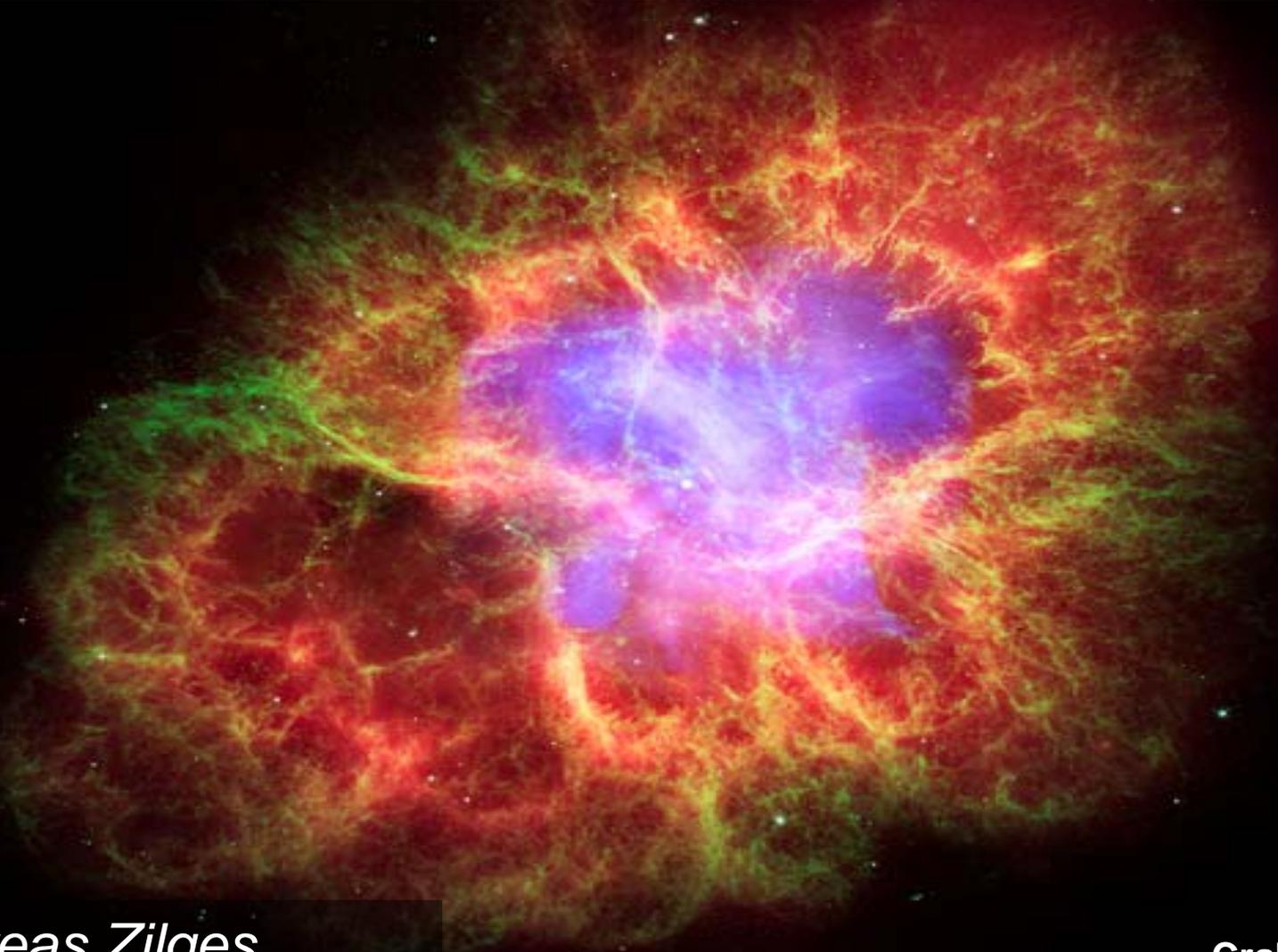


Die Synthese der schweren Elemente: Von Kernen und Sternen

*Andreas Zilges
Institut für Kernphysik*

**Crab Nebula,
CHANDRA 10/2006**



Die Synthese der schweren Elemente: Von Kernen und Sternen

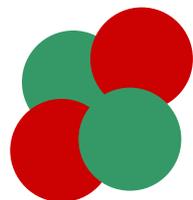


**Empedokles (ca. 450 v. Chr.):
Alle Elemente sind Mischungen von
Erde, Luft, Feuer und Wasser.**

Die Synthese der schweren Elemente: Von Kernen und Sternen

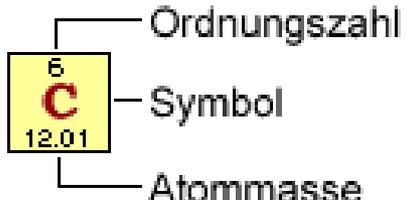
- **Synthese schwerer Atomkerne**
- **Kerne im Photonenbad**
- **Reaktionen mit Ionen**
- **Beschleuniger-Massenspektrometrie**

Wie entstanden die Elemente?

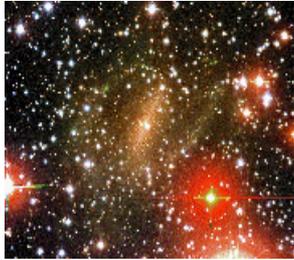


Fusion von Protonen und Neutronen zu Wasserstoff, Helium, Lithium

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 1.008																	2 He 4.003
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18
3	11 Na 22.99	12 Mg 24.31											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95
4	19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80
5	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	Zeit: ca. 3 Minuten nach dem Urknall												52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3
6	55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	71 Lu 175.0	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.8	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po 209.0	85 At 210.0	86 Rn 222.0
7	87 Fr 223.0	88 Ra 226.0	103 Lr 262.1	104 Rf 261.1	105 Db 262.1	106 Sg 263.1	107 Bh 264.1	108 Hs 265.1	109 Mt 268	110 Uun 269	111 Uuu 272	112 Uub 277	113 Uut	114 Uuq 289	115 Uup	116 Uuh 289	117 Uus	118 Uuo 293
6			57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm 146.9	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0		
7			89 Ac 227.0	90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np 237.0	94 Pu 244.1	95 Am 243.1	96 Cm 247.1	97 Bk 247.1	98 Cf 251.1	99 Es 252.0	100 Fm 257.1	101 Md 258.1	102 No 259.1		



