

# A: Detektoren für Teilchenstrahlung

(Prof. Dr. O. Biebel)

geplante Themen der Vorlesung:

## 1. Einleitung, Motivation

- (a) Quellen: Radioaktivität, Beschleuniger, kosmische (solare, galaktische, extragalaktische) Quellen von Teilchenstrahlung
- (b) Aufgaben: Nachweis von Strahlung, Dosismessung, Orts-, Zeit-, Energie- und Impulsmessung, Teilchenidentifikation
- (c) Methoden: Teilchenphysik, Elektrodynamik, Optik, Atomphysik, Festkörper- und Halbleiterphysik, Transporttheorie, analoge und digitale Elektronik, anorganische und organische Chemie
- (d) Einsatzgebiete: Medizin, Werkstoffkunde, Geophysik, Teilchenphysik, ...

## 2. Wechselwirkung zwischen Teilchen und Materie:

- (a) Elementarteilchen, Wechselwirkungen & typ. Wechselwirkungsstärken
- (b) (schwere) geladene Teilchen: Energieverlust durch inelast. Streuung, Ionisation, Bethe-Bloch-Formel, Čerenkov-Effekt, Übergangsstrahlung, Landau-Verteilung,  $\delta$ -Elektronen
- (c) Elektronen, Positronen: Bremsstrahlung, Strahlungslänge
- (d) Photonen: Photoeffekt, Compton-Effekt, Paarbildung, Strahlungslänge
- (e) Neutronen: Kerneinfang, Kernreaktionen, elastische & inelastische Streuung, Moderation
- (f) Neutrinos: elastische Streuung, NC- & CC-Reaktionen
- (g) Vielfachstreuung geladener Teilchen: Coulomb-Streuung

## 3. Prinzipien von gasgefüllten Teilchendetektoren:

- (a) Ionisation: Mechanismen, mittlere Anzahl erzeugter Elektron-Ion-Paare
- (b) Transport freier Elektronen&Ionen: Drift und Beweglichkeit, Diffusion (feldfrei), Rekombination, Elektronanlagerung
- (c) Elektronendrift und -diffusion in Feldern: elektr. Felder, elektr.+magn. Feldern,
- (d) Ionisationsverstärkung im Gas

## 4. Prinzipien von Flüssigkeits-Teilchendetektoren

- (a) Ionisation und Transport

# Prinzipien von Flüssigkeits-Teilchendetektoren

Gegenüber gasgefüllten Detektoren zeichnen sich Flüssigkeits-Teilchendetektoren durch die höhere Dichte des Mediums aus. Daraus folgen einige Konsequenzen für die Eigenschaften und das Verhalten von freien Ladungsträgern in Flüssigkeiten:

- **Absorptionslänge / Strahlungslänge**  $\lambda_0 \sim 1/\rho$   
⇒ stärkere Absorption der Teilchenstrahlung
- **Energienstreuung (energy straggling)**  $\chi \sim \xi \sqrt{\Delta E} \sim \rho$   
⇒ große  $\chi$  ( $> 10$ ) bedeutet gaußsche Verteilung des Energieverlustes statt Landau-Verteilung  
⇒ keine  $\delta$ -Elektronen
- **Diffusionskoeffizient**  $D \sim \lambda_e \sim 1/\rho \sim 1/\xi$   
⇒ geringere Diffusionseffekte
- **Driftgeschwindigkeit**  $v_D \sim \lambda_e \sim 1/\rho \sim 1/\xi$   
⇒ geringere Driftgeschwindigkeit bei gleichem  $\vec{E}$ -Feld  
⇒ geringere Beweglichkeit von Elektronen (und insbes. von pos. Ionen)  
⇒ geringere Lorentzwinkel  $\alpha_L$  ( $\tan \alpha_L \sim v_D/E$ )

## Flüssigkeits-Teildendektoren

Problematisch ist allerdings, dass Ionisations- und Transportphänomene in Flüssigkeiten weniger gut verstanden sind als in Gasen. Ein zentrales technisches Problem stellen Verunreinigungen der Flüssigkeiten durch elektronegative Substanzen dar. Durch die erheblich kürzere freie Weglänge  $\lambda_e$  ist die Rate von Stößen sehr hoch und damit auch die Wahrscheinlichkeit einer Anlagerung selbst bei sehr geringer Konzentration  $f$  der elektroneg. Substanz. Die freie Weglänge  $\lambda_a$  bis zur Anlagerung ist:

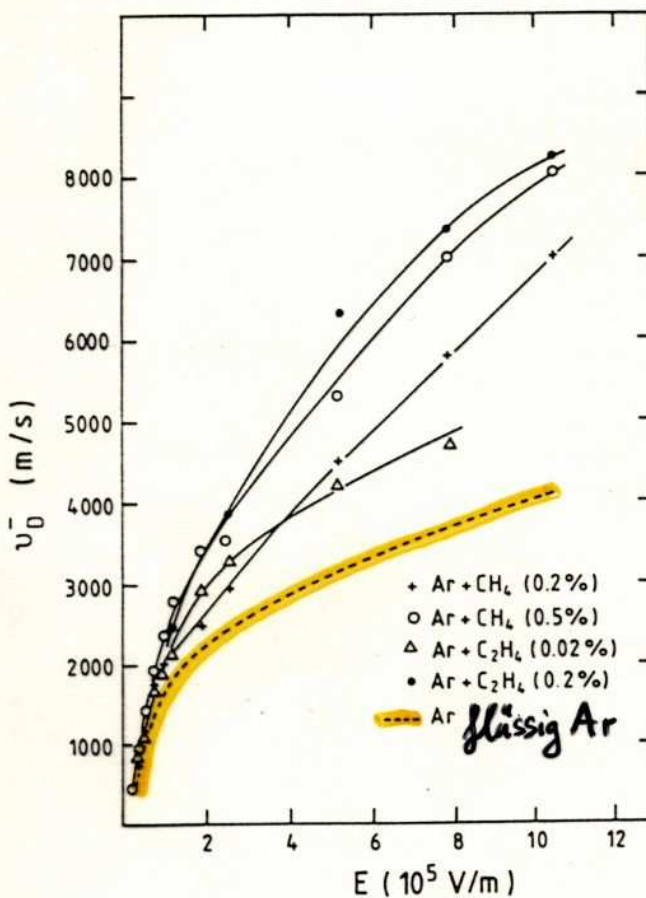
$$\lambda_a \sim \frac{1}{f} \cdot \lambda_e \sim \frac{1}{f \cdot s}$$

Daher ist die Reinigung der Flüssigkeiten notwendig, die jedoch nicht so zuverlässig möglich ist wie bei Gasen (z.B. Molekularsiebe, Oxidationselektroden wie:  $2\text{Cu}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{CuO}$ ). Daher wurden bisher nur Flüssigedelgas-Dektoren und einige Kohlenwasserstoff-Dektoren realisiert, bei denen die Reinigung technisch einfach ist. Zudem ist es schwierig, Gasverstärkung zu erreichen, wofür einerseits sehr große Feldstärken (da  $q \cdot |\vec{E}| \cdot \lambda_e \geq I$  erreicht werden muss, folgt  $|\vec{E}| \sim s$ , weil  $\lambda_e \sim 1/s$ ) und andererseits Verunreinigungen unterhalb des ppm-Niveaus erforderlich waren (da  $\lambda_a \sim 1/f \cdot s$ )

Physikalische Eigenschaften von flüssigen Edelgasen

$T_{sm}$ : Schmelztemperatur,  $T_s$ : Siedetemperatur,  $\mu_e$ : Elektronenbeweglichkeit

Flüssigkeit	LAr	LKr	LXe
Ordnungszahl	18	36	54
Massenzahl	40	84	131
$T_{sm}(K)$	83.6	115.8	161.2
$T_s(K)$	87.1	119.6	164.9
Dichte ( $g/cm^3$ )	1.4	2.45	3.06
Strahlungslänge $X_0(cm)$	13.5	4.60	2.77
Molière-Radius <sup>**</sup> (cm)	10.0	6.6	5.7
$W_i$ (eV)	23.6	20.5	15.6
$\mu_e$ ( $m^2/Vs$ ) bei $E = 10^4$ V/m	0.047	0.18	0.22
bei $E = 10^6$ V/m	0.004 <sup>*</sup>	0.005	0.0025
Fano-Faktor F	0.107	0.057	0.041



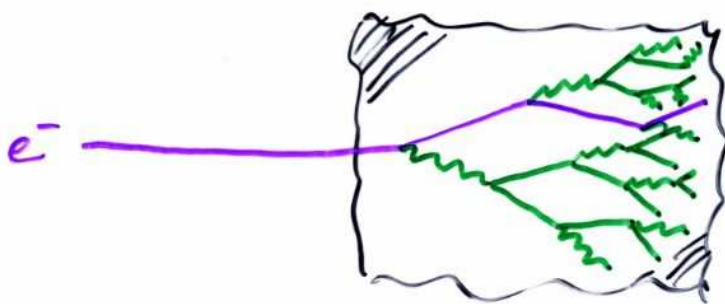
\* NB: Die Ionenbeweglichkeit in LAr ist sehr klein: Bei  $E = 2.4 - 18.7$  MV/m ist  $\mu_I = 2.8 \cdot 10^{-7} m^2/Vs$   
Für gasförmiges Argon ist  $\mu_I^{gas} \approx 1.7 \cdot 10^{-4} m^2/Vs$

\*\* Der Molière-Radius beschreibt die transversale Ausdehnung eines elektromagnetischen Teilchenschauers ( $R_M \approx X_0/E_c$ , kritische Energie  $E_c$ )

# Flüssigkeits-Detektoren

Da Gasverstärkung schwierig zu erreichen ist, werden Flüssigkeits-Detektoren heute meist als Kalorimeter zur Energiemessung eingesetzt (folgt später). Hier ist eine Vervielfachung der zu messenden Ionisationsladung durch den Wechselwirkungsprozess (Teilchenschauer) des Teilchens mit der Absorberflüssigkeit für das Entstehen einer großen Ladungsmenge verantwortlich.

Beispiel (im Vorgriff): elektromagnetische Kaskade durch



wiederholte Bremsstrahlung  
und Paerbildung bis zur  
vollständigen Energieabsorption