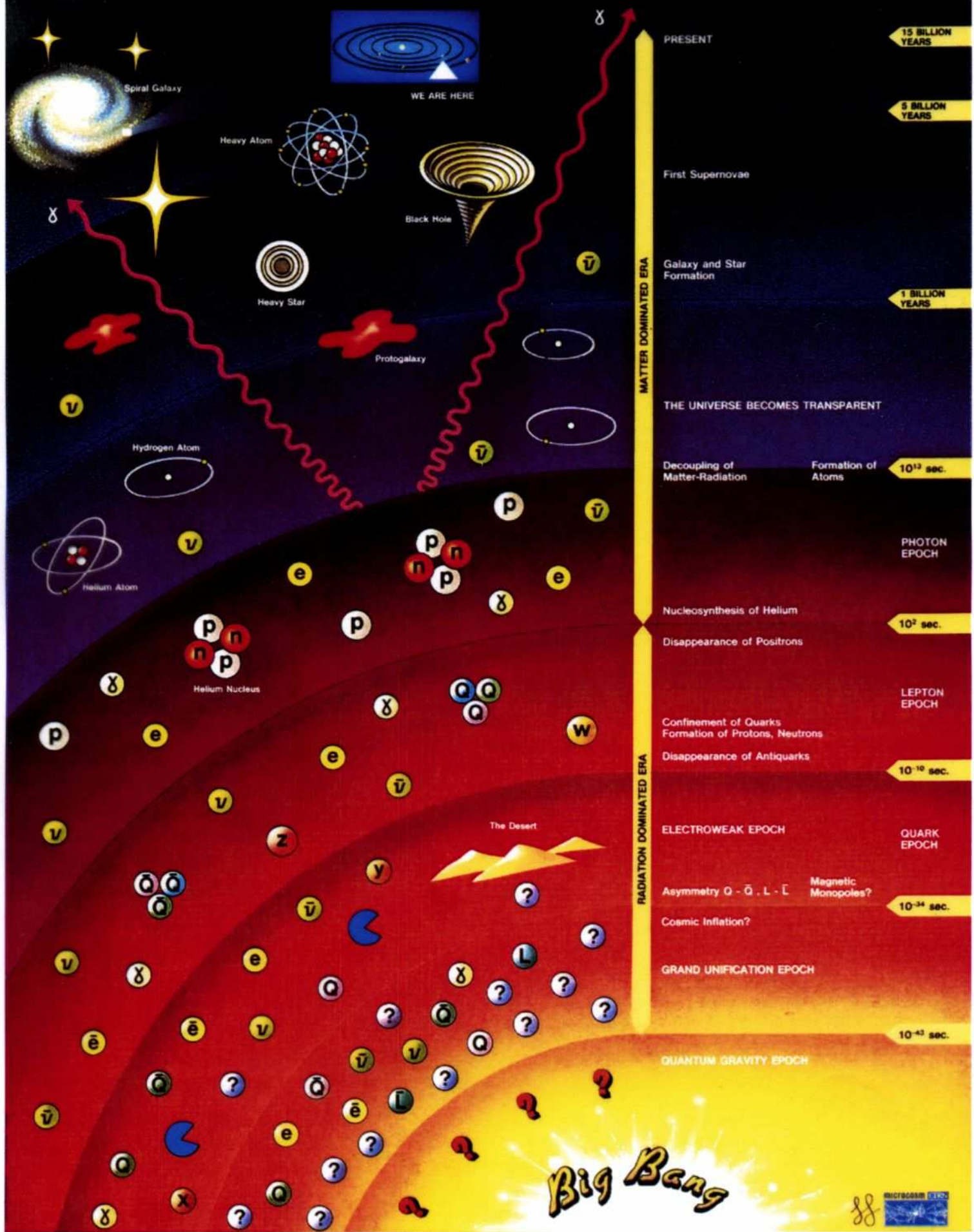


# History of the Universe



# Einführung: Standardmodell

Standardmodell ist derzeit beste gemeinsame Beschreibung von **elektroschwacher** und **starker Wechselwirkung**. Historisch sind diese beiden Teile separat entwickelt worden:

## (elektro-)schwach

## stark

- |           |  |   |
|-----------|--|---|
| 1930ff.   | ▶ Fermi-Theorie zum $\beta$ -Zerfall                     | ▶ Neutron-Entdeckung (Chadwick)                                 |
|           | ▶ Paulis Neutrino-Postulat                               | ▶ anomales magn. Moment des Protons (Stern)                     |
| 1957      | ▶ Wu-Experiment zur Paritätsverletzung                   |   |
| 1959-64   |  | ▶ statisches Quarkmodell (Gell-Mann)                            |
| 1961-68   | ▶ Glashow-Salam-Weinberg Theorie der el.schw. Ww         |   |
| 1971      |  | ▶ Renormierbarkeit nicht-abelscher Theorien (t'Hooft, Veltmann) |
| 1973      | ▶ Entdeckung der neutralen Ströme                        | ▶ asymptot. Freiheit (Gross, Politzer, Wilczek)                 |
| 1979      |  | ▶ Entdeckung d. Gluons  |
| 1983      | ▶ Entdeckung von $W^\pm$ , Z-Bosonen (Rubbia, v.d. Meer) |   |
| seit 1983 | Standardmodell d. el.schw. u. starken Ww.                |   |





# Einleitung

## ● Bausteine der Materie: Fermionen

|                   | <u>Familien</u> |           |            | <u>elekt. Ladung</u> | <u>Kräfte</u><br>st., em., schw., grav. |
|-------------------|-----------------|-----------|------------|----------------------|---|
| <u>Leptonen</u> : | $\nu_e$         | $\nu_\mu$ | $\nu_\tau$ | 0                    | - x x x                                 |
|                   | e               | $\mu$     | $\tau$     | -1                   | - x x x                                 |
| <u>Quarks</u> :   | u               | c         | t          | +2/3                 | x x x x                                 |
|                   | d               | s         | b          | -1/3                 | x x x x                                 |

und ihre Anti-Teilchen

## ● Kräfte und Vermittler: Bosonen

| <u>Theorie</u> | <u>Wechselwirkung</u> | <u>Austauschteilchen</u> | <u>relative Stärke</u> | <u>Beispiel für Wechselwirkung</u>  |
|----------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|---|
| QCD            | stark                 | Gluon $g$                | 1                      |  |
| QED            | elektromagnet.        | Photon $\gamma$          | 1/137                  |  |
| QFD            | schwach               | $W^+, W^-, Z$            | $10^{-14}$             |  |
| ...            | gravitativ            | Graviton $G$ ?           | $10^{-40}$             |  |

## ● Erzeugung der Massen:

Higgs-Boson  $H$

wird noch gesucht

# Wechselwirkungen im Standardmodell

## Wechselwirkungen:

|  | elmagn.  | schwach  | stark  | gravitativ  |
|--|--|--|--|---|
| rel. Stärke:   | $1/137$  | $10^{-5}$  | $1$  | $10^{-40}$  |
| gegeben durch:                                       | $\alpha_{\text{em}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$ | $G_F \approx 1.166 \cdot 10^{-5} \frac{(\hbar c)^3}{\text{GeV}^2}$ | $\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi\hbar c}$       | $\frac{G_N \cdot m_{\text{Proton}}^2}{4\pi\hbar c}$ |
| Träger der Kraft:                                    | Photon<br>$\gamma$                                       | Weakonen<br>$W^+, W^-, Z^0$  | Gluon<br>$g$                                 | Graviton?<br>$G?$                                   |
| elektr. Ladung:                                      | $0e$   | $+e, -e, 0e$   | $0e$   | $0e$  |
| starke (Farb-)Ladung:                                | $0$  | $0$  | 2-fach                                       | $0$   |
| schwache Ladung:                                     | $0$  | ja   | $0$  | $0$   |
| Spin:  | $1\hbar$   | $1\hbar$   | $1\hbar$                                     | $2\hbar?$   |
| Masse [GeV/c <sup>2</sup> ]:                         | $0$  | $80, 91$   | $0$  | $0$   |
| Reichweite:<br>$\Delta R = \frac{\hbar c}{\Delta E}$ | $\infty$   | $\sim 10^{-18} \text{ m}$  | $\sim 10^{-15} \text{ m}$<br>(Confinement !) | $\infty$  |

• "Kraft"-Teilchen mit ganzzahligem Spin  $1\hbar$  (Graviton vermutl.  $2\hbar$ )

• unterliegen Bose-Einstein-Statistik

→ *Bosonen*

# Materieteilchen im Standardmodell

## Quarks und Leptonen:

Standard-Modell besitzt Familienstruktur mit drei Generationen:

|          | 1. Gen.                                      | 2. Gen.  | 3. Gen.  | elektrische Ladung                 | schwache Ladung | starke Ladung | Spin                                     |
|----------|--|--|--|------------------------------------|-----------------|---------------|--|
| Leptonen | $\begin{bmatrix} \nu_e \\ e^- \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{bmatrix}$ | 0e<br>-1e                          | ja<br>ja        | 0<br>0        | $\frac{1}{2}\hbar$<br>$\frac{1}{2}\hbar$ |
| Quarks   | $\begin{bmatrix} u \\ d \end{bmatrix}$       | $\begin{bmatrix} s \\ c \end{bmatrix}$           | $\begin{bmatrix} t \\ b \end{bmatrix}$             | $+\frac{2}{3}e$<br>$-\frac{1}{3}e$ | ja<br>ja        | 1<br>1        | $\frac{1}{2}\hbar$<br>$\frac{1}{2}\hbar$ |

- "Materie"-Teilchen mit Spin  $\frac{1}{2}\hbar$
- unterliegen Fermi-Dirac-Statistik  
→ *Fermionen*
- Aus Quarks werden "Hadronen" aufgebaut:
- Mesonen:  $q\bar{q}'$  (z.B.  $\pi^+ \hat{=} u\bar{d}$ )
- Baryonen:  $qq'q''$  (z.B.  $p \hat{=} uud$ )

# "Weltformel" des Standardmodells

Lagrangedichte des Standardmodells  $\mathcal{L}$

(Lösung beschreibt Teilchen und ihre Wechselwirkungen)

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} W_{\mu\nu}^i W_i^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} \quad (1.2)$$

{ kinetische Energie und Selbstwechselwirkung von  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ ,  $\gamma$  und Gluonen.

$$+ \sum_l (\bar{L}_l \gamma^\mu (i\partial_\mu - g \frac{\tau_3}{2} W_\mu^i - g' \frac{Y}{2} B_\mu) L_l + \bar{R}_l \gamma^\mu (i\partial_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu) R_l)$$

{ kinetische Energie der Leptonen und ihre Wechselwirkung mit  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ ,  $\gamma$ .

$$+ \sum_q (\bar{L}_q \gamma^\mu (i\partial_\mu - g \frac{\tau_3}{2} W_\mu^i - g' \frac{Y}{2} B_\mu - g'' \frac{\lambda_q}{2} G_\mu^a) L_q) + \sum_q (\bar{R}_q \gamma^\mu (i\partial_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu - g'' \frac{\lambda_q}{2} G_\mu^a) R_q)$$

{ kinetische Energie der Quarks und ihre Wechselwirkung mit  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ ,  $\gamma$  und Gluonen.

$$+ \left| (i\partial_\mu - g \frac{\tau_3}{2} W_\mu^i - g' \frac{Y}{2} B_\mu) \Phi \right|^2 - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$$

{ Massen von  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ ,  $\gamma$  und des Higgs selbst bzw. ihre Kopplungen an das Higgs.

$$- \sum_l (G_l \bar{L}_l \Phi R_l + \text{hermitisch konjugierte Form})$$

{ Massen der Leptonen bzw. ihre Kopplungen an das Higgs.

$$- \sum_{q_1, q_2} (G_{q_1} \bar{L}_{q_1} \Phi R_{q_1} - i G_{q_2} \bar{L}_{q_2} \tau_2 \Phi^* R_{q_2} + \text{hermitisch konjugierte Form})$$

{ Massen der Quarks bzw. ihre Kopplungen an das Higgs.

mit:

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

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

und mit:

- $G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g'' f_{abc} G_\mu^b G_\nu^c$
- $W_\mu^i, B_\mu =$  Felder von  $W^+, W^-, Z, \gamma$  ( $i = 1, 2, 3$ )
- $G_\mu^a =$  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

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

und:

- $g \cdot \sin \theta_w = g' \cdot \cos \theta_w$
- =  $e = \sqrt{4\pi} \alpha_{em}$
- $\cos \theta_w = m_W / m_Z$
- $g'' = g_s = \sqrt{4\pi} \alpha_s$

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 Austauschteilchen  $W^i, B, G^a$  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 Austauschteilchen. Die Massenterme entstehen in diesem Modell durch die Wechselwirkung des Higgs-Feldes  $\Phi$  mit den anderen Teilchenfeldern. Kinetische Energien werden durch die zeitliche und örtliche Änderung der Teilchenfelder erzeugt, welches Termen mit  $\partial_\mu$  entspricht.

