

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.02.01

银河系双星团及星团群研究进展

单星美¹, 刘桂梅^{2,3}, 钟 靖², 林 清¹

(1. 上海天文馆(上海科技馆分馆), 上海 201306; 2. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 疏散星团是研究恒星形成和演化理论的理想实验室, 然而星团的形成模式仍是一个基本但未解决的问题。为了深入探讨星团的形成与演化模式, 首先需要从观测上证认出具有物理联系的双星团或星团群系统。开展双星团及星团群性质的研究可以为深入理解恒星等级成团形成的模式提供重要线索; 此外, 双星团与星团群为研究同一片分子云中星团的形成与演化模式提供了绝佳的机会, 并有助于理解星团和母分子云在形态及运动学特性之间的联系。从双星团及星团群的样本甄选和形成机制等出发, 简单介绍银河系双星团及星团群的研究历史, 着重讨论了 Gaia 时代该领域的研究近况。

关 键 词: 疏散星团; 双星团; 银河系

中图分类号: P154.1

文献标识码: A

1 引 言

银河系中的疏散星团是受引力束缚的恒星系统, 通常包含数十到数千颗成员恒星, 但成员星间引力联系较弱, 结构比球状星团更加松散, 年龄范围在数百万年到数亿年之间。疏散星团的成员星几乎同时形成于同一个分子云中, 因此具有相近的年龄、距离、化学成分和红化值。银河系内的疏散星团明显集中在银道面附近, 尽管目前在银河系中已经发现了数千个疏散星团, 并且可能还存在更多, 但是人们对于疏散星团的形成与演化模式仍知之甚少。在巨分子云坍缩过程中, 恒星成群地聚集形成星团, 而星团是否也会有相伴(双星团)甚或成群(多星团或星团群)的形成倾向呢? 如果有, 这种倾向与何种物理因素有关? 以往对疏散星团的研究表明, 其中至少有一部分星团是成双或成群诞生的, 形成所谓的原初双星团或星团群。例如, Chupina 和 Vereshchagin^[1] 在 2000 年研究了猎户座星云附近的恒星形成区, 发现星团 Trapezium、NGC 1997 和 NGC 1980 以及邻近的其他星团自行一致, 可能构

收稿日期: 2023-06-01; 修回日期: 2023-06-20

资助项目: 中国科学院青年创新促进会; 上海科技馆科研专项基金

通讯作者: 钟靖, jzhong@shao.ac.cn

成相互关联的星团群。长期稳定的双星团或星团群是罕见的,观测到的双星团年龄很少超过 100 Ma,原初双星团或星团群会在短时间内瓦解进而分散到银盘^[2-6]。双星团及星团群的研究可以帮助我们更好地理解星团形成与演化过程,进而为恒星和星团形成模式、星团的动力学演化以及对银河系结构等方面的研究提供新的见解。

对于银河系中的双星团,Subramaniam 等人^[7]早在 1995 年就开始了双星团的搜索工作;根据 Lynga^[8]的星团表,他们发现大约 8% 的疏散星团可能是双星团,与大小麦哲伦星云中的双星团比例相似。de la Fuente Marcos 等人^[3]在 2009 年通过分析 WEBDA^[9]^①和 NCOVOCC^[10](the New Catalogue of Optically Visible Open Clusters and Candidates)星表寻找双星团候选样本,结果显示太阳附近至少有 12% 的疏散星团正在通过引力作用与其他星团发生合并。随着 Gaia 数据的发布,大量的天体测量数据(位置、视差和自行)和多波段的测光数据^[11]被释放,引起了天文学家对银河系疏散星团的广泛研究热潮。Zhong 等人^[12]在 2019 年利用 Gaia DR2 数据,研究了观测上被证认为属于共同形成的银河系双星团的经典代表 h 和 χ Persei (NGC869 和 NGC884)。此对星团距离我们约 2.2 ± 0.2 kpc,星团之间的距离为 21 pc,两个星团在颜色-星等图上形态相似,说明两者处于相同恒星演化阶段。同时还发现了一个扩展的晕结构及一个伸展的丝状子结构,这些扩展的结构表明,星团的形成模式及其历史可能比预期的更为复杂。高精度的天体测量数据有助于搜寻证认更多的新星团,同时高精度的运动学数据可以帮助我们更加深入研究双星团和多星团之间的运动学联系。基于 Gaia 数据,我们期待在银河系中找到更多的双星团/星团群,从而能够深入了解星团的形成和演化,加深对银盘结构与演化的理解。本文主要叙述了银河系双星团/星团群的研究进展,第 2 章论述了双星团样本的挑选及起源的讨论;第 3 章介绍了星团群的选择及有关讨论;第 4 章进行总结与展望。

2 双星团

2.1 样本挑选

在 Gaia 数据释放之前,针对银河系双星团及星团群的研究并不多,主要原因是缺乏高精度天体测量数据,难以进行深入探讨。de la Fuente Marcos 等人^[3]在 2009 年第一次系统地提出双星团可能的形成模式以及部分银河系双星团的候选星团表。根据河外星系双星团研究工作的启发,设定星团之间的距离小于 30 pc,分别利用 WEBDA 和 NCOVOCC 数据找到了 34 对和 27 对双星团。自从 de la Fuente Marcos 等人^[3, 5]给出银河系双星团样本后,开始不断有针对银河系双星团及星团群等开展的研究,这些研究往往是基于空间投影信息来搜寻双星团,但是实际上角距离小的星团不一定在物理上相关联。在大多数情况下,它们只是碰巧位于同一视线上,只能算是“光学星团对”。光学星团对并非物理双星团,尽管它们在视线方向上处于相同的位置,但它们不具有共同的运动学特性。从统计学上讲,在没有星团三维速度信息的情况下,将光学星团对错误地识别为真实双星团的概率很大。

^①<https://webda.physics.muni.cz>

Conrad 等人^[13]在 2017 年首次使用 6 维空间信息 (位置、自行、视差以及视向速度信息), 用于判断银河系疏散星团是否具有成对或成群的现象。Conrad 等人从具有 6D 数据的 432 个疏散星团中搜寻双星团, 图 1 展示了 432 个星团样本中星团之间的间距和速度差分布情况。由图 1a) 可知在 50 pc 和 100 pc 附近有两个明显的峰值, Conrad 等人认为这可能是形成双星团的典型特征值, 因此将双星团间的距离设定为小于 100 pc。根据疏散星团内部运动的典型速度弥散为 $3 \sim 5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[14, 15], UVW 数据的不确定度的峰值为 $3 \sim 4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大不超过 $20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 结合图 1b), Conrad 等人认为存在物理联系的双星团之间的速度差应该小于 $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。结果挑选出 14 对双星团, 4 组包括 3~5 个成员星团的星团群以及 1 组具有 15 个成员星团的星团群结构。虽然这项工作搜寻到不少的双星团及星团群, 但是使用的疏散星团成员星样本的完备与可靠性仍显不足, 并且仍有许多疏散星团的距离、运动学信息缺失, 导致难以准确地研究双星团的物理性质。

