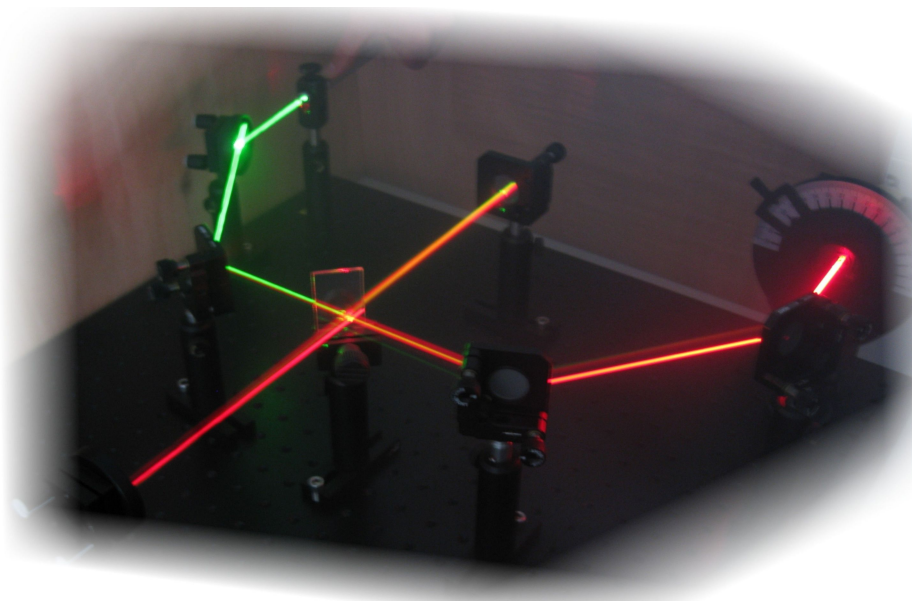


PSI

die

# Physik–Schülerlabor-Initiative



## Die Kosmische Kanne

Version ohne eingebettete Animationen

Mit der kosmischen Kanne können Myonen detektiert und gezählt werden. Die Myonen sind Elementarteilchen, die nach dem Standardmodell mit den Elektronen verwandt sind, sie entstehen durch Einwirkung der kosmischen Strahlung auf die oberen Schichten der Atmosphäre.



Abbildung 1: Bestandteile der kosmischen Kanne

## 1 Aufbau

Die kosmische Kanne besteht aus einer Thermoskanne, die als lichtundurchlässiger Behälter für Wasser dient. Fliegt ein Myon durch dieses Wasserreservoir, so entsteht durch den Tscherenkov-Effekt ein schwacher Lichtblitz, dessen Intensität proportional zum Energieverlust des Myons ist.

Dieser Lichtblitz wird mit einem im Schraubverschluss der Thermoskanne eingebauten Detektor (einem Photomultiplier) nachgewiesen. Durch die verspiegelte Innenfläche der Thermoskanne ist sichergestellt, dass der Großteil des Lichts den Detektor erreicht. Der Detektor gibt ein zur Lichtmenge proportionales elektrisches Signal aus, welches dann elektronisch ausgewertet werden kann.

## 2 Mögliche Versuche

### 2.1 Einführender Versuch

Generell kann das Signal, das der Photomultiplier ausgibt, auf drei verschiedene Weisen ausgewertet werden:

- es kann auf einem Oszilloskop betrachtet werden,
- die Signale können von einem elektronischen Zähler, im folgenden als „Zähler-Box“ bezeichnet, gezählt werden,
- über ein Interface können die Signale vom Computer gezählt werden.

#### **Was wird gemessen?**

Mit der Durchführung verschiedener Versuche kann man nachweisen, dass tatsächlich Myonen gemessen werden.

Um zu klären, was die Ursache des Signals ist, wird der Versuch zweimal durchgeführt, einmal mit Wasser und einmal ohne Wasser in der Kanne.

Da man nur dann Signale erhält, wenn Wasser in der Kanne ist, liegt der Schluss nahe, dass das Wasser eine wichtige Rolle spielt.