# Wechselwirkungen und zugehörige Theorien

- elektromagn. Ww  $\longleftrightarrow$  QED QuantenElektrodynamik
- elektroschwache Ww  $\longleftrightarrow$  QFD QuantenFlavourDynamik
- starke Wechselwirkung  $\longleftrightarrow$  QCD QuantenChromodynamik

Diese Theorien sind Bestandteile des Standardmodells der elektroschwachen und starken Wechselwirkungen.

Bei QED, QFD, QCD handelt es sich um Quantenfeldtheorien (QFT), das sind Eichtheorien, bei denen die Lösungen der jeweiligen Lagrangedichte L unter gewissen Eichtransformationen (korrekt eigentlich Phasentransformationen) invariant bleiben. Die Eichtransformationen entsprechen Symmetrioperationen und die Invarianz der Lösungen einer Symmetrie.

$\Rightarrow$  Noether - Theorem:

- |                            |                       |                          |
|----------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Symmetrien                 | $\longleftrightarrow$ | Erhaltungsgrößen         |
| z.B. Translationsinvarianz | $\longleftrightarrow$ | Impulserhaltung          |
| Zeitinvarianz              | $\longleftrightarrow$ | Energieerhaltung         |
| QED: U(1) - Symmetrie      | $\longleftrightarrow$ | elektr. Ladungserhaltung |



# Grundzüge der Eichtheorien

## • E-Dynamik (zur Erinnerung)

Eichtransf.    Potential  $\phi \rightarrow \phi + \frac{\partial \chi(\vec{r}, t)}{\partial t}$   
                  Vektorfeld  $\vec{A} \rightarrow \vec{A} - \vec{\nabla} \chi(\vec{r}, t)$

} ohne Einfluss  
auf Lösung  
der Maxwell-  
Gleichungen

→ Eichinvarianz der E-Dynamik, weil

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

trotzdem:  $\phi$  und  $\vec{A}$  haben direkte physikal. Bedeutung:

$e\phi \cong$  potentielle Energie des Teilchens

$e\vec{A}$  beeinflusst die de-Broglie-Wellenlänge  
 $\lambda = h/|\vec{p}|$  ;  $\vec{p} = m\vec{v} + e\vec{A}$

## • Quantenmechanik

Eichtransf. beeinflusst Phase der Wellenfunktion:

$$\rightarrow H\psi = E\psi \quad \text{und} \quad H = T + V$$

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

$\psi'$  erfüllt Schrödinger-Gl. nach Transformation

$$\phi' = \phi + \frac{\partial \chi}{\partial t} \quad ; \quad \vec{A}' = \vec{A} - \vec{\nabla} \chi$$

# Eichprinzip

Wenn man die Phase der Wellenfkt. eines Teilchens lokal (ortsabhängig) beliebig abändert ( $\psi' = \exp[ie\chi(\vec{r}, t)] \cdot \psi$ ), so muss man notgedrungen die Existenz eines äußeren Feldes fordern, damit das Teilchen weiterhin die Schrödinger-Gl. (Dirac; Proca; Klein-Gordon-Gl.) erfüllt

z.B. Forderung der lokalen Phaseninvarianz

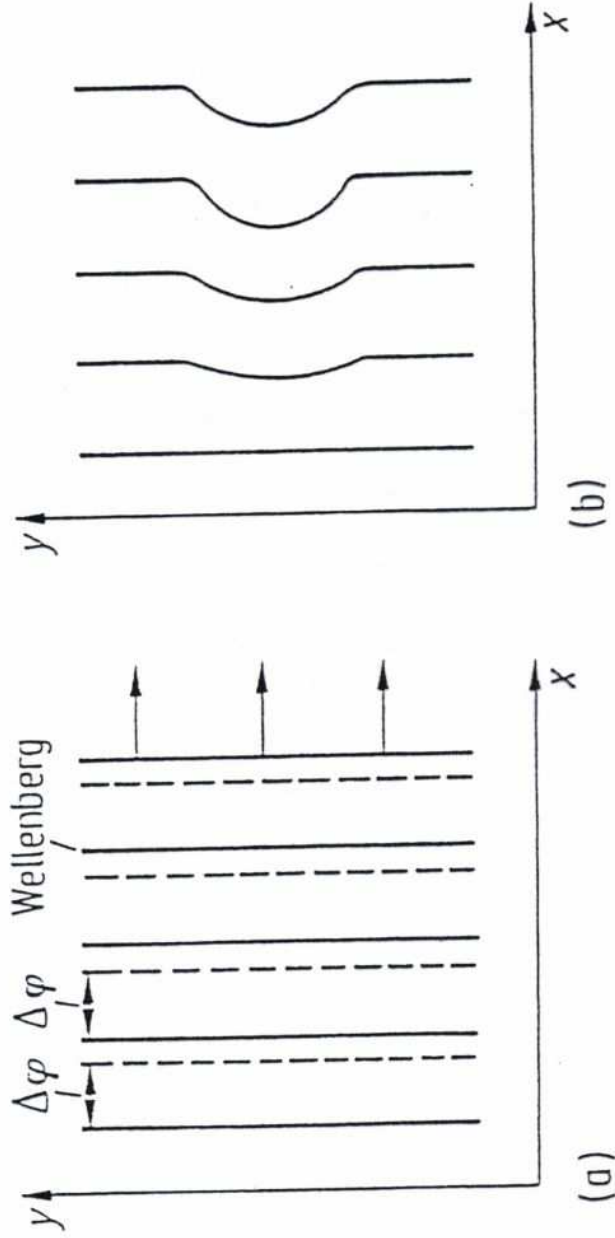
→ ∃ elektromagn. Feld ( $\cong$  Photon)

→ elekt. Ladungserhaltung (Noether-Theorem)

# Versanschaulichung des Eichprinzips an Wasserwellen

globale Phasentransf.  
 $\chi = \text{const}$

lokale Phasentransf.  
 $\chi = \chi(x, y)$



**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.

## Noether-Theorem: Symmetrien $\leftrightarrow$ Erhaltungssätze

Insbesondere interne Symmetrie spielen im Standardmodell und dessen Erweiterungen eine zentrale Rolle. Durch das Noether-Theorem sind diese Symmetrien mit erhaltenen Größen, konkret: mit Ladungen, verbunden. Zudem erzwingt das Eichprinzip bei lokaler Eichinvarianz die Existenz äußerer Felder, also von Teilchen, die Wechselwirkungen zwischen den Ladungen vermitteln, damit die Symmetrie erhalten bleibt.

In der Quantenfeldtheorie werden Teilchen und Felder durch die Lagrangedichte  $\mathcal{L}$  beschrieben, die mit der bekannten Lagrange-Fkt.  $L = \int d^3x \mathcal{L}$  verknüpft ist und die die Symmetrien beinhaltet (NB:  $L = T - V$ ).

$\mathcal{L}$  ist eine Funktion der Teilchen  $\psi$  und Felder  $A_\mu$ , z.B. für <sup>Spin  $\frac{1}{2}$</sup>  ein Teilchen der Masse  $m$  (ohne Feld) gilt

$$\mathcal{L} = i \bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m \bar{\psi} \psi$$

mit Spinor  $\psi$  ( $\bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma^0$ ) und  $\gamma$ -Matrizen  $\gamma^\mu$ . Mittels Euler-Lagrange-Formalismus folgt aus  $\mathcal{L}$  die Dirac-Gl.  $(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$

# Noether Theorem

Beispiel einer (globalen) Phasentransformation für ein Elektron  $\psi$

$$\otimes \quad \psi(x) \mapsto e^{i\chi} \psi(x) \quad \chi: \text{reelle Konst.}$$

Lagrangedichte  $\mathcal{L} = i \bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m \bar{\psi} \psi$  ist invariant

unter  $\otimes$ , weil  $\partial_\mu \psi \mapsto e^{i\chi} \partial_\mu \psi$

$$\bar{\psi} \mapsto e^{-i\chi} \bar{\psi}$$

$e^{i\chi}$  ist ein  $U(1)$ -Transformation. Betrachte infinitesimale  $U(1)$ -Transform.  $\psi \mapsto (1 + i\chi) \psi$

und fordere Invarianz der Lagrangedichte, d.h.

$$0 = \delta \mathcal{L} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \psi} \delta \psi + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \psi)} \delta (\partial_\mu \psi) + \delta \bar{\psi} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \bar{\psi}} + \delta (\partial_\mu \bar{\psi}) \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \bar{\psi})}$$

$$= \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \psi} \cdot (i\chi \psi) + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \psi)} \cdot (i\chi \partial_\mu \psi) + \dots$$

$$= i\chi \cdot \underbrace{\left[ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \psi} - \partial_\mu \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \psi)} \right) \right]}_{=0 \text{ durch Euler-Lagrange-Formalismus}} \psi + i\chi \partial_\mu \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \psi)} \psi \right) + \dots$$

$$= i\chi \partial_\mu \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \psi)} \psi \right) + \dots = 0$$

hat Form eines erhaltenen Stroms  $j^\mu$ :  $\partial_\mu j^\mu = 0$

wobei 
$$j^\mu = \frac{ie}{2} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \psi)} \psi - \bar{\psi} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \bar{\psi})} \right) = -e \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$
  
mit  $\mathcal{L}$  wie oben

# Noether-Theorem

U(1)-Symmetrie der Lagrangedichte führt auf einen erhaltenen Strom(dichte)  $j^\mu$ :

$$\partial_\mu j^\mu = 0 \quad \text{mit} \quad j^\mu = -e \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$

Die 0. Komponente von  $j^\mu$  ergibt die Ladung

$$Q = \int d^3x j^0$$

die eine erhaltene Größe ist aufgrund der U(1)-Phaseninvarianz, d.h.

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= \frac{d}{dt} \int d^3x j^0 = \int d^3x \partial_0 j^0 = - \int d^3x \vec{\nabla} \cdot \vec{j} \\ &= - \int \underset{\text{Oberfläche}}{d\vec{F}} \cdot \vec{j} = 0 \quad \left( \begin{array}{l} \text{mit Gauss-Integralsatz} \\ \text{und } F \rightarrow \infty \end{array} \right) \end{aligned}$$

- Die Verallgemeinerung von globaler auf lokale U(1)-Phaseninvarianz, d.h.  $\psi(x) \rightarrow e^{i\chi(x)} \psi(x)$  erfordert zur Erhaltung der Invarianz der Lagrangedichte

zusätzliche Ergänzungen:

- ▶ kovariante Ableitung:  $\partial_\mu \rightarrow D_\mu = \partial_\mu - ieA_\mu$
- ▶ neues, äußeres Feld  $A_\mu$ :  $A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{1}{e} \partial_\mu \chi(x)$
- ▶ Term in  $\mathcal{L}$  für kinet. Energie des Feldes  $A_\mu$ :  $\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$

→ Lagrangedichte der QuantenElektrodynamik

# Eichtheoriebeispiel: QuantenElektrodynamik

Beschreibung durch Lagrangedichte  $\mathcal{L}_{QED}$

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

↑ Teilchen  
↑ Teilchenmasse

mit

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

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

↑ Photon  
↑ Kopplungsstärke

Die Lagrangedichte  $\otimes$  besitzt eine lokale Eich-  
(Phasen-)invarianz unter  $U(1)$ -Transformationen,

d.h.  $\Psi(x) \mapsto \Psi'(x) = \exp[i\chi(x)] \cdot \Psi(x) = U \cdot \Psi(x)$

$$U \in U(1), \text{ d.h. } U^\dagger U = 1$$

wobei kovariante Ableitung und Photonfeld gemäß

$$D_\mu \mapsto D_\mu = \partial_\mu - ie A_\mu$$

(minimale Substitution  
für Teilchenbewegung  
in electrom. Potential  $A_\mu$ )

$$A_\mu \mapsto A_\mu + \frac{1}{e} \partial_\mu \chi(x)$$

(für  $U(1)$ -Eichtransf.)

gegeben sind.

