

Nukleare Astrophysik am Beispiel eines kohligen Chondriten



Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzfassung2
2.	Zielsetzung
3.	Literaturrecherche zum Allende Meteoriten3
4.	Optische Strukturanalyse4
5.	Neutronenaktivierungsanalyse7
	5.1 Theoretische Grundlagen7
	5.2 Anfrage am Fraunhofer Institut INT Euskirchen7
	5.3 Vorbereitung des Experiments7
	5.4 Die erwarteten Hauptreaktionen
	5.5 Versuchsaufbau9
	5.6 Versuchsablauf
	5.7 Ergebnisse
	5.8 Deutung
6.	Danksagung
7.	Link-und Literaturverzeichnis

1. Kurzfassung

In dieser Arbeit haben wir Bruchstücke des Allende Meteoriten untersucht. Dieser Meteorit gehört zur Gruppe der seltenen kohligen Chondriten. Das Ziel war einerseits die kristalline Struktur zu bestimmen und andererseits die chemische Zusammensetzung zu untersuchen. Um die Herkunft des Meteoriten zu klären, haben wir Silizium-Isotope untersucht bzw. das Isotopenverhältnis der Isotope²⁸Si zu²⁹Si bestimmt.

Zur Untersuchung der kristallinen Struktur wurde ein Dünnschliff des Meteoriten angefertigt und mikroskopisch untersucht. Wir haben eine körnige Kristallstruktur beobachtet. Veröffentlichte Mikroskopbilder zeigen eine ähnliche Struktur.

Zur Untersuchung des Isotopenverhältnisses von ²⁸Si und ²⁹Si haben wir die zerstörungsfreie Neutronenaktivierungsanalyse verwendet. Dazu haben wir unser Bruchstück des Allende Meteoriten mit Neutronen bestrahlt. Dadurch werden in den Elementen bzw. deren Isotopen, aus denen der Meteorit besteht, Kernreaktionen ausgelöst. Die resultierenden radioaktiven Kerne zerfallen unter Aussendung charakteritischer γ -Strahlung und auf diese Weise können die Isotope von Elementen identifiziert werden.

Wir haben speziell das Isotopenverhältnis von ²⁸Si zu²⁹Si untersucht, da Silizium eines der wichtigsten Elemente in der astronomischen Forschung darstellt und präsolare und solare Si Isotope

unterschiedliche Isotopenverhältnisse aufweisen. Zu diesem Zweck haben wir zwei Experimente ausgeführt, eines mit dem Meteoriten und ein zweites mit einem Bergkristall terrestrischen Ursprungs. Das von uns am Meteoriten gemessene Isotopenverhältnis von ²⁸Si zu ²⁹Si stimmt innerhalb des Messfehlers mit dem des Bergkristalls überein. Dieses Ergebnis legt nahe, daß der Allende Meteorit solaren Ursprungs ist.

2. Zielsetzung

Unser Betreuungslehrer Hr.Stein, gab uns zwei Steine. Er sagte nur, dass es Teile des Allende Meteoriten seien und dass es unsere Aufgabe wäre, soviel wie nur möglich über diese Stein rauszufinden. "Diese Steine haben eine spannende Geschichte, ihr müsst sie nur finden!" fügte er hinzu. Das war auch unsere Zielsetzung in dieser Untersuchung, wir wollten rausfinden, was diese Meteoritenbruchstücke uns erzählen könnten.



2.1 Die überreichten Steine



2.2 Nahaufnahme eines dieser Steine

3. Literaturrecherche zum Allende Meteoriten

Der Allende Meteorit trat 1969 in die Erdatmosphäre ein und ging in Mexico nieder. Er verteilte sich auf einer mehrere Quadratkilometer großen Fläche, nachdem er beim Eintritt in den Orbit zersplitterte. Er wird klassifiziert als kohliger Chondrit, gehört wie die anderen Gesteine seiner Art zu den Steinmeteoriten und enthält natürlich Kohlenstoff. Aber es sind zum Beispiel auch die Elemente Calcium und Aluminium enthalten. Diese werden als erste feste und älteste Materialien in unserem



Sonnensystem angesehen. Die Klassifizierung der Meteoriten reicht weit von gröberen bis hin zu feinsten Kriterien. Zuerst wird in differenziert und undifferenziert geteilt. Die differenzierten Meteoriten stammen von anderen Himmelskörpern mit erdähnlichem Schalenaufbau. Dies ist ein Vorgang der seinerzeit mit Schmelzprozessen einherging. Durch

3.1 Klassifikation der Meteorite^[1]

ebendiese entstand dann eine Materialtrennung, die wir Differentiation nennen. Aus den jeweils unterschiedlichen Schalen entstammen unterschiedliche Gesteine: die Eisen-Meteoriten aus dem Kern, die Stein-Eisen-Meteorite aus dem Übergangsbereich zwischen Kern und Mantel, schließlich die nichtchondritischen Steinmeteoriten, Achondriten aus dem Mantel. Die undifferenzierten gliedern sich in die frequenteste Meteoriten Art: die zu den Steinmeteoriten zählende Chondriten. Weitere Einteilungen beziehen sich auf kleinste Differenzen.

