

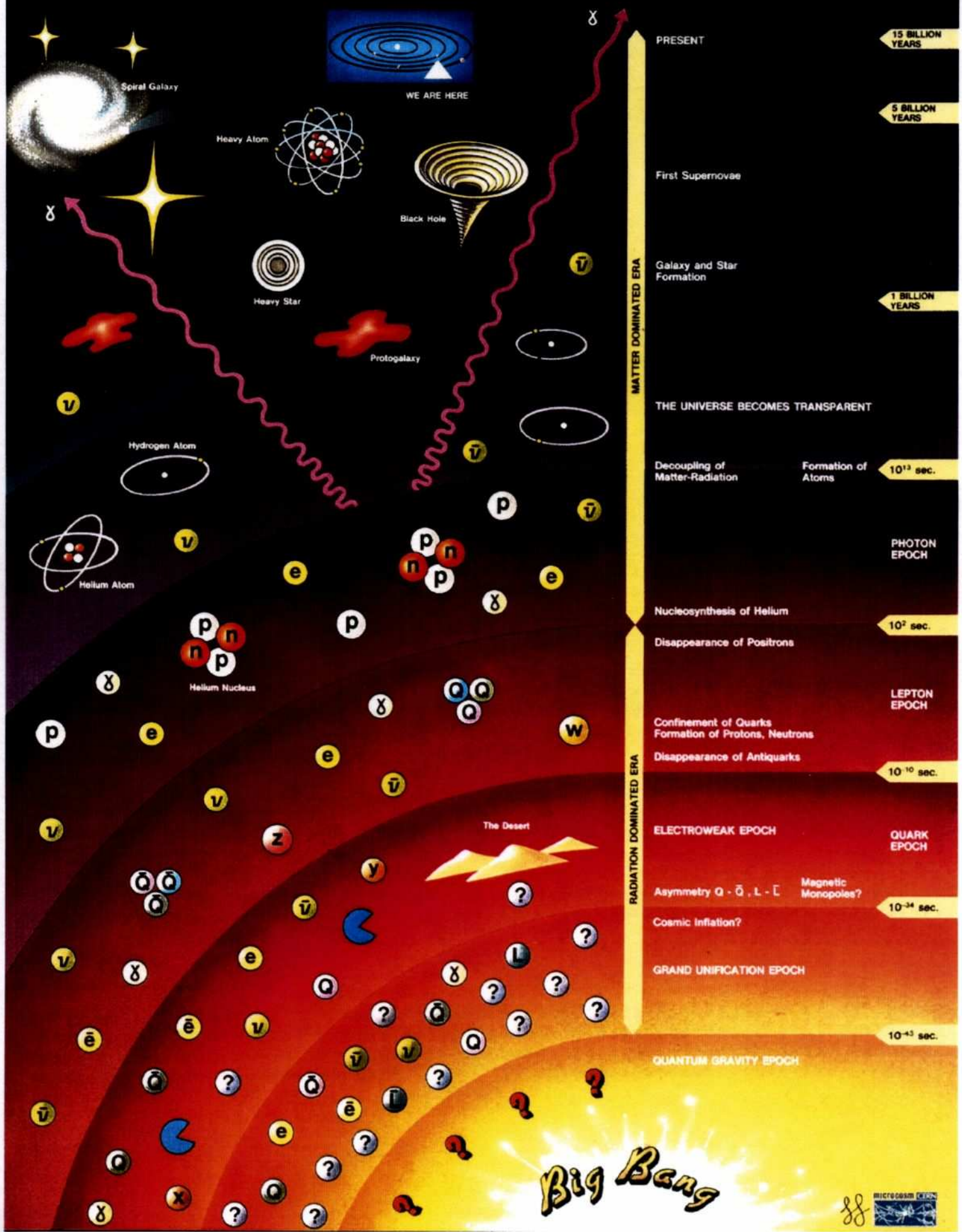
Einleitung

Meilensteine der Elementarteilchenphysik:

- 1897 J.J. Thomson Entdeckung des Elektrons
(e/m Messung)
- { 1900 M. Planck Quantisierung der elektromagnet. Strahlung
- { 1905 A. Einstein Erklärung d. photoelektr. Effekts
- { 1923 A.H. Compton Compton-Effekt: Wellenlängenverschiebung nach Streuung am Elektron
- Entdeckung des Photons
(Name stammt von Gilbert Lewis, Chemiker 1926)
- 1911 E. Rutherford Kern des Wasserstoff-Atoms
- Entdeckung des Protons
- 1932 J. Chadwick Entdeckung des Neutrons
- 1930 W. Pauli Postulat des Neutrinos

Genügt, um status quo der Welt zu erklären

History of the Universe



PRESENT

15 BILLION YEARS

5 BILLION YEARS

First Supernovae

Galaxy and Star Formation

1 BILLION YEARS

THE UNIVERSE BECOMES TRANSPARENT

Decoupling of Matter-Radiation

Formation of Atoms

10^{13} sec.

PHOTON EPOCH

Nucleosynthesis of Helium

Disappearance of Positrons

10^2 sec.

LEPTON EPOCH

Confinement of Quarks
Formation of Protons, Neutrons

Disappearance of Antiquarks

10^{-10} sec.

ELECTROWEAK EPOCH

QUARK EPOCH

Asymmetry $Q - \bar{Q}$, $L - \bar{L}$

Magnetic Monopoles?

Cosmic Inflation?

10^{-34} sec.

GRAND UNIFICATION EPOCH

10^{-43} sec.

QUANTUM GRAVITY EPOCH

Big Bang

Meilensteine

Aber: Wie hat sich das Universum zu diesem Zustand entwickelt?

und noch viele weitere Fragen...

Außerdem:

• { 1927 P. Dirac Postulat der Anti-Elektronen
1931 C. Anderson Entdeckung des Positrons

1934 H. Yukawa Postulat von Mesonen als Träger der Kernkraft

Konzept: Kernteilchen tauschen ein "Feldquant" aus (analog zum Photon)

Abschätzung: Reichweite \approx Kerngröße $\approx 10^{-15}$ m

Unschärferelation: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ für beobachtbare Vorgänge

→ borge $\Delta E'$ für $\Delta t'$, sodass

$$\Delta E' \Delta t' < \hbar$$

$\Delta E' \hat{=}$ Masse des "Feldquants"

Reichweite: $\Delta R = c \cdot \Delta t' = \frac{\hbar c}{\Delta E'}$ \Rightarrow Masse m_π

\Rightarrow Masse \approx 300 Elektron- bzw. $\frac{1}{6}$ Protonenmasse

\Rightarrow Postulat der Mesonen

Entdeckung des Positrons

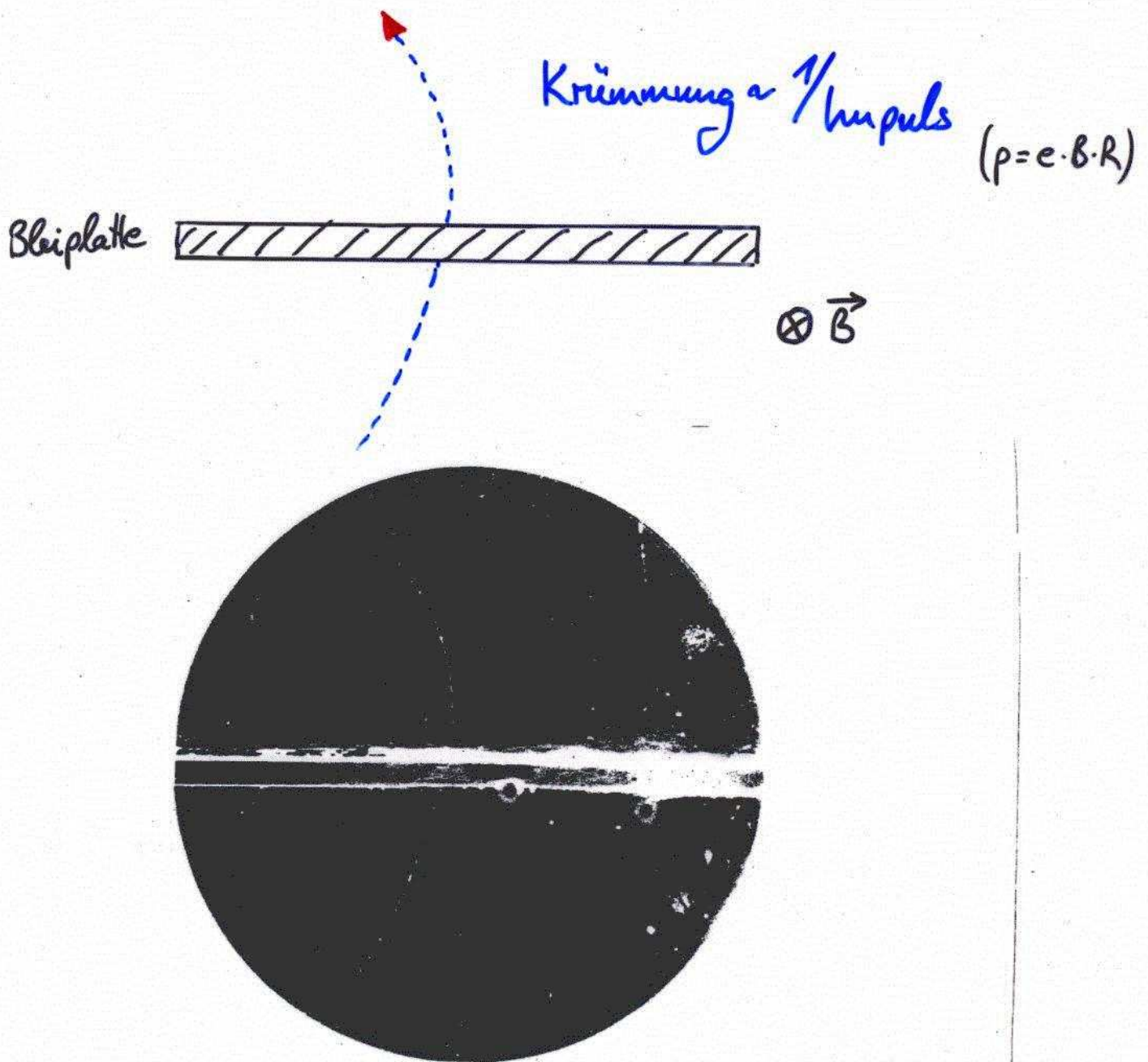


Fig. 1.2 Discovery of the positron by Anderson in 1932, in a cloud chamber. The particle's momentum and sign of charge are inferred from its direction and curvature in the applied magnetic field. It loses energy in the central lead plate, and was therefore moving upwards and positive. The droplet density along the track implies a velocity $v \simeq c$ and thus a small mass.

Entdeckung der π -Mesonen und Myonen

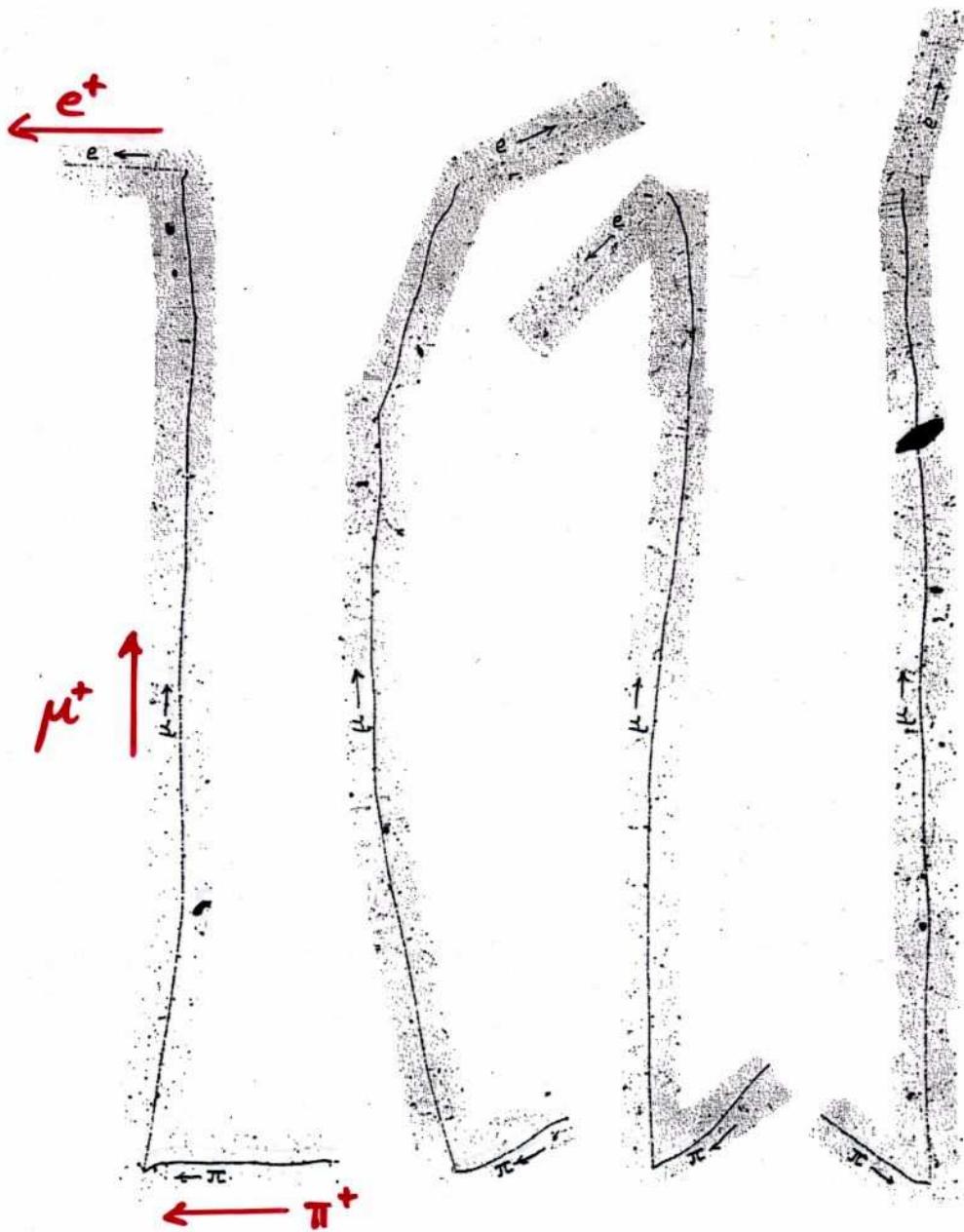


Fig. 1.3 Examples of the decay sequence $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ in G5 emulsion exposed at Pic du Midi. The constancy of range ($\approx 600 \mu\text{m}$) of the muon implies two-body decay at rest of the pion: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. The first examples of pion decay were observed by Lattes, Muirhead, Occhialini, and Powell in 1947. The electron emitted in muon decay, $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$, was not observed in the early experiments employing less sensitive emulsions. (Photograph courtesy University of Bristol).

π^+ gestoppt ; Zerfall in μ^+

μ^+ gestoppt ; Zerfall in e^+

\approx gleiche Flugstrecke bis zum Zerfall

Meilensteine

- 1947 C.F. Powell Entdeckung der π -Mesonen
(Höhenstrahlungsexperiment)
- 1937/38 Street, Stevenson
Anderson, Neddermeyer Entdeckung der Myonen μ
 μ zeigt keine Wechselwirkung mit Kernen
Lebensdauer $\approx 2 \mu\text{s}$
Masse ≈ 200 Elektronenmassen
verhält sich wie ein schweres Elektron
- 1947 G.D. Rochester, C.C. Butler Entdeckung seltener Teilchen
große Lebensdauer $\sim 10^{-8} \text{ s}$
große Masse ≥ 1000 Elektronenmassen
- ... Entdeckung vieler hunderter Elementarteilchen!
- 1956 C.L. Cowan, F. Reines Entdeckung des Neutrinos
- 1964 H. Gell-Mann
G. Zweig Quarkmodell der Hadronen
- 1974 C.C. Ting, B. Richter Entdeckung des $J/\psi \rightarrow$ charm Quark
- 1975 M. Perl Entdeckung des τ -Leptons
- 1978 S.W. Herb u. a. Entdeckung des $Y \rightarrow$ bottom Quark
- 1983 C. Rubbia, S. v. d. Meer Entdeckung der W^\pm, Z Bosonen
- 1995 CDF-Kollaboration Entdeckung des top Quarks

Entdeckung seltsamer Teilchen

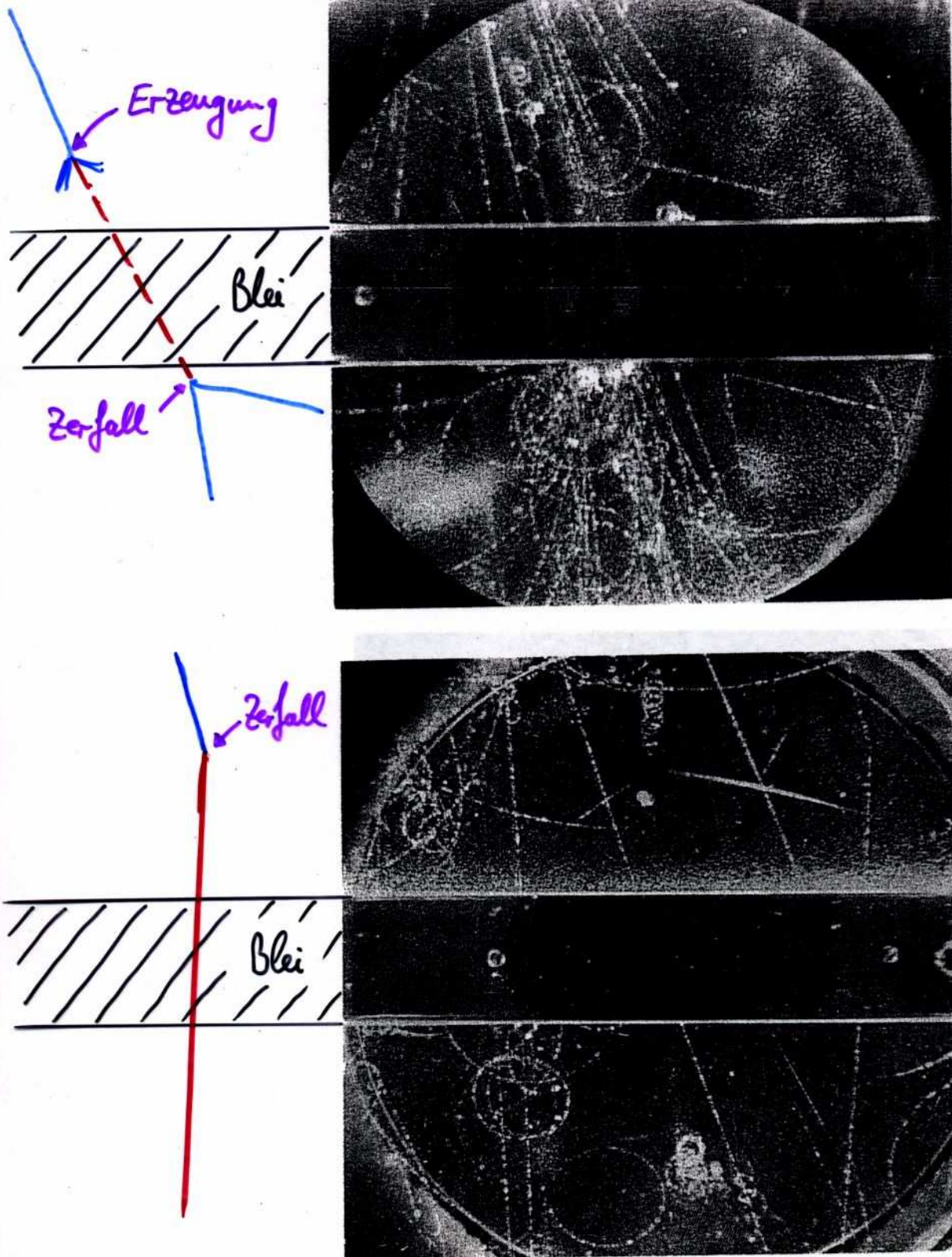


Fig. 1.5 First observations of V-events in a cloud chamber, by Rochester and Butler (1947). The upper picture is of a "neutral V-event", consisting of a wide-angle fork occurring in the gas a few millimeters below the horizontal plate. Subsequent analysis suggests that it was due to the decay $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. The lower picture is of a "charged V-event", seen as a fork near the right-hand top corner of the picture. The secondary traverses the 3-cm lead plate without interaction. The measured momenta are in fact consistent with the decay scheme $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$, or what is now called the $K_{\mu 2}$ decay mode of the charged kaon. (Courtesy Pergamon Press.)

