

# 探测到气体的碎片盘统计研究\*

曹鹏程 刘琼<sup>†</sup> 廖能惠<sup>‡</sup>

(贵州大学物理学院 贵阳 550000)

**摘要** 碎片盘通常被描述为贫气盘,其气尘比显著低于原行星盘,因此很少在碎片盘中探测到气体.得益于各种灵敏的望远镜,探测到气体的碎片盘的数量正在不断增加,寻找更多的含有气体的碎片盘成为碎片盘研究的重点课题.然而大范围的搜寻非常耗时且低效,因而为了更快更好地遴选探测的目标,需要根据这类源的特性择选更小范围样本.通过统计探测到气体的碎片盘及其宿主恒星的参数总结出这些源的总体特性.为此搜集了已经发表的探测到气体的碎片盘的文献,总计找到37个源,包括探测到CO等冷气体的12个源、CaII等热气体的14个源以及冷热气体共存的11个源.通过统计其宿主恒星的光谱类型、年龄、离地球距离和碎片盘的相对光度、气体质量、尘埃质量等信息,得出了主要结论:宿主恒星多为B型和A型恒星,年龄大部分都小于50 Myr,相对光度分布相比于已知碎片盘更为集中,在 $10^{-5}$ – $10^{-2}$ 区间范围.

**关键词** 恒星:形成,原行星盘,方法:统计

**中图分类号**: P152; **文献标识码**: A

## 1 引言

在早期演化过程中新生恒星被富含大量气体的星周盘所包围,盘的质量通常为中心恒星质量的百分之几,且盘大部分质量由气体贡献,只有少部分质量存在于小的、亚微米级尘埃颗粒中<sup>[1]</sup>,通常称为原行星盘.随着恒星的演化,大多数原行星盘在10 Myr时消失<sup>[2]</sup>,其中尘埃颗粒通过形成更大的星子、小行星或行星被清除,而气体通过粘性吸积、光蒸发或行星形成被清除.随后,在一些没有消失殆尽的恒星盘中,星子通过不断碰撞产生了新的尘埃<sup>[3]</sup>,由这些第2代尘埃颗粒形成的碎片盘可能伴随恒星几乎整个生命周期<sup>[4]</sup>.碎片盘通常被描述为贫气盘,因为与原行星盘中的标准气尘比100:1相比,该比率虽然不受限制,但明显更低<sup>[5]</sup>.由于

冰粒或星子的碰撞、蒸发和光解析等过程只能产生少量的二次气体,而其中最容易探测到的分子气体CO也会在星际辐射和恒星辐射下快速光解,所以在碎片盘中很少探测到气体<sup>[6]</sup>.

通过不同类型的望远镜,在碎片盘中也逐渐发现了不同类型的气体存在,包括分子气体与原子气体.其中,分子气体主要通过单碟望远镜如JCMT (James Clerk Maxwell Telescope)、APEX (Atacama Pathfinder Experiment telescope)和射电望远镜阵列ALMA (Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array)、SMA (Sub-Millimeter Array)等在亚毫米范围进行观测.对于明亮的目标,ALMA的高分辨率和高灵敏度特性能让我们获得诸如CO及其同位素等谱线信息,显示CO带的位置

2021-12-28收到原稿,2022-05-11收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(U1631109、11703093、U2031120),贵州大学一流学科建设(物理学)以及校立特设岗位基金项目(201911A)资助

<sup>†</sup>qliu1@gzu.edu.cn

<sup>‡</sup>nhliao@gzu.edu.cn

并可估算其气体质量. 而原子气体和离子气体也在一些碎片盘中被探测到. HSO (Herschel Space Observatory)能够检测OI和CII精细结构线. 位于不同天文台的多台望远镜/光谱仪如Mercator Telescope/HERMES (High Efficiency and Resolution Mercator Echelle Spectrograph)、NOT (Nordic Optical Telescope)/FIES (The high-resolution Fibre-fed Echelle Spectrograph)、MPG (Max Planck Gesellschaft)/ESO (The European Southern Observatory) 2.2-metre telescope/FEROS (The Fiber-fed Extended Range Optical Spectrograph)等在碎片盘中也观测到了金属气体. 根据气体温度, 也常将观测到的气体分为冷气体与热气体两种类型, 冷气体诸如CO、CI、CII、OI等, 热气体诸如CaII、FeII、NaI等金属气体.

此前在碎片盘中很少检测到气体, 因而对碎片盘中的气体了解很少, 对碎片盘的研究主要集中在尘埃上, 红外和亚毫米连续谱观测解释了尘埃质量如何随时间减少<sup>[3]</sup>. 随着探测到气体的碎片盘数量的增多, 人们逐渐展开了对碎片盘中气体的研究. 研究碎片盘中的气体有助于更好地了解原行星盘的演化情况, 从而对于了解该演化对行星形成机制的影响也有重要意义<sup>[7-8]</sup>.

目前碎片盘中气体的研究主要围绕以下几个方面: 一是通过观测寻找新的含有气体的碎片盘<sup>[9-11]</sup>; 二是通过对已知含有冷气体的碎片盘和已知含有热气体的碎片盘的研究, 分析冷热气体之间的关系<sup>[5, 9]</sup>. Rebollido等人分别在2018年和2022年通过对15个含冷气体碎片盘中的热气体探测和8个含热气体碎片盘中的冷气体探测来研究冷热气体之间的关系, 由于探测率小, 分别为10/15和1/8, 暂时没有建立起热气体和冷气体之间明显的联系<sup>[5, 9]</sup>; 三是通过已知含有气体的碎片盘信息, 利用模型预测星子间碰撞产生的气体质量和探究气体的起源<sup>[12-13]</sup>. Kral等人利用模型估算了不同源二次起源的CO气体质量, 发现CO气体质量存在探测的下限 $10^{-7}M_{\oplus}$  (地球质量), 当距离大于100 pc时, CO质量需要大于 $10^{-6}M_{\oplus}$ 才能被探测到<sup>[12]</sup>. 而关于气体的起源, 目前主要有两种可能: 一是原行星盘剩余的气体; 二是原行星盘演化后期二次起源的

气体. 通常原行星盘剩余的气体具有更高的质量, 若气体是二次起源的, 则不能合理解释其星子之间碰撞的高气体产生率<sup>[1]</sup>; 而原行星盘演化后期二次起源的气体通常具有更低的质量, 因为星子间的碰撞只能产生少量的气体<sup>[6]</sup>.