4. Optische Strukturanalyse

Während der Vorbereitungsphase sind wir übereingekommen, mit einer optischen Analyse in Form der groben und daraufhin der detaillierten Oberflächenuntersuchung zu beginnen. Dazu haben wir erst mit einem Auflichtmikroskop das Äußere des Gesteins untersucht und haben ein erwartungsgemäß unspektakuläres Bild vorgefunden (Abb. 4.1). Die rauen Formationen sind das natürliche Resultat der Herkunft und der Kollision mit der Erdatmosphäre, wie auch des Fundorts in der Wüste. Weitere Schlüsse haben diese Aufnahmen nicht zugelassen. Interessantere Formen waren erst nach einem Teilen durch die Mitte zu sehen (Abb. 4.2). Die dort sichtbaren Mineralien mussten im nächsten Schritt identifiziert werden.



4.1 Oberfläche des Allende Meteoriten betrachtet unter einem Auflichtmikroskop



4.2 Querschnitt unseres Bruchstücks

Zur detaillierten Untersuchung haben wir uns mit der aus der Petrographie bekannten Praxis des Dünnschliffes befasst. Zur Erklärung dieses Sachverhalts einige Worte: Gesteine sind fast ausnahmslos undurchsichtig und deshalb für die Durchlichtmikroskopie ungeeignet, doch durch akkurates Schleifen der Proben mit Siliziumkarbid kann eine Dicke von unter 30 µm (0,03 mm) erreicht werden. Ab dieser Größenordnung können dann bei Betrachtung durch polarisiertes Licht erstaunliche Farbkombinationen beobachtet werden, wobei eine Farbe bei unterschiedlicher Dicke des Dünnschliffs, andere Minerale darstellt. Da wir, vollkommene Neulinge auf dem Gebiet der Geologie, kein allzu hohes Risiko eingehen wollten, aber gleichzeitig auch nicht unsere Selbständigkeit opfern, haben wir bei Herrn Nils Jung, Präparator im Bonner Steinmann Institut, angefragt ihm bei seiner Arbeit zusehen zu dürfen und um Hilfestellungen für die manuelle Fertigung von Dünnschliffen gebeten. Freundlicherweise war er dazu bereit sich am Montag, den 12. November 2012 mit uns zu treffen.

Am Morgen dieses Tages sind wir dann ins Poppelsdorfer Schloss, Sitz der geologischen Fakultät in Bonn, aufgebrochen. Dort hat Herr Jung uns freundlich begrüßt und uns einen allgemeinen, sowie visuellen Überblick zur Vorgehensweise gegeben, wie aus Gesteinen von mehreren Zentimetern Länge, Dicke und Breite, Mikrometer dünne Dünnschliffe werden.



4.3 Verschiedene Stadien während der Produktion von Dünnschliffen Darauf hat er mit uns einen Plan für das Schleifen, Materialien und andere zu beachtende Aspekte erstellt und uns einige seiner fertigen Präparate durch das Mikroskop gezeigt. Außerdem hat er uns Quellen zur Materialbeschaffung und Fachliteratur empfohlen, sowie auch einen Auszug aus einem Werk mitgegeben. Dank der Tatsache, dass wir eines unserer Meteoritenstücke dabei hatten, war Herr Jung dazu bereit das Schneiden des Stücks an der Säge vorzumachen, da uns das in der Schule nicht mehr möglich gewesen wäre. Im weiteren Verlauf der Exkursion musste erstmalig geschliffen werden, um das Präparat auf einen Objektträger kleben zu können. Auf einer Glasplatte wird das Siliziumkarbid, das Schleifmaterial in verschiedenen Körnungen, mit wenig Wasser vermengt und dann gilt es das Objekt achtförmig mit der gräulichen Konsistenz glatt zu Schleifen. Begonnen haben wir mit einer 220 Körnung, einer relativ groben, denn es lassen sich beim Zerreiben zwischen den Fingern noch Körner fühlen. Fortgefahren sind wir mit dem 500- und danach dem 800-Pulver. Schließlich musste der halbe Stein auf einen Objektträger geklebt werden, was wiederum durch einen in der Schule nicht realisierbaren Vorgang mit speziellem UV-Kleber geschieht. Dieser hat eine sehr kurze, circa 4 minütliche Erhärtungphase in einem mit UV-Lampen ausgestatteten geschlossenen Kasten. Das war für uns, die wir von einem mehrtägigen Festigungsprozess mit Harz ausgegangen waren, eine Überraschung. Nach einigen Komplikationen die Luftbläschen im Kleber verursacht hatten war das Präparat aufgeklebt. Dann hat Herr Jung erneut gesägt um die Dicke des Objektes auf ungefähr 3 mm zu minimieren (Abb. 4.4), Herr Jung hat uns zusätzlich die Kontaktdaten anderer Bonner und Kölner Wissenschaftler gegeben, die sich auch mit Meteoriten/Geologie befassen, für eventuelle fachspezifische Rückfragen.