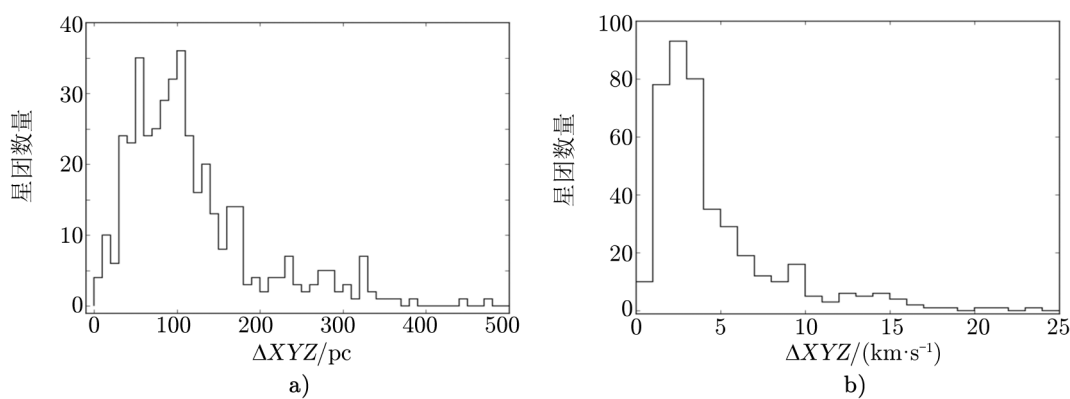


图 1 不同星团间的距离和速度差分布^[13]

Gaia 数据的相继释放为发现新的星团和双星团的验证提供了数据基础。基于其提供的海量高精度的天体测量和多波段的测光数据, 人们可以深入地研究银河系中的双星团整体性质及相关性, 尤其是运动学上的相关性, 从而更好地了解银河系恒星的形成模式。Gaia DR2^[11]数据提供约 13 亿颗恒星精确的天体测量数据 (位置、视差和自行) 和 3 个波段的高精度测光信息, 对银河系疏散星团的研究提供极其重要的数据基础。Gaia EDR3^[16]提供更多数据量, 发布了大约 15 亿颗恒星的天体测量数据, 同时提供了评估天体测量数据质量的指标, 如归一化单位权重误差 (RUWE), 可以过滤掉部分相对不精确的数据。Gaia DR3^[17]提供了涵盖天空中约 18 亿颗恒星的天体测量与多波段测光信息, 其精度与 Gaia EDR3 相当。对于 Gaia DR3, 典型的自行不确定度分别从 $G \approx 17 \text{ mag}$ 的 $0.07 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$ 到 $G = 20 \text{ mag}$ 的 $0.5 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$; 视差不确定度在 $G \approx 17 \text{ mag}$ 时为 0.07 mas , 在 $G = 20 \text{ mag}$ 时为 0.5 mas 。此外, Gaia DR3 使用视向速度光谱仪 (RVS) 测量得到视向速度的目标数量从 DR2 的约 700 万增加到 DR3 的 3300 余万^[18], 同时还提供了 4.7 亿个源的大气参数 (T_{eff} , $\lg g$ 和 $[\text{M}/\text{H}]$)^[19]。视向速度的中位数精度在 $G_{\text{RVS}} = 12 \text{ mag}$ 时为 $1.3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 在 $G_{\text{RVS}} = 14 \text{ mag}$ 时为 $6.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[18], 与 Gaia DR2 相比, DR3 发布的视向速度数量大大增

加,这对研究银河系中疏散星团的动力学演化有极大帮助。

2019 年, Soubiran 等人^[20]利用 Gaia DR2 数据得到 406 个高质量的疏散星团样本,并根据星团之间的距离与三维速度之差来认证双星团,其中距离分布的峰值为 150 pc,速度差的峰值为 $3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。速度差峰值较低是因为在样本中占主导地位的年轻疏散星团群具有非常相似的速度。双星团之间的距离应该与星团群内成员的间距相关并且应该明显小于成员之间的典型间距,所以在此工作中将星团间距离差异小于 100 pc,速度差异小于 $5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为双星团的选择标准,由此搜寻到 21 对双星团。Casado^[21]2021 年基于 Gaia EDR3 的数据,并利用当时最新整理的疏散星团表^[23-29],在银经 $240^\circ \sim 271^\circ$ 的天区范围内搜寻银河系中的双星团及星团群样本,通过限制质量指标 $RUWE < 1.4$,进一步选择出可靠的数据源^[22]。Casado 通过限制星团间距离及速度差,筛选得到了 11 对双星团和 13 组星团群。较之以前的研究,此项研究搜寻到的双星团样本得到较大增加,但由于分析样本的不完整性,仍不足以可靠地确定银河系中双星团/星团群的比例。Song 等人^[30]在 2022 年利用 Gaia DR2 数据,根据星团间距离筛选得到 14 对双星团。在最近的工作中, Qin 等人^[31]在 2023 年基于 Gaia DR3 数据,系统搜寻并研究距离太阳 500 pc 范围内的 324 个疏散星团,其中首次发现 101 个新的疏散星团;在这些太阳邻域星团样本中,按照星团间距离、速度差及年龄差可靠地确认出 15 对双星团及 3 组星团群,其中 12 对双星团的认证成果为首次报道。随着数据精度的提升,伴随着更大的疏散星团样本,筛选双星团的标准也略有不同。我们对于上述研究工作中筛选的条件及结果做了简单的整理汇总,结果见表 1。

表 1 双星团及星团群主要甄选结果

数据	选择标准/聚类方法	结果	参考文献
WEBDA	$\Delta_{\text{pos}} < 30 \text{ pc}$	34 对双星团	[3]
NCVOCC	$\Delta_{\text{pos}} < 30 \text{ pc}$	27 对双星团	[5]
COCD 和 RAVE	$\Delta_{\text{pos}} < 100 \text{ pc}$	14 对双星团	[13]
	$\Delta V < 10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	5 组星团群	
Gaia DR2	$\Delta_{\text{pos}} < 100 \text{ pc}$	21 对双星团	[20]
	$\Delta V < 5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$		
Gaia EDR3	$\Delta_{\text{pos}} < 100 \text{ pc}$	11 对双星团	[21]
	$\Delta V < 10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	13 组星团群	
Gaia DR2	$\Delta_{\text{pos}} < 50 \text{ pc}$	14 对双星团	[30]
Gaia DR3	$\Delta_{\text{pos}} < 20 \text{ pc}$	15 对双星团 3 组星团群	[31]
	$\Delta V < 5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$		
	$\Delta_{\text{age}} < 30 \text{ Ma}$		
Gaia DR2	DBSCAN	1 组星团群	[42]
Gaia DR2	DBSCAN	2 组星团群	[39]
Gaia DR2	FOF	1 组星团群 (蛇形结构)	[51]
Gaia DR2	FOF	1 组星团群	[52]
Gaia EDR3	StarGo	1 对双星团	[54]
		1 组星团群	
Gaia EDR3	StarGo	1 组星团群 (3 个子群)	[56]

2.2 起源讨论

恒星通常被认为在分子云中成团形成^[32, 33], 并且研究人员对于疏散星团的形成模式是否与恒星形成过程一样倾向于成群形成, 也表现出浓厚的兴趣。尽管疏散星团在早期主要被作为孤立的恒星系统进行研究, 然而在 2009 年, de la Fuente Marcos 等人^[3]首次系统地提出了双星团的可能形成模式, 并提供了一部分银河系中双星团的候选星团表。de la Fuente Marcos 等人通过距离限定选择了一些双星团进行研究。值得一提的是, 在这些选定的双星团中, 有 3 对几乎同时形成的双星团, 并且绝大多数星团的年龄都不超过 25 Ma。de la Fuente Marcos 等人^[5]在 2010 年结合 N 体模拟的结果, 提出了以下几种双星团/星团群的可能形成模式:

(1) 共同形成模式。在同一个分子云内形成的双星团, 具有十分相近的年龄、化学丰度和共同运动, 此即为原初形成的双星团。

(2) 相继形成模式。一个星团形成时的超新星爆发会导致邻近的分子云塌缩, 从而引发伴星团的形成^[34, 35]。这可能会导致在观测上两个星团有相对较小的年龄差异, 而超新星爆发造成的金属污染可能会使两个星团产生不同的金属丰度。

