

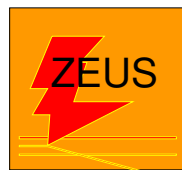
Suche nach neuer Physik bei HERA

Ulrich F. Katz, ZEUS
Universität Bonn

Physikalisches Kolloquium
RWTH Aachen
18. Oktober 1999

- Einführung
 - Elektron–Proton–Streuung bei HERA
 - HERA, ZEUS und H1
- Neue Physik bei HERA?
 - Leptoquarks
 - Angeregte Fermionen
 - Kontakt–Wechselwirkungen
 - Das Unerwartete
- Zusammenfassung und Ausblick

Ergebnisse der



und



Kollaborationen

Einführung

Theoretische Beschreibung von
Teilchenreaktionen
im **Standardmodell der Teilchenphysik (SM)**.

Das **SM** wird von (fast)
allen experimentellen Messungen
in hoher Präzision bestätigt.

Der **Elektron–Proton–Collider HERA**
hat **~ 10 -fach höhere Schwerpunktsenergie**
als vergleichbare frühere Experimente.
Die vorhandenen Datenmengen erlauben
mittlerweile **statistisch präzise** Aussagen.

Frage: Finden wir Abweichungen vom SM
oder experimentelle Hinweise auf
Hypothesen jenseits des SM?

Elemente des Standardmodells (SM)

Elementare, punktförmige Teilchen:

Leptonen:

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Quarks:

$$\begin{pmatrix} d \\ u \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} s \\ c \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} b \\ t \end{pmatrix}$$

(Konstituenten der Hadronen)

Fermionen

(Spin 1/2)



Materie

(Zu jedem Fermion gibt es ein Antifermion)

Austauschteilchen:

Photon γ
Weakonen $W^\pm, Z$
Gluonen g

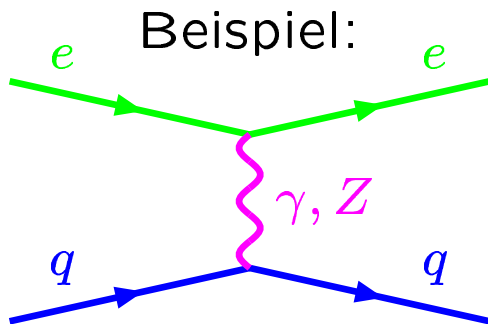
Bosonen

(Spin 1)



“Kraft-Überträger”

Teilchen–Wechselwirkungen



Kraft =
Austausch von Bosonen
→ Wechselwirkung

Elektromagnetische Wechselwirkung:

Wirkt auf: Austausch von:
geladene Teilchen Photon
→ Atomare Kräfte, ... , Magnetismus, ...

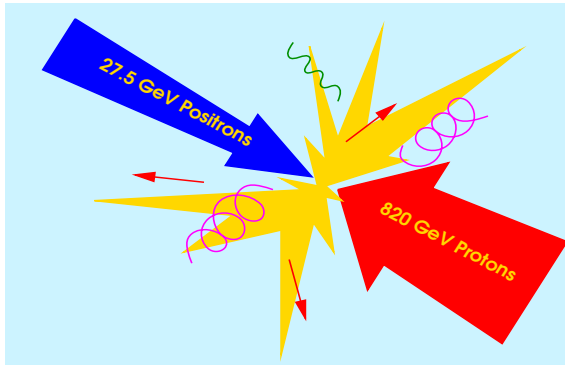
Schwache Wechselwirkung:

Leptonen, Quarks $W^\pm, Z$
→ Radioaktivität, ν -Wechselwirkungen, ...

Starke Wechselwirkung:

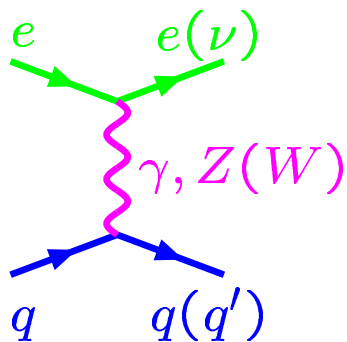
Quarks, Gluonen Gluon
→ Kernkräfte, Quark–Wechselwirkungen, ...

Beispiele einiger SM-Mechanismen von Elektron–Proton–Reaktionen



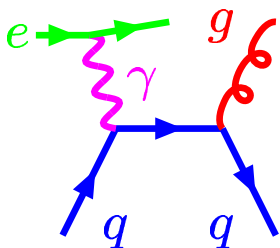
Neu bei HERA:

Große invariante
Elektron–Quark–Massen



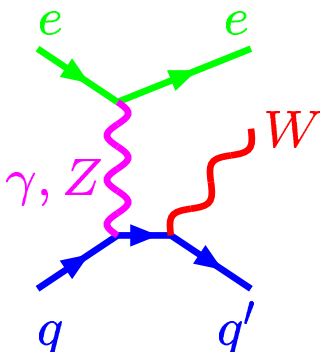
Tiefinelastische Streuung (DIS)

$e(\nu)$ und $q(q')$ haben große
Transversalimpulse (p_t)



Photoproduktion

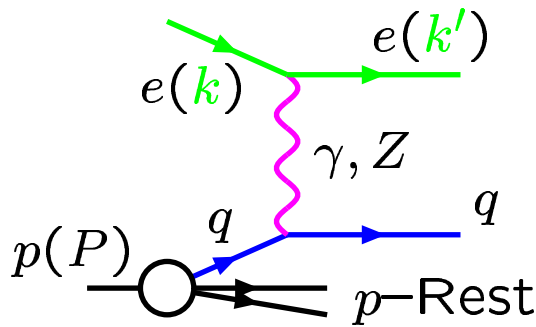
Elektron e fast nicht abgelenkt,
quasi–reelles Photon γ .
2 oder mehr q/g mit hohem p_t



W–Produktion

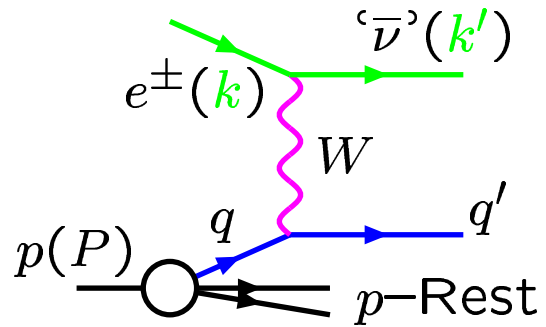
Reelles W –Boson wird erzeugt
und zerfällt in $q\bar{q}'$ oder $\ell\nu_\ell$

DIS: Signaturen und Kinematik



Neutral Current (NC)

Gestreutes e im Detektor



Charged Current (CC)

Gestreutes ν' unsichtbar

NC&CC: Gestreutes q und p -Rest bilden hadronische Jets

Kinematische Variablen:

Quadrat der ep -Schwerpunktsenergie:

$$s = (k + P)^2 = 4E_e E_p$$

Vierimpuls-Übertrag:

$$q = k - k'; \quad Q^2 = -q^2 = 2E_e E' (1 + \cos \theta_e)$$

Bjorken-Skalenvariable x :

$$x = Q^2 / (2 q \cdot P) = \text{Impulsanteil des Quarks}$$

Inelastizität:

$$y = (q \cdot P) / (k \cdot P) = (1 - \cos \theta_e^*) / 2;$$

θ_e^* = Streuwinkel im eq -Schwerpunktsystem

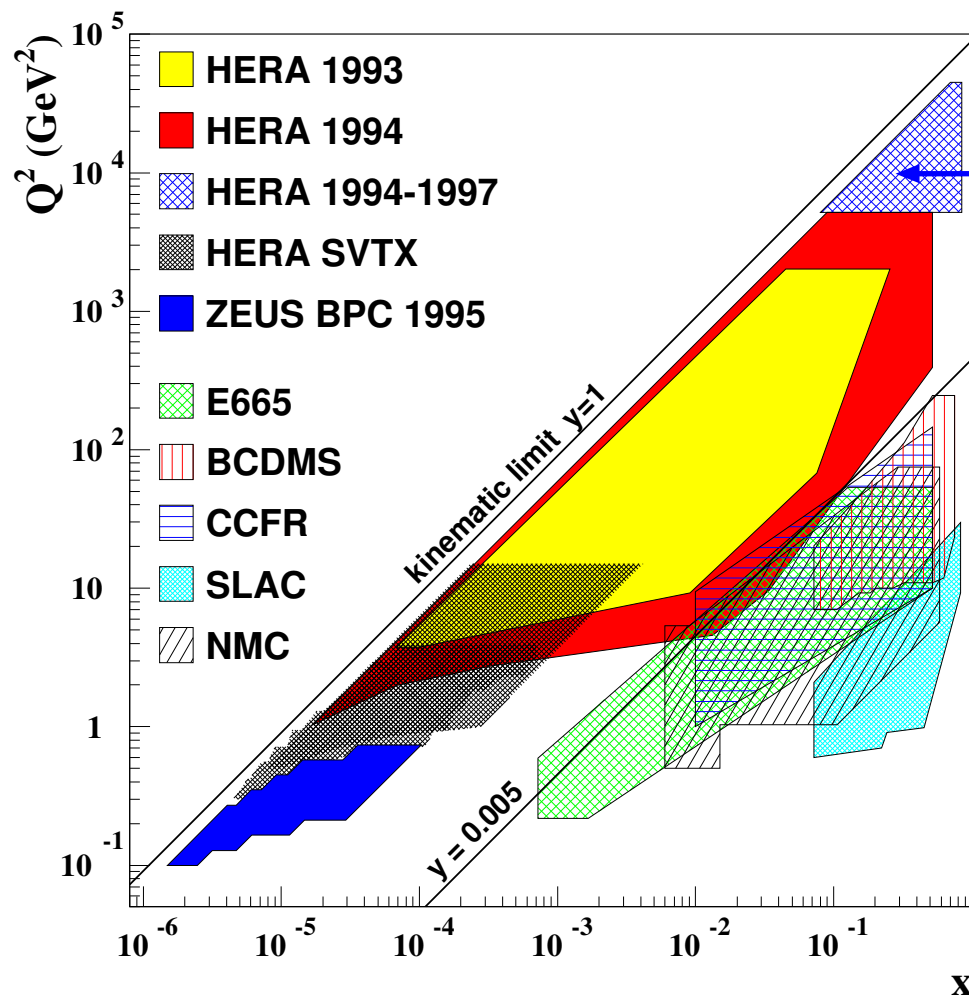
Q^2 , x und y :

$$Q^2 = x \cdot y \cdot s$$

Invariante eq -Masse:

$$M = \sqrt{(k + xP)^2} = \sqrt{xs}$$

Die kinematische Ebene für DIS



Große
 x, Q^2, M
 $\Rightarrow$
 Suche
 nach neuer
 Physik

- HERA erweitert Q^2 -Bereich um zwei Größenordnungen $\Rightarrow Q^2 \gtrsim M_{W,Z}^2$; DIS in diesem kinematischen Bereich vor HERA unerforscht
- Neue Physik $\Leftrightarrow$ Abweichungen von SM-Vorhersagen
- eq -Resonanzen, Kontakt-Wechselwirkungen

Der DIS–Wirkungsquerschnitt

Tiefinelastische ep –Streuung =
inkohärente Summe elastischer eq –Streuungen:

$$\sigma(ep) = \sum_{q,\bar{q} \text{ in } p} f_{q|p} \cdot \sigma(eq)$$

Partonverteilungen $f_{q|p}(x)$:

- Wahrscheinlichkeit, ein Parton der Sorte q mit Impulsanteil x im Proton p zu finden
- Starke Wechselwirkung: $f_{q|p} = f_{q|p}(x, Q^2)$
- Q^2 –Abhängigkeit in QCD berechenbar

$\sigma(eq)$:

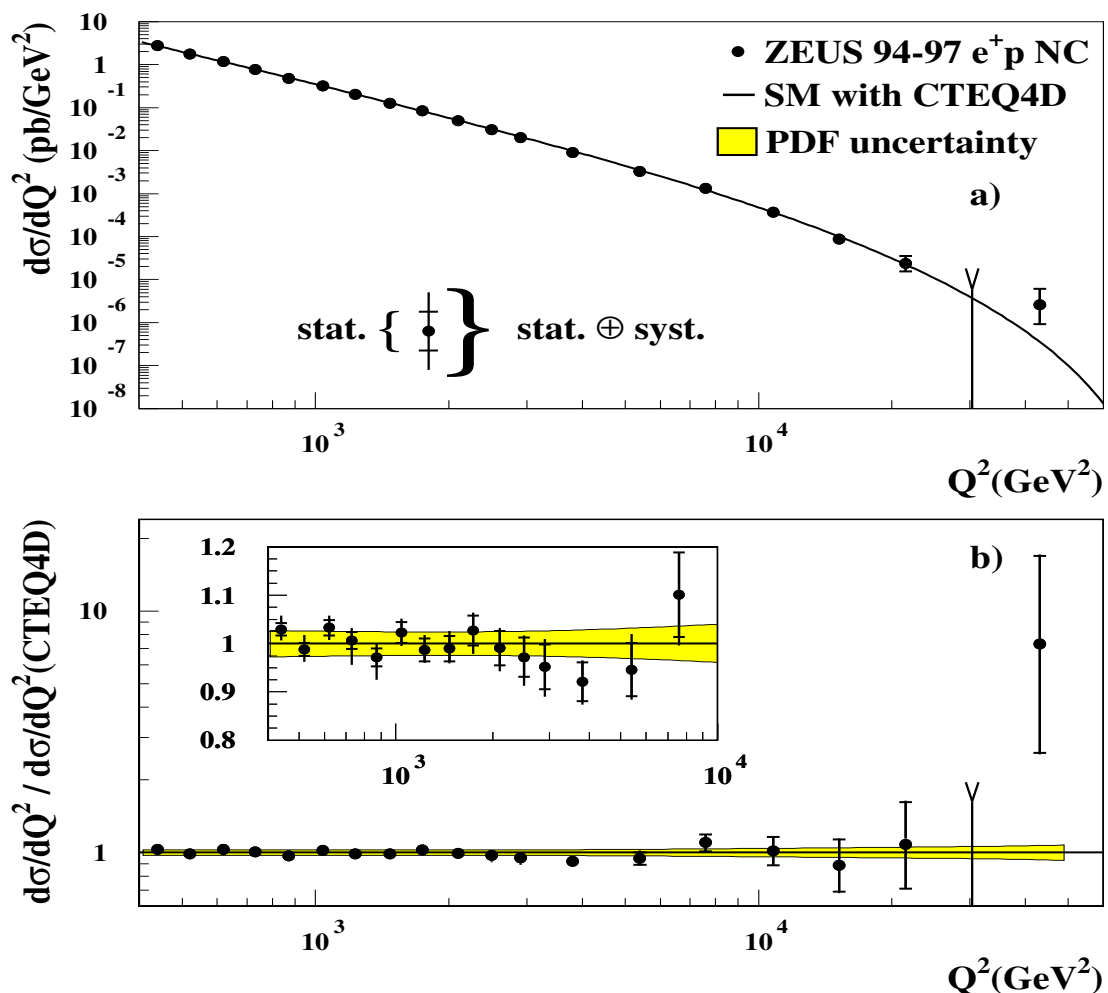
- (Differentieller) Wirkungsquerschnitt für eq –Streuung
- Im SM berechenbar
- Hängt von SM–Parametern ab: $\alpha, G_F, \sin^2(\theta_W), M_{W,Z}, \dots$ (auch m_t, m_H)