4.4 Mit UV-Kleber auf einen Objektträger befestigter Querschnitt

Wir hatten auch direkt Möglichkeit mit einem der hausinternen Kollegen ins Gespräch zu kommen. Nach dem produktiven Besuch in Bonn waren wir nun weitreichend auf uns alleine gestellt und haben das Schleifen bei unserem nächstmöglichen Treffen weitergeführt. Dabei sind wir nach den Vorschlägen von Herrn Junge vorgegangen und haben, um nicht zu viel Materie zu verlieren, während des Schleifens Tesafilm, der sich etwa in ähnlicher Größenordnung von 20µm bewegt, um die Ränder des Objektträgers gewickelt. Es wurde darauf geachtet durch gleichmäßige Achter-Bewegungen mit der 220 Körnung keine Unregelmäßigkeiten hervorzubringen. Außerdem haben wir stets kontrolliert, sowohl mit dem Auge als auch unter dem Mikroskop in

polarisiertem Licht, inwieweit wir fortgeschritten sind. Nach mehreren Stunden Arbeitszeit haben wir die Körnung gewechselt auf das 500 Siliziumkarbid und erste Farbzusammenstellungen waren zu entdecken. Da sich jedoch auf unerklärliche Weise eine Unebenheit ergeben hat, haben wir auf das feinste Schleifmittel zurückgegriffen, das 1000 Pulver. Doch konnten wir nicht verhindern, dass eine Seite weiter heruntergeschliffen wurde als die andere und schlussendlich die Dichte des Meteoriten an dieser Stelle dezimiert war. Unser Ergebnis ist nun leider mit kleinen freien Stellen behaftet. Aber auch so haben wir



4.8 Unser Dünnschliff betrachtet unter einem Mikroskop durch einen Polarisationsfilter



4.9 Unser fertiger Dünnschliff

Unser Ergebnis zeigt zwar viele vielversprechende Farben und Strukturen, aber um diese Bilder analysieren zu können, müssten die Stellen größer sein und die Dicke müsste genauestens bekannt sein. Obwohl der Dünnschliff kein wesentlicher Erfolg war, konnten wir dennoch mit großer Wahrscheinlichkeit zeigen, dass der Stein wirklich ein Bruchstück des Allende Meteoriten sein muss, denn wenn man unseren Querschnitt mit bekannten Querschnitten vergleicht, stellt man fest, dass die äußere Struktur sehr ähnlich ist, insbesondere die gut erkennbaren weißen Einschlüsse.



4.10 *Links*: Unser halbierter Stein; *Rechts:* Querschnitt von öffentlicher Webseite^[2]

Da wir mit dem Dünnschliff nicht sehr weit gekommen waren, brauchten wir eine andere Art des Analysierens. Nach längerer Recherche begegneten wir der Neutronenaktivierungsanalyse (NAA). Die NAA ist eine gängige Methode um Stoffe auf ihre Zusammensetzung zu analysieren.

5. Neutronenaktivierungsanalyse

5.1 Theoretische Grundlagen

Eine Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) wird eingesetzt um die Zusammensetzung eines Objekts an Hand verschiedener Isotope feststellen zu können. Hierzu wird die Probe mit Neutronen bestrahlt. Hierdurch finden im Objekt verschieden Kernreaktionen statt. Bei einer von diesen wird durch ein Neutron ein Proton aus einem Kern herausgeschossen. Die Kernladungszahl des Isotops wird dadurch um eins erniedrigt, wodurch ein anderes Element entsteht, die Massenzahl bleibt gleich. Somit wird erreicht, dass aus zuvor stabilen Isotopen neue Isotope entstehen, die durch die Instabilität des Kernes elektromagnetische Strahlung abgeben. Dies geschieht nach einem β -Zerfall durch Emission von γ -Quanten im Tochterkern. Nach der Bestrahlung misst man die Energien der Gamma-Quanten der Probe und erstellt ein Gammaspektrum. Anhand der Positionen der vorliegenden peakförmigen Signale kann man auf die enthaltenden Isotope schließen.

5.2 Anfrage am Fraunhofer Institut INT Euskirchen

Wir mussten nun einen brauchbaren Neutronengenerator finden um eine NAA durchführen zu können. Es befindet sich ein Neutronengenerator in unserer Nähe am Fraunhofer Institut INT Euskirchen. Dort fragten wir an, ob wir einige Versuche durchführen dürfen. Nach einem gemeinsamen Treffen einigten wir uns auf einen Termin für das Experiment. Unsere Aufgabe bestand nun darin uns mit den genauen physikalischen Grundlagen vertraut zu machen und so das Experiment gründlich vorzubereiten.