(3) 俘获形成模式。星团各自形成之后, 由于动力学相互作用俘获而形成。由潮汐捕获形成的双星团必须具有共同的空间速度, 但它们的年龄和化学成分可能会有很大差异, 即两个星团不存在共同起源的关系。

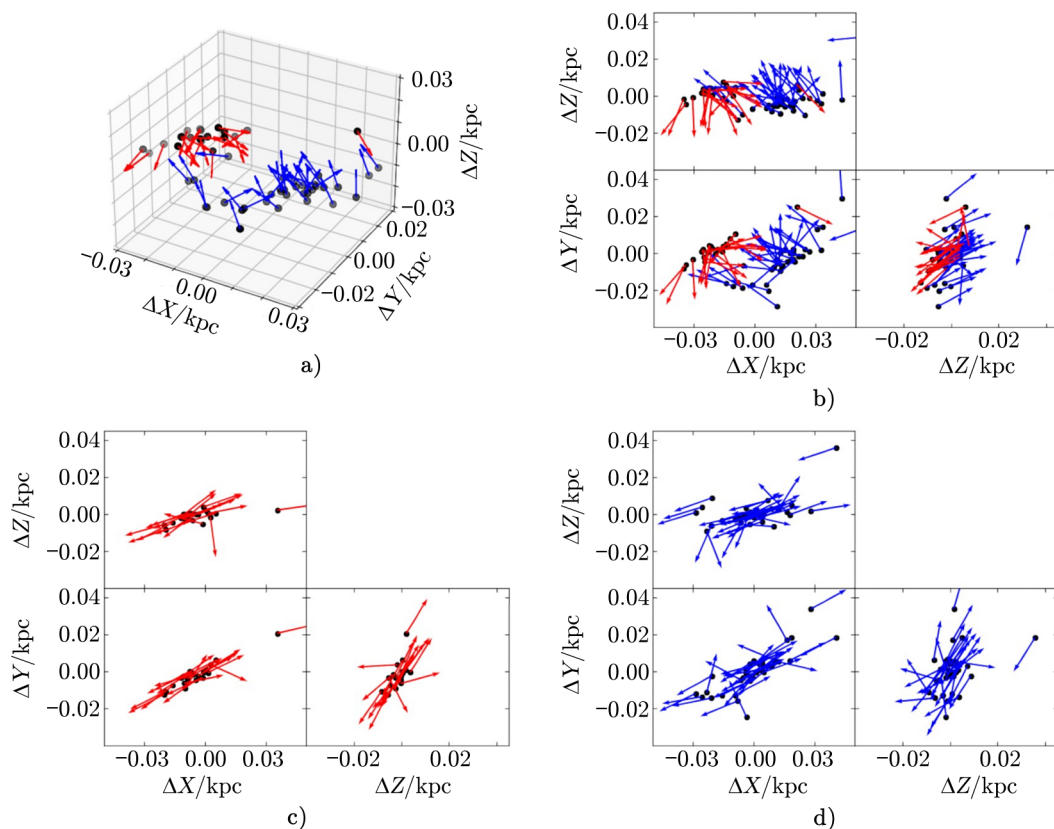
随后对已发现的双星团候选样本进行分析, 认为双星团更有可能是同时或相继形成的。de la Fuente Marcos 等人^[5]认为双星团是非常不稳定的系统。Arnold 等人^[36]在 2017 年的 N 体数值模拟结果也表明, 原初形成的双星团很难持久, 其动力学瓦解或并合时标约为数千万年; 此外, 分子云坍缩过程中双星团的形成与分子云原初结构中超位力化区域密切相关。

为了更好地判定星团成员并测定疏散星团的物理性质, Kovaleva 等人^[37]在 2020 年根据 Gaia DR2 数据认证了 Collinder 135 与 UBC 7 为一对双星团。UBC 7 距离太阳约 300 pc^[28, 38], 靠近著名的疏散星团 Collinder 135。在 Gaia 数据发布之前, 归属于 UBC 7 的恒星曾被认为是 Collinder 135 的一部分。对场星污染概率的估计结果显示, 周围存在的延展结构中分布有数十颗可能的成员星, 可能是两个星团共同扩展晕的一部分, 或者构成类似 Beccari 等人^[39]2020 年发现的丝状结构特征。由于很难定义这些周围的恒星是成员星还是场星, 所以只选择了属于两个星团的中心部分的成员星来确定星团的运动情况。根据颜色星等图, Kovaleva 等人认为 Collinder 135 与 UBC 7 团具有相同的年龄和红化, 年龄大概在 40 Ma 左右, 中心之间的距离为 24.2 ± 2.1 pc, 自行差为 0.6 ± 0.1 mas $\cdot$ a⁻¹ (相对切向速度为 1.42 ± 0.15 km $\cdot$ s⁻¹)。由于 Collinder 135 与 UBC 7 具有相近的位置、距离、年龄和相似的运动信息, 所以被认为是同一个分子云诞生的双星团。

许多研究结果都认为真正的原初双星团在颜色-星等图中应该具有相似/重合的分布以及共同的运动, 类似于 Collinder 135 与 UBC 7。还有一种情况是非原初双星团, 也就是说两个独立的疏散星团可能在运动轨道中偶然相遇, 其各自成员星的空间散布范围部分重合, 但两个星团年龄等性质各不相同。这种情况的典型例子是 Piatti 和 Malhan^[40]在 2020 年发现

的首个银河系内“碰撞”的双星团 IC 4665 和 Collinder 350。

IC 4665 和 Collinder 350 均位于银河系平面上方约 100 pc，距离太阳约 330 pc，年龄差大于 500 Ma，速度差约为 $5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。两个星团在空间上仅相隔约 36 pc，小于它们各自半径之和^[5]。图 2 显示了 IC 4665 和 Collinder 350 的 3D 视图，可见两个星团都具有细长的形状。恒星的空间速度矢量方向表明 IC 4665 与 Collinder 350 正相向而行，揭示出这两个星团可能正处于俘获并合的过程之中。其中速度（蓝色、红色箭头）是相对于这两个星团的质心计算的。图 2 展示了两个疏散星团的内部运动，可以看出星团两侧的恒星以相反的方向运动。尽管考虑的恒星数量很少，但这些趋势可以表明这些星团处于瓦解的过程中。



注：红色和蓝色箭头表示 IC 4665 和 Collinder 350 相对于两个星团质心的空间速度矢量，太阳的位置为 $\Delta X = 7.82 \text{ kpc}$, $\Delta Y = -0.17 \text{ kpc}$, $\Delta Z = -0.12 \text{ kpc}$ 。

图 2 a) IC 4665 和 Collinder 350 成员星(黑点)的三维视图；b) IC 4665 和 Collinder 350 相应的投影空间速度矢量；c) IC 4665 相对于其中心运动的投影空间速度矢量；d) Collinder 350 相对于其中心运动的投影空间速度矢量^[40]

为了探究两个疏散星团的物理起源，Piatti 等人^[41]计算了两个星团（位于银盘中）的轨道，利用星团的位置和速度信息将轨道回溯约 80 Ma，发现两个星团过去在空间上是分开的，但其各自的运动使它们在今天更加接近；并且可以推断出 Collinder 350 的移动速度

比 IC 4665 快 $5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此外轨道分析显示, 在 60 Ma 前 IC 4665 与 Collinder 350 的距离大于 500 pc, 可以注意到两个星团之间的相对距离比它们的物理半径之和要大得多。因此 IC 4665 和 Collinder 350 不是原初双星团系统, 而是两个独立诞生的疏散星团通过运动学演化相遇。因为大多数原初双星团起源于一个共同的分子云, 初始距离不会相差这么远。IC 4665 与 Collinder 350 之间的持续碰撞不同于星团形成理论提出的典型现象。因此, 这两个星团为探索星团形成和演化理论的各个方面提供了一个独特的实验室。