Meilensteine

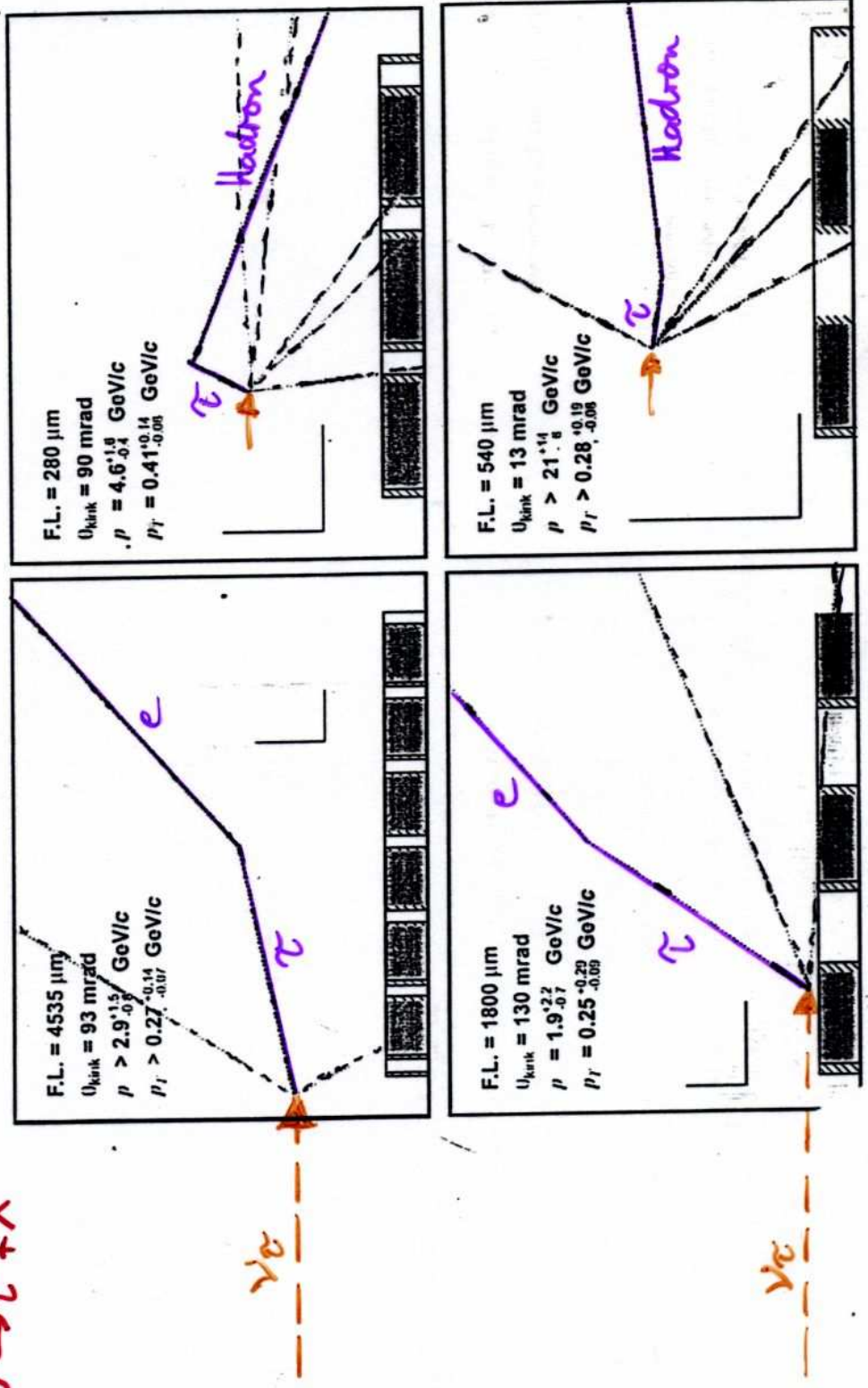
- 2000 DONUT-Kollaboration Nachweis des τ -Neutrinos
- 1968-2002 Homestake, Super-Kamiokande, SNO Nachweis von ν -Oszillationen
↳ Neutrinos sind massiv
(Nobelpreis 2002: R. Davis, M. Koshiba, R. Giacconi)

Nachweis des τ -Neutrinos

Four events were found which satisfied the above criteria. Figure 1. shows the tracks reconstructed from the emulsion segments to form a neutrino interaction and tau decay.

Figure 1: Emulsion segments of the four events surviving tau decay cuts. Clockwise from upper-left: 3024-30175 $\tau \rightarrow$ electron; 3039-01919 $\tau \rightarrow$ hadron, 3263-25105 $\tau \rightarrow$ hadron, 3333-17665 $\tau \rightarrow$ electron. Target material is shown on the bar along the bottom: plastic (no shading) emulsion (hatched) and steel (shaded). This figure is taken from reference 4.

Reaktion:



Beachte: Abbildung habe
unterschiedl.
Vergrößerungen

It is some measure of the surprise with which these new heavy baryons and mesons were greeted that they came to be known collectively as “strange” particles. In 1952 the first of the modern particle accelerators (the Brookhaven Cosmotron) began operating, and soon it was possible to produce strange particles in the laboratory (before this the only source had been cosmic rays) . . . and with this, the rate of proliferation increased. Willis Lamb began his Nobel Prize acceptance speech in 1955 with the words

When the Nobel Prizes were first awarded in 1901, physicists knew something of just two objects which are now called “elementary particles”: the electron and the proton. A deluge of other “elementary” particles appeared after 1930; neutron, neutrino, μ meson, π meson, heavier mesons, and various hyperons. I have heard it said that “the finder of a new elementary particle used to be rewarded by a Nobel Prize, but such a discovery now ought to be punished by a \$10,000 fine”. [Source: Les Prix Nobel 1955, The Nobel Foundation, Stockholm.]

Das Standard-Modell der Elementarteilchen und ihrer Kräfte

Konzept: "Kraft"-Teilchen vermitteln die Wechselwirkung zwischen "Materie"-Teilchen

Konstituenten:

"Materie"-Teilchen: Leptonen und Quarks

"Kraft"-Teilchen: Photonen, Weakonen, Gluonen
(elektromagn., schwach, starke Ww.)

Standard-Modell: beschreibt elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung zwischen den Konstituenten des Modells

("Weltformel"?)

"Weltformel" des Standard-Modells

Lagrangedichte des Standard-Modells der Teilchenphysik: \mathcal{L}

(Lösungen beschreiben Teilchen und ihre Wechselwirkung)

$$\mathcal{L} = \mathcal{L} = -\frac{1}{4} W_{\mu\nu}^i W_i^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} \quad (1.2) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{kinetische Energie und Selbstwechsel-} \\ \text{wirkung von } W^+, W^-, Z, \gamma \text{ und Gluo-} \\ \text{nen.} \end{array} \right.$$

$$+ \sum_l (\bar{L}_l \gamma^\mu (i\partial_\mu - g \frac{\tau_i}{2} W_\mu^i - g' \frac{Y}{2} B_\mu) L_l + \bar{R}_l \gamma^\mu (i\partial_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu) R_l) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{kinetische Energie der Leptonen und} \\ \text{ihre Wechselwirkung mit } W^+, W^-, Z, \\ \gamma. \end{array} \right.$$

$$+ \sum_q (\bar{L}_q \gamma^\mu (i\partial_\mu - g \frac{\tau_i}{2} W_\mu^i - g' \frac{Y}{2} B_\mu - g'' \frac{\lambda_a}{2} G_\mu^a) L_q + \bar{R}_q \gamma^\mu (i\partial_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu - g'' \frac{\lambda_a}{2} G_\mu^a) R_q) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{kinetische Energie der Quarks und} \\ \text{ihre Wechselwirkung mit } W^+, W^-, Z, \\ \gamma \text{ und Gluonen.} \end{array} \right.$$

$$+ |(i\partial_\mu - g \frac{\tau_i}{2} W_\mu^i - g' \frac{Y}{2} B_\mu) \Phi|^2 - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Massen von } W^+, W^-, Z, \gamma \text{ und des} \\ \text{Higgs selbst bzw. ihre Kopplungen an} \\ \text{das Higgs.} \end{array} \right.$$

$$- \sum_l (G_l \bar{L}_l \Phi R_l + \text{hermitisch konjugierte Form}) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Massen der Leptonen bzw. ihre} \\ \text{Kopplungen an das Higgs.} \end{array} \right.$$

$$- \sum_{q_1, q_2} (G_{q_1} \bar{L}_{q_1} \Phi R_{q_1} - i G_{q_2} \bar{L}_{q_2} \tau_2 \Phi^* R_{q_2} + \text{hermitisch konjugierte Form}) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Massen der Quarks bzw. ihre Kopp-} \\ \text{lungen an das Higgs.} \end{array} \right.$$

$$W_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i - g \epsilon_{ijk} W_\mu^j W_\nu^k$$

$$B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu$$

$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g'' f_{abc} G_\mu^b G_\nu^c$$

$W_\mu^i, B_\mu =$ Felder von W^+, W^-, Z, γ ($i = 1, 2, 3$)

$G_\mu^a =$ Felder der Gluonen ($a = 1, \dots, 8$)

$L_l =$ Felder der linkshändigen Dubletts der Leptonen ($l = 1, 2, 3$)

$R_l =$ Felder der rechtshändigen Singulets der Leptonen ($l = 1, 2, 3$)

$L_q =$ Felder der linkshändigen Dubletts der Quarks ($q, q_1, q_2 = 1, 2, 3$)

$R_q =$ Felder der rechtshändigen Singulets der Quarks ($q = 1, \dots, 6$), ($q_1 = 1, 3, 5$), ($q_2 = 2, 4, 6$)

$\Phi =$ Feld des Higgs-Teilchens

$g, g', g'' =$ Kopplungen der Kräfte

$G_l, G_{q_1}, G_{q_2} =$ Kopplungen der Higgs-Fermion-Kopplung \propto der Fermionmassen

$\tau_i = 3$ Pauli Matrizen (Erzeugende der $SU(2)_L$)

$\lambda_a = 8$ Gell-Mann Matrizen (Erzeugende der $SU(3)_c$)

$Y =$ schwache Hyperladung (Erzeugende der $U(1)_Y$)

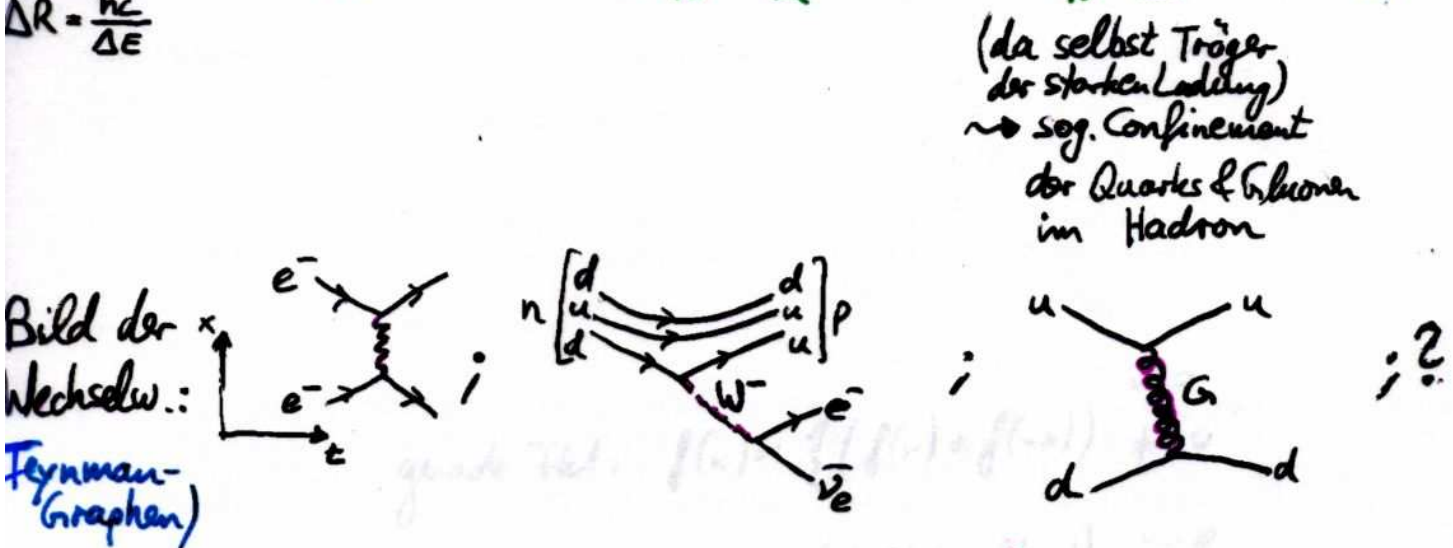
$\mu, \lambda > 0 =$ Parameter des Higgs-Potential

$||^2 \equiv ()^\dagger ()$

In der Gleichung werden Teilchen durch Felder und die Wechselwirkungen durch „Produkte“ der Teilchenfelder $L_f, R_f, L_q, R_q, W^i, B, G^a, \Phi$ mit den Feldern der Austauscheteilchen W^i, B, G^a ausgedrückt. Die Stärke der Kraft wird durch die Kopplungen g, g', g'' und G_l, G_{q_1}, G_{q_2} bestimmt und ist abhängig von der Energie der Austauscheteilchen. Die Massenterme entstehen in diesem Modell durch die Wechselwirkung des Higgs-Feldes Φ mit den anderen Teilchenfeldern. Kinetische Energien werden durch die zeitliche und örtliche Änderung der Teilchenfelder erzeugt, welches Termen mit ∂_μ entspricht.

Wechselwirkungen

| | el. magn. | schwach | stark | gravitativ |
|---------------------------------------|--|---|---|---|
| rel. Stärke | $1/137$ | 10^{-5} | 1 | 10^{-40} |
| gegeben durch | $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$ | $G_{Fermi} = 1.166 \cdot 10^{-5} \frac{(\hbar c)^3}{GeV^2}$ | $\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi \hbar c}$ | $\frac{G_N \cdot m_{Proton}^2}{4\pi \hbar c}$ |
| Träger der Kraft: | Photon | Weakonen | Gluon | Graviton? |
| el. Ladung: | γ | W^+, W^-, Z^0 | G | |
| starke ": | 0 | $+e, -e, 0e$ | $0e$ | $0e$ |
| schwache ": | 0 | δ | $2 \times$ starke Ladung | 0 |
| Masse: | 0 | ja | 0 | 0 |
| Reichweite: | ∞ | $80 GeV/c^2$ $91 GeV/c^2$ | $10^{-15} m$ | ∞ |
| $\Delta R = \frac{\hbar c}{\Delta E}$ | | $\sim 10^{-18} m$ | | |



Spin der "Kraft"-Teilchen ist ganzzahlig (= 1h bis auf Graviton)
 → unterliegen Einstein-Bose-Statistik (Wellenfkt gerade) → Bosonen

Quarks und Leptonen

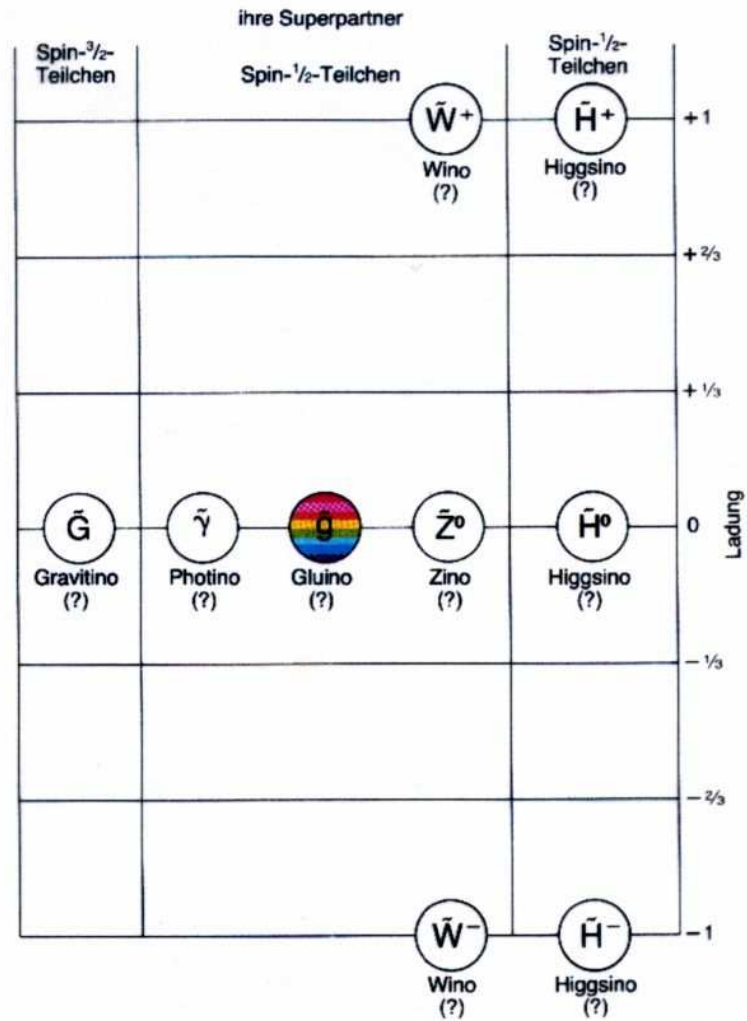
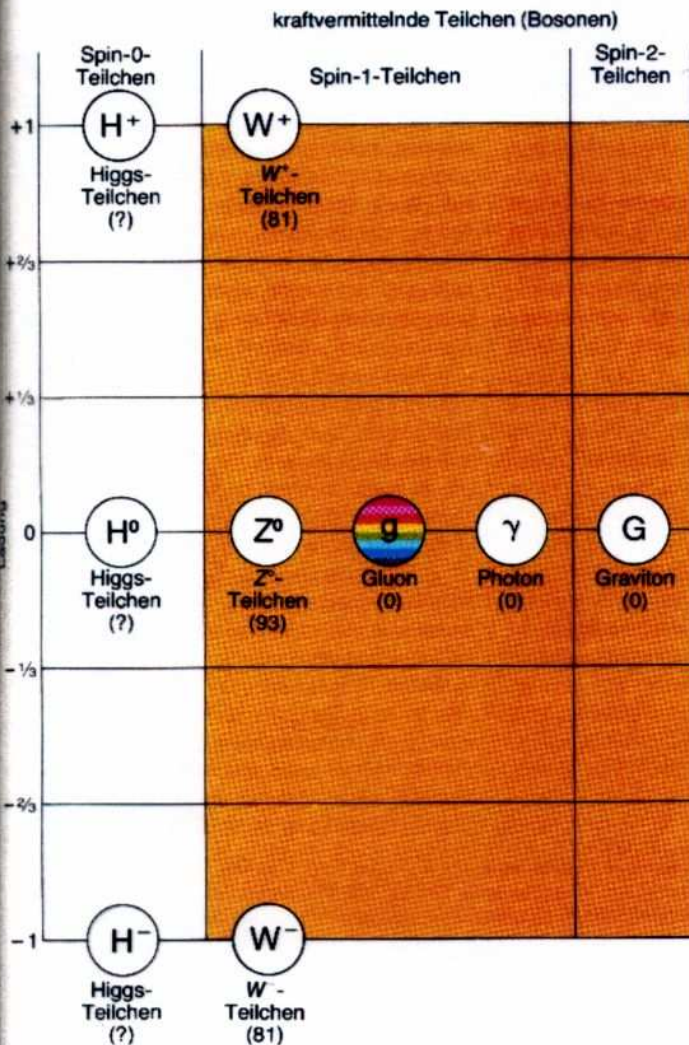
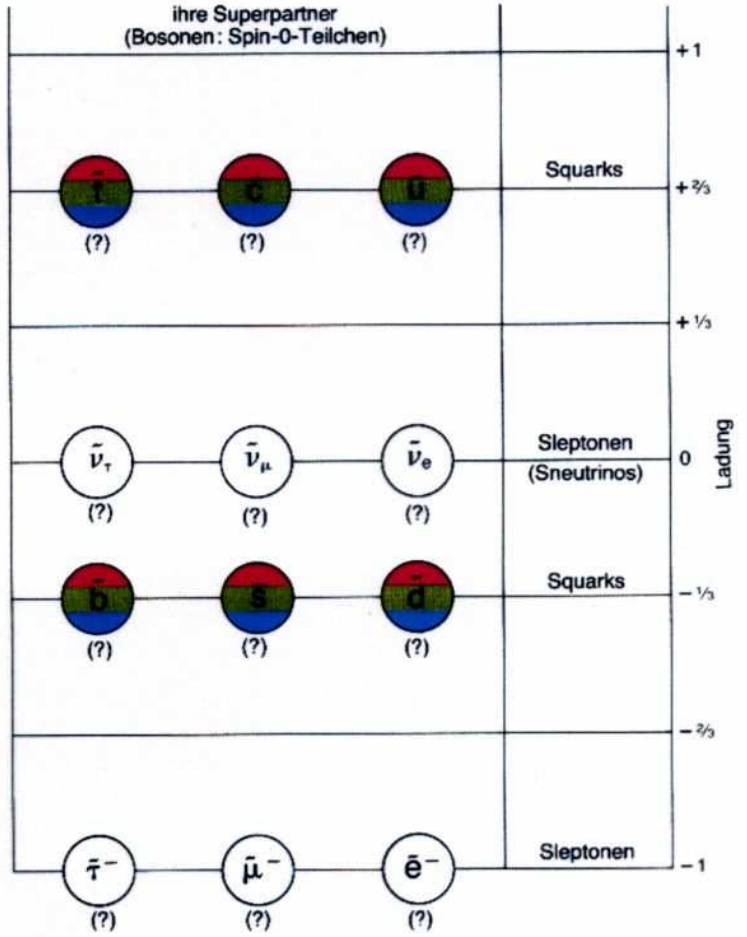
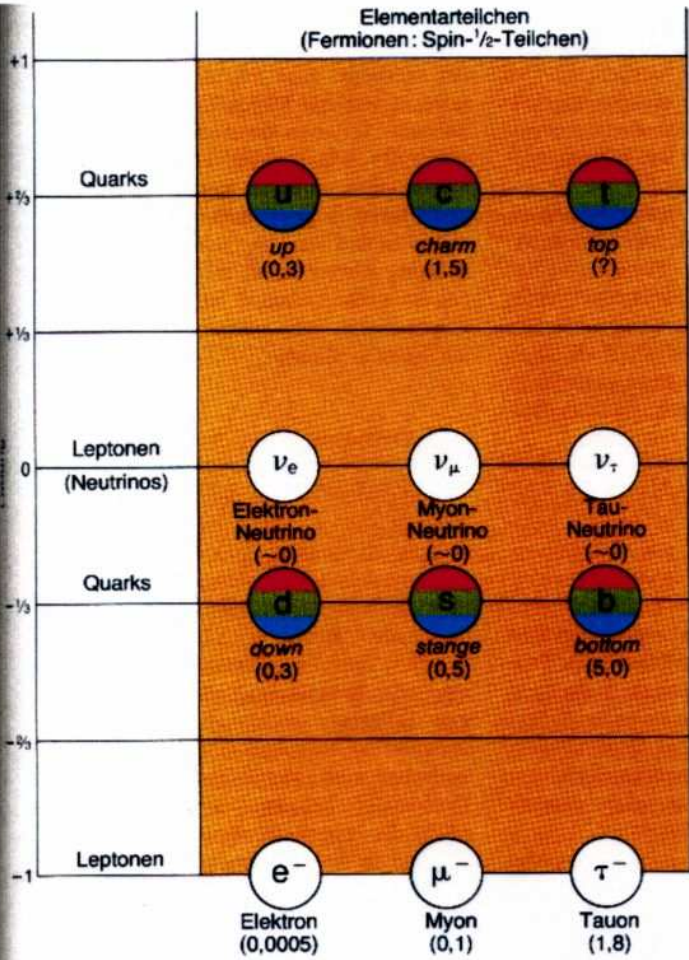
Standard-Modell besitzt Familienstruktur mit drei Generationen:

| | 1. Generation | 2. | 3. | el. Ladung [e] | schwache Ladung | starke Ladung |
|----------|--|--|--|----------------|-----------------|---------------|
| Leptonen | $\begin{bmatrix} \nu_e \\ e^- \\ u \\ d \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \\ c \\ s \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \\ t \\ b \end{bmatrix}$ | 0 | ja | 0 |
| Quarks | | | | -1 | ja | 0 |
| | | | | $+\frac{2}{3}$ | ja | 1^* |
| | | | | $-\frac{1}{3}$ | ja | 1^* |

(wenn $\neq 0$ oder "ja", dann Teilnahme an zugehöriger Wv.)