5.3 Vorbereitung des Experiments

Zur Vorbereitung des Experiments informierten wir uns über die schon gemessene Zusammensetzung des Allende Meteoriten.^[3] Die wichtigsten Bestandteile des Allende Meteoriten sind Sauerstoff (O), Silizium (Si), Magnesium (Mg) und Eisen (Fe). Zu den jeweiligen Reaktionen haben wir die Wirkungsquerschnitte, Halbwertszeiten und γ -Übergänge mit ihren entsprechenden γ -Linien aus Datenbanken herausgesucht. Der Wirkungsquerschnitt beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der eine bestimmte Reaktion abläuft und die γ -Übergänge charakterisieren den Zerfall eines Kerns mit seiner Halbwertszeit.

Mit Hilfe dieser Informationen kann man die Aktivität A (in Becquerel oder $\frac{Rate}{s}$) eines Isotopes mit folgender Formel errechnen.^[4]

$$A = \sigma \cdot \phi \cdot \frac{G}{M} \cdot h \cdot L \cdot \left(1 - e^{-\lambda \cdot t}\right)$$

A = Aktivität des Nuklids in Bq

 σ = Aktivierungs-Wirkungsquerschnitt in cm² der untersuchten Reaktion

 ϕ = Neutronenfluss in $\frac{n}{cm^2 \cdot s}$

G = Masse des bestrahlten Elements in g

M = Atomgewicht des bestrahlten Elements in $\frac{g}{mol}$

h = Relative Häufigkeit des bestrahlten Isotopes

L = Loschmidt-Zahl $\left(\frac{6,023 \cdot 10^{23}}{\text{mol}}\right)$

 λ = Zerfallskonstante des Radionuklids in $s^{-1} = \frac{ln2}{t_{1/2}}$, $t_{1/2}$ = Halbwertszeit

t = Bestrahldauer

5.4 Die erwarteten Hauptreaktionen im Allende Meteorit bei einer Neutronenbestrahlung mit 14MeV

²⁸ Si (n,p) ²⁸ Al
²⁹ Si (n,p) ²⁹ Al
³⁰ Si (n,α) ²⁷ Mg
²⁴ Mg (n,p) ²⁴ Na
⁵⁶ Fe (n,p) ⁵⁶ Mn
[[]]

Links sind die wahrscheinlichsten Reaktionen für 14MeV Neutronen aufgelistet. ²⁸Si (n,p) ²⁸Al bedeutet, dass ²⁸Silizium ein Neutron aufnimmt und darauf ein Proton abgibt. Als Produkt entsteht ²⁸Aluminium. Die Zahl oben links neben dem Elementsymbol gibt die Massenzahl an.

Quelle: [5]

Berechnung der Aktivität am Beispiel von 28Si(n,p)28Al

Wirkungsquerschnitt von 28 Silizium(²⁸Si) bei Verwendung von 14MeV Neutronen: 264mb = 0,264b = $0,264 \cdot 10^{-24}$ cm²

Neutronenfluss des Generators = $3 \cdot 10^8 \frac{n}{cm^2 \cdot s}$

Masse von ²⁸Si in dem Bruchstück des Allende Meteoriten= 0,52705g

Atomgewicht von ²⁸Al = $28 \frac{g}{mol}$

Häufigkeit von ²⁸Si = 92,23%

Halbwertszeit von ²⁸AI: 2,246min = 134,76s

Bestrahlzeit = 1800s

$$0,264 \cdot 10^{-24} \text{cm}^2 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{n}{cm^2 \cdot s} \cdot \frac{0,52705\text{g}}{28\frac{g}{mol}} \cdot 0,9223 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{\text{mol}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{134,76s} \cdot 1800s}\right)$$

= 8.28 \cdot 10^5 \text{s}^{-1}

Die Wirkungsquerschnitte und Halbwertszeiten der jeweiligen Isotope bei 14MeV Neutronen:

²⁸ Si(n,p) ²⁸ Al	Wirkungsquerschnitt: 264mb
	Halbwertszeit von ²⁸ Al: 2,246min
²⁹ Si(n,p) ²⁹ Al	Wirkungsquerschnitt: 103mb
	Halbwertszeit von ²⁹ AI: 6,6min
30 Si(n, α) ²⁷ Mg	Wirkungsquerschnitt: 56mb
	Halbwertszeit von ²⁷ Mg: 9,46min
$^{24}Mg(n,p)^{24}Na$	Wirkungsquerschnitt: 173,5mb
	Halbwertszeit von ²⁷ Mg: 14,96h
⁵⁶ Fe(n,p) ⁵⁶ Mn	Wirkungsquerschnitt: 112mb
	Halbwertszeit von ²⁷ Mg: 2,58h

