Auf der Spur von Instantonen – grundlegenden Tunnelprozessen in der Teilchenphysik

F. Schrempp, DESY

in Zusammenarbeit mit

S. Moch und A. Ringwald

Plan

1. **Elemente des Standardmodells**
2. **Instantonen**
3. **Experimenteller Nachweis bei HERA?**
4. **Zusammenfassung**

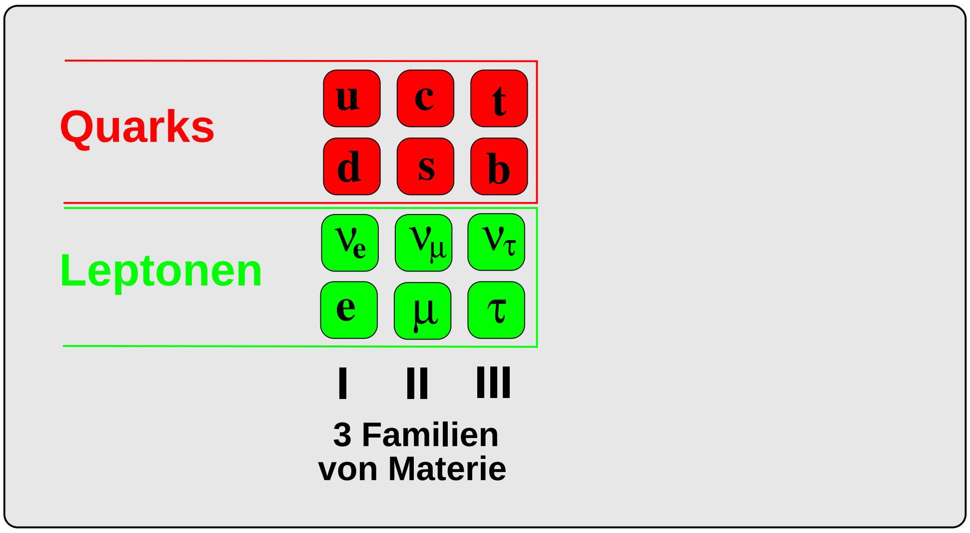
Kopie erhältlich via WWW:

http://www.desy.de/~t00fri/talks/talks.html

– Kaiserslautern, Februar 1998 –

1. Elemente des Standardmodells

- **Elementare Materiebausteine:** **Fermionen** mit **Spin** $1/2$,



- **Rahmen:** Theorie der $\left\{ \begin{array}{l} \text{elektromagnetischen} \\ \text{starken} \\ \text{schwachen} \end{array} \right.$ Wechselwirkungen

in Form einer

$\underbrace{\text{relativistischen}}$ $\underbrace{\text{Quanten}}$**feldtheorie (QFT)**

$\Delta x \Delta p \gtrsim \hbar$: kleine Abstände Δx große Impulse Δp,

Teilchen $\left\{ \begin{array}{l} \text{Erzeugung} \\ \text{Vernichtung} \end{array} \right.$

$\left. \begin{array}{l} \text{starke} \\ \text{schwache} \end{array} \right\}$ Ww nur bei kleinen

Abständen $< \left\{ \begin{array}{l} 10^{-15}\text{m} \\ 10^{-18}\text{m} \end{array} \right.$

Relativistische Notation ($\hbar = c = 1$):

$$\begin{array}{ll} \text{Vierervektoren :} & x := (x^\mu) = (t, \vec{x}); \\ \text{Viererableitung :} & \partial_\mu := \frac{\partial}{\partial x^\mu} \end{array} \quad ; \mu = 0, 1, 2, 3$$

1) $\boxed{\text{Jedem Teilchen} \Longleftrightarrow \text{klassisches Feld } \Psi(x);}$

- **Vorbild:** Elektrodynamik: elektr./magn. Feld: $\vec{E}(t,\vec{x})$, $\vec{B}(t,\vec{x})$,

  bzw. $\left\{ \begin{array}{ll} \text{skalares Potential} & \Phi \\ \text{Vektorpotential} & \vec{A} \end{array} \right\} : \begin{array}{rcl} \vec{E} & = & -\vec{\nabla}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \vec{B} & = & \vec{\nabla} \times \vec{A} \end{array}$

- Photon $\boldsymbol{\gamma} \Longleftrightarrow$ Viererpotential $A^\mu(x) \leftrightarrow (\Phi(x), \vec{A}(x))$

- Analogie zur klassischen Punktmechanik, Lagrangefunktion $L(q(t), \dot{q}(t))$,

$$q(t) \Rightarrow \Psi(x); \qquad \dot{q}(t) \Rightarrow \partial_\mu \Psi(x)$$

Dynamik bestimmt durch $\boxed{\textbf{Lagrange Dichte } \boldsymbol{\mathcal{L}(\Psi, \partial_\mu \Psi)}}$

- **Invariant** unter **Symmetrietransformationen** der Theorie (einschließlich Lorentztransformationen!)

- **klassische Feldgleichungen** (Euler-Lagrange) aus "Prinzip der kleinsten Wirkung":

$$S = \int \mathrm{d}^4 x \mathcal{L}(\Psi, \partial_\mu \Psi) : \qquad \boxed{\delta S = 0}$$

2)

♣ **Eichprinzip:** fixiert Form der $\left\{ \begin{array}{l} \text{elektromagnetischen} \\ \text{starken} \\ \text{schwachen} \end{array} \right.$

Wwn. aus der Forderung einer **lokalen Eichsymmmetrie!** $\Rightarrow$

♣ Existenz von **Eichbosonen (Spin 1)**, als Trägerteilchen der Eichkräfte (Fig.)

Eich(↔ "Phasen")transformationen der Materiefelder $\Psi_i(x)$: $\Psi_i(x) \Rightarrow \left(\underbrace{e^{i\sum_a \omega_a(x) T_a}}_{\substack{\in \text{ (Lie-)Gruppe G} \\ \text{Generatoren } T_a}} \Psi(x) \right)_i$;

	Eichgruppe G	Eichtheorie	#Generatoren	Eichbosonen	Name
Elektrodynamik	$U(1)_{\mathrm{em}}$	abelsch	**1**	ungeladen **1 Photon γ**	vereinheitlichte elektro-schwache Eichtheorie "QuantenFlavour-Dynamik" (**QFD**)
Schwache Wwn	$SU(2)_{\mathrm{schwach}}$	nicht-abelsch [Yang-Mills '54]	**3**	mit schwacher Ladung **3 W-Bosonen**	
Starke Wwn	$SU(3)_{\mathrm{Farbe}}$		**8**	mit Farb-Ladung **8 Gluonen**	"QuantenChromo-Dynamik" (**QCD**)

- **Materiefelder (q,l):** in Multiplets, (Fundamental-) Darstellung von G:
  (q,l) in Flavour-Doublets (schwacher Isospin), q in Farb-Triplets, (rot, blau, grün).
  - Spin 1/2 ⇒ 2 Spineinstellungen: rechts(**R**)-/links(**L**) händig.
  - schwache Ww nur $(\mathrm{q_L}, \mathrm{l_L})$ (Paritätsverletzung!); $\left\{ \begin{array}{l} \text{elmagn.} \\ \text{starke} \end{array} \right.$ Wwn: **symmetrisch** unter **R** ⇔ **L**;

- **Stärke der Ww: Kopplungen** $\alpha \equiv \frac{g^2}{4\pi}$: Für $\alpha \ll 1$ ⇒ **Störungstheorie**, **Feynman**-Graphen. . .

- Störungstheorie der starken Wwn, QCD??

3) Quantisierung: . . .

- **Vakuumpolarisationseffekte**!
  Eichkopplungskonstanten α $\Rightarrow$ laufende Kopplungen $\alpha(Q^2)$,
  Q = Impulsskala $\sim 1/$Abstand.

- **QED:** Abschirmung der elektrischen Ladung bei zunehmendem Abstand.

♣ **QCD:** Gluonen tragen Farbladung $\Rightarrow$ Gluon-Selbstwechselwirkung! $\Rightarrow$ **umgekehrter Effekt!**:

♣ Abschirmung der Farb-Ladung für kleine Abstände, $\lim_{Q^2\to\infty} \alpha_s(Q^2) = 0!$ (**“Asymptotic Freedom”**).

