

ep-Physik bei höchsten Energien und Suche nach neuen Phänomenen

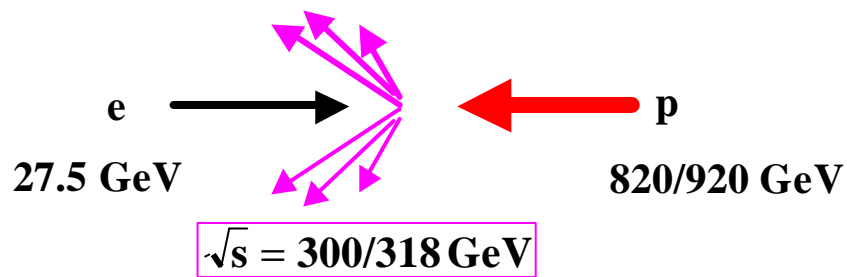
Wolfram Zeuner
DESY/ZEUS



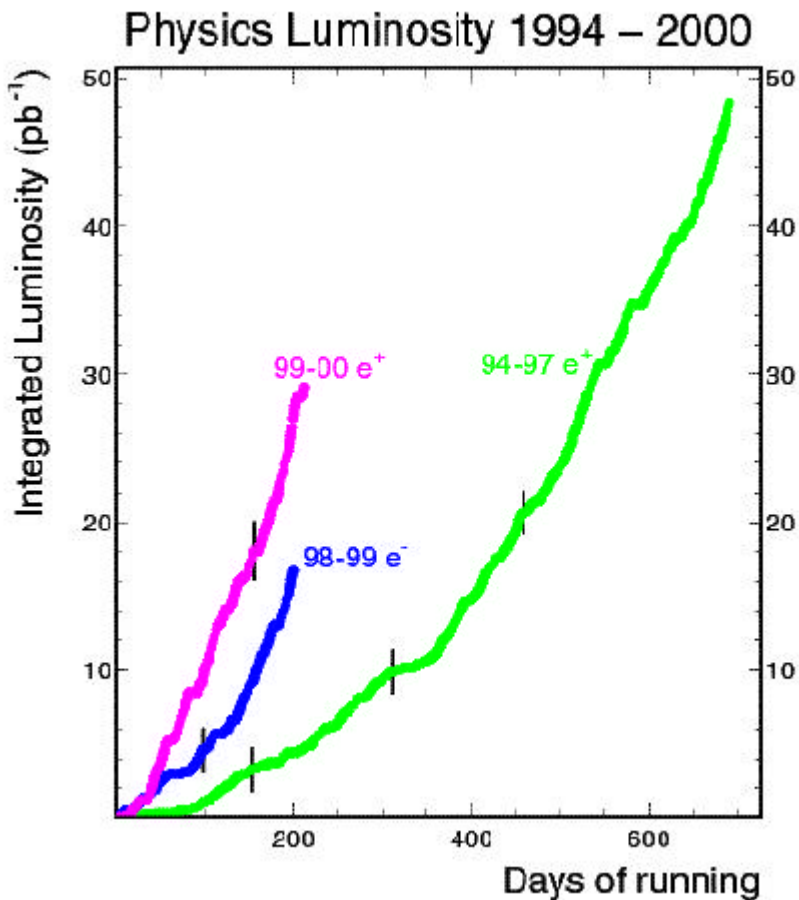
64. Physikertagung der DPG
Dresden - März 2000

- Einführung
- Inklusive Wirkungsquerschnitte bei hohem Q^2
 - Elektroschwache Effekte
- Suche nach neuen Phänomenen
und seltenen Ereignisklassen
 - Isolierte Leptonen
 - Leptoquarks
 - Angeregte Fermionen
 - Kontakt-Wechselwirkungen
- Zusammenfassung und Ausblick

Einführung

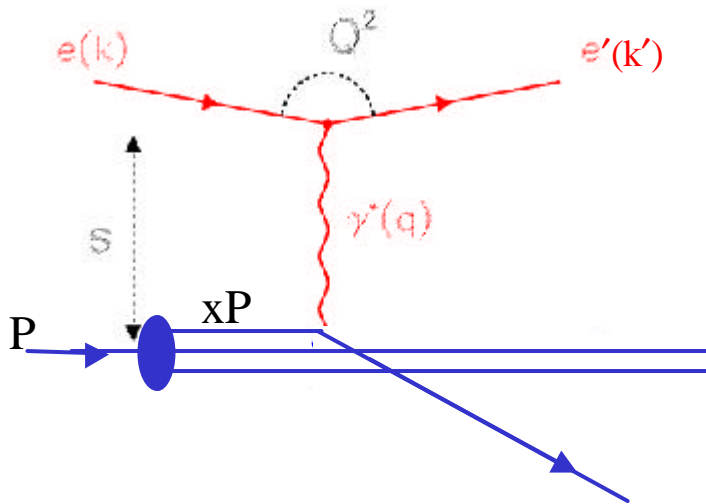


- HERA ist der einzige ep Speicherring der Welt
- Erlaubt Untersuchungen der Protonstruktur bei bisher unerreichten Q^2



Zwei Datensamples
pro Experiment:
 e^+p : $\sim 40 \text{ pb}^{-1}$
 e^-p : $\sim 15 \text{ pb}^{-1}$

Kinematik



HERA 94-97 (98-00)

e^+/e^-

$E_e = 27.5 \text{ GeV}$

Protonen

$E_p = 820 \text{ (920) GeV}$

Schwerpunktsenergie

$\sqrt{s} = 300/320 \text{ GeV}$

- $Q^2 = -q^2 = -(k - k')^2 = 2E_e E_e' (1 - \cos \theta)$

Negativer Viererimpuls-Austausch oder negatives Massen-Quadrat des virtuellen Photons

- $x = \frac{Q^2}{2P \cdot q} = \frac{Q^2}{s y} \quad 0 < x < 1$

Bjorken-x

Impulsanteil des getroffenen Partons im Proton

- $y = \frac{P \cdot q}{P \cdot k} = 1 - \frac{E_e'}{2E_e} (1 + \cos \theta) \quad 0 < y < 1$

Inelastizität

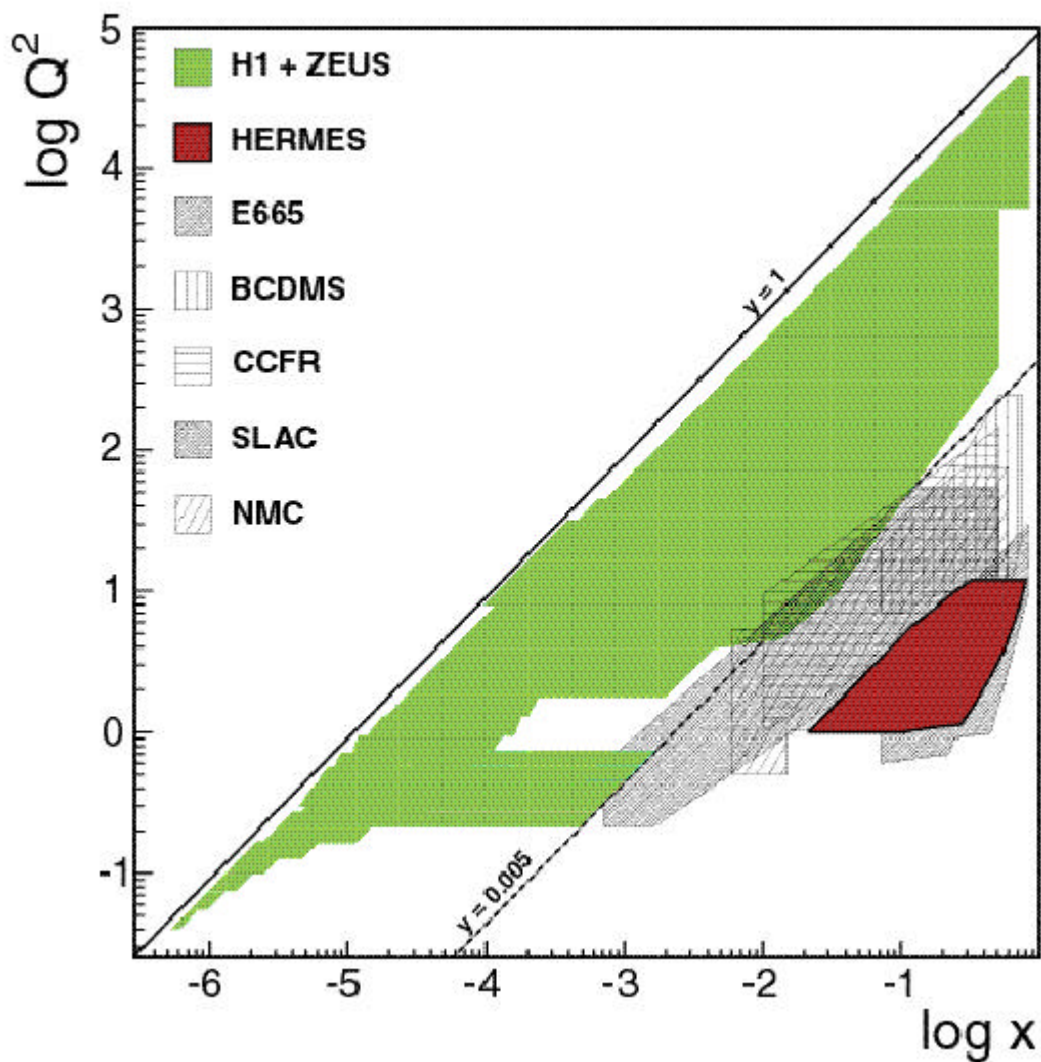
Relativer Energieübertrag auf das Proton in seinem Ruhesystem

- $W^2 = (P + q)^2 = \frac{Q^2 (1 - x)}{x} + m_p^2$

Photon-Proton Schwerpunktsenergie oder Massen-Quadrat des hadronischen Systems

Kinematischer Bereich von HERA

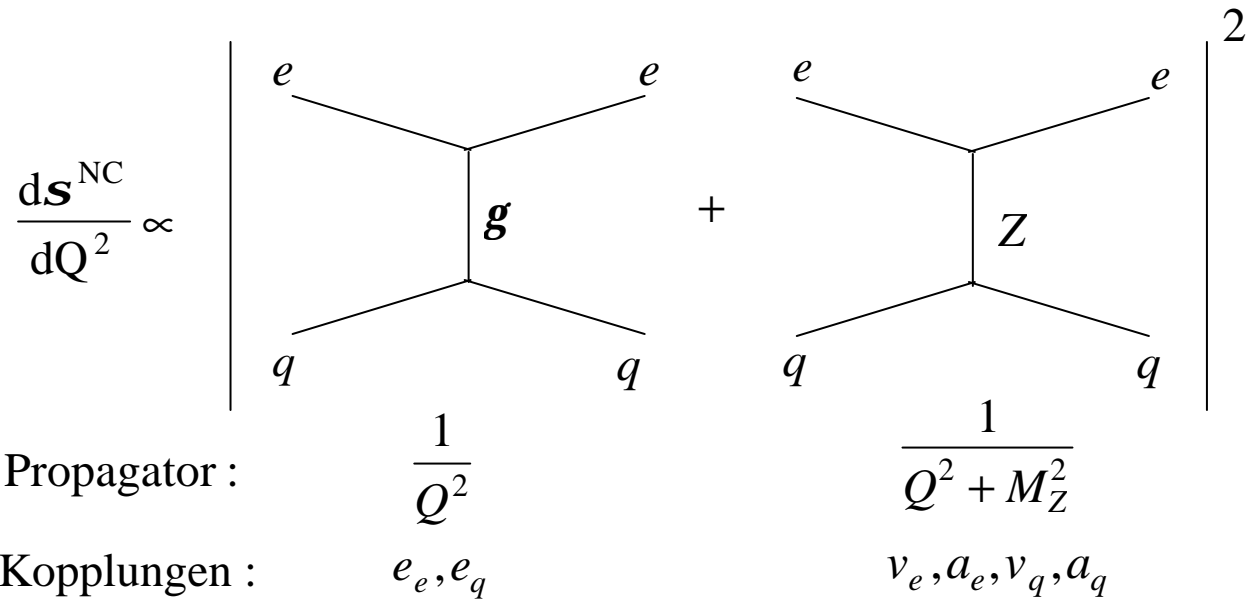
Kinematik vollständig bestimmt durch zwei Variable



