

Wiederholung

- Energieverlust geladener (ionisierender) Teilchen in Materie.

Bethe-Bloch-Beziehung

$$\frac{dE}{dx} = De \left(\frac{Z}{\beta} \right)_{\text{Proj.}}^2 n_e \left\{ \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 \right\}$$

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

$$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} \hat{=} \text{klass. } e^- \text{-Radius}$$

$$n_e = Z_e \frac{N_A \rho}{A} \hat{=} \# e^- / \text{Vol.}$$

Merke

- Energie wird übertragen auf Hüllenelektronen
- E-Verlust prop. Z^2/v^2 (Projektil)
- $E \cdot \frac{dE}{dx}$ prop. $m \cdot Z^2$
(oder $dE/dx \approx \frac{1}{E} m Z^2$)

Teilchen-
identifizierung

Stopping power

$$S := \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \quad [\text{MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)]$$

Reichweite

$$R := - \int_E^0 \frac{1}{(dE/dx)} dE$$

Beispiel:

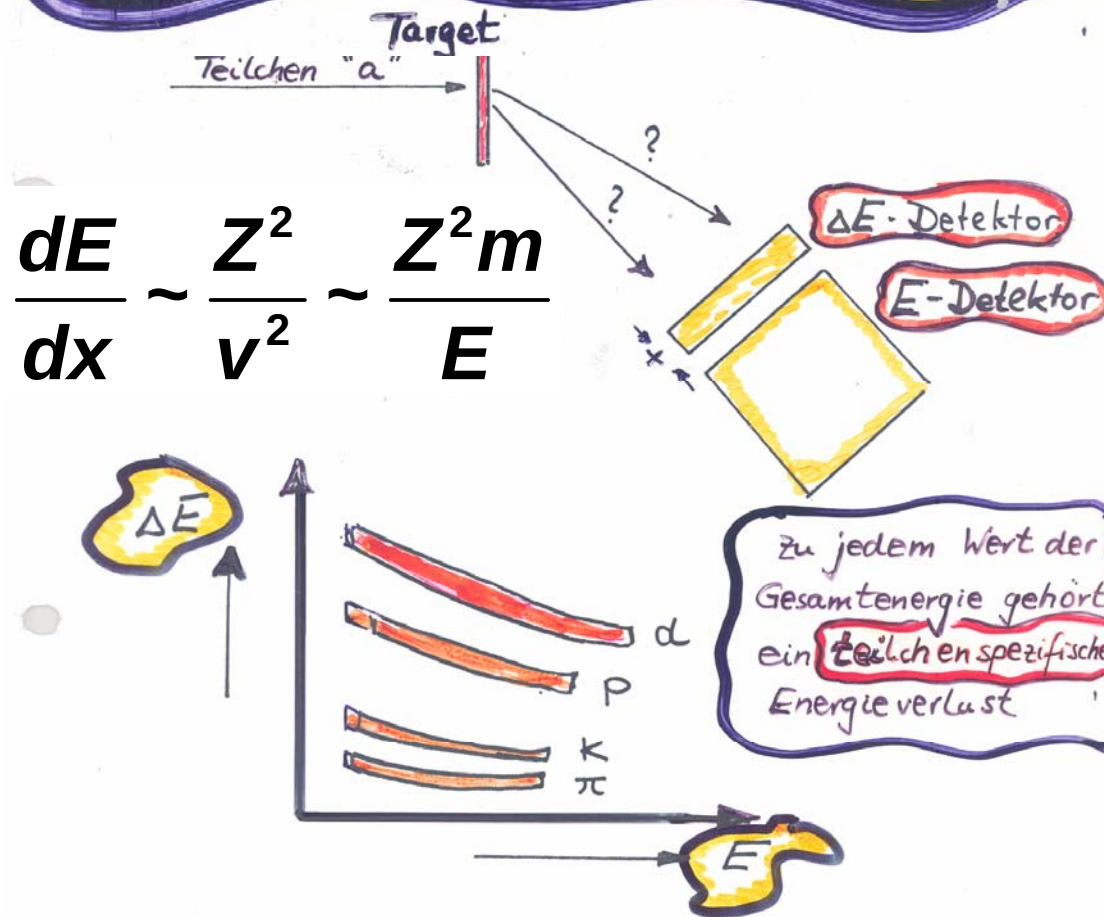
$$200 \text{ MeV } \alpha = 50 \text{ MeV/A} ; z^2 = 4$$

$$600 \text{ MeV } {}^{12}\text{C} = 50 \text{ MeV/A} ; z^2 = 36$$

$$> \frac{dE}{dx} (600 \text{ MeV } {}^{12}\text{C}) \stackrel{!}{=} 9 \cdot \frac{dE}{dx} (200 \text{ MeV } \alpha)$$

