

Konzepte für Experimente an zukünftigen Hadroncollidern I

PD Dr. Oliver Kortner

13/20.12.2021

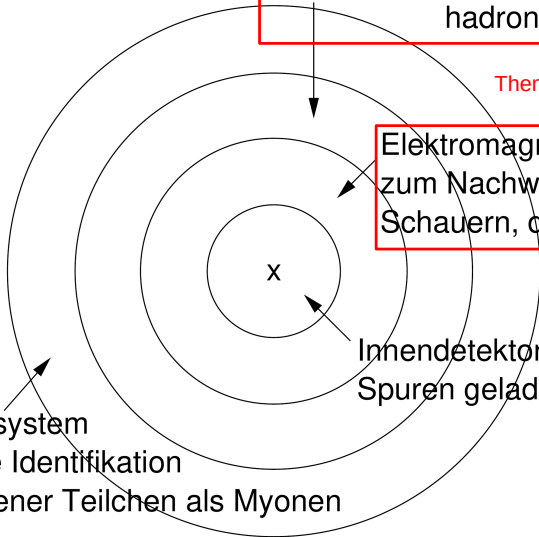
Hadronkalorimeter zum Nachweis
hadronischer Schauer

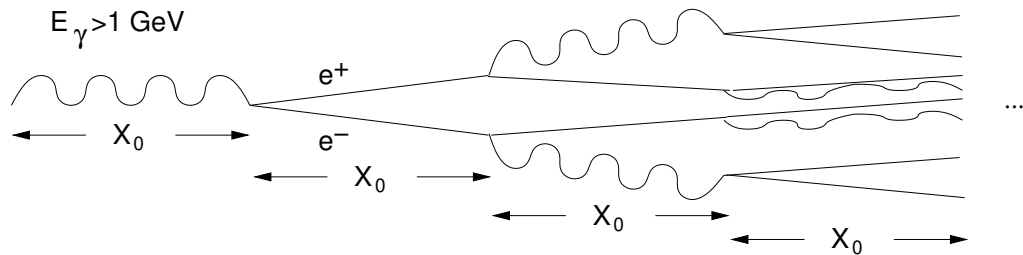
Thema dieser und der nächsten Vorlesung

Elektromagnetisches Kalorimeter
zum Nachweis von elektromagnetischen
Schauern, die von e^\pm und γ stammen

Innendetektor zur Messung der
Spuren geladener Teilchen ✓

Myonsystem
für die Identifikation
geladener Teilchen als Myonen



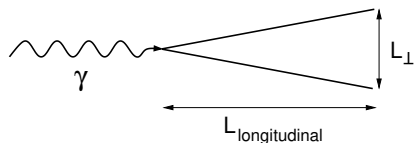


- Nach der Strecke $n \cdot X_0$: 2^n Teilchen mit Energie $E_n \approx \frac{E_\gamma}{2^n}$.
- Ende der Kaskade (des Schauers), wenn $E_n = E_k$: $n = \frac{\ln \frac{E_\gamma}{E_k}}{\ln 2}$.
- Länge des Schauers: $n \cdot X_0 = X_0 \cdot \frac{\ln \frac{E_\gamma}{E_k}}{\ln 2}$.

Beispiel

- $E_\gamma = 100 \text{ GeV}$.
 - Material: Eisen, d.h. $X_0 \approx 2 \text{ cm}$, $E_k \approx 20 \text{ MeV}$.
- $\Rightarrow n = 12$, d.h. ~ 4000 Teilchen.
Schauerlänge: $L_{longitudinal} \approx 24 \text{ cm}$.

Die volle Behandlung mit massiven Elektronen und Positronen ergibt folgendes Ergebnis.

