

A QUÍMICA INTERESTELAR

James LEQUEUX (*)

Introdução

A descoberta nos anos 70 de uma grande quantidade de moléculas — algumas delas bastante complexas — no meio muito rarefeito que separa as estrelas foi uma descoberta profundamente surpreendente. Apesar de alguns espíritos audaciosos, como o americano C. Townes, terem há muito previsto que o meio interestelar poderia ser sede de reacções químicas que conduziram à formação de alguns radicais livres diatómicos como o radical OH, ou até à formação de moléculas com 3 ou 4 átomos como H_2O ou NH_3 , estávamos longe de imaginar a presença de espécies como HC_{11}N , a molécula mais pesada até hoje observada. Não só o gás interestelar se revelou fértil em moléculas; o mesmo acontece com os envelopes de gás e poeira que rodeiam algumas estrelas frias.

Existem diferentes métodos para detectar moléculas em astronomia. Um deles consiste em observar as transições electrónicas moleculares em absorção no espectro das estrelas que se encontram por detrás dessas moléculas. Infelizmente são raras as transições desse tipo que caem no domínio do visível e por isso só algumas espécies como CH, CH^+ , CN e muito recentemente CS^+ foram descobertas por este método. O domínio do ultravioleta é mais favorável, mas desde a interrupção do funcionamento do satélite espectroscópico americano Copérnico deixaram de existir meios sensíveis de observação neste domínio do espectro. Esse satélite permitiu estudar em

milimétricas, que possibilitaram a maioria das descobertas: as moléculas são observadas neste domínio através das suas transições de rotação, e eventualmente de desdobramento $\Lambda(\text{OH}, \text{CH})$ ou de inversão (NH_3).

A tabela 1 apresenta a lista das moléculas interestelares ou circunstelares descobertas até hoje (um pequeno número de identificações não está ainda confirmado). Este quadro está certamente longe de estar completo. Faltam com efeito a maioria das moléculas simétricas como O_2 , N_2 , etc... que podem ser muito abundantes: dado que as suas transições de rotação e de vibração são interditas, elas só poderiam ser observadas através das suas transições electrónicas. Também são muito difíceis de detectar, mesmo admitindo que existem, moléculas complexas como os aminoácidos: o seu espectro é muito complexo e mal conhecido, e a energia que emitem no domínio rádio encontra-se diluída num grande número de riscas de forma que cada uma delas é muito fraca. As tentativas insistentes para detectar a glicina, o mais simples dos aminoácidos, não foram conclusivas. Pelo contrário, a ausência de moléculas cíclicas no meio interestelar é um facto notável e real. Para além disso, as moléculas lineares são claramente favorecidas relativamente às moléculas ramificadas.

Vamos agora ver as condições físicas em que estas moléculas se formam e, em seguida, indicar os princípios

TABELA 1
Lista das moléculas interestelares e circunstelares detectadas; as mais abundantes encontram-se sublinhadas

2 átomos	3 átomos	4 átomos	5 átomos	6 átomos	7 átomos	8 átomos	9 átomos	11 átomos	13 átomos
<u>H_2</u>	<u>H_2O</u>	<u>NH_3</u>	<u>H_2CNH</u>	<u>CH_3OH</u>	<u>CH_3NH_2</u>	<u>HCOOCH_3</u>	<u>CH_3OCH_3</u>	<u>HC_9N</u>	<u>HC_{11}N</u>
CH	<u>H_2S</u>	<u>H_2CO</u>	<u>CH_2CO</u>	<u>CH_3CN</u>	<u>$\text{CH}_3\text{C}_2\text{H}$</u>	<u>$\text{CH}_3\text{C}_3\text{N}$</u>	<u>$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$</u>		
CH^+	<u>C_2H</u>	<u>H_2CS</u>	<u>H_2NCN</u>	<u>HCONH_2</u>	<u>CH_3CHO</u>		<u>$\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$</u>		
CN	<u>HCN</u>	<u>HNCO</u>	<u>HCOOH</u>		<u>$\text{C}_2\text{H}_3\text{CN}$</u>		<u>HC_7N</u>		
CO	<u>HNC</u>	<u>HCNO</u>	<u>C_4H</u>		<u>HC_5N</u>				
<u>CS</u>	<u>HCO</u>	<u>C_3N</u>	<u>HC_3N</u>						
<u>CS^+</u>	<u>HCO^+</u>	<u>$\text{C}_3\text{H}^?$</u>							
<u>C_2</u>	<u>HN_2^+</u>	<u>$\text{HCO}_2^+?$</u>							
<u>OH</u>	<u>OCS</u>								
<u>SiO</u>	<u>SO_2</u>								
SiS									
NS									
SO									
<u>$\text{CO}^+?$</u>									

