



人马座B2化学性质的观测研究

李娟^{1,2*}, 郑思琪^{1,3}, 王均智⁴

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030

2. 射电天文与技术全国重点实验室, 北京 100101

3. 中国科学院大学, 北京 100049

4. 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西相对论天体物理重点实验室, 南宁 530004

* 联系人, E-mail: lijuan@shao.ac.cn

2025-04-13 收稿, 2025-08-17 修回, 2025-08-21 接受, 2025-08-22 网络版发表

国家重点研发计划(2022YFA1603101)和射电天文与技术全国重点实验室资助

摘要 人马座B2是位于银心的巨分子云复合体, 与银盘上的分子云相比, 这里有大量的分子气体、丰富的激波、宇宙线、更强的湍流、更高的气体动力学温度等, 化学组成非常丰富. 本文介绍了我们在人马座B2的化学性质研究方面的工作, 主要包括: (1) 用上海天马65米望远镜在其中探测到了延展分布的乙醇醛和乙二醇分子, 为银心存在延展分布的复杂有机分子提供了直接证据; (2) 利用ALMA存档数据, 首次在星际空间发现类肽键分子丙酰胺和氨基甲酰胺存在的证据; (3) 利用西班牙IRAM 30米望远镜对人马座B2中的类肽键分子进行了大尺度成图, 探讨了类肽键分子的形成机制. 最后, 回顾了近些年国内外对人马座B2化学性质的研究进展, 并对未来研究进行了展望.

关键词 银河系中心, 分子云, 人马座B2, 射电光谱, 复杂有机分子

迄今为止, 人类已在星际介质中探测到330多种分子^[1], 其中有160多种分子是由6个及以上原子组成的, 这些分子被称为复杂有机分子^[2]. 复杂有机分子又分为两种类型, 分别是不含或者含有少量氢原子的不饱和和复杂有机分子如碳基、长碳链分子, 以及富含氢原子的饱和复杂有机分子如二甲醚(CH_3OCH_3)等. 饱和且含有氮或者氧原子的复杂有机分子与地球上的有机分子类似, 可能与地球上的生命起源息息相关, 解析这类复杂有机分子的形成路径与演化机制, 是天体化学研究的核心课题之一.

在距我们8 kpc的银河系中心有大量的尘埃和气体, 它们是银河系中心恒星形成的主要物质来源. 这些尘埃和气体主要分布在银河系中心的盘面上, 形成了一个半径约150 pc, 厚度数十pc的环状结构, 被称为中央分子带(central molecular zone, CMZ)^[3]. 观测表明中央分子带的物理环境与银盘分子云有非常明显的差异, 比如更

高的气体运动学温度(气体运动学温度 $>50\text{ K}$)^[4,5]、更高的密度(典型值 10^4 cm^{-3} , 比银盘高出2个数量级)、丰富的激波、更强的宇宙射线^[6,7]、更强的磁场和湍动^[8,9]等. 在这样复杂的物理环境下, 尘埃表面形成的一些复杂分子释放为气相, 由于更多的自由基被释放为气相, 气态反应也会生成一定数量的复杂有机分子, 从而被射电望远镜捕捉到.

位于中央分子带的巨分子云人马座B2 (Sagittarius B2, Sgr B2)是一个非常活跃的大质量恒星形成区, 它是由致密热分子云核(分子云坍缩后形成的致密区域, 因引力势能转化热能及原恒星辐射加热, 温度升高至100 K左右, 以下简称为热核)、电离氢区和冷的分子气体包层构成的^[10~12]. 与旋臂上的分子云相比, 这里的物理环境更为复杂, 化学组成也更为丰富. 其中恒星形成活动最剧烈的地方被称为Sgr B2(N)和Sgr B2(M), 是多年来最受关注的区域. 由于银心分子云较

引用格式: 李娟, 郑思琪, 王均智. 人马座B2化学性质的观测研究. 科学通报

Li J, Zheng S, Wang J. Research progress in chemical studies of Sagittarius B2 (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/CSB-2025-0505](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0505)

高的柱密度(氢分子柱密度 $\sim 10^{24} \text{ cm}^{-2}$)^[13], 复杂有机分子的发射线很强, 因此容易被射电望远镜俘获. 大部分复杂有机分子, 如乙醇醛(CH_2OHCHO)、乙二醇($\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$)、乙酰胺($\text{C}_2\text{H}_5\text{CONH}_2$)、尿素(NH_2CONH_2)、首个星际手性分子——环氧丙烷($\text{CH}_3\text{CHCH}_2\text{O}$)等, 都是在Sgr B2中被首次探测到的, 有一些分子仅能在Sgr B2中探测到^[14–18]. 因此, Sgr B2为我们提供了研究星际介质化学组成, 以及星系中心物理与化学过程的绝佳实验室.