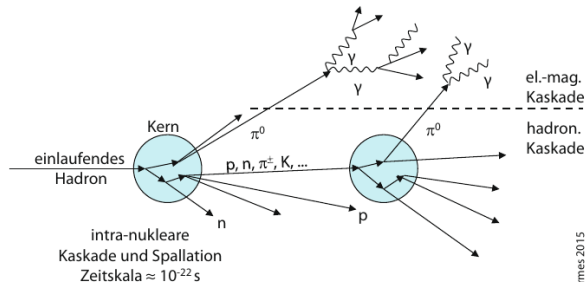


$$L_{\perp} \approx 4R_M = 4X_0 \frac{21,2 \text{ MeV}}{E_k}$$

R_M : Molièreradius

- Die transversale Ausdehnung des Schauers L_{\perp} ist unabhängig von $E_{\gamma/e^{\pm}}$.
- $L_{T,Fe} = 4 \cdot 1,8 \text{ cm} \cdot \frac{21,2 \text{ MeV}}{30,2 \text{ MeV}} \approx 5 \text{ cm}$.
- Für elektromagnetische ist also eine kleine, von $E_{\gamma,e^{\pm}}$ unabhängige transversale Ausdehnung charakteristisch.
- Die Anzahl der erzeugten Schauerteilchen ist das Maß für $E_{\gamma,e^{\pm}}$ und ist proportional zu $E_{\gamma,e^{\pm}}$.

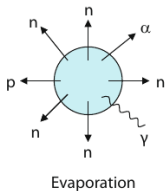
Hochenergie-Kaskade



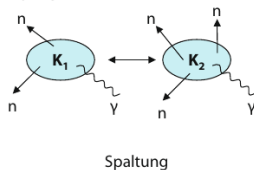
Kolancski, Wermes 2015

Deaktivierung des Kerns

Zeitskala $\geq 10^{-18}$ s



oder



Qualitativ ähnliches Verhalten wie bei elektromagnetischen Schauern:

- Schauerlänge proportional zu $\lambda_A \approx 35 \text{ g cm}^{-2} \frac{A^{1/3}}{\rho} \gg X_0$.
- Transversale Ausdehnung unabhängig von der Energie des primären Hadrons: λ_A .
- Allerdings viel stärkere Schwankungen der Schauergröße als bei elektromagnetischen Schauern.

Beiträge zur in einem Materialblock eingebrachten Energie E_{dep}

$$E_{dep} = (f_{em} + \underbrace{f_{ion} + f_n + f_\gamma + f_B}_{=: f_h}) E_{dep}$$

=1 per definitionem

- f_{em} . Anteil der von den Photonen aus den π^0 -Zerfällen deponierten Energie. Da in der hadronischen Kaskade immer wieder neutrale Pionen entstehen, nimmt f_{em} mit der Teilchenmultiplizität in der Kaskade, also mit der Energie des einlaufenden Hadrons zu.
- f_{ion} . Anteil der von den geladenen Teilchen im Schauer durch Ionisierung deponierten Energie.
- f_n . Anteil der von Neutronen durch elastische Stöße oder Kernreaktionen deponierten Energie.
- f_γ . Anteil der von Photonen deponierten Energie, die in Kernreaktionen entstanden sind. $E_\gamma \sim \text{keV} \dots \text{MeV} \Rightarrow$ Energieübertrag durch Comptonstreuung oder Photoeffekt. Dieser Beitrag kann mit großer Verzögerung $\gtrsim \mu\text{s}$ auftreten.
- f_B . Die Bindungsenergie, die zum Aufbrechen eines Kerns benötigt wird, wird nicht gemessen und trägt nicht zum Kalorimetersignal bei. Ähnlich ist dies bei Neutrinos, die in f_B üblicherweise berücksichtigt werden.

Beiträge zur in einem Materialblock eingebrachten Energie E_{dep}

$$E_{dep} = (f_{em} + \underbrace{f_{ion} + f_n + f_\gamma + f_B}_{=: f_h}) E_{dep}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{=1 \text{ per definitionem}}$

- f_{em} schwankt in einem hadronischen Schauer sehr stark zwischen 0 und 1, wenn in den ersten Wechselwirkungen gar keine oder nur neutrale Pionen erzeugt werden.
- Die hadronische Komponente ist in ihrer Zusammensetzung weitgehend unabhängig von der Art des einlaufenden Teilchens und deren Energie.

Begriffseinführung

Passives Medium: Material, in dem sich der Schauer entwickelt.

Aktives Medium: Material, in dem elektronisch registrierbare Signale der Schauerteilchen entstehen.

