

Einführung in die moderne Teilchenphysik

Dr. Stefan Schael
Max-Planck Institut für Physik
Werner Heisenberg Institut
Föhringer Ring 6
D-80805 München

1. Das Standardmodell der Teilchenphysik
2. Teilchenbeschleuniger & Teilchendetektoren
3. Erhaltungssätze und Symmetrien
4. Die elektroschwache Wechselwirkung
5. Das Top Quark
6. Physik mit B-Hadronen
7. CP Verletzung
8. Das ATLAS Experiment
9. Neutrinos
10. Grenzen des Standardmodells

Literatur:

- H. Hilscher, "Elementare Teilchenphysik", Vieweg,
- E. Lohrmann, "Hochenergiephysik", Teubner,
- O. Nachtmann, "Elementarteilchenphysik", Vieweg.

ftp:

[afmp02.mppmu.mpg.de:/pub/stefan/augsburg_ss98/](ftp://afmp02.mppmu.mpg.de:/pub/stefan/augsburg_ss98/)

Teilchenbeschleuniger

Ein geladenes Teilchen im elektromagnetischen Feld:

$$\vec{F}_L = e \cdot (\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E})$$

Energie:

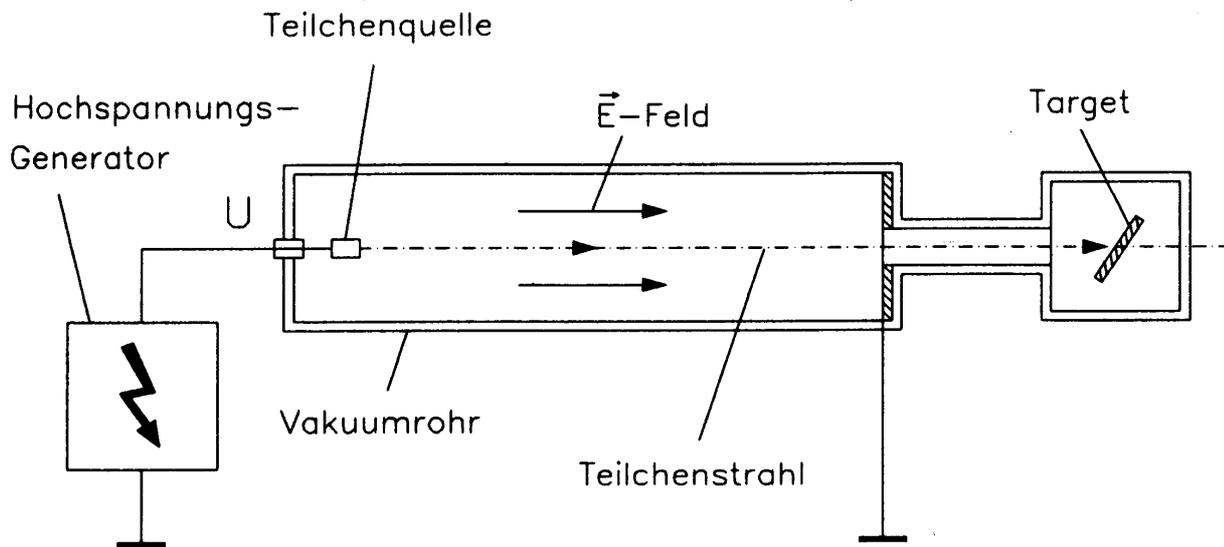
Teilchen bewegt sich von \vec{r}_1 nach \vec{r}_2 :

$$\Delta E = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F} d\vec{r} = e \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} (\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E}) d\vec{r}$$

$$(\vec{v} \times \vec{B}) \perp d\vec{r} \Rightarrow (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{r} \equiv 0$$

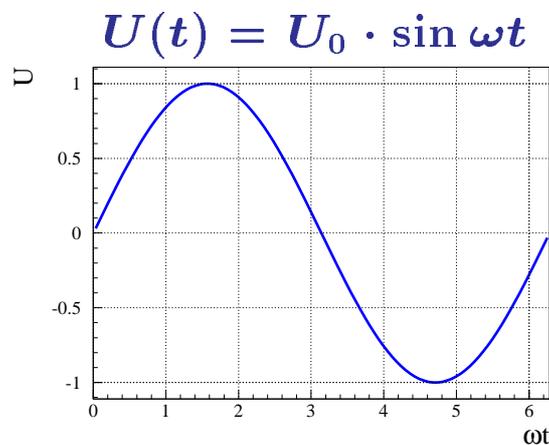
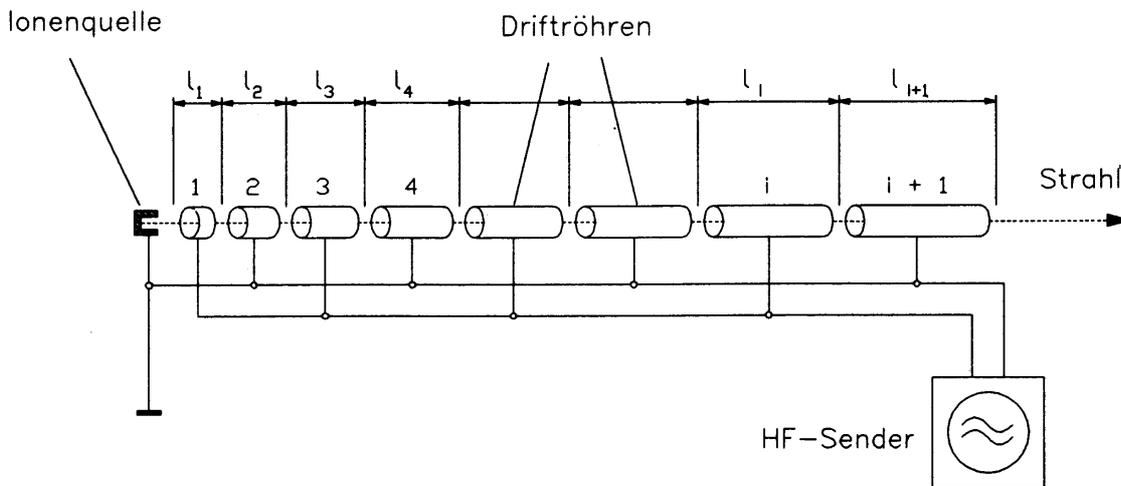
$$\Rightarrow \Delta E = e \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} d\vec{r} = e \cdot U$$

U ist die vom Teilchen durchlaufende Spannung.



$$E_{max} \propto U_{max} \approx \text{einige MeV}$$

Linearbeschleuniger:



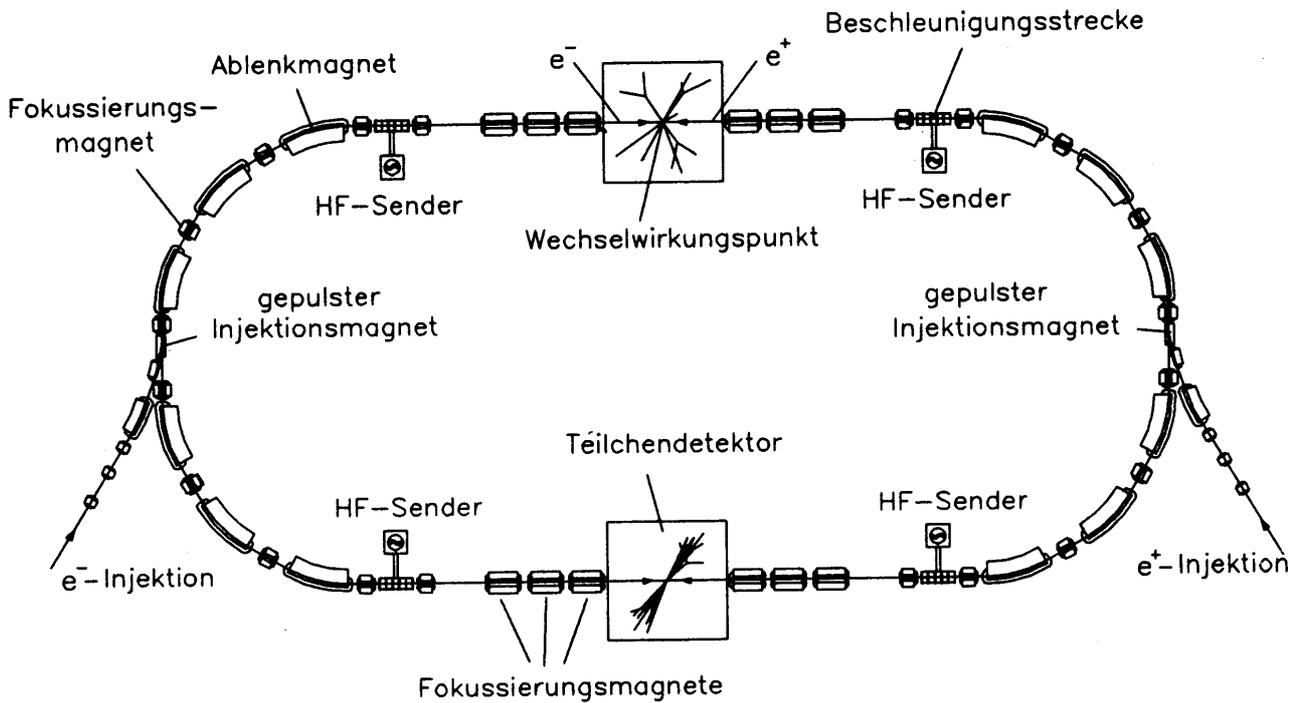
$$E_i = iqU_0 \sin \Psi_s, \quad l_i = v_i \frac{1}{2} \tau_{HF} = \frac{1}{2} \frac{v_i}{c} \lambda_{HF}$$

Für Elektronen: $E \approx MeV \Rightarrow v = c$ und $l_i = const.$
 d.h. mit zunehmender Beschleunigung wächst die Elektronen-
 masse an:

$$m_e = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

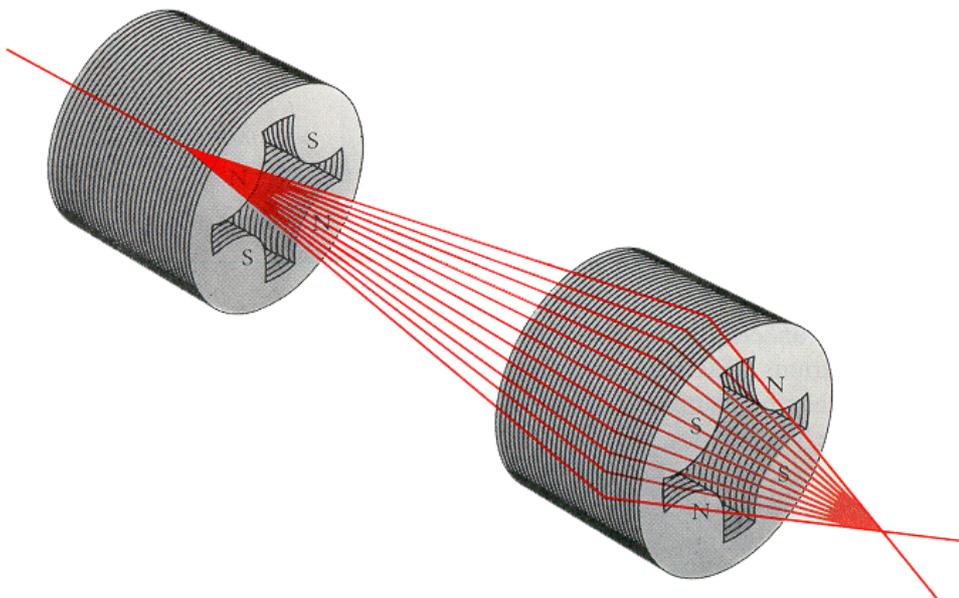
Der größte Linearbeschleuniger der Welt ist 3 Km lang und befindet sich am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) in Kalifornien. Die Endenergie beträgt $E_{cms} = 91 GeV$ wie bei LEP.

