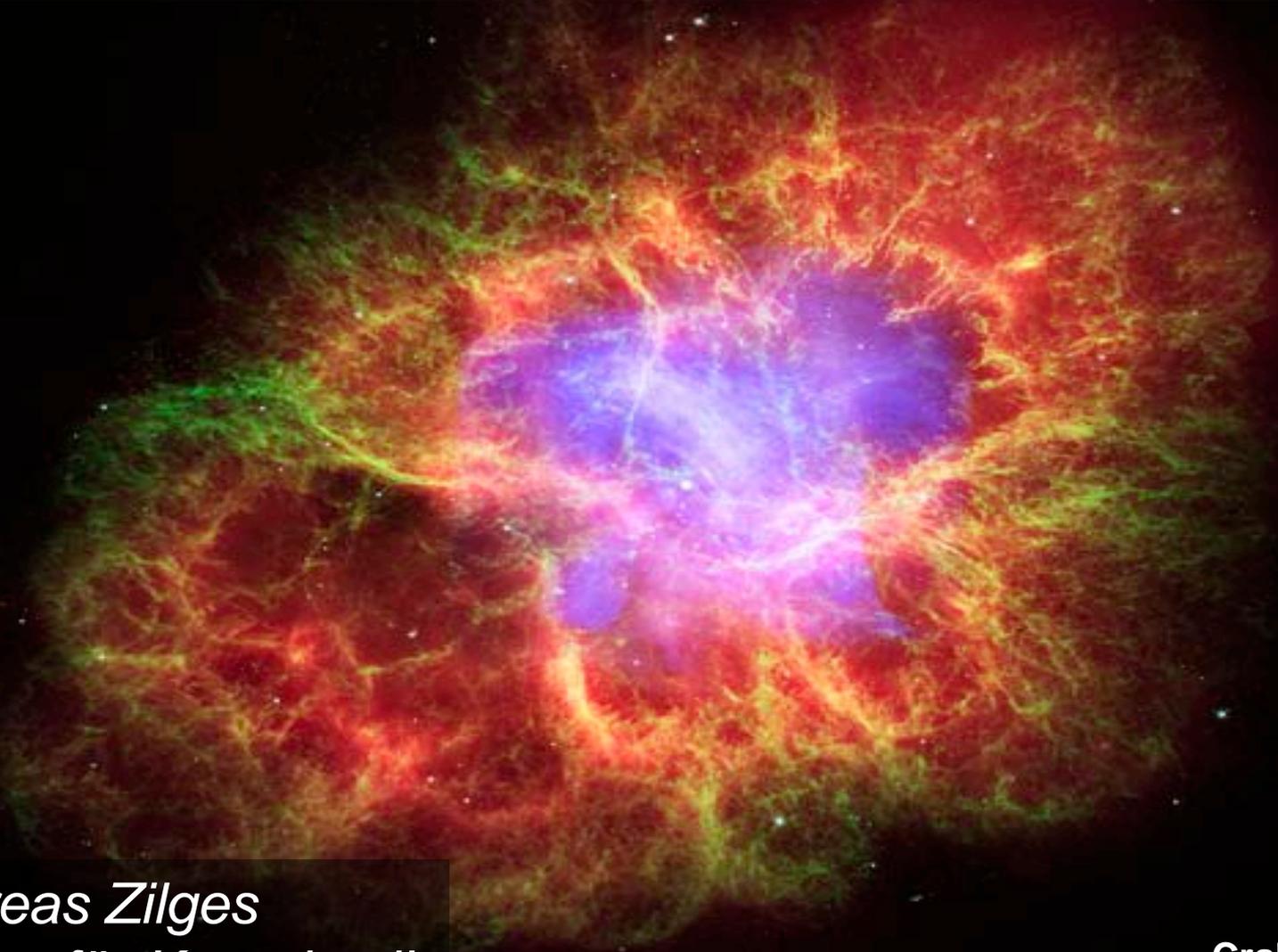


Die Synthese der schweren Elemente: Von Kernen und Sternen

*Andreas Zilges
Institut für Kernphysik
Universität zu Köln*

**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.**

Wechselwirkungen: Liebe und Hass

Die Synthese der schweren Elemente: Von Kernen und Sternen



**Die Atomkerne aller Elemente bestehen
aus Protonen und Neutronen.**

**Wechselwirkungen:
starke, elektromagnetische und schwache**

**Wie entstanden/entstehen aus diesen
Bausteinen die Elemente ?**

Synthese der Elemente: Energieproduktion im Inneren der Sterne



Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne. I.

Von C. F. v. Weizsäcker.

1. Die Aufbauhypothese. — 2. Umwandlung durch geladene Kerne. — 3. Reaktionsketten der leichtesten Elemente. — 4. Folgerungen für den inneren Aufbau der Sterne. — 5. Umwandlung durch Neutronen. — 6. Der Aufbau der schwereren Elemente. — 7. Allgemeinere astrophysikalische Fragen. — 8. Zusammenfassung.

Physikalische Zeitschrift 38 (1937) 176

Synthese der Elemente: Energieproduktion im Inneren der Sterne



Energy Production in Stars*

H. A. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

(Received September 7, 1938)

Phys. Rev. 55 (1939) 434

Synthese der Elemente im Urknall: Das $\alpha\beta\gamma$ -Paper



The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

February 18, 1948

Phys. Rev. 73 (1948) 803

Synthese schwerer Elemente: B2FH-Paper

REVIEWS OF MODERN PHYSICS

VOLUME 29, NUMBER 4

OCTOBER, 1957

Synthesis of the Elements in Stars*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,
California Institute of Technology, Pasadena, California*

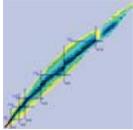
“It is the stars, The stars above us, govern our conditions”;
(*King Lear*, Act IV, Scene 3)

but perhaps

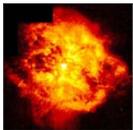
“The fault, dear Brutus, is not in our stars, But in ourselves,”
(*Julius Caesar*, Act I, Scene 2)



Die Synthese der schweren Elemente: Von Kernen und Sternen



Prinzip der Nukleosynthese

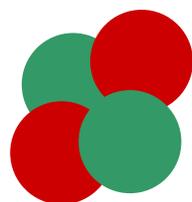


Kerne im Photonenbad



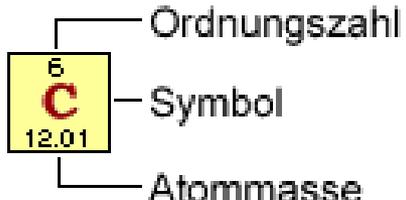
Nachweis kleinster Reaktionsraten

Wie entstanden die Elemente?

