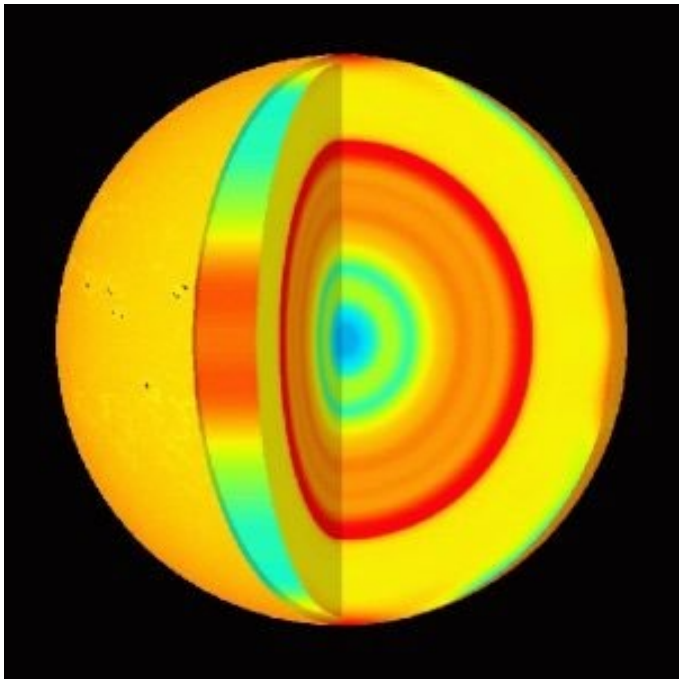
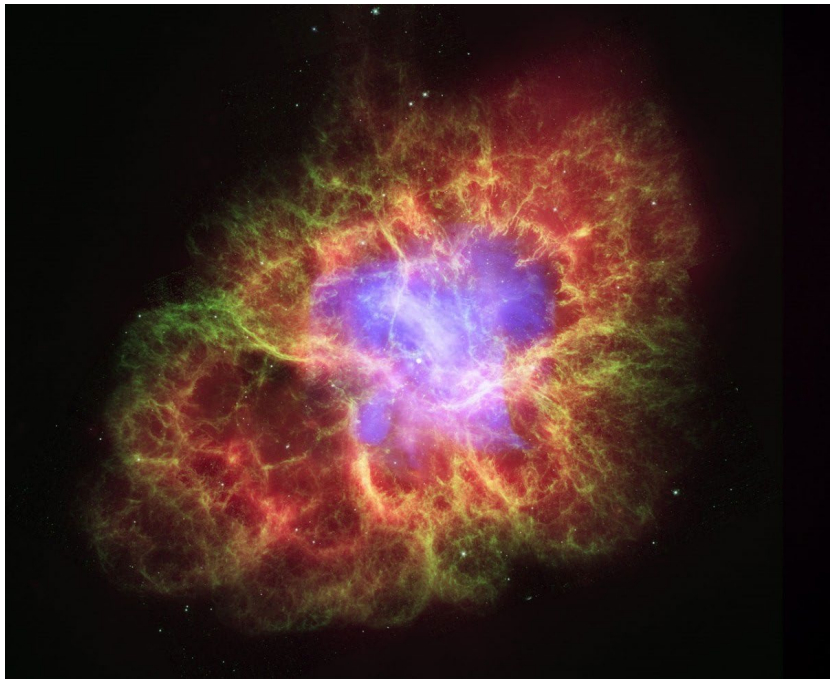
# *Die Entstehung der chemischen Elemente im Universum*

***öffentlicher Abendvortrag***

aus Anlass der Tagung «Nuclear Physics in Astrophysics XI» in Dresden
am 17.9. 2024

Friedrich-Karl Thielemann
Departement Physik, Universität Basel
und GSI Helmholtz-Zentrum für Scherionenforschung, Darmstadt





Die Rolle von Sternen und Sternexplosionen

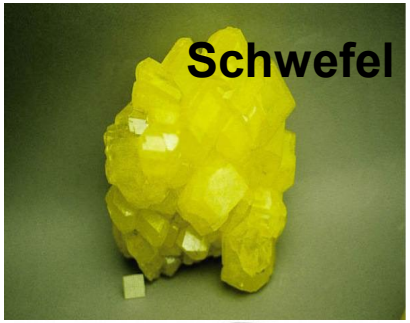
# Uns bekannte chemische Elemente: z.B.:

**Wasserstoff und Helium**
gasförmig in der Erdatmosphäre
(wie auch Stickstoff, Sauerstoff,
Neon, Argon...)

**Brom** und
**Quecksilber**
flüssig

**Kohlenstoff**

**Silizium**

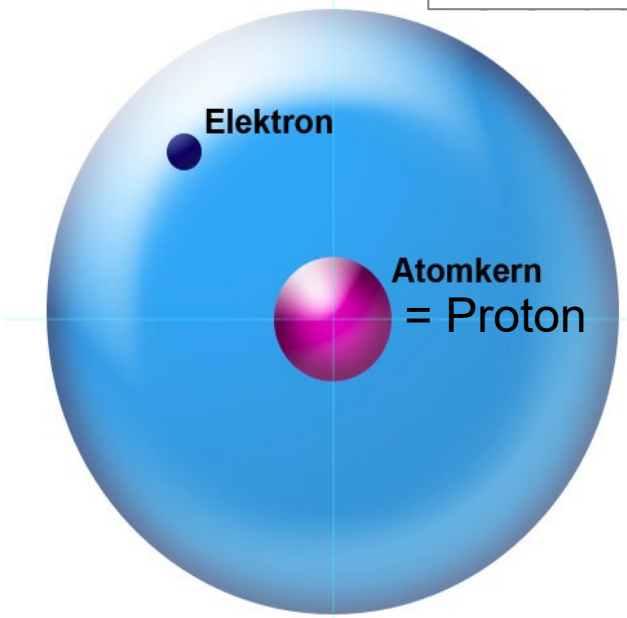


Elemente
in fester
Form

**Silber und Gold**
Edelmetalle

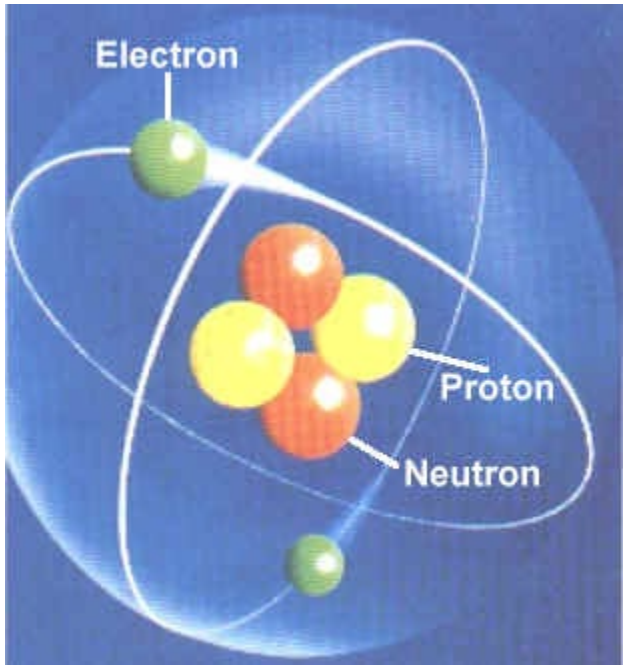
# Aufbau der Atome und chemischen Elemente

Wasserstoff




Die am häufigsten in stabiler Materie vorkommenden Elementarteilchen sind Protonen, Neutronen und Elektronen.
Die Anzahl der Elektronen in der Elektronenhülle bestimmt das chemische Element,
bei Z=1 handelt es sich um H (Wasserstoff), bei Z=2 um He (Helium).
Die Protonen im Atomkern sind positiv geladen, die Elektronen in der Hülle negativ. Es gibt ebenfalls neutrale Neutronen im Atomkern

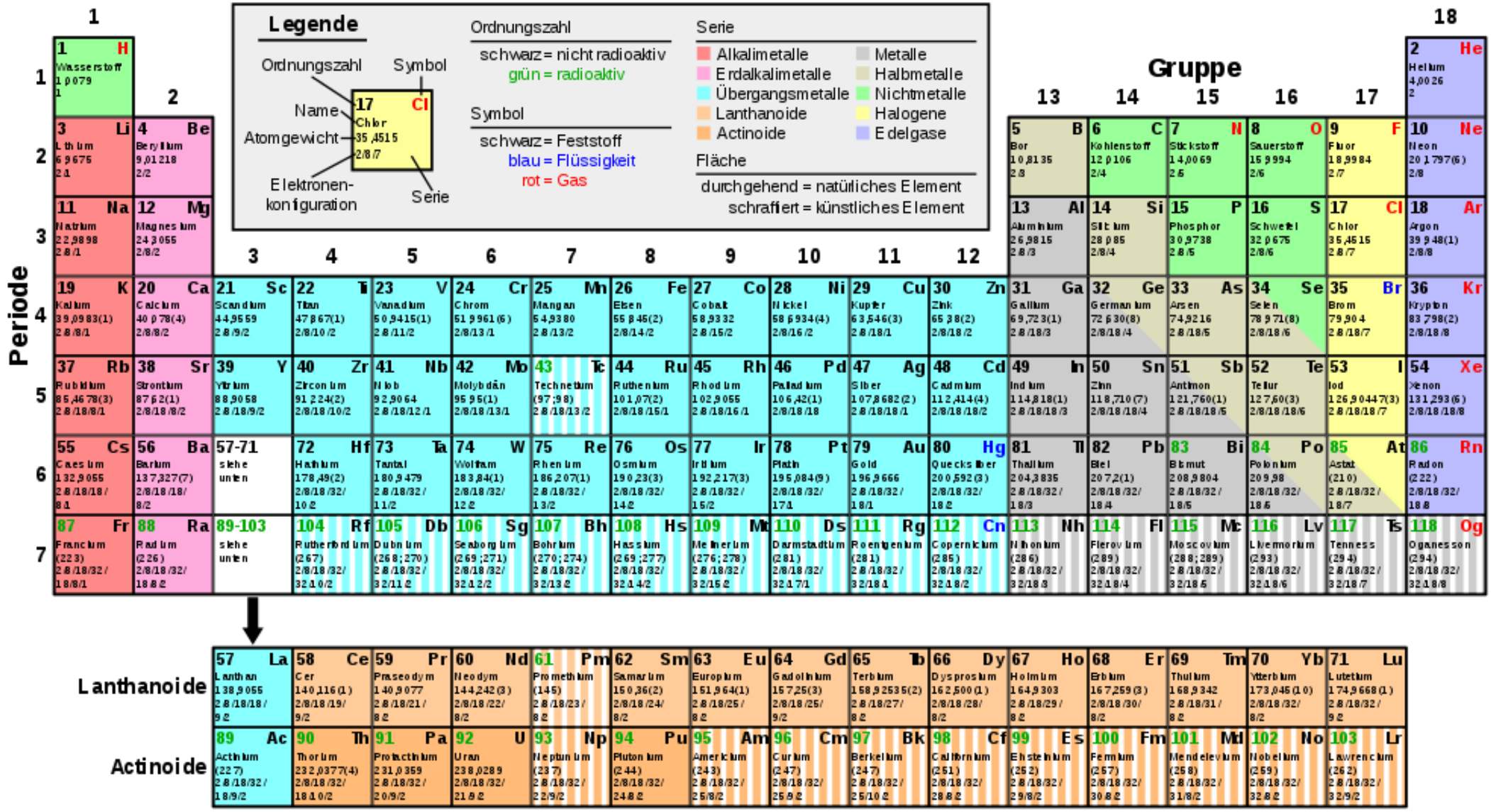
Helium




*In den Jahren 1868/69 brachten der russische Chemiker Dimitri Iwanowitsch Mendelejew und der Deutsche Lothar Meyer unabhängig voneinander die damals bekannten Elemente in eine bestimmte Ordnung ⟶ 1869 (vor 155 Jahren) Veröffentlichung des Periodensystems der Elemente*

# Die heute bekannten chemischen Elemente

bis Oganessan (Z=118), Elemente mit Z>94 (Plutonium) sind instabil, kurzlebig und nur in kernphysikalischen Beschleunigerlabors erzeugt. *(wikimedia)*

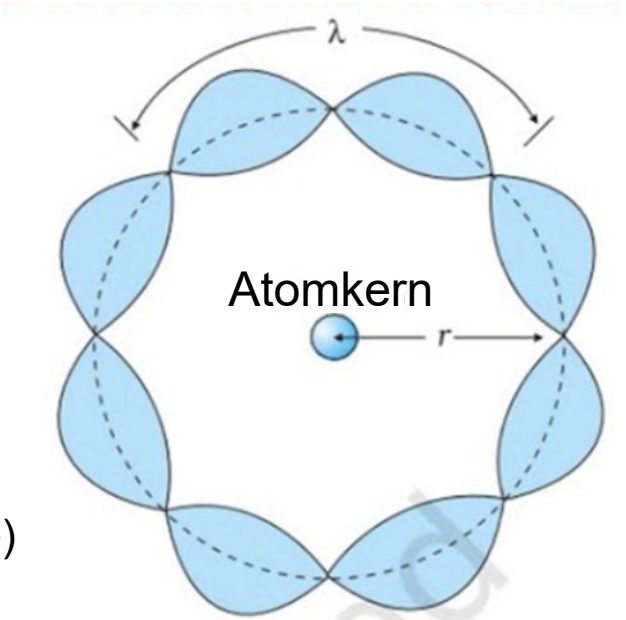


Niels Bohr postulierte 1913, dass man die Energiezustände der unterschiedlichen Elektronenbahnen erklären konnte, wenn der Bahndrehimpuls nur ein Vielfaches des Planckschen Wirkungsquantums annehmen kann $L=n\ h/2\pi$

Nachdem Louis de Broglie 1924 einführte, dass Materieteilchen auch Welleneigenschaften haben mit einer Wellenlänge $\lambda$, die mit dem Impuls des Teilchens durch $p=h/\lambda$ verknüpft ist, bzw. $\lambda=h/p$, war das Bohrsche Postulat identisch mit der Aussage, dass Elektronen auf ihren Bahnen stehende Wellen bilden und die Umlauflänge gerade ein Vielfaches der Wellenlänge sein muss $2\pi r=n\lambda$. Damit (und weiteren Verfeinerungen*) lassen sich alle Elemente und ihre Elektronenzustände verstehen.

Die Elektronenhülle bestimmt die chemischen Eigenschaften.

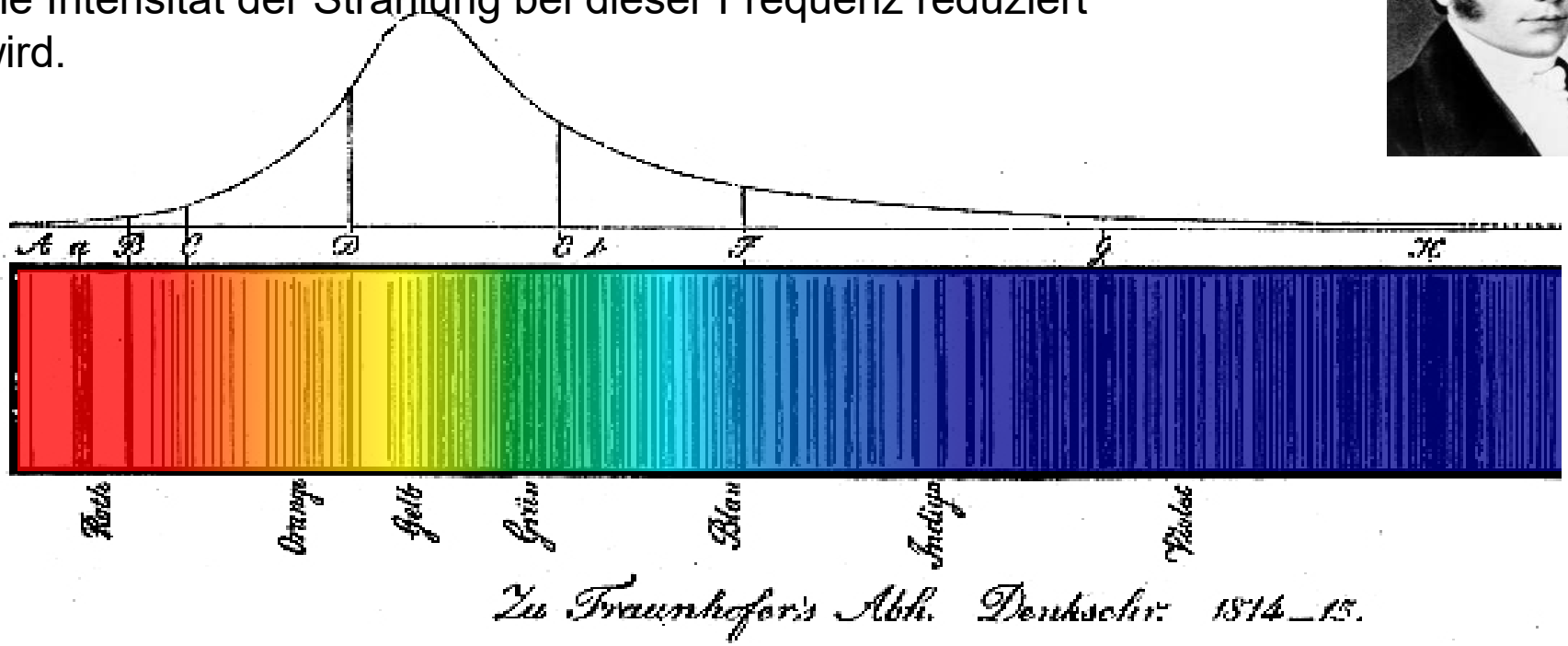
*die Kopplung vom Bahndrehimpuls mit dem intrinsischen Drehimpuls (Spin) des Elektrons und die Berücksichtigung von relativistischen Effekten bei schweren Kernen bestimmen das vollständige Verständnis der Elektronenzustände

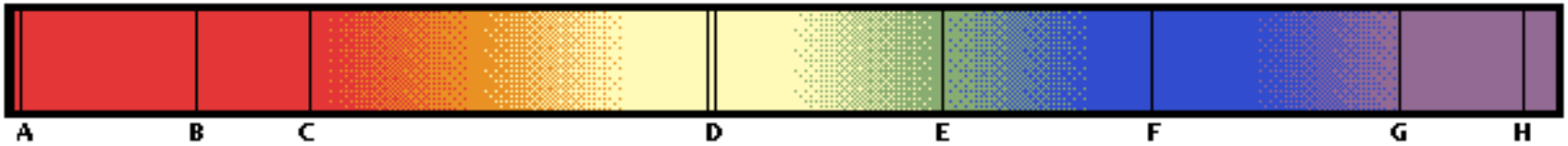



** wenn die maximale Besetzung von Elektronenbahnen (Schalenabschlüsse) erreicht ist, ergibt sich eine sehr hohe Bindungsenergie und solche Elemente gewinnen in der Regel keine Energie durch chemische Reaktionen (Edelgase), bei denen sich gemeinsame Elektronenbahnen um (mehrere) Atomkerne bilden würden

# Fraunhofersche Absorptionslinien im Sonnenlicht

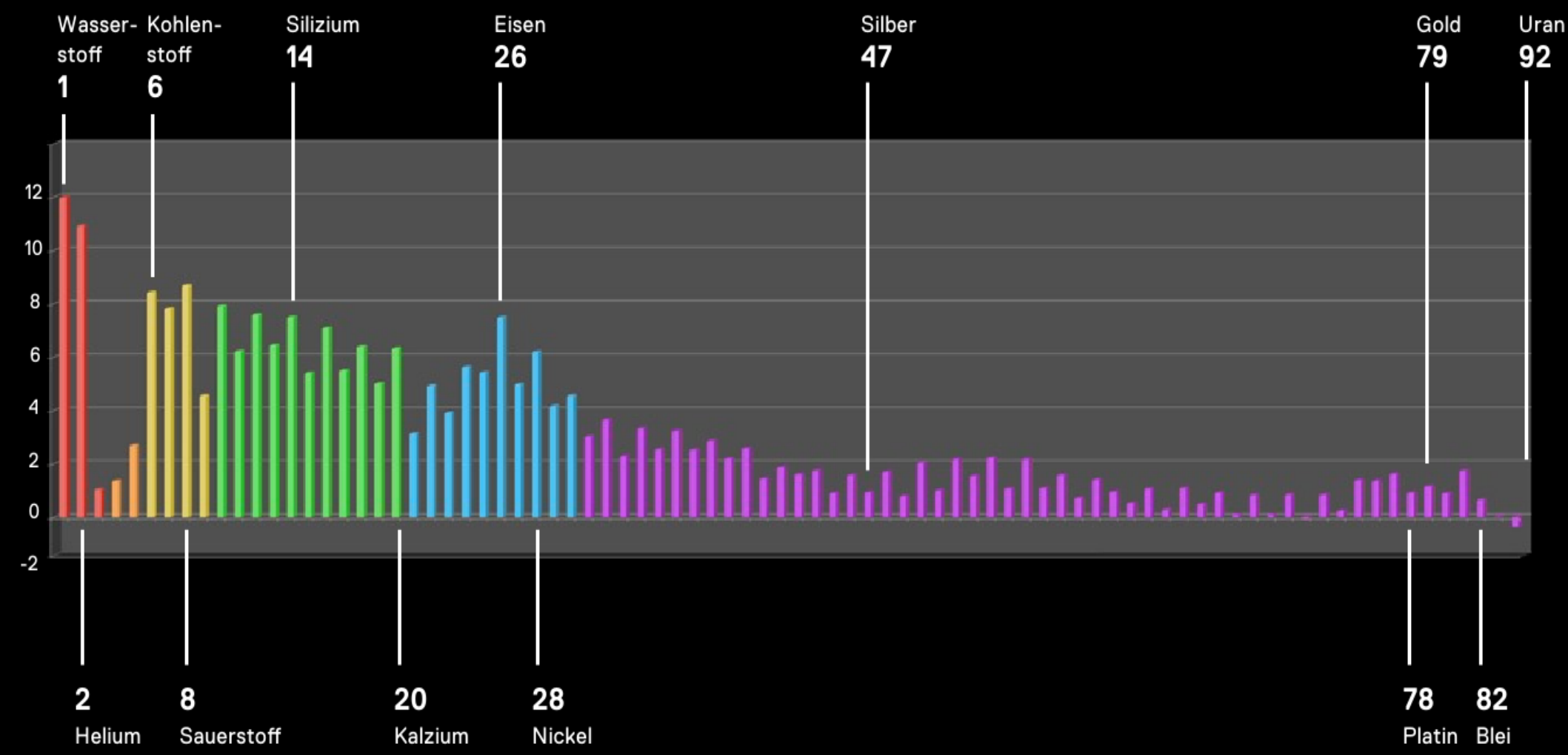
entsprechen der Energie zwischen Anregungszuständen in der Elektronenhülle, wobei aus dem Inneren strömende Photonen dieser Frequenz absorbiert werden und damit die Intensität der Strahlung bei dieser Frequenz reduziert wird.




| | | |
|---|---|---|
| A | (äußerstes Rot) | Terrestrischer Sauerstoff |
| B | (Rot) | Terrestrischer Sauerstoff |
| C | (Rot) | Solarer Wasserstoff |
| $D_1$ | (Gelb) | Solares Natrium |
| $D_2$ | (Gelb) | Solares Natrium |
| E | (Grün) | Solares Eisen |
| F | (Blau) | Solarer Wasserstoff |
| G | (Violett) | Solares Eisen und solares Calcium |
| H | (äußerstes Violett) | Solares Calcium |

# HÄUFIGKEITSVERTEILUNG IM SONNENSYSTEM
## (AUS KOHLIGEN CHONDRITEN UND SOLAREN ABSORPTIONSSPEKTREN)




***Eine Einheit auf der y-Achse entspricht einem Faktor 10, d.h. Von 2 nach 4 bzw. 8 nach 10 sind Elemente 100 mal häufiger. Auf der x-Achse ist die Atomzahl Z aufgetragen.***

***(mit Hilfe von Sternmodellen kann aus der Tiefe der Absorptionslinien die Elementhäufigkeit bestimmt werden)***

# Isotope des Wasserstoffs

| Name | Symbol | Modell des Kerns | Bau des Kerns | Anteil |
|---|---|---|---|---|
| Protium | $^{1}H$ | p | 1 Proton, keine Neutronen<br>Z = 1<br>A = 1 | 99,985 % |
| Deuterium | $^{2}H$ bzw. D | n p | 1 Proton, 1 Neutron<br>Z = 1<br>A = 2 | 0,0145 % |
| Tritium | $^{3}H$ bzw. T | n n p | 1 Proton, 2 Neutronen<br>Z = 1<br>A = 3 | $10^{-16}$ % |

Die Anzahl der Protonen im Atomkern ist identisch mit der Anzahl der Elektronen in der Hülle (positive und negative Ladungen führen zum insgesamt ungeladenen Atom).

