

Photoinduzierte Zwei Nukleon Emission zur Untersuchung von NN Korrelationen *

F.A. Natter

PiP/TOF Gruppe: Edinburgh, Glasgow, Tübingen
A2 Kollaboration Mainz

7.7.00

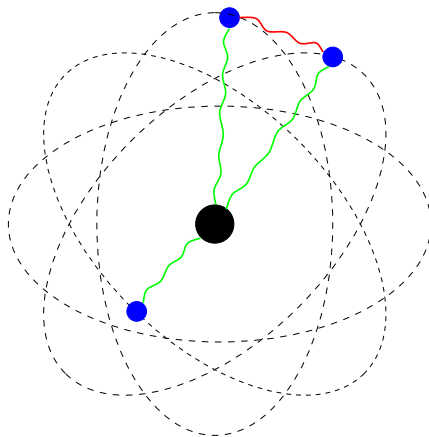
- ▶ Einleitung
 - Kernkraft
 - Schalenmodell und SRC
- ▶ Experimente zu SRC
 - bisherige Experimente
 - experimenteller Aufbau
- ▶ Polarisierte Bremsstrahlung
 - Produktion
 - Beschreibung
- ▶ Die ${}^4\text{He}(\vec{\gamma}, np)$ Reaktion
 - Wirkungsquerschnitte
 - Asymmetrien

* unterstützt durch DFG(Schwerpunkt/Graduiertenkolleg), DAAD, NATO

Schalen - Modell

Experimentelle Beobachtung: Edelgase, magische Zahlen

Atom

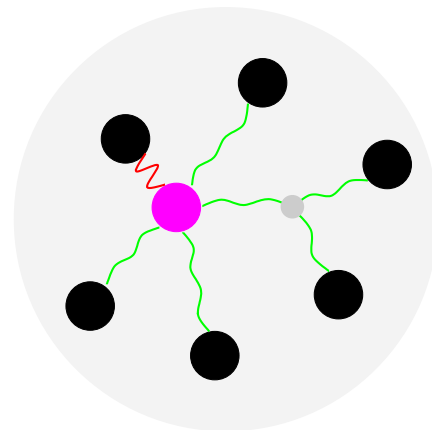


$$V_i = V_i^N + \sum_{j'} V_{ij}^e$$

→ V_i^{Hartree}

attraktives Zentralpotential
repulsives e-e Potential

Kern



$$V_i = \sum_{j'} V_{ij} + \sum_{jk'} V_{ijk}$$

→ $V_i^{\text{mean field}}$: IPM

stark zustandsabhängig
kurzreichweitig repulsiv

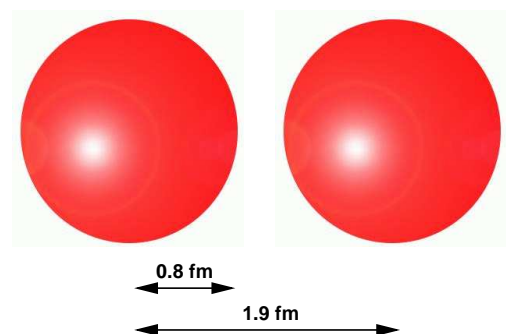
Erfolg

Grundzustandseigenschaften:

Spin, Parität, Bindungs- u. Anregungsenergien

Aber

Näherung fraglich
nicht fundamental
nur phänomenologisch

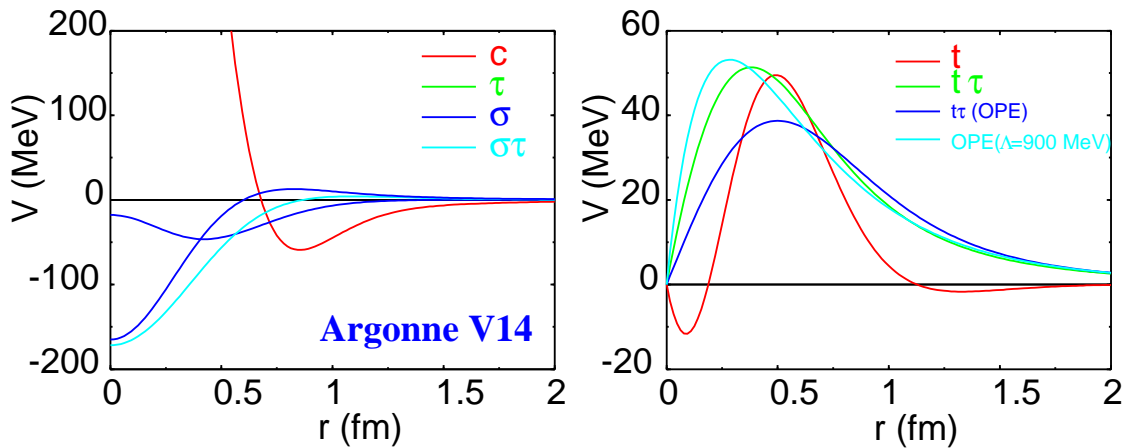


Realistische Beschreibung

Moderne NN Potentiale:
(fundamentale Invarianz-
Prinzipien, NN Streudaten)

$$V_{ij} = \sum_{p=1}^{14} v_p(r_{ij}) \hat{O}_{ij}^p$$

\hat{O}_{ij}^p : $\mathbf{1}$, $\tau_i \tau_j$, $\sigma_i \sigma_j$, $\sigma_i \sigma_j \cdot \tau_i \tau_j$, S_{ij} , $S_{ij} \cdot \tau_i \tau_j$, LS , $LS \cdot \tau_i \tau_j$,
 L^2 , $L^2 \cdot \tau_i \tau_j$, $L^2 \cdot \sigma_i \sigma_j$, $L^2 \cdot \sigma_i \sigma_j \cdot \tau_i \tau_j$, $(LS)^2$, $(LS)^2 \cdot \tau_i \tau_j$



realistisches Potential + HF → **ungebundene Kerne**

[MeV/A]	CDB	ArgV18	Nijm1	Bonn C	Reid
E_{HF}	4.64	30.34	12.08	29.56	176.20
E_{Corr}	-17.11	-15.85	-15.82	-14.40	-12.47
$V_{\pi HF}$	16.7	15.8	15.0	17.8	
$V_{\pi Corr}$	-2.30	-40.35	-28.98	-45.74	
T	36.23	47.07	39.26	40.55	49.04

Ansatz: Effektive 1K Potentiale (mean field) + NN Korrelationen

Brückner-Bethe-Goldstone (G-Matrix) / BHF, Fermi-Hypernetted chain, VMC, e^S Method

Korrelationen

Mean field Potential → SM-Wellenfunktionen: Φ_{SM}
 Real. NN Potential → **korrelierte Wellenfunktionen:** Ψ_{NN}

Jastrow-type:

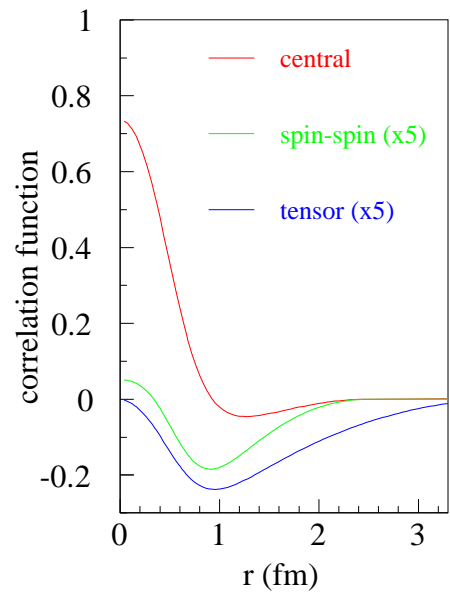
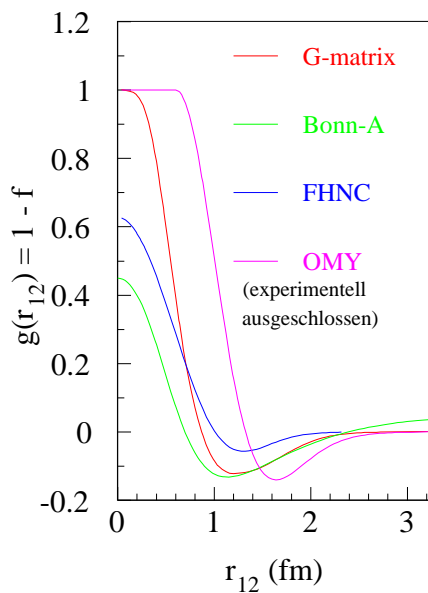
$$\sum f_\alpha \cdot \Phi_{SM}$$

Defekt Funkt.:

$$\sum \Phi_\alpha + \Phi_{SM}$$

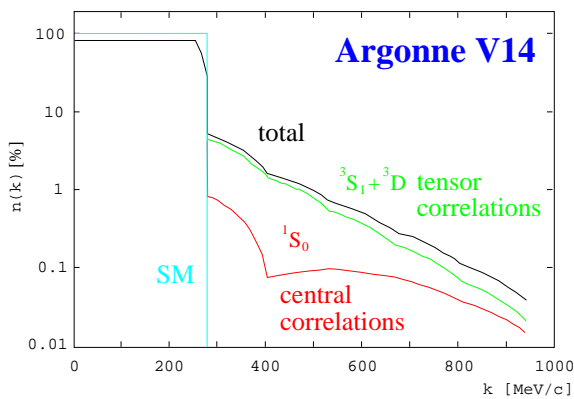
$$\Phi_{SM} =$$

$$\begin{vmatrix} \phi_1(1) & \phi_1(2) \\ \phi_2(1) & \phi_2(2) \end{vmatrix}$$

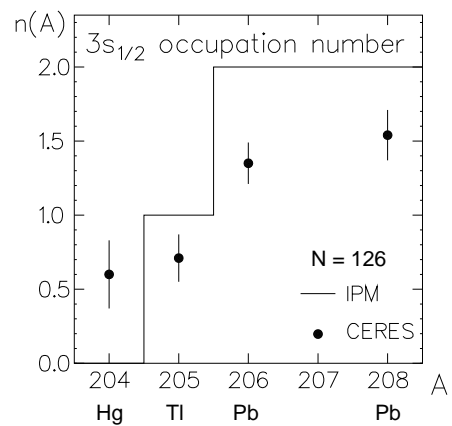


$$SM - \text{Besetzungszahl } n_\alpha(k) = \sum \langle A | \hat{n}_i(E_i, k) | A \rangle$$

H. Mütter BHF Rechnung



CERES, P. Grabmayr*



*Prog.Part.Nucl.Phys 29 (92) 251

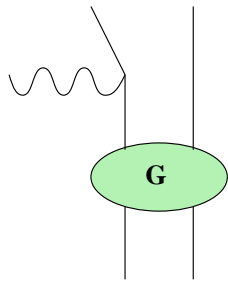
Meßprinzip

Elastische e-Streuung:

Globale 1 Körper Eigenschaften (Ladungsverteilung)

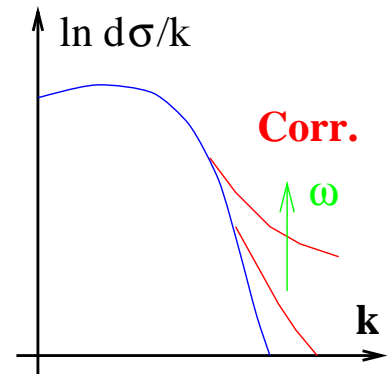
1N knockout:

1 Körper Wellenfunktion (mean field Eigenschaften)
Spektator Modell (PWIA) → Teilchenimpuls im Kern



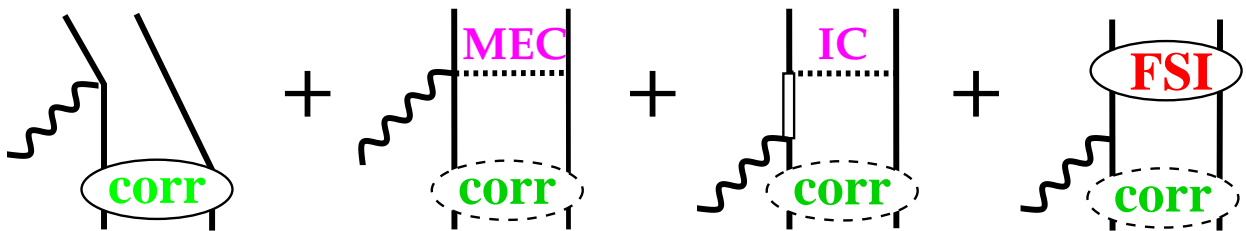
BHF Rechnungen mit
korr. $\Psi_{NN} + \text{real. } V_{NN}$
(Müther et al., PRC 51(95)3040)

Idee: hoch $\omega \rightarrow \text{SRC} \nearrow$
Aber: $E_x > 2N$ Schwelle



2N knockout:

2 Körper Eigenschaften (relative Wellenfunktion)



Anfangszustand: korrelierte Wellenfunktion

→ Wirkungsquerschnitt abhängig vom NN-Pot.

