

Nukleon-Nukleon-Reaktionen

Eigenschaften des Nukleons

Formalismus zur Beschreibung der elastischen Streuung
(Optisches Modell, Streuphasen) und von Reaktionen

Zwei-Nukleonen-Problem (Streulängen, NN-Potential, NN-Reaktionen)

Reaktionen zwischen Nukleonen und leichten Kernen

Folien im Internet: <http://www.fzd.de/db/Cms?pOid=26617>

14. Vorlesung, TU Dresden 15.07.2008

Dr. Daniel Bemmerer



**Forschungszentrum
Dresden** Rossendorf

1. Vorlesung, 08.04.2008

- Starke Wechselwirkung, Ladungsunabhängigkeit, Einführung des Isospins
- Eigenschaften der Nukleonen: Masse und Lebensdauer
- Kinematik nichtrelativistisch

2. Vorlesung, 15.04.2008

- Kinematik relativistisch
- Das Deuteron

3. Vorlesung, 22.04.2008 (Prof. Grosse)

- Das Deuteron im elektromagnetischen Feld
- Reziprozitätssatz (*detailed balance theorem*)
- Synthese und Photodissoziation des Deuterons
- Astrophysikalisches: Bedeutung des Deuterons im Urknall

4. Vorlesung, 29.04.2008

- Rutherford-Streuung (klassisch)
- Optisches Modell, elastische Streuung

5. Vorlesung, 06.05.2008

- Rutherford-Streuung (quantenmechanisch)
- Resonanzen (Einführung)

6. Vorlesung, 20.05.2008

- Breit-Wigner-Formel

7. Vorlesung, 27.05.2008

- Exkurs: Abbremsung schneller Teilchen in Materie
- Messung von Resonanzparametern: Gamma- und Teilchenbreite

8. Vorlesung, 03.06.2008

- Drehimpulse und Winkelkorrelationen

9. Vorlesung, 10.06.2008 (Prof. Grosse)

- Dipol-Riesenresonanz

10. Vorlesung, 17.06.2008

- Direkte Reaktionen I: Phänomenologie, quantitative Beschreibung

11. Vorlesung, 24.06.2008

- Aus aktuellem Anlass: Halbwertszeiten von in Metallen eingebetteten Radionukliden

12. Vorlesung, 01.07.2008

- Direkte Reaktionen II

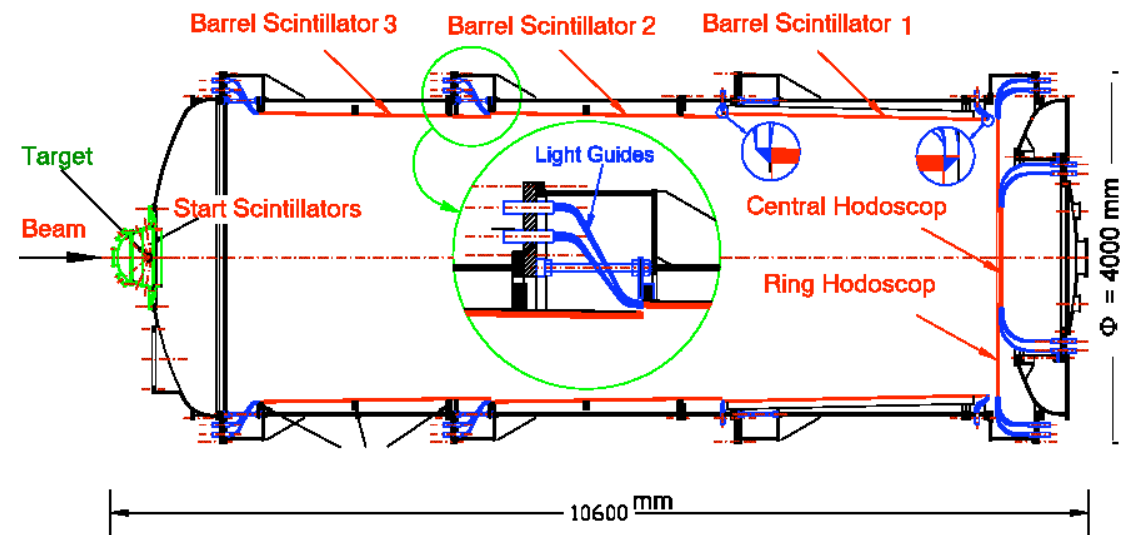
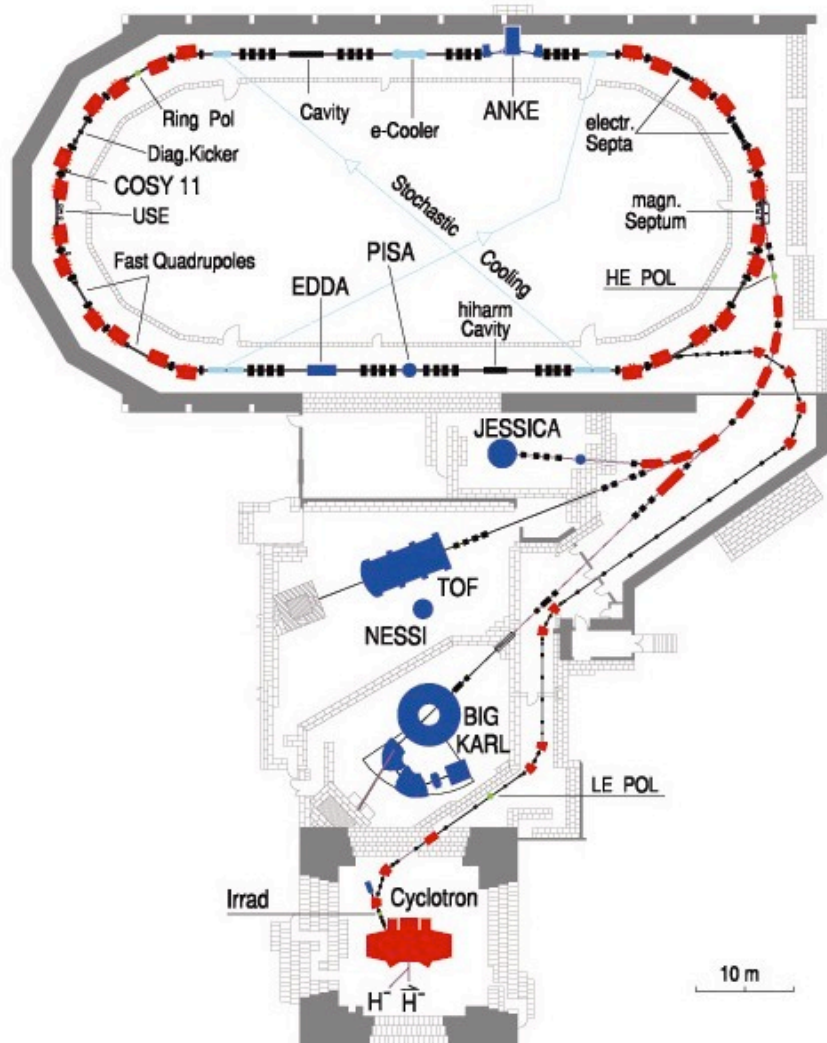
13. Vorlesung, 08.07.2008

- Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung I

14. Vorlesung, heute

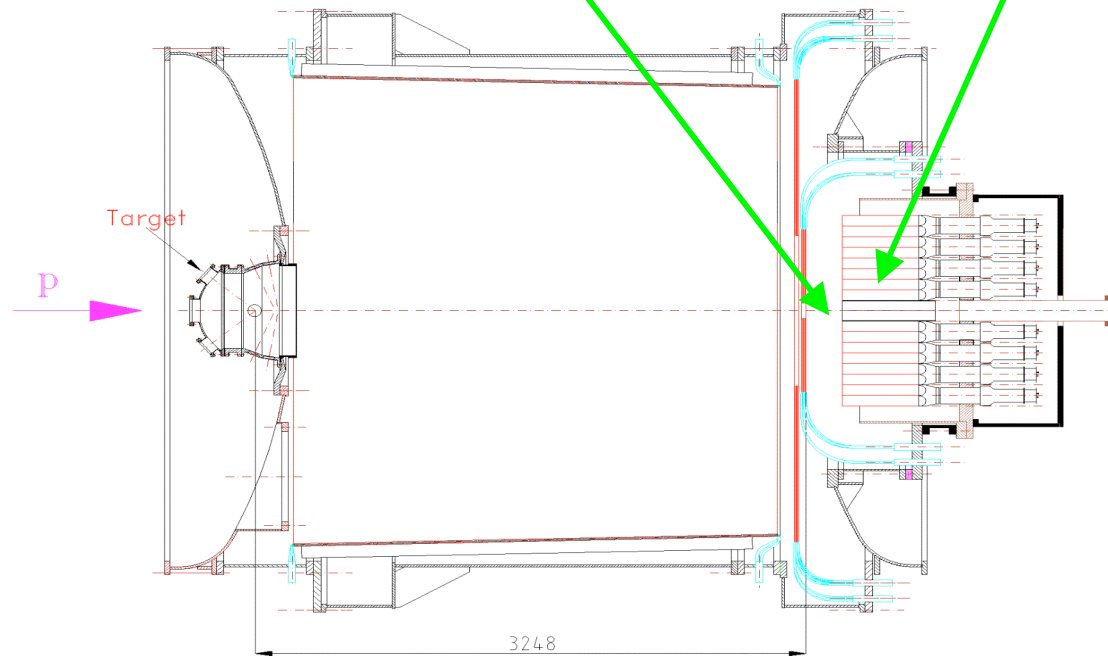
- Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung II

COSY-TOF Experiment



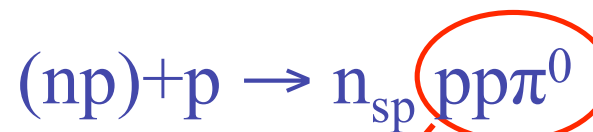
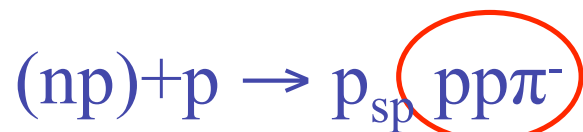


hard forward
 spectator (about
 half of the beam
 momentum!)



