Auf der Spur von Instantonen – grundlegenden Tunnelprozessen in der Teilchenphysik

F. Schrempp, DESY

in Zusammenarbeit mit

A. Ringwald

Plan

1. **Elemente des Standardmodells**
2. **Instantonen**
3. **Tiefunelastische eP Streuung**
4. **Zusammenfassung**

Kopie erhältlich via WWW:

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

– Würzburg, Februar 1999 –

1. Elemente des Standardmodells

Zentrale Fragen in der Teilchenphysik

Elementare Bausteine der Materie?

Fundamentale Kräfte?

Gegenwärtiger Stand

STANDARD MODELL

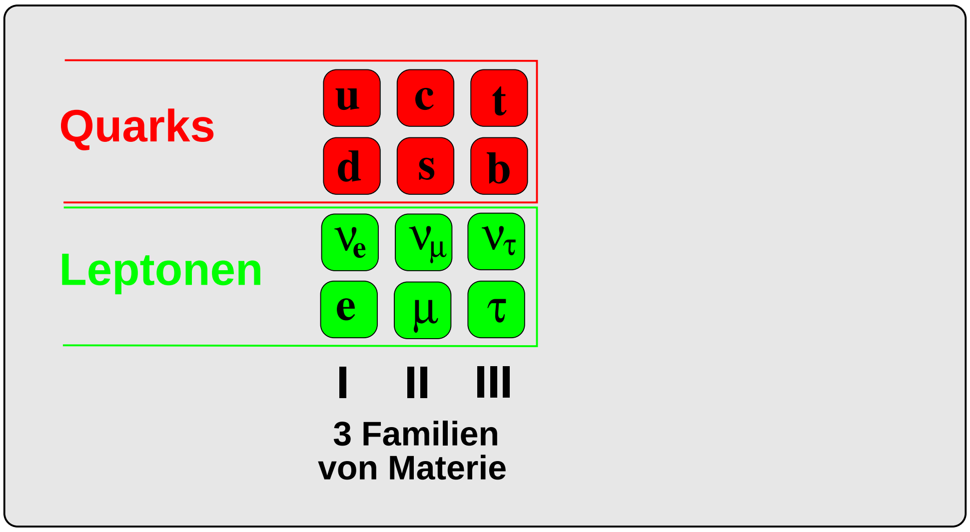
Quarks und Leptonen

Eichkräfte

als Konsequenz des Eich-Prinzips

Eich-Prinzip= Symmetrie Forderung

- **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

Relativistischen $\Leftarrow \left\{\begin{array}{l}\text{kleine Abstände } \Delta\mathrm{x} \Rightarrow\\ \text{große Impulse } \Delta\mathrm{p} \gtrsim \frac{\hbar}{\Delta\mathrm{x}}\end{array}\right.$

Quanten $\Leftarrow \left\{\begin{array}{l}\text{starke}\\ \text{schwache}\end{array}\right\}$ Ww bei kleinem $\Delta\mathrm{x} \lesssim \left\{\begin{array}{l}10^{-15}\mathrm{m}\\ 10^{-16}\mathrm{m}\end{array}\right.$

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

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

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

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

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

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

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

- Klassische Feldtheorie in Erweiterung der klassischen Mechanik, Übergang von 3 zu ∞ vielen Freiheitsgraden/Teilchen:

$$\begin{array}{lcl} \vec{x}(t) & \Rightarrow & \Phi(t,\vec{x}) \equiv \boldsymbol{\Phi(x)}, \\ \dot{\vec{x}}(t) & \Rightarrow & (\,\dot{\Phi}(t,\vec{x}), \vec{\nabla}\Phi(t,\vec{x})\,) \equiv \boldsymbol{\partial_\mu \Phi(x)} \end{array}$$

Lagrangefunktion: $L(\,\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t)\,)$ $\Rightarrow$ **Lagrange Dichte** $\boldsymbol{\mathcal{L}(\Phi, \partial_\mu \Phi)}$

- $\mathcal{L}(\,\{\Phi_i\}, \{\partial_\mu \Phi_i\}\,)$ enthält die Wwn zwischen den Feldern.

- $\mathcal{L}(\,\{\Phi_i\}, \{\partial_\mu \Phi_i\}\,)$ **invariant** unter **Symmetrietransformationen** der Theorie (einschließlich Lorentztransformationen).

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

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

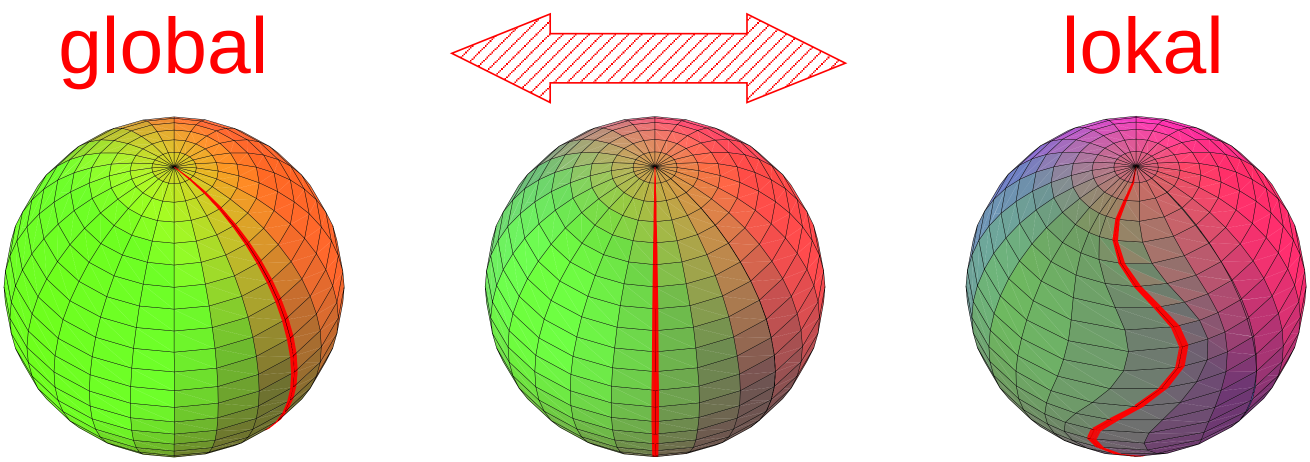
2)

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

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

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

Symmetrie unter Drehungen



- **Ballon** (Fig.): Lokale Rotationsinvarianz bedingt Kräfte!