Berechnung von $\sigma(ep)$ erfordert:

- ✓ Kenntnis von $f_{q|p}(x, Q^2)$
aus Messungen bei kleineren Q^2
- ✓ QCD–Entwicklung, α_s
- ✓ SM–Parameter (von LEP, SLAC, Tevatron, ...)

Beispiel: Messung von $d\sigma_{\text{NC}}^{e^+p}/dQ^2$

ZEUS NC 1994 – 97



- Theoretische Vorhersage über ~ 7 Größenordnungen bestätigt
- Unsicherheit der Vorhersage $\mathcal{O}(5\%)$ (dominiert von Partonverteilungen)
- Abweichung bei höchsten Q^2 ?

Warum “neue Physik” ?

Das Standardmodell ist über alle Maßen erfolgreich !

Warum sind wir nicht zufrieden, sondern suchen nach Abweichungen und neuen Phänomenen ?

1) Das Parameter-Problem

- (Zu) viele freie Parameter (Massen, CKM–Matrix, ...)
- Es gibt keine Erklärung für die Parameter–Werte

2) Das Massen-Problem

- Herkunft der Massen unbekannt
- Warum nicht von $\mathcal{O}(\text{Planck–Masse}) \sim 10^{19} \text{ GeV}$?

3) Das Generationen-Problem

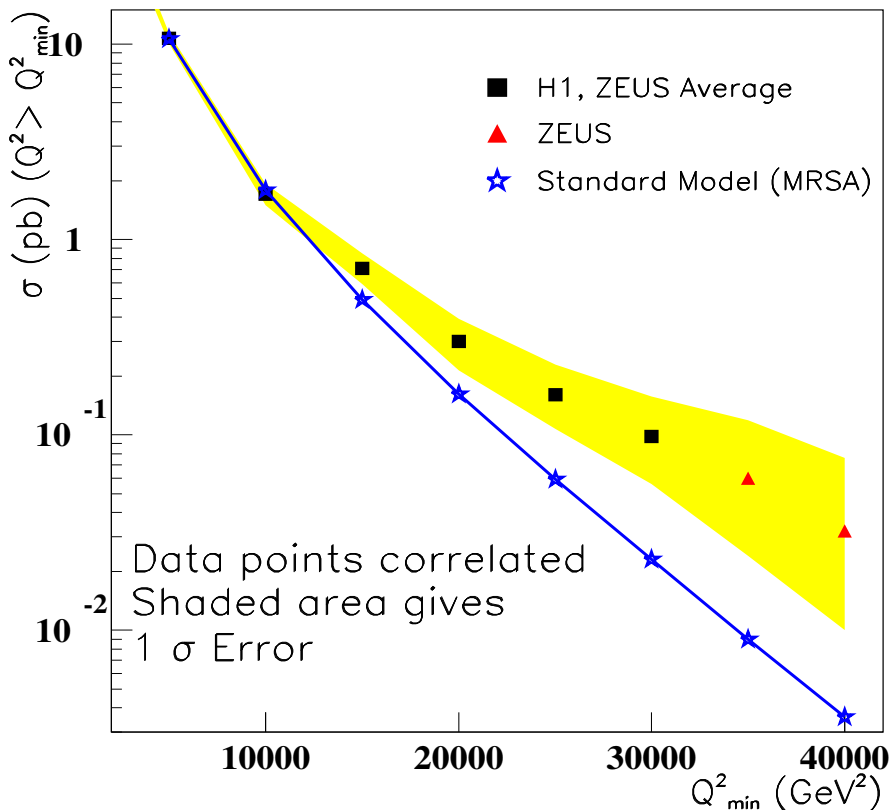
- Warum je drei Familien von Leptonen und Quarks?

4) Das Vereinigungs-Problem

- Lassen sich alle Wechselwirkungen in einer gemeinsamen Theorie beschreiben?
- Wie kommt die Gravitation ins Spiel?

Erste Anomalien bei HERA?

1994-97 Preliminary NC Cross Sections

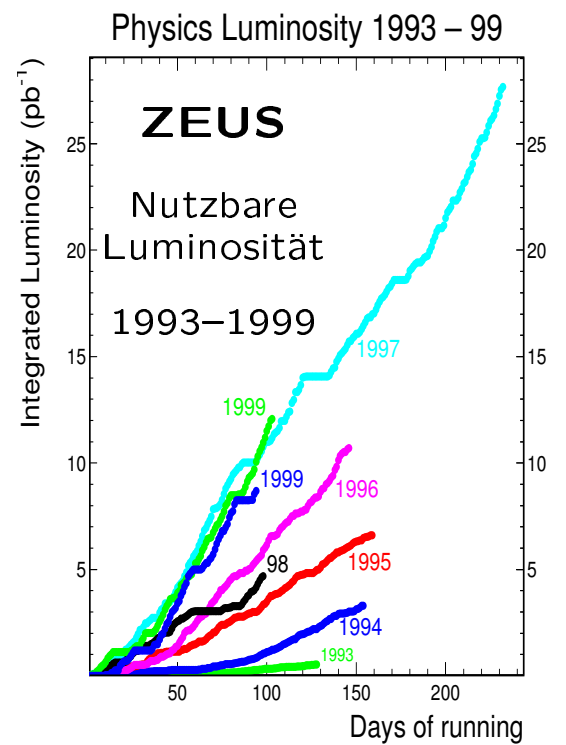
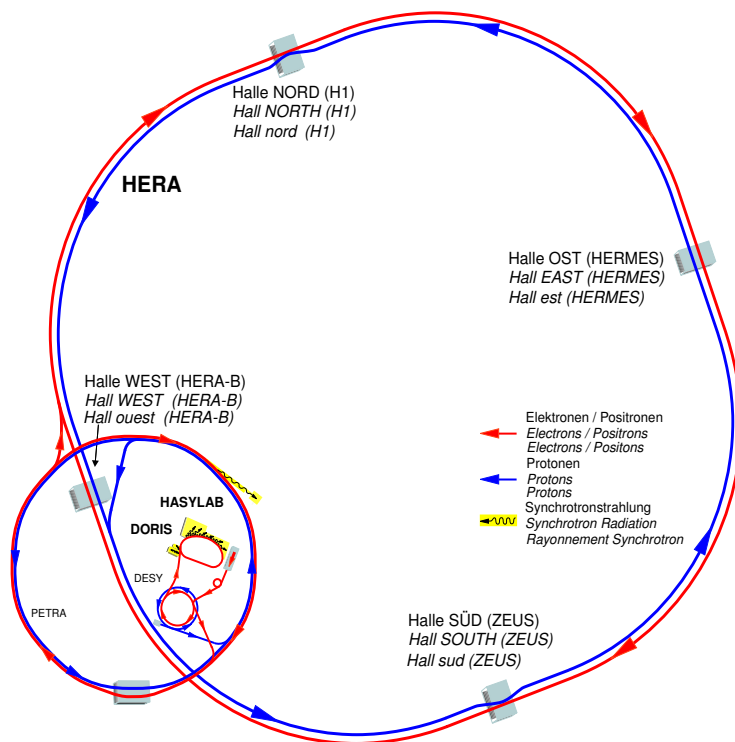


ZEUS+H1
bei LP97:
Ereignis-
Überschuß
bei
 $Q^2 \gtrsim 10^4 \text{ GeV}^2$

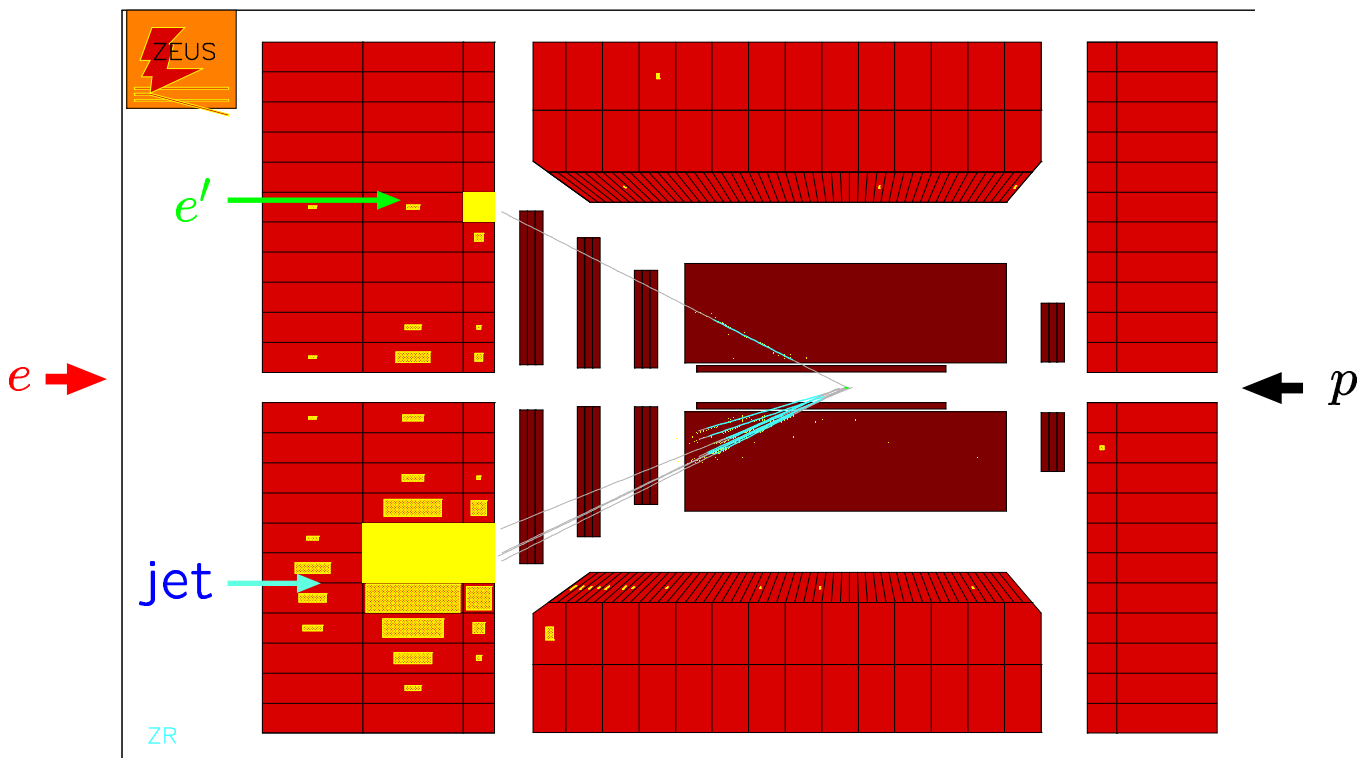
- Statistische Fluktuation oder neue Physik?
- Neue Daten bestätigen Überschuß nicht
- Intensive phänomenologische Studien
 - verschiedene spekulative Hypothesen
 - neue experimentelle Befunde

Suche nach neuer Physik
nicht beschränkt auf DIS bei hohen Q^2 !

