

Kosmochemie – Geschichte der Entdeckung und Erforschung
der chemischen Elemente im Kosmos

*Cosmochemistry – History of Discovery and Research
of Chemical Elements in the Cosmos*



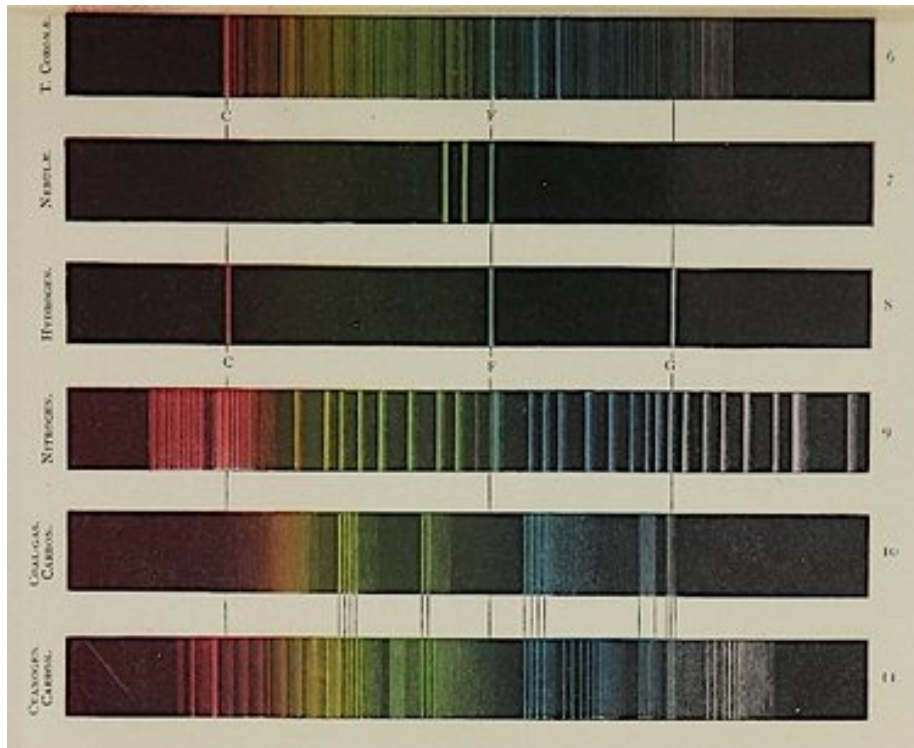


Abbildung 0.1:
 Spektren von Sternen und Nebeln (Spectra of Stars and Nebulae)
Roscoe, Henry E.: Spectrum Analysis. Six Lectures. Delivered in 1868
 Before the Society of Apothecaries of London. New York: Macmillan 1869.

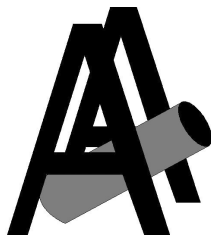
Nuncius Hamburgensis
Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften
Band 50

Wolfschmidt, Gudrun (Hg.)

Kosmochemie

Geschichte der Entdeckung und Erforschung
der chemischen Elemente im Kosmos

zum 150. Jubiläum des Periodensystems der Elemente
und anlässlich des 50. Jubiläums der Mondlandung



Cosmochemistry – History of Discovery and Research
of Chemical Elements in the Cosmos

Hamburg: tredition 2022

Nuncius Hamburgensis

Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften

Hg. von Gudrun Wolfschmidt, Universität Hamburg,
Arbeitsgruppe Geschichte der Naturwissenschaft und Technik
(ISSN 1610-6164).

*Diese Reihe „Nuncius Hamburgensis“ wird gefördert von der Hans
Schimank-Gedächtnisstiftung. Dieser Titel wurde inspiriert von „Sidereus Nuncius“
und von „Wandsbeker Bote“.*

Wolfschmidt, Gudrun (Hg.): Kosmochemie – Geschichte der Entdeckung und Erforschung der chemischen Elemente im Kosmos zum 150. Jubiläum des Periodensystems der Elemente und anlässlich des 50. Jubiläums der Mondlandung. Cosmochemistry – History of Discovery and Research of Chemical Elements in the Cosmos – on the Occasion of the 150th Anniversary of the Periodic Table of the Elements (PSE, 1869) and on the Occasion of the 50th Anniversary of the Moon Landing. Proceedings der Tagung des Arbeitskreises Astronomiegeschichte in der Astronomischen Gesellschaft in Stuttgart 2019. Hamburg: tredition (Nuncius Hamburgensis – Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften, Band 50) 2022.

*Cover vorne: Origin of the Solar System Elements (Jennifer A. Johnson,
credits: ESA/NASA/AASNova)*

Frontispiz: Spektren von Sternen und Nebeln (Roscoe 1869)

*Cover hinten: Katzenaugen-Nebel (© J.P. Harrington & K.J. Borkowski,
University of Maryland, NASA/ESA), Helium Spektrum (© NASA)*

AG Geschichte der Naturwissenschaft und Technik, Hamburger Sternwarte,
Bundesstraße 55 – Geomatikum, 20146 Hamburg, Germany
<https://www.fhsev.de/Wolfschmidt/GNT/home-wf.htm>

Dieser Band wurde gefördert von der Schimank-Stiftung und dem
Arbeitskreis Astronomiegeschichte in der Astronomischen Gesellschaft.

