

Nukleare Astrophysik

Atomkerne \leftrightarrow Astrophysik

Beobachtung von Isotopen-Verteilungen

- Absorptionsspektren
- γ -Astronomie
- Extrasolare Radionuklide
- Solare Isotopenhäufigkeiten
 - Sonnenspektrum
 - Meteoriten

Nukleosynthese

- Urknall
- Sternbrennen (kein ^2He , A=5, ^8Be !!!)
 - Fusion p+p, p+d, $\alpha+\alpha+\alpha$, $\rightarrow ^{56}\text{Ni}$
 - solare Neutrinos
- Supernovae
- explosive Nukleosynthese
 - s – Prozess (slow neutron capture)
 - r – Prozess (rapid neutron capture)
 - rp – Prozess (rapid proton capture)
 - p – Prozess (tatsächlich (γ, n)-Prozesse)

Kernreaktionen mit geladenen Teilchen

- Coulomb Barriere
- Tunnelwahrscheinlichkeit
- Maxwell-Boltzmann Verteilung
- Bedeutsamer Energiebereich
- Resonanz-Reaktionen

Experimente

- Direkte Reaktionen
- Verbesserungen
- Umkehrreaktionen
- Transferreaktionen
- Methode mit dem „Trojanischen Pferd“

Primordiale Nukleosynthese

Urknall

Universum ist soweit abgekühlt, dass sich die **Nukleonen** gebildet haben.

Wegen der unterschiedlichen Masse $\delta m = 0.8 \text{ MeV}$
mehr Protonen als Neutronen

$$\frac{H(n)}{H(p)} = \exp(-\delta m / kT) \approx 1/6$$

außerdem $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ $\tau = 900 \text{ s}$

keine Fusion n+n oder p+p möglich !!!

solange $T > 0.5 \text{ MeV}$ keine Fusion $n + p \rightarrow d + \gamma$
da nur $Q = 2.2 \text{ MeV}$, wird d wieder zerlegt durch γ

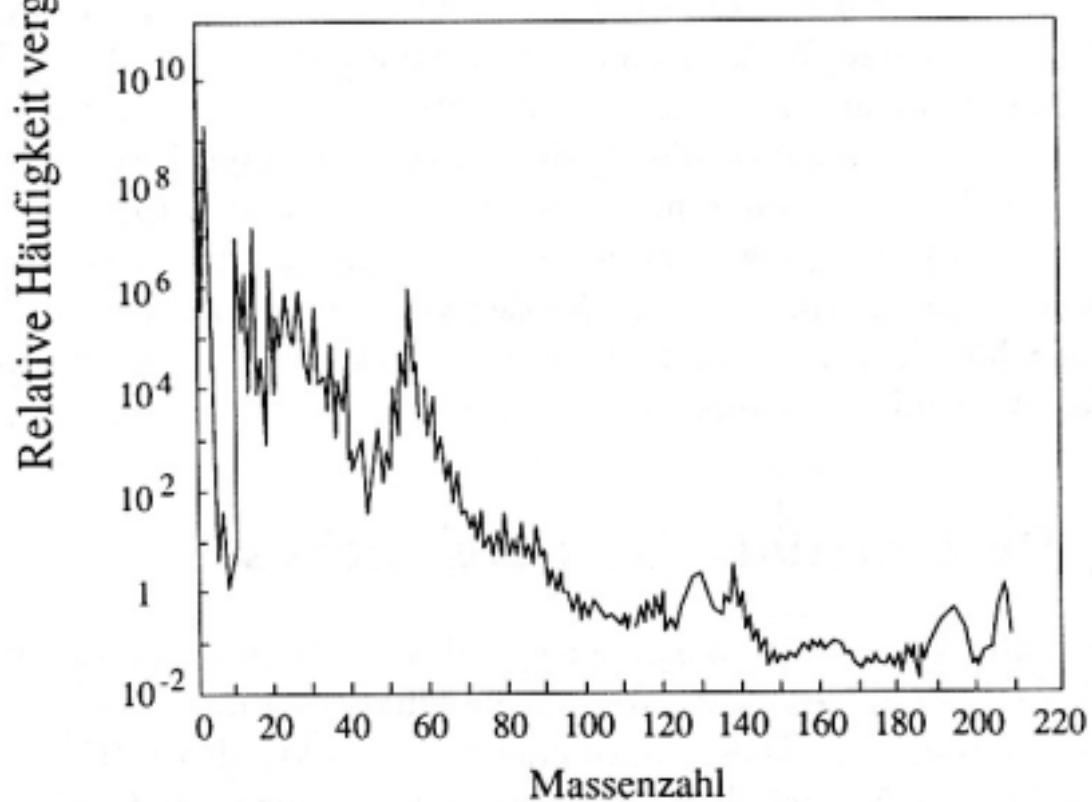
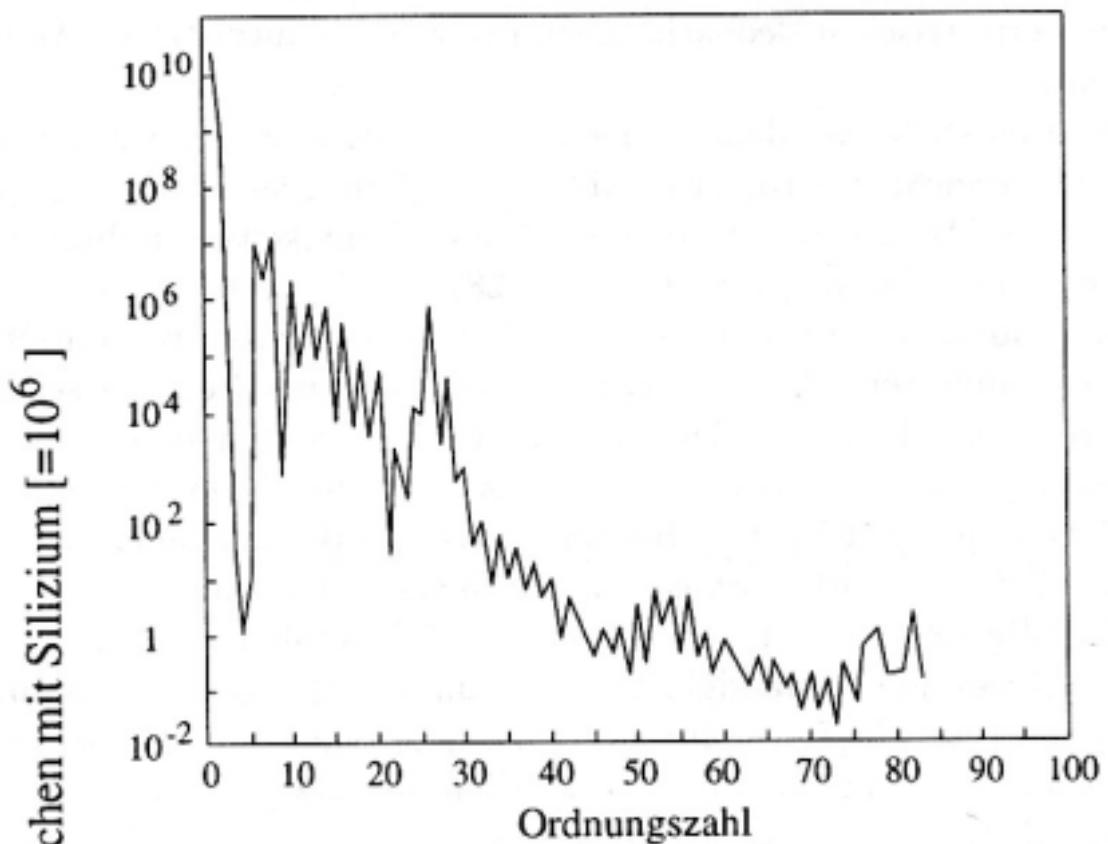
Erst ab $kT \approx 0.4 \text{ MeV}$ $n + p \rightarrow d + \gamma$

dann sofort $d + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$
 $d + n \rightarrow {}^3\text{H} + \gamma$

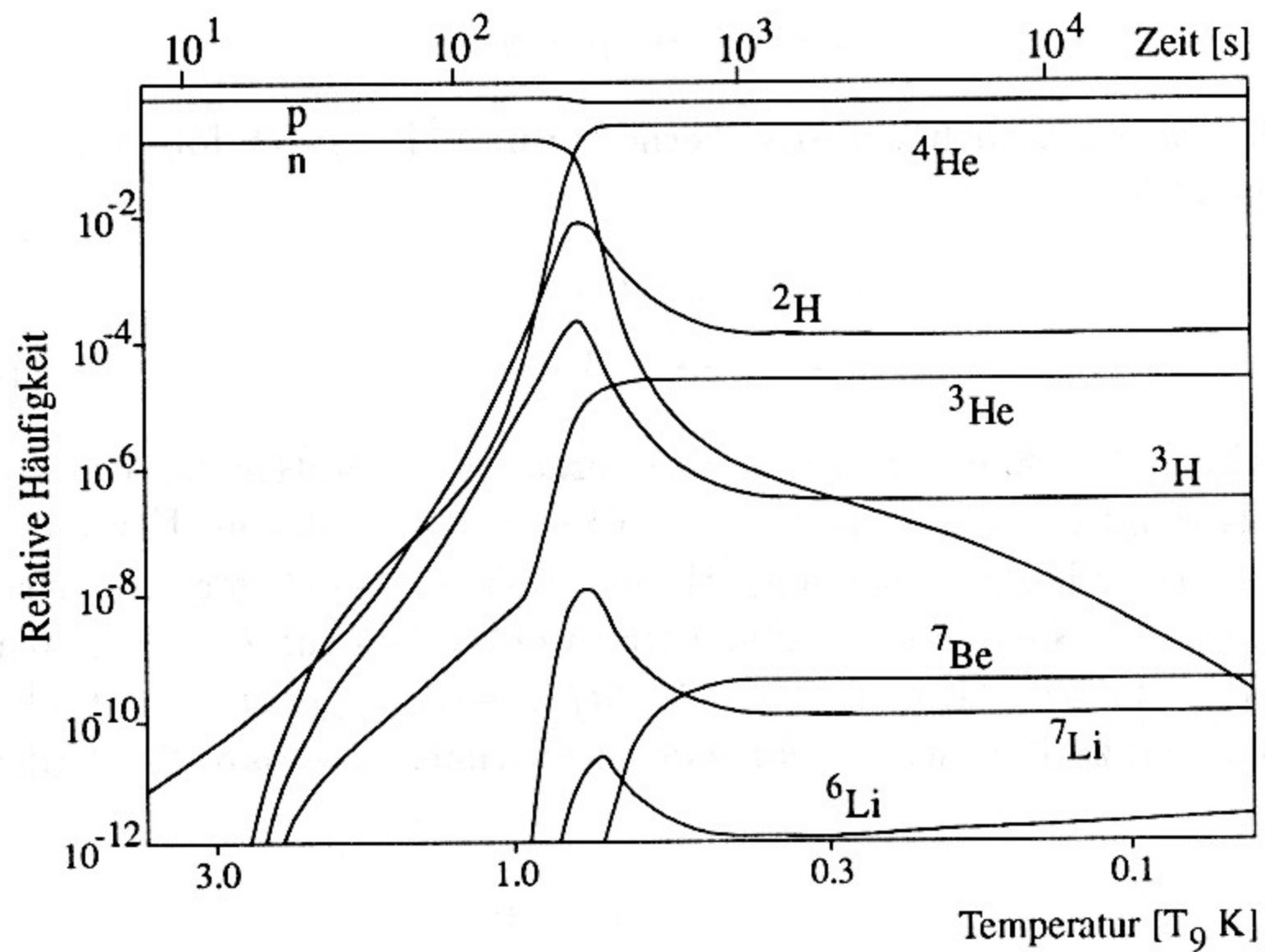
und ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$
 ${}^3\text{H} + p \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$