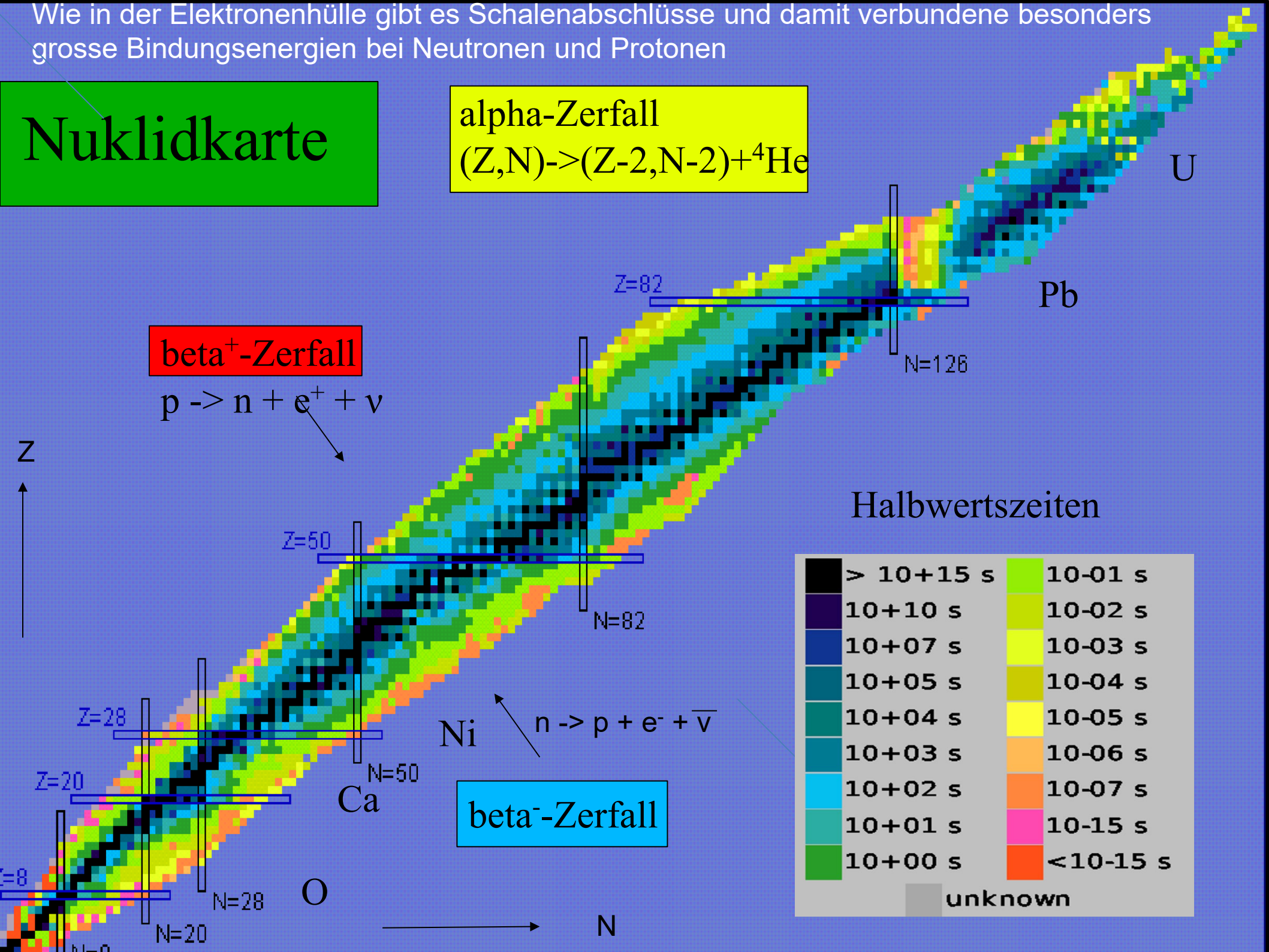
*Unterschiedliche Anzahlen von Neutronen führen zu unterschiedlichen Isotopen des gleichen Elements.*

*Typischerweise sind Isotope mit etwa gleichen Neutronen- und Protonenzahlen stabil.*

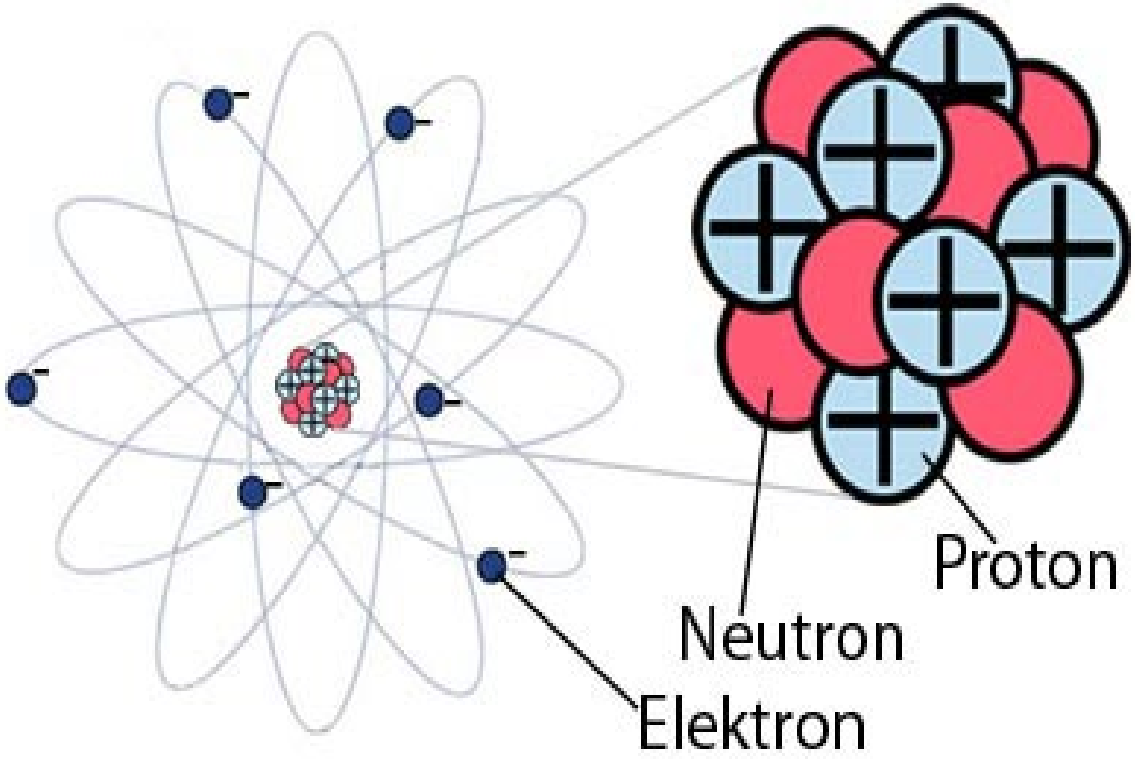
Wie in der Elektronenhülle gibt es Schalenabschlüsse und damit verbundene besonders grosse Bindungsenergien bei Neutronen und Protonen

# Nuklidkarte

alpha-Zerfall
$(Z,N) \rightarrow (Z-2,N-2) + {}^{4}He$



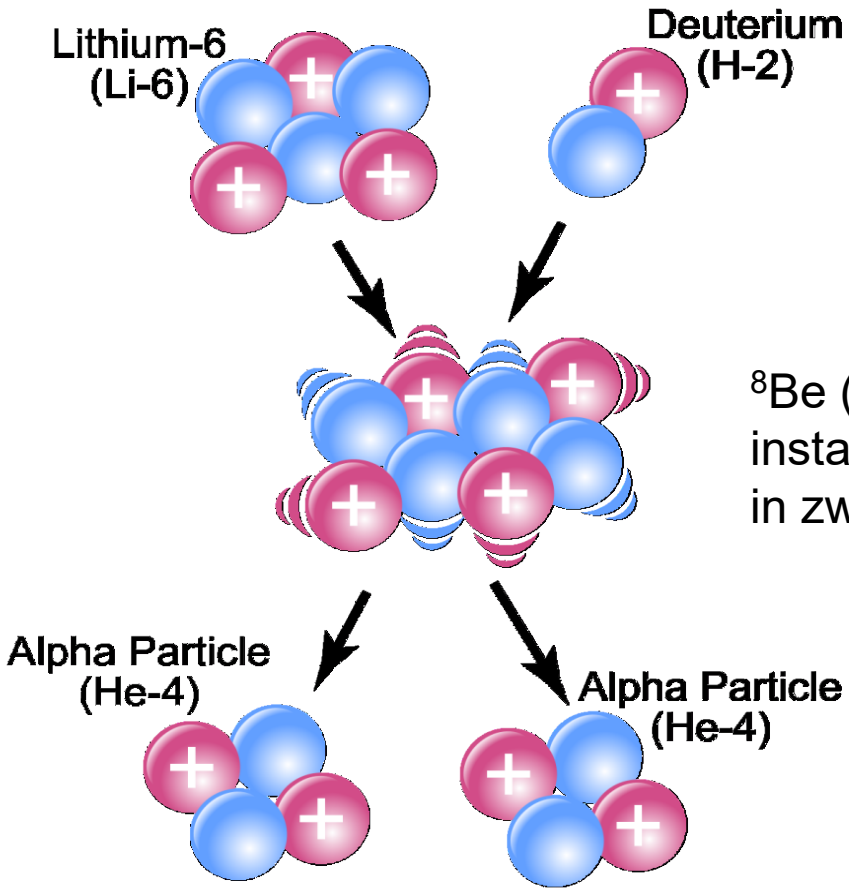
# Was ist Bindungsenergie? ($E=mc^2$)




*6 freie Protonen + 6 freie Neutronen + 6 freie Elektronen sind schwerer als ein Kohlenstoffatom in dem diese gebunden vorliegen*

*Die Differenz von 6 Protonen + 6 Neutronen – Masse des Atomkerns entspricht der Kernbindungsenergie, die Bindung der 6 Elektronen in der Atomhülle entspricht der chemischen Bindungsenergie*

# Kernreaktionen

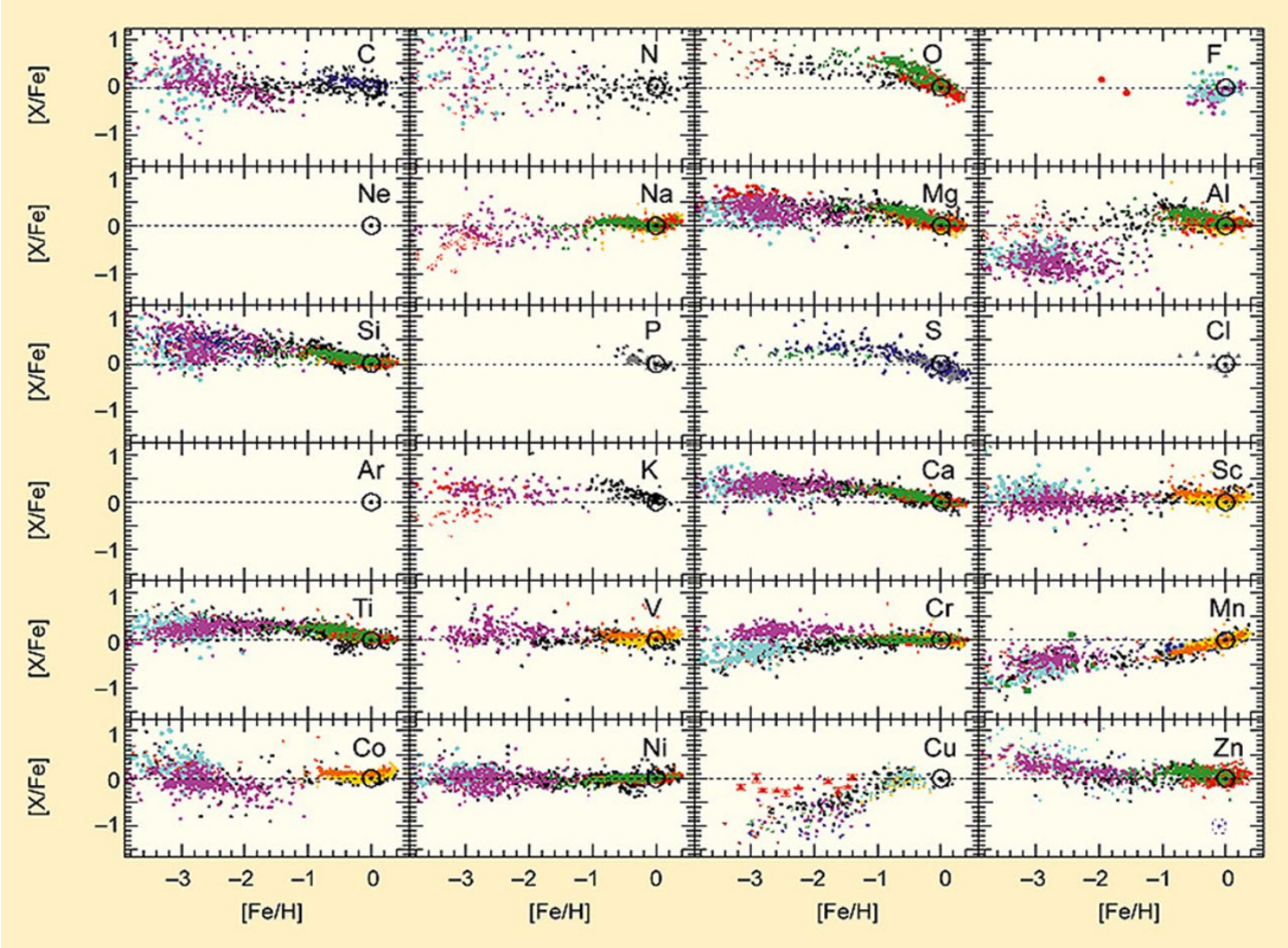



Lithium-6 – Deuterium Reaction

$^{8}$Be (Berillium 8) ist extrem instabil, zerfällt in $10^{-16}$ s in zwei Alpha-Teilchen

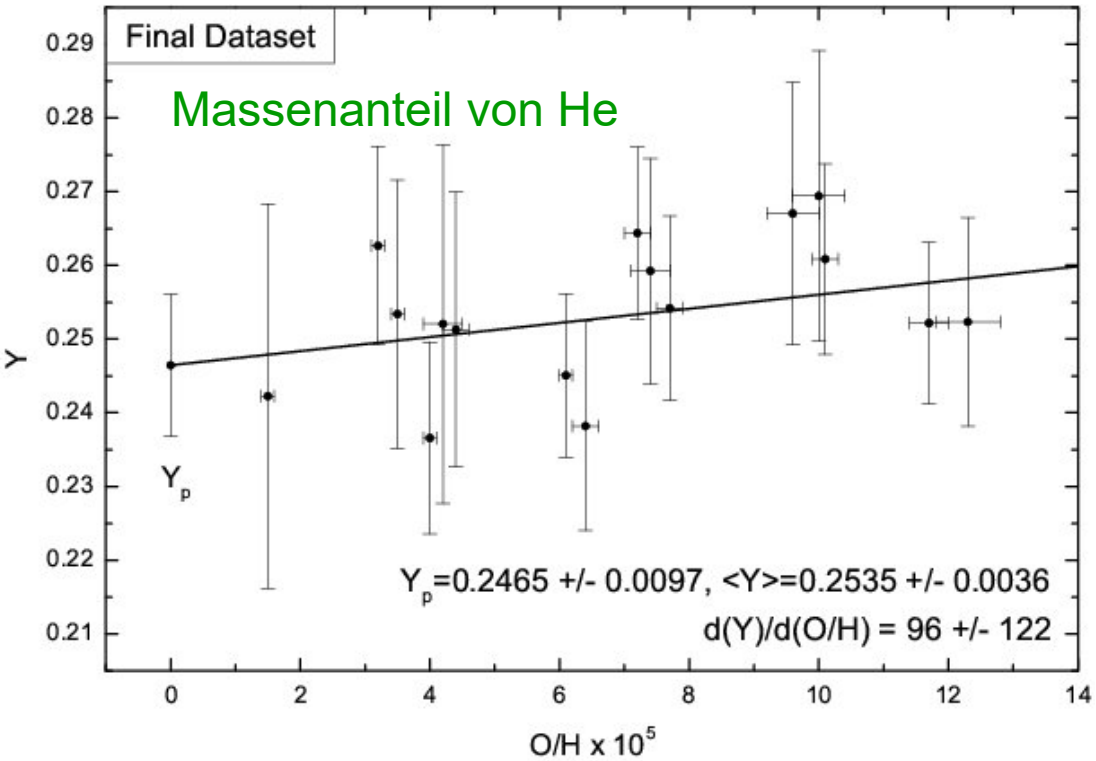
***Bei Kernreaktionen werden durch Zusammenstoss (Fusion) von zwei Atomkernen andere Kerne erzeugt. Voraussetzung ist, dass die Abstossung zwischen den Ladungen der kollidierenden Kerne überwunden wird (daher entsprechende Geschwindigkeiten notwendig = Temperatur in einem Gas). Bei den Kernumwandlungen wird Energie frei. Fusion von leichteren Kernen bis Eisen führt zur Freisetzung von Energie.***

# Spektren alter Sterne informieren über die Element-entwicklung in unserer Galaxie (der Milchstrasse)




von
N. Prantzos

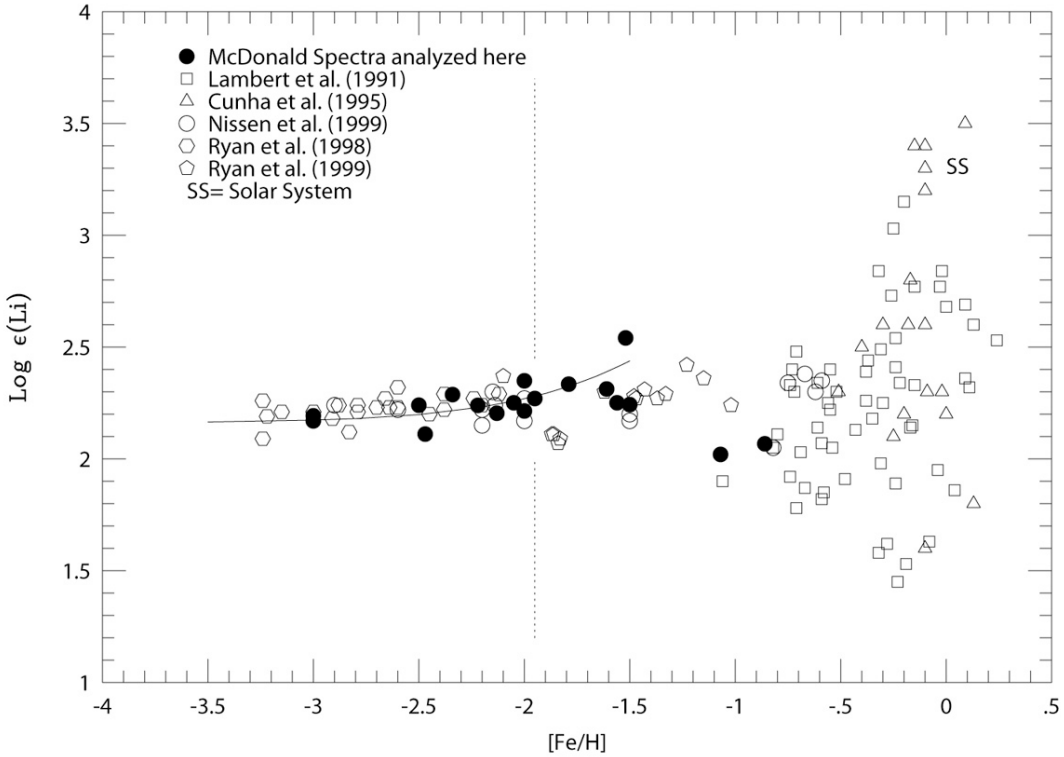
Sterne «brennen» durch Kernfusionen im Innern, aber die Oberfläche zeigt die Komposition an mit der sie aus Gaswolken entstanden sind, d.h. wir können bei der Beobachtung verschieden alter Sterne in die Vergangenheit unserer Galaxie sehen.
Die Häufigkeitsverhältnisse sind logarithmisch angegeben (0=solar, -1=1/10 solar, -3=1/1000 solar). Die Verhältnisse der verschiedenen Elemente (X=C,N,O,Mg,Si,S,Ca,Ti) zu Eisen (Fe) variieren mit dessen Anreicherung, d.h. der Zeit, aber mit verschwindend kleinen Fe-Häufigkeiten verschwinden sie ebenfalls.

