

Didaktische Rekonstruktion der Nukleosynthese schwerer Elemente

Albert Teichrew*, Roger Erb*, Kerstin Sonnabend⁺

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main

⁺Institut für Angewandte Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main
ateichrew@gmail.com, roger.erb@physik.uni-frankfurt.de, kerstin-sonnabend@gmx.de

Kurzfassung

Die Entstehung schwerer Elemente von Eisen bis Uran bleibt eine der wichtigen physikalischen Fragen des neuen Jahrhunderts. Dass der Ursprung der Materie bislang nicht im vollen Umfang im Unterricht behandelt wird, ist daher naheliegend. Es bietet sich jedoch an, das oft bestätigte Interesse an astrophysikalischen Inhalten zu nutzen und mithilfe der Nukleosynthese inhaltliche Aspekte der Themenfelder Kernphysik und Astrophysik zu verbinden. Aus diesem Anlass wurden in einer wissenschaftlichen Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung Unterrichtsinhalte zum Neutroneneinfang bei der Entstehung schwerer Elemente entwickelt. Neben der Sachanalyse bildet eine Erhebung der Schülervorstellungen zu den Elementen, dem Urknall, den Sternen und der Radioaktivität das Fundament dieser Arbeit. Als Ergebnis werden Leitlinien formuliert und Lernaktivitäten vorgeschlagen, mithilfe derer bestehende Vorstellungen mit einer wissenschaftlichen Sichtweise erweitert werden. Das Kernstück der Unterrichtseinheit bildet ein angefertigtes Lernspiel, mit dem Schülerinnen und Schüler nach einer theoretischen Vorarbeit selbstständig Strukturen der Nuklidkarte zusammenstellen können. Eine reduzierte Form der Modellierung der relativen Häufigkeiten der Elemente, die im behandelten s-Prozess entstehen, wird ebenfalls vorgestellt.

1. Einleitung

Als Nukleosynthese wird die natürliche Entstehung schwerer Elemente aus ihren leichteren Vorgängern bezeichnet. Sie setzte unmittelbar nach dem Urknall ein und wird solange andauern, bis die letzten Sterne ausgebrannt sind. Die Temperaturen und Dichten, bei denen sie stattfindet, sind auf der Erde nur mit großem Aufwand realisierbar. Dennoch versucht der Mensch der Frage nach dem Ursprung der Materie auf den Grund zu gehen. In der Nuklearen Astrophysik werden dazu die Erkenntnisse des Mikro- und Makrokosmos vereint.

Mit der Behandlung der Nukleosynthese der Elemente, die schwerer als Eisen sind und aufgrund ihrer niedrigeren Bindungsenergie pro Nukleon nicht durch Kernfusion entstehen können, findet nicht nur ein Thema der modernen Physik Einzug in die Schule. Darüber hinaus wird eine erweiterte Sicht auf Radioaktivität gefördert. Schülervorstellungen zum radioaktiven Zerfall hängen oft mit der Aussendung gefährlicher Strahlung zusammen [1]. Dass sich Atomkerne dabei verändern und Materie durch kernphysikalische Prozesse eine andere Form annehmen kann, bleibt häufig unerkannt. Auch die Kernfusion in Sternen tritt im Unterricht als Energiequelle auf und nicht als Quelle der Elemente, aus denen wir bestehen. Die freigesetzte Energie hindert den Stern außerdem daran zu kollabieren. Die Auseinandersetzung mit der Nukleosynthese baut bei angehenden Abiturienten eine differenziertere Sicht auf die Struktur der Materie und unsere Existenz auf.

Inhaltliche Voraussetzungen, um physikalische Prozesse der Nukleosynthese zu behandeln, sind zum Ende der Oberstufe in den Themenfeldern Kern- und Astrophysik gegeben. Studien zu Interessen an naturwissenschaftlichen Inhalten und Kontexten deuten auf ein hohes Interesse sowohl von Schülerinnen als auch von Schülern an Astrophysik und spektakulären Phänomenen im Weltall [2]. Es bietet sich daher an, die Entstehung der Elemente in Sternen als übergeordneten Kontext im Vorfeld einzuführen und anhand dieser Fragestellung den Unterricht zu gestalten. Wichtige kern- und astrophysikalische Inhalte werden durch das Ziel motiviert, verschiedene Entstehungsprozesse zu verstehen.

