

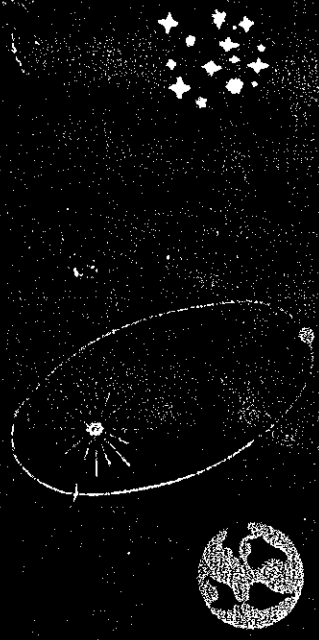
ELEKTRONENPHYSIK BEI HOHEN ENERGIEN

J. BLÜMLEIN
DESY

1. DAS ELEKTRON - EIN FELD IM
STANDARD MODELL
2. e^+e^- STREUUNG : EIN WEG ZU NEUEN
TEILCHEN
3. ep - STREUUNG : AUF DEM WEG IN DAS
INNERE DER HADRONEN
4. OFFENE PROBLEME & DIE ZUKUNFT
DER LEPTONFORSCHUNG

LES INSTITUTS DE PHYSIQUE
DE L'UNIVERSITÉ DE CHICAGO
CHICAGO, ILLINOIS

LES INSTITUTS DE PHYSIQUE
DE L'UNIVERSITÉ DE CHICAGO
CHICAGO, ILLINOIS

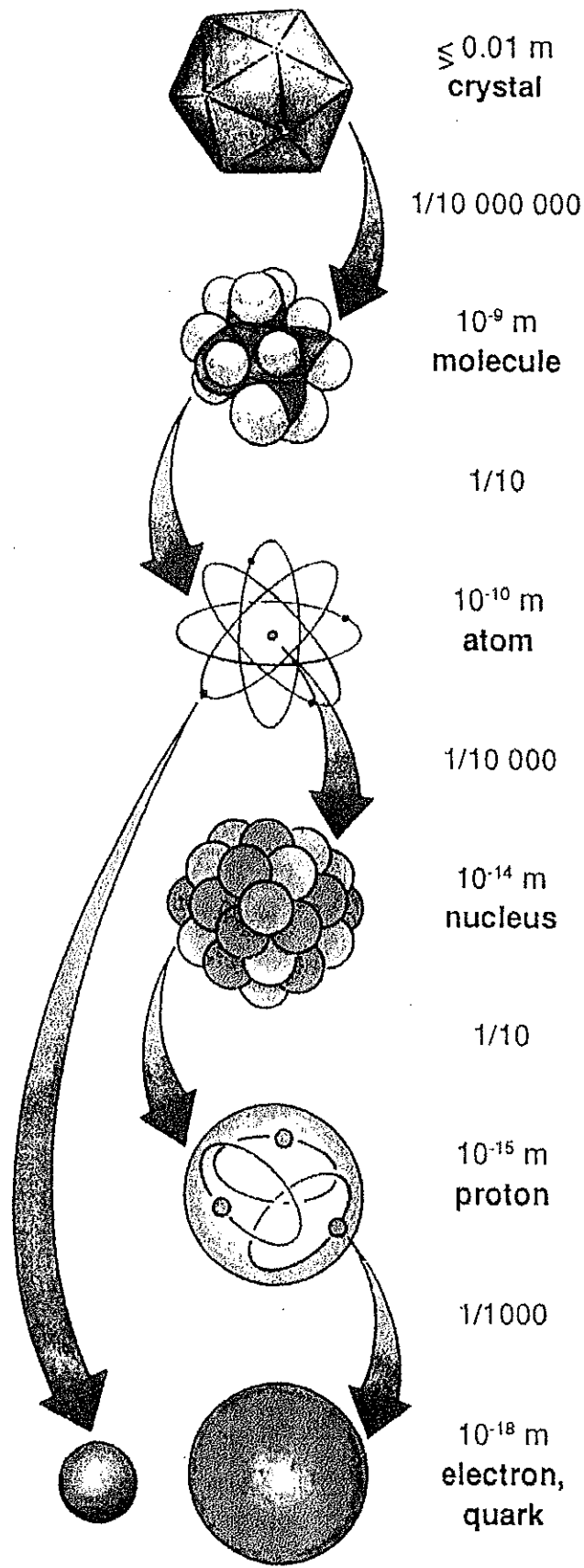


Jumelles
Binoculars

Accélérateurs
et détecteurs
Accelerators
and detectors

Télescopes optiques et radio
Optical and radio telescopes

LES DEUX FRONTIÈRES DE LA PHYSIQUE
THE TWO FRONTIERS OF PHYSICS



1. DAS ELEKTRON - EIN FELD IM STANDARD MODELL

$|e\rangle$: DIE QUANTENZAHLEN

$$O_i |e\rangle = o_i |e\rangle$$

LADUNG : $Q_{em} = -1$

SPIN : $1/2$ - FERMION

HELIZITÄTEN:

$$\begin{aligned} |e_R\rangle &= \frac{1}{2} (1 + \gamma_5) |e\rangle \\ |e_L\rangle &= \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) |e\rangle \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} |e_R\rangle \\ |e_L\rangle \end{aligned}} \right\} 2.$$

$$Q = T_L^3 + \frac{1}{2} Y$$

$$T_L^3 (|e_R\rangle) = 0$$

$$Y (|e_R\rangle) = -2$$

\uparrow 3. KOMPONENTE DES EW. SCHWACHEN ISOSPINS \uparrow HYPERLADUNG (SCHW)

$|e_L\rangle$ UND $|e_L\rangle$ BILDEN EIN DOUBLETT: $\begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L \equiv \ell_L$

$$T_L^3 (|\nu_L\rangle) = +\frac{1}{2}, \quad T_L^3 (|e\rangle)_L = -\frac{1}{2}$$

$$\uparrow \quad \underline{Y(\ell_L) = -1} \quad (Y(|\nu\rangle_R) = 0)$$

!

\curvearrowright Y ERZEUGT DIE ABELSCHER GRUPPE $U(1)_Y$

(Q_{em} erzeugt zunächst keine fundam. Gruppe).

T_L - DER LINKSHÄNDIGE ISOSPIN ERZEUGT
DIE NICHTABELSCHE GRUPPE
 $SU(2)_L$

DA: $[T_L^i, Y] = 0$

IST DIE EICHGRUPPE:

$$SU(2)_L \otimes U(1)_Y$$

DIE SYMMETRIEBRECHUNG ZERSTÖRT DIESE
EICHSYMMETRIE, UND LÄSST NUR

$$U(1)_{em}$$

INVARIANT \rightarrow QED, LADUNGSERHALTUNG (EM.)

- DESWEITEREN $\exists U(1)_{\text{gesamt}}$: LEPTONZÄHLERH. / FAMILIE.

POSITRONEN SIND ANTEILCHEN DER
ELEKTRONEN:

DIRAC:

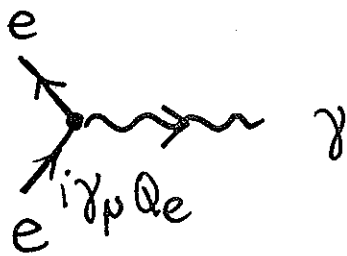
$$\begin{aligned} \psi & \begin{cases} (\partial_\mu \gamma^\mu - m) |e\rangle = 0 \\ (\partial_\mu \gamma^\mu + m) |\bar{e}\rangle = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\psi = i \gamma_2 \gamma_0 \quad : \quad \psi^{-1} \gamma_\mu \psi = -\gamma_\mu^T$$

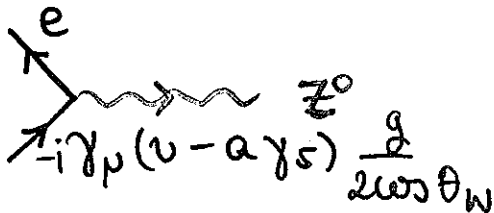
NEUTRINOS SIND 'NATÜRLICHE' PARTNER DER GELADENEN LEPTONEN.

$|e\rangle$:

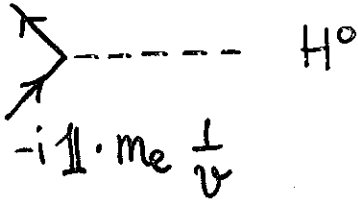
DIE WECHSELWIRKUNGEN



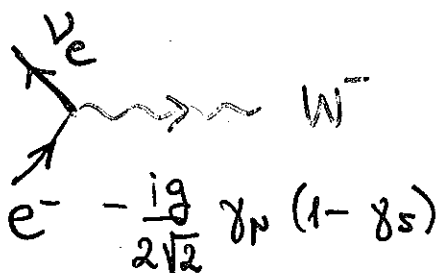
ELEKTROMAGNETISCHE WW



NEUTRALE SCHWACHE WW



HIGGS WECHSELWIRKUNG
(NOCH NICHT EXPLIZIT
BEOBACHTET).



SCHWACHE GELADENE WW

ELEKTRONEN NEHMEN AN DER STARKEN WECHSELWIRKUNG NICHT TEIL, D.H. SIE KOPPELN NICHT AN GLUONEN (S. ABER (3.2)).

DAS ELEKTRON & ANDERE MATERIEFELDER

$$|e\rangle_R \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L, |\nu\rangle_R ?$$

LEPTONEN DER
1. FAMILIE

$$\updownarrow \gamma, W^\pm, Z$$

$$|d\rangle_R \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L |u\rangle_R$$

QUARKS DER
1. FAMILIE

BISHER : 3 FAMILIEN , $\exists! \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, m < M_Z$.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

e^- 1897
 (e^+) 1931
ANDERSON

μ 1936
ANDERSON
NEDDERMEYER

τ PERL et al. '75
 b 1977 HESB et al.

u } p, n, π^\pm, π^0
 d } -----

$K^0, \Lambda (s)$ 1947
ROCHESTER
BUTLER

t 1995 CDF, DO
 ν_τ (incl.)

ν_e 1956 COWAN
et al.

ν_μ DANBY et al
1962

c AUBERT et al. '74
AUGUSTIN et al

GIBT ES EINE RELATION ZWISCHEN
LEPTONEN & QUARKS ?

RENORMIERBARKEIT \leftrightarrow KEINE DREIECKSANOMALIEN

$$\sum_f Q_{em,f}^2 (Q_{L,f} - Q_{R,f}) = 0$$

EIN TIEFERES VERSTÄNDNIS DIESER RELATION MUSS
IN ZUKUNFT GEFUNDEN WERDEN.

