

Interstellare Moleküle und Mikrowellenspektroskopie II*

18

Abb. 18. Die interstellaren Emissionslinien der Moleküle HNC, HCO⁺ und HCN von der kalten Dunkelwolke L134 haben eine hohe spektrale Auflösung, und ihre Intensitäten deuten gleichzeitig auf vergleichbare Konzentrationen dieser drei Moleküle hin. Ein Vergleich mit den entsprechenden Laboratoriumsspektren in Absorption und Maser-Emission ist auf der rechten Bildhälfte gegeben.

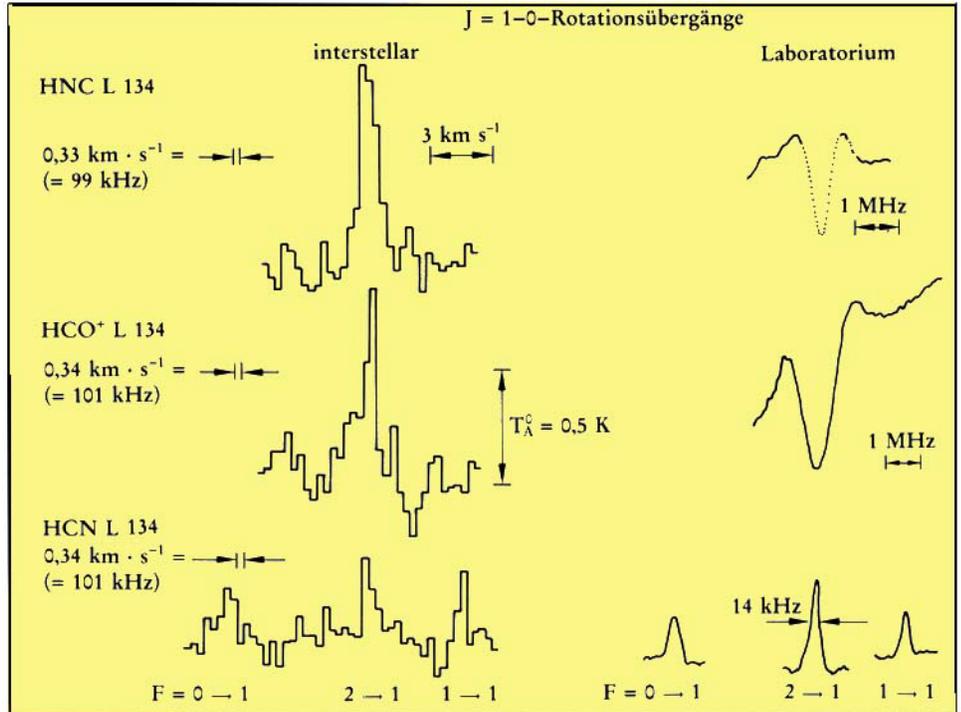
Abb. 19. Ausschnitt aus dem Energietermschema für den Schwingungsgrundzustand der oft assoziierten Moleküle und Ionen HCN, HNC, HCO⁺, HOC⁺, HNN⁺ und HCS⁺. Die radioastronomisch beobachteten Frequenzen sind eingezeichnet.

Alle bisher vorliegenden Beobachtungen deuten darauf hin, daß die interstellaren Moleküle in den interstellaren Wolken gebildet werden, unabhängig davon, welcher Bildungsmechanismus zugrunde liegt. Bevor wir nun die Chemie der Molekülbildung in den interstellaren Wolken diskutieren, müssen wir noch einige Fragen nach der Energie stellen, welche die Chemie in den Weiten des Weltraumes ermöglicht.

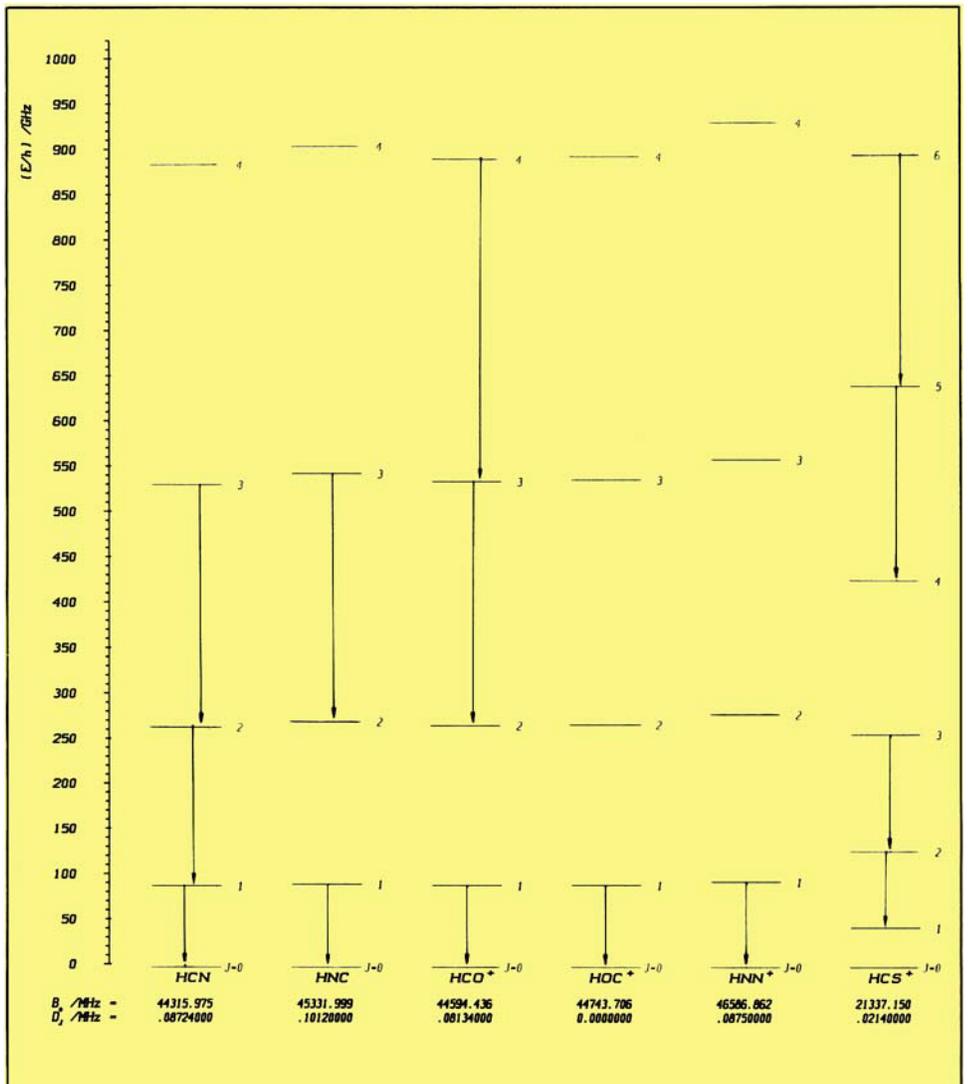
Energetische Voraussetzungen für die interstellare Chemie