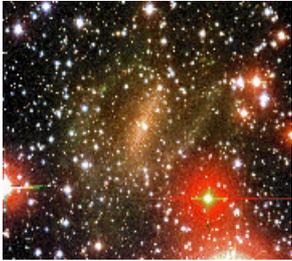


Fusion von Protonen und Neutronen zu Helium und Lithium

	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		

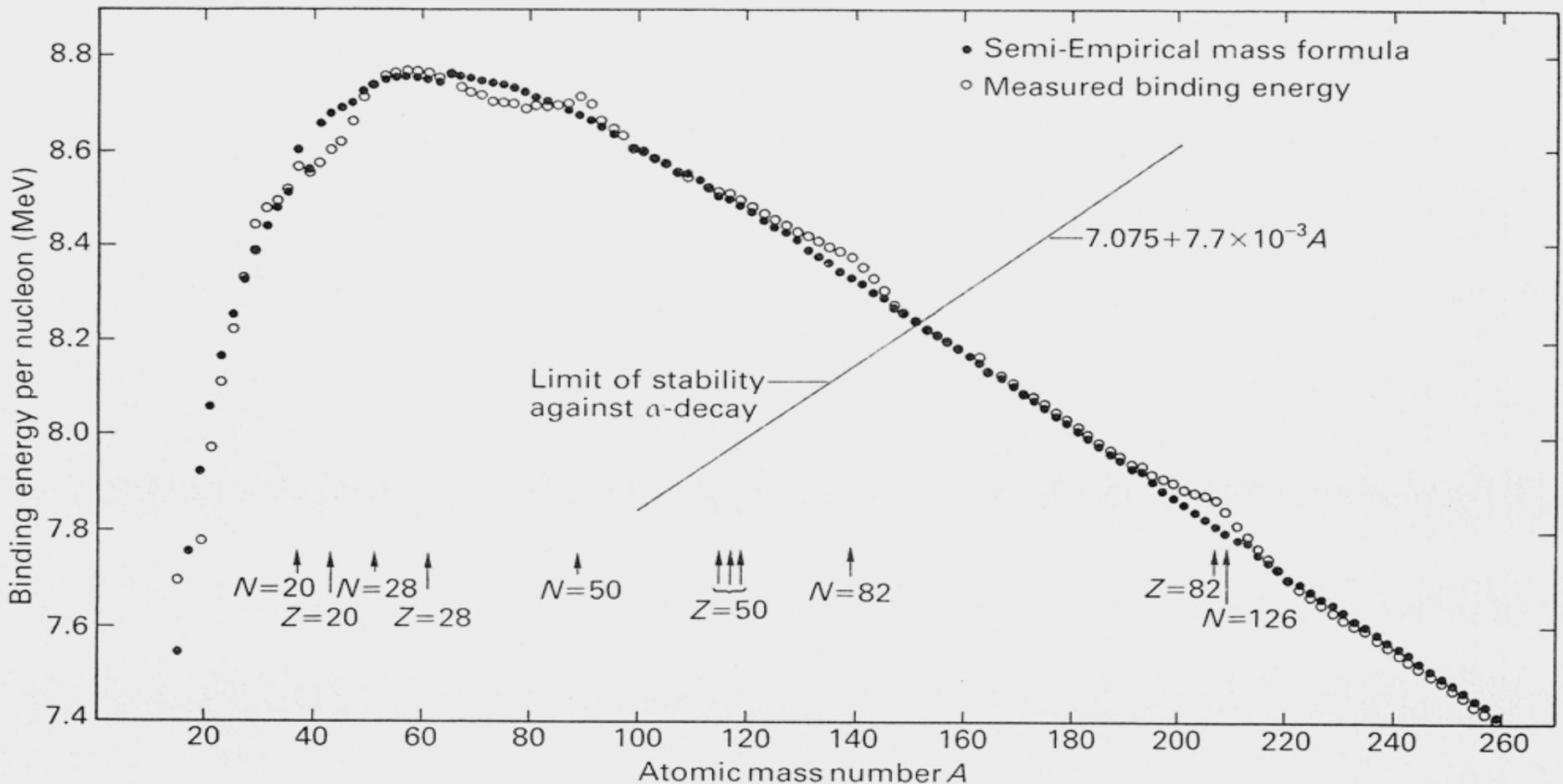


Das Ende der Fusionskette

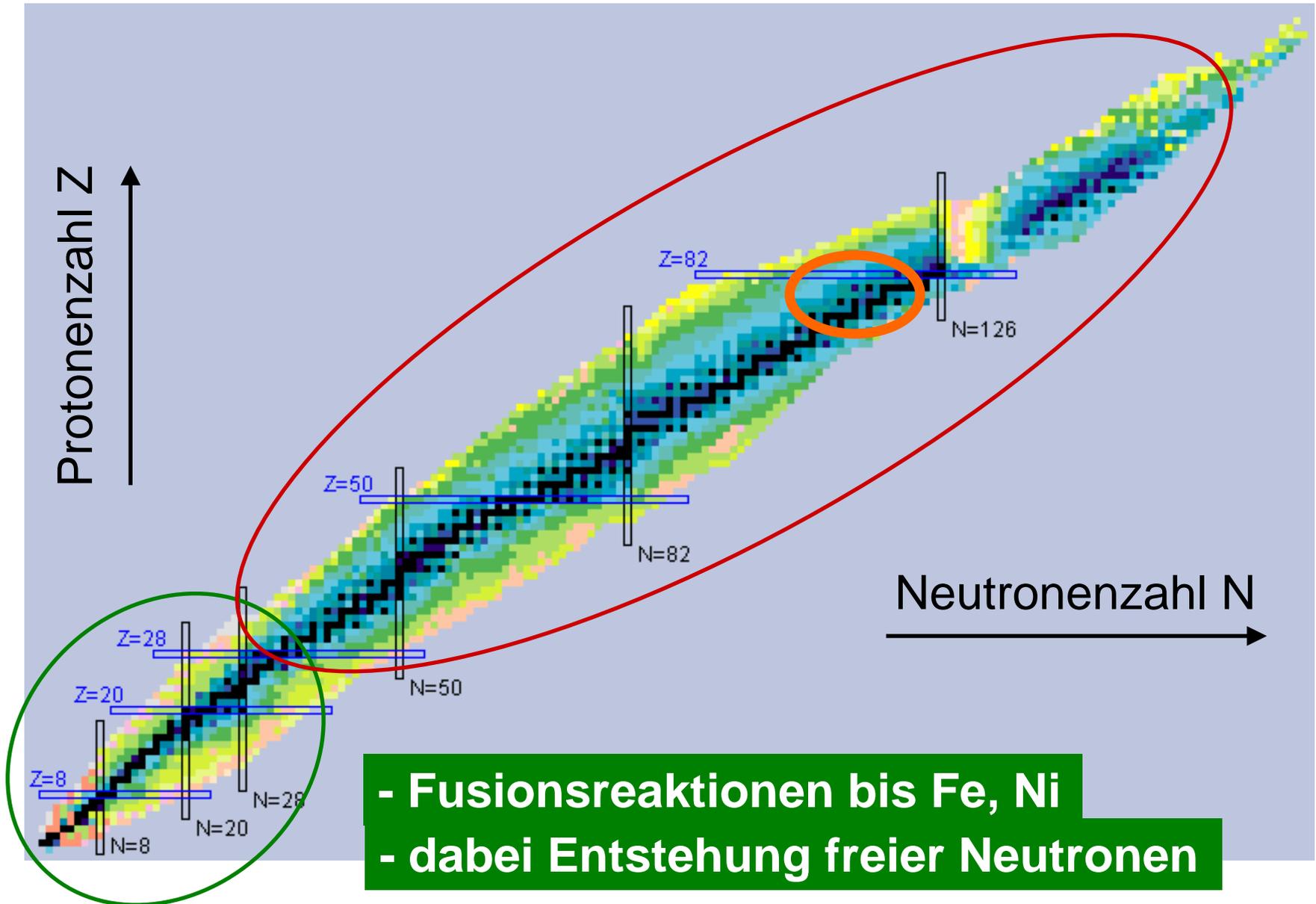


In Sternen: Fusionsreaktionen zu schwereren Elementen bis zu Eisen

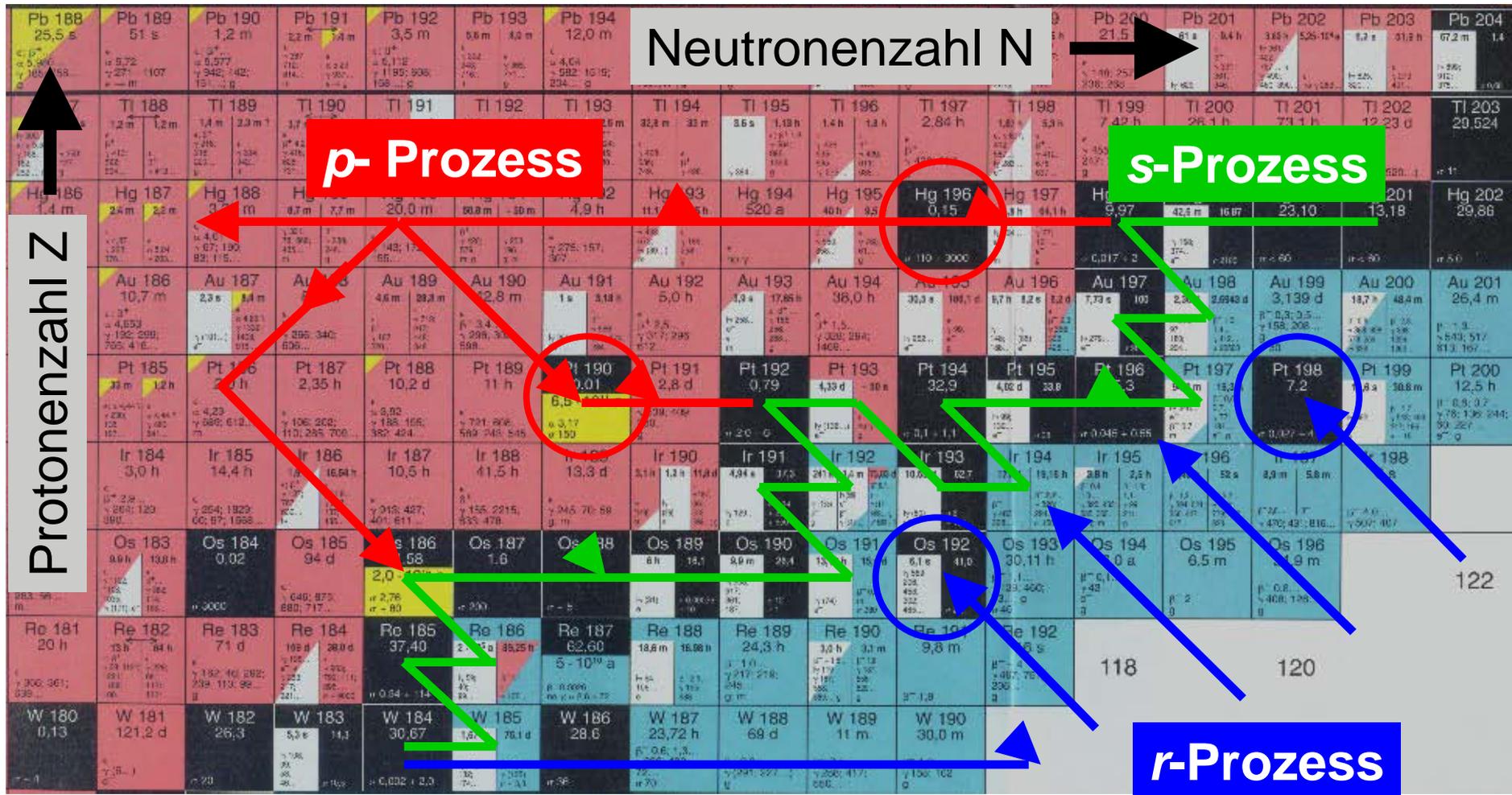
14



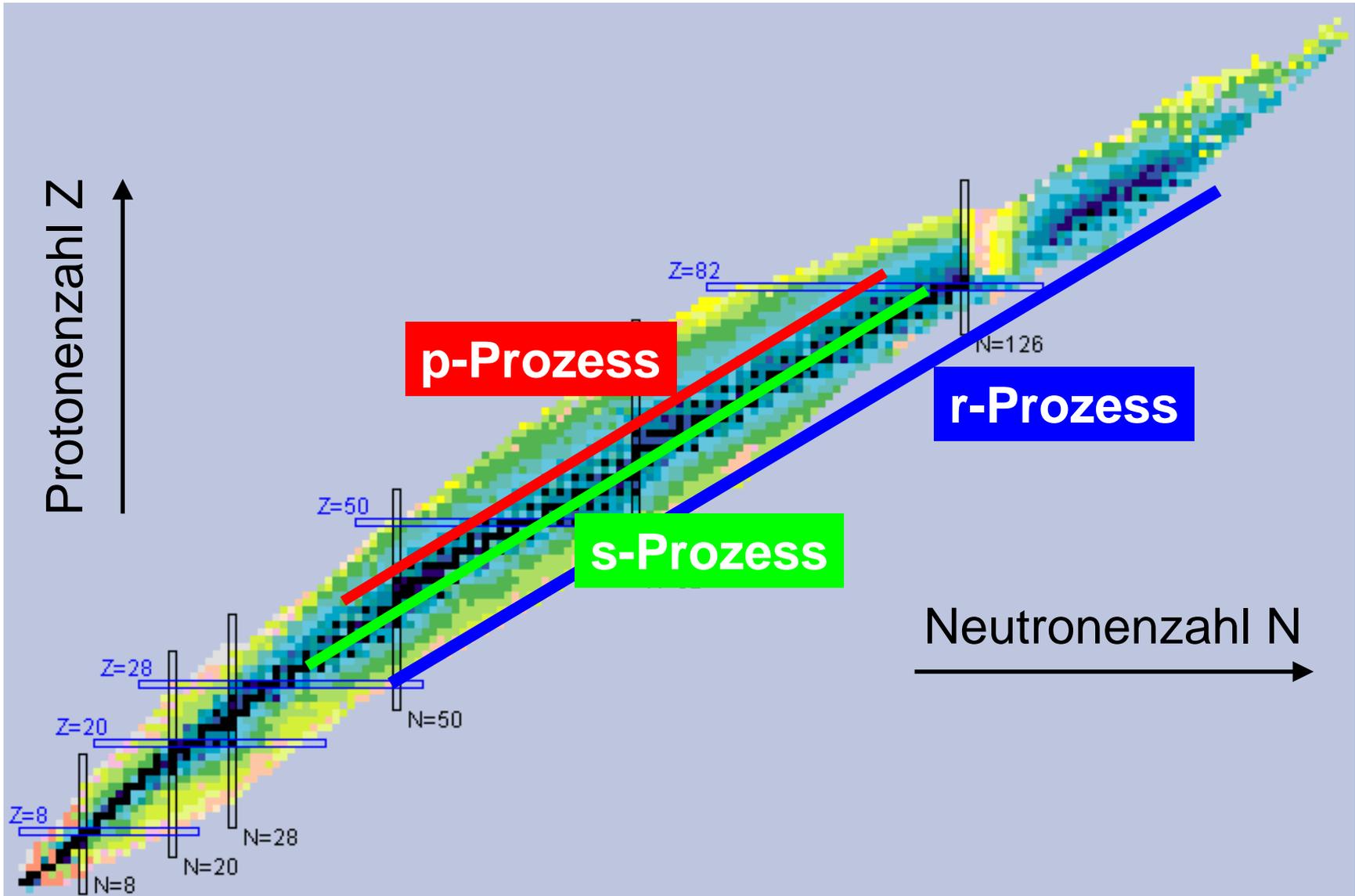
Synthese schwerer Atomkerne



Synthese schwerer Atomkerne

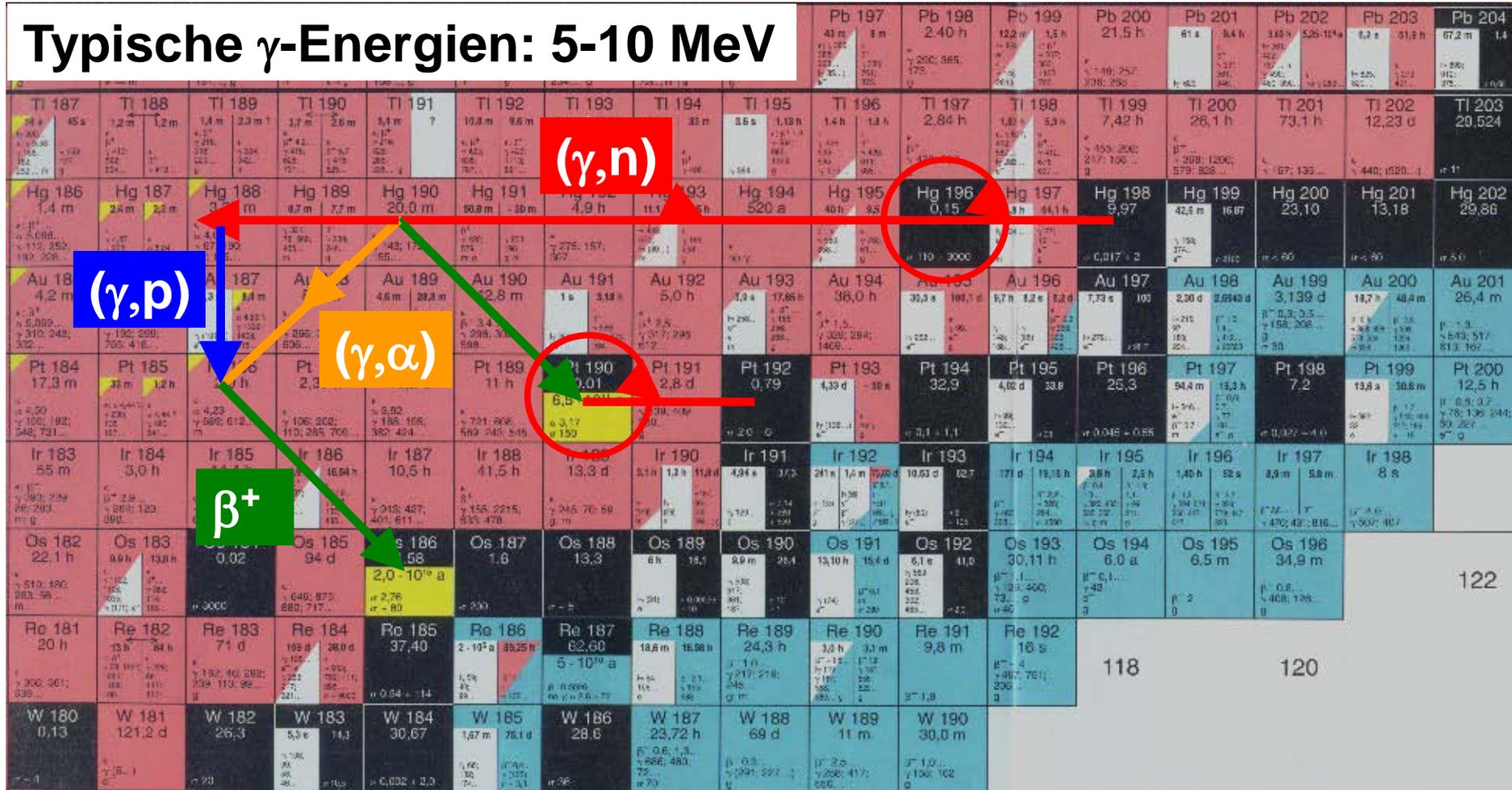


Synthese schwerer Atomkerne



Kernreaktionen und Zerfälle im p-Prozess

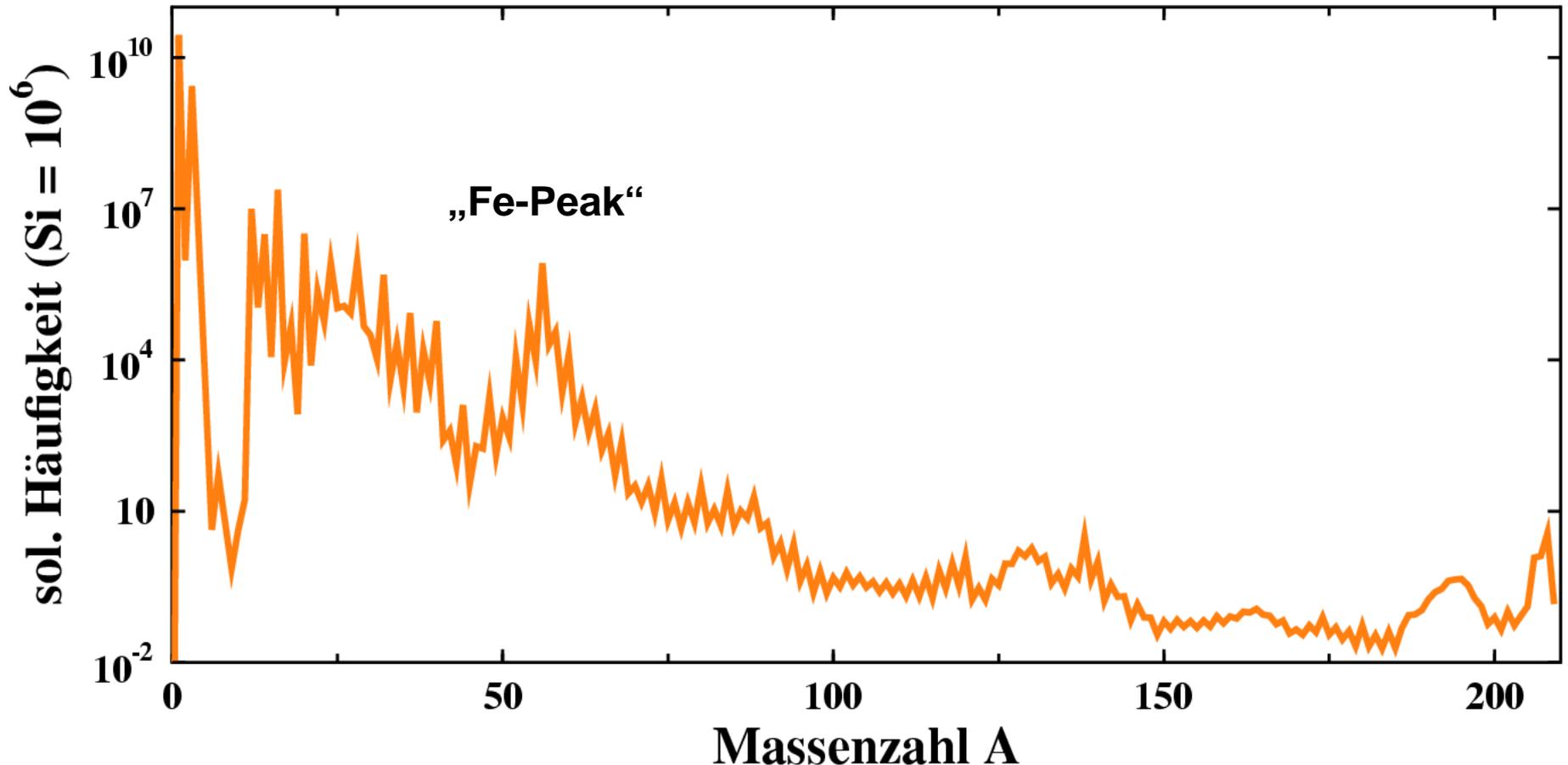
Typische γ -Energien: 5-10 MeV



Weitere Prozesse können konkurrieren:
 (n, γ) , (p, γ) , (α, γ) , νp -process

