

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

13. Vorlesung, TU Dresden 08.07.2008

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, heute

- Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung I

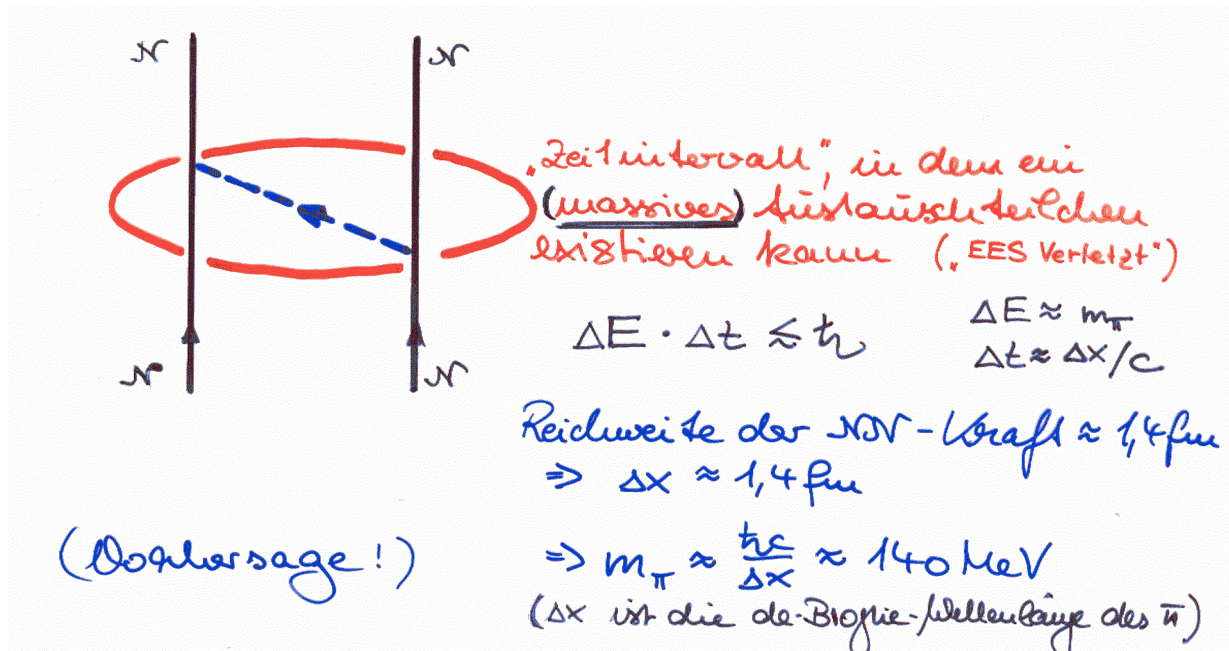
Folien im Internet: <http://www.fzd.de/db/Cms?pOid=26617>

Phänomenologie der Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung

Yukawa 1935: Es gibt ein Teilchen, das die Kernkraft vermittelt.

Allgemein: Es gibt keine Punkt-Wechselwirkung und keine instantane Fernwechselwirkung!

Wechselwirkung ↔ Teilchenaustausch



1947 Entdeckung der Pionen in der kosmischen Strahlung.

Die Tensorkraft (aus Eigenschaften des Deuterons)

Quadrupolmoment des Deuterons $Q = 2,86 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2$ (bei $\mu = 0,857393 \mu_N$)

Q ist klein, aber nicht Null.

⇒ Das Deuteron zeigt eine, wenn auch geringe, Abweichung von der Kugelgestalt. Daher muss das Potential einen nicht zentralen Anteil enthalten!

⇒ Die Kraft enthält einen Spin-abhängigen Anteil. Dieser wirkt auf den Radialteil der Wellenfunktion und erzeugt die kleine Abweichung von $\mu_d = \mu_n + \mu_p$.

$$\textit{TENSORKRAFT}: \quad \mathbf{S}_{12} V_T(r) = \left(\frac{3(\sigma_1 \cdot \vec{r}) \cdot (\sigma_2 \cdot \vec{r})}{r^2} - \sigma_1 \cdot \sigma_2 \right) V_T(r)$$

$$\textit{mit} \quad \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \quad ; \quad r = |\vec{r}_2 - \vec{r}_1| = |\vec{r}|$$

$\mathbf{S}_{12}$ ist ein Tensor 2. Stufe im Orts- und Spinraum.

Spin-Bahn-Wechselwirkung

Streuphasen für $L > 0$

Polarisationsobservablen $\Rightarrow$ Es gibt eine $\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$ -Wechselwirkung!

Spin – Orbit : $(\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}) V_{so}(r)$ mit : $\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$; $\vec{p} = \frac{1}{2}(\vec{p}_2 - \vec{p}_1)$

$$\Rightarrow \vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

$$d.h. \quad \mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} ; \quad \mathbf{S} = \frac{1}{2}(\hat{\mathbf{o}}_1 + \hat{\mathbf{o}}_2)$$

$\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$ vertauscht mit $\mathbf{J}^2, \mathbf{L}^2, \mathbf{S}^2, \mathbf{J}_z \Rightarrow J, M, L, S$ QZ zu V_{so}

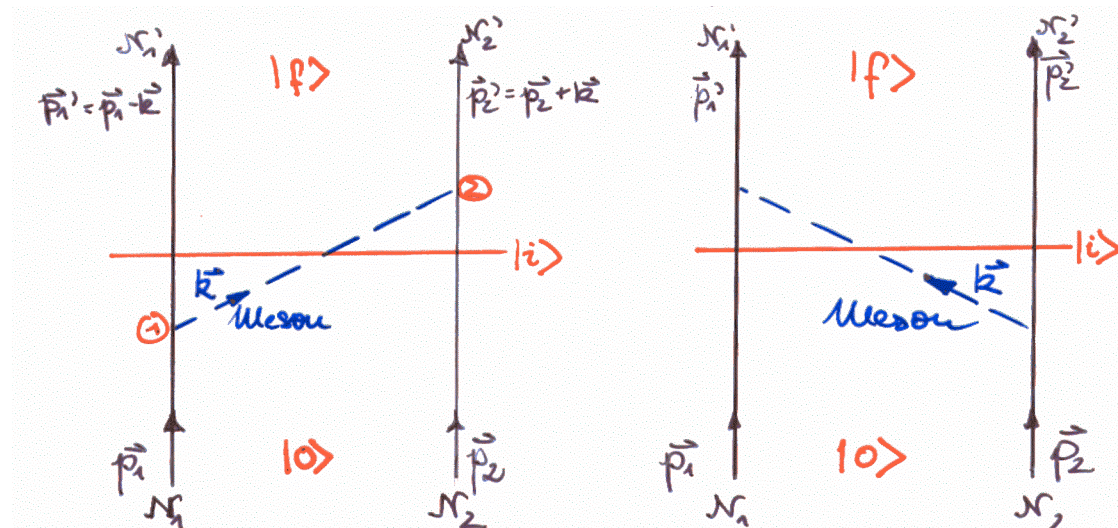
Eigenwerte von $\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} : \frac{1}{2}(J(J+1) - L(L+1) - S(S+1))$

