

152 Jahre Periodensystem der chemischen Elemente

127 Jahre Georges Lemaitre

64 Jahre seit B²FH und Cameron (1957)

Sterbende Sterne und ihre Rolle bei der Entstehung der Elemente im Universum

Friedrich-Karl Thielemann

Departement Physik und Helmholtz-Zentrum für Schwerionenforschung
Universität Basel
Schweiz

GSI Darmstadt
Deutschland



Winterthur 17.1.2021

Uns bekannte chemische Elemente: z.B.:



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

Kohlenstoff

Silizium



Brom und Quecksilber
flüssig



Lithium



Schwefel



Eisen



Kupfer



Gallium

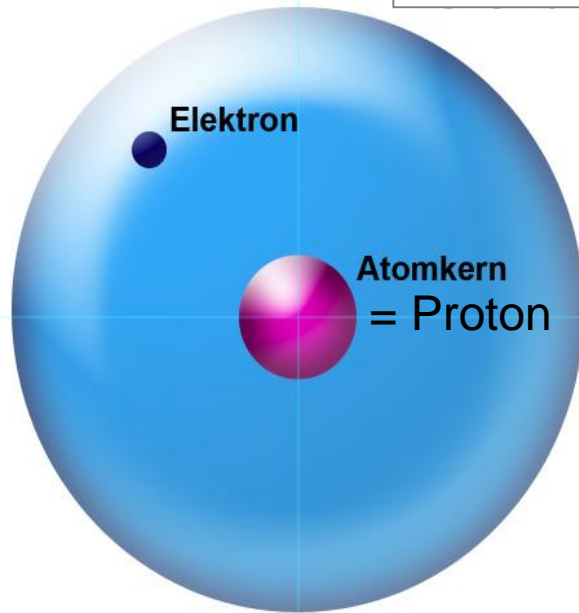
Elemente
in fester
Form



Silber und Gold
Edelmetalle

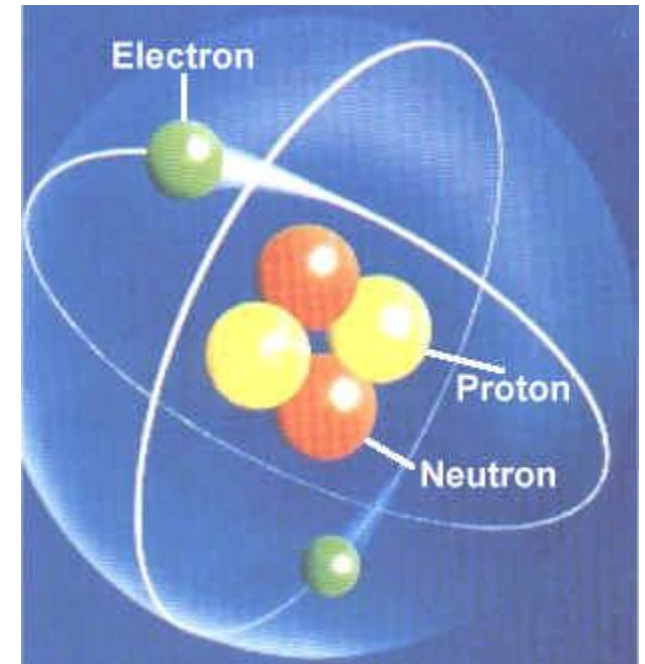
Aufbau der Atome und chemischen Elemente

Wasserstoff



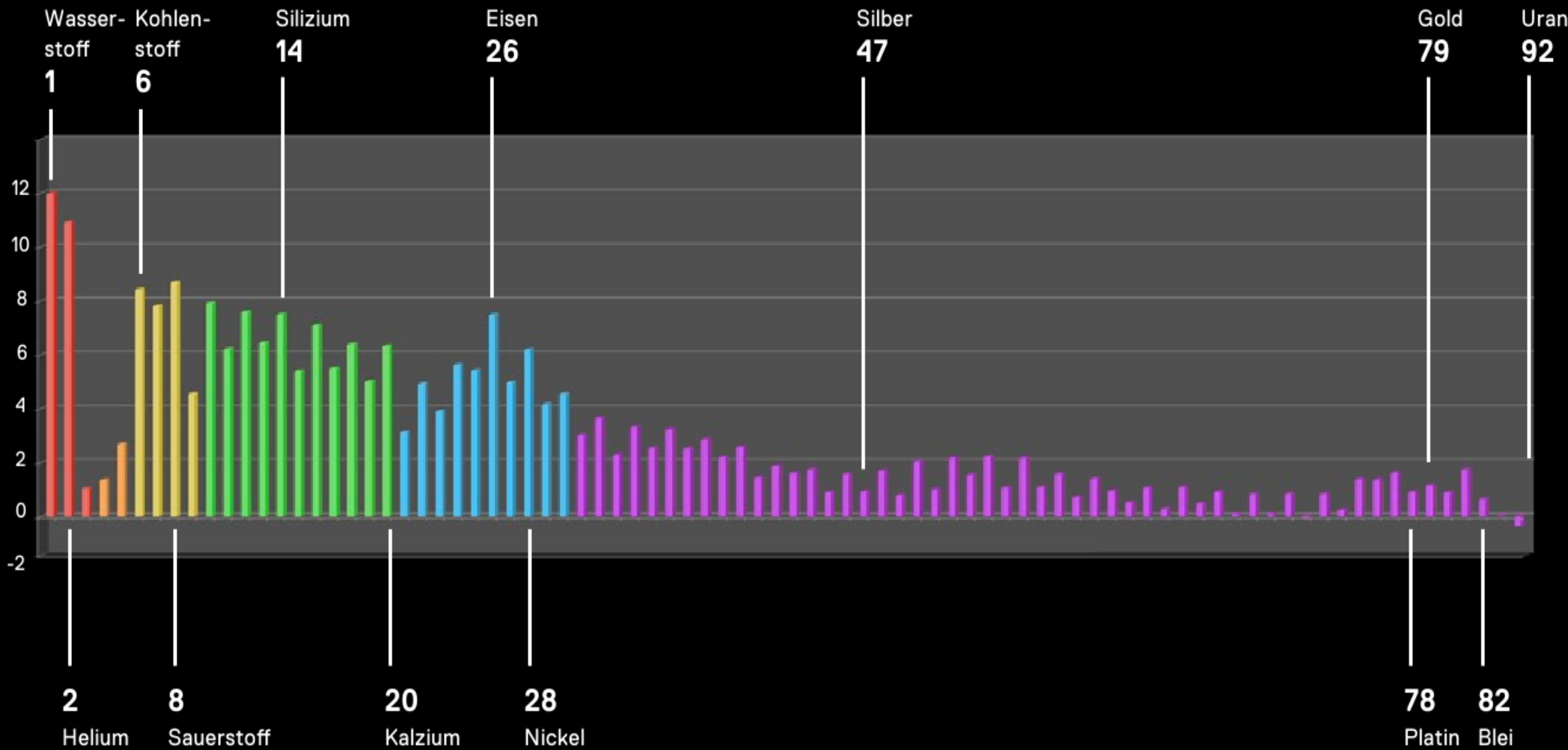
Die am häufigsten in stabiler Materie vorkommenden Elementarteilchen sind Protonen, Neutronen und Elektronen. Die Anzahl der Elektronen in der Elektronenhülle bestimmt das chemische Element, bei $Z=1$ handelt es sich um H (Wasserstoff), bei $Z=2$ um He (Helium). Die Protonen im Atomkern sind positiv 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 152 Jahren) Veröffentlichung des Periodensystems der Elemente

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.

Isotope des Wasserstoffs

Name	Symbol	Modell des Kerns	Bau des Kerns	Anteil
Protium	${}^1\text{H}$		1 Proton , keine Neutronen $Z = 1$ $A = 1$	99,985 %
Deuterium	${}^2\text{H}$ bzw. D		1 Proton , 1 Neutron $Z = 1$ $A = 2$	0,0145 %
Tritium	${}^3\text{H}$ bzw. T		1 Proton , 2 Neutronen $Z = 1$ $A = 3$	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.

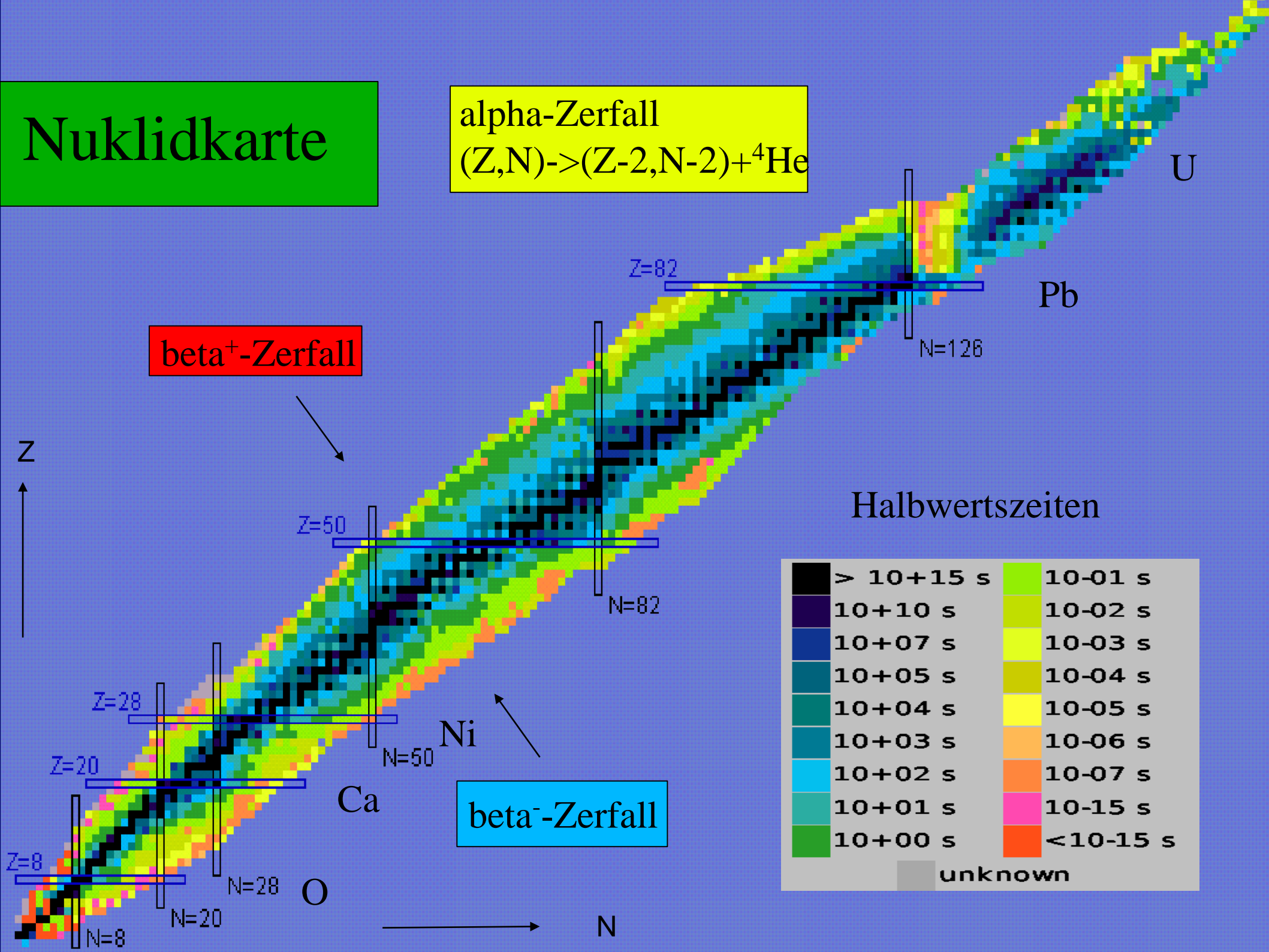
Typischerweise sind Isotope mit etwa gleichen Neutronen- und Protonenzahlen stabil.

Nuklidkarte

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

beta⁺-Zerfall

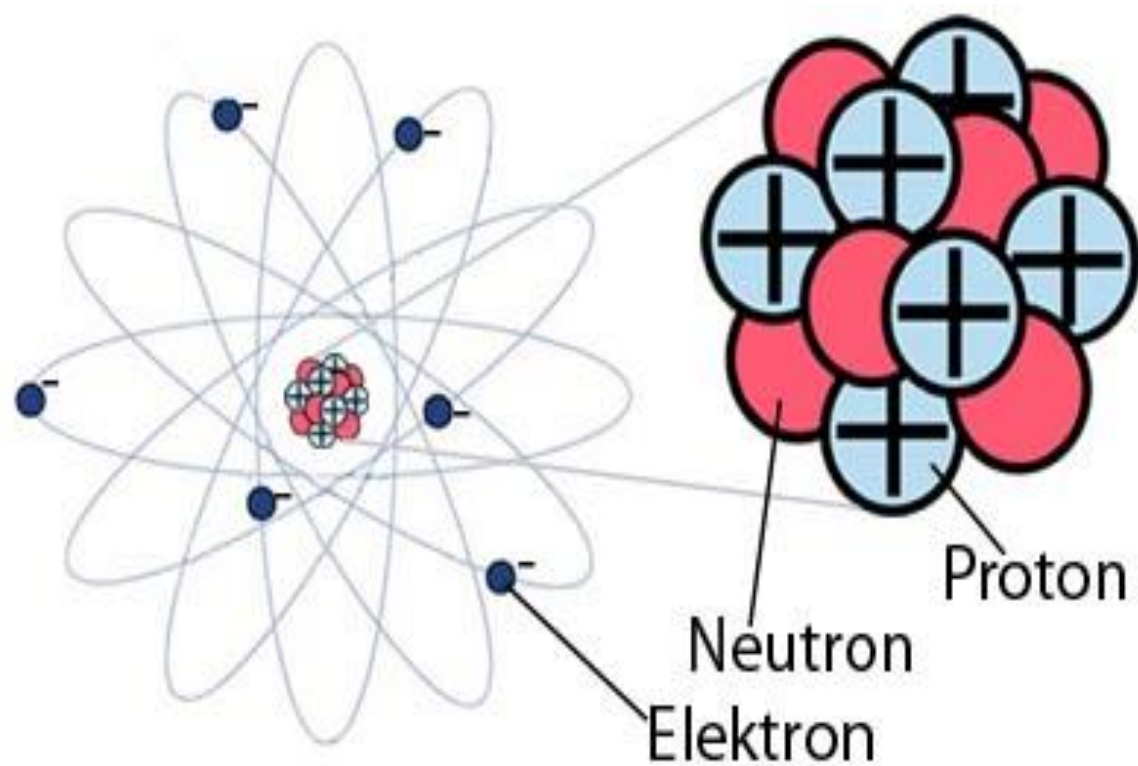
beta⁻-Zerfall



Halbwertszeiten

> 10+15 s	10-01 s
10+10 s	10-02 s
10+07 s	10-03 s
10+05 s	10-04 s
10+04 s	10-05 s
10+03 s	10-06 s
10+02 s	10-07 s
10+01 s	10-15 s
10+00 s	< 10-15 s
unknown	

