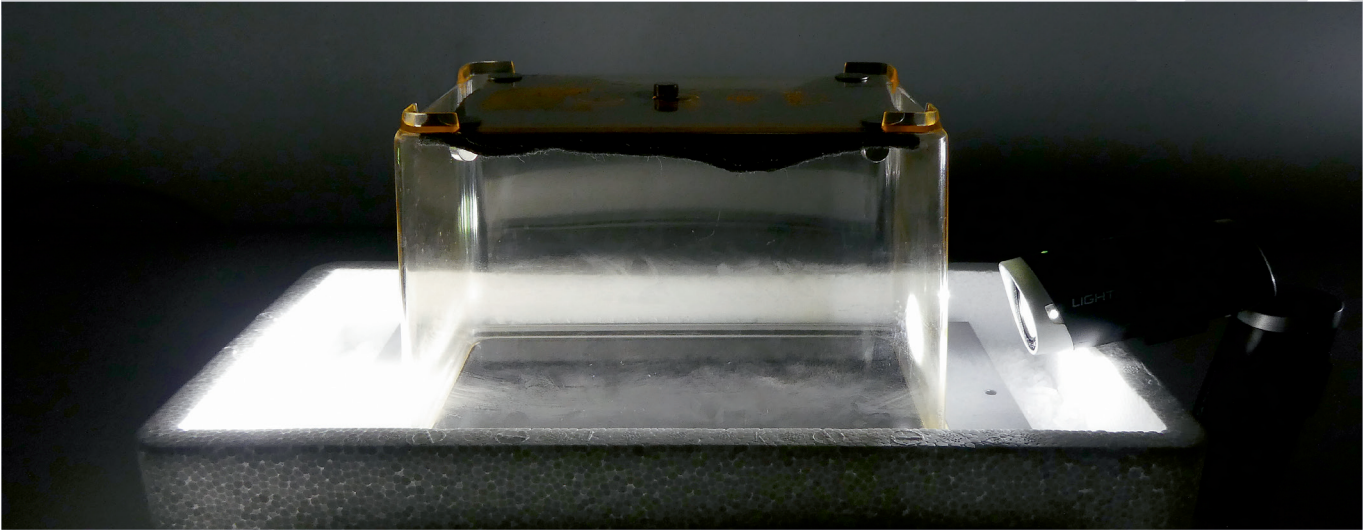




NETZWERK
TEILCHENWELT



TEILCHENSPUREN SICHTBAR MACHEN

HANDREICHUNG ZUM
SELBSTBAU EINER NEBELKAMMER

IMPRESSUM Herausgeber: Netzwerk Teilchenwelt, TU Dresden, Institut für Kern- und Teilchenphysik, Zellescher Weg 19, 01069 Dresden, www.teilchenwelt.de, mail@teilchenwelt.de Redaktion: Carolin Schwerdt, DESY
Layout und Grafiken: www.buero-quer.de, DESY Redaktionsschluss: Juli 2020 Lizenz und Nutzung: Creative Commons 2.0-by-nc-nd | Vervielfältigung und Weiterverbreitung des Inhalts ist bei Nennung der Quelle für Lehrzwecke ohne Rückfragen gestattet, sofern keine Veränderungen vorgenommen werden. Kommerzielle Nutzung, z.B. zu werblichen Zwecken oder in Lehrbüchern, ist ohne Rücksprache nicht gestattet. Es gilt das Impressum unter www.teilchenwelt.de/service/impressum.

GEFÖRDERT VOM



PROJEKTLEITUNG



PARTNER



KOOPERATION



SCHIRMHERRSCHAFT





INHALTSVERZEICHNIS

Bau einer Nebelkammer	1
Materialien	2
Einsatz von Trockeneis	6
Anleitung *	8
Mögliche Probleme *	9
Aufgaben *	10
Hintergrundwissen Nebelkammer *	11
Detailwissen Nebelkammer *	15
Hintergrundwissen Kosmische Teilchen *	17

* Kopiervorlagen



BAU EINER NEBELKAMMER

Eine Nebelkammer ist ein einfacher Detektor, mit dem sich Spuren von hindurchfliegenden Teilchen sichtbar machen lassen. Wurden mit ihnen in den 1930er Jahren spektakuläre Entdeckungen gemacht, findet man sie heute in Museen und wissenschaftlichen Ausstellungen. Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Nebelkammern: Expansions- und Diffusionsnebelkammern.

Im Folgenden wird eine Diffusionsnebelkammer vorgestellt, welche mit relativ leicht zugänglichen Materialien selbst hergestellt werden kann und im Gegensatz zur Expansionsnebelkammer längere Beobachtungszeiten ermöglicht. Aufgrund des kleineren Aufbaus eignet sich das Experiment für die Durchführung in Kleingruppen. Es können die Spuren von verschiedenen Teilchenarten beobachtet werden. Auch können die Nebelkammern zum Tüfteln dienen und der Einfluss von Veränderungen im Aufbau auf die Funktionsfähigkeit untersucht werden.

Einordnung im Unterricht

Das Experiment passt zu einer Unterrichtssequenz über Astroteilchen- oder Teilchenphysik, ebenso wie zu den Themen Kernphysik oder Radioaktivität. Es bietet sich eine Überleitung zur historischen Entwicklung der Teilchen- und Astroteilchenphysik oder zu weiteren experimentellen Methoden an. Auch kann in dem Zusammenhang die spezielle Relativitätstheorie anhand der Beobachtung von Myonen in der Nebelkammer behandelt werden (siehe dazu Unterrichtsmaterial „Kosmische Strahlung“). Die Seiten 8–19 in dieser Anleitung sind als Kopiervorlagen aufbereitet.

Lernziele

- ▶ Jugendliche wenden eine Methode zum Nachweis von Teilchen an.
- ▶ Sie identifizieren und beschreiben unterschiedliche Teilchenspuren.
- ▶ Sie erklären, wie Teilchenspuren in der Nebelkammer entstehen.
- ▶ Sie entdecken, dass wir permanenten von kosmischen Teilchen umgeben sind.

Zeitbedarf

- ▶ Aufbau: 5–30 min (je nach Vorbereitung)
- ▶ Kühlung der Nebelkammer: 5–10 min
- ▶ Beobachtung: Erste Spuren sind schon nach wenigen Minuten zu sehen. Je nach Beobachtungsauftrag können zwischen 10 und 60 min eingeplant werden. Die Funktionsdauer der Nebelkammer hängt von mehreren Faktoren ab, z. B. von der verwendeten Menge an Trockeneis und der Dicke des Filzes und der damit einhergehenden Menge an zur Verfügung stehendem Isopropanol.

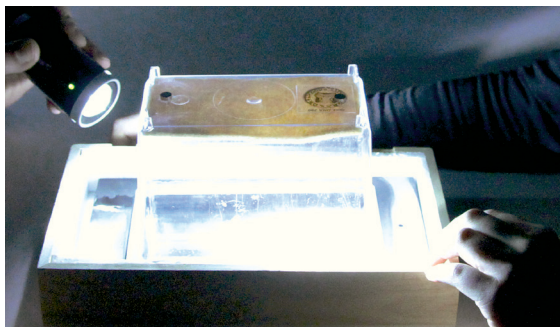


Abb. 1: Beobachtung in der fertig aufgebauten Nebelkammer

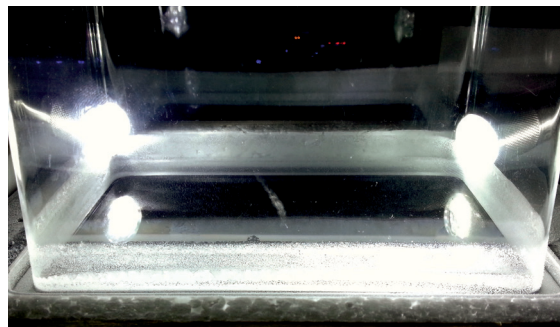


Abb. 2: Blick in die Nebelkammer, in der Mitte ist eine Spur zu erkennen



Unterrichtsmaterial „Kosmische Strahlung“

Netzwerk Teilchenwelt:

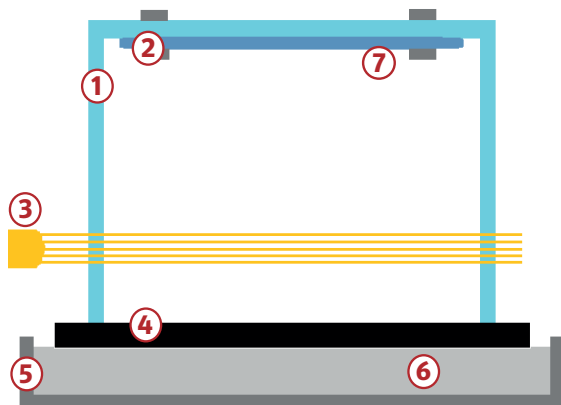
<https://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/unterrichtsmaterial-teilchenphysik>

Diese Handreichung digital

Netzwerk Teilchenwelt: <https://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte>



BAU EINER NEBELKAMMER MATERIALIEN



- ① Durchsichtige Box
- ② Filz mit Magneten zum Befestigen
- ③ Taschenlampe
- ④ Schwarze Metallplatte
- ⑤ Styroporkiste
- ⑥ Trockeneis
- ⑦ Isopropanol (reiner Alkohol)

Schutzhandschuhe, Schutzbrille und kleine Schaufel, ggf. Knete oder radioaktive Präparate.