以上3方面研究内容中, 寻找更多的含气体碎片盘是研究的基础和重点. 然而大范围搜寻所有碎片盘中的气体非常耗费时间. 因而为了更好地选择探测的目标源, 需要根据该类源的特性择选更小范围样本. 为此, 本文搜集了已经发表探测到气体的碎片盘的文献, 目的在于通过统计碎片盘及其宿主恒星的参数总结出该类碎片盘的总体性质.

在第2节介绍了样本的搜集, 并对其宿主恒星的光谱类型、年龄、离地球距离和碎片盘的相对光度等信息进行了统计分析, 并与已知碎片盘样本进行了对比; 第3节讨论了样本碎片盘的气体成分、质量以及起源; 最后第4节对样本碎片盘的性质进行了总结.

## 2 样本搜集与统计

本章介绍样本的搜集, 并根据气体类型对样本进行了分类, 通过统计恒星的光谱型、年龄、离地球距离与碎片盘的相对光度分布得到样本及子样本的总体性质.

### 2.1 样本介绍

通过搜集目前已经发表的探测到气体的碎片盘文献, 我们总计找到了37个源, 列于表1中(方括号中的数字为参考文献的序号): 列(1)表示序号; 列(2)表示恒星的名字; 列(3)表示冷气体; 列(4)表示热气体; 列(5)表示碎片盘的相对光度, 即碎片盘的红外光度 $L_{\text{IR}}$ 与宿主恒星的光度 $L_{*}$ 之比; 列(6)表示恒星的光谱类型; 列(7)表示恒星的年龄; 列(8)表示恒星离地球的距离. 表1中我们搜集到的源分为冷气体与热气体两大类. 为了了解含不同类型气体的碎片盘的特性, 我们根据探测到气体的类型将样本分成了3个子样本: 子样本I为只存在冷气体的12个系统; 子样本II为只存在热气体的14个系统; 子样本III为同时存在冷气体和热气体的11个系统. 后面章节将研究3个子样本的参数分布.

表 1 样本源的盘和恒星参数  
Table 1 Disk and stellar parameters of our sample stars

Number (1)	Star's name (2)	Cold gas (3)	Hot gas (4)	$L_{\text{IR}}/L_*$ (5)	Sp.type (6)	Age/Myr (7)	Distance/pc (8)
1	HD9672	CO, CI, CII, OIb [14]	CaII [5]	$1.1 \times 10^{-3}$ [12]	A1V	40 [12]	57.07
2	HD21997	CO [1]		$5.9 \times 10^{-4}$ [12]	A3IV/V	30 [1]	69.64
3	HD32297	CO, CII [15]	CaII [5]	$5.4 \times 10^{-3}$ [12]	A0V	30 [12]	132.19
4	HD36546	CO [9]	CaII [10]	$3.4 \times 10^{-3}$ [9]	B8V	10 [9]	101.35
5	HD39060	CO, CI, CII, OI [16]		$1.7 \times 10^{-3}$ [12]	A6V	23 [12]	19.44
6	HD95086	CO [11]		$1.5 \times 10^{-3}$ [11]	A8III	17 [11]	86.44
7	HD109085	CO [17]		$3.4 \times 10^{-4}$ [18]	F2V	1400 [18]	18.28
8	HD110058	CO [19]	CaII [5]	$1.9 \times 10^{-3}$ [12]	A0V	10 [12]	129.98
9	HD121191	CO [4]		$4.7 \times 10^{-3}$ [4]	A5IV/V	16 [4]	132.11
10	HD121617	CO [4]		$4.8 \times 10^{-3}$ [4]	A1V	16 [4]	116.87
11	HD129590	CO [20]		$5.8 \times 10^{-3}$ [20]	G3V	10 [20]	136.04
12	HD131488	CO [4]	CaII [5]	$5.5 \times 10^{-3}$ [4]	A1V	16 [4]	154.62
13	HD131835	CO, CI [21]	CaII [5]	$1.5 \times 10^{-3}$ [12]	A2IV	16 [12]	133.65
14	HD138813	CO [19]	CaII [5]	$1.5 \times 10^{-3}$ [12]	A0V	10 [12]	137.42
15	HD141569	CO, OI, CII [22]		$8.4 \times 10^{-3}$ [22]	B9.5V/A0V	5 [22]	110.63
16	HD146897	CO [19]	CaII [5]	$5.4 \times 10^{-3}$ [12]	F2/3V	10 [12]	131.50
17	HD156623	CO [19]	CaII [5]	$5.5 \times 10^{-3}$ [12]	A0V	10 [12]	111.75
18	HD158643	CO [23]			A0V	0.7 [24]	124.38
19	HD172555	OI [25]	CaII [5]	$7.8 \times 10^{-4}$ [12]	A7V	23 [12]	28.79
20	HD181296	CII [26]	CaII [5]	$7.6 \times 10^{-4}$ [12]	A0V	23 [12]	47.36
21	HD181327	CO [27]		$2.0 \times 10^{-3}$ [12]	F6V	23 [12]	48.21
22	HD216956	CO [28]		$4.98 \times 10^{-5}$ [29]	A4V	440 [28]	7.70
23	TWA7	CO [30]		$1.7 \times 10^{-3}$ [30]	M2V	10 [30]	34.03
24	HD21620		CaII [10]	$2.5 \times 10^{-5}$ [10]	A0V	80 [10]	135.00
25	HD37306		CaII, FeII, TiII [31]	$7.0 \times 10^{-5}$ [31]	A1V	30 [31]	70.46
26	HD61950		CaII [32]	$1.4 \times 10^{-4}$ [32]	B8V		411.86
27	HD75416		CaII [32]	$1.8 \times 10^{-5}$ [32]	B8V	8 [32]	99.56
28	HD109573		CaII [10]	$4.6 \times 10^{-3}$ [10]	A0V	8 [10]	71.91