pormenor a molécula de H_2 , de longe a mais abundante pois constitui metade da massa do meio interestelar, assim como as de CO e OH. No infravermelho próximo detectou-se a espécie C_2 e no infravermelho longínquo observaram-se as riscas espectrais de vibração-rotação de várias moléculas entre as quais a de H_2 . Foi no entanto o domínio das ondas rádio e nomeadamente o das ondas

da química interestelar, primeiramente em fase gasosa, e depois à superfície dos grãos de poeira que se encontram misturados com o gás. Finalmente analisaremos as eventuais relações entre as moléculas interestelares e a aparição da vida: problema apaixonante que está na ordem do

* Observatoire de Marseille, 13248 Marseille Codex 4, France.

dia, mas em que tudo ainda faz parte do domínio da especulação.

O meio interestelar

As estrelas que formam a nossa Via Láctea não se encontram separadas por um vazio absoluto, mas estão na realidade mergulhadas num meio muito diluído formado de gás e de finas poeiras. Este meio interestelar é muito heterogêneo: por exemplo, o Sol situa-se numa região quase vazia de matéria. Podemos falar de nuvens interestelares: estas nuvens são entidades mal definidas, de grandes dimensões (da ordem do ano-luz ou maiores) e formas variadas. A sua densidade é em geral muito fraca, correspondendo a um vácuo que não conseguimos realizar no laboratório: foi este facto que desencorajou durante muito tempo a procura de moléculas dado que a sua formação se considerava difícil em tais condições. No entanto, o tempo joga a favor da formação das moléculas, as escalas de tempo sendo neste caso superiores ao milhão de anos em vez dos minutos ou das horas dos nossos laboratórios.

Sucintamente, a densidade do gás é da ordem de alguns átomos por cm^3 , a sua temperatura de algumas dezenas de Kelvin. O campo de radiação ultravioleta proveniente das estrelas quentes não é desprezável e desempenha um papel importante na química interestelar. As poeiras interestelares são grãos de silicato ou de grafite de tamanho reduzido — da ordem do décimo de μm — mas são abundantes e a sua massa atinge cerca de um por cento da massa do gás. A sua temperatura é da ordem de 10 a 20 K. As poeiras desempenham um duplo papel: por um lado são como veremos, locais possíveis para a formação de uma parte das moléculas; por outro lado absorvem e difundem a luz das estrelas de tal forma que as regiões centrais de uma nuvem suficientemente densa podem encontrar-se quase completamente ao abrigo desta luz. Estamos neste caso em presença daquilo que se designa por nuvem sombria, ou nuvem molecular (porque nelas o gás se encontra essencialmente sob a forma molecular). Neste caso, um outro fenómeno, aliás secundário, pode desempenhar um papel capital na química: as partículas cósmicas, que penetram livremente no interior destas nuvens, produzem aí ionizações que são o ponto de partida para reacções químicas.

A composição do gás interestelar é relativamente bem conhecida. Nove átomos em dez são átomos de hidrogénio, um em dez é um átomo de hélio, e os elementos mais pesados, dos quais os mais abundantes são C, N, O, S, Si, Fe, apenas estão presentes em fraca quantidade: o oxigénio, que é o elemento mais abundante a seguir ao H e He, tem uma abundância de 8×10^{-4} (relativamente ao hidrogénio). É claro que isto vai influenciar directamente a química interestelar. De facto, as moléculas mais abundantes observadas, e nomeadamente as moléculas orgânicas, são precisamente aquelas que são formadas pelos elementos mais correntes: não há “milagre” na química interestelar, mas apenas algumas peças que ainda faltam para completar o **puzzle**.