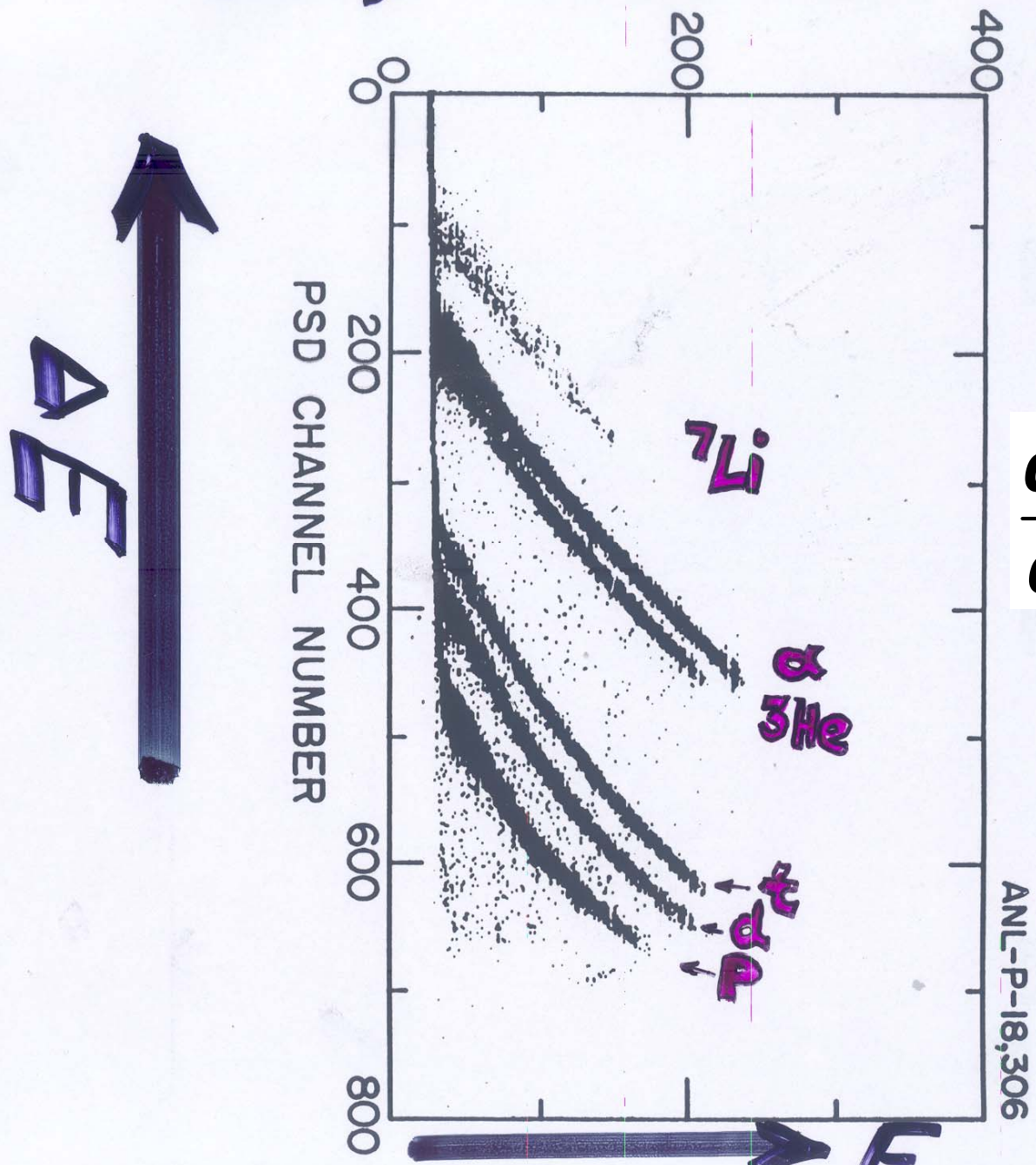
$$909.97 \text{ MeV/cm} = 9.0016 \cdot 101.09 \text{ MeV/cm}$$

Teilchen identifizierung über Messung des Energieverlusts



! teilchen spezifischer Energieverlust !

