

Die Wechselwirkung zwischen Photonen und Atomkern: Kernstruktur und Nukleosynthese



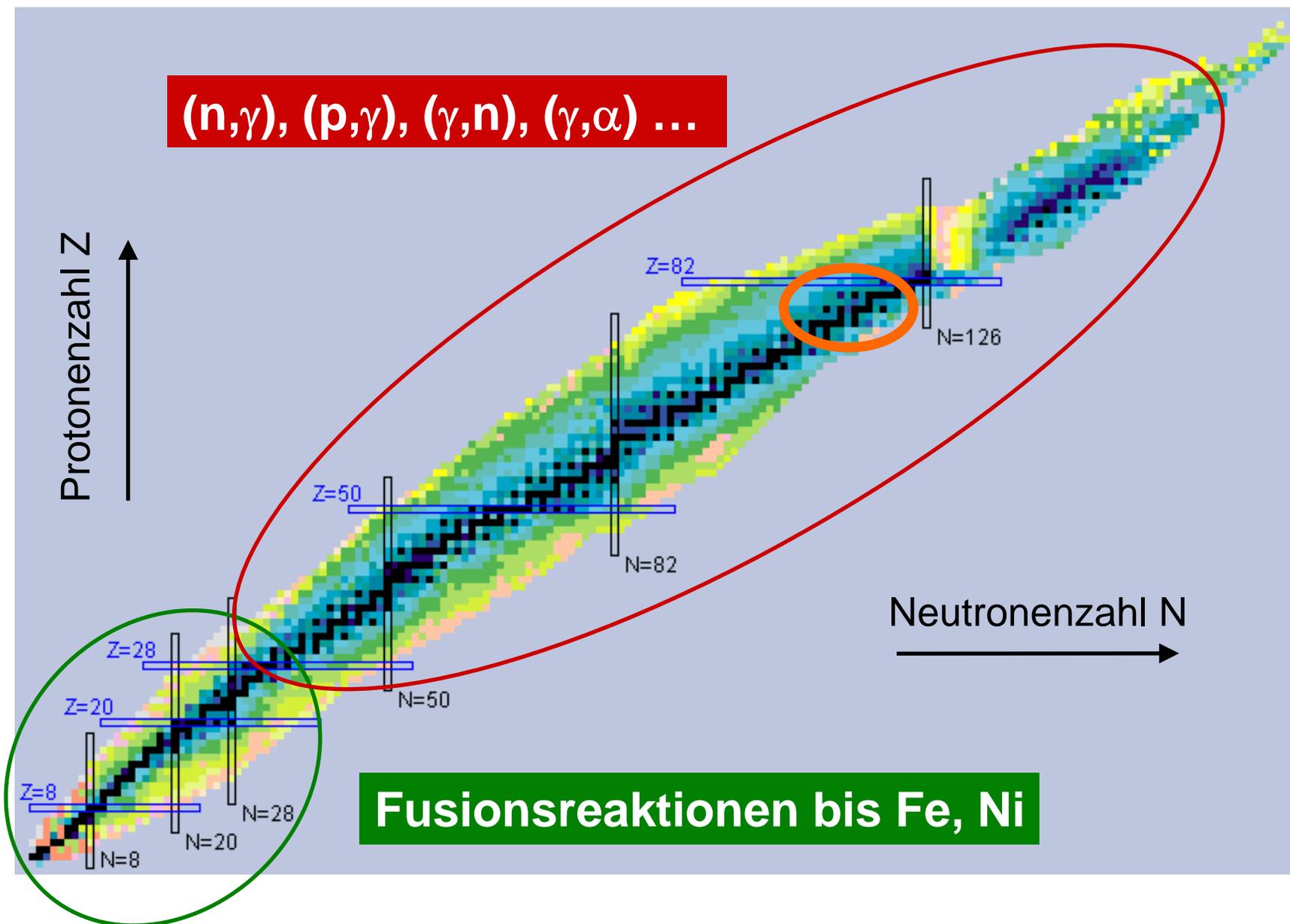
Andreas Zilges
Institut für Kernphysik
TU Darmstadt

CRAB NEBULA,
CHANDRA 04/2001

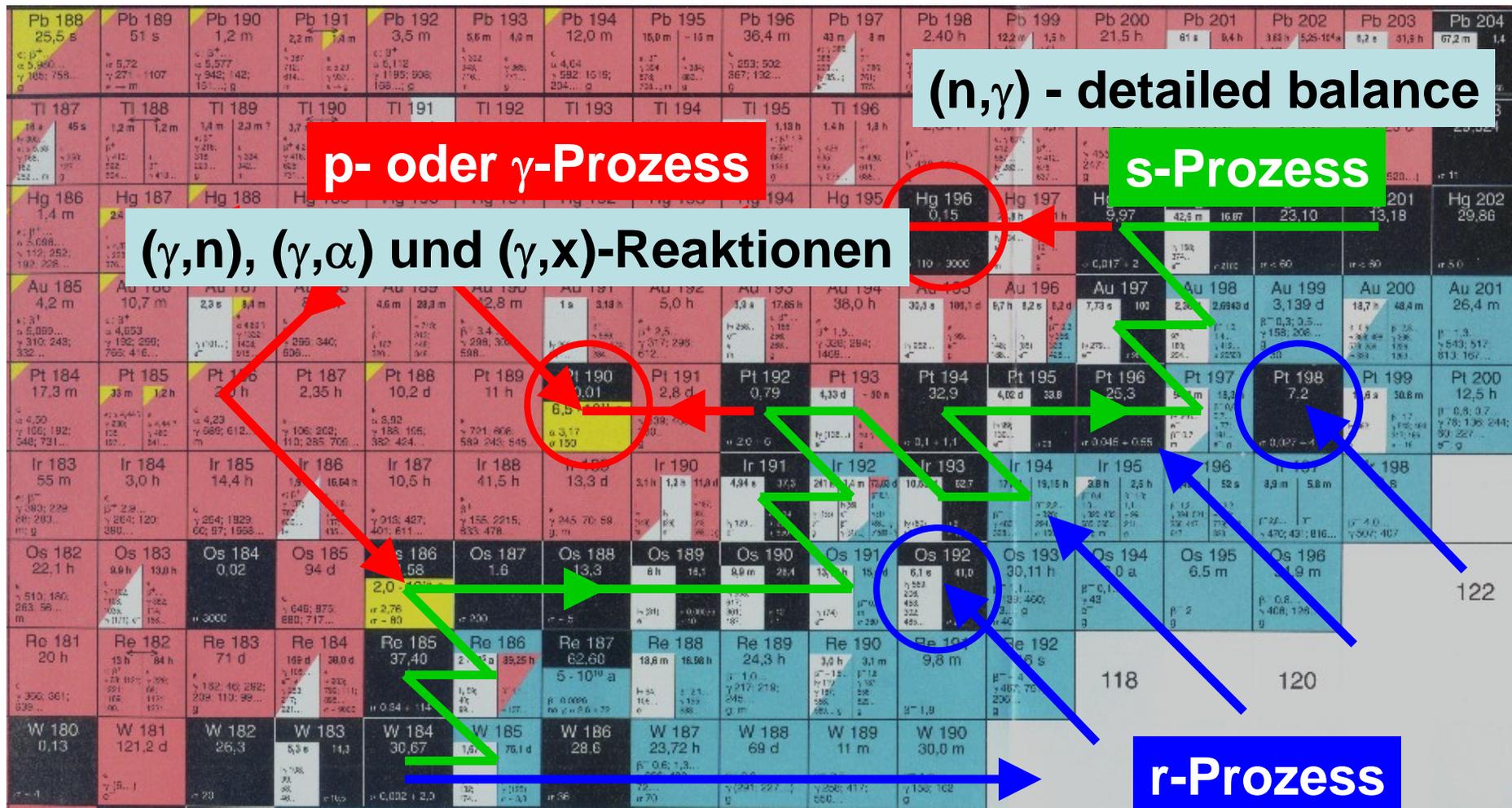
Die Wechselwirkung zwischen Photonen und Atomkern: Kernstruktur und Nukleosynthese

- **Nukleosynthese schwerer Kerne**
- **Photoresponse von Atomkernen**
- **EM Sonden und die Pygmydipolresonanz**
- **Ergänzende Experimente mit Hadronen**
- **Ausblick**

Synthese schwerer Atomkerne



Synthese schwerer Atomkerne



(n, γ) - detailed balance

p- oder γ -Prozess

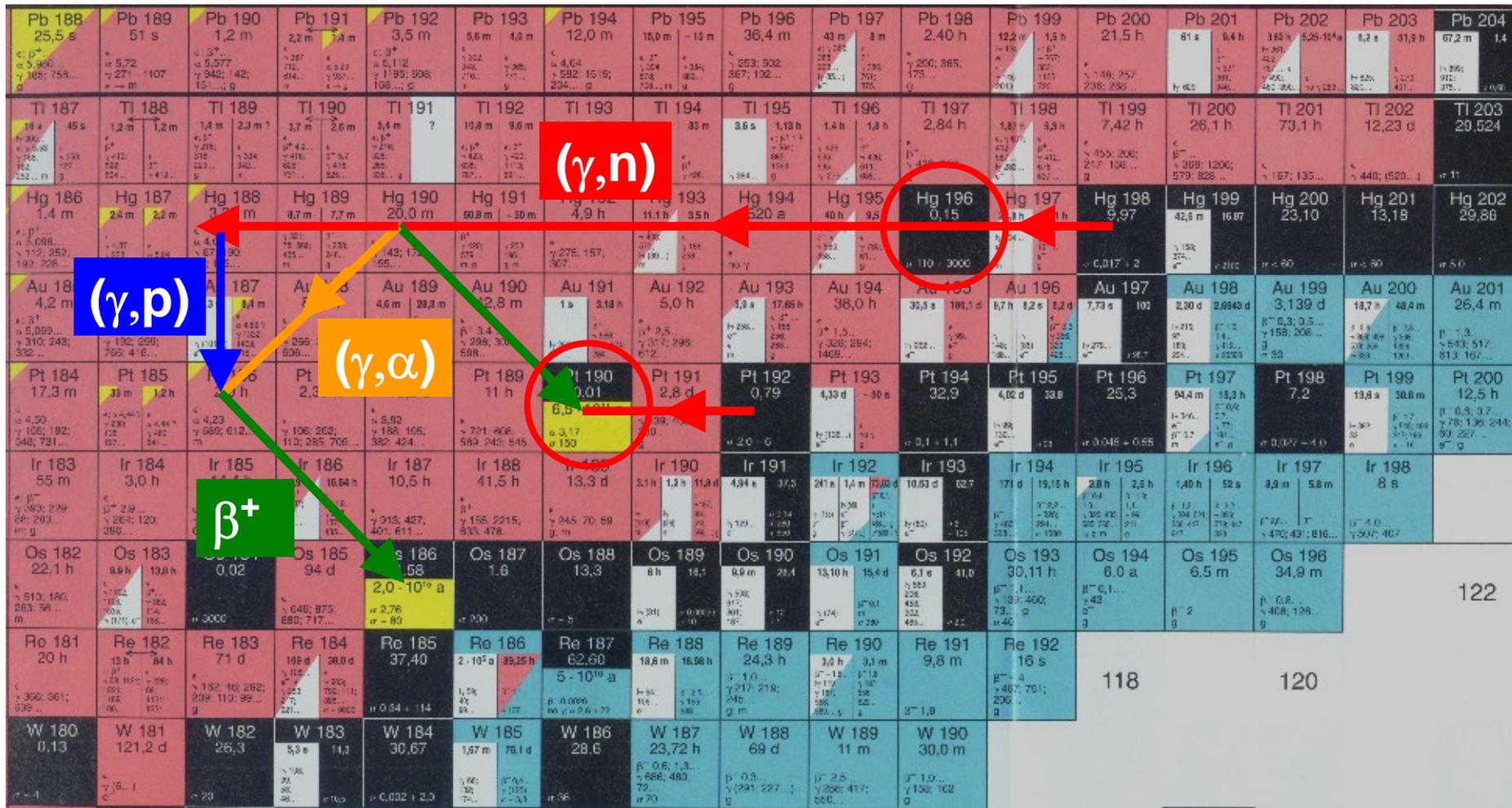
s-Prozess

(γ ,n), (γ , α) und (γ ,x)-Reaktionen

r-Prozess

(n, γ) \leftrightarrow (γ ,n)-Gleichgewicht

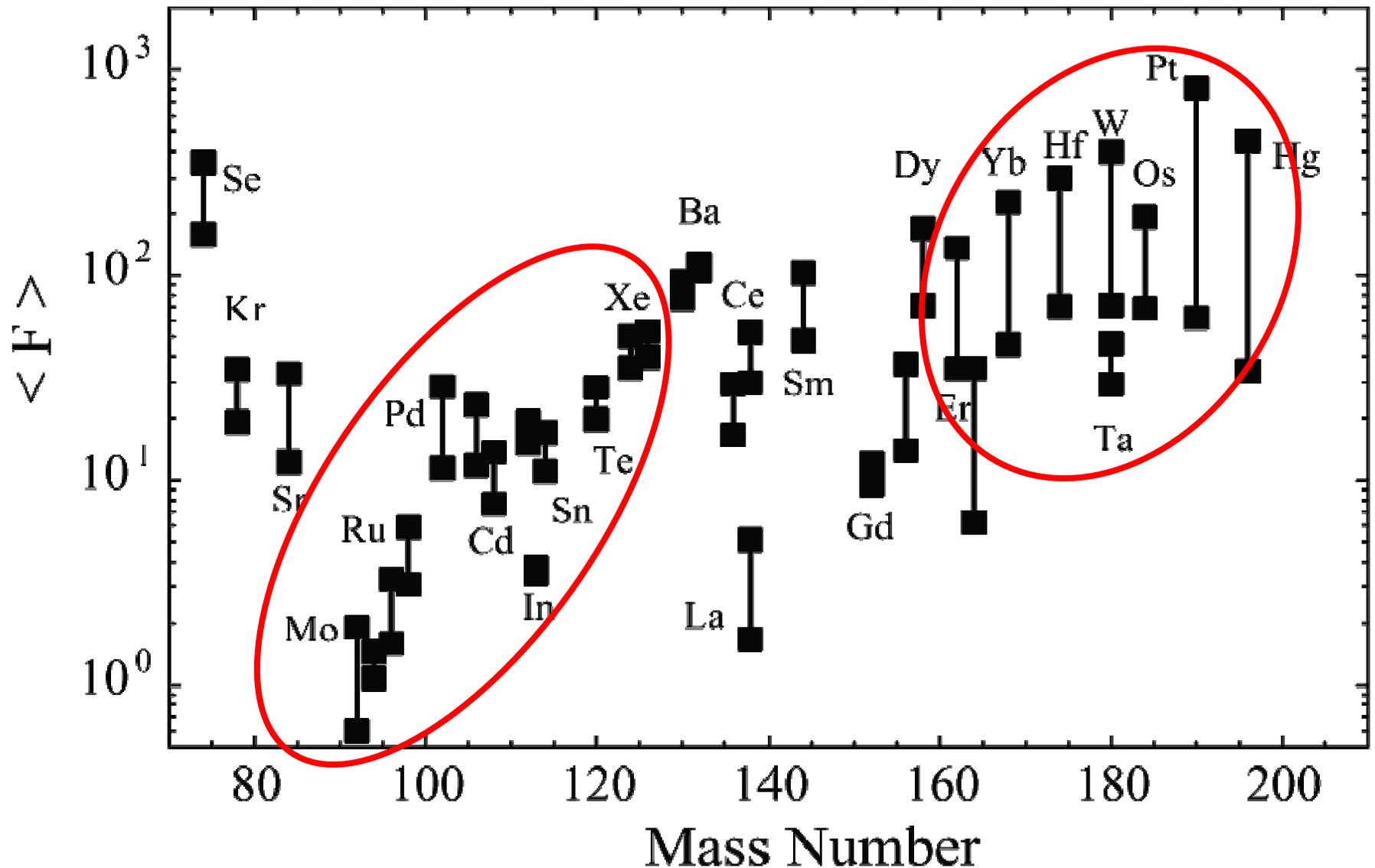
Kernreaktionen und Zerfälle im p-Prozess



Kernphysikalische Größen im p-Prozess-Netzwerk

- Grundzustandsmassen
- Eigenschaften angeregter Zustände
- Zustandsdichten
- Photoresponse (γ, γ') , (γ, n) , (γ, α) , (γ, p)
- Optische Potenziale

Häufigkeit von p-Kernen: Modell vs. Experiment



Woher kommen die hochenergetischen Photonen ?