# 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.



# Experimente zum Standardmodell

3 Klassen von Beschleuniger-Experimenten:

- Hadron-Hadron

- ▷ Tevatron (Fermilab), seit 1987,  $p \rightarrow \bar{p}$  bei  $\sqrt{s} = 2 \text{ TeV}$   
DØ-, CDF-Detektoren

- ▷ LHC (CERN), ab 2007,  $p \rightarrow p$  bei  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$   
ATLAS, CMS-Detektoren

- Lepton-Hadron

- ▷ HERA (DESY), seit 1990,  $e^+ \rightarrow p$  bei  $\sqrt{s} = 320 \text{ GeV}$   
H1-, ZEUS-Detektoren

- Lepton-Lepton

- ▷ LEP (CERN), 1989-2000,  $e^+ \rightarrow e^-$  bei  $\sqrt{s} = 90-209 \text{ GeV}$   
ALEPH, DELPHI, L3, OPAL-Detektoren

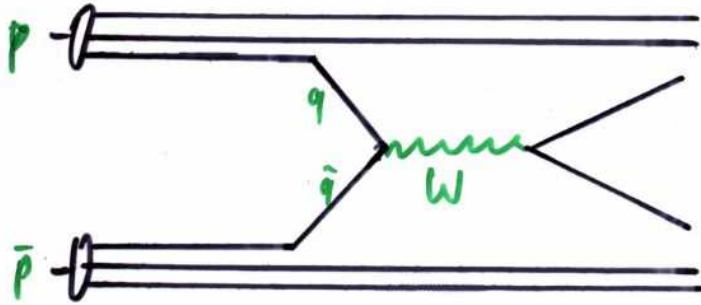
- ▷ SLC (SLAC), 1988-2000,  $e^+ \rightarrow e^-$  bei  $\sqrt{s} = 50 \text{ GeV}$   
MARK III, SLD-Detektoren

- ▷ ILC (?), 201x,  $e^+ \rightarrow e^-$  bei  $\sqrt{s} = 500-1000 \text{ GeV}$   
... - Detektoren

# Experimente zum Standardmodell

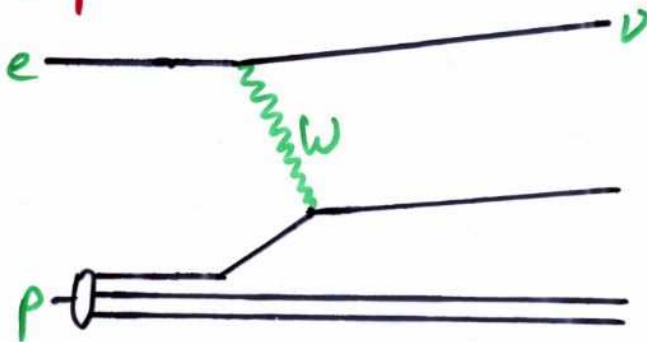
## Grundlegende Prozesse für Standardmodell-Studien (Beispiele)

### • $P\bar{P}$ , $PP$



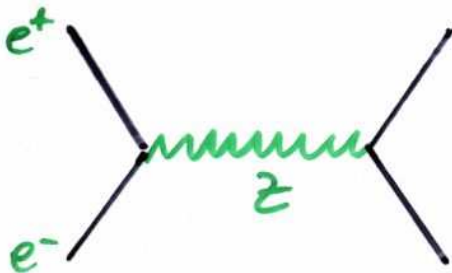
- ⊕ hohe Schwerpunktsenergie
- ⊖ Protonreste als Untergrundbeitrag
- ⊖ Impulse von  $q, \bar{q}$  nicht direkt messbar

### • $e p$



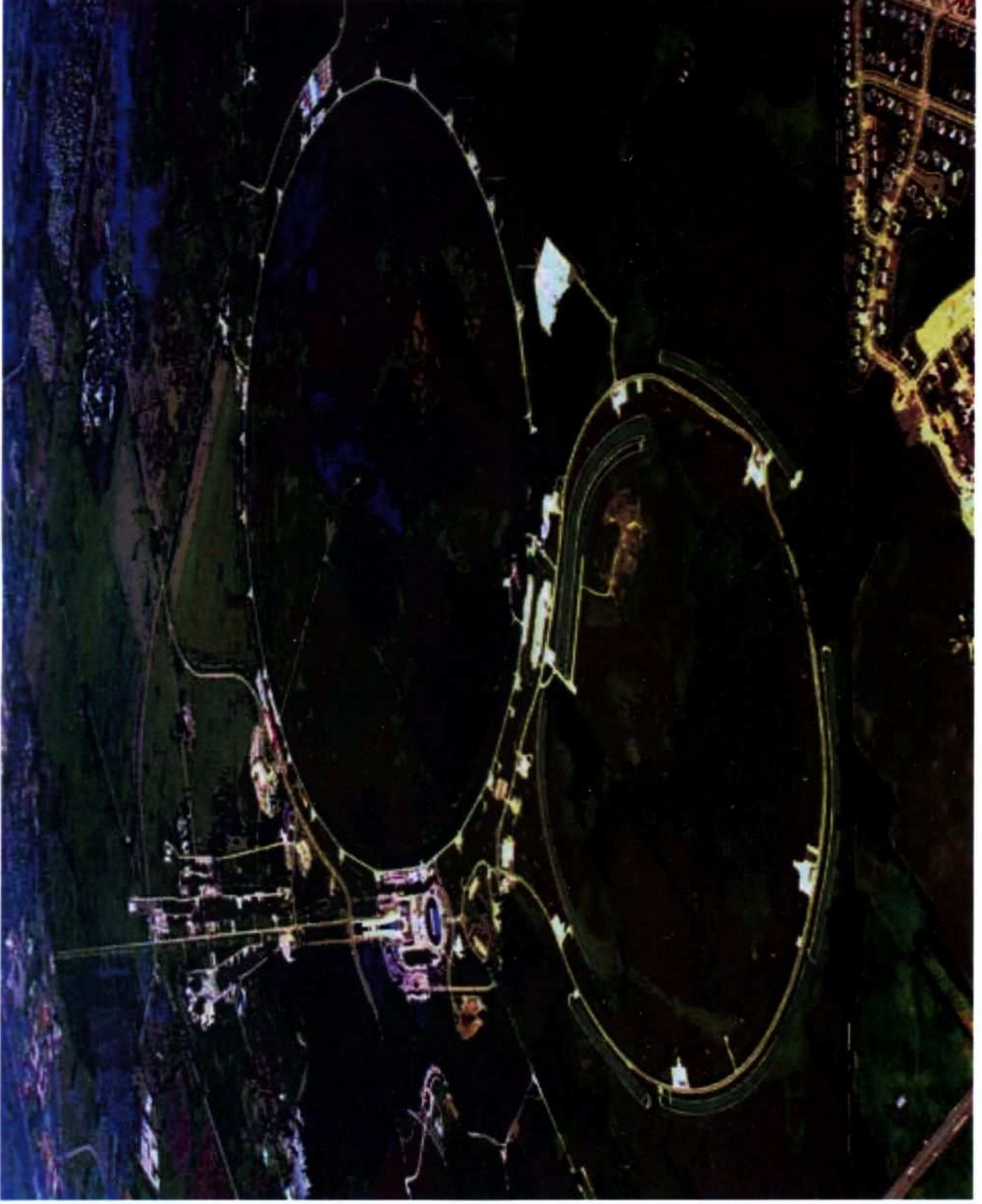
- ⊕ gezielte Auswahl der Streupartner im Proton durch Ladung von Elektron/Positron
- ⊖ wie oben

### • $e^+e^-$

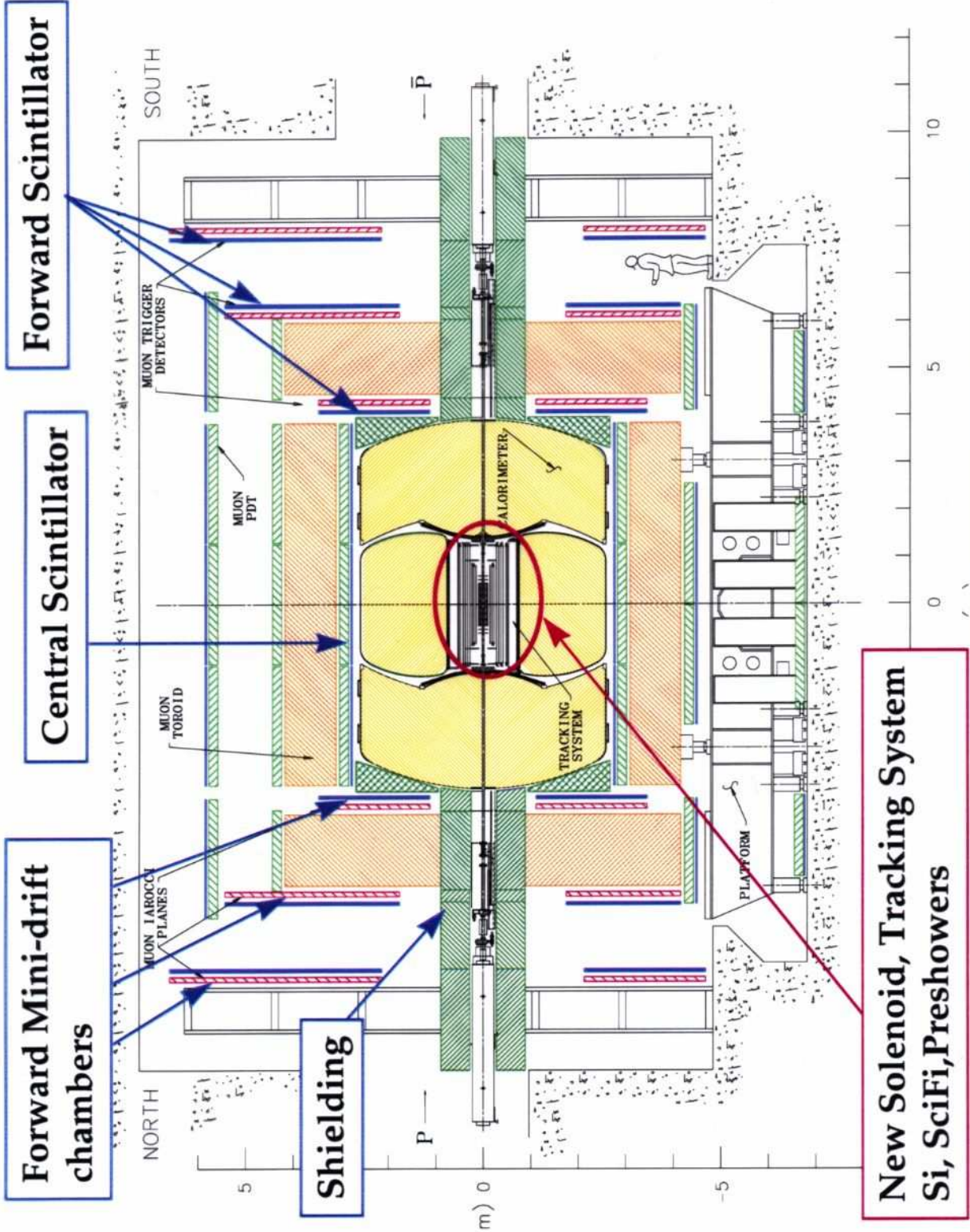


- ⊕ keine Untergrundbeiträge
- ⊕ bekannte Impulse von  $e^+e^-$
- ⊕ bekannte Quarkenzahlen für Austauschpartikelchen
- ⊖ geringe Schwerpunktsenergie

Tevatron @ Fermilab, U.S.A.