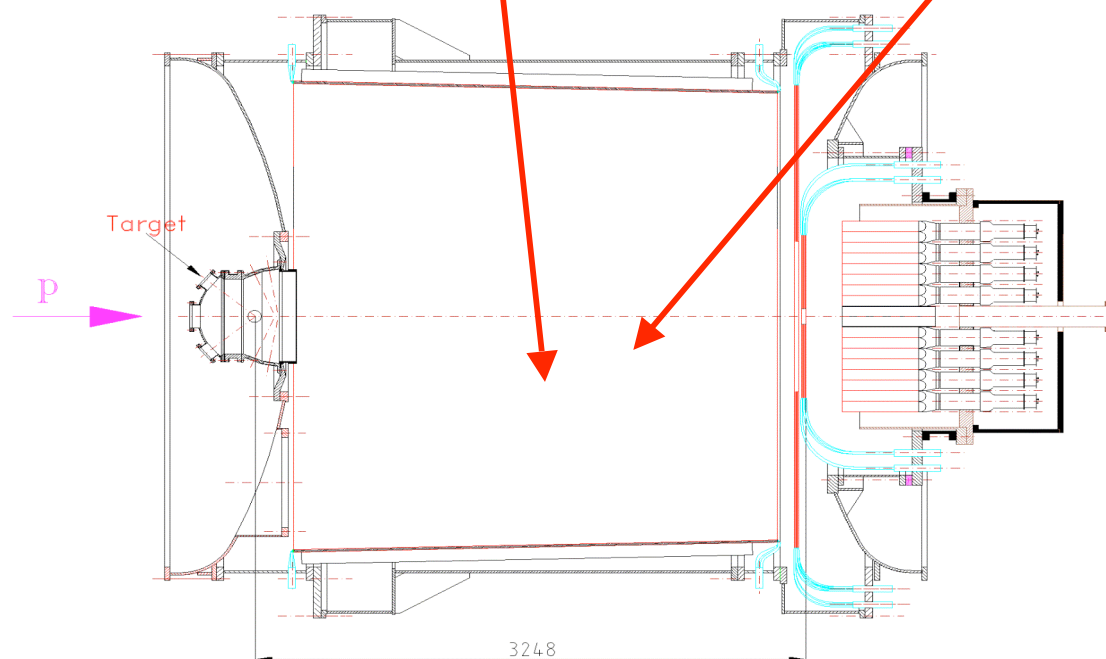
TOF=time of flight:

- scintillator hodoscope and start detector
- full forward coverage
- excellent spatial and time-of-flight resolution
- calorimetric scintillator structure converging 2° to 10° forward cone



"weiche" Protonen (und Pionen)
im gesamten TOF-Volumen

Bestimmung des Impulses
aller Reaktionsbeteiligten
(zumindest prinzipiell) möglich.

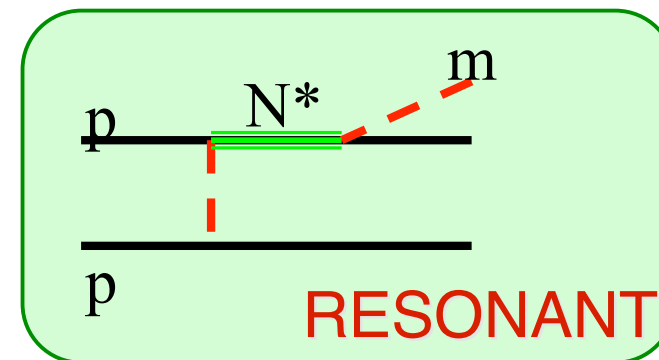
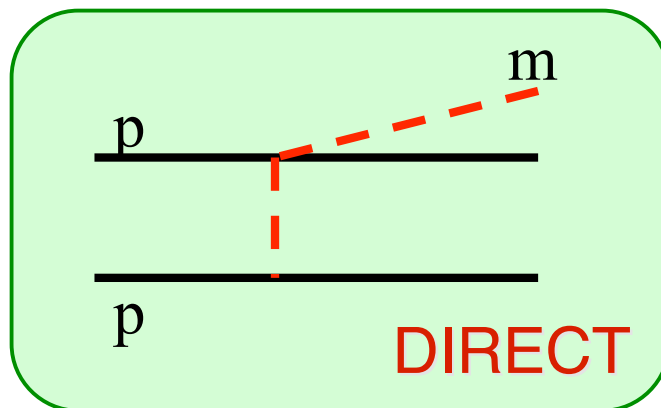
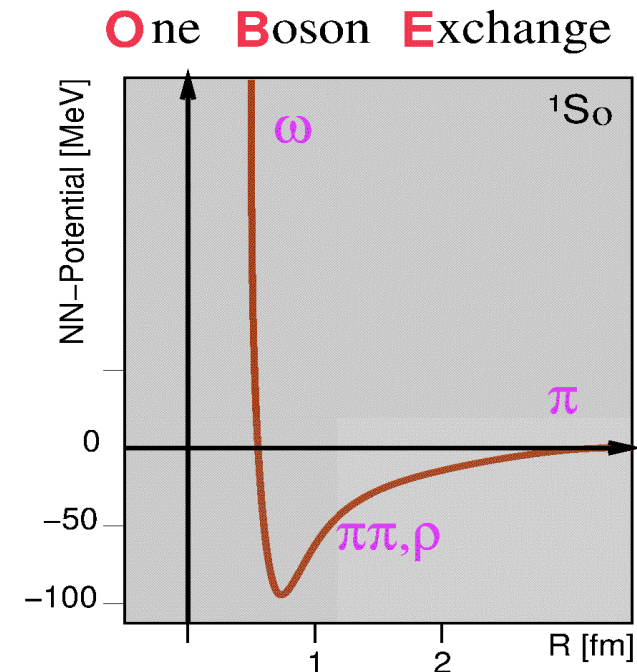


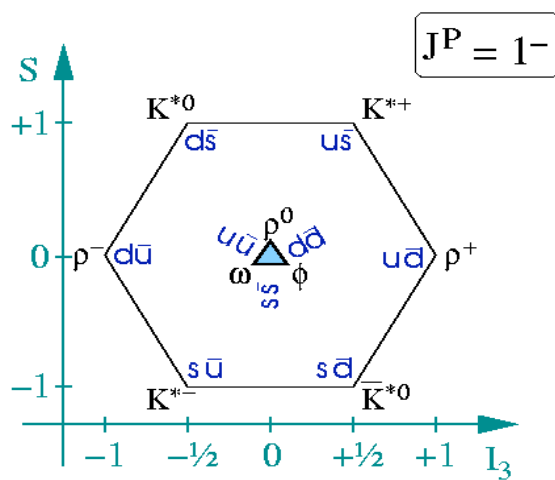
Vektormesonen: NN-Wechselwirkung bei kleinen Abständen

$$|q^2 c^2| \sim O(m_N m_M) \quad r/\text{fm} \approx 200/(qc/\text{MeV})$$

meson	mass / MeV	r / fm
π	140	0.55
η	550	0.28
ω	780	0.23
ϕ	1020	0.20

quark effects?





$$|\omega\rangle_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle + |s\bar{s}\rangle) \quad |\omega\rangle_8 = \frac{1}{\sqrt{6}}(|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle - 2|s\bar{s}\rangle)$$

$$\sin \theta_V \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\theta_V = 39^\circ = \theta_I + \Delta\theta_V, \theta_I = 35.3^\circ)$$

$$|\phi\rangle = \cos \theta_V |\omega\rangle_8 - \sin \theta_V |\omega\rangle_1 \approx |s\bar{s}\rangle$$

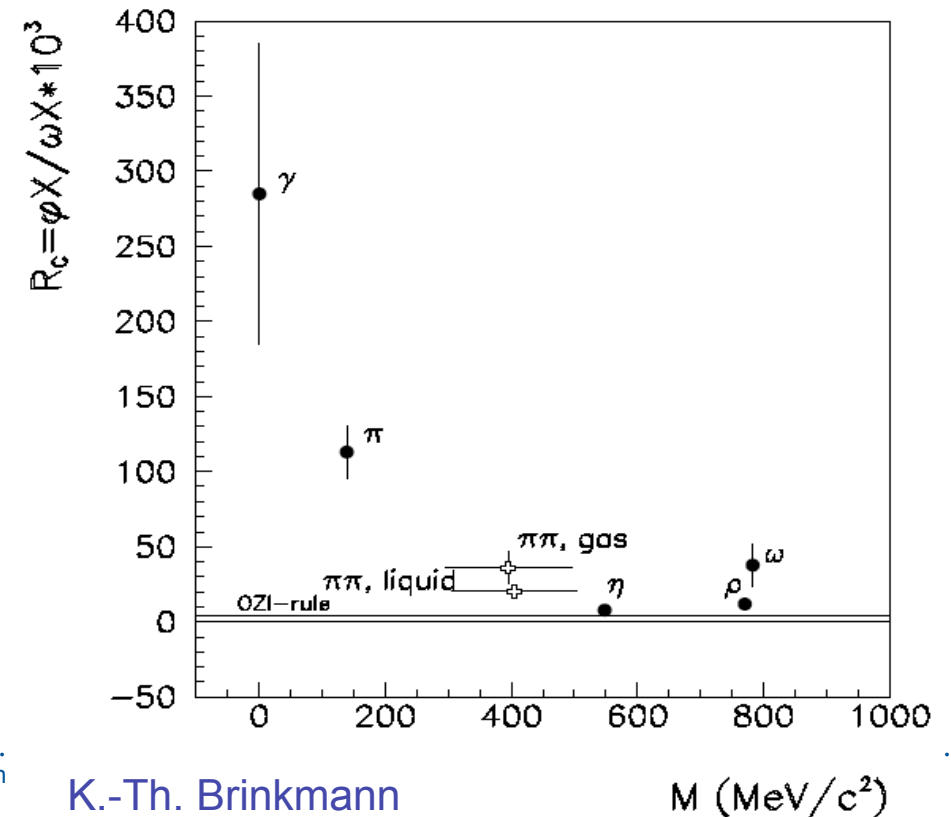
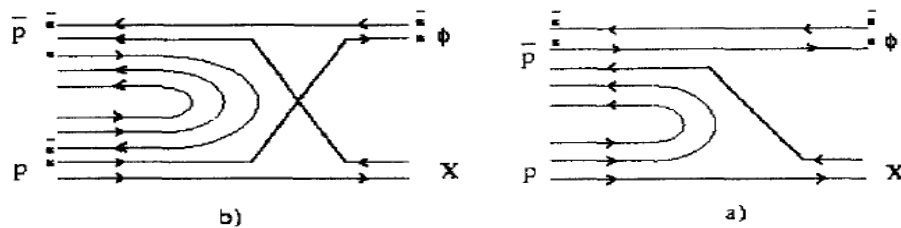
$$|\omega\rangle = \sin \theta_V |\omega\rangle_8 + \cos \theta_V |\omega\rangle_1 \approx \frac{1}{\sqrt{2}}(|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle)$$