♣ **Störungstheorie** für große Q^2: $\alpha_s(Q^2) \ll 1$!

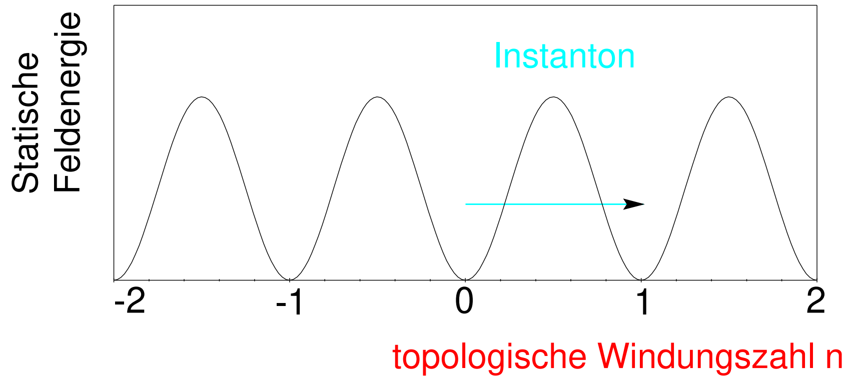
♣ Farbkopplung wächst “unbeschränkt” an für große Abstände $\Rightarrow$ **“Confinement”**! Nur farbneutrale Bindungszustände der Quarks und Gluonen beobachtbar(**Hadronen**)!

– Aus Quarks werden hadronische **Jets** im Detektor!

2. Instantonen

- **Grundzustand in QCD ("Vakuum"):** "Suppe" aus Gluonen und Quarks, die in komplizierter (nicht störungstheoretisch zugänglicher) Weise wechselwirken.

- QCD als nicht-abelsche Eichtheorie: $\Rightarrow$ unendlich viele, energetisch degenerierte, aber **topologisch unterscheidbare** Vakua ($\Leftarrow$ topologische Windungszahl n);



  durch endlichen Energiewall separiert. Vakua nicht durch stetige Deformation von Eichtransformationen ineinander überführbar!

- Erwarte: Wichtige Quanteneffekte in Form von Tunnelübergängen zwischen diesen Vakua

- ♣ **Instantonen** sind solche Tunnelübergänge!

  ♣ Explizite Lösungen der **klassischen Feldgleichungen** mit **endlicher Wirkung**! [Belavin, Polyakov et.al, '75]

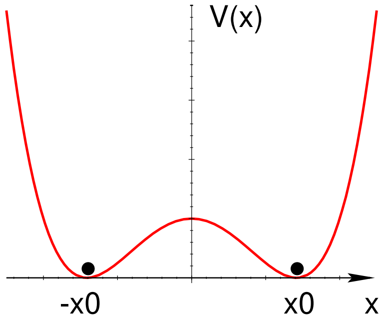
- Wieso können klassische Lösungen klassisch **verbotene** Phänomene, d.h. Tunneln beschreiben? $\Rightarrow$ Illustration in Quantenmechanik:

2.1 Ein Quantenmechanisches Instanton

♣ Einfachstes Beispiel, fast alle Ergebnisse analog in nicht-abelschen Eichtheorien, nur viel komplizierter. . .

- Betrachte: Teilchen der Masse $m = 1$ in einem **Doppel-Mulden Potential:**

$\boldsymbol{V(x) = g(x^2 - x_0^2)^2}$; Kopplungsstärke g



$$\text{Energie} : E = \frac{1}{2}\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right)^2 + V(x)$$

$$\text{Lagrange Funktion} : L(x, \dot{x}) = \frac{1}{2}\dot{x}^2 - V(x)$$

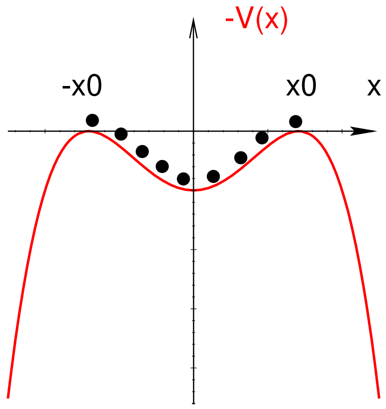
- klassisch erlaubte Lösungen nur für $E - V \geq 0$

- Klassisch:
  - 2 energetisch degenerierte Grundzustände (Gleichgewichtslagen) mit $\boldsymbol{E = 0}$ bei $x = \pm x_0$ (Fig.).
  - Für $\boldsymbol{E = 0}$: keine erlaubte Trajektorie $x(t)$ zwischen $-x_0$ und x_0 wegen Potentialschwelle $V > 0$ (Fig.).

- Quantenmechanisch:
  - Tunnelübergänge zwischen $-x_0$ und x_0.
  - $|\,\mathrm{Grundzustand}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|\,-\mathrm{x}_0\rangle + |\,\mathrm{x}_0\rangle\}$

- Klassische Beschreibung von Tunneln??

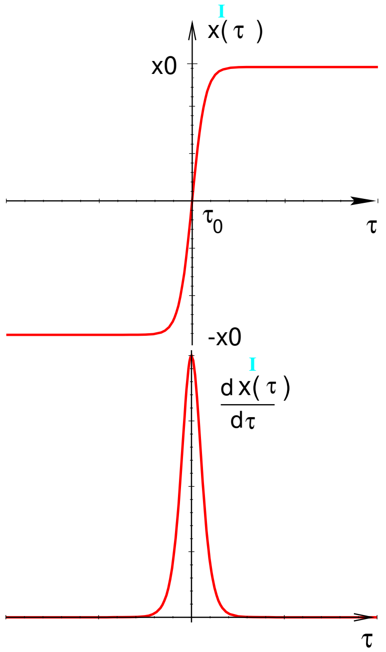
- Übergang zu imaginärer Zeit $t \to -i\tau$: $(\mathrm{d}x/\mathrm{d}t)^2 = -(\mathrm{d}x/\mathrm{d}\tau)^2$



Energie: $-E = \frac{1}{2}\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\tau}\right)^2 - V(x)$

♣ **klassisch erlaubter Weg** zwischen $-x_0$ und x_0 mit $E = 0$ im Potential $-V(x)$!
$\Rightarrow$

$$\frac{\mathrm{d}x}{\sqrt{2V(x)}} = \mathrm{d}t \;\Rightarrow$$



- $\boldsymbol{x^{(I)}(\tau) = x_0 \tanh(\sqrt{2g}x_0[\tau - \tau_0])}$
- Lösung heißt "Instanton", da lokalisiert in (imaginärer) Zeit; Tunneln ist "instantan" in reeller Zeit ['t Hooft '76]
- τ_0 = Zentrum des Instantons in der Zeit

♣ Endliche Wirkung?? $S \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}t L(x, \dot{x}) \overset{t=-i\tau}{\Longrightarrow} iS_E$;

- Euklidische Wirkung:

$$S_E = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}\tau [\frac{1}{2}\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\tau}\right)^2 + V(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}\tau 2V(x(\tau))$$

- Bedingung der Endlichkeit von S_E $\Rightarrow$ starke Einschränkung für die möglichen Pfade $x(\tau)$ für $\tau \to \pm\infty$

- Instanton-Lösung: $\boldsymbol{x}^{(I)}(\boldsymbol{\tau} = \pm\boldsymbol{\infty}) = \pm x_0 \Rightarrow$

$$\boxed{S_E^{(I)} = \int_{-x_0}^{x_0} \mathrm{d}x \sqrt{2V(x)} = \tfrac{4}{3}\sqrt{2g}\,x_0^3 \ \textbf{endlich}}$$

- Tunnelamplitude (WKB) exponentiell unterdrückt:

$$T \propto e^{i\frac{S}{\hbar}}(1 + \mathcal{O}(\hbar)) \overset{t \to -i\tau}{\Rightarrow} e^{-\frac{S_E}{\hbar}}(1 + \mathcal{O}(\hbar))$$

- S_E unabhängig vom Parameter τ_0, dem Zentrum des Instantons in τ. Reflektiert Symmetrie des Systems, hier beliebige Wahl des euklidischen Zeitursprungs ($\Rightarrow$ Nullmode)!

