

KHuK Jahrestagung 2008
Physikzentrum Bad Honnef
16.-18. Dezember 2008

Physik an einem Elektron Nukleon Collider
(ENC@FAIR)

Dietrich von Harrach
Institut für Kernphysik der Universität Mainz

Es geht um die starke Wechselwirkung !

- Warum finden wir die starke Wechselwirkung immer noch interessant und wichtig ?
- Warum brauchen wir neue Beschleuniger und Detektoren ?
- Welche Anlagen brauchen wir als nächstes ?
- Welche Möglichkeiten für eine Realisierung bestehen ?

Starke QCD

- Renormierbare nichtabelsche Feldtheorie eingebettet in das Standardmodell
- Laufende Kopplungskonstante mit asymptotischer Freiheit $Q^2 \rightarrow \infty$ und “infrared slavery” im Bereich kleiner Impulsüberträge
- Die Kopplungsstärke erlaubt keine kontrollierbare Anwendung der Störungstheorie im Bereich $Q^2 < 1 \text{ GeV}$
- Hadronen, chirale Symmetriebrechung und Confinement als emergente Eigenschaften
Grundlage für Konstituentenmodelle oder effektive Feldtheorien

Fragen an die Natur und praktische Bedeutung

- Verständnis der (starken) QCD :
Vorhersage der emergenten Eigenschaften und Wechselwirkungen hadronischer Systeme mit beliebiger Präzision
→ Massen, Radien, Polarisierbarkeit, Lebensdauern, Streuquerschnitte
- QCD als Fallbeispiel einer fundamentalen starken Wechselwirkung mit dem Vorteil zugänglicher Skalen

Anwendungen der starken Wechselwirkung

- Elektroschwache Präzisionsphysik mit ihrem Fenster ins “Jenseits” hängt von der “starken QCD” ab
K, C und B Zerfälle, $g-2$
- Kollider wie LHC beginnen und enden mit Hadronen
Strukturfunktionen und Fragmentation sind “starke QCD”
- Kernkräfte, Grenzen der Stabilität von Kernen und Hyperkernen

Intuition, Experiment und Theorie

Was ist “interessant”?

Intuition oder spontane Einsicht motiviert und hilft beim Verständnis komplexer Zusammenhänge

Beispiel: Konstituentenquarkmodell einschliesslich Spin des Nukleons, Gluebälle

Experimentelles Ergebnis: siehe “missing resonances”, Spinkrise, Glueballfrustration

Interessant ist die offenbar die Kollision unserer Intuition mit der experimentellen Realität

Motiviert neue experimentelle und theoretische Arbeit → vertieftes Verständnis, neue Begriffe und Intuition

Spin des Nukleons und die Folgen

- Analyse des Energie-Impulstensors:
Alle fundamentalen Felder tragen zum Impuls und Drehimpuls der Hadronen
Helizität und Bahndrehimpuls
- Die Struktur von transversal und longitudinal orientierte Nukleonen ist unterschiedlich
Transversalität, neue T-2 Strukturfunktionen
- Das Konzept des Bahndrehimpulses bzw. des magnetischen Moments verknüpft Ort
und Impuls
Verallgemeinerte Strukturfunktionen
- Spin-Bahn Kopplung in der Hadronisierung können behandelt und systematisiert
werden
Sivers, Collins, Boer-Mulders

Geschmacks- und Gretchenfragen

- Struktur vs. Spektroskopie
 - A) Formfaktoren, Strukturfunktionen, Polarisierbarkeiten
 - B) Resonanzen, Zerfallskanäle, Partialwellen
raumartig und zeitartig, komplementär
- Hadronstrahlen vs. Leptonstrahlen
 - DY Prozesse vs. DIS
 - Gleiche Graphen, Unterschiede in den Faktorisierungseigenschaften und Untergrundprozessen