Solare Häufigkeit der Elemente

Ziel: Erklärung der beobachteten solaren Häufigkeiten der Elemente



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)

Kernphysikalische Parameter im p-Prozess

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

Problem:

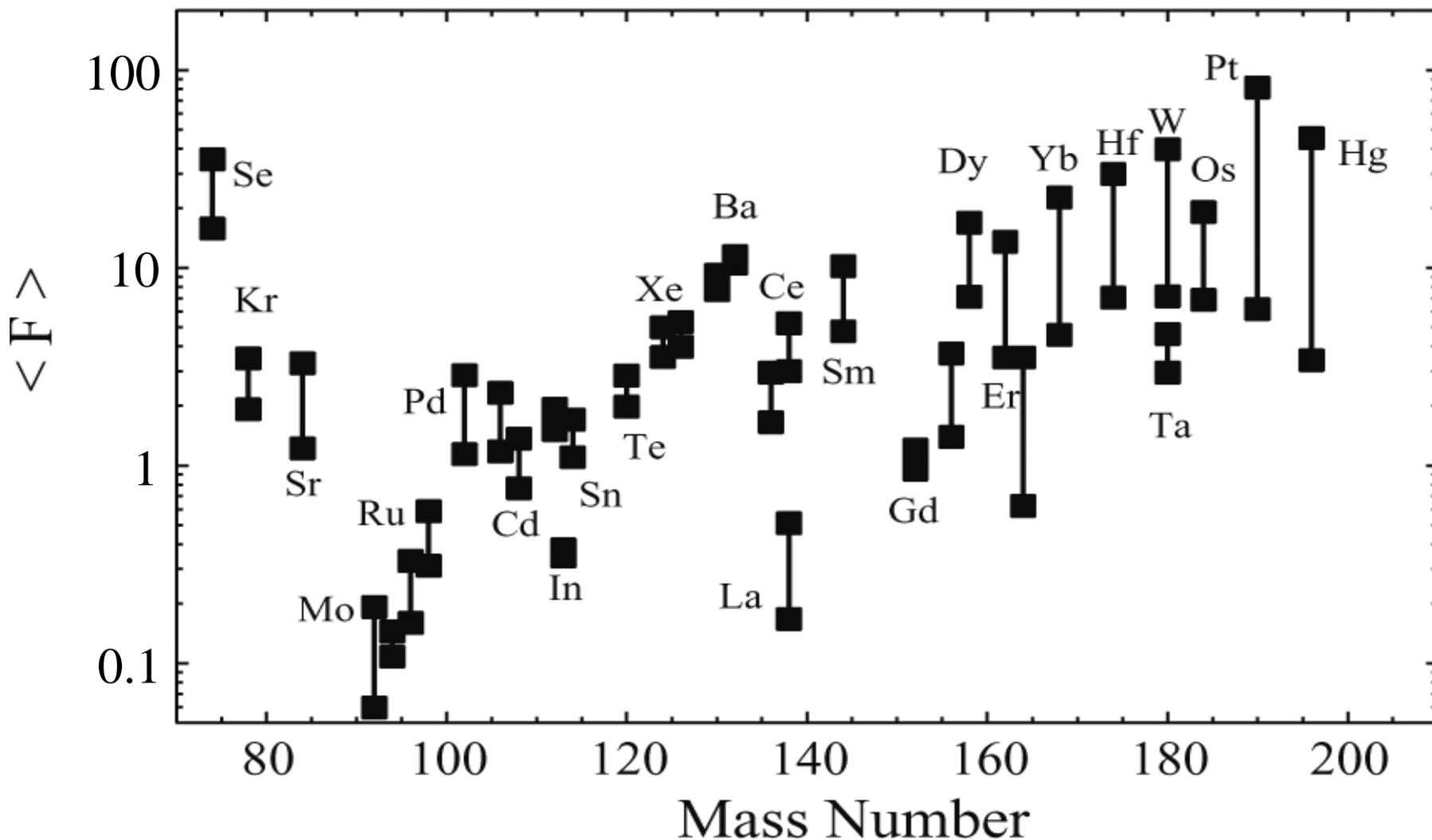
- Mehrere tausend Isotope
- Radioaktive Isotope
- Über 20.000 Reaktionsraten

→ Zuverlässige und robuste
Modellvorhersage der Parameter



Test der Modelle durch Schlüsselexperimente

Häufigkeit der p-Kerne: Vorhersage vs. Experiment



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

*S. Goriely et al., Astronomy & Astrophysics **444** (2005) L1*

Kernphysikalische Parameter im p-Prozess

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

Problem:

- Mehrere tausend Isotope
- Radioaktive Isotope
- Über 20.000 Reaktionsraten

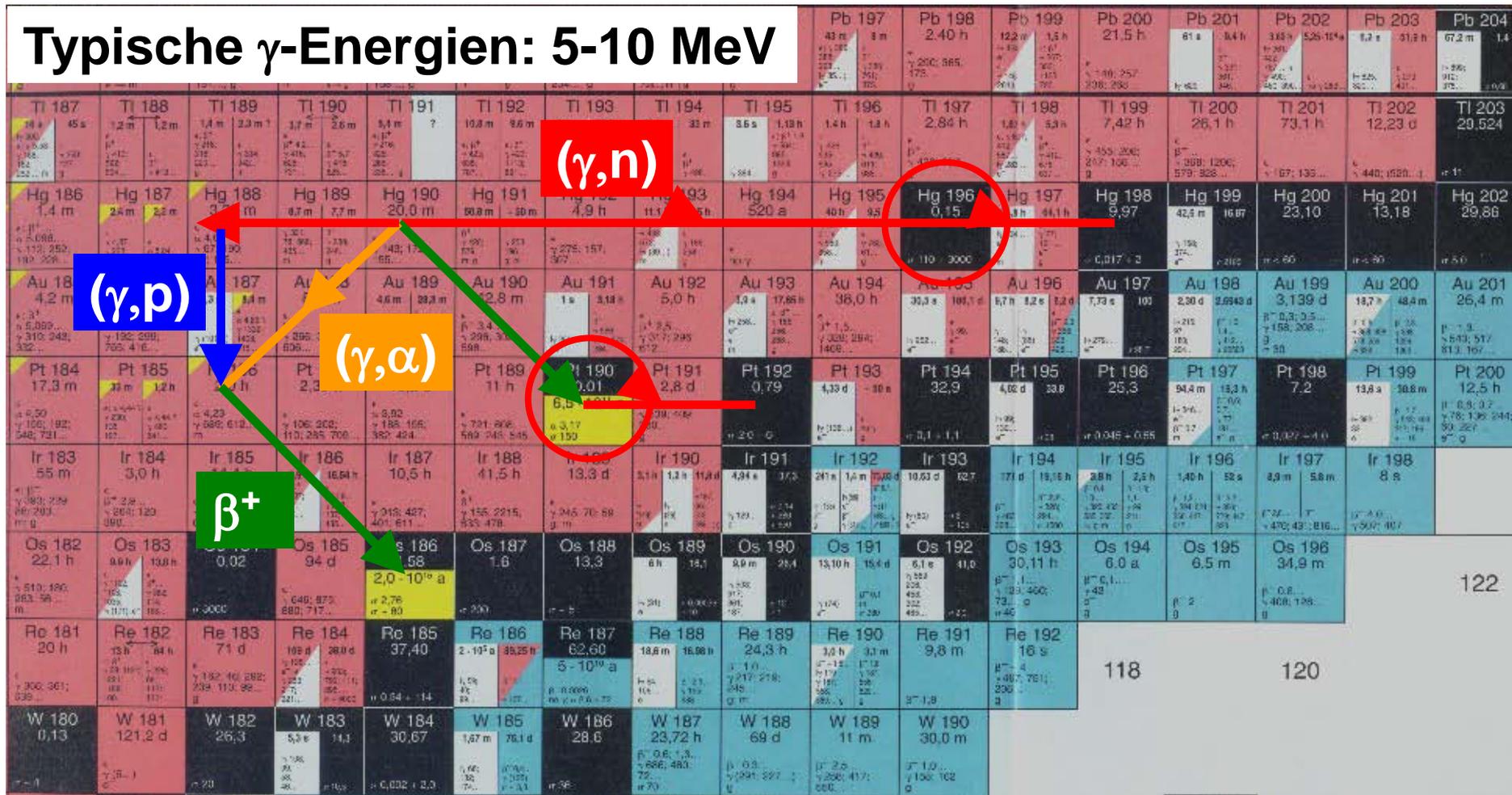
→ Zuverlässige und robuste
Modellvorhersage der Parameter



Test der Modelle durch Schlüsselexperimente

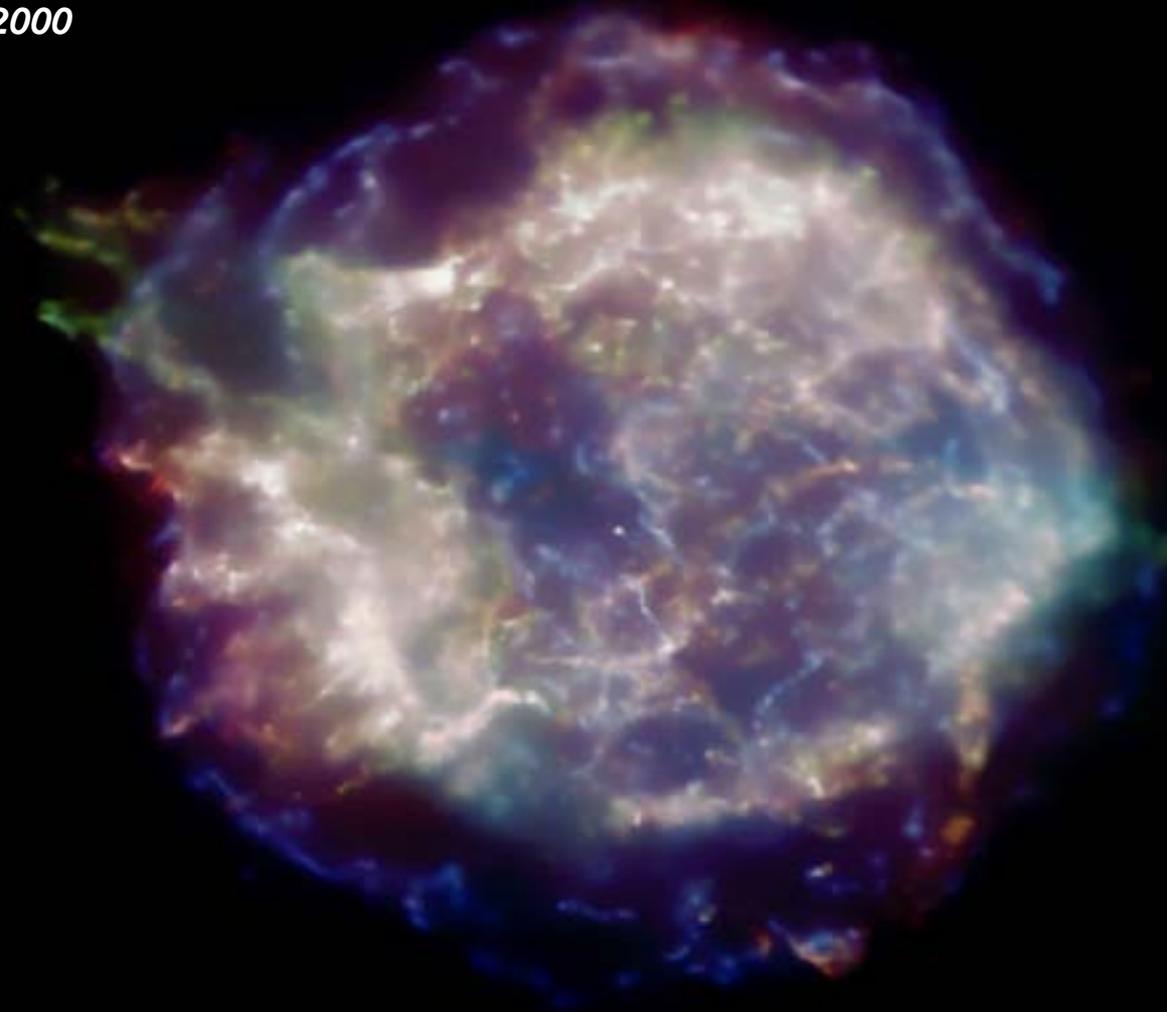
Kernreaktionen und Zerfälle im p-Prozess

Typische γ -Energien: 5-10 MeV



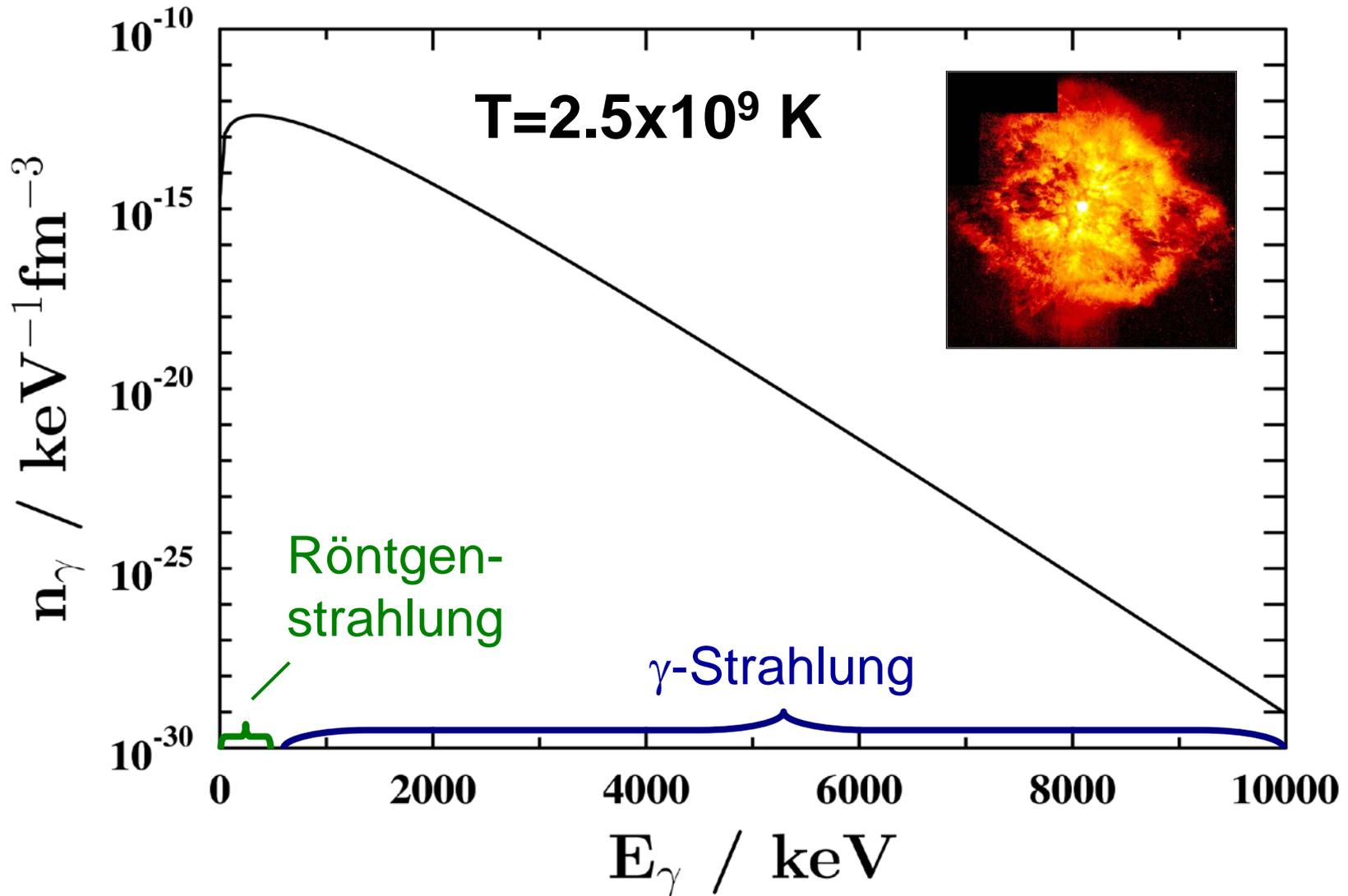
Woher kommen die hochenergetischen Photonen?