1 我们团组对Sgr B2化学性质的观测研究

1.1 Sgr B2延展分布的乙醇醛和乙二醇分子

乙醇醛是与糖分子有关的最简单的分子, 这一分子与核糖核酸(RNA)的重要组成成分——核酸糖的形成有关, 是非常重要的前生命分子. 2000年, 美国的射电天文学家Hollis等人^[14]利用NRAO 12米毫米波望远镜, 在Sgr B2(N)方向, 探测到了来自乙醇醛分子(CH_2OHCHO)的转动跃迁. Hollis等人期待乙醇醛与它的同分异构体甲酸甲酯(CH_3OCHO)有类似的空间分布, 也就是都来自热核. 他们用射电干涉仪BIMA (Berkeley-Illinois-Maryland Association)望远镜对Sgr B2(N)方向进行了高分辨率(12角秒, 对应银心 $\sim 0.5 \text{ pc}$)的观测. 令他们惊讶的是, 与以往观测的复杂有机分子不同, 观测数据显示, 乙醇醛并非来自致密热核, 而是来自比较延展的区域, 尺度似乎大于1角分. 这个分子的空间分布究竟如何呢?

为了回答这个问题, 2016年, 我们用上海天马65米望远镜, 在Ku波段(12~18 GHz), 对Sgr B2巨分子云复合体的复杂有机分子乙醇醛和乙二醇开展了成图观测. 乙二醇分子是多元醇的一种, 常用作汽车防冻剂. 由于复杂有机分子的发射线非常弱, 我们并没有采用传统的飞行模式(On-The-Flying, OTF)进行成图观测, 而是将成图区域分成若干网格, 一个点一个点地观测. 65米望远镜在13 GHz的观测波束为1.5角分, 我们采用的采样间隔为1角分^[18]. 目标谱线是 CH_2OHCHO $1_{1,0}-1_{0,1}$ (13476.995 MHz, 上能级温度 $E_u = 1.2 \text{ K}$)和 $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ $2_{0,2}(\nu=0)-1_{0,1}(\nu=1)$ (13380.638 MHz, $E_u = 1.5 \text{ K}$). 这两条跃迁均被美国绿岸100米望远镜(Green Bank Telescope, GBT)对Sgr B2(N)方向的观测所证认^[20], 由于两条跃迁均已经被证认, 每个分子仅观测一条跃迁来得到其空间分布. 对于位于北半球的65米望远镜, 每天

最多可对Sgr B2观测6小时(俯仰角 $15^\circ\sim 30^\circ$), 我们开展了40多次, 总共将近200小时的观测(噪声 $0.004\sim 0.008 \text{ K}$, 速度分辨率 2 km s^{-1}). 基于天马望远镜的观测数据, 我们发现这两个分子在Sgr B2巨分子云复合体中的分布非常延展, 角大小达15角分, 折合线尺度达100光年(图1), 表明在银河系中心存在着极其丰富的饱和的含氧复杂有机分子. 我们发现, 这两个分子不仅仅集中在具有恒星形成活动的热核周围, 在没有明显恒星形成活动的冷暗区域(激发温度 $\sim 12 \text{ K}$, 密度 $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$)^[21]也具有广泛的分布. 从冷暗区域到恒星形成区域, 两个分子的丰度有下降的趋势, 从 10^{-9} 降到 10^{-10} .

由于复杂有机分子的丰度低、谱线强度低、对观测灵敏度要求高, 以往对中央分子带的复杂有机分子观测仅是针对单点进行搜寻, 天马望远镜首次成功对Sgr B2巨分子云复合体中的乙醇醛和乙二醇分子进行了高灵敏度的大尺度成图观测. 该观测结果表明, 这两种分子可能是低温下(中央分子带尘埃温度 $\sim 20 \text{ K}$)^[22], 尘埃表面上一氧化碳分子的氢化反应形成的. 银河系中心极为复杂的物理条件, 如大尺度的激波、丰富的宇宙线等, 使得这些分子由尘埃表面释放出来, 变成气相分子. 当然也无法排除气态反应的可能性, 未来还需要更多的理论、实验数据, 以及更多的观测数据, 来更好地研究银心复杂有机分子的形成机制. 这些观测结果向我们提出一个问题: 这些高度饱和且含氮或者氧原子, 与地球有机分子相似的复杂有机分子是否在星际空间广泛存在? 如果是的话, 这些分子将会被转移到行星上, 为生命起源提供丰富的材料. 由于射电望远镜主要探测分子气体的转动跃迁, 无法观测固态尘埃成分的振动跃迁, 红外望远镜如詹姆斯韦伯太空望远镜(James Webb Space Telescope, JWST), 通过对尘埃成分的更高灵敏度观测, 可能有助于解答这些问题.

