



Leitartikel zum CHIMIA-Jubiläum 1996

Leading Articles on the Occasion of the CHIMIA Anniversary 1996

Aus Anlass des 50. Jahrgangs der CHIMIA werden zusätzlich zu den üblichen Aktivitäten über das ganze Jubiläumsjahr 1996 Leitartikel von ausgewählten Persönlichkeiten zu wissenschaftlichen, industriellen, technologischen, ökologischen, sozialen, politischen und wirtschaftlichen Aspekten erscheinen, die im Zusammenhang mit Chemie stehen.

Das Editorial Board der CHIMIA dankt allen Autorinnen und Autoren, die hierzu spontan ihre Bereitschaft bekundet haben. Mögen die verschiedenen Beiträge auch zu Diskussionen anregen, unser 'Leserforum' steht zur Verfügung.

During 1996, on the occasion of the 50th volume, in addition to the usual activities, CHIMIA will publish leading articles by selected personalities on scientific, industrial, technological, ecological, social, political, and economical aspects connected with chemistry.

The Editorial Board of CHIMIA is grateful to all authors for their spontaneous readiness to write a contribution. Active participation of our readers is welcomed and the discussion forum is open for 'letters to the editor'.

Chimia 50 (1996) 119–121
© Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft
ISSN 0009–4293

Après le big bang, la chimie

Prof. Dr. **Bernard Hauck***

Président de l'Académie Suisse des Sciences Naturelles (ASSN/SANW)

1. Introduction

L'invitation à écrire un article pour CHIMIA, dans le cadre du 50^{ème} anniversaire de cette revue, m'a paru séduisante pour deux raisons.

Tout d'abord, elle permet au président de l'ASSN de dire, de redire même, l'importance de la communication entre scientifiques d'une part et entre scientifiques et le grand public d'autre part. CHIMIA a, notamment par son souci de qualité et par son esprit d'ouverture, de nombreux atouts pour être un journal apprécié de ses lecteurs. Je forme tous mes vœux pour que

l'excellent travail accompli jusqu'à présent perdure au cours du prochain siècle!

Ensuite, elle permet à l'astrophysicien de se poser la question de savoir quels sont les progrès en astrophysique réalisés au cours de ces cinquante dernières années qui sont de nature à intéresser ses collègues chimistes. La réponse vient très rapidement: c'est la formation des éléments et la découverte des molécules interstellaires.

2. Formation des éléments chimiques

La formation des éléments, ou nucléosynthèse, s'est effectuée en deux étapes distinctes. Les éléments légers, au sens des astrophysiciens, soit hydrogène, deutérium, hélium et lithium sont formés tout au début de l'histoire de notre Univers et durant une période très courte. Nous parlons alors de nucléosynthèse primordiale. La découverte en 1965 du rayonnement cosmique à 3 K a incité de nombreux astrophysiciens et physiciens à se pencher sur la nucléosynthèse primordiale. L'abon-

dance des éléments légers est un test cosmologique important. Selon les valeurs trouvées, notre Univers est fermé ou ouvert.

La formation des éléments 'lourds' doit attendre la formation des premières étoiles! C'est en effet en leur sein, soit tranquillement au cours de la vie de l'étoile, soit brutalement au moment de l'explosion finale, que l'ensemble des éléments lourds se forme. Si les premiers travaux sur la nucléosynthèse stellaire datent de la fin des années trente, c'est surtout après 1957 qu'ils prirent de l'importance.

2.1. Nucléosynthèse primordiale

Examinons maintenant plus en détail la nucléosynthèse primordiale. Pour cela, faisons un très long retour dans le passé, environ 15 milliards d'années, jusqu'au moment improprement appelé 'Big Bang' (il n'y a pas eu d'explosion!). Dans les tout premiers instants de l'Univers, la température atteint des valeurs de l'ordre de 10^{32} K. Très rapidement, elle décroît. Lorsqu'elle est de l'ordre de 10^{10} K, l'Univers est âgé d'environ 1 s et il contient essentiellement des protons et des neutrons. La température continue à baisser et vers 10^9 K, les protons et les neutrons commencent à fusionner. Les premiers éléments apparaissent. La première réaction de fusion conduit à la formation de deutérium. Ensuite, d'autres réactions nucléaires conduisent à la synthèse de ^3He , ^4He et ^7Li . Cette période de formation des premiers éléments ou nucléosynthèse primordiale dure jusqu'à ce que la température atteigne 10^8 K. L'Univers est alors âgé de 100 s environ. Aux températures plus faibles,

*Correspondance: Prof. Dr. B. Hauck
Président de l'Académie Suisse des Sciences Naturelles (ASSN/SANW)
Bärenplatz 2
CH-3011 Bern

Institut d'Astronomie
de l'Université de Lausanne
CH-1290 Chavannes-des Bois

les taux de réactions nucléaires deviennent négligeables.

