

分类号 0175.2 密级 公开

UDC 004.72

学 位 论 文

太阳系外行星系统

从探测到统计刻画

(题名和副题名)

孟泽洋

(作者姓名)

指导教师姓名、职务、职称、学位、单位名称及地址 周济林 教授

南京大学天文与空间科学学院 南京市仙林大道 163 号 210089

申请学位级别 博士 专业名称 天体力学与天体测量

论文提交日期2017年5月10日 论文答辩日期 2017年6月1日

学位授予单位和日期_____

答辩委员会主席： A 教授

评阅人: B 教授

C 副教授

D 教授

E 研究员



南京大學

研究生毕业论文 (申请博士学位)

论 文 题 目 太阳系外行星系统

从探测到统计刻画

作 者 姓 名 孟泽洋

学 科、专 业 方 向 天体力学与天体测量

指 导 教 师 周济林 教授

联 合 导 师 林潮 教授

研 究 方 向 太阳系外行星的探测与统计

2017 年 2 月 22 日

学 号：**DG1326007**

论文答辩日期：**2017 年 6 月 1 日**

指导教师： (签字)

On the Detection and Statistics of Exoplanets

by

Meng Ze-Yang

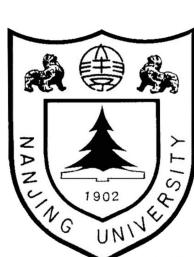
Supervised by

Professor Zhou Ji-Lin (NJU)

Co-supervised by

Professor Douglas Lin (UCSC)

A dissertation submitted to
the graduate school of Nanjing University
in partial fulfilment of the requirements for the degree of
DOCTOR OF PHILOSOPHY
in
Department of Astronomy and Space Science



Department of Astronomy and Space Science
Nanjing University

May 1, 2017

南京大学研究生毕业论文中文摘要首页用纸

毕业论文题目： 太阳系外行星系统
从探测到统计刻画

天体力学与天体测量 专业 2013 级博士生姓名：孟泽洋

指导教师（姓名、职称）：周济林 教授

摘要

关键词：

南京大学研究生毕业论文英文摘要首页用纸

THESIS: On the Detection and Statistics of Exoplanets

SPECIALIZATION: Department of Astronomy and Space Science

POSTGRADUATE: Meng Ze-Yang

MENTOR: Professor Zhou Ji-Lin (NJU)

Abstract

keywords:

前　　言

自诞生以来，人类就从未停止向外界探索以及反思自我。从技术层面上看，在望远镜分辨率与灵敏度被推向极限的同时，科学家们也在考究着生命与宜居行星存在的合理性。现如今太阳系外行星（简称：系外行星）科学领域，与传统的行星科学相比，虽然诞生并未满半个世纪，但也正尝试以「它山之石」—其它恒星周围的行星们，来内窥太阳系行星系统以及生命本身。

近二十年来，随着观测技术的迭代更新，被探测到的系外行星样本也在正加速地扩大，以往得到的基于太阳系行星系统的传统行星形成理论也随之不停地被改进、更正。正当行星的形成阶段一次次地被观测到（如行星形成早期的原行星盘），一些看似与太阳系大不同的系外行星系统（如周期小于十天的热木星）也不断地完善并细化着已知的行星系统动力学作用理论。系外行星领域也正随之如此恰似涓涓细流般启发着人类对太阳系起源与系外生命的认知。

而以上这一切里程碑，正离不开高精度数据预处理与前卫的理论分析和计算，如基于地面的高精度光谱仪 HIRES 和 *Kepler* 太空望远镜等仪器的数据处理流程。此册博士论文也借此尝试从高精度数据处理入手（「中国之星」中的「鬼像」处理），去探寻可能的系外原始行星盘（搜索大麦哲伦云星系中的掩食盘候选体），并且从统计上对现有的热木星系统的形成与潮汐演化作出部分限制（平衡潮汐模型下，热木星轨道法向与宿主恒星自转轴取向不一致性在统计上的物理性质）。

作为一门跨学科领域，如今系外行星也正通往着融合了天体生物和行星大气等多科学的方向发展。*Spitzer* 太空望远镜也已观测到数十颗系外行星大气存在的证据。在不久的将来，光合化学与有机分子化学也会被有效地应用到如何将观测到的光信号转化成生命存在的证据。科学家们也正在摸索中走出一条通往太阳系的起源与太阳系外生命之路，而此刻的人类是否已蓄势待发准备好迎接新的纪元…

目 次

前 言	v
目 次	vii
插图清单	ix
附表清单	xiii
1 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 地球与人类，无独有偶？	1
1.1.2 系外行星的定义	2
1.1.3 系外行星扼要史	3
1.2 探测方法	5
1.2.1 视向速度	6
1.2.2 凌星法	7
1.2.3 天体测量	8
1.2.4 直接成像	9
1.2.5 其他方法	10
1.3 行星形成理论	10
1.3.1 基于太阳系的经典形成理论	13
1.3.2 经典理论新挑战：系外行星	15
1.4 本文立意	20
2 基于南极的天文数据观测与处理	21
2.1 南极天文背景	21
2.2 CSTAR 以及其测光数据中的鬼像处理	23
2.2.1 CSTAR 望远镜光学设计和预数据处理	23
2.2.2 鬼像简介以及修正 CSTAR 数据中的鬼像	24

2.3 AST3 项目中系外行星的巡天策略	33
3 利用掩星搜索双星中的原行星盘	37
4 基于热类木星系统的统计性质	39
5 总结与展望	41
致 谢	43
参考文献	45
A 文内常用约定	65
A.1 物理符号含义	65
A.2 首字母缩写	66
B 二体运动示意图	67
简历与科研成果	69
学位论文出版授权书	71

插图清单

1-1	人类从太空看到的赖以居住和生存的母亲行星 — 地球。 (a) Apollo 17 号飞船航向月球的途中宇航员们回望并拍摄到的地球。这张图被称作「蓝宝石」，图中可以清晰的看到南半球的大气云层与被冰雪覆盖的南极点，另外还可看到非洲与亚洲大陆。 (b) Voyager 1 航天器在距离太阳四十亿公里外拍摄到的地球。在最右侧的太阳散射光柱中，地球就只是不到一个像素的小白点，而在这颗蔚蓝的星球上曾居住并流逝着所有的人类足迹。	2
1-1a	Apollo 17 号船员拍摄的南半地球，拍摄时间 1972 年 12 月 7 日。（图片版权：NASA）	2
1-1b	Voyager 1 于 1996 年 9 月 12 日拍摄到的多色合成地球肖像照。（图片版权：NASA/JPL-Caltech）	2
1-2	1995 年，日内瓦天文台天文学家 Mayor 和 Queloz 连续观测恒星 51 Pegsi 得到的视向速度曲线图，观测点已全数叠加至其伴星的周期 4.23 天。该系统主星是一颗类太阳恒星，因此视向速度曲线振幅所对应的最小质量为 $0.47 M_J$ ，系人类首次发现到类太阳恒星周围的短周期类木行星。	4
1-3	系外行星发现数量趋势图，不同颜色代表不同的探测方法（参照 § 1.2），可以看出该数目呈现指数式增长。（图片取自 NASA Exoplanet Archive）	5
1-4	行星对主星造成的视向速度曲线示意图，从左至右分别代表不同的行星偏心率和轨道近心点取向。此图版权归 Perryman M. 所有。	6
1-5	凌星法探测行星示意图，上半部分表示不同的轨道时刻。下方则为整个系统观测到的流量变化。版权 Joshua Winn。	7
1-6	由于行星的存在，宿主恒星的天球坐标随着时间的变化示意图，版权所有：Perryman M。	8

- 1-7 直接成像法探测系外行星。**(a)** 仪器接受类太阳恒星在 10 pc 以外的黑体辐射强度，其余为太阳系行星与热木星在此恒星周围黑体发射与发射的叠加流量。**(b)** Keck 望远镜利用角向较差与自适应光学技术直接成像观测到的 HR 8799 系统。 9
- 1-7a 仪器接受类太阳恒星在 10 pc 以外的黑体辐射（黄色实线），其余为太阳系行星与热木星在此恒星周围黑体发射与发射的叠加流量。在可见光波段行星与主星的对比度可差至十个量级，因此直接成像法一般选择在长波范围（如红外波段）探测系外行星。图片版权 Seager and Deming。 9
- 1-7b Keck 望远镜利用角向较差成像与自适应光学技术在近红外波段通过直接成像得到的 HR 8799 系统。中心恒星的大部分光已被星冕仪遮挡，留下小部分噪声，与远处四颗行星。图片版权：Marois 等人。 9
- 1-8 系外行星探测方法大全，图片版权 Michael Perryman。 11
- 1-9 YSOs 按照红外谱指数划分的四种主要类别，版权所有：Armitage P. 12
- 1-10 不同星团红外超等效的原（恒）行星盘站所有星团成员的比例。此图可推断星团年龄老于 10 Myr 后，恒星周围的气体盘已近乎完全消散。此图版权所有：Hernández J. 等人。 13
- 1-11 基于太阳系的传统行星形成理论模型在不同阶段的说明图，其中「米级障碍」属于至今为止的重大难题。图片版权 Michael Perryman。 15
- 1-12 现今探测到系外行星的周期 – 质量散点图。其中不同颜色分别代表不同的探测方法：红色代表视向速度法，灰色是凌星法，绿色指代微引力透镜法黄色代表直接成像法。黑色字母 V, E, J, S, U, N 则分别表示太阳系内金星，地球，木星，土星，天王星和海王星。本文将系外行星进行人为类别划分包络在封闭曲线内，分别为热类木星族（椭圆实线），冷类木星族（方框实线）和超级地球族（椭圆虚线）。此图取自 <http://exoplanets.org/>。 16

- 1-13 已知双星内卫星型（S-type）与行星型（P-type）行星系统中双星和行星轨道半长径分布图，数据来自 <http://openexoplanetcatalogue.com>。 18
- 1-14 所有拥有热类木星的已确认多行星系统汇总图，点的相对大小正比于行星的质量。数据同样来自 <http://openexoplanetcatalogue.com>。 19
- 2-1 南极地理位置图，暗咖啡色曲线表示地形等高线。可以看到 Dome Argus（或称冰穹 A）台址（中国，以红星标注）位于南极大陆最高点，另外冰穹 C（澳洲）和 F（日本）分别以灰色圆点表示。此地图版权 Australian Antarctic Division。 22
- 2-2 CSTAR 多镜面结构光路设计图。入射平板镜（最左侧）由改正镜与滤镜组成，最右侧的镜片为中空反射球面镜，中间子镜的右侧面涂有反射材料，该图与实际大小不成比例。 23
- 2-3 周天鬼像叠加图，也即「脏」图。图中的圆弧结构为鬼像所致，黑色十字标注的是南极点。为了更好的看清鬼像的结构，我们已经将已确认的恒星从本图中剔除，此外图中线状物为人造卫星。 .. 25
- 2-4 CSTAR 视场内坐标为 R.A.: $23^{\text{h}}24^{\text{m}}28.4^{\text{s}}$, decl.: $-89^{\circ}25'10.6''$ 的恒星的光变曲线。通常此特定鬼像会在一个恒星日内遭遇该被影响的恒星一次，从而将恒星的亮度提高半个星等。 26
- 2-5 坐标相对固定的恒星（蓝色标志）遇到鬼像（红色标注的模糊状弥散源）前后恒星星等的变化程度原始图片数据示意。 27
- 2-6 上栏为产生鬼像的源恒星（R.A.: $21^{\text{h}}08^{\text{m}}44.2^{\text{s}}$, decl.: $-88^{\circ}57'21.6''$ ）在一天内的星等变化图；中间栏为该源对应鬼像在这天内的星等变化；下栏为两者星等的差量。 30
- 2-7 光学对称轴在 CCD 上像素坐标的统计直方图，直方图格点宽度为一个像素点。图中实线为本地 x 坐标像素值，虚线则为 y 坐标。 30
- 2-8 选定的图片文件名为「16RE0312.fit」的光学对称轴示意图。方框选中的亮源（垂直溢出条纹）与圆环内的弥散鬼像相交于同一个像素点，即光学对称点。 31

2-9 鬼像影响因子 $f_1(d)$ 与被影响背景恒星和鬼像之间距离的依赖关系。实线为形式如方程 2-3 的拟合曲线，当两者之间的距离大于约 6 个像素时，鬼像几乎不对该星的亮度造成影响。相反，当鬼像完全重叠在背景恒星上时，鬼像自身高达 97% 的光子流量都会被算入恒星的孔径测光亮度中。	32
2-10 鬼像修正前后（分别为点和圆）恒星的光变曲线。此恒星坐标为 R.A.: $23^{\text{h}}24^{\text{m}}28.4^{\text{s}}$, decl.: $-89^{\circ}25'10.6''$ 。当鬼像距离恒星达到 6 个像素点的临界值后，鬼像修正程序便会自动在恒星的光变曲线基础上计算影响值并做修正。如图所示，此方法可以大幅度减小恒星光变曲线的弥散误差。	32
2-11 AST3-2 望远镜（左侧）就位于南极天穹 A 观测站。本图拍摄者为天文科考科考人员杜福嘉。	34
2-12 AST3-2 观测策略。整体流程包括初始化输入，观测，容错以及数据处理共四个环节。	35
B-1 二体在轨道平面内的椭圆运动示意图，图片来源 Perryman。	67
B-2 椭圆二体运动轨道在三维空间内的示意图，图内标识分别为轨道根数与参考系。图片来源 Perryman。	68

附表清单

1-1 太阳系八大行星物理参数与轨道参数，轨道根数取值依照 J2000 平赤道参考系，数据源自 NASA/JPL 网站。	14
2-1 CSTAR 星表中主要产生鬼像的亮星列表。	29

第一章 緒論

1.1 引言

1.1.1 地球与人类，无独有偶？

由古至今，人类在宇宙中的所处的位置就一直魂牵梦绕着人们的思绪。这个难题既包括了人类居住的地球在空间上究竟是否独特，另一方面也包含人类（或生命）在宇宙中的唯一性与否。而正因人类拥有了实证与思考的能力，因而在这个问题上的观测与探索也从未曾停歇。

首先，行星科学（Planetology）是一门古老的以观测为基础的科学。早在公元前，古希腊等各大文明已有天文学家（如伊巴谷）统计了相当可观的夜空发光天体的运行与方位^[1,2]。而在以托勒密为代表所提倡的地心说主导了这个星球一千多年后，文艺复兴时期的哥白尼等人也通过观测提出了日心说^[3]。自此地球在空间位置谜团便开始层层被揭开，地球的面貌（图 1-1）也愈发完整地展现在了人类面前。

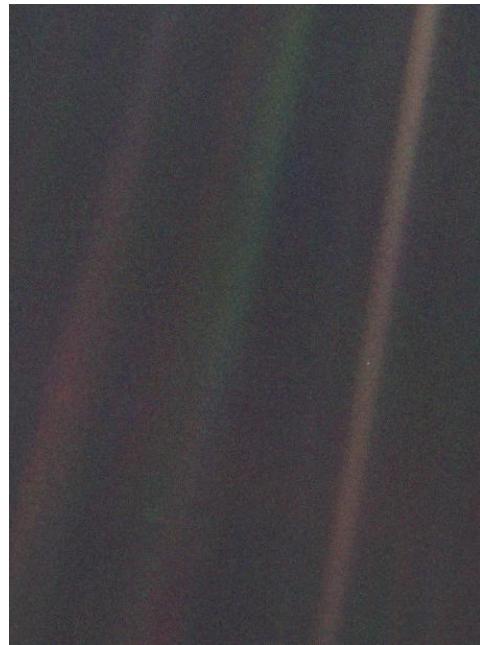
此外，人们往往会展开哲学角度来思考地球与生命在宇宙中普遍与否。比如原子论的宇宙描述早已开端于古希腊与古印度。随后，意大利哲学家 Bruno 亦于 1584 年提出无穷宇宙论：太阳与地球在宇宙中并不特殊，不计其数的其他星体也和地球相差无几（文献 [4]）

Onde possiamo stimare che de stelle innumerabili sono altre tante lune, altre tanti globi terrestri, altre tanti mondi simili a questo.