Nun muss gezeigt werden, dass die Signale nicht allein durch das Wasser entstehen, beispielsweise könnte das Wasser ja radioaktive Isotope enthalten, die beim Zerfallen Photonen aussenden, welche dann nachgewiesen werden.

Hierzu werden zwei Kannen in Koinzidenz geschaltet, d.h. an beide Kannen wird je eine Zähler-Box angeschlossen, die Signale der beiden Zähler-Boxen werden an die Koinzidenz-Box weitergeleitet, diese leuchtet immer dann auf, wenn von beiden Zähler-Boxen gleichzeitig ein Signal kommt.

Würden die Signale durch innere Prozesse im Wasser verursacht, wäre es äußerst unwahrscheinlich, dass in beiden Kannen gleichzeitig z.B. ein radioaktiver Zerfall stattfindet, d.h. die Koinzidenz-Box dürfte nur sehr selten blinken. Man beobachtet jedoch, dass die Koinzidenz-Box sehr häufig aufleuchtet, d.h. die Signale kommen durch etwas zustande, das von außen in die Kannen eindringt.

### 2.2 Weitergehende Versuche

Der Aufbau befindet sich auf einem mobilen Experimentierwagen, dies ermöglicht die Messung an verschiedenen Orten, beispielsweise auf dem Dach und im Keller des 13 Stockwerke hohen Physikhochhauses. Durch den Vergleich der Zählraten können

Aufschlüsse über die Absorption der Myonen im Beton des Gebäudes gezogen werden.

Des Weiteren können die Pulshöhenverteilung, die Abhängigkeit der Myonenrate vom Zenitwinkel und die Lebensdauer der Myonen bestimmt werden.

### L 3 Kosmische Strahlung

Die Erde wird kontinuierlich von hochenergetischen Teilchen, vor allem Protonen und Alpha-Teilchen, aus dem Weltall getroffen. Diese Teilchenstrahlung bezeichnet man als primäre kosmische Strahlung.

Treffen diese Teilchen auf die Erdatmosphäre, so zerschmettern die Protonen die in der Atmosphäre vorhandenen Atomkerne, es werden neue Teilchen frei, deren Zahl kaskadenartig anwächst.

Diese Teilchenschauer werden als sekundäre kosmische Strahlung bezeichnet.

Es entstehen verschiedene Zwischenstufen, wie z.B. Pionen oder Kaonen.

Sie erreichen die Erdoberfläche jedoch nicht, sondern zerfallen wieder, v.a. in Myonen (80%) und Elektronen (20%) sowie den jeweiligen Neutrinos, diese erreichen die Erdoberfläche und können detektiert werden, z.B. mit dem Praktikumsversuch „kosmische Kanne“.

### L 4 Photomultiplier

Ein Photomultiplier wandelt schwache Lichtsignale (bis hin zu einzelnen Photonen) in elektrische Impulse um, diese können dann mit einem elektronischen Zähler ausgewertet werden.

