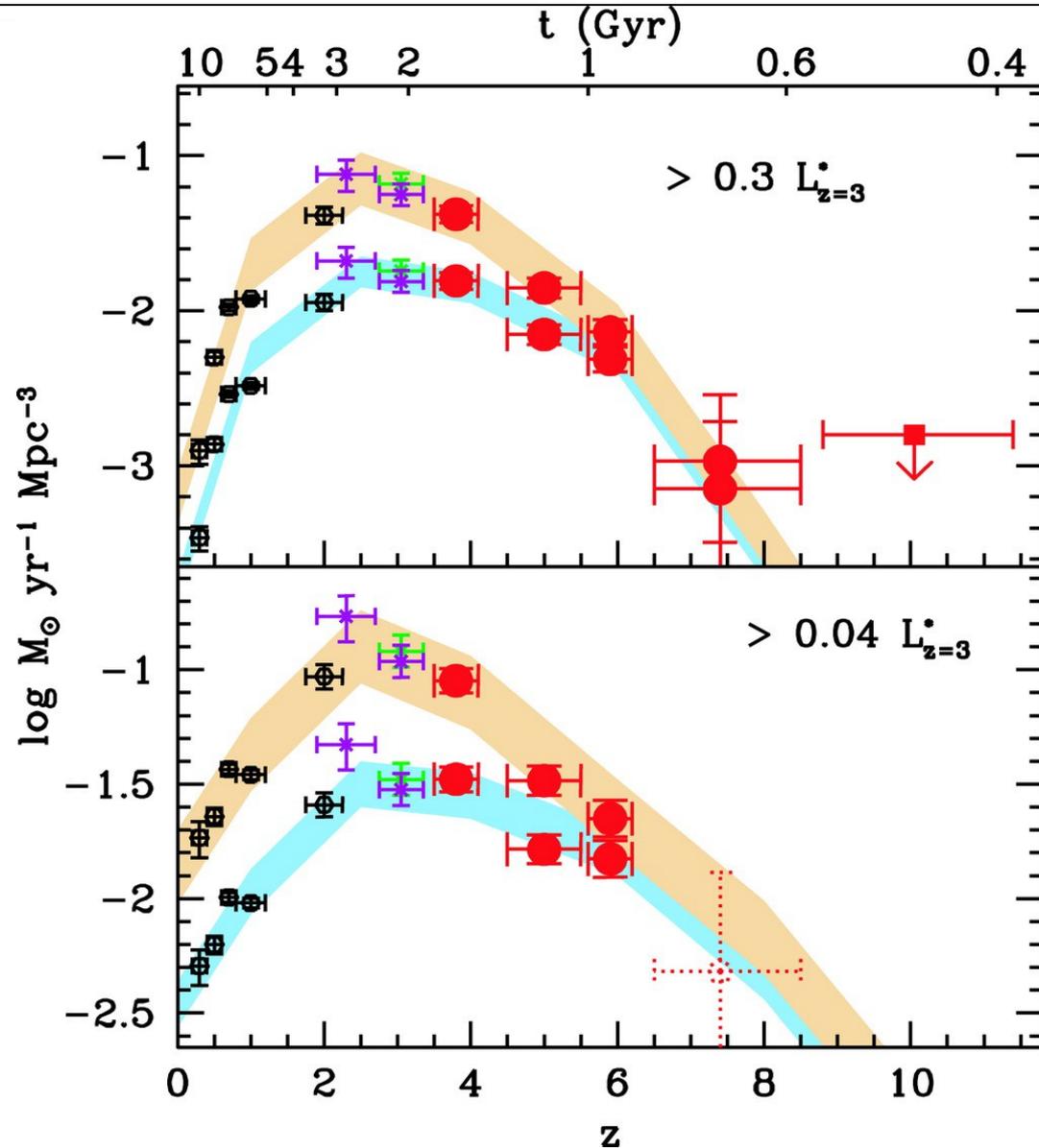
aus Dropout-Galaxien in
HUDF u.a. tiefen Feldern