2. Sachstruktur

Bereits in der Antike versuchten Philosophen alles, was uns umgibt, auf elementare Einheiten zurückzuführen. Die Auffassung, dass die Welt aus den vier Elementen Feuer, Wasser, Erde und Luft zusammengesetzt ist, hatte lange Bestand. Mittlerweile zählen weder Atome noch Kernbausteine zu den Elementarteilchen. Dennoch hängt unsere unmittelbare Umwelt in erster Linie von den chemischen Elementen und ihren Verbindungen ab.

Die Entstehung der ersten Protonen und Neutronen hängt mit der Urknall-Theorie zusammen. Das endliche und expandierende Universum wird darin bis zur Gültigkeit physikalischer Gesetze zurückverfolgt. Die primordiale Nukleosynthese setzte 10^{-4} s nach dem Urknall an, wo bei einer Temperatur von

10^{12} K Quarks und Antiquarks sich zu Protonen und Neutronen verbunden haben. Die Entstehung der leichten Elemente ging bis etwa 20 min nach dem Urknall weiter, solange die Temperaturen für Fusionen günstig waren. Ein Netz aus Fusionsreaktionen führte zu einem relativen Massenanteil von 25 % Helium zur Gesamtmasse im Universum, zu der hauptsächlich Wasserstoff gehört. Das elementare Prinzip während der Nukleosynthese nach dem Urknall liegt in der „Kondensation“ der Materie aus dem thermischen Gleichgewicht im Zuge der Expansion des Universums. Wie sich Wasser an den Wänden absetzt, wenn die Duschkabine geöffnet wird und mehr Wasserdampf kondensiert als verdunstet, so ist auch die Materie aus Energie in der heißen Phase des Urknalls kondensiert.

Weitere Abkühlung des Universums führte zur Vereinigung von Atomkernen und Elektronen zu neutralen Atomen. Wir beobachten noch heute die zu dieser Zeit freigewordene Strahlung als kosmische Hintergrundstrahlung, die uns aus allen Richtungen erreicht. Nach dem sogenannten Dunklen Zeitalter kam erst wieder Licht in das Universum, als die großen Gaswolken aus Wasserstoff und Helium unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabierten und in den aufgeheizten Protosternen die Fusion von Wasserstoff zu Helium zündete. Abhängig von der Gesamtmasse treten weitere stellare Brennphasen auf. Sterne mit einer Masse größer als acht Sonnenmassen erleben alle stellaren Brennphasen bis zum Eisenkern. Der Kern kollabiert, sobald die Fusion aufhört und kein Strahlungsdruck mehr dem Gravitationspotential entgegenwirkt. Die äußeren Schichten stürzen nach innen und der Kern implodiert unter dem enormen Druck. Die Verdichtung führt zur Erzeugung von Neutronen aus Protonen und Elektronen. Es entsteht ein Neutronengas, das weiteres auf den Kern einstürzendes Material reflektiert. In der sogenannten Supernova entstehen durch vielfachen Neutroneneinfang schwerere Elemente als Eisen.

Doch auch während der Brennphasen hält ein niedriger Neutronenfluss an, der als sogenannter s-Prozess zur Entstehung schwerer Elemente beiträgt und am besten erforscht ist [3]. Bei einem Neutroneneinfang erhöht sich zunächst nur die Massenzahl A und es entsteht ein schwereres Isotop desselben Elements. Elemente können mehrere stabile Isotope haben, sodass weitere Neutroneneinfänge folgen. Liegt ein relativer Neutronenüberschuss vor, ist das entstandene Nuklid instabil. Der energetisch günstigere Zustand wird daraufhin durch einen β^- -Zerfall erreicht, indem ein Neutron in ein Proton unter Abgabe eines Elektrons und eines Antineutrinos umgewandelt wird. Es entsteht ein neues Element mit einer um eins erhöhten Protonenzahl. Die neuen Elemente werden wiederum durch weitere Abfolgen von Neutroneneinfängen und Zerfällen zu schweren Elementen umgewandelt.