Zwei Kalorimetertypen

- Homogene Kalorimeter, bei denen das aktive Material auch die Rolle des passiven Materials erfüllt.
- Inhomogene Kalorimeter, auch Samplingkalorimeter genannt, bei denen sich aktives und passives Material abwechseln.

Hadronkalorimeter werden als inhomogene Kalorimeter ausgeführt, um ihre Größe zu begrenzen. Bei elektromagnetischen Kalorimetern kommen beide Typen zum Einsatz.

- Elektromagnetische Kalorimeter werden longitudinal segmentiert, um die longitudinale Form von Schauern messen zu können. Dann kann man Schauer, die von Elektronen herrühren, von Schauern unterscheiden, die von Pionen erzeugt werden und länger als Elektronenschauer sind.
- Auch bei Hadronkalorimetern ist die longitudinale Segmentierung wichtig, um aus der Form der Schauer auf die unterschiedlichen Schauerkomponenten schließen zu können.

Tailcatcher

Hierunter versteht man eine longitudinale Erweiterung eines Kalorimeters, mit der man recht grob die Schwänze der Schauer vermisst, um so die Nachweisverluste klein zu halten.

Presampler

Hierunter versteht man eine dem elektromagnetischen Kalorimeter vorgeschaltete Kalorimeterebene, die es gestattet festzustellen, ob ein von einem Photon ausgelöster Schauer bereits vor dem Kalorimeter entstanden ist.

Laterale Struktur

Lateral müssen Kalorimeter so fein segmentiert sein, dass man benachbarte Schauer voneinander trennen kann. D.h. der Molière- radius bzw. die nukleare Wechselwirkungslänge bestimmt die benötigte Segmentierung.

Energieauflösung

- Die Energiemessung in einem Kalorimeter besteht im Nachweis der Schauerteilchen. Die gemessene Energie E ist proportional zur Anzahl der nachgewiesenen Schauerteilchen N , woraus sich eine statistische Schwankung $\frac{\delta E}{E} = \frac{\delta N}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$ ergibt.
- Bei einem realen Kalorimeter kommen Beiträge von dem Detektorrauschen sowie mechanischen und elektronischen Unregelmäßigkeiten zur Energieauflösung hinzu:

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \underbrace{\frac{b}{E}}_{\text{El. Rauschen}} \oplus \underbrace{c}_{\text{Unregelmäßigkeiten}}$$

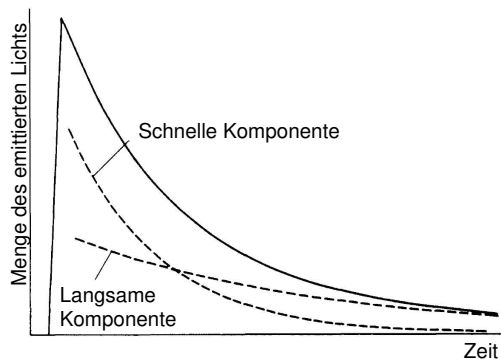
Linearität

Nicht nur $\frac{\delta E}{E}$ wichtig, sondern auch, dass das gemessene Signal linear mit E ansteigt.

- Szintillationszähler sind wichtige Detektoren für den aktiven Teil eines Kalorimeters.
- In Szintillationszählern werden Materialien eingesetzt, die einen kleinen Lichtblitz aussenden, wenn sie von Teilchenstrahlung getroffen werden.
- **Wichtige Eigenschaften des Signals eines Szintillationszählers:**
 - Oberhalb eines gewissen Mindestenergiedeposition ist die **Menge des erzeugten Szintillationslichts** in guter Näherung **proportional zum Energieniederschlag**.
 - **Schnelle Reaktionszeit**, d.h. das Lichtsignal entsteht kurz nach der Energiedeposition.

Zeitlicher Verlauf der Szintillation

- Szintillatoren sind **lumineszierende** Stoffe.
- Wenn die Lichtemission innerhalb 10 ns auftritt, spricht man von **Fluoreszenz**.
- Wenn die Lichtemission verzögert geschieht, spricht man von **Phosphoreszenz**.



