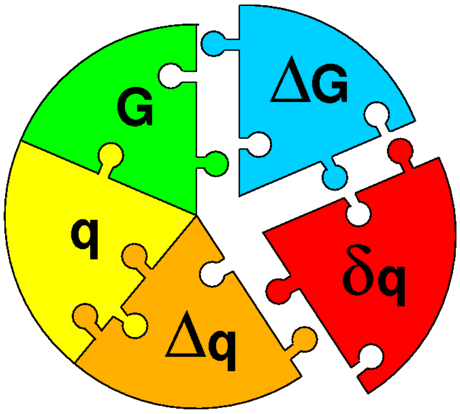
HERMES und der Spin des Nukleons

Ralf Kaiser
University of Glasgow / Desy Zeuthen

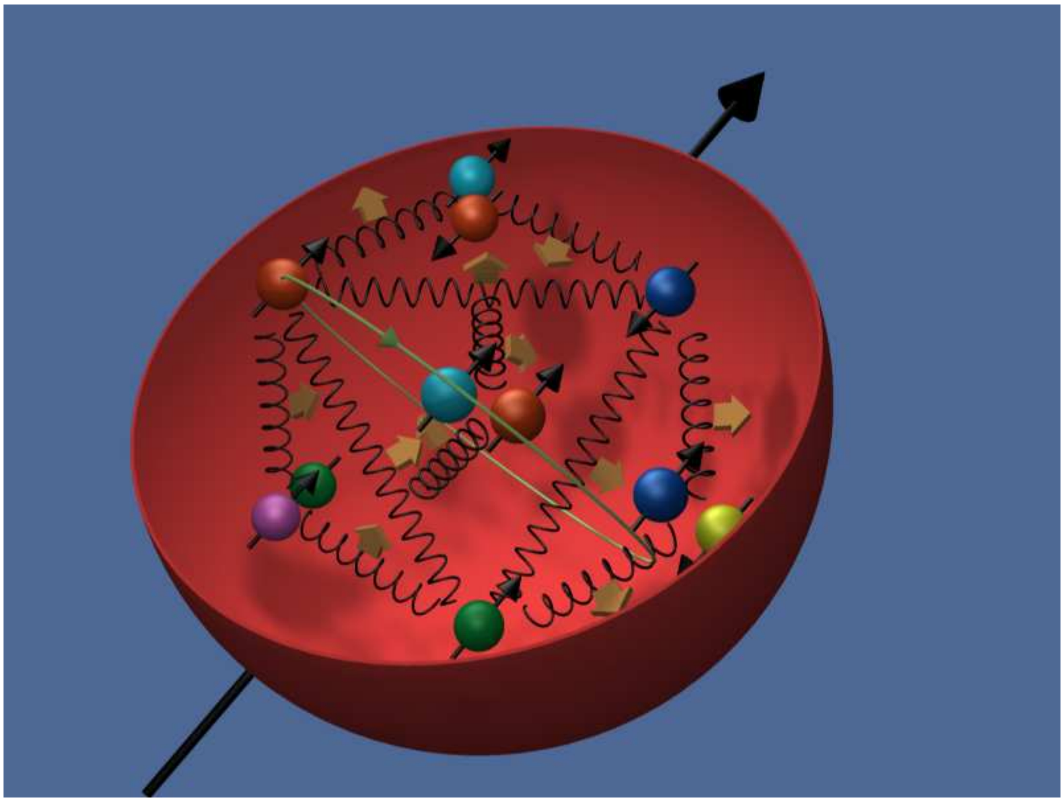
Erlangen, 21. März 2001

- Das Nukleon-Spin-Puzzle
- Quark-Polarisation
- Gluon-Polarisation
- 'Transversity'
- SPDs - Mehr Teile für das Puzzle
- Zusammenfassung und Ausblick



bmb+f - Förderschwerpunkt
HERMES
Großgeräte der physikalischen
Grundlagenforschung

Der Spin des Nukleons



Spinstruktur des Protons:

$$S_z = \frac{1}{2} = J_q + J_g = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + L_q + \Delta G + L_g$$

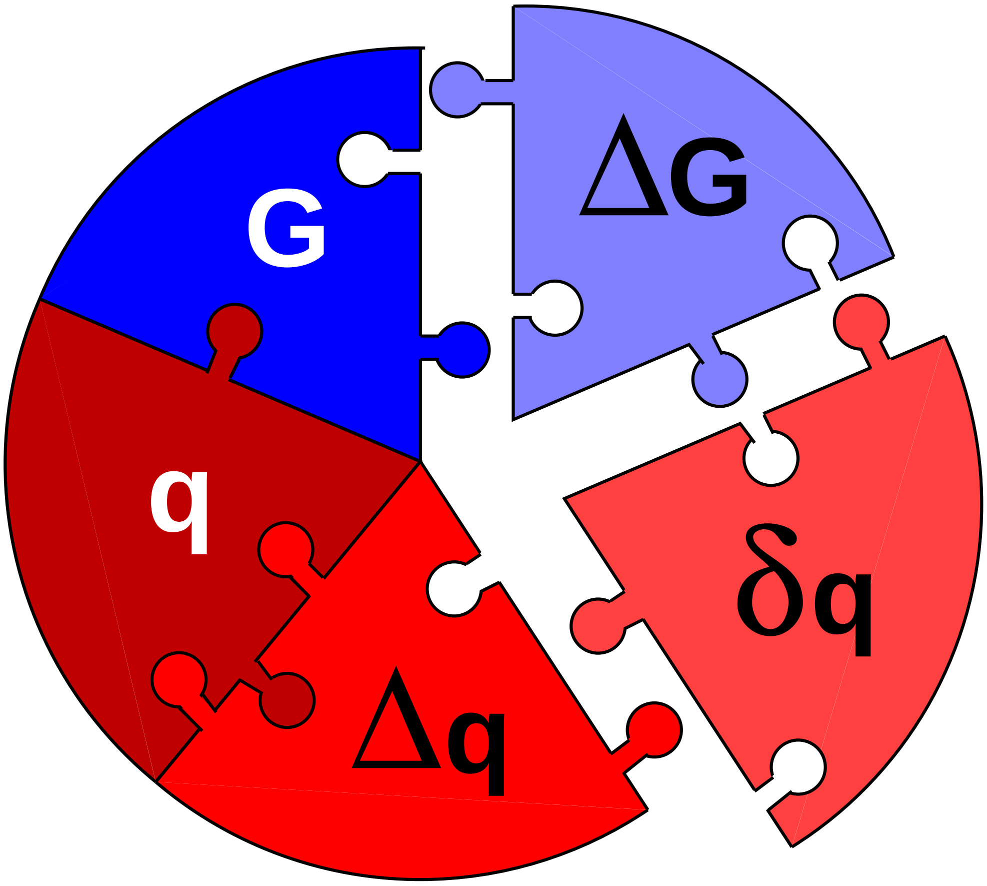
QPM: $\Delta\Sigma = 0.6$ (QPM+SU3, Hyperonzerfälle) [Ellis,Jaffe,1974].