Einkörperstrom sehr empfindlich

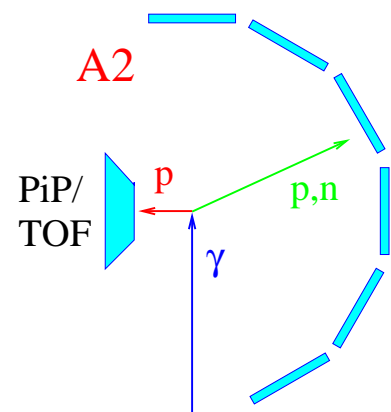
Beitrag verschwindet im SM, also ohne Korrelationen

Experimentelle Ansätze

Durch Gleichstrom Beschleuniger mit hoher Brillianz wurden Messungen mit mittlerer Energie - Auflösung durchführbar:

(γ, pp) (γ, pn)

- Koinzidenz Messung
(weiter Winkel- und E_γ Bereich)
(Diss. T. Lamparter, R. Schneider)
- Reelle (transversale) Photonen
empfindlich auf *Tensor* Korrelationen
- MEC/IC separierbar über
Kinematik und Isospin
(D. Knödler Diss., M. Heim)

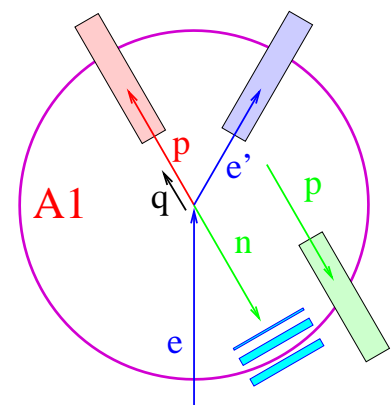


$(e, e'pp)$

- Superparallele Kinematik:
MEC=0, IC=0 für σ_L
- zentrale SRC (WQ sehr klein)

$(e, e'pn)$

- Superparal. Kin.: IC=0 für σ_L
- + *Tensor* Korrelationen (MEC)



Erste hoch-auflösende $(e, e'pn)$ - Testmessung
erfolgreich abgeschlossen

Kinematik and Observable

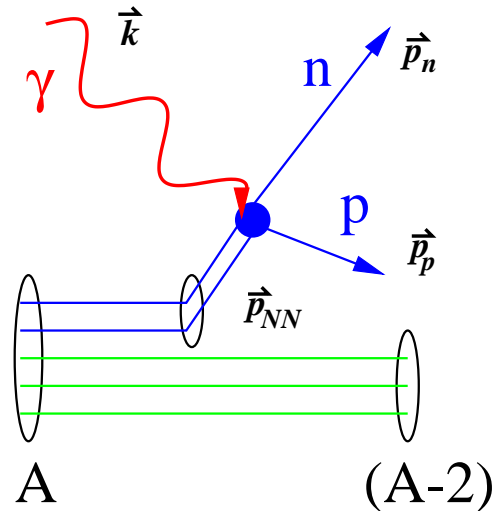
Kinematik der (γ, np) Reaktion

$$\vec{p}_m = \vec{k} - \vec{p}_p - \vec{p}_n \stackrel{!}{=} -\vec{p}_{NN}$$

PWIA: $\vec{p}_m = -\vec{p}_{rec}$

$$E_m = E_\gamma - T_p - T_n - T_{rec}$$

$$\vec{p}'_{rel} = \frac{1}{2} (\vec{p}_p - \vec{p}_n)$$



Erster Ansatz

faktorisiertes 2N Modell von K. Gottfried (1958)

$$d\sigma = 2\pi^{-4} \delta(E_f - E_i) d^3p_n d^3p_p F(p_{NN}) \cdot S_{fi}(\langle p_{rel} \rangle)$$

F:

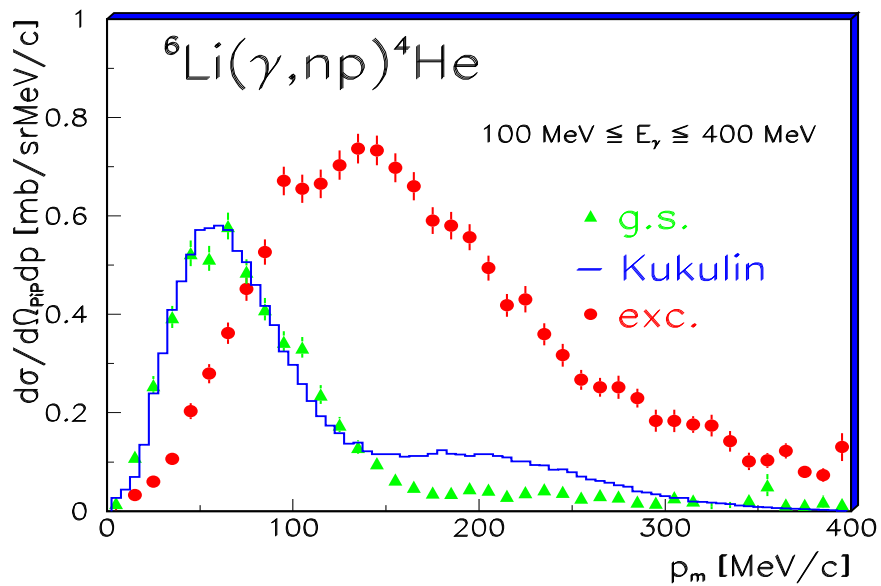
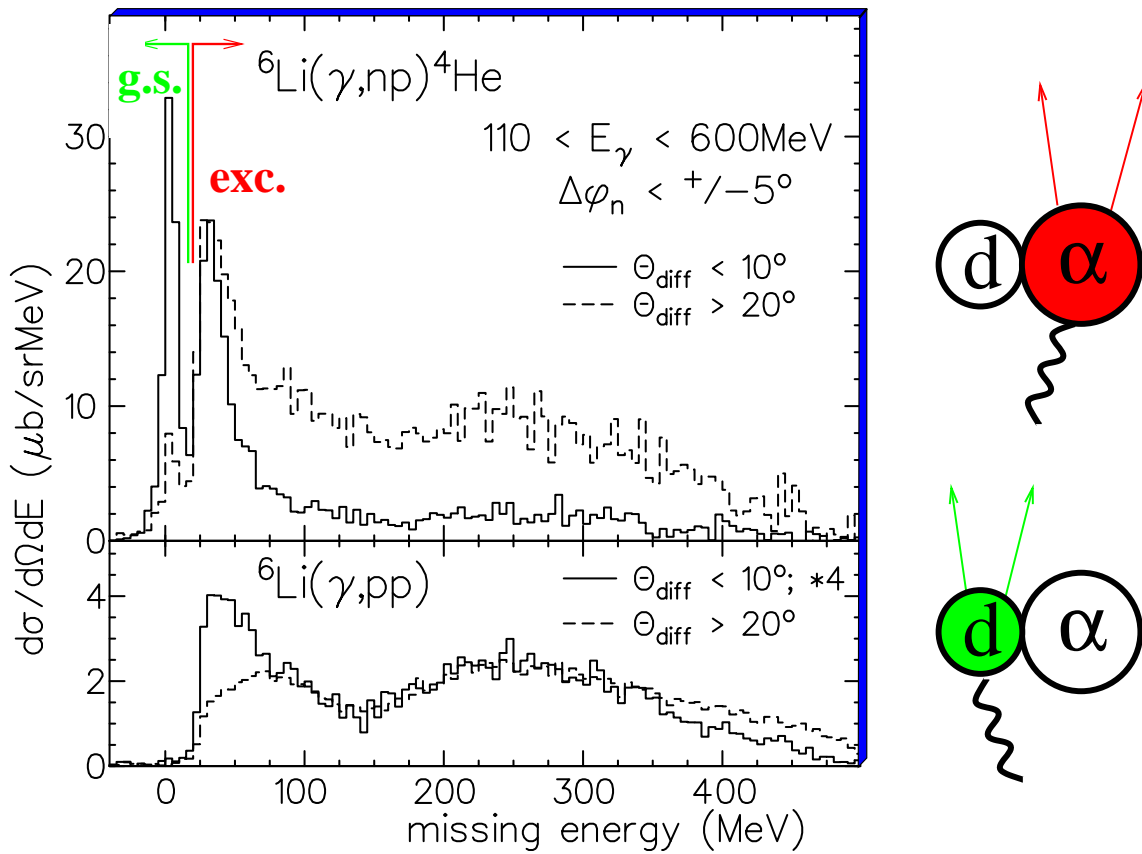
Paarimpulsverteilung
(globale Eigenschaften)

S_{fi}:

Reaktions - Dynamik
(Korrelationen)

$$\sigma \propto \Psi^* \Psi_{HO} \cdot \sigma(\gamma D)$$

${}^6\text{Li}$: α -d Cluster Struktur



Übersicht

Ziel dieser Experimente:

Messung bzw. Quantifizierung der SRC über 2N knockout

Verifikation:

Test von Modellvorstellungen

Verständnis des Reaktionsmechanismus

Bestimmung der relevanten Observablen (${}^6\text{Li}$)

E_m : Anregung des Restkerns (Spektatormodell)

p_m : Paarimpuls im Kern vor dem Stoß

Frühere Experimente: π -Streuung

Problem: ISI im Eingangskanal

π : starke WW. \Leftrightarrow γ : elektromagn. WW.

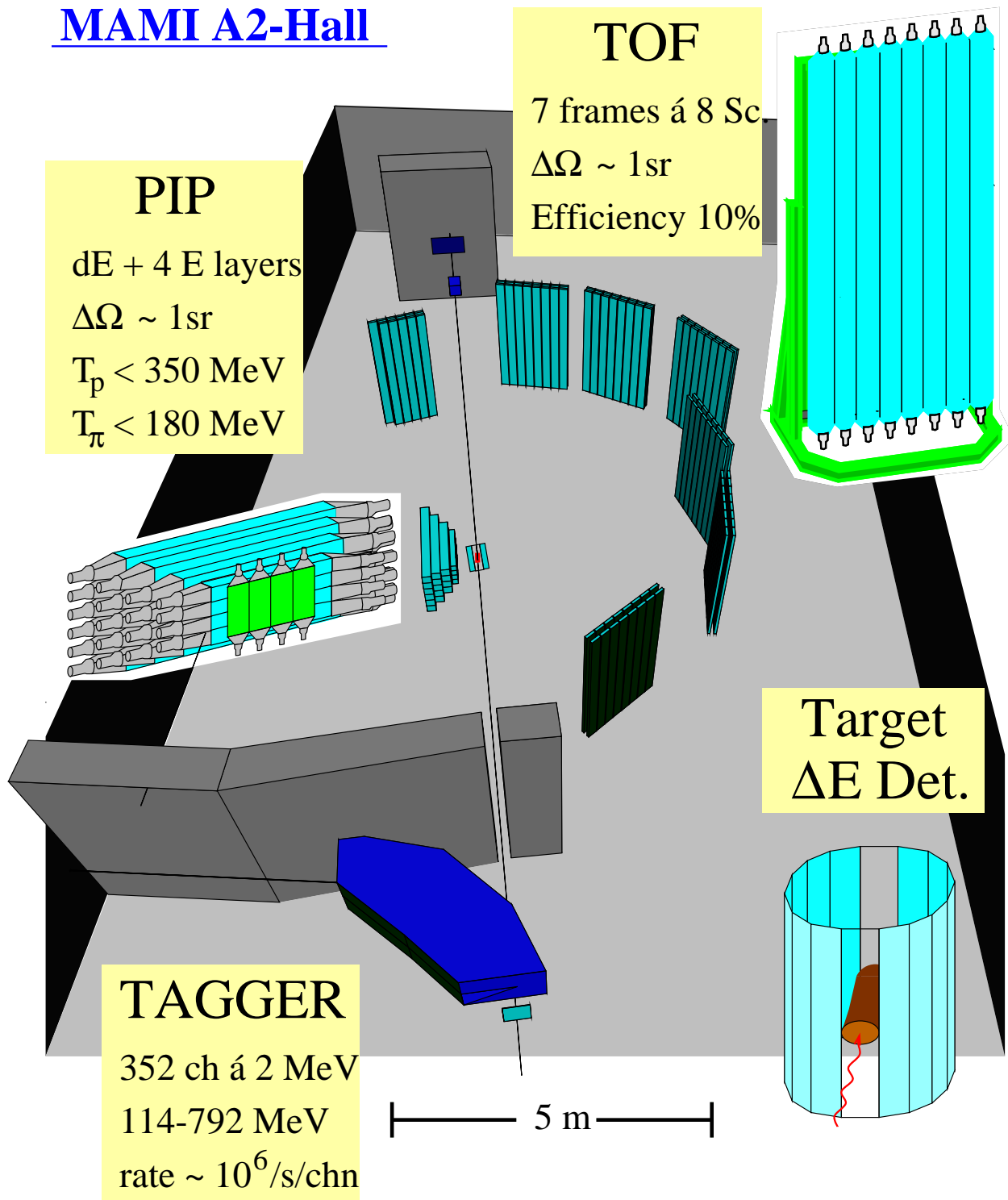
→ PWIA kaum gerechtfertigt.