此后, 我们利用美国ARO 12米、西班牙IRAM 30米望远镜对Sgr B2中的一系列复杂有机分子进行了成图观测, 发现大部分复杂有机分子都有延展的分布^[23,24]. 这些研究工作发表后, 国际天体化学领域的多个团队对其进行了关注与引用. 2020年, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics (ARA&A)*刊载的综述“天体化学前沿进展”评述了该成果^[25]. 2025年出版的*Handbook of Astrochemistry*将其列为银河系中心延展分布的复杂有机分子的证据.

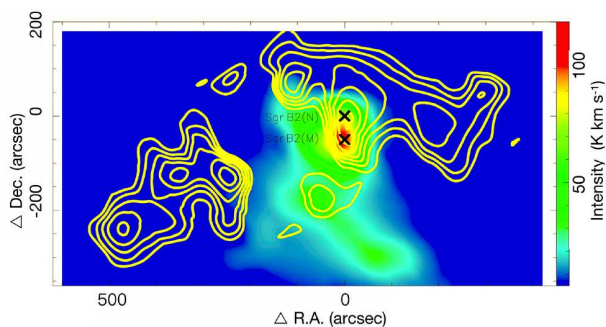


图1 天马65米望远镜在Sgr B2观测得到的乙醇醛分子(等高线)和射电复合线(彩图)的积分流量图。“×”标示了Sgr B2(N)和(M)的位置。数据来自文献[19]

Figure 1 Integrated intensity map of glycolaldehyde in contours and radio combination line in color scale. The data was observed with Shanghai Tianma 65 m Radio Telescope. Crosses show locations of Sgr B2(N) and (M). Data are from Ref. [19]

1.2 星际类肽键分子的搜寻

蛋白质与DNA、RNA是地球生命的三要素,蛋白质由氨基酸($\text{NH}_2\text{CH}(\text{R})\text{COOH}$, $\text{R}=\text{H}$, CH_3 等)连接而成,两个氨基酸之间的羧基和氨基发生脱水缩合,形成一个肽键结构 $-\text{NHCO}-$ 。肽键是蛋白质中普遍存在的特殊结构,也是蛋白质的特征结构,因此类肽键分子的观测对于星际蛋白质形成的研究具有重要科学意义。

基于IRAM 30米望远镜的观测数据(空间分辨率30角秒,速度分辨率 0.64 km s^{-1} ,灵敏度 $4\sim 8 \text{ mK}$),我们发现甲酰胺和乙酰胺在Sgr B2具有非常广泛的分布和较高的丰度,那么,能否在Sgr B2形成更大的类肽键分子——丙酰胺($\text{C}_2\text{H}_5\text{CONH}_2$)? Sgr B2(N)是一个年轻的大质量恒星形成区,它的物理环境非常复杂,既有多热核和电离氢区,又有冷的分子包层,视线方向上还有一些弥散的分子云。多个成分的光谱叠加在一起,导致这个源的光谱异常复杂,谱线数量众多,谱线之间的混淆特别严重。分子越大,丰度越低,发射线也越弱,越容易淹没在谱线森林里。因此,丙酰胺这类大分子的探测难度非常大。乌克兰国家科学院的Vadim Ilyushin教授介绍,曾经有两组天文学家试图在星际空间搜寻这一分子,均以失败告终。我们参考了马克斯·普朗克射电天文学研究所Arnald Belloche博士在Sgr B2(N1)中找尿素分子的方法,由于尘埃连续谱的中心位置处光学深度最大,是光厚的,谱线发射会受到显著的自吸收影响,使得谱线发射减弱,于是他们选取了连续谱中心以南1角秒的位置Sgr B2(N1S)提取谱线^[16]。利用ALMA望远镜高空间分辨率和灵敏度的存档数据(PI: Arnald

Belloche, 空间分辨率 $0.25\sim 0.93$ 角秒,速度分辨率 $1.3\sim 1.7 \text{ km s}^{-1}$,灵敏度 $0.19\sim 0.95 \text{ K}$),我们首先在Sgr B2(N)找到相对干净的丙酰胺的跃迁线($5_{5,1}-4_{4,1} \text{ E, A}$, $5_{5,0}-4_{4,0} \text{ E, A}$, 静止频率分别是 92.141928 , 92.142666 , 92.142895 , 92.143080 GHz , 由于距离很近,四条跃迁是混在一起、无法分辨的)。通过将丙酰胺与热核分子的积分流量图比较(V_{LSR} 积分范围 $62\sim 66 \text{ km s}^{-1}$,其峰值 $V_{\text{LSR}}=64 \text{ km s}^{-1}$),发现丙酰胺分子相对增丰的位置在连续谱中心以东1.5角秒处,我们称这一位置为Sgr B2(N1E),并从这一位置提取谱线。去除连续谱后,我们对3毫米波段($84.1\sim 114.4 \text{ GHz}$)丙酰胺分子的~150条跃迁进行了搜寻,发现了6条干净的跃迁线。所谓干净的跃迁线,指的是线翼没有与其他分子互相叠加,没有其他可能的干扰谱线。该工作首次在星际空间发现丙酰胺分子存在的证据,丙酰胺分子的发射来源于人马座B2的热核Sgr B2(N1),表明丙酰胺分子可以在恒星形成过程中形成并稳定存在^[26]。