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

Rot: Korrektur bzgl.
Staubextinktion

Blau: keine Korrektur bzgl.
Staubextinktion

(Bouwens et al. 2007)

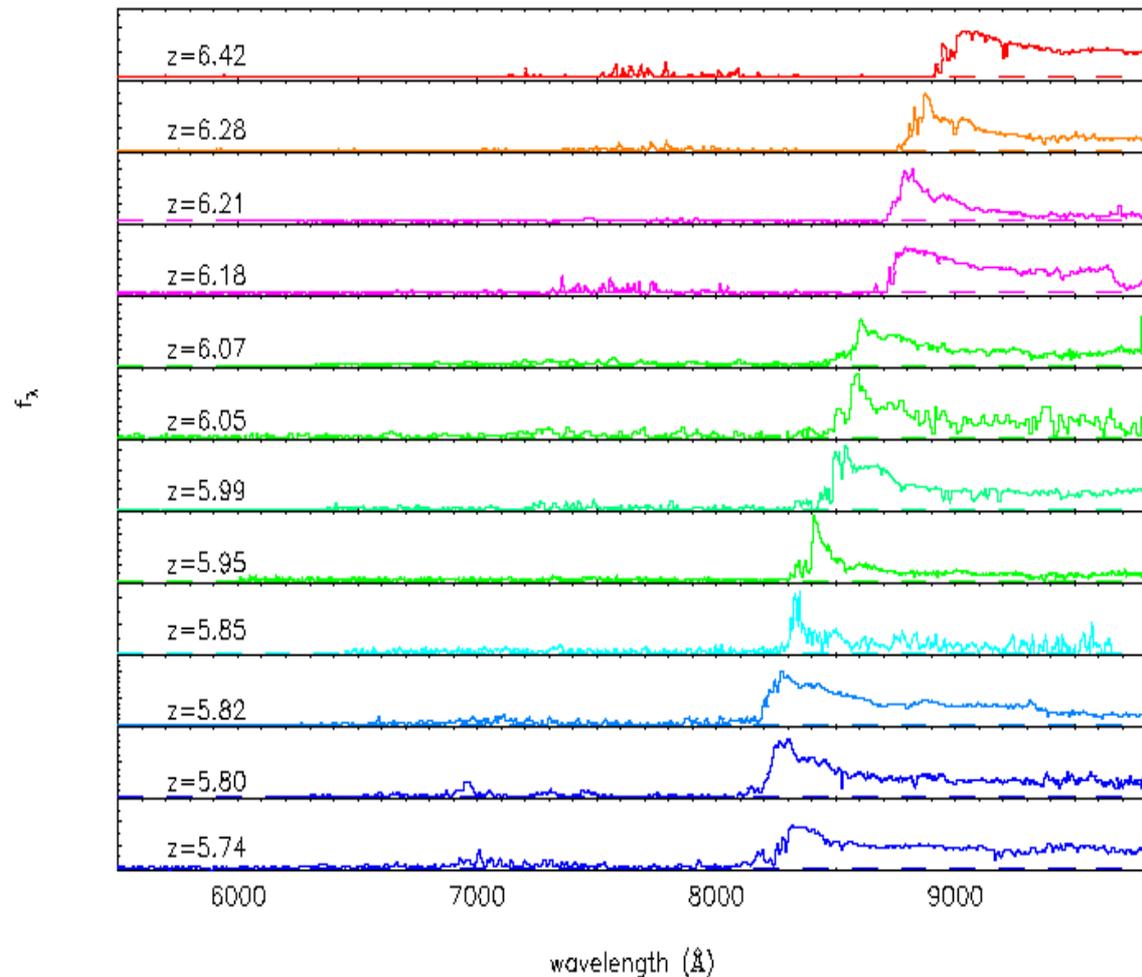