CASSIOPEIA A,
CHANDRA 01/2000



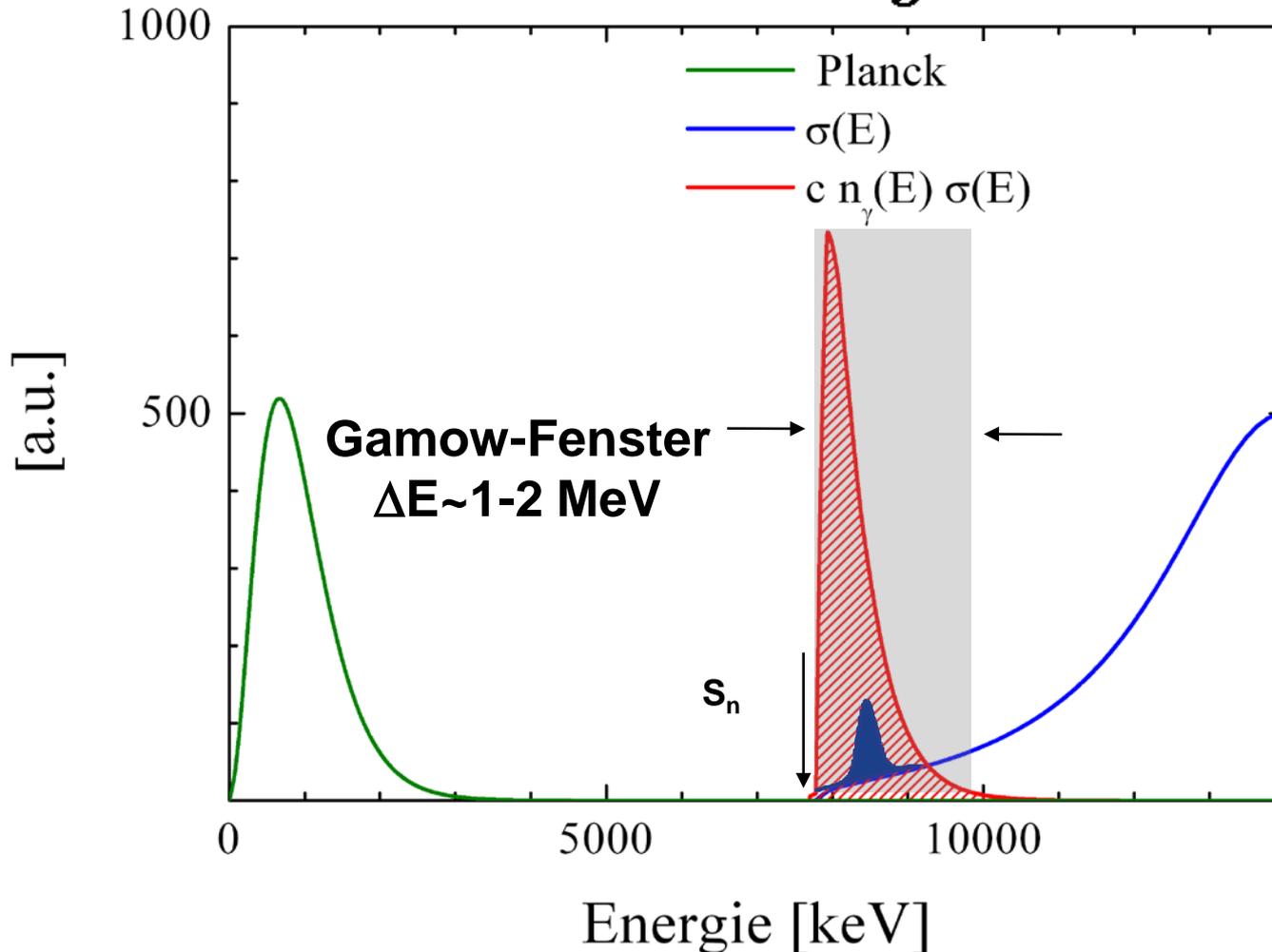
Temperaturen bis zu 10^{10} K \sim 800 keV

Photonenbad bei 2.5 Milliarden Kelvin



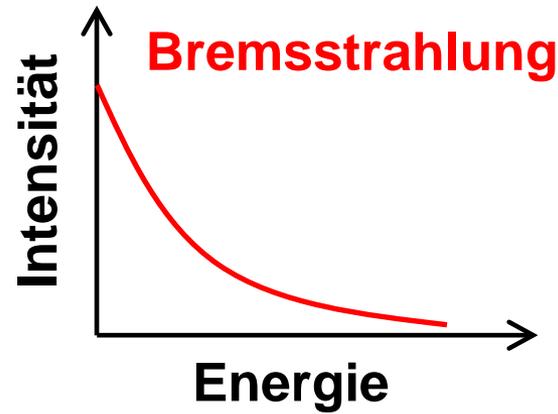
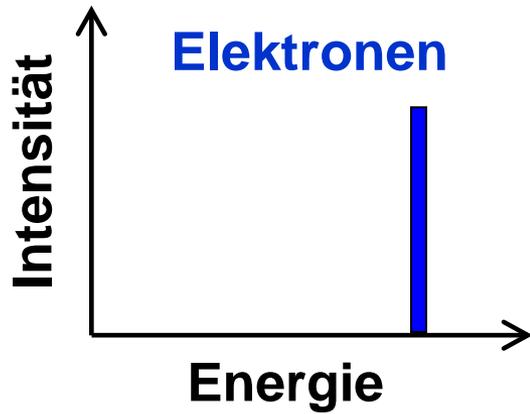
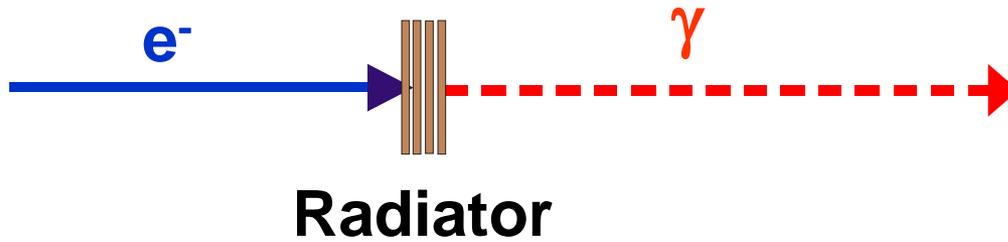
Relevanter Energiebereich für (γ, n) -Reaktionen

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

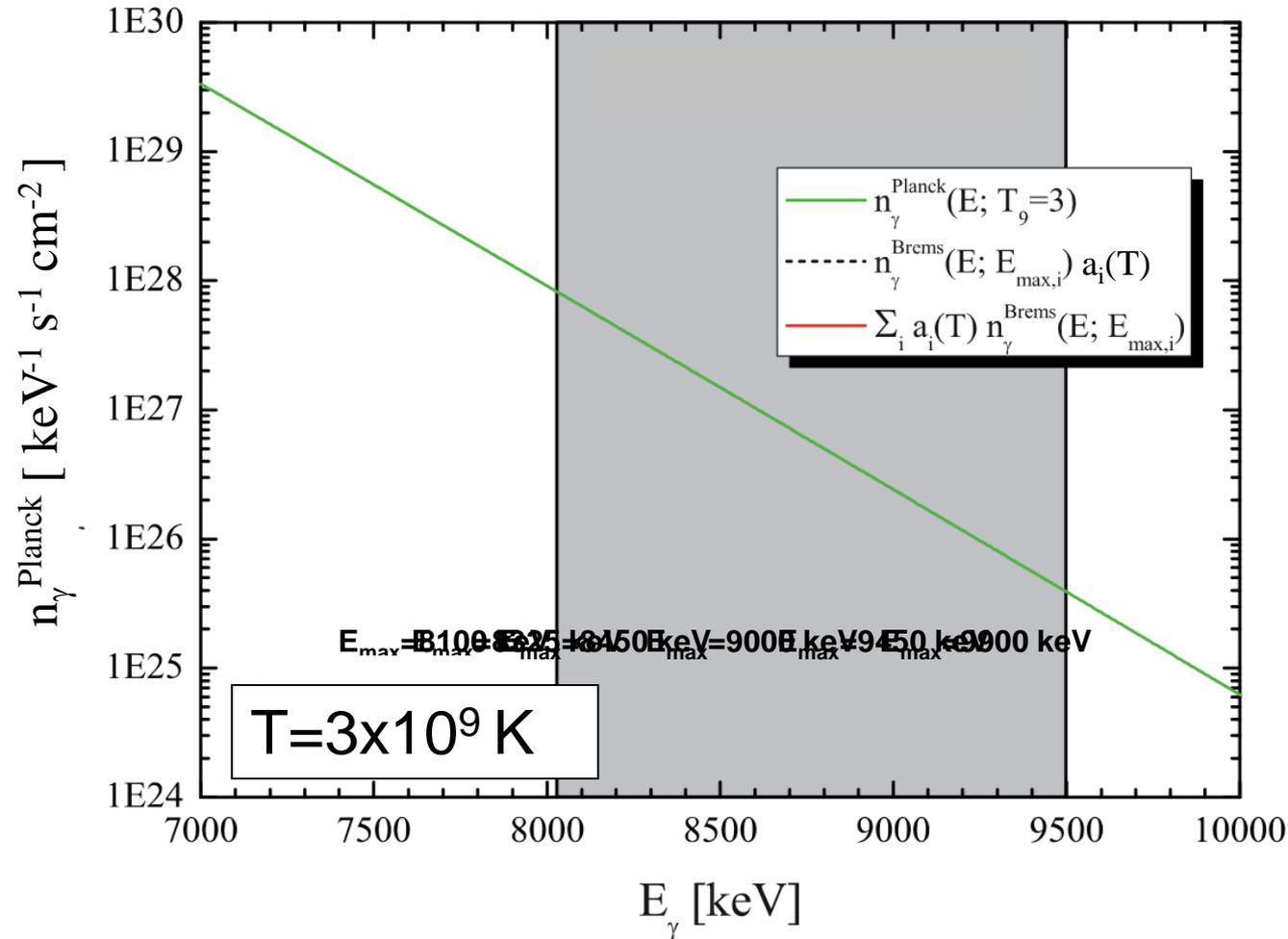


Details der Kernstruktur haben sehr großen Einfluss!