Das Ende der Fusionskette



In Sternen: Fusionsreaktionen zu schwereren Elementen bis zu Eisen

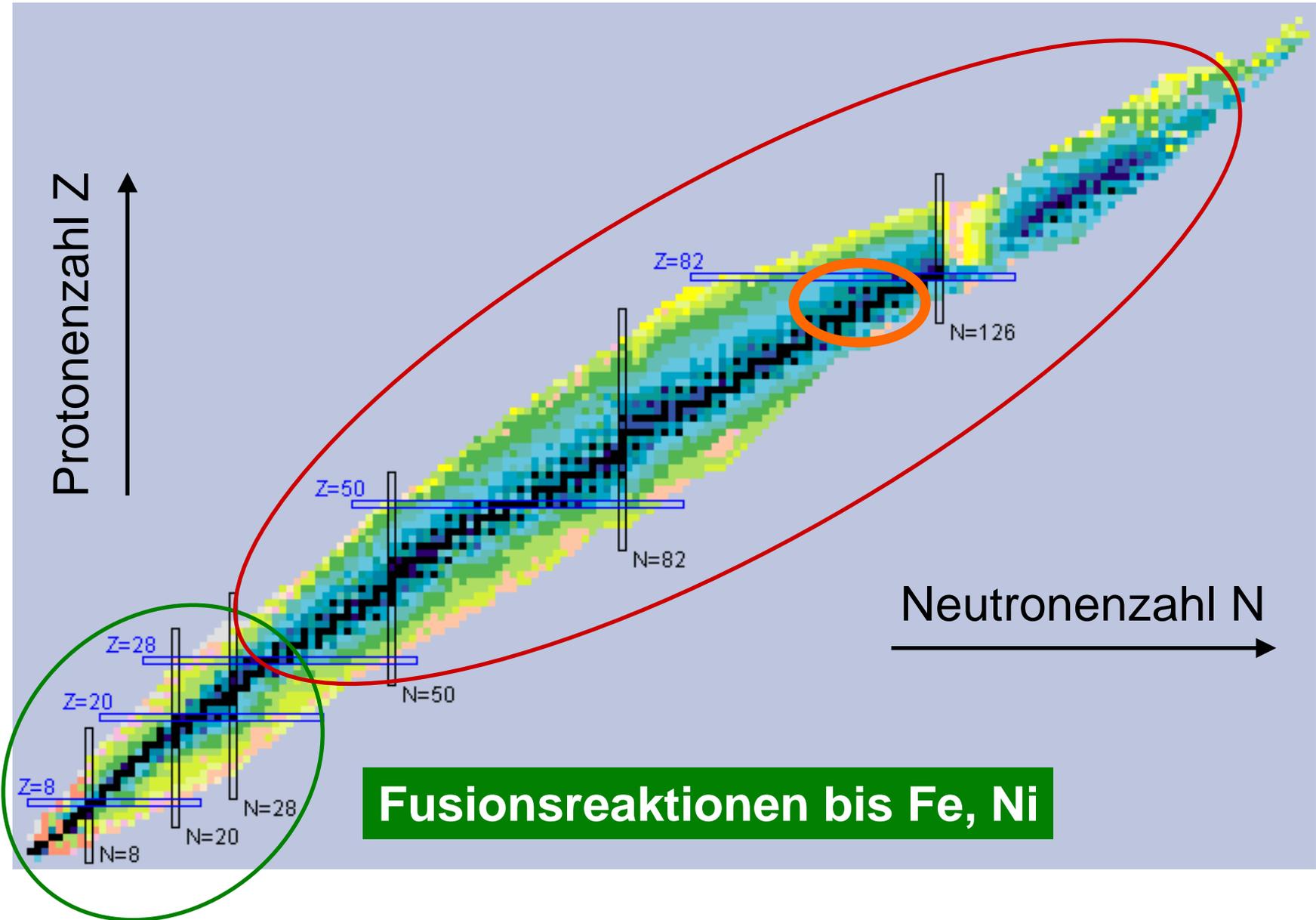
Ordnungszahl
Symbol
Atommasse

Metall
Halbmetall
Nichtmetall

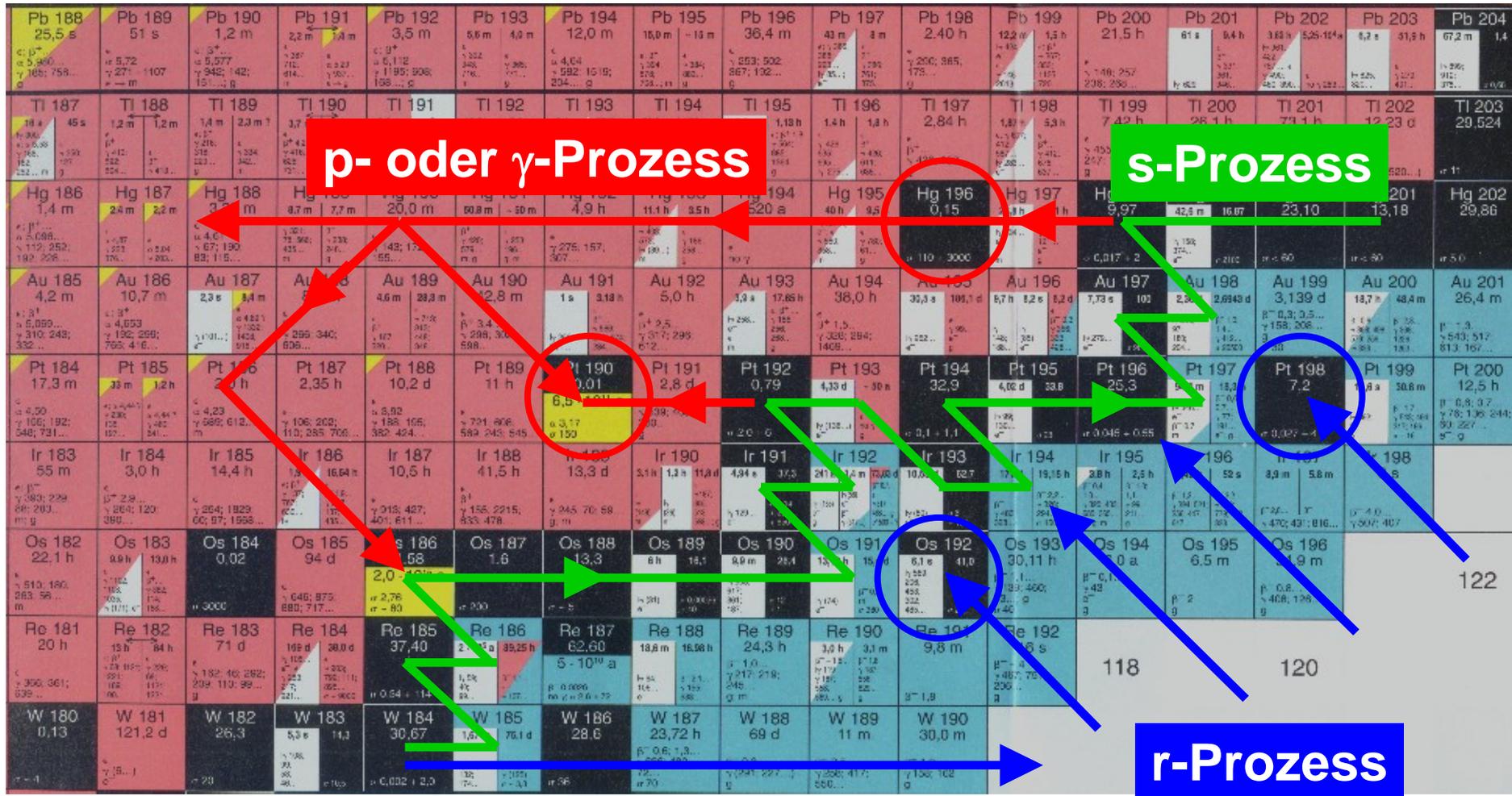
Zeit: ca. 200 Millionen Jahre nach dem Urknall

1	1 H 1.008	2	3 Li 6.941	4	4 Be 9.012	5	6 C 12.01	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18 He 4.003															
2	11 Na 22.99	12 Mg 24.31	13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95	19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80								
3	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc 98.91	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.32	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.91	54 Xe 131.3	55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm 144.91	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.05
4	87 Fr 223.0	88 Ra 226.0	89 Ac 227.0	90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np 237.0	94 Pu 244.1	95 Am 243.1	96 Cm 247.1	97 Bk 247.1	98 Cf 251.1	99 Es 252.0	100 Fm 257.1	101 Md 258.1	102 No 259.1	103 Lr 262.1	104 Rf 261.1	105 Db 262.1	106 Sg 263.1	107 Bh 264.1	108 Hs 265.1	109 Mt 268	110 Uun 269	111 Uuu 272	112 Uub 277	113 Uut 289	114 Uuq 289	115 Uup 289	116 Uuh 289	117 Uus 289	118 Uuo 293		

Synthese schwerer Atomkerne

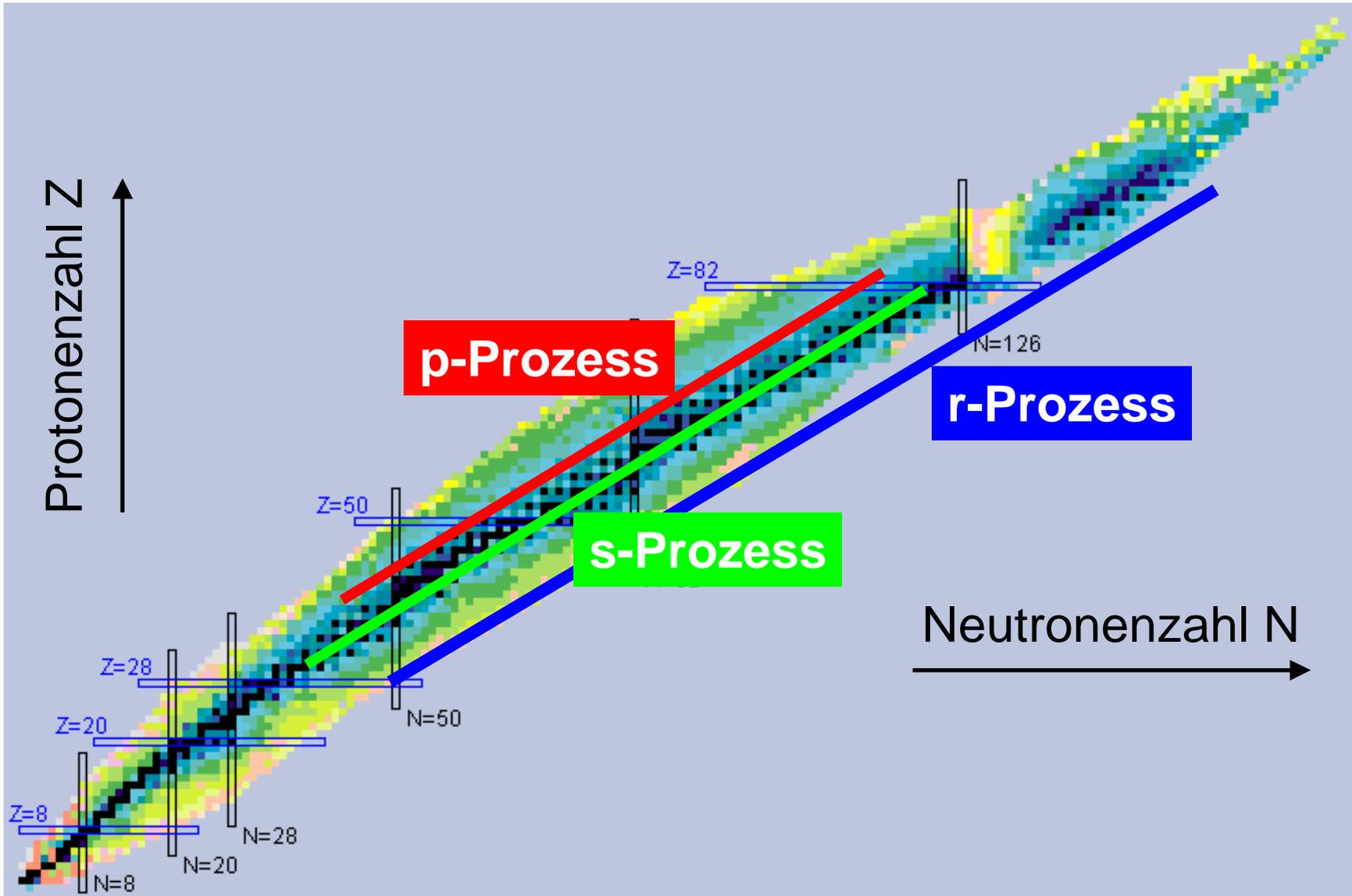


Synthese schwerer Atomkerne

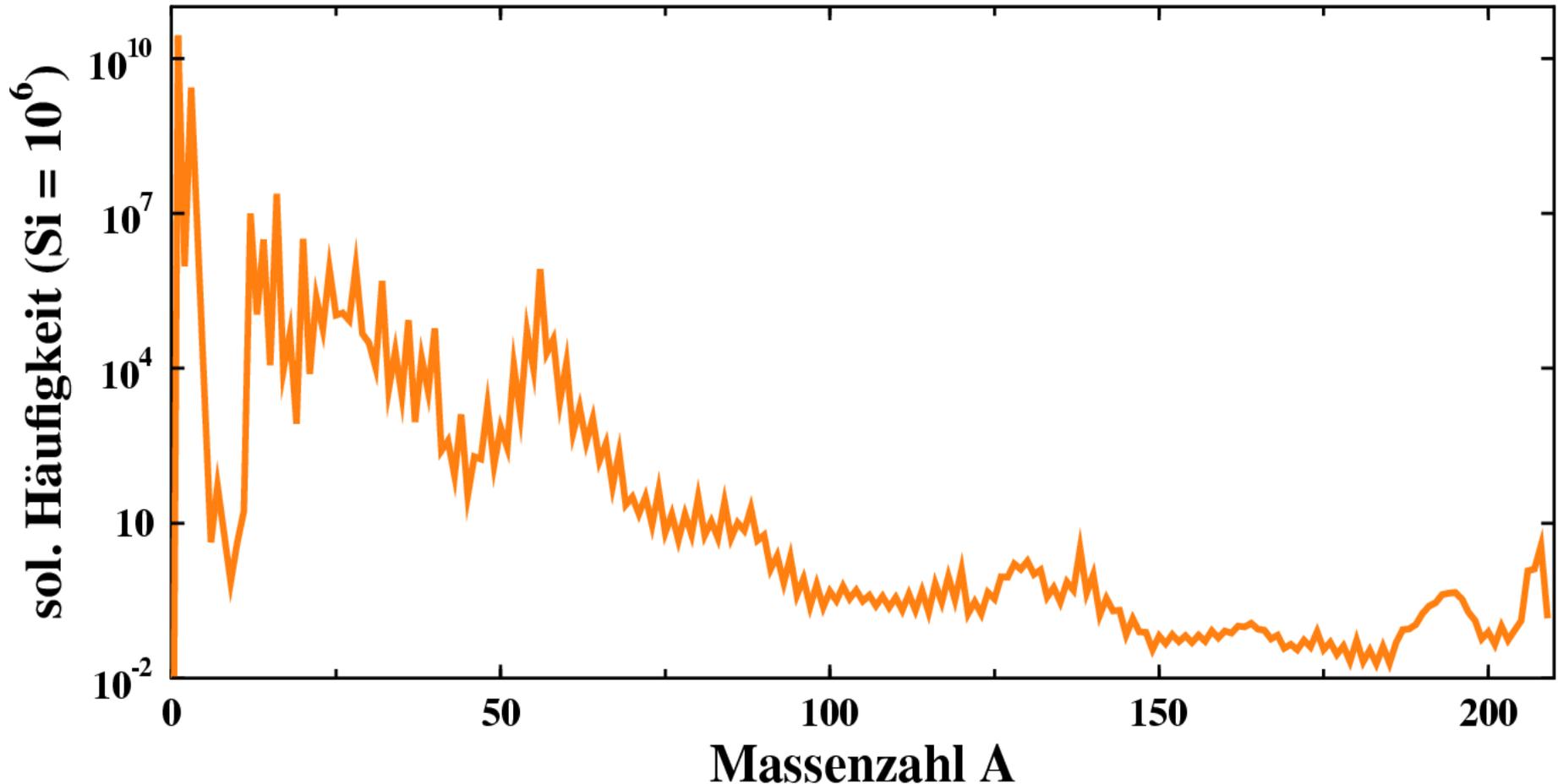


E.M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler, and F. Hoyle (B²FH)
Rev. Mod. Phys. **29** (1957) 547