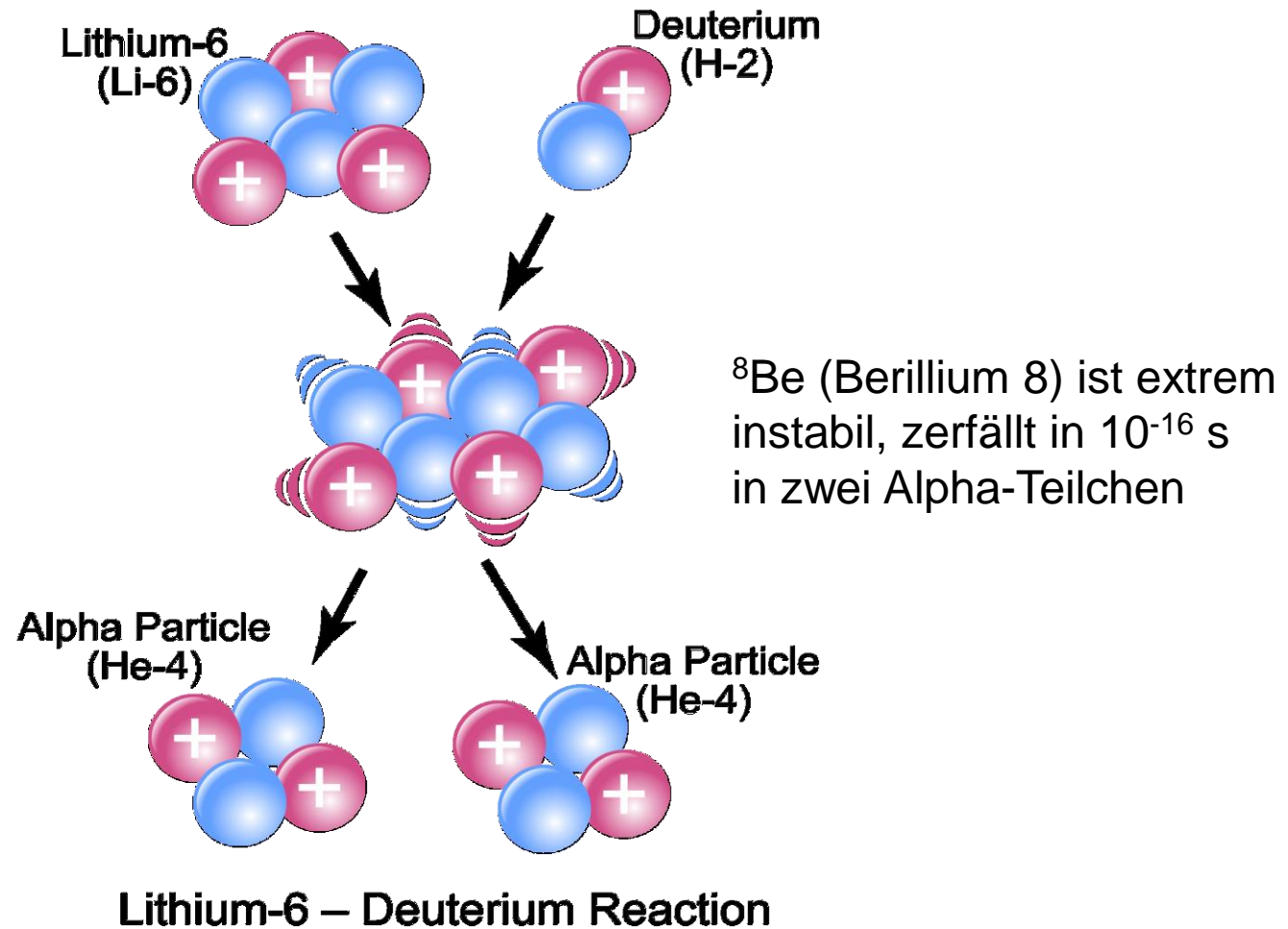
Was ist Bindungsenergie? ($E=mc^2$)



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

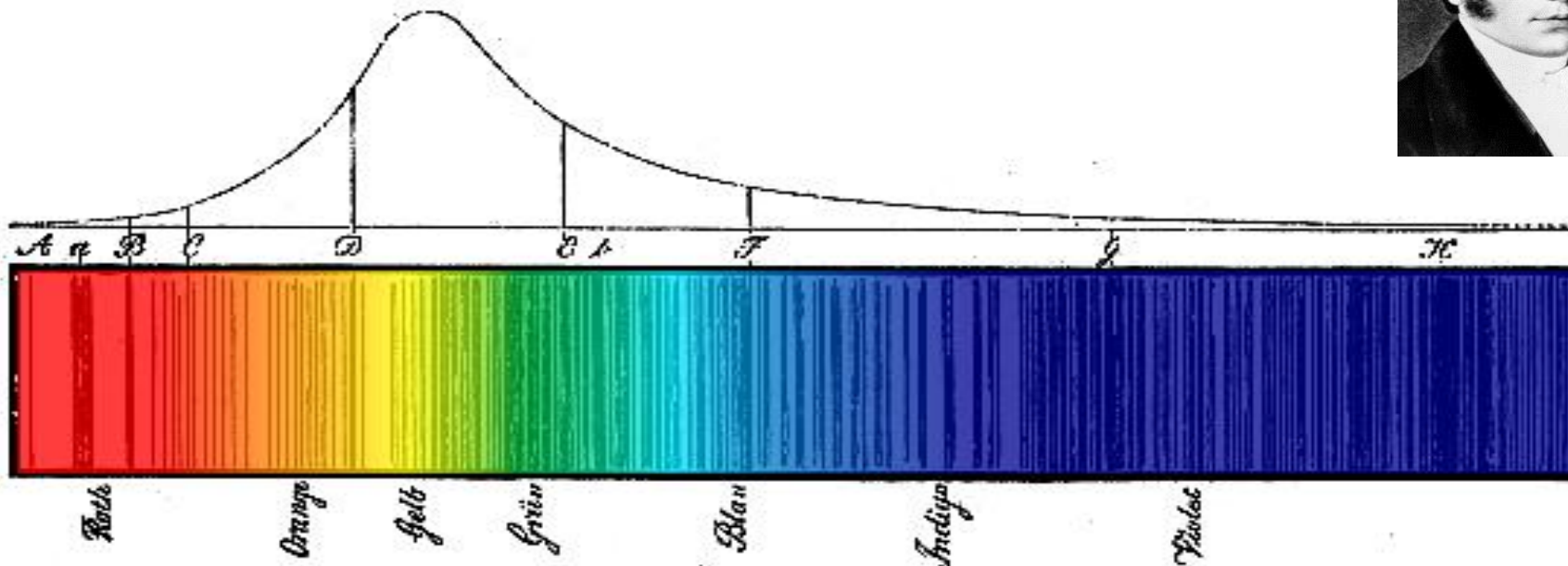
Kernreaktionen



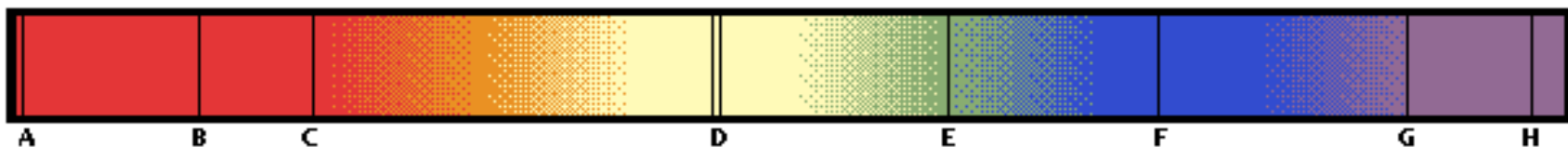
Bei Kernreaktionen werden durch Zusammenstoß (Fusion) von zwei Atomkernen andere Kerne erzeugt. Voraussetzung ist, dass die Abstossung zwischen den Ladungen der kollidierenden Kerne überwunden wird (daher entsprechende Geschwindigkeiten notwendig = Temperatur in einem Gas). Bei den Kernumwandlungen wird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

Fraunhofersche Absorptionslinien im Sonnenlicht

entsprechen der Energie zwischen Anregungszuständen in der Elektronenhülle

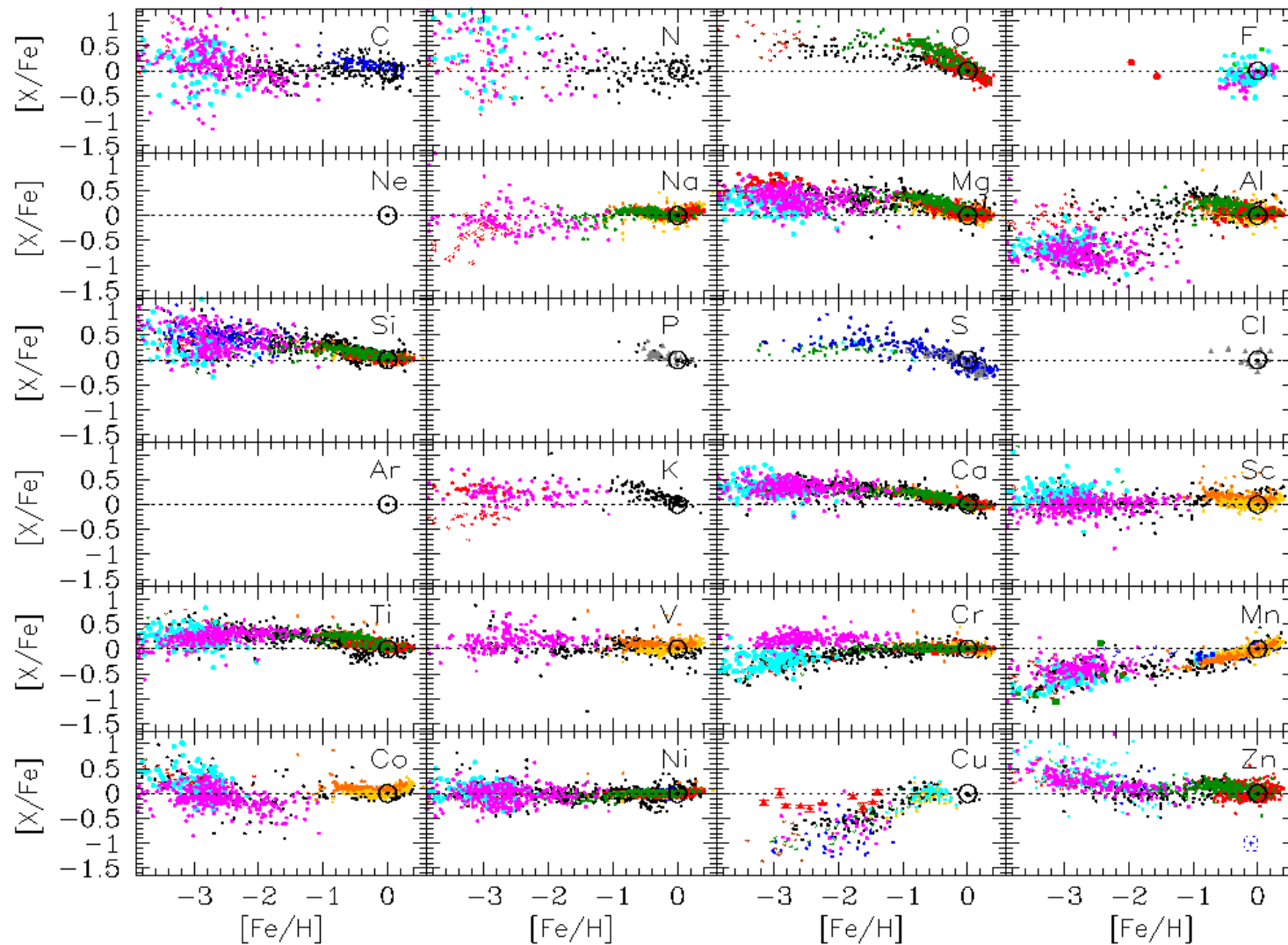


Zu Fraunhofer's Abh. Denkschr. 1814-15.



A	(äußerstes Rot)	Terrestrischer Sauerstoff
B	(Rot)	Terrestrischer Sauerstoff
C	(Rot)	Solarer Wasserstoff
D₁	(Gelb)	Solares Natrium
D₂	(Gelb)	Solares Natrium
E	(Grün)	Solares Eisen
F	(Blau)	Solarer Wasserstoff
G	(Violett)	Solares Eisen und solares Calcium
H	(äußerstes Violett)	Solares Calcium

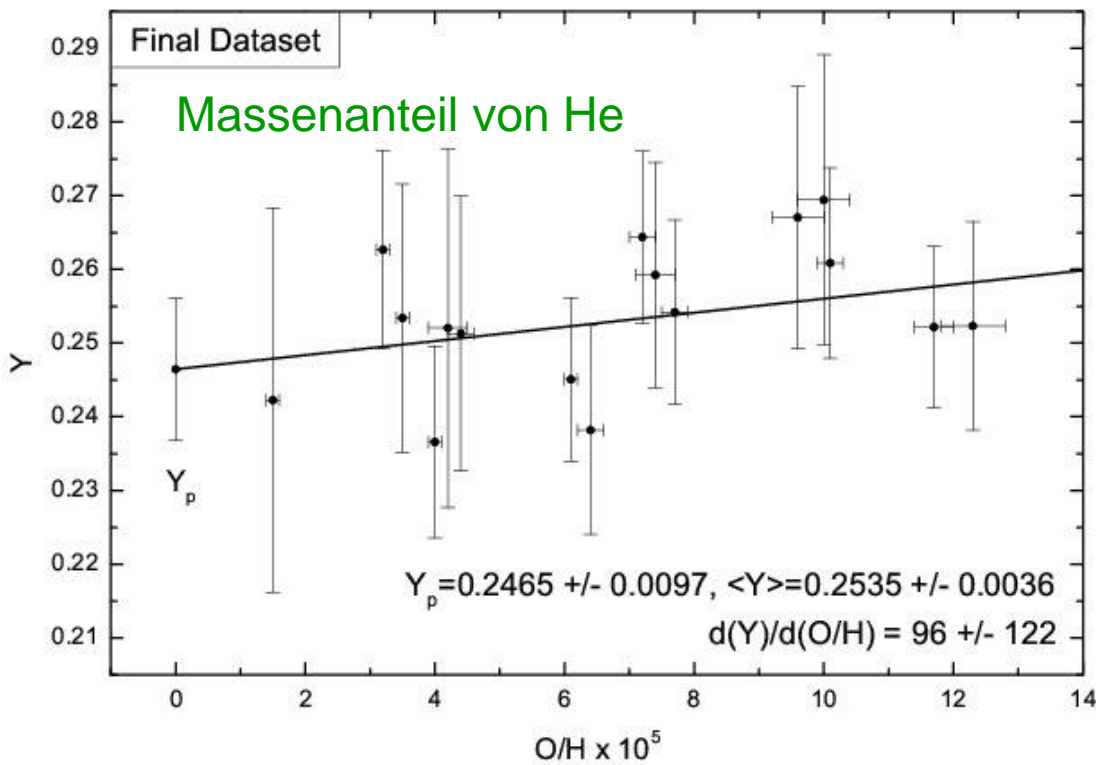
Spektren alter Sterne informieren über die Elemententwicklung in unserer Galaxie (der Milchstrasse)



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.

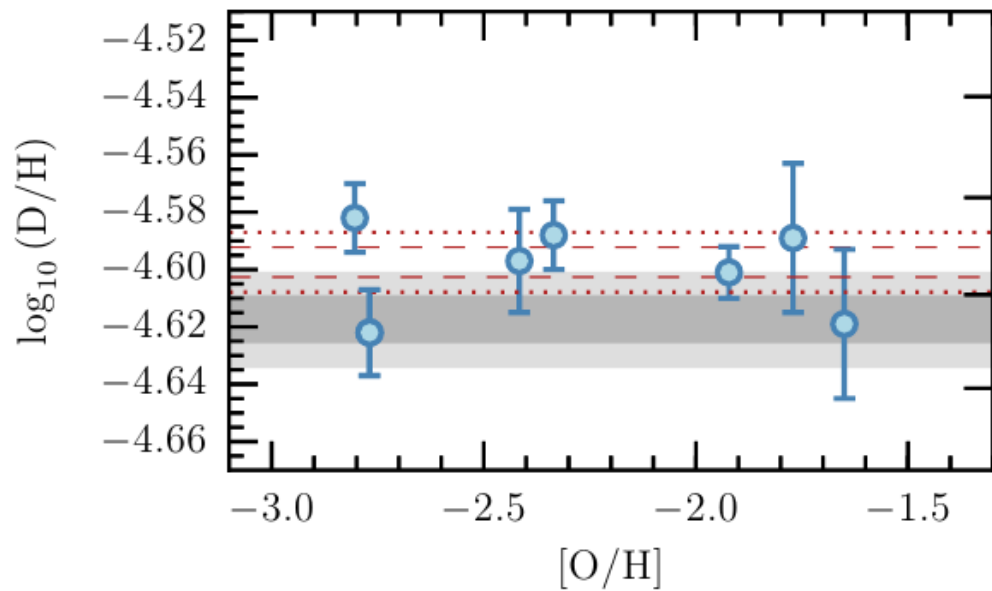
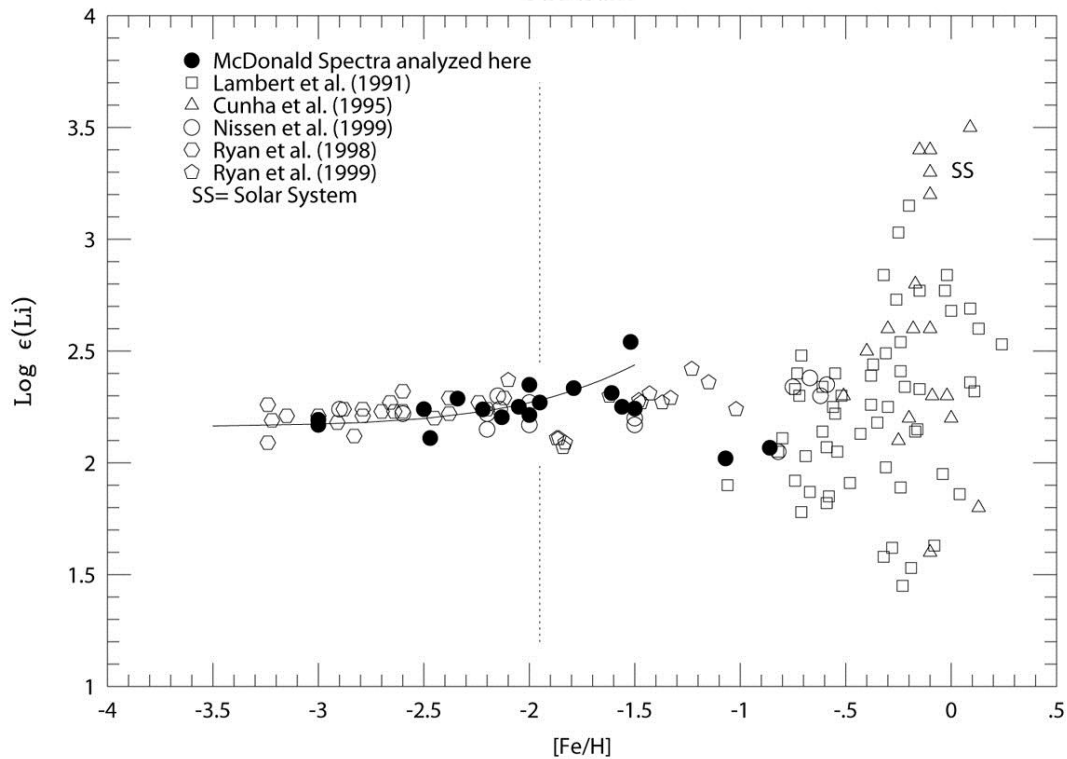
Die Häufigkeitsverhältnisse sind logarithmisch angegeben (0=solar, -1=1/10 solar, -3=1/1000 solar). Die Verhältnisse der verschiedenen Elemente ($X=C, N, O, Mg, Si, S, Ca, Ti$) zu Eisen (Fe) variieren mit dessen Anreicherung, d.h. der Zeit, aber mit verschwindend kleinen Fe-Häufigkeiten verschwinden sie ebenfalls.