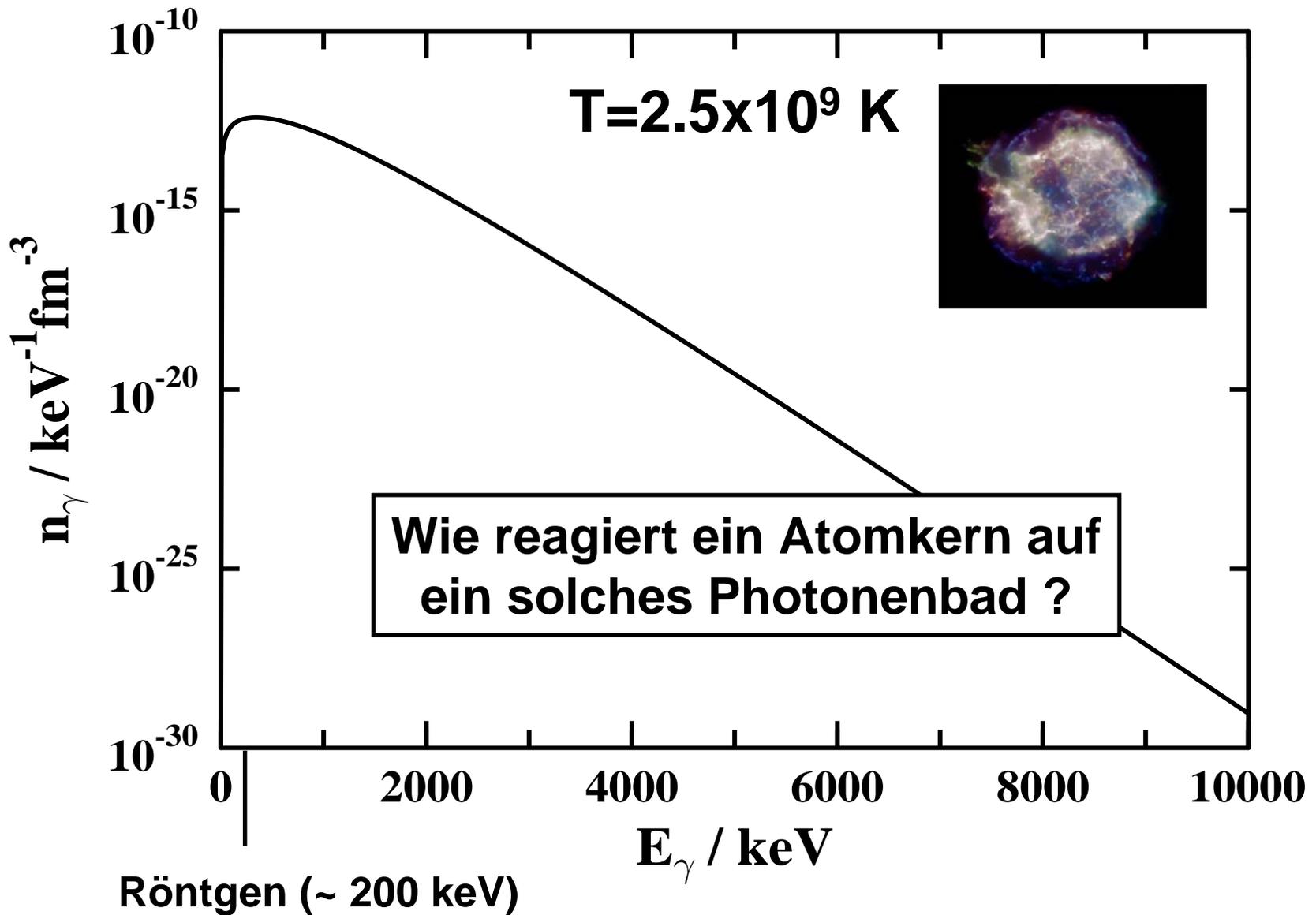
CASSIOPEIA A,
CHANDRA 01/2000

A Chandra X-ray image of the Cassiopeia A supernova remnant. The image shows a complex, multi-colored structure with a bright, irregularly shaped core. The colors range from blue and purple to yellow and white, indicating different temperatures and densities of the gas. The structure is roughly circular but has a highly textured, filamentary appearance.

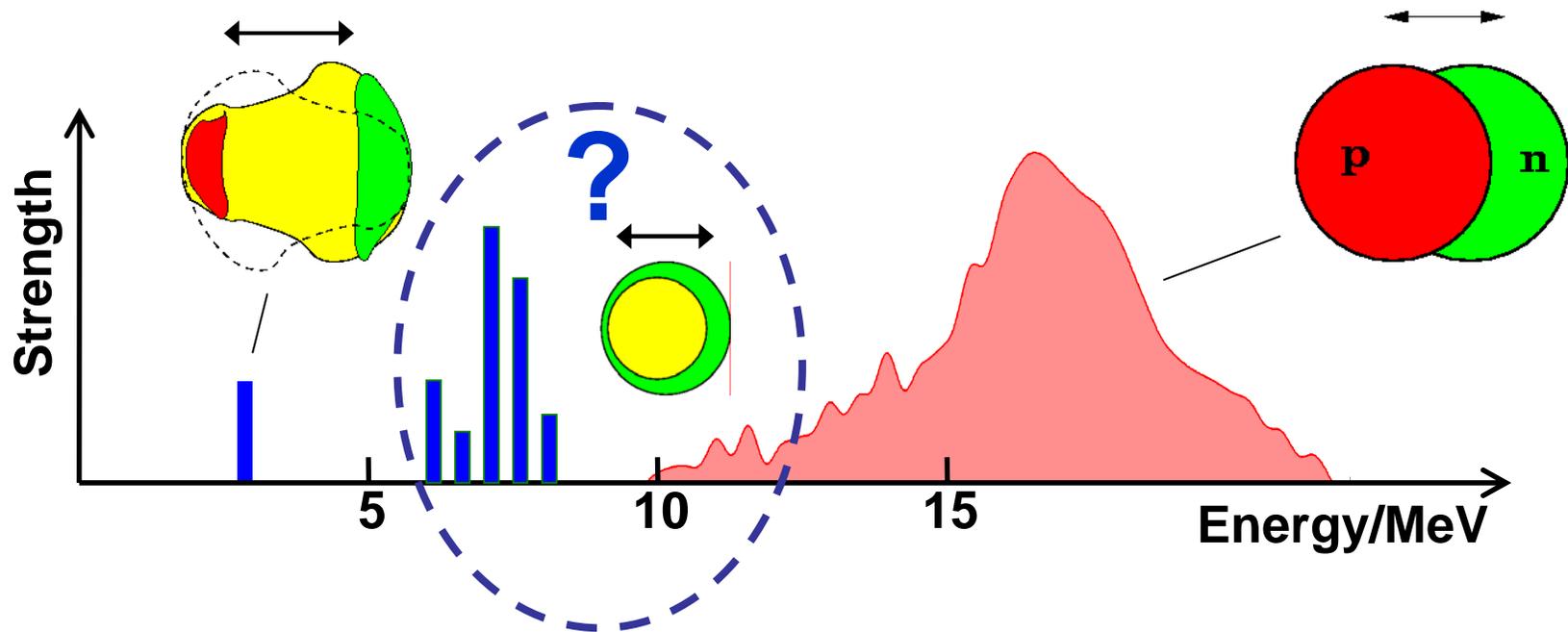
Temperaturen bis zu 10^{10} K \sim 800 keV

Ultra High Energy Cosmic Rays ? (E. Khan, Astropart. Phys. 23 (2005) 191)

Planck-Spektrum bei 2.5×10^9 Kelvin

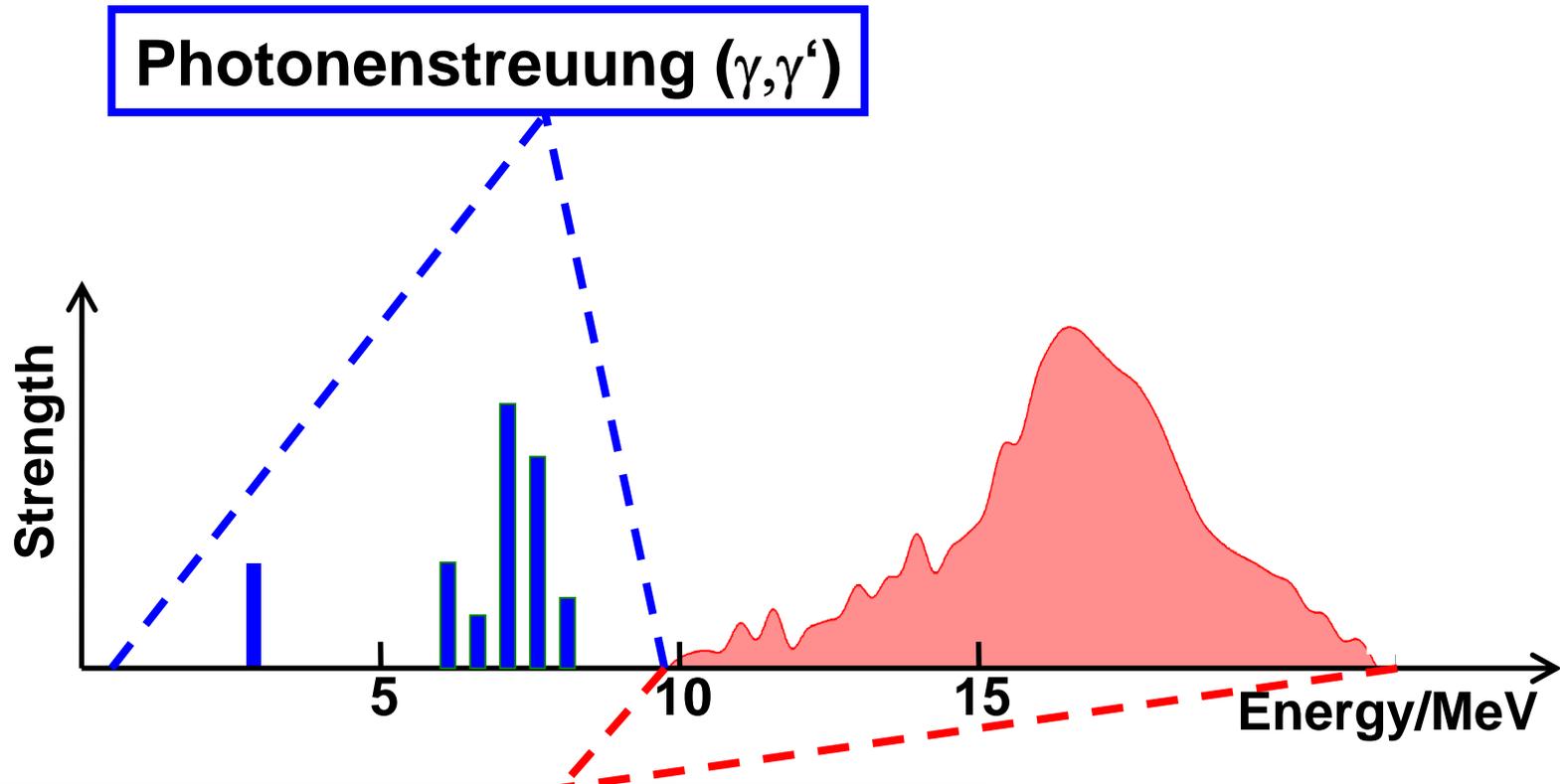


Die Photoresponse von Atomkernen – E1-Stärke



- Dipolriesenresonanz: $E_x \sim 18$ MeV, $B(E1) \sim 10$ W.u.
- Zwei-Phononen-Anregung: $E_x \sim 3$ MeV, $B(E1) \sim 10^{-2}$ W.u.
- **Pygmydipolresonanz ?**
 - F. Iachello, PLB 160 (1985) 1
 - G. Colò et al., PLB 485 (2000) 362
 - D. Vretenar et al., PLB 487 (2000) 334
 - N. Tsoneva, H. Lenske et al., PLB 586 (2004) 273

Untersuchung mit elektromagnetischen Sonden



Photodissoziation (γ, n), (γ, p), ...

