



# Die Reionisierungsepoche

Das Ende des dunklen Zeitalters

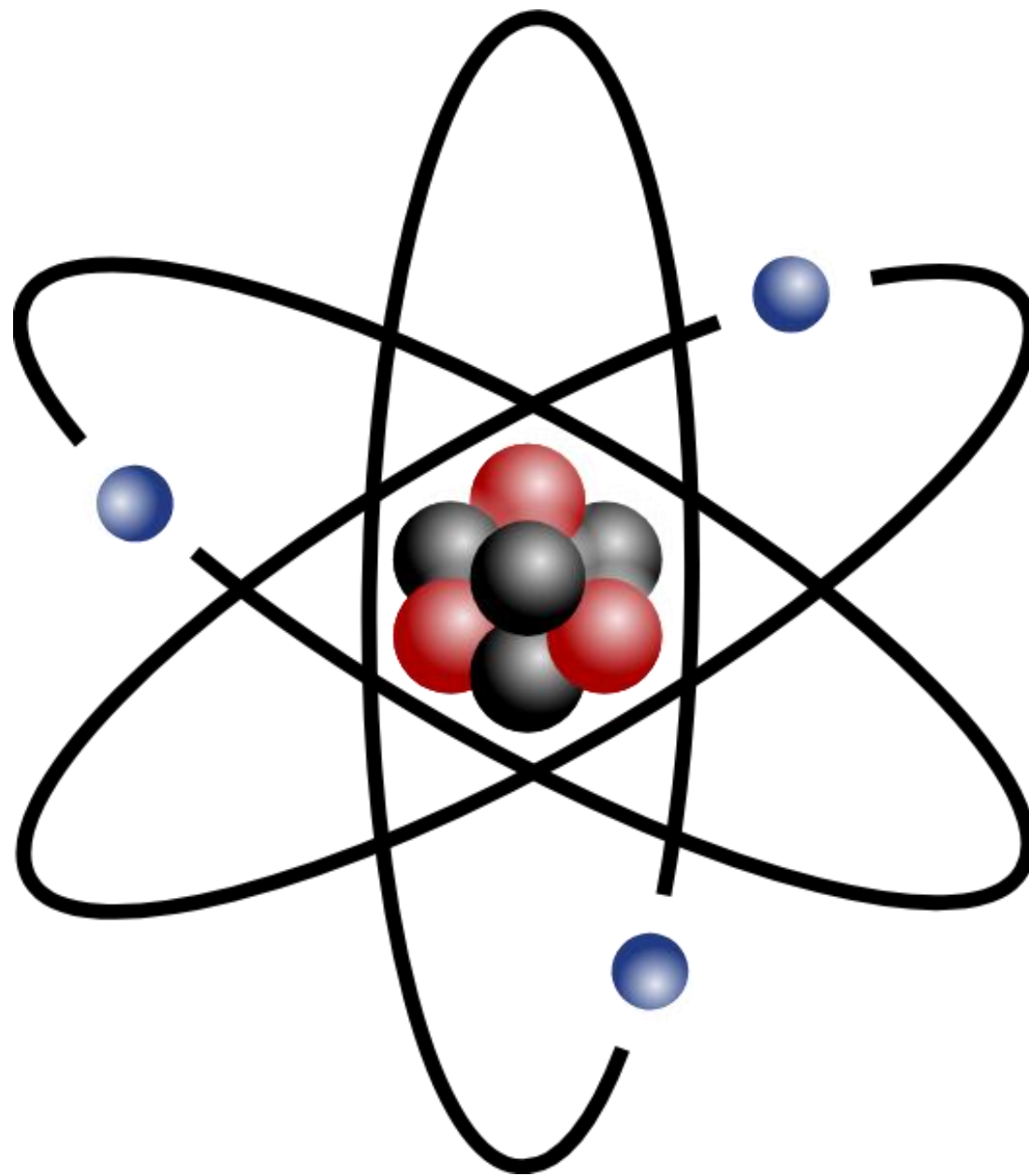
Emmanuel Blum

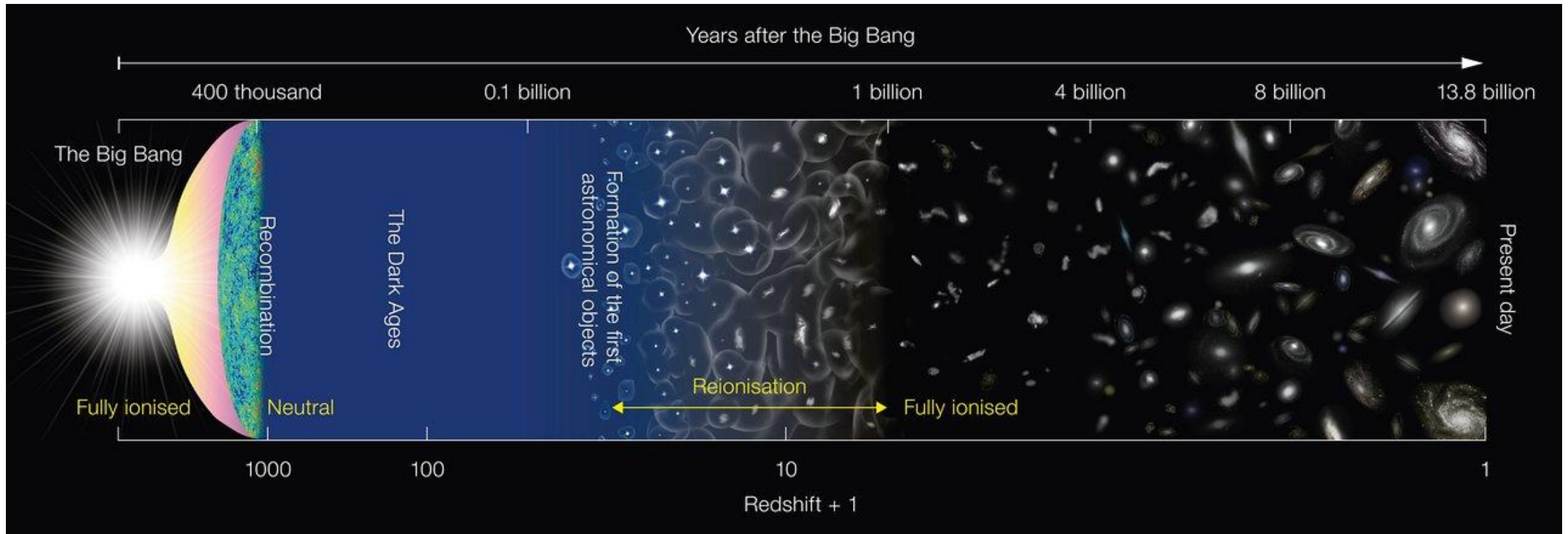
10. Oktober 2024

# Inhalt

1. Grundlagen
  - Chronologie des Universums
  - Wasserstoffatom & Lyman-Serie
  - Thomson Streuung
  - Kosmische Rotverschiebung
2. Untersuchung der Reionisierungsepoche
  - Intergalaktisches Medium (IGM)
  - Lyman Alpha Wald
  - Gunn-Peterson Effekt
  - Optische Tiefe
  - Weitere Untersuchungsmethoden mit Radioastronomie und X-Ray
3. Strukturen und ersten Quellen im kosmischen Dunkel
  - Hierarchische Entstehung der Strukturen
  - Virialsatz
  - Jeans-Kriterium
  - Energiequellen der Reionisierung
  - Klasse extragalaktischer Objekte
4. Der Reionisierungsprozess
  - Reionisierungsphasen
  - Helium Reionisierung

# 1. Grundlagen





# Chronologie des Universums

# Reionisierung: letzter Phasenübergang

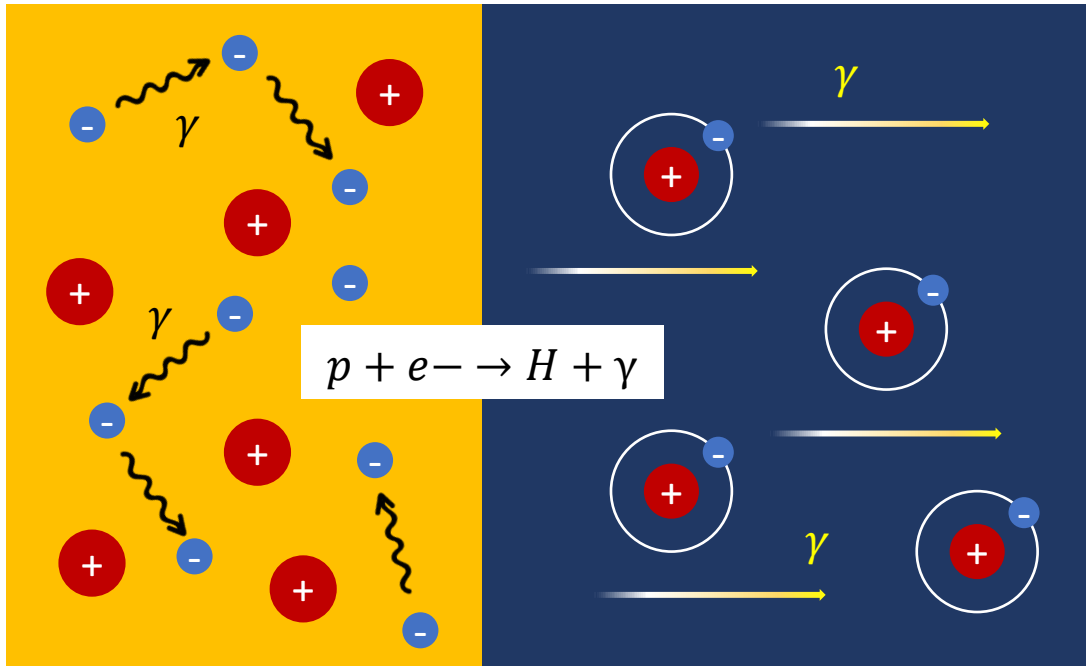
Z=1100  
(380.000 J)

Z=20  
(150 Mio. J)

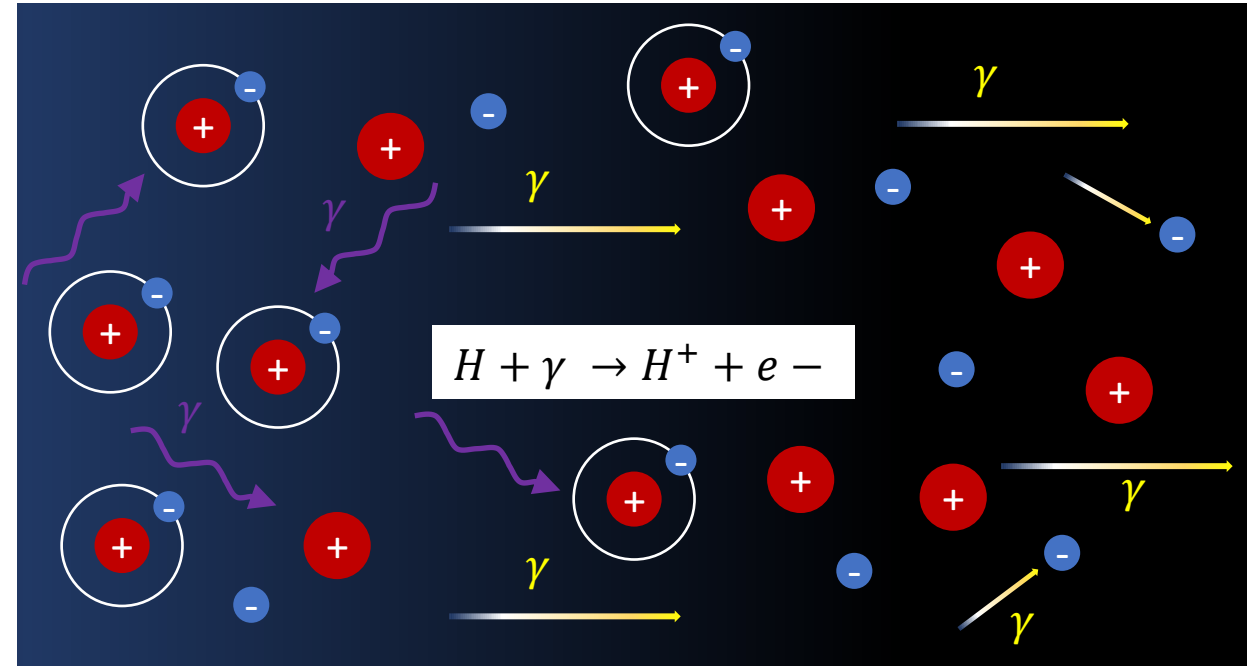
Z=6  
(1 MJ)

Heute  
13,8 MJ

REKOMBINATION

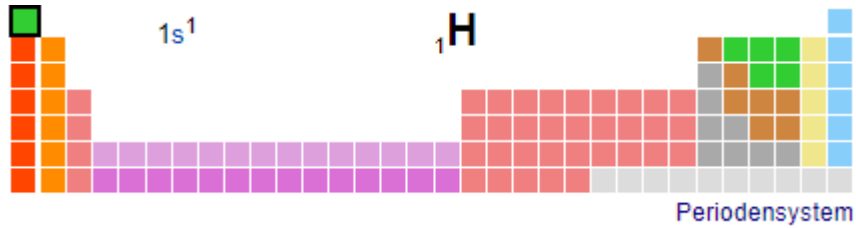


REIONISIERUNG



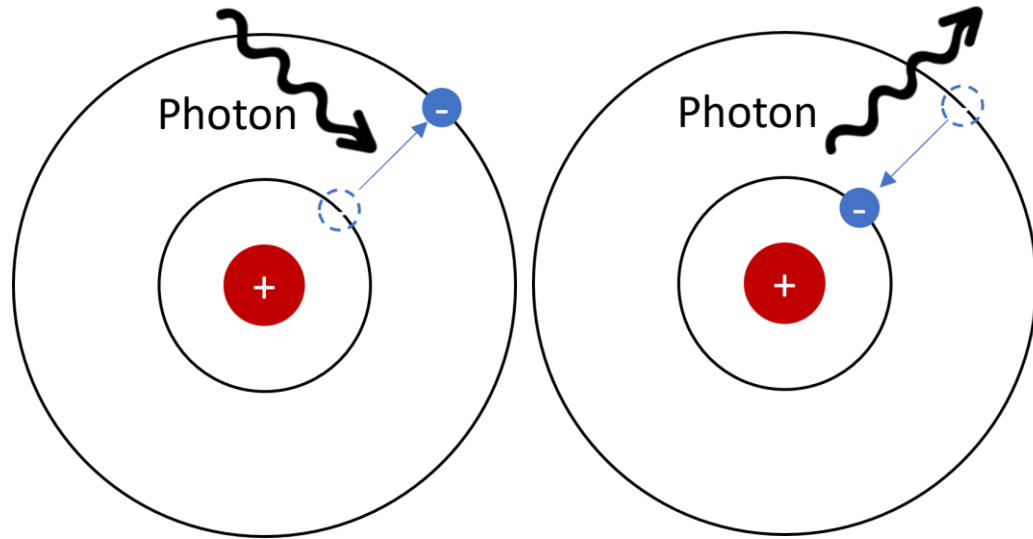
# Wasserstoffatom

Symbol: H

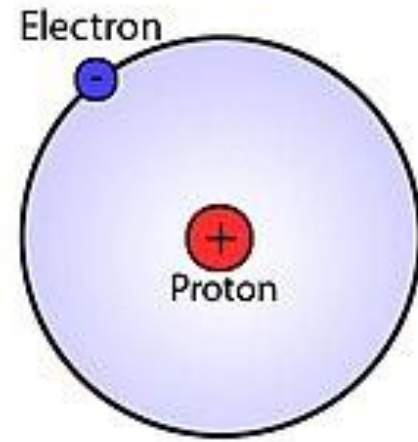


Absorption

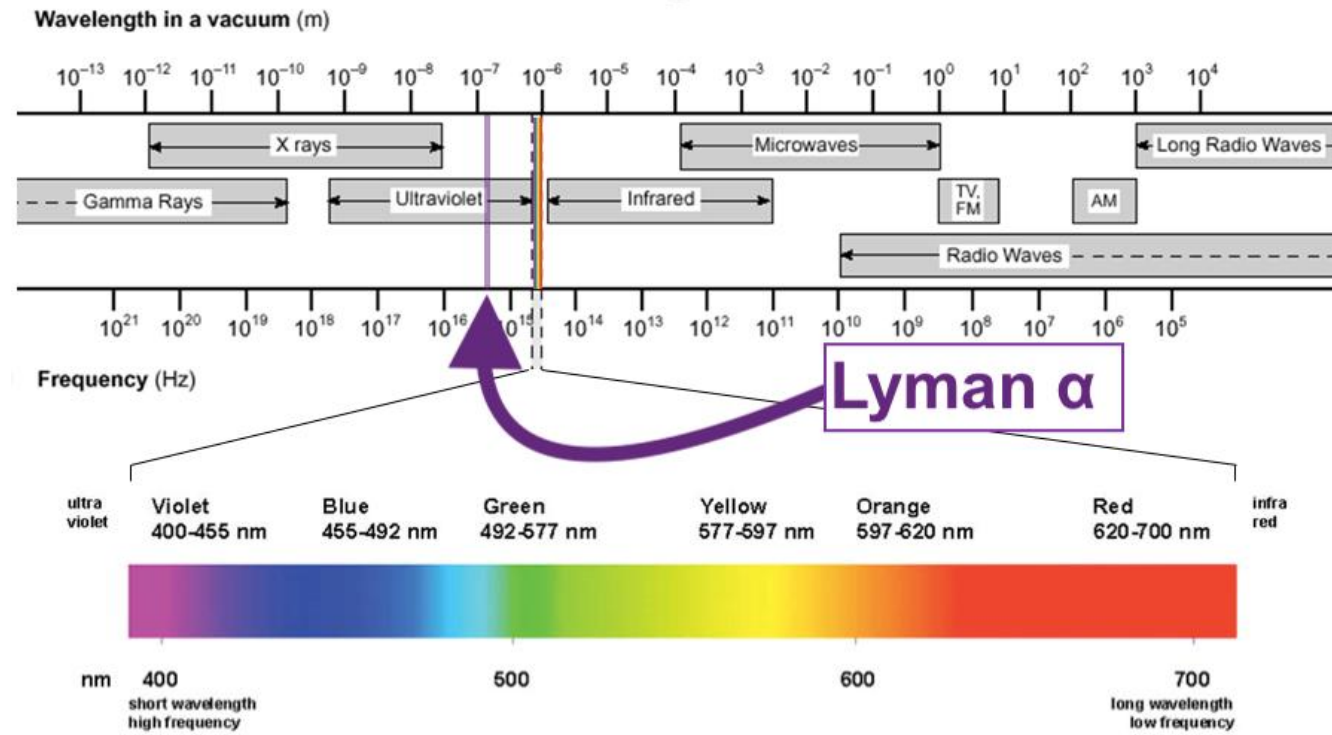
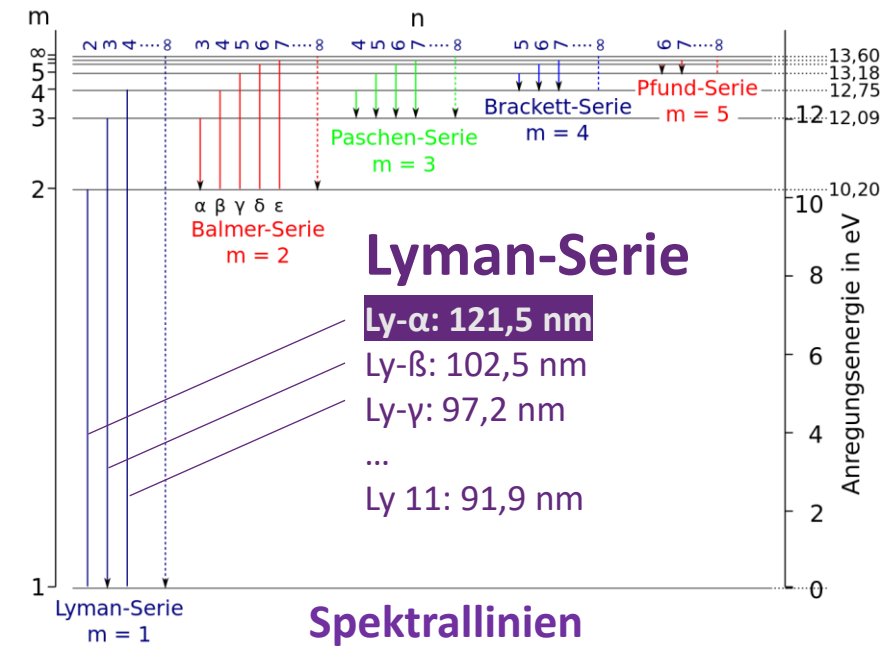
Emission