Der ep -Beschleuniger HERA



Ein NC-Ereignis im ZEUS-Detektor



Uran-Szintillator Kalorimeter

6000 Zellen,
jede von 2 Photomultipliern ausgelesen

$$\sigma_{\theta_e} = 3 \text{ mrad}$$

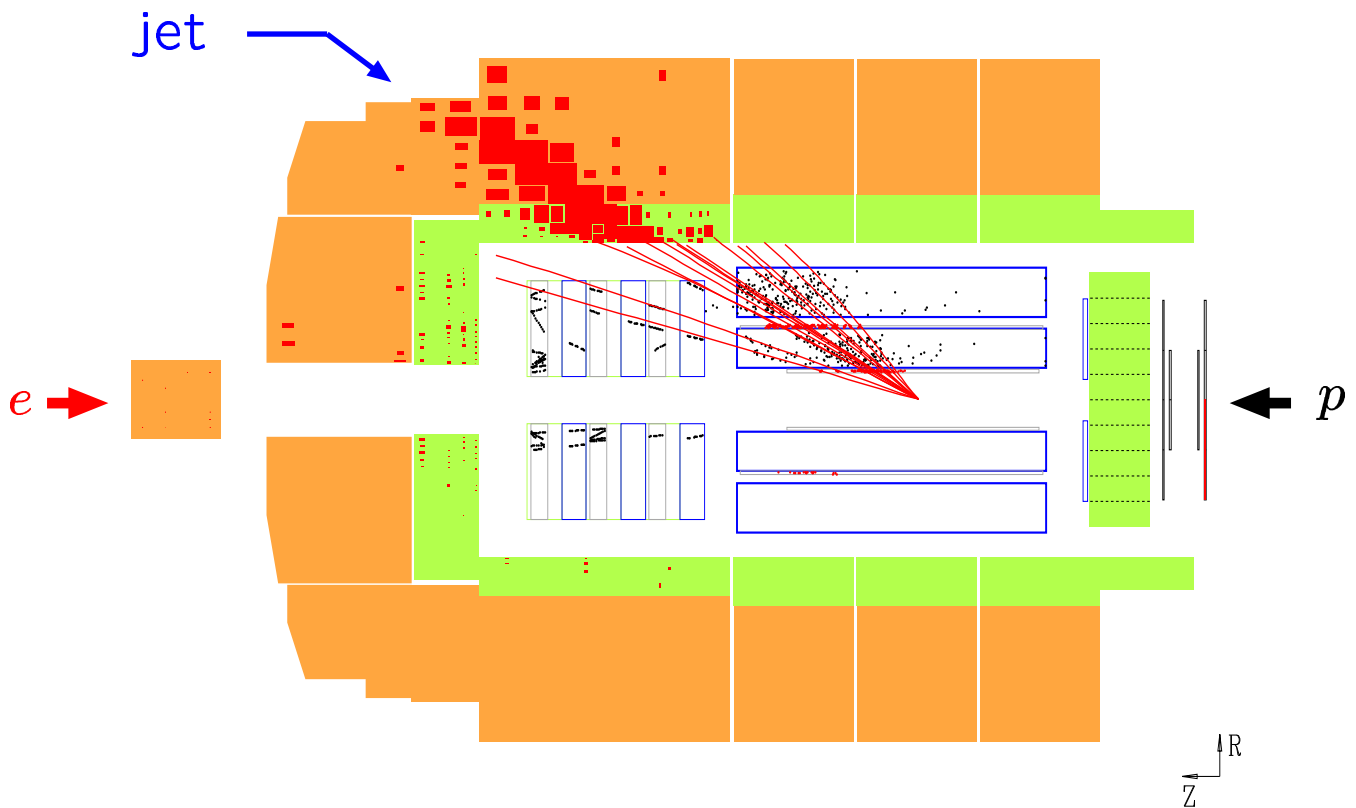
$$\sigma_E / \sqrt{E \text{ (GeV)}} (e) = 18 \%$$

$$\sigma_E / \sqrt{E \text{ (GeV)}} (\text{had}) = 35 \%$$

$$\sigma_t = 2 \text{ ns} / \sqrt{E \text{ (GeV)}}$$

$$\Delta E / E (\text{syst}) = 1 - 3 \%$$

Ein CC–Ereignis im H1–Detektor



Flüssig–Argon Kalorimeter

44000 Zellen

$$\sigma_{\theta_e} = < 3 \text{ mrad}$$

$$\sigma_E / \sqrt{E \text{ (GeV)}} (e) = 12\%$$

$$\sigma_E / \sqrt{E \text{ (GeV)}} (\text{had}) = 50\%$$

in-situ-Kalibration:

$$\Delta E / E \text{ (syst., } e) = 0.7 - 3\%$$

$$\Delta E / E \text{ (syst., had)} = 2\%$$

Neue Physik bei HERA?

Fragestellungen bei HERA:

- Gibt es Elektron–Quark–Resonanzen?
- Gibt es angeregte Fermionen?
- Anzeichen von Kontakt–Wechselwirkungen?
- Überraschende Beobachtungen?
- Anomale $WW\gamma$ –Kopplungen
- “Minimale” Supersymmetrie
- ...

Datenmengen:

Datensatz	Luminosität (pb^{-1})		Status
	ZEUS	H1	
e^+p 94–97	47.7	37.0	Analyse abgeschlossen
e^-p 98–99	16.6	~ 15	erste Ergebnisse
e^+p 99	Datennahme läuft		

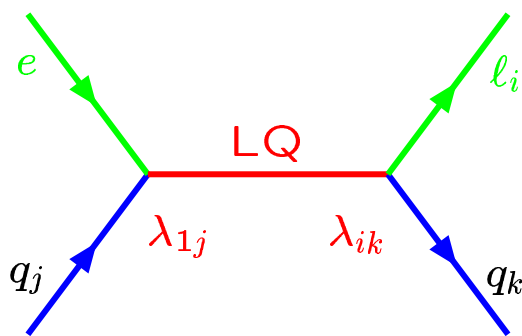
- $\sqrt{s} = 300 \text{ GeV}$ (318 GeV) für 1994–97 (1998–99)
- $M = \sqrt{xs}$ bis $\sim 200 \text{ GeV}$ untersuchbar
- Räumliche Auflösung bis hinunter zu $\sim 10^{-16} \text{ cm}$
- Wirkungsquerschnitte von $\mathcal{O}(0.1 \text{ pb})$ erfassbar (entspricht z.B. NC DIS bei $Q^2 \gtrsim 20000 \text{ GeV}^2$)

Elektron–Quark–Resonanzen

Zustand, der an Leptonen und Quarks koppelt
= Leptoquark (LQ)

LQ–Produktion

bei HERA:



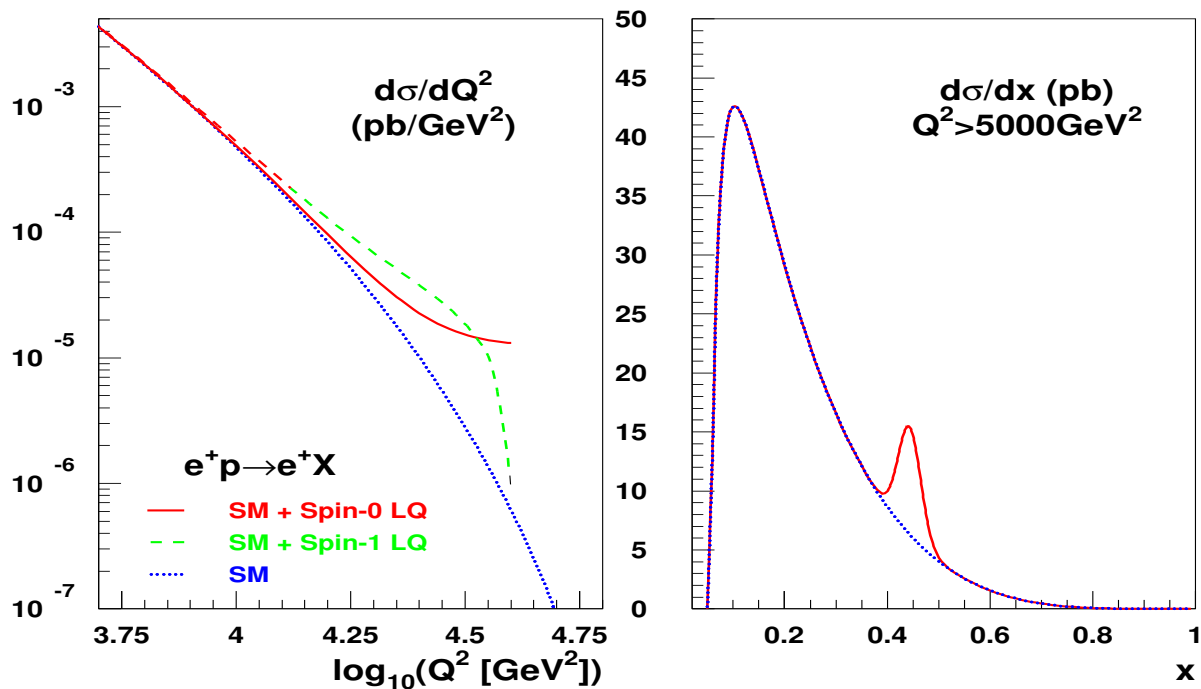
$$\sigma(eq_j \rightarrow LQ) \propto \lambda_{1j}^2$$

Signal:

- schmale Resonanz in $M = \sqrt{x \cdot s}$
- y -Verteilung:
→ Spin 0: ~ 1
→ Spin 1: $\sim (1 - y)^2$

Untergrund:

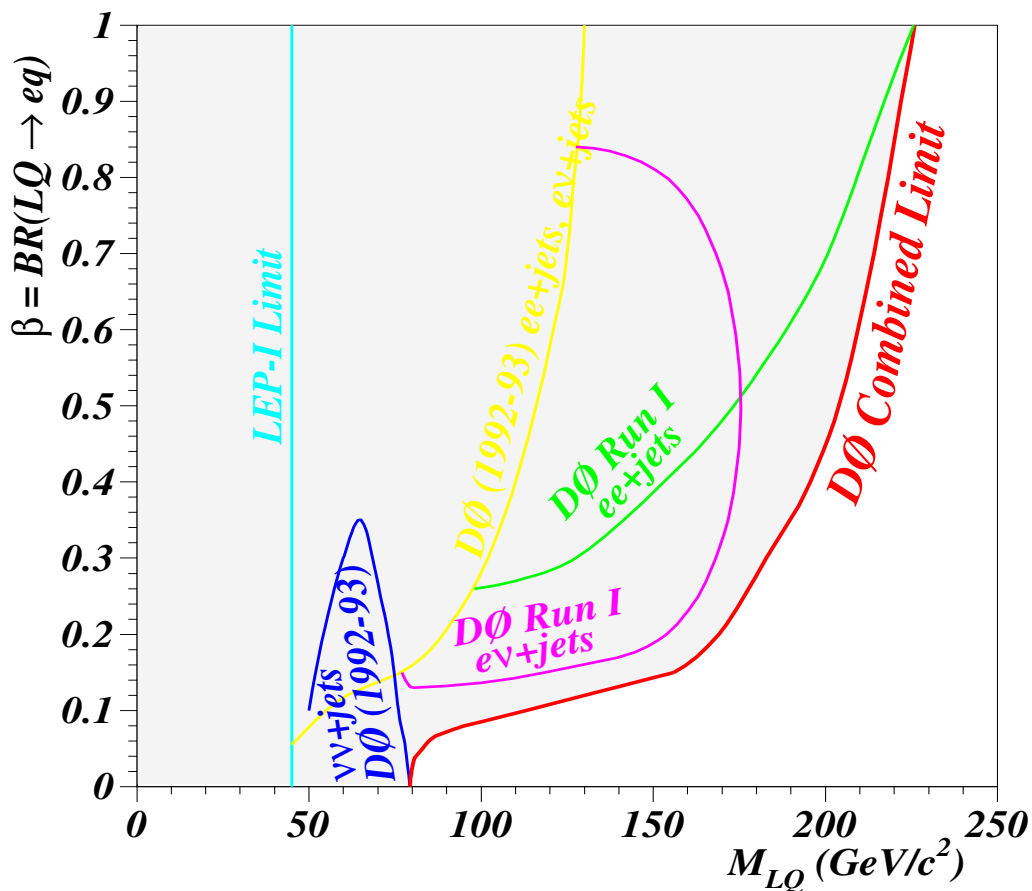
- Ereignis–Topologie ununterscheidbar von NC oder CC DIS
- NC DIS: $\sim 1/y^2$



Ausschlussgrenzen von Tevatron

$$\sigma(p\bar{p} \rightarrow LQ \bar{LQ} X) \propto \left| \begin{array}{c} g \\ g \\ g \end{array} \begin{array}{c} \bar{LQ} \\ LQ \end{array} + \begin{array}{c} \bar{q} \\ q \end{array} \begin{array}{c} g \\ g \end{array} \begin{array}{c} \bar{LQ} \\ LQ \end{array} + \dots \right|^2$$

$\sigma(p\bar{p} \rightarrow LQ \bar{LQ} X \rightarrow eeqq X) \propto \text{BR}(LQ \rightarrow eq)^2$
 $\sigma(p\bar{p} \rightarrow LQ \bar{LQ} X)$ unabhängig von λ_{1j}



Tevatron: untere LQ–Massengrenzen (95% C.L.)