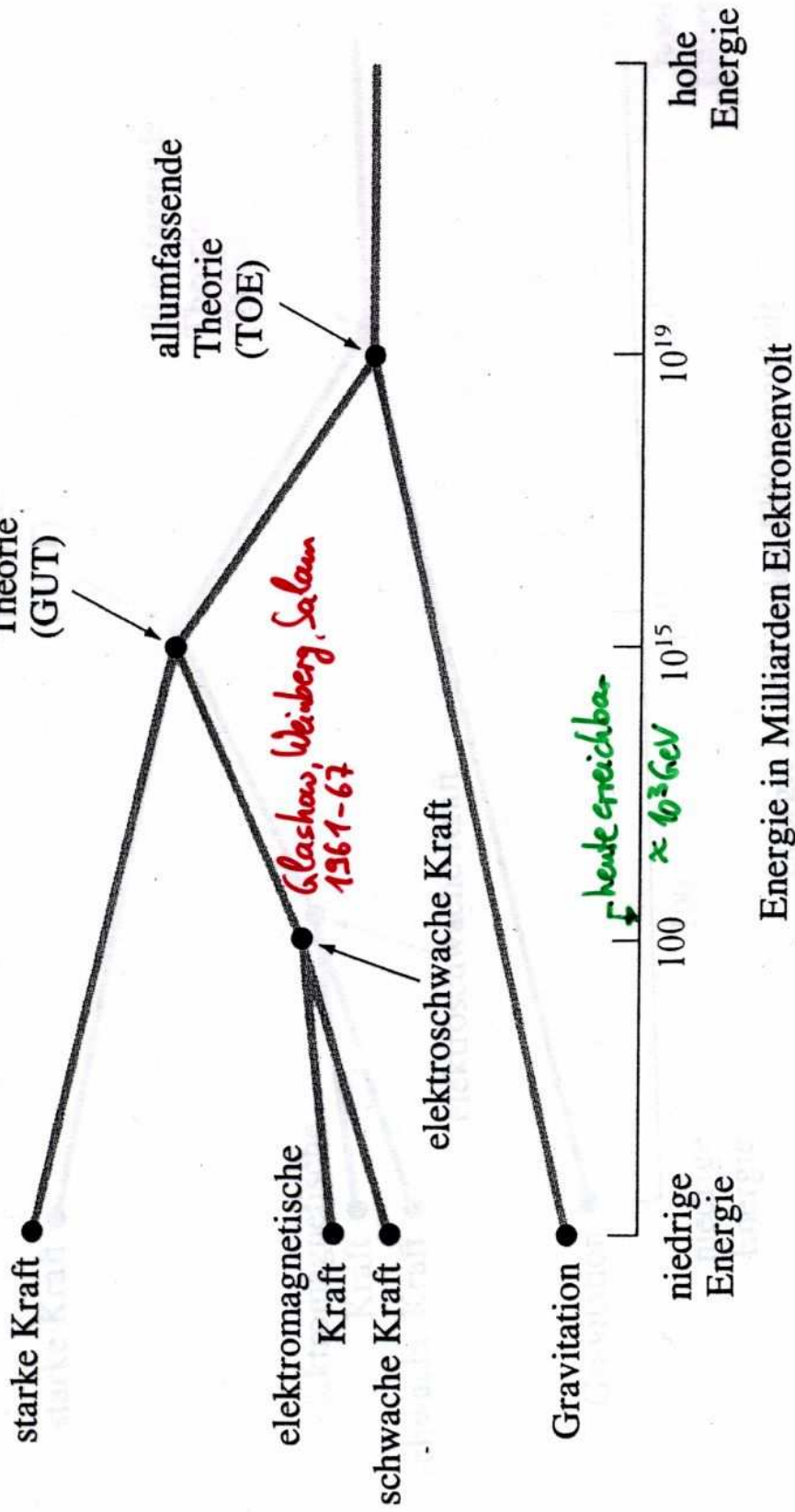
* Situation kompliziert für starke Ladung als für elektr.: (folgt später)

- Spin der "Materie"-Teilchen ist $\frac{1}{2} \hbar$
- Teilchen unterliegen Fermi-Dirac-Statistik, d.h. Wellenfkt ist ungerade (→ Pauli Ausschlußprinzip)
- Bezeichnung: Fermion
- Aus Quarks werden "Hadronen" aufgebaut: Mesonen $q\bar{q}$ ($\pi \cong u\bar{d}$), Baryonen qqq (p=und)



Vereinheitlichung der Wechselwirkungen

große vereinheitlichte Theorie (GUT)



6.2 Die Vereinheitlichung der vier Grundkräfte setzt enorme Energien voraus. Man nimmt an, daß die vier Kräfte unter den hochenergetischen Bedingungen unmittelbar nach dem Urknall vereinheitlicht waren. Experimentell bestätigt hat sich die elektroschwache Theorie, die die schwache und die elektromagnetische Kraft bei Energien von einigen hundert GeV zusammenfaßt.

Wechselwirkungen und zugehörige Theorien

- elektromagn. Ww. \longleftrightarrow QED Quanten Elektrodynamik
- elektroschwache Ww. \longleftrightarrow QFD Quanten Flavour Dynamik
- starke Wechselwirkung \longleftrightarrow QCD Quanten Chromodynamik

Bei den Theorien QED, QFD, QCD handelt es sich um Eichtheorien, bei denen die Lösungen der jeweiligen Lagrangedichte unter gewissen Eichtransformationen invariant bleiben. Die Eichtransformationen entsprechen Symmetrioperationen und die Invarianz der Lösungen einer Symmetrie. Das Noether-Theorem besagt:

- | Symmetrien | \longleftrightarrow | Erhaltungsgrößen |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| z.B.: Translationsinvarianz | \longleftrightarrow | Impulserhaltung |
| Zeitinvarianz | \longleftrightarrow | Energieerhaltung |
| QED: U(1)-Symmetrie | \longleftrightarrow | d. Ladungserhaltung |
| QCD: SU(3)-Symmetrie | \longleftrightarrow | "Farb"-Ladungserhaltung |

Grundzüge der Eichtheorien

Erinnerung: Eichtransformation in E-Dynamik

$$\left. \begin{array}{l} \text{Potential } \phi \rightarrow \phi + \frac{\partial \chi(\vec{r}, t)}{\partial t} \\ \text{Vektorfeld } \vec{A} \rightarrow \vec{A} - \vec{\nabla} \chi(\vec{r}, t) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{ohne Einflu\ss auf} \\ \text{L\u00f6sung der} \\ \text{Maxwell-Gleichungen} \end{array}$$

→ Eichinvarianz der E-Dynamik, weil

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad \text{und} \quad \vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad \text{sich nicht \u00e4ndern}$$

Potential ϕ und Vektorfeld \vec{A} haben direkte physical. Bedeutung:

$e\phi \equiv$ potentielle Energie des Teilchens
 $e\vec{A}$ beeinflusst die de-Broglie-Wellenl\u00e4nge

$$\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|} \quad ; \quad \vec{p} = m\vec{v} + e\vec{A}$$

(siehe Aharonov-Bohm-Effekt)

⇒ Eichtransformation beeinflusst die Phase der Wellenfkt. → $H\psi = E\psi$ und $H = T + V$

$$\rightarrow \psi'(\vec{r}, t) = \exp[ie\chi(\vec{r}, t)] \cdot \psi(\vec{r}, t)$$

ψ' erf\u00fcllt Schr\u00f6dinger-Gl. nach der Transformation $\phi' = \phi + \frac{\partial \chi}{\partial t}$; $\vec{A}' = \vec{A} - \vec{\nabla} \chi$

Eichprinzip

Wenn man die Phase der Wellenfkt. eines Teilchens lokal (ortsabhängig) beliebig abändert ($\psi' = \exp(i\chi(\vec{r}, t)) \cdot \psi$) so muß man notgedrungen die Existenz eines äußeren Feldes fordern, damit das Teilchen weiterhin die Schrödinger-Gleichung (oder Klein-Gordon-, (Spin 0) Dirac- oder Proca-Gleichung) (Spin 1/2) erfüllt!

z.B. Forderung der lokalen Phaseninvarianz $\rightarrow \exists$ electrom. Feld
 Verallgemeinerung bei Eichtheorie der starken WW $\rightarrow \exists$ Gluonen

Veranschaulichung des Prinzips an Wasserwellen

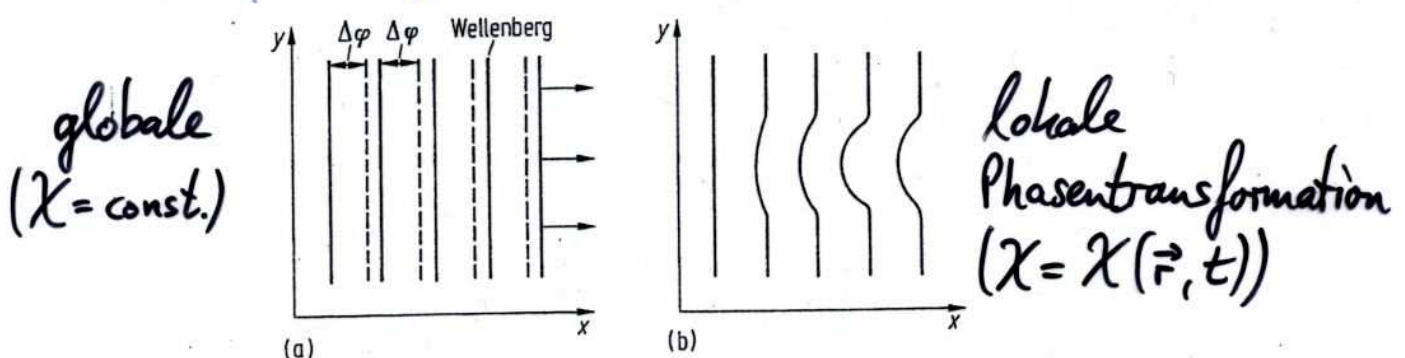


Abb. 3.76 (a) In einem flachen Behälter breitet sich eine ebene Wasserwelle in positiver x -Richtung aus. Die Wellenberge sind als durchgezogene Linien angedeutet. Eine globale Phasentransformation besteht darin, daß man an jeden Ort (x, y) die Phase um den gleichen Betrag $\Delta\varphi$ abändert. Dadurch wandern die Wellenberge zu den gestrichelten Linien. Es bleibt eine ebene Welle, und im zeitlichen Mittel hat die globale Phasentransformation keinen Effekt. (b) Bei einer lokalen Phasentransformation ist die Phasenänderung an jedem Ort verschieden: $\Delta\varphi = f(x, y)$. Die transformierte Welle ist keine ebene Welle mehr. Man könnte eine solche Veränderung durch ein Hindernis im Wasserbehälter erreichen. Lokale Phasentransformationen erfordern also die Existenz äußerer Kräfte.

Struktur der starken Wechselwirkung

- in Quanten Elektrodynamik QED:

$$\psi \mapsto e^{ie\mathcal{X}(\vec{r},t)} \cdot \psi \equiv U \cdot \psi \quad (U^\dagger U = \mathbb{1})$$

U ist eine unitäre 1×1 Matrix aus der Gruppe $U(1)$

- in Quanten Chromodynamik QCD:

$$q \mapsto e^{ig_s \cdot \alpha_A(\vec{r},t) \cdot t^A} \cdot q \equiv U_{\text{QCD}} \cdot q$$

U_{QCD} ist eine unitäre 3×3 Matrix aus der Gruppe $SU(3)$

t^A sind die Generatoren einer $SU(3)$ -Gruppe; $A = 1, \dots, 8$

α_A sind Gruppenparameter

"Farb"-Indices $a, b = 1, \dots, 3$ sind unterdrückt

in QED war $U(1)$ der elektr. Ladung zugeordnet

in QCD ist: $SU(3)$ einer "Farb"-Ladung zugeordnet

\leadsto jedes Quark trägt genau eine Einheit der "Farb"-Ladung

außerdem: jedes Gluon trägt zwei Einheiten der "Farb"-Ladung

Eichprinzip: lokale Phasenänderung $\rightarrow \exists$ äußer Felder

$SU(3) \rightarrow G_\mu$ Gluon koppelt an "Farb"-Ladung

Wechselwirkungen und zugehörige Theorien

- elektromagn. Ww. \longleftrightarrow QED
(Quanten Elektrodynamik)

Lagrangedichte:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\Psi} (i\gamma^\mu D_\mu - m) \Psi$$

$$F_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu - ie A_\mu$$

↑ ↑
Kopplungsstärke Photon

↑
Teilchen
↑
Teilchenmasse

- elektroschwache Ww. \longleftrightarrow QFD
(Quanten Flavour Dynamik)

beschrieben durch vereinheitlichte Theorie von elektromagn. und schwacher Ww.

Lagrangedichte enthält unterschiedliche Kopplungen links- und rechtshändiger Teilchen, γ, W^+, W^-, Z als Austauschpartikel, Higgs-Mechanismus der Massenerzeugung.

(siehe "Weltformel" des Standard-Modells)

Wechselwirkungen und zugehörige Theorien

- starke Wechselwirkung \longleftrightarrow QCD
(Quanten Chromodynamik)

Lagrangedichte:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^A G_{\mu\nu}^A + \bar{q}_a (i\gamma^\mu D_\mu - m)_{ab} q_b$$

$$G_{\mu\nu}^A \equiv \partial_\mu G_\nu^A - \partial_\nu G_\mu^A - g_s f^{ABC} G_\mu^B G_\nu^C$$

\uparrow Kopplungsstärke \uparrow Gluon

$$(D_\mu)_{ab} \equiv \partial_\mu \delta_{ab} + i g_s (t^A G_\mu^A)_{ab}$$

\uparrow Quark
 \uparrow Quarkmasse

dabei indizieren:

$A, B, C = 1, \dots, 8$ acht verschiedene Gluonen

$a, b = 1, \dots, 3$ drei unterschiedliche "Farb"-
Quantenzahlen

Beachte:

- (i) Einstein-Summenkonvention (Summation über gleiche Indices)
- (ii) Summe über verschiedene Quarktypen (Flavours) unterdrückt
(\sum_q)
- (iii) t_{ab}^A sind die Generatoren einer SU(3)-Gruppe
- (iv) f^{ABC} sind Strukturkonstanten; bestimmen Eigenschaften der QCD

f^{ABC} ($A, B, C = 1, \dots, 8$) are the structure constants of the SU(3) colour group. The quark fields q_a are in the triplet representation of the colour group, ($a = 1, 2, 3$) and D is the covariant derivative. Acting on triplet and octet fields the covariant derivative takes the form

$$(D_\alpha)_{ab} = \partial_\alpha \delta_{ab} + ig (t^C \mathcal{A}_\alpha^C)_{ab}, \quad (D_\alpha)_{AB} = \partial_\alpha \delta_{AB} + ig (T^C \mathcal{A}_\alpha^C)_{AB}, \quad (1.12)$$

where t and T are matrices in the fundamental and adjoint representations of SU(3) respectively:

$$[t^A, t^B] = if^{ABC} t^C, \quad [T^A, T^B] = if^{ABC} T^C, \quad (T^A)_{BC} = -if^{ABC}. \quad (1.13)$$

A representation for the generators t^A is provided by the eight Gell-Mann matrices, which are hermitean and traceless,

$$t^A = \frac{1}{2} \lambda^A \quad (1.14)$$

$$\lambda^1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \lambda^2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \lambda^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda^4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \lambda^5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \lambda^6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda^7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \lambda^8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}. \quad (1.15)$$

By convention the normalization of the SU(N) matrices is chosen to be

$$\text{Tr } t^A t^B = T_R \delta^{AB}, \quad T_R = \frac{1}{2}. \quad (1.16)$$

With this choice, the colour matrices obey the following relations:

$$\sum_A t_{ab}^A t_{bc}^A = C_F \delta_{ac}, \quad C_F = \frac{N^2 - 1}{2N} \quad (1.17)$$

$$\text{Tr } T^C T^D = \sum_{A,B} f^{ABC} f^{ABD} = C_A \delta^{CD}, \quad C_A = N. \quad (1.18)$$

Thus for the specific case of SU(3) we have

$$C_F = \frac{4}{3}, \quad C_A = 3. \quad (1.19)$$

Strukturkonstanten f^{ABC} der $SU(3)$

($A, B, C = 1 \dots 8$)

- f^{ABC} :
- hat insgesamt $8 \times 8 \times 8 = 512$ Elemente
 - die meisten Elemente sind $= 0$, z.B. alle Elemente $f^{AAC}, f^{ABA}, f^{ABB}, \dots$
 - ist völlig antisymmetrisch unter Vertauschung jedes Paares der Indices:
z.B. $f^{ABC} = -f^{BAC} = -f^{ACB} \dots$
 - nur 9 Strukturkonstanten (und zugehörige Permutationen von ABC) sind $\neq 0$:
 - ▶ $f^{123} = 1$
 - ▶ $f^{147} = f^{246} = f^{257} = f^{345} = f^{516} = f^{637} = \frac{1}{2}$
 - ▶ $f^{458} = f^{678} = \frac{1}{2} \sqrt{3}$

Bedeutung der Lagrangedichte

zunächst am Beispiel der QED

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} (i\gamma^\mu D_\mu - m) \psi$$

nach Einsetzen von $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ und der kovarianten Ableitung $D_\mu = \partial_\mu - ieA_\mu$ ergibt sich in symbolischer Schreibweise

$$\mathcal{L}_{QED} = \text{"}\bar{\psi}\psi\text{"} + \text{"}A^2\text{"} + e \text{"}\bar{\psi}\psi A\text{"}$$

was man in der Feynman-Graphen-Notation als



darstellen kann. Der Reihe nach beschreiben sie die freie Propagation von Elektronen und Photonen sowie die Elektron-Photon-Wechselwirkung.

Bedeutung der QCD-Lagrangedichte

$$\mathcal{L}_{QCD} = \bar{q} (i\gamma_\mu \partial^\mu - m) q + ig_s (\bar{q} \gamma^\mu t^A q) G_\mu^A - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^A G_{\mu\nu}^A$$

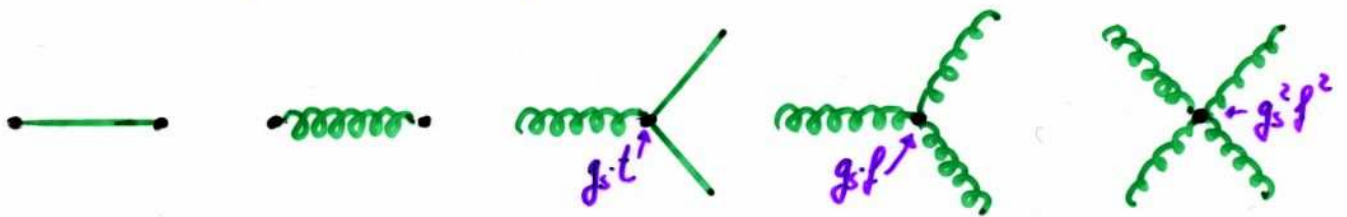
nach Einsetzen von

$$G_{\mu\nu}^A = \partial_\mu G_\nu^A - \partial_\nu G_\mu^A - g_s f^{ABC} G_\mu^B G_\nu^C$$

ergibt sich in symbolischer Schreibweise:

$$\mathcal{L}_{QCD} = \text{"}\bar{q}q\text{"} + \text{"}G^2\text{"} + g_s \cdot t \text{"}\bar{q}qG\text{"} + g_s f \text{"}G^3\text{"} + g_s^2 f^2 \text{"}G^4\text{"}$$

was in Feynman-Graphen als



aufgefasst werden kann. Die ersten drei Terme sind durch ihre QED-Analogs bekannt.

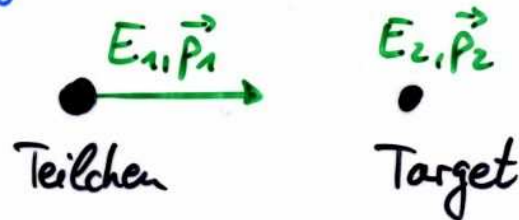
Neu sind die Terme vier und fünf, die Drei- und Vier-Gluon-Kopplungen darstellen. Dies unterscheidet QCD von QED und ist insbesondere eine klare Vorhersage der $SU(3)$ -Struktur der QCD, da eine dreifache $U(1)$ -Struktur $U(1)^3$ ebenfalls keine Gluon-selbstwechselwirkung kennt.