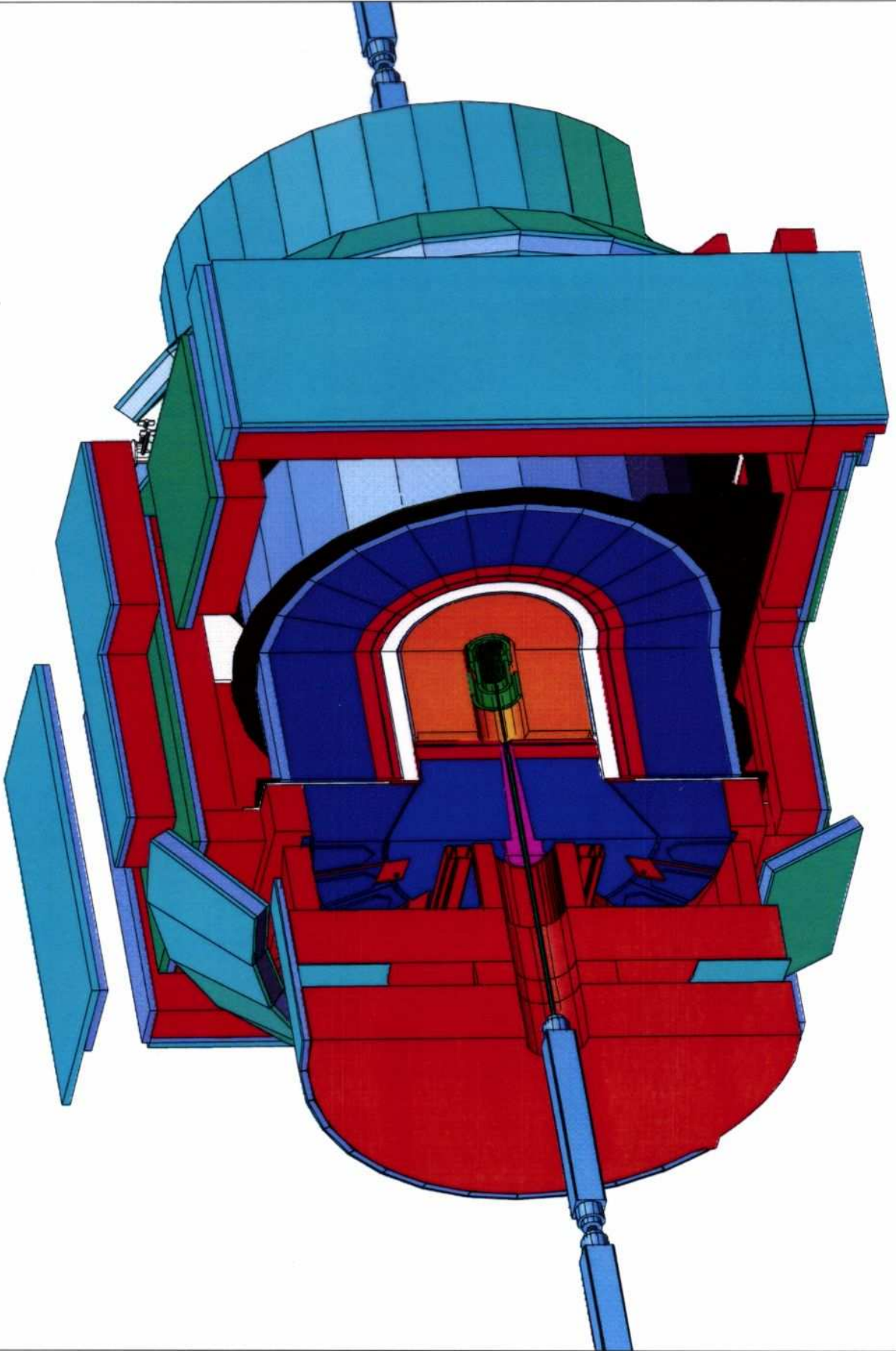
# D0 Upgrade



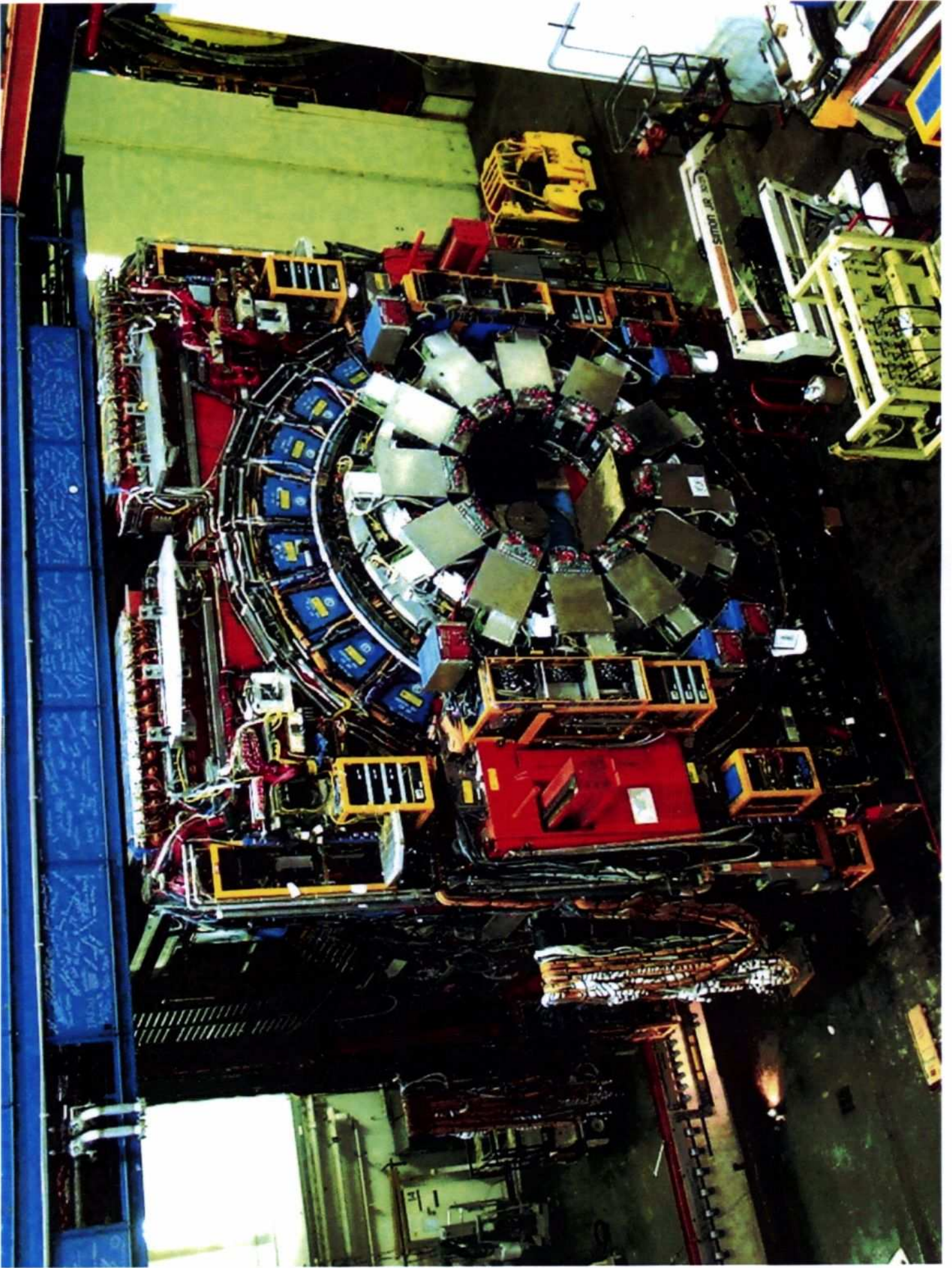
New Solenoid, Tracking System  
Si, SciFi, Preshowers