3. Methodik

Die Nukleosynthese schwerer Elemente wurde im Rahmen des Modells der Didaktischen Rekonstruktion aufgearbeitet [4]. Sie beinhaltet drei wechselwirkende Teilaufgaben: Fachliche Klärung, Erfassung von Schülervorstellungen und didaktische Strukturierung. Lernen wird darin als aktive Modifizierung von Vorstellungen und Konzepten verstanden. Das vorgestellte Unterrichtskonzept leitete sich aus dem Vergleich von fachlichen Zielen und Schülervorstellungen ab. Angelehnt an die in der Sachstruktur grob geschilderten Inhalte, wurde die wissenschaftliche Perspektive auf die Nukleosynthese um vier Grundbegriffe konzentriert:

- a) Chemische Elemente, ohne deren klare Bedeutung die Frage nach ihrer Entstehung nicht sinnvoll verfolgt werden kann,
- b) Urknall, der die Startbedingungen für die Nukleosynthese festlegt,
- c) Sterne, die für die nötige Umgebung im weiteren Verlauf sorgen,
- d) Radioaktivität, die für viele Kernumwandlungen auf dem Weg zu den schweren Elementen verantwortlich ist.

In einer Befragung aller Physiks Schülerinnen und -schüler eines Jahrgangs der Oberstufe eines Gymnasiums (N=40) wurden Schülerperspektiven und Interessen bezüglich der vier Bereiche ermittelt. Daraus wurden Leitlinien und Unterrichtselemente für ein kontextorientiertes Vorgehen abgeleitet, dessen Kernelemente in einem selbst durchgeführten Unterrichtsversuch erprobt wurden. Damit soll gezeigt werden, inwieweit sich Nukleosynthese schwerer Elemente im Physikunterricht ansiedeln lässt.

4. Ergebnisse der Befragung

Bei der Auswertung schriftlicher Antworten zu offenen Fragen bezüglich der vier Grundbegriffe (z. B.: „Was verbinden Sie mit dem Begriff der Radioaktivität?“) wurden Kategorien gebildet. Diese teilen sich nicht nach „Fehlvorstellungen“ und fachlich richtigen Aussagen auf. Vielmehr beinhalten sie unterschiedliche Perspektiven auf den jeweiligen Begriff:

- a) Bei der Frage nach den chemischen Elementen lassen sich 37,3 % der Aussagen als Eintrag im Periodensystem ohne kennzeichnendes Merkmal kategorisieren. Die restlichen Aussagen beinhalten zur Hälfte entweder ein chemisches oder ein atomares Unterscheidungsmerkmal.
- b) Zum Urknall werden vorzugsweise Entstehungsprodukte wie Welt, Materie oder Raum und Zeit genannt (55,3 %). Entstehungsprozesse spielen eine untergeordnete Rolle und beinhalten vorwiegend physikalisch fragwürdige Aussagen.
- c) Bei den Vorgängen in Sternen bezieht sich die Mehrheit der Aussagen auf die Kernfusion (53,1 %). Bei den restlichen Aussagen handelt es

sich entweder um radioaktive, chemische oder makroskopische Vorgänge.

- d) Bei der Frage nach der Radioaktivität werden mehrheitlich technische Anwendungen und negative gesundheitliche Folgen aufgezählt (49,1%). Danach folgen wertneutrale Aussagen zu den verschiedenen Strahlungsarten (37,7%) und nur 13,2% der Aussagen beziehen sich auf Veränderungen im Atomkern.

Neben den Vorstellungen wurde auch das Interesse an mit diesen Begriffen verbundenen Fragestellungen in einer fünfstufigen Skala (1: „gering“ – 5: „sehr groß“) abgefragt. Die vier Fragestellungen hängen mit der Nukleosynthese zusammen, unterscheiden sich jedoch im gewählten Kontext:

- a) Wie sind die verschiedenen Stoffe (chemischen Elemente) entstanden?
- b) Welche Bedeutung haben die Sterne für die Herkunft der Materie?
- c) Wie hat sich das Universum seit dem Urknall entwickelt?
- d) Was spielt sich kernphysikalisch beim radioaktiven Zerfall ab?

Um das Interesse an dem Kontext abzuschätzen, wurden in Abbildung 1 Mittelwerte samt Standardfehler berechnet. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung (Sphärizität angenommen: Mauchly-W = .862, p = .349) zeigt, dass das angegebene

Interesse mit der vorgeschlagenen Fragestellung zusammenhängt ($F(3,117) = 6.01, p < .001$). Bonferroni-korrigierte paarweise Vergleiche zeigen, dass das Interesse am Urknall ($M = 4.00, SD = 1.04$) signifikant höher ist als an den Elementen ($M = 3.25, SD = 1.37$) und an den Kernprozessen beim radioaktiven Zerfall ($M = 3.28, SD = 1.30$). Zwischen den anderen Fragestellungen unterscheidet sich das Interesse hingegen nicht signifikant.

