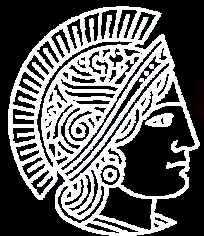


Nukleare Astrophysik mit Photonen

FZ Rossendorf, 14.01.2005



Andreas Zilges
Institut für Kernphysik
TU Darmstadt

CRAB NEBULA,
CHANDRA 04/2001

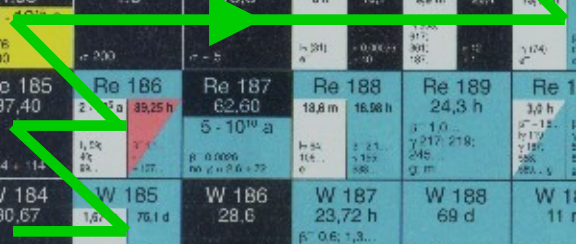
Nukleare Astrophysik mit Photonen

- **Synthese schwerer Atomkerne**
- **„Direkte“ Experimente zur Nukleosynthese**
 - Photodissoziation im p-Prozess
 - Neutroneneinfang radioaktiver Kerne
- **Grenzen der „direkten“ Experimente**
- **Beispiele für indirekte Experimente**
 - Messung der Photoresponse von Atomkernen
 - Isospincharakter der E1-Anregungen
- **Ausblick**

Synthese schwerer Atomkerne

Pb 188 25,5 s	Pb 189 51 s	Pb 190 1,2 m	Pb 191 2,2 m	Pb 192 3,5 m	Pb 193 5,6 m	Pb 194 12,0 m	Pb 195 15,0 m	Pb 196 36,4 m	Pb 197 43 m	Pb 198 2,40 h	Pb 199 12,2 m	Pb 200 21,5 h	Pb 201 61 s	Pb 202 5,25 10 ⁴ a	Pb 203 8,2 s	Pb 204 67,2 m
Tl 187 45 s	Tl 188 1,2 m	Tl 189 1,4 m	Tl 190 3,7 m	Tl 191 5,4 m	Tl 192 10,8 m	Tl 193 21 m	Tl 194 32,8 m	Tl 195 3,5 s	Tl 196 1,4 h	Tl 197 2,84 h	Tl 198 1,8 m	Tl 199 7,42 h	Tl 200 28,1 h	Tl 201 79,1 h	Tl 202 12,23 d	Tl 203 29,524
Hg 186 1,4 m	Hg 187 2,4 m	Hg 188 3,25 m	Hg 189 8,7 m	Hg 190 20,0 m	Hg 191 60,8 m	Hg 192 4,9 h	Hg 193 11,1 h	Hg 194 520 a	Hg 195 40 h	Hg 196 0,15	Hg 197 23,8 h	Hg 198 9,97	Hg 199 42,6 m	Hg 200 16,67	Hg 201 23,10	Hg 202 13,18
Au 185 4,2 m	Au 186 10,7 m	Au 187 2,3 s	Au 188 8,8 m	Au 189 4,6 m	Au 190 42,8 m	Au 191 1 s	Au 192 5,0 h	Au 193 3,3 s	Au 194 38,0 h	Au 195 30,3 s	Au 196 6,7 h	Au 197 7,73 s	Au 198 2,28	Au 199 3,139 d	Au 200 18,7 h	Au 201 26,4 m
Pt 184 17,3 m	Pt 185 33 m	Pt 186 2,0 h	Pt 187 2,35 h	Pt 188 10,2 d	Pt 189 11 h	Pt 190 0,01	Pt 191 2,8 d	Pt 192 0,79	Pt 193 4,33 d	Pt 194 32,9	Pt 195 4,02 d	Pt 196 25,3	Pt 197 5 m	Pt 198 7,2	Pt 199 13,6 s	Pt 200 12,5 h
Ir 183 55 m	Ir 184 3,0 h	Ir 185 14,4 h	Ir 186 1,9 m	Ir 187 10,5 h	Ir 188 41,5 h	Ir 189 13,3 d	Ir 190 5,1 h	Ir 191 4,94 s	Ir 192 37,3	Ir 193 26,1 m	Ir 194 10,6 d	Ir 195 12,7	Ir 196 19,15 h	Ir 197 2,8 h	Ir 198 2,5 h	Ir 199 1,40 h
Os 182 22,1 h	Os 183 9,9 h	Os 184 0,02	Os 185 94 d	Os 186 1,58	Os 187 1,6	Os 188 13,3	Os 189 8 h	Os 190 14,1	Os 191 8,9 m	Os 192 25,4	Os 193 13,7 m	Os 194 15,4 d	Os 195 6,1 s	Os 196 41,0	Os 197 30,11 h	Os 198 6,0 a
Re 181 20 h	Re 182 13 h	Re 183 71 d	Re 184 169 d	Re 185 37,40	Re 186 2,5 a	Re 187 62,60	Re 188 18,8 m	Re 189 16,06 h	Re 190 3,0 h	Re 191 3,1 m	Re 192 16 s	Re 193 9,8 m	Re 194 18 s	Re 195 16 s	Re 196 16 s	Re 197 16 s
W 180 0,13	W 181 121,2 d	W 182 26,3	W 183 5,3 s	W 184 30,67	W 185 76,1 d	W 186 28,6	W 187 23,72 h	W 188 69 d	W 189 11 m	W 190 30,0 m	W 191 11 m	W 192 30,0 m	W 193 11 m	W 194 30,0 m	W 195 11 m	W 196 30,0 m

s-Prozess

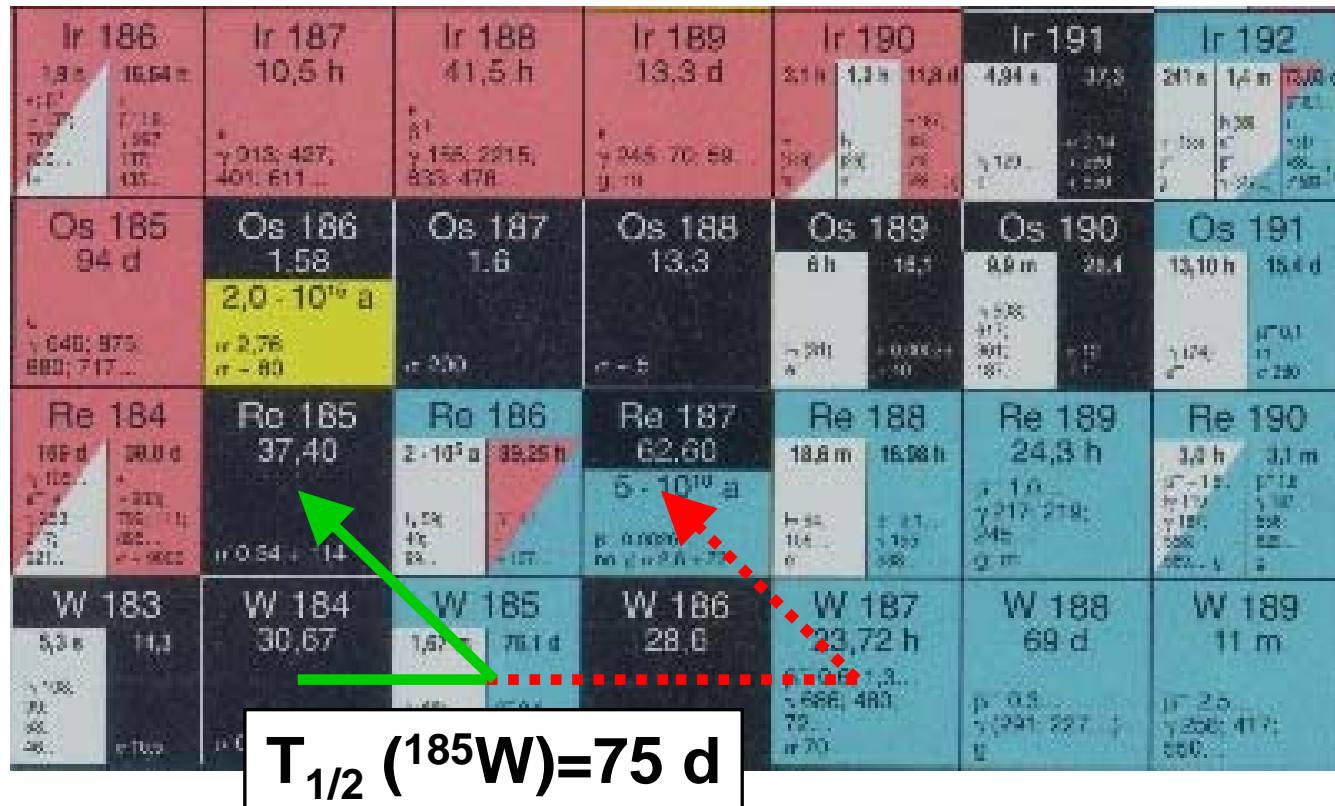


122

118

120

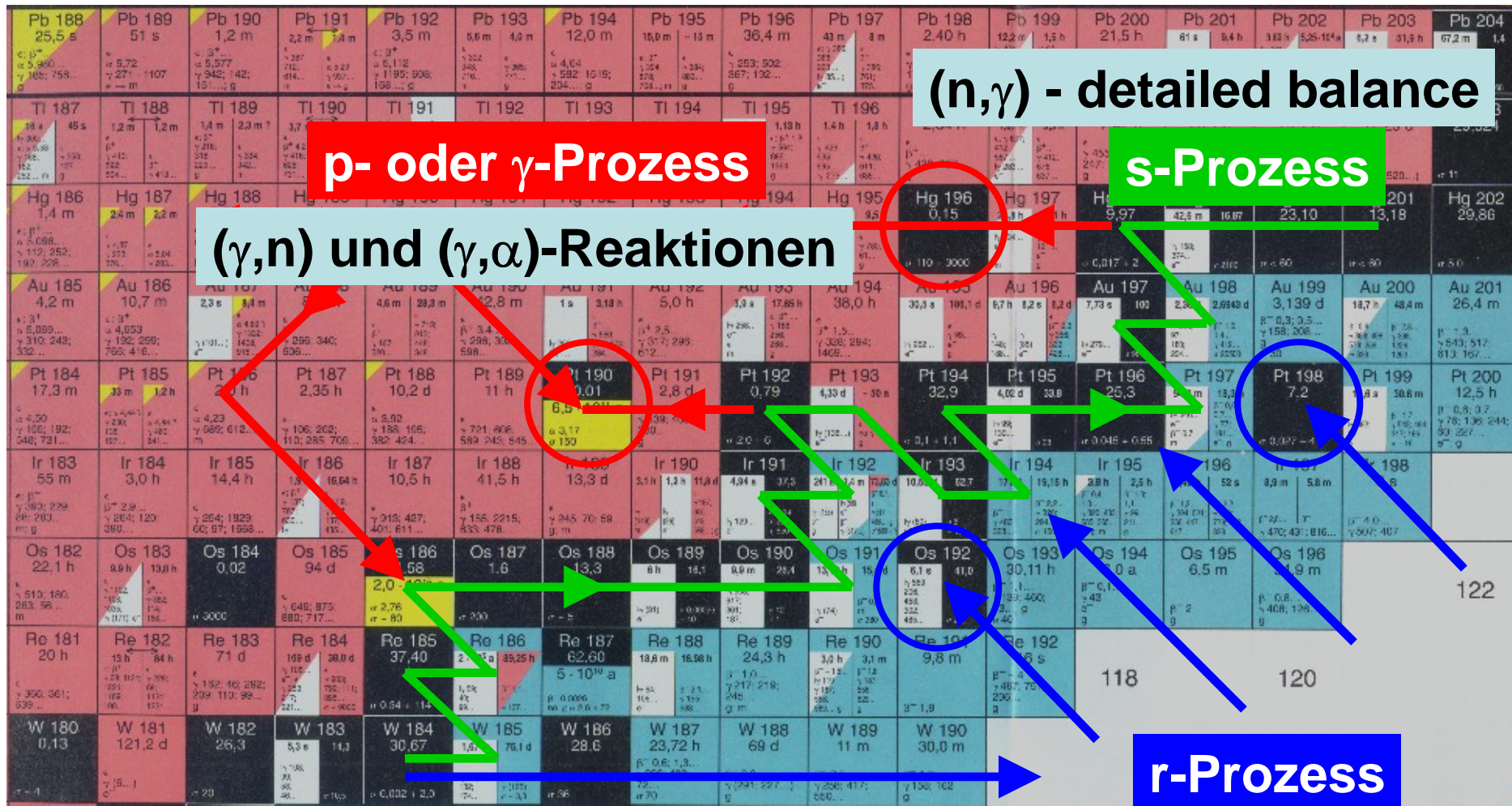
Schon alles bekannt im s-Prozess ?



Die Verzweigung wird bestimmt durch:

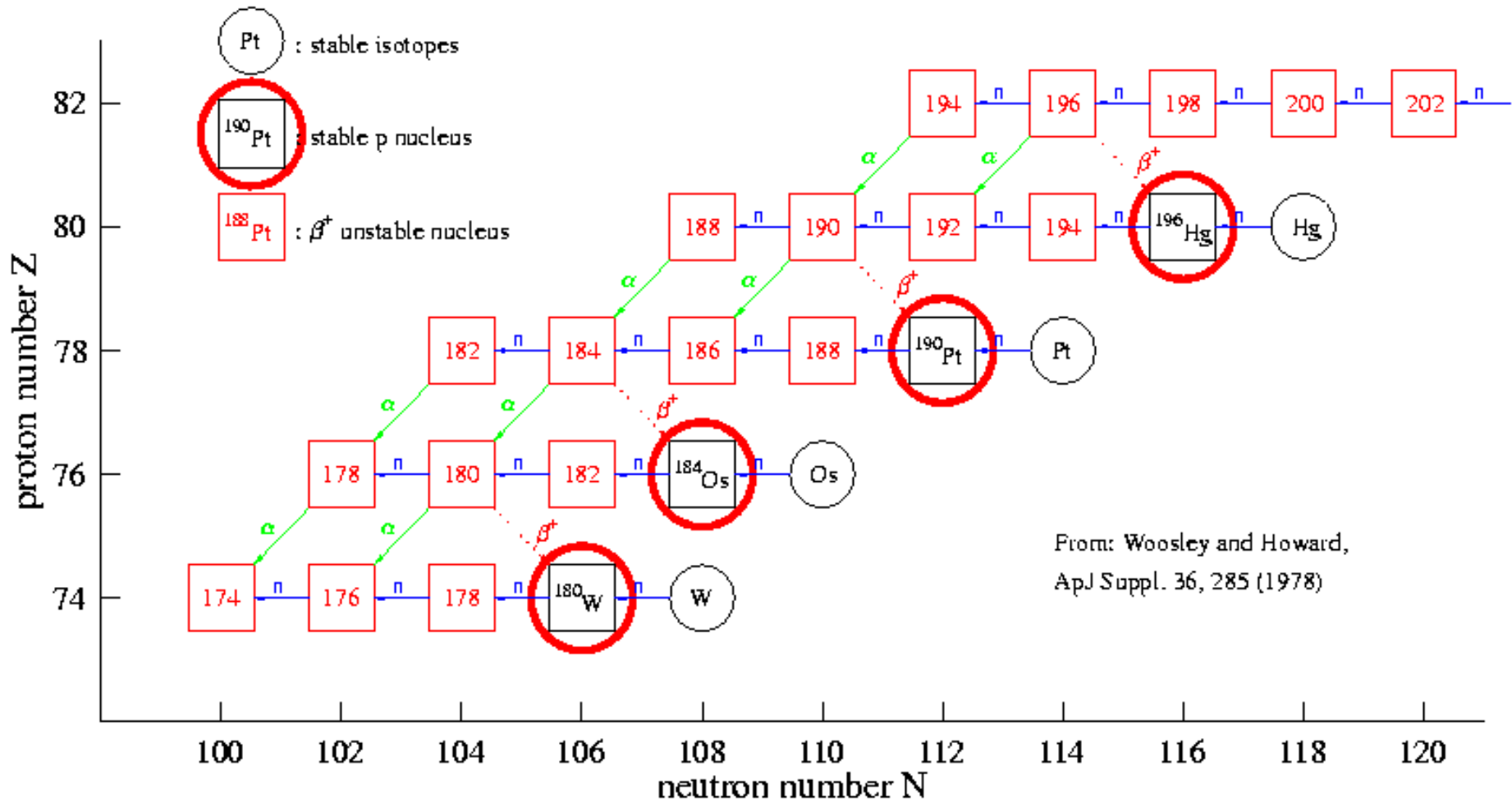
- die Halbwertszeit von ^{185}W unter stellaren Bedingungen;
- die Neutronendichte und Temperatur im s-Prozess;
- den Neutronen-Einfangquerschnitt von ^{185}W .