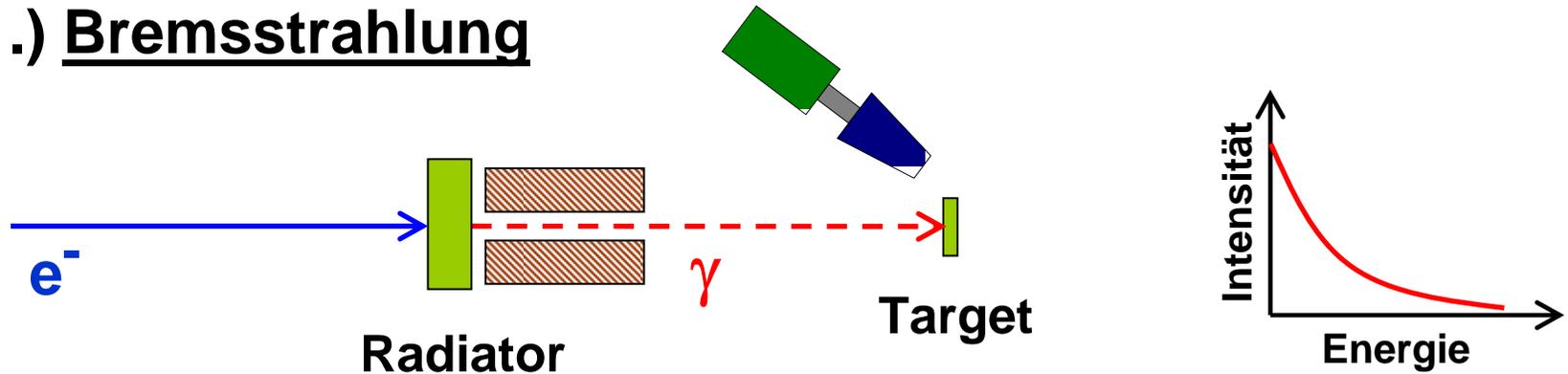
Es können reelle und virtuelle Photonen genutzt werden!

stabile Kerne

stabile und radioaktive Kerne

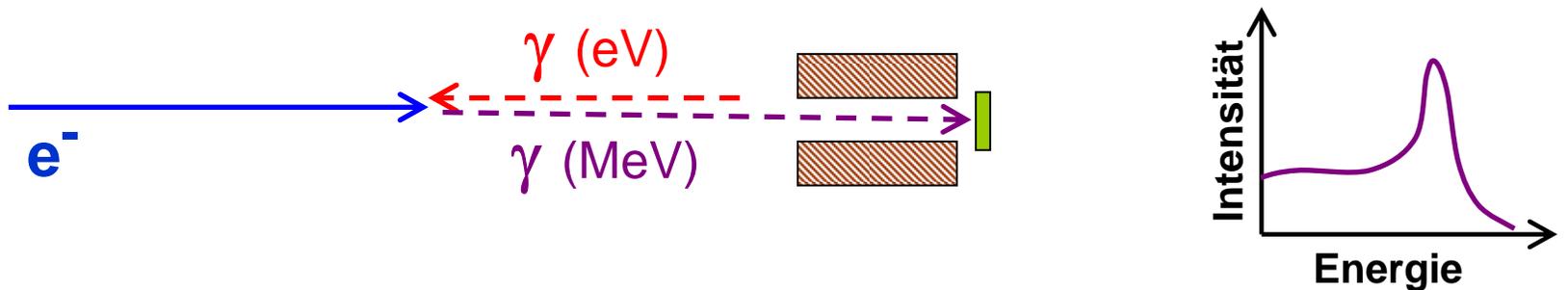
Erzeugung reeller Photonen

1.) Bremsstrahlung



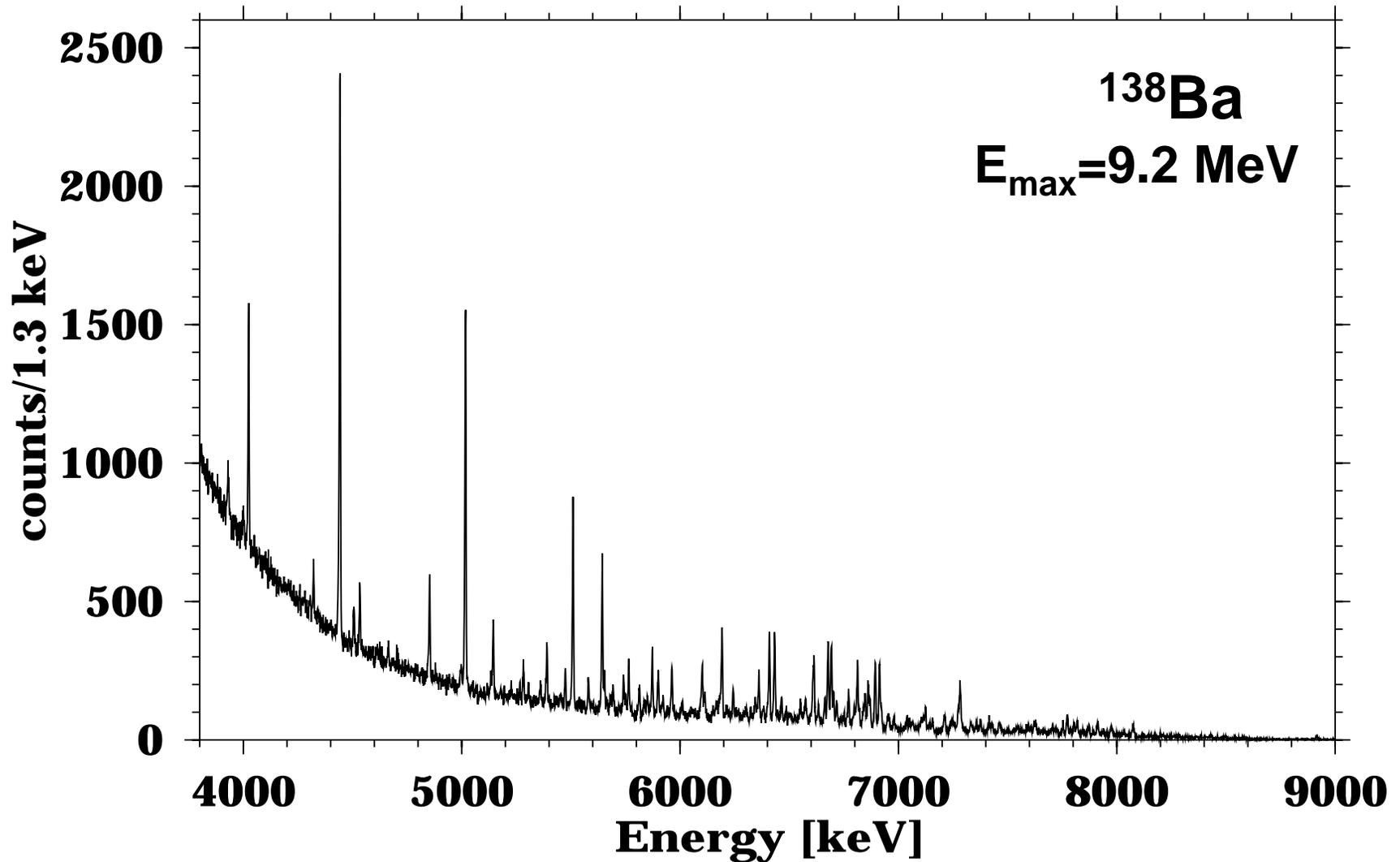
Review: U. Kneissl, H.H. Pitz, and A.Z., *Prog. Part. Nucl. Phys.* 37 (1996) 349