- τ_0 ist Beispiel einer sog. **kollektiven Koordinate c**, über die in jeder physikalisch messbaren Größe O integriert werden muß (vgl. später!),

$$O^{(I)} = \int \mathrm{d}c\,\mathcal{O}^{(I)}(c)$$

- Analog, kollektive Koordinaten in QCD-Instanton Lösungen:
ρ = Instanton-Radius, R_μ = Vierervektor des Instanton-Zentrums, etc.

- **Topologische Klassifikation** der Pfade mit endlicher Wirkung durch ihre Grenzwerte bei $\tau = \pm\infty$:
ganzzahlige topologische Ladung:

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}\tau \frac{\dot{x}(\tau)}{2x_0} = \frac{x(\infty) - x(-\infty)}{2x_0} = \begin{cases} 0 \\ +1 \ \text{Instanton} \\ -1 \ \text{Anti} - \text{Instanton} \end{cases}$$

- Wege mit verschiedenem Q können nicht durch stetige Deformation ineinander übergeführt werden! ($\Leftarrow$ Homotopie-Klassen)

2.2 Instantonen im Standardmodell

- **Wichtige Frage:** Kann man Instantonen im Standardmodell mittels physikalischer Observabeln verfolgen/nachweisen??

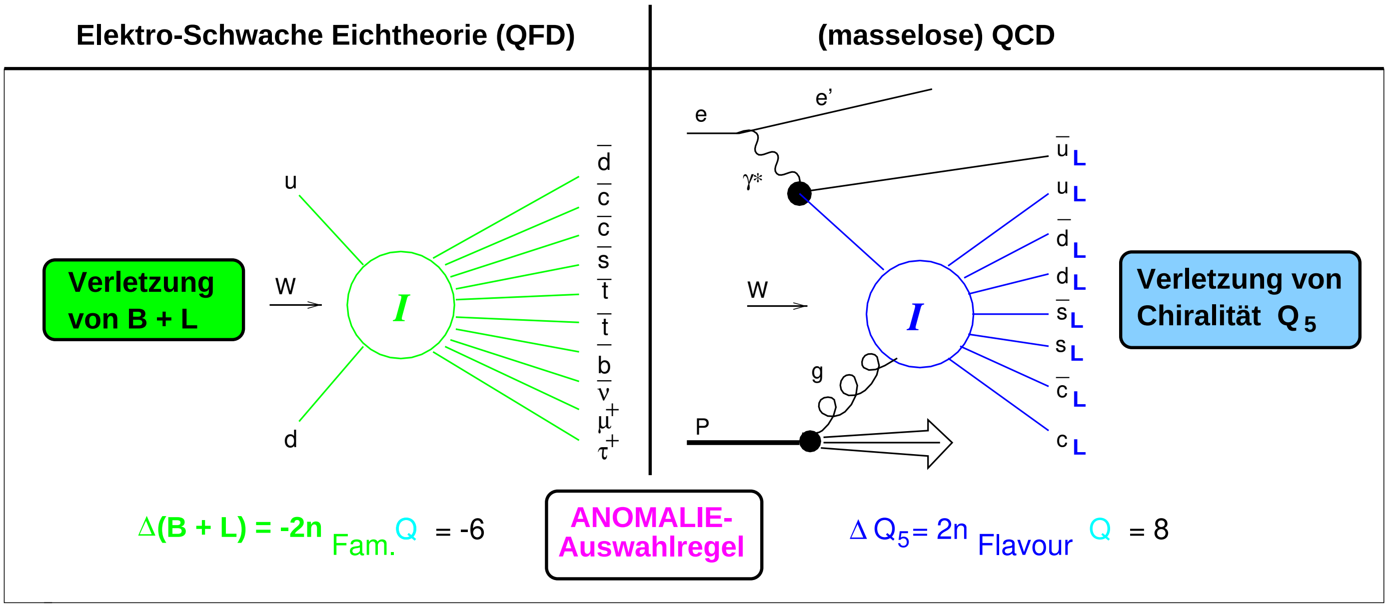
- **Ja**, wegen Existenz von leichten Fermionen (Quarks und Leptonen)! ['t Hooft '76]

- Aufgrund allgemeiner Argumente (**Adler-Bell-Jackiw Anomalien**)$\Rightarrow$ Gewisse, in jeder Ordnung der Störungstheorie erhaltene fermionische Quantenzahlen **müssen** durch Quanteneffekte verletzt sein:

♣ Summe aus **Quark und Leptonzahl** $(B+L)$ in **QFD**;
♣ **Chiralität** $Q_5 = \#q_{\rm L} - \#q_{\rm R}$ in **QCD**.

- $\Rightarrow$ Es müssen physikalische Prozesse existieren, die diese "anomalen" Quantenzahlen verletzen und die in Störungstheorie verboten sind!

♣ Instantonen induzieren genau diese anomalen Prozesse! ['t Hooft '76]



- durch Instantonen induzierte physikalische Prozesse
  - sind als Tunnelübergänge bei niedrigen Energien stark unterdrückt

$$\text{(Tunnel)Rate} \sim e^{-\frac{16\pi^2}{g^2}}; \quad \text{Eichkopplung g klein!}$$

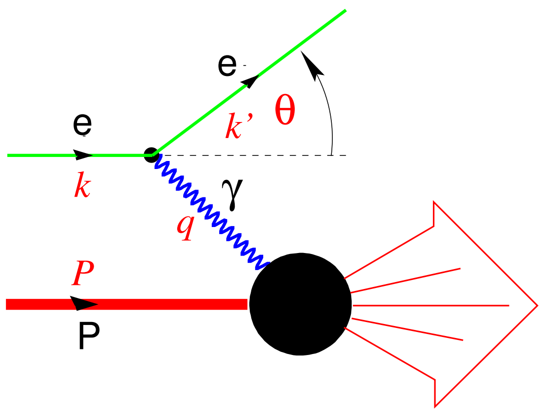
  - können bei **hohen Energien** unungterdrückt, d.h. beobachtbar werden, aufgrund der Erzeugung von vielen Eichbosonen $A_\mu^{(I)} \sim 1/g$ [Ringwald '90; Espinosa '90]

  - sind für **QCD** in bestimmten kinematischen Bereichen

    messbar⇐ **HERA** und berechenbar!

2.3 QCD-Instantonen und tiefunelastische eP Streuung

- Tiefunelastische eP-Streuung ⇐ "Wiege" der störungstheoretischen QCD!



"Mikroskop" mit hochvirtuellen Photonen:

$Q^2 = -q^2 = (k - k')^2 = 4E_e E_e' \sin^2(\frac{\theta}{2})$;

Struktur des Protons mit hoher Auflösung:

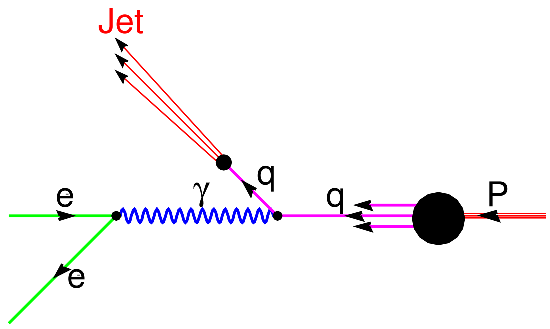
$$\Delta x_T \sim \frac{1}{\sqrt{(Q^2)}},$$

Bjorken Variable: $0 \leq x = \frac{Q^2}{2P\cdot q} \leq 1$;

- Virtuelles Photon "sieht" quasi-freie **Partonen** (=Konstituenten=Quarks, Gluonen) des Protons.