**Ionisation:** Elektron wird entfernt, Atom ist positiv geladen:  $E_{\text{Photon}} \geq 13,6 \text{ eV}$  ( $91,2 \text{ nm}$ )



Bohrsches Atommodell



# Photon



- Quantenenergie eines Lichtteilchens (Photon)
- Max Planck (Quantenhypothese des Lichtes - 1900) und Einstein (Photoeffekt - 1905)
- Einheit:
  - Joule (J)
  - Elektronenvolt (eV)  
 $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{J}$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

- $\nu, \lambda$  Frequenz, Wellenlänge des Lichts
- $h$ : Planck – Konstante ( $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ )
- $c$ : Lichtgeschwindigkeit

### Beispiele:

Rotes Licht	620 nm	2 eV
Lyman Alpha	121,5 nm	10,2 eV
X Ray	< 10 nm	> 100 eV

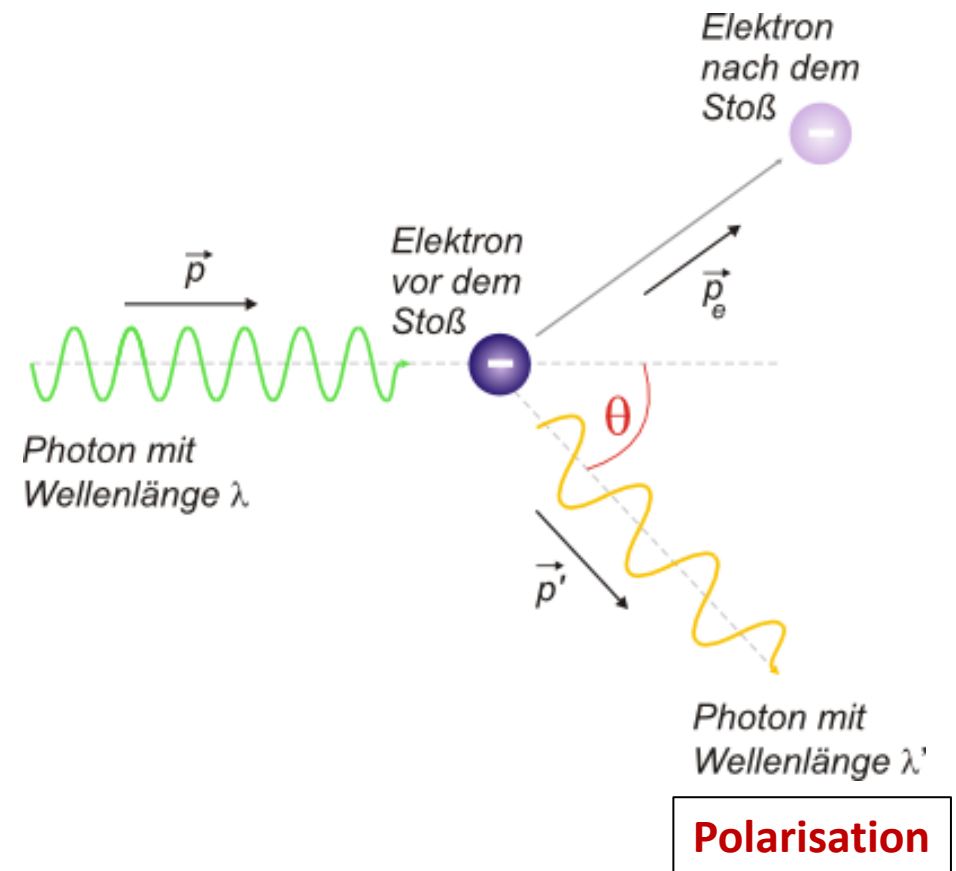
**Je kleiner die Wellenlänge, desto grösser die Energie !**

# Wechselwirkung Licht-Elektron

## Thomson-Streuung

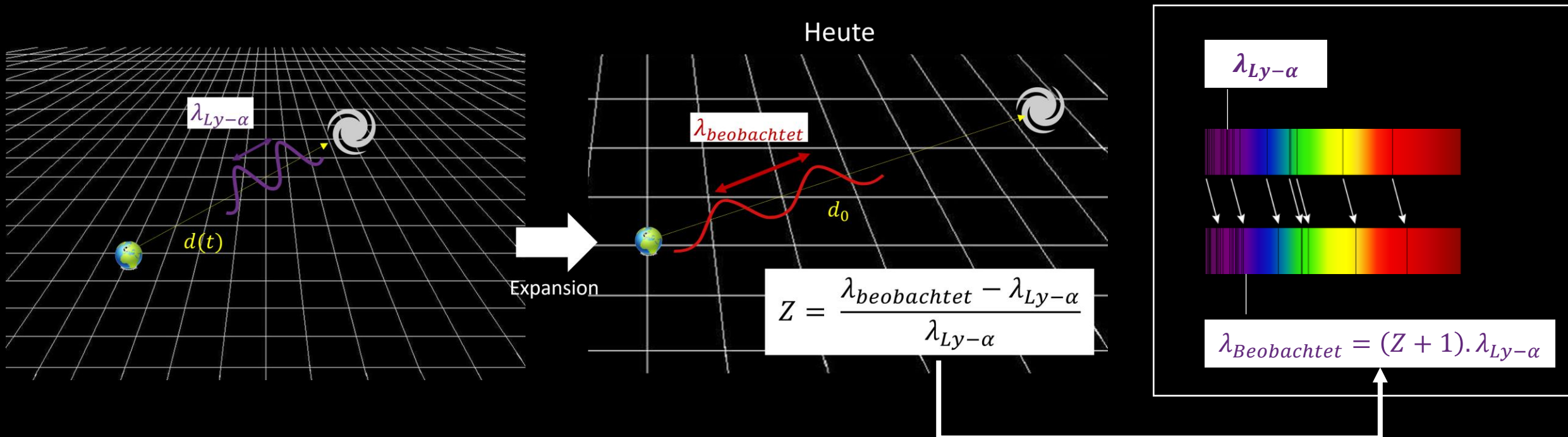
- **Streuung von elektromagnetischen Wellen (Photon) an geladenen Teilchen**
- Sonderfall von Compton Streuung: wenn  $E_{\text{photon}} \ll E_{e^-}$  ( $0,5\text{MeV}$ ) dann ändert das Photon nicht seine Wellenlänge  $\lambda = \lambda'$  sondern nur die Richtung (und Polarisation des Lichtes)
- Sie findet statt:
  - Vor der Rekombination: Primäre Anisotropie im CMB
  - Nach der Reionisierung: CMB Photonen werden durch die freien Elektronen gestreut (Sekundäre Anisotropie im CMB)

## Die Compton Streuung:

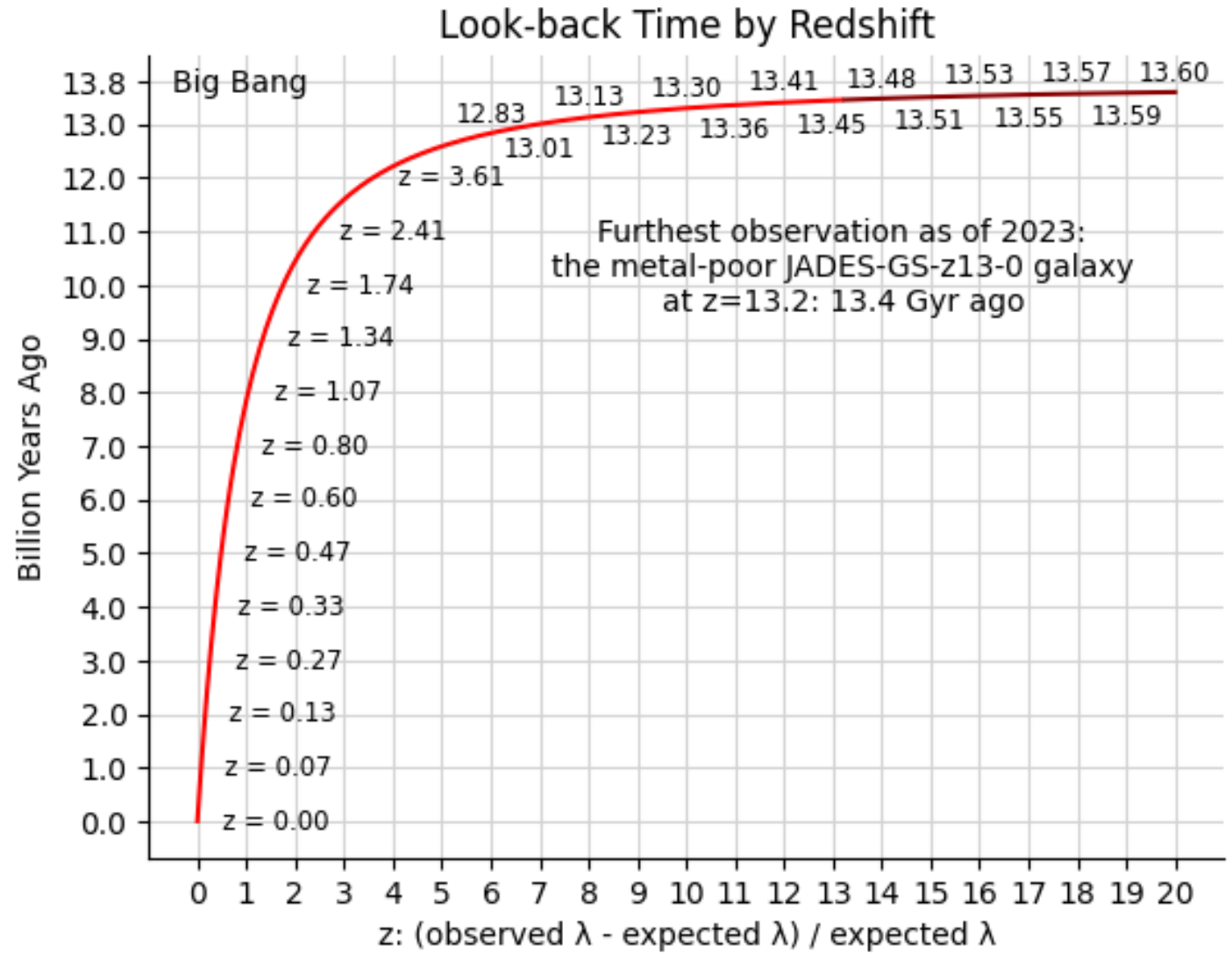


# Kosmologische Rotverschiebung (Redshift Z)

- Lageveränderung des Spektrums (Emission/Absorptions-Linie) in Richtung grösserer Wellenlängen durch die Expansion des Universums
- Beispiel: Strahlungsemission der Ly-Alpha Linie bei der Entstehung und frühen Entwicklung von Galaxien.

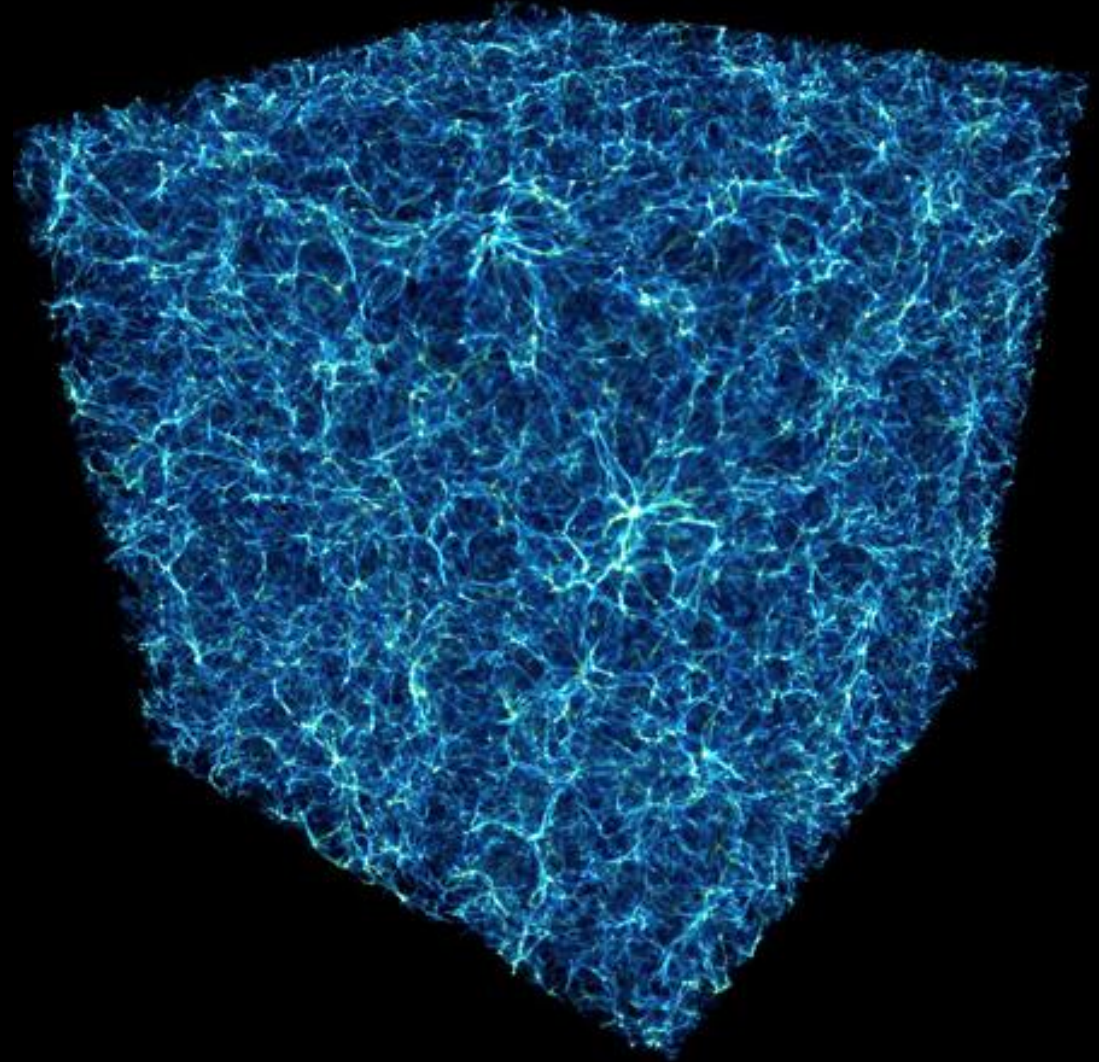


Z ist ein bequemes Maß für das Alter des Universums\* oder die Entfernungen im Kosmos



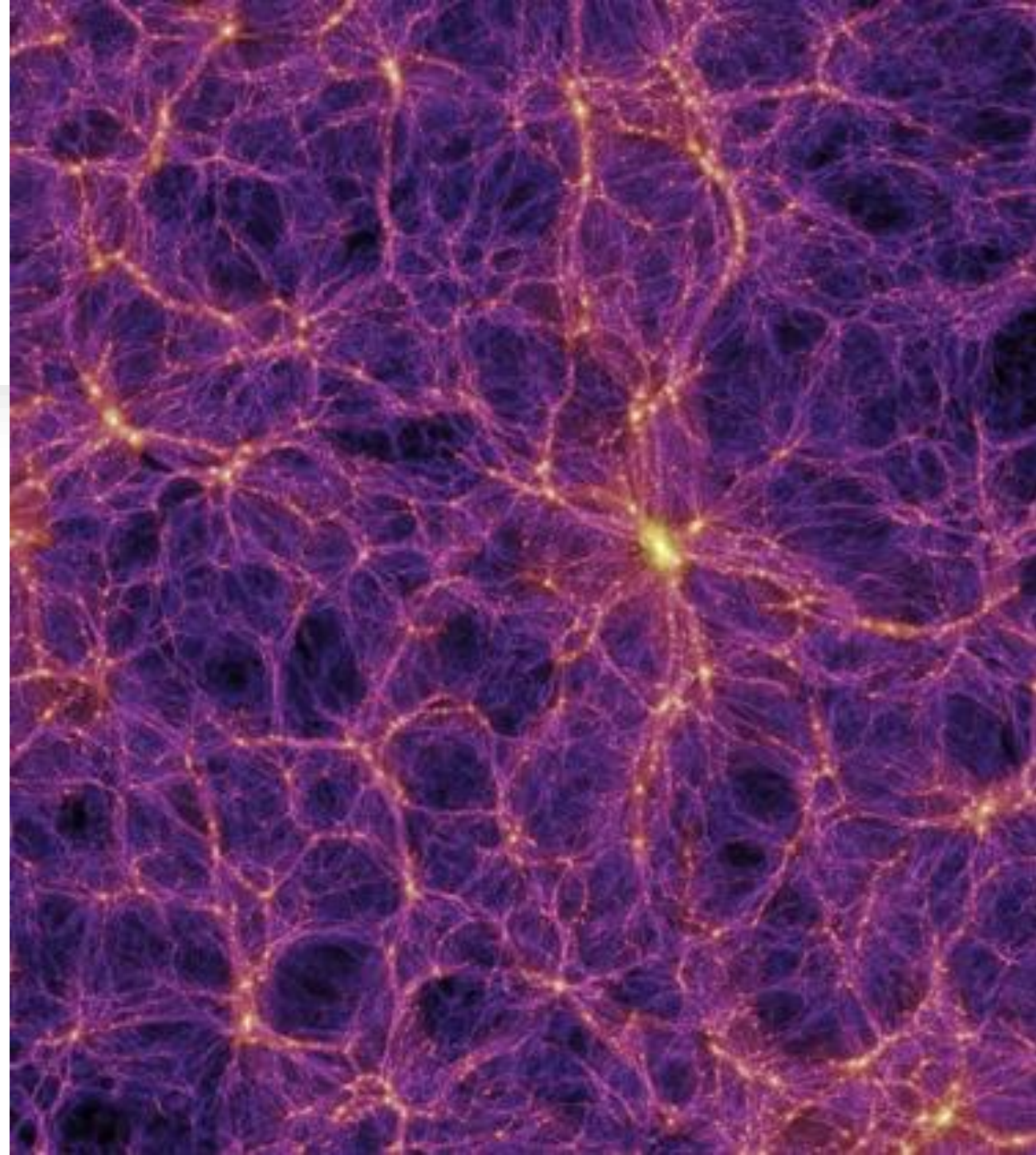
\*Siehe Vortrag „Die Entdeckung der Kosmischen Expansion“ – Beziehung zwischen Skalenfaktor und Rotverschiebung  $a(t) = \frac{1}{1+z}$