- **Materiefelder** $\Psi_i(x) \Leftrightarrow (q,l)$**:** in **Multiplets**, (Fundamental-) Darstellung einer (Lie-) Gruppe G:

  q,l: elektr. geladen, Dubletts bzgl. schwacher (Isospin-)Kraft,
  q : Tripletts (rot, blau, grün) unter der starken "Farbkraft".

♣ Forderung der Invarianz von $\mathcal{L}(\{\Psi_i\},\{\partial_\mu\Psi_i\},\ldots)$ unter **lokalen Eich**($\leftrightarrow$ "Phasen")transformationen,

$$\Psi(x)_i \Rightarrow \left(\underbrace{e^{i\sum_a \boldsymbol{\omega_a(x)} T_a}}_{U_{ij}(x)\,\in\,\textbf{(Lie-)Gruppe G},\ \text{Generatoren } T_a} \Psi(x) \right)_i ;$$

- Invarianz der $\partial_\mu\Psi$-Terme (kin. Energie) erst nach Einführung von Eichfeldern ($\Leftrightarrow$ Spin-1 Bosonen):

  $A_\mu(x) \equiv \sum_a A_\mu{}^a(x) T^a \Rightarrow U(x)^{-1} A_\mu(x) U(x) - \frac{i}{g} U(x)^{-1} \partial_\mu U(x)$,

  (Eich-)Kopplungskonstante g $\Leftrightarrow$ Stärke der Ww.

Wwn:	el.-magn.	schwach	stark
Eichgruppe	$U(1)_{\mathrm{em}}$	$SU(2)_{\mathrm{schwach}}$	$SU(3)_{\mathrm{Farbe}}$
Struktur	abelsch	nicht-abelsch [Yang-Mills '54]	
Generatoren	**1**	**3**	**8**
Eichbosonen	**1 Photon** γ ungeladen	**3 W-Bosonen** mit schwacher Ladung	**8 Gluonen** mit Farb-Ladung
Name	vereinheitlichte el.-schw. Eichtheorie Quanten Flavour Dynamik (QFD)		Quanten Chromo Dynamik (QCD)

- Spin 1/2 $\Rightarrow$ 2 Spineinstellungen: rechts(**R**)-/links(**L**) händig.

- el.-magn.
starke $\Big\}$ Wwn: **symmetrisch** unter **R** $\Leftrightarrow$ **L** (klassisch!);
schwache Ww: nur $(\mathrm{q_L}, \mathrm{l_L})$ (Paritätsverletzung!).

3) $\boxed{\text{Quantisierung:}}$ ...

- Für $\alpha \equiv \frac{g^2}{4\pi} \ll 1 \Rightarrow$ **Störungstheorie**, **Feynman-Graphen**... Störungstheorie für starke "Farb"- Wwn??

- $\Leftarrow$**Vakuumpolarisationseffekte**!
Eichkopplungskonstanten $\alpha \Rightarrow$ 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

2.1 Topologische Objekte in der Feldtheorie

- Quanten-Feldtheorie in störungstheoretischer Näherung: enorm erfolgreich.
- Potenzreihen Entwicklung (des Feynman'schen Pfadintegrals) um triviale Feldkonfiguration $\Phi_i = 0$, für $g \ll 1$.
- Materiefelder $\Leftrightarrow$ punktförmige, elem. Objekte (Teilchen).

♣ Klassische Feldgleichungen in

Nicht-linearen Feldtheorien	Nicht-abelschen Eichtheorien

auch stabile, lokalisierte Lösungen mit
raum (-zeit)licher Ausdehnung:

Solitonen	Vortizes, magn. Monopole & Instantonen.

♣ **Gemeinsam:** Stabilität und Existenz $\Leftrightarrow$ Nicht-triviale **Topologie** der Randbedingungen!

♣ Neue Störungstheorie um solche Lösungen $\Rightarrow$ Einblick in wichtige Quanteneffekte außerhalb der üblichen Störungstheorie um $\Phi_i = 0$!

2.2 Instantonen in der QuantenChromoDynamik

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

- Betrachte zunächst: "Reine Eichtheorie" (nicht-abelsche Selbst-Ww der Gluonfelder $A_\mu(x)$ ohne Quarks),

  Topologie?

♣ Klassisch: ∞ viele energetisch degenerierte, aber topologisch unterscheidbare Grundzustände, charakterisiert durch

endliche Wirkung $S = \int d^4x\, \mathcal{L}$, i.e. $\mathcal{L}[A_\mu(x)] \overset{|x|\to\infty}{\Rightarrow} 0$

◇ Erfüllt durch triviale Feldkonfiguration $\boldsymbol{A_\mu(x) \equiv 0, S = 0}$ ($\Leftarrow$ übliche Störungstheorie).

◇ Viel zu restriktiv aufgrund lokaler Eichinvarianz $\Rightarrow$

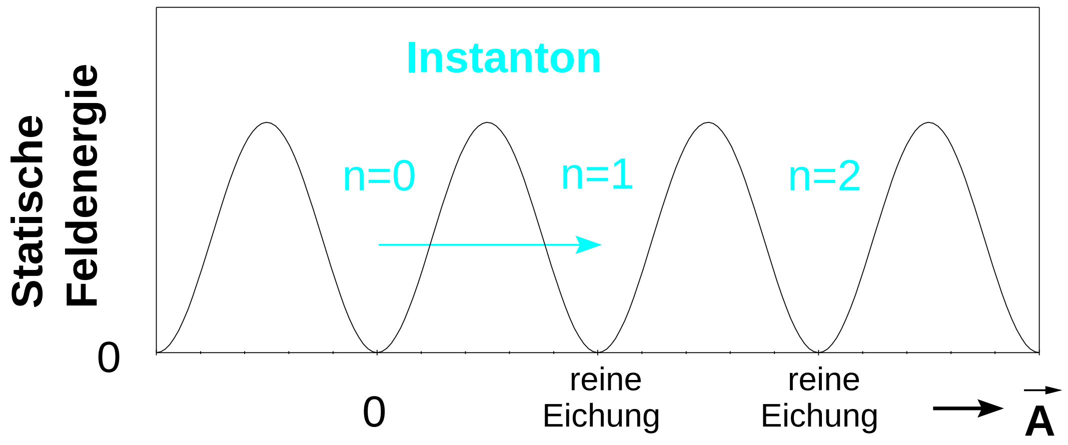
Randbedingungen: $$\begin{cases} \vec{A}(x) \overset{|x|\to\infty}{\Rightarrow} -\frac{i}{g}\underbrace{U^{-1}(\vec{x})\nabla U(\vec{x})}_{\text{“reine Eichung”}}; \\ A_0(x) = 0 \text{ (o.B.d.A)} \end{cases}$$