Erste photoinduzierte knockout-Experimente hatten schlechte Energie Auflösung und Statistik.

Erst durch moderne Gleichstrombeschleuniger sind Photon-Tagging mit guter Statistik und somit die hier vorgestellten Experimente mit hoher Energie-Auflösung möglich geworden.

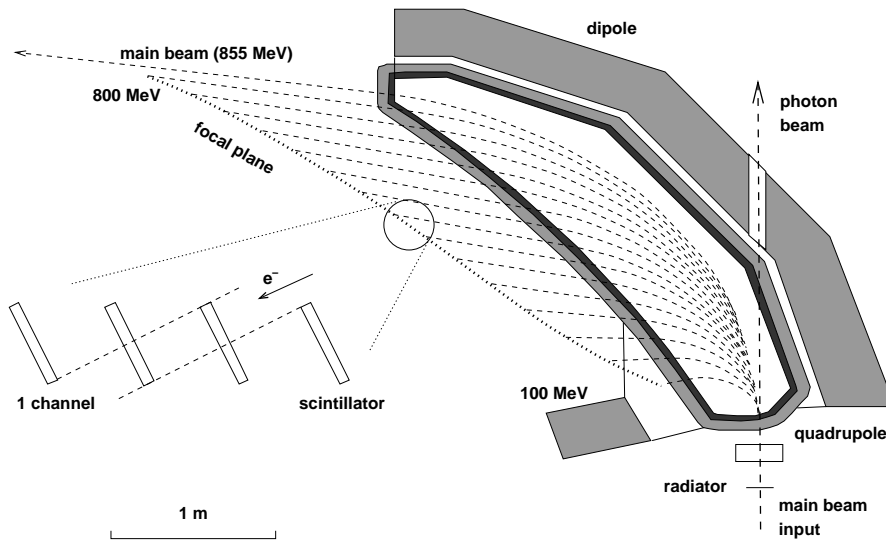
Experimenteller Aufbau

MAMI A2-Hall

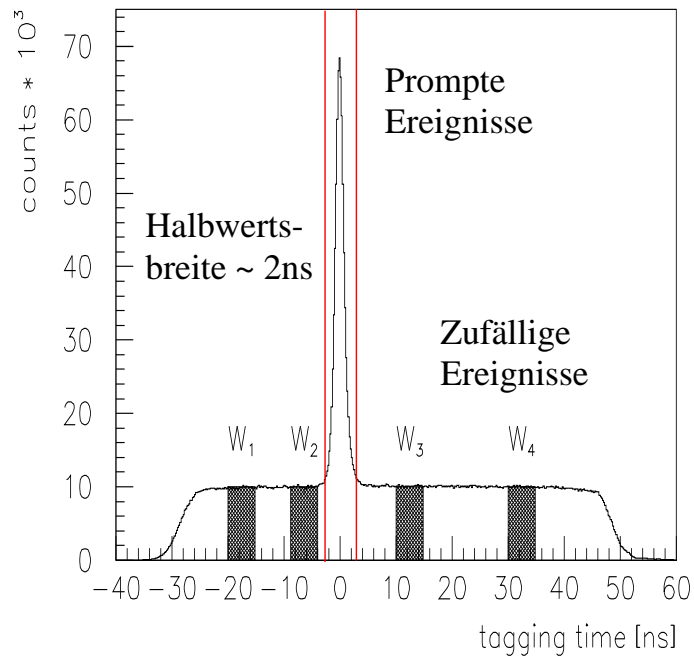


Tagger

Photon Markierung: $E_\gamma = E_e - E'_e$



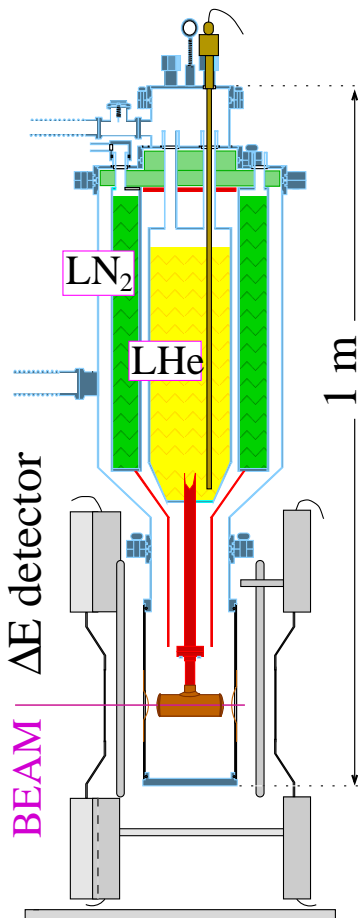
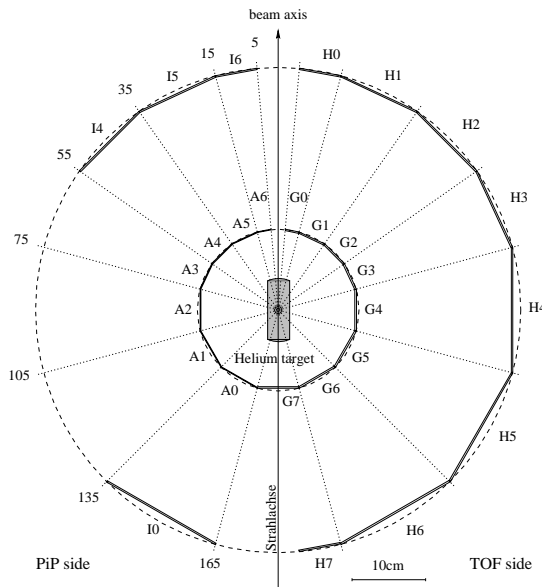
Untergrund Subtraktion



Startdetektor und Target

Start- und Veto Detektor

Definiert
Reaktionszeitpunkt
Teilchen-
Diskriminierung



Target-Anforderungen

hohe ^4He Dichte

Kaum störendes Material im Strahl
(Fenster: $100\mu\text{m}$ Kapton)

Lange Standzeiten (12h)
(großes He Reservoir, LN_2 Schild)

Geometrische Beschränkungen
aufgrund des ΔE Detektors

Kalibrierung

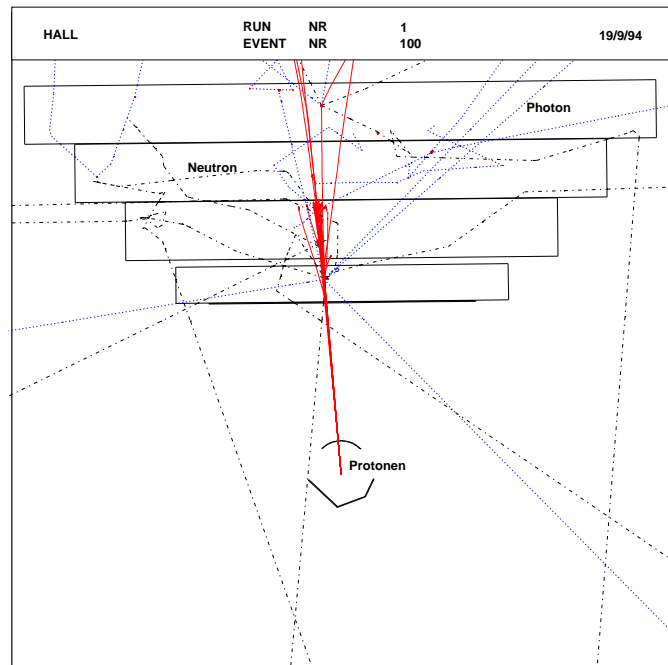
Myonen :

Landau Verteilung:
 $\approx 2 \text{ MeV/cm}$

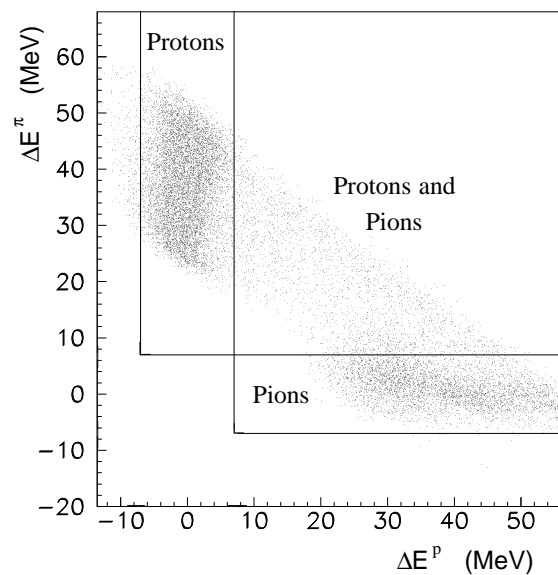
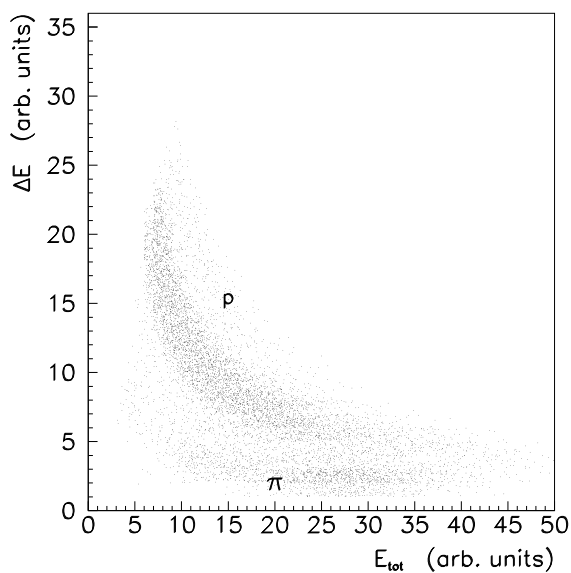
CD₂ :

3K Kinem.: $T_p(\theta_p)$

Geant Simulation
 zur Detektor Effizienz
 und Teilchentrennung

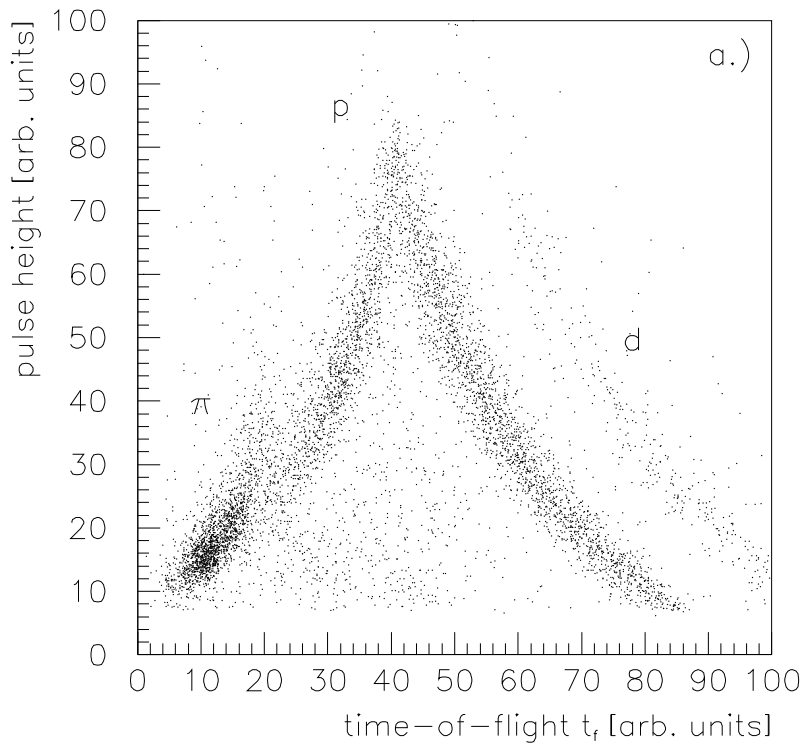


Teilchentrennung mit ΔE -E und Range Methode



Diss. T.Lamarter 97

TOF



Teilchen-
trennung

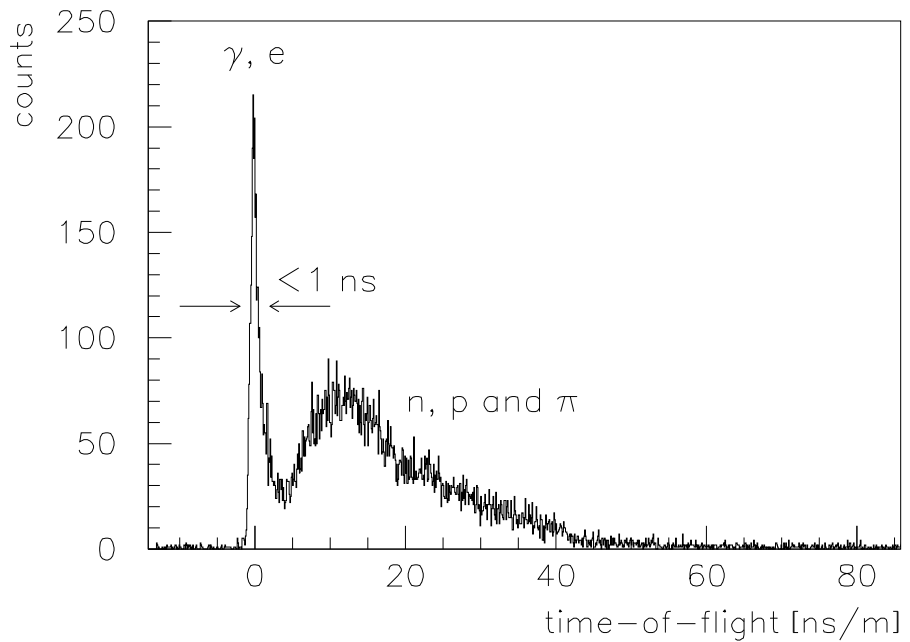
Geladene
Teilchen:
 $\Delta E-E$

Ungeladene:
Veto Det.