#### **Aufbau und Funktionsweise**

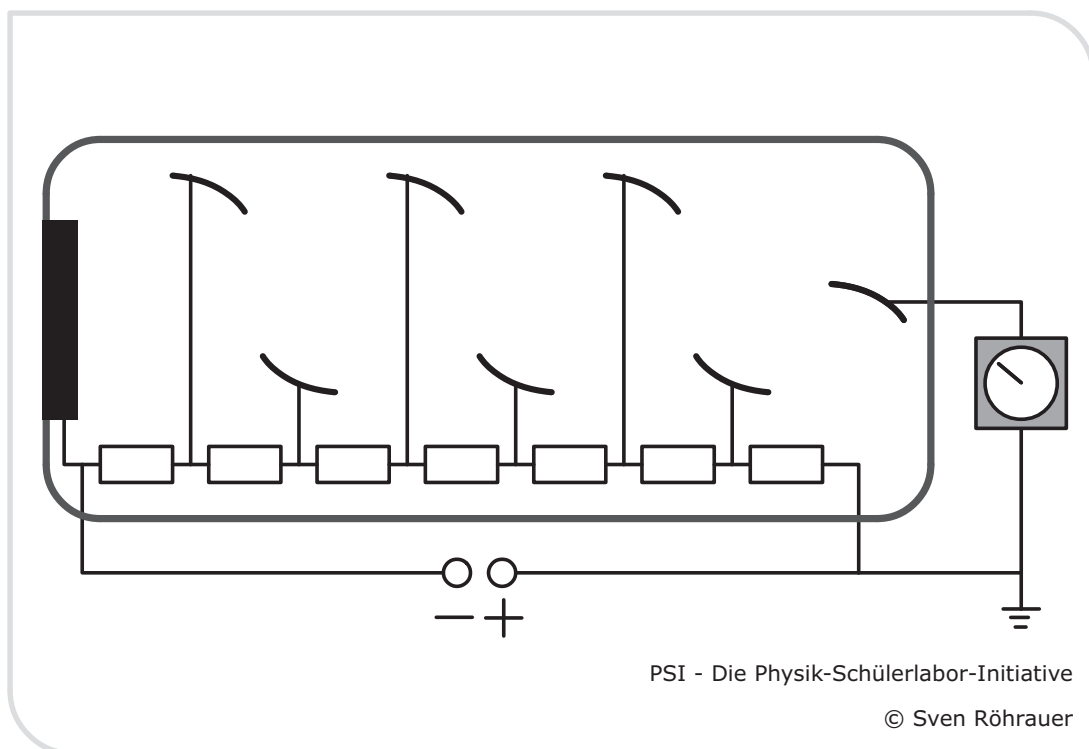
Die Photonen treffen zunächst auf eine Photokathode, durch den äußeren photoelektrischen Effekt werden schwach gebundene Valenzelektronen aus der Kathode gelöst, dazu muss das Material der Kathode so gewählt werden, dass fast jedes ankommende Photon ein Elektron herausschlägt.

Die nun freien Elektronen werden durch die anliegende starke elektrische Hochspannung zur ersten Dynode (zu deutsch: Prallelektrode) hin beschleunigt. Damit die Elektronen freie Bahn (eine große freie Weglänge) haben, befindet sich der gesamte Aufbau in einer Vakuumröhre.

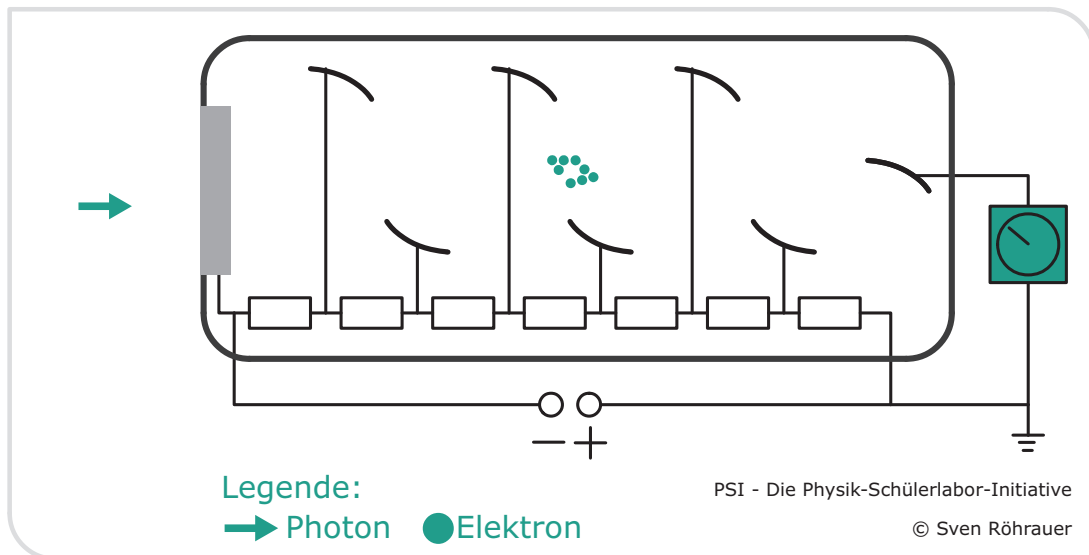
Das auf die Dynode auftreffende Elektron schlägt nun mehrere Elektronen, so genannte Sekundärelektronen, heraus. Diese werden zur nächsten Dynode hin beschleunigt. Dieser Prozess wird durch mehrere hintereinandergeschaltene Dynoden wiederholt, so dass die Zahl der Elektronen lawinenartig anwächst.