Abb. 4: Schematischer Aufbau einer Nebelkammer (© Netzwerk Teilchenwelt)

	Hinweise	Empfehlungen
Durchsichtige Box	Es kann eine Kunststoff- oder Glasbox genutzt werden. Die Wände müssen durchsichtig sein. Ideal ist eine Seitenlänge von 10–30 cm und eine Höhe von 10–15 cm. Der Rand der Öffnung darf keine Vorsprünge aufweisen. Kleine Aquarien oder Terrarien sind gut geeignet, aber auch aus einem durchsichtigen Plastikbecher lässt sich eine Nebelkammer improvisieren.	Faunarium PT2255 von Exo Terra, Größe: 230 x 155 x 170 mm ³
Schwarze Metallplatte	Diese sollte etwas größer als die Öffnung der Plastikbox sein und in die Styroporkiste passen. Ihre Oberfläche sollte mattschwarz sein; ideal ist eine schwarze Eloxierung. Eine Nut passend zur Öffnung der durchsichtigen Box sorgt für eine Abdichtung der Nebelkammer. Alternativ kann der Einsatz von einem Backblech oder einem anderen metallenden Gegenstand getestet werden. Die Oberfläche kann mit mattschwarzem Isolierband oder mit Stoff bedeckt werden. Zur Abdichtung kann Knetmasse erprobt werden. Diese Alternativen können jedoch die Funktionsfähigkeit einschränken.	Siehe technische Zeichnung Seite 4
Knetmasse	Die Knetmasse kann zum Abdichten der Fuge zwischen durchsichtiger Box und schwarzer Metallplatte genutzt werden. Ungeeignete Knetmasse kann bei den tiefen Temperaturen spröde werden.	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Haftkraft um 65 N (Herstellerangabe meist 650 g), Durchmesser max. 10 mm, Höhe 5 mm ▶ selbstklebende Magnete: Haftkraft um 65 N, Durchmesser max. 15 mm, Höhe 1 mm
Taschenlampe	Bei der Wahl einer Taschenlampe ist auf einen breiten Lichtkegel zu achten, um den sensitiven Bereich in der Nebelkammer möglichst gut auszuleuchten. Fahrradlampen sind gut geeignet. Ein interner Akku und ein dazugehöriges externes Ladegerät haben sich als praktisch erwiesen.	Sigma Beleuchtung Lightster Frontlicht Set, 1841 Alternativ: Horex LED Akku-Stableuchte 260



BAU EINER NEBELKAMMER

MATERIALIEN

	Hinweise	Empfehlungen
Styroporkiste	In diese Kiste wird das Trockeneis gefüllt und die Metallplatte aufgelegt. Damit die Metallplatte nicht seitlich wegrutschen kann, sollte die Styroporkiste groß genug sein, um die Metallplatte hineinzu-legen. Eine Höhe von 5 cm ist für die Befüllung mit genügend Trockeneis ausreichend. Gut eignet sich auch eine Holzkiste, die mit einer Schicht Styropor ausgekleidet wird.	Kühlbehälter K2 E von Ohlro oder Selbstbau Holzkiste: <ul style="list-style-type: none"> ▶ Sperrholz: Pappel, Stärke 4 mm, aus dem Baumarkt ▶ Styroporplatte: Stärke 10 mm, (Baumarkt) ▶ eventuell heißer Draht zum Schneiden des Styropors (Bastelbedarf) ▶ Holzleim
Filz	Der verwendete Filz sollte nicht zu dünn sein, damit genügend Isopropanol aufgenommen werden kann. Auch sollte der Filz ungefärbt sein, da durch den reinen Alkohol die Farbstoffe gelöst werden und die Plastikbox verfärben könnten. Der Filz muss auf die Größe der Bodenfläche der durchsichtigen Box zugeschnitten sein.	Wollfilz der Dicke 3–5 mm
Magnete	Um den Filz am Boden der Box zu befestigen, eignen sich kleine Neodym-Magnete. Für eine gute Handhabung ist darauf zu achten, dass die Haftkraft nicht zu groß und der Durchmesser nicht zu klein ist. Auch können selbstklebende Magnete von außen an der Box angebracht werden.	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Haftkraft um 65 N (Herstellerngange meist 650 g), Durchmesser max. 10 mm, Höhe 5 mm ▶ selbstklebende Magnete: Haftkraft um 65 N, Durchmesser max. 15 mm, Höhe 1 mm
Schutzhand-schuhe Schutzbrille kleine Schaufel	Wird für den Umgang mit Trockeneis benötigt. Siehe Hinweise Trockeneis	
Isopropanol	Auf folgende Bezeichnung ist zu achten: Isopropanol oder Isopropylalkohol, chemisch rein oder 99,9 % reiner Alkohol.	In der Apotheke oder im Internet erhältlich. 100 ml sind ausrei-chend, um ein Filz einer Größe von 18 x 12 cm ² zu tränken.
Trockeneis	Bitte die Hinweise zur Verwendung von Trockeneis beachten. Trockeneis gibt es in verschiedenen Formen, kleine Stücke sind am besten geeignet. Bezugsquellen sind unter Hinweise zur Verwendung von Trockeneis vermerkt. Das Trockeneis sollte nicht zu lange vorher geliefert werden, da es sublimiert.	Um den Boden einer Styroporkiste von 32 x 20 cm ² Grundfläche voll-ständig zu bedecken, sind etwa 500 g Trockeneis (Pelletform) nötig. Mit einer Füllhöhe von 3 cm kann die Nebelkammer mind. eine halbe Stunde betrieben werden.



BAU EINER NEBELKAMMER MATERIALIEN

Weitere Hinweise

- ▶ Die Beobachtung sollte in einem abgedunkelten Raum erfolgen.
- ▶ Funktioniert die Nebelkammer nicht, liegt es meist daran, dass zu wenig Isopropanol verwendet wurde. Gerade bei größeren Nebelkammern sollte dann ein stärkerer Filz verwendet werden.
- ▶ Es können radioaktive Präparate eingesetzt werden. Spuren aus Alpha- oder Betastrahlern können gut unterschieden werden und weisen deutlich auf die Quelle. Gamma-Strahler hinterlassen keine sichtbaren Spuren in der Nebelkammer. Sie können jedoch Elektronen aus Atomen herauslösen, welche ihrerseits Spuren hinterlassen. Geeignete Präparate sind: Glühstrumpf, Uranglasperlen, Thoriumteststrahler und Aschenbecher mit Uranglasur, Americium-Isotop 241 aus Rauchmeldern. Auch kann sich genügend radioaktives Material im Staub eines alten Kellers gesammelt haben. Diese radioaktiven Proben sind frei erwerbbar und z.T. Gebrauchsgegenstände mit geringer Aktivität, jedoch kann deren Einsatz im Schulunterricht verboten sein. Bitte besprechen Sie den Einsatz im Unterricht mit dem an der Schule zuständigen Strahlenschutzbeauftragten.
- ▶ Sie können die Nebelkammer in ein starkes Magnetfeld einbringen (z. B. hinreichend große und leistungsstarke Helmholtzspulen). Die beobachteten Teilchen sind z.T. viel energiereicher als die in typischen Schulversuchen (Fadenstrahl- oder Braunsche Röhre). Das Magnetfeld der im Unterricht üblichen Helmholtzspulen kann zu gering sein, um eine Krümmung sichtbar zu machen.
- ▶ An sehr heißen und schwülen Sommertagen kann es sein, dass sich nicht gut Spuren in der Nebelkammer beobachten lassen. Die Wände der durchsichtigen Box beschlagen infolge der erhöhten Luftfeuchtigkeit sehr schnell.
- ▶ Die Teilchen der kosmischen Strahlung bewegen sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit. Trotzdem ist deutlich zu beobachten, wie sich eine Spur bildet. Das ist dadurch zu erklären, dass es einen Moment dauert, bis sich die Alkoholtröpfchen an die freien Ionen binden. Bereiche, in denen mehr Ionen gebildet wurden, werden zuerst gegenüber denjenigen Bereichen sichtbar, in denen weniger Ionen entstanden sind. Auch bedarf es einer gewissen Mindestanzahl an Ionen und damit Tröpfchen, bis eine Spur sichtbar wird. Durchqueren die elektrisch geladenen Teilchen schräg die Nebelkammer, können Ionen über dem übersättigten Bereich gebildet werden. Aufgrund der Schwerkraft sinken diese in den übersättigten Bereich, diffundieren dabei und können dann eine breite, nicht so dichte Spur erzeugen. Diese Prozesse sorgen für eine sichtbare Verzögerung in der Spurentstehung, wobei die Einfallsrichtung des ionisierenden Teilchens unter Umständen nicht mehr nachvollzogen werden kann.

Pflege und Aufbereitung

Um die Materialien lange nutzen zu können, ist nach ihrer Verwendung Folgendes zu beachten:

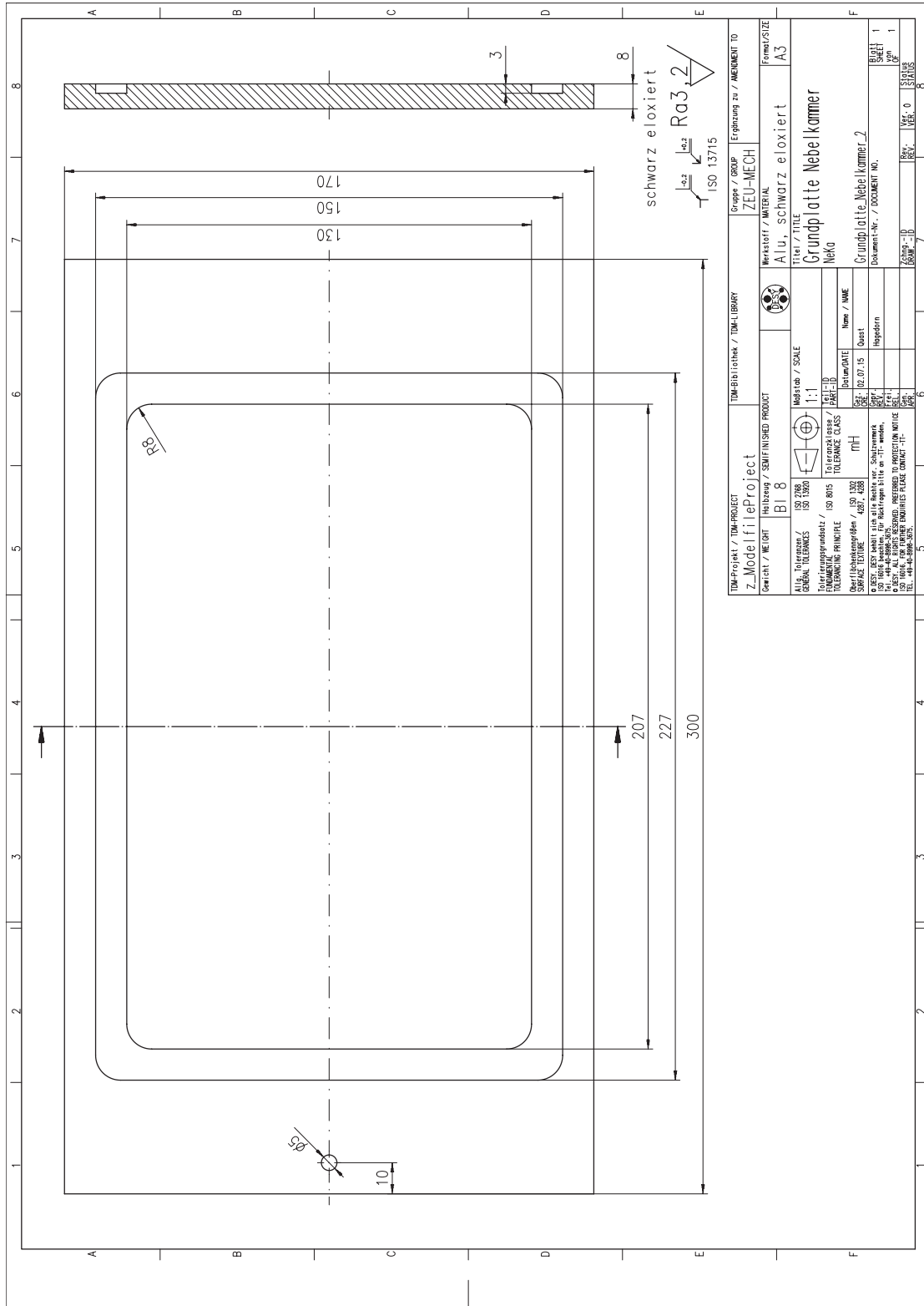
- ▶ Alle Materialien müssen frei von Alkoholrückständen getrocknet werden.
- ▶ Der Filz sollte ausgewaschen und zur Trocknung einige Stunden an einem gut belüfteten Ort aufgehängt werden.
- ▶ Die durchsichtige Box muss ausgewaschen werden, eine Kunststoffbox ohne Spülmittel säubern.
- ▶ Das Trockeneis muss aus der Styroporbox entfernt werden (Schutzhandschuhe tragen). Styroporbox trocknen lassen. Zur Entsorgung bitte die Hinweise zur Verwendung von Trockeneis beachten.
- ▶ Die Metallplatte kann mit warmem Wasser abgetaut werden. Gefrorene Alkohol- und Wasserdampfreste sollten nicht durch Kratzen entfernt werden, da dabei die eloxierte Oberfläche beschädigt werden kann. Nach dem Abtauen kann die Platte ausgewaschen und getrocknet werden.
- ▶ Das Experimentierset nach jeder Verwendung auf Vollständigkeit prüfen, eventuell Taschenlampen laden.



BAU EINER NEBELKAMMER

MATERIALIEN

Technische Zeichnung der Metallplatte





BAU EINER NEBELKAMMER EINSATZ VON TROCKENEIS

Ist Trockeneis gefährlich?

Trockeneis ist festes Kohlendioxid CO_2 und bei ordnungsgemäßem Umgang kein Gefahrstoff. Trockeneis ist nicht toxisch und nicht brennbar, geschmacksneutral und geruchlos. Jedoch verdrängt CO_2 den Luftsauerstoff und wirkt in höheren Konzentrationen erstickend. Aus 500 g Trockeneis entstehen 250 l gasförmiges CO_2 . Das gasförmige CO_2 ist 1,5 mal schwerer als Luft.

Beim Umgang mit Trockeneis sind folgende Vorsichtsmaßnahmen einzuhalten:



▶ **Schutzhandschuhe und Schutzbrille tragen!**

Trockeneis hat eine Temperatur von ca. -78°C . Hautkontakt führt nach kurzer Zeit zu Kälteverbrennungen.



▶ **Niemals in den Mund nehmen oder verschlucken!**

Trockeneis darf auf keinen Fall verzehrt werden, da dies zu schweren inneren Verletzungen führt. Es sollte auch nicht zur Kühlung direkt in Getränken verwendet werden.



▶ **Nur bei ausreichender Belüftung verwenden!**

Die Lagerung sollte möglichst nur im Freien erfolgen oder in gut belüfteten Räumen. Auch beim Transport ist immer auf eine entsprechend gute Belüftung zu achten. Der private Transport im PKW sollte nur mit geöffneten Fenstern erfolgen, auch wenn das Trockeneis im Kofferraum liegt. Das Trockeneis nicht über Nacht im PKW liegen lassen. Auch dürfen Personen nicht zusammen mit Trockeneis im Fahrstuhl transportiert werden.



▶ **Nicht in fest verschlossenen Behältnissen aufbewahren!**

Durch die Volumenvergrößerung beim Sublimieren können fest verschlossene Gefäße bersten.



Sicherheitshinweise zum Umgang mit Trockeneis

Industriegaseverband e.V.: <https://www.industriegaseverband.de>

Woher bekommt man Trockeneis?

Einige Firmen wie Linde oder Coditec bieten in lokalen Shops oder im Internet Trockeneis an. Es kann nach regionalen Lieferanten gesucht werden oder Sie können beim Chemischen Institut einer Universität anfragen, ob der Bezug einer kleinen Menge Trockeneis für Lehrzwecke möglich ist. Auch könnten Sie in einem Lebensmittelmarkt oder einer Fleischer-Genossenschaft fündig werden, da Trockeneis zur Lagerung bzw. Auslieferung von Lebensmitteln genutzt wird.



Mögliche Bezugsquellen von Trockeneis

Coditec: <https://www.coditec.de/de/>

Linde Gas: <https://www.linde-gas.de/>



BAU EINER NEBELKAMMER EINSATZ VON TROCKENEIS

Wie wird Trockeneis geliefert?

Der Versand erfolgt in Isolierboxen aus Styropor. Da Trockeneis bei Temperaturen von über -78 °C sublimiert, verflüchtigt sich Trockeneis recht schnell. Terminlieferungen können für den Versand vereinbart werden, um die Lagerungszeit und damit den Verlust von Trockeneis möglichst gering zu halten.

In welcher Form wird Trockeneis geliefert?

Trockeneis gibt es in Form von Nuggets, Pellets, Platten oder Blöcken. Für die Nebelkammer sind Nuggets oder Pellets am besten geeignet.

Wie lagert man Trockeneis am besten?

Am besten ist eine Styroporbox geeignet, wie sie auch bei der Lieferung von Trockeneis verwendet wird. Sie isoliert gut, ist aber nicht dicht verschlossen. Der Behälter sollte so wenig wie möglich geöffnet werden und darf nicht luftdicht versiegelt werden, da er sonst bersten kann. Die Lagerung von Trockeneis in Kühlschränken oder Gefriertruhen hat kaum Einfluss auf die Haltbarkeit, da die notwendigen Temperaturen von handelsüblichen Geräten nicht erreicht werden.

Wie viel Trockeneis benötige ich für eine Nebelkammer?

Das hängt von der Größe der Styroporbox ab. Um den Boden einer $32 \times 20\text{ cm}^2$ großen Box mit 3cm Trockeneispellets zu bedecken, sind etwa 50 g Trockeneis nötig.

Wie schnell verflüchtigt sich Trockeneis?

Trockeneis sublimiert rückstandslos vom festen direkt in den gasförmigen Zustand, wobei CO_2 -Gas entsteht. Die Herstellerangaben zur Sublimationsrate schwanken. Unsere Erfahrung zeigt, dass sich etwa ein Drittel von 5 kg Trockeneis innerhalb von 24 h in einer geschlossenen Transportbox verflüchtigt.

Warum quietscht das Trockeneis beim Bau der Nebelkammer?

Wenn die Metallplatte auf dem Trockeneis platziert wird, kann ein lautes Geräusch entstehen. Dies geschieht, weil das Trockeneis beim Kontakt mit der wärmeren Metallplatte schlagartig sublimiert; da die Metallplatte Druck auf die Gasbläschen ausübt, platzen diese. Dies verursacht das Geräusch.

Wie entsorge ich das Trockeneis?

Am besten entsorgt man das Trockeneis draußen, z. B. im Garten. Man sollte das Trockeneis in einen offenen Behälter füllen und diesen außerhalb der Reichweite von Kindern und Tieren positionieren. So kann das Trockeneis sublimieren. Geschlossene Räume oder kleine Nischen sind ungeeignet, weil sich dort das CO_2 sammeln kann. Trockeneis sollte nicht im Abfluss entsorgt werden, da es zum Bersten der Plastikrohre führen kann.



Abb. 3: Trockeneis in Pelletform



BAU EINER NEBELKAMMER ANLEITUNG

Eine Nebelkammer macht die Spuren von Teilchen sichtbar. Unter diesen Teilchen befinden sich auch solche, die kosmische Teilchen genannt werden. Obwohl jeden Tag unzählige kosmische Teilchen durch uns hindurch fliegen, können wir sie nicht spüren oder sehen. Kannst du sie in der Nebelkammer nachweisen?

Materialliste und Bauplan

- ① Durchsichtige Box
- ② Filz mit Magneten zum Befestigen
- ③ Taschenlampe
- ④ Schwarze Metallplatte
- ⑤ Styroporkiste
- ⑥ Trockeneis
- ⑦ Isopropanol (reiner Alkohol)

Schutzhandschuhe, Schutzbrille und kleine Schaufel, ggf. Knete oder radioaktive Präparate.

