

Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

- ausgenutzt in Detektoren
- verschiedene Effekte dominieren je nach

Teilchenart und Energie

Masse

$m=0$ (γ)

"leicht": $e^\pm$

"schwer": μ, p, K, π

Ladung

geladen: $e^\pm, \mu^\pm, p, \bar{p}, \dots$

neutral: n, ν, γ

Wechselwirkung

elektromagnetisch (gel., γ)

schwach (ν)

stark ($n, K, \text{Hadronen}$)

Neutron: erst starke WW oder Zerfall } dann e.m. Nachweis
Neutrino: erst schwache WW mit Detektor } der
Reaktionsprodukte
↳ 99,9999999999%:
fehlender Impuls

- geladene Teilchen:

$e, \mu, \pi^\pm, K^\pm, p$

Ionisation

Bremsstrahlung

Cherenkov-Effekt

Übergangsstrahlung

Photonen:

Photoeffekt

Compton effekt

Paarbildung

- Spezifischer Energieverlust durch Ionisation, dE/dx

Bethe - Bloch - Gleichung

(1930 - 1933) :

$$\frac{dE}{dx} = D_e \left(\frac{Z_1}{\beta} \right)^2 \eta_e \left[\ln \left(\frac{2mc^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\sigma(\gamma)}{2} \right]$$

$$D_e = 4\pi r_e^2 m_e c^2 = 5.1 \cdot 10^{-25} \text{ MeV cm}^2$$

einlaufendes Teilchen

Material-Einfluss

$$\bullet \frac{dE}{dx} \propto Z_1^2 \cdot Z_2$$

• Teilchenmasse geht nicht ein, nur Geschwindigkeit:

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \text{ bei kleiner Energie}$$

• relativistischer Anstieg mit $\ln \gamma^2$

• ... begrenzt durch Dichteeffekt $\sigma(\gamma) \Rightarrow \frac{dE}{dx} \rightarrow \text{const.}$

• Minimum von $\frac{dE}{dx}$ beträgt 1-2 MeV/g cm² · g und liegt bei $\beta\gamma \approx 3-4$

$$\eta_e = Z_2 \eta_a = Z_2 \frac{N_A S}{A}$$

$$I \approx Z_2 \cdot 10 \text{ eV}$$

"m.Hlaes Ionisations-potential"

$\sigma = \text{Dicht} - \text{Korrektur}$

spez. Energieverlust :

$$\frac{dE}{d(gx)} = \frac{1}{S} \cdot \frac{dE}{dx}$$

in MeV/g cm²

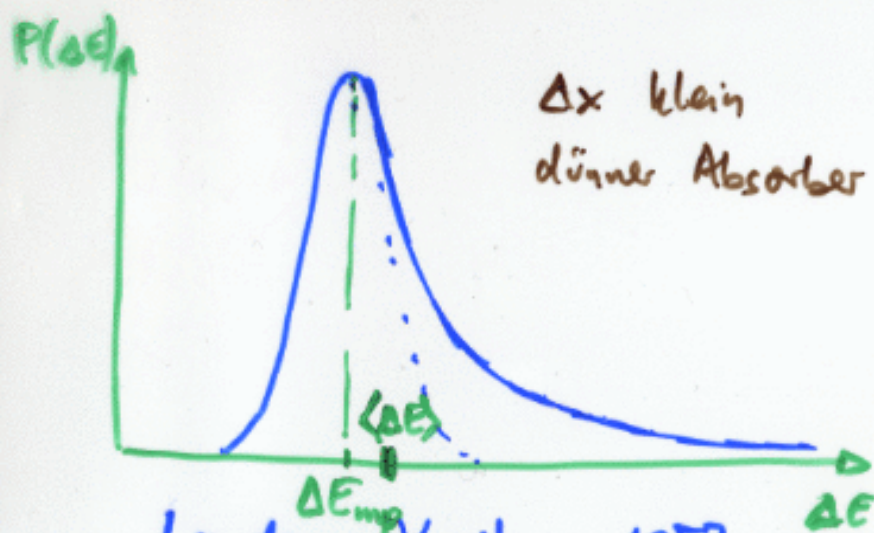
Fluktuationen im Energieverlust durch Ionisation