+ New Electronics, Trig, DAQ

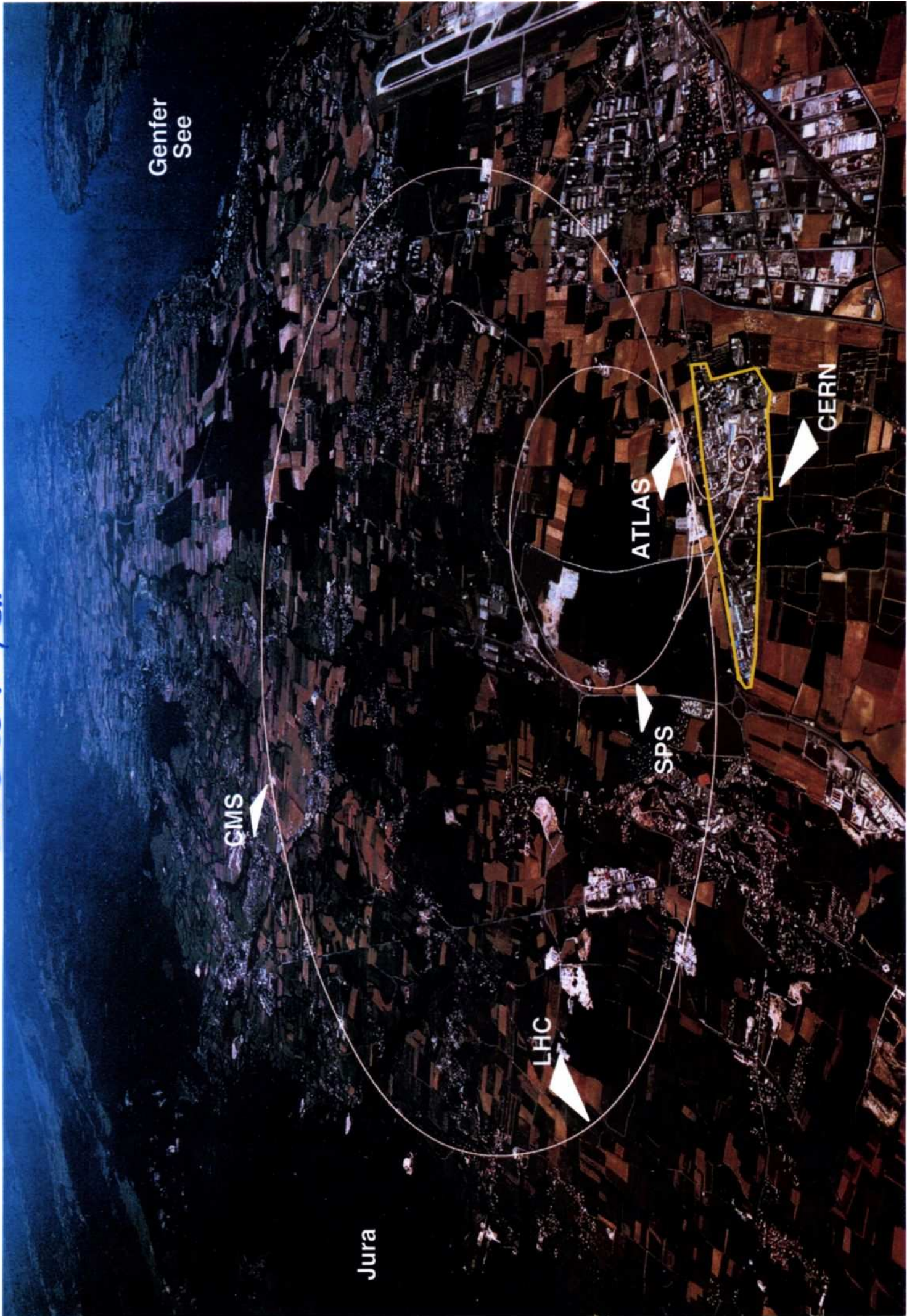
CDF@Tevatron



CDF



LHC @ CERN, CH



Genfer See

CMS

LHC

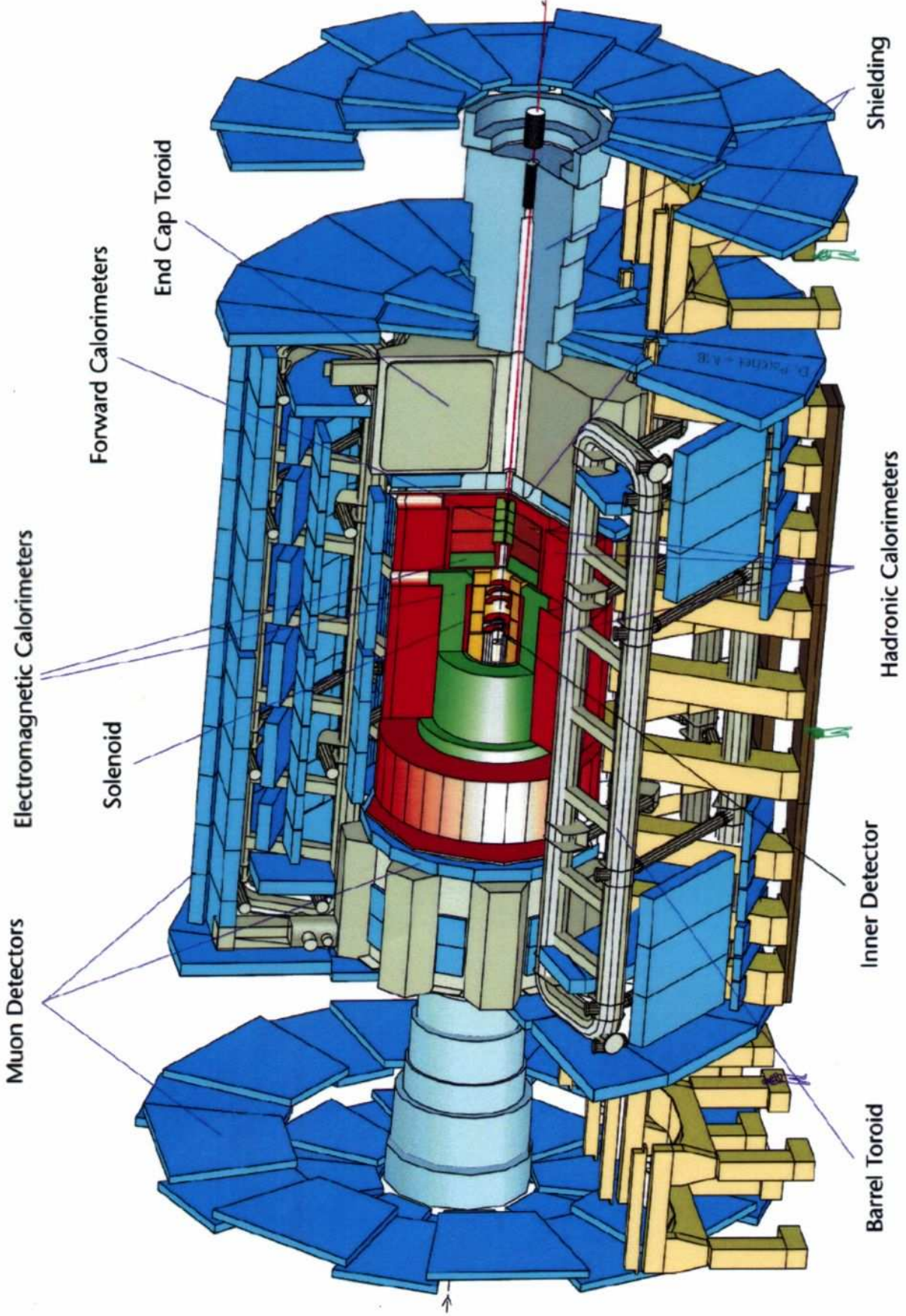
ATLAS

SPS

CERN

Jura

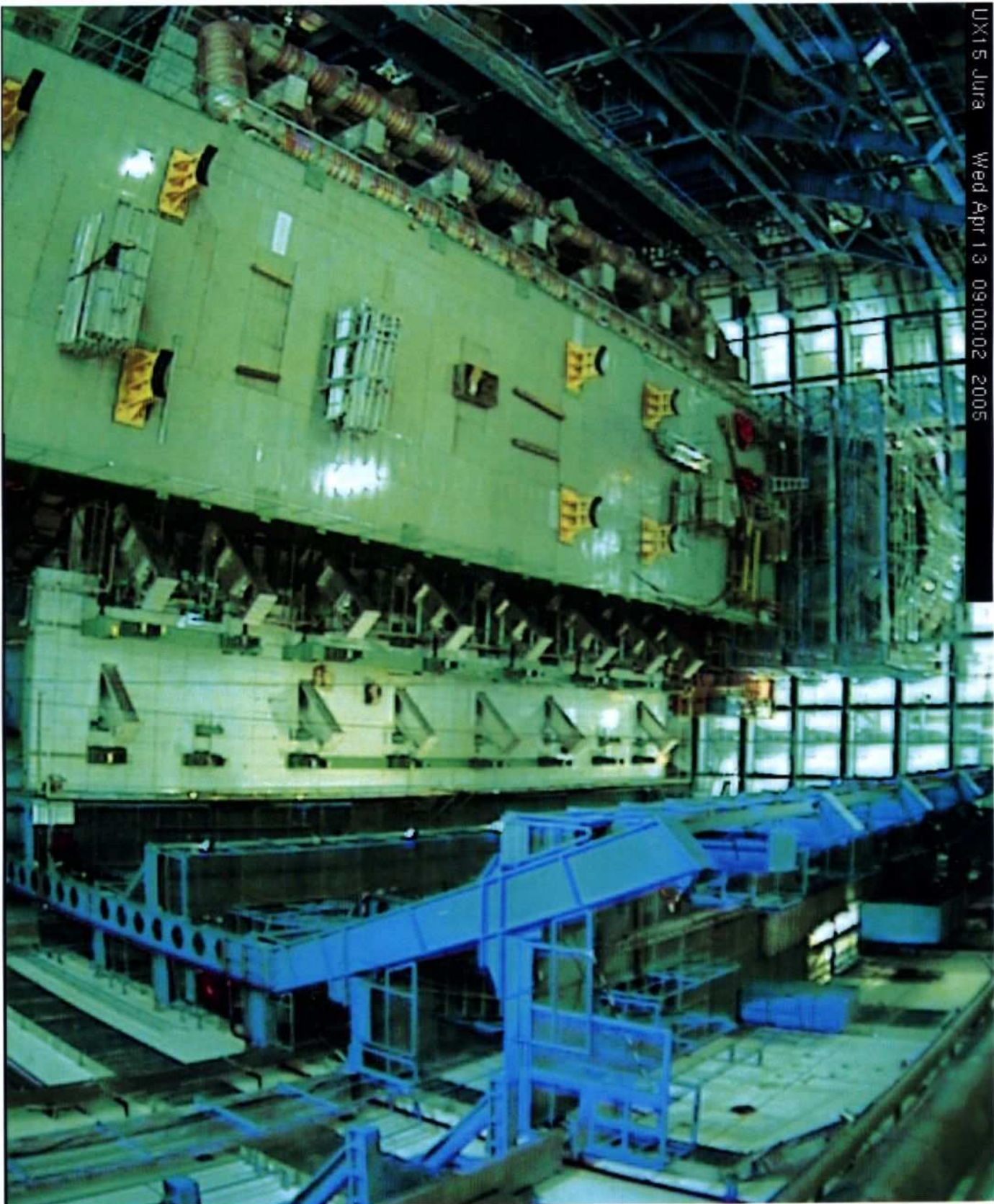