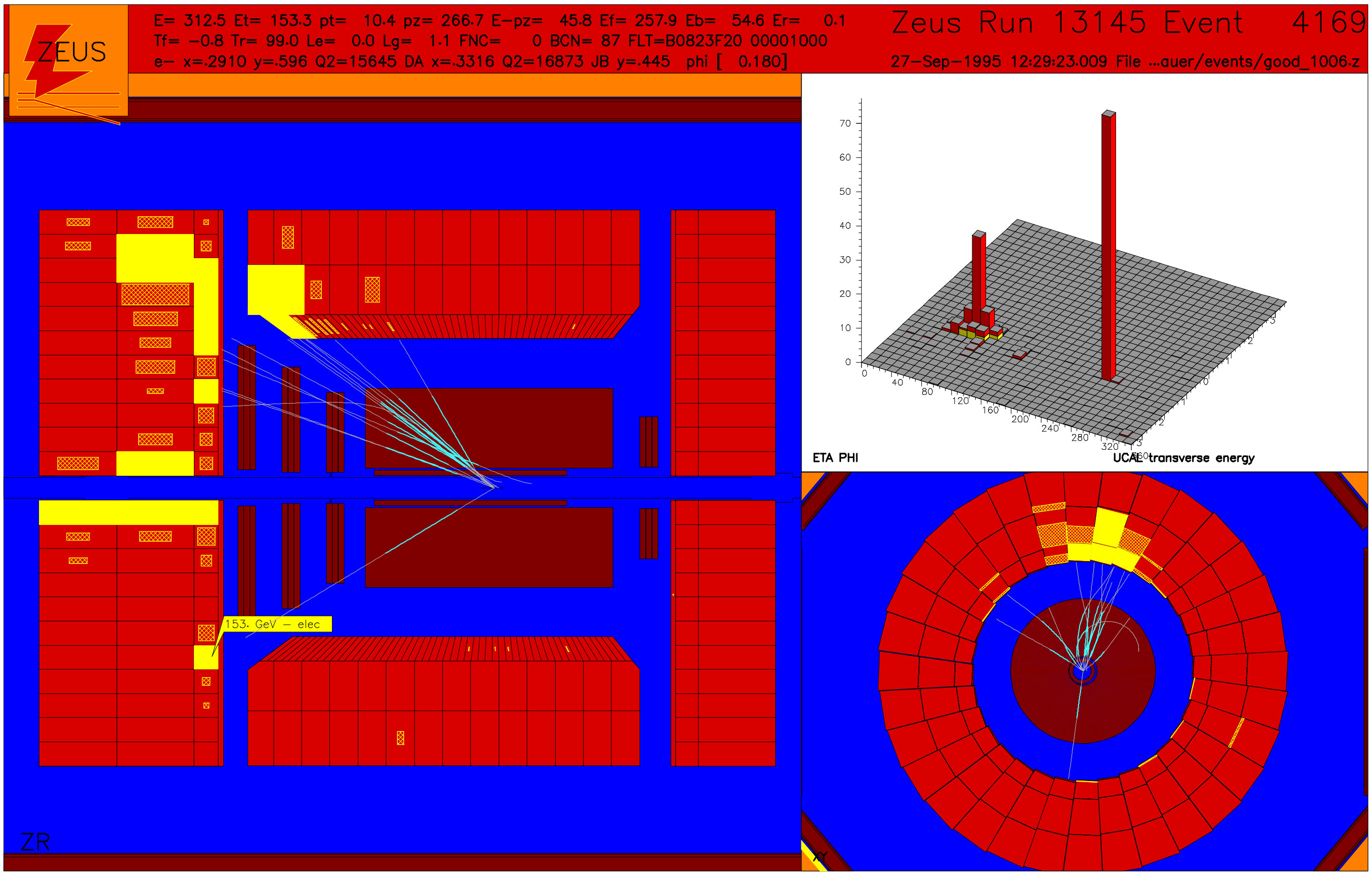
- Wechselwirkung über störungstheoretische Elementarprozesse der QCD, da laufende QCD-Kopplung $\alpha_s(Q^2) \ll 1$ (Asymptotische Freiheit!)

- $\mathcal{O}(\alpha_{em}^2)$:

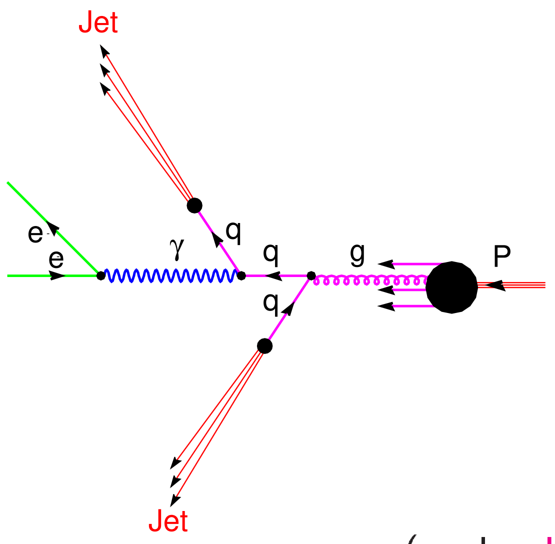


$$\boxed{e + P \Rightarrow e' + 1\text{Jet} + X}$$

(reales HERA-Ereignis)

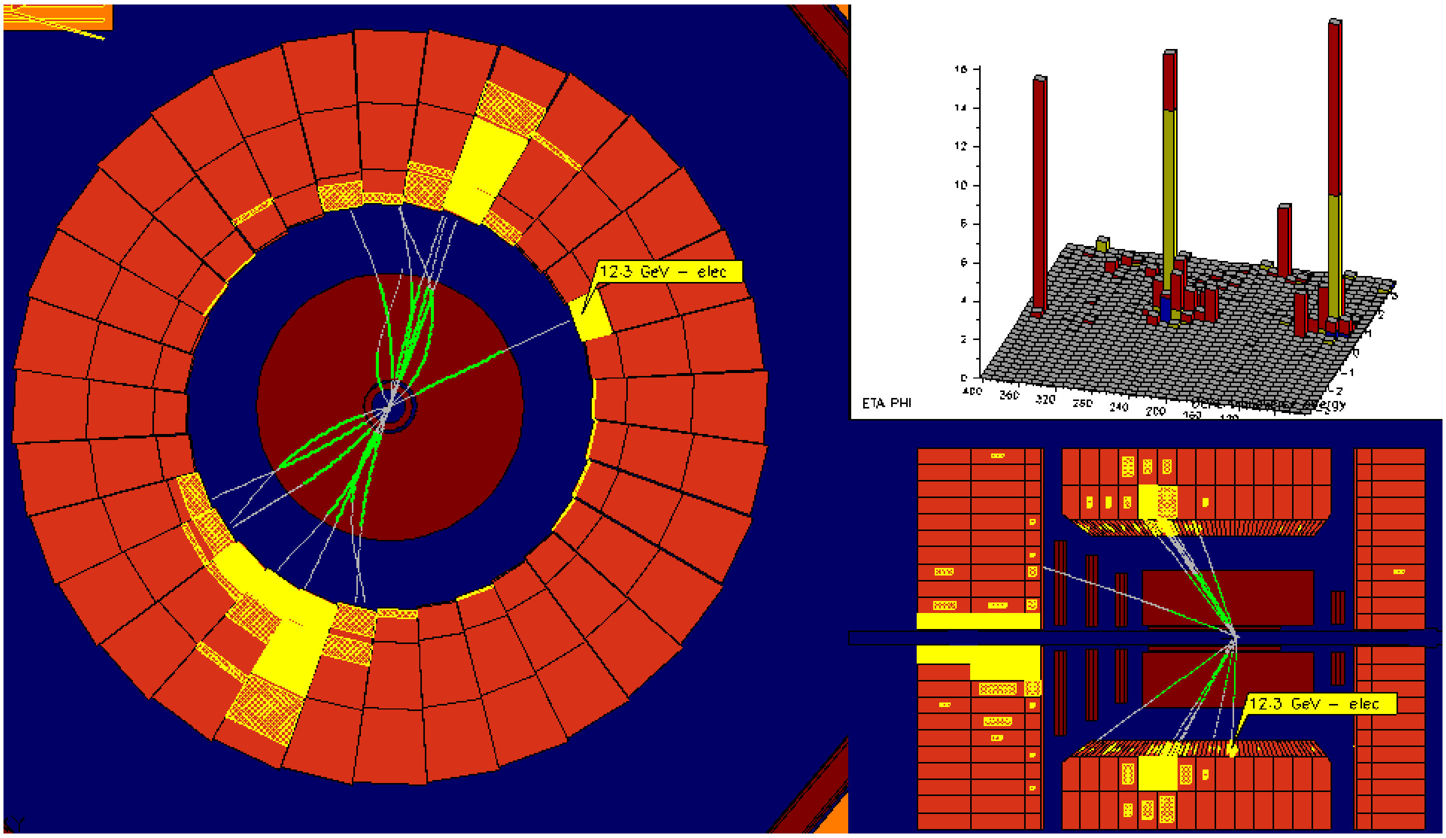


- $\mathcal{O}(\alpha_{em}^2 \alpha_s)$:



$$\boxed{e + P \Rightarrow e' + 2\mathrm{Jet} + X}$$

(reales HERA-Ereignis)



- Ebenso Multijets. . .

