QCD-Instantonen in der Tiefunelastischen Streuung

F. Schrempp

in Zusammenarbeit mit

A. Ringwald

und

M. Gibbs (Monte Carlo) S. Moch (Doktorarbeit)

1. **Einleitung**
2. **Strukturfunktionen und Wirkungsquerschnitt bei HERA**
3. **Vielteilchen-Endzustände bei HERA (MC-Simulation)**
4. **Zusammenfassung und Ausblick**

– Aachen, November 1996 –

1. Einleitung

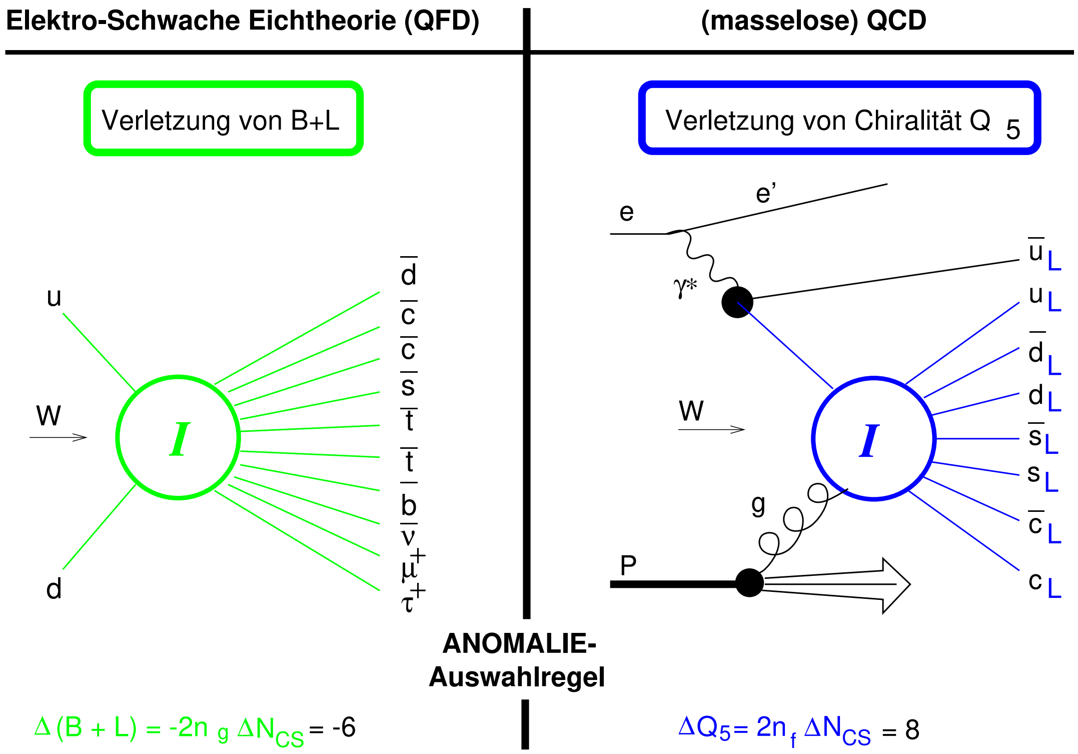
- Perturbative Formulierung des Standard Modells: theoretisch konsistent und in bester Übereinstimmung mit gegenwärtigen Experimenten.

- Allgemein jedoch: Gewisse in der Störungstheorie erhaltene, fermionische Quantenzahlen werden durch sog. Adler-Bell-Jackiw Anomalien gebrochen:

  $B + L$ in QFD und Chiralität (Q_5) in (masseloser) QCD.

  $\Rightarrow$ Es gibt Prozesse, die diese "anomalen" Quantenzahlen verletzen und entsprechend nicht durch Störungstheorie beschreibbar sind!

- Solche anomalen Prozesse werden induziert ['t Hooft'76] durch Instantonen [Belavin *et al.* '75]:



- Instantonen
  - sind Tunnel-Übergänge in nicht-abelschen Eichtheorien, zwischen degenerierten, topologisch inäquivalenten Vakua.
  - sind exponentiell unterdrückt bei niedrigen Energien,

$$\text{Gamov Tunnel} - \text{Faktor}: \sim \exp\{-4\pi/\alpha\}.$$

♣ können bei hohen Energien (!) **ununterdrückt, d. h. beobachtbar** werden, aufgrund der Erzeugung von vielen zusätzlichen Eichbosonen $A_\mu^{(I)} \sim 1/g$ [Ringwald '90; Espinosa '90].

♣ Tiefunelastische Streuung:

- Bei kurzen Abständen ⇒ wohldefinierte, berechenbare Beiträge von kleinen QCD-Instantonen! [Balitsky, Braun '93; Moch, Ringwald, F. Sch. hep-ph 9609445/DESY 96-202].
- Inverse harte Impulsskala $1/Q$ liefert einen dynamischen IR-cutoff für Instanton-Größe ρ , $\rho \lesssim 1/Q$; ⇒

  Übliche "Instanton-Problematik" tritt nicht auf: Integration über ρ endlich!, keine *ad hoc* "cut-off"-Parameter. [Moch, Ringwald, F. Sch. hep-ph 9609445/DESY 96-202]

– Beste experimentelle Chancen:

Suche nach "footprints" von QCD-Instantonen in tiefunelastischen Vielteilchen-Endzuständen [Ringwald, F. Sch. '94].

♣ Entdeckung wäre von grundlegender Bedeutung:

* **Neuartige, nicht-perturbative Manifestation von QCD**
* **Enge Analogie** zur $B+L$ **Verletzung** im mittelfristig nicht zugänglichen multi-TeV Regime.

