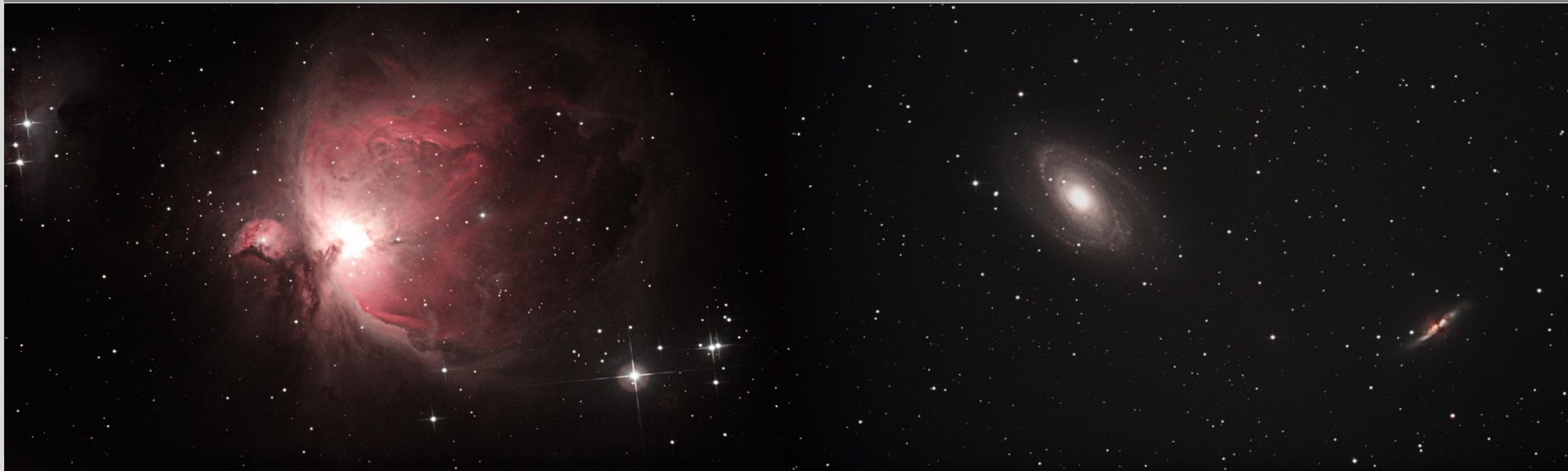


Astroteilchenphysik

The Hitchhiker's Guide to the Universe

Nancy Wandkowsky, Institut für Kernphysik (IKP)



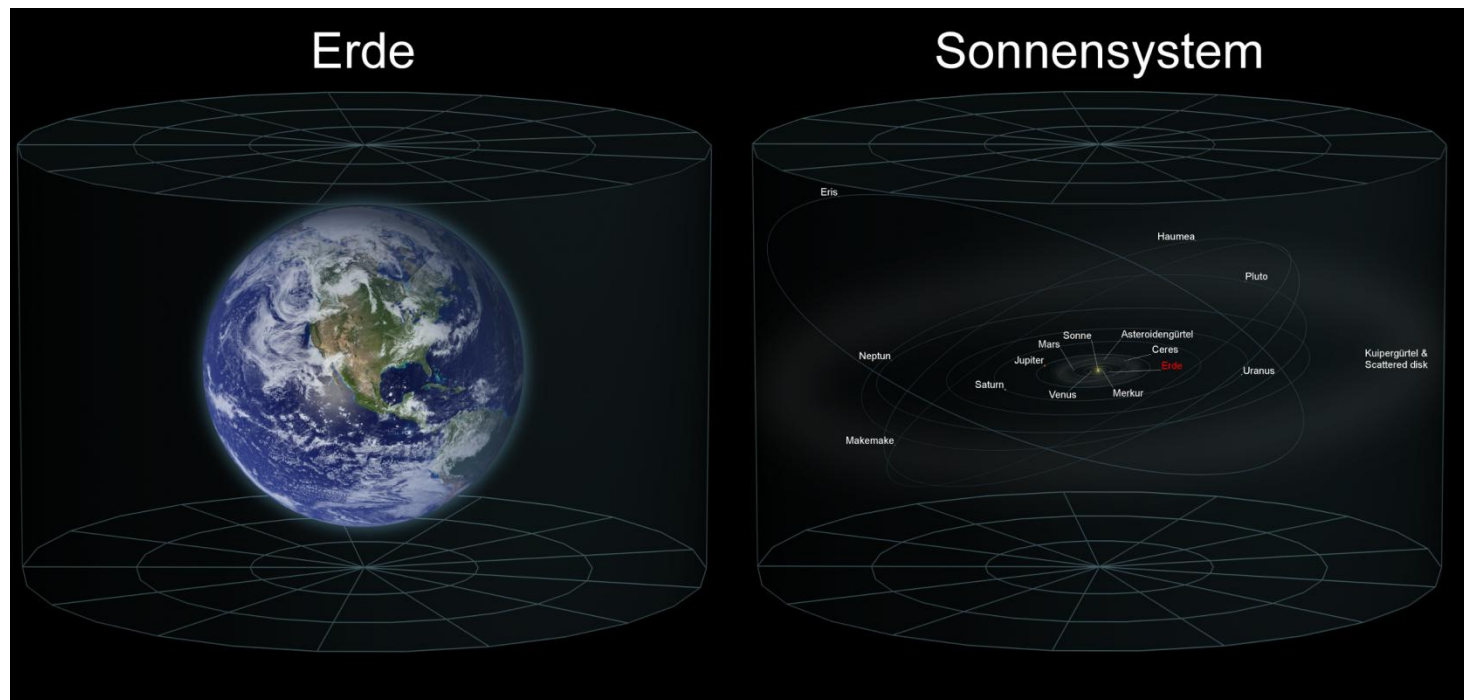
Inhalt

- Wo befinden wir uns im Universum?
- Der mathematische Kosmos
- Standardmodell der Kosmologie
 - Hubble-Expansion
 - Hintergrundstrahlung
 - Nukleosynthese
- Dunkle Materie
- Leben und Sterben von Sternen

Wo befinden wir uns im Universum?



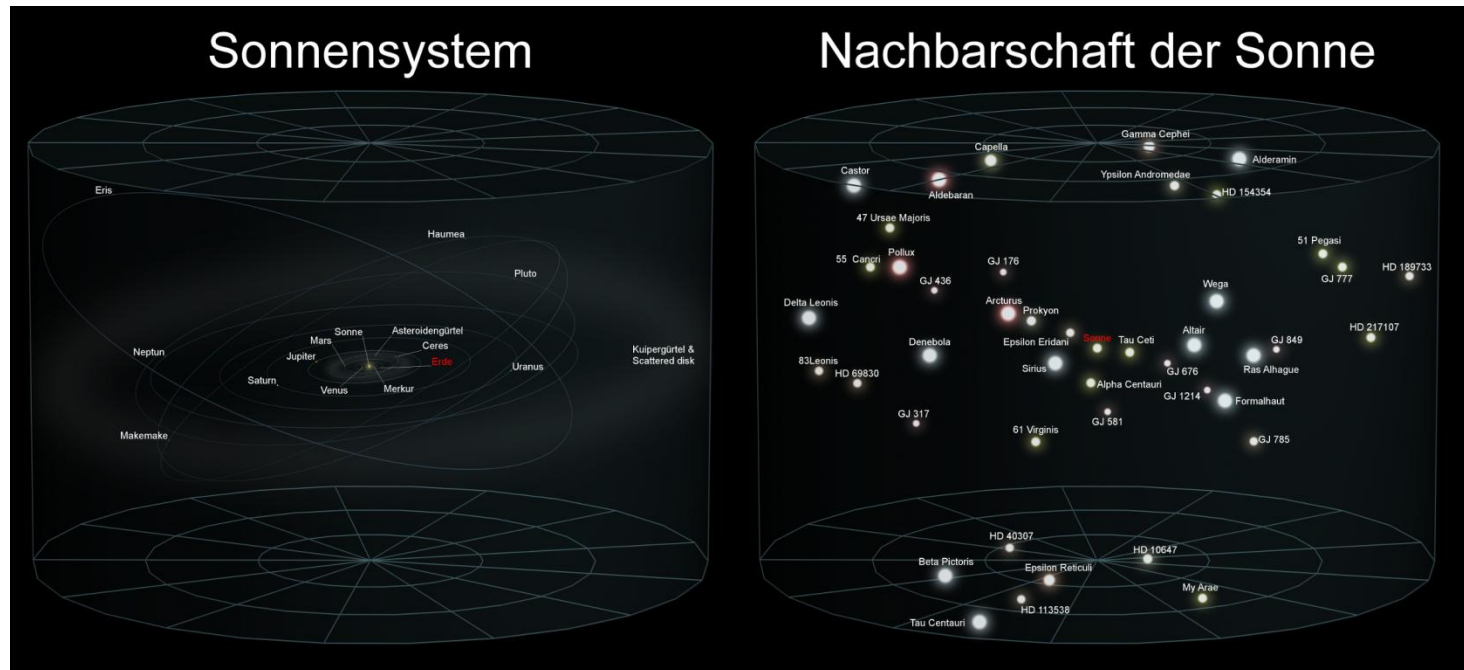
Wo befinden wir uns im Universum?



13000 km

$5 \cdot 10^9$ km (50 AE)

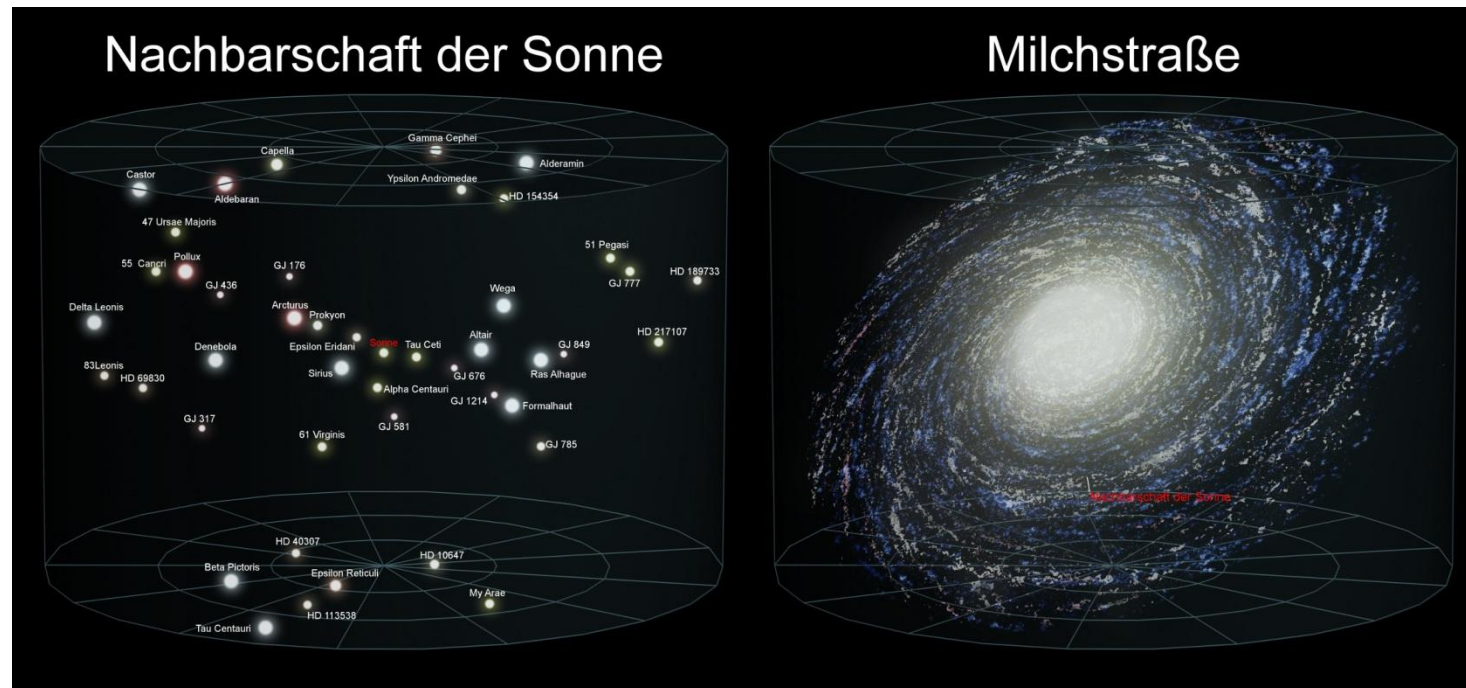
Wo befinden wir uns im Universum?



$5 \cdot 10^9$ km (50 AE)

$1 \cdot 10^6$ AE (25 LJ)

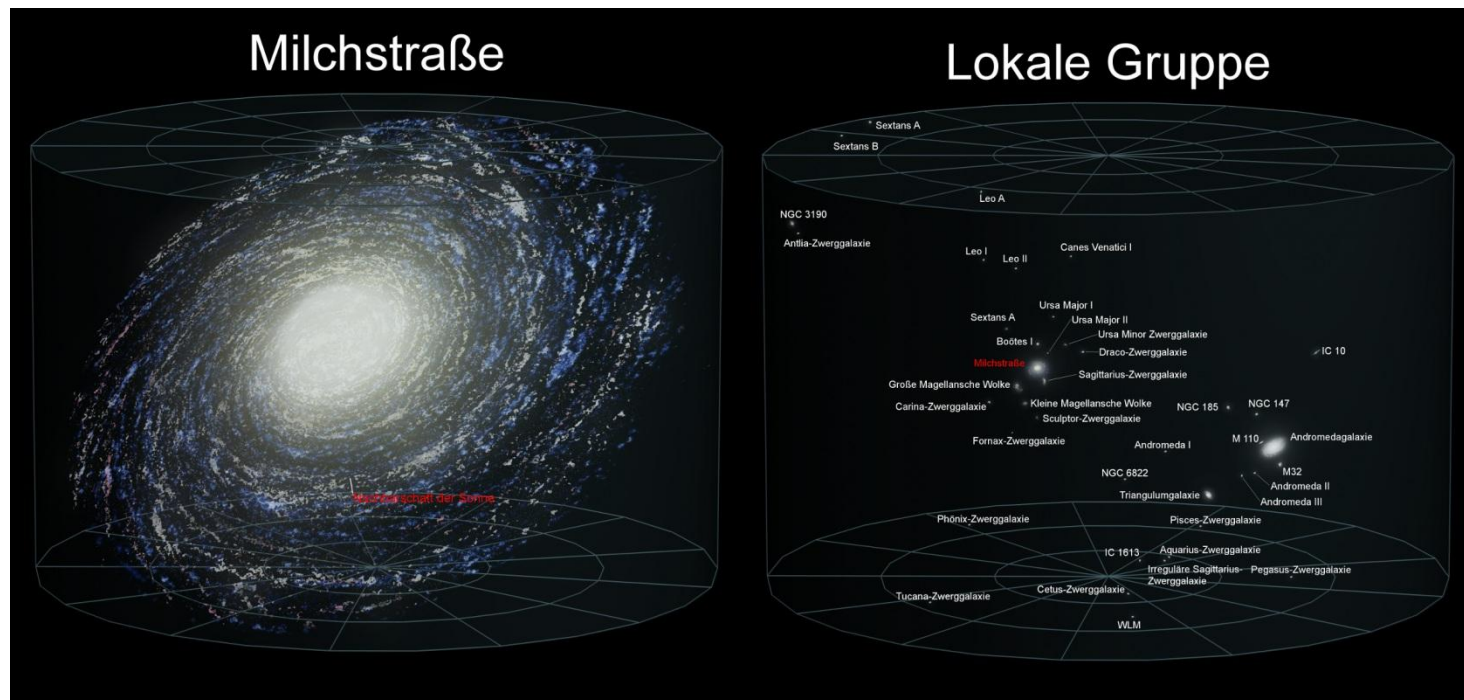
Wo befinden wir uns im Universum?



$1 \cdot 10^6$ AE (25 LJ)

$1 \cdot 10^5$ LJ (30 kpc)

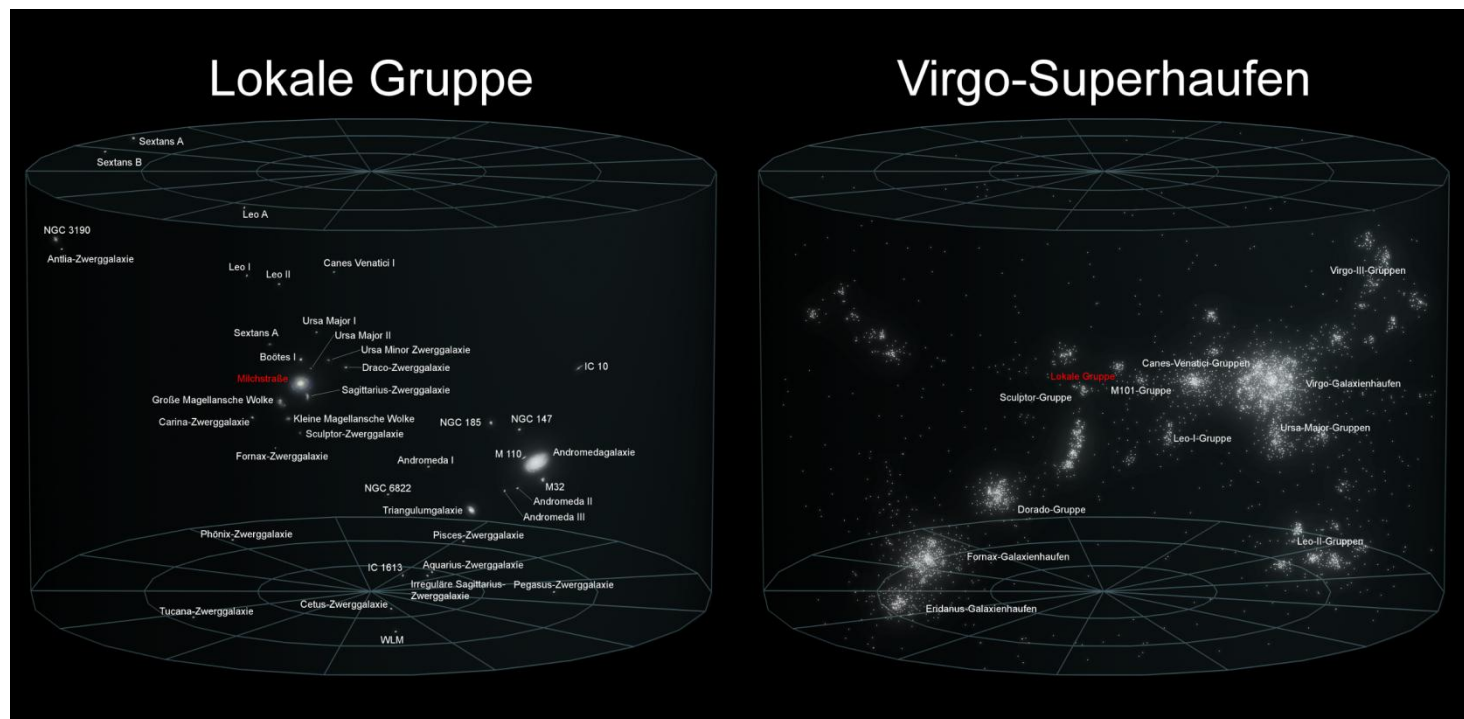
Wo befinden wir uns im Universum?



$1 \cdot 10^5$ LJ (30 kpc)

3 Mpc

Wo befinden wir uns im Universum?



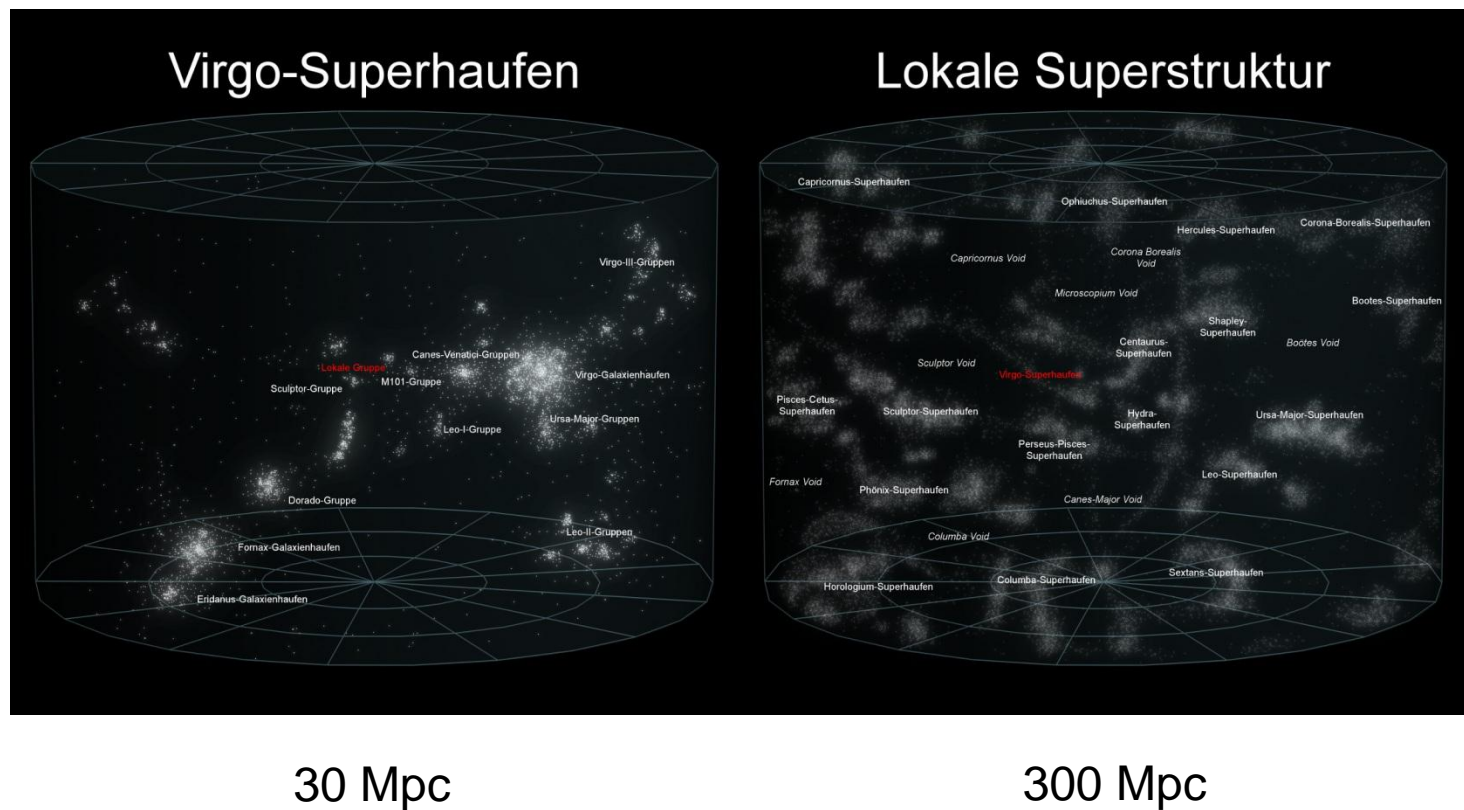
Lokale Gruppe

Virgo-Superhaufen

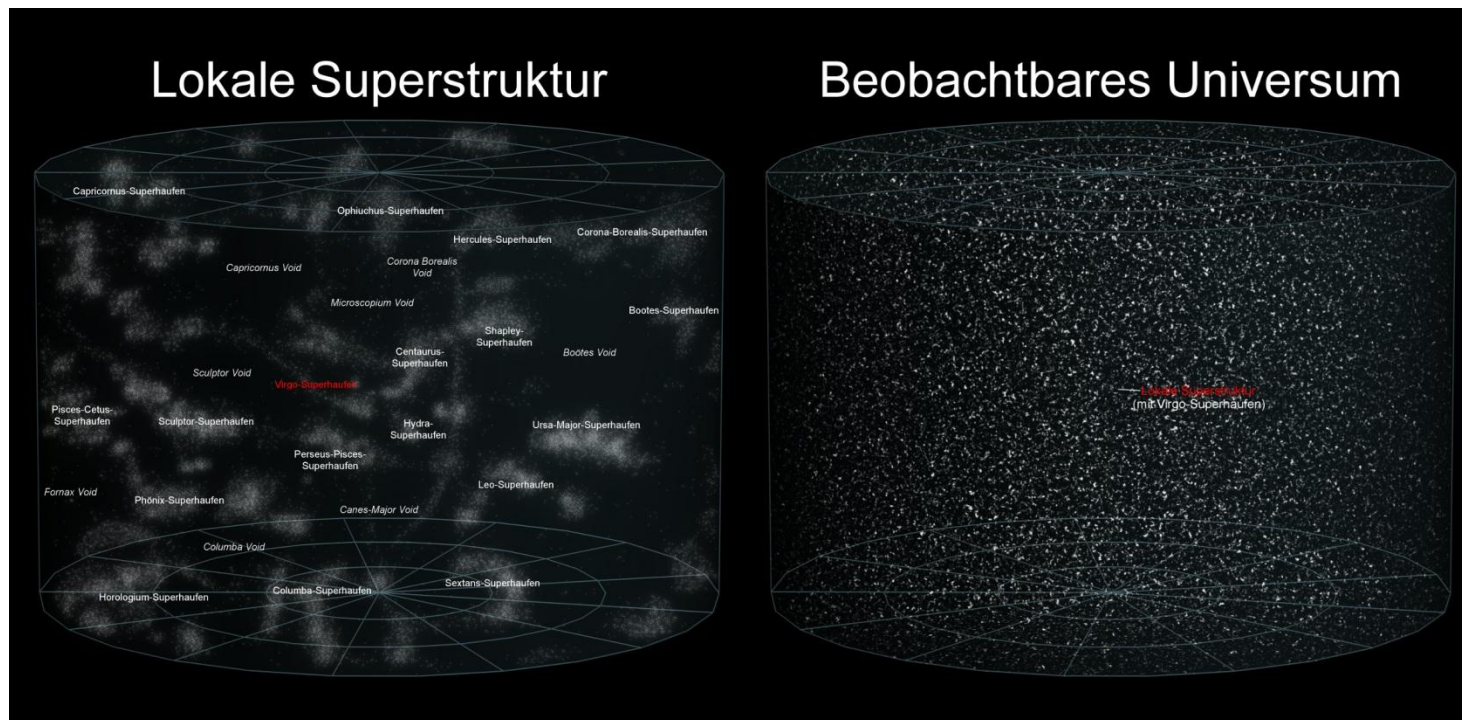
3 Mpc

30 Mpc

Wo befinden wir uns im Universum?