$$\frac{dE}{dx} \sim \frac{Z^2}{v^2} \sim \frac{Z^2 m}{E}$$



Energieverlust von Elektronen

$$\Delta E = \Delta E_{\text{kollision}} + \Delta E_{\text{Bremsstrahlung}}$$

Bethe-Bloch

s.a. Jackson: Class. E-Dyn

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{B.S.}} / \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{koll}} \approx \frac{Z_2 E}{1600 m c^2}$$

Kritische Energie : $\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{B.S.}} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{koll.}}$

$$E_{\text{krit}} = \frac{1600}{Z_2} m c^2$$

Projektil

Material

● e^- in Pb : $E_{\text{krit}} \approx 10 \text{ MeV}$

● μ in Pb : $E_{\text{krit}} \approx 2.05 \text{ GeV}$

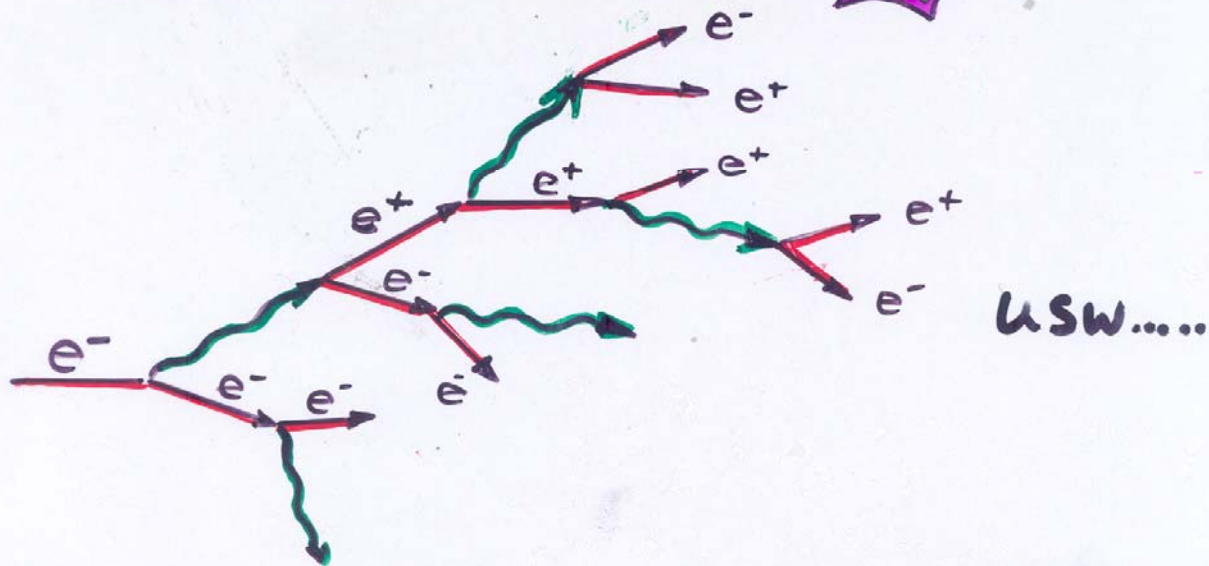
● p in Pb : $E_{\text{krit}} \approx 18 \text{ GeV}$

$\frac{dE}{dx}$ (2 GeV μ in Pb) $\sim 1.6 \text{ MeV/cm}$

$\frac{dE}{dx}$ (18 GeV p in Pb) $\sim 1.5 \text{ MeV/cm}$

Merke auch : $\frac{d\sigma}{dE_{\text{hv}}} \sim \frac{Z^2}{E_{\text{hv}}} \text{ für Elektronen}$
(E_{hv} genügend groß)

damit ergibt sich bei hohen
Energien folgende Situation
bei der **Bremsstrahlung**

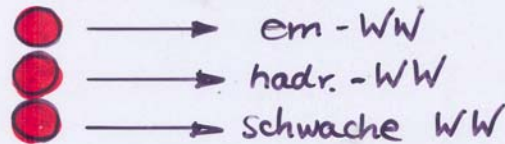


Ausbildung eines
e-m Schauers !