$\frac{dE}{dx}$ = mittlerer Energieverlust,

zentrale Stöße seltener als periphere: $P(\Delta E \text{ groß}) < P(\Delta E \text{ klein})$

ΔE für dünne Materieschicht: $\Delta E = \frac{dE}{dx} \cdot \Delta x$

hat asymmetrische Wahrscheinlichkeitsverteilung (mit „Landau-Schwanz“)



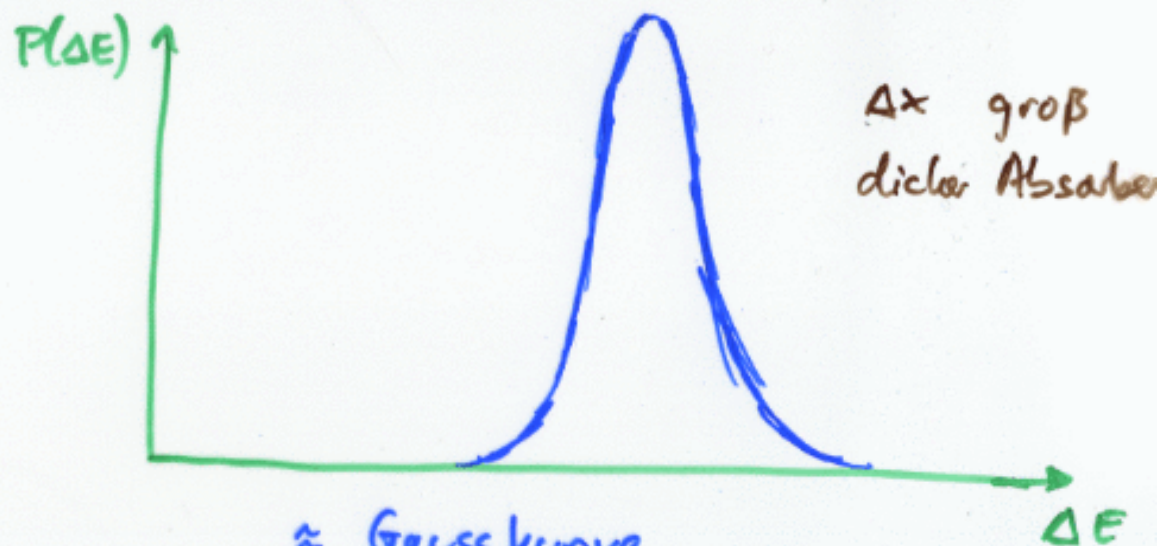
Landau, Vavilov 1957

analytische Näherung: Moyal-Funktion

$$\chi(\lambda) = a \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}(\lambda - e^{-\lambda})\right)$$