- HABEN LEPTONEN & QUARKS EINEN GEMEINSAMEN
URSPRUNG ?

ELEKTRONEN SIND (BISHER) DURCH LOKALE
FELDER BESCHREIBBAR \leftrightarrow PUNKTFÖRMIGE TEILCHEN.

DIE LAGRANGEFUNKTION

$$\mathcal{L}_e = \bar{e}_R i \gamma^\mu D_\mu^R e_R + \bar{\psi}_L i \gamma^\mu D_\mu^L \psi_L - \frac{GeV}{\sqrt{2}} (\bar{e}_R e_L + \bar{e}_L e_R)$$

$\hookrightarrow m_e$

$$D_\mu^R = \partial_\mu - \frac{i}{2} Y g' B_\mu$$

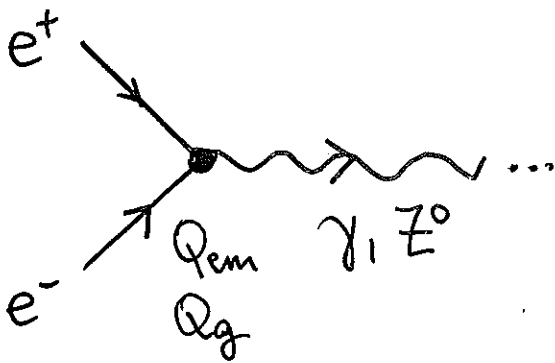
$$D_\mu^L = \partial_\mu - \frac{i}{2} Y g' B_\mu - \frac{i}{2} g \sigma_i A_\mu^i$$

$$e = g' \cos \theta_w = g \sin \theta_w$$

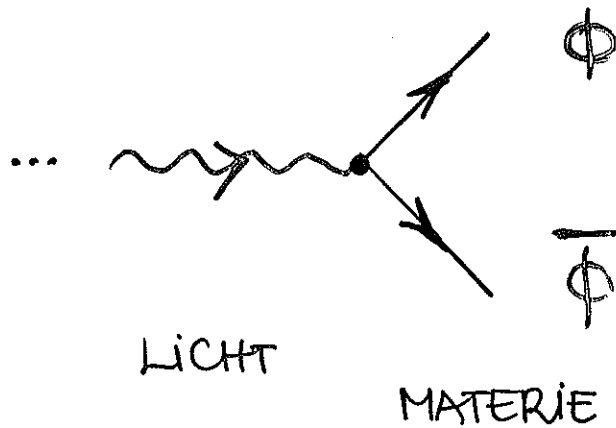
$$\frac{M_W}{M_Z} = \frac{e}{g'} = \cos \theta_w$$

2. e^+e^- STREUUNG : EIN WEG ZU NEUEN
TEILCHEN

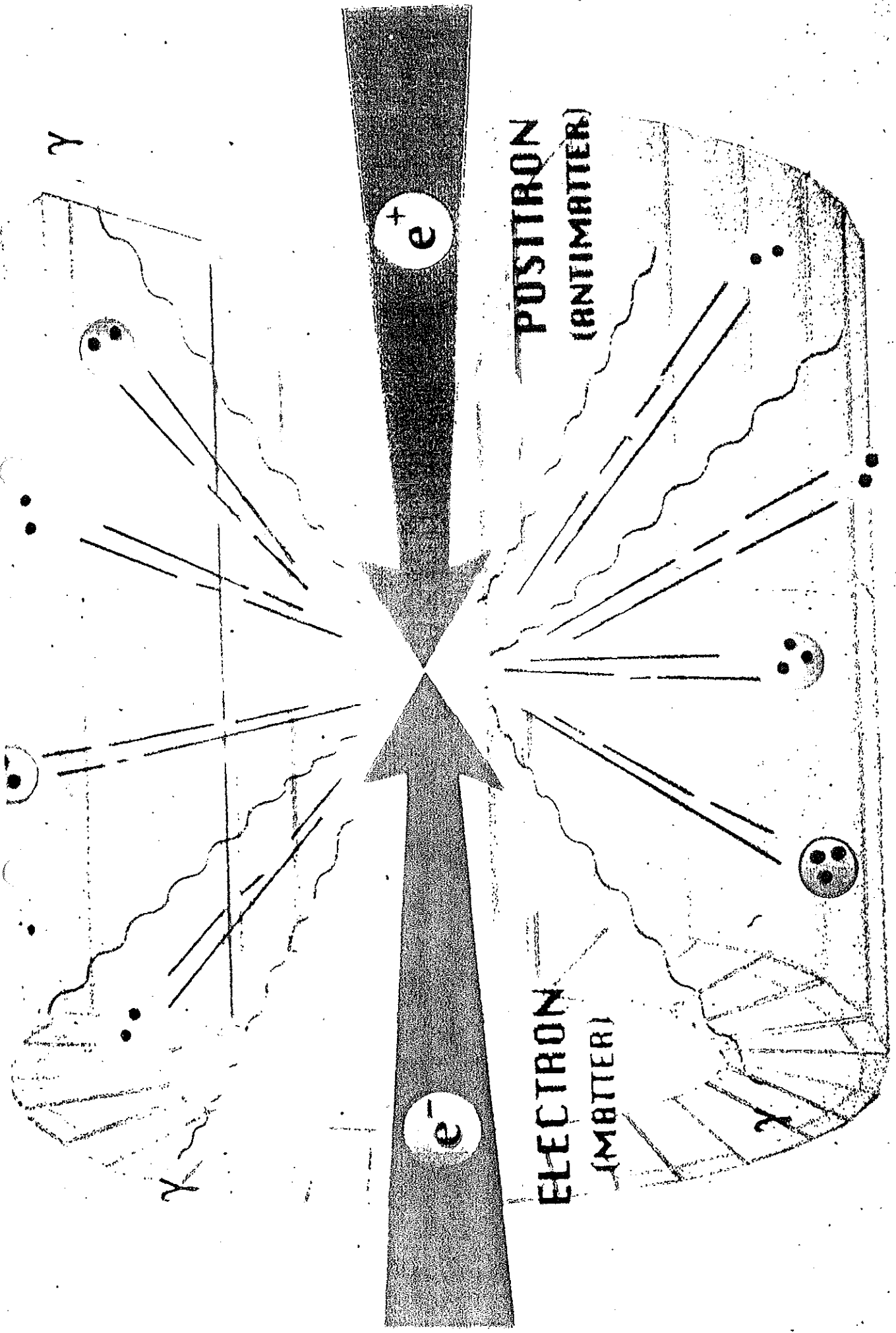
DIE PAARVERNICHTUNG: FIG



MATERIE 'LICHT' (ES WERDE LICHT!)



$\phi = l \rightarrow l^\pm, \bar{q}, W^\pm : l$ NEUERE
EW \wedge EM
GELADENE
TEILCHEN
PAARE.



CERN (GENEVA)



LEP

SPS

• ELEKTRONEN SIND GUT BESCHLEUNIGBAR

→ $\sim 100 \text{ GeV}/\text{beam}$ IN SPEICHERRINGEN

PETRA $\sqrt{s} \sim 45 \text{ GeV}$ DESY

TRISTAN $\sqrt{s} \sim 60 \text{ GeV}$ JAPAN

LEP 1 $\sqrt{s} \sim M_Z$ CERN, Genf

LEP 2 $\sqrt{s}_{\text{max}} \sim 200 \text{ GeV}$ —||—

↑ $\mathcal{L} \sim 500 \text{ pb}^{-1}$ (ZIEL)

→ ZIEL (Zunächst) bis

$\sqrt{s} = 2 \text{ TeV}$ IN LINEARBESCHLEUNIGERN

SLC $\sqrt{s} \sim M_Z$ SLAC, USA

PROJEKTE: NLC USA

TESLA: INT COLL. DESY

JLC JAPAN

⋮

$\sqrt{s} \sim 350 \text{ GeV}, 500 \text{ GeV}, 1 \text{ TeV}, \dots$

$t\bar{t}$

↑

↑

$\mathcal{L} \sim 10 \text{ fb}^{-1}$ (ZIEL)

$\sigma \approx \infty \frac{1}{s}$

↘

\mathcal{L} MUSS MIT s
WACHSEN!

EXTREME FOKUSSIERUNG.

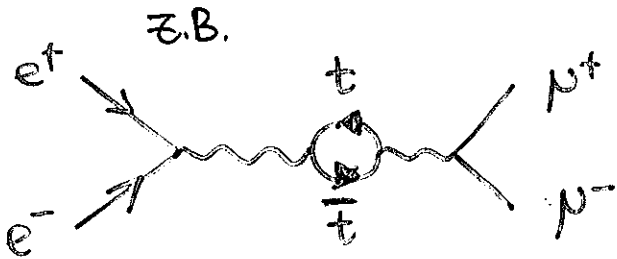
WAS IST INTERESSANT ?

- NEUE TEILCHEN ! REALE PRODUKTION
PRÄZISE MASSEMESSUNG MÖGLICH

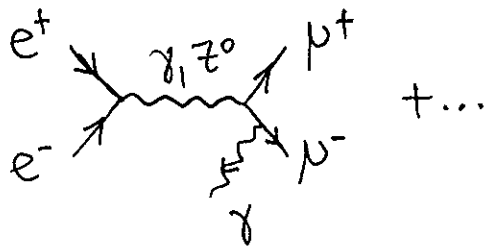
$$\begin{aligned} \text{CMS: } (p_{e^+} + p_{e^-})^2 &= s = (p_\phi + p_{\bar{\phi}})^2 \\ &= (2E_\phi)^2 - (\vec{p}_\phi + \vec{p}_{\bar{\phi}})^2 \\ &= 4(M^2 + p_\phi^2) \end{aligned}$$

$$\therefore e^+e^- \rightarrow W^+W^-, e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$$