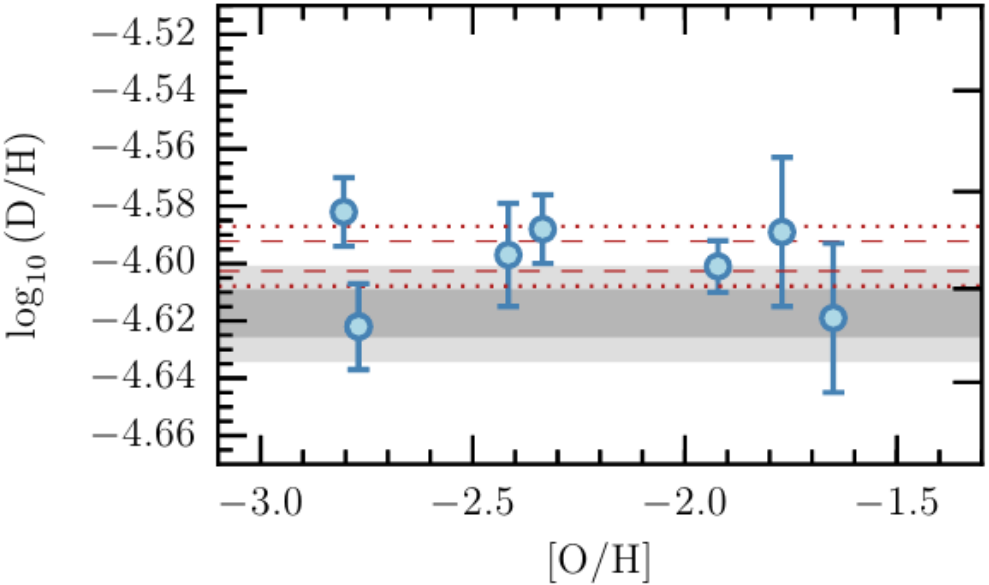



**Ausnahmen:** Wenn wir Helium, Lithium und Deuterium bis zu den kleinsten Fe oder O-Werten zurückverfolgen, verschwinden diese nicht, sondern werden konstant, d.h. sie müssen schon vor der Entstehung der Milchstrasse mit ihren Beiträgen durch Sterne vorhanden gewesen sein

➡ **Urknall**.

Normalerweise lassen sich Spektren unterschiedlicher Isotope des gleichen Elements kaum unterscheiden. Bei normalem $^1$H (1 Proton) und dem Isotop $^2$H (D = 1 Neutron,1 Proton) liegt aber eine doppelt so grosse Masse des Atomkerns vor -> gut unterscheidbare Spektren



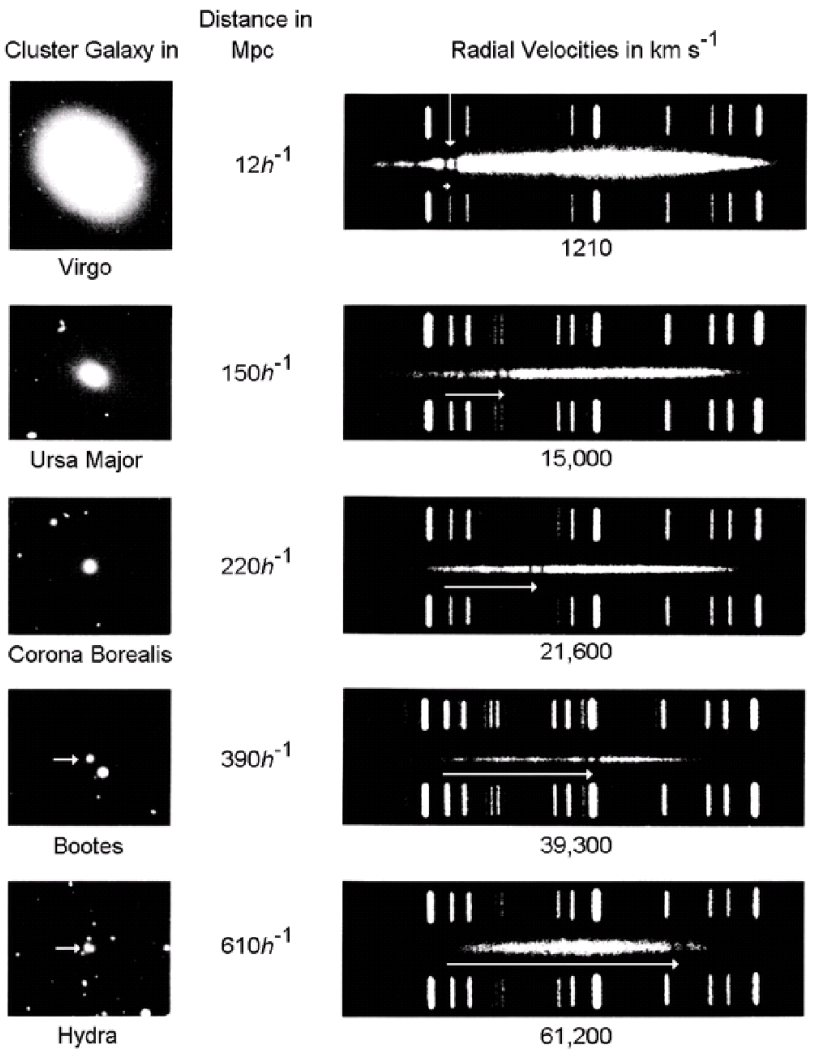



# Der Urknall und die Expansion des Universums, Messung mit Hilfe der Rotverschiebung von Galaxien

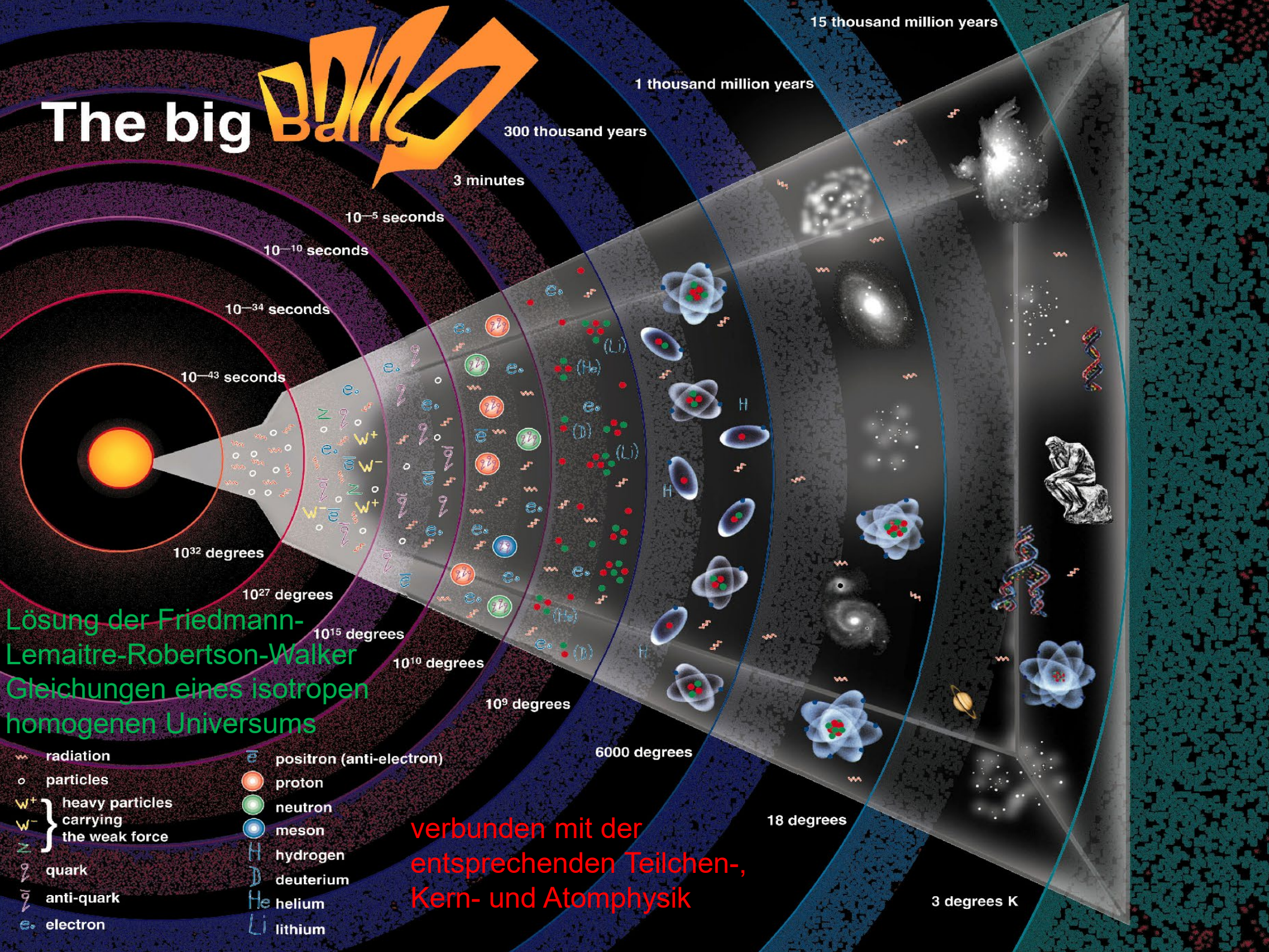
**Rotverschiebung** $= \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$

Die Rotverschiebung der Ca H und K Atom-Linien ist wie eine Dopplerverschiebung der Frequenz auf Grund der Geschwindigkeit zu sehen, mit der sich die Galaxien von uns entfernen.

Je weiter weg, umso grösser die Geschwindigkeit. Das Universum expandiert homogen!



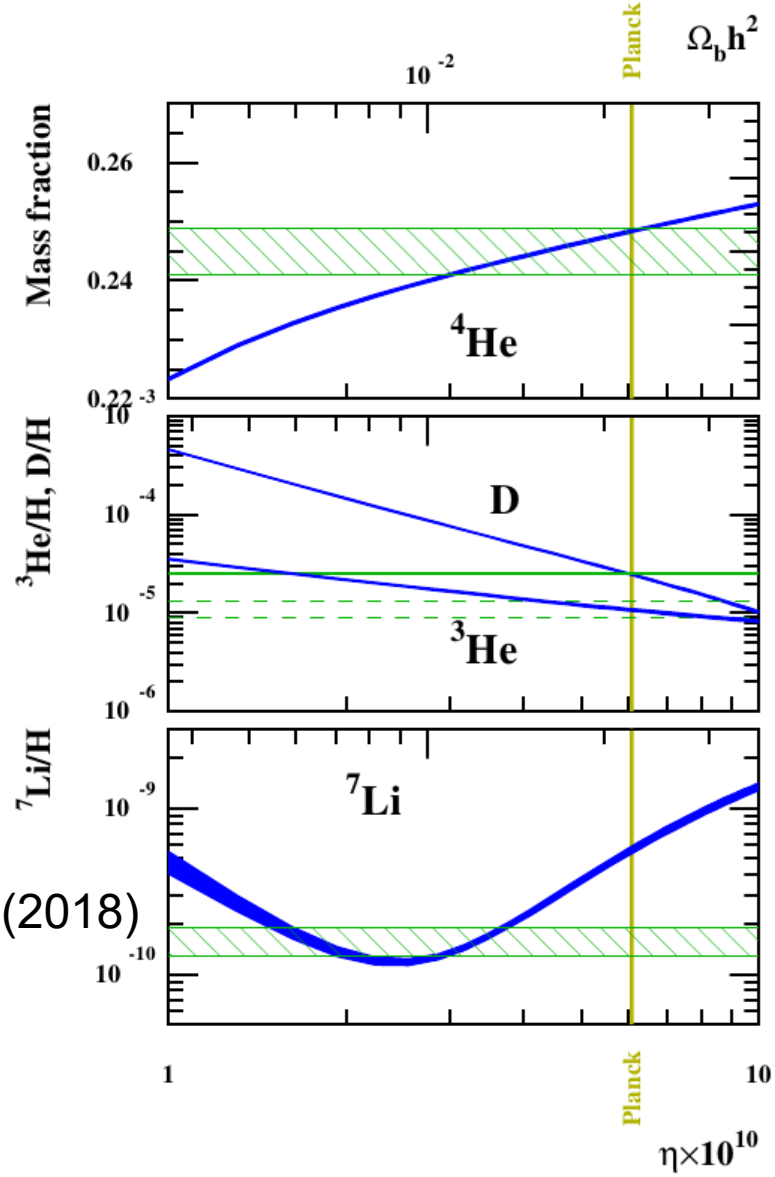

Die Expansion des Universums kann mit Hilfe der Hubble-Konstanten H (v=Hr) bestimmt werden (die Geschwingigkeit ist mit der Hubble-Konstanten proportional zum Abstand der Galaxie)




Lösung der Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker Gleichungen eines isotropen homogenen Universums

verbunden mit der entsprechenden Teilchen-, Kern- und Atomphysik

# Primordiale Häufigkeiten



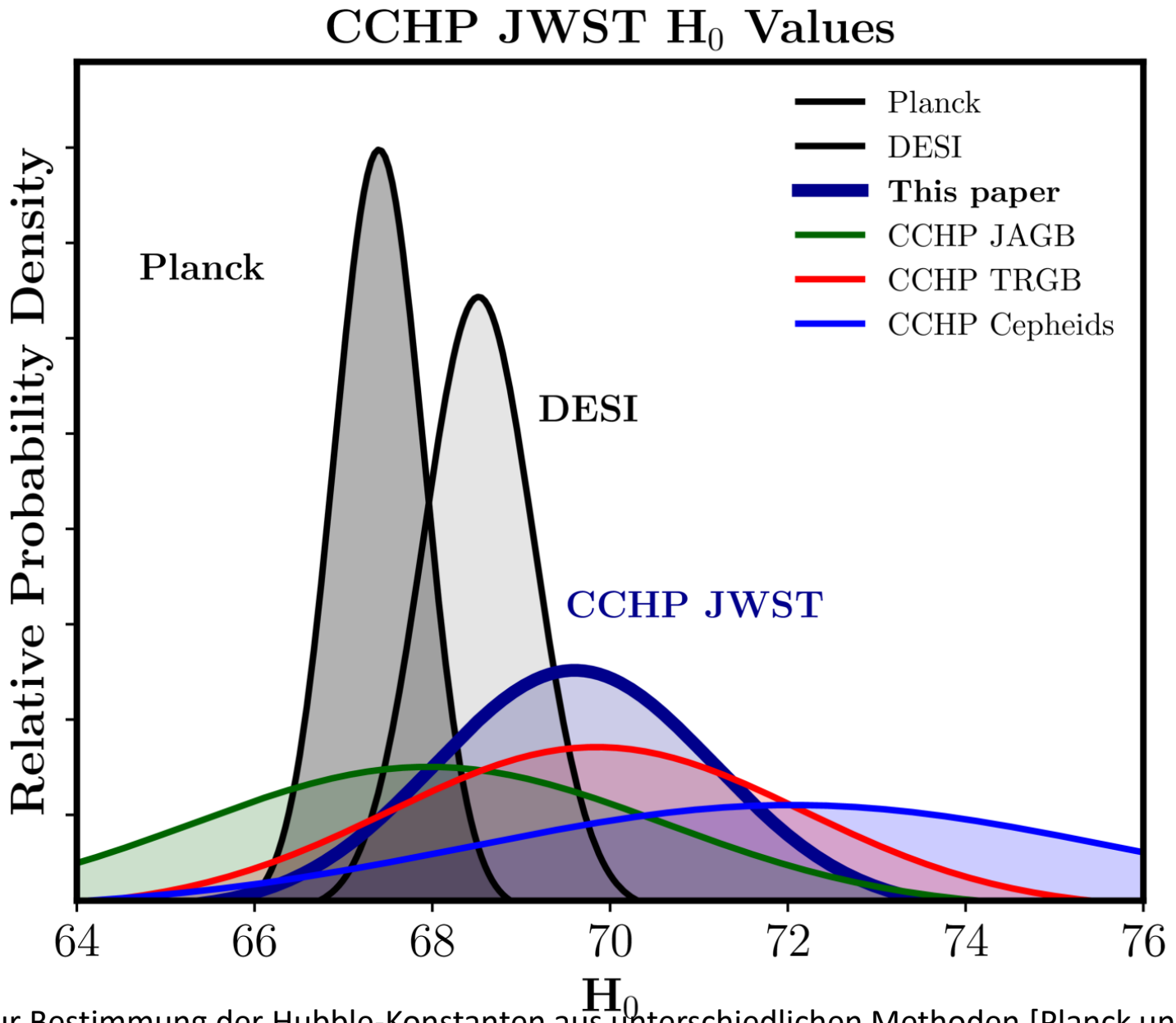

Coc et al. (2018)

Die am Anfang der Galaxiengeschichte vorliegenden primordialen Häufigkeiten von $^1$H, $^2$H, $^3$He, $^4$He und $^7$Li (waagerechte Linien) können verglichen werden mit Vorhersagen als Funktion von einem freien Parameter η (nicht bekannte Anfangsbedingung der Entropie).
Der Wert $\eta = 6 \times 10^{-10}$ entspricht der Messung der Hintergrundstrahlung mit dem Planck-Satelliten (Li ist wahrscheinlich in alten Sternoberflächen abgebaut).

Daraus folgt, dass nur etwa 4.8% der Gesamtenergiedichte des Universums aus uns bekannter baryonischer Materie besteht.

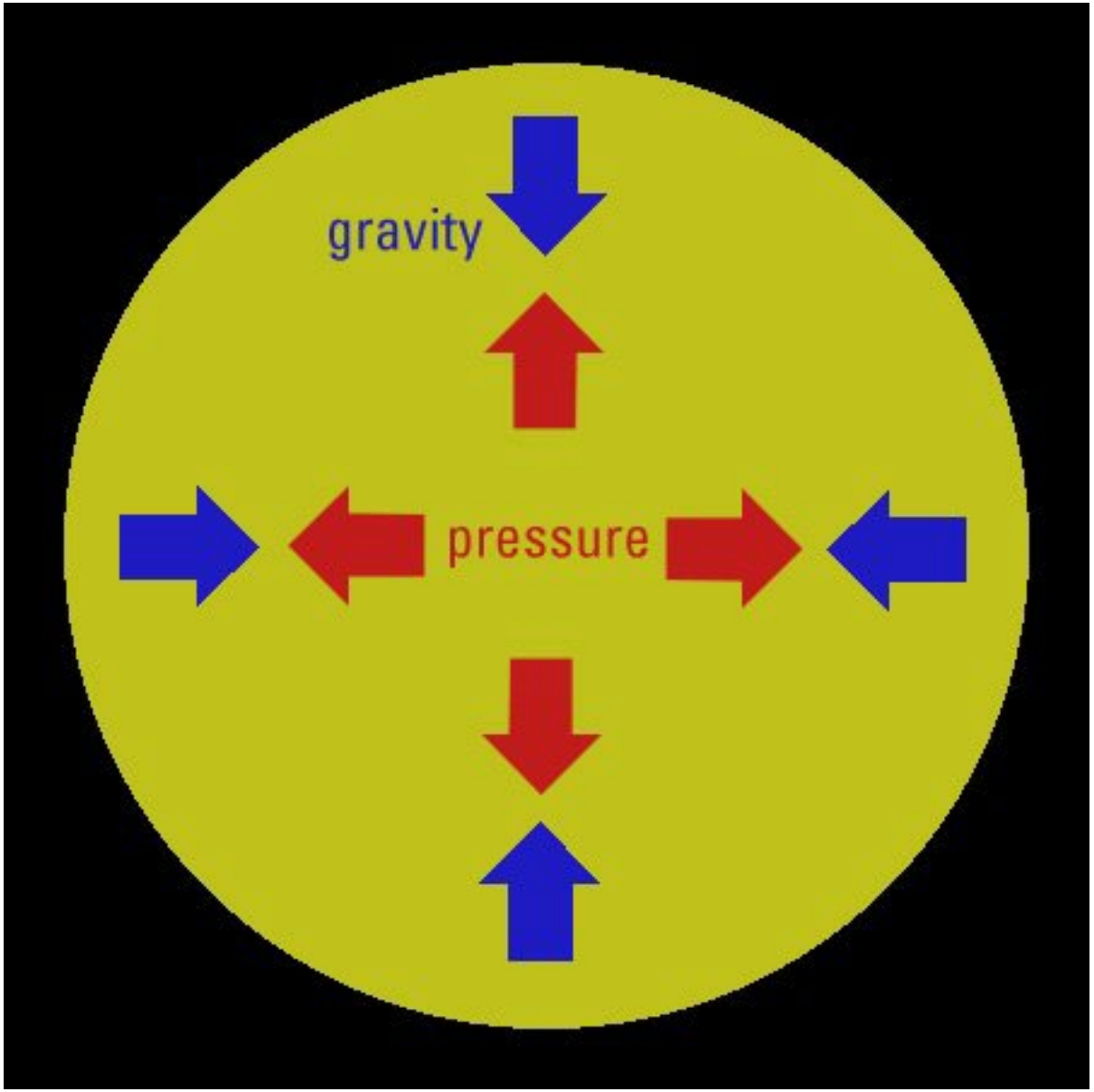
*„freier“ Parameter η, der das Baryonen/Photonen Verhältnis oder die Entropie des Universums misst (verknüpft mit Energiedichte und Hubble-Expansion)*

W. Freedman et al. (2024) aus Beobachungen mit Hilfe des neuen James Webb Teleskopes



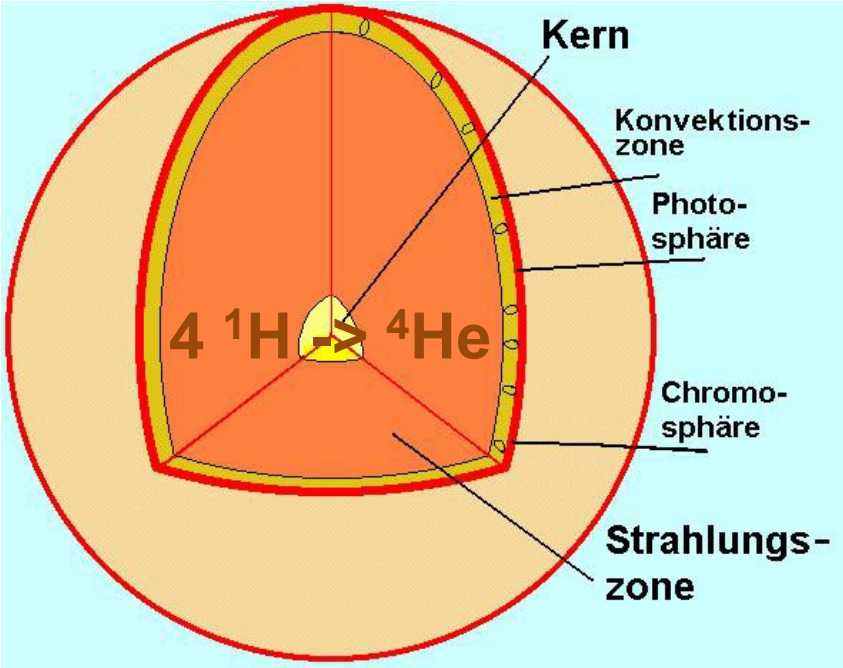

Fehlerverteilungen zur Bestimmung der Hubble-Konstanten aus unterschiedlichen Methoden [Planck und DESI Mikrowellenstrahlung aus dem Urknall, andernfalls aus Entfernungsmessungen mit Hilfe von Sternen: Cepheiden, Roten Riesen (TRGB) und speziellen Sternen auf dem asymptotischen Riesenast (JAGB)]. Die Resultate überlappen in ihren Fehlern und sind konsistent mit dem kosmologischen Standardmodell. Die in den letzten Jahren viel beschworende sogenannte Hubble-Tension (scheinbarer Widerspruch) kann damit vermieden werden.