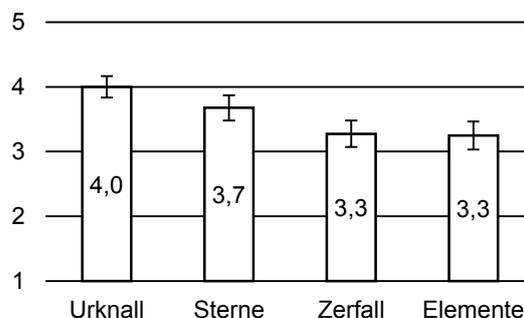


Abb.1: Mittelwerte des Interesses am Kontext.

5. Folgen für den Unterricht

Im Zuge der didaktischen Strukturierung wurden Leitlinien für einen Unterricht formuliert, der die ermittelten Vorkenntnisse der Schülerinnen und Schüler um die wissenschaftliche Perspektive erweitert. Tabelle 1 gibt Grundzüge der Ansichten und Leitlinien wieder.

Grundbegriff	Schülerperspektive	Wissenschaftliche Perspektive	Leitlinie für den Unterricht
Chemische Elemente	Sie stehen im Periodensystem und lassen sich zu Stoffen verbinden oder wieder trennen. → Verschiedene Grundstoffe aufgrund des chemischen Verhaltens.	Alle Atome eines Elements haben dieselbe Protonenzahl, von der die Elektronenhülle und ihr chemisches Verhalten abhängen. → Verschiedene Atomsorten aufgrund der Kernzusammensetzung.	Periodensystem als Anknüpfungspunkt wählen und das Ordnungssystem bewusst machen. Unterschiede zwischen Element, Isotop und Nuklid erläutern.
Urknall	Raum, Zeit und Materie ist aus dem Urknall entstanden und hat sich ausgebreitet. → Urplötzliches Ereignis, bei dem sich die Welt aus dem Nichts gebildet hat, worüber nichts Genaueres bekannt ist.	Zu Beginn des Universums bildeten sich durch Abkühlung des heißen Plasmas aus Strahlung und Elementarteilchen Protonen und Neutronen. → Wissenschaftlich greifbarer Entstehungsprozess.	Über die Beobachtung des endlichen, expandierenden Universums auf seine Anfänge schließen. Mit Einstein'scher Masse-Energie-Äquivalenz „Kondensation“ der Materie aus Energie anführen.
Sterne	Durch die Kernfusion in Sternen wird viel Energie, Licht und Wärme frei. → Energiequellen.	In stellaren Brennphasen fusionieren leichte Elemente zu schwereren. → Elementfabriken.	Art der Energie hinterfragen. Über Massendefekt und den Verlauf der Bindungsenergie pro Nukleon stellare Brennphasen und die Entstehung der Elemente bis Eisen begründen.
Radioaktivität	Radioaktive Stoffe senden gefährliche Strahlung aus, insbesondere nach einem Unfall in einem Atomkraftwerk. → Schädliche Eigenschaft eines begrenzten, aber technisch nutzbaren Teils der Materie.	Energetisch unausgeglichene Zusammensetzung eines Atomkerns führt zu seiner Umwandlung unter Abgabe entsprechender Strahlung. → Natürliche Eigenschaft aller Kerne und Teil des Entstehungsprozesses schwerer Elemente.	Beliebige Kernumwandlungen am Beispiel des Beschusses von stabilen Kernen behandeln und im Z-N-Diagramm verdeutlichen. Instabilität radioaktiver Nuklide im Hinblick auf Neutroneneinfänge und ihre Folgen diskutieren.

Tab.1: Leitlinien als Ergebnis des Vergleichs der Schülerperspektive und der wissenschaftlichen Perspektive.

Ergebnisse aus dem zweiten Teil der Befragung lassen auf ein höheres Interesse an astrophysikalischen als an kernphysikalischen Inhalten schließen. Trotz des hohen Interesses am Urknall wird die primordiale Nukleosynthese im Vergleich zur Sternentwicklung nicht als passender Kontext erachtet. Es handelt sich hierbei um einen begrenzten Abschnitt der Nukleosynthese, der im Rahmen des kosmischen Materiekreislaufs thematisiert wird. Unterrichtskonzepte und Beiträge, die das Leben massereicher Sterne behandeln, eignen sich allerdings als vorausgehendes Thema oder als Einstieg [5,6].