É necessário dizer algumas palavras acerca da química nos envelopes das estrelas frias. Estes envelopes são formados de gás inicialmente quente e denso ejectado pelas estrelas (estas só são “frias” relativamente às outras estrelas dado que a sua temperatura é da ordem de 3000 K). Inicialmente produzem-se reacções em equilíbrio que dão origem a moléculas como CO , H_2O , C_2H_2 , etc...;

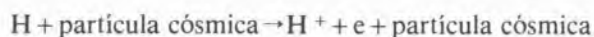
estas moléculas podem constituir materiais de base para reacções mais complexas que se realizarão ulteriormente, nas regiões exteriores do envelope em que as condições físicas são bastante próximas das que reinam no meio interestelar. Uma diferença importante entre este e o meio circunstelar reside na composição química: em torno de algumas estrelas ditas estrelas carbonadas, o carbono é mais abundante que o oxigénio. Todo o oxigénio disponível está então “bloqueado” sob a forma de CO (e de H_2O ?) e a química é essencialmente uma química do carbono: é o caso da célebre estrela carbonada IRC + 10216 (célebre pelo menos entre os astrónomos!) em torno da qual foi descoberta uma série de moléculas de longa cadeia carbonada, até a HC_{11}N . Os envelopes de estrelas frias são também os locais em que se condensam as poeiras que ulteriormente se encontrarão no meio interestelar: silicatos nas atmosferas ricas em oxigénio, grafite naquelas em que o carbono domina.

A química em fase gasosa

É certo que uma grande parte das moléculas interestelares se formam em fase gasosa. É seguramente este o caso de iões moleculares como HCO^+ ou N_2H^+ , cuja formação é dificilmente imaginável sobre os grãos de poeira.

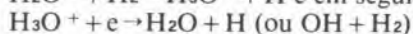
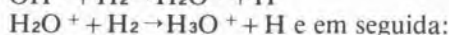
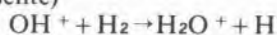
A muito baixa temperatura do gás implica que as únicas reacções susceptíveis de se realizarem são as reacções exotérmicas, ou muito fracamente endotérmicas. É para além disso necessário que estas reacções não tenham barreiras de activação insuperáveis a essas baixas temperaturas. Só as reacções com iões, atómicos ou moleculares, são geralmente desprovidas de barreira de activação: as reacções espécie neutra-espécie neutra têm geralmente barreiras elevadas e são por isso quase sempre impossíveis.

Contrariamente à química dos nossos laboratórios, a química interestelar em fase gasosa é pois essencialmente uma química iónica. A base desta química é a transferência de ionização das espécies abundantes (H^+ , He^+) para as espécies menos abundantes (C, N, O); é pois necessário dispôr à partida de iões H^+ (e He^+). Os fotões ultravioletas estelares são incapazes de produzir estes iões nas núvens que nos interessam; os fotões susceptíveis de ionizar o hidrogénio ($h\nu > 13,6 \text{ eV}$) são absorvidos pelo hidrogénio presente na vizinhança da estrela que os emite, e não podem ir muito longe. A ionização é devida aos raios cósmicos:



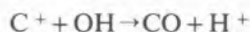
H^+ é capaz de ionizar o átomo de oxigénio através da reacção de transferência de carga quase-ressonante $\text{H}^+ + \text{O} \rightarrow \text{H} + \text{O}^+$ e o ião O^+ assim formado é o ponto de partida de reacções que conduzem às moléculas abundantes e inequivocamente observadas OH e H_2O :

$\text{O}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H}$ (existe sempre um pouco de H_2 presente)

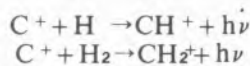


Nas nuvens interestelares não muito densas, em que está presente radiação ultravioleta susceptível de ionizar

o carbono, existem iões C^+ . Uma importante reacção de transferência produz então CO:



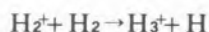
Poder-se-ia pensar que as reacções de associação radiativa conduziram à formação de moléculas carbonadas como CH^+ , CH_2^+ , etc...