# Warum sind Sterne stabil?



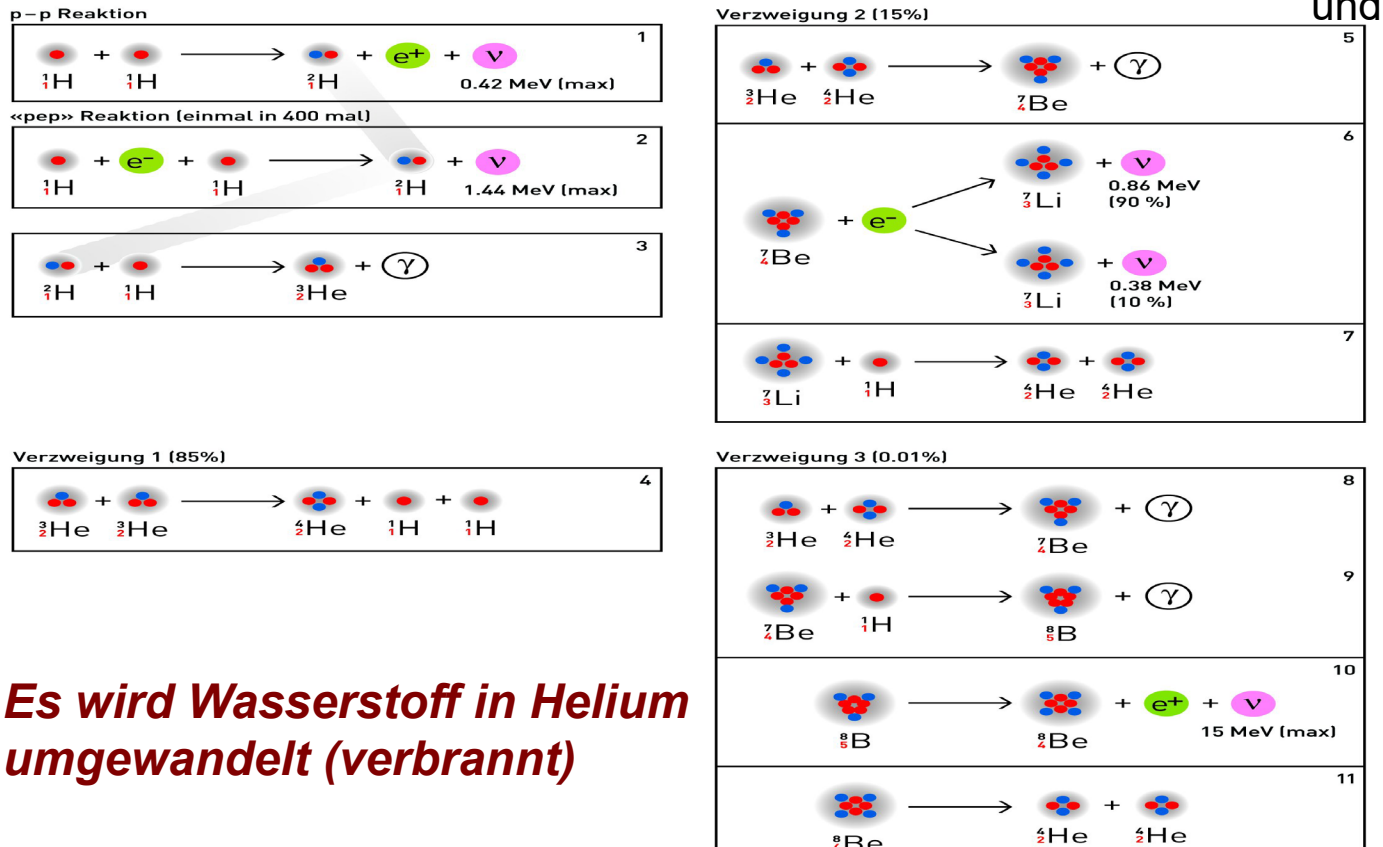

- Sterne würden durch ihre Masse unter ihrer Eigengravitation kollabieren
- sie werden stabilisiert durch den Druck des Gases aus dem sie bestehen, d.h. der Zustandsgleichung P=P(Dichte,Temp.)
- Kräftegleichgewicht

# Struktur der Sonne



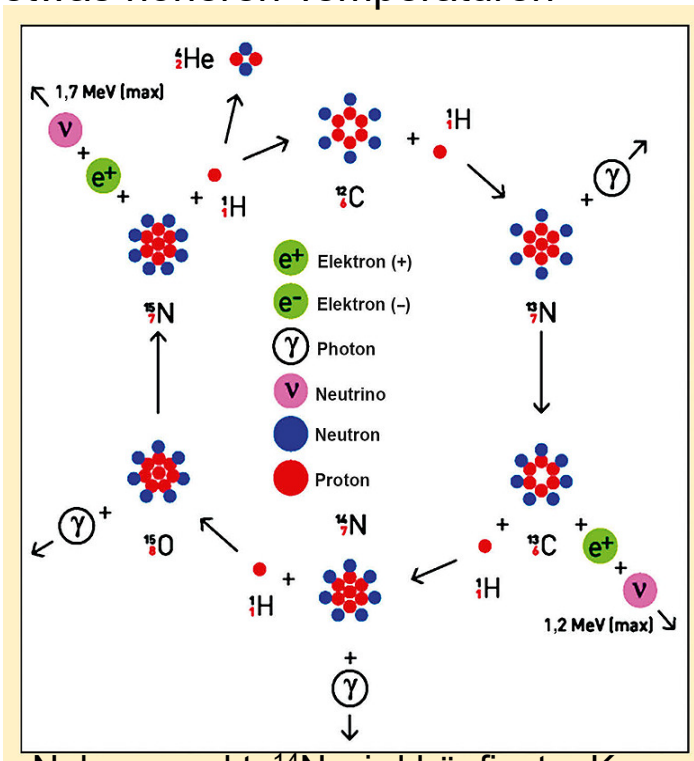

Wenn der Druck abhängig von Dichte und Temperatur ist, muss der Abkühlung durch Lichtabstrahlung durch neue Energiezufuhr ersetzt werden. Energiezufuhr durch Kern-fusionen im zentralen heissen Core

**Wasserstoffbrennen** – P-P Zyklen

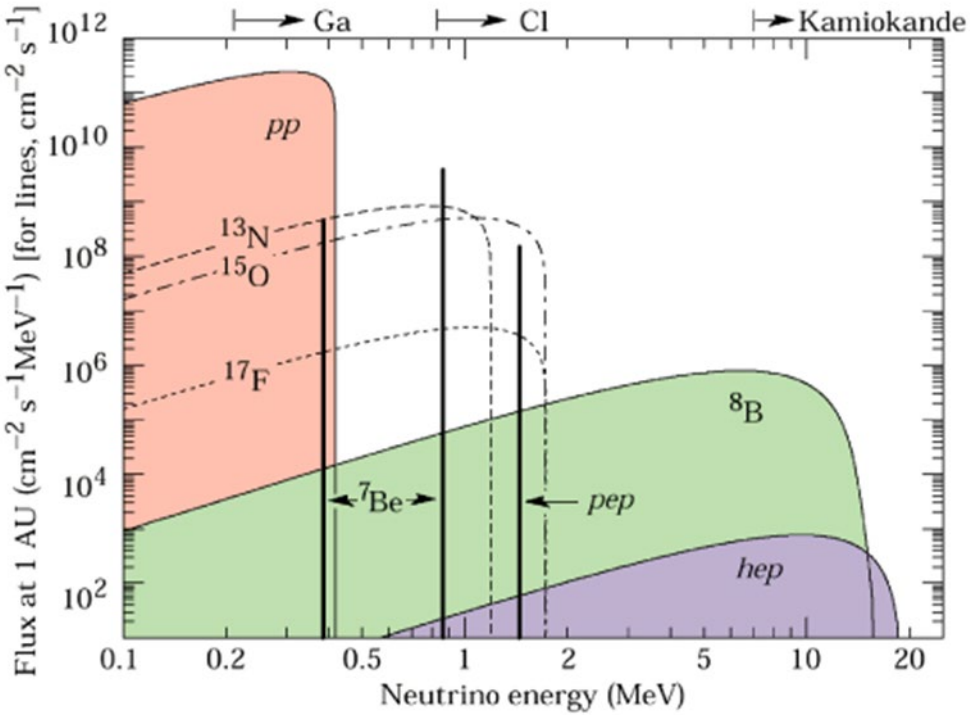



***Es wird Wasserstoff in Helium umgewandelt (verbrannt)***

**CNO-Zyklus** bei massereicheren Sternen und etwas höheren Temperaturen



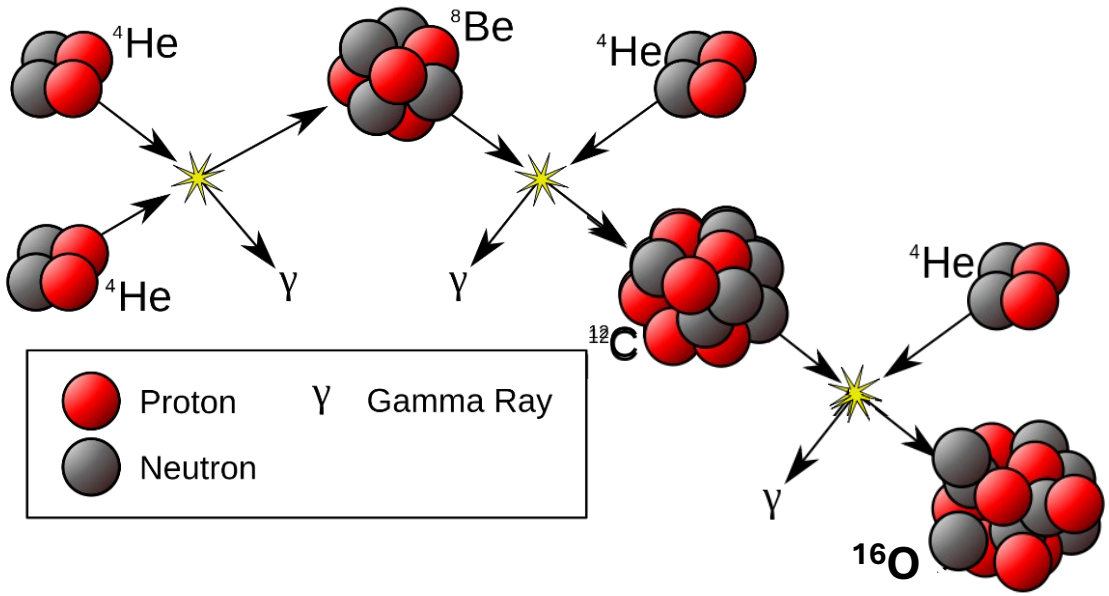

Nebenaspekt, $^{14}N$ wird häufigster Kern des CNO-Zyklus




Erzeugtes Neutrino-Energiespektrum aus dem Wasserstoffbrennen der Sonne

Das sogenannte Solare Neutrinoproblem wurde durch Beobachtungen mit dem Sudbury Neutrino Observatory (SNO) gelöst (Neutrino-Oszillationen, Nobelpreis für McDonald 2015)

# He-Brennen



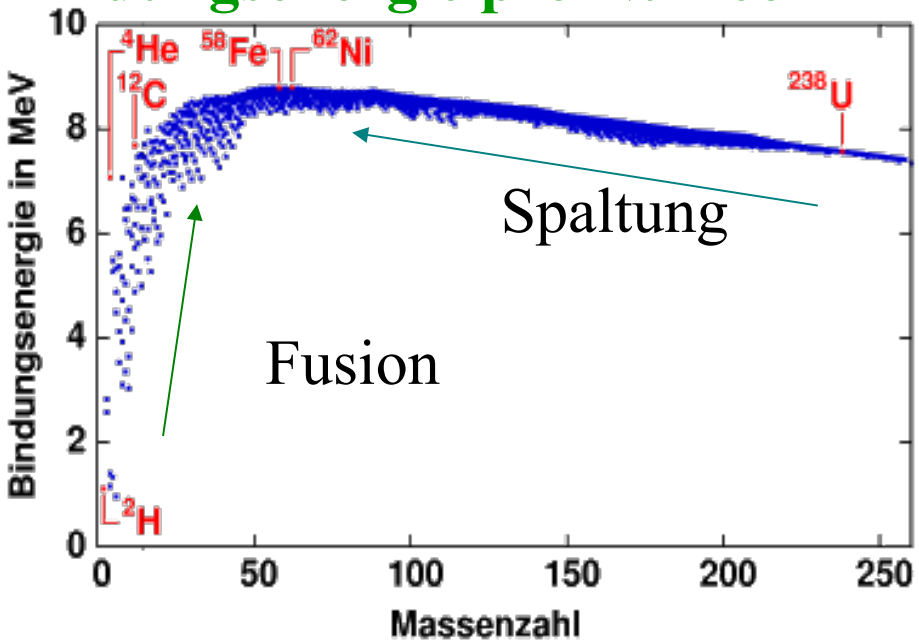

$^8$Be ist hoch instabil und zerfällt in etwa $10^{-16}$s, d.h. nur unter Dichtebedingungen, die eine weitere Einfangreaktion zu $^{12}$C zulassen, kann diese Barriere zu schwereren Elementen überwunden werden (nicht der Fall im Urknall)

# Weitere Brennphasen

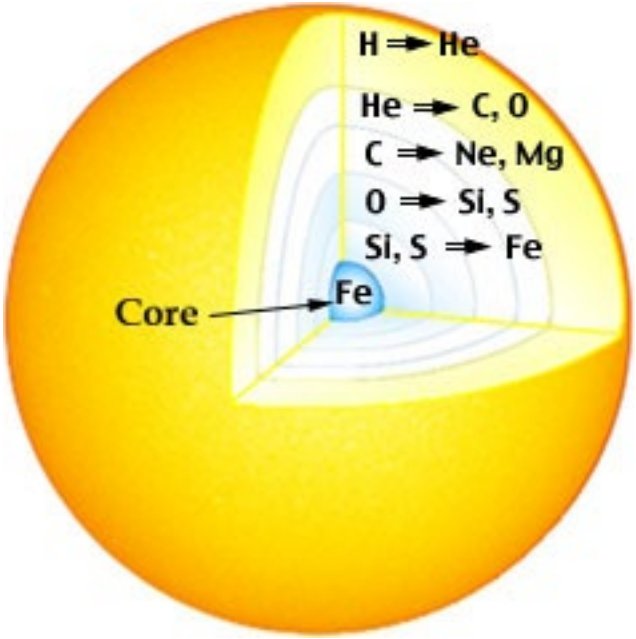
Nachdem der Wasserstoff im Zentrum verbraucht ist, kontrahiert dieses. Bei der Kontraktion wird Gravitationsbindungsenergie frei, die zur Erhöhung der Temperatur führt. Das wiederum ermöglicht die Fusion schwererer Atomkerne (erst Helium, dann Kohlenstoff, etc.), da bei Kollisionen mit höherer Geschwindigkeit die elektrostatische Abstossung der schwereren positiv geladenen Atomkerne überwunden warden kann. Bis zur Erzeugung von Elementen wie Fe und Ni wird dabei Energie freigesetzt.

$$B/A=[Zm_p+Nm_n-M(Z,N)]c^2/(N+Z)$$

**Bindungsenergie pro Nukleon**

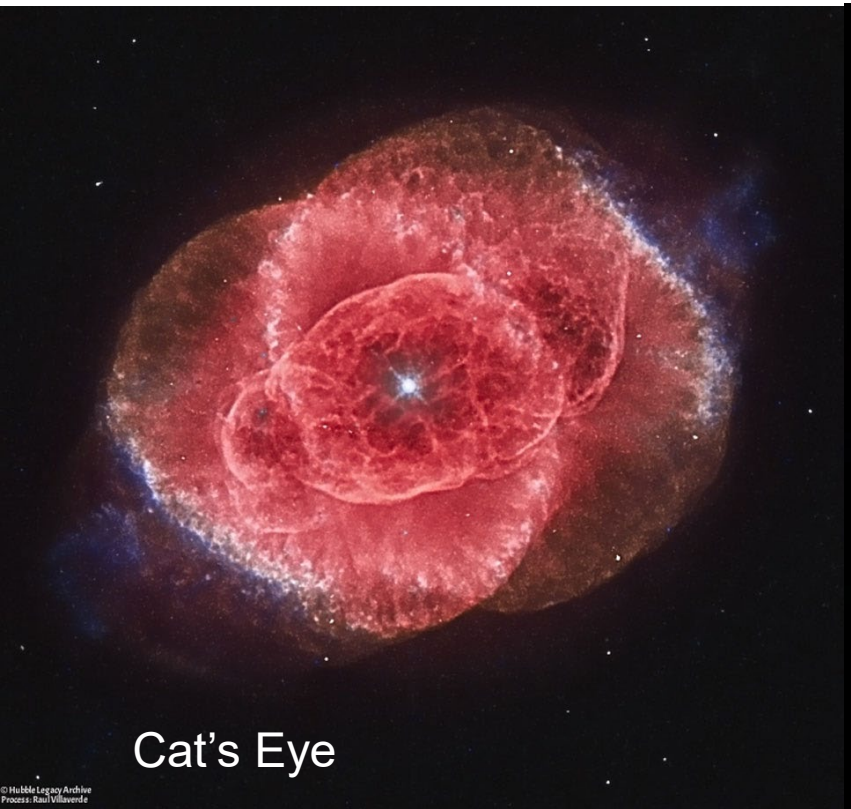


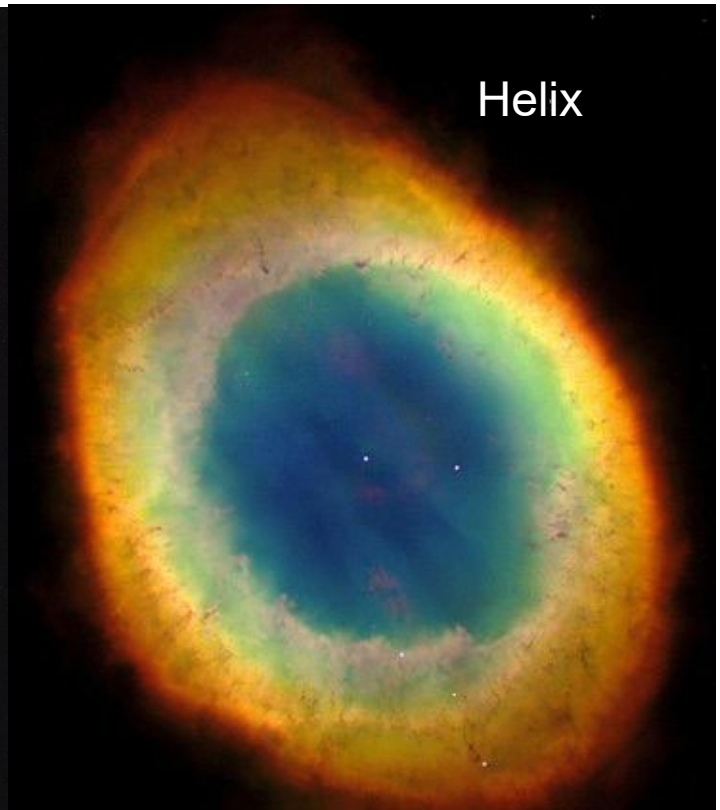

| Brennphase | Brennstoff | Temperatur | Haupt-Produkte | Wichtige Reaktionen |
|---|---|---|---|---|
| Wasserstoff-Brennen | $^1$H | $1–4\cdot10^7$ K | $^4$He ($^{14}$N) | pp- und CNO-Zyklen |
| Helium-Brennen | $^4$He | $1–2\cdot10^8$ K | $^{12}$C, $^{16}$O | Triple-α-Reaktion |
| Kohlenstoff-Brennen | $^{12}$C | $6–8\cdot10^8$ K | $^{20}$Ne, $^{24}$Mg | $^{12}$C-Fusion |
| Neon-Brennen | $^{20}$Ne | $1–2\cdot10^9$ K | $^{16}$O, $^{24}$Mg | Photodesintegration und α-Einfang |
| Sauerstoff-Brennen | $^{16}$O | $2\cdot10^9$ K | $^{28}$Si, $^{32}$S (bis zu $^{40}$Ca) | $^{16}$O-Fusion und α-Einfang |
| Silizium-Brennen | $^{28}$Si | $3–4\cdot10^9$ K | $^{56}$Fe, $^{58}$Ni, $^{60}$Ni | Photodesintegration, p- und α-Einfang |




# massereiche Sterne mit mehr als 8 Sonnenmassen durchlaufen alle Brennphasen bis zum Siliziumbrennen

masseärmere Sterne durchlaufen nur das Wasserstoff- und Heliumbrennen und werden weisse Zwerge (mit der Maximalmasse von 1.4 Sonnenmassen) nachdem die äusseren Hüllen als Wind abgeblasen worden sind. (Objekte unterhalb dieser Grenzmasse lassen sich auf Grund des Drucks des Elektronengases nicht so weit komprimieren, dass Temperaturen für das Kohlenstoffbrennen erreicht würden)