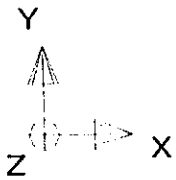
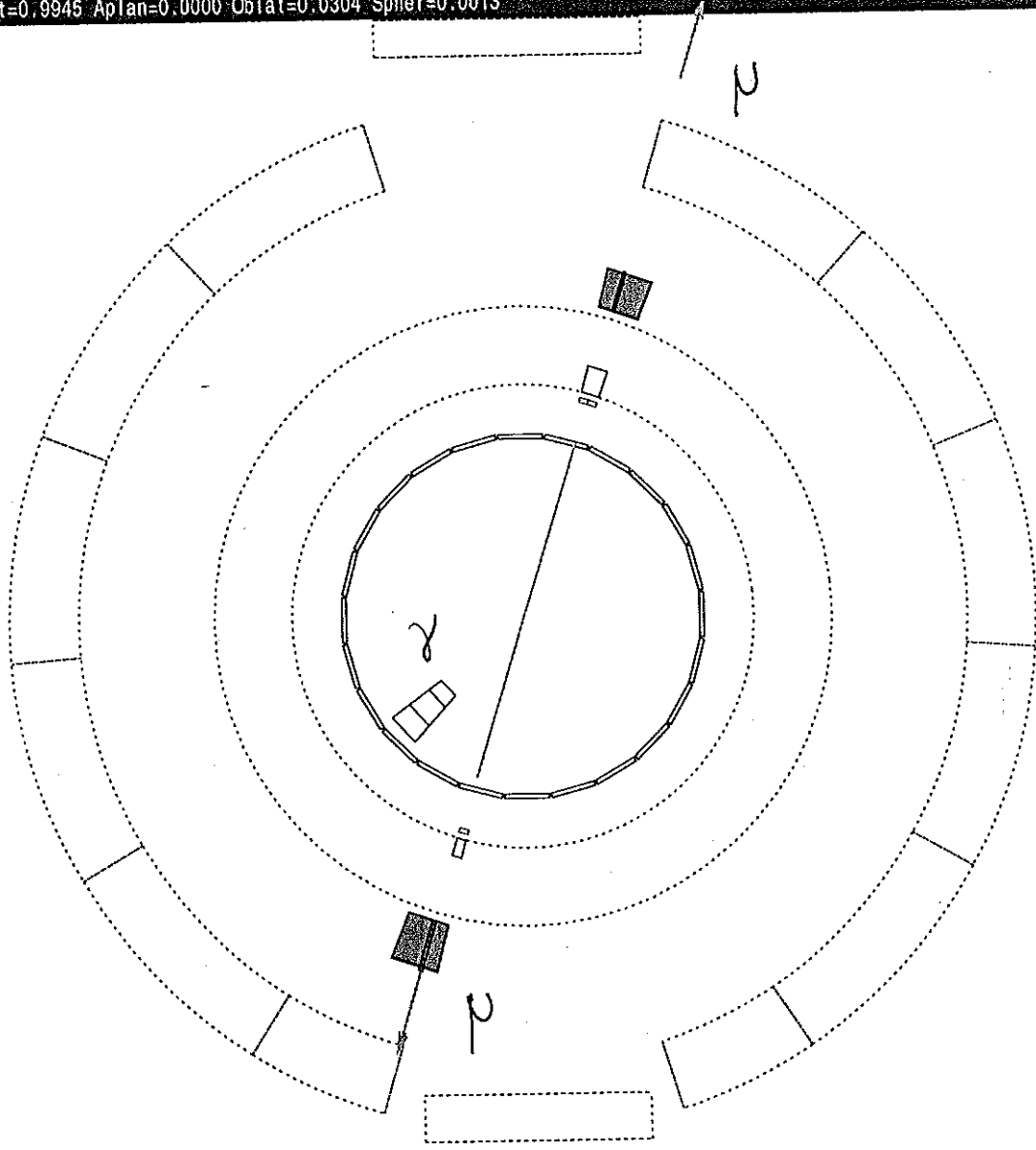
- VIRTUELLE EFFEKTE



$$\sigma = \sigma(m_t).$$



Run:event 4093: 1042 Date 930527 Time 20724 Cirk(N= 2 Sump= 91.4) Ecal(N= 8 SumE= 5.0) Hcal(N= 4 SumE= 6.9)
 Ebeam 45.658 Evis 101.0 Emis -9.6 Vix (-0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 2) Sec Vix(N= 0) Fdet(N= 1 SumE= 0.0)
 .350 Thrust=0.9945 Aplan=0.0000 Oblat=0.0304 Spher=0.0013

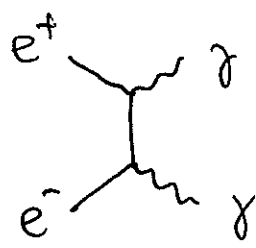


200. cm.

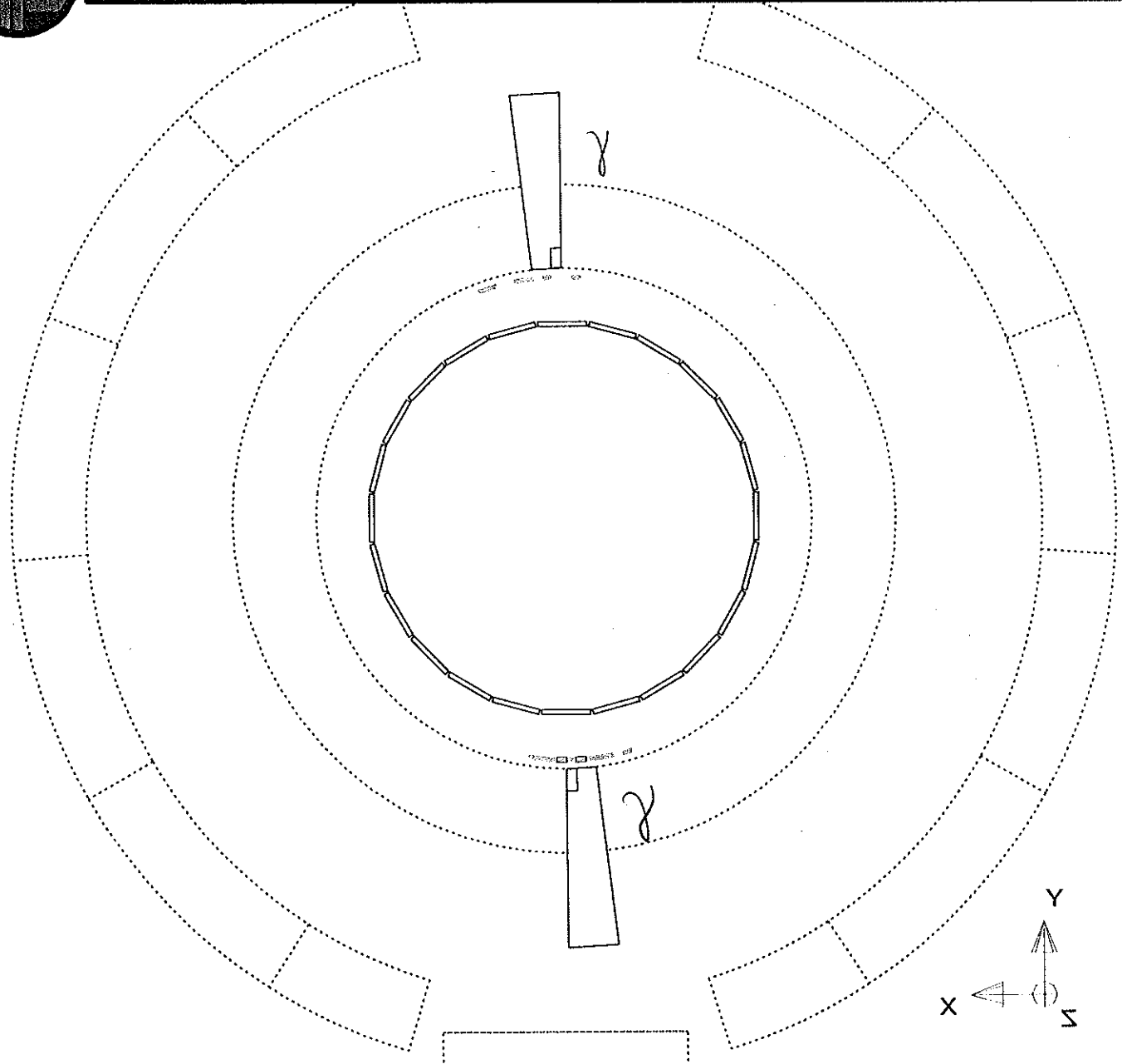
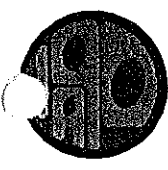
510 20 50 GeV



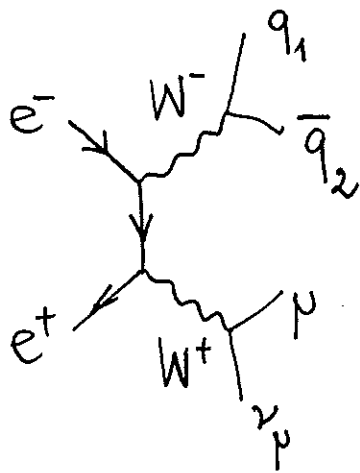
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



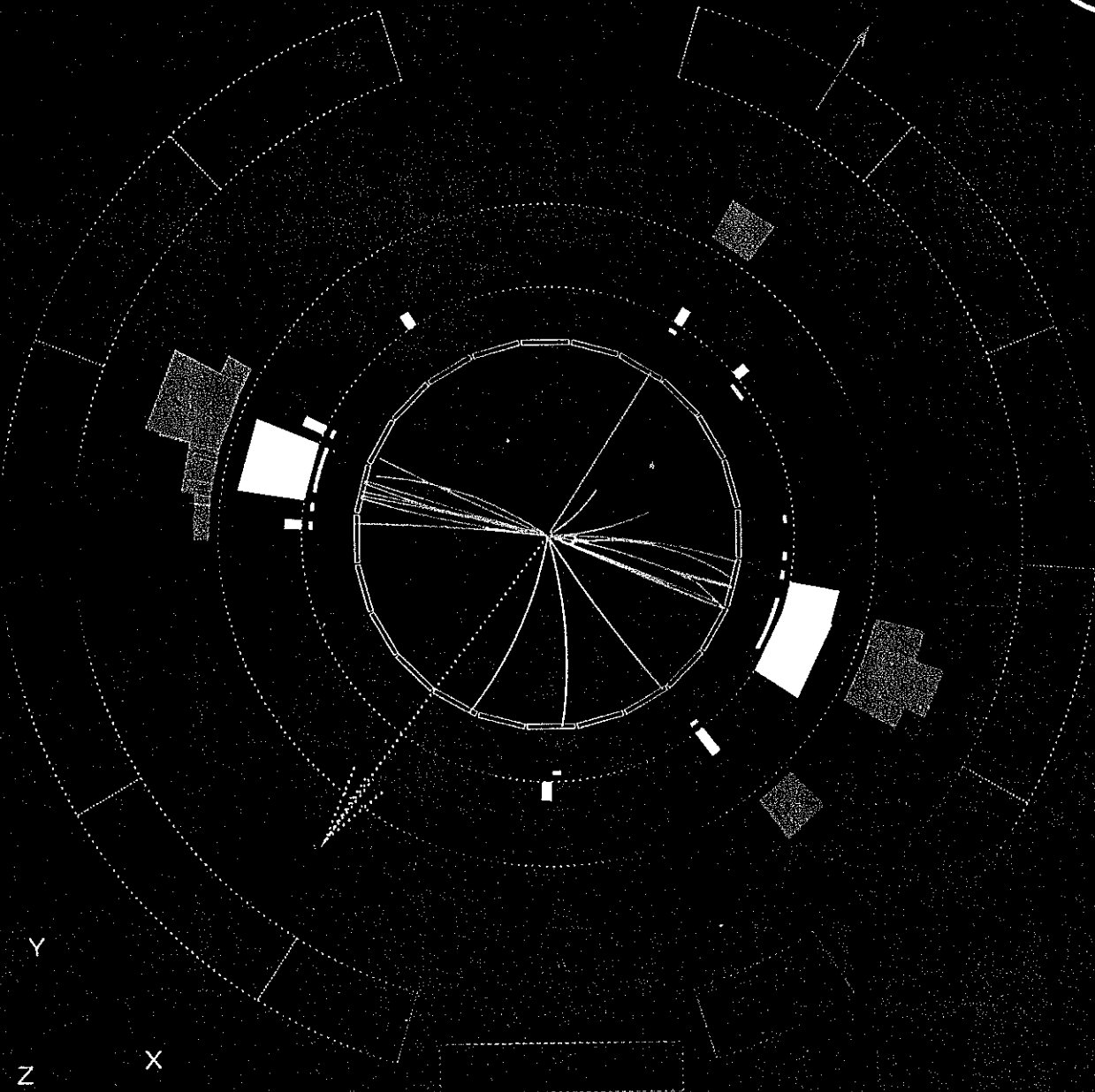
Run: event 4177:15034 Date 930815 Time 10314 Cirk(N= 0 Sump= 0.0) Ecal(N= 8 Sume= 97.4) Hcal(N= 1 Sume= 5.2)
 Ebeam 45.661 Evis 99.6 Emiss -8.3 Vix (-0.04, 0.08, 0.45) Muon(N= 0) Sec Vix(N= 0) Fcal(N= 0 Sume= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9957 Aplan=0.0000 Cpl1=0.9288 Spher=0.0006



Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)
 500. cm
 2 10 50 20 GeV



Run: event 7439; 45890 Date 960812 Time 204330 Cirk(N= 30 Sump=111.1) Ecal(N= 25 SumE= 24.5) Hcal(N=16 SumE= 27.8)
 Ebeam 80.500 Evis 140.4 Emiss 20.6 Vtx (-0.02, 0.07, 0.56) Muon(N= 1) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 0.027 Bunchlet 1/1 Thrust=0.7766 Aplan=0.0035 Oblat=0.4726 Spher=0.2982



200 cm 5.10 20 GeV

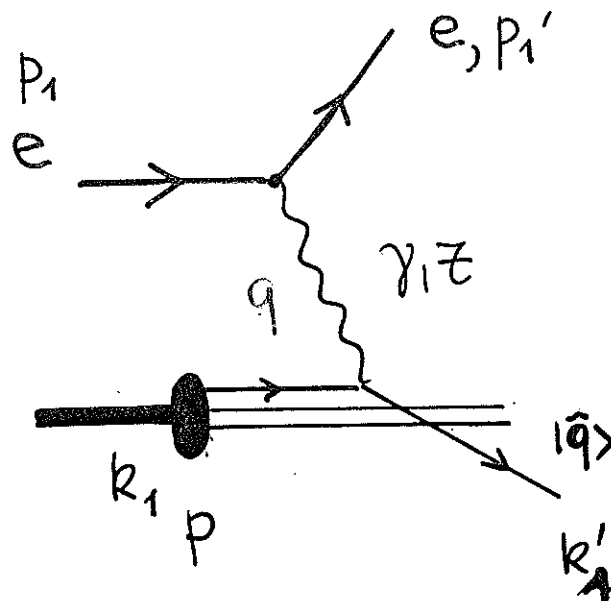
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

3. ep-STREUUNG : AUF DEM WEG IN DES INNERE DER HADRONEN

$e^+e^- \rightarrow \phi \bar{\phi}$: S-KANAL PROZESS

$$(p_1 + p_2)^2 = s > 0$$

$ep \rightarrow eX$: t-KANAL PROZESS



$$(p_1 - p_2)^2 = q^2 < 0.$$

$$q^2 = -Q^2.$$

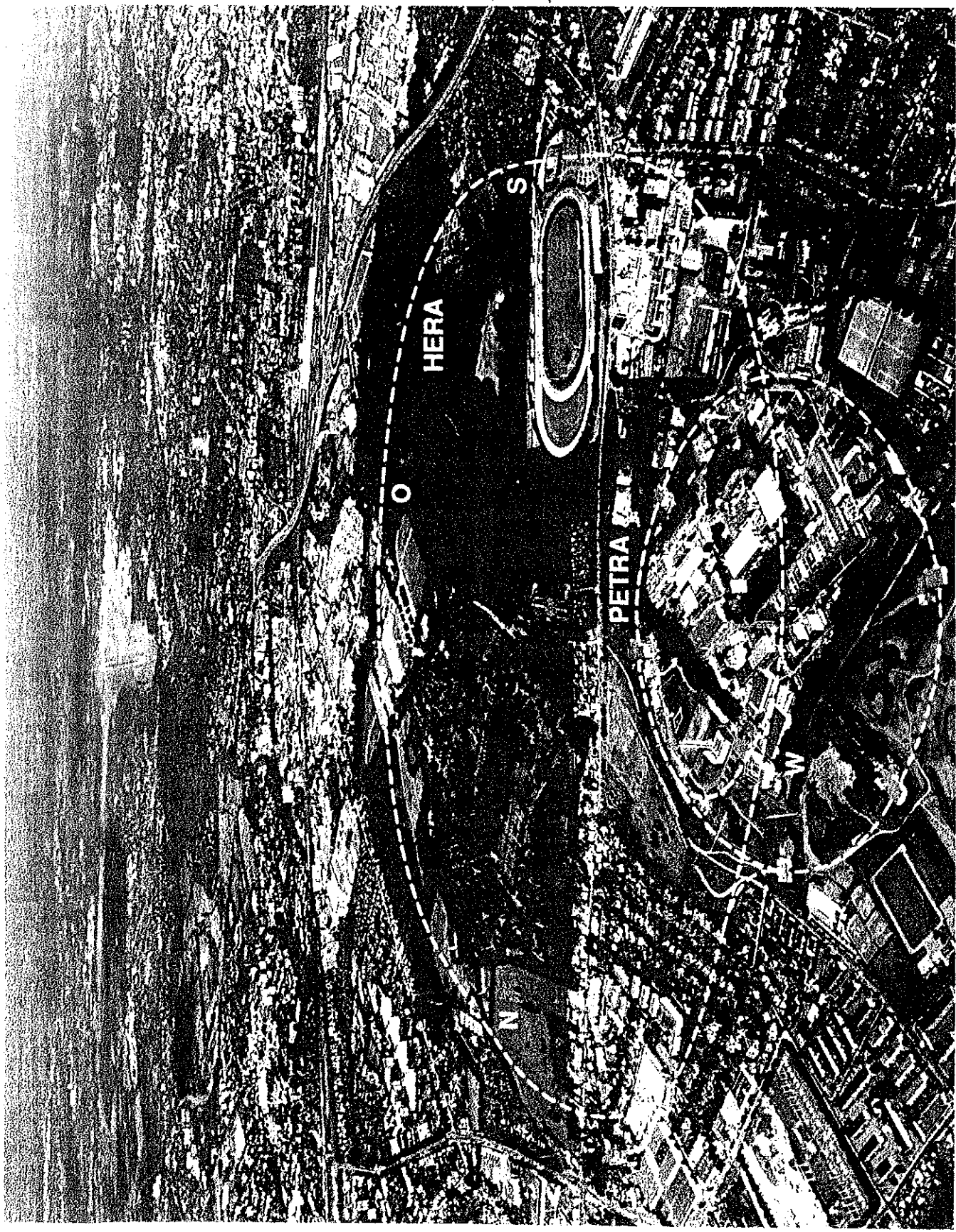
q IST EIN RAUMARTIGER IMPULS.

