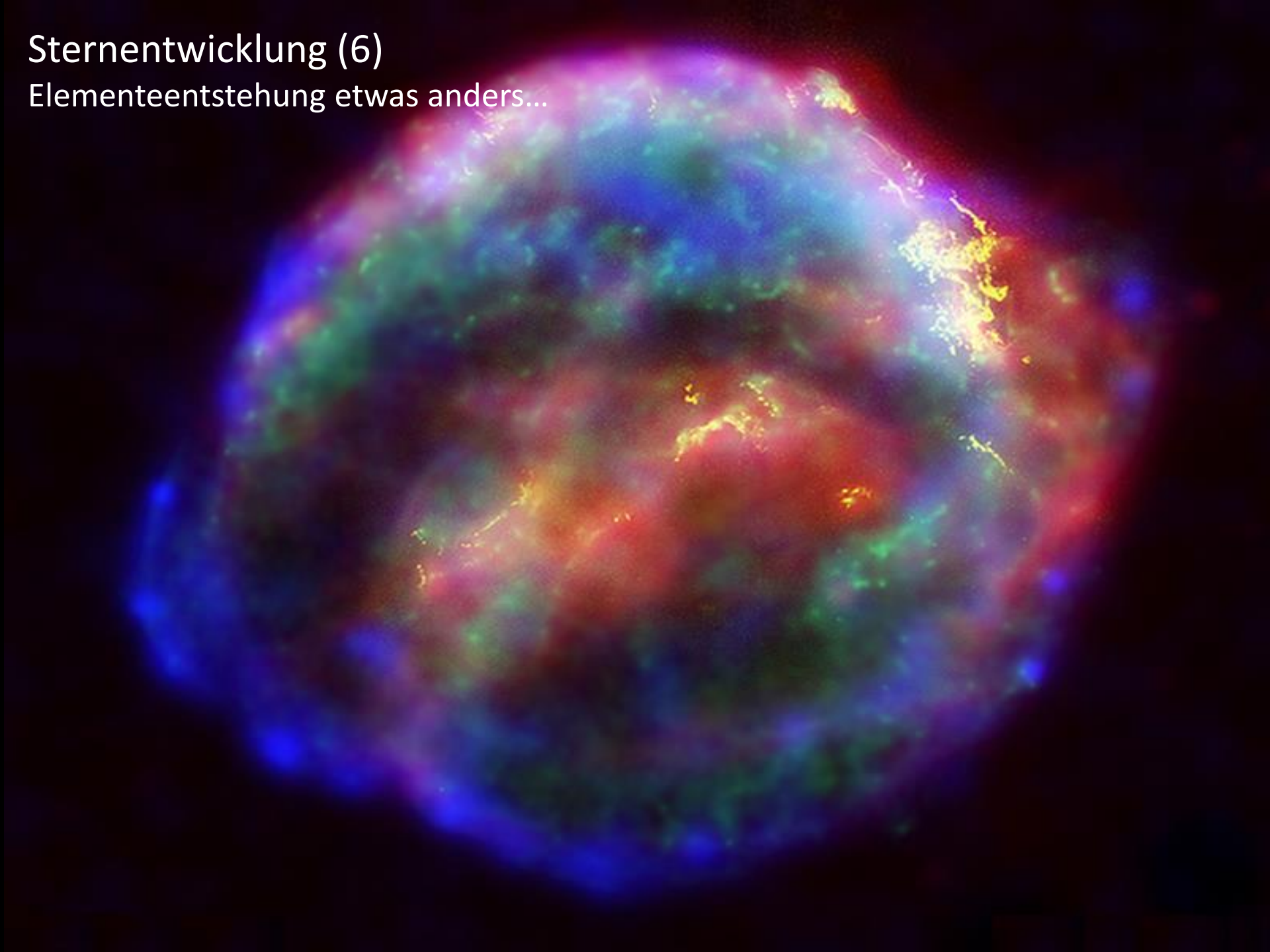
# Sternentwicklung (6)