2. Strukturfunktionen und Wirkungsquerschnitt bei HERA

[Balitsky, Braun '93;
Ringwald, F. Sch., hep-ph 9607238/DESY 96-125; hep-ph 9610213/DESY 96-203;
Moch, Ringwald, F. Sch., im Druck]

- I-induzierter Beitrag zur Nukleon-Strukturfunktion, ausgedrückt durch Parton-Strukturfunktionen $\mathcal{F}_{i\,\mathrm{g}}, \ldots,\ i = 2, L$, and Dichten $\mathrm{f}_{\mathrm{g}}, \ldots$:

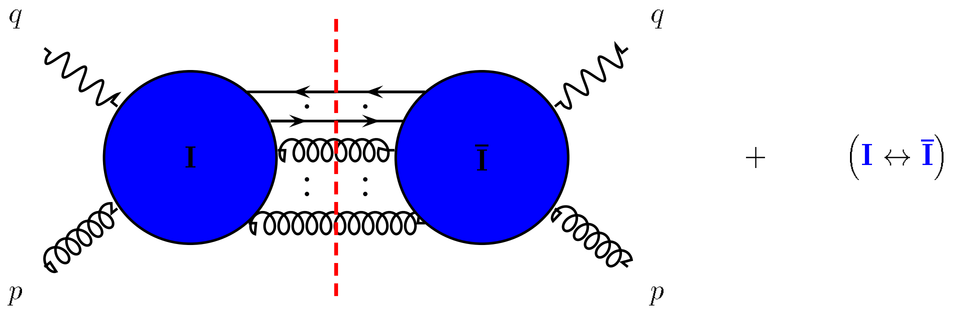
$$F_2^{(I)}(x_{\mathrm{Bj}}, Q^2) = \sum_{\mathrm{k}} \int_{x_{\mathrm{Bj}}}^{1} \frac{dx}{x}\, f_{\mathrm{k}}\left(\frac{x_{\mathrm{Bj}}}{x}\right) \frac{x_{\mathrm{Bj}}}{x}\, \mathcal{F}_{2,\mathrm{k}}^{(I)}(x, Q^2)$$

- I-Beitrag von Gluon-Strukturfunktion dominiert ($\propto 1/\alpha_s$).
- Balitsky, Braun '93: erste Abschätzung von $F_2^{(I)}$ für $x_{\mathrm{Bj}} \gtrsim 0.25$ $\Rightarrow$ motivierend, aber phänomenologisch wenig relevant! Rechnungen im Ortsraum.
- Unsere Strategie: Entwickle zunächst Impulsraum-Zugang

  $\Rightarrow$ Behalte "Kontrolle" über $F_2^{(I)}$, $\sigma^{(I)}_{\mathrm{tot,\,HERA}}$ auch bei kleinen $x_{\mathrm{Bj}} \gtrsim \mathcal{O}(10^{-3})$ durch kin. Schnitte an Impulsvariable des Endzustands!

2.1 I-Beitrag zur Gluon-Strukturfunktion

- Benutze optisches Theorem $\oplus$ $I\bar{I}$-"valley" Methode.
- Optisches Theorem:



  - Elegante Summation über Vielteilchen-Endzustand!
  - I-Beitrag zu Gluon-Strukturfunktionen durch Projektionen des Imaginärteils des $I\bar{I}$-Beitrags zur γ^*g Vorwärts-Streuamplitude, z. B.

$$\mathcal{F}_{2,g}^{(I)}(x,Q^2) = \left[-g^{\nu\mu} + 6\,x\,\frac{p^\mu p^\nu}{p\cdot q}\right] x\frac{1}{\pi}\mathrm{Im}\,\mathcal{T}_{g\,\mu\nu}^{(I\bar{I})}(p,q)$$

- $I\bar{I}$-"valley" Methode:

  [V.V. Khoze, Ringwald '91; Balitsky, Braun '92]

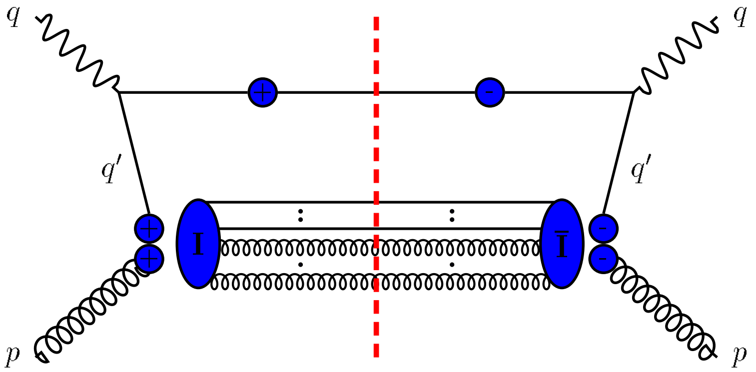
  Entwickle um $I\bar{I}$-"valley" Konfiguration: $\Leftrightarrow$ Minimum der Wirkung unter best. "Constraints"; interpoliert

  $\left\{\begin{array}{l}\text{schwach wechselwirkendes}\\ \text{stark annihilierendes}\end{array}\right\}$ $I\bar{I}$ Paar für $\left\{\begin{array}{l}\text{große}\\ \text{kleine}\end{array}\right\}$

  $I\bar{I}$ Separation; "valley"-Wirkung $S^{I\bar{I}}_{\text{valley}}$ bekannt!

- Struktur des I-Beitrags zum Imaginärteil der γ^*g Vorwärts-Streuanmplitude für große Q^2

[Moch, Ringwald, F. Sch. '96, im Druck.]:



$$\mathrm{Im}\,\mathcal{T}^{(I\overline{I})}_{g\,\mu\nu}(p,q) \simeq \frac{1}{4\,\pi^2}\sum_q e_q^2 \int d^4q'\,\delta_+\left((q-q')^2\right)\; s_{\mu\nu}(p,q,q')$$
$$\times \int d\rho_I \int d\rho_{\overline{I}} \int d^4R\;\mathcal{M}(\rho_I,\rho_{\overline{I}},R)$$
$$\times\; e^{\left[\mathrm{i}\,(p+q')\cdot R - Q'\,\left(\rho_I+\rho_{\overline{I}}\right) - \frac{4\pi}{\alpha_s(\rho^{-1})} S^{I\overline{I}}_{\mathrm{valley}}(\rho_I,\rho_{\overline{I}},R)\right]};$$

kollektive Koordinaten: $I,\overline{I}$–Radien $\rho_{I,\overline{I}}$, $I\overline{I}$-Abstand R_μ.

- I-Beitrag zur Gluon-Strukturfunktion hat intuitive Form:

$$\mathcal{F}^{(I)}_{2\,g}(x,Q^2) \simeq$$
$$x\sum_{\mathrm{q}} e_{\mathrm{q}}^2 \int_x^1 \frac{dx'}{x'} \int^{Q^2\frac{x'}{x}} dQ'^2\; P^{(I)}_{\mathrm{q}^*/\gamma}\left(\frac{x}{x'}\right)\, \sigma^{(I)}_{\mathrm{q}^*\mathrm{g}}(x',Q'^2)\,,$$

$\Rightarrow$ Faltung einer schwach veränderlichen "Splitting"-Funktion, $P^{(I)}_{q*/\gamma}(z) \sim z$, mit dem totalen Wirkungsquerschnitt des I-induzierten q^*g- Subprozesses,

$$\sigma^{(I)}_{\mathrm{q}^*\mathrm{g}}(x',Q') \simeq \int d\rho_I \int d\rho_{\overline{I}} \int d^4R\;\mathcal{M}(\rho_I,\rho_{\overline{I}},R)$$
$$\mathrm{e}^{\left[\mathrm{i}\,(p+q')\cdot R - Q'\,\left(\rho_I+\rho_{\overline{I}}\right) - \frac{4\pi}{\alpha_s(\rho^{-1})} S^{I\overline{I}}_{\mathrm{valley}}(\rho_I,\rho_{\overline{I}},R)\right]}\,,$$

der die wesentliche **Instanton** Dynamik enthält.