Tab. 3.3 Liste einiger im Betrieb oder im Bau befindlicher Teilchenbeschleuniger und Speicherringe.

| Name | Ort | Teilchen | Max. Strahlenergie/GeV | Fertigstellung | Umfang / Länge |
|--|------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------|
| <i>Protonen-Synchrotrons (fixed target)</i> | | | | | |
| CERN PS | Genf, Schweiz | | 28 | 1960 | |
| BNL AGS | Brookhaven, USA | | 32 | 1960 | 3.0 km |
| KEK | Tsukuba, Japan | | 12 | 1976 | |
| Serpukhov | Serpukhov, UdSSR | | 76 | 1967 | |
| → CERN SPS | Genf, Schweiz | | 450 | 1976 | 6.9 km |
| → Fermilab Tevatron | Batavia, USA | | 900 | 1982 | 6.3 km |
| <i>Elektronenbeschleuniger</i> | | | | | |
| SLAC Linearbeschleuniger | Stanford, USA | | 20 | 1966 | 3.0 km |
| DESY-Synchrotron | Hamburg, BRD | | 7 | 1964 | 0.29 km |
| <i>Speicherringe (collider)</i> | | | | | |
| SPEAR | Stanford, USA | e^+e^- | 4.2 + 4.2 | 1972 | 0.23 km |
| DORIS II | DESY, Hamburg | e^+e^- | 5.6 + 5.6 | 1974/82 | 0.29 km |
| PETRA | DESY, Hamburg | e^+e^- | 23 + 23 | 1978 | 2.3 km |
| → PEP (als PEP-II 3.1+9) | Stanford, USA | e^+e^- | 15 + 15 | 1980 | 2.2 km |
| CESR | Cornell, USA | e^+e^- | 8 + 8 | 1979 | 0.77 km |
| TRISTAN | Tsukuba, Japan | e^+e^- | 30 + 30 | 1986 | 3.0 km |
| → LEP (bis Nov. 2000) | CERN, Schweiz | e^+e^- | 104 50 + 50 104 | 1989 | 26.7 km |
| Sp̄pS | CERN, Schweiz | $p\bar{p}$ | 310 + 310 | 1982 | 6.9 km |
| → Tevatron | Fermilab, USA | $p\bar{p}$ | 1000 900 + 900 1000 | 1987 | 6.3 km |
| → HERA | Hamburg, BRD | ep | 30e + 820p | 1990 | 6.3 km |
| SSC | Dallas, USA | pp | 20000 + 20000 | >1998 | 87.1 km |
| LHC | CERN, Schweiz | pp | 7000 + 7000 | 2007 | 26.7 km |
| ? | ? | $\mu^+\mu^-$ | >2000 + >2000 | ? | ~ einige km |
| <i>Linearbeschleuniger mit kollidierenden Strahlen</i> | | | | | |
| SLC | Stanford, USA | e^+e^- | 50 + 50 | 1988 | 3.0 km |
| NLC, TESLA | ? | e^+e^- | 250 + 250 | ? | 30. km |

Collider \leftrightarrow fixed target

- **Fixed target:** beschleunigter Teilchenstrahl wird ausgekoppelt und auf Treffermaterial gelenkt



+ leicht realisierbar (große Trefferfläche)

- geringe Energie im Stoß: $(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$

$$(E_1 + m_2)^2 - (\vec{p}_1)^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1 m_2 \equiv s$$

$$E_1 \gg m_1, m_2 \rightarrow \sqrt{s} \approx \sqrt{2E_1 m_2}$$

(z.B. Proton $m_1 = 938 \text{ MeV}/c^2$, $E_1 = 10^6 \text{ MeV} \hat{=} 1 \text{ TeV}$)

auf Proton $m_2 = m_1 \Rightarrow \sqrt{s} = 43 \cdot 10^3 \text{ MeV} \hat{=} 43 \text{ GeV}$)

- **Collider:** gegenläufig umlaufende Strahlen werden frontal zur Kollision gebracht

- fokussierte Strahlen müssen sich treffen (kleine Trefferfläche)

+ hohe Energie im Stoß: $(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 =$

$$m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 + |\vec{p}_1 \vec{p}_2|) \equiv s$$

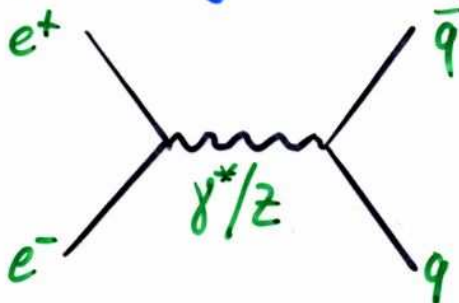


(z.B. Proton auf Proton mit je $E_1 = E_2 = 0.5 \text{ TeV}$
 $\rightarrow \sqrt{s} \approx 1 \text{ TeV}$, d.h. $\sqrt{s} \approx 2 \cdot \sqrt{E_1 E_2}$)

QCD in Collider-Experimenten

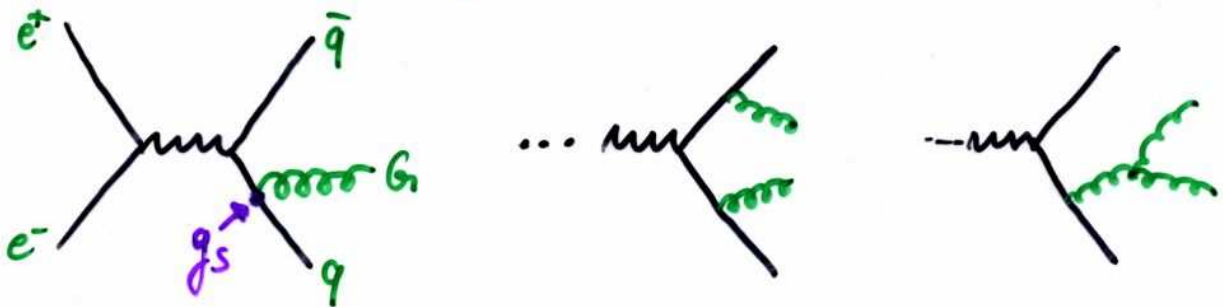
• e^+e^-

Grundlegender Prozeß:



hängt noch nicht von QCD ab (wohl aber von der "Farb"-Ladung, da q und \bar{q} insgesamt 3 verschiedene "Farb"-Zustände annehmen können)

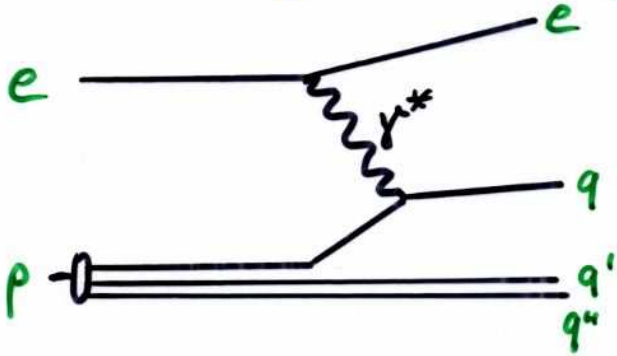
QCD kommt ins Spiel bei Prozessen in höherer Ordnung, z.B.



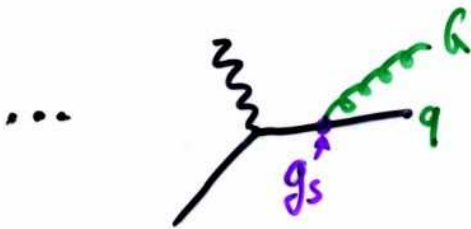
QCD in Collider-Experimenten

- ep

Grundlegender Prozeß:

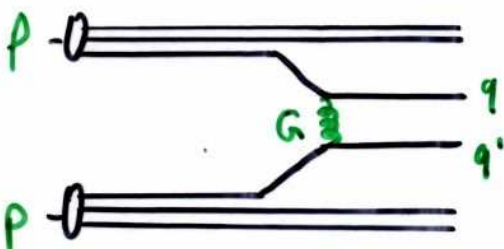


hängt ebenfalls noch nicht von QCD ab. Analog wie bei e^+e^- tritt QCD erst richtig bei Gluon-Abstrahlung auf den Plan

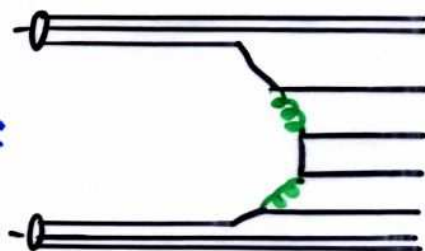


- pp bzw. $p\bar{p}$

Hier ist QCD von Anfang an mit von der Partie, z.B.:



oder:

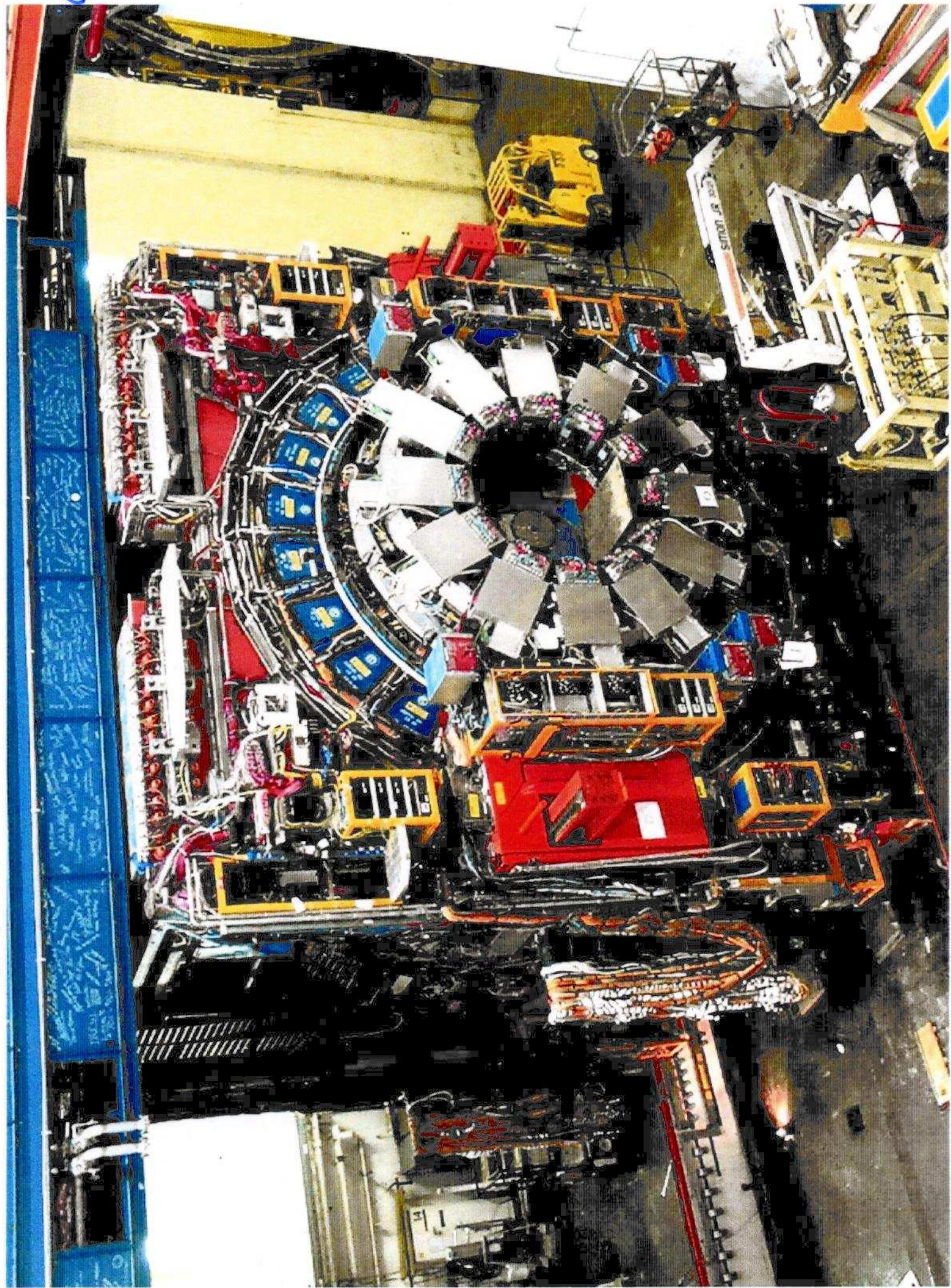


u.v.a.m.!

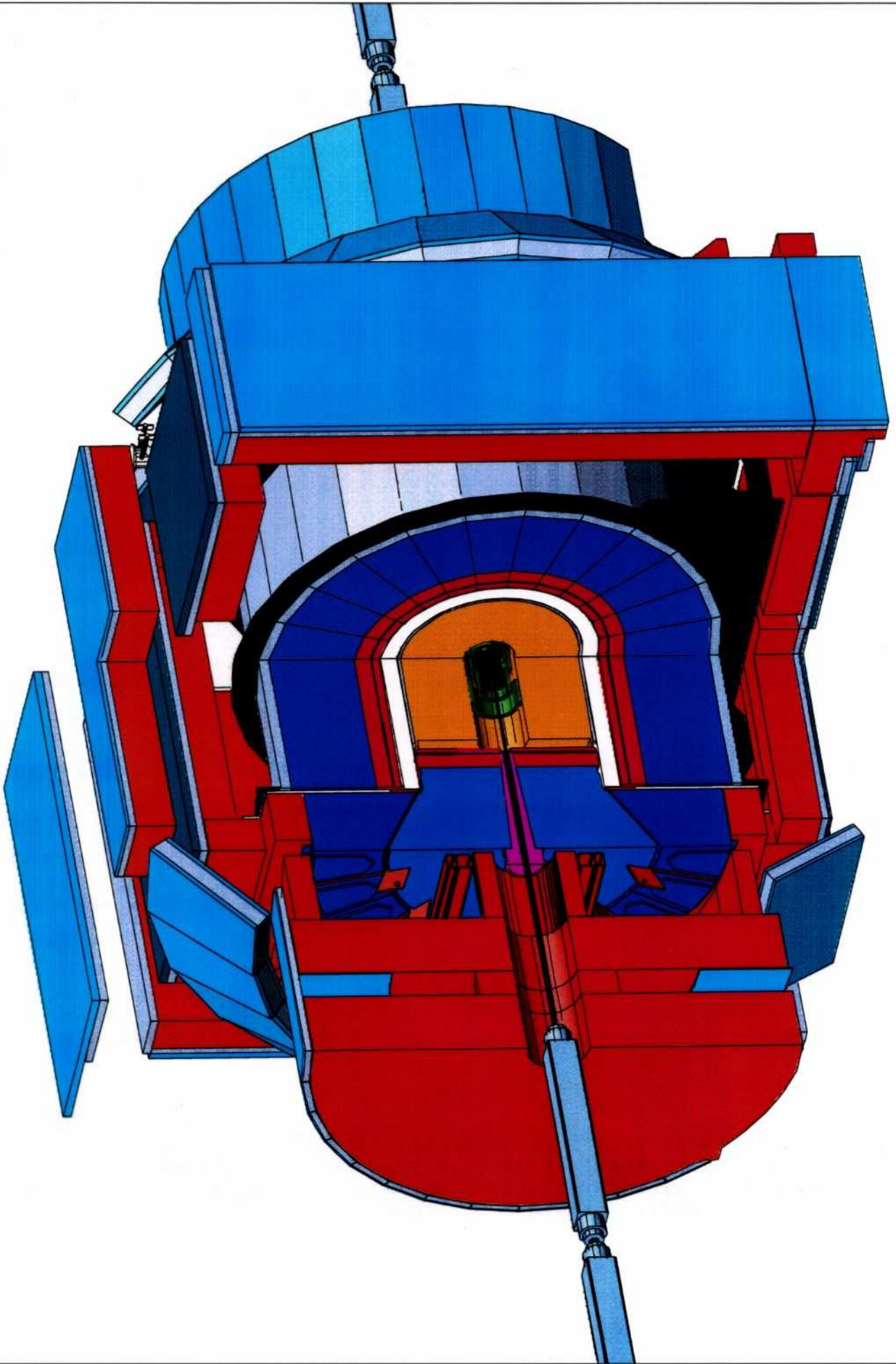
TeVatron @ Fermilab, U.S.A.



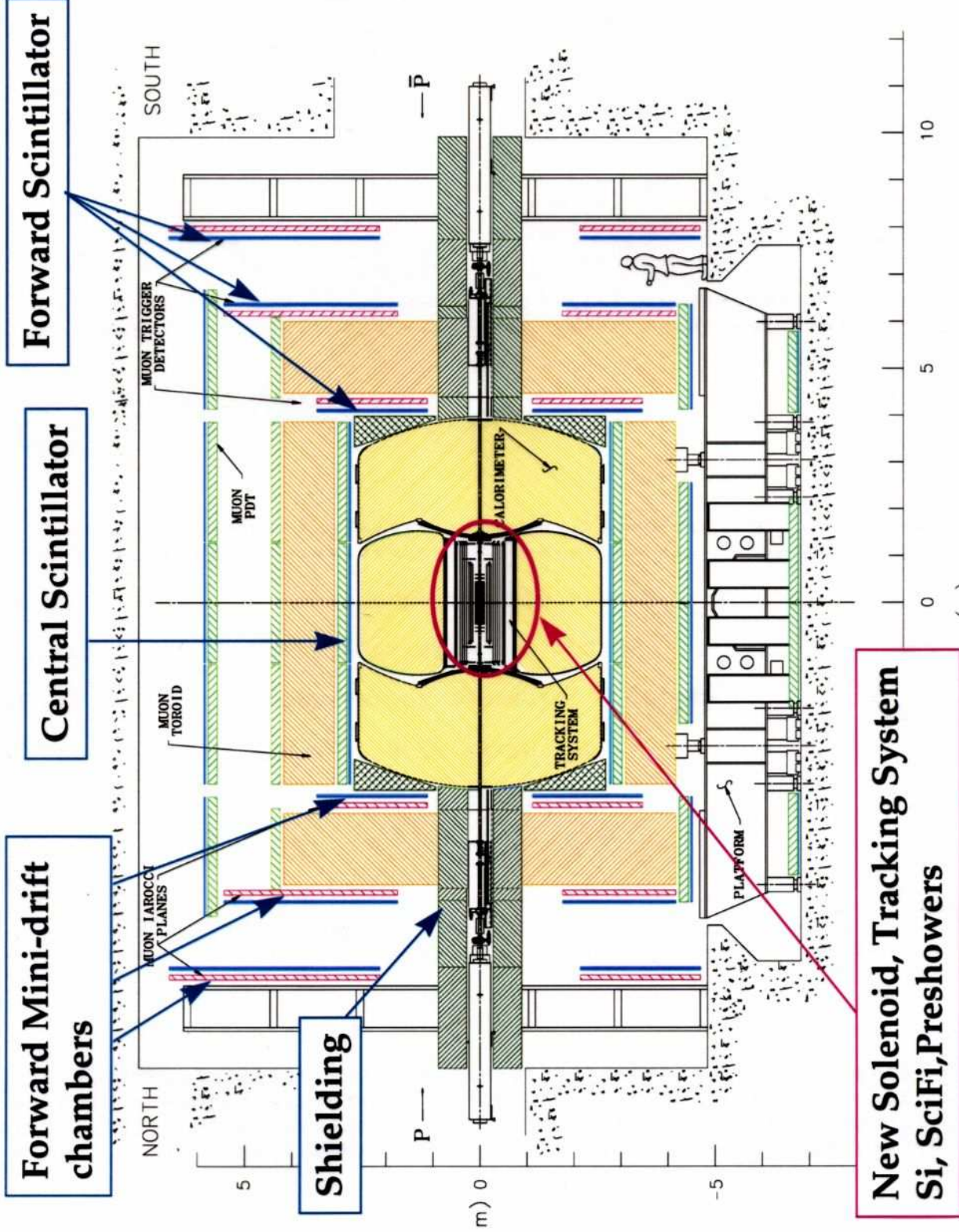
COF



CDF @ Telatron



DØ Upgrade



Forward Scintillator

Central Scintillator

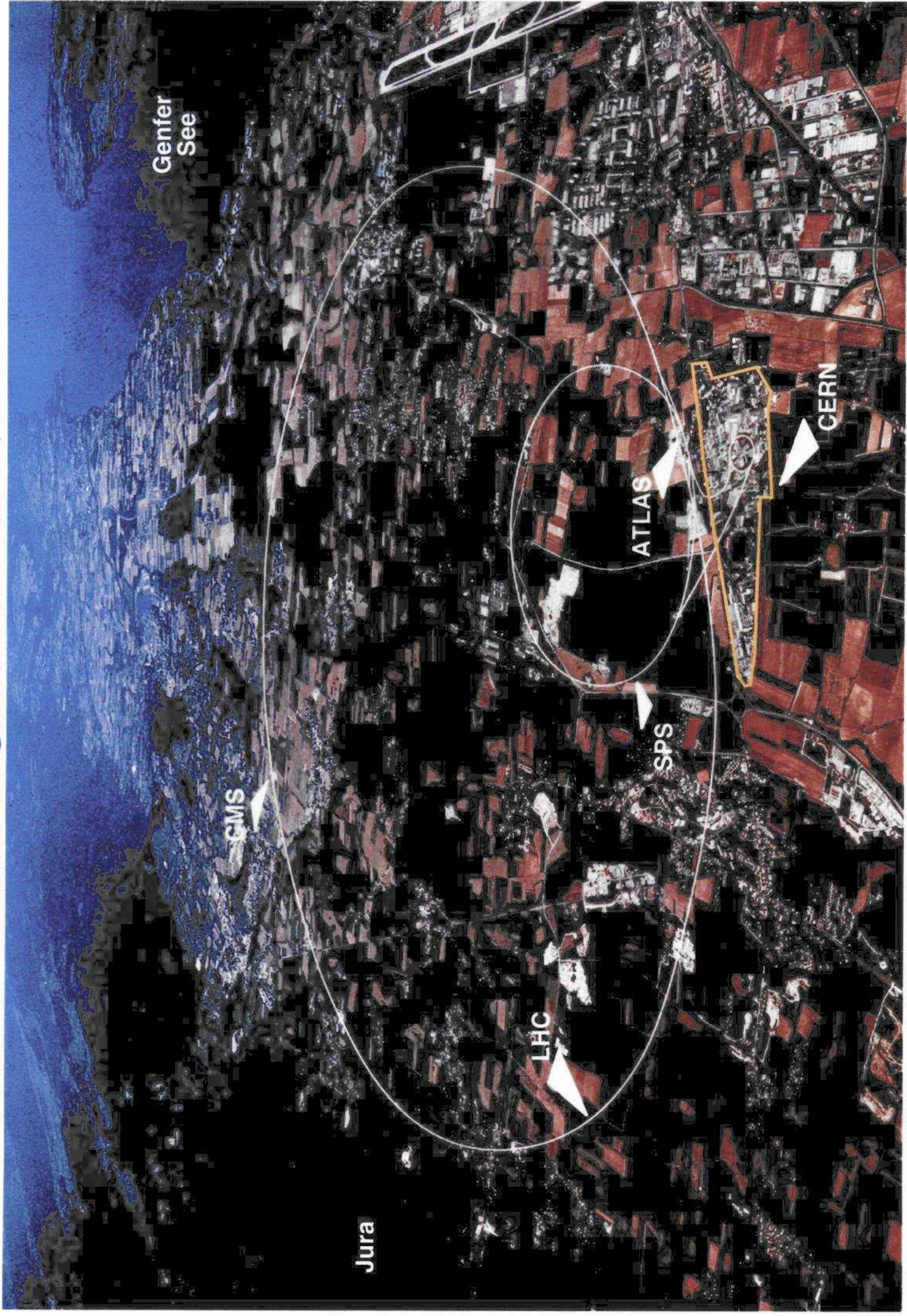
Forward Mini-drift chambers

Shielding

New Solenoid, Tracking System
Si, SciFi, Preshowers

+ New Electronics, Trig, DAQ

LHC @ CERN, CH (ab ~ 2007)