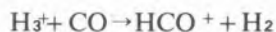
No entanto, a abundância bem determinada de CH^+ é demasiado grande para poder ser explicada pela primeira destas duas reacções, que é uma reacção lenta, tanto mais que a reacção de destruição $CH^+ + e \rightarrow C + H$ é muito rápida. Somos pois levados a pensar que CH^+ é formado através de outras reacções, provavelmente nas ondas de choque; se bem que não haja lugar no contexto deste artigo para aprofundarmos a química nas ondas de choque, convém sublinhar que ela pode desempenhar um papel importante. A sua característica principal é que a temperatura do gás é elevada e, nestas condições, tornam-se possíveis algumas reacções endotérmicas e as barreiras de activação que impedem a maioria das reacções espécie neutra-espécie neutra a baixas temperaturas podem ser superadas.

A radiação ultravioleta que provoca a ionização de carbono nas núvens pouco densas provoca também a fotodissociação das moléculas formadas. Mesmo a água é fotodissociada em $OH + H$. Por isso não é de prever que existam moléculas complexas nestas condições: com efeito, o formaldeído H_2CO é a molécula mais complexa detectada no contexto referido.

A situação é totalmente diferente nas nuvens moleculares, mais densas, em que a radiação ultravioleta não consegue penetrar. A química iónica é neste caso muito diferente da que descrevemos precedentemente. Em primeiro lugar o material de base é o H_2 em vez do H . A sua ionização pelas partículas cósmicas produz H_2^+ que reage rapidamente para dar origem a H_3^+ mais estável:

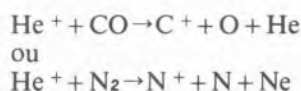


Em seguida o ião H_3^+ vai ser o ponto de partida para uma vasta série de reacções, por exemplo:



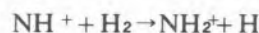
A detecção de HCO^+ e de N_2H^+ constitui um dos grandes sucessos da química interestelar; infelizmente a detecção de H_3^+ não foi ainda possível, sendo aliás esta detecção muito difícil *a priori*.

O hélio também é ionizado pelas partículas cósmicas. Dado que o He não pode formar moléculas, He^+ é sobretudo um agente destruidor. Temos por exemplo:

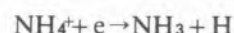


Mas estes processos permitem fabricar iões que podem iniciar novas séries de reacções: o ião C^+ pode for-

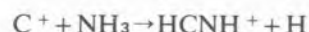
mar novamente CO reagindo sobre OH; N^+ é o ponto de partida de toda a química do azoto:



e assim por diante para formar NH_3^+ e NH_4^+ , o qual dá amónia por recombinação dissociativa:



Quanto ao ião C^+ , ele pode reagir com NH_3 conduzindo a reacções interessantes:

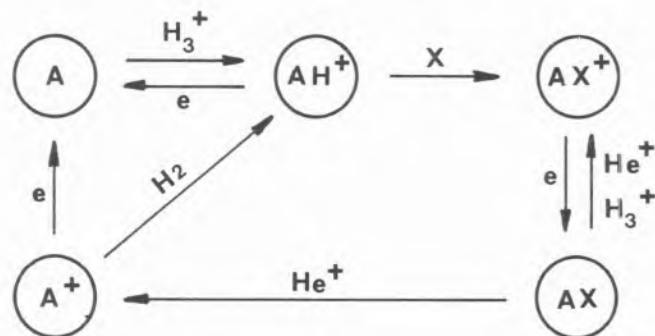


e em seguida $HCNH^+ + e \rightarrow HCN + H$

ou $HNC + H$

sendo as duas últimas moléculas observadas com abundância.