Energie

aus TOF

Flugweg
korrigierte
Flugzeit
aller ToF
Detektoren



TOF

Mehrfach- Lagen

Verwerfung
eines nach-
folgenden Hits

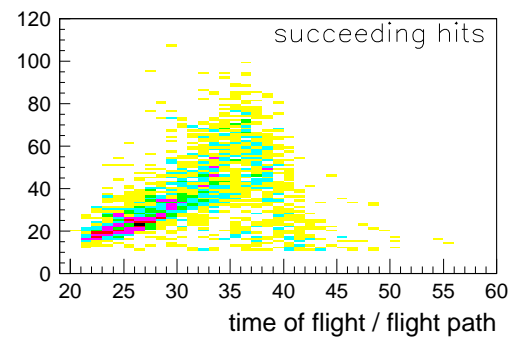
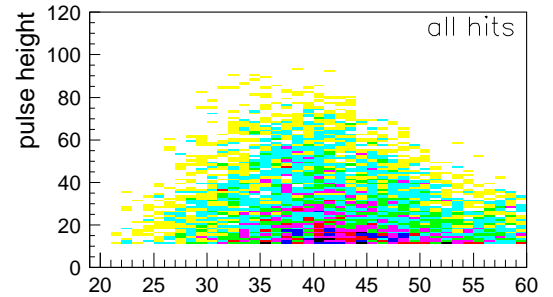
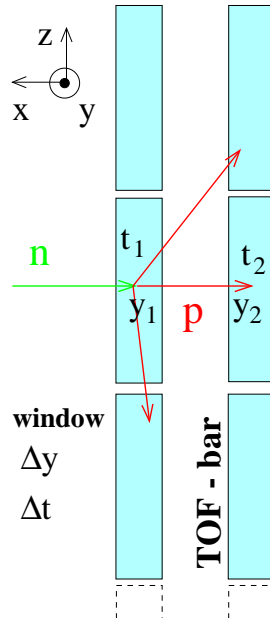
Effizienz:

1 Lage: ϵ

2 Lage: $(1 - \epsilon)\epsilon$

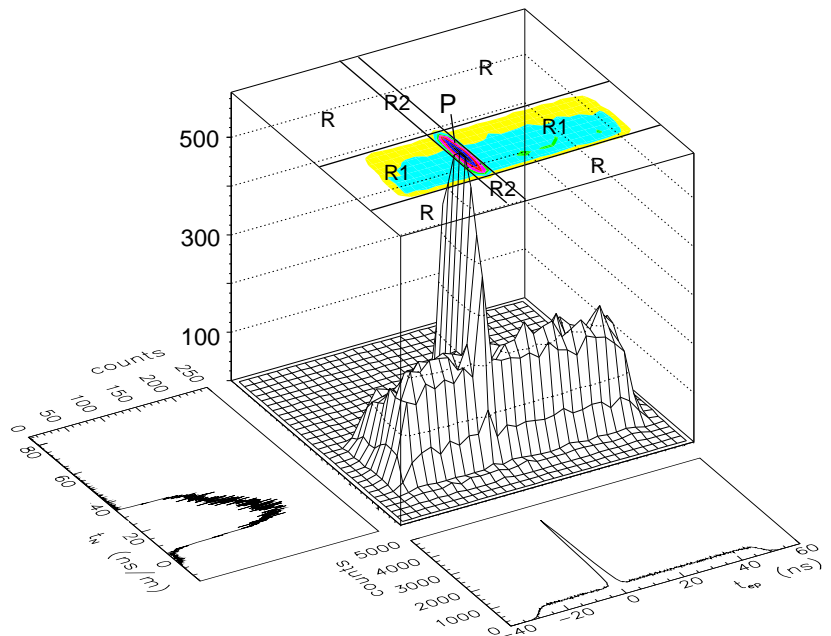
⋮

TOF - stand

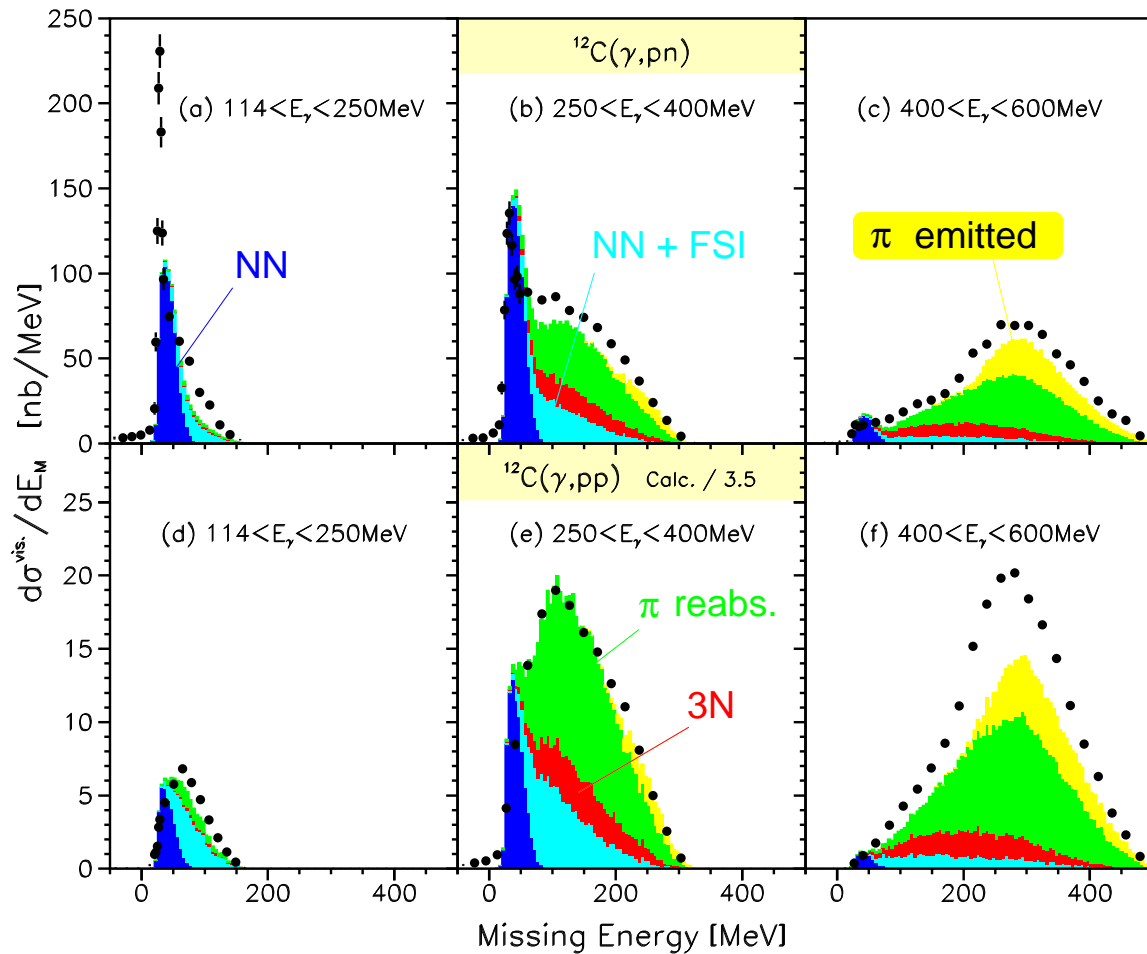


Zufällige Ereignisse

3-fach
Koinzidenzen



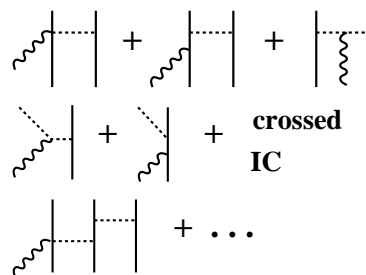
Reaktions Mechanismus: ^{12}C



2N Absorption (+ FSI)

QF π Produktion (emit/reabs)

3N Absorption



E_{2m} Schnitt erhöht die direkte 2N Absorption

T. Lamparter et. al. ,Z. Phys. A **355** (96)
T. Hehl, Prog.Part.Nucl.Phys. **34** (95)

Ph.-Selbstenergie + LDA:

$$\sigma_{\text{tot}} = -\frac{1}{k} \int d^3r \rho(r) \text{Im}\Pi(k, \rho)$$

Carrasco, Oset NPA **536** (92) 445

¹²C Paar-Impulsverteilungen des pn-Paares

Paar Impuls

Quasideuteron-Kinematik:

$$\vec{p}_m = \vec{k} - \vec{p}_p - \vec{p}_n = -\vec{p}_{NN}$$

Quasideuteron Modell

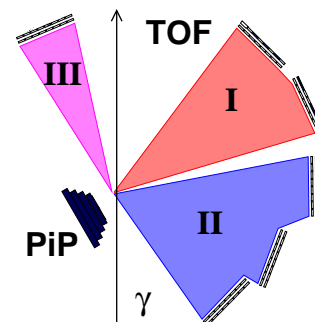
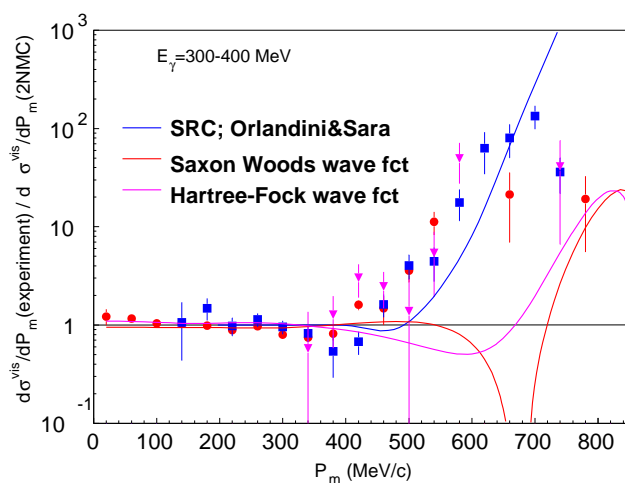
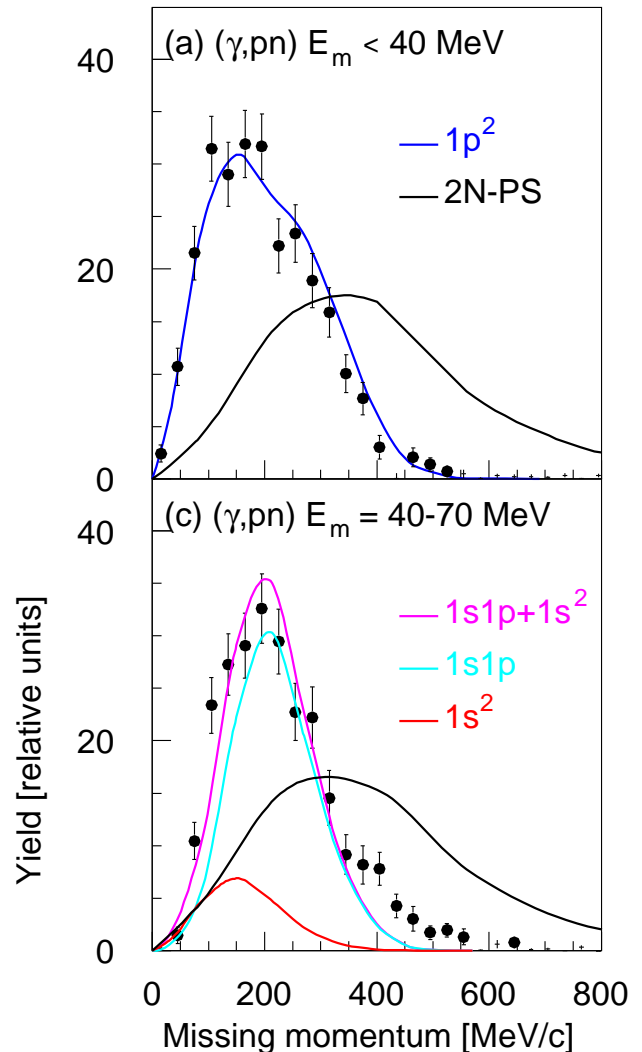
HO-Wellenfunktion
für np-Paar