1988: EMC Experiment am CERN $\Delta\Sigma = 0.12 \pm 0.17$ ('Spinkrise')

'88-'00: SMC, SLAC, HERMES
$\Delta\Sigma$ gemessen in tiefinelastischer Streung (Deep Inelastic Scattering - DIS) nicht Null, aber klein ($\overline{\mathrm{MS}}$ Schema):

$$\Delta\Sigma = \sum_{q=u,d,s} (\Delta q + \Delta\bar{q}) \approx 0.2$$

Das Nukleon-Puzzle



Parton-Verteilungsfunktionen

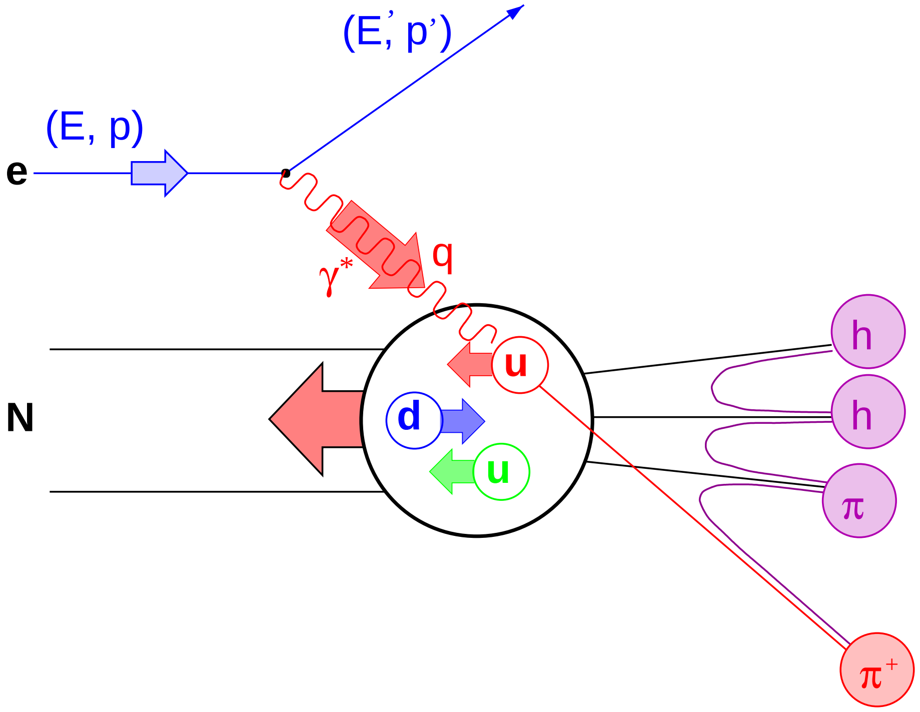
leading twist in pQCD

$q(x, Q^2)$	Quark-Impulsverteilung (f_1^q)
$\Delta q(x, Q^2)$	Longitudinale Quark-Spinverteilung (g_1^q)
$\delta q(x, Q^2)$	Transversale Quark-Spinverteilung (h_1^q)
$G(x, Q^2)$	Gluon-Impulsverteilung
$\Delta G(x, Q^2)$	Polarisierte Gluonverteilung

Es gibt keine direkte Beschreibung von L_z durch eine Parton-Verteilungsfunktion.

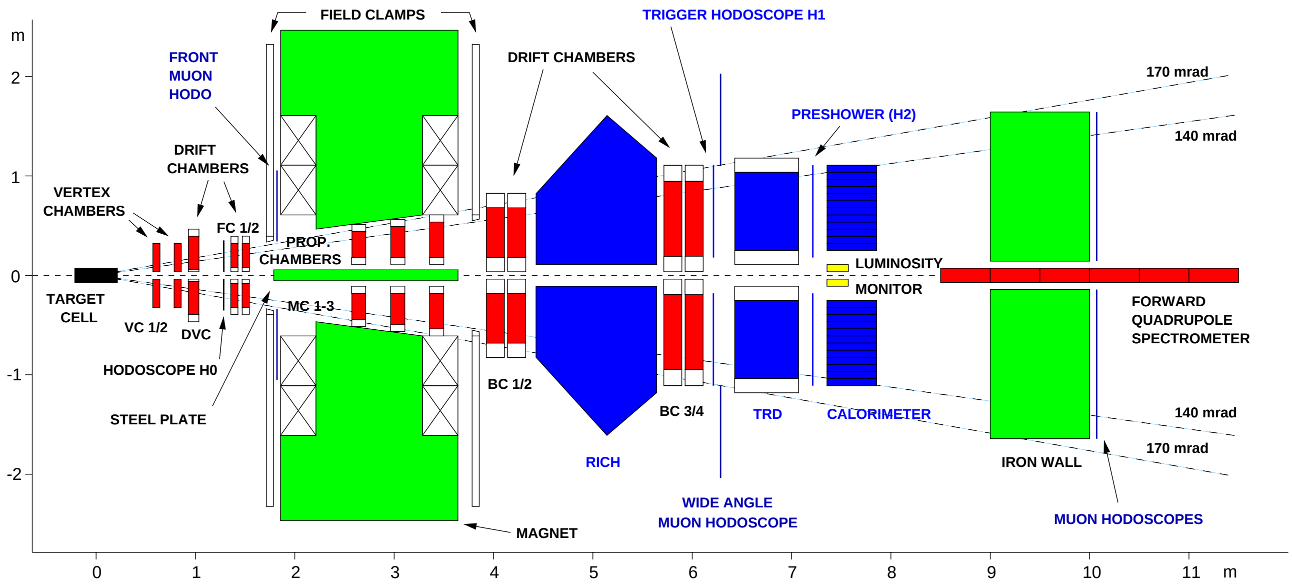
$\delta q(x, Q^2)$ und $\Delta G(x, Q^2)$ weitgehend unbekannt !

Semi-inklusive Tiefinelastische Streung



q	4er-Impuls des virtuellen Photons $q = k - k'$
ν	Energie des virtuellen Photons $\nu = E - E'$
Q^2	$Q^2 = -q^2 \overset{lab}{=} 4EE' \sin^2 \frac{\vartheta}{2}$
W	Inv. Masse des $\gamma^* N$-Systems $W^2 = p'^2 \overset{lab}{=} M^2 + 2M\nu - Q^2$
x z	$x = \frac{Q^2}{2p \cdot q} \overset{lab}{=} \frac{Q^2}{2M\nu}$ $z = \frac{p \cdot p_h}{p \cdot q} \overset{lab}{=} \frac{E_h}{\nu}$

Das HERMES Experiment bei HERA



- Longitudinal pol. 27.5 GeV Elektronen.

- Internes polarisiertes Gastarget: H, D, ^{3}He

  $\rightarrow$[A.Nass HK 9.24]

  $\rightarrow$[P.Lenisa HK 34.2]

  $\rightarrow$[I.Brunn HK 34.2]