$$|Q| \Delta x \sim \hbar$$

→ $|Q| \gg 1$ AUFLÖSUNG KLEINER ABSTÄNDE

▷ EIN 'MIKROSKOP' FÜR DAS PROTON

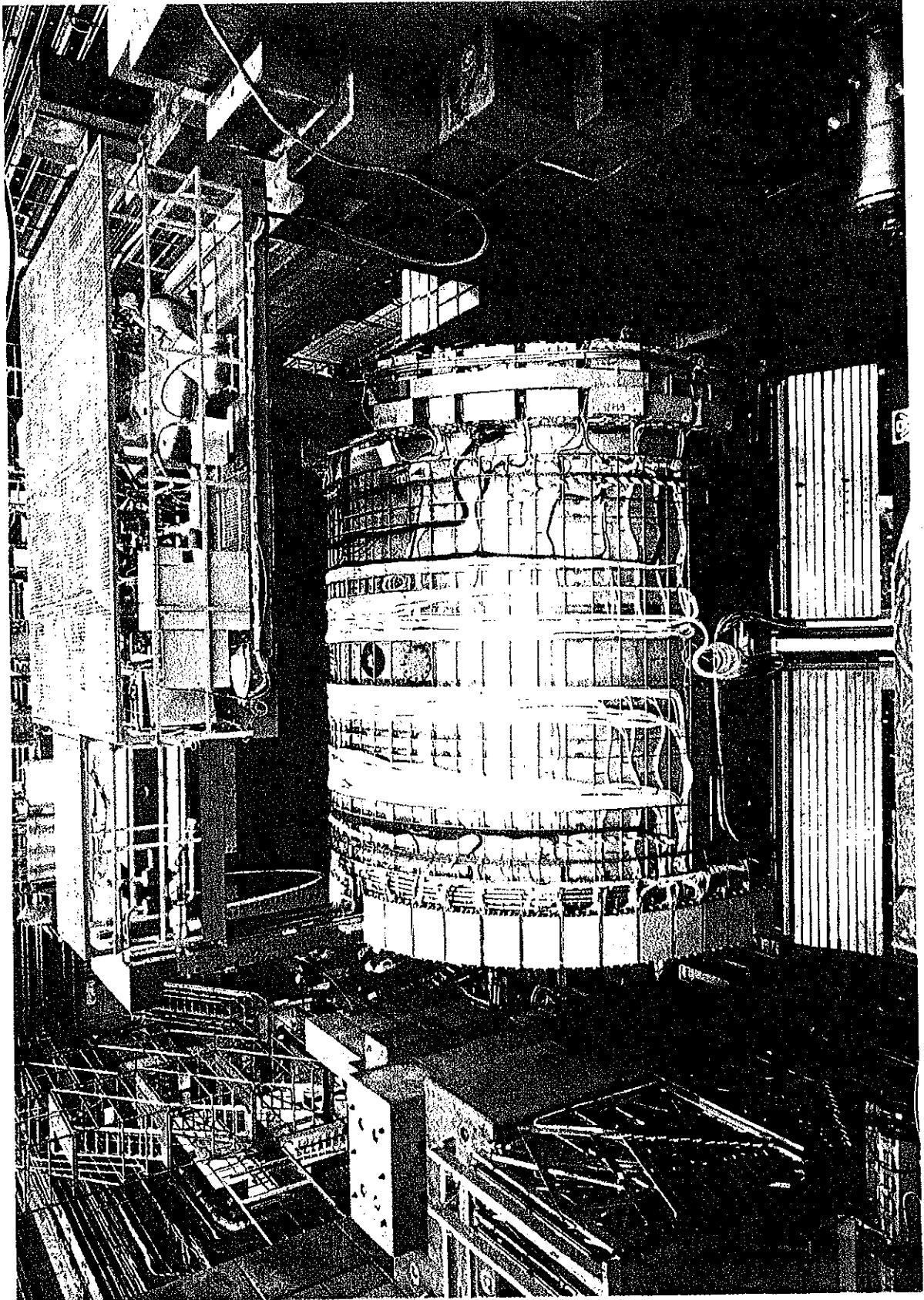
H1

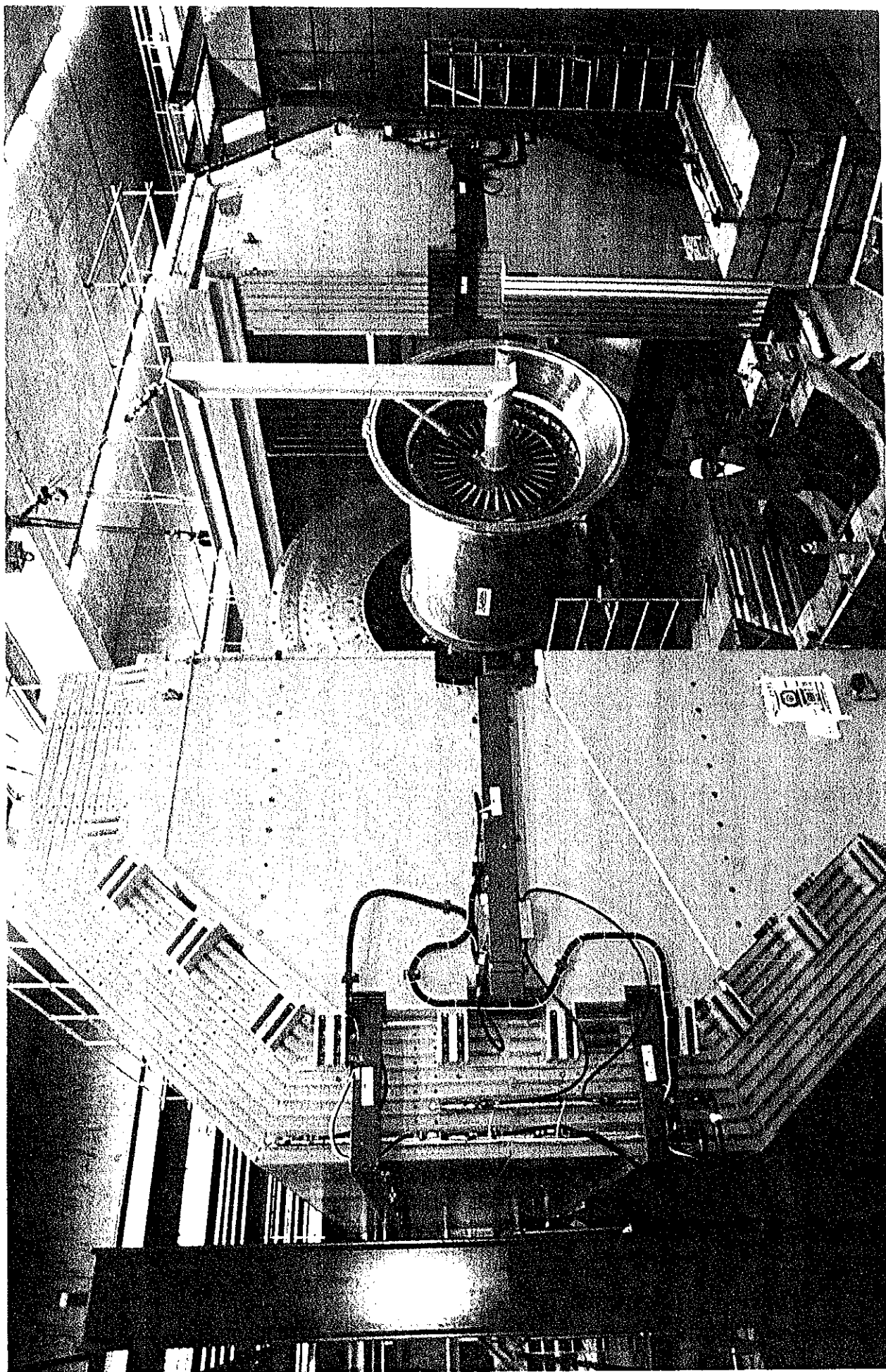


HERMES

ZEUS
TRABRENN-
BAHN

HERA-B DESY (HAMBURG)





20°C
OPEN
SUPERIEURE
UP

STRUKTUR DER HADRONEN

$$|p\rangle = \overset{g\ r\ b}{|uud\rangle} \quad \underline{\text{VALENZSTRUKTUR}}$$

$$Q|p\rangle = 1 = Q|u\rangle + Q|u\rangle + Q|d\rangle = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3}$$

$$|n\rangle = |ddu\rangle$$

$$m = |q\bar{q}\rangle$$

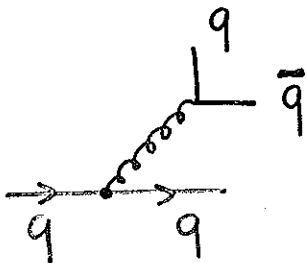
$$3 \otimes 3 \otimes 3 = \underline{1} \oplus 8 \oplus 8 + 10$$

$$3 \otimes \bar{3} = \underline{1} \oplus 8$$

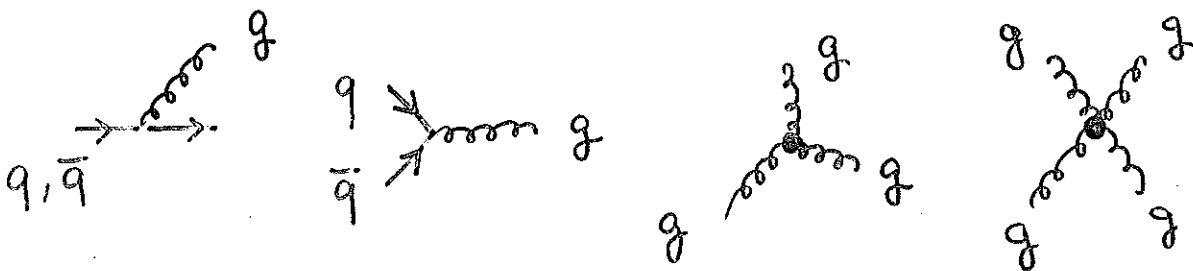
QUARKSEE:

WEITERE
 $|q\bar{q}\rangle$

FOCK-ZUSTÄNDE



GLUON-SEE:

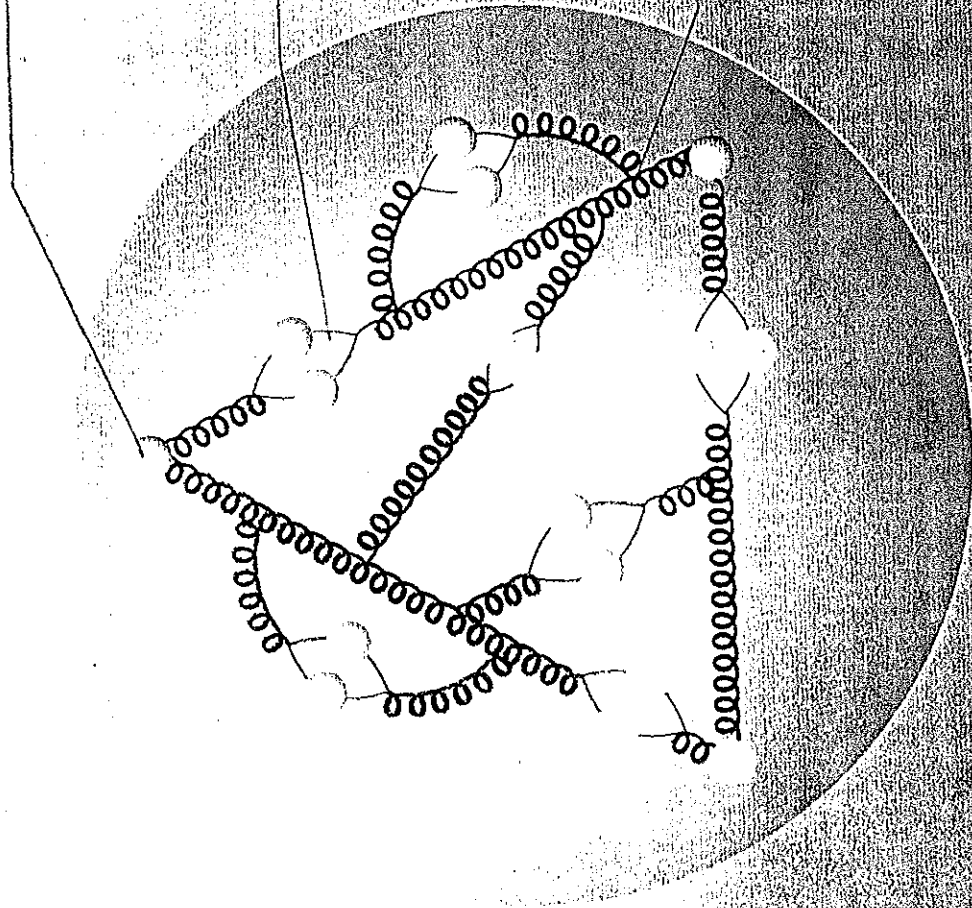


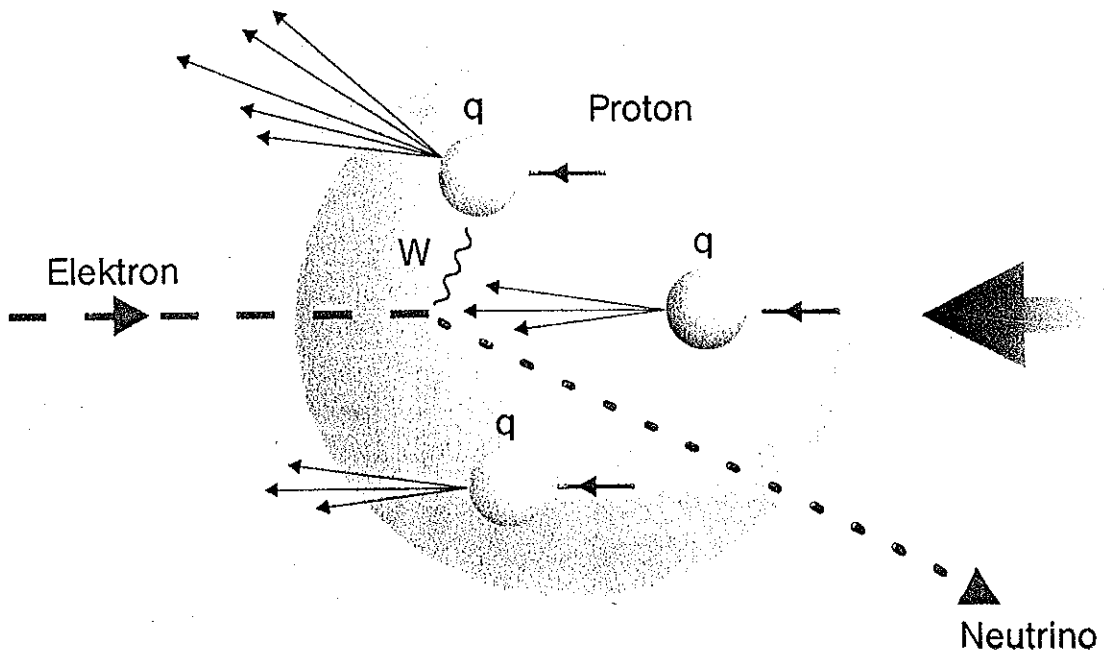
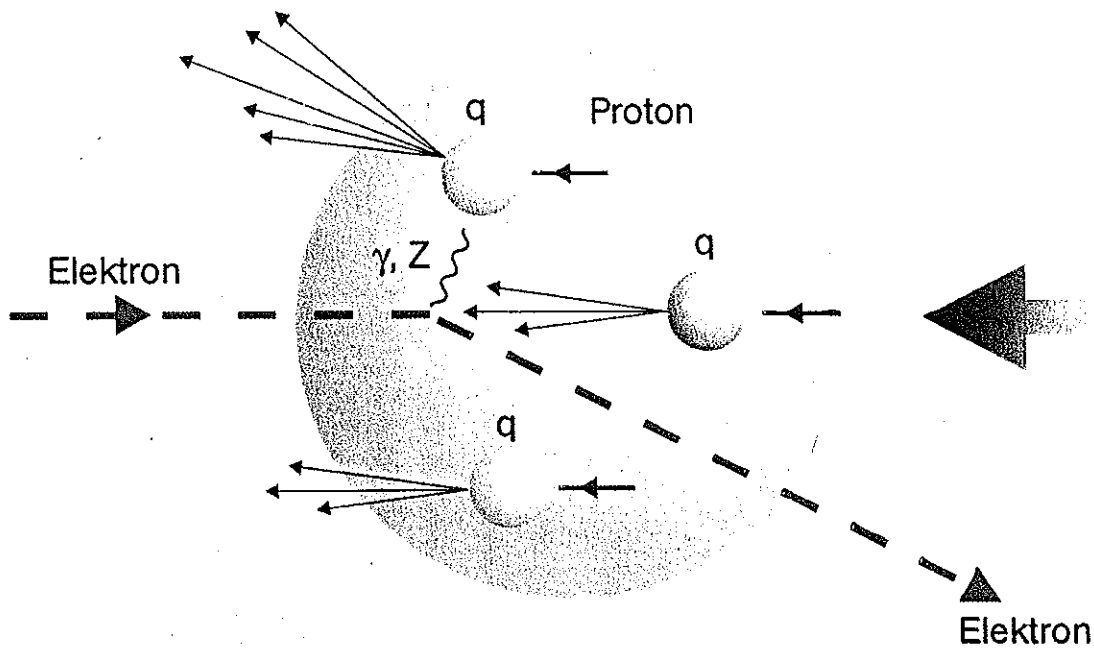
HADRONEN SIND FARBNEUTRAL. ANTIQUARKS WERDEN NUR GEMEINSAM MIT QUARKS ERZEUGT. GLUONEN WECHSELWIRKEN UNTEREINANDER UND MIT QUARKS.

Valenzquark

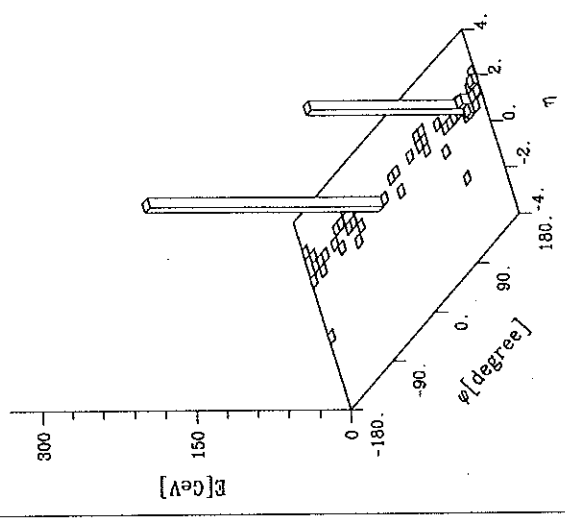
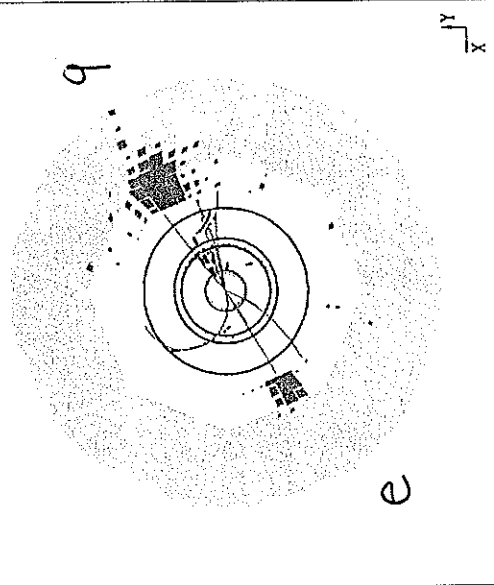
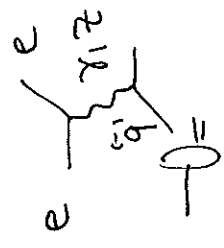
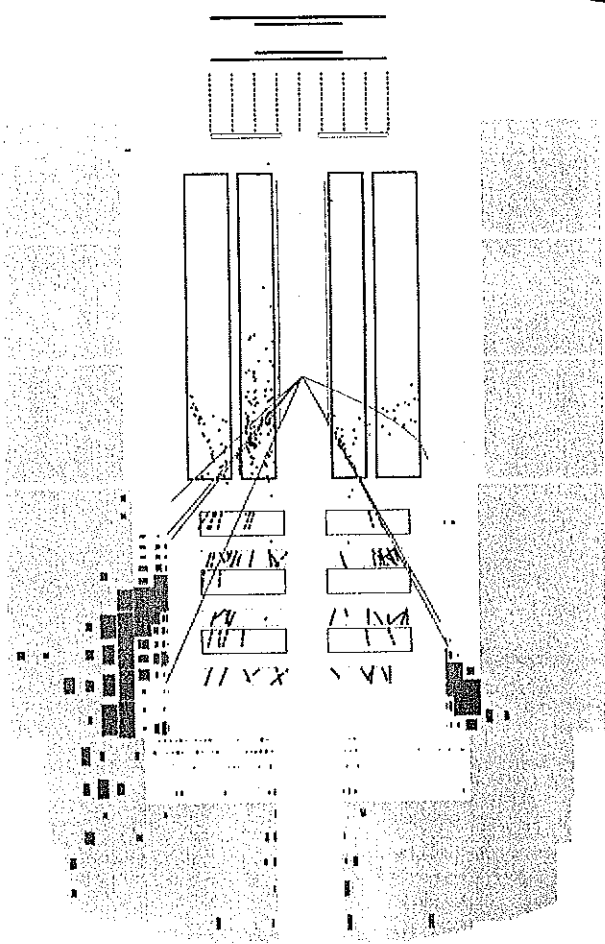
Quark-Antiquark Paar