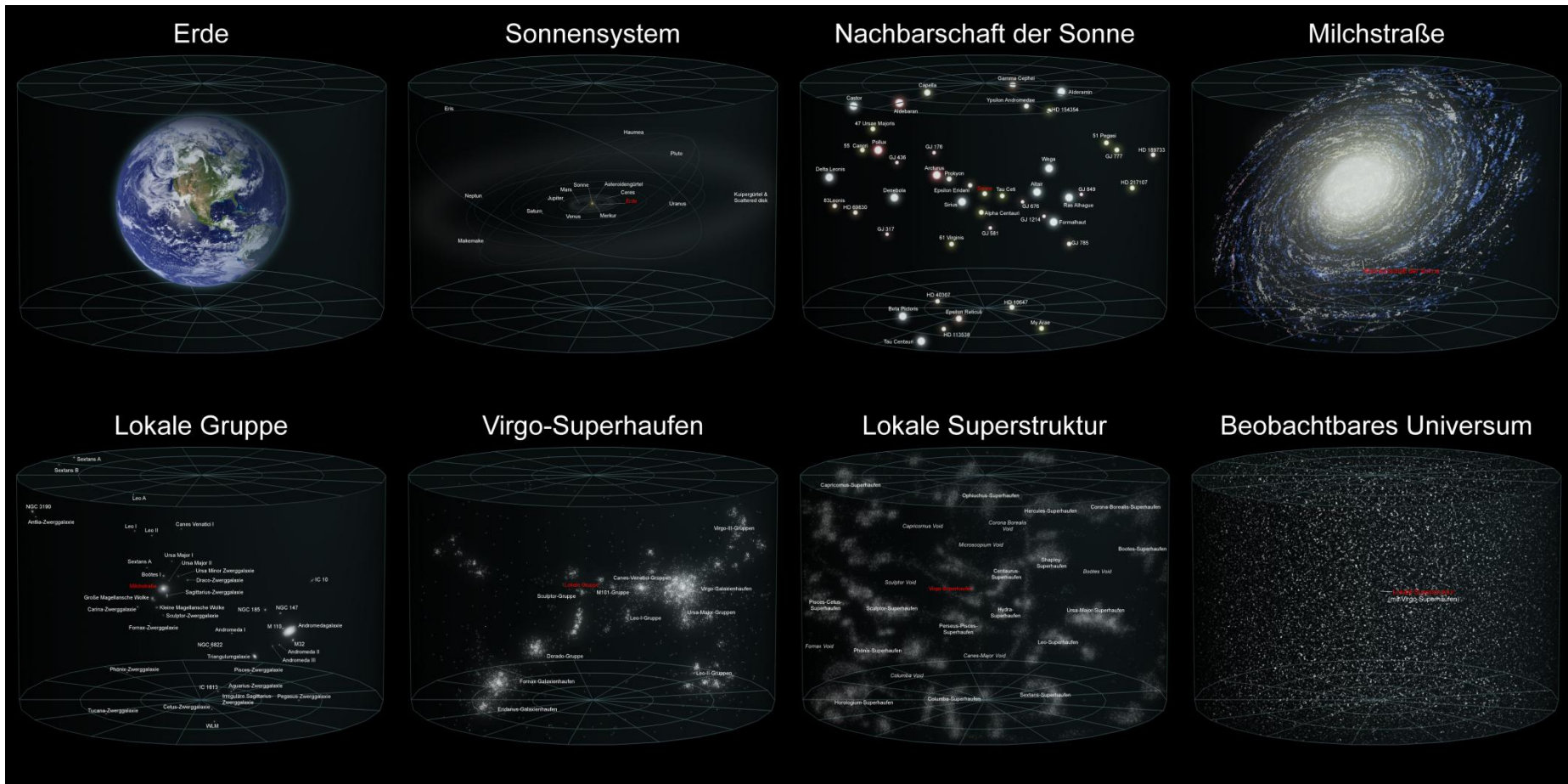
Wo befinden wir uns im Universum?



300 Mpc

1 Gpc

Wo befinden wir uns im Universum?



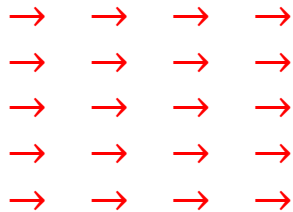
An keinem besonders ausgezeichneten Ort!

Wo befinden wir uns im Universum?

Das Kosmologische Prinzip

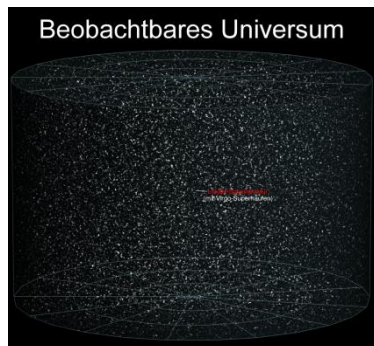
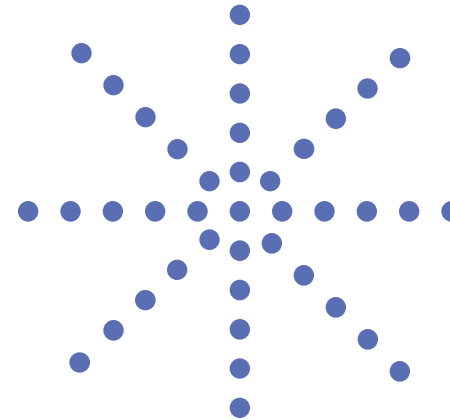
Homogenität:

Das Universum sieht von jedem beliebigen Punkt aus betrachtet gleich aus



Isotropie:

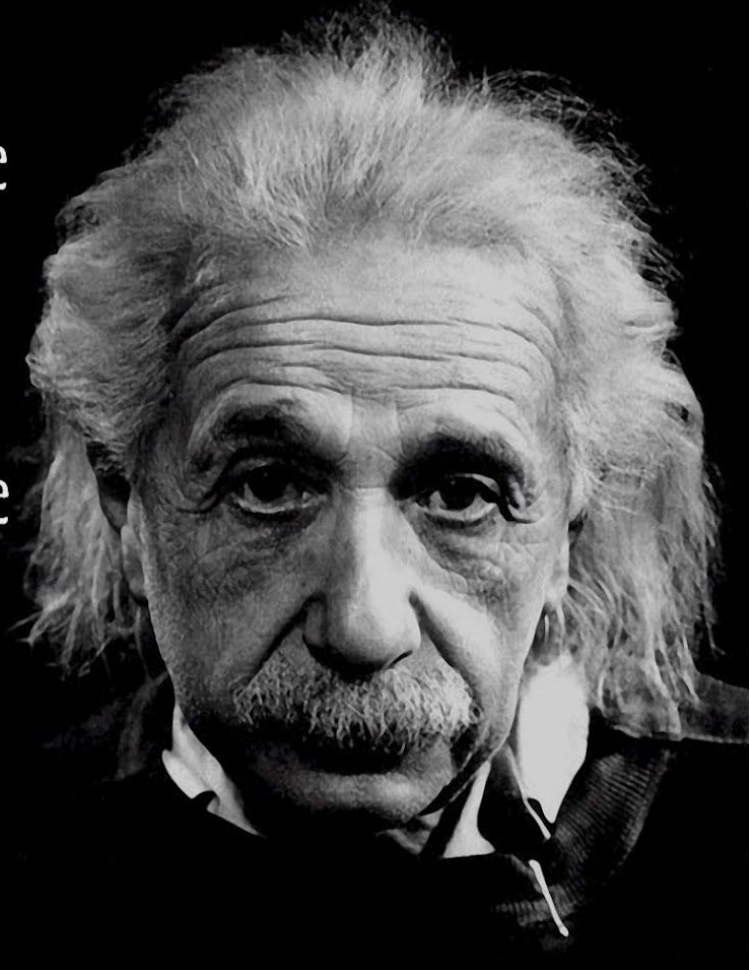
Das Universum sieht unabhängig von der Beobachtungsrichtung immer gleich aus



→ *Unser Platz im Universum ist in keinster Weise ausgezeichnet!*

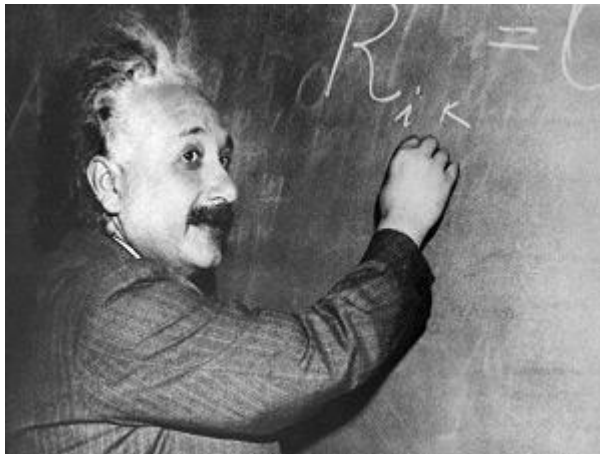
"Two things are
infinite. The universe
and human stupidity.

...and i'm not so sure
about the universe."



Der mathematische Kosmos

- Einstein'sche Feldgleichungen
 - Jegliche Form von Energie hat gravitative Wirkung
 - „Geometrisierung der Schwerkraft“



Metrischer Tensor
(Maß für Abstände und Winkel)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

Ricci-Krümmungstensor/Skalar (Krümmung der Raumzeit) Energie-Impuls-Tensor (gravitativ wirkende Energie)

Der mathematische Kosmos

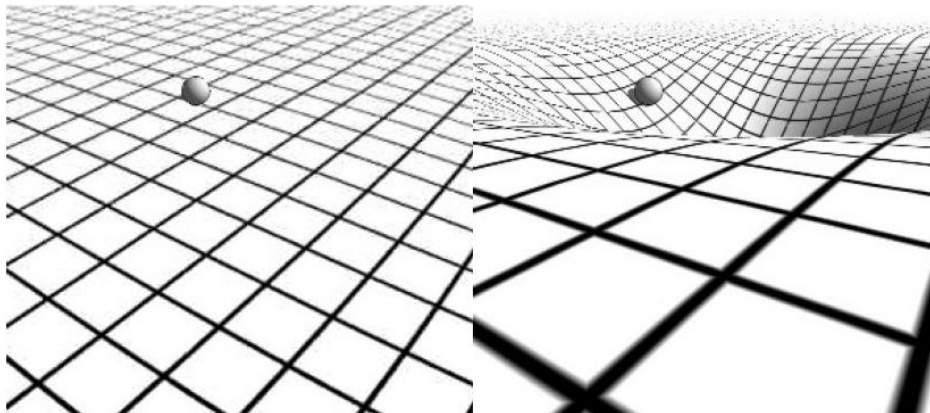
■ Einstein'sche Feldgleichungen – Metrik + Krümmung

- Kosmologisches Prinzip → konstante räumliche Krümmung
- Robertson-Walker-Metrik

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = dt^2 - R^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right)$$

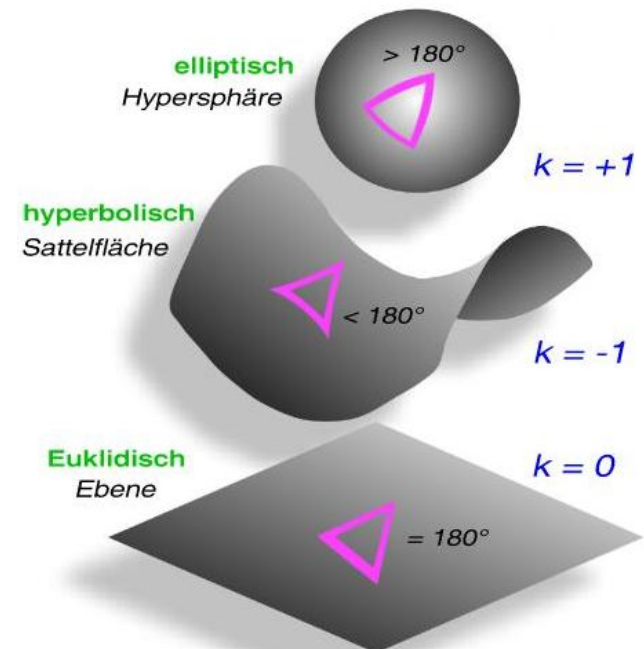
R(t): kosm. Skalenfaktor

k: Krümmungsparameter



2d-Koordinatensystem
(Riemannscher Raum)

Skalierung der Abstände mit ds^2
→ gekrümmte Hyperfläche



Der mathematische Kosmos

■ Einstein'sche Feldgleichungen – Energie-Impuls-Tensor

- Universum als perfekte Flüssigkeit mit Energiedichte ρ und Druck p

$$(T^{\alpha\beta}) = \begin{pmatrix} w & \frac{S_x}{c} & \frac{S_y}{c} & \frac{S_z}{c} \\ \frac{S_x}{c} & G_{xx} & G_{xy} & G_{xz} \\ \frac{S_y}{c} & G_{yx} & G_{yy} & G_{yz} \\ \frac{S_z}{c} & G_{zx} & G_{zy} & G_{zz} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Isotropie}} \begin{matrix} \omega = -\rho c^2 \\ G_{ij} = \begin{pmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{pmatrix} \end{matrix}$$

ω : Energiedichte

(S_x, S_y, S_z) : Energiestromdichte

G_{ij} : Maxwell'scher Spannungstensor (räumlicher Impulstransport)

Der mathematische Kosmos

■ Einstein'sche Feldgleichungen – Energie-Impuls-Tensor

- Universum als perfekte Flüssigkeit mit Energiedichte ρ und Druck p

$$(T^{\alpha\beta}) = \begin{pmatrix} w & \frac{S_x}{c} & \frac{S_y}{c} & \frac{S_z}{c} \\ \frac{S_x}{c} & G_{xx} & G_{xy} & G_{xz} \\ \frac{S_y}{c} & G_{yx} & G_{yy} & G_{yz} \\ \frac{S_z}{c} & G_{zx} & G_{zy} & G_{zz} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Homogenität + Isotropie}} \begin{matrix} \omega = -\rho(t)c^2 \\ G_{ij} = \begin{pmatrix} p(t) & 0 & 0 \\ 0 & p(t) & 0 \\ 0 & 0 & p(t) \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$$T_{\mu\nu} = \rho(t)g_{00} + p(t)g_{ii}$$

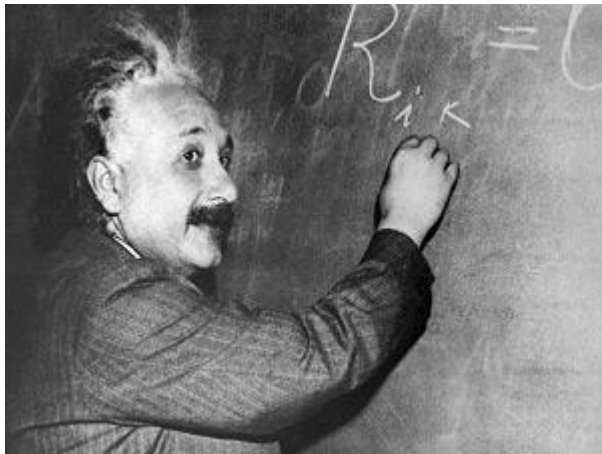
ω : Energiedichte

(S_x, S_y, S_z) : Energiestromdichte

G_{ij} : Maxwell'scher Spannungstensor (räumlicher Impulstransport)

Der mathematische Kosmos

- Einstein'sche Feldgleichungen
 - Jegliche Form von Energie hat gravitative Wirkung
 - „Geometrisierung der Schwerkraft“



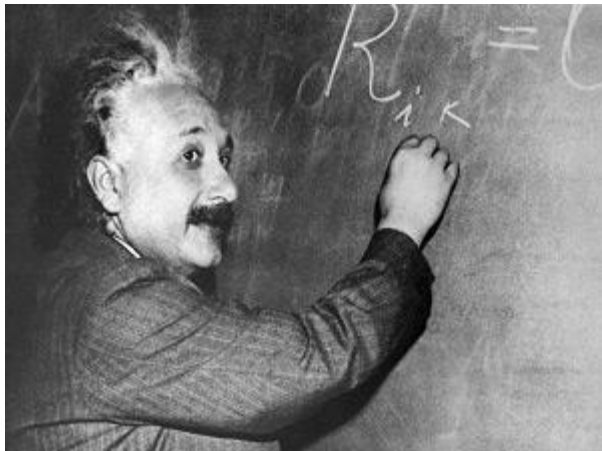
Metrischer Tensor
(Maß für Abstände und Winkel)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

Ricci-Krümmungstensor/Skalar (Krümmung der Raumzeit) Energie-Impuls-Tensor (gravitativ wirkende Energie)

Der mathematische Kosmos

■ Einstein'sche Feldgleichungen - Verallgemeinerung



Kosmologische Konstante

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

Ricci-Krümmungstensor/skalar
(Krümmung der Raumzeit)

Energie-Impuls-Tensor
(gravitativ wirkende Energie)

Metrischer Tensor
(Maß für Abstände und Winkel)

■ Vakuumfeldgleichungen:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 0 \rightarrow$$

$$T_{\mu\nu}^{(vac)} = -\frac{c^2}{8\pi G} \Lambda g_{\mu\nu}$$

Vakuumenergiedichte $\rho_{(vac)}$

Der mathematische Kosmos

- Einstein'sche Feldgleichungen – Lösung
 - Einsetzen von Energie-Impuls-Tensor und Metrik
 - Friedmann-Lemaître-Gleichungen:

00-Komponente liefert:

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

Spur liefert:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu}$$

$$T_{\mu\nu} = \rho(t)g_{00} + p(t)g_{ii}$$

$$g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu = dt^2 - R^2(t)\left(\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 \dots\right)$$

$$R = \frac{6}{R^2}(\ddot{R}R + \dot{R}^2 + kc^2)$$

$$\text{Skalenfaktor: } a = \frac{R_t}{R_0}$$

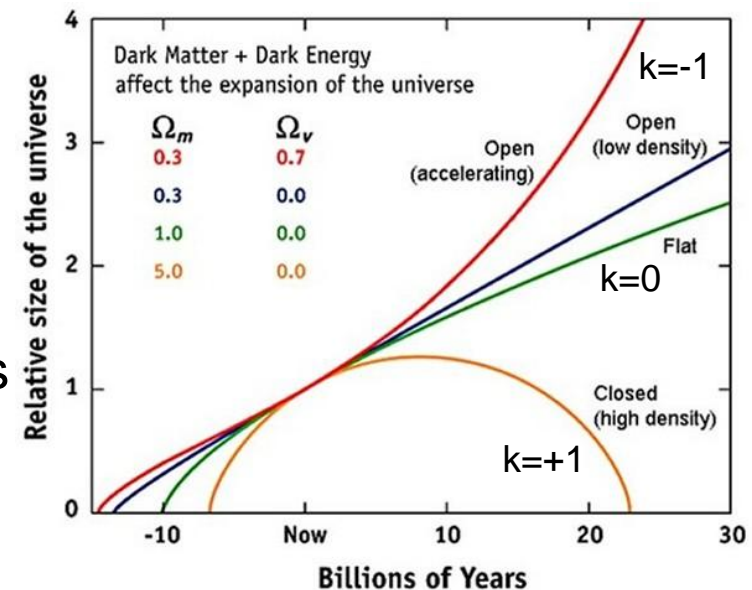
Der mathematische Kosmos

- Einstein'sche Feldgleichungen – Lösung
 - Einsetzen von Energie-Impuls-Tensor und Metrik
→ Friedmann-Lemaître-Gleichungen:

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

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

- Energiedichte ρ und Geometrie k bestimmen Schicksal des Universums



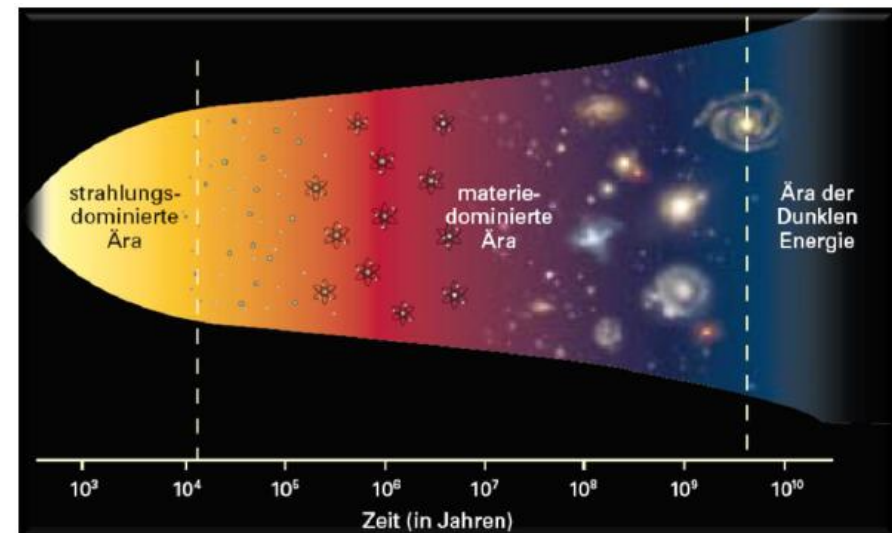
Der mathematische Kosmos

- Einstein'sche Feldgleichungen – Lösung
 - Einsetzen von Energie-Impuls-Tensor und Metrik
 - Friedmann-Lemaître-Gleichungen:

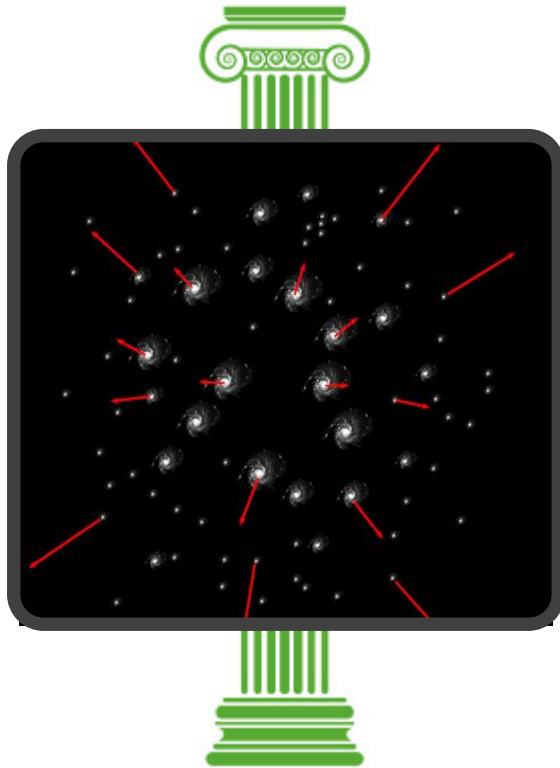
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