Synthese schwerer Atomkerne

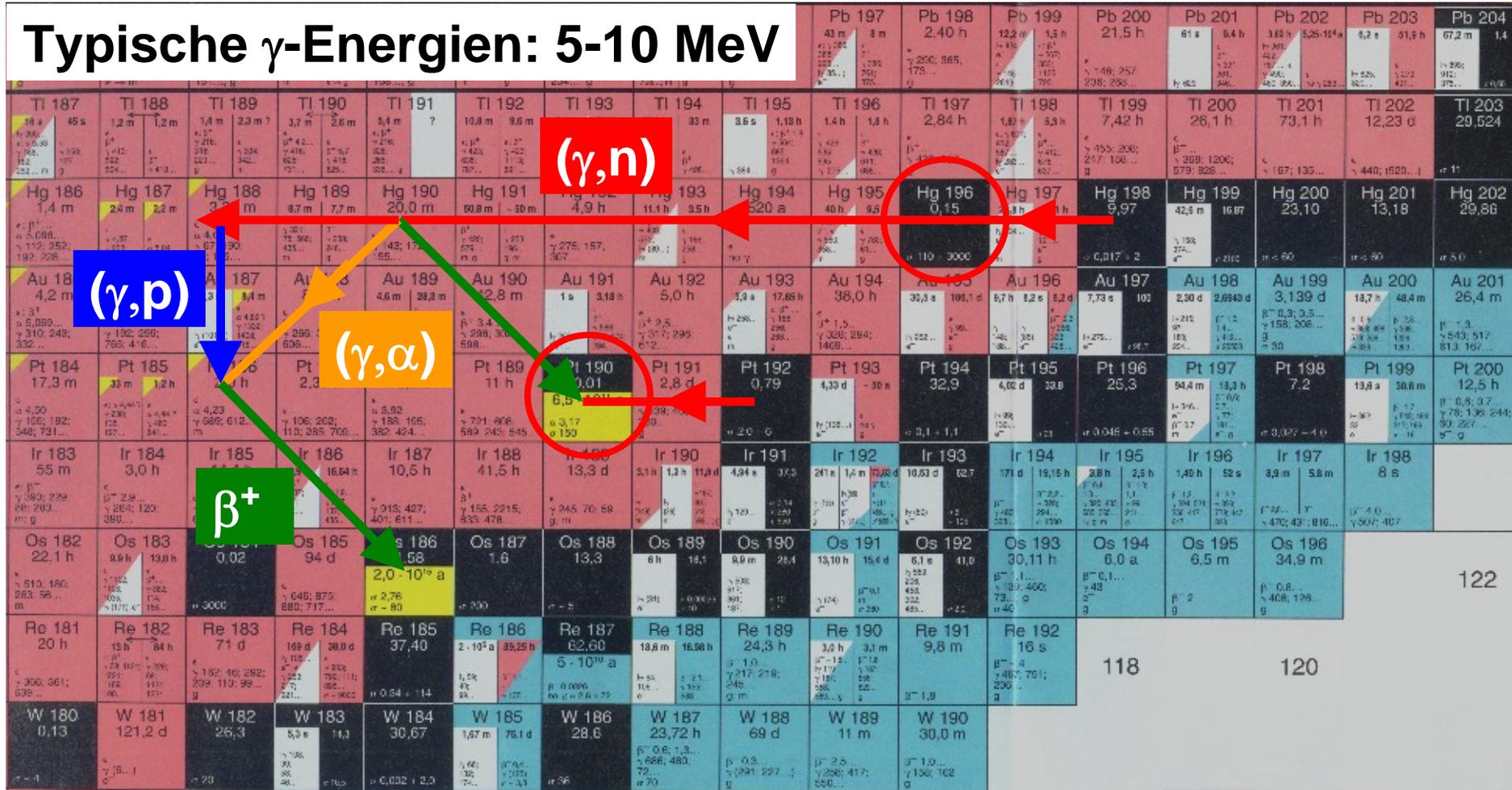


Häufigkeit der Elemente und Isotope



Kernreaktionen und Zerfälle im p-Prozess

Typische γ -Energien: 5-10 MeV



Für leichtere Kerne können weitere Prozesse konkurrieren:
 (n, γ) , (p, γ) , (α, γ) , νp -process

Was bestimmt die Elementsynthese im p-Prozess?

Astrophysikalische Parameter:

- Sternmasse
- Temperatur
- Dichten
- Dynamik, z.B. Massentransport

Kernphysikalische Parameter:

- Grundzustandsmassen
- Zustandseigenschaften
- Zustandsdichten
- Optische Potenziale
- → Reaktionsraten, z.B. (γ, n) , (γ, α) , (γ, p)



p-Prozess

Kernphysikalische Parameter im p-Prozess

- Grundzustandsmassen
- Zustandseigenschaften
- Zustandsdichten
- Optische Potenziale
- → Reaktionsraten,
z.B. (γ, n) , (γ, α) , (γ, p)

Probleme:

- Mehrere tausend Isotope
- Radioaktive Isotope
- Über 20.000 Reaktionsraten

→ Zuverlässige und robuste
Modellvorhersage der Parameter



Test der Modelle durch Schlüsselexperimente

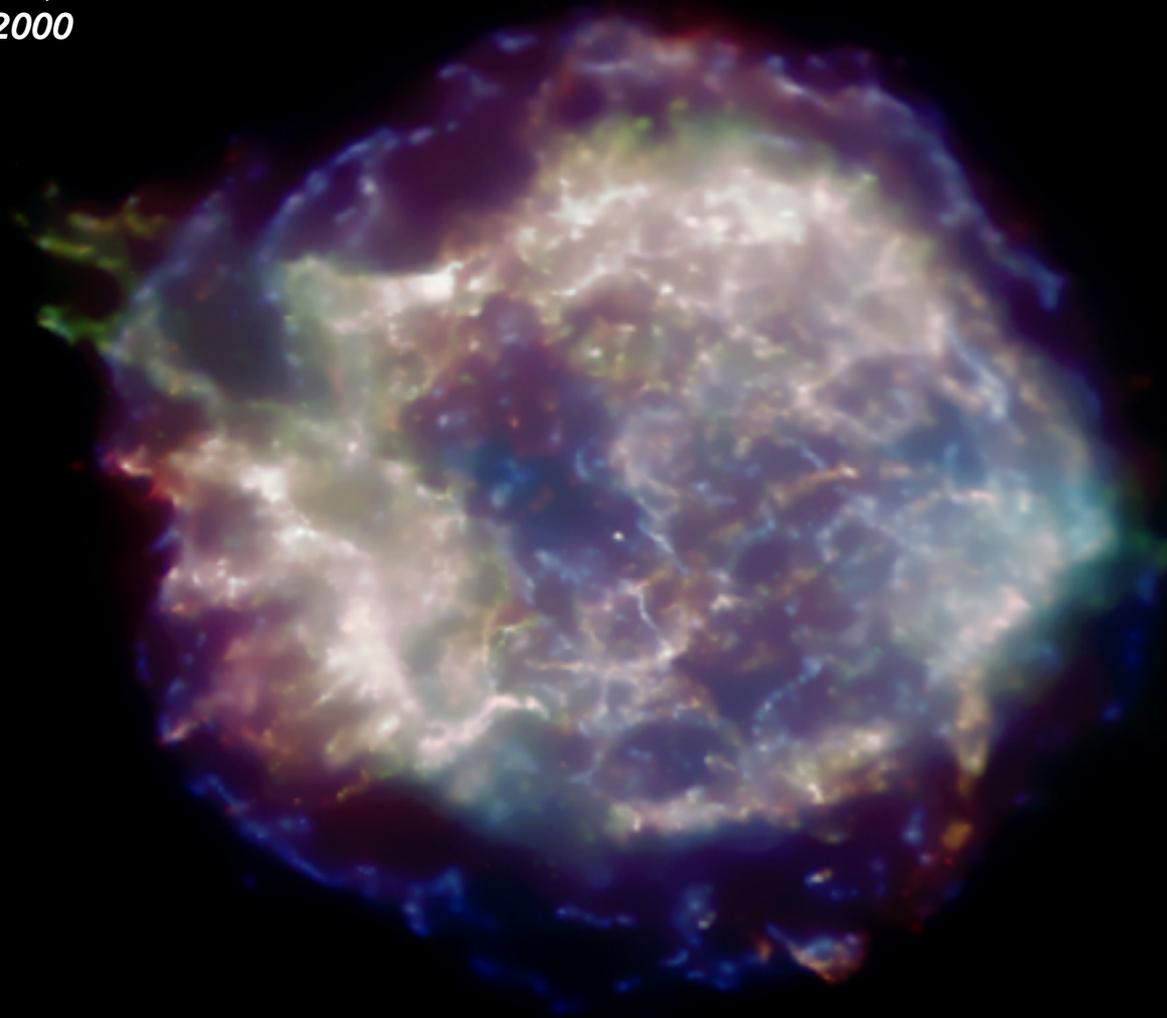
Reaktionsraten für (γ, n)

- Grundzustandmassen
- Zustandseigenschaften
- Zustandsdichten
- Optische Potenziale
- → Reaktionsraten,
z.B. (γ, n) , (γ, α) , (γ, p)

Was ist der relevante Energiebereich?