- **QCD-Instantonen** $\Big\{$ [Balitsky, Braun '93, Ringwald, F. Sch. '94 -'97; Moch, Ringwald, F. Sch., Nucl. Phys. B507 (1997) 134; Moch, Ringwald, F. Sch., DESY-98-XXX].

- Warum ist die tiefunelastische eP-Streuung ideal??

1) Theoretisch:

♣ Streuamplituden $T^{(I)}$ für dominante Instanton-induzierte eP-Prozesse mit Chiralitätsverletzung **berechnet** im Rahmen der Instanton-Störungstheorie: [Moch, Ringwald, F. Sch., Nucl. Phys. B507 (1997) 134; DESY-98-XXX]

	Übliche Störungstheorie	**Instanton**-Störungstheorie
ΔQ_5	$\mathbf{0}$	$\mathbf{2\,n}_{\text{Flavours}}$
Entwicklung um	"triviales" Vakuum $A_\mu^a(x) \equiv 0$ a=1,. . . ,8 Farbindex	QCD-Instanton $A_\mu^{(I)\,a}(x;\rho) = \sqrt{\frac{2}{\pi\alpha_s}\frac{\rho^2}{x^2}}\frac{\overline{\eta}_{a\,\mu\nu}\,x_\nu}{x^2+\rho^2}$ a=1,. . . ,8 Farbindex
minimale Wirkung	$S_E = 0$	$S_E^{(I)} = \frac{2\pi}{\alpha_s}$
kleiner Parameter	$\alpha_s(Q^2) \ll 1$	$\alpha_s(Q^2) \ll 1$

- 't Hooft-Symbole $\overline{\eta}_{a\,\mu\nu}$;

- **Kollektive Koordinate:** ρ= Instanton-Radius (und Instanton-Zentrumsvektor R_μ, hier $R_\mu = 0$). I-Wirkung unabhängig von ρ.

♣ Übliche "Instanton-Problematik" mit ρ tritt **nicht** auf:

– Streuamplitude

$$T^{(I)} \sim \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}\rho}{\rho^5} \underbrace{n(\rho)}_{I-\mathrm{Dichte}} \underbrace{\mathcal{T}^{(I)}(\rho, Q^2, \ldots)}_{\propto \exp(-\rho Q)}$$

– Integration über Instanton-Radius **endlich!**; keine infrarot Divergenzen (große ρ), denn

♣ Inverse, große Impulsskala $1/Q$ liefert eine dynamische infrarot-Abschneidung des Instanton-Radius $\rho \lesssim 1/Q$!

[Moch, Ringwald, F. Sch., Nucl. Phys. B507 (1997) 134].

> $\Rightarrow$ Damit zum ersten Mal wohldefinierte, berechenbare Beiträge von kleinen Instantonen!

2) Experimentell:

- $\exists$ **HERA!**
- Instanton-Rate überraschend hoch.
- "Untergrund" von Ereignissen der normalen QCD-Störungstheorie sehr gut verstanden!

♣ Entdeckung wäre von grundlegender Bedeutung:

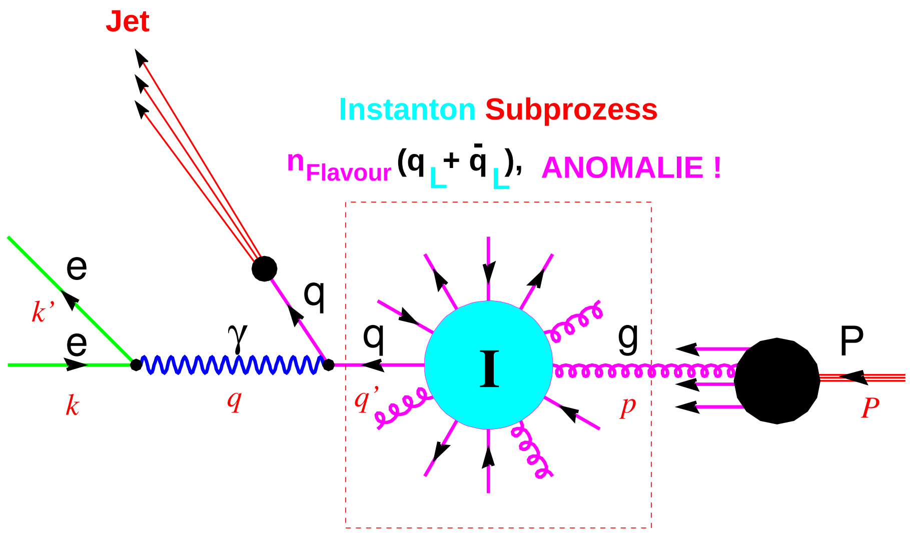
– **Neuartige, nicht-störungstheoretische Manifestation der QCD!**

– Enge Analogie zur **Quark+Leptonzahl (B+L)-Verletzung** durch Instantonen der elektro-schwachen Eichtheorie im mittelfristig nicht zugänglichen multi-TeV Energiebereich.

3. Experimenteller Nachweis bei HERA?

[Ringwald, F. Sch. '94, Gibbs, Ringwald, F. Sch. '95, Carli, Kuhlen, '97, Carli, Ringwald, F. Sch. '98]

3.1 Kinematik und Signatur von I-Ereignissen



- Instanton-Subprozess mit eigenen **Bjorken**-Variabeln:

$$Q'^{\,2} = -q'^{\,2} > 0; \quad 0 \leq x' = \frac{Q'^{\,2}}{2p\cdot q'} \leq 1$$

- Instanton-Störungstheorie verlangt: $Q'^{\,2}$ groß; $x' \gtrsim x'_{\rm min} > 0$!

- **Wichtiges Werkzeug:** "Monte-Carlo" Generatorprogramm zur Simulation von Instanton-Ereignissen bei HERA: **"QCDINS"**
[Gibbs, Ringwald, F. Sch. '95]

- Phänomenologische Analyse/Suche basiert auf Signaturen des Endzustands, die als charakteristisch für den zugrunde liegenden Instanton-Mechanismus hergeleitet wurden:
[Ringwald, F. Sch. '94 & in Vorbereitung; Balitsky, Braun '93; V.V. Khoze, Ringwald '91; 't Hooft '76]

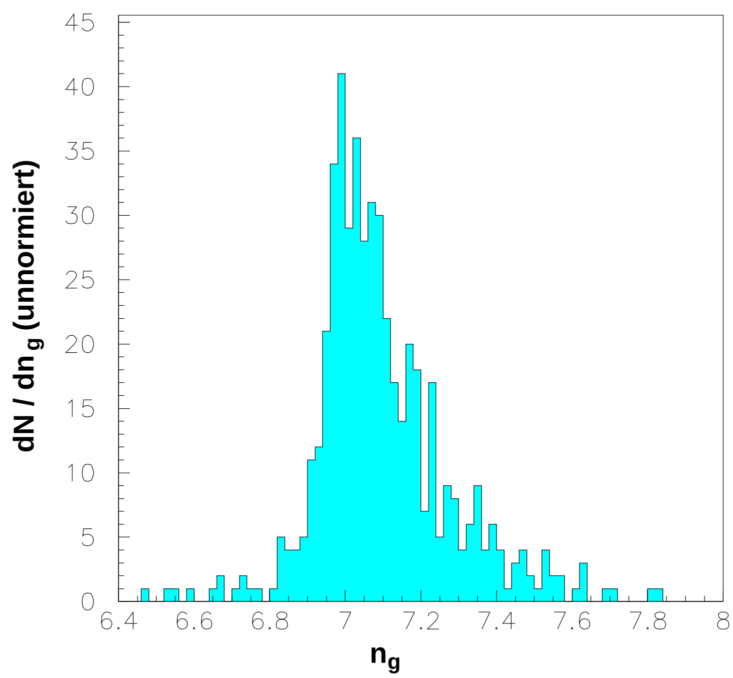
- Isotrope Emission von vielen Partonen im $\boldsymbol{I}$-Ruhesystem: **"zerfallender Feuerball"**