- Überlapp mit fixed Targetexperimenten bei kleinem y
- Hohes Q^2 : elektroschwache Effekte und Suche nach neuen Phänomenen

Inklusive Wirkungsquerschnitte

Neutraler Strom: $e^\pm p \rightarrow e^\pm X$



Wirkungsquerschnitt:

$$\frac{d\mathbf{s}}{dx dQ^2} (e^\pm) = \frac{2pa^2}{xQ^4} \left(Y_+ F_2^{\text{NC}} \mp Y_- x F_3^{\text{NC}} - y^2 F_L^{\text{NC}} \right)$$

$Y_\pm = 1 \pm (1-y)^2$

Strukturfunktionen des Protons

$$F_2^{\text{NC}}(x, Q^2) = \sum_q A_q(Q^2) \cdot \left[q(x, Q^2) + \bar{q}(x, Q^2) \right] + \text{QCD Korr.}$$

$$F_3^{\text{NC}}(x, Q^2) = \sum_q B_q(Q^2) \cdot \left[q(x, Q^2) - \bar{q}(x, Q^2) \right] + \text{QCD Korr.}$$

F_3 - Paritätsverletzende Strukturfunktion - wichtig ab $Q^2 \approx M_Z^2$

$F_L^{\text{NC}}(x, Q^2)$: longitudinale Strukturfunktion, klein bei hohem Q^2

A_q und B_q : Kopplungen und Propagatorterm $P_Z = \frac{Q^2}{Q^2 + M_Z^2}$

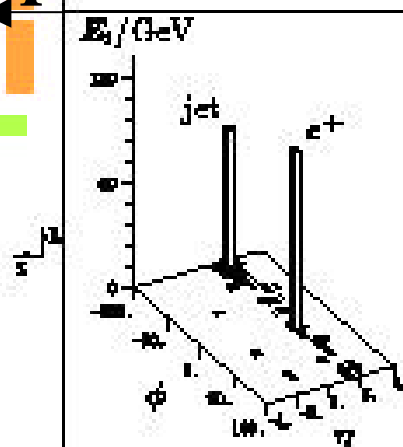
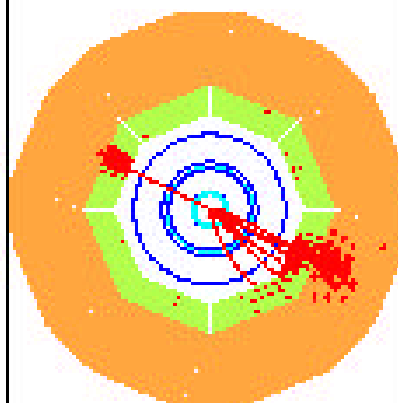
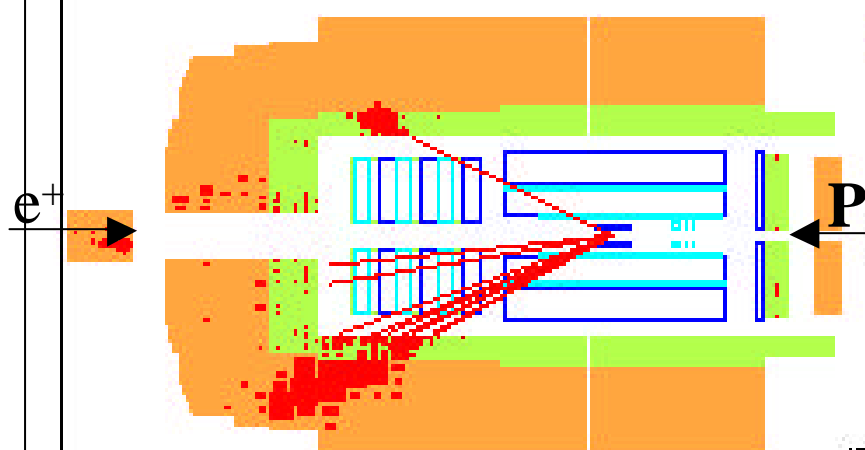
q, \bar{q} : Partondichten im Proton

Candidate from NC sample

H1 Run 122145 Event 00500

Date 10/09/1995

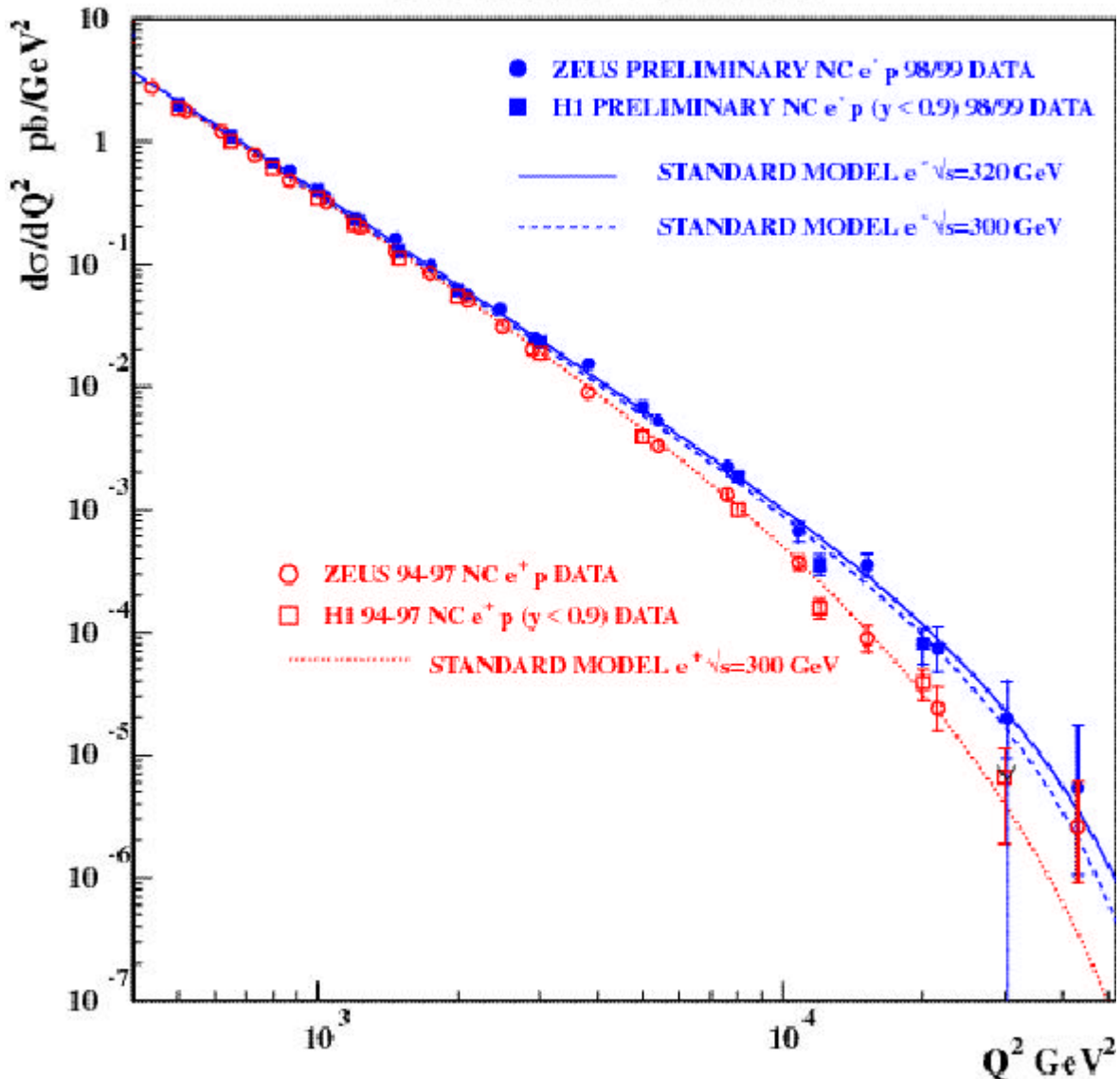
$Q^2 = 25050 \text{ GeV}^2$, $y = 0.56$, $M = 211 \text{ GeV}$



DIS Wirkungsquerschnitte

Neutraler Strom NC

H1 + ZEUS NC DATA

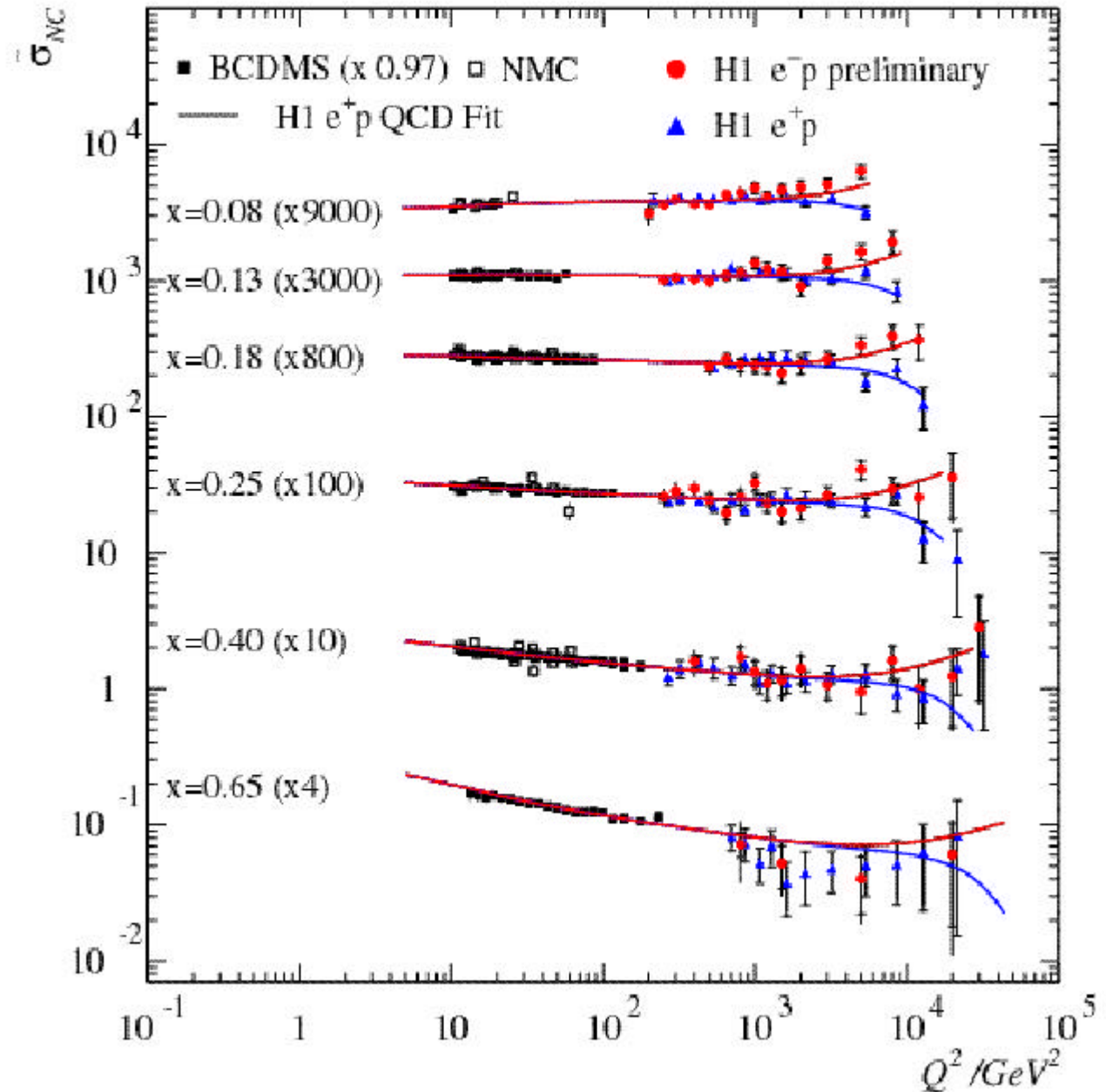


- SM beschreibt Daten über 6 Größenordnungen
- $Q^2 \sim 10^4$ GeV² Massenskala der elektroschwachen Eichbosonen
- Ab $Q^2 \sim 10^3$ GeV² Wirkungsquerschnitte: $e^+p < e^-p$