$$\lambda = (\Delta E - \Delta E_{mp})/b$$

a = Höhe
 ΔE_{mp} = Lage
 b = Breite



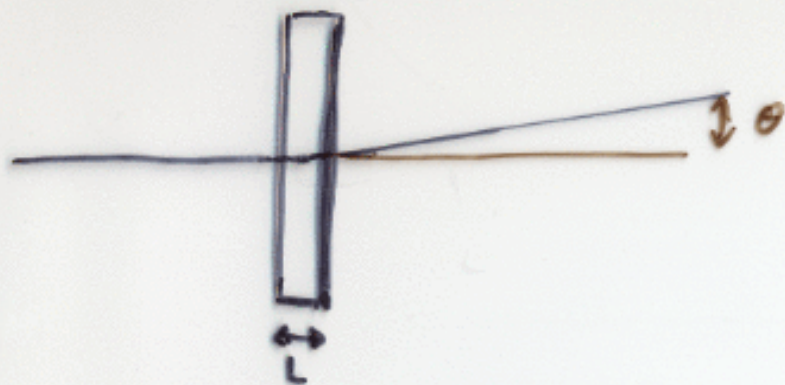
$\approx$ Gaußkurve

$\Delta E = \sum$ vieler kleiner Zufallswerte

$\downarrow$
Zentraler Grenzwertsatz

$\downarrow$
Gauß-Verteilung

- Vielfachstreuung



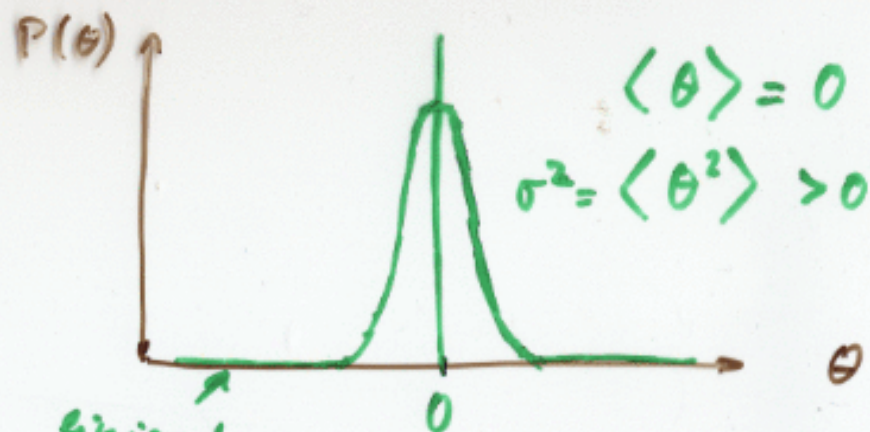
Statistischer Prozess

$$\theta_{\text{streu}} \propto \sqrt{L}$$

$$\propto \frac{1}{p}$$

mit charakteristischen
Skalenfunktionen

Praktische Näherung : $\sqrt{\langle \theta_{\text{streu}}^2 \rangle} \approx \frac{21 (\text{MeV}/c)}{p (\text{MeV}/c)} \cdot \sqrt{\frac{L}{X_0}}$



einige harte
Streuungen

X_0 = Strahlungslänge

Pb: 5 mm

Plastik: 40 cm

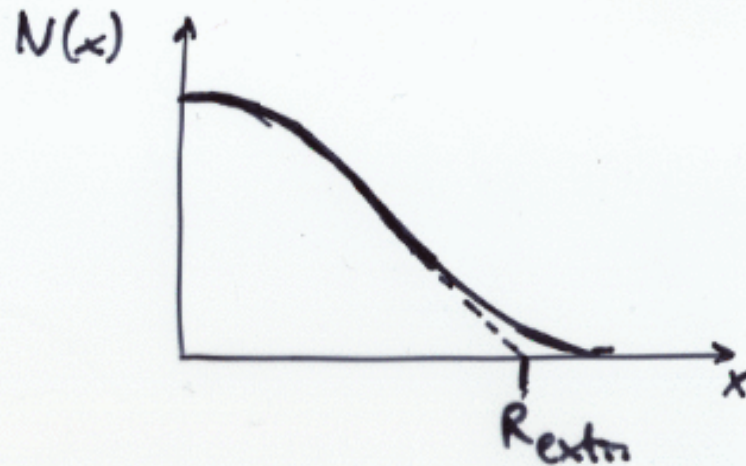
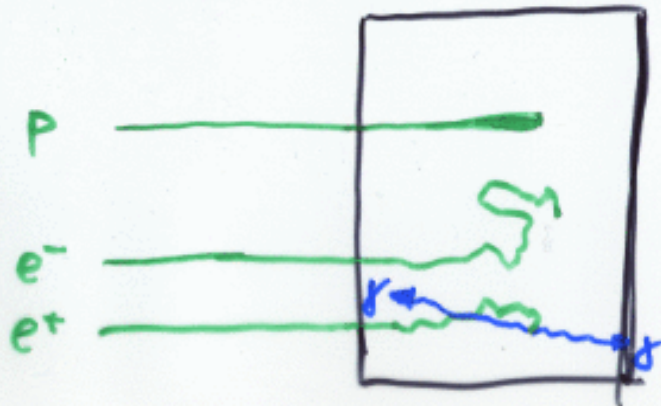
- Energieverlust von leichten Teilchen : $e^\pm$

$E \lesssim E_c$: überwiegend Ionisation
 $E \gtrsim E_c$: " Bremsstrahlung } beide $\beta \rightarrow 1$

E_c = kritische Energie $\approx \frac{600 \text{ MeV}}{Z_{\text{absorber}}}$

es gibt genauere Formeln für $e^\pm$ -Ionisation (Spinabh.; Ladungseffekte etc)