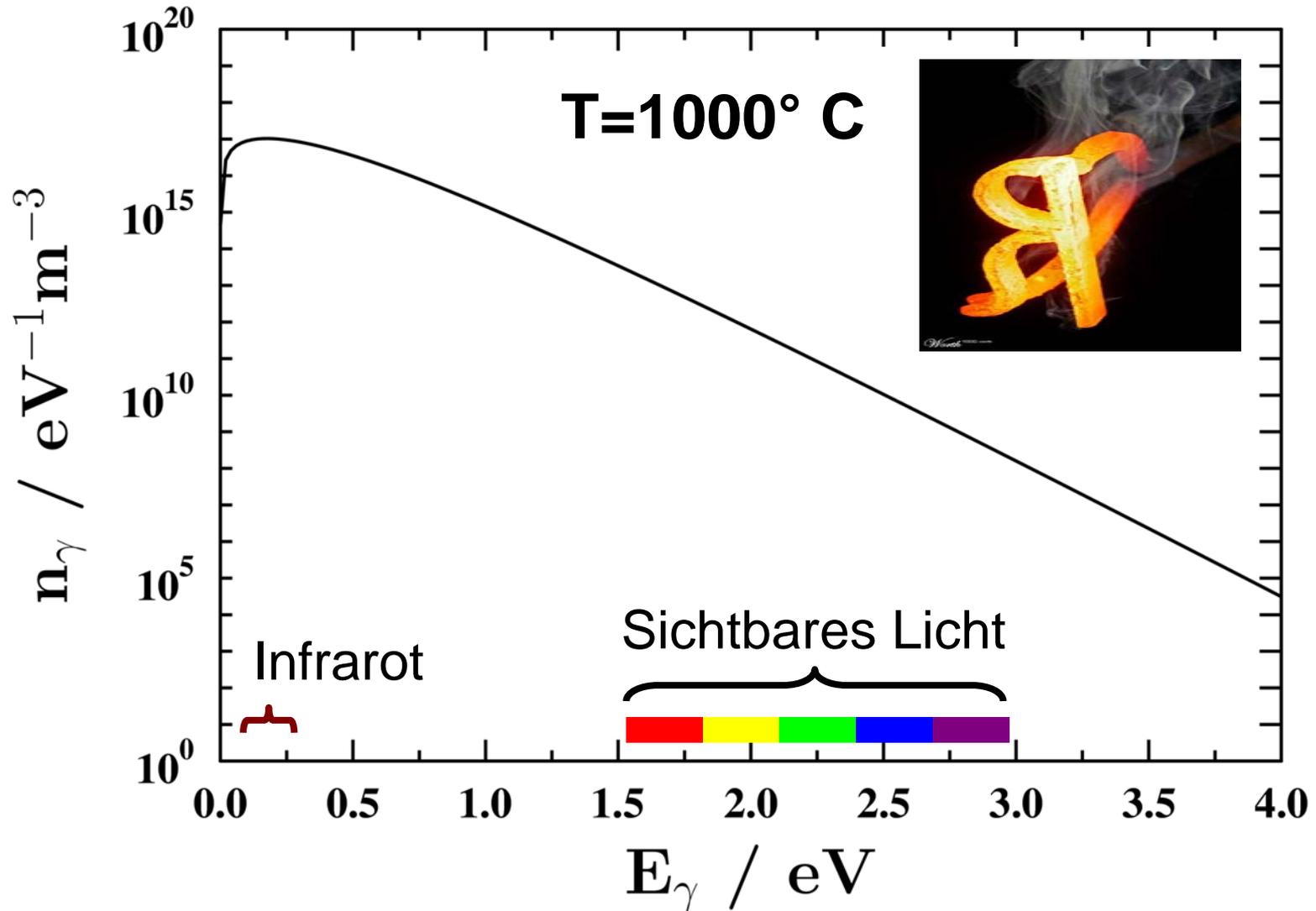
Woher kommen die hochenergetischen Photonen?

CASSIOPEIA A,
CHANDRA 01/2000

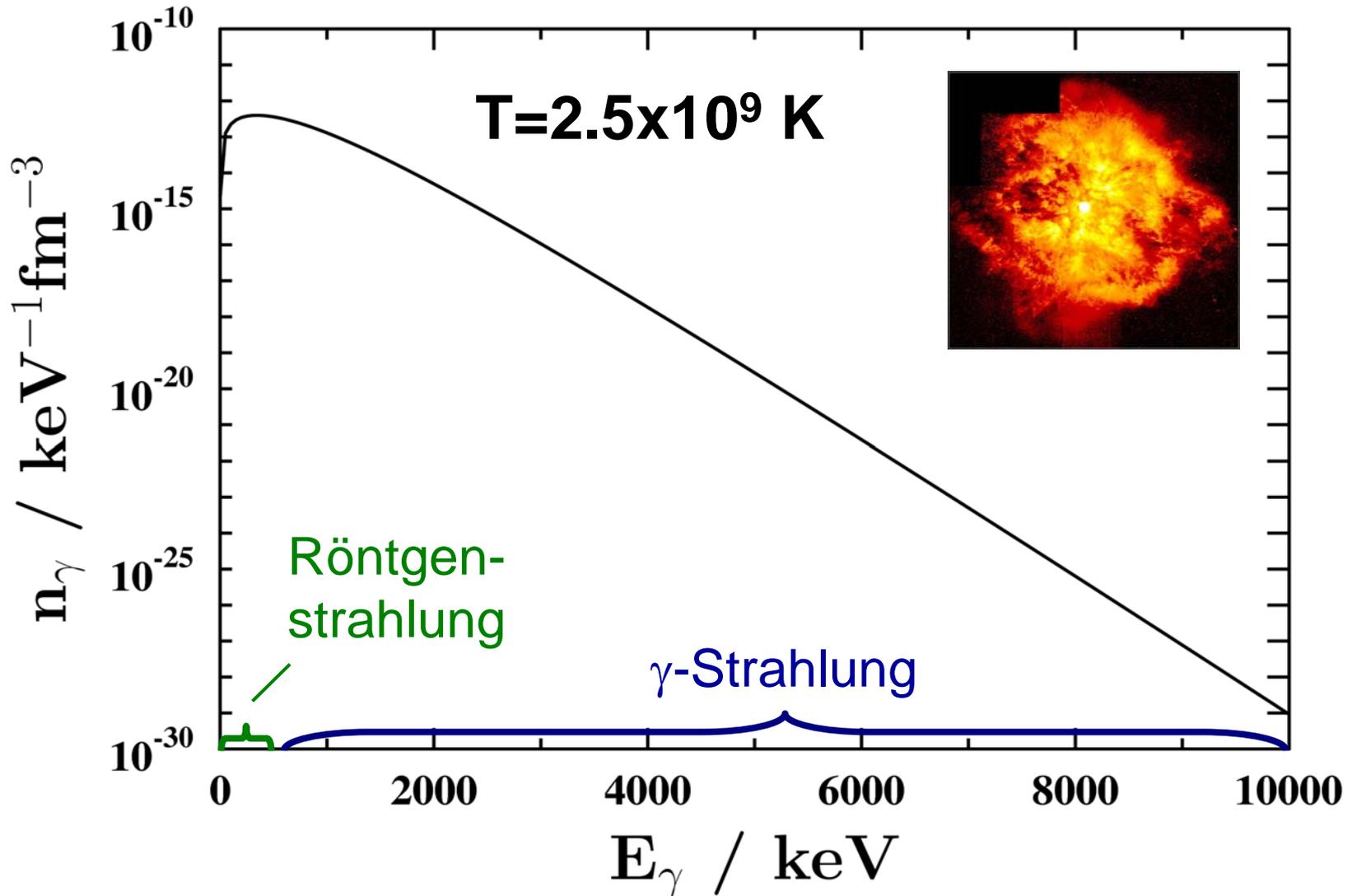


Temperaturen bis zu 10^{10} K \sim 800 keV

„Photonenbad“ bei 1000° Celsius

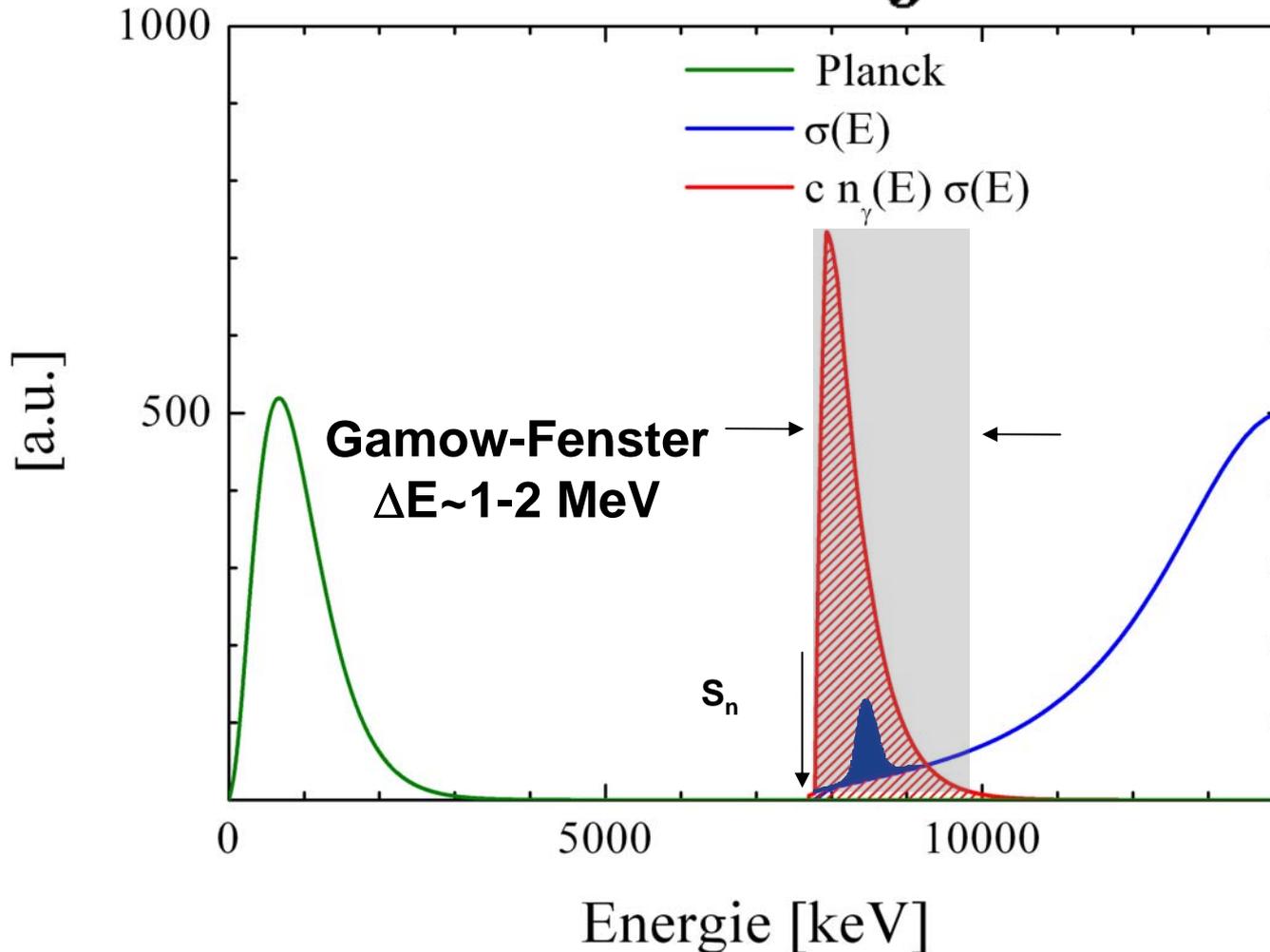


Photonenbad bei 2.5 Milliarden Kelvin



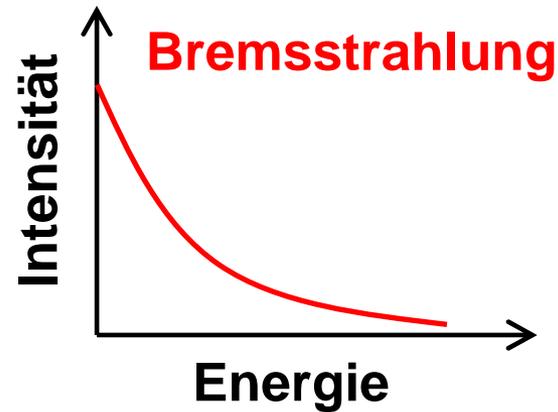
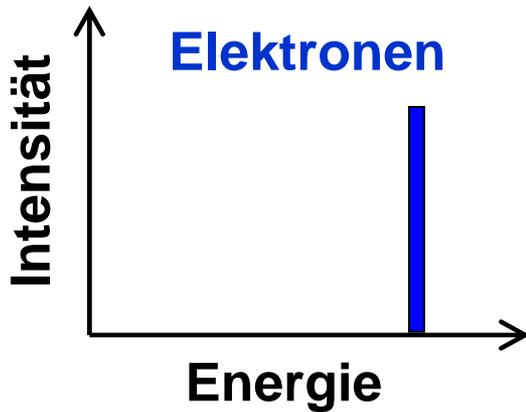
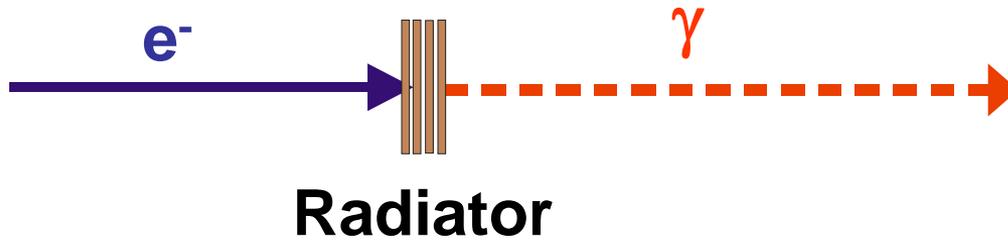
Relevanter Energiebereich für (γ, n) -Reaktionen

