

Les faisceaux moléculaires croisés pour étudier l'homochiralité des biomolécules

Olivier Durif¹, Astrid Bergeat², Sébastien Morales², Barbara Nozière¹

¹ Institut Royal de Technologie, Département de Chimie, Stockholm, Suède

² Université de Bordeaux, Institut des Sciences Moléculaires, Talence, France

Introduction

Les faisceaux moléculaires sont une approche expérimentale incontournable pour l'étude dynamique des processus chimiques élémentaires. Le principe est simple mais puissant : deux faisceaux de différentes espèces moléculaires sont générés séparément, accélérés et dirigés de manière à se croiser. L'angle formé par les deux faisceaux est ajustable car cet angle détermine l'énergie de collision. La collision engendre un transfert d'énergie ou une réaction chimique dont le processus est sondé par des techniques spectroscopiques.

Cette technique est particulièrement bien adaptée pour étudier en laboratoire les réactions en phase gazeuse des nuages moléculaires interstellaires car cette approche permet une maîtrise fine des vitesses de collision avec des énergies de quelques meV (quelques Kelvin) qui correspondent à ces milieux.

Le domaine des jets et faisceaux moléculaires compte déjà onze prix Nobel mais beaucoup reste encore à faire. Dans ce projet de recherche, nous proposons d'appliquer cette technique en utilisant l'appareillage existant du groupe COMEX de l'ISM à Bordeaux[1], pour obtenir des informations sur la dynamique réactionnelle de molécules chirales.

La grande question scientifique

Comprendre pourquoi les acides aminés des protéines sont tous de configuration lévogyre et les sucres de l'ADN dextrogyre reste un mystère majeur pour expliquer l'origine de la vie sur Terre et au-delà[5]. Cette grande question nécessite un effort scientifique interdisciplinaire.

Sous l'aspect philosophique la question est tout aussi passionnante tant les implications sont profondes de savoir si ce résultat est le fruit d'un hasard par le fait d'une particularité locale ou bien alors si des mécanismes fondamentaux régissent un tel processus universel dans tout le cosmos.

Les études suggèrent que cette énigme pourrait avoir sa réponse dans l'espace interstellaire, soutenues par la découverte d'excès d'acides aminés dans des météorites primitives. En utilisant des techniques expérimentales qui permettent d'aborder ces questions, telles que les faisceaux moléculaires croisés et les écoulements supersoniques uniformes, nous proposons de chercher certains phénomènes inhérents à la nature même de la matière, comme une violation de la parité dans certaines interactions fondamentales en fonction des énantiomères à de très faibles énergies de collision. Cette recherche pourrait fournir des indices précieux sur l'origine de la vie et éclairer la question de savoir si la vie extraterrestre pourrait être basée sur des molécules similaires à celles sur Terre.

Le spectromètre

Le spectromètre adéquat reste encore à construire en se basant sur les technologies existantes. La difficulté est de pouvoir discriminer les énantiomères. La technique privilégiée est le couplage d'un imageur de vecteurs vitesse avec un spectromètre de masse, à la manière de la technique PE-PICO ou bien en utilisant deux multiplicateurs d'électrons à la manière de certains instruments PECD/PEELD[3]. Ce même type de spectromètre est adapté pour sonder les processus moléculaires dans les faisceaux moléculaires croisés et les écoulements supersoniques uniformes.

Le dispositif expérimental à l'ISM à Talence



La cinétique par écoulement dense

Une approche cinétique par écoulement supersonique uniforme en tuyère de Laval complète l'approche dynamique par faisceaux moléculaires croisés. Le principe est tout aussi simple: un écoulement de haute densité (10^{16} cm^{-3} à 10^{17} cm^{-3}) est produit en pompant un réservoir à travers une tuyère. La détente provoque une chute de densité et un refroidissement permettant d'atteindre les températures pertinentes pour l'astrochimie (1 K à 100 K). Si la détente est uniforme en densité et en température, des mesures cinétiques sont alors possibles (généralement sur une gamme de 10 μs à 500 μs).