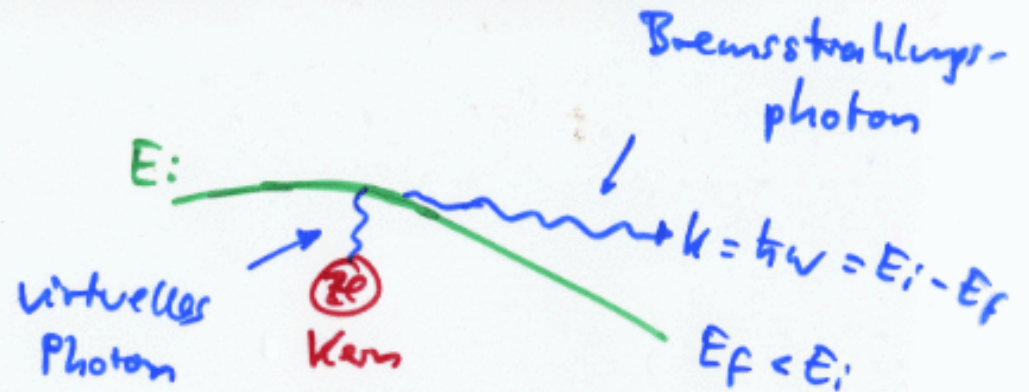
Reichweite von $e^\pm$ irregulär!



Strahlungsbereich $E > E_c$:



elastische Streuung



Bremsstrahlung

Bethe - Heitler 1934 : $N(\omega) d\omega \propto Z^2 \frac{d\omega}{\omega}$

$$\frac{d\sigma}{dk} \propto Z_1^4 \cdot Z^2 \cdot \frac{1}{m^2} \cdot \frac{1}{k}$$

Z_1^4 → schwere Absorber effektiver
 $\frac{1}{m^2}$ → μ, p stark unterdrückt
 $m_p = 200 \cdot m_e$
 $\frac{1}{k}$ → $1/E_\gamma$ - Spektrum

- Integration über $k \Rightarrow \frac{dE}{dx} |_{\text{rad}} = - \frac{1}{X_0} \quad E = E_0 \cdot e^{-\frac{x}{X_0}}$

$X_0 =$ Strahlungslänge

Wechselwirkung von Photonen

Photoeffekt	alles / nichts	überwiegt bei kleinen Energien
Comptoneffekt	kontinuierlich	fällt mit E
Paarbildung	alles / nichts	erst ab $E_\gamma > 2m_0c^2$ möglich

Photoeffekt und Paarbildung absorbieren das Photon,
es „ist danach weg“

→ „Reichweite“ für Photonen falsches Konzept

Intensität eines Photonstrahls nimmt exponentiell ab

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x} = I_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

$$\lambda = \frac{1}{\mu} = (\text{Abschwächungskoeffizient})^{-1} = \text{mittlere freie Weglänge}$$