8.3.2 Quasare bei großem z

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

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

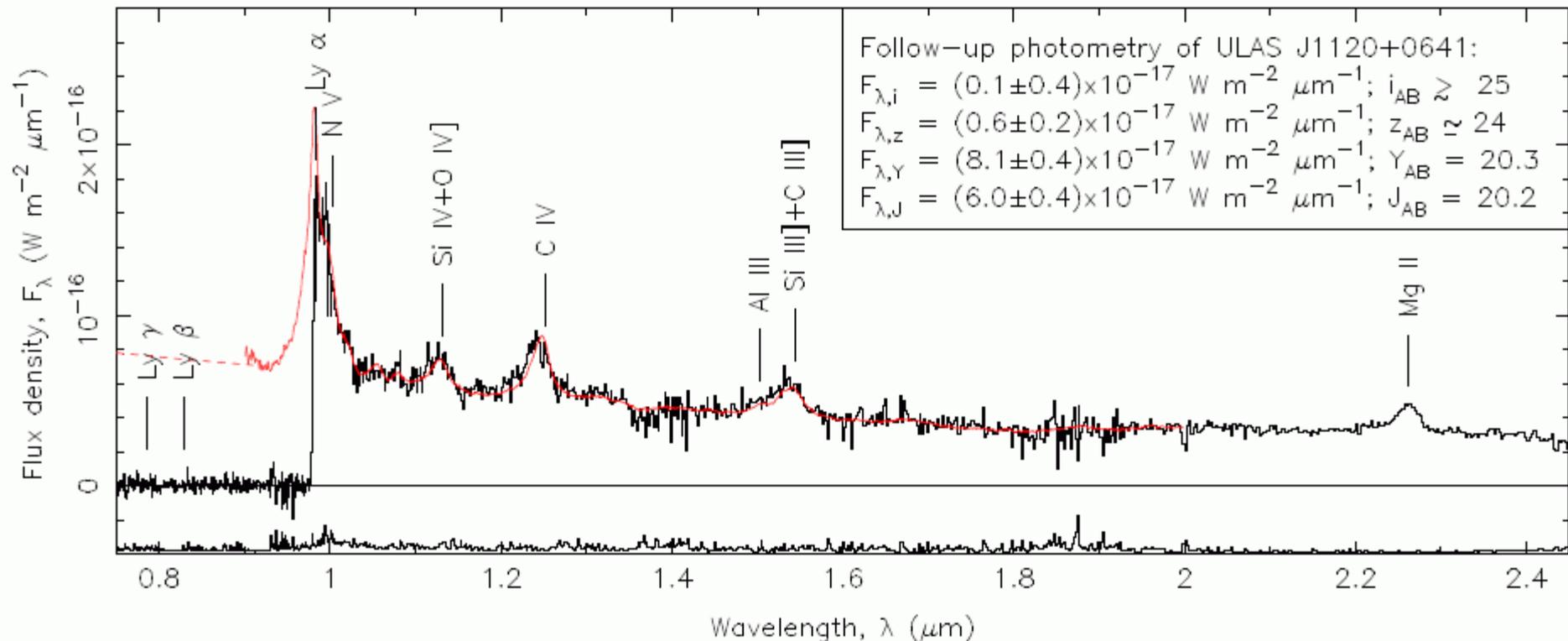
→ Suche im NIR erforderlich
(z.Z. im Gang)