In der Rechnung sind wir von 1800s Bestrahlzeit ausgegangen. Da jedoch aus Sicherheitstechnischen Gründen mindestens 720s (12 min) gewartet werden muss, haben wir noch 900s als Abklingzeit mit

einberechnet. Die Transferzeit des bestrahlten Meteoriten beträgt zum Germanium-Detektor etwa 3 min. Desweiteren gingen wir von 1000s Messzeit aus. Es geht aus der obigen Formel hevor, dass folgende Aktivitäten und Zerfälle erwartet werden:

Reaktionen:	Aktivität bei	Aktivität nach 900s	Zerfälle in 1000s
	Bestrahlungsende		Messzeit
²⁸ Si(n,p) ²⁸ Al	8,28·10 ⁵ s ⁻¹	8,08·10 ³ s ⁻¹	1,56·10 ⁶
²⁹ Si(n,p) ²⁹ Al	1,51·10 ⁴ s ⁻¹	3,13·10 ³ s ⁻¹	1,48·10 ⁶
³⁰ Si(n,alpha) ²⁷ Mg	4,90·10 ³ s ⁻¹	1,63·10 ³ s ⁻¹	0,942·10 ⁶

Für die spätere Auswertung des γ-Spektrums brauchten wir die γ-Energien der jeweiligen γ-Übergänge. Diese sind in der folgenden Tabelle aufgelistet:

Reaktion	γ-Energie in keV der Übergänge
²⁸ Si(n,p) ²⁸ Al	1779,0
²⁹ Si(n,p) ²⁹ Al	1273,4
³⁰ Si(n,alpha) ²⁷ Mg	843,8
	1014,4
²⁴ Mg(n,p) ²⁴ Na	2754,0
	1368,8
⁵⁶ Fe(n,p) ⁵⁶ Mn	846,8
	1810,8
	2113,1

Quelle: [6]

5.5 Versuchsaufbau

Zur Messung benutzten wir einen Germanium-Detektor, da nur dieser eine hohe Energieauflösung gewährleistet. Ein Neutronengenerator, der 14MeV Neutronen erzeugt, wurde für die Bestrahlung genutzt. Beides, Bestrahlung und Messungen, wurden am Fraunhofer Institut INT Euskirchen durchgeführt. Der Versuchsaufbau sieht wie folgt aus:



5.5.1 Allgemeiner Überblick



5.5.2 Neutronengenerator



5.5.3 Bestrahlunganordnung

Bei der linken Skizze ist der Meteorit möglichst genau an der Kante des Trägers plaziert. Auf diese Art und Weise wurde bei dem ersten Versuch bestrahlt. Die rechte Zeichnung entspricht dem Versuchsaufbau des 2. und 3. Durchlaufs. Dort liegt der Stein und hat den angegebenen Abstand zur Kante. Dies hat zur Folge, dass der Neutronenfluss am Ort des Meteoriten etwas kleiner ist.



5.5.4 Messstelle

5.6 Versuchsablauf

1. Durchgang

Nach dem Aufbau konnte mit der Bestrahlung des Meteoriten begonnen werden. Der Neutronenfluss wurde bei einer 1801s langen Bestrahlung mit 14Mev-Neutronen gleichmäßig erhöht. Nach dem Ende der Bestrahlung musste 12min gewartet werden, um kein Gesundheitlichesrisiko einzugehen. Aufgrund der Sicherheitsbestimmungen, unter Berücksichtigung des Transports des bestrahlten Meteoriten und der Plazierung am Messplatz, wurde erst 1295s nach der Bestrahlung mit der Messung angefangen. Die gesamte Messung dauerte 4279s und die γ -Spektren wurden alle 200-300s abgespeichert.

2. Durchgang

Beim zweiten Versuch wurde der Neutronenfluss konstant über eine Dauer von 1814s gehalten. Nach 965s konnte mit der Messung begonnen werden, die 4061s dauerte. Erneut wurden alle 200-300s die γ -Spektren abgespeichert.

3. Durchgang

Der dritte Versuch wurde wieder mit einer konstanten Anzahl von Neutronen durchgeführt. Die Bestrahlung dauerte 1799s. Nach 969s wurde mit der Messung begonnen. Diese dauerte nun 4 Tage, um auch langlebige Reaktionsprodukte untersuchen zu können.

Kontrollmessung

Außerdem haben wir eine Kontrollmessung mit einem Quartzkristall terrestrischen Ursprungs (Bergkristall) durchgeführt, um die Messergebnisse direkt ohne mathematischen Formalismus vergleichen zu können. Es wurden dieselben Bestrahlungs-und Messbedingungen verwendet.