=> Massenverhältnis:
76% H
24% He
<0.1% "Metalle"

Solare Häufigkeiten



Urknall Nukleosynthese



Bindungs-Energie pro Nukleon

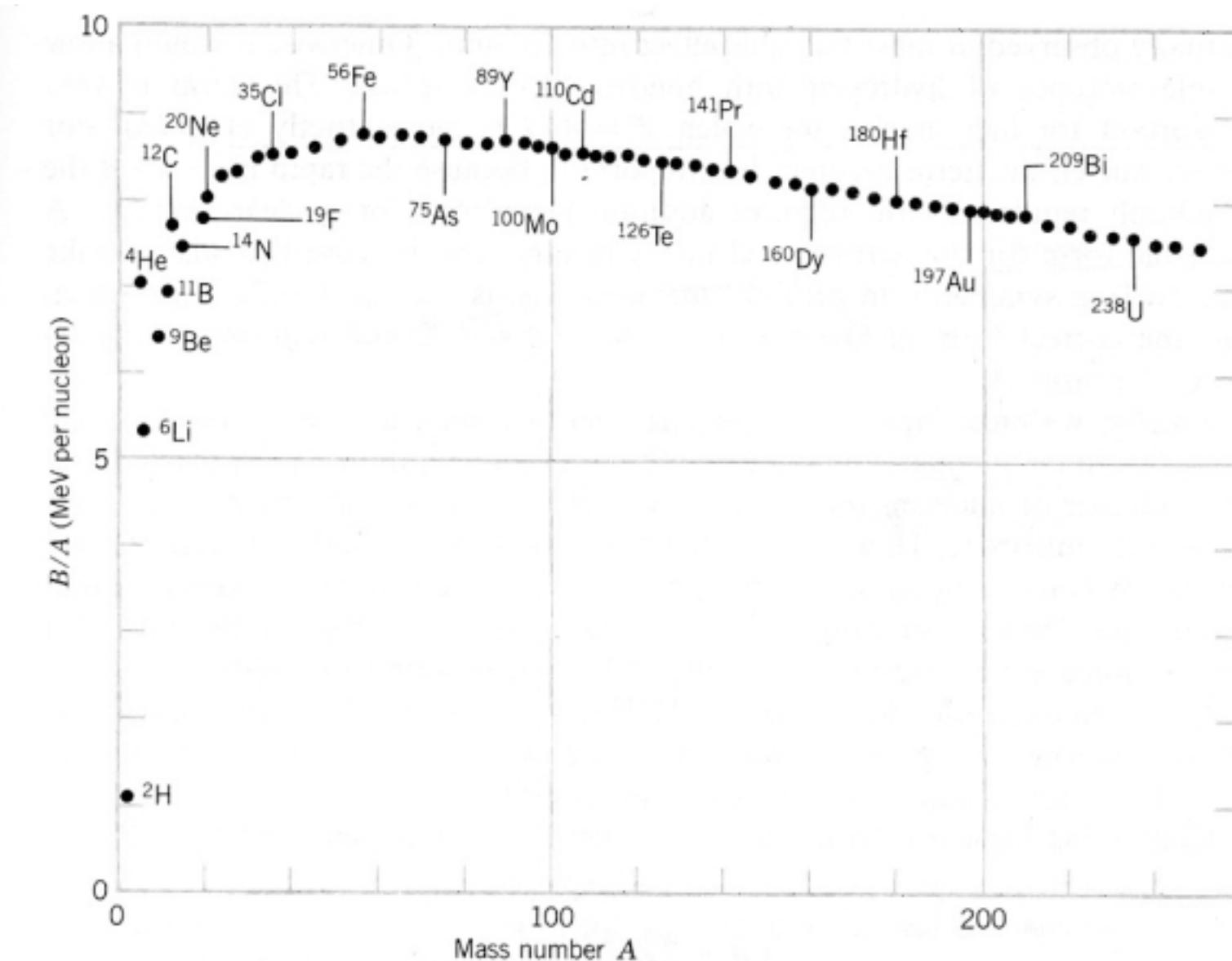
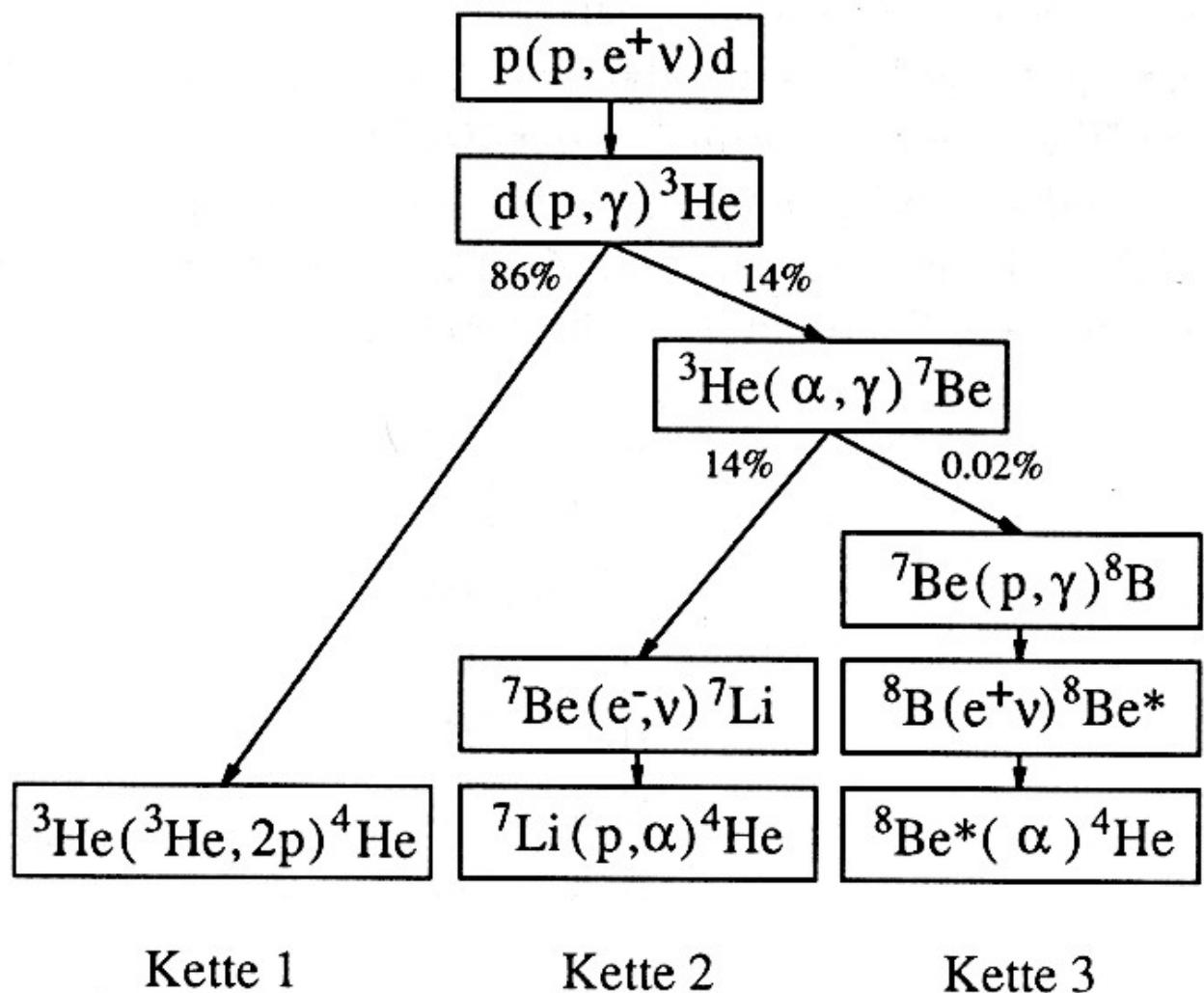
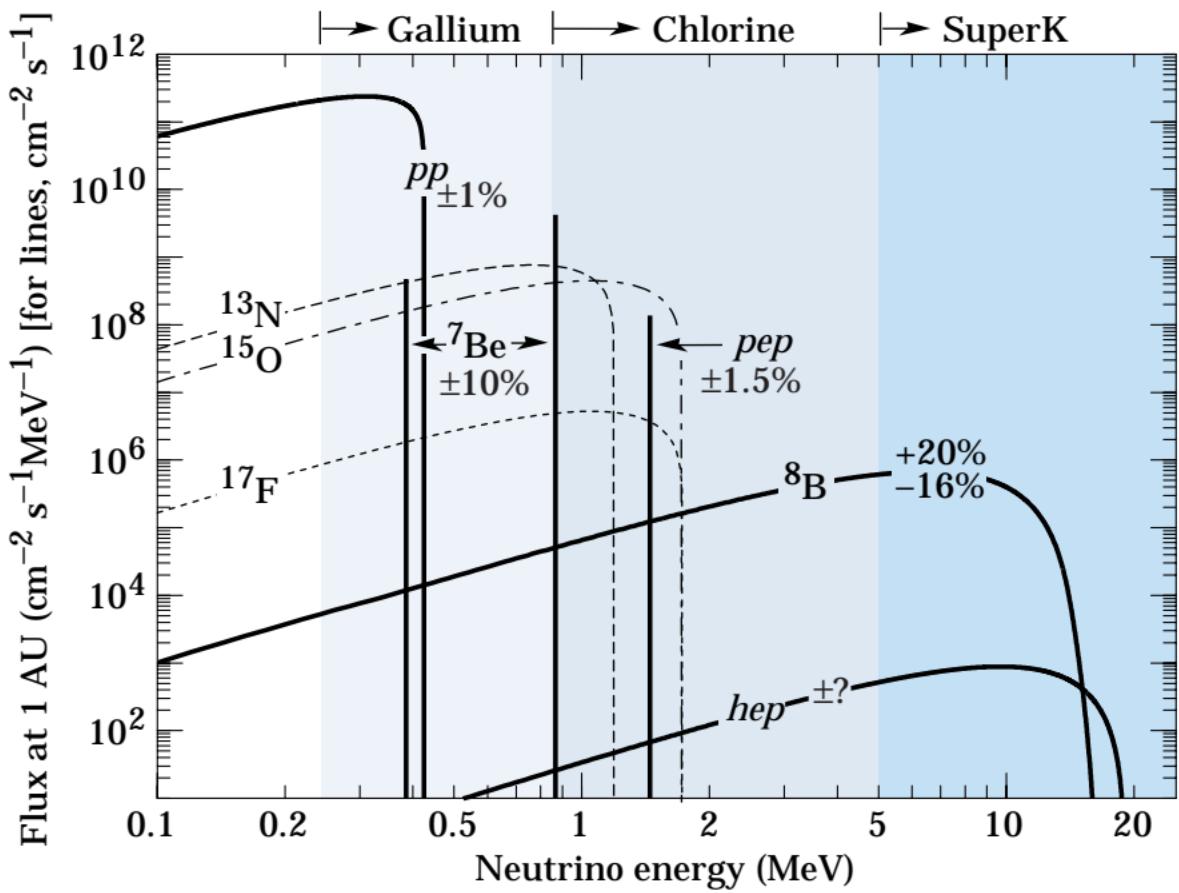