Forderungen an das NN-Potential, die sich aus Experimenten ableiten lassen:

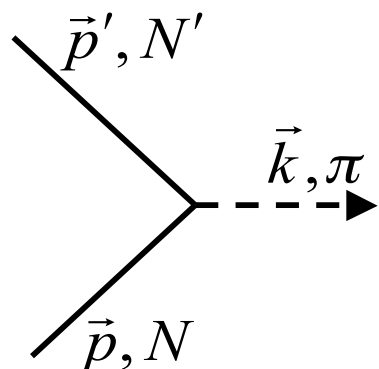
1. Kurze Reichweite $R \sim R_{p,n}$ (endliche Masse des Pions)
2. Attraktive Kraft bei „mittleren Abständen“ (im Vergleich mit R_N)
3. Repulsiver Core (phase shifts)
4. Tensorkraft (Deuteron)
5. Spin-Bahn-Kraft

Quantitative Beschreibung (in Störungstheorie)

(z.B. G.E. Brown and A.D. Jackson, The Nucleon-Nucleon Interaction, North Holland Publ. Co., Amsterdam 1976)



Grafische Beschreibung von Wechselwirkungen, formale Beschreibung in Feldtheorie



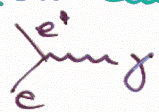
entspricht einer Lagrangedichte $\delta L = - \delta H = g_s \psi_{N'}^+ \phi_S \psi_N$

$$g_s \psi_{N'}^+ \phi_S^+ \psi_N$$

wobei $\left. \begin{array}{l} \psi_{N'}^+ \text{ Erzeugung} \\ \psi_N \text{ Vernichtung} \end{array} \right\} \text{ eines Nukleons}$

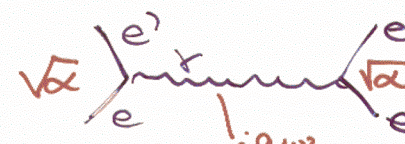
$\left. \begin{array}{l} \phi_S^+ \text{ Erzeugung} \\ \phi_S \text{ Vernichtung} \end{array} \right\} \text{ eines (skalaren) Mesons}$

g_s misst die Stärke der Kopplung des (skalaren) Mesons an das Nukleon.

ANALOG findet man in der Quantenelektrodynamik Graphen der Form ; die Kopplungskonstante ist $\sqrt{\alpha}$ in jedem Vertex, die totale Amplitude für die WW zweier Elektronen z.B. ist:

Meson:

$$\sim \frac{1}{q^2 - \mu^2 + i\epsilon}$$



$$- \frac{ig_{\mu\nu}}{q^2 + i\epsilon}$$

(vgl. z.B.

QED-Ableitung der Rutherford-Streuung bei Bohr)

Störungsrechnung zweiter Ordnung:
$$V = \frac{\langle f | \delta H | i \rangle \langle i | \delta H | 0 \rangle}{E_0 - E_i}$$

Berechnung:

Eingangskanal $E_0 = E_1 + E_2 \quad E_{1/2}^2 = p_{1/2}^2 + m_N^2$

$$|\vec{p}_{1/2}| \ll m_N$$

Intermediate State $E_i = E_1' + E_k + E_2$

$$\Rightarrow E_0 - E_i = E_1 - E_1' - E_k$$

Statische Näherung: $E_1' = \sqrt{(\vec{p}_1 - \vec{k})^2 + m_N^2} \approx E_1$

$$\Rightarrow E_0 - E_i \approx -E_k = -\sqrt{\mu^2 + k^2}$$

$$\mu = \frac{m_{\text{MESON}}}{\hbar c}$$

$$\langle i | \delta H | 0 \rangle = g_s \langle N_1' N_2 M | \psi_{N_1'}^+ \phi_S^+ \psi_{N_1} | N_1 N_2 M \rangle$$

$$= g_s \langle N_1' N_2 M | N_1' N_2 M \rangle$$

$$= g_s \sqrt{\frac{2\pi}{E_k}} \quad (\text{nach Normierung von } M \text{ und } N)$$

Analog $\langle f | \delta H | i \rangle = g_s \sqrt{\frac{2\pi}{E_k}}$

$$\Rightarrow V = -\frac{2\pi g_s^2}{E_k^2} \times 2 \quad (1 \leftrightarrow 2 \text{ Austausch})$$

$$V = -\frac{4\pi g_s^2}{\mu^2 + k^2}$$

Wechselwirkungspotential in Impulsraumdarstellung

Impulsraum $\leftrightarrow$ Ortsraum

Fouriertransformation

$$\begin{aligned} V(\vec{r}) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int d\vec{k} e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} V(\vec{k}) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty k^2 dk V(\vec{k}) \iint e^{ik \cdot r \cos \theta} d\cos \theta d\varphi \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty k^2 dk V(k) 2\pi \left(-\int_{-1}^1 e^{ikrX} dX \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} X := \cos \theta \\ dX := -\sin \theta d\theta \end{array} \right\} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty k^2 dk V(k) \frac{-2\pi}{ikr} (e^{ikr} - e^{-ikr}) \\ &= -\frac{2g_s^2}{i\pi r} \int_{-\infty}^\infty \frac{k}{\mu^2 + k^2} e^{-ikr} dk \end{aligned}$$

Lösung mit Residuensatz in der komplexen k -Ebene oder Aufspaltung von e^{ikr} ,
Symmetriebetrachtungen und Bronstein

$$V(r) = -g_s^2 \frac{e^{-\mu r}}{r}$$

Yukawa-Potential

Pion : Pseudoskalar

$$\Rightarrow \delta L = -\frac{g_{ps}}{\mu} \psi^+ (\sigma \cdot \nabla) (\tau \cdot \Phi) \psi$$

$$V(\vec{k}) = \frac{g_{ps}^2}{\mu^2} 4\pi (\tau_1 \cdot \tau_2) \frac{(\sigma_1 \cdot \vec{k})(\sigma_2 \cdot \vec{k})}{E_k^2}$$