In meinem Unterrichtsversuch habe ich einen Kurzfilm verwendet, der im Auftrag der Max-Planck-Gesellschaft produziert wurde [7]. Darin wird unter anderem der Nachweis verschiedener Elemente in Sternüberresten eindrucksvoll geschildert. Daraufhin stellte sich die Frage nach den physikalischen Prozessen, die zur Entstehung dieser Elemente geführt haben. Stellare Brennphasen und das Maximum der Bindungsenergie der Kerne bei Eisen wurden dafür zu Beginn behandelt.

Für die anschließende Modellierung kernphysikalischer Prozesse der Nukleosynthese schwerer Elemente wurde zunächst die Ordnungszahl mit der Protonenzahl Z als Unterscheidungsmerkmal für die Elemente verknüpft. Für Kernreaktionen und Kernstabilität ist darüber hinaus die Neutronenzahl N entscheidend. Eine Anordnung möglicher Nuklide in einem Z - N -Diagramm wurde dadurch unabhängig von der Nuklidkarte motiviert. Die Pfeilrichtungen bei Kernreaktionen zeigten dabei stets verschiedene Entstehungsmöglichkeiten eines Nuklids auf und keine potentiellen Zerfallsarten, was man häufig als Legende auf Nuklidkarten findet. Solche Darstellungen wie in Abbildung 2 sind verwirrend, weil ein instabiles Nuklid in der Regel nicht alle Zerfallsarten ausführt.

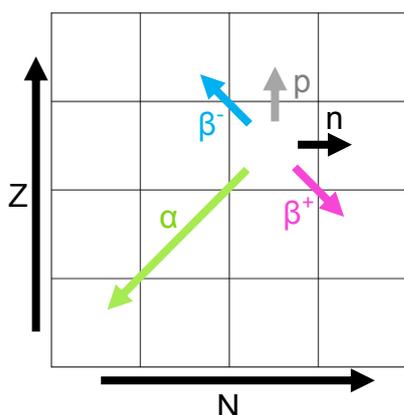


Abb.2: Zerfallswege eines Nuklids.

Dasselbe Nuklid kann jedoch durch verschiedene Kernumwandlungen entstehen, was in Abbildung 3 mit Pfeilen in Richtung des Nuklids dargestellt ist. Eine bewusste Verwendung des Begriffs „Entstehungsweg“ unterstreicht die Bedeutung der Radioaktivität für die Entstehung der Elemente.

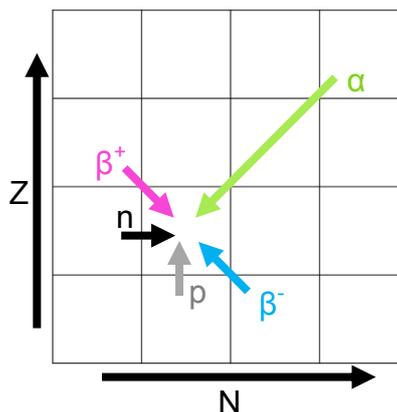


Abb.3: Entstehungswege eines Nuklids.

Neben dem α -Zerfall ist die Unterscheidung in β^+ - und β^- -Zerfall vorgenommen worden, da sich bei diesen Kernumwandlungen die Protonenzahl unterschiedlich verändert und andere Elemente entstehen. Hinzu kamen der Neutronen- und Protoneneinfang (n und p) als potentielle Kernreaktionen auf dem Weg zu schwereren Elementen. Mit dem Coulomb-Gesetz lassen sich Aussagen über die Wahrscheinlichkeit dieser Vorgänge vornehmen. Auf diesem Weg wurde das Modell der langsamen Neutroneneinfänge als potentieller Entstehungsmechanismus für schwere Elemente eingeführt. Im Folgenden werden qualitative und quantitative Modellexperimente vorgestellt, die zur eigenständigen Überprüfung der Theorie verwendet wurden.