Diese große Anzahl von Elektronen wird am Ende von der Anode absorbiert, es kommt zu einem elektrischen Impuls, welcher von einem elektronischen Zähler detektiert wird.

In den beiden folgenden Animationen wird der Aufbau bzw. die Funktionsweise dargestellt, in der Realität werden jedoch mehr Dynoden verwendet, so dass das Eingangssignal etwa um den Faktor 1.000.000 verstärkt wird.



Animation 1: Aufbau eines Photomultipliers



Animation 2: Funktionsweise eines Photomultipliers

## L 5 Das Standardmodell der Teilchenphysik

Die Teilchenphysik beschäftigt sich mit den Grundbausteinen der Materie und den zwischen ihnen wirkenden Kräften.

Der erste Schritt zur Teilchenphysik war die Erkenntnis, dass Materie kein Kontinuum darstellt, sondern aus kleinsten Teilchen aufgebaut ist. Diese Teilchen nannte man Atome, sie sollten ja elementar, d.h. nicht weiter teilbar sein.

Mit der Erkenntnis, dass die Atome der verschiedenen Elemente nach ihren Eigenschaften in einem periodischen System angeordnet werden können, erwog man, dass Atome eine Substruktur haben.

Mit der Entdeckung des Elektrons, Protons und etwas später des Neutrons und den damit einhergehenden Atommodellen schien klar, dass die elementarsten Teilchen nun gefunden seien.

Mit der Entdeckung weiterer Teilchen, wie z.B. dem Myon in der kosmischen Strahlung und über hundert weiterer Teilchen in Teilchenbeschleunigern entbrannte die Frage nach den elementarsten Bausteinen neu.

Wie zuvor bei den Atomen erkannte man auch bei den entdeckten Teilchen periodische Muster und man nahm wieder an, dass die gefundenen Teilchen eine Substruktur haben.

Schließlich konnte „das Periodensystem der Physik“ entwickelt werden, das bis heute

fast alle Beobachtungen erklären kann, man nennt es „das Standardmodell der Teilchenphysik“.

Das folgende Schema versucht, alle wichtigen Aspekte des Standardmodells zusammenzufassen.

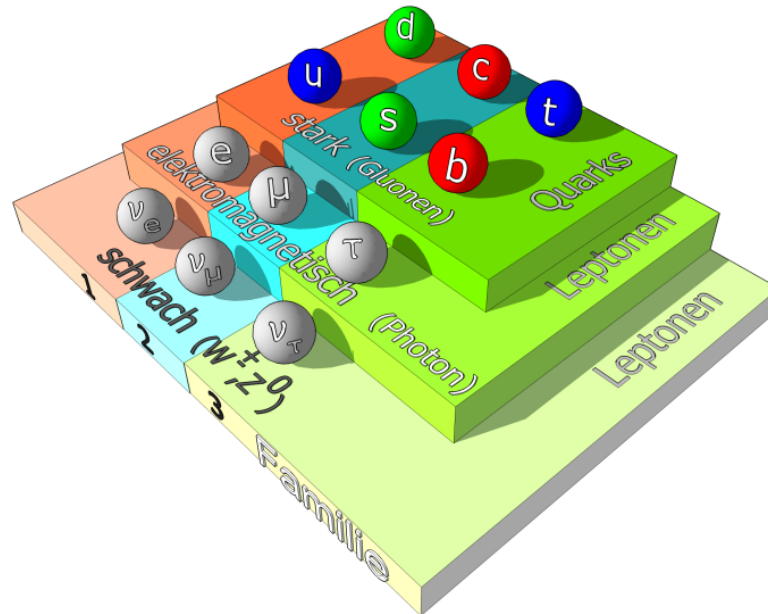


Abbildung 2: Das Standardmodell der Teilchenphysik

Im Standardmodell werden die Elementarteilchen und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte beschrieben, diese sind die

- Elektromagnetische Kraft,
- Schwache Kraft,
- Starke Kraft.