- Zugehörige Eichfelder einteilbar in topologisch verschiedene (Homotopie-) Klassen von Abbildungen des

Ortsraums: $\{\vec{x}\} \Rightarrow$ Raum der (Eich-)Gruppenelemente: $\{U_n(\vec{x})\}$

charakterisiert durch ganzzahlige topol. Windungszahl $\boldsymbol{n}$.

- Entsprechende Vakua nicht durch stetige Deformation von Eichtransformationen $U_n(\vec{x})$ ineinander überführbar (für E fest)! $\Rightarrow$ Vakua separiert durch endlichen Energiewall.



- Erwarte: Quanteneffekte in Form von Tunnelübergängen als Konsequenz von lokaler Eichsymmetrie & Topologie $\Rightarrow$

♣ **(Anti-) Instantonen:** [Belavin *et al.* '75; 't Hooft '76]

Einfachste, nicht-triviale "Bausteine" topologischer Struktur im Vakuum.

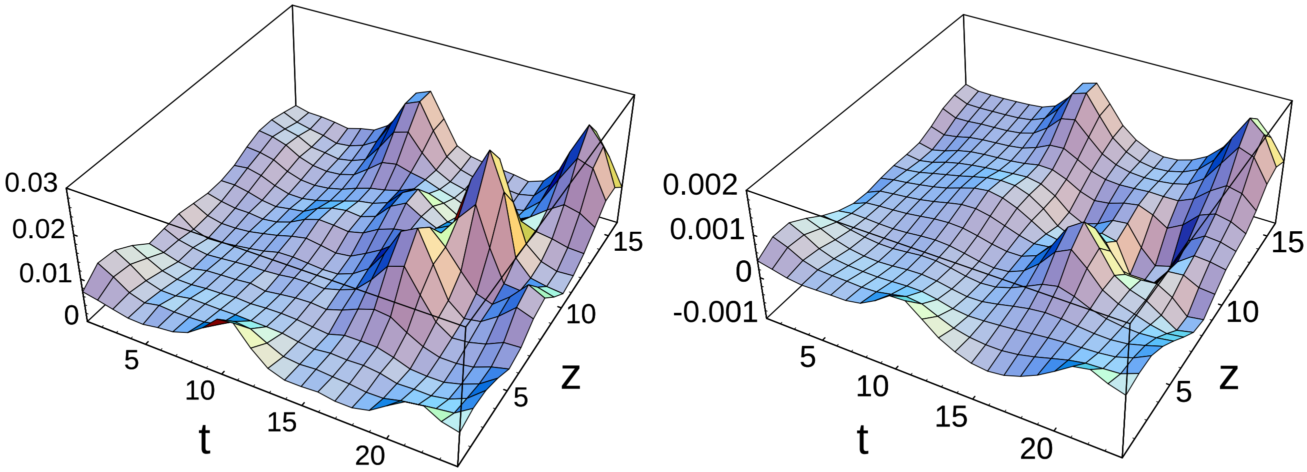
◇ Explizite Lösungen $A_\mu^{(I)}(x)$ der klass. Feldgleichungen (in 4d Euklidischer Raum-Zeit, d.h. für imaginäre Zeit !)

◇ Tunnel Übergänge zwischen benachbarten Vakua $n \rightleftharpoons n+1$

◇ Tragen erhaltene topologische Ladung $Q = (n+1) - n = 1$.

◇ Nicht-perturbative topologische Fluktuationen der Eichfelder, lokalisiert ("instantan") in Zeit und Raum.

Lagrangedichte **Topologische Ladungsdichte**



(Realistische, nicht-perturbative Gittersimulation, [Chu *et al.*'94], 3 $\boldsymbol{I}$'nen und 2 $\overline{\boldsymbol{I}}$'nen erkennbar!)

◇ Minimieren die Euklidische Wirkung für $\mid \boldsymbol{Q} \mid = \mathbf{1}$: $S[A_\mu^{(I)}(x)] = \frac{2\pi}{\alpha}$.

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

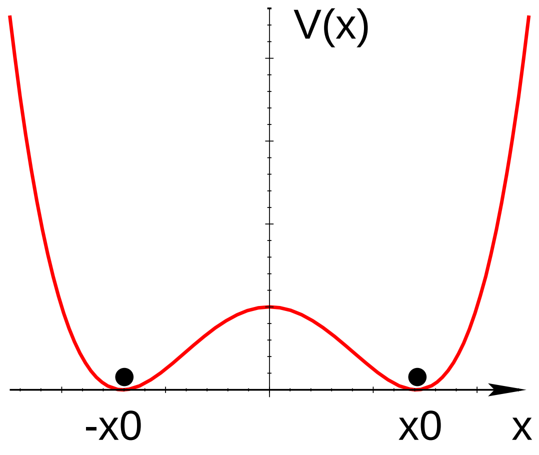
2.3 Ein Quantenmechanisches Instanton

♣ Einfachstes Beispiel, fast alle Ergebnisse analog in nicht-abelschen Eichtheorien, dort 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