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlages und des Autors unzulässig. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Verlag & Druck: tredition GmbH, An der Strusbek 10, 22926 Ahrensburg
ISBN – 978-3-347-78303-4 (Softcover), 978-3-347-78304-1 (Hardcover),
978-3-347-78305-8 (e-Book), © 2022 Gudrun Wolfschmidt.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort:	
<i>Wolfschmidt, Gudrun (Hamburg)</i>	12
ZUM 150. JUBILÄUM DES PERIODENSYSTEMS DER ELEMENTE	13
1 Zur Einführung – Das Periodensystem der Elemente und das Weltall	
<i>Katrin Cura (Hamburg)</i>	14
1.1 Einleitung	16
1.2 Elemente des Weltalls: Wasserstoff, Helium, Lithium	18
1.2.1 Wasserstoff	20
1.2.2 Helium und die anderen Edelgase	22
1.2.3 Lithium	23
1.3 Atomtheorie und Systematisierungsansätze bis zum Karlsruher Kongress 1860	24
1.4 Lebensläufe	30
1.4.1 Demitri Mendelejew	30
1.4.2 Lothar Meyer und die unveröffentlichte Tabelle von 1868	33
1.5 Das Periodensystem der Elemente von Meyer und Mendelejew .	39
1.5.1 Mendelejews Geistesblitz und erste Veröffentlichung von 1869	39
1.5.2 Meyers Veröffentlichung von 1870	47
1.5.3 Mendelejew finales Periodensystem von 1871	50
1.6 Bestätigung des Periodensystems der Elemente durch „National-elemente“	54
1.6.1 Gallium	54
1.6.2 Scandium	55
1.6.3 Germanium	56
1.6.4 Francium	58
1.6.5 Rhenium	59
1.6.6 Hafnium	59
1.7 Zusammenfassung	60
1.8 Literatur	63

KOSMOCHEMIE – CHEMISCHE ELEMENTE UND MOLEKÜLE IM UNIVERSUM 66

2 Kosmochemie – Chemische Elemente im Kosmos – Meteoriten, Sterne, Kosmologie <i> Gudrun Wolfschmidt (Hamburg)</i>	66
2.1 Kosmochemie – Analyse von Meteoriten und Mond- und Mars- gestein	68
2.1.1 Meteoriten – Kosmische Herkunft?	68
2.1.2 Chemische Analyse von Material von Mond- und Mars- Missionen	73
2.2 Der Weg zum Periodensystem der Elemente	75
2.2.1 Entdeckung von Elementen bis zur Spektralanalyse . . .	75
2.2.2 Vorläufer des Periodensystems der Elemente: Berzelius, Döbereiner und Newlands	75
2.2.3 Periodensystem der Elemente (PSE) 1869 – Meyer und Mendelejew	78
2.3 Spektralanalyse und die Entdeckung neuer Elemente	82
2.3.1 Fraunhofer als Begründer der Spektroskopie	82
2.3.2 Kirchhoff und Bunsen – Entdeckung der Spektralanalyse	84
2.3.3 Entdeckung zwölf neuer Elemente mit der Spektralanalyse (1860–1900)	87
2.4 Wirkung der Spektralanalyse in der Astronomie	88
2.4.1 Protuberanzen und Heliumentdeckung (1868)	88
2.4.2 Entdeckung der drei Atmosphäreschichten der Sonne . .	92
2.4.3 Auf dem Weg zur Klassifikation von Sternspektren . . .	93
2.4.4 Spektren von Novae	97
2.4.5 Chemische Zusammensetzung von Kometen	98
2.4.6 Entdeckung der Interstellaren Materie	102
2.4.7 Gasnebel- und Spiralnebelspektren	104
2.5 Quantitative Spektralanalyse	106
2.5.1 Saha-Gleichung	106
2.5.2 Woraus besteht die Sonne?	106
2.5.3 Erste quantitative Spektralanalyse – Unsöld τ Scorpii .	108
2.6 Atome und Moleküle im Interstellaren Medium	108
2.6.1 Radioastronomie und die 21 cm-Spektrallinie des atoma- ren (neutralen) Wasserstoffs (HI)	108
2.6.2 Ionisierter Wasserstoff (H II-Regionen)	110
2.6.3 Molekularer Wasserstoff (H_2)	111
2.6.4 Atome und Moleküle im Interstellaren Medium	111
2.7 Erste Elemente nach dem Urknall – Primordiale Nukleosynthese	115