Erzeugung hochenergetischer Photonen im Labor

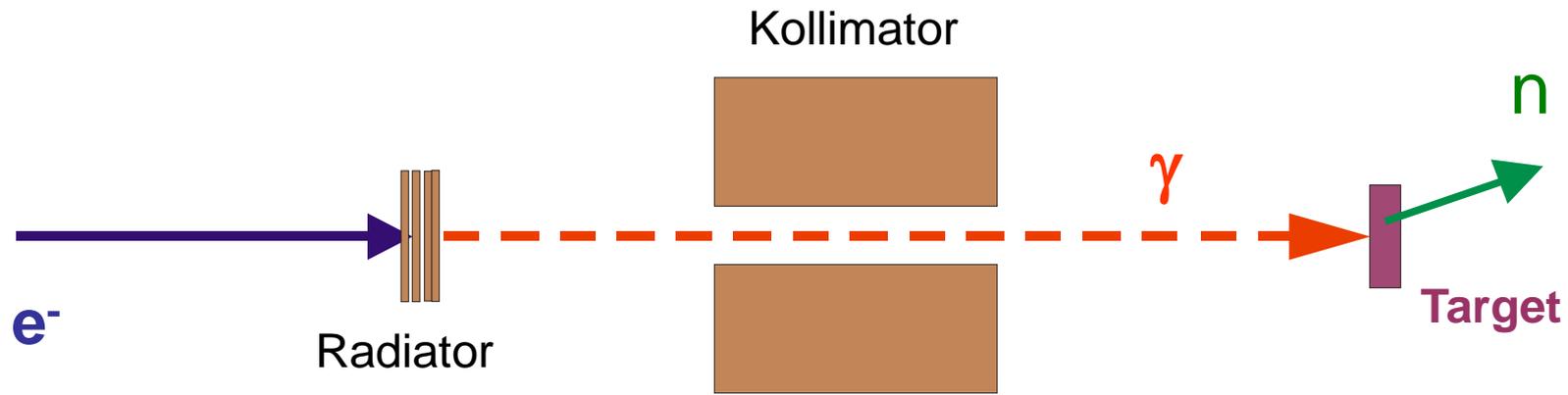


Produktion eines Planck-Spektrums



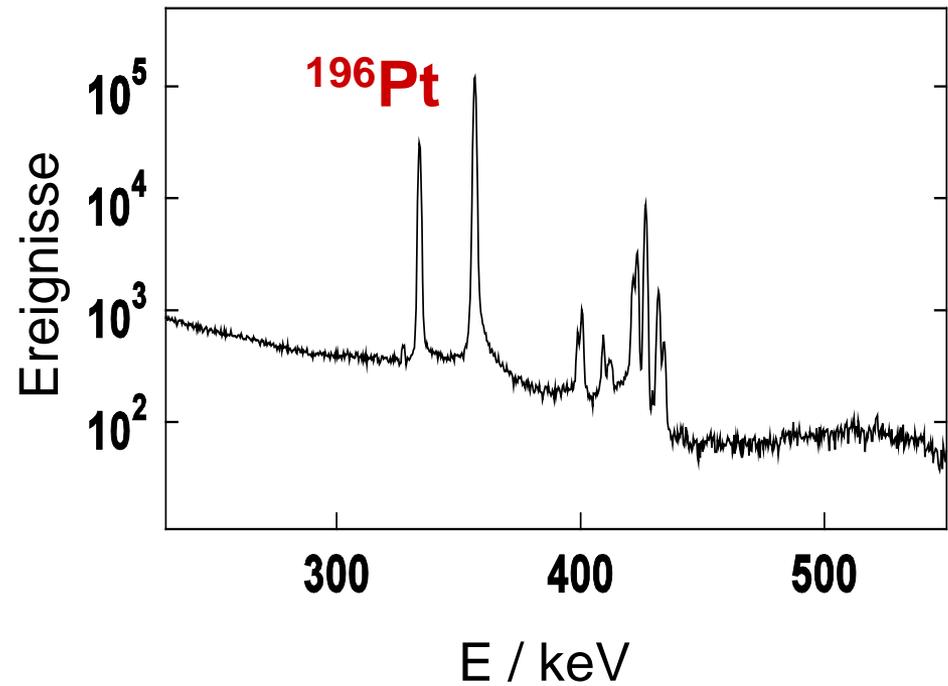
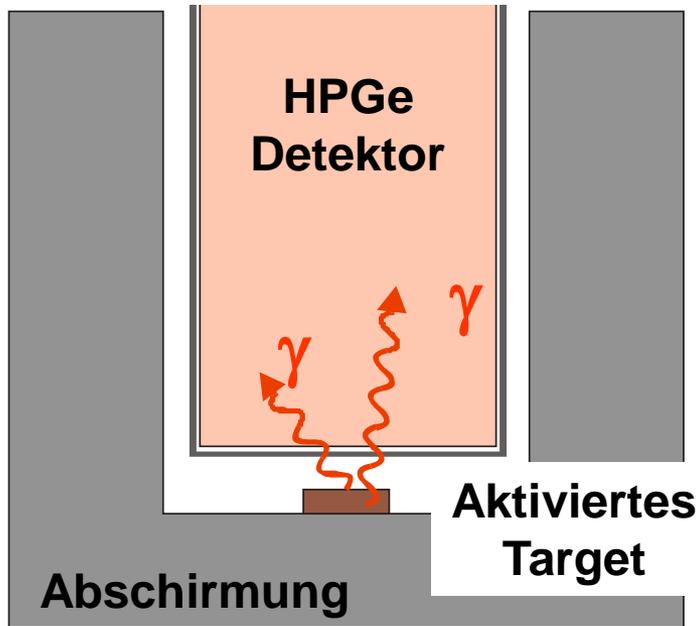
A. Z. et al., *Prog. Part. Nucl. Phys.* **44** (2000) 39
 P. Mohr et al., *Phys. Lett. B* **488** (2000) 127

Aktivierung des Targets im Photonenbad

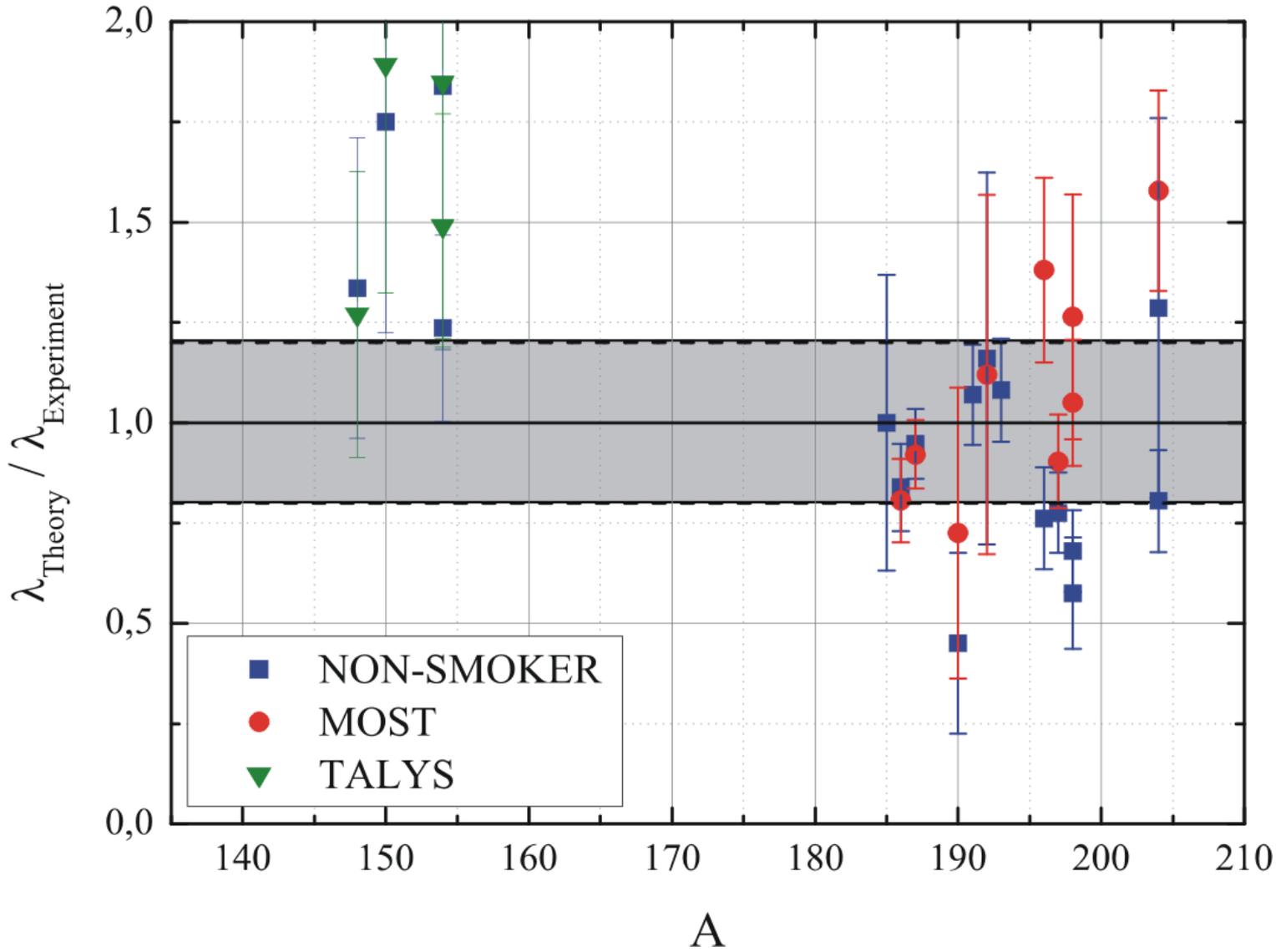


Messung der Aktivierung

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



Grundzustand-Reaktionsraten bei 2.5×10^9 K

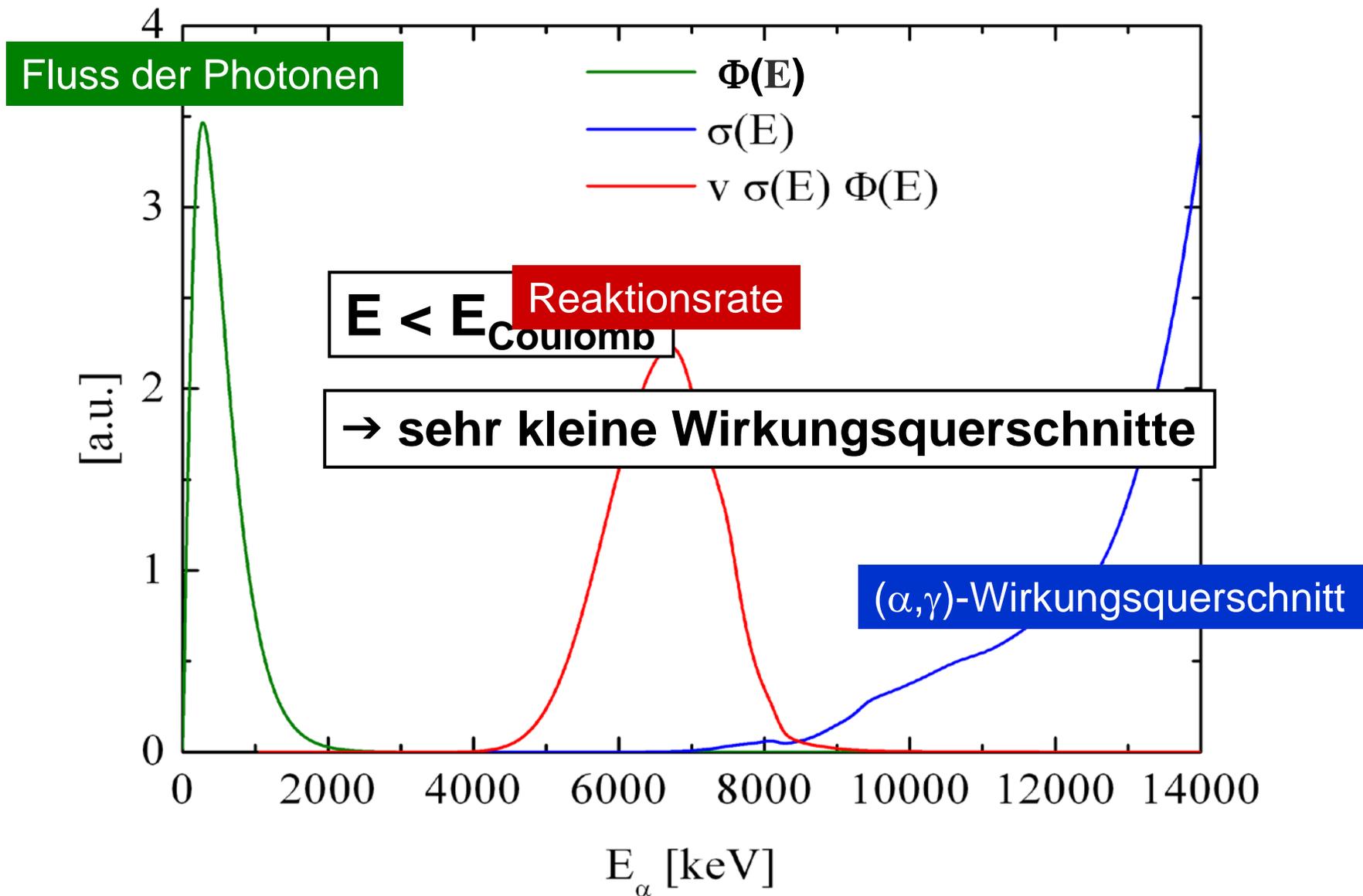


M. Arnould and S. Goriely, *Phys. Rep.* 384 (2003) 1
T. Rauscher and F.-K. Thielemann, *ADNDT* 75 (2000) 1
A. J. Koning et al., *AIP* 769 (2004) 1154