在此之后,我们又在Sgr B2(N)的同一个位置,对另一个类肽键分子——氰基甲酰胺(NCCONH_2)进行了搜寻。氰基甲酰胺是甲酰胺的氰基衍生物,对核酸前体的合成可能有重要作用。利用搜寻丙酰胺分子时使用的同一个ALMA存档数据,我们在Sgr B2(N)找到了10条干净的跃迁($84.1\sim 114.4 \text{ GHz}$)。氰基甲酰胺的丰度是甲酰胺的1%,它的形成很可能与甲酰胺有关^[27]。这些观测结果表明,星际空间有可能形成多肽等更复杂的类肽键分子,为地球上的生命起源提供原料。目前在星际空间共探测到约300多个分子(<http://https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>),由12个原子组成的丙酰胺是其中最大的类肽键分子。

1.3 Sgr B2中类肽键分子的观测与形成机制研究

甲酰胺(HCONH_2)和乙酰胺(CH_3CONH_2)是目前在星际空间中探测到的最简单的两种类肽键分子。通过对这两种分子同时进行成图观测,有助于推断它们的形成机制。2019年5月,我们使用IRAM 30米望远镜在3毫米波段对Sgr B2进行了成图观测。与前文介绍的65米望远镜的观测一样,这里也没有用OTF模式,而是将成图区域分成网格,一个点一个点地观测。观测波束30角秒,采样间隔30角秒,观测区域尺寸约为7角分。观测数据覆盖频率范围 $82.3\sim 90.1 \text{ GHz}$,覆盖了甲酰胺的六条跃迁和乙酰胺的五条跃迁。我们发现,随着甲酰胺不同跃迁的上能级能量的变化,甲酰胺同样速度范围的积

分强度在Sgr B2中的分布有明显的变化,这意味着这种分子在Sgr B2中不同位置的激发温度是不一样的.为了得到不同分子之间的丰度比,首先需要得到激发温度的分布情况.我们利用转动图的方法,借助甲酰胺可以分辨开的五条跃迁,计算得到了甲酰胺分子的激发温度和柱密度的空间分布.转动图方法是估算气体动力学温度和柱密度的经典方法,该方法基于局部热动平衡(local thermo-dynamic equilibrium, LTE)和光薄假设,认为不同转动能级上的粒子数分布服从玻尔兹曼分布.以上能级温度 E_u 为横坐标, $\ln(N_u/g_u)$ 为纵坐标构建转动图,其中 N_u 是上能级柱密度, g_u 为简并度,通过线性拟合得到转动温度和柱密度^[28].我们假设乙酰胺和甲酰胺的激发温度相同,从而计算得到了乙酰胺柱密度的空间分布.为了探究这两种分子的形成机制是否相同,我们将与这两种分子相关的分子HNCO也加入了讨论.我们发现,在Sgr B2的分子包层中,乙酰胺和甲酰胺的相对丰度恒定,而甲酰胺与HNCO的相对丰度变化范围较大.最后,我们用一个含时演化的模型来解释观测到的分子的丰度.该模型同时考虑分子的尘埃表面反应和气态反应机制,采用宏观蒙特卡罗方法开展详细的参数空间研究,使用包含冷相和升温相的演化物理模型.基准模型除局部宇宙射线电离速率(ζ_{CR})外均采用观测物理参数^[29].在模型中加入了短期的X射线暴的影响,在尘埃温度为 54.5 ± 1.5 K时,模型得到的分子的相对丰度与观测结果吻合,在这个条件下,主导的反应机制是分子从尘埃解吸到气相中的反应.然而,这个模型得到的尘埃温度高于观测得到的尘埃温度.观测尘埃温度是在黑体辐射的假设下,通过拟合尘埃连续谱的能谱分布得到的, Sgr B2延展区域的尘埃温度大约20 K^[22].在将来,仍然需要更新的化学模型来解释类肽键分子在Sgr B2包层中的形成机制^[21].

2 国内外对Sgr B2化学性质的观测研究

利用国内外的大型单天线或者望远镜干涉阵,国内外的研究团组对Sgr B2的化学性质开展了许多卓有成效的观测研究.一方面是利用单天线或者干涉阵进行大尺度的成图观测,如日本的Nobeyama 45米、澳大利亚Mopra 22米、ATCA、SMA等^[30-32].这些项目揭示中央分子带广泛分布的激波示踪分子,如SiO、I型CH₃OH脉泽、HNCO等.通过对离子分子如HCO⁺、HOC⁺、CO⁺,以及自由基HCO的成图观测,发现电离氢区附近CO⁺显著增强,表明紫外光化学占主导地位;

在其余地区,则受到慢速激波($2 \sim 4$ km s⁻¹)^[21]和银心增强的宇宙线电离率(10^{-17} s⁻¹)的共同作用^[33,34].