Elementeentstehung etwas anders…



# Schalenbrennen innerhalb von Sternen, die den asymptotischen Riesenast im Hertzsprung-Russell-Diagramm bevölkern

Stern mit ~ zwei Sonnenmassen mit beginnenden Kohlenstoffbrennen → **AGB – Stern**

~ 1000 facher Sonnendurchmesser

$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{24}Mg + \gamma$

$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{23}Mg + n$ (endotherm)

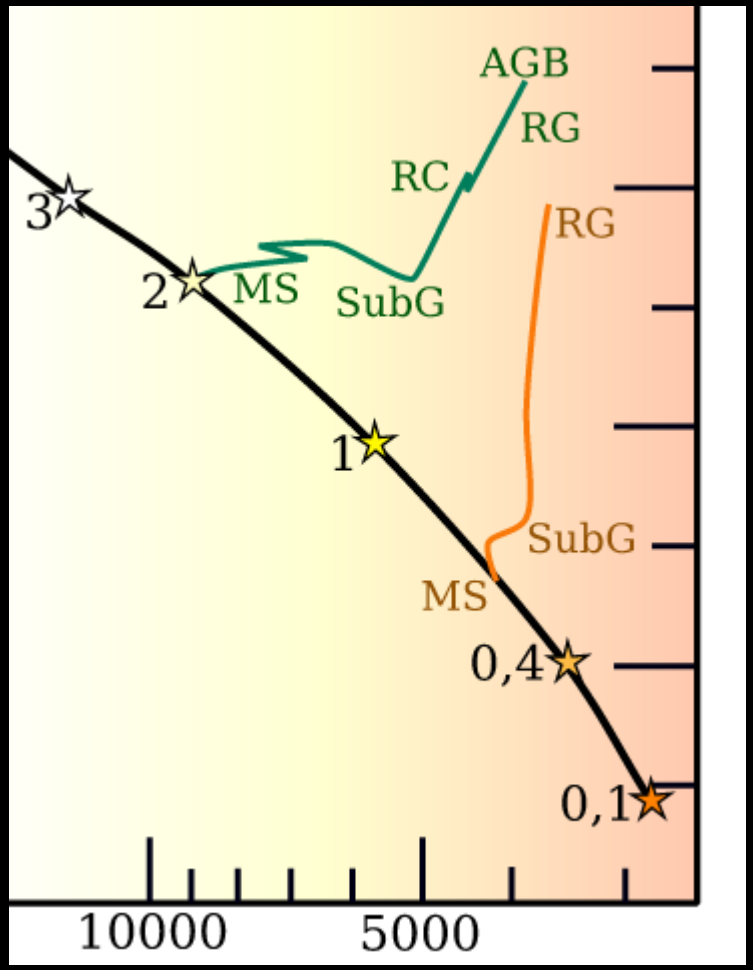
$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{23}Na + {}^{1}H$ Neutronenfreisetzung!