Synthese schwerer Atomkerne

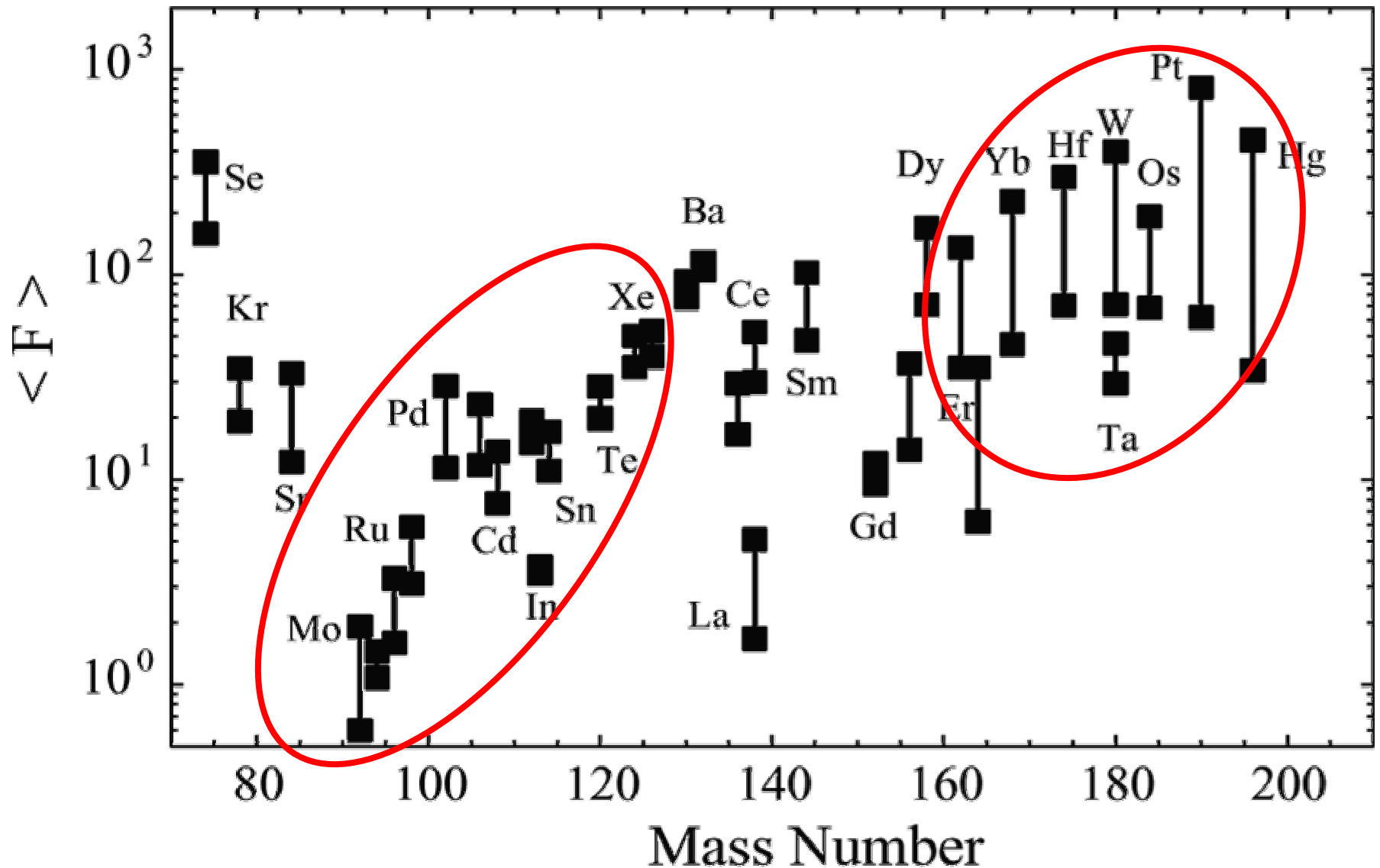


(n,γ) ↔ (γ,n)-Gleichgewicht

Synthese von p-Kernen: Reaktions-Netzwerk



Synthese von p-Kernen: Modell vs. Experiment



Synthese von p-Kernen: Status

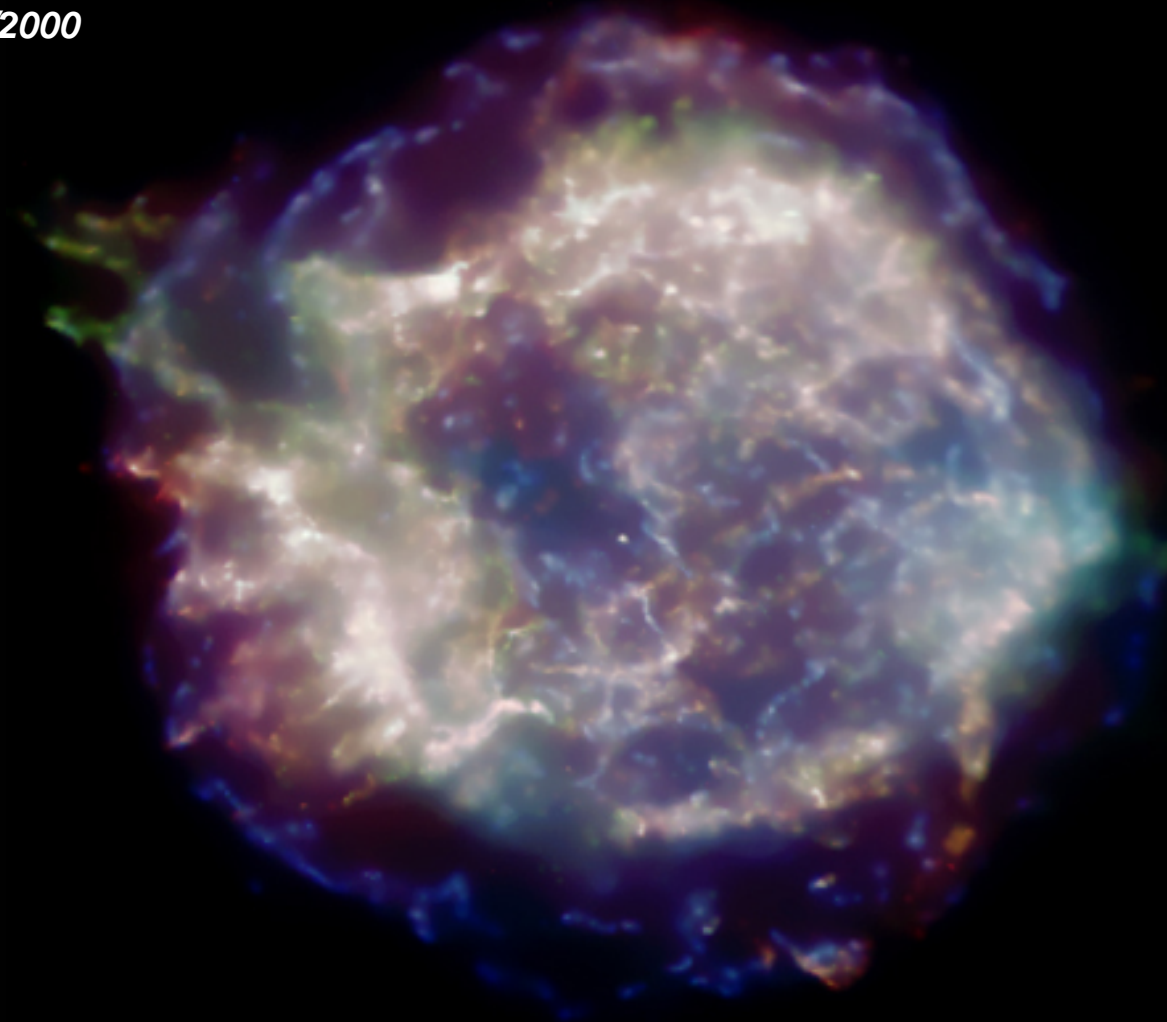
„This review demonstrates that the relatively small number of papers devoted to the p-process clearly does not do justice to the astrophysics and nuclear physics richness of this mechanism“

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

**„Direkte“ Messungen I:
Bestimmung von (γ,n) -Reaktionsraten
im p-Prozess**

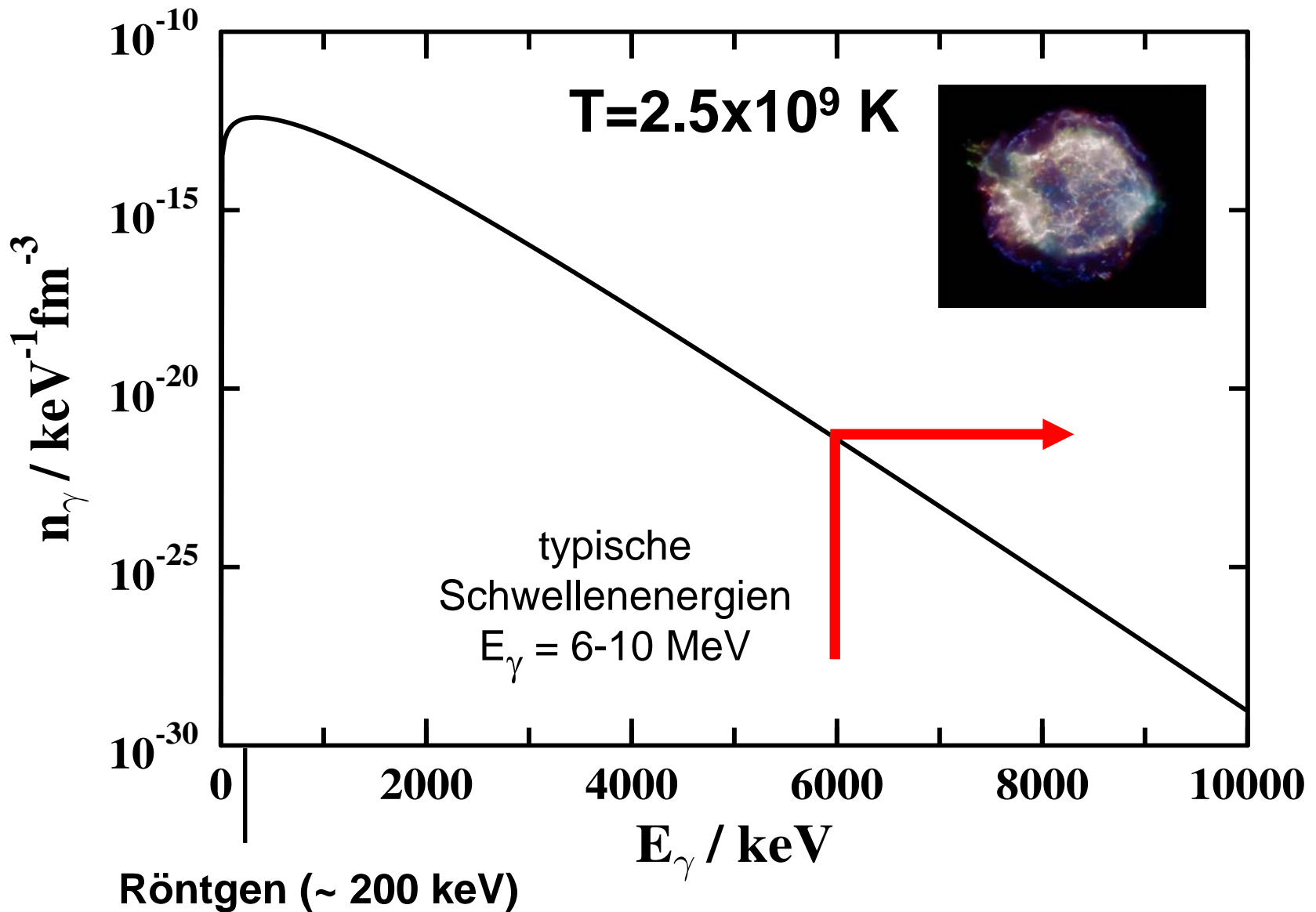
Herkunft der Photonen im p-Prozess

CASSIOPEIA A,
CHANDRA 01/2000



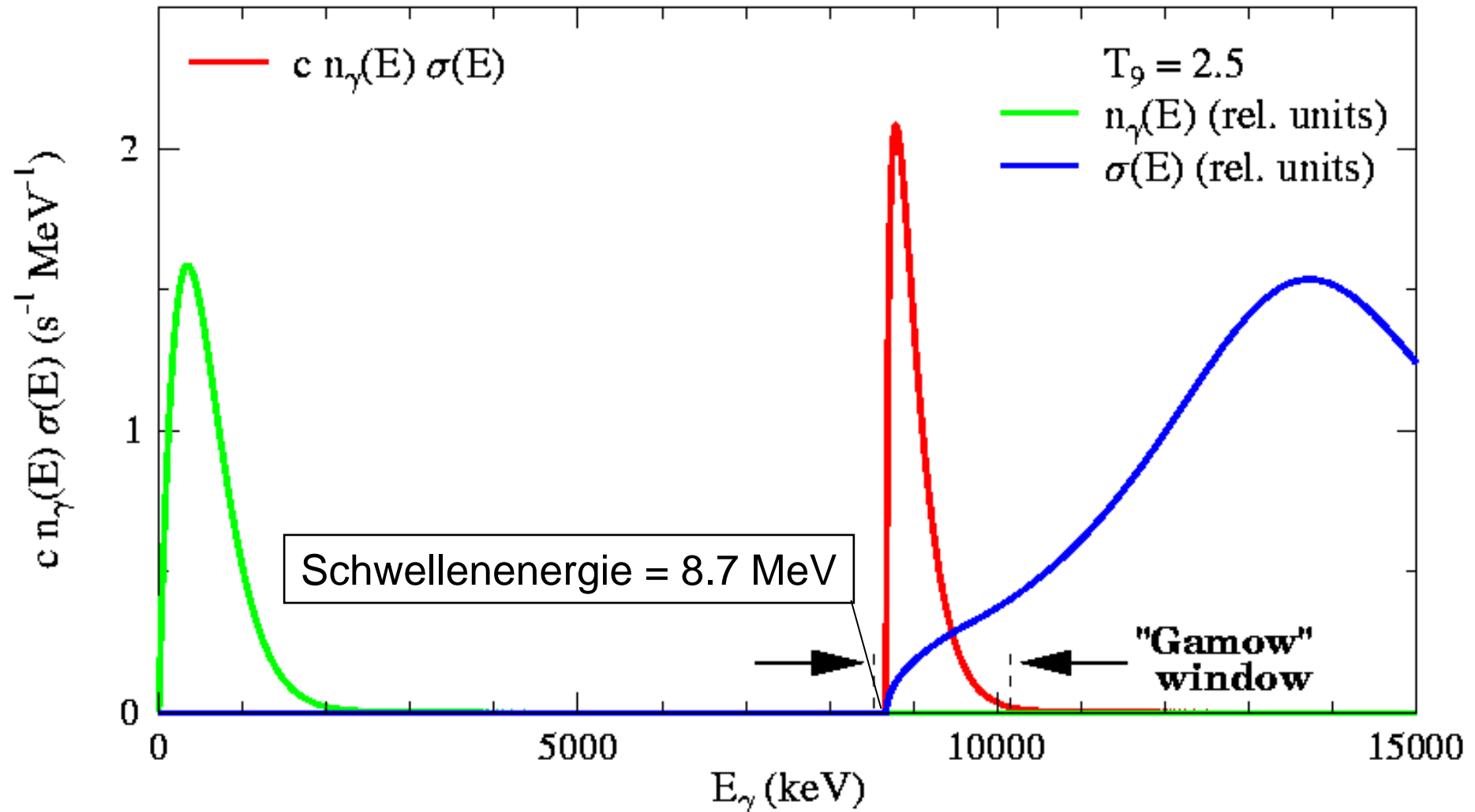
Temperaturen bis zu 10^{10} K \sim 800 keV