6. Lernspiel

Die Nukleosynthese schwerer Elemente mit langsamen Neutroneneinfängen verläuft nach klaren Regeln: Ist das entstandene Nuklid stabil, wird es bei gleichbleibenden Neutronenfluss ein weiteres Mal um ein Neutron schwerer. Ist das entstandene Nuklid instabil, wird es sich nach einer bestimmten Zeit gemäß seiner Kernzusammensetzung umwandeln. Auf der Nuklidkarte erinnert es an Spielzüge, bei denen von einem Feld auf das nächste „gehüpft“ wird. Auf jedem Feld muss eine Entscheidung getroffen werden, welche Kernumwandlung bei den vorgegebenen Bedingungen passiert, welche „Weg“ die Nuklide einschlagen und welche Häufigkeiten sich daraus ergeben. Ist die Nuklidkarte vorgegeben, lassen sich der komplette Entstehungsweg und seine Lücken nach den Regeln des s -Prozesses schnell nachvollziehen. Umgekehrt lassen sich mögliche Nuklidstrukturen zusammenstellen und mit den realen Gegebenheiten vergleichen. Diese Idee führte zur Ausarbeitung eines Lernspiels mit dem Namen Nuklid-Domino:

Das Spielfeld stellt eine leere Nuklidkarte mit einem „Saatnuklid“ in der linken unteren Ecke dar. Die Spiel- oder Bausteine, aus denen die Nuklidkarte aufgebaut wird, bestehen jeweils aus einem stabilen und instabilen Nuklid. Sie ähneln in ihrem zweiteiligen Aufbau den klassischen Dominosteinen. Die schwarzen Kästchen stellen stabile Nuklide dar, die

im Inneren eines Sterns ein Neutron einfangen. Der Pfeil zeigt nach rechts zu einem Kästchen mit einem Neutron mehr als sein Vorgänger. Blaue und rote Kästchen stellen instabile Nuklide dar, die sich gemäß ihrer Position durch einen β^+ - oder β^- -Zerfall umwandeln. Die Pfeilrichtung ergibt sich aus der Umwandlung eines Protons in ein Neutron und umgekehrt. Die Bausteine in Abbildung 4 wurden ausgedruckt und zur besseren Haltbarkeit laminiert. Dem Beitrag ist eine Druckvorlage für Spielfeld und Spielset beigelegt.

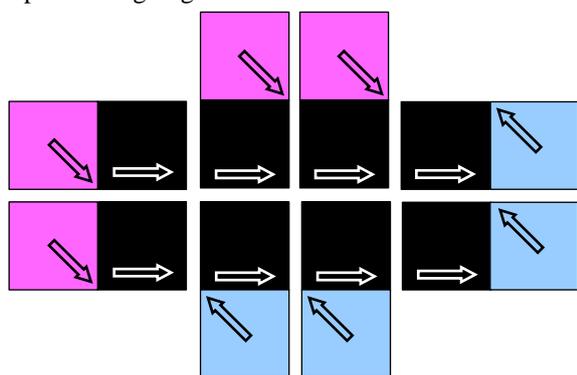


Abb.4: Zu jedem Spielfeld gehört ein Spielset aus acht Paaren stabiler und instabiler Nuklide.

Das Ziel des Lernspiels ist es, schwere Elemente zu modellieren. Übersetzt auf das Z-N-Diagramm bedeutet das, einen zusammenhängenden Weg nach rechts oben auszulegen. Zwei Spieler legen dazu abwechselnd Bausteine in das Spielfeld. Auf dem beigelegten Tagungsposter sind Beispiele für Schülerergebnisse aus dem Unterrichtsversuch abgebildet. Der Vergleich der vielfältigen Strukturen mit der Nuklidkarte bietet genügend Anlässe zur fachlichen Diskussion über die Stabilität der Kerne oder die Grenzen des Modells.

7. Modellierung der Häufigkeiten stabiler Nuklide

Darüber hinaus wird ein quantitatives Modell für den Unterricht vorgestellt, indem das Zustandekommen unterschiedlicher Häufigkeiten stabiler Nuklide im s-Prozess untersucht werden kann. Zu den Grundannahmen gehört ein kontinuierlicher Prozess mit einem konstanten Neutronenfluss und einer nicht abnehmenden Zahl an Saatnukliden. Der Zeitraum zwischen zwei Neutroneneinfängen soll so groß sein, dass in der Zwischenzeit jegliche β^- -Zerfälle erfolgen. Es stellt sich in diesem Fall ein Gleichgewicht zwischen den Häufigkeiten N benachbarter Nuklide mit den Massenzahlen $A-1$ und A ein. Die relative Häufigkeit zwischen zwei Nukliden hängt dabei nur von dem Verhältnis der Wirkungsquerschnitte für Neutroneneinfänge σ_{A-1} und σ_A ab:

$$\frac{N_A}{N_{A-1}} = \frac{\sigma_{A-1}}{\sigma_A} \quad \{1\}$$

Die Wirkungsquerschnitte können zu Wahrscheinlichkeiten $0 < p_A \leq 1$ für einen Neutroneneinfang während eines festen Zeitraums Δt umgerechnet werden. Damit lässt sich der dynamische Vorgang

