

Forschung, Wissenschaft



Chemie im interstellaren Raum*

M. Taube**

Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung Würenlingen, Schweiz

Abstract

The parameters of the interstellar chemistry have been discussed: the cosmic abundance of elements, the mass and density of the gaseous component in the interstellar space, the temperature, the source of free energy, the stability of the molecules in the flux of ultraviolet light, the role of cosmic rays and the spectral lines of the molecules.

1. Interstellare Chemie, eine exotische Chemie?

Schon seit zweihundert Jahren hat die Chemie die Glasretorte verlassen und immer grössere Bereiche erobert. Die moderne technologische Chemie, inklusive Metallurgie und Energieerzeugung, herrscht über einen Fluss der Materie von etwa 10^{12} kg pro Jahr. Die Biochemie untersucht die chemischen Prozesse in lebendigen Wesen der gesamten Masse von etwa 10^{15} kg. Die Geochemie hat als Objekt die Erdkruste und die Hydrosphäre mit einer gesamten Masse $\sim 10^{22}$ kg. Die Planetenchemie, die noch ihre ersten Schritte macht, interessiert sich für die Planetenentwicklung; die gesamte Menge der hier zugeordneten Materie erreicht etwa 10^{27} kg. Ist hier die Grenze bereits erreicht?

Seit etwa 10 Jahren entwickelt sich die sogenannte Kosmochemie, auch Astrochemie genannt. Ihr Objekt: die extrasolare kalte Materie in gasförmigem und festem Zustand, d.h. die kalten Atmosphären der infraroten Sterne, der Protosterne und der zwischenstellaren Materie.

Wie gross sind die Mengen dieser Materie, welche als Objekt der Chemie im interstellaren Raum zu betrachten ist? Nur in unserer Galaxis erreichen diese Mengen etwa 10^{39} kg, also milliardenmal mehr als die Masse der Sonne. Und im Universum gibt es etwa 100 Milliarden Galaxien!

Es kann kein Zweifel bestehen, dass der grösste Teil der Materie im Universum, welcher in chemischen Aktivitäten involviert ist, der «interstellaren Chemie» einzuordnen ist.

Die Biochemie und die Technochemie interessieren sich für einen winzig kleinen Anteil der kosmischen Materie, welche sich noch dazu in einem ganz spezifischen und extrem seltenen Zustand befindet. Es sind deshalb eigentlich «exotische» Chemiegebiete. Die in-

terstellare Chemie dagegen repräsentiert die häufigste Form der chemischen Aktivitäten im Universum.

2. Was möchten wir über die interstellare Chemie wissen?

Nehmen wir an, dass wir noch nichts über dieses Gebiet der Chemie gehört haben. Welche Fragen wollen wir stellen, um uns ein Bild von diesem Neuland der Chemie zu schaffen?

Die folgenden Fragen scheinen die selbstverständlichsten zu sein.

- Welche chemischen Individuen nehmen an der interstellaren Chemie teil?
 - Wie gross ist ihre Menge?
 - Wie gross ist der Reaktionsraum?
 - Welche Konzentrationen, Dichten, Drücke kommen hier in Frage?
 - Welche Temperaturen herrschen hier?
 - Welche Energiequellen und Energiesenken stehen hier zur Verfügung?
 - Was wissen wir über die thermodynamischen Eigenschaften der hier anzutreffenden Individuen?
 - Was wissen wir über das kinetische Verhalten?
 - Wieviel Zeit steht hier zur Verfügung?
 - Welche Produkte entstehen und wie kann man die Produkte messen? Mit welcher Messtechnik?
 - Welche Eigenschaften haben die Produkte der interstellaren Chemie?
- und nicht zuletzt:
- Wozu ist diese Forschung gut?

3. Die «Reagenten» in der interstellaren Chemie

Beginnen wir mit der elementaren Zusammensetzung der reagierenden Masse. Welche chemischen Elemente sind hier zu erwarten?