- Hohe Multiplizität: $2n_f - 1 = 5 - 7$ Quarks und $\mathcal{O}(7)$ Gluonen bei HERA,

$$\langle n_{\rm g}\rangle^{(I)} \propto \pi/\alpha_s$$

- Gluon-Multiplizitätsverteilung:

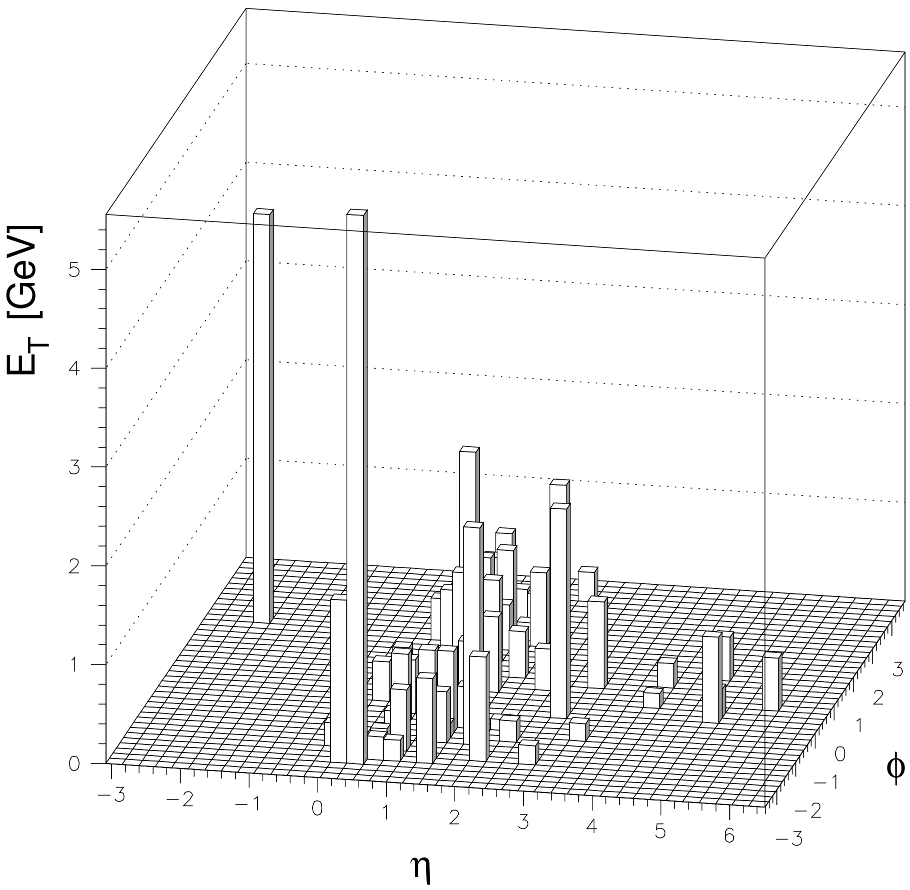
$$P(n_g) = \frac{\sigma^{(I)}(qg \to n_g \text{Gluonen} + X)}{\sigma_{\rm tot}{}^{(I)}(qg)} \sim \text{Poisson Verteilung}$$



- Charakteristische Flavour-Signatur:
  In jedem Ereignis $\Rightarrow$ Strangeness, Charm $\stackrel{\text{schwach}}{\Longrightarrow}$ Muonen

3.2 Typisches Ereignis

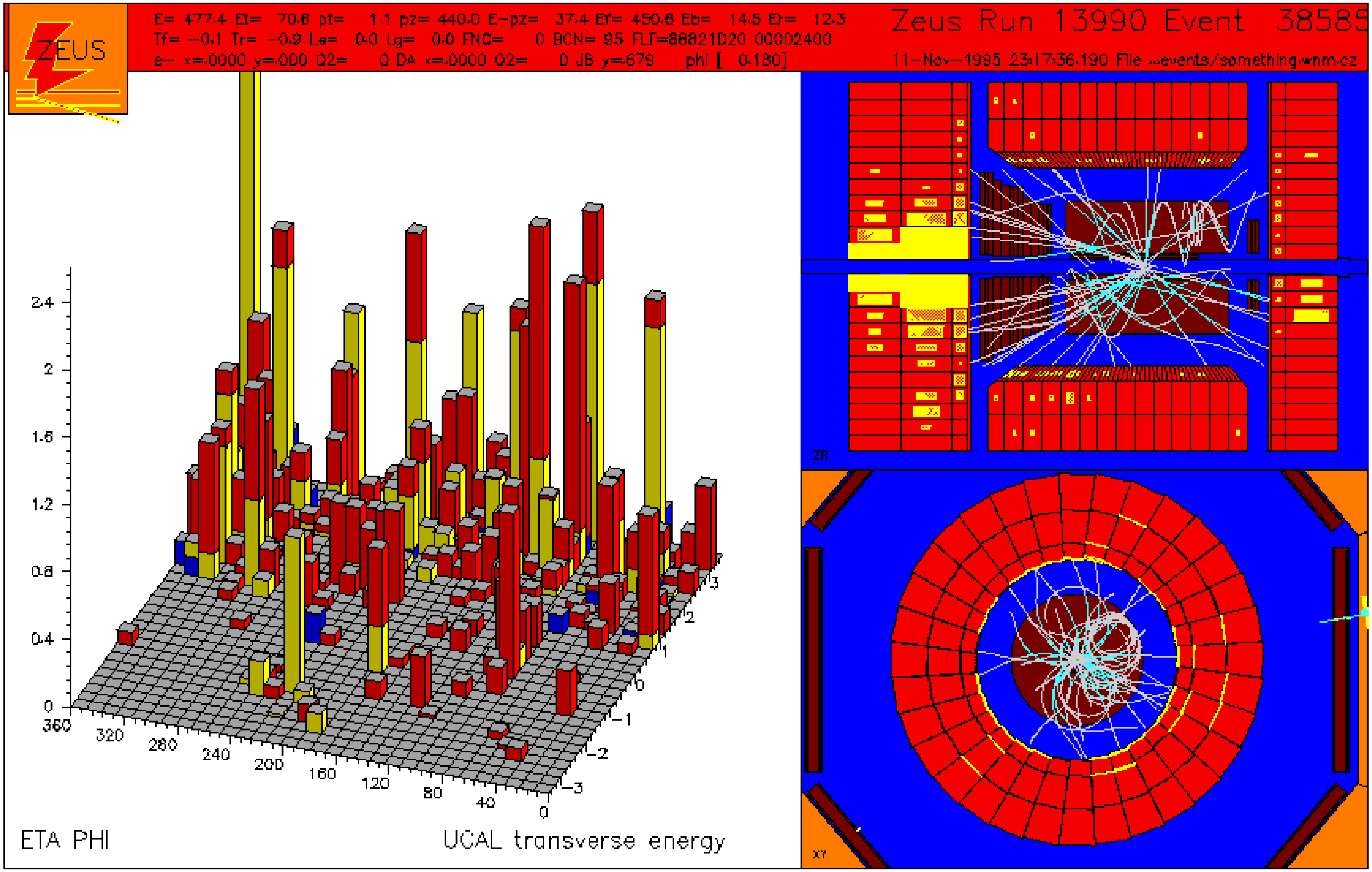
- **"LEGO"**-Darstellung im HERA-Laborsystem:
  ("Pseudo-Rapidität" $\eta = -\ln\tan\theta/2$, Azimuthwinkel ϕ, Transversalenergie E_T) jedes Teilchens im Endzustand. $\Rightarrow$