Não é possível aprofundar mais as coisas no contexto deste artigo. Podemos reter que as reacções espécie neutra-espécie neutra possíveis são raras, excepto nas ondas de choque. A única destas reacções que parece ter importância fora das ondas de choque é: $CH_3 + O \rightarrow H_2CO + H$, que está na origem do formaldeído. Quanto às reacções iónicas, elas correspondem basicamente ao esquema geral seguinte (em que A é um átomo ou eventualmente uma molécula):



A partir destes princípios, e conhecendo aproximadamente as velocidades de reacção (muitas não estão experimentalmente determinadas e são raras as que estão estudadas às baixas temperaturas que nos interessam), foi possível construir modelos numéricos para prever as abundâncias das moléculas interestelares quer em equilíbrio, quer em função do tempo; estes modelos conduzem a previsões em acordo razoável com as observações. No entanto ainda não estão suficientemente elaborados para poderem analisar as moléculas mais complexas como as longas cadeias carbonadas de C_4H ou dos cianopoli-íons $HC_{2n+1}N$, cujos mecanismos de formação ainda não estão perfeitamente esclarecidos. Para explicar a formação dos cianopoli-íons é talvez necessário recorrer às reacções de associação radiativa directa. Uma tal reacção ($AB^+ + CD \rightarrow ABCD^+ + h\nu$) só pode desempenhar um papel efectivo se a reacção $AB^+ + H_2 \rightarrow ABH^+ + H$, necessariamente mais rápida, for endotérmica. Para além disso é necessário que ela própria seja suficientemente rápida, isto é que o complexo excitado intermediário se deexcite radiativamente suficientemente depressa. A medi-

da experimental das velocidades destas reacções é muito difícil: a única até agora estudada é a reacção $\text{CH}_3^+ + \text{HCN}$, que se verifica ser muito rápida. Será este dado generalizável? A questão é polémica.

A química à superfície dos grãos

Os sucessos da química interestelar em fase gasosa, assim como as incertezas acerca da natureza, forma e dimensões dos grãos interestelares, conduziram a um certo menosprezo das possibilidades de formação de moléculas à superfície dos grãos. Esta atitude não é justificável e é provável que os grãos desempenhem um papel importante na química interestelar. Este papel importante é uma certeza no que diz respeito à formação do hidrogénio molecular, dado que a reacção $\text{H} + \text{H}$ é impossível na ausência de um terceiro corpo que forneça a energia necessária, não se produzindo pois em fase gasosa às baixas densidades do meio interestelar. O hidrogénio molecular forma-se pois à superfície dos grãos. Os átomos de hidrogénio que colidem com os grãos colam-se a eles com uma probabilidade praticamente unitária, deslocam-se à sua superfície e aí formam moléculas de H_2 que se evaporam posteriormente: as previsões quantitativas deste mecanismo estão em acordo satisfatório com a observação. É importante notar que não se trata de catálise: a quimisorção não é necessária, bastando para o efeito a adsorção física; a natureza e a forma dos grãos não desempenham um papel tão importante como se poderia pensar. Pelo contrário a carga eléctrica dos grãos é importante.

Os estudos sobre a química interestelar nos grãos sofreram recentemente um novo impulso, mas não se encontram ainda muito avançados. Um facto encorajante é que a espectroscopia no infravermelho das nuvens interestelares densas mostre que os grãos que elas contêm devem estar cobertos por uma carapaça de moléculas (formadas *in loco* ou capturadas?) que dão origem a bandas de absorção características, se bem que nem sempre atribuíveis a uma dada molécula. Isto mostra em todo o caso que átomos que não de hidrogénio, e também moléculas, se podem colar sobre os grãos.

Ainda não é fácil fazer previsões quantitativas. O que é certo é que o átomo de hidrogénio se desloca mais facilmente à superfície dos grãos do que os outros átomos ou as moléculas, e participará por isso mais facilmente em reacções químicas: prevê-se ainda que as moléculas hidrogenadas se formarão mais facilmente que as outras. O dará H_2O , C dará CH_4 e N dará NH_3 , ao passo que CO (a molécula mais abundante depois de H_2) dará HCO depois de se ter fixado sobre um grão (mas não dará H_2CO devido a uma energia de activação elevada): tudo isto foi verificado em laboratório, por exemplo através de experiências em matriz de argon sólido. Reacções como $\text{O} + \text{O} \rightarrow \text{O}_2$, $\text{O} + \text{N} \rightarrow \text{NO}$, etc... são também possíveis mas necessariamente mais lentas.