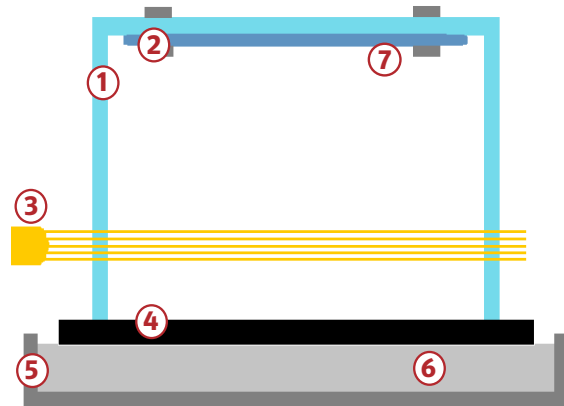


Abb. 4: Schematischer Aufbau einer Nebelkammer (© Netzwerk Teilchenwelt)

Vorgehen

1 Kammer vorbereiten

Befestige den Filz innen am Boden der durchsichtigen Box mit den Magneten.

2 Isopropanol einfüllen und Kammer abdichten



Während des Umgangs mit reinem Isopropanol Schutzbrille und Handschuhe tragen. Es reizt Haut und Schleimhäute. Nicht trinken!

Tränke den Filz mit Isopropanol, bis er vollgesogen ist. Wenn du die Box leicht schräg hältst, sammelt sich das überschüssige Isopropanol in einer Ecke und du kannst es abtropfen lassen. Stelle dann die Box mit der Öffnung nach unten auf die Metallplatte.

Das Abdichten der Kammer ist optional: Hat die Metallplatte eine Nut, kannst du zur Abdichtung dort auch etwas Isopropanol einfüllen. Steht Knetmasse zur Verfügung, kannst du den Spalt von außen mit Knetmasse abdichten.

3 Kammer auf dem Trockeneis platzieren



Schutzbrille und Handschuhe nicht vergessen! Das Trockeneis hat eine Temperatur von -78 °C und kann Kälteverbrennungen verursachen. Nicht essen oder anfassen!

Fülle mit der Schaufel eine Schicht Trockeneis in die Styroporkiste, so dass der Boden bedeckt ist. Setze die Metallplatte mit der durchsichtigen Box auf das Trockeneis. Die Platte sollte überall auf dem Trockeneis aufliegen.

4 Spuren beobachten

Verdunkle den Raum und leuchte die durchsichtige Box mit der Taschenlampe von der Seite so aus, dass der untere Bereich nahe der Metallplatte erhellt ist. Wenn du feine Tröpfchen siehst, die in Richtung Boden fallen, ist die Nebelkammer bald bereit. Es kann 5–10 min dauern, bis die ersten Spuren zu erkennen sind. Der Versuchsaufbau sollte möglichst nicht bewegt oder geöffnet werden. So wird verhindert, dass Luft hinein gelangt und die Funktionsfähigkeit der Nebelkammer gestört wird.

5 Aufräumen der Materialien

Bespreche mit deiner Lehrkraft, was zu tun ist.



BAU EINER NEBELKAMMER

MÖGLICHE PROBLEME

„Ich sehe keine Spuren!“

- ▶ Abwarten. Es dauert 5–10 min, bis sich das richtige Gleichgewicht in der Kammer eingestellt hat.
- ▶ Ändere deinen Blickwinkel. Die Spuren sind nicht von jedem Ort aus gleich gut zu sehen.
- ▶ Achte darauf, dass der Raum dunkel, die Lampe hell genug und richtig platziert ist. Die Spuren sind am besten direkt über der Metallplatte zu sehen.
- ▶ Überprüfe, ob die ganze Metallplatte direkt auf dem Eis aufliegt. Nur so wird es in der Nebelkammer kalt genug.
- ▶ Vielleicht ist der Alkoholvorrat im Filz nicht ausreichend. Füge darum mehr Isopropanol hinzu, indem du Schritt 2 wiederholst.

„Ich sehe Wolken in der Kammer!“

- ▶ Das ist ein Hinweis auf eine undichte Stelle, an der Luft in die Nebelkammer einströmt. Du musst versuchen, die Nebelkammer abzudichten. Wenn deine Metallplatte eine Nut hat, kannst du vorsichtig etwas Isopropanol in diese Rille füllen. Auch kannst du mit Knete arbeiten. Warte einige Minuten und achte darauf, den Versuchsaufbau nicht zu bewegen.
- ▶ Abwarten kann auch helfen. Es dauert etwas, bis sich das richtige Gleichgewicht in der Kammer eingestellt hat, das Eindringen von Luft kann sich auch von allein legen.

„Die Metallplatte ist ganz weiß belegt und ich kann keine Spuren sehen!“

- ▶ Das kann passieren, wenn die Metallplatte bereits auf dem Trockeneis liegt und sehr lange der Raumluft ausgesetzt ist. Dann schlägt sich die Feuchtigkeit in der Raumluft auf die Metallplatte nieder und gefriert.
- ▶ Beginne von vorn, indem du die Metallplatte reinigst und dann mit Schritt 2 fortfährst.

„Die Spuren lassen nach!“

- ▶ Erwärme den Filz von außen, z. B. durch Auflegen einer warmen Hand oder eines Wärmekissens. Zum Ende hin kühlt der Filz so sehr aus, dass kein Alkohol mehr verdampft.
- ▶ Vielleicht ist der Alkoholvorrat im Filz nicht mehr ausreichend. Füge darum mehr Isopropanol hinzu, indem du Schritt 2 wiederholst.

„Ich sehe Wellen im Nebel!“

- ▶ Wenn deine Metallplatte schräg liegt, kann es passieren, dass der Nebel wegdriftet. Das sieht dann aus wie Wellen. Unter Umständen funktioniert dann die Nebelkammer nicht.



BAU EINER NEBELKAMMER AUFGABEN

1 Spuren beobachten

Beobachte, was für Spuren sich in der Nebelkammer bilden. Versuche verschiedene Arten von Spuren zu identifizieren, aufzuzeichnen oder zu beschreiben.

2 Spuren zählen

Wie viele Spuren siehst du innerhalb einer bestimmten Zeitspanne? Wenn du verschiedene Arten von Spuren unterscheiden kannst, vergleiche deren Häufigkeiten.

3 Spuren filmen

Mit z. B. einer Handykamera können die Spuren in der Nebelkammer fotografiert oder gefilmt werden. Versuche deine Beobachtungen so zu dokumentieren.

4 Spuren identifizieren

Ordne den beobachteten oder gefilmten Spuren Teilchen zu! Begründe deine Schlussfolgerungen.

5 Spuren erzeugen

Hält man ein radioaktives Präparat an die Kammer oder legt es hinein, sind deutlich mehr Spuren zu erkennen. Woran erkennst du, dass die Spuren von der radioaktiven Quelle stammen? Kannst du die Spuren von Alpha- und Beta-Teilchen unterscheiden? Beschreibe deine Beobachtung.

6 Spuren beeinflussen

Magnetfelder beeinflussen die Bewegungsrichtung von elektrisch geladenen Teilchen. Kannst du, wenn du die Nebelkammer in ein Magnetfeld einbringst, eine Veränderung der Spuren beobachten? Erkläre deine Beobachtung.

7 Recherche

Bei der Beschäftigung mit der Nebelkammer können sich verschiedene Fragen ergeben, die recherchiert und diskutiert werden können. Die unten angegebenen Links können als Recherchegrundlage dienen.

- ▶ Wer hat die Nebelkammer erfunden und wozu?
- ▶ Wie funktioniert eine Nebelkammer? Welche Arten von Nebelkammern gibt es?
- ▶ Wie entstehen Spuren in der Nebelkammer? Warum sehen die Spuren verschieden aus?
- ▶ Welche Entdeckungen wurden mit der Nebelkammer gemacht?
- ▶ Woher kommen die Teilchen, die wir in der Nebelkammer sehen?
- ▶ Aus welchen Teilchen besteht die primäre kosmische Strahlung? Woher kommen diese?
- ▶ Aus welchen Teilchen besteht die sekundäre kosmische Strahlung? Wie entsteht diese?
- ▶ Wie und von wem wurde die kosmische Strahlung entdeckt?
- ▶ Welche Bedeutung haben kosmische Teilchen für die aktuelle Forschung in der Astroteilchenphysik?

8 Relativitätstheorie

In der Nebelkammer können auch Myonen beobachtet werden. Diese entstehen in ca. 15 km Höhe, wenn primäre kosmische Teilchen auf die Erdatmosphäre treffen und mit den Atomkernen der Luft kollidieren. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass Myonen eine mittlere Lebensdauer von $2 \cdot 10^{-6}$ s haben. Nach klassischen Berechnungen würden sie damit aber nicht die Erdoberfläche erreichen. Kannst du erklären, warum wir sie trotzdem in einer Nebelkammer beobachten können?



Nebelkammer im Video erklärt

Terra X Lesch & Co: Weltraumstrahlung im Wohnzimmer. <https://www.youtube.com/watch?v=KuSLfCUGZTc>
LekkerWissen: Wir machen Radioaktivität sichtbar. <https://www.youtube.com/watch?v=N17HHWmlWho>

Informationen zu kosmischen Teilchen

DESY: Einführung in das Themengebiet kosmische Teilchen:
https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort_zeuthen/kosmische_teilchen/index_ger.html
Welt der Physik: Einführungsartikel und Nachrichten:
<https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmische-strahlung>
Neutron Monitor Database: http://www01.nmdb.eu/public_outreach/de/



HINTERGRUNDWISSEN NEBELKAMMER

Wie funktioniert die Selbstbau-Nebelkammer?