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

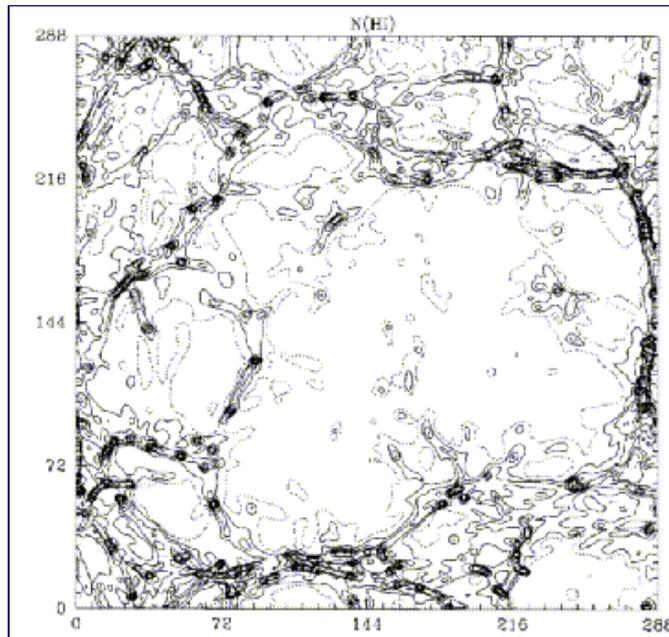
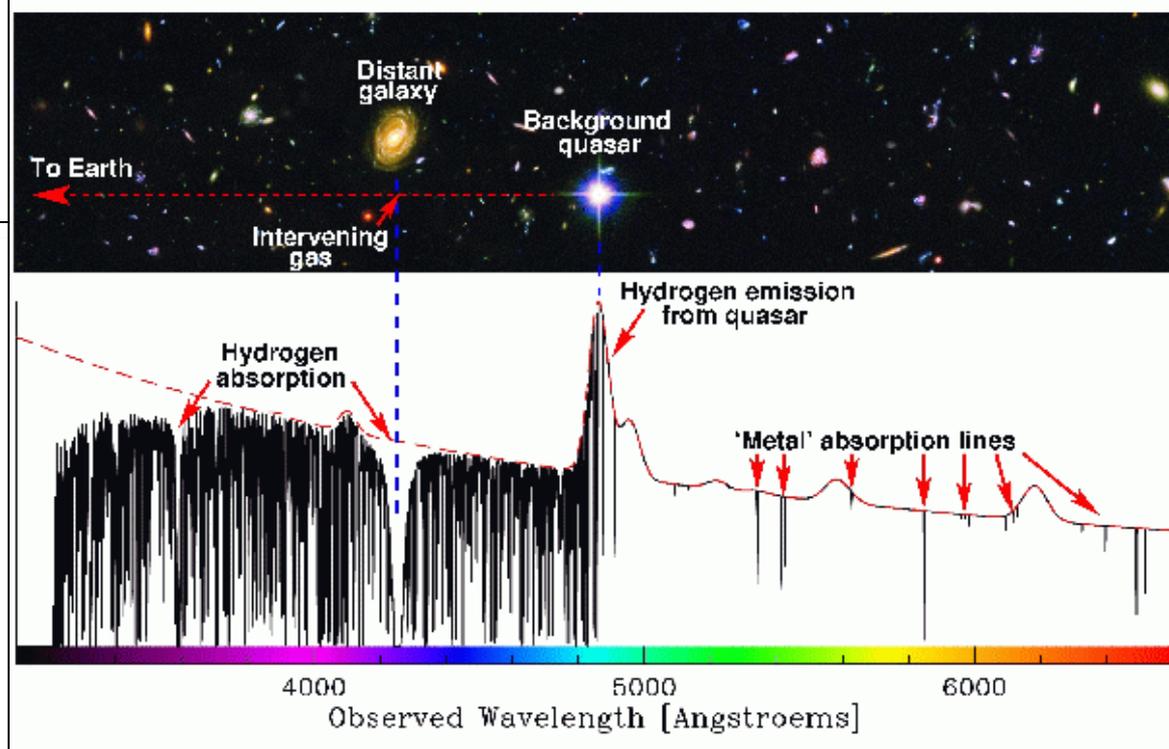
Quasare als Tiefensonden:

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

Absorption durch HI-Gas (vor allem Ly α -Linie)

→ Vielzahl von Abs.linien (“Lyman α -Wald”)