$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{20}Ne + {}^{4}He$

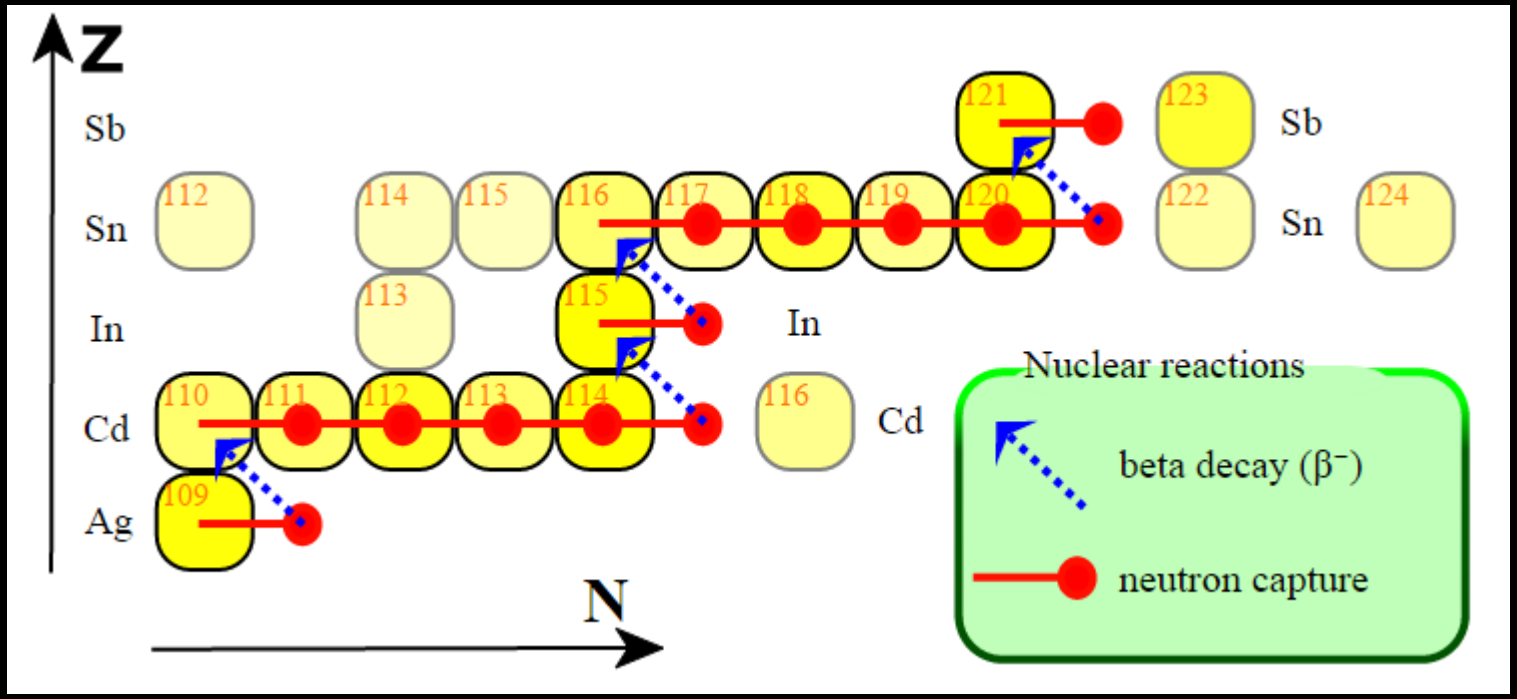
$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{16}O + 2\ {}^{4}He$ (endotherm)

Im kohlenstoffbrennenden Bereich entstehen Neutronenflüsse, die zwar nicht sehr hoch sind , die aber ausreichen, um eine Vielzahl von Neutroneneinfangreaktionen in der kohlenstoff-brennenden Schicht und darüber zu ermöglichen