Speicherring:

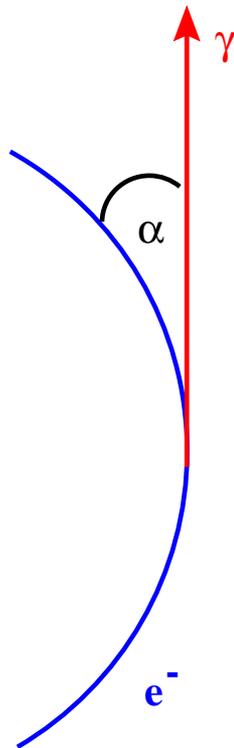


$$\vec{F}_L = e \cdot (\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E}) = -e \cdot (-\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E})$$

Strahlfokussierung mit Hilfe von Quadropolmagnetfeldern:



Beschleunigte Ladungen strahlen Photonen ab:



$$P_s = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 m_0^2 c^3} \cdot \frac{E^2}{m_0^2 c^4} \cdot \left(\frac{dp}{dt}\right)^2$$

$$dp = p \cdot d\alpha$$

$$\frac{dp}{dt} = p \frac{d\alpha}{dt} = \frac{p \cdot v}{R} = \frac{p \cdot c}{R} = \frac{E}{R}$$

$$\Rightarrow P_s = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0 (m_0 c^2)^4} \frac{E^4}{R^2}$$

$$m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$$

$$m_p c^2 = 938.19 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow \frac{P_s(e)}{P_s(p)} = \left(\frac{m_p c^2}{m_e c^2}\right)^4 = 1.13 \cdot 10^{13}$$

Energieverlust bei einem Umlauf:

$$\begin{aligned}\Delta E &= \oint P_s dt = P_s T_b = P_s \frac{2\pi R}{c} \\ &= \frac{e^2}{3\epsilon_0(m_0 c^2)^4} \frac{E^4}{R}\end{aligned}$$

In einfachen Einheiten:

$$\Delta E[\text{keV}] = 88.5 \cdot \frac{E^4[\text{GeV}^4]}{R[\text{m}]}$$

Bei LEP: $R = 26.7 \text{ km} / 2\pi = 4250 \text{ m}$

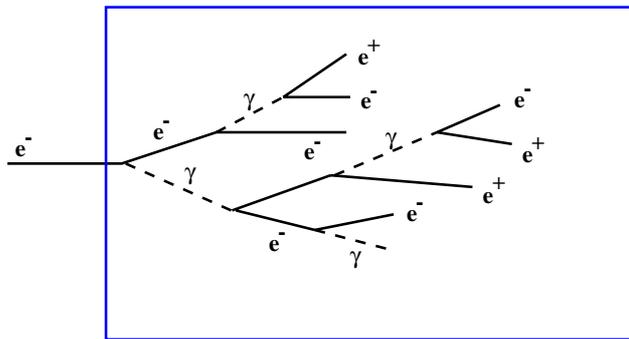
$$\begin{aligned}LEP I : E_e = 45 \text{ GeV} &\Rightarrow \Delta E = 90 \text{ MeV} \\ &(\text{gemessen } 124 \text{ MeV})\end{aligned}$$

$$LEP II : E_e = 100 \text{ GeV} \Rightarrow \Delta E = 2080 \text{ MeV}$$

Es ist technisch und finanziell nicht möglich deutlich höhere Energien in e^+e^- Speicherringen zu erreichen.

Woher kommen die Positronen ?

- Eine Glühkathode erzeugt e^-
- Beschleunigung auf 200 MeV mit Hilfe eines Linearbeschleunigers
- Beschuß eines Wolfram-Targets,
 - die Elektronen werden im elektrischen Feld der Kerne abgebremst und emittieren Photonen,
 - die Photonen konvertieren in Elektron-Positron Paare,
 - mit einem geeigneten elektrischen Feld werden die Positronen abgesaugt.



Photoeffekt

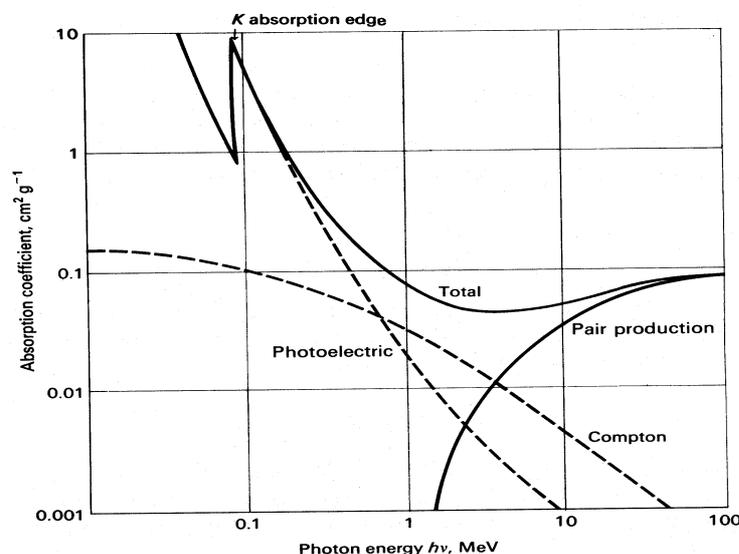
$$\propto 1/E_\gamma^3$$

Comptonstreuung

$$\propto 1/E_\gamma$$

Paarbildung

$$E_{\text{gamma}} > 2m_e = 1.02 \text{ MeV}$$



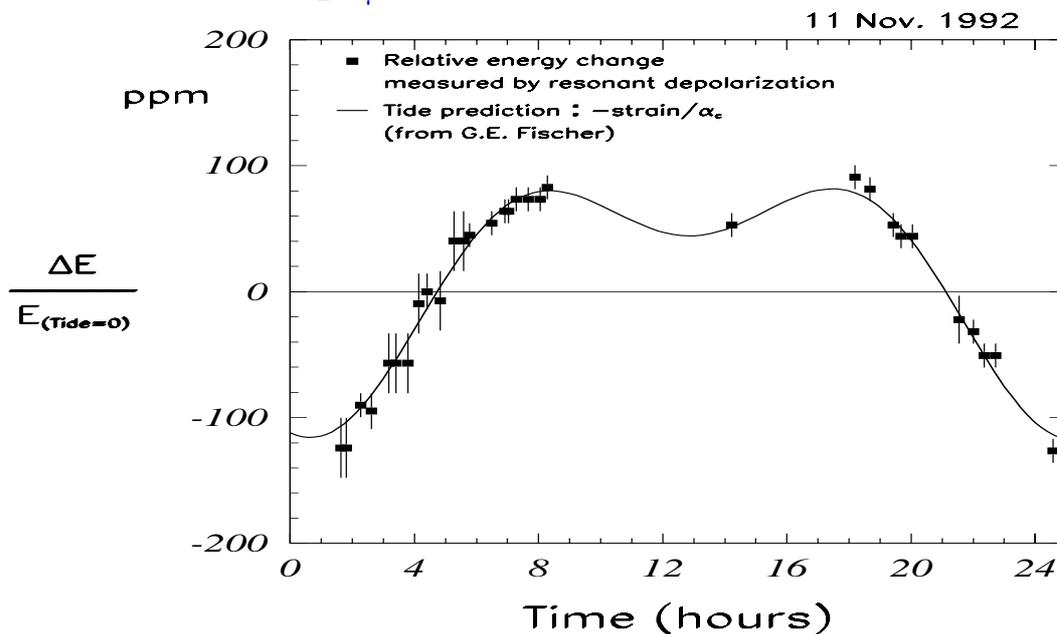
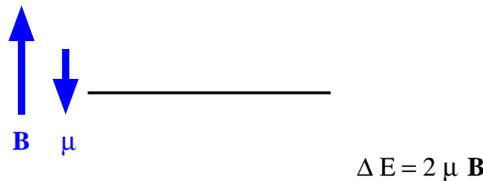
Die Messung der LEP Energie

z.B. mit einer NMR-Probe:

$$E_{pot} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

dabei $\vec{\mu}$ ist das magnetische Moment.

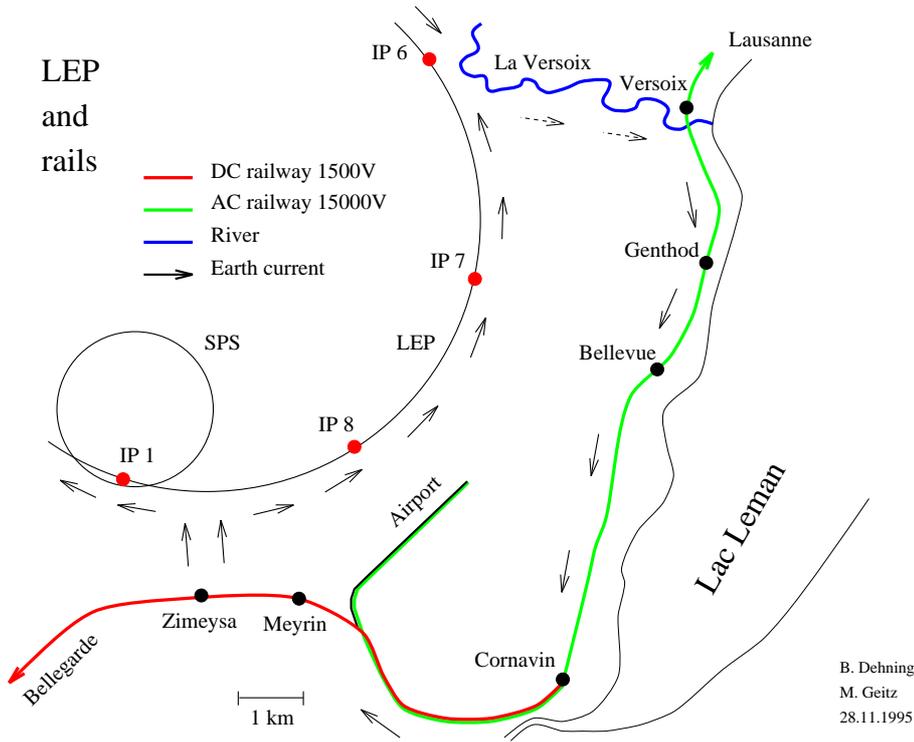
$$h \cdot \nu = \Delta E = 2 \cdot \mu \cdot B$$



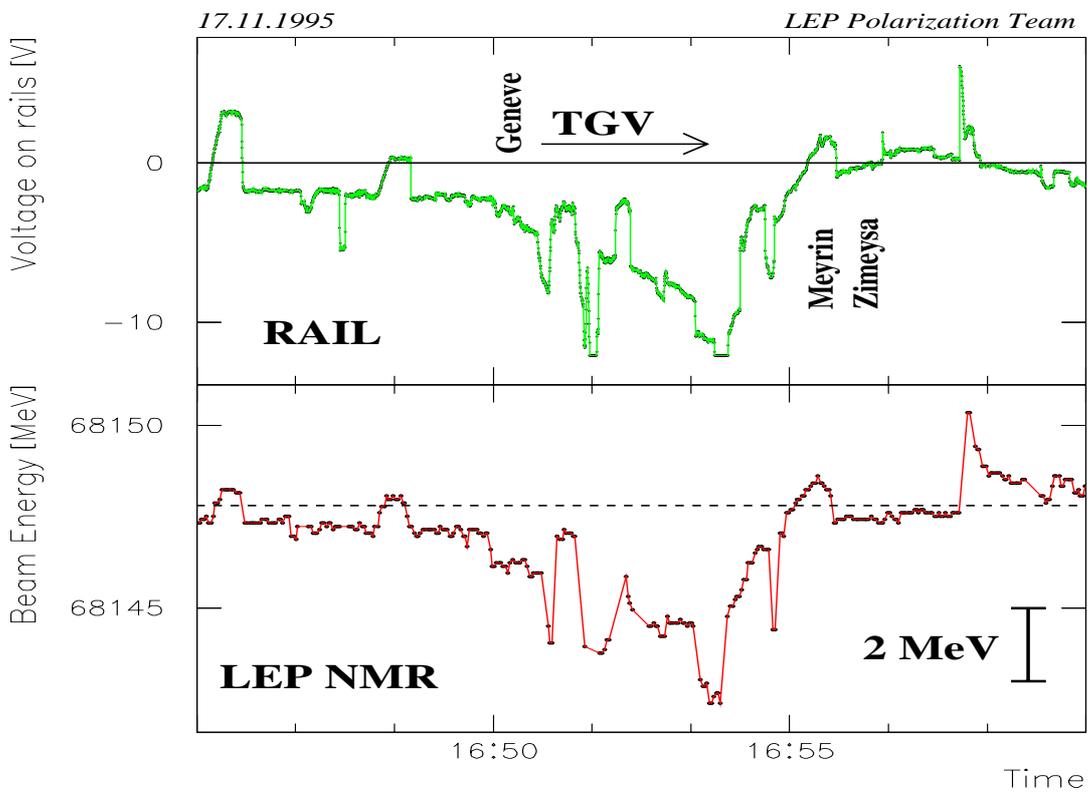
Änderung des Umfangs (26.6 km) um 0.5 mm !