2.2 Totaler Wirkungsquerschnitt des I-induzierten $q^\star g$-Subprozesses

- Für großes $-q'^{\,2} = Q'^{\,2}$ $\Rightarrow$ Integrationen über kollektive Koordinaten $\rho_I, \rho_{\overline{I}}, R_\mu$ via eindeutigen Sattelpunkt $\Leftrightarrow$ kleine Instantonen:

$$\rho_I^\star = \rho_{\overline{I}}^\star = \mathcal{O}\left(\frac{1}{Q'\alpha_s^{\rm eff}(Q'^2)}\right); \qquad \rho_I^\star \rho_{\overline{I}}^\star / R^{\star 2} = \frac{1-x'}{4x'}.$$

$$\sigma^{(I)}_{\mathrm{q^*g}} \approx \frac{\Sigma(x')}{Q'^2}\left(\frac{4\pi}{\alpha_s^{\rm eff}(Q'^2)}\right)^{\frac{21}{2}} \exp\left\{-\frac{4\pi}{\alpha_s^{\rm eff}(Q'^2)}F(x')\right\}$$

- Im Rahmen der "valley" Methode wird die sog. "Holy Grail"-Funktion $F(x')$ mit der bekannten, am Sattelpunkt ausgewerteten $I\overline{I}$-Wirkung identifiziert:

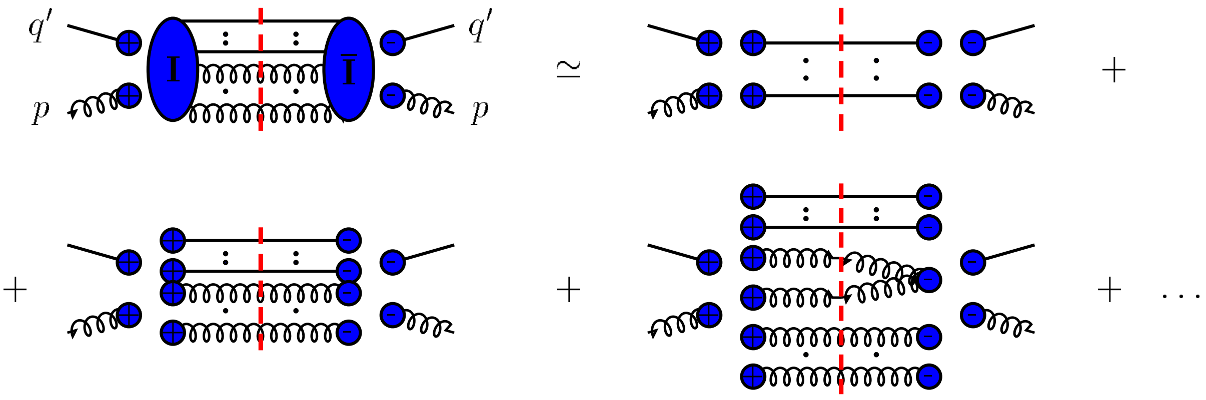
$$F(x') = S^{I\overline{I}\star}{}_{\rm valley}(x')\,; \quad \Sigma(x') \text{ bekannt.}$$

- Für kleine q*g CM-Energie s', d. h. $x' \equiv Q'^2/(s' + Q'^2) \sim 1$, entsprechend großer $I\overline{I}$-Separation $\Rightarrow$

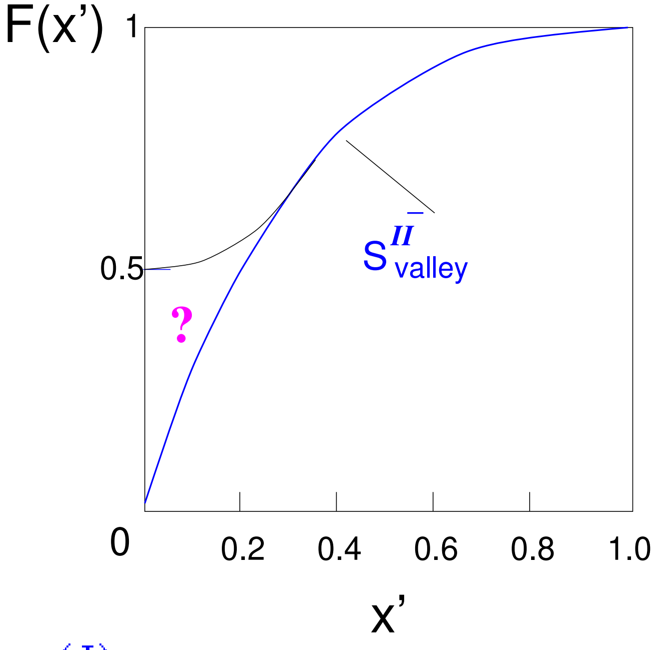
$$S^{I\overline{I}\star}{}_{\rm valley}(x') = 1 - \frac{3}{8}\left(\frac{1-x'}{x'}\right)^2 + \frac{3}{8}\left(\frac{1-x'}{x'}\right)^3 + \mathcal{O}\left(\left(\frac{1-x'}{x'}\right)^4\right).$$

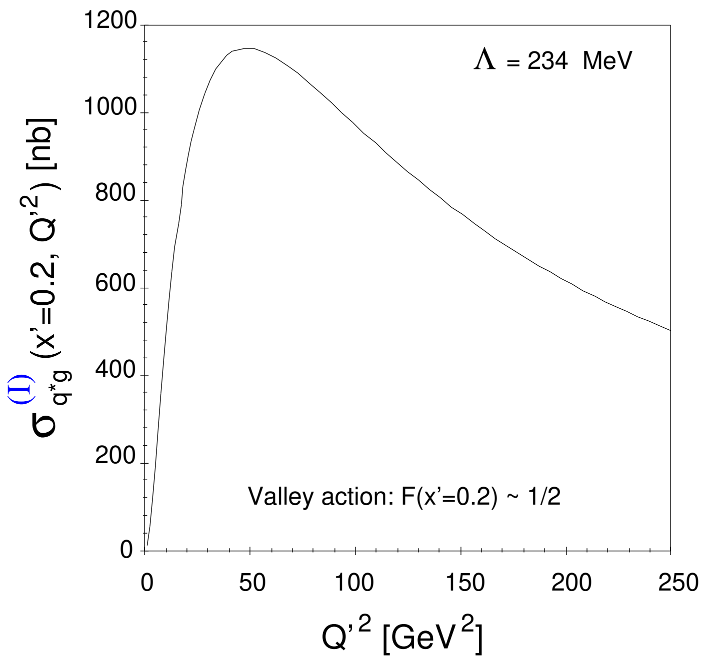
– Erster Term $\Leftrightarrow$ 't Hooft's Tunnel-Faktor;

- zweiter Term $\Leftrightarrow$ Aufsummation der Gluonemission in führender Ordnung;
- dritter Term $\Leftrightarrow$ Aufsummation der Interferenzterme.