$$\mu_{\text{total}} = \mu_{\text{ph}} + \mu_{\text{c}} + \mu_{\text{paar}}$$

- Photoeffekt

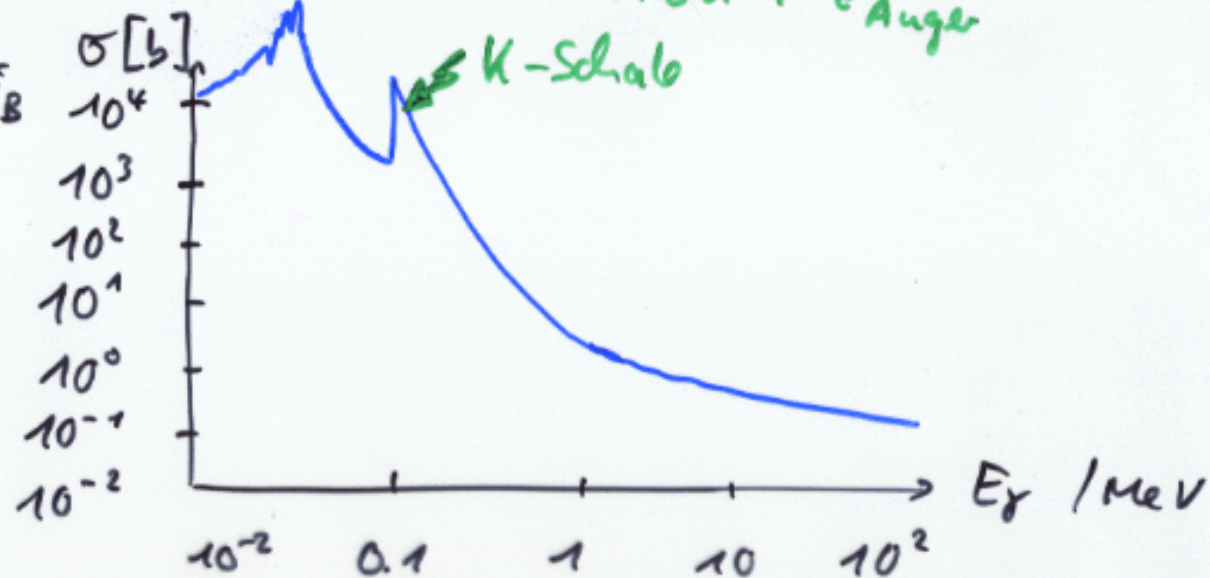
Absorption eines Photons durch ein im Atom gebundenes Elektron (Bindungsenergie E_B)

nimmt Impuls auf



Atom + γ durch Rekombination
Atom + e^- Auger

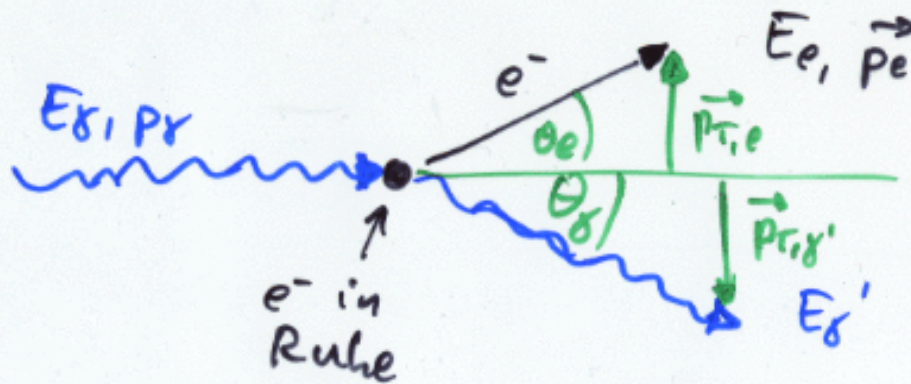
$$E_e = h \cdot \nu - E_B$$



Q.M. Berechnung kompliziert, wenn volle Wellenfunktion des Elektrons berücksichtigt werden soll.

- Compton-Streuung

γ -Streuung an einem „freien“ Elektron (E_0 vernachlässigbar)



elastische Streuung

$$p_\gamma' = \frac{E_\gamma'}{c} = \frac{h\nu'}{c}$$

Impulserhaltung:

longitudinal:

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos \theta_\gamma + p_e \cos \theta_e$$

transversal:

$$0 = \frac{h\nu}{c} \sin \theta_\gamma - p_e \sin \theta_e$$

Energieerhaltung: $(m_0 c^2) h\nu = h\nu' + E_e$

$$h\nu' = E_\gamma' = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta_\gamma)}$$