ATLAS @ LHC





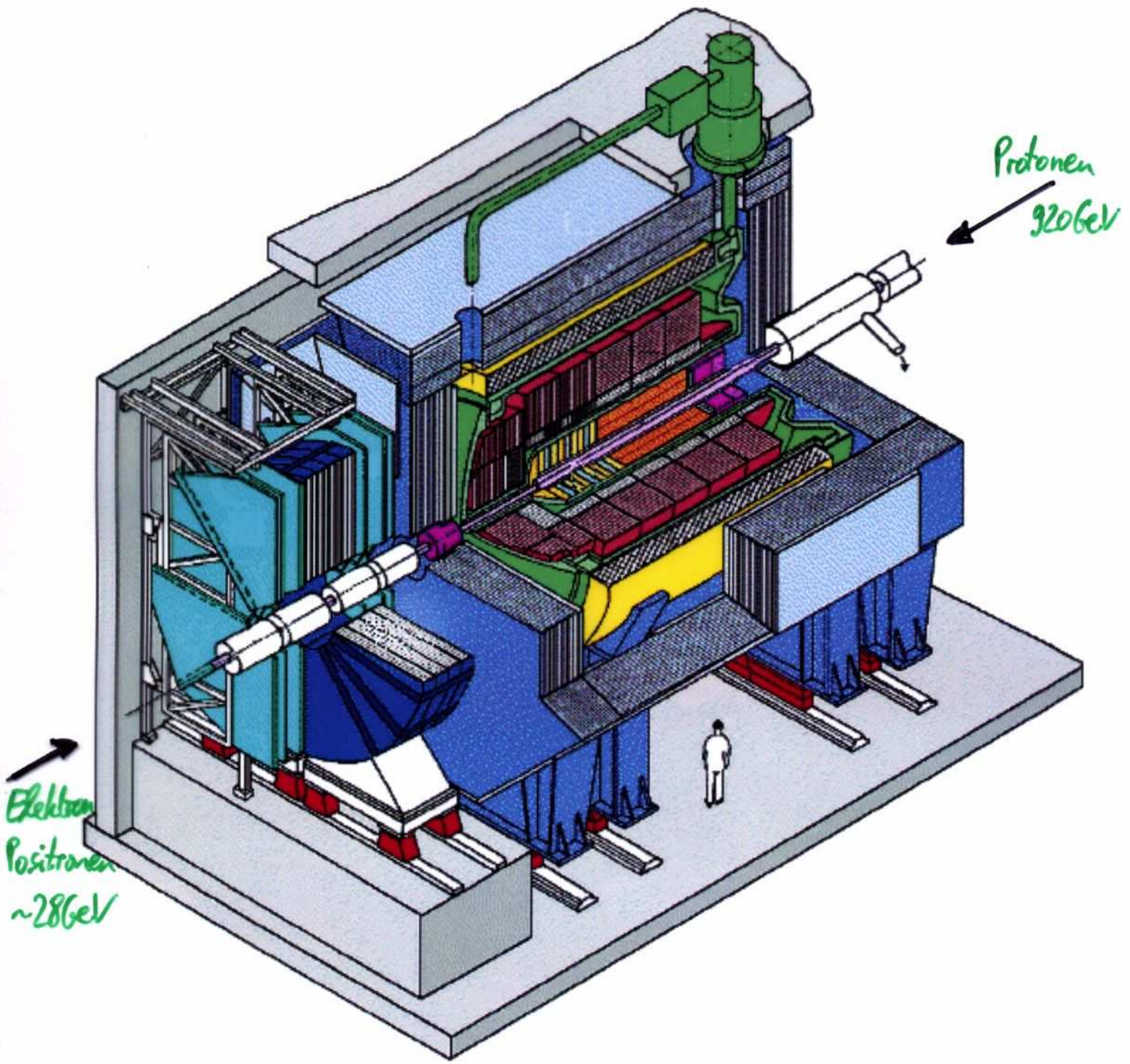
UX15 Jura Wed Apr 13 09:00:02 2005

ATLAS - Detektorhalle

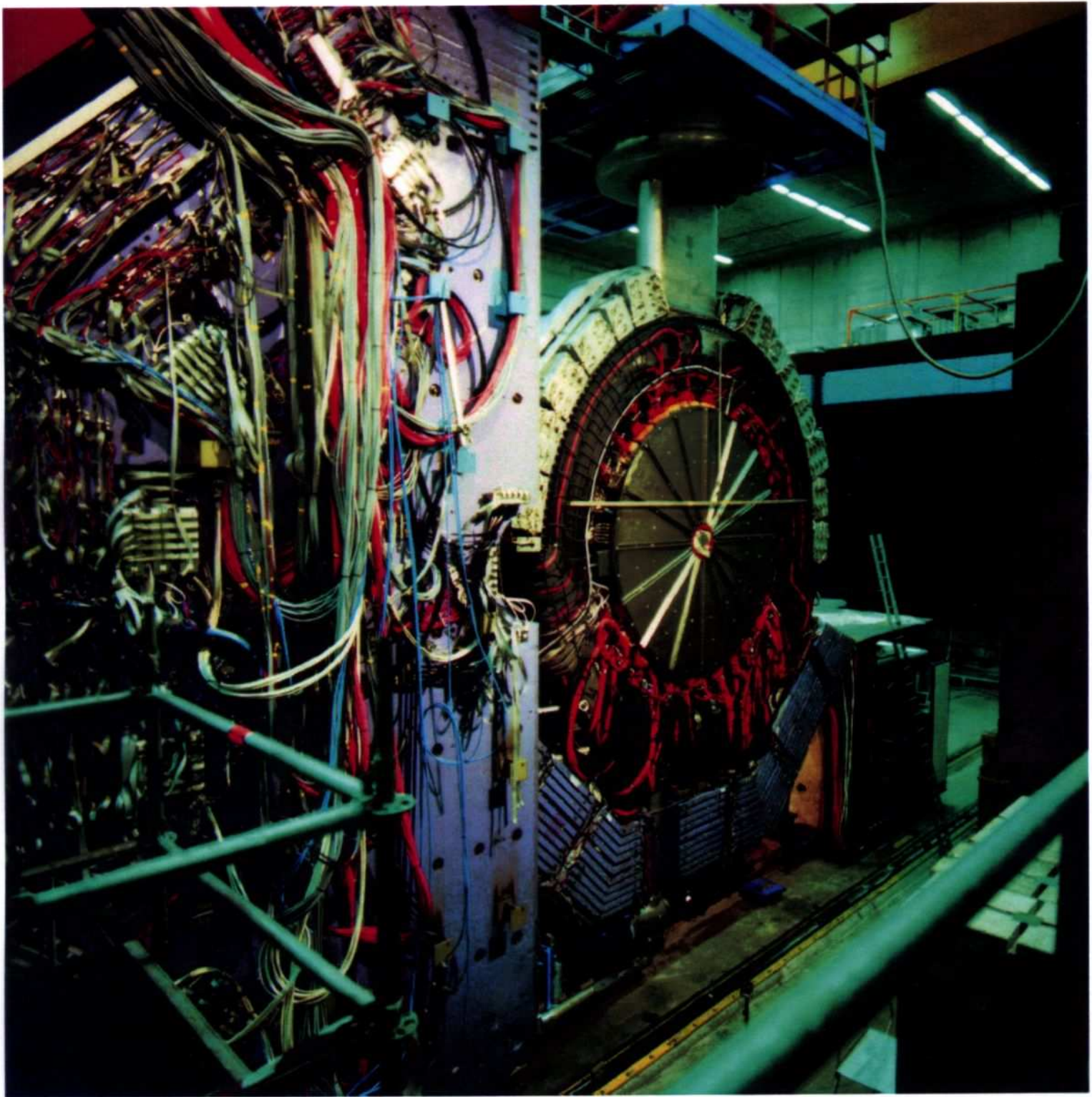




# H1 @ HERA



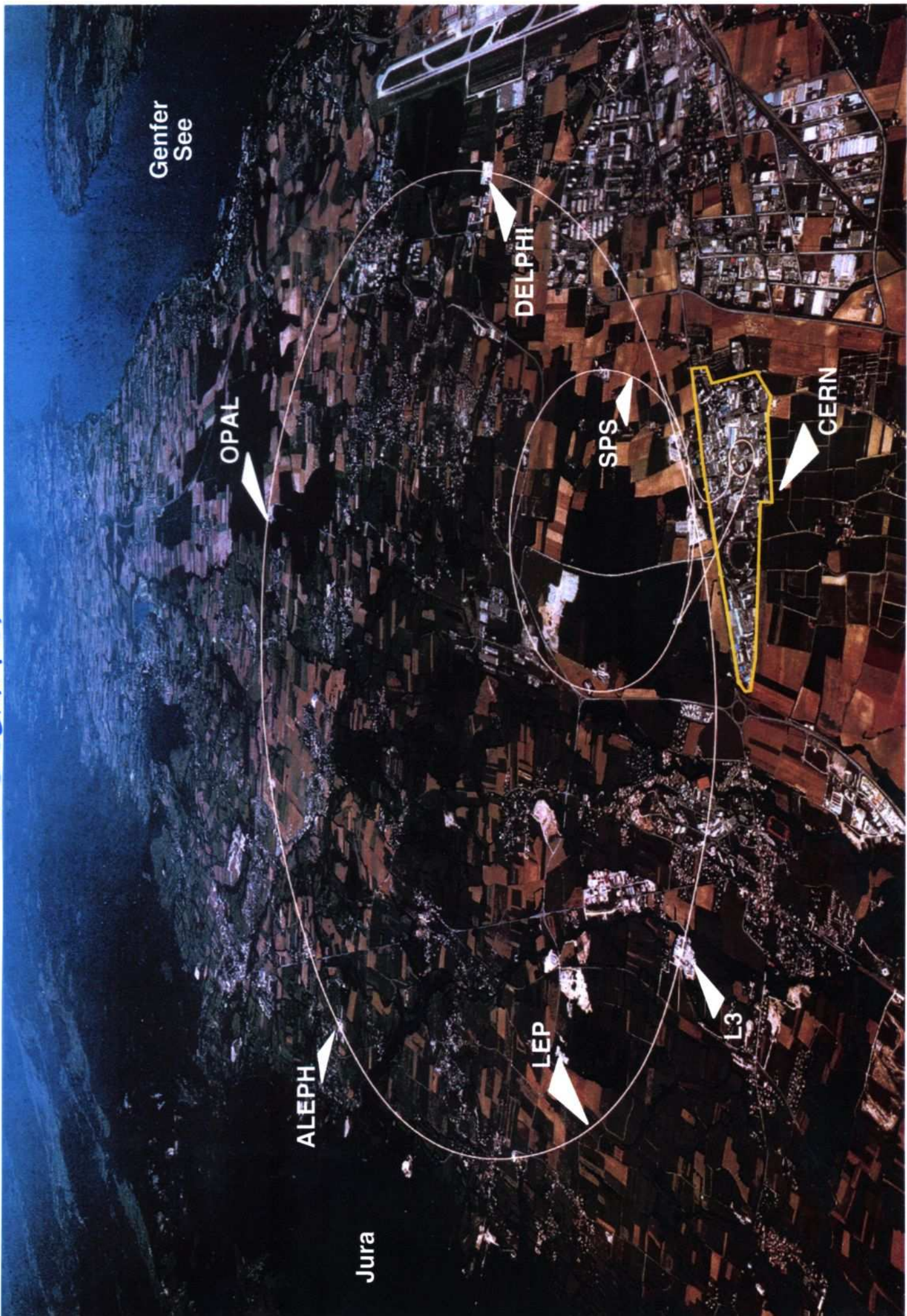
H1 @ HERA



SLC @ SLAK U.S.A.