- "Valley"-Methode erlaubt glatte Extrapolation über die Instanton-Störungstheorie hinaus! Sehr wichtig für die experimentell relevante Region kleinerer x', $1 \gg x' \gtrsim 0.2$ bei HERA. Jedoch dort intrinsische Unsicherheiten (Fig. links):





- $\sigma^{(I)}_{q^*g}$ hat ausgeprägtes Maximum in Q', weit weg vom IR-Bereich (Fig. rechts),

$$Q'_{\rm peak}(x'=0.2) \approx 31\,\Lambda \gg \Lambda$$

- $\Rightarrow \int_0^{Q^2\frac{x'}{x}} dQ'^2 \sigma^{(I)}_{q^*g}(x', Q'^2)$:
  - IR-endlich! (in führender semi-klass. Näherung.)
  - Unabhängig von Q^2 für $Q^2 \to \infty$, d. h. $\mathcal{F}^{(I)}_{2\,g}$ "scaling"!
- Voraussage der Annäherung an "Scaling"-Limit:

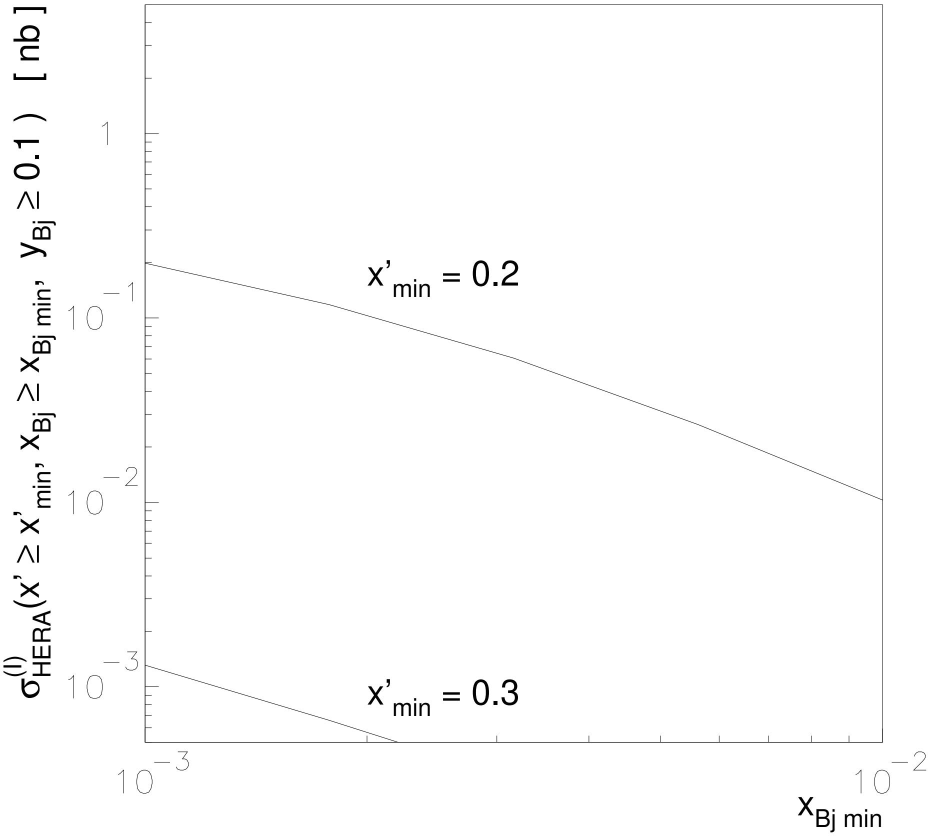
$$Q^2 \, \frac{d\,\mathcal{F}^{(I)}_{2\,g}(x, Q^2)}{dQ^2} \underset{\approx}{Q\ \text{groß}}$$

$$\sum_q e_q^2\, x\, P^{(I)}{}_{q^*/\gamma}(1)\, \frac{\Sigma(x)}{\frac{d\,F(x)}{dx}} \left[b\, \ln\left(\frac{Q^2}{\Lambda^2}\right)\right]^{\frac{19}{2}+2\,b\,F(x)} \left[\frac{\Lambda^2}{Q^2}\right]^{b\,F(x)}$$

- Hat die Form eines "fractional Twist" Beitrags, wobei der "Twist" mit x variiert. "Scaling"-Verletzung verschwindet schneller für wachsendes x

2.3 Wirkungsquerschnitt bei HERA ("preliminary")

[Ringwald, F. Sch., hep-ph 9607238/DESY 96-125; hep-ph 9610213/DESY 96-203; Gibbs, Ringwald, F. Sch., in Vorbereitung]



- Überraschend großer Wirkungsquerschnitt für HERA,

  $\sigma_{\mathrm{e\,P}}{}^{(I)} \approx 0.2$ (0.0015) nb für $x_{\mathrm{Bj}} \geq 10^{-3}$ und konservativen x'-"cut-off": ${x'}_{\mathrm{min}} = 0.20$ (0.3) und $y_{\mathrm{Bj}} > 0.1$.

- Beträchtliche Abhängigkeit von Renormierungs-/Faktorisierungs-Skalen möglich. Daher noch "preliminary".

- Subdominante Valence Quark Beiträge vernachlässigt.

- Weitere theoretische Unsicherheiten!?

3. Vielteilchen-Endzustände bei HERA (Monte-Carlo Simulation)

[Gibbs, Ringwald, F. Sch. '95 & in Vorbereitung.]