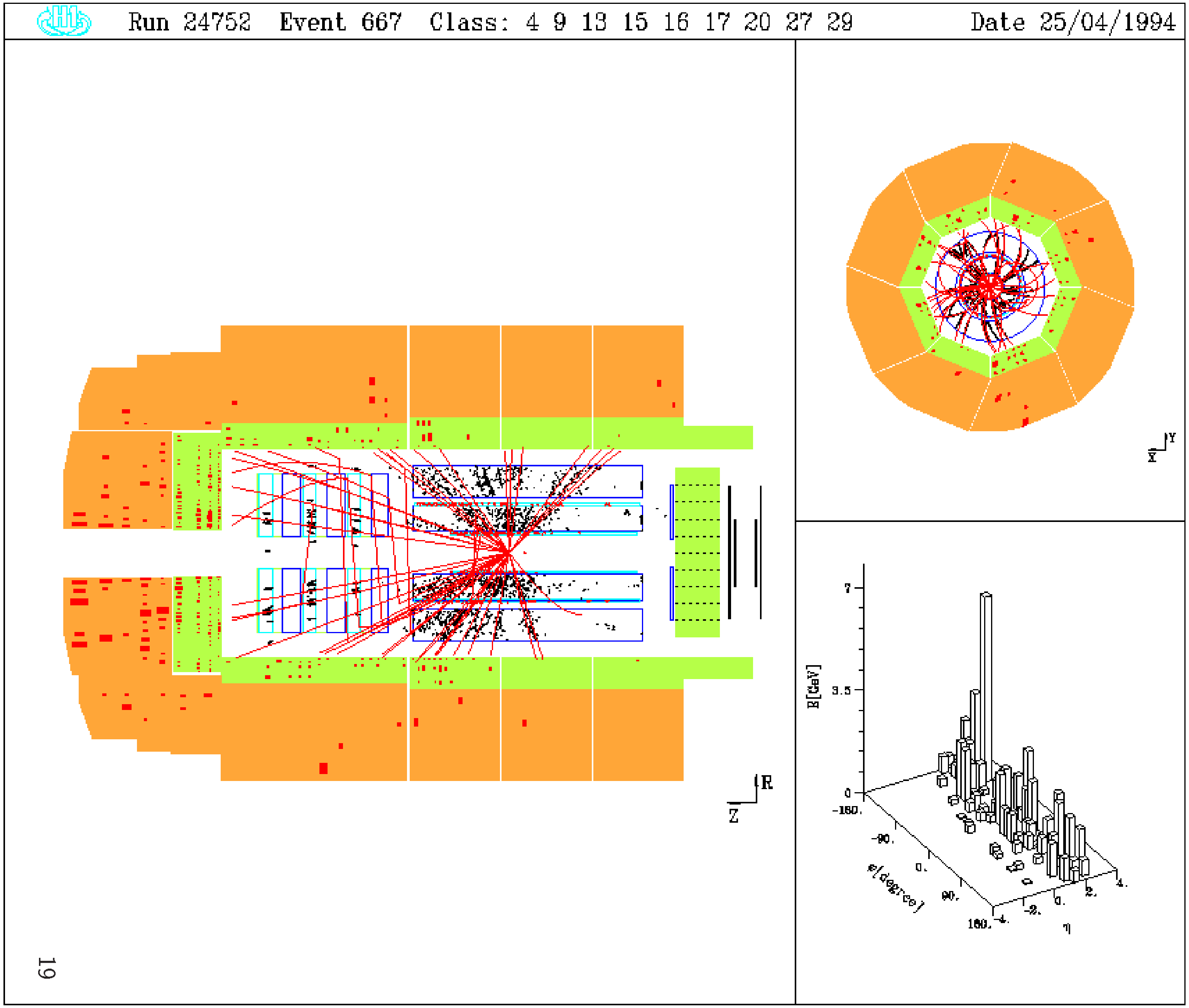
- "Current jet"
- Hadronisches "Band": $\Leftrightarrow$ **Isotropie** im $\boldsymbol{I}$-Ruhesystem
  - Hohes (gesamt-) $E_T = \mathcal{O}(20)$ GeV
  - Hohe Multiplizität $N_{\rm Band} = \mathcal{O}(25)$
  - Keine Jets im "Band" !
  - Charakteristischer Flavour-Fluß:

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

Zum Vergleich: Interessantes, reales **HERA** Ereignis!?? (**ZEUS Kollaboration**)

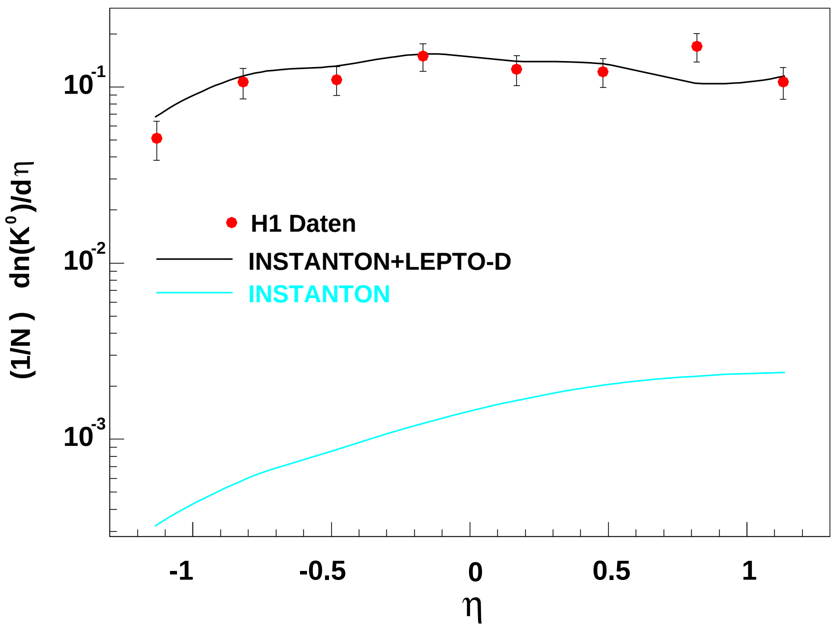


Weiteres reales **HERA** Ereignis!?? (**H1 Kollaboration**)



3.3 Experimentelle Schranken

- Methode : Mit Hilfe von **Monte-Carlo Ereignissimulation**: Erlaube Bruchteil f von Instanton-Ereignissen neben Ereignissen der normalen QCD-Störungstheorie.
- Bestimme das maximal erlaubte f_{lim} aus den experimentellen Daten. Aus der Kenntnis der entsprechenden eP Wirkungsqueschnitte und $f_{\mathrm{lim}} \Rightarrow$ obere Schranke für den durch QCD-Instantonen induzierten Wirkungsquerschnitt!
- Die absolute (noch unsichere/vorläufige) theoretische Voraussage wird dabei nicht verwendet.
- **Suche nach K^0's (Strangeness!)**
  [**H1 Kollaboration**, S. Aid et.al., hep-ex/9607010 und Nucl. Phys. B480 (1996) 3]
- ***I*-Signatur:** starke Erhöhung des K^0-Flusses im "Band" bei $\eta \sim 1$! $\Rightarrow$



$(10^{-3} < x < 10^{-2},\ 0.1 < y < 0.6,\ 10 < Q^2 < 70\ \mathrm{GeV}^2)$.