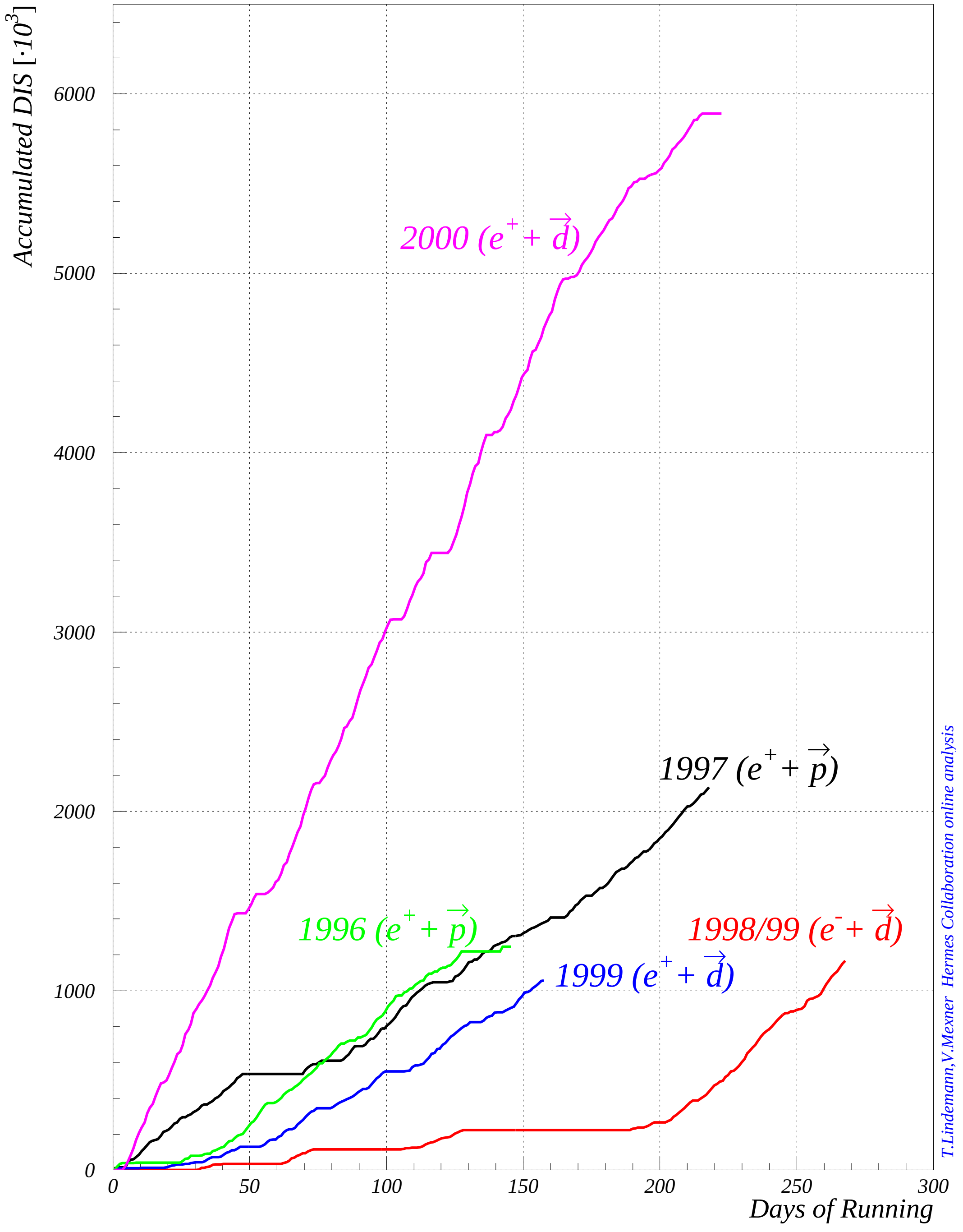
- Rekonstruktion: $\delta p/p$ 0.7-1.3 %,

  $\delta\theta \leq 0.6$ mrad

- Teilchenidentifizierung:
  TRD, Preshower, Kalorimeter,
  RICH (seit 1998, vorher Schwellen-Cherenkov),
  Myon-Hodoskop (seit 1998)

- Luminositätsmonitor $\rightarrow$[U.Elschenbroich HK 42.4]

HERMES Daten 1996-2000



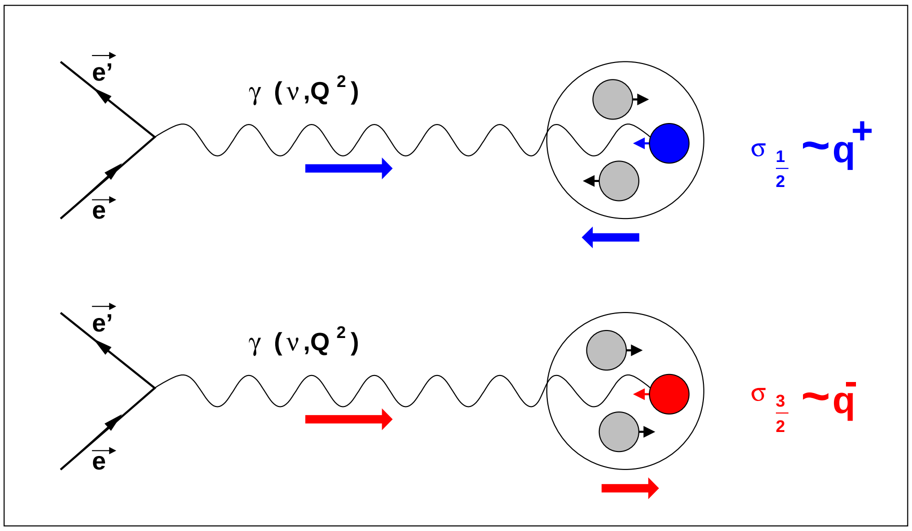
...plus 29,7 Millionen Ereignisse mit unpolarisierten Targets (H_2, D_2, He, N_2, Ne, Ar, Kr) !

Asymmetrien

- Typische Messgrößen in der Spinphysik: Asymmetrien , nicht Wirkungsquerschnitte.

⇒ Isolierung der polarisierten Beiträge und Minimierung der Akzeptanzeffekte.

Beispiel:
Inklusive Asymmetrie im Quark Parton Model



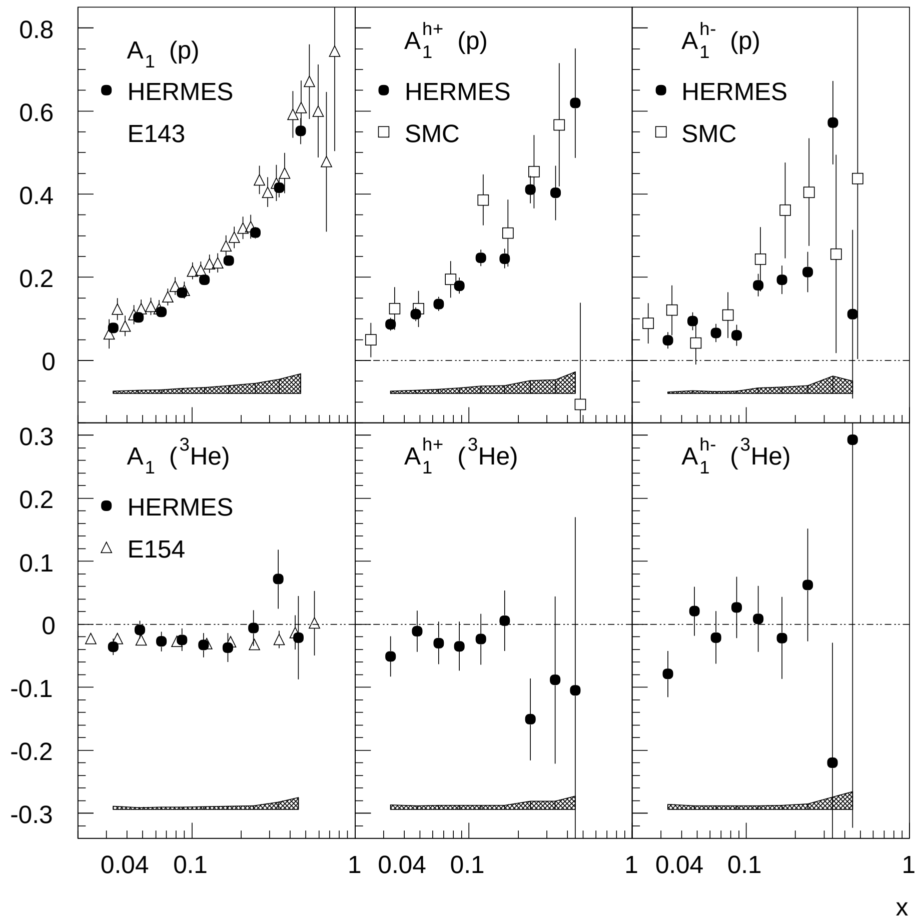
$$A_1 = \frac{\sigma_{\frac{1}{2}} - \sigma_{\frac{3}{2}}}{\sigma_{\frac{1}{2}} + \sigma_{\frac{3}{2}}} = \frac{g_1}{F_1}$$