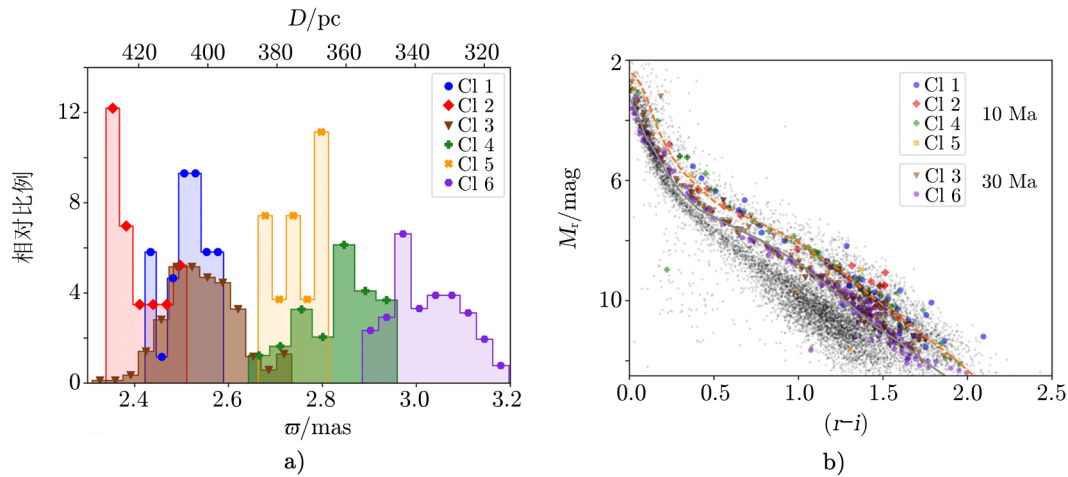
根据上述可知, 双星团中的星团年龄通常较为年轻, 并且没有发现由较老的星团组成的双星团, 这也说明了大多数双星团是在同一个分子云中同时形成的, 它们的年龄还不足以导致其动力学瓦解而成为银盘场星的一部分。de la Fuente Marcos 等人^[3]在 2009 年提出的双星团/星团群的三种形成模式, “同时形成”意味着双星团/星团群的成员星团极有可能是年轻的, 具有相似的化学成分, 因此在颜色-星等图上它们应该非常相似/重叠。对于“非同时形成”的双星团, 目前还无法确切地了解通过潮汐捕获或共振俘获形成双星团的可能性, 若通过潮汐捕获或共振俘获形成双星团应该具有共同的运动学信息, 但可能具有相当不同的年龄和化学成分, 并最终倾向于合并, 因此它们各自的颜色-星等图可能存在较大的差异。

3 星团群

星团群由 3 个及以上星团组成, 成员星团是连接单颗恒星与整个星团群的纽带。因此星团群是研究恒星与星团形成模式的最佳样本, 能够加深对巨分子云中恒星成团形成与演化的理解。星团群的搜寻标准与双星团类似, 两者都基于星团间的距离和一致的运动学信息进行证认。以往在搜寻双星团的过程中也发现了部分星团群, 如果星团 A 和星团 B 都可以与星团 C 形成双星团, 那么星团 A、B、C 被认为是一组星团群。随着数据精度的不断提高, 搜寻星团群的方法也在不断进步, 越来越多的研究基于机器学习算法在较大范围天区寻找星团群。大多数研究认为疏散星团群是在同一个巨分子云中形成的, 星团群的形态反映了形成疏散星团的原始分子云的丝状/湍流结构。

以往双星团搜寻工作报道过一些星团群的发现, 例如上文中提到的 Conrad 等人^[13]、Casado^[21]和 Qin 等人^[31]的工作, 以上研究均表明星团群可能起源于一个共同的分子云, 而不是通过捕获形成的。因为大多数成员星团都比较年轻, 且年龄差异小, 所以最可能的解释是这些星团在同一个分子云中同时形成, 它们的年龄还不足以使其瓦解进而分散在银盘中。Conrad 等人^[13]在 2017 年提出 1 个包含 15 个成员星团的较大星团群, 该星团群的年龄分布范围为 $4.7 \sim 61.7 \text{ Ma}$, 与连续恒星形成事件的时间尺度相当。最初形成的星团内的恒星产生反馈活动 (如超新星激波等), 可以诱发周围其余星团的形成。如果分子云团足够大, 这样的触发星团形成事件可以在几千万年里连续发生。这个结果与文献 [3] 提出的形成模式基本符合, 也与疏散星团以成群的模式形成的情况相吻合。在 Casado^[21]2021 年发表的样本中, 包括两组星团群的成员分别为 8 个和 9 个, 如此多的成员星团也表明大多数星团群是原初形成的, 因为通过引力俘获形成 2 个以上星团群的概率极低。

对于星团群的研究历程, Vela OB2 是必不可少的一部分。近年来关于 Vela OB2 天区内星团群的研究不断涌现, 不仅扩大了星团群的样本, 也为恒星成团形成尺度提供了新的视角。Beccari 等人^[42] 在 2018 年利用 Gaia DR2 数据和 DBSCAN 聚类方法在 Vela OB2 区域搜索星团群, 分别在不同参数空间聚类得到 6 个星团。图 3 展示了 6 个星团的视差分布和颜色星等图。通过视差推算发现 Cl 1–3 的距离相似 (约 400 pc), 而其他 3 个星团的距离更近 (330 ~ 360 pc)。颜色星等图上各个星团都显示了非常清晰的主序, 所测得的星团年龄非常年轻。其中 Cl 3 与 Cl 6 的年龄相似, Cl 1、Cl 2、Cl 4 以及 Cl 5 年龄相似, 所以 Cl 1、Cl 2、Cl 4、Cl 5 可能是在 10 Ma 前同时形成的, 而 Cl 3 (NGC 2547) 与新发现的 Cl 6 可能是在 30 ~ 35 Ma 之前一起形成的。进一步, 通过分析每个星团的视向速度和自行数据表明, 所有星团几乎沿着从西南到东北的平行轨迹移动。但根据现有数据尚无法确切判断整个星团群的成员是否在 10 ~ 30 Ma 前起源于相同天区, 需要更详细的运动学信息来重建这一区域的恒星形成历史。