LEP @ CERN, CH



Genfer See

OPAL

DELPHI

SPS

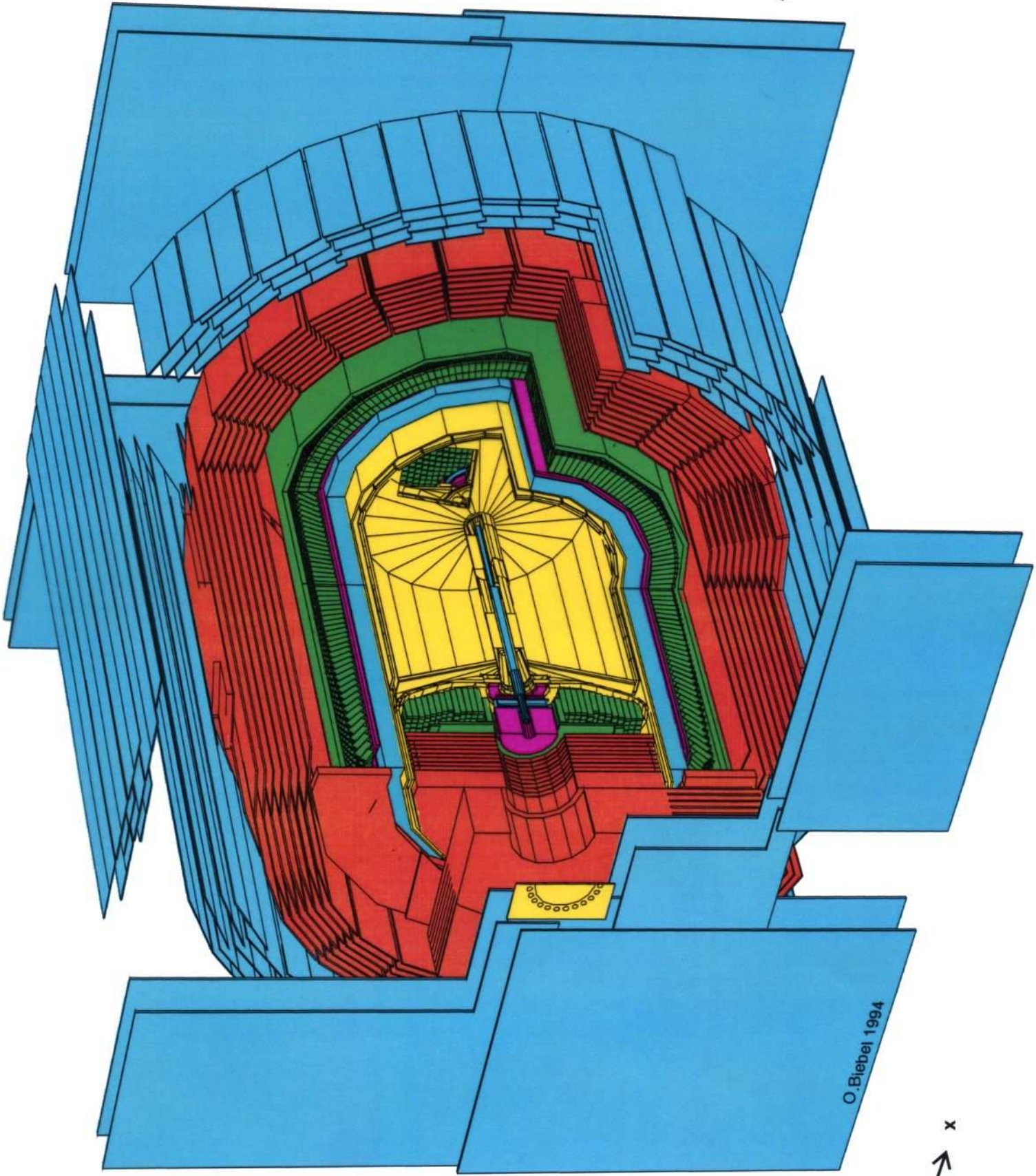
CERN

ALEPH

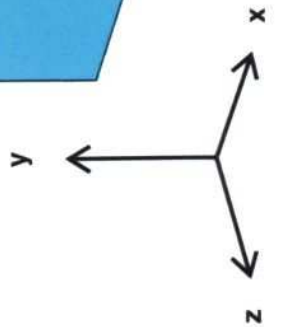
LEP

L3

Jura

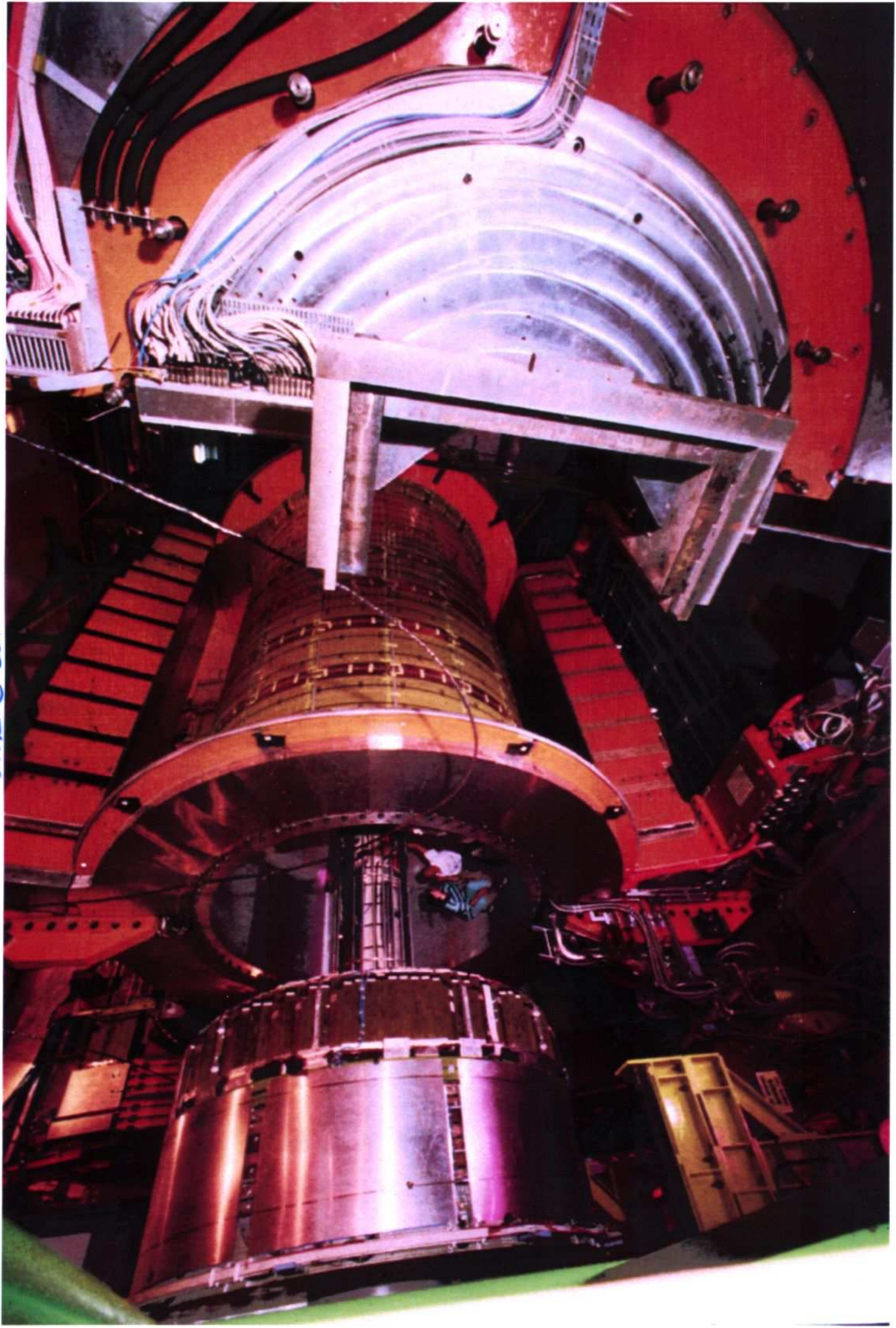


O. Biebel 1994



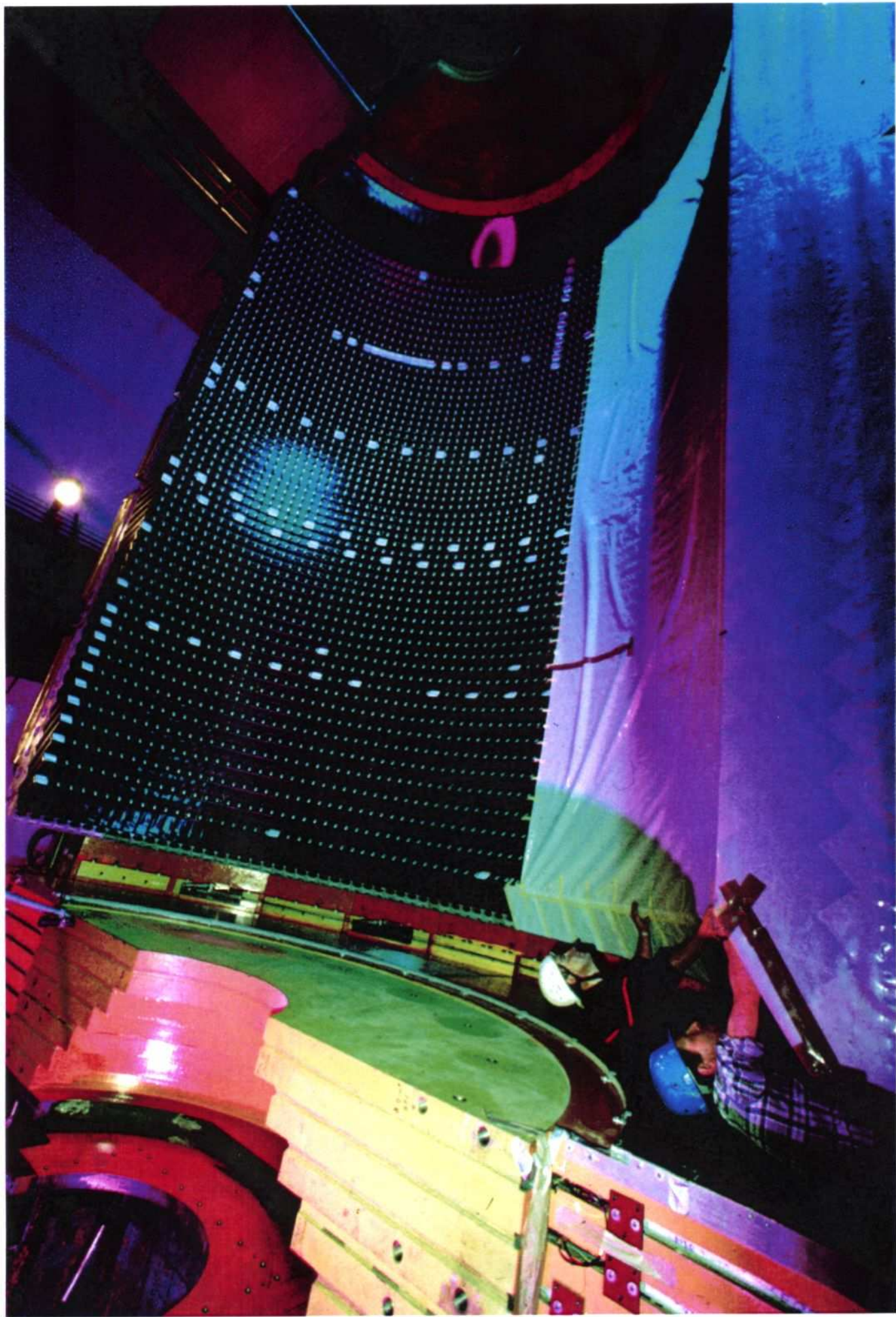
OPAL@LEP

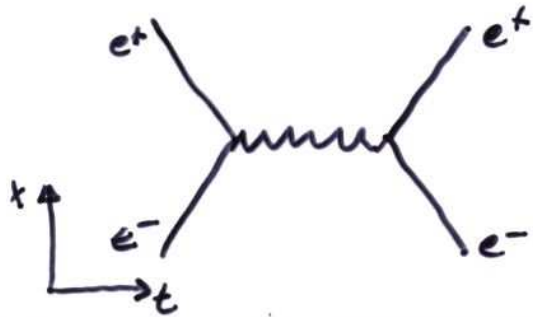
OPAL @ LEP



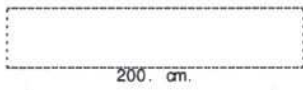
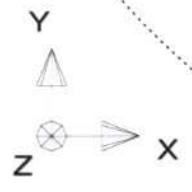
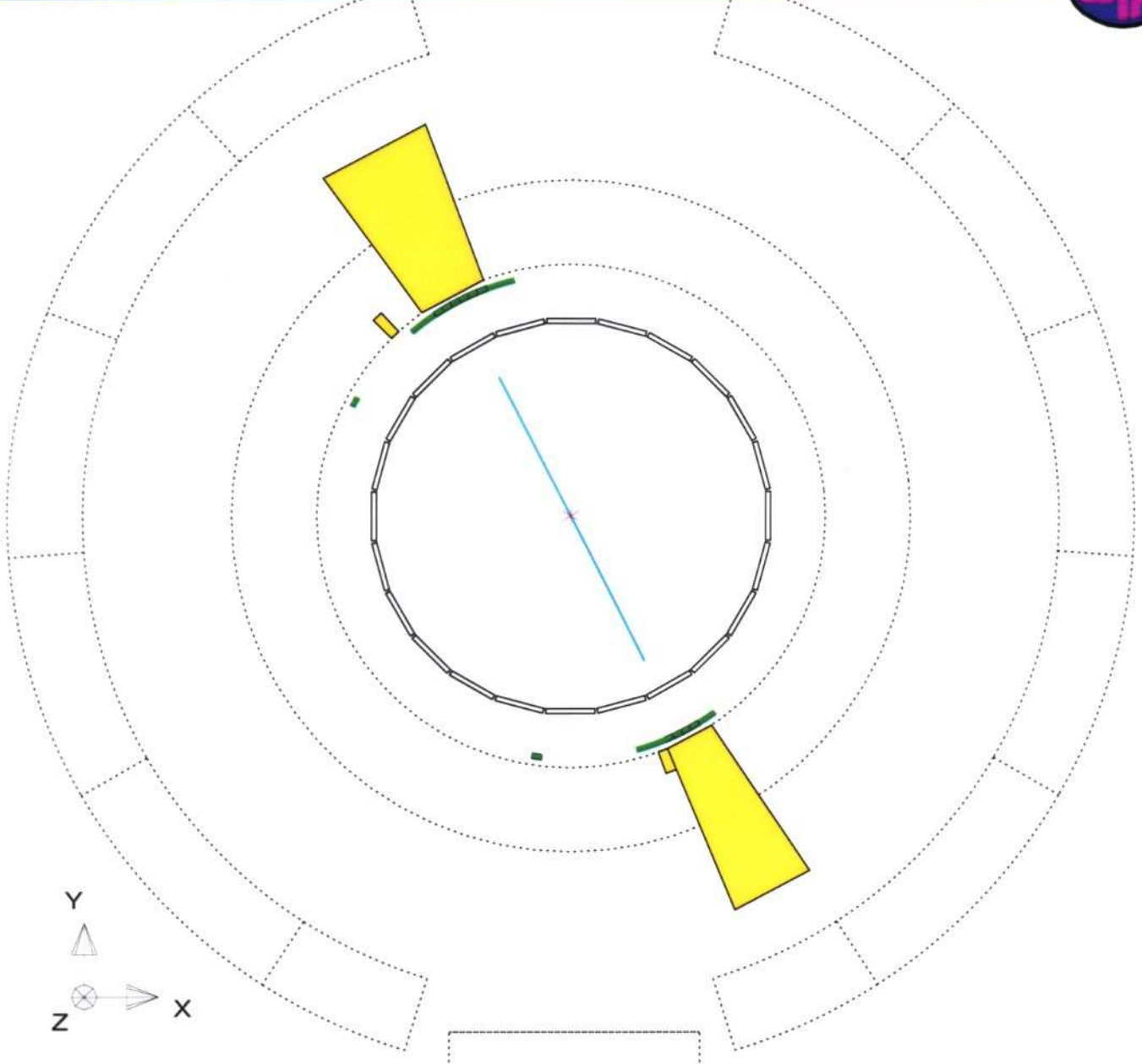


OPAL@LEP



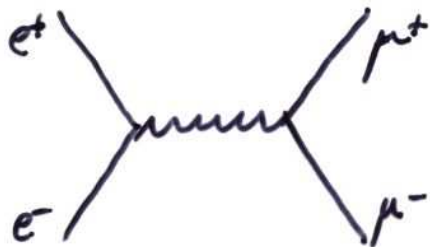


Run: event 4093: 1150 Date 930527 Time 20751 Ctrk(N= 2 Sump= 92.4) Ecal(N= 9 SumE= 90.5) Hcal(N= 0 SumE= 0.0)  
 Ebeam 45.658 Evis 94.4 Emiss -3.1 Vtx ( -0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 1 SumE= 0.0)  
 Bz=4.350 Thrust=0.9979 Aplan=0.0000 Cblat=0.0039 Spher=0.0001

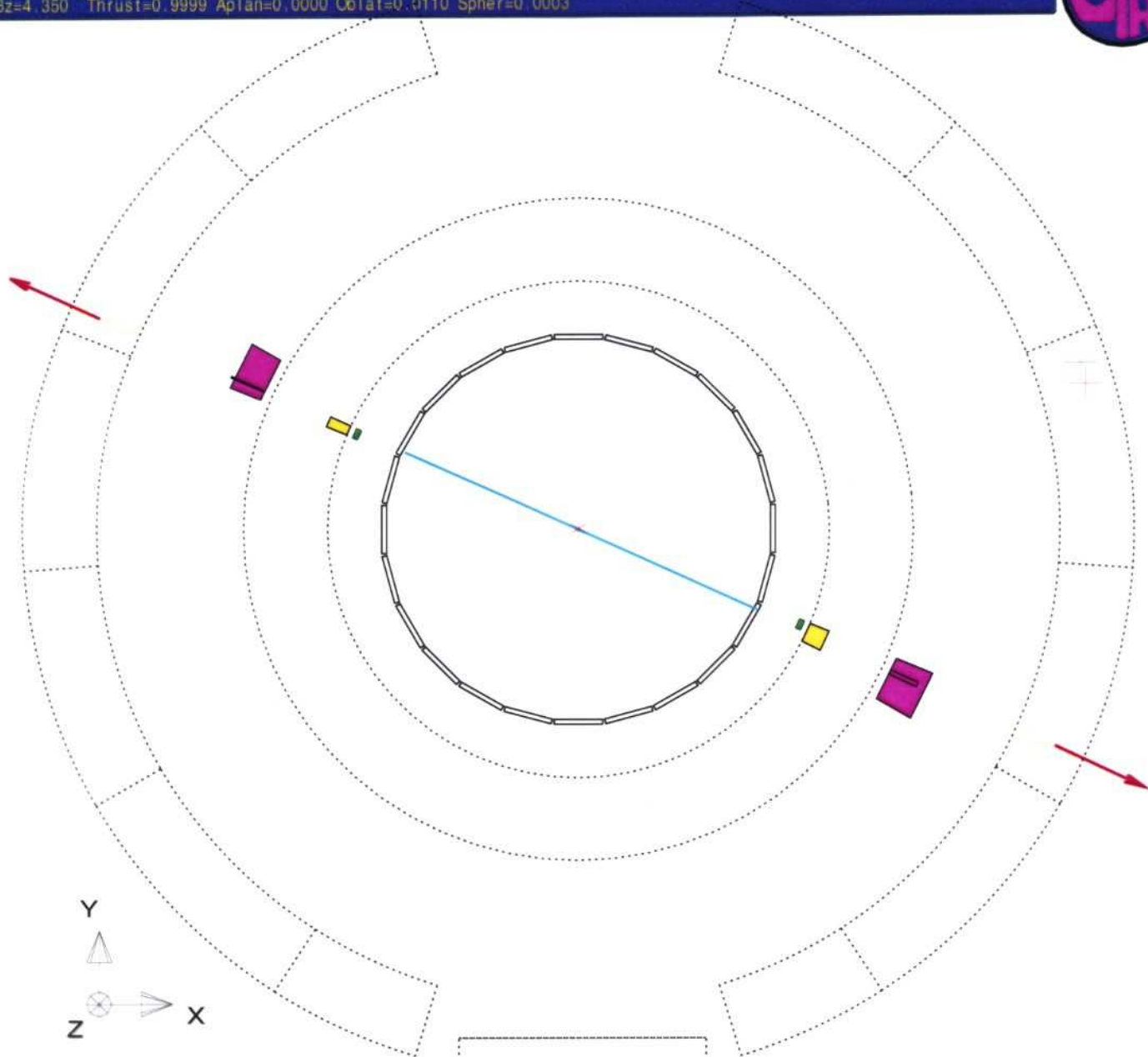


5 10 20 50 GeV

Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)