O problema maior é o da ejeção das moléculas dos grãos onde se formaram e onde permanecem fisicamente adsorvidas. Este problema está ainda mal elucidado, mas experiências recentes mostram que se se submeterem os grãos a uma radiação ultravioleta e aquecerem simultaneamente a cerca de 27 K — condições que podem perfeitamente produzir-se não muito longe das estrelas quentes — se produz uma ejeção quase explosiva do seu manto molecular. Parece assim possível fabricar sobre os grãos uma parte importante e talvez maioritária do CH_2 ,

H_2O e NH_3 interestelares e dos seus subprodutos (nomeadamente OH que provém da fotodissociação de H_2O). Estas moléculas teriam sido sobretudo sintetizadas nas nuvens densas e teriam sido dispersas depois da dissipação destas, por exemplo depois da formação no seu seio de novas estrelas.

Nada se sabe sobre a possibilidade de formar moléculas mais complicadas sobre os grãos: é certo que foi possível produzir em laboratório moléculas orgânicas bastante pesadas por fotólise UV de depósitos de moléculas simples em superfícies frias, mas estas experiências requerem condições bastante complexas e bem definidas que não temos a certeza de se poderem produzir na natureza.

Uma última possibilidade para fabricar moléculas nos grãos (e não neste caso sobre os grãos) é submetê-los a um bombardeamento iónico. Foi assim que foi possível fabricar CO e CO_2 por implantação de iões C^+ na sílica ou em silicatos. As moléculas CO e CO_2 foram efectivamente observadas nos grãos lunares, que estão submetidos ao bombardeamento pelo vento solar, e um fenómeno semelhante poderia perfeitamente produzir-se nos envelopes circunstelares ou imediatamente após a formação das estrelas, período em que elas emitem um vento intenso. É no entanto demasiado cedo para tirarmos conclusões quantitativas e o problema da ejeção das moléculas assim formadas no gás interestelar fica assim formulado.

Química interestelar e química prebiótica

Muito se disse neste domínio, mas tudo ou quase tudo releva da especulação, e a maior parte é sem fundamento. Três questões (pelo menos) podem ser formuladas a este respeito: 1) poderão as moléculas prebióticas existir no meio interestelar? 2) poderão as moléculas interestelares ter sido trazidas para a Terra primitiva e terem aí servido eventualmente de elementos para a construção das primeiras moléculas vivas? 3) qual pode ser a contribuição da química interestelar para a compreensão da química prebiótica?. Eis alguns elementos da resposta a estas questões:

1) É certo que no meio interestelar se podem formar moléculas bastante complexas. Mas será que daquelas já observadas haverá algumas que poderemos realmente qualificar de prebióticas? Provavelmente que não. A detecção de um aminoácido constituiria uma resposta positiva, mas já vimos que esta detecção é uma operação extremamente difícil que ainda não foi conseguida.

2) Não é fácil imaginar como é que as moléculas interestelares terão podido sobreviver às condições tão extremas que devem ter acompanhado a formação do sistema solar, e nomeadamente ao vento violento que deve ter sido emitido pelo protosol. É no entanto possível que tenha havido moléculas que foram capturadas e preservadas nos cometas que residem ordinariamente nos confins do sistema solar. Resta então saber como é que a matéria cometária poderá ter caído na Terra sem que que as moléculas nela contida tenham sido destruídas...

3) As relações entre a química interestelar e a química prebiótica são longe de ser evidentes. As condições fi-

sicas que reinam no meio interestelar e nos envelopes circunstelares e na atmosfera primitiva da Terra são extremamente diferentes. Experiências como as de Urey e de Miller, em que se produzem moléculas orgânicas complexas pela acção de descargas eléctricas ou de radiação ultravioleta sobre determinadas misturas gasosas, têm pou-

co a ver com o que se pode passar no meio interestelar. No entanto, o estudo das moléculas interestelares mostra que se podem sintetizar moléculas complexas em meios aparentemente muito pouco favoráveis, e isto constitui um encorajamento para os investigadores que se interessam pelo problema da origem da vida.