## 2. Untersuchung der Reionisierung



# Das Intergalaktische Medium: IGM

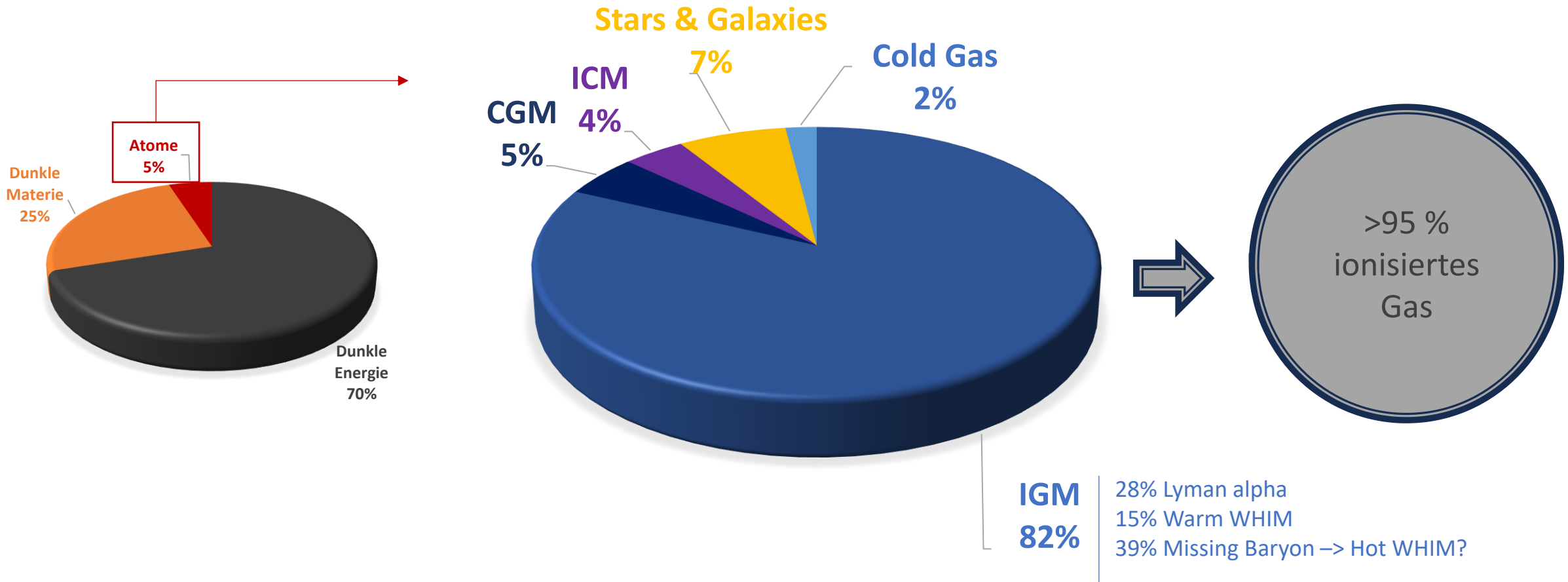
- **Wasserstoffgas/plasma** zwischen den Galaxien/Galaxien Cluster
- Fast **vollständig ionisiert**: HI (neutral H) Spuren von ca. 1 ppm
- Extrem Heiß (**Plasma**  $10^5 - 10^7 K$ )
- Strukturiert in **Filamente**: Galaxien sind nicht willkürlich im IGM verteilt aber sind miteinander vernetzt. **Galaxien entstehen in den Knoten.**
- Leerräume (Voids) bis zu 100 Mpc Durchmesser
- Untersuchungsmethoden des IGM:
  - Quasar Spektren
  - CMB: Kosmische Hintergrundstrahlung
  - 21 cm Linie
  - Röntgenstrahlung



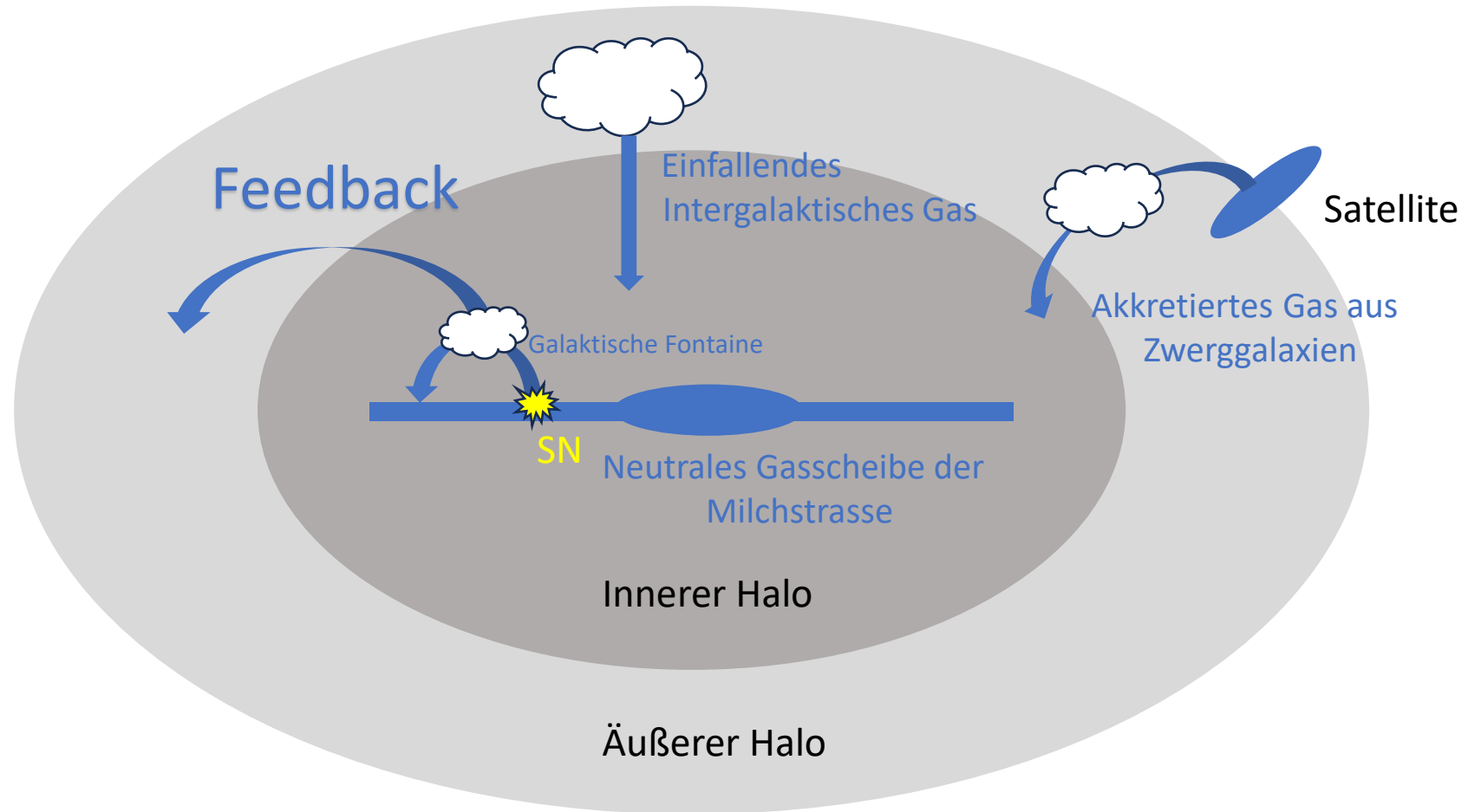
Medium	Bestandteil	Form Bestandteil	Dichte Atom/cm <sup>3</sup>	Temperatur T (K)
<b>IGM</b> Intergalactic medium	Filamente: HII, HI (1ppm) Metall angereicht  Voids	Ionisiert	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-4</sup>	10 <sup>5</sup> -10 <sup>7</sup>
<b>ICM</b> Intracluster medium	H, He, angereicht mit schweren Elementen	Ionisiert	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>
<b>CGM</b> Circumgalactic Medium	Multiphase Struktur	Teilweise ionisiert		10 <sup>6</sup> ;10 <sup>4</sup>
<b>ISM</b> Interstellar medium	Molekülwolke HI Wolken Warmes ionisiertes Medium Sehr inhomogen (99% Gas, 1% Staub) HII Wolken Koronales Gas	Molekül Atom Teilweise Ionisiert Ionisiert Ionisiert	10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup> 10 <sup>3</sup> 10 <sup>-2</sup> 10 <sup>2</sup> -10 <sup>4</sup> 10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-3</sup>	20-50 50-100 10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup> 10 <sup>4</sup> 10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>

Was bedeutet Vakuum auf der Erde:	Druck (mbar)	Dichte (Teilchen/cm <sup>3</sup> )
Normaldruck	1000	10 <sup>19</sup>
Großvakuum	1	10 <sup>16</sup>
<b>Ultrahochvakuum</b>	<b>10<sup>-11</sup></b>	<b>10<sup>5</sup></b>

# Wo ist die Baryonische Materie versteckt?

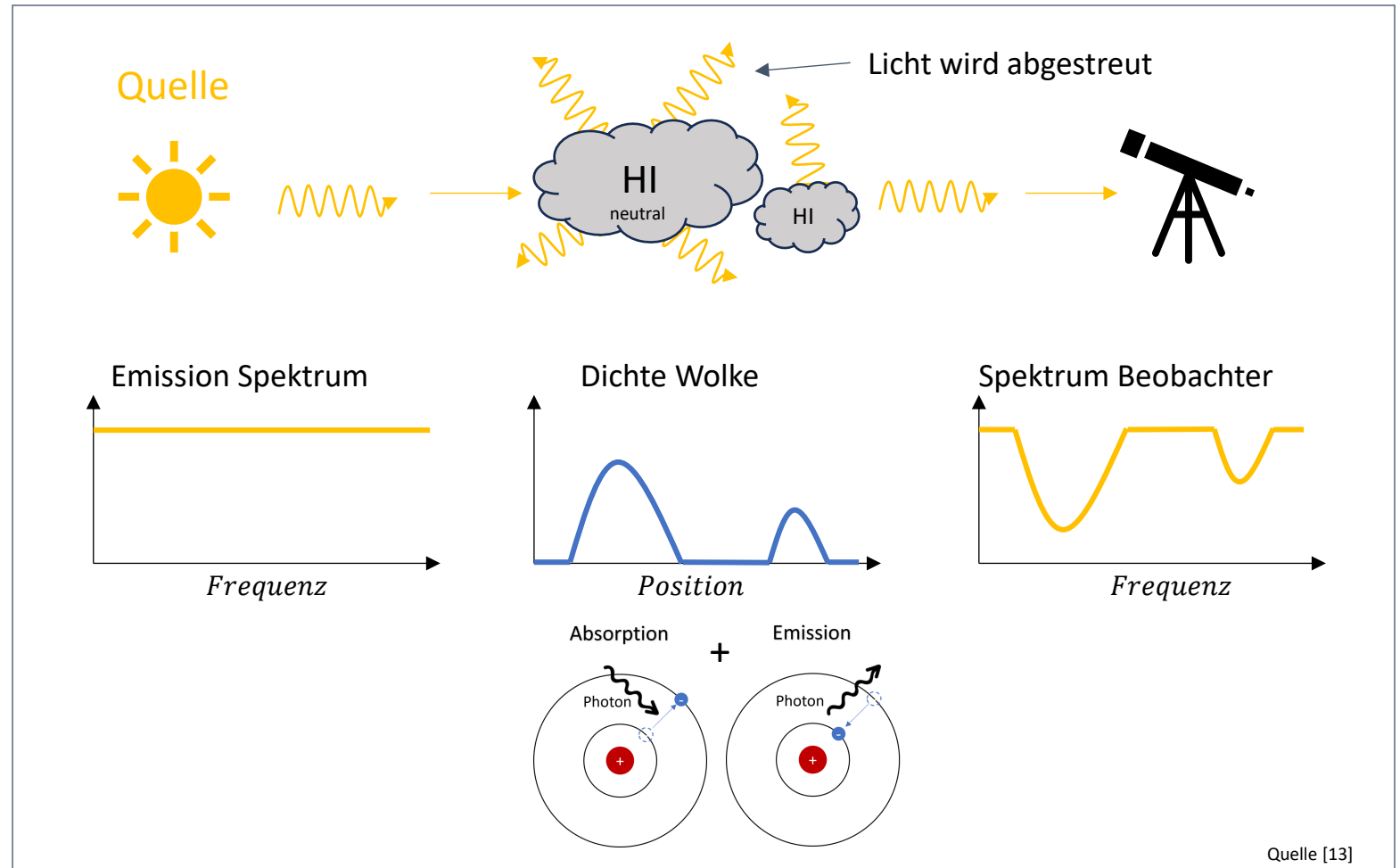


# Materiekreislauf einer Galaxie



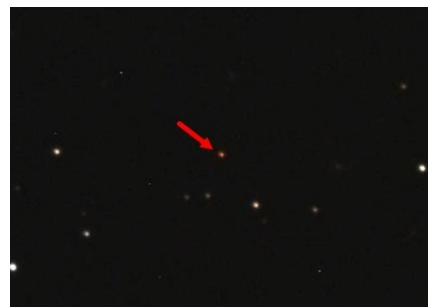
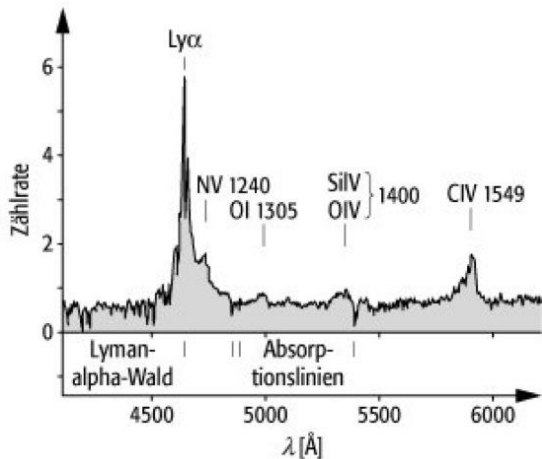
# Prinzip für die Untersuchung des IGM

- Licht einer Quelle wird von einer dichten HI-Wolke absorbiert
- Absorptionslinien entstehen durch den **Ly- $\alpha$  Übergang** des neutralen HI
- Die **Position der Absorptionslinien** im Spektrum entsprechen den räumlichen Positionen der verantwortlichen Wolken
- Emissions- und Absorptionslinien wegen **Kosmische Rotverschiebung** verschoben

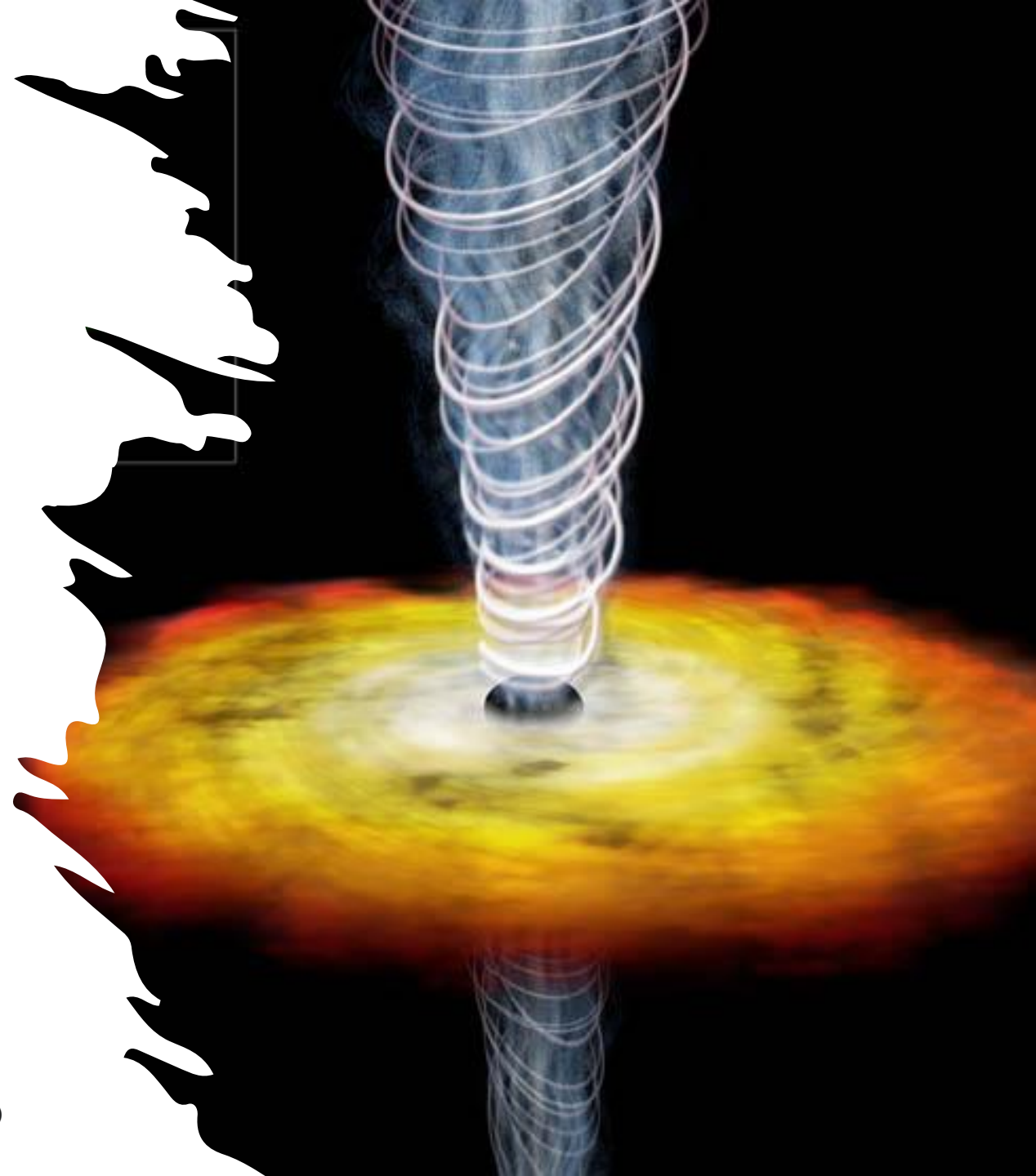


# Quasare

- **Aktiver Galaxienkern (AGN)** mit Supermassereiches Schwarzes Loch
- **Leuchtkräftigste Objekte** im Universum
- **weit entfernt** :  $Z$  bis 7,6
- Strahlen über das **gesamte elektromagnetische Spektrum** (Radio bis Gamma)
- Die Strahlungsemission stammt von der rotierenden Scheibe leuchtender Materie (**Akkretionsscheibe**).
- Mit Hilfe von **Quasar Spektren** kann die physikalische Eigenschaft des IGM untersucht werden



Fotografische Aufnahme des Quasars APM08279+5225 (Rotverschiebung  $z = 3,9$ )