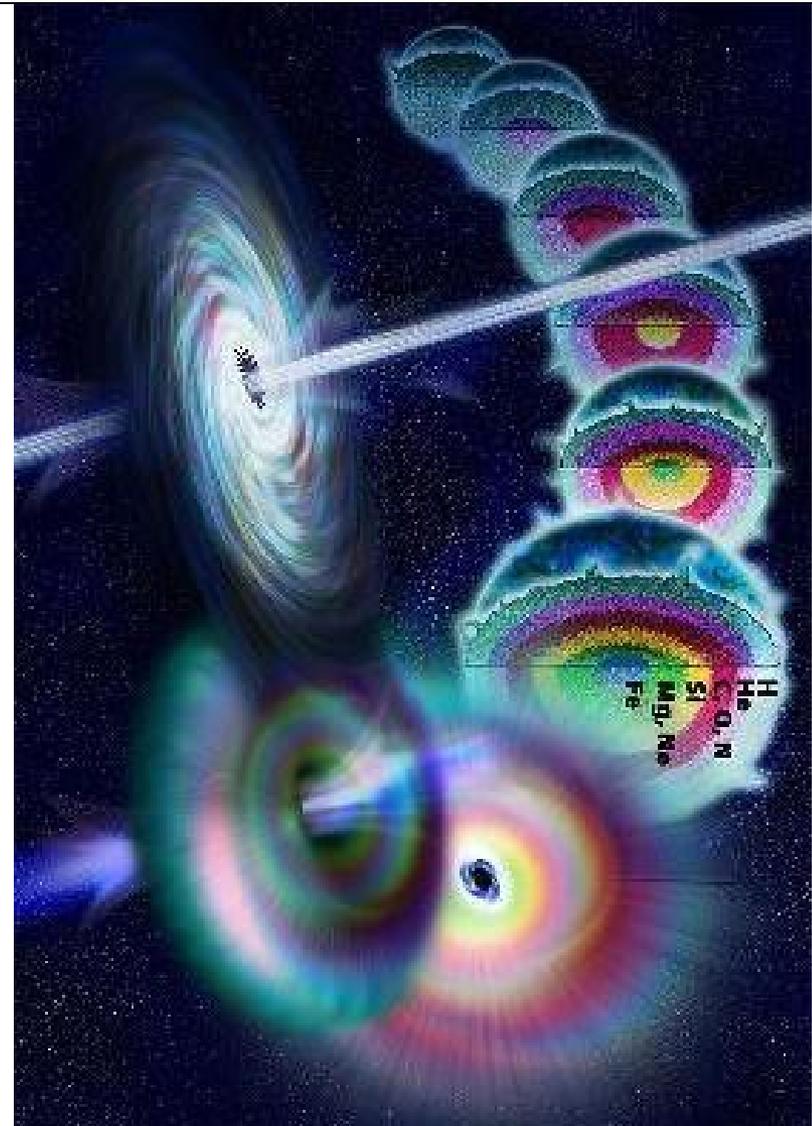
→ Großskalige Struktur des IGM aus Quasar-Spektren