...

$$= \frac{g_{ps}^2}{\mu^2} 4\pi (\tau_1 \cdot \tau_2) (\sigma_1 \cdot \nabla) (\sigma_2 \cdot \nabla) \frac{e^{-\mu r}}{r}$$

S₁₂: Tensorwechselwirkung; Spin-Anteil; Isospin-Abhängigkeit

(Analogie: Photonenaustausch zwischen gleichen Ladungen)

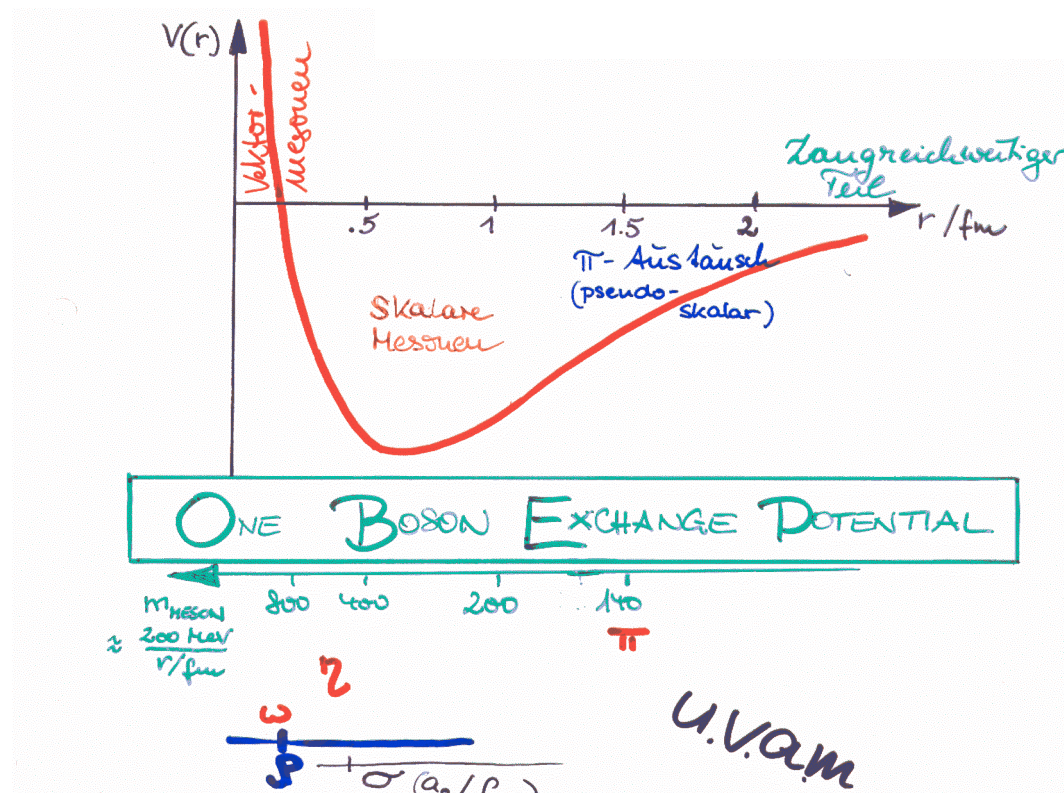


TABLE 3.1

Various Meson-Nucleon Couplings and their Contributions to the Nuclear Force as Obtained from One-Boson Exchange

I denotes the isospin of a boson. The characteristics quoted refer to $I = 0$ bosons (no isospin dependence). The isovector ($I = 1$) boson contributions, carrying a factor $\tau_1 \cdot \tau_2$, provide the isospin-dependent forces.

Coupling	Bosons (Strength of coupling)		Characteristics of predicted forces			
	$I = 0$ [1]	$I = 1$ [$\tau_1 \cdot \tau_2$]	Central [1]	Spin-Spin [$\sigma_1 \cdot \sigma_2$]	Tensor [S_{12}]	Spin-Orbit [$L \cdot S$]
ps	η (weak)	π (strong)	—	Weak, coherent with v, t	Strong	—
s	σ (f_0) (strong)	δ (a_0) (weak)	Strong, attractive	—	—	Coherent with v
v	ω (strong)	ρ (weak)	Strong, repulsive	Weak coherent with ps	Opposite to ps	Strong, coherent with s
t	ω (weak)	ρ (strong)	—	Weak, coherent with ps	Opposite to ps	—