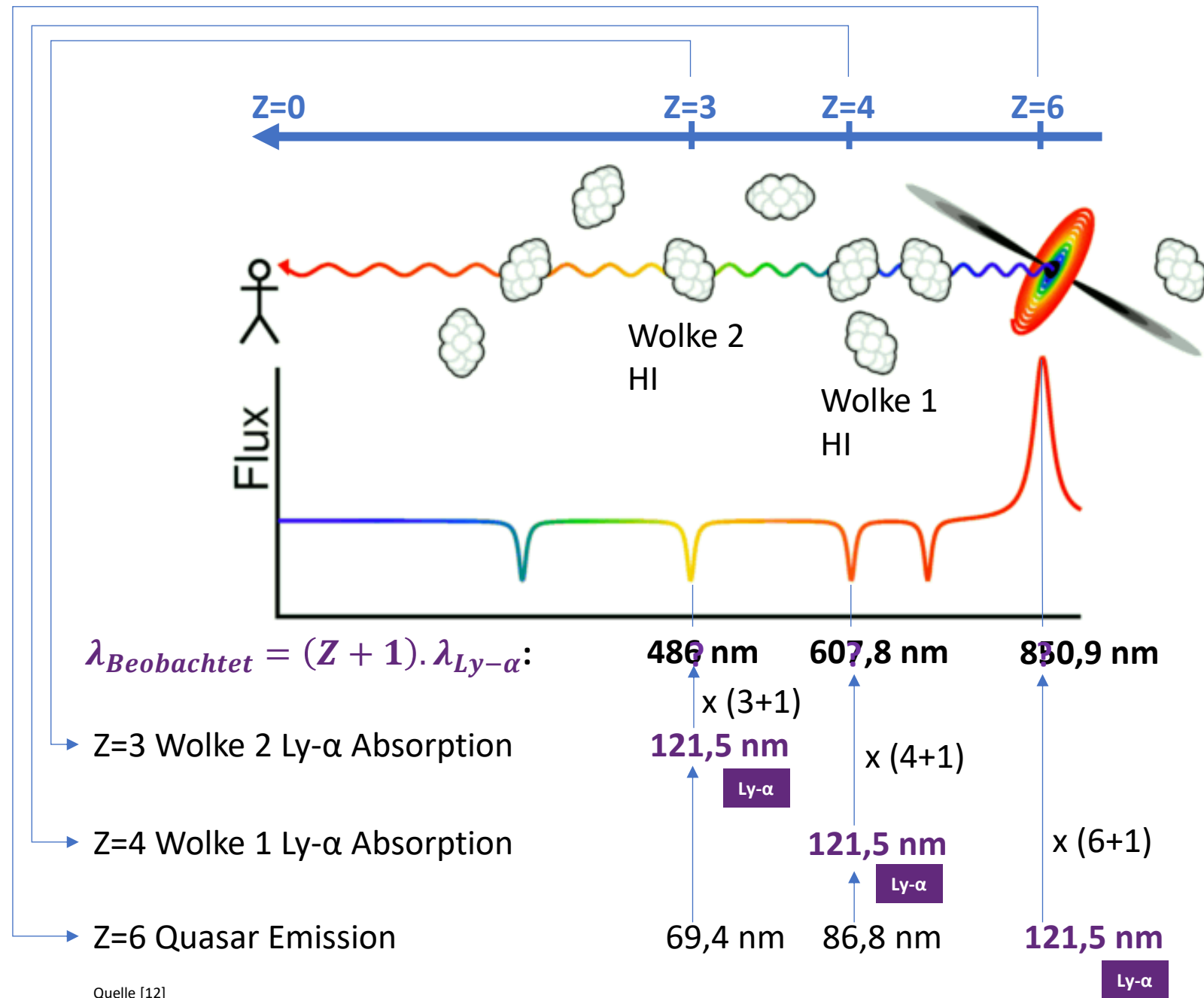
# Quasar Spektren

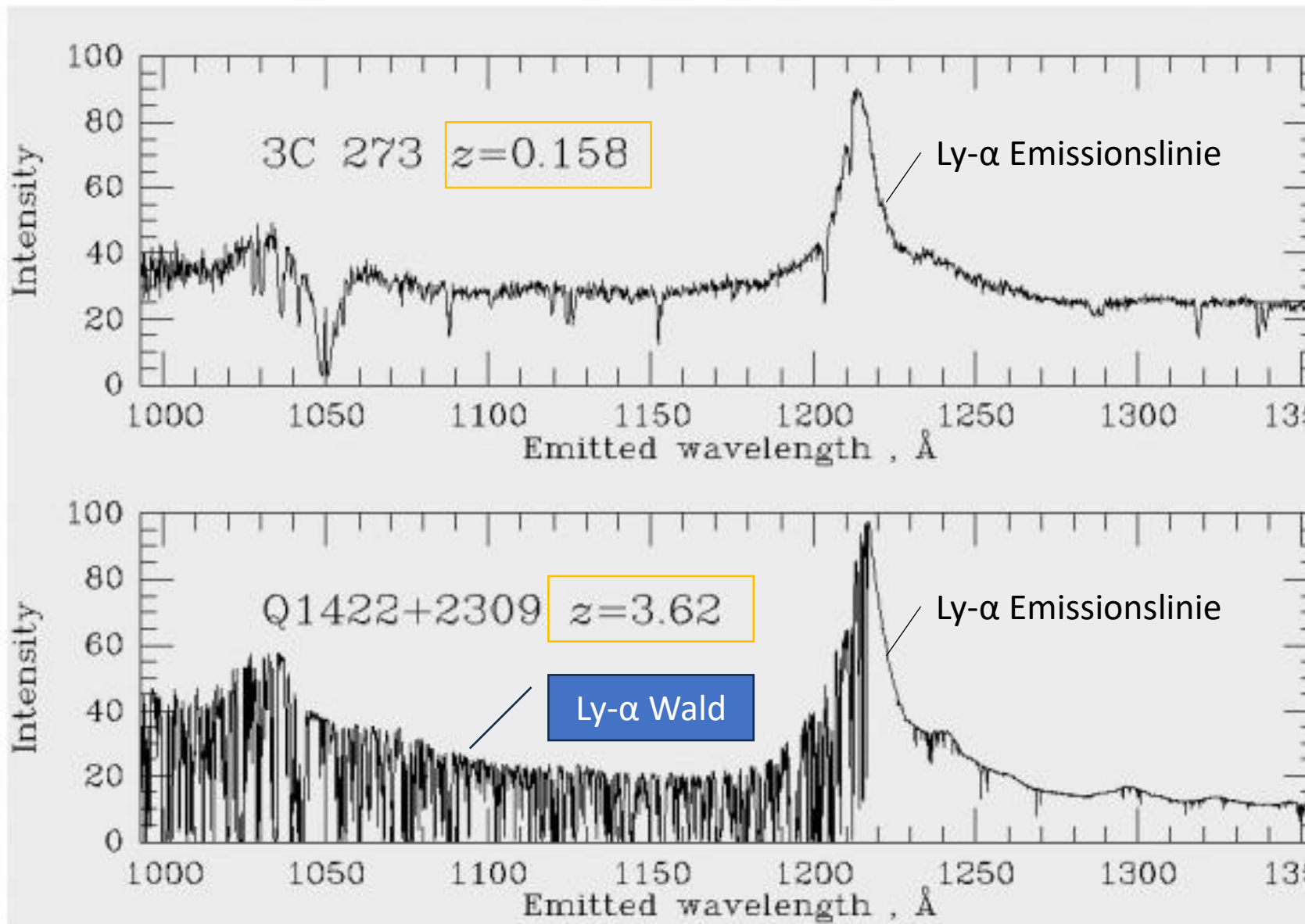
## Einfluss kosm. Rotverschiebung

### Fragen:

- Welche Wellenlänge hat die beobachtete Ly- $\alpha$  Emissionslinie?
- Welche Wellenlänge haben die Absorptionslinien der Wolken 1 und 2?

- Fazit: Wegen der unterschiedlichen Rotverschiebungen der Wolken (Entfernung), sind die **Absorptionslinien an verschiedenen Positionen im Spektrum und zwar immer links von der Ly- $\alpha$  Emissionslinie**



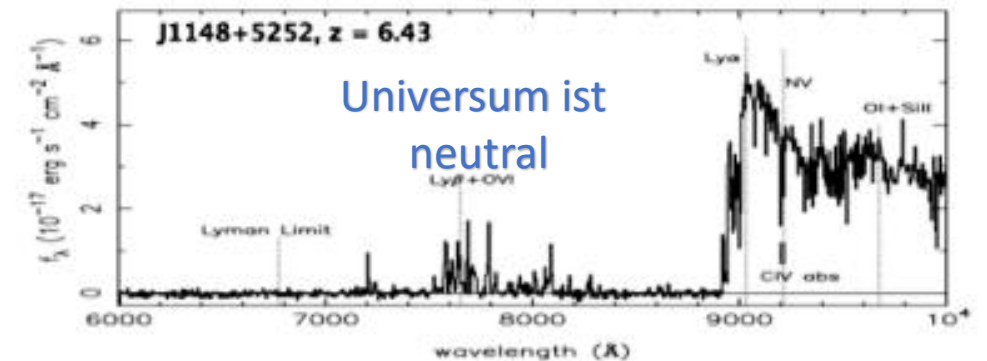
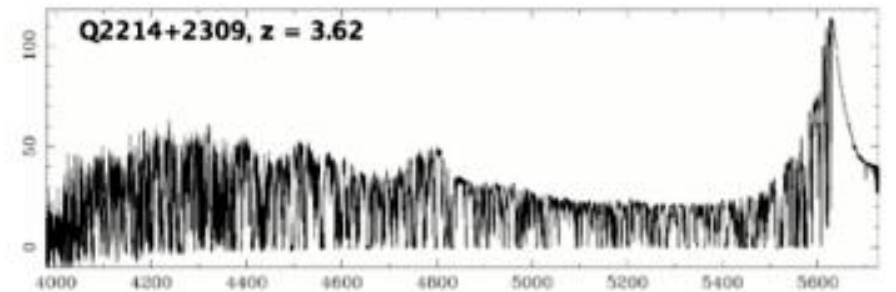


# Lyman Alpha Wald

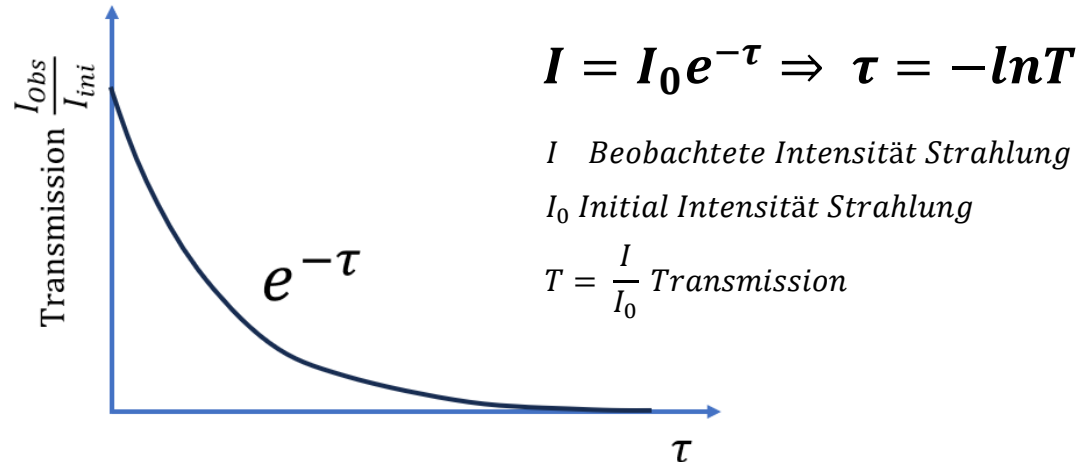
- **Ansammlung von scharfen Absorptionslinien** im Spektrum von Quasaren (linke Seite der Ly- $\alpha$  Linie)
- **Die Anzahl der Absorptionslinien nimmt mit der Entfernung zu** weil das Universum Dichter wird.
- Somit kann die **3D-Struktur** des Kosmos untersucht werden (Tomografie)
- Erstmals entdeckt im Jahr 1970: Quasar 4COT34

# Der Gunn-Peterson Trog

- **1965: Jim Gunn und Bruce Peterson** erkannten, dass das Universum wieder reionisiert sein muss.
- **Idee: Falls der Quasar von vollständig neutralem Gas umgeben ist, dann müsste der Spektralfluss zu den kürzeren Wellenlängen gänzlich verschwinden.**
- Lange Zeit wurde dieser Effekt in den Quasar Spektren ( $Z < 6$ ) nicht aufgewiesen, **daher muss das Universum ionisiert sein**
- 1990 startet das SDSS: Sloan Digital Sky Survey: GP Effekt bleibt aus.
- Erst in **2001** wird der GP Effekt von Becker, Fan und Kol. bei  $Z = 6,28$  beobachtet.



# Optische Tiefe (Optische Dicke)



$\tau \gg 1$  spricht man von optisch dick (**Absorption**)  
 $\tau \ll 1$  spricht man von optisch dünn

Mathematische Definition:

$$\tau(\nu) = \int \underbrace{n_{HI}(z)\sigma(\nu)}_{\text{Absorptionskoeffizient}} dl$$

$n_{HI}$ : Teilchendichte

$\sigma(\nu)$ : Wirkungsquerschnitt

Quelle [1]



Vertiefung: [Optical Depth applied on the Gunn-Peterson effect](#)

- Aus Berechnung vom Integral folgt  $\tau_{GP} \sim 10^5 X_{HI}$  mit  $X_{HI}$ : Bruchteil von neutralem HI
- Wenn also **kein GP Trog** beobachtet wird ( $\tau_{GP} < 1$ ), muss  $X_{HI} < 10^{-5}$
- **Das heißt das Universum muss Reionisiert sein !**
- Artikel von Gunn-Peterson - 1965 : [On the density of neutral Hydrogen in intergalactic space](#)

# Evidence for REIONIZATION

## 2001

EVIDENCE FOR REIONIZATION AT  $Z \sim 6$ : DETECTION OF A GUNN-PETERSON TROUGH IN A  $Z = 6.28$  QUASAR<sup>1,2</sup>

ROBERT H. BECKER<sup>3,4</sup>, XIAOHUI FAN<sup>5</sup>, RICHARD L. WHITE<sup>6</sup>, MICHAEL A. STRAUSS<sup>7</sup>, VIJAY K. NARAYANAN<sup>7</sup>, ROBERT H. LUPTON<sup>7</sup>, JAMES E. GUNN<sup>7</sup>, JAMES ANNIS<sup>8</sup>, NETA A. BAHCALL<sup>7</sup>, J. BRINKMANN<sup>9</sup>, A. J. CONNOLLY<sup>10</sup>, ISTVÁN CSABAI<sup>11,12</sup>, PAUL C. CZARAPATA<sup>8</sup>, MAMORU DOI<sup>13</sup>, TIMOTHY M. HECKMAN<sup>11</sup>, G. S. HENNESSY<sup>14</sup>, ŽELJKO IVEZIĆ<sup>7</sup>, G. R. KNAPP<sup>7</sup>, DON Q. LAMB<sup>15</sup>, TIMOTHY A. MCKAY<sup>16</sup>, JEFFREY A. MUNN<sup>17</sup>, THOMAS NASH<sup>8</sup>, ROBERT NICHOL<sup>18</sup>, JEFFREY R. PIER<sup>17</sup>, GORDON T. RICHARDS<sup>19</sup>, DONALD P. SCHNEIDER<sup>19</sup>, CHRIS STOUGHTON<sup>8</sup>, ALEXANDER S. SZALAY<sup>11</sup>, ANIRUDDA R. THAKAR<sup>11</sup>, D. G. YORK<sup>15,20</sup>

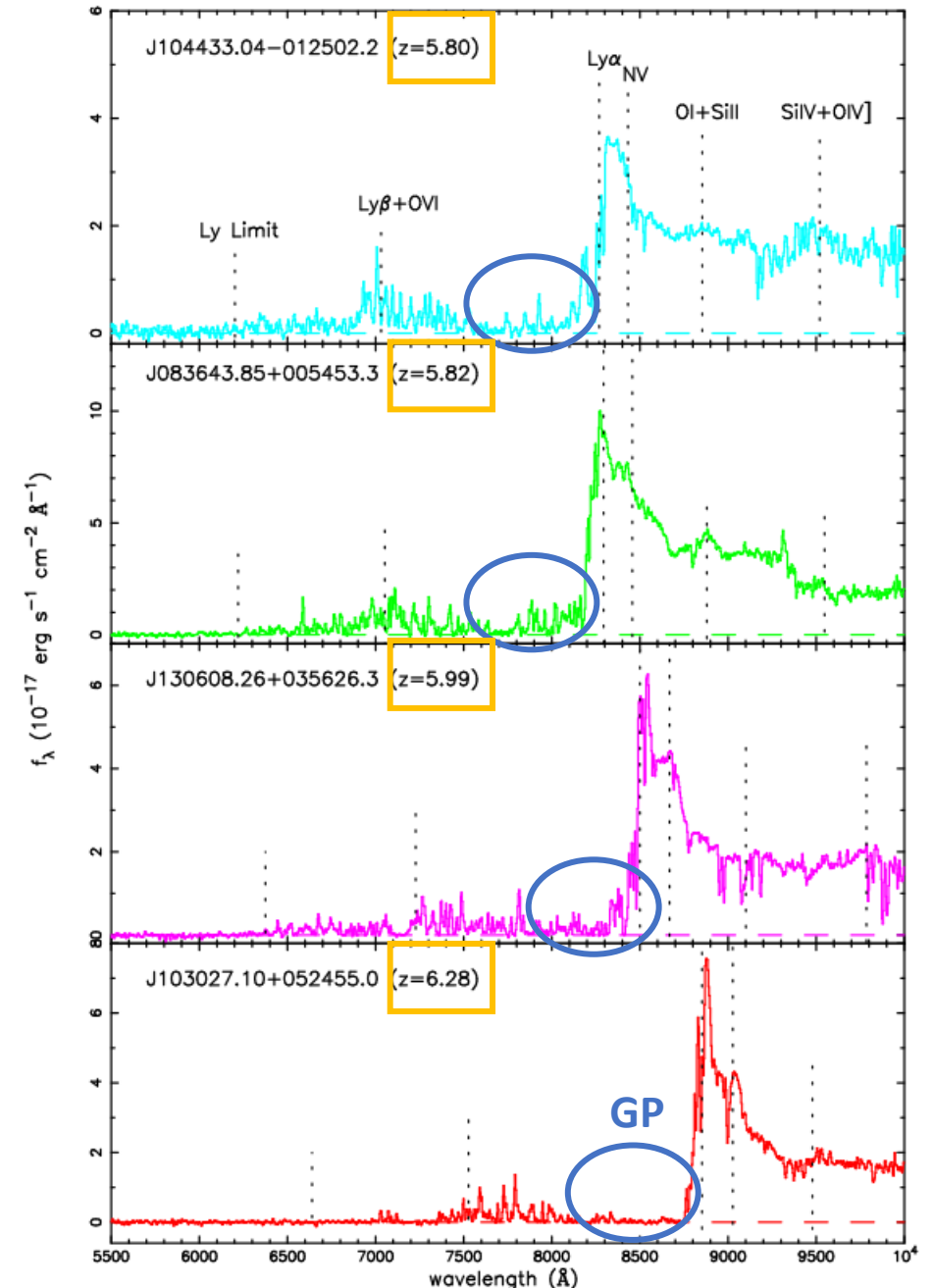
*Accepted by the Astronomical Journal*

### ABSTRACT

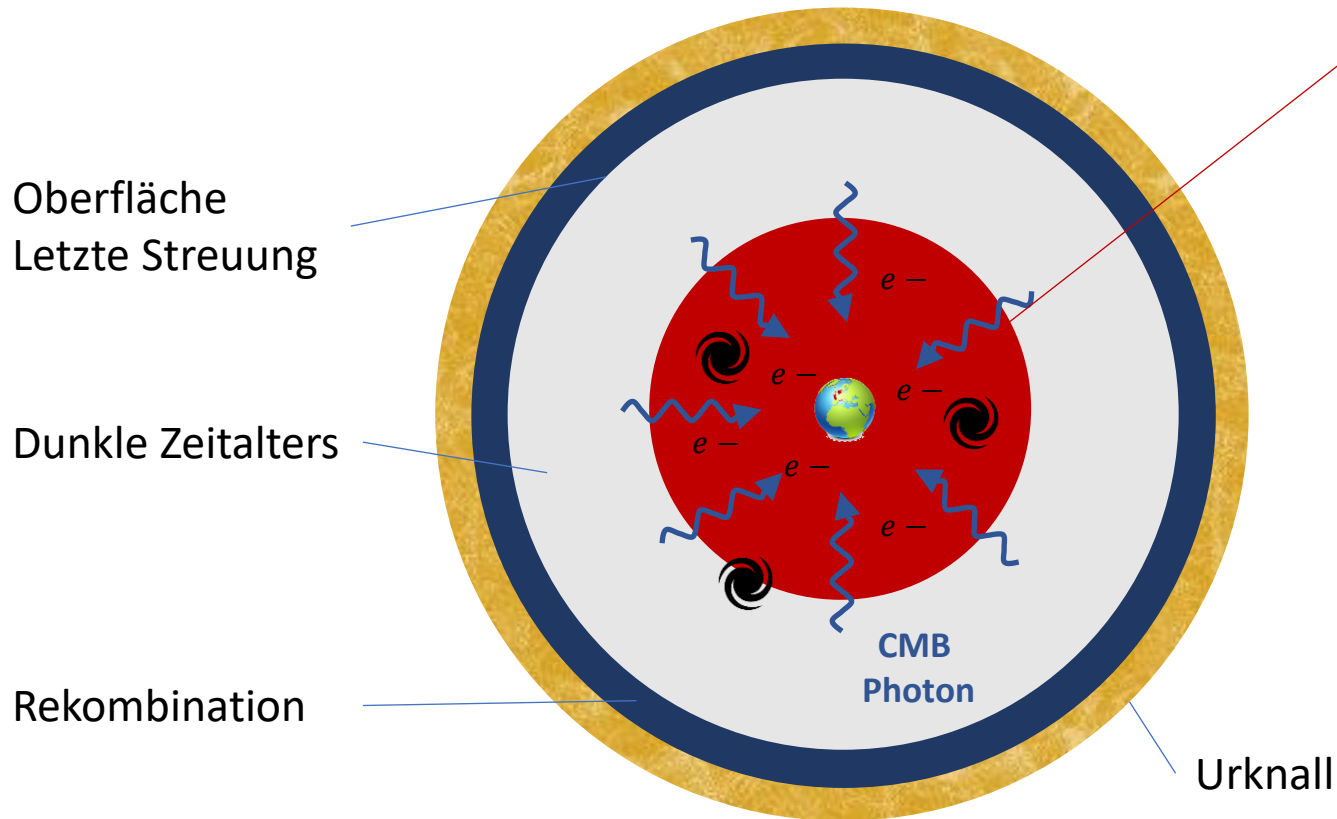
We present moderate resolution Keck spectroscopy of quasars at  $z = 5.82, 5.99$  and  $6.28$ , discovered by the Sloan Digital Sky Survey (SDSS). We find that the  $\text{Ly}\alpha$  absorption in the spectra of these quasars evolves strongly with redshift. To  $z \sim 5.7$ , the  $\text{Ly}\alpha$  absorption evolves as expected from an extrapolation from lower redshifts. However, in the highest redshift object, SDSSp J103027.10+052455.0 ( $z = 6.28$ ), the average transmitted flux is  $0.0038 \pm 0.0026$  times that of the continuum level over  $8450 \text{ \AA} < \lambda < 8710 \text{ \AA}$  ( $5.95 < z_{\text{abs}} < 6.16$ ), consistent with zero flux. Thus the flux level drops by a factor of  $> 150$ , and is consistent with zero flux in the  $\text{Ly}\alpha$  forest region immediately blueward of the  $\text{Ly}\alpha$  emission line, compared with a drop by a factor of  $\sim 10$  at  $z_{\text{abs}} \sim 5.3$ . A similar break is seen at  $\text{Ly}\beta$ ; because of the decreased oscillator strength of this transition, this allows us to put a considerably stronger limit,  $\tau_{\text{eff}} > 20$ , on the optical depth to  $\text{Ly}\alpha$  absorption at  $z = 6$ .