历史一脉相承至今，随着人们对太阳系内行星与地球的运动探求愈来愈充分，也许便不难理解搜索系外行星与系外生命为何如此举足轻重。而且从技术层面上，人类也已经有足够的能力将「第二颗地球」与「地外生命」放入可见的未来计划中^[5]。



(a) Apollo 17 号船员拍摄的南半球^①，拍摄日期为 1972 年 12 月 7 日。（图片版权：NASA）



(b) Voyager 1 于 1996 年 9 月 12 日拍摄到的多色合成地球肖像照^②。（图片版权：NASA/JPL-Caltech）

图 1-1：人类从太空看到的赖以生存的母亲行星 — 地球。**(a)** Apollo 17 号飞船航向月球的途中宇航员们回望并拍摄到的地球。这张图被称作「蓝宝石」，图中可以清晰的看到南半球的大气云层与被冰雪覆盖的南极点，另外还可看到非洲与亚洲大陆。**(b)** Voyager 1 航天器在距离太阳四十亿公里外拍摄到的地球。在最右侧的太阳散射光柱中，地球就只是不到一个像素的小白点，而在这颗蔚蓝的星球上曾居住并流逝着所有的人类足迹。

1.1.2 系外行星的定义

二十一世纪以前，由于对冥王星的测量并不充分，科学界从传统层面上也似乎没有必要争论如何去界定行星。尔后，随着更多的海外天体（Trans-Neptunian Objects，简称 TNOs）被发现，冥王星是否还是太阳系第九大行星的争辩也愈演愈烈^[6]。终于，国际天文学联合会（International Astronomical Union，简称 IAU）于 2006 年在「B5 决议^③」中给太阳系内的行星做出如下定义：

1. 必须拥有围绕太阳的轨道；
2. 质量应充分大，使得其自引力足够克服刚性力，以形成（近）球外形；
3. 另外，行星必须清空轨道附近的其它天体。

^①<https://www.nasa.gov/content/blue-marble-image-of-the-earth-from-apollo-17>

^②<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00452>

^③https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf

根据此定义，冥王星不再属于行星范畴，而被称作一颗矮行星。那如今观测到的近 3500 颗^①系外行星呢？从词源学上，行星（planet）一词取名自希腊语，那么系外行星（exoplanet）自然也该遵循上述 2006-B5 决议。然而部分系外气态巨行星（gas giant）质量已经大于十个木星质量（ M_J ），此类行星的质量上限在 IAU 决议中也并未给出。实际上，早于冥王星争辩，IAU 系外行星工作小组就已规定真实质量小于 $13 M_J$ （或行星内部氘元素热核反应的质量下限^[7]）的行星才被称作系外行星^②。在本文亦一律遵循以上两者来定义系外行星。

1.1.3 系外行星扼要史

人类从诞生之始就默默地注视着夜空的「神行者」——行星。而作为专注于研究系外行星系统的科学（Exoplanetology），其研究对象则跳脱出传统可观测的太阳系各大行星，转向了银河系内太阳周围临近的恒星。回顾历史，这门领域的兴起也并非一蹴即成，而是融入许多先人不停探索、试错与更新的艰辛历程。

近代系外行星搜索开始于十九世纪中页，Jacob 在对 70 Ophiuchi 的天体测量数据中找到类似行星的信号^[8]，然而 Moulton 后续观测立即证否了这颗行星^[9]。在随后的一个世纪内，对木星质量的系外行星探索逐渐变得活跃，如 van de Kamp 于 1963 年将仪器系统信号误认为一颗围绕巴纳德恒星的行星（文献 [10]）。

另外一面，Struve 在 1952 年提出短周期类木系外行星可同时通过视向速度与测光探测的设想^[11]。然而科学界当时理所当然都以为木星只能处在距离主星 5 AU 轨道上，因此需要太长的时间跨度来确认探测^③。不过，恒星光谱学依然在其间飞速发展，HD 114762 被发现拥有一颗非常接近系外行星质量上限的褐矮伴星^[12]。

此时，来自美国的二人团队 Wolszczan 和 Frail 于 1992 年利用射电脉冲信号的周期变化率在脉冲星 PSR1257+12 周围率先成功探测到包含两颗约 $3 M_{\oplus}$ 行星的行星系统^[13]。而 Walker 等人则在对主序恒星长达 12 年的视向速度监测中，宣布没有迹象表明他们嗅探到系外木星信号^[14]。

^① 来源 NASA Exoplanet Archive <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>，数据库更新至 2017 年 2 月 14 日

^② 请查看链接 <http://home.dtm.ciw.edu/users/boss/IAU/div3/wgesp/>

^③ 一般来说，由于引力所造成的周期信号被连续确认三个周期以上便被认为是真实的天体信号。

同一年，来自瑞士日内瓦天文台的 Mayor 和 Queloz 做出了系外行星领域里程碑式的发现（文献 [15]）：他们利用坐落在法国 Haute-Provence 天文台的 ELODIE 光谱仪从 150 颗恒星样本中成功探测到第一颗类太阳恒星周围的行星 — 51 Peg b（见图 1-2）。这颗轨道周期只有 4.23 天的类木行星于同一年被美国 Marcy 和 Butler 团组证实，随后便引起了对此类行星（即热类木星）形成理论机制广泛而又深远的讨论（§ 1.3），一直延续至今。

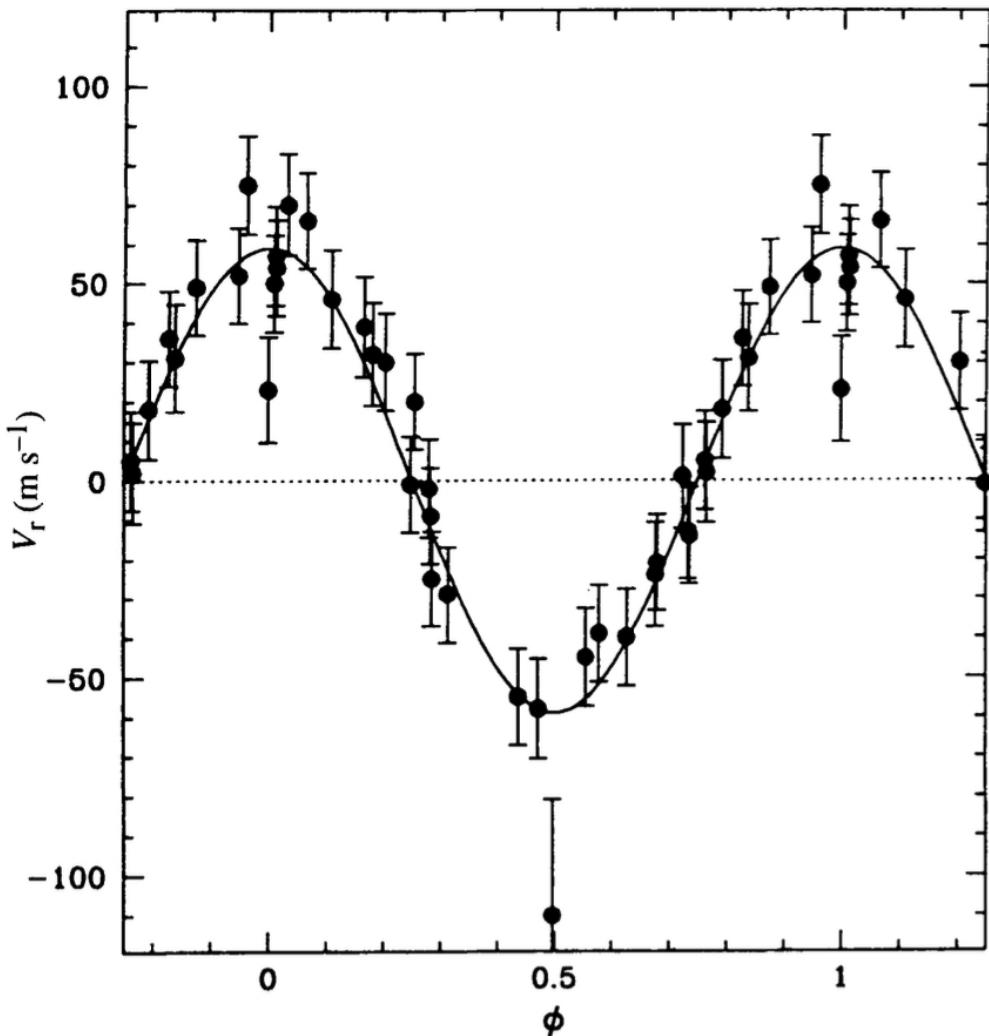


图 1-2：日内瓦天文台天文学家 Mayor 和 Queloz 连续观测恒星 51 Pegi 得到的视向速度曲线图，观测点已全数叠加至其伴星的周期 4.23 天。该系统主星是一颗类太阳恒星，因此视向速度曲线振幅所对应的最小质量为 $0.47 M_J$ ，系人类首次发现到类太阳恒星周围的短周期类木行星。图片取自他们于 1995 年发表在自然杂志的文献 [15]。

紧随其后的二十年内，系外行星领域各大新奇发现此起彼伏。图 1-3 为年度新发现系外行星数目柱状图，该数目明显呈现出指数式增长，尤其是 2009 年

Kepler 太空望远镜^[16] 的发射新带来了大批通过凌星法发现的系外行星。图 1-3 中所展现的愈加多样化的样本也极大地丰富了我们对系外行星的认知。

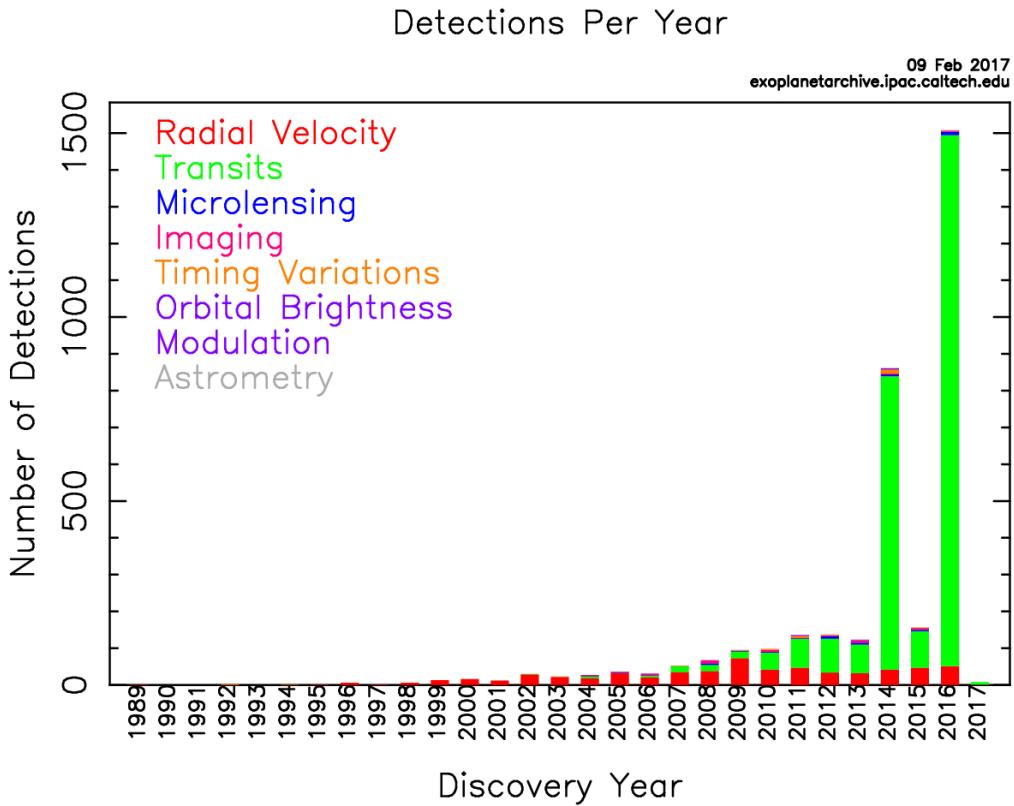


图 1-3: 系外行星发现数量趋势图, 不同颜色代表不同的探测方法 (参照 § 1.2) , 可以看出该数目呈现指数式增长。 (图片取自 NASA Exoplanet Archive)

1.2 探测方法

天文学所研究的天体普遍离地球遥远, 因而观测手段也主要集中在分析天体发射的光子上。观测系外行星相较与恒星或太阳系内行星, 通常要求非常高分辨率、灵敏度和稳定性的仪器, 也因而会遇到诸多困难, 甚至还得排除恒星自身活动的干扰。比如测量围绕类太阳的系外地球需要精度为 1 m s^{-1} 的视向速度测量, 相当于使用分辨率为 $R = 100,000$ 的光谱仪器探测主星光谱约 10^{-6} 的移动大小。参考书籍 [17], 本文大致罗列目前主要探测系外行星的方法如下:

1.2.1 视向速度

假使恒星周围存在行星，那么它们便会同时绕着公共的质心（Center Of Mass，简称为 COM）做开普勒运动。在观测中，这种三维运动可分解为视线平面内的二维运动与视线方向上的运动。视向速度（Radial Velocity，简称 RV）法就是通过测量视线方向上恒星谱线的多普勒红（蓝）移来探测周围行星的存在。

在简单的二体运动中，可以得到一颗轨道半长径为 a ，质量为 M_p 的行星，可对质量为 M_s 的宿主恒星造成如下大小的半振幅视向速度 K_1 （单位：米每秒）：

$$K_1 \simeq \frac{28.4}{\sqrt{1-e^2}} \frac{M_p \sin i}{M_J} \left(\frac{M_p + M_s}{M_\odot} \right)^{-1/2} \left(\frac{a}{1\text{AU}} \right)^{-1/2}, \quad (1-1)$$

其中各物理量的意义参见附录 B。由上式可知，视向速度方法最重要的缺陷即它只能测量（或拟合）出行星的最小质量（minimum mass，即 $M_p \sin i$ ）因为行星的轨道倾角 i 或视线方向夹角无法被测量。但与此同时，视向速度最明显优势是它可以精确测量行星的轨道偏心率 e （图 1-4）。

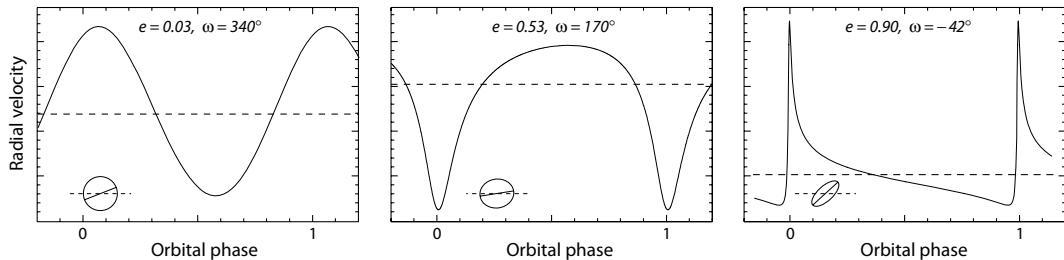


图 1-4：行星对主星造成的视向速度曲线示意图，分别代表不同的行星偏心率和轨道近心点取向。从左至右分别示意系统 HD 73256^[18]，HD 142022^[19] 和 HD 4113^[20]。此图取自文献 [21]。