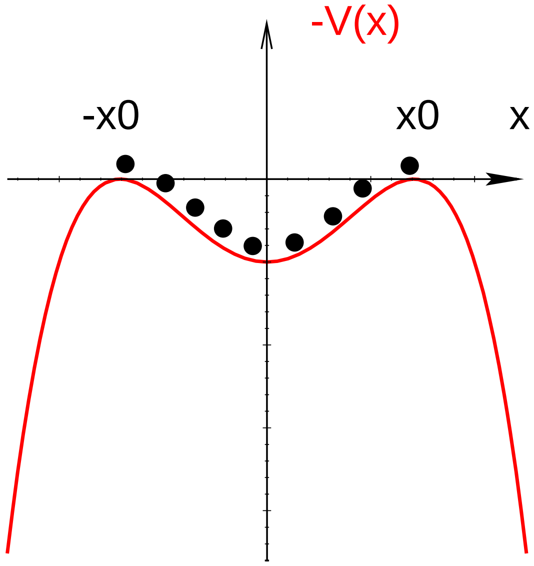
$$E = \frac{1}{2}\dot{x}^2 + V(x), \qquad L(x,\dot{x}) = \frac{1}{2}\dot{x}^2 - V(x)$$

- 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.
  - ◇ $|\,\text{Grundzustand}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|-x_0\rangle + |\,x_0\rangle\}$

- (Semi-)Klassische Beschreibung von Tunneln??

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

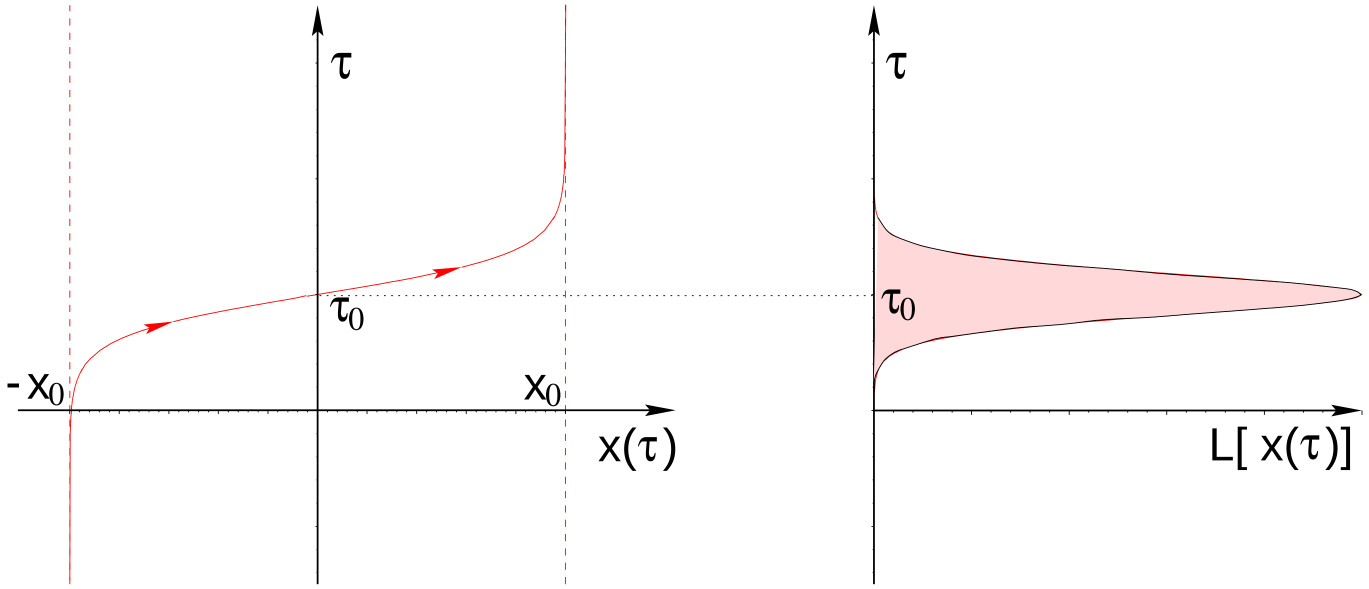


- $-E = \frac{1}{2}\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\tau}\right)^2 - V(x) = 0$

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

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

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



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

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

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

- **Topologische Klassifikation** der Pfade $x(\tau)$ mit endlicher Wirkung durch ihre Randwerte bei $\tau = \pm\infty$:

  ganzzahlige topologische Ladung:

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

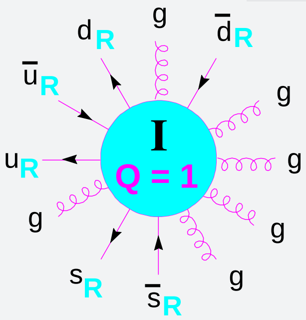
- Wege mit verschiedenem Q können nicht durch stetige Deformation ineinander übergeführt werden!
  ($\Leftarrow$ Homotopie-Klassen)

2.4 Leichte Quarks und Chiralitätsverletzende Prozesse

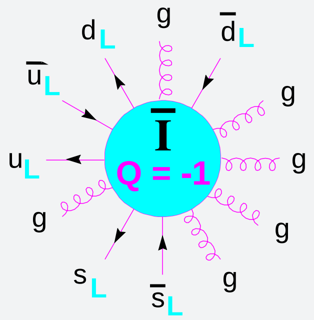
- **Wichtige Frage:** Kann man Instantonen im Standardmodell mittels physikalischer Observabeln verfolgen/nachweisen??

- **Ja**, aufgrund der Existenz leichter Fermionen (Quarks in QCD)! ['t Hooft '76]

Instantonen induzieren Prozesse mit Verletzung der **"Chiralität"** $Q_5 = \#(q_{\rm R}) - \#(q_{\rm L})$ in (massloser) QCD



$$\Delta\, Q_5 = 2n_{\rm f} \cdot Q$$



- in Übereinstimmung mit der allgemeinen Adler-Bell-Jackiw ANOMALIE Relation,

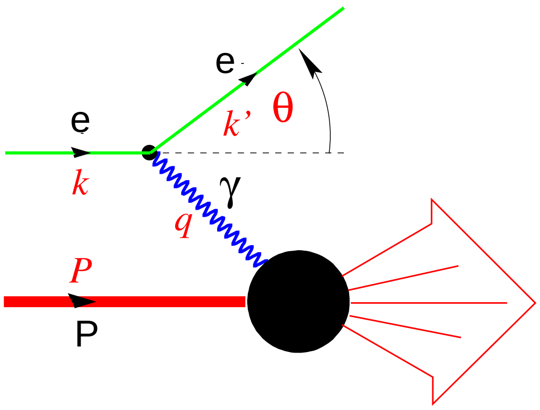
- verboten in üblicher Störungstheorie ($Q = 0$!)