This is a clear detection of a complete Gunn-Peterson trough, caused by neutral hydrogen in the intergalactic medium. Even a small neutral hydrogen fraction in the intergalactic medium would result in an undetectable flux in the  $\text{Ly}\alpha$  forest region. Therefore, the existence of the Gunn-Peterson trough by itself does not indicate that the quasar is observed prior to the reionization epoch. However, the fast evolution of the mean absorption in these high-redshift quasars suggests that the mean ionizing background along the line of sight to this quasar has declined significantly from  $z \sim 5$  to  $6$ , and the universe is approaching the reionization epoch at  $z \sim 6$ .

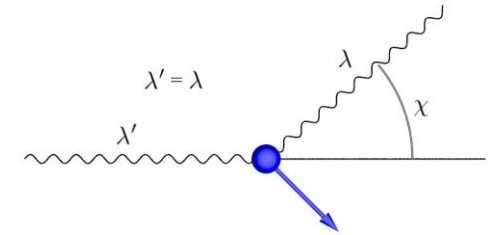
Ende der Reionisierung bei  $Z \approx 6$



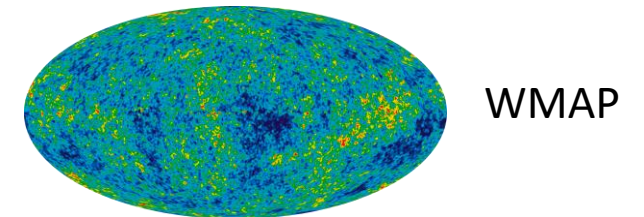
# Radioastronomie CMB



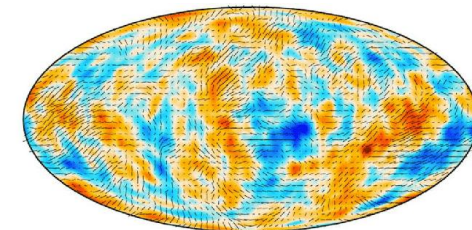
**Reionisation:  
Thomson Streuung**



- **Einfluss der Reionisation auf die Temperatur Fluktuationen des CMB**



- **Einfluss der Reionisation auf die Polarisation des CMB**



CMB: Cosmic Microwave Background

# Radioastronomie: CMB

- Optische Tiefe angewandt an die Thomson Streuung: beschreibt die Wechselwirkung zwischen Photon CMB und freies Elektron.
- Wirkungsquerschnitt ist unabhängig von der Frequenz.
- Voraussetzung **homogenes Medium**, mit **instante Reionisation** bei einer Rotverschiebung  $z_r$

$$\tau_e = \int_0^{z_r} n_e(z) \sigma_T c \left| \frac{dt}{dz} \right| dz$$

$$\tau_e \approx 0,0533 \cdot \left[ \frac{1 + z_r}{8} \right]^{3/2}$$

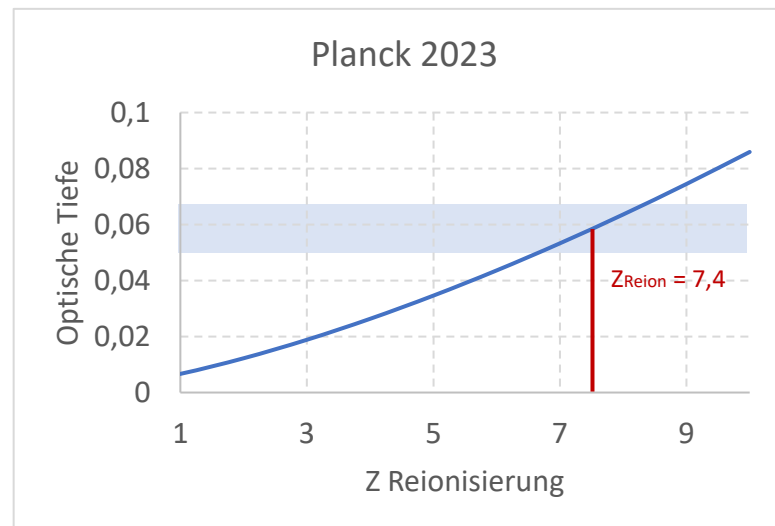
- $\sigma_T = 0,66 \cdot 10^{-24} \text{cm}^2$  Wirkungsquerschnitt
- $n_e$ : Anzahldichte freie Elektronen
- $\left| \frac{dz}{dt} \right|$  aus Friedmann Gleichungen



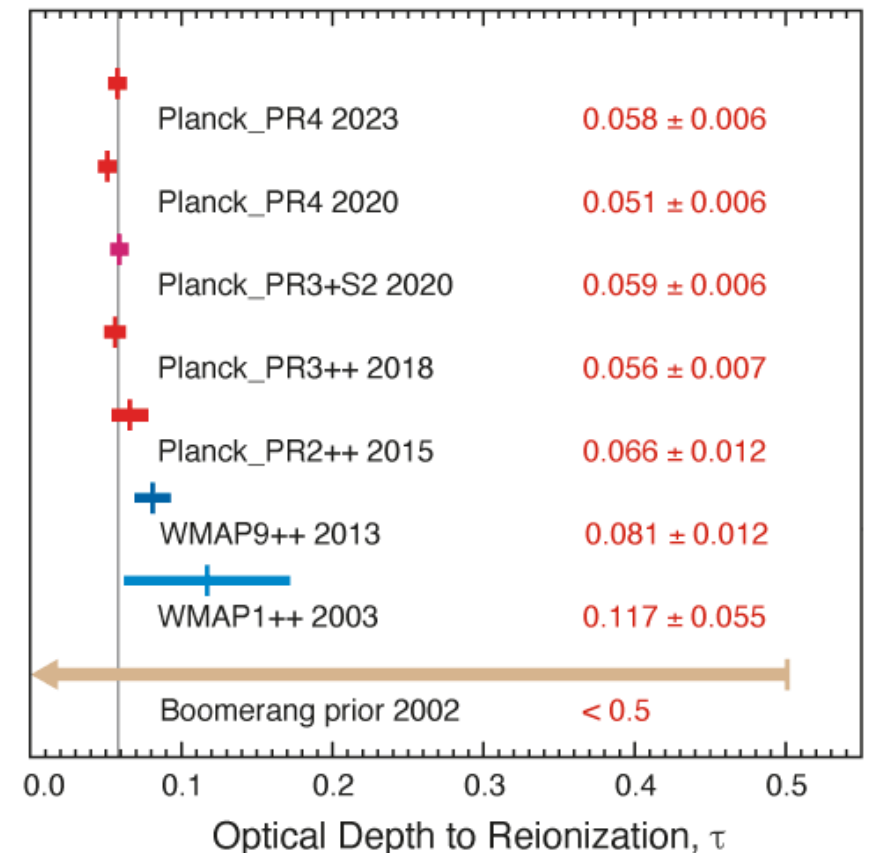
Vertiefung:  
[Optical Depth of the CMB \(Analytic Calculation\)](#)

**Ergebnis in guter  
 Übereinstimmung mit  
 dem GP Effekt**

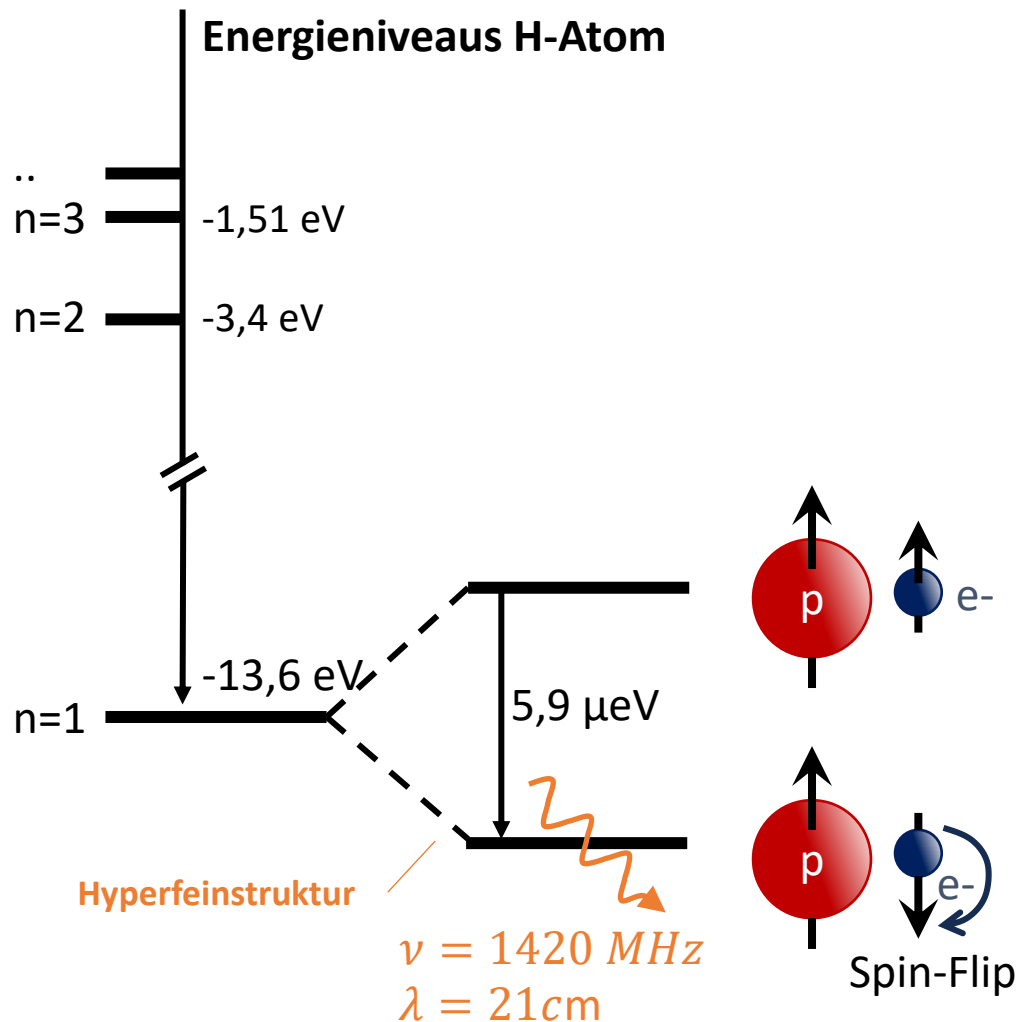
Quelle [17]



## Optische Tiefe aus den CMB Messungen:

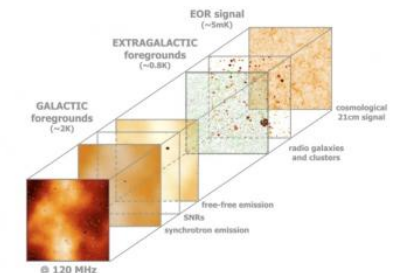


# Radioastronomie: 21cm Linie

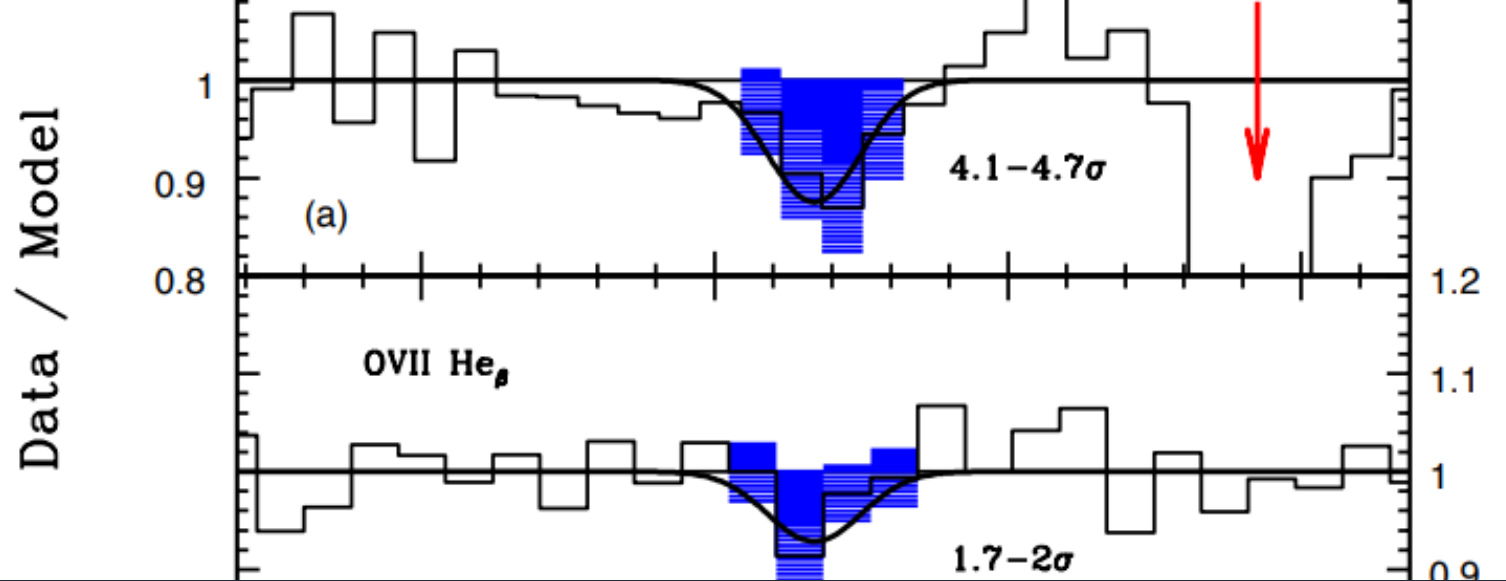


- Beobachtung des neutralen Wasserstoffs durch die berühmte 21 cm Strahlung (Spin-Flip Übergang)
- Potential dieser Methode ist gewaltig: Vermessung der 3D Verteilung des neutralen Wasserstoffs im frühen Universum.
- Aktuelle Forschungen: [LOFAR](#) (Low-Frequency-Array) Niederland, [SKA](#) (Square Kilometer Array), [EDGES](#),...
- Untersuchung im Frequenzbereich **50 MHz-230MHz (Rotverschiebung 6-20)** ist schwierig.

LOFAR is searching for the 21-cm line signal from diffuse neutral hydrogen between 110 and about 200 MHz, corresponding to a Cosmic time between 400 and 900 million years after the Big-Bang. More recently, the AARTFAAC system on LOFAR is also being used to search for similar signal from the earlier cosmic dawn epoch, about 200 million years after the big bang.



# Röntgenteleskop



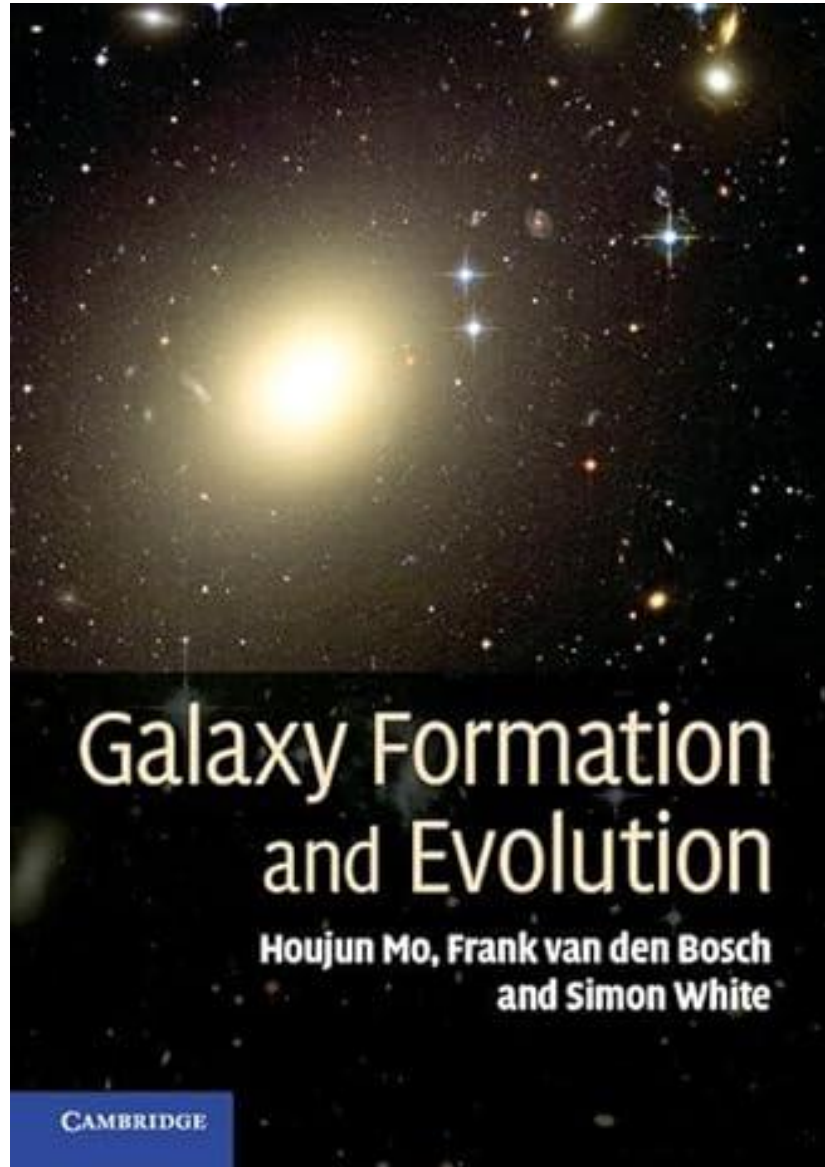
1E 0657–56



- **XMM-Newton**
  - ESA Mission: 1999-2029
  - Spektrometer RGS: Entdeckung zwei OVII Absorptionen bei  $Z=0,43$  und  $Z= 0,35$   
F. Nicastro et al.: [“Detection of the Missing Baryons in the Warm Hot IGM”](#)
- **Chandra**
  - NASA Mission - Start 1999
  - Beispiel: Untersuchung Heisses Plasma (Bremsstrahlung) von Galaxy Cluster