Anteil der Schalen
angepaßt

Gute Beschreibung
ohne Korrelationen

P. Harty et al.

Phys. Lett. **B380**(1996)247

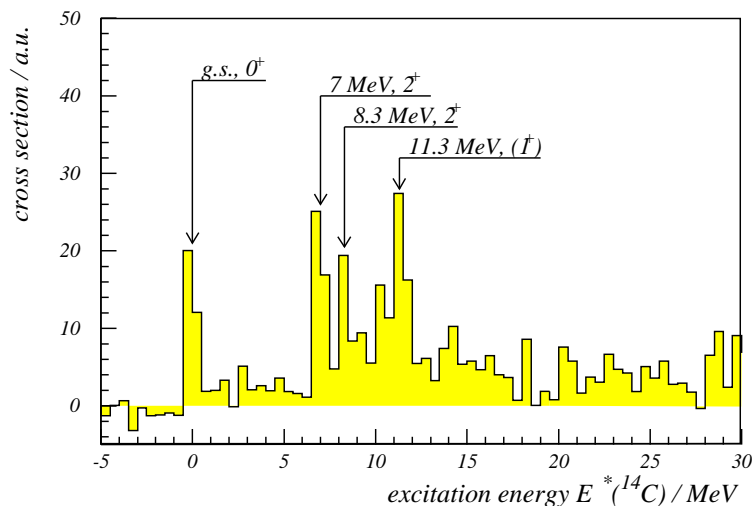
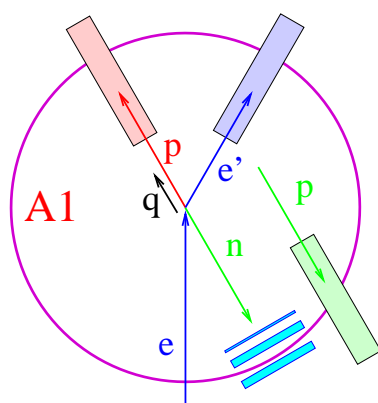


Neue Ansätze

$^{16}\text{O}(\gamma^*, NN)^{14}\text{C}/^{14}\text{N}$ hochauflösend

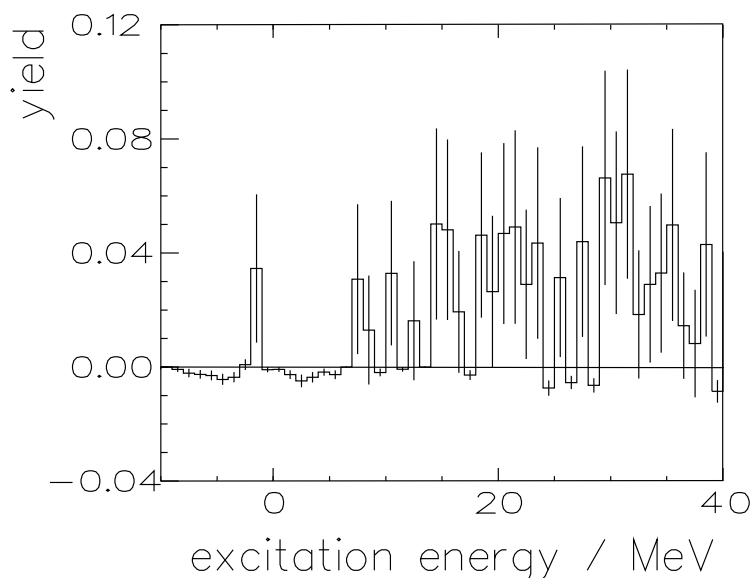
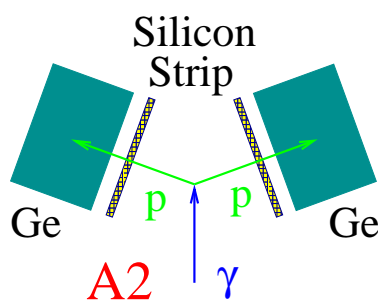
Untersuchung der individuellen Reaktionsmechanismen in separat aufgelösten Endzuständen (Erwartete E_m Auflösung: 1.5 MeV)
 → (e,e'pn) Strahlzeit: soeben (5/00) erfolgreich beendet

$\langle p_m \rangle = 125 \text{ MeV}$



(γ, pp) Test 98

$100 < E_\gamma < 200 \text{ MeV}$



Neue Ansätze

^4He als Target

- Einfache Struktur ('nur' 1s) → keine Schalenmischung
- Hohe Dichte, wenig Nukleonen → mehr SRC, weniger FSI
- Verbindung von mikroskopischen Rechnungen mit phänomenologischen Modellen

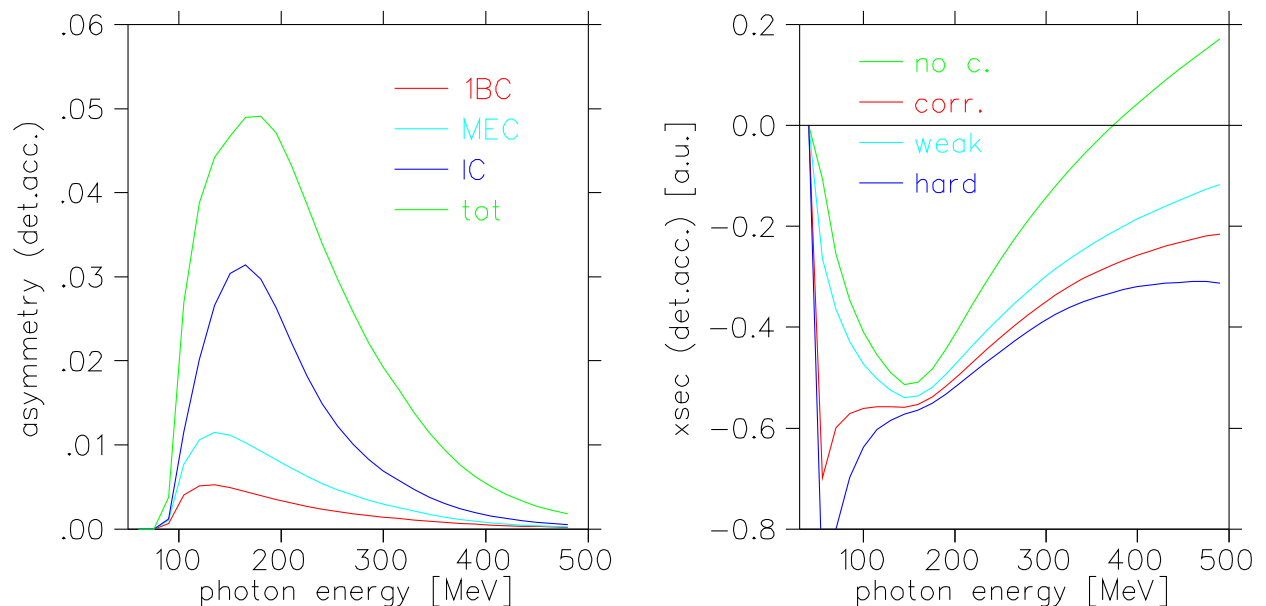
Photonasymmetrie

Neue Observable Σ (Photonasymmetrie) ist sensitiv auf SRC

$$\sigma_{\parallel,\perp} = \sigma_0(1 \pm P_\gamma \Sigma), \quad \Sigma = \frac{1}{P_\gamma} \frac{\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}}{\sigma_{\parallel} + \sigma_{\perp}} \quad \text{für } (\vec{\epsilon} \parallel, \perp n'p')$$

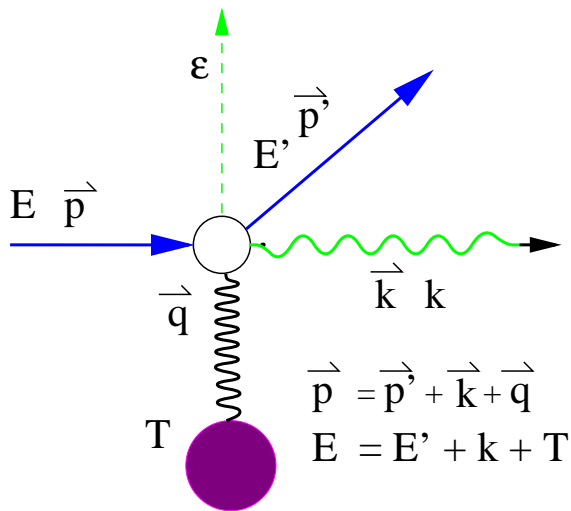
Einfluß der SRC

Modell: Impuls Appr., Gottfried Appr., Detektor Akzeptanz



Ryckebusch: Phys.Lett. B383, Boato, Giannini: J.Phys. G15, Boffi: Nucl.Phys. A564

Polarisierte Bremsstrahlung



Kinematik:

$$\delta = q_l^{\min}(E_\gamma) < q < 2\delta$$

$$q_t/q_l \approx 10^3 \rightarrow \text{pancake}$$

Wirkungsquerschnitt:

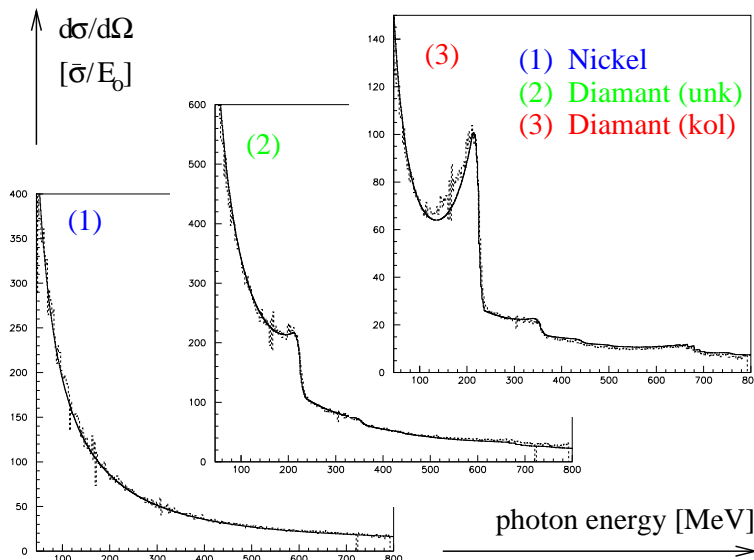
$$\sigma \sim \frac{1}{k} \cos^2 \phi$$

Haupt Beitrag:

$$\vec{E} \parallel \vec{\epsilon} \in (\vec{p}, \vec{q}) \text{ Ebene}$$

Kristall Radiator (Diamant) und Bragg Bedingung $\vec{q} = \vec{g}$

\rightsquigarrow zusätzliche kohärente (polarisiert) Intensität: $I = \frac{k}{\sigma} \frac{d\sigma}{dk}$



Kollimierung: (ϑ_c)

inkohärent:

wird reduziert

kohärent:

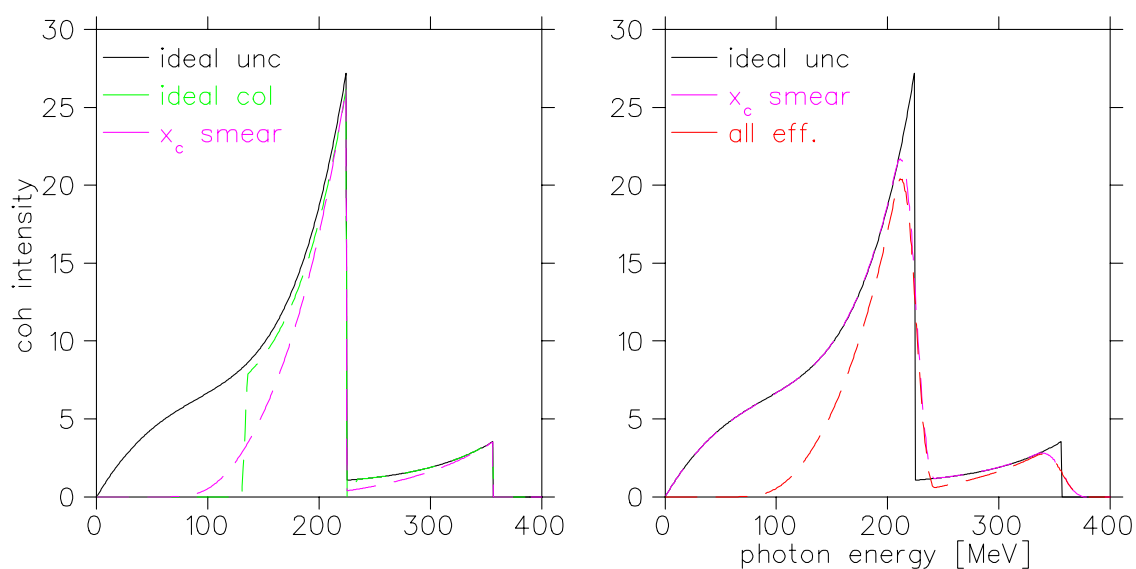
unbeeinflusst

in $x_c < x < x_d$

$x_d, x_c \leftarrow \vartheta_c, \vec{g}$

Experimentelle Effekte

Ursache	→ Effekt	Einfluß
Temperatur	→ Debye Waller Faktor	$I_{\text{coh}}/I_{\text{inc}}$
BS: Strahl Fleck	→ "verschmierter" Koll.	x_c
BD: Strahl Divergenz	→ + θ, α - Variation	x_d
MS: Mehrfachstreuung	→ erhöht BD	x_d



$$I_{\text{exp}} = \int_{MS} ds \int_{BD} d^2 t_b \int_{BS} d^2 r_e \\
 w(\vec{t}_b) \otimes w(\vec{t}_m(s)) \cdot w(\vec{r}_e) \cdot I_{\text{coh}}(\theta_0, \alpha_0, \vec{t}_e) \Big|_{r_c > |\vec{r}_\gamma^c|}$$

Monte Carlo Simulation (MCB)

Parameter:

ES (E_0), BS (\vec{r}_e), BD(\vec{t}_b),
MS ($\vec{t}_m(s)$) Verteilungen
Radiator Eigenschaften

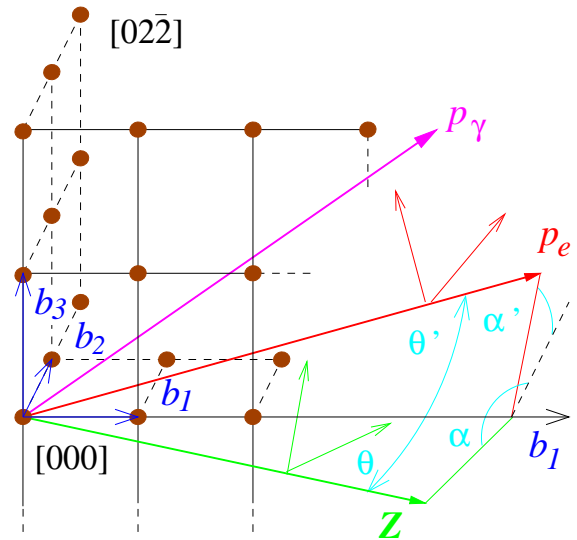
Bremsstrahl. Prozess

$\theta_0, \alpha_0 \xrightarrow{\vec{p}_e} \theta_e, \alpha_e$

Berechnung $I^{\text{coh,inc}}$

photon \longrightarrow lab sys

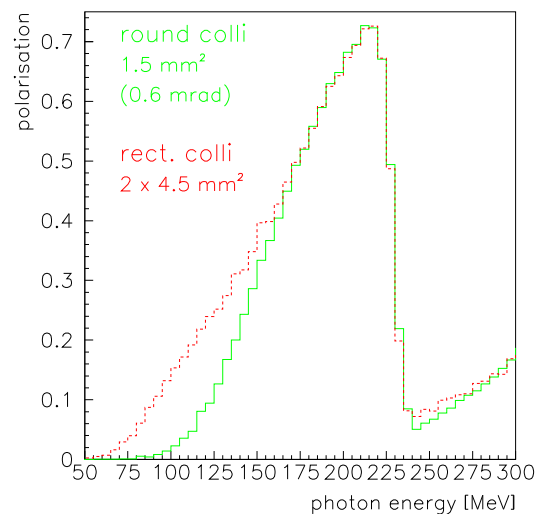
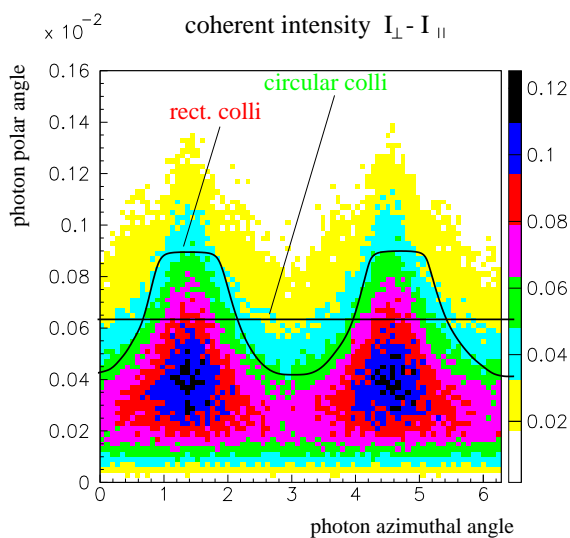
Test Kollimation



\rightarrow Vorteil: 'präzise', Auswertung pro Event

Rechteckiger Kollimator

gleicher totaler Wirkungsquerschnitt (tagging efficiency)



Näherungsweise analytische Rechnung (ANB)

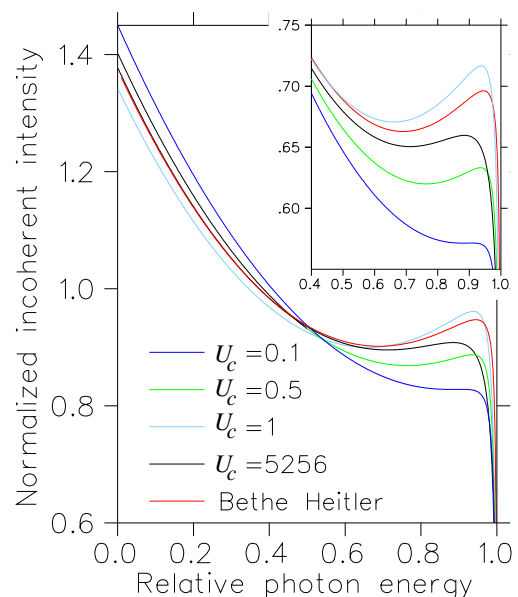
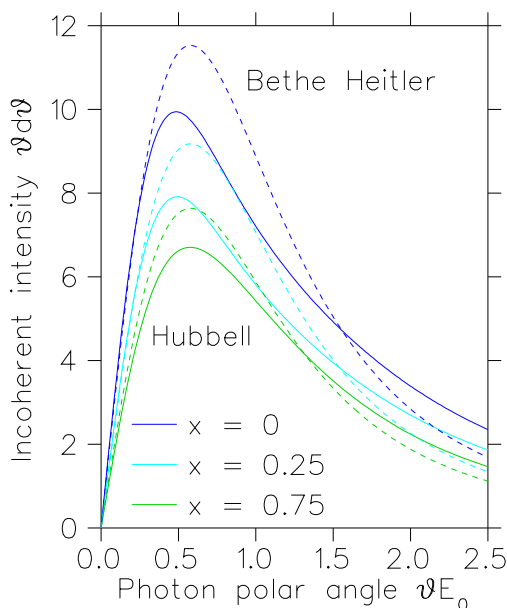
Näherungen

- 2d transverse Verteilungen \longrightarrow sphärisch symmetrisch
- mittlere Verteilung der Mehrfachstreuung:
 $\bar{\sigma}_m$ (Molière Theorie)
- effektive Elektron Divergenz (ED): $\sigma_{ED}^2 = \bar{\sigma}_m^2 + \sigma_{BD}^2$

$$\Rightarrow I_{\text{exp}}^{\text{inc/coh}} = \int_{\text{6 fold}} \longrightarrow \int_{\vartheta_c} C'_{ED}(\vartheta_C) I_{\text{inc}} / C_{ED} I'_{\text{coh}}$$

Verbesserungen* (ANB, MCB \leftrightarrow Göttingen)

- Hubbells WQ.: bessere Z, x, ϑ_c Abhängigkeit JAP 30/7(59)981
- exakterer e^- Beitrag: Z, x, E_B - abhängig Mathew, Owens
NIM 111(73)157



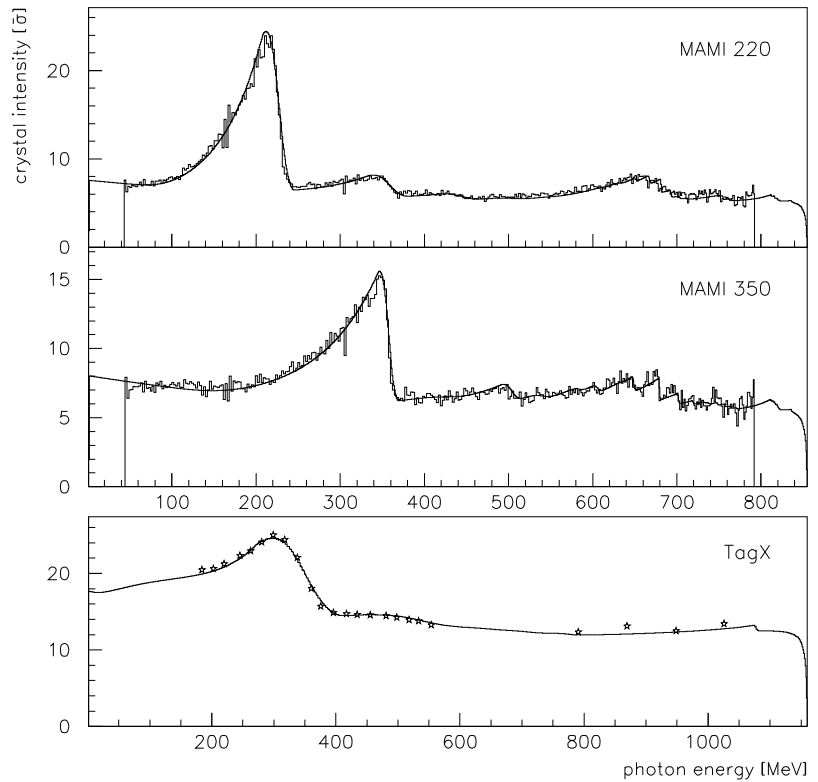
Ergebnisse

$^4\text{He}(\vec{\gamma}, 2N)$ @ MAMI:

Vergleich Diamand
Yield mit gesamter
Kristall Intensität für
 $k_d = 220, 350$ MeV

TagX @ Tokio:

1.2 GeV
 $k_d = 350$ MeV

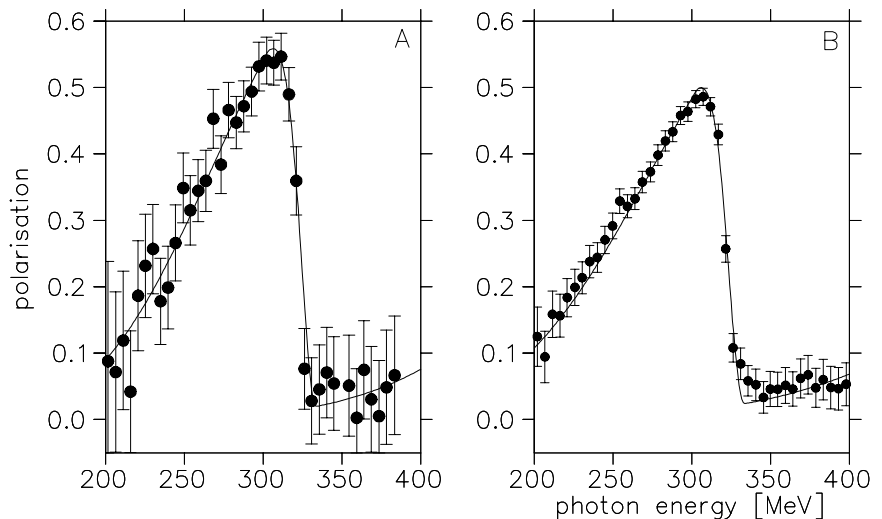


$^4\text{He}(\gamma, \pi^0)$

@ MAMI/TAPS

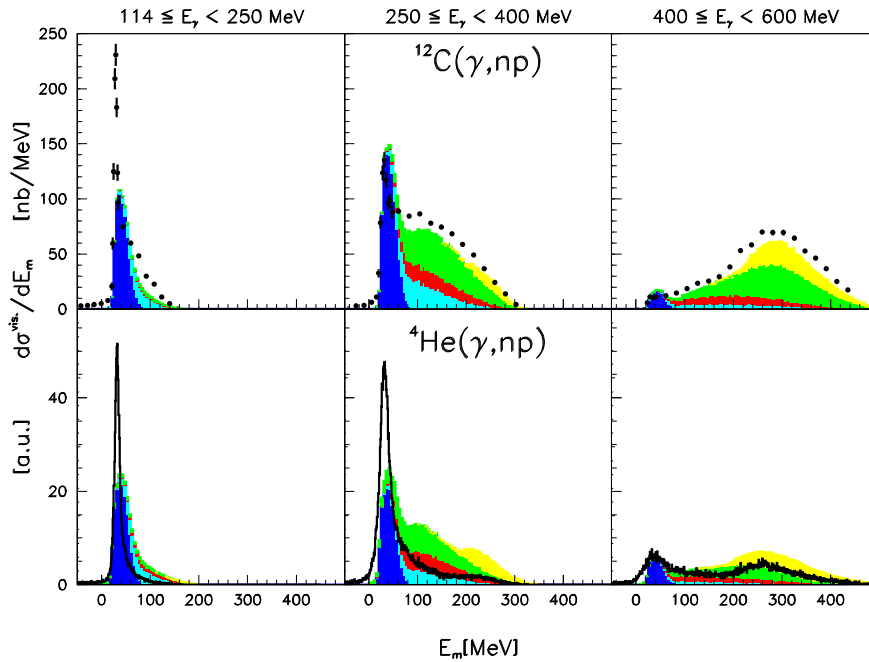
P_γ vollständig
an Azimut-Asym.
der π^0 Mesonen
übertragen:

$$P_\gamma \propto \mathcal{A}^{\pi^0}(\epsilon_{\parallel, \perp})$$



→ ANB Rechnung für 2 Koll. Winkel: $\vartheta_c^{A,B} = 0.5, 0.7$ mrad

Vergleich ^4He und ^{12}C



Prozesse:

direkte NN
 +FSI
 π Produktion
 (emit., reabs.)
 3N Absorption

Geringer:

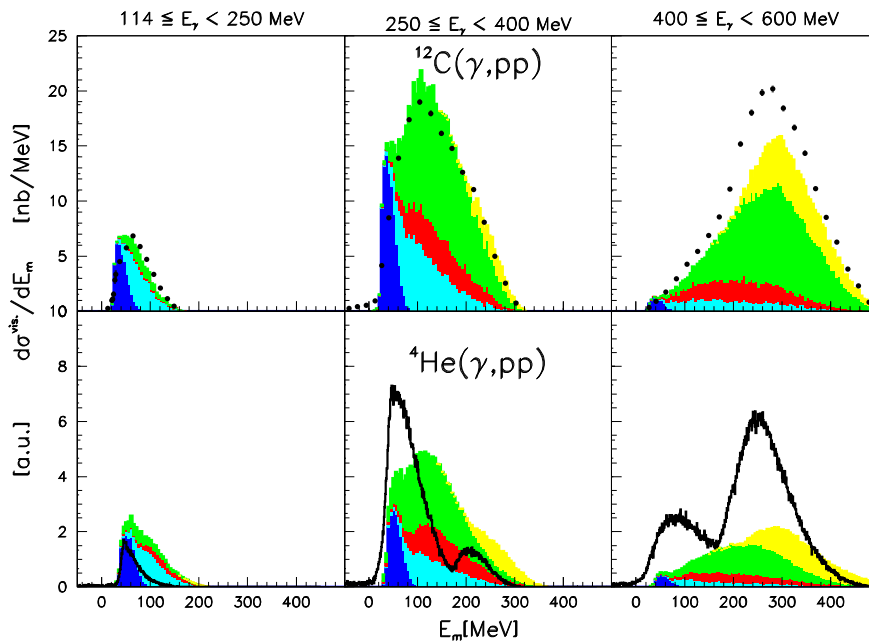
FSI
 π Produktion

Stärker:

direkte NN
 Absorption
 dominant
 wegen
 höherer Dichte

Analog:

E_m Schnitt
 erhöht direkte
 NN Absorption



^4He -Wirkungsquerschnitt

Anregungs- funktion

(γ, np)

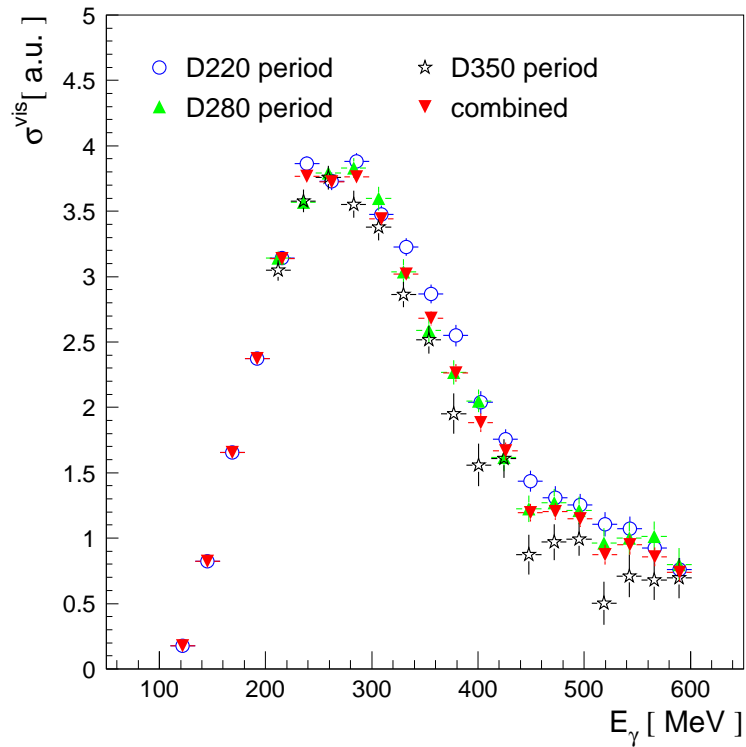
3 Perioden

$P(E_\gamma) > 0.1$

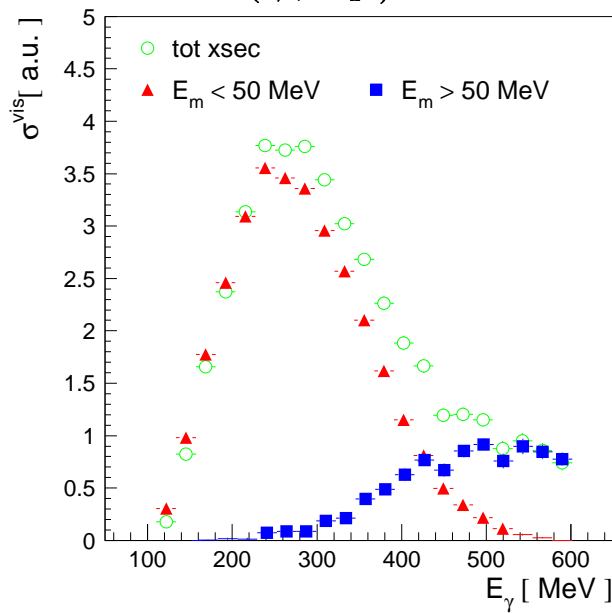
160 ... 220 MeV

220 ... 280 MeV

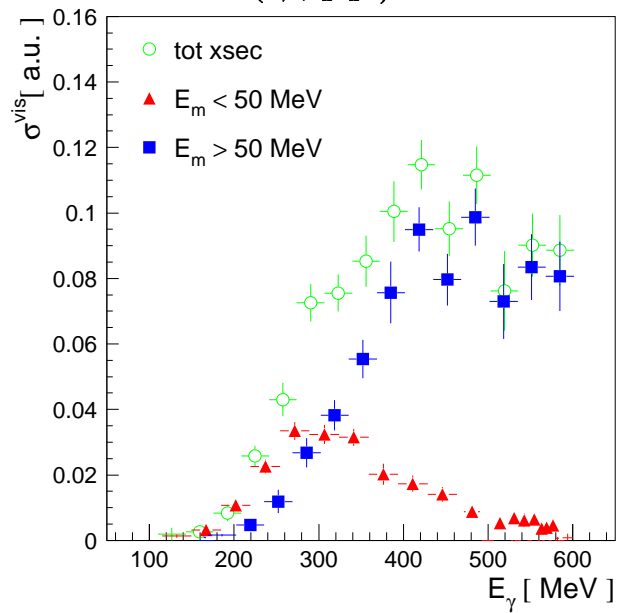
280 ... 350 MeV



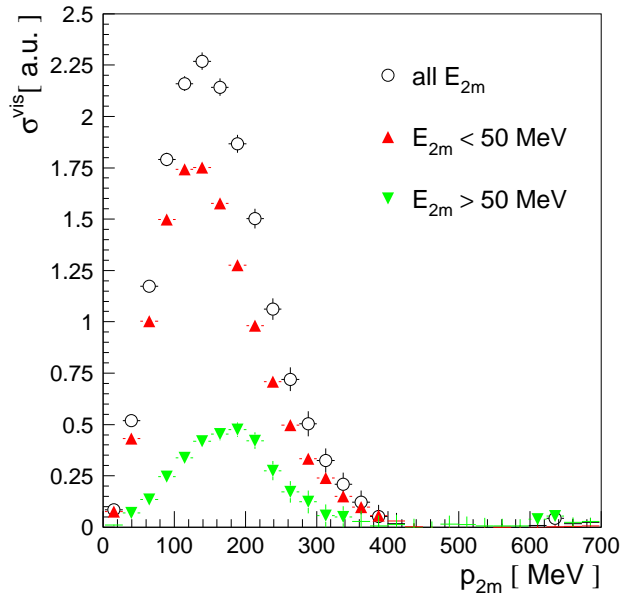
(γ, np)



(γ, pp)



Paarimpuls

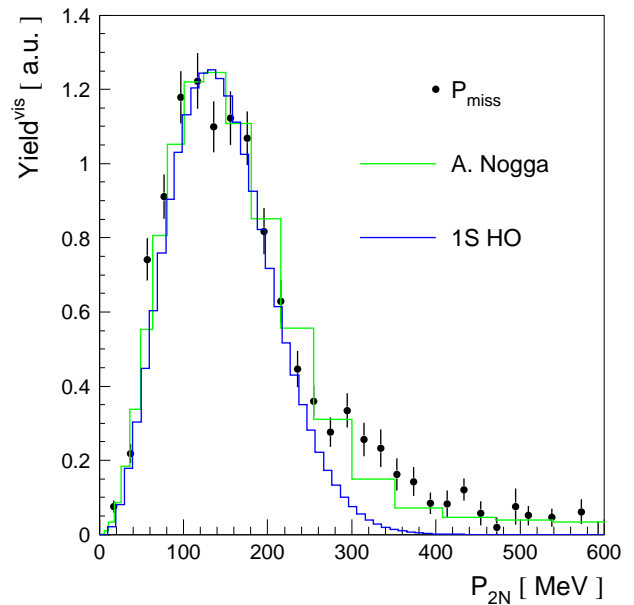
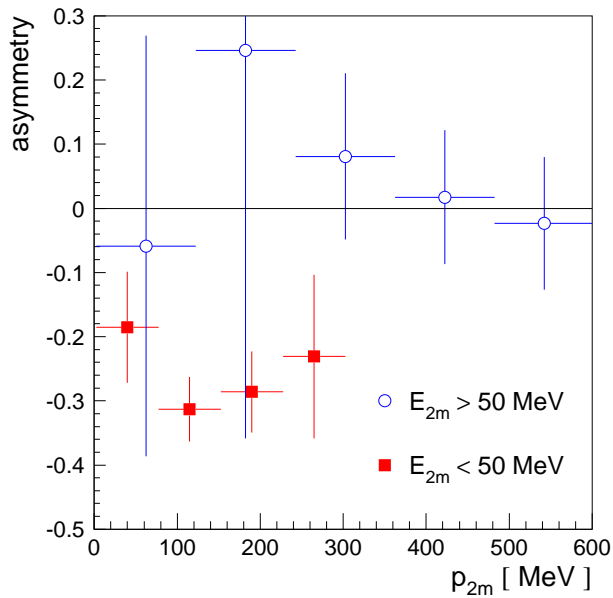


Missing momentum

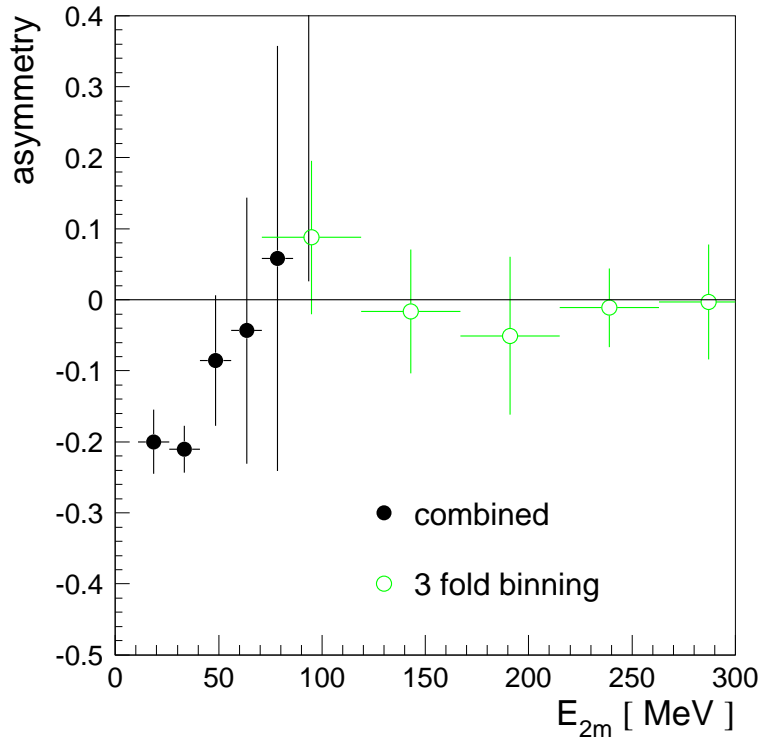
= Paarimpuls
für $2N, 3B + \pi$ Prod.