2.8	Entwicklung der Sterne – Stellare Nukleosynthese	120
2.8.1	Geburt von Sternen in Gasnebeln	120
2.8.2	Bildung der Elemente leichter als Eisen – Kernfusion . .	120
2.8.3	Häufigkeiten leichter Elemente in kosmischer Strahlung	122
2.8.4	Sternentwicklung: Bildung von Eisen bis Uran – Endsta- dien der Sterne	122
2.8.5	Nukleosynthese Schwerster Elemente – Neutroneneinfang	124
2.9	„Wir sind Sternenstaub“	127
2.10	Literatur	128
KOSMOCHEMIE – ANALYSE VON METEORITEN		136
3	Die Anfangsgeschichte der chemischen Analyse außerirdischer Materie	
	<i>Xian Wu (Dresden)</i>	136
3.1	Astronomie und Chemie	138
3.2	Meteoritenchemie	139
3.2.1	Meteorite als außerirdische Materie	139
3.2.2	Chemische Analysen von Meteoriten	140
3.3	Warum erlebte die chemische Analyse von Meteoriten einen Auf- schwung Anfang des 19. Jahrhunderts?	147
3.4	Schlussfolgerung	150
3.5	Literatur	150
ERSTE ELEMENTE NACH DEM URKNALL – PRIMORDIALE NUKLEOSYN- THESE		152
4	Deuterium in the Universe	
	<i>Hans-Ulrich Keller (Stuttgart)</i>	152
4.1	Discovery of Deuterium and the <i>Miller-Urey-Experiment</i>	154
4.2	What is Deuterium?	155
4.3	Where Deuterium was coming from?	156
4.4	Who was George A. Gamow (1904–1968)?	159
4.5	Ralph Asher Alpher (1921–2007)	162
4.6	The Big Bang Standard Scenario	164
4.6.1	The Supernova Cosmology Project	166
4.7	Primordial Nucleosynthesis	168
4.8	Phillip James [Jim] Edwin Peebles (*1935)	169
4.9	Fred Hoyle (1915–2001)	170
4.10	Theory of Stellar Nucleosynthesis	171
4.10.1	Chūshirō Hayashi (1920–2010)	171

4.10.2	Robert Vernon Wagoner (*1938)	172
4.11	Where was the water on Earth coming from? NOT from comets!	174
4.12	Literature	176
5	Helium – Sonnenelement aus dem Urknall – Teil 1: Die Entdeckung des Heliums	
	<i>Dietrich Lemke (Heidelberg)</i>	178
5.1	Einleitung – Vorgeschichte	180
5.2	Die Geburt der Astrophysik	182
5.3	Neues Werkzeug für Astronomen	184
5.4	Eine Sonnenfinsternis bringt Licht ins Dunkel	188
5.5	Linienfund in Londons Sonne	190
5.6	Chemische Spurensuche	191
5.7	Geheimnisvoller Stickstoff	194
5.8	Endlich: Helium im Labor	194
5.9	Fünf neue Elemente in vier Jahren	195
5.10	Eine dritte Entdeckung des Elements Helium	197
5.11	Wer hat Helium entdeckt?	199
5.12	Literatur	201
6	Helium – Sonnenelement aus dem Urknall – Teil 2: Ursprung und Anwendungen	
	<i>Dietrich Lemke (Heidelberg)</i>	204
6.1	Einleitung	206
6.2	Elemente aus dem Urknall	207
6.3	Ende bei Helium	211
6.4	Helium – Das erste Atom im Kosmos	211
6.5	Das Edelgas in Sternen	213
6.6	Heliumschwund in der Erdatmosphäre	215
6.7	Helium im Erdgas	215
6.8	Die Verflüssigung von Helium	217
6.9	Eine super Flüssigkeit	220
6.10	Helium in der Infrarotastronomie	223
6.11	Helium in der Ballonastronomie	225
6.12	Stoppt die Vergeudung von Helium!	227
6.13	Literatur	229

ENTWICKLUNG DER STERNE – STELLARE NUKLEOSYNTHESE 230

7 Stellar Evolution and the Production of Chemical Elements

David Walker (Hamburg) 230

7.1 The Situation after the Big Bang 232

7.1.1 Abundance of Elements in the Present Universe 232

7.1.2 Primordial Helium 233

7.2 Production of Metals by Nuclear Burning in Stars 237

7.2.1 Light and Heavy Elements 237

7.2.2 Stellar Life in a Nutshell 238

7.2.3 Stellar Mass and Stellar Life-Expectancy 242

7.2.4 The Main Nuclear Burnings 245

7.3 The Ongoing Enrichment of Space with Metals: The Chemical Evolution of the Universe 247

7.3.1 Stellar Populations: Evidence that the Metals were Produced by the Stars 247

7.3.2 Production of Heavy Elements by Neutron Capture 249

7.3.3 The *s* Process 250

7.3.4 The Star FG Sagittae 257

7.3.5 Supernovae 259

7.3.6 *r* Processes 270

7.4 Appendix: Processes of Radioactive Decay 277

7.5 Literature 279

8 Wir sind Sternenstaub – Zur Wissenschaft hinter der Metapher

Michael Geymeier & Susanne M. Hoffmann(Jena) 284

8.1 Einleitung 284

8.2 Das Narrativ: Gustl 286

8.3 Ausgangsfragen: Welcher Staub? 288

8.4 Welche Prozesse kommen in Frage? 291

8.4.1 Warum nicht unsere Sonne? 291

8.4.2 Urknall? 291

8.4.3 Kernfusion – Sternleichen 292

8.4.4 Neutroneneinfang 294

8.5 Fazit: Elemententstehung 295

9 200 Jahre nach Gadolins irdischer Entdeckung – Yttrium überrascht als Altersindikator von Sternen