### 3. Bildung Strukturen





[4]



Bibliothek NAA, Ub1634

# Bildung von Galaxien & Sternen

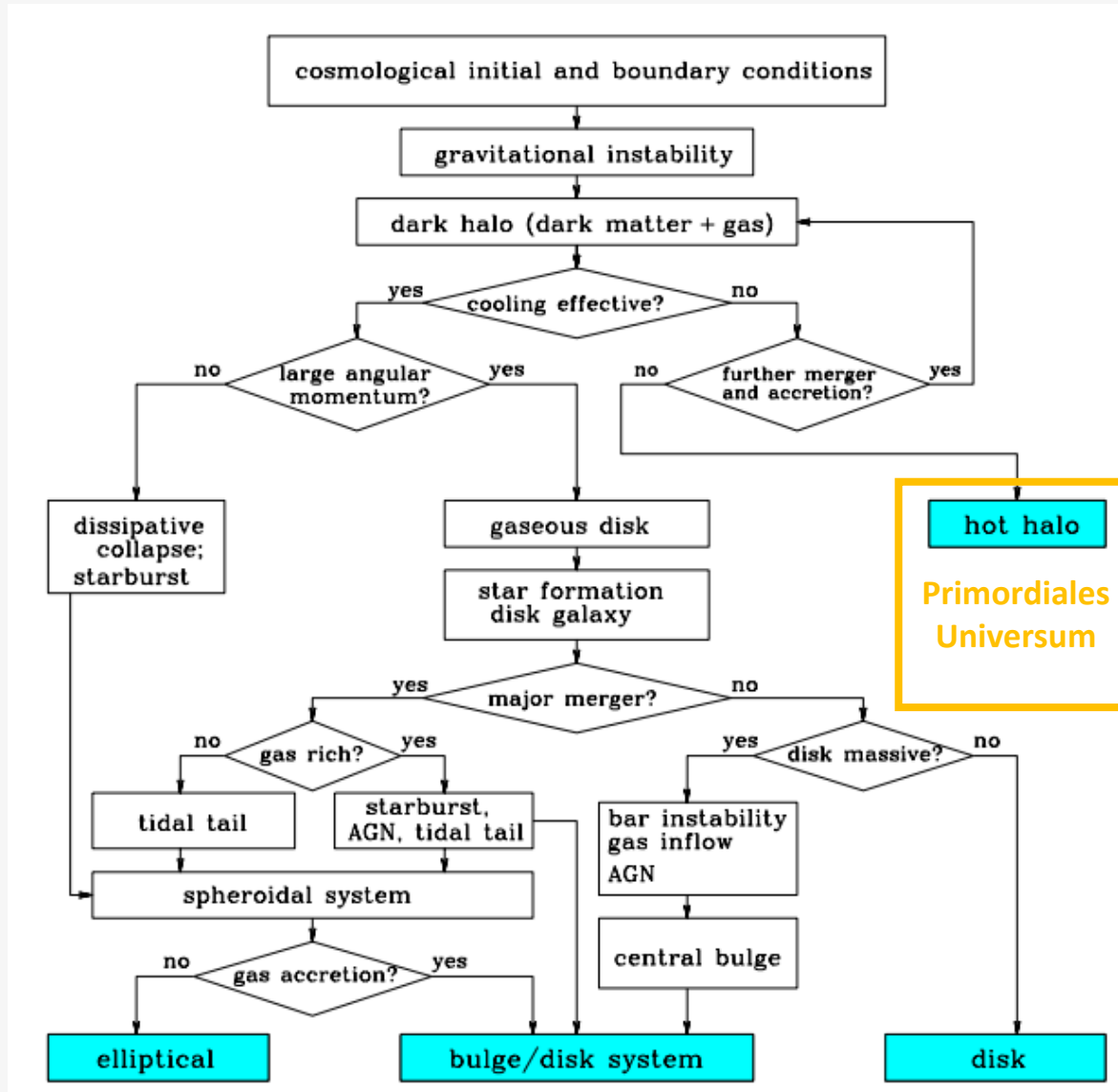
Thema ist sehr komplex weil es sehr stark abhängt von:

- Initialkonditionen
- Sehr vielen unterschiedlichen physikalischen Prozessen

Flussdiagramm zeigt Standard Szenario

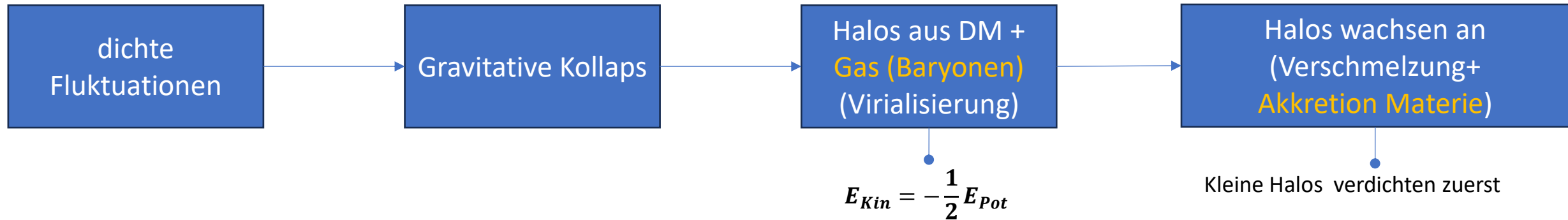
Der Entstehungsprozess der ersten Galaxien & Sternen aus dem **primordialen Gaz** ist nochmal anders und noch nicht vollständig geklärt.

ART erreicht ihre Grenze am Anfang des Universums als die Quanteneffekte eine wichtige Rolle spielen.

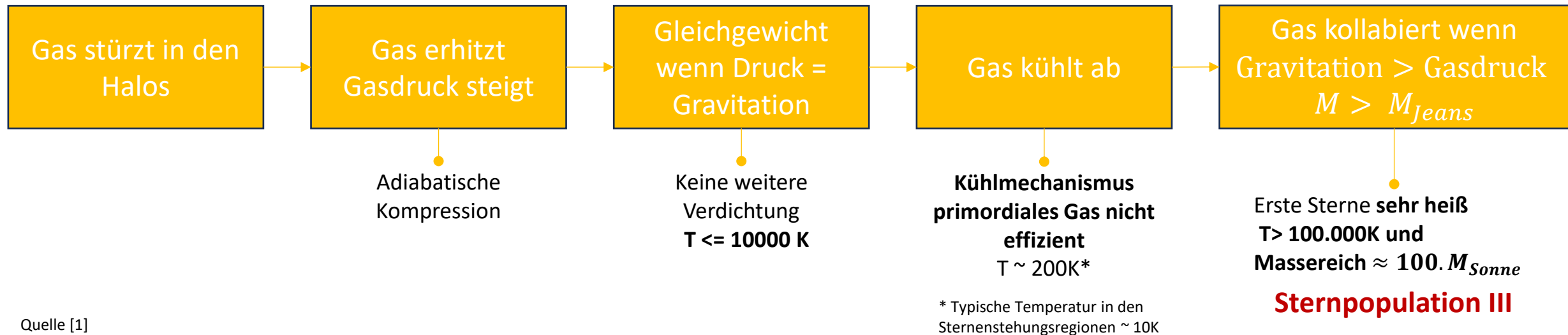


# Hierarchische Entstehung der Strukturen

## Verhalten Dunkle Materie:



## Verhalten Baryonische Materie:



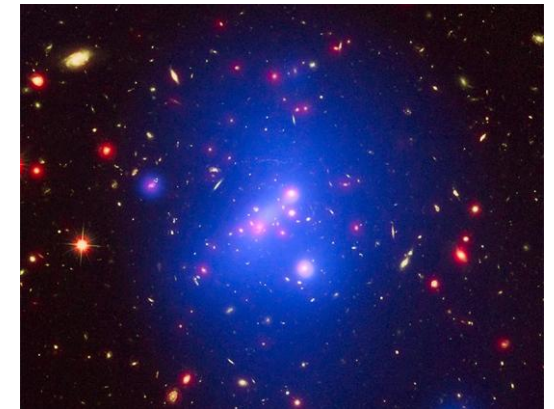
# Virialsatz

- In einem abgeschlossenen physikalischen Mehrkörpersystem im Gleichgewicht:  $E_{Kin} = -\frac{1}{2}E_{Pot}$   
mit  $E_{Kin} = \frac{1}{2}M_{vir} \cdot \bar{V}^2$  und  $E_{Pot} = -\frac{GM_{vir}}{R_{vir}}$

- $M_{vir}$ : Gesamtmasse System
- $R_{vir}$ : Radius System
- $\bar{V}$ : Mittlere Geschwindigkeit Teilchen System

Daraus folgt:

$$M_{vir} = \frac{R_{vir} \bar{V}^2}{G}$$



Galaxy Cluster in X-Rays, Visible and IR light

- $R_{vir}$  und  $\bar{V}$  sind Beobachtungsgrößen und somit kann die Masse des Systems abgeschätzt werden.
- Beispiel Fritz Zwicky 1933 wandte den Virialsatz auf den [Coma Galaxiehaufen](#) an und entdeckte  $M_{vir} = 10 \cdot \text{Masse Sichtbare Galaxien} \Rightarrow$  **Existenz Dunkler Materie**

# Jeans Masse

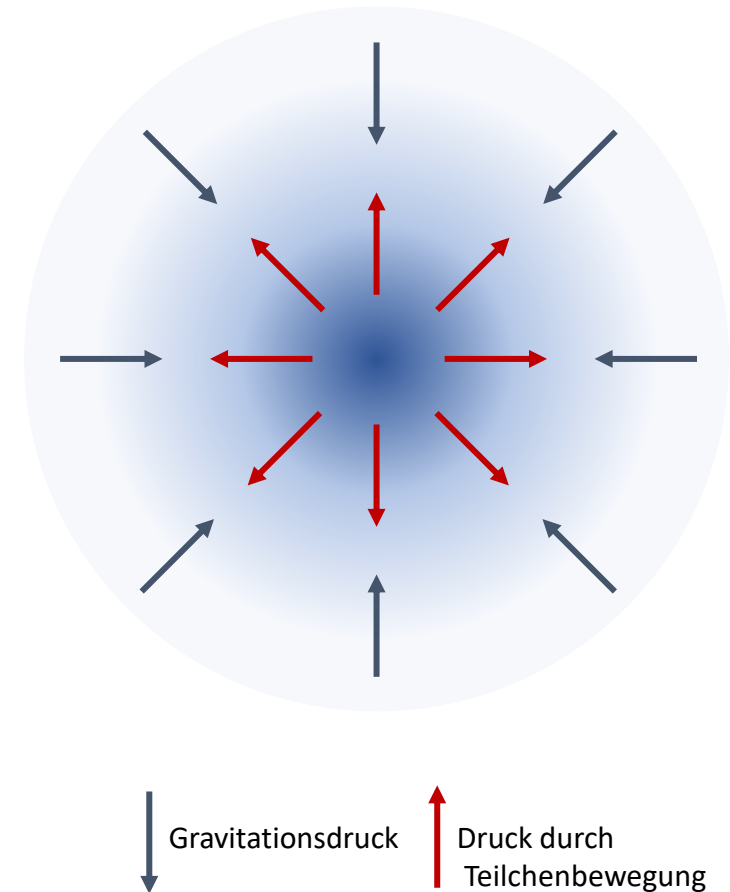
- Kosmische Gaswolke kollabiert wenn ihre Masse größer als die Jeans-Masse ist.
- Jeans Masse kann unterschiedlich ermittelt werden:
  - Gleichgewichtsdruck:  $P_{grav} = P_{Gas}$
  - Energiegleichgewicht:  $E_{Kin} = -\frac{1}{2}E_{Pot}$
  - Schallgeschwindigkeit

- Allgemeiner Ausdruck:

$$M_{Jeans} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{kT}{G\mu}\right)^3}$$

*k*: Boltzmann Konstante  
*G*: Gravitationskonstante  
*μ*: Molekular Masse  
*ρ*: Dichte Gaswolke  
*T*: Temperatur  
*α*: Konstante

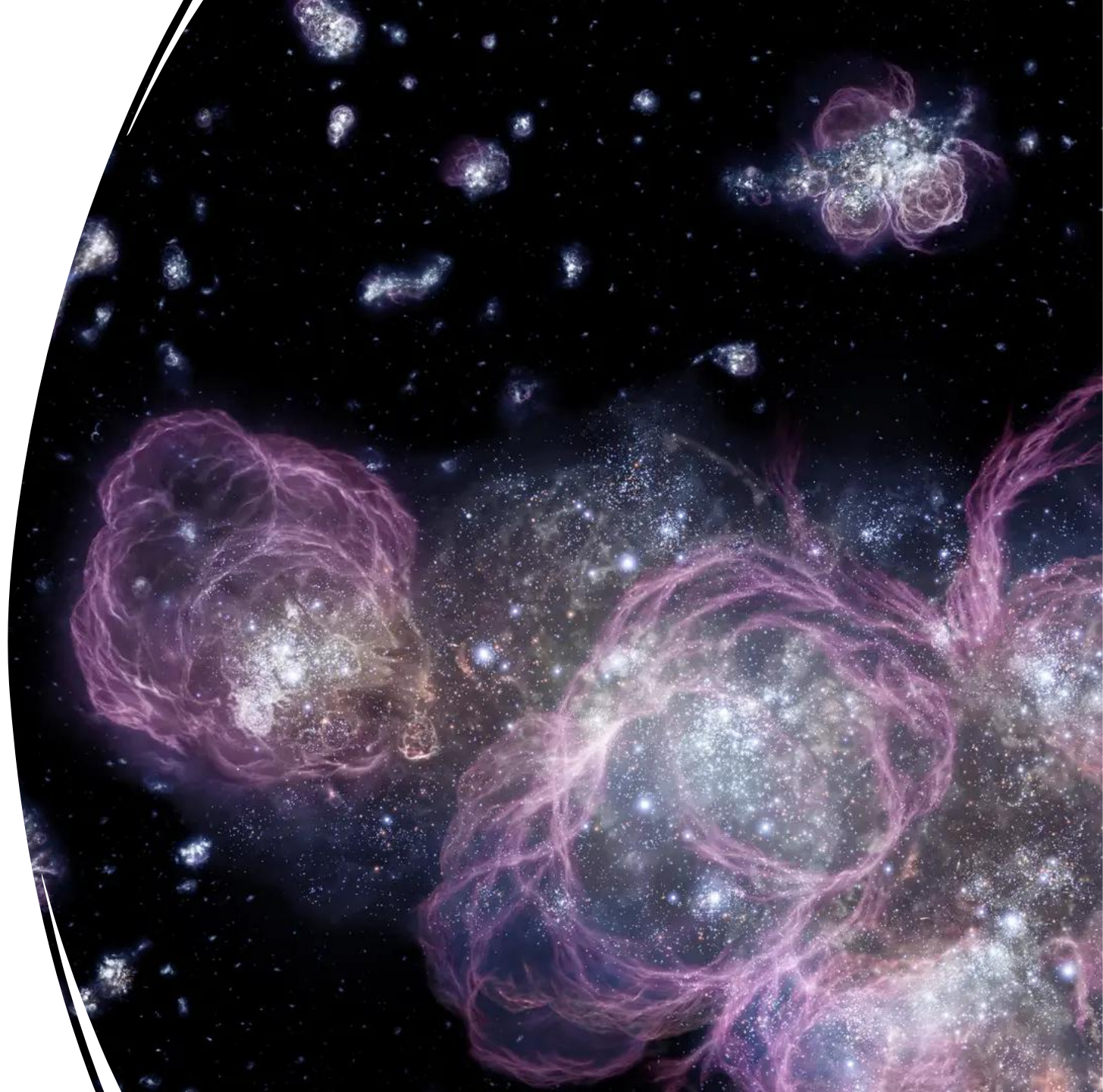
- Je höher die Temperatur desto größer die kritische Masse (=> Sternpopulation III sind riesig)



# Energiequellen der Reionisierung

---

- Heute ist noch unsicher, welche Objekte für die Reionisierung zuständig sind.
- Beschränkungen für diese Objekte:
  - Photonen müssen eine grössere Energie als die Wasserstoff **Ionisierungsenergie 13,6 eV** aufweisen (**UV**)
  - **Anzahl & Lebensdauer** : da wieder eine Rekombination von Protonen und Elektronen stattfindet, muss genug Energie bereitgestellt werden, um sie auseinanderzuhalten.
  - **Emissionsrate von Photonen** dieser Objekte zur Ionisierung von Wasserstoff pro kosmologischer Volumeneinheit.



# Stern Population III

---

- Hypothetische erste Sterne die nur aus Wasserstoff und Helium (keine Metalle) bestehen.
- Sehr heiß und massereich mit kurzer Lebensdauer daher sind sie sehr effiziente Quellen.
- Im Einklang mit numerischen Simulationen.
- Allerdings noch nie beobachtet.



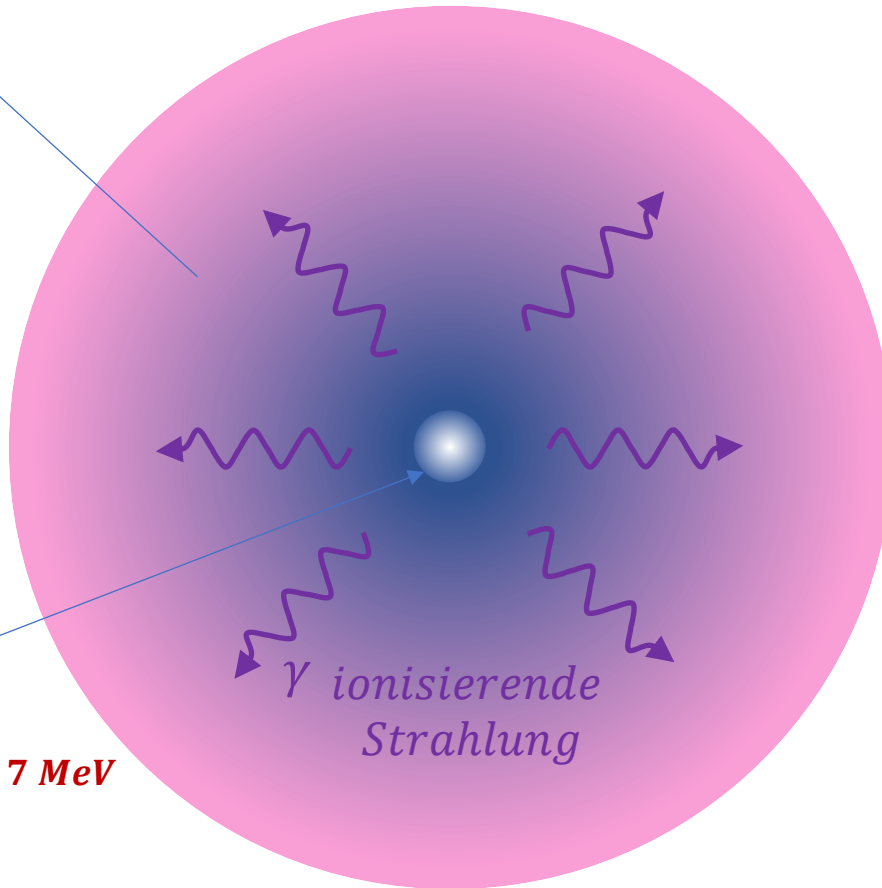
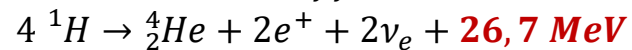
# Stern Pop III: Effiziente Reionisierung

*HII Region*

Blase von  
ionisierten Gas

*Stern Pop III*

Wasserstoff Brennen



**Nur ein kleinen Anteil von Sternepopulation III reicht aus:**

- Falls, Freie Energie 1 MeV / Baryon
- Aber nur ca. 10 eV pro  $^1\text{H}$  zur Ionisierung benötigt.
- Dann könnte schon ein Baryon ausreichen um  $10^5$  Wasserstoffatome zu ionisieren.