表 1 续  
Table 1 Continued

Number	Star's name	Cold gas	Hot gas	$L_{\text{IR}}/L_*$	Sp.type	Age/Myr	Distance/pc
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
29	HD110411		CaII [10]	$6.4 \times 10^{-5}$ [10]	A0V	86 [10]	38.16
30	HD145689		CaII [10]	$4.9 \times 10^{-5}$ [10]	A3V	40 [10]	55.55
31	HD145964		CaII [10]	$1.5 \times 10^{-5}$ [10]	B9V	11 [10]	112.18
32	HD158352		CaII [10]	$9.3 \times 10^{-5}$ [10]	A8V	890 [10]	63.46
33	HD166841		CaII, NaI [32]	$1.1 \times 10^{-4}$ [32]	B8/9V		278.71
34	HD182919		CaII [10]	$3.4 \times 10^{-5}$ [10]	A0V	198 [10]	71.98
35	HD183324		CaII [10]	$1.8 \times 10^{-5}$ [10]	A0IV	140 [10]	60.68
36	HD184006		CaII [33]		A5V	430 [33]	37.20
37	HD223884		CaII [33]		A5V	5.5 [33]	104.35

Notes. Column (1): numbers. Column (2): star's name. Column (3): cold gas. Column (4): hot gas. Column (5): fractional luminosity of the debris disk. Column (6): spectral type (from SIMBAD<sup>[34]</sup> (Set of Identifications, Measurements, and Bibliography for Astronomical Data), except for HD141569; see Ref. [22]). Column (7): stellar age. Column (8): distance (from SIMBAD<sup>[34]</sup>). The numbers in square brackets are serial numbers of the references.

## 2.2 样本恒星光谱型分布

首先我们对样本及子样本的恒星光谱型进行了统计. 如图1 (a)所示, 总样本的恒星光谱类型分布范围较广, 从B型到M型, 包括6颗B型恒星、26颗A型恒星、3颗F型恒星、1颗G型恒星以及1颗M型恒星. 3个子样本的光谱类型分布如图1 (b)、1 (c)、1 (d)所示: 子样本I有1颗B型恒星、7颗A型恒星、2颗F型恒星、1颗G型恒星以及1颗M型恒星; 子样本II有4颗B型恒星、10颗A型恒星; 子样本III有1颗B型恒星、9颗A型恒星以及1颗F型恒星. 从图1 (b)、1 (d)可知, 含冷气体的碎片盘其宿主恒星光谱类型分布范围较广, 从B型到M型. 从图1 (c)可知, 目前探测到的只含热气体的碎片盘其宿主恒星只有B型和A型, 从图1 (d)可知, 同时探测到热冷气体的子样本III中除了B型和A型外, 也仅有一颗F型恒星. 由此可见含热气体的碎片盘其宿主恒星更倾向于早型星, 含冷气体和含热气体的碎片盘其宿主恒星都是A型恒星最多.

## 2.3 样本恒星年龄与碎片盘相对光度

接下来, 我们统计了恒星的年龄与碎片盘相对光度, 对3个子样本进行了分析, 如图2所示. 由图2中的圆圈可知, 只含有冷气体的碎片盘的恒星年龄大部分都小于50 Myr, 只有两颗年老的恒星, 分别是HD109085 (1400 Myr)、HD216956 (440 Myr), 且碎片盘都具有较高的相对光度 $L_{\text{IR}}/L_* > 10^{-4}$ , 随着年龄的增加, 其相对光度呈下降的趋势. 由图2中的三角形所示, 只含有热气体的碎片盘的恒星年龄分布范围较广, 有6颗超过了50 Myr, 有两颗年龄尚不可知, 且碎片盘的相对光度 $L_{\text{IR}}/L_* > 10^{-5}$ . 而从图2中的五角星则可以看到, 同时存在冷热气体的碎片盘的恒星年龄都小于50 Myr, 碎片盘都具有高相对光度( $10^{-3}$ 左右), 随着年龄的增加, 其相对光度也呈下降的趋势. 由此可见, 含有冷气体的碎片盘相对光度更高, 宿主恒星年龄更小, 随着年龄的增加相对光度有下降的趋势.