5.7 Ergebnisse



5.7.1 Diese Abbildung zeigt das gemessene Spektrum des ersten Versuchs nach 2010s

In Abb. 5.7.1 ist einer der gemessenen Spektren im logarithmischen Maßstab dargestellt. Die gemessenen γ -Linien gehören verschiedenen Isotopen an. Dabei stellt die x-Achse die Kanalzahl und die y-Achse die Ereignisse dar. Die Kanalzahl ist proportional zur Energie. Wenn nun z.B. ²⁸Si im Meteoriten bestrahlt wurde, entsteht ²⁸Al (siehe Kapitel 5.4). Dieses Isotop ist instabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 2,25min unter Aussendung von γ -Quanten bestimmter Energie, die in einem bestimmten Kanal landen. Durch das Aufsummieren der Ereignisse wird ein Peak sichtbar. Die Energie der γ -Quanten für ²⁸Al beträgt 1779,0keV. In dem Spektren sind γ -Linien der Reaktionsprodukte von den am häufigsten im Allende Meteoriten vertretenden Elemente, bzw. Isotope zu sehen, nämlich ²⁴Na, ²⁷Mg, ²⁸Al, ²⁹Al und ⁵⁶Mn sowie eine Reihe schwächerer γ -Linien.

In der folgenden Abbildung ist ein Ausschnitt des Spektrums in linearem Maßstab dargestellt. Hier sind die 1273,4keV und 1779,0keV Linie des Zerfalls von ²⁹Al bzw. ²⁸Al markiert.



15.7.2 Ausschnitt des Spektrums

Wenn man nun die Differenz aller Spektren bildet, kann man die Zerfallsereignisse als Funktion der Zeit t(s) bestimmen. Dies entspricht den gemessenen Zerfällen in einem bestimmten Zeitraum. Im folgenden Bild sind Zerfallsereignisse als Funktion der Zeit für die Reaktionen ²⁸Si(n,p)²⁸Al, ²⁹Si(n,p)²⁹Al und ³⁰Si(n,p)²⁷Mg dargestellt.



5.7.3 Zerfallskurven von ²⁸Si(n,p)²⁸Al, ²⁹Si(n,p)²⁹Al und ³⁰Si(n,p)²⁷Mg

Jeder der Punkt (schwarze Quadrate) im Diagramm (5.7.2) entspricht den gemessenen Zerfällen in der Zeit bis zur nächsten Abspeicherung. Man kann nun die Funktion $N = N_0 \cdot e^{(-\lambda \cdot t)}$ (Radioaktives Zerfallsgesetz) an die Punkte angleichen (rote Linien). Die Messungen für ²⁷Mg und ²⁹Al sind jeweils aus dem 1. Durchlauf und die Messungen für ²⁸Al aus dem 2. Zyklus, denn ²⁸Al besitzt eine Halbwertszeit von nur 134,76s und, da die 2. Messung früher anfing, ist es sinnvoll diese zu verwenden um mehr Messpunkte zu erhalten. Wenn man die Halbwertszeit der von uns angeglichenen Funktion mit den tatsächlichen Halbwertszeiten vergleicht, sieht man, dass die Werte innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmen. Dies dient als Beweis, dass es sich tatsächlich um die erwarteten Isotope handelt.

Isotop:	Unsere Halbwertszeit in s:	Tatsächliche Halbwertszeit in s:
²⁸ Al	$151,2 \pm 16,2$	134,76
²⁹ Al	396,6 ± 19,2	396,0
²⁷ Mg	579 ± 18,6	567,6

Nachdem wir bewiesen hatten, dass es sich um die erwarteten Isotope handelt, war es unsere Idee, das Isotopenverhältnis zu bestimmen. Dabei entschieden wir uns für das Element Silizium, da wir wegen seiner großen Häufigkeit im Allende Meteorit für diese Reaktionen die genauesten Ergebnisse hatten. Das Isotopenverhältnis beschreibt das Verhältnis, der Häufigkeiten mit denen die verschiedenen Isotope vom entsprechenden Elements auftreten. So ist das Isotopenverhältnis in unserem Sonnensystem immer gleich und beträgt für Silizium: ²⁸Si = 92,23%; ²⁹Si = 4,67% und ³⁰Si = 3,10%

Wenn man nun das Isotopenverhältnis von Silizium in unseren Meteoriten durch unsere Messungsergebnisse bestimmen möchte, braucht man das Intensitätsverhältnis der verschiedenen Isotope. Die Intensität ist die Zahl der beobachten γ-Übergänge. Die Formel zur Errechnung der Intesität folgt aus dem radioaktiven Zerfallsgesetz:

$$N = N_0 \cdot e^{(-\lambda \cdot t)}$$

N = Intensität/Zerfälle

 N_0 = Zerfälle am Zeitpunkt zum Ende der Bestrahlung t = 0

 λ = Zerfallskonstante des Radionuklids in $s^{-1} = \frac{ln2}{t_{1/2}}, \quad t_{1/2} =$ Halbwertszeit