Genfer See

Jura

CMS

LHC

ATLAS

SPS

CERN

ATLAS @ LHC (ab~2007)

Muon Detectors

Electromagnetic Calorimeters

Solenoid

Forward Calorimeters

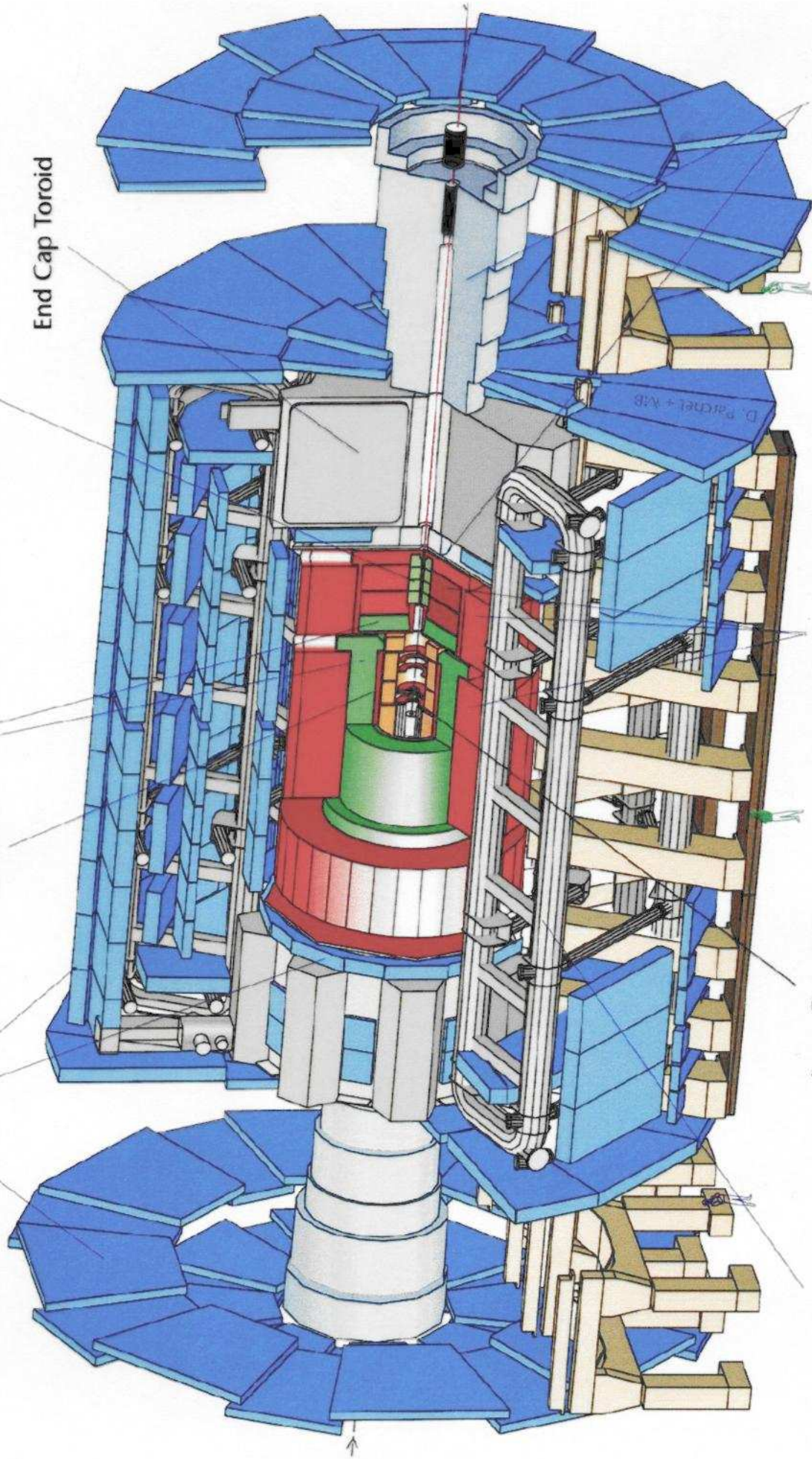
End Cap Toroid

Barrel Toroid

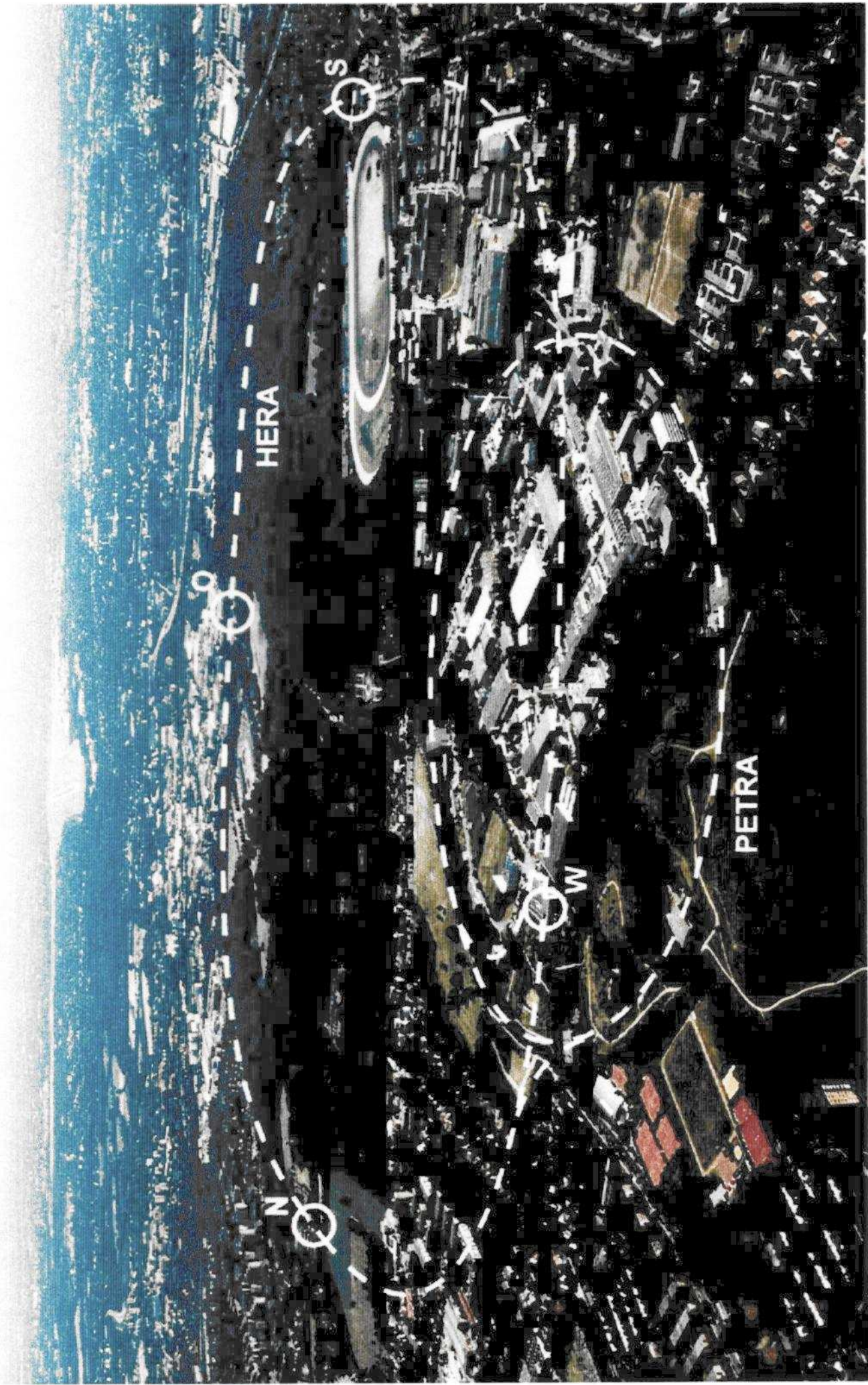
Inner Detector

Hadronic Calorimeters

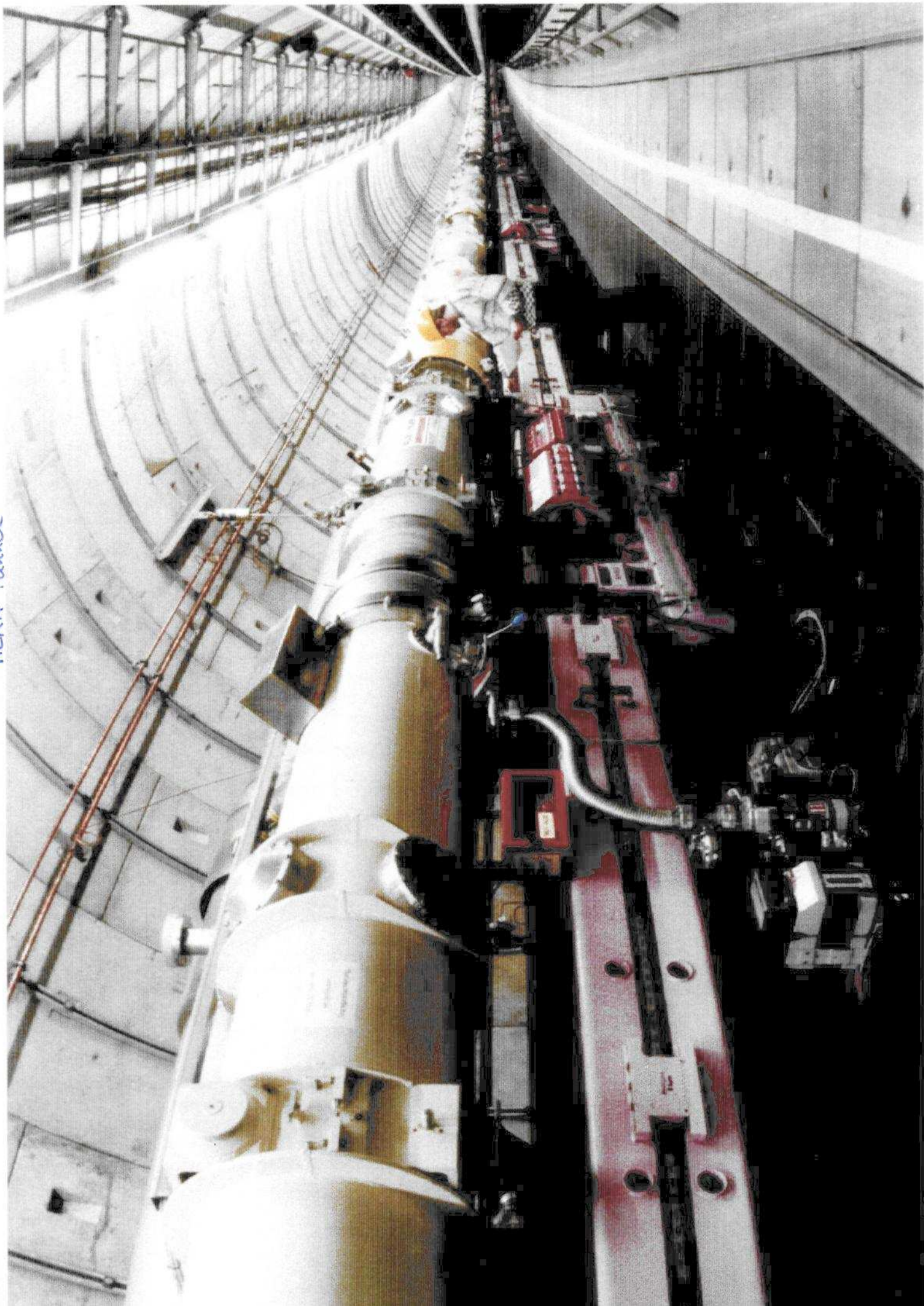
Shielding



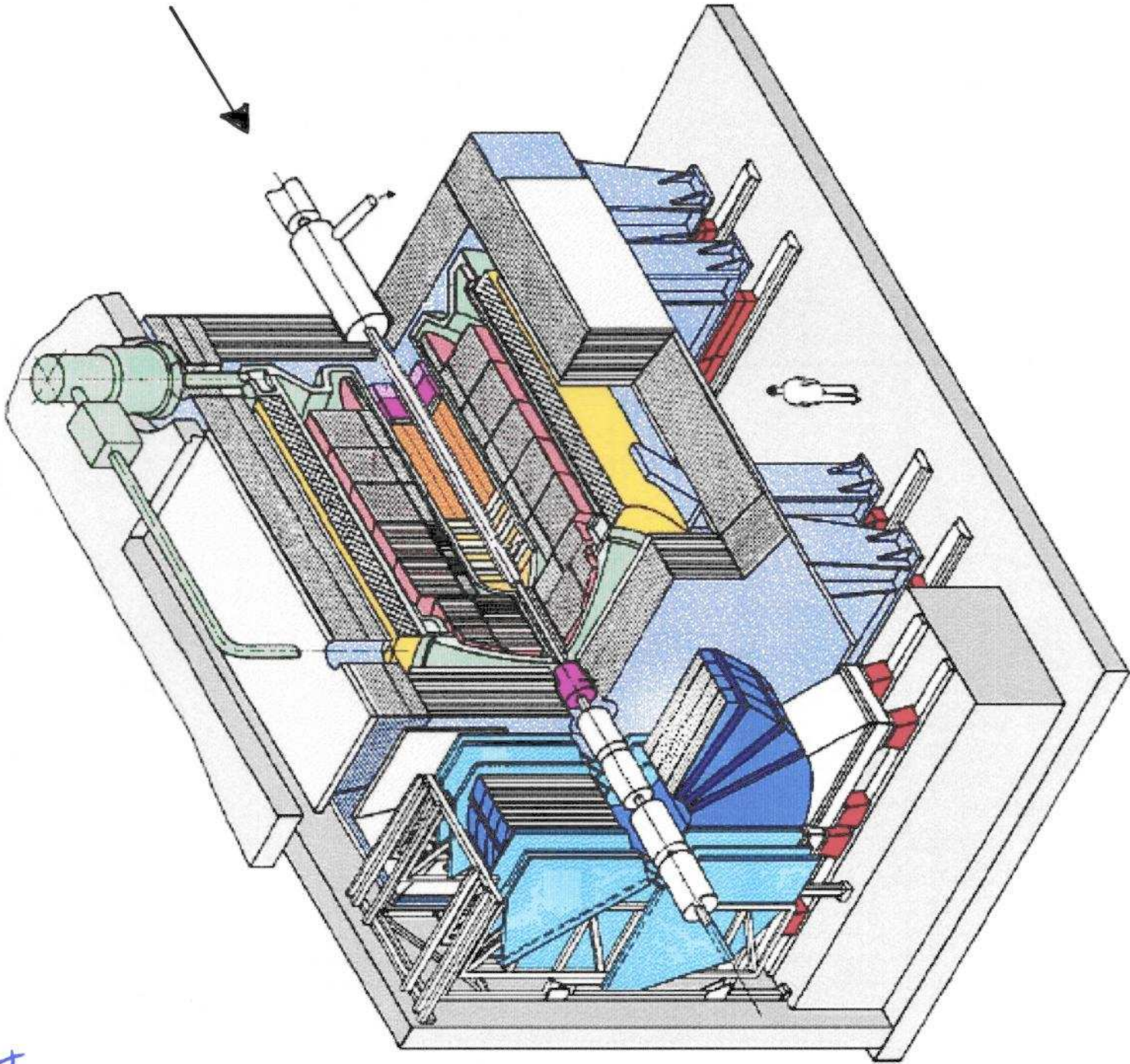
HERA & PETRA @ DESY, D