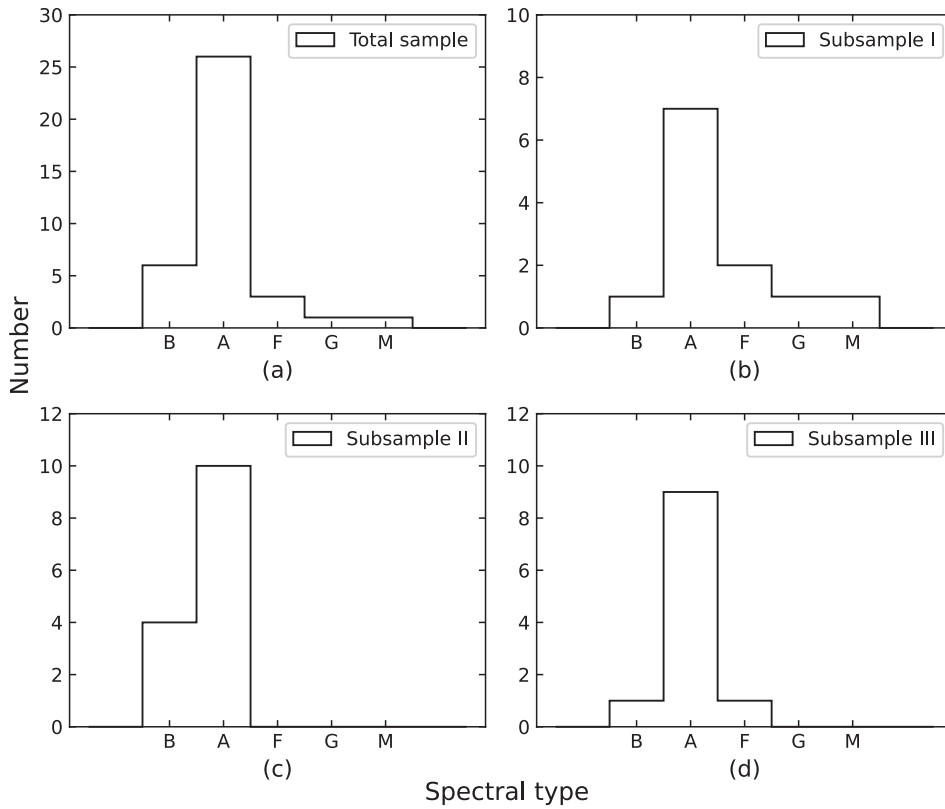


图 1 样本和子样本恒星的光谱型分布

Fig. 1 Distributions of spectral types of the sample and subsample stars

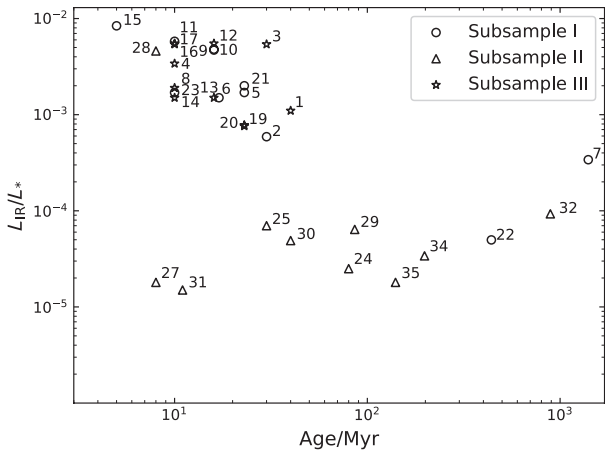


图 2 子样本恒星年龄与相对光度的分布. 图中源的序号与表1第(1)列序号对应.

Fig. 2 Distribution of stellar ages and fractional luminosities of subsample stars. The serial number of the source in the figure corresponds to the number shown in column (1) of Tab. 1.

### 2.4 探测到气体的碎片盘样本与已知碎片盘样本的比较

最后, 我们将探测到气体的碎片盘样本与已知碎片盘样本做了对比, 从而分析性质分布上的差异. 通过搜集已经发表的关于碎片盘研究的文献, 我们总计在近30篇文献中找到了373个参数信息比较全的碎片盘, 参数主要包括光谱型、离地球距离和相对光度. 因大部分源都没有恒星年龄数据, 这里不做统计. 下面我们将比较搜集到的已知碎片盘样本和本文探测到气体的碎片盘样本在这3个参数分布上的差异.

关于光谱型, 在已知碎片盘样本中, 我们总计搜集到了其中356个源的光谱型, 包括49颗B型恒星、125颗A型恒星、98颗F型恒星、52颗G型恒星、26颗K型恒星以及6颗M型恒星, 其分布如图3虚线所示, 而本文探测到气体的碎片盘样本如实线

所示: 两样本都是A型恒星居多; 已知碎片盘样本的宿主恒星中B型恒星的数量小于F型恒星的数量, 而探测到气体的碎片盘其宿主恒星中B型恒星数量多于F型恒星的数量; K型恒星的碎片盘中暂时还没探测到气体.

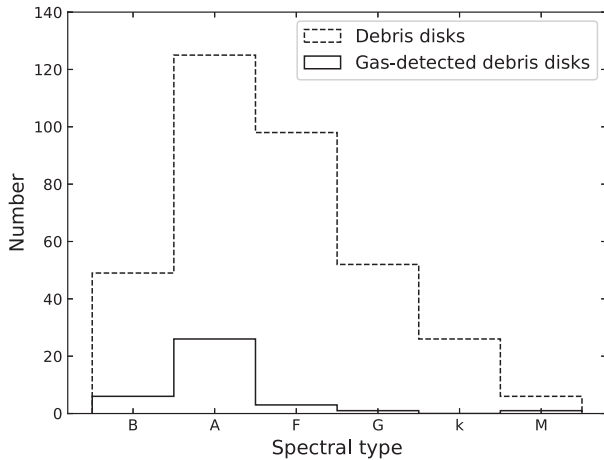


图 3 已知碎片盘样本与探测到气体的碎片盘样本的光谱型分布

Fig. 3 Distribution of spectral types of the known debris disks' sample and gas-detected debris disks' sample

关于离地球距离与相对光度, 我们总计搜集到了363个源的数据, 其分布如图4黑点所示, 而探测到气体的碎片盘样本源如图4空心五边形所示: 大于500 pc的碎片盘中暂时没有探测到气体的存在, 探测到气体的碎片盘的相对光度分布相对已知碎片盘更窄, 在 $10^{-5}$ – $10^{-2}$ 区间范围.

为了验证探测到气体的碎片盘与已知碎片盘样本是否来源于同一分布, 我们对两个样本的参数分布进行了对比. 通过对两个样本恒星光谱型做K-S (Kolmogorov-Smirnov)检验以及对距离和相对光度做二维K-S检验, 得到样本的显著性 $P$ 值都小于 $10^{-3}$ , 说明两样本不属于同一种分布. 在碎片盘样本中, 高相对光度、距离地球更近的早型星周围的碎片盘中的气体更容易被探测到.

### 3 讨论

上一章统计得到了探测到气体的碎片盘及宿主恒星的总体性质, 本章主要从探测到的气体着手, 对气体的成分及质量和气体的起源两个方面进行了讨论.

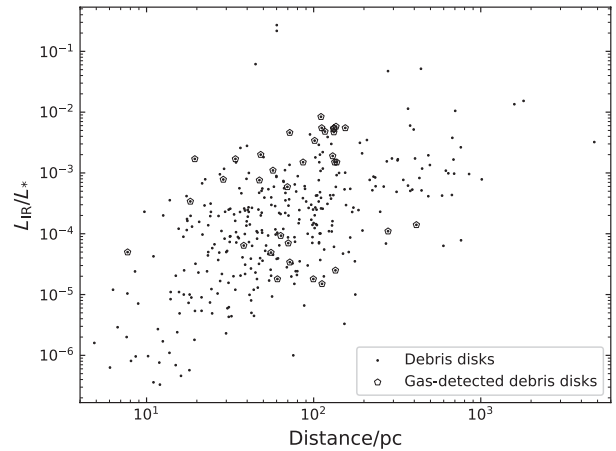


图 4 已知碎片盘样本和探测到气体的碎片盘样本的相对光度与恒星离地球距离的分布

Fig. 4 Distribution of fractional luminosities and distance from Earth in the known debris disks' sample and gas-detected debris disks' sample

#### 3.1 气体的成分及质量

关于气体的成分, 本文搜集到的样本源中的气体主要分为两大类: 冷气体和热气体. 如表1第(3)列所示: 含有冷气体的碎片盘中, 其气体成分主要是分子气体CO、原子气体OI、CI以及离子气体CII; 如表1第(4)列所示: 含有热气体的碎片盘中, 其气体成分主要是金属气体CaII, 少部分含有金属气体NaI、FeII、TiII.