Figure 3.16 The binding energy per nucleon.

Proton-Proton Kette





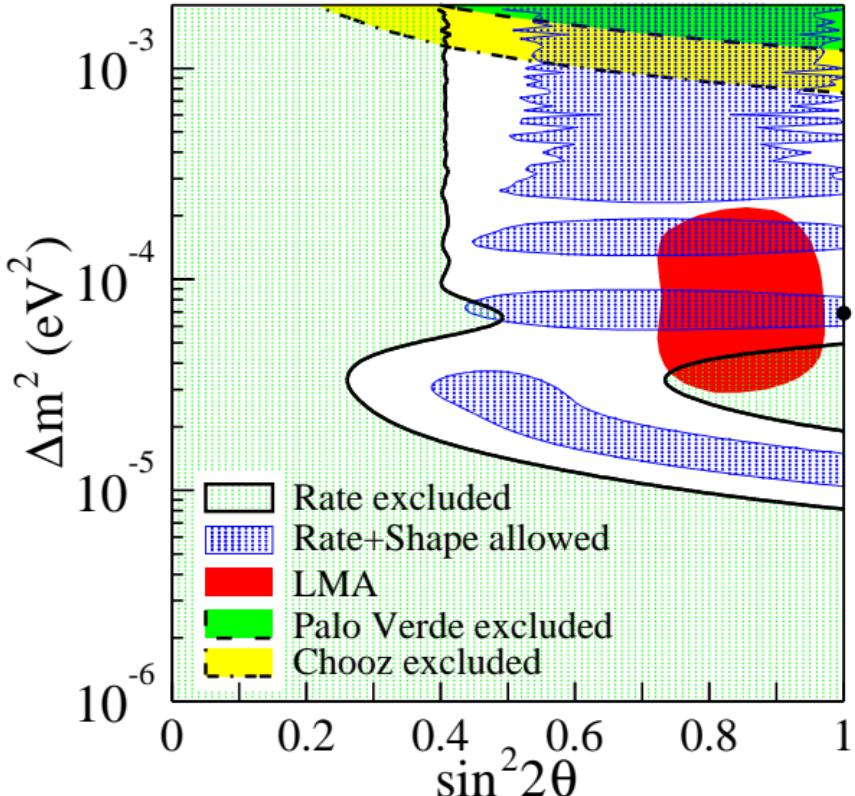


FIG. 6: Excluded regions of neutrino oscillation parameters for the rate analysis and allowed regions for the combined rate and shape analysis from KamLAND at 95% C.L. At the top are the 95% C.L. excluded region from CHOOZ [15] and Palo Verde [16] experiments, respectively. The 95% C.L. allowed region of the ‘Large Mixing Angle’ (LMA) solution of solar neutrino experiments [13] is also shown. The thick dot indicates the best fit to the KamLAND data in the physical region: $\sin^2 2\theta = 1.0$ and $\Delta m^2 = 6.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$. All regions look identical under $\theta \leftrightarrow (\pi/2 - \theta)$ except for the LMA region.

Table 3.6									
16	S 32,066 ≈ 0.54	S 27 21 ms ≈ 0.54	S 28 125 ms ≈ 0.54	S 29 187 ms ≈ 0.54	S 30 1,16 s ≈ 0.54				
15	P 30,973762 ≈ 0.16	P 26 20 ms ≈ 0.16	P 27 260 ms ≈ 0.16	P 28 268 ms ≈ 0.16	P 29 4,18 ms ≈ 0.16				
14	Si 28,0855 ≈ 0.17	Si 22 29 ms ≈ 0.17	Si 23 42,3 ms ≈ 0.17	Si 24 140 ms ≈ 0.17	Si 25 210 ms ≈ 0.17	Si 26 2,21 s ≈ 0.17	Si 27 4,16 s ≈ 0.17	Si 28 92,23 ≈ 0.17	
13	Al 26,981539 ≈ 0.20	Al 22 59 ms ≈ 0.20	Al 23 470 ms ≈ 0.20	Al 24 128 ms ≈ 0.20	Al 25 7,18 s ≈ 0.20	Al 26 0,35 s ≈ 0.20	Al 27 T15, ≈ 0.20	Al 100 ≈ 0.20	
12	Mg 24,3050 ≈ 0.30	Mg 20 95 ms ≈ 0.30	Mg 21 122,5 ms ≈ 0.30	Mg 22 3,86 s ≈ 0.30	Mg 23 11,3 s ≈ 0.30	Mg 24 78,99 ≈ 0.30	Mg 25 10,00 ≈ 0.30	Mg 11,01 ≈ 0.30	
11	Na 22,9889768 ≈ 0.38	Na 19 0 ≈ 0.38	Na 20 446 ms ≈ 0.38	Na 21 2,600 s ≈ 0.38	Na 22 2,600 s ≈ 0.38	Na 23 100 ≈ 0.38	Na 24 39 ms ≈ 0.38	Na 25 59,6 s ≈ 0.38	
10	Ne 20,1797 ≈ 0.46	Ne 16 109,2 ms ≈ 0.46	Ne 18 1,67 s ≈ 0.46	Ne 19 17,22 s ≈ 0.46	Ne 20 90,46 ≈ 0.46	Ne 21 0,27 ≈ 0.46	Ne 22 9,26 s ≈ 0.46	Ne 23 37,2 s ≈ 0.46	
9	F 18,9986403 ≈ 0.0098	F 15 70 ≈ 0.0098	F 16 64,8 s ≈ 0.0098	F 17 109,7 m ≈ 0.0098	F 18 100 ≈ 0.0098	F 19 11,0 s ≈ 0.0098	F 20 4,16 s ≈ 0.0098	F 21 F 22 4,23 s ≈ 0.0098	F 23 3,38 m ≈ 0.0098
8	O 12 8,58 ms ≈ 0.7	O 14 70,59 s ≈ 0.7	O 15 2,03 m ≈ 0.7	O 16 99,762 ≈ 0.7	O 17 0,038 ≈ 0.038	O 18 0,290 ≈ 0.024	O 19 27,1 s ≈ 0.00916	O 20 13,5 s ≈ 0.00916	O 21 3,4 s ≈ 0.007
7	N 11 20 ≈ 0.7	N 12 11,0 ms ≈ 0.7	N 13 9,96 m ≈ 0.7	N 14 99,634 ≈ 0.7	N 15 0,386 ≈ 0.00904	N 16 53,48 ≈ 0.7	N 17 4,17 s ≈ 0.7	N 18 0,63 s ≈ 0.007	N 19 329 ms ≈ 0.007
6	C 9 126,5 ms ≈ 0.5	C 10 19,3 s ≈ 0.5	C 11 20,38 m ≈ 0.5	C 12 98,90 ≈ 0.5	C 13 1,10 ≈ 0.0036	C 14 5730 a ≈ 0.2	C 15 2,45 s ≈ 0.2	C 16 0,747 s ≈ 0.007	C 17 193 ms ≈ 0.007
5	B 8 770 ms ≈ 0.5	B 9 B 10 19,9 ≈ 0.5	B 11 80,1 ≈ 0.006	B 12 20,20 ms ≈ 0.006	B 13 17,33 ms ≈ 0.006	B 14 13,8 ms ≈ 0.006	B 15 10,4 ms ≈ 0.006	B 16 1,77 s ≈ 0.006	B 17 5,1 ms ≈ 0.006
4	Be 7 53,29 d ≈ 0.5	Be 8 100 ≈ 0.006	Be 9 1,6 · 10 ⁴ s ≈ 0.006	Be 10 13,8 s ≈ 0.006	Be 11 1,6 · 10 ⁴ s ≈ 0.006	Be 12 23,6 ms ≈ 0.006	Be 13 11,7 s ≈ 0.006	Be 14 4,35 ms ≈ 0.006	Be 15 1,16 s ≈ 0.006
3	Li 6 7,5 ≈ 0.045	Li 7 92,5 ≈ 0.045	Li 8 840,3 ms ≈ 0.045	Li 9 178,3 ms ≈ 0.045	Li 10 178 ms ≈ 0.045	Li 11 8,5 ms ≈ 0.045			