Kalevi Mattila (Helsinki, Finnland) 298

9.1 Eine schwarze Steinart vom Ytterby Steinbruch 300

9.2	Seltene Erden – gar nicht so selten	302
9.3	Johan Gadolin, Vater der chemischen Forschung in Finnland	303
9.4	Hundert Jahre später – Seltene Erden auch in Sternen nicht selten	308
9.5	Pekuliäre Sterne	309
9.6	Heute: Yttrium dient als kosmische Uhr	312
9.7	Literatur	315
ATOME UND MOLEKÜLE IM INTERSTELLAREN MEDIUM – RADIO- UND IR-ASTRONOMIE		318
10	Interstellares Medium – der Stoff aus dem die Sterne sind	
	<i>Markus Röllig (Köln)</i>	318
10.1	Einleitung	320
10.2	Von den Sternen zum Interstellaren Medium	320
10.3	Entschlüsselung des Interstellaren Mediums	321
10.3.1	Der Spektroskopische Fingerabdruck	321
10.3.2	Löchriger Himmel	323
10.3.3	Atome, Staub und Moleküle	325
10.3.4	UV Schutz Extrem	328
10.4	Schlußworte	330
10.5	Literatur	332
11	Cosmochemistry – Discoveries of Molecules in Green Bank	
	<i>Natalia Lewandowska (Haverford College, Pennsylvania, USA)</i>	334
11.1	Foreword	336
11.2	The beginning	336
11.3	Observations with the 300 foot radio telescope	341
11.4	Observations with the Green Bank Telescope	342
11.5	References	345
ZUM 50. JUBILÄUM DER MONDLANDUNG – MONDGLOBEN UND KARTEN		350
12	Die Mondgloben-Sammlung des Tobias-Mayer-Vereins Marbach	
	<i>Armin Hüttermann (Marbach am Neckar)</i>	350
12.1	Einleitung: Kurzer Überblick über die Entwicklung der Herstel- lung von Mondgloben	352
12.2	Tobias Mayers Mondkarte	354
12.3	Tobias Mayers Mondglobus	357
12.4	Tobias Mayer „auf dem Mond“	363
12.5	Katalog der Globen des Tobias-Mayer-Vereins	363

12.6 Literatur	378
13 Der Tango von Science und Fiction auf dem Weg zum Mond <i>Susanne M. Hoffmann (Jena)</i>	380
14 „Die Rückseite des Mondes“ oder Die Herstellung von Mondgloben seit Lunik 3 vor 60 Jahren <i>Harald Gropp (Heidelberg)</i>	382
14.1 Literatur	385
15 Der Mond ist nicht schwarz-weiß – Von Apollo-Steinen zu Vollmond- Fotos <i>Daniel Fischer (Königswinter)</i>	386
15.1 Literatur	395
ANHANG	396
16 Links – Astronomie, Museen in Stuttgart <i>Gudrun Wolfschmidt (Hamburg)</i>	396
16.1 Allgemeine Links zur Astronomie und Astronomiegeschichte . .	397
16.2 Links zur Astronomie und ihrer Geschichte in Stuttgart und Um- gebung	398
16.3 Museen in Stuttgart und Umgebung	400
17 Tagung des Arbeitskreises Astronomiegeschichte in Stuttgart 2019	402
17.0.1 SOC – Scientific Organizing Committee	403
17.0.2 LOC – Local Organizing Committee	403
17.1 Sonntag, 15. September 2019 – Exkursion nach Marbach am Neckar zum Tobias-Mayer-Museum, Torgasse 13	404
17.2 Stuttgart, Montag, 16. September 2019	406
18 List of Participants – „Kosmochemie“ – AKAG Stuttgart 2019	409
Autoren	413
Nuncius Hamburgensis	418
Personenindex	429

Vorwort

Kosmochemie – chemische Elemente im Kosmos

Wolfschmidt, Gudrun (Hamburg)

Kosmochemie – Geschichte der Entdeckung und Erforschung der chemischen Elemente im Kosmos – diese Tagung des Arbeitskreises Astronomiegeschichte in der Astronomischen Gesellschaft fand in Stuttgart am 15.–16. September 2019 statt – zum 150. Jubiläum des Periodensystems der Elemente (PSE, 1869) und anlässlich des 50. Jubiläums der Mondlandung.¹ Das *Internationale Jahr des Periodensystems der Elemente* (IYPT2019) wurde von den United Nations ins Leben gerufen anlässlich der Entdeckung des PSE durch Lothar Meyer (1830–1895) und Dmitri Iwanowitsch Mendelejew (1834–1907).²

Die Kosmochemie befasst sich mit der Entstehung der Elemente, ihrer Isotope, und ihrer Verteilung im Universum. In 15 Beiträgen wird das Thema beleuchtet. Man versucht, die chemische Entwicklung unseres Sonnensystems und auf anderen Planeten zu verstehen bis hin zur Entstehung des Lebens auf anderen Himmelskörpern. Auch ist die Frage sehr spannend, wie das Leben auf die Erde kam, über Kometen oder Asteroiden?

Die Kosmochemie, auch Astrochemie genannt, ist ein interdisziplinäre Gebiet, das Astrophysik und Chemie verbindet. Thematisiert wird nicht nur das Sonnensystem (Planetenatmosphären, Kometen, Asteroiden, Meteoriten), sondern auch die Atome und Moleküle der interstellaren Materie mit Hilfe der IR- und Radioastronomie. Chemische Verbindungen entstehen in kosmischen Gaswolken.