HEKA Tunnel



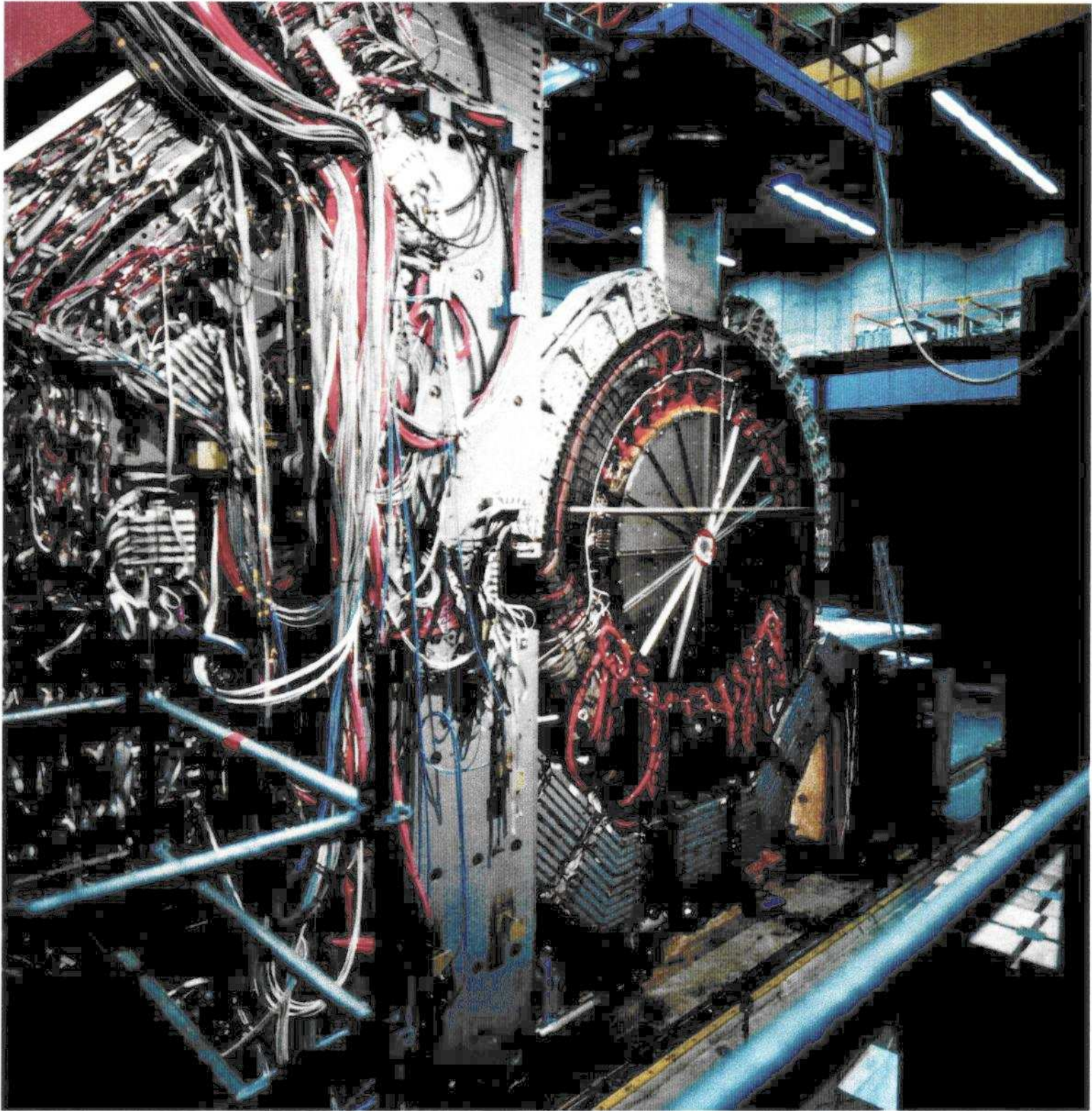
Protonen
920 GeV

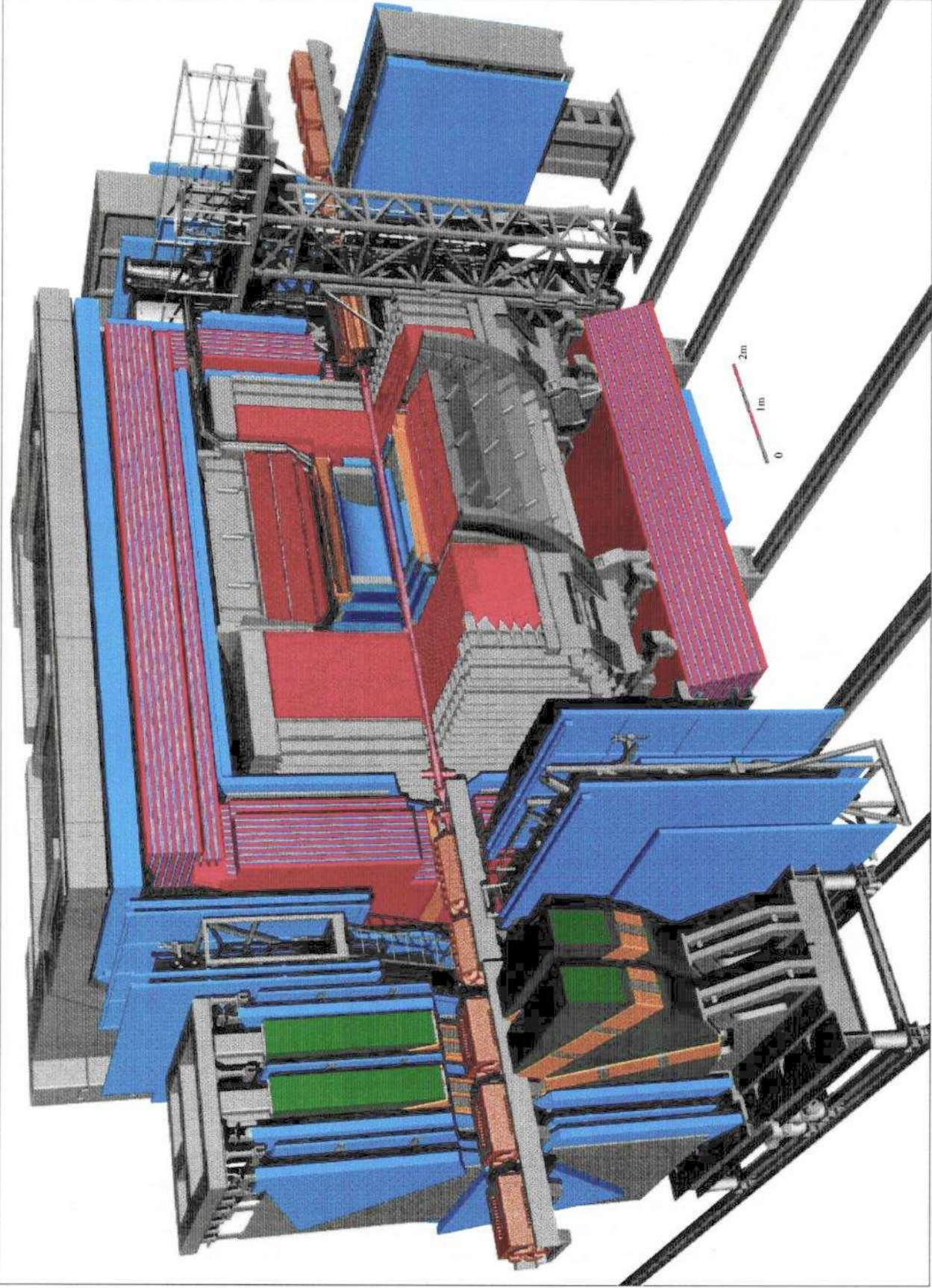


Elektronen/
Positronen
~28 GeV

H1 @ HERA

H1 @ HERA

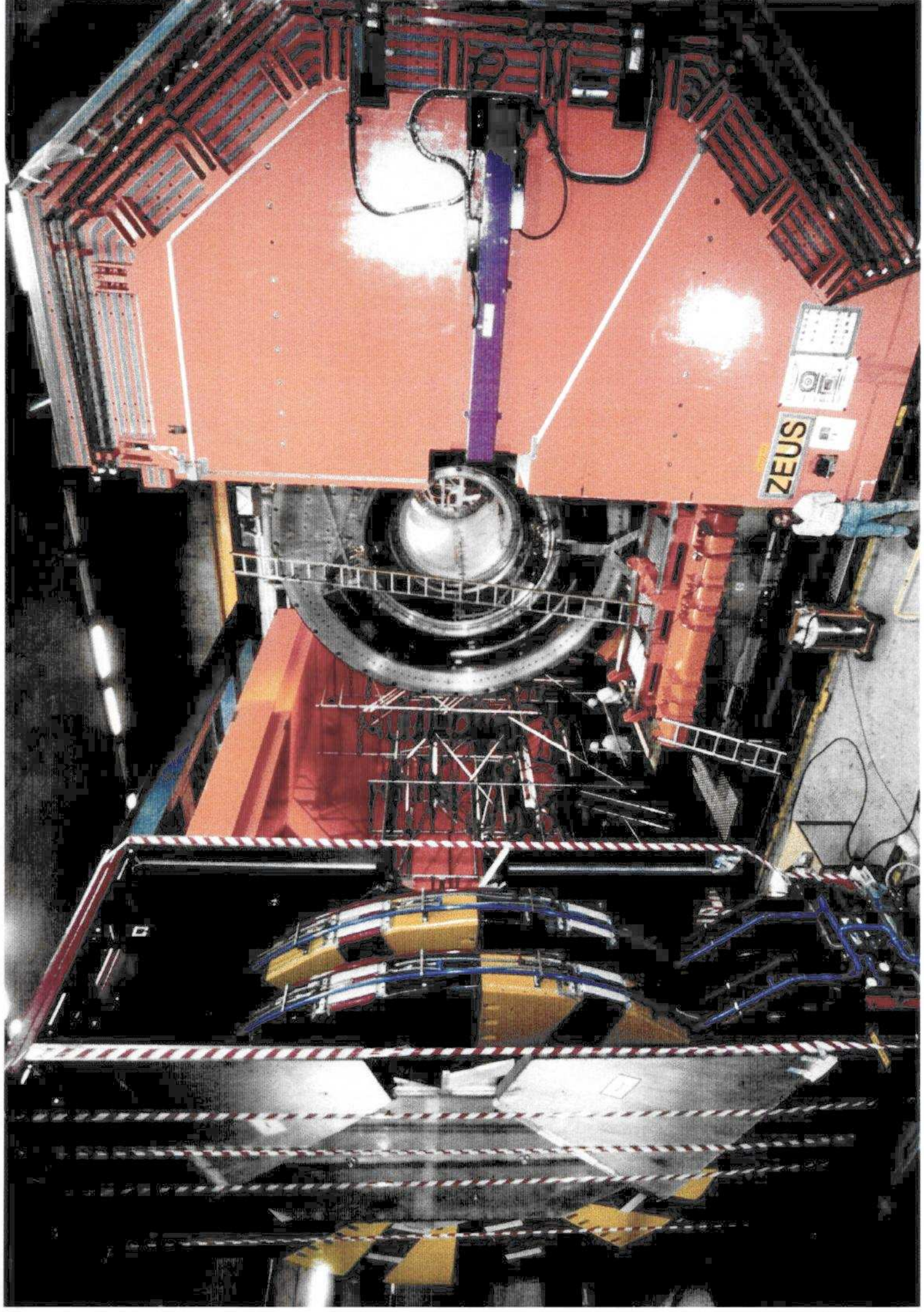




Software :SDRC-IDEAS level VLi
Performed by : Carsten Hartmann
Status : October 1993



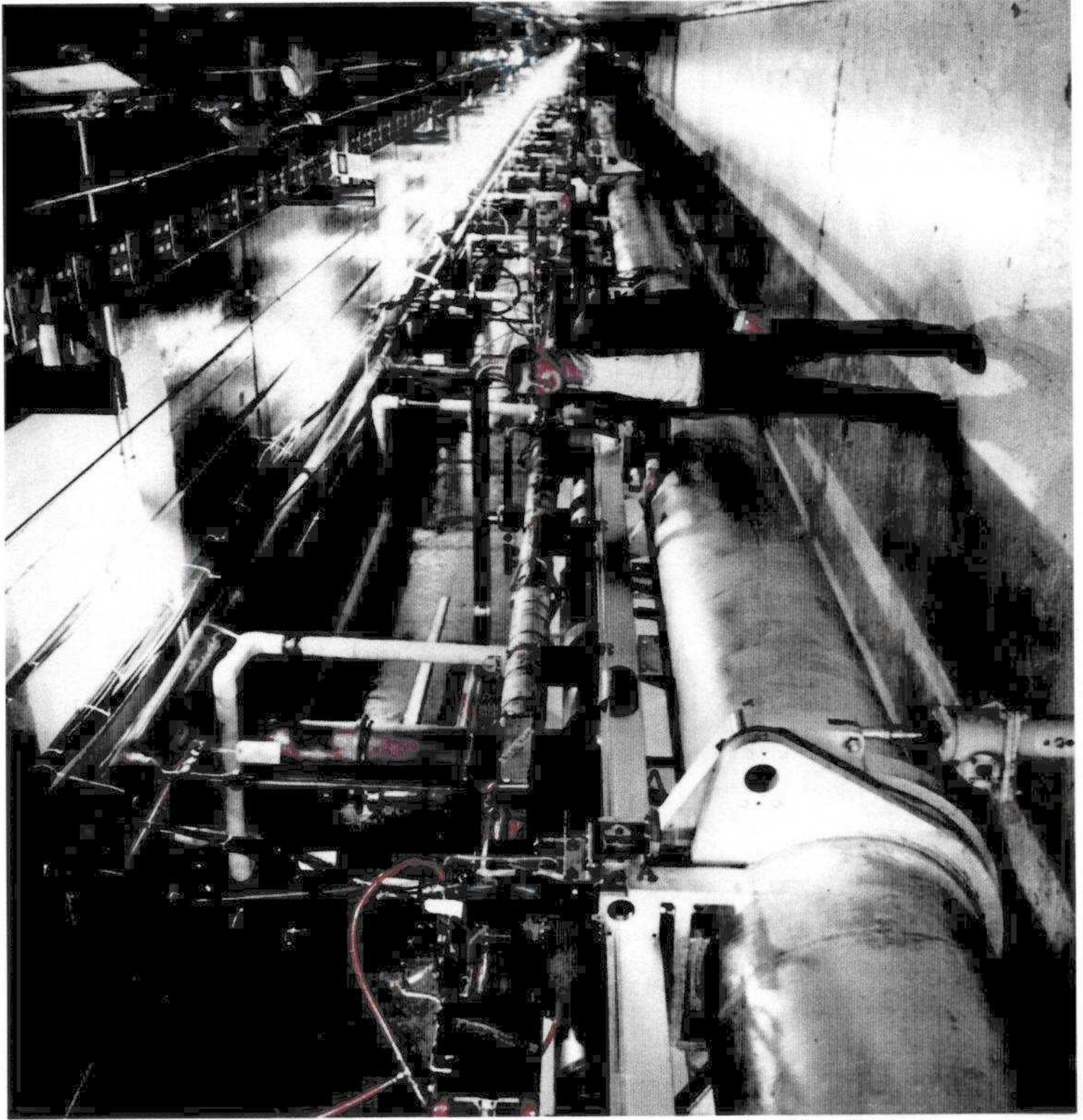
ZEUS (HERA)



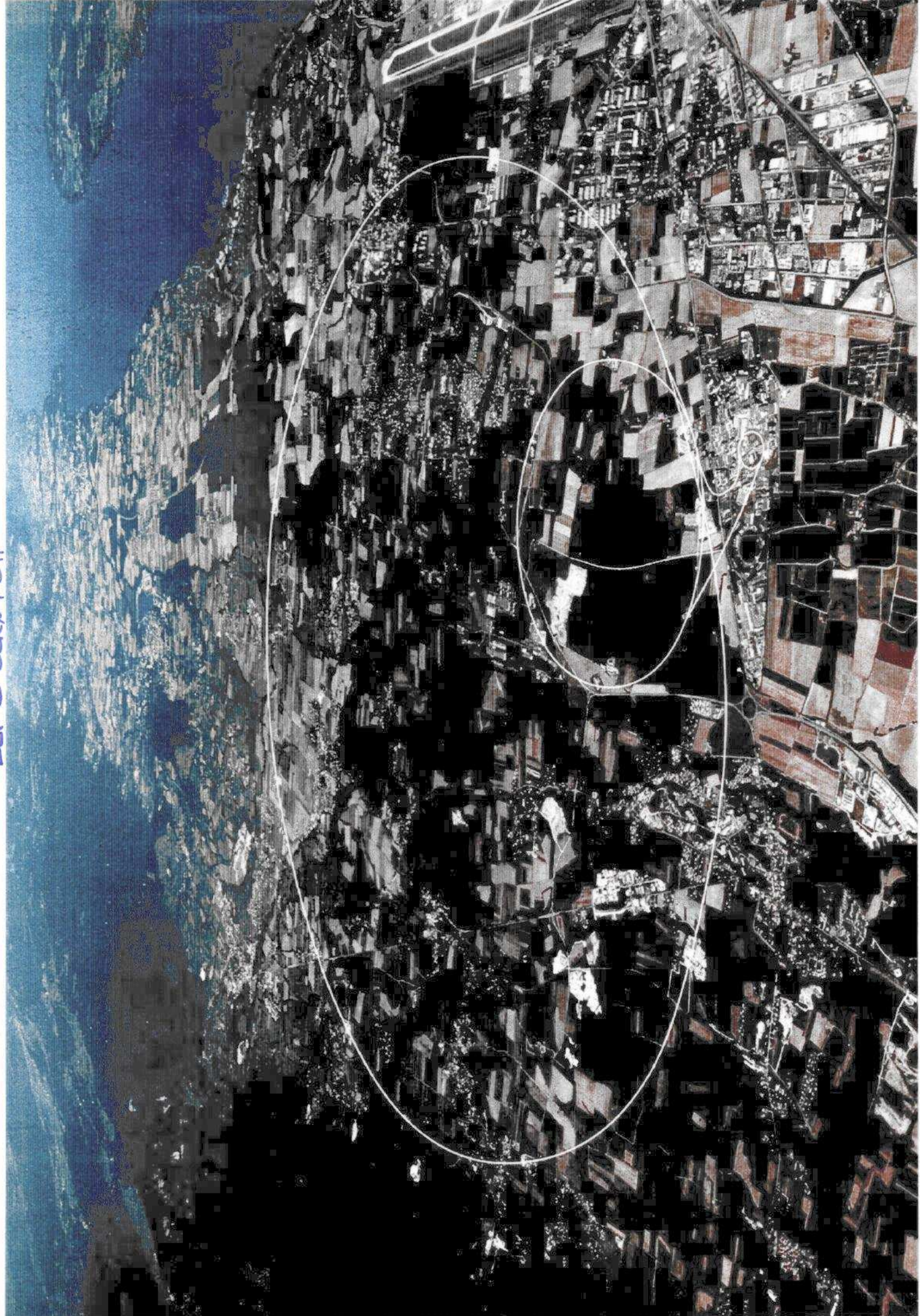
SLC
Ⓟ
SAC,
U.S.A.