- "QCDINS 1.3", mit Hadronisierung ("HERWIG 5.8")

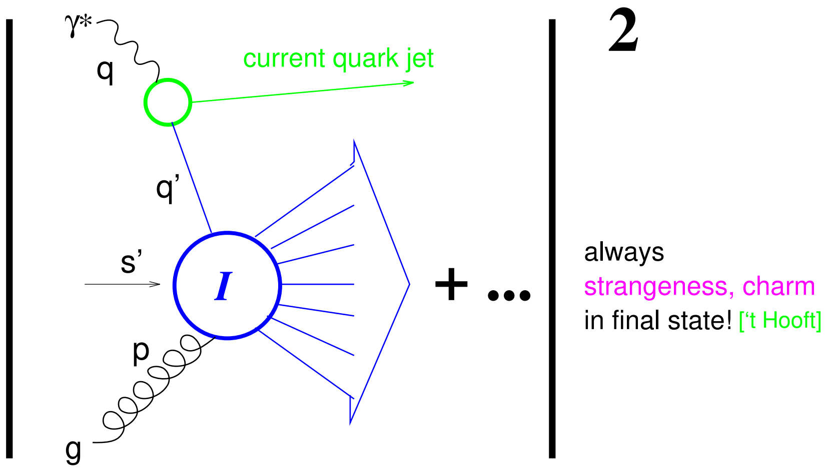
- Phänomenologische Analyse basiert auf Eigenschaften, die charakteristisch für den zugrunde liegenden Instanton-Mechanismus sind:
  [Ringwald, F. Sch. '94 & in Vorbereitung; Balitsky, Braun '93; V.V. Khoze, Ringwald '91; 't Hooft '76]

  – Isotrope Emission von vielen "halb-harten" Partonen im I-Ruhesystem: "zerfallender Feuerball"

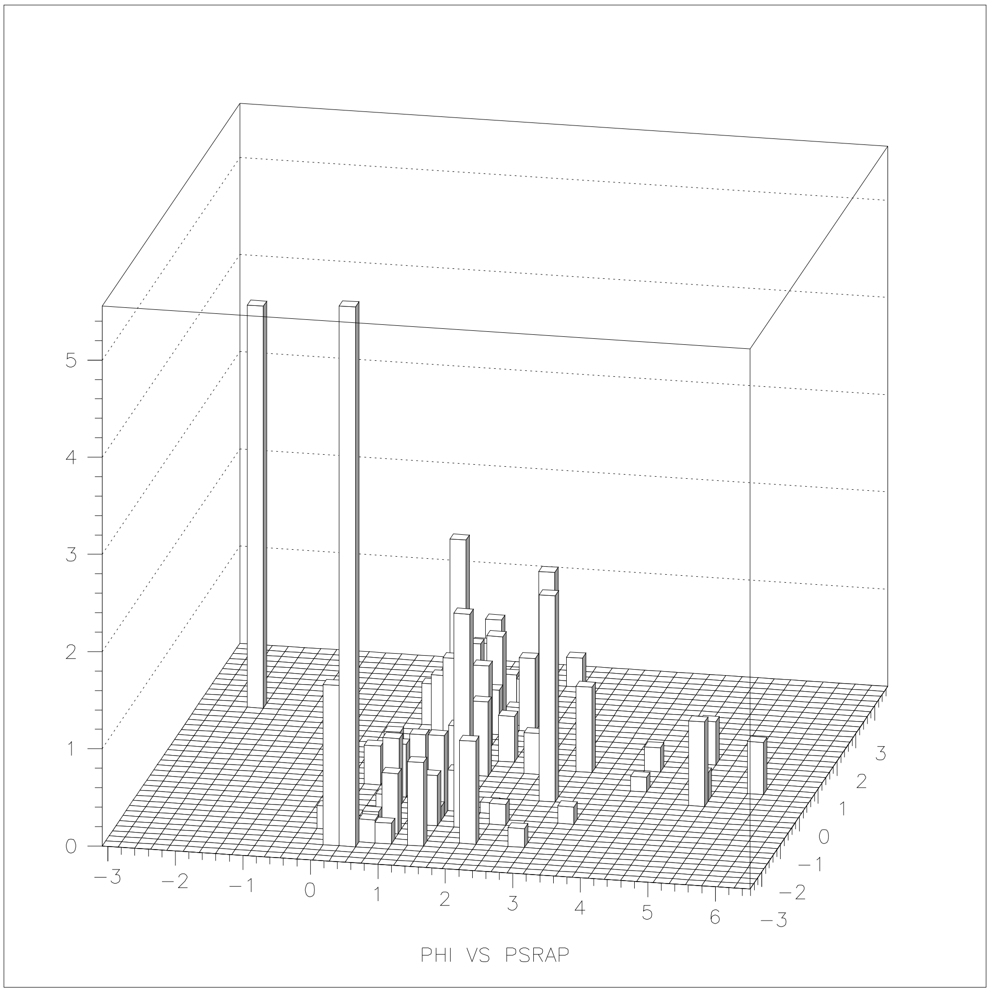
  – Hohe Multiplizität: $\langle n_{\rm q+G}\rangle^{(I)}_{n_f=4} \simeq 10$ (!) bei HERA.

  – Multiplizitätsverteilung: $\lim_{\rm Bj}\sigma_n^{(I)\,\rm excl.} =$ Poisson

  – Charakteristischer Flavour-Fluß (strangeness, charm ⇒ muons)