另一方面,谱线巡测能够无偏地揭示分子云的成分,是研究分子云物理和化学特性的重要手段.国际上的很多大型望远镜都对Sgr B2开展过高灵敏度的谱线巡测,如美国的GBT 100米、西班牙的IRAM 30米、Yebes 40米、ALMA等.作为NRAO的key project之一,Hollis等人曾经用GBT望远镜开展了PRIMOS项目,在300 MHz~50 GHz的范围内对Sgr B2(N)进行了谱线巡测.通过对这一数据的分析,已探测到数个新的复杂有机分子,包括E-氰基甲亚胺E-HNCHCN^[35]、CH₃CHNH^[36]、碳二亚胺HNCNH^[37]、手性分子环氧丙烷C₃H₆O^[18]等.这些分子都是与生命起源息息相关的分子. Belloche等人^[38]利用IRAM 30米望远镜对Sgr B2(N)和(M)进行了谱线巡测,首次探测到了氨基乙腈NH₂CH₂CN.在此基础上,他们利用ALMA望远镜对人马座B2(N)进行了高灵敏度的谱线巡测,探测到了星际第一个支链分子异丙基氰i-C₃H₇CN^[39]、尿素NH₂CONH₂^[17]、丙醇n-C₃H₇OH等^[40].

由于Sgr B2(N)是活跃的恒星形成区,如前所述,它的物理环境非常复杂,各种物理成分的光谱叠加在一起,导致光谱异常复杂,谱线数量众多,谱线之间的混淆特别严重.近几年,人马座B2中的G+0.693-0.027被认为是新的星际复杂有机分子搜寻的最好的目标^[41].这一区域没有恒星形成活动,在单天线成图中,它表现为HNCO发射最亮的位置^[42],I型甲醇脉泽的发射也很强,它丰富的化学可能来源于云云碰撞导致的激波^[41].西班牙的研究团组利用Yebes 40 m、IRAM 30 m、GBT 100 m等望远镜对G+0.693-0.027进行了灵敏度极高的谱线巡测^[43],探测到了一系列新的星际分子,包括前生命分子乙醇胺NH₂CH₂CH₂OH、2-羟乙酰胺NH₂COCH₂OH、丙醇n-C₃H₇OH^[44,45],以及丰富的含磷、硫、镁等元素的分子,如PO⁺、HNSO、HOCS⁺、NaS、MgS等^[46-49].

3 总结与展望

目前的深度积分巡测仅针对Sgr B2(N)、(M),及同样处于Sgr B2分子云复合体,距Sgr B2(N)角距离约90角秒(线尺度 ~ 3.7 pc)的G+0.693-0.027方向^[12,17,43]. Requena-Torres等人^[21,50]对中央分子带典型分子云的CH₃OH、CS、C₂H₅OH等分子进行了搜寻,发现这些分子云普遍含有丰富的热核分子,反映了银心尘埃成

分的一致性。目前对中央分子带延展分子云化学普遍接受的观点是“没有热核的热核化学”^[51], 然而由于观测资料有限, 对于中央分子带中Sgr B2外的分子云的化学性质还缺乏全面系统的了解。ALMA望远镜正在进行ACES(ALMA CMZ Exploration Survey; PI: Steve Longmore)项目, 将利用1000小时左右的观测时间, 对整个中央分子带进行成图, 系统研究银心云团的复杂化学性质, 结果非常值得期待。

高灵敏度的单天线成图观测对于银心延展分布的复杂有机分子的研究来说具有不可或缺的作用。我们于2022和2024年用西班牙Yebes 40米望远镜对Sgr B2左侧富含复杂有机分子的分子云团G0.66-0.13进行了高灵敏度的成图和单点的谱线巡测, 发现这一分子云团的分子组成异常丰富, 且不同分子空间分布有明显的差异, 同时还探测到了很多未知谱线, 结果正在分析中。