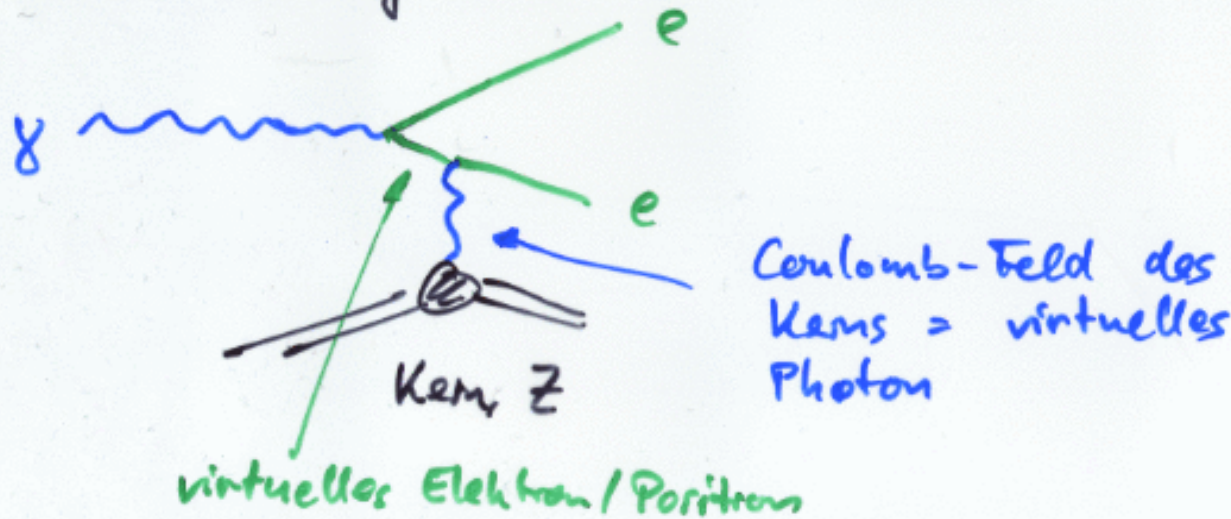
Energieverlust des ~~Elektron~~ Photons $\hat{=}$ Wellenlängenverschiebung

$$\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta_\gamma)$$

mit $\lambda_c = \frac{hc}{m_0 c^2} =$ Compton-Wellenlänge

- Paarbildung

= Absorption eines Photons im Coulombfeld von Kernen (oder)
und Bildung eines e^+e^- -Paares



übernimmt
Rückstoß - p, E

Schwellenverhalten:

$$E_\gamma \geq 2 \cdot m_e \cdot c^2 + 2 \cdot \frac{m_e^2}{m} c^2$$

Ruheenergie von Elektron + Positron

Energieabhängigkeit:

$$\sigma_p \propto Z^2 \ln E_\gamma \quad \text{für } 5m_e c^2 < E_\gamma < 50m_e c^2$$

$$\propto Z^2 \quad \text{für } E_\gamma > 1000m_e c^2$$

Rückstoß

$m_k \gg m_e$

$E_\gamma > 2m_e c^2$

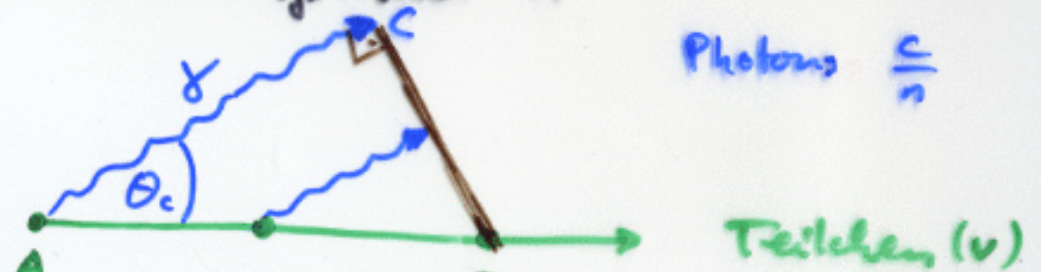
Kern- oder Elektron-Masse

$E_\gamma > 4m_e c^2$

- Cherenkov - Strahlung

= Lichtemission von Teilchen bei Bewegungen mit $v > \frac{c}{n}$ in Medium mit Brechungsindex n

Geometrische Konstruktion:



Teilchen: $\overline{AB} = \beta c t$
 Photon: $\overline{AC} = \left(\frac{c}{n}\right) \cdot t$ } ebenso für $A'C'$, $A'B$ etc für alle t

⇒ unter θ_c wird eine e.m. Schockwelle emittiert

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n \cdot \beta}$$

- Schwellenverhalten: Emission nur für $\beta > \frac{1}{n}$

Schwellen - Cherenkov - Detektoren zur

- Ring Imaging Cherenkov RICH: Teilchenidentifizierung
 z.B. DELPHI-Exp. am LEP:

misst Öffnungswinkel aus ≈ 10 abgestrahlten Photonen um Spur