Die Antwort ist mehr als trivial: alle stabilen und quasistabilen Elemente sind hier zu erwarten. Wir nehmen an, dass der interstellare Raum eine gute mittlere Probe der kosmischen Materie ist.

Aber diese Antwort ist nicht exakt genug. Wir wollen wissen, in welchen Proportionen die Elemente in dieser Art der Materie vertreten sind.

Die heute bekannte durchschnittliche Zusammensetzung der kosmischen Materie und deshalb auch der interstellaren Materie kann man kurz wie folgt charakterisieren (siehe Abb. 1).

* Vortrag gehalten bei der «Chemischen Gesellschaft» Freiburg, am 26. Oktober 1976

** Prof. Dr. M. Taube, Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung, CH-5303 Würenlingen

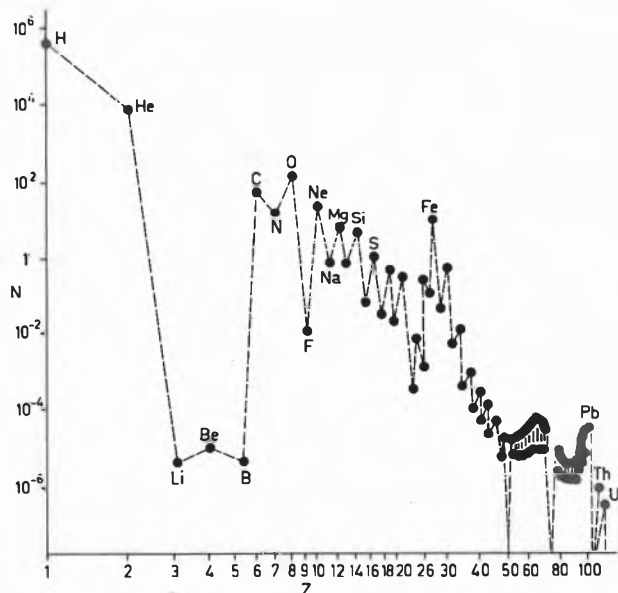


Abb. 1: Die kosmische Häufigkeit der Elemente, bezogen auf 1 Million Atome:

N = relative Häufigkeit

Z = Atomzahl (in logarithmischem Massstab)

Nehmen wir eine mittlere interstellare Probe mit einer Million Atomen; wir finden dort folgende Elemente:

Wasserstoff	H	920 500	Atome
Helium	He	78 320	Atome
Leichteste Metalle	Li, Be, B	0,001	Atome
Kohlenstoff	C	304	Atome
Stickstoff	N	84	Atome
Sauerstoff	O	607	Atome
Fluor	F	0,04	Atome
Neon	Ne	76	Atome
Leichte Metalle	Na, Mg, Al	28	Atome
Silicium	Si	30	Atome
Phosphor	P	0,3	Atome
Schwefel	S	15	Atome
Metalle der Eisengruppe	Fe, Ni, Zn, Cu	36	Atome
Alle anderen Elemente bis Uran		0,01	Atome

Die chemische Zusammensetzung der interstellaren Materie entspricht einer Formel (sehr vereinfacht!)



wo Me für alle andern Elemente steht mit Ausnahme der edlen Gase: He, Ne, Ar usw.

Aus dieser grob vereinfachten Formel der interstellaren Materie geht schon hervor, welche Produkte hier zu erwarten sind.

4. Wie dicht ist die interstellare Materie?

Unsere Galaxis enthält etwa 200 Milliarden Sterne mit durchschnittlichen Massen von 10^{30} kg. Die totale Masse der Sterne in unserer Galaxis erreicht etwa 10^{41} kg. Man schätzt, dass die Sterne etwa 90% der ganzen Masse der Galaxis repräsentieren. Der Rest, etwa 10%, befindet sich im interstellaren Raum; d.h. 10^{40} kg. Die Sterne nehmen nur einen Teil von 10^{-22} des Volumens der Galaxis in Anspruch. Der Rest, also

fast das ganze Volumen gehört der interstellaren Materie.