Eine experimentelle Entdeckung von **Instantonen** mit Hilfe solcher Prozesse wäre von grundlegender Bedeutung!.

3. Tiefunelastische eP Streuung

- "Wiege" der störungstheoretischen QCD!
- "Mikroskop" mit hochvirtuellen Photonen:

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



Struktur des Protons mit hoher Auflösung: $\Delta x_T \sim \frac{1}{\sqrt{(Q^2)}}$,

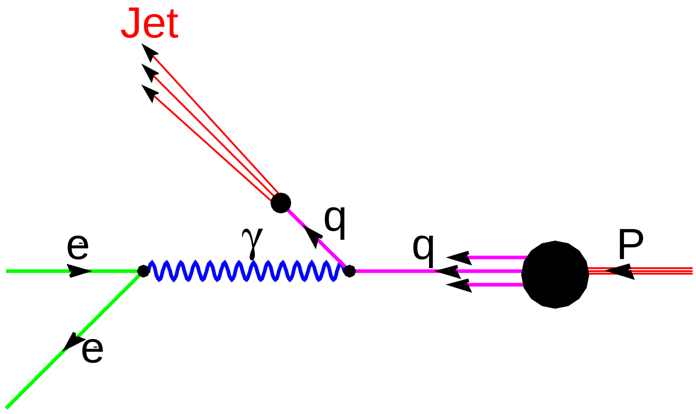
Bjorken Variable: $0 \leq x = \frac{Q^2}{2P\cdot q} \leq 1$;

3.1 QCD-Störungstheorie und Experiment

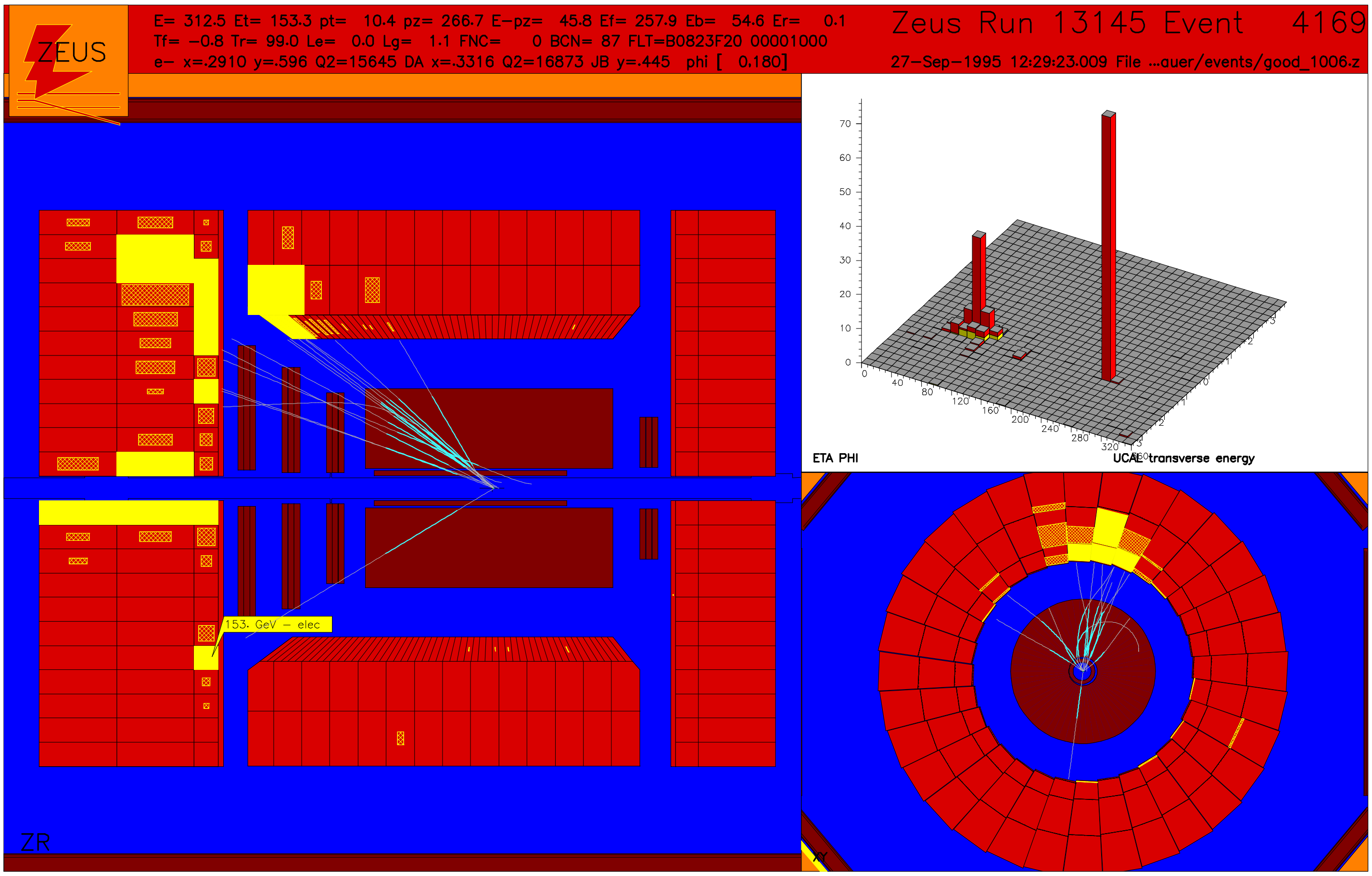
- Virtuelles Photon "sieht" quasi-freie **Partonen** (=Konstituenten=Quarks, Gluonen) des Protons.