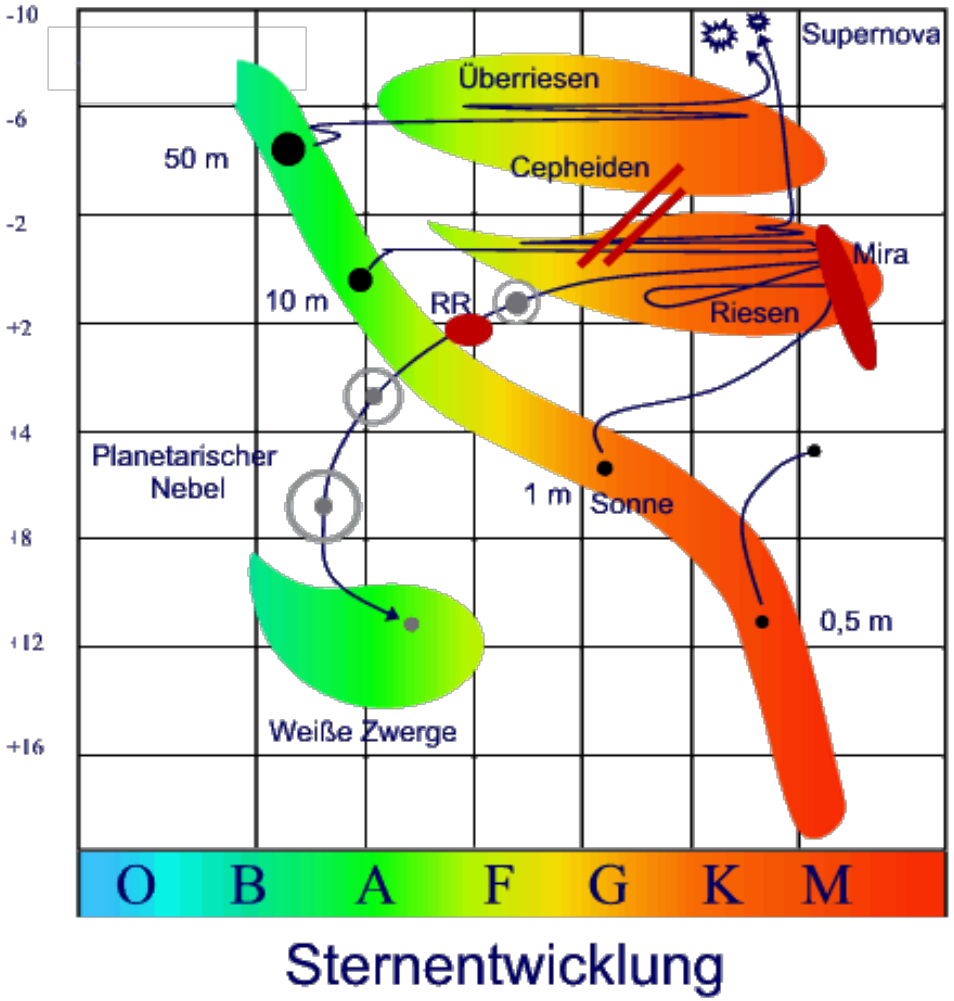


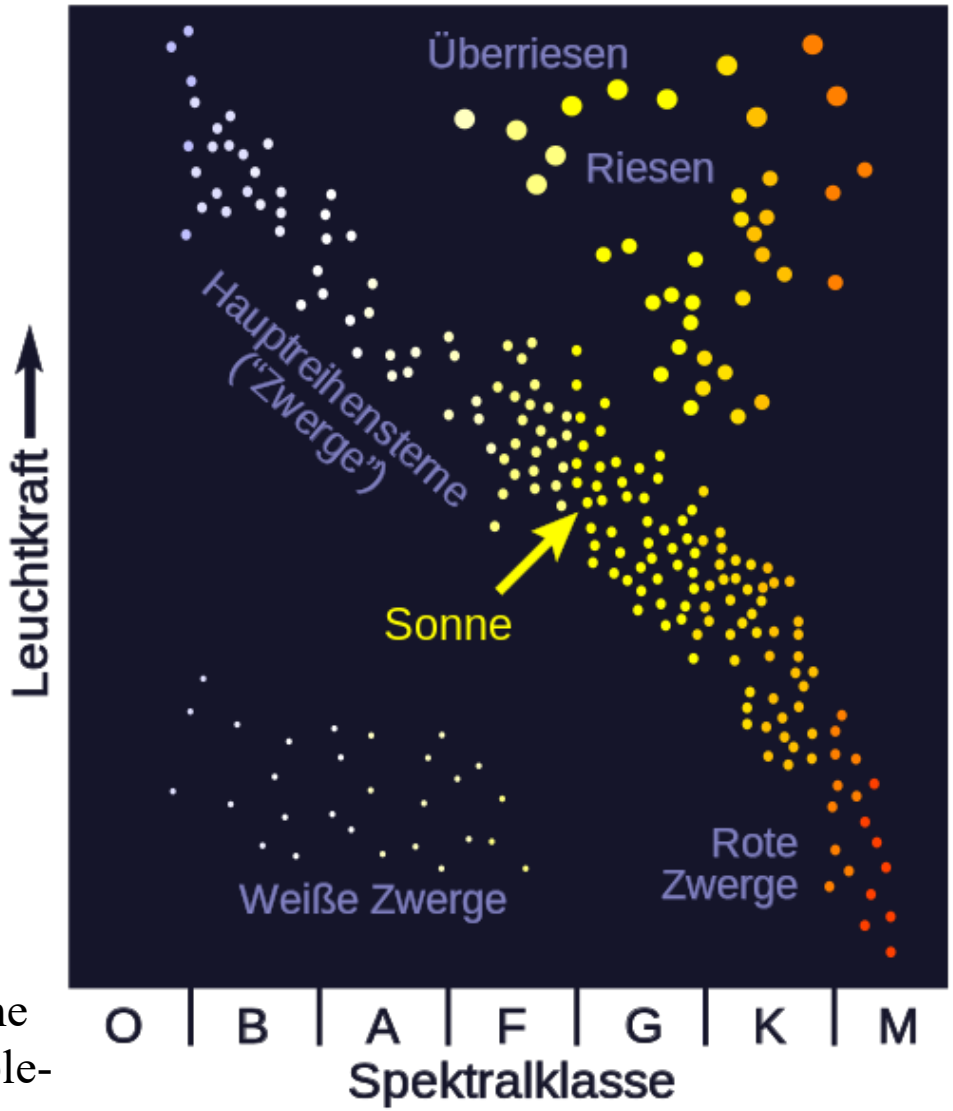

Planetarische Nebel sind abgeblasene Sternwinde und enthalten im Endstadium im Zentrum Weisse Zwerge

# Entwicklungswege im Hertzsprung-Russell-Diagramm

Als Funktion der Zeitentwicklung für Sterne unterschiedlicher Masse




Als Schnappschussbeobachtung zu einem festen Zeitpunkt

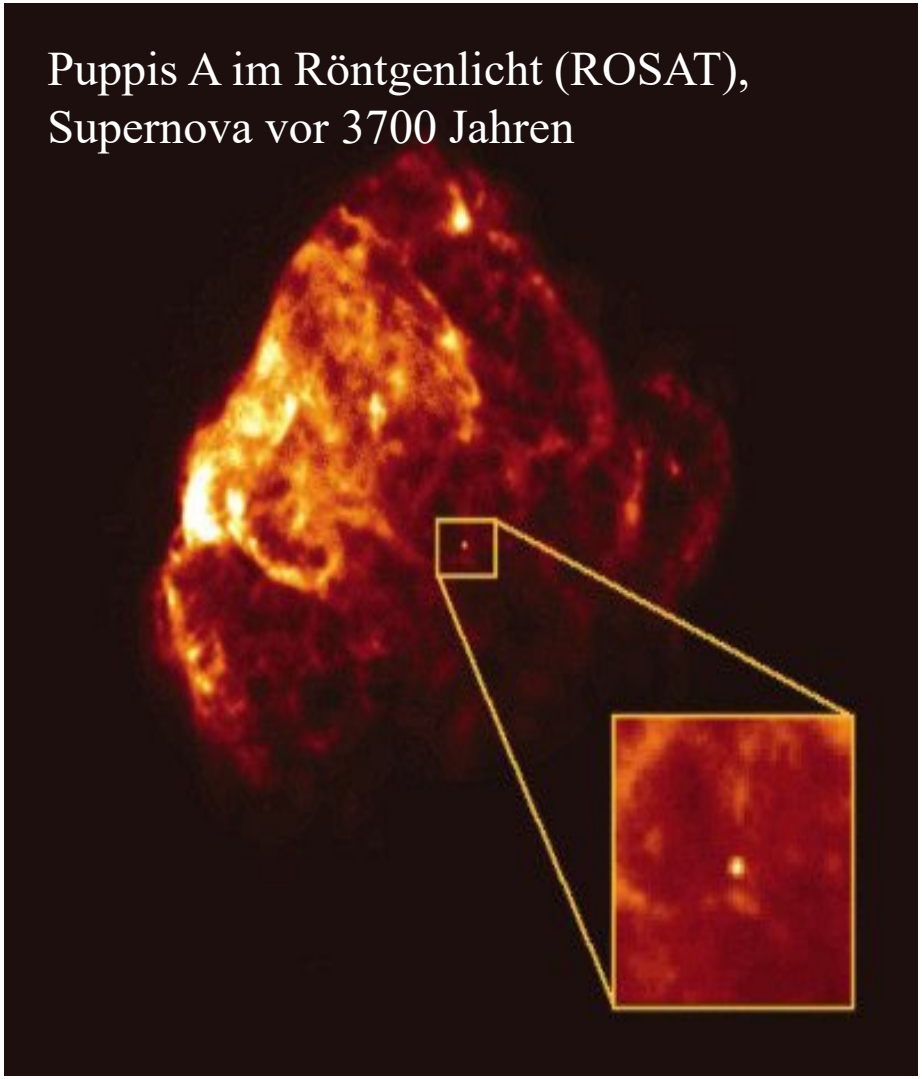



beinhaltet auch Cepheiden, Rote Riesen, Asymptotische Riesenaststerne, wie sie bei der Bestimmung der Hubble-Konstanten benutzt wurden (1m = Sonnenmasse)

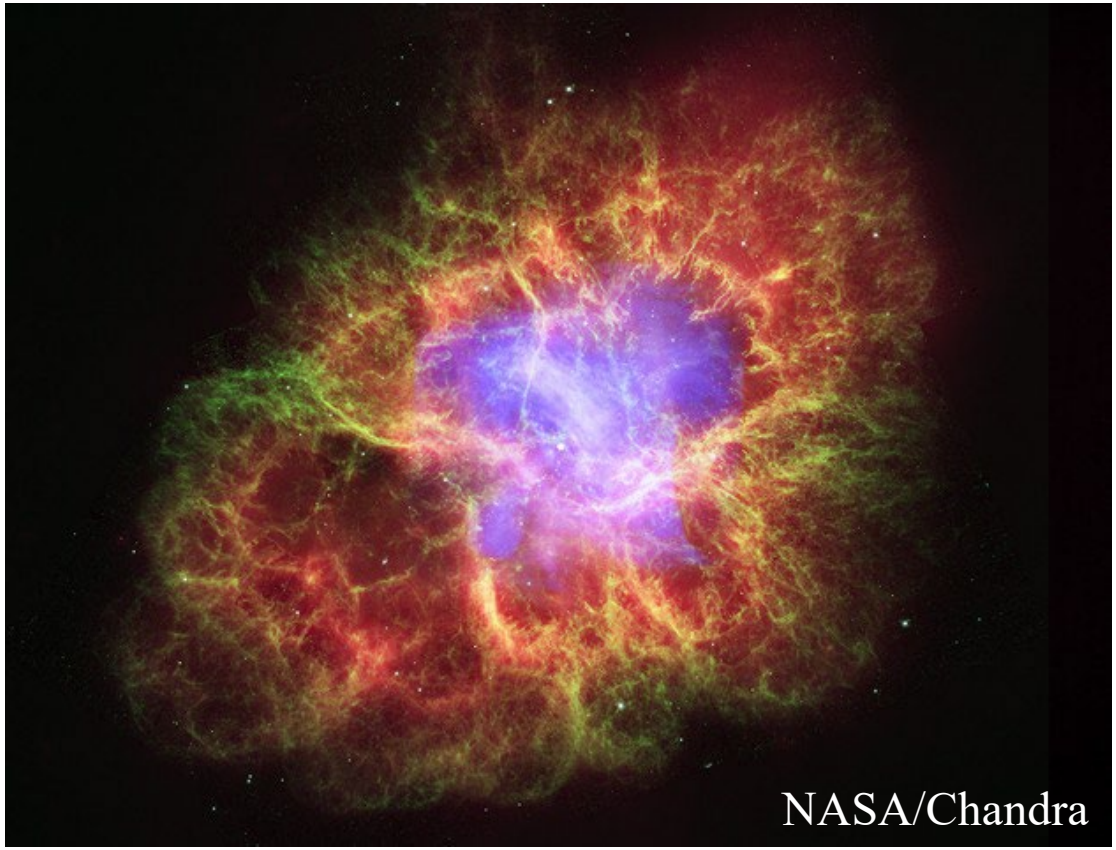
# Supernova 1987A (nach und vor Explosion)

**Zusätzlich wurden Stunden vor dem Ausbruch durch mehrere Detektoren (hauptsächlich Kamiokande in Japan) Neutrinos gemessen, die einer Gesamtenergie von etwa $10^{53}$erg entsprachen ($10^{46}$ J)**

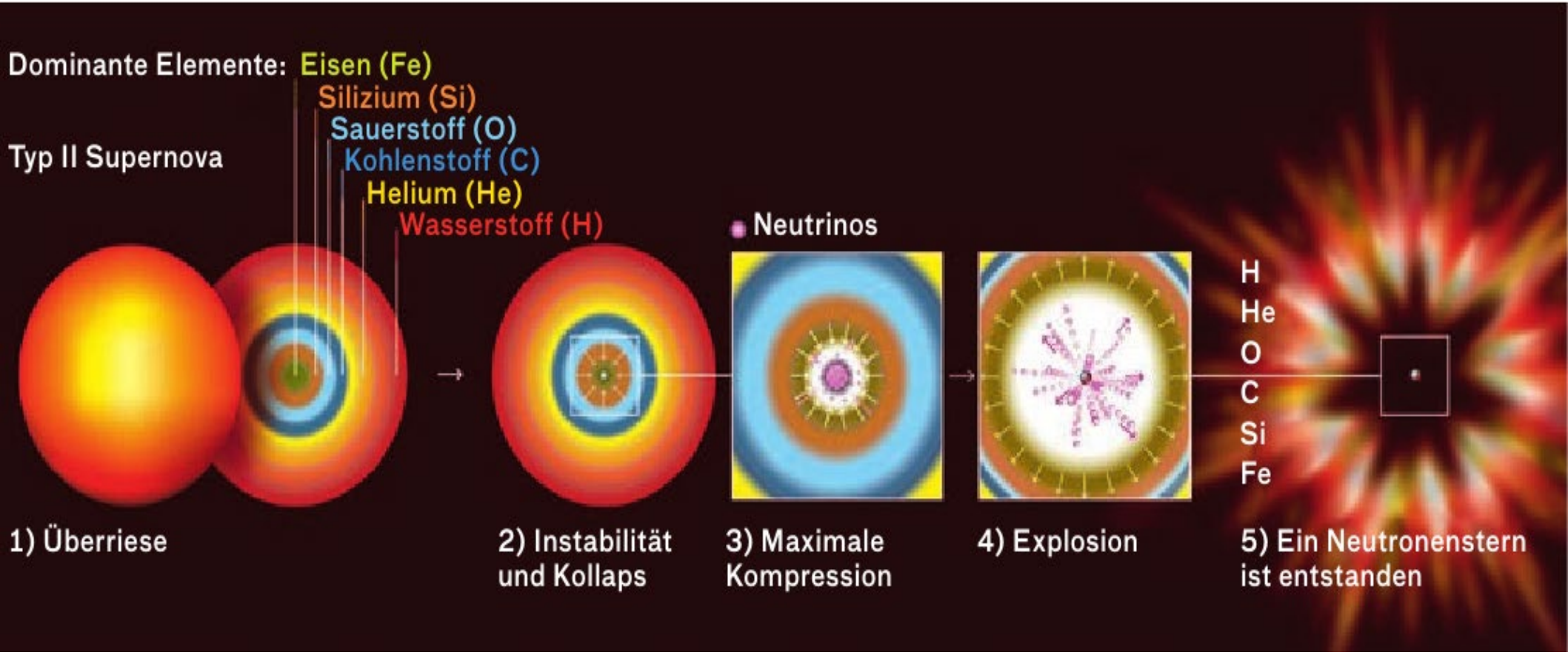
# Der Neutronensterne in Supernova-Ueberresten




Krebsnebel, Explosion vor 1058 Jahren



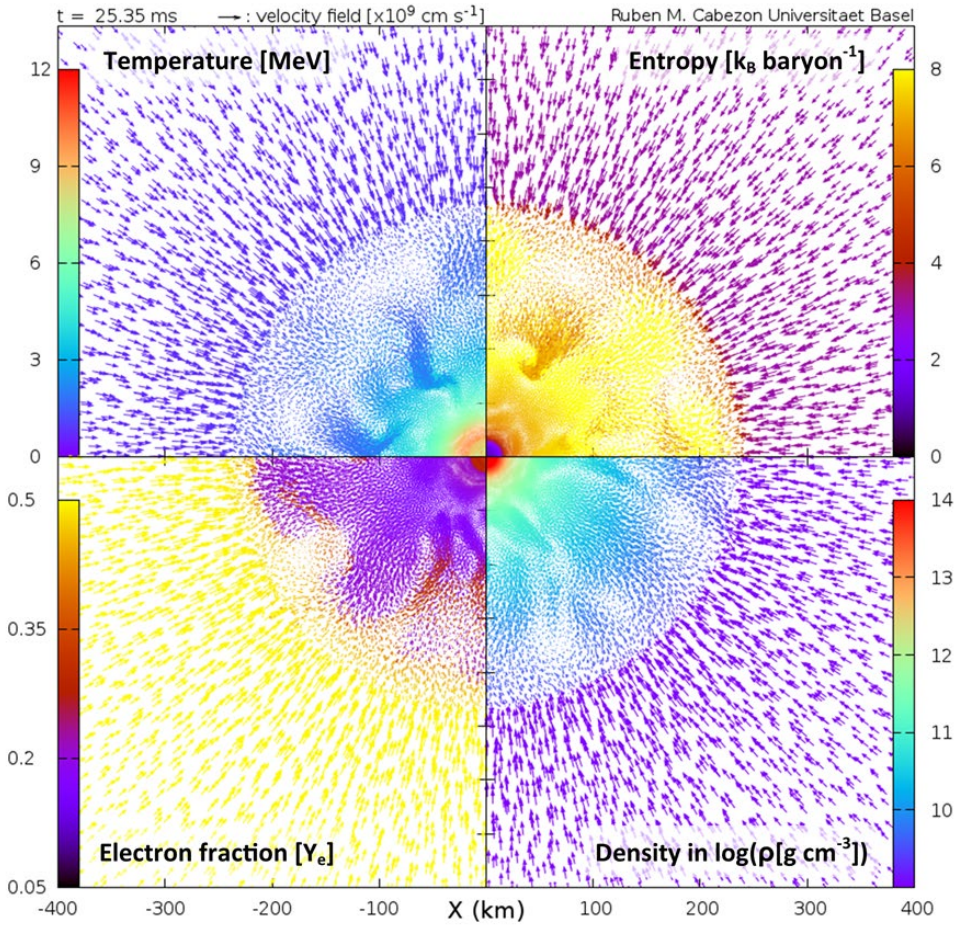
# Core-Kollaps-Supernovae und Neutronensterne als Endstadium massereicher Sterne




nach Durchlaufen aller Brennphasen kollabiert der Fe-Core zu einem heissen Proto-Neutronenstern, der durch Neutrinoabstrahlung kühlt, welche wiederum die umgebende Hülle aufheizen und mit einer explosiven Stosswelle abwerfen

- oberhalb von ursprünglich 20-40 Sonnenmassen entstehen Schwarze Löcher

# Die Wirklichkeit ist etwas komplizierter: drei-dimensionale Simulationen

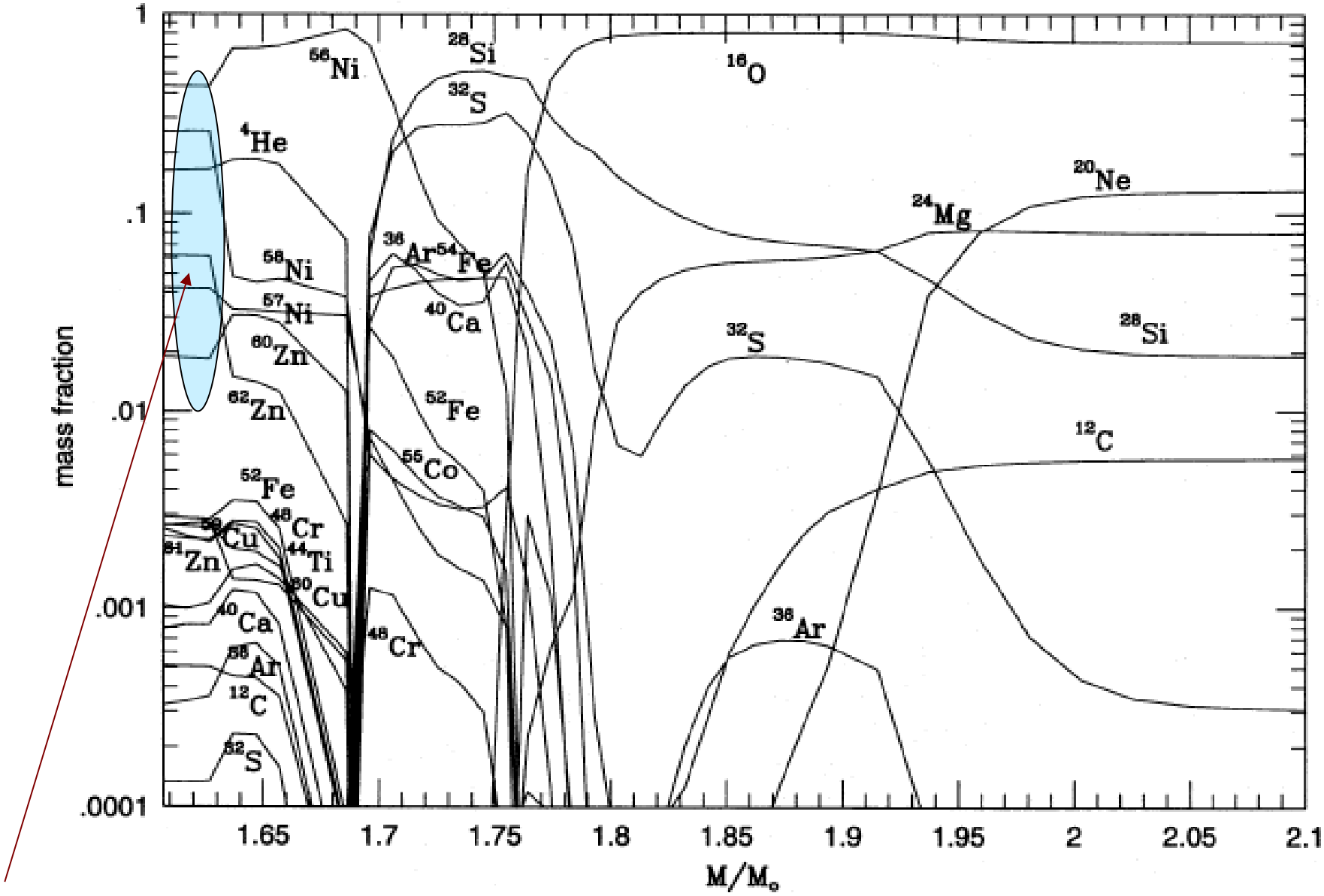


Anfangsphase: Heizen durch die Energie der ausströmenden Neutrinos, sich bildender zentraler Neutronenstern und turbulentes Verhalten innerhalb der sich bildenden Stossfront (R. Cabezon 2024)

Die Reaktionen $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ und $\nu + n \rightarrow p + e^-$ heizen und bestimmen das Verhältnis n/p bzw. Ye.