另外由于视向速度需要通过尽可能多的主星谱线来确认谱线的位移，因而往往更容易探测到 FGKM 型主序星附近的大质量行星。在这里值得一提的是，由 Murphy 等人提出的激光频率梳法^[22]与 Molecule Iodine Cell 或 ThAr Lamps 等传统的光谱仪器定标方法相比，可以更稳定重复的覆盖同样的谱线区间，因此未来在视向速度方法上有相当可观的应用前景。

1.2.2 凌星法

从原理上来说，凌星法是通过测量行星遮挡主星时主星亮度（流量）的变化来探测行星的。如图 1-5 所示，系外行星处于恒星与地球的连线时被称作凌星（transit）或主掩食（primary eclipse），而当恒星处于系外行星与地球的连线时则被称为掩星（occultation）或次掩食（secondary eclipse）^①。

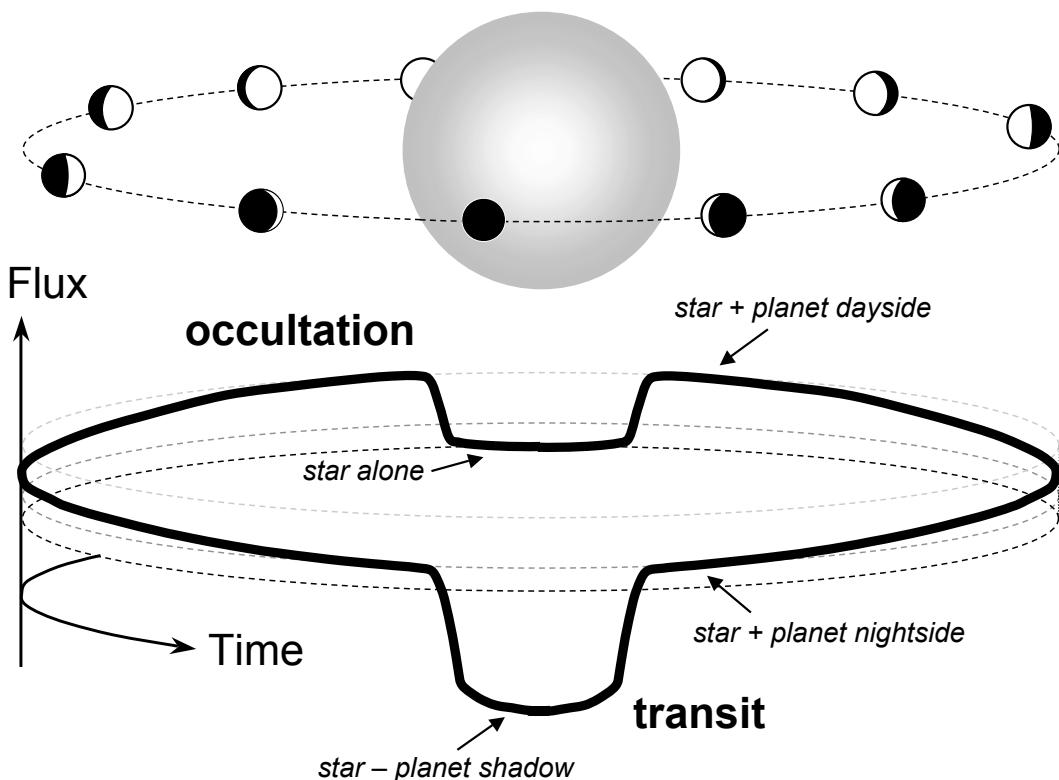


图 1-5：凌星法探测行星示意图，凌星法探测行星示意图，上半部分表示不同的轨道时刻。下方则为整个系统观测到的流量变化。此图取自书籍 [23]。

事实上，掩食在太阳系内已属屡见，比如日、月食和金星凌日现象。虽然凌星法探测与视向速度法在原理上被 Struve 于同一年提出^[11]，但真正意义上的第一次观测到系外凌星却比视向速度晚了五年^[23]。当时视向速度已经发现了 64 颗系外行星，在对其中 6 颗行星系统的凌星监测中，行星 HD

^①凌星被约定特指半径较小天体遮挡大天体，而掩星则相反。双星中的掩食通常只用于大小相近天体的互相遮挡

209458 b 的主掩食成功被观测到^[24,25]。这种滞后主要是因为凌星发生的几何空间概率较低 ($p = R_s/a$)，与此同时还要求观测的相对测光精度至少达到 5 % (对应于木星凌太阳)，凌星法也因此通常结合巡天计划 (尤其是大视场巡天) 展开，因而提高测光精度、处理数据和去除假阳性信号也成了该方法的技术难关^①。目前地面上比较成熟的巡天项目，包括 The Trans-atlantic Exoplanet Survey (TrES)^[26]，XO^[27]，The Hungarian-made Automated Telescope Network (HAT)^[28] 以及 Wide Angle Search for Planets (SuperWASP)^[29]，相应空间巡天项目也有 Convection, Rotation and planetary Transits (CoRoT)^[30] 与 *Kepler*^[16]。

1.2.3 天体测量

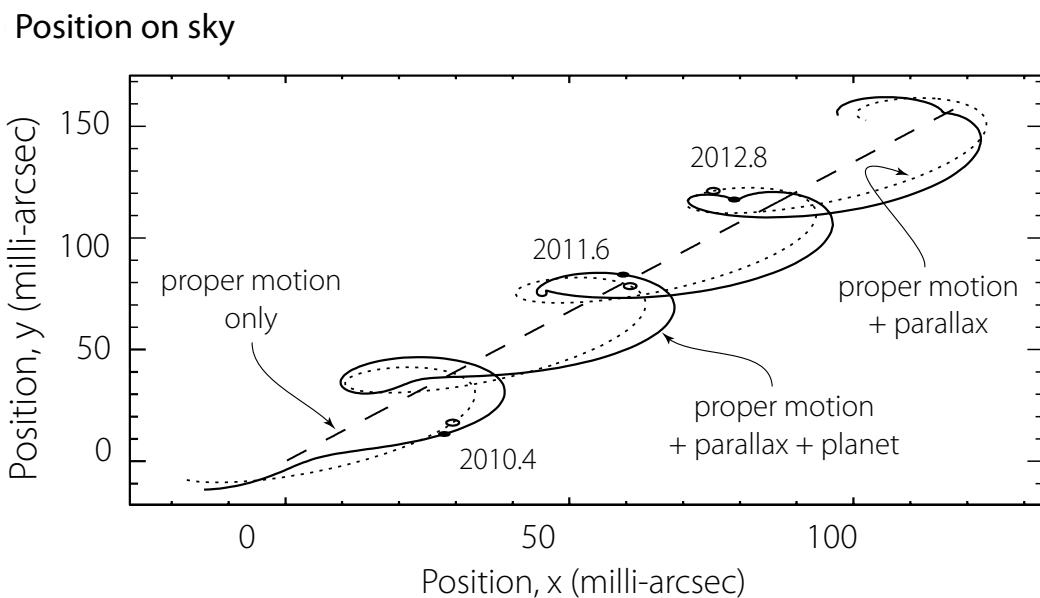


图 1-6：由于行星的存在，宿主恒星的天球坐标随着时间的变化示意图。此图取自文献 [21]。

和视向速度探测主星前后摆动不同，天体测量法 (astrometry) 着重于观测恒星在天球上的左右摆动。行星对宿主恒星造成的来回振幅大小可用如下公式估算

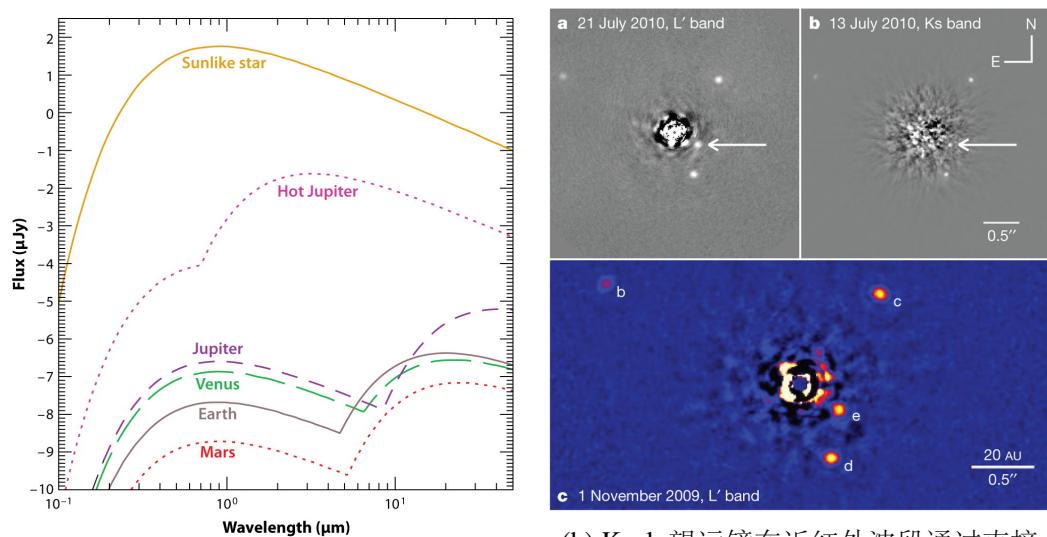
$$\alpha \simeq \left(\frac{M_p}{M_s} \right) \left(\frac{a}{1\text{AU}} \right) \left(\frac{d}{1\text{pc}} \right)^{-1} \text{arcsec} . \quad (1-2)$$

^①凌星法只能得到系外行星的候选体，一般还需额外使用其他方法联合认证该行星，如中天时刻变化 (Transit Timing Variation, 简称 TTV) 或者 RV。

如图 1-6 所示，天体测量法只需要恒星在天球球面上的经度纬度信息就可探测到行星，它也对主星的性质没有任何依赖，因而有其独特的优势，如可探测轨道倾角参数 i 。2013 年，Gaia 天体测量卫星成功发射，虽然目前来看科学数据尚未达到探测系外行星的精度^[31]，期待今后几年会有振奋人心的成果。

1.2.4 直接成像

中国古话有道是「耳听为虚，眼见为实」，直接成像法便可把行星直观地展示出来。技术上这其实并非易事：距太阳系几十个秒差距以外的行星与其主星的空间张角（angular separation）往往远小于望远镜分辨率。即使空间上能分辨，恒星的黑体辐射也往往比行星高近十个量级（图 1-7a）。在实际的观测中，对行星直接成像往往需要星冕仪（coronagraph）或干涉仪（interferometer）的辅助（如图 1-7b）。



(a) 可见光波段行星与主星的对比度可差至十个量级，因而直接成像法一般选择在长波范围（如红外波段）观测系外行星。图片摘自文献 [32]。

(b) Keck 望远镜在近红外波段通过直接成像得到的 HR 8799 系统。中心恒星的大部分光已被星冕仪遮挡，留下小部分噪声，与远处四颗行星。图片取自文献 [33]。

图 1-7：直接成像法探测系外行星。**(a)** 仪器接受类太阳恒星在 10 pc 以外的黑体辐射强度，其余为太阳系行星与热木星在此恒星周围黑体发射与发射的叠加流量。**(b)** Keck 望远镜利用角向较差与自适应光学技术直接成像观测到的 HR 8799 系统。

直接成像方法往往偏向于探测年轻的系统，如 HR 8799^[34]，Fomalhaut^[35] 和 β Pictoris^[36]，这是因为行星在其形成早期会拥有较强的近红外辐射。目前用此方法的望远镜有 Hubble Space Telescope (HST)，Keck，Very Large

Telescope (VLT) 和 Gemini Planet Imager (GPI) 等^[34,37,38]。

1.2.5 其他方法

微引力透镜 (microlensing)：本方法原理可以追溯到 1936 年，Einstein 发表了一篇计算前景星对视线方向上背景星引力放大率的文章^[39]。而且在第一颗用微引力透镜观测得的行星前，Mao 和 Paczynski 就已经从理论上提出了行星能在恒星引力透镜基础上造成额外的微引力透镜效^[40]。如今已经有 42 个通过微引力透镜发现的系外行星系统，包括 2 个双行星系统^①。在役的仪器主要有 Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE)^[41] 和 Microlensing Observations in Astrophysics (MOA)^[42]，它们一般会监测恒星密度较大的区域如银河系核球 (Galactic Bulge，简称 GB)。

计时法 (timing)：传统计时法最典型的例子就是最早被发现的系统 — 脉冲星 PSR1257+12 行星系统^[13]。除了传统的 Pulsar Timing Variation 之外，可以说任何理论上拥有稳定周期信号的恒星计时变化都可以用来探测潜在的系外行星：如凌星计时变化 TTV^[43,44] 和星震时变^[45,46]。此方法应用前景也非常可观，特别是针对多行星系统动力学特征刻画^[47]。

除此以外，Perryman 列出了更为系统且详细的探测方法，对应的探测能力以及它们在将来可能的应用^[48]，请参见下页图 1-8。

1.3 行星形成理论

星际空间并不是空无一物的，英国天文学家 William Herchel 在 18 世纪末观测到恒星周围冷暗物质吸收带，我们的原太阳就是在这般空间环境中孕育而成^[49]。随着原初分子云坍缩，核心区域会演化成原恒星，而周围的物质会由于原初角动量守恒而沉降成盘状结构以及双极喷流 (bipolar jets)，比如观测到的 Herbig-Haro 型天体^[50]。

在恒星形成的早期，现有的观测证据主要集中在 T-Tauri 型天体上（又叫 Young Stellar Objects，简称 YSOs）。YSOs 通常会按照红外谱指数 ($\alpha_{\text{IR}} = \log \lambda F_\lambda / (\log \lambda)$) 分为 Class 0, Class I, Class II, Class III 四种类型^[51]（见图 1-9），它们恰恰各自对应着不同的原恒星演化阶段。

^①参见 NASA Exoplanet Archive: <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