Après la formation des premiers éléments, l'Univers sera pendant près de 500 000 ans dominé par le rayonnement. Puis, alors que la température n'est plus que de 3000 K, les photons cessent d'interagir avec la matière et c'est au tour de cette dernière de dominer. Les premières galaxies, ainsi que les premières étoiles, peuvent se former. L'Univers est constitué alors essentiellement d'hydrogène et d'un peu d'hélium (environ 24%).

Jusqu'à présent, seuls des processus physiques ont intervenus. Le gaz de cet Univers primordial est composé essentiellement d'atomes neutres d'hydrogène. Quelle chimie peut être faite avec un tel gaz? Les atomes d'hydrogène sont dans leur état fondamental et une association directe de deux atomes pour former une molécule H₂ est ainsi impossible. La toute première chimie dans l'Univers naissant est plus complexe. La route qui conduit à la formation de molécules H₂ implique un électron en tant que catalyseur:



Une seconde route utilisant un proton comme catalyseur conduit également, mais dans des proportions moindres, à la formation de molécules H₂. Les molécules H₂ peuvent être détruites par le rayonnement UV et par des collisions avec des atomes d'hydrogène. Aussi estime-t-on la présence de une à deux molécules H₂ pour un million d'atomes d'hydrogène. Cette proportion changera considérablement par la suite!

2.2. Nucléosynthèse stellaire

Intéressons-nous maintenant à la nucléosynthèse stellaire et cherchons tout d'abord à savoir pourquoi les étoiles rayonnent.

Question importante restée longtemps sans bonne réponse. Au milieu du siècle passé, *Helmholtz* avait proposé une solution paraissant séduisante: le Soleil se contracte sous l'effet de sa gravitation et libère ainsi une partie de son énergie potentielle. Un rapide calcul montre alors que le Soleil est âgé au plus de 20 millions d'années, âge qui apparaît en désaccord avec celui trouvé au début de notre siècle pour l'âge de la Terre. En 1939, *Hans Bethe* présenta alors l'idée que l'énergie émise par les étoiles est produite par des réactions nucléaires, plus précisément par la fusion de l'hydrogène, le produit de la fusion étant l'hélium. Étape importante qui fut suivie en 1957 par la publication d'un article de *Burbidge, Burbidge, Fowler*

et *Hoyle* suggérant la production des éléments chimiques, du moins jusqu'au fer, par des réactions de fusion dans les noyaux stellaires. Les éléments plus lourds que le fer sont produits par des réactions d'absorption de neutrons.

La suite des réactions nucléaires est intimement liée à l'évolution des étoiles. Ce sont les étoiles plus massives qui pourront synthétiser le fer. Ce sont aussi les plus massives qui évolueront le plus vite et qui termineront leur vie par une belle explosion devenant en un court instant une supernova.

La nucléosynthèse explosive a fait l'objet de nombreux travaux durant les vingt-cinq dernières années. Lors de l'explosion, l'augmentation de la température et de la densité due au passage de l'onde de choc provoque diverses réactions nucléosynthétiques: fusion, absorption de neutrons, photodésintégration.

Les étoiles massives jouent donc un rôle majeur dans l'histoire chimique de l'Univers. Les éléments rejetés dans l'espace lors de l'explosion viennent enrichir le milieu interstellaire. Les étoiles qui naîtront par la suite d'un tel milieu auront donc une composition chimique différente de celle de la toute première génération.

3. Les molécules interstellaires

Avec la découverte de molécules dans le milieu interstellaire est née ce que certains appellent 'astrochimie'. C'est entre 1937 et 1941 que les toutes premières molécules interstellaires (CH, CN et CH⁺) furent découvertes grâce aux raies fines d'absorption observées dans le spectre d'étoiles brillantes. Mais il faut attendre les années 50 pour que *Townes* et *Schklovskii*, indépendamment l'un de l'autre, réalisent l'intérêt qu'il y a à utiliser la radioastronomie, technique naissante à cette époque, pour découvrir des molécules. Ainsi, en 1963, l'hydroxyle était découvert. Cette découverte sera suivie en 1968 de celle de l'ammoniac et de la vapeur d'eau, puis en 1969, de celle du formaldéhyde. Les années 70 verront la découverte de 43 molécules. A la découverte de molécules interstellaires est venue s'ajouter celle de molécules circumstellaires et, aujourd'hui, près d'une centaine de molécules au total sont connues.

La table ci-après, adaptée de *Lequeux* et *Roueff* (1991), donne la liste des molécules connues en 1990. Celles précédées d'un astérisque ont été observées seulement dans une enveloppe circumstellaire. Les éléments les plus abondants, après l'hydrogène, sont le carbone, l'oxygène et

l'azote, ce qui n'a rien d'étonnant vu les processus nucléosynthétiques dans les étoiles.