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

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

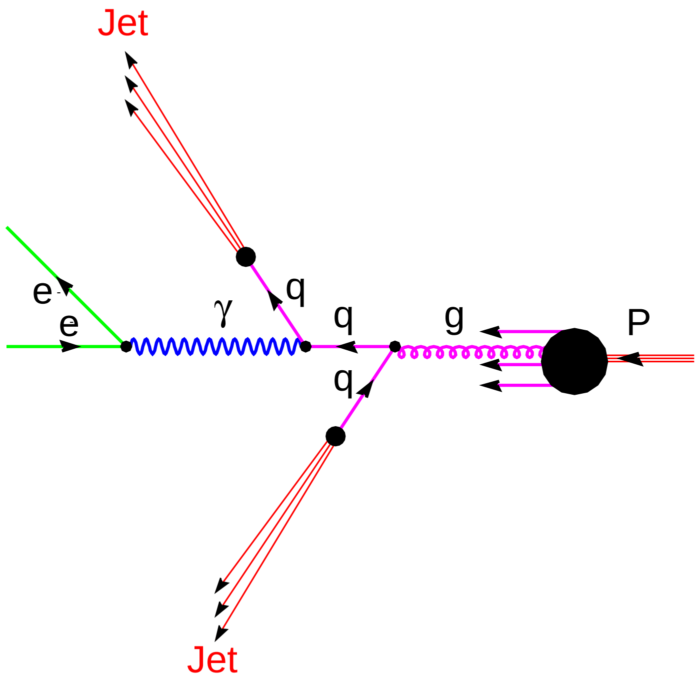


$$\boxed{e + P \Rightarrow e' + 1\text{Jet} + X}$$

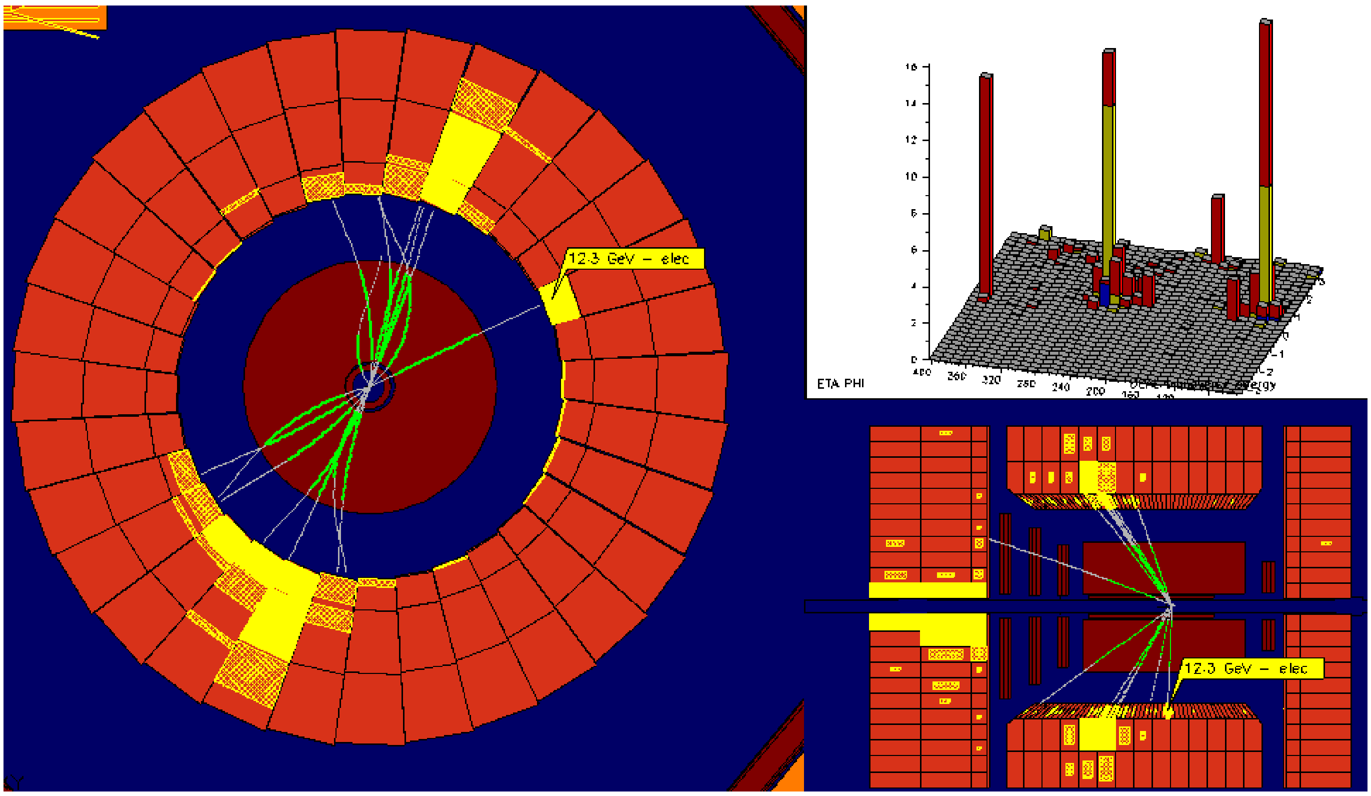


(reales HERA-Ereignis)

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



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



(reales HERA-Ereignis)

- Ebenso Multijets. . .

3.2 Instanton-Störungstheorie

[Balitsky, Braun '93, Ringwald, F. Sch. '94 -'97;
Moch, Ringwald, F. Sch., Nucl. Phys. B507 (1997) 134;
Ringwald, F. Sch., Phys. Lett B438 (1998) 217; hep-ph/9812359]

- Tiefunelastische eP-Streuung ideal

1) Theoretisch:

♣ Rate für dominante Instanton-induzierte eP-Prozesse mit Chiralitätsverletzung konnte im Rahmen der Instanton - Störungstheorie **berechnet** werden:

[Moch, Ringwald, F. Sch., Nucl. Phys. B507 (1997) 134; DESY-99-xxx (1999), Ringwald, F. Sch., Phys. Lett B438 (1998) 217.]