Sensitiv auf Protonstruktur (QCD) und Elektroschwache Effekte

DIS Wirkungsquerschnitte

$$\tilde{s}_{\text{NC}} = \frac{1}{Y_+} \frac{Q^4}{2pa^2} \frac{d^2s}{dx dQ^2}$$



- γ -Z Interferenz negativ für e^+ und positiv für e^-
- QCD Fits bei niedrigem Q^2 beschreiben Daten bei hohem Q^2

DIS Wirkungsquerschnitte

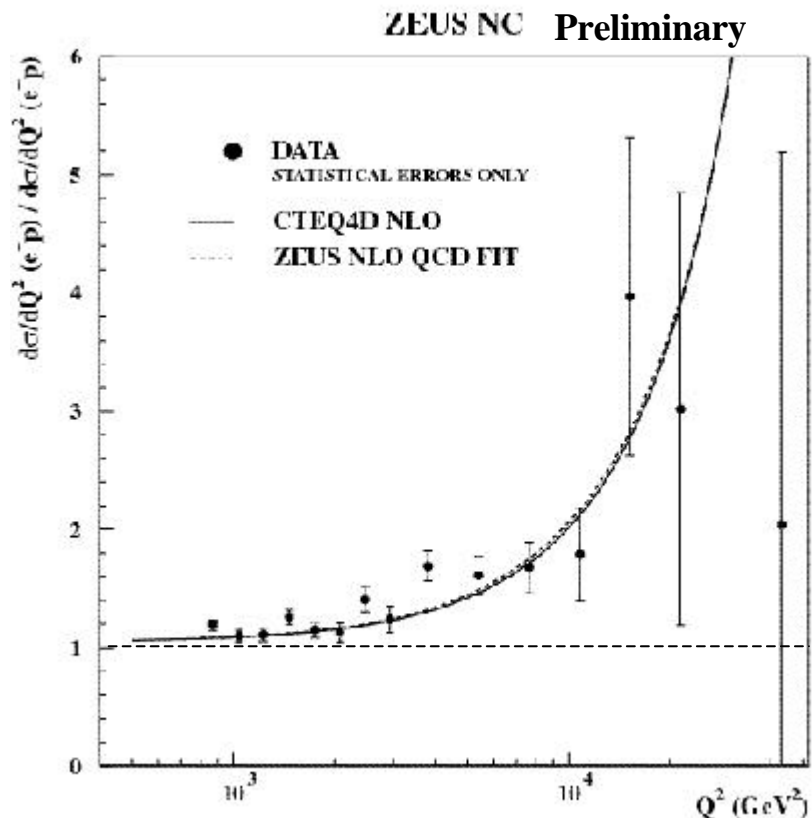
γ -Z Interferenz

$$\frac{d\mathbf{s}}{dx dQ^2}(e^\pm) = \frac{2pa^2}{xQ^4} (Y_+ F_2^{NC} \mp Y_- xF_3^{NC} - y^2 F_L^{NC})$$

$$xF_3 = \frac{Q^4}{4pa^2} \left[\frac{d^2\mathbf{s}}{dx dQ^2}(e^- p) - \frac{d^2\mathbf{s}}{dx dQ^2}(e^+ p) \right]$$

Verhältnis $\frac{e^- p}{e^+ p}$

$e^- p > e^+ p$
bei hohem Q^2



- $\frac{d(xF_3)}{xF_3} \approx 35 - 65\%$ - mehr $e^- p$ Daten nötig
- z.B. alle vorhandenen Daten + $9 \text{ pb}^{-1} e^- p$
Reduktion des Fehler von xF_3 um 10-25%

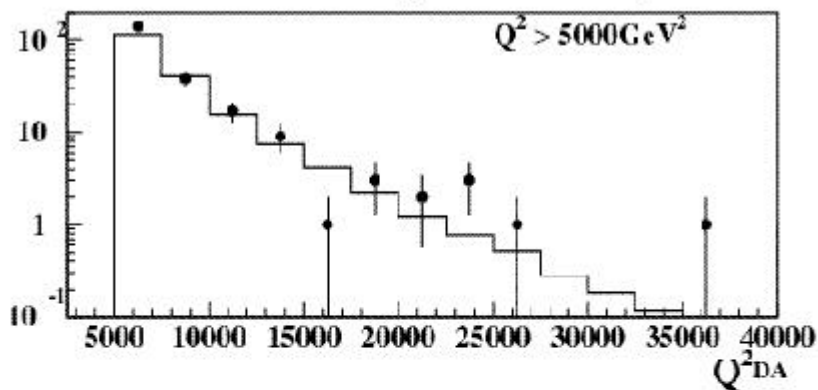
Mehr Daten....

ZEUS Daten 1999 18pb^{-1} , $E(p)=920\text{ GeV}$

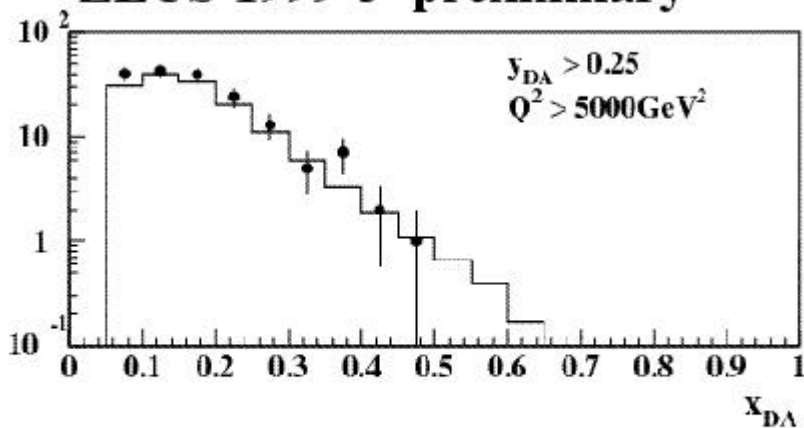
Höhere $E(p) \Rightarrow$ höhere Sensitivität z.B. für Leptoquarks
 $M_{LQ} \sim 220\text{-}230\text{ GeV}$ $\sim 50\%$ höhere Sensitivität

Keine Auffälligkeiten

ZEUS 1999 e^+ preliminary

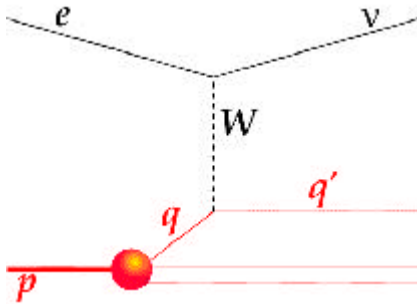


ZEUS 1999 e^+ preliminary



Inklusive Wirkungsquerschnitte

Geladener Strom (CC): $e^\pm p \rightarrow \bar{\nu} X$



Gestreutes Neutrino nicht beobachtbar
Nur hadronischer Endzustand messbar

Differentielle Wirkungsquerschnitte:

$$\frac{d\mathbf{s}^{\text{CC}}}{dx dQ^2}(e^\pm) = \frac{G_F^2}{4p_x} \left(\frac{M_W^2}{M_W^2 + Q^2} \right)^2 (Y_+ F_2^{\text{CC}} \mp Y_- x F_3^{\text{CC}} - y^2 F_L^{\text{CC}})$$

- e^+ und e^- koppeln an unterschiedliche Quarks

$$\frac{d\mathbf{s}^{\text{Born}}}{dx dQ^2}(e^+) = \frac{G_F^2}{2p_x} \left(\frac{M_W^2}{M_W^2 + Q^2} \right)^2 (x\bar{u} + (1-y)^2 x d)$$

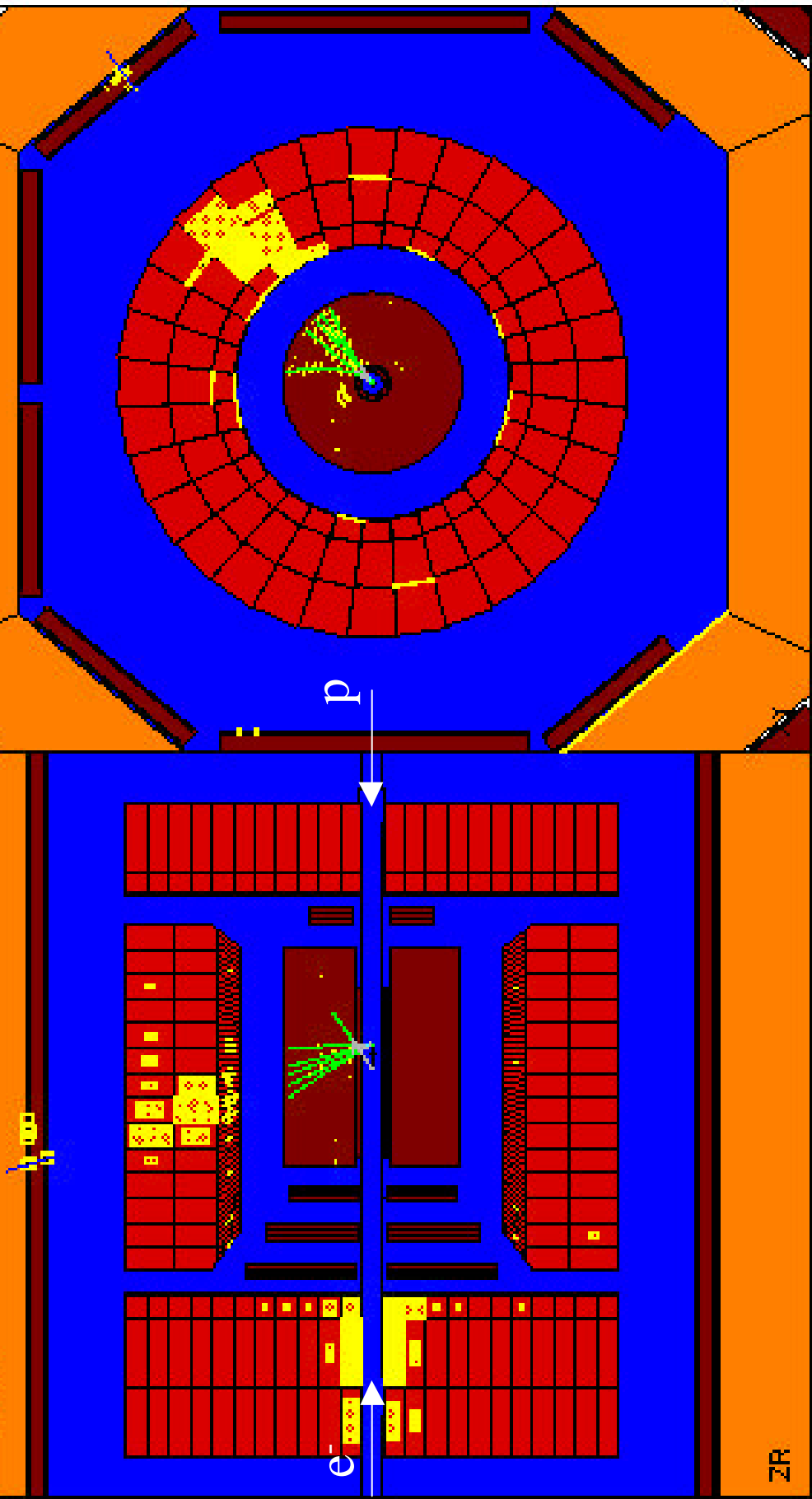
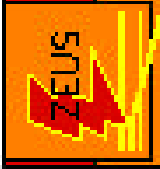
e^+p sensitiv auf \bar{u} und d