$$1990 : \Delta E \approx 20 \text{ MeV}, \Delta E/E = 2 \cdot 10^{-4}$$

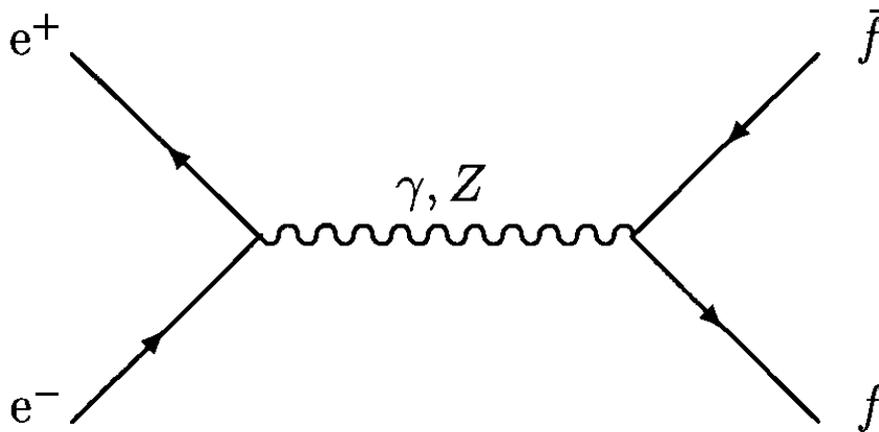
$$1995 : \Delta E \approx 2 \text{ MeV}, \Delta E/E = 2 \cdot 10^{-5}$$



Correlation between trains and LEP energy



● Schwache WW: Elektron-Positron Annihilation



- $f = e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, u, d, c, s, b$

- $N_{f\bar{f}} = L \cdot \sigma_{f\bar{f}}$

Die Luminosität L ist eine Beschleunigereigenschaft.

- $[\sigma] = \text{cm}^2 \Rightarrow [L] = \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

$$L = \frac{N^+ \cdot N^- \cdot f}{A}$$

dabei ist A der Kollisions-Querschnitt der Teilchenpakete.

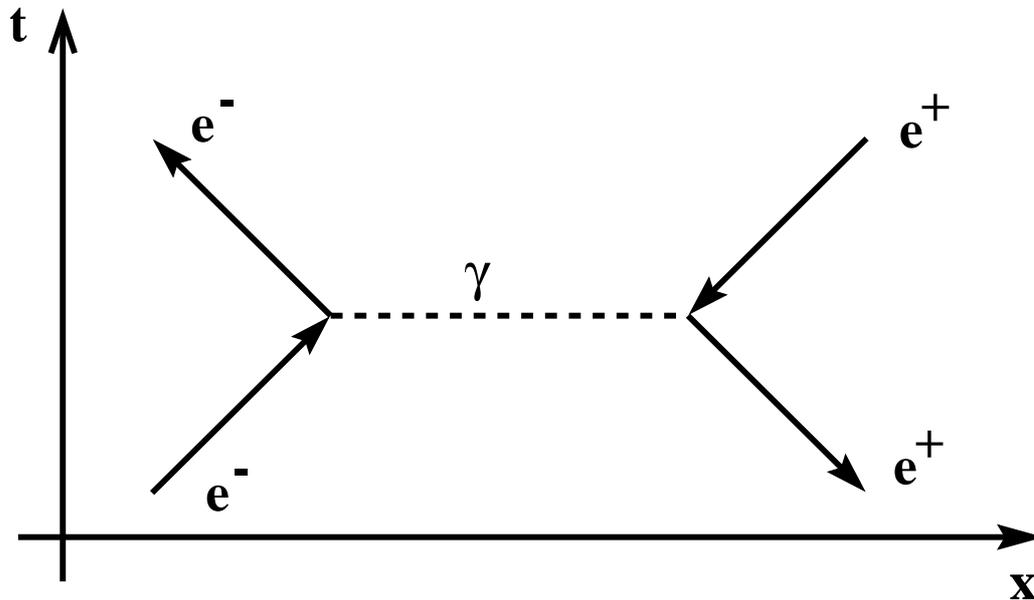
Für einen Speicherring mit Umfang U gilt:

$$f = \frac{c}{U} \Rightarrow f_{LEP} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{26.6 \cdot 10^3 \text{ m}} = 11280 \text{ Hz}$$

d.h. bei LEP gibt es alle $90 \mu\text{s}$ eine e^+e^- -Kollision.

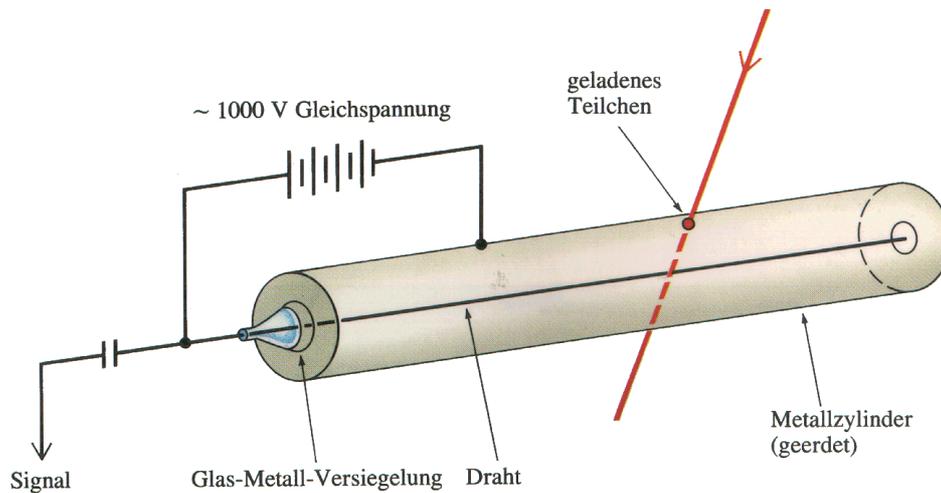
- $[\sigma] = 1 \text{ barn} = 1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$
- $1 \text{ pb} = 10^{-12} \text{ barn}$.

Die Luminosität eines Beschleunigers wird mit Hilfe von Standardprozessen, die sich sehr gut berechnen lassen, wie die Bhabha-Streuung $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$,



und sehr hohe Wirkungsquerschnitte haben, bestimmt.

Nachweis geladener Teilchen

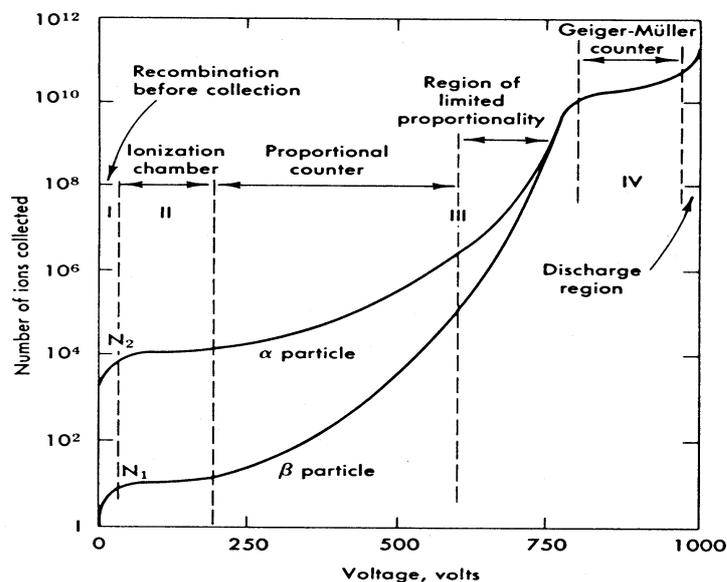


Geladene Teilchen ionisieren die Atome beim Durchgang durch Materie. Die Anzahl der Elektron-Ion Paare ist proportional zum Energieverlust.

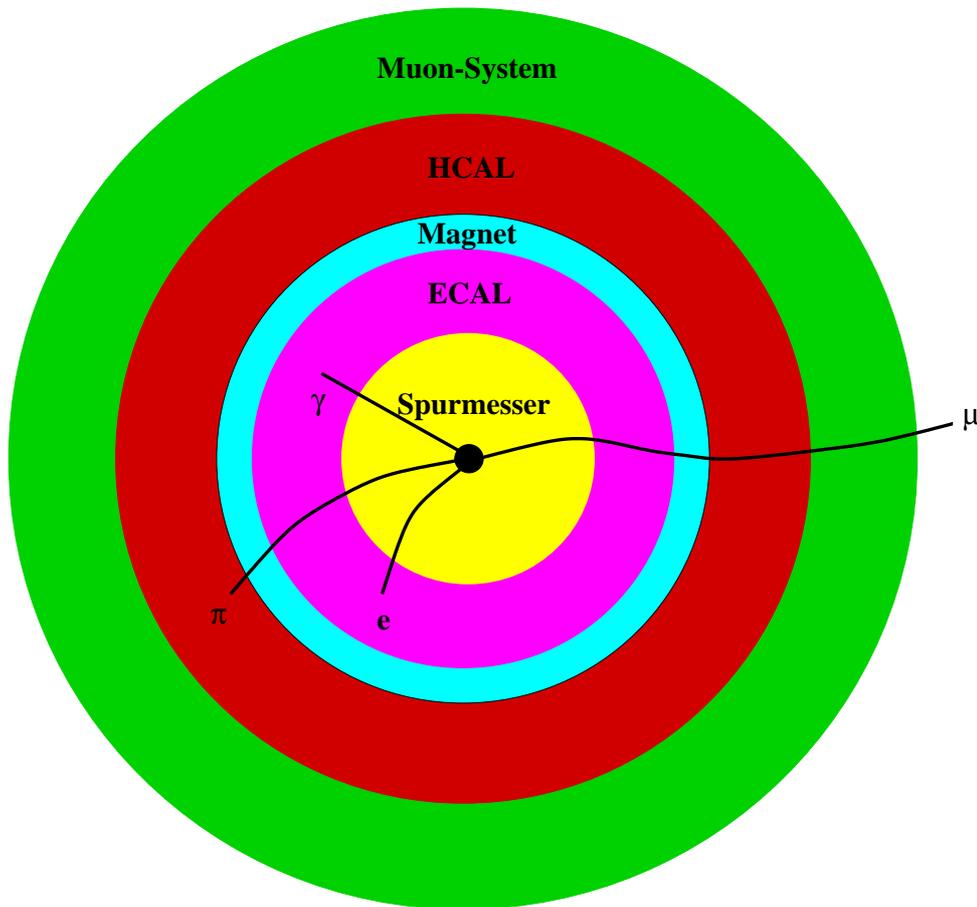
Der Energieverlust wird mit der Bethe-Bloch Formel beschrieben:

$$\frac{dE}{dx} = f(v, K_{Material})$$

dabei ist x die Wegstrecke in dem Medium.