Planck-Spektrum bei 2.5×10^9 Kelvin

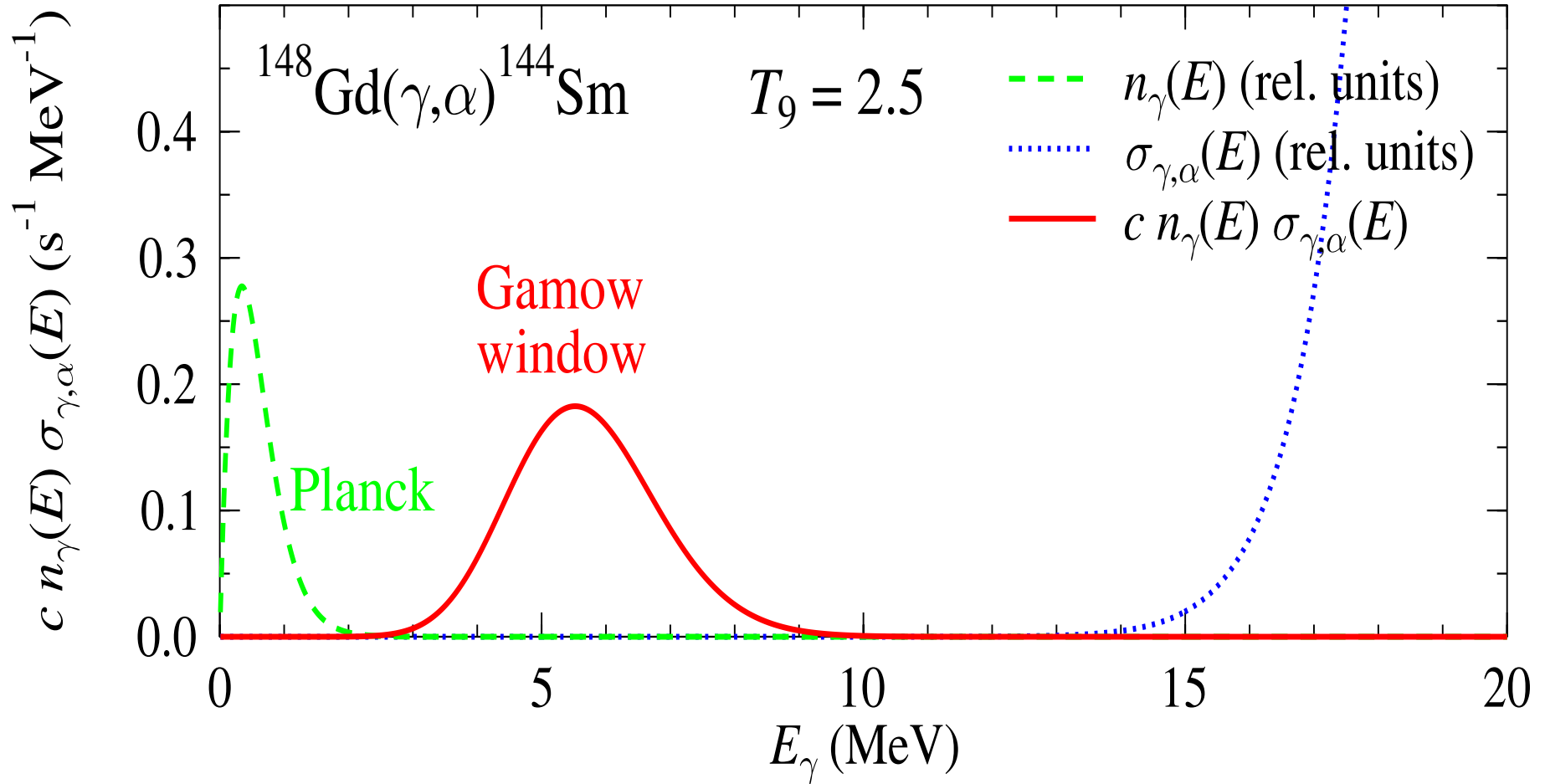


Relevanter Energiebereich für (γ, n) -Reaktionen

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



Konkurrierende (γ, α) -Reaktionen im p-Prozess



Branching point beim p-Prozess : $\lambda_{(\gamma, n)} \sim \lambda_{(\gamma, \alpha)}$

Methode I: Erzeugung eines Planck-Spektrums

- 1.) Erzeugung eines Planck-Spektrums im relevanten Energiebereich**
- 2.) Bestrahlung des Target-Isotops**
- 3.) Direkte Messung der energieintegrierten (γ,n) - oder (γ,α) - Grundzustands-Reaktionsrate**

Keine Annahmen über Verlauf des Wirkungsquerschnitts nötig !

Aber Messungen bei mehreren Photonen-Endpunktenergien erforderlich !

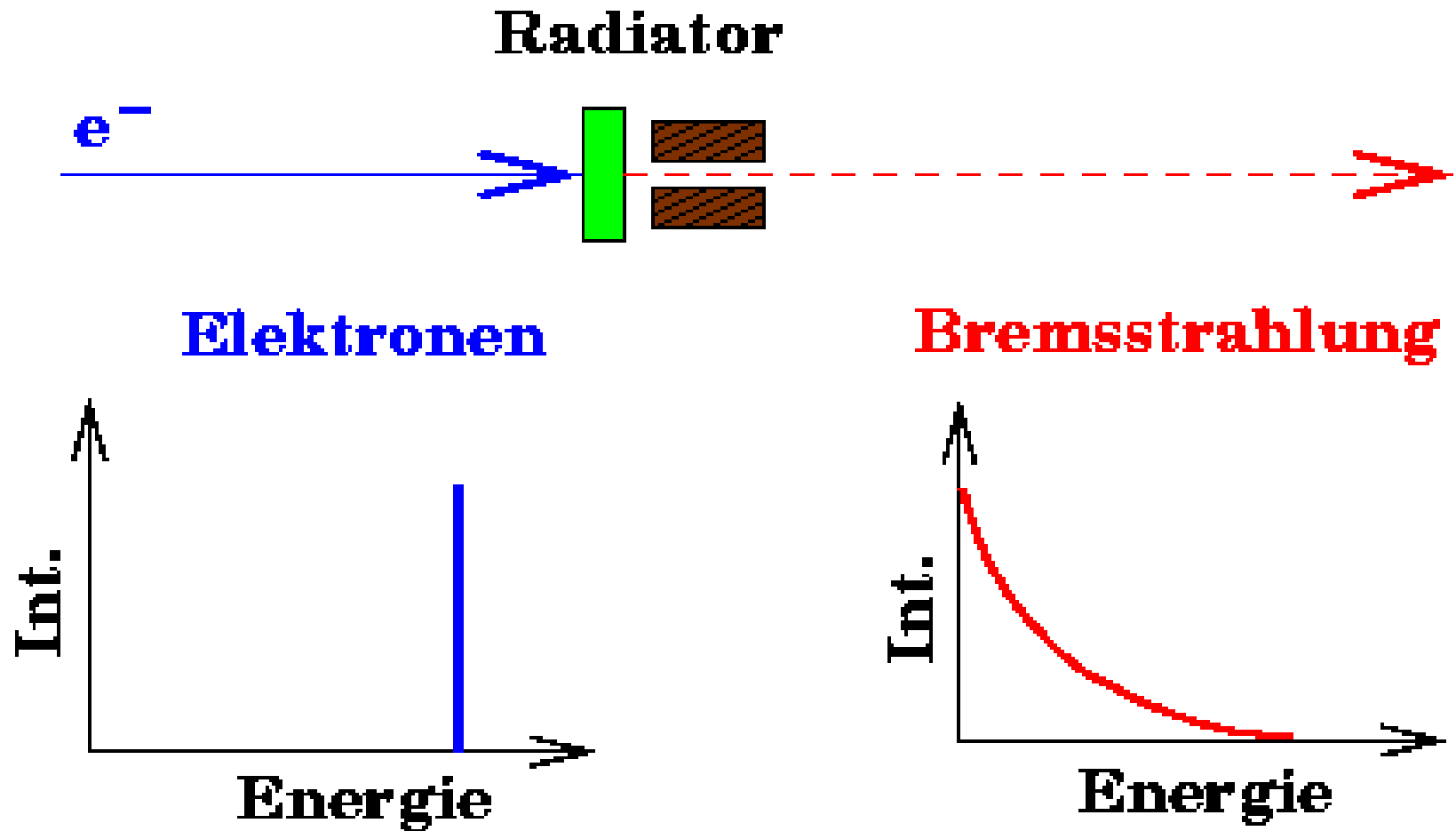
Methode II: Normierung des Wirkungsquerschnitts

- 1.) Erzeugung eines beliebigen
Photonenspektrums**
- 2.) Bestrahlung des Target-Isotops**
- 3.) Annahme über Verlauf des WQ**
- 4.) Messung der Reaktionsrate**
- 5.) Normierung des (γ, n) - oder (γ, α) -WQ**

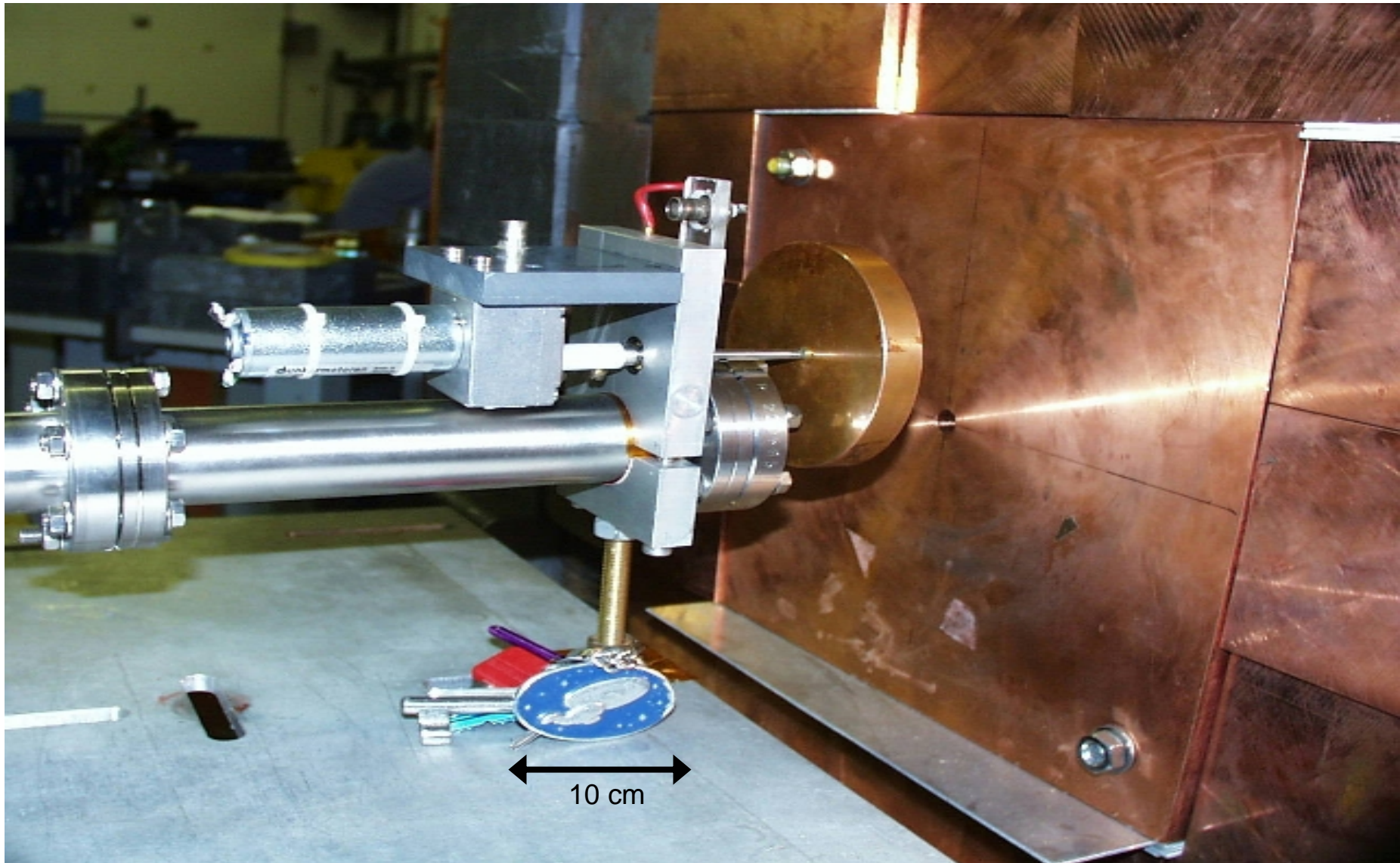
Nur eine Messung nötig!

**Aber Annahme über den Verlauf des
Wirkungsquerschnitts erforderlich !**

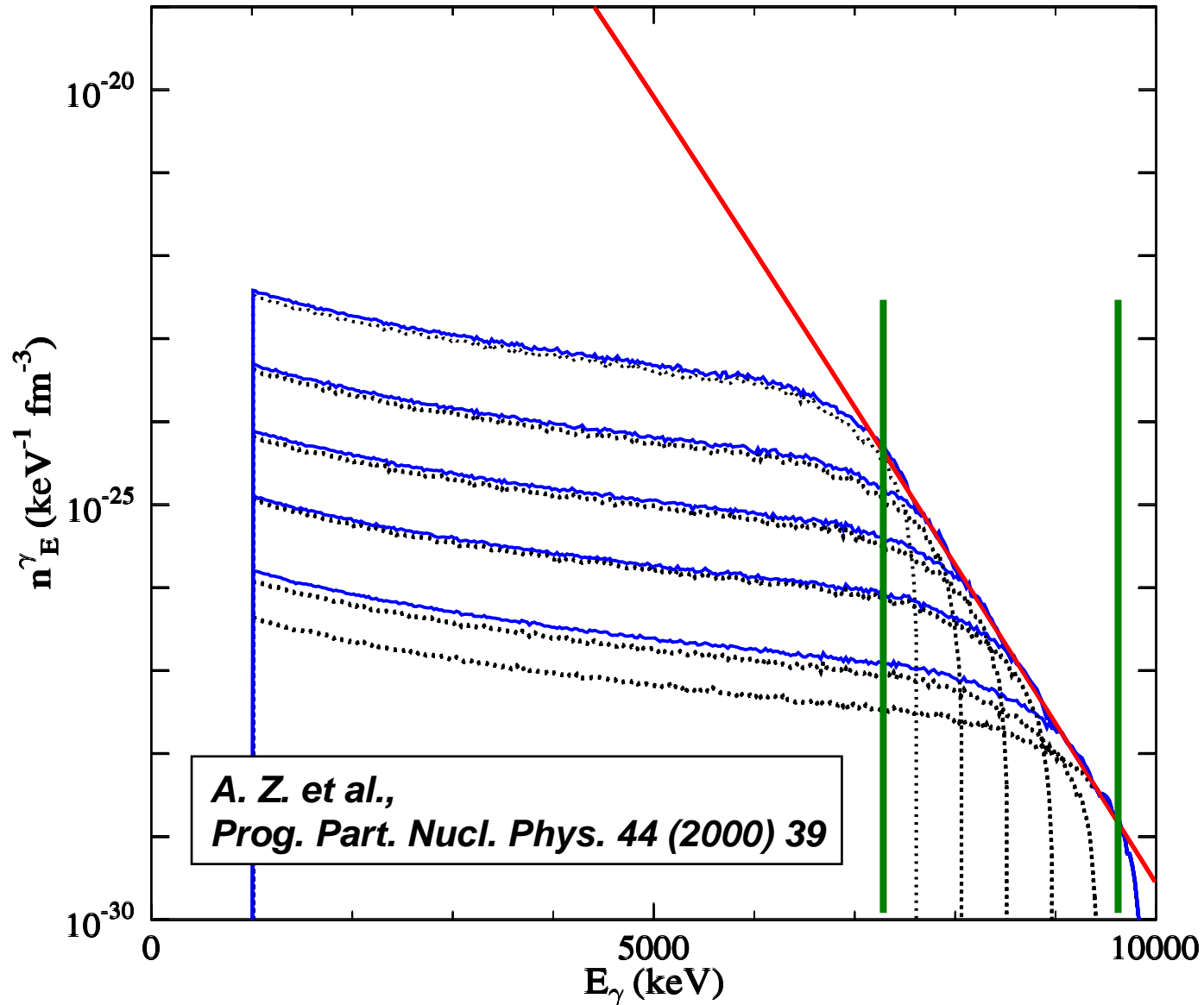
Methode I: Erzeugung eines Planck-Spektrums