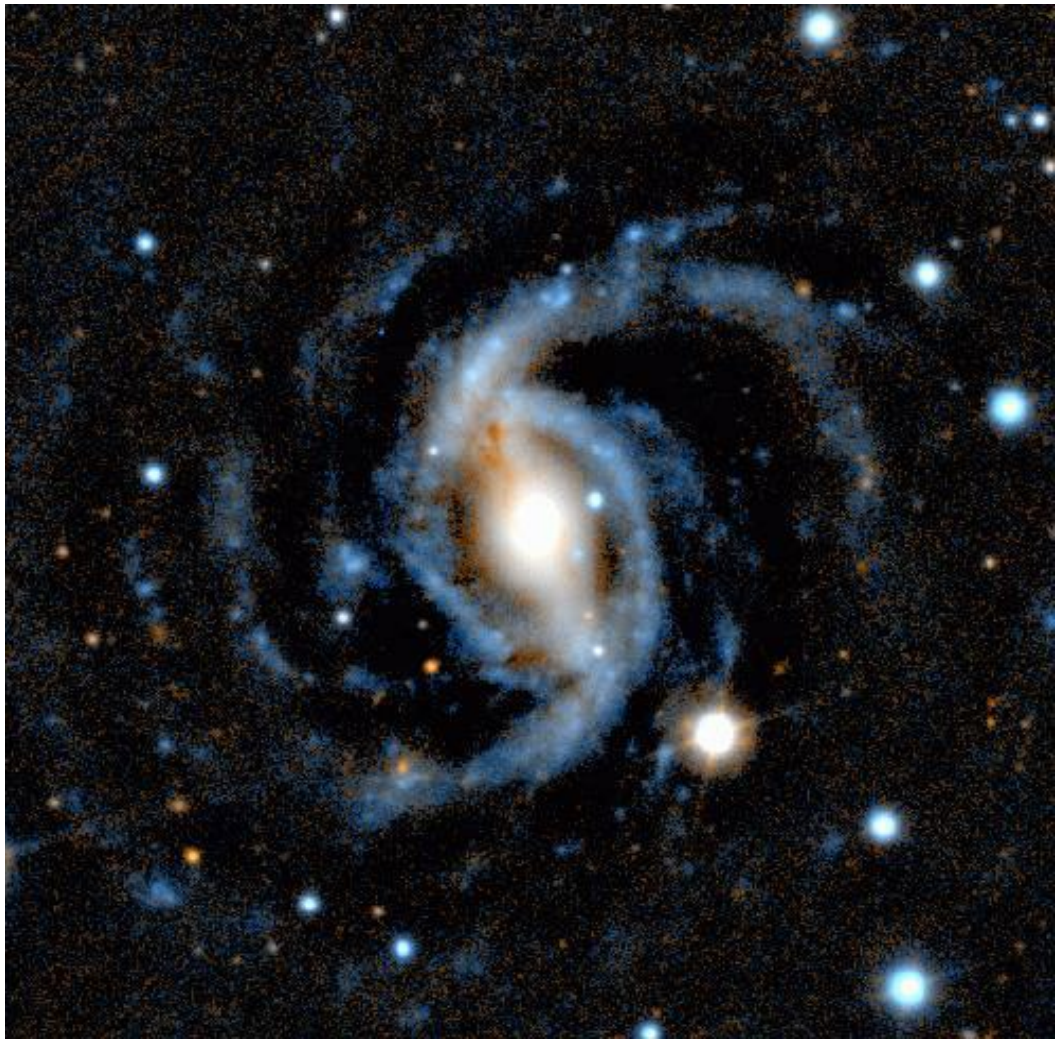
Die Explosion ejektiert sowohl neutronen- wie protonenreiches Material (Ye grösser/ kleiner 0.5 – siehe Farbgebung) (Burrows 2021)

# Ergebnis der explosiven Nukleosynthese



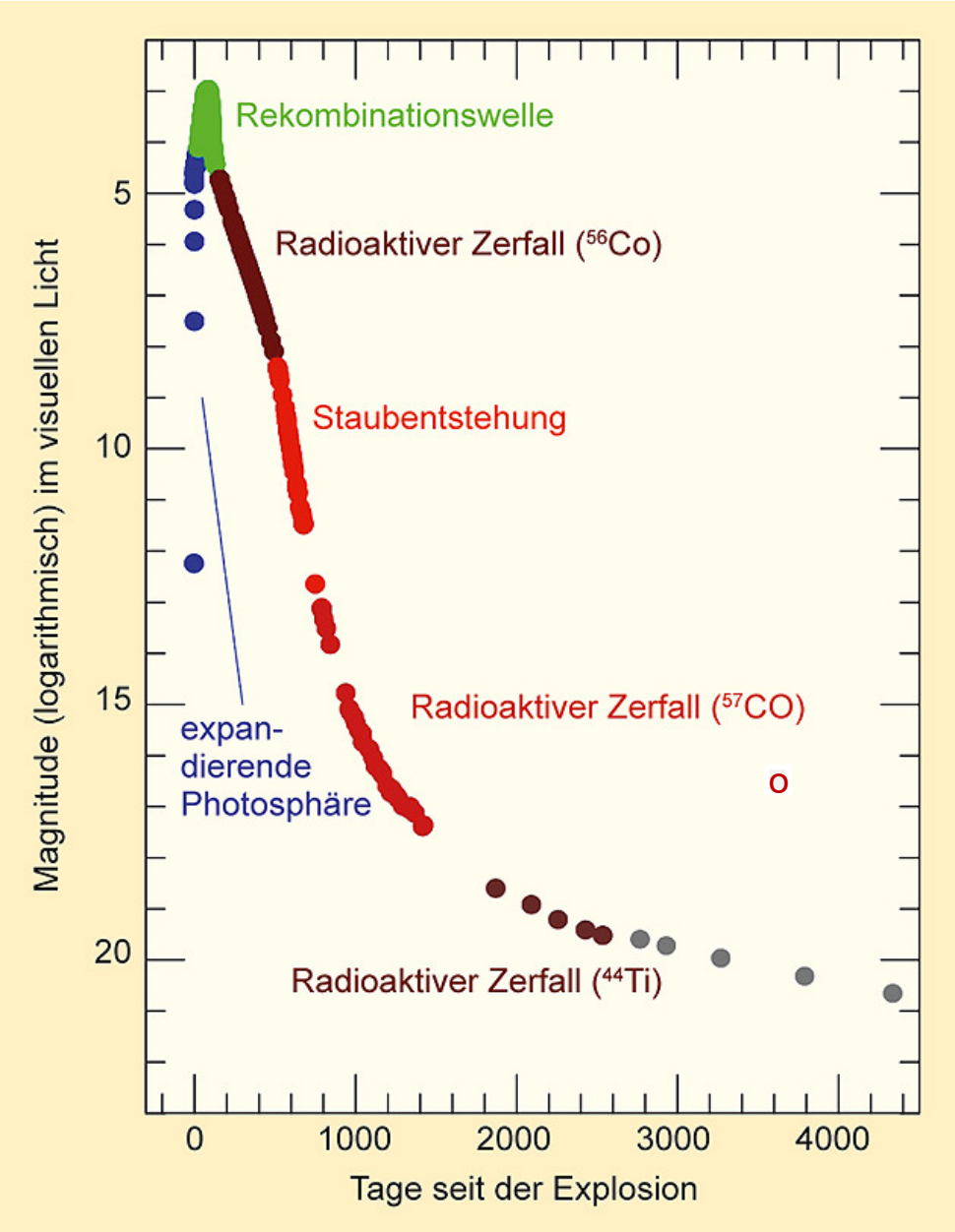

Häufigkeitsprobleme der Fe-Gruppe in innersten Zonen durch Neutrinoeinfluss behoben (Fröhlich et al. 2006, Ebinger et al. 2020, Ghosh, Wolfe, Fröhlich 2022)

# Supernovaexplosionen, so hell wie Galaxien



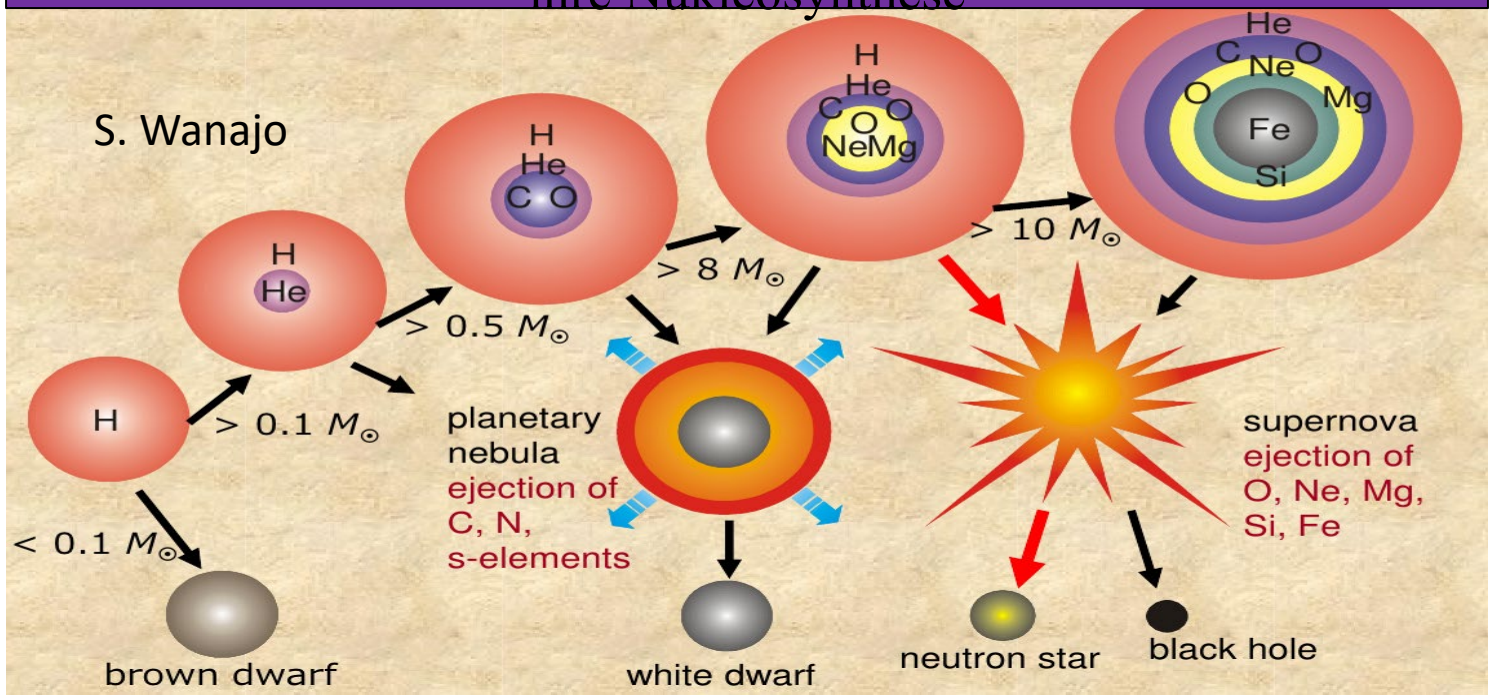
Galaxie NGC5921 mit Supernova

Lichtkurve der SN 1987A

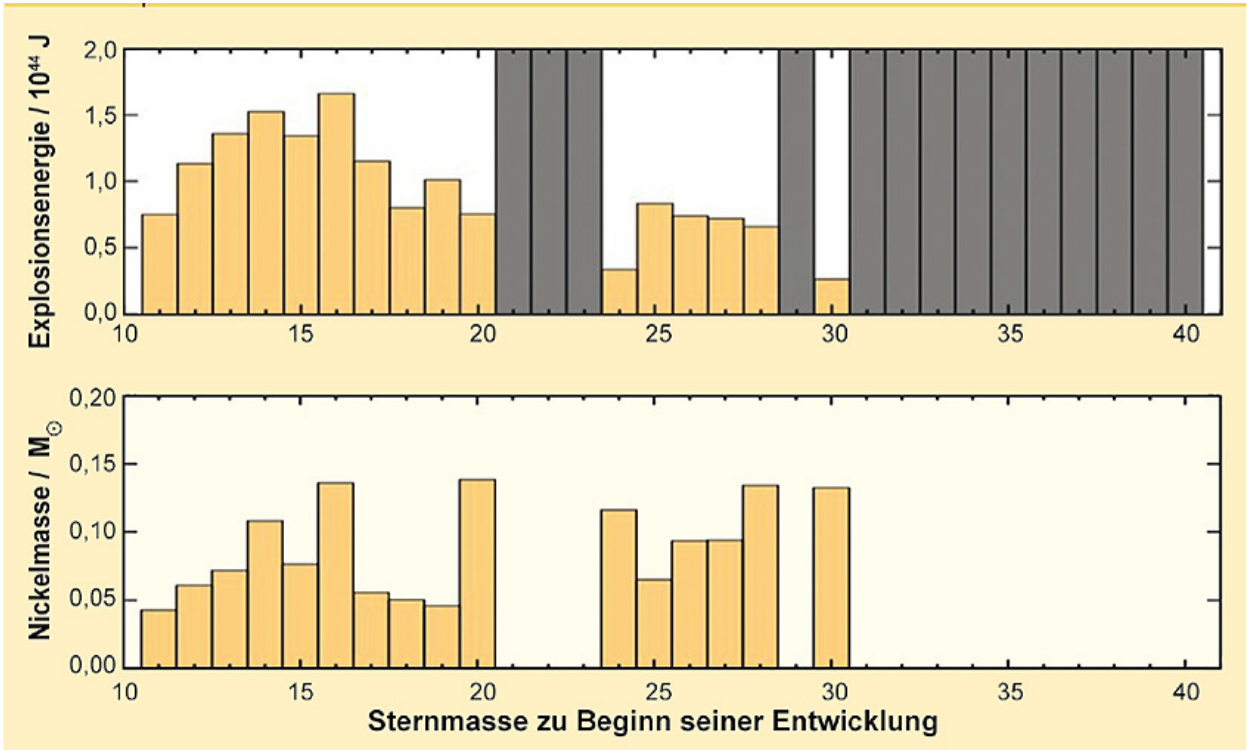



In den innersten explosiv prozessierten Massenzonen, werden Atomkerne mit hohen Bindungs-energien erzeugt, d.h. um Fe/Ni/Zn. $^{56}$Ni ist ein «doppelt magischer» Kern (N=Z=28) ->$^{56}$Co->$^{56}$Fe

# Das Schicksal von (Einzel-)Sternen als Funktion ihrer Masse und ihre Nukleosynthese




K. Ebinger et al. (2020) Explosionsenergie und ausgestossene Nickelmasse $^{56}Ni \rightarrow ^{56}Co \rightarrow ^{56}Fe$



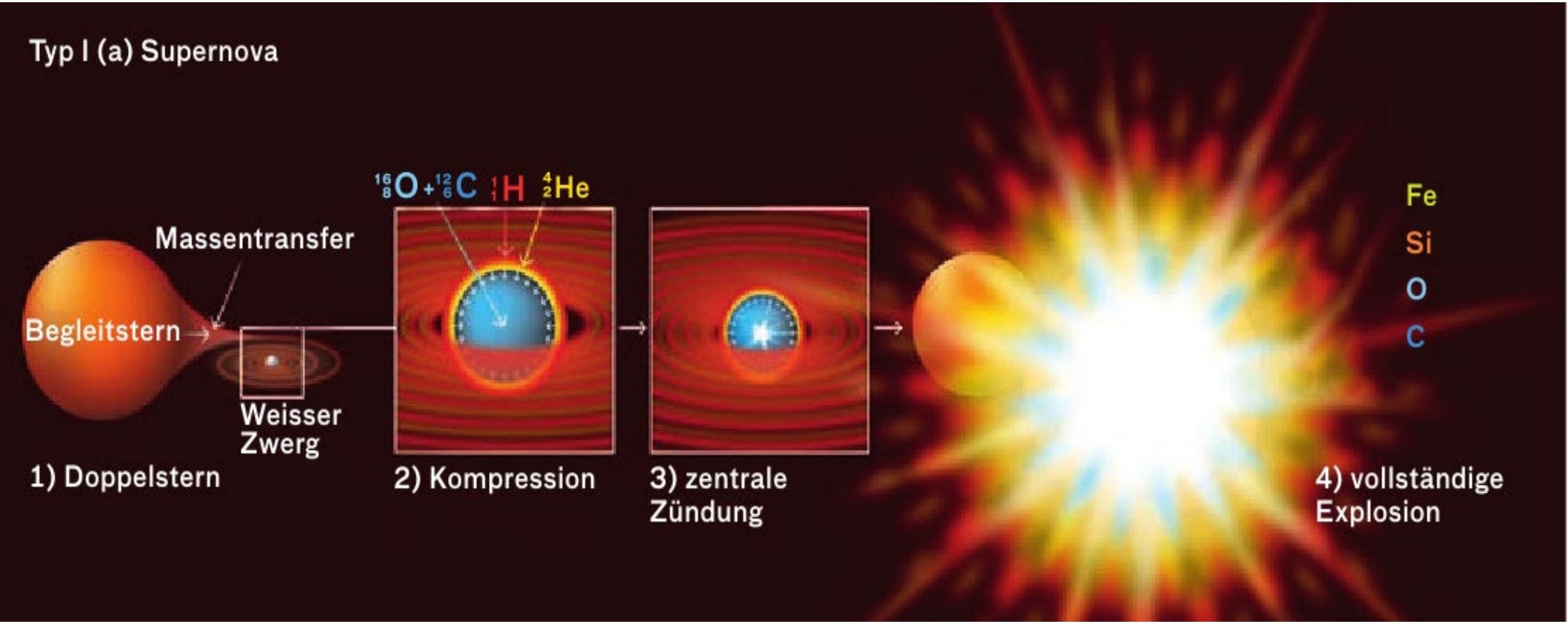
# Massenaustausch in Doppelsternsystemen

durch Anwachsen des Radius eines Sterns (z.B. Roter Riese) wird der Abstand zu seinem Zentrum so gross, dass die Gravitionskraft in Richtung auf den Begleiter grösser ist (Massentransfer)

aus der Hülle lagert sich unverbrannter Wasserstoff an

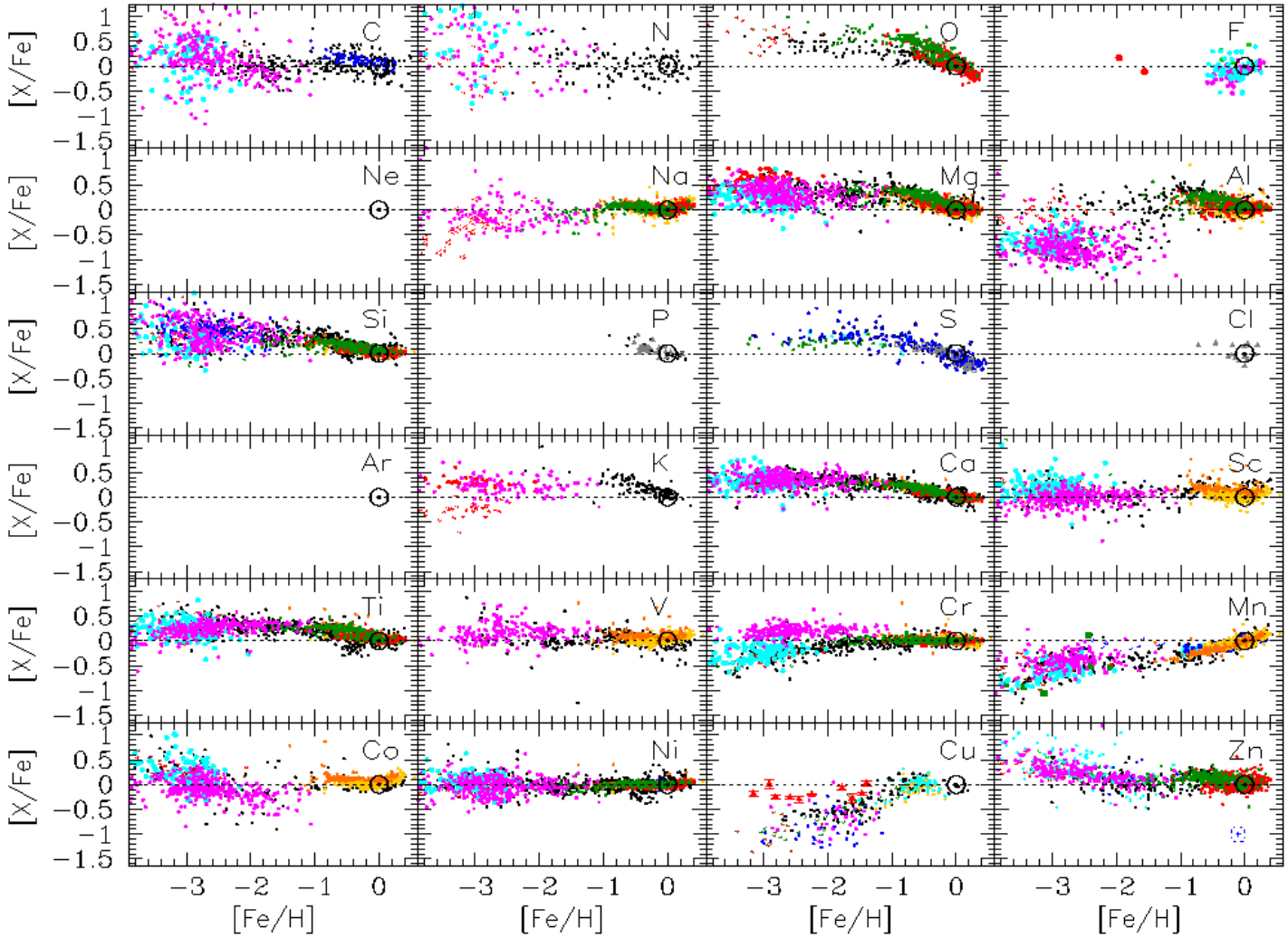
bei Erreichen einer Grenzmasse zündet explosives Wasserstoffbrennen (Nova auf weissem Zwerg, Röntgenburst auf Neutronenstern)

# Typ Ia-Supernovae durch Massenübertrag in Doppelsternsystemen




ein weisser Zwerg in einem Doppelsternsystem wächst durch (stärkerem) Massenübertrag (oberhalb einer kritischen Grenze) zur maximalen Chandrasekharmasse, der WZ wird instabil, kontrahiert, zündet und explodiert vollkommen (etwa 0.6 Sonnenmassen $^{56}$Ni->$^{56}$Fe werden erzeugt).