♣ Schlüsseleigenschaft : Übliche Problematik mit Instanton-Ausdehnung ρ tritt hier **nicht** auf:

◇ Streuamplitude:

$$T^{(I)} \sim \int_0^\infty \mathrm{d}\rho \underbrace{D(\rho)}_{\substack{\text{I-Dichte} \\ \propto \rho^{6-2/3\, n_f}}} \underbrace{\mathcal{T}^{(I)}(\rho, Q^2, \ldots)}_{\propto \exp(-\rho Q)}$$

◇ Integration über Instanton-Ausdehnung **endlich!** Keine infrarot Divergenzen (große ρ), denn

◇ Inverse, große Impulsskala $1/Q$ liefert eine dynamische infrarot-Abschneidung der Instanton-Ausdehnung, $\rho \lesssim 1/Q$! [Moch, Ringwald, F. Sch., Nucl. Phys. B507 (1997) 134].

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

2) Experimentell:

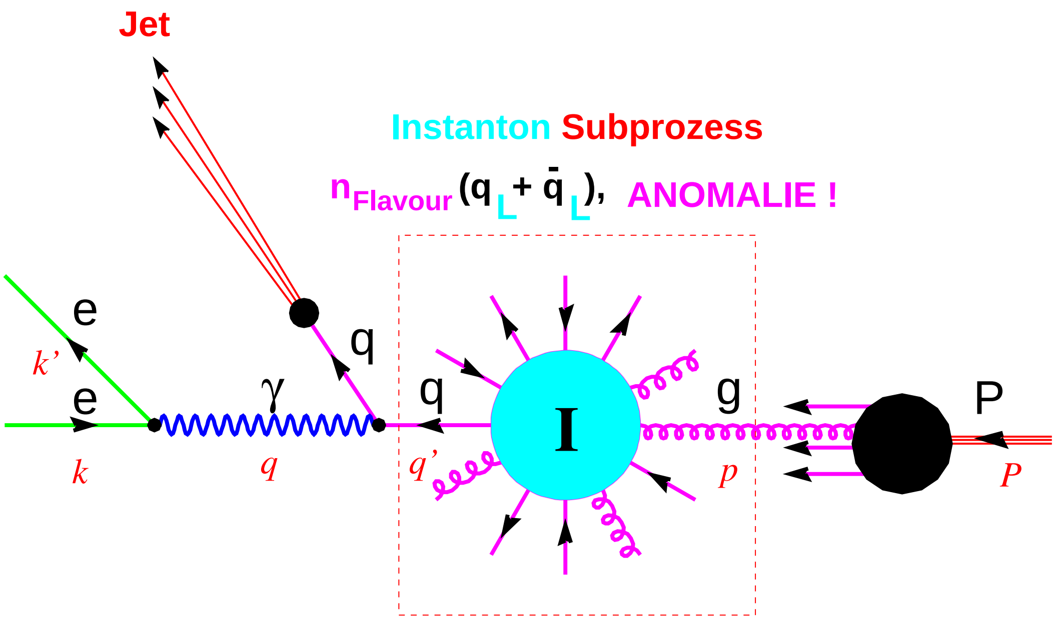
- $\exists$ eP - Speicherring **HERA** (DESY)!
- Instanton - Rate bei **HERA** überraschend hoch, $\mathcal{O}(100)$ pb
- Charakteristische Ereignissignatur
- "Untergrund" von Ereignissen der üblichen QCD-Störungstheorie vergleichsweise gut verstanden!

3.3 Experimentelle Suche bei HERA

[Ringwald, F. Sch. '94, Gibbs, Ringwald, F. Sch. '95, Carli, Kuhlen, '97, Carli, Ringwald, F. Sch. '99, in Vorber.]

- **Wichtiges Werkzeug:** "Monte-Carlo" Generatorprogramm zur Simulation von Instanton-Ereignissen bei HERA: **"QCDINS 1.60"** [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; Balitsky, Braun '93; 't Hooft '76]



♣ Isotrope Emission von vielen Partonen im I-Ruhesystem:
"Isotrop zerfallender Feuerball"

♣ Hohe Multiplizität: $2\,n_f - 1 = 5 - 7$ Quarks und $\mathcal{O}(3-4)$ Gluonen bei HERA, $\langle n_{\rm g}\rangle^{(I)} \propto \pi/\alpha_s$

♣ Multiplizitätsverteilung der Gluonen:

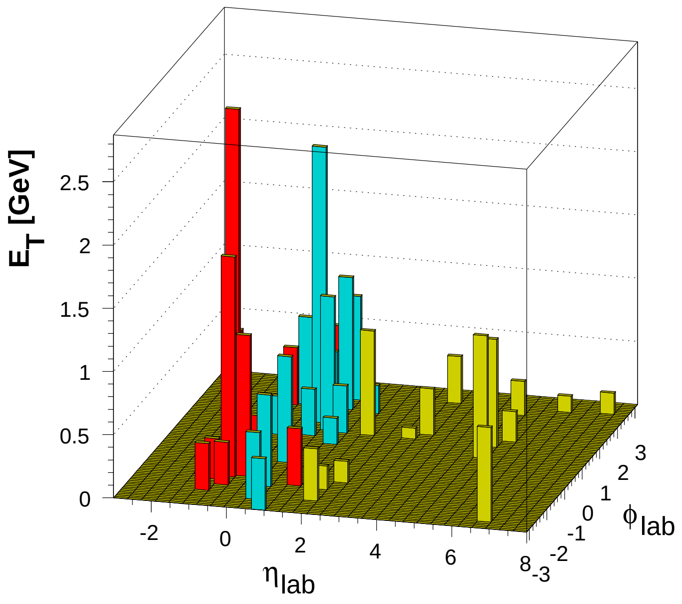
$$P(n_g) = \frac{\sigma^{(I)}(q\,g \to n_g\,{\rm g} + X)}{\sigma_{\rm tot}{}^{(I)}(q\,g)} \sim \text{Poisson Verteilung}$$