LQ Spin	$\beta = 1$		$\beta = 1/2$
	DØ	CDF+DØ	DØ
$S = 0$	225 GeV	242 GeV	204 GeV
$S = 1$	298 GeV	—	270 GeV

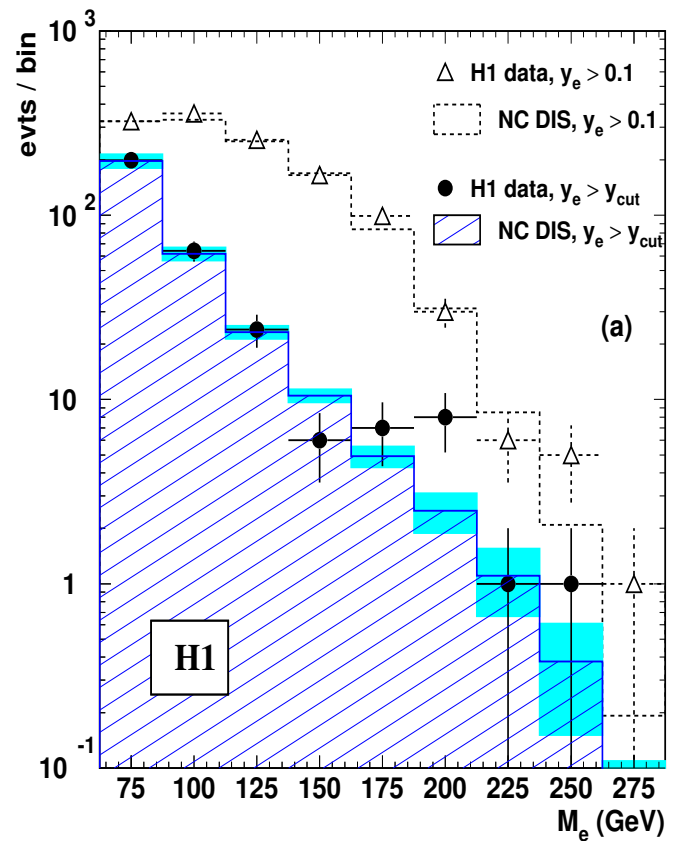
HERA $e+ \text{Jet}$ –Massenspektren

H1:

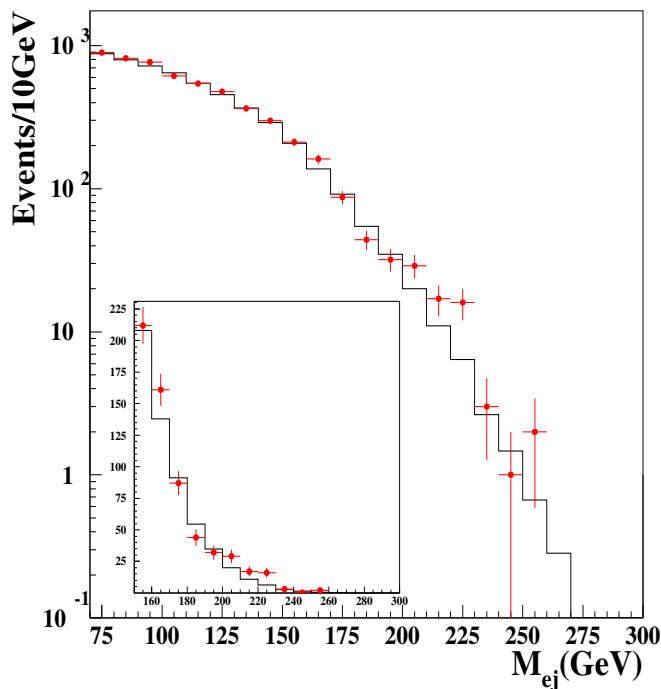
- Verteilung von $M_e = \sqrt{x_e s}$ für $y > y_{\text{cut}}$
- y_{cut} für LQ–Suche optimiert

ZEUS:

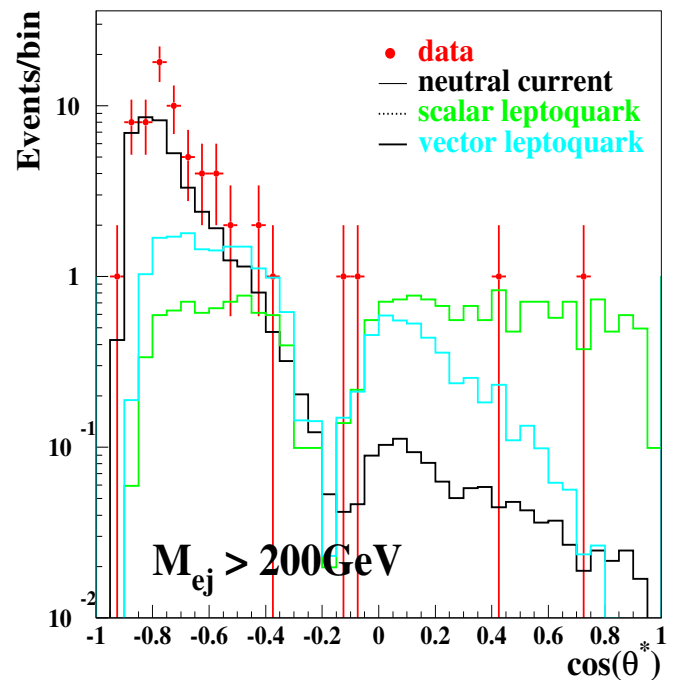
- M_{ej} ohne y –Schnitt
- y –Verteilung für $M_{ej} > 200 \text{ GeV}$



ZEUS 1994-97 Preliminary



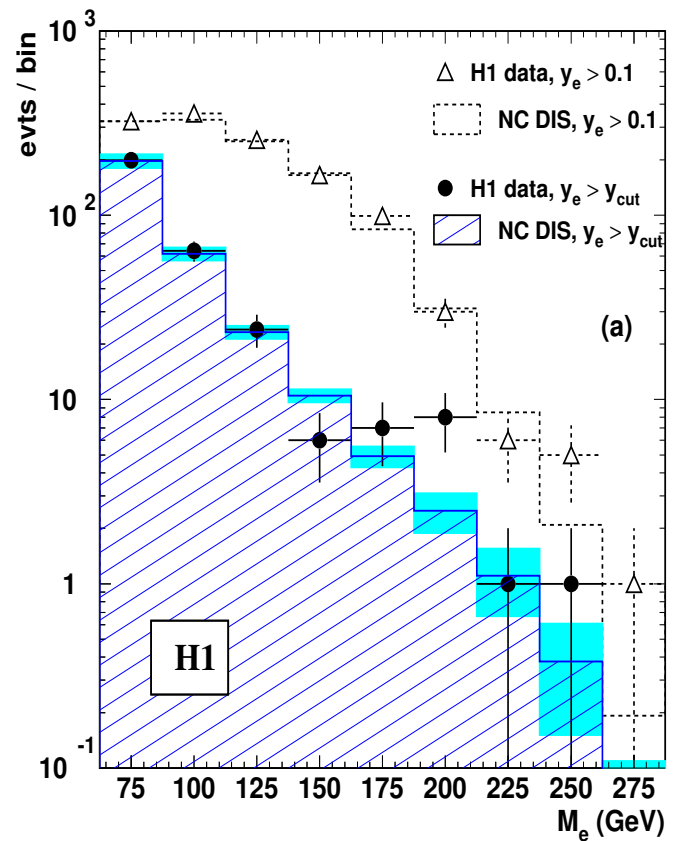
ZEUS 1994-97 Preliminary



HERA $e+ \text{Jet}$ –Massenspektren

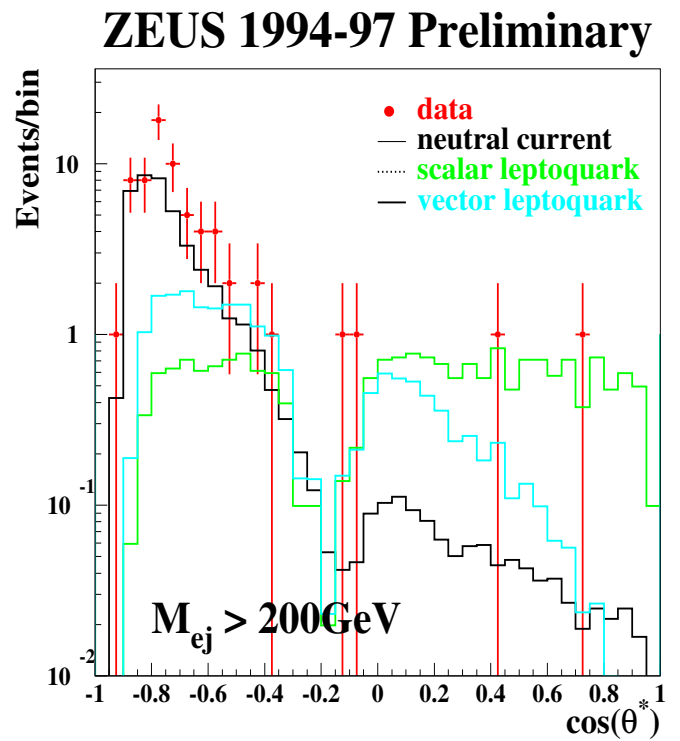
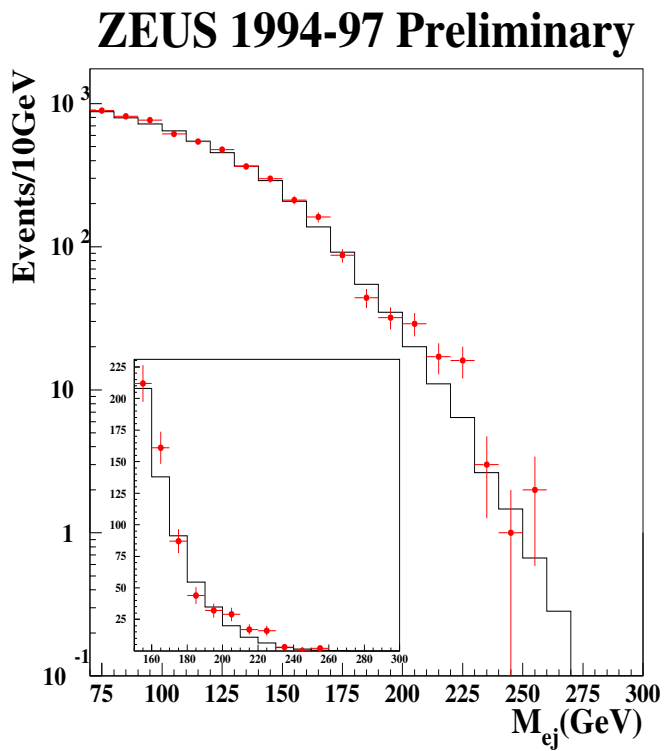
H1:

- Verteilung von $M_e = \sqrt{x_e s}$ für $y > y_{\text{cut}}$
- y_{cut} für LQ–Suche optimiert



ZEUS:

- M_{ej} ohne y -Schnitt
- y -Verteilung für $M_{ej} > 200$ GeV

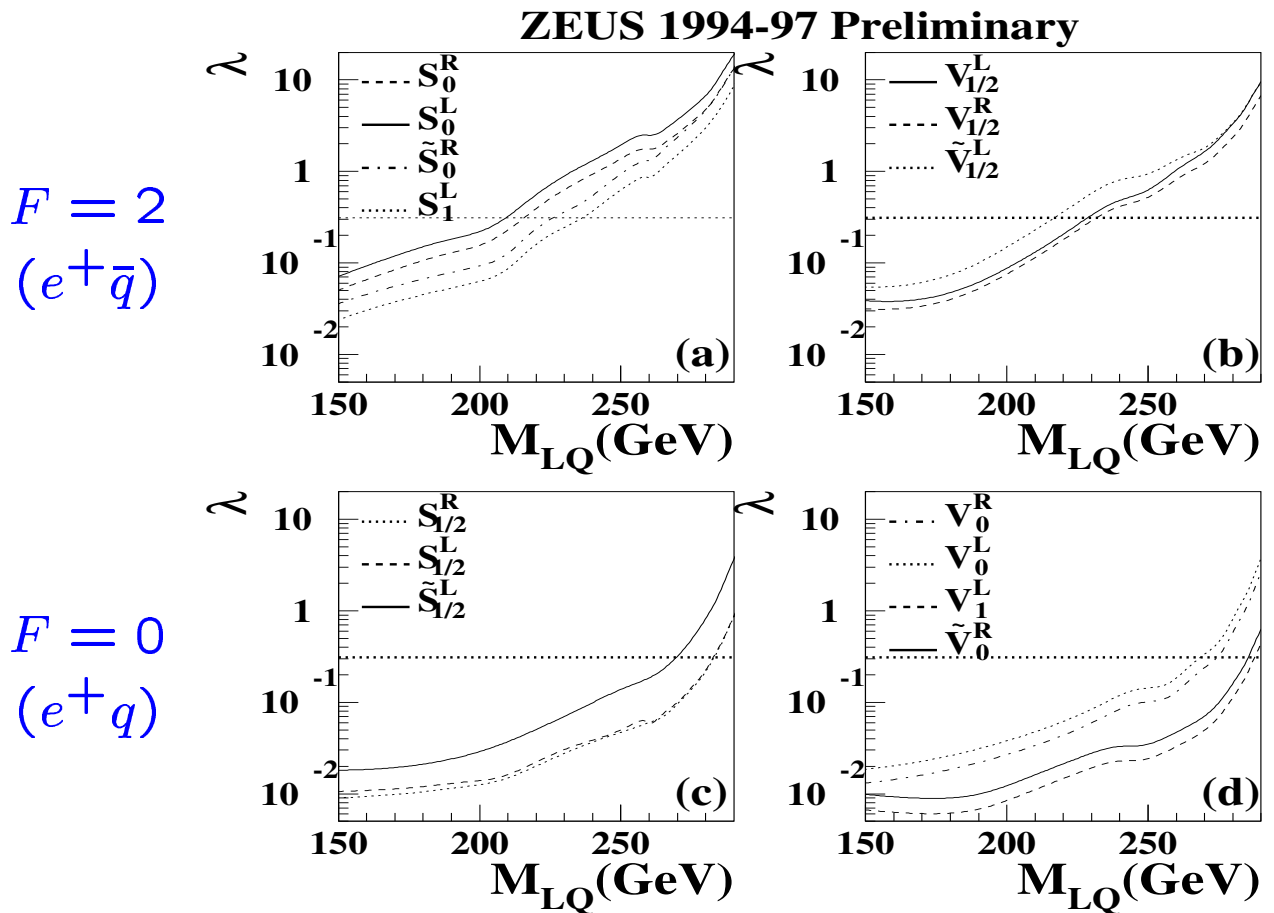


Grenzen für LQ–Kopplungen

Kein eindeutiges Signal für LQ–Produktion

⇒ Obere Grenzen für Kopplung λ_{1j} als Funktion von M_{LQ}

Annahme: LQ's respektieren SM–Symmetrien
und zerfallen ausschließlich in eq oder $\nu q'$