Die in der makroskopischen Welt vorherrschende Kraft, die gravitative Kraft konnte noch nicht in das Standardmodell eingebunden werden.

Nicht alle Teilchen spüren alle drei Kräfte, dies wird durch die verschiedenen Ebenen in dem Schema verdeutlicht: Die starke Kraft spüren nur die Teilchen auf der obersten Ebene, die Quarks.

Die elektromagnetische Kraft wirkt neben den Quarks auch noch auf die geladenen Leptonen (mittlere Ebene), zu denen auch das Elektron und das Myon gehören.

Die schwache Kraft wirkt auf alle Teilchen, auch auf die ungeladenen Leptonen, die Neutrinos.

Eine weitere Möglichkeit der Klassifikation der Teilchen sind die Familien (auch Generationen genannt), von denen es drei gibt.

Die uns umgebende, alltägliche Materie besteht nur aus Teilchen der ersten Familie, z.B. besteht ein Proton aus zwei up-Quarks (u) und einem down-Quark (d), ein Neutron aus einem up-Quark (u) und zwei down-Quarks (d).

Die Teilchen der zweiten und dritten Generation treten nur bei extremen Bedingungen auf, z.B. in Teilchenbeschleunigern oder in den oberen Schichten der Atmosphäre, wo kosmische Strahlung auf Gasteilchen trifft, als Folge dieses Prozesses entstehen z.B. Myonen.

Zurück zur Erläuterung des Schemas: Das Grundgerüst des Standardmodells sind relativistische Quantenfeldtheorien, eine Quantenfeldtheorie ist die Zusammenführung von klassischer Feldtheorie (wie z.B. der Elektrodynamik), Quantenmechanik und Relativitätstheorie.

In einer Quantenfeldtheorie werden nicht nur Energien und Impulse quantisiert, sondern darüber hinaus auch das Feld, oder anders ausgedrückt: Kräfte werden durch Austauschteilchen vermittelt. Im Schema steht das jeweilige Austauschteilchen in Klammer hinter der Kraft, die elektromagnetische Kraft wird zum Beispiel durch Photonen vermittelt.

## L 6 Tscherenkow–Strahlung

Bewegen sich geladene Teilchen in einem Medium schneller als Licht in diesem Medium, so kommt es zu einem interessanten Effekt, dem Tscherenkow-Effekt: Auf Photos von Kernkraftwerken schimmert das Kühlwasser der Brennstäbe immer geheimnisvoll blau.

Was ist die Ursache dieses Lichts?

In einem Medium (wie z.B. Wasser) bewegt sich Licht langsamer als im Vakuum, das heißt, in einem Medium können sich energiereiche Teilchen schneller bewegen als Licht.