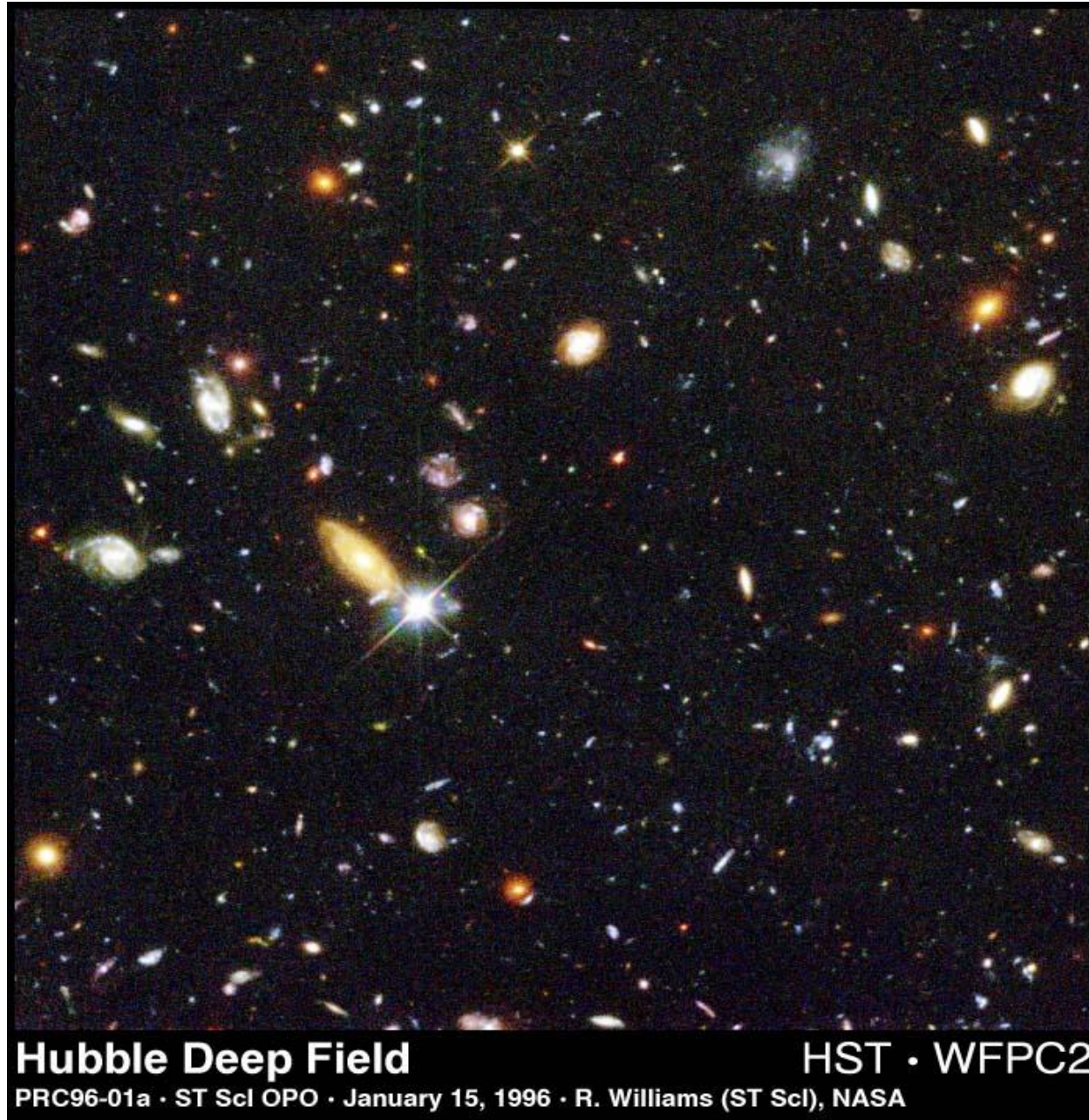
Ausnahmen: Wenn wir **Helium**, **Lithium** und **Deuterium** bis zu den kleinsten Fe oder O-Werten zurückverfolgen, verschwinden diese nicht, sondern werden konstant, d.h. sie müssen schon vor der Entstehung der Milchstrasse vorhanden gewesen sein

➔ **Urknall.**

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



Galaxien im “Hubble Deep Field” Survey



weit entfernte Galaxien bewegen sich mit grösseren Geschwindigkeiten von uns fort
als nähere Galaxien

Der Urknall und die Expansion des Universums: Galaxien als Rosinen im Gugelhupf

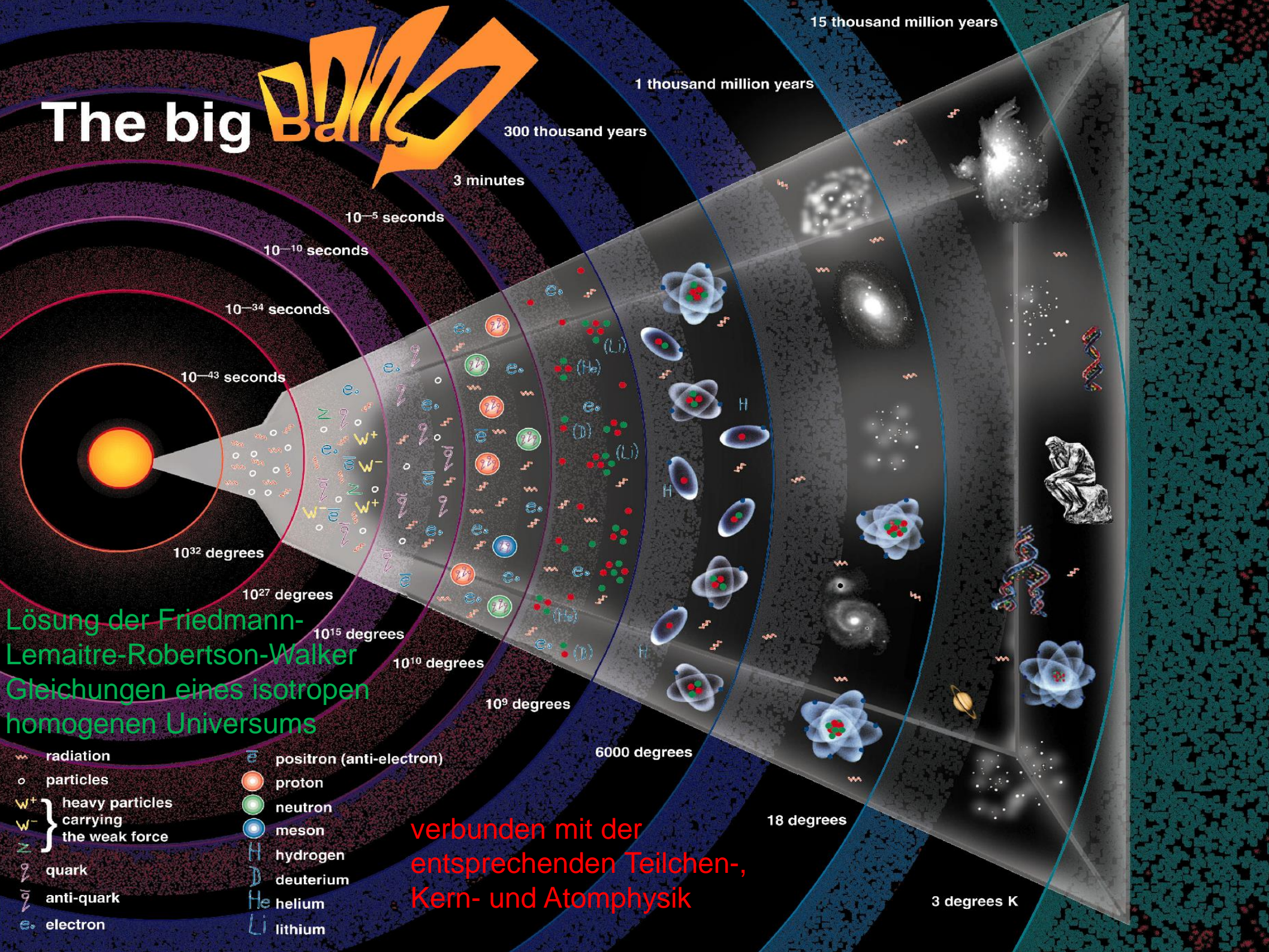
(viel und gerne von meinem ehemaligen Basler Kollegen
Gustav Andreas Tammann gezeigt)



Während der Gugelhupf durch Wirkung der Hefe im Backofen aufgeht (sich ausdehnt) ist die Geschwindigkeit mit der Rosinen (Galaxien) sich voneinander entfernen vom Abstand abhängig. Diese Wirkung ist gleich für alle Galaxien, keine sitzt im Mittelpunkt!!

Die Expansion führt zur Abkühlung (heute herrschen im Universum Temperaturen von lediglich -270.25 Grad Celsius). In der unendlich heißen Frühphase wurde in Reaktion Wasserstoff, Helium, und Lithium erzeugt. Woher kommen die anderen Elemente??

The big Bang



15 thousand million years

1 thousand million years

300 thousand years

3 minutes

10^{-5} seconds

10^{-10} seconds

10^{-34} seconds

10^{-43} seconds

10^{32} degrees

10^{27} degrees

10^{15} degrees

10^{10} degrees

10^9 degrees

6000 degrees

18 degrees

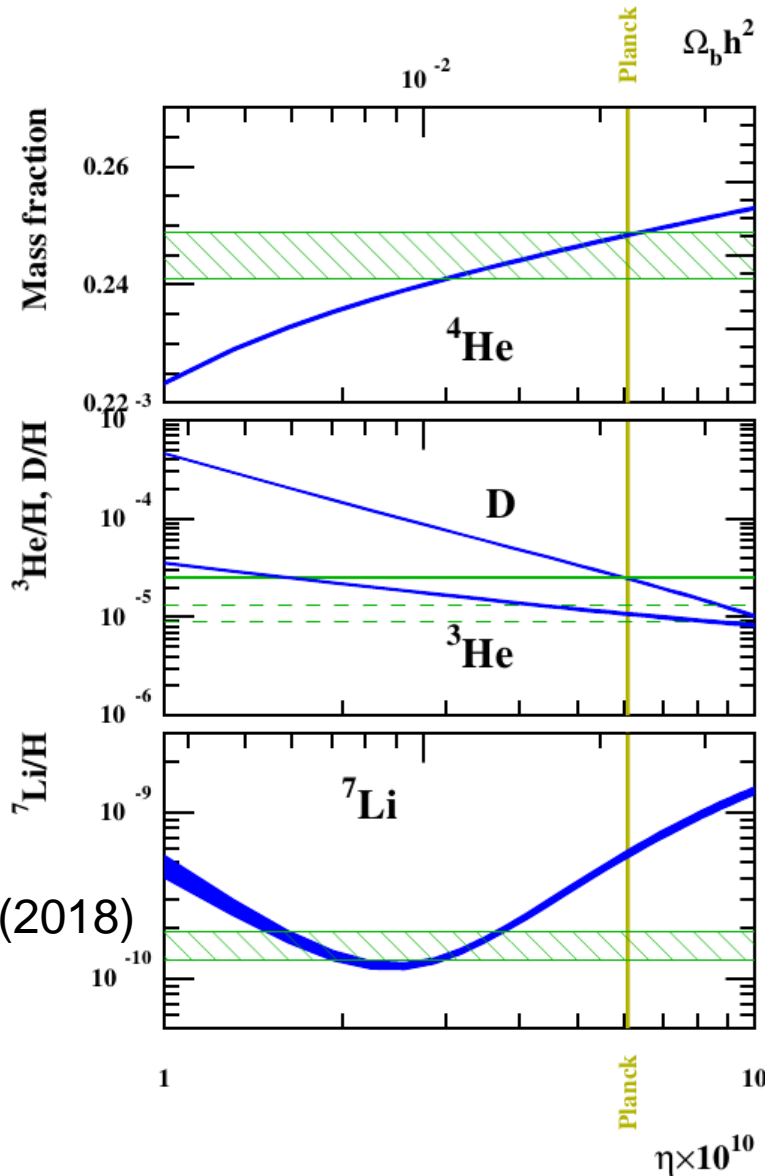
3 degrees K

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

verbunden mit der entsprechenden Teilchen-, Kern- und Atomphysik

- radiation
- particles
- W^+ } heavy particles carrying the weak force
- W^- }
- Z }
- quark
- anti-quark
- e^- electron
- e^+ positron (anti-electron)
- proton
- neutron
- meson
- H hydrogen
- D deuterium
- He helium
- Li lithium

Primordiale Häufigkeiten



Coc et al. (2018)

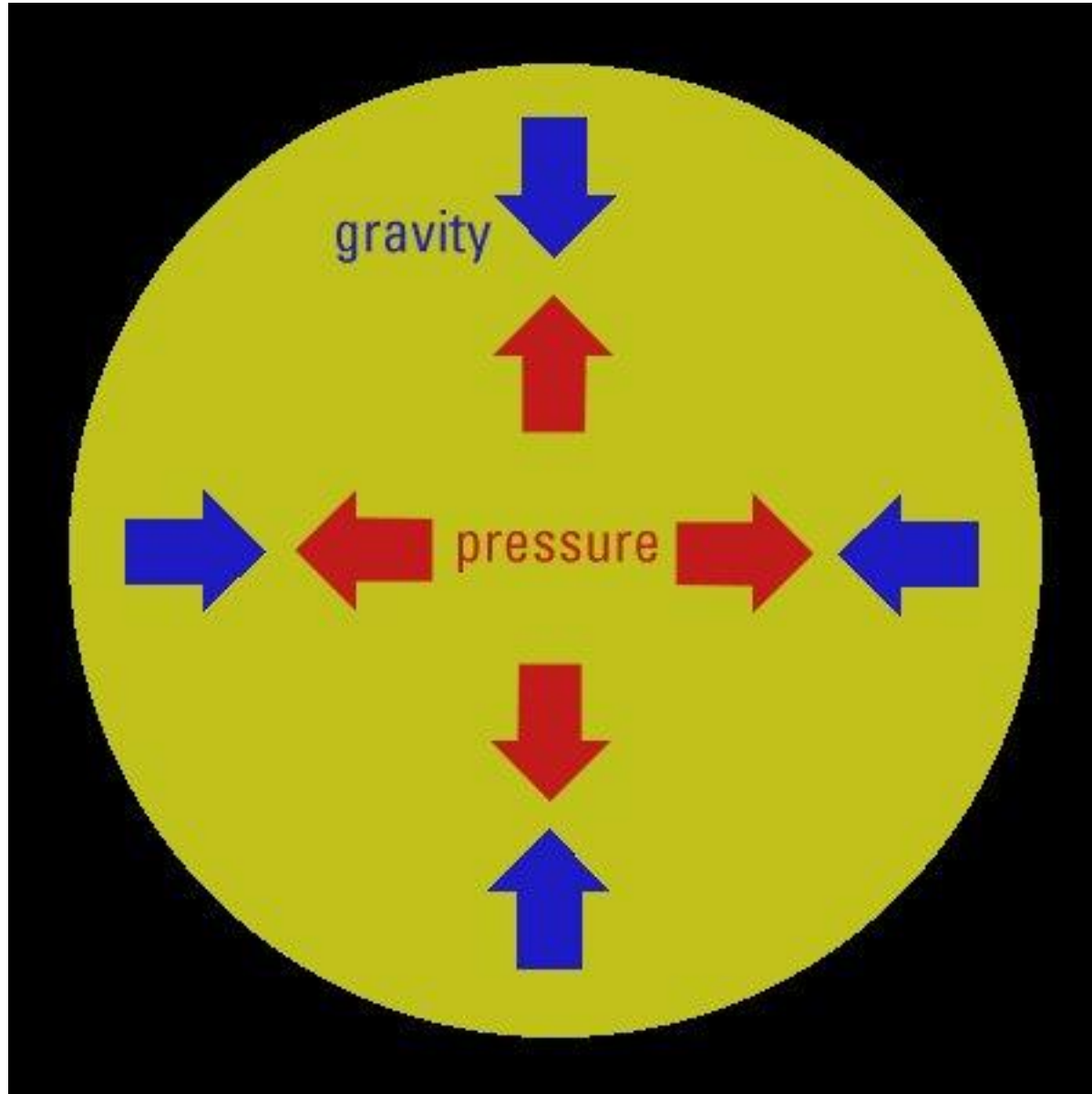
Die am Anfang der Galaxiengeschichte vorliegenden primordialen Häufigkeiten von ¹H, ²H, ³He, ⁴He und ⁷Li (waagerechte Linien) können verglichen werden mit Vorhersagen als Funktion von einem freien Parameter η (nicht bekannte Anfangsbedingung der Entropie).