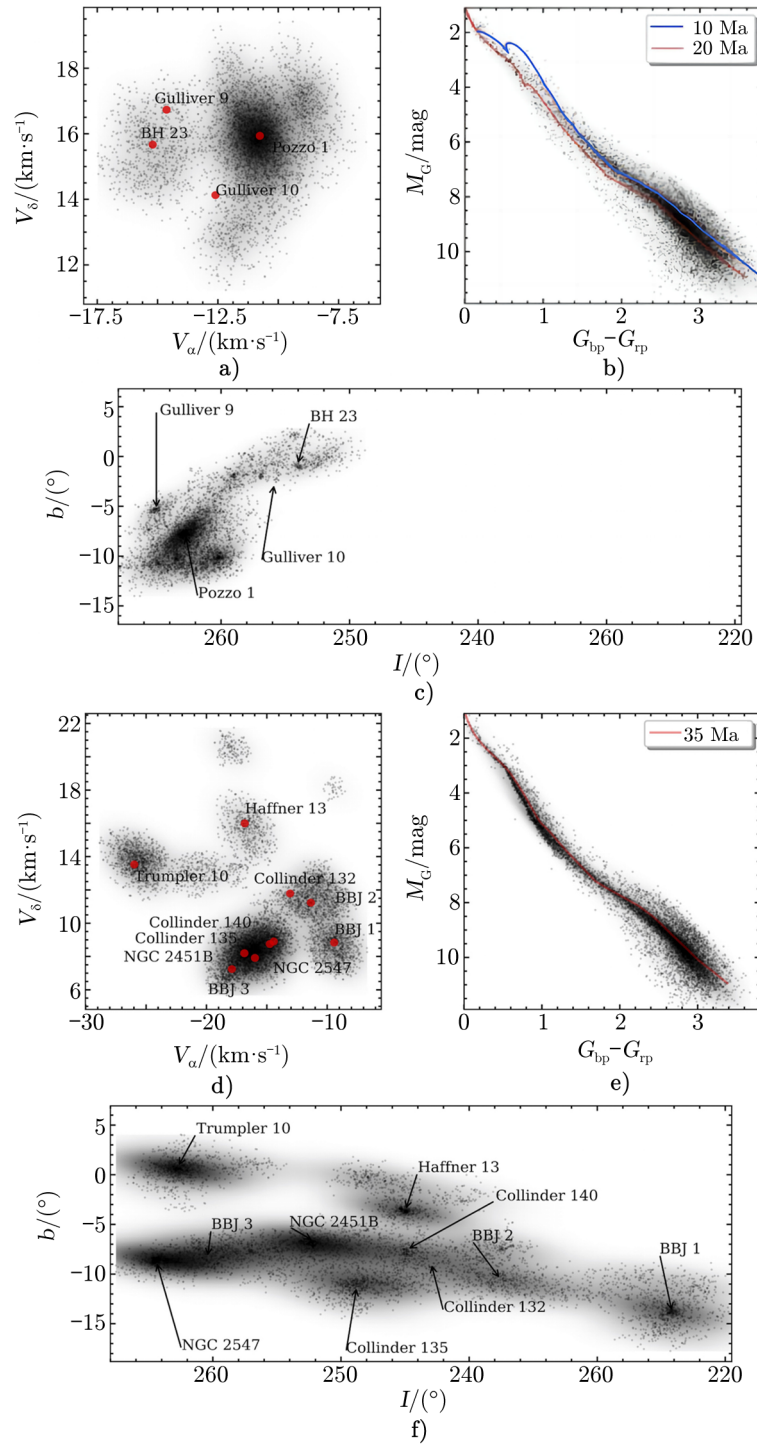


注: 黑点表示 $2.2 < \varpi < 3.9$, $\sigma_{\varpi}/\varpi < 0.1$ 范围内的所有恒星, 两图颜色相对应。

图 3 Cl 1-6 的视差分布图及颜色星等图^[13]

Beccari 等人^[39] 在 2020 年再次利用 Gaia DR2 数据对 Vela OB2 区域展开研究, 将天区扩大到以 Collinder 135 为中心, 半径为 40° 的范围内。此项研究利用 DBSCAN 在不同参数空间进行三次聚类得到了两组不同年龄的成分: 一组是由年龄在 15 Ma 左右的 4 个星团组成, 另一组则由年龄约为 35 Ma 的 10 个星团组成, 如图 4 所示。其中发现了一个新的星团, 被命名为 BBJ1, BBJ1 的距离约 347 pc, 年龄约 30 Ma, 性质与 NGC2547 相似。BBJ1 与 NGC 2547 的距离约为 259 pc, 与 Collinder 135 的距离约为 158 pc。

由图 4 可知, 相对年轻的一组星团群 (见图 4c) 在二维投影空间分布在 $257^\circ < l < 270^\circ$ 和 $-15^\circ < b < -5^\circ$ 中; 而另一组星团群 (见图 4f) 在空间上分布呈现为一条约 260 pc 的恒星丝状结构。由于研究天区的扩大以及 BBJ 1 的发现, 该结构才得以充分显现。图 5 展示了年龄为 35 Ma 的星团群的 3D 空间分布, 蓝线表示星团群的主要丝状结构, 该结构



注: a)、b)、c) 星团群的年龄为 15 Ma, d)、e)、f) 星团群的年龄为 35 Ma。

图 4 a) 和 d) 星团群的速度分布; b) 和 e) 星团群的颜色星等图; c) 和 f) 星团群的位置空间的分布^[39]

位于距离太阳 $320 \sim 420$ pc 的范围内。由于星团群整体年轻, 因此不能用年老星团周围形成恒星潮汐尾/流的机制来解释^[43, 44]。因为潮汐尾结构, 实际上是受到星团内部动力学的调节, 由两体弛豫的作用使得成员星逃逸^[45], 亦或银河系引力场的外部影响加速了星团的瓦解^[46]。这两种机制都会导致在非常大的时间尺度上形成潮汐尾。而这项工作提出的星团群是 35 Ma 的年轻结构, 且长达 260 pc, 在如此短的时间内无法形成如此长的潮汐尾结构。这个大尺度结构见证了 35 Ma 前复杂的丝状分子云里面恒星形成的瞬间, 就像 ALMA 观测到的那样^[47, 48], 称这种结构为丝状恒星结构遗迹 (relic stellar filament)。此项研究及猎户座 (Orion) 中发现的年轻恒星样本皆表明这些星团成分还留存着其原初形成时的丝状分布结构, 这与 Cantat-Gaudin 等人^[49, 50] 在 2019 年的研究结论也一致。

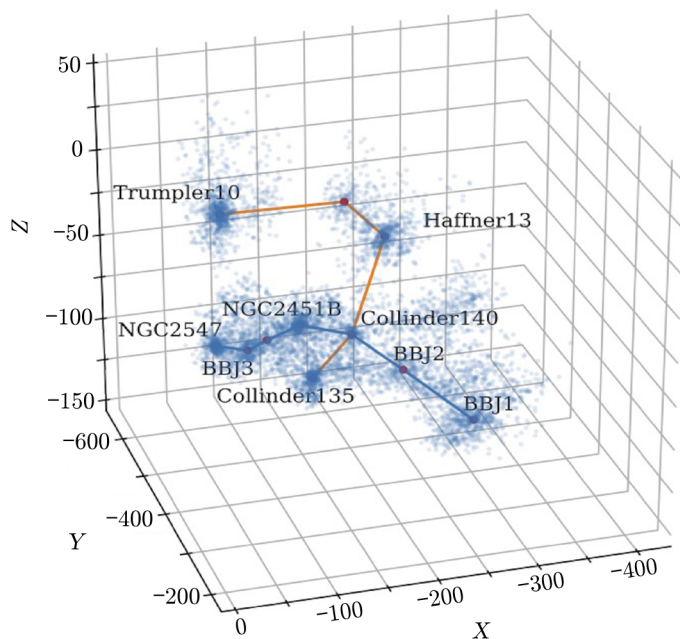
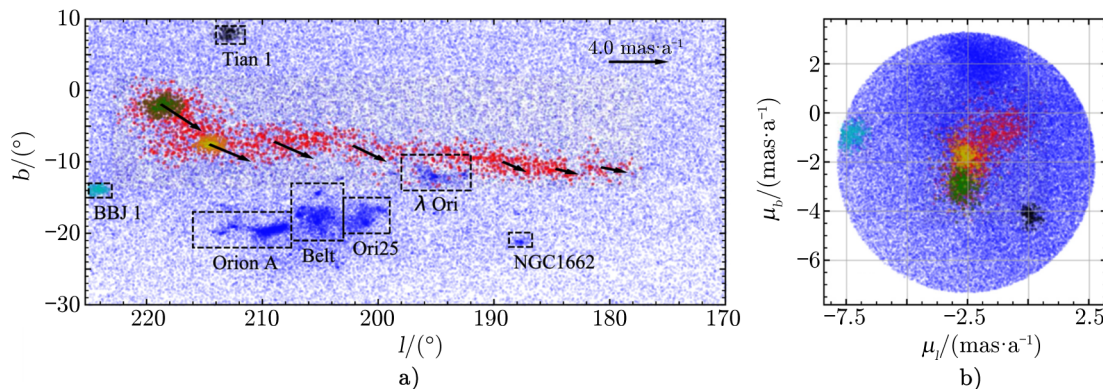