关于气体的质量, 我们搜集到的具有质量数据的气体是碎片盘中探测得最多的分子气体CO. 如表1所示, 在37个探测到气体的碎片盘中, 21个探测到了分子气体CO. 我们找到了其中20个源的CO气体质量和尘埃质量, 列于表2: 列(1)表示序号(与表1序号相对应); 列(2)表示恒星的名称; 列(3)表示碎片盘中CO气体的相对质量 $M_{\text{CO}}/M_{\oplus}$ ; 列(4)表示碎片盘中尘埃的质量 $M_{\text{dust}}/M_{\oplus}$ ; 列(5)表示碎片盘中气体的可能来源. 由表2可以看出CO气体质量分布范围较广, 在 $10^{-7}$ – $10^{-1}M_{\oplus}$ 区间范围内. 表2源中CO气体质量与恒星离地球的距离的关系, 如图5所示, 距离我们越远的恒星, CO气体质量越大. CO气体质量存在探测下限 $10^{-7}M_{\oplus}$ , 当距离大于100 pc时, CO质量大于 $10^{-6}M_{\oplus}$ 才能被探测到, 这与Kral等人2017年的文章描述一致<sup>[12]</sup>. 该分布主要受望远镜分辨率的限制, 属于观测效应.

表 2 具有CO气体质量的源列表  
**Table 2 List of sources with CO gas mass**

Number (1)	Star's name (2)	$M_{\text{CO}}/M_{\oplus}$ (3)	$M_{\text{dust}}/M_{\oplus}$ (4)	The origin of gas (5)
1	HD9672	$1.4 \times 10^{-4}$ [12]	$2.7 \times 10^{-1}$ [12]	Primordial [14]
2	HD21997	$6.0 \times 10^{-2}$ [12]	$1.6 \times 10^{-1}$ [12]	Primordial [1]
3	HD32297	$1.3 \times 10^{-3}$ [12]	$3.7 \times 10^{-1}$ [12]	Primordial [15]
4	HD36546	$3.2 \times 10^{-3}$ [9]	$9.0 \times 10^{-2}$ [9]	Uncertain
5	HD39060	$2.8 \times 10^{-5}$ [12]	$7.8 \times 10^{-2}$ [12]	Secondary [16]
6	HD95086	$1.3 \times 10^{-5}$ [11]	$6.8 \times 10^{-1}$ [35]	Secondary [11]
7	HD109085	$3.0 \times 10^{-7}$ [17]	$1.4 \times 10^{-2}$ [17]	Secondary [17]
8	HD110058	$2.1 \times 10^{-5}$ [12]	$3.0 \times 10^{-3}$ [12]	Uncertain
9	HD121191	$2.7 \times 10^{-3}$ [4]	$9.5 \times 10^{-3}$ [4]	Primordial [4]
10	HD121617	$1.8 \times 10^{-2}$ [4]	$1.4 \times 10^{-1}$ [4]	Primordial [4]
11	HD129590	$3.0 \times 10^{-5}$ [20]	$3.9 \times 10^{-1}$ [20]	Secondary [20]
12	HD131488	$8.9 \times 10^{-2}$ [4]	$3.2 \times 10^{-1}$ [4]	Primordial [4]
13	HD131835	$6.0 \times 10^{-2}$ [12]	$4.7 \times 10^{-1}$ [12]	Primordial [21]
14	HD138813	$7.4 \times 10^{-4}$ [12]	$7.6 \times 10^{-3}$ [12]	Primordial [19]
15	HD141569	$1.5 \times 10^{-1}$ [22]	$5.2 \times 10^{-1}$ [22]	Primordial [22]
16	HD146897	$2.1 \times 10^{-4}$ [12]	$2.0 \times 10^{-2}$ [12]	Uncertain
17	HD156623	$2.0 \times 10^{-3}$ [12]	$2.4 \times 10^{-4}$ [12]	Primordial [19]
21	HD181327	$1.8 \times 10^{-6}$ [12]	$4.4 \times 10^{-1}$ [12]	Secondary [27]
22	HD216956	$4.2 \times 10^{-6}$ [28]	$6.3 \times 10^{-2}$ [29]	Secondary [28]
23	TWA7	$8.0 \times 10^{-5}$ [30]	$1.0 \times 10^{-4}$ [30]	Secondary [30]

Notes. Column (1): numbers (same to Tab. 1). Column (2): star's name. Column (3): CO gas mass. Column (4): dust mass. Column (5): the origin of gas. The numbers in square brackets are serial numbers of the references.

由于气体质量的观测限制, 我们现在可以解释2.3节图2中冷热气体碎片盘中相对光度分布的差异. 冷气体一般都在红外光度较亮的盘中被探测到, 因为红外相对光度与气体质量具有一定相关性: 根据Kral等人2017年的工作介绍<sup>[12]</sup>, CO气体质量依赖于CO气体的产生率和光解寿命, CO的产生率可以通过 $M_{\text{CO}} = M_{\text{loss}} \times \gamma$ 来估算, 其中 $\gamma$ 是CO + CO<sub>2</sub>冰态固体的质量分数<sup>[36]</sup>,  $M_{\text{loss}}$ 是碰撞级联的质量损失, 它与相对光度 $(L_{\text{IR}}/L_*)^2$ 有很强的相关性<sup>[3]</sup>. 由于望远镜分辨率限制, CO气体质量存在

探测下限, 这就导致了只有红外光度较亮的盘中才能探测到较大质量的CO气体.