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)

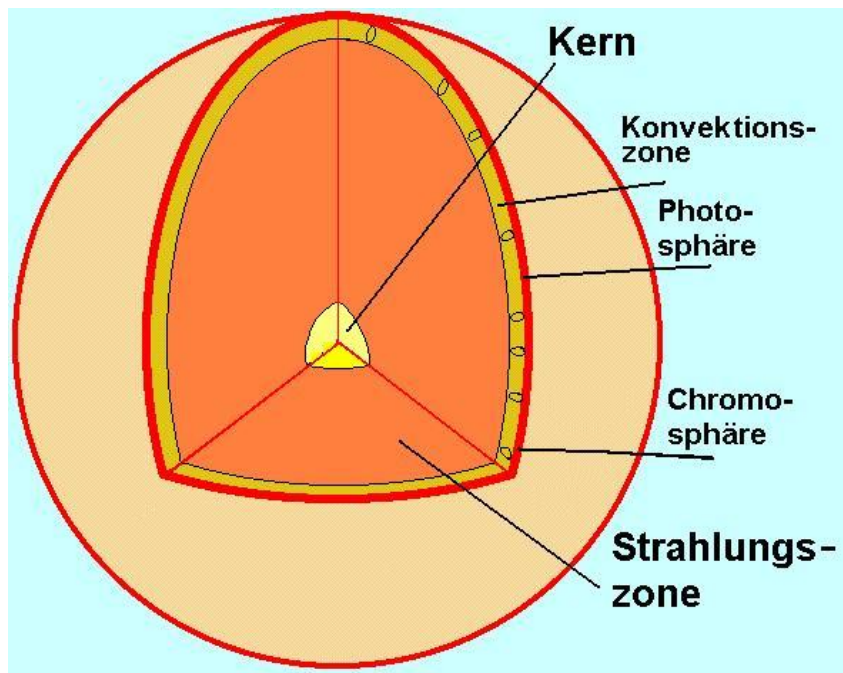
Warum sind Sterne stabil?



- 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 **$P=P(\text{Dichte}, \text{Temp.})$**
- 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 Kernfusionen im zentralen heißen Core

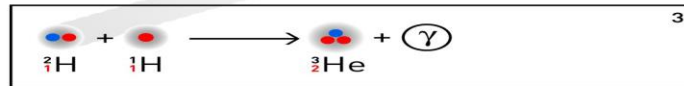
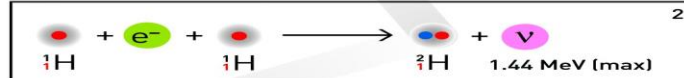


Wasserstoffbrennen – P-P Zyklen

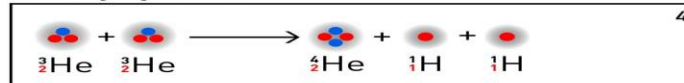
p-p Reaktion



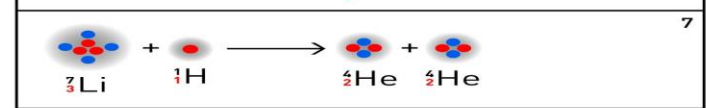
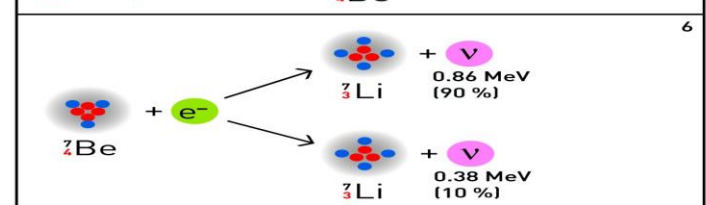
<<pep>> Reaktion (einmal in 400 mal)



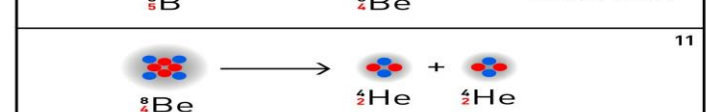
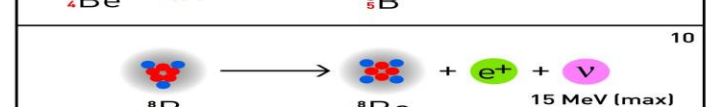
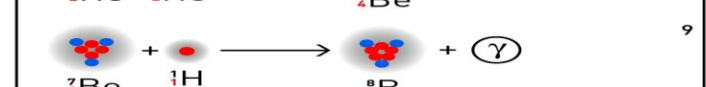
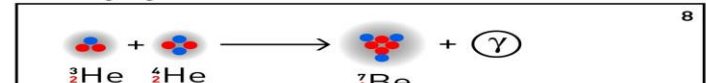
Verzweigung 1 (85%)



Verzweigung 2 (15%)



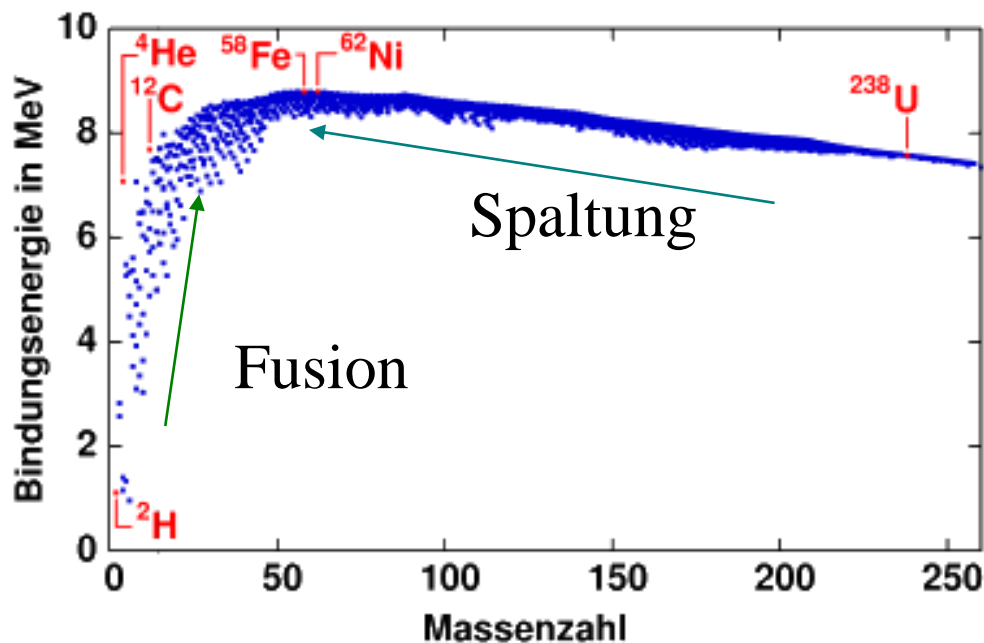
Verzweigung 3 (0.01%)



Es wird Wasserstoff in Helium umgewandelt (verbrannt)

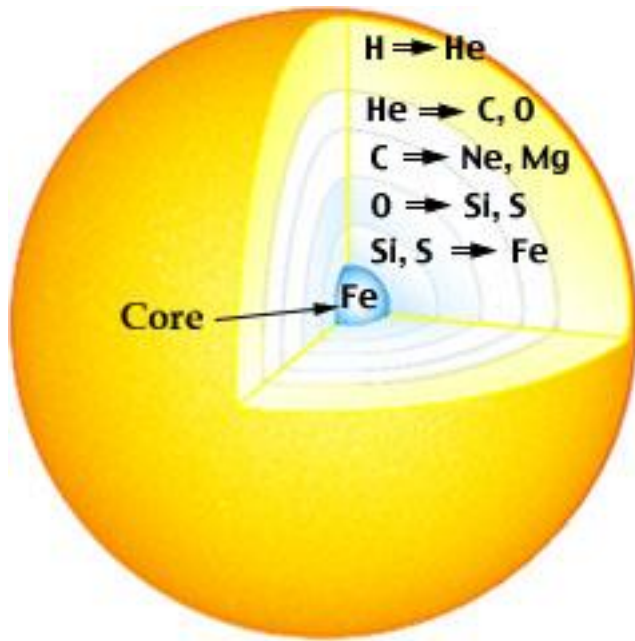
Weitere Brennphasen

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 werden kann. Bis zur Erzeugung von Elementen wie Fe und Ni wird dabei Energie freigesetzt.



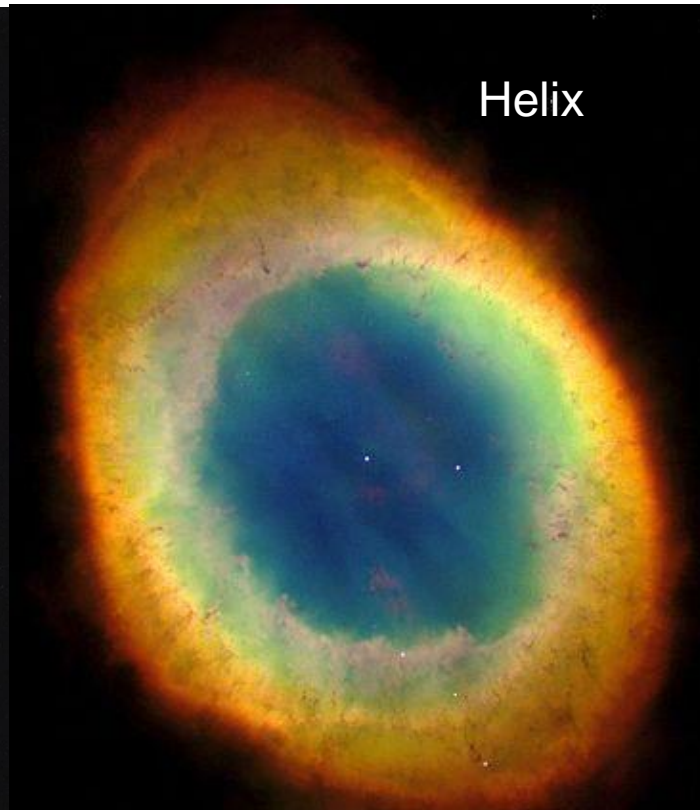
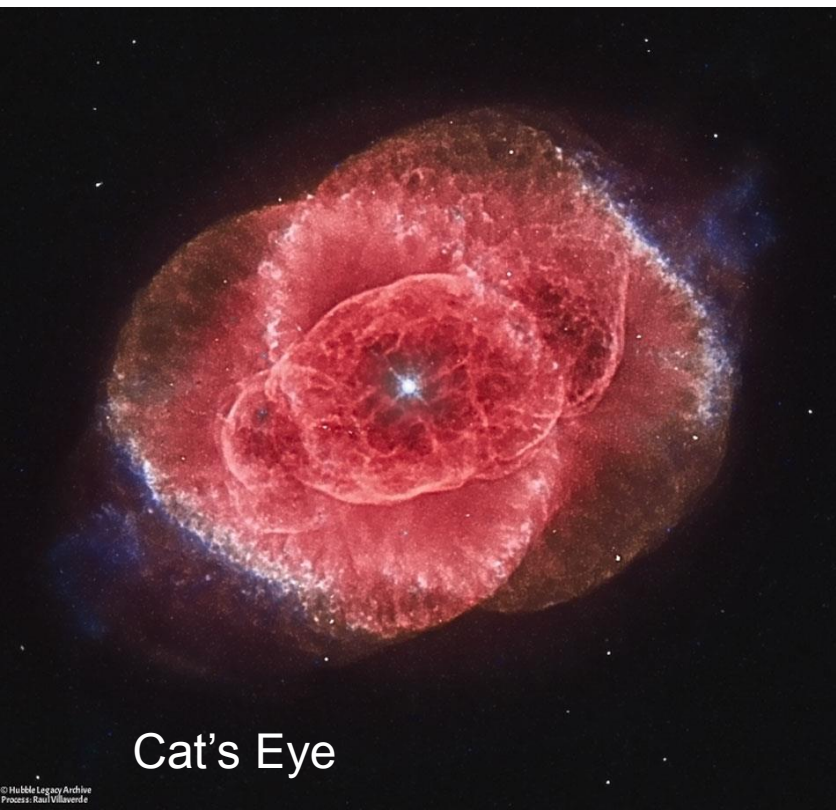
$$B/A = [Zm_p + Nm_n - M(Z, N)]c^2 / (N + Z)$$

Bindungsenergie pro Nukleon



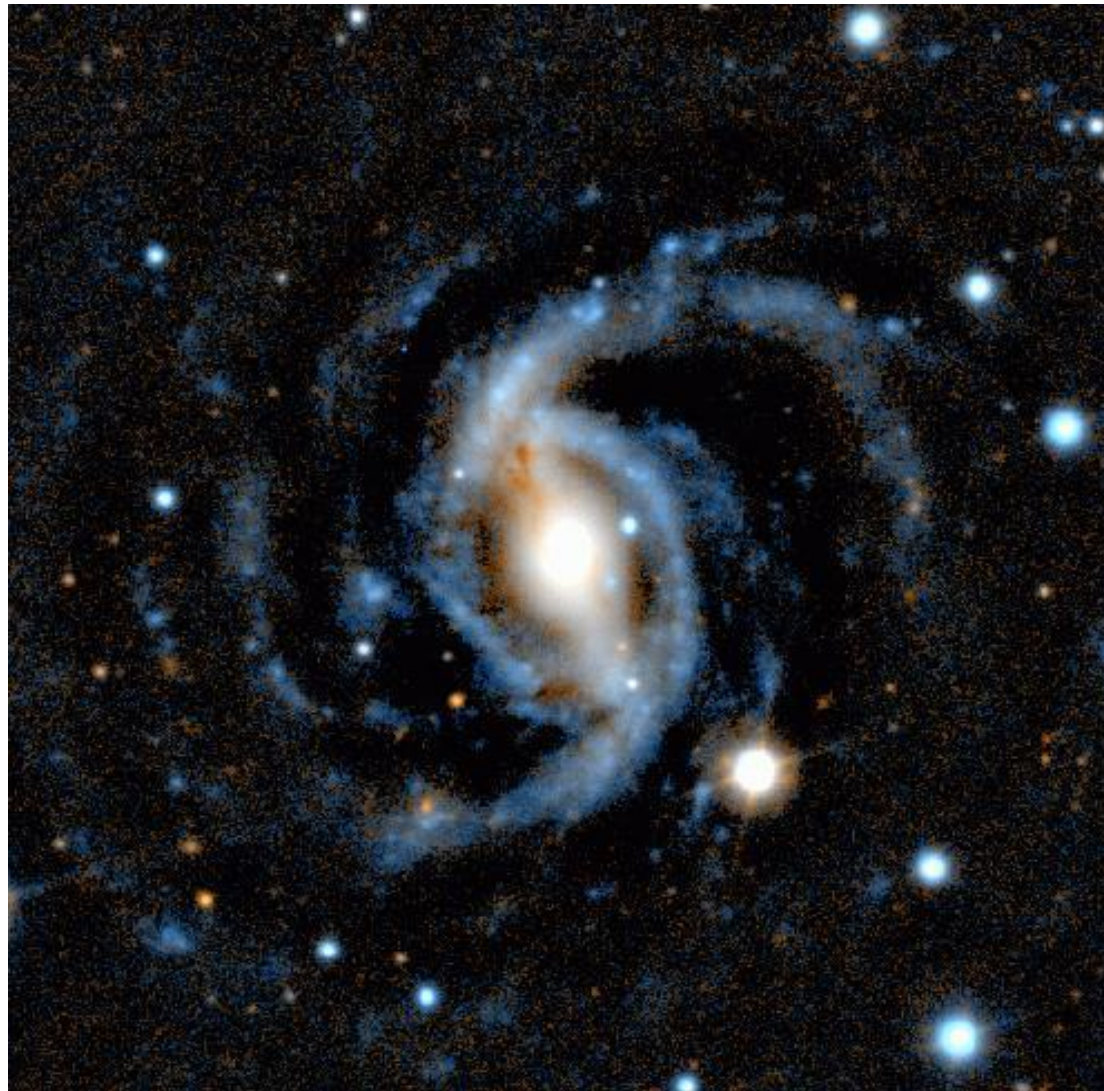
massereiche Sterne mit mehr als 8 Sonnenmassen durchlaufen alle Brennphasen bis zum **Siliziumbrennen**

masseärmere Sterne durchlaufen nur das Wasserstoff- und **Heliumbrennen** und werden **weisse Zwerge** nachdem die äusseren Hüllen als Wind abgeblasen worden sind.