Die Schalenstruktur eines Teilchendetektors



Ein Teilchendetektor muß:

- Die Bahnen geladener Teilchen messen.
- Die Ladung und den Impuls der Teilchen messen.
 - Die Lorenzkraft $\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$ zwingt die Teilchen auf Kreisbahnen.

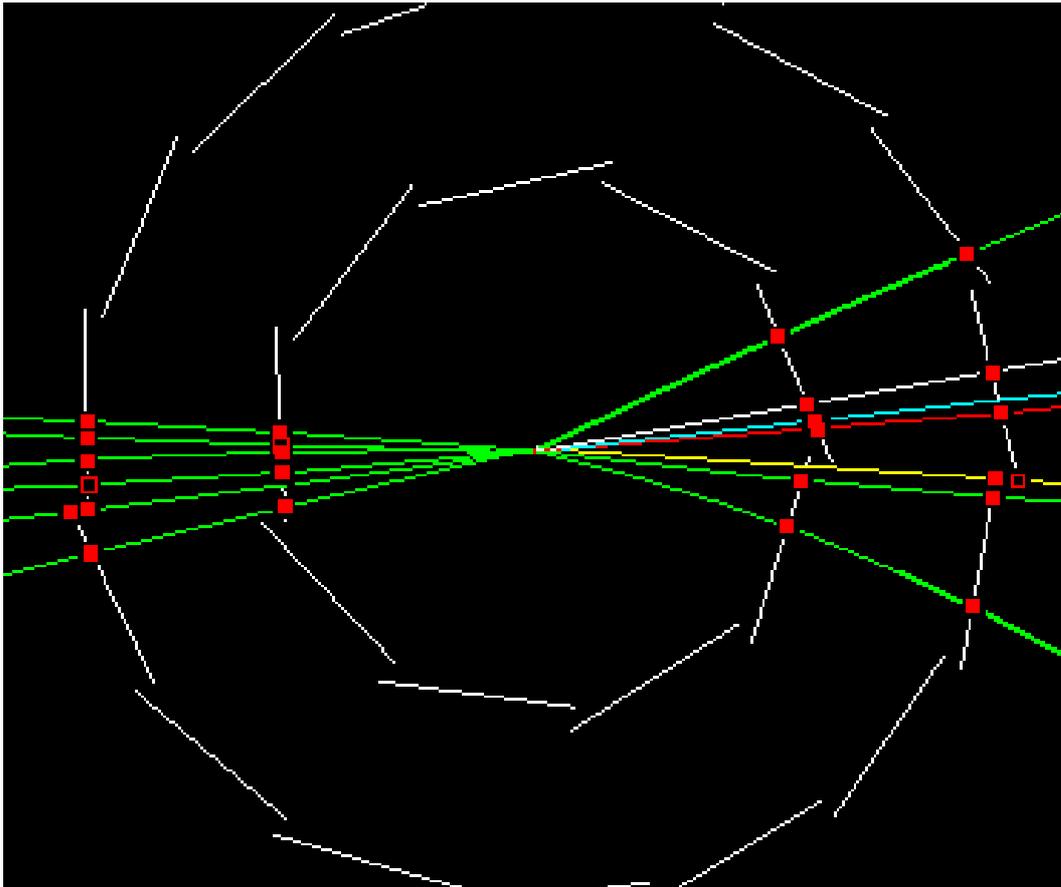
$$\frac{mv^2}{R} = q \cdot v \cdot B \Rightarrow m \cdot v = q \cdot B \cdot R$$

- links- oder rechts-gekrümmt legt die Ladung fest
- Aus der Messung von Energie und Impuls $m^2 = E^2 - p^2$ ergibt sich die Masse des Teilchen.

Spurdetektoren

Silizium-Vertexdetektor

Er befindet sich in zwei Lagen im Abstand von 6.5 cm und 11.3 cm vom Wechselwirkungspunkt.

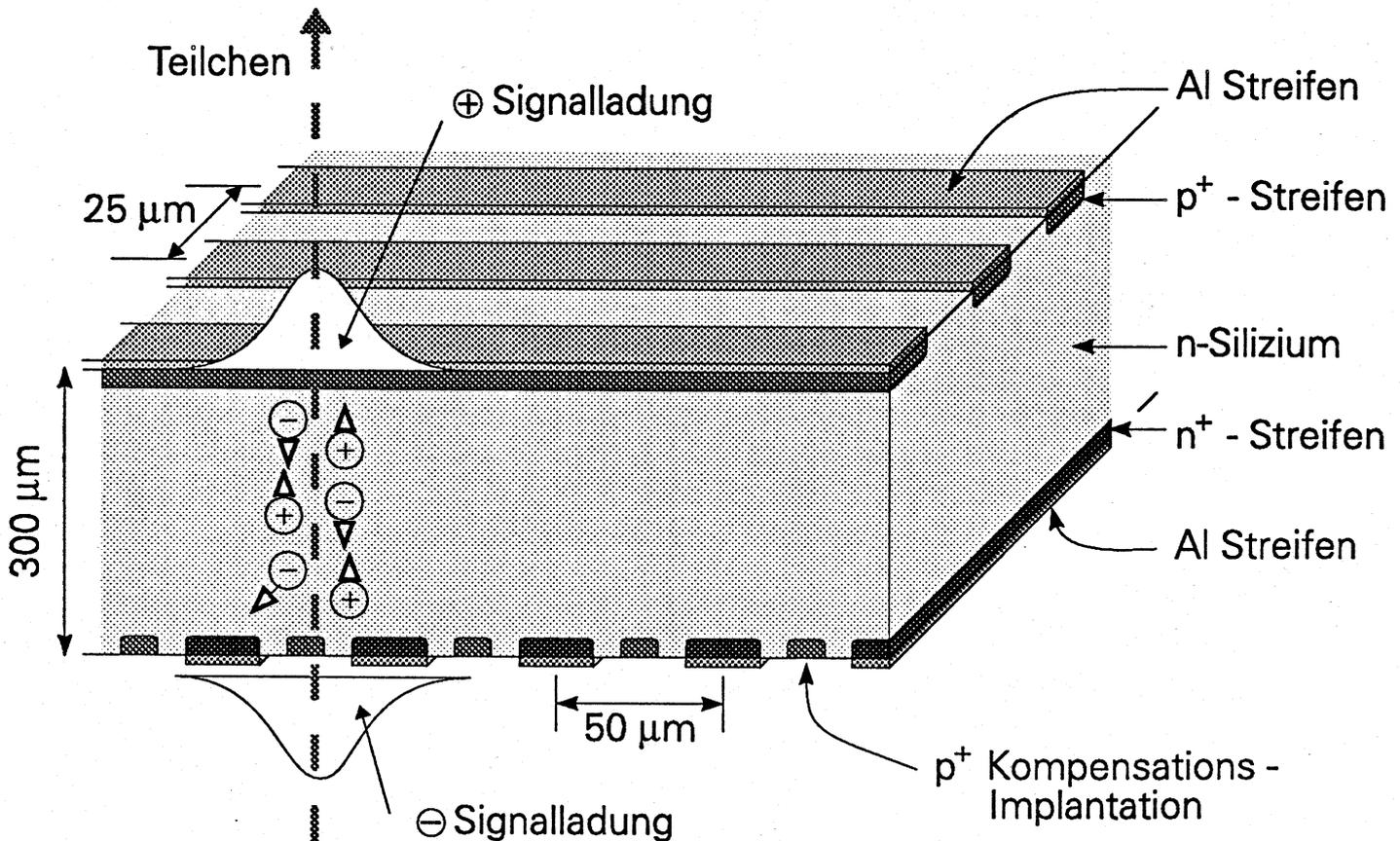


Jeder der 96 Silizium-Wafer hat die Abmessungen:

$$51 \text{ mm} \times 51 \text{ mm} \times 300 \text{ }\mu\text{m}.$$

- Innere Lage: $9 \times 4 = 36$ Wafer
- Äußere Lage: $15 \times 4 = 60$ Wafer

- Ortsauflösung: $\sigma_{r\phi} \approx \sigma_{rz} \approx 12 \text{ }\mu\text{m}$



Ein relativistisches Teilchen erzeugt etwa 25000 Elektron-Loch Paare.

Silizium; vierwertiges Atom, d.h. 4 Valenzelektronen.

n-Streifen

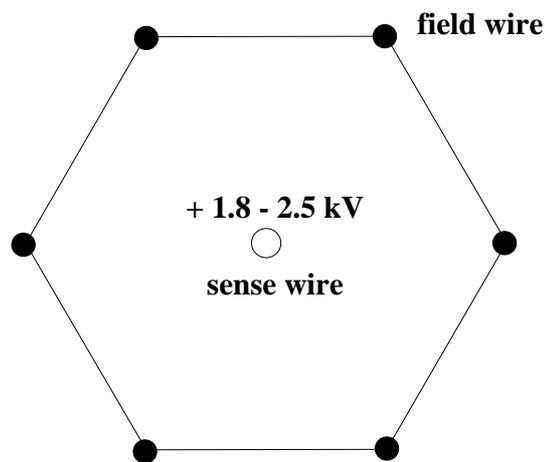
Arsen, fünfwertiges Fremdatom, Elektronen im Leitungsband, Sperr-Spannung macht den Bereich positiv.

p-Streifen

Bor, dreiwertiges Fremdatom, Löcher im Valenzband, Sperr-Spannung macht den Bereich negativ.

Driftkammer

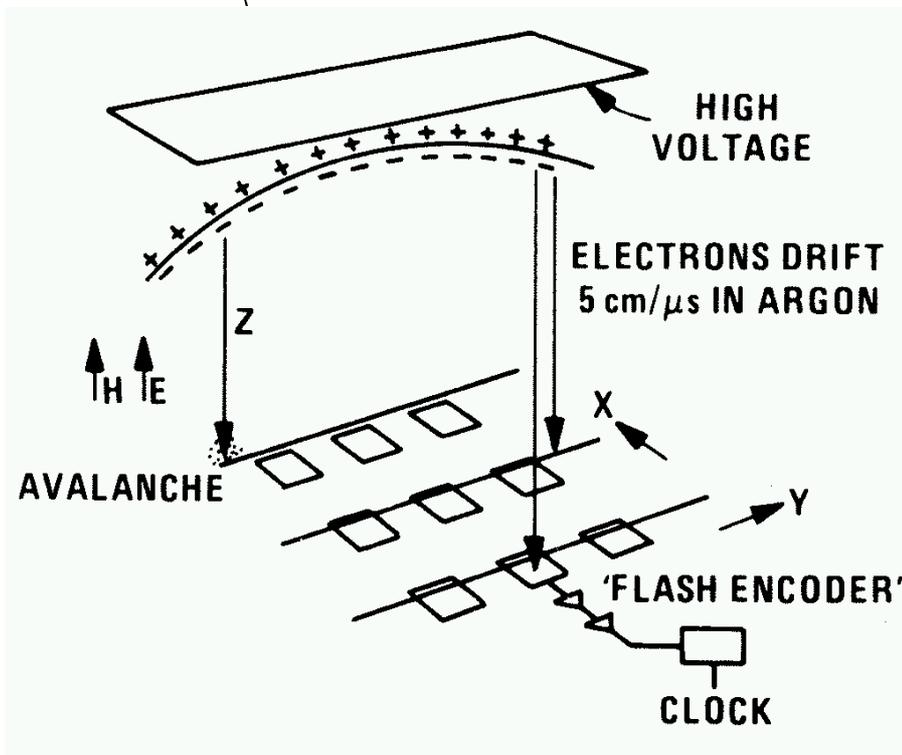
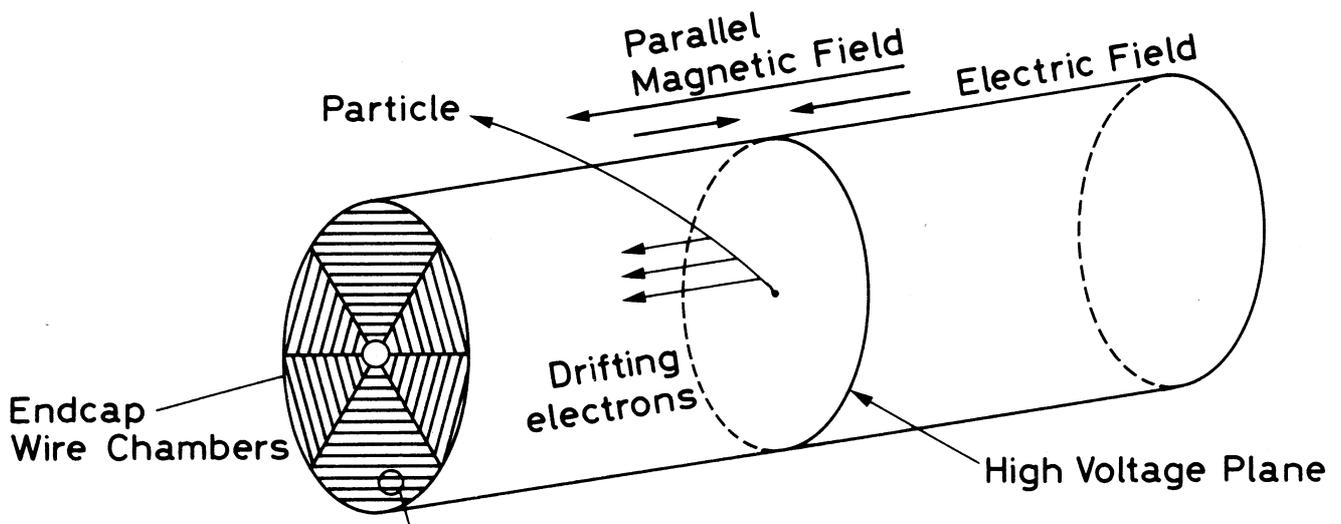
Länge: 2000 mm
Innerer Radius: 128 mm
Äußerer Radius: 285 mm