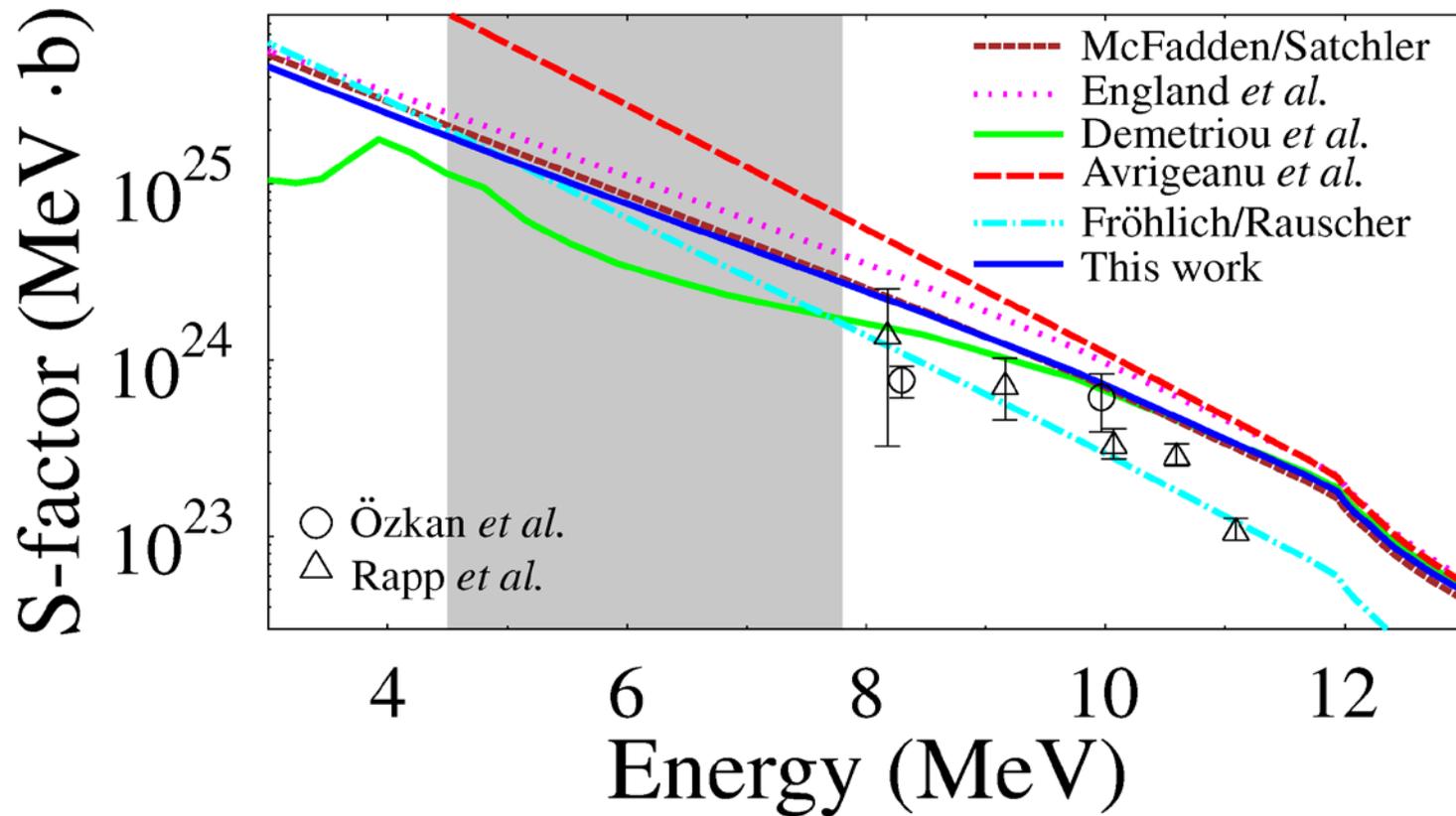
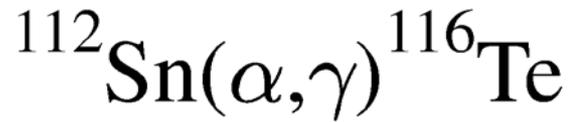
Kerne im Photonenbad

- **Schwere Saatkerne werden im Photonenbad bei mehreren Milliarden Kelvin photodissoziiert**
 - **Simulation des temperaturabhängigen Photonenbads im Labor mit Bremsstrahlung**
 - **Grundzustands-Raten für (γ, n) -Reaktionen können exemplarisch für einige Kerne bestimmt werden, (γ, p) und (γ, α) sehr schwer**
- Messe die Umkehrreaktion, z.B. (α, γ)**

Relevanter Energiebereich für (α, γ)



S-Faktor für α - Einfang



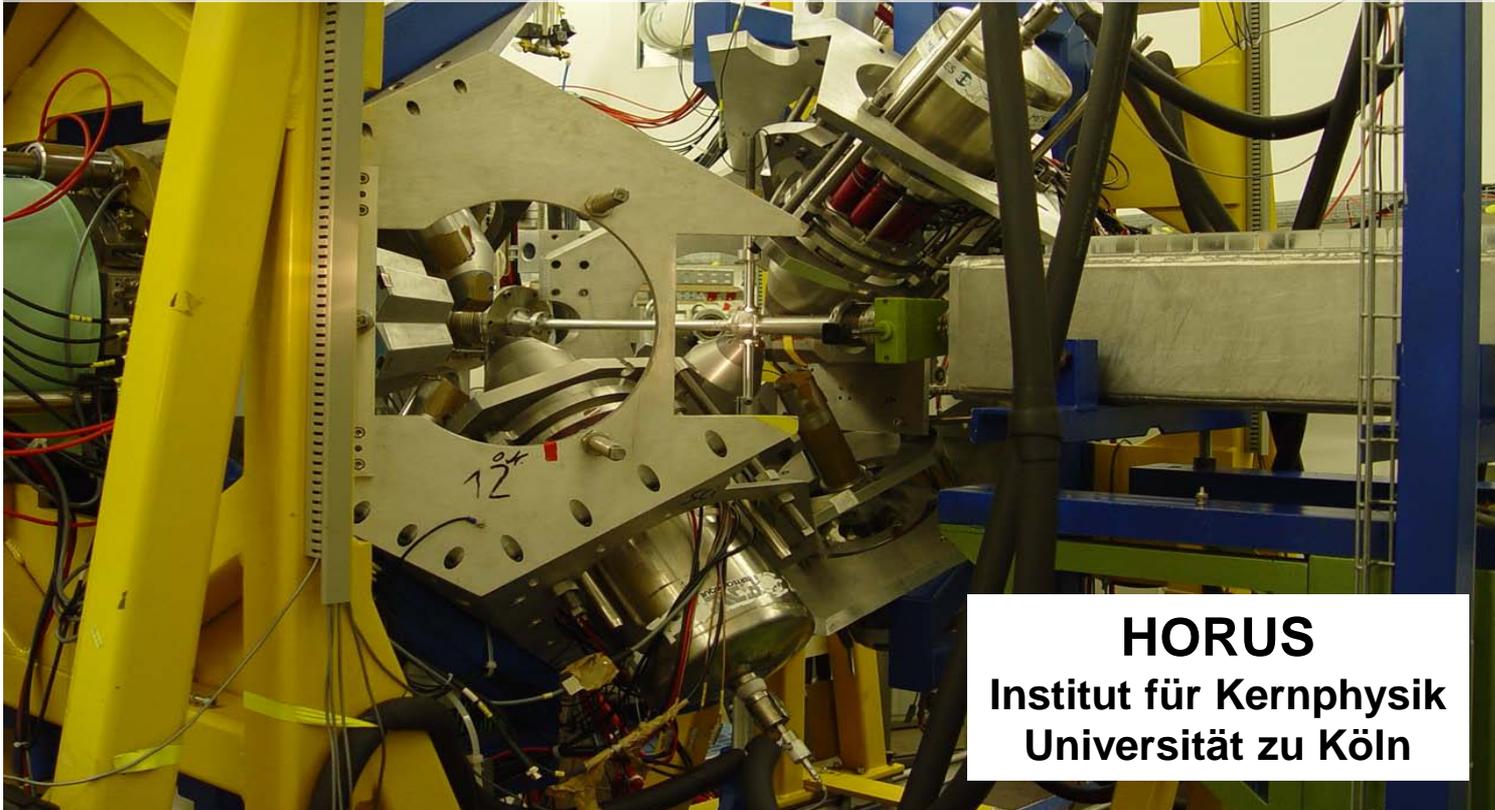
N. Özkan *et al.*, *Phys. Rev. C* **75** (2007) 025801

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

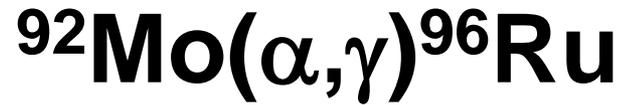
Messung sehr kleiner Reaktionsraten

- Erhöhung der Anzahl produzierter Kerne
- Optimierung der Nachweiswahrscheinlichkeit