2.) Laser Compton Backscattering



T. Carman et al., *NIM A* 378 (1996) 1

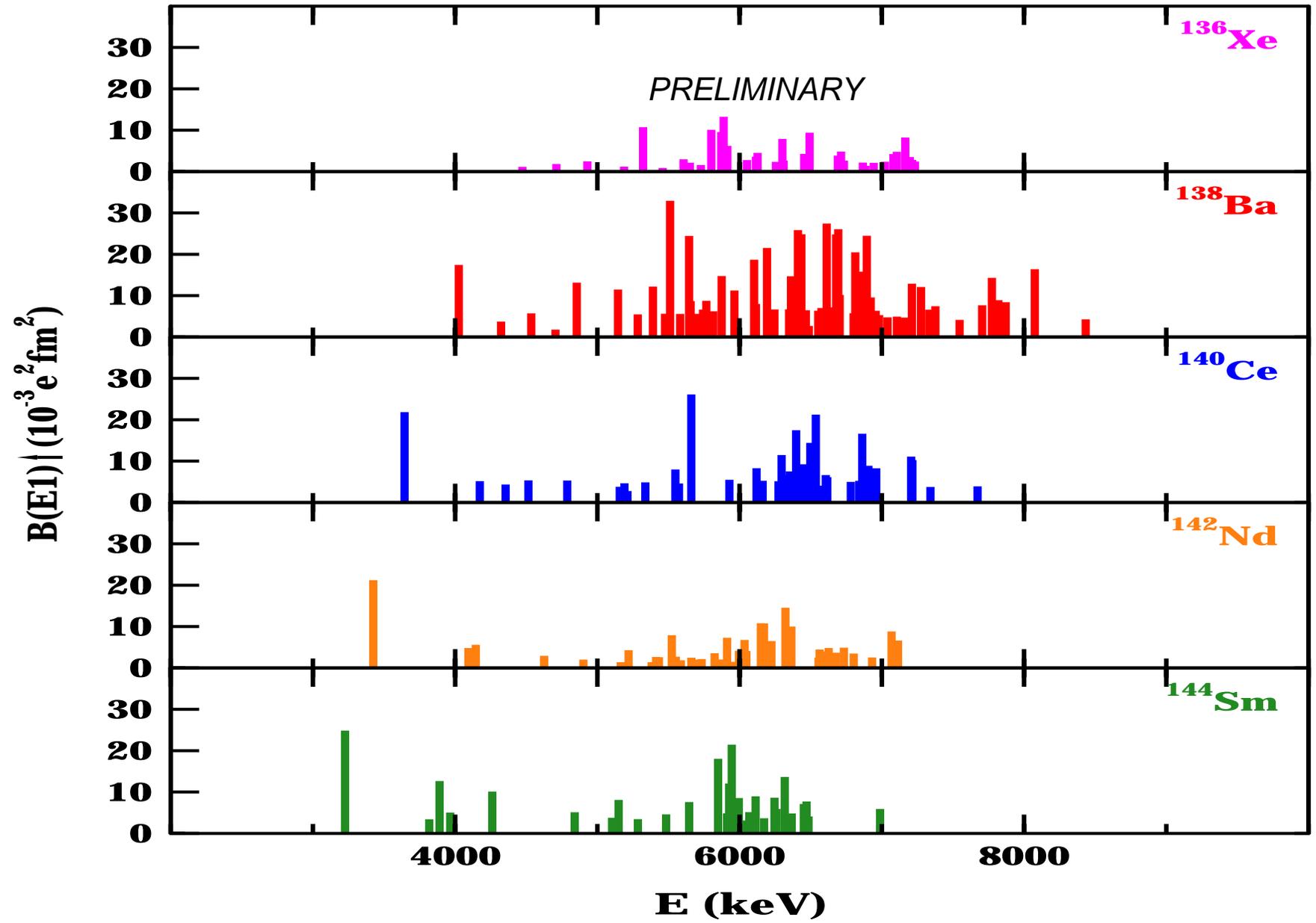
Photonenstreuung an ^{138}Ba



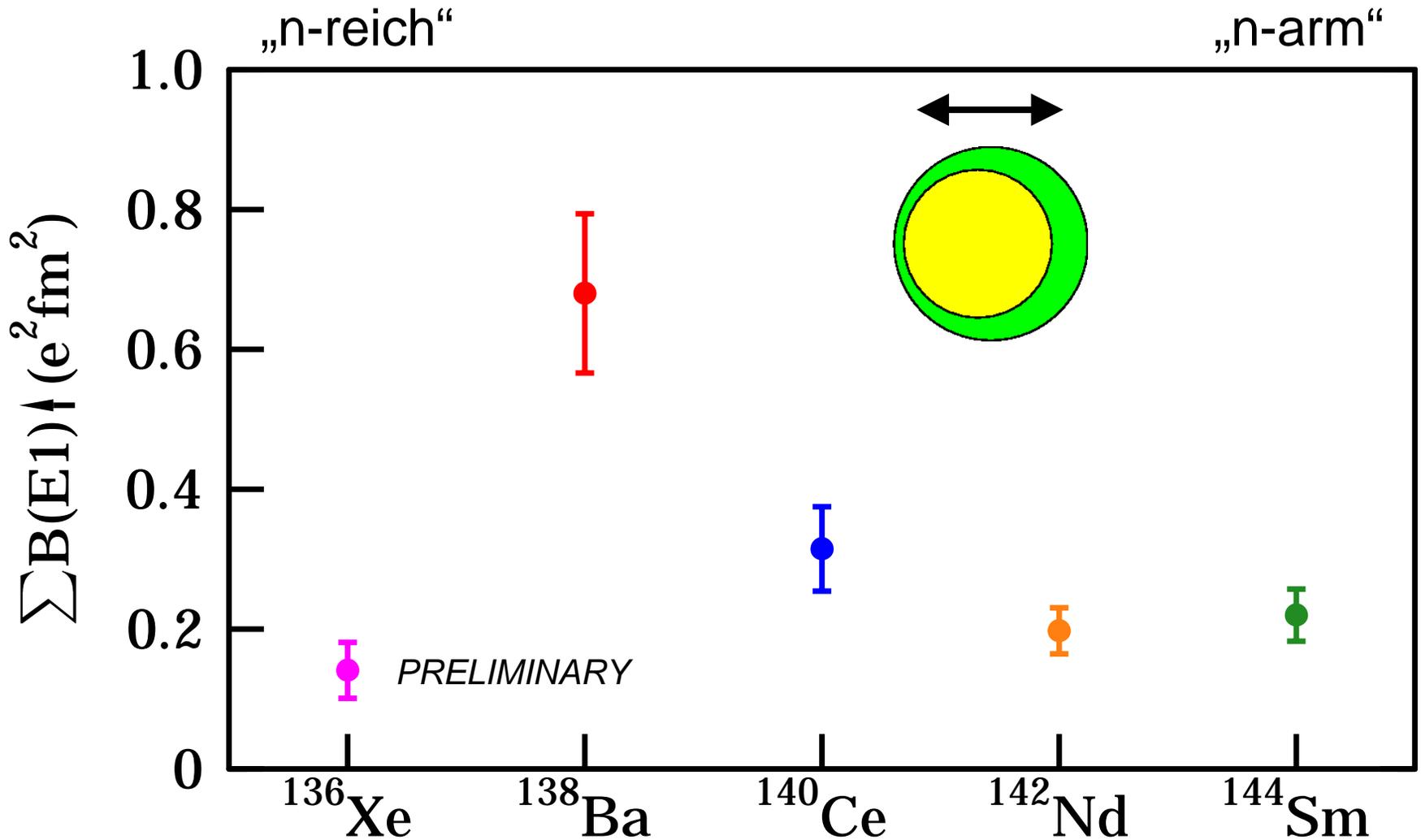
Reelle Photonen

(γ, γ') : E1-Stärke in stabilen N=82-Kernen

Reelle Photonen



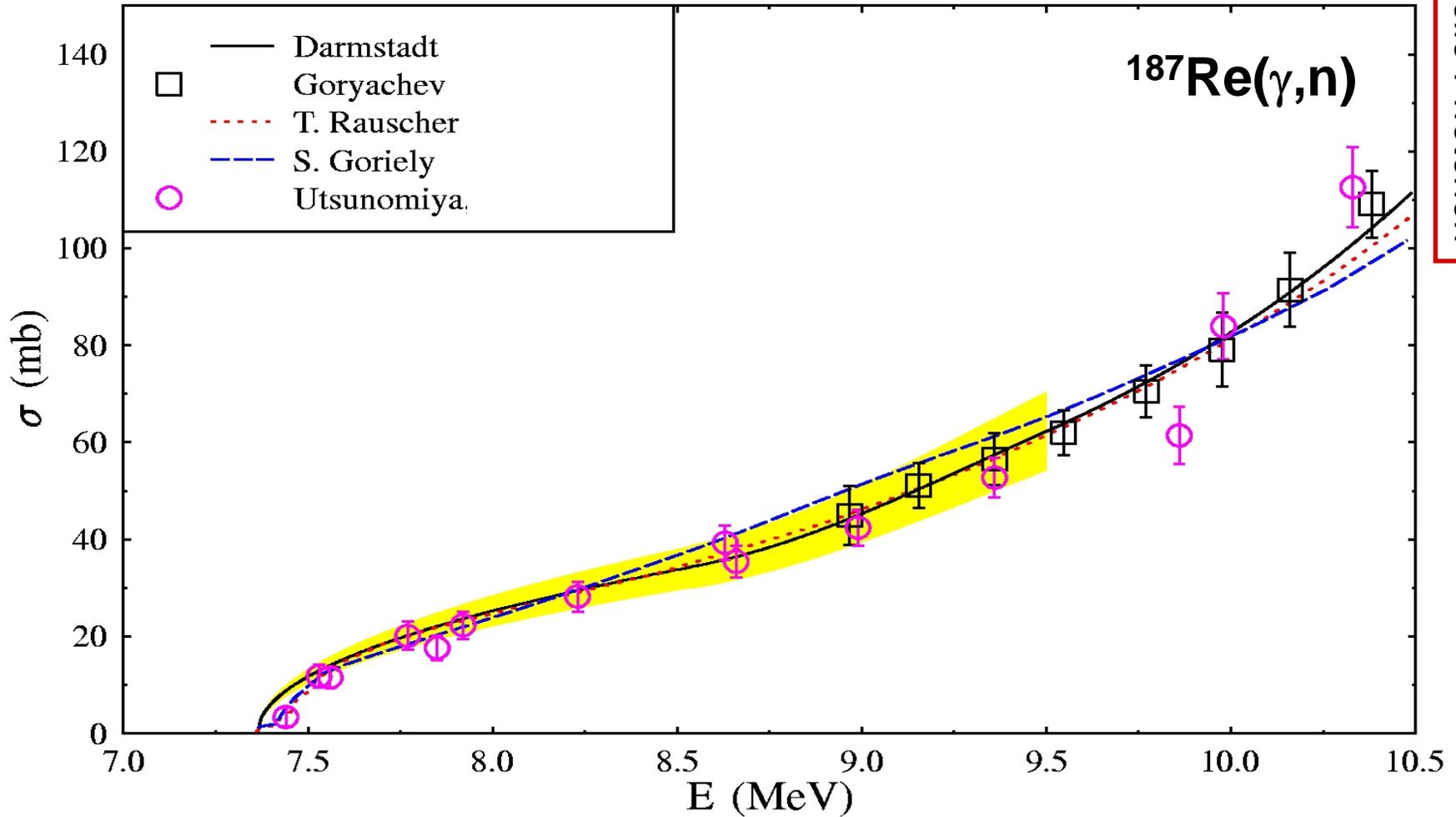
(γ, γ') : E1-Stärke unterhalb von 9 MeV



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

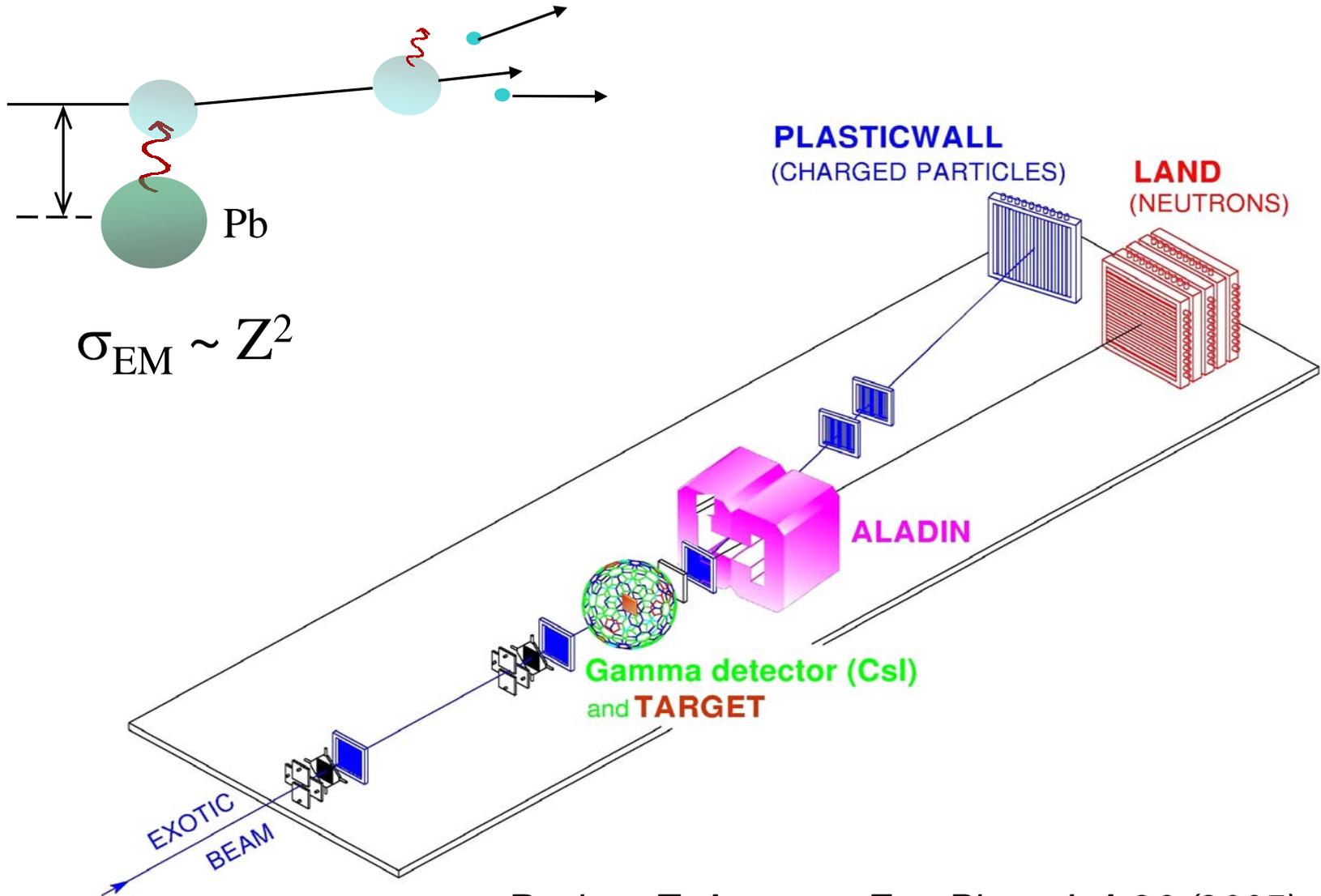
S. Volz, N. Tsoneva et al. *Nucl. Phys. A* **779** (2006) 1

Oberhalb der Teilchenschwelle: (γ, n) an stabilen Kernen



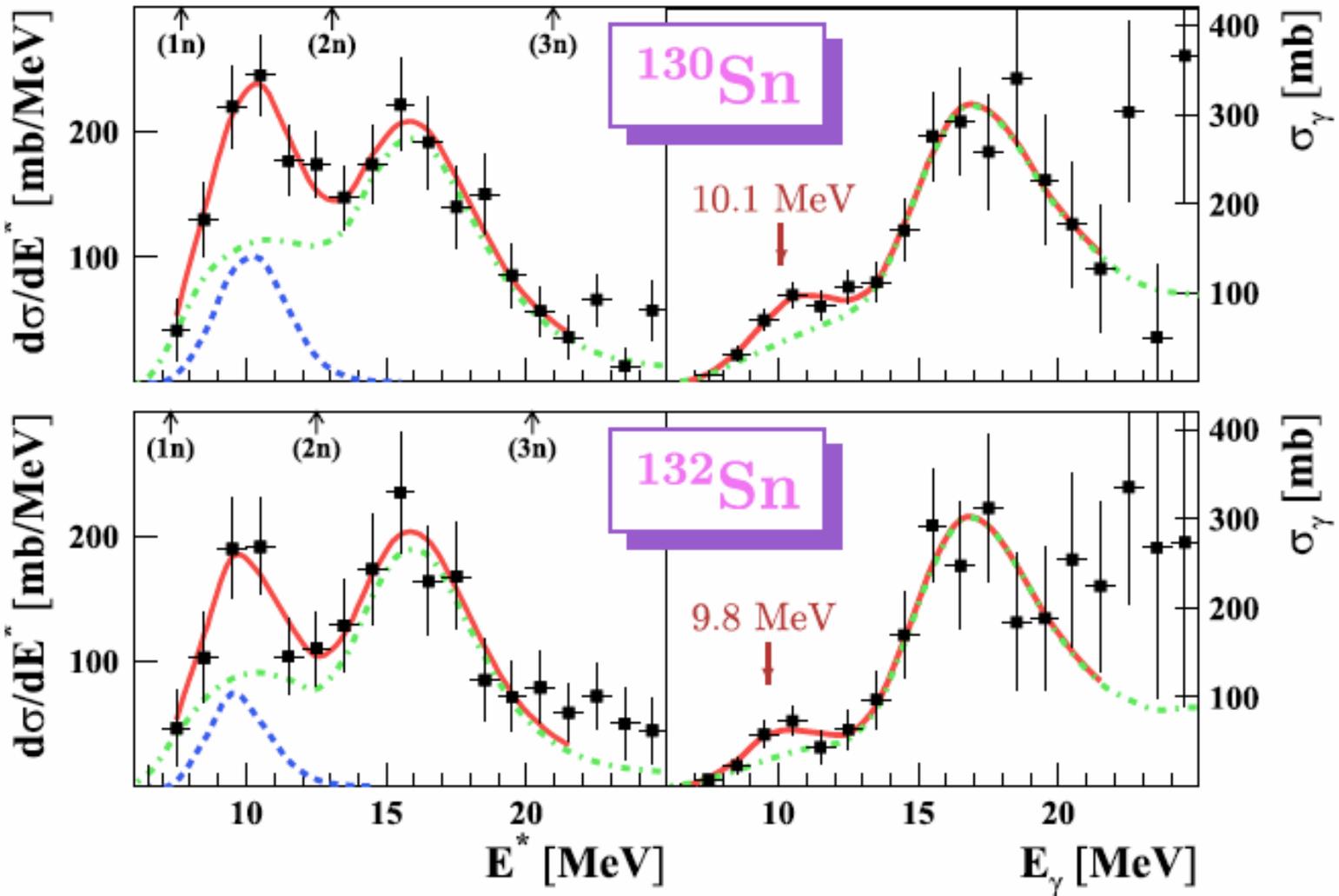
S. Müller et al., Phys. Rev. C 73 (2006) 025804

Erzeugung virtueller Photonen



Review: T. Aumann, *Eur. Phys. J. A* 26 (2005) 441

Oberhalb der Teilchenschwelle: E1-Stärke in exotischen Kernen



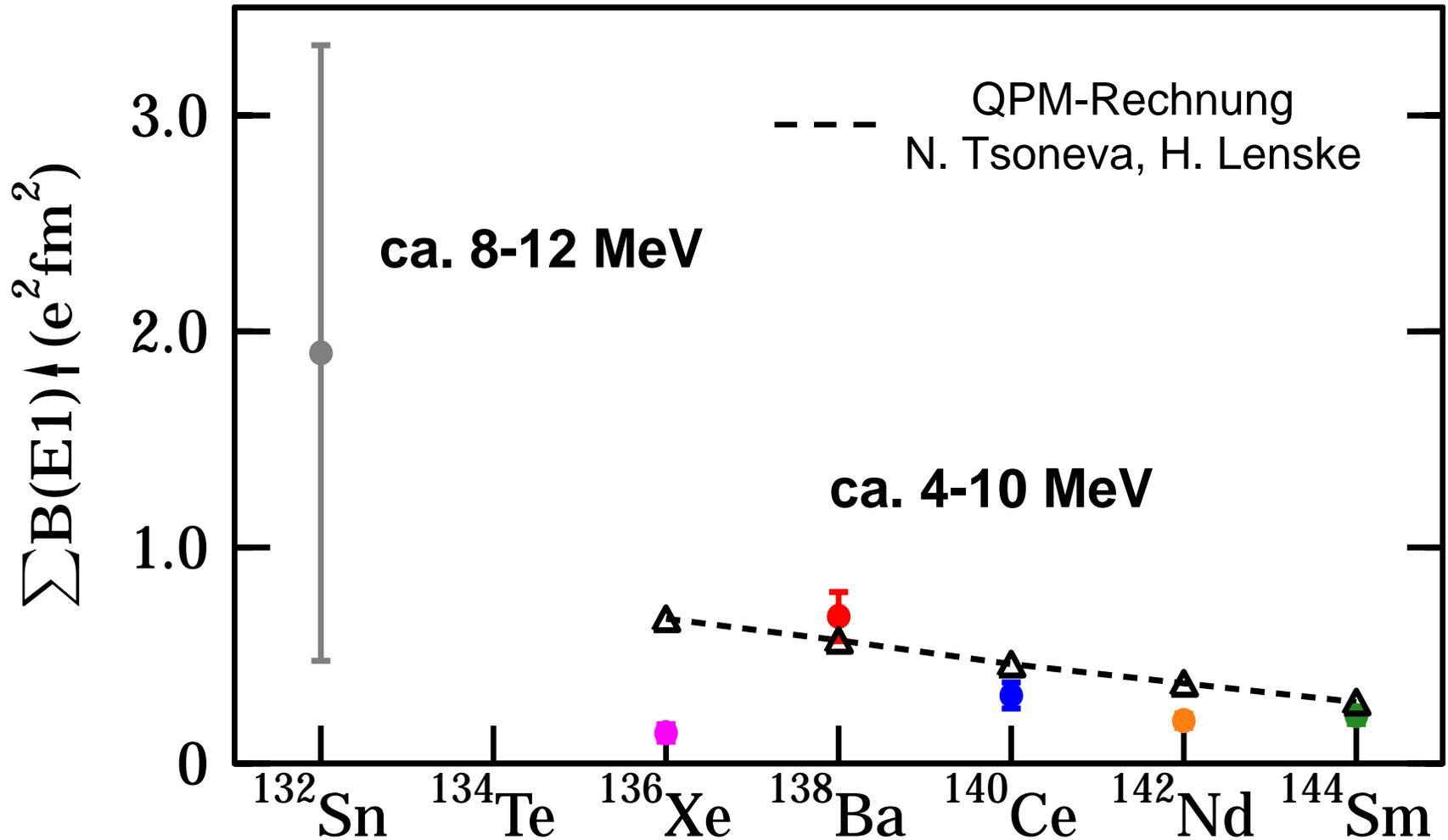
Virtuelle Photonen

Ergebnisse der Experimente mit Photonen

- In stabilen Kernen beobachtet man um 6 MeV resonanzartige E1-Stärke unbekannter Struktur mit $\Sigma B(E1) \sim 1\%$ der IV-EWSR
- In neutronenreichen Kernen beobachtet man zusätzliche Stärke im „Tail“ der GDR
- Zusammenhang zwischen der Stärke unterhalb und oberhalb der Schwelle unklar
- Zusammenhang zwischen der Stärke in stabilen und exotischen Kernen unklar

Was sagen die Modellrechnungen?