OBELIX, hep-ex/9607006

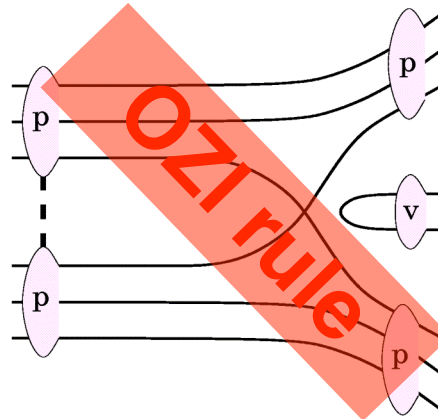
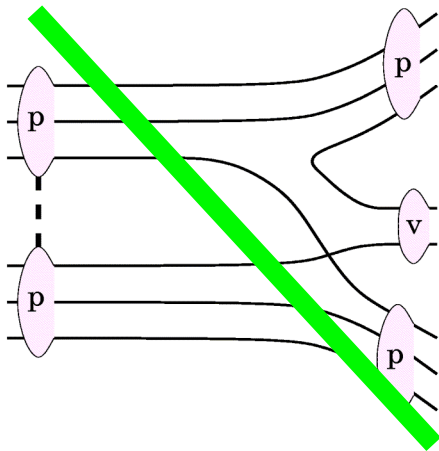
OBELIX Collaboration / Nuclear Physics A 655 (1999) 453–494



Fig. 1. “Hairpin” quark diagram for the production of ϕ meson in $N\bar{N}$ annihilation.

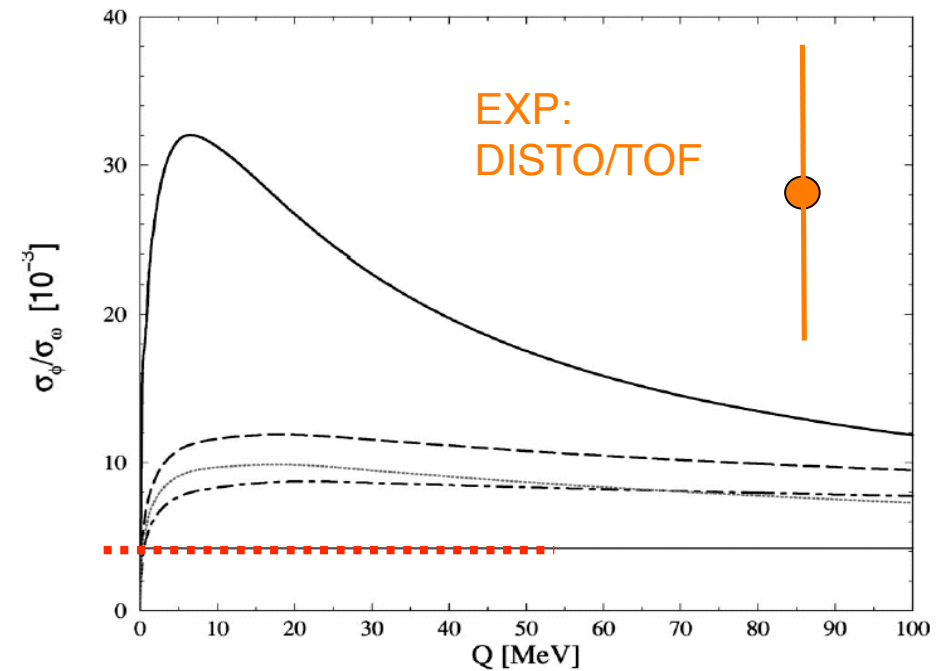


$$|\omega\rangle \approx \frac{1}{\sqrt{2}} (|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle) ; |\phi\rangle \approx |s\bar{s}\rangle \Rightarrow$$

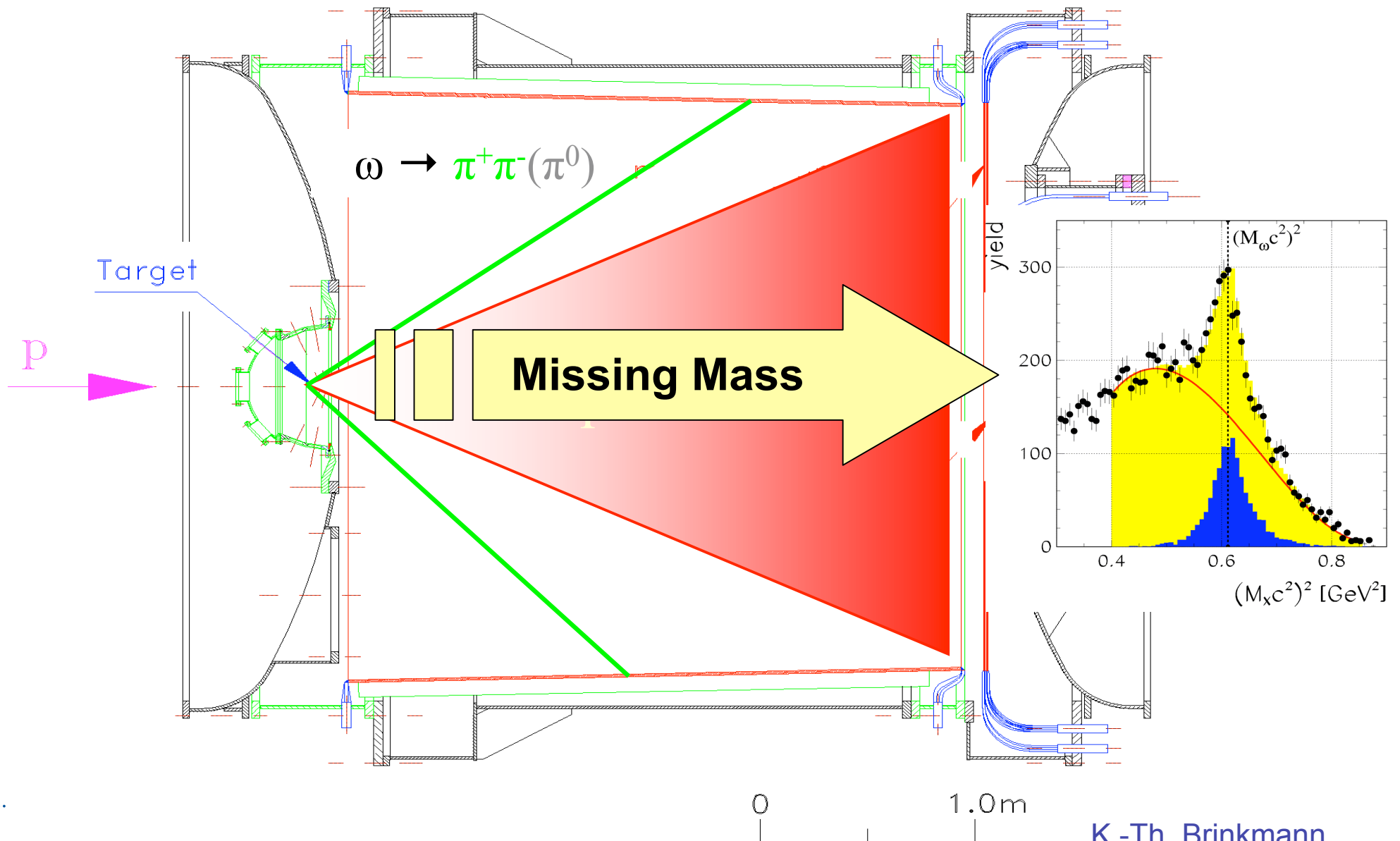


$$\left(\frac{\sigma_\phi}{\sigma_\omega} \right)_{\text{SU}(3)} = \tan^2 \Delta\theta_V = 4.2 \cdot 10^{-3}$$