$$\frac{d\mathbf{s}^{\text{Born}}}{dx dQ^2}(e^-) = \frac{G_F^2}{2p_x} \left(\frac{M_W^2}{M_W^2 + Q^2} \right)^2 (xu + (1-y)^2 x\bar{d})$$

e^-p sensitiv auf u und \bar{d}

ZEUS
Zeus Run 7239 Event 8004
11-04-1993 09:20:44.774 File: ultronbaur/events/031H0.c

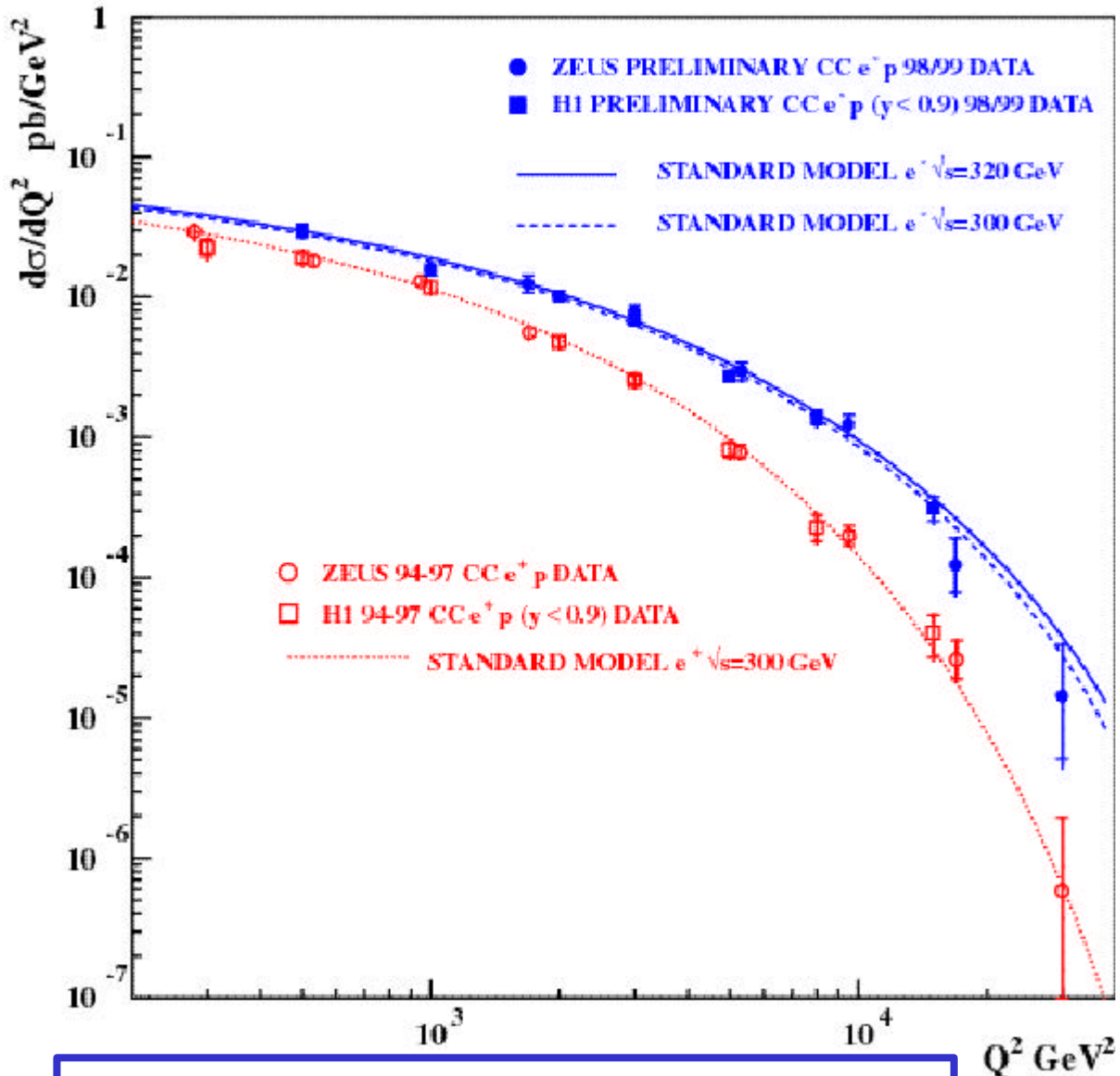
E= 48.4 E= 31.2 pE= 26.3 pE= 48.4 E= 32.1 E= 18.8 E= 38.7 E= 28.7 E= 40.0
T= -0.3 T= 99.0 L= 1000 L= 1000 P= 0 B= 171 P= 2801299 01002500
x= 20100 y= 20000 z= 0 DA= 00000000 0 AB y= 372 phi= 0.1263



ZR

DIS Wirkungsquerschnitte geladener Strom (CC)

H1 + ZEUS CC DATA



- Test der QCD und des elektroschwachen SM

- $e^- \sim xu$

- $e^+ \sim (1-y)^2 xd$

- Abhängigkeit von Massenterm : $\left(\frac{M_W^2}{Q^2 + M_W^2} \right)^2$

Geladener Strom W-Boson Masse

$$\frac{d\mathbf{s}^{\text{CC}}}{dx dQ^2}(e^\pm) = \frac{G_F^2}{4p_x} \left(\frac{M_{\text{Prop}}^2}{M_{\text{Prop}}^2 + Q^2} \right)^2 \cdot \text{PDF}(x, Q^2)$$

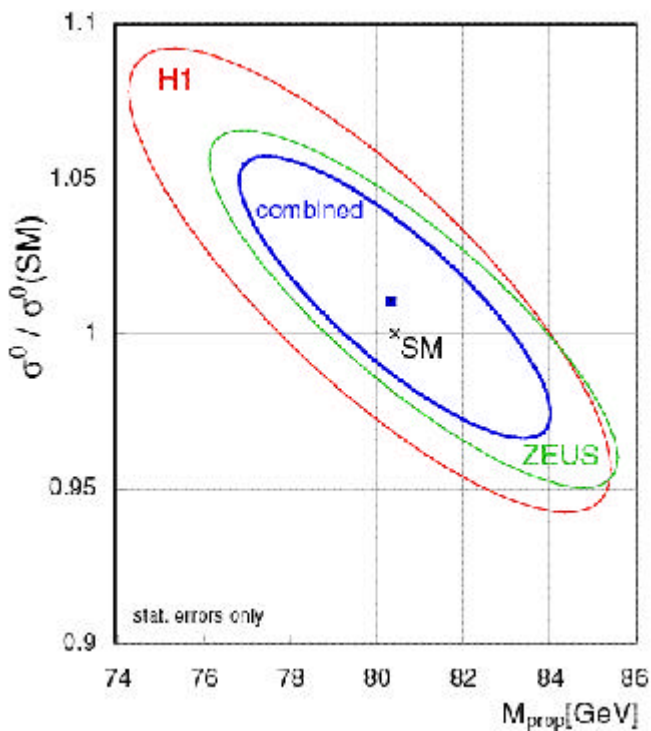
- Wähle PDF z.B. CTEQ 4D
- Fit an Massenterm
- a) Normalisierung frei

ZEUS

$$M_W = 80.8_{-4.5}^{+4.9} (\text{stat.})_{-4.3}^{+5.0} (\text{syst.})_{-1.3}^{+1.4} (\text{PDF}) \text{ GeV}$$

PDG

$$M_W = 80.394 \pm 0.042 \text{ GeV}$$



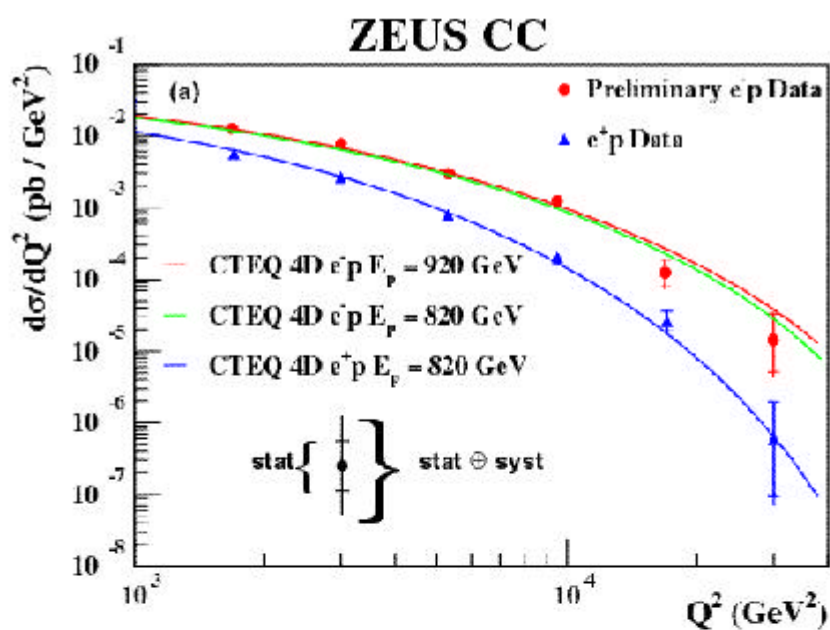
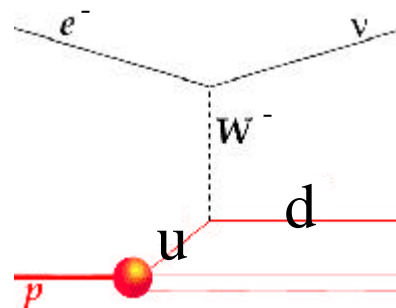
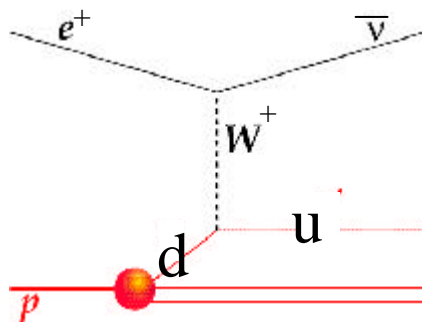
- b) Fixiere G_F und fitte M_W - Konsistenzcheck mit SM