$d\sigma^{(I)}_{\gamma^* g} \sim$ 

3.1 Typisches Ereignis

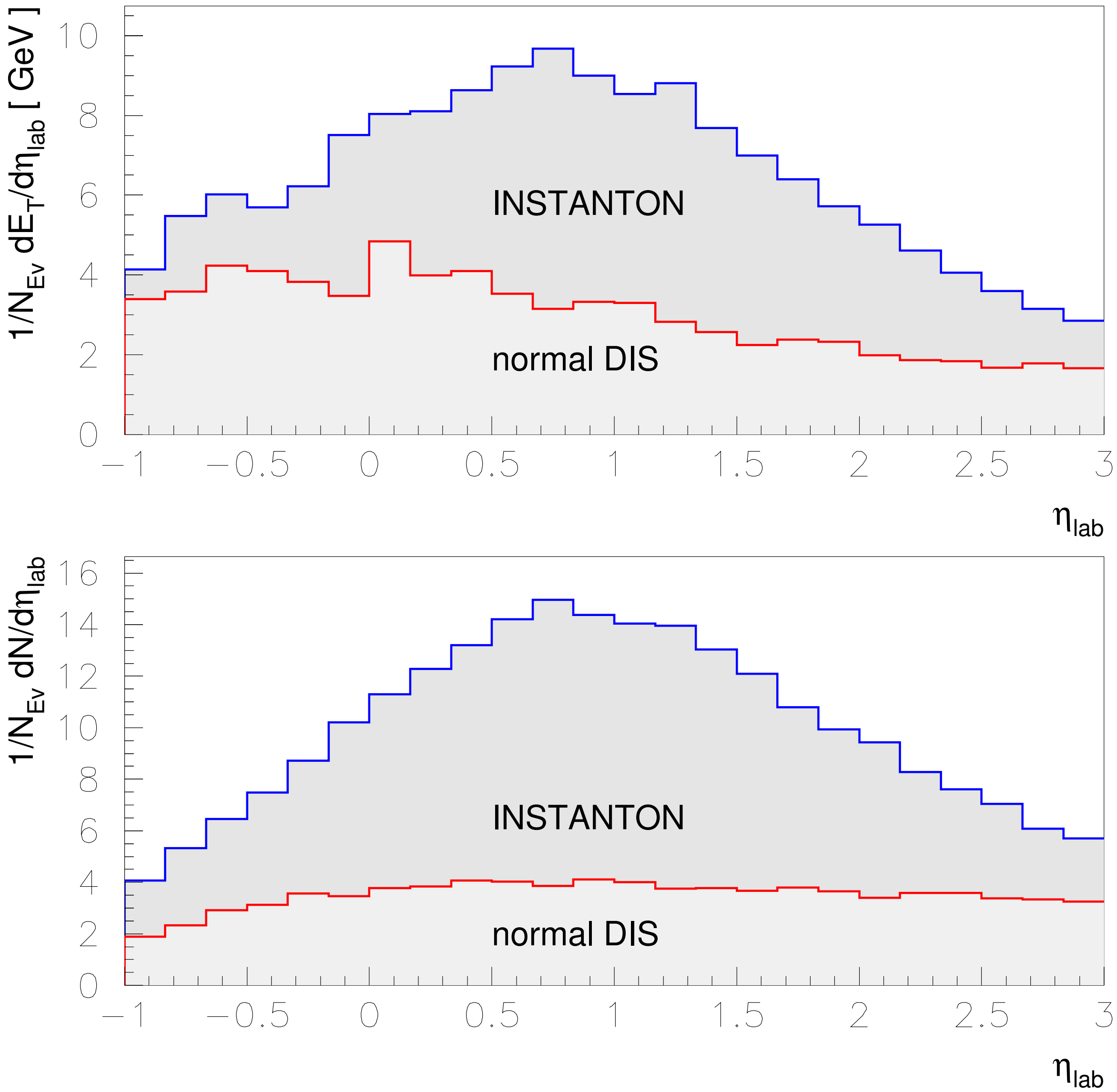


- "Current jet"
- Hadronisches "Band" : $\Leftrightarrow$ **Isotropie** im $\boldsymbol{I}$-Ruhesystem
  - Hohes (gesamt-) $E_T = \mathcal{O}(20)$ GeV
  - Hohe Multiplizität $N_{\mathrm{Band}} = \mathcal{O}(25)$
  - Keine Jets im "Band" !
  - Charakteristischer Flavour-Fluß:

    ⋆ **Strangeness** $\Rightarrow$ K_S^0's ⋆ **Charm** $\Rightarrow$ μ's

3.2 Transversalenergie- und Multiplizitäts-Flüsse[1]

$(x_{\text{Bj}} \geq 10^{-3}, y_{\text{Bj}} \geq 0.1, x_{\min} = 0.2)$



- Erhöhung der E_T- und Multiplizitäts-Flüsse im "Band".

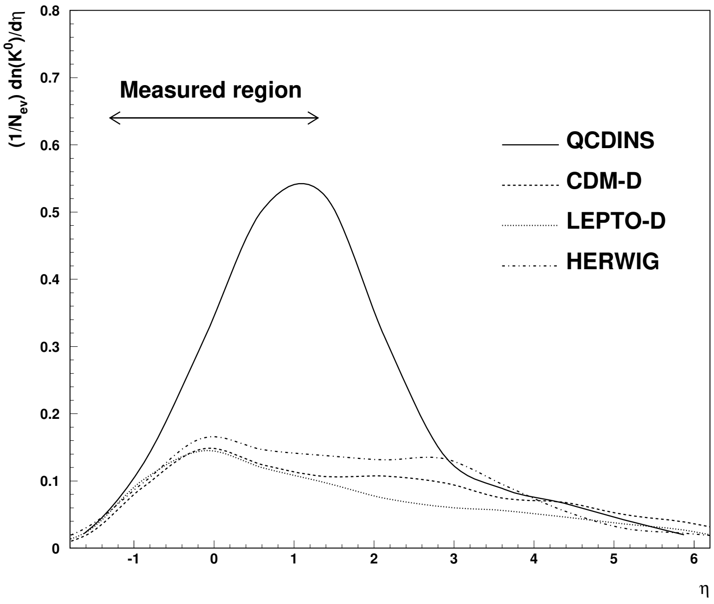
- $\Rightarrow$ Multiplizitätsschnitte in der "Band"-Region, $0 \leq \eta \leq 2$!

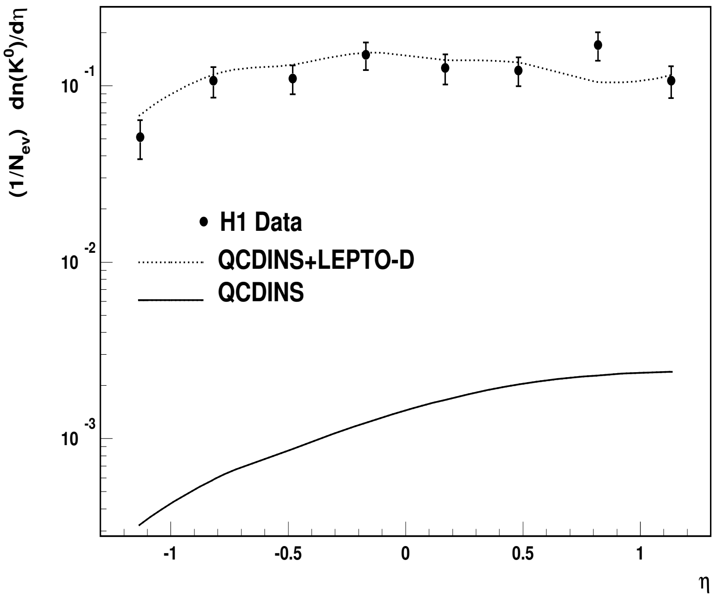
[1] Alle Teilchen, nicht nur Hadronen

3.3 Erste Suche nach I-induzierten Ereignissen bei HERA

[H1 Kollaboration, S. Aid et.al., hep-ex 9607010/DESY 96-122]