Die wohl wichtigste Energiequelle in den mehr lichtdurchlässigen interstellaren Wolken ist das diffuse galaktische Sternenlicht. Dieses Licht fällt in die Wolken von allen Seiten ein und zwar von Sternen, die in der Nachbarschaft der Wolke im Radius von etwa 1000 Lichtjahren angesiedelt sind. Das photolysierende Licht enthält auch die Strahlung von jungen Sternen, deren Oberflächentemperatur etwa 10000 K beträgt (vgl. Abbildung 2, Teil I). Die größte Energiedichte dieses Lichtes liegt im Wellenlängenbereich von 1000 bis 2000 Å (1 Å = 10⁻⁸ cm).

Eine weitere Energiequelle ist die interne kinetische Energie der Molekülwolken. Aus den interstellaren Intensitäten der Rotationsübergänge des Kohlenmonoxids, CO, konnten kinetische Temperaturen von 10 K für Wolken mit Teilchendichten von ca. 10³ bis 10⁴ H₂-Moleküle pro Kubikzentimeter abge-



19



*Teil I dieses Beitrags erschien in dieser Zeitschr. 18, 1 (1984).

leitet werden. Die Zentralregionen der dichteren gravitationsmäßig gebundenen Wolken haben Temperaturen von über 100 K und Teilchendichten von ca. 10^6 H₂-Moleküle pro Kubikzentimeter sowie eingelagerte Klumpen von heißem gasförmigem Material, das im IR-Bereich strahlt. Wie wir aus den Mikrowellenmessungen der Linienprofile in TMC1 gelernt haben, unterliegen diese Dunkelwolken einer systematischen Bewegung, die im Falle der TMC1 auf einen ruhigen metastabilen Zustand hinweist.

In den meisten diffusen Wolken, d.h. Wolken geringer Dichte (ca. 10 bis 100 Teilchen pro Kubikzentimeter), kann die ionisierende Strahlung bis weit in das Innere eindringen. Die Ionisation und der thermische Energiefluß sind eindeutig auf das Sternenlicht zurückzuführen. Der Wasserstoff liegt hauptsächlich in atomarer Form vor. Die meisten Moleküle mit Ausnahme der stabilen zweiatomigen Spezies, wie CH, CH⁺, CN, CO und OH, die in geringer Konzentration vorkommen, sind photodissoziiert. Die diffusen Wolken sind im allgemeinen nicht gravitationsmäßig gebunden, d.h. sie verflüchtigen sich langsam im interstellaren Raum. Die Dunkelwolken dagegen sind gravitationsmäßig gebunden und bestehen hauptsächlich aus molekularem Wasserstoff, den in Tabelle 2 und 5 (vgl. Teil I) aufgeführten Molekülen und dem kosmischen Staub. Je dunkler die Wolken, desto kälter sind sie auch. Es ist interessant festzuhalten, daß mit zunehmender Dichte einer Wolke ein Übergang vom atomaren zum molekularen Wasserstoff stattfindet, begleitet von einer Abnahme der durch das UV-Licht verursachten Ionisation. Das führt beim Übergang von Wolken niedriger Dichte zu Wolken hoher Teilchendichte dazu, daß Kohlenstoff nicht mehr als C oder C⁺, sondern als Kohlenmonoxid, CO, vorliegt, das nach dem Wasserstoff das häufigste interstellare Molekül ist ($N_{CO} = 10^{-4} N_{H_2}$). Das bedeutet, daß in diffusen Wolken die UV-Photonen von 1000 bis 2000 Å die Elemente wie Kohlenstoff (1. Ionisierungspotential: 11,26 eV) etc. leichter ionisieren können als Wasserstoff, der ein höheres Ionisierungspotential von 13,6 eV besitzt. Die Elemente Stickstoff (erstes Ionisierungspotential 14,53 eV) und Sauerstoff (erstes Ionisierungspotential 13,62 eV) liegen nicht-ionisiert vor, da ihre Ionisierungspotentiale größer als die Energien der UV-Photonen sind.

In Dunkelwolken spielt die photolytische Moleküldissoziation nur noch eine unterge-

ordnete Rolle. Man muß also nach einer anderen Energiequelle suchen. Es wird vermutet, daß die Ionisation durch kosmische Strahlung (1 bis 100 MeV per Nukleon) und weiche Röntgen-Strahlen (100 eV) verursacht wird. Die Ionisationsgeschwindigkeit liegt bei etwa 10^{-17} pro Wasserstoffatom und pro Sekunde. In den diffusen Wolken haben wir eine um etwa den Faktor 100 höhere Photoionisationsgeschwindigkeit.

An chemischen Energiequellen ist natürlich die Rekombination von Wasserstoffatomen zu Wasserstoffmolekülen zu nennen, wobei die Überschussenergie von ca. 4,4 eV an die Stauboberflächen abgegeben werden muß, anderenfalls ist eine Rekombination der H-Atome nicht möglich.

Eine weitere Komponente des interstellaren Mediums ist die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung von 2,7 K, die man als die rot-verschobene „Urstrahlung“ des Urknalls bezeichnen kann. Mit ihrer Energiedichte von 10^{-12} erg pro Kubikzentimeter entspricht sie in etwa dem diffusen Sternenlicht. Diese Strahlung folgt dem Planckschen Gesetz eines schwarzen Strahlers und hat ihr Energiemaximum bei einer Wellenlänge von ungefähr 1 mm oder 300 GHz, was einer Strahlungstemperatur von 2,7 K entspricht. Dies ist die tiefste erreichbare Temperatur in den interstellaren Wolken. Natürlich ist diese Strahlung nicht wichtig für die interstellare Chemie, aber sie hat eine enorme Bedeutung für die relative Besetzung der untersten Energieniveaus der interstellaren Moleküle und ist damit für das Verständnis der Anregungsmechanismen sowie bei den Häufigkeitsberechnungen wichtig.

Spektroskopische Hinweise zur interstellaren Chemie

Die Entdeckungen der interstellaren Moleküle HCO⁺, NNH⁺ und des instabilen Moleküls HNC zusammen mit den assoziierten stabilen Molekülen wie HCN, HC₃N etc. in den frühen siebziger Jahren waren wohl entscheidend für die Entwicklung der Theorie der Molekülbildung durch Gasphasenreaktionen [6, 14, 15, 16]. In Abbildung 18 sind die $J = 1 - 0$ -Rotationsübergänge der interstellaren und terrestrischen Spektren der oft assoziierten interstellaren Moleküle HNC, HCO⁺ und HCN zusammengestellt. Für die Moleküle ist das entsprechende Rotationsenergieschema in Abbildung 19 wiedergegeben, in der auch die radioastro-

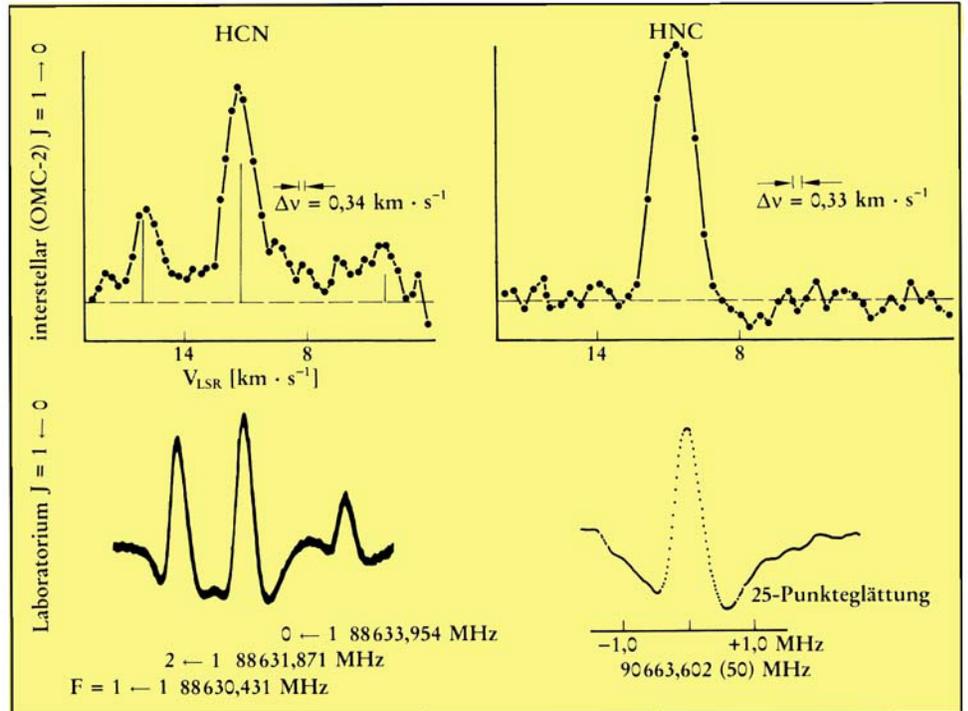
nomisch entdeckten interstellaren Rotationsübergänge eingezeichnet sind. Beim Bildungsmechanismus der komplizierteren organischen Moleküle in Tabelle 2 (Teil I) ist die Frage noch nicht geklärt, ob diese Moleküle durch Gasphasen- oder durch Oberflächenreaktionen an Staubkörnern gebildet werden. Sie ist Gegenstand der heutigen Forschung.

HCO⁺, NNH⁺ und HNC gehören zu jenen Molekülen, die erst nach ihrem interstellaren Nachweis terrestrisch synthetisiert wurden. Wir wollen am Beispiel von HNC das Zusammenwirken von astrophysikalischen Beobachtungsmethoden und Laboratoriumsmessungen demonstrieren. In Abbildung 20 sind die interstellaren Spektren von HCN und HNC [17] den entsprechenden im Laboratorium gemessenen Spektren [18] gegenübergestellt. Unsere Gießener Laboratoriumsspektren halfen damals mit, das HNC eindeutig zu identifizieren. Aufgrund unserer Messungen wurden anschließend die Spektren der Isotopenspezies H¹⁵NC, HN¹³C und DNC entdeckt. Das Interessante bei all diesen Bemühungen war neben der Entdeckung und Zuordnung der Spezies HNC die Tatsache, daß die Intensitäten der interstellaren HCN- und HNC-Signale auf vergleichbare Häufigkeiten dieser beiden Moleküle in den interstellaren Wolken hindeuten. Im Laboratorium ließ sich HNC jedoch nur in sehr geringen Konzentrationen herstellen. Man mußte drastische Methoden zur Erzeugung der Isoblausäure, HNC, anwenden, z.B. die thermische Isomerisierung von HCN bei 1300 K oder eine Gasentladung (Gleichspannungs- oder Radiofrequenzentladung) in Stickstoffgas bei einem Druck von 3 bis 10 Pa unter Zugabe von Methyljodid, CH₃I, oder anderer Kohlenstoff und Wasserstoff enthaltender Moleküle. Die Lebensdauer der HNC-Moleküle unter terrestrischen Laboratoriumsbedingungen war ca. 100 ms. Das bedeutet, daß ganz im Gegensatz zum stabilen Molekül Blausäure, HCN, eine nachweisbare Konzentration von HNC nur unter den Bedingungen eines Fließgleichgewichtes im Entladungsrohr aufrecht erhalten werden kann.

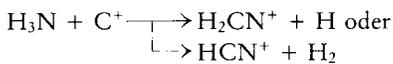
Die beobachtete fast gleiche interstellare Häufigkeit von HCN und HNC war sehr überraschend und konnte nur durch die Annahme eines Ion-Neutralkmolekül-Reaktionsmechanismus [14, 15] und durch die sehr geringe Stoßrelaxation in den Wolken befriedigend erklärt werden, deren Teilchendichten

Abb. 20. Interstellare Emissions- und terrestrische Absorptionslinien der beiden Moleküle HCN und HNC. Die drei Komponenten der ¹⁴N-Kernquadrupolhyperfeinstruktur sind im Falle des endständigen Stickstoffkernes der HCN völlig aufgelöst, beim HNC sind die drei Komponenten innerhalb des Dopplerlimitierten Linienprofils. Bemerkenswert ist, daß beide Moleküle mit gleicher Konzentration vorkommen.

Abb. 21. Gasphasen-Ionisationsschema von H, H₂ und He durch kosmische Strahlung. Das mittlere Reaktionsschema dominiert in dichten interstellaren Wolken [20].



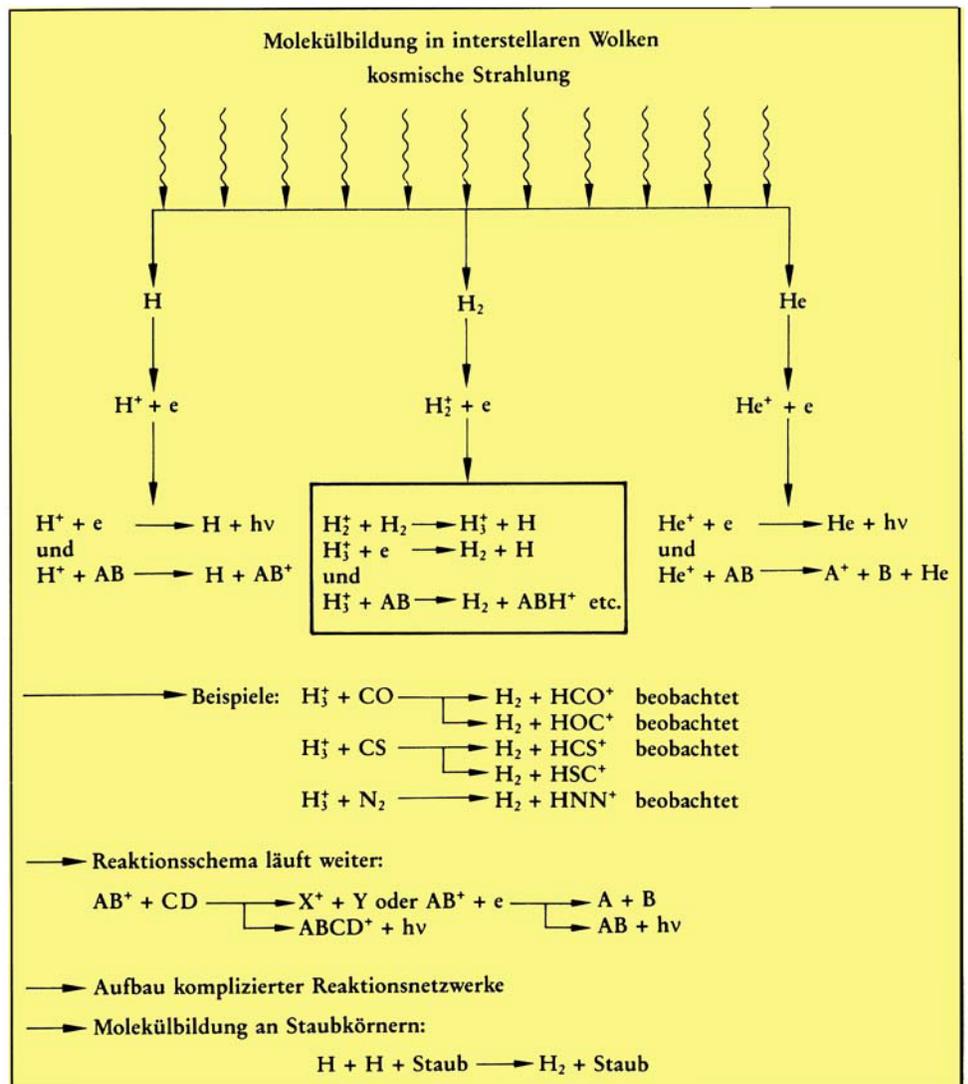
bei ca. 10⁴ Teilchen pro Kubikzentimeter liegen. Als möglicher Reaktionsweg soll hier jedoch nur die Umsetzung von NH₃ mit dem Kohlenstoffion, C⁺, diskutiert werden:



Dabei ist das Verhältnis zwischen den beiden Reaktionswegen unbekannt. Mit Hilfe von quantenmechanischen Rechnungen konnte man sicherstellen, daß sich H₂CN⁺ rasch in die energetisch stabilere Form der protonierten Blausäure HCNH⁺ umlagert. Ein dissoziativer Elektronenrekombinationsprozeß sollte anschließend HCN und HNC in gleichen Mengen liefern, wobei das abgestoßene H-Atom die Überschussenergie entfernen und damit HCN und HNC stabilisieren sollte. Natürlich ist der wirkliche Ablauf komplizierter, und neuere Überlegungen deuten dies auch an [16]; trotzdem bleibt die Grundidee der Ion-Molekül-Reaktionen ausschlaggebend.

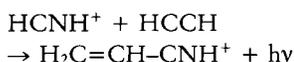
Grundzüge der interstellaren Chemie

Aufgrund der extrem niedrigen Temperaturen, die in interstellaren Wolken herrschen (vgl. Tabelle 4, Teil I), und aufgrund der geringen Dichten müssen alle chemischen Reaktionen, die unter diesen Bedingungen Bedeutung haben sollen, exotherm und ohne Aktivierungsenergien ablaufen. Dies schränkt natürlich die Zahl der Reaktions-

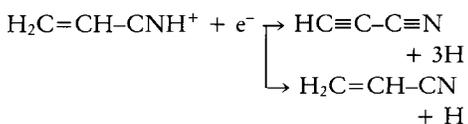


möglichkeiten ein: Deshalb sind auch die Reaktionen stabiler und neutraler Moleküle mit dem häufigsten interstellaren Molekül H_2 nur von relativ geringer Bedeutung. Reaktionen zwischen positiven Ionen und neutralen Molekülen erfüllen jedoch beide Bedingungen in den Dunkelwolken. Der entscheidende erste Schritt ist die Ionisation von molekularem Wasserstoff oder Helium durch die schon erwähnte hochenergetische kosmische Strahlung. Die primär entstehenden Molekülionen, z.B. H_3^+ , reagieren mit der neutralen Gaskomponente, vor allem mit CO und N_2 , zu den Ionen HCO^+ und NNH^+ , die ihrerseits weiterreagieren können. Es kommt zur Ausbildung mehrdimensionaler Reaktionsnetzwerke [16, 19, 20, 21]. Das Flußschema des besprochenen Bildungsmechanismus ist in Abbildung 21 wiedergegeben. Reaktionen von neutralen Molekülen mit negativen Ionen verlaufen normalerweise endotherm und sind deshalb nur von begrenztem Interesse für unsere Diskussion.

Wie auf der Erde so ist auch für die Chemie der interstellaren Wolken die Kohlenstoffchemie von großer Bedeutung. Sowohl in diffusen Wolken als auch in den Dunkelwolken laufen die Reaktionen weiter. Als Beispiel sei hier eine denkbare interstellare Synthese der Cyanpolyine (Polyinnitrile) angeführt. Das zentrale Ion der in Abbildung 22 wiedergegebenen Reaktionskette ist $HCNH^+$, das durch eine Reihe von Protonierungsreaktionen gebildet werden kann. Drei davon sind ebenfalls in Abbildung 22 angegeben. Durch die Anlagerungsreaktion mit Acetylen, H_2C_2 , bildet sich das Molekülion $H_2CCHCNH^+$ unter Emission eines Photons:



Nach Rekombination mit einem Elektron geht das Ion in ein um zwei C-Atome verlängertes Cyanpolyin oder 2-Propennitril über:



Nach den interstellaren Häufigkeiten (vgl. Abbildung 16, Teil I) zu schließen, ist $HC\equiv C-C\equiv N$ das bevorzugte Reaktionsprodukt, das 2-Propennitril, $H_2C=CH-CN$, kommt in deutlich geringeren Konzentrationen vor. Die grauen Felder der Abbildung 22

geben die tatsächlich interstellär nachgewiesenen Moleküle an. Entsprechend diesem Schema können offensichtlich alle langkettigen Cyanpolyine aufgebaut werden.

Natürlich lassen sich nicht alle gefundenen Molekülhäufigkeiten durch die diskutierten chemischen Reaktionsmodelle erklären. Es ist durchaus vorstellbar, daß komplexere Moleküle durch eine Kombination von Oberflächen- und Ion-Molekül-Reaktionen entstehen [16, 21].

Bedeutung der Isomeren für die interstellare Chemie

Das Studium der kleinen organischen und anorganischen Isomeren ist wichtig für das Verständnis der Verzweigungsverhältnisse interstellärer Reaktionen. Ich möchte hier noch ein aktuelles Thema aufgreifen: Im Jahre 1982 konnte das isomere Molekülion HOC^+ von Gudeman und Woods [23, 24] im Plasma einer H_2 - und CO-Gasentladung terrestrisch zum ersten Mal nachgewiesen werden. Die radioastronomische Identifizierung des HOC^+ gelang noch im gleichen Jahr in der galaktischen Zentrumswolke Sagittarius B2. Damit sind terrestrisch und interstellär die beiden möglichen Protonierungsprodukte des Kohlenmonoxids, CO, bekannt. Spektroskopische Konstanten und die Strukturparameter dieser fundamentalen Molekülionen sind in Tabelle 6 zusammengestellt [24].

Von den vieratomigen Isomeren der interstellär häufigsten Elemente H, C, N, O (vgl. Tabelle 3, Teil I) sind nur zwei, nämlich die Isocyanensäure, $HNCO$, und die Knallsäure, $HCNO$, terrestrisch in freier Form bekannt. Die Isocyanensäure wurde in interstellären Wolken nachgewiesen, wie aus Tabelle 2 (Teil I) hervorgeht, während $HCNO$ interstellär nicht bekannt ist. Historisch interes-

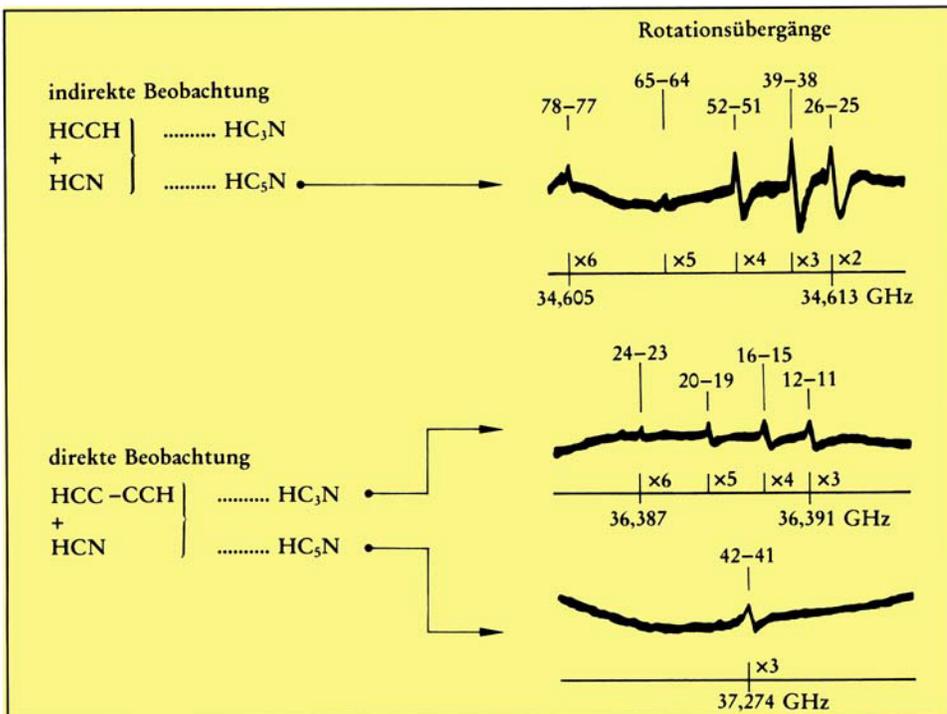
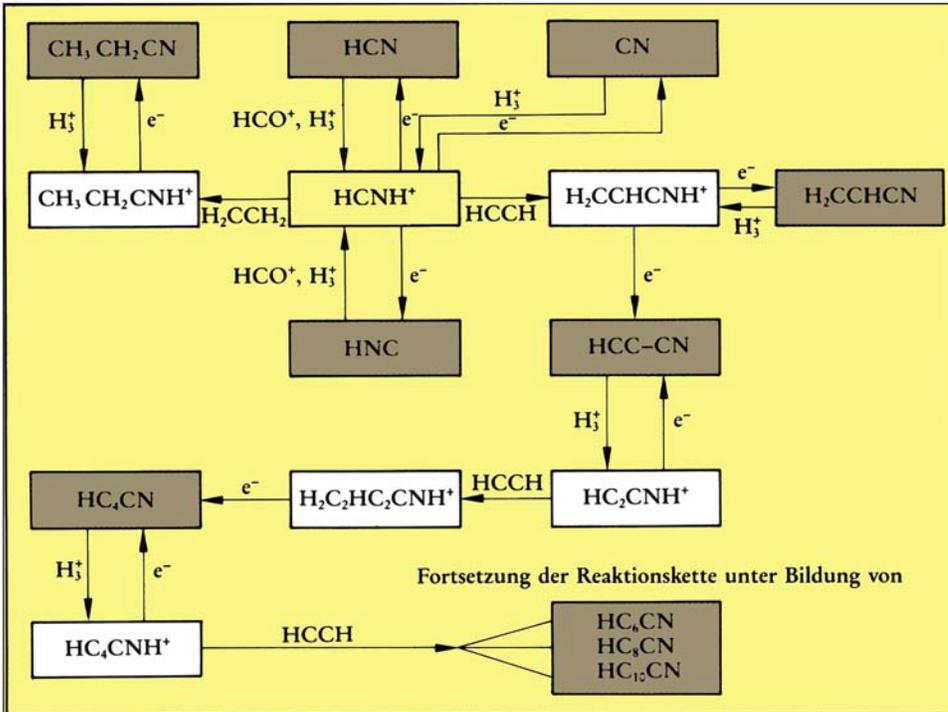
sant ist, daß Liebig und Wöhler zwischen 1820 und 1830 an diesen Verbindungen das von Berzelius stammende Konzept der Isomerie experimentell beweisen konnten. Seit dieser Zeit versuchten Chemiker, die freie gasförmige Cyansäure, $HOCN$, herzustellen. Thaddeus und Mitarbeiter [25] berichteten über "Three New Non-Terrestrial Molecules", die sie in den galaktischen Zentrumswolken (Sagittarius B2, Sgr B2) gefunden hatten. Aus drei interstellär gemessenen Rotationsübergängen eines unbekanntes Moleküls ergibt sich eine Rotationskonstante von $B_0 = 10691,406$ MHz. Aufgrund quantenchemischer Rechnungen konnte die Zahl der in Frage kommenden Moleküle auf zwei eingengt werden, nämlich die Cyansäure, $HOCN$, oder das protonierte Kohlendioxid, $HOCO^+$. Die drei noch nicht zugeordneten interstellären Rotationsübergänge sind in Abbildung 23 reproduziert. Ihre eindeutige Zuordnung ist entweder durch neue terrestrische Laboratoriumsmessungen oder durch die Beobachtung interstellärer Isotopenspezies zu erwarten. Über 200 nicht-zugeordnete interstelläre Molekülionen sind heute bekannt, deren Träger einfache Ionen, freie Radikale, instabile Isomerenmoleküle oder terrestrisch unbekannte stabile Moleküle sein können. Ihre Zuordnung ist ein lohnendes Forschungsgebiet.

Terrestrische Plasmachemie interstellärer Moleküle

Im Plasma einer elektrischen Entladung wird die Synthese kurzlebiger Spezies wie positiver Ionen und Elektronen, Radikale, Atome und instabiler Moleküle in Zuständen differierender Energie begünstigt. Bis heute konnten im Laboratorium die Mikrowellenspektren von fünf positiven Molekülionen eindeutig nachgewiesen werden. Diese Ionen sind: CO^+ , HOC^+ , HCO^+ , HCS^+ und HNN^+ [24]. Für die drei letztgenannten Io-

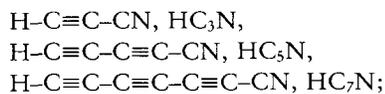
Tabelle 6. Vergleich zwischen den spektroskopischen Konstanten und den Strukturparametern der Ionen HCO^+ , HOC^+ und HNN^+ .

	HCO^+	HOC^+	HNN^+
B_0 [MHz]	44 594,436	44 743,706	46 586,862
D_J [MHz]	0,08134	—	0,0875
$r(HX)$ [Å]	1,093	0,934	1,032
$r(XY)$ [Å]	1,107	1,159	1,095



nen waren die radioastronomischen Linienfrequenzen vor den terrestrischen Messungen verfügbar. Die eindeutige Zuordnung gelang jedoch erst, nachdem die entsprechenden Laboratoriumsspektren vorlagen. Diese Tatsache gilt nicht nur, wie wir gesehen haben, für Ionen, sondern auch für die Zuordnung der instabilen Moleküle wie HNC oder HCC-CN und der in manchen interstellaren Wolken so häufigen Cyanpolyine. Von ihnen sind plasmachemische [26] und naßchemi-

sche [27] Synthesen bekannt für:



bisher nur im interstellaren Raum nachgewiesen wurden:

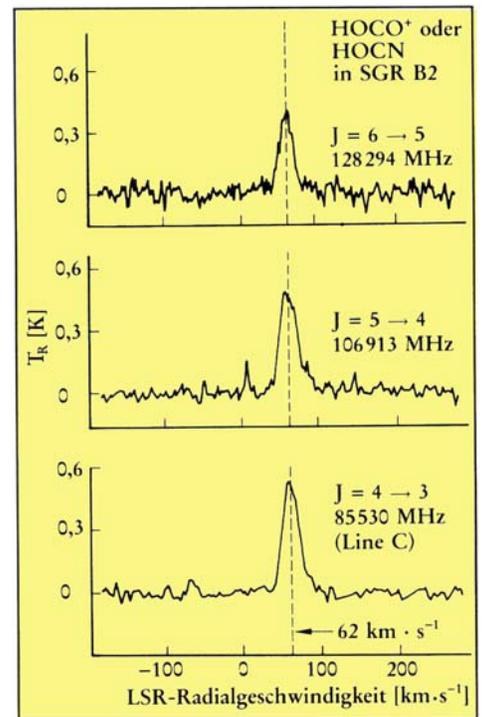
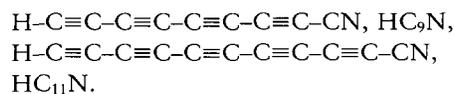


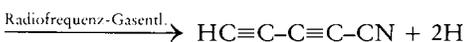
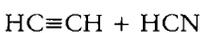
Abb. 22. Denkbare interstellare Synthesen für 2-Propinnitril, 2-Propennitril, Propanitril und die komplexen Cyanpolyine nach Huntress und Mitarbeitern [22].

Abb. 23. Drei Rotationsübergänge eines terrestrisch unbekanntes Moleküls oder Ions, HOCN oder HOCO⁺, wie sie von Thaddeus und Mitarbeitern [25] in der Zentrumswolke des Sagittarius B2 beobachtet wurden.

Abb. 24. Entdeckung von 2-Propinnitril, HC≡C-C≡N, und 2,4-Pentadiinnitril, HC≡C-C≡C-C≡N, im Plasma einer HCN-, HCCH- und HC≡C-C≡C-H-Radiofrequenzgasentladung. Während bei der indirekten Beobachtungsmethode die Entladungsprodukte durch fraktionierte Destillation getrennt wurden, ist bei der direkten Beobachtung der status nascendi festgehalten. Die reproduzierte Frequenzskala muß mit den angegebenen Harmonischen Zahlen der Klystronfrequenz multipliziert werden, um die korrekten Linienfrequenzen zu erhalten. Die Zentrifugalverzerrung eines rotierenden linearen Moleküls verhindert das Zusammenfallen der beobachteten Rotationsübergänge bei einer Fundamentalfrequenz.

Trotz wechselnder physikalischer und chemischer Bedingungen in den unterschiedlichsten interstellaren Wolken beobachten wir, daß HCN, HNC, HCO⁺ und einige oder alle Cyanpolyine anzutreffen sind (vgl. Tabelle 5, Teil I). Die Cyanpolyine sind relativ häufig in kalten (ca. 10 K) Dunkelwolken mit Teilchendichten von ca. 10⁴ Teilchen pro Kubikzentimeter. Ferner treffen wir auf diese Moleküle in einigen Molekülwolken mit assoziierten Regionen ionisierten Wasserstoffs und in molekülreichen circumstellaren Hüllen alter Sterne [6].

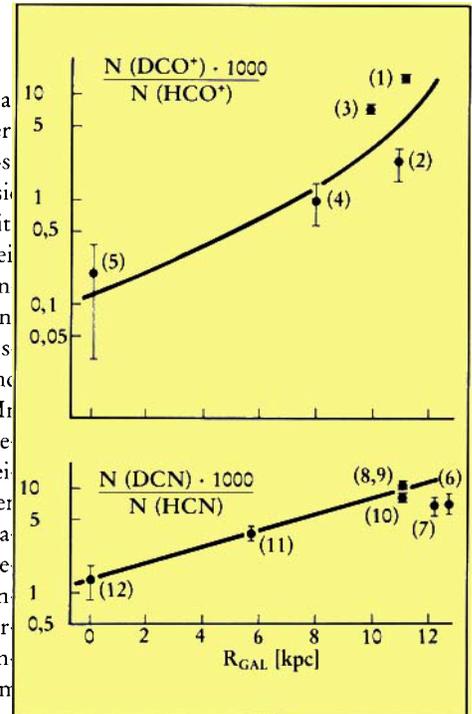
Von allen Molekülwolken ist die Taurus Molecular Cloud 1 (TMC1) die einzige, in der alle Cyanpolyine gleichzeitig vorkommen. Wie wir der Abbildung 16 (s. Teil I) entnehmen können, nehmen die Intensitäten der länger-kettigen Cyanpolyine nur langsam ab, was nur bedeuten kann, daß die Chemie in dieser Wolke die Cyanpolyinbildung begünstigt. Verschiedene Bildungsmechanismen werden in der Literatur nach dem Ion-Molekül-Reaktionsschema diskutiert [16, 21, 22]. Ein Mechanismus, der durch unsere Plasmaexperimente untermauert wird, ist die Ausbildung von Polyacetylenketten und deren anschließende Reaktion mit HCNH⁺ in der Wolke oder HCN in einer Radiofrequenz-Gasentladung [26].



Eine Zusammenstellung dieser Versuche ist in Abbildung 24 dargestellt. Unter den reduzierenden Bedingungen in einer HCCH- und HCN-Gasentladung scheinen HCN und die länger-kettigen Cyanpolyine chemische Senken zu sein. Diese Beobachtung wird noch dadurch erhärtet, daß diese Substanzen in Plasmen der verschiedensten Entladungsarten erzeugt werden können, die Kohlenwasserstoffe und Stickstoff enthalten. Da in diesen Plasmen auch HNC beobachtet wird und HNC interstellar fast mit der gleichen Häufigkeit wie das stabile Isomer HCN vorkommt, erhebt sich sofort die Frage nach der Existenz der Isocyanpolyine HCC-NC etc. Bis jetzt konnte kein Vertreter dieser Verbindungsklasse, sei es interstellar oder terrestrisch, nachgewiesen werden.

Zusammenfassung, kosmologische Implikationen und Ausblick

Wie wir im Laufe dieses Artikels gesehen haben, bilden interstellare Materie und die Sterne innerhalb einer Galaxis keine abgeschlossenen oder statischen Systeme, sondern sind durch einen gigantischen Kreislauf miteinander verbunden (vgl. Abbildung 3, Teil I). Aufgrund radioastronomischer Erfahrungen besteht heute kein Zweifel mehr daran, daß die Sternbildung in kalten gravitationsmäßig gebundenen Dunkelwolken – und vielleicht nur dort – ihren Anfang nimmt. In der Endphase der stellaren Entwicklung geben die Sterne in gewaltigen Explosionen einen Teil ihrer Materie in den interstellaren Raum zurück. Dort vermischt sich die stellare mit der interstellaren Materie. Die Chemie, die in den interstellaren Wolken stattfindet, hängt nicht nur von der Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Elemente ab, sondern sie ist eindeutig geprägt durch die Form und den Inhalt der Energie, die in diesen Wolken vorhanden ist und chemische Reaktionen initiieren kann. Diese Energie reicht von dem diffusen Sternenlicht über die kinetische und Gravitations-Energie bis hin zur galaktischen kosmischen Strahlung und der 3K-kosmischen Hintergrundstrahlung. Die interstellare Molekülspektroskopie erlaubt uns gemeinsam mit der terrestrischen Mikrowellenspektroskopie, über die Molekülspektren in die Orte der Sternbildung hineinzuschauen und an den Bildungsprozessen der Moleküle und der Sterne messend teilzunehmen. Auch der Tod eines Sternes läßt sich über die Molekülspektren messend verfolgen, denn aus den Linienformen der Moleküllinien können durch hochentwickelte Verfahren Dichten, z. B. von H₂, Temperaturen und Geschwindigkeiten der Teilchen abgeleitet werden. Je höher natürlich die räumliche Auflösung unserer Meßgeräte wird, desto detaillierter wird das Bild der kollabierenden Wolken, der Protosterne und der sterbenden Sterne werden. Wenn der Massenverlust eines Sternes langsam und stetig ist, dann umgibt er sich nachweislich mit einer ausgedehnten Hülle von stellarem Material, in dem zum Teil recht komplizierte Moleküle angetroffen werden. Die schon mehrfach erwähnten Cyanpolyine HC₅N und HC₇N wurden in der expandierenden Hülle eines Kohlenstoffsternes nachgewiesen. Durch die Messungen der Säulendichten der interstellaren Moleküle, ihrer Isomeren und ihrer Isotopomeren lassen sich nicht nur die chemischen Reaktionen oder besser ge-



sagt die Reaktionsnetzwerke verfolgen, sondern die gemessenen Isotopenverhältnisse geben auch Aufschluß über die Kernprozesse, die vor der Wolkenbildung in den Sternen abgelaufen sein müssen [28]. Zum Beispiel liegen die interstellaren ¹²C:¹³C-Verhältnisse bei ca. 40, einem Wert, der deutlich unter dem terrestrischen Wert von 89 liegt. Man kann dies so interpretieren: Die gemessenen Isotopenverhältnisse spiegeln die gegenwärtige Situation wieder (d. h. vor etwa 30000 Jahren, als die Information aus dem Zentrum der Milchstraße zu uns geschickt wurde). Die terrestrischen Isotopenverhältnisse stellen einen Wert dar, der vor etwa 5 · 10⁹ Jahren „eingefroren“ wurde, als das Sonnensystem sich vom interstellaren Medium abkoppelte.

Da das interstellare Material sich sowohl aus primordialer Materie als auch aus der Sternasche zusammensetzt, geben die beobachtbaren Isotopenhäufigkeiten ein gutes Abbild einerseits der vergangenen kosmischen Ereignisse, andererseits auch der heute noch ablaufenden nuklearen Entstehungsprozesse. Das Wasserstoff-zu-Deuterium-Verhältnis wird von den Astronomen als wichtiger Indikator für die Bedingungen kurz nach dem Urknall angesehen.

Heute wissen wir, daß die stellaren Aktivitäten im Zentrum der Milchstraße die Häufigkeit von Deuterium stark verringern, da die Deuteronen in den stellaren Kernprozessen eine wesentlich geringere Lebensdauer ha-

Abb. 25. Messung der Säulendichteverhältnisse von $\text{DCO}^+:\text{HCO}^+$ und $\text{DCN}:\text{HCN}$ in Abhängigkeit von der Position der Molekülwolke entlang des galaktischen Radius R_{gal} . In Richtung des galaktischen Zentrums (Sagittarius B2) nimmt der Deuteriumgehalt ab [29].

ben. In der Sonne z.B. haben die ^1H -Kerne eine Lebensdauer von $5,8 \cdot 10^9$ Jahren, die D-Kerne dagegen nur eine solche von $3,2 \cdot 10^{-8}$ Jahren. Das terrestrische D:H-Verhältnis ist ca. 1:6500. Penzias von den Bell-Laboratorien [29] in den USA hat in überzeugender Weise den prägalaktischen und damit kosmologischen Ursprung des Deuteriums bestätigen können. Er beobachtete die Isotopenverhältnisse in verschiedenen Molekülwolken anhand der Molekülkombinationen $\text{DCO}^+:\text{HCO}^+$, $\text{DCN}:\text{HCN}$ und $\text{DNC}:\text{HNC}$ als Funktion des galaktischen Radius. Einige dieser Befunde sind in Abbildung 25 mit dem erstaunlichen Gesamtergebnis wiedergegeben: Die Deuteriumhäufigkeit weist einen positiven Gradienten entlang des galaktischen Radius auf. Nach den Arbeiten von Ostriker und Tinsley [30] kann diese Tatsache als direkte Konsequenz des Urknall-Modells verstanden werden. Damit gehört Deuterium zur prägalaktischen Materie.

Die Unterscheidung zwischen Radioastronomie und Infrarotastronomie wird in zunehmendem Maße verschwinden, da die heutigen Messungen bis weit in den Submillimeterwellen-Bereich vorangetrieben worden sind, und es nur noch eine Frage der Zeit ist, wann mit Hilfe der Satellitentechnik das letzte wichtige Fenster zum Universum aufgestoßen wird. Der gesamte Submillimeterwellen- und Infrarot-Bereich wird dann nicht mehr durch die störende Erdatmosphäre

(vgl. Abbildung 1, Teil I) behindert werden. Damit können wir hoffen, daß auch in den vor uns liegenden Jahren die hochauflösende Spektroskopie der interstellaren Wolken und der protostellaren Regionen im Submillimeterwellenbereich bis hin zum Infrarot ein fruchtbares Gebiet der Astrophysik und Astrochemie bleiben wird. Die kommenden Generationen von rauscharmen Strahlungsempfängern in den angesprochenen Wellenlängenbereichen werden uns sicher noch viele unbekannte Moleküle bescheren. Dabei wird den Ionen, den Radikalen und den kurzlebigen Molekülen eine besondere Rolle als Zwischenprodukte in den schon mehrmals angesprochenen chemischen Reaktionsnetzwerken zukommen. Es ist durchaus wahrscheinlich, daß Alkane wie z.B. Propan oder noch weitere Cyanpolyine entdeckt werden. Auch Ringverbindungen sind nicht grundsätzlich auszuschließen. Wie weit jedoch die chemische Evolution in den interstellaren Wolken in Richtung biologisch interessanter Moleküle fortgeschritten ist, läßt sich noch nicht abschätzen. Die heutigen Ergebnisse hätte man vor zehn Jahren jedenfalls nicht vorhersehen können. Radioastronomische Untersuchungen sind schon jetzt aufgenommen worden, um nach der einfachsten Aminosäure Glycin, $\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COOH}$, in den interstellaren Wolken zu suchen.

Literatur

- [14] E. Herbst und W. Klemperer, *Physics Today* **29** (6), 32 (1976).
- [15] W. D. Watson, *Rev. Mod. Phys.* **48**, 513 (1976).
- [16] G. Winnewisser, *Topics in Current Chemistry* **99**, 39 (1981).
- [17] M. Morris, B. Zuckerman, B. E. Turner und P. Palmer, *Astrophys. J.* **192**, L27 (1974).
- [18] R. A. Creswell, E. F. Pearson, M. Winnewisser und G. Winnewisser, *Z. Naturforsch.* **31a**, 221 (1976).
- [19] S. S. Prasad und W. T. Huntress, Jr., *Astrophys. J. Supplement Series* **43**, 1 (1980); *Astrophys. J.* **239**, 151 (1980).
- [20] W. D. Watson, *Ann. Rev. Astrophys.* **16**, 585 (1978).

- [21] H. Suzuki, *Prog. Theor. Phys.* **62**, 936 (1979).
- [22] G. F. Mitchell, W. T. Huntress, Jr., und S. S. Prasad, *Astrophys. J.* **233**, 102 (1979).
- [23] C. S. Gudeman und R. C. Woods, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 1344 (1982).
- [24] R. C. Woods: "Spectroscopy of Molecular Ions in the Microwave Region", in T. A. Miller und V. E. Bondybey (Hrsg.): "Molecular Ions: Spectroscopy, Structure and Chemistry". North-Holland Publishing Company, 1983.
- [25] P. Thaddeus, M. Guelin und R. A. Linke, *Astrophys. J.* **246**, L41 (1981).
- [26] G. Winnewisser, M. Winnewisser und J. J. Christiansen, *Astron. Astrophys.* **109**, 141 (1982).
- [27] H. W. Kroto, *Nachr. Chem. Tech. Lab.* **30**, 765 (1982).
- [28] A. A. Penzias, *Science* **208**, 663 (1980).
- [29] A. A. Penzias, *Astrophys. J.* **228**, 430 (1979).
- [30] J. M. Ostriker und B. M. Tinsley, *Astrophys. J.* **201**, L51 (1975).