Der im Filz gespeicherte Alkohol verdunstet, bis die Luft im Innern der Kammer mit Alkoholdampf gesättigt ist. Ein Gasvolumen kann bei einer bestimmten Temperatur eine begrenzte Menge an Flüssigkeit aufnehmen. Je höher die Temperatur ist, desto mehr Flüssigkeit kann verdampfen und vom Gas gehalten werden.

Das Trockeneis kühlt den unteren Teil der Kammer stark ab. Der absinkende Alkoholdampf aus dem oberen Bereich der Nebelkammer geht durch die geringere Temperatur in dem unteren Bereich in einen übersättigten Zustand über. Das heißt, die Luft enthält mehr Alkoholdampf, als sie bei dieser Temperatur aufnehmen könnte.

Fliegt ein elektrisch geladenes Teilchen durch Luft, erzeugt es zahlreiche Ionen in seiner Umgebung. In der übersättigten Schicht dienen diese Ionen als Kondensationskeime, d. h. der übersättigte Alkoholdampf kann an dieser Stelle kondensieren, und es entstehen sichtbare Spuren aus Alkoholtröpfchen.

Welche Teilchen kann man in der Nebelkammer beobachten?

In einer Nebelkammer kann man die Spuren von elektrisch geladenen Teilchen sehen. Die meisten beobachteten Teilchen sind **Alpha-Teilchen** (Alpha-Strahlung/Heliumkerne), **Elektronen** (Beta-Teilchen/Beta-Strahlung) und **Myonen**. Alpha- und Beta-Teilchen sind Zerfalls- bzw. Umwandlungsprodukte von radioaktiven Stoffen. Radioaktive Stoffe haben instabile Atomkerne, die bei der radioaktiven Umwandlung Teilchen emittieren. Alpha-Teilchen haben in Luft und Alkoholdampf eine relativ kleine Reichweite. Da Alpha-Teilchen bereits durch ein Blatt Papier absorbiert werden, können sie nicht durch die Hülle der Kammer dringen. Sie müssen von einem radioaktiven Bestandteil der Luft in der Kammer ausgehen. In der Tat handelt es sich hier um Produkte, die bei der radioaktiven Umwandlung des Edelgases Radon entstehen. Dieses ist Bestandteil der Luft.

Je nachdem, ob ein Elektron bei einer radioaktiven Umwandlung entstanden ist oder ob es der kosmischen Strahlung entstammt, wird es als Beta-Teilchen (radioaktive Umwandlung) oder Elektron (kosmische Strahlung) bezeichnet. Myonen und Elektronen entstammen der sekundären kosmischen Strahlung. Sekundäre kosmische Strahlung entsteht, wenn Teilchen aus dem Kosmos auf die Erdatmosphäre treffen. Myonen und Elektronen haben eine größere Reichweite als Alpha-Teilchen in Luft und können zum Teil die ganze Nebelkammer passieren.

Alle Teilchen, die in der Nebelkammer beobachtet werden können, zählen zur ionisierenden Strahlung aus natürlichen Quellen. Es ist nicht immer möglich, jeder Spur eindeutig einer Teilchenart zuzuordnen bzw. die Herkunft des Teilchens festzulegen. Nur die Beobachtung von vielen Spuren lässt Rückschlüsse auf die Natur der uns allzeit umgebenden Teilchen zu.

Einzelne gerade Spuren stammen von schnellen Teilchen mit hoher Bewegungsenergie. Durch ihre hohe Bewegungsenergie werden sie nicht oder wenig gestreut.

- ▶ **Dünne lange Spuren** deuten auf energiereiche Myonen, Elektronen oder ihre jeweiligen Anti-Teilchen hin. Sie ionisieren nur wenige Alkoholmoleküle entlang ihrer Flugbahn, wodurch die Spuren nicht sehr dicht erscheinen.
- ▶ **Dicke, dichte, kurze Spuren** deuten auf Teilchen hin, welches auf kurzer Strecke mehr Ionen erzeugt. In der Nähe der Erdoberfläche handelt es sich in den meisten Fällen um Alpha-Teilchen. Andernfalls könnten es auch Protonen sein.



Abb. 5: Myon

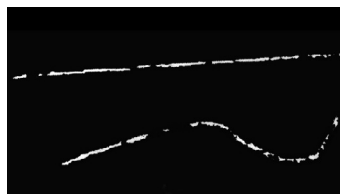


Abb. 6: Elektronen mit unterschiedlichen Energien



Abb. 7: Alpha-Teilchen

© Markus Breig | Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



HINTERGRUNDWISSEN NEBELKAMMER

Gekrümmte Spuren entstehen, wenn vergleichsweise langsame Teilchen mit weniger Bewegungsenergie an den Atomen der übersättigten Dampfschicht gestreut werden. Je langsamer das Teilchen ist, desto verschnörkelter und verschlungener sehen die Spuren aus. Dabei kann es sich um Beta-Teilchen handeln. **Punkte bzw. Nebelflecken** entstehen, wenn Teilchen senkrecht die Nebelkammer durchqueren. Eine deutlich **geknickte Spur** tritt auf, wenn sich ein Myon in ein Elektron und zwei Neutrinos umwandelt, der sogenannte Myonen-Zerfall. Die Neutrinos hinterlassen keine Spuren in der Nebelkammer, weil sie elektrisch neutral sind.



Abb. 8: Energiearmes Elektron

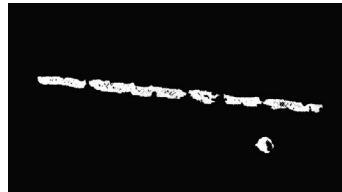


Abb. 9: Nebelfleck neben Teilchenspur

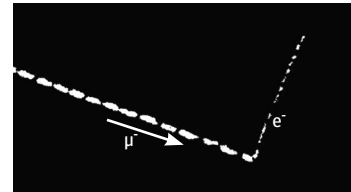


Abb. 10: Myon wandelt sich um
(sog. Myon-Zerfall)

© Markus Breig | Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Wie sehen die Teilchen in der Selbstbau-Nebelkammer aus?

Je nachdem wie dicht die übersättigte Schicht ausgeprägt ist, ob viel Feuchtigkeit auf der Grundplatte niedergeschlagen ist und wie mit der Taschenlampe der übersättigte Bereich ausgeleuchtet wird, können Spuren mehr oder weniger gut zu sehen und zu unterscheiden sein. Auch können Strömungseffekte den Beginn einer Spurentwicklung oder die gesamte Spur verzerren. Für die detaillierte Untersuchung der Spuren empfiehlt sich die Arbeit mit einer guten Kamera. Zum Vergleich können auch radioaktive Präparate genutzt werden.

Im Nachfolgenden werden Bilder von Spuren gezeigt, wie sie in einer Selbstbau-Nebelkammer fotografiert wurden. Abb. 11 zeigt eine kurze, gerade, sehr dichte Spur, woraus sich im Vergleich zu anderen Spuren auf ein Alpha-Teilchen schließen lässt. Viel dünnere, geradlinige Spuren sind in Abb. 12 und 13 zu erkennen. Die leichte Abweichung der Spur in Abb. 13 kann dadurch erklärt werden, dass das energiereiche Elektron oder Myon die Ionen dicht über der gesättigten Schicht erzeugt hat. Durch Diffusion kommt es zu einer leichten Verzerrung der Spur, wenn die Ionen in die übersättigte Schicht sinken und dort eine sichtbare Spur erzeugen.



Abb. 11: Alpha-Teilchen hinterlässt gerade,
dichte Spur



Abb. 12: Energiereiches Elektron hinterlässt
gerade Spur

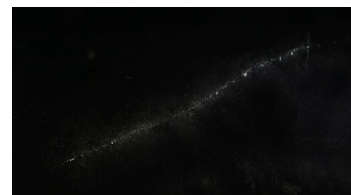


Abb. 13: Energiereiches Elektron oder Myon
durchquert gesamte Kammer

© Carolin Schwerdt | DESY



HINTERGRUNDWISSEN

NEBELKAMMER

Die Spuren energieärmer und damit langsamerer Elektronen sind in Abb. 14 bis 16 zu sehen. Ist am Ende der Spur ein weißer Punkt zu erkennen, deutet dies darauf, dass das Elektron sehr langsam wurde und all seine Energie in Form von Ionisation an einer Stelle abgab. Dadurch entsteht der sehr dichte Fleck am Ende der Spur. Darüber hinaus ist in Abb. 16 und 17 hinter dem Fleck bzw. senkrecht dazu eine weitere kurze Spur zu erkennen. Dabei kann es sich um Elektronen handeln, welche infolge des Zusammenstoßes des spurerzeugenden Elektrons mit einem Atom herausgelöst wurden. Dieses hatte dann wiederum selbst genügend Energie, um eine sichtbare Spur zu erzeugen.



Abb. 14: Energiearmes Elektron wird vielfach gestreut



Abb. 15: Energiearmes Elektron wird gestreut, gibt alle Energie ab



Abb. 16: Energiearmes Elektron wird gestreut, gibt alle Energie ab und erzeugt sekundäres Elektron



Abb. 17: Energiereiches Elektron gibt alle Energie ab, erzeugt sekundäres Elektron

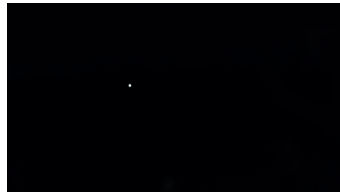


Abb. 18: Nebelkammerfleck

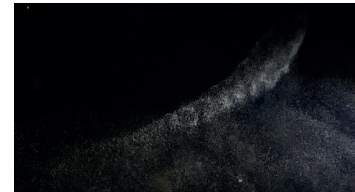


Abb. 19: Tröpfchenwolke

In Abb. 18 ist ein sogenannter Nebelkammerfleck zu sehen, wie er entsteht, wenn ein Teilchen senkrecht die übersättigte Schicht passiert. Die Tröpfchenwolke in Abb. 19 entsteht durch ein elektrisch geladenes Teilchen, welches sehr viele Ionen über der übersättigten Schicht erzeugt. Durch Diffusion und Abstoßung driften diese Ionen schnell auseinander. Sinken diese dann in die übersättigte Schicht, sammeln sich Tröpfchen an ihnen und es entsteht eine sichtbare, deutlich breitere Spur.