- 960 Signaldrähte, Durchmesser $30 \mu m$, in 8 Lagen
- Gasfüllung: 80% Argon, 20% CO_2
- Maximale Driftstrecke: 6.5 mm \Rightarrow Readout Zeit: $3 \mu s$
- Ortsauflösung: $100 \mu m$ in $r - \phi$.

Zeitprojektionskammer (TPC)

Länge:	4700 mm	Innerer Radius:	310 mm
Äußerer Radius:	1800 mm	Gas Volumen:	43 m ³
Gewicht:	3.6 t	Driftzeit:	5 cm/μs ⇒ 45 μs



- 21 Raumpunkte mit $\sigma_{r\phi} = 160 \mu m$ & $\sigma_{rz} = 800 \mu m$

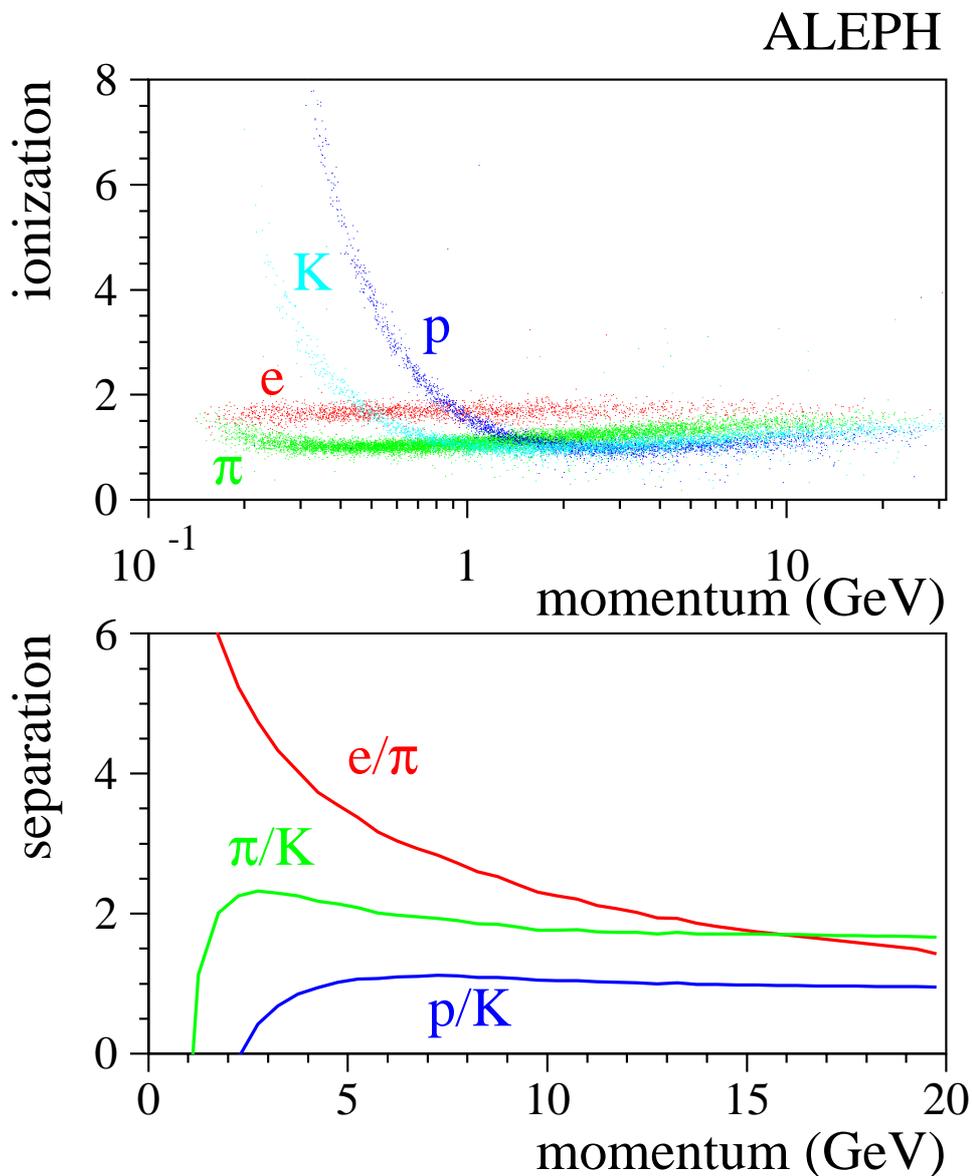
Teilchenidentifizierung

Der Energieverlust wird mit der Bethe-Bloch Formel beschrieben:

$$\frac{dE}{dx} = f(v, K_{Material})$$

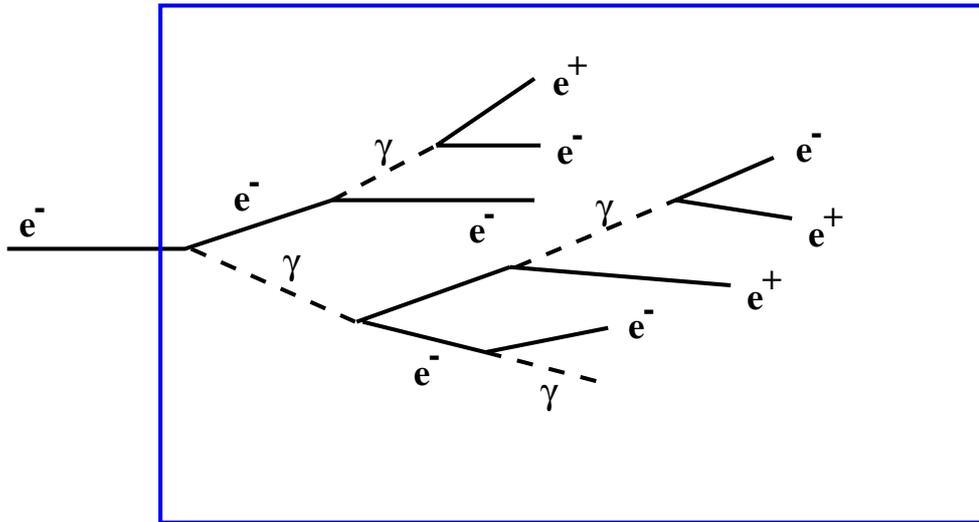
x ist die Wegstrecke in dem Medium.

Aus $\frac{dE}{dx}$ folgt v und aus der Krümmung $p \Rightarrow m$

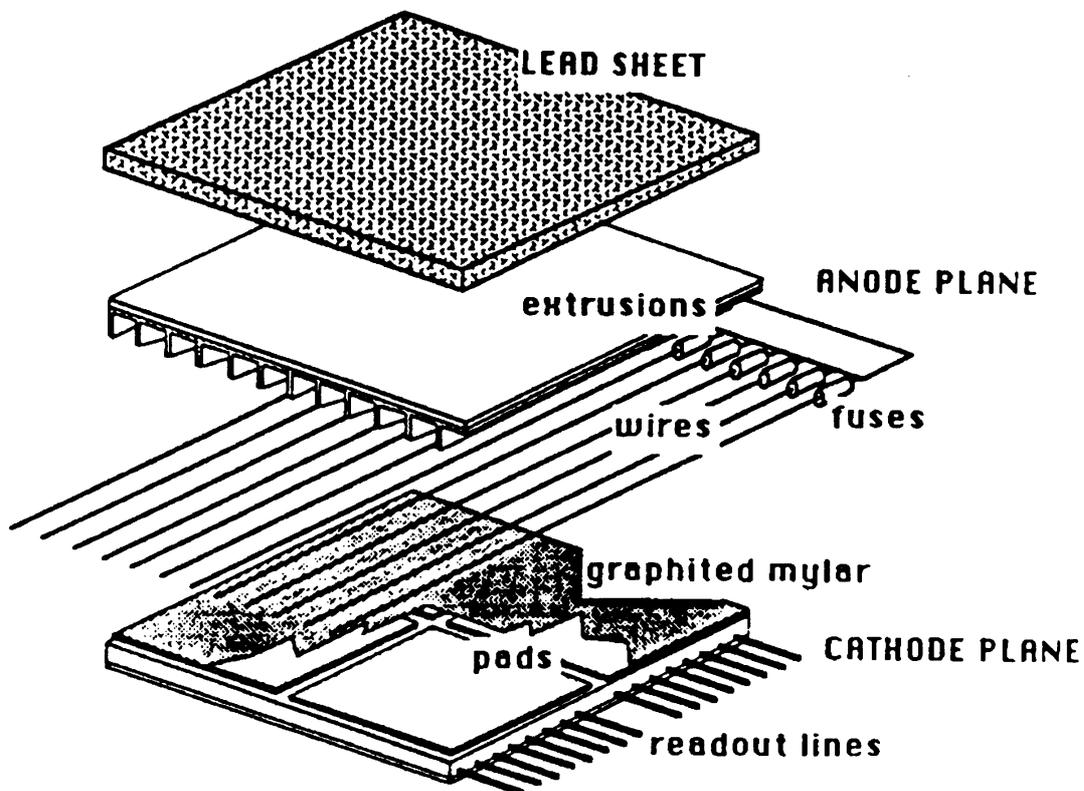


- $1 \sigma \Leftrightarrow 68.3\% \text{ CL}$, $2 \sigma \Leftrightarrow 95.4\% \text{ CL}$.

Das Elektromagnetische Kalorimeter



In den Bleilagen kommt es zu elektromagnetischen Schauern, die dazwischen liegenden Driftkammern messen die Energie und die Position.



Die abgestrahlte Leistung: $P_s \propto m_0^{-4}$

$$m(e^\pm) = 0.511 \text{ MeV}, m(\mu^\pm) = 105 \text{ MeV},$$

$$m(\pi^\pm) = m(\pi^0) = 135 \text{ MeV},$$

$$m(K^\pm) = m(K^0) = 494 \text{ MeV},$$

$$m(p^\pm) = m(n) = 940 \text{ MeV}$$

d.h. nur Elektronen und Photonen werden im ECAL gestoppt.