Das Volumen der Galaxis beträgt etwa 10^{62} m³. (Durchmesser der Galaxis 100 000 Lichtjahre; Dicke des Diskus 5000 Lichtjahre; 1 Lichtjahr $\sim 9 \cdot 10^{15}$ m.) Die durchschnittliche Dichte der interstellaren Materie ist die folgende:

$$\frac{10^{10} \text{ kg}}{10^{62} \text{ m}^3} = 10^{-22} \text{ kg/m}^3 \triangleq 100\ 000 \text{ Atome/m}^3$$

Zum Vergleich zwei Zahlen:

die Dichte der irdischen Atmosphäre 10^{25} Atome/m³
die mittlere Dichte des Universums 10 Atome/m³

Die interstellare Materie ist aber bei weitem nicht homogen verteilt. Es existieren etwa 3000 Gaswolken in unserer Galaxis, die eine etwa millionenmal grössere Zahl von Atomen pro Einheit des Volumens als die oben geschätzte mittlere Konzentration enthalten. In diesen Gaswolken befinden sich in einem Kubikmeter bis 10^{11} Atome.

In diesen Gaswolken befinden sich auch Staubpartikel. Etwa $1/100$ Teil der Materie der Wolken befindet sich in festem Zustand. Eine durchschnittliche Staubpartikel hat einen Durchmesser von etwa $0,1 \mu\text{m}$, eine Masse von 10^{-18} kg und enthält etwa 10^8 Atome. In einem Kubikmeter dieser dichteren Gaswolken findet man etwa 10 Staubpartikel: man spricht von Staub-Gaswolken.

5. Ist die interstellare Materie kalt oder heiss?

Seit etwa 10 Jahren wissen wir, dass das Universum eine Temperatur von 2,7 Kelvin aufweist. Diese erstaunlicherweise homogen verteilte Temperatur ist ein Überbleibsel der früheren, sehr heissen Etappen in der Evolution des Universums (Abb. 2).

Die dichteren Regionen des interstellaren Raumes, die wir als Staub-Gaswolken betrachten, werden in zwei Klassen unterteilt, die heissen Regionen mit Temperaturen von etwa 10 000 K, genannt HII-Regionen, und die kalten Regionen mit Temperaturen von etwa 50 bis 100 K, genannt HI-Regionen.

Die heissen Regionen, HII, in welchen sich die Hauptkomponente Wasserstoff in Form von Plasma, d.h. in voll ionisiertem Zustand als H^+ und e^- befindet, bietet für die Chemie keine grossen Interessen.

Die kalten Regionen HI, in welchen sich der Wasserstoff in atomarem Zustand findet, sind die Hauptobjekte der interstellaren Chemie.

6. Über welche Energiequellen verfügt die interstellare Chemie?

Die Frage nach chemischen Ereignissen ist nicht nur die Frage nach den Komponenten, sondern auch die Frage nach der Art und Grösse der Quelle der freien Enthalpie.

Im kosmischen Raum gibt es viele Energiequellen, die hier eine wichtige Rolle spielen könnten:

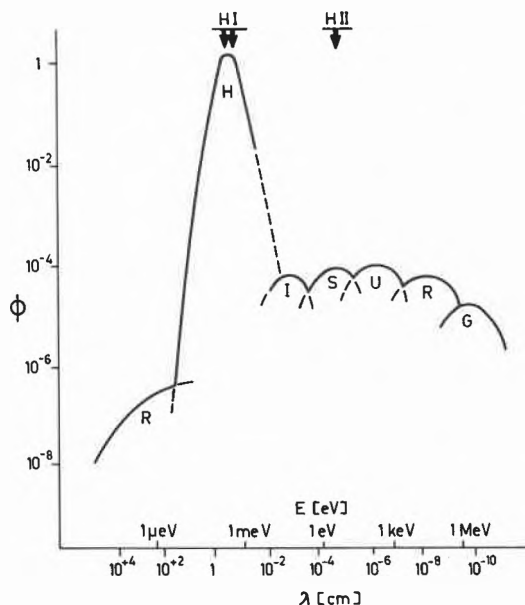


Abb. 2: Das Spektrum der Strahlung im kosmischen Raum:

- ϕ = relativer Fluss
- E = Energie der Photonen (Elektronvolts)
- λ = Wellenlänge (cm)
- R = Radioquellen
- H = Hintergrundstrahlung (2,7 K Reliktstrahlung)
- I = infrarote Strahlung
- S = sichtbare Strahlung
- U = ultraviolette Strahlung
- X = Röntgenstrahlung
- G = Gamma-Strahlung
- HI = Regionen mit kalter Materie (HI für H_{Atom})
- HII = Regionen mit heisser Materie (HII für H^+)

- die ultraviolette Strahlung der sich in der Nähe befindlichen heissen Sterne,
- die Regionen der äusseren Atmosphären der kälteren Sterne oder Protosterne,
- die Schockwellen, verursacht durch die Explosion einer Supernova,
- die Kollision zweier Gaswolken,
- die kosmischen Strahlen, d.h. der Fluss, der sich sehr schnell bewegenden Wasserstoffatomkerne, welche die kinetische Energie von etwa 100 Mega-elektronenvolt und viel mehr erreichen.

In der letzten Zeit ist es immer klarer geworden, dass die letztgenannte Quelle, d.h. die kosmische Strahlung offenbar sehr wohl den Mechanismus der Synthese der interstellaren Moleküle erklären lässt.

Die Frage nach der Energiesenke, d.h. nach dem Mechanismus der Kühlung, ist viel einfacher zu beantworten: die Umgebung jeder Gaswolke ist kalt genug; sie zeigt eine Temperatur von 2,7 Kelvin.

Die wichtigsten Parameter, welche den Lauf der chemischen Prozesse in einer Staub-Gaswolke beeinflussen, sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

7. Die interstellaren Moleküle

Noch einmal wollen wir die chemische Zusammensetzung der interstellaren Materie in Erinnerung bringen. In sehr groben Zahlen, bezogen auf 1 Atom Schwefel, sieht die relative Konzentration der chemischen Elemente so aus (edle Gase sind nicht einbezogen):

Schwefel	1 Atom
Silicium	2 Atome
Stickstoff	5 Atome
Kohlenstoff	20 Atome
Sauerstoff	40 Atome
Wasserstoff	60000 Atome

Diese Zahlen erlauben, mit etwas Geschick, das folgende Bild der interstellaren Chemie zu entwerfen:

- die Atmosphäre ist stark reduzierend,
- das Hauptprodukt scheint H_2O und OH zu sein,
- weitere Produkte: CO und CH_4 und andere Moleküle vom Typ H_xC_y und $H_xO_zC_y$,
- weniger häufig scheinen die Stickstoffverbindungen zu sein: NH_3 , $H_xC_yN_q$, CN ,
- die Schwefel- und Silicium-Verbindungen mit H, O und C sind zu erwarten.

Wir haben schon genügend Informationen über die Verhältnisse in den Staub-Gaswolken gesammelt, um zu erfahren, welche Moleküle unter diesen Bedingungen entstehen und welche von diesen schon beobachtet und identifiziert wurden. Bis heute wurden etwa 39 verschiedene Moleküle im interstellaren Raum beobachtet und identifiziert (Tabelle 2).

Tabelle 1: Parameter in der interstellaren Gaswolke und in der irdischen Flamme

Parameter	Einheit	Gasflamme auf der Erde	Gaswolke in interstellarem Raum
Totale Masse	kg	~ 1	10^{33} (etwa tausend Sonnenmassen)
Gesamtmessung	m	1	10^{17}
Dichte	Atom/m ³	$\sim 10^{25}$	$> 10^{10}$
Temperatur	K	1000	100
Freie Weglänge	m	10^{-6}	10^{12}
Zeit zwischen zweifachen Stössen	s	10^{-8}	10^8
Zeit zwischen dreifachen Stössen	s		10^{17} (10 Milliarden Jahre)
Lebensdauer des Objektes	s	$1 \div 10^8$	10^{13} (1 Million Jahre)
Energiequelle	-	esothermische Reaktion (Verbrennung)	kosmische Strahlung
Energiesenke	-	Umgebung mit 300 K	Umgebung mit 2,7 K
Produkte der Reaktionen	-	H_2O, CO_2, CO, NO_x , Russ	siehe Tabelle 2