Abb. 20: Spiegelung (zur besseren Sichtbarkeit wurde ein Teil des Bildes geschwärzt)



Abb. 21: Alpha-Teilchen ausgehend von Thoriumstab



Abb. 22: Beta-Teilchen ausgehend von Thoriumstab

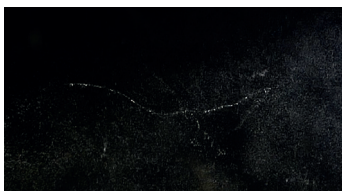


Abb. 23: Zwei sich V-förmig ausbreitende Spuren

In Abb. 20 ist etwas links unterhalb der eigentlichen Spur abgeschwächt die Spiegelung dieser Spur zu erkennen. Infolge der Ablagerung des Alkoholdampfes auf der Grundplatte kann diese eine spiegelnde Fläche bilden, was bei Beobachtungen zu Täuschungen führen kann. Abb. 21 und 22 zeigen die Spuren ausgehend von einem Thoriumstab, der als radioaktive Quelle dient. Zwei sich V-förmig ausbreitende Spuren, wie in Abb. 23 zu sehen, können selten in der Nebelkammer beobachtet werden. Es könnte die zufällige Überschneidung zweier voneinander unabhängiger Teilchen zeigen oder aber ein Elektronen-Positronen-Paar, welches von einem Photon der Gammastrahlung erzeugt wurde.



HINTERGRUNDWISSEN

NEBELKAMMER

Welche Bedeutung hatte die Nebelkammer für die Astroteilchen- und Teilchenphysik?

Die Nebelkammer war der erste Teilchendetektor, mit dem sich Spuren von Elementarteilchen sichtbar machen ließen. Nebelkammern ermöglichten viele Erkenntnisse über Elementarteilchen. Erst in den 1950er Jahren wurden Nebelkammern nach und nach durch Blasenkammern ersetzt.

Beispiele für wichtige Experimente mit Nebelkammern sind:

- ▶ Untersuchung der Reichweite von Alpha-Strahlung (L. Meitner, 1926)
- ▶ Entdeckung des Positrons (C. Anderson, 1932)
- ▶ Nachweis der Paarerzeugung und -vernichtung von Elektronen und Positronen (P. Blackett & G. Occhialini, 1933)
- ▶ Entdeckung des Myons (C. Anderson und S. Neddermeyer, 1937)



Historische Quelle

Atlas typischer Nebelkammerbilder (W. Gentner, H. Maier-Leibnitz, W. Bothe) Verlag Julius Springer (Berlin 1940):
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-50750-2>



DETAILWISSEN NEBELKAMMER

Radioaktivität, ionisierende Strahlung und kosmische Teilchen

Radioaktivität bezeichnet die Eigenschaft bestimmter Atomkerne, instabil zu sein. Diese radioaktiven Kerne senden bei ihrer Umwandlung Teilchen aus (z. B. Alpha- oder Beta-Teilchen). Diese Teilchen sind selbst nicht radioaktiv, weswegen die Bezeichnung "radioaktive Strahlung" nicht ganz präzise ist. Die Teilchen können jedoch andere Atome und Moleküle ionisieren. Der Fachbegriff ist daher ionisierende Strahlung. Wir leben seit jeher in einer strahlenden Umwelt. Hauptsächlich sind es kosmische Teilchen und Teilchen von radioaktiven Stoffen, die natürlich in der Erdkruste, in Baustoffen und in der Atmosphäre vorkommen, die zu dieser natürlichen ionisierenden Strahlung beitragen. In der Nebelkammer kann man diese beobachten. Legt man ein radioaktives Präparat in die Nebelkammer, kann man von diesem ausgehend zusätzliche Spuren beobachten.

Ionisation und Erzeugung von Spuren in der Nebelkammer

Elektrisch geladene Teilchen hinterlassen in Nebelkammern Spuren. Die wichtigste Eigenschaft dafür ist, dass diese Teilchen die sie umgebenden Atome ionisieren. Durchfliegt ein elektrisch geladenes Teilchen Materie (z. B. durch Luft), ionisiert es die Atome um sich herum. Genauer gesagt, hat das Teilchen inelastische Stöße mit den Elektronen der Atomhülle. Besitzen die Teilchen genügend kinetische Energie, so wird das einfach elektrisch negativ geladene Elektron aus der Hülle gelöst. Es bleibt ein einfach elektrisch positiv geladenes Ion zurück, d. h. das Atom ist ionisiert.

Weil die elektrisch geladenen Teilchen unterschiedlich mit der umgebenden Materie wechselwirken, sind sie in ihrer ionisierenden Wirkung unterschiedlich*. Daher lassen sie sich in der Nebelkammer anhand ihrer Spuren unterscheiden und identifizieren.

Die meisten Ionen pro Wegstrecke erzeugen Alpha-Teilchen. Alpha-Teilchen haben eine Masse von 4 u (die ca. vierfache Protonenmasse), Elektronen eine ungefähre von 1/2000 u. Trifft ein Alpha-Teilchen auf das Elektron in der Hülle eines Atoms, wird es praktisch nicht abgelenkt. Es bewegt sich annähernd geradlinig und verursacht dabei 3000 bis 7000 Stoßionisationen pro Millimeter in Luft. Das Alpha-Teilchen gibt so nach und nach seine Energie ab, bis nach zwei bis neun Zentimetern die kinetische Energie für keine weitere Ionisation mehr ausreicht. Im Prinzip verhält sich das Alpha-Teilchen wie eine Bowlingkugel, die geradlinig durch die Kegel pflügt.

Bei Beta-Teilchen ist die Lage eine andere. Beta-Teilchen oder schnelle Elektronen haben die gleiche Masse wie die Elektronen der Hülle. Es kommt deutlich seltener zu einem inelastischen Stoß zwischen Beta-Teilchen und Hüllenelektron als bei einem Alpha-Teilchen. D. h. die Beta-Teilchen ionisieren viel seltener Atome und geben weniger Energie in Form von Ionisation ab. Es kommt nur zu vier bis acht Ionisationen pro Millimeter. Dafür verlieren sie sehr viel Energie durch Bremsstrahlung, was sich in der Nebelkammer nicht sehen lässt. Hat das Beta-Teilchen viel Energie verloren, wird es genau wie beim Billard bei jedem Aufprall abgelenkt. Es entsteht eine Zickzack-Spur.

Myonen sind rund 200-mal schwerer als Elektronen. Sie haben öfter inelastische Stöße mit den Elektronen einer Atomhülle und der Energieverlust durch Bremsstrahlung ist 40 000-mal kleiner als bei Elektronen. Damit erzeugen sie mehr Ionen pro Wegstrecke (aber immer noch deutlich weniger als Alpha-Teilchen) und haben eine größere Reichweite als Elektronen.

Gamma-Strahlung, also energiereiche Photonen, können je nach Energie durch Photo-, Compton- oder Paarbildungseffekt mit Materie in Wechselwirkung treten. Dabei können sie freie Elektronen erzeugen. Diese sekundären Elektronen können wiederum in der Nebelkammer Spuren hinterlassen. Diese Elektronen sind zumeist viel energiereicher, haben eine Reichweite von vielen Metern und hinterlassen in der Nebelkammer auch sehr dünne Spuren.

*Die Bethe-Bloch-Formel beschreibt den Energieverlust von elektrisch geladenen Teilchen beim Durchgang durch Materie. Für Elektronen und Positronen muss die Bethe-Bloch-Formel modifiziert werden.

Übersättigung von Gasen

Das zweite wichtige physikalische Prinzip für die Funktion einer Nebelkammer ist die Übersättigung. Ein abgeschlossenes Gasvolumen einer bestimmten Temperatur kann eine ganz bestimmte Menge Flüssigkeit aufnehmen. Je höher die Temperatur des Gases ist, desto mehr Flüssigkeit kann es halten. Hat das Gas die maximale Menge an Flüssigkeit bei einer gewissen Temperatur aufgenommen, so hat es den gesättigten Zustand erreicht, d. h. die relative Feuchtigkeit beträgt dann 100 %, die zugehörige Temperatur nennt man Taupunkt. Weitere Flüssigkeit würde in Form von Tropfen kondensieren, sofern Kondensationskeime vorhanden sind. Als solche können kleinste Staubteilchen oder Ionen dienen. Handelt es sich um eine staubfreie Atmosphäre, so kann das Gas den übersättigten Zustand erreichen, d. h. es hält mehr Flüssigkeit als für die jeweilige Temperatur normal ist. Bei der Nebelkammer gibt es zwei grundlegende Möglichkeiten eine solche Übersättigung zu erreichen.



DETAILWISSEN

NEBELKAMMER

Übersättigung durch Volumenvergrößerung

Dehnt man das Volumen eines Gases plötzlich aus, so verringert sich die Temperatur des Gases (adiabatische Abkühlung). War dieses vorher mit Flüssigkeit gesättigt, so befindet es sich jetzt im übersättigten Zustand, da es bei niedrigerer Temperatur weniger Flüssigkeit halten kann. Dies ist das Prinzip der Wilson'schen Expansionsnebelkammer. Der Nachteil dieser Methode ist, dass der Zustand der Übersättigung nur für einen kurzen Zeitraum zu erreichen ist (ca. 1/10 s), da er nur so lange anhält, wie Unterdruck herrscht. Es gelingt zwar durch langsame Expansion, diesen Zeitraum auf etwa 2 s auszudehnen, das ist jedoch noch nicht genug, um mit ausreichend hoher Wahrscheinlichkeit seltene Kernprozesse zu beobachten.