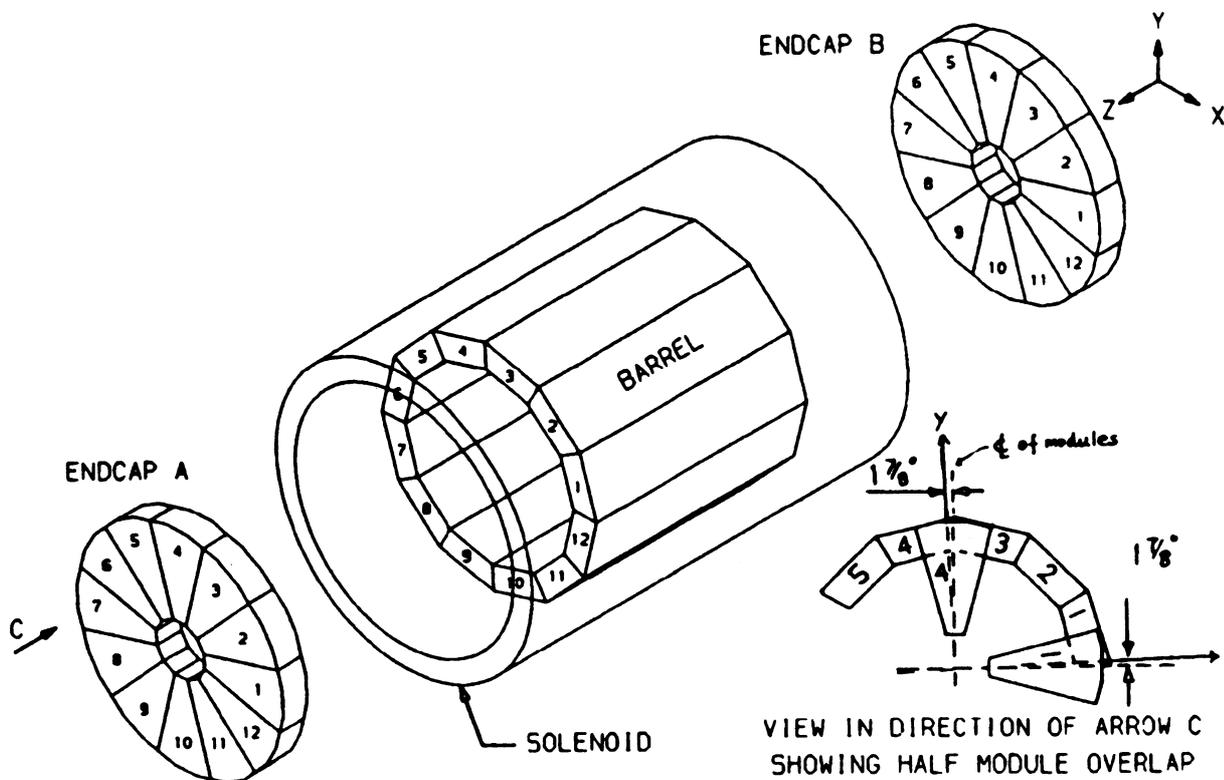
Innerer Radius: 1847 mm

Äußerer Radius: 2254 mm

Gewicht: 120 t

Energieauflösung: $\sigma_E/E = 18\%/\sqrt{E[\text{GeV}]}$

Ortsauflösung: $\sigma_x = \sigma_y = 6.8 \text{ mm}/\sqrt{E[\text{GeV}]}$



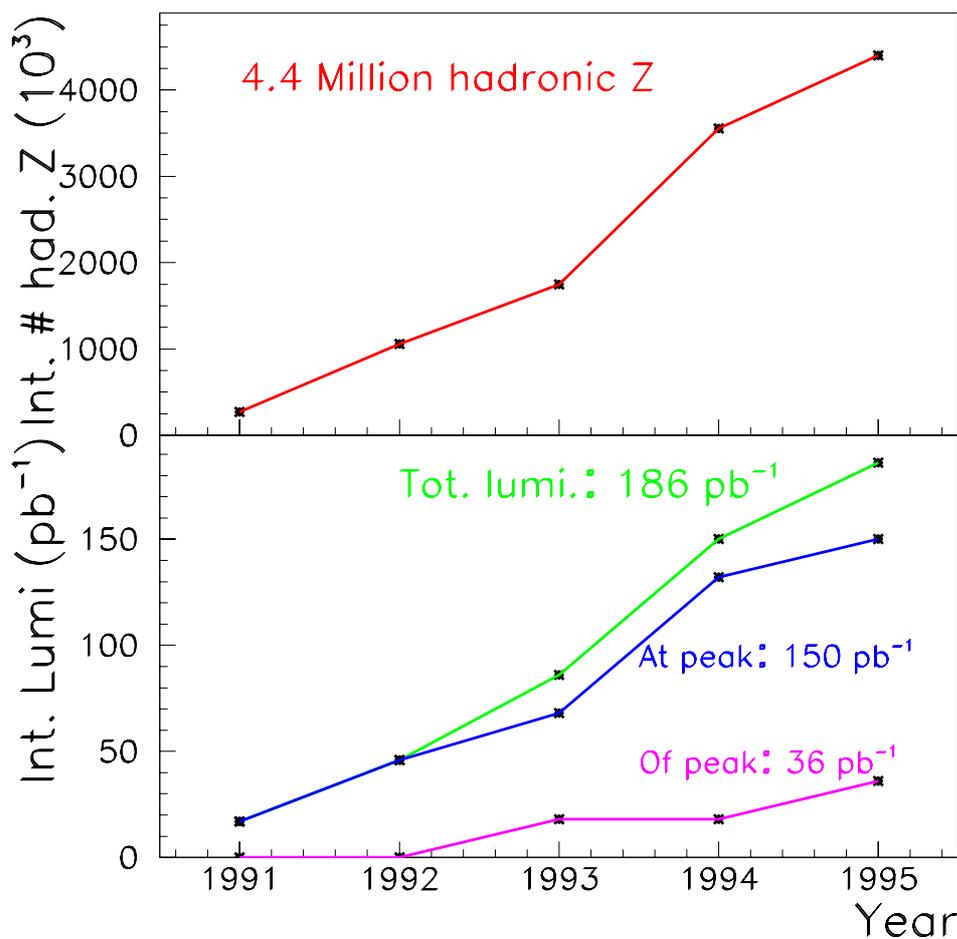
Das ALEPH Experiment am LEP/CERN

ALEPH: Kollaboration von 31 Instituten

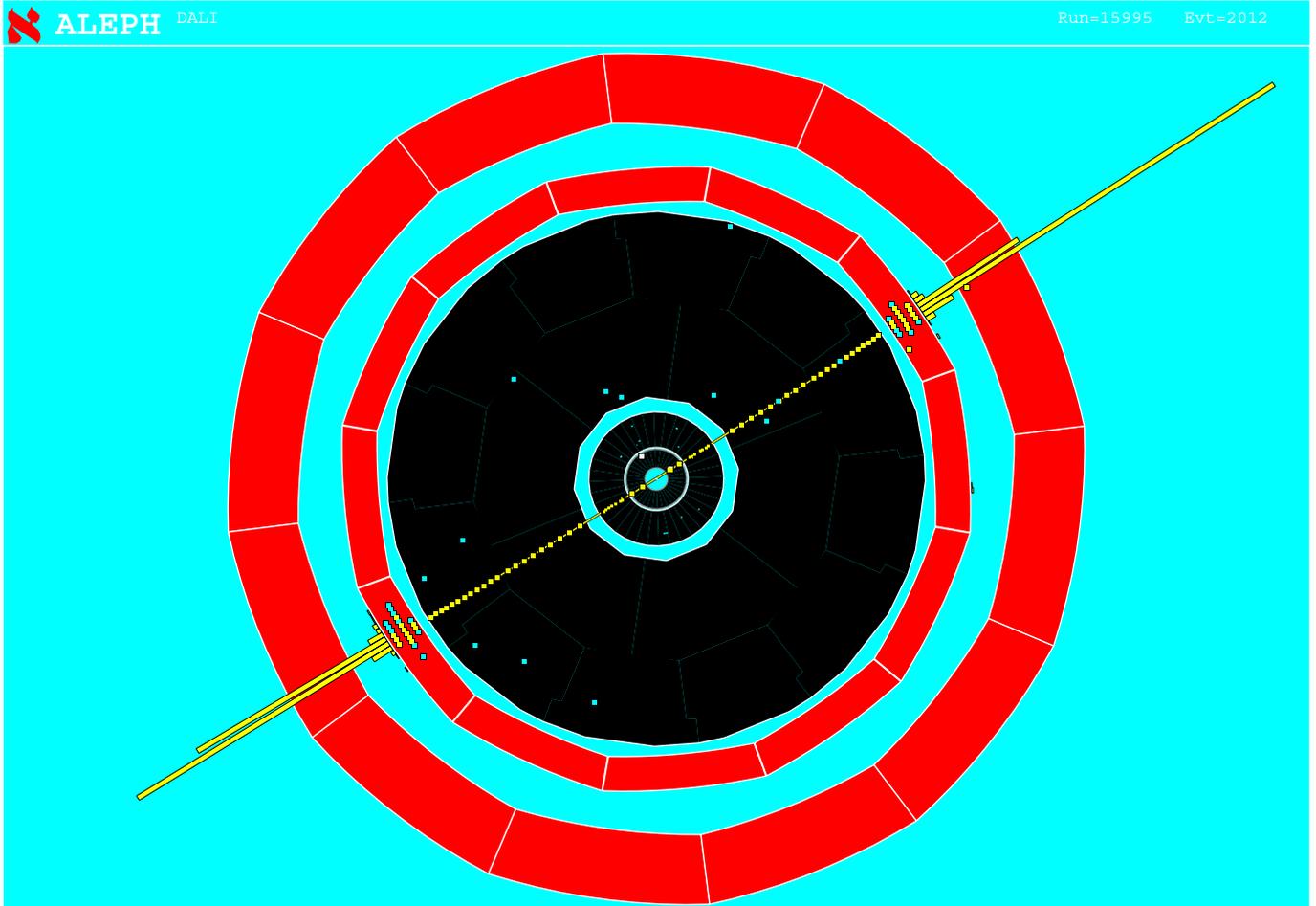
Annecy, Athens, Barcelona, Bari, Beijing, CERN, Clermont-Ferrand, Copenhagen, Edinburgh, Florence, Thallahassee, Frascati, Glasgow, Heidelberg, IC London, Innsbruck, Lancaster, Mainz, Marseille, **Munich**, Orsay, Palaiseau, Pisa, RH London, RAL, Saclay, Santa Cruz, Sheffield, Siegen, Trieste, Wisconsin.