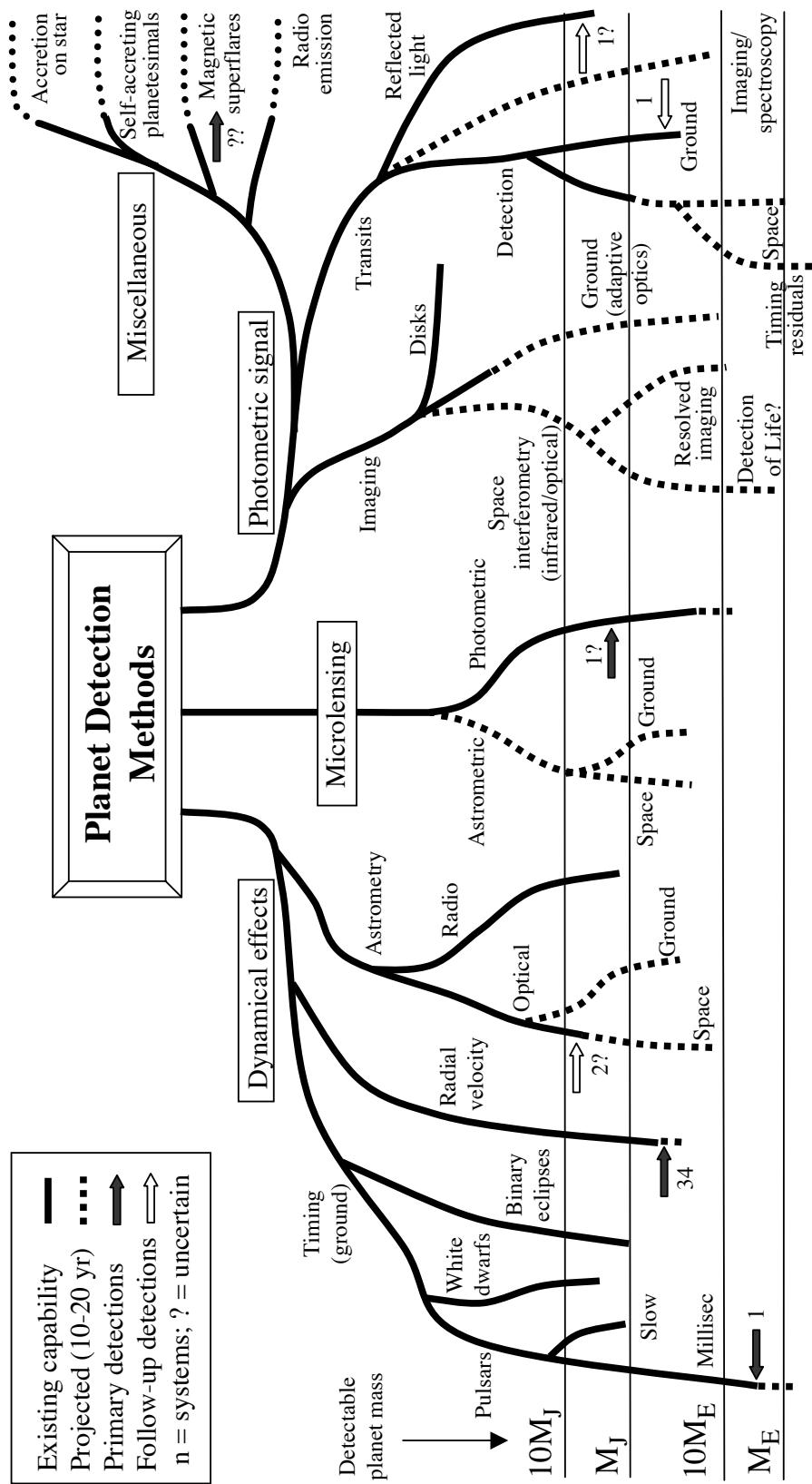


图 1-8：系外行星探测方法大全，关于图片说 明请参见文献 [48]，此图摘录自该文献的第一幅插图。

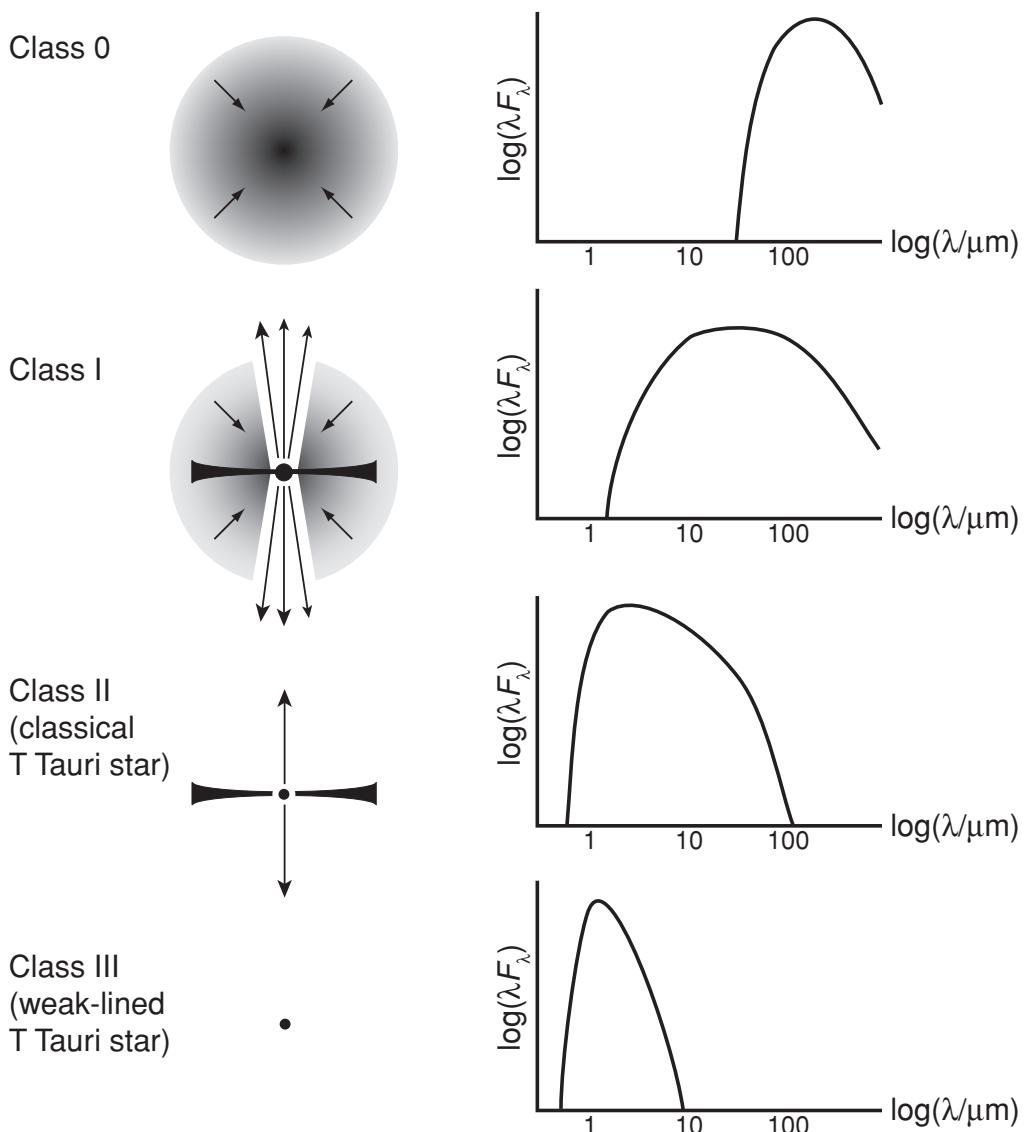


图 1-9: YSOs 按照红外谱指数划分的四种主要类别，图中背离黑体谱的红外突起部分又被称作红外超，它也是恒星是否存在盘的重要判据之一。此图取自书籍 [52]。

从某种程度上说，此刻的原恒星盘（protostellar disk）已可被称作原行星盘^①（ProtoPlanetary Disk，简称 PPD）。根据文献 [53]，由于恒星对周围气体的吸积^[54]、恒星的高能辐射^[55,56]，以及气体盘自身的粘滞性^[57,58]，角动量会从气体盘的内侧向外转移，原行星盘也会逐渐耗散。如图 1-10 所示，2001 年 Haisch 等人通过统计不同星团中的红外超恒星比例，发现原行星盘的存活时标在不到百万年（10 Myr）的量级^[59]。这对类木行星行形成有着非常重要的限

^①一般而言在恒星形成的早期，当恒星处于活跃吸积阶段时星周盘被称作原恒星盘，而在随后的行星形成阶段则被称作原行星盘。

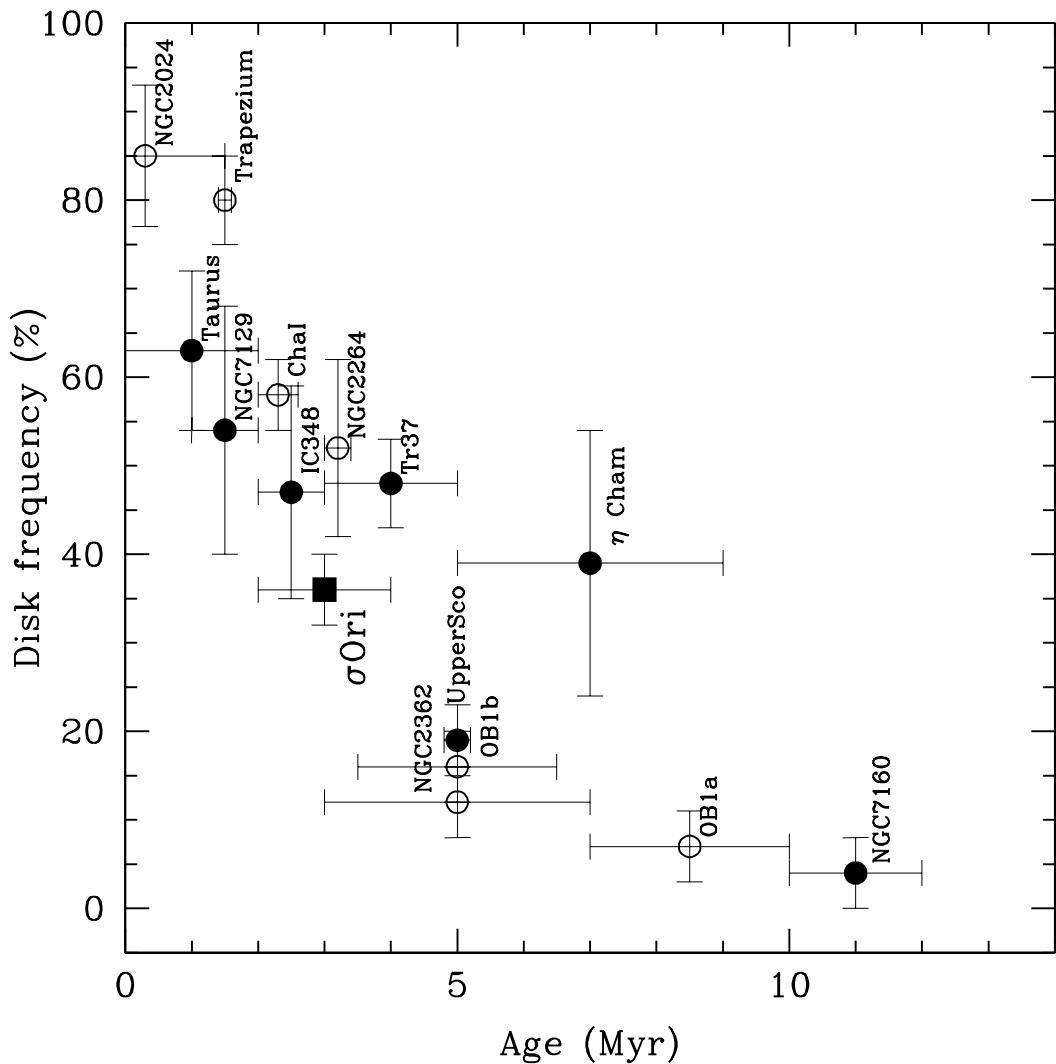


图 1-10: 不同星团红外超等效的原(恒)行星盘占所有星团成员的比例。此图可推断星团年龄在 5 Myr 左右，恒星周围的气体盘已近乎消散。此图取自文献 [61]。

制，因为如今普遍认为木星必须在气体盘消散前吸收足够的气体来长成如今的质量大小^[60]。

1.3.1 基于太阳系的经典形成理论

早在 18 世纪中页，关于行星形成假说就已纷繁多样。其中康德、拉普拉斯等人提出的「星云假说」因可较好应用至太阳系行星系统中而发展壮大。表 1-1 给出了太阳系八大行星的物理参数，由此表可得出太阳系各大行星具有非常好的一致共面性，除了水星以外都处于近圆轨道，且在火星和木星之间存在明显的物理性质差异。如果将每个行星的重元素平均到打散至行星之间

表 1-1: 太阳系八大行星物理参数与轨道参数, 轨道根数取值依照 J2000 平赤道参考系, 数据源自 NASA/JPL 网站。

	$a(\text{AU})$	$P(\text{days})$	$M_p(M_\oplus)$	e	$i(\text{deg})$	$R_p(R_\oplus)$	$\rho(\text{g cm}^{-3})$
水星	0.3871	88.0	0.0553	0.2056	7.00	0.383	5.427
金星	0.7233	224.7	0.815	0.0068	3.39	0.949	5.243
地球	1.000	365.2	1	0.0167	0.00	1	5.514
火星	1.524	687.0	0.107	0.0934	1.85	0.532	3.933
木星	5.203	4331	317.8	0.0484	1.30	11.2	1.326
土星	9.537	10,747	95.2	0.0539	2.49	9.45	0.687
天王星	19.19	30,589	14.5	0.0473	0.77	4.01	1.271
海王星	30.07	59,800	17.1	0.0086	1.77	3.88	1.638

的空隙中, 并且混入适量的氢、氦使得新的混合物拥有与太阳相等的金属丰度^① ($[\text{Fe}/\text{H}]$) , 这样得到的最小质量原太阳行星盘被称作 Minimum Solar Mass Nebula^[62,63], MMSN 气体盘的面密度拥有如下的幂率函数形式:

$$\Sigma_g = 1.7 \times 10^3 \left(\frac{r}{\text{AU}} \right)^{-3/2} \text{ g cm}^{-2}; \quad (1-3)$$

相应的固体盘的面密度分布同样可描述为:

$$\Sigma_s = 7.1 f_{\text{ice}} \left(\frac{r}{\text{AU}} \right)^{-3/2} \text{ g cm}^{-2}, \quad (1-4)$$

其中 f_{ice} 为雪线因子。在距离太阳 2.7 AU 以外, 水分子等会凝结成冰雪等固体物质, 因而此因子会从 1 增加至约 4.2^[64]。从此最小太阳星云模型出发, 假若在垂直方向上给它一个标高使其变为三维盘, 这就是经典太阳系行星形成模型的开端。根据文献 [65], 重元素物质 (以微米到厘米级尘埃形式存在) 会最先开始在垂直方向上沉降到盘的中平面; 紧接着固体物质 (dust) 开始碰撞结合^[66–68] 或引力坍缩^[69–72] 成星子 (planetesimal)。

在 MMSN 模型下, 星子的半径大概为公里量级。这样大小的星子和尘埃性质不同, 它可以脱离气体的阻尼力并通过自引力保持其结构。此时星子相互之间的引力作用变得显著, 它们会经过雪崩增长与寡头生长两个时期成长为原行星^[73–76]。原行星 (Protoplanet, 亦称做行星胚胎) 会在接下来分别演化

^①在天文学中, 金属元素特指氢和氦以外的所有重元素。

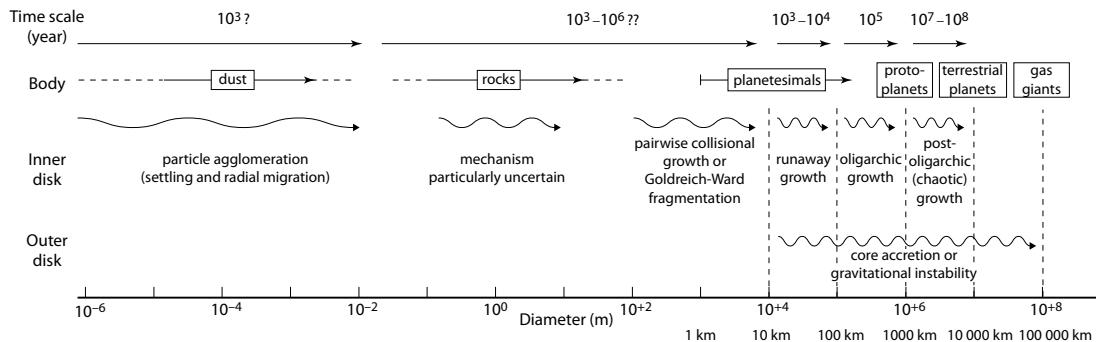


图 1-11: 基于太阳系的传统行星形成理论模型在不同阶段的说明图，其中「米级障碍」属于至今为止的重大难题。此图取自文献 [21]。

成气态巨行星和类地行星，其中形成气态巨行星一般被认为通过核吸积模型（core accretion）形成^[77-79]，而类地行星则需要经历更多的动力学作用过程才能形成^[80]。

当然，行星形成也还存在很多问题与挑战，解释太阳系太行星还存在许多难关^[81,82]，数值模拟如 Nice 模型^[83]也并不能解释太阳系细节构型（尤其是水的来源^[84]），本文仅能作粗略介绍，图 1-11 为上述经典形成模型的核心各阶段过程的总结。