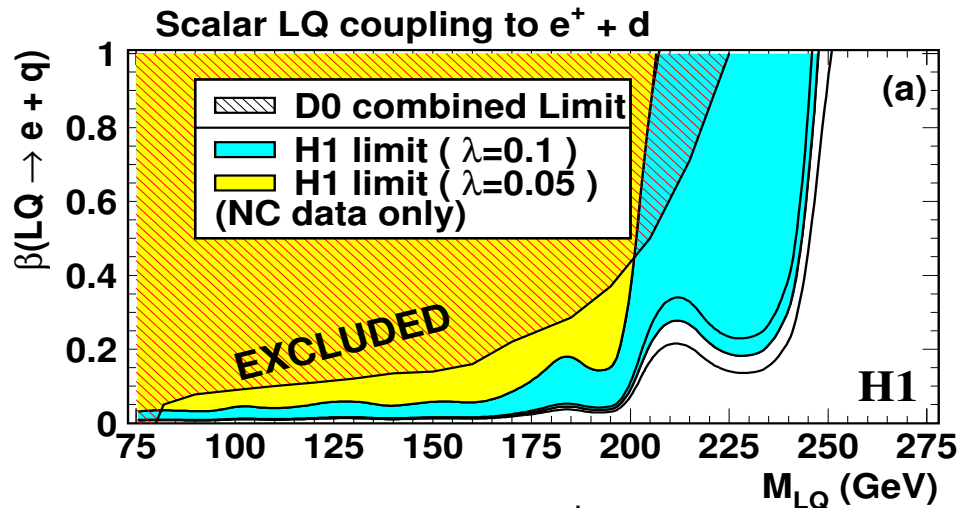
- Sehr ähnliche Grenzen von H1
- Empfindlichkeit höher für $F=0$ ($e^+ q$)
als für $F=2$ ($e^+ \bar{q}$)
- $F=0$ LQ's mit elm. Kopplungsstärke ($\lambda = \sqrt{4\pi\alpha}$)
sind für $M_{LQ} \lesssim 270$ GeV ausgeschlossen (95% C.L.)

LQ's mit alternativen Zerfallskanälen

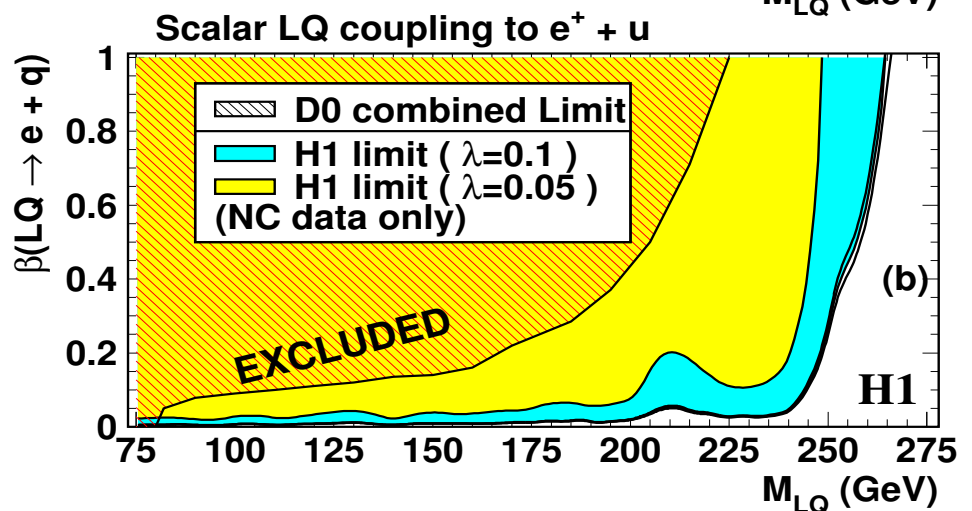
Falls LQ's auch anders als nach eq oder $\nu q'$ zerfallen,
kann $\beta_e = \text{BR}(\text{LQ} \rightarrow eq) \neq 1$ oder 0.5 sein

⇒ Betrachte Grenzen für β_e als Funktion von M_{LQ} (H1)
für festes λ_{11}

$F=0$
Kopplung
an d -Quark



$F=0$
Kopplung
an u -Quark



- HERA hat Entdeckungspotential bei hohen M_{LQ} und niedrigen β_e
- "Beule" bei $M_{\text{LQ}} \sim 210$ GeV ist Folge des Ereignisüberschusses

Verletzung von Lepton-Flavor

Suche nach Ereignissen mit τ (oder μ) im Endzustand

Interpretation als $e^+p \rightarrow LQ X \rightarrow \tau^+ q X$

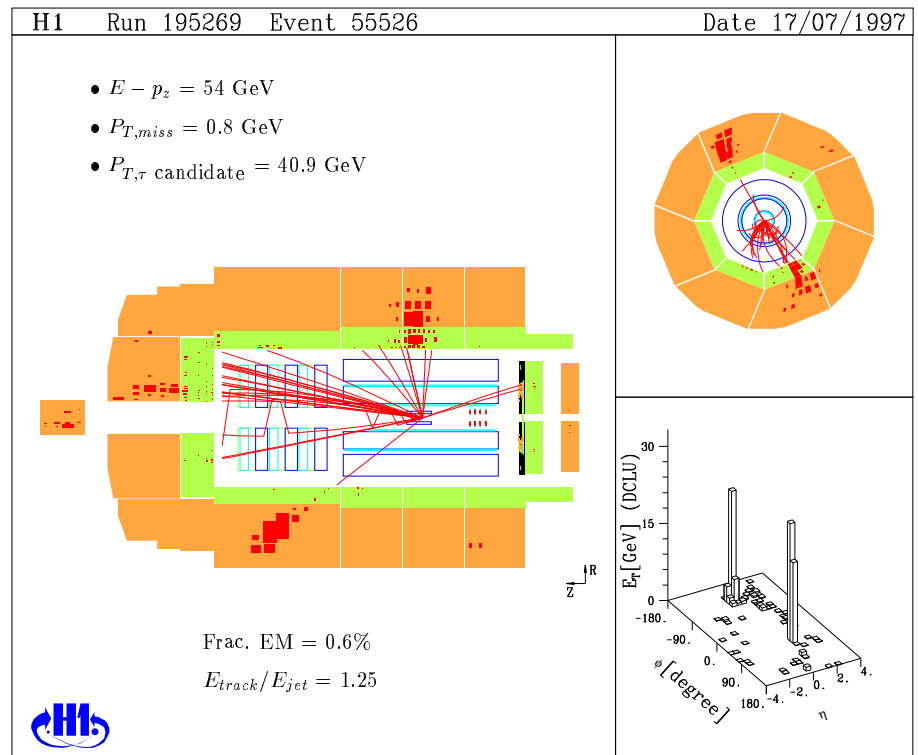
Starkes Interesse: Lepton-Flavor für ν 's nicht erhalten!

H1
Ereignis-
Kandidat

Nach
Vorselektion:

$$N_{\text{obs}} = 28$$

$$N_{\text{exp}} = 23.7 \pm 5.7$$



Ereignis-Selektion (H1):

- isolierter $\tau \rightarrow \text{Hadron}$ Kandidat
- $\cancel{P}_t > 10 \text{ GeV}$ in τ -Richtung

Effizienz:

- $\sim 10\% \dots 25\%$, steigt mit M_{LQ}

Ergebnis:

- Kein Ereignis selektiert

Ausschlussgrenzen für Lepton–Flavor verletzende LQ's

Direkte Suche nach LQ's mit Kopplungen
an $e q$ (λ_{1j}) und an τq (λ_{3k}) oder μq (λ_{2k})

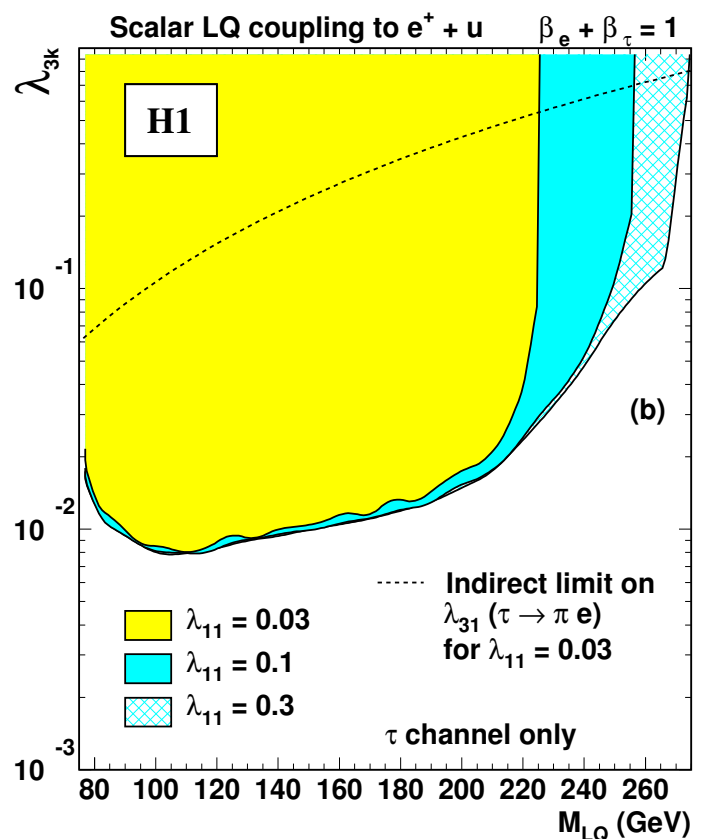
H1: $LQ \rightarrow \tau q$

Annahme: LQ koppelt
nur an $e^+ u$ und $\tau^+ q$

Suche nach Ereignissen
mit $e + \text{jet}$ oder $\tau + \text{jet}$

Ausschlussgrenzen
für λ_{3k} (95% C.L.)
als Funktion von M_{LQ}
bei festem λ_{11}

Hohe HERA–Sensitivität
im Kanal $e \rightarrow \tau$



ZEUS: $LQ \rightarrow \mu q$

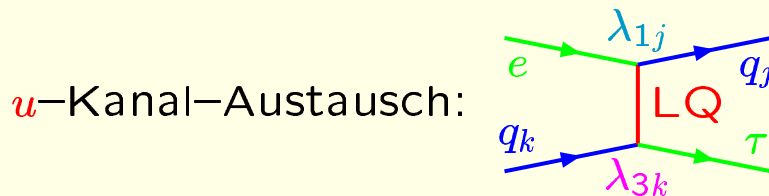
Suche nach Ereignissen mit $\mu + \text{jet}$

Ausschlussgrenzen für $\lambda_{2k} \cdot \text{BR}(LQ \rightarrow \mu q)$ (95% C.L.)

$\Rightarrow M_{LQ} > 262 - 285 \text{ GeV}$ für elm. Kopplungsstärke

Grenzen für LQ's mit $M_{LQ} > \sqrt{s_{\text{HERA}}}$

Indirekte Suche nach LQ's mit Kopplungen
an $e q$ (λ_{1j}) und an τq (λ_{3k}) oder μq (λ_{2k})



$$\sigma \propto \left(\frac{\lambda_{1j} \lambda_{3k}}{M_{LQ}^2} \right)^2$$

e $\longleftrightarrow$ τ				F = 0			
BEST EXCLUSION UPPER LIMITS ON $\frac{\lambda_{1i} \lambda_{3j}}{M_{LQ}^2}$ (in 10^{-4} GeV^{-2})							
FOR LEPTON FLAVOUR VIOLATING LEPTOQUARKS							
$q_i q_j$	$S_{1/2,L}$	$S_{1/2,R}$	$\tilde{S}_{1/2,L}$	$V_{0,L}$	$V_{0,R}$	$\tilde{V}_{0,R}$	$V_{1,L}$
1 1	$\tau \rightarrow \pi e$ 0.0032 H1: 0.046	$\tau \rightarrow \pi e$ 0.0016 H1: 0.037	$\tau \rightarrow \pi e$ 0.0032 H1: 0.062	G_F 0.002 H1: 0.015	$\tau \rightarrow \pi e$ 0.0016 H1: 0.015	$\tau \rightarrow \pi e$ 0.0016 H1: 0.013	G_F 0.002 H1: 0.0060
1 2	ZEUS: 0.12 H1: 0.047	$\tau \rightarrow K e$ 0.05 H1: 0.038	$\tau \rightarrow K e$ 0.05 H1: 0.063	$\tau \rightarrow K e$ 0.03 H1: 0.017	$\tau \rightarrow K e$ 0.03 H1: 0.017	ZEUS: 0.10 H1: 0.014	$K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ 2.5×10^{-6} H1: 0.0065
1 3	*	$B \rightarrow \tau \bar{e} X$ 0.08 H1: 0.065	$B \rightarrow \tau \bar{e} X$ 0.08 H1: 0.065	$B \rightarrow l \nu X$ 0.02 H1: 0.020	$B \rightarrow \tau \bar{e} X$ 0.04 H1: 0.020	*	$B \rightarrow l \nu X$ 0.02 H1: 0.020
2 1	ZEUS: 0.34 H1: 0.15	$\tau \rightarrow K e$ 0.05 H1: 0.095	$\tau \rightarrow K e$ 0.05 H1: 0.12	$\tau \rightarrow K e$ 0.03 H1: 0.020	$\tau \rightarrow K e$ 0.03 H1: 0.020	ZEUS: 0.10 H1: 0.023	$K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ 2.5×10^{-6} H1: 0.010
2 2	$\tau \rightarrow e \gamma$ 0.03 H1: 0.18	$\tau \rightarrow e \gamma$ 0.02 H1: 0.10	ZEUS: 0.48 H1: 0.13	ZEUS: 0.25 H1: 0.024	ZEUS: 0.25 H1: 0.024	ZEUS: 0.31 H1: 0.034	ZEUS: 0.13 H1: 0.014
2 3	*	$B \rightarrow \tau \bar{e} X$ 0.08 H1: 0.14	$B \rightarrow \tau \bar{e} X$ 0.08 H1: 0.14	$B \rightarrow l \nu X$ 0.02 H1: 0.035	$B \rightarrow \tau \bar{e} X$ 0.04 H1: 0.035	*	$B \rightarrow l \nu X$ 0.02 H1: 0.035
3 1	*	$B \rightarrow \tau \bar{e} X$ 0.08 H1: 0.16	$B \rightarrow \tau \bar{e} X$ 0.08 H1: 0.16	V_{ub} 0.002 H1: 0.022	$B \rightarrow \tau \bar{e} X$ 0.04 H1: 0.022	*	V_{ub} 0.002 H1: 0.022
3 2	*	$B \rightarrow \tau \bar{e} X$ 0.08 H1: 0.19	$B \rightarrow \tau \bar{e} X$ 0.08 H1: 0.19	$B \rightarrow l \nu X$ 0.02 H1: 0.026	$B \rightarrow \tau \bar{e} X$ 0.04 H1: 0.026	*	$B \rightarrow l \nu X$ 0.02 H1: 0.026
3 3	*	ZEUS: 0.72 H1: 0.23	ZEUS: 0.72 H1: 0.23	$\tau \rightarrow e \gamma$ $0.51 Z$ H1: 0.045	$\tau \rightarrow e \gamma$ $0.51 Z$ H1: 0.045	*	ZEUS: 0.38 H1: 0.045