Tabelle 2: Interstellare Moleküle

Zahl der Atome	Zahl der Elemente			
	2	3	4	5
10	×	×	×	×
9	×	CH ₃ CH ₂ OH (CH ₃) ₂ O	×	×
8	×	HCOOCH ₃	×	×
7	HCCCH ₃	CH ₃ CHO CH ₃ NH ₂ H ₂ CCHCN	×	×
6	×	CH ₃ OH	NH ₂ CNO	×
5	CH ₄	CH ₃ CN HCOOH HCCCN CH ₂ NH	×	×
4	NH ₃	H ₂ CO H ₂ CS	HCNO	=
3	H ₂ O H ₂ S	HCN COS	=	=
2	OH SiO CO NS CN SiS CS	=	=	=

× nicht beobachtet
= nicht möglich

Diese Moleküle sind kurz so zu beschreiben:

- Sie enthalten folgende Elemente: H, O, C, N, S, Si.
- Teilweise wurden verschiedene Isotope gefunden wie z. B. H/D, ¹²C/¹³C, ¹⁴N/¹⁵N, ¹⁶O/¹⁷O, ³²S/³⁴S.
- Die schwersten Moleküle enthalten bis 9 Atome. Beispiel: Ethanol CH₃CH₂OH.
- Die kompliziertesten Moleküle enthalten bis 4 verschiedene Elemente; Beispiel: Isocyanäure HCNO.
- Die relative Häufigkeit der Moleküle in 1 Kubikmeter beträgt etwa
 - 10¹¹ Moleküle: H₂
 - 10⁵ Moleküle: OH, NH₃, CH₃OH, CS
 - 10⁸ Moleküle: H₂CO
 - 10² Moleküle: alle anderen
 - 10 Staubpartikel
- Diese Moleküle wurden in zahlreichen Gaswolken unserer Galaxis oft nebeneinander entdeckt.
- Viele der erwähnten interstellaren Moleküle wurden in anderen, auch entfernteren Galaxien ebenfalls nachgewiesen.

8. Wie wurden die interstellaren Moleküle registriert und identifiziert?

Wenn wir uns erinnern, dass die mittlere Temperatur der Staub-Gaswolken auf etwa 50–100 K geschätzt wurde, dann verstehen wir, dass diese Temperatur nur sehr schwach energetische Übergänge in den Molekülen anregen kann. Zur Erinnerung: die mittlere Energie bei 50 K ist gleich $kT^{(50\text{ K})} = 0,0043\text{ eV}$, was Radiowellen mit einer Wellenlänge von 0,29 mm oder Frequenzen von 1040 GHz entspricht.

Leider ist in diesem Bereich die irdische Atmosphäre undurchsichtig. Das geeignetste Beobachtungsfenster liegt im Gebiet der Radiowellen mit folgenden Parametern:

	Energie [meV]	Wellenlänge [mm]	Frequenz [GHz]	Temp. [K]	
obere Grenze	0,620	2	150,0	7,19	
untere Grenze	0,0041	300	1,0	0,048	
Zum Vergleich	96 kJ/mol	1 eV	1,240 mm	241 800 GHz	11 605 K

In diesem Energiebereich finden zahlreiche Energieübergänge statt, wie z. B.

- Reine Rotationsübergänge, z. B. für CS,
- Doublet des Elektronenspins, z. B. bei OH,
- verbotene Übergänge, z. B. bei NH₃.

Abb. 3 zeigt das Spektrum der Hintergrundstrahlung und ein paar ausgewählte Linien interstellarer Moleküle.