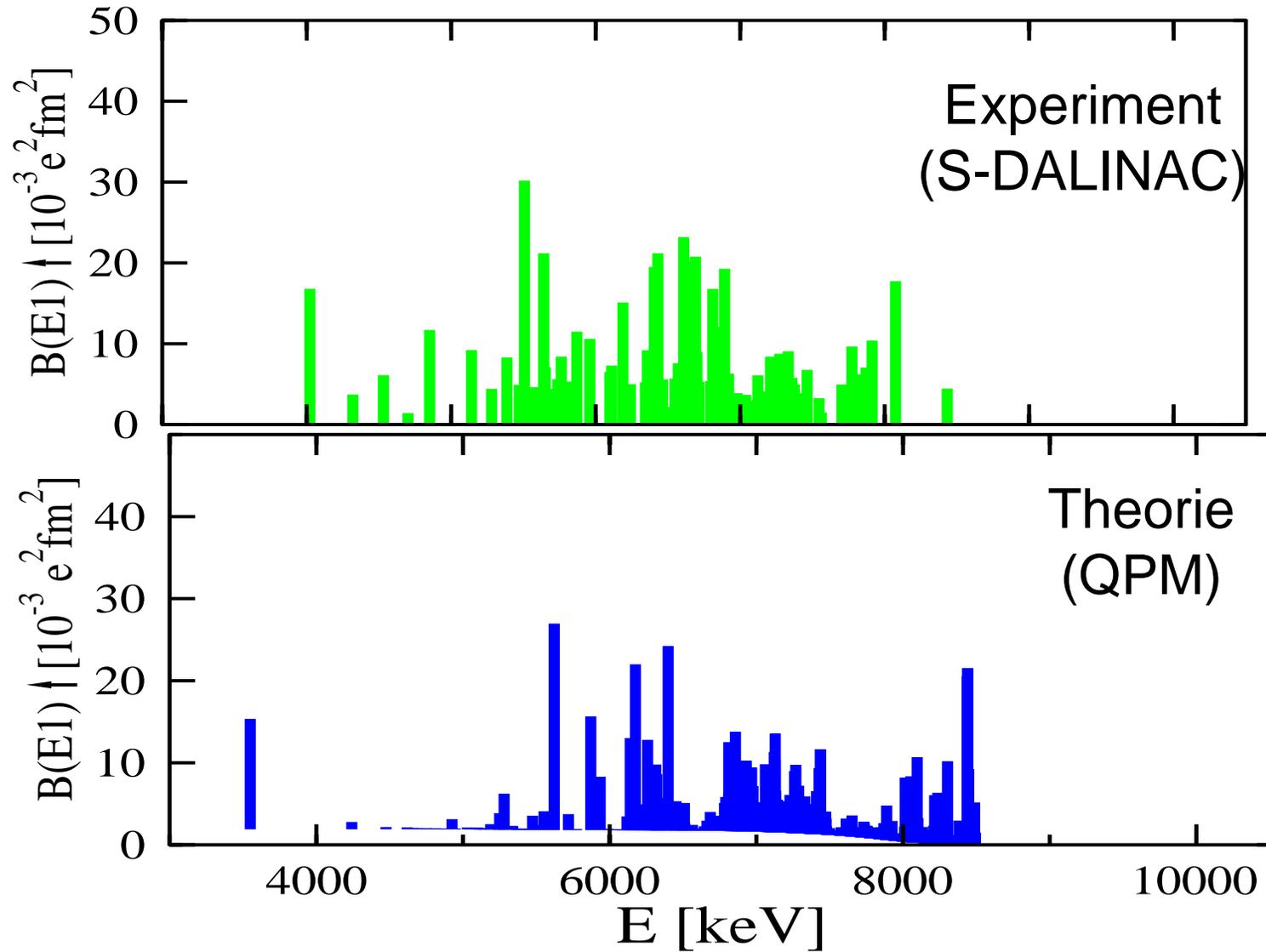
QPM-Rechnungen für die summierte Stärke



S. Volz, N. Tsoneva et al., *Nucl. Phys. A* **779** (2006) 1

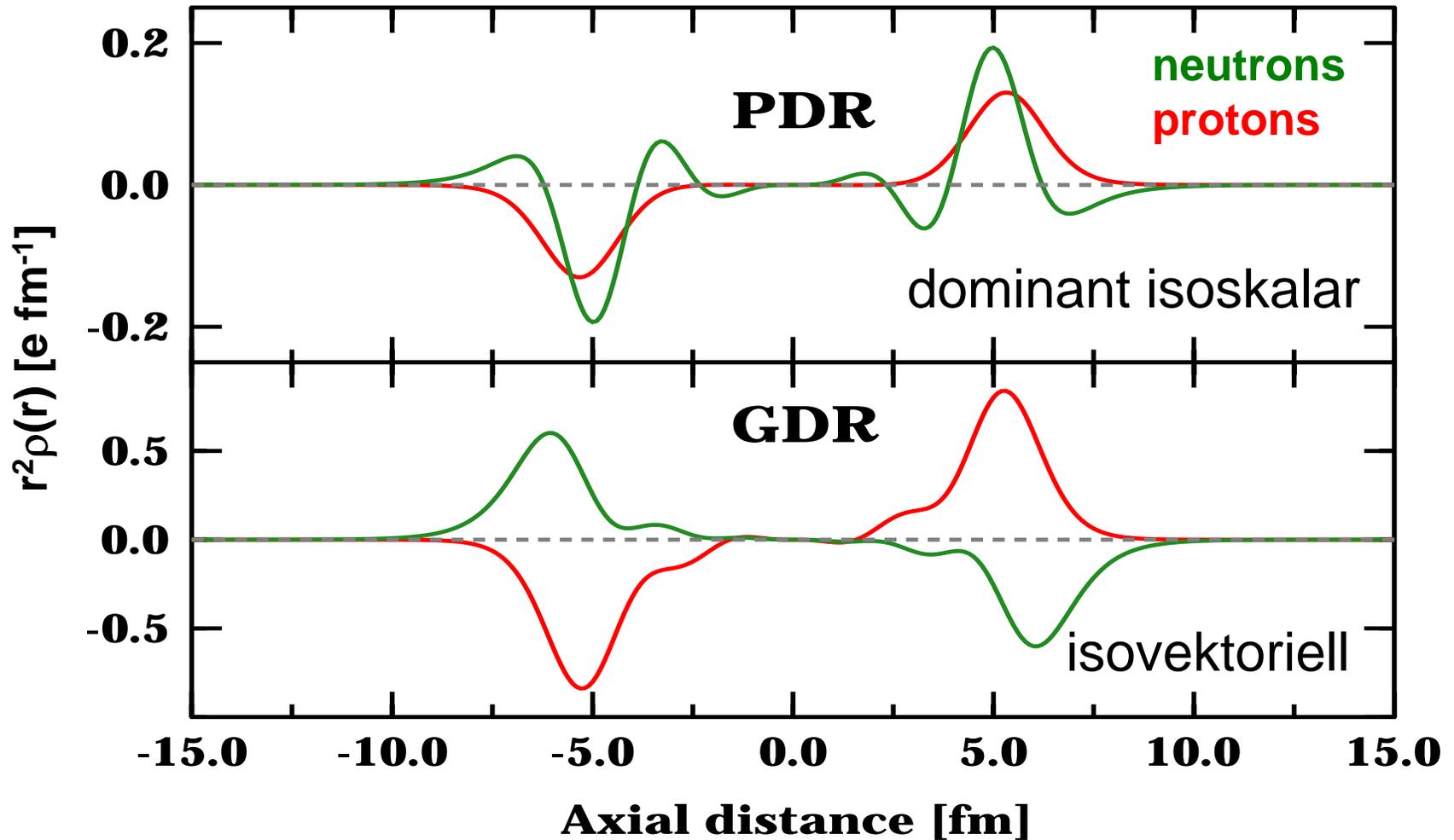
P. Adrich et al., *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 132501

QPM-Rechnungen für ^{138}Ba



V. Ponomarev and J. Wambach, priv. comm.

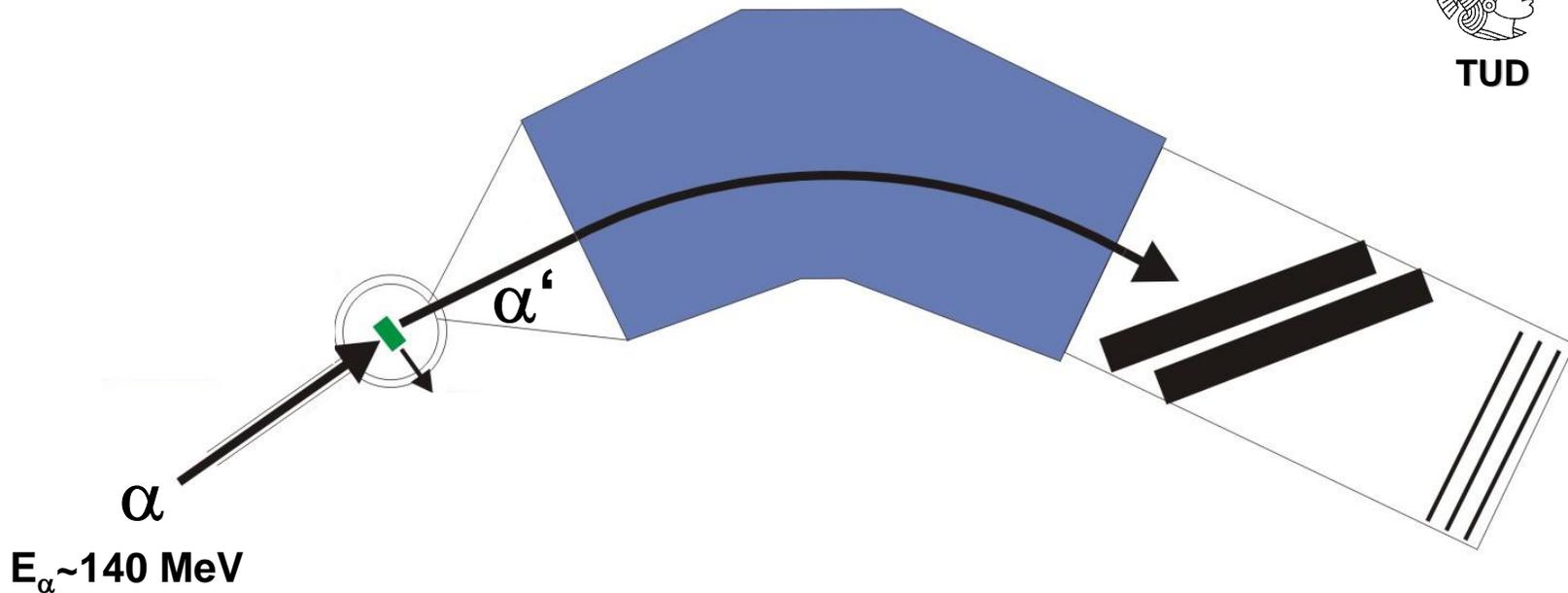
QPM-Rechnungen für ^{138}Ba



Um diese Struktureigenschaft zu testen sind elektromagnetische Sonden alleine nicht ausreichend !

Untersuchung der PDR mit α -Streuung

Big-Bite-Spektrometer (BBS)



**European Supernova Detector
zur Messung von α -Teilchen,
 $\Delta E \sim 30\text{-}200$ keV**

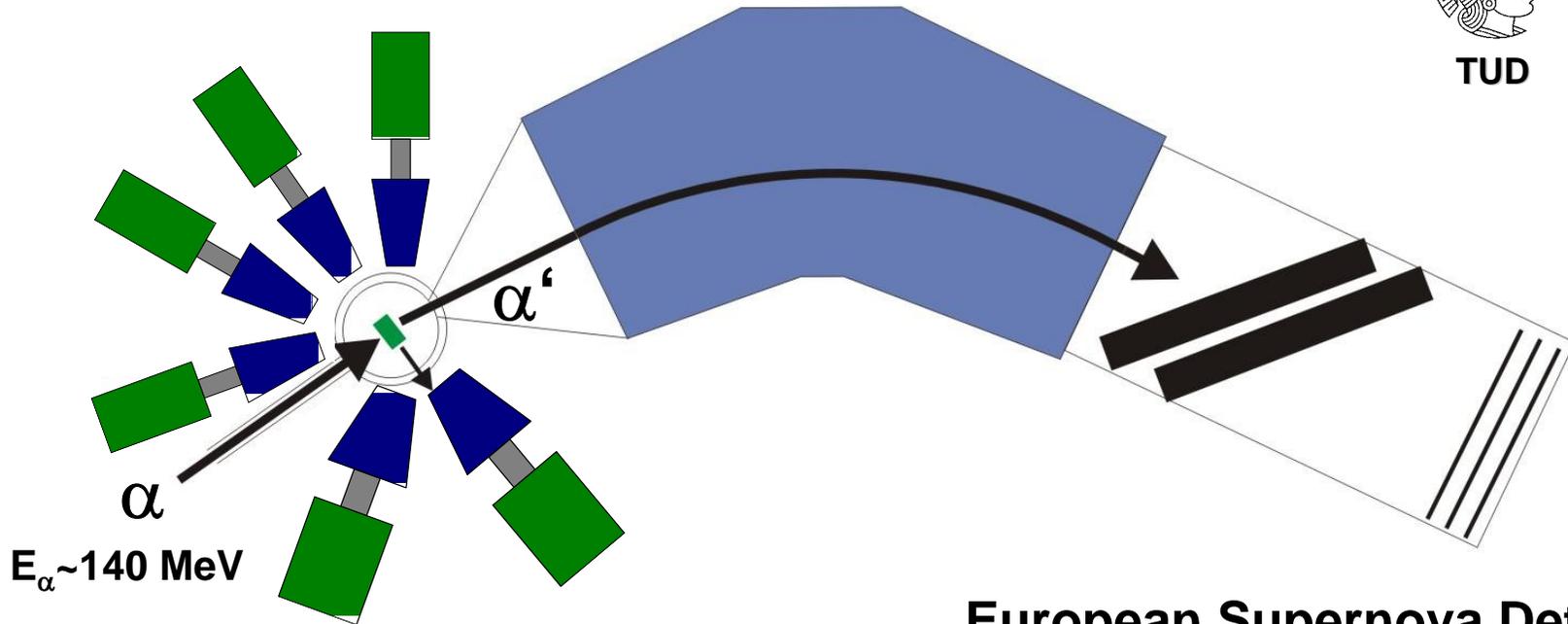
(γ, γ') versus (α, α')