**s - Prozeß**



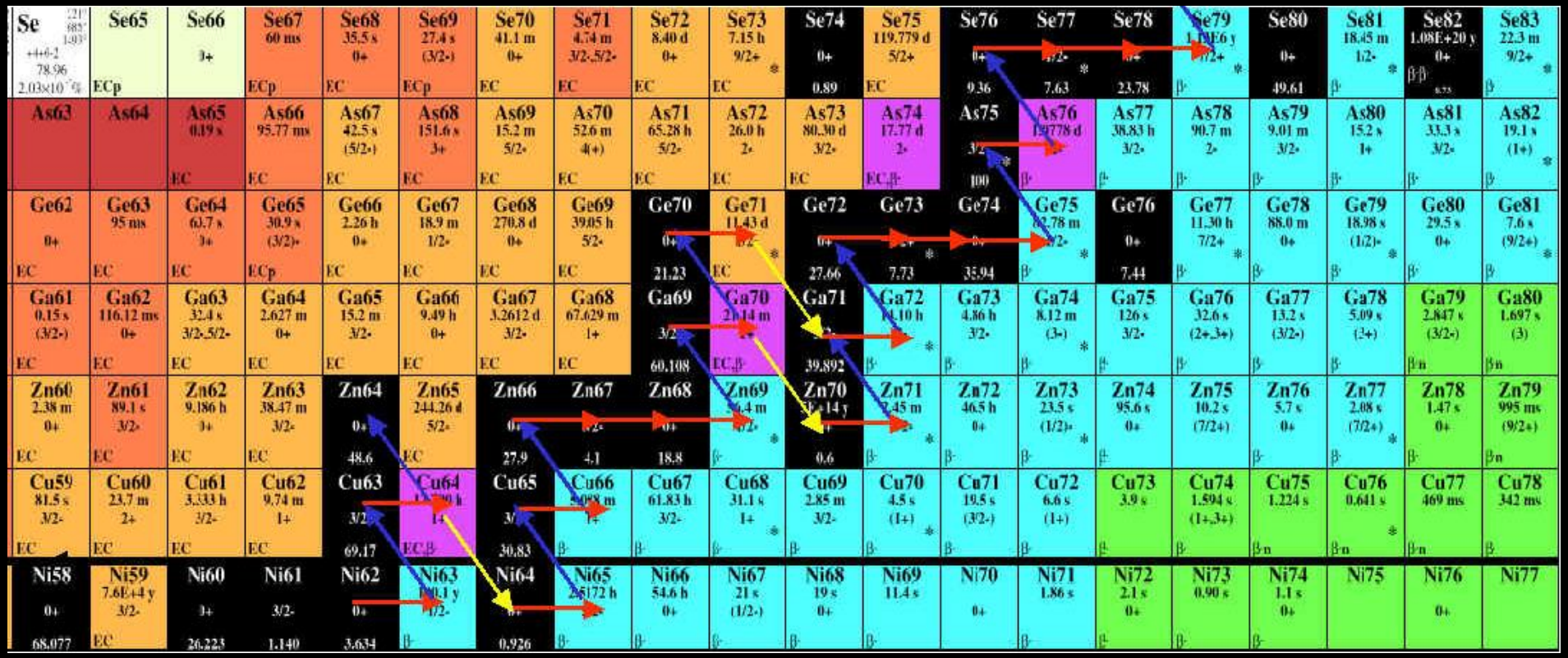
Die Neutronenflüsse bedingen bei den hohen Temperaturen Neutroneneinfangreaktionen, die über Kernreaktionsketten weitere Elemente oberhalb von Eisen erzeugen.




Reaktionskette, bei der aus Silber Antimon entsteht…

Da derartige Reaktionen „langsam“ vonstatten gehen, nennt man sie „**s-Prozesse**“