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

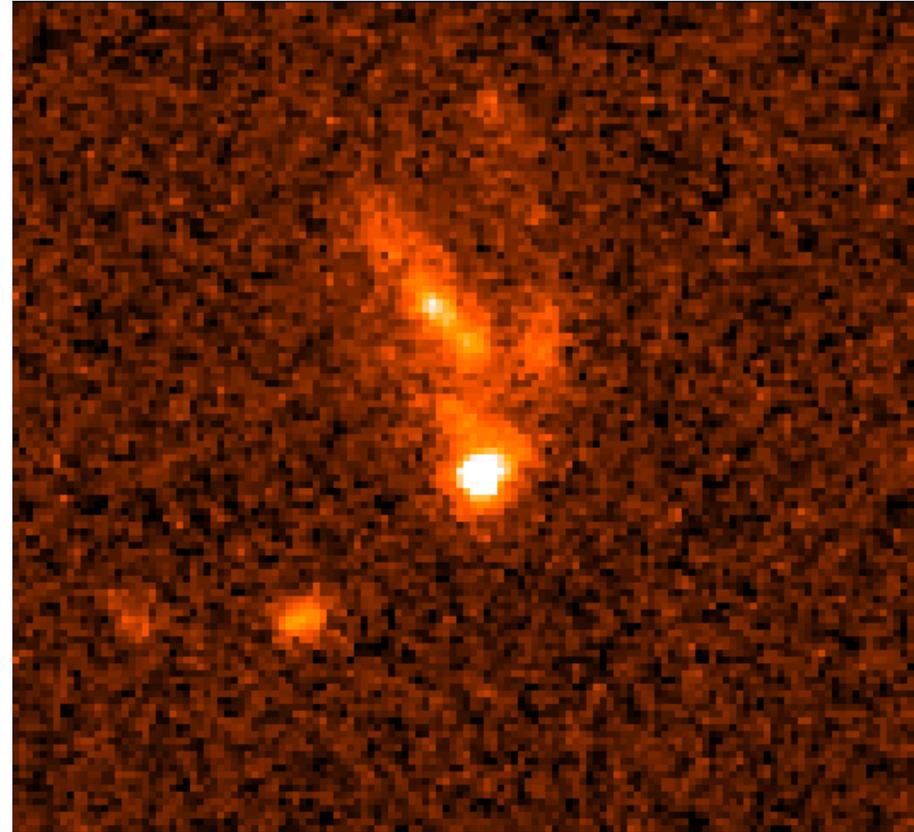
8.3.3 Gamma Ray Bursts bei großen z

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)

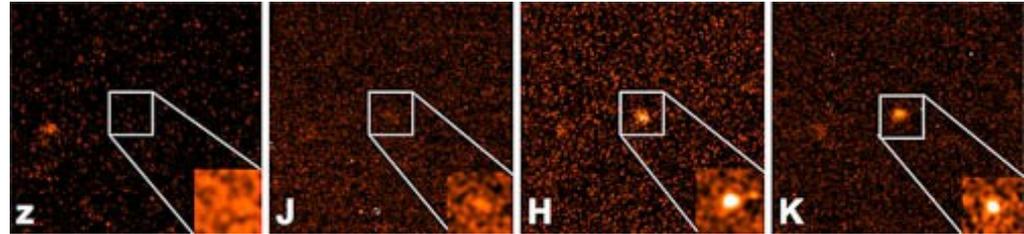
→ Spekulation, dass damit Sternent-
stehung bei sehr großem z beobachtbar