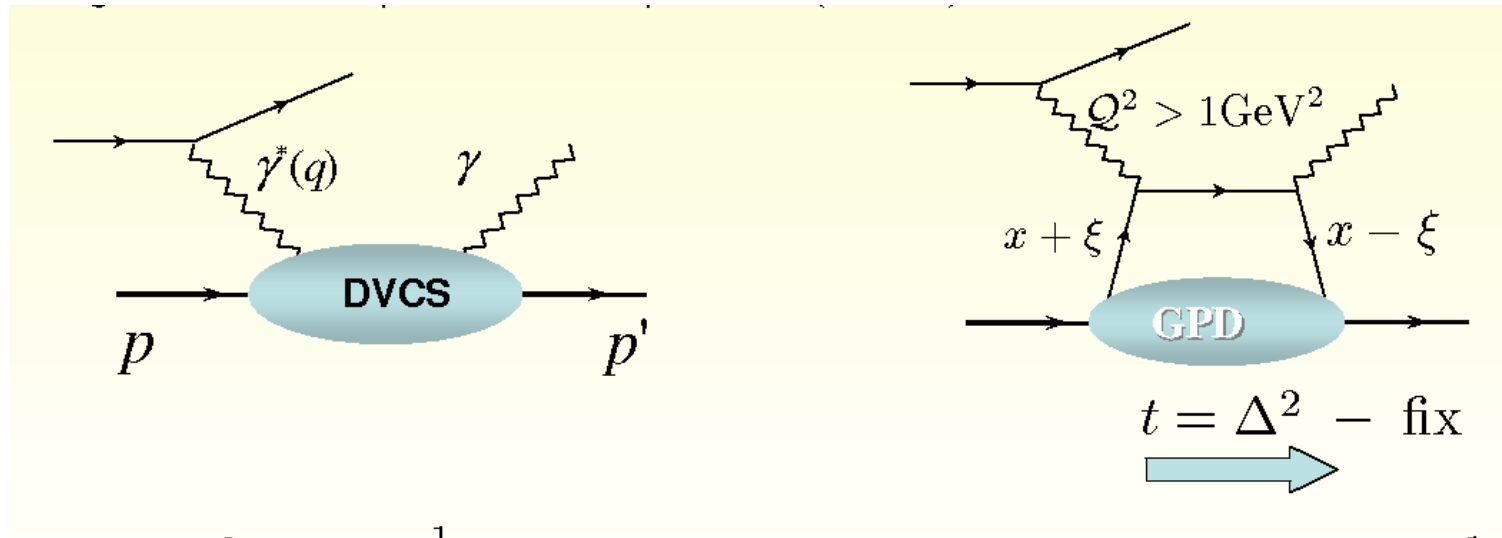
Leptonstrahlen

- Trennung von Sonde und Objekt durch führenden Einbosonaustausch: γ^* , W^\pm , Z
- Skalentrennung und Faktorisierung der Quarkverteilung bei hohen Impulsüberträgen
Bjorken limit, "handbags", OPE
- Gluonverteilungen zugänglich über Skalenverletzungen und Photon-Gluon Fusion
- alle Variatianten des Comptonprozesses
 - A) Comptonvorwärtsamplitude = DIS
 - B) Virtuelle Comptonstreuung = DVCS
 - C) elastische Streuung als Grenzfall

Verallgemeinerte Strukturfunktionen (GPDs)

- Made in Leipzig: Geyer, Müller, Robaschik ..
- Verbindung mit dem Drehimpuls und DVCS: Ji
- Eigenschaften und Observable H , \tilde{H} , E , \tilde{E} : Radyushkin, Polyakov, Vanderhaeghen, Diehl und andere
- Tomographie: Burkardt und andere
- Gitter: Schäfer und andere
- Erste Messungen: HERMES, HERA, CEBAF

Bedeutung der Generalisierten Partonverteilungen



- GPDs führen auf die Abhängigkeit der Quarkverteilungen von der transversalen Position: $q(x) \rightarrow q(x, b_{\perp})$
- Das Konzept des Drehimpulses $\mathbf{r} \times \mathbf{p}$ als Korrelation von Ort und Impuls ist natürlich darin enthalten \rightarrow Ji's Summenregel

- Anschauliche Konzepte der transversale Verteilung von Ladung, Helizität, Impuls
→ Tomographie
gibt es eine "Pionwolke", mehrfach harte Streuprozesse in h-h Kollisionen

- wohldefinierte Operatoren zugänglich durch LQCD und effektive Feldtheorien

DVCS

- stark fallende Abhängigkeit von Q^2 , Unterdrückung α : $\sigma_{DVCS} \propto \frac{\alpha^3}{Q^6}$,
- Interferenz mit Bethe-Heitler: $\sigma_{BH} \propto \frac{\alpha^3}{Q^4} \mathcal{F}(G_E, G_M)$
- starker γ Untergrund von π^0 Erzeugung und Resonanzanregungen
- Experimentelle Bedingungen:
 - braucht hohe Impulsüberträge und weiten dynamischen Bereich $2 \text{ GeV} < Q^2 < 20 \text{ GeV}$
 - polarisierte Protonen, polarisierte Leptonen (Positron/Elektron, Myon/Antimyon)
 - “missing mass” Auflösung besser als eine Pionmasse

Weitere aktuelle experimentelle Fragestellungen

- Harte exklusive Mesonenerzeugung, DVCS in Resonanzen $p \rightarrow \Delta$
- Messung der Transversalität und anderer transversaler Drehimpulsobservablen
- Präzisionsmessung der Gluonpolarisation mit Charmerzeugung mit versetzten Zerfallsvertices
- Flavourseparierte polarisierte Strukturfunktionen

Wie messen?