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

Supernovaexplosionen, so hell wie Galaxien



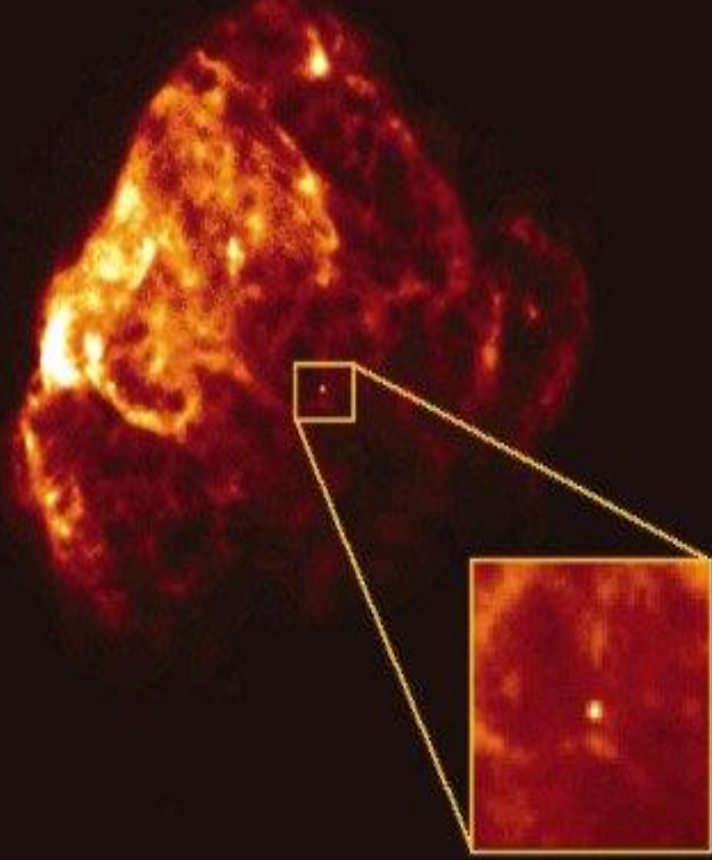
Galaxie NGC5921 mit Supernova

Supernova 1987A (nach und vor Explosion)

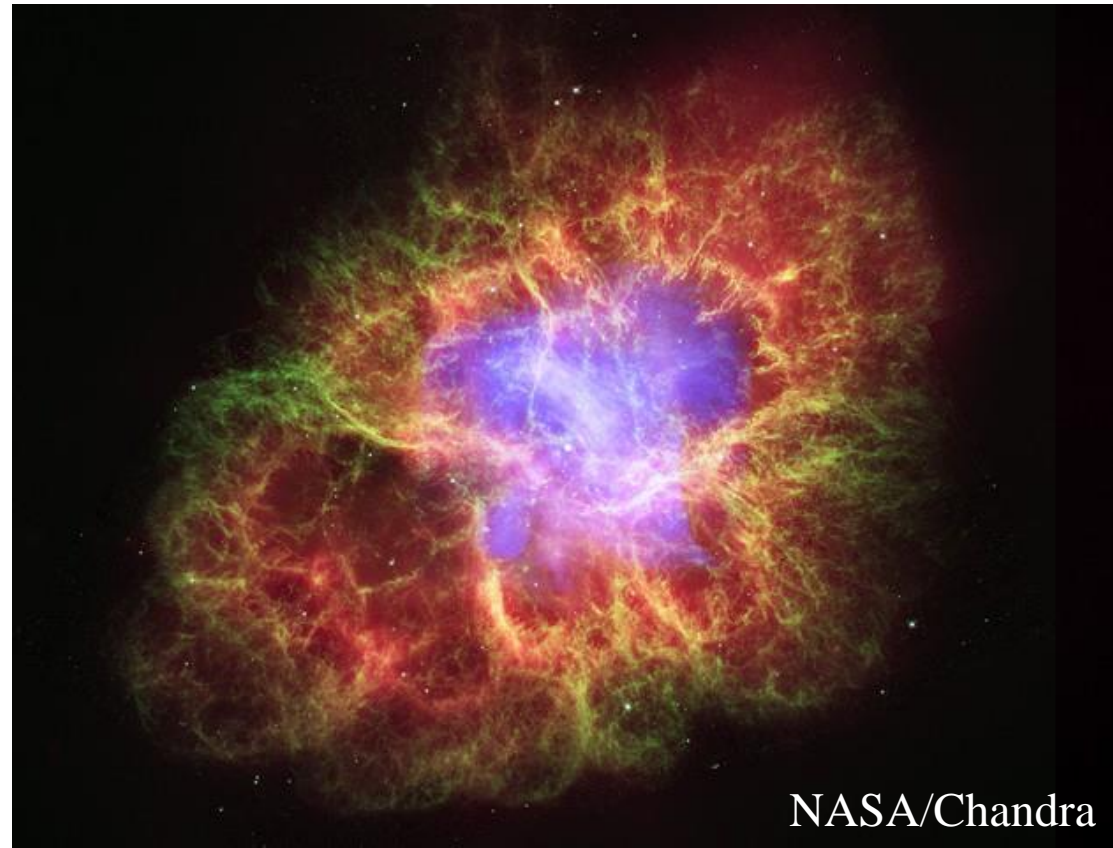


Der Neutronensterne in Supernova- Ueberresten

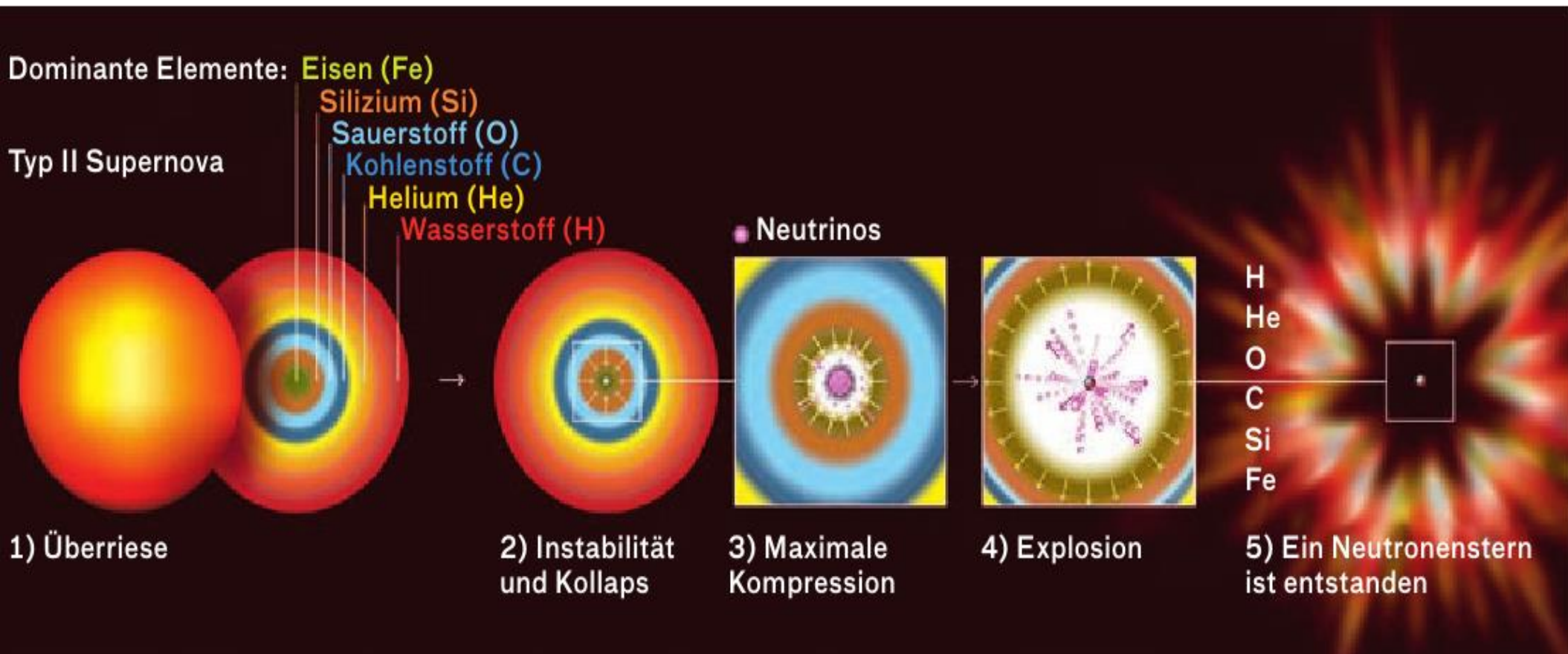
Puppis A im Röntgenlicht (ROSAT),
Supernova vor 3700 Jahren



Krebsnebel, Explosion vor 1054 Jahren

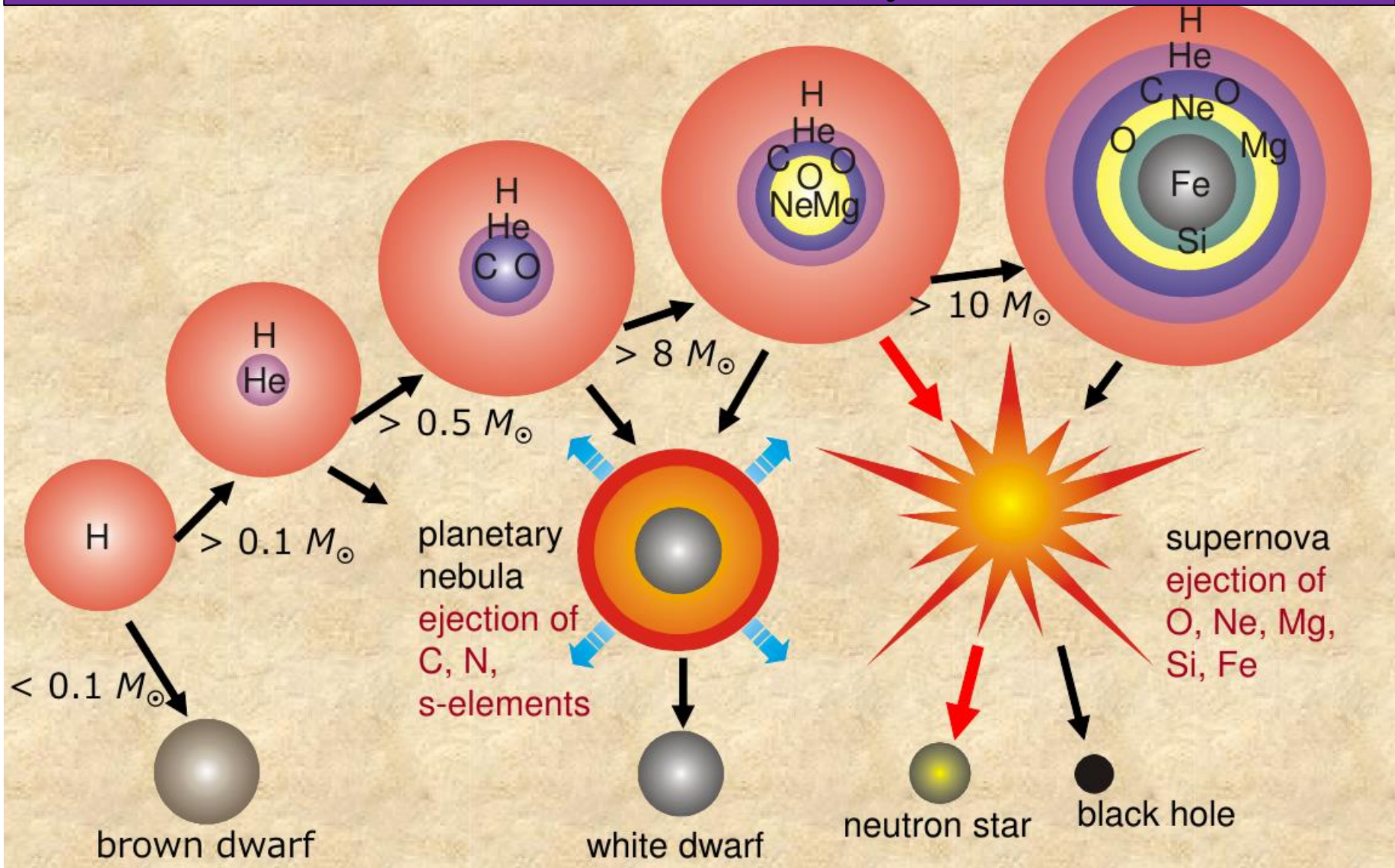


Core-Kollaps-Supernovae und Neutronensterne als Endstadium massereicher Sterne



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

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



Massenaustausch in Doppelsternsystemen



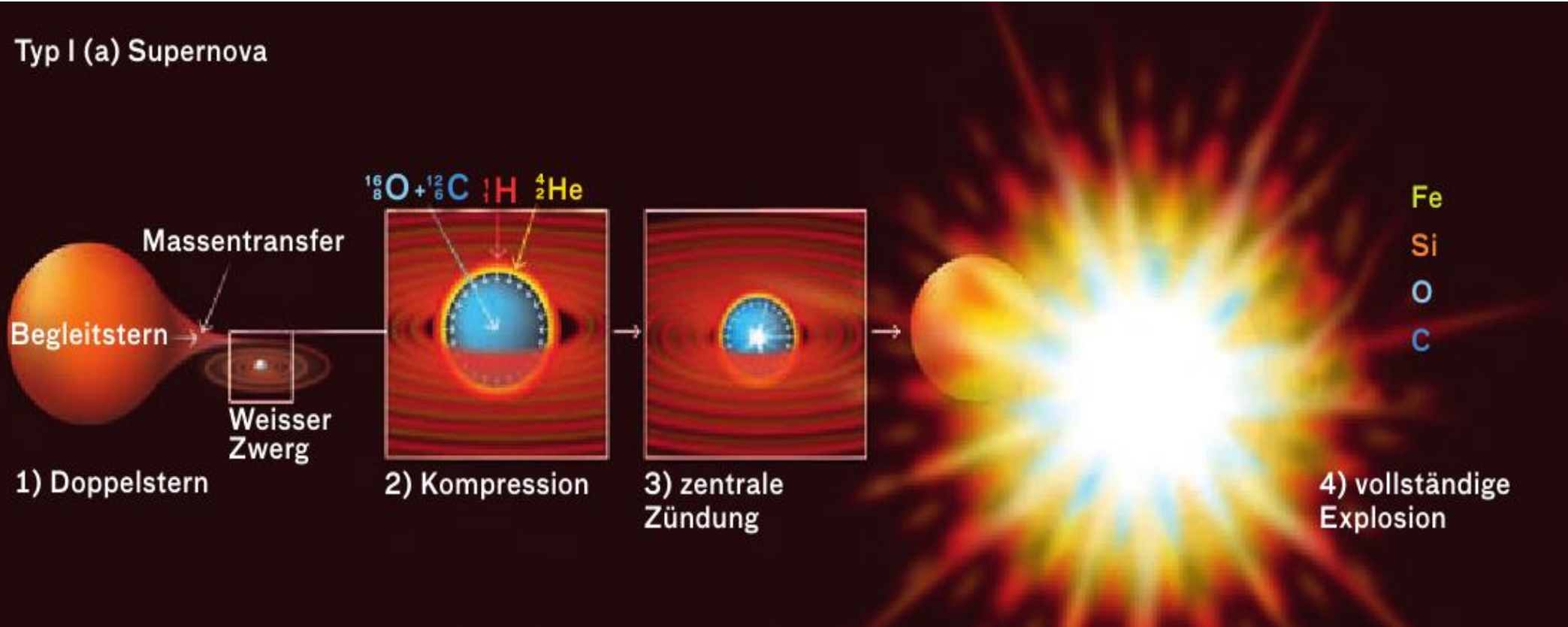
durch Anwachsen des Radius eines Sterns (z.B. Roter Riese) wird der Abstand zu seinem Zentrum so gross, dass die **Gravitationskraft in Richtung auf den Begleiter** grösser ist (Massentransfer)