Obere Grenzen

für

$$\frac{\lambda_{1j} \lambda_{3k}}{M_{LQ}^2}$$

($F=0$)

Gelb:

Weltbeste

Grenzen von H1

Weiß:

... von seltenen
Zerfällen

R_P –verletzende Squarks

Supersymmetrie (SUSY):

Jedem Fermion des SM wird ein bosonischer Partner zugeordnet, und umgekehrt.

Beispiele:

SM	SUSY
Quark q	Squark $\tilde{q}$
Lepton ℓ	Slepton $\tilde{\ell}$
Photon γ	Photino $\tilde{\gamma}$
Higgs H	5 Higgsinos ($h^0, H^0, A^0, H^\pm$)

Neutrale Eichbosinos und Higgsinos $\rightarrow$ Neutralinos (χ^0)

Geladene Eichbosinos und Higgsinos $\rightarrow$ Charginos ($\chi^\pm$)

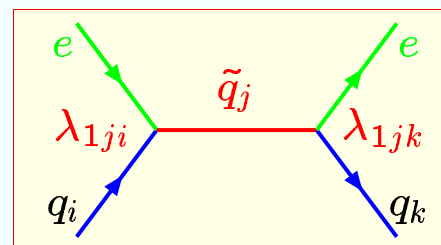
Die R –Parität:

$$R_P = (-1)^{3B+L+2S} = \begin{cases} +1 & \text{für SM} \\ -1 & \text{für SUSY} \end{cases}$$

Wenn R_P nicht erhalten ist ...

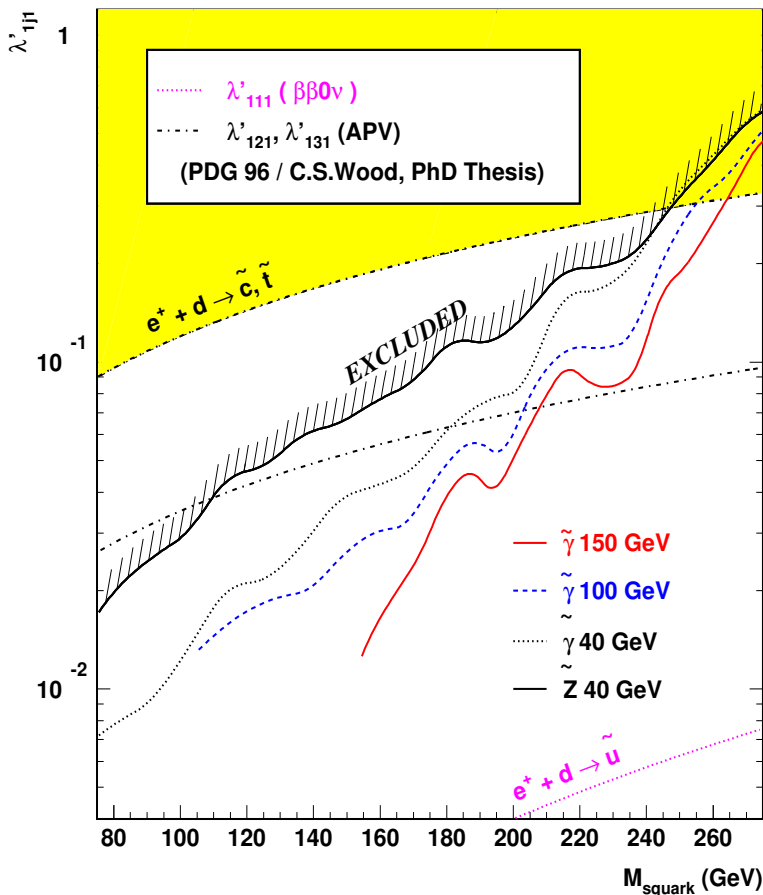
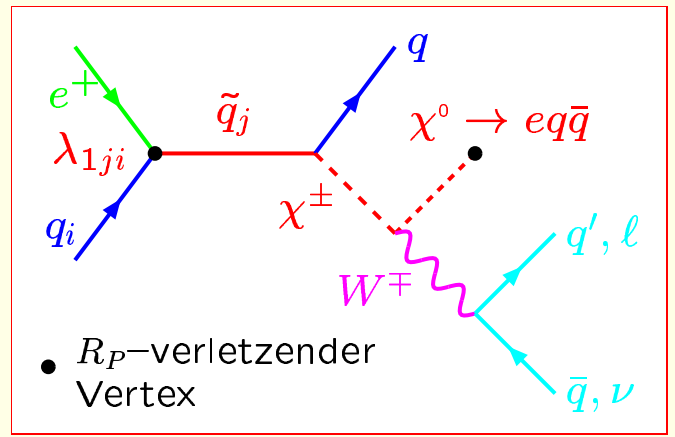
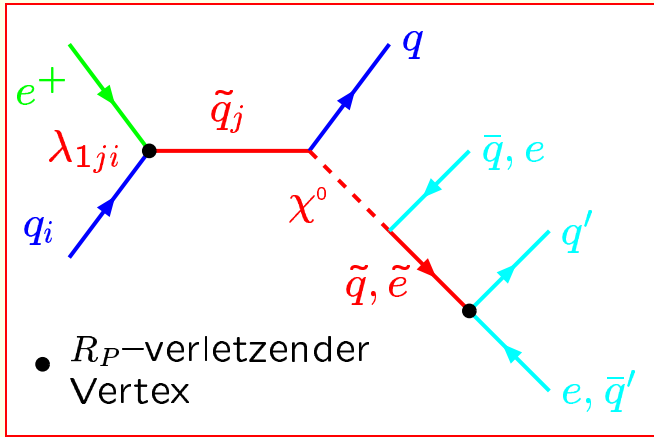
- Können SUSY–Teilchen einzeln produziert werden

- Können sich Squarks ($\tilde{q}$) wie LQ's mit alternativen Zerfallskanälen verhalten (d.h. $\text{BR}(\text{LQ} \rightarrow eq) < 1$)



Suche nach R_P -verletzenden Squarks

Alternative Zerfälle von R_P -verletzenden $\tilde{q}$'s (Beispiele):



H1:

- Suche nach $e + n \text{ Jets}$;
e kann e^- sein
- Kein Überschuss solcher Ereignisse
- Annahme:
 $\tilde{q}$ koppelt an $q_1 = u, d$
 $\Rightarrow$ Ausschlussgrenzen für λ_{1j1}
- Neu erschlossener Bereich für $\tilde{q}_{2,3}$

ZEUS: Ähnliche Ergebnisse, kein Hinweis auf $\tilde{q}$

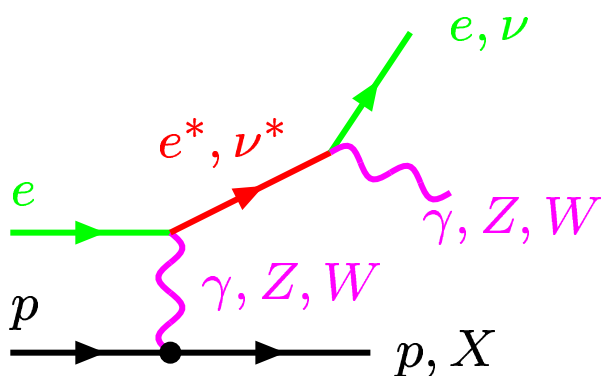
Angeregte Fermionen

Fermion-Substruktur

$\Leftrightarrow$ schwere angeregte Fermion-Zustände (f^*), koppeln an Grundzustands-Fermionen und Eichbosonen

e^*, ν^* -Produktion

bei HERA:



Modell ($S_{f^*} = 1/2$):

(Hagiwara, Komamiya, Zeppenfeld)

$$\mathcal{L}_{ff^*} = \frac{1}{\Lambda} \cdot f_R^* \left[f(gV)_{SU(2)_L} + f'(gV)_{U(1)_Y} + f_s(gV)_{SU(3)_C} \right] f_L$$

Annahme bei HERA:

$$|f| = |f'| \text{ und } f_s = 0$$

f^* -Zerfall

exp. Signaturen

$$e^* \rightarrow e + \gamma$$

$$e + \gamma$$

$$e^* \rightarrow e + Z$$

$$e + 2, 3e, e + \cancel{P}_t, \dots$$

$$e^* \rightarrow \nu + W$$

$$\cancel{P}_t + 2\text{Jets}, e + \cancel{P}_t, \dots$$

$$\nu^* \rightarrow \nu + \gamma$$

$$\gamma + \cancel{P}_t$$

$$\nu^* \rightarrow e + W$$

$$e + 2\text{Jets}, 2e + \cancel{P}_t, \dots$$

$$\nu^* \rightarrow \nu + Z$$

$$\cancel{P}_t + 2\text{Jets}, 2e + \cancel{P}_t, \dots$$

$$q^* \rightarrow q + \gamma$$

$$\gamma + \text{Jet}$$

$$q^* \rightarrow q' + W$$

$$e + \cancel{P}_t + \text{Jet}, \dots$$

$$\cancel{P}_t =$$

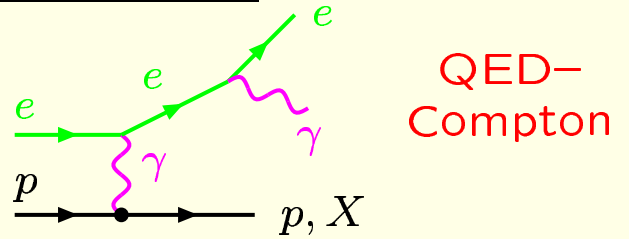
fehlender
Trans-
versal-
impuls

Beispiel: Suche nach $e^* \rightarrow e\gamma$

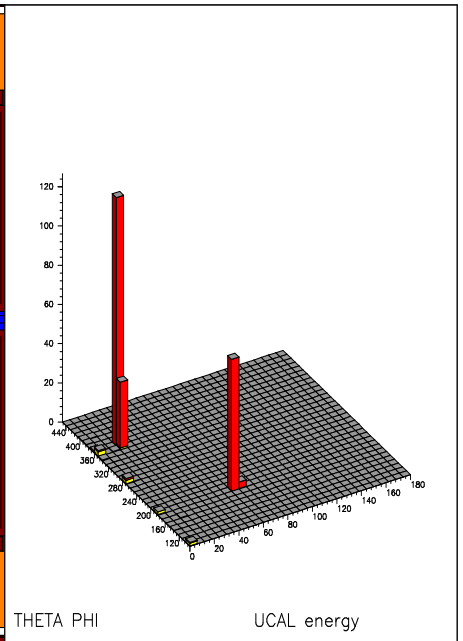
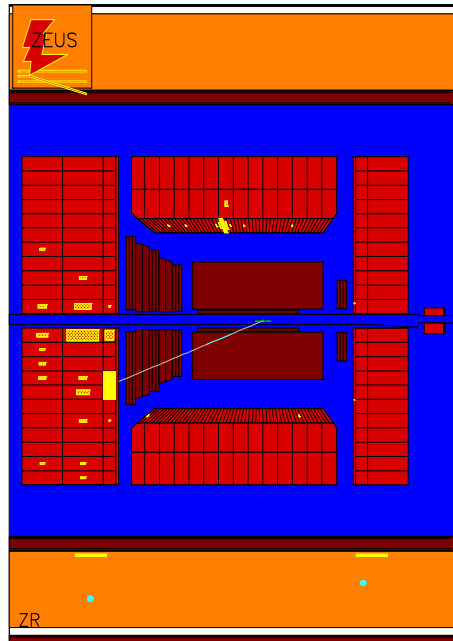
Experimentelle Signatur:

- 2 isolierte elm. Cluster
- wenig hadronisches p_t
- kein $\cancel{p}_t$

Untergrund:



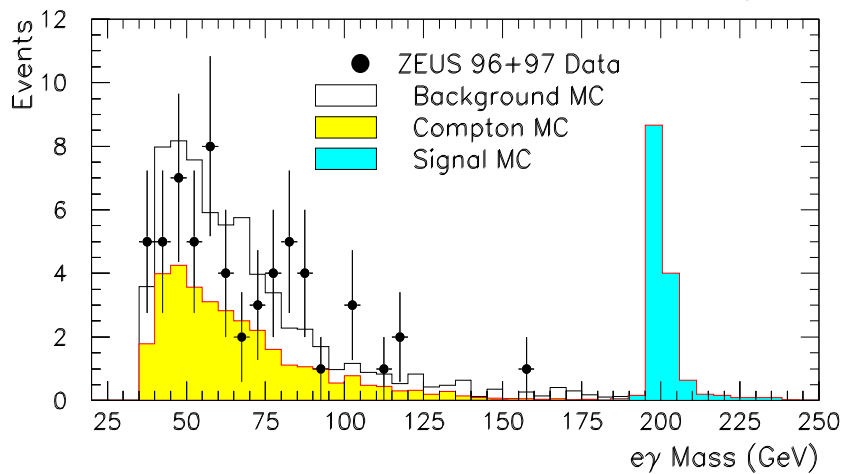
ZEUS
 e^* -Kandidat
 mit höchster
 $e\gamma$ -Masse
 ($M_{e\gamma} = 159 \text{ GeV}$)



$M_{e\gamma}$ -Spektrum

- Daten
- SM-Untergrund
- QED-Compton
- e^* (Simulation)

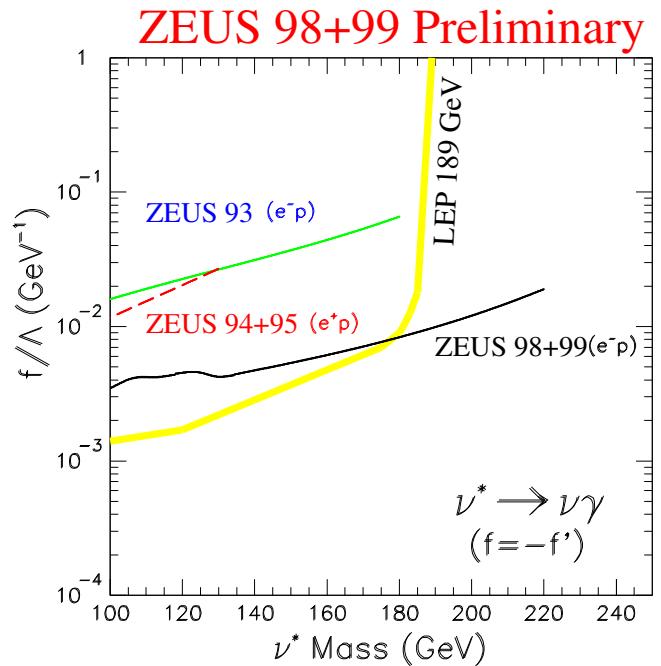
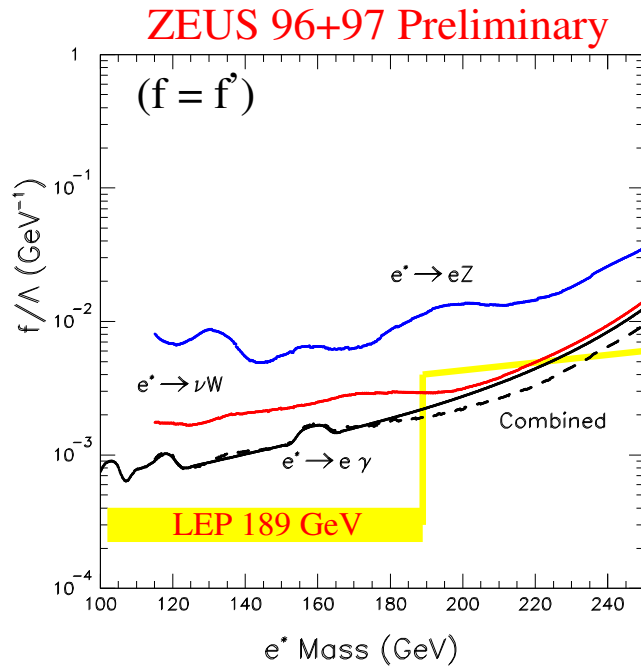
ZEUS 96+97 Preliminary



e^* – und ν^* –Ausschlussgrenzen

Kein Anzeichen für f^* –Produktion bei HERA gefunden

⇒ Obere Ausschlussgrenzen für $|f|/\Lambda$

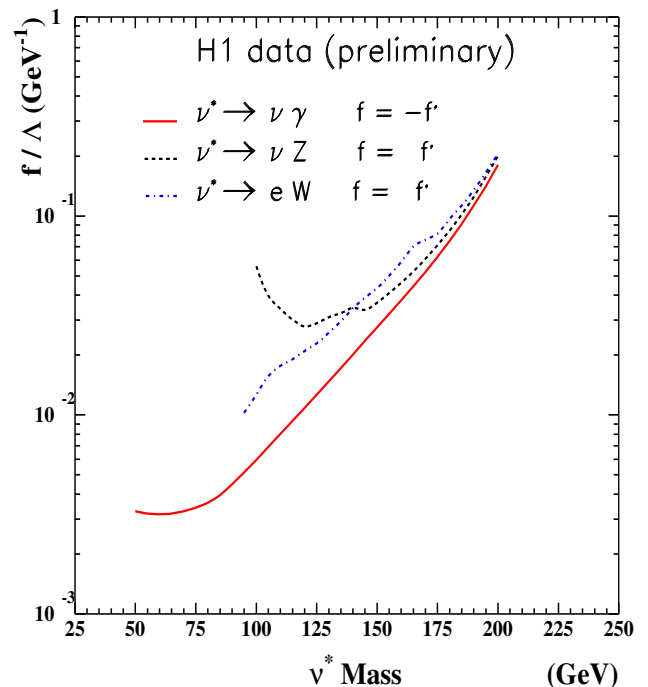


e^* –Produktion:

- Ähnliche H1–Ergebnisse
- Sensitivität wie bei LEP

ν^* –Produktion:

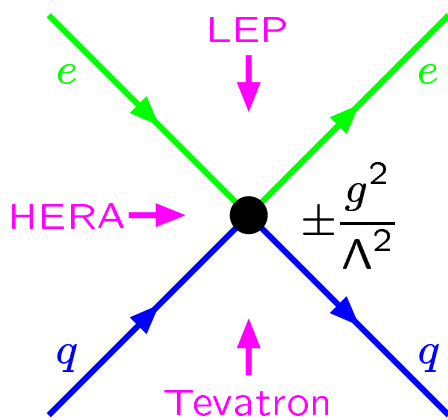
- $\sigma(e^-p \rightarrow \nu^* X) \gg \sigma(e^+p \rightarrow \bar{\nu}^* X)$
- Verschiedene Szenarien
($f=f'$, $f=-f'$)
- HERA konkurrenzlos bei
 $M_{\nu^*} \gtrsim 200$ GeV



Kontakt–Wechselwirkungen (KW)

KW: effektive phänomenologische Beschreibung
 von Prozessen mit **Massenskalen** $\gg \sqrt{s_{\text{HERA}}}$
 Historisches Äquivalent: 4–Fermion–Wechselwirkung

(eeqq)–KW:



Beispiele für KW:

- Austausch schwerer (Eich)bosonen
- Leptoquarks (*s/u*–Kanal)
- Wechselwirkung zusammengesetzter Elektronen und Quarks
- ...

Effektive Lagrange–Dichte:

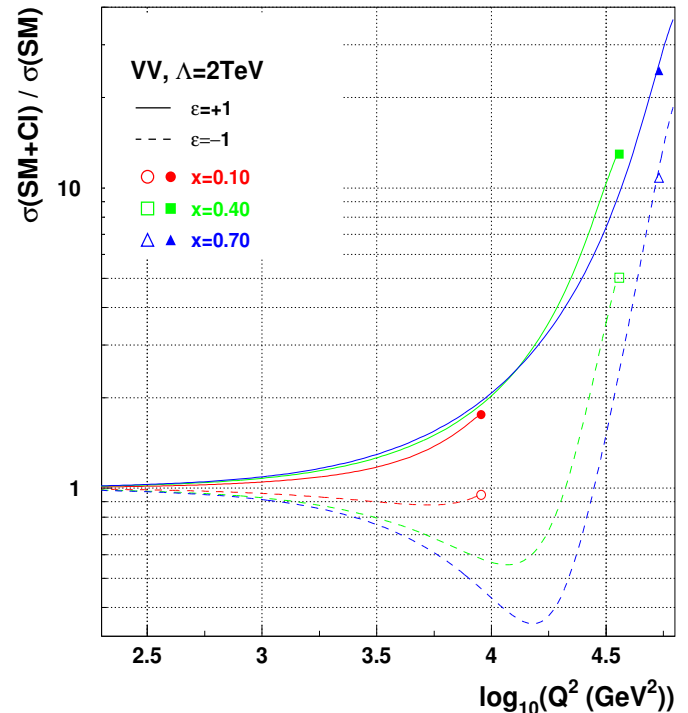
$$\mathcal{L} = \frac{g^2}{\Lambda^2} \cdot \sum_{\substack{a,b=L,R \\ q=u,d}} \eta_{ab}^q (\bar{e}_a \gamma^\mu e_a) (\bar{q}_b \gamma_\mu q_b)$$

- Interferenz mit SM (konstruktiv oder destruktiv)
- Linearkombinationen der $\eta_{ab}^q \Rightarrow$ “KW–Szenarien”
- $\eta_{ab}^q = \pm 1, 0$; g^2/Λ bestimmt KW–Stärke

Suche nach KW–Signaturen

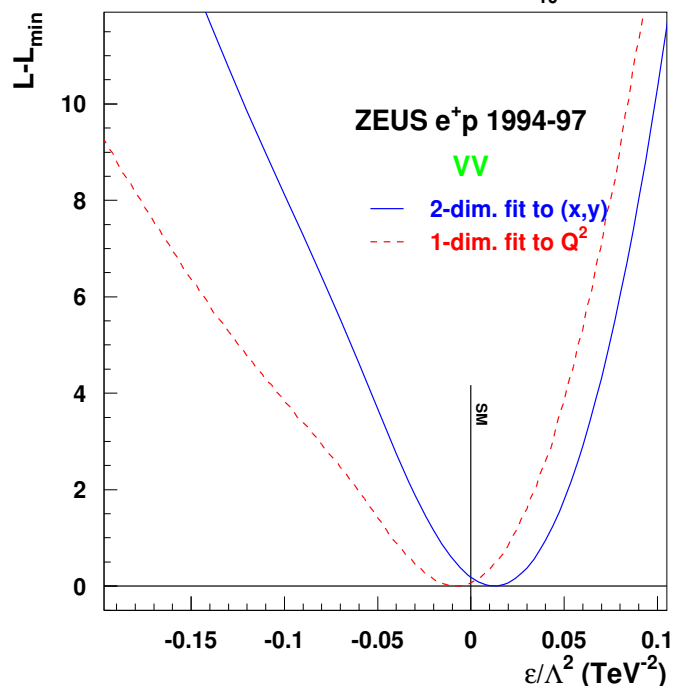
Modifikation von: $d\sigma_{\text{NC}}/dQ^2$ durch KW:

- KW–SM–Interferenz ($\propto \pm Q^2/\Lambda^2$)
- reiner KW–Beitrag ($\propto Q^4/\Lambda^4$)
- WQ steigt bei hohen Q^2
- KW–Nachweis nicht auf Ereignisbasis



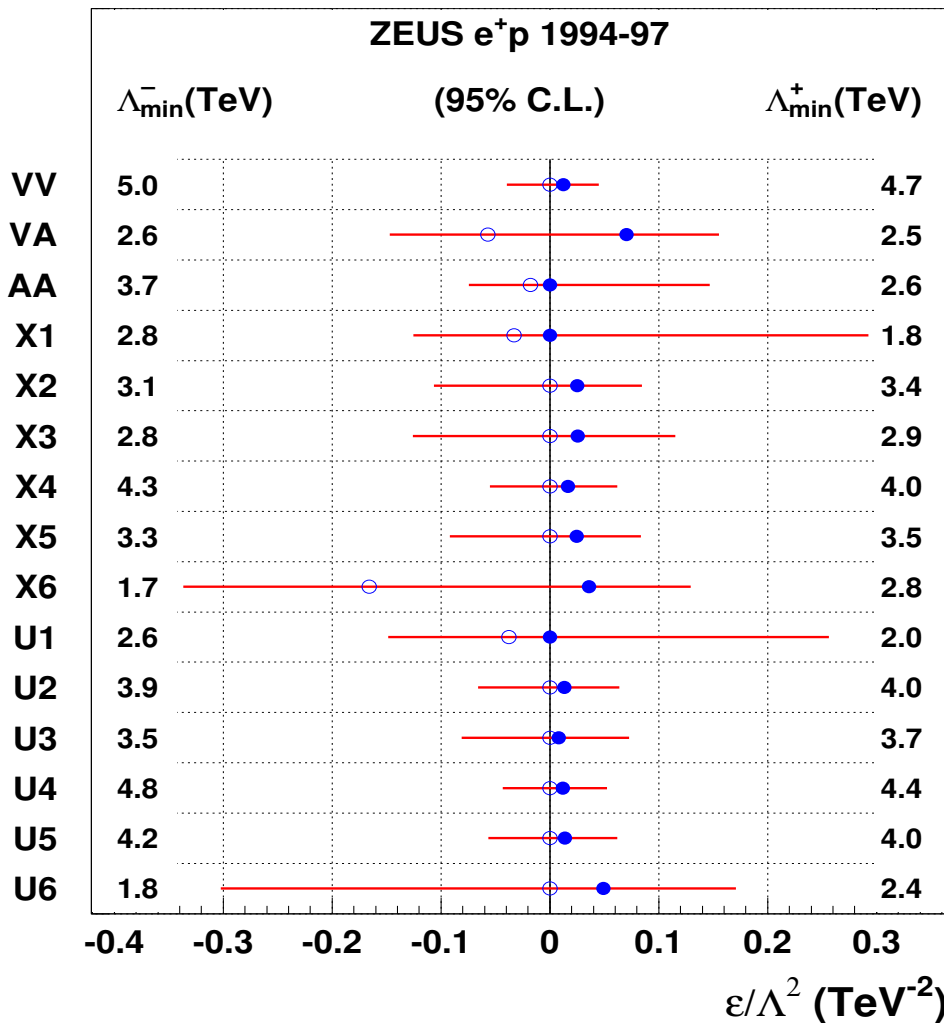
ZEUS KW–Analyse:

- Simulation von KW: MC–Umgewichtung
- Bestimmung von **Log–Likelihood** aus Vergleich von gemessenen und MC–Verteilungen von (x, y) bzw. Q^2



H1: χ^2 –Fit an gemessenen Wirkungsquerschnitt $d\sigma/dQ^2$
Ausschlussgrenzen–Bestimmung nach anderem Verfahren

Grenzen auf KW–Massenskalen

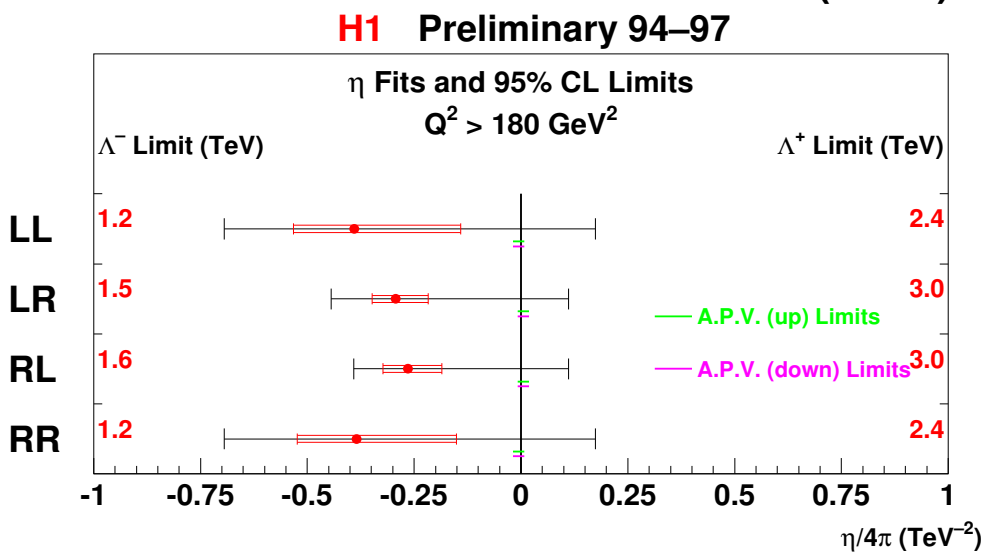


Kein Hinweis
auf
KW–Signal



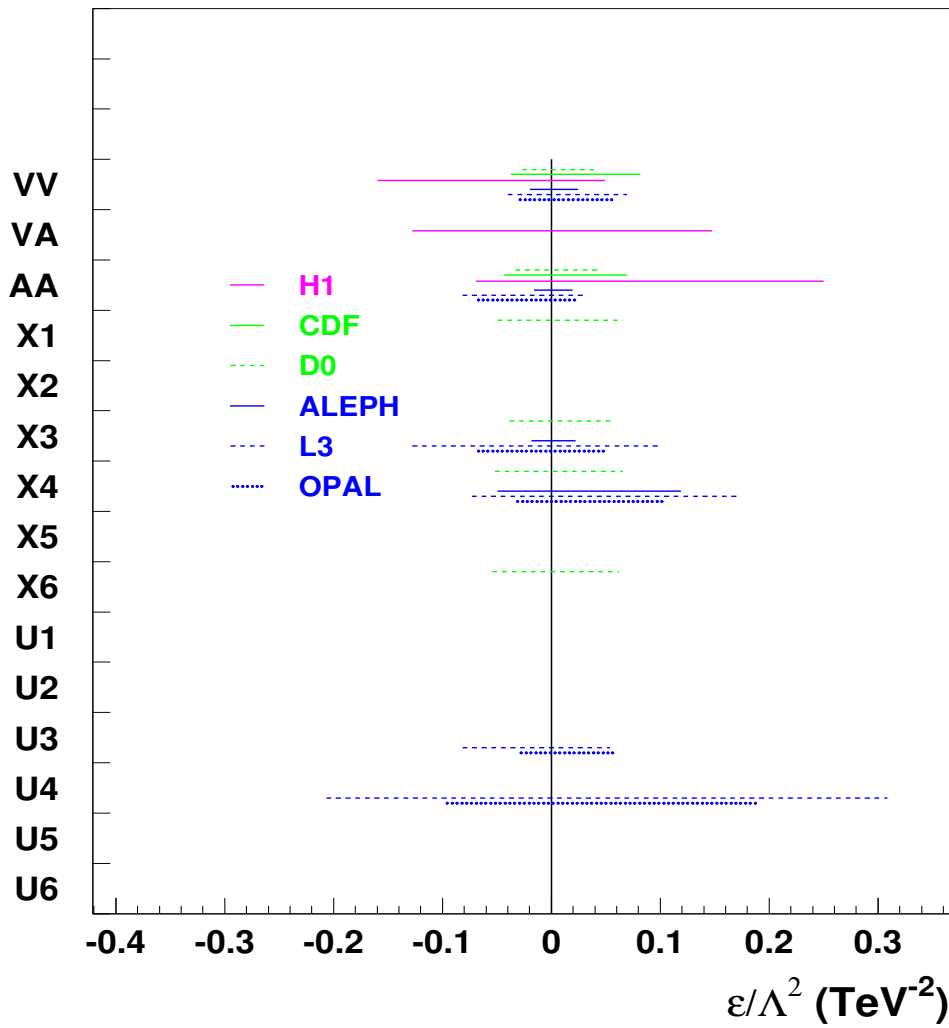
Berechnung
von Grenzen

● Bester Fit
— Grenzen
(95% C.L.)



● Bester Fit
— Grenzen
(95% C.L.)
= 1 σ –Grenzen

A.P.V.:
Grenzen von
Experimenten
zur Paritäts-
verletzung
in Atomen



KW und Leptoquarks

LQ's mit $M_{LQ} \gg \sqrt{s_{\text{HERA}}} \Rightarrow (eeqq) - \text{KW}$

$\Rightarrow$ LQ-Kopplungs/Massengrenzen aus KW-Analyse (H1):

$$\frac{g^2}{\Lambda^2} \cdot \eta_{ab}^q = \frac{\lambda_{11}^2}{M_{LQ}^2} \cdot A_{ab}^q \Rightarrow \text{untere Grenze von } \frac{M_{LQ}}{\lambda}$$

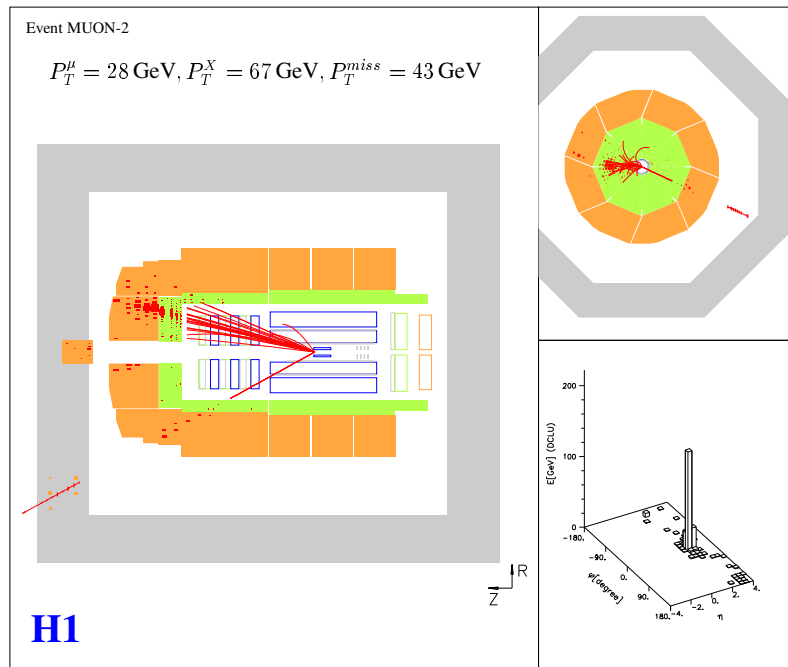
LQ	F	Kopplung an u	Kopplung an d	$(M_{LQ}/\lambda)_{\text{lim}}$ (GeV)
S_0^L	2	$A_{LL} = +1/2$	—	598
S_0^R	2	$A_{RR} = +1/2$	—	554
$\tilde{S}_0^R$	2	—	$A_{RR} = +1/2$	202
$S_{1/2}^L$	0	$A_{LR} = -1/2$	—	294
$S_{1/2}^R$	0	$A_{RL} = -1/2$	$A_{RL} = -1/2$	308
$\tilde{S}_{1/2}^L$	0	—	$A_{LR} = -1/2$	416
S_1^L	2	$A_{LL} = +1/2$	$A_{LL} = +1$	385
V_0^L	0	—	$A_{LL} = -1$	655
V_0^R	0	—	$A_{RR} = -1$	547
$\tilde{V}_0^R$	0	$A_{RR} = -1$	—	299
$V_{1/2}^L$	2	—	$A_{LR} = +1$	345
$V_{1/2}^R$	2	$A_{RL} = +1$	$A_{RL} = +1$	859
$\tilde{V}_{1/2}^L$	2	$A_{LR} = +1$	—	952
V_1^L	0	$A_{LL} = -2$	$A_{LL} = -1$	400

Diese Grenzen sind nicht anwendbar für $M_{LQ} \lesssim \sqrt{s_{\text{HERA}}}$
und sind fragwürdig für $\lambda_{11} \gg 1$.

A.P.V.-Messungen liefern stärkere Grenzen.

Das Unerwartete: Die “Myon–Ereignisse” von H1

$$e^+p \rightarrow \mu^+ X$$



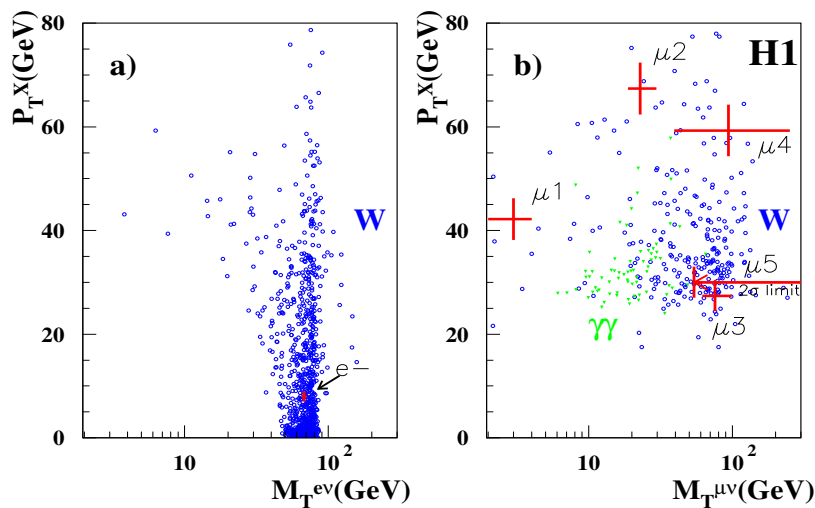
Signaturen:

(e^+p -Daten)

- Isoliertes μ/e^- mit **hohem** p_t
- Großes P_t
- Hadr. System mit hohem p_t

SM-Prozesse:

- $e^+p \rightarrow W X \rightarrow \ell \nu_\ell X$
- $e^+p \rightarrow \ell^+ \ell^- X$



Ereigniszahlen:

	exp.	erw.
e^-	1	2.4 ± 0.5
$\mu^\pm$	5	0.8 ± 0.2

ZEUS: Kein Überschuss beobachtet
H1+ZEUS: Keine Anomalie in e^-p -Daten
Theorie: Keine naheliegende Erklärung

Zusammenfassung und Ausblick

HERA erschließt Lepton–Nukleon–Streuung in einem neuen kinematischen Bereich.

Die Daten der Jahre 1994–99 erlauben präzise Tests hypothetischer Szenarien “neuer Physik”.

Bisher wurden bei HERA keine zweifelsfreien Abweichungen vom SM gefunden.

Einige Effekte bedürfen jedoch des genaueren Studiums in Daten mit hoher Statistik.

Ab 2001: signifikant erhöhte Luminosität und longitudinale Elektron–Polarisation bei HERA.

Zukunftshoffnung:

Die Daten der Beschleuniger
HERA, LEP, Tevatron, LHC, NLC, ... sowie von
Experimenten ohne Beschleuniger
ergeben ein konsistentes Bild und führen zu
einem tieferen Verständnis der fundamentalen
Teilchen und ihrer Wechselwirkungen.