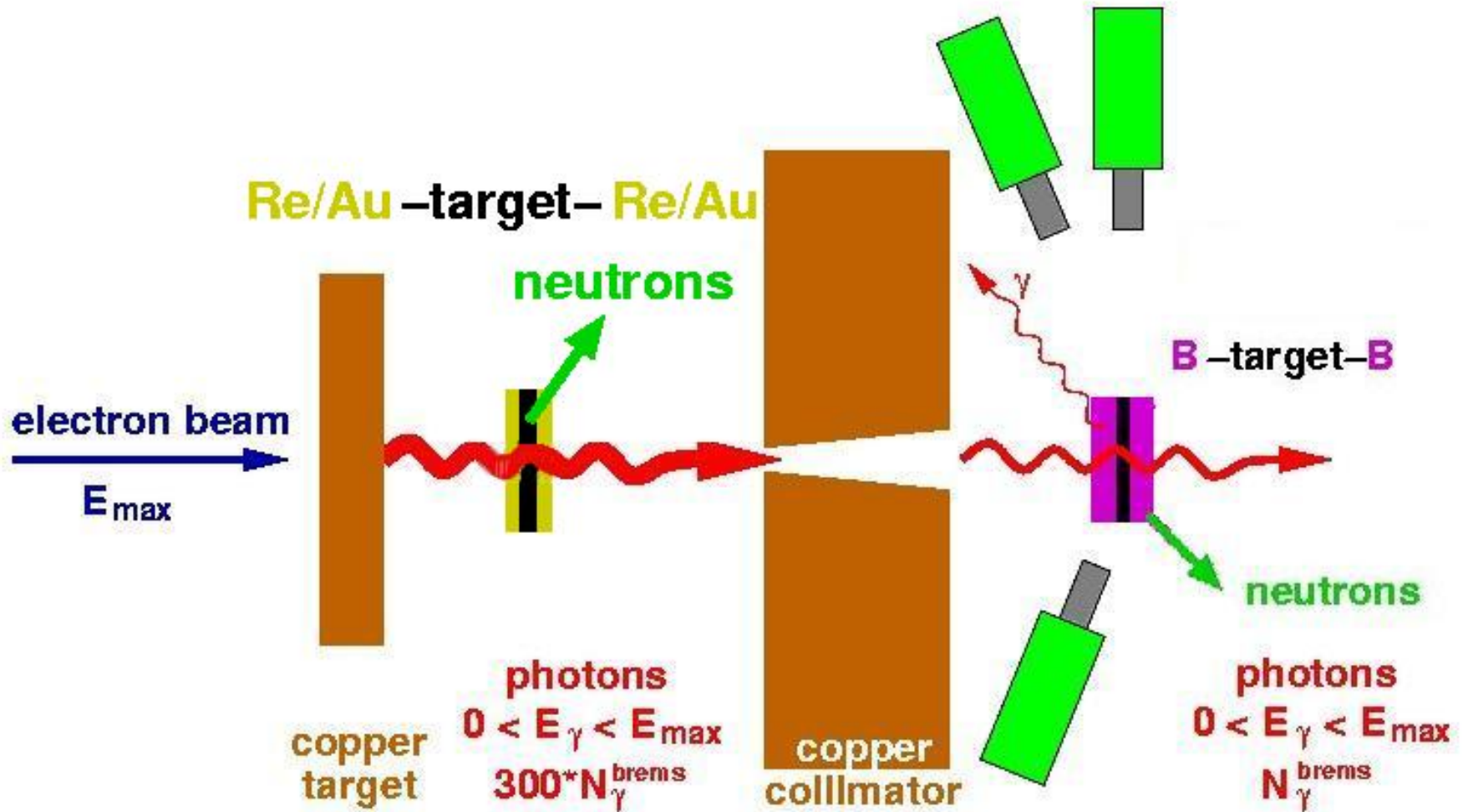
Radiator und Kollimator am S-DALINAC



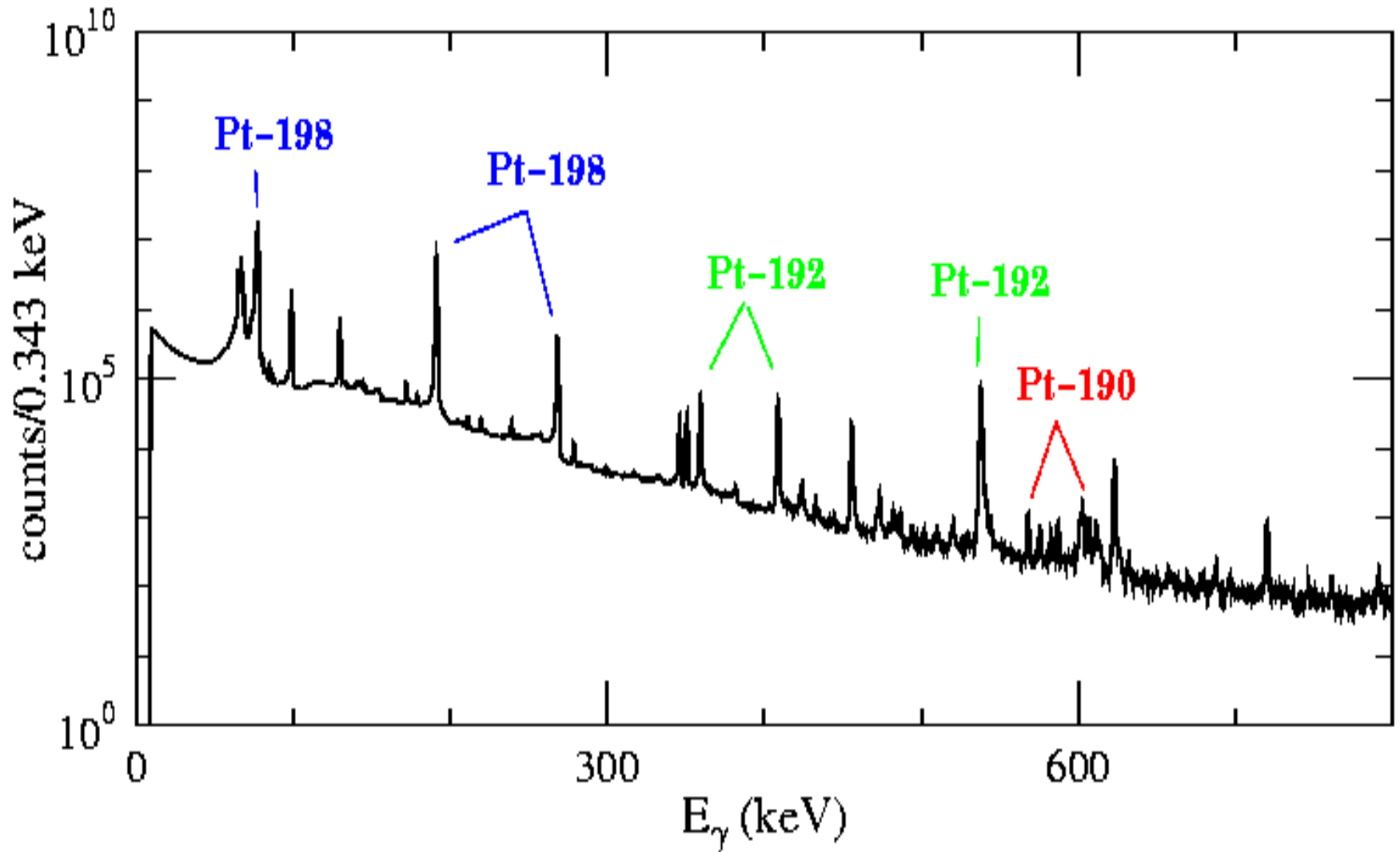
Methode I: Erzeugung eines Planck-Spektrums



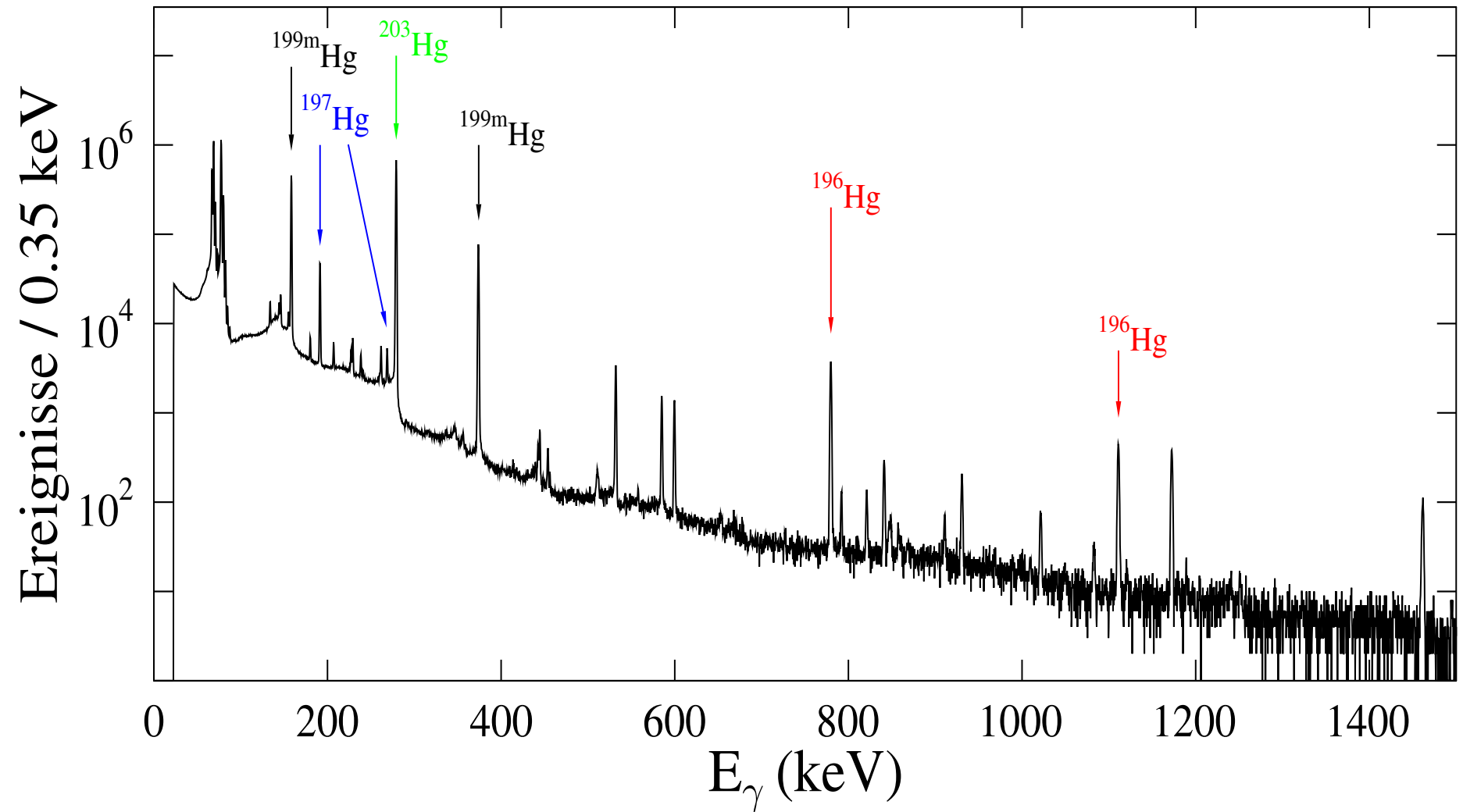
Bestrahlung des Target-Isotops



Aktivierungsspektrum von $^{\text{nat}}\text{Pt}$



Aktivierungsspektrum von ^{nat}Hg



Grundzustands-Reaktionsraten

Kern	S_n (MeV)	$\lambda_{\text{exp}} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$\lambda_{\text{NONS}} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$\lambda_{\text{MOST}} \text{ (s}^{-1}\text{)}$
^{190}Pt	8911	0.4(2)*	0.18	0.29
^{192}Pt	8676	0.5(2)	0.58	0.56
^{198}Pt	7557	87(21)	50	110
^{197}Au	8071	6.2(8)	4.81	5.6
^{196}Hg	8840	0.42(7)*	0.32	0.58
^{198}Hg	7103	2.0(3)	1.36	2.1
^{204}Hg	7495	57(21)	73.3	170
^{204}Pb	8394	1.9(3)	1.53	3.0

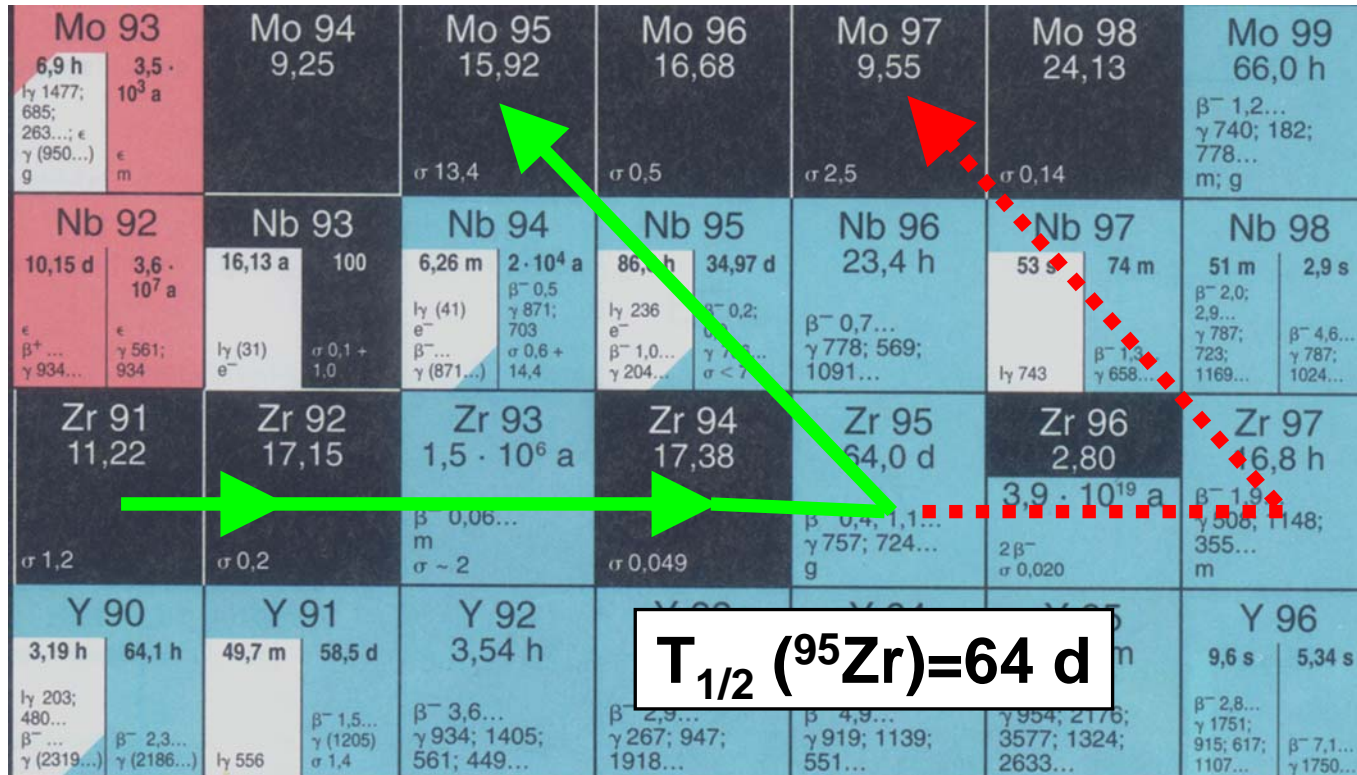
Temperatur: $T=2.5 \times 10^9 \text{ K}$

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

*S. Goriely,
priv. comm.*

**„Direkte“ Messungen II:
Bestimmung von (n,γ) -Reaktionsraten
radioaktiver Kerne im s-Prozess**

Untersuchung von „branching points“ im s-Prozess



Die Verzweigung wird bestimmt durch:

- die Halbwertszeit von ^{95}Zr ;
- die Neutronendichte und Temperatur im s-Prozess;
- den Neutronen-Einfangquerschnitt von ^{95}Zr .

Der (n,γ) -Wirkungsquerschnitt von ^{95}Zr : Vorhersagen für den MACS bei $kT=30$ keV

- J. Holmes et al., At. Data Nucl. Data Tables **18** (1976) 305:
MACS (^{95}Zr) = 72 mb
- K. Toukan et al., Astrophys. J. **348** (1990) 357:
MACS (^{95}Zr) = 50 mb
- T. Rauscher et al., At. Data Nucl. Data Tables **75** (2000) 1:
MACS (^{95}Zr) = 126 mb
- S. Goriely, Nuclear Astrophysics Data Base (2002):
MACS (^{95}Zr) = 23 mb

Untersuchung von „branching points“ im s-Prozess

Mo 93 6,9 h 3,5 · 10 ³ a Iy 1477; 685; 263...; ε γ (950...) g e m	Mo 94 9,25	Mo 95 15,92 σ 13,4	Mo 96 16,68 σ 0,5	Mo 97 9,55 σ 2,5	Mo 98 24,13 σ 0,14	Mo 99 66,0 h β ⁻ 1,2... γ 740; 182; 778... m; g
Nb 92 10,15 d 3,6 · 10 ⁷ a e e β ⁺ ... γ 561; γ 934... 934	Nb 93 16,13 a 100 Iy (31) e ⁻ σ 0,1 + 1,0	Nb 94 6,26 m 2 · 10 ⁴ a Iy (41) e ⁻ β ⁻ 0,5 γ 871; 703 γ 787; β ⁻ ... σ 0,6 + γ (871...) 14,4	Nb 95 86,7 h 34,97 d Iy 236 e ⁻ β ⁻ 0,2; β ⁻ 1,0... γ 778... γ 204... σ < 7	Nb 96 23,4 h β ⁻ 0,7... γ 778; 569; 1091...	Nb 97 53 s 74 m Iy 743 β ⁻ 1,3 γ 658...	Nb 98 51 m 2,9 s β ⁻ 2,0; 2,9... γ 787; 723; β ⁻ 4,6... 1169... γ 787; 1024...
Zr 91 11,22 σ 1,2	Zr 92 17,15 σ 0,2	Zr 93 1,5 · 10 ⁶ a β ⁻ 0,06... m σ - 2	Zr 94 17,38 σ 0,049	Zr 95 64,0 d β ⁻ 0,4; 1,1... γ 757; 724... g	Zr 96 2,80 3,9 · 10 ¹⁹ a 2 ⁻ σ 0,020	Zr 97 16,8 h β ⁻ 1,9 γ 506; 1148; 355... m
Y 90 3,19 h 64,1 h Iy 203; 480... β ⁻ 2,3... β ⁻ ... γ (2186...) γ (2319...) γ (2186...)	Y 91 49,7 m 58,5 d Iy 556 β ⁻ 1,5... γ (1205) σ 1,4	Y 92 3,54 h β ⁻ 3,6... γ 934; 1405; 561; 449...	Y 93 β ⁻ 2,9... γ 267; 947; 1918...	Y 94 β ⁻ 4,9... γ 919; 1139; 551...	Y 95 γ 954; 2176; 3577; 1324; 2633...	Y 96 9,6 s 5,34 s β ⁻ 2,8... γ 1751; 915; 617; 1107... β ⁻ 7,1... γ 1750...