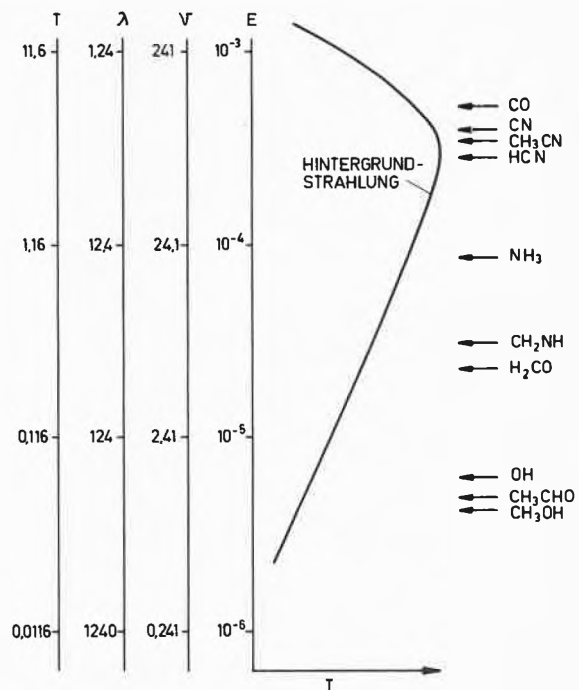


Abb. 3: Spektrallinien ausgewählter interstellarer Moleküle und das Spektrum der Hintergrundstrahlung:

H = Hintergrundstrahlung
I = Intensität der Hintergrundstrahlung
T = Temperatur (K)
D = Wellenlänge (mm)
ν = Frequenz (GHz)
E = Energie (eV)

Die geeignetsten Messgeräte sind die Radioteleskope, riesige Geräte, von welchen in den letzten Jahrzehnten auf der Welt über ein Dutzend gebaut wurden. Hier nur ein paar der berühmtesten Radioteleskope, welche die interstellare Chemie sehr gefördert haben (Tabelle 3).

Tabelle 3: Die wichtigsten Radioteleskope

Organisation	Ort	Durchmesser des Teleskopes [m]	Optimale Effizienz
NRAO	USA Greenbank	43	53% für 18 cm
NRAO	USA Kitt Peak	11	40% für 11 mm
MIT	USA Haystack	42	
Max Planck	BRD Effelsberg	100	bis 1 cm
CSIRO	Austr. Parkes	64	

9. Wie stabil sind die interstellaren Moleküle?

Bis jetzt haben wir nichts gesagt über die Lebensdauer dieser Moleküle im interstellaren Raum. Diese Moleküle können nicht beliebig lange die zerstörende Wirkung der ultravioletten Strahlung überstehen, welche praktisch jede Region der Galaxis erreicht. Nehmen wir an, dass ultraviolette Strahlung mit einer Wellenlänge von 100 bis 200 nm, also mit einer Energie von 12,4 Elektronvolt bis 6,2 Elektronvolt pro Photon im interstellaren Raum vorherrscht.

Nur solche Moleküle, deren Ionisationspotential größer als die Energie dieser Photonen ist (12 eV), können diesen Energiefluss längere Zeit überstehen.

Dies trifft für folgende Moleküle zu: CO, CN, HCN, OH. Viele andere Moleküle haben jedoch ein kleineres Ionisationspotential (ca. 11-10 eV), z. B. H₂CO, CH₄, NH₃.

Unter einem solchen Fluss ultravioletter Strahlung zeigt nur Kohlenmonoxid eine Lebensdauer von etwa 1000 Jahren. Für andere Moleküle fällt die Lebensdauer im freien Raum auf 100 und weniger Jahre.

Unter solchen Umständen scheinen diese Moleküle so gefährdet zu sein, dass ihre Konzentration kaum ein Niveau erreichen kann, welches erlaubt, sie auch mit empfindlichsten Radioteleskopen zu registrieren. Also muss bezweifelt werden, dass diese interstellaren Moleküle frei im Raum existieren. Es muss ein komplexes Modell postuliert werden, welches die Existenz, d. h. den Schutz vor Vernichtung durch ultraviolette Strahlung, wie auch die Synthese dieser Moleküle garantiert. Ein solches Modell wurde ausgearbeitet, und entsprechende Objekte wurden in Galaxien auch gefunden: Es sind dies die bereits erwähnten Staub-Gaswolken.