SLC Tunnel



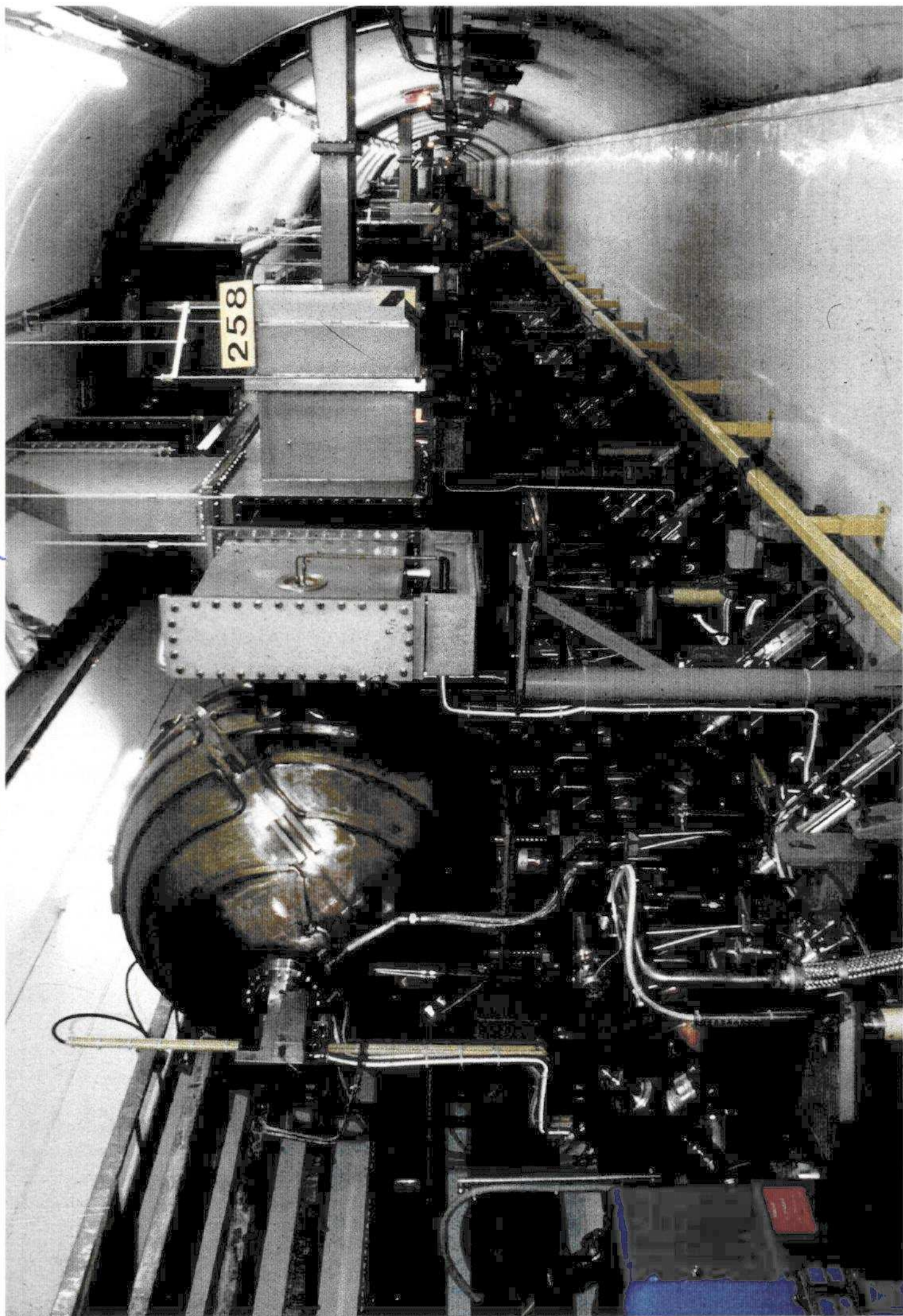
LEP @ CERN, CH



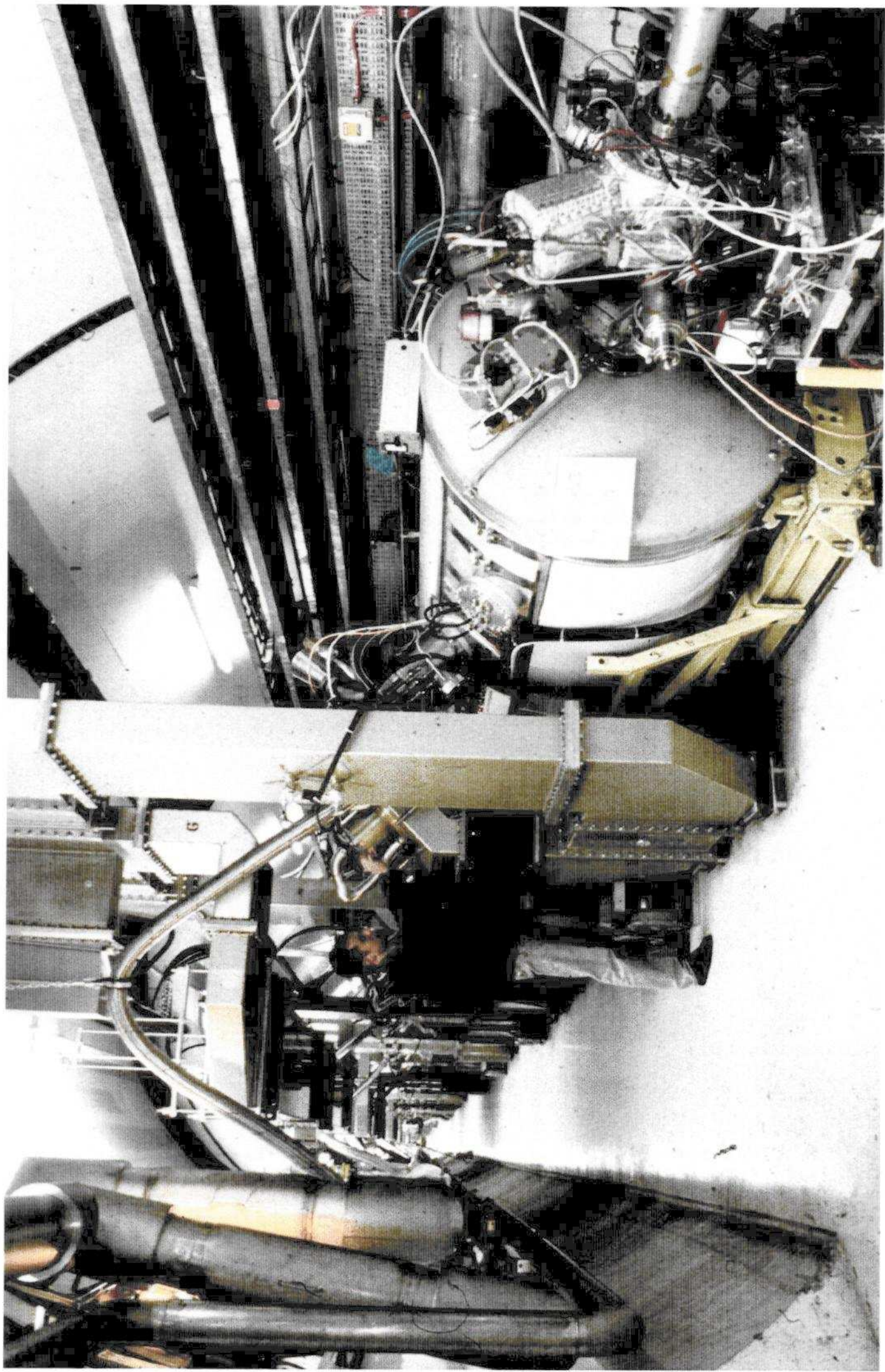
LEP Tunnel

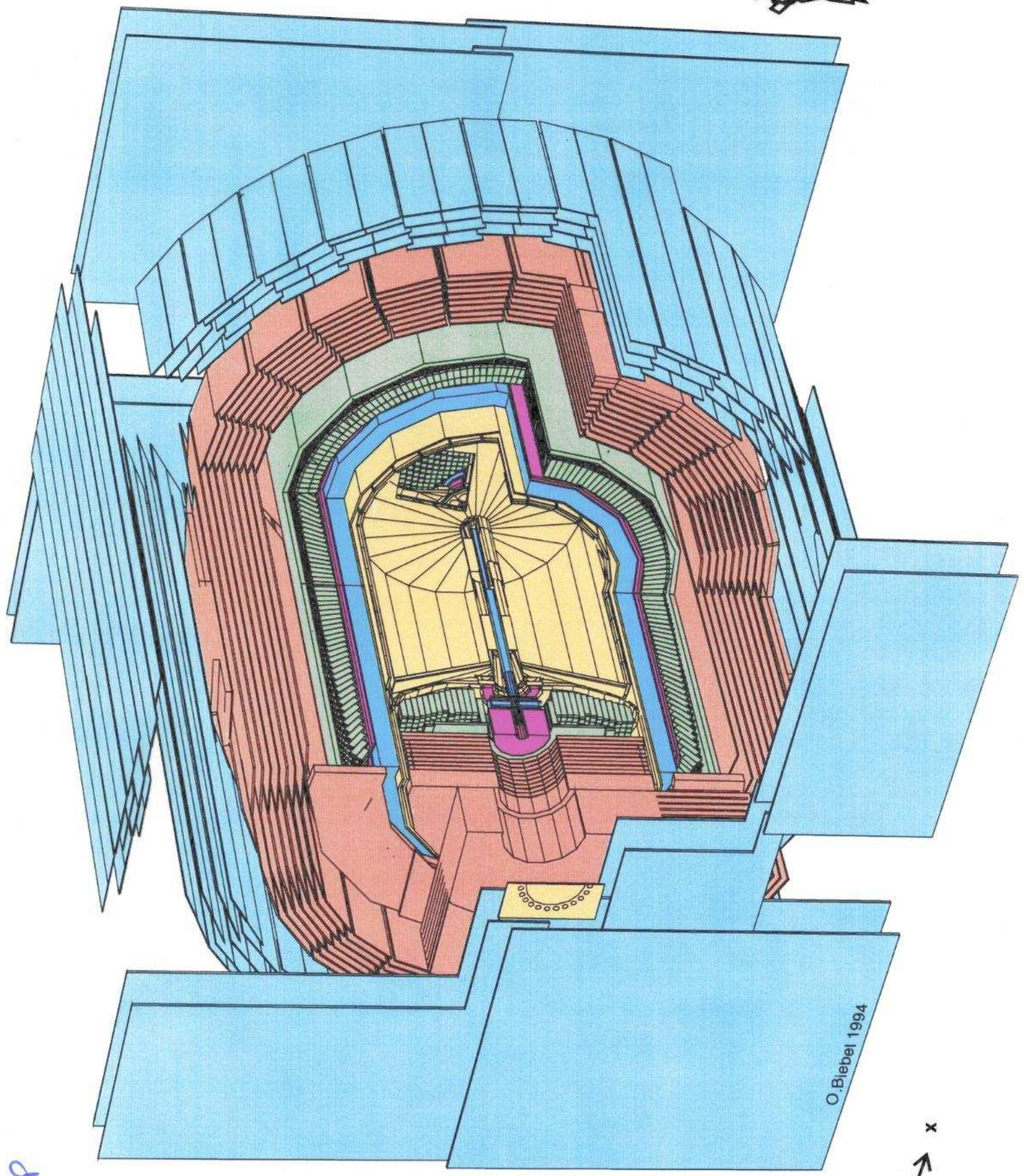


normalleitende Cavity von LEP



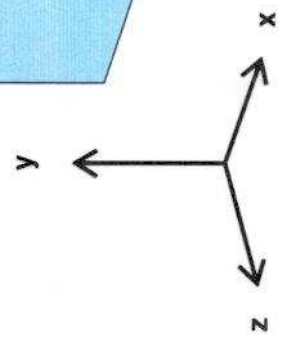
Supraleitende Cavity von LEP



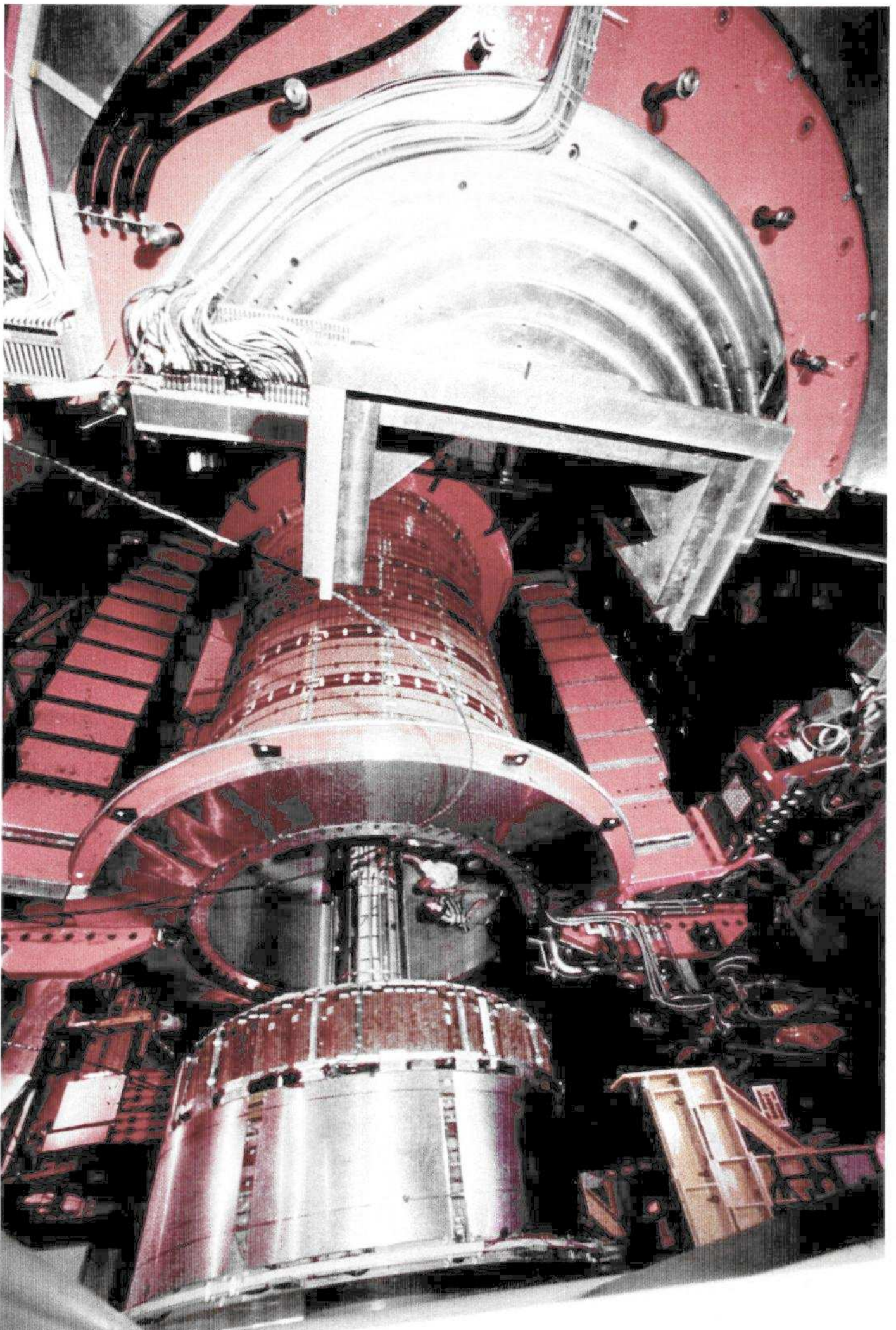


OPAL@LEP

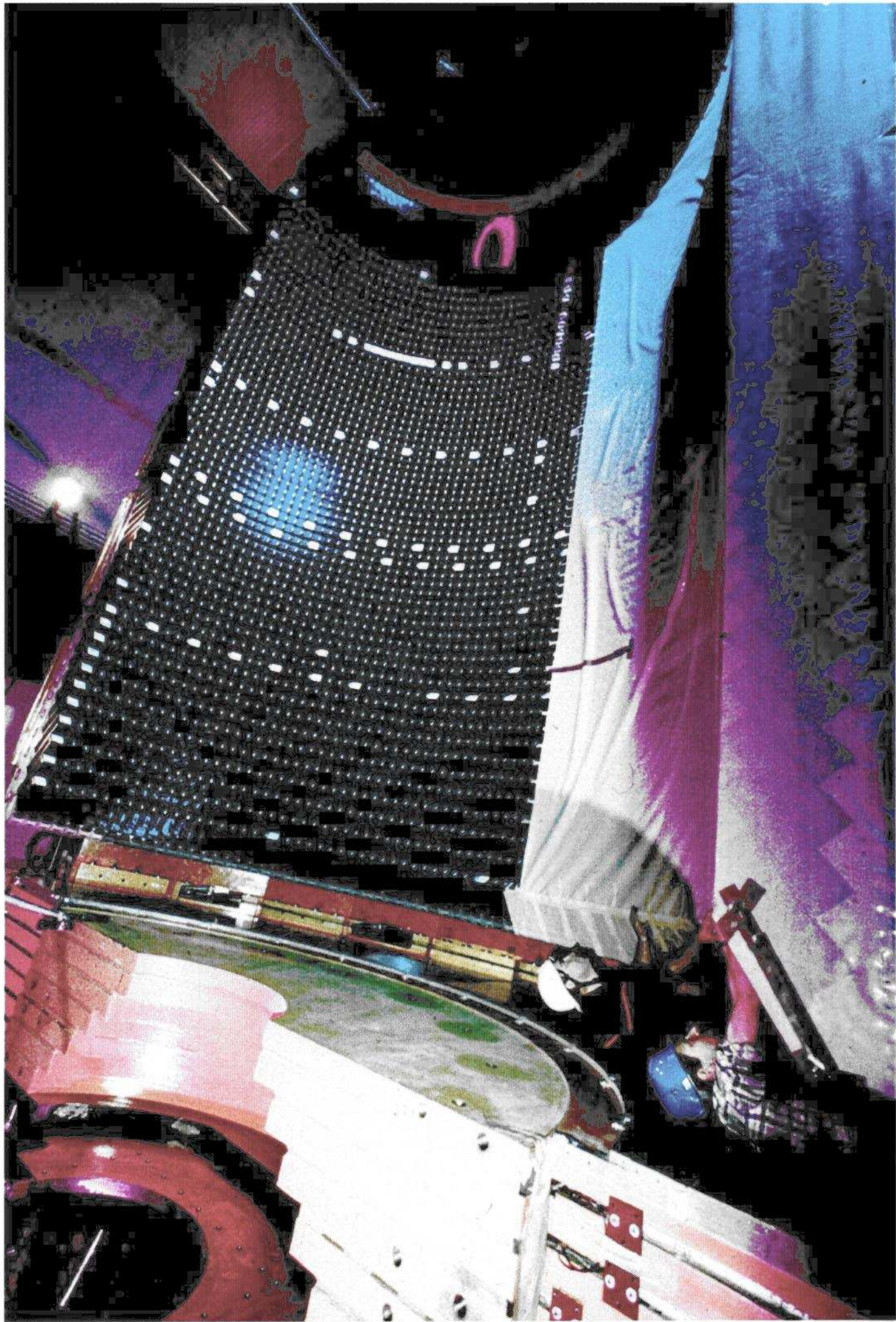
O. Biebel 1994

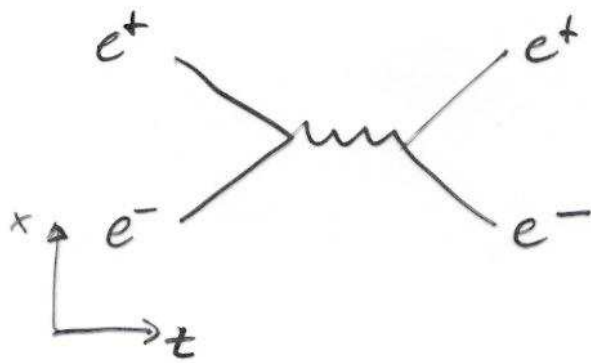


OPAL @ LEP

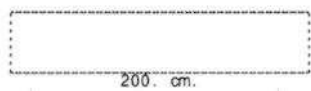
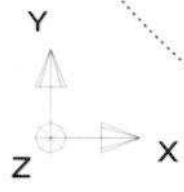
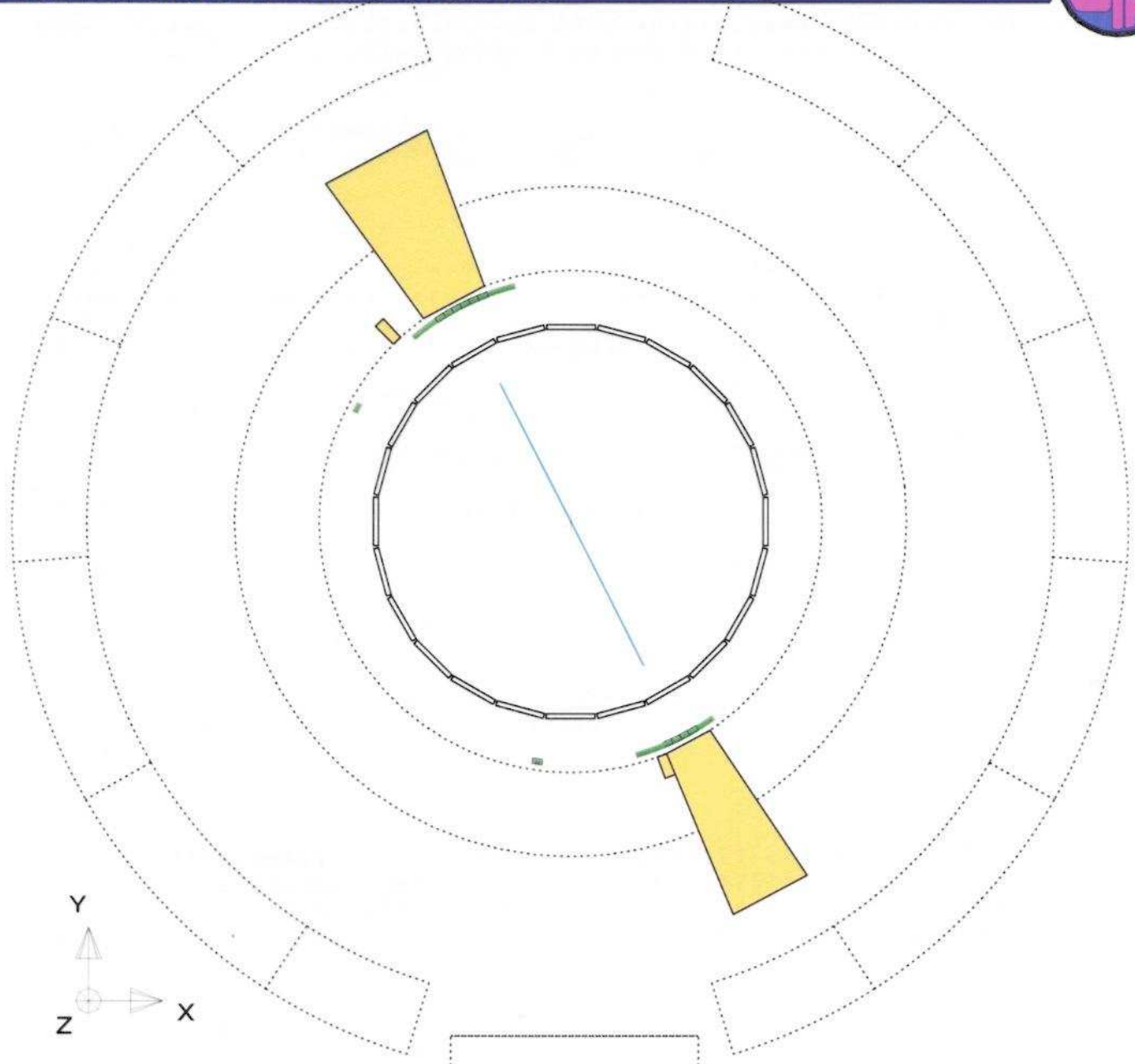


OPAL @ LEP



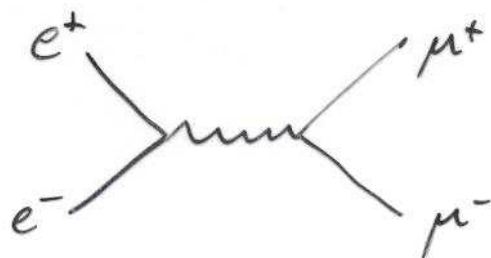


Run:event 4093: 1150 Date 930527 Time 20751 Ctrk(N= 2 Sump= 92.4) Ecal(N= 9 SumE= 90.5) Hcal(N= 0 SumE= 0.0)
 Ebeam 45.658 Evis 94.4 Emiss -3.1 Vtx (-0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 1 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9979 Aplan=0.0000 Oblat=0.0039 Spher=0.0001

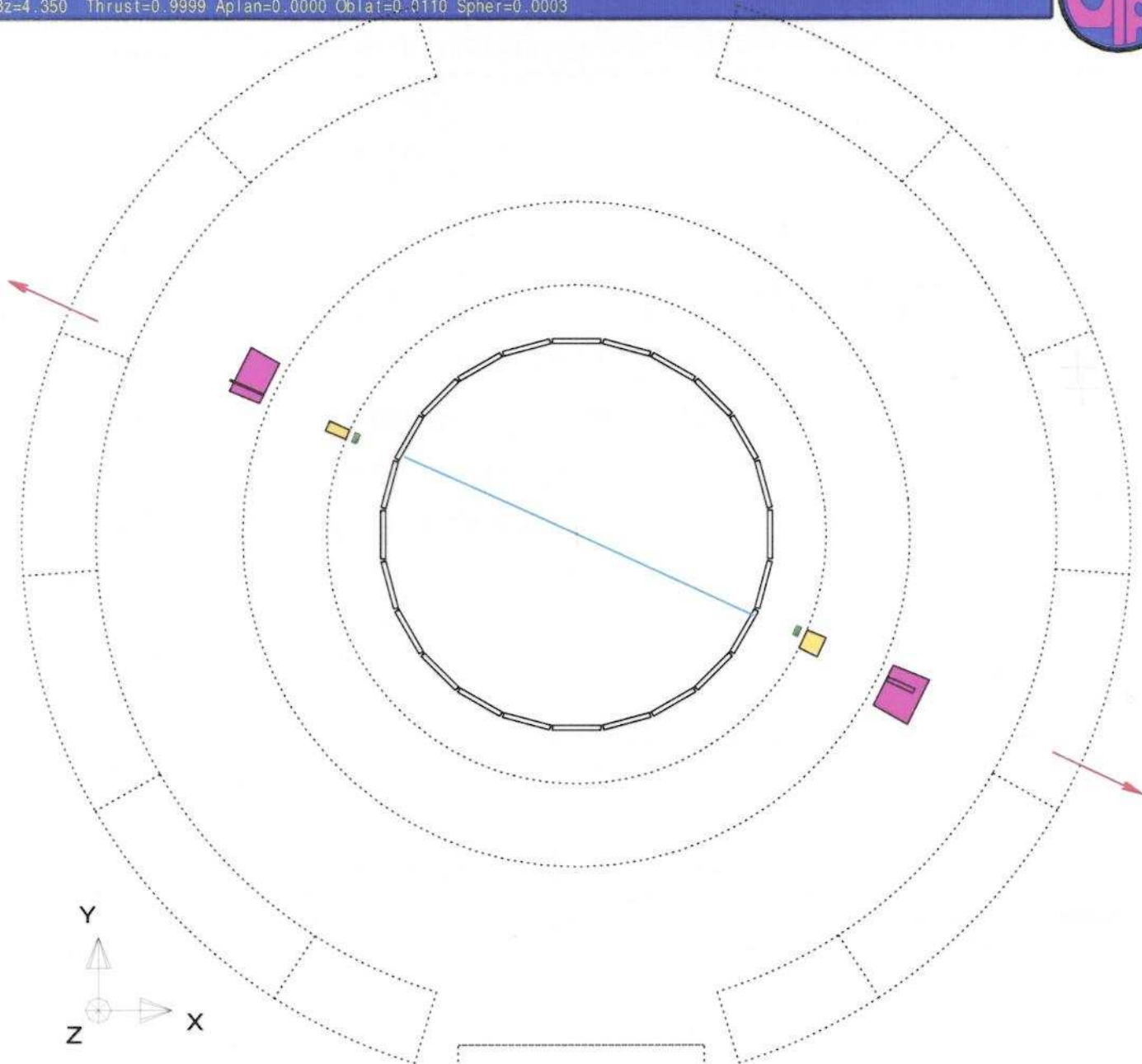


5 10 20 50 GeV

Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

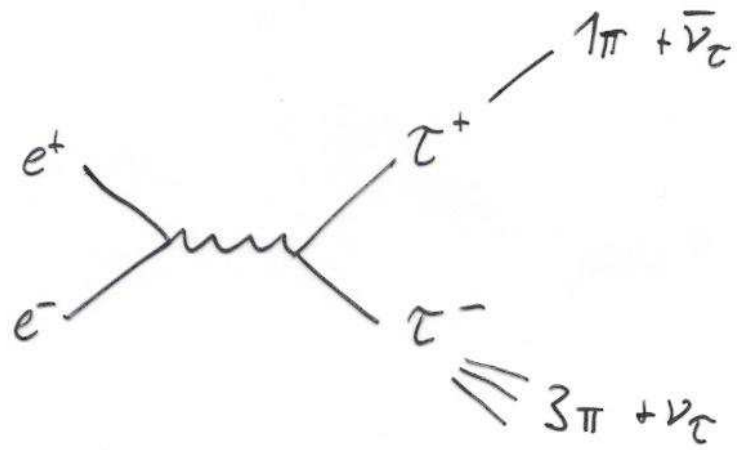


Run:event 4093: 4556 Date 930527 Time 22439 Cirk(N= 2 Sump= 86.8) Ecal(N= 5 SumE= 1.6) Hcal(N= 4 SumE= 4.0)
 Ebeam 45.658 Evis 90.8 Emiss 0.6 Vtx (-0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9999 Aplan=0.0000 Oblat=0.0110 Spher=0.0003