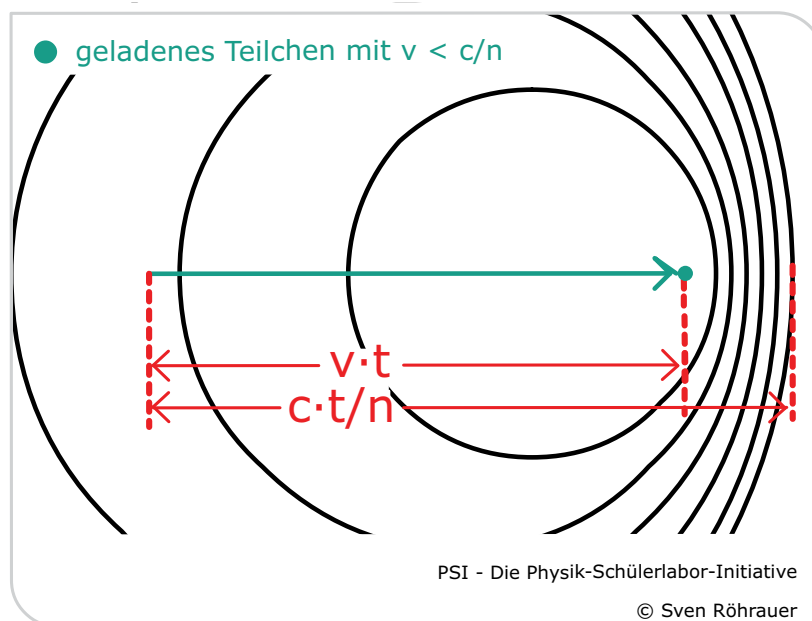
Bewegt sich ein geladenes Teilchen, wie z.B. ein Elektron durch ein dielektrisches Medium, so werden die Atome entlang der Flugbahn aufgrund des elektrischen Feldes des Elektrons polarisiert und zu elektrischen Dipolschwingungen angeregt, d.h. sie strahlen elektromagnetische Wellen ab.



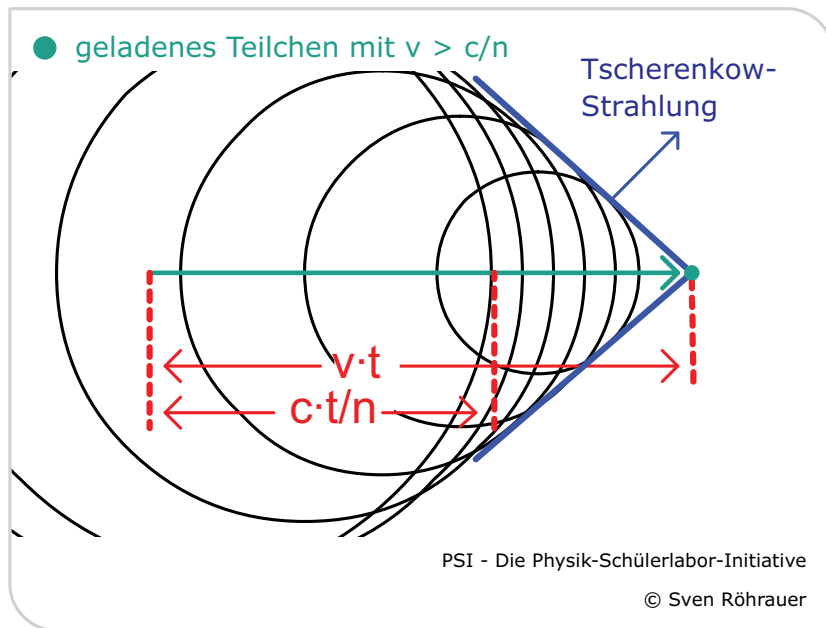
Bewegt sich das geladene Teilchen mit Unterlichtgeschwindigkeit, so interferieren die abgestrahlten elektromagnetischen Wellen destruktiv.

Bewegt sich das Teilchen hingegen mit Überlichtgeschwindigkeit, so interferieren die elektromagnetischen Wellen konstruktiv, es kommt zu einer „elektromagnetischen Stoßwelle“, dem Tscherenkow-Licht.

In den beiden folgenden Animationen wird der Tscherenkow-Effekt verdeutlicht, man erkennt dabei auch gut, dass man den Effekt aus der Akustik kennt: ein Analogon für den Tscherenkow-Effekt stellt ein Flugzeug dar, welches sich mit Überschallgeschwindigkeit bewegt, der Mach'sche Kegel entspricht dem Tscherenkow-Kegel.



Animation 3: Ein Teilchen bewegt sich mit Unterlichtgeschwindigkeit durch ein Medium mit dem Brechungsindex  $n$ .



Animation 4: Ein Teilchen bewegt sich mit Überlichtgeschwindigkeit durch ein Medium (mit dem Brechungsindex  $n$ ), es entsteht Tscherenkow-Strahlung.