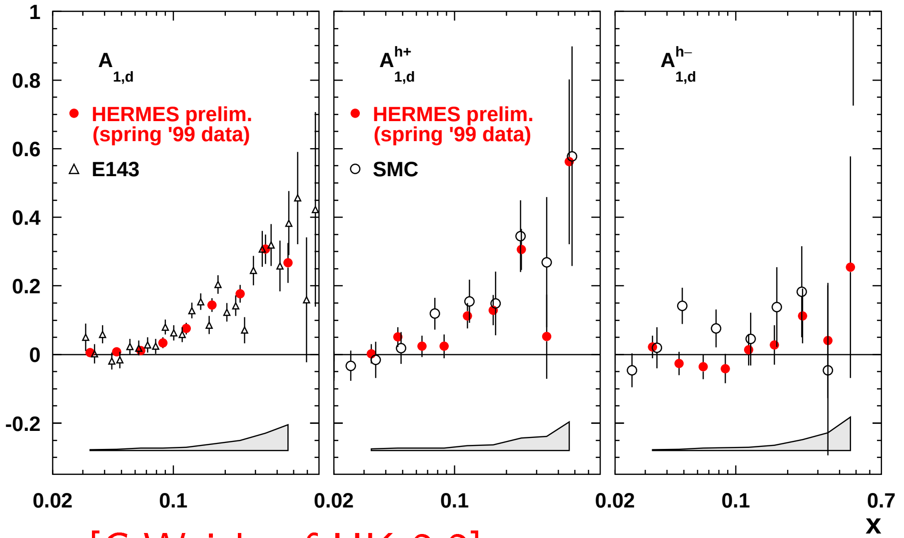
$$g_1(x) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 \ (q_i^+(x) - q_i^-(x)) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 \ \Delta q_i(x)$$

$$F_1(x) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 \ (q_i^+(x) + q_i^-(x)) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 \ q_i(x)$$

Semi-Inklusive Asymmetrien

$$A_1^h \approx \frac{g_1^h}{F_1^h}(x,Q^2) = \frac{\int_{z_{min}}^1 dz \sum_q e_q^2 \Delta q(x,Q^2) \cdot D_q^h(z,Q^2)}{\int_{z_{min}}^1 dz \sum_q e_q^2 q(x,Q^2) \cdot D_q^h(z,Q^2)}$$





$\rightarrow$[C.Weiskopf HK 2.2]

Δq - Extraktion

- Umgruppieren der Photon-Nukleon-Asymmetrie

$$A_1^h(x,z) = \sum_q \left[\underbrace{\frac{e_q^2\; q(x) \cdot D_q^h(z)}{\sum_{q'} e_{q'}^2\; q'(x) \cdot D_{q'}^h(z)}}_{P_q^h(x,z)} \cdot \frac{\Delta q(x)}{q(x)} \right]$$

- Die Purity $P_q^h(x,z)$ entspricht der Wahrscheinlichkeit, daß ein Quark $q(x)$ getroffen wurde, wenn ein Hadron $h(z)$ detektiert worden ist.

- Die Purities sind spinunabhängige Größen.

- Definiere

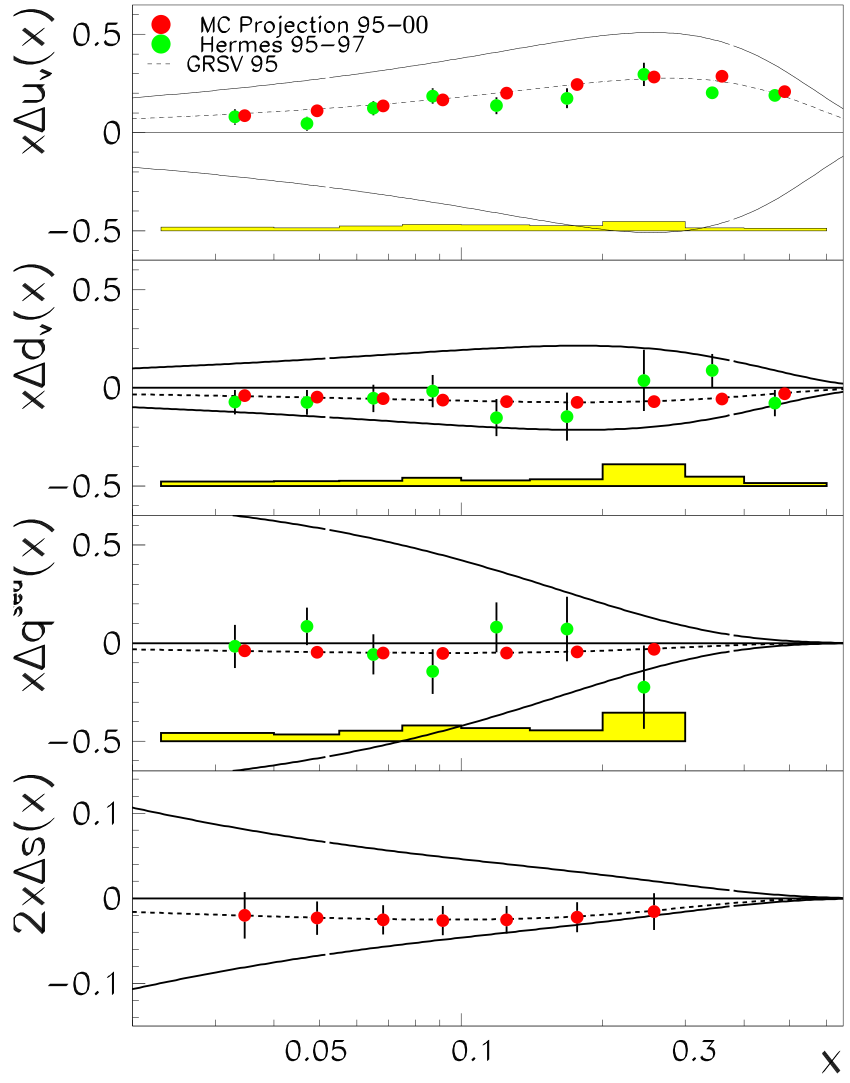
$$\vec{A} = \begin{pmatrix} A_1^{h_1(x)} \\ \dots \\ A_1^{h_m(x)} \end{pmatrix} \qquad \vec{Q} = \begin{pmatrix} \Delta q_1(x)/q_1(x) \\ \dots \\ \Delta q_n(x)/q_n(x) \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{P} = \left[P_q^{h_j}(x) \right]_{mn} \text{ mit } P_q^h(x) = \int_{z_{min}}^1 P_q^h(x,z)\; dz$$

- Die Quark-Polarisationen $\vec{Q}$ folgen dann aus

$$\vec{A} = \mathcal{P}\vec{Q}$$

Quark-Spinverteilungen



- Projizierte Genauigkeit nach der Analyse der bereits existierenden Daten (1995-2000)