10. Die interstellaren Moleküle existieren in einer Staub-Gaswolke

Es scheint, dass folgende Meinung über die Existenz der interstellaren Moleküle durch die Mehrheit der Forscher anerkannt wird.

Im interstellaren Raum findet man Gas-Staubwolken, die mit folgenden Parametern zu beschreiben sind:

Mittlere Masse	~ 10 ³⁵ kg (bis 100000 Sonnenmassen)
Durchmesser	~ bis 100 Lichtjahre, d. h. 10 ¹⁸ m
Volumen	~ 10 ⁵⁴ m ³
Dichte	~ 10 ¹¹ Moleküle/m ³
Staubpartikel	~ 10 Partikel/m ³

Temperatur	~ 100 K
Bewegung im Raum	~ 100 bis 200 km s ⁻¹
Zahl in einer Galaxis	~ 3000
Struktur	~ siehe Abb. 4
Lebensdauer einer Wolke	~ ein paar Millionen Jahre

In solchen Staub-Gaswolken sind folgende Prozesse zu beobachten:

- Die äusseren Schichten der Wolke sind sehr stark der Wirkung der Ultravioletstrahlung ausgesetzt und enthalten nur Staubpartikel, aber keine kleinen Moleküle.
- Die tieferen Schichten befinden sich im Schatten der äusseren Schichten, so dass hier die Intensität des Ultravioletts viel geringer ist. Das stabilste Molekül, Kohlenmonoxid, kann überleben; die anderen Moleküle aber können das nicht.
- Noch tiefere Schichten sind noch besser vor Ultraviolet-Strahlung geschützt. Hier können weitere Moleküle wie HCN, OH dauernd existieren, und tiefer noch CH₄.
- In der Mitte der Wolke findet man auch HCHO und NH₃ (Abb. 4).

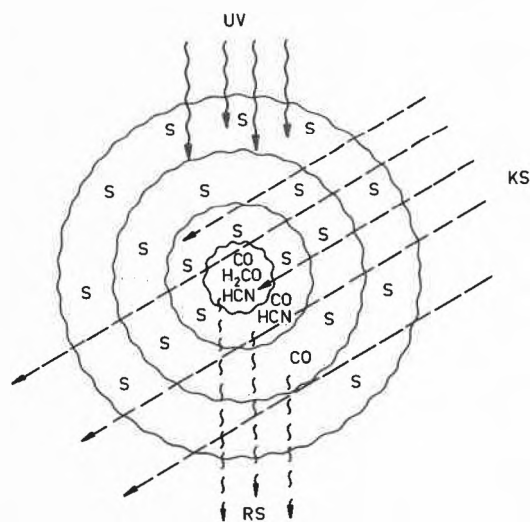


Abb. 4: Modell einer Staub-Gaswolke:

- UV = ultraviolette Strahlung
- KS = kosmische Strahlung
- RS = Radiostrahlung
- S = Staubpartikel
- CO = Kohlenmonoxid; HCN = Blausäure
- H₂CO = Formaldehyd

Dieses Bild sagt aber nicht viel über die Entstehung dieser Moleküle aus. Die beste Erklärung liegt in der Annahme, dass kosmische Strahlung, vor allem in Form von 100 MeV Protonen, bis in die tiefsten Schichten der Staub-Gaswolken dringen kann und dort die Synthese der Moleküle auslöst.

11. Wozu ist diese Forschung gut?

Dies ist eine berechtigte Frage. Zuerst gibt sie ein neues Bild des Universums, in welchem neben den

nuklearen Prozessen in Sternen auch sehr häufig chemische Prozesse stattfinden.