- Der zeitliche Verlauf der Lichtemission kann durch die Überlagerung zweier Exponentialverteilungen angenähert werden:

$$N_{\gamma} = A \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) + B \exp\left(-\frac{t}{\tau_l}\right);$$

τ_s Zeitkonstante der schnellen Komponente.

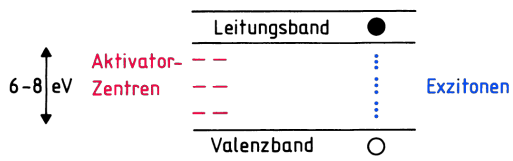
τ_l Zeitkonstante der langsamen Komponente.

Gute Szintillationszähler sollten die folgenden Eigenschaften erfüllen:

- Hohe Effizienz für die Umwandlung deponierter Energie in Szintillationslicht.
- Transparenz für das Szintillationslicht, um die Lichttransmission zu ermöglichen.
- Emission des Szintillationslichts in einem Wellenlängenbereich, für den es effiziente Lichtdetektoren gibt.
- Dominante schnelle Komponente mit kurzer Zeitkonstante τ_s .

- Anorganische Szintillatoren sind vor allem Kristalle von Alkalihaliden, denen kleine Menge sogenannter **Aktivatorzentren** beigemischt werden.
- Beispiele: NaI(Tl), CsI(Tl), $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, PbWO_4 .
- Viele anorganische Szintillatoren sind hygroskopisch, z.B. NaI, und müssen vor Feuchtigkeit geschützt werden.
- Nicht bzw. nur schwach hygroskopisch sind zum Beispiel CsI oder BGO.

Szintillationsmechanismus in anorganischen Szintillatoren

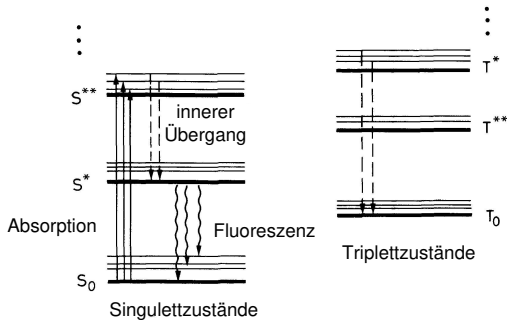


- Ionisierende Teilchenstrahlung kann Elektronen ins Leitungsband oder in Exzitonenbänder anregen.

- Licht, das beim Übergang von Elektronen aus dem Leitungs- ins Valenzband ausgesendet wird, ist nicht im sichtbaren Bereich.
- Sichtbares Licht wird emittiert bei Übergängen von Niveaus der Aktivatorzentren.
- Frei Löcher oder Löcher von Exzitonen können Aktivatoratome ionisieren. Wenn nun ein Elektron auf diese Atom trifft, kann es ein angeregtes Aktivatorniveau belegen und in den Grundzustand durch Emission sichtbaren Lichts zurückfallen.

- Organische Szintillatoren sind atomatische Kohlenwasserstoffe, die gebundene oder kondensierte Benzolringstrukturen enthalten.
- Organische Szintillatoren zeichnen sich durch kurze Zeitkonstanten im Nanosekundenbereich aus.
- Das Szintillationslicht kommt von Übergängen freier Valenzelektronen in den π -Orbitalen der Moleküle.