尽管国内外研究人员在银心的化学性质问题上已

取得显著进步, 在此领域仍有许多问题有待解决, 如何正确地证认谱线、建立化学网络, 是未来研究的重要方向。这些工作需要天文观测、光谱测量、化学理论工作者的共同努力。由几个原子构成的分子, 其低能级跃迁通常在毫米波段, 而大的有机分子具有较高的极角动量, 低能级转动跃迁通常落在厘米波段。另一方面, 复杂有机分子的丰度通常比较低, 在毫米波段, 大量的来自小分子的谱线使得复杂有机分子谱线的证认变得极为困难, 可以说, 在毫米波段, 复杂有机分子的探测主要是受到谱线混淆的限制, 而不是噪声的限制。而厘米波段谱线密度比高频波段低得多, 更容易证认来自复杂有机分子的微弱的谱线。所以, 厘米波段观测在复杂有机分子的观测研究方面具有很大的优势。然而, 由于谱线相对较弱, 厘米波段的谱线观测对灵敏度的要求较高。期待ALMA band 1, 未来的ng-VLA、SKA望远镜, 能够帮助我们更好地研究银心这一独特环境下的分子云的化学性质。

参考文献

- McGuire B A. 2021 Census of interstellar, circumstellar, extragalactic, protoplanetary disk, and exoplanetary molecules. *Astrophys J Suppl Ser*, 2022, 259: 30
- Herbst E, van Dishoeck E F. Complex organic interstellar molecules. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2009, 47: 427–480
- Morris M, Serabyn E. The Galactic Center environment. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1996, 34: 645–701
- Mills E A C, Morris M R. Detection of widespread hot ammonia in the Galactic center. *Astrophys J*, 2013, 772: 105
- Ao Y, Henkel C, Menten K M, et al. The thermal state of molecular clouds in the Galactic center: evidence for non-photon-driven heating. *Astron Astrophys*, 2013, 550: A135
- Henshaw J D, Barnes A T, Battersby C, et al. Star formation in the central molecular zone of the Milky Way. In: Inutsuka S, Aikawa Y, Muto T, et al., eds. *Protostars and Planets VII*, ASP Conference Series. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2023, 534: 83
- Oka T, Geballe T R, Goto M, et al. The central 300 pc of the galaxy probed by infrared spectra of H_3^+ and CO. I. Predominance of warm and diffuse gas and high H_2 ionization rate. *Astrophys J*, 2019, 883: 54
- Kauffmann J, Pillai T, Zhang Q, et al. The Galactic Center Molecular Cloud Survey. *Astron Astrophys*, 2017, 603: A89
- Henshaw J D, Ginsburg A, Haworth T J, et al. ‘The Brick’ is not a brick: a comprehensive study of the structure and dynamics of the central molecular zone cloud G0.253+0.016. *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 485: 2457–2485
- Mehringer D M, Palmer P, Goss W M, et al. Radio continuum and radio recombination line observations of Sagittarius B2. *Astrophys J*, 1993, 412: 684
- Gaume R A, Claussen M J, de Pree C G, et al. The Sagittarius B2 star-forming region. I. Sensitive 1.3 centimeter continuum observations. *Astrophys J*, 1995, 449: 663
- Belloche A, Müller H S P, Menten K M, et al. Complex organic molecules in the interstellar medium: IRAM 30 m line survey of Sagittarius B2(N) and (M). *Astron Astrophys*, 2013, 559: A47
- Bally J, Aguirre J, Battersby C, et al. The Bolocam Galactic Plane Survey: $\lambda = 1.1$ and 0.35 mm dust continuum emission in the Galactic Center region. *Astrophys J*, 2010, 721: 137–163
- Hollis J M, Lovas F J, Jewell P R. Interstellar glycolaldehyde: the first sugar. *Astrophys J*, 2000, 540: L107–L110
- Hollis J M, Lovas F J, Jewell P R, et al. Interstellar antifreeze: ethylene glycol. *Astrophys J*, 2002, 571: L59–L62
- Hollis J M, Lovas F J, Remijan A J, et al. Detection of acetamide (CH_3CONH_2): the largest interstellar molecule with a peptide bond. *Astrophys J*, 2006, 643: L25–L28