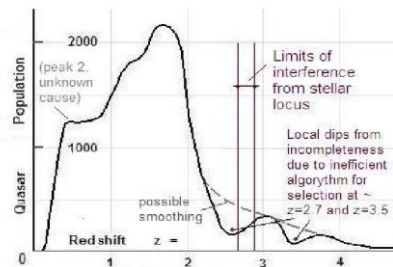
# Was sind Strömgren Sphären?

- Kugelförmiges H-II-Gebiet um einen Stern der Spektralklassen O oder B. Durch seine ultraviolette Strahlung ionisiert der Stern den Wasserstoffnebel.
- Bekanntes Beispiel Bild: [Rosettennebel](#) (NGC 2237) im Sternbild Einhorn, ist ein diffuser Emissionsnebel. Offener Sternhaufen NGC 2244 bringt diesen Nebel zum Leuchten.



# Quasare

- Gute potentielle Kandidaten, da sie viel Licht mit Energie über die Wasserstoffionisierungsgrenze aussenden
- Waren genügend Quasare in dieser Epoche vorhanden?
- Studien zeigen dass bei  $Z > 2$  nicht ausreichend vorhanden waren.



[A CYCLIC MODEL OF GALAXY EVOLUTION WITH BARS](#)  
(Published HJ 2014)

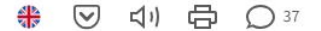


# Junge Galaxien

- Heute als wichtigste Quelle ?
- Optische Survey haben eine hohe Anzahl an Lyman Break Galaxies gefunden
- Aber, Galaxien mit jungen Sternentstehungsgebieten sind oft mit Staub befüllt und könnten somit nicht genug UV Licht aussenden
- Neue Einblicke Dank WEBB

## Weltraumteleskop James Webb entdeckt entstehende Galaxien nach Urknall

Nach dem Urknall mussten die ersten Galaxien das Universum erst lichtdurchlässig machen. Nun wurden drei Galaxien entdeckt, die während dieser Epoche entstehen.



Künstlerische Darstellung von entstehenden Galaxien im frühen Universum. (Bild: NASA, ESA, CSA, Joseph Olmsted (STScI))

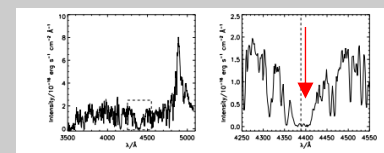
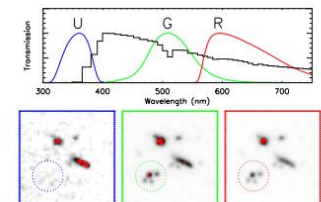
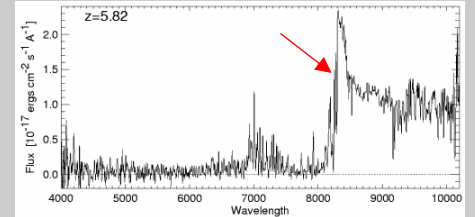
24.05.2024, 13:27 Uhr Lesezeit: 3 Min.

Von [Martin Holland](#)

# Klasse Extragalaktischer Objekte

Einteilung der Objekte in Klassen aufgrund der **Beobachtungsmethode:**


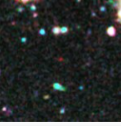
Klasse	Verfahren	Anzahl Entdeckungen
<b>Ly<math>\alpha</math> emitters (LAE)</b>	Galaxien werden durch die starke Ly $\alpha$ Emissionslinie gefunden (Spektroskopie, Bandfilter). Da die Ly-alpha Linie im UV Bereich ist und von der Erdatmosphäre absorbiert wird, können auf der Erde nur Objekte gefunden werden mit einer Rotverschiebung $> 2$ .	$> 1$ Mio
<b>Lyman-break galaxies (LBG)</b>	Starker Abfall in der Intensität des Spektrums unter der Grenze von $912 \text{ \AA}$ (Photon vom neutralen H absorbiert) Beobachtungen mit unterschiedlichen Filtern (U-G-R) Vorteil: ganzen Himmel gleichzeitig absuchen	$> 100.000$
<b>Damped Ly<math>\alpha</math> absorbers (DLA)</b>	Basiert auf Absorptionsverfahren. Breite Absorptionslinie im Spektrum aufgrund vom neutralen Wasserstoff.	$> 1.000$



# Die am weitesten entfernten astronomischen Objekte

Most distant spectroscopically-confirmed objects [\[ edit \]](#)

Most distant astronomical objects with spectroscopic redshift determinations

Image	Name	Redshift (z)	Light travel distance <sup>s</sup> (Gly) <sup>[4][5][6][7]</sup>	Proper distance (Gly)	Type	Notes
	JADES-GS-z13-0	$z = 13.20^{+0.04}_{-0.07}$	13.576 <sup>[4]</sup> / 13.596 <sup>[5]</sup> / 13.474 <sup>[6]</sup> / 13.473 <sup>[7]</sup>	33.6	Galaxy	Lyman-break galaxy, detection of the Lyman break with JWST/NIRSpec. <sup>[8]</sup> Possibly a dark star. <sup>[9]</sup>
	UNCOVER-z13	$z = 13.079^{+0.014}_{-0.001}$	13.51	32.56 <sup>†</sup>	Galaxy	Lyman-break galaxy, detection of the Lyman break with JWST/NIRSpec. <sup>[10]</sup>
	JADES-GS-z12-0	$z = 12.63^{+0.24}_{-0.08}$	13.556 <sup>[4]</sup> / 13.576 <sup>[5]</sup> / 13.454 <sup>[6]</sup> / 13.453 <sup>[7]</sup>	32.34 <sup>†</sup>	Galaxy	Lyman-break galaxy, detection of the Lyman break with JWST/NIRSpec. <sup>[8]</sup> Possibly a dark star. <sup>[9]</sup>
	UNCOVER-z12	$z = 12.393^{+0.004}_{-0.001}$	13.48	32.21 <sup>†</sup>	Galaxy	Lyman-break galaxy, detection of the Lyman break with JWST/NIRSpec. <sup>[10]</sup>
	GLASS-z12	$z = 12.117^{+0.01}_{-0.01}$	13.536 <sup>[4]</sup> / 13.556 <sup>[5]</sup> / 13.434 <sup>[6]</sup> / 13.433 <sup>[7]</sup>	33.2	Galaxy	Lyman-break galaxy discovered by JWST/NIRCam, confirmed by ALMA detection of [O III] emission <sup>[11]</sup>
	UDFJ-39546284	$z = 11.58^{+0.05}_{-0.05}$	13.512 <sup>[4]</sup> / 13.532 <sup>[5]</sup> / 13.410 <sup>[6]</sup> / 13.409 <sup>[7]</sup>	31.77 <sup>†</sup>	Galaxy	Lyman-break galaxy, detection of the Lyman break with JWST/NIRSpec. <sup>[8]</sup> Possibly a dark star. <sup>[9]</sup>

	QSO J0313-1806	$z = 7.6423 \pm 0.0013$	13.218 <sup>[4]</sup> / 13.238 <sup>[5]</sup> / 13.119 <sup>[6]</sup> / 13.118 <sup>[7]</sup>	30	Quasar	Lyman-alpha break detected <sup>[31]</sup>
	ULAS J1342+0928	$z = 7.5413 \pm 0.0007$	13.206 <sup>[4]</sup> / 13.226 <sup>[5]</sup> / 13.107 <sup>[6]</sup> / 13.106 <sup>[7]</sup>	29.36	Quasar	Redshift estimated from [C II] emission <sup>[32]</sup>
	z8_GND_5296	$z = 7.51$	13.202 <sup>[4]</sup> / 13.222 <sup>[5]</sup> / 13.103 <sup>[6]</sup> / 13.102 <sup>[7]</sup>	30.01	Galaxy	Lyman-alpha emitter <sup>[33]</sup>
	A1689-zD1	$z = 7.5 \pm 0.2$	13.201 <sup>[4]</sup> / 13.221 <sup>[5]</sup> / 13.102 <sup>[6]</sup> / 13.101 <sup>[7]</sup>	30	Galaxy	Lyman-break galaxy <sup>[34]</sup>
	GS2_1406	$z = 7.452 \pm 0.003$	13.195 <sup>[4]</sup> / 13.215 <sup>[5]</sup> / 13.096 <sup>[6]</sup> / 13.095 <sup>[7]</sup>	28.62 <sup>†</sup>	Galaxy	Lyman-alpha emitter <sup>[35]</sup>
	GN-108036	$z = 7.213$	13.164 <sup>[4]</sup> / 13.184 <sup>[5]</sup> / 13.065 <sup>[6]</sup> / 13.064 <sup>[7]</sup>	29	Galaxy	Lyman alpha emitter <sup>[36]</sup>

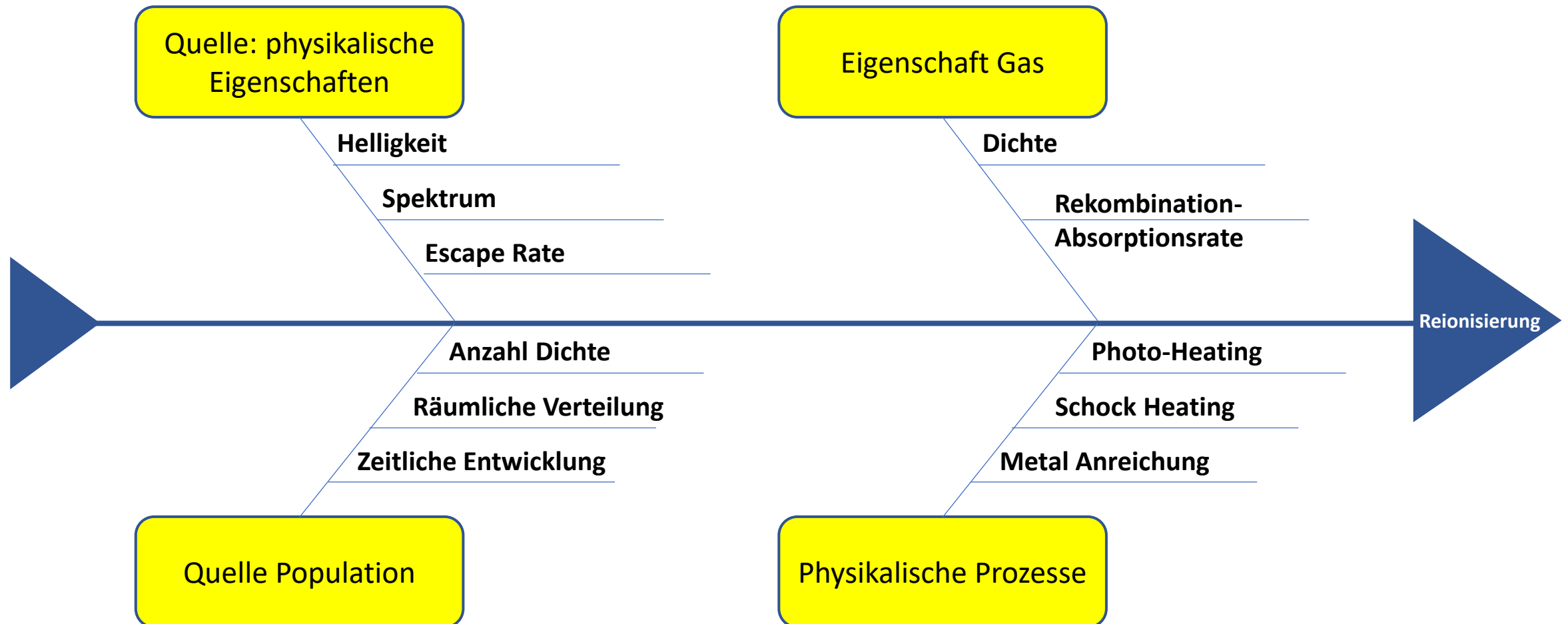
[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_the\\_most\\_distant\\_astronomical\\_objects](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_the_most_distant_astronomical_objects)

[Cosmology Calculator](#)

## 4. Reionisierungsprozess



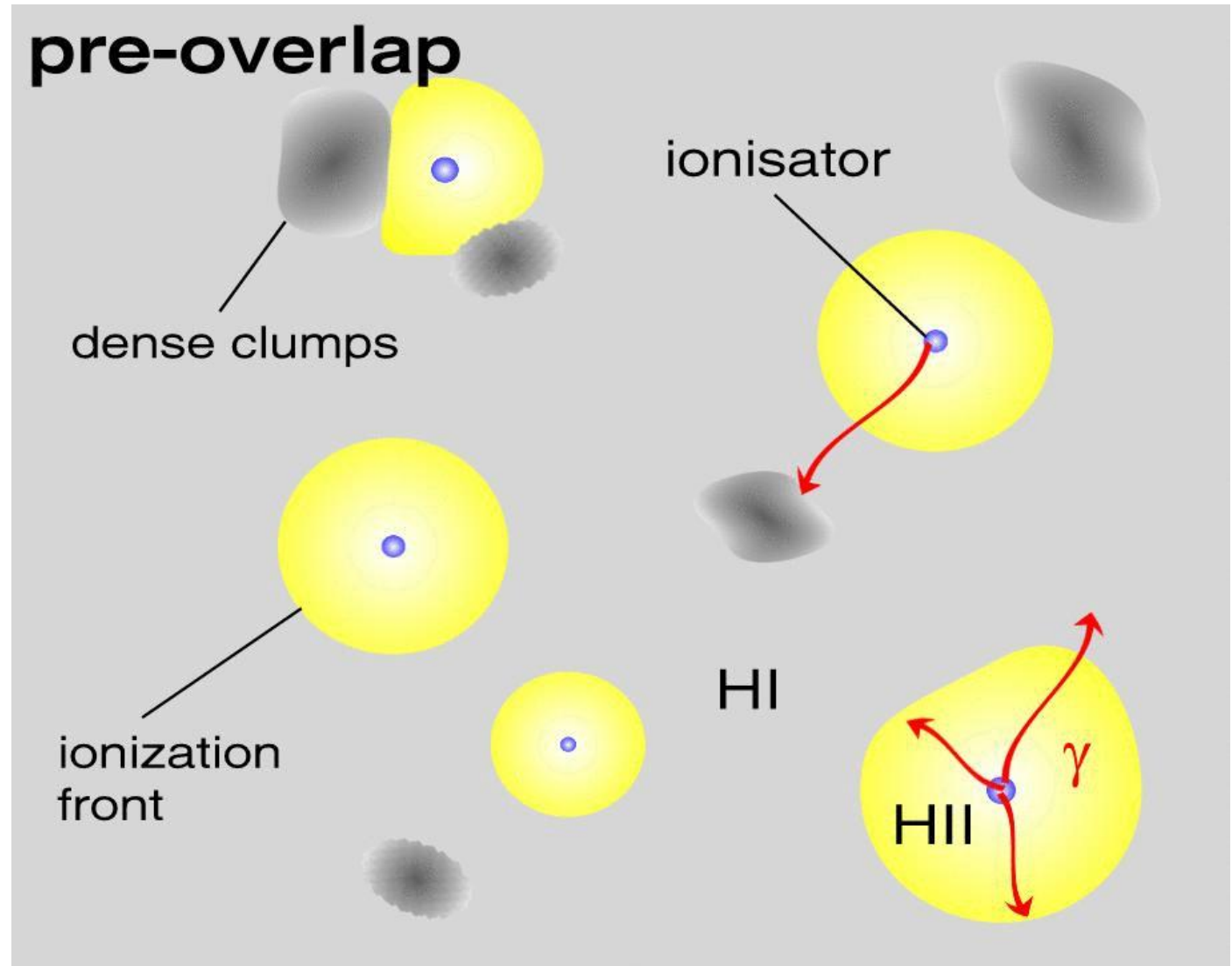
# Einflussfaktoren auf die Reionisierung



# Etapen der Reionisierung

---

- Initial Phase:
  - Quellen ionisieren Umgebung und bilden kosmische Superblasen (Strömgren)
  - Escape Photons
- Overlap:
  - HII Blasen wachsen und überlappen
  - Reionisation beschleunigt
- Reionisation
  - Ionisierungsintensität sehr hoch
  - Von Quellen weit entfernte Dichte Regionen bleiben neutral



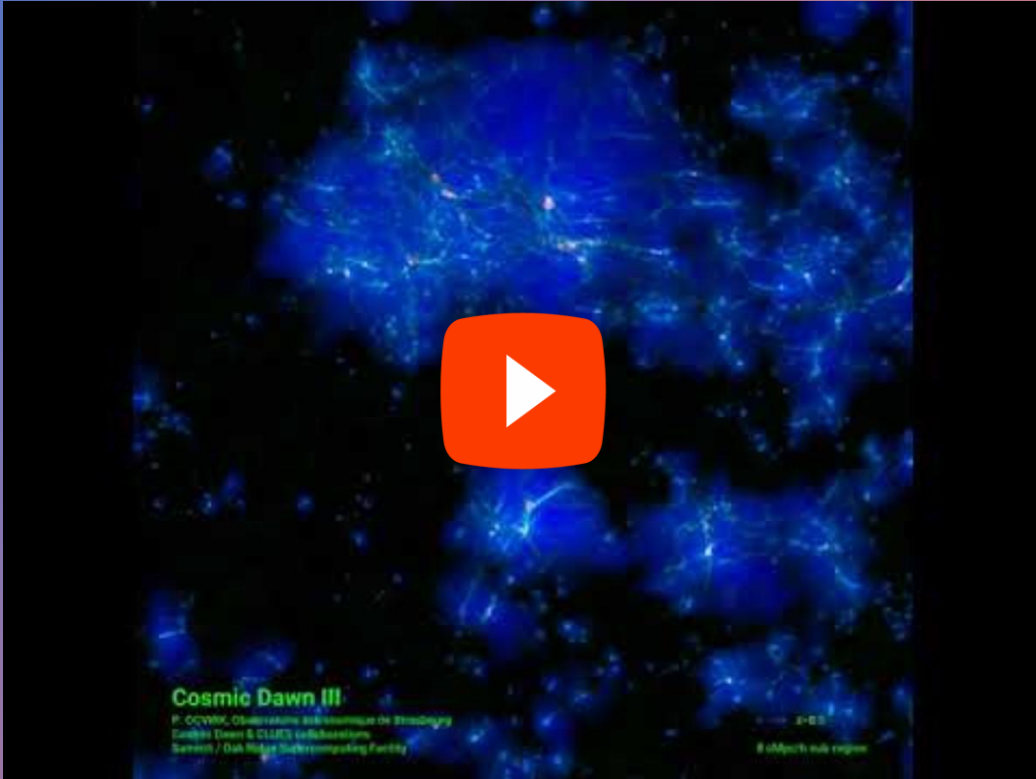
# Simulation Reionisierung

## Vielzahl von theoretischen Modellen:

- **Inside-Out:** Zuerst werden Regionen mit größten Dichte reionisiert.
- **Outside In:** Zuerst werden Regionen mit niedriger Dichte reionisiert
- **Universum 2 mal reionisiert ? ([Cen 2003](#)):**
  - zuerst durch Stern Population III
  - Gefolgt durch einer Rekombination als die Sterne ausginge
  - Zweite Reionisierung durch Quasare / junge Galaxien

## Simulation:

- Sehr hohe Rechenkapazität benötigt
- Kompromiss zwischen großen Skala (100 Mpc) und Auflösung