14 12 11

CNO Zyklus

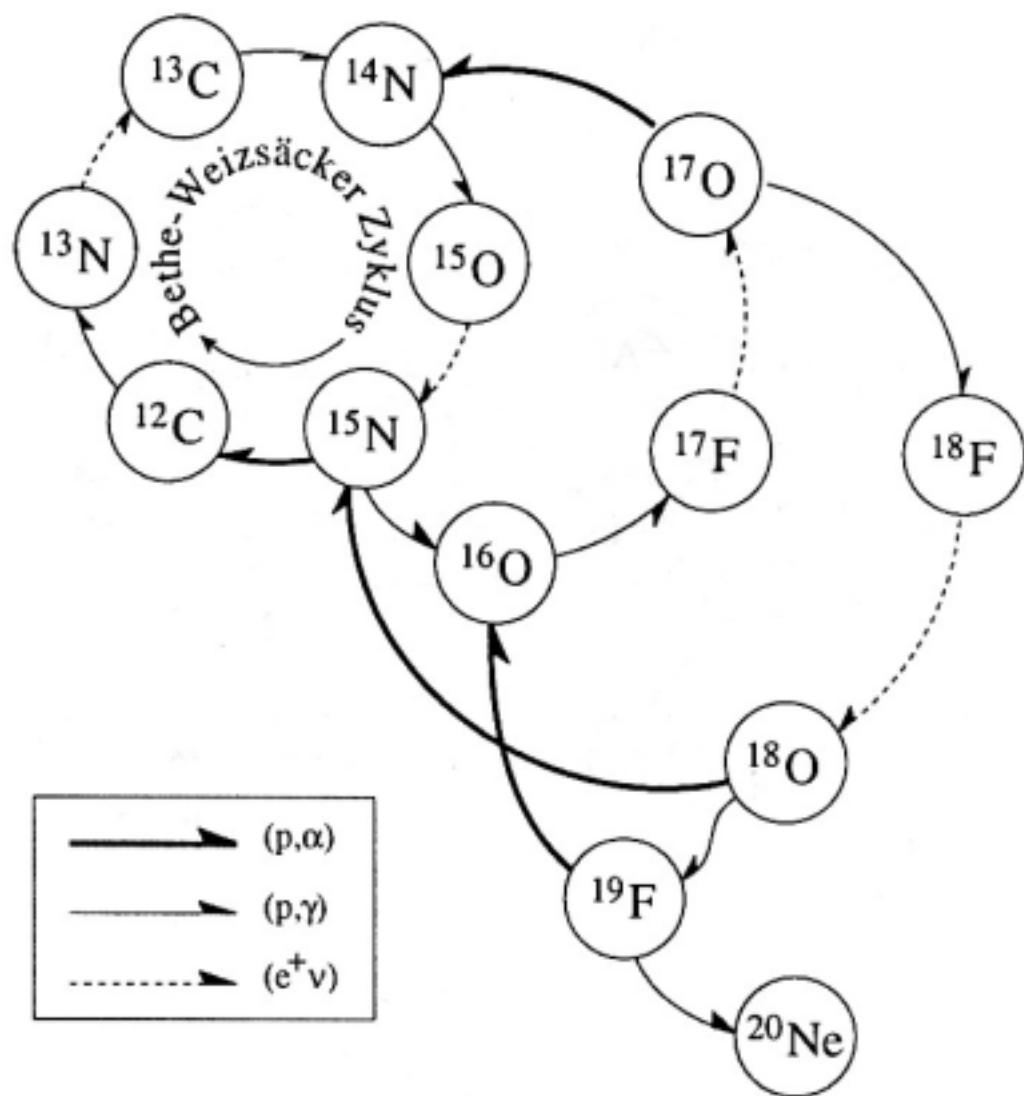


Abbildung 5.6 Der CNO-Zyklus

NeNa und Mg Al Zyklus

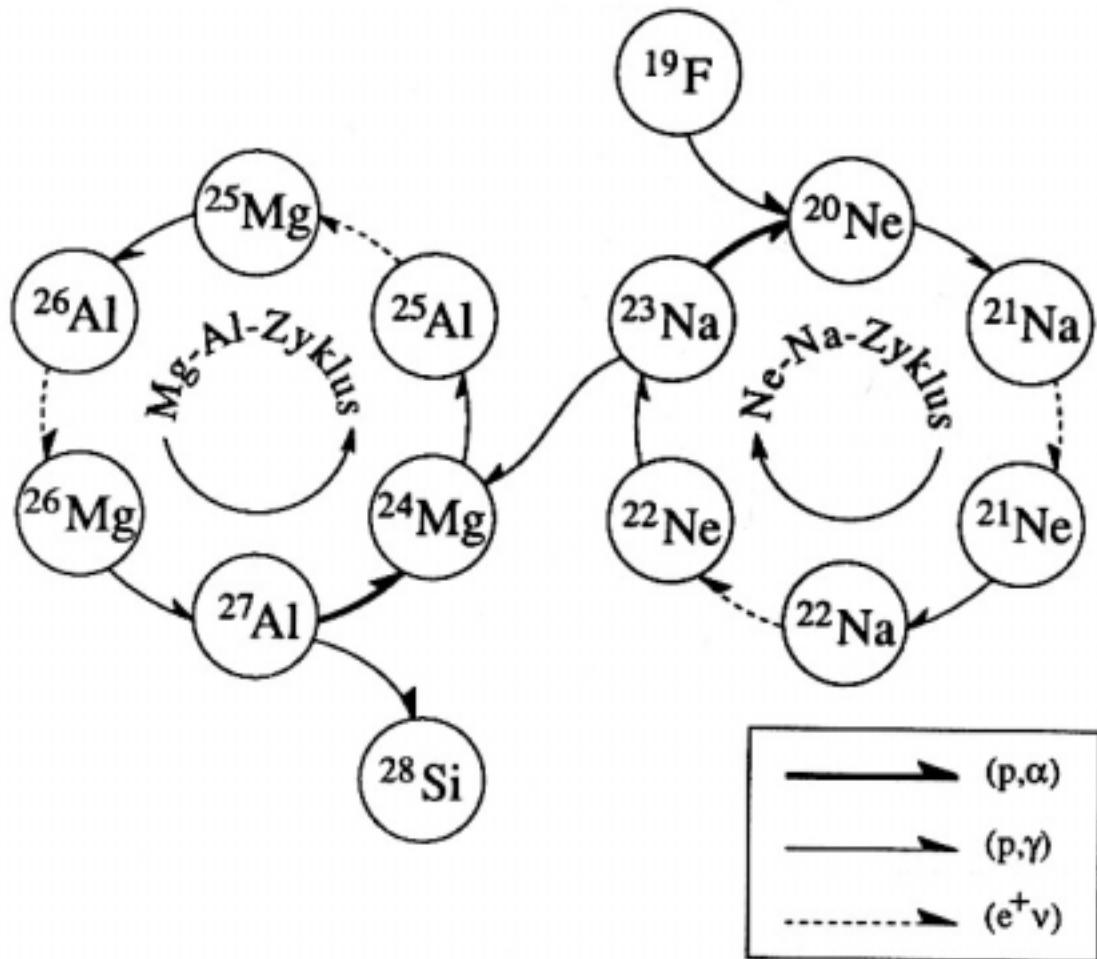
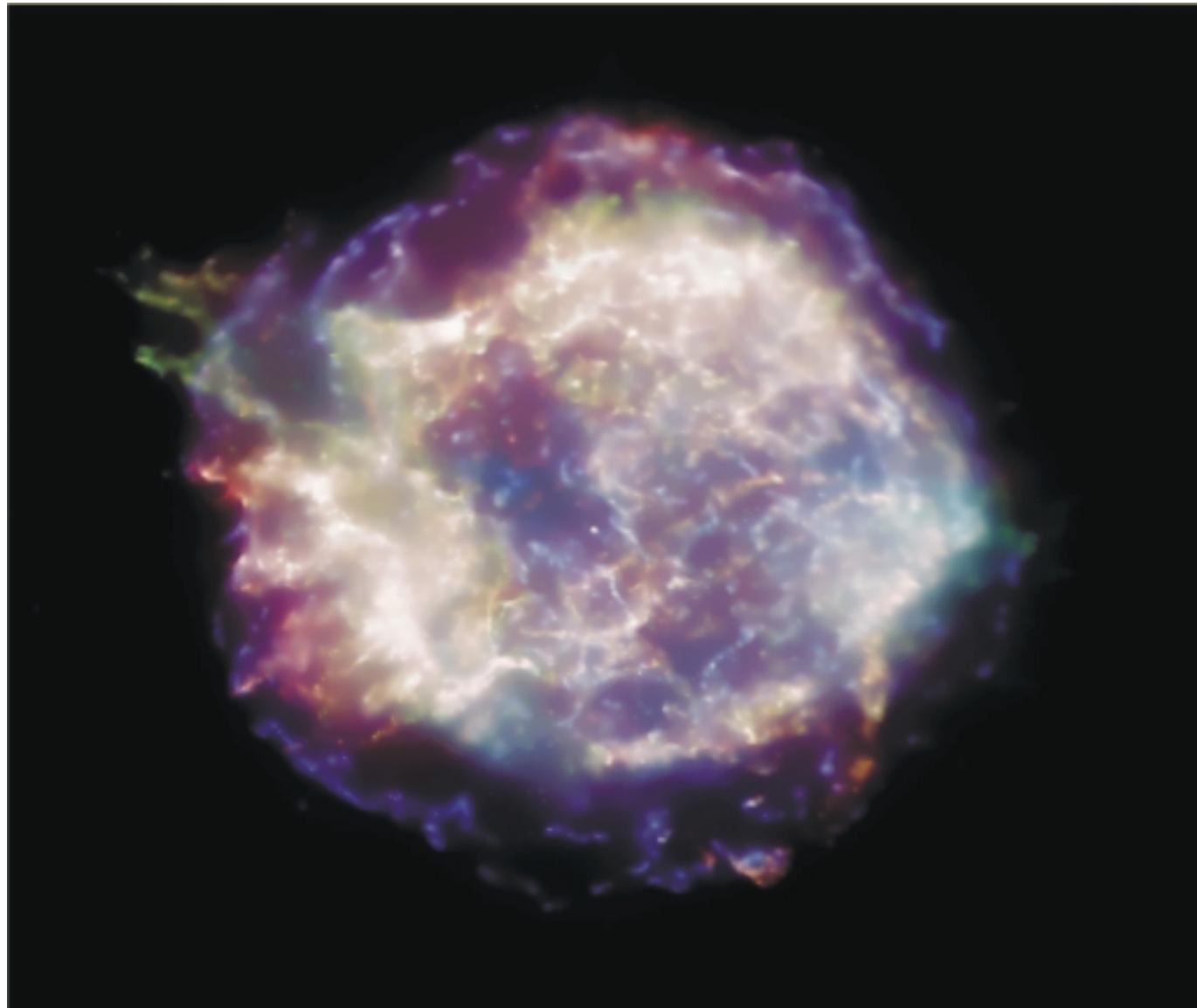


Abbildung 5.7 Der NeNa- und MgAl-Zyklus

SN Überrest CAS A (x-rays)