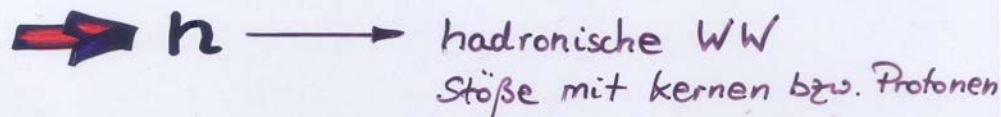
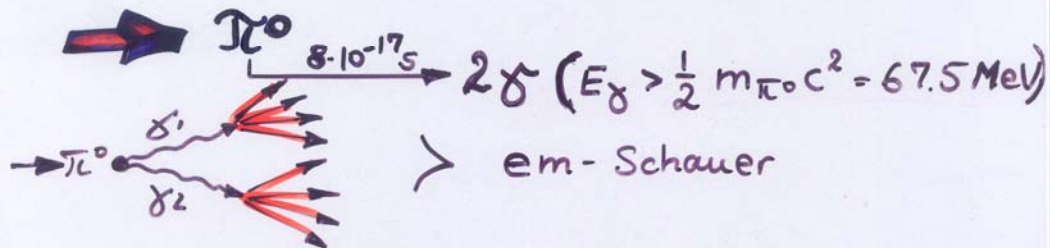
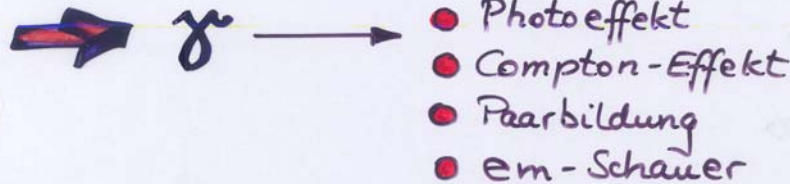
Nachweis neutraler Teilchen

Prinzip: WW im Detektor muß ein geladenes Teilchen produzieren
(am Ende der WW-Kette steht ein elektrischer Impuls.)

Primärer WW-Prozeß

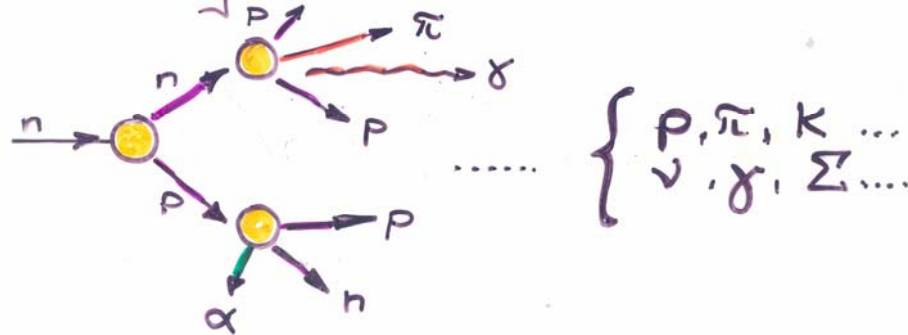


Beispiel:



Nachweis extrem hochenergetischer Neutronen
($E \gtrsim 5-10 \text{ GeV}$)

Ausbildung eines **hadronischen** Schauers



- die ionisierenden sekundären Teilchen erzeugen das elektrische Signal
- die Dimensionen des Detektors müssen der zu erwartenden Schauerausdehnung angepasst werden (große Detektoren)
- die schnelle **transversale** Ausdehnung des Energieflusses unterscheidet hadronische von em. Schauern
- hadronische Schauer haben größere Eindringtiefen