	(γ, γ') (EM Wechselwirkung)	(α, α') * (Starke Wechselwirkung)
Multipolarität	E1, M1, (E2) (Grundzustands- zerfallsbreite Γ_0)	E0, E1, E2, E3 (Winkelverteilung)
Isospin	isovektoriell	isoskalar
“Ort”	“ganzer” Kern ($kR \ll 1$)	Oberfläche (strong absorption)
Energieauflösung (@ $E_x = 8$ MeV)	7-10 keV	30-200 keV

* 140 MeV und Vorwärtswinkelstreuung

Untersuchung der PDR mit α -Streuung

Big-Bite-Spektrometer (BBS)

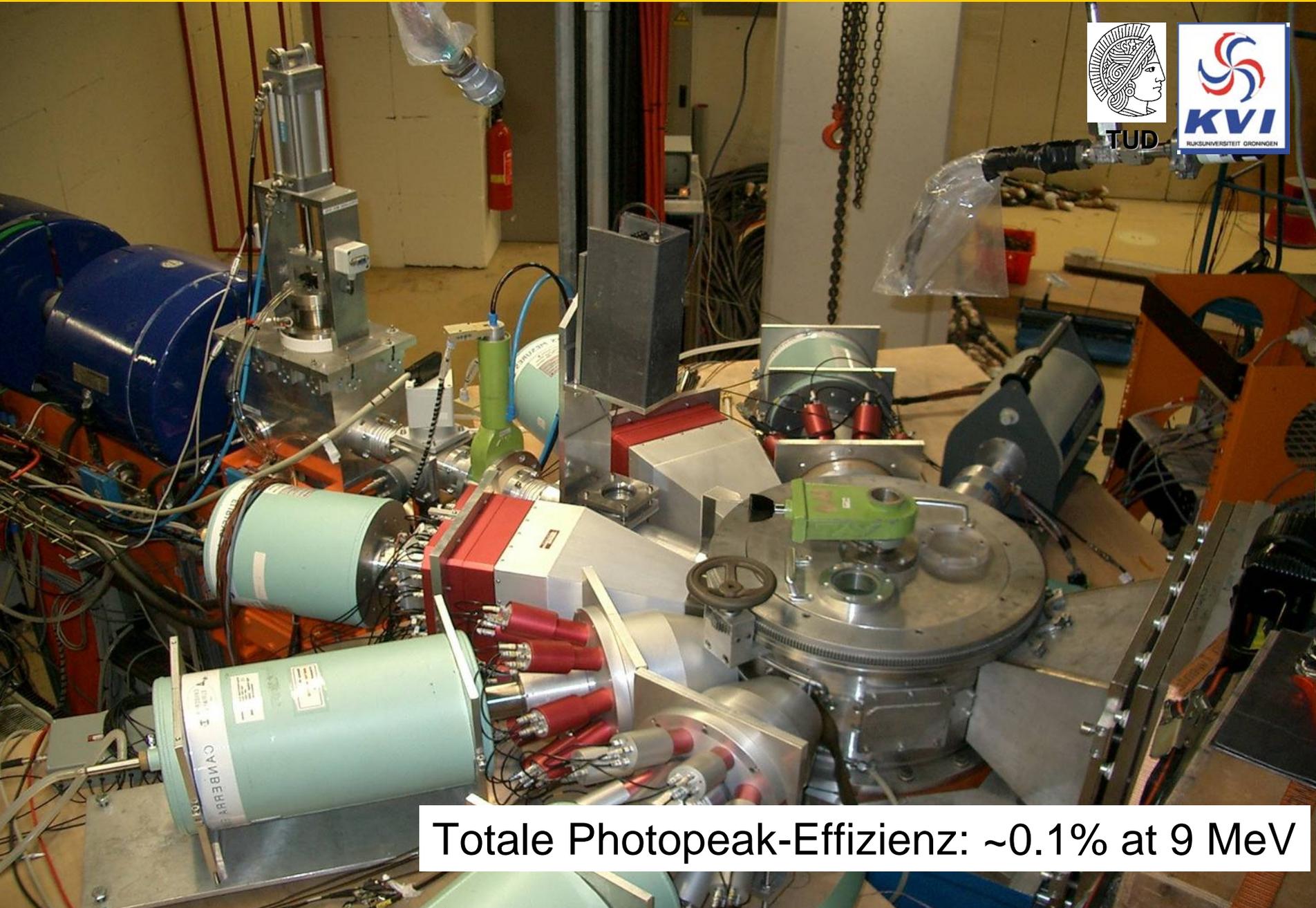


European Supernova Detector
zur Messung von α -Teilchen,
 $\Delta E \sim 30\text{-}200 \text{ keV}$

Ge Detektor-Array
zur Messung der γ -Zerfälle

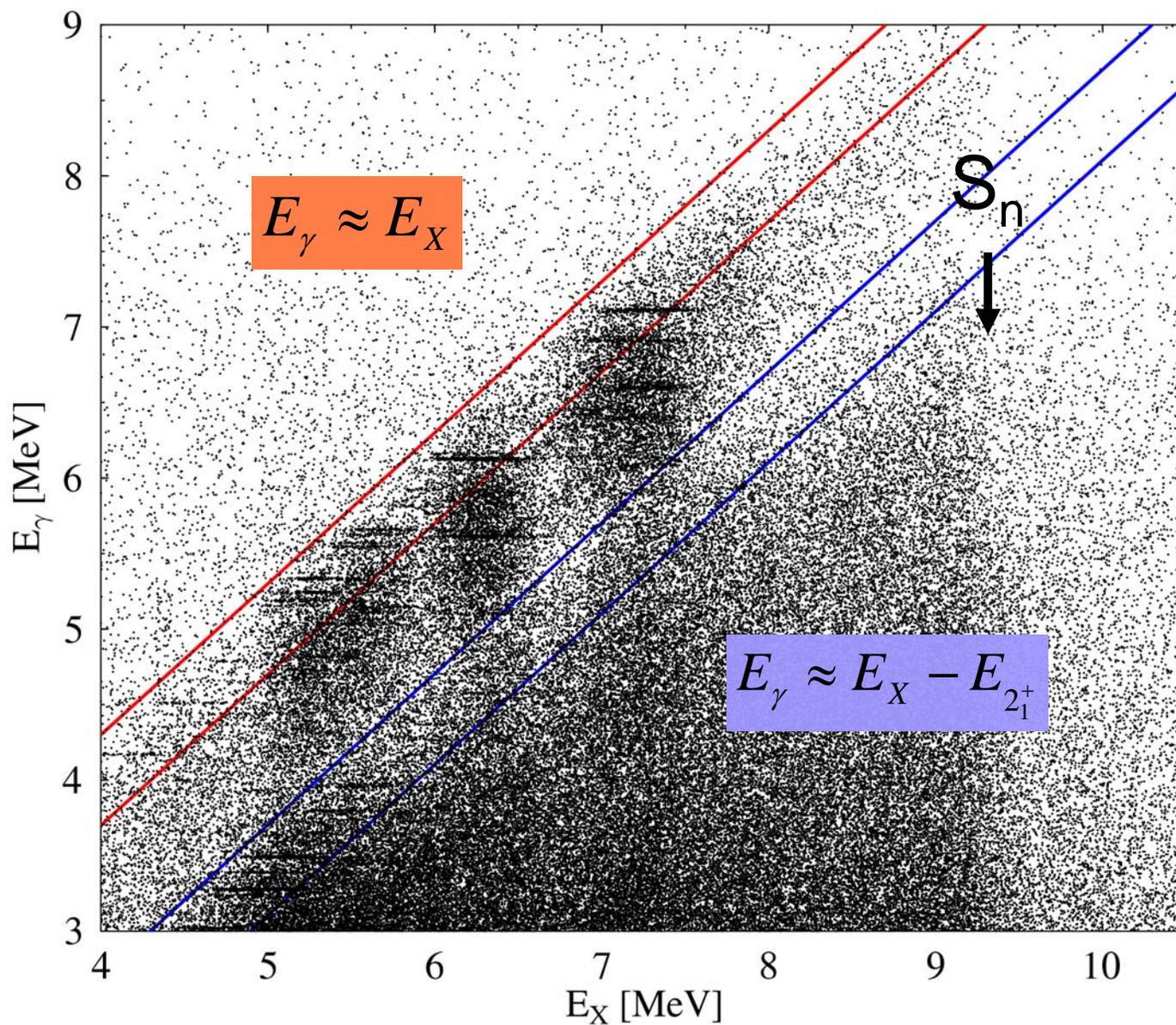
Dieser Aufbau kombiniert die
Isospin-Selektivität und Oberflächen-Sensitivität von α -Streuung
mit der Spin-Selektivität und Energieauflösung von γ -Spektroskopie

Der ISOSPIN-Setup am KVI



Totale Photopeak-Effizienz: $\sim 0.1\%$ at 9 MeV

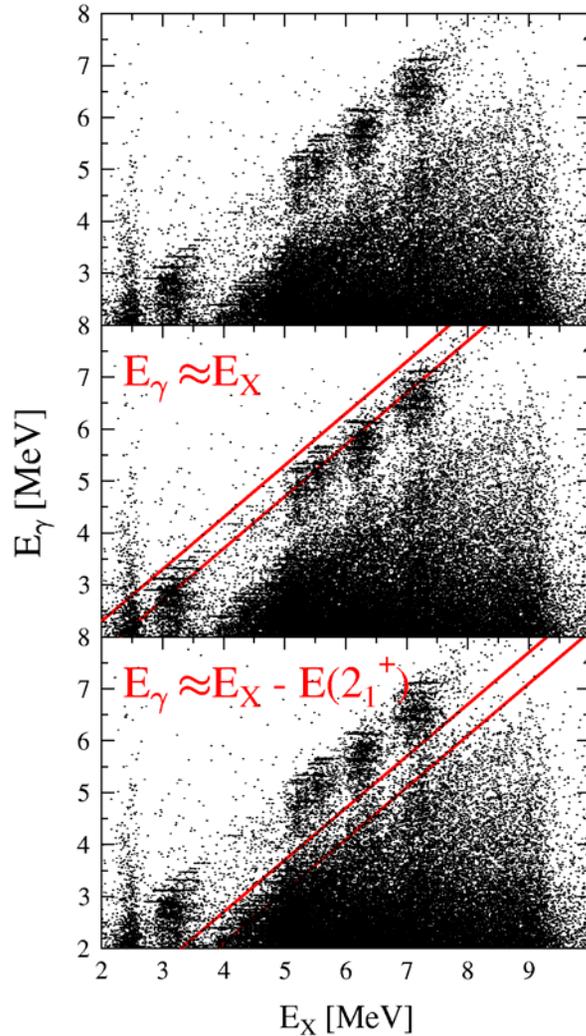
2D-Energie-Matrix: $(\alpha, \alpha'\gamma)$ an ^{140}Ce



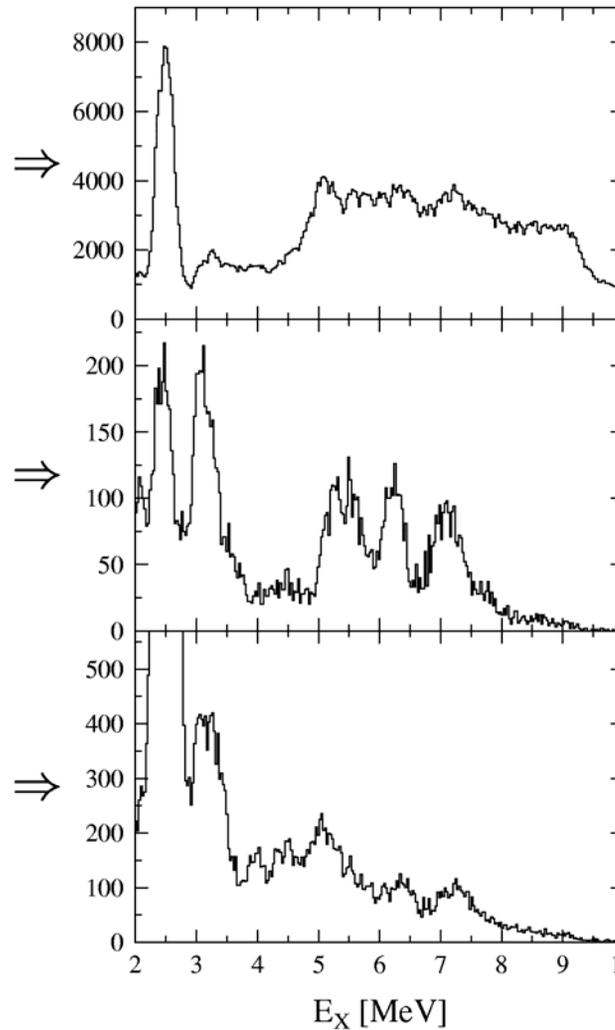
D. Savran et al., Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 172502