[Nakayama et al., PRC63 (01) 014201]



$$p+p \rightarrow p+p+X$$

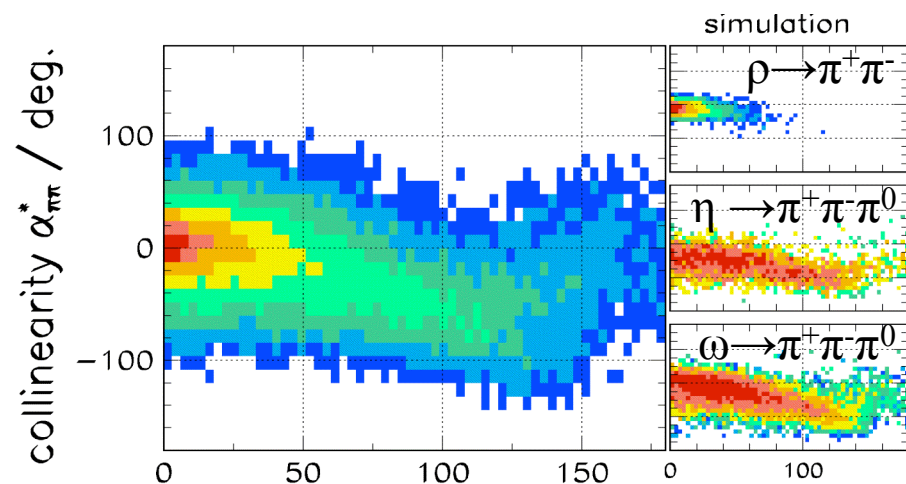
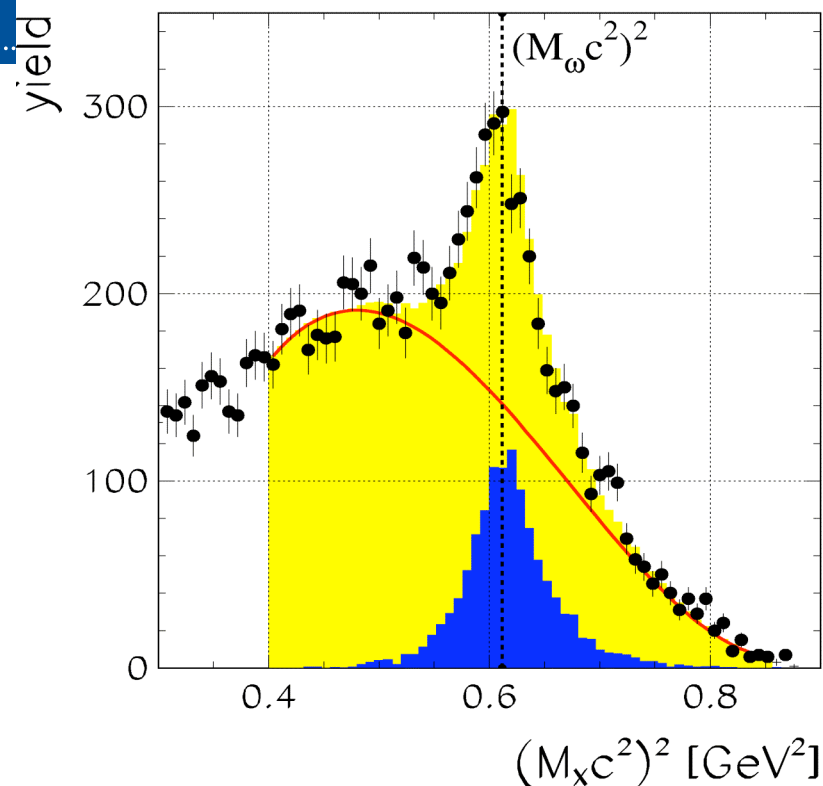


Identification of ω production using

➤ event topology (pion directions)

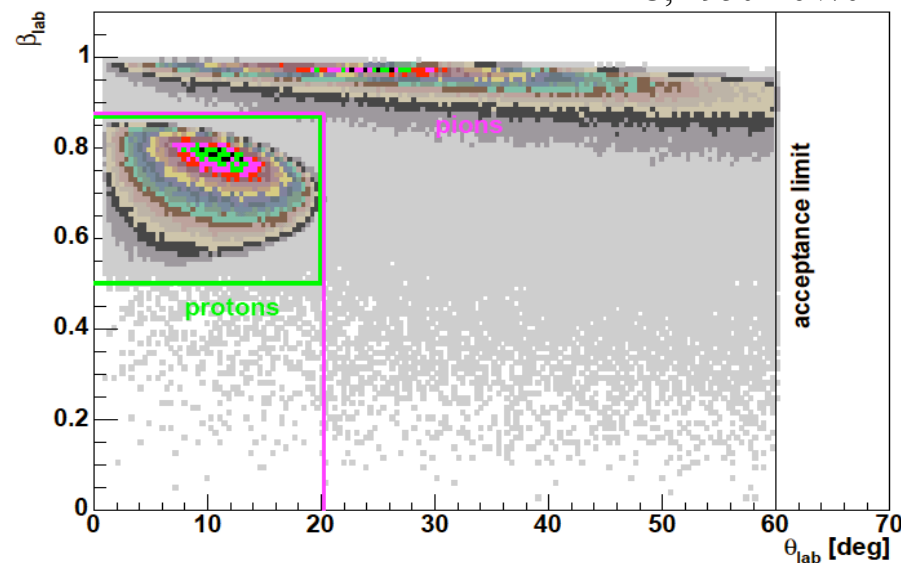
and

➤ proton-proton missing mass

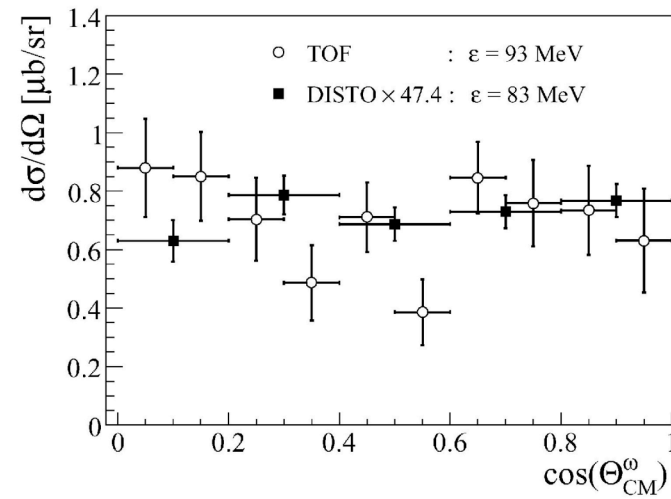
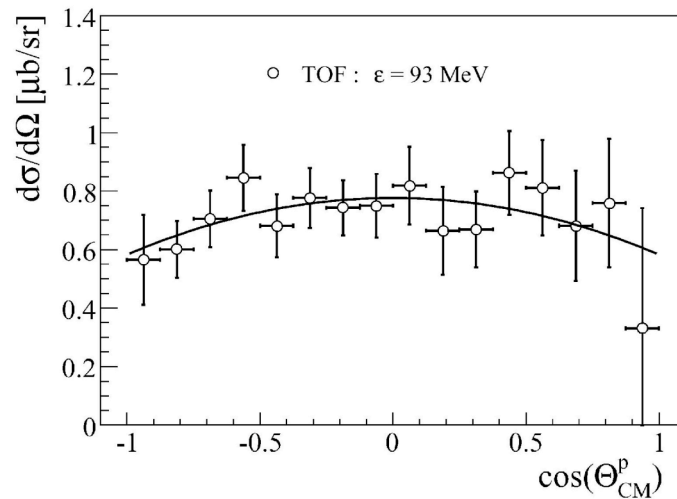


Separation of Pions and Protons

MC, 2950 MeV/c



Vergleich ϕ - und ω -Produktion (COSY-TOF)

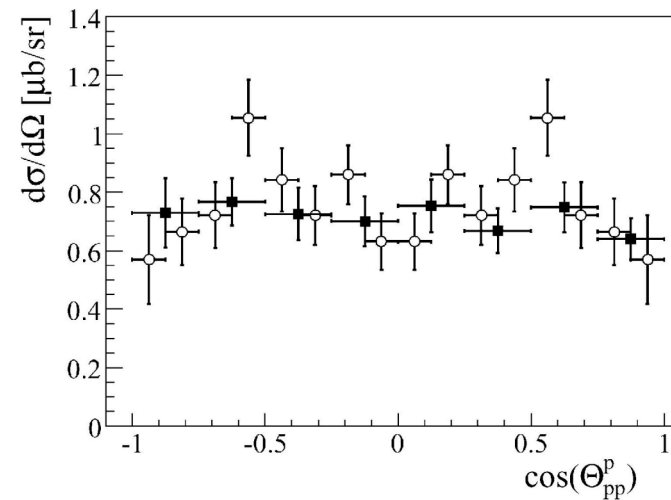
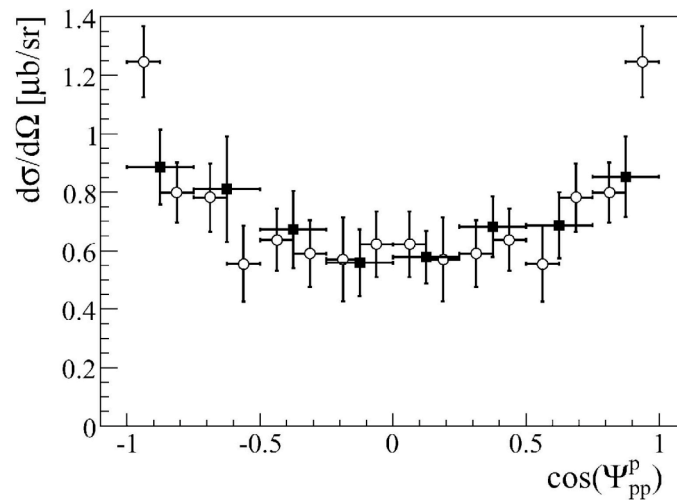


TOF = Cosy

$pp \rightarrow pp\omega$

DISTO =

$pp \rightarrow pp\phi$



1. Vorlesung, 08.04.2008

- Starke Wechselwirkung, Ladungsunabhängigkeit, Einführung des Isospins
- Eigenschaften der Nukleonen: Masse und Lebensdauer
- Kinematik nichtrelativistisch