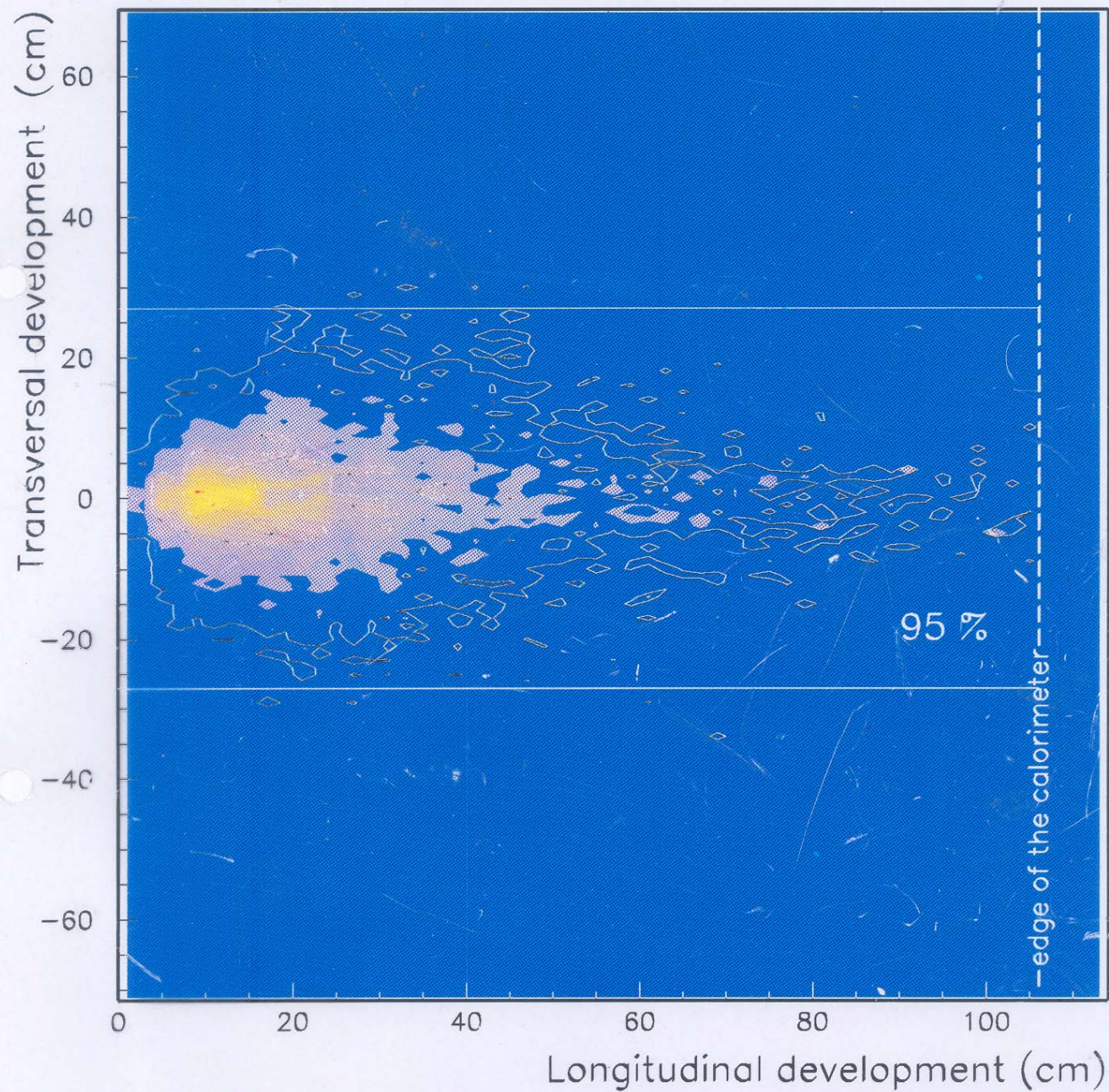
ABER

n^- , p^- , oder π^- -induzierte Schauer lassen sich nicht unterscheiden.

➤ Teilchenidentifizierung muß vorher geschehen

Detektortechnologie immer noch entwickelbar

10 GeV π shower



Ansprechwahrscheinlichkeit, Effizienz

$$dI = -I_0 \cdot \mu \cdot dx$$
$$= -I_0 \cdot \left(\frac{\rho N_L}{A} \sigma_{\text{tot}} \right) dx$$

definiere: "mittlere freie Weglänge" λ_{mfp}

$$\lambda_{\text{mfp}} = \frac{A}{\rho N_L \sigma_{\text{tot}}}$$

Beispiel:

Wasser: $A = 18$ (2/18 H + 16/18 O)

$$\rho = 1$$

$$\sigma_{\text{tot}} = 400 \text{ mb} \quad 100 \text{ MeV } n$$

$$\lambda_{\text{mfp}} \approx 75 \text{ cm}$$

oder:

$$10 \text{ cm Wasser: } I = I_0 e^{-10/75}$$
$$= 0.88 I_0$$

$$\epsilon = (1 - 0.88) \approx 12\%$$

Wieviel Eisen ist erforderlich um einen
20 GeV π -Strahl um 90% abzuschwächen

zunächst elektronische Reichweite

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \sim 2 \frac{\text{MeV}}{(\text{g/cm}^2)} \quad \leftarrow \text{min. ion.}$$

$$\rho_{\text{Eisen}} \sim 7.9 \text{ g/cm}^3$$

$$> \frac{dE}{dx} = 16 \text{ MeV/cm}$$

$$> \text{bei } 20 \text{ GeV} : \frac{20 \cdot 10^3}{16} \text{ cm} \sim 12.5 \text{ m}$$

Aber: hadr. WW

$$20 \text{ GeV } \pi : \rho \lambda_{\text{mfp}} \sim 132 \text{ g/cm}^2$$

nachge-
guckt

$$I = I_0 e^{-x/\lambda_{\text{mfp}}}$$

$$\ln(I/I_0) = -x/\lambda_{\text{mfp}}$$

$$\begin{aligned} > x &= -\ln I/I_0 \lambda_{\text{mfp}} \\ &= -\ln(0.1) \cdot 16.7 \\ &= 2.3 \cdot 16.7 \approx 39 \text{ cm} \end{aligned}$$



Vorsicht: nicht alle sekundären
Teilchen werden gestoppt.