图 5 聚类结果中年龄为 35 Ma 的星团群的 3D 空间分布图^[39]

Tian^[51] 在 2020 年基于 Gaia DR2 数据, 利用机器学习聚类方法 Friend-of-Friend (FOF) 在 Vela OB2 天区发现了一个年轻的蛇形结构 (Snake)。根据空间上毗邻以及速度空间上的重叠与连续, 确定了该结构的成员, 如图 6 所示。蛇形结构由一个延展的“蛇尾”和两个趋于瓦解的星团作为核心, 在 6D 相空间中可以清晰地区分出来。蛇形结构包括数千颗成员星, 平均距离约为 310 pc, 总质量大于 $2000 M_{\odot}$ 。由于蛇形结构的年龄仅约 $30 \sim 40$ Ma, 因此不能用经典的潮汐尾的形成理论来解释, 与 Beccari 等人^[39] 在 2020 年的结论相似。蛇形结构与 Beccari 等人^[39] 提出的丝状恒星结构具有相似的 5D 相位空间特征和年龄。尽管蛇形结构可能在膨胀, 但相似的 5D 相位空间特性和年龄表明它很可能与 Beccari 等人^[39] 在 2020 年研究中的丝状恒星结构形成环境相同。如果相关性得到确认, 蛇形结构可将 Vela OB2 天区的星团群范围扩大约 2 倍, 对于理解该区域星团的形成和演化历史具有重要意义。

义。

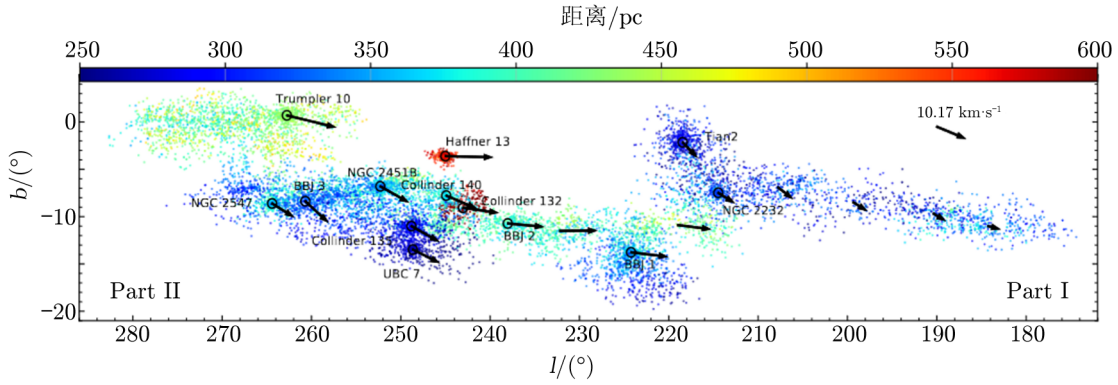


注: a) 为银经-银纬空间, b) 为自行空间。红色点代表蛇形结构的候选成员, 绿色点和黄色点表示两个正在瓦解的核心 (黄色表示已知星团 NGC 2232), 而青色和黑色的点代表疏散星团 BBJ 1 和一个新发现的星团 (Tian 1)。黑色箭头表示在本地静止坐标系 (LSR) 中的自行运动, l 方向的自行逐渐平滑并在其尾部变小, b 方向的自行逐渐消失^[51]。

图 6 星团群的空间分布^[51]

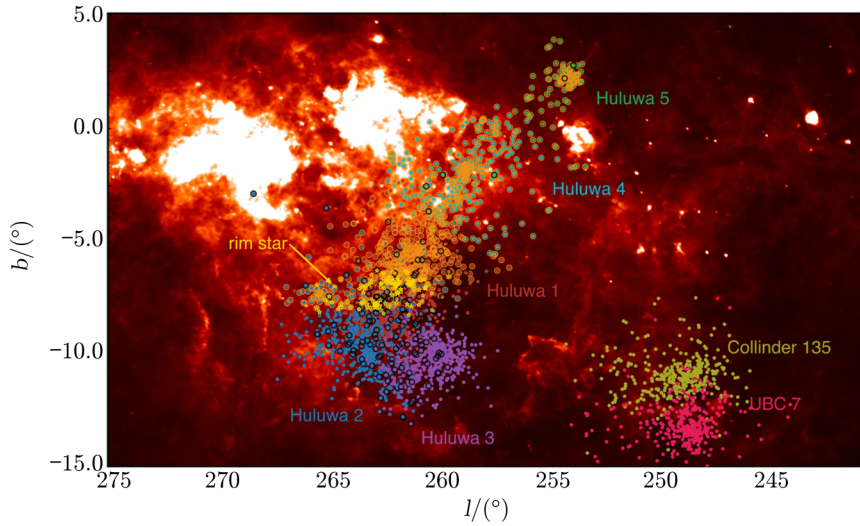
Wang 等人^[52]在 2022 年进一步扩大天区范围研究蛇形结构及其与周围结构的关系, 旨在揭示蛇形结构的完整程度。如图 7 所示, 使用 FOF 算法聚类得到 Tian^[51]在 2020 年研究的蛇形结构 (part1), 以及 Beccari 等人^[39]在 2020 年研究的星团群 (part2) 在内的近 1.2×10^4 颗成员星的大结构。通过结合多个光谱数据库的视向速度以及金属丰度研究该结构的综合性质, 结果表明这两个部分很可能是诞生于同一片巨分子云的大结构, 因为两个部分的结构在空间上相互毗连, 年龄在 $30 \sim 40$ Ma 并且具有一致的金属丰度。这个庞大的结构很可能起源于原初星等级聚集的分布结构, 诞生在巨分子云内纤维状结构的若干区域, 且各自的形成历史也不尽相同。

随着 Gaia EDR3 数据的释放, Pang 等人^[54]在 2021 年对 Vela OB2 天区星团形成模式提出另一种假设, 即 Vela OB2 的星团群起源于连续的恒星形成过程。Pang 等人基于神经网络的机器学习算法 StarGO^[55]研究 Vela OB2 区域中的星团群, 发现 5 个新的疏散星团 (命名为 Huluwa 1-5) 及已知双星团 Collinder 135 和 UBC 7。图 8 展示了星团成员星叠加在 IRIS 图像上^[53]的二维分布。Huluwa 1-3 的星团年龄约为 $10 \sim 22$ Ma, Huluwa 4-5 的星团年龄为 $7 \sim 20$ Ma, 并发现 Huluwa 1 由 Huluwa 1A 和 Huluwa 1B 两部分组成。虽然 Huluwa 1A 与 Huluwa 1B 结构相对较为分散, 但运动学信息表明两者仍然可能是同时形成的双星团。对整体的形成过程进行研究后发现: Huluwa 1-3 在演化过程中产生的恒星反馈, 引发了湍流进而诱发了年轻一代星团 Huluwa 4-5 ($7 \sim 20$ Ma) 的形成; 嗣后位于 Vela IRAS 内的超新星爆发迅速将星团内的剩余气体排出, 从而阻止了 Huluwa 4-5 恒星的继续形成。根据 Vela OB2 的速度弥散度, 表明 Vela OB2 和 Huluwa 1-5 星团均处于超位力化, 正处在瓦解状态。通过 N 体模拟预测了 Vela OB2 中的 Huluwa 1-5、双星团 Collinder 135



注：颜色表示不同的距离，右上角的箭头表示整体结构的平均切向速度 ($v_t = -9.47 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $v_b = -3.72 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)，其余箭头表示该局部区域恒星的平均切向速度，箭头的长度相对于右上角的箭头等比例缩放，所有速度都是相对于 LSR 计算^[52]。