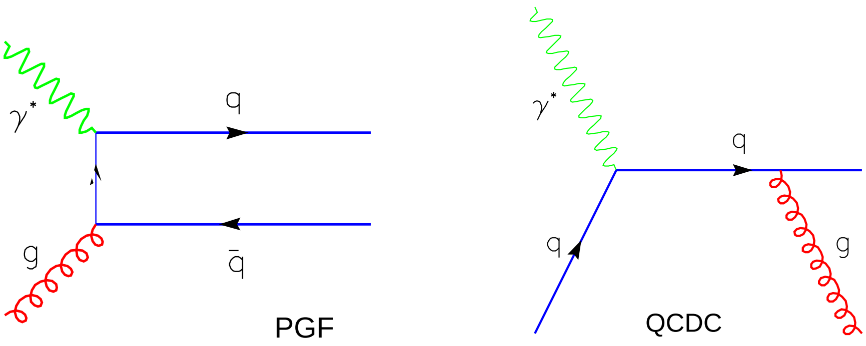
- π,K,p-Asymmetrien identifiziert mittels RICH

$\Rightarrow$ Statistik ausreichend für 5-Parameter-Fit !
Δu_v, Δd_v, $\Delta \bar{u}$, $\Delta \bar{d}$, $\Delta(s+\bar{s})$

Gluon-Polarisation

Zur Messung der Gluon-Polarisation wird ein Prozess mit Gluonen gebraucht. Offensichtlicher Kandidat: Photon-Gluon-Fusion (PGF) .

Hohe Energien: 2-Jet-Ereignisse isolieren PGF.
Niedrige Energien: Ereignisse mit Hadronpaaren mit relativ hohem Transversalimpuls p_t.
Untergrund: QCD-Comptoneffekt (QCDC).



Gemessen wird die Asymmetrie

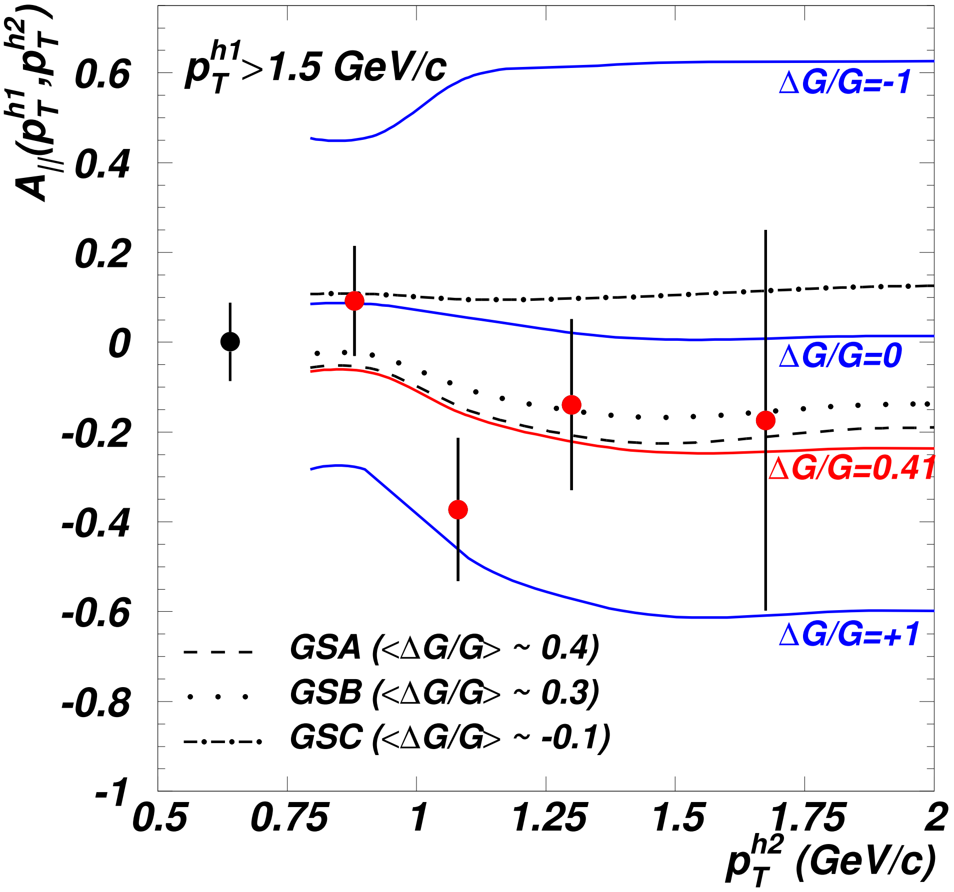
$$A_{\parallel} = \frac{N^{\uparrow\downarrow}_{h^+h^-} L^{\uparrow\uparrow} - N^{\uparrow\uparrow}_{h^+h^-} L^{\uparrow\downarrow}}{N^{\uparrow\downarrow}_{h^+h^-} L_P^{\uparrow\uparrow} + N^{\uparrow\uparrow}_{h^+h^-} L_P^{\uparrow\downarrow}}$$

$$\approx \left(\hat{a}_{\mathrm{PGF}} \frac{\Delta G}{G} f_{\mathrm{PGF}} + \hat{a}_{\mathrm{QCDC}} \frac{\Delta q}{q} f_{\mathrm{QCDC}} \right) D$$

$$\hat{a}_{\mathrm{PGF}} = -1 \qquad \hat{a}_{\mathrm{QCDC}} \approx 0.5$$

$f_{\mathrm{PGF}}, f_{\mathrm{QCDC}}$: rel. Anteil an Ereignissen, PYTHIA

Gluon-Polarisation



HERMES Daten 1996/97 [PRL 84 (2000) 2584-2588]
(ohne systematische Fehler vom PYTHIA Monte Carlo)

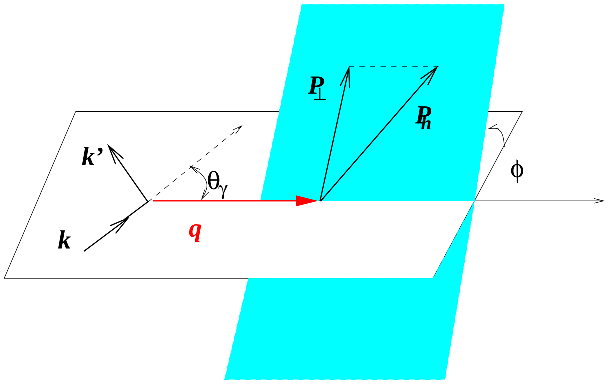
⇒ Die Gluon-Polarisation $\Delta G/G$ ist positiv! $\langle \Delta G/G \rangle = 0.41 \pm 0.18(stat.) \pm 0.03(syst.)$ mit $\langle x_g \rangle = 0.17$.