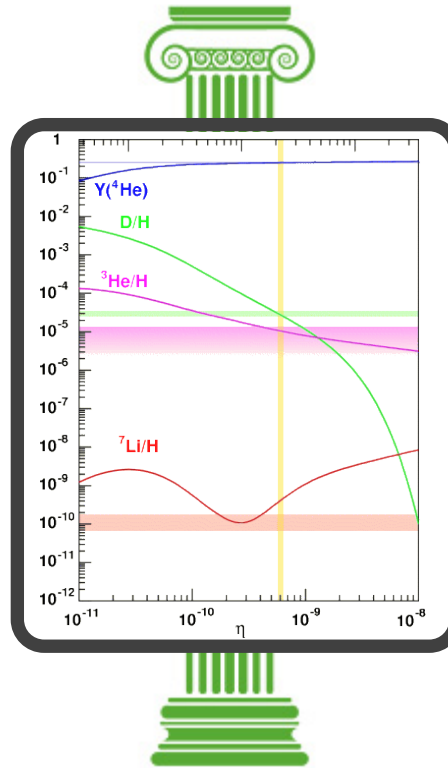
- Phasen mit unterschiedlicher dominierender Energiedichte ρ



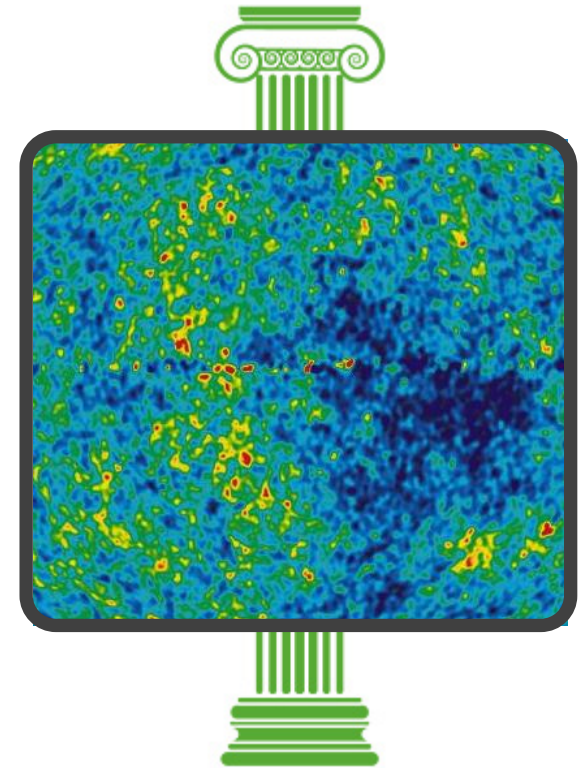
Standardmodell der Kosmologie – 3 Säulen



Hubble-Expansion

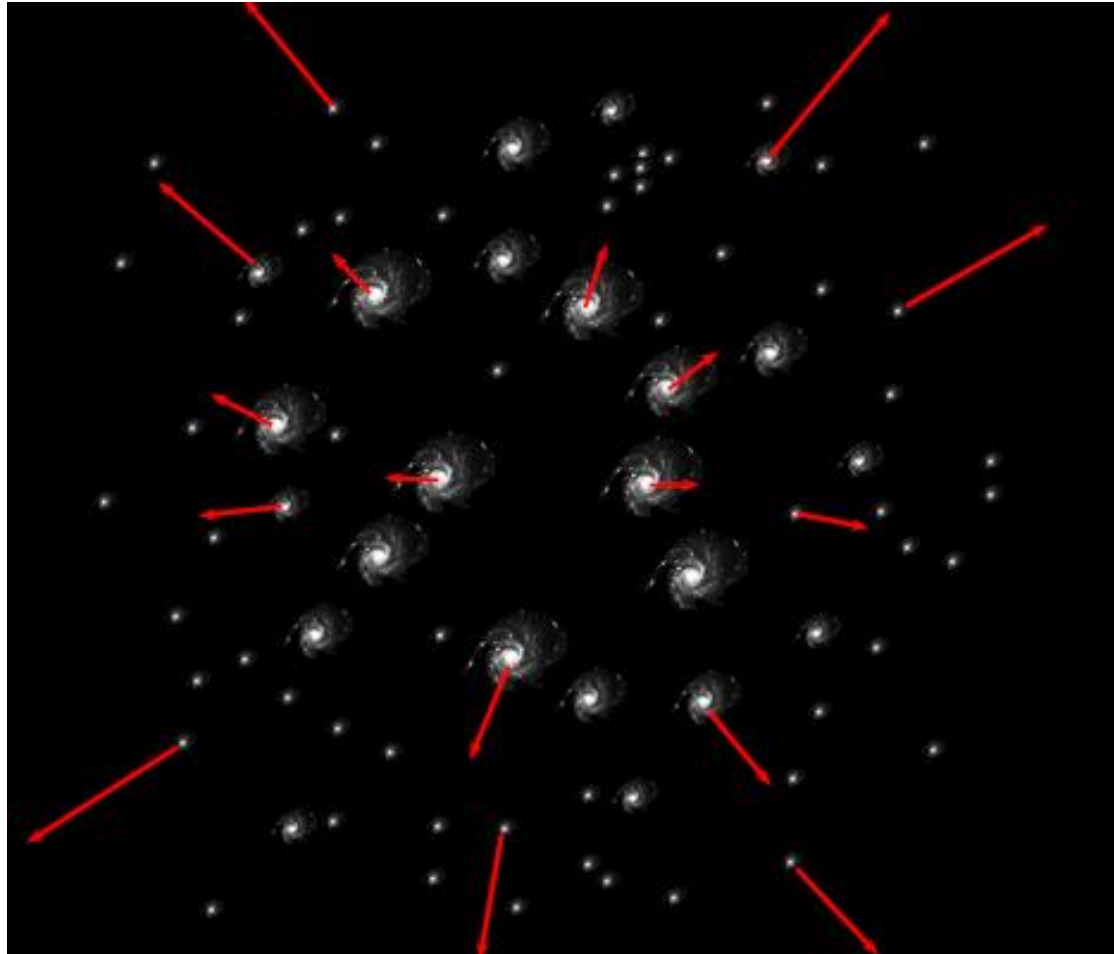


Nukleosynthese



Hintergrundstrahlung

Hubble Expansion

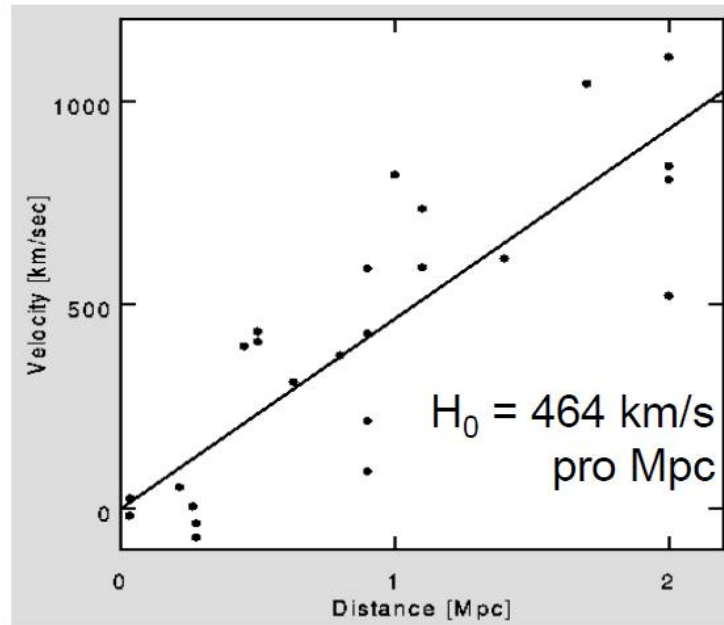


Hubble-Expansion

- 1929: Hubble untersucht Spektrallinien entfernter Galaxien



Edwin Hubble (1889-1953)



- Linearer Zusammenhang (Hubble-Gesetz):
- Heute: $H_0 = 74 \text{ km/s} \cdot \text{Mpc}$

$$v = H_0 D$$

Hubble-Expansion

- 1929: Hubble untersucht Spektrallinien entfernter Galaxien

- Hubble-Gesetz: $v = H_0 D$

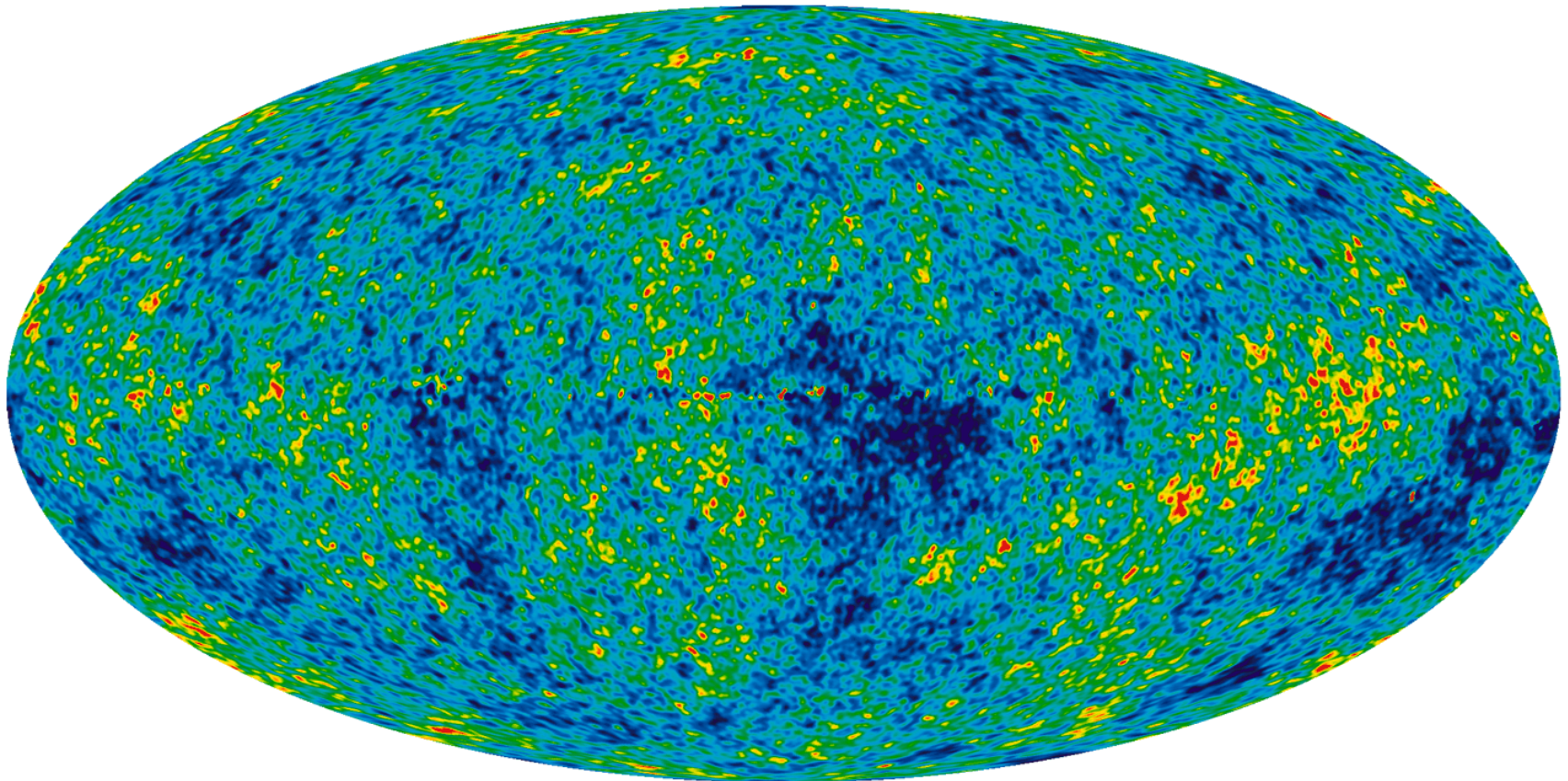
- Ursache: Expansion des Raumes

- Hubble-Parameter: $H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$

- Änderung des Hubble-Parameters: $\dot{H} + H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$

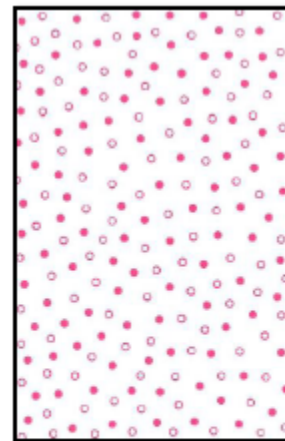
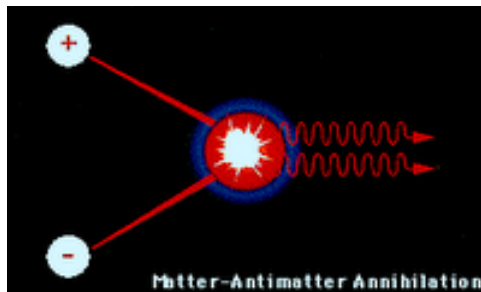
- Hubble-Zeit: $1/H_0 = 13,7 \text{ Mrd Jahre}$

Hintergrundstrahlung



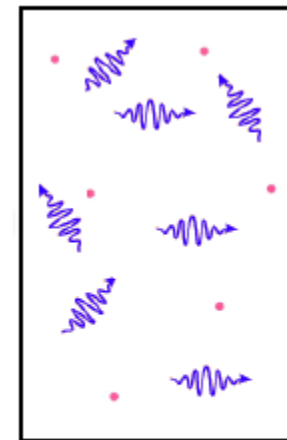
Hintergrundstrahlung - Entstehung

- Annihilation $p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$ bei $T = 10^{10} \text{ K}$, $t = 0,1 \text{ ms}$



$t < 10^{-4} \text{ s}$:
Materie-Antimaterie

Annihilation



$t > 10^{-4} \text{ s}$:
nur Materie

Warum keine vollständige Vernichtung?

Einschub: Materie-Antimaterie-Asymmetrie

■ Baryogenese

- Zu Beginn war das Universum Baryon-symmetrisch, aber ist es inzwischen nicht mehr
- Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein?
- Welcher Prozess führt zur Baryogenese?

Einschub: Materie-Antimaterie-Asymmetrie

■ Baryogenese

- Zu Beginn war das Universum Baryon-symmetrisch, aber ist es inzwischen nicht mehr
- **Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein?**
- Welcher Prozess führt zur Baryogenese?

■ Sakharov-Kriterien

- Baryonenzahlverletzende Prozesse
 - $X \rightarrow Y + B$
- C- und CP-verletzende Prozesse:
 - Verschiedene Eigenschaften von Materie und Antimaterie (z.B. Kaon)
 - C-Erhaltung: $\Gamma(X \rightarrow Y + B) = \Gamma(\bar{X} \rightarrow \bar{Y} + \bar{B})$
- Verletzung des thermischen Gleichgewichts
 - Gleichgewicht: Hin- und Rückreaktion gleich wahrscheinlich

Einschub: Materie-Antimaterie-Asymmetrie

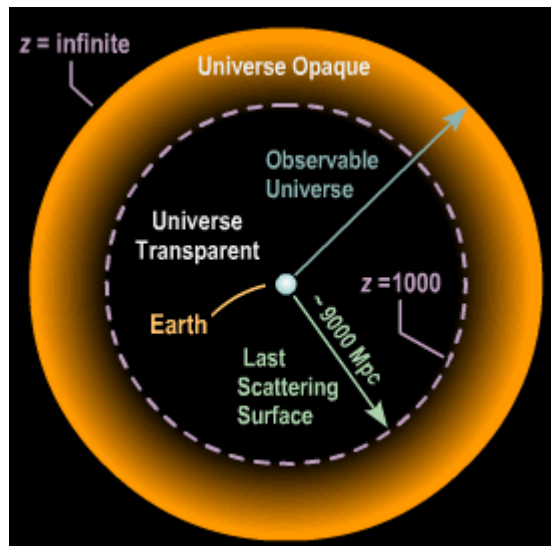
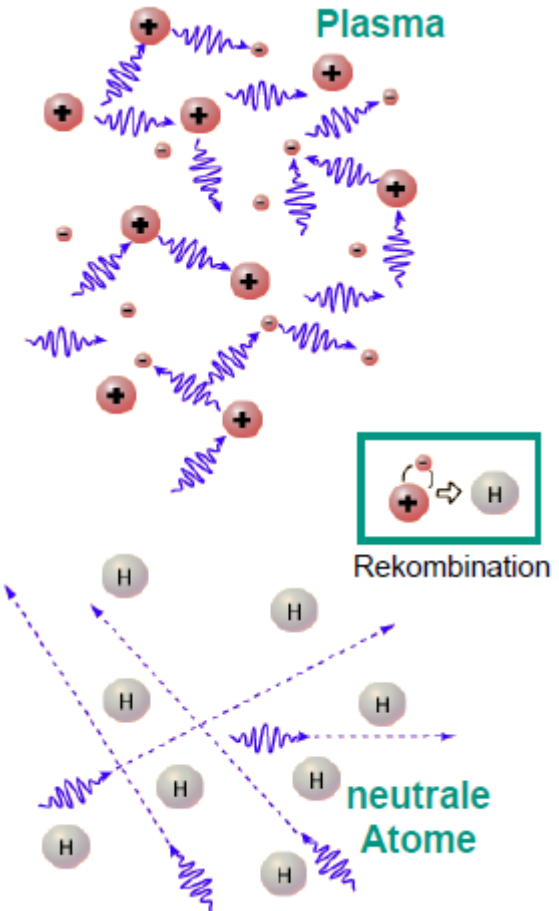
■ Baryogenese

- Zu Beginn war das Universum Baryon-symmetrisch, aber ist es inzwischen nicht mehr
- Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein?
- **Welcher Prozess führt zur Baryogenese?**

Noch ungeklärt ☹️

Hintergrundstrahlung - Ausfrieren

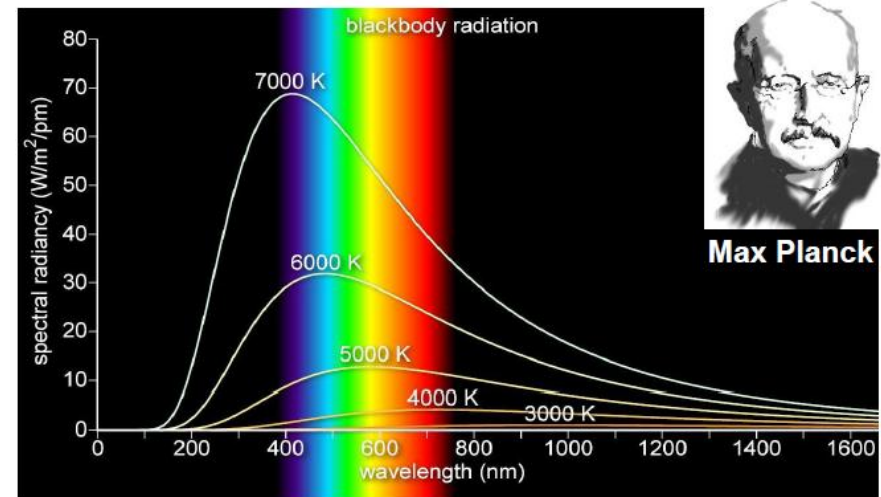
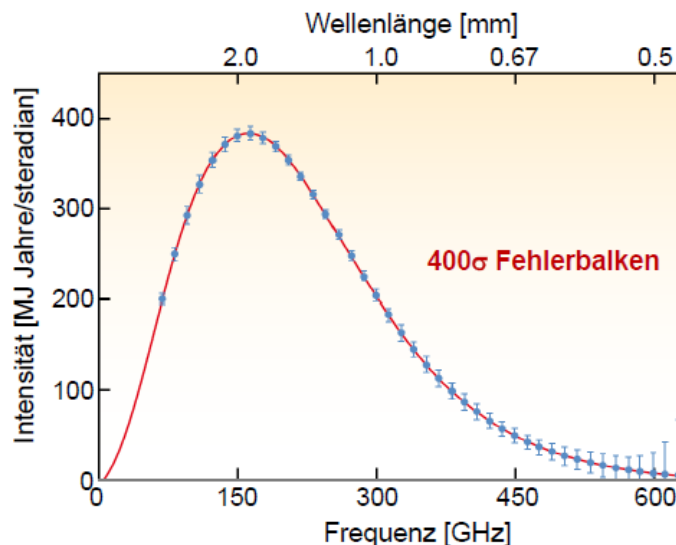
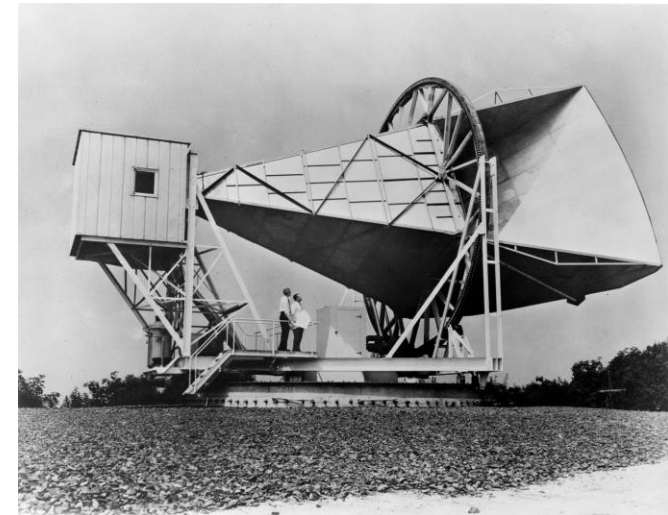
- Übergang Plasma – neutrales Gas
 - CMB-Photonen und Materie im therm. GG
 - Hohe Temperatur: $\gamma + H \rightarrow e^- + p$
 - Fallende Temperatur: Rekombination
 - Photonen propagieren frei



CMB- γ als ideal Boten aus dem frühen Universum!