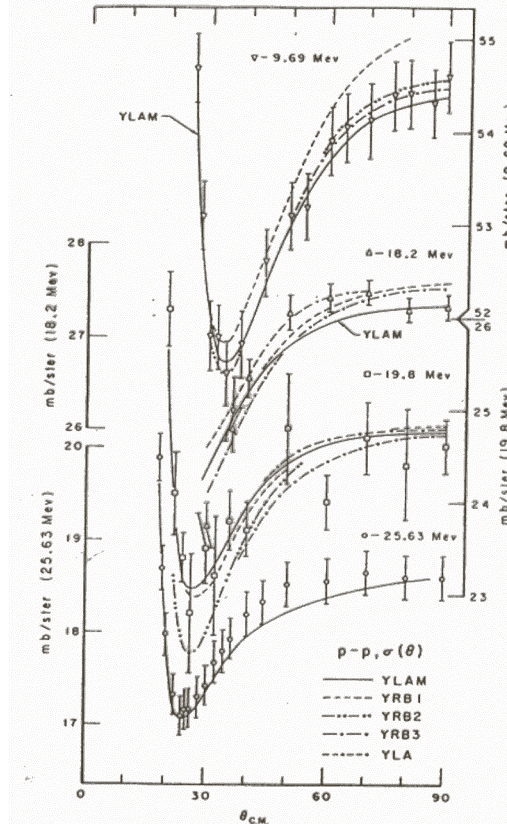
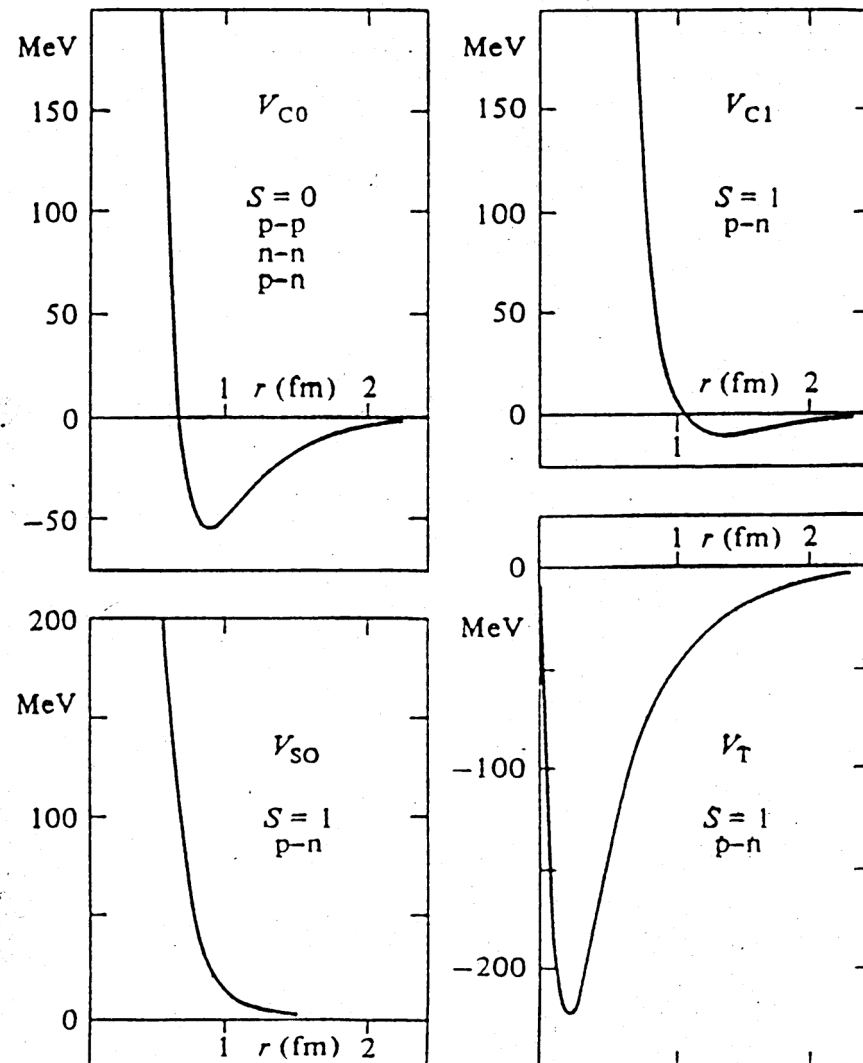


FIG. 7. Representations of the proton-proton differential scattering cross section, $\sigma(\theta)$, at 9.69, 18.2, 19.8, and 25.63 MeV as a function of the center-of-mass scattering angle, θ , provided by phase parameters of Figs. 1-6 combined with OPEP values for phase parameters as described in the text. The curves are being compared with experiment. The same conventions regarding full and dashed lines with gradient searches is used as in preceding figures. Data sources for this and succeeding figures are listed in Tables I and II. Different designations of experimental points are used to distinguish between different energies. Data at 25.63 MeV became available after completion of all searches other than YLAM and are compared with that fit only. Cross-section data at 14.16 MeV mentioned in footnote^b to Table I, which were available only for late work on YLAM, are not compared with prediction in this figure. However, the data are well fitted by YLAM: the weighted mean square error for these data alone is 0.55.

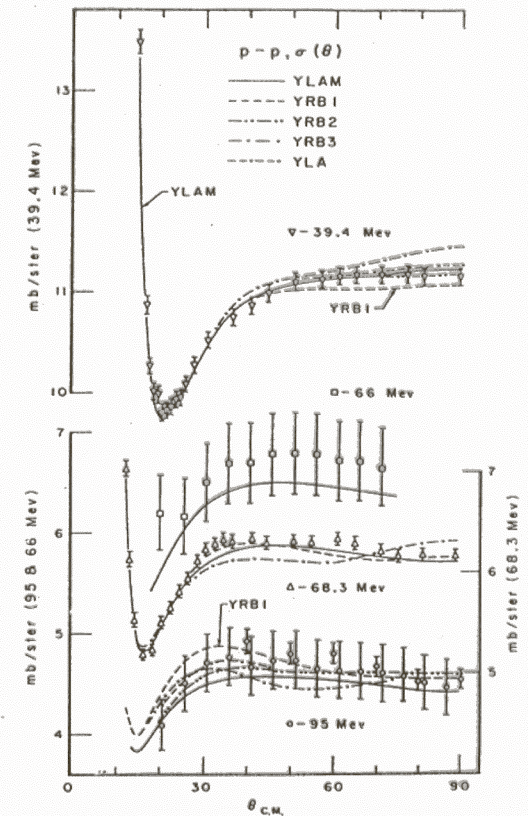


FIG. 8. Representations of the proton-proton differential scattering cross section, $\sigma(\theta)$, at 39.4, 66, 68.3, and 95 MeV compared with experiment. Data at 66 MeV were omitted in searches other than YLAM. At 66 and 95 MeV the fit YLAM is seen to fall consistently below the measured values. The data shown in this and other figures are directly as published, even though adjustments of the Harvard data have been made for probable shifts in the YLAM search.

The most important components of the 'Paris p
(After Lacombe, M. et al. (1980), Phys. Rev. C21,

G. Breit et al. Phys. Rev. 120 (1960) 2227

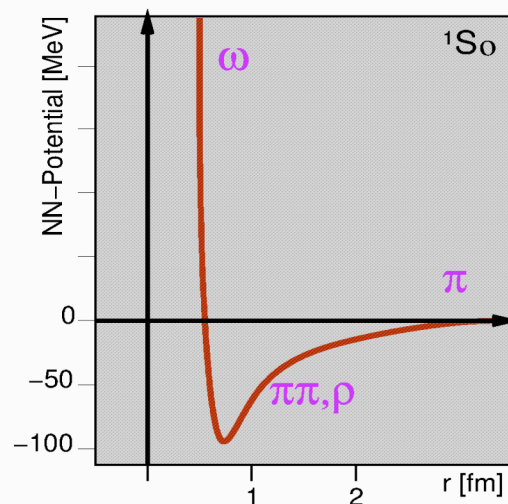
Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung

Kernkraft

- endliche Reichweite
- $R \sim 1\text{--}2\text{ fm}$: attraktiv
- $R < 0.5\text{ fm}$: abstoßend
- Tensorkraft
- Spin-Orbit-Kraft