# s-Prozeß bei der Arbeit…




Rote Pfeile: Neutroneneinfang

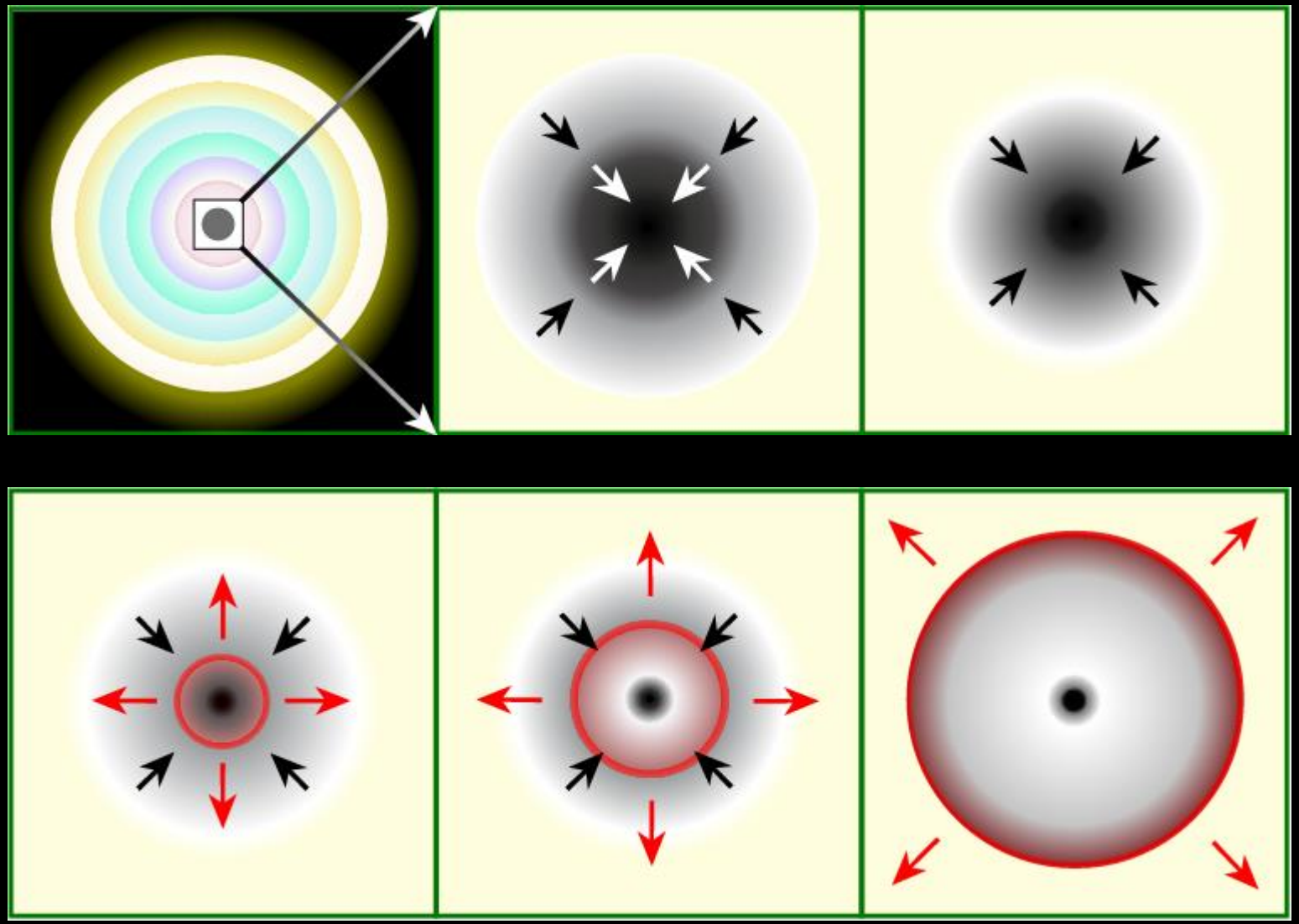
Blaue Pfeile: Neutronenzerfall (Beta-Minus Zerfall) n → p + Elektron + Antineutrino

Gelbe Pfeile: Protonenzerfall (Beta-Plus Zerfall) p → n + Positron + Neutrino

Die Reaktionskette ist dann beendet, wenn ein stabiles Isotop erreicht wird.