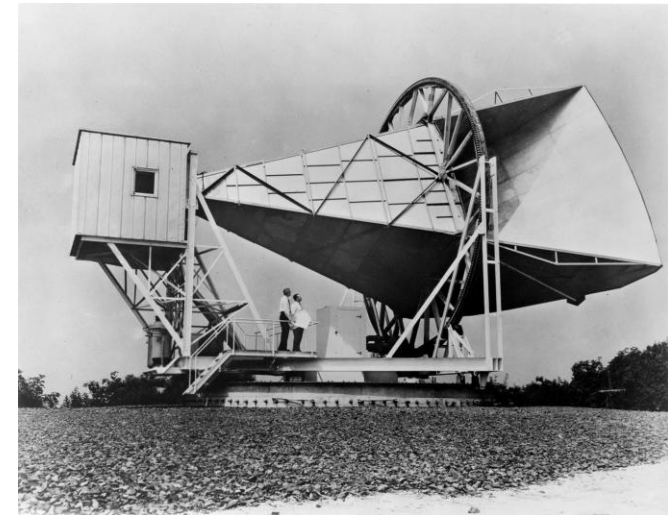
Hintergrundstrahlung - Entdeckung

- Entdeckung 1965: Penzias & Wilson
 - Nobelpreis 1978
 - Erklärung durch R. Dicke et al.
- Satellitenmission COBE
 - Mather: Spektrale Form
 - Smoot: Fluktuationen



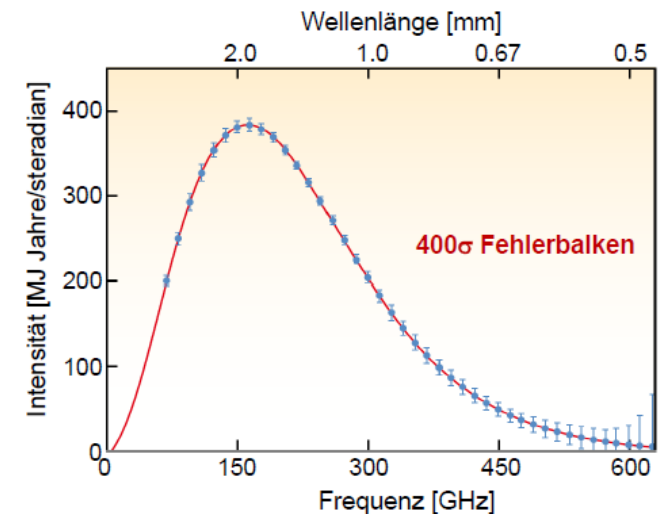
Hintergrundstrahlung - Entdeckung

- Entdeckung 1965: Penzias & Wilson
 - Nobelpreis 1978
 - Erklärung durch R. Dicke et al.
- Satellitenmission COBE
 - Mather: Spektrale Form
 - Smoot: Fluktuationen

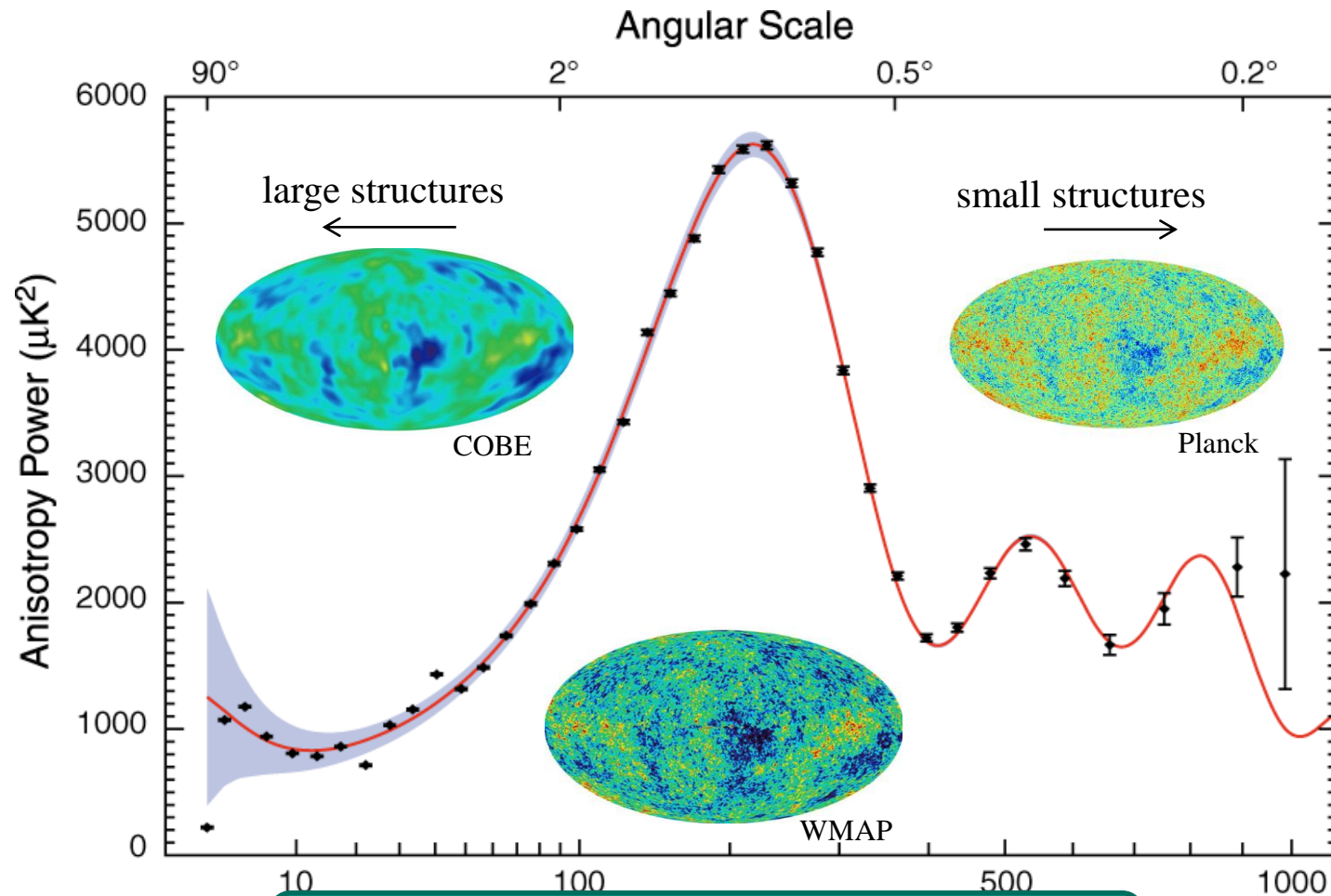


CMB ist idealer schwarzer Strahler mit $T = 2,725 \text{ K}$

$$\rightarrow N_{\gamma} = 20.3 \frac{T^3}{\text{cm}^3} = \frac{411}{\text{cm}^3}$$

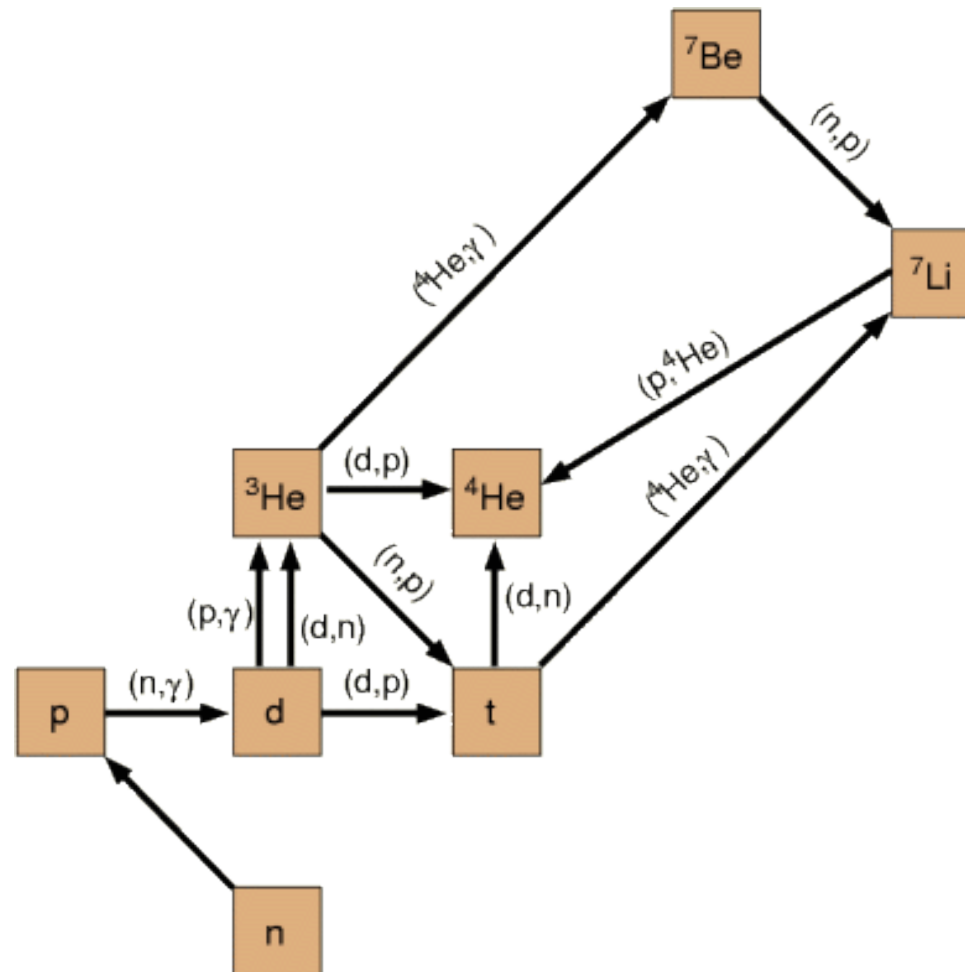


Hintergrundstrahlung - Leistungsspektrum



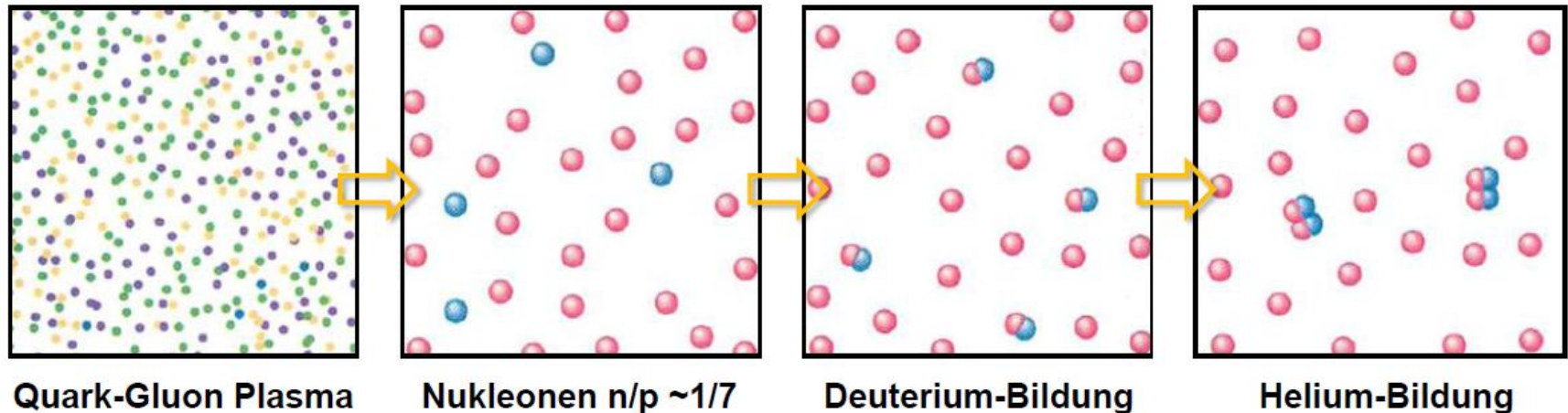
Details: Gruppenpuzzle!

Nukleosynthese



Nukleosynthese

- 1940: G. Gamow, R. Alpher: alle ^{leichteren} Elemente entstehen im frühen Universum durch Neutroneneinfang & β -Zerfall

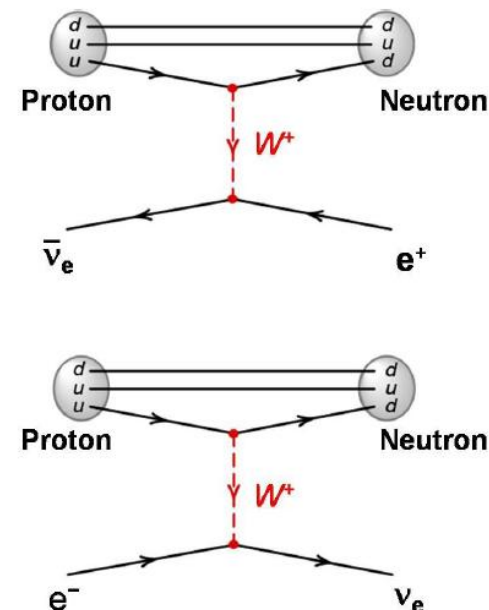
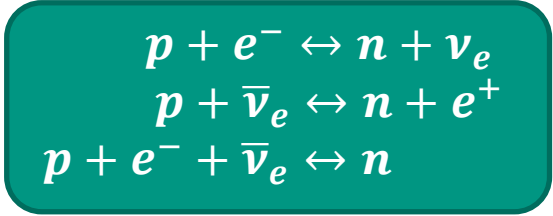


Nukleosynthese – 4 Phasen

■ Phase 1: Gleichgewicht

$E = 10 \text{ MeV}$
 $T = 10^{11} \text{ K}$
 $t = 0,01 \text{ s}$

- Strahlungsdominiertes Universum
- Protonen und Neutronen im thermischen Gleichgewicht
- Umwandlungen über schwache Wechselwirkung
- $N_p \approx N_n$



Nukleosynthese – 4 Phasen

■ Phase 2: Ausfrieren

$$E = 1 \text{ MeV}$$

$$T = 10^{10} \text{ K}$$

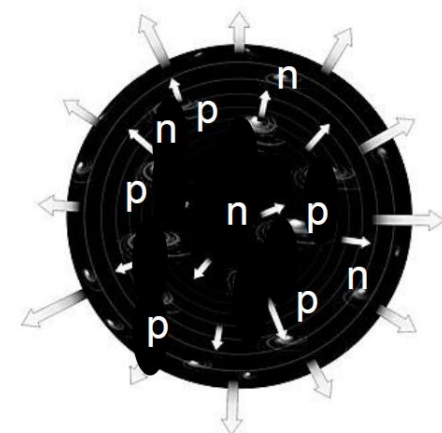
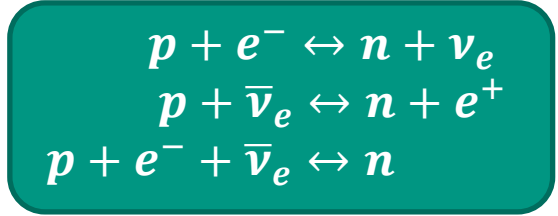
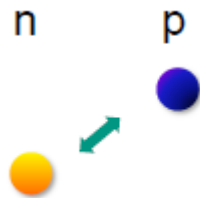
$$t = 1 \text{ s}$$

- Gleichgewicht bis Expansionsrate > schwache WW-Rate
- Ausfrieren (Entkoppeln) bei ~ 1MeV
- Verhältnis Neutronen/Protonen (Maxwell-Boltzmann):

$$\frac{n}{p} = e^{-\frac{\Delta mc^2}{kT}} \approx \frac{1}{6}$$

$$\Gamma_{weak} \sim G_F^2 T^5$$

$$H_{exp} \sim \sqrt{g_*} T^2$$



Nukleosynthese – 4 Phasen

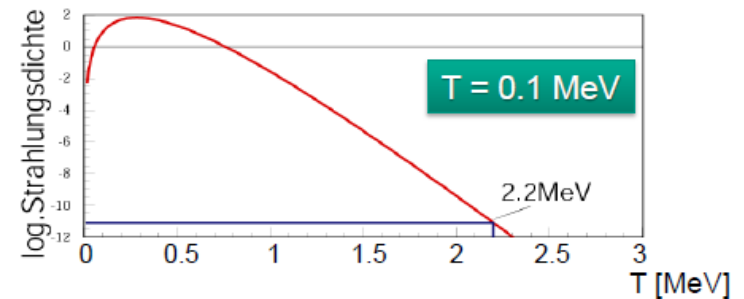
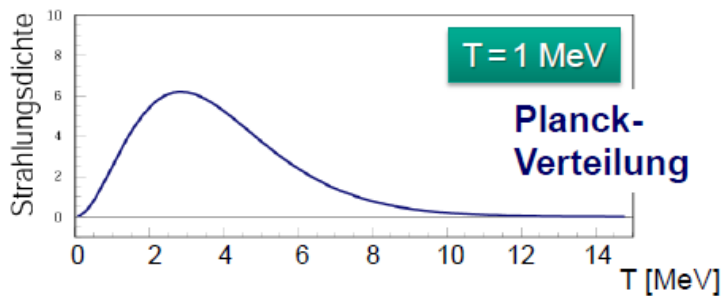
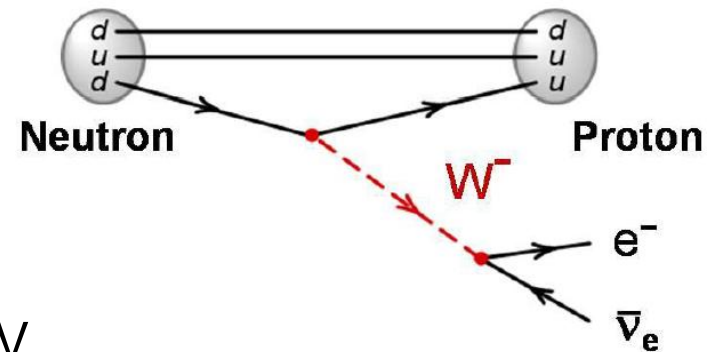
Phase 3: Neutronzerfall

$E > 0,1 \text{ MeV}$
 $T > 10^9 \text{ K}$
 $t = 1 \text{ s} - 1 \text{ min}$

Neutron- β -Zerfall



- Deuterium-Bottleneck:
 Deuterium-Bindungsenergie: 2,2 MeV
 aber: $N_\gamma \gg N_p$

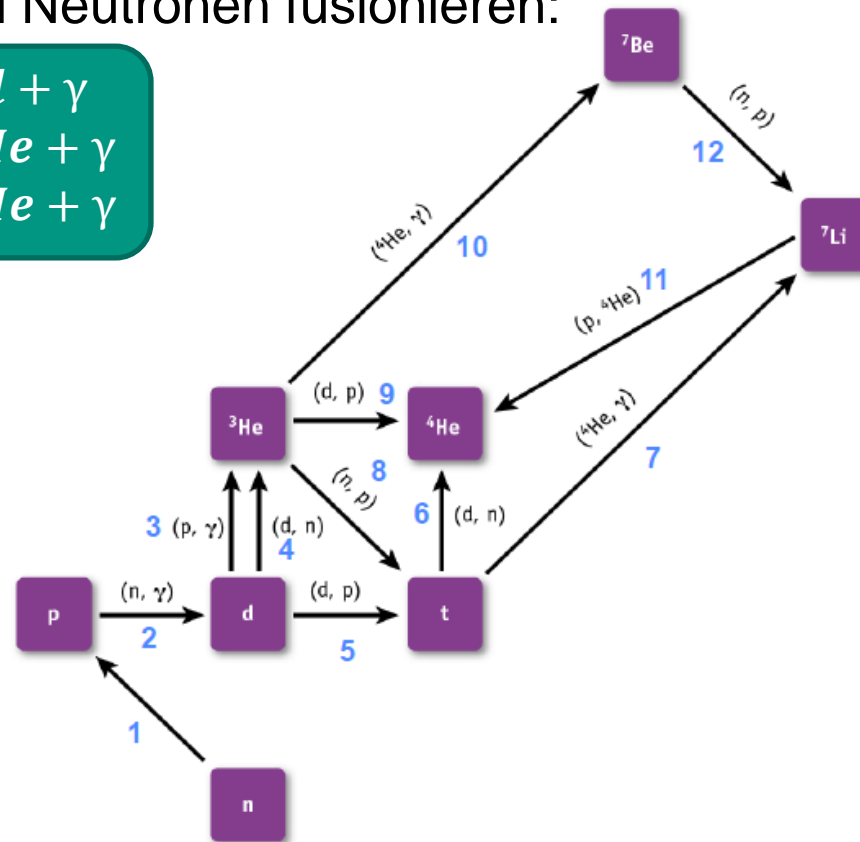
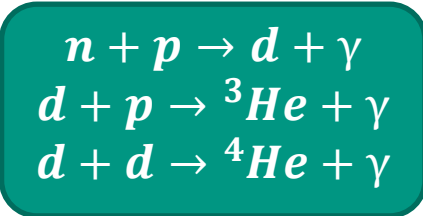


Nukleosynthese – 4 Phasen

Phase 4: Kernreaktionen

$E = 0,1 \text{ MeV}$
 $T = 10^9 \text{ K}$
 $t = 1 - 3 \text{ min}$

Protonen und Neutronen fusionieren:



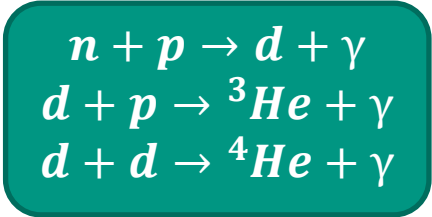
- 1 $n \rightarrow {}^1\text{H} + e^- + \bar{\nu}$
- 2 ${}^1\text{H} + n \rightarrow {}^2\text{H} + \gamma$
- 3 ${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$
- 4 ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + n$
- 5 ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{H}$
- 6 ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$
- 7 ${}^3\text{H} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$
- 8 ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{H}$
- 9 ${}^3\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H}$
- 10 ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$
- 11 ${}^7\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$
- 12 ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^7\text{Li} + {}^1\text{H}$

Nukleosynthese – 4 Phasen

■ Phase 4: Kernreaktionen

$E = 0,1 \text{ MeV}$
 $T = 10^9 \text{ K}$
 $t = 1 - 3 \text{ min}$

■ Protonen und Neutronen fusionieren:



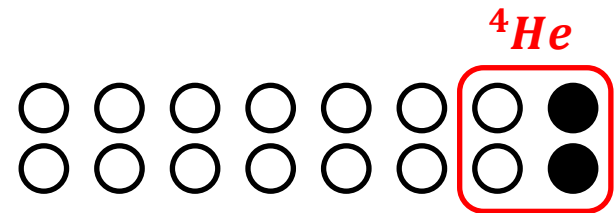
■ Ausgangs-Verhältnis Neutronen/Protonen:

$\frac{n}{p} \approx \frac{1}{7}$



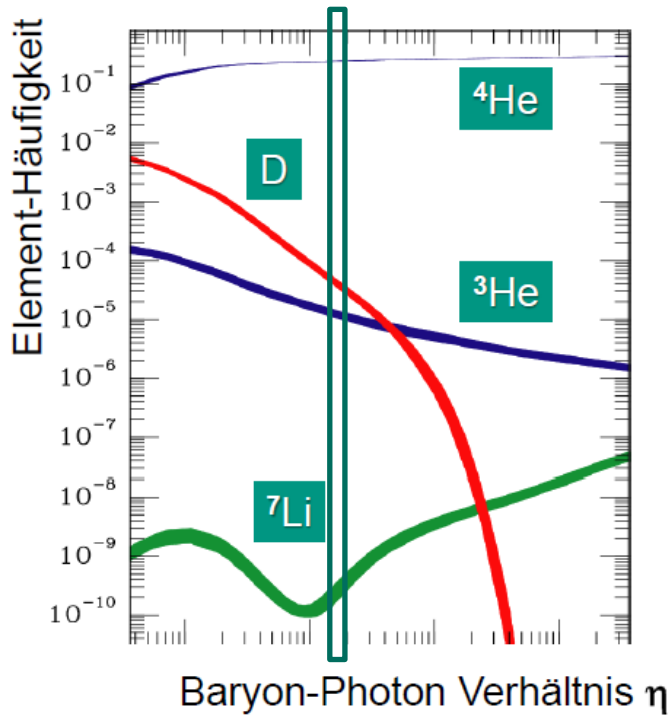
■ He-4-Massenanteil:

$Y_4 = \frac{2N_n}{N_n + N_p} \approx 0,24$



Nukleosynthese - Implikationen

Baryon-Photon-Verhältnis und Baryonendichte

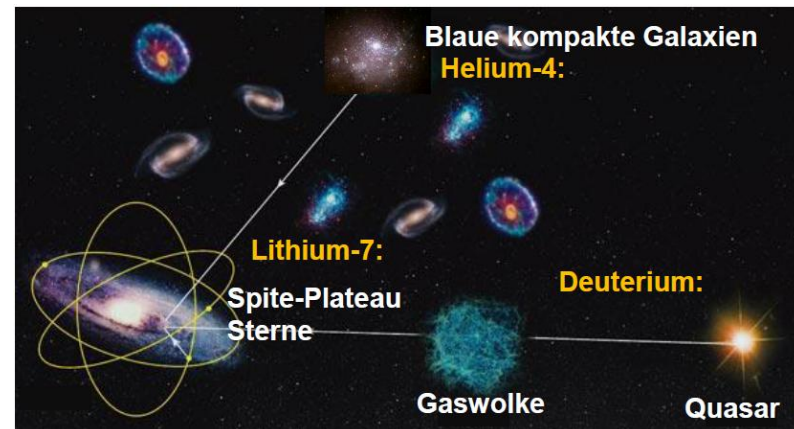


$$n_\gamma = \frac{411}{\text{cm}^3} \rightarrow \frac{\Omega_b}{\Omega_{tot}} = 3 - 5\%$$

Baryon-Photon-Verhältnis:

$$\eta = \frac{n_{\text{Baryonen}}}{n_{\text{Photonen}}} = \frac{\text{n,p}}{\text{CMB}} \sim 10^{-10}$$

Messung der Elementhäufigkeit:



Nukleosynthese - Implikationen

■ Anzahl Neutrino-Generationen

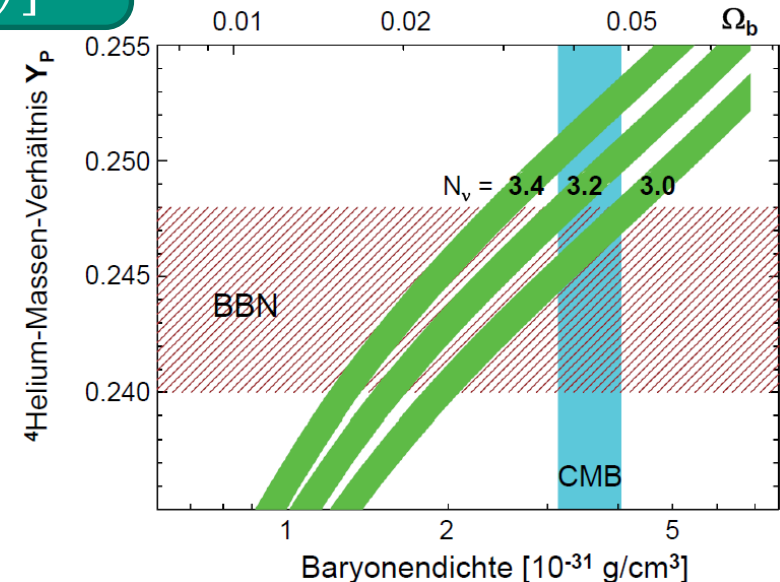
- Expansionsrate

$$H_{exp} \sim \sqrt{g_*} T^2$$

- Relativistische Energiedichte treibt Expansion voran:

$$\rho_R = \rho_\gamma + \rho_e + \rho_\nu = \left[1 + \frac{7}{8} \left(\frac{4}{2} + \frac{N_\nu \cdot 2}{2} \right) \right] \rho_\gamma$$

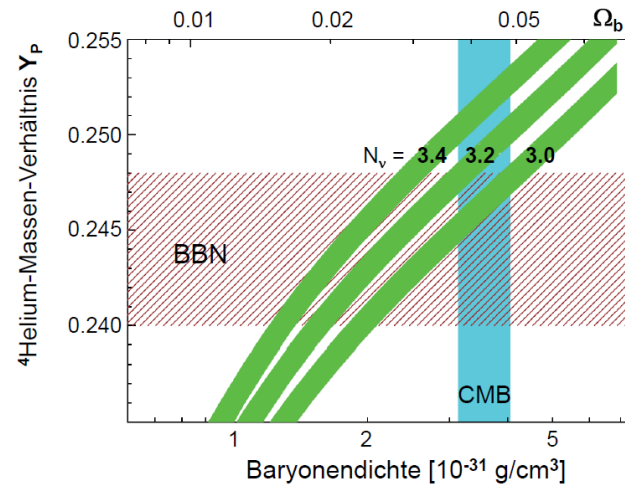
- $N_\nu > 3 \rightarrow$ höhere Expansionsrate
 - \rightarrow höhere Ausfrieretemperatur
 - $\rightarrow n/p > 1/6$
 - \rightarrow mehr Fusionsreaktionen
 - \rightarrow He-4 Rate steigt



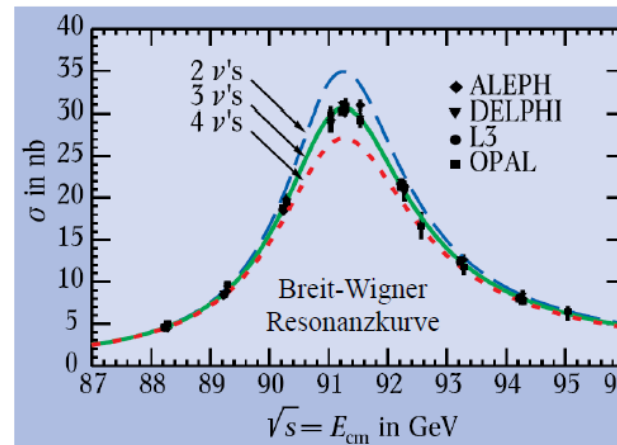
Nukleosynthese - Implikationen

■ Anzahl Neutrino-Generationen

■ Nukleosynthese



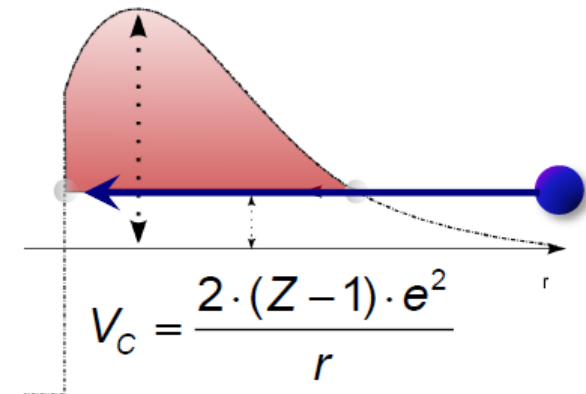
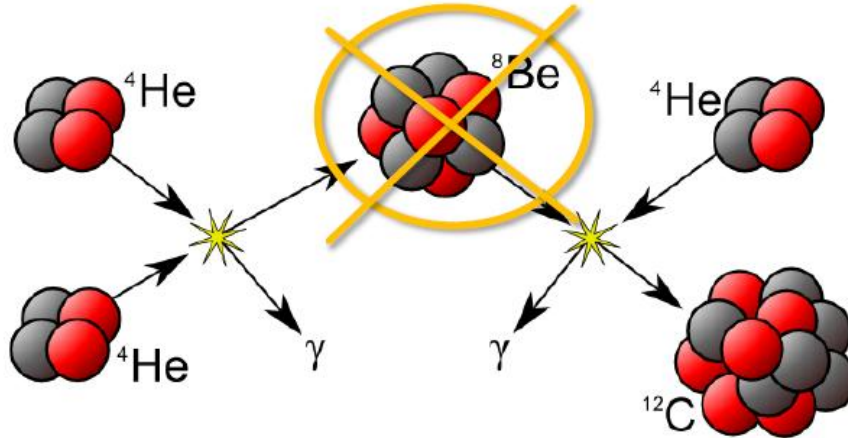
■ Beschleuniger (LEP) Z^0 -Breite



Nukleosynthese – Leichte Elemente

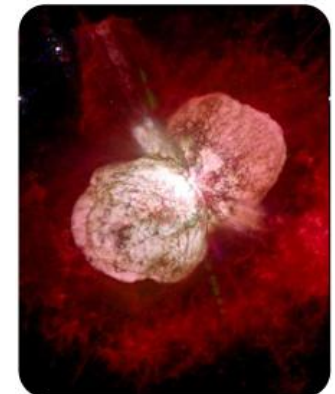
- Universum kühlt ab → Energie der Nukleonen zu gering um durch den Coulombwall zu tunneln

- Elemente 5-8 instabil

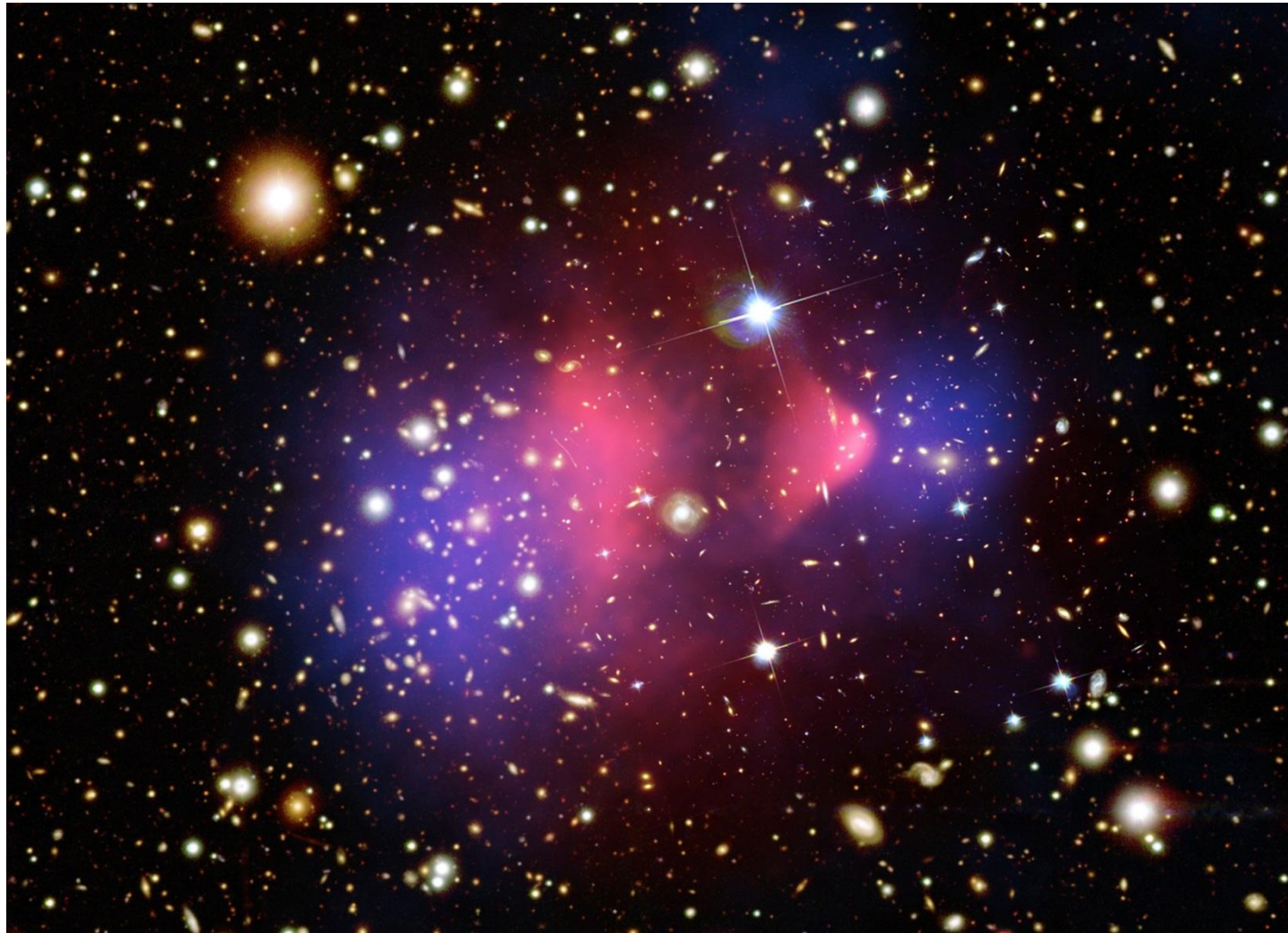


- Helium-Dichte zu gering für Triple- α -Reaktion

Schwere Elemente durch Fusion in Sternen!



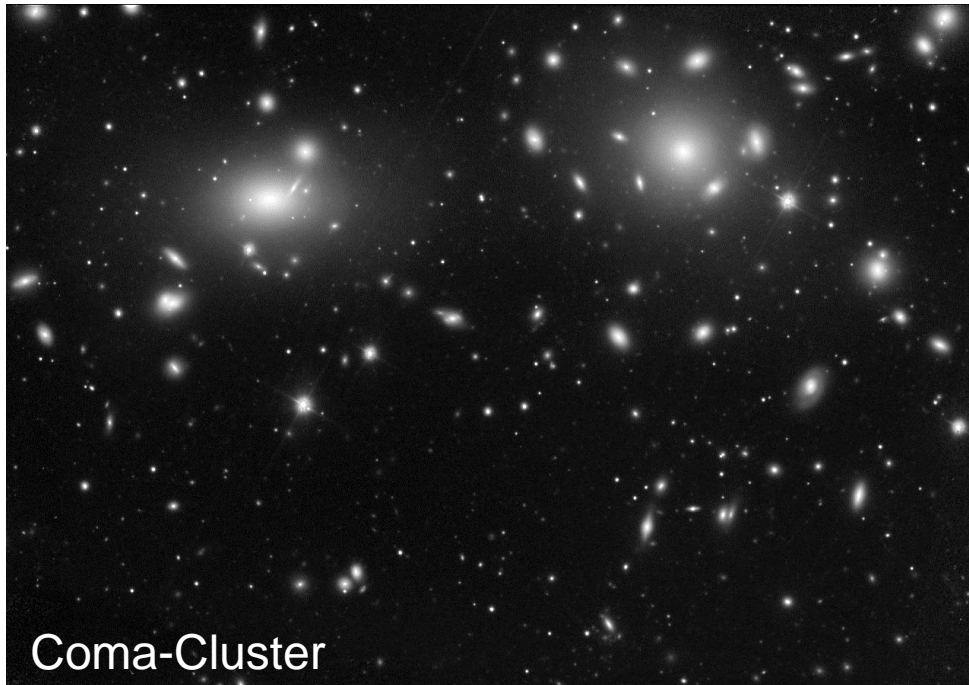
Dunkle Materie



Dunkle Materie

■ Evidenzen

- 1933: F. Zwicky postuliert nicht-leuchtende Materie um hohe Pekuliargeschwindigkeiten von Galaxien zu erklären
- Virialsatz: $\langle E_{kin} \rangle = -\frac{1}{2} \langle U_{pot} \rangle$

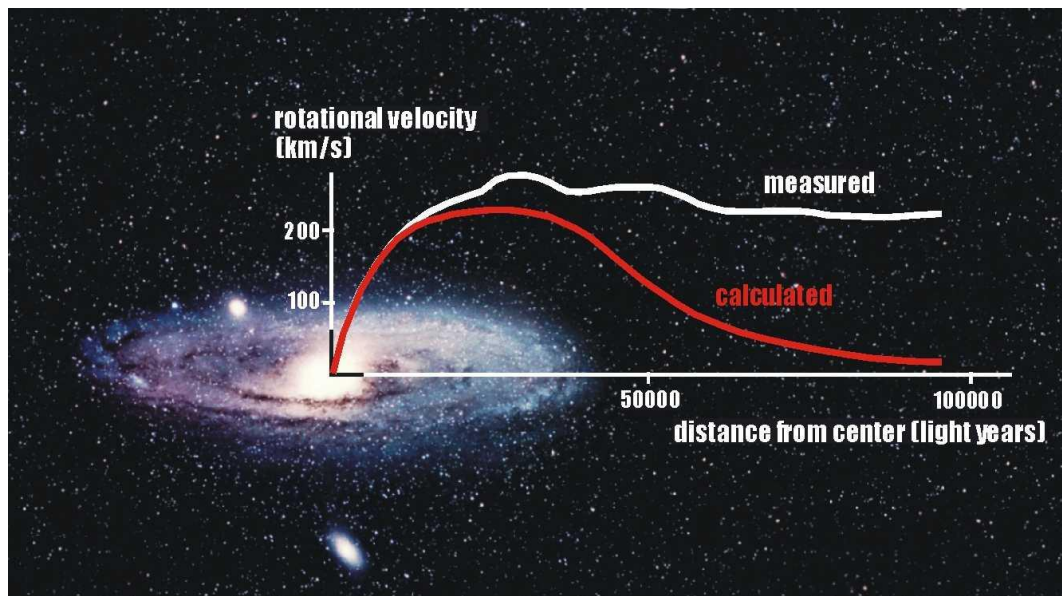


F. Zwicky

Dunkle Materie

■ Evidenzen

- V. Rubin, 1970: Objekte am Rand einer Galaxie bewegen sich zu schnell
- Vergleich mit Newton'scher Berechnung
- Zusätzliche Materie mit radial ansteigender Dichte

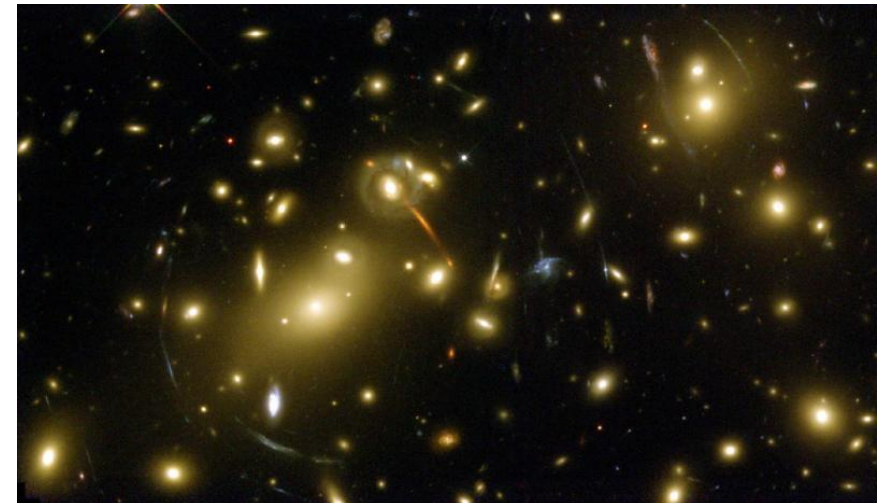
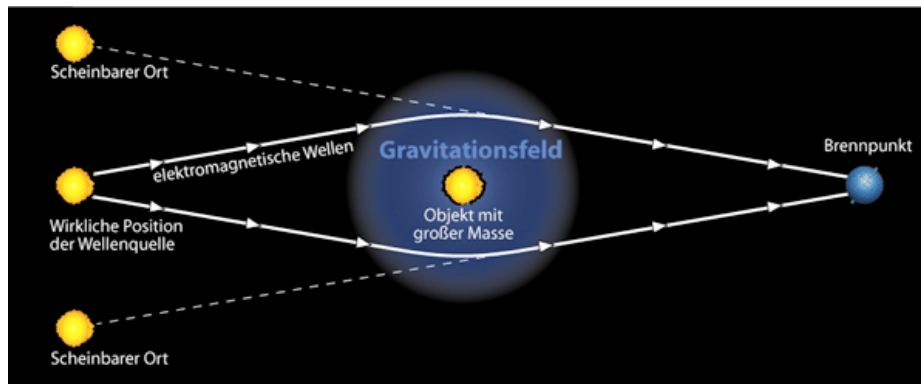
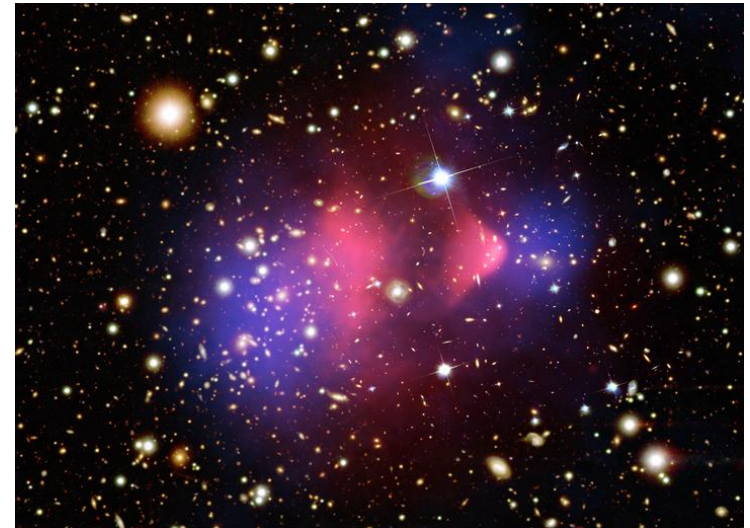


V. Rubin

Dunkle Materie

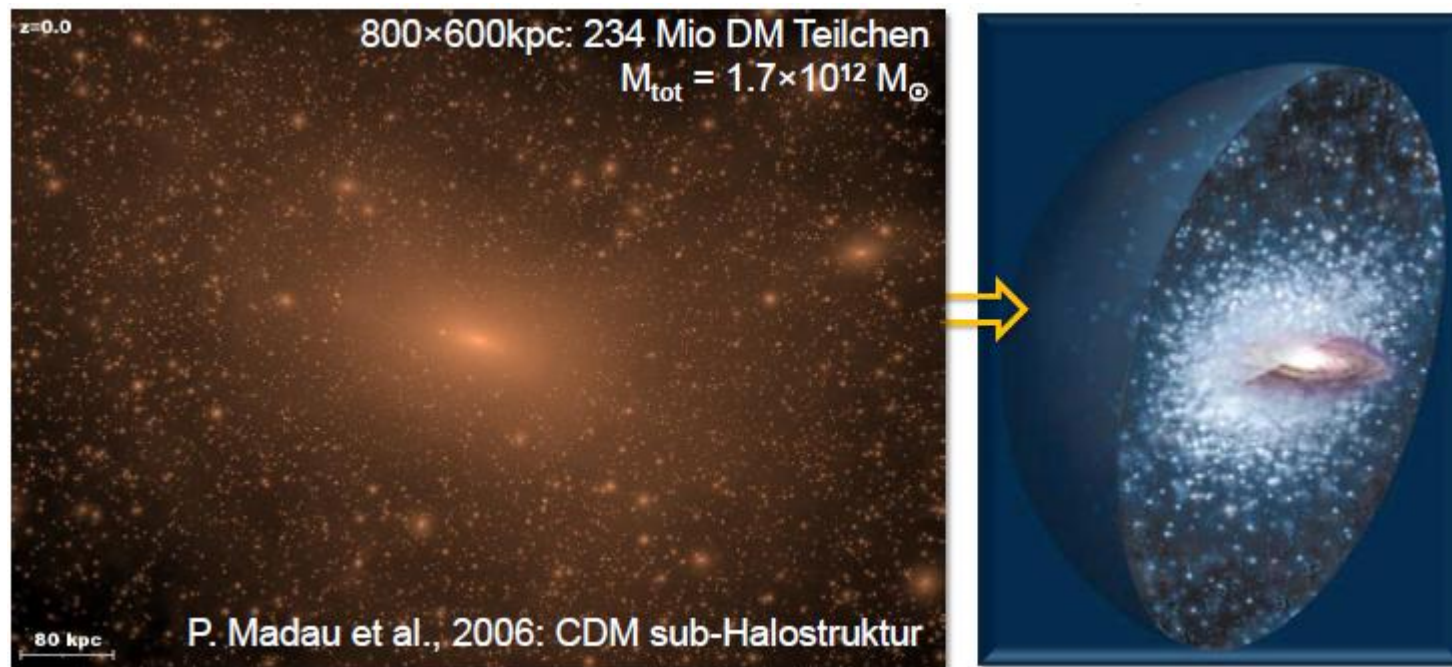
Evidenzen

- Bullet-Cluster
- Trennung von „normaler“ und dunkler Materie
- Rot: heißes Gas
- Blau: Gravitations Zentrum
- Gravitationslinseneffekt



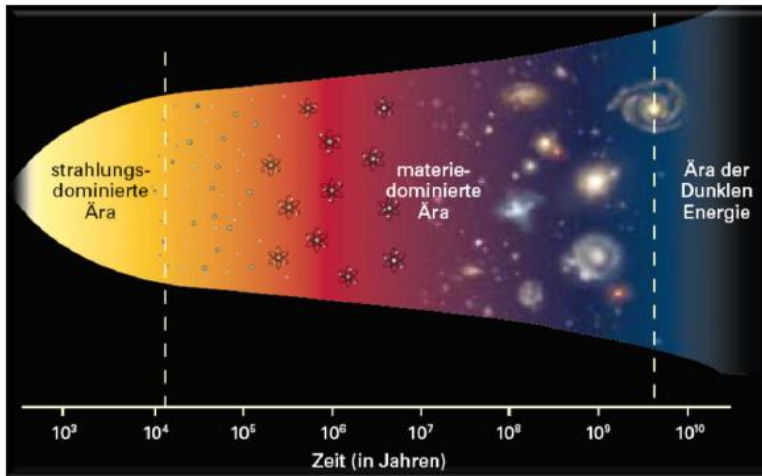
Dunkle Materie

- Verteilung
 - DM-Halo: N-Teilchen-Simulationen
 - ~ 10000 DM-sub-Halos in einem galaktischen Halo