1.3.2 经典理论新挑战：系外行星

由于观测极限，太阳系行星如今尚身处观测能力范围以外。如图 1-12 所示，系外行星种类遍布多样，堪称百花齐放，且已确认数量仍在日趋增加。抛开观测选择偏差（observational selection bias），太阳系与之相比似乎显得有些「格格不入」。按照图 1-12，本文将系外行星按照其集中区域大致分为三类：热类木星族（椭圆实线），冷类木星族（方框实线）和超级地球族（椭圆虚线）。

1.3.2.1 热类木星族 Hot Jupiter Population

当 Mayor 和 Queloz 与 1995 年发现第一颗围绕类太阳的系外行星 51 Peg b 时^[15]，整个行星学界都为之震惊，因为这颗类木星的轨道周期只有 4.23 天。51 Peg b 单独用经典行星形成理论根本无法解释。由于此类行星非常靠近其主星（轨道周期 $P \leq 10$ 天），质量大于土星质量 ($0.3 M_J$) 故而得名曰热类木星。作为本册论文重要的研究对象，此类行星详细的介绍内容请参见 §4。

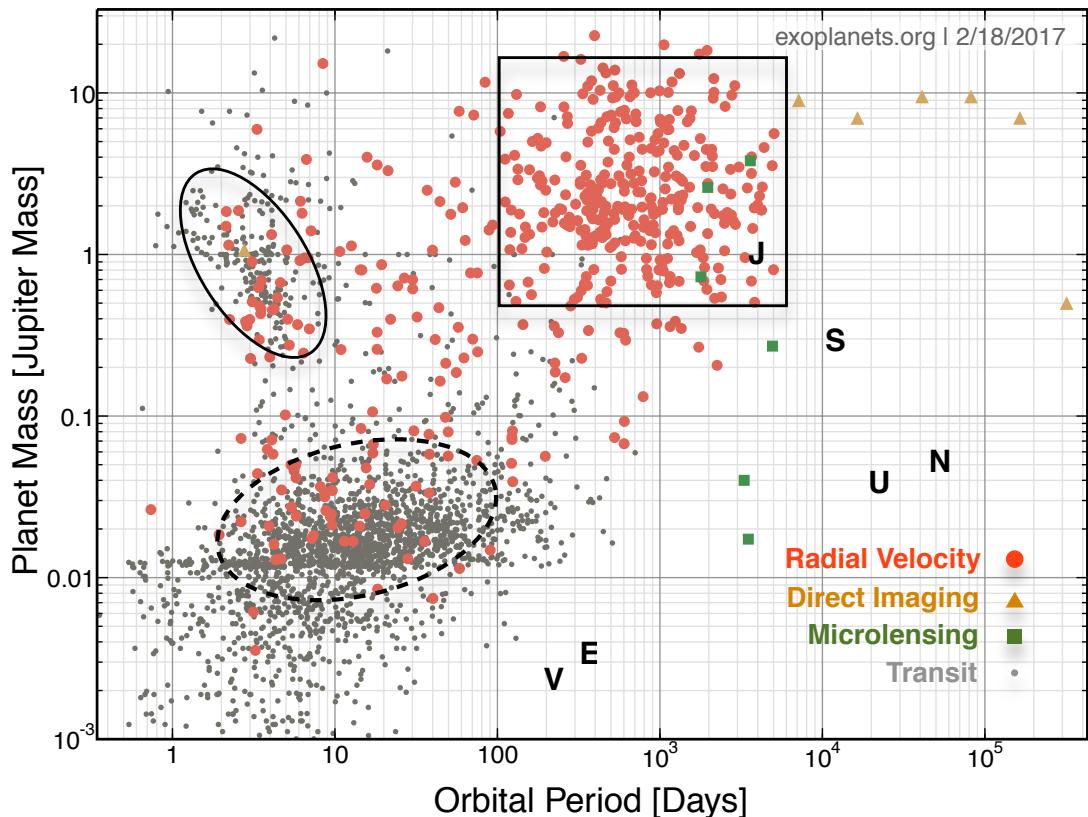


图 1-12: 现今探测到系外行星的周期—质量散点图。其中不同颜色分别代表不同的探测方法：红色代表视向速度法，灰色是凌星法，绿色指代微引力透镜法黄色代表直接成像法。黑色字母 V, E, J, S, U, N 则分别表示太阳系内金星，地球，木星，土星，天王星和海王星。本文将系外行星进行人为类别划分包络在封闭曲线内，分别为热类木星族（椭圆实线），冷类木星族（方框实线）和超级地球族（椭圆虚线）。此图取自 <http://exoplanets.org/>。

1.3.2.2 冷类木星族 Cold/Normal Jupiter Population

与轨道距离主星较近的热类木星相对应有一类行星被称作冷类木星（或者常规类木星）。此类行星在观测上拥有长于约一百天的轨道周期，有效温度也比热类木星低得多，太阳系木星就属于一颗典型冷木星。相比短周期行星，确认此区域的行星通常需要望远镜连续观测几年甚至数十年，因而样本完备性也相对较差^[85]。根据使用 Keck 望远镜进行的 Lick-Carnegie 行星搜索项目，Rowan 等人通过观测样本估算得到此类行星的出现概率大概只有约 3%（文献 [86]），因而木星在人类想法中先入为主、见惯非惯的概念也许并不周全。

另外值得提的一点是直接成像法（§ 1.2.4）可以观测到更长周期行星，如 HR 8799 系统（文献 [34]，详见图 1-7b）等屈指可数的样本。传统的核吸积模型需要花很长时间来形成此类气巨星的胚胎核心。相比之下，另辟蹊径的引力

不稳定（Gravitational/Disk Instability，一般简称 GI）模型^[87-89]则可比较合理地解释这些巨行星是如何形于距离主星几十个天文单位的轨道上^[90]。

1.3.2.3 超级地球族 Super-Earth Population

超级地球，又称迷你海王星（mini-Neptune），对于 RV 探测到的系外行星一般定义为介于十个地球质量与海王星质量之间。而对于凌星法探测到的行星，则其半径大约介于二到四个地球半径^[91]。在图 1-12 中，不难发现超级地球十分常见与 1 天至 100 天之间的轨道，Batalha 等人利用 *Kepler* 前 16 个月的数据也推断超级地球为银河系最常见的行星类别^[92]。

那么超级地球的形成历史究竟何般？它们又是否可归至类地行星范畴呢？前面 §1.3.1 提到在核吸积模型下，气态巨行星首先会成长为约 $10 M_{\oplus}$ 的固态核心后通过吸积气体而成长^[93]。超级地球质量也正好估算为此值附近^[94]，因而很自然的假设便是此类行星在雪线之外形成并且轨道迁移至如今的位置^[95-97]。然而也有争论认为在 M 型矮星周围，超级地球完全可以于当地形成（*in situ* formation，文献 [98-102]）。或许随着越来越多的超级地球内部结构被观测所限制后，此难题才可被解答^[103]。

另外，超级地球一般存在于多行星系统中^[104]，而且 Fabrycky 等人发现这些行星倾向于聚集在平运动共振（Mean Motion Resonance，简称 MMR）的内边缘，尤其是 3:2 和 2:1 平运动共振^[105]。一时之间包括潮汐作用、共振结构等解释众说纷纭^[106-111]，到如今也尚未弄清其中的动力学机制，还有此现象是否依赖于超级地球的形成过程。

1.3.2.4 值得一提的行星系统

除了以上三大类系外行星系统，本文额外汇总了一些有趣的行星系统（Planet of Interest，POI），它们诡怪的轨道构型在某种程度上令人叹为观止，甚至挑战了现有的行星形成理论。

共振系统 — GJ 876。 2001 年，Marcy 等人发现 GJ 876 b 和 c 两颗类木行星周期比接近 2:1^[112]。几年后，Rivera 等人更是发现 GJ 876 的额外一颗行星 d 与前两颗处于 Laplace MMR^[113]。这和太阳系木星的内侧内伽利略卫星 Io，Europa 以及 Ganymede 的构型堪称如出一辙。理论上，此类轨道构型很有可能是行星在气体盘中迁移所致^[114,115]。

紧凑系统 — Kepler-11。 它因其 6 颗行星的紧密轨道构型^[116]而被称作太

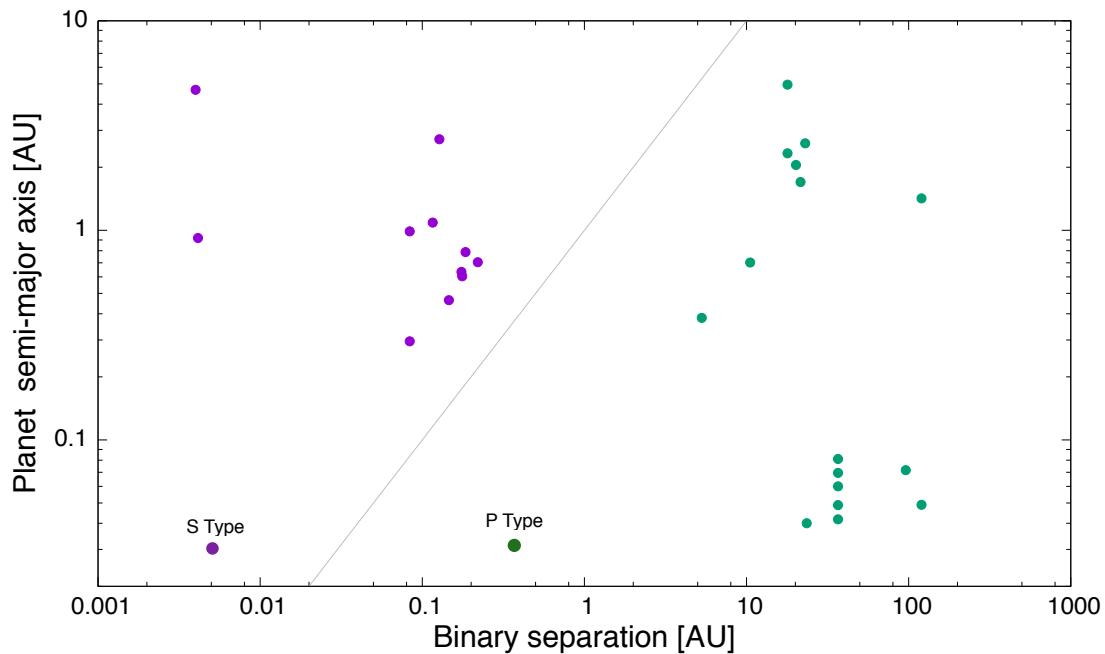


图 1-13: 已知双星内卫星型 (S-type) 与行星型 (P-type) 行星系统中双星和行星轨道半长径分布图, 数据来自 <http://openexoplanetcatalogue.com>。

阳系的孪生子系统^[117]。行星在此如此紧凑的系统几乎处于稳定的边缘^[118]。此紧密构型起源也是一直处于争辩中, 关于 Kepler-11 行星系统形成理论详见文献 [119]。此类系统还有另外一个有代表性的例子: HD 10180^[120]。

双星系统行星 – γ Cephei b。，双星系统中的行星分为卫星型与行星型^①，其中 γ Cephei^[121] 系前者，而 Kepler-16^[122] 则属后者。如图 1-13，近距离双星中的行星系统与单恒星周围相差迥异，这是因为存在伴星的引力干扰，导致行星系统形成过程大相近庭。关于此类行星系统，请详见书籍 [123]。

高偏心率系统 – HD 80606。作为偏心率最大的几个系统之一，HD 80606 拥有 0.93 的轨道偏心率^[124]，远心点居然是近心点距离的近三十倍。同属此类的系统还有 HD 4113^[125]，HD 80606 行星轨道法向和主星自转轴方向测量 (spin-orbit measurement)^[126] 表明它们的起源很可能与 Lidov-Kozai 机制^[127,128] 有着密切关联^[129]。

极短周期行星 – Kepler-78 b。极短周期行星又称 (Ultra Short Period Planets, USPs)，它们因周期通常在一天以内，和主星表面的距离非常近而得称。代表性行星有 Kepler-78 b (周期为 8.5 小时^[130])，Kepler-70 b (周期仅 5.8 小

^① 卫星型又称 Satellite/Circumprimary Type，构型为行星围绕双星中的一颗运转；行星型或称 Planet/Circumbinary Type，构型为行星轨道围绕双星的质心。

时^[131]等。由于它们受到主星强烈的辐射与引力作用，因而通常拥有非常大的密度，近年来也越发成为行星与主星物理性质新实验基地^[132,133]。

主序后恒星 – HD 13189^[134]。虽然利用 RV 探测主序后恒星周围行星的效率并不高^[135]，但是此类行星依然对检验行星对恒星的质量、演化历史依赖度极为重要^[96,136,137]。观测显示巨星周围的行星普遍距离主星较远 ($a > 1 \text{ AU}$)，这也许正是主星演化吞噬近距轨道行星的证据^[138,139]。

其他诡怪系统 – WASP-47。该行星系统拥有一颗典型的热类木星^[140]，然而后续长期检测显示该系统有另外两颗小质量行星^[141,142]以及一颗长周期冷类木行星^[143]。这和传统的认为热类木星更倾向于成单的想法截然不同^[144]，并

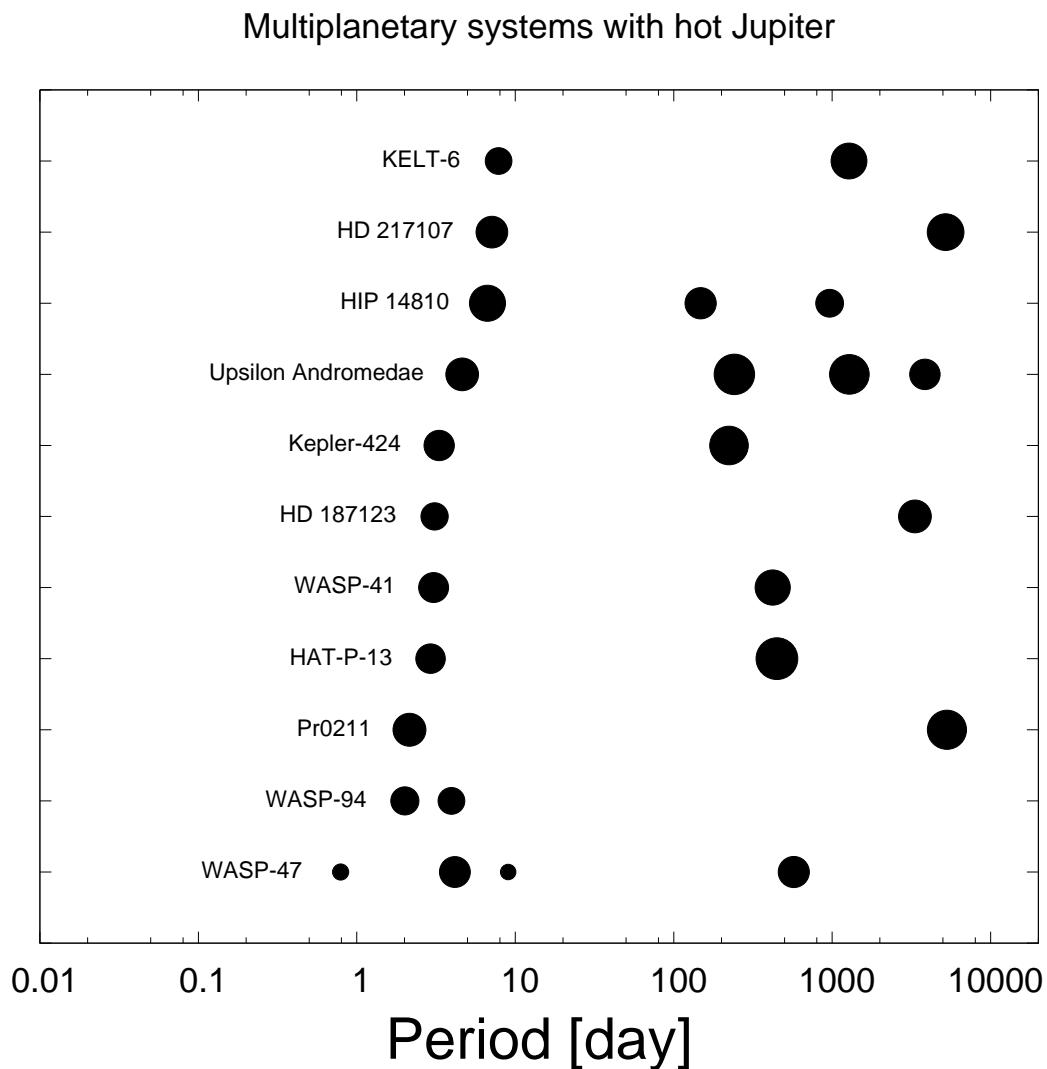


图 1-14: 所有拥有热类木星的已确认多行星系统汇总图，点的相对大小正比于行星的质量。数据同样来自 <http://openexoplanetcatalogue.com>。