对于热气体却没有这种限制, 因而含有热气体的碎片盘其红外光度分布很广泛, 从高光度到低光度都有: 其中红外光度更大的源才可能探测到冷气体, 即冷热气体共存的子样本III多为红外光度高的源; 而对于只探测到热气体未探测到冷气体的子样本II则多为红外光度较暗的盘.

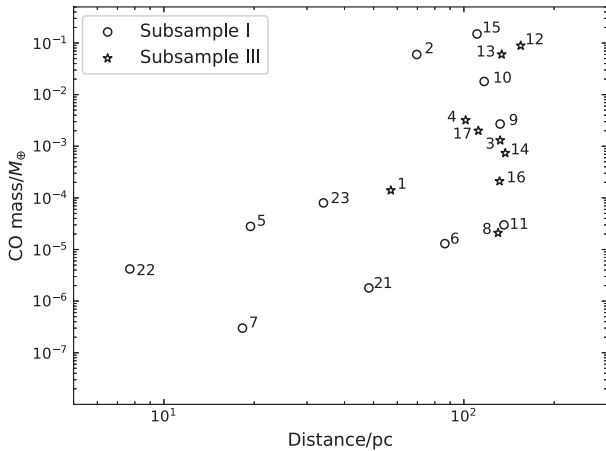


图 5 探测到CO气体的碎片盘中CO气体质量与恒星离地球距离的分布。图中源的序号与表2第(1)列序号对应。

Fig. 5 Distribution of CO gas masses and distance from Earth around CO-detected debris disks. The serial number of the source in the figure corresponds to the number shown in column (1) of Tab. 2.

### 3.2 气体的起源

碎片盘中气体的起源与中心恒星及盘的演化过程相关, Wyatt等人将原行星盘演化到碎片盘过程大致分为5个阶段: 过渡盘、外盘中毫米级尘埃耗尽、内部区域热尘埃的演化、气体消失以及环状小行星结构的形成<sup>[37]</sup>。气体的消失大约在10 Myr, 也是通常界定原行星盘与碎片盘的年龄分界线, 所以碎片盘一度被认为是鲜有气体存在的<sup>[3]</sup>。但随着观测发现了碎片盘中也存在气体, 关于气体的起源, 目前主流观点有两种: 一是原行星盘剩余的气体; 二是原行星盘演化后期二次起源的气体。对于热气体而言, 起源通常解释为二次起源, 即来自靠近恒星的地方由于外彗星碎裂释放出的大量气体<sup>[5, 10, 31]</sup>。对于冷气体而言, 因受到气体质量、气体与尘埃的位置以及恒星年龄的影响, 其起源就有两种可能: 气体质量越低、气体与尘埃位置越近或恒星年龄越大则气体多解释为二次起源; 反之, 气体多解释为原行星盘剩余的气体<sup>[1, 27]</sup>。

正因为冷气体的起源具有两种可能, 本节主要讨论搜集到的冷气体起源。在我们总样本中共计有23个碎片盘中探测到了冷气体。其中冷气体CO是碎片盘中探测得最多的气体, 我们统计到了20个

源中的CO气体质量, 如表2所示。第5列是我们查到的气体起源, 其中10个盘的气体被解释为原始的, 这些盘通常被定义为混合盘(Hybrid disk, 命名来自Kóspál等人2013年的文章<sup>[1]</sup>, 即它们的气体是原行星盘剩余的气体, 尘埃是二次起源的), 分别是HD9672<sup>[14]</sup>、HD21997<sup>[1]</sup>、HD32297<sup>[15]</sup>、HD121191<sup>[4]</sup>、HD121617<sup>[4]</sup>、HD131488<sup>[4]</sup>、HD131835<sup>[21]</sup>、HD138813<sup>[19]</sup>、HD141569<sup>[22]</sup>、HD156623<sup>[19]</sup>; 有7个盘中的气体被解释为二次起源(secondary disk), 分别是HD39060<sup>[16]</sup>、HD95086<sup>[11]</sup>、HD109085<sup>[17]</sup>、HD129590<sup>[20]</sup>、HD181327<sup>[27]</sup>、HD216956<sup>[28]</sup>、TWA7<sup>[30]</sup>; 有3个盘中的气体起源由于没有找到相关论述, 其气体起源尚未明确(uncertain disk)。除了表2中的20个源, 冷气体还有3个源分别为HD172555、HD181296以及HD158643, 前两者由于其碎片盘中的气体不是CO气体, 后者由于没有查到其CO气体质量, 因此都未列入表2中。关于它们的气体起源, Riviere-Marichalar等人指出HD172555<sup>[25]</sup>和HD181296<sup>[26]</sup>中的气体属于二次起源, 而HD158643由于没有找到相关论述, 其气体起源尚未明确。综上可知, 23个含有冷气体的源中, 有10个源的气体被解释为原始的, 9个源的气体被解释为二次起源的, 4个源中的气体起源尚未确定。

对碎片盘中冷气体起源的解释, 常认为与气体质量有关, 通过碰撞二次起源的气体质量较少, 质量高的气体就可能是原始遗留的。为此, 我们分析了表2中碎片盘的气体质量分布, 结果如图6所示, 我们发现不同起源的盘气体质量有明显不同: 处于混合盘的系统其气体质量较高, 而气体解释为二次起源的系统其气体质量较低, 分界线在 $10^{-4}M_{\odot}$ 左右。

虽然气体质量高低常用来判断冷气体的起源, 但长期以来关于气体的起源仍存在争议, 基于不同的模型往往有着不同的结论: Hughes等人利用简单模型<sup>[38]</sup>对HD9672 (49Ceti)进行拟合, 发现内盘气体已经被恒星辐照清空, 但外盘40-200 au处仍存在一个气体环, 认为该恒星可能正处于过渡阶段, 气体是原始遗留的<sup>[14]</sup>; Moór等人利用开普勒盘模型对HD21997进行解释, 认为无论是原始起源还是二次起源, 都不能明确解释其气体的存在<sup>[39]</sup>。



Zuckerman等人利用碰撞彗星模型对HD9672和HD21997进行了解释, 认为HD9672和HD21997不太可能在超过数百万年的时间段内一直处于稳定状态, 气体倾向于二次起源的<sup>[40]</sup>. Kral等人利用自洽模型对HD39060进行解释, 认为其气体是二次起源<sup>[16]</sup>. Marino等人利用马尔可夫链蒙特卡罗方法研究了HD181327, 从CO的密度和位置出发认为其是二次起源<sup>[27]</sup>.