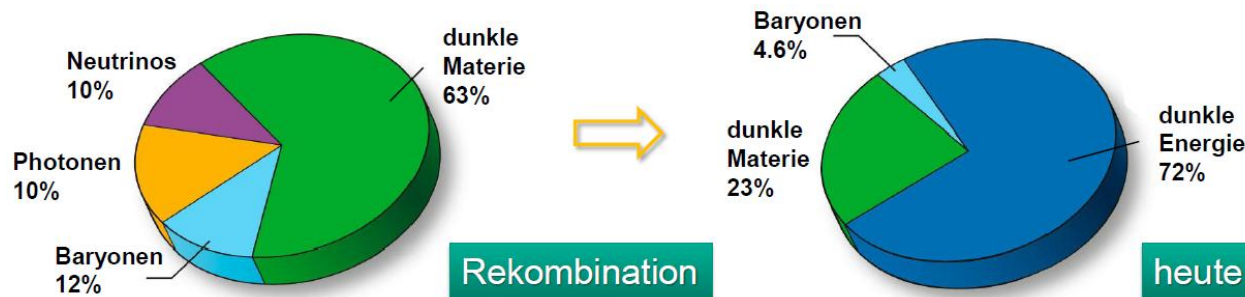


Zusammenfassung: Λ CDM-Modell

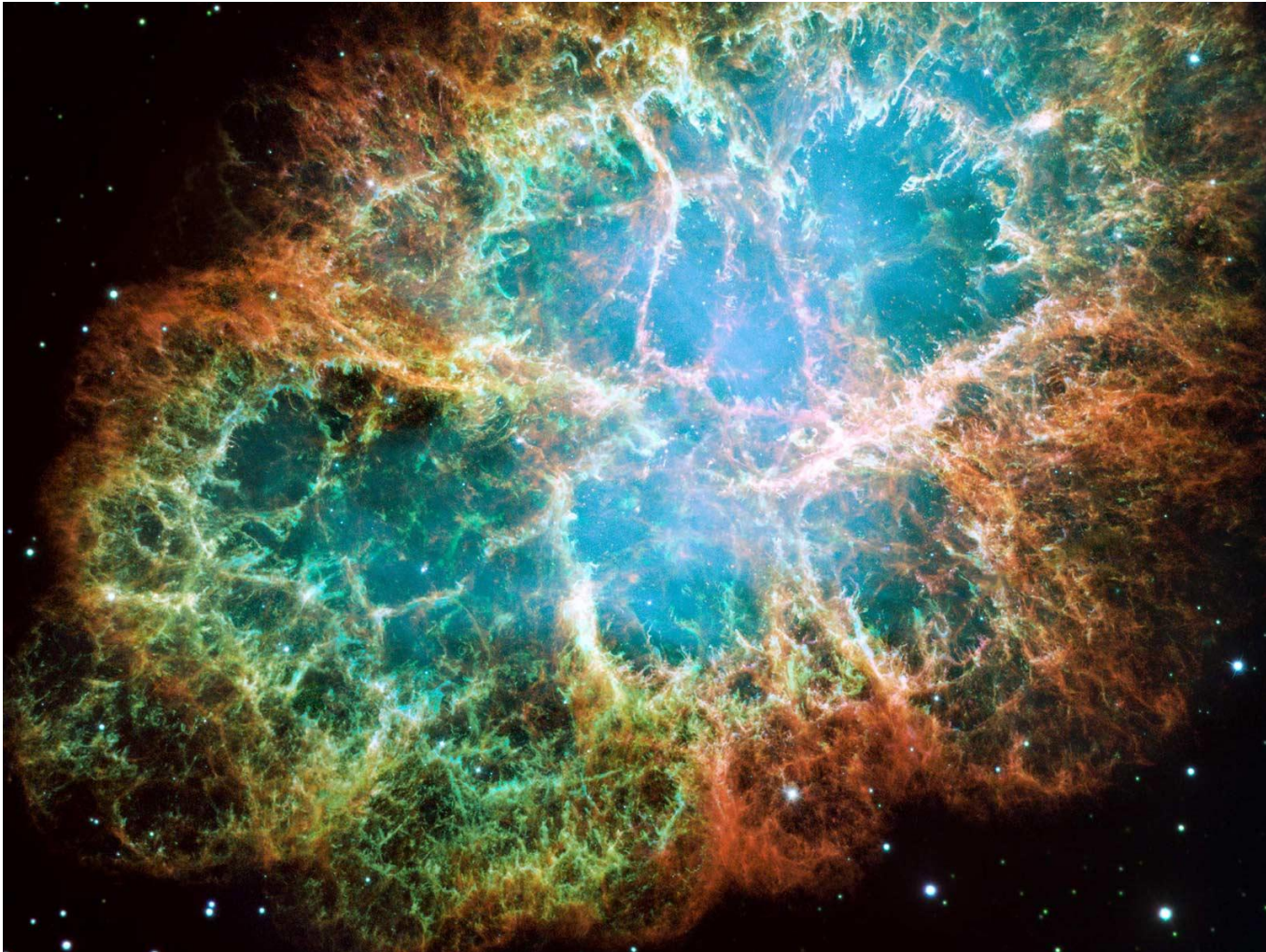
■ Evolution des Universums und heutiger Stand:



Parameter	Symbol	Wert
Alter des Universums	t_0	$(13,73 \pm 0,12)$ Milliarden Jahre
Hubble-Konstante	H_0	$(70,1 \pm 1,3)$ km/(Mpc s)
Dichte der baryonischen Materie	Ω_b	$0,0462 \pm 0,0015$
Dichte der Dunklen Materie	Ω_c	$0,233 \pm 0,013$
Dichte der Dunklen Energie (Vakuumenergiedichte)	Ω_Λ	$0,721 \pm 0,015$
Ära der Entkopplung (Rekombinationszeitpunkt)	t_*	$375\,940 \pm 3150$ Jahre
Rotverschiebung zum Rekombinationszeitpunkt	z_*	$1091,0 \pm 0,7$

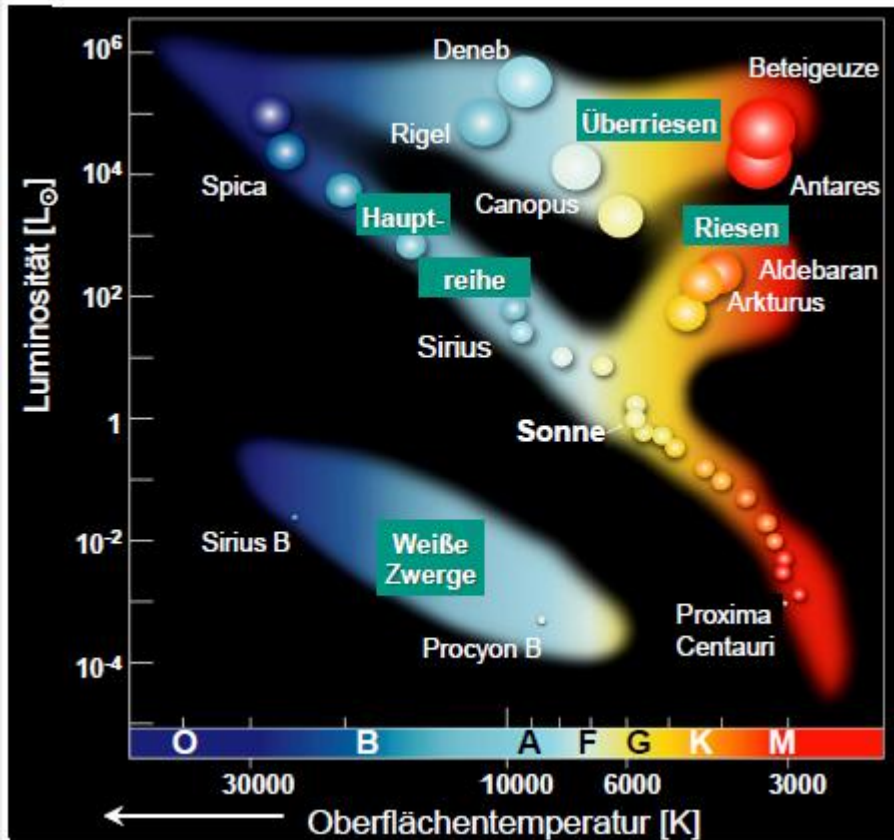


Leben und Sterben von Sternen



Leben und Sterben von Sternen

■ Hertzsprung-Russel-Diagramm



Henry Norris Russell
1877-1957



1925
Bruce-Medaille



Ejnar Hertzsprung
1873-1967

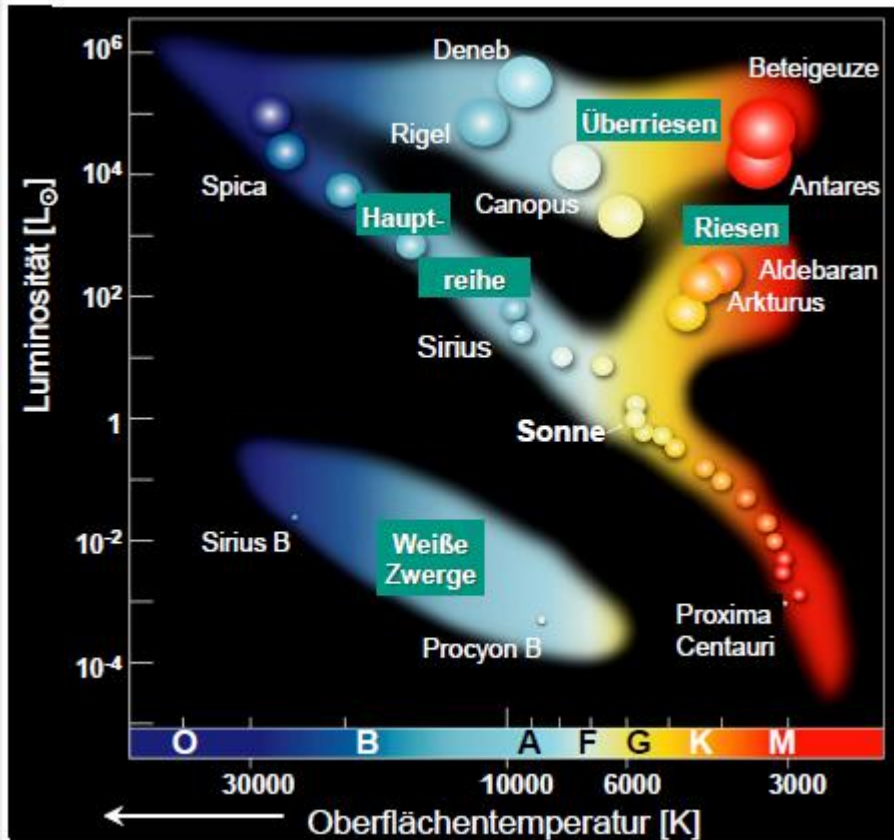


1937
Bruce-Medaille

**Entwicklungsphasen
der stellaren Evolution**

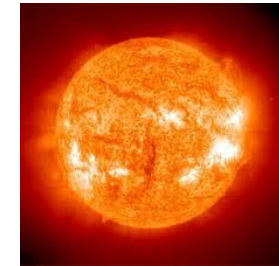
Leben und Sterben von Sternen

■ Hertzsprung-Russel-Diagramm



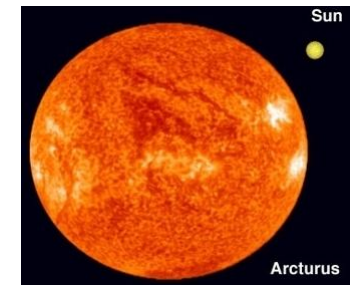
Hauptreihe: H-Fusion

Bsp: Sonne



Riesen: He-Fusion

Bsp: Arkturus

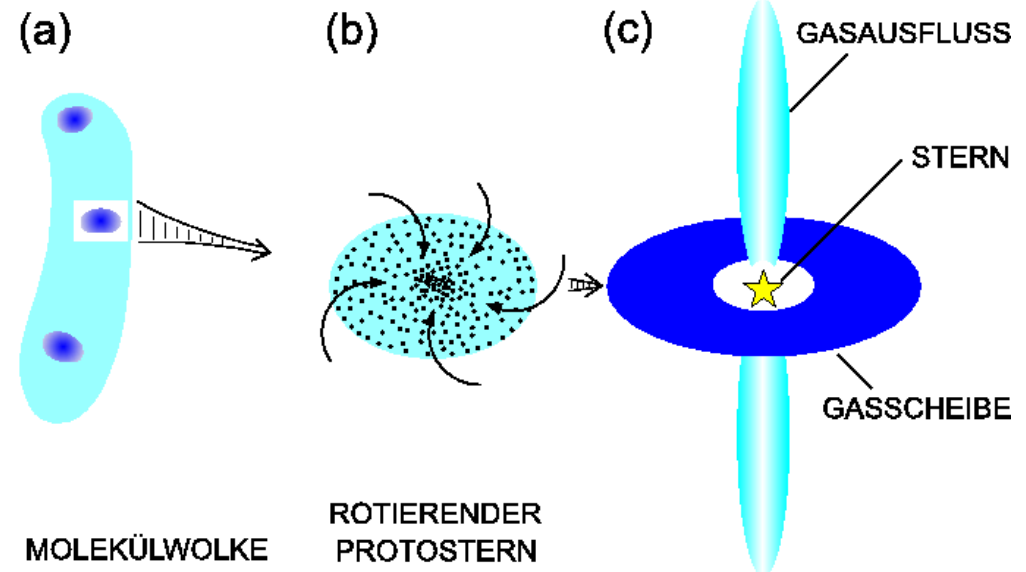
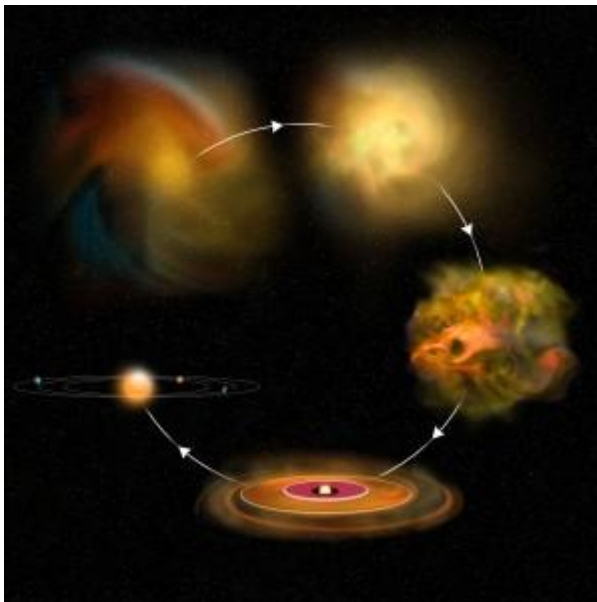


**Entwicklungsphasen
der stellaren Evolution**

Leben und Sterben von Sternen

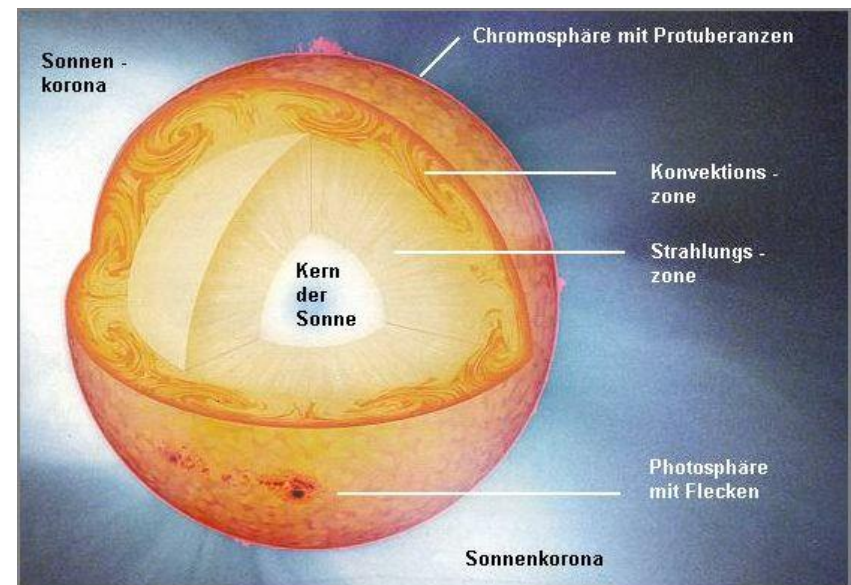
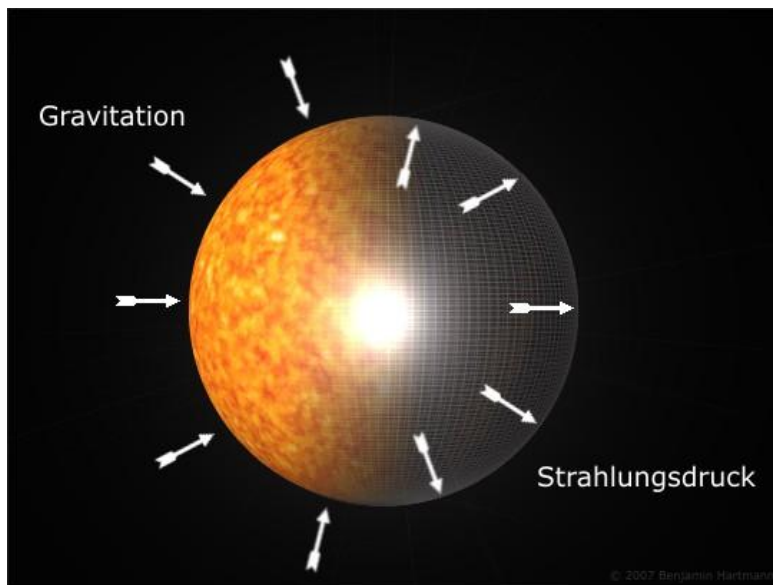
■ Sternentwicklung: Protostern

- Große Gas-/Staubwolke zieht sich gravitativ zusammen
- Druck und Temperatur steigen
- Große Strahlungsverluste



Leben und Sterben von Sternen

- Sternentwicklung: Hauptreihe
 - p/T -Anstieg \rightarrow Kernfusion
 - Gleichgewicht Strahlungsdruck und Gravitation
 - Energietransport durch Strahlung und Konvektion

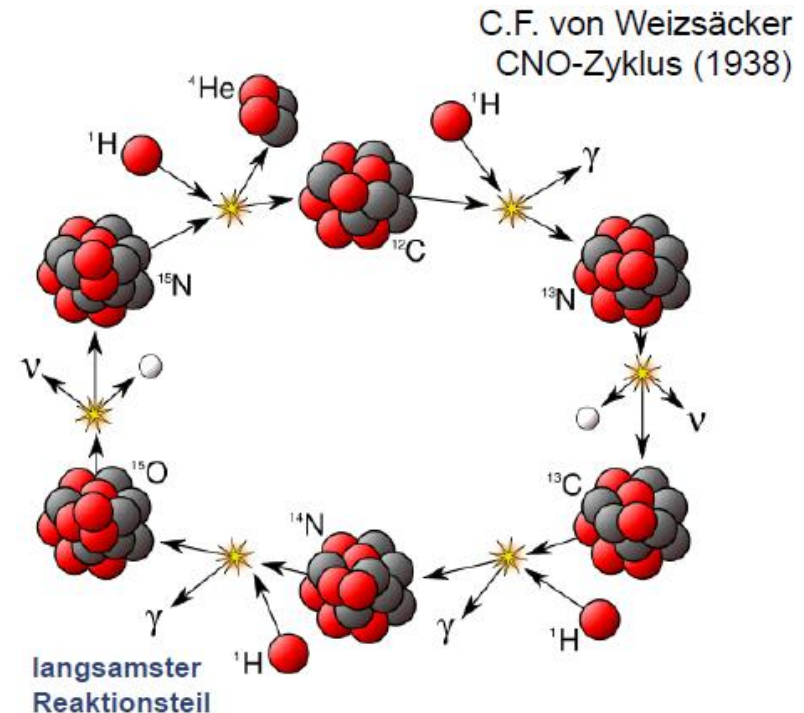
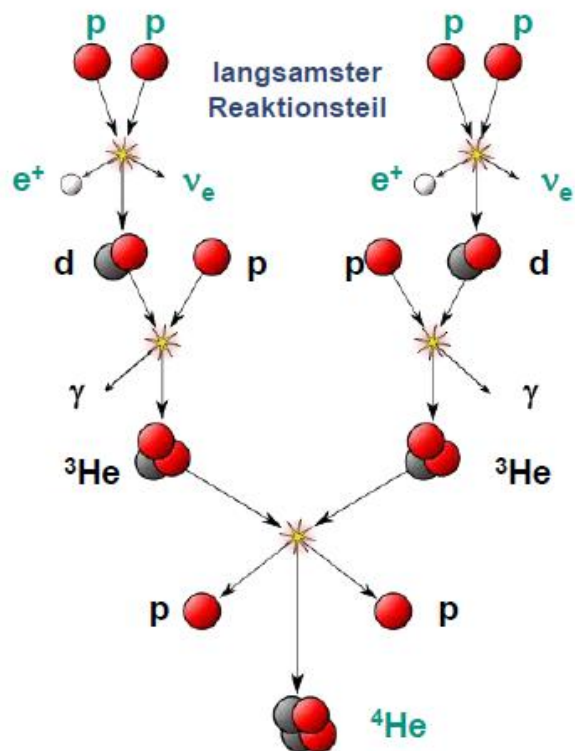


Längste und stabilste Phase (Mrd Jahre)

Leben und Sterben von Sternen

■ Sternentwicklung: Hauptreihe

- Energieerzeugung durch Fusion: $\Delta E = 26,73 \text{ MeV}$



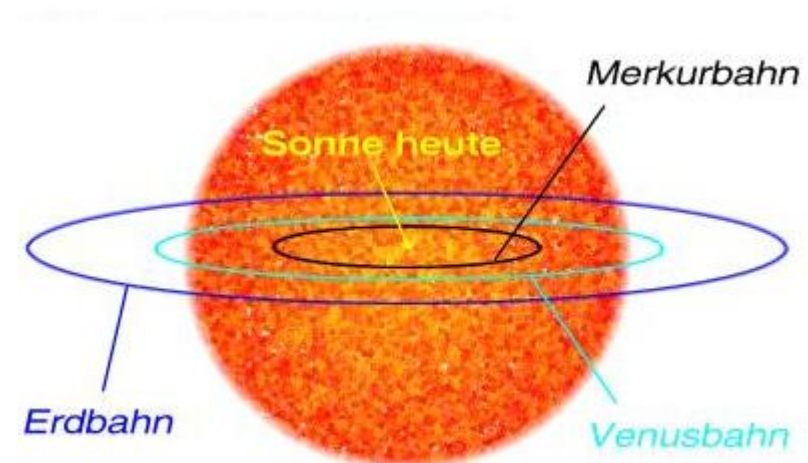
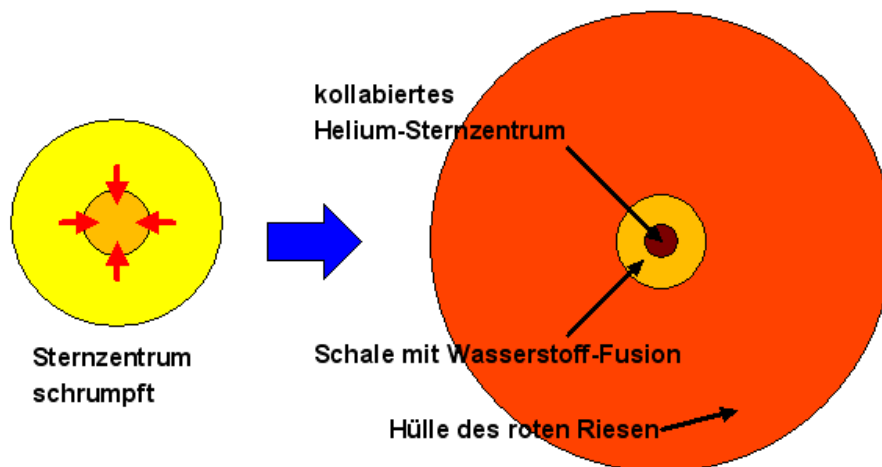
wichtig für schwere Sterne ($T_z > 1.8 \times 10^7 \text{ K}$)



Leben und Sterben von Sternen

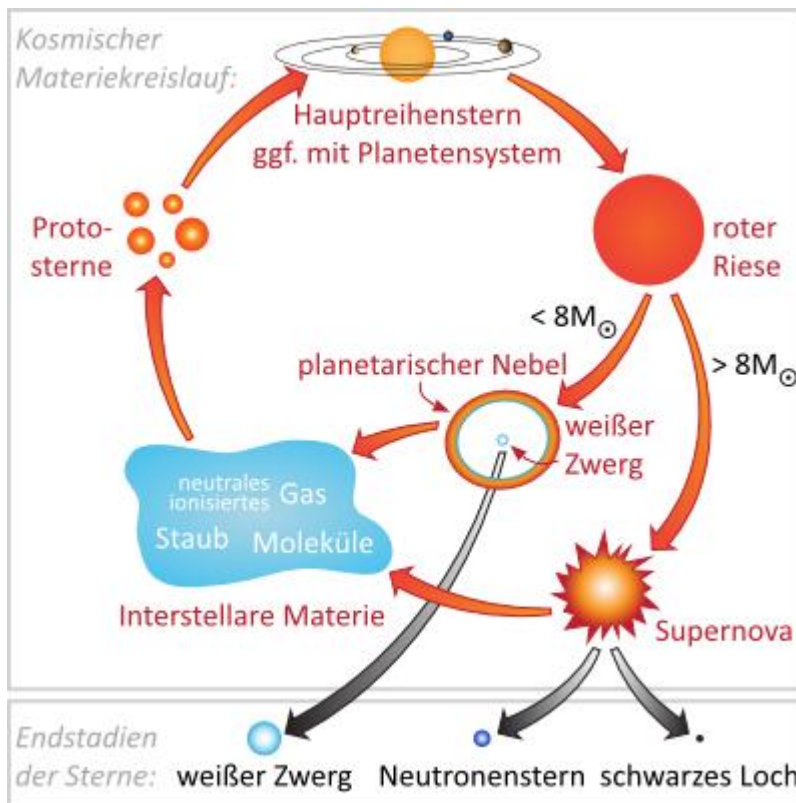
■ Sternentwicklung: Roter Riese

- Wasserstoff im Kern geht zur Neige
- He-Brennen zu C setzt ein → Sternzentrum schrumpft
- Wasserstoffschalenbrennen bläht Stern auf
- Geringe Gravitation → hohe Verluste durch Sonnenwind