T_{1/2} (⁹⁵Zr)=64 d

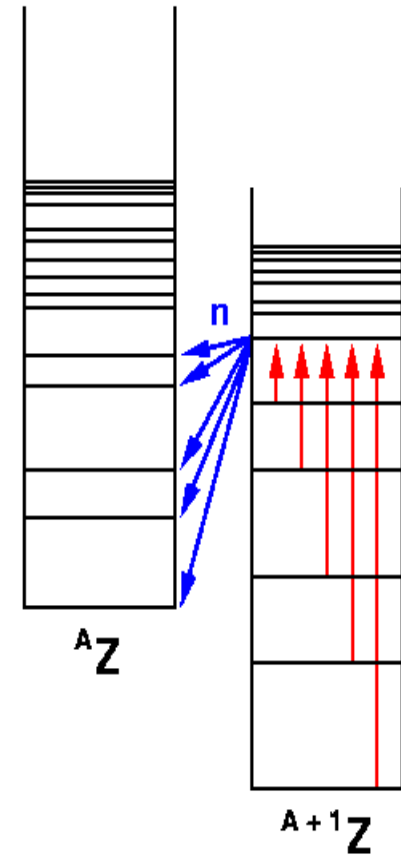
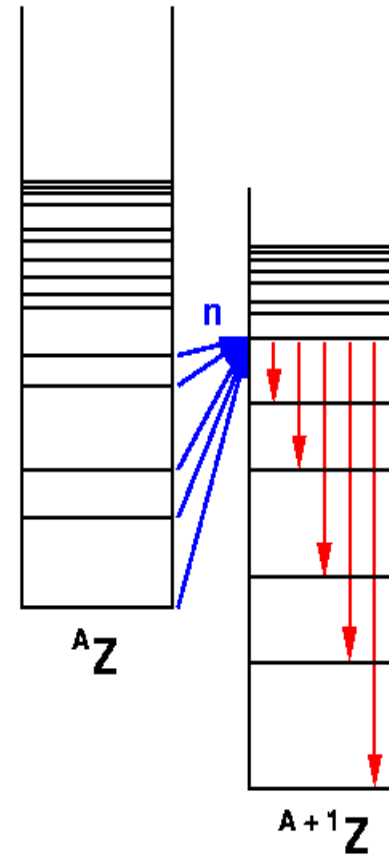
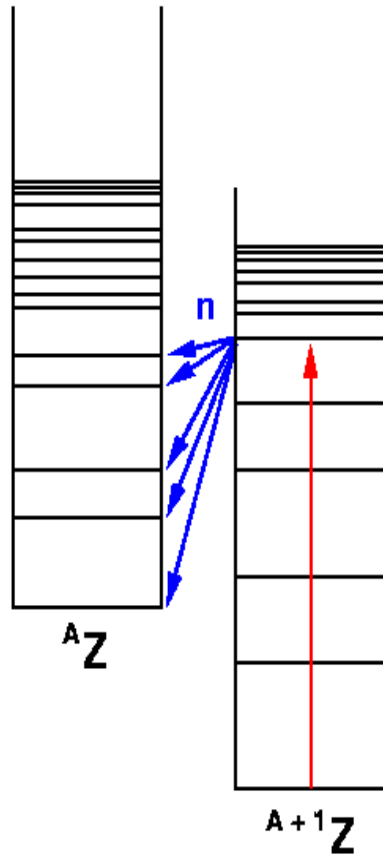
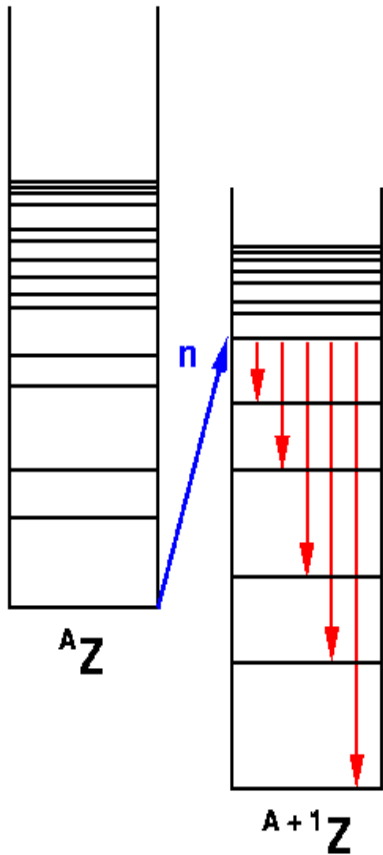
Gesucht ist die (n,γ)-Neutroneneinfangrate instabiler Kerne

→ **Messung der (γ,n)-Photodissoziationsrate des Nachbarkerns + „detailed balance principle“**

(n,γ) - vs. (γ,n) -Reaktionsrate: Detailed balance

Laborbedingungen, $T=0$

Stellare Bedingungen, $T>0$



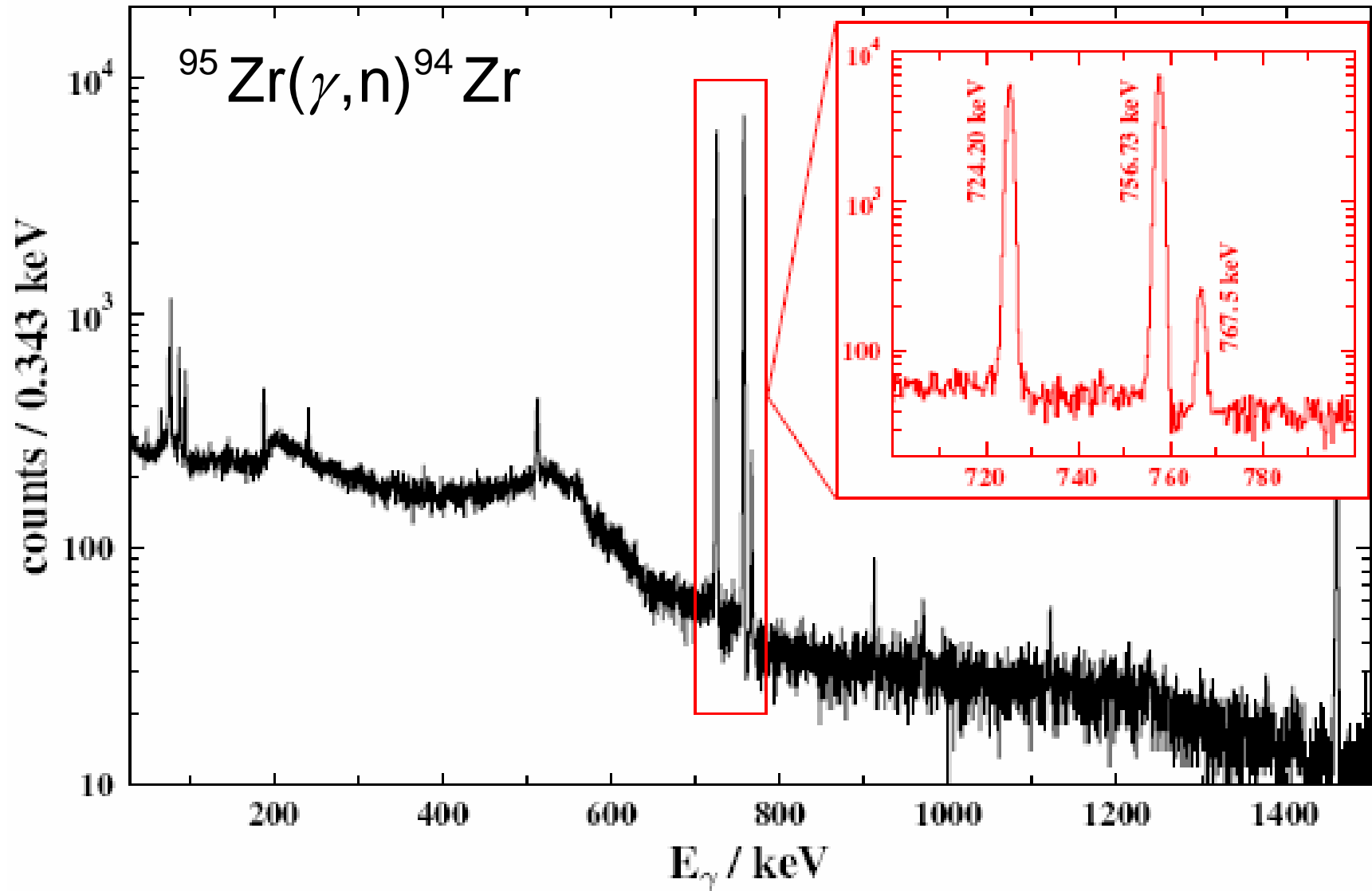
(n,γ)

(γ,n)

(n,γ)

(γ,n)

Untersuchung von „branching points“ im s-Prozess



Der (n,γ) -Wirkungsquerschnitt von ^{95}Zr : Vorhersagen für den MACS bei $kT=30$ keV

- J. Holmes et al., At. Data Nucl. Data Tables **18** (1976) 305:
MACS (^{95}Zr) = 72 mb
- K. Toukan et al., Astrophys. J. **348** (1990) 357:
MACS (^{95}Zr) = 50 mb
- T. Rauscher et al., At. Data Nucl. Data Tables **75** (2000) 1:
MACS (^{95}Zr) = 126 mb
- S. Goriely, Nuclear Astrophysics Data Base (2002):
MACS (^{95}Zr) = 23 mb

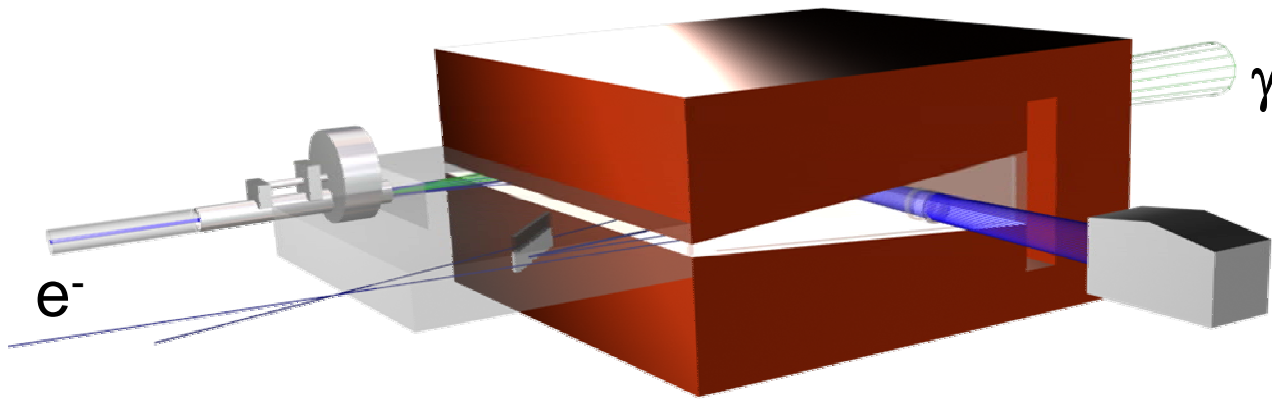
- Experiment (vorläufig):
MACS (^{95}Zr) = 91(14) mb

K. Sonnabend et al., Astrophys. J. 583 (2003) 506 and to be published

Grenzen der direkten Experimente

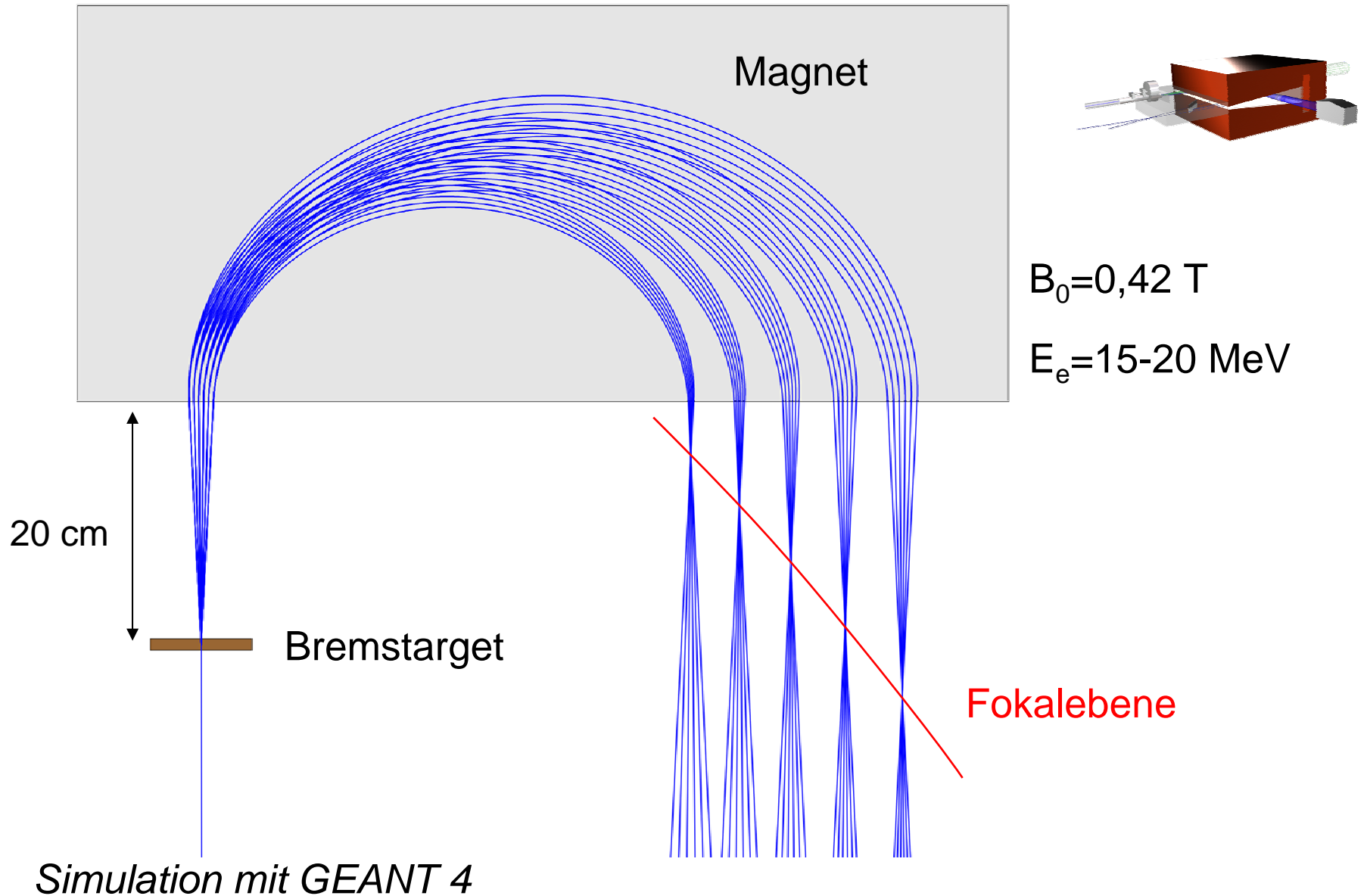
- Überwiegend Messung integraler Reaktionsraten
 - Reaktionen mit monoenergetischen Photonen

Photonen-Tagger @ S-DALINAC



- „Clam Shell“ Magnetdesign
- Szintillationskabel zur Detektierung der Elektronen
- Energieauflösung $< 0.25 \%$ für $8 \text{ MeV} < E_\gamma < 16 \text{ MeV}$