Reaktionsrate: $\lambda(T) = c \int n_\gamma(E) \sigma(E) dE$



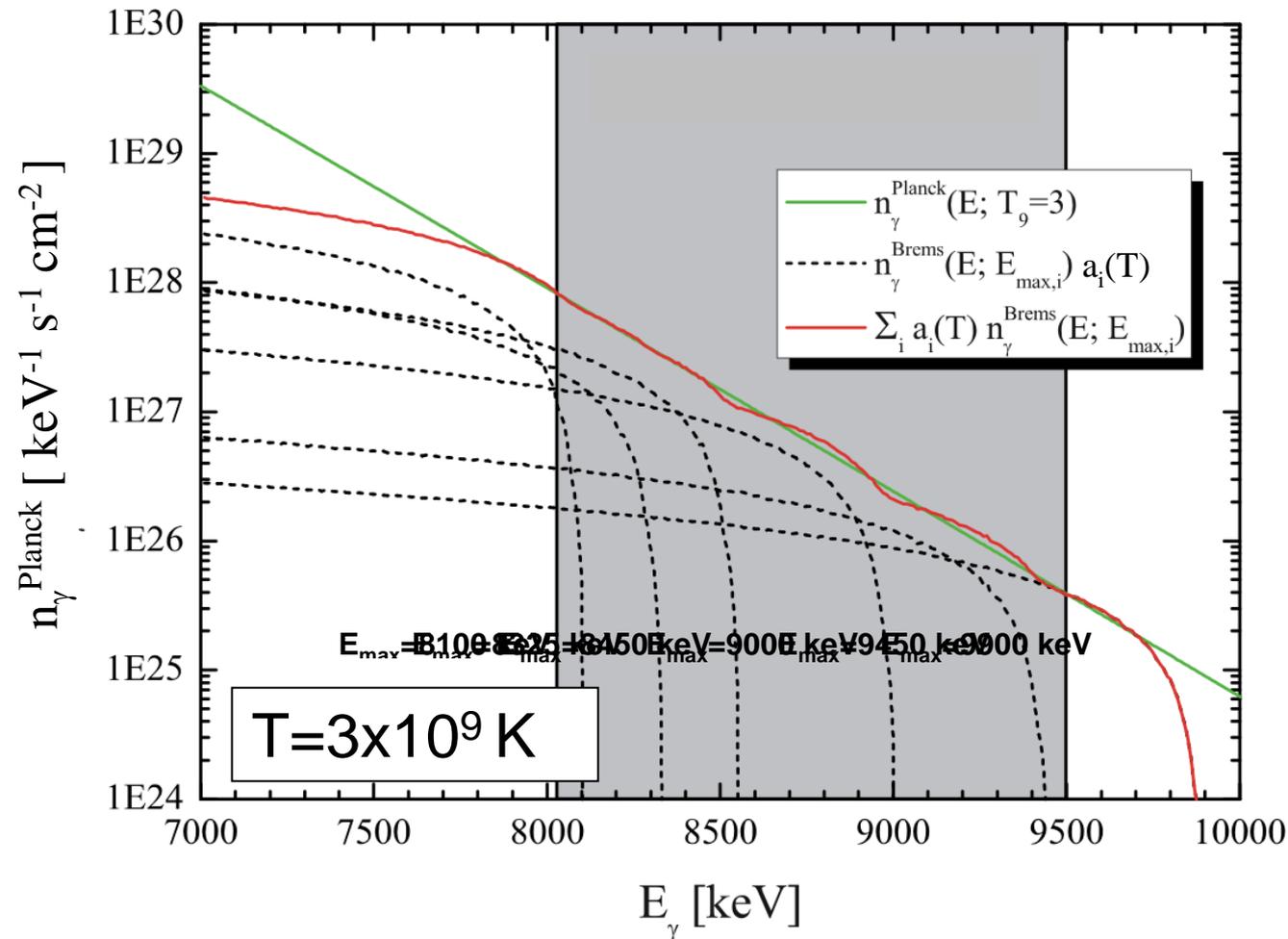
Details der Kernstruktur haben sehr großen Einfluss!

Erzeugung hochenergetischer Photonen im Labor



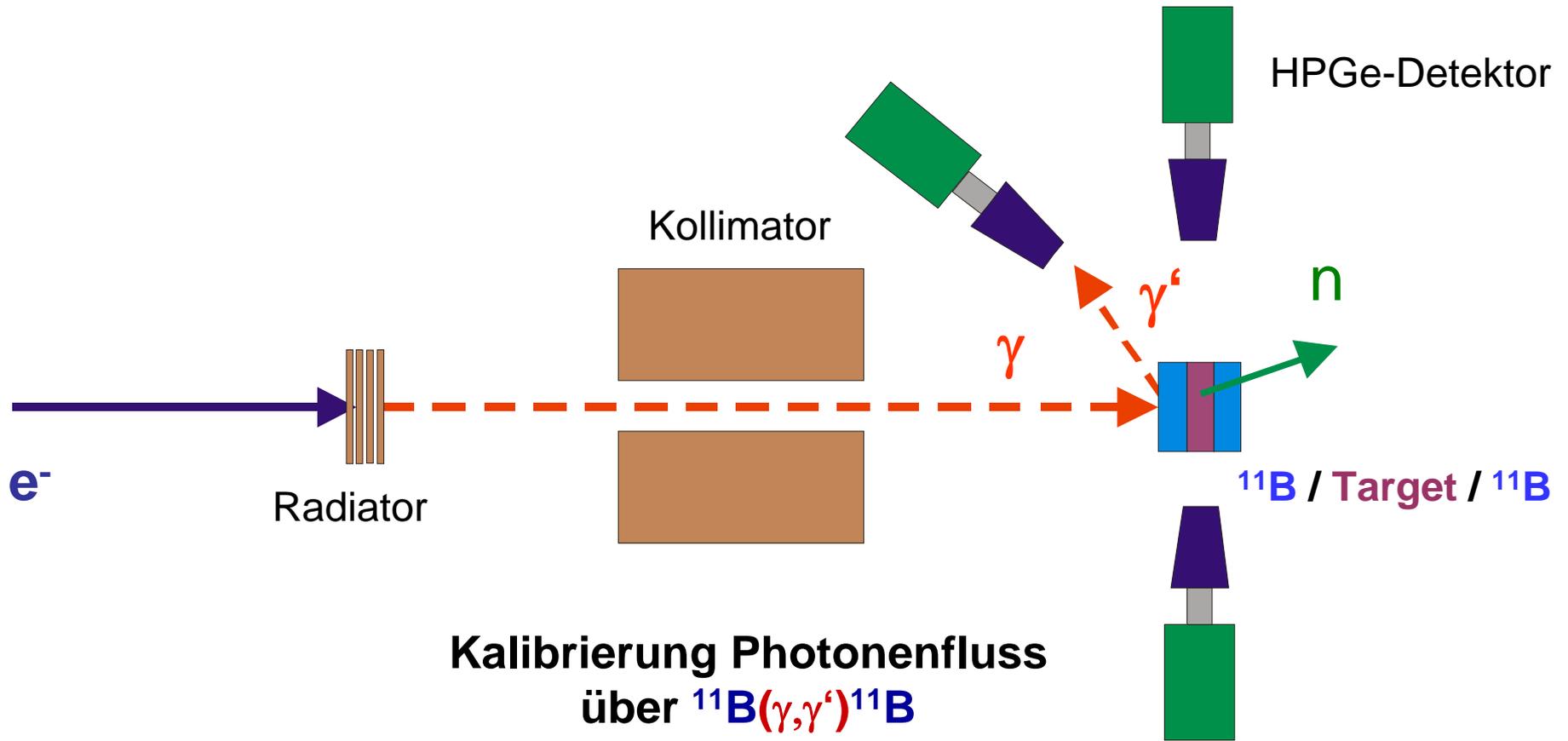
*Review: U. Kneissl, H.H. Pitz, and A.Z.,
Prog. Part. Nucl. Phys. **37** (1996) 349*