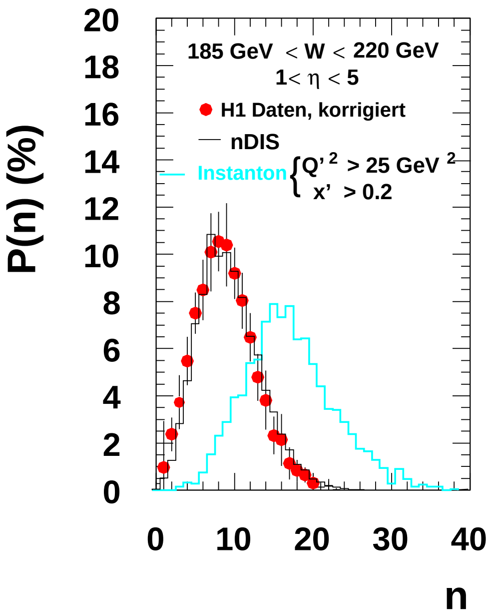
- **H1:** Erste experimentelle obere Schranke für I -induzierten Wirkungsquerschnitt bei HERA basierend auf den beobachteten K_S^0's,

$$\boldsymbol{f}_{\text{lim}} = \mathbf{6\%} \Rightarrow \boldsymbol{\sigma}_{\text{eP}}{}^{(\boldsymbol{I})} < \mathbf{900\ pb\ (95\%\ CL)};$$

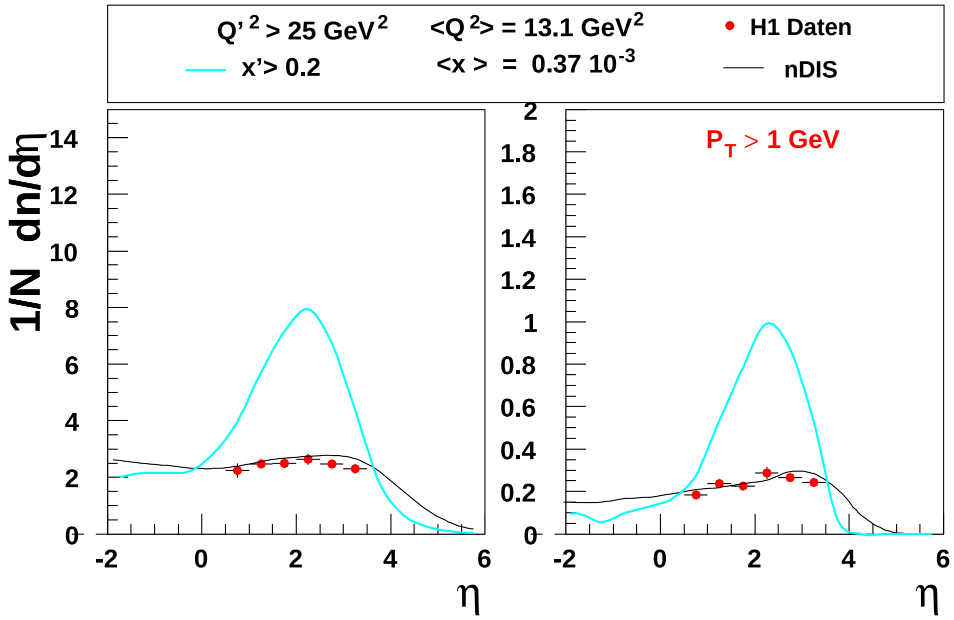
- **Multiplizität(s-) und Energieflüsse**

[**H1 Kollaboration**, S. Aid et.al., Z. Phys. C72 (1996) 573; Carli, Kuhlen,(**H1**) '97, hep-ex/9708008 und Nucl. Phys. B im Druck]

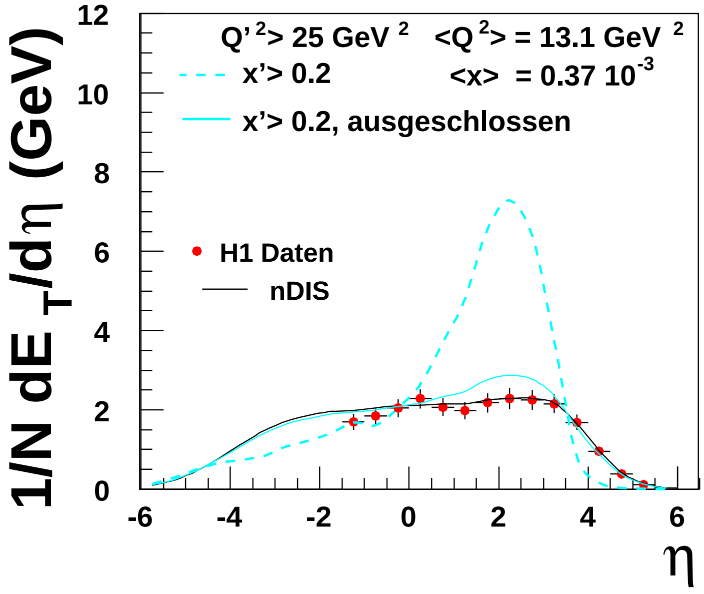
Multiplizitätsverteilung:
Wahrscheinlichkeit, **n Hadronen** in einem Ereignis zu produzieren.



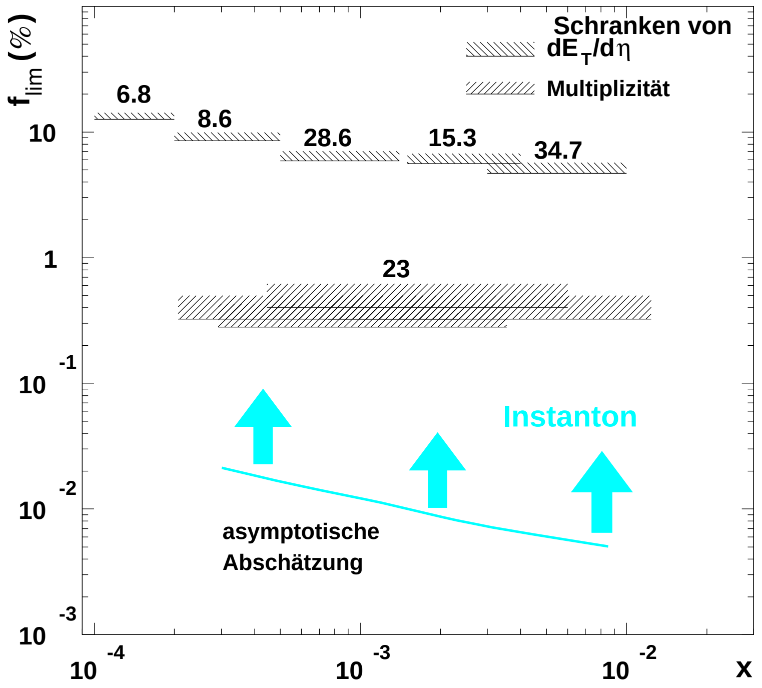
Multiplizitätsfluß:



- **Fluß der transversalen Energie E_T:**
  [Carli, Kuhlen,(**H1**) '97, hep-ex/9708008 und Nucl. Phys. B im Druck]



- **Schranken:** [Carli, Kuhlen,(**H1**) '97, hep-ex/9708008 und Nucl. Phys. B im Druck]



- Empfindlichste Observable: Multiplizitätsverteilung $P(n)$ und transversaler Energiefluß $\mathrm{d}E_T/\mathrm{d}\eta$

- **Es wird spannend. . . !**

4. Zusammenfassung

- Entdeckung von QCD-Instanton Ereignissen wäre von grundlegender Bedeutung:
  - Neuartige, nicht-störungstheoretische Manifestation von QCD
  - Enge Analogie zur **Quark+Leptonzahl (B+L) Verletzung** in elektro-schwachen Prozessen im mittelfristig nicht zugänglichen multi-TeV Energiebereich.
- HERA bietet einzigartiges "Entdeckungsfenster"!
- Systematische theoretische und phänomenologische Untersuchung des Entdeckungs-Potentials, einschließlich Monte-Carlo Ereignissimulation (**QCDINS**):
  - Theoretisch: wohldefinierte, **berechenbare** Beiträge von kleinen Instantonen! Berechnete Rate **beobachtbar groß**; Unsicherheiten!?
  - Experimentell: **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".
  - Gegenwärtig beste experimentelle Schranken für den maximalen Bruchteil $f_{\rm lim}^{(I)}$ von Instanton-Ereignissen in tiefunelastischer Streuung aus **Multiplizitätsverteilung** bei **HERA**:

$$0.2\% \lesssim f_{\rm lim}^{(I)} \lesssim 0.3\%$$