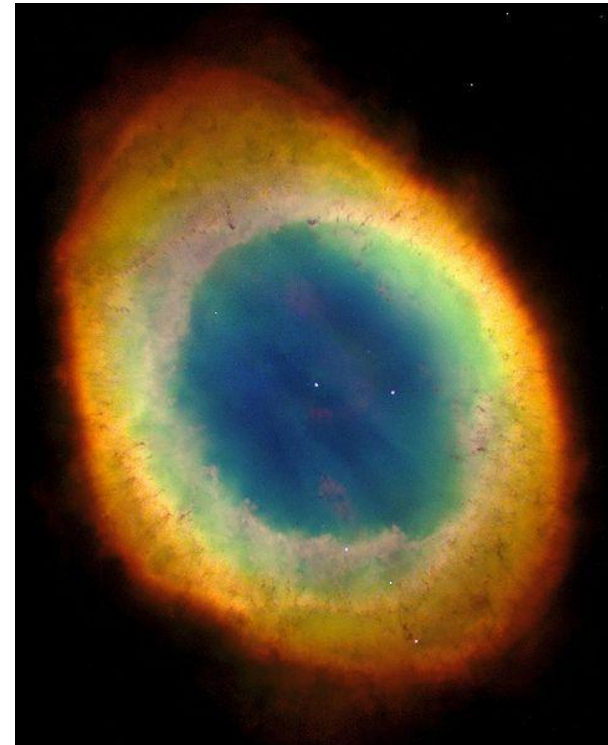


Leben und Sterben von Sternen

- Sternentwicklung: Roter Riese
 - Weiterentwicklung hängt von Sternmasse ab

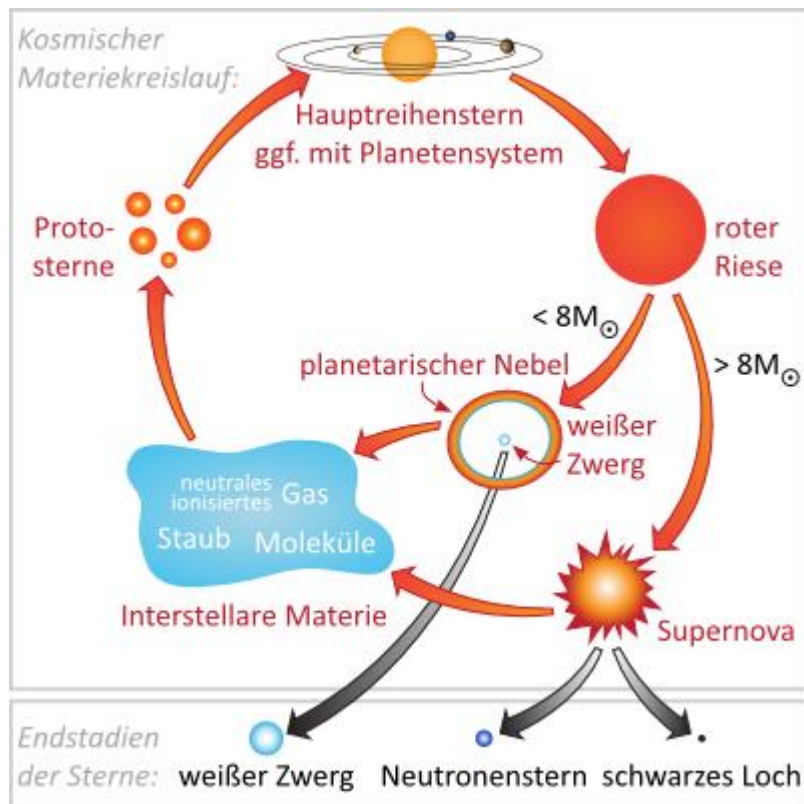


Kleine Ausgangsmasse:
Weißer Zwerg und planetarischer Nebel

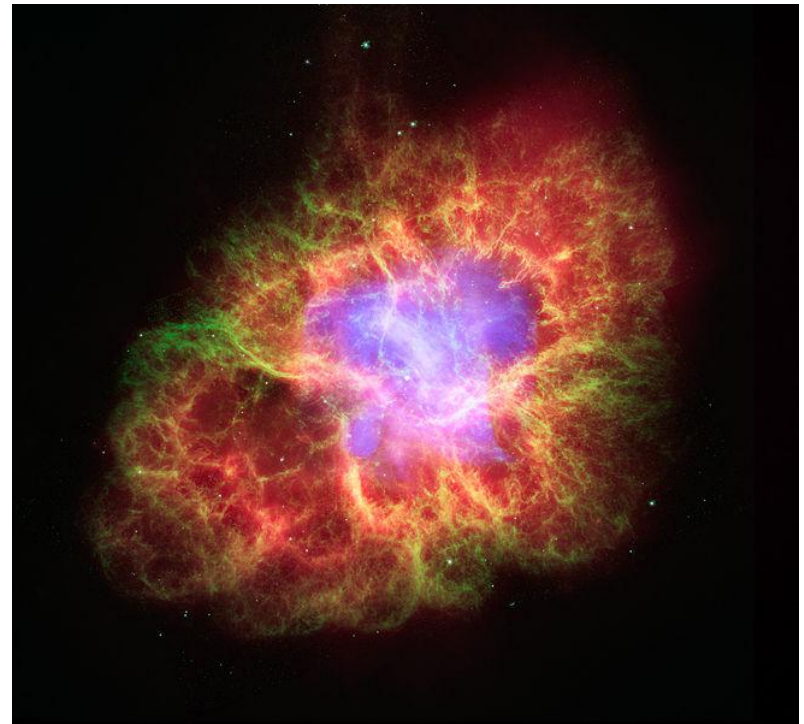


Leben und Sterben von Sternen

- Sternentwicklung: Roter Riese
 - Weiterentwicklung hängt von Sternmasse ab

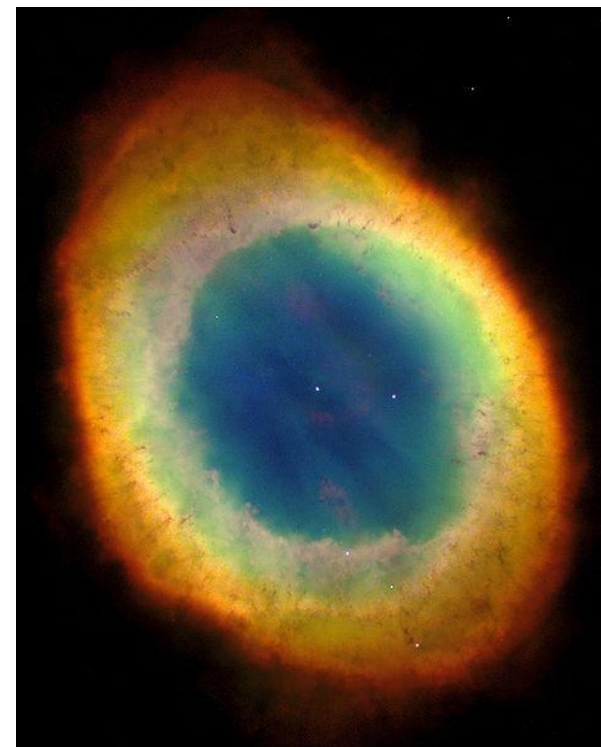
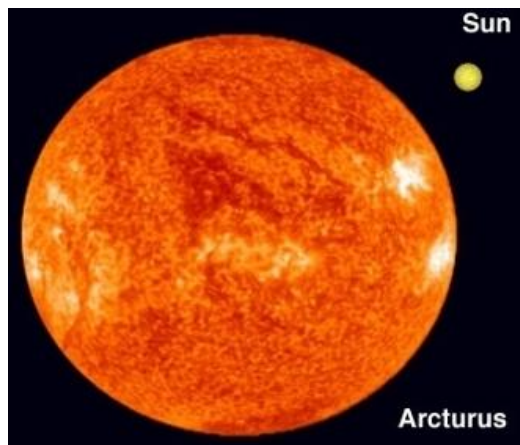


Große Ausgangsmasse:
Supernova



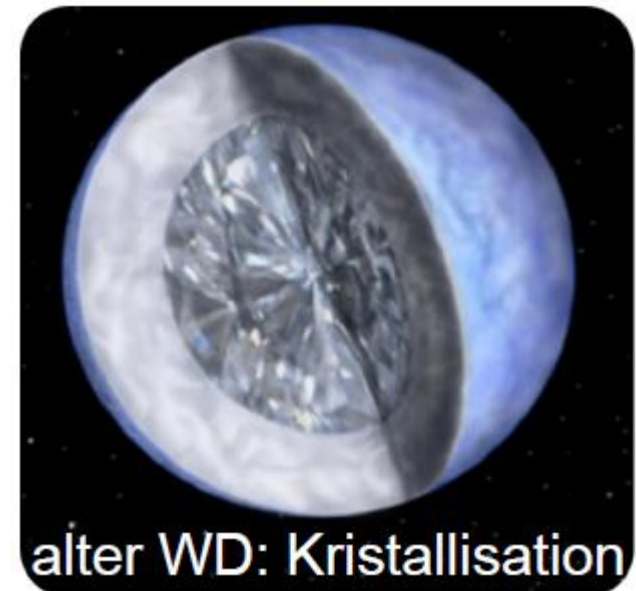
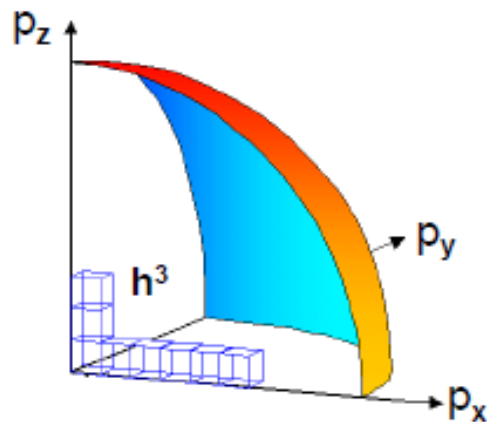
Leben und Sterben von Sternen

- Sternentwicklung: Weiße Zwerge + Planet. Nebel
 - Geringe gravitative Bindung der äußeren Schichten
 - Abstoßung führt zu planetarischem Nebel
 - Verteilung von „schweren“ Elementen (s-Prozess)



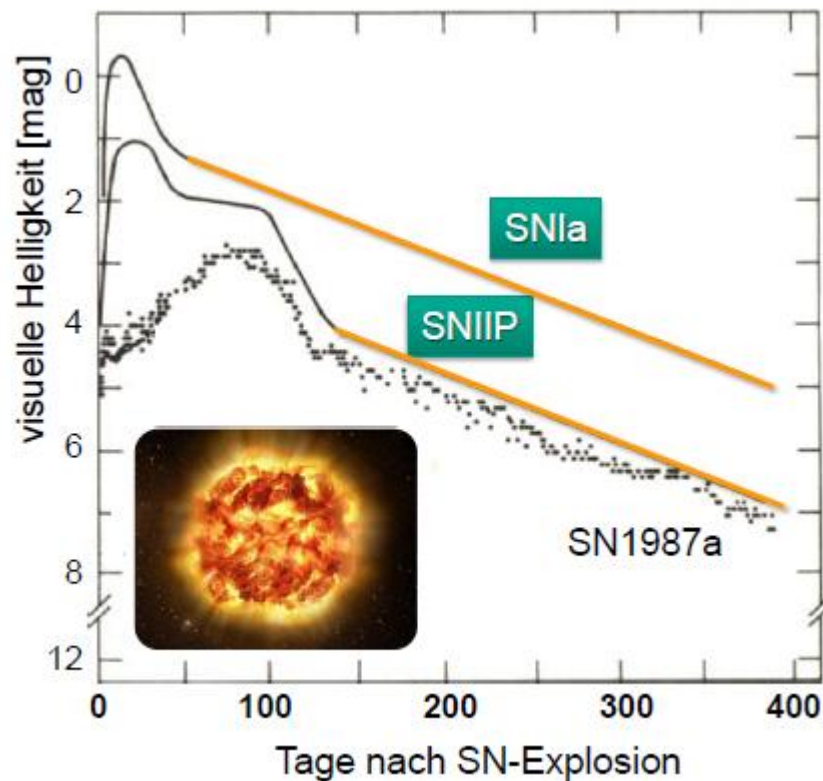
Leben und Sterben von Sternen

- Sternentwicklung: Weiße Zwerge + Planet. Nebel
 - Geringe gravitative Bindung der äußeren Schichten
 - Abstoßung führt zu planetarischem Nebel
 - Verteilung von „schweren“ Elementen (s-Prozess)
 - Weißer Zwerg:
 - Stabilisation durch Fermi-Dirac-Entartungsdruck
 - (Pauli-Prinzip, entartetes Elektronengas)



Leben und Sterben von Sternen

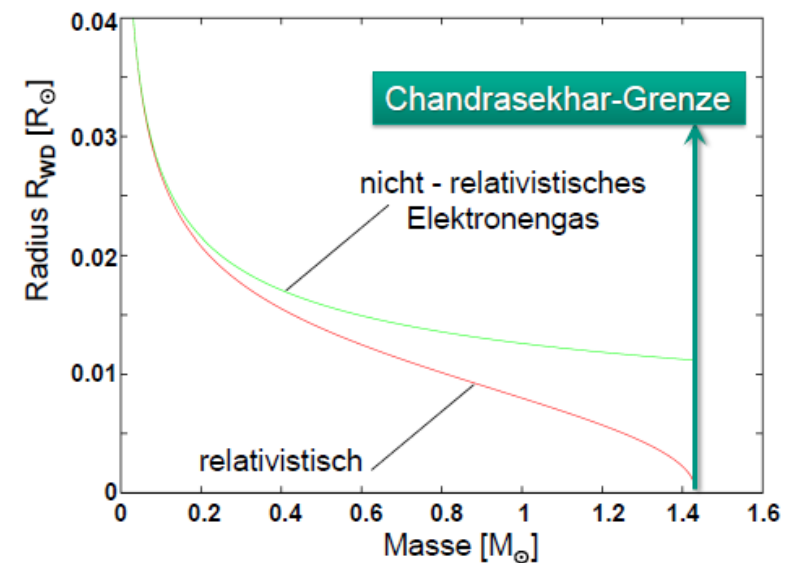
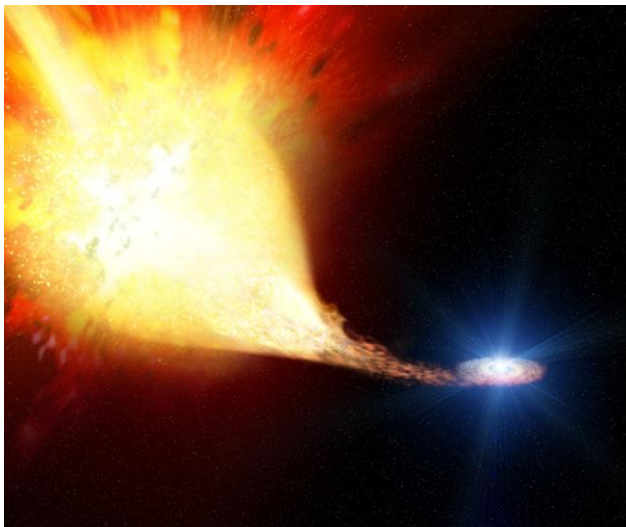
- Sternentwicklung: Supernova
 - Klassifikation: Lichtkurve und Emissionsspektren



Supernova-Klassifikation		
Typ	H-Linie	spektrale Signatur
SN Ia	nein	ionisiertes Si II bei $\lambda=615$ nm, Ca II, Mg I, Na I
SN Ib	nein	kein Si II bei $\lambda=615$ nm, nicht-ionisiertes He I bei $\lambda=587.6$ nm
SN Ic	nein	kein He I und Si II
SNIIP	H α , H β	Plateau der Leuchtkurve
SNIIL	H α , H β	linearer Abfall Leuchtkurve

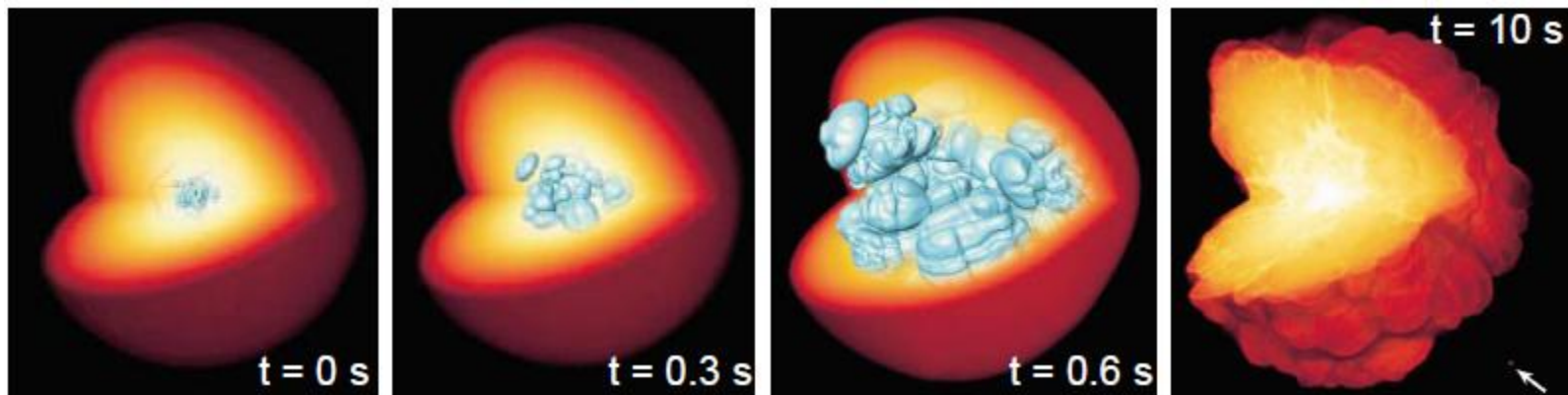
Leben und Sterben von Sternen

- Sternentwicklung: Supernova Typ I Explosionsmechanismus
 - Voraussetzung: Binärsystem
 - $M > M_{Ch} = 1,4 M_{sol}$ → Übergang zum relativistischen Elektronengas → Kollaps des WD



Leben und Sterben von Sternen

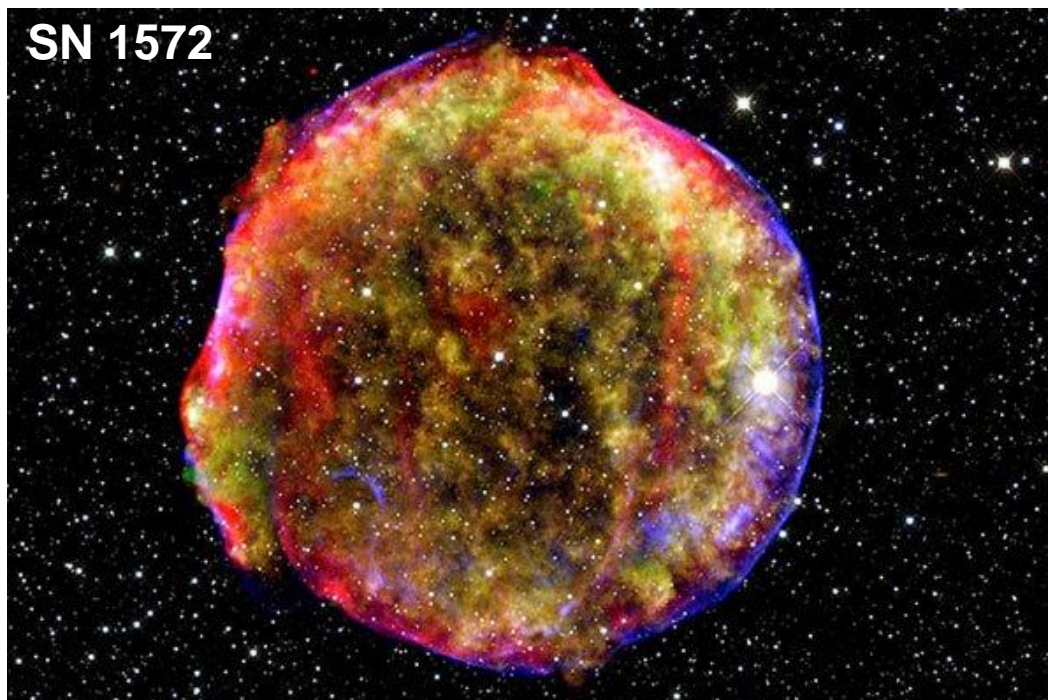
- Sternentwicklung: SN Typ I - Explosionsmechanismus
 - Voraussetzung: Binärsystem
 - $M > M_{Ch} = 1,4 M_{sol}$ → Kollaps des WD → ^{12}C -Brennen zu ^{56}Ni
 - Deflagration:



Thermonukleare Detonation eines weißen Zwerges

Leben und Sterben von Sternen

- Sternentwicklung: SN Typ I - Charakteristiken
 - Energie: 10^{44} J aus Kernfusion
 - 99% der Energie als kin. Energie der Hülle, 1% Licht (Standardkerze)
 - Überrest: nur expandierende Hülle



Leben und Sterben von Sternen

- Sternentwicklung: S Typ II - Explosionsmechanismus
 - Zwiebelschalenstruktur durch:

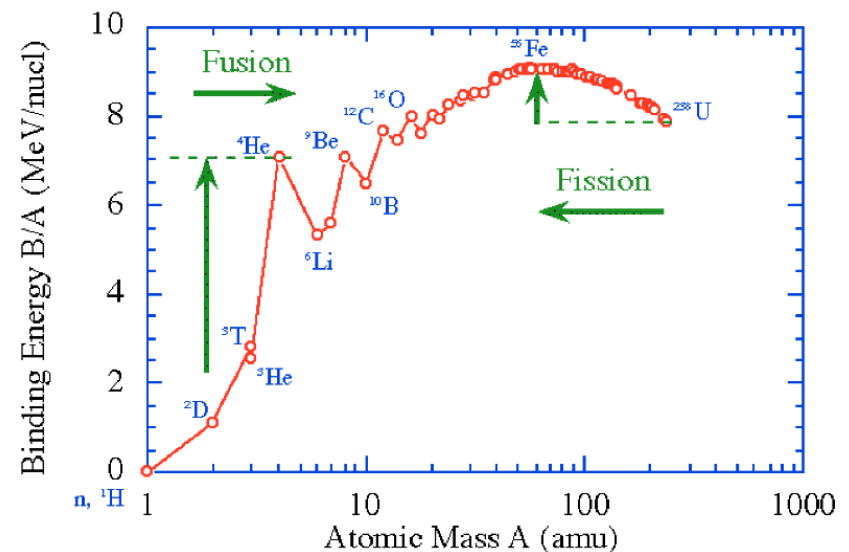
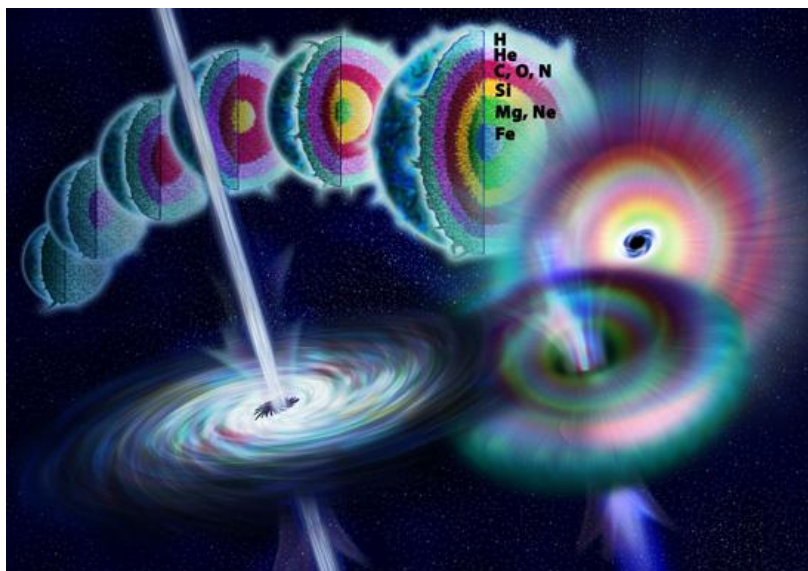
P-, T-Zunahme → Zündung der nächsten Brennphase