⇒ Deutliche Verbesserung (Statistik und Systematik) zu erwarten nach Analyse der 1998-2000 Daten

→[F.Menden HK 2.3]

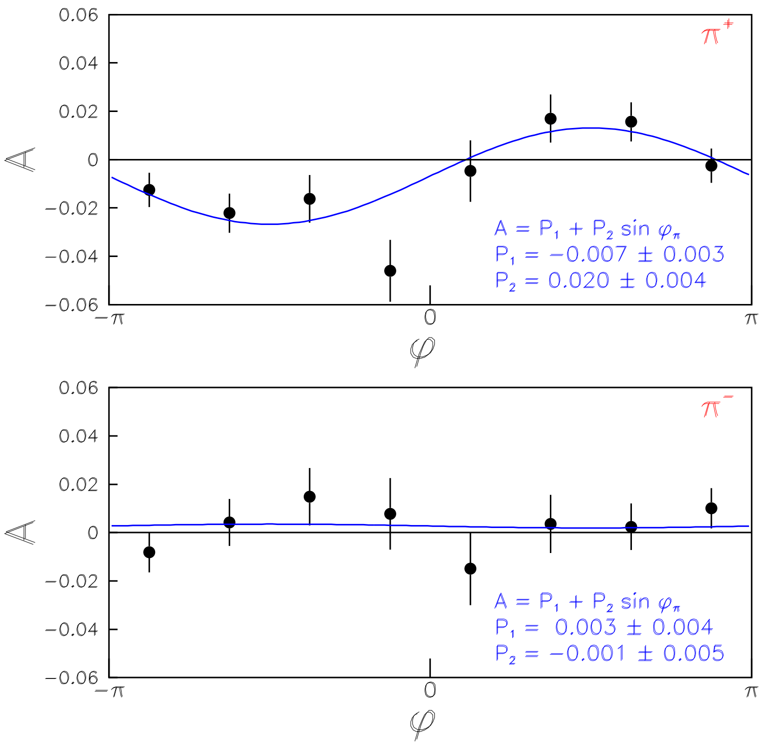
Azimutale Single-Spin-Asymmetrie

δq 'chiral odd' $\Rightarrow$ kann nur semi-inklusiv gemessen werden, z.B. über azimutale Asymmetrien.



Azimutale Asymmetry semi-inklusiver Pionen, unpol. Strahl, long. pol. Target:

$$A(\phi) = \frac{1}{P_t} \frac{N^{\Uparrow}(\phi) - N^{\Downarrow}(\phi)}{N^{\Uparrow}(\phi) + N^{\Downarrow}(\phi)}$$

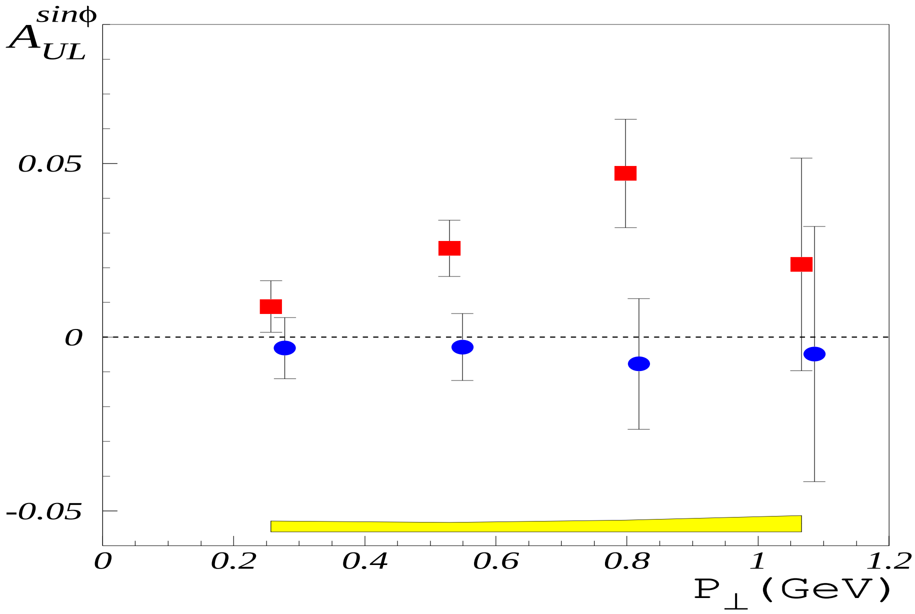


[PRL 84 (2000) 4047-4051]

Pol. Fragmentationsfunktion $H_1^\perp$

Azimutal-gewichtete Asymmetrie:

$$A_{LU}^{\sin\phi} = \frac{\frac{L^\uparrow}{L_P^\uparrow}\sum_{i=1}^{N^\uparrow}\sin\phi_i^\uparrow - \frac{L^\uparrow}{L_P^\uparrow}\sum_{i=1}^{N^\downarrow}\sin\phi_i^\downarrow}{\frac{1}{2}[N^\uparrow + N^\downarrow]}$$



(rot: π^+, blau:π^-)[PRL 84 (2000) 4047-4051]

$$A_{LU}^{\sin\phi} \sim \delta q \cdot H_1^\perp \qquad \text{(vereinfacht)}$$

⇒ Pol. Fragmentationsfunktion $H_1^\perp \neq 0$

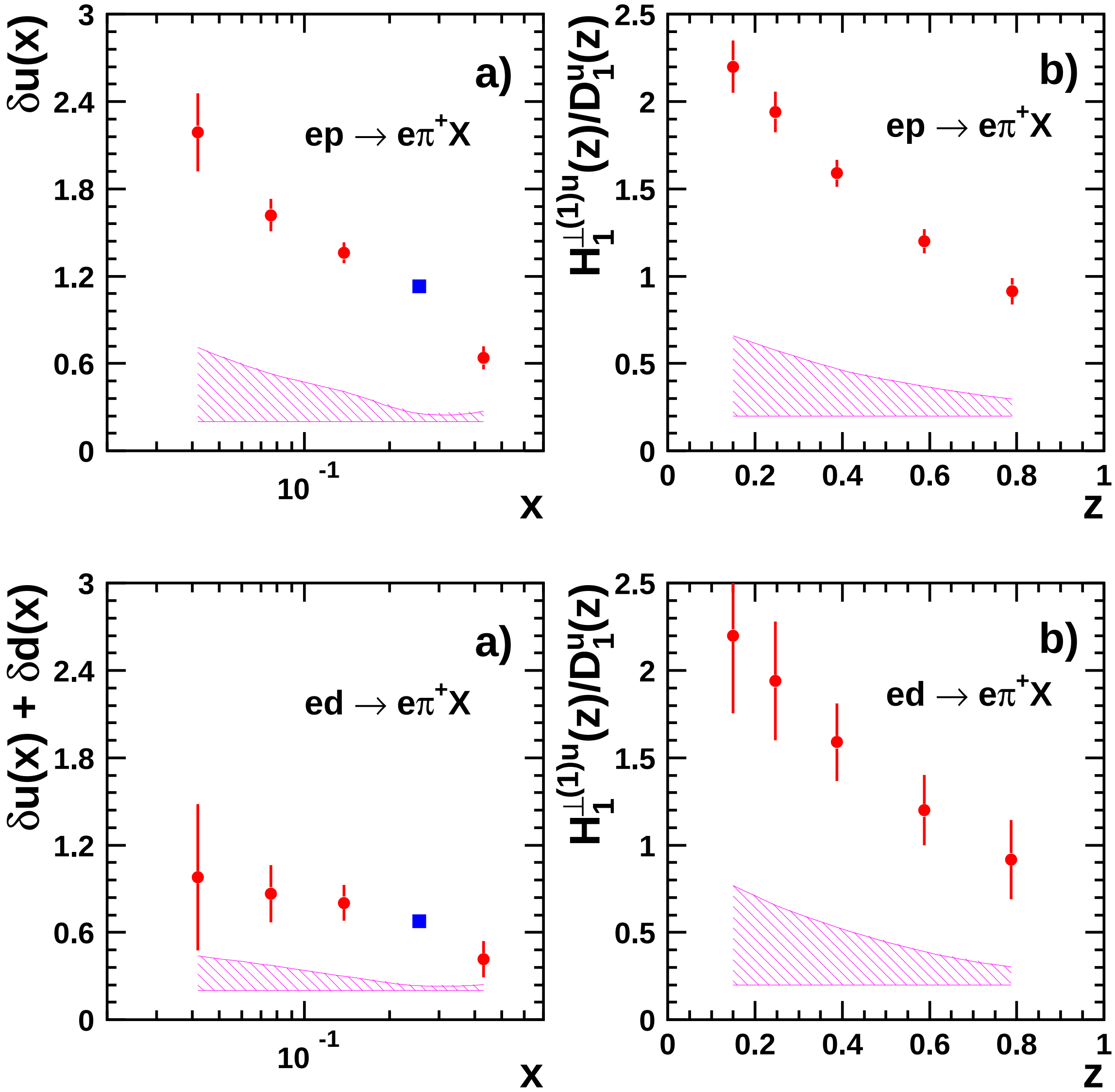
- Effekte schon meßbar für long. pol. Target