且即使与其他包含热类木星的多行星系统相比，WASP-47 也大有不同（如图 1-14），现有的理论并不能完全解释该系统的构型，因而更完善的形成理论与观测限制也更加迫在眉睫。

另外对疏散星团以及球状星团的巡天显示，Free-floating Planets (FFPs) 也许是潜在的数量最多的行星质量天体^[145-147]，星团环境作为系外（内）行星的出生环境^[148,149]，也不得不考虑该环境的反馈作用。

1.4 本文立意

系外行星从无到有，再到现如今样本越来越丰富，正是因此前人不断去进化仪器、细化观测流程以及大胆探索数据。因此本文亦从观测作为出发点，讲述怎么利用南极望远镜观测、如何去处理测光数据处理、如何提高数据的精度（§ 2）从而服务于后续行星探测以及原恒星盘搜索等科学目标（§ 3）。

另外，本文将于 § 4 章详细探讨系外热类木星系统的统计性质，回顾解释这类行星形成的困难之处。最后还包括如何利用轨道-自转不共面性（spin-orbit misalignment）来限制这些系统的潮汐演化过程和参数，以及这些过程和参数蕴含或还原了哪些系统演化的物理效应。

第二章 基于南极的天文数据观测与处理

2.1 南极天文背景

搜索系外行星需要长时间基线和高精度的天文观测，然而因为地球在做周日自转并且存在大气包层，因而在地球上很难同时满足这些严苛的观测条件。

§ 1.2.2 中曾提到空间望远镜 CoRoT^[30] 与 *Kepler*^[16]，它们花费了昂贵的代价（数十亿美元）才能得到满足上述观测条件的数据，事实证明它们也取得了令人瞠目的科学成果。而横向对比，南极台址（Antarctic plateau）作为理想的地面台址可在经费花费相对较少的同时，依然拥有良好的观测条件 — 而这得归功于以下几点优势：

- 南极高台地址拥有大陆上最冰冷、干燥^①的空气（文献 [150]）。此气候条件尤为适合进行光学、红外以及亚毫米波段的天文观测^[151]。
- 南极高台水平高度高，因而空气层厚度薄，大气湍流少，空气状况也更稳定^[152]。
- 极夜（Polar nights）为观测提供了长达 3 个月的连续观测条件，这也是观测系外行星最重要的优势^[153]。

得益于拥有如此得天独厚的先天条件，南极台址在短短 30 年内就已吸引了大批的天文开拓实验与项目（南极天文的历史相关细节请查阅综述文献 [154]）。Grec 等人于 1980 年开启首个地处南极的光学实验^[155]。随后一大批天文学成果相继涌现^[150]，以高精度测光科学为例：ASTEP（Antarctic Search for Transiting Extrasolar Planets）项目先后于 Dome C 观测台址捕捉到 WASP-19 b 次掩食的证据^[156]，并对该台址在凌星法探测系外行星领域的可行性作出测试^[157]。

Dome A（位于昆仑站附近，坐标 $80^{\circ}37'S$ and $77^{\circ}53'E$ ，如图 2-1）作为

^①以绝对水气值来衡量。



图 2-1: 南极地理位置图, 暗咖啡色曲线表示地形等高线。可以看到 Dome Argus (或称冰穹 A) 台址 (中国, 以红星标注) 位于南极大陆最高点, 另外冰穹 C (澳洲) 和 F (日本) 分别以灰色圆点表示。此地图版权 Australian Antarctic Division。

南极大陆最高的台址 (海拔高度 4093m) 在南极天文领域有着特殊的地位。Saunders 在比较过云层覆盖率、空气对流层厚度和视宁度 (seeing) 后, 指出 Dome A 也许是地面潜在的最佳天文观测台址 (文献 [158])。中国南极天文中心也于 2008 年成功将中国之星小望远镜阵 (Chinese Small Telescope ARray, 简称 CSTAR) 成功安装就位于冰穹 A 台址。在极地冰寒的环境下需要克服许多的障碍^①, CSTAR 也取得硕果累累的成果, 本文将于 § 2.2 中详细介绍如何通过修正鬼像 (ghost image) 来提高数据精度。另外 § 2.3 将简单描述 AST3 (Antarctic Survey Telescopes) 巡天项目中系外行星搜寻计划的观测策略。

^①关于南极天文科考支撑平台, 请参见网址 http://www.ccaa.pmo.cas.cn/njtwt/201312/t20131203_144501.html。

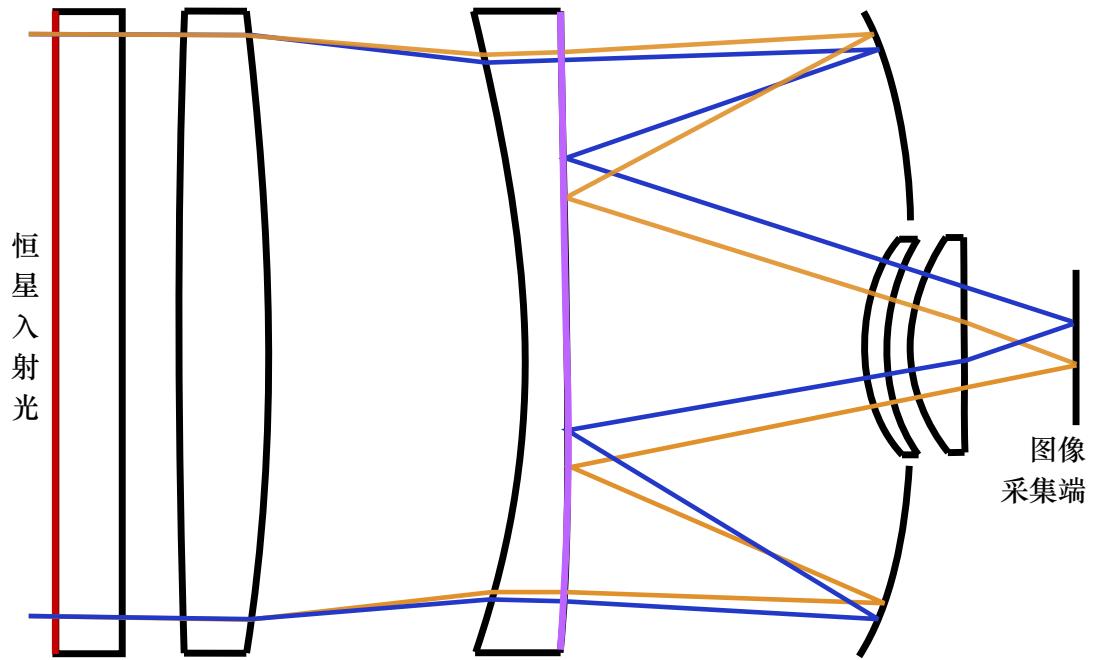


图 2-2: CSTAR 多镜面结构光路设计图。入射平板镜（最左侧）由改正镜与滤镜组成，最右侧的镜片为中空反射球面镜，中间子镜的右侧面涂有反射材料。作图时未按照实际比例，参考自文献 [162]。

2.2 CSTAR 以及其测光数据中的鬼像处理

2.2.1 CSTAR 望远镜光学设计和预数据处理

作为 PLATO 平台^[159,160]下一台子设备，CSTAR 望远镜由南京天文光学技术研究所（Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology，即 NIAOT）承担设计工作。CSTAR 阵列由 2×2 共四面施密特卡式（Schmidt-Cassegrain）望远镜组成，每面镜子大小 145 mm 口径：其中三面拥有与斯隆数字化巡天类似的 g, r, i 宽带滤镜，另一面无滤镜。望远镜在设计上被固定于地表，因而观测模式为指向天顶附近的南天极天区保持凝视，考虑此做法也是因为这样更有利于研究天文变源。CSTAR 成像后端匹配了 Andor DV435 型号 $1k \times 1k$ 的 CCD，联合望远镜 $4.5^\circ \times 4.5^\circ$ (20 deg^2) 的视场（Field Of View 或 FOV）大小，可知一个像素（pixel）对应于天球 $15''$ 的张角^[161]。图 2-2 展示的是 CSTAR 内部光路结构，在已有的 i 波段数据中，入射镜的表面覆盖了滤光片，且子镜（中间镜）也涂有反射膜，恒星的光线容易在两面涂层之间反射，从而导致鬼像的产生。

CSTAR 于 2008 年 1 月份，正式跟随南极科考队抵达冰穹 A 站点，可惜的

是在第一个观测季度结束后，望远镜只剩下 i 波段镜面能正常观测。于是从 2008 年 3 月 4 日至 8 月 8 日（冰穹 A 站极夜），CSTAR 共以 20 秒或 30 秒的曝光时间拍摄了超过 310,000 张图片。多亏了极夜创造的连续不间断观测条件，这些总曝光时间长达 1,728 小时的图片数据表现出良好的科学状况与条件。

随着极昼的到来，科考人员取回了 CSTAR 的原始观测数据，国内两个小组分别开始了独立的分析工作，国家天文台南极天文小组于 2010 年分别计算了台址当地 i 波段的天光背景以及大气透明度^[163]，并释放出超过 10,000 颗恒星点源星表^[164]。Wang 等人^[165]则于来年在光变数据中找出了 157 颗变星（这高于该天区先前所知数量 6 倍）。随后 Wang 分别在随后分别对测光给出大气消光、不均匀云层和周天效应的修正（文献 [166, 167]）。

下面，本文将简要介绍文献^[164]的主要数据处理流程。在完成扣除本底和平场等预数据处理后，Zhou 对每张原始图片采用了以 3, 4 和 5 为半径的孔径测光（aperture photometry）。接着，一张测光条件较好的图被选用作为标准参考，并用模式匹配来认证不同图内相同参考星的位置变化，并同时矫正其他图片内点源的星等偏差量。以上操作得到标准星表后，其中 48 颗恒星被挑选出来和 USNO-B1.0 参考星表对比从而得到最终星表。在以上的工作中，作者发现数据中的鬼像修正对于进一步提高测光精度有着非常重要的意义。

2.2.2 鬼像简介以及修正 CSTAR 数据中的鬼像

2.2.2.1 鬼像以及 CSTAR 中的鬼像

正如前文（§2.2.1）提到，鬼像在光学系统中并不算罕见，尤其是拥有大视场的施密特望远镜。U.K. 施密特望远镜单元（UKSTU）将鬼像的产生原因共归为五类，分别是乳化剂涂层、滤片修正镜、改正镜、滤光片以及尖状鬼像。CSTAR 在设计上采取施密特卡式光学设计，因而鬼像很可能产生于恒星入射光传播、折射与反射的过程中。UKSTU 手册^[168]将此类鬼像定性形容成弥散状的斑点，且鬼像光斑坐标与产生鬼像的亮源位置关于光学轴对称。对于 CSTAR 而言，鬼像修正十分必要，因为鬼像不仅会被误认证成一颗恒星源，还会叠加在背景恒星上从而造成额外的测光误差。

作为第一代南极天文望远镜，CSTAR 采取相对安全的凝视模式 — 望远镜支撑点固定在冰层上，并且对淮南天极附近的天区观测。当恒星做周日运动时，星象斑也会在 CCD 上绕着南极点做近圆周运动。若选取图「A5CH5029」

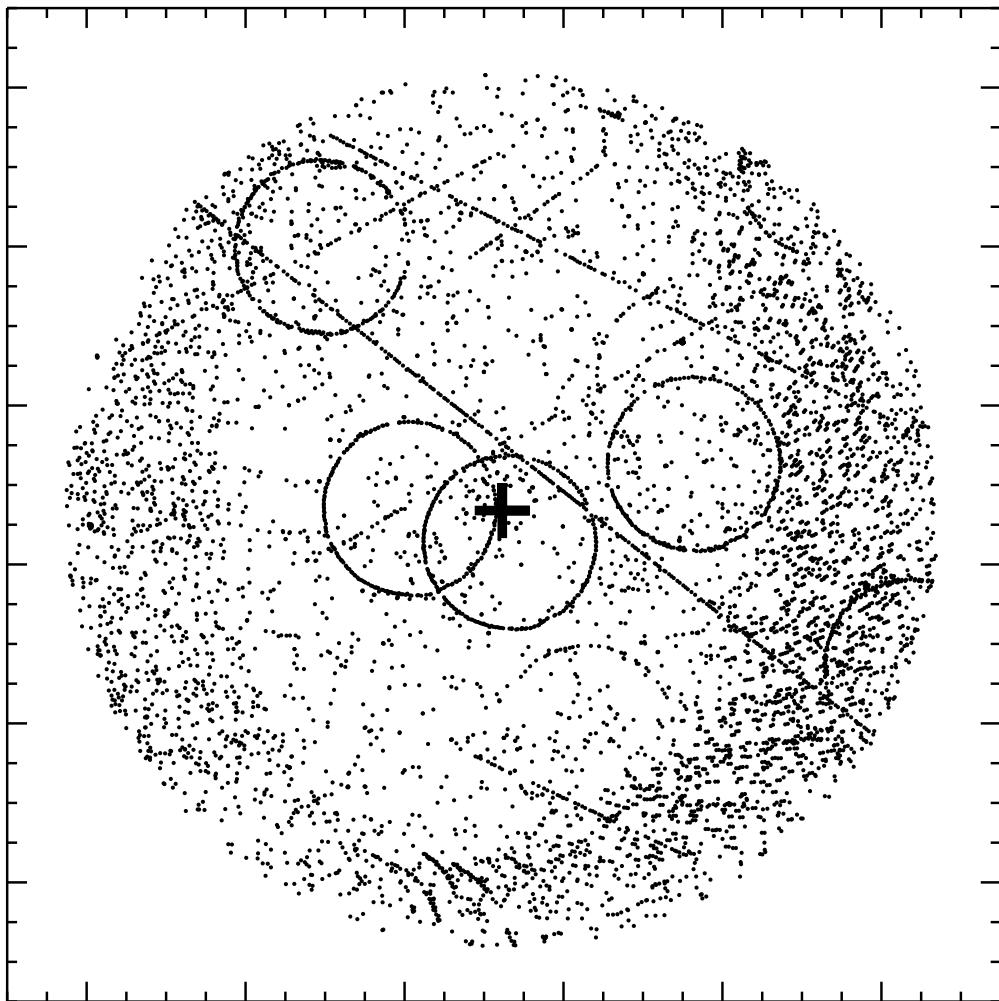


图 2-3: 周天鬼像叠加图, 也即「脏」图。图中的圆弧结构为鬼像所致, 黑色十字标注的是南极点。为了更好的看清鬼像的结构, 我们已经将已确认的恒星从本图中剔除, 此外图中线状物为人造卫星。