Fokussiereigenschaften des Taggers



Grenzen der direkten Experimente

- Überwiegend Messung integraler Reaktionsraten
 - Reaktionen mit monoenergetischen Photonen
- Nur stabile Isotope können untersucht werden
 - Coulomb-Dissoziation radioaktiver Strahlen, Extrapolation vom Stabilitätstal

S. Müller und eine FZR/FZK/GSI/TUD-Kollaboration,
GSI-Experiment S295:

„Photodissociation of astrophysical interest“

30 Strahlzeitschichten im Herbst 2005



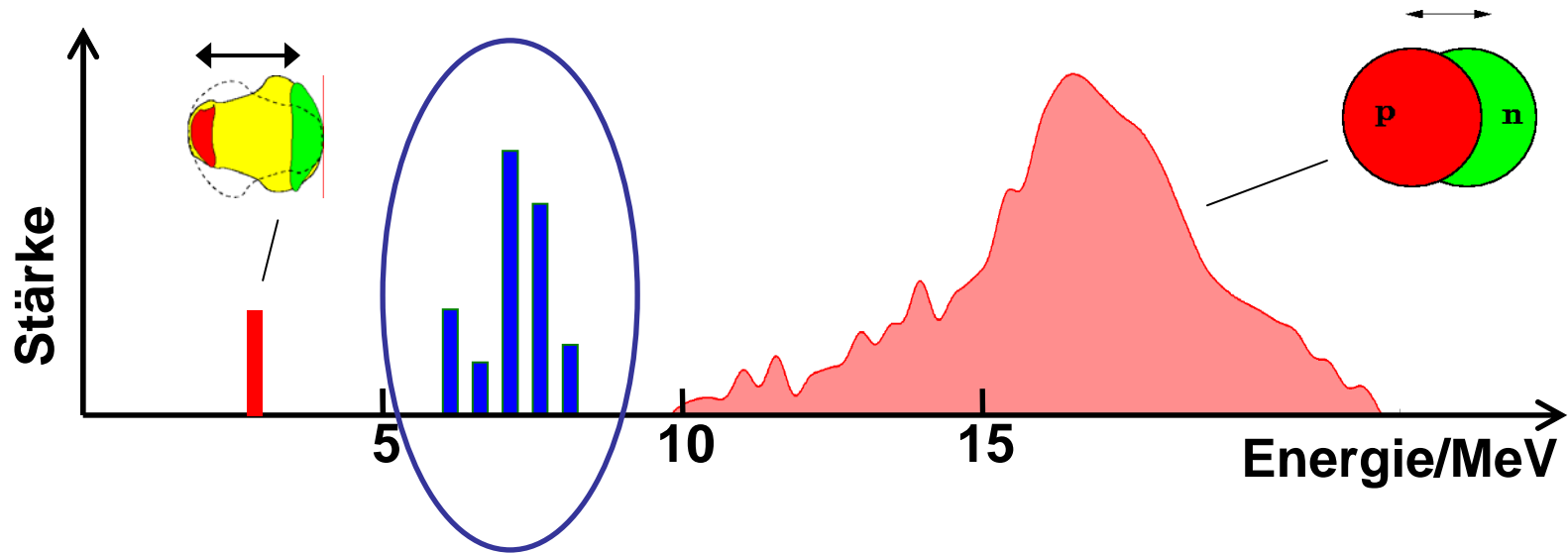
Grenzen der direkten Experimente

- Überwiegend Messung integraler Reaktionsraten
 - Reaktionen mit monoenergetischen Photonen
- Nur stabile Isotope können untersucht werden
 - Coulomb-Dissoziation radioaktiver Strahlen, Extrapolation vom Stabilitätstal
- Thermische Anregung im Photonenbad
 - Messung und Verständnis der kompletten Photoresponse des Kerns
- Zu viele Isotope im Reaktionsnetzwerk
 - Zuverlässige Modellrechnungen basierend auf Untersuchungen der Kernstruktur

Messung der Photoresponse

Photoresponse eines Atomkerns

Pygmy Dipole
Resonance (PDR) ?

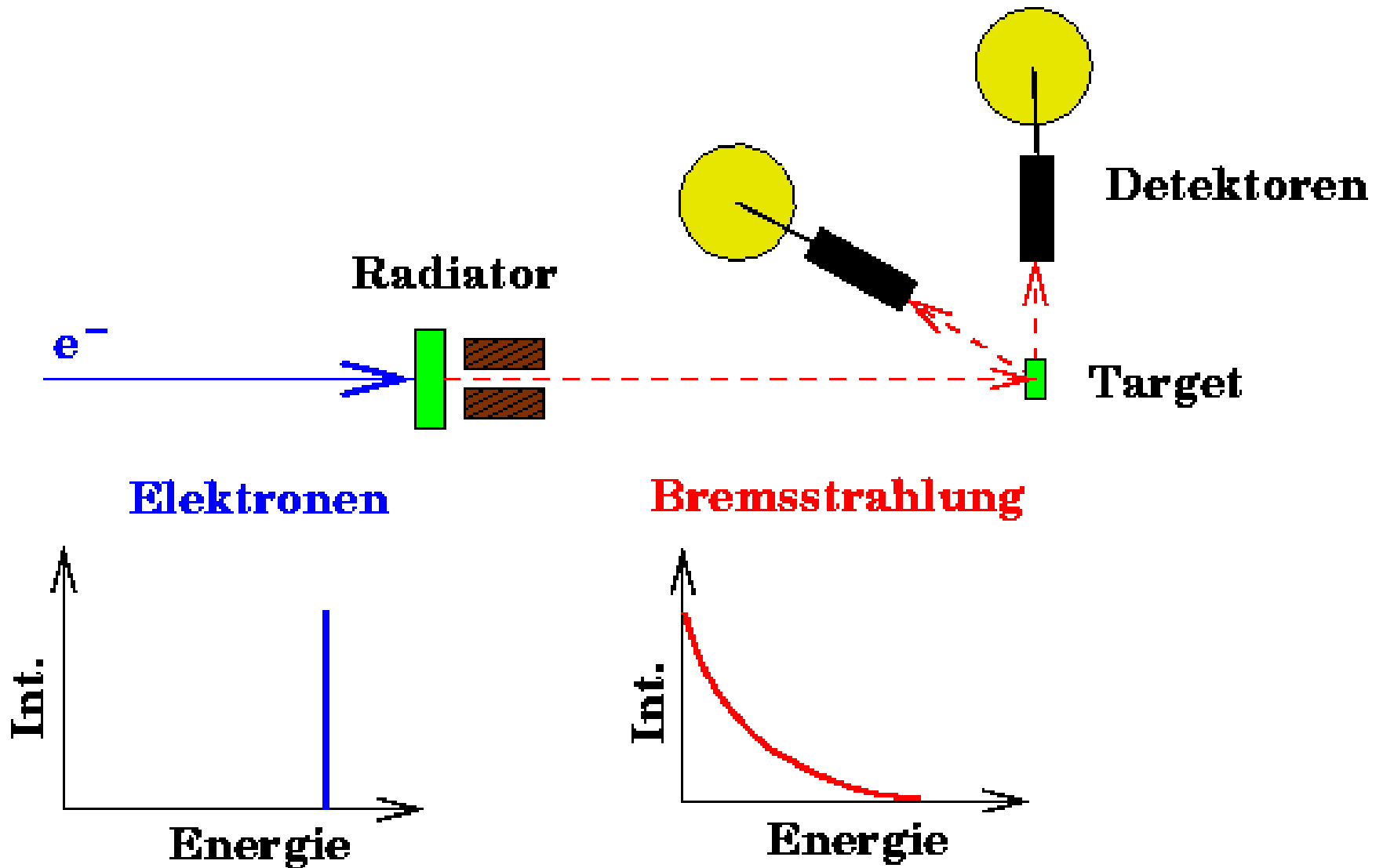


Experimentelle Methode:

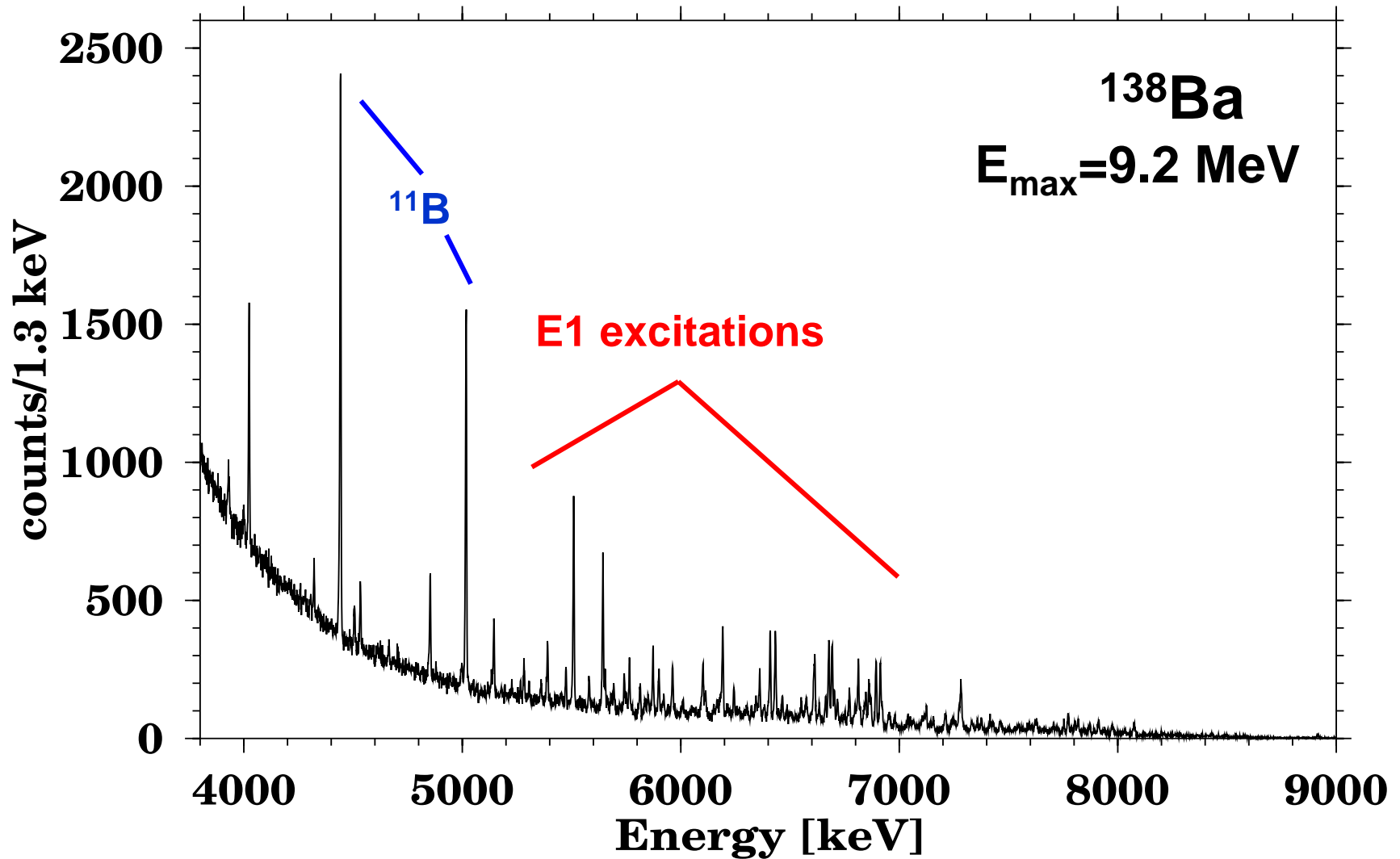
Photonenstreuung

Kernresonanzfluoreszenz – (KRF)

Photonenstreuung mit Bremsstrahlung

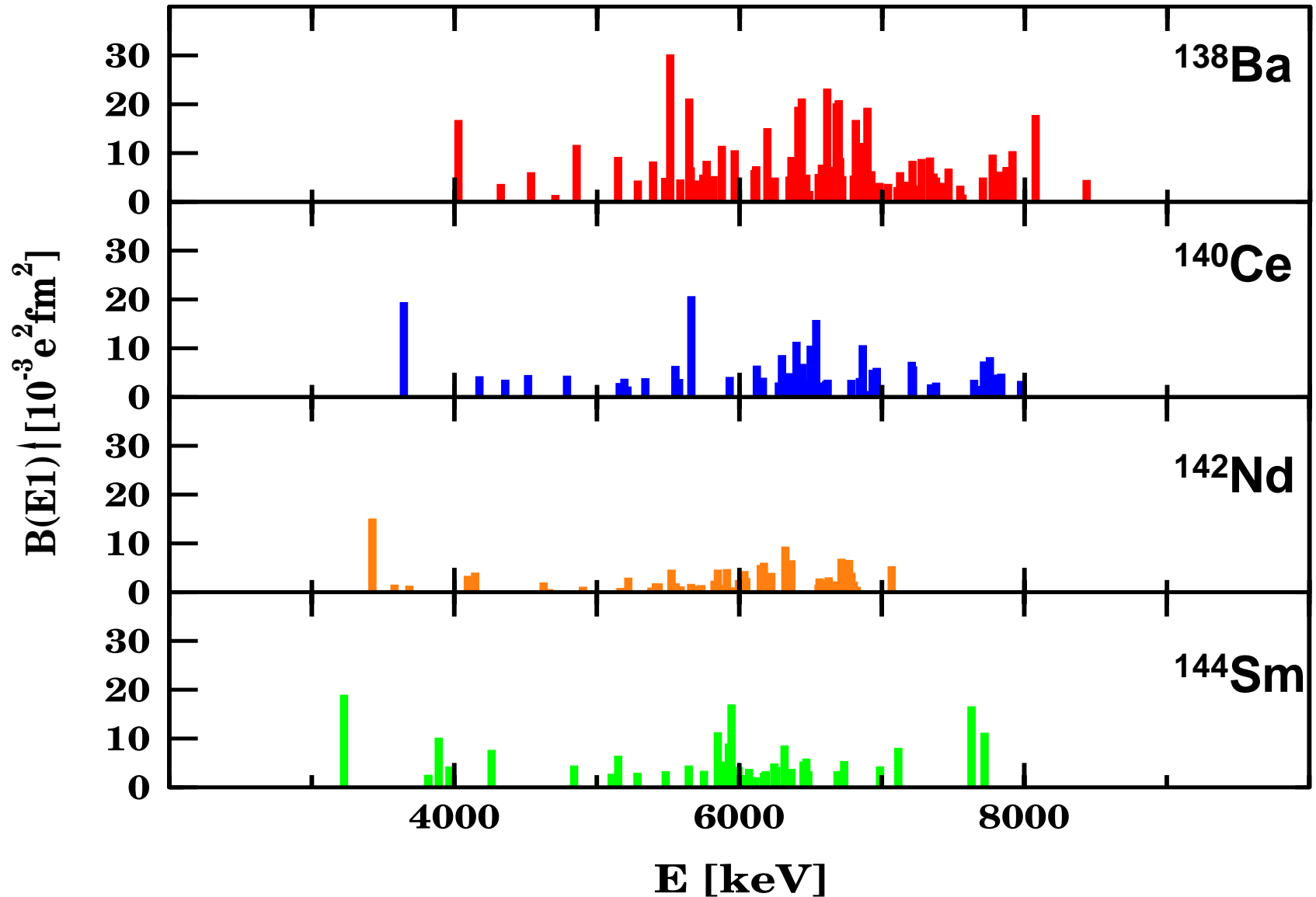


Photonenstreuung an ^{138}Ba



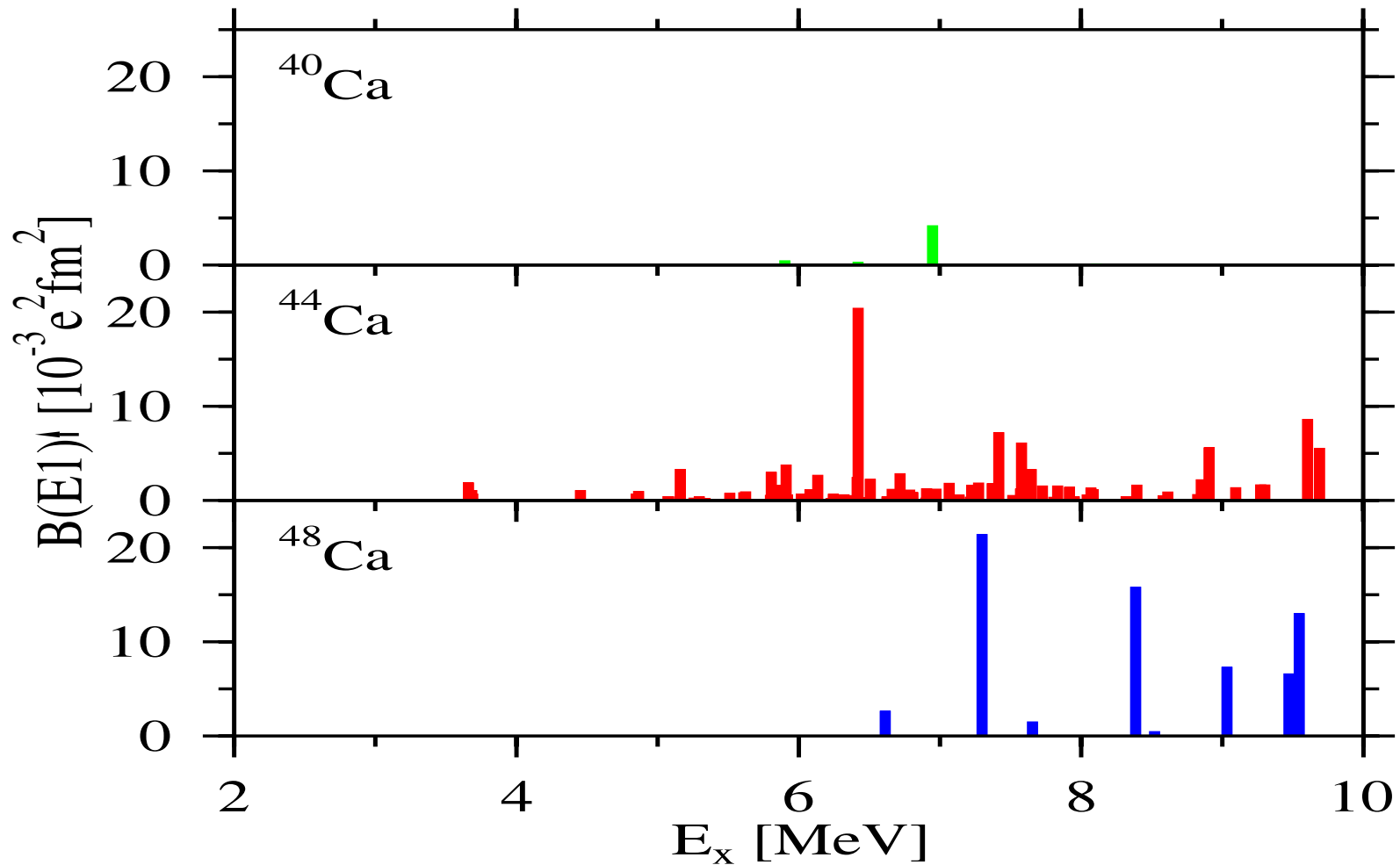
A. Z. et al., *Phys. Lett. B* **542** (2002) 43