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

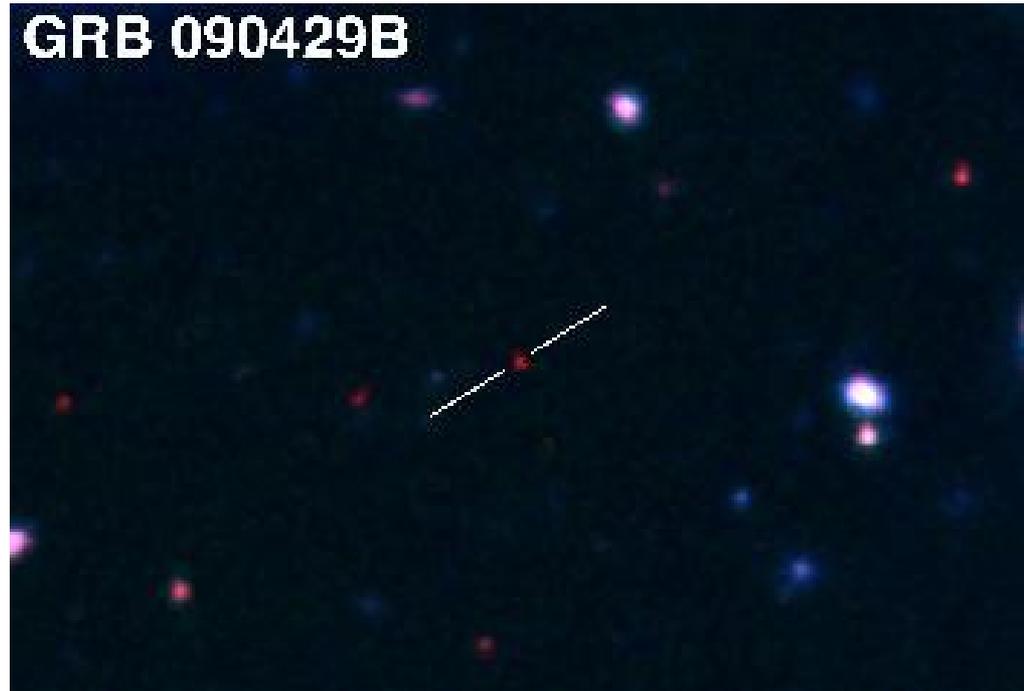
8.3.3 Gamma Ray Bursts bei großen z

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



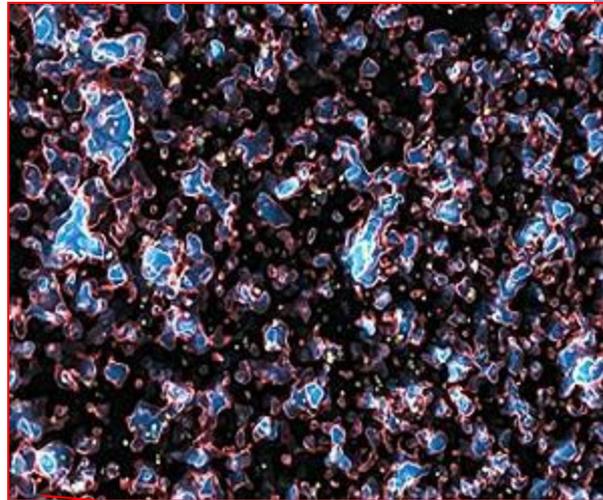
Optischer *Afterglow* von GRB 090429B

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?

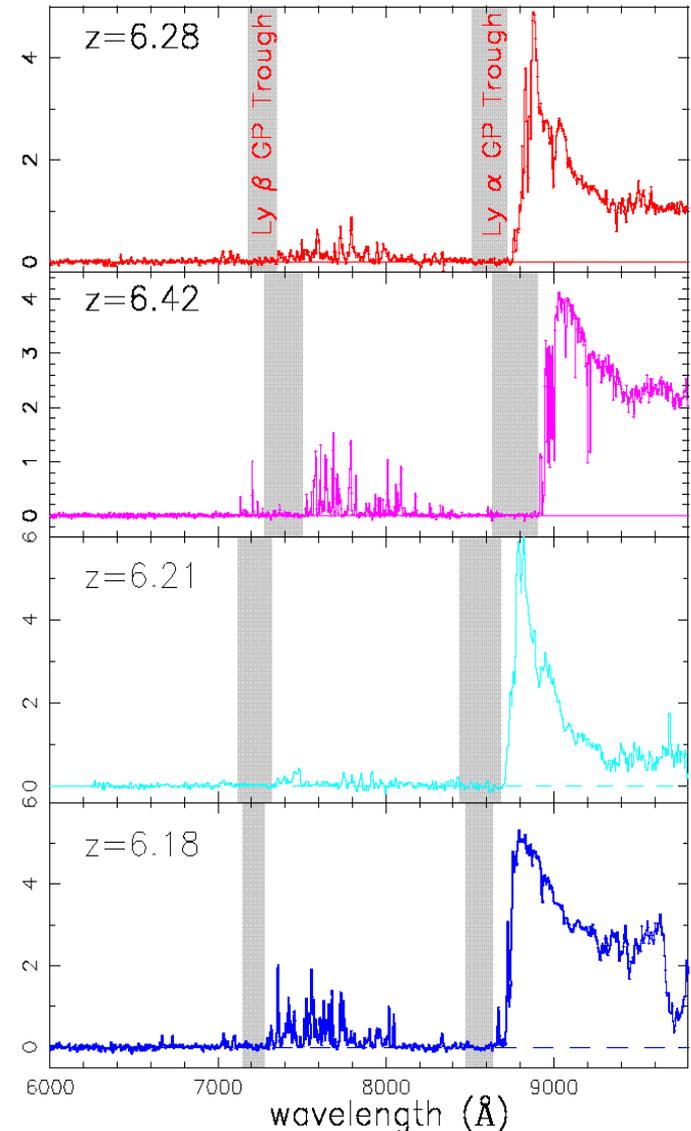
Quasare mit $z > 6$:

Spektren: Vollständige Absorption unmittelbar kurzwellig von Ly α -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?

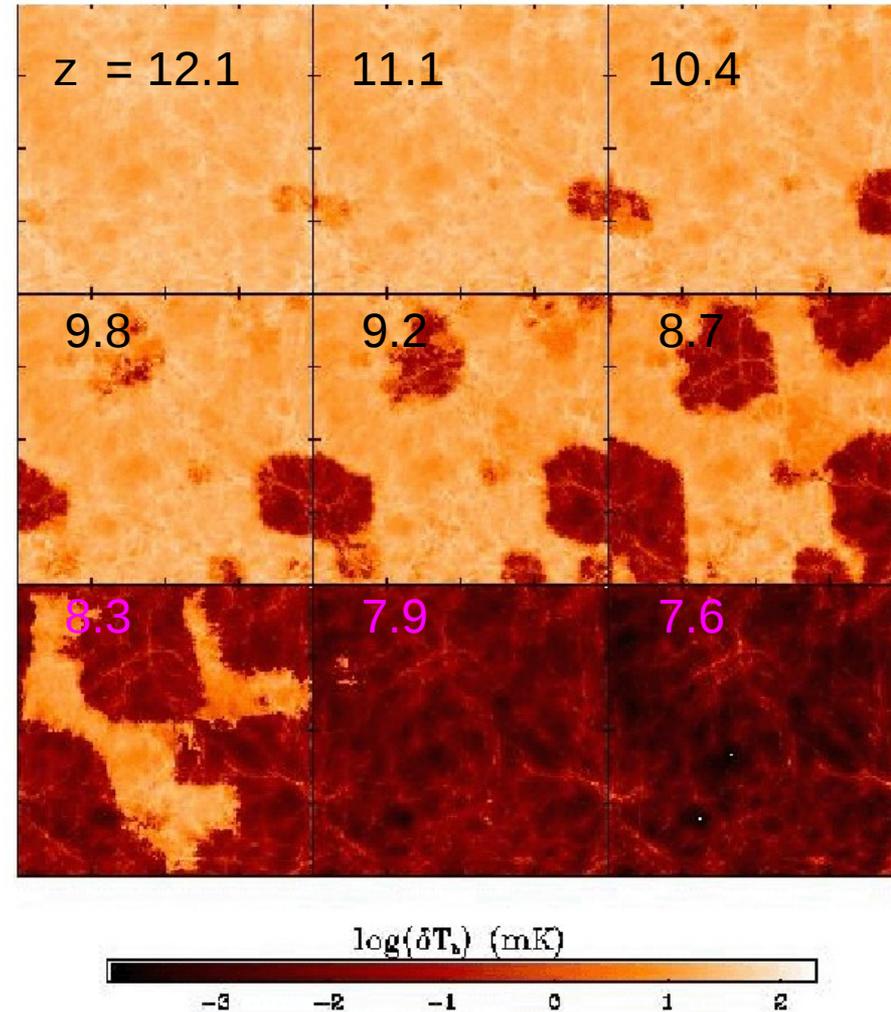
Beobachtung der Re-Ionisation mit Radioteleskopen?

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 ~ 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 ...