$(\alpha, \alpha'\gamma)$ an ^{140}Ce - Selektivität

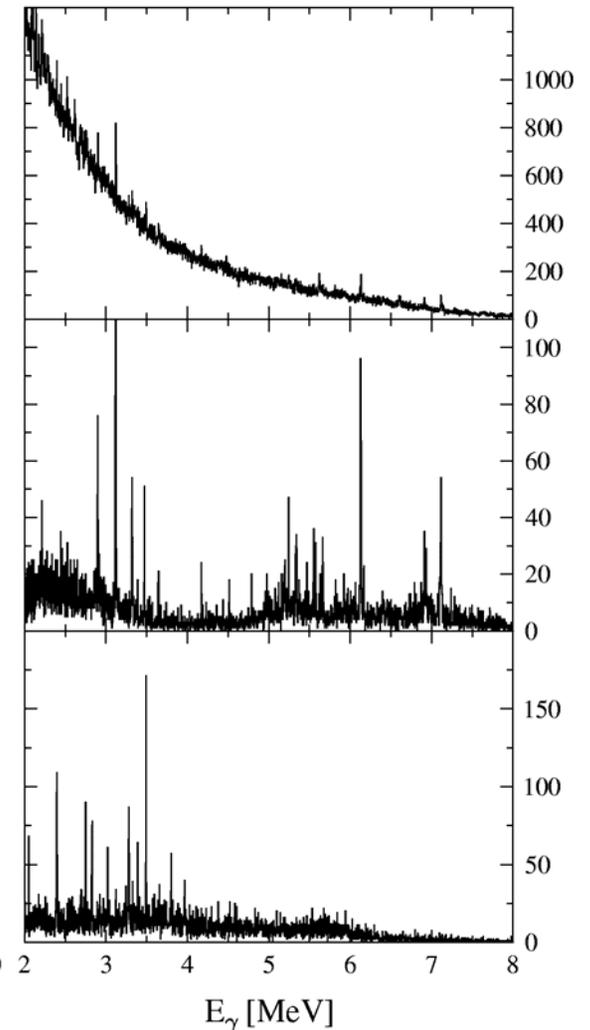
Koinzidenzmatrix



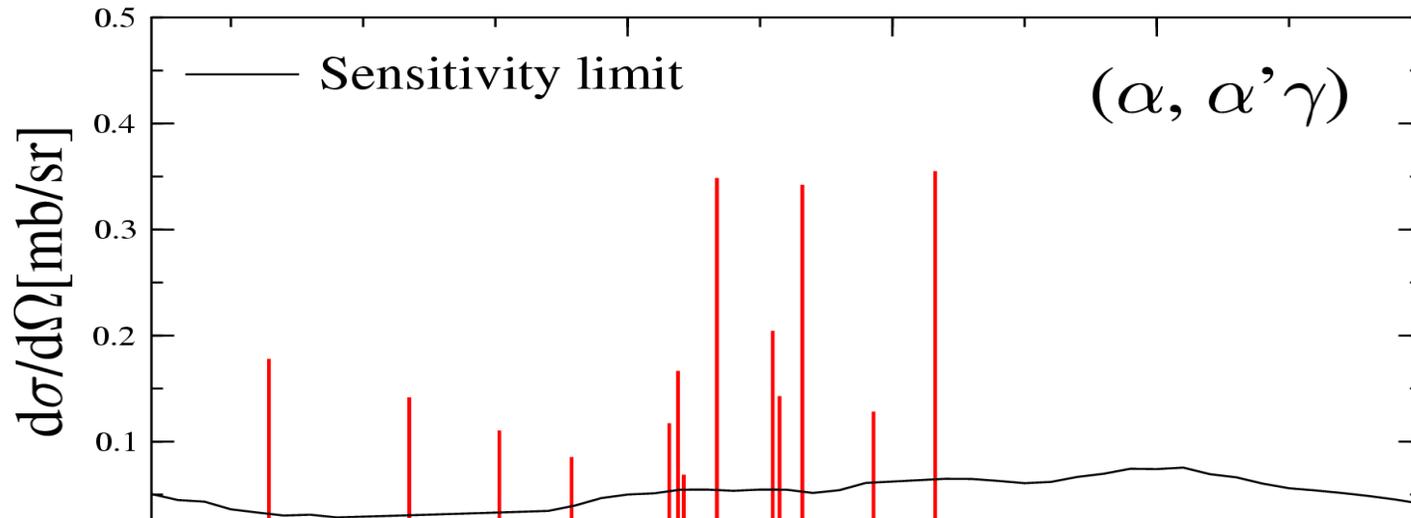
Anregungsspektrum



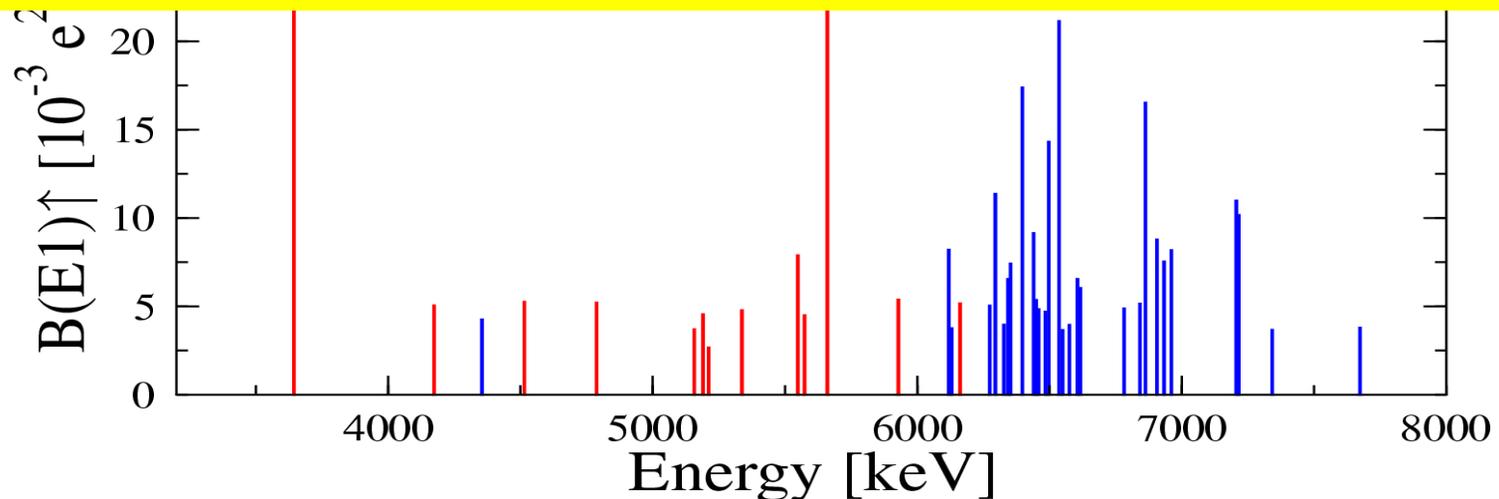
Zerfallsspektrum



E1-Stärke in ^{140}Ce : $(\alpha, \alpha'\gamma)$ vs. (γ, γ')

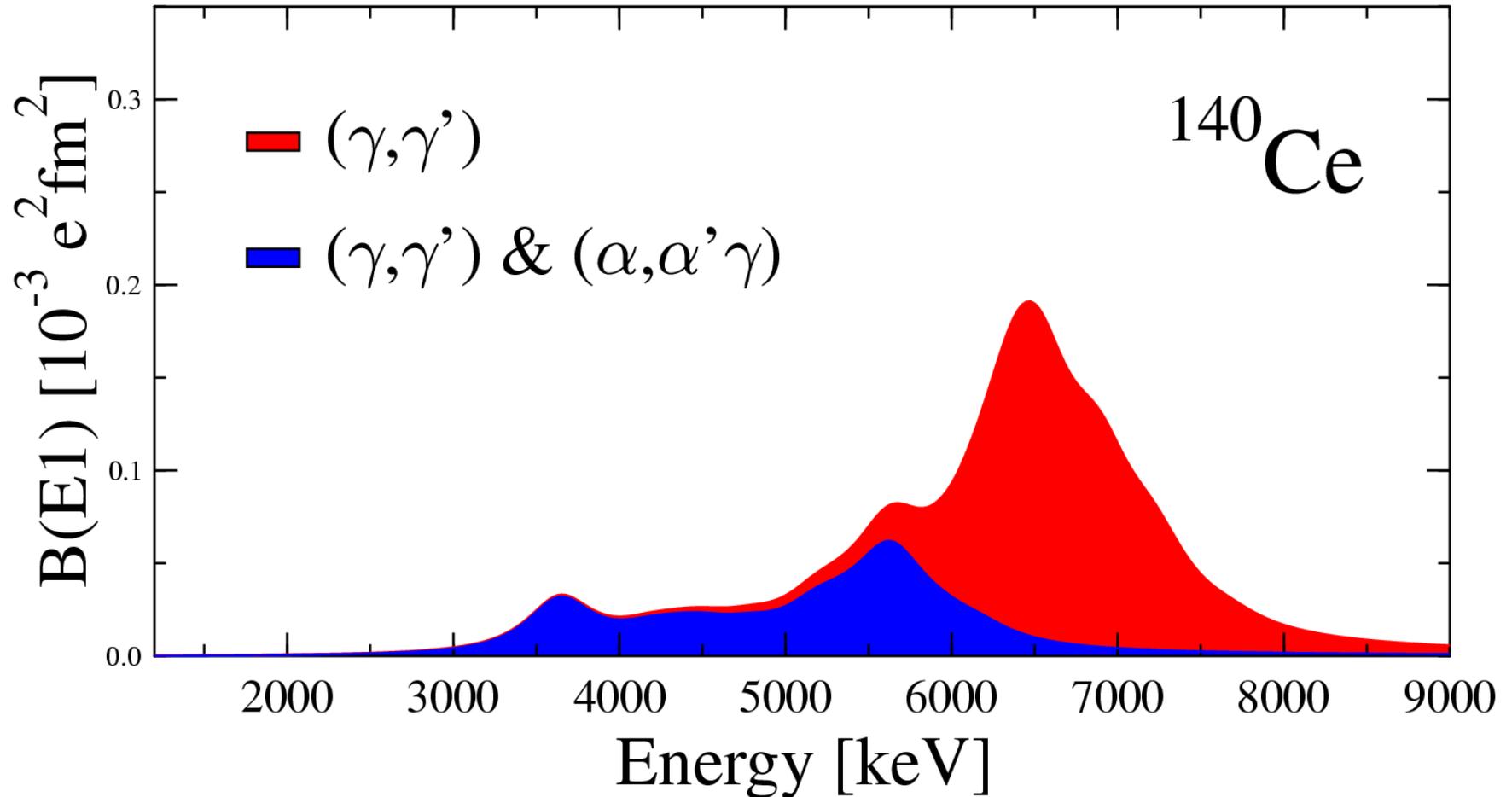


Die PDR unterhalb der Neutronenschwelle spaltet in zwei Anteile unterschiedlicher Struktur auf !

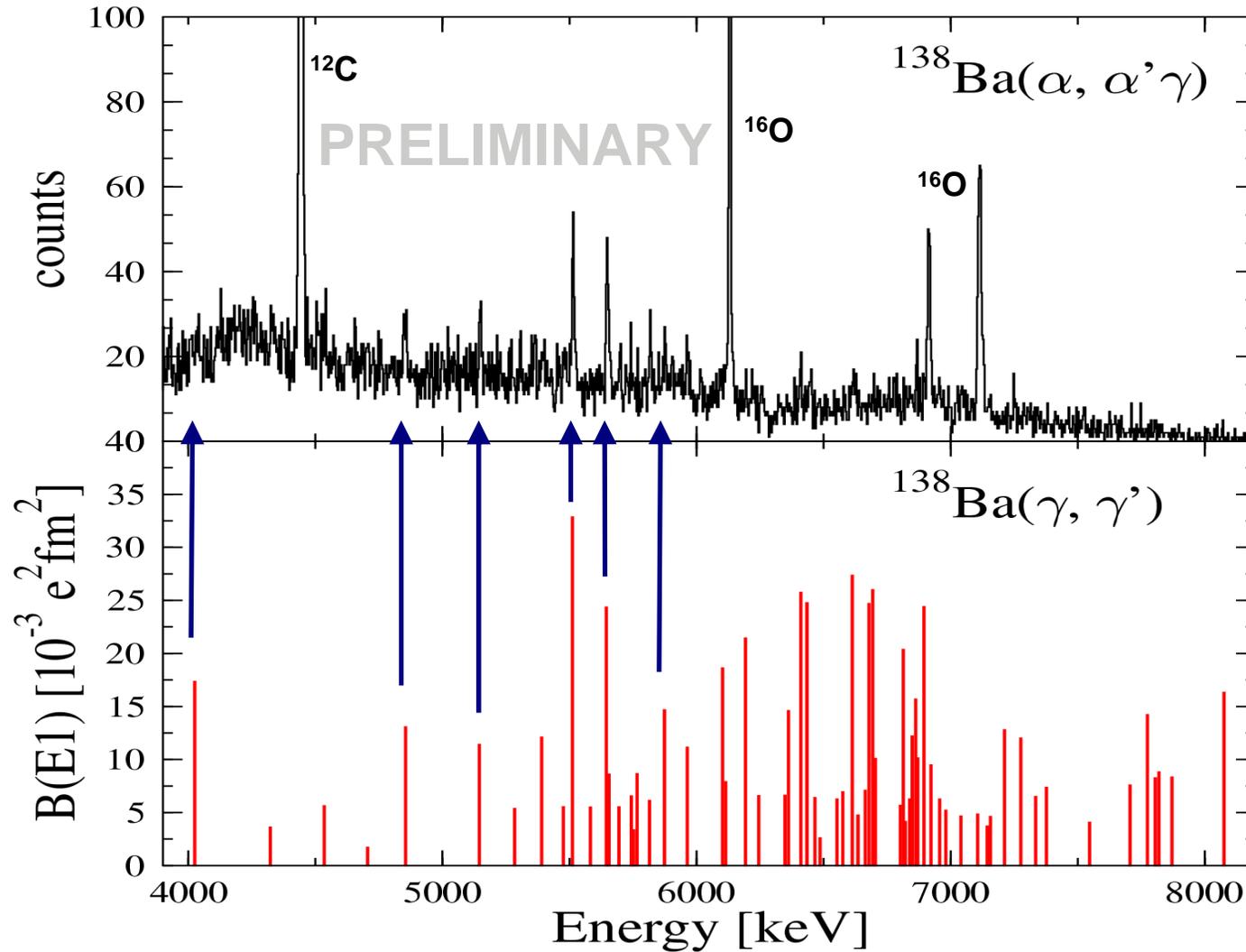


Aufspaltung der PDR in ^{140}Ce

E1-Stärke gefaltet mit einer
Lorentz-Verteilung, $\Gamma = 300$ keV



$(\alpha, \alpha'\gamma)$ an ^{138}Ba : Erste Ergebnisse



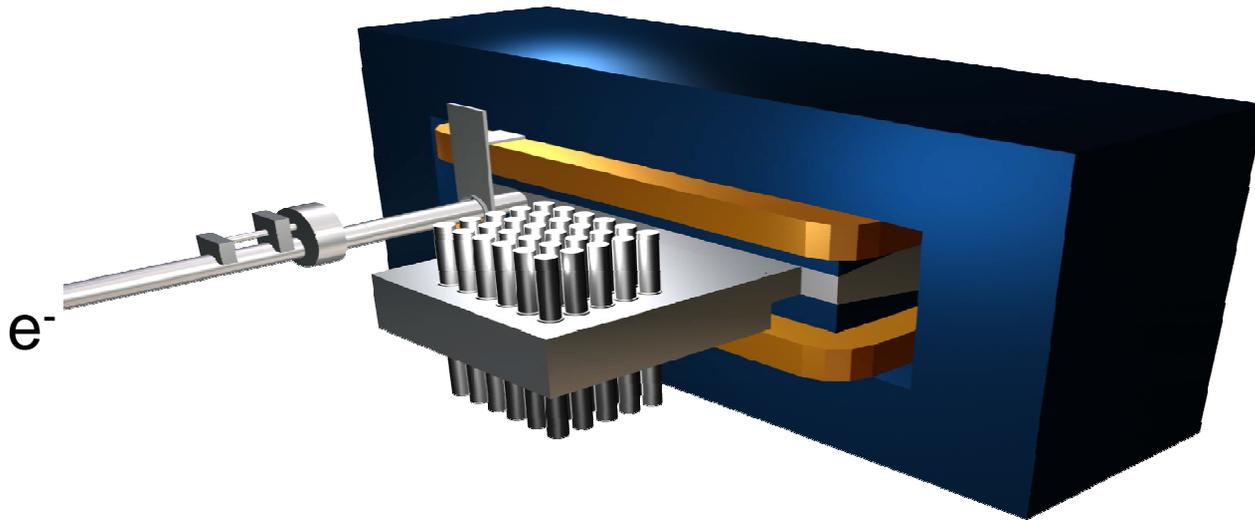
KVI Groningen, November 2006

Stabile Kerne:

- Erweiterung der Systematik in (γ, γ') und (γ, n) -Aktivierungsexperimenten am S-DALINAC
- Fortsetzung der $(\alpha, \alpha' \gamma)$ - und $(p, p' \gamma)$ -Experimente am KVI Groningen und RCNP Osaka
- Direkte Messung von (γ, x) -Wirkungsquerschnitten mit dem Taggersystem NEPTUN am S-DALINAC

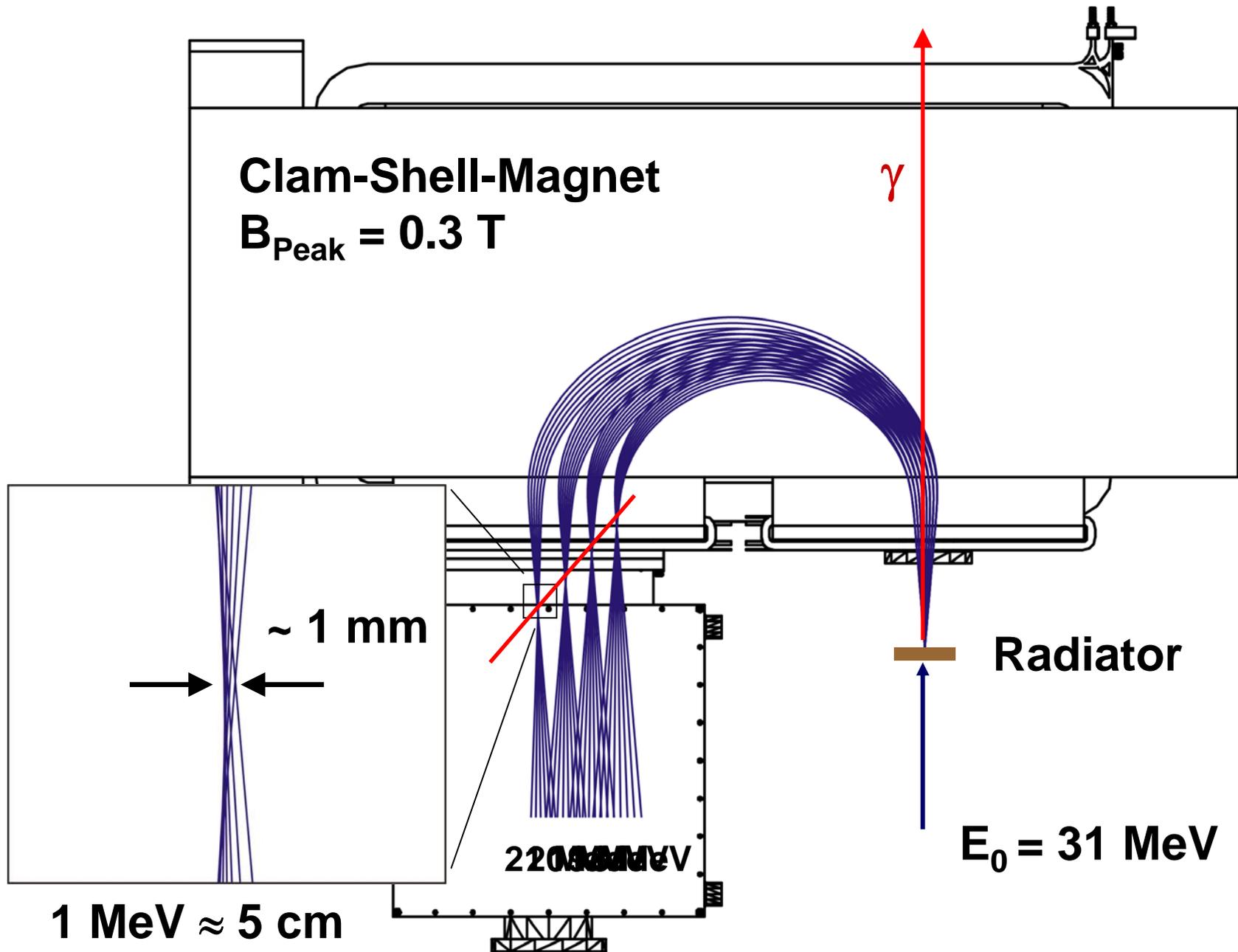
Messung der Photoresponse oberhalb der Teilchenschwelle mit NEPTUN

NiederEnergiePhotonenTaggerUN @ S-DALINAC

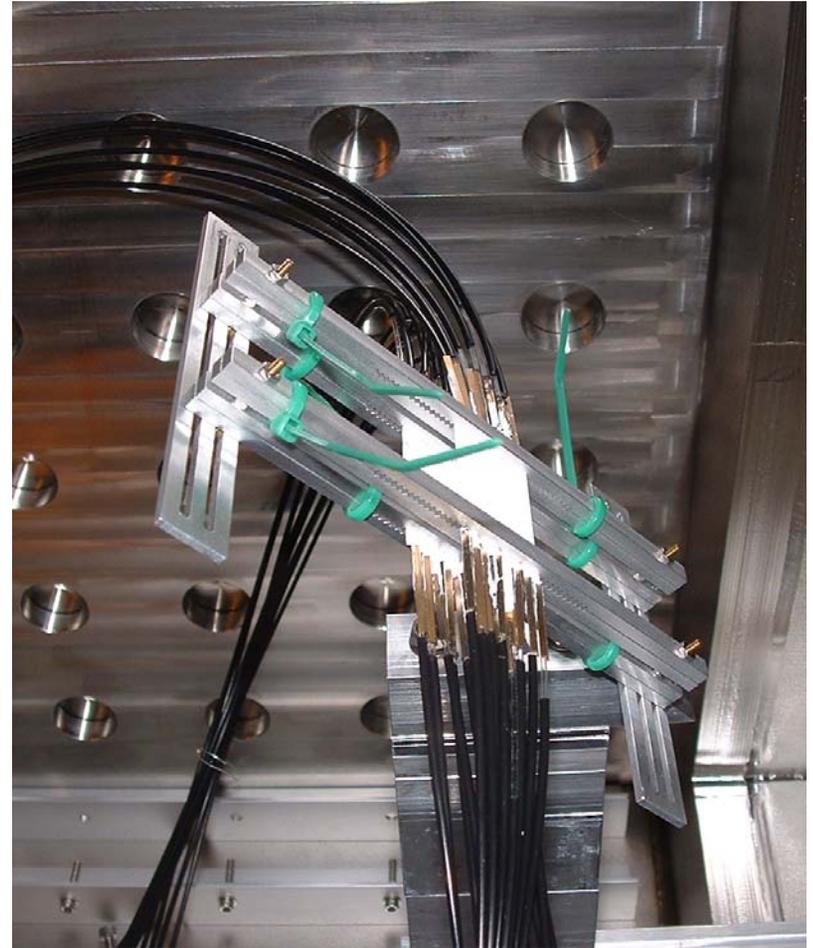
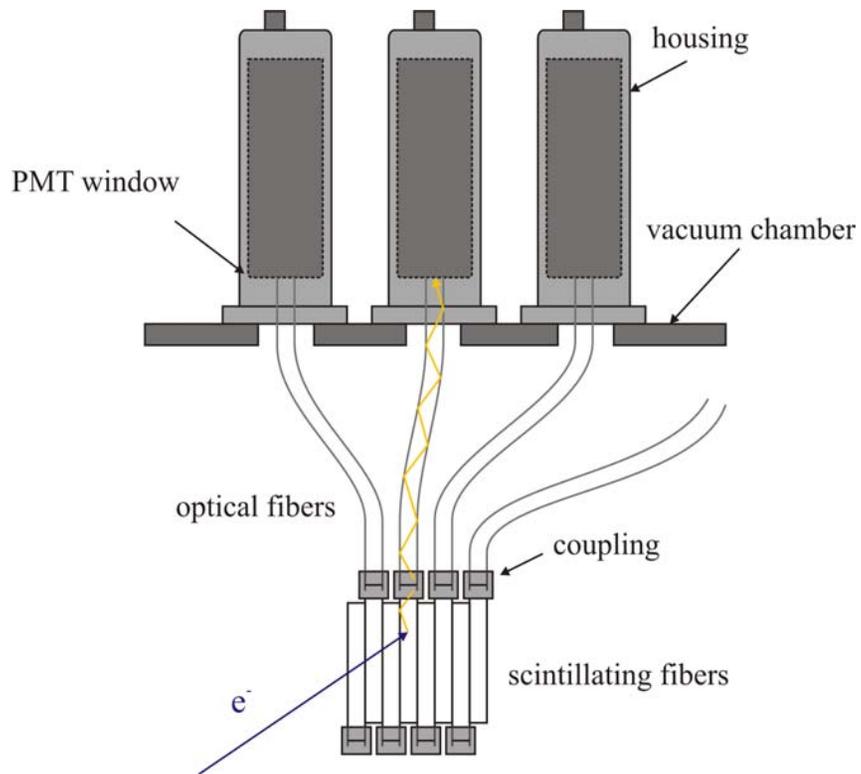


**Hochauflösende Messung ($\Delta E/E < 0.25\%$)
photoneninduzierter Reaktionsraten im
Energiebereich $8 \text{ MeV} < E_\gamma < 20 \text{ MeV}$**

NEPTUN am S-DALINAC



NEPTUN: Teil der Fokalebene

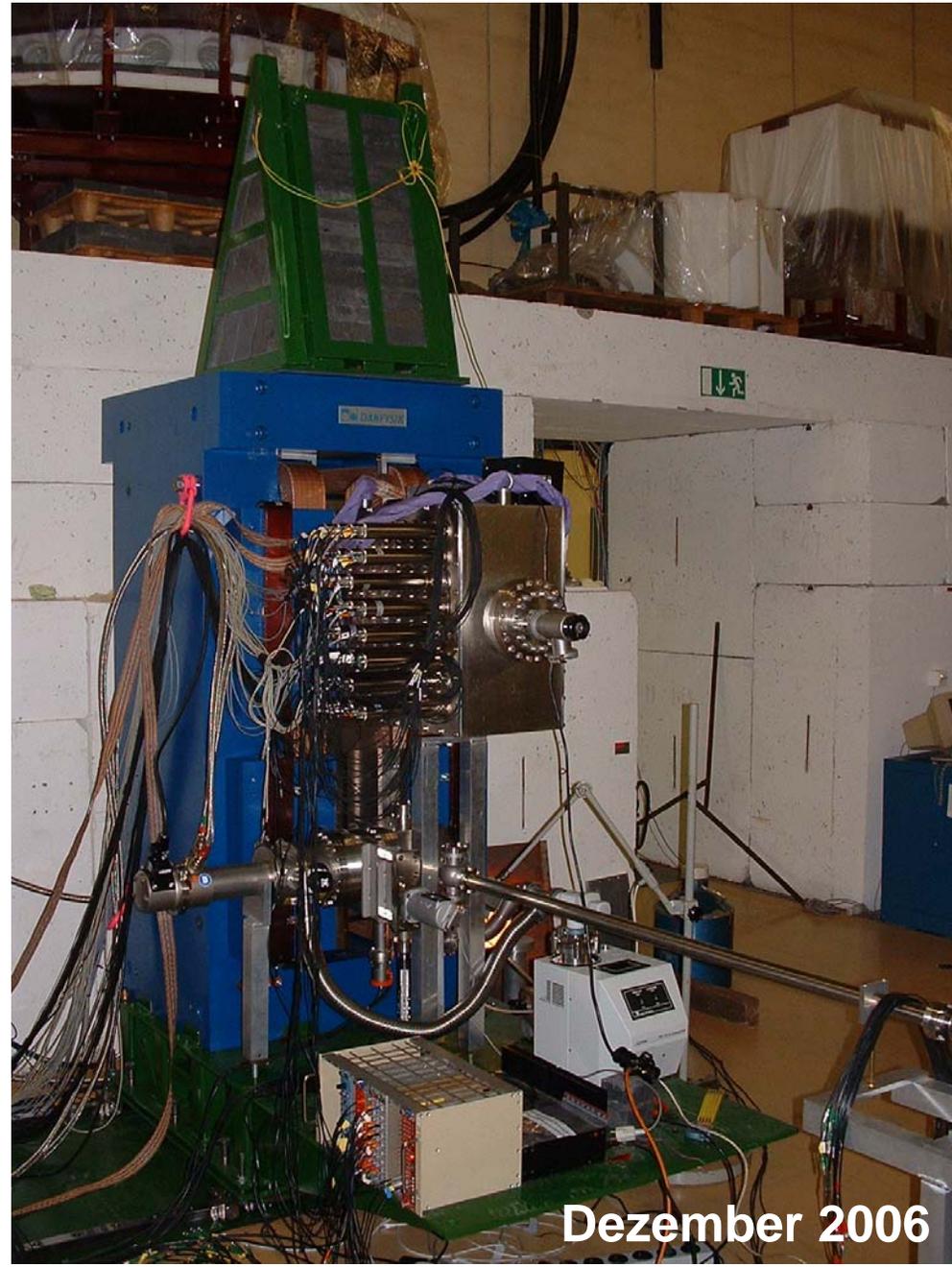


NEPTUN am S-DALINAC



NEPTUN am S-DALINAC

**NEPTUN erlaubt
die hochauflösende
Messung
photoinduzierter
Wirkungsquerschnitte
im Energiebereich von
 $E_\gamma = 8\text{-}20\text{ MeV}$.**



Dezember 2006

Ausblick

Stabile Kerne:

- Erweiterung der Systematik in (γ, γ') - und Aktivierungsexperimenten am S-DALINAC
- Fortsetzung der $(\alpha, \alpha' \gamma)$ - und $(p, p' \gamma)$ -Experimente am KVI Groningen und RCNP Osaka
- Direkte Messung von (γ, x) -Wirkungsquerschnitten mit dem Taggersystem NEPTUN am S-DALINAC

Radioaktive Kerne:

- Messung von (γ, x) -Wirkungsquerschnitten in inverser Kinematik (T. Aumann, H. Emling, K. Sümmerer et al.)
- (α, α') und (p, p') in inverser Kinematik (EXL)

Die Wechselwirkung zwischen Photonen und Atomkern: Kernstruktur und Nukleosynthese

M. Elvers, J. Endres, M. Fritzsche, D. Galaviz*,
J. Hasper, L. Kern, K. Lindenberg, S. Müller,
D. Savran, C. Siegel, K. Sonnabend, S. Volz

(Institut für Kernphysik, TU Darmstadt)

T. Rauscher (Basel), N. Tsoneva, H. Lenske (Gießen),
M. Harakeh, A. van den Berg, H. Wörtche (KVI 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).*