Austauschkraft:

One Boson Exchange

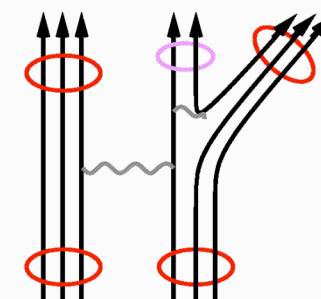
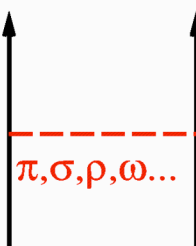


QCD

*Diffraktionsmodelle
(Optische Potentiale)*

**Mesonen und
Baryonen-
resonanzen**

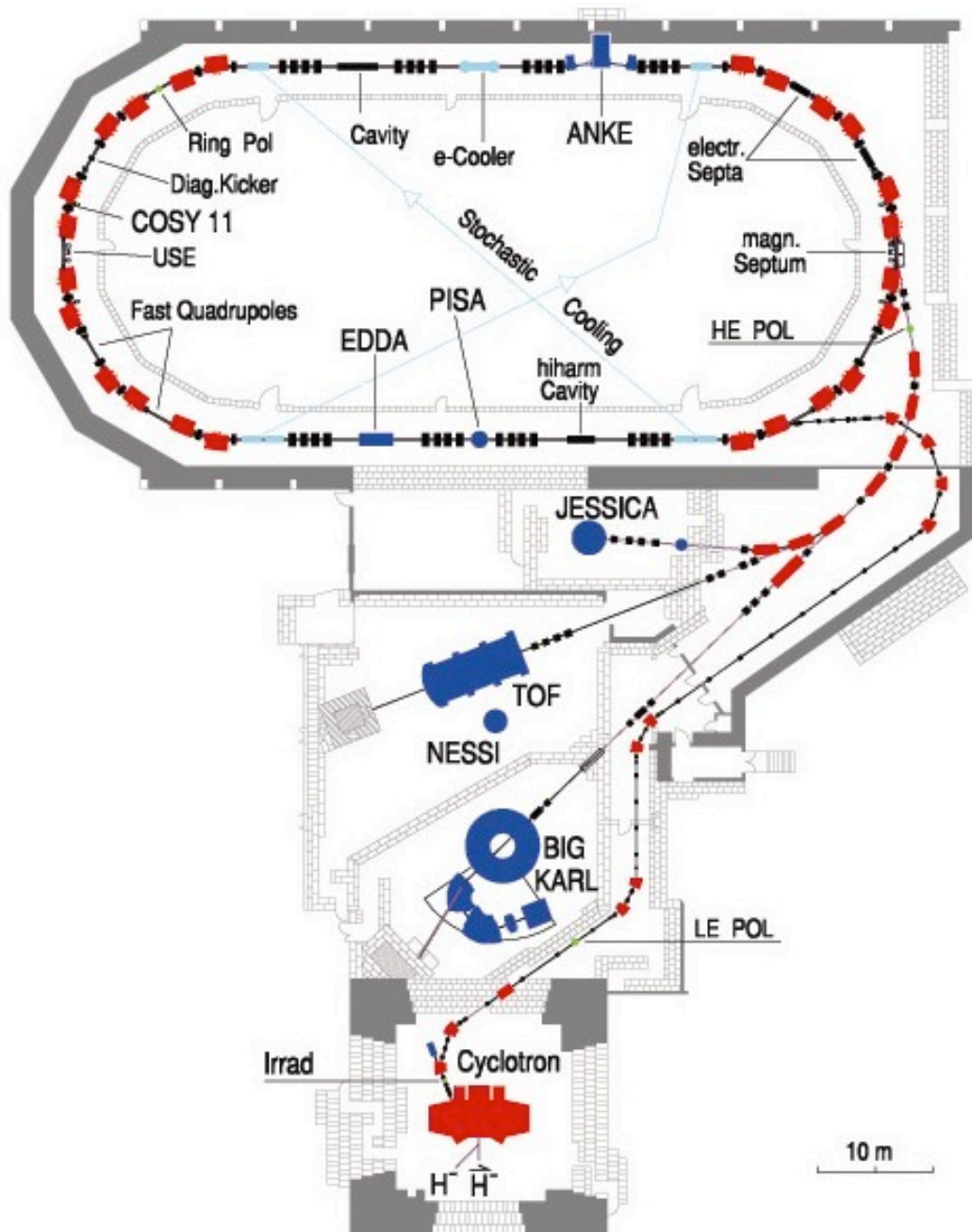
Strangeness



*Nichtperturbative QCD
Chirale Störungstheorie*



K.-Th. Brinkmann

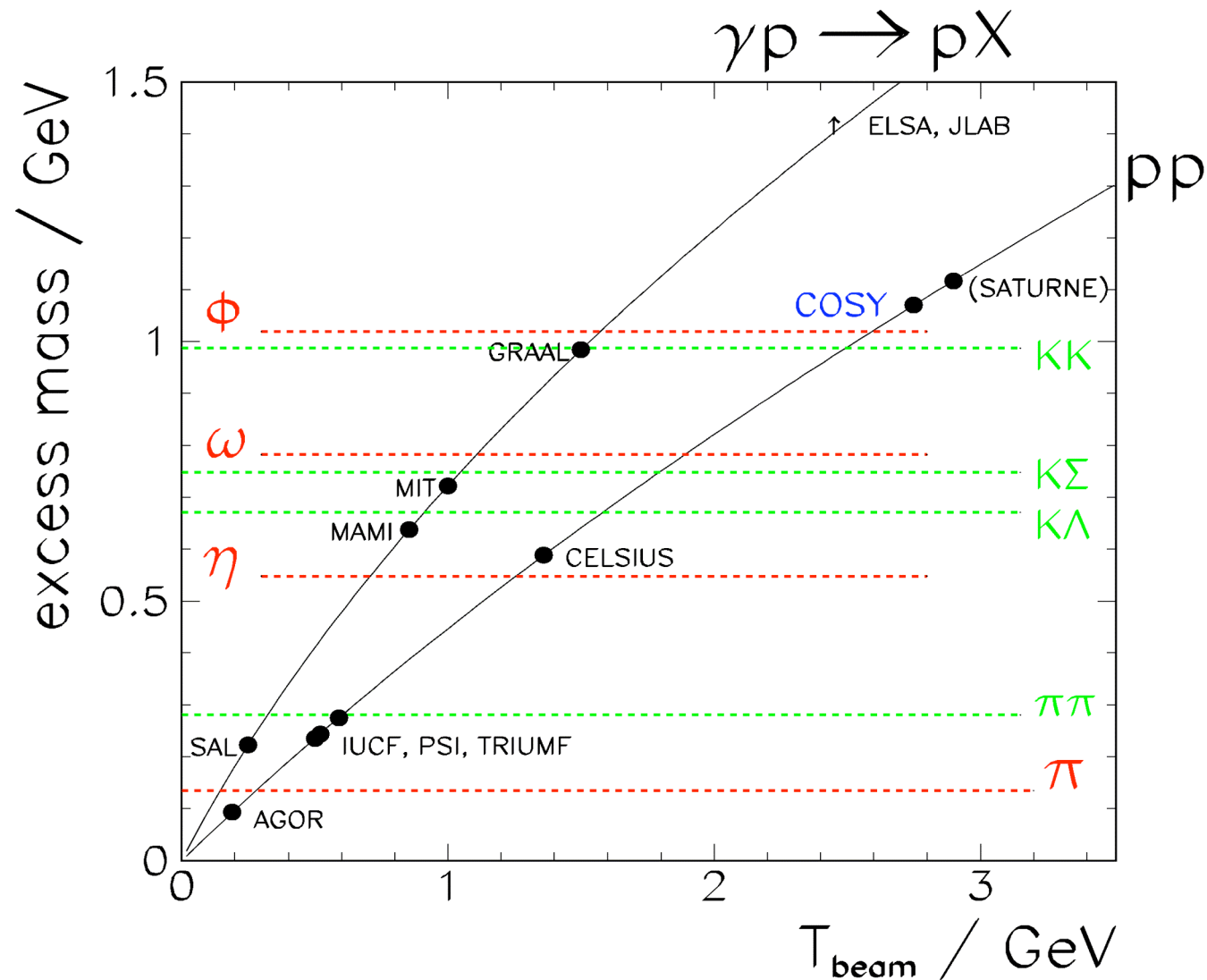


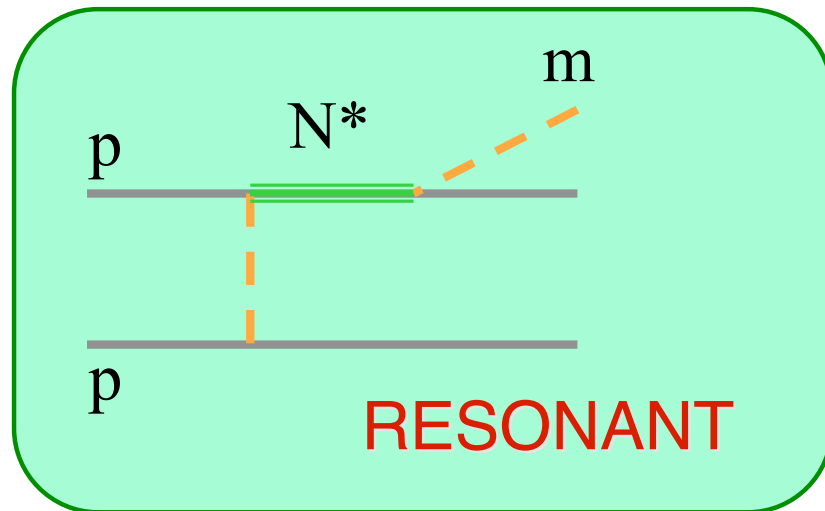
- 184 m Umfang