作为标准参考图, 那么经过恒星图案模式匹配 (pattern match) 后, 其余所有图相对于标准参考图的旋转角度便可被计算出。从而不同时间测得的图像内相同位置的恒星可被识别认证。此时将相同恒星的本地坐标 (pixel coordinate) 通过旋转缩放等操作转化成标准参考图内的坐标后, 便可得到与其对应的主坐标 (master coordinate)。从上一段文字中, 已经得知鬼像 (假恒星) 与产生鬼像的亮星关于光学轴对称, 所以当恒星们时时刻刻被匹配上的同时, 鬼像却只能经过一个周天后才能匹配上自己。若把一天之内所有拍摄的图片作叠加, 然后将同一颗恒星给抹去后, 我们可得到周天鬼像叠加图 (请查阅图 2-3)。从图

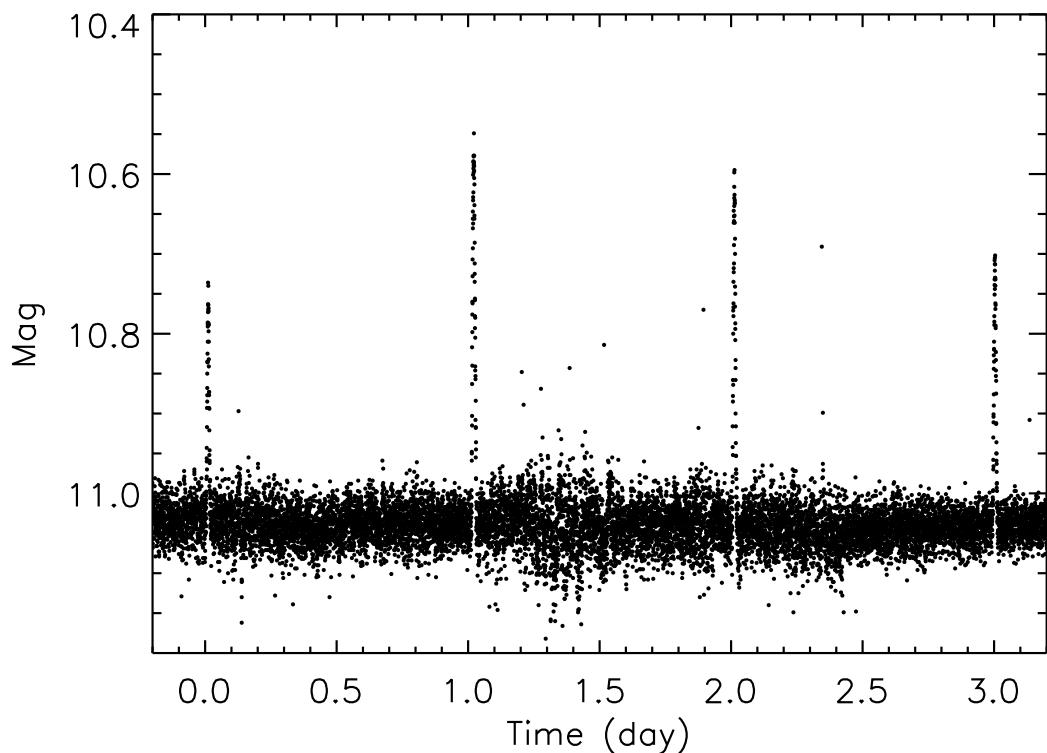


图 2-4: CSTAR 视场内坐标为 R.A.: $23^{\text{h}}24^{\text{m}}28.4^{\text{s}}$, decl.: $-89^{\circ}25'10.6''$ 的恒星的光变曲线。通常此特定鬼像会在一个恒星日内遭遇该被影响的恒星一次, 从而将恒星的亮度提高半个星等。

中可以看出, 鬼像的转动方向与周日运动方向相反, 鬼像因此也很可能周期性地「撞」到恒星。当然, 如果将南极冰川板块的微弱移动^[169] 与恒星自身的运动考虑在内, 鬼像很有可能在一天内遭遇到多颗恒星, 从而对恒星亮度造成多达约 1.0 星等的变化(如图 2-4 与 2-5)。若不小心处理这种变化很可能会被误认为恒星自身的性质, 例如恒星耀斑^[170], 因此修正鬼像是后续天体物理研究(如搜寻系外行星^[171] 等) 的基础工作。

2.2.2.2 CSTAR 鬼像修正方法

为了扣除所影响的恒星的流量中鬼像的污染, 我们首先得确认产生这些鬼像的前身, 即视场中的亮源。之所以采取此途径是因为鬼像通常为暗弱的延展源, 背景噪声对它们的孔径测光影响很大, 直接扣除被影响恒星中鬼像的孔径测光流量的做法会非常不可靠。找到产生鬼像的亮源后, 我们会将被影响恒星的星等变化程度极短出来, 最后就可以对 CSTAR 的数据进行系统性的修正。

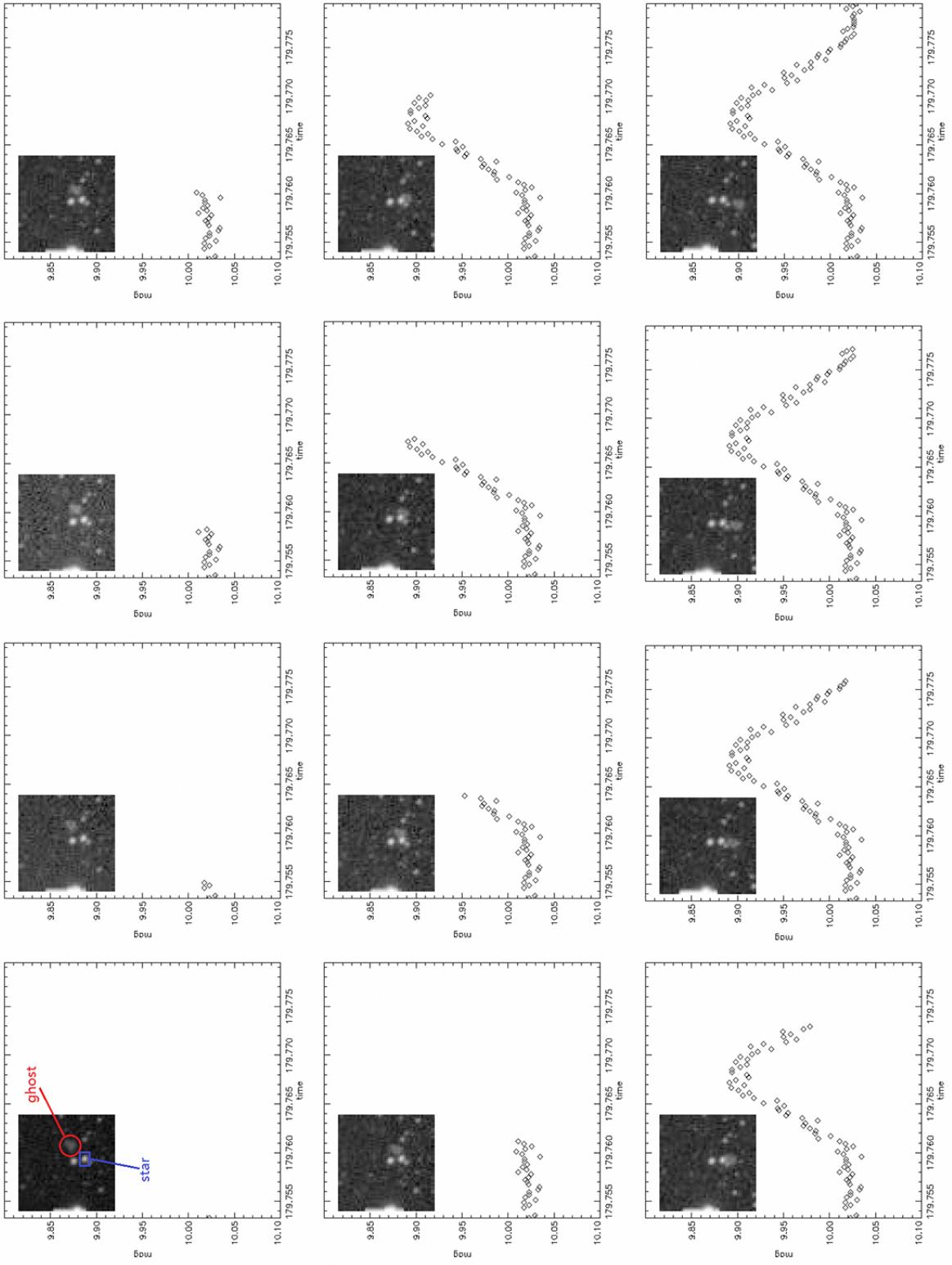


图 2-5: 坐标相对固定的恒星（蓝色标志）遇到鬼像（红色标注的模糊状弥散源）前后恒星星等的变化程度原片数据示意。每张快照的纵坐标为星等值横坐标为时间，如需查看此图清晰的动画版本请前往网址 https://github.com/meldonization/PhD_Disseration/blob/master/figures/chapter2/ghost_animation.gif。

我们因此发展了一整套处理识别鬼像、计算并消除鬼像对恒星星等的影响的流程。具体如下：

1. 确定光学系统对称轴和产生鬼像的亮源。CSTAR 视场较大，点源密集，因而对每个鬼像每张图做修正几乎是不可能完成的任务，这里我们只查找星场中最显著的鬼像环。由于望远镜观测的极限星等限制，因而只有最亮的恒星才会产生鬼像。当我们把星表中的前 100 颗亮星与最明显的鬼像环圆心做匹配，那么匹配成功的亮星就是产生鬼像的源。一旦产生鬼像的源被确定后，我们便可将鬼像的主坐标 $[X, Y]$ 转换成每张图片中的本地坐标 $[x, y]$ 。通过交叉联立此本地坐标和上文提到的亮星坐标，可以进一步得到望远镜系统的光学对称轴在 CCD 上的像素坐标值。
2. 定量的描述鬼像对背景星的影响。当知晓系统的光学对称轴后，我们可以从文献 [166] 中找到产生鬼像的恒星、鬼像以及被鬼像影响恒星的星等数值，且最后一个物理量会随着鬼像和恒星之间的距离变化而发生改变。下文统一用 d 替代鬼像中心与被鬼像影响恒星中心之间的距离，用 m_g , m_{gs} , m_s^0 和 m_s^1 分别表示鬼像的星等、鬼像源亮星的星等、被鬼像影响前后背景星的星等。本文采取两个基本假设：1. 鬼像源亮星流量与鬼像流量的转化率为 f_0 ，即 $F_g = f_0 \cdot F_{gs}$ ；2. 鬼像对背景星造成的光子数影响比例 f_1 只是距离 d 的函数， $\Delta F_s = F_s^1 - F_s^0 = f_1(d) \cdot F_g$ 。若此时带入流量与星等之间的转换关系 $m = -2.5 \lg F + m_0$ ，我们可以得到如下两个等式：

$$\begin{cases} m_g = -2.5 \lg f_0 + m_{gs} \\ , f_1(d) \cdot f_0 \cdot C^{m_{gs}} = C^{m_s^1} - C^{m_s^0} \end{cases} \quad (2-1)$$

其中常数 $C = \lg 2.5$ 。从统计上，我们可从鬼像、源恒星以及被影响的背景星的列表中拟合两个自由参数 f_0 和 $f_1(d)$ 。这里需要指出的是不同亮星产生的鬼像之间的参数并不完全一致，为了方便起见，我们归一化处理了第二个参数 $f_1(d)$ 。

3. 修正星表中的鬼像影响。以上两步完成后，我们可估算每张图内的未知参数 f_0 和 $f_1(d)$ 。假设图片拍摄时间为 t ，那么在带入每张图内每个恒星的修正量后，可得到去除鬼像污染的新光变曲线序列 (t, d, mag_s, mag_{gs}) 以及全新的星表。

表 2-1: CSTAR 星表中主要产生鬼像的亮星列表。

CSTAR ID	R.A. (h:m:s)	Decl. (d:m:s)	masterX (pixel)	masterY (pixel)	<i>i</i> (mag)
00003	49:03.3	-88:16:34.99	7497.2864	1386.2566	6.1357
00004	15:58.6	-87:33:53.25	1350.1814	8661.678	6.1444
00006	34:34.0	-89:46:18.97	5129.6065	5103.6644	6.3055
00007	08:26.2	-88:57:34.07	2812.204	4118.1307	6.3671
00008	15:55.2	-87:58:09.94	1740.2338	1388.6649	6.4489
00009	42:07.6	-89:27:37.16	6386.3986	4679.7432	6.4995
00011	20:07.4	-88:14:48.27	8033.5867	7374.1179	6.5395
00012	39:55.7	-88:39:19.55	4151.218	7494.304	6.5944
00018	45:45.4	-88:48:57.98	2940.9191	3000.1653	6.8181

2.2.2.3 鬼像修正结果及讨论

当拟合鬼像环半径数值（约 107 像素大小）、圆心位置坐标，并通过 match 程序^①和文献 [166] 给出的参考新表对比后，我们得到了一批产生鬼像的恒星列表（表格 2-1）。由图 2-6 可知鬼像与源恒星 *i* 波段的星等差约为 5.5，考虑到 CSTAR *i* 波段的极限星等约为 14 等，因而在接下来计算背景恒星星等受影响量的过程中，我们仅需考虑 *i* < 8.5 的亮星产生的鬼像。

然而在实际情况中，并不是所有星等量过 8.5 的恒星均会产生鬼像。亮星产生鬼像有很多条件，最重要的两个因素是这些亮源距离视场中心以及光学对称轴的距离。原理上讲，当亮星距离视场中心或者对称轴中心太远，它在镜面反射层之间被反射的光需要经过更长的光学路径来传播，产生的鬼像也因此而更暗弱。

在得到鬼像源亮星列表后，我们将该列表和鬼像环内的所有恒星做比较。这样做可以得到每张图中真正的鬼像和 CSTAR 系统的光学对称轴在 CCD 上的像素坐标。如图 2-7 所示，光学对称轴的本地坐标为 $[477 \pm 2, 297 \pm 2]$ 。该值也同样经过真实图像的测试（图 2-8）。考虑到鬼像以及其对应产生亮源之间的

^①源代码链接 <http://spiff.rit.edu/match/>

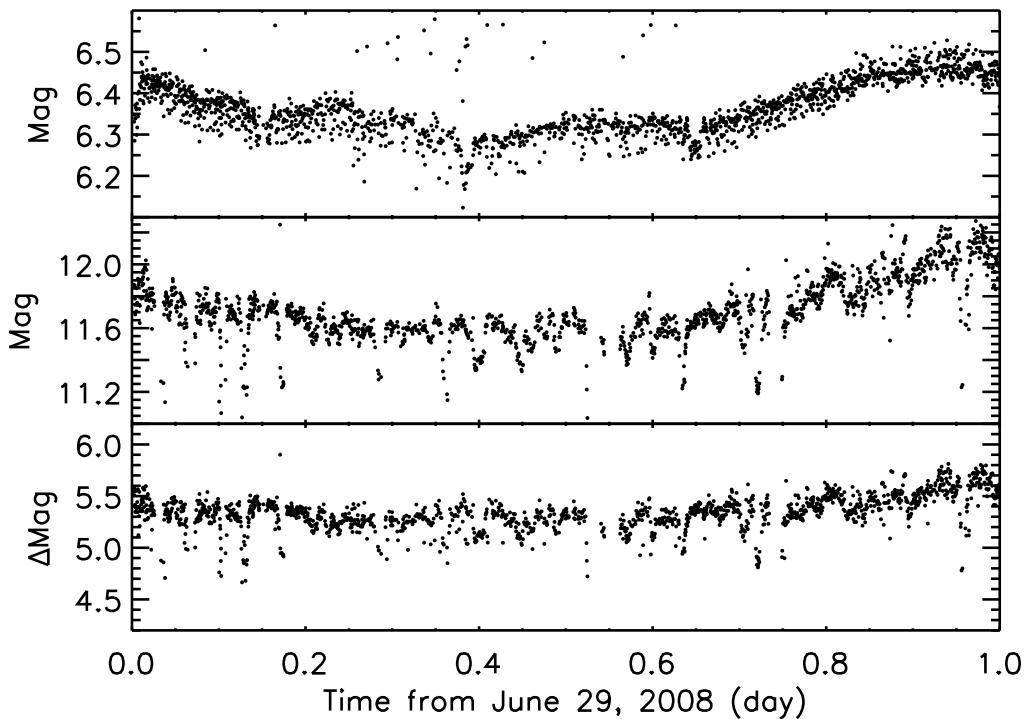


图 2-6: 上栏为产生鬼像的源恒星 (R.A.: $21^{\text{h}}08^{\text{m}}44.2^{\text{s}}$, decl.: $-88^{\circ}57'21.6''$) 在一天内的星等变化图; 中间栏为该源对应鬼像在这天内的星等变化; 下栏为两者星等的差量。