Übersättigung durch Temperaturgradienten

Weitaus effektiver ist die Methode, Dampf durch ein Temperaturgefälle von einer wärmeren in eine kältere Zone diffundieren zu lassen und somit eine Übersättigung zu erzeugen. Hierdurch ist es möglich, eine kontinuierlich übersättigte Gasschicht zu erzeugen. Der gleiche Effekt tritt auf, wenn man aus der Kälte kommend einen warmen Raum betritt und die Brillengläser beschlagen. Wie beschrieben, kann ein Gas bei höherer Temperatur mehr Flüssigkeit aufnehmen. Um die kalten Brillengläser herum kühlt die warme Raumluft ab, so dass sie weniger Feuchtigkeit halten kann. Diese Feuchtigkeit schlägt sich dann auf den Gläsern nieder. Dies sind die Grundsätze, die in einer Diffusionsnebelkammer nach Langsdorf Anwendung finden.

Kontinuierliche Nebelkammern

In Museen oder Forschungseinrichtungen gibt es manchmal kontinuierlich arbeitende Diffusionsnebelkammern. Diese Geräte werden elektrisch gekühlt und lassen permanent Teilchenspuren erkennen. Neben der permanenten Kühlung und dem permanenten Zu- und Rücklauf von Alkohol ist eine Heizung in der Decke der Glashaube eingebaut. Diese dient zum einen dazu, ein Beschlagen der Scheibe zu vermeiden. Zum anderen werden Ionen abgesaugt, die außerhalb der übersättigten Schicht entstehen und das Sichtfeld verschmutzen könnten. Über eine Schleuse können radioaktive Quellen ins Innere der Nebelkammer eingeführt werden.

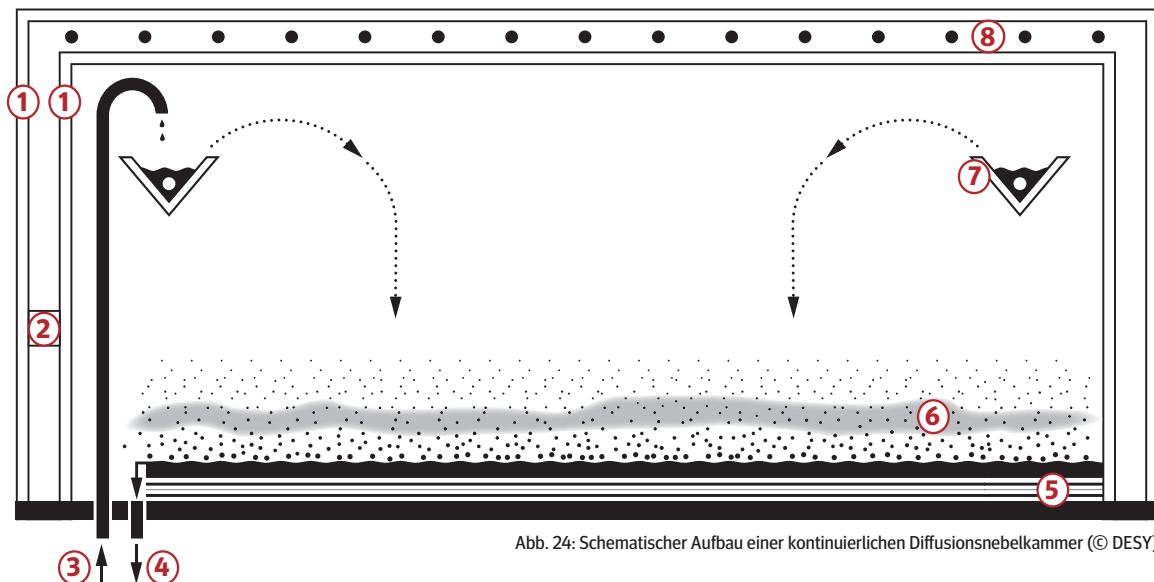


Abb. 24: Schematischer Aufbau einer kontinuierlichen Diffusionsnebelkammer (© DESY)

- | | |
|------------------------|--------------------------------------|
| ① Glashauben | ⑤ Kühlung der schwarzen Metallplatte |
| ② Schleuse | ⑥ übersättigter Dampf |
| ③ Zulauf von Alkohol | ⑦ Rinne mit Heizung |
| ④ Rücklauf von Alkohol | ⑧ 1–4 kV Heizung und Ionenabsaugung |



HINTERGRUNDWISSEN KOSMISCHE TEILCHEN

Was sind kosmische Teilchen?

Das Universum wird von der sogenannten primären kosmischen Strahlung durchströmt und besteht größtenteils aus Protonen, gefolgt von Alpha-Teilchen (Heliumkernen) und Elektronen. Auch Neutrinos und Photonen sind kosmische Boten, werden aus historischen Gründen meist aber nicht zur kosmischen Strahlung gezählt. Kosmische Teilchen können zum Teil sehr hohe Energien besitzen. Wenn ein Teilchen der kosmischen Strahlung auf einen Atomkern in der Erdatmosphäre trifft, kommt es zu einer Wechselwirkung, ganz analog zu den Proton-Proton Kollisionen an dem Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider (LHC) am CERN. Alles, was am LHC geschieht, passiert auch permanent in unserer Erdatmosphäre. Jedoch sind die Energien, die in kosmischen Beschleunigern, wie z. B. Supernova-Explosionen erreicht werden, weitaus höher als im weltgrößten Teilchenbeschleuniger. Je nach Energie des primären kosmischen Teilchens können viele neue Teilchen erzeugt werden. Diese werden als sekundäre kosmische Strahlung bezeichnet. Die hierbei am häufigsten erzeugten Teilchen sind die Pionen π . Pionen haben eine sehr kurze Lebensdauer. Elektrisch geladene Pionen π wandeln sich hauptsächlich in Myonen μ und Myon-Neutrinos ν_μ um, während sich neutrale Pionen π^0 in Photonen umwandeln:



Die so entstehenden Myonen bewegen sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit und können auf der Erdoberfläche nachgewiesen werden. Auf Erdniveau sind rund 80 % der elektrisch geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung Myonen*.

*C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chinese Physics C, 40, 100001 (2016). 29. Cosmic Rays.

Legende

Teilchenart

p Proton n Neutron π Pion μ Myon
 ν Neutrino γ Photon e Elektron/Positron

Elektrische Ladung

— geladen - - - neutral

Bezeichnung Schaueranteil

— hadronische Kaskade
 — elektromagnetische Kaskade
 — Myonen-Neutrino-Kaskade

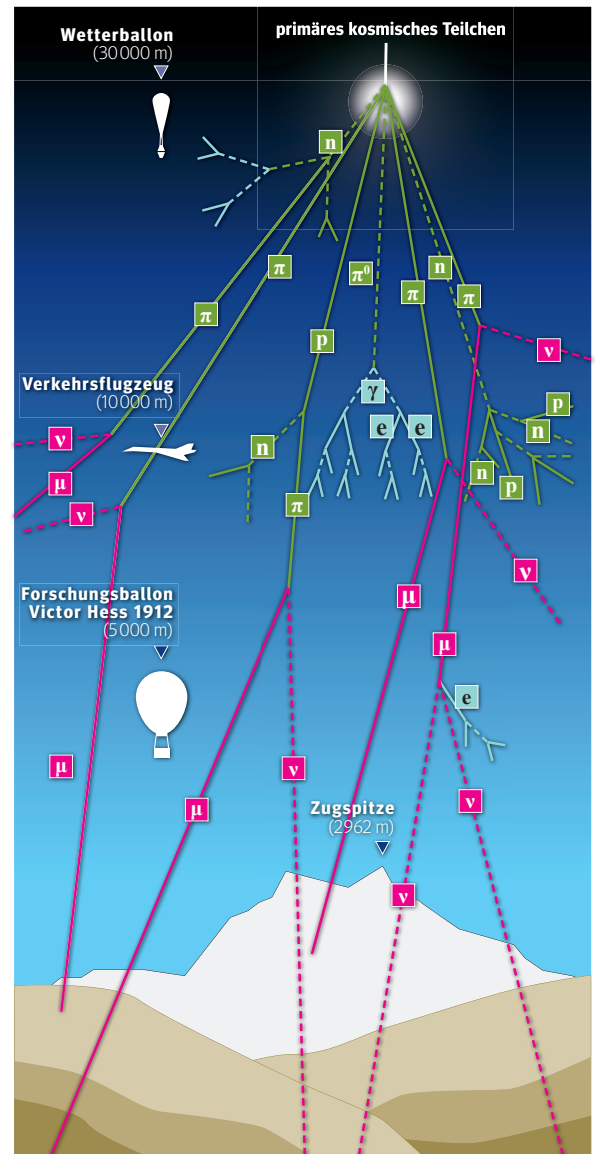


Abb. 25: Entstehung von Teilchenschauern in der Erdatmosphäre (© Netzwerk Teilchenwelt)



Mehr Wissen

femto – Das DESY-Forschungsmagazin, verschiedene Artikel in den Ausgaben: 03|2016, 02|2016 und 01|2014
<https://www.desy.de/femto>

Film „The fantastic voyage of Nino the Neutrino“: <http://ippog.org/resources/2012/fantastic-voyage-nino-neutrino-sun-earth>
 (Filmlänge: 5:49 min, Sprache: Italienisch mit englischen Untertiteln)

Pressemeldung DESY „Durchbruch bei der Fahndung nach Teilchenbeschleunigern im Weltall“ mit vielen Videos und Animationen: <https://t.co/9u9COsTJB6>



HINTERGRUNDWISSEN

KOSMISCHE TEILCHEN

Wo entstehen kosmische Teilchen?

Da elektrisch geladene kosmische Teilchen durch galaktische und intergalaktische Magnetfelder abgelenkt werden, können Wissenschaftler bei der Messung auf der Erde nicht mehr auf ihren genauen Ursprungsort schließen. Anhand der Energie, die ein Teilchen der primären kosmischen Strahlung besitzt, können Astroteilchenphysiker aber bestimmen, von welcher Art der wahrscheinlichste Ursprungsort ist.