- 10^{11} Protonen pro Füllung
@ 620 MeV (25 mA, $T \sim 600$ ns)
- $p_{C_{MAX}} = 3.7$ GeV
- $\Delta p/p \leq 10^{-4}$, $\varepsilon = \pi$ mm mrad
(1 mm $\varnothing \cdot 0,18^\circ$) Strahlkühlung
- bis zu 80% Polarisation

Extrahierter Strahl:

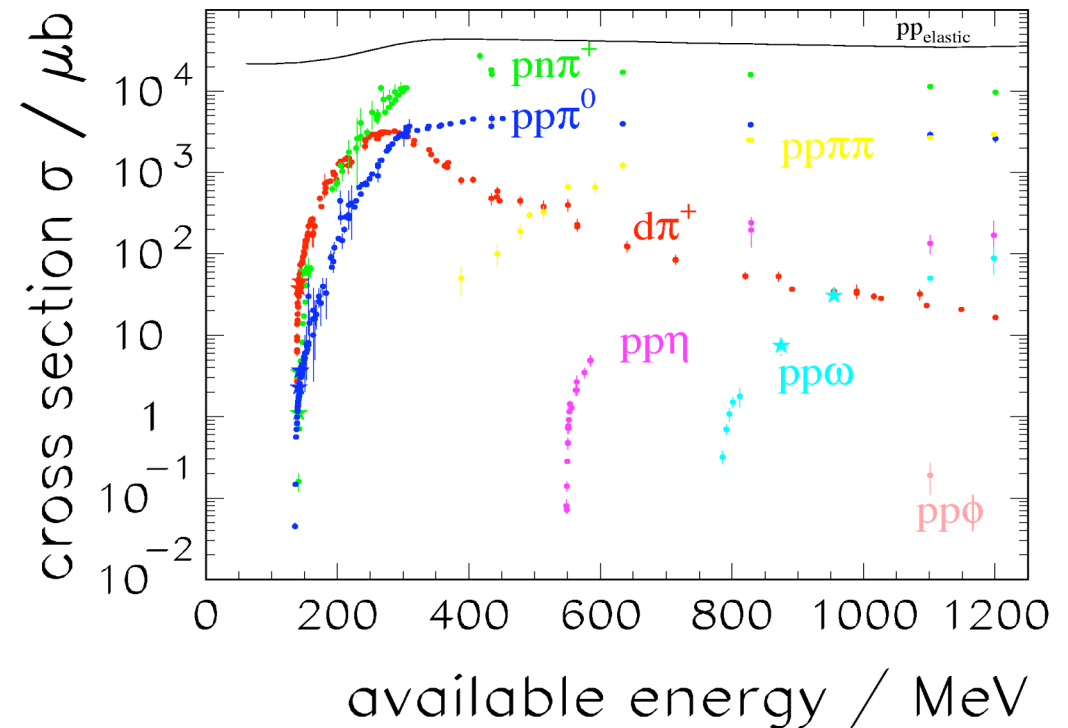
- $10^5 \dots 10^9$ Protonen/s im Spill
- 1 s...>2 min Spill, 5 s Interspill
oder $2 \cdot 10^9$ p in 200 ns
- Quasi-DC, polarisiert