ZEUS:	$M_W = 81.4_{-2.6}^{+2.7} (\text{stat.}) \pm 2.0 (\text{syst.})_{-3.0}^{+3.3} (\text{PDF}) \text{ GeV}$
H1:	$M_W = 80.9 \pm 3.3 (\text{stat.}) \pm 1.7 (\text{syst.}) \pm 3.7 (\text{theo.}) \text{ GeV}$

- Messung der W-Masse im raumartigen Bereich
- Propagator und W-Boson sind das selbe Teilchen

Geladener Strom

Quarks im Proton



Grosser Unterschied
zwischen
 e^+p und e^-p bei hohem Q^2

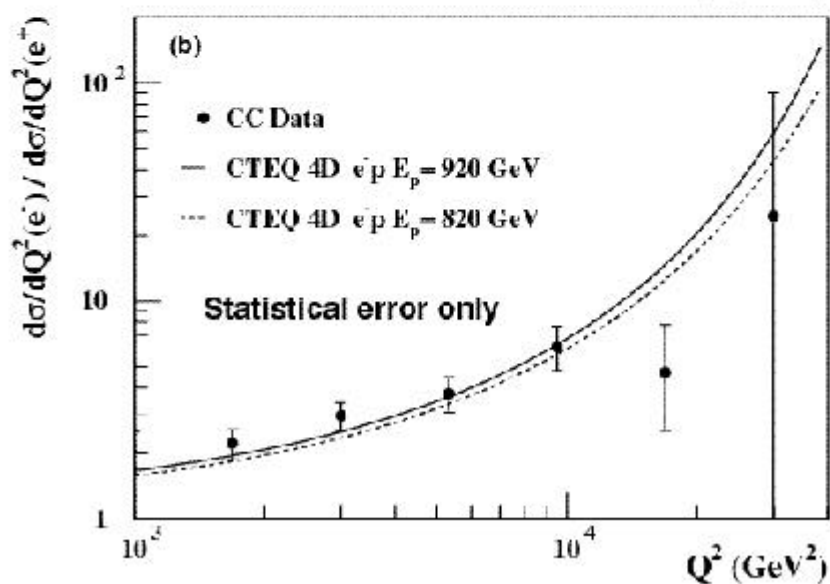
$$e^- \sim xu$$

$$e^+ \sim (1-y)^2 xd$$

Verhältnis für CC:

$$\frac{e^-p}{e^+p} \approx 10$$

für $Q^2 \approx 20000 \text{ GeV}^2$



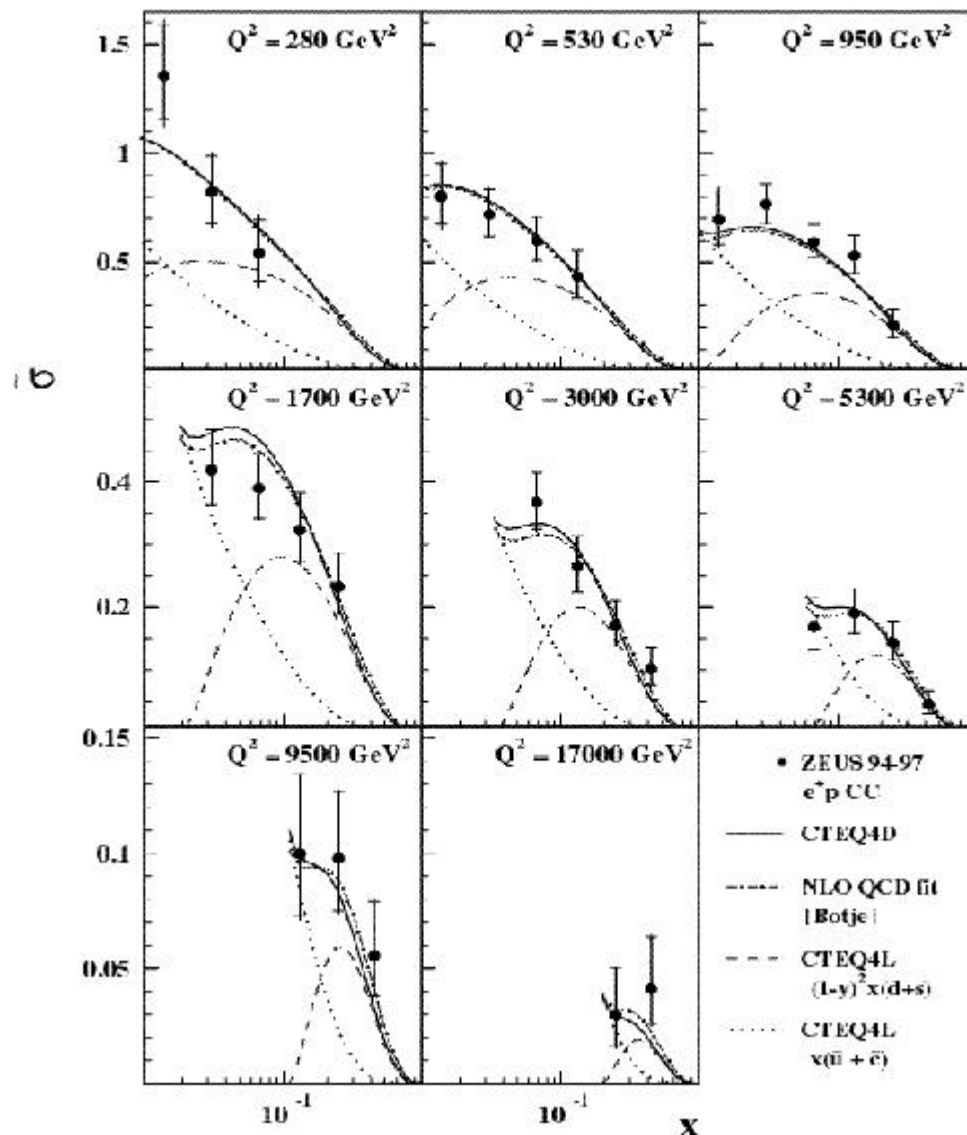
Geladener Strom

Quarks im Proton gemessen mit e^+p

Reduzierter Wirkungsquerschnitt \Rightarrow PDFs sichtbarer

$$\tilde{s} = \frac{2px}{G_F^2} \left[\frac{Q^2 + M_W^2}{M_W^2} \right]^2 \frac{d^2s^{CC}}{dx dQ^2} = x \left[(\bar{u} + \bar{c}) + (1-y)^2 (d+s) \right]$$

ZEUS CC 1994-97



- Bei hohem Q^2 dominieren d-Quarks

Zwischenbilanz

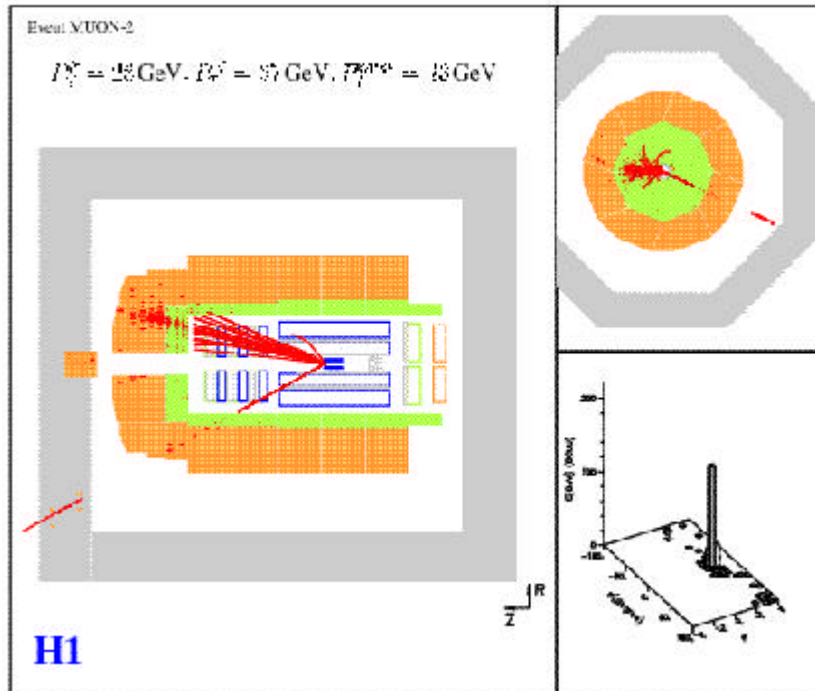
Inklusive Wirkungsquerschnittsmessungen

H1 und ZEUS haben mit je etwa 40pb^{-1} e^+p Daten und 15pb^{-1} e^-p Daten ep Streuung des neutralen und geladenen Stroms bis zu $Q^2 \approx 40000 \text{ GeV}^2$ detailliert untersucht.

- QCD beschreibt Partonverteilungen im Proton über 4 Größenordnungen in Q^2
- Klare Sensitivität auf Quarksorten in CC e^+p vs e^-p
- Propagatorterme ändern W_q dabei über bis zu 6 Größenordnungen
- Eindeutige Hinweise für den Einfluß der schwachen Eichbosonen
- Raumartige W-Massenmessung
- Endgültige Klärung unverstandener Effekte am Phasenraumrand bedarf wesentlich höherer Luminosität

Isolierte Leptonen

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



H1: e^+p , 36.5 pb^{-1}

6 Ereignisse:

- Isoliertes Lepton
- fehlender Transversalimpuls
- - $1e^-$, 5μ

e^-p , 13.6 pb^{-1}

0 Ereignisse

Standardmodell:

W-Produktion, Photon-Photon, DIS-NC

e^+p :

e^- : 2.4 ± 0.5

μ : 0.8 ± 0.2

e^-p :

e^- : 1.0 ± 0.2

μ : 0.4 ± 0.1

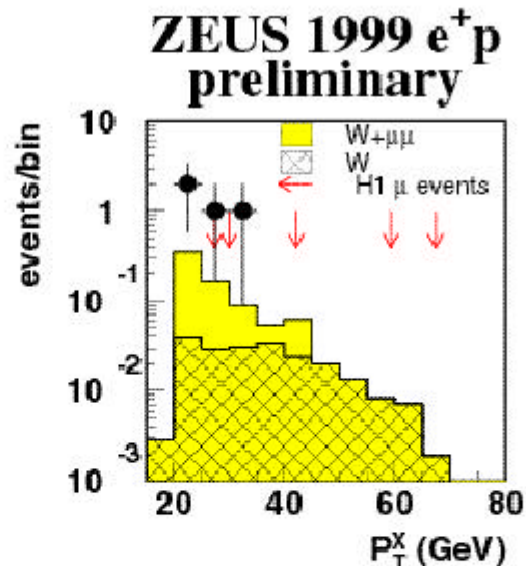
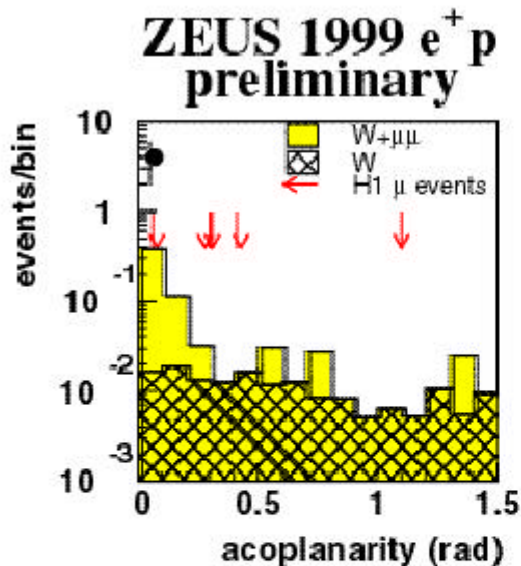
Überschuss nur in e^+p