t = Zeit seit Ende der Bestrahlung

Da man das Intensitätsverhältnis braucht um auf das Isotopenverhältnis schließen zu können, muss man die Intensität des einen Isotops durch die des anderen teilen, um zu einem Verhältnis zu gelangen. Unglücklicherweise wird ²⁷Mg in unserem Experiment durch zwei Reaktionen gebildet, nämlich durch ³⁰Si(n, α)²⁷Mg und ²⁷Al(n,p)²⁷Mg. Somit ist ²⁷Mg ungeignet um das Isotopenverhältnis von Silizium zu bestimmen, da man nicht sicher sein kann durch welche Reaktion es gebildet wurde. Es wurde daher das Verhältnisses von ²⁸Al und ²⁹Al berechnet. Dann haben wir folgende Formel verwendet.

$$\frac{N_{28Al}}{N_{29Al}} = \frac{N_0^{28Al}}{N_0^{29Al}} \cdot \frac{e^{(-\lambda_{28Al}\cdot t)}}{e^{(-\lambda_{29Al}\cdot t)}}$$
$$\frac{N_{28Al}}{N_{29Al}} = \frac{N_0^{28Al}}{N_0^{29Al}} \cdot e^{-(\lambda_{28Al} - \lambda_{29Al}) \cdot t}$$
(a)

In dem folgendem Diagramm ist für den Allende Meteoriten und den Quarzkristall das Intensitätsverhältnis von $\frac{28Al}{29Al}$ als Funktion der Zeit dargestellt. Innerhalb der Messgenauigkeit ergeben sich identische Intensitätsverhältnisse für beide Proben. Daraus kann man bereits schließen, daß der Allende Meteorit aus unserem Sonnensystem stammen muß.



5.7.4 Intensitätsverhältnis von ²⁸AI/²⁹AI im Allende Meteoriten und im Bergkristall

Um auf das Intensitätsverhältnis nach Bestrahlungsende schließen zu können, haben wir für den Allende Meteoriten und den Quartzkristall getrennt die Funktion (a) angeglichen.



5.7.5 Extrapoliertes Intensitätsverhältnis von ²⁸Al/²⁹Al im Allende Meteorit und im Bergkristall

Es ergeben sich folgende Intensitätsverhältnisse zum Zeitpunkt t=0:

Allende Meteorit	45,4 ±1,9
Quartzkristall	46,7 ±0,8

Es lässt sich nun aus den extrapolierten Intensitätsverhältniswerten auf das Isotopenverhältnis schließen. Dazu wird zum Zeitpunkt t=0 das Verhältnis der Zerfälle gleich dem Verhältnis der Aktivitäten gesetzt. Aus dem Aktivitätsverhältns kann man unter Verwendung der oben genannten Formel für die Aktivität (vgl.S.7) das Isotopenverhältnis herleiten:

$$\frac{A^{28Al}}{A^{29Al}} = \frac{\sigma_{28} \cdot \phi \cdot \frac{G}{M_{28Si}} \cdot h_{28Si} \cdot L \cdot (1 - e^{-\lambda_{28Al} \cdot t})}{\sigma_{29} \cdot \phi \cdot \frac{G}{M_{29Si}} \cdot h_{29Si} \cdot L \cdot (1 - e^{-\lambda_{29Al} \cdot t})}$$

$$\frac{A^{28Al}}{A^{29Al}} = \frac{\sigma_{28}}{\sigma_{29}} \cdot \frac{M_{28Si}}{M_{29Si}} \cdot \frac{h_{28Si}}{h_{29Si}} \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda_{28Al} \cdot t})}{(1 - e^{-\lambda_{29Al} \cdot t})}$$

$$\frac{A^{28Al}}{A^{29Al}} = \frac{0,264 \cdot 10^{-24} \text{cm}^2}{0,103 \cdot 10^{-24} \text{cm}^2} \cdot \frac{28}{29} \cdot \frac{h_{28Si}}{h_{29Si}} \cdot \frac{(1 - 1 \cdot 10^{-24})}{(1 - 0,0428)}$$

$$\frac{A^{28Al}}{A^{29Al}} = \frac{h_{28Si}}{h_{29Si}} \cdot 2,77$$

Da auf der Erde Silizium zu 92,23% aus ²⁸Si und zu 4,67% aus ²⁹Si besteht, gilt für das Isotopenverhältnis: $\frac{h_{28Si}}{h_{29Si}} = \frac{92,23\%}{4,67\%} = 19,75$