- 17 Belloche A, Garrod R T, Müller H S P, et al. Re-exploring molecular complexity with ALMA (ReMoCA): interstellar detection of urea. *Astron Astrophys*, 2019, 628: A10
- 18 McGuire B A, Carroll P B, Loomis R A, et al. Discovery of the interstellar chiral molecule propylene oxide ($\text{CH}_3\text{CHCH}_2\text{O}$). *Science*, 2016, 352: 1449–1452
- 19 Li J, Shen Z, Wang J, et al. Widespread presence of glycolaldehyde and ethylene glycol around Sagittarius B2. *Astrophys J*, 2017, 849: 115
- 20 Hollis J M, Jewell P R, Lovas F J, et al. Green Bank Telescope observations of interstellar glycolaldehyde: low-temperature sugar. *Astrophys J*, 2004, 613: L45–L48
- 21 Requena-Torres M A, Martín-Pintado J, Rodríguez-Franco A, et al. Organic molecules in the Galactic Center. *Astron Astrophys*, 2006, 455: 971–985
- 22 Etzaluze M, Goicoechea J R, Cernicharo J, et al. *Herschel* observations of the Sagittarius B2 cores: hydrides, warm CO, and cold dust. *Astron Astrophys*, 2013, 556: A137
- 23 Li J, Wang J, Qiao H, et al. Mapping observations of complex organic molecules around Sagittarius B2 with the ARO 12 m telescope. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 492: 556–565
- 24 Zheng S, Li J, Wang J, et al. Mapping observations of peptide-like molecules around Sagittarius B2. *Astrophys J*, 2024, 961: 58
- 25 Jørgensen J K, Belloche A, Garrod R T. Astrochemistry during the formation of stars. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2020, 58: 727–778
- 26 Li J, Wang J, Lu X, et al. Propionamide ($\text{C}_2\text{H}_5\text{CONH}_2$): the largest peptide-like molecule in space. *Astrophys J*, 2021, 919: 4
- 27 Li J, Quan D, Wang J, et al. Tentative detection of cyanoformamide NCCONH_2 in space. *Publ Astron Soc Jpn*, 2024, 76: 54–64
- 28 Goldsmith P F, Langer W D. Population diagram analysis of molecular line emission. *Astrophys J*, 1999, 517: 209–225
- 29 Wang Y, Du F, Semenov D, et al. Chemical modeling of the complex organic molecules in the extended region around Sagittarius B2. *Astron Astrophys*, 2021, 648: A72
- 30 Jones P A, Burton M G, Cunningham M R, et al. Spectral imaging of the Central Molecular Zone in multiple 3-mm molecular lines. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 419: 2961–2986
- 31 Henshaw J D, Longmore S N, Kruijssen J M D, et al. Molecular gas kinematics within the central 250 pc of the Milky Way. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 457: 2675–2702
- 32 Callanan D, Longmore S N, Battersby C, et al. CMZoom III: spectral line data release. *Mon Not R Astron Soc*, 2023, 520: 4760–4778
- 33 Armijos-Abendaño J, Martín-Pintado J, López E, et al. On the effects of UV photons/X-rays on the chemistry of the Sgr B2 cloud. *Astrophys J*, 2020, 895: 57
- 34 Martín S, Requena-Torres M A, Martín-Pintado J, et al. Tracing shocks and photodissociation in the Galactic center region. *Astrophys J*, 2008, 678: 245–254
- 35 Zaleski D P, Seifert N A, Steber A L, et al. Detection of E-cyanomethanimine toward Sagittarius B2(N) in the Green Bank Telescope primos survey. *Astrophys J*, 2013, 765: L10
- 36 Loomis R A, Zaleski D P, Steber A L, et al. The detection of interstellar ethanimine (CH_3CHNH) from observations taken during the GBT primos survey. *Astrophys J*, 2013, 765: L9
- 37 McGuire B A, Loomis R A, Charness C M, et al. Interstellar carbodiimide (HNCNH): a new astronomical detection from the GBT PRIMOS survey via maser emission features. *Astrophys J*, 2012, 758: L33
- 38 Belloche A, Menten K M, Comito C, et al. Detection of amino acetonitrile in Sgr B2(N). *Astron Astrophys*, 2008, 482: 179–196
- 39 Belloche A, Garrod R T, Müller H S P, et al. Detection of a branched alkyl molecule in the interstellar medium: *iso*-propyl cyanide. *Science*, 2014, 345: 1584–1587
- 40 Belloche A, Garrod R T, Zingsheim O, et al. Interstellar detection and chemical modeling of *iso*-propanol and its normal isomer. *Astron Astrophys*, 2022, 662: A110
- 41 Zeng S, Zhang Q, Jiménez-Serra I, et al. Cloud–cloud collision as drivers of the chemical complexity in Galactic Centre molecular clouds. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 497: 4896–4909
- 42 Jones P A, Burton M G, Cunningham M R, et al. Spectral imaging of the central molecular zone in multiple 7-mm molecular lines. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 433: 221–234
- 43 Rivilla V M, Sanz-Novo M, Jiménez-Serra I, et al. First glycine isomer detected in the interstellar medium: glycolamide ($\text{NH}_2\text{C}(\text{O})\text{CH}_2\text{OH}$). *ApJL*, 2023, 953: L20
- 44 Sanz-Novo M, Rivilla V M, Jiménez-Serra I, et al. Discovery of the elusive carbonic acid (HOCOOH) in space. *Astrophys J*, 2023, 954: 3
- 45 Rivilla V M, Jiménez-Serra I, Martín-Pintado J, et al. Discovery in space of ethanolamine, the simplest phospholipid head group. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2021, 118: e2101314118
- 46 Rivilla V M, García De La Concepción J, Jiménez-Serra I, et al. Ionize hard: interstellar PO^+ detection. *Front Astron Space Sci*, 2022, 9: 829288
- 47 Sanz-Novo M, Rivilla V M, Müller H S P, et al. Discovery of thionylimide, HNSO , in space: the first N-, S-, and O-bearing interstellar molecule.