- Erwarte starke Erhöhung des K^0-Flusses im "Band" durch I-induzierte Ereignisse (Fig. links)! $\Rightarrow$





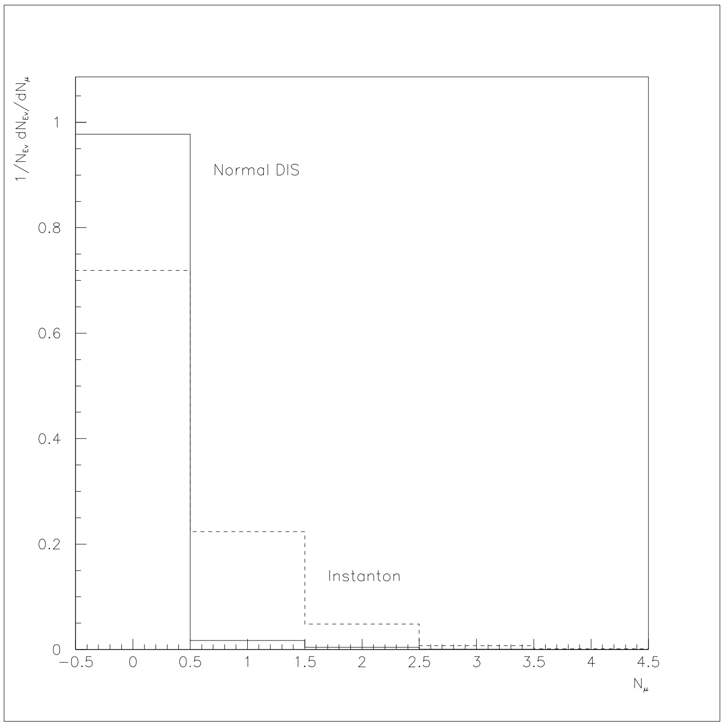
- H1: Erste experimentelle obere Schranke für I -induzierten Wirkungsquerschnitt bei HERA basierend auf den beobachteten K_S^0's (Fig. rechts),

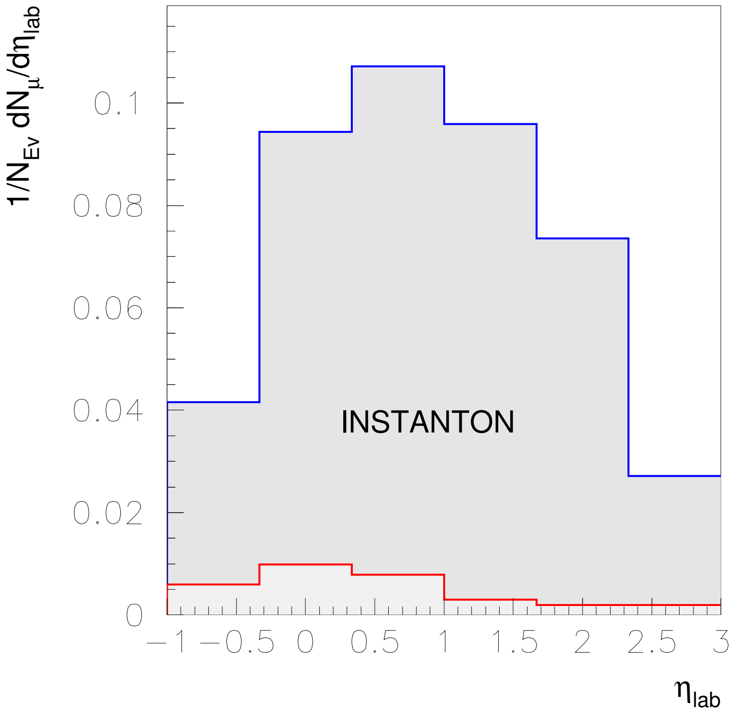
$$\sigma_{\mathrm{e\,P}}{}^{(I)} < 0.9\ \mathrm{nb}\ (95\%\ \mathrm{CL});$$

$$10^{-3} < x_{\mathrm{Bj}} < 10^{-2},\ 0.1 < y_{\mathrm{Bj}} < 0.6,\ 10 < Q^2 < 70\ \mathrm{GeV}^2.$$

- Weniger als 1 Größenordnung über der theoretischen Abschätzung, die weit stärkere, zusätzliche Schnitte enthält!

3.4 Multiplizitätsverteilung und Multiplizitätsfluss von μ's





- Starker Exzess von μ's in I-induzierten Ereignissen!

3.5 Neue Suchstrategien

[Gibbs, Greenshaw, Milstead, Ringwald, F. Sch., Proc. "Future Physics at HERA", 1996]

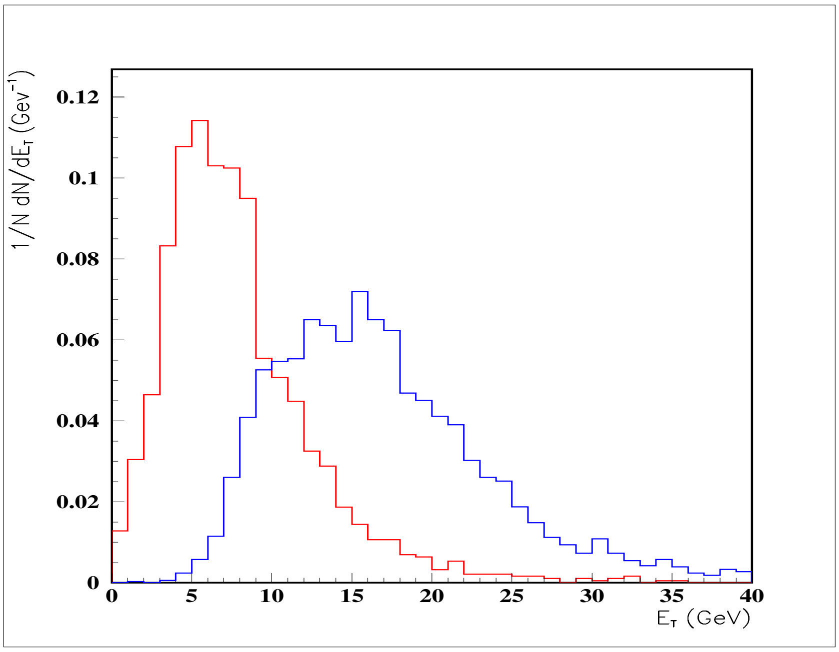
- Implementiere Information über die räumliche Struktur der Ereignisse, um Trennung vom Untergrund zu verbessern! $\Rightarrow$

- Vielversprechend: Analyse im $\gamma - P$ Schwerpunkt-System

  - Beachte : Pert. QCD-Prozesse mit (1+1) und (2+1) Jets deponieren ihre Energie vorwiegend in einer Ebene, die durch die $\gamma - P$ Richtung verläuft.