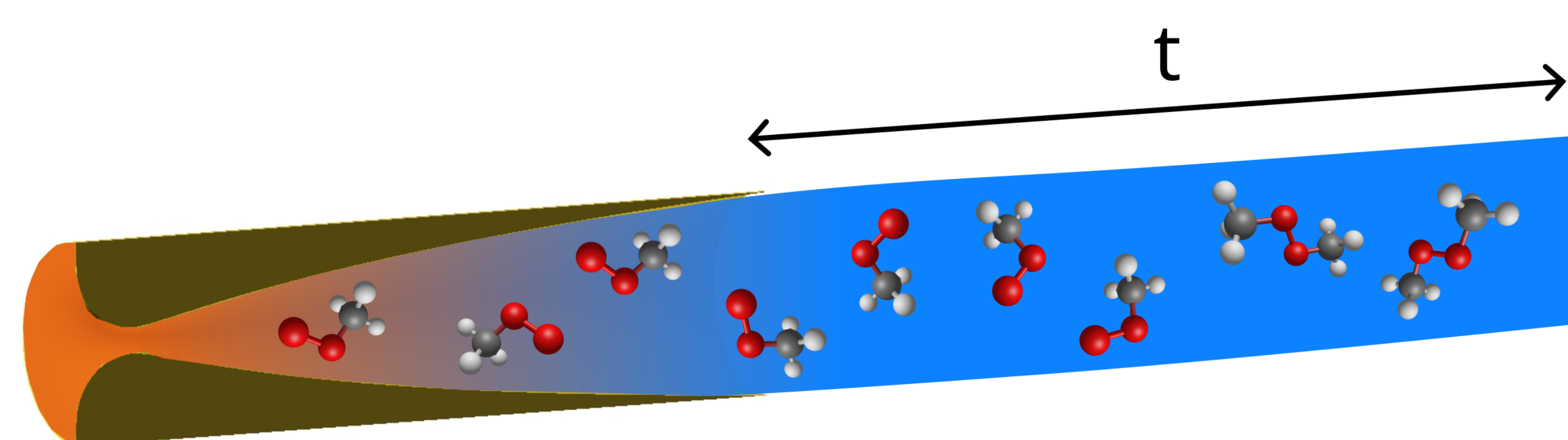


FIGURE 1 – Illustration du principe de mesure cinétique en tuyère de Laval.

Pour ces usages, un outil facile à utiliser pour calculer le profil géométrique de tuyères de Laval a été mis au point[2]. Cette application est disponible publiquement afin de construire les tuyères adéquates pour générer un écoulement uniforme dans diverses conditions.

<https://gitlab.com/odurif/cresu/>

Cette technique d'étude cinétique en écoulement supersonique uniforme est activement employée par le groupe COMEX à l'ISM.

Une étude expérimentale de la réaction de l'ion méthanium avec la glycine est par exemple parfaitement envisageable dans ce type de réacteur. Cette réaction a été suggérée comme pouvant mener dans l'espace à la formation de l'alanine[4], le plus simple des acides aminés chiraux.

References

- [1] Astrid BERGEAT, Alexandre FAURE, Laurent WIESENFIELD, Chloé MIOSSEC, Sébastien B. MORALES et Christian NAULIN. "Near-Threshold and Resonance Effects in Rotationally Inelastic Scattering of D2O with Normal-H2". In : *Molecules* 27.21 (21 jan. 2022), p. 7535. DOI : 10.3390/molecules27217535.
- [2] O. DURIF. "Design of de Laval nozzles for gas-phase molecular studies in uniform supersonic flow". In : *Physics of Fluids* 34.1 (jan. 2022). DOI : 10.1063/5.0060362.
- [3] Jason GREENWOOD et Ian D. WILLIAMS. "Investigation of Photoelectron Elliptical Dichroism for Chiral Analysis". In : *Physical Chemistry Chemical Physics* 25.24 (2023), p. 16238-16245. DOI : 10.1039/D3CP01058A.
- [4] Pilar REDONDO, Carmen BARRIENTOS et Antonio LARGO. "Complex Organic Molecules Formation in Space Through Gas Phase Reactions: A Theoretical Approach". In : *The Astrophysical Journal* 836.2 (fév. 2017). DOI : 10.3847/1538-4357/aa5ca4.
- [5] Quentin SALLEMBIEN, Laurent BOUTEILLER, Jeanne CRASSOUS et Matthieu RAYNAL. "Possible Chemical and Physical Scenarios towards Biological Homochirality". In : *Chemical Society Reviews* 51.9 (10 mai 2022). DOI : 10.1039/d1cs01179k.