In diesem Zusammenhang wird einerseits die primordiale Nukleosynthese, die Entstehung der leichtesten Elemente Wasserstoff, Deuterium, Helium und Tritium n-ach dem Urknall diskutiert, andererseits die Physik der Sterne (Kernfusion), die stellaren Nukleosynthese, bis zur Entstehung schwerster Elemente in Supernovae und bis zu den Elementhäufigkeiten im Kosmos. Da die Sterne nicht ins Labor geholt werden können, ist man bei den astrophysikalischen Untersuchungen auf die Methoden der Spektroskopie, der Analyse des Lichtes mit Prismen oder Gittern, angewiesen, wobei heute nicht nur sichtbares Licht der

1 Webseite der Tagung des AKAG: <https://www.fhsev.de/Wolfschmidt/events/akag-stuttgart-2019.php>.

2 *International Year of the Periodic Table of the United Nations, 2019*, <https://iypt2019.org/>.

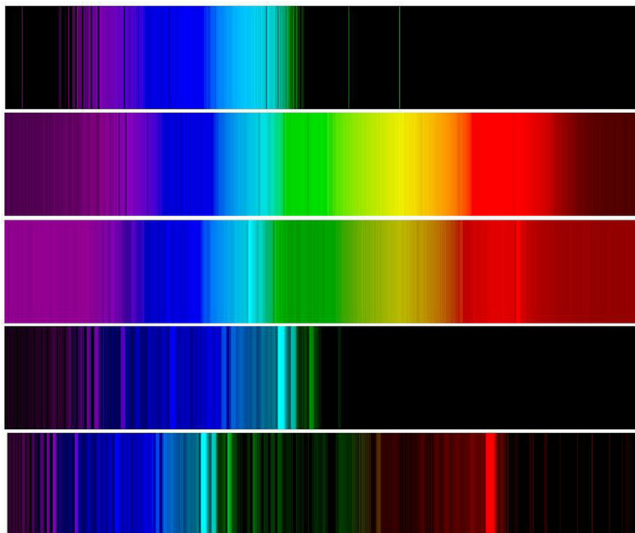


Abbildung 0.2:
Spektren der Nova-Cygni (1920), aufgenommen mit dem
37''-Reflektor am 23., 24., 25., 29. August und 2. September 1920

© University of Michigan)

Himmelskörper ausgewertet wird, sondern Strahlung aller Wellenlängen (Radioastronomie, Infrarot, Ultraviolett, Röntgen und Gamma) ausgewertet wird.

Zudem gibt es mit Raumsonden die Möglichkeit, das Sonnensystem direkt zu erforschen. Durch unbemannte und selten (wie beim Mond) bemannte Raumfahrt lassen sich Proben außerirdischen Materials vom Mond, von Kometenstaub, Asteroiden, Sonnenwind und vom Mars sammeln. Natürlich werden auch die Meteoriten auf der Erde gründlich analysiert. Schließlich war auch das 50jährige Jubiläum der Mondlandung, so dass auch zu diesem Thema Beiträge vorhanden sind.

Ich möchte schliessen mit dem bekannten Zitat von Carl Sagan *We are made of star stuff*:

„The nitrogen in our DNA, the calcium in our teeth, the iron in our blood, the carbon in our apple pies was made in the interiors of collapsing stars. We are made of star stuff.“

Periodensystem der Elemente
Kurzversion (Stand 2015)

Klüber & Schulz

The periodic table displays elements from Hydrogen (H, 1) to Oganesson (Og, 118). It includes the Lanthanide and Actinide series at the bottom. The table is color-coded to show different groups of elements: Metals (blue), Nonmetals (green), Metalloids (yellow), and Gases (orange). The legend also indicates the positions of noble gases, halogens, and other specific groups.

Abbildung 0.3:
Modernes Periodensystem der Elemente
Das Periodensystem der Elemente hängt in jedem Chemieraum
Foto: Katrin Cura (Berufliche Schule Farmsen, 2020)

Zur Einführung – Das Periodensystem der Elemente und das Weltall

Katrin Cura (Hamburg)

Abstract

From the 19th century onwards, astronomers studied the structure of the universe and, together with chemists, tracked down the noble gases. In doing so, they expanded the periodic table, which was created 150 years ago during a brief period of discussion: In 1869, the Russian chemist Dmitri I. Mendelejew published his first paper, to which the German chemist Lothar Meyer responded publicly in 1870. Thereupon, in 1871 Mendeleev published a final system in which the elements were arranged according to their atomic weights and periodic properties. For unknown elements he left blank spaces and predicted their properties. Only a few years later, the discovery of gallium, scandium and germanium confirmed the importance of the periodic table for research.

Mendeleev and Meyer worked together successfully without personal contact, because they had a similar way of thinking. Both suffered from serious illnesses at an early age and were not always able to meet social demands. As a result of this experience, they studied several natural sciences and pursued an interdisciplinary approach right from the beginning of their career. They also pursued the discovery of new elements under the chemist Robert Bunsen and openly took up the impulses from the 1860 *Karlsruhe Congress*. The discussion there about atoms, molecules and their weights flowed into their systematics of elements. They researched these out of pure interest, as the topic was considered an unscientific gimmick.