  - Energie von I-induzierten Ereignissen dagegen immer annähernd sphärisch verteilt (ISOTROPIE!).

  - I-induzierte Ereignisse haben großes $\langle E_T \rangle$! (Fig.)

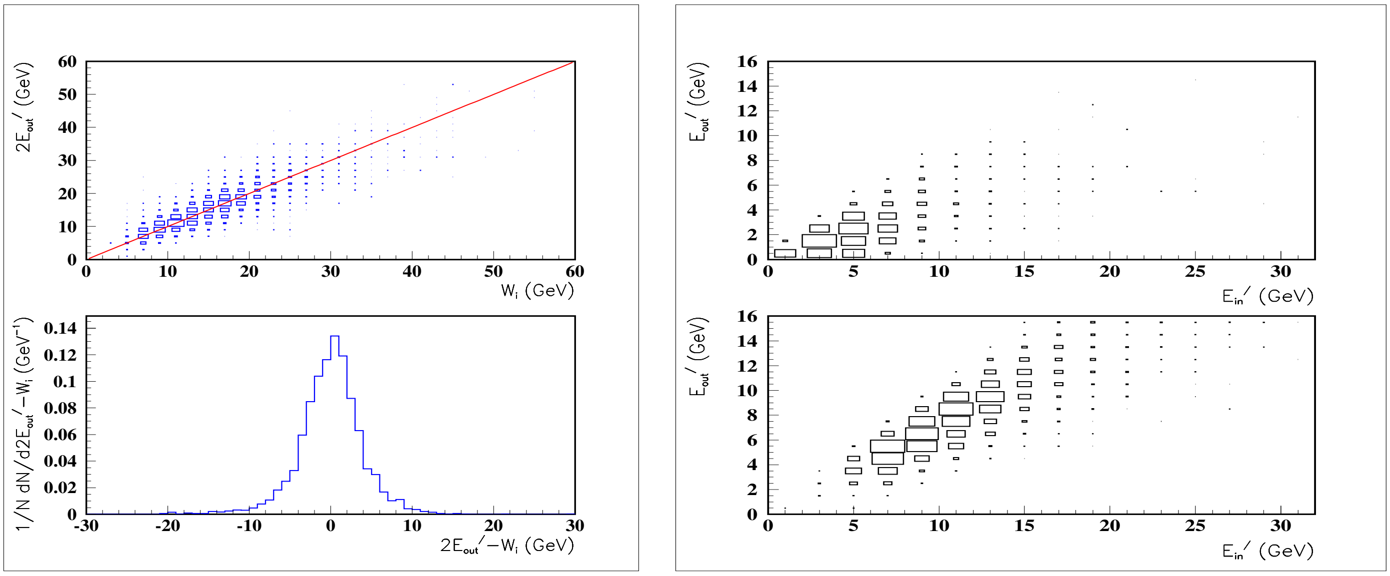


- Erwarte : Starke Reduktion des normalen "DIS" Untergrundes nach Minimieren der Größe

  $E_{\rm out} = \min_{\hat{\imath}} \sum_k^n |\, \vec{p}_k \cdot \hat{\imath}\,|$, (auf "event-by-event"-Basis)

  durch Wahl des Einheitsvektors $\hat{\imath}$ senkrecht zur $\gamma - P$ Richtung. Dann . . .

- Standard (2+1) Jet-Ereignisse (Boson-Gluon Fusion) haben kleines $E_{\rm out} = \mathcal{O}$(Jet-Breite), während für I-induzierte Ereignisse $2E_{\rm out} \approx \sqrt{s'} \equiv W_I$ groß! (Fig. links)



- $E_{\rm out}$ vs. $E_{\rm in}$ Verteilungen im $\gamma - P$ Schwerpunkt-System für $0.001 < x < 0.01$, $0.1 < y < 0.6$ und $20 < Q^2 < 70$ GeV^2. Normale "DIS"-Ereignisse (Fig. rechts oben), I-induzierte Ereignisse (Fig. rechts unten).

- Erwartungen voll bestätigt! Wirksamkeit einer auf "event-shape"-Information basierenden Selektion I-induzierter Ereignisse evident.

4. Zusammenfassung und Ausblick

- Entdeckung von QCD-Instanton-induzierten Ereignissen wäre von grundlegender Bedeutung:
  - Neuartige, nicht-perturbative Manifestation von QCD
  - Enge Analogie zur B+L Verletzung in elektro-schwachen Prozessen im mittelfristig nicht zugänglichen multi-TeV Bereich.

- HERA bietet einzigartiges "Discovery-Window"!

- Systematische theoretische und phänomenologische Untersuchung des Entdeckungs-Potentials, einschließlich Monte-Carlo Simulation (QCDINS, in HERWIG 5.8 eingebettet):
  - Erste ("preliminary") Abschätzung des Wirkungsquerschnitts für HERA: nicht klein,

$$\sigma^{(I)}{}_{\mathrm{eP}}(x' \geq 0.2\ [0.3], x_{\mathrm{Bj}} \geq 10^{-3}) \approx \mathcal{O}(0.2\ [0.002])\ \mathrm{nb}$$

  - Charakteristische Ereignissignatur:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{dicht mit Hadronen gefülltes "Band"} \\ \text{immer Strangeness, Charm} \end{array} \right\} \oplus \quad \text{1 Jet}$$

– Überhöhung verschiedener ‘Flüsse’ im “Band” der Breite $\Delta\eta_{\rm lab} \approx \pm 0.9$ (bei $\eta^{\rm Band}{}_{\rm lab} \simeq 1$ für $x_{Bj} \simeq 10^{-3}$).

– Neue Suchstrategien, auf der Basis von “Event-Shape” Information.

Ausblick

- Kombination von “Event-Shape” Information mit Messung der K^0- und μ-Raten.

- Messung der Multiplizität in Bins von η, vor allem im “Band”, Multiplizitätsschnitte!

- Untersuche, wie gut I-Subprozess Variable s', x' aus hadronischen Impulsen in “Bandregion” & vom “current” Jet rekonstruiert/eingeschränkt werden können. ⇒
Würde direkten Vergleich mit Theorie ermöglichen. (gleiche Schnitte in $\sigma_{\rm eP}$)

ALL DIES IST JETZT BEI HERA MACHBAR!

- Theorie: Untersuchung der Abhängigkeit von Renormierungs/Faktorisierungsskalen . . .