- [ApJL](#), 2024, 965: L26
- 48 Sanz-Novo M, Rivilla V M, Jiménez-Serra I, et al. Interstellar detection of O-protonated carbonyl sulfide, HOCS⁺. [Astrophys J](#), 2024, 965: 149
- 49 Rey-Montejo M, Jiménez-Serra I, Martín-Pintado J, et al. Discovery of MgS and NaS in the interstellar medium and tentative detection of CaO. [Astrophys J](#), 2024, 975: 174
- 50 Requena-Torres M A, Martín-Pintado J, Martín S, et al. The Galactic Center: the largest oxygen-bearing organic molecule repository. [Astrophys J](#), 2008, 672: 352–360
- 51 Menten K M, Wilson R W, Leurini S, et al. Molecules in G1.6–0.025—“HOT” chemistry in the absence of star formation at the periphery of the Galactic Center region. [Astrophys J](#), 2009, 692: 47–60

Summary for “人马座B2化学性质的观测研究”

Research progress in chemical studies of Sagittarius B2

Juan Li^{1,2*}, Siqi Zheng^{1,3} & Junzhi Wang⁴

¹ *Depart of Radio Science and Technology, Shanghai Observatory, Shanghai 200030, China*

² *State Key Laboratory of Radio Astronomy and Technology, Beijing 100101, China*

³ *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

⁴ *Guangxi Key Laboratory for Relativistic Astrophysics, School of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China*

* Corresponding author, E-mail: lijuan@shao.ac.cn

Sagittarius B2 is a giant molecular cloud complex located in the Galactic center. The physical conditions of the molecular gas in Sagittarius B2 are quite different from those found in molecular clouds in the Galactic disk. The gas densities are higher than those in the disk. Line widths due to turbulent motions are also large. Gas temperatures are also higher than those in the disk. Sagittarius B2 is the best hunting ground for complex organic molecules. Most complex organic molecules reported so far, such as glycolaldehyde, E-cyanomethanimin, carbodiimid, and so on, were found for the first time in space toward Sgr B2(N). We have carried out studies of complex organic molecules toward Sagittarius B2 since 2016. Firstly, we detected widespread CH_2OHCHO and $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ emission in Sagittarius B2 using the Shanghai Tianma 65 m Radio Telescope. Our observations show for the first time that the spatial distribution of these two important prebiotic molecules extends over 15 arcmin, corresponding to a linear size of approximately 36 pc. These two molecules are not just distributed in or near the hot cores. The abundance of these two molecules seems to decrease from the cold outer region to the central region associated with star formation activity. Secondly, we found evidence for the existence of two peptide-like molecules in space for the first time, including propionamide ($\text{C}_2\text{H}_5\text{CONH}_2$) and cyanoformamide (NCCONH_2). Our observing results indicate that propionamide emission comes from the warm, compact cores in Sagittarius B2, in which massive protostellars are forming. The column density of propionamide toward Sgr B2(N1E) is three-fifths of that of acetamide, and one-nineteenth of that of formamide. These detections suggest that large peptide-like molecules can form and survive during the star-forming process and may form more complex molecules in the interstellar medium (ISM). Thirdly, mapping observations of HCONH_2 and CH_3CONH_2 , two of the simplest peptide-like molecules, are performed toward the Sagittarius B2 complex with the IRAM 30 m telescope. The spatial distributions of the excitation temperature and column density of HCONH_2 in the molecular envelope of Sgr B2 are obtained by rotation diagrams. The results show that the excitation temperature ranges from 6 to 46 K in the molecular envelope of Sagittarius B2. The abundance ratio of $\text{CH}_3\text{CONH}_2/\text{HCONH}_2$ varies from 10% to 20%, while that of $\text{HCONH}_2/\text{HNCO}$ ranges from 1.5% to 10%. CH_3CONH_2 is enhanced with respect to HCONH_2 in the northwest region of Sgr B2. One transition of $\text{H}^{13}\text{CONH}_2$ is detected toward 12 positions of Sgr B2, from which a $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio of 28.7 is obtained. A time-dependent chemical model with a short-duration X-ray burst is used to explain the observed abundances of HCONH_2 and CH_3CONH_2 , with the best-fitting result at $T_{\text{dust}} = 53\text{--}56$ K. More chemical reactions are required to be included in the model since the modeled abundance is lower than the observed one at the observed T_{dust} . Lastly, the research advances on recent chemical studies of Sagittarius B2 are reviewed. In the future, observations with the ALMA band 1, ng-VLA, and SKA are expected to play key roles in this exciting field.

Galactic Center, molecular cloud, Sagittarius B2, radio spectrum, complex organic molecule

doi: [10.1360/CSB-2025-0505](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0505)