# Supernovae und r-Prozeß

Beispiel: Hydrodynamische Supernova (Kernkollaps)



# Dynamik eines Kernkollapses

Ein Stern mit einer Masse, die mindesten 8 Sonnenmassen beträgt, gelangt am Ende seiner Entwicklung in das Regime des vollständigen Schalenbrennens, bei dem im Sternzentrum schließlich Temperaturen und Dichten erreicht werden, die das sogenannte Siliziumbrennen ermöglichen ($T>2{,}7\cdot10^9$ K; $\rho>3\cdot10^{10}$ kg/m³). Es faßt einige, energetisch bereits recht uneffektive Kernfusionsreaktionen zusammen, in deren Ergebnis zuerst Nickel Ni aus zwei Si-Kernen und in weiteren Reaktionen aus Ni Kobalt (Co) und aus Co Eisen (Fe) gebildet wird. Oberhalb von Eisen existieren nur noch endotherme Fusionsreaktionen, die keinen Beitrag mehr zur hydrostatischen Stabilisierung eines Sterns leisten können.

Sobald die Energieerzeugung nicht mehr ausreicht den Stern stabil zu halten, versucht er das entstehende Energiedefizit durch Kontraktion des Kerns auszugleichen, was in diesem Fall bedeutet, daß der Kern im freien Fall zu kollabieren beginnt (Gravitationskollaps). Dadurch steigt die Dichte schnell an und der Eisenkern wird unter endothermer Photodesintegration der Fe-Kerne soweit zusammengepreßt, daß die Materie durch eine Art inversen β-Zerfall in Neutronenmaterie umgewandelt wird. Bleibt dabei die kollabierende Kernmasse unterhalb der Oppenheimer-Volkoff-Grenze (sie liegt irgendwo zwischen 1,5 und 3,2 $M_\odot$), dann kann der quantenmechanisch bedingte Entartungsdruck der Neutronenflüssigkeit den Kollaps stoppen und den Sternkern in Form eines „Neutronensterns“ hydrostatisch stabilisieren. Andernfalls entsteht unweigerlich ein Schwarzes Loch bzw. der gesamte Stern wird zerstört (*pair instability supernova*), bevor dieser stellare Endzustand überhaupt erreicht wird. In beiden Fällen spricht man oft von einer Hypernova, wenn die dabei insgesamt durch elektromagnetische Strahlung freigesetzte Energie $10^{45}$ J übersteigt (entspricht ≈1/180 der „Ruheenergie“ der Sonne).

Bei Erreichen des zwei- bis dreifachem der Atomkerndichte wird der Kollaps gestoppt (soweit die Masse des kollabierenden Sternkerns die Oppenheimer-Volkoff-Grenze nicht übersteigt) und es entsteht so etwas wie ein *rebounce*, also eine Art Zurückschwingen in die endgültige Gleichgewichtslage (*core bounce*), was zu einer von innen nach außen laufenden Stoßwelle führt, die an ihrer Front die Materie enorm aufheizt: der Stern explodiert. Dabei wird dieses „Absprengen“ der Sternhülle durch einen enormen Strom von Neutrinos, der bei der „Neutronifizierung“ der Kernmaterie entsteht und eine Energiemenge in der Größenordnung von 10^46 J mit sich fortträgt, unterstützt. Die äußere Sternhülle expandiert schließlich mit einer Geschwindigkeit von ~10^5 km/s in den freien Raum, was einer kinetischen Energie von größenordnungsmäßig 10^44 J entspricht. Davon wird wiederum nur ein geringer Teil, ~10^42 J, in elektromagnetische Strahlung umgewandelt und abgestrahlt.