2. Vorlesung, 15.04.2008

- Kinematik relativistisch
- Das Deuteron

3. Vorlesung, 22.04.2008 (Prof. Grosse)

- Das Deuteron im elektromagnetischen Feld
- Reziprozitätssatz (*detailed balance theorem*)
- Synthese und Photodissoziation des Deuterons
- Astrophysikalisches: Bedeutung des Deuterons im Urknall

4. Vorlesung, 29.04.2008

- Rutherford-Streuung (klassisch)
- Optisches Modell, elastische Streuung

5. Vorlesung, 06.05.2008

- Rutherford-Streuung (quantenmechanisch)
- Resonanzen (Einführung)

6. Vorlesung, 20.05.2008

- Breit-Wigner-Formel

7. Vorlesung, 27.05.2008

- Exkurs: Abbremsung schneller Teilchen in Materie
- Messung von Resonanzparametern: Gamma- und Teilchenbreite

8. Vorlesung, 03.06.2008

- Drehimpulse und Winkelkorrelationen

9. Vorlesung, 10.06.2008 (Prof. Grosse)

- Dipol-Riesenresonanz

10. Vorlesung, 17.06.2008

- Direkte Reaktionen I:
Phänomenologie, quantitative Beschreibung

11. Vorlesung, 24.06.2008

- Aus aktuellem Anlass: Halbwertszeiten von in Metallen eingebetteten Radionukliden

12. Vorlesung, 01.07.2008

- Direkte Reaktionen II

13. Vorlesung, 08.07.2008

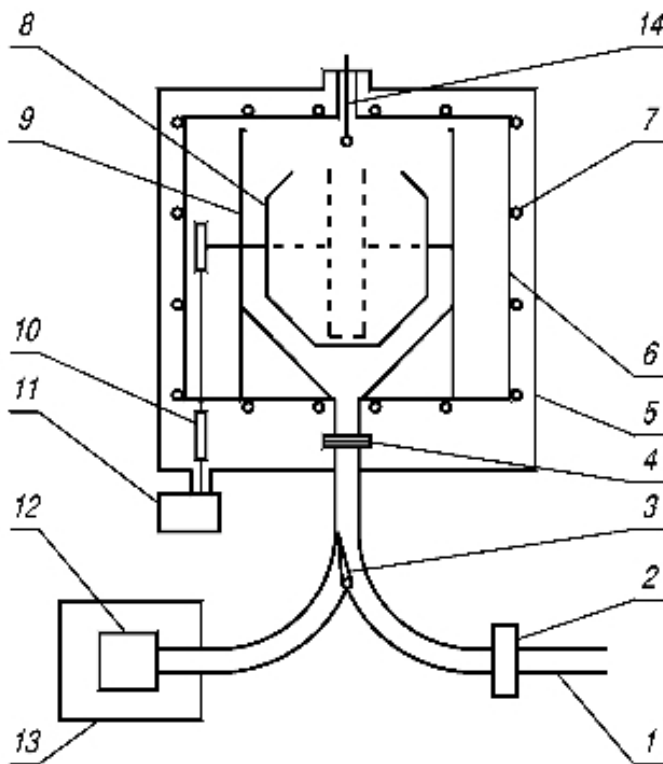
- Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung I

14. Vorlesung, heute

- Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung II

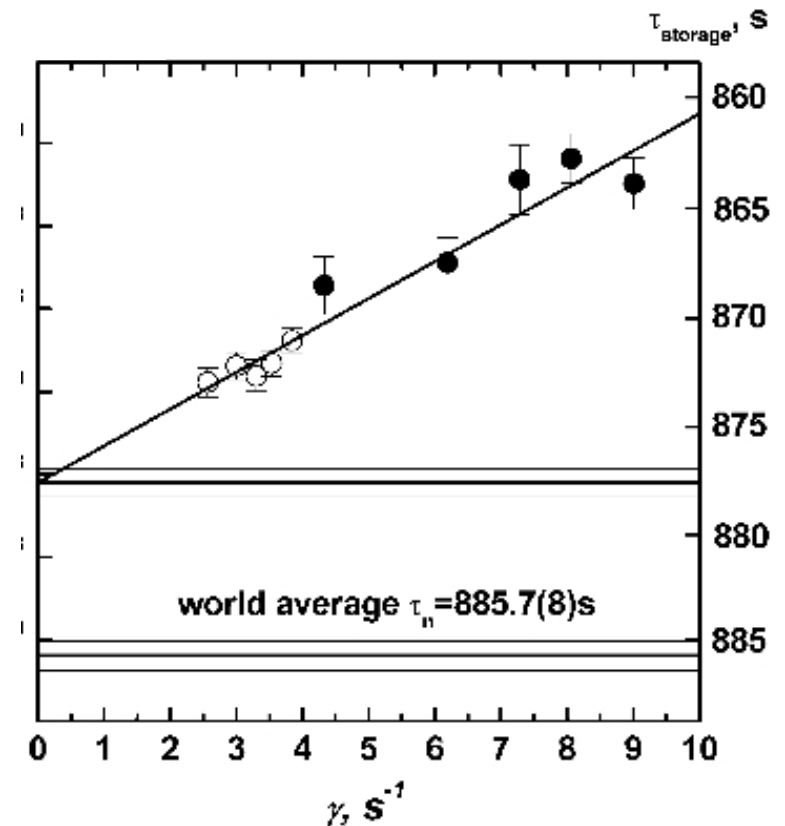
Lebensdauer des freien Neutrons: Experiment $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

$$m_n = 939.6 \text{ MeV}/c^2 > 938.3 \text{ MeV}/c^2 + 0.5 \text{ MeV}/c^2 = m_p + m_e$$



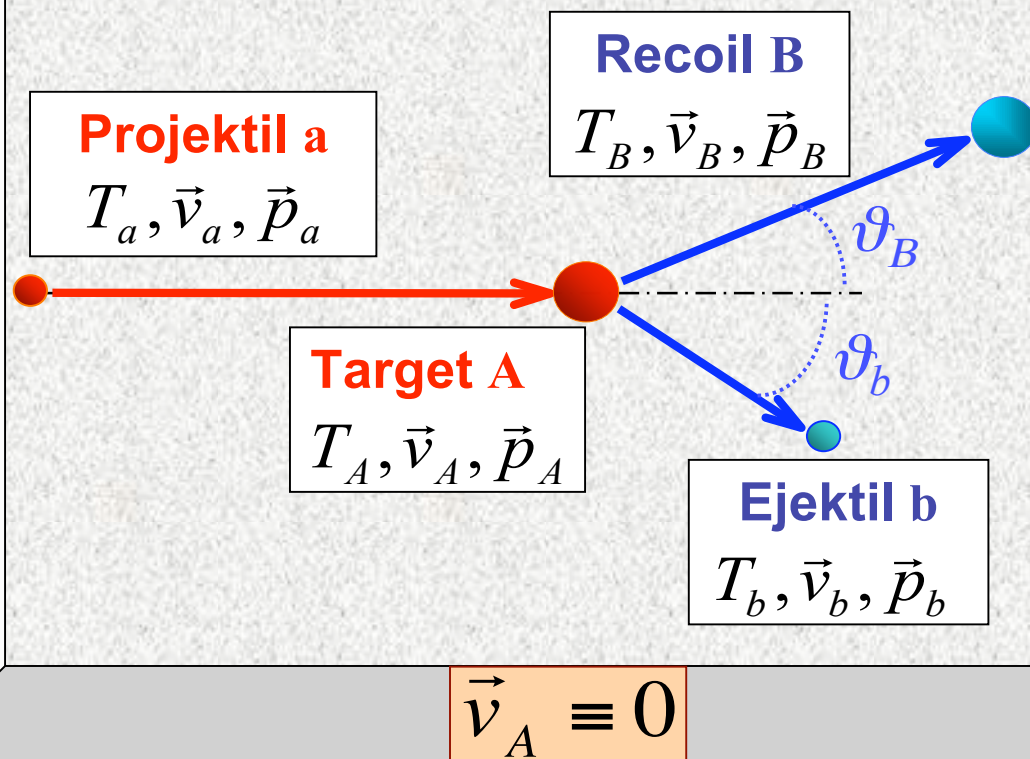
$$t_{1/2} = \tau_n \ln 2$$

$$\frac{1}{\tau_{\text{storage}}} = \frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_{\text{loss}}}$$

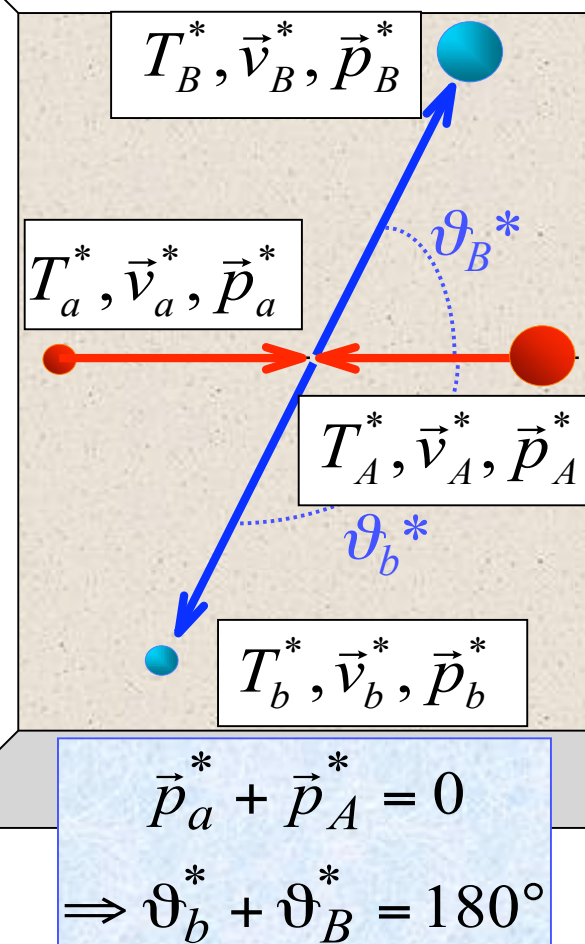


A. Serebrov et al., Physics Letters B (2005), <http://arxiv.org/abs/nucl-ex/0408009>

Laborsystem



CM-System



Galilei-Transformation

Geschwindigkeit des Schwerpunktes
 (Center of Mass) im Laborsystem

$$\vec{v} + \vec{v}_S = \vec{v}^*$$

Der Reziprozitätssatz:



$$\frac{\frac{d\sigma_{i \rightarrow f}}{d\Omega}}{\frac{d\sigma_{f \rightarrow i}}{d\Omega}} = \frac{(2I_b + 1)(2I_B + 1)}{(2I_a + 1)(2I_A + 1)} \frac{k_f^2}{k_i^2}$$

- Unter der fundamentalen Voraussetzung der Zeitumkehrinvarianz lassen sich also zwei Kernreaktionen miteinander verknüpfen, wenn man die Drehimpulse der Reaktionspartner kennt und die Impulse / Wellenzahlen k_i/k_f in den Ein- und Ausgangskanälen berücksichtigt.