Produktion eines Planck-Spektrums



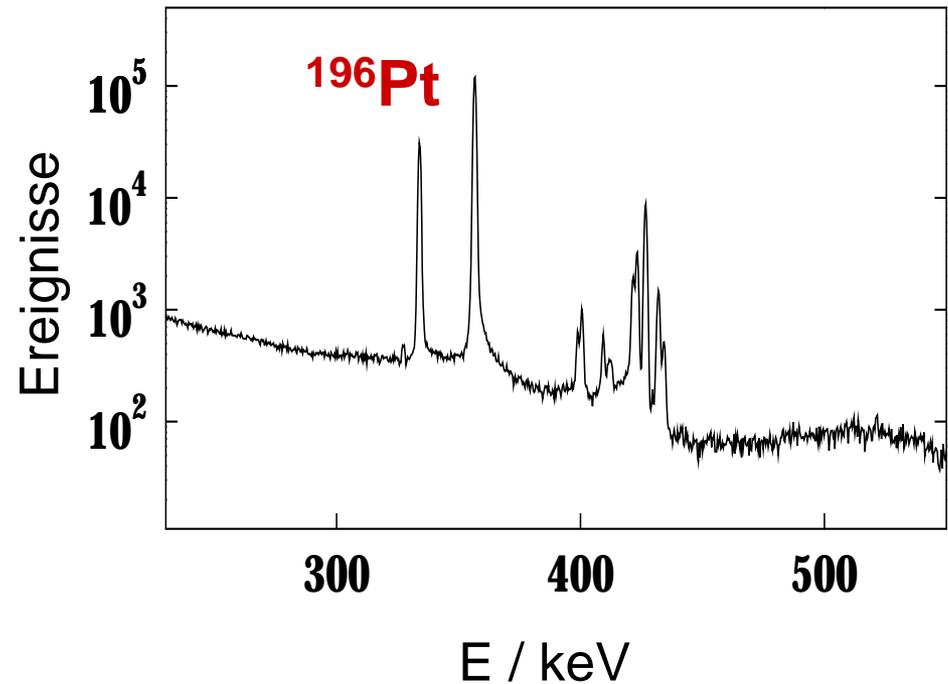
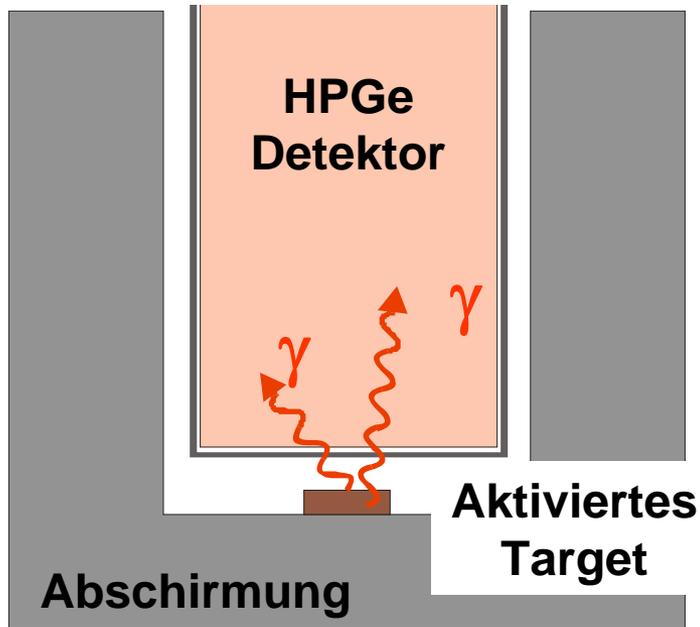
A. Z. et al., *Prog. Part. Nucl. Phys.* **44** (2000) 39
 P. Mohr et al., *Phys. Lett. B* **488** (2000) 127

Aktivierung des Targets im Photonenbad



Messung der Aktivierung

z.B.: $^{197}\text{Au} (\gamma, n) ^{196}\text{Au} \rightarrow ^{196}\text{Pt}^*$



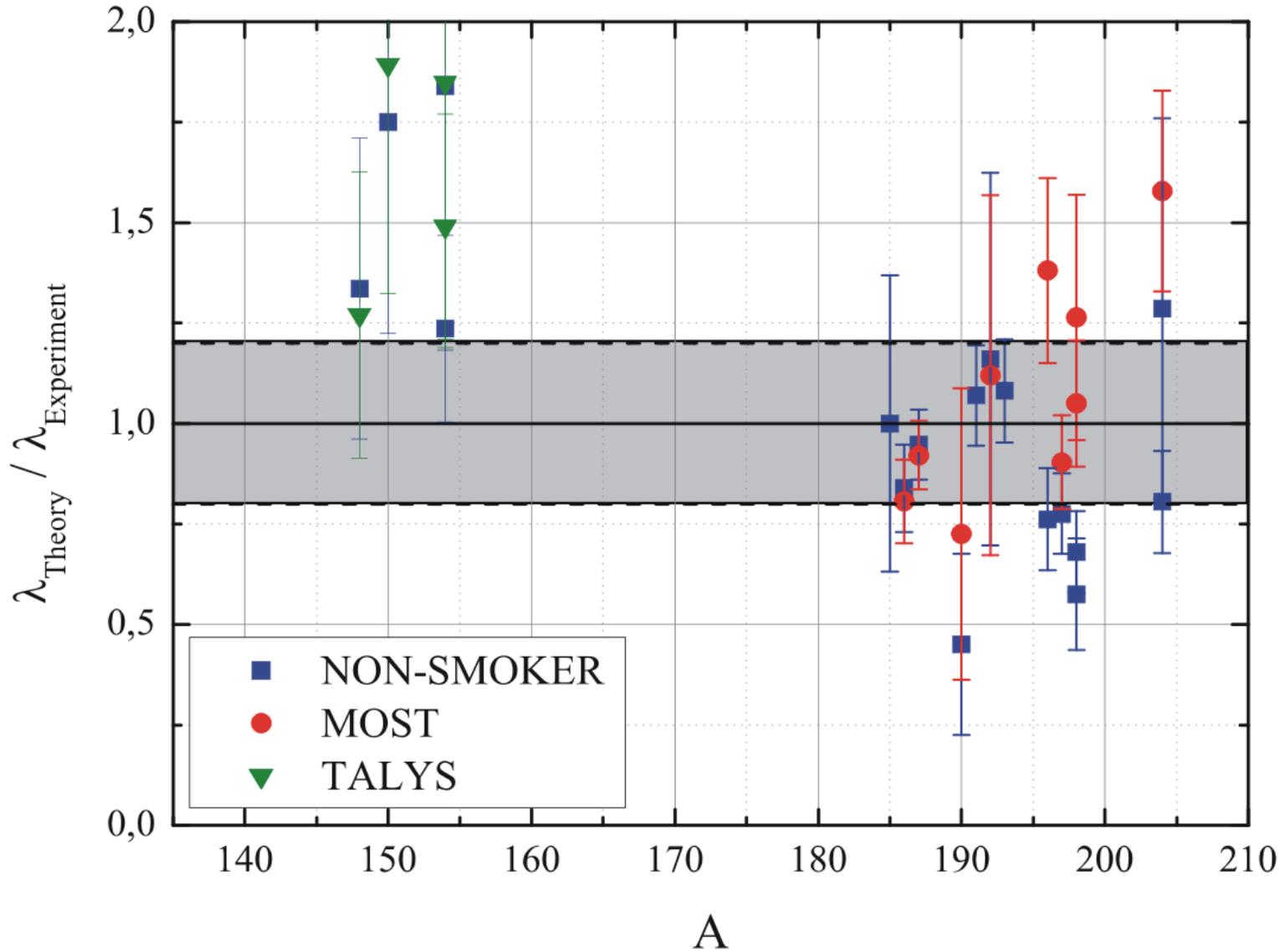
Grundzustand-Reaktionsraten bei 2.5×10^9 K

Isotope	$\lambda_{\text{exp,gs}}$	Reference	$\lambda_{\text{NONS,gs}}$	$\lambda_{\text{MOST,gs}}$
^{186}W	310(40)	K. Sonnabend et al., ApJ 583 (2003) 506	260	250
^{185}Re	19(7)	S. Müller et al., Phys. Rev. C 73 (2006) 025804	19	44
^{187}Re	76(7)		72	70
^{190}Pt	0.4(2)	K. Vogt et al., Phys. Rev. C 63 (2001) 055802	0.18	0.29
^{192}Pt	0.5(2)		0.58	0.56
^{198}Pt	87(21)		50	110
^{197}Au	6.2(8)	K. Vogt et al., Nucl. Phys. A 707 (2002) 241	4.81	5.6
^{196}Hg	0.42(7)	K. Sonnabend et al., Phys. Rev. C 70 (2004) 035802	0.32	0.58
^{198}Hg	2.0(3)		1.36	2.1
^{204}Hg	57(21)		73.3	170
^{204}Pb	1.9(3)		1.53	3.0
^{191}Ir	4.3(5)	J. Hasper et al., to be published	4.6	-
^{193}Ir	13.5(16)		14.6	-

M. Arnould and
S. Goriely,
Phys. Rep. 384
(2003) 1

T. Rauscher and
F.-K. Thielemann,
ADNDT 75 (2000) 1

Grundzustand-Reaktionsraten bei 2.5×10^9 K



M. Arnould and S. Goriely, *Phys. Rep.* 384 (2003) 1
T. Rauscher and F.-K. Thielemann, *ADNDT* 75 (2000) 1
A. J. Koning et al., *AIP* 769 (2004) 1154

Optische Potenziale

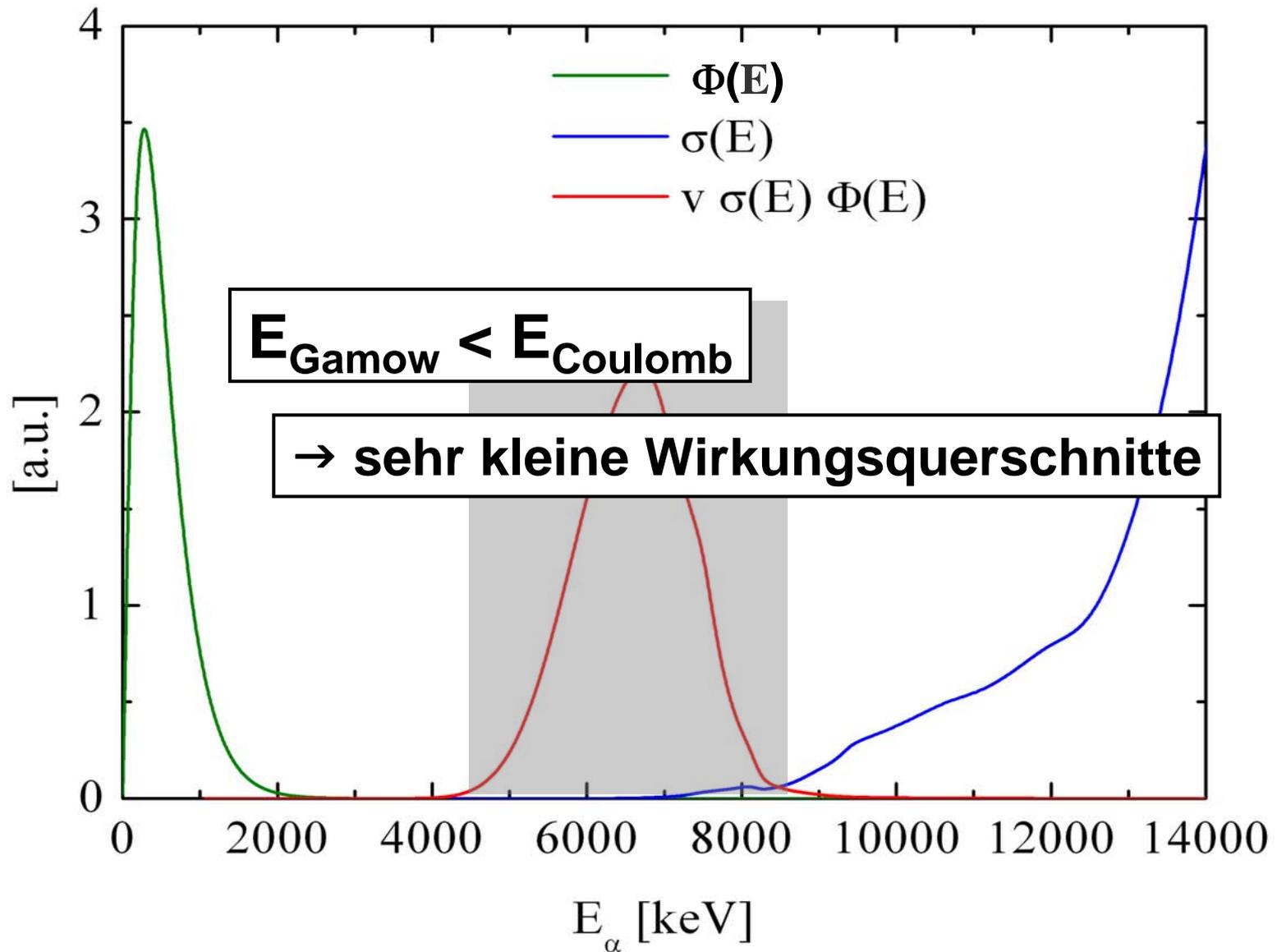
- Grundzustandmassen
- Zustandseigenschaften
- Zustandsdichten
- **Optische Potenziale**
- Reaktionsraten,
z.B. (γ, n) , (γ, α) , (γ, p)

Wie ist die Wechselwirkung z.B. zwischen einem α -Teilchen und einem Kern?