- Herkunft unklar
- W-Produktion am wahrscheinlichsten

Isolierte Leptonen

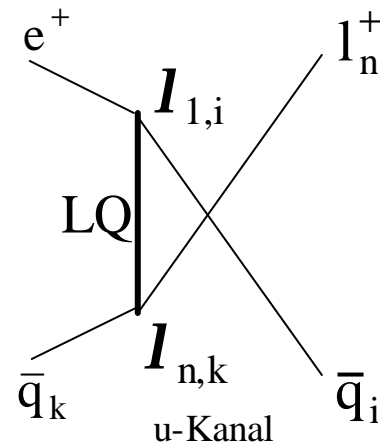
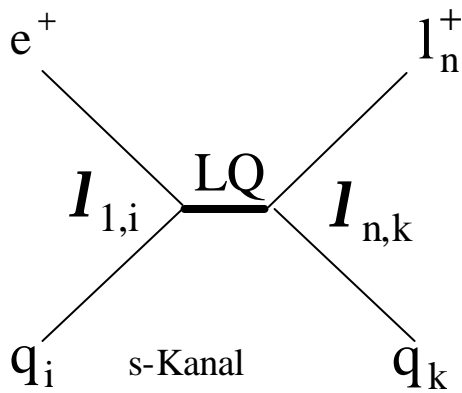
ZEUS high-Pt lepton summary

	Electrons observed (expected)	Muons observed (expected)
1994-97 e⁺p (48 pb ⁻¹ , published)	3 (3.5±0.7)	0 (2.0±0.4)
1998-99 e⁻p (16 pb ⁻¹ , preliminary)	2 (0.8±0.4)	0 (0.8±0.1)
1999 e⁺p (18 pb ⁻¹ preliminary)	2 (1.8±0.4)	4 (0.9±0.1)
Total (82 pb ⁻¹)	7 (6.1±0.9)	4 (3.7±0.4)



ZEUS Ereignisse
verträglich mit SM

Leptoquarks



LQ: Bosonen, Leptonzahl (L) und Baryonzahl (B),
drittelzahlige Ladung, direkte Kopplung an Quark-Lepton Paare

- HERA

Direkte Suche nach LQs 1. Generation via Lepton-Quark Fusion

Signatur: Resonanz in eq (vq) Massenverteilung

Einzelnes Ereignis nicht unterscheidbar von DIS NC

LQ: $\frac{d\mathbf{s}}{dy} \propto (1-y)^2$ (Vector-LQ) oder flach (Skalar-LQ)

DIS: $\frac{d\mathbf{s}}{dy} \propto \frac{1}{y^2}$

Theorie: BRW - $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ erhaltend

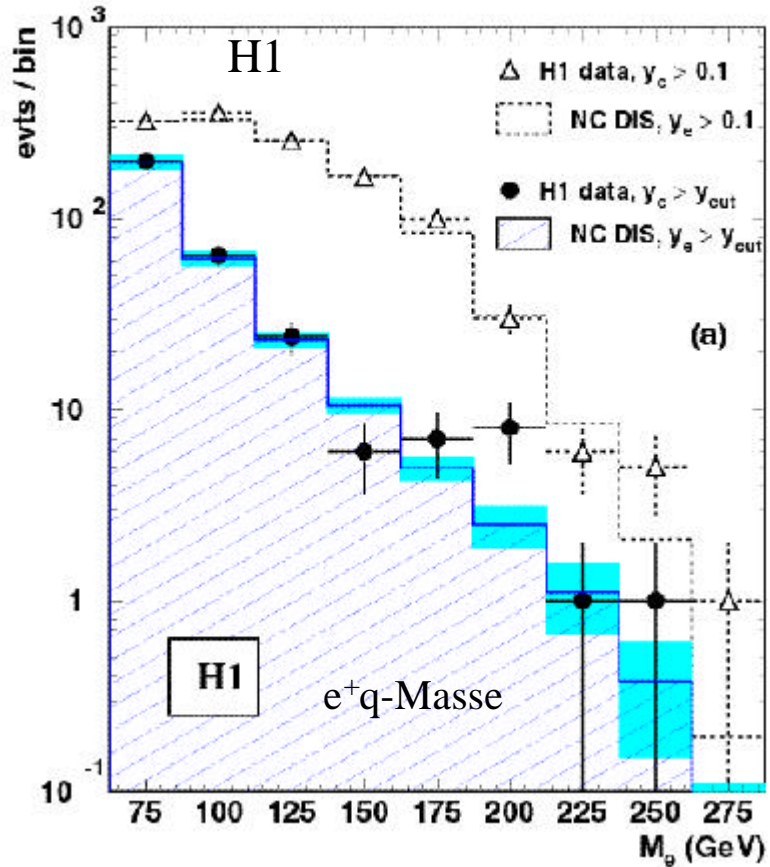
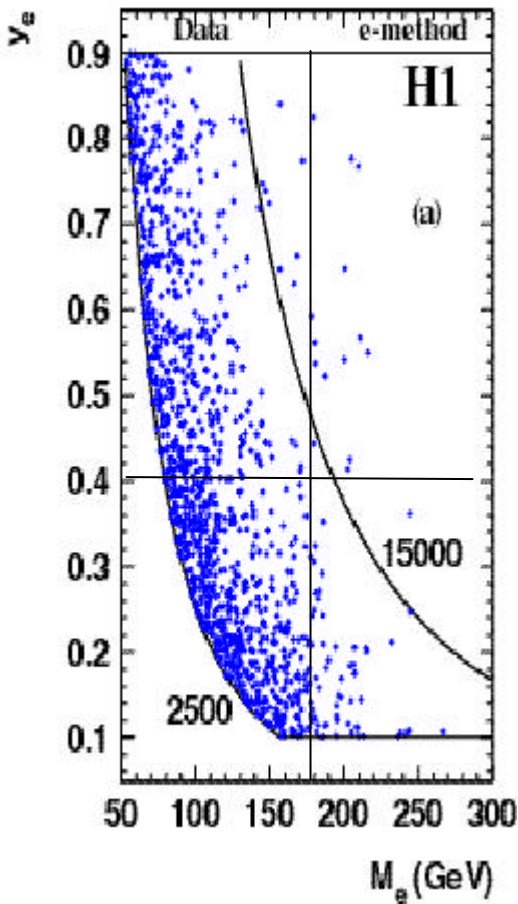
W. Buchmüller, R. Rückl, D. Wyler, Phys. Lett B191, 442 (1987)

Scalare und Vector LQs mit $F=0$ und $|F|=2$ mit $F=L+3B$

LQ-Zerfall nach eq 100% oder 50%

Leptoquarks

e^+p NC



H1

$y_e > 0.4$, $M_e > 180$ GeV: 11 Ereignisse

1994-1996: 7 Ereignisse gesehen, 2.21 ± 0.33 erwartet

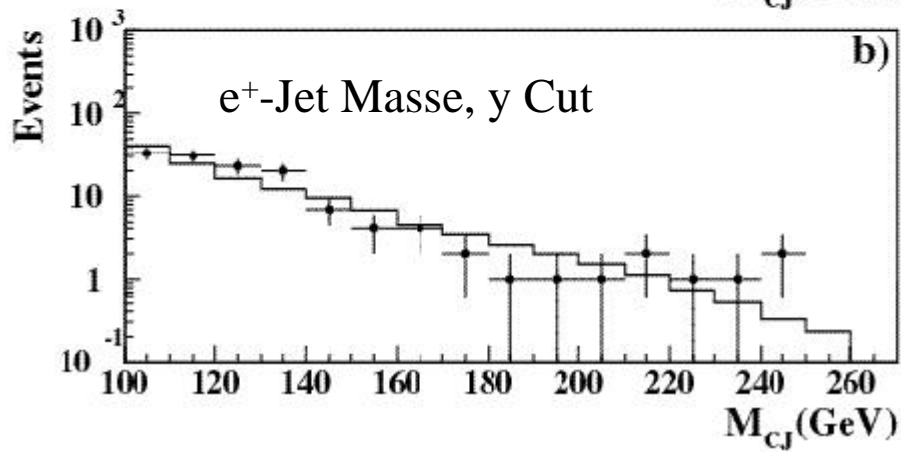
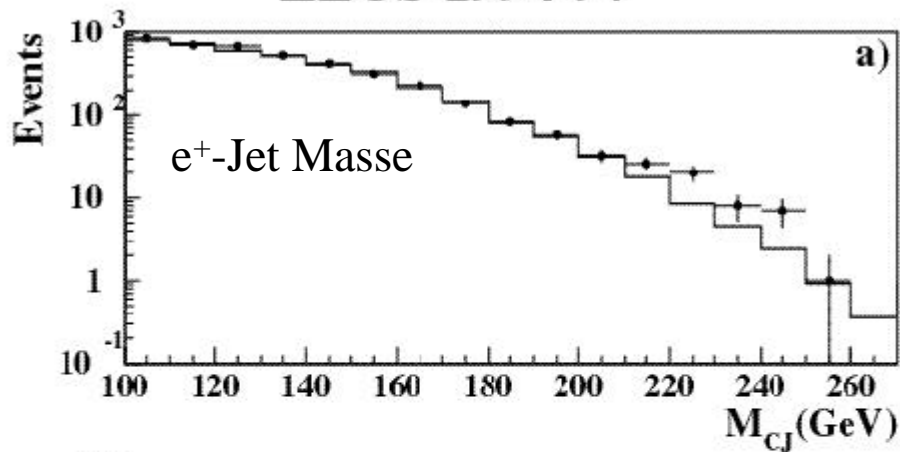
1997: 4 Ereignisse gesehen, 3.17 ± 0.49 erwartet