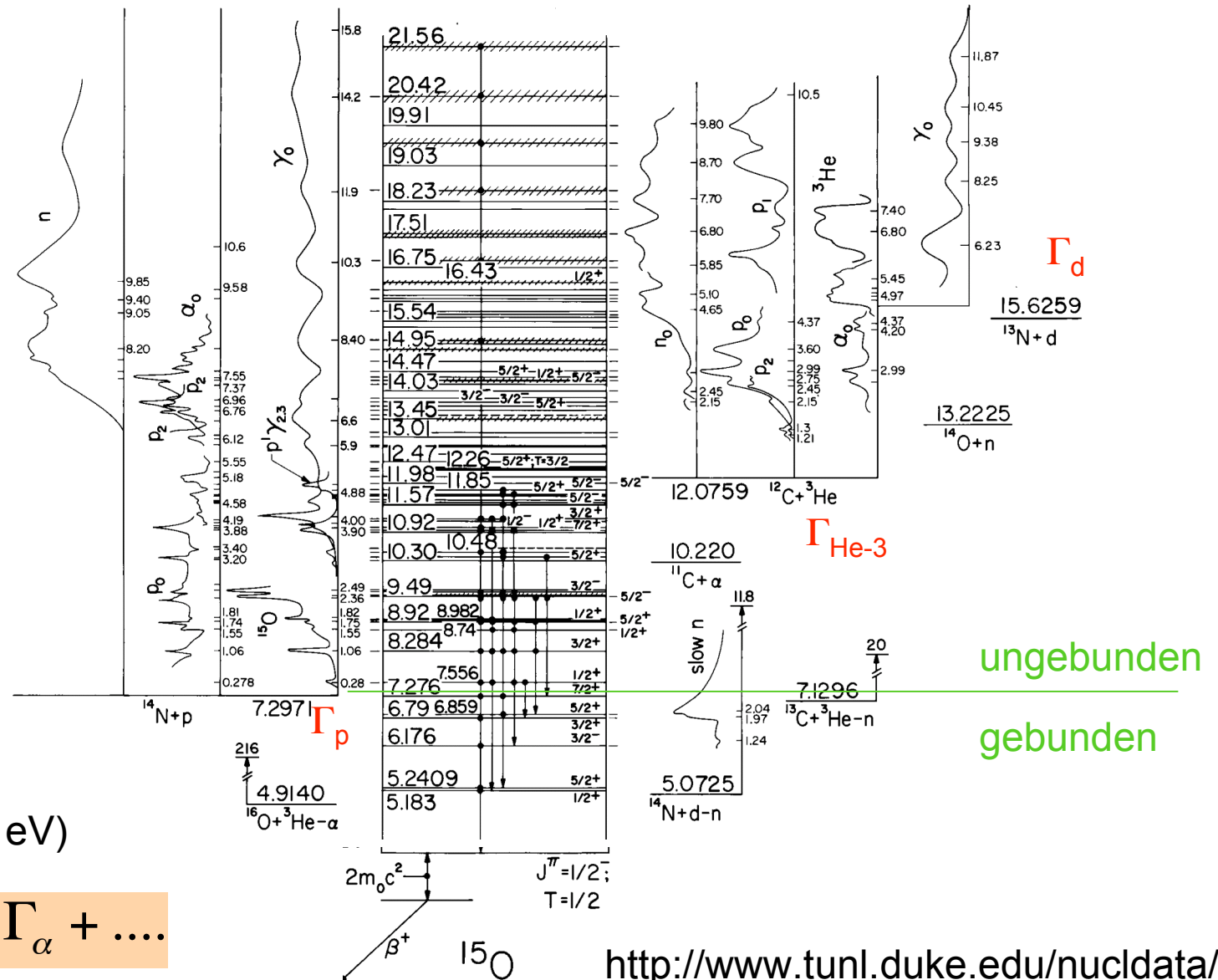
Insbesondere kann man Synthese und Photodissoziation des Deuterons zueinander in Beziehung setzen:



Resonanz
 in der Reaktion
 $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$
 =
 Energieniveau
 im Kern ^{15}O

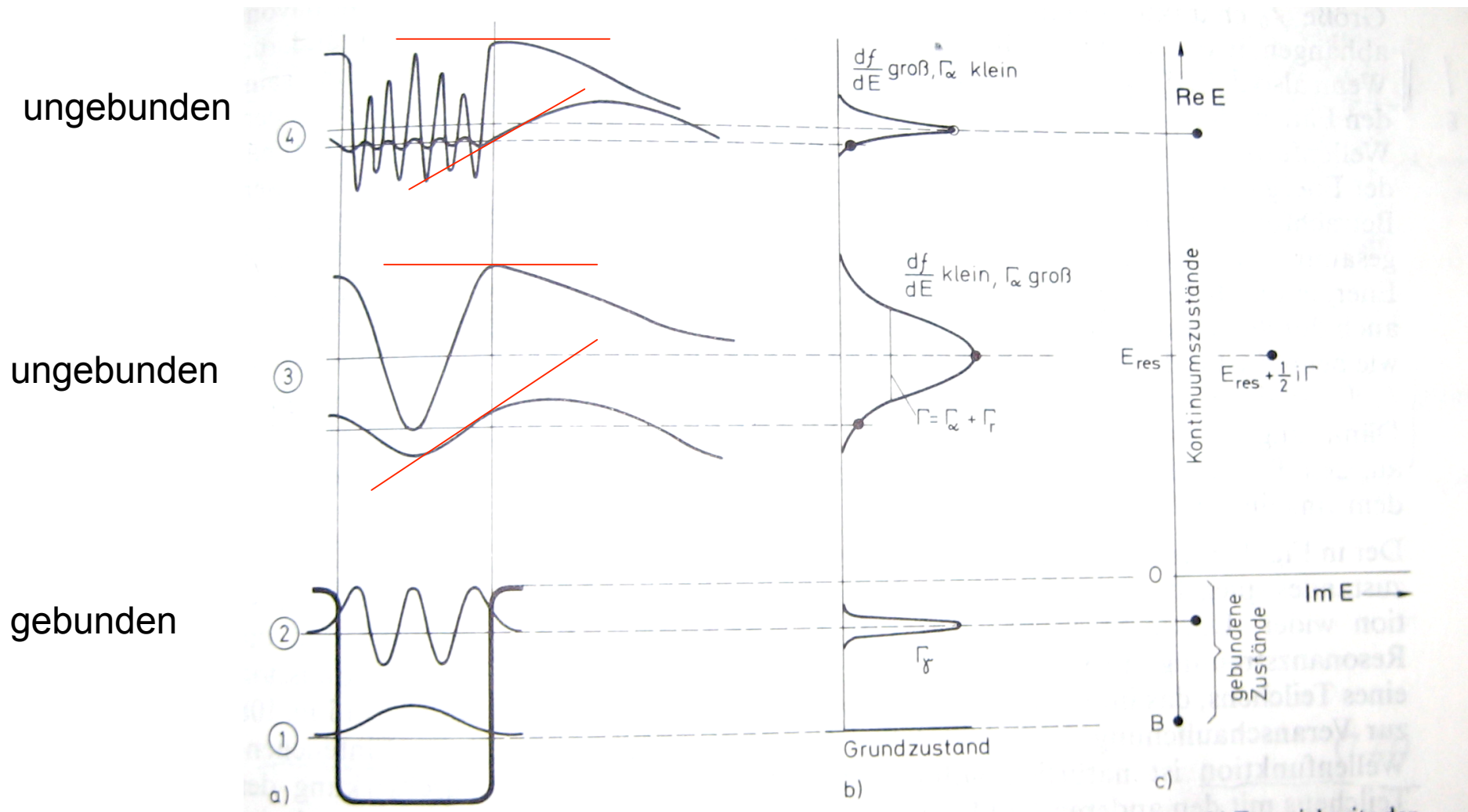
Energetische Breite (in eV)

$$\Gamma = \Gamma_p + \Gamma_\gamma + \Gamma_n + \Gamma_\alpha + \dots$$



<http://www.tunl.duke.edu/nucldata/>

Resonanzbreite = Änderung der Tangente



Anwendung der Potenzialstreuung: $^{89}\text{Y}(\alpha, \alpha)^{89}\text{Y}$

- Verschiedene Formen des Potenzials können an den elastischen Streudaten getestet werden.