图 7 候选样本成员星在银经-银纬空间的分布^[52]



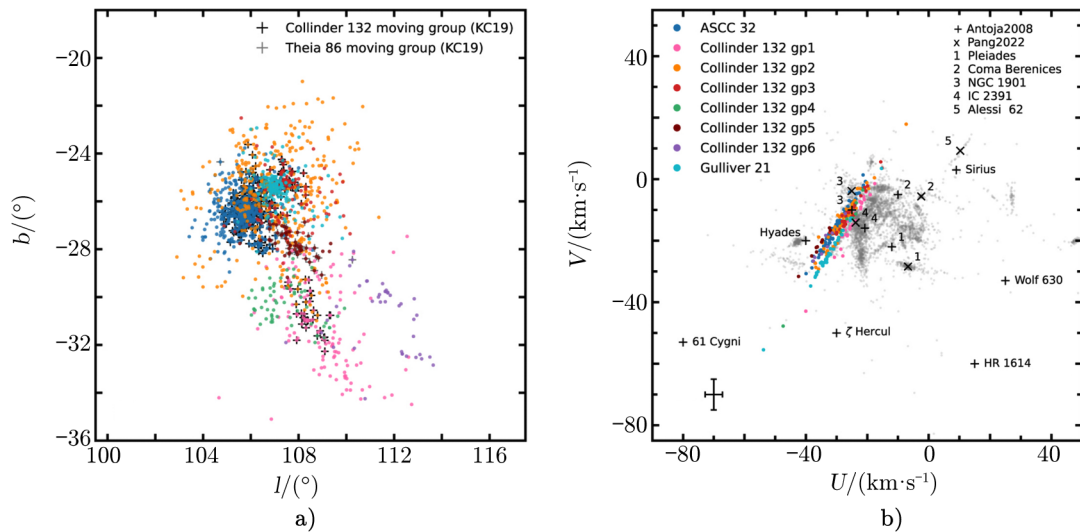
注：Hula 1-5 以及双星团 Collinder 135 和 UBC 7 的成员星为彩色点；黄色五角星符号突出显示位于壳体边缘的恒星，用于分隔上壳体和下壳体；位于壳层上部区域的恒星被突出显示为橙色圆圈；黑色圆圈表示 G 波段星等在 $2.5 \sim 6 \text{ mag}$ 且年龄大于 10 Ma（更蓝）的恒星，主要位于壳层下部区域^[54]。

图 8 60 μm 波段的 IRAS-IRIS 红外图像^[53]

和 UBC 7 将在未来 100 Ma 继续膨胀并最终瓦解。

Pang 等人^[56] 2022 年继续在其他区域探究星团群的起源与星团群之间的相关性，研究结果显示，具有共同运动的不同星团群可能是由于银河系棒/旋臂等导致的轨道偶然重合。Pang 等人再次通过 StarGO 算法在 Collinder 132-Gulliver 21 天区证认了 3 个共同移动的星团群：(1) 年龄为 25 Ma 的子群 (ASCC 32、Collinder 132 gp1-4)；(2) 中等年龄范围为 50 ~ 100 Ma 的子群 (Collinder 132 gp5-6)；(3) 年龄为 275 Ma 的星团 Gulliver 21。这些星

团在 3D 空间中延伸超过 270 pc, 最大年龄差约 250 Ma。成员星在 U - V 速度分布如图 9 所示, 呈现出平行的对角线形态, 斜率接近相同, 速度上的条状分布是稳健的, 因为速度的延展分布 (小于 $30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) 远大于观测误差 (图 9b) 左下角) 和视向速度的弥散。在 U - V 空间中产生的拉长结构与太阳附近的星团或星团群相比是独特的, 体现了不同子群的运动状态。已知经典星团群在 U - V 空间中形成一个速度恒定的水平分支/弧, 这意味着角动量沿垂直方向守恒, 也是共振场景中预期的运动特征。然而这 3 个星团群在 U - V 速度空间上表现出“平行倾斜”的特征, 在移动群 HR 1614 中也观测到类似的特征^[57]。银河系棒共振^[58, 59]、旋臂暂现波的共振散射^[60]和随机旋臂波^[61]都能改变银盘平面内恒星的运动。年轻的 Collinder 132 子群诞生于旋臂上的巨分子云中, Gulliver 21 和中等年龄子群可能受到这些机制的影响, 并可能分散到 Collinder 132 移动群的位置。为了确认每个子群的形成与演化, Pang 等人将 8 个星团的运动轨道在时间上前后积分, 发现 7 个较年轻的星团与星团 Gulliver 21 之间的距离在目前达到最小值, 并将在不久的将来快速远离。即 3 个子群可能是因为共振原因偶然地重叠在一起, 这个阶段开始于大约 20 Ma 前, 这种临时的共同运动状态只能存在大约 70 Ma 的时间。



注: Kounkel 和 Covey^[62]与 Collinder 132 星团群匹配的成员用黑色加号表示, 与 Theia 86 星团群匹配的成员用灰色加号表示, 星团成员以彩色圆点显示, U 和 V 的平均误差标注在左下角^[54]。

图 9 a) 成员星团的位置空间分布; b) 聚类得到的 8 个星团的 U - V 速度分布^[56]

多数研究表明年轻的星团群是在同一个巨大分子云中同时形成的, 并且形成疏散星团群的原始分子云具有丝状结构^[39, 42, 51, 52]; 星团群还可能包括年龄和金属丰度不同的子星团群, 同时星团群在速度分布中也可能表现为拉长的子结构^[56]。以上这些研究为星团群的动力学起源提供了重要的观测约束, 上述研究工作中的星团群汇总结果见表 1。

4 总结与展望

到目前为止,双星团及星团群并没有明确的定义,但无论双星团/星团群是以何种形式形成,成员星团的距离相近是第一要素。大多数研究认为双星团是在同一个分子云中共同形成,因此具有相似的年龄、化学丰度和一致的运动,也可以称为原初双星团。以往研究中证认的双星团的成员星团大多数较年轻,并且数值模拟的结果也表明双星团的生命周期从几百万年到数千万年不等。一般认为只有足够年轻的疏散星团才可以形成双星团/星团群,而年老的疏散星团在本质上应该是孤立的,因为原初分子云中的疏散星团之间的引力相互作用非常弱,依靠引力作用使两个疏散星团保持长期稳定的概率非常低。原初的双星团系统也非常不稳定,短时间内就会合并或瓦解后分散到银盘中,双星团的寿命取决于它们的相互距离、潮汐力,以及在较小程度上取决于与巨分子云的相遇情况。而非原初双星团的物理起源较为复杂,一般认为有两种模式^[5]:一种是相继形成模式,此种情况下形成的双星团应该具有较小的年龄差以及不同的金属丰度;另一种是俘获形成模式,此种情况下形成的双星团可能具有不同的年龄和化学成分,但通常具有一致的运动速度。

星团群的起源与双星团类似,近年来发现的大多数星团群都被认为是在同一个巨分子云中形成的,反映了形成疏散星团的原始分子云的丝状/湍流结构。不论是原初形成的星团群还是通过运动轨道的偶然重叠聚集到一起的星团群,最终都趋向瓦解。

虽然现在 Gaia 数据空前精确,但由于缺少足够的运动学信息,因此对已经找到的星团群,人们很难详细地研究其运动学结构。值得一提的是,未来 Gaia DR4 数据的发布相对于 Gaia DR3 会有重大的进步。Gaia DR4 是基于长达 66 个月的观测,所包含的天体物理数据的数量、质量和种类前所未有的,尤其是提供了高精度的运动学数据,包括增加近 5 倍的恒星视向速度样本,并且自行运动的精度提高近 3 倍。结合 LAMOST 等光谱巡天数据能够更深入地研究银河系双星团与星团群之间的联系,便于更好地理解银河系恒星的形成模式以及银河系的形成与演化。