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

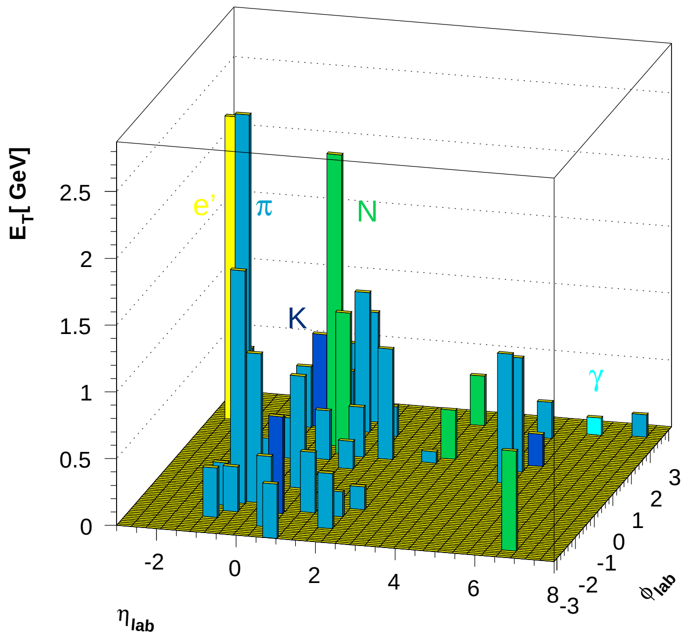
Typisches Ereignis

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

Charakteristika



Teilchen Komposition



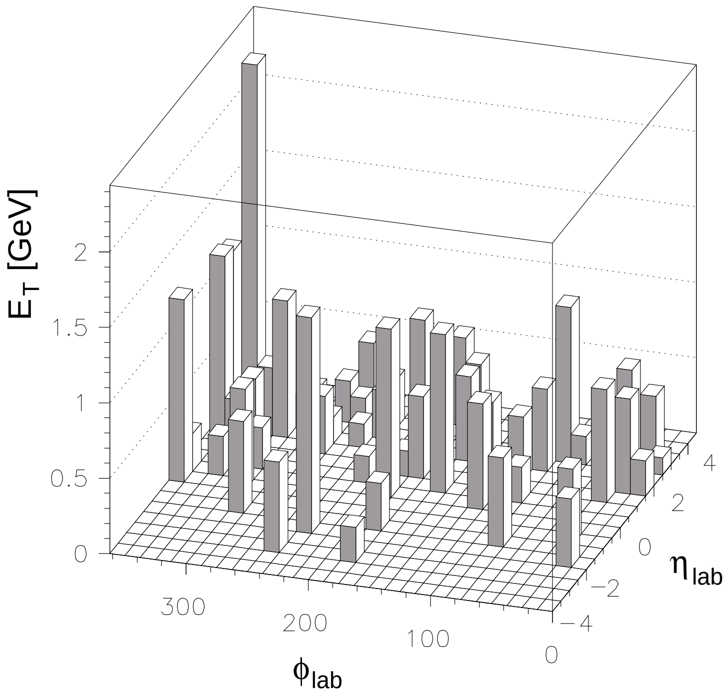
- **"Current Jet"**

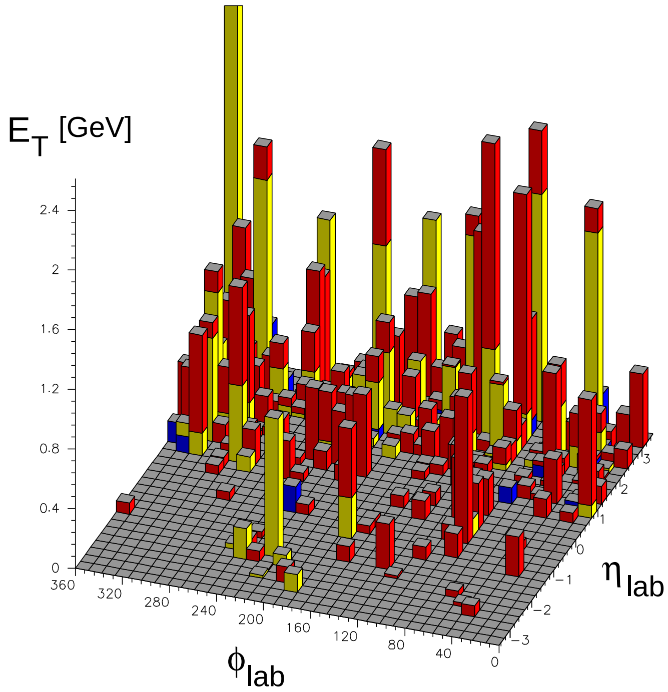
- **Hadronisches "Band"** : $\Leftrightarrow$ **Isotrop** zerfallender **"Feuerball"** im $\boldsymbol{I}$-Ruhesystem
  - ◇ Hohes (gesamt-) E_T
  - ◇ Hohe Multiplizität
  - ◇ Keine Jets im "Band" !
  - ◇ Charakteristischer Flavour-Fluß: $\star$ **Strangeness** $\Rightarrow$ K_S^0's

Kandidaten

- Klasse von neuartigen "Feuerball" - Ereignissen mit großem E_T von **ZEUS** - Kollaboration bei HERA für kleine Q^2 (Photoproduktion) gefunden. (Fig. rechts, typ. Ereignis)

- Zeigen alle von Instanton - Ereignissen erwarteten Eigenschaften (Fig. links, typ. Ereignis von QCDINS 1.60)!





- Quantitative experimentelle Analyse erst im Anfangsstadium [PhD Thesis, C. Nath (Oxford) '98] $\Rightarrow$

- Überhöhung der Rate im Vergleich zu Monte-Carlo Simulationen der üblichen QCD-Störungstheorie um Faktor O(10)

- **Es wird spannend . . .**

4. Zusammenfassung

- Topologische Fluktuationen ($\Leftarrow$ Instantonen), wichtiger Aspekt nicht-abelscher Eichtheorien wie QCD.

- Tunnelübergänge, signalisiert durch Existenz von charakteristischen QCD Prozessen mit Chiralitätsverletzung.

- Entdeckung von QCD-Instanton Ereignissen wäre von grundlegender Bedeutung.

- 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**.

  - Phänomenologisch: **Charakteristische Signatur**:

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

- Experimentelle Schranken $\sim$ theoretische Instanton-Rate!

- Neuartige Klasse von “Feuerball” - Ereignissen zeigen alle erwarteten Eigenschaften...