Gluon

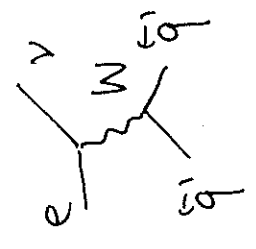
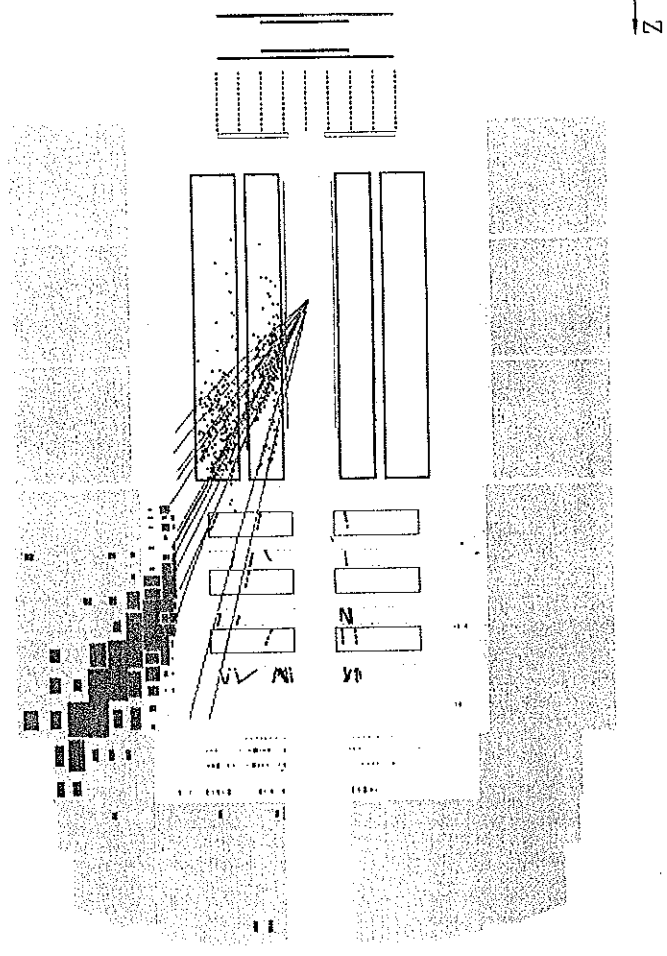
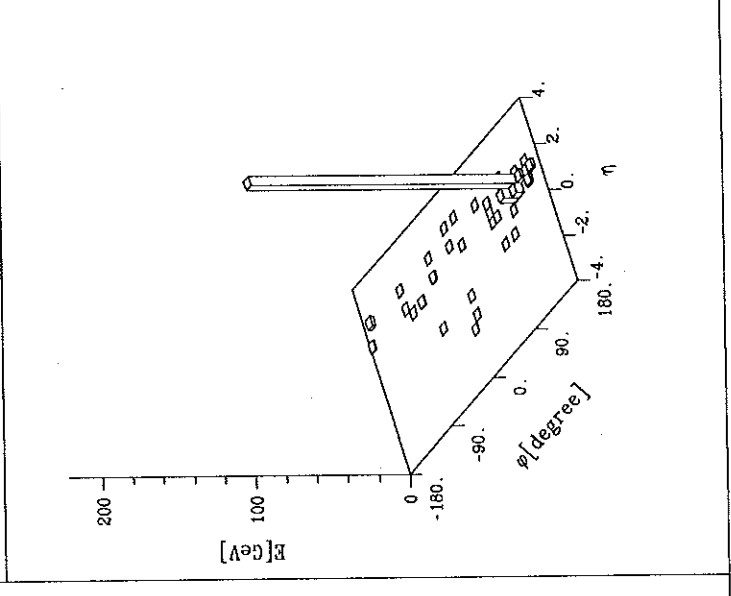
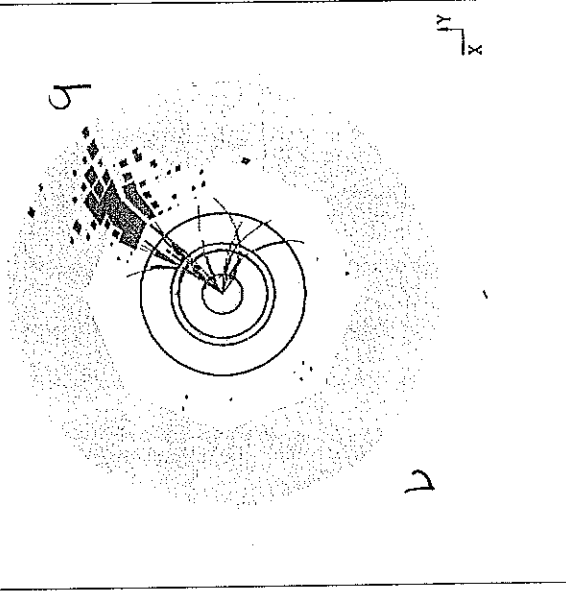




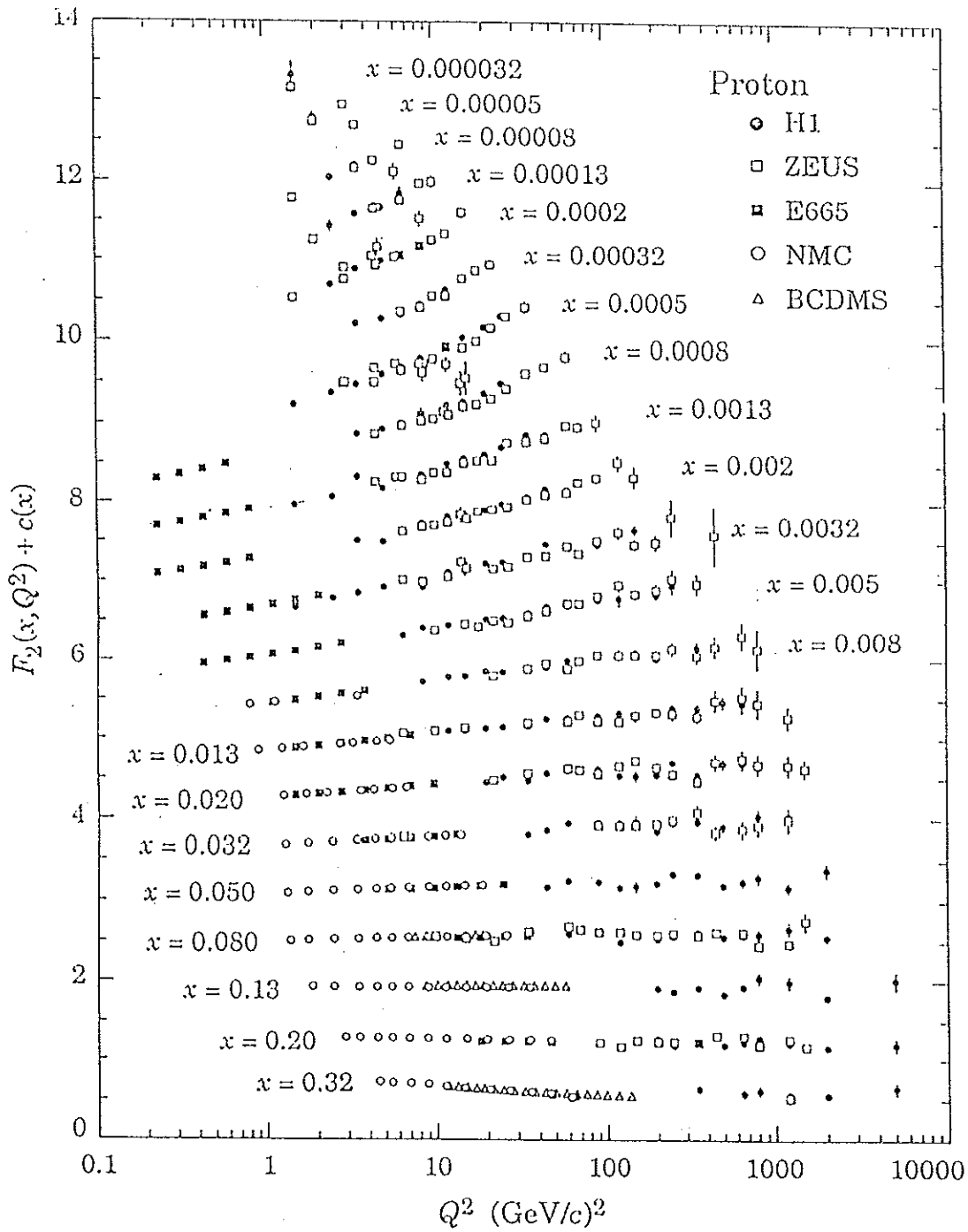
NC event $Q^2 = 24800 \text{ GeV}^2$ $y = 0.66$ $x = 0.4$



CC event $Q^2 = 20000 \text{ GeV}^2$ $y = 0.49$ $x = 0.44$



Structure Functions



WAS IST INTERESSANT ?

- TEST DER QCD:

$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi} = \frac{12\pi}{(33 - 2N_f) \log \frac{Q^2}{\Lambda^2}} + \dots$$

→ ASYMPTOTISCHE FREIHEIT

- QUARK - GLUON - DYNAMIK

- GLUON & QUARKDICHEN BEI $x \ll 1$

$$x = \frac{Q^2}{2p \cdot q}$$

→ NOTWENDIGKEIT KOMPLIZIERTER RECHNUNGEN

!! $O(\alpha_s^3)$, RESUMATIONEN $x \ll 1$, $x \sim 1$.

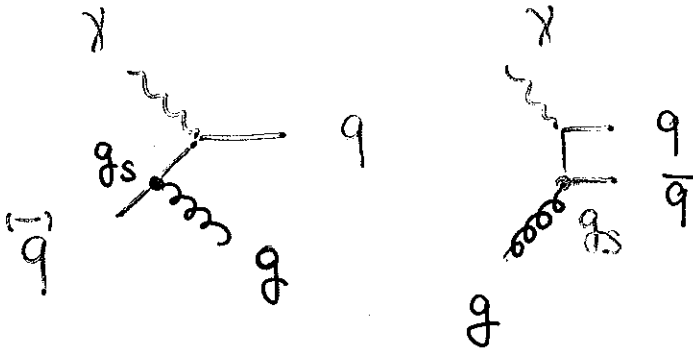
- SUCHE NACH EINER EVTL. SUBSTRUKTUR DER QUARKS

- NEUE DYNAMISCHE EFFEKTE

→ NEUE TEILCHEN ?

↳ NEUE MATERIEFELDER !

α_s : MESSUNG MIT HILFE DER EVOLUTIONSGL.
VON STRUKTURFUNKTIONEN



\overline{MS} :

$$\alpha_s(M_Z) = .121 \pm 0.004$$

$$\alpha_s(M_Z) = .112 \pm 0.004$$

e^+e^-

DIS



WEITERE KLÄRUNG ERFORDERLICH.

→ HERA : SKALENSICHERHEIT ERFORDERT
KENNTNIS DER $O(\alpha_s^3)$ SPLITTING
FUNCTIONS! (SCHWIERIGE TH. AUFGABE)

THEOR. FEHLER VON ± 0.002 WIRD ANGESTREBT.

$\delta\alpha_s^{\text{stat}} \sim 0.003$ möglich!