# Spektren alter Sterne informieren über die Element-entwicklung in unserer Galaxie (der Milchstrasse)

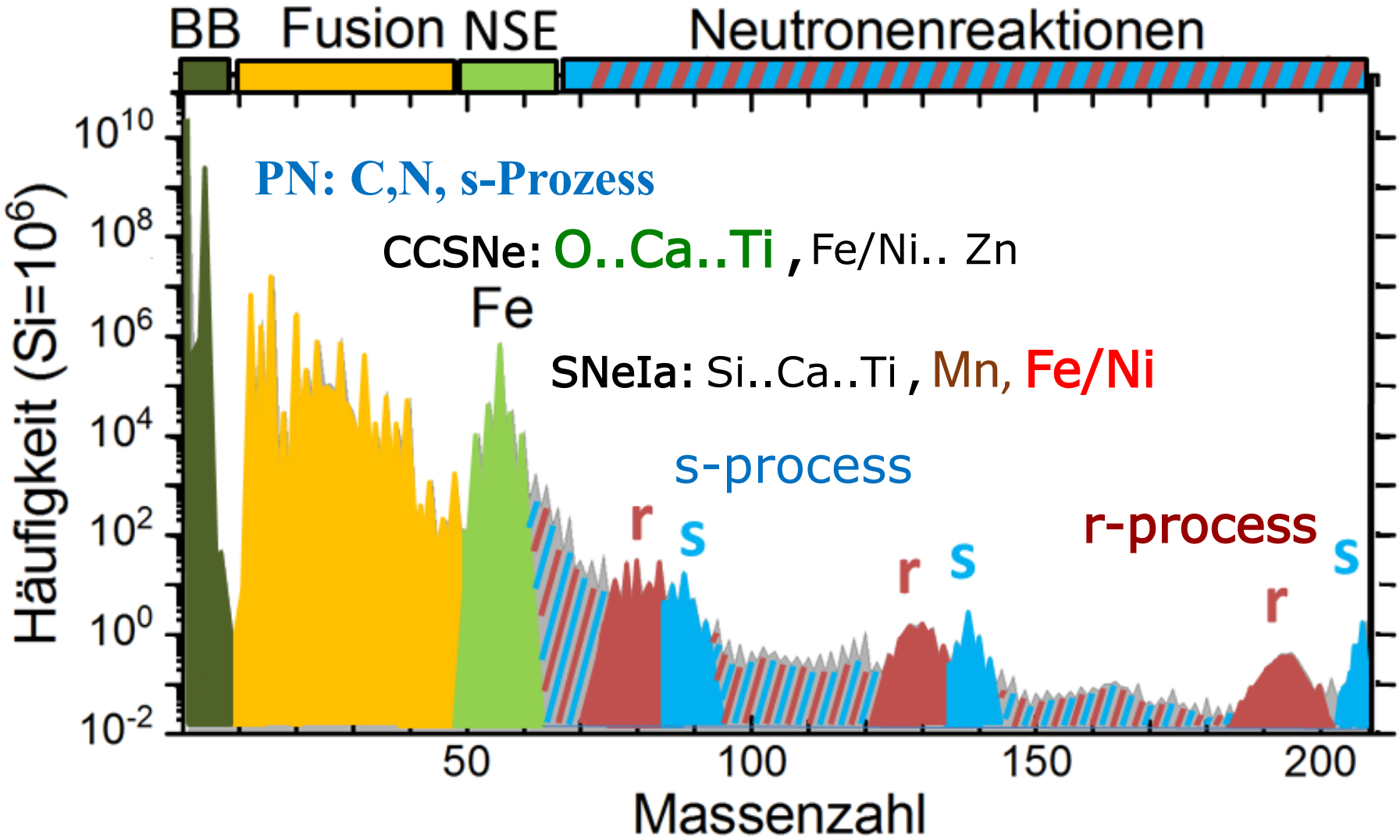



von
N. Prantzos

Die Verhältnisse der sogenannten alpha-Elemente (X=O,Mg,Si,S,Ca,Ti) variieren mit der Anreicherung von Eisen (Fe), d.h. der Zeit. Anfänglich (verursacht durch Core-Kollaps-Supernovae) sind die Verhältnisse zu Fe (z.B. O/Fe) grösser als das solare Verhältnis (logarithmisch = 0, 0.5 bedeutet einen Faktor 3 grösser als das solare Verhältnis). Im Laufe der Entwicklung kommen verspätet Typ Ia-Supernovae zum Zuge: (a) massearme Sterne entwickeln sich langsam um Weisse Zwerge zu bilden, (b) die Entwicklung eines Doppelsternsystems mit weissem Zwerg bis zur Typ Ia-Supernovaexplosion benötigt ebenfalls Zeit. Typ Ia-Supernovae erzeugen grosse Mengen an Eisen (Fe) und reduzieren das Verhältnis der alpha-Elemente zu Fe. [Fe/H]=-1 entspricht 1 Milliarde Jahren, -2 100 Millionen Jahren

BBN macht $^{1,2}$H, $^{3,4}$He, $^{7}$Li

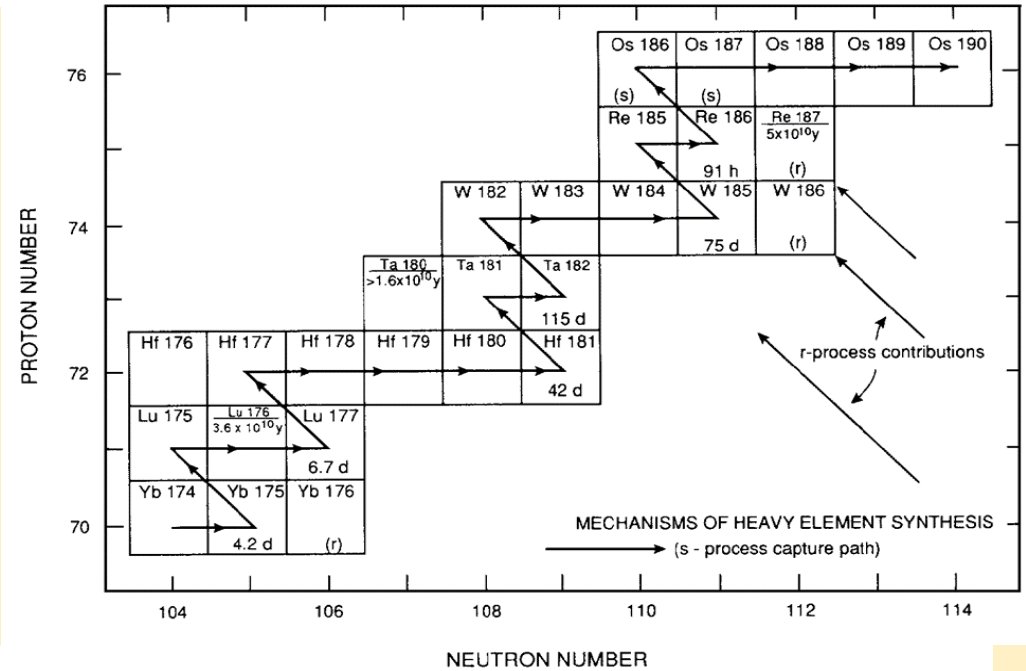
Wie entstehen Elemente schwerer als Eisen?




**Langsamer (s=slow) und schneller (r=rapid) Neutroneneinfang**

**Erste Ideen 1957 von B$^2$FH und Cameron mit der Postulierung von H- und He-Brennen, alpha-Prozess, e-Prozess, x-Prozess und r- und s-Prozess.**

# s-Prozess (slow neutron capture)




Neutronen entstehen bei alpha (He-Kern)-Einfängen im Heliumbrennen massearmer Sterne (z.B. $^{4}He + ^{22}Ne$, $^{4}He + ^{13}C$ -> ergibt $^{25}Mg$ bzw. $^{16}O$ + **n**)

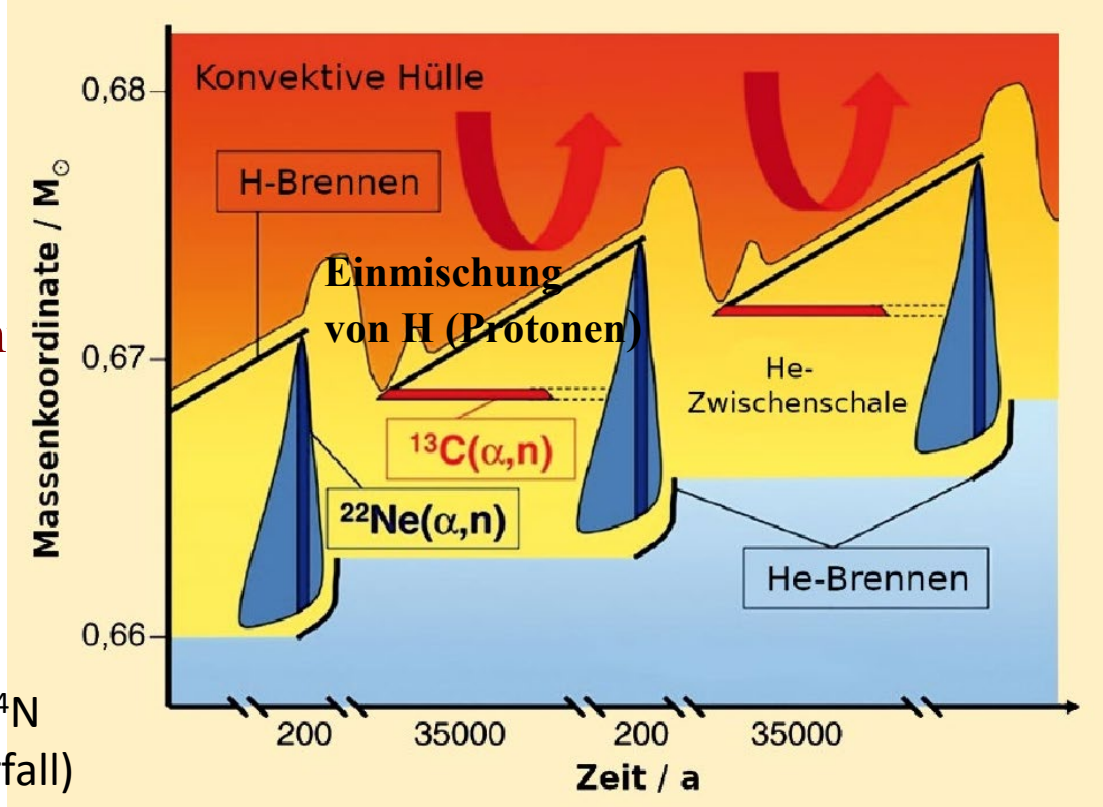
mögliche Vernichtung des Kerns (Z,A) durch Beta-Zerfall oder Neutronen-einfang. Bei geringen Neutronen-dichten gilt immer $\tau_n > \tau_\beta$

d.h. Beta-Zerfall von (Z,A) nach (Z+1,A)

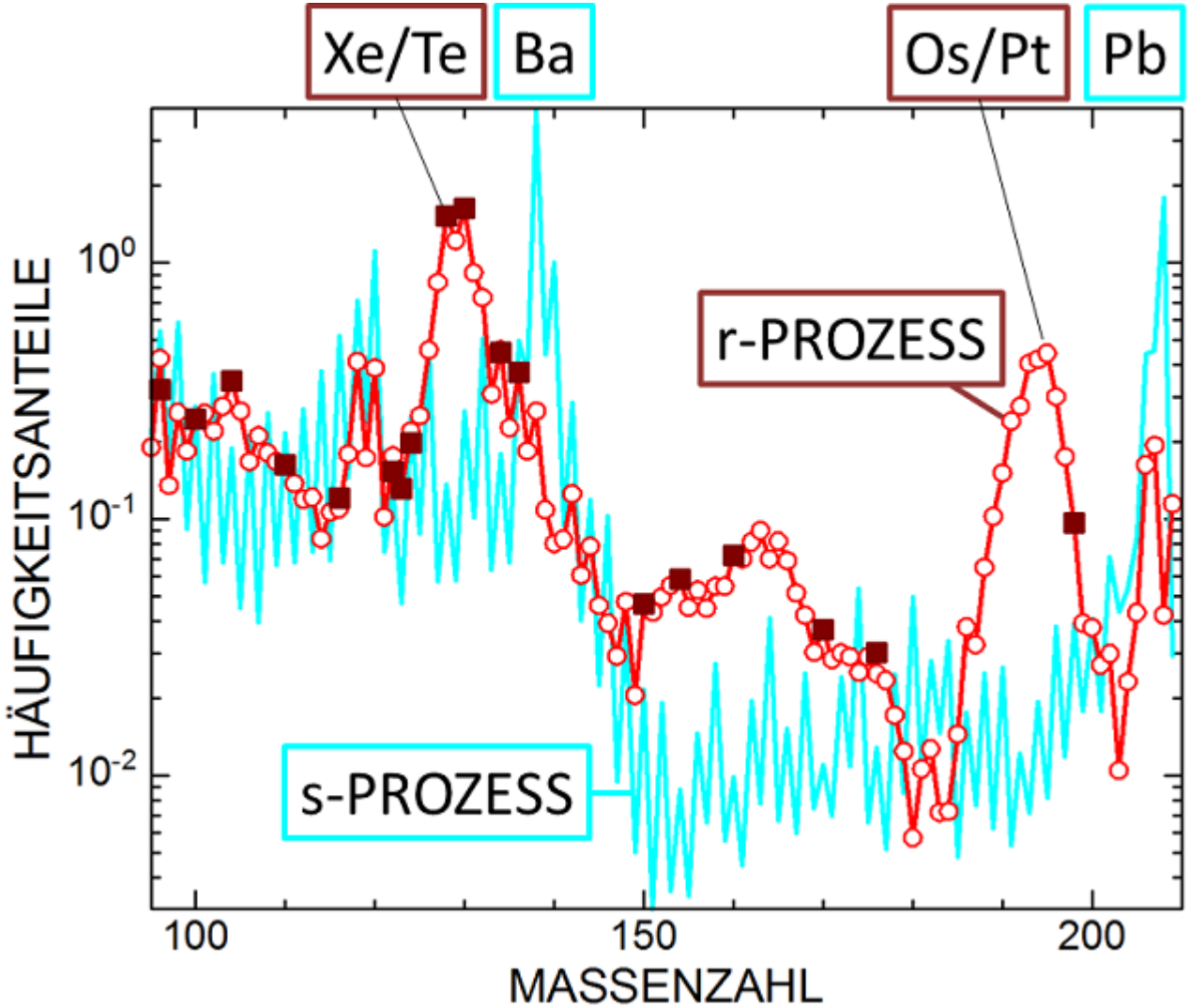
und der Reaktiuonsfluss durch den s-Prozess-Pfad wird auschliesslich durch die Geschwindigkeit der Neutroneneinfänge bestimmt.

es stellt sich nahezu ein Flussgleichgewich ein, Häufigkeitsmaxima entstehen an Neutronenschalenabschlüssen, wo Neutroneneinfangsraten klein sind.

Instabile Pulse von He-Schalenbrennen in massearmen Sternen, wo H und He-Schale sehr nah beieinander liegen ($^{22}Ne$ aus α-Einfängen an $^{14}N$ aus CNO-Zyklus, $^{13}C$ aus $^{12}C$+p->$^{13}N$->$^{13}C$ (beta-Zerfall)

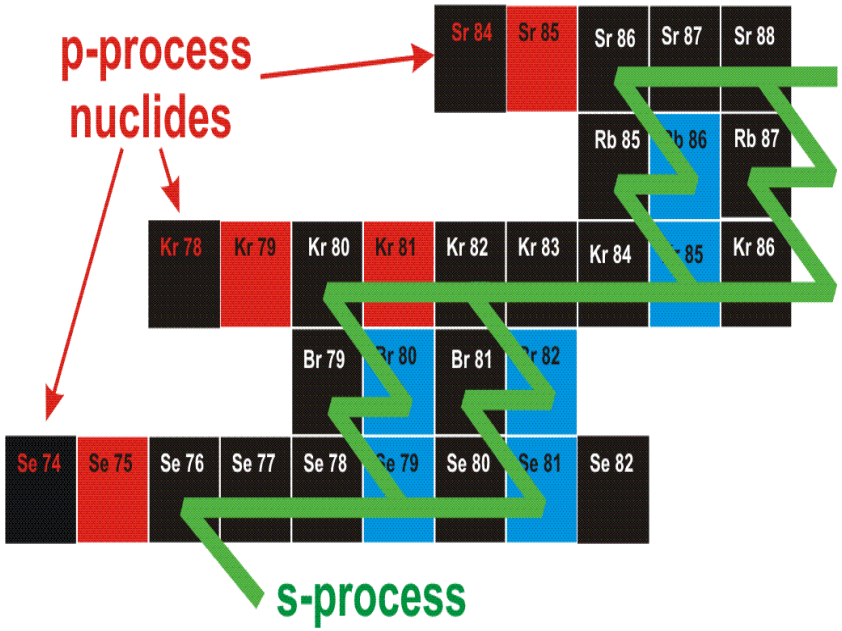


# Zerlegung in s- und r-Prozess



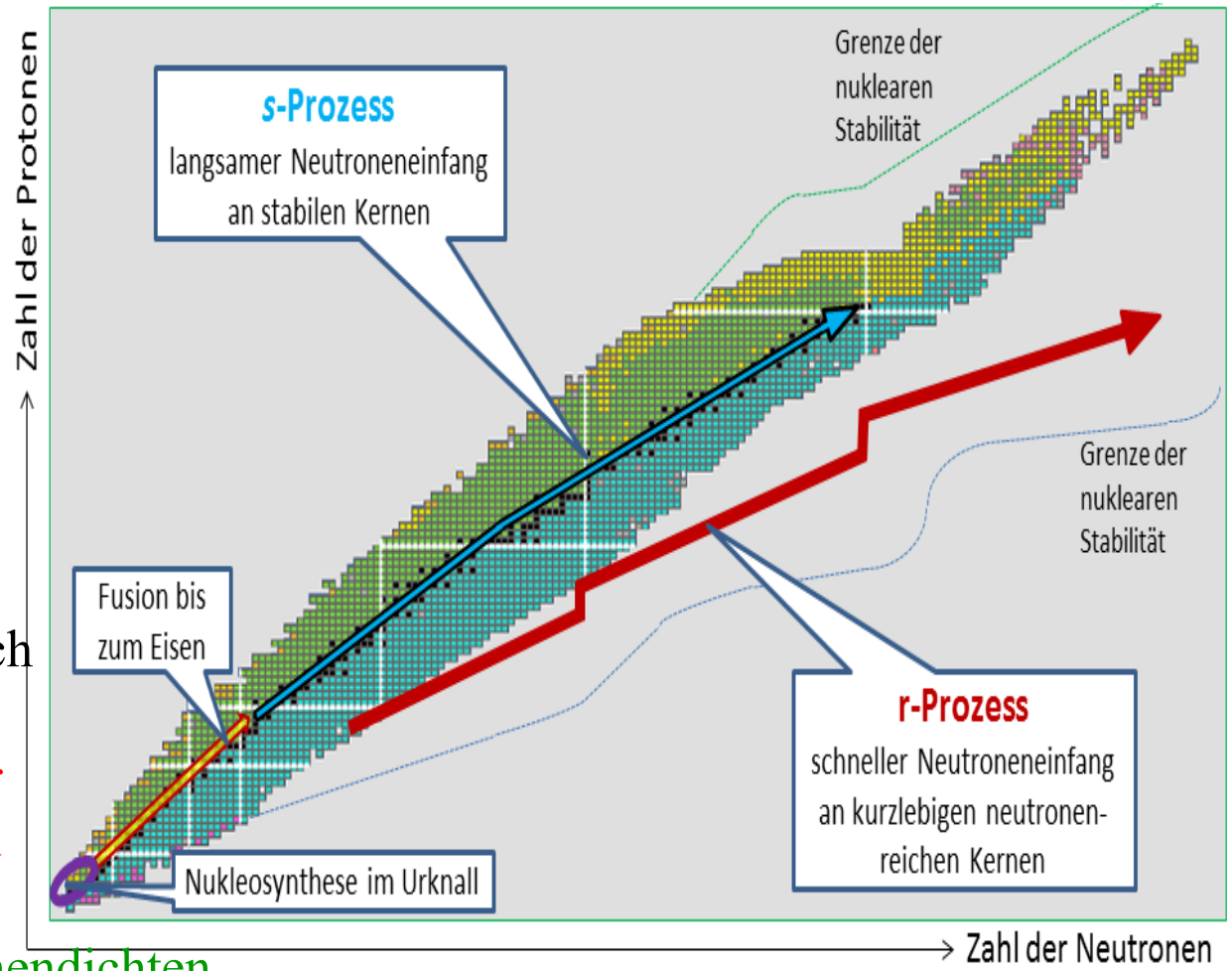

es gibt reine s- und r-Kerne, andere haben einen Beitrag vom s- und r-Prozess. Da der s-Prozess verstanden ist (bekannte Kernphysik nahe der Stabilität sowie verstandene Sternmodelle), kann die r-Komponente durch Subtraktion der s-Komponente von solaren Häufigkeiten erreicht werden.

# s-, r- und p-Prozess




F. Käppeler

***Kerne weitab der Stabilität:***
***Grossprojekte GSI/FAIR (Darmstadt),***
***FRIB (MSU-USA),***
***RIKEN (Tokio-Japan)***

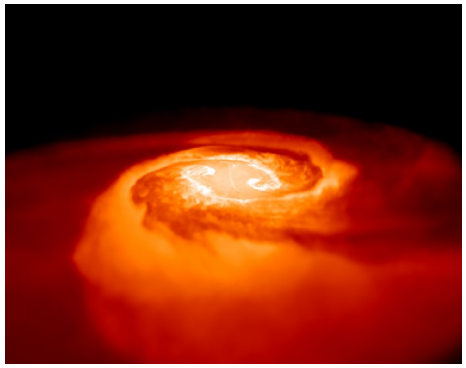



Bei hohen Neutronendichten sind die Zeitskalen für Neutroneneinfänge kurz und können wesentlich kleiner sein als Beta-Zerfallszeiten. Dies ermöglicht auch die Erzeugung von Isotopen weitab der Stabilität und einen r-Prozess, der Silber und Gold, aber auch Uran, Thorium und Plutonium erzeugt.

Aber wo kann man diese hohen Neutronendichten erhalten?????