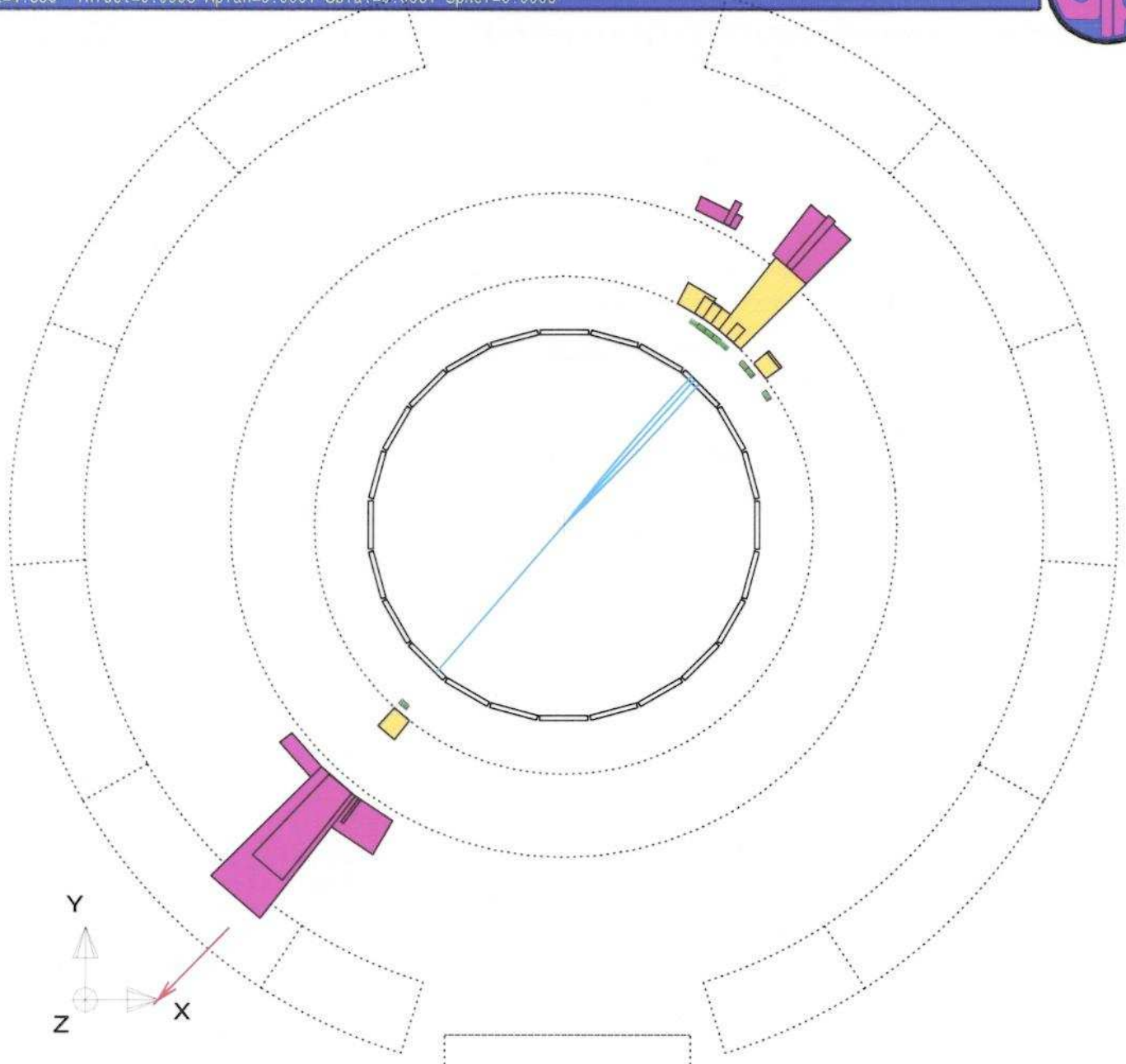


Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



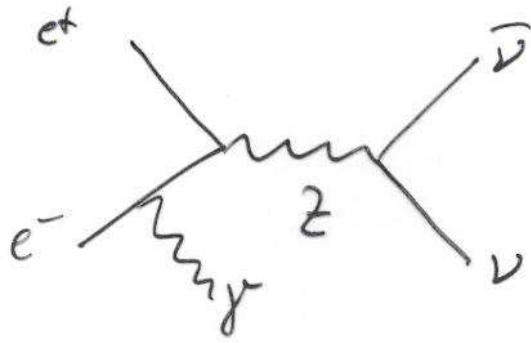


Run:event 4302: 75672 Date 930717 Time 225034 Ctrk(N= 4 Sump= 72.1) Ecal(N= 14 SumE= 23.7) Hcal(N= 9 SumE= 46.4)
 Ebeam 45.610 Evis 121.9 Emiss -30.7 Vtx (-0.04, 0.04, 0.29) Muon(N= 1) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9993 Aplan=0.0001 Oblat=0.0061 Spher=0.0006

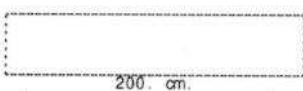
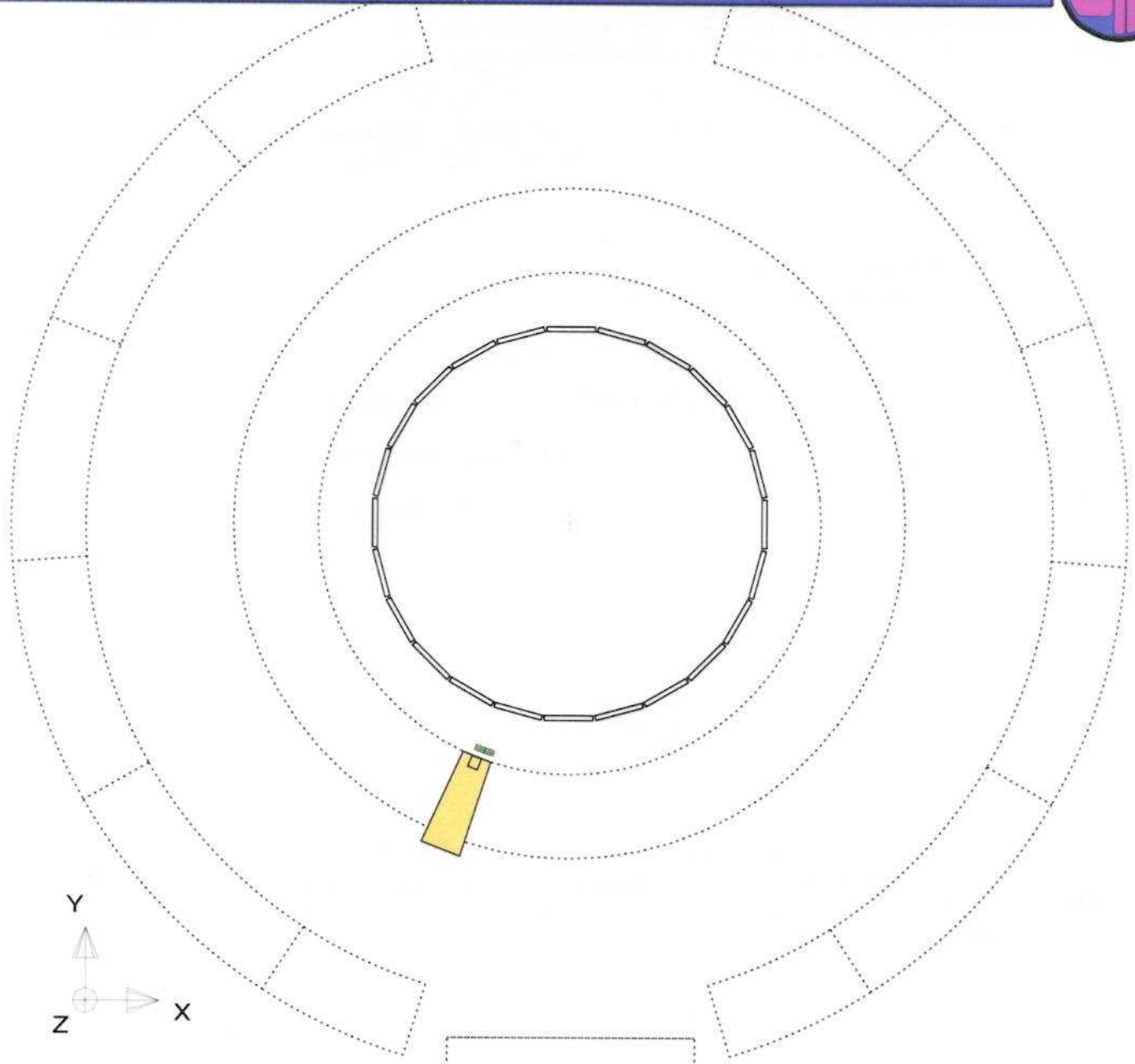


Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



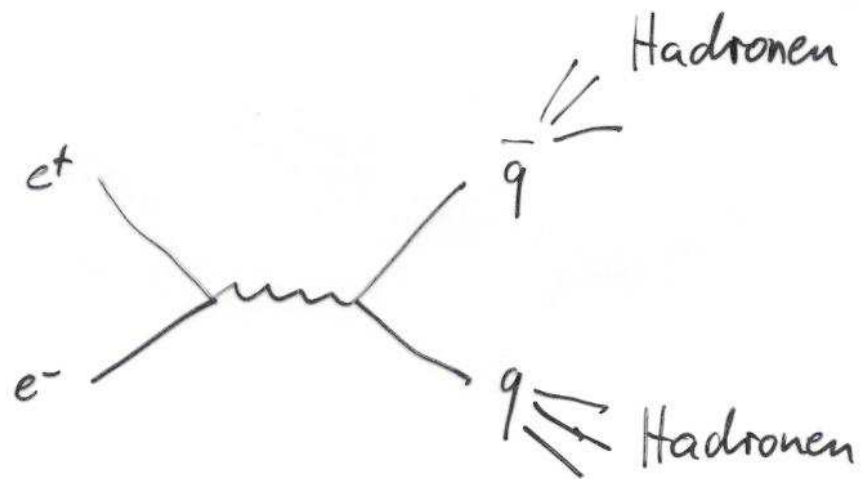


Run:event 2468: 66487 Date 910819 Time 91037 Ctrk(N= 0 Sump= 0.0) Ecal(N= 4 SumE= 15.3) Hcal(N= 0 SumE= 0.0)
 Ebeam 45.613 Evis 15.3 Emiss 75.9 Vtx (-0.12, 0.12, 0.19) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9993 Aplan=0.0000 Oblat=0.0049 Spher=0.0000

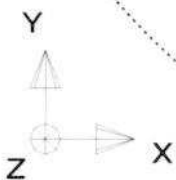
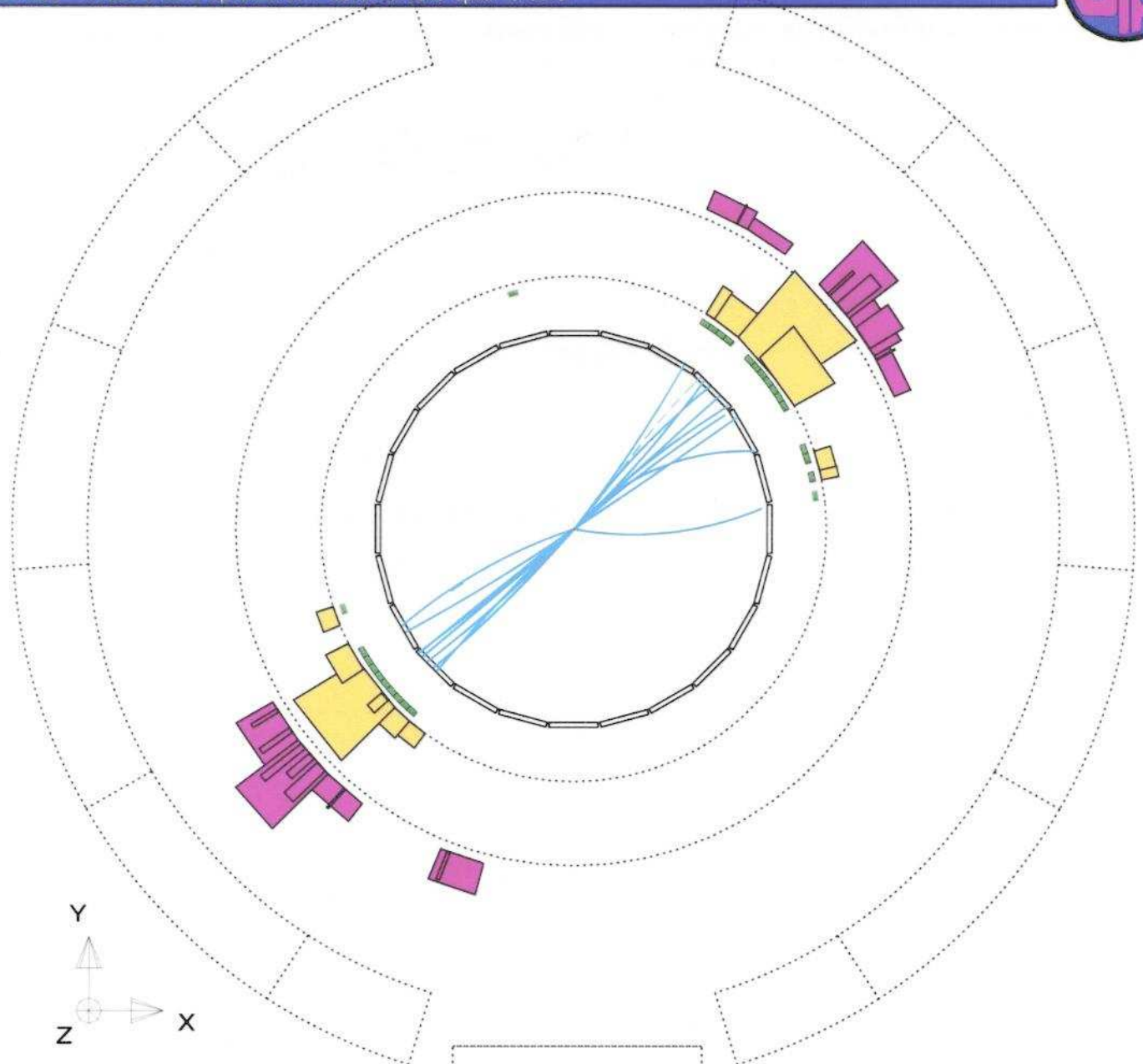


5 10 20 50 GeV

Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



Run:event 4093: 1000 Date 930527 Time 20716 Ctrk(N= 39 Sump= 73.3) Ecal(N= 25 SumE= 32.6) Hcal(N=22 SumE= 22.6)
 Ebeam 45.658 Evis 99.9 Emiss -8.6 Vtx (-0.07, 0.06, -0.80) Muon(N= 0) Sec Vtx(N=,3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9873 Aplan=0.0017 Oblat=0.0248 Spher=0.0073

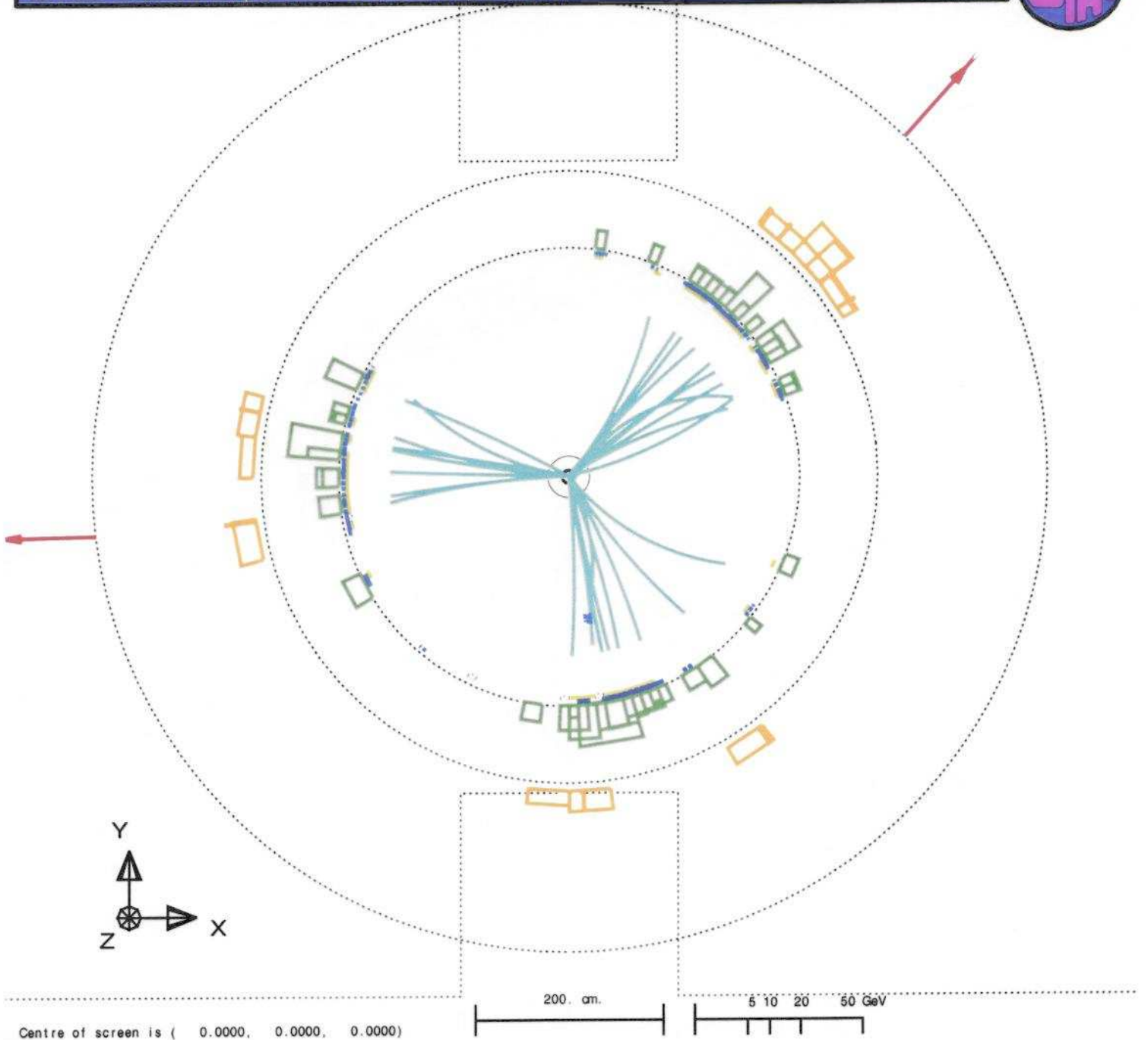


200. cm.

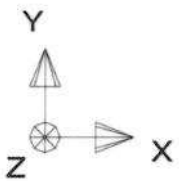
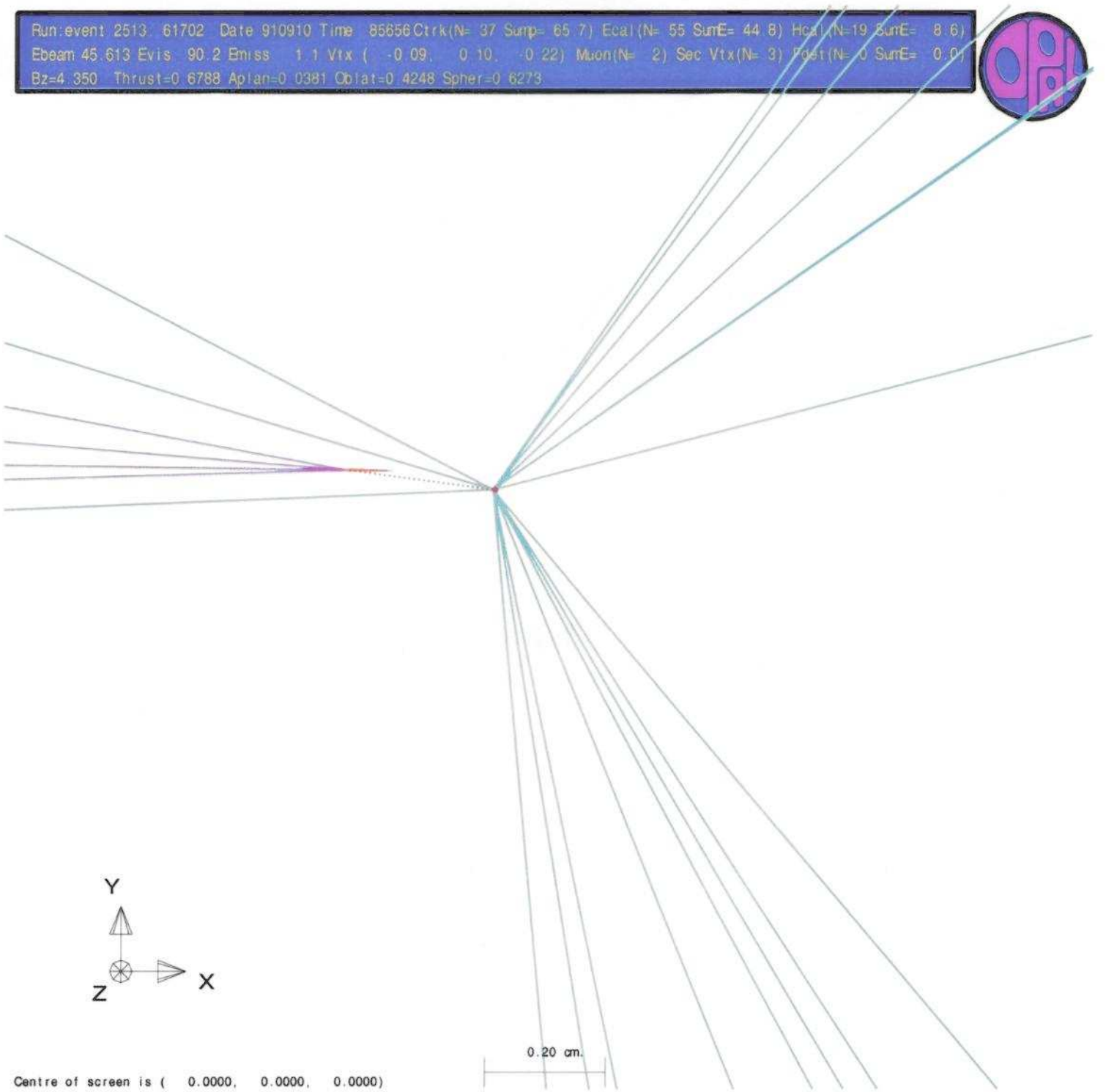
5 10 20 50 GeV

Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

Run:event 2513: 61702 Date 910910 Time 85656 Ctrk(N= 37 Surp= 65.7) Ecal(N= 55 SurE= 44.8) Hcal(N=19 SurE= 8.6)
 Ebeam 45.613 Evis 90.2 Emiss 1.1 Vtx (-0.09, 0.10, -0.22) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SurE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.6788 Aplan=0.0381 Oblat=0.4248 Spher=0.6273



Run: event 2513. 61702 Date 910910 Time 85656 Ctrk(N= 37 SumP= 65.7) Ecal(N= 55 SumE= 44.8) Hcal(N=19 SumE= 8.6)
Ebeam 45.613 Evis 90.2 Emiss 1.1 Vtx (-0.09, 0.10, -0.22) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 3) Post(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.6788 Aplan=0.0381 Oblat=0.4248 Spher=0.6273



0.20 cm.

Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)