unter Beteiligung von ca. 400 Physikern

LEP I statistics

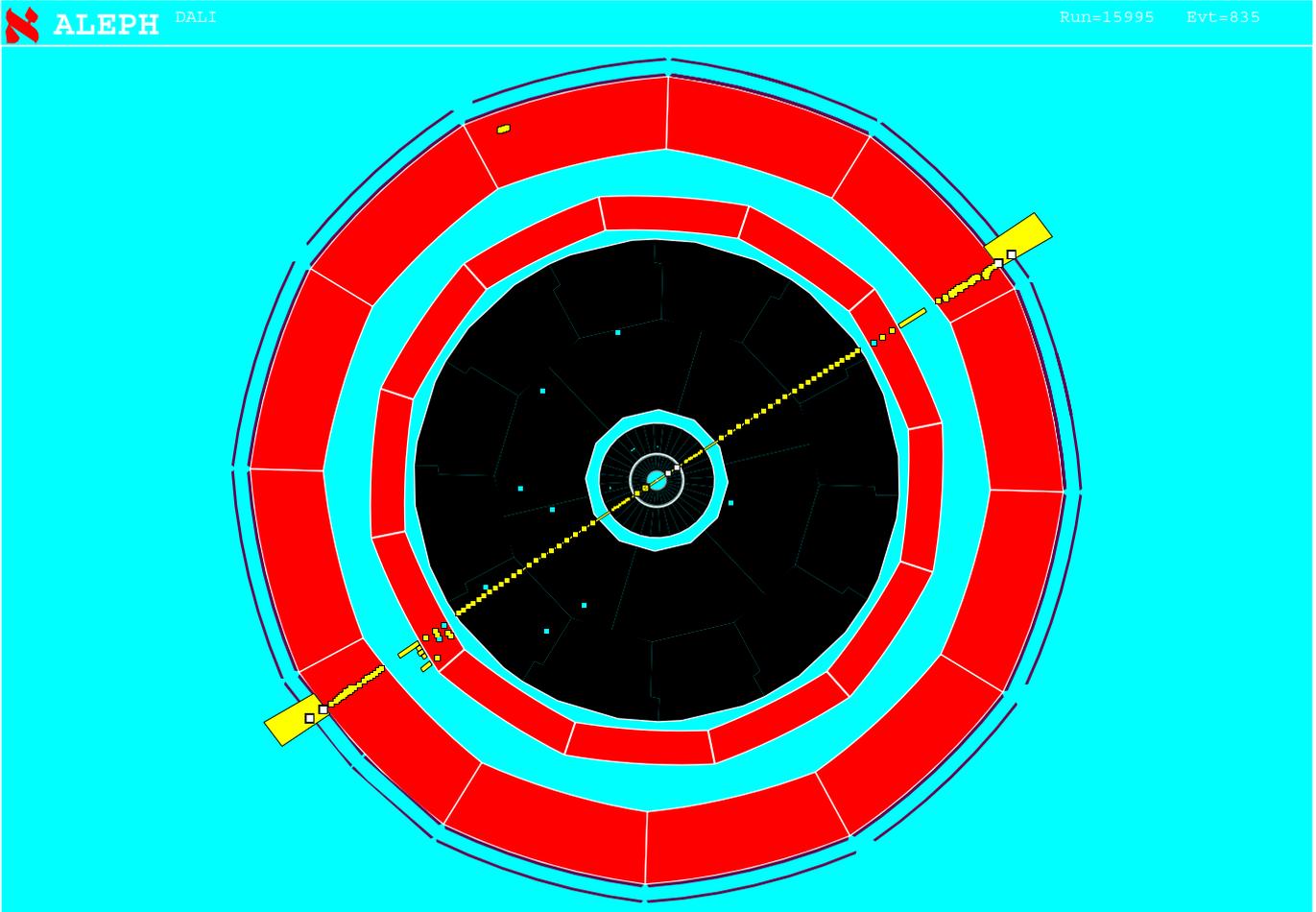


$$Z^0 \rightarrow e^+ e^-$$



Made on 9-Sep-1993 13:24:10 by DREVERMANN with DALI.D1.

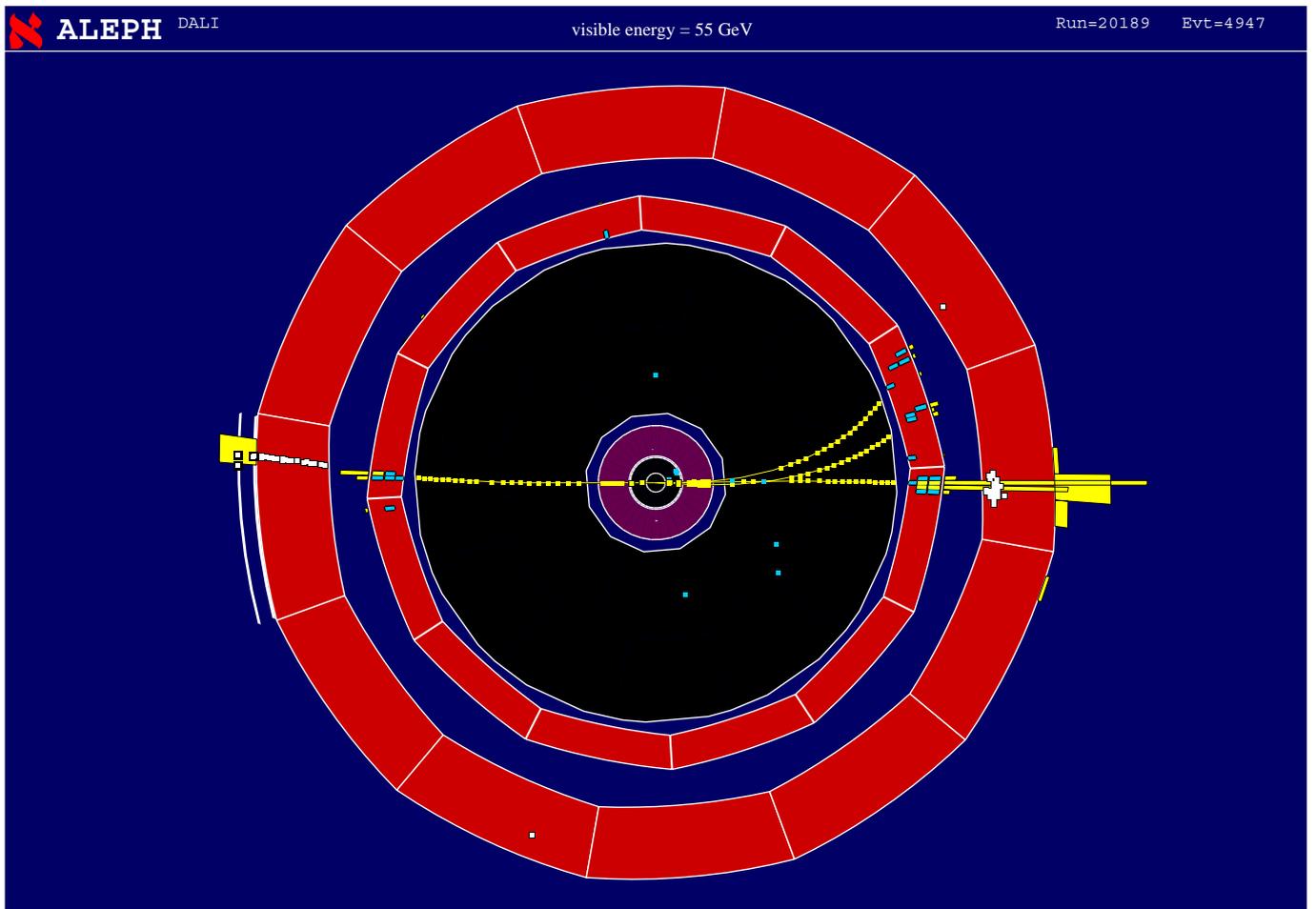
$$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



Made on 9-Sep-1993 13:32:51 by DREVERMANN with DALI.D1.

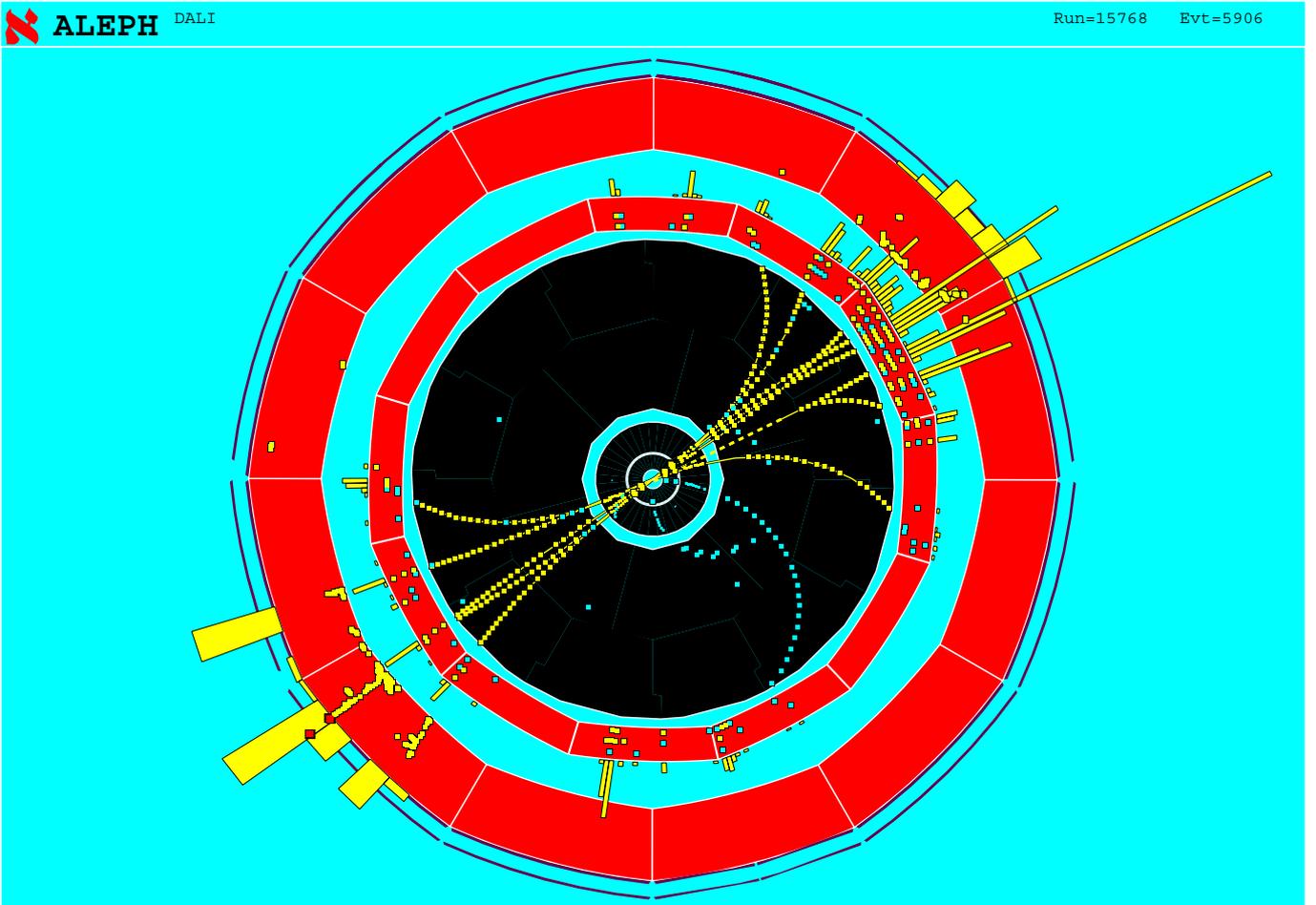
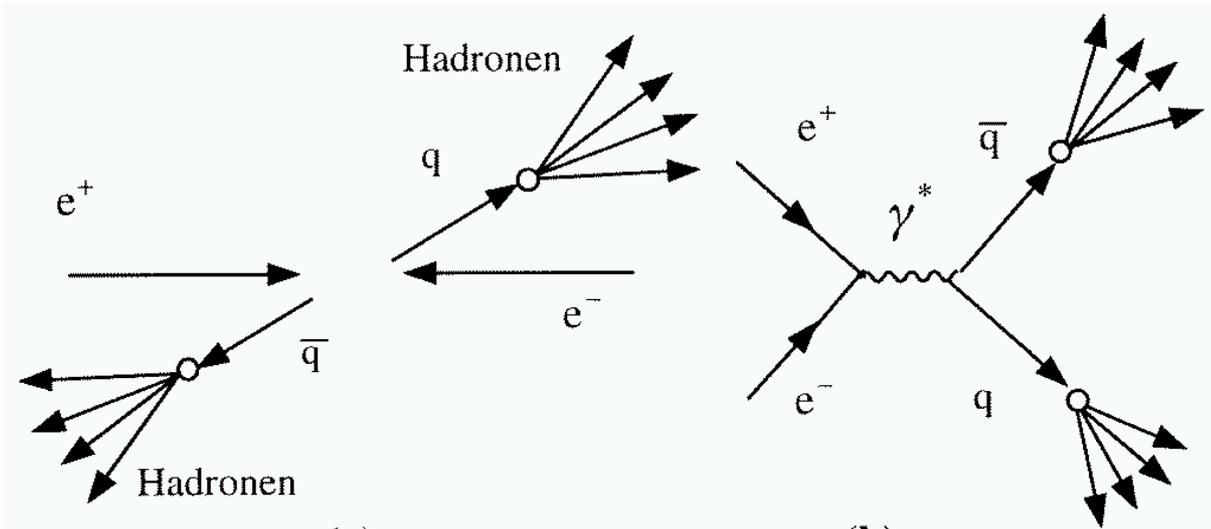
$$Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