G. Kiss et al., J. Phys. G 35, 014037 (2008)

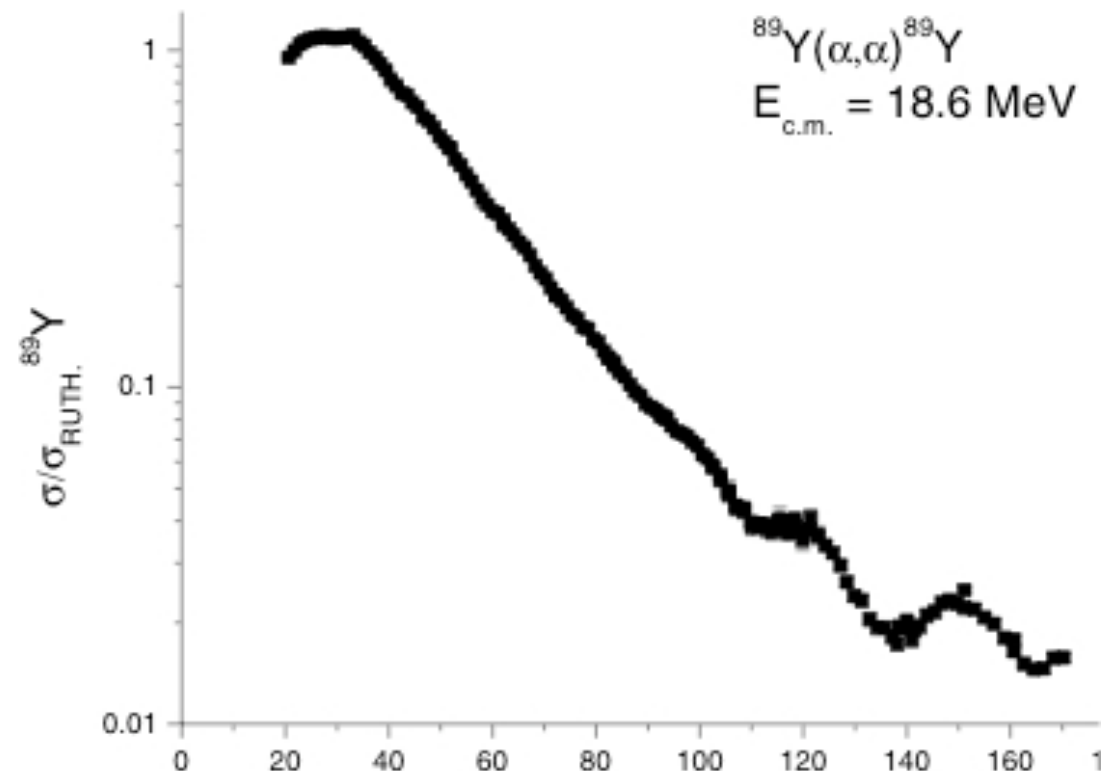
Schrödinger-Gleichung:

$$u_\ell'' + \left(k^2 - U(r) - \frac{\ell(\ell+1)}{r^2}\right)u_\ell = 0$$

mit Potenzial $U(r)$:

$$U(r) = \frac{Z_{\text{Projektil}} Z_{\text{Target}} e^2}{r} + V(r) + iW(r)$$

Coulomb (Rutherford- Streuung)	elastische Streuung	Kern- reak- tionen
	Kernpotenzial	



The Giant Dipole Resonance in ^{197}Au and a fit with the modified Breit-Wigner formula

A. Bohr & B. Mottelson, Nuclear Structure – Dipole Modes

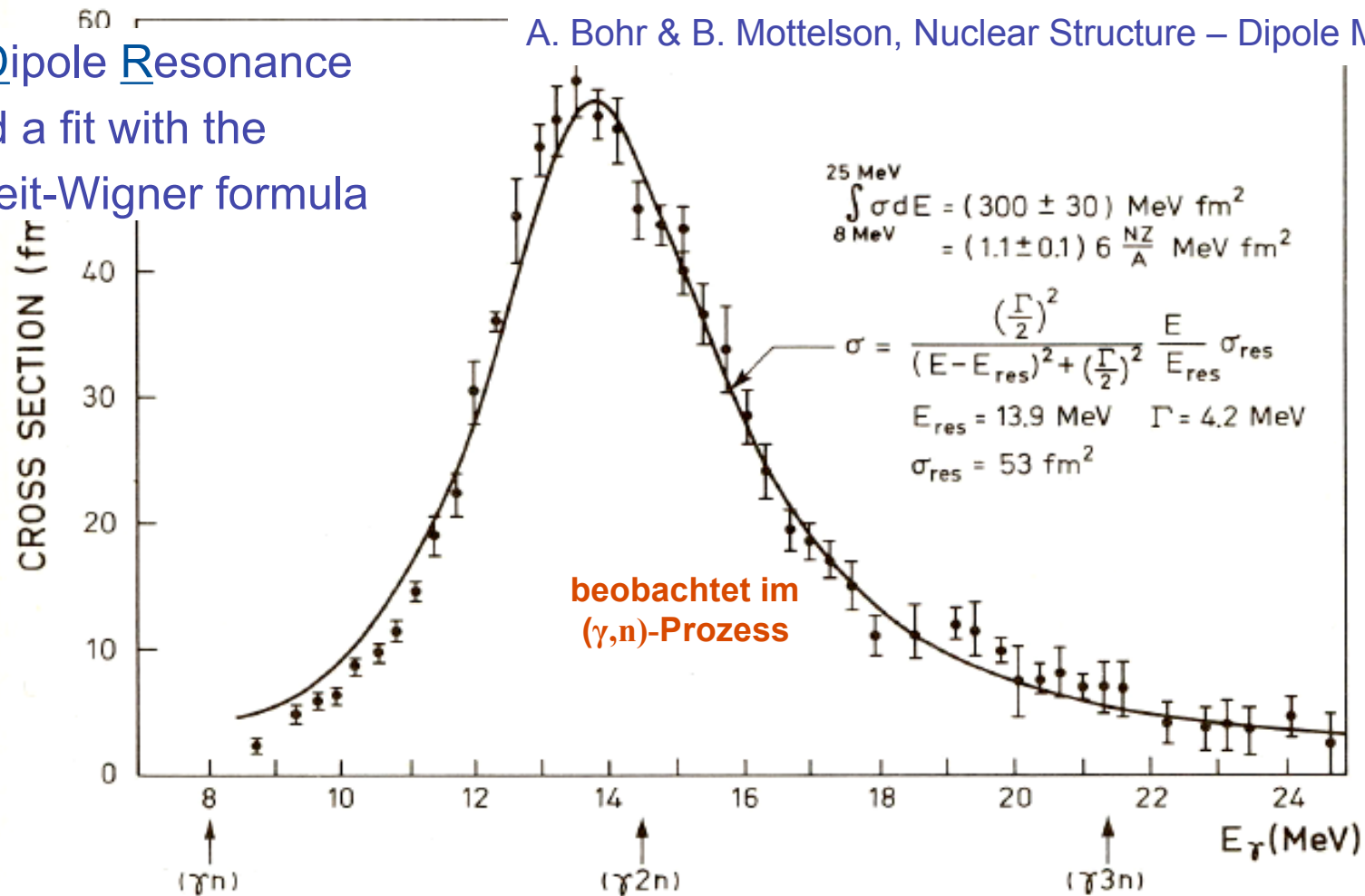
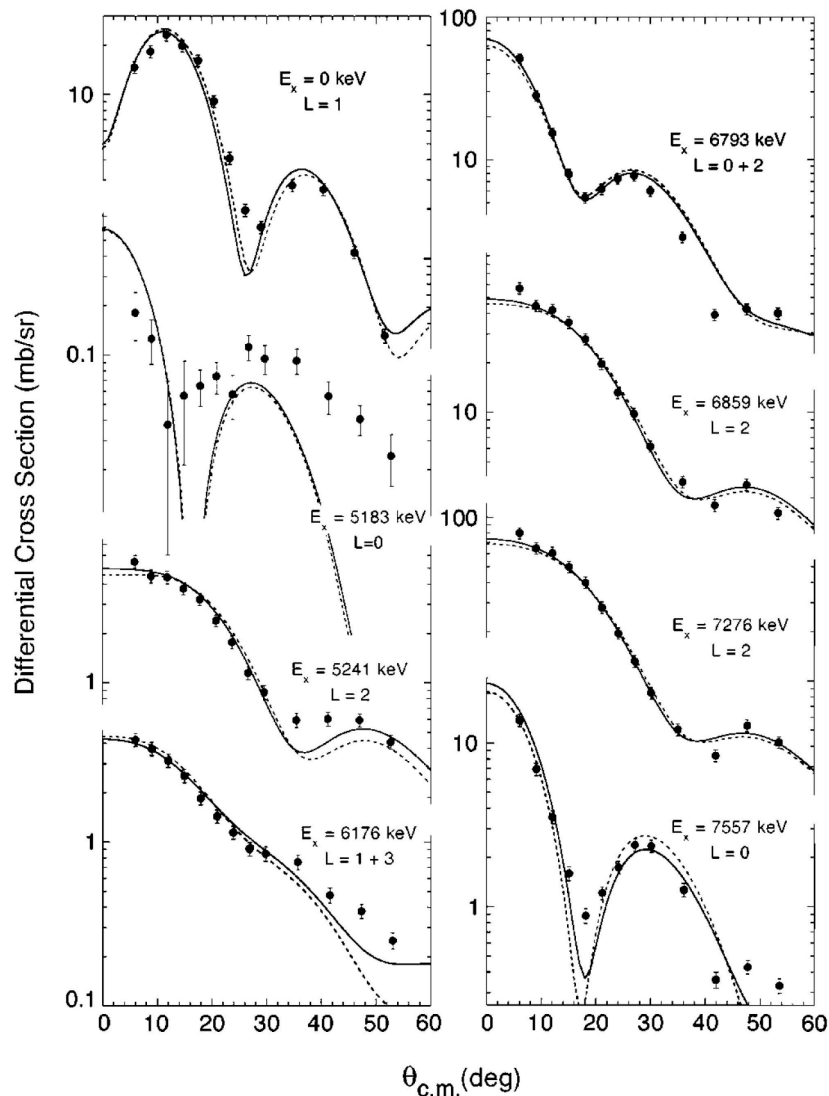


Figure 6-18 Total photoabsorption cross section for ^{197}Au . The experimental data are from S. C. Fultz, R. L. Bramblett, J. T. Caldwell, and N. A. Kerr, *Phys. Rev.* **127**, 1273 (1962). The solid curve is of Breit-Wigner shape with the indicated parameters.