Zusammenfassung

Die Astronomen erforschten ab dem 19. Jahrhundert den Aufbau des Weltalls und spürten mit den Chemikern die Edelgase auf. Damit erweiterten sie das Periodensystem, das vor 150 Jahren während einer kurzen Diskussionszeit entstand: 1869

veröffentlichte der russische Chemiker Dmitri I. Mendelejew seinen ersten Beitrag, auf den 1870 der deutsche Chemiker Lothar Meyer öffentlich antwortete. Daraufhin publizierte 1871 Mendelejew ein finales System, in dem die Elemente nach ihren Atomgewichten und periodischen Eigenschaften angeordnet waren. Für unbekannte Elemente ließ er Leerstellen und sagte deren Eigenschaften voraus. Nur wenige Jahre später bestätigte die Entdeckung des Galliums, Scandiums und Germaniums die Bedeutung des Periodensystems für die Forschung.

Mendelejew und Meyer arbeiten ohne persönlichen Kontakt erfolgreich zusammen, da sie eine ähnliche Denkweise hatten. Beide litten früh unter schweren Krankheiten und konnten gesellschaftliche Anforderungen nicht immer erfüllen. Durch diese Erfahrung studierten sie mehrere Naturwissenschaften und verfolgten bereits am Anfang ihrer Karriere einen interdisziplinären Ansatz. Zudem verfolgten sie beim Chemiker Robert Bunsen die Entdeckung neuer Elemente und nahmen die Impulse vom *Karlsruher Kongresses* von 1860 offen auf. Die dortige Diskussion über die Atome, Moleküle und deren Gewichte floss in ihre Systematik der Elemente. Diese erforschten sie aus reinem Interesse, denn das Thema galt als unwissenschaftliche Spielerei.

1.1 Einleitung

Die Gedanken wirbelten dem urwüchsigen russischen Chemiker Dimitri Iwanowitsch Mendelejew (1843–1907) durch den Kopf. Elektrisiert schrieb er die chemischen Elemente auf Kärtchen und schob sie wild hin und her, bis ein Muster aus waagerechten und senkrechten Reihen entstand. Erschöpft schlief er ein und sah im Traum die ideale Anordnung. Kaum wach, schrieb er sie auf und daneben die Worte: Da ist was dran. Seine erste Veröffentlichung im Jahre 1869 wirkte wie ein Paukenschlag, der bis heute zu hören ist. 150 Jahre später erklärte die UNESCO das Jahr 2019 zum *Internationalen Jahr des Periodensystems der Elemente* (IYPT2019, *International Year of the Periodic Table*, 2019).

Zu einer spannenden Geschichte gehören immer ein Held und ein großes Finale, obwohl bekanntermaßen die Realität vielschichtig ist. Die heutige Chemiegeschichte reduziert die Entdeckung des Periodensystems nicht nur auf einen Geistesblitz, sondern stellt den wissenschaftlichen Austausch zwischen den Jahren 1869 bis 1871 in den Vordergrund. Einen wichtigen Beitrag leistete der deutsche Chemiker Lothar Meyer (1830–1895), der bis heute im Schatten seines schillernden russischen Kollegen steht.

Heute gelten beide Helden als Urheber der berühmten bunten Tafel, die zum Erkennungszeichen der Chemie wurde und Generationen von Schülern, Stu-

denten und Wissenschaftler prägte. In den Unterrichts- und Vorlesungsräumen hängt meistens die populäre Langform mit ihrem symmetrischen Raster: Die insgesamt 18 senkrechten Zeilen umfassen acht Hauptgruppen, in denen Elemente mit ähnlichen Eigenschaften angeordnet sind. Dazwischen sind die acht Nebengruppen, von denen die VIIIb aus drei Teilgruppen (8, 9, 10) besteht. Die waagerechten Zeilen entsprechen den sieben Perioden, in denen die Elemente von links nach rechts periodisch in wiederkehrenden Eigenschaften und steigender Elektronenzahl angeordnet sind. Dazu kommen noch zwei nicht nummerierte Perioden mit den Lanthanoide und Actinoide von jeweils 14 Stück.

Die Anordnung richtet sich nach den darzustellenden Inhalten, die durch die Quantenmechanik zunahm. Dadurch können die Elemente nach ihren chemischen Ähnlichkeiten, Kernladungszahl, Elektronenkonfiguration, besetzten Schalen und Unterschalen angeordnet werden. Heute gibt es das Periodensystem auch noch in Form von Schleifen, Spiralen, gedrehten Pyramiden, Kurzform und Blumen. Es lässt sich nur spekulieren, wie beide Chemiker diese Formen bewertet hätten.¹

Ihr Beitrag zum System ist nur im Kontext der Chemiegeschichte zu bewerten. Deshalb werden die wichtigsten Etappen der Atom- und Elementforschung sowie die ersten Systematisierungsversuche seit Anfang des 19. Jahrhunderts dargestellt. Diese Vorarbeiten waren ebenso wichtige Beweggründe für ihr Handeln, wie ihre erstaunlich ähnlichen Biographien.