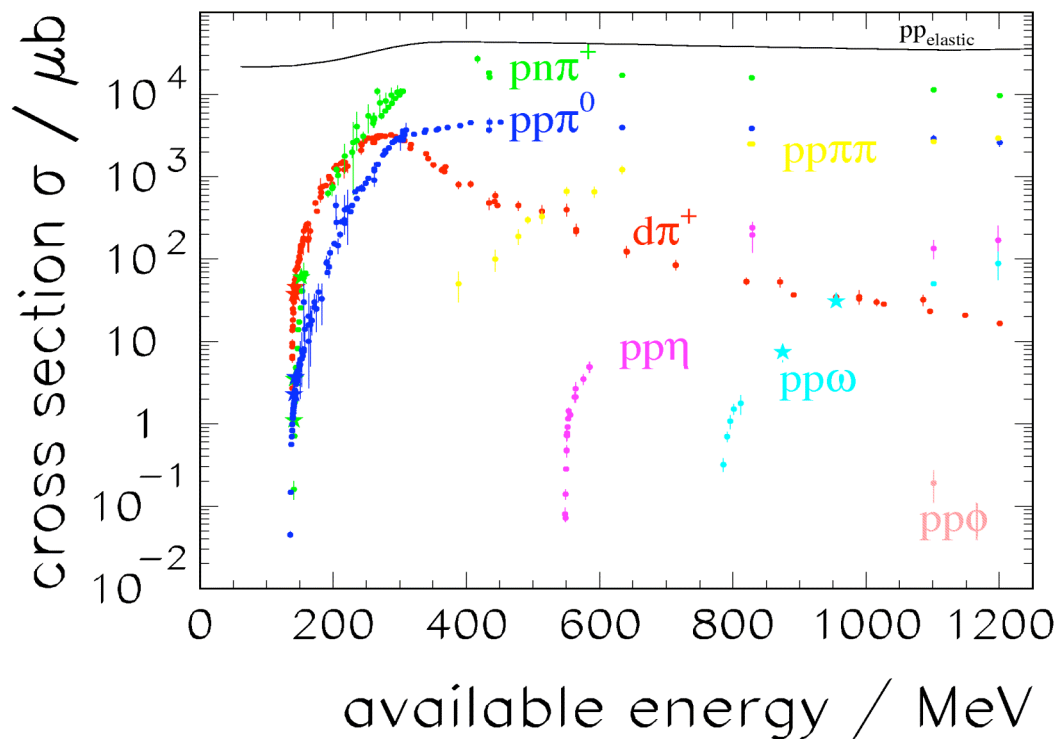
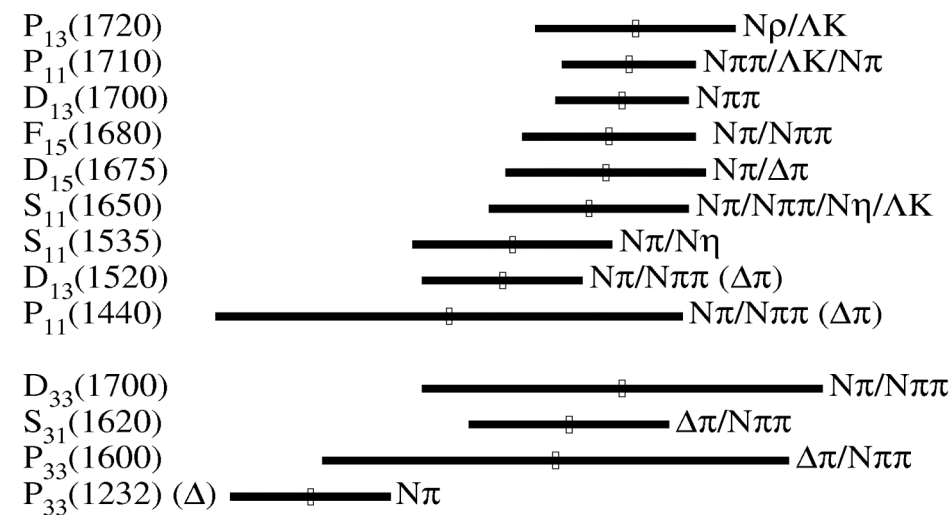
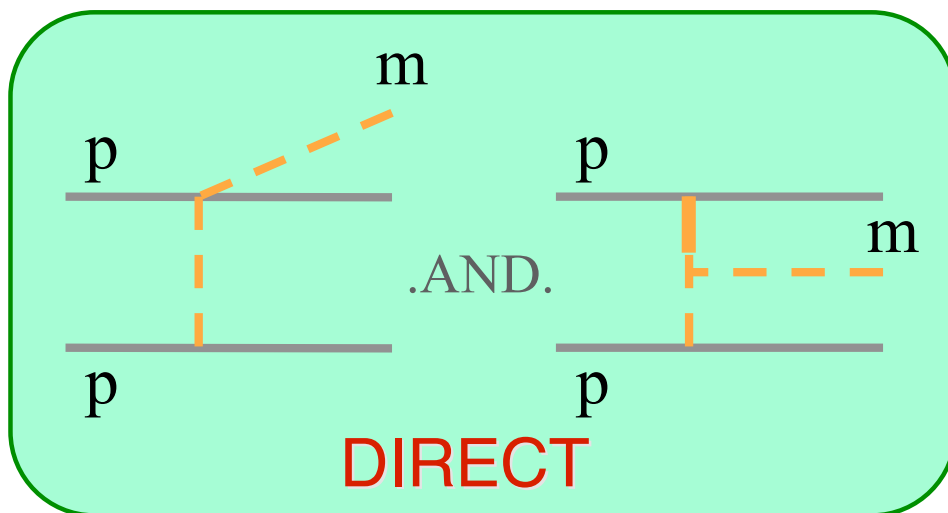
Energetisch erreichbare Teilchen