Gammas von Supernova

SN in CAS A vor 300 a

^{44}Ti = 90a

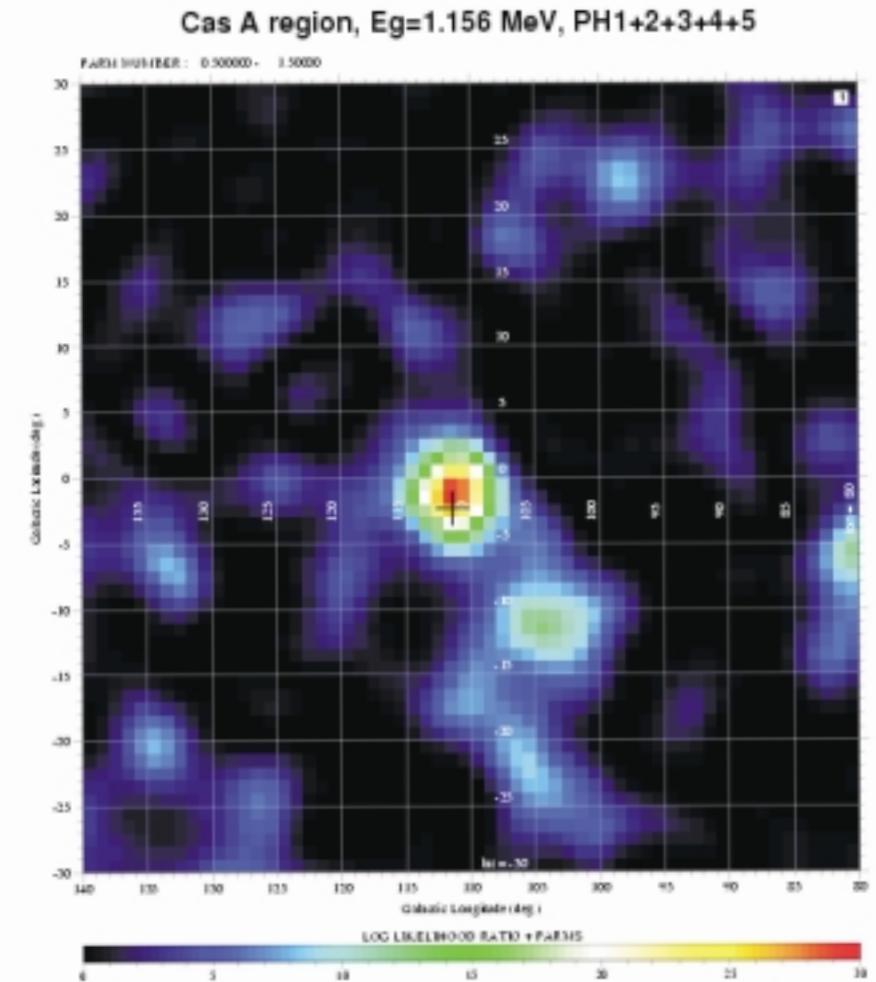
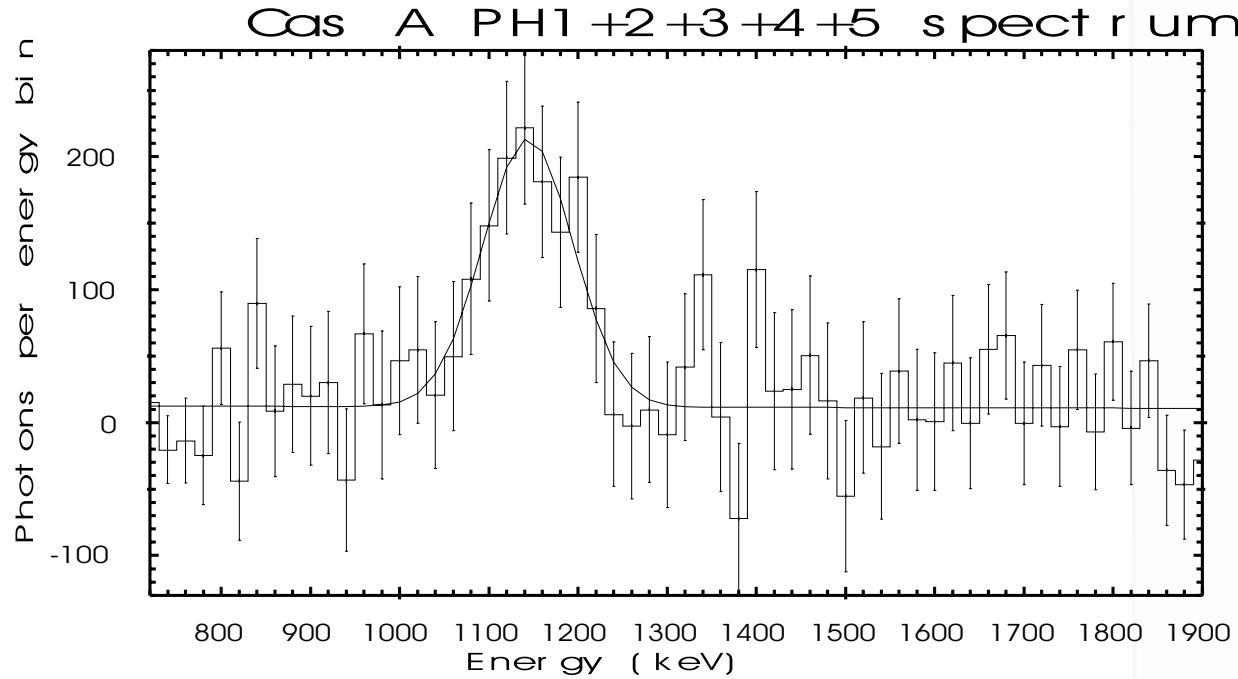


Figure 1. The youngest Galactic Supernova Remnant Cassiopeia A shining in the 1.16 MeV γ -ray line emission of the radioactive ^{44}Ti , produced in the supernova explosion about 320 years ago. The cross marks position of Cas A. The first detection of Cas A in the ^{44}Ti line emission was made by COMPTEL on-board Compton Gamma-Ray Observatory (Iyudin et al. 1994). This map was produced by combining COMPTEL data for ~ 6 years of the CGRO mission (Iyudin et al. 1997). Galactic coordinate grid is overlaid.

Neutron-Einfangsprozesse

s-Prozess (slow neutron capture)

erzeugt Kerne bis ^{209}Bi

niedrige Neutronendichte

He-Brennen (α, n)

sukzessiver Einfang, bis β^- -Zerfall

Zeitskala Jahre

aus Verzweigungen, wo $\tau(\beta) \approx \tau(\text{Einfang})$

Isotopenverhältnisse aus Gleichgewicht der Häufigkeiten

$$dH(A) = 0 = H(A-1) \cdot \sigma(A-1) - H(A) \cdot \sigma(A)$$

$$\Rightarrow \frac{H(A-1)}{H(A)} = \frac{\sigma(A)}{\sigma(A-1)}$$

\Rightarrow diese lassen sich aus **experimentellen $\sigma(n,\gamma)$** berechnen und abziehen
übrig bleiben Nuklide des

r- Prozess (rapid neutron capture)

erzeugt Kerne bis $A \approx 250$, die dann spalten

explosiver Prozess

hohe Neutronendichte

hohe Temperatur

Zeitskala Sekunden

wahrscheinlich bei **Supernovae** (Kollaps schwerer Sterne)

wahrscheinlich verschiedene Prozesse

einer bis $A \approx 130$

einer bis $A \approx 250$

vom Experiment:

$T_{1/2}$ Q_β $\sigma(n,\gamma)$

direkt kaum zugänglich

\Rightarrow besseres Verständnis der **Kernstruktur**

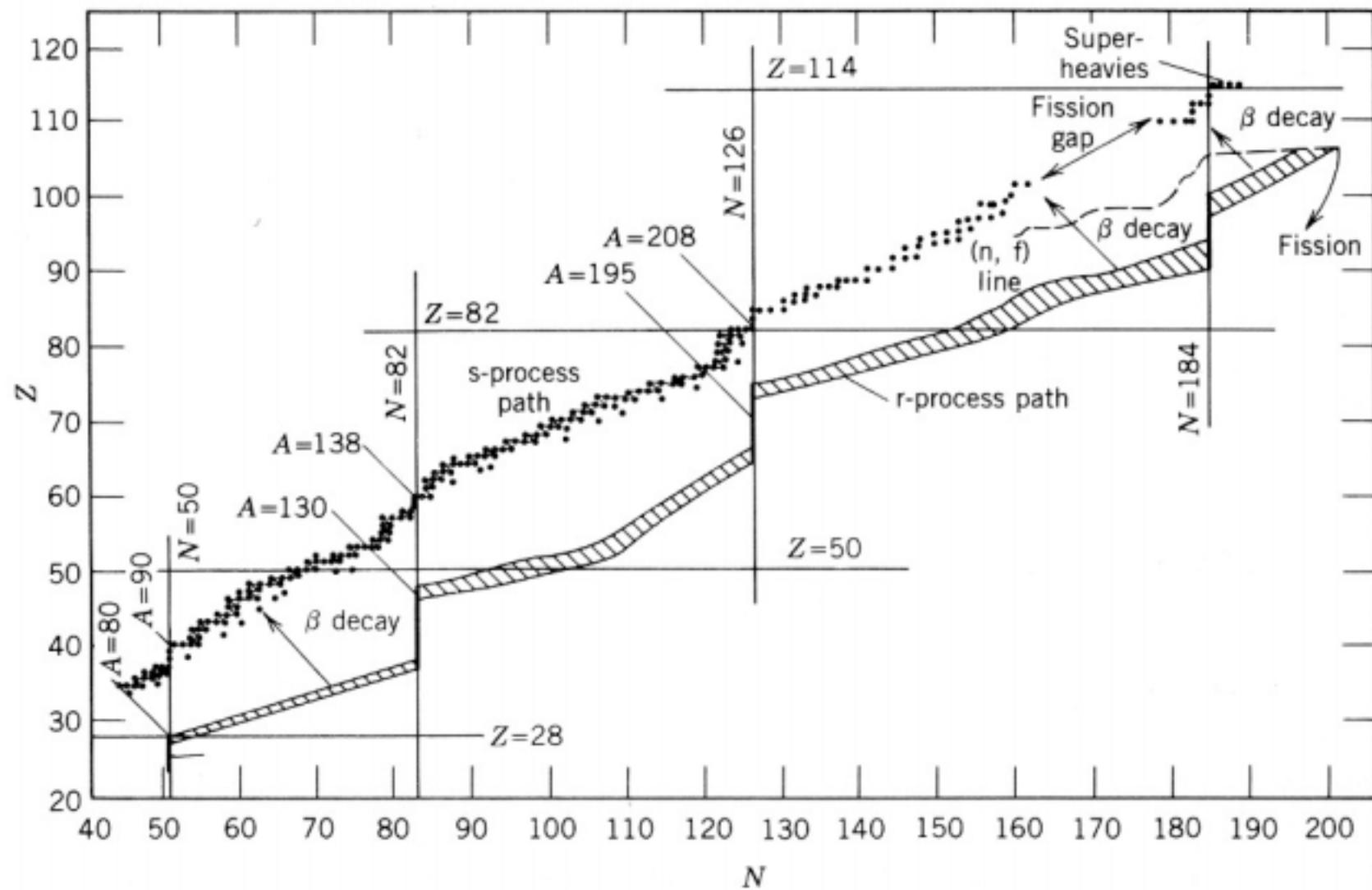
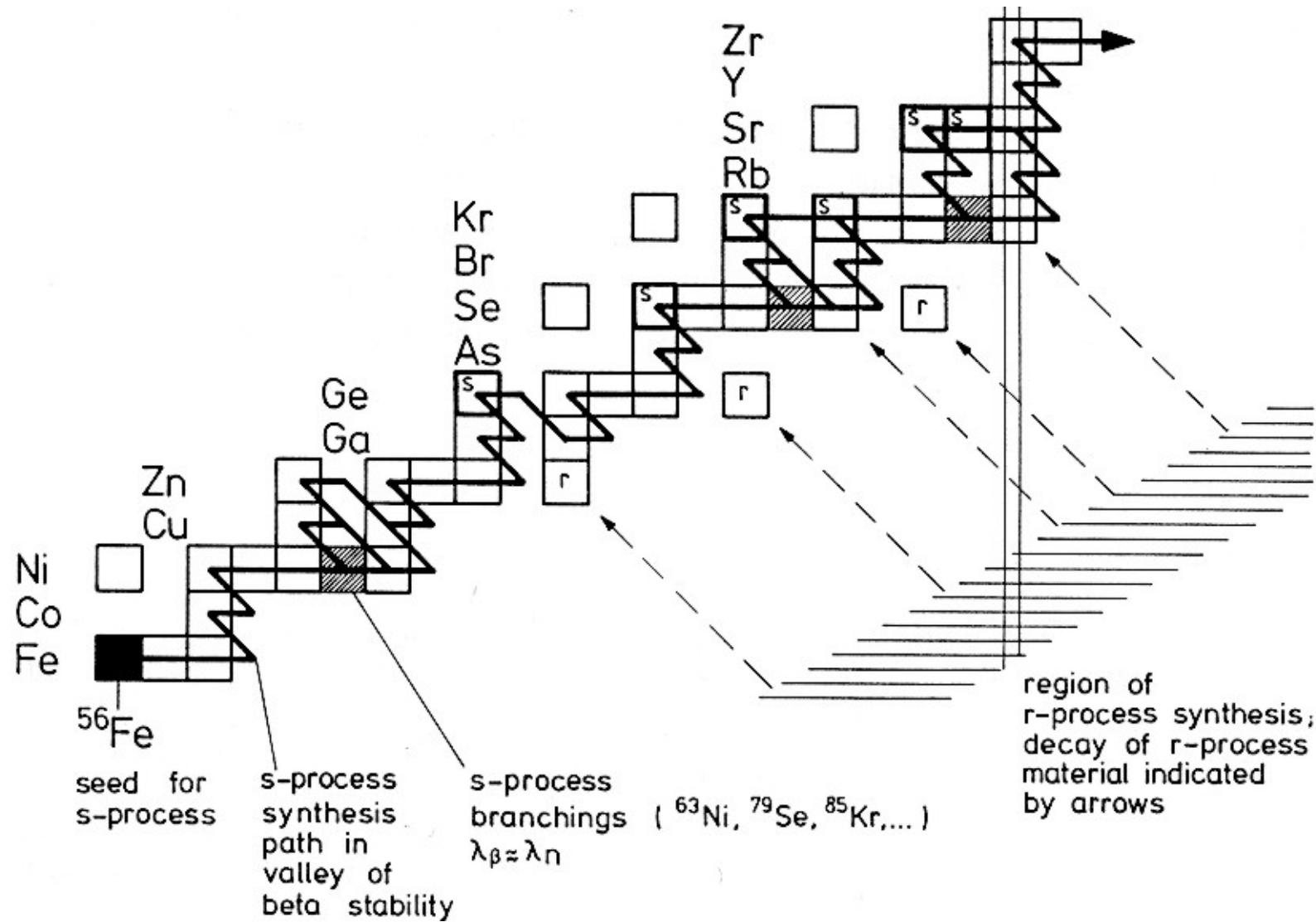
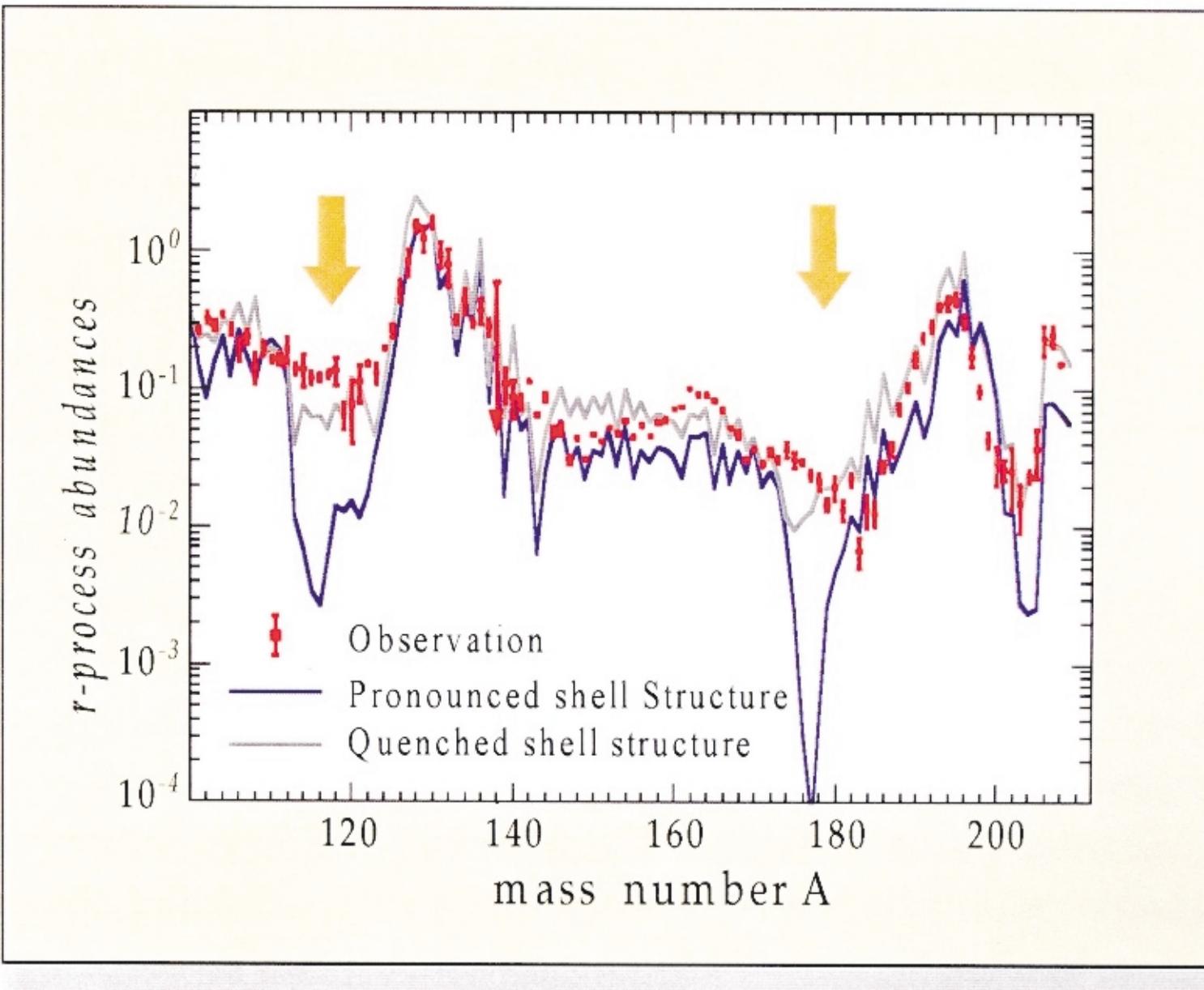


Figure 19.17 Neutron capture paths for r and s processes.

Neutron-Einfang: s-Prozess slow



r-Prozess und Theorie



rp-Prozess

Schnelle Folge von (p,γ) Reaktionen
bis zur **p-dripline** ($\sim N=Z$)
dort (γ,p) Reaktionen und β^+ -Zerfälle

Wartepunkte an gg-Kernen ($N=Z$) mit großem $T_{1/2}$

hohe Temperaturen $kT \sim 150 \text{ keV}$
und Dichten $\rho \sim 10^6 \text{ g/cm}^3$

Zeitskala $\sim 100 \text{ s}$

wahrscheinlich bei
x-ray bursts n-Stern akkretiert H vom Nachbarn
Novae Weißer Zwerg mit H vom Nachbarn