QUÍMICA ORGÂNICA INTERESTELAR

Eric Herbst (*)

I — O MEIO INTERESTELAR

Existe no plano da nossa galáxia, e no de outras idênticas à nossa, uma quantidade importante de matéria sob a forma de gás e de poeira. Esta matéria interestelar não é homogênea encontrando-se concentrada em regiões a que os astrónomos chamam «nuvens interestelares». Estas nuvens têm uma extensão de alguns anos-luz e são bastante frias; as estimativas da temperatura variam entre 10 e 50 K. A matéria é predominantemente gasosa, sendo cerca de 1% constituída por partículas de 0,1 micrómetro designadas por «poeira» ou «grãos». As densidades do gás variam de valores baixos da ordem de 100 cm^{-3} nas nuvens ditas «difusas» até valores elevados de talvez 10^6 cm^{-3} nas nuvens ditas «densas». Tal como a maioria do Universo, o gás das nuvens interestelares é constituído essencialmente por hidrogénio em qualquer das suas formas. Nas nuvens difusas o hidrogénio encontra-se essencialmente na forma atómica enquanto nas nuvens densas ele se encontra predominantemente na forma molecular. As abundâncias dos outros elementos na fase gasosa são inferiores às abundâncias cósmicas («depleted cosmic abundance ratios»), e são apresentadas na Tabela 1. As nuvens densas interestelares podem ser subdivididas em dois tipos: as nuvens negras, que são normalmente frias (10 K), e as nuvens moleculares gigantes que são locais de formação activa de estrelas, em que se observam estrelas recentemente formadas, e são um pouco mais quentes (50 K).

As moléculas interestelares são observadas tanto nas nuvens difusas como nas densas, se bem que as moléculas mais complexas se observam apenas nas regiões mais densas. Nas nuvens mais difusas a radiação das estrelas exteriores penetra facilmente nas nuvens e fotodissocia as espécies moleculares tornando impossível a complexificação molecular. Nas nuvens mais densas existe poeira suficiente para isolar as regiões interiores da nuvem da radiação estelar letal. A grande quantidade de poeira impede as observações na região visível do espectro mas não nas regiões rádio e das micro-ondas em que os comprimentos de onda são muito superiores ao tamanho das partículas de poeira não sendo essas radiações atenuadas por estas partículas.

Mais de cinquenta moléculas interestelares no estado gasoso foram até hoje descobertas no espaço

TABELA 1
Abundâncias dos elementos (a)

Elemento	Abundância
H	1.00
He	1.40×10^{-1}
O	1.76×10^{-4}
C	7.30×10^{-5}
N	2.14×10^{-5}
S	8.00×10^{-6}
Si	8.00×10^{-7}
Fe	3.00×10^{-7}
Na	2.00×10^{-7}
Mg	7.00×10^{-7}

(a) Os elementos mais pesados que o hélio apresentam abundâncias inferiores às abundâncias estelares normais. As abundâncias aqui apresentadas resultam do estudo da fase gasosa das nuvens difusas e a diminuição das abundâncias pensa-se ser devida à presença de poeira.

interestelar a partir sobretudo da radioastronomia. Estas moléculas estão inventariadas na Tabela 2, e a sua complexidade varia desde as moléculas diatómicas como H_2 e CO até ao nitrilo de onze átomos HC_9N , incluindo um vasta série de espécies orgânicas de complexidade intermédia. A observação destas moléculas faz-se normalmente através das suas riscas espectrais de emissão na região das radiofrequências e das micro-ondas. O espectro nestes domínios de frequência resulta das transições entre níveis quânticos rotacionais das moléculas em fase gasosa. Os espectroscopistas de micro-ondas estudaram no laboratório o espectro rotacional de um grande número de espécies estáveis em fase gasosa, o que permite aos radioastrónomos a identificação rápida de muitas das riscas de emissão observadas. Foram no entanto observadas no espectro interestelar algumas riscas não identificadas, designadas por riscas «U» (*). Estas são devidas a espécies instáveis — iões ou radicais moleculares — ou a espécies estáveis

(*) Department of Physics, Duke University, Durham, NC 27706, U.S.A.

(*) «U» de unidentified (Nota do tradutor).