⇒ Große Effekte für trans. pol. Target

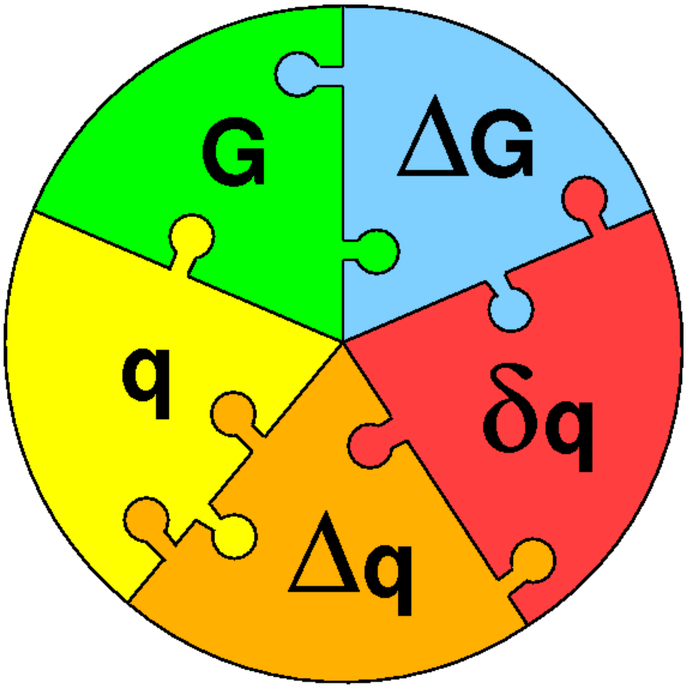
⇒ δq kann gemessen werden !

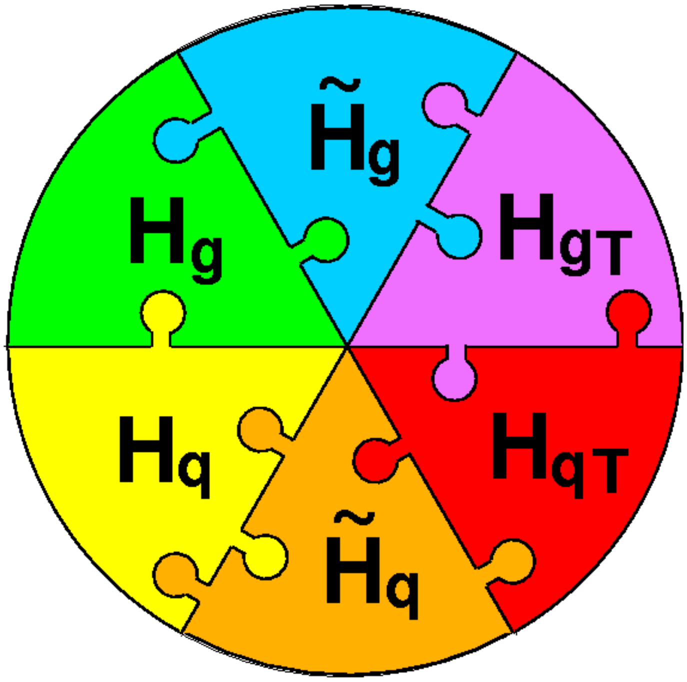
Projizierte Genauigkeit für δq

- Ab 2002 transversal polarisiertes Target in HERMES.
- Angenommene Statistik: 7 Mio. DIS-Ereignisse.



SPDs - Mehr Teile für das Puzzle





... und das gleiche nochmal für E_q, E_g etc. mit Spin-Flip des Target-Nukleons.

Skewed Parton Distributions (SPDs)

- Analyse von harten exklusiven Prozessen führt zu sogenannten 'Skewed Parton Distributions' $H(x, \xi, t)$.

- H: Nukleonspin erhalten, E: Nukeonspin geflippt

- Einheitliche Beschreibung von elastischen Formfaktoren und DIS-Strukturfunktionen.

$$
\begin{aligned}
q(x) &= \quad H_q(x, 0, 0) \\
\Delta q(x) &= \quad \tilde{H}_q(x, 0, 0)
\end{aligned}
$$

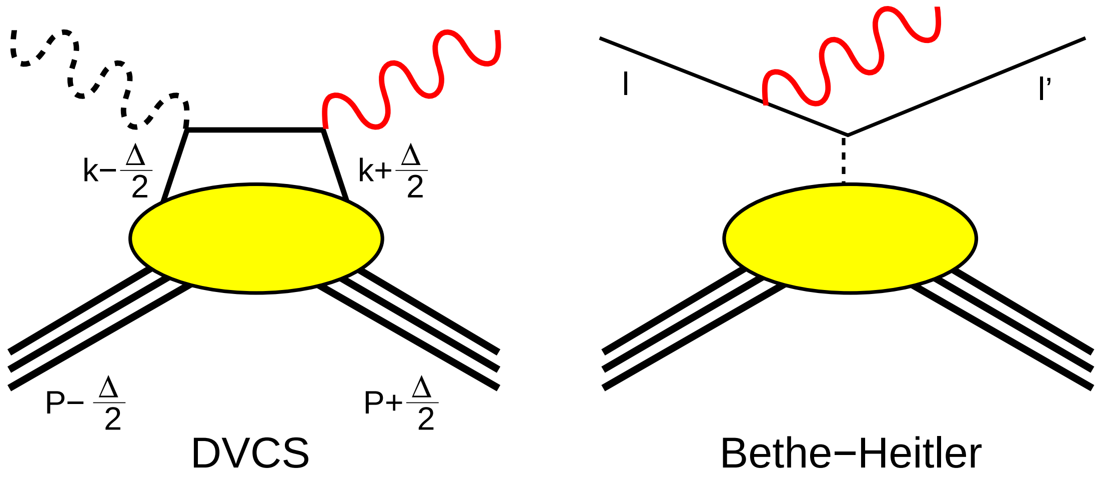
$$
\begin{aligned}
G_M(t) &= \quad \int_{-1}^{1} dx \sum q[H_q(x, \xi, t) + E_q(x, \xi, t)] \\
G_E(t) &= \quad \int_{-1}^{1} dx \sum q[H_q(x, \xi, t) + \tfrac{t}{4M^2} E_q(x, \xi, t)]
\end{aligned}
$$

Insbesondere erlauben sie auch einen Zugang zum Gesamtspin J_q der Quarks und damit zum Bahndrehimpuls der Quarks L_q:

$$
\begin{aligned}
J_q &= \frac{1}{2}\Delta\Sigma + L_q \\
&= \frac{1}{2}\int_{-1}^{1} x\, dx [H_q(x, \xi, t = 0) + E_q(x, \xi, t = 0)]
\end{aligned}
$$

Deeply Virtual Compton Scattering

Einfachster harter exklusiver Prozess: tief-inelastische Comptonstreuung (Deeply Virtual Compton Scattering, DVCS). Hauptsächlicher Untergrund: Bremsstrahlung (Bethe-Heitler, BH).