vom Experiment
Lage der p drip-line
p Bindungsenergie
 $T_{1/2}$ an Wartepunkten

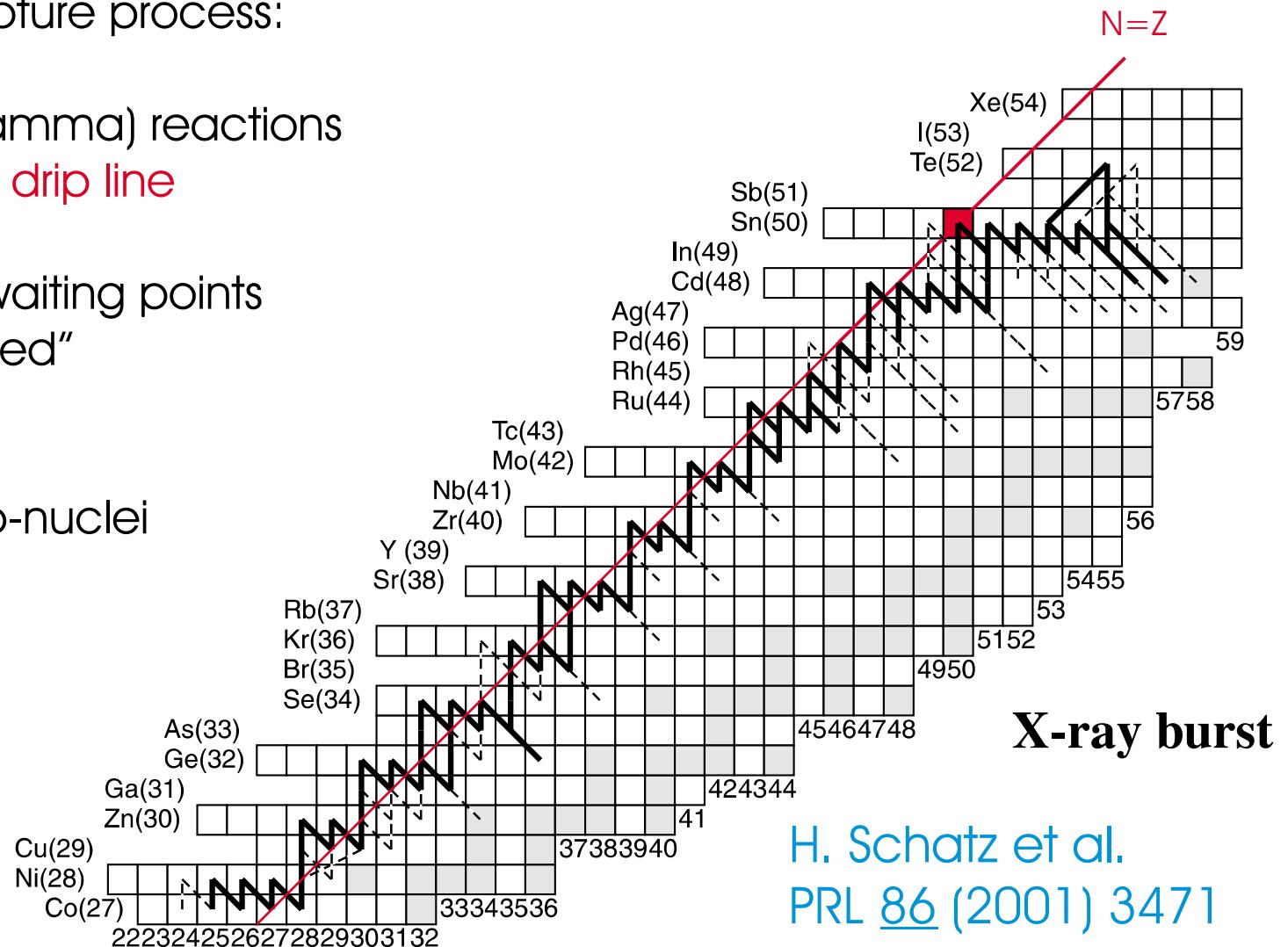
rp-process

rapid proton capture process:

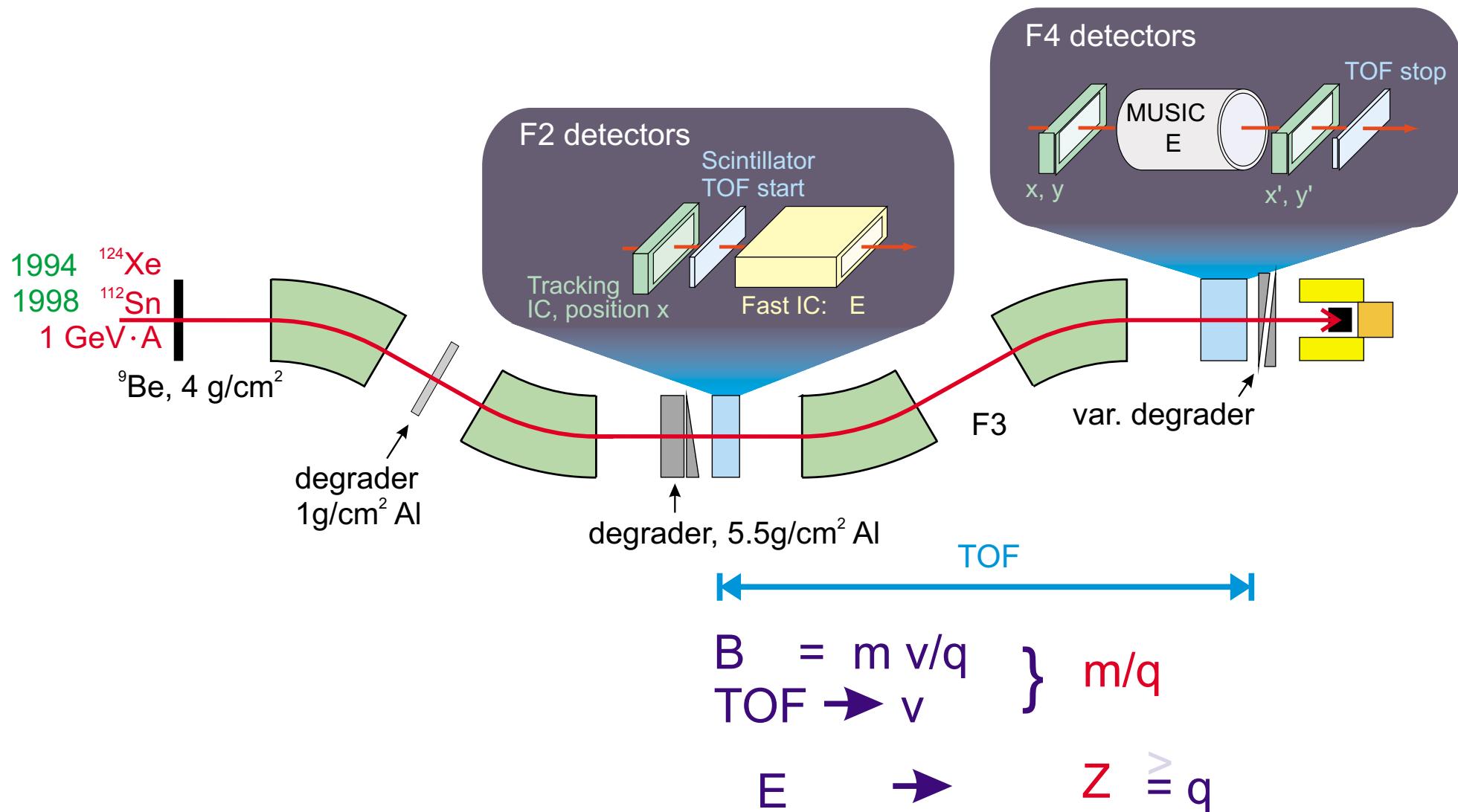
successive (p,gamma) reactions
up to the **proton drip line**