以上都是基于个源的讨论, 之后Kral等人对多数源进行探究, 在其2017年的文章<sup>[12]</sup>中利用二次起源模型解释了大部分盘中的气体起源, 但无法利用该模型合理解释HD21997、HD131835和HD138813这三个高气体质量系统, 判断这3系统中的气体是原始的. 然而在其2019年的文章<sup>[13]</sup>中利用半解析模型(描述起源于富含挥发性的星子带中的CO、C和O的演化), 发现当粘性演化缓慢(即粘性参数 $\alpha \lesssim 10^{-3}$ 时<sup>[41]</sup>)和/或CO产率较高时, CO的屏蔽变得重要, 通过对9个混合盘系统进行研究(如图6, 除了HD141569), 运用二次起源模型解释了这些含有大质量气体的盘不是混合盘而是二次起源盘. 即CO分子光解产生的C原子的遮蔽效应, 在一定时间内避免了CO被快速光解从而累计到了更高的质量, 基于这个遮蔽效应, Rebollido等人提出具有较大气尘比的碎片盘其冷气体也可以仅用二次起源来解释<sup>[9]</sup>. 为此我们还统计了可能来自原行星盘剩余气体的混合盘与不确定起源盘的气尘比分布, 如图7所示. 我们发现在CO气体含量较高的混合盘中其气尘比也较大, 大于 $10^{-4}$ , 猜测处于混合盘的10个系统其冷气体可能也是二次起源. 通过图7我们还发现了3个具有质量数据的不确定起源盘的气尘比也比较大, 猜测其气体可能也是二次起源的.

综上所述, 关于碎片盘中气体起源的解释: 对于热气体都倾向于二次起源来解释; 对于冷气体具有一定争议, 一种观点认为气体质量高的盘中气体倾向于原始的(混合盘), 气体质量低的盘中气体倾向于二次起源的, 如图6所示, 混合盘对应的是相对年轻的源. 而另一种观点认为大部分混合盘(10个中的9个, 除了HD141569)中的气体也可以通过二次起源来解释, 这是基于多人利用模型得出的结论<sup>[13, 16, 27, 40]</sup>. 总之, 不论冷气体还是热气体的起

源大多都可以用二次起源来解释.

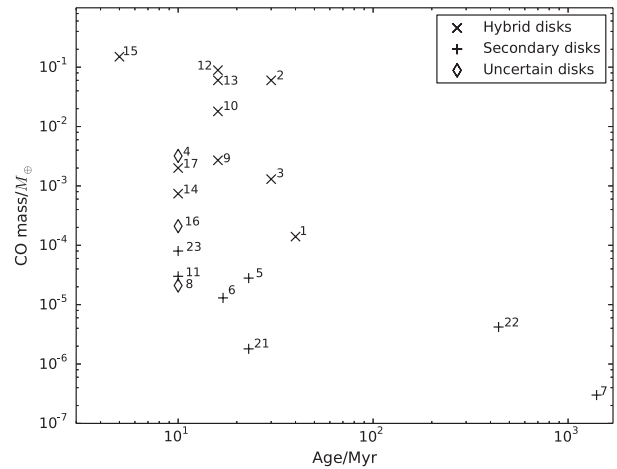


图6 探测到CO气体的碎片盘中的CO气体质量分布. 图中源的序号与表2第(1)列序号对应.

Fig. 6 Distribution of CO gas masses around CO-detected debris disks. The serial number of the source in the figure corresponds to the number shown in column (1) of Tab. 2.

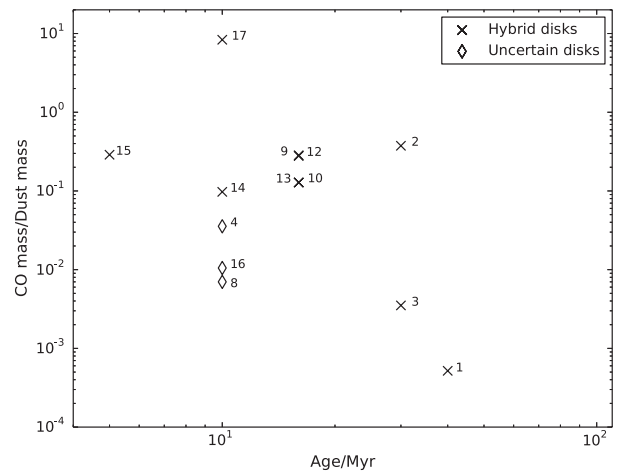


图7 混合盘与不确定起源盘的气尘比分布. 图中源的序号与表2第(1)列序号对应.

Fig. 7 Distribution of gas to dust ratio of hybrid disks and uncertain disks. The serial number of the source in the figure corresponds to the number shown in column (1) of Tab. 2.

## 4 结论

本文通过搜集已经发表的探测到气体的碎片盘文献, 总计找到了37个碎片盘的样本. 通过对样

本盘及其宿主恒星参数的统计分析,对探测到气体的碎片盘的性质进行了总结:样本的宿主恒星多为B型和A型恒星且年龄大部分小于50 Myr,相对光度分布相比于已知碎片盘更为集中,在 $10^{-5}$ – $10^{-2}$ 区间范围.含冷气体的碎片盘其宿主恒星光谱类型分布从B型到M型,其中A型星最多;含热气体的碎片盘其宿主恒星光谱类型倾向于B型和A型.含冷气体的碎片盘其宿主恒星年龄更小且相对光度 $L_{\text{IR}}/L_* > 10^{-4}$ ,随着年龄的增加其相对光度有下降的趋势;含热气体的碎片盘其宿主恒星年龄跨度更大且相对光度 $L_{\text{IR}}/L_* > 10^{-5}$ .因此在未来探测气体盘的目标上应倾向于选择年轻的具有高相对光度的早型星样本.