Zweitens erlaubt sie die Bewegung der Materie in der Nähe des Zentrums unserer Galaxis zu untersuchen. Die Doppler-Verschiebung der Spektrallinien der Radiostrahlung der Moleküle zeigt eine grosse Geschwindigkeit der Staub-Gaswolken bis etwa 200 km s^{-1} an, was den Verdacht auf eine Explosion vor ein paar Millionen Jahren nahelegt.

Drittens erlaubt sie, das Spektrum der Hintergrundstrahlung, des Reliktes aus dem Urknall, besser zu untersuchen.

Viertens vertieft sie unsere Kenntnisse über «exotische», hier auf der Erde nur sehr schwer zu beobachtende Moleküle, Ionen und Radikale.

Fünftens vertieft sie die Hypothese über die Entstehung von planetaren Systemen, weil es heute keinen Zweifel gibt, dass die kalten Staub-Gaswolken mit einer Masse von Tausenden von Sonnenmassen gegenüber der Gravitations schrumpfung instabil sind, nach ein paar Millionen Jahren zu schrumpfen beginnen und dann neue Protosterne mit neuen Planetensystemen formieren.

Man sollte aber auch sagen, wozu sich diese Forschungsergebnisse nicht eignen. Die Forscher, welche sich mit der Entstehung des Lebens auf diesem Planeten beschäftigen und schon lange vorausgesagt haben, dass die Natur in spontanen Prozessen eine Menge von sogenannten «organischen Molekülen» produziert, könnten jetzt triumphieren. In den Staub-Gaswolken mit ihren zahlreichen «organischen Molekülen» haben manche von ihnen den Anfang des Lebens gesehen. Nachdem es klargeworden war, dass diese Staub-Gaswolken eine Stufe auf der Entstehung der Planetensysteme sind, wurde behauptet, dass jeder Planet schon von Anfang an ein Geschenk in Form von zahlreichen

«organischen Molekülen» mitbekommt. Aber die Wahrheit scheint komplizierter zu sein.

Wenn aus der Staub-Gaswolke der zentralen Protosterne und die kalten Planetosimalen (kalte Körper von etwa 1 m Durchmesser) entstehen, werden die flüchtigen Komponenten (Wasserstoff, Helium und weitere edle Gase, Wasserstoffverbindungen: CH_4 , NH_3 , H_2O) durch die Planetosimalen nicht festgehalten, sondern verlassen für immer diese Körper. Nur weiter weg von den zentralen Sternen, dort wo die Temperatur genügend niedrig ist, werden diese flüchtigen Wasserstoffverbindungen ausgefroren und verbleiben auf den Planeten.

Auf der Erde aber scheint es so gewesen zu sein, dass die «organischen Moleküle» aus der primären Atmosphäre verloren wurden. Bei der Formierung der Erde und beim stufenweisen Aufheizen entgasten viele Mineralien und schafften damit eine sekundäre Atmosphäre. Hier musste die Natur unter neuen Bedingungen, d. h. bei relativ hohem Druck und hohen Dichten (die Werte sind mehrere Milliarden mal grösser als die in den Staub-Gaswolken), unter dem Einfluss der Ultraviolettstrahlung der Sonne und unter dem Schutz des flüssigen Wassers noch einmal den Weg der spontanen Synthese der organischen Moleküle gehen –, den Weg der schliesslich zur Entstehung des Lebens führte.

Literatur (nur Übersichtsartikel)

- C. Sagan*: Interstellar Organic Chemistry, *Nature* 238 (1972) 77.
L. E. Snyder: Chemistry between the stars in "the emerging universe", Ed. *W. C. Saslaw*, University Press, Virginia 1972.
P. M. Solomon: Interstellar molecules, *Physics Today* 3 (1973) 32.
S. Drapatz: Das interstellare Medium, *Physik in unserer Zeit* 4 (1973) 98.
E. E. Salpeter: Dying stars and reborn dust, *Rev. Mod. Phys.* 46, (1974) 433.
E. Herbst und *W. Klemperer*: The formation of interstellar molecules, *Physics Today* 6 (1976) 32.