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

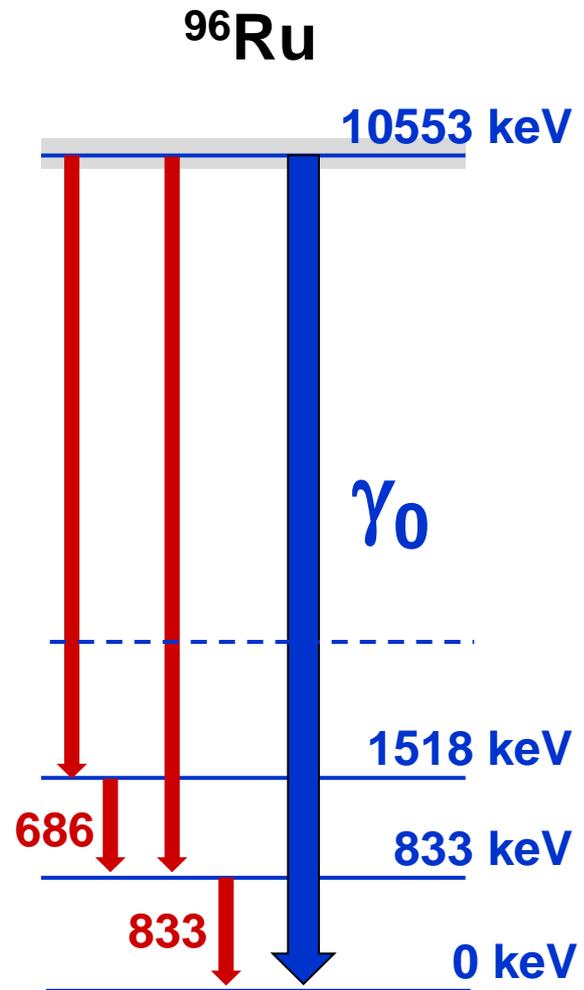


α -Einfang an ^{92}Mo

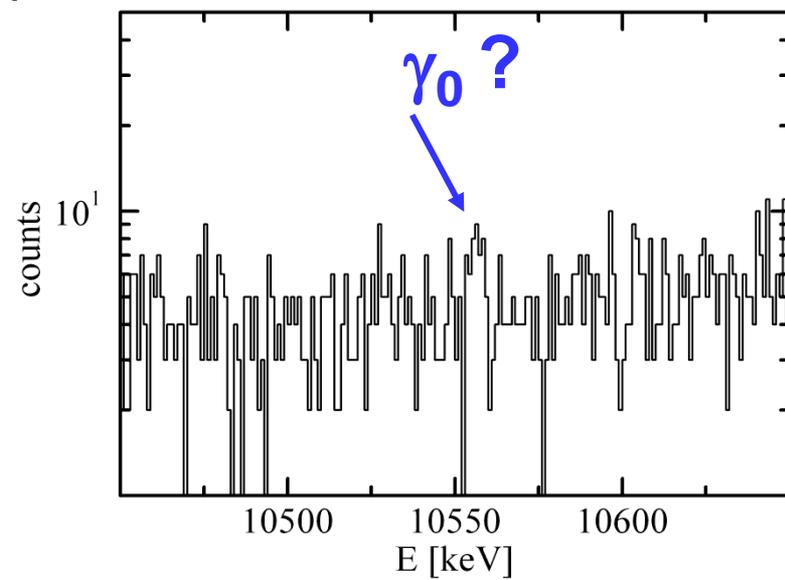
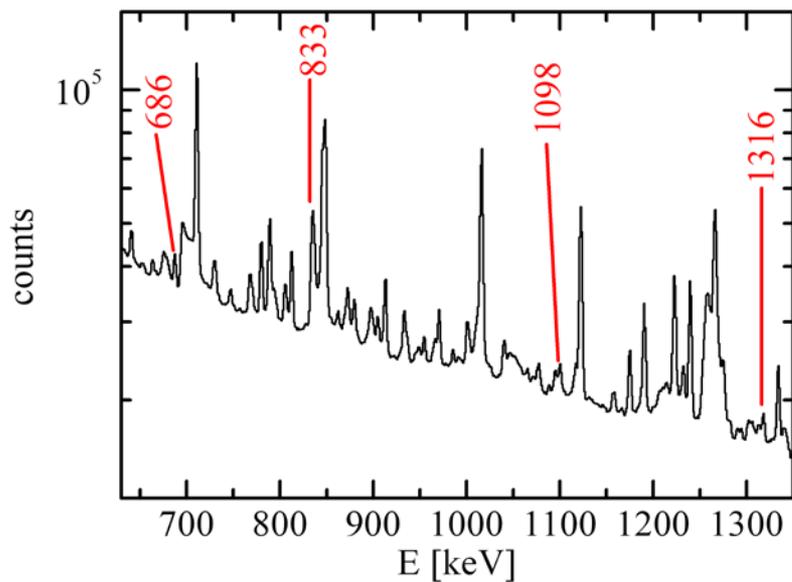
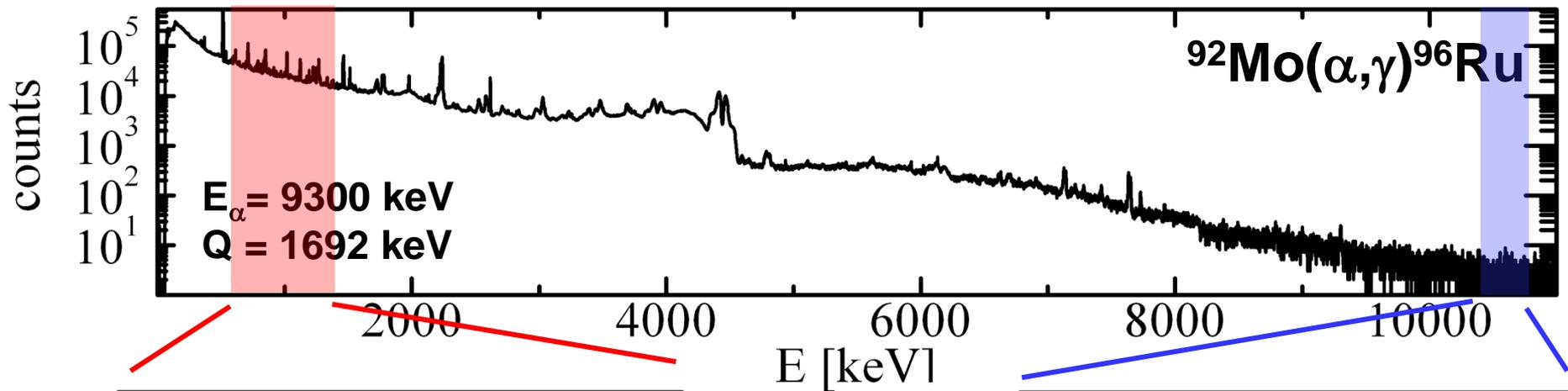


$$Q = 1962 \text{ keV}$$

$$E_{\alpha} = 9300 \text{ keV}$$



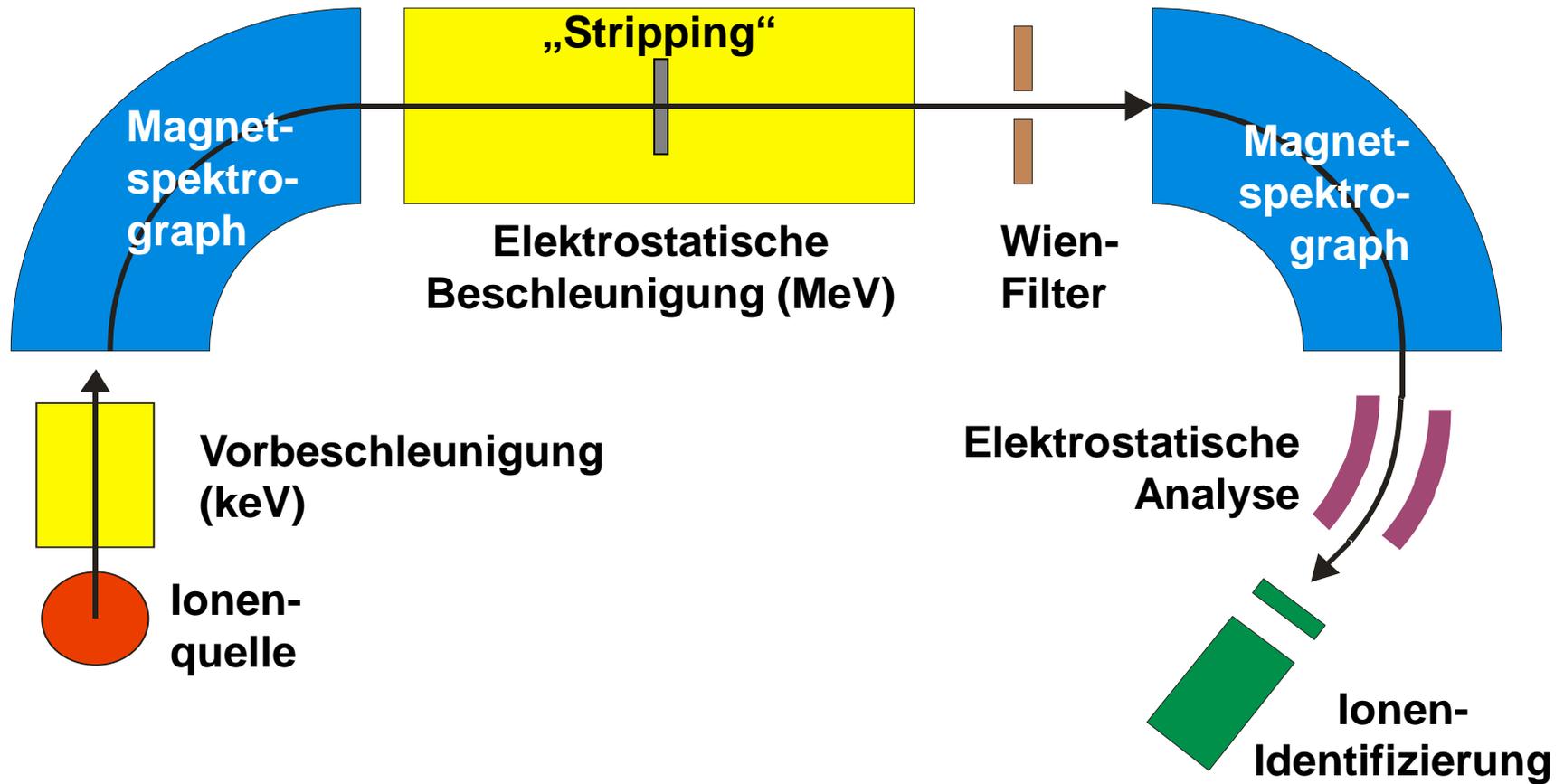
α -Einfang an ^{92}Mo



Nachweis kleinster Reaktionsraten

- **Erhöhung der Anzahl produzierter Kerne**
- **Optimierung der Nachweiswahrscheinlichkeit**
 - **Indirekter Nachweis der erzeugten Isotope durch γ -Spektroskopie („Fingerabdruck“)**
 - **Direkter Nachweis der erzeugten Isotope
→ Beschleuniger-Massenspektrometrie**

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)**

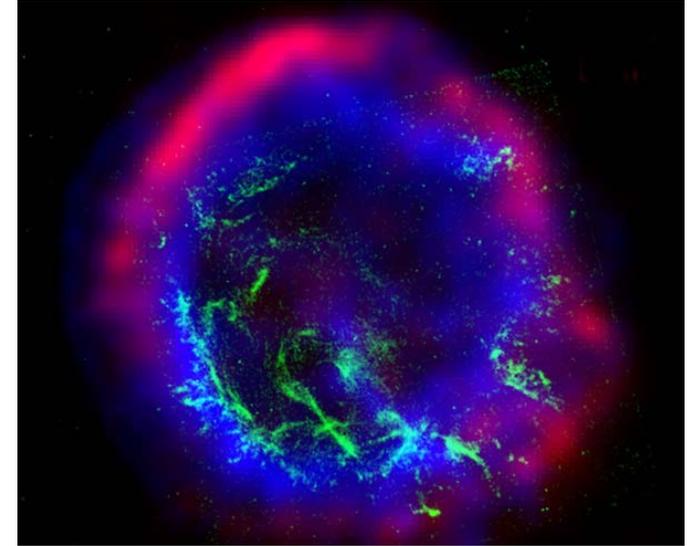


**Weitere Anwendung:
Nachweis kleinster Mengen
kosmogener Nuklide**



Beschleuniger-Massen-Spektrometrie (AMS)

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



Ein neuer 6 MV Tandetron-Beschleuniger an der Universität zu Köln

Beteiligt: Geowissenschaften, Ur- und Frühgeschichte, Kernphysik



A. Dewald, J. Jolie, and A. Zilges, Nuclear Physics News 18 (2008) 26

Unterstützt durch die **DFG** und



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, J. Endres, M. Elvers, J. Hasper,
L. Netterdon, M. Zvolisky, A. Z.**

Institut für Kernphysik, Universität zu Köln

S. Müller, A. Sauerwein, D. Savran, K. Sonnabend

Institut für Kernphysik, TU Darmstadt

Unterstützt durch die **DFG** (ZI 510/5-1, SFB 634) und das BMBF

Mehr Informationen und Publikationen: www.zilges.de