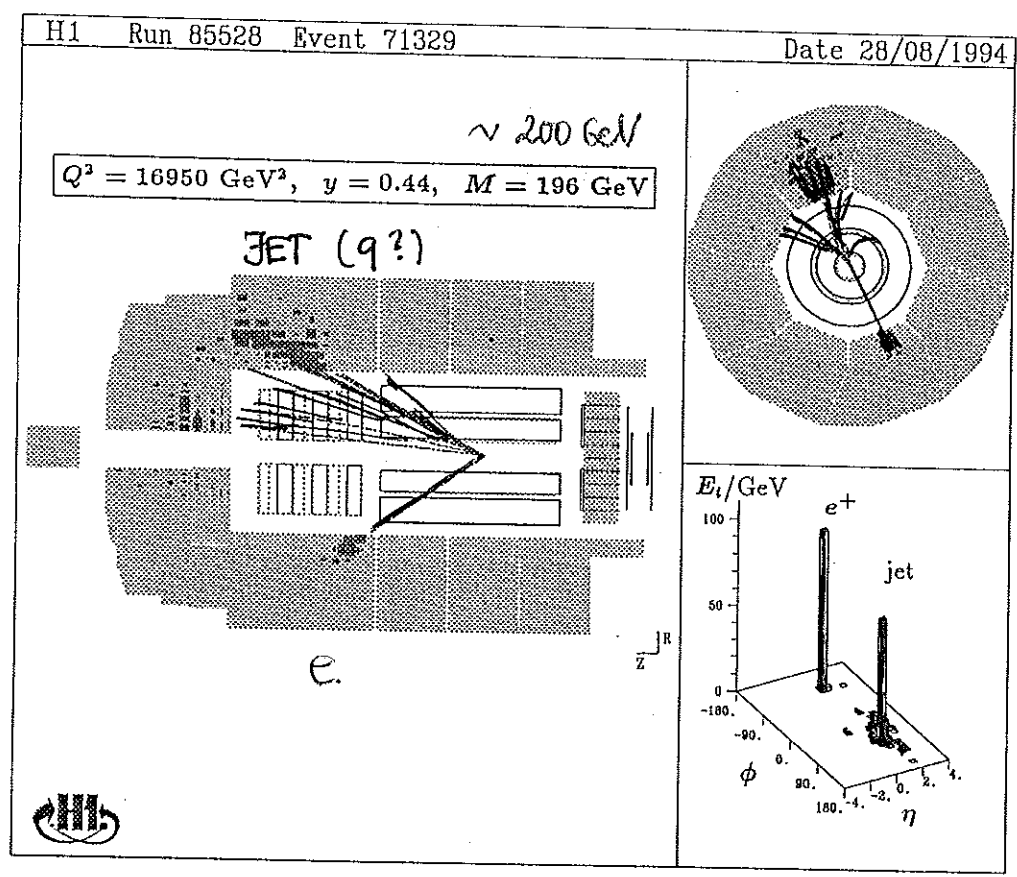
NEUE EREIGNISSE BEI HERA.

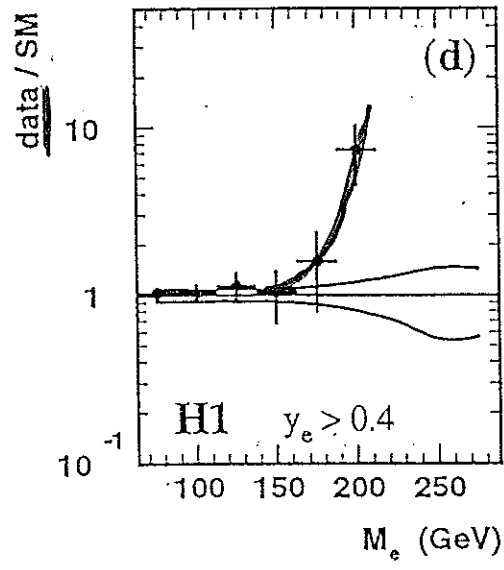
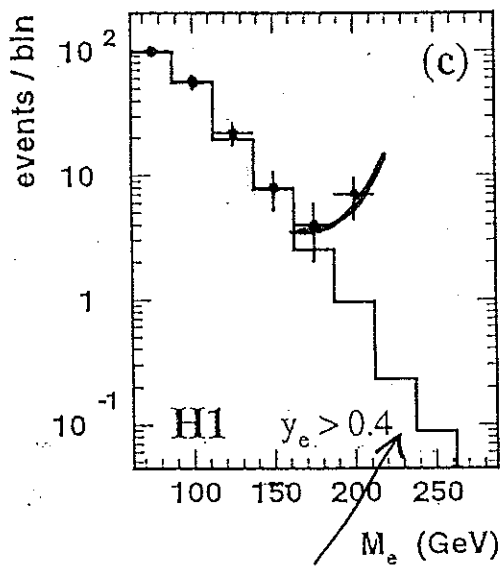
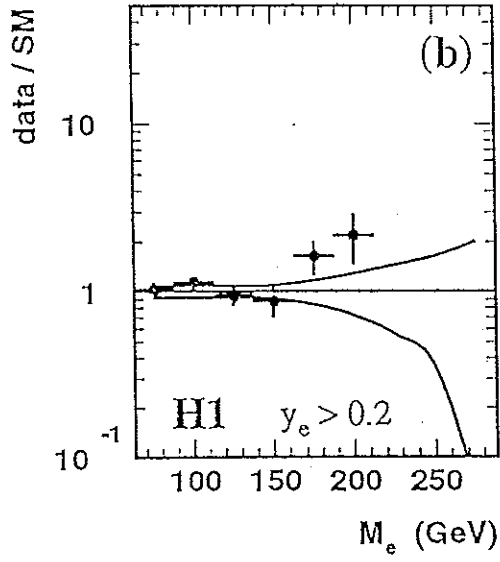
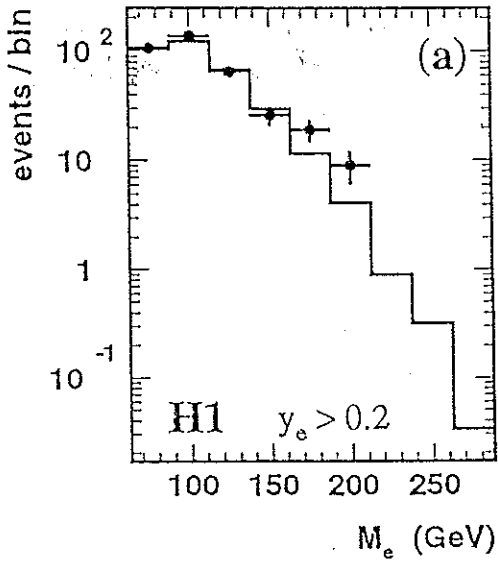
- H1
- ZEUS

$$Q^2 \gtrsim 15000 \text{ GeV}^2$$

12 vs 4.5 events!

$$M = \sqrt{s} \sim 200 \text{ GeV!}$$

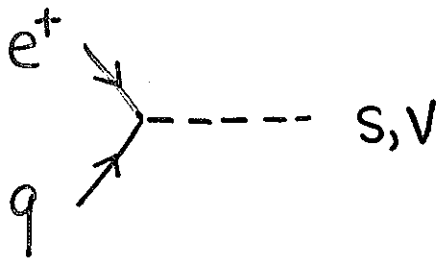




STANDARD MODEL

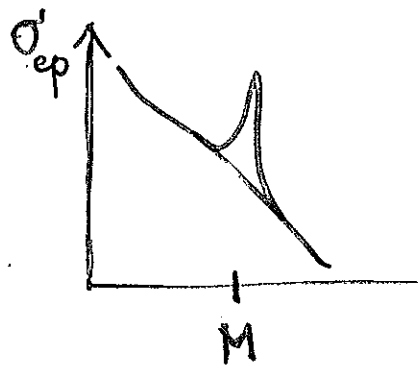
NEW PHYSICS ?

LEPTOQUARKS ?



$$\propto \delta(s - M^2)$$

$$\Gamma \ll M.$$

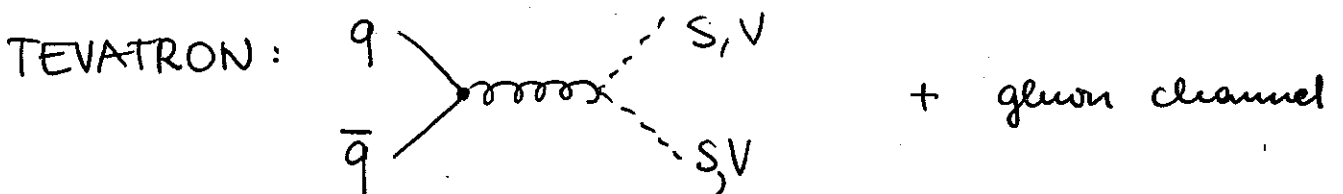


ERSTE ANZEICHEN FÜR:

ÜBERSCHUSS IN qe^+ & $q\nu$ FINAL STATES

- STATISTISCH NOCH NICHT VOLLSTÄNDIG GESICHERT ($\sim 1\%$)

- VERDOPPLUNG DER STATISTIK BIS ENDE 1997.



S : # 10... 16

V : > # 20... 30

$$\left. \begin{array}{l} S : \# 10 \dots 16 \\ V : > \# 20 \dots 30 \end{array} \right\} 4\pi, \quad Br = 1, \quad \eta = 1.$$

$$Br \sim 0.8? \quad \eta \sim 0.2$$

$$\# N_{obs} = (Br)^2 0.2 N_{4\pi}$$

$$\hookrightarrow M_S < 175 \text{ GeV / exp.}$$

DIS 97: CHICAGO, TUE, APRIL 15 ; 16:30

4. OFFENE PROBLEME UND DIE ZUKUNFT DER LEPTONFORSCHUNG

- WIEVIELE FAMILIEN GIBT ES ? SIND ES 3
- AUS WELCHEM GRUNDE ?
- WELCHES GESETZ DETERMINIERT DIE LEPTONMASSEN?
- SIND NEUTRINOS MASSELOS ? - GIBT ES MASSIVE DIRAC OD. MAJORANA NEUTRINOS ?
- GIBT ES ANREGUNGSZUSTÄNDE VON ELEKTRONEN
- $|e^*\rangle \rightarrow \gamma |e\rangle$?
- HAT DAS STANDARD MODELL EINE SUPER-SYMMETRISCHE ERWEITERUNG,
D.H. EXISTIEREN SELECTRONS $|e\tilde{\nu}\rangle$ SNEUTRINOS $|\tilde{\nu}\rangle$ } SKALARE.
- GIBT ES LEPTOQUARKS $e + q \rightarrow \phi_{S,V} ?$
- HABEN FERMIONEN EINE SUBSTRUKTUR ?
- WENN JA, WELCHE KRÄFTE BINDEN WELCHE BAUSTEINE ...

pp- und e^+e^- STREUUNG BEI
NOCH HÖHEREN ENERGIEEN KÖNNEN
ANTWORTEN AUF DIESE FRAGEN GEBEN.

NACH EINER ERSTEN PHÄNOMENOLOGISCHEN
ORDNUNG DER MATERIEFELDER $|v\rangle, |l\rangle, |u_i\rangle, |d_i\rangle$
UND DER BISHER BEKANNTEN KRAFTFELDER
 $A_i = \gamma, W^\pm, Z, g, H_0$ (AUSSER GRAVITATION)
DURCH DAS STANDARD MODELL -
SIND VIELE WESENTLICHE FRAGEN NOCH
UNGEKLÄRT.

EXPERIMENTE IM BEREICH $200 \text{ GeV} \lesssim \sqrt{s} \lesssim 2 \text{ TeV}$
WERDEN AUFSCHLÜSSE GEBEN $\rightarrow \exists H_0 \vee \nexists H_0$
etc.