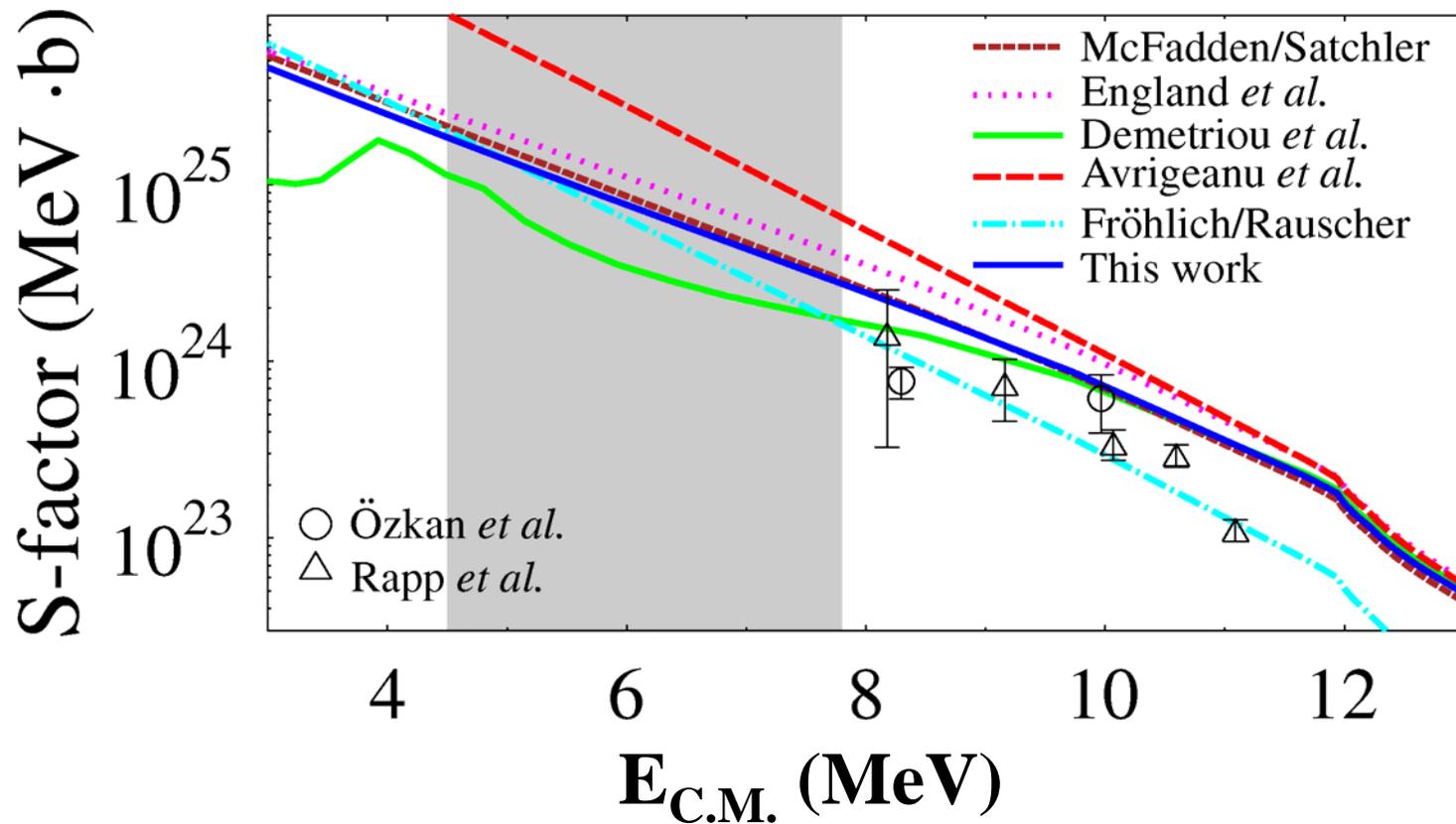
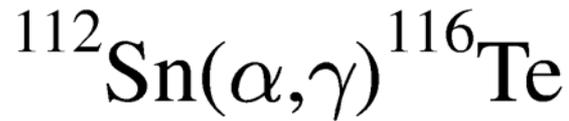
→ Vorhersage für (γ, α) , (α, γ) , (α, n) , ...

Welchen Weg nimmt der p-Prozess?

Relevanter Energiebereich für (α, γ)



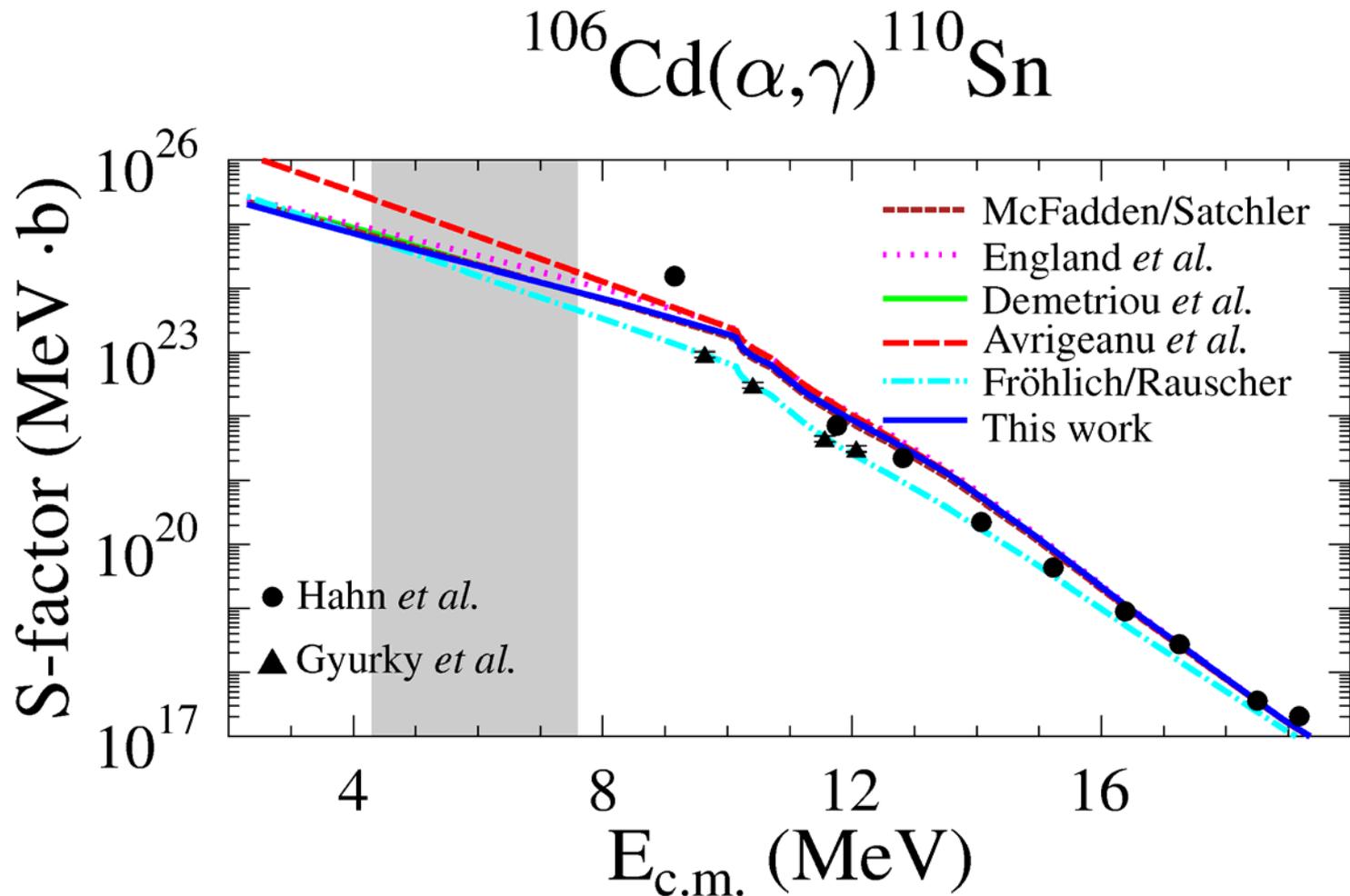
S-Faktor für α - Einfang



N. Özkan *et al.*, *Phys. Rev. C* **75** (2007) 025801

P. Demetriou *et al.*, *Nucl. Phys. A* **707** (2002) 253

S-Faktor für α - Einfang



N. Özkan *et al.*, *Phys. Rev. C* **75** (2007) 025801

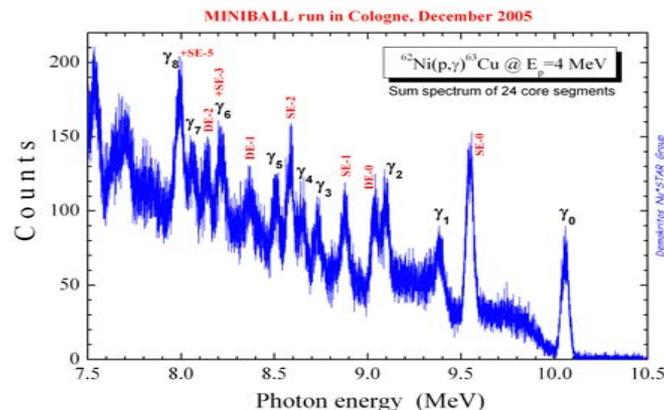
P. Demetriou *et al.*, *Nucl. Phys. A* **707** (2002) 253

Messung sehr kleiner Wirkungsquerschnitte

- Erhöhung der Anzahl produzierter Kerne
- Optimierung der Nachweiswahrscheinlichkeit