- polarisierter Elektronenstrahl und “fixed target”, Energie 30-50 GeV
kinematische Auflösung $\delta p/p \approx 0.1\%$, Rückstossdetektor, EM-Kalorimeter
 - HERMES 27.5 GeV Luminosität $10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ mit polarisiertem Gastarget
 - ELFE bzw. TESLA-N mit polarisiertem Gas oder Festkörpertarget
 - CEBAF 11 GeV , relevante $Q^2 > 1 - 4 \text{GeV}^2$, bei $x > 0.2$ (ab 201x)
- polarisierte Myonstrahlen μ^+, μ^- “fixed target”, Energie 100-200 GeV
(COMPASS Proposal 2009)
 - mit unpolarisiertem L- H_2 Target Luminosität $\mathcal{L} = 2.0 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
 - polarisiertes Festkörpertarget $FOM < \frac{1}{32} \mathcal{L}$
 - kinematische Auflösung $\delta m \approx 1 \text{GeV}$

e,N-Collider

- HERA war der bislang einzige e^+, p bzw. e^-, p Collider mit einer Spitzenluminosität $\mathcal{L} = 1.5 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
 - Schwerpunktenergie war $\sqrt{s} = \sqrt{4(27.5 * 920)} = 318 \text{GeV}$
 - Mission: Substruktur der Quarks. Leptoquarks, schwache Beiträge bzw. Interferenzen
 - Keine polarisierten Protonen, keine Nukleonen (Deuteronen, schwere Ionen)
 - Erfolge: Strukturfunktion bei sehr kleinen $x > 10^{-5}$, keine Abweichungen DGLAP, Gluonverteilung bei kleinen x
- RHIC hat die Kollision polarisierter Protonstrahlen demonstriert
 - ein doppelt polarisierter e,p Kollider (eRHIC) wurde vorgeschlagen

- die Niederenergieversion (e-Ring 3 GeV, p-Ring 50 GeV) $s = 600 \text{ GeV}^2$, soll $\mathcal{L} = 5.3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erreichen können
 - eine Hochenergieversion (e-ERL 20 GeV, p-Ring 250 GeV) soll $\mathcal{L} = 2.6 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erreichen können
- eRHIC-H $s = 2 \times 10^4 \text{ GeV}^2$ \leftrightarrow HERA $s = 10 \times 10^4 \text{ GeV}^2$

HESR und PANDA

- Der Antiprotonenspeicherring HESR des FAIR Basisprogramms ist auf eine Steifigkeit von 50 Tm ausgelegt
- Der Ring ist für stochastische und Elektronkühlung ausgelegt
- Das PANDA Experiment wird mit zirkulierenden Antiprotonen bei ca. 8 GeV und Clustertargets betrieben werden
- Die Polarisation der Antiprotonen kann erhalten werden
- Es können polarisierte Protonen am SIS18 beschleunigt werden und zum HESR transferiert werden
- Polarisationstechniken wurden für das PAX Proposal entwickelt

ENC@FAIR

- Hinzufügung eines Elektronspeicherrings in den polarisierte Elektronen bei 3 GeV injiziert werden
- Kollisionspunkt mit Protonen im PANDA Detektor
- Schwerpunktenenergie $s = 4 \times 3 \times 15 = 180 \text{ GeV}$
vergleiche eRHIC-L $s = 600 \text{ GeV}^2$, CEBAF 11 GeV $s = 21 \text{ GeV}^2$
HERMES $s = 52 \text{ GeV}^2$, COMPASS $s = 300 \text{ GeV}^2$
- Luminosität $\mathcal{L} \approx 4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kann erreicht werden
- 80% Polarisation beider Strahlen kann erreicht werden

- Verbesserung der FOM (Verkürzung der Messzeit) gegenüber HERMES oder COMPASS
um einen Faktor besser als 64

Probleme bei der Realisierung von ENC@FAIR

- Können die Werte von Polarisation und Luminosität gleichzeitig erreicht werden
- Elektronenkühlung des Protonstrahls bei vollem Impuls bei 15 GeV/c
Kühlung mit 8 MeV Elektronen mit mehreren Ampere
- Kollisionsgeometrie und Nachweiseffizienz in PANDA
Strahlseparation mit Vorwärts und Rückwärtsspektrometern (Dipolen)
- Kosten für Bau bzw. Einbau, Integration in HESR/PANDA, Finanzierung, Beziehung zu FAIR/GSI

Schlussfolgerungen

- Die Hadronphysik und die starke QCD bieten interessante Perspektiven
Konzept der Tomographie, Bahndrehimpuls, Transversalität
- Die Qualität der spinabhängigen Observablen (Fehler) können mit einem doppelt polarisierten eN Kollider um einen Faktor ≈ 10 verbessert werden
Die Konfrontation der Daten mit exakten feldtheoretischen Rechnungen und Konzepten ist möglich
- Die Hinzufügung eines Elektroninjektors und eines Elektronspeicherrings zum HESR/FAIR Projekt bietet eine kostengünstige Lösung in einem für die Hadronstrukturphysik optimalen Energiebereich
- Eine zügige Realisierung würden dem Projekt eine international führende Rolle garantieren