Szintillationsmechanismus in organischen Szintillatoren



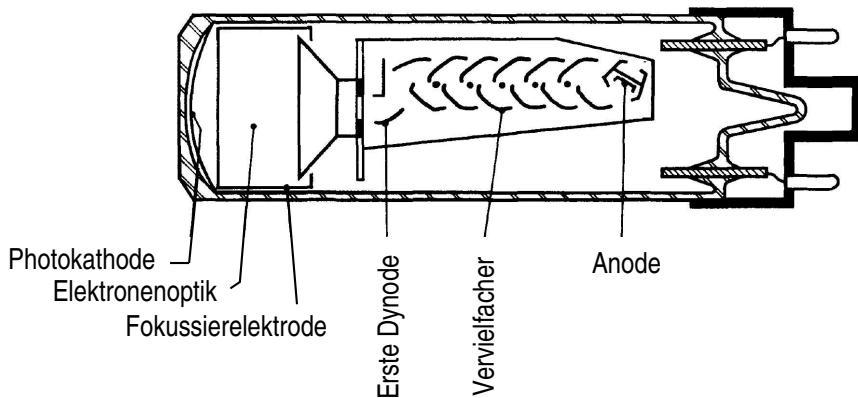
- Anregung der Elektronenenergie- und Vibrationsniveaus durch die ionisierende Teilchenstrahlung.
 - Innerhalb <10 ps strahlungsloser Übergang von der Singulettanregung S^{**} in S^* .
 - Große Wahrscheinlichkeit für einen Strahlungsübergang von S^* in ein tiefergelegenes Vibrationsniveau.
- ⇒ Transparenz für ausgesendetes Licht, da das Vibrationsniveau über dem Grundzustand S_0 liegt.

- Ähnliche innere Übergänge von den angeregten Tripletzuständen.
- $T_0 \rightarrow S_0$ wegen Auswahlregeln unterdrückt.
- $T_0 + T_0 \rightarrow S^* + S_0 + \text{Phononen}$, danach Emission von Szintillationslicht wie oben.

- Plastikszintillatoren sind in einem festen Plastik gelöste organische Szintillatoren.
- Häufig benutztes Plastik: Polyvinyltoluen, Polyphenylbenzol, Polystyren.
- Gebräuchliche Szintillatoren:
 - p-Terphenyl ($C_{18}H_{14}$).
 - PDB ($C_{20}H_{14}N_2O$).
 - PPO ($C_{15}H_{11}NO$).

Photovervielfacher

- Zum Nachweis des Szintillationslicht werden meistens Photovervielfacherröhren eingesetzt.
- Allerdings benötigen sie viel Platz und können nur bedingt in großen Magnetfeldern betrieben werden, so dass in einigen Experimenten durch Avalanchphotodioden oder Siliziumphotovervielfacher ersetzt werden. Aus Zeitgründen werden wir diese neueren Vervielfacher nicht besprechen.
- Schematische Darstellung eines Photovervielfachers

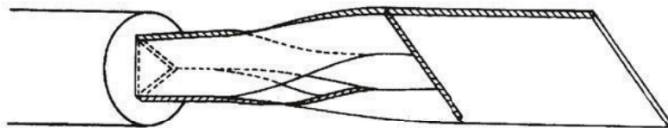


Typischer Aufbau eines Szintillationszählers

Photomultiplier

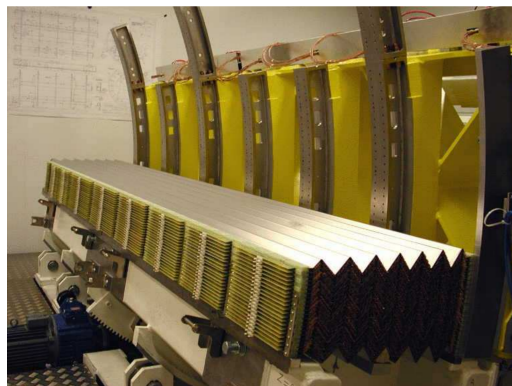
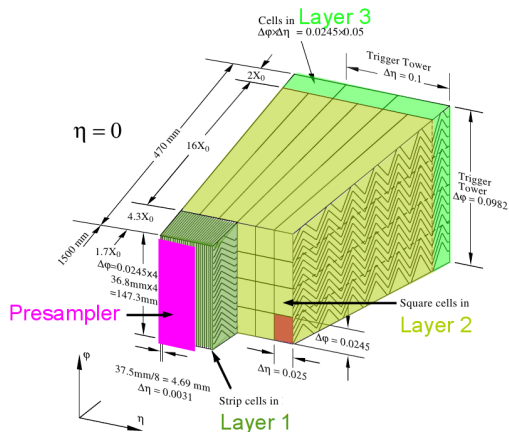
Lichtleiter

Szintillator



- Auch flüssiges Argon wird in Kalorimetersn als aktives Medium eingesetzt.
- Im flüssigen Zustand ist das Edelgas so dicht, dass die geladenen Schauerteilchen viele Elektronen durch Ionisation freisetzen können.
- Um diese Elektronen einzufangen, schließt man das flüssige Argon zwischen zwei Elektroden ein, die auf Hochspannung zum Ladungseinsammeln gesetzt werden.