Aufschlüsselung der einzelnen
Beiträge beim Nachweis eines
10 GeV p (n) in einem

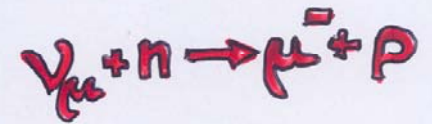
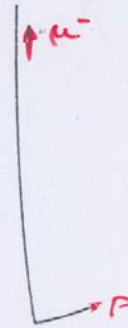
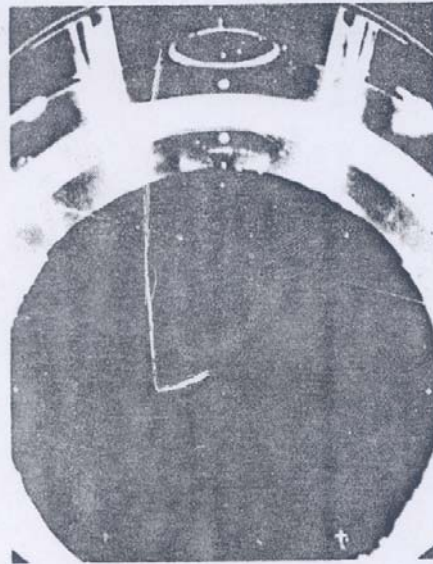
Eisen / L(Ar) "kalorimeter"

Table 11.2. Average fractional energy deposition for a 10-GeV proton in an iron/liquid argon calorimeter

Process	Percent of total
Secondary proton ionization	31.6
Electromagnetic cascade (π^0)	21.0
Nuclear binding energy plus neutrino energy	20.6
Secondary $\pi^\pm$ ionization	8.2
Neutrons with $E > 10$ MeV	4.9
Neutrons with $E < 10$ MeV	3.9
Residual nuclear excitation energy	3.7
$Z > 1$ ionization	2.4
Primary proton ionization	2.3
Other	1.4

aus einer **Monte-Carlo** - Rechnung

**CERN
Big-European
Bubble Chamber
(BEBC)
1963**

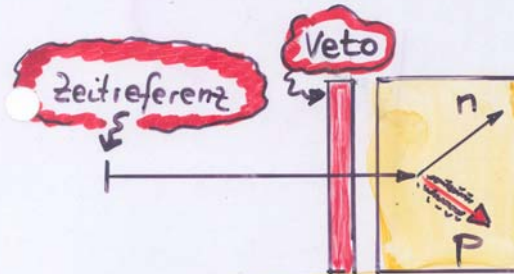


Nachweis von Neutronen im 10-1000 MeV-Bereich

Prinzip

elastische Streuung an **protonenhaltigen** Substanzen

(Plastiksziintillatoren → Emmission von $h\nu$)
szint. Strahlung



Detektorparameter

Zeitauflösung
Ansprechwahrsch

← S →
Flugzeit (t_{of})

Energiebestimmung über
Flugzeit

$$E = mc^2 \gamma$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow t_{of} = \frac{S}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