- $\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau$
- $\tau^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- \nu_\tau$



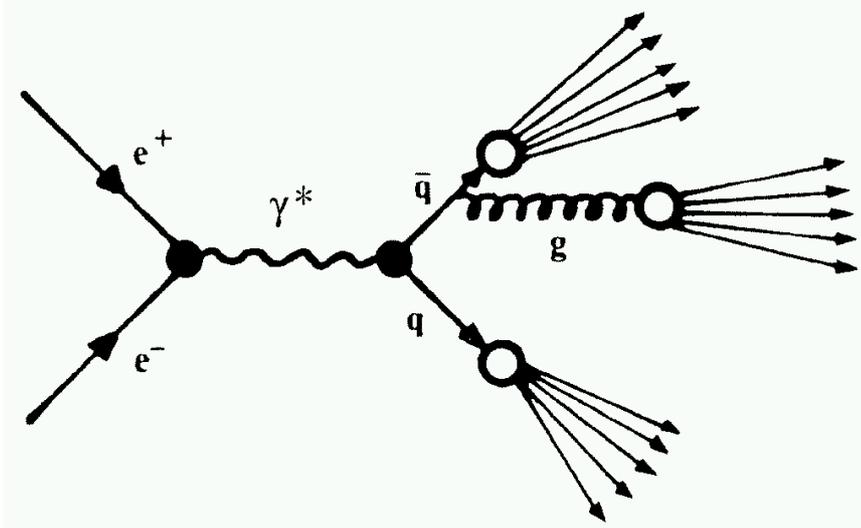
Made on 24-Oct-1995 10:38:03 by DREVERMANN with DALI.D5.
Filename: VC020189_004947_TA-MU_TA-3P.PS_951024_1037

$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$$



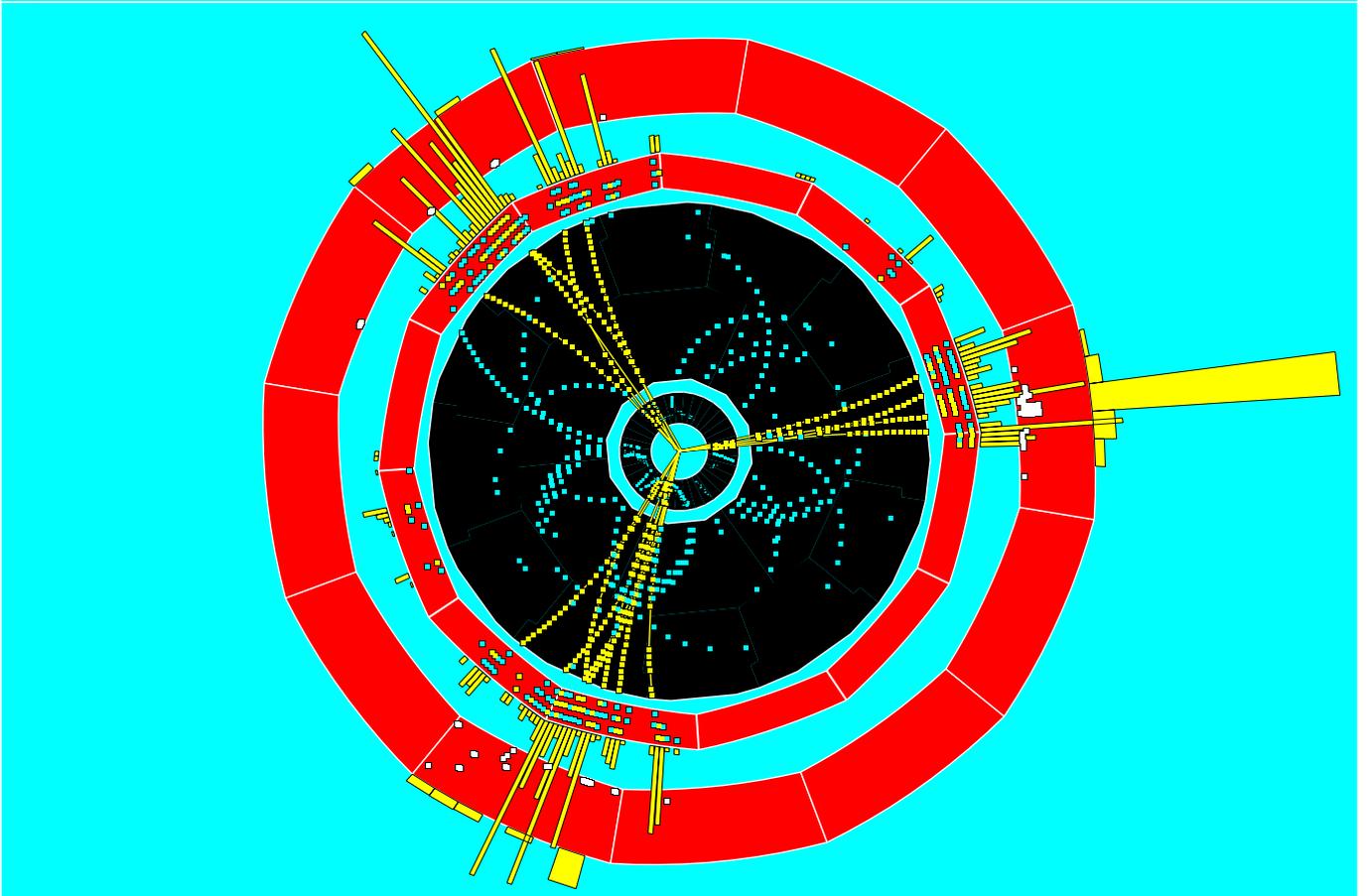
Made on 9-Sep-1993 14:15:44 by DREVERMANN with DALDI.

$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$$



ALEPH DALI

Run=9063 Evt=7848

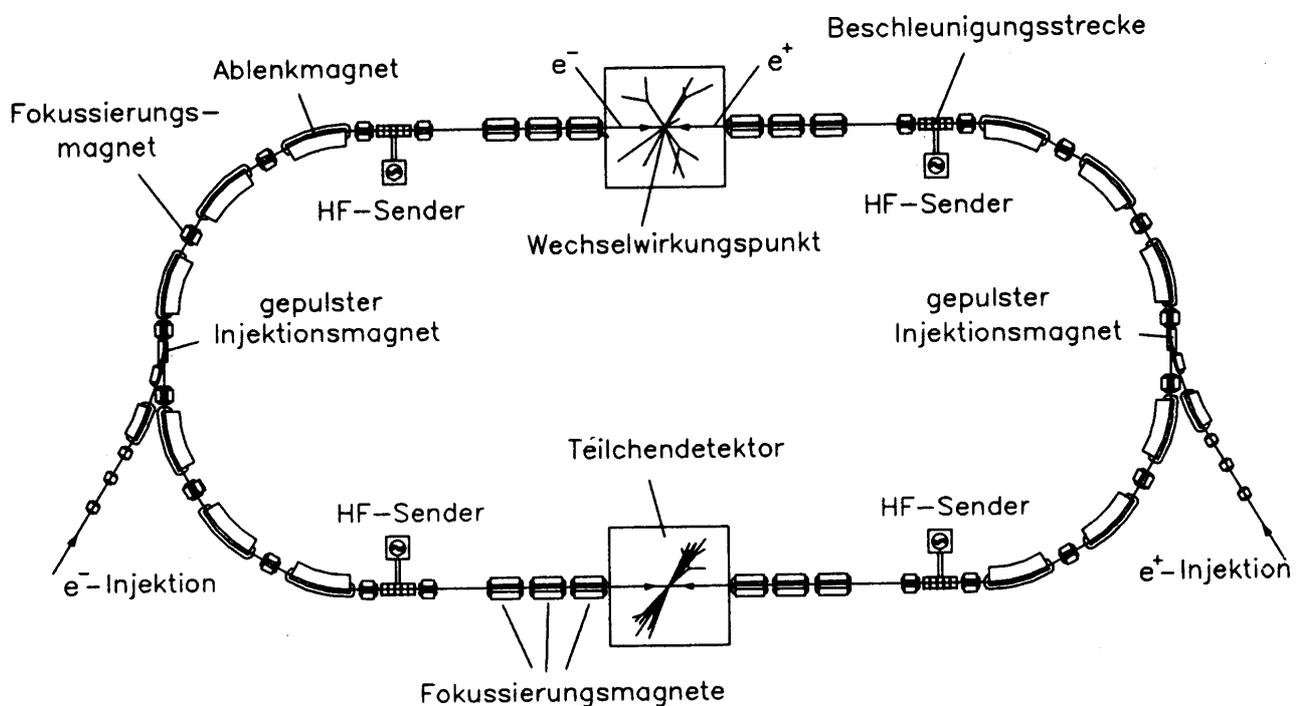


Made on 9-Sep-1993 11:43:03 by DREVERMANN with DALI.DI.

Zusammenfassung

- Geladene Teilchen können nur in elektrischen Feldern beschleunigt werden.
- Mit magnetischen Feldern werden die Teilchenbahnen festgelegt.

$$\vec{F}_L = e \cdot (\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E})$$

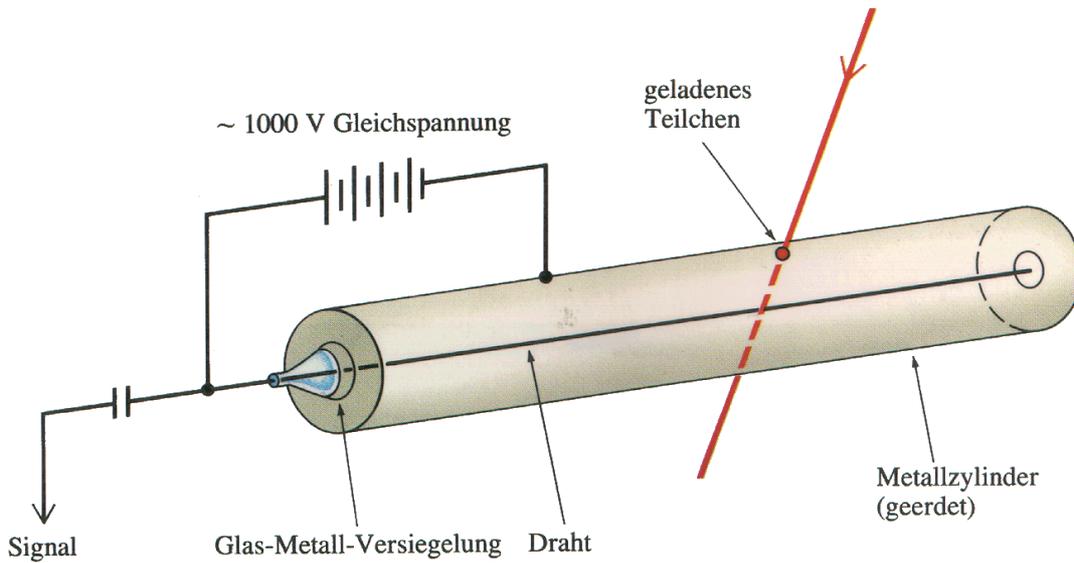


Beschleunigte elektrische Ladungen strahlen Energie ab:

$$\Rightarrow P_s = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0 (m_0 c^2)^4} \frac{E^4}{R^2}$$

dies limitiert e^+e^- -Speicherringe auf $E_{cms} \leq 100 \text{ GeV}$.

Geladene Teilchen ionisieren beim Durchgang durch Materie die Atome und können so nachgewiesen werden.



Aufbau eines modernen Teilchendetektors:

