

La matière interstellaire, l'essentiel de l'univers? = Die interstellare Materie, der Grossteil des Universums?

Autor(en): **Guarinos, J. / Pfenniger, D.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **51 (1993)**

Heft 255

PDF erstellt am: **16.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-898176>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.



La matière interstellaire, l'essentiel de l'univers?

J. GUARINOS ET D. PFENNIGER

1. Introduction

L'espace qui sépare les étoiles est communément considéré comme parfaitement vide. En effet, il contient moins de matière par unité de volume que les meilleurs vides réalisés en laboratoire. Néanmoins, les volumes intersidéraux sont si vastes que les infimes traces restantes de matière accumulée deviennent des quantités considérables, comparables à la masse de toutes les étoiles d'une galaxie comme la nôtre. D'autres galaxies contiennent au moins dix fois plus de masse sous la forme de ce gaz extraordinairement ténu que sous forme d'étoiles.

Le milieu interstellaire est un milieu riche, complexe et encore mal connu. Il est le théâtre d'échanges multiples qui lui confèrent notamment un rôle important dans l'évolution de la Galaxie. C'est en effet à partir de ces nuées extraordinairement diffuses que les étoiles et planètes se forment, par la condensation de nuages d'hydrogène et d'hélium. Lorsque les étoiles meurent, elles libèrent dans le milieu interstellaire de nouveaux éléments tels que le carbone, l'azote et l'oxygène (C, N, O) qu'elles ont synthétisés au cours de leur vie. Aussi bien les agonies lentes des étoiles qui rejettent de la matière sous forme de vents stellaires, que les morts violentes par les explosions de supernovae, enrichissent lentement le milieu interstellaire en éléments lourds. Au cours des milliards d'années, les nouvelles générations d'étoiles contiennent peu à peu davantage d'éléments plus lourds que leur ont légués les générations d'étoiles précédentes.

C'est aussi dans le milieu interstellaire que se déroulent de nombreux phénomènes de redistribution des diverses formes d'énergie, en particulier de l'énergie d'origine nucléaire libérée au cœur des étoiles. On sait par exemple qu'une grande partie de la lumière émise par les étoiles dans l'ultraviolet est absorbée par le gaz et la poussière interstellaires qui réémettent cette énergie sous forme de lumière infrarouge. Ainsi, notre Voie Lactée est presque aussi brillante dans l'infrarouge que dans le domaine visible. D'autres galaxies peuvent rayonner 100 fois plus d'énergie dans l'infrarouge que dans le visible, ce qui montre combien il est important de comprendre les phénomènes qui se déroulent dans le milieu interstellaire pour pouvoir décrire l'évolution des galaxies.

Une autre raison, plus pratique, justifie l'étude du milieu interstellaire: la connaissance de notre Galaxie passe par une cartographie du milieu voisin du Soleil, c'est-à-dire une détermination la plus soignée possible des distances des étoiles; or cette détermination est affectée par l'extinction interstellaire, appellation globale sous laquelle on désigne l'absorption et la dispersion de la lumière par la matière interstellaire.

2. Les travaux des pionniers

Il faut remonter au siècle dernier pour qu'apparaissent les premiers travaux spécifiquement consacrés à la matière interstellaire. Les tout premiers constats de l'existence d'une matière distribuée entre les étoiles reposent sur l'exploitation

Die interstellare Materie, der Grossteil des Universums?

1. Einleitung

Der Raum zwischen den Sternen wird im allgemeinen als absolut leer angesehen. Tatsächlich enthält er weniger Materie pro Volumeneinheit als das beste Vakuum, das man im Labor herstellen kann. Doch sind die intersideralen Volumen so gross, dass diese winzigen Materiemengen zusammengenommen eine beachtliche Masse ergeben. In unserer Galaxis entspricht diese Masse etwa der aller Sterne. Andere Galaxien enthalten mindestens zehnmal mehr Masse in Form von diesem ausserordentlich dünnen Gas als in Form von Sternen.

Das Interstellarmilieu ist vielfältig, komplex und noch wenig bekannt. In ihm finden zahlreiche Austausche statt, was ihm eine wichtige Rolle in der Evolution der Galaxis einräumt. Tatsächlich bilden sich Sterne und Planeten aus diesen ausserordentlich diffusen Nebeln, indem sie sich aus Wasserstoff- und Heliumwolken kondensieren. Bei ihrem "Tod" geben die Sterne neue Elemente, die sie im Laufe ihres Lebens synthetisiert haben in den interstellaren Raum ab, wie zum Beispiel Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff (C, N, O). Stirbt der Stern langsam und wirft die Materie in Form von Sternwinden aus oder stirbt er plötzlich wie bei einer Supernovaexplosion, in jedem Fall wird das interstellare Milieu langsam mit schweren Elementen bereichert. Im Laufe von Milliarden Jahren sind die neuen Sterngenerationen allmählich mit immer mehr schweren Elementen angereichert, die ihnen die vorangegangenen Sterngenerationen vererbt haben.

Im interstellaren Milieu finden ausserdem zahlreiche Phänomene der Energieumwandlung statt. Dabei handelt es sich besonders um ursprüngliche Kernenergie aus dem Zentrum der Sterne. Man weiss zum Beispiel, dass ein Grossteil des Lichtes, das die Sterne im ultravioletten Bereich ausstrahlen, von Gas und Staub absorbiert wird, welche wiederum diese Energie in Form von Infrarotlicht abgeben. Daher ist unsere Milchstrasse im infraroten Bereich beinahe genauso hell wie im sichtbaren. Andere Galaxien können hundertmal mehr Energie im infraroten als im sichtbaren Bereich ausstrahlen, was zeigt, wie wichtig das Verständnis der interstellaren Phänomene ist, um die Entwicklung der Galaxien zu erklären.

Ein anderer praktischer Grund berechtigt das Studium des Interstellarmilieus: Die Kenntnis der Galaxis erfordert eine Kartographierung der Sonnenumgebung, d.h. eine möglichst genaue Bestimmung der Sternentfernungen. Diese Messungen sind durch die interstellare Extinktion, das heisst durch die Absorption und Streuung des Lichts durch die interstellare Materie beeinträchtigt.

2. Die Arbeiten der Pioniere

Schon im letzten Jahrhundert erschienen die ersten Arbeiten, die sich speziell mit der interstellaren Materie befassten. Die allerersten Feststellungen der Existenz einer Materie zwischen den Sternen beruhen auf einer heute beinahe ausser



d'une technique aujourd'hui presque désuète: la photographie. Quiconque a eu l'occasion de contempler le merveilleux ciel de l'hémisphère sud ne peut avoir manqué de remarquer plusieurs régions noires au milieu du ruban de la Voie Lactée, et en particulier le fameux Sac de Charbon, qui porte bien son nom, à côté de la Croix du Sud.

Les manifestations de la présence de matière entre les étoiles ne sont devenues évidentes que progressivement. A la fin du siècle dernier, alors que le concept de galaxie était encore inconnu, E. E. Barnard identifiait et recensait dans ses clichés de la Voie Lactée les nombreuses zones dépourvues d'étoiles, fixant sur plaques photographiques ce que W. Herschel avait décrit au dix-huitième siècle déjà comme étant des «trous» dans le ciel. A propos des Pléiades, Barnard parlait même de «matière nébuleuse» dans laquelle semblaient baigner les étoiles. Pendant toute sa vie Barnard, chercha à comprendre la nature exacte de ces zones sombres et hésita entre l'interprétation en termes de «trous» ou de «tunnels», et celle en termes de nuages de matière absorbante.

A la même époque et indépendamment de Barnard, M. Wolf avait entrepris le même travail: établir une couverture photographique complète de la Voie Lactée. Il mit en évidence les mêmes régions sombres et dépourvues d'étoiles. Wolf alla cependant plus loin que Barnard: Il démontra *quantitativement* l'existence de nuages de matière interstellaire. Pour ce faire, il construisit ce qui est désormais connu sous le nom de *diagrammes de Wolf*. Partant de ses clichés de la Voie Lactée, Wolf put ainsi mettre en évidence l'extinction causée par les nuages, qui se traduisait sur ses diagrammes par un fléchissement brusque de la courbe.

C'est en étudiant le spectre de l'étoile variable spectroscopique δ Orionis que J. Hartmann découvrit le premier, en 1904, une raie interstellaire. Il décrit le comportement «très particulier» de la raie à 3934 Å du calcium, qui «ne partage pas les déplacements périodiques [...] causés par le mouvement orbital de l'étoile». Hartmann ne se contenta pas de ce simple constat, il proposa qu'un nuage de vapeur de calcium en fût la cause.

Il fallut cependant attendre plus de 20 ans avant que l'étude de ces raies interstellaires avance significativement. J. S. Plaskett en 1924, puis O. Struve en 1927, étudièrent à leur tour les raies «stationnaires» du calcium, et proposèrent qu'elles se forment dans un nuage interstellaire de matière ténue, après avoir montré que leur intensité augmente avec la distance des étoiles. Un peu plus tard, en 1929, B. P. Gerasimovič et O. Struve déterminaient même que le «substrat» responsable de ces raies d'absorption «partage le mouvement rotationnel des étoiles autour d'un lointain centre de masse situé à $l = 325^\circ$ de longitude galactique». Il s'agit bien de la direction du centre galactique dans l'ancien système de coordonnées.

A. S. Eddington rassembla en 1926 tous les nouveaux résultats sur le milieu interstellaire et, dans son célèbre cours «Diffuse Matter in Interstellar Space» proposa l'idée que la matière interstellaire est répandue dans toute la Galaxie. Il y énuméra également toutes les raisons pour lesquelles les astronomes *devaient* croire en l'existence de cette matière.

Comme pour balayer les derniers doutes qui auraient pu subsister, à la fin des années 30, on détecta la présence de molécules dans le milieu interstellaire en identifiant les raies de CH, CN et CN⁺ dans des spectres d'étoiles. Ces molécules interstellaires composées de carbone, d'hydrogène et d'azote allaient rester les seules connues pendant encore un quart de siècle.

Gebrauch geratener Technik: der Fotografie. Wer schon einmal die Gelegenheit gehabt hat, den Südhimmel zu bewundern, hat bestimmt dabei mehrere dunkle Regionen in der Mitte der Milchstrasse bemerkt. Berühmt ist vor allem der treffend benannte "Kohlensack" direkt neben dem Kreuz des Südens.

Die Zeichen des Vorhandenseins von Materie zwischen den Sternen sind nur allmählich richtig gedeutet worden. Am Ende des letzten Jahrhunderts, als das Konzept der Galaxis noch unbekannt war, identifizierte und katalogisierte E. E. Barnard auf seinen Aufnahmen der Milchstrasse zahlreiche sternlose Zonen. Er fixierte also auf seinen Fotoplaten, was W. Herschel schon im 18. Jahrhundert als "Löcher" im Sternenhimmel beschrieben hatte. Anlässlich der Plejaden sprach Barnard sogar von einer "nebulösen Materie", in der die Sterne zu schwimmen schienen. Sein ganzes Leben lang versuchte Barnard, die exakte Natur dieser dunklen Zonen zu verstehen. Er zögerte, sie als "Löcher" oder "Tunnel" zu interpretieren oder als Wolke aus absorbierender Materie.

Zu gleicher Zeit und unabhängig von Barnard stellte sich M. Wolf dieselbe Aufgabe: die Aufstellung der kompletten, fotografischen Abdeckung der Milchstrasse. Er hob dieselben dunklen, sternlosen Regionen hervor. Wolf ging indessen weiter als Barnard: Er bewies *quantitativ* die Existenz der Wolken aus interstellarer Materie. Dafür entwickelte er, was seitdem als *Wolfsches Diagramm* bekannt ist. Von seinen Aufnahmen der Milchstrasse ausgehend, konnte Wolf so die Extinktion durch die Wolken zeigen, die sich als ein plötzliches Abknicken der Kurve dieses Diagrammes darstellten.

Beim Studium des Spektrums des spektroskopisch variablen Sterns δ Orionis entdeckte J. Hartmann 1904 als erster eine interstellare Linie. Er beschrieb das "sehr bemerkenswerte" Verhalten der 3934 Å-Linie des Kalziums, die nicht den periodischen Schwankungen folgt, die aus der Bahnbewegung des Sterns resultieren. Hartmann gab sich nicht mit dieser einfachen Feststellung zufrieden, sondern er schlug vor, dass ein Nebel aus Kalziumdampf die Ursache sein sollte.

Erst 20 Jahre später machte das Studium dieser interstellaren Linien bedeutende Fortschritte. J. S. Plaskett (1924) und danach O. Struve (1927) erforschten ihrerseits die "stationären" Linien des Kalziums. Nachdem sie gezeigt hatten, dass ihre Intensität mit der Entfernung der Sterne zunimmt, schlugen sie vor, dass die Linien sich in einer interstellaren Wolke aus verdünnter Materie bilden. Wenig später, im Jahre 1929, wiesen B. P. Gerasimovič und O. Struve sogar nach, dass das für die Absorptionslinien verantwortliche "Substrat" die Rotationsbewegung der Sterne um ein weit entferntes Massenzentrum auf $l = 325^\circ$ galaktischer Länge teilt. Dabei handelt es sich tatsächlich um die Richtung des Zentrums der Galaxis im alten Koordinatensystem.

A. S. Eddington sammelte 1926 alle neuen Resultate über das Interstellarmilieu und präsentierte in seiner berühmten Vorlesung "Diffuse Matter in Interstellar Space" die Idee, dass die interstellare Materie in der ganzen Galaxis verbreitet wäre. Er zählte dabei auch sämtliche Gründe auf, weshalb die Astronomen an die Existenz dieser Materie glauben *mussten*.

Um allerletzte Zweifel zu beseitigen, die eventuell noch weiterhin bestehen konnten, wies man Ende der dreissiger Jahre die Anwesenheit von Molekülen im Interstellarmilieu nach, indem man die Linien von CH, CN und CN⁺ in den Sternspektren identifizierte. Diese interstellaren Moleküle aus Kohlen-, Wasser- und Stickstoff sollten noch ein Vierteljahrhundert lang die einzig bekannten bleiben.



3. Mise en évidence de la loi générale d'extinction

Les analyses statistiques de la distribution spatiale des étoiles ont été parmi les premières à inciter les astronomes à émettre l'hypothèse de l'existence d'une loi générale d'extinction de la lumière dans la Galaxie. Cette hypothèse avait même été proposée pour expliquer le paradoxe de Cheseaux-Olbers: Comment le ciel nocturne peut-il être aussi noir dans un Univers supposé infini?

J. C. Kapteyn fut l'un des tout premiers à appuyer l'idée d'une telle extinction, comme l'attestent notamment deux articles qu'il publia en 1904 et 1909. Il étudia même le rougissement des spectres en fonction de la distance, proposant comme explication l'existence d'une absorption *sélective* dès 1914.

Mais c'est en recherchant la quantité d'extinction qui permettrait de réconcilier les dénombrements d'étoiles avec une distribution spatiale uniforme de ces dernières, que la mise en évidence de cette loi générale d'extinction progressa le plus. Si des travaux allant dans ce sens furent publiés assez tôt (cf. par exemple ceux de J. Halm en 1919), ce fut néanmoins R. J. Trumpler qui présenta le premier, en 1930, un travail prouvant de façon irréfutable qu'une telle extinction existe dans la Galaxie, et qui en fit même une estimation relativement correcte. Dans le but d'étudier les distances, dimensions et distribution d'amas ouverts, Trumpler compara diverses méthodes de calcul de distances. Il montra que les méthodes photométriques, qui reposent sur une comparaison entre les magnitudes absolue et apparente, donnent des distances d'amas bien supérieures à celles obtenues à l'aide de méthodes géométriques, où la distance est calculée en supposant que les amas de structure comparable ont un diamètre comparable. Il montra qu'en ajoutant à la formule de Pogson, établie en 1856, un terme supplémentaire proportionnel à la distance, on pouvait réconcilier les résultats des deux méthodes. Une fois démontrée la nécessité d'admettre l'existence d'une absorption qui fausse les distances photométriques, Trumpler montra que celle-ci varie avec la longueur d'onde, la lumière bleue étant plus absorbée que la lumière rouge.

Trumpler plaidait pour un milieu interstellaire pas nécessairement uniforme, et pouvant présenter des irrégularités locales. Selon lui, le matériau «absorbant» devait être distribué d'une façon qui, *en moyenne*, produisait une absorption proportionnelle à la distance, raison pour laquelle les distances photométriques différaient systématiquement de celles obtenues par des méthodes non affectées par le phénomène de l'extinction: Méthode du point convergent, diamètres apparents d'amas... Bref, en 1930, Trumpler fournissait déjà une description tout à fait correcte du phénomène de l'extinction, évaluée aujourd'hui à 0.85 magnitude par kiloparsec dans le visible, en moyenne. Il prédisait également les observations qui devraient être faites dans le cadre d'une extinction interstellaire sélective, et interprétait l'absence apparente d'amas globulaires ou de «nébuleuses spirales» près de l'équateur galactique, comme la preuve que la matière «absorbante» était fortement concentrée dans le plan galactique.

4. Découverte de l'hydrogène neutre

En 1945, H.C. van de Hulst prédisait par des considérations théoriques la possibilité de détecter l'hydrogène neutre (HI) à l'aide d'observations qui seraient effectuées dans la longueur d'onde de 21 cm, située dans le domaine des ondes radio. Bien

3. Beweis des allgemeinen Extinktionsgesetzes

Die statistischen Analysen der räumlichen Verteilung der Sterne haben die Astronomen als erstes dazu angeregt, die Hypothese eines allgemeinen Gesetzes der Extinktion des Lichtes in der Galaxis aufzustellen. Diese Hypothese war sogar als Erklärung des Cheseaux-Olbers-Paradoxes vorgeschlagen worden: Wie kann der Himmel in einem als unendlich angenommenen Universum so schwarz sein?

J. C. Kapteyn war einer der ersten, die die Idee einer solchen Extinktion unterstützten. Dies zeigen zwei Artikel, die er 1904 und 1909 veröffentlichte. Er untersuchte sogar die Rötung der Spektren im Verhältnis zur Entfernung und schlug ab 1914 als Erklärung die Existenz einer *selektiven* Absorption vor.

Aber erst mit der Suche nach der Quantität der Extinktion, die die Anzahl der sichtbaren Sterne mit einer gleichmässigen räumlichen Verteilung vereinbaren würde, schritt die Klarstellung dieses allgemeinen Gesetzes der Extinktion am meisten fort. Obgleich schon früh Forschungsarbeiten, die in diese Richtung gingen, veröffentlicht wurden (zum Beispiel 1919 die von J. Halm), war es erst R. J. Trumpler, der 1930 eine Arbeit vorstellte, in der er in unwiderlegbarer Weise eine solche Extinktion in der Galaxis bewies. Er schätzte sie sogar relativ korrekt ab. Mit dem Ziel, die Entfernungen, Dimensionen und Verteilung offener Sternhaufen zu erforschen, verglich Trumpler verschiedene Methoden der Entfernungsberechnung. Er zeigte, dass die photometrischen Methoden, die auf einem Vergleich der absoluten mit der scheinbaren Magnitude beruhen, weit grössere Entfernungen für die Sternhaufen ergeben als die geometrischen Methoden. Bei diesen wird davon ausgegangen, dass Sternhaufen mit ähnlicher Struktur einen ähnlichen Durchmesser besitzen. Trumpler zeigte, dass die beiden Methoden vereinbar wurden, indem man in die Pogsonsche Formel von 1856 einen zusätzlichen, zur Entfernung proportionellen Faktor einfügte. Nachdem er die Notwendigkeit der Existenz einer Absorption, die die photometrischen Distanzen verfälschen würde, bewiesen hatte, zeigte Trumpler, dass sie von der Wellenlänge abhängig ist; wobei das blaue Licht stärker absorbiert wird als das rote.

Trumpler sprach sich für ein nicht unbedingt gleichmässiges Interstellarmilieu aus, das örtliche Irregularitäten aufweisen könnte. Seiner Meinung nach sollte das "absorbierende" Material so verteilt sein, dass es *im Durchschnitt* eine zur Entfernung proportionelle Absorption bewirken sollte, weshalb die photometrischen Entfernungen systematisch von jenen abweichen würden, die durch von der Absorption unabhängige Methoden ermittelt wurden (zum Beispiel Methode des Konvergenzpunktes, des scheinbaren Sternhaufendurchmessers u.a.). Kurz gesagt: 1930 lieferte Trumpler schon eine völlig korrekte Beschreibung des Phänomens der Extinktion, die heute durchschnittlich als 0.85 Magnitude pro Kiloparsec im sichtbaren Bereich veranschlagt wird. Ausserdem sagte er jene Beobachtungen voraus, die im Rahmen einer selektiven interstellaren Extinktion gemacht würden. Er deutete auch die scheinbare Abwesenheit von Kugelhaufen und "Spiralnebeln" nahe dem galaktischen Äquator als Beweis für eine starke Konzentration des "absorbierenden" Materials in der galaktischen Ebene.

4. Entdeckung des neutralen Wasserstoffs

1945 sagte van de Hulst aufgrund von theoretischen Überlegungen die Möglichkeit voraus, den neutralen Wasserstoff (HI) mit Hilfe von Beobachtungen auf der Radiowellenlänge von 21 cm zu entdecken. Die Messung dieser Emission



que la mesure de cette émission soit impossible en laboratoire, car l'hydrogène trop dense se combine en molécules H_2 , van de Hulst comprit que l'accumulation de cette faible émission sur une ligne de visée traversant une grande partie de notre Galaxie engendrerait un signal suffisamment important pour pouvoir être mesuré avec une antenne de taille raisonnable. En 1951, deux groupes, l'un aux Etats-Unis et l'autre aux Pays-Bas, réussirent l'exploit de détecter cette raie avec des antennes de fortune. Depuis lors, cette raie à 21 cm a été la source principale de renseignements sur la plus grande partie du milieu interstellaire.

Grâce à ces mesures radio de la raie à 21 cm, on peut déterminer comment tourne notre Galaxie à de grandes distances du Soleil, et aussi comment tournent les galaxies spirales voisines. Un des problèmes issus de ces mesures de la rotation des nuages HI autour du centre de la Galaxie est que la vitesse de rotation observée est beaucoup plus élevée que celle nécessaire pour compenser l'attraction gravitationnelle de la masse connue. Ainsi, dans les galaxies spirales, on en déduit l'existence d'environ 10 fois plus de matière que celle qui constitue les étoiles et autres formes connues de matière. C'est le principal fait observationnel qui motive aujourd'hui ce que certains astronomes considèrent comme étant le problème principal de l'astrophysique: le problème de la matière «cachée» ou matière «noire».

5. Découverte des molécules complexes

Jusque vers la fin des années 60, on divisait le milieu interstellaire en deux constituants: les régions HI et les régions HII. L'existence de la poussière était aussi une chose connue. Les régions HI étaient de grands nuages d'hydrogène atomique neutre, à une température estimée à environ 100 K. Les régions HII, entourant les étoiles chaudes, étaient constituées d'atomes d'hydrogène ionisés (HII) à environ 10^4 K.

Cette image simpliste du milieu interstellaire a été complètement bouleversée dans les années 70 avec l'avènement de la radio-astronomie dans les ondes millimétriques et la découverte de nombreuses molécules interstellaires, ainsi que la découverte de la nature diffuse du rayonnement X mou déjà observé dans certaines directions. Si la présence de CH, CN et CN^+ dans l'espace interstellaire était connue depuis la fin des années 30, il avait fallu attendre 1963 pour qu'on détecte la molécule OH à 18 cm de longueur d'onde. Mais à cette époque, il semblait improbable de détecter une molécule interstellaire de plus de deux atomes, compte tenu de l'extrême raréfaction du milieu, qui rend très peu probable la collision et la combinaison de ces radicaux (CH, CN, OH) entre eux.

En 1968 cependant, C. H. Townes, lauréat du prix Nobel de physique pour la découverte du laser, et son équipe réussirent les premiers à identifier une telle molécule, en l'occurrence l'ammoniac (NH_3), après avoir mis plusieurs années à construire un récepteur pouvant capter une émission à 1 cm. A l'époque, ceci représentait une réelle performance. La même année, la même équipe identifiait aussi la molécule d'eau, H_2O . La découverte de l'existence d'ammoniac et d'eau dans le milieu interstellaire était déjà surprenante. Mais, hormis le groupe CN du cyanogène dont le nombre de détections restait faible, aucune molécule contenant plus d'un seul atome lourd n'avait été mise en évidence. A la fin de 1968, L. E. Snyder et ses collaborateurs achevaient de bouleverser notre conception du milieu interstellaire. Ils détectèrent en effet du formol (H_2CO) dans la Galaxie.

Sans le développement de l'astronomie millimétrique, nous ignorerions probablement encore la variété des réactions chimi-

ist im Laboratorium unmöglich, weil sich der zu dichte Wasserstoff zu H_2 -Molekülen kombiniert. Trotzdem verstand van de Hulst, dass die Summe der schwachen Emissionen auf unserer Visierlinie durch einen Grossteil der Galaxis ein ausreichend starkes Signal ergeben würde, um mit einer Antenne vernünftiger Grösse messbar zu sein. 1951 gelang es zwei Gruppen, einer in den USA und der anderen in den Niederlanden, diese Linie mit einer Behelfsantenne zu entdecken. Seitdem war die 21 cm-Linie die Hauptquelle für Auskünfte über den grössten Teil des Interstellarmilieus.

Dank der Radiomessungen dieser 21 cm-Linie kann man bestimmen, wie sich unsere Galaxis in grossen Entfernungen von der Sonne dreht und auch, wie sich die benachbarten Spiralgalaxien drehen. Eines der aus dieser Messung der Rotation der HI-Wolken um das Zentrum der Galaxis hervorgegangenen Probleme ist, dass die beobachtete Rotationsgeschwindigkeit wesentlich grösser als diejenige ist, die nötig wäre, um die Gravitationskraft der bekannten Masse zu kompensieren. Daraus schliesst man, dass in den Spiralgalaxien etwa zehnmal mehr Materie existiert, als die in den Sternen oder unter anderer bekannter Form vorhandene. Diese Beobachtung ist die Hauptursache für das, was einige Astronomen als das wichtigste Problem der Astrophysik ansehen: das Problem der "versteckten" oder "dunklen" Materie.

5. Entdeckung komplexer Moleküle

Bis ans Ende der 60er Jahre teilte man das Interstellarmilieu in zwei Komponenten auf: die HI-Regionen und die HII-Regionen. Die Existenz von Staub war ebenfalls bekannt. Die HI-Regionen waren grosse Wolken neutralen, atomischen Wasserstoffs mit einer Temperatur von etwa 100 K. Die einen heissen Stern umgebenden HII-Regionen bestanden aus ionisierten Wasserstoffatomen (HII) mit ungefähr 10^4 K.

Dieses vereinfachte Bild des Interstellarmilieus wurde in den 70er Jahren mit dem Beginn der Radioastronomie in millimetrischen Wellenlängen und der Entdeckung zahlreicher interstellarer Moleküle völlig umgewälzt. Wie zum Beispiel durch die Entdeckung der diffusen Natur der weichen Röntgenstrahlung, die schon in einigen Richtungen beobachtet worden war. Im Gegensatz zu CH, CN und CN^+ , deren Anwesenheit im Interstellarmilieu bereits seit Ende der 30er Jahre bekannt war, wurde das Molekül OH auf 18 cm Wellenlänge erst 1963 entdeckt. Doch zu dieser Zeit schien es unwahrscheinlich, interstellare Moleküle aus mehr als zwei Atomen zu entdecken, weil die extreme Verdünnung des Milieus eine Kollision und Kombination dieser Radikale (CH, CN, OH) unter sich unwahrscheinlich macht.

1968 gelang es indessen C. H. Townes (Nobelpreisträger der Physik für die Entdeckung des Lasers) und seinem Team als ersten, solch ein Molekül zu identifizieren: das Ammoniak (NH_3). Sie hatten mehrere Jahre gebraucht, um einen Rezeptor für die Wellenlänge 1 cm zu konstruieren. Zu jener Zeit handelte es sich dabei um eine bemerkenswerte Leistung. Im gleichen Jahr identifizierte dasselbe Team auch das Wassermolekül (H_2O). Die Entdeckung der Existenz von Ammoniak und Wasser im Interstellarmilieu war schon erstaunlich, aber ausser der CN-Gruppe des Cyan, das nur relativ selten detektiert wurde, wurde kein anderes Molekül mit mehr als einem schweren Atom gefunden. Ende 1968 stürzten L. E. Snyder und seine Mitarbeiter unser Konzept des Interstellarmilieus endgültig um, indem sie Formaldehyd (H_2CO) in der Galaxis entdeckten.

Ohne die Entwicklung der millimetrischen Astronomie würden wir wahrscheinlich die Vielfalt der im Interstellarmi-



ques qui peuvent se produire dans le milieu interstellaire. Pendant les années 70, de nouvelles molécules organiques furent identifiées, pouvant même atteindre un degré surprenant de complexité, comme par exemple l'alcool ordinaire (alcool éthylique, C_2H_5OH). La plupart des molécules interstellaires contiennent les atomes H, C, N, ou O, les briques élémentaires de la vie.

C'est vers la même époque que G. C. Carruthers (en 1970) découvrit le premier de l'hydrogène moléculaire (H_2) grâce à une expérience embarquée à bord d'une fusée. Peu après cette première découverte, le satellite Copernicus (lancé en 1972) allait montrer l'importance première de cette molécule H_2 dans les nuages interstellaires. On sait maintenant que c'est la molécule la plus abondante du milieu interstellaire. Malheureusement, cette molécule a la particularité, avec un autre constituant fréquent du milieu interstellaire, l'atome d'hélium (He), de ne posséder dans son spectre qu'extrêmement peu de raies grâce auxquelles il serait possible de l'observer.

6. Découverte du gaz très chaud

Une découverte de taille intervint au début des années 70, avec les progrès de l'astronomie dans l'ultraviolet (UV) et de l'astronomie dans le domaine des rayons X. Grâce à des observations spatiales, et notamment celles réalisées par Copernicus (spectres UV et mesures X) et à bord du laboratoire spatial Skylab (rayons X mous), on découvrit une composante très chaude dans l'espace intersidéral. Ce fut Copernicus qui, le premier, observa en direction d'étoiles des raies en absorption d'éléments très ionisés, indicateurs de la présence d'un gaz très chaud (au moins 500'000 K). En fait, un rayonnement X montrant l'existence d'un tel gaz avait déjà été détecté dans plusieurs directions, mais Skylab (station spatiale habitée en 1973 et 1974) montra son caractère diffus, alors qu'on le pensait dû à des sources ponctuelles.

7. Découverte du ciel infrarouge

Les mesures depuis le sol du ciel infrarouge commencèrent vers la fin des années 60. L'infrarouge proche du visible étant beaucoup moins absorbé par la poussière que la lumière visible, il nous permet de mieux voir les étoiles à travers le «brouillard» interstellaire, en particulier dans les régions froides, où se forment les étoiles.

C'est le satellite IRAS qui, dès 1984, a permis de découvrir dans l'infrarouge lointain ce qui est désormais connu sous le nom de «cirrus IR». Il semble bien que la plupart des cirrus infrarouges (IR) aient une contrepartie en HI, comme F. Boulanger et M. Pérault l'ont montré en 1988. J. L. Weiland et ses collaborateurs ont, quant à eux, établi en 1986 que l'émission de ces cirrus à 100 μm peut être associée à des nuages contenant du monoxyde de carbone (CO) lorsque les zones concernées sont situées à de hautes latitudes galactiques (où l'émission IR peut être résolue en cirrus). En outre, on observe une association étroite entre l'émission des nuages de poussière dans les ondes submillimétriques et les régions de formation stellaire.

Récemment, le satellite COBE a dressé une carte du ciel infrarouge encore plus précise que celle d'IRAS. Cependant, les données fournies par COBE n'ont encore été qu'à peine exploitées. En outre, de nouveaux satellites infrarouges ayant une résolution accrue sont en préparation, tel le satellite européen ISO.

8. Théories

Comme dans toute recherche scientifique, les observations et expériences doivent être guidées par des modèles et théories,

lieu possibles chimiques réactions ne connaissent. In den 70er Jahren wurden weitere organische Moleküle identifiziert, die teilweise erstaunliche Komplexität erreichten, wie zum Beispiel ganz gewöhnlicher Alkohol (Äthylalkohol: C_2H_5OH). Die meisten interstellaren Moleküle enthalten H-, C-, N- oder O-Atome, die Grundbausteine des Lebens.

Zur selben Zeit entdeckte G. C. Carruthers (1970) als erster molekularen Wasserstoff (H_2) mit Hilfe eines Experimentes in einer Rakete. Kurze Zeit nach dieser ersten Entdeckung zeigte der Satellit Copernicus (1972 gestartet) die ausserordentliche Bedeutung dieses H_2 -Moleküls in den interstellaren Wolken. Heute weiss man, dass dies das häufigste Molekül im Interstellarmilieu ist. Leider hat dieses Molekül die Besonderheit, ebenso wie ein anderer häufiger Bestandteil des Interstellarmilieus, das Heliumatom (He), in seinem Spektrum nur ganz wenig Linien zu besitzen, mit dessen Hilfe man es beobachten könnte.

6. Entdeckung des sehr heissen Gases

Eine massgebliche Entdeckung ergab sich Anfang der 70er Jahre aus den Fortschritten der Ultraviolett (UV)- und der Röntgenastronomie. Dank der Beobachtungen vom Weltraum aus, hauptsächlich mit Hilfe von "Copernicus" (UV-Spektren und Röntgenmessungen) und von dem Weltraumlaboratorium Skylab (weiche Röntgenstrahlen), entdeckte man eine sehr heisse Komponente im intersideralen Raum. Als erster beobachtete "Copernicus" in Richtung einiger Sterne Absorptionslinien von stark ionisierten Elementen, als Anzeichen eines sehr heissen Gases (mindestens 500'000 K). Tatsächlich waren die für ein solches Gas typischen Röntgenstrahlen schon in mehreren Richtungen gemessen worden, aber Skylab (1973 und 74 bewohnte Raumstation) zeigte ihren diffusen Charakter, wohingegen man vorher von einzelnen Quellen ausging.

7. Entdeckung des Infrarothimmels

Infrarotmessungen von der Erde aus begannen Ende der 60er Jahre. Das dem sichtbaren Licht nahe Infrarotlicht wird vom Staub wesentlich weniger absorbiert als das sichtbare Licht. Es ermöglicht uns, die Sterne besser durch den interstellaren "Dunst" hindurch zu sehen, insbesondere in den kalten Regionen, in denen sich die Sterne bilden.

Der IRAS-Satellit ermöglichte ab 1984 im entfernten Infrarotbereich die Entdeckung des "IR-Zirrus". Es scheint, dass die meisten Infrarotzirren (IR) eine HI-Gegenpartie hätten, wie F. Boulanger und M. Pérault 1988 zeigten. J. C. Weiland und seine Mitarbeiter bestimmten dagegen 1986, dass die Zirrus-Emissionen bei 100 μm mit Wolken aus Kohlenmonoxyd (CO) assoziiert werden können, wenn sich die betreffenden Zonen in hohen galaktischen Breitengraden befinden, wo die IR-Emission in Zirren aufgelöst werden kann. Ausserdem beobachtet man einen engen Zusammenhang zwischen der Emission der Staubwolken in submillimetrischen Wellenlängen und den sternbildenden Regionen. Vor kurzem hat der Satellit COBE den Infrarothimmel noch genauer als IRAS kartographiert. Doch sind die Daten von COBE bis jetzt noch kaum ausgewertet worden. Andere Infrarotsatelliten mit noch besserem Auflösungsvermögen sind in Vorbereitung, zum Beispiel der europäische Satellit ISO.

8. Theorien

Wie bei jeder wissenschaftlichen Forschung müssen Beobachtungen und Versuche durch Modelle und Theorien geleitet werden, um den Überfluss an Fakten zu ordnen. Im heutigen



afin de mettre de l'ordre dans le foisonnement des faits apparemment disparates. Au stade actuel, les théories du milieu interstellaire sont relativement grossières à cause de sa complexité. Il est déjà difficile de préciser simplement quels sont les principaux acteurs dans ce milieu: la gravité, les rayons cosmiques, les champs magnétiques ou les réactions chimiques.

Divers modèles du milieu interstellaire ont été proposés pour expliquer les observations. Dans les années 60, apparut le concept de milieu à plusieurs phases: Une partie du gaz à basse température (environ 100 K ou moins) mais dense coexiste avec du gaz chaud (environ 10'000 K) mais raréfié.

C. F. McKee et J. P. Ostriker ont développé en 1977 une théorie du milieu interstellaire dans laquelle les supernovae (SN) jouent un rôle primordial. Selon eux, les explosions de SN produiraient une grande quantité de gaz ténu et très chaud (à environ 1'000'000 K) dans lequel baigneraient les nuages moléculaires froids. Ceux-ci, comprimés par le gaz chaud, verraient donc leur densité augmenter jusqu'aux valeurs importantes qui sont effectivement observées. Les bords de nuages, jouant le rôle d'interface, seraient ionisés par les rayonnements de fond UV et X, et produiraient à leur tour les composantes neutres et ionisées à 10'000 K. C'est ce qu'on appelle le modèle à trois phases. A l'aide de ce modèle, on peut expliquer de manière pas trop mauvaise de nombreuses propriétés du gaz interstellaire. Par exemple, on sait depuis peu que le disque formé par le gaz chaud est beaucoup plus épais que celui contenant les étoiles. Ce phénomène trouve une explication toute naturelle si l'on prend en compte l'énorme quantité d'énergie libérée par les supernovae.

C'est aussi dans le cadre de ce modèle que beaucoup d'astronomes expliquent la formation des étoiles à grande échelle, explication qui semble confirmée par l'observation d'étoiles jeunes ou en formation aux bords de nuages moléculaires.

Ainsi, après avoir longtemps considéré le milieu interstellaire comme un milieu exclusivement froid, on en était venu à penser que 70 à 80% du volume de la Galaxie était rempli d'un gaz très chaud et raréfié, expulsé par les supernovae. Il ne fait cependant aucun doute que la plus grande partie de la masse se trouve dans le petit volume occupé par les nuages froids, des millions de fois plus denses.

Les bulles de gaz chaud et ténu sont très étudiées depuis quelques années. Ces «super-bulles» seraient le résultat de l'onde de choc créée autour de l'explosion d'une série de supernovae. Leur expansion serait régie par les actions combinées des supernovae, des photons ultraviolets et des vents stellaires d'étoiles massives.

Il faut cependant reconnaître que malgré les nombreux succès du modèle de McKee et Ostriker, cette image d'une galaxie essentiellement remplie de gaz très chaud est actuellement sujette à des critiques, fondées sur des observations récentes et de nouveaux développements théoriques. En 1990, J. D. Slavin et D. P. Cox ont simulé numériquement l'évolution d'un reste de supernova dans un champ magnétique (dont l'influence avait jusque-là été sous-estimée, semble-t-il) et sont parvenus aux conclusions suivantes: Les bulles de gaz chaud ne seraient que des sphères localisées relativement petites, et vouées à disparaître après environ 5 millions d'années. Au total, elles n'occuperaient guère plus de 10% du volume interstellaire.

9. Le milieu interstellaire local

Ce qui est indubitable, c'est la présence de gaz à environ 1'000'000 K tout autour du Soleil. Les observations relatives

Stadium sind die Theorien zum Interstellarmilieu wegen seiner Komplexität relativ grob. Es ist schon allein schwierig, die Hauptfaktoren in diesem Milieu zu bestimmen: die Schwerkraft, die kosmische Strahlung, die Magnetfelder oder die chemischen Reaktionen.

Verschiedene Modelle des Interstellarmilieus sind vorgeschlagen worden, um die Beobachtungen zu erklären. In den 60er Jahren kam das Konzept des *Mehrphasenmilieus* auf: Ein dichtes Gas mit niedriger Temperatur (etwa 100 K oder weniger) existiert neben einem verdünnten heissen Gas (etwa 10'000 K). C. F. McKee und J. P. Ostriker haben 1977 eine Theorie des Interstellarmilieus entwickelt, in dem die Supernovae (SN) eine Hauptrolle spielen. Ihrer Ansicht nach erzeugen die Supernovaexplosionen eine grosse Menge sehr heissen, sehr dünnen Gases (mit etwa 1'000'000 K), das die kalten Molekülwolken umgibt. Diese würden durch das heisse Gas komprimiert, und ihre Dichte würde so die hohen Werte erreichen, die tatsächlich beobachtet werden. Die Oberfläche der Wolken, die die Rolle einer Übergangsschicht spielt, würde durch die UV- und Röntgenstrahlung ionisiert und darauf ihrerseits neutrale und ionisierte Stoffe mit 10'000 K erzeugen. Dies nennt man das Drei-Phasen-Modell. Mit Hilfe dieses Modells kann man zahlreiche Eigenschaften des Gases relativ gut erklären. Zum Beispiel weiss man seit kurzem, dass die galaktische Scheibe aus heissem Gas dicker als die Scheibe aus Sternen ist. Dieses Phänomen findet eine ganz natürliche Erklärung, wenn man die enorme von den Supernovae freigesetzte Energie berücksichtigt.

Im Rahmen dieses Modells erklären viele Astronomen ebenfalls die grossräumige Sternbildung, was durch die Beobachtung junger oder sich bildender Sterne an der Oberfläche der Molekülwolken bestätigt scheint.

Nachdem man also lange Zeit das Interstellarmilieu nur als kalt betrachtet hatte, war man dazu übergegangen, 70 bis 80% des Volumens der Galaxis als von dem sehr heissen und verdünnten Gas aus den Supernovae gefüllt anzusehen. Dagegen ist zweifellos der grösste Teil der Masse in Wirklichkeit in dem kleinen Volumen der kalten, millionenmal dichteren Wolken enthalten.

Die Blasen sehr heissen, verdünnten Gases werden seit einigen Jahren viel erforscht. Diese "Superblasen" resultieren aus einer Stosswelle, die bei einer Supernova-Kettenexplosion entstanden wäre. Ihre Expansion würde durch die kombinierte Aktion der Supernovae, der ultravioletten Photonen und der Sternwinde der massiven Sterne gelenkt.

Man muss allerdings zugeben, dass trotz der zahlreichen Erfolge des McKee-Ostriker-Modells, das Bild der hauptsächlich mit heissem Gas gefüllten Galaxie gegenwärtig Kritiken ausgesetzt ist, die auf neuen Beobachtungen und theoretischen Entwicklungen gegründet sind. 1990 simulierten J. D. Slavin und D. P. Cox numerisch die Evolution der Überreste einer Supernova in einem Magnetfeld (dessen Einfluss bis dahin anscheinend unterbewertet wurde) und kamen zu diesen Schlussfolgerungen: Die Blasen heissen Gases wären nur räumlich begrenzte, relativ kleine Sphären, die nach etwa 5 Millionen Jahren verschwinden würden. Insgesamt würden sie kaum mehr als 10% des interstellaren Volumens ausmachen.

9. Das lokale Interstellarmilieu

Unbestritten ist die Anwesenheit von Gas mit 1'000'000 K um die Sonne. Die Beobachtungen des nahen Interstellarmilieus erklären sich gut, wenn man die Sonne in eine heisse



au milieu interstellaire proche s'expliquent bien si l'on place le Soleil dans une «bulle» de gaz chaud d'au moins 100 pc de rayon qui serait le reliquat d'une supernova ayant explosé il y a quelques centaines de milliers d'années. Depuis la première moitié des années 70, on connaît l'existence d'une déficience locale en HI, qui a clairement été mise en évidence par les observations de l'extinction dans l'ultraviolet effectuées par les satellites Copernicus, lancé en 1972, et IUE, lancé en 1978. Depuis les années 80, les travaux des spécialistes ne cessent de confirmer l'existence d'une cavité remplie de gaz très chaud et très ténu dans laquelle le Soleil se situerait. Il semble bien que cette bulle locale de gaz chaud ne soit pas représentative du milieu interstellaire global de notre Galaxie.

Dans l'environnement immédiat du Soleil, on trouve aussi un grand nombre de nuages moléculaires, dont la distance de certains n'excéderait pas 15 pc. Quant aux nuages de poussière, J. Knude a publié en 1979 un catalogue de 200 de ces nuages qui se situeraient dans le voisinage solaire. A partir d'un grand nombre de mesures photométriques, Knude a pu déterminer les paramètres physiques individuels d'une centaine d'entre eux. Ces nuages auraient de faibles masses (environ $30 M_{\odot}$), un diamètre moyen de 4 pc et une densité moyenne de 30 atomes par cm^3 .

La figure 1 (voir couverture) montre une carte de l'extinction dans le voisinage solaire, réalisée par l'un des auteurs à partir de données photométriques. Quelques nuages denses y sont nettement visibles, dont une partie du complexe «Aql Rift» (constellation de l'Aigle), identifiable en bas de la figure.

La présence de ces nuages sombres dans la «banlieue» de notre système solaire n'est pas sans susciter quelques questions concernant l'avenir de la race humaine. On peut en effet s'interroger sur les conséquences possibles d'une rencontre éventuelle entre le système solaire et un nuage «dense». Le fait que les nuages interstellaires connus les plus denses soient des milliards de fois moins denses que l'atmosphère terrestre laisse à première vue une marge confortable de sécurité. Cependant, il n'est pas exclu qu'une telle rencontre provoque des perturbations sur la haute atmosphère, sur le vent solaire, ou même sur l'orbite de la Terre, perturbations qui, à long terme, pourraient modifier la biosphère.

10. Les grains de poussière

Nous avons déjà évoqué la grande variété des molécules, souvent organiques, qui peuplent l'espace interstellaire, ainsi que leur degré parfois élevé de complexité. Les nuages moléculaires semblent bien être les sites privilégiés où se forment la plupart des étoiles, en tout cas les étoiles les plus massives. Mais si l'existence de ces molécules interstellaires est désormais bien acquise, la question de leur formation est un thème de recherche qui suscite toujours de nombreux travaux. C'est là qu'intervient la poussière interstellaire, distribuée sous forme de «grains». La théorie confère en effet aux grains de poussière un rôle de catalyseur pour la formation des molécules. Les atomes, en se collant à la surface des grains, peuvent se constituer ensuite rapidement en molécules. On pense que les grains se forment par condensation dans les atmosphères des étoiles géantes rouges. Des agrégats solides de quelques microns de diamètre, aux formes éventuellement compliquées (fractales), seraient expulsés par la pression de radiation. L'observation de molécules autour de ces étoiles plaide fortement en faveur de cette théorie.

La poussière est responsable de la dispersion et, dans une moindre mesure, de l'absorption des ondes électromagnétiques ayant une longueur d'onde comparable à la taille des

"Gasblase" mit mindestens 100 pc Radius plaziert, die von einer Supernovaexplosion vor einigen hunderttausend Jahren übrig wäre. Seit der ersten Hälfte der 70er Jahre kennt man die Existenz eines lokalen Mangels an HI, der eindeutig durch die Beobachtungen der Ultravioletttextinction von den Satelliten Copernicus (1972) und IUE (1978) gezeigt wurde. Seit den 80er Jahren bestätigen die Arbeiten der Spezialisten ununterbrochen die Existenz einer mit sehr heissem, sehr verdünntem Gas gefüllten Blase, in der sich die Sonne befände. Anscheinend ist dies nicht stellvertretend für das gesamte Interstellarmilieu unserer Galaxis. In der direkten Umgebung der Sonne befinden sich ausserdem zahlreiche Molekülwolken, die weniger als 15 pc entfernt sind. J. Knude hat 1979 einen Katalog mit 200 Staubwolken in Sonnennähe veröffentlicht. Von einer grossen Anzahl photometrischer Messungen ausgehend, konnte Knude die physikalischen Parameter von etwa hundert Wolken bestimmen. Sie hätten eine geringe Masse (etwa $30 M_{\odot}$), einen mittleren Durchmesser von 4 pc und eine mittlere Dichte von 30 Atomen pro cm^3 .

Figur 1 (siehe Titelbild) zeigt eine Karte der Extinction in der Sonnenumgebung, die von einem der Autoren nach photometrischen Daten realisiert wurde. Einige dichte Wolken sind darin eindeutig erkennbar, u.a. ein Teil des Komplexes "Aql Rift" (Sternbild des Adlers) unten in der Figur.

Die Anwesenheit dieser Dunkelwolken in der "Peripherie" unseres Sonnensystems wirft einige Fragen hinsichtlich der Zukunft der Menschheit auf. So kann man sich fragen, was im Falle der Begegnung des Sonnensystems mit einer "dichten" Wolke geschehen würde. Die Tatsache, dass die dichtesten Interstellarmolekülwolken, die man kennt, milliardenmal weniger dicht als die Erdatmosphäre sind, lässt uns auf den ersten Blick einen beruhigenden Spielraum zur Sicherheit. Dagegen ist es nicht ausgeschlossen, dass eine solche Begegnung Störungen der äusseren Atmosphäre, des Sonnenwindes oder sogar der Erdumlaufbahn hervorrufen könnte, was auf die Dauer die Biosphäre verändern würde.

10. Die Staubkörner

Die grosse Vielfalt der häufig organischen interstellaren Moleküle haben wir schon erwähnt, ebenso ihre teilweise grosse Komplexität. Die Molekülwolken scheinen tatsächlich wichtige Bildungsorte für Sterne zu sein, auf alle Fälle für die aktivsten unter ihnen, die massiven Sterne. Obwohl die Existenz dieser Interstellarmoleküle inzwischen für selbstverständlich angesehen wird, ist die Frage nach ihrem Ursprung noch das Thema zahlreicher Forschungsarbeiten. Hierbei spielen die interstellaren "Staubkörner" eine wichtige Rolle. Die Theorie verleiht nämlich den Staubkörnern die Rolle eines Katalysators bei der Molekülbildung. Die Atome haften auf der Oberfläche der Körner und reagieren so schneller zu Molekülen. Man nimmt an, dass sich die Staubkörner bei etwa 3000 K in den Atmosphären der roten Riesensterne durch Kondensation bilden. Atomansammlungen mit einigen Mikrometern Durchmesser und eventuell sehr komplizierten Formen würden durch den Strahlungsdruck ausgeschleudert. Die Beobachtung von Molekülen rund um diese Sterne unterstützt diese Theorie.

Der Staub ist für die Dispersion und Absorption von elektromagnetischen Wellen verantwortlich, die eine der Staubgrösse vergleichbare Wellenlänge besitzen. So würden zum Beispiel die Staubteilchen mit einer charakteristischen



grains. Ainsi, les grains de poussière, dont les dimensions caractéristiques seraient comprises entre 10^{-5} et 10^{-6} cm, affecteraient la lumière visible et ultraviolette. Les grains ont d'abord servi de justification au pic dans les courbes d'extinction situé à la longueur d'onde de 2175 Å, pic que F. Hoyle et N. C. Wickramasinghe, en 1963, expliquaient par l'absorption causée par de petites particules de graphite (carbone à l'état cristallin). En fait, pour expliquer toutes les observations, il faut admettre l'existence de plusieurs sortes de grains. La présence de composés carbonés mais aussi de silicate, dont la signature est visible à la longueur d'onde infrarouge de 9.7 μm , semble maintenant quasi certaine.

Depuis quelques années, on parle aussi beaucoup des PAH (*polycyclic aromatic hydrocarbons*) qui sont de grosses molécules d'hydrocarbures ayant environ 50 atomes et satisfaisant certaines conditions posées par les données observationnelles. Ils expliquent surtout le spectre d'émission de la Galaxie dans l'infrarouge. Le modèle des PAH a été proposé par A. Léger et J.-L. Puget en 1984, afin d'expliquer cette émission infrarouge, attribuée à la poussière qui réémettrait le rayonnement des étoiles dans ce domaine de longueur d'onde. Ils montrèrent que l'absorption d'un photon UV par une molécule PAH, chauffée ainsi à une température moyenne de 600 K, peut expliquer les bandes d'émission observées dans l'infrarouge proche et confirmées de façon spectaculaire par le satellite IRAS. Une autre caractéristique des PAH est d'expliquer les courbes d'extinction dans l'UV lointain, mieux que ne le faisaient les grains de graphite. F.-X. Désert, F. Boulanger et J.-L. Puget ont fait paraître en 1990 un modèle de poussière qui rend compte à la fois des courbes d'extinction observées et du spectre d'émission infrarouge de la poussière. Leur modèle empirique a trois composantes: de gros grains de silicate, de très petits grains à base de carbone et des PAH.

11. La structure du milieu interstellaire

On peut voir le milieu interstellaire comme une scène où plusieurs acteurs de force comparable sont en compétition pour influencer sur la matière. Ces acteurs sont la gravité, la turbulence du gaz, la rotation de la Galaxie, les champs magnétiques, les rayons cosmiques. Leurs incessantes interactions produisent des structures désordonnées, turbulentes. Ainsi, la «météorologie interstellaire» est bien plus difficile que la météorologie terrestre!

Les étoiles massives sont les principales sources d'énergie, car elles engendrent les supernovae et les pulsars qui, eux, produisent des rayonnements électromagnétiques, des ondes de choc et des rayons cosmiques. Les pertes d'énergie s'effectuent surtout par le rayonnement dans l'infrarouge.

Le gaz est loin d'être réparti de manière uniforme. Pour résumer, les principales composantes gazeuses, classées par températures croissantes, sont essentiellement:

- 1) *Des nuages sombres*: les nuages moléculaires dont la densité est importante. Elle pourrait atteindre 10^7 particules par cm^3 et même plus. Leur température est comprise entre 3 K et 20 K. Ces nuages contiennent principalement de l'hydrogène moléculaire mais aussi des molécules plus compliquées. On y a observé des molécules organiques, ce qui a notamment suscité de nombreuses discussions sur l'origine de la vie. Dans les nuages moléculaires se forment les étoiles massives productrices des éléments lourds.

Größe von 10^{-5} bis 10^{-6} cm das sichtbare und das ultraviolette Licht beeinflussen. Zuerst dienten diese Körner in den Extinktionskurven als Rechtfertigung für den Pik bei 2175 Å Wellenlänge. Diese Spitze wurde von F. Hoyle und N. C. Wickramasinghe 1963 als Absorption durch kleine Graphitteilchen (kristalliner Kohlenstoff) erklärt. Um alle Beobachtungen zu deuten, wird die Existenz mehrerer Arten Körner benötigt. Die Anwesenheit von Kohlenstoffverbindungen ebenso wie von Silikat, dessen Zeichen bei der infraroten Wellenlänge von 9.7 μm sichtbar ist, ist seit mehreren Jahren so gut wie sicher.

Seit einigen Jahren spricht man auch viel von den PAH (*polycyclic aromatic hydrocarbons* = polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe). Das sind grosse Kohlenwasserstoffmoleküle von ungefähr 50 Atomen, die gewissen Beobachtungsdaten entsprechen. Sie dienen hauptsächlich als Erklärung für das infrarote Emissionsspektrum der Galaxis. Das PAH-Modell wurde 1984 von A. Léger und J.-L. Puget aufgebracht, um die Infrarotemission bei 9.7 μm zu erklären, die dem Staub zugeschrieben wird, der die Sternstrahlung in diesem Wellenlängenbereich wieder abstrahlt. Sie zeigten, dass die Absorption von einem UV-Photon durch ein PAH-Molekül, das so zu einer mittleren Temperatur von 600 K aufgeheizt würde, die beobachteten Emissionslinien im nahen Infrarotbereich erklären kann. Dies wurde auf spektakuläre Art und Weise vom IRAS-Satelliten bestätigt. Ausserdem erklären die PAHs die Extinktionskurven im entfernten UV-Bereich noch besser als die Graphitkörner. F.-X. Désert, F. Boulanger und J.-L. Puget veröffentlichten 1990 ein Staubmodell, das gleichzeitig die beobachteten Extinktionskurven und das infrarote Emissionsspektrum des Staubes berücksichtigt. Ihr empirisches Modell enthält drei Komponenten: grosse Silikatkörner, sehr kleine Körner aus Kohlenstoff und PAHs.

11. Die Struktur des Interstellarmilieus

Man kann das Interstellarmilieu als einen Schauplatz ansehen, auf dem sich gleichstarke Konkurrenten um den Einfluss auf die Materie streiten. Diese Konkurrenten sind die Gravitation, die Gasturbulenz, die Rotation der Galaxis, die Magnetfelder und die kosmische Strahlung. Aus ihrer ununterbrochenen Wechselwirkung resultieren ungeordnete, turbulente Strukturen. Aus diesem Grund ist die "interstellare Meteorologie" wesentlich komplizierter als die atmosphärische!

Die massiven Sterne sind die wichtigste Energiequelle, denn sie werden zu Supernovae und Pulsaren, die elektromagnetische Strahlung, Stosswellen und kosmische Strahlung produzieren. Die Energieverluste entstehen hauptsächlich durch Infrarotstrahlung.

Das Gas ist auf keinen Fall gleichmässig verteilt. Zusammenfassend sind die wichtigsten gasförmigen Komponenten der Temperatur nach geordnet:

- 1) *Die Dunkelwolken*: Molekülwolken mit einer grossen Dichte, die bis zu 10^7 Teilchen pro cm^3 und mehr erreichen könnte. Ihre Temperatur liegt zwischen 3 K und 20 K. Diese Wolken enthalten hauptsächlich molekularen Wasserstoff aber auch kompliziertere Moleküle. Man hat in ihnen organische Moleküle gefunden, was zahlreiche Diskussionen über den Ursprung des Lebens hervorgerufen hat. In den Molekülwolken bilden sich die massiven Sterne, die Produzenten schwerer Elemente.



- 2) *Les nuages atomiques* diffus ou *régions HI*, formées d'hydrogène atomique neutre. Leur température est comprise entre 10 et 100 K.
- 3) *Une composante* à environ 8'000 K, contenant un mélange d'atomes d'hydrogène ionisés et neutres, dont la densité est voisine de 0.1 atome par cm^3 .
- 4) *Les régions HII*, ou «sphères de Strömgren», entourant des étoiles chaudes excitatrices. Elles sont constituées d'atomes d'hydrogène ionisés et leur température est d'environ 10'000 K.
- 5) *Un gaz ténu et très chaud*, appelé aussi «gaz coronal», dont la température avoisine 1'000'000 K et dont l'origine est attribuée aux supernovae. Sa densité n'atteint pas 0.01 atome par cm^3 .

Les nuages froids n'occupent qu'une petite fraction du volume interstellaire (environ 1%), mais contiennent la plus grande partie de la matière gazeuse. Par contre, plus le gaz est chaud, plus le volume occupé est grand (plus de 50%), mais moins importante est la fraction de matière la constituant. La poussière n'entre que pour environ 1% dans la composition de la matière interstellaire. Contrairement à la densité et à la température, la *pression* dans le milieu interstellaire est beaucoup plus uniforme.

Le constituant le plus fréquemment *observé* du milieu interstellaire (ce qui n'implique pas qu'il soit le constituant effectivement le plus fréquent!) se trouve sous la forme des régions HI, vastes structures qui paraissent englober les nuages contenant du monoxyde de carbone (CO) (ceci est bien observé dans le bras de la Carène). Ainsi, les gaz atomique et moléculaire semblent intimement liés. Ils forment des complexes géants de nuages qui suivent bien la structure spirale de la Galaxie. Le diamètre moyen de ces complexes géants est d'environ 100 à 300 pc. La molécule la plus abondante est l'hydrogène H_2 . Ensuite, vient le monoxyde de carbone CO avec une abondance relative de 10^{-5} . Il est le traceur le plus couramment utilisé pour estimer la masse de l'hydrogène moléculaire dont les observations directes restent difficiles.

12. La structure fractale du gaz froid et la matière cachée

Le gaz froid est beaucoup plus complexe que l'image simplificatrice que nous en avons eue pendant des décennies. En particulier, des études récentes montrent que le gaz froid présente une structure *fractale*: Comme certaines roches ou bien d'autres objets naturels, les nuages interstellaires froids ont une apparence irrégulière, fragmentée, mais qui reste similaire aussi bien à petite échelle (moins de 0.01 pc) qu'à grande échelle (jusqu'à environ 1000 pc). La Figure 2 montre la structure complexe de la carte de l'émission d'une raie moléculaire du CO dans Orion, sur une échelle de distance couvrant 4 ordres de grandeur. Cette structure hiérarchisée signifie que les grands ensembles de gaz sont constitués de plus petits nuages, qui eux-mêmes sont constitués de plus petits nuages, etc. L'aspect de ces cartes est similaire à plusieurs longueurs d'onde, que ce soit dans l'infrarouge ou dans les ondes millimétriques ou centimétriques. Ainsi, de ces cartes en apparence sans ordre se dégage une propriété commune qui est une dimension fractale identique.

Ces structures fractales peuvent être étudiées en générant des modèles par ordinateur. La Figure 3 montre de tels modèles de nuages réalisés par l'un des auteurs à l'Observatoire de Genève. Une des conséquences importantes est que la façon traditionnelle dont la masse de gaz froid est évaluée, supposant

- 2) Die diffusen *Atomwolken* oder auch *HI-Regionen* aus neutralem, atomarem Wasserstoff. Ihre Temperatur liegt zwischen 10 und 100 K.
- 3) *Ein Bestandteil* mit etwa 8000 K aus einer Mischung von neutralen und ionisierten Wasserstoffatomen und einer Dichte von etwa 0.1 Atomen pro cm^3 .
- 4) *Die HII-Regionen* oder auch "Strömgrenosphären", die um heisse, anregende Sterne gelegen sind. Sie bestehen aus ionisierten Wasserstoffatomen und besitzen eine Temperatur von ungefähr 10'000 K.
- 5) *Ein sehr heisses, verdünntes Gas*, das auch "Koronagas" genannt wird. Seine Temperatur liegt nahe bei 1'000'000 K, und sein Ursprung wird den Supernovae zugeschrieben. Seine Dichte erreicht keine 0,01 Atome pro cm^3 .

Die kalten Wolken besetzen nur einen kleinen Anteil des interstellaren Volumens (etwa 1%) aber enthalten den grössten Teil gasförmiger Materie. Je heisser das Gas hingegen ist, desto mehr Raum nimmt es ein (mehr als 50%) und desto kleiner ist sein Anteil an Materie. Der Staub macht nur etwa 1% in der Zusammensetzung der interstellaren Materie aus. Im Gegensatz zu Dichte und Temperatur ist der *Druck* im Interstellarmilieu überall ähnlich.

Im Interstellarmilieu am häufigsten *beobachtet* werden die HI-Regionen (was nicht unbedingt heisst, das dies auch der häufigste Bestandteil ist). Es handelt sich dabei um weiträumige Strukturen, die Kohlenmonoxyd enthaltende Wolken zu umschliessen scheinen, was besonders gut im Carina-Arm zu beobachten ist. Das atomische und das molekulare Gas sind also anscheinend innig miteinander verbunden. Sie bilden gigantische Wolkenkomplexe, die der Spiralstruktur der Galaxie folgen. Der mittlere Durchmesser dieser Komplexe ist ungefähr 100—300 pc. Am reichlichsten vorhanden ist das H_2 -Molekül. Danach kommt das Kohlenmonoxyd (CO) mit einer relativen Häufigkeit von 10^{-5} . Man benutzt es üblicherweise um indirekt die Masse des molekularen Wasserstoffes abzuschätzen, dessen direkte Beobachtungen weiterhin schwierig sind.

12. Die fraktale Struktur des kalten Gases und die versteckte Materie

Das kalte Gas ist wesentlich komplexer als das vereinfachte Bild, das wir uns jahrzehntlang von ihm gemacht haben. Jüngste Studien zeigen, dass das kalte Gas eine *fraktale* Struktur besitzt: Genau wie Gestein oder andere natürliche Dinge besitzen die kalten Interstellarwolken ein unregelmässiges, fragmentiertes Aussehen, das in kleinem Raum (unter 0.01 pc) ähnlich ist wie in grossem (bis zu 1000 pc). Figur 2 zeigt die komplexe Struktur der Konturenkarte von einer molekularen CO-Emissionslinie im Orion über ein Intervall von 4 Grössenordnungen. Diese hierarchisierte Struktur bedeutet, dass die grossen Wolkenkomplexe aus kleinen Wolken zusammengesetzt sind, die ihrerseits aus noch kleineren Wolken bestehen usw.. Bei mehreren verschiedenen Wellenlängen sehen diese Karten ähnlich aus, ob es sich nun um infrarote, millimetrische oder zentimetrische Wellen handelt. So ergibt sich aus diesen anscheinend ordnungslosen Karten eine gemeinsame Eigenschaft, eine identische fraktale Dimension.

Diese fraktalen Strukturen können mit Hilfe von Computermodellen studiert werden. Figur 3 zeigt solche Wolkenmodelle, die von einem der Autoren in der Sternwarte Genf berechnet wurden. Die traditionelle Art, die Masse des kalten Gases zu

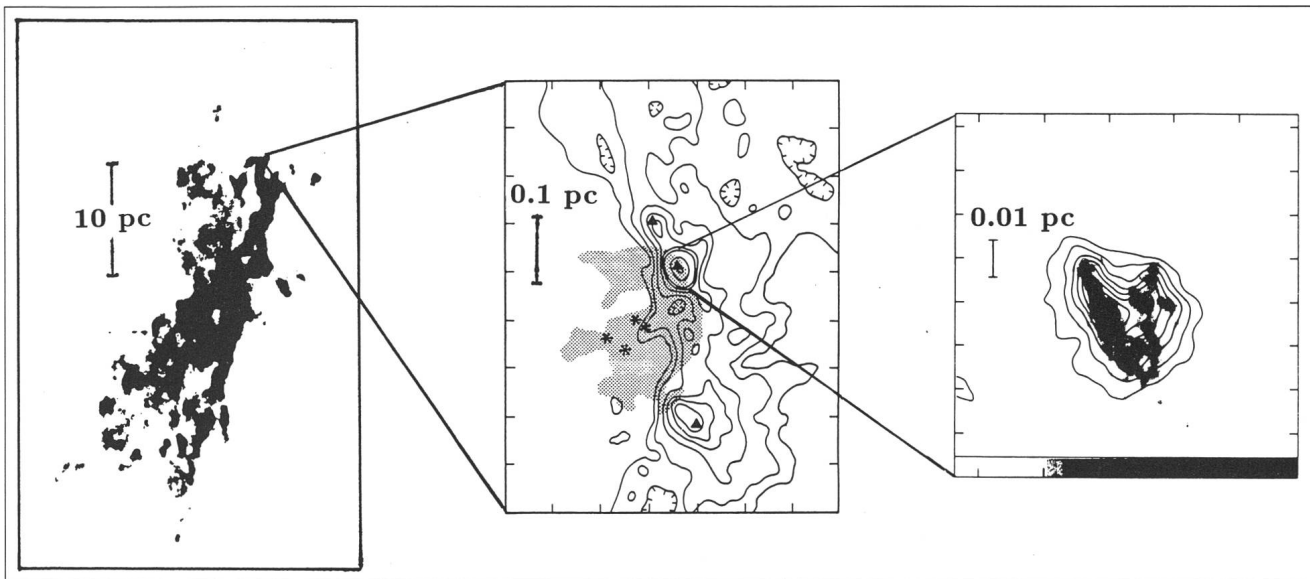


Fig. 2: Cartes des raies d'émission du monoxyde de carbone (CO) dans Orion montrant le caractère essentiellement fragmenté du gaz froid (échelles de 10 pc à 0.01 pc).

Fig. 2: Konturenkarten der Emissionslinien des Kohlenmonoxyd (CO) in Orion. Sie zeigen den grundsätzlich fragmentierten Charakter des kalten Gases (Massstab: 10 pc - 0.01 pc).

un milieu homogène, peut engendrer une sous-estimation de cette masse d'un facteur de l'ordre de 10, lorsque le gaz a en fait une structure fractale.

Liés à la géométrie fractale des nuages froids, plusieurs facteurs conduisent à sous-estimer la quantité de gaz: 1) les grumeaux les plus denses sont opaques à la raie à 21 cm, 2) ils couvrent une très petite fraction du ciel bien que contenant beaucoup de masse, 3) ils peuvent former rapidement des molécules H₂, ce qui supprime l'émission à 21 cm, et 4) ils atteignent rapidement une température très basse, proche du rayonnement cosmologique à 3 K, ce qui ne permet pas de les distinguer de celui-ci.

Or, si l'on trouve qu'il y a en fait 10 fois plus d'hydrogène interstellaire qu'estimé usuellement, le problème de la matière cachée dans les galaxies disparaît! A ce propos, il est particulièrement remarquable que, dans les parties extérieures des galaxies spirales, la quantité de gaz HI soit systématiquement *proportionnelle* à la quantité de matière cachée par un facteur d'environ 1/10. Ce fait a d'abord été montré par A. Bosma en 1981, et confirmé ensuite par de nombreuses observations.

13. Conclusions

Notre vision du milieu interstellaire a considérablement évolué au cours de ce siècle et surtout au cours des deux dernières décennies. Cette évolution a été rendue possible par la multiplicité de nouvelles techniques d'observation qui ont permis, en particulier, d'élargir de façon décisive la région du spectre électromagnétique accessible à nos instruments. Les progrès de la radio-astronomie ont été déterminants dans la découverte et l'étude de l'hydrogène et des molécules interstellaires. Dans l'infrarouge, les satellites, tels IRAS et COBE, ont révolutionné nos idées sur le milieu interstellaire froid. L'extinction dans l'ultraviolet, longtemps mal déterminée, est désormais un thème de recherche fécond grâce aux techniques spatiales. Enfin, l'observation des rayons X et gamma nous offrent de nouvelles indications sur les gaz chauds et les rayons cosmiques.

bestimmen, setzt ein homogenes Milieu voraus. Dies kann dazu führen, diese Masse um einen Faktor von etwa 10 zu unterschätzen, wenn die Gas-Struktur in Wirklichkeit fraktal ist.

Mehrere an die fraktale Geometrie der kalten Wolken gebundene Faktoren führen zu einer Unterschätzung der Gasmenge: 1) Die dichtesten Klumpen sind für die 21 cm-Linie undurchlässig, 2) sie bedecken nur einen sehr kleinen Teil des Himmels obwohl sie viel Masse enthalten, 3) sie können rasch H₂-Moleküle bilden, was die 21cm-Emissionslinie aufhebt, und 4) sie erreichen leicht eine sehr niedrige, der kosmischen Hintergrundstrahlung nahe Temperatur von 3 K, was eine Unterscheidung von der Hintergrundstrahlung unmöglich macht.

Wenn man nun also feststellt, dass es in Wirklichkeit zehnmal mehr interstellaren Wasserstoff gibt als allgemein angenommen, dann erübrigt sich das Problem der in den Galaxien versteckten Masse! Hierzu ist besonders bemerkenswert, dass in den äusseren Bezirken der Spiralgalaxien die Menge HI-Gas grundsätzlich der Menge versteckter Materie *proportional* ist, und zwar mit einem Faktor von etwa 1/10. Dies wurde zum ersten Mal 1981 von A. Bosma gezeigt und seitdem durch zahlreiche Messungen bestätigt.

13. Schlussfolgerungen

Unser Bild des Interstellarmilieus hat sich im Laufe dieses Jahrhunderts erheblich entwickelt, besonders während der letzten zwanzig Jahre. Diese Entwicklung wurde durch die Vielfalt der neuen Beobachtungstechniken ermöglicht, die insbesondere den messbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums erweitert haben. Die Fortschritte der Radioastronomie waren die Voraussetzung für Entdeckung und Erforschung des Wasserstoffs und der interstellaren Moleküle. Im Infrarotbereich haben die Satelliten wie IRAS und COBE unsere Vorstellung von dem kalten Interstellarmilieu umgewälzt. Die Ultravioletttextinction war lange Zeit kaum bestimmt und ist jetzt ein fruchtbares Forschungsthema dank der Raumfahrttechnik. Zu guter Letzt bieten uns die Röntgen- und Gammastrahlen neue Hinweise über die heissen Gase und die kosmische Strahlung.

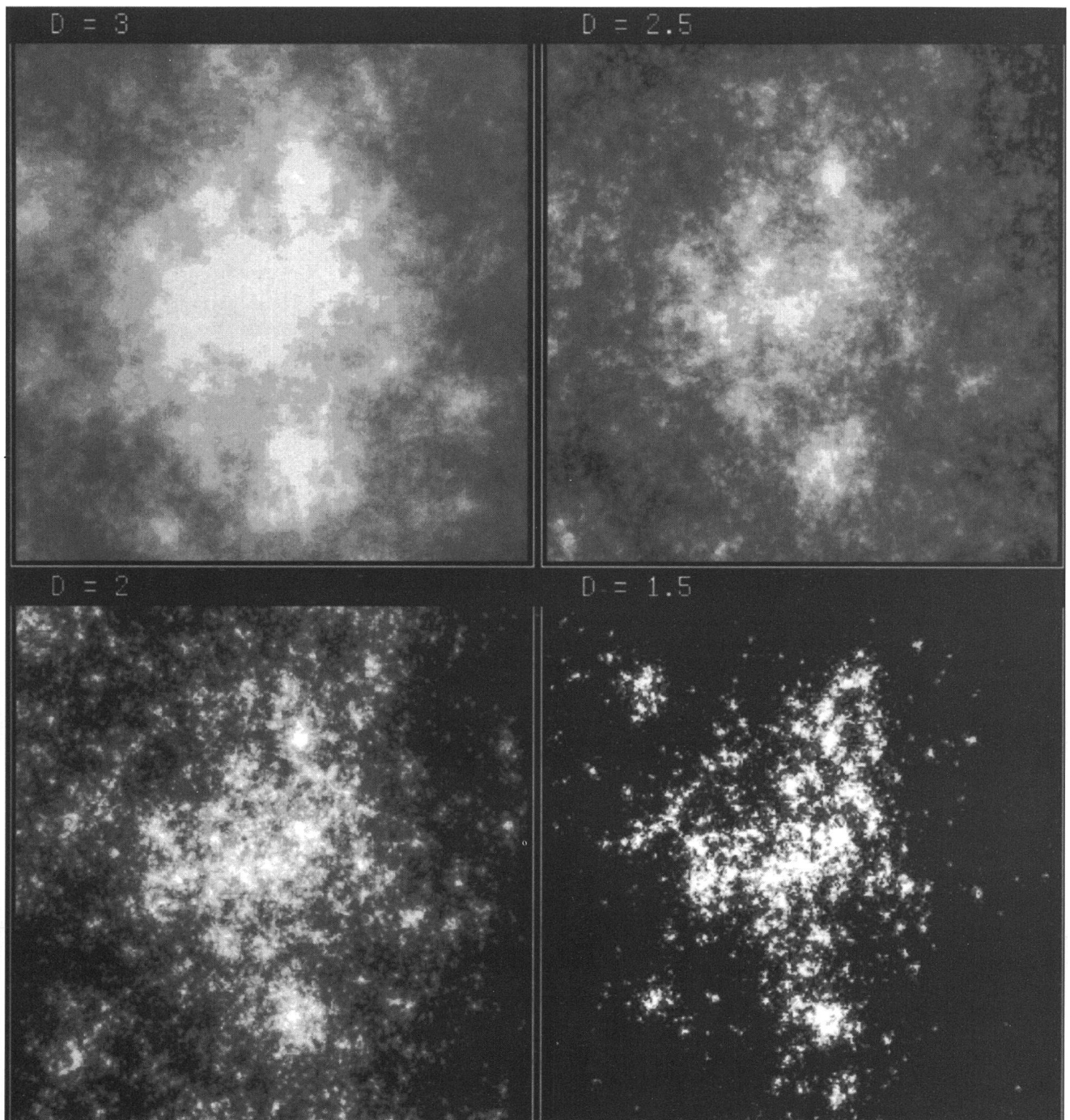


Fig. 3: Modèles de nuages fractals. Les propriétés de tels nuages varient énormément avec la dimension fractale D .

Fig. 3: Modelle fraktaler Wolken. Die Eigenschaften variieren stark mit der fraktalen Dimension D .

Si, au début de ce siècle, des astronomes hardis s'aventuraient à supposer l'existence de matière interstellaire sous forme de traces, on s'est peu à peu rendu compte que ces gaz diffus trahissaient en fait la présence d'au moins autant de matière sous forme gazeuse que sous forme d'étoiles. Aujourd'hui, on soupçonne que le milieu interstellaire pourrait contenir beaucoup plus de matière froide qu'on ne le pensait encore récemment. Ainsi, si les mesures de la masse de l'hydrogène neutre s'avéraient correspondre seulement à un dixième de la masse réelle de gaz, la matière obscure dans les galaxies serait en fait surtout de l'hydrogène froid à une température proche de 3 K et cachée dans des petits globules de quelques centièmes de masse solaire et de quelques unités astronomiques de diamètre.

JACQUES GUARINOS ET DANIEL PFENNINGER
Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny

Am Anfang des Jahrhunderts wagten einige kühne Astronomen die Vermutung der Existenz von Spuren interstellarer Materie. Allmählich nahm man wahr, dass diese diffusen Gase in Wirklichkeit die Anwesenheit von mindestens ebensoviel gasförmiger Masse verraten wie die in den Sternen enthaltene. Heute hat man den Verdacht, dass das Interstellarmilieu viel mehr kalte Materie enthalten könnte, als man vor kurzem noch dachte. Wenn also die gemessene Masse des neutralen Wasserstoffs nur einem Zehntel der tatsächlichen Gasmasse entspräche, dann wäre die versteckte Materie in den Galaxien in Wirklichkeit hauptsächlich kalter Wasserstoff mit einer Temperatur von ungefähr 3 K und in kleinen Globulen von einigen hundertsteln Sonnenmasse und einem Durchmesser von einigen astronomischen Einheiten verborgen.

Deutsche Übersetzung:
Barbara Pfenninger, Anja & Martin Wiest

Aussergewöhnliche Beobachtungserfolge

APQ heissen unsere Fluorid-Objektive mit höchster apochromatischer Qualität.

Für Beobachtungserlebnisse von unbeschreiblicher Schönheit.



Refraktor APQ 130/1000

Durchmustern Sie den Himmel mit dem neuen APQ-Refraktor und Sie entdecken eine neue Welt: eine unbekannte Detailfülle auf dem Mond, die Venus glasklar und ohne Farbsaum, Jupiters Atmosphäre in den schönsten Pastelltönen, den Orionnebel in ungewöhnlicher Pracht. Feinste lichtschwache Details jetzt auch bei hohen Vergrösserungen. Erfreuen Sie sich an den beeindruckend hellen und kontrastreichen Bildern: absolut farbrein und brillant.



Carl Zeiss AG

Grubenstrasse 54
Postfach
8021 Zürich
Telefon 01 465 91 91
Telefax 01 465 93 14

Av. Juste-Olivier 25
1006 Lausanne
Telefon 021 20 62 84
Telefax 021 20 63 14