darstellen, mit dem sich das Gleichgewicht einstellt. Die Anzahl der Nuklide nach einem Zeitabschnitt Δt setzt sich zusammen aus den Nukliden zum Zeitpunkt t reduziert um den Erwartungswert $N \cdot p$ der Nuklide, die ein Neutron einfangen, und erhöht um dem Erwartungswert der hinzugekommenen:

$$N_A(t + \Delta t) = N_A(t) - N_A(t) \cdot p_A + N_{A-1}(t) \cdot p_{A-1} \quad \{2\}$$

Diese Rechnung lässt sich mit einer Tabellenkalkulation iterativ für einige Nuklide ausführen. In Tabelle 2 sind für stabile Nuklide der Massenzahlen 102 bis 107 die Häufigkeiten relativ zum Saatnuklid Ru_{101} berechnet worden. Die Häufigkeit des Saatnuklids wurde auf zehn festgesetzt und die Wirkungsquerschnitte wurden dem Nuclear Data Service der IAEA entnommen [8].

A	101	102	103	104	105	106	107
σ_A in b	5,2	1,8	10,6	0,7	21,0	0,3	2,5
p_A	0,25	0,09	0,50	0,03	1,00	0,01	0,12
Iteration	N_{101}	N_{102}	N_{103}	N_{104}	N_{105}	N_{106}	N_{107}
0.	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5.	10,0	10,4	1,2	0,8	0,0	0,0	0,0
10.	10,0	17,1	2,5	4,8	0,1	0,2	0,0
20.	10,0	24,1	3,9	17,7	0,5	3,1	0,1
50.	10,0	28,6	4,8	51,0	1,7	31,2	2,6
100.	10,0	28,9	4,9	69,9	2,3	91,1	9,8
300.	10,0	28,9	4,9	74,3	2,5	168,3	20,1
600.	10,0	28,9	4,9	74,3	2,5	173,3	20,8
analytisch	10,0	28,9	4,9	74,3	2,5	173,3	20,8

Tab.2: Iterativ berechnete Häufigkeiten nähern sich einem Gleichgewichtszustand nach Gl. {1} an.

In Abbildung 5 ist die Entwicklung der modellierten Häufigkeiten aus Tabelle 2 in halblogarithmischer Darstellung veranschaulicht.

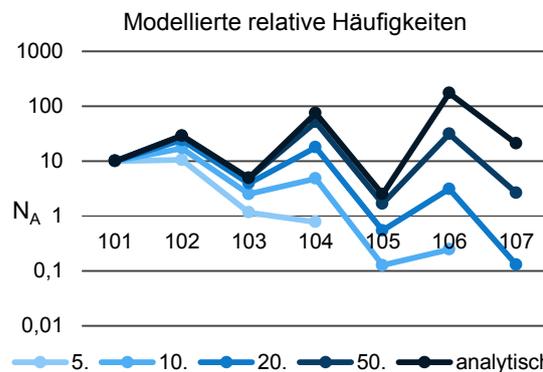


Abb.5: Modellerte Häufigkeiten relativ zu $N_{101} = 10$ in halblogarithmischer Darstellung.

Durch Neutroneneinfänge „wandern“ die Saatnuklide weiter, werden aber gleichzeitig von vorhergehenden Reaktionen neu gebildet. Je nachdem wie hoch die Reaktionsrate ist, verbleiben bei der einen Kernzusammensetzung mehr Nuklide als bei der

anderen. In der Chemie wird das Bild von zwei unterschiedlich schnellen Nachbarn verwendet, die sich gegenseitig Äpfel über den Zaun werfen. Egal wie die Verteilung am Anfang des Streits aussah, im Reaktionsverlauf wird sich ein vorhersehbares, dynamisches Gleichgewicht einstellen. Dieses Bild lässt sich auf nebeneinanderliegende Gärten erweitern, bei denen die Äpfel jeweils in den nächsten Garten weitergeworfen werden, wobei auf der Ausgangsseite der Vorrat an Äpfeln konstant bleibt. Je niedriger die Neutroneneinfangswahrscheinlichkeit, desto höher ist die relative Häufigkeit im Gleichgewichtszustand. Eine höhere Stabilität der Kerne bei geraden Massenzahlen führt zu dieser charakteristischen Zick-Zack-Struktur, die in der relativen Häufigkeit stabiler Nuklide im Sonnensystem gefunden wird.