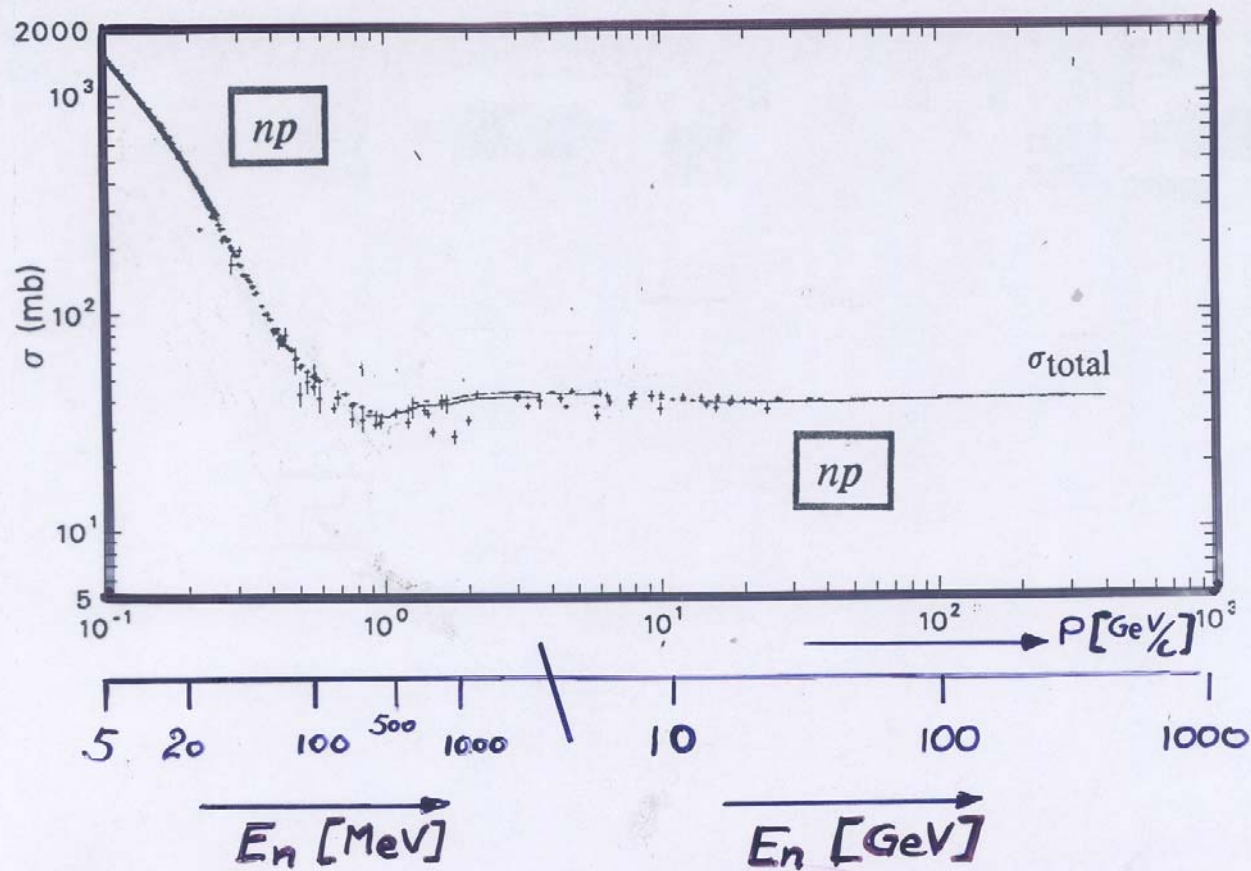
$$E = E_{kin} + mc^2$$

$$c = 0.3 \text{ m/nsec}$$

$$m_n c^2 = 939.6 \text{ MeV}$$

Beispiel: **S=10m**

$E_{kin} [\text{MeV}]$	$t_{of} [\text{nsec}]$	$\Delta E (\Delta t = 0.5 \text{ nsec})$
10	230	~ 20 keV
100	77.8	~ 300 keV
200	58.8	~ 3 MeV
500	44.	~ 10 MeV
1000	38.1	~ 50 MeV



elementarer totaler Neutron-
 Proton Wirkungsquerschnitt σ_{tot}
 $\sigma(E_n=0) = 20 \text{ barn}$

Wirkung von Strahlung auf biologische Substanzen

1

γ -Strahlung

Absorption durch

- Photo-Effekt
- Compton-Effekt
- Paarbildung

Folge

- Erzeugung energetischer Elektronen am Ort der Absorption
- weitere Ionisierung der Umgebung & Dissoziation der Molekülstruktur
- Eindringtiefe **groß!!** stark E-abhängig

2

β -Strahlung

Absorption durch

- Kollision mit Hüllenelektronen (Bethe-Bloch)
- Bremsstrahlung

Folge

- Ionisation & Dissoziation der Umgebung
- Eindringtiefe **kleiner** als bei γ -Strahlung

3

α -Strahlung

Absorption durch

- Kollision mit Hüllenelektronen (Bethe-Bloch)

Folge

- starke Ionisation der Umgebung & Dissoziation
- Eindringtiefe **gering** $> \frac{dE}{dx}$ **groß**

4

Schwerionenstrahlen ($A > 4$)

Absorption

wie bei α -Strahlung
aber

- Eindringtiefe **extrem gering**
 $(\frac{dE}{dx} \sim \frac{Z^2}{v^2}) > \text{Schädigung maximal}$