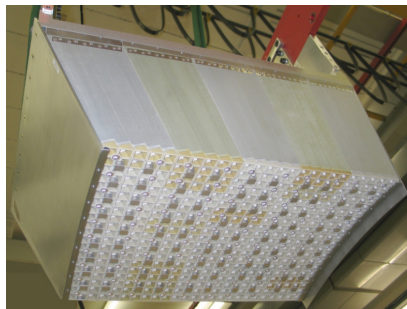
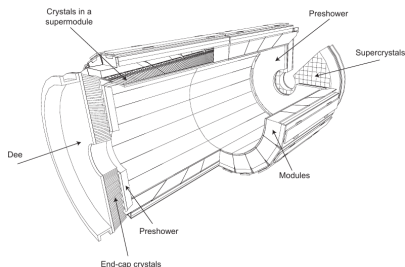
Elektromagnetisches Kalorimeter von ATLAS



- Inhomogenes Akkordeonkalorimeter mit Blei als passivem und flüssigem Argon als aktivem Medium.
- Akkordeonstruktur zur Vergrößerung der Primärionisationsstrecke.
- Energieauflösung:

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{9\%}{\sqrt{E[\text{Gev}]}} \oplus 0,2\%$$

Elektromagnetisches Kalorimeter von CMS



- Homogenes PbWO_4 -Kalorimeter.
- Detektormaterial: Szintillierende PbWO_4 -Einkristalle mit hoher Strahlenhärte, um die Energieauflösung für Photonen zu maximieren:

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{2,8\%}{\sqrt{E[\text{Gev}]}} \oplus \frac{120 \text{ MeV}}{E} \oplus 0,3\%$$

- Nachteile:
 - Keine longitudinale Segmentierung \Rightarrow schlechte Richtungsauflösung.
 - Kleine Lichtausbeute erfordert Einsatz einer Auslese mit hoher zusätzlicher Verstärkung: Avalanche-Photodioden im Zentralbereich, Photovervielfacher im Endkappenbereich.

- Hadronkalorimeter sind Samplingkalorimeter.
- Wahl des passiven Mediums so, dass λ_A nicht zu verschieden von X_0 ist, damit sich die hadronischen und elektromagnetischen Komponenten ähnlich entwickeln.
- Gutes Absorbermaterial: Eisen ($X_0=1,8$ cm, $\lambda_A=17$ cm).
- Alternativer Ansatz: Kompensierendes Kalorimeter.
Wahl von Absorbermaterialien mit hoher Ordnungszahl (Uran, Blei, Wolfram), um die Signalausbeute für die elektromagnetische Komponente gegenüber der hadronischen zu dämpfen.

- Signal eines Pions:

$$S(\pi) = (f_{em} \cdot \epsilon_{em} + f_h \cdot \epsilon_h) \cdot E,$$

(ϵ : Nachweeffizienz).

- Signal eines Elektrons:

$$S(e) = \epsilon_{em} \cdot E$$

- $\frac{e}{p}$ -Verhältnis:

$$\frac{S(e)}{S(\pi)} = \frac{\epsilon_{em} \cdot E}{(f_{em} \cdot \epsilon_{em} + f_h \cdot \epsilon_h) \cdot E} = \frac{\frac{\epsilon_{em}}{\epsilon_h}}{1 - f_{em} \left(1 - \frac{\epsilon_{em}}{\epsilon_h}\right)},$$

also $\frac{S(e)}{S(\pi)} = 1$, wenn $\epsilon_{em} = \epsilon_h$.

- Energieauflösung:

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \left(\frac{\epsilon_{em}}{\epsilon_h} \right);$$

$a \sim 50\%$, also viel größer als bei einem elektromagnetischen Kalorimeter.

- Wert von $\frac{\epsilon_{em}}{\epsilon_h}$ beeinflusst auch die Linearität des Kalorimeters.