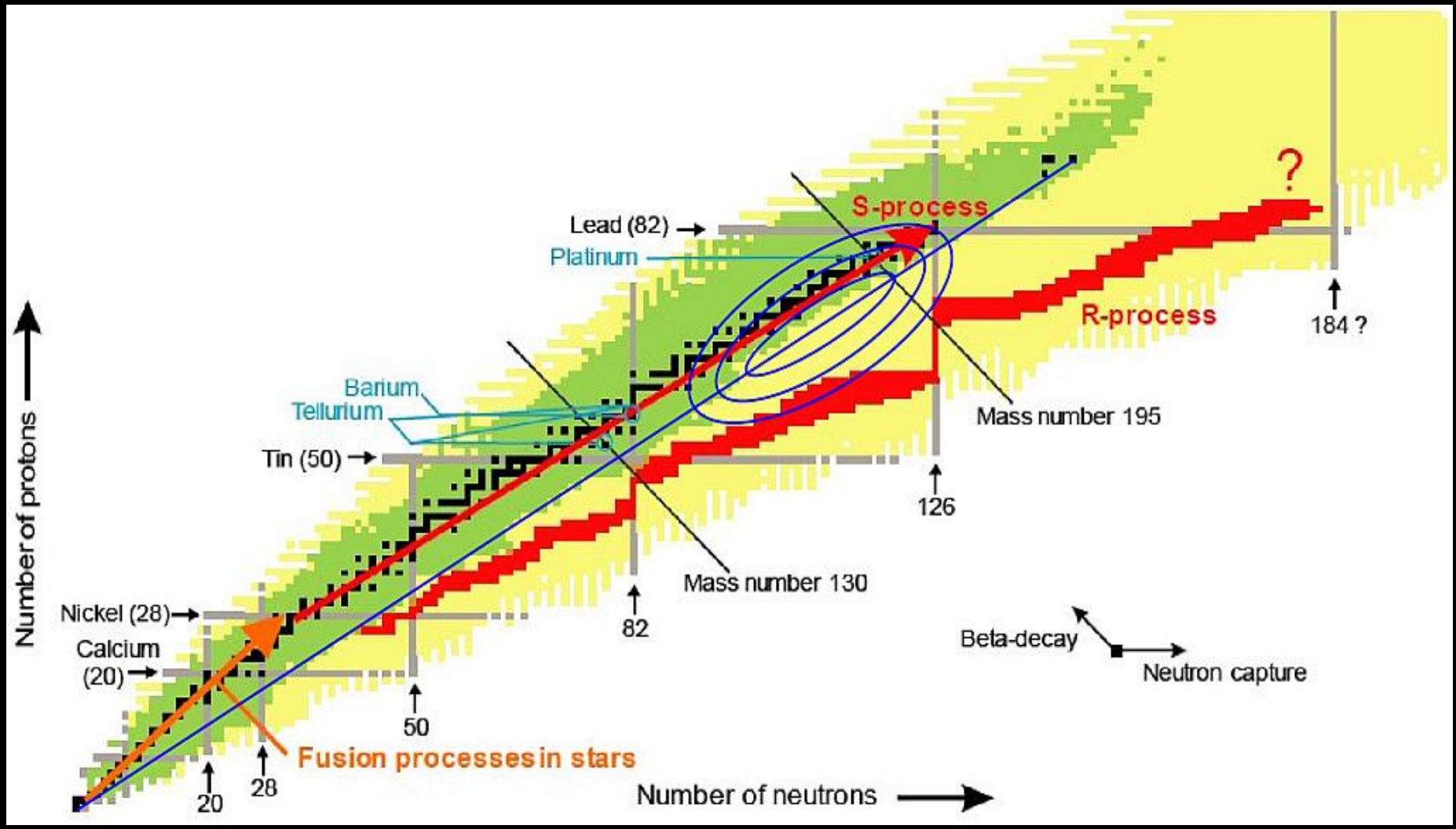
**Energiebilanz**

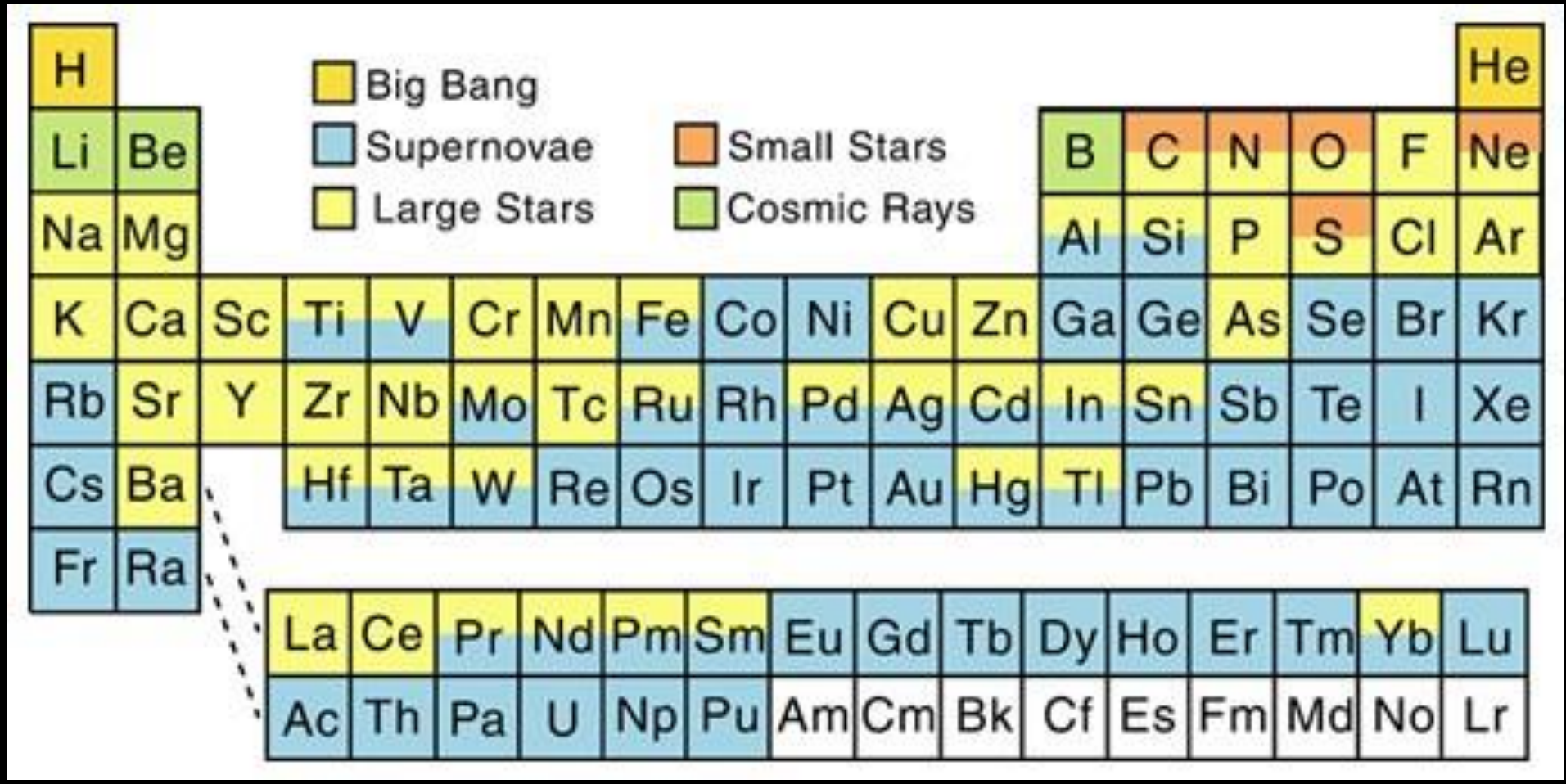
~99% auf Neutrinos
~1% auf die kinetische Energie der expandierenden Hülle
~0,01% auf die emittierte elektromagnetische Strahlung

Und diese ~0,01% „Strahlung“ lassen eine Supernova zeitweise so hell leuchten wie alle Sterne einer Galaxie zusammen!

Während der Sekundenbruchteile des Kernkollapses entsteht ein riesiger Neutronenfluß, welcher den Stern durchflutet.

**r-Prozeß** = *rapid neutron capture* - schneller Neutroneneinfang






Periodensystem der Elemente nach ihrem Ursprung im Kosmos