Paarimpuls

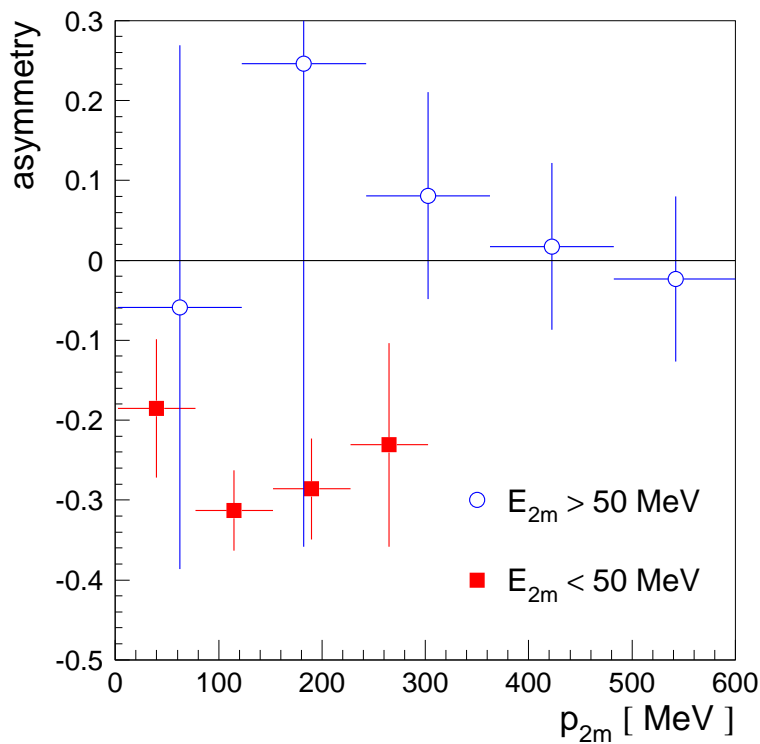
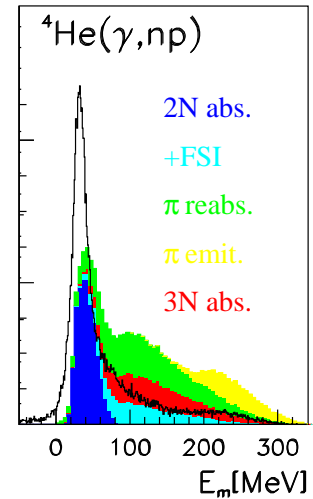
Theor. Rechnung
zu ${}^4\text{He}$
der Bochum Gruppe
sowie HO



Asymmetrien



Monte Carlo
Rechnung
(Valentia Modell)

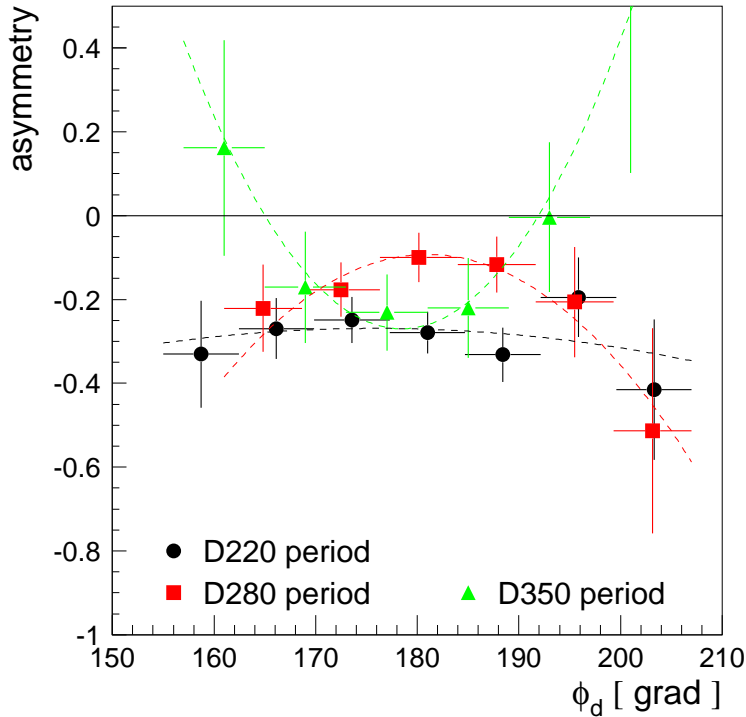


Asymmetrie Σ

$$\Sigma = \frac{1}{P_\gamma} \frac{\sigma_\perp - \sigma_\parallel}{\sigma_\perp + \sigma_\parallel}$$

$$\vec{\epsilon} \perp, \parallel (p_p, p_n)$$

Weitere Observablen

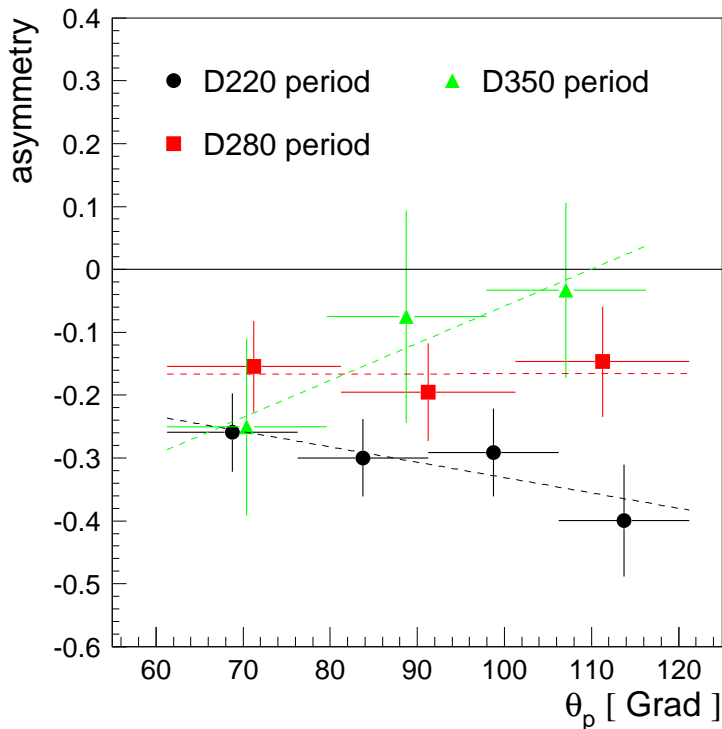


Asymmetrie Σ

$$\sigma = \sigma_0 \cdot (1 + P_\gamma \Sigma \cos 2\phi_m)$$

$$\sigma_0(E_\gamma, p_p, p_n, \dots)$$

$$\sigma_0(\dots, \theta_p, \theta_n, \phi_d)$$



$$\phi_m = \frac{1}{2}(\phi_p + \phi_n)$$

$$\phi_d = \phi_p - \phi_n$$

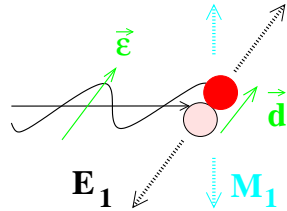
Nur Daten mit

$E_\gamma < 50 \text{ MeV}$
 \rightarrow direkte 2N Abs.

Vergleich

Low E_γ :

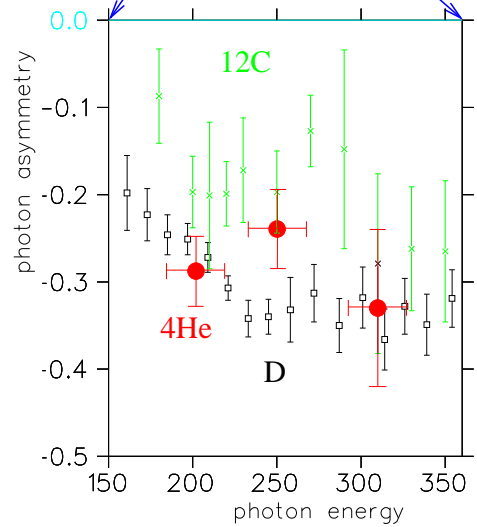
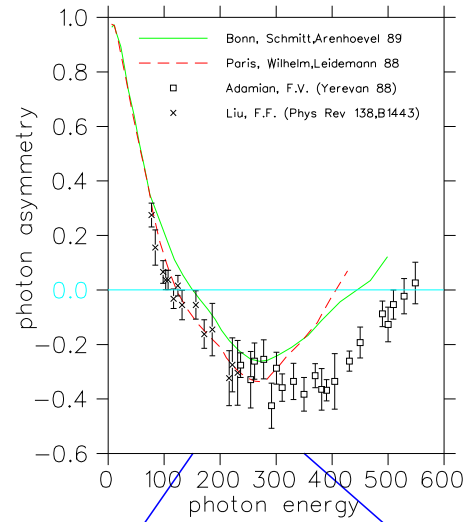
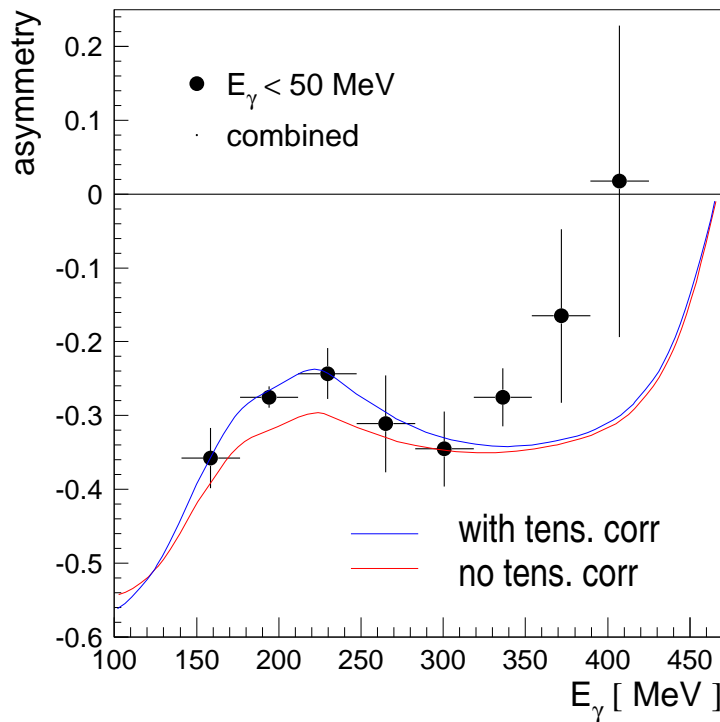
E1 dominant $\rightarrow \Sigma$ pos



$E_\gamma > \pi$ threshold :

Δ excitation \rightsquigarrow

M1 dominant $\rightarrow \Sigma$ neg



(p-shell)²

$\theta_p = \theta_n = 90^\circ$

(J. Ryckebusch,
priv. Mitteilung)

Zusammenfassung

- Aus bisherigen Messungen:
Verständnis des Reaktionsmechanismus
Test einfacher Korrelationsfunktionen
- Polarisations - Freiheitsgrad:
→ zusätzliche Einschränkung für
mögliche Korrelationsfunktionen.
Grad der Polarisation gut bestimmt
(zwei Beschreibungen: ANB schnell,
MCB 'exakt', syst. Fehler < 3%)
- Vielversprechende Ergebnisse
aus der $^4\text{He} (\vec{\gamma}, np)$ Messung

Ausblick

- Quantifizierung der Korrelationen durch
Vergleich der ^4He Wirkungsquerschnitte
und Asymmetrien beider Isospinkanäle
mit theoretischen Rechnungen
- Hochauflösende ($\Delta E_m < 1 \text{ MeV}$)
Messungen (γ, pp), ($e, e'pn$)