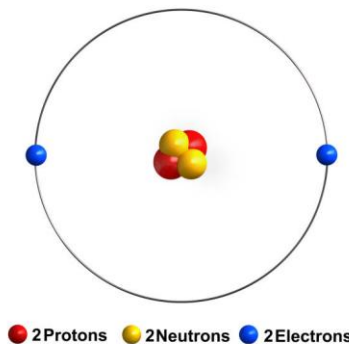
## The Cosmic Dawn Simulation

Observatoire astronomique de Strasbourg

<https://coda-simulation.github.io/>

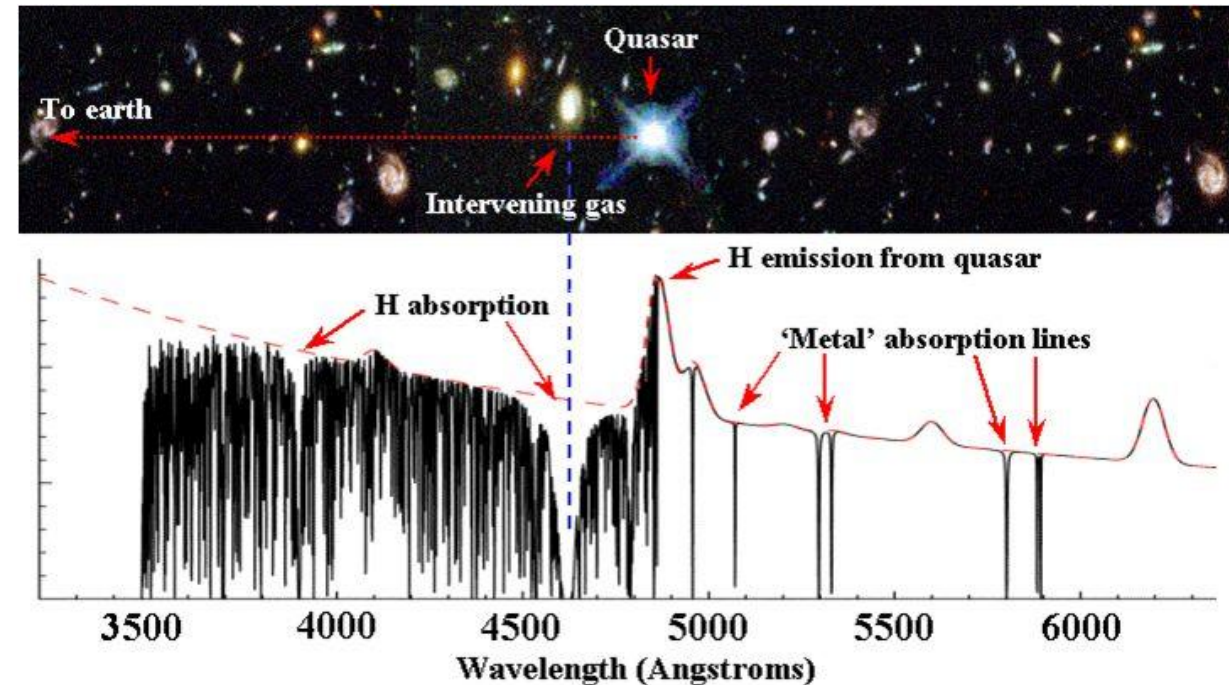
# Helium Reionisierung

- He Atom: 2 Protonen und 2 Elektronen
- Die Ionisation Helium HeI und HeII bei höheren Schwellwerten (XUV):
  - 1. Ionisation: **24.6 eV** (50 nm)
  - 2. Ionisation **54.4 eV** (22 nm)
- Wichtige Absorptionslinie: **He Ly $\alpha$**  mit **30,4 nm** (1/4 von HI Ly $\alpha$ )
- Quasare sind die einzigen möglichen Quellen.
- Wegen der höheren Ionisierungsenergie, tritt die **Helium-Reionisationsepoche später** auf (niedrige Rotverschiebung, deshalb leichter zu beobachten)
- **bei  $Z = 2$  ist Helium vollständig reionisiert**



# Was haben wir gelernt ?

- **Quasare** sind ideale Quelle um das **IGM** zu sondieren
- Die Nichterkennung des **Gunn-Peterson-Trogs** bis zu  $Z=6$ , hat zum Ergebnis geführt, dass das **IGM größtenteils ionisiert** ist. Somit konnte auch festgestellt werden, wann die Reionisierung zu Ende war.
- Der **Ly $\alpha$ -Wald** gibt uns ein 3D-Bild des IGM.
- Aus den Messungen der **Polarisierung der CMB-Strahlung** (WMAP) konnte der Beginn der Reionisierung ermittelt werden: Die Reionisierung ist ein **zeitlich ausgedehnter Prozess**.
- Es ist noch unklar welche Objekte verantwortlich sind. Mögliche Quellen der Reionisierung sind **Sterne Population III und oder junge Galaxien**.
- Kann die Radioastronomie mit der **21 cm Linien** neue Kenntnisse bringen (LOFAR, SKA) ?



Danke Schön



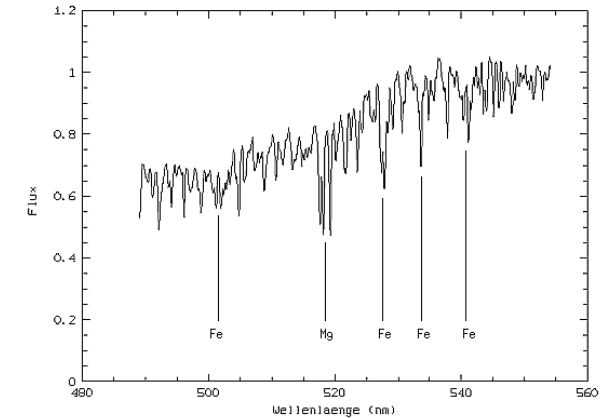
# Quellen

- [\[1\] Das Ende des dunklen Zeitalters](#) – Volker Bromm – Physik Journal (2008)
- [\[2\] https://www.anisotropela.dk/encyclo/lyman\\_alpha.html#galaxy\\_formation](https://www.anisotropela.dk/encyclo/lyman_alpha.html#galaxy_formation)
- [\[3\] Interpreting Lyman  \$\alpha\$  radiation from young, dusty galaxies](#) - Peter Laursen – Philosophiae Doctor – 2010
- [\[4\] Galaxy Formation and Evolution](#) – Houjun Mo, Frank van den Bosch, Simon White – Cambridge University Press – 2010 - <https://people.astro.umass.edu/~hjmo/astro330/html/dir/reading.pdf>
- [\[\[5\] On the density of neutral Hydrogen in intergalactic space](#) – Gunn, Peterson - 1965
- [\[6\] EVIDENCE FOR REIONIZATION AT  \$Z \sim 6\$ : Detection of a Gunn-Peterson Effect in a  \$Z = 6.28\$  Quasar](#) Becker, Fan und Kol.
- [\[7\] Cosmological Reionization by Stellar Sources](#) – Gnedin 1999
- [\[8\] Reionisation – Lexikon Spektrum](#) – Andreas Müller 2014
- [9] Kosmische Ursprünge – Spektrum der Wissenschaft. Dossier 5/2007. Bibliothek NAA, Ub1669
- [10] Das Junge Universum – Sterne und Weltraum Spezial 1/03 . Bibliothek NAA, Ub1335
- [11] [Die Macht der Kosmischen Leere](#) – Spektrum 01.11.2002
- [12] <https://www.spektrum.de/sixcms/media.php/1308/WIS-2005-07-OS-Lyman%20alpha.pdf>
- [13] [Lyman alpha systems and cosmology](#) – astro.berkeley – University of California
- [\[14\] Video Simulations and models of the cosmic reionization evolution](#) – Dominique Aubert –Conference IAP Fevrier 2024
- [\[15\] Video Reionization Lectures1-3](#) Saleem Zaroubi Summer school on Cosmology - 2016
- [\[16\] Video Sterne und Galaxien im frühen Universum](#) - Volker Bromm – Youtube Haus der Astronomie – 2023
- [17] [Optical Depth of the Cosmic Microwave Background and Reionization of the Intergalactic Medium](#) – J M. Shull, A Venkatesan – 2007
- [\[18\] https://ay201b.wordpress.com/2013/04/20/on-the-density-of-neutral-hydrogen-in-intergalactic-space-2/](https://ay201b.wordpress.com/2013/04/20/on-the-density-of-neutral-hydrogen-in-intergalactic-space-2/)
- [19] [https://www.astro.physik.uni-potsdam.de/~www/research/astro\\_2\\_de.html](https://www.astro.physik.uni-potsdam.de/~www/research/astro_2_de.html)
- [20] <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March14/Zaroubi/Zaroubi2.html>

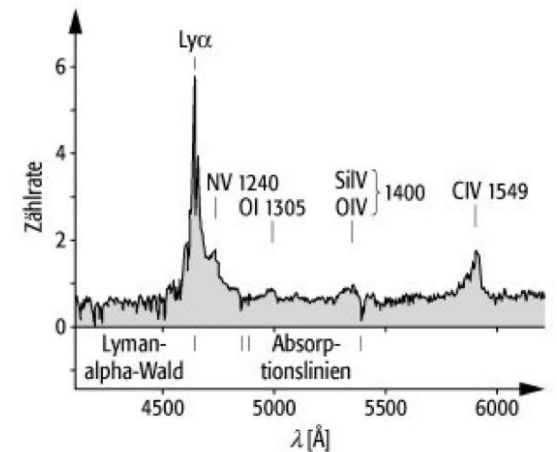
Back up

# Spektroskopie Galaxien

- **Spektroskopie** ist eine Gruppe experimenteller Verfahren, die anhand des Spektrums (Farbzerlegung) von Lichtquellen untersuchen, wie elektromagnetische Strahlung und Materie in Wechselwirkung stehen.
- Licht einer Galaxie wird in ihre verschiedenen Farben zerlegt. Es gibt Auskunft über die **genaue Rotverschiebung** sowie über **Temperatur** und die **Chemische Zusammensetzung** der Körper die das Licht der Galaxie aussendet: Sterne und ionisierte Gaswolke.
- **Spektroskopie ist jedoch Aufwändig**
- **Absorptionslinie:** Atome aus denen die Sterne der Galaxie aufgebaut sind, entziehen dem Licht die Charakteristische Farbe sodass im Spektrum Lücke entstehen
- Aus der Verschiebung der Linien bestimmt man die Rotverschiebung
- Jede Galaxie typ (Spiral, Ellipse, Irreguläre, Starburst) hat seinen charakteristischen Spektrum
- Neben Absorptionslinien, können Gasreiche Galaxien auch **Emissionslinien** zeigen. Beispiel Lyman Alpha Galaxien
- Absorptionslinien von Schweren Elemente O, C, Si deuten hin dass das Gas der Galaxien durch Supernovae zum Beispiel , angereicht wurde.



Elliptische Galaxie



Lyman Alpha Galaxie

# RECALL

- *Expansion of the universe parametrized by Scale factor  $a(t)$*
- *Red Shift  $Z = \frac{\lambda_r - \lambda_e}{\lambda_e}$*
- *Therefore from the FLRW metric:  $a(t) = \frac{1}{1+z(t)}$*
- *Hubble parameter  $H = \frac{\dot{a}}{a}$  therefore  $(1 + Z)H = \frac{dZ}{dt}$*
- *Proper distance  $dl = \pm cdt$*
- *Critical density  $\rho_{cr} = \frac{3H^2}{8\pi G}$*
- *Density Parameter  $\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_{cr}}$  (matter, radiation, baryon)*
- *Flat Universe  $\sum \Omega_i = 1$*

# Optical Depth applied on the Gunn-Peterson effect

- *The optical depth at observed frequency:*
  - $\tau(\nu) = \int_0^{Z_0} n_{HI}(z) \cdot \sigma(\nu_{obs}(1+z)) c \left| \frac{dt}{dz} \right| dz$
- $n_{HI}$  Neutral hydrogen density
- $\frac{dl}{dz} = \frac{cdt}{dz} = cH^{-1}(1+z)^{-1}$

## Assumptions:

- **Resonance cross section strongly peaked at Ly $\alpha$ :**  $\sigma(\nu) = \frac{\pi e^2 f}{m_e c} \overset{\text{Dirac Function}}{\delta(\nu - \nu_\alpha)}$ ,  
where  $f = 0,416$  is the oscillator strength
- $Z_0$  is the redshift of the observed object
- $Z$  is the redshift of the resonance scattering layer,  $Z < Z_0$
- Frequency of Scattering Layer is  $\nu_{scat} = \nu_{obs}(1+z)$   
(for a stationary observer with respect to the scattered layer)

# Optical Depth applied on the Gunn-Peterson effect

- $\sigma(v(1+Z)) = \frac{\pi e^2 f}{m_e c} \delta(v_{obs}(1+Z) - v_\alpha) = \frac{\pi e^2 f}{m_e c} \frac{1}{v} \delta\left(Z + 1 - \frac{v_\alpha}{v}\right)$

- $\tau_{GP} = \int_0^{Z_0} n_{HI}(z) \cdot \frac{\pi e^2 f (1+z)}{m_e c v_{scat}} \delta\left(Z + 1 - \frac{v_\alpha}{v}\right) c \frac{dz}{H(1+z)}$  mit  $\int \delta\left(Z + 1 - \frac{v_\alpha}{v}\right) dz = 1$

- $\tau_{GP} = n_{HI}(z) \cdot \frac{\pi e^2 f}{m_e v_\alpha} H^{-1}$

Wobei:

- $X_{HI} = \frac{n_{HI}}{n_H}$  wobei  $n_{HI}$  ist die Anzahldichte von H – Atomkern gesamt
- Density of neutral hydrogen  $n_H = \frac{\rho_{cr}}{m_H} (1-Y)\Omega_b(1+Z)^3$
- $H \approx H_0(\Omega_{m,0}(1+z)^3)^{\frac{1}{2}}$ , for large redshifts

Daraus folgt:

$$\tau_{GP} = n_H X_{HI} \frac{\pi e^2 f}{m_e v_\alpha} H^{-1} = \frac{\rho_m}{m_H} \cdot \frac{\Omega_b}{\Omega_m} (1-Y) (1+Z)^3 \cdot X_{HI} \frac{\pi e^2 f}{m_e v_\alpha} \cdot \frac{1}{H_0(\Omega_{m,0}(1+Z)^3)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\tau_{GP} = 6,5 \cdot 10^5 X_{HI} \left(\frac{1+z}{10}\right)^{3/2}$$

Quelle1: Artikel V. Bromm

# Optical Depth of the CMB (Analytic Calculation)

- The electron scattering optical depth can be written:
- $\tau_e = \int n_e \cdot \sigma_T dl = \int_0^{z_r} n_e \cdot \sigma_T \cdot \left| \frac{cdt}{dz} \right| dz$  with  $\left| \frac{dz}{dt} \right| = (1+z)H$

- $n_e$  Electron Density
- $\sigma_T$  Thomson cross section =  $0,66 \cdot 10^{-24} \text{cm}^2$

- Assumptions:

- instantaneous, complete ionization at redshift  $z_r$ .
- Adopt Standard Model with no curvature:

$$H = H_o \left( \Omega_{m,0} (1+z)^3 + \Omega_{\Delta,0} \right)^{1/2}$$
$$\approx H_o \left( \Omega_{m,0} (1+z)^3 \right)^{1/2}, \text{ Einstein - De Sitter Model, for large redshifts } z$$

# Optical Depth of the CMB (Analytic Calculation)

- *Number Density of neutral hydrogen*  $n_H = \frac{\rho_{cr}}{m_H} (1 - Y)\Omega_b (1 + Z)^3$
- *Number Density of Helium*  $n_{He} = yn_H$
- *Number Density of electrons*  $n_e = n_H(1 + y)$  *H and He ionization if He single ionized*
- *Y: He fraction by mass*  $Y \approx 0,244$  *(Beobachtungsgröße)*
- *y: He fraction by number* *and*  $y = \frac{Y}{4} / (1 - Y) \approx 0,0807$
- Thus,

$$\tau_e = \frac{c}{H_0} \Omega_b \frac{\rho_{cr}(1 - Y)(1 + y)\sigma_T}{m_H} \int_0^{z_r} \frac{(1 + z)^3}{(1 + z)\Omega_m^{1/2} (1 + z)^{3/2}} dz = \dots \int_0^{z_r} (1 + z)^{1/2} dz$$

$$\tau_e = \frac{c}{H_0} \frac{2\Omega_b}{3\Omega_m^{1/2}} \frac{\rho_{cr}(1 - 3Y/4)\sigma_T}{m_H} (1 + z_r)^{3/2}$$

# Warum bleibt das Universum reionisiert?

Quelle: Chat GPT „“ Why does the universe remain ionised and does not recombine the protons with the electrons (at a redshift below 5)?“

After the epoch of reionization, which concluded by redshift  $z \approx 5$ , the universe remains ionized for several reasons related to its overall energy conditions and the presence of ionizing sources:

- 1. Presence of Ionizing Sources:** Even after reionization, the universe contains a continuous supply of high-energy radiation from various sources such as quasars, young stars, and active galactic nuclei (AGN). These objects emit ultraviolet (UV) photons that have enough energy to ionize neutral hydrogen, keeping the intergalactic medium (IGM) ionized.
- 2. Low Density of the IGM:** As the universe expands, the density of the intergalactic medium decreases. In such a low-density environment, recombination (where a free electron combines with a proton to form neutral hydrogen) becomes less likely. The time between collisions of free electrons and protons is long due to this low density, reducing the efficiency of recombination processes.
- 3. High Temperature of the IGM:** The post-reionization intergalactic medium is heated to temperatures of around  $10^4$  to  $10^5$  K by the ionizing radiation. At such high temperatures, the kinetic energy of particles is sufficient to prevent protons and electrons from recombining easily. The temperature keeps electrons moving fast enough to avoid binding with protons.
- 4. Photon-Electron Interactions:** The universe is filled with the cosmic microwave background (CMB) radiation and starlight, which provides a small but steady source of energy that helps prevent recombination. Even though the CMB itself no longer ionizes hydrogen, radiation from stars and galaxies keeps the process of ionization ongoing.

**Because of these factors, the ionized state of hydrogen persists in the vast majority of the intergalactic medium, and recombination does not occur on a large scale. The universe remains largely ionized up to the present day, except in dense regions like galaxies where neutral hydrogen can exist.**

# He II Lyman Series

Quelle: Chat GPT „ what is the He II Lyman Series“

The **He II Lyman series** is a set of spectral lines resulting from electronic transitions in singly ionized helium (He<sup>+</sup>). It is analogous to the **hydrogen Lyman series**, but it involves the transitions of an electron in a helium ion, which has a nucleus with two protons instead of one, leading to different energy levels.

## Key Points about the He II Lyman Series:

**1. Singly Ionized Helium (He II):** In He II, the helium atom has lost one electron, leaving just one electron orbiting the nucleus, similar to a hydrogen atom. However, due to the increased nuclear charge (two protons instead of one, like in hydrogen), the energy levels are more tightly bound, and the transitions result in higher energy (shorter wavelength) spectral lines compared to hydrogen.

**2. Transitions:** The He II Lyman series consists of transitions from higher energy levels ( $n \geq 2$ ) down to the ground state ( $n = 1$ ) of the singly ionized helium atom.

1.  $n=2$  to  $n=1$  transition: This is the **Lyman-alpha** line for He II, and it occurs at **30.4 nm** in the extreme ultraviolet (EUV) region.
2.  $n=3$  to  $n=1$ : This is the **Lyman-beta** line for He II, and it occurs at a shorter wavelength in the EUV.
3. The series continues with higher- $n$  transitions, producing additional lines at shorter wavelengths.

**3. Wavelengths:** Due to the higher nuclear charge of helium (compared to hydrogen), the spectral lines of the He II Lyman series occur at shorter wavelengths than the corresponding lines in the hydrogen Lyman series.

1. For instance, while the Lyman-alpha line of hydrogen occurs at **121.6 nm**, the Lyman-alpha line of He II is at **30.4 nm**.

**4. Importance in Astrophysics:** The He II Lyman series is particularly important in the study of very hot astrophysical environments, such as:

1. **Hot stars** (e.g., O-type stars) where temperatures are high enough to ionize helium.
2. **Planetary nebulae** where ultraviolet radiation from a central hot star ionizes the surrounding gas.
3. **Active galactic nuclei (AGN)** and other high-energy environments where He II can be ionized and emit these lines.

Because the ionization potential of He II is higher than that of hydrogen (54.4 eV for He II vs. 13.6 eV for hydrogen), He II spectral lines are observed in regions where the radiation field is extremely energetic.