Interferenz von DVCS- und BH-Amplituden für pol. e^+-Strahl und unpol.Target:

$$A_{LU} \sim \sin(\phi) \cdot Im \left\{ F_1 \mathcal{H}_1 + \frac{x}{2-x}(F_1 + F_2)\widetilde{\mathcal{H}}_1 - \frac{\Delta^2}{4M^2} F_2 \mathcal{E}_1 \right\}$$

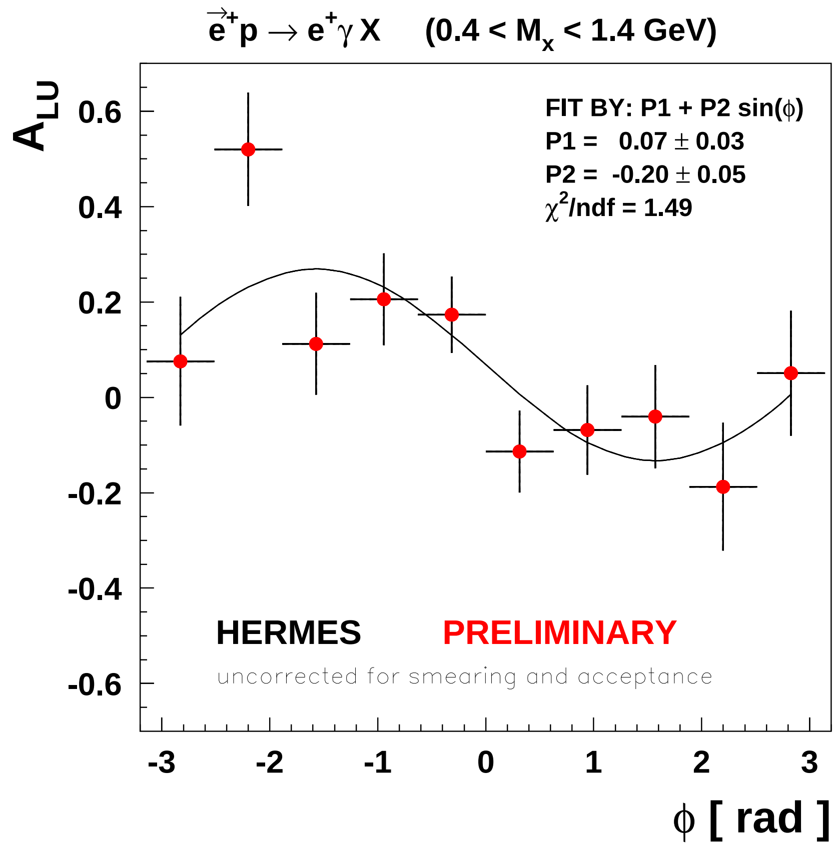
$\mathcal{H}_1$ etc: Faltung von H_q mit einer (harten) Streuamplitude, $F_{1,2}$: Formfaktoren

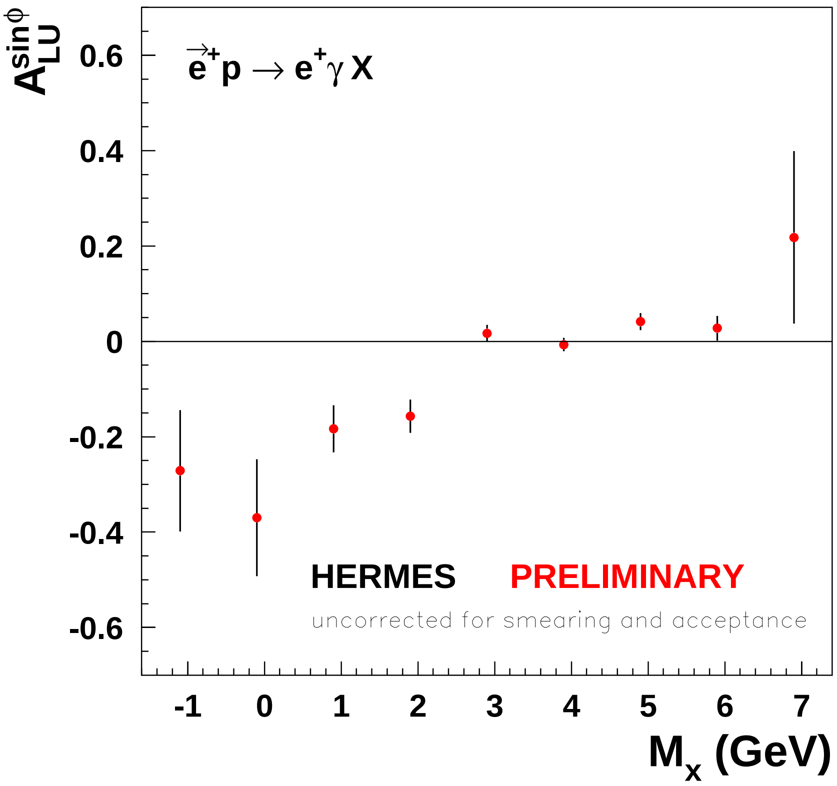
$$A_{LU}(\phi) = \frac{2(N^+(\phi) - N^-(\phi))}{\langle |P_b| \rangle \cdot (N^+(\phi) - N^-(\phi)}$$

Azimuthal-gewichtete Asymmetrie:

$$A_{LU}^{\sin(\phi)} = \frac{2 \sum_i^N \frac{\sin(\phi_i)}{(P_b)_i}}{N}$$

DVCS Resultate





Erste eindeutige Evidenz für DVCS.

Recoil Detektor

- Rückstoßprotonen aus harten exklusiven Prozessen (wie DVCS oder ρ-Produktion) haben in HERMES typische Impulse von 100-1200 MeV/c ($E_{kin} = 5 - 600$ MeV) und Polarwinkel θ von 10°-80°.

- Nachweis dieser Rückstoßprotonen erlaubt eine wesentliche Verbesserung der Messungen. Daher plant HERMES zur Zeit einen Recoil-Detektor.

- Zylinderförmiger Spur-Detektor (Silizium oder SciFi) in einem longitudinalen Magnetfeld.

- Kombination mit einem unpolarisierten Target erlaubt die Messung von Strahlpolarisations- und Ladungs-Asymmetrien.

→[B.Krauss HK 42.3]

Zusammenfassung und Ausblick

- HERMES hat durch die Messung inklusiver und semi-inklusiver Asymmetrien die Beiträge der einzelnen Quarkflavour $\Delta q(x)$zum Spin des Nukleons bestimmt. Nach der Analyse der bisher gesammelten Daten werden Aussagen über $\Delta\bar{u}$, $\Delta\bar{d}$ und Δs möglich sein.

- Die Asymmetrie für Paare von Hadronen mit hohem Transversalimpuls p_t zeigt, daß die Gluonpolarisation $\Delta G/G$ positiv ist.

- Die DVCS-Messungen zeigen eine azimuthale Asymmetrie in Übereinstimmung mit den auf SPDs basierenden theoretischen Erwartungen.

- In 2002+ wird ein transversal polarisiertes Target die ersten Messungen der Transversity δq ermöglichen.

- Ab 2004 wird der Recoil-Detector verbesserte Messungen harter exklusiver Prozesse erlauben.