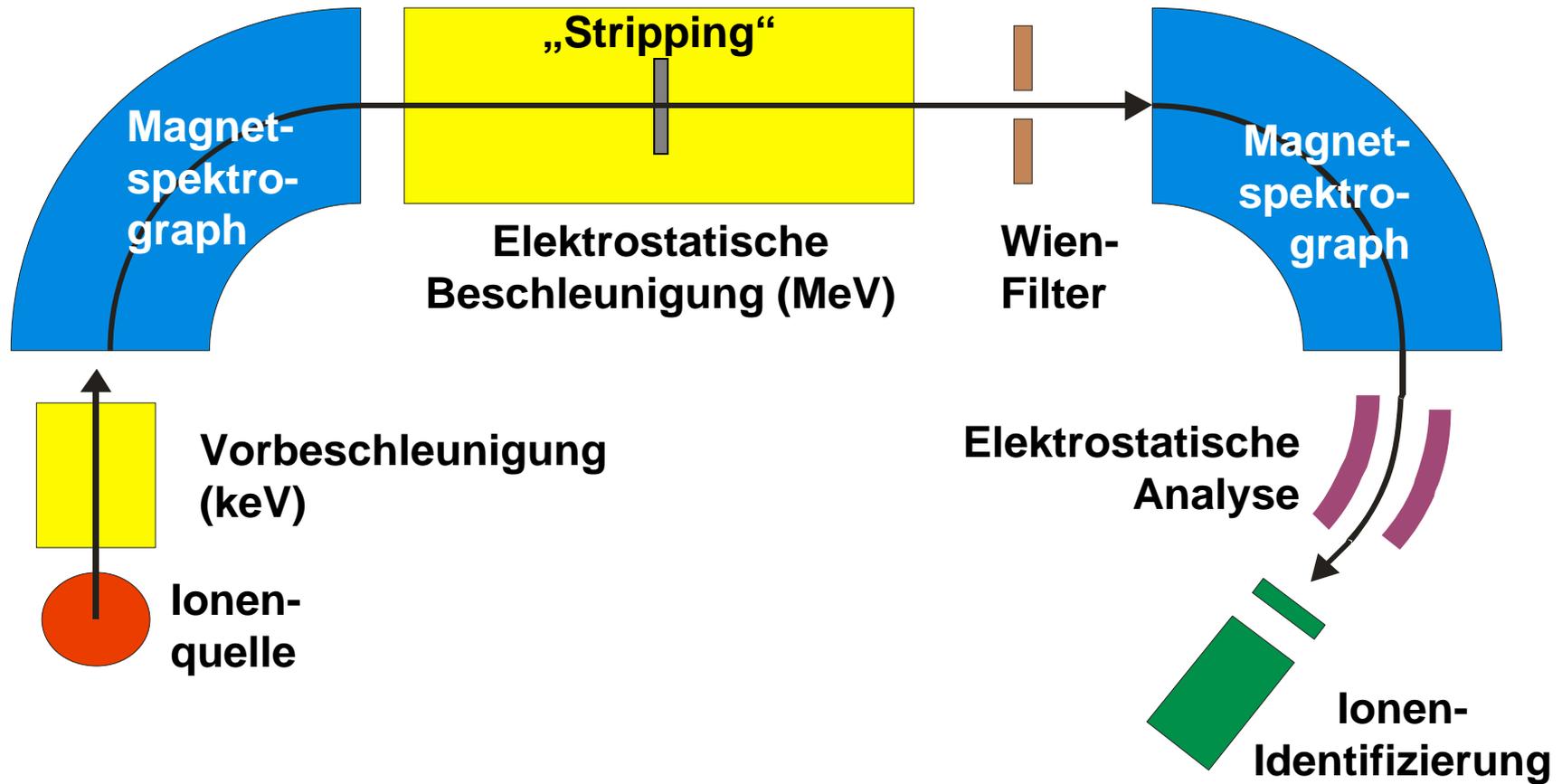
- Indirekter Nachweis der erzeugten Isotope durch γ -Spektroskopie („Fingerabdruck“)

- Direkter Nachweis der erzeugten Isotope
→ Beschleuniger-Massenspektrometrie



HORUS
Institut für Kernphysik

Beschleuniger-Massen-Spektrometrie (AMS)



Hohe Sensitivität: Isotopenverhältnis bis 10^{-15}

Hohe Effizienz: $< 10^5$ Kerne nachweisbar

Beschleuniger-Massen-Spektrometrie (AMS)

**Typische Anwendung:
Nachweis kleinster Mengen
von radioaktivem ^{14}C (Datierung)**

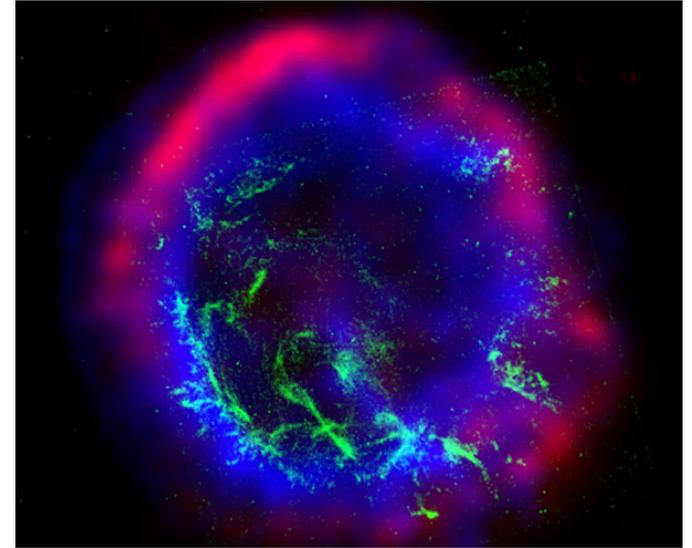


**Weitere Anwendung:
Nachweis kleinster Mengen
kosmogener Nuklide**



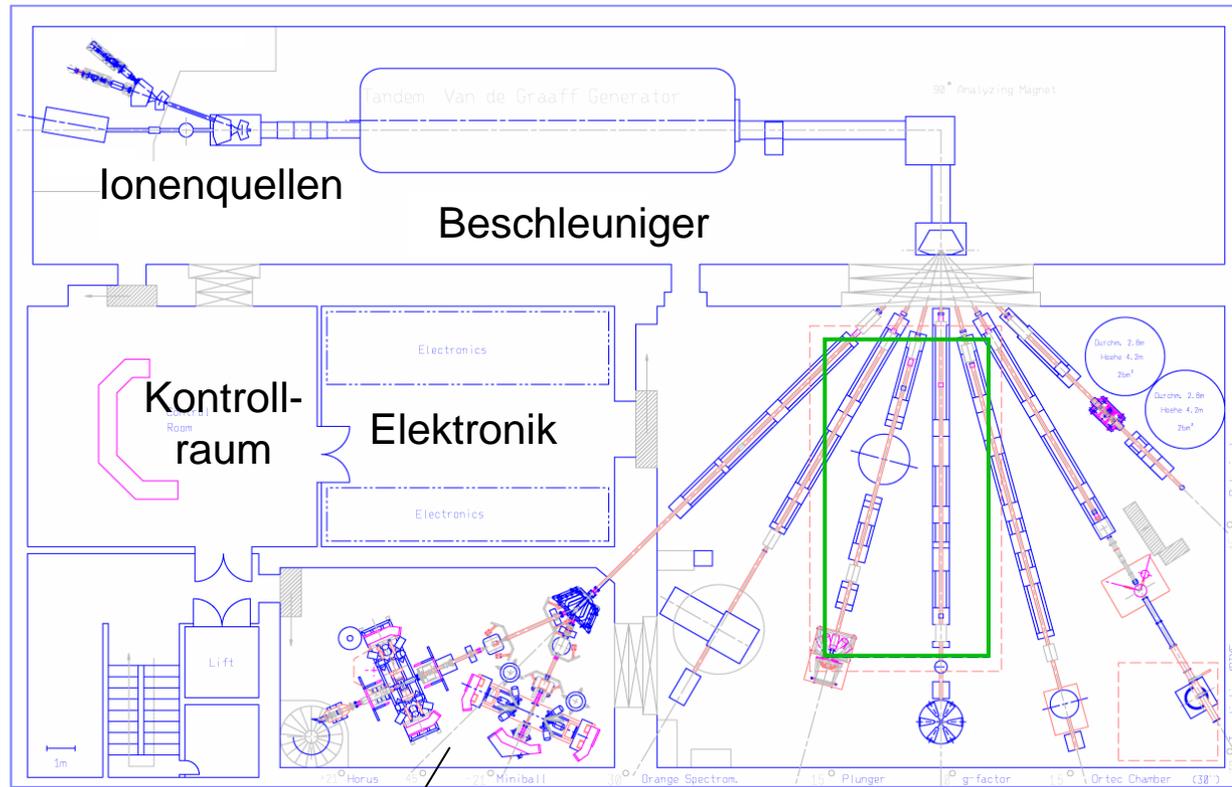
Beschleuniger-Massen-Spektrometrie (AMS)

**Aber auch:
Nachweis kleinster Mengen
im Labor erzeugter Atomkerne**

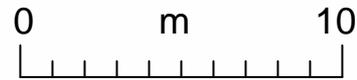


- **Ausschreibung der DFG im März 2007:
„6 MV Hochleistungs-Massenspektrometer“**
- **Juli 2007: Zuschlag für die Universität zu Köln**

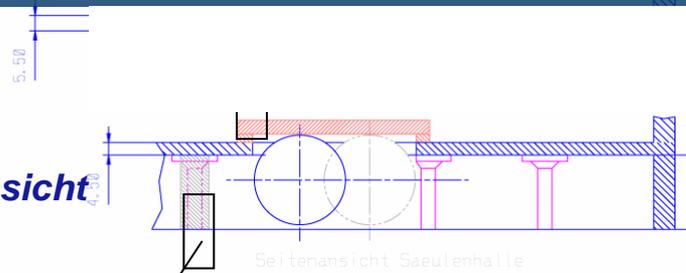
10 MV Tandem-Beschleuniger (1. Tiefkeller)



Neue 6 MV Tandem-AMS-Maschine (2. Tiefkeller)



Seitenansicht



Geographie

(U. Radtke)

Geologie

(M. Melles, M. Staubwasser)

Mineralogie Uni Hannover

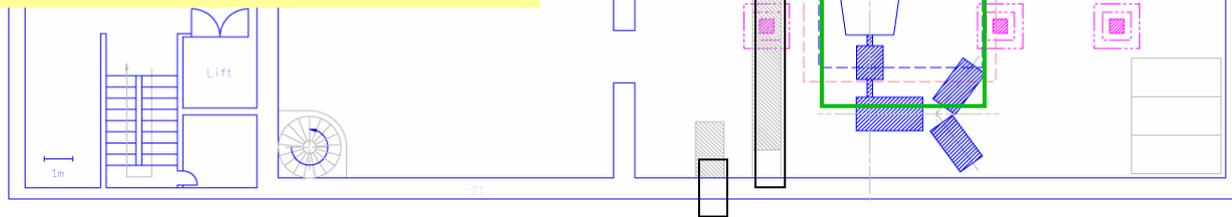
(F. von Blanckenburg)

Kernphysik

(A. Dewald, J. Jolie, A. Z.)

Abschirmung

Erste Experimente: Mitte 2010



Gefördert durch die **DFG** und die



Universität
zu Köln

Die Synthese der schweren Elemente: Von Kernen und Sternen

**Eine vollständige Beschreibung der
Nukleosynthese benötigt:**

Astrophysik UND Kernphysik

**Robuste, extrapolationsfähige
Modelle zur Kernstruktur**

Schlüsselexperimente zum Test der Modelle

Die Synthese der schweren Elemente: Von Kernen und Sternen

M. Büssing*, **M. Elvers***, **J. Endres***, **M. Fritzsche**,
J. Hasper, **L. Schnorrenberger**, **K. Lindenberg**,
S. Müller, **D. Savran**, **V. Simon**, **K. Sonnabend**

Institut für Kernphysik, TU Darmstadt

** Seit Oktober 2007:*

Institut für Kernphysik, Universität zu Köln

*Unterstützt durch die **DFG** (SFB 634) und das BMBF*

Mehr Informationen und Publikationen: www.zilges.de