Die Sonne ist die uns am nächsten gelegene Quelle kosmischer Teilchen. Sie sendet insbesondere Teilchen mit vergleichsweise niedriger Energie aus. Pulsare, Doppelsternsysteme und die Druckwellen von Supernovae erzeugen und beschleunigen kosmische Teilchen innerhalb der Milchstraße auf höhere Energien. Sehr hochenergetische Teilchen stammen wahrscheinlich von Quellen außerhalb der Milchstraße. Ein Beispiel dafür ist ein Aktiver Galaxienkern. Er befindet sich im Zentrum einer aktiven Galaxie und besteht aus einem supermassereichen Schwarzen Loch. Um dieses Schwarze Loch bildet sich eine Akkretionsscheibe, die diesem ständig Materie zuführt. Senkrecht zur Akkretionsscheibe entstehen Jets, welche große Mengen an Materie mit nahezu Lichtgeschwindigkeit herausschleudern. Diese aktiven Galaxienkerne sind mit die hellsten Objekte am Himmel. Obwohl sie punktförmig erscheinen, können sie so groß sein wie unser Sonnensystem!

Wie solch hohe Energien entstehen können und ob es eine obere Grenze für die erreichten Energien gibt, ist ein Forschungsschwerpunkt der Astroteilchenphysik. Während die kosmische Strahlung bei niedrigen Energien hauptsächlich aus Protonen besteht, ist ihre Zusammensetzung bei den höchsten Energien noch nicht endgültig geklärt.

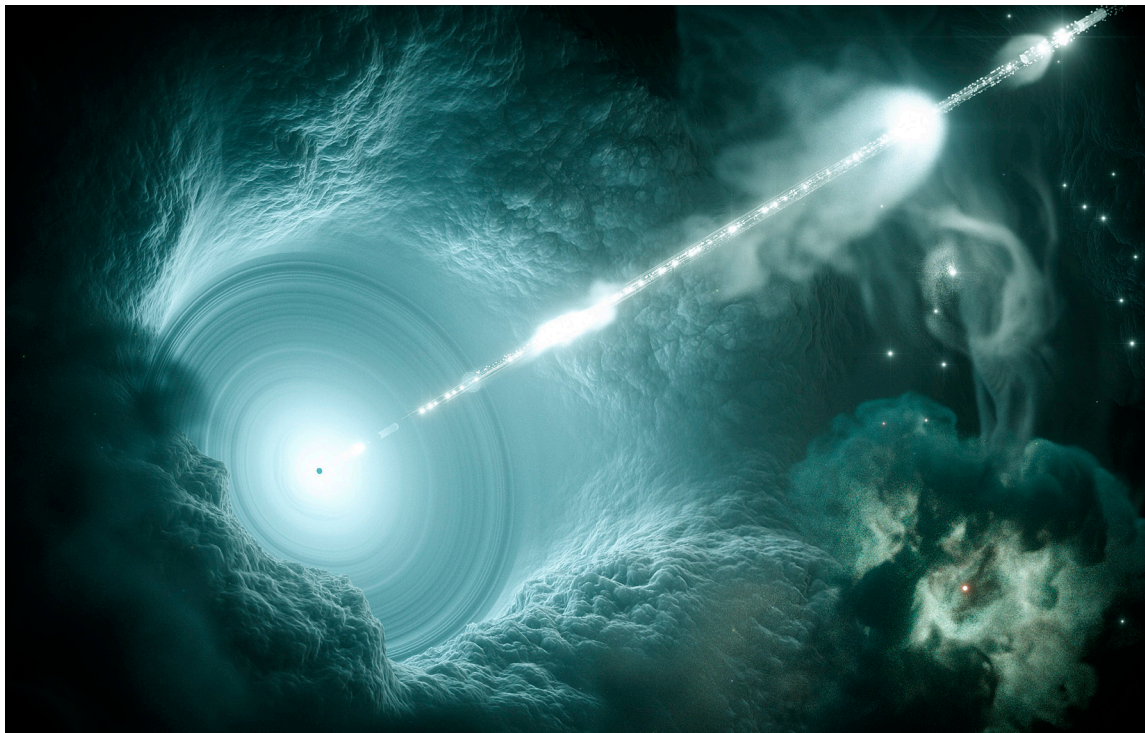


Abb. 26: Künstlerische Darstellung eines aktiven Galaxienkerns. Das supermassive Schwarze Loch im Zentrum der Akkretionsscheibe schickt einen energiereichen, scharf gebündelten Teilchenstrahl senkrecht ins All (© DESY, Science Communication Lab).



HINTERGRUNDWISSEN

KOSMISCHE TEILCHEN

Welche Bedeutung haben kosmische Teilchen für die Astroteilchen- und Teilchenphysik?

Bis in die 50er Jahre spielten die aus dem Kosmos ständig auf uns einfallenden Teilchen eine führende Rolle bei der Erforschung der Elementarteilchen. Viele neue Teilchen wurden in der kosmischen Strahlung entdeckt und untersucht, beispielsweise Myonen und Positronen. Mit dem technologischen Fortschritt im Bau von Teilchenbeschleunigern wurde es möglich, Elementarteilchen mit definierten Energien zu erzeugen und ihre Wechselwirkungsprozesse in Experimenten mit großer Statistik zu untersuchen. Die Eigenschaften von Teilchen ließen sich so wesentlich genauer untersuchen und man musste nicht mehr auf das zufällige Eintreffen von Teilchen aus dem Kosmos warten. Neue Teilchen, ihre Wechselwirkungen und Umwandlungseigenschaften wurden so nach und nach entdeckt. Am Large Hadron Collider (LHC) am CERN haben Teilchenphysiker mit der Entdeckung des Higgs-Teilchens 2012 einen großen Durchbruch gefeiert. Für die theoretischen Überlegungen und Berechnungen, die die Existenz dieses Teilchens vorausgesagt haben, erhielten der Belgier François Englert und der Brite Peter Higgs im Jahr darauf den Physik-Nobelpreis.

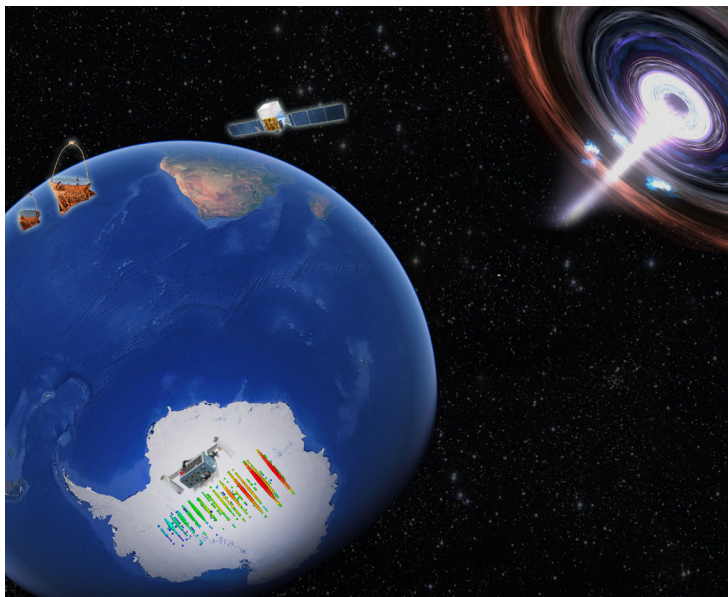


Abb. 27: Künstlerische Darstellung eines Schwarzen Lochs im Zentrum einer Galaxie, welches Neutrinos und Gamma-Strahlung aussendet. Aus derselben Quelle detektierten zunächst IceCube ein Neutrino, anschließend die MAGIC-Teleskope und das Fermi-Observatorium im Weltraum hochenergetische Gamma-Strahlung. (©IceCube Collaboration/Google Earth: PGC/NASA U.S. Geological Survey Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO Landsat/Copernicus)

Das neu gewonnene Wissen aus den Beschleunigerexperimenten hilft auch, die kosmische Strahlung besser zu verstehen. Wesentliche Impulse lieferten die experimentellen Methoden zum Nachweis der Teilchen sowie die Registrierung, Speicherung und Analyse großer Datenmengen. Heute versucht die Astroteilchenphysik herauszufinden, von welchen Quellen die kosmischen Teilchen erzeugt werden und welche Beschleunigungsmechanismen den Teilchen zu derart hohen Energien verhelfen. Dazu ist es wichtig, die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung genauer zu untersuchen. Durch Messung der verschiedenen von einer Quelle ausgesendeten kosmischen Boten kann auf die Beschleunigungsmechanismen in der Quelle geschlossen werden. Einen Durchbruch in diesem Bereich gab es 2017.

Das Neutrinoobservatorium IceCube am Südpol hatte ein einzelnes hochenergetisches kosmisches Neutrino detektiert. Dieses Neutrino hatte eine Energie von etwa 300 Teraelektronenvolt, etwa 40 mal so viel Energie wie ein Proton im Large Hadron Collider (LHC) erreicht. Wenige Minuten nachdem das Neutrino gemessen worden war, wurde eine automatische Benachrichtigung von IceCube an zahlreiche andere astronomische Observatorien geschickt. Daraufhin wurde die Region, aus der das Neutrino stammen musste, im Licht verschiedener Wellenlängen untersucht: von der energiereichen Gamma- und Röntgenstrahlung über das sichtbare Licht bis hin zu den Radiowellen. Insgesamt 18 Observatorien auf der Erde und im Weltraum waren beteiligt. Und tatsächlich, es gelang erstmals in Zusammenarbeit verschiedenster Astroteilchenphysik-Experimente eine Quelle für das hochenergetische kosmische Neutrino ausfindig zu machen. Ein Schwarzes Loch in einer fast vier Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie im Sternbild Orion hatte das Neutrino entsendet.