aus der Hülle lagert sich unverbrannter Wasserstoff an

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

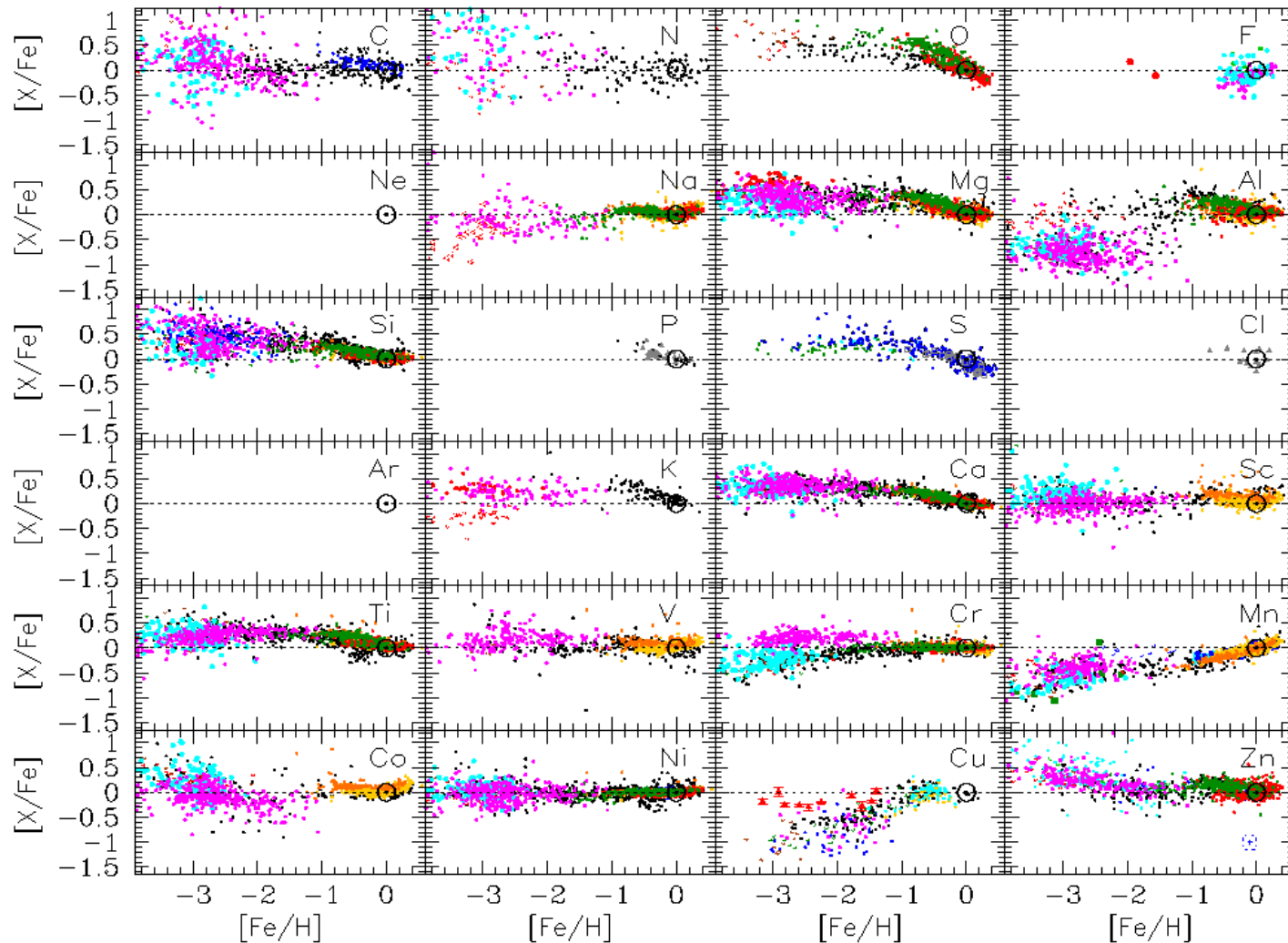
Typ Ia-Supernovae durch Massenübertrag in Doppelsternsystemen

Typ I (a) Supernova



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

Spektren alter Sterne informieren über die Elemententwicklung in unserer Galaxie (der Milchstrasse)

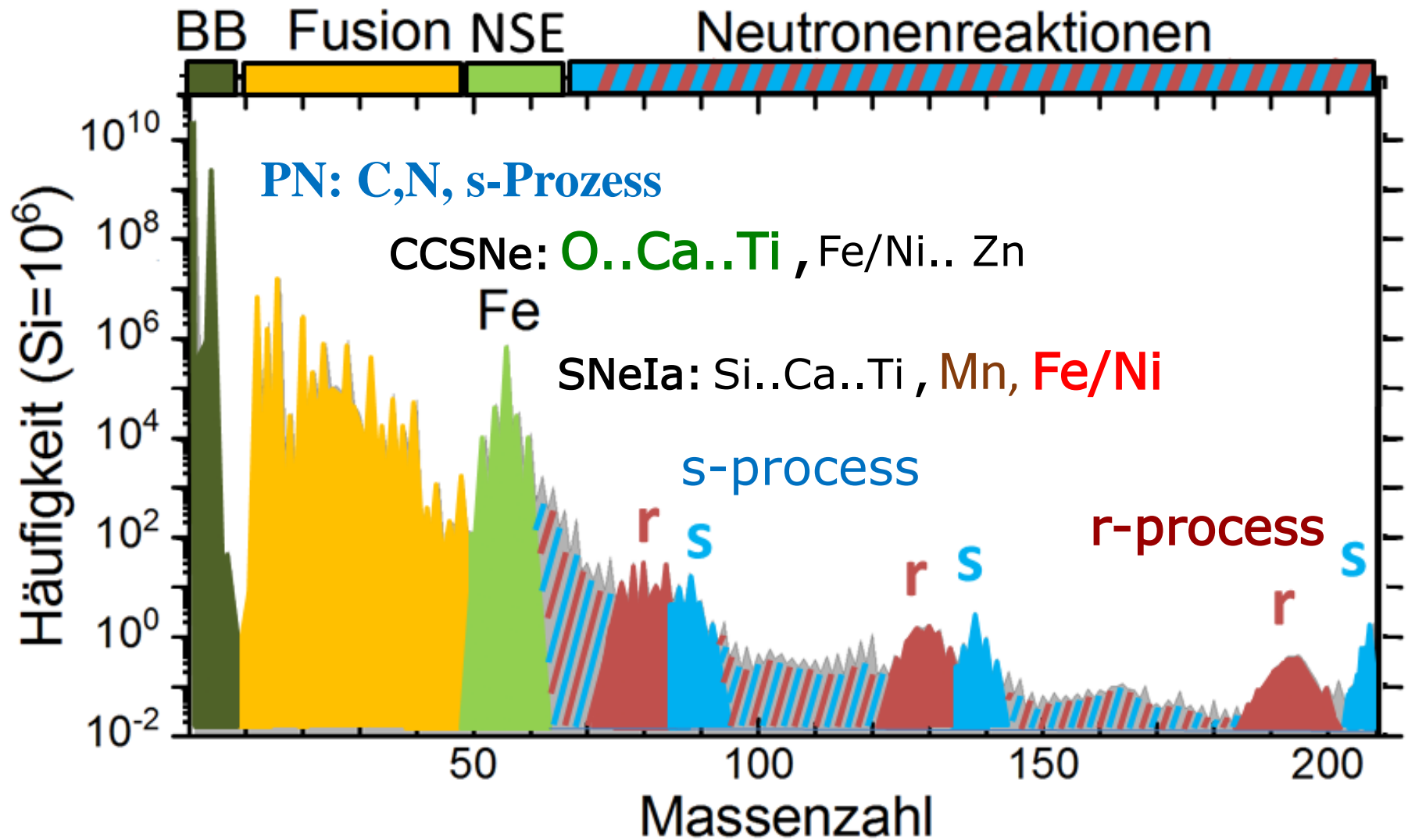


von
N. Prantzos

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.

BBN macht ${}^1_2\text{H}$, ${}^3_4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$

Wie entstehen Elemente schwerer als Eisen?



Langsamer (s=slow) und schneller (r=rapid) Neutroneneinfang
Erste Ideen 1957 von B²FH und Cameron mit der Postulierung von H- und He-Brennen, alpha-Prozess, e-Prozess, x-Prozess und r- und s-Prozess.

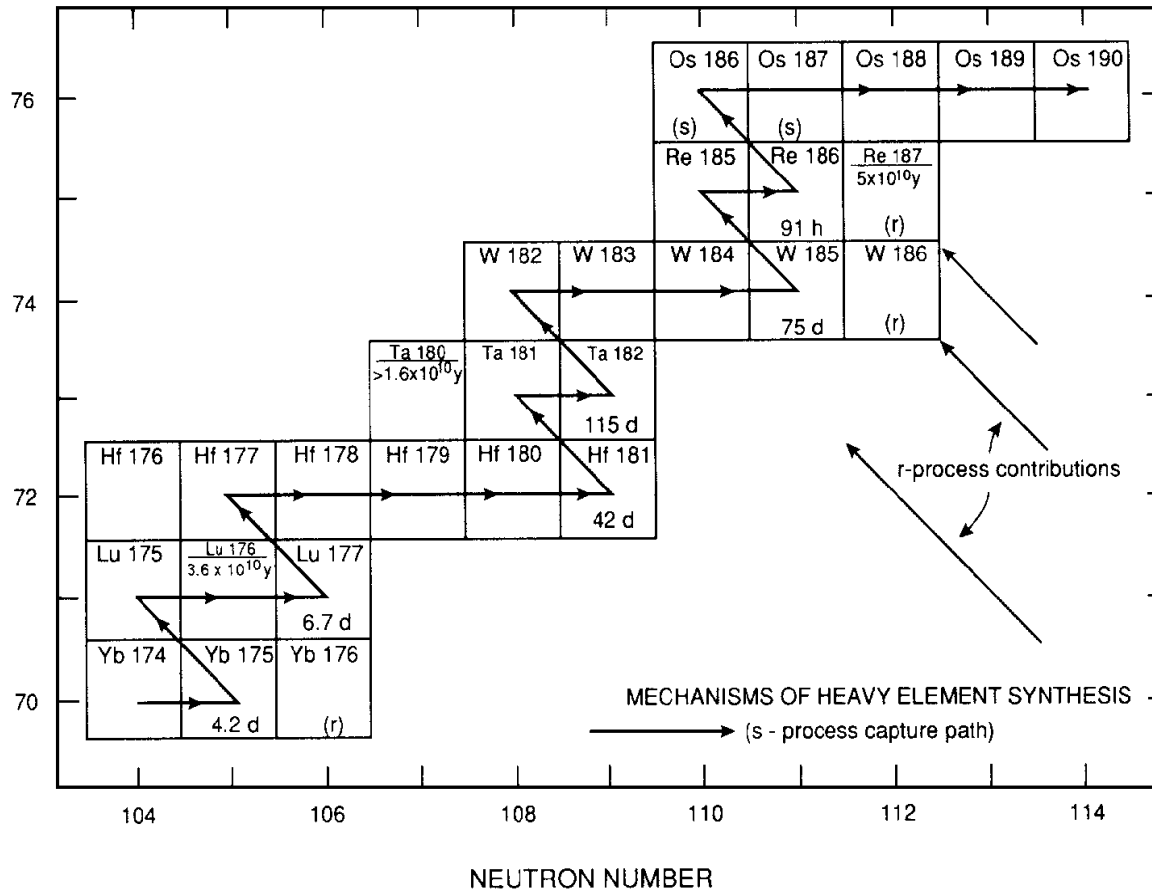
s-Prozess (slow neutron capture)

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

mögliche Vernichtung des Kerns (Z,A) durch Beta-Zerfall oder Neutroneneinfang. Bei geringen Neutronendichten gilt immer

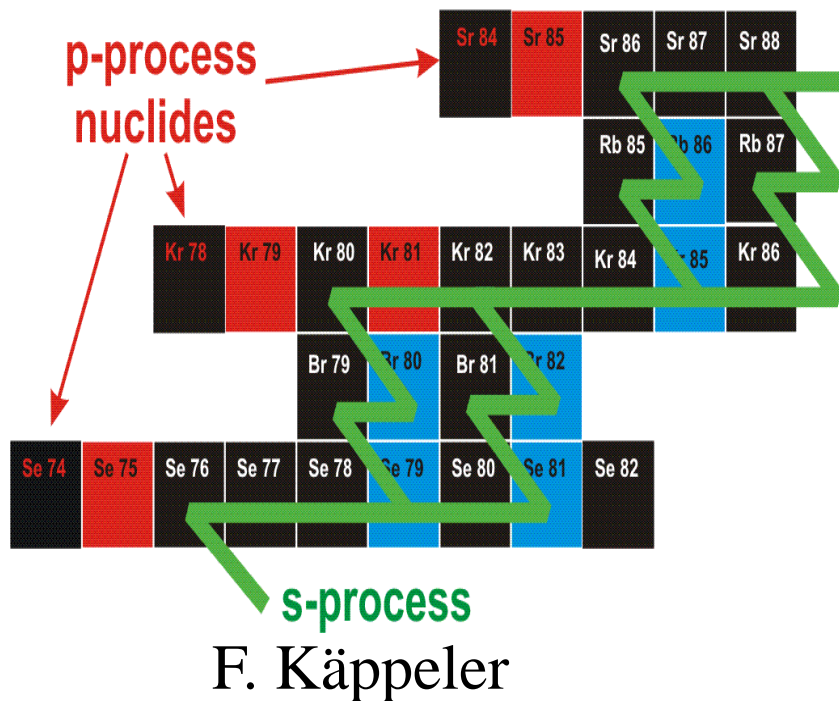
$$\tau_n > \tau_\beta \quad \text{d.h. Beta-Zerfall nach } (Z+1, A)$$

und der Reaktionsfluss durch den s-Prozess-Pfad wird ausschliesslich durch die Geschwindigkeit der Neutroneneinfänge bestimmt.