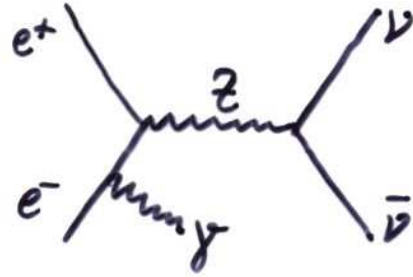
Run event 4093: 4556 Date 930527 Time 22439 Ctrk(N= 2 Sump= 86 8) Ecal(N= 5 SumE= 1.6) Hcal(N= 4 SumE= 4.0)  
 Ebeam 45.658 Evis 90.8 Emiss 0.6 Vtx ( -0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)  
 Bz=4.350 Thrust=0.9999 Aplan=0.0000 Oblat=0.0110 Spher=0.0003



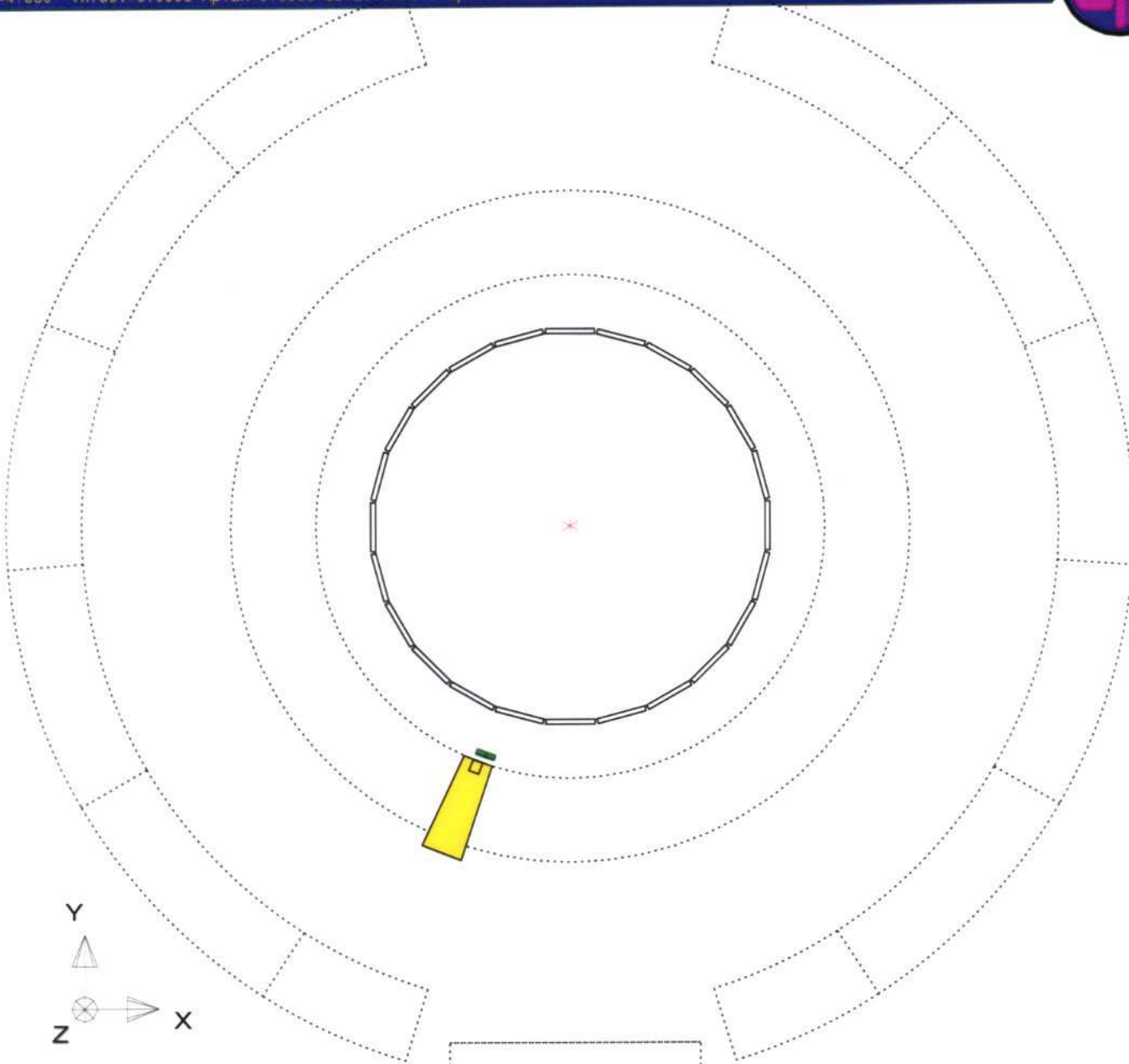
200. cm.

5 10 20 50 GeV

Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)

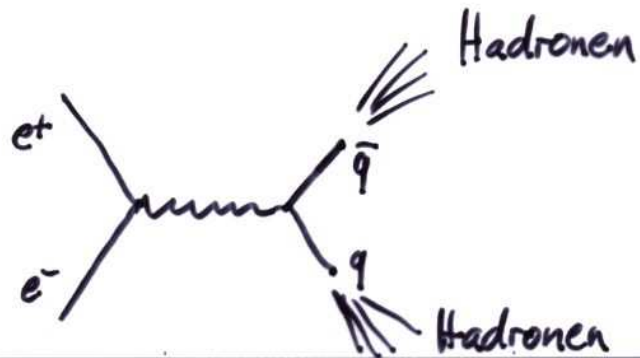


Run: event 2468: 66487 Date 910819 Time 91037 Ctrk(N= 0 Sump= 0.0) Ecal(N= 4 SumE= 15.3) Hcal(N= 0 SumE= 0.0)  
 Ebeam 45.613 Evis 15.3 Emis 75.9 Vtx ( -0.12, 0.12, 0.19) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)  
 Bz=4.350 Thrust=0.9993 Aplan=0.0000 Oblat=0.0049 Spher=0.0000

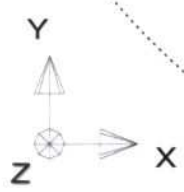
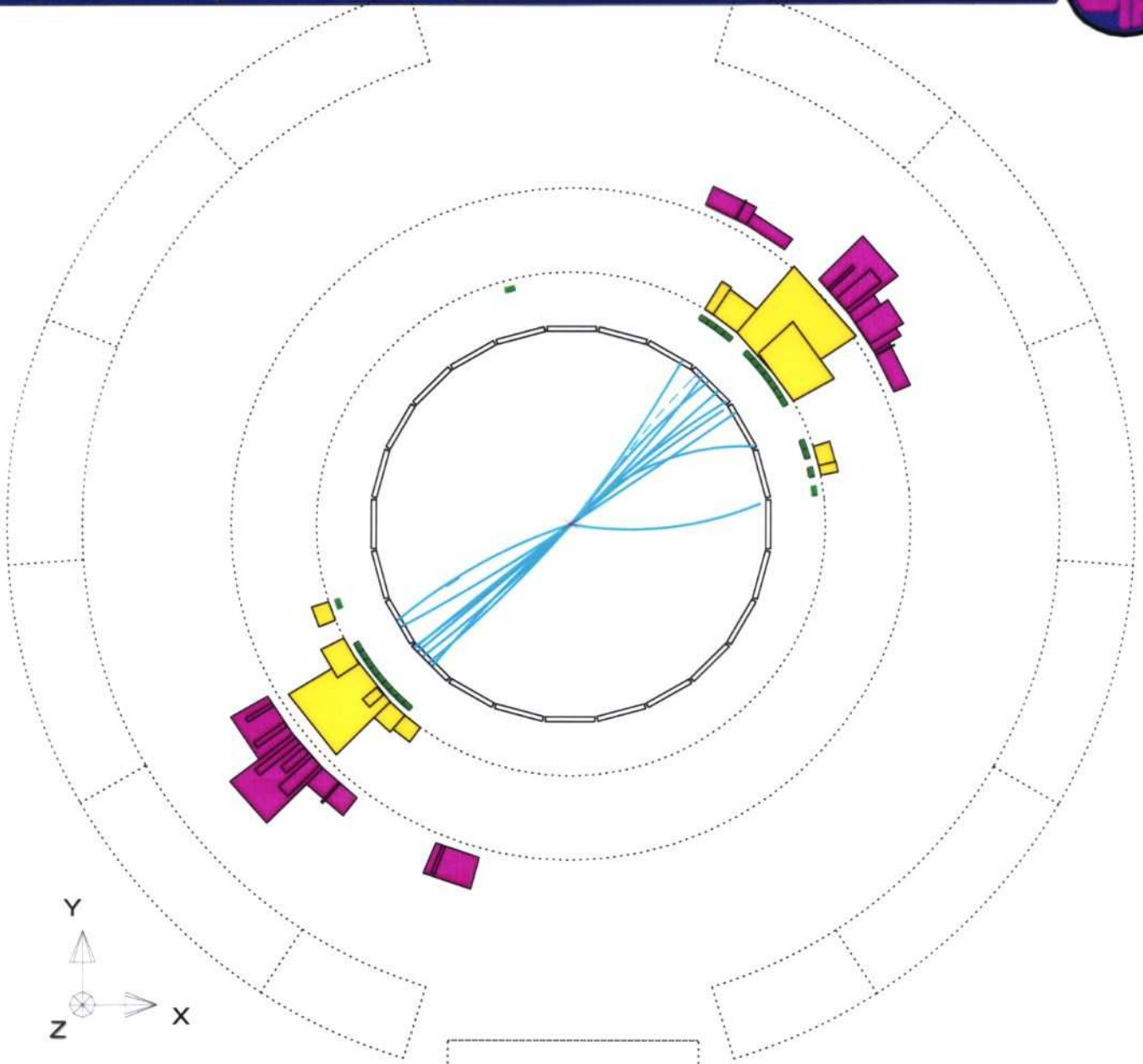


Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)





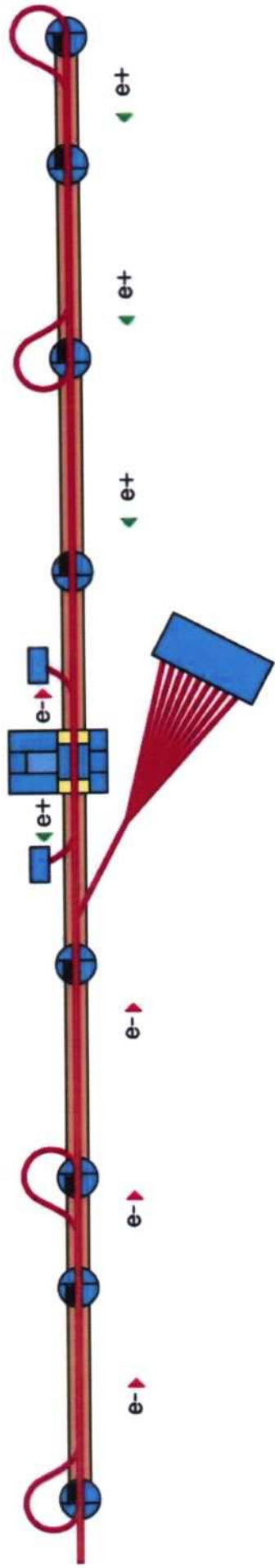
Run event 4093: 1000 Date 930527 Time 20716 Ctrk(N= 39 Sump= 73 3) Ecal(N= 25 SumE= 32.6) Hcal(N=22 SumE= 22.6)  
 Ebeam 45.658 Evis 99.9 Emiss -8.6 Vtx ( -0.07, 0.06, -0.80) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)  
 Bz=4.350 Thrust=0.9873 Aplan=0.0017 Oblat=0.0248 Spher=0.0073



Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)

# TESLA-Konzept für ILC

Aufsicht

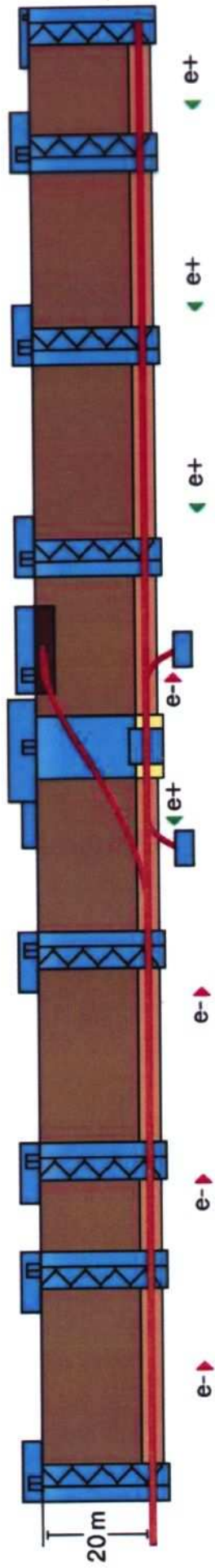


33 km

DESY Hamburg-Bahrenfeld

Ellerhoop

Westerhorn



Seitenansicht