Signifikanz hat abgenommen

Leptoquarks

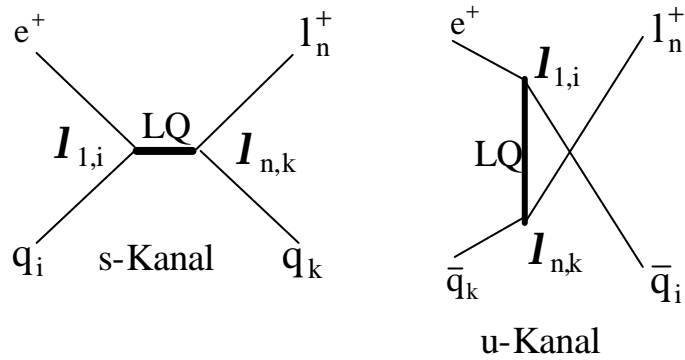
e^+p NC

ZEUS 1994-97



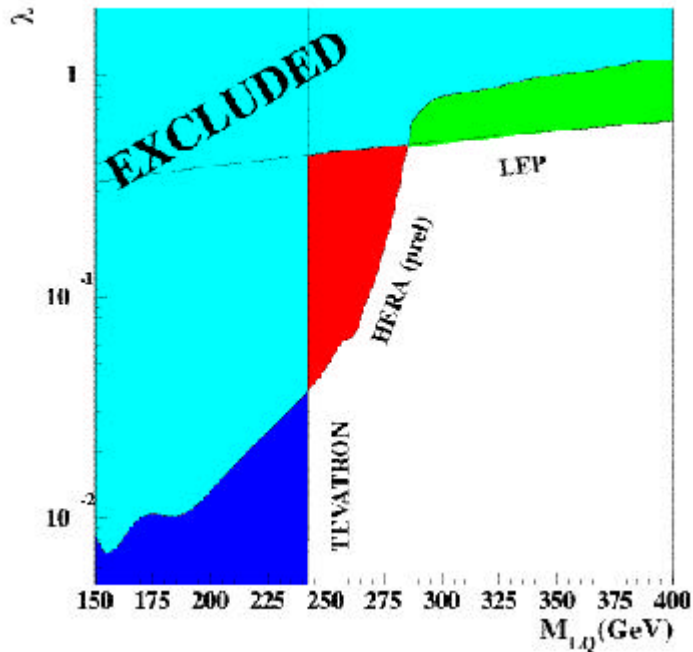
- Kein signifikanter Überschuss
- Ereignisse um 210 GeV überwiegend kleines y
- \Rightarrow konkurrenzfähige Ausschlusslimits

Leptoquark-Limits

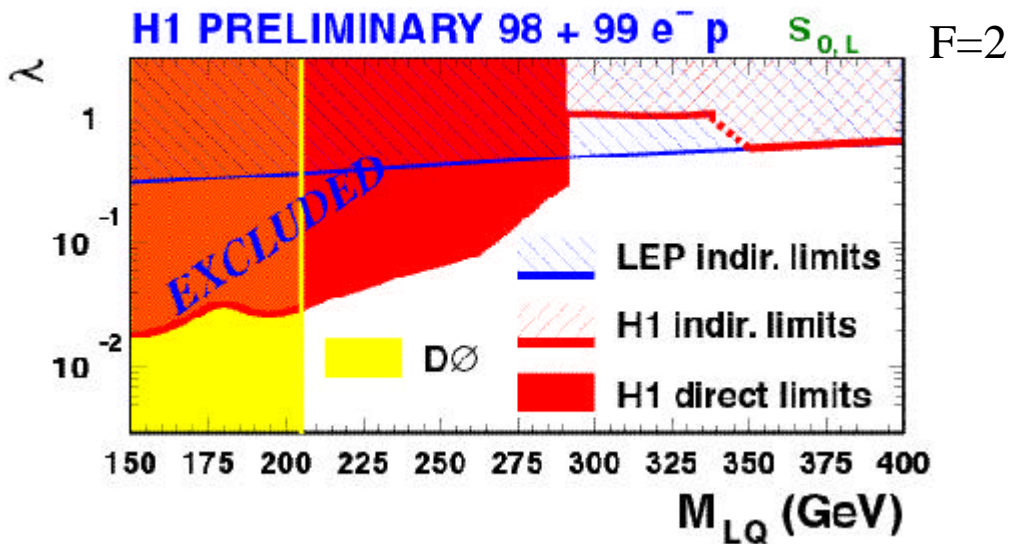


λ Limit for $F=0$ scalar LQ

ZEUS
 $e^+p S_{1/2}^R$

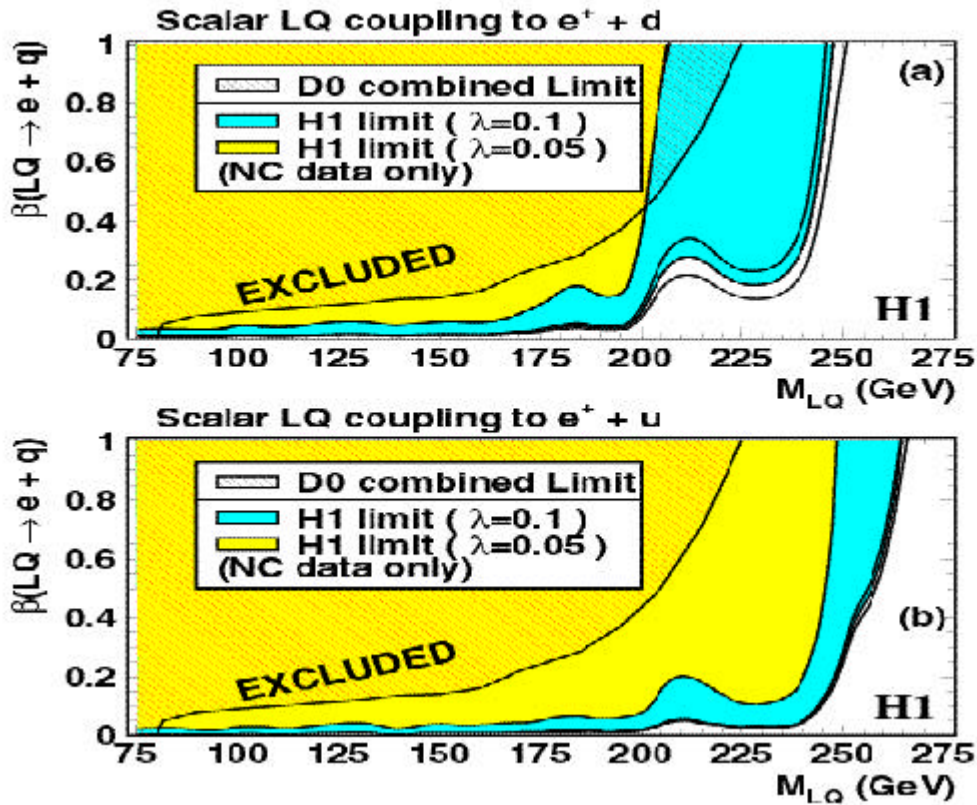


- $e p$ - Keine Abweichung vom SM
- Limits am besten für $F=2$, $E_p=920$ GeV erhöht Sensitivität



Leptoquark Limits

- H1: Zerfallswahrscheinlichkeit β , $LQ \rightarrow e+q$ variiert
Erweiterung des BRW Modells

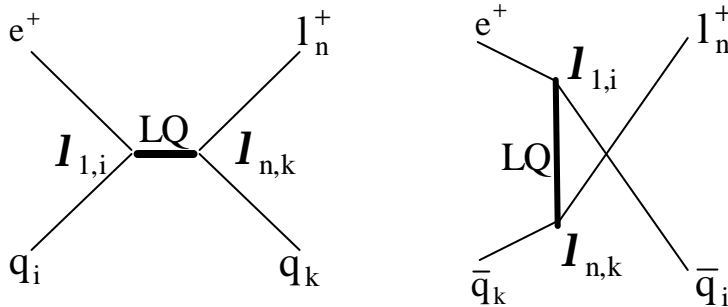


- Exklusives Entdeckungspotential für HERA
in breitem Massenbereich bei kleinem β

-
- Analoge Suche in e^+p CC - (ν -jet Resonanzen)
 - Keine signifikante Abweichung vom SM -(ZEUS&H1)
 - \Rightarrow Limits

Leptoquarks

Leptoquarks können zu Leptonzahlverletzung führen ($n \neq 1$)



- Suche nach DIS Ereignissen: $e^+ p \rightarrow m^+ X$ $e^+ p \rightarrow t^+ X$

Kein Ereignis gefunden

$M_{LQ} < \sqrt{s}$ Limits aus Resonanzsuche
 z.B. ZEUS: F=0 Vector-LFV-LQ bis 285 GeV
 ausgeschlossen ($I_{eq1}^2 = I_{mQ}^2$)

$M_{LQ} > \sqrt{s}$ $\mathbf{s} \propto \frac{\mathbf{l}_{1,i} \mathbf{l}_{n,k}}{M_{LQ}^2} \Rightarrow 252$ Hypothesen testbar

H1: 212 Hypothesen ausgeschlossen für $e \leftrightarrow \mu$ und $e \leftrightarrow \tau$
 Vector und Scalar F=0 und $|F|=2$;

59 Limits beste Limits oder
 vergleichbar mit besten Limits

Angeregte Fermionen

- Modelle mit strukturierten Fermionen (Compositness)
- HERA: NC und CC
auslaufendes Lepton oder gestreutes Quark angeregt
- Zerfälle:

$$e^* \rightarrow \begin{cases} eg \\ nW \\ eZ \end{cases} \quad n^* \rightarrow \begin{cases} ng \\ nZ \\ eW \end{cases} \quad q^* \rightarrow \begin{cases} qg \\ qW \\ qZ \end{cases}$$

- Suche nach Resonanzen in inv. Massen der Zerfallsprodukte

Modell von Hagiwara et al.

K.Hagiwara, S. Komamiya, D. Zeppenfeld, Z. Phys. C29, 115 (1985)

Kopplungskonstanten zu jedem Eichsektor des SM
und Substrukturskala Λ

$$\begin{array}{ccc} \text{SU}(2) & \times & \text{U}(1) & \times & \text{SU}(3) \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ f & & f' & & f_s \end{array}$$

Annahmen über Relationen der Kopplungen (z.B. $f = f'$)

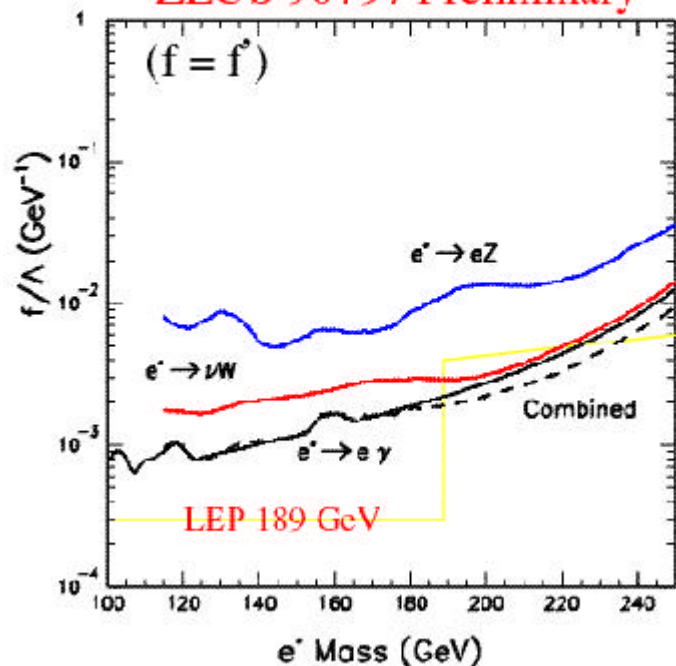
\Rightarrow Verzweigungsverhältnisse hängen nur von $\frac{f}{\Lambda}$ ab

Limits: $\frac{f}{\Lambda}$ vs. Masse

Angeregte Fermionen

- Mit Resonanzsuche keine Abweichung vom SM gefunden

ZEUS 96+97 Preliminary



Angeregte Positronen

Ausschluss:

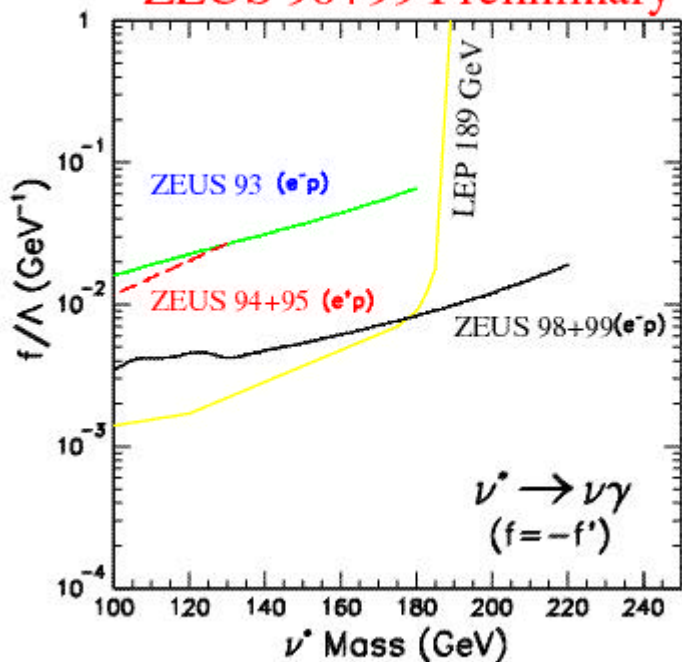
$100 < M_{e^*} < 229$ GeV 95% C.L.

für $f/\Lambda = 1/M_{e^*}$

Vergleichbar mit LEP Limits

für $m_{e^*} > \sqrt{s_{\text{LEP}}}$

ZEUS 98+99 Preliminary



Angeregte Neutrinos

Sensitivität in $e^*p > e^+p$

$f = -f'$

Zerfall verboten für $f = f'$

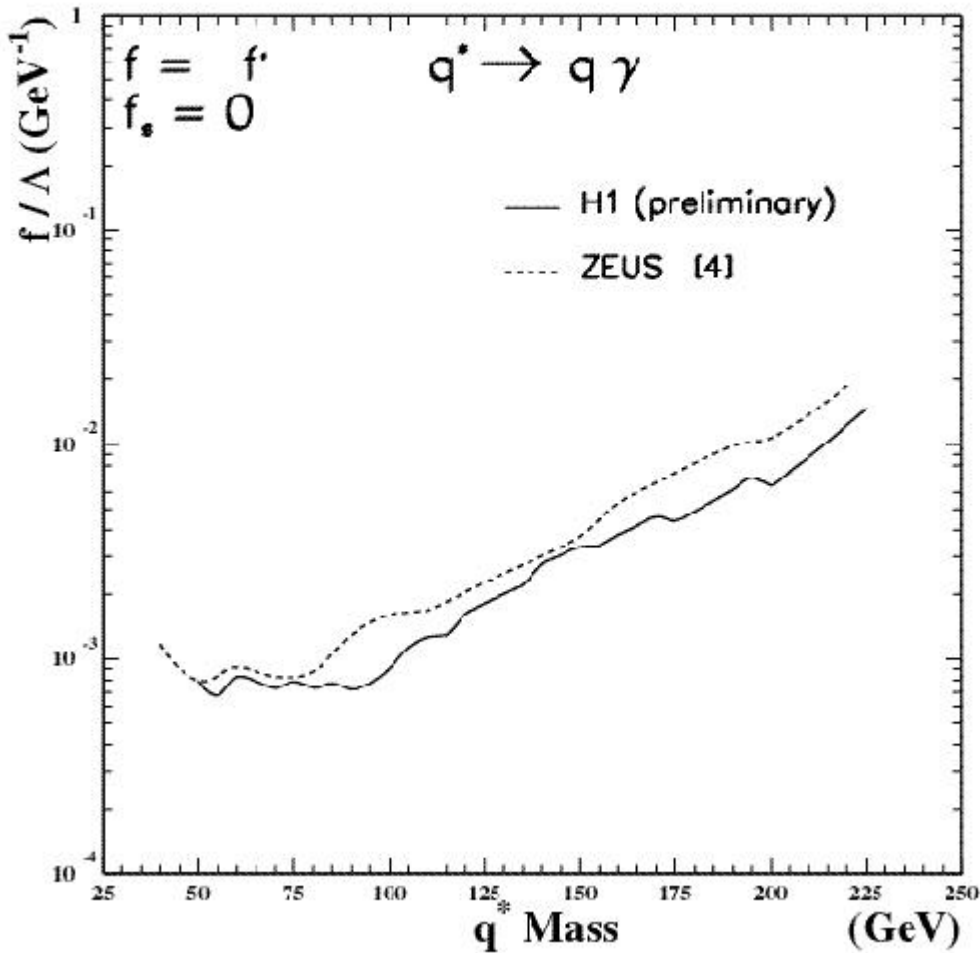
Ausschluss:

$100 < M_{n^*} < 161$ GeV 95% C.L.

für $f/\Lambda = 1/M_{n^*}$

Angeregte Fermionen

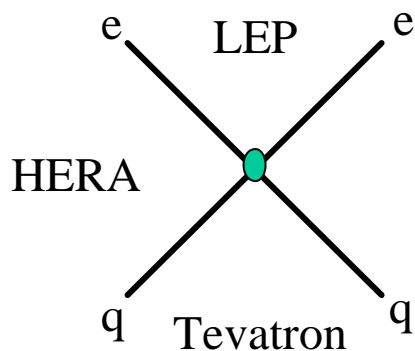
H1: e^+p 1994-97, 37pb^{-1}



- Limit für $f_s = 0$
- $f_s \neq 0$ Massenbereich 80-300 GeV
ausgeschlossen vom Tevatron

Kontakt-Wechselwirkungen

- Indirekte Suche nach neuen Phänomenen bei Skala $\Lambda \gg \sqrt{s}$
- Interferenz von virtuellen schweren Teilchen mit γ, Z
- Beschreibung durch punktartige 4 Fermion Wechselwirkung mit effektiver Kopplung η



$$h_{ab}^q = e \frac{g^2}{(\Lambda_{ab}^q)^2}$$

Kopplungsstärke: g

Skala: Λ

Quarksorten q : HERA - u, d Quark

Helizität (ab): LL, LR, RL, RR, VV, AA, VA

Interferenz konstruktiv oder destruktiv, $\varepsilon = \pm 1$

Experiment: Fit der Modelle an NC $\frac{d\mathbf{s}}{dQ^2}$

Substruktur von Fermionen (ZEUS & H1)

Leptoquarks (ZEUS & H1)

virtueller Graviton-Austausch (H1)

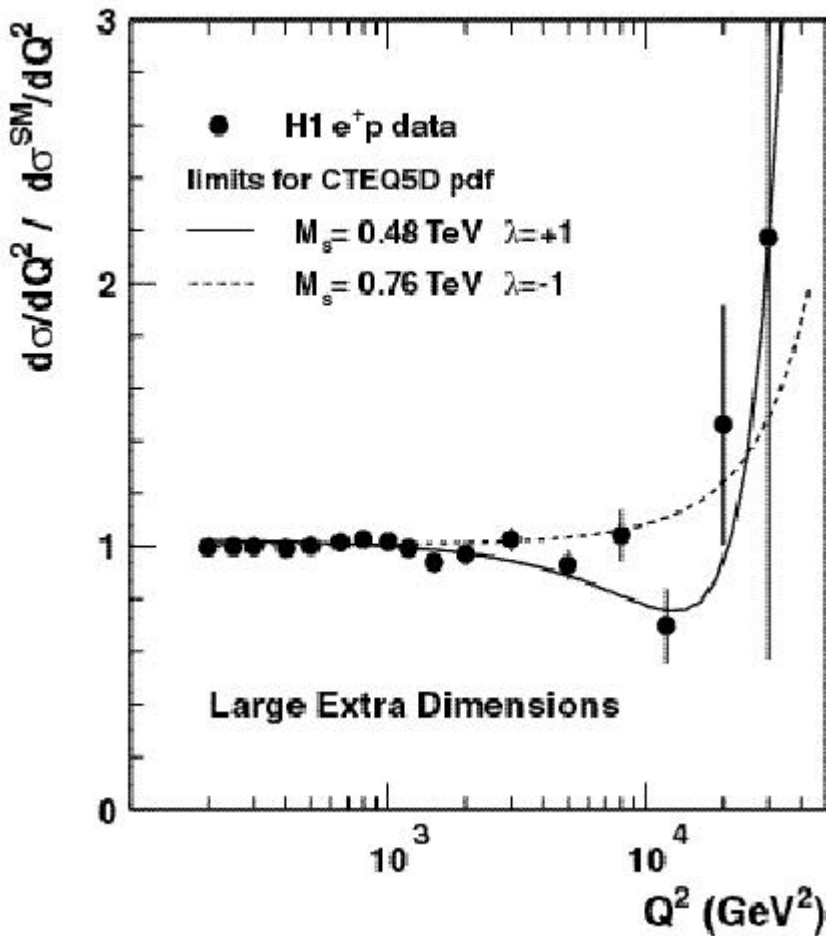
Kontakt-Wechselwirkungen

Idee: Virtueller Graviton-Austausch

N. Arkani-Hamed, S. Dimopolous, G. Dvali, Phys.Lett B429 (1998),223
 Phys.Rev. D59 (1999)

G. F. Giudice, R. Rattazi, J. D. Wells, Nucl. Phys. B544 (1999) 3

- Starke Gravitationseffekte bei subatomaren Abständen
- Gravitationskala $M_s \approx O(TeV)$
- $4+n$ Dimensionen auf Radius R mit $M_P^2 \approx R^n M_s^{2+n}$
 $M_P \approx 10^{19} \text{ GeV}$ Planck Masse



Erstes M_s -Limit
 bei HERA

$$h = \frac{l}{M_s^4} \quad l = \pm 1$$

Zusammenfassung

Suche nach neuen Phänomenen

- Vielzahl von Modellen und Theorien für Physik jenseits des SM getestet
- Direkte LQ Suche \Rightarrow HERA beste Limits für $M_{LQ} \sim 250$ GeV
Für $\beta < 0.5$ besten Grenzen für M_{LQ} zwischen ~ 180 GeV und 250 GeV
- Indirekte Limits für $M_{LQ} > 300$ GeV vergleichbar mit LEP Limits
- Leptonzahl verletzende LQs, besten Limits für $M_{LQ} > 300$ GeV spez. $e \leftrightarrow \tau$
- Angeregte Fermionen - $e^* \nu^*$ konkurrenzfähige Limits für Massen 190 - 220 GeV
- Erstes Limit bei HERA für M_S - grosse extra Dimensionen
- Es gibt zur Zeit keinen klaren Hinweis auf neue Physik
- Andererseits: H1 - isolierte Leptonen im SM schwer erklärbar
 e^+q -Massenverteilung in NC
- Zur endgültigen Klärung sind mehr Daten sind erforderlich

Ausblick

- HERA Datennahme bis Anfang September 2000
Danach Umbau zur Luminositätserhöhung
- Ab 2001 deutlich höhere Luminosität - 1fb^{-1} /Experiment bis 2005
 - Präsentierte Analysen mit maximal 48pb^{-1}
Polarisation des e^\pm Strahls

Ausschnitt aus Physik-Potential

- Inklusive W_q Präzision von wenigen % bis $Q^2 \approx 50000 \text{ GeV}^2$
- Messung der u und d-Quark Impulsverteilungen im Proton bis zu hohen x
- Direkte Messung von a und v für u und d-Quarks (6-17% Genauigkeit) - Polarisation!
- Größtes Entdeckungspotential für LQs mit $\beta < 0.5$
- HERA bestes Testfeld für leptonzahlverletzende LQs mit Massen $> 300 \text{ GeV}$
insbesondere $e \leftrightarrow \tau$ konkurrenzlose Sensitivität