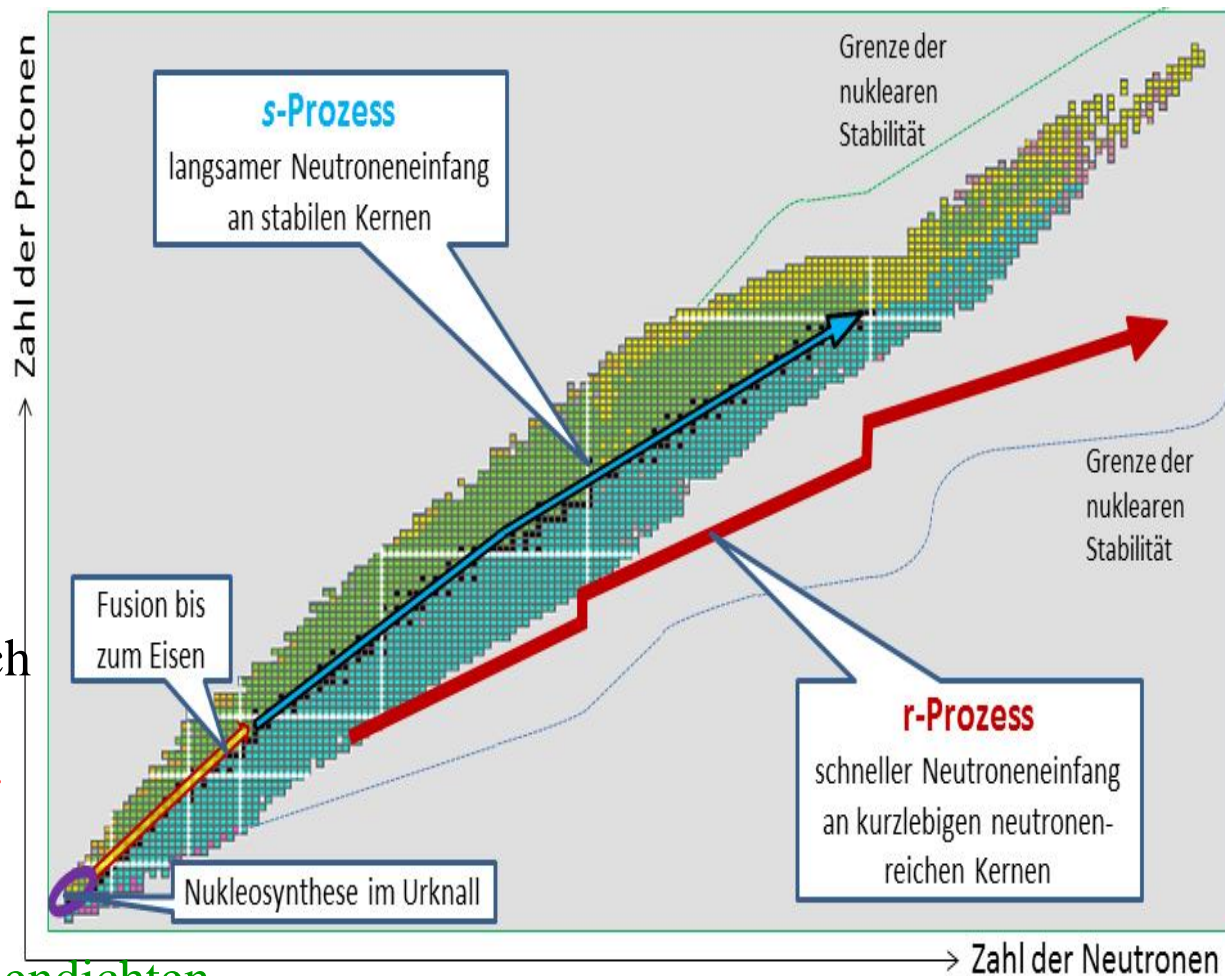


es stellt sich nahezu ein Flussgleichgewicht ein, Häufigkeitsmaxima entstehen an Neutronenschalenabschlüssen, wo Neutroneneinfangsraten klein sind.

s-, r- und p-Prozess



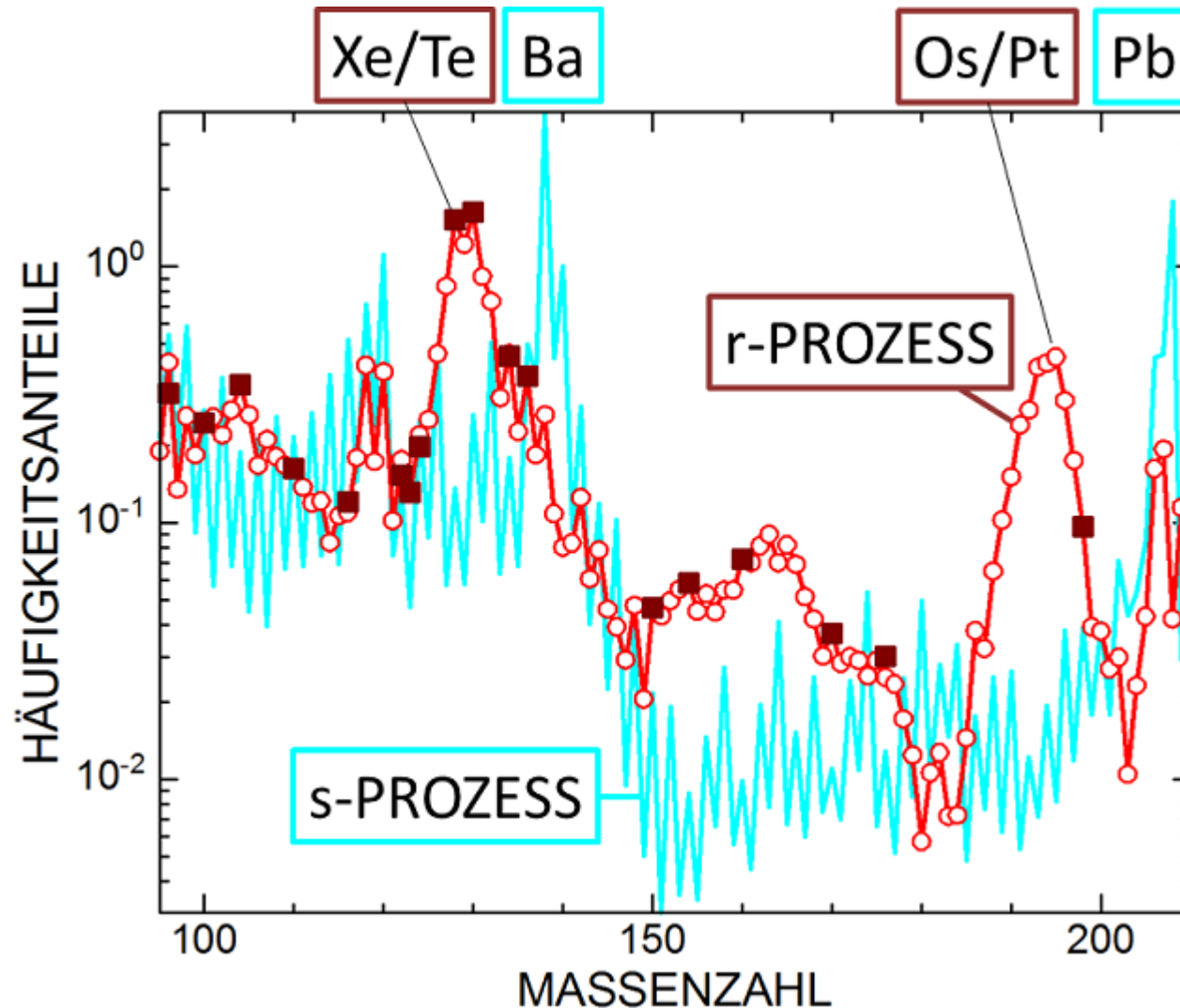
*Kerne weitab der Stabilität:
Grossprojekte GSI/FAIR (Darmstadt),
FRIB (MSU-USA),
RIKEN (Tokio-Japan)*



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?????

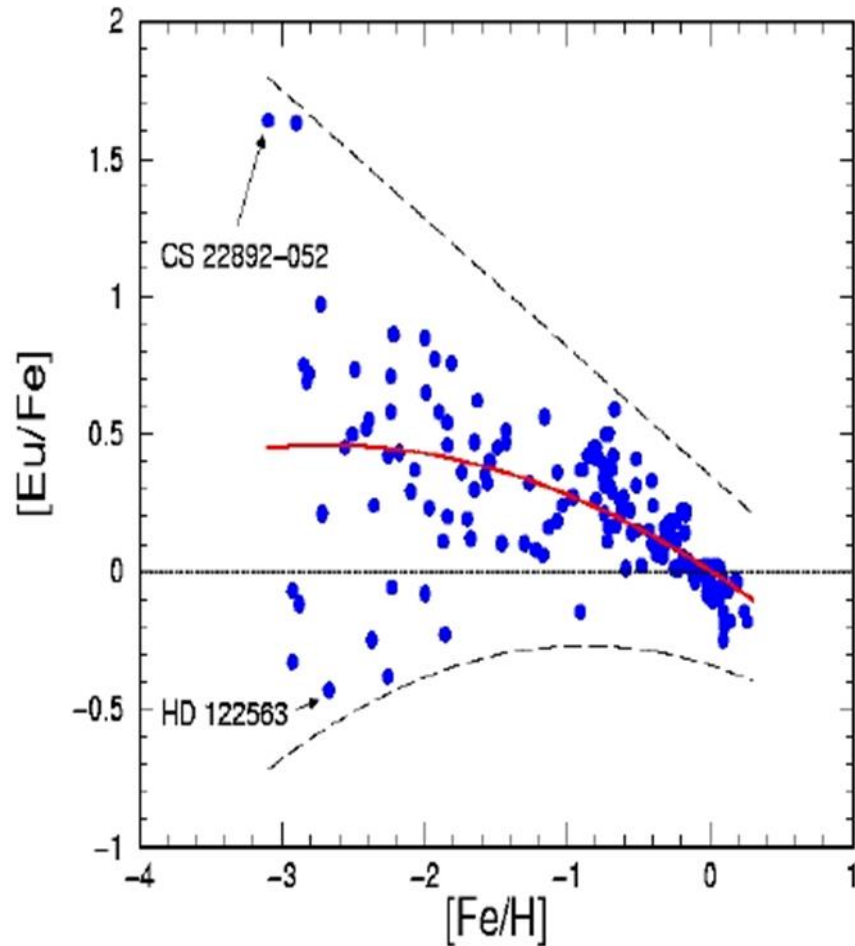
Zerlegung in s- und r-Prozess



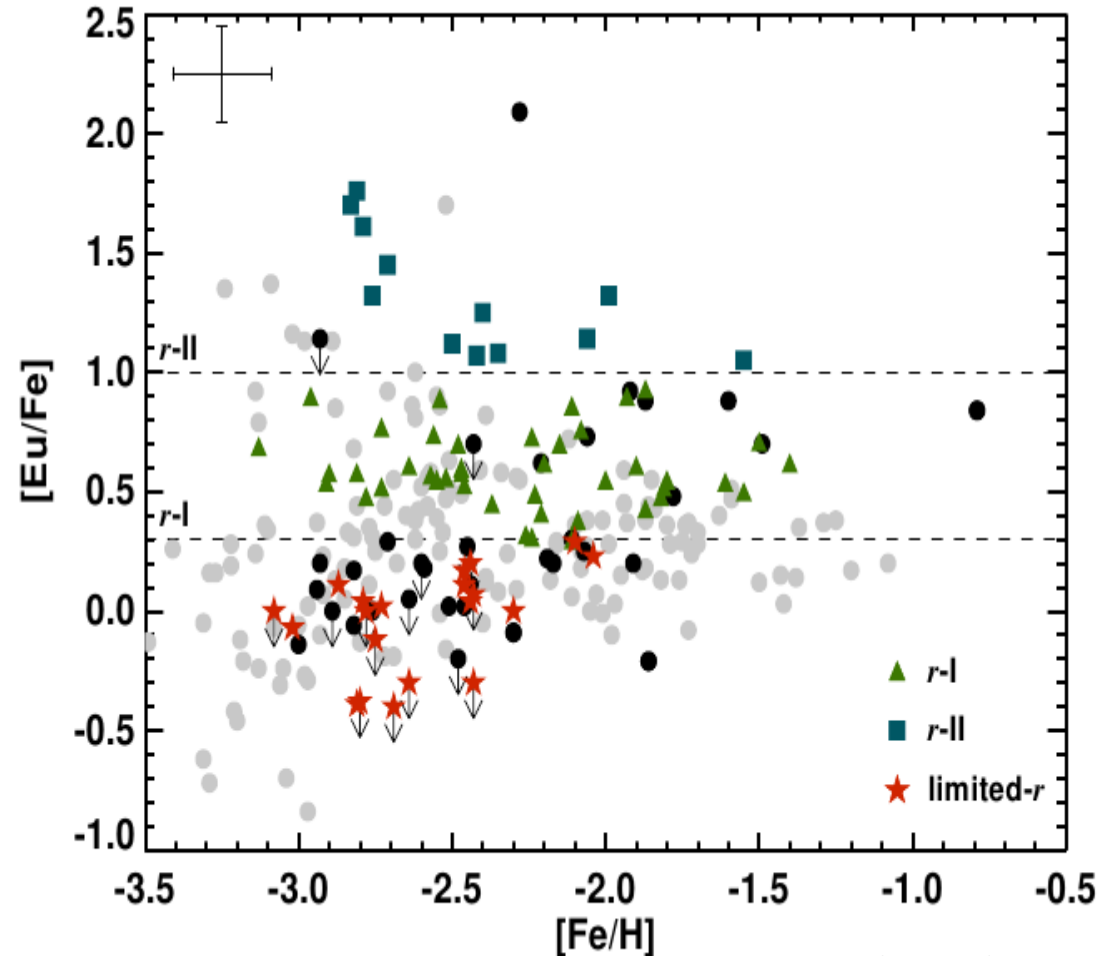
es gibt reine s- und r-Kerne, andere haben einen Beitrag vom s- und r-Prozess. Da der s-Prozess verstanden ist (bekannte Kernphysik nahe der Stabilität sowie verstandene Sternmodelle), kann die r-Komponente durch Subtraktion von solaren Häufigkeiten erreicht werden.

Das gemittelte Eu/Fe -Verhältnis (r -Prozess) verhält sich wie bei CCSNe das α/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 oder seltene Supernovae/Hypernoae/Collapsare)?



Cowan & Thielemann (2004)

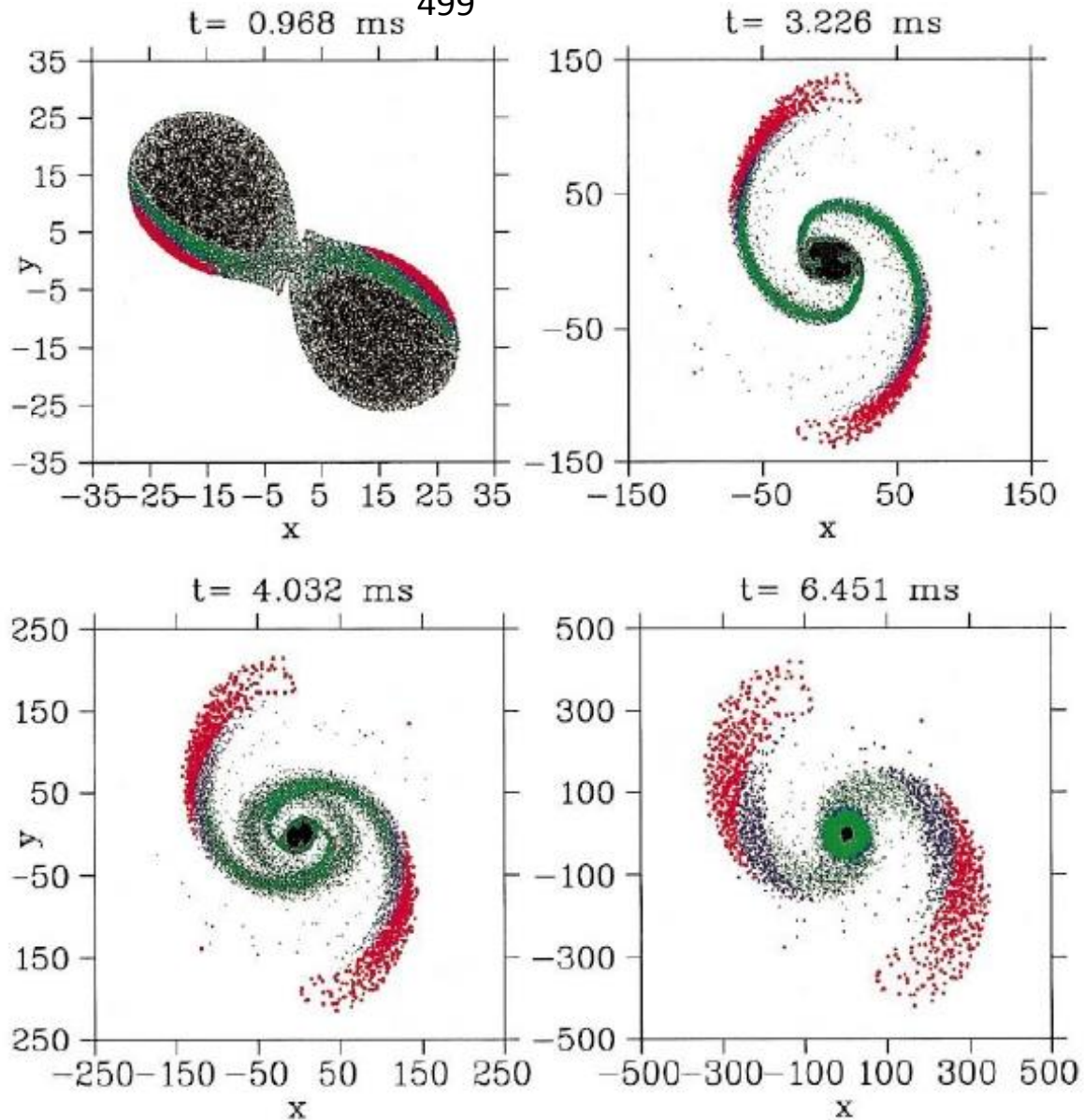


«The r-process alliance» Hansen et al. (2018)