G. Martinez-Pinedo

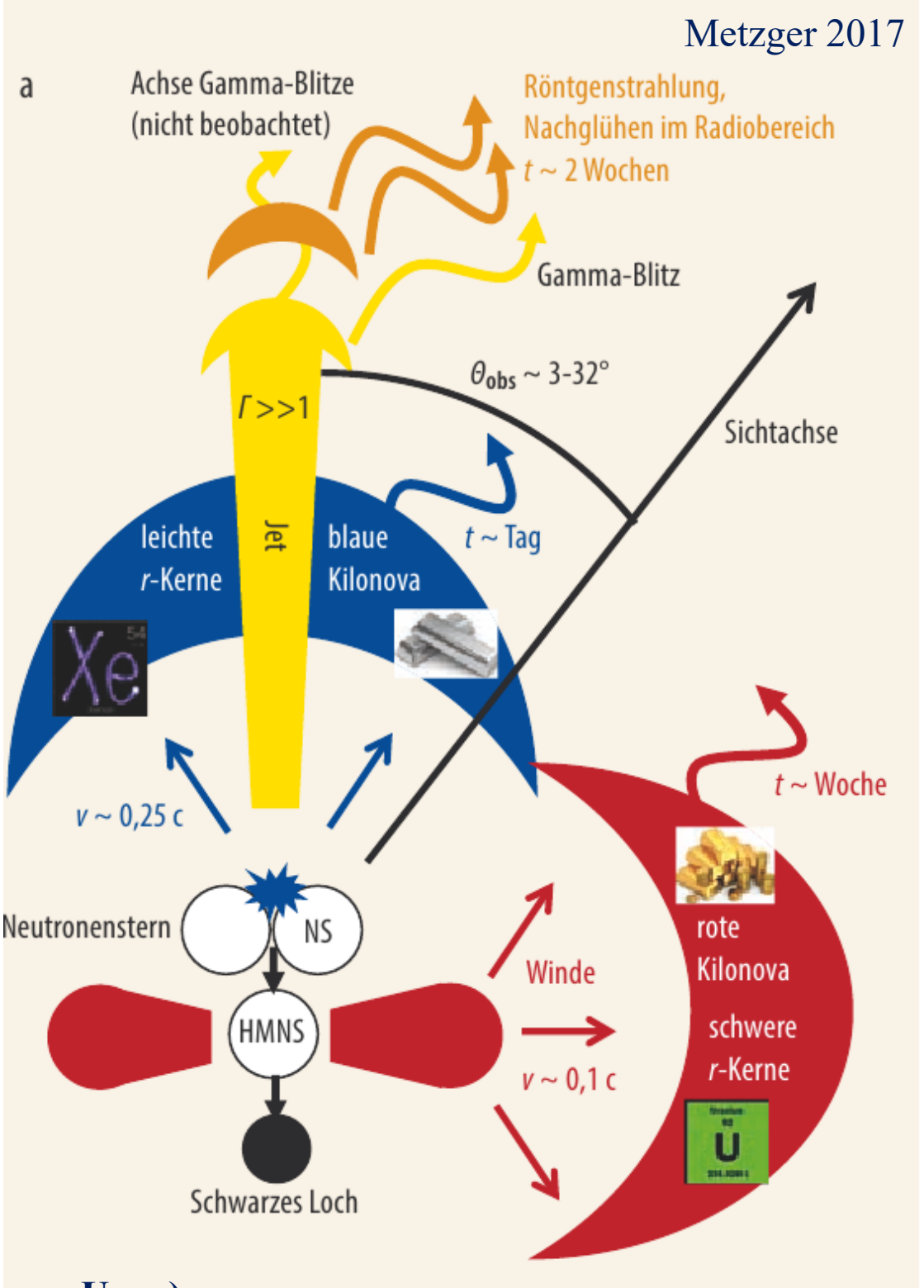
# GW170817, die erste beobachtete Neutronensternverschmelzung



**Simulationen z.B, Rosswog et al. (1999-2022) n/p-Verhältnis >20 in Neutronensternen**

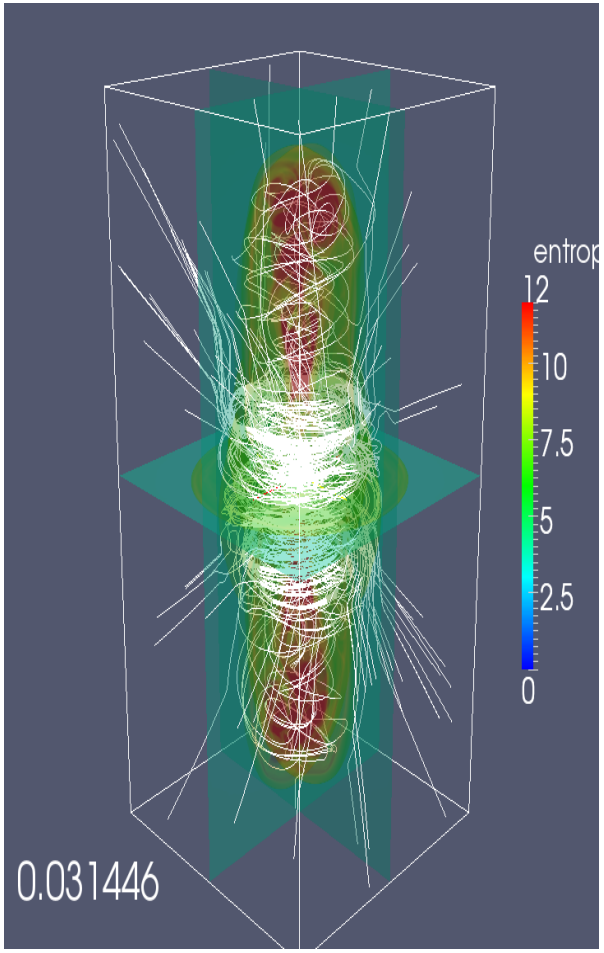
1. **Gravitationswellenabstrahlung bis zur Verschmelzung**
2. **Dynamische Ejekta (Kollision und Spiralarme)**
3. **Hypermassiver Neutronenstern für etwa 100ms, Wind mit leichten r-Kernen**
4. **HMNS kollabiert zum Schwarzen Loch**
5. **Teil des Massenflusses aus der Scheibe auf das Schwarze Loch wird in hoch-relativistischen polaren Jets ejektiert (Gamma-Blitz GRB)**
6. **Äquatorialer Massenausfluss aus der Scheibe**
7. **Urspünglich optisch dichte Ejekta ergeben optisches/infrarotes Nachglühen abhängig von der Komposition (unter anderem etwa 40 Erdmassen Gold, 10 Erdmassen Uran)**

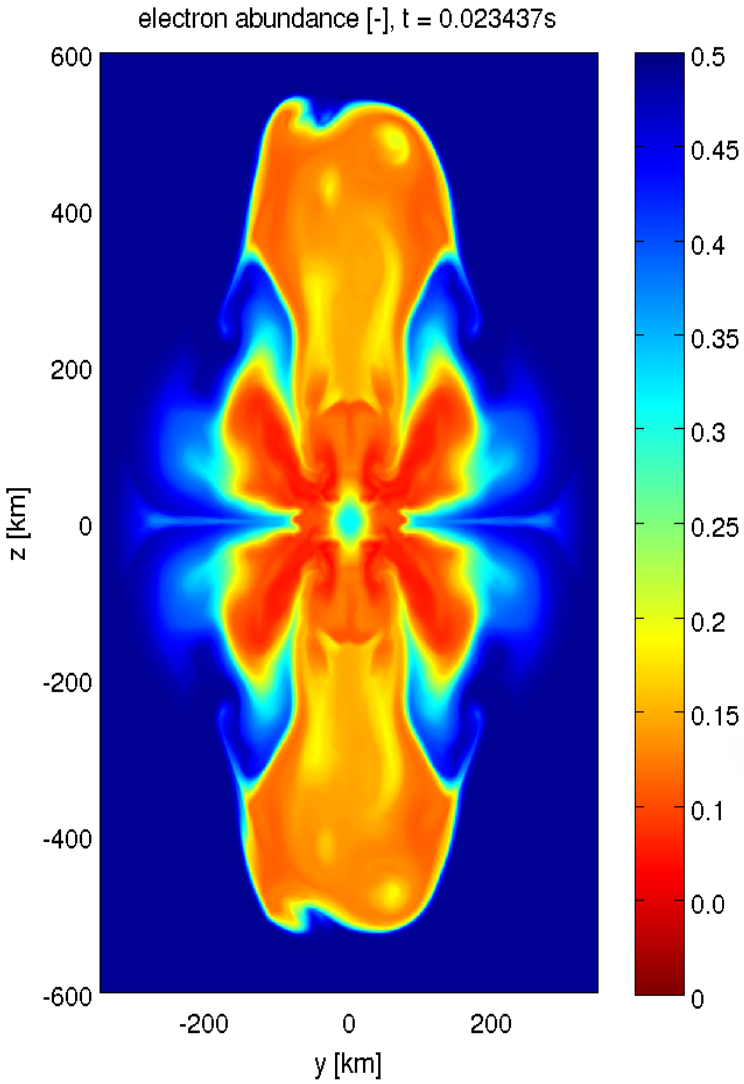
Metzger 2017



# Eine seltene Klasse von Supernovae mit schneller Rotation und hohen Magnetfeldern

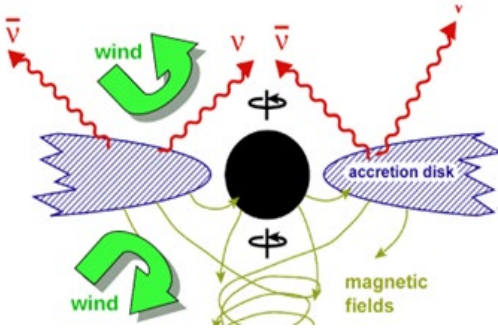
*die zu schnell rotierenden Neutronensternen mit sehr hohen Magnetfeldern führen (Magnetare, $10^{15}$ Gauss);* *r-Prozess-Stärke abhängig von Magnetfeld und Rotation*



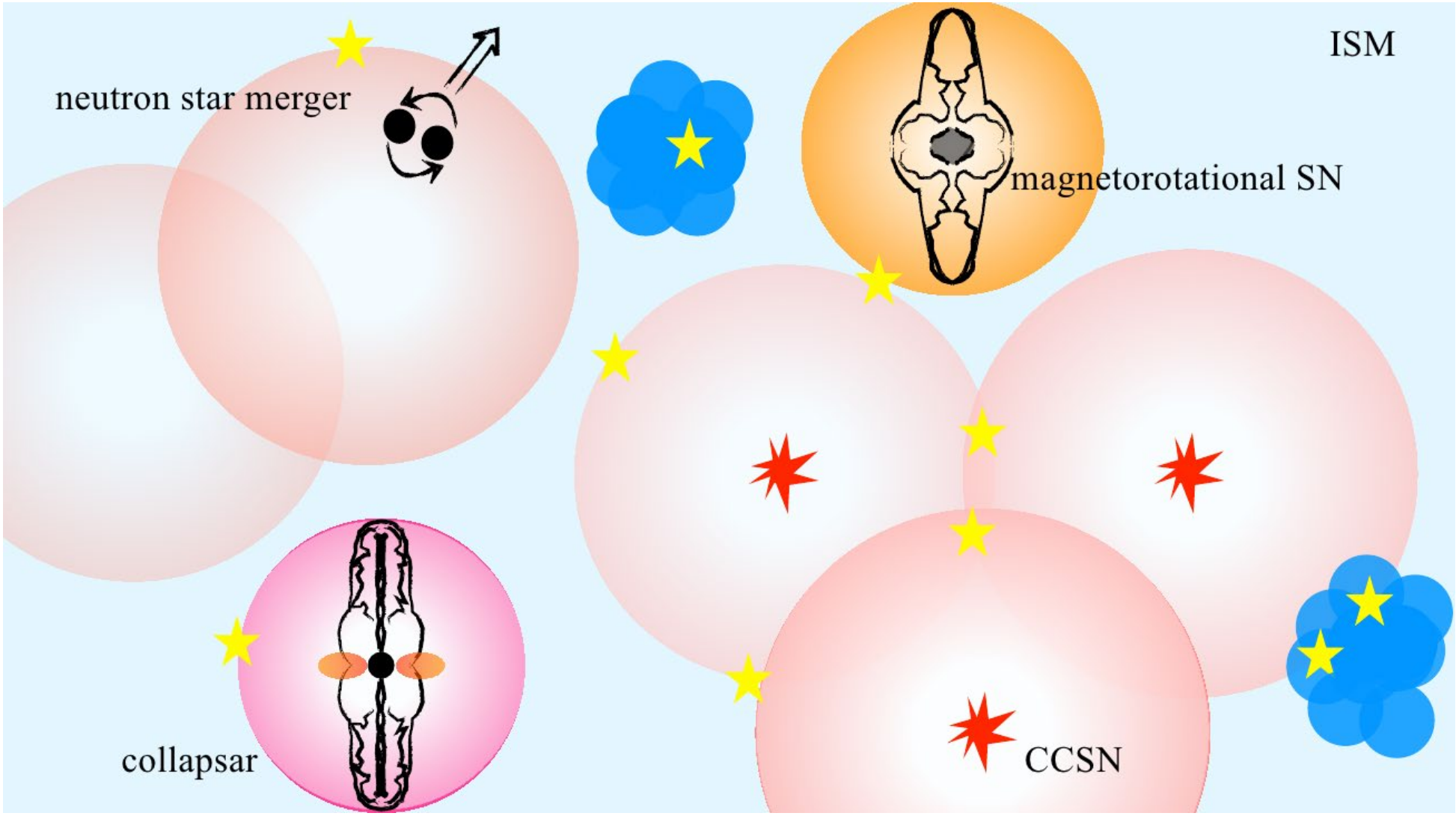

n/p-Verhältnisse von 10

**und Kollapsare, Hypernovae**
die im Core-Kollaps zu schwarzen Löchern führen, aber auch Jets und Scheibenaus-würfe erzeugen (Siegel et al. 2019, 2020)



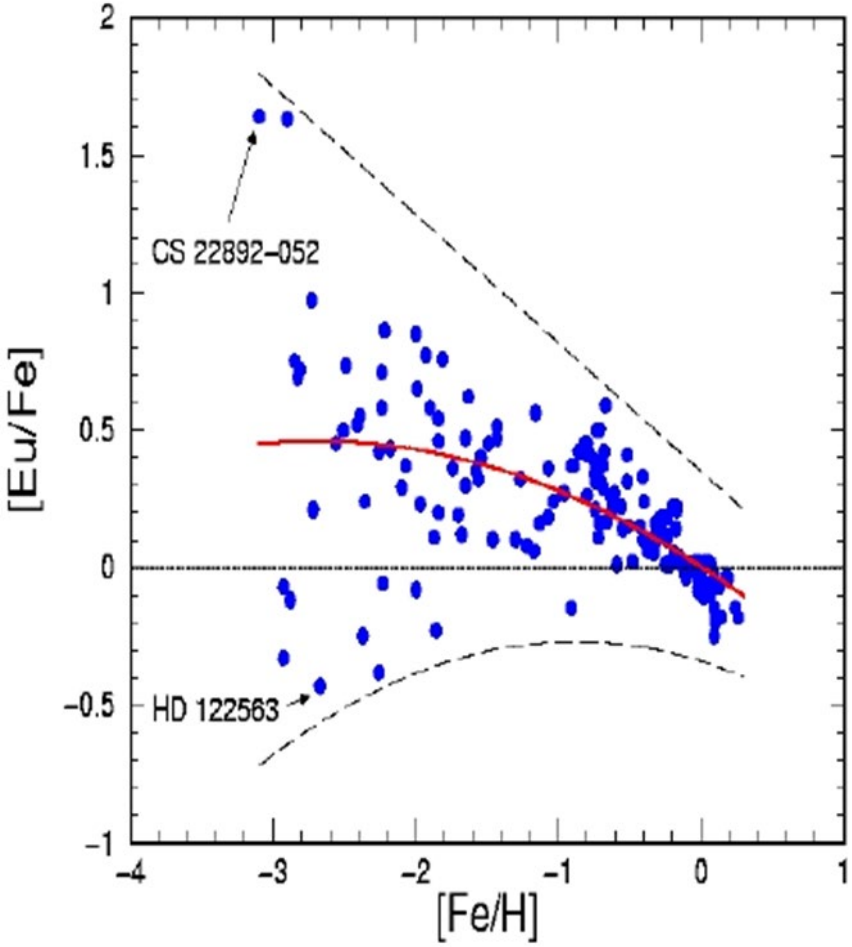

***C. Winteler, R. Käppeli, M. Liebendörfer et al. 2012, Eichler et al. 2015, Nishimura et al. 2015, 2017, Reichert et al. 2022, 2023***

*Die galaktische Entwicklung zeigt in den Frühphasen die Ergebnisse einzelner Explosionsereignisse, die in den Spektren der neu entstandenen Sterne, welche durch diese Explosionen «verunreinigt» wurden, zu sehen sind. Erst im Laufe der galaktischen Entwicklung, wenn viele solche Ereignisse sich überlagern, kommt es zu einer Mittelung.*

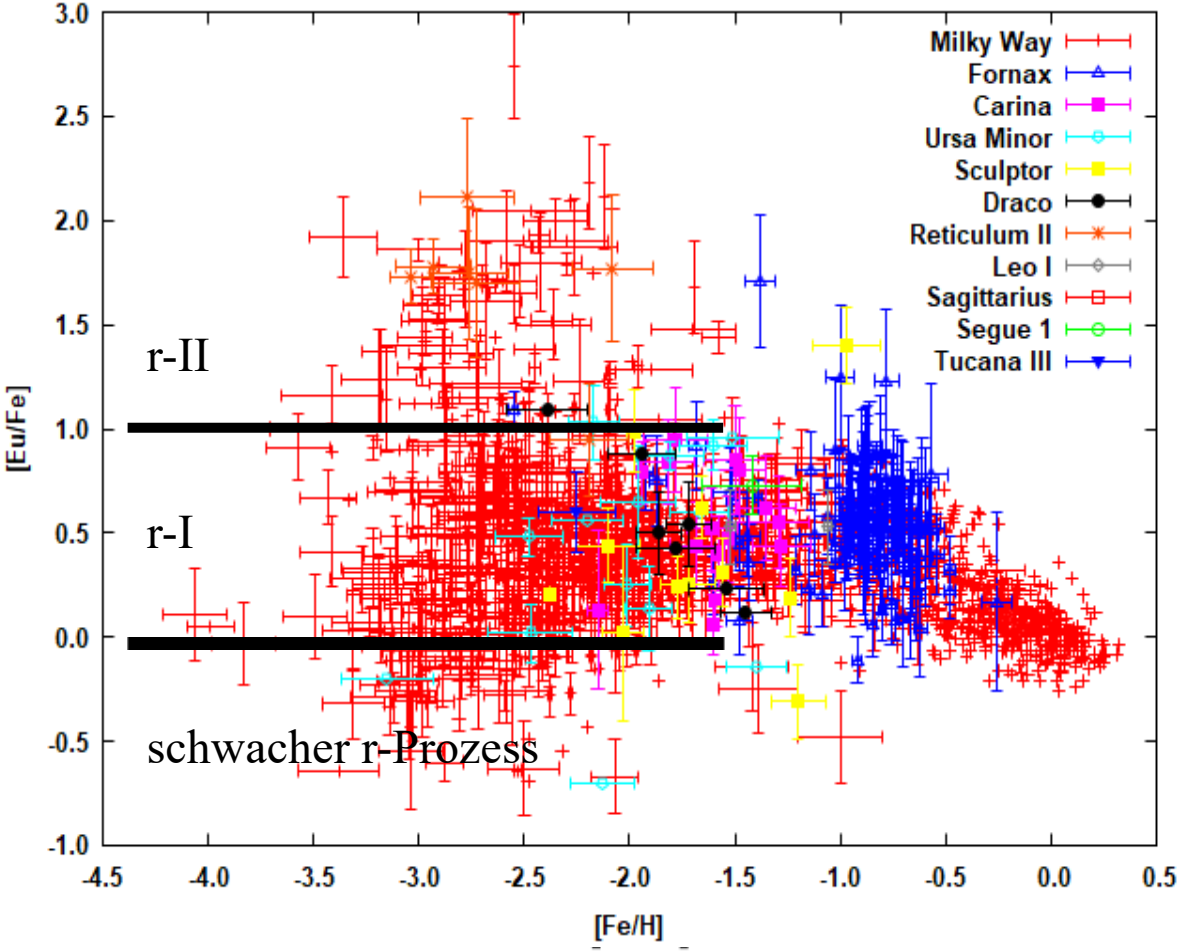


*Das gemittelte Eu/Fe-Verhältnis (r-Prozess) verhält sich wie bei CCSNe das alpha/Fe Verhältnis (O, Mg, SI, S, Ca, Ti), aber mit grösserer Streuung!*

**Die Streuung von [Eu/Fe] von mehr als einem Faktor 100 deutet auf seltene Ereignisse hin (Neutronensternverschmelzungen, seltene Supernovae/Hypernoae/Kollapsare)**

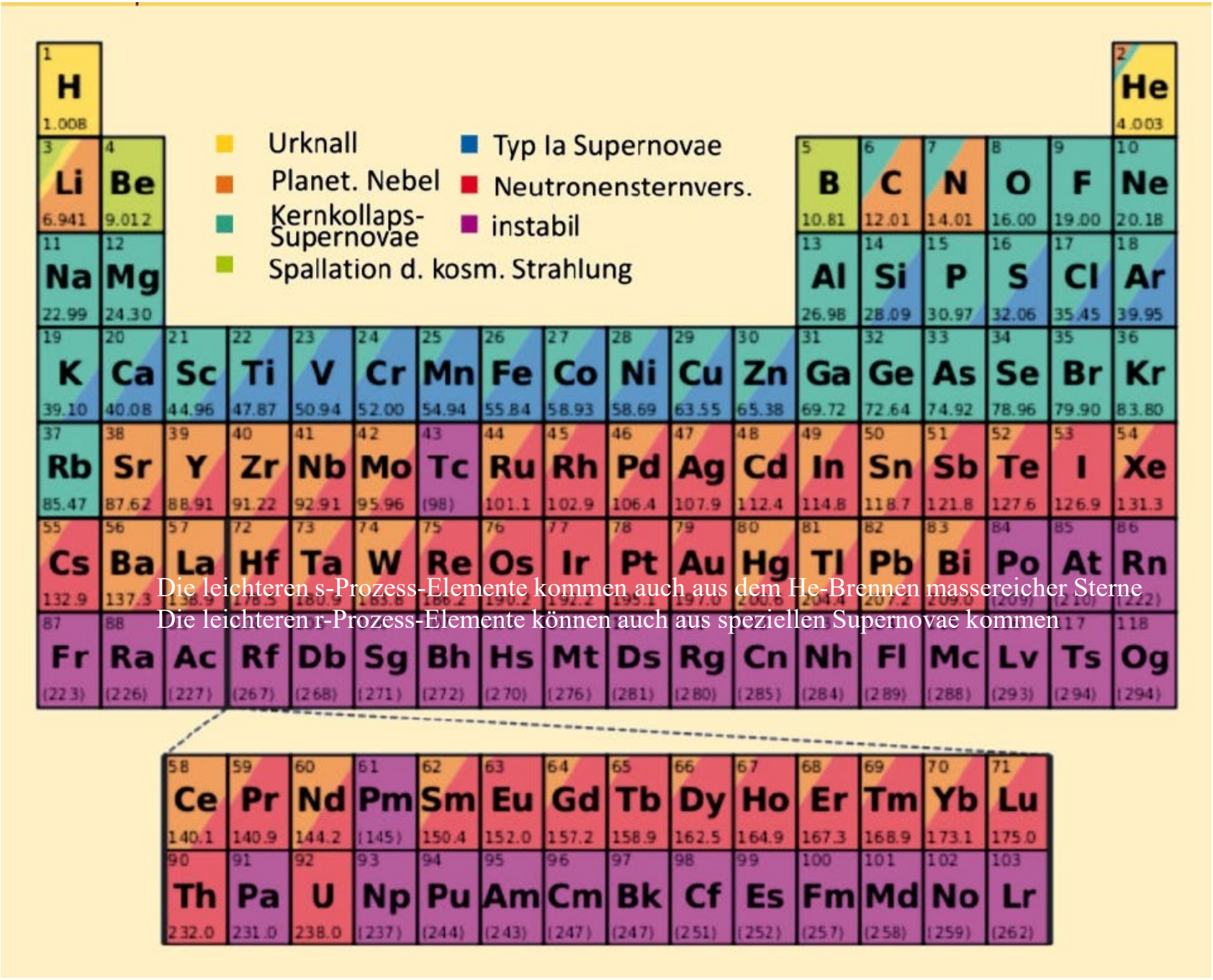



Cowan & Thielemann (2004)




«The r-process alliance» (2018-2022)

# Ursprungsorte/quellen der Elemente




**Bezug zu den individuellen astrophysikalischen Produktionsorten und ihrer Ereignis-Häufigkeit während der zeitlichen Entwicklung der Galaxie.**

R. Reichert (2022): noch mit gewissen Unsicherheiten, da es «schwache» und «Haupt» s- und r-Prozesse gibt, und wahrscheinlich sogar mehrere starke r-Prozess-Orte, sowie weitere unbedeutendere Prozesse, die hier nicht behandelt wurden. (schwacher s-Prozess aus massereichen Sternen ($^{22}$Ne) bis A=100, schwacher r-Prozess aus speziellen Supernovae)