Dabei stehen zwei Fragen im Vordergrund: Warum arbeiteten Mendelejew und Meyer an einem Randthema der Chemie? Schließlich suchten die zeitgenössischen Fachleute nach neuen Elementen, taten aber deren Systematisierung als unsinnige Spielerei ab. Die zweite Frage betrifft die sehr kurze Zusammenarbeit der beiden Wissenschaftler. Warum schufen sie in nur vier Jahren das System, ohne sich persönlich zu kennen oder im Briefkontakt zu stehen. Stattdessen schrieben beide ihre Gedanken in Artikeln nieder und betrieben darüber den Gedankenaustausch. Gewissermaßen warfen sie sich die Bälle zu und Mendelejew schoss im Jahre 1869 sowie 1871 insgesamt dreimal und Meyer 1870 nur einmal.

Weitere Beachtung findet die Entdeckungsgeschichte der „Nationalelemente“ *Gallium*, *Scandium* und *Germanium*, die auf sensationelle Weise ihr System bestätigten. Da es noch keine Edelgase enthielt, wurde deren Entdeckung zur ersten Bewährungsprobe und bewirkte die Einführung der achten Hauptgruppe. In deren erster Stelle steht *Helium*, das zusammen mit dem *Wasserstoff* eine Sonderstellung in der ersten Periode einnimmt. Beide Elemente lassen sie

¹ Schmiermund (2019), S. 37.

nicht nur die Herzen der Chemiker höher schlagen, sondern versetzten auch die Astronomen in höhere Sphären.

Für sie sind die funkelnden Sterne am Nachhimmel riesige Wolken aus Wasserstoff sowie Helium und zeugen von der Entstehungsgeschichte des Universums. Dagegen ist *Lithium* ein mengenmäßig kleines Relikt aus dieser Zeit, aber bei seiner Entdeckungsgeschichte kamen die wichtigsten drei Nachweismethoden der natürlichen Elemente zum Einsatz: Chemischer Nachweis, Elektrolyse und Spektralanalyse.

Wegen ihrer Bedeutung für die Astronomie und Chemie wird die Entdeckungsgeschichte der Elemente vorangestellt.

1.2 Elemente des Weltalls: Wasserstoff, Helium, Lithium

Im Weltall sind Wasserstoff und Helium die mengenmäßig wichtigsten Elemente und entstanden nach einem theatralisch anmutenden Urknall vor 14 Milliarden Jahren. In der Ursuppe reiner Strahlung schwammen nach kurzer Zeit Schwerkraft, nukleare Wechselwirkung, elektromagnetische Kraft, Materie und Antimaterie. Währenddessen expandierte das Universum mit extremer Geschwindigkeit in alle Richtungen, kühlte ab und die Elementarbausteine Quarks entstanden, die wiederum Protonen und Neutronen bildeten. Sobald das Proton sich mit einem Elektron umhüllen konnte, lag atomarer Wasserstoff vor. Er wurde zu einem Erfolgsmodell und macht bis heute 90% aller Atome und 75% Masse der Materie aus. Die Wasserstoffatome fusionierten zu Helium, das als zweithäufigstes Element immerhin ca. 24% der verfügbaren Masse darstellt.

Für die Nukleosynthese schwerer Elemente blieb durch die schnelle Abkühlung des Universums kaum Zeit und nur noch die kleinen Atome von Lithium und Bor entstanden. Mehr Produkte gab es nach dem Urknall nicht und alle „schweren Elemente“ von Beryllium bis zum Uran bildeten sich später im Inneren der Sterne oder bei Explosionsprozessen. Ihre Gesamtmenge ist mit fast 1% vernachlässigbar und kann den stellaren „Dreckeffekten“ zugeordnet werden.²

Ausgerechnet auf der Erde häufen sich die schweren Atome, während die beiden leichten Erfolgselemente Mangelware sind. Das Ungleichgewicht hängt mit der Entstehung des Planetensystems vor 4,5 Milliarden Jahren zusammen, bei dem die Sonne im Zentrum einer flachen Gas- und Staubscheibe entstand. Die hohen Temperaturen sowie die geringe Gravitation der kleinen Planeten

² Trueb (2005), S. 25–31. Scerri (2020), S. 281–298.