Examinons, avant de parler de la formation des molécules, les propriétés du milieu interstellaire. Nous trouvons tout d'abord un milieu interstellaire diffus, contenant principalement de l'hydrogène atomique de faible densité (de 1 à 100 particules par cm³) et de température plutôt basse (quelques dizaines de °K). Nous rencontrons ensuite, immergés dans ce milieu, des nuages denses (plus de 1000 particules par cm³), partiellement ou totalement opaques au rayonnement. Ces nuages sont appelés nuages sombres ou nuages moléculaires, car ils sont constitués essentiellement de molécules.

Des ondes de chocs se propagent dans les milieux que nous venons de rencontrer et créent localement des zones de hautes température et densité. Le milieu interstellaire ne contient pas seulement du gaz, mais également des petits grains solides, ou poussières, dont la densité est de l'ordre de 10⁻¹³ grains par cm³, soit 1000 grains par km³, et la température de 10 à 20 K.

Ces grains sont formés dans les atmosphères d'étoiles évoluées, dans les enveloppes des protoétoiles et également par condensation dans le gaz interstellaire. Leur rayon est de l'ordre de 0.1 μm ou moins.

Il ne semble pas possible de rendre compte des observations avec un seul type de grains et le modèle qui prévaut à l'heure actuelle est celui d'un noyau de silicates entouré d'un manteau dont la composition peut différer. Certains grains auraient, par ex., un manteau de glace.

Les processus responsables de la formation des molécules interstellaires sont au nombre de trois:

- association directe, ou radiative, d'atomes: une molécule est formée lors de la collision entre deux atomes. Ce mécanisme peut expliquer la formation des premières molécules observées, par exemple $C + H \rightarrow CH + h\nu$
- réactions catalytiques à la surface des grains: ce type de réactions favorise la formation de radicaux contenant de l'hydrogène, e.g. $OH + H \rightarrow H_2O$, $HCO + OH \rightarrow CO + H_2O$
- réactions chimiques entre molécules déjà formées, e.g. $CH^+ + H_2 \rightarrow CH_2^+ + H$, $CH^+ + H \rightarrow C^+ + H_2$

4. Conclusion

Si les premiers instants de l'Univers sont régis par des processus purement

Table. Molécules interstellaires et circumstellaires

H ₂	HD	H ₂ D ⁺ ?		
CH	CH ⁺	C ₂	C ₂ H	C ₃ H
C ₄ H	C ₅ H	C ₆ H	CH ₃ C ₂ H	CH ₃ C ₄ H
*CH ₄	C ₂ H ₂	*C ₂ H ₄	c-C ₃ H ₂	c-C ₃ H
*C ₃	*C ₅			
OH	CO	H ₂ O	H ₃ O ⁺	CH ₃ OH
HCO	HCO ⁺	HOC ⁺ ?	HOCO ⁺	H ₂ CO
CH ₃ CO	CH ₃ OCHO	CH ₃ OCH ₃	CHOOCH ₃	CH ₃ CH ₂ OH
HCOOH	C ₃ O	(CH ₃) ₂ CO	CH ₂ CO	HC ₃ HO
C ₅ O				
NH ₃	N ₂ H ⁺	CN	HCN	HNC
HCNH ⁺	CH ₂ CN	NH ₂ CH	CH ₂ NH	CH ₃ NH ₂
CH ₃ CH ₂ CN	CH ₂ CHCN	HC ₃ N	HC ₅ N	HC ₇ N
HC ₉ N	HC ₁₁ N	CH ₃ C ₃ N	C ₃ N	CH ₃ NC
CH ₃ CN				
NO	HNO	HNCO	NH ₂ CHO	
SO		SO ₂	SN	H ₂ S
CS	OCS	HCS ⁺	H ₂ CS	HNCS
c-H ₃ SH	C ₂ S	C ₃ S	SiO	SiS
*SiH ₄	HCl	PN	NaOH?	*NaCl
*AlCl	*KCl	*AlF	*CP	*HSiC ₂ ?
*SiC	c-SiC ₂	*SiC ₄		

physiques, c'est toutefois très rapidement après le 'Big Bang' qu'apparaissent les processus chimiques. L'importance de cette deuxième phase apparaît lorsque l'on considère le rôle joué par les molécules dans la formation des galaxies d'abord, puis des étoiles. La constitution de molécules dans des atmosphères stellaires influence l'évolution de ces dernières. La présence de grains, résultat de processus

chimiques, permettra, dans une étape ultérieure, la formation de planètes, du moins autour du Soleil et de l'étoile 51 Pegasi! L'existence de molécules interstellaires a certainement, par un processus à préciser, favorisé la formation de molécules prébiotiques.

Le demi-siècle qui s'achève a révélé aux astronomes l'importance de la chimie. A la physique, avec laquelle ils sont en

interaction permanente depuis plusieurs siècles, ils ont ajouté la chimie. Ainsi, ils peuvent mieux comprendre le monde qui nous entoure.

Pour en savoir plus: J. Lequeux, E. Roueff, *Phys. Rep.* (Review section of *Phys. Lett.*) **1991**, 200, 241.

Reçu le 24 janvier 1996