**致谢** 本文利用了法国斯特拉斯堡多内斯天文学中心的SIMBAD数据库.

### 参 考 文 献

- [1] Kóspál Á, Moór A, Juhász A, et al. *ApJ*, 2013, 776: 77
- [2] Alexander R, Pascucci I, Andrews S, et al. *The Dispersal of Protoplanetary Disks*//Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al. *Protostars and Planets VI*. Tucson: University of Arizona Press, 2014: 475-496
- [3] Wyatt M C. *ARA&A*, 2008, 46: 339
- [4] Moór A, Curé M, Kóspál Á, et al. *ApJ*, 2017, 849: 123
- [5] Rebollido I, Eiroa C, Montesinos B, et al. *A&A*, 2018, 614: A3
- [6] Matthews B C, Krivov A V, Wyatt M C, et al. *Observations, Modeling, and Theory of Debris Disks*//Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al. *Protostars and Planets VI*. Tucson: University of Arizona Press, 2014: 521-544
- [7] Chauvin G, Lagrange A M, Beust H, et al. *A&A*, 2012, 542: A41
- [8] Dent W R F, Wyatt M C, Roberge A, et al. *Science*, 2014, 343: 1490
- [9] Rebollido I, Ribas Á, de Gregorio-Monsalvo I, et al. *MNRAS*, 2022, 509: 693
- [10] Rebollido I, Eiroa C, Montesinos B, et al. *A&A*, 2020, 639: A11
- [11] Booth M, Matrá L, Su K Y L, et al. *MNRAS*, 2019, 482: 3443
- [12] Kral Q, Matrá L, Wyatt M C, et al. *MNRAS*, 2017, 469: 521
- [13] Kral Q, Marino S, Wyatt M C, et al. *MNRAS*, 2019, 489: 3670
- [14] Hughes A M, Wilner D J, Kamp I, et al. *ApJ*, 2008, 681: 626
- [15] Greaves J S, Holland W S, Matthews B C, et al. *MNRAS*, 2016, 461: 3910
- [16] Kral Q, Wyatt M, Carswell R F, et al. *MNRAS*, 2016, 461: 845
- [17] Marino S, Wyatt M C, Panić O, et al. *MNRAS*, 2017, 465: 2595
- [18] LEBRETON J, BEICHMAN C, BRYDEN G, et al. *ApJ*, 2016, 817: 165
- [19] Lieman-Sifry J, Hughes A M, Carpenter J M, et al. *ApJ*, 2016, 828: 25
- [20] Kral Q, Matrá L, Kennedy G M, et al. *MNRAS*, 2020, 497: 2811
- [21] Moór A, Henning T, Juhász A, et al. *ApJ*, 2015, 814: 42
- [22] Di Folco E, Péricaud J, Dutrey A, et al. *A&A*, 2020, 635: A94
- [23] GRAVITY Collaboration. *A&A*, 2021, 645: A50
- [24] Jenkins E B, Gry C. *ApJ*, 2020, 896: 24
- [25] Riviere-Marichalar P, Barrado D, Augereau J C, et al. *A&A*, 2012, 546: L8
- [26] Riviere-Marichalar P, Barrado D, Montesinos B, et al. *A&A*, 2014, 565: A68
- [27] Marino S, Matrá L, Stark C, et al. *MNRAS*, 2016, 460: 2933
- [28] Matrá L, MacGregor M A, Kalas P, et al. *ApJ*, 2017, 842: 9
- [29] Liu Q, Wang T G, Jiang P. *AJ*, 2014, 148: 3
- [30] Matrá L, Öberg K I, Wilner D J, et al. *AJ*, 2019, 157: 117
- [31] Iglesias D P, Olofsson J, Bayo A, et al. *MNRAS*, 2019, 490: 5218
- [32] Hales A S, Barlow M J, Crawford I A, et al. *MNRAS*, 2017, 466: 3582
- [33] Montgomery S L, Welsh B Y. *PASP*, 2012, 124: 1042
- [34] Wenger M, Ochsenbein F, Egret D, et al. *A&AS*, 2000, 143: 9
- [35] Moór A, Kóspál Á, Ábrahám P, et al. *MNRAS*, 2015, 447: 577
- [36] Mumma M J, Charnley S B. *ARA&A*, 2011, 49: 471
- [37] Wyatt M C, Panić O, Kennedy G M, et al. *Ap&SS*, 2015, 357: 103
- [38] Wahhaj Z, Koerner D W, Sargent A I. *ApJ*, 2007, 661: 368
- [39] Moór A, Ábrahám P, Juhász A, et al. *ApJ*, 2011, 740: L7
- [40] Zuckerman B, Song I. *ApJ*, 2012, 758: 77
- [41] Xie J W, Brandeker A, Wu Y Q. *ApJ*, 2013, 762: 114

## Statistical Study of Debris Disks with Gas Detected

CAO Peng-cheng    LIU Qiong    LIAO Neng-hui

*(School of Physics, Guizhou University, Guiyang 550000)*

**ABSTRACT** Debris disks have been described as gas-poor disks with gas-to-dust ratio is significantly lower than that of the protoplanetary disks so that gas is rarely detected in debris disks. Thanks to various sensitive telescopes, the number of debris disks with gas detection is increasing, so finding more debris disks with gas has become a key topic in debris disk research. However, large-scale search is very time-consuming and inefficient. Therefore, in order to select detection targets faster and better, it is necessary to select smaller-scale samples according to the characteristics of such sources. This paper aims to summarize the overall characteristics of these sources by analyzing the parameters of debris disks and their host stars. For this purpose, this paper collected published literature of debris disks with gas detected and found a total of 37 sources, including 12 sources of cold gases such as CO, 14 sources of hot gases such as CaII and 11 sources of coexistence of cold and hot gases. Through statistics of the spectral types, ages and distances of the host stars, as well as the fractional luminosities, gas mass and dust mass of the disks, this paper draws the conclusion: the host stars are mostly B-type and A-type stars. The stellar ages are mostly less than 50 Myr. The distribution of fractional luminosities is more concentrated than the known debris disks, which is in the range of  $10^{-5}$ – $10^{-2}$ .

**Key words** stars: formation, protoplanetary disks, methods: statistical