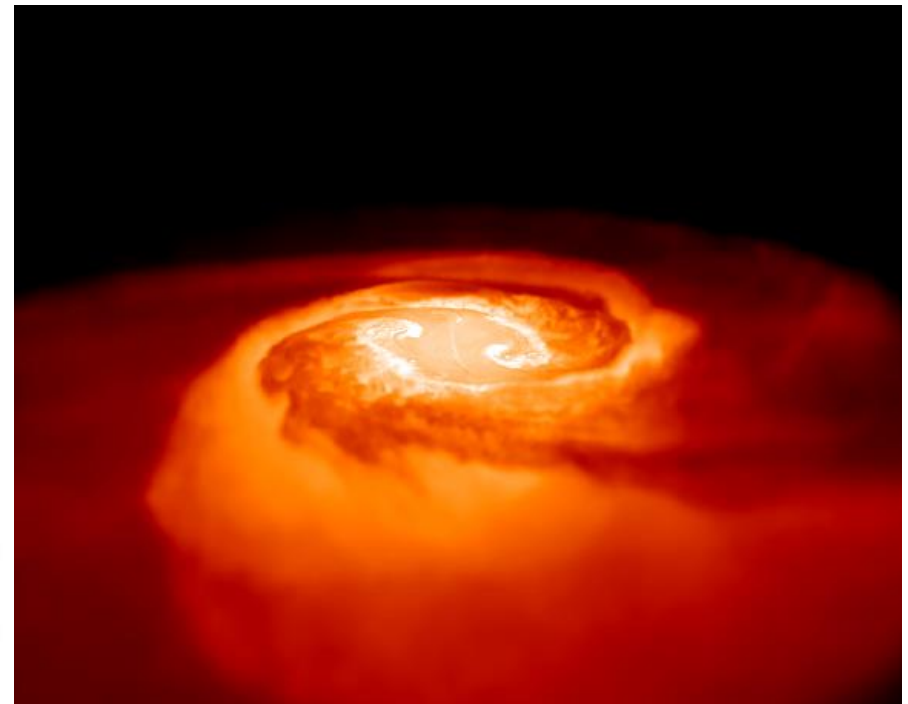
Im Vergleich zu Roederer et al. (2014, graue Punkte)

Simulationen von Neutronenstern-Verschmelzungen

Rosswog et al.
A&A 341 (1999)
499



Neutronensterne sind sehr
neutronreich n/p -Verhältnis >20



Rosswog et al. 2014

Die Arme werden zum Teil weggeschleudert,
im Zentrum bildet sich ein schwarzes Loch

LIGO Hanford Detektor zur Beobachtung von Gravitationswellen

Schenkellänge jeweils 4km, aber Laserlicht kann im Hochvakuum so häufig reflektiert werden, dass dies einer effektiven Länge von 1120km entspricht

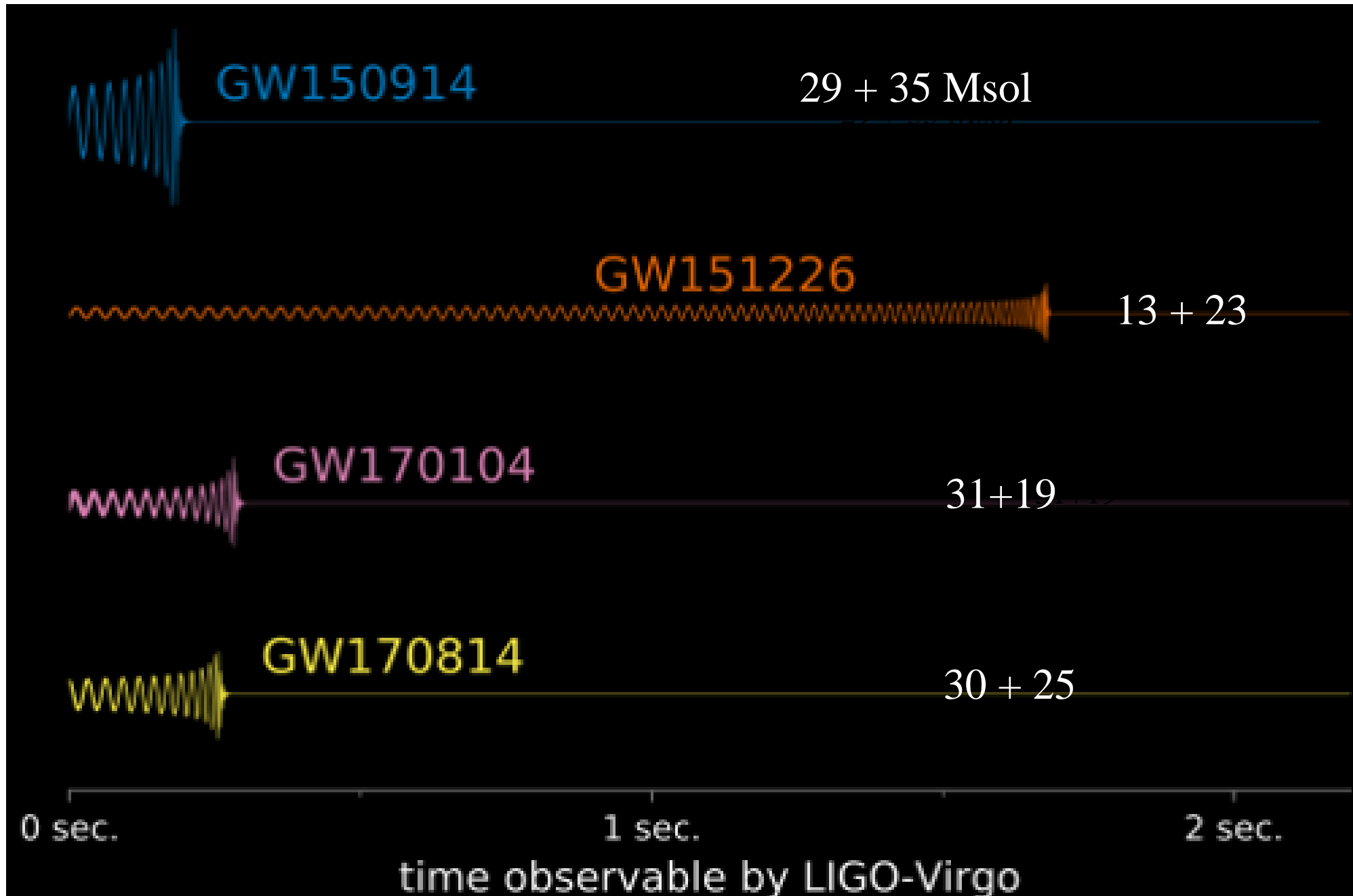
Kleine Wegunterschiede in den beiden Schenkeln führen zu Interferenzen und zeigen wie eine Gravitationswelle über den Detektor hinwegläuft.

Dabei können Wegunterschiede von der Grösse eines Protons (10^{-15}m) gemessen werden!!

Inzwischen gibt es drei aktive Detektoren (zwei von LIGO), dazu Virgo (nahe Pisa), bald auch KAGRA (Japan)

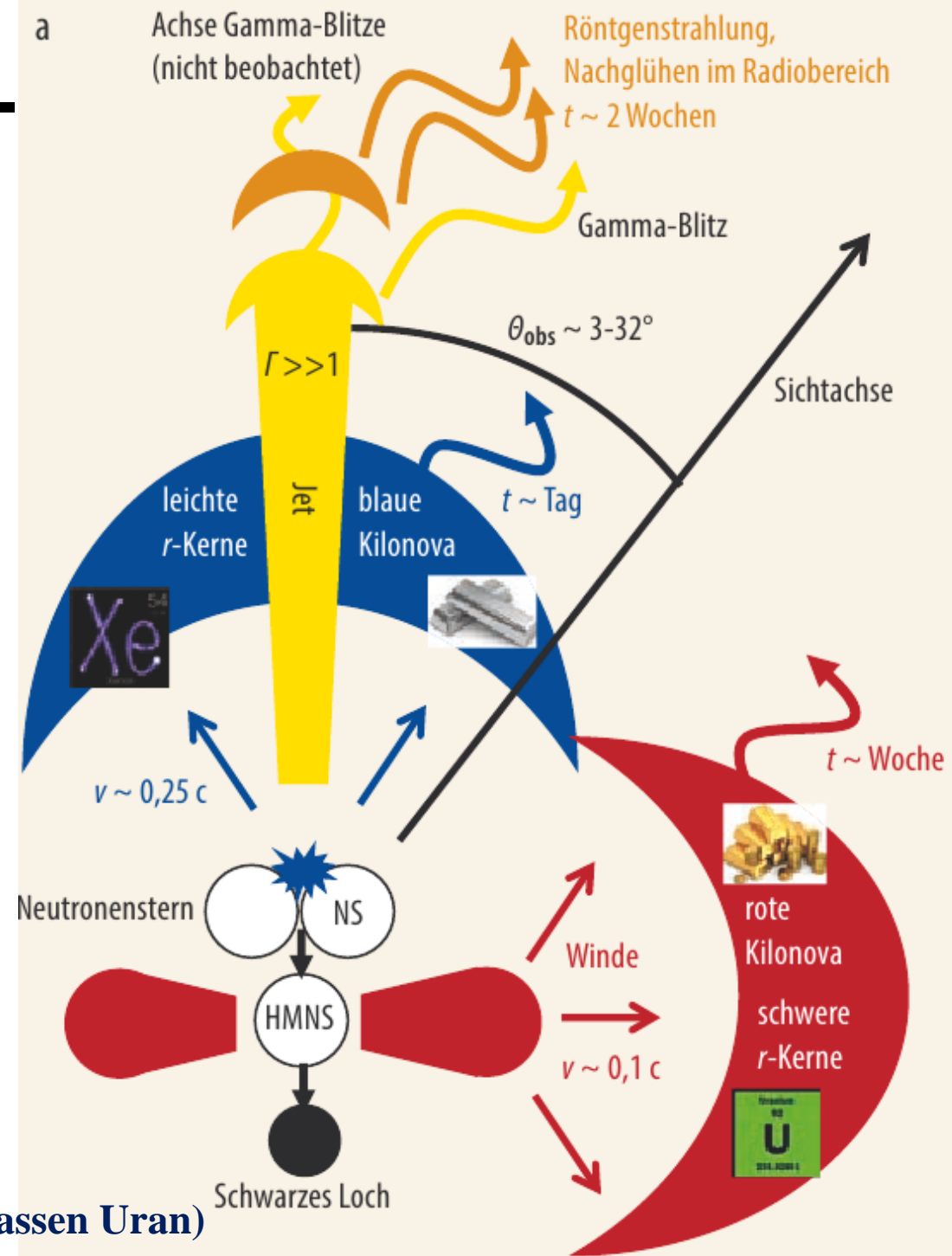


Beobachtete Verschmelzungen Schwarzer Löcher



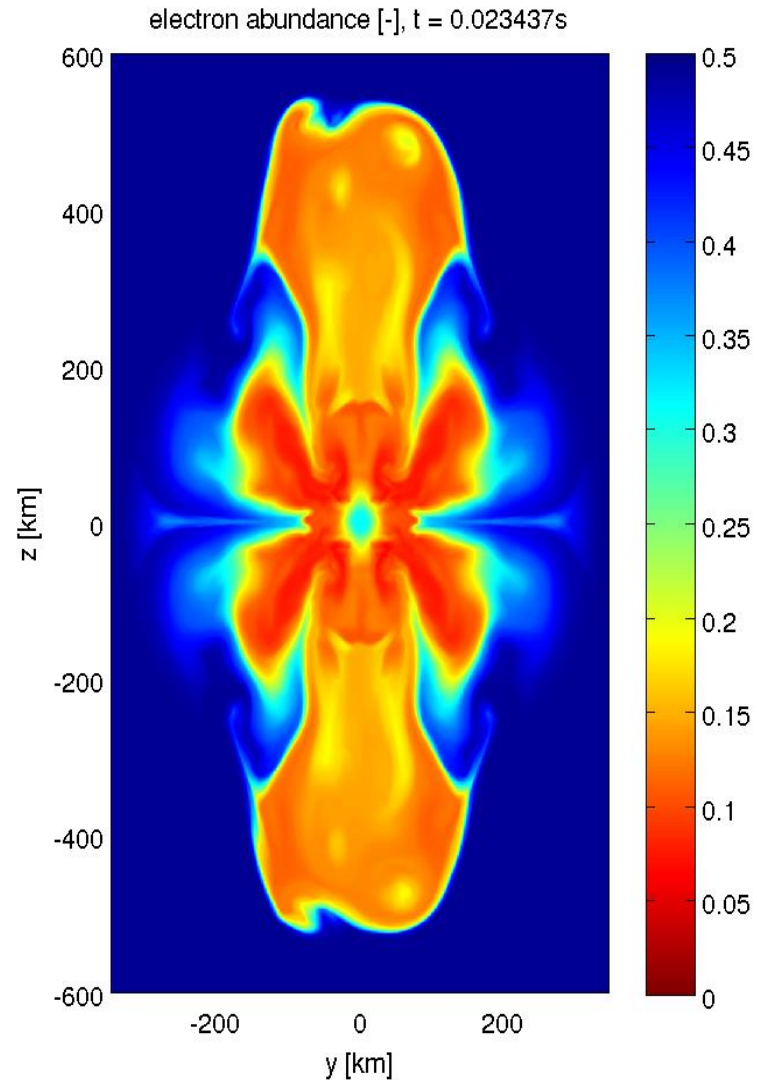
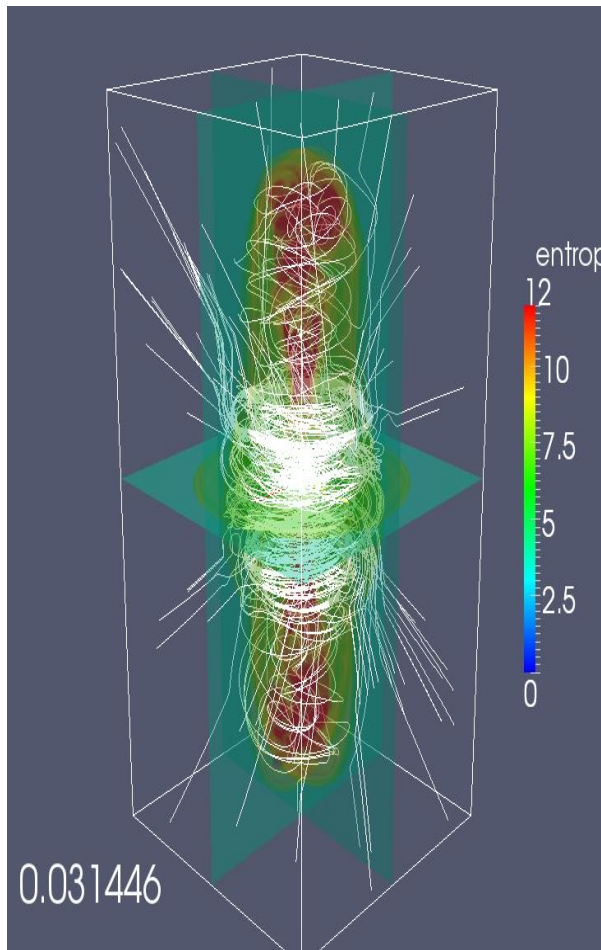
GW170817, die erste beobachtete Neutronensternverschmelzung

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. Ursprünglich optisch dichte Ejekta ergeben optisches/infrarotes Nachglühen abhängig von der Komposition (unter anderem etwa 40 Erdmassen Gold, 10 Erdmassen Uran)



Eine seltene Klasse von Supernovae mit schneller Rotation und hohen Magnetfeldern

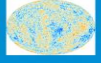





die zu schnell rotierenden Neutronensternen mit sehr hohen Magnetfeldern führen (Magnetare, 10^{15} Gauss)



n/p-Verhältnisse
von 10

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

The Origin of the Solar System Elements

1 H	Urknall 						Kosm. Strahlung 						2 He				
3 Li	4 Be	Neutronenstern- verschmelzungen 				Core-Collapse Supernovae 				5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
11 Na	12 Mg	Planet. Nebel 				Typ Ia Supernovae 				13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra																
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U												

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


J. Johnson (2019): 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.

Astronomical Image Credits:
ESA/NASA/AASNova

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!!

Lassen Sie mich zum Schluss noch etwas Werbung für unsere Europäische COST Action ChETEC (Chemical Elements as Tracers of the Evolution of the Cosmos) machen, die einen Kalender 2020 erarbeitet hat, der bedeutende Frauen der Nuklearen Astrophysik porträtiert

2021 Calendar



presented by COST Action ChETEC

Women Scientists Who Made Nuclear Astrophysics

Er kann in 24 Sprachen von dieser Webseite heruntergeladen werden:
<http://www.chetec.eu/news>