Winkelverteilung einer direkten Reaktion, Stripping $^{14}\text{N}(^3\text{He},d)^{15}\text{O}$



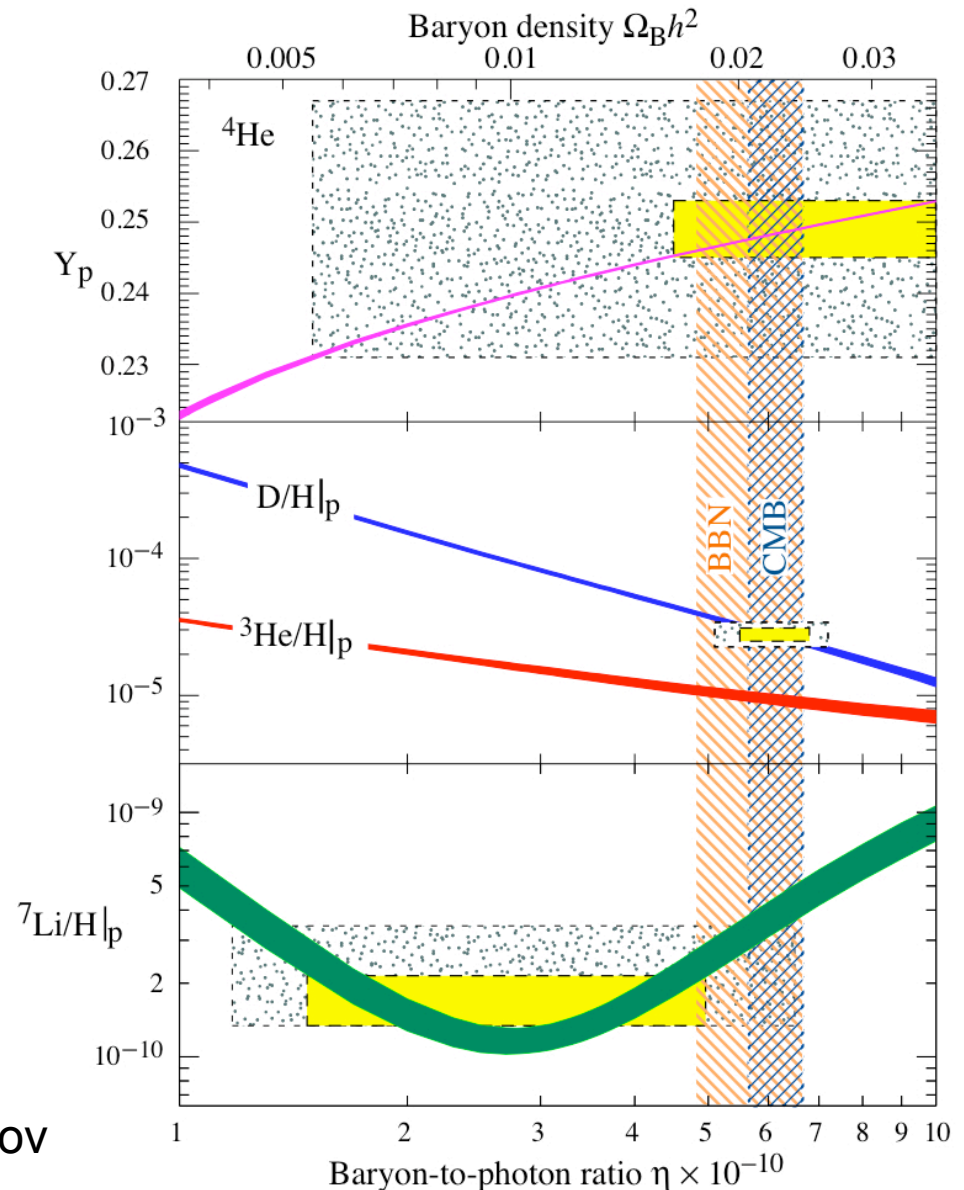
- Winkelverteilung zeigt ein starkes Maximum bei 0° (Vorwärtsrichtung)
- Spin- und Paritätsmessung (mittels Winkelkorrelationen, 8. VL)
- Vergleich mit DWBA-Rechnungen mit verschiedenen Potenzialformen
- Beschreibung des Einfangs in verschiedene Endzustände desselben Kerns

Bertone et al., Phys. Rev. C 66, 055804 (2002)

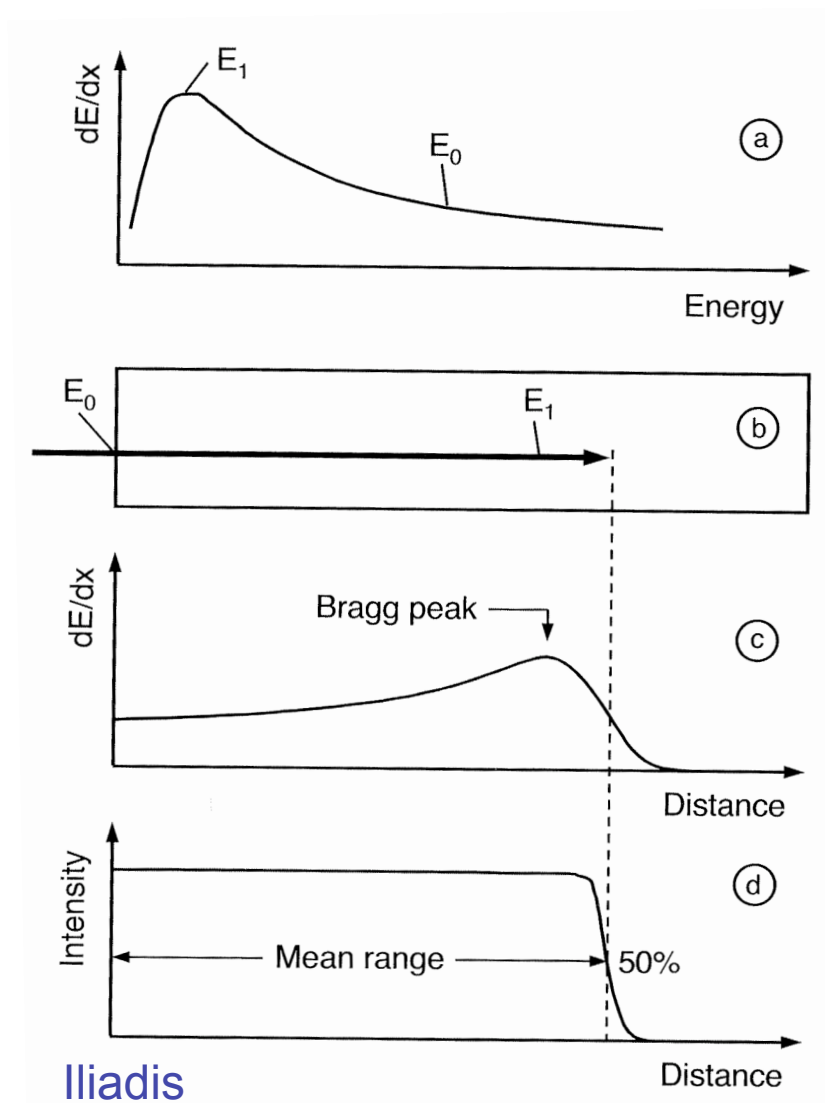
Informationsquelle, alternativ zum kosmischen Mikrowellen-Hintergrund: Die leichten Elemente ^2H , $^3,^4\text{He}$, $^6,^7\text{Li}$

- Messung der Häufigkeit Y von Elementen in der interstellaren Materie oder in alten Sternen = BBN
- Vergleich mit $\eta \propto \Omega_B$ aus dem Mikrowellen-Hintergrund = CMB
- Diese beiden Informationsquellen liefern konsistente Ergebnisse!

<http://pdg.lbl.gov>



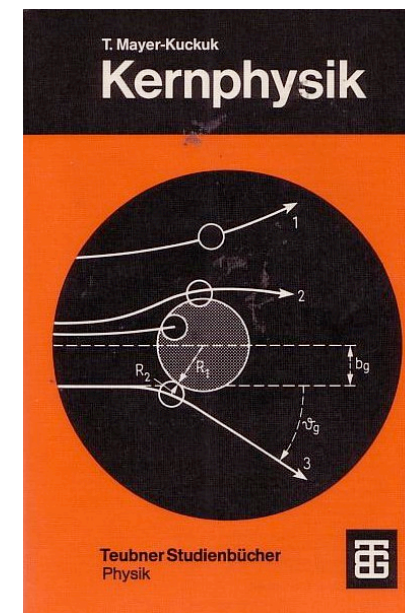
Folgen des Energieverlusts



1. Energieverlust („stopping power“) wie vorhin beschrieben
2. Energie am Ort x
3. Energieverlust am Ort x (wichtig z.B. für Krebstherapie)
4. Noch nicht gestoppte Projektile am Ort x (range straggling)

Weiterführende Literatur

- T. Mayer-Kuckuck:
Kernphysik. Teubner Studienbuch. 7. Aufl. 2002
- B. Povh, Rith, Scholz, Zetsche:
Teilchen und Kerne. Springer. 7. Aufl. 2006
- G. Musiol, J. Ranft, R. Reif, D. Seeliger:
Kern- und Elementarteilchenphysik. Harri Deutsch, 2. Aufl. 1995
- Web-Ressourcen (frei zugänglich)



<http://pdg.lbl.gov>

<http://arxiv.org>

<http://www.nndc.bnl.gov>

Particle Data Group: Teilcheneigenschaften

Original-Veröffentlichungen

Informationen zu (nicht nur radioaktiven) Kernen

Webseite der Vorlesung:

<http://www.fzd.de/db/Cms?pOid=26617>