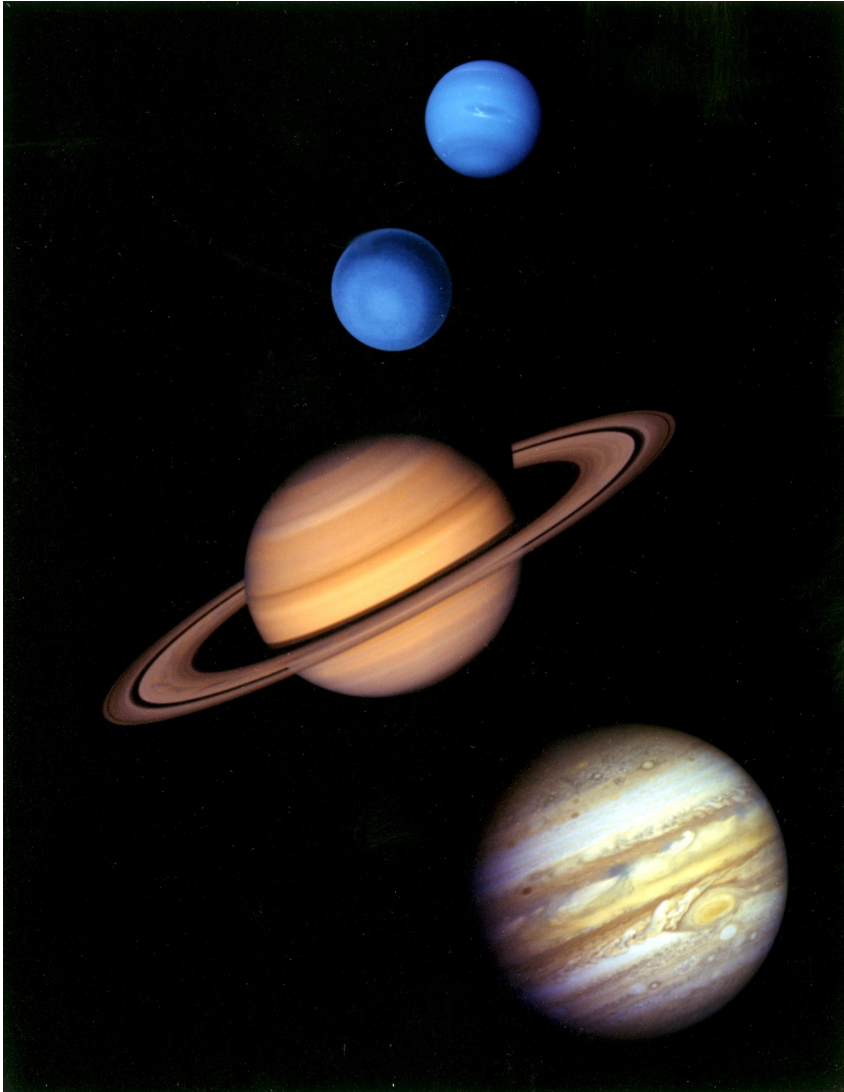


Abbildung 1.1:
Die Riesenplaneten Jupiter und Saturn bestehen größtenteils aus Wasserstoff und Helium, die Eisriesen Uranus und Neptun dagegen mehr aus Wasser (Eis), Ammoniak und Methan

(<http://www.jpl.nasa.gov/images/policy/index.cfm>, NASA)

trieben die leichtflüchtigen Elemente in die äußeren Bereiche und deshalb bestehen die Riesenplaneten wie Jupiter und Saturn größtenteils aus Wasserstoff und Helium, die Eisriesen Uranus und Neptun mehr aus Wasser (Eis), Ammoniak und Methan. Dagegen gibt es diese kaum auf den sonnennahen Planeten Merkur, Venus, Mars und Erde, die einem stellaren Destillationsrückstand gleich kommen. In ihrem Bodensatz sammeln sich die restlichen Elemente des Periodensystems und bilden die Grundlage für unser Leben.

1.2.1 Wasserstoff

Im Gegensatz zum Weltall kommt der Wasserstoff auf der Erde nur zu 0,88% vor und einzig die vulkanischen Gase enthalten bis zu 30 Volumenprozent Wasserstoff, der durch die thermische Zersetzung von Wasser entsteht. Bei Zimmertemperatur ist er in Molekülen wie dem farb- und geruchslosen H_2 -Gas gebunden, dessen brennbare Eigenschaft früh die Wissenschaftler faszinierte.

Schon der Arzt Paracelsus (1493/94–1541)³ beschrieb die Explosion von Wasserstoff-Luftgemischen. Im Jahre 1766 ließ der englische Chemiker Henry Cavendish (1731–1810) Salzsäure auf Metalle tropfen und fand den entstehenden Wasserstoff auf. Die „*brennbare Luft*“ war für ihn das reinste *Phlogiston*, also das brennbare Prinzip nach der Phlogistontheorie. 1783 führte Cavendish die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser durch und leitete davon den Namen aus dem Griechischen ab: *Hydrogenium* (ὕδωρ – *hydor*: Wasser; genau: erzeugen).⁴ Der französische Chemiker Antoine Laurent de Lavoisier (1743–1794) bestätigte diese Reaktion und gleichzeitig ihre Rückreaktion, indem er Wasser über glühende Eisenspäne laufen ließ. Dabei fand er den Wasserstoff auf und hatte neben der wissenschaftlichen Erkenntnis gleich ein billiges Verfahren gefunden, um die neuartige Ballon-Luftfahrt mit Traggas zu versorgen.⁵ Auch wenn seine Oxidationstheorie der alten Phlogistontheorie den Todesstoß gab, behielt der Wasserstoff noch lange seine Sonderstellung bei.

So schrieb Mendelejew im Jahre 1869: „*Mit Recht wird daher das leichteste Element H als typischer Maßstab gewählt.*“⁶ Dabei folgte er nicht mehr dem englischen Arzt William Prout (1785–1850), für den Wasserstoff der Urstoff aller Elemente war. Prout's Urstofftheorie ist aus heutiger Sicht eine „diffuse Vorstufe“ moderner atomtheoretischer Vorstellungen und nur haltbar, wenn man die Neutronen unterschlägt. So ist der Kern des Wasserstoffs, das Proton,

³ Der richtige Name lautete Theophrastus Bombst von Hohenheim.

⁴ Jakubke (1987), S. 1207. Trueb (2005), S. 30. Engels & Stolz (1989), S. 409.

⁵ Taube & Rudenko (1972), S. 9–10.

⁶ Mendelejew, Dmitrij: Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente. Zeitschrift für Chemie 12 (1869), S. 405–406. Zitiert bei Seubert 1895, S. 18–19.