beta-decay at waiting points
determines "speed"
==> **halflives**

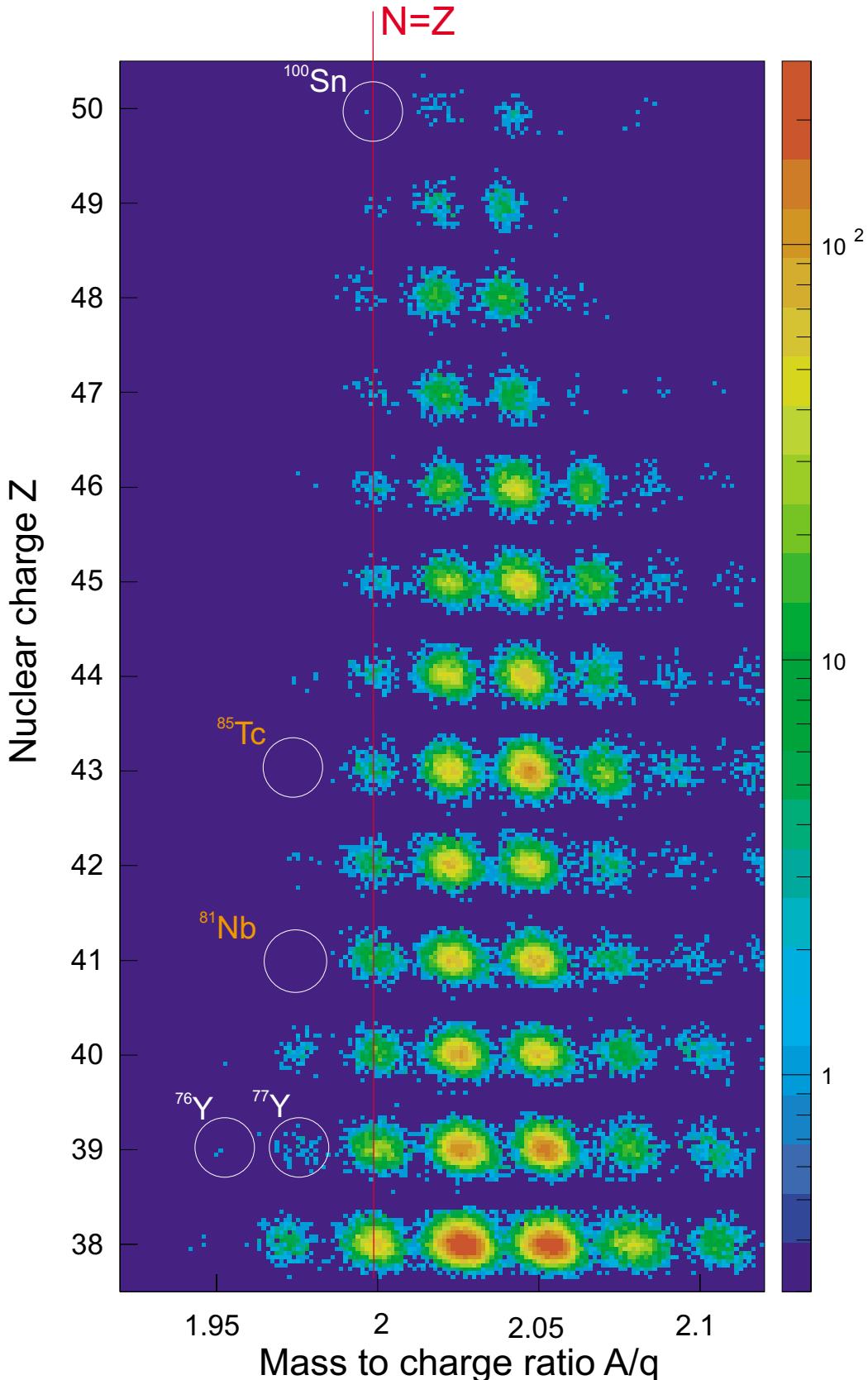
abundance of p-nuclei
is the result



Fragment Separator FRS



Identified Nuclides



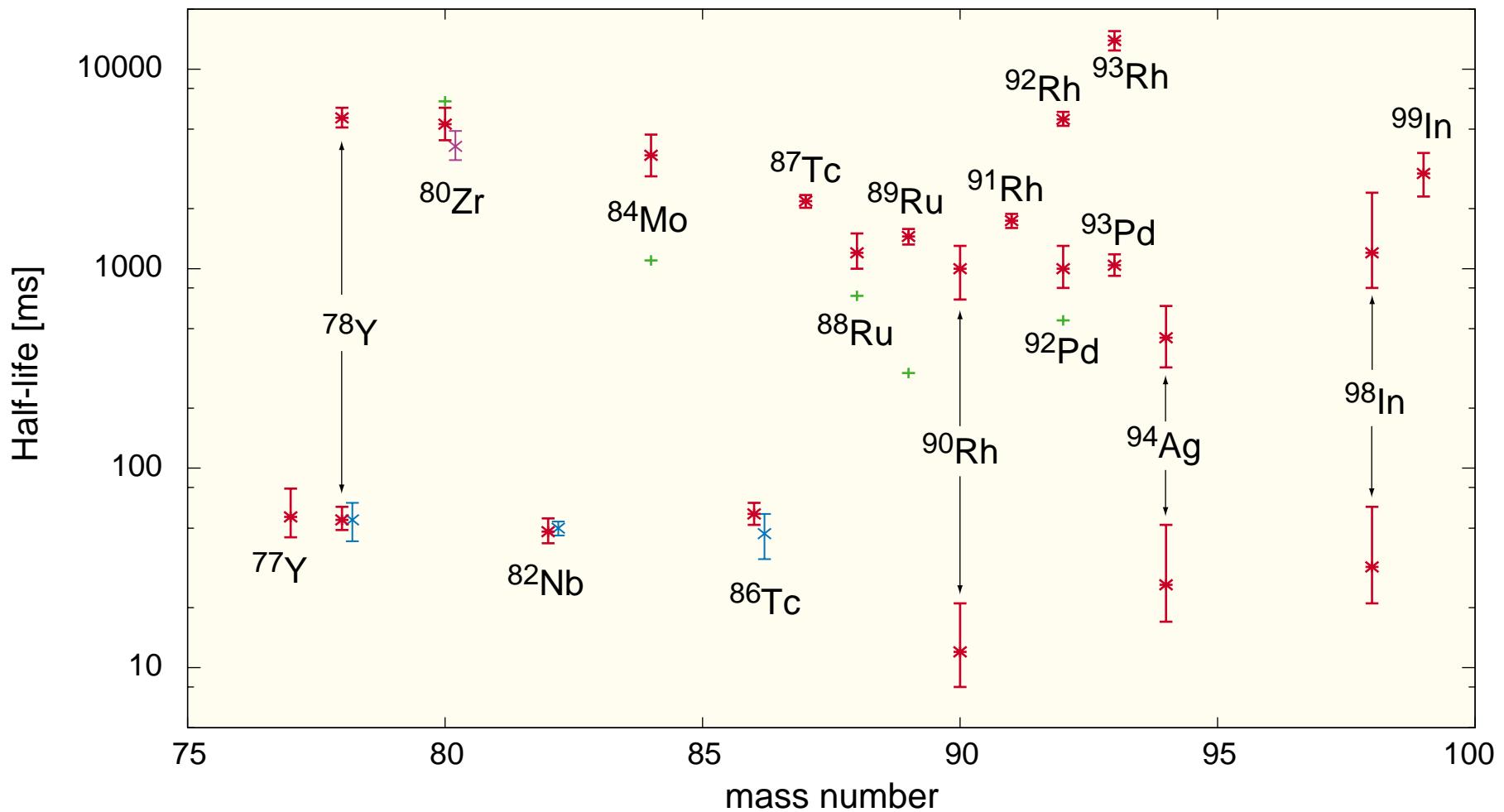
observed with halflives
longer than 100ns:

^{76}Y , ^{77}Y (mainly β^+ -emitter)

not observed:

^{81}Nb (3 μs), ^{85}Tc (1 μs)

Measured half-lives



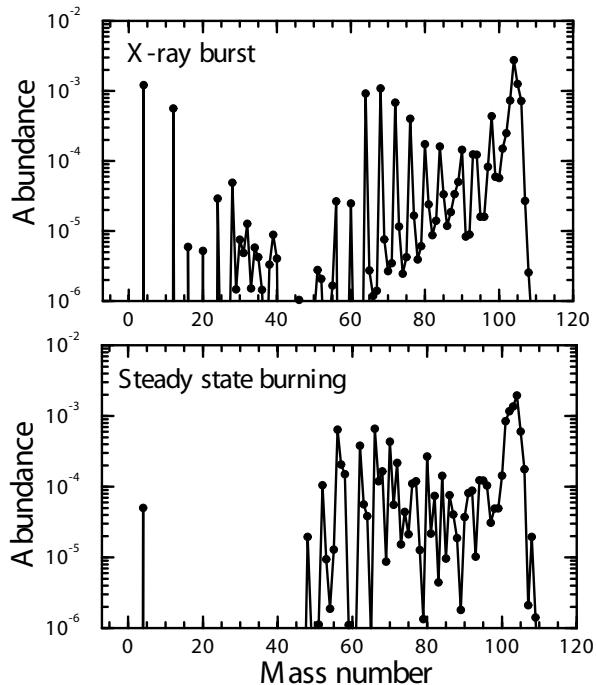
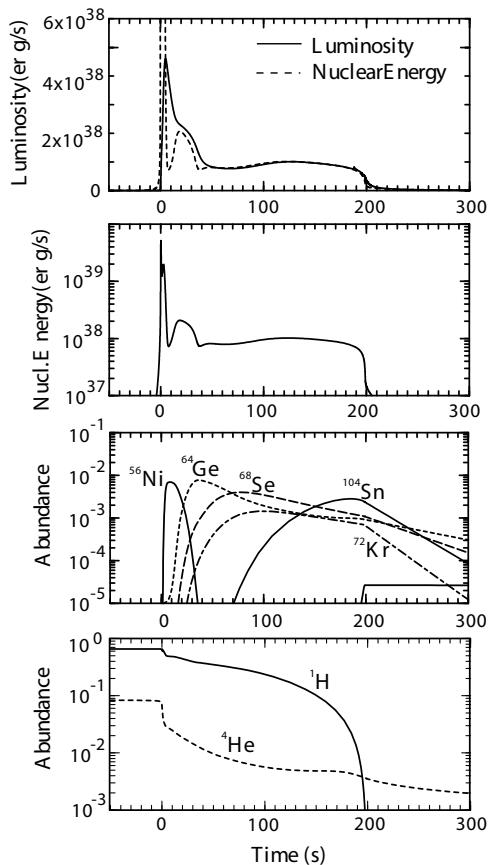
| our results

+ values used by Schatz et al.

| GANIL, PRL 81 (1998) 3337

| Oak Ridge, PRL 84 (2000) 2104

rp - process



Gamow Peak

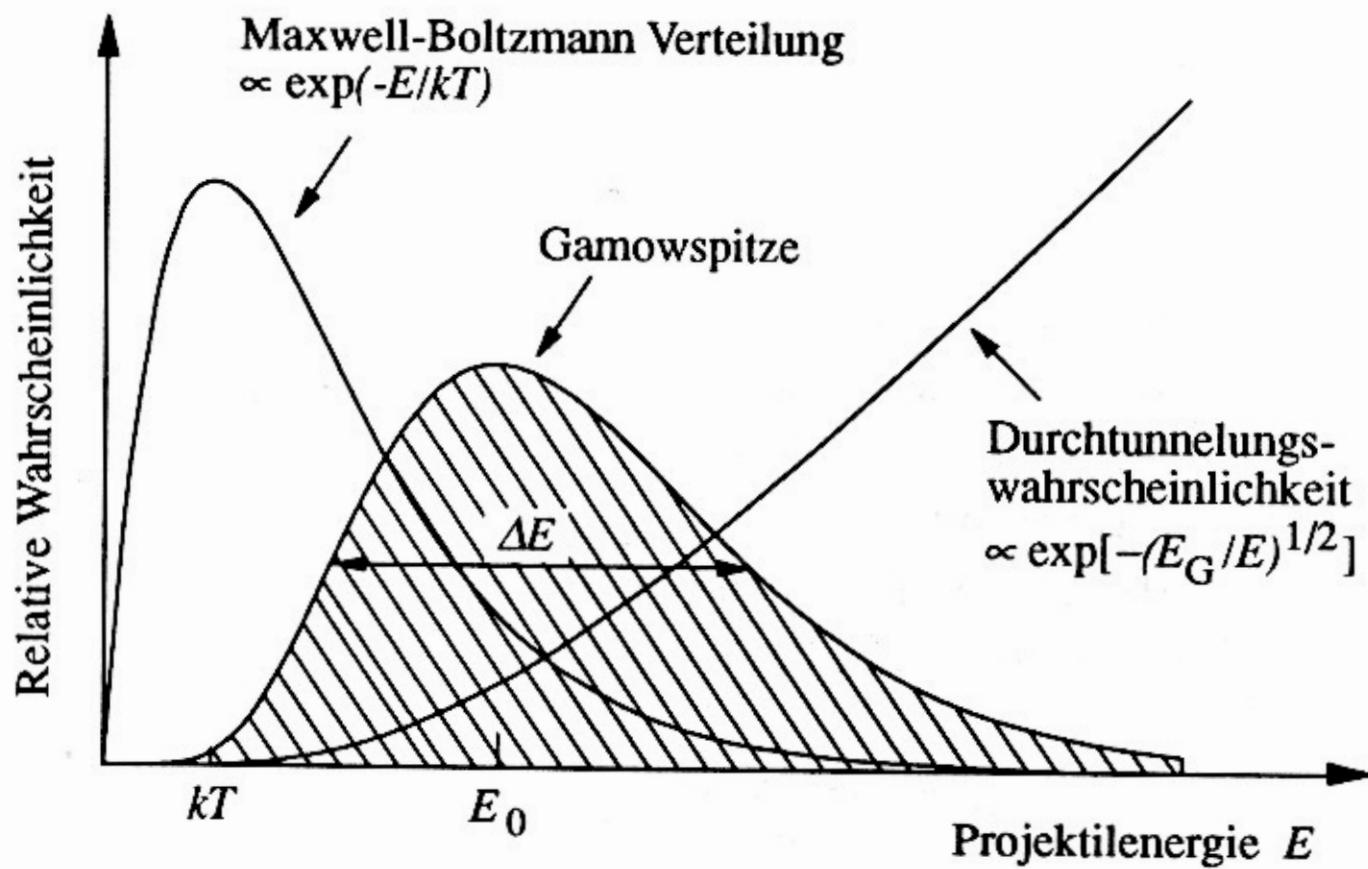


Abbildung 8.5 Die verschiedenen relativen Wahrscheinlichkeiten bei nichtresonanten Reaktionen als Funktion der Projektilenergie