8. Zusammenfassung

Im Rahmen der Didaktischen Rekonstruktion der Nukleosynthese schwerer Elemente wurden Leitlinien für einen Unterricht gesucht, der wissenschaftliche Perspektiven und Schülerperspektiven aufeinander bezieht und Vorstellungen zur Entstehung der Elemente nachhaltig erweitert. Als Ergebnis werden Grundvorstellungen der Nukleosynthese zu den chemischen Elementen, dem Urknall, den Sternen und der Radioaktivität formuliert:

- Die Kernzusammensetzung ist für die Eigenschaften der Materie verantwortlich.
- Nach dem Urknall bildeten sich Neutronen und Protonen als Folge der Expansion des Universums.
- In Sternen fusionieren Kerne zu den Elementen bis Eisen unter Freisetzung der Bindungsenergie.
- Schwerere Elemente entstehen durch sukzessiven Neutroneneinfang, wobei die Umwandlung radioaktiver Nuklide aufgrund ihrer Kernzusammensetzung eine wichtige Rolle spielt.

Für den Einstieg werden als Kontext die Entwicklung eines massereichen Sterns und der Nachweis verschiedener Elemente in seinen Überresten vorgeschlagen. Ein Unterrichtsversuch konnte bestätigen, dass Lernende daraufhin kernphysikalische Fragen entwickeln, die als Grundlage für die Strukturierung des weiteren Unterrichts genommen werden:

- Ausgehend von Beobachtungen der Elemente in Überresten einer Supernova wird eine kernphysikalische Theorie ihrer Entstehung erarbeitet.
- Der Unterricht mündet in eine selbstständige Untersuchung der Nuklidlandschaft in einem qualitativen Modellexperiment und eine anschließende Modellierung der relativen Häufigkeiten.
- Die Ergebnisse werden wiederum mit den Beobachtungen verglichen.

Bislang konnte der Gesamttablauf und das Potential der Lernaktivitäten nur ansatzweise überprüft wer-

den. Erweiterungen und aufwendigere Testverfahren sind nötig, bevor von einer erfolgreichen Verortung der Nukleosynthese schwerer Elemente im Oberstufenunterricht gesprochen werden kann. Dieser Beitrag unterstreicht jedoch die grundsätzliche Bedeutung des Themas für das Verständnis der Welt.

9. Literatur

- Neumann, S. (2013). Schülervorstellungen zum Thema Strahlung. Dissertation, Universität Wien. Url: http://othes.univie.ac.at/28457/1/2013-01-28_9901447.pdf
- Elster, D. (2007). In welchen Kontexten sind naturwissenschaftliche Inhalte für Jugendliche interessant? In: PLUS LUCIS 3/2007, S. 2-8. Url: https://www.univie.ac.at/pluslucis/PlusLucis/073/s2_8.pdf
- Rolfs, C. E.; Rodney, W. S. (1988). *Cauldrons in the Cosmos: Nuclear Astrophysics*. University of Chicago Press.
- Kattmann, U.; Duit, R.; Gropengießer, H.; Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, Jg. 3, Heft 3, S. 3-18. Url: <http://archiv.ipn.uni-kiel.de/zfdn/jg3h3.htm>
- Scorza, C. (2011). Die Suche nach verborgenen Sternen. In: *Wissenschaft in die Schulen!* Url: <http://www.wissenschaft-schulen.de/sixcms/media.php/1308/WIS-2011-12MS-OffeneSternhaufen.pdf>
- Fischer, O. (2005). Supernovae und ihre Überreste - Makroskopische Ereignisse mit mikroskopischem Hintergrund. In: *Wissenschaft in die Schulen!* Url: <http://www.wissenschaft-schulen.de/sixcms/media.php/1308/supernova.pdf>
- Wettmarshausen, N.; Janka, H. T. (2013). *Supernovae – Was passiert, wenn Sterne sterben?* In: fluxfilm Filmproduktion Nicola Wettmarshausen im Auftrag der Max-Planck-Gesellschaft. Url: <http://fluxfilm.de/video/supernovae.html>
- Mughabghab, S. F. (2006). *Atlas of Neutron Resonances* Elsevier Science. Url: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/NdsEnsdf/neutroncs.html>

Dem Beitrag beigefügte Medien:

- Druckvorlage: Nuklid-Domino für 2×2 Personen.
- Poster.