Gravitation: P-, T-Zunahme

Expansion vs. Gravitation

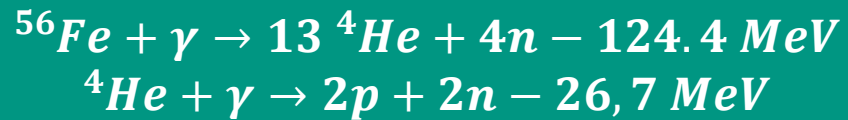
Fusion "beendet"



Leben und Sterben von Sternen

■ Sternentwicklung: S Typ II - Explosionsmechanismus

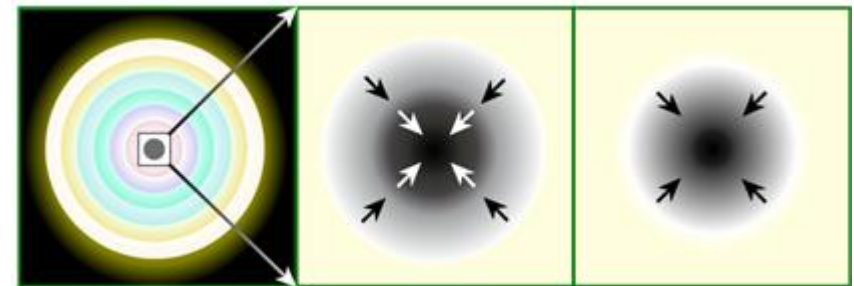
- Zwiebelschalenstruktur
- Photodesintegration:



- Neutronisation:



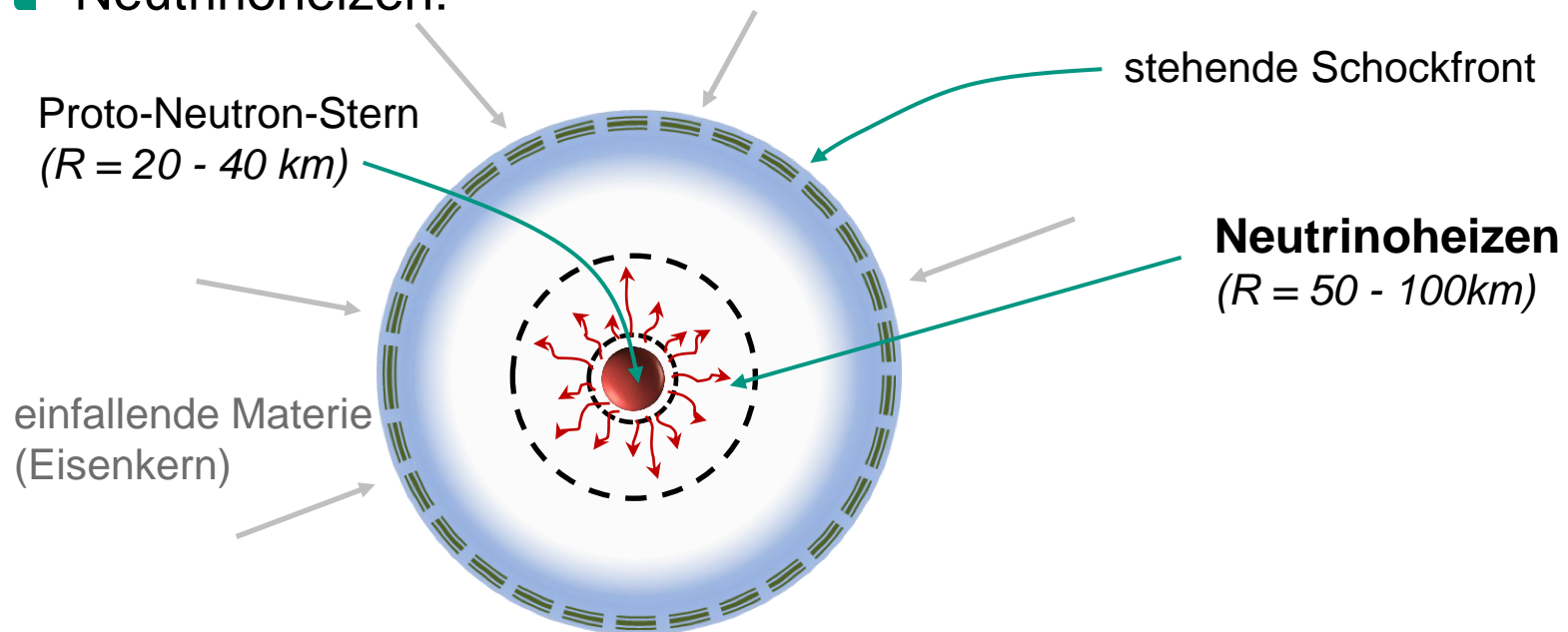
- Elektronendruck sinkt
- Eisenkern erreicht $M_{\text{Ch}} \rightarrow$ Kernkollaps
- Kern erreicht Atomkerndichte (fast nur Neutronen)



Leben und Sterben von Sternen

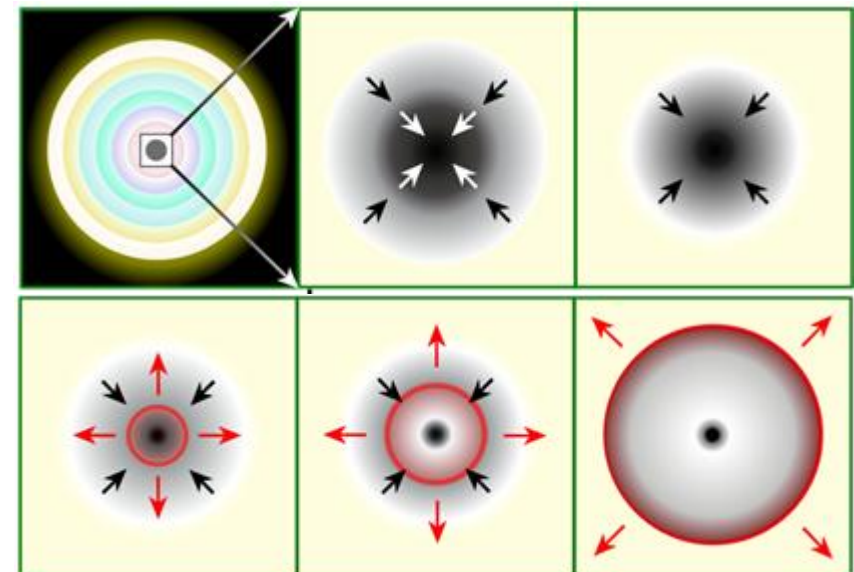
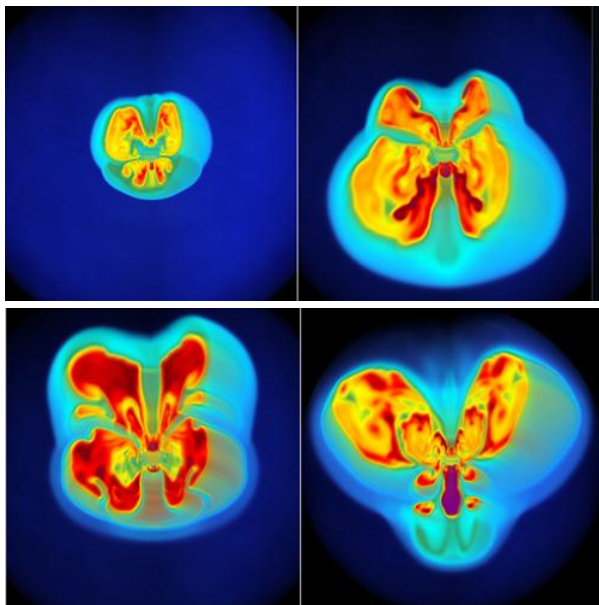
■ Sternentwicklung: S Typ II - Explosionsmechanismus

- Kern erreicht Atomkerndichte (fast nur Neutronen)
- „Rückprall“ der einfallenden Materie
- Kollaps wird gestoppt
- Neutrinoheizen:



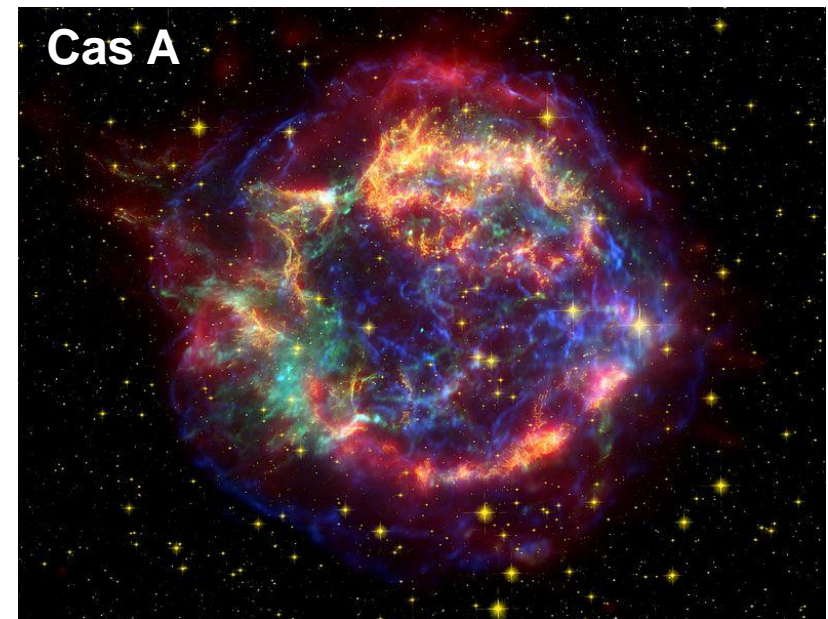
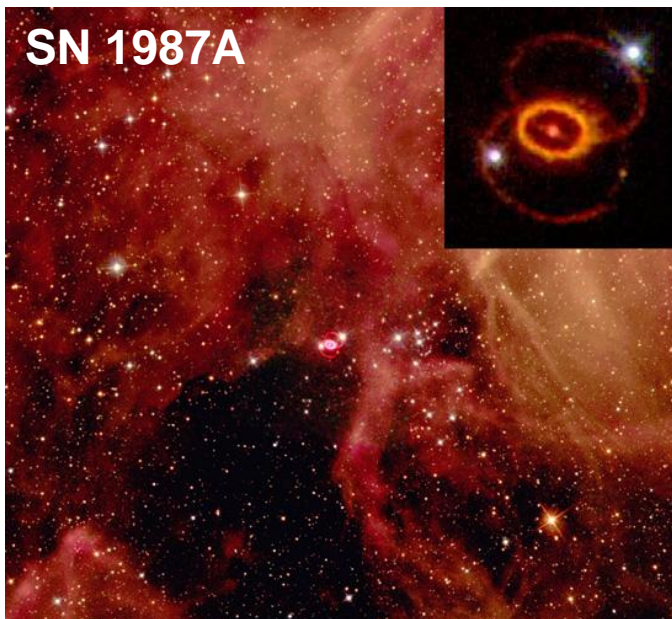
Leben und Sterben von Sternen

- Sternentwicklung: S Typ II - Explosionsmechanismus
 - Kern erreicht Atomkerndichte (fast nur Neutronen)
 - „Rückprall“ der einfallenden Materie
 - Kollaps wird gestoppt
 - Neutrinoheizen
 - Verzögerte Explosion



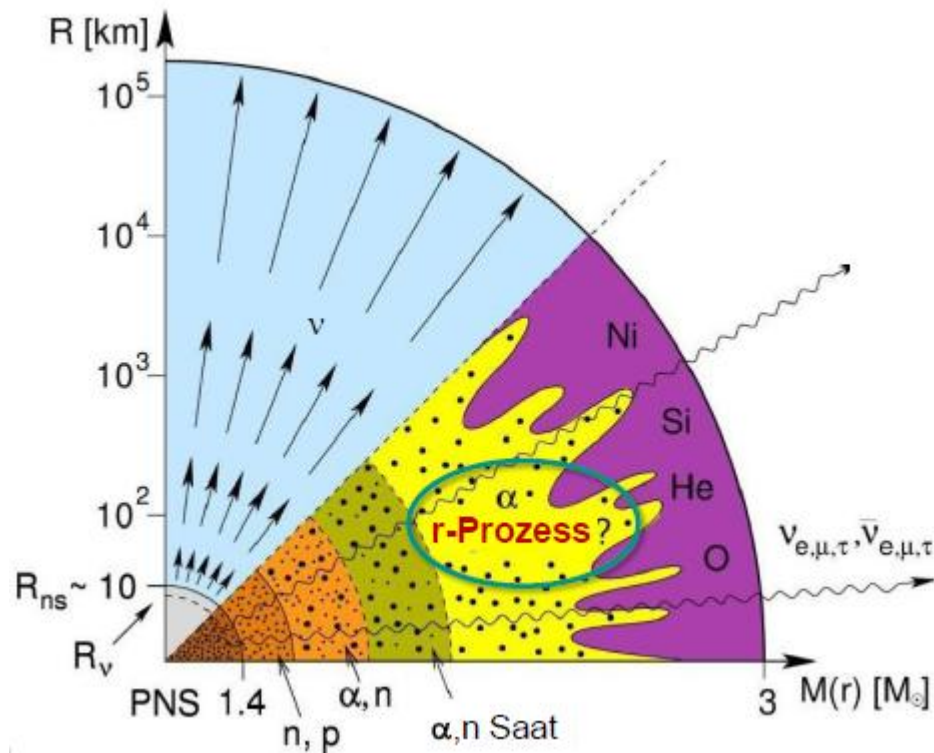
Leben und Sterben von Sternen

- Sternentwicklung: S Typ II - Charakteristiken
 - Energie: 10^{46} J aus Gravitationspotential
 - 99% der Energie in Neutrinos, 1% kin. Energie der Hülle
 - Überrest: Neutronenstern, schwarzes Loch



Leben und Sterben von Sternen

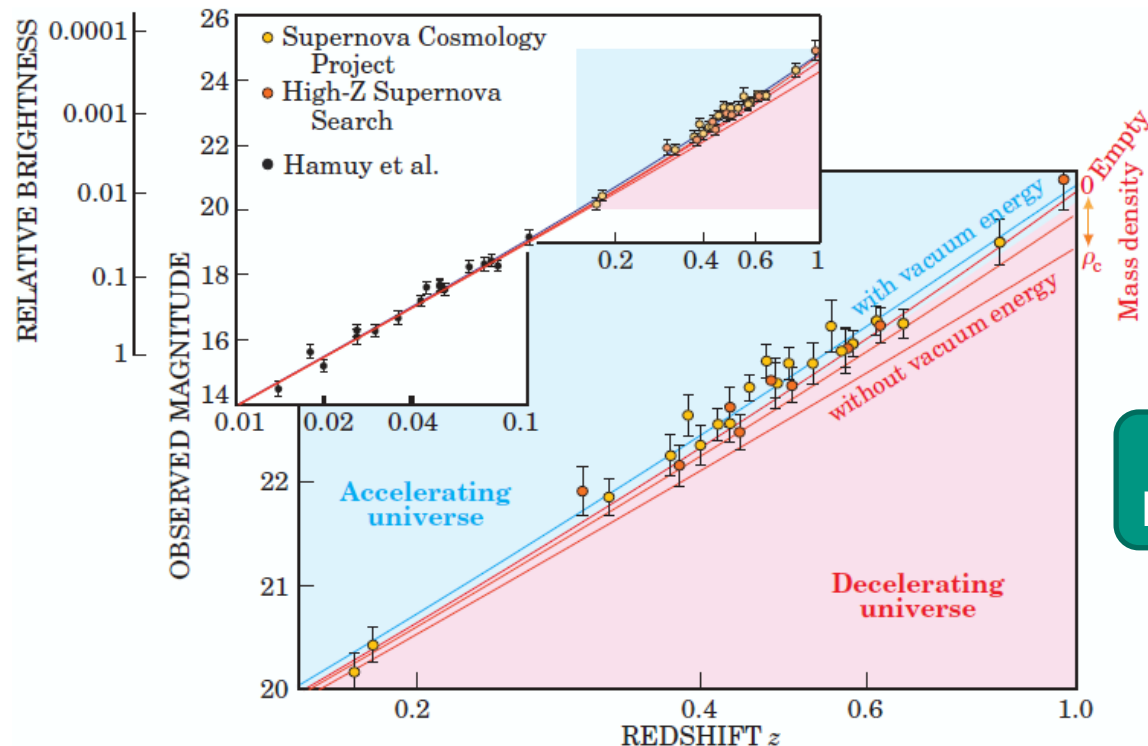
- Supernovae: Auswirkungen
 - Entstehung schwerer Elemente durch r-Prozess



Leben und Sterben von Sternen

■ Supernovae: Auswirkungen

- Standardkerzen: Bekannte Leuchtkraft (SNI) → Messung der Lichtabschwächung → Entfernung (Rotverschiebung)

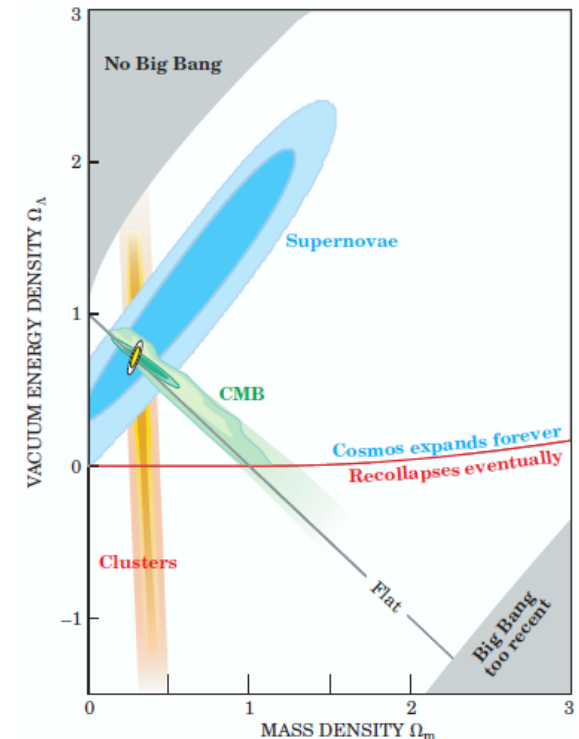
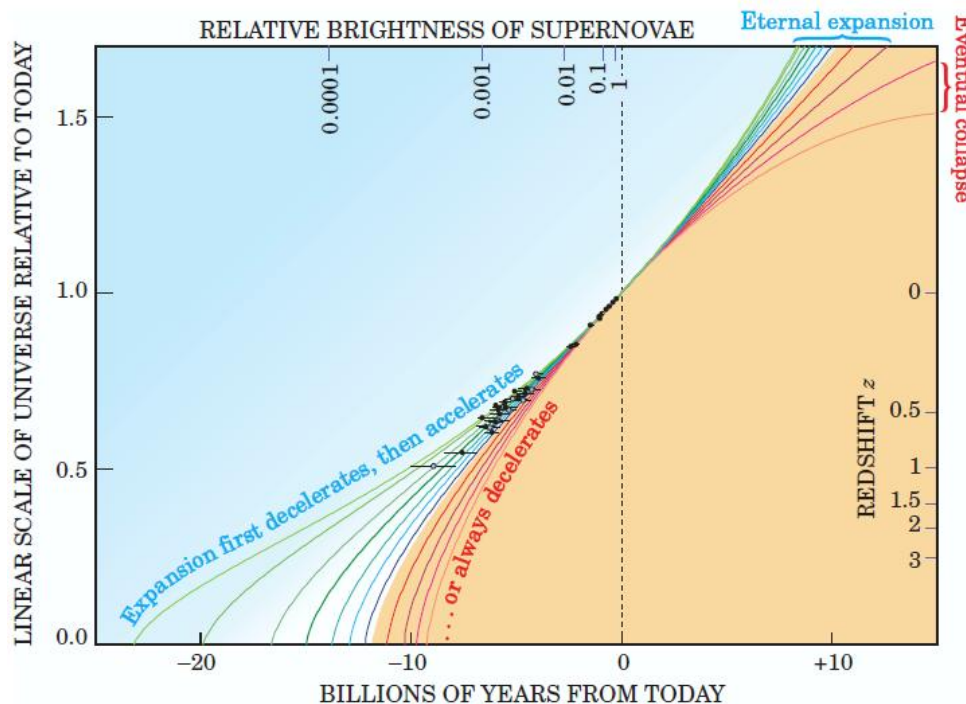


Nobelpreis 2011
Perlmutter, Schmidt, Riess

Leben und Sterben von Sternen

■ Supernovae: Auswirkungen

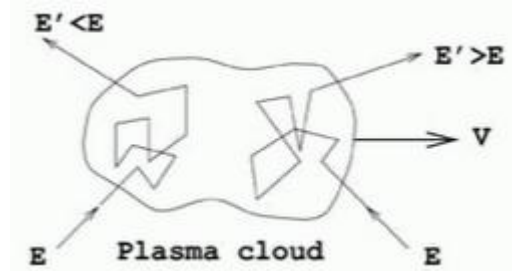
- Standardkerzen: Bekannte Leuchtkraft (SNI) → Messung der Lichtabschwächung → Entfernung (Rotverschiebung)
- Expansion des Universums durch dunkle Energie $\Omega_\Lambda \approx 0,7$



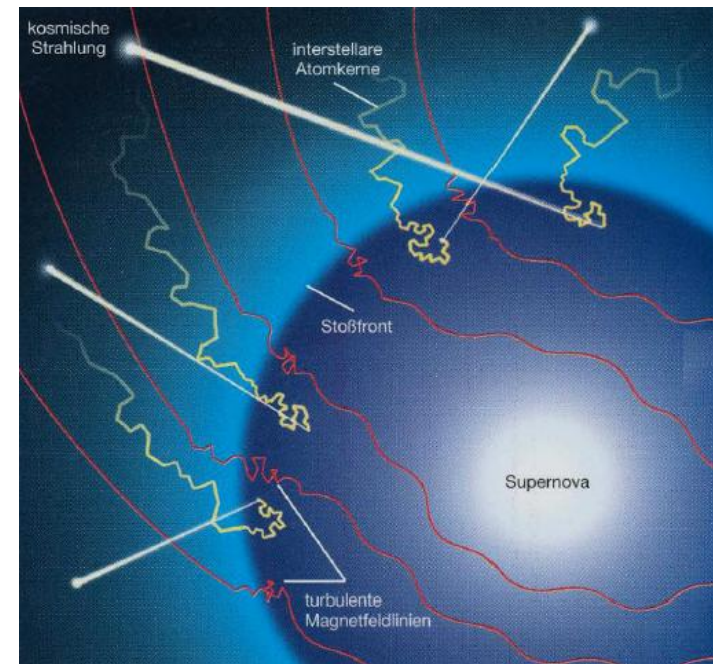
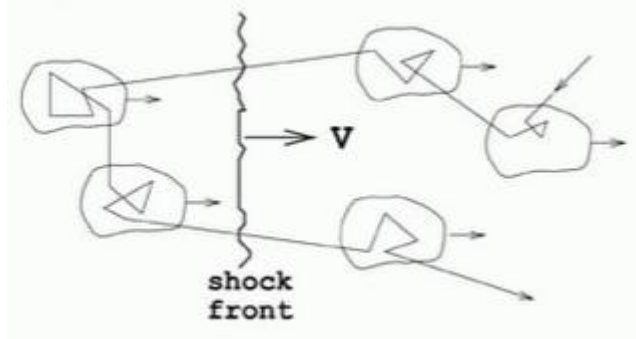
Leben und Sterben von Sternen

■ Supernovae: Auswirkungen

- SNR als Quellen kosmischer Strahlung
- Fermi-Beschleunigung: Streuung an Magnetfeldern → stochastische Energie-/Impulsänderung
- 2. Ordnung: zufällig orientierte Felder



- 1. Ordnung: Schockfront von SNRs



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

DON'T PANIC