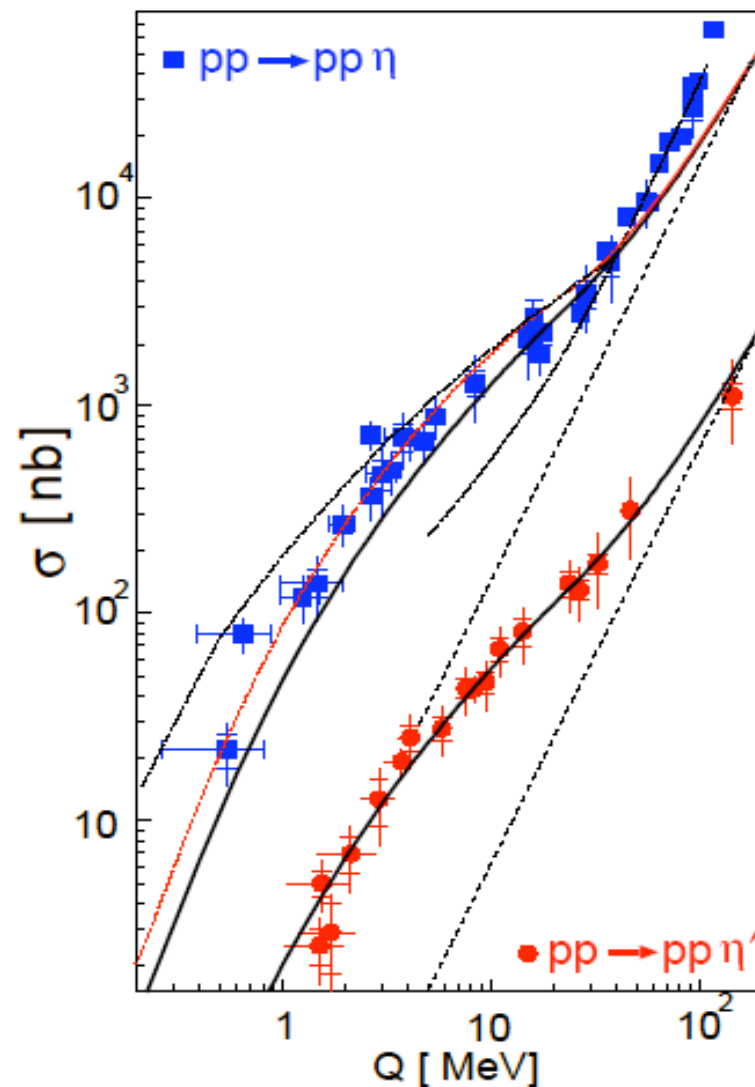
N^*

 Δ

$P_{13}(1720)$	$N\rho/\Lambda K$
$P_{11}(1710)$	$N\pi\pi/\Lambda K/N\pi$
$D_{13}(1700)$	$N\pi\pi$
$F_{15}(1680)$	$N\pi/N\pi\pi$
$D_{15}(1675)$	$N\pi/\Delta\pi$
$S_{11}(1650)$	$N\pi/N\pi\pi/N\eta/\Lambda K$
$S_{11}(1535)$	$N\pi/N\eta$
$D_{13}(1520)$	$N\pi/N\pi\pi (\Delta\pi)$
$P_{11}(1440)$	$N\pi/N\pi\pi (\Delta\pi)$
$D_{33}(1700)$	$N\pi/N\pi\pi$
$S_{31}(1620)$	$\Delta\pi/N\pi\pi$
$P_{33}(1600)$	$\Delta\pi/N\pi\pi$
$P_{33}(1232) (\Delta)$	$N\pi$

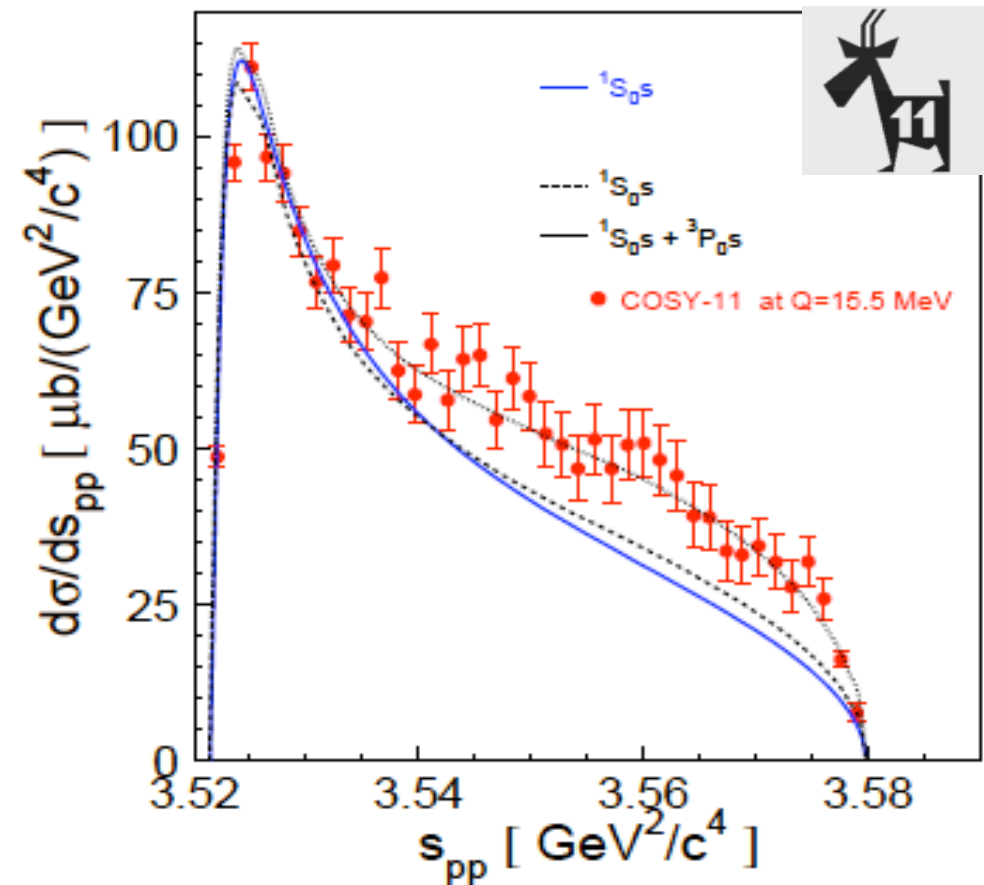




Baryon-Baryon- und Baryon-Meson-Wechselwirkung



$$\vec{p} + p \rightarrow p + p + \eta$$



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

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 (T-Matrix-Formalismus)

13. Vorlesung, heute

- Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung I

14. Vorlesung, nächste Woche

- Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung II (mehr zu COSY)