参考文献:

- [1] Chupina N V, Vereshchagin S V. ESA Special Publication, 2000, 445: 347
- [2] de la Fuente Marcos R, de la Fuente Marcos C. New Astronomy, 2009, 14: 180
- [3] de La Fuente Marcos R, de La Fuente Marcos C. A&A, 2009, 500: L13
- [4] de la Fuente Marcos R, de la Fuente Marcos C. ApJ, 2009, 700: 436
- [5] de la Fuente Marcos R, de la Fuente Marcos C. ApJ, 2010, 719: 104
- [6] Grasha K, Calzetti D, Adamo A, et al. ApJ, 2015, 815: 93
- [7] Subramaniam A, Gorti U, Sagar R, et al. A&A, 1995, 302: 86
- [8] Lynga G. VizieR Online Data Catalog, 1995, VII/92A
- [9] Merriliod J -C, Paunzen E. A&A, 2003, 410: 511
- [10] Dias W S, Alessi B S, Moitinho A, et al. A&A, 2002, 389: 871
- [11] Gaia Collaboration. VizieR Online Data Catalog, <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/I/345>, 2018,

I/345

- [12] Zhong J, Chen L, Kouwenhoven M B N, et al. *A&A*, 2019, 624: A34
- [13] Conrad C, Scholz R -D, Kharchenko N V, et al. *A&A*, 2017, 600: A106
- [14] Bate M R. *MNRAS*, 2009, 392: 590
- [15] Bate M R. *MNRAS*, 2012, 419: 3115
- [16] Gaia Collaboration, Brown A G A, Vallenari A, et al. *A&A*, 2021, 649: A1(29)
- [17] Gaia Collaboration, Vallenari A, Brown A G A, et al. *A&A*, 2023, 674: A1
- [18] Katz D, Sartoretti P, Guerrier A, et al. *A&A*, 2023, 674: A5
- [19] Fouesneau M, Frémat Y, Andrae R, et al. *A&A*, 2023, 674: A28
- [20] Soubiran C, Cantat-Gaudin T, Romero-Gómez M, et al. *A&A*, 2019, 623: C2
- [21] Casado J. *Astronomy Reports*, 2021, 65: 755
- [22] Gaia Collaboration. *VizieR Online Data Catalog*, <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/I/350>, 2020
- [23] Kharchenko N V, Piskunov A E, Schilbach E, et al. *A&A*, 2013, 558: A53
- [24] Cantat-Gaudin T, Jordi C, Vallenari A, et al. *A&A*, 2018, 618: A93
- [25] Bica E, Pavani D B, Bonatto C J, et al. *AJ*, 2019, 157: 12
- [26] Liu L, Pang X. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2019, 245(2): 32
- [27] Sim G, Lee S H, Ann H B, et al. *Journal of Korean Astronomical Society*, 2019, 52: 145
- [28] Castro-Ginard A, Jordi C, Luri X, et al. *A&A*, 2020, 635: A45
- [29] Cantat-Gaudin T, Anders F, Castro-Ginard A, et al. *A&A*, 2020, 640: 1
- [30] Song F, Esamdin A, Hu Q, et al. *A&A*, 2022, 666: 75
- [31] Qin S, Zhong J, Tang T, et al. *ApJS*, 2023, 265: 12
- [32] Lada C J. *ApJ*, 2006, 640: L63
- [33] Lada C J, Lada E A. *ARA&A*, 2003, 41: 57
- [34] Brown J H, Burkert A, Truran J W. *ApJ*, 1995, 440: 666
- [35] Goodwin S P. *MNRAS*, 1997, 284: 785
- [36] Arnold B, Goodwin S P, Griffiths D W, et al. *MNRAS*, 2017, 471: 2498
- [37] Kovaleva D A, Ishchenko M, Postnikova E, et al. *A&A*, 2020, 642: L4
- [38] Castro-Ginard A, Jordi C, Luri X, et al. *A&A*, 2018, 618: A59
- [39] Beccari G, Boffin H M J, Jerabkova T. *MNRAS*, 2020, 491: 2205
- [40] Piatti A E, Malhan K. *MNRAS*, 2022, 511: L1
- [41] Malhan K, Yuan Z, Ibat R A, et al. *ApJ*, 2021, 920: 51
- [42] Beccari G, Boffin H M J, Jerabkova T, et al. *MNRAS*, 2018, 481: L11
- [43] Carballo-Bello J A, Martínez-Delgado D, Navarrete C, et al. *MNRAS*, 2018, 474: 683
- [44] Malhan K, Ibata R A, Carlberg R G, et al. *ApJ*, 2019, 881: 106
- [45] Binney J, Tremaine S, Princeton N J. *Galactic dynamics*, Princeton: Princeton University Press, 1987: 681
- [46] Spitzer L, Thuan T X. *ApJ*, 1972, 175: 31
- [47] André P, Di Francesco J, Ward-Thompson D, et al. *Protostars and Planets VI*, Arizona: University of Arizona Press, 2014: 27
- [48] Hacar A, Tafalla M, Forbrich J, et al. *A&A*, 2018, 610: A77
- [49] Cantat-Gaudin T, Mapelli M, Balaguer-Núñez L, et al. *A&A*, 2019, 621: A115
- [50] Cantat-Gaudin T, Jordi C, Wright N J, et al. *A&A*, 2019, 626: A17
- [51] Tian H J. *ApJ*, 2020, 904: 196
- [52] Wang F, Tian H, Qiu D, et al. *MNRAS*, 2022, 513: 503
- [53] Miville-Deschênes M A, Lagache G. *ApJS*, 2005, 157: 302
- [54] Pang X, Yu Z, Tang S Y, et al. *ApJ*, 2021, 923: 20
- [55] Yuan Z, Chang J, Banerjee P, et al. *ApJ*, 2018, 863: 26
- [56] Pang X, Li Y, Tang S Y, et al. *ApJ*, 2022, 937: L7
- [57] Kushniruk I, Bensby T, Feltzing S, et al. *A&A*, 2020, 638: A154

- [58] Dehnen W. AJ, 2000, 119: 800
[59] Bovy J, Hogg D W. ApJ, 2010, 717: 617
[60] Sellwood J A, Binney J J. MNRAS, 2002, 336: 785
[61] De Simone R, Wu X, Tremaine S. MNRAS, 2004, 350: 627
[62] Kounkel M, Covey K. AJ, 2019, 158: 122

Recent Advances in the Study of Binary Star Clusters and Star Cluster Groups in the Milky Way

SHAN Xing-mei¹, LIU Gui-mei^{2,3}, ZHONG Jing², LIN Qing¹

(1. Shanghai Astronomy Museum (Branch of Shanghai Science and Technology Museum), Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Open clusters are ideal laboratories for studying star formation and evolution. However the pattern of the formation of star clusters remains a fundamental and unresolved question. To explore the formation of star clusters, it is essential to search physically connected pairs or multiple systems of open clusters that could constrain the theories of star cluster formation. Revealing the properties of binary clusters and cluster groups can also yield important insights into the hierarchical formation of stars. Additionally, binary star clusters and cluster groups provide exceptional opportunities to investigate the formation and evolution patterns of star clusters, which are born in the same molecular cloud and to reveal the connection between the cloud and star clusters in morphological and kinematic properties. This article begins by discussing the selection of samples and the patterns of formation for binary star clusters and cluster groups, providing a concise review of research conducted within the Milky Way, and focusing on recent advancements in this field during the Gaia era.

Key words: open cluster; binary star clusters; Milky Way