5

Neutronen

Absorption durch

schnell

- elastische Stöße mit Protonen
- durch sukzessive Stöße schnelle Thermalisierung

langsam

- anschließender Einfang da $\sigma(n, \gamma)$ groß für E_n klein

Folge:

- Erzeugung energetischer Protonen oder anderer Rückstoßteilchen
Zerstörung des Moleküls
- nachfolgende starke Ionisation & Dissoziation der Umgebungsmoleküle
- n-Einfang und Erzeugung von γ -Strahlung ($\langle N_\gamma \rangle \sim 3-5$)
 $\Sigma E_\gamma = B_n \sim 7-8 \text{ MeV}$
- Eindringtiefe **groß**

Strahlungsdosen

- **Ionendosis** : Röntgen (R)
Strahlungsmenge, die in **1 ml** Luft
1 esE ($= 3 \cdot 10^{-9} \text{ C}$) Ionen erzeugt
oder
 $1 \text{ R} = 2.6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{C}}{\text{kg}} \text{ (Luft)}$ Gray

- **Energiedosis** :
 $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/kg} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{g}} = 10^{-2} \text{ Gy}$
die durch die Strahlung pro Substanzmenge
abgegebene Energie

● Röntgen äquivalent man

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv} \quad (\text{Sievert})$$

(1 mrem = 10 μ Sv)

Äquivalentdosis zu **1 rad** Röntgenstr.
(γ -Strahlung) von 200 keV

für alle anderen Strahlen muß
ein zusätzlicher Bewertungs-
faktor **q** eingeführt werden

biologische Bewertungsfaktoren

● β -Strahlung	:	q $\approx$ 1.5
● α -Strahlung	:	q $\approx$ 20
● thermische n	:	q $\approx$ 2
● schnelle n	:	q $\approx$ 10

zur Orientierung

bei Ganzkörperexposition

natürliche Strahlenbelastung : $\sim 100 \text{ mrem/y}$ = 1 mSv / y

Strahlenkrankheit : $> 20 \text{ rem}$ = 0.2 Sv

lethale Dosis : $\sim 500 \text{ rem}$ = 5 Sv

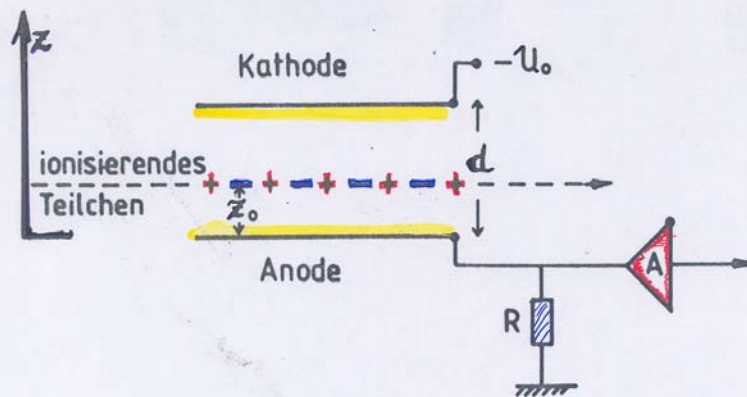
Detektoren - Grundprinzipien

Beispiele:

- ● Ionisationskammer
 - ● Proportionalzählrohr
 - ● Geiger-Müller zähler
 - Vieldraht-Proportionalkammer
- } Gas-Zähler
- Flüssigkeits-Ionisationsdetektor
 - Emulsionen
- ● Halbleiterzähler
(Si-, Ge-Dioden, μ -Strips, CCD's)
- ● Szintillationszähler
(fest, flüssig, Kapillaren)
- Čerenkov-Zähler
- Transition-Radiation-Detektoren (TRD)



Ionisationskammer



primärer Prozeß: Ionisation des "Zählgases"
(z.B. Argon)
Trennung der positiven & negativen Ladung über E -Feld.

Verschiebung der Ladung erzeugt elektr. Impuls

$$|\vec{E}| = E_z = U_0/d$$

Energie: $\frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} C U_0^2 - Nq \int_{z_0}^z E_z dz$

$$U^2 - U_0^2 \approx 2U_0 \Delta U$$

$W = - \int_A^B q \vec{E} \cdot d\vec{r}$

$$C \cdot U_0 \Delta U = - \frac{Nq}{d} U_0 (z - z_0)$$

$$\Delta U = \frac{1}{C \cdot d} Nq (z - z_0)$$