E1-Stärkeverteilung in N=82-Kernen



S. Volz et al., to be published

E1-Stärkeverteilung in Ca-Isotopen

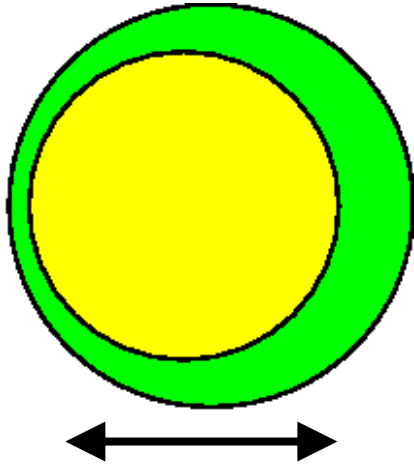


*T. Hartmann et al., PRL, **93** (2004) 192501*

*T. Hartmann et al., PRC **65** (2002) 034301*

*T. Hartmann et al., PRL **85** (2000) 274*

Neutronen- und Protonenhaut-Anregungen

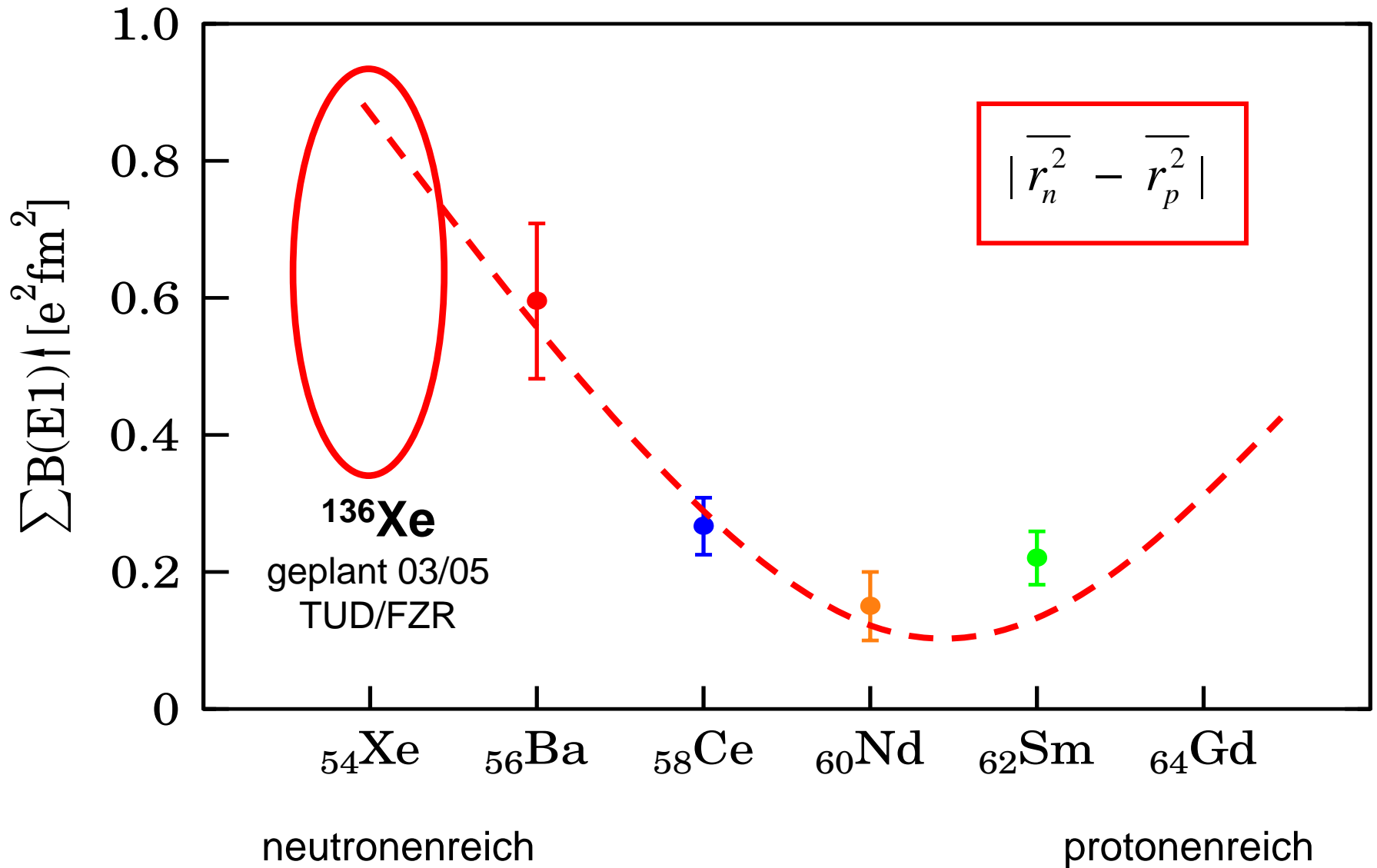


Oszillationen einer neutronen- oder protonenreichen Peripherie gegen den Restkern
→ isovektorielle E1-Anregungen
„Pygmy Dipole Resonance (PDR)“

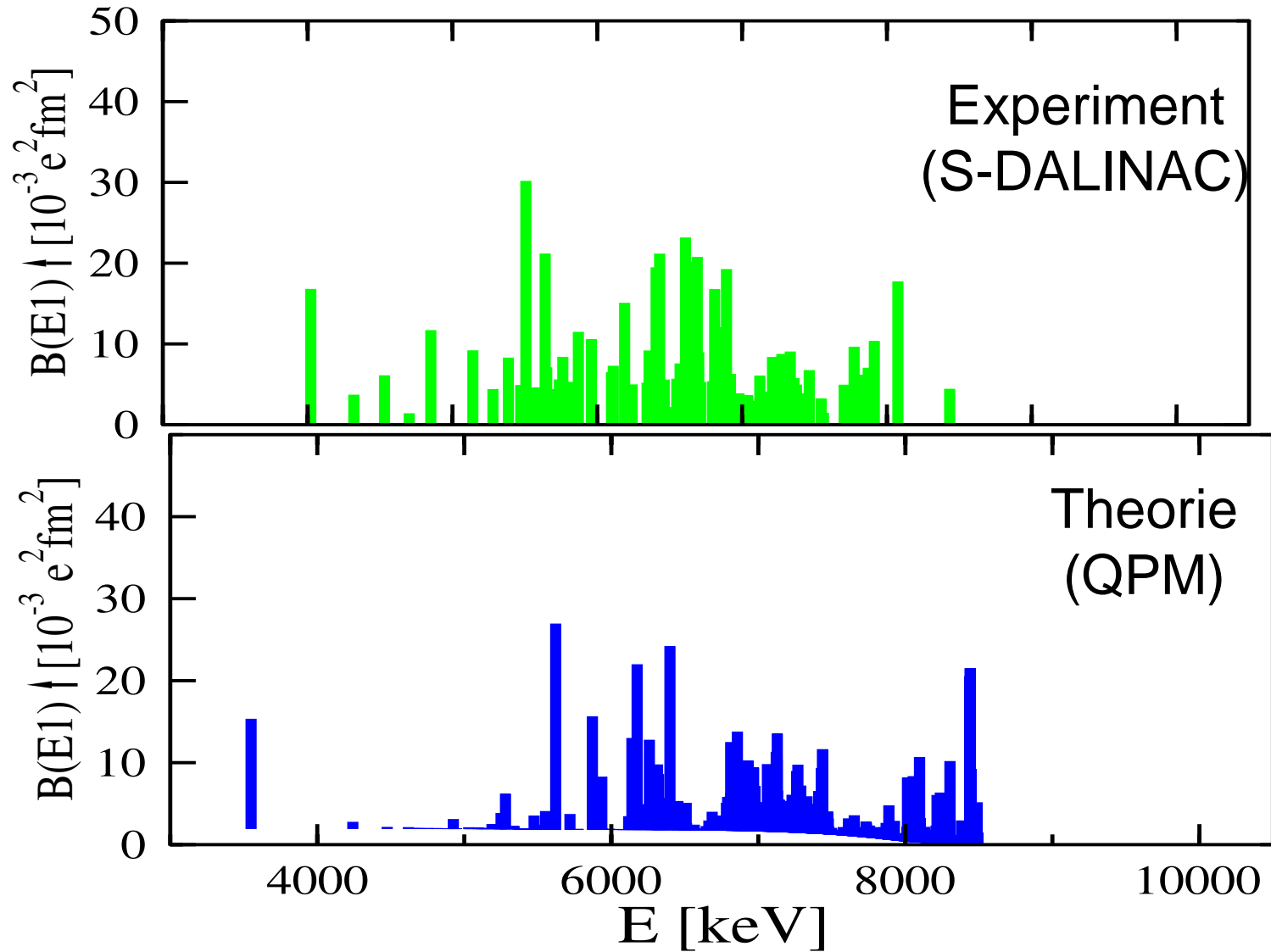
- „Soft Dipole Mode“ in exotischen Kernen
- Bis zu 1% der EWSR in stabilen Kernen
- Energie um 8 MeV in stabilen Kernen

siehe z.B.: J. Chambers et al., *Phys. Rev. C* **50** (1994) R2671
P. van Isacker et al., *Phys. Rev. C* **45** (1992) R13

Summierte E1-Stärke in N=82 nuclei

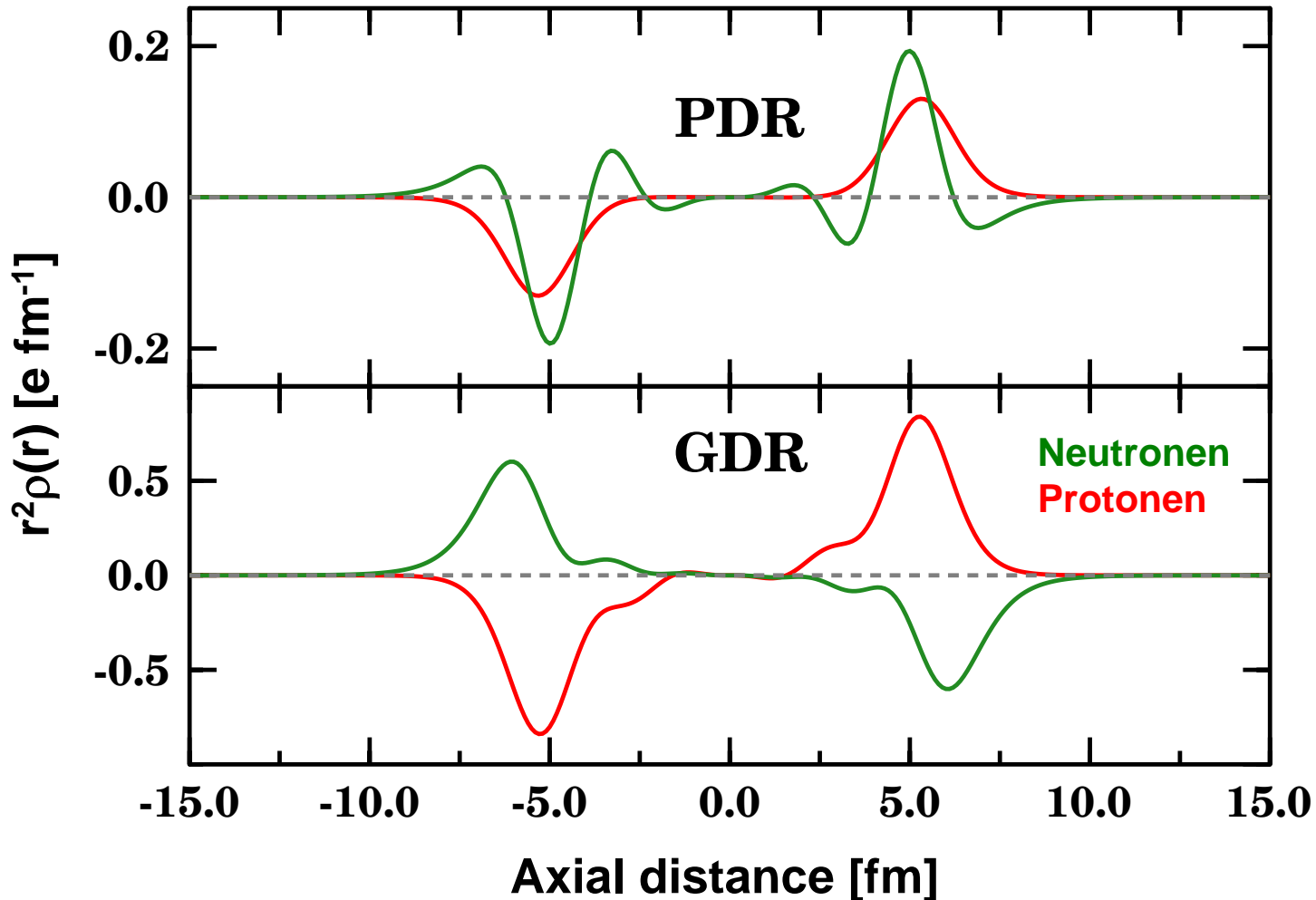


Quasiparticle-Phonon Model (QPM) für ^{138}Ba



Quasiparticle-Phonon Model (QPM) für ^{138}Ba

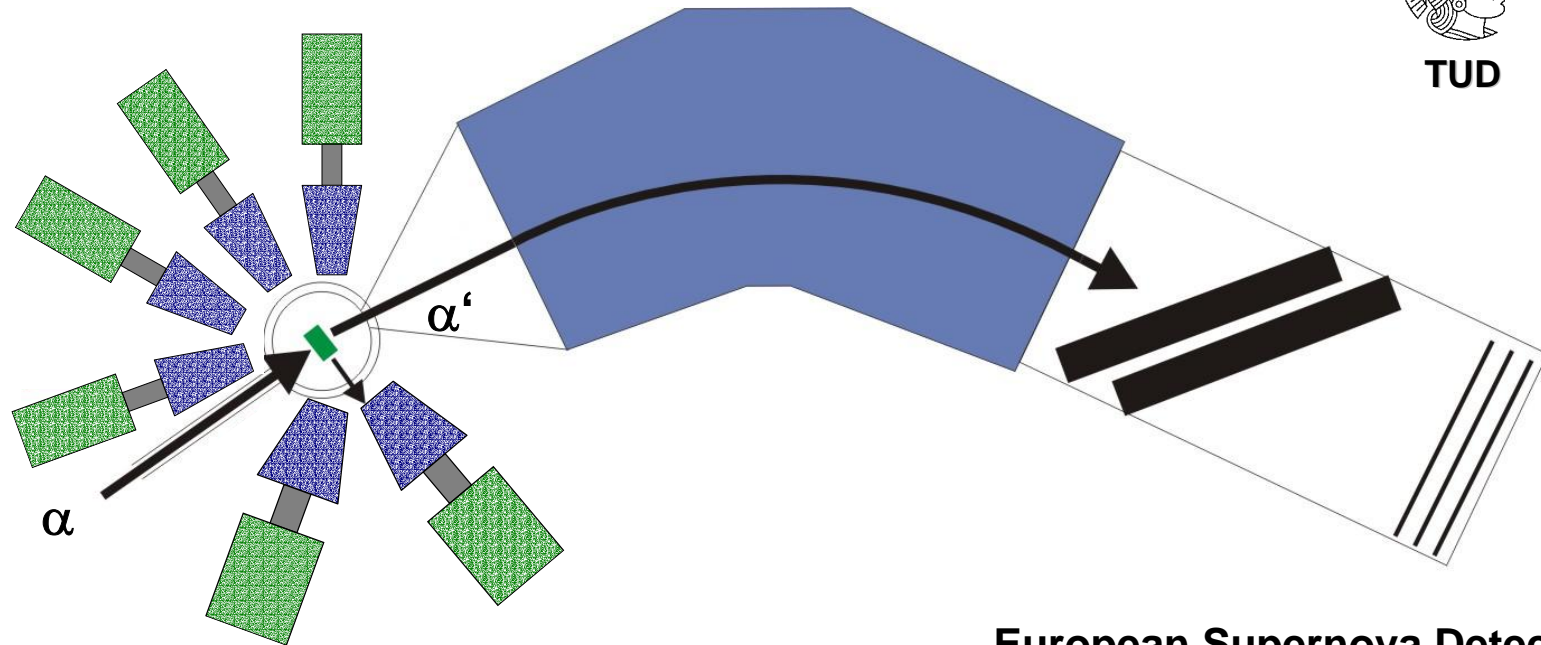
Die E1-Stärke bei 7 MeV ist überwiegend isoskalar.



**Struktur der E1 Anregungen:
Isoskalar oder isovektoriell ?**

Das neue ISOSPIN-Meter am KVI Groningen

Big Bite Spectrometer (BBS)

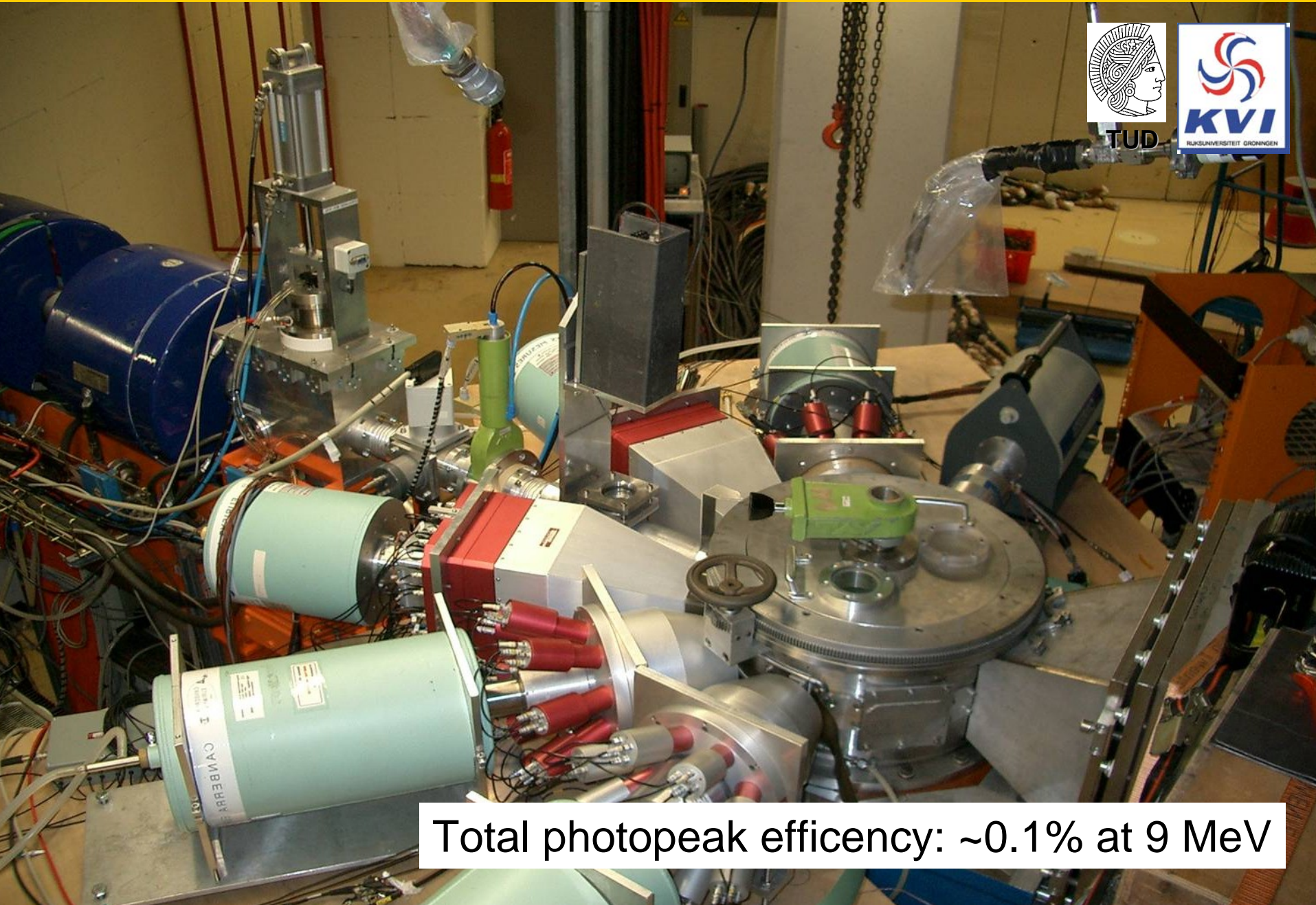


Ge-Detektor-Array
für γ -Spektroskopie

European Supernova Detector
zur Messung der α -Teilchen,
 $\Delta E \sim 100\text{-}200 \text{ keV}$

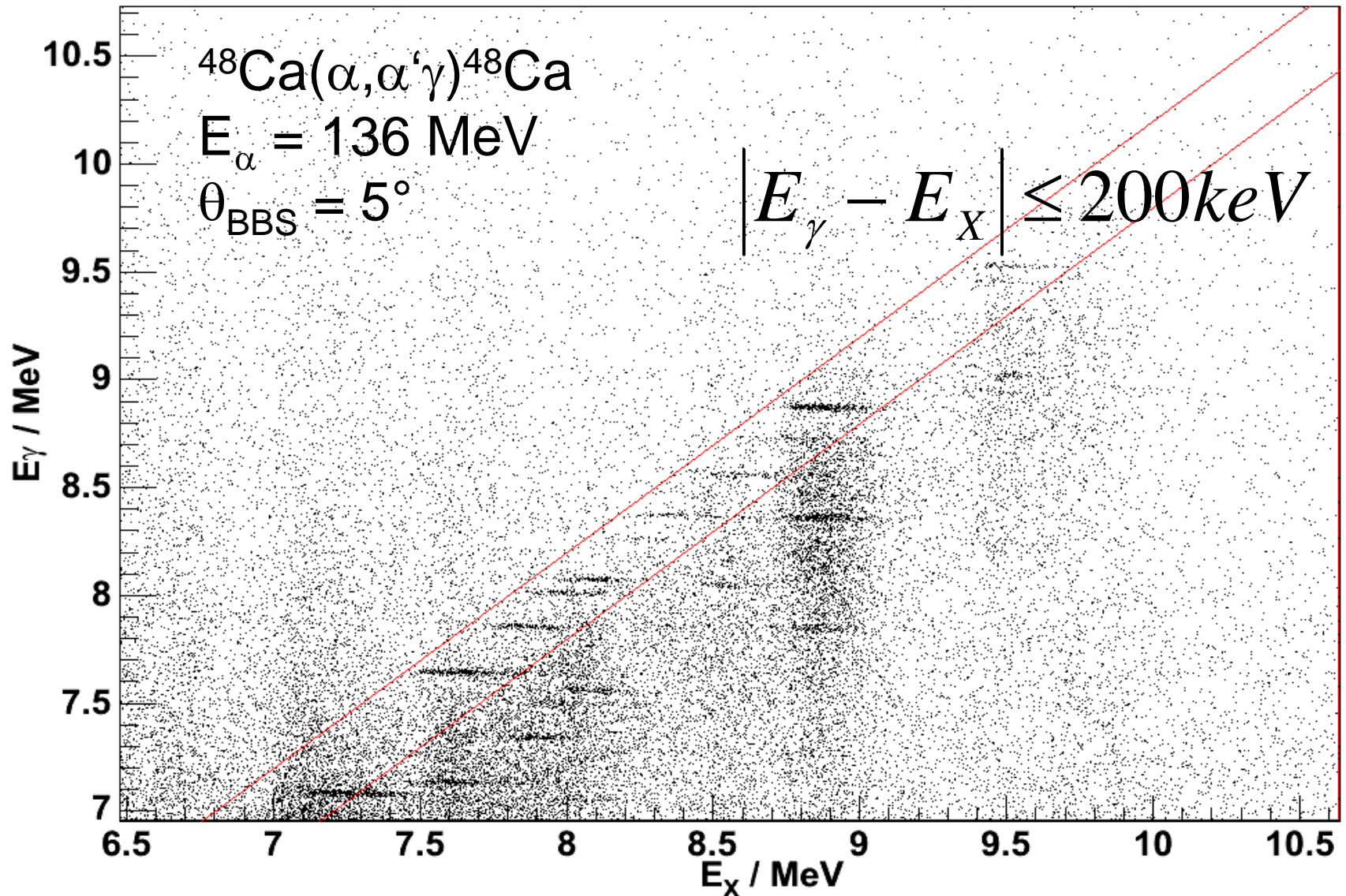
Dieser Aufbau erlaubt die Bestimmung des Isospin-Charakters gebundener Zustände.

Das neue ISOSPIN-Meter am KVI Groningen



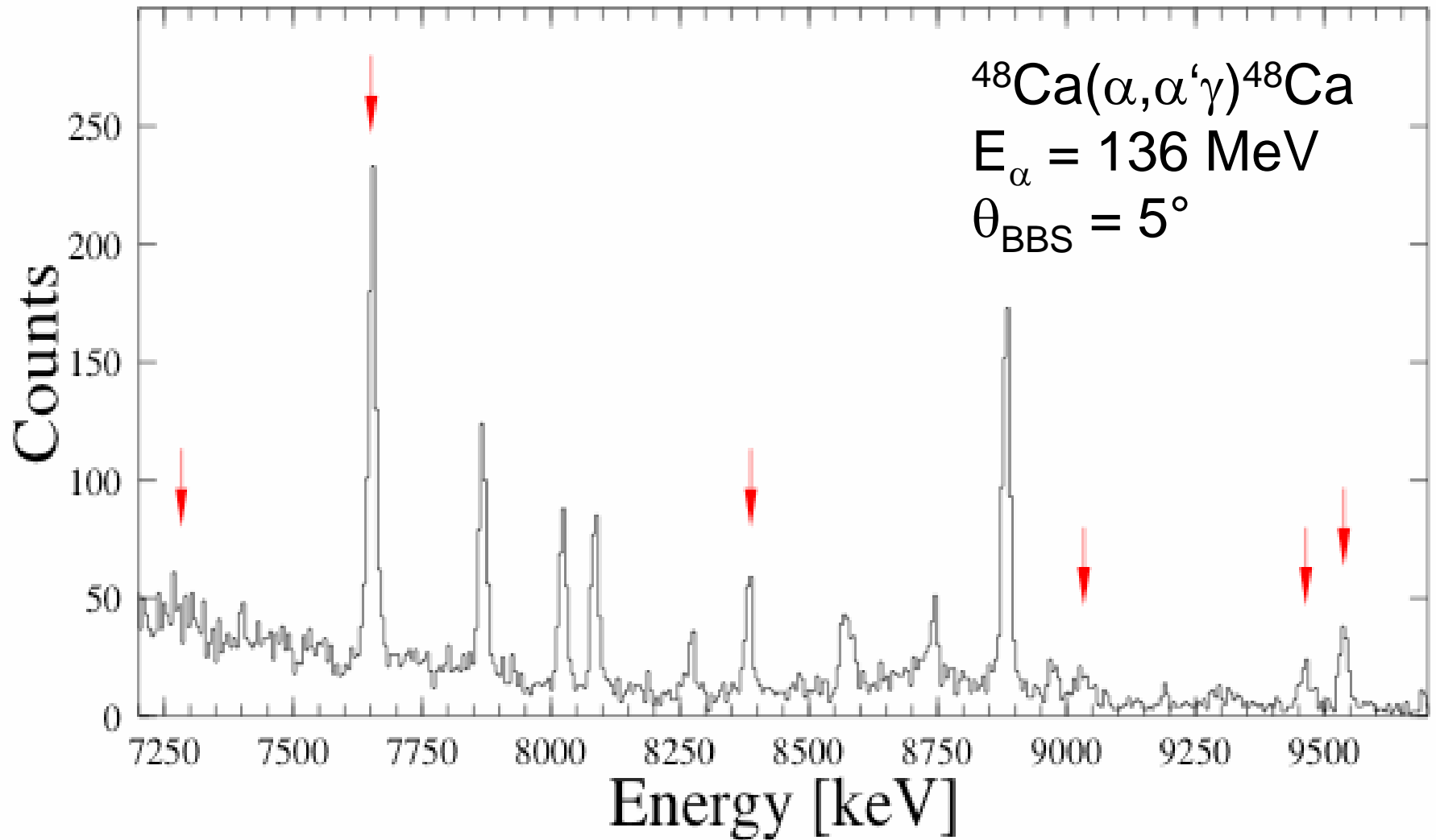
Total photopeak efficiency: $\sim 0.1\%$ at 9 MeV

Das neue ISOSPIN-Meter am KVI Groningen



D. Savran, H.J. Wörtche, M. Harakeh, K. Ramspeck, A. van den Berg, A.Z.

Das neue ISOSPIN-Meter am KVI Groningen



D. Savran, H.J. Wörtche, M. Harakeh, K. Ramspeck, A. van den Berg, A.Z.

E1-Stärke nahe der Schwelle - Ausblick

- **Systematische Stärkemessungen**

[(γ, γ') und (γ, n) @ S-DALINAC]

- **Isospin-Charakter**

[$(\alpha, \alpha'\gamma)$ @ KVI]

- **Verzweigungsverhältnisse**

[$(\vec{\gamma}, \gamma')$ @ HI γ S, Duke University, $(p, p'\gamma)$ @ Tandem]

→ Verbesserte Modelle für E1-Stärke

→ Verbesserter Input für Netzwerkrechnungen

Nukleare Astrophysik mit Photonen

- **„Direkte“ Experimente zur Nukleosynthese**
 - Photodissoziation im p-Prozess
 - Neutroneneinfang radioaktiver Kerne
- **Grenzen der „direkten“ Experimente**
- **Beispiele für indirekte Experimente**
 - Messung der Photoresponse
 - Isospincharakter der E1-Anregungen

Nur umfassende systematische „direkte“ und indirekte Studien können Erkenntnisse zur Nukleosynthese schwerer Atomkerne liefern

Nukleare Astrophysik mit Photonen

ELBE:

- Messungen der Photoresponse bis 20 MeV: (γ, γ') und Aktivierungsexperimente
- Ausnutzung des hohen Elektronenstroms
- Messung einzelner Paritäten

S-DALINAC:

- Messungen der Photoresponse bis 11 MeV: (γ, γ') und Aktivierungsexperimente
- Messungen mit dem Photonentagger bis 15 MeV

GSI:

- Photoresponse radioaktiver Kerne

HI γ S@Duke, AIST Tsukuba, ...

Vom Atomkern zur Supernova -

Die Synthese der Elemente in explosiven Szenarien

**M. Babilon, W. Bayer, D. Galaviz*, J. Hasper,
A. Kretschmer, K. Lindenberg, S. Müller,
D. Savran, K. Ramspeck, K. Sonnabend, S. Volz**

(Institut für Kernphysik, TU Darmstadt)

**T. Rauscher (Basel), N. Tsoneva, H. Lenske (Gießen),
H. Wörtche, A. van den Berg (Groningen),
S. Kamedzhiev, E. Litvinova (Obninsk)**

*Unterstützt durch die **DFG** (SFB 634 und Zi 510/2-2),
das BMBF (06 DA 115) und den DAAD (247211).*