 $\frac{A^{28Al}}{A^{29Al}} = 19,75 \cdot 2,77 = 54,7075$

Es folgt aus der Rechnung, dass das Intensitätsverhältnis auf der Erde zwischen ²⁸Al und ²⁹Al 54,7075 sein muss. Verglichen mit dem gemessenen Intensitätsverhältnis des Meteoriten von 45,4±1,9, müsste man schließen, daß das Isotopenverhältnis anders als auf der Erde ist. Wenn man jedoch das Ergebnis mit dem Intensitätsverhältnis unserer Kontrollmessung am Bergkristall vergleicht, wird deutlicht daß beide innerhalb der Fehlergrenzen identisch sind. Die Ursache für die Abweichung von dem terrestrischen Isotopenverhältnis legt nahe, daß die gemessenen Wirkungsquerschnitte nicht genau genug gemessen worden sind. Aus unserer Messung ergibt sich ein Verhältnis der Wirkungsquerschnitte von $\sigma_{28}/\sigma_{29} =$ 2,19. Das Verhältnis der oben angegebenen Wirkungsquerschnitte ist jedoch 2.56. In der Literatur findet man für den Wirkungsquerschnitt der ²⁹Si(n,p)²⁸Al Reaktion alternativ einen Wert von $\sigma_{29} = 0,128 \cdot 10^{-24}$. Damit wäre das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte $\sigma_{28}/\sigma_{29} = 2,06$. Der aus der vorliegenden Messung extrahierte Wert liegt näher an dem letzteren Wert.

Somit kann man schließen, dass innerhalb der Fehlergrenzen die Isotopenverhältnisse des Bergkristalls und des Allende Meteorit übereinstimmen und das Siliziumisotopenverhältnis im Meteoriten gleich dem auf der Erde ist.

5.8 Deutung

Unsere Ergebnisse konnten die wichtigsten Elemente aus denen sich der Meteorit zusammensetzt nachweisen. Desweiteren ist bei einem direkten optischen Vergleich deutlich sichtbar, dass der Allende Meteorit die gleichen Einschlüsse besitzt wie bekannte Quellen zeigen.

Silizium ist eines der wichtigsten Elemente in astronomischen Untersuchungen, da präsolare Körner eine anomale Zusammensetzung der Si Isotope haben, das heißt, dass das Isotopenverhältnis von demjenigen im Sonnensystem abweicht. Die Variation des Isotopenverhältnisses erlaubt die stellare Herkunft der Kärner zu bestimmen^[7].

Daher hatten wir uns auch für die Untersuchung des Si Isotopenverhältnisses entschieden. Das von uns gemessene Isotopenverhältnis von ²⁸Si und ²⁹Si ist innerhalb der Fehlergrenzen gleich dem in unserem Sonnensystem. Das lässt darauf schließen, dass der Meteorit aus unserem Solarsystem stammen muss. Andere Untersuchungen kommen zu dem selben Schluss.

6. Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei den zahlreichen Menschen bedanken, die uns bei diesem Projekt unterstützt haben und uns die Projektdurchführung erst ermöglicht haben.

Als erstes danken wir Hrn. Dr. Köble und Hrn. Schumann aus der Gruppe "Nukleare Sicherheitspolitik und Detektionsverfahren" im Fraunhof Institut INT Euskirchen. Hrn. Dr. Köble danken wir für das Ermöglichen der Untersuchung im Fraunhofer Institut und für die Betreuung während des Experiments. Bei Hrn. Dr. Schumann möchten wir uns für die Unterstützung beim Versuchsaufbau, und bei der Durchführung des Experiments bedanken. Weiterhin danken wir den Herren Clemens, Ruge und Weber von der Gruppe "Wissenschaftlich-Technische Infrastruktur" für die Durchführung der Bestrahlungen und die Erklärung des Neutronengenerators. Hrn. Dr. Köble und Hrn. Dr. Schumann danken wir auch für die wissenschaftliche Betreuung und für die Diskussion der Ergebnisse.

Desweiteren möchten wir uns bei Hrn. Jung bedanken, der uns bei der Erklärung und Vorbereitung des Dünnschliff sehr geholfen hat.

Herrn Stein, der dieses Projekt vorgeschlagen hat, danken wir für seine intensive Betreuung während des gesamten Projekts und für viele Diskussionen.

7. Link- und Literaturverzeichnis

^[1]http://www.uni-muenster.de/Planetology/people/addi_bischoff/meteorite.html

^[2]http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Allende_meteorite.jpg&filetimestamp=20080626133714

^{[3]"}The Allende Mteorite Reference Sample"von Eugene Jarosewich, Roy S. Clarke, Jr., und Julie N. Barrows von Smithsonian Institution Press in Washington, D.C. aus dem Jahre 1987

^[4] "Bericht Neutronen Generator16" Fraunhofer Institut INT Euskirchen

^[5]http://www.nndc.bnl.gov/exfor/endf00.jsp

^[6]"Table of Isotopes Eighth Edition Volume I" von Richard B. Firestone von Wiley-Interscience Publication aus dem Jahre 1996

^[7]D. Clayton, Handbook of Isotopes in the Cosmos. Cambridge University Press (2003)

Verwendete Programme

Spektrenanalyse: Radware: http://radware.phy.ornl.gov