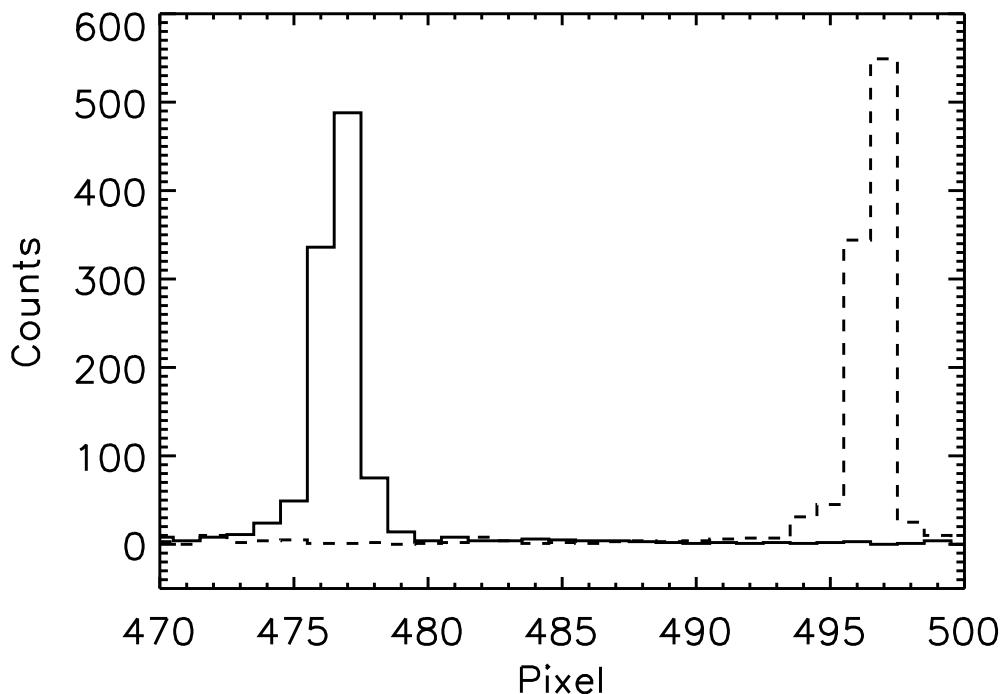


图 2-7: 光学对称轴在 CCD 上像素坐标的统计直方图, 直方图格点宽度为一个像素点。图中实线为本地 x 坐标像素值, 虚线则为 y 坐标。

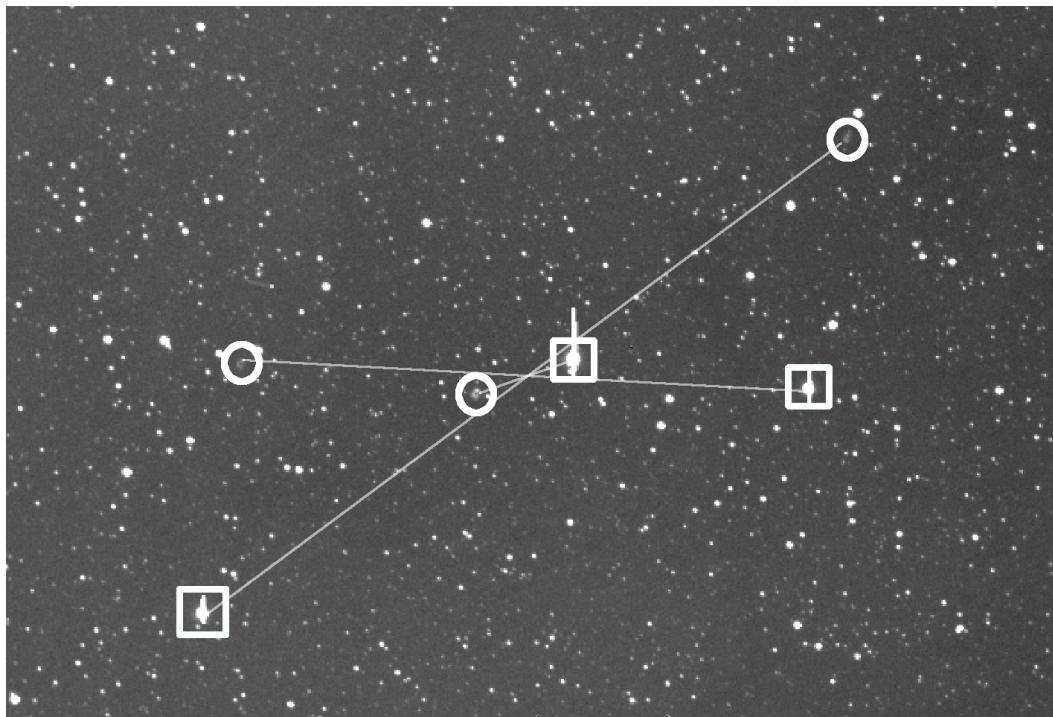


图 2-8: 选定的图片文件名为「16RE0312.fit」的光学对称轴示意图。方框选中的亮源（垂直溢出条纹）与圆环内的弥散鬼像相交于同一个像素点，即光学对称点。

几何构造，不难得到鬼像环半径与光学对称轴和南极点之间距离的关系式：

$$r_{\text{ghost}} = 2 \cdot d_{\text{Pole, axis}} . \quad (2-2)$$

如果将南极点的本地坐标值 $[523, 467]$ 与上文提到的光学对称轴坐标值 $[477, 497]$ 带入上式，可算得鬼像的半径理论值为 109 像素，这和前面的拟合值一致。

至于第一个影响因子 f_0 ，图 2-6 已经展示了鬼像与亮星之间的亮度变化基本趋于一致，这个差别值大概为 5.4 星等，即对应亮星 0.7% 的光子流量被反射再聚集成鬼像。但与此同时，我们应该意识到实际中的鬼像更加复杂：不同的位置、星等都会给 f_0 因子带来不确定性。

如此一来，在计算第二影响因子的过程中，我们一律假设 $f_0 = 0.7\%$ 。在对星象班等天文观测数据中，很自然便是假设此函数为高斯函数。因为鬼像与恒星之间的距离叫减小到临界值时，恒星的亮度开始被影响，而这个临界值就是鬼像展源半径的大小。该高斯函数有如下形式：

$$f_1(d) \simeq A_0 \cdot e^{-Z^2/2} , \quad (2-3)$$

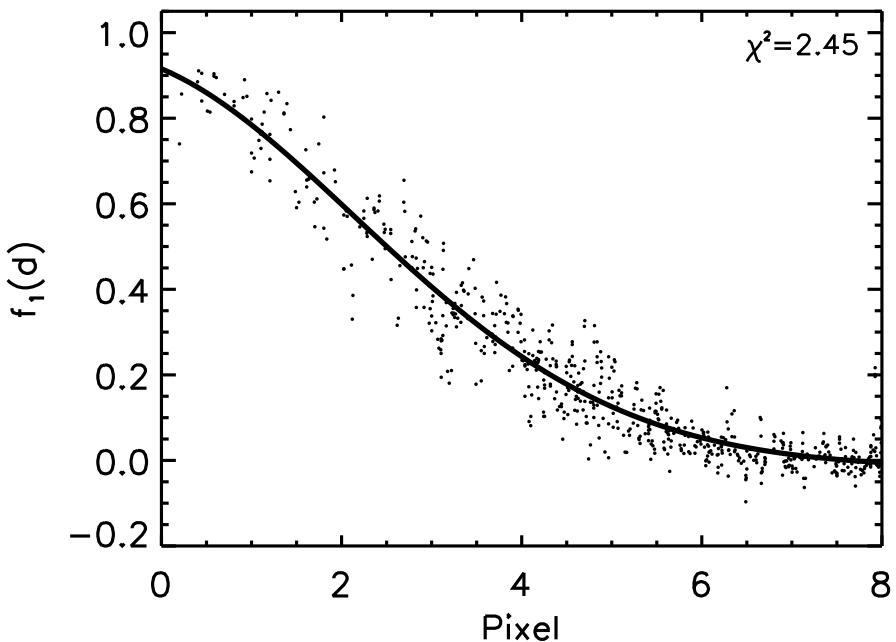


图 2-9: 鬼像影响因子 $f_1(d)$ 与被影响背景恒星和鬼像之间距离的依赖关系。实线为形式如方程 2-3 的拟合曲线, 当两者之间的距离大于约 6 个像素时, 鬼像几乎不对该星的亮度造成影响。相反, 当鬼像完全重叠在背景恒星上时, 鬼像自身高达 97% 的光子流量都会被算入恒星的孔径测光亮度中。

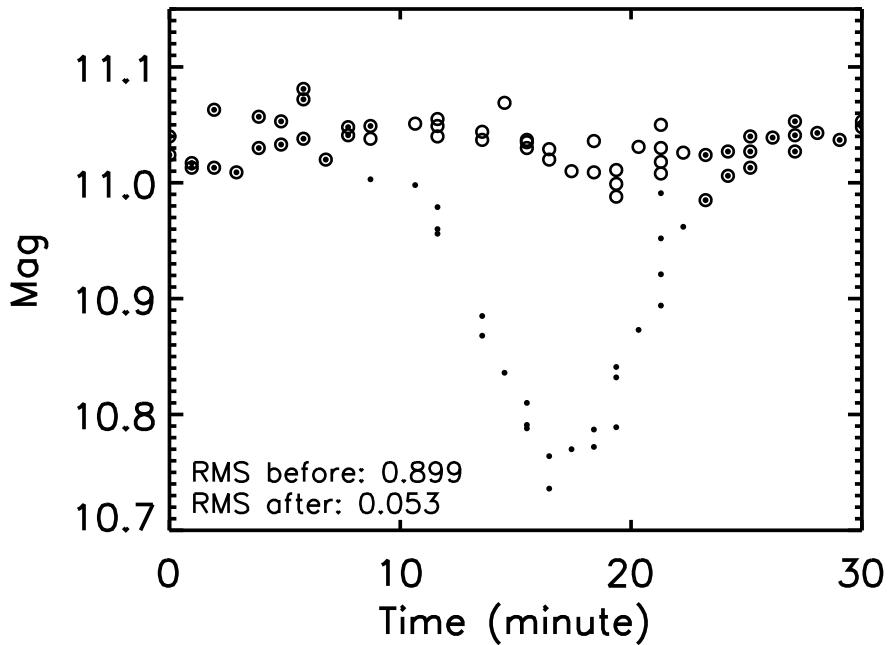


图 2-10: 鬼像修正前后 (分别为点和圆) 恒星的光变曲线。此恒星坐标为 R.A.: $23^{\text{h}}24^{\text{m}}28.4^{\text{s}}$, decl.: $-89^{\circ}25'10.6''$ 。当鬼像距离恒星达到 6 个像素点的临界值后, 鬼像修正程序便会自动在恒星的光变曲线上计算影响值并做修正。如图所示, 此方法可以大幅度减小恒星光变曲线的弥散误差差。

其中 $Z = (d - A_1)/A_2$, $A_0 \approx 0.97$, $A_1 \approx -0.86$, $A_2 \approx 2.99$ 。这边需要强调的是由于并不知道背景星被鬼像遮挡后的真正星等值，因而我们假设星等值为固定值（取自文献 [166]）。上述高斯函数也正好说明鬼像的典型半径为 6 个像素点，这明显大于孔径测光所选取的孔径大小^[164]，这也从侧面说明了利用孔径测光直接求鬼像星等来修正星表的做法在此处并不适用（如图 2-9 所示）。

最后一步，我们需要将表达式 2-3 中的关系带入每张图中，并对在鬼像和任意恒星靠近时修正对应的鬼像流量值即可得到无鬼像版本的星表数据^①。前文中给出的例子表明本文的鬼像修正是真实且有效的，当然也还有部分误差来源无法还原，比如 f_0 因子的不确定性，以及最初的星表位置精度可能并不能达到 2 个像素半径。

包括鬼像修正在内的各种预数据处理工作都对提高测光精度有着极为重要的作用。修正鬼像并提高精度后的数据有利于研究耀斑以及系外行星搜寻^[170,171]。另外对于今后的巡天工作，例如为下文提到的 AST3 望远镜做出铺垫^[172]。

2.3 AST3 项目中系外行星的巡天策略

在天文学研究中，观测是最基础也是最重要的环节。科学项目中，观测台址，选源以及策略直接决定了预定科学价值的实现程度，天穹 A 台址的优势之处我们从上章节已经有大概了解。紧随 CSTAR 项目，AST3 望远镜同样一个大视场广角巡天项目。大视场优势就在于望远镜能够同时利用多波段检测一大片天区，本来相对低效的巡天项目可以有许多丰富的科学成果。AST3 顾名思义，由三个 50/68 cm 的修正施密特望远镜组成。后端装备的是 10k×10k 的的帧转移 CCD 相机。其中第一台 AST3-1 于 2012 年 3 月正式安装就位并投入使用。但不幸的是该台望远镜于当年 5 月份停止工作。一批关于变源搜索的成果也已经浮现，如文献^[173,174]。

而经过两年多的测试，AST3-2 也于 2015 年正式着陆南极领土并投入工作。图 2-11 为前两台 AST3 望远镜在南极冰穹 A 站点的合影。系外行星搜索作为本次观测的科学目标之一也因此而得到 2016 极夜一个多月的观测时间。下面将主要介绍 AST3-2 望远镜的观测策略（Strategy and Pipeline）。整个脚本自动化观测的流程（图 2-12）包括初始化输入、自动观测、报错系统以及预数据

^① 星表文件请访问网址 <http://explore.china-vo.org/data/cstar/>



图 2-11: AST3-2 望远镜（左侧）就位于南极天穹 A 观测站。本图拍摄者为天文科考科考人员杜福嘉。

处理四个主要环节：

- **初始化输入** 整个观测自动化程序从这里开始。首先观测开始会生成当天的日志记录。紧接着读取输入参数并检查文件系统是否正常。如果正常则读取我们的目标观测天区信息文件，跳转到下一步自动观测流程。
- **观测操作** 因为 AST3 有了一整套的望远镜跟踪系统，因而观测操作除了正常的 CCD 曝光采集恒星图像文件以外，还额外需要控制望远镜的正常指向和信息反馈。特别是对与风雪恶劣的天气，需要额外小心操作并及时采集错误。
- **数据处理** 为了实时检测系统的工作状况，除了有一套实时摄像头对准 AST3 之外^①，我们还额外加入了远程定位（astrometry）与测光（photometry）的模块。这部分环节和观测模块各自独立运行，可返回非常实用的实时消光以及望远镜指向跟踪精度等信息。
- **报错系统** 容错子系统是观测策略中必不可少的成分。以上描述的各个流程都会对错误守护进程实时反馈，一旦有错误报错系统会在当前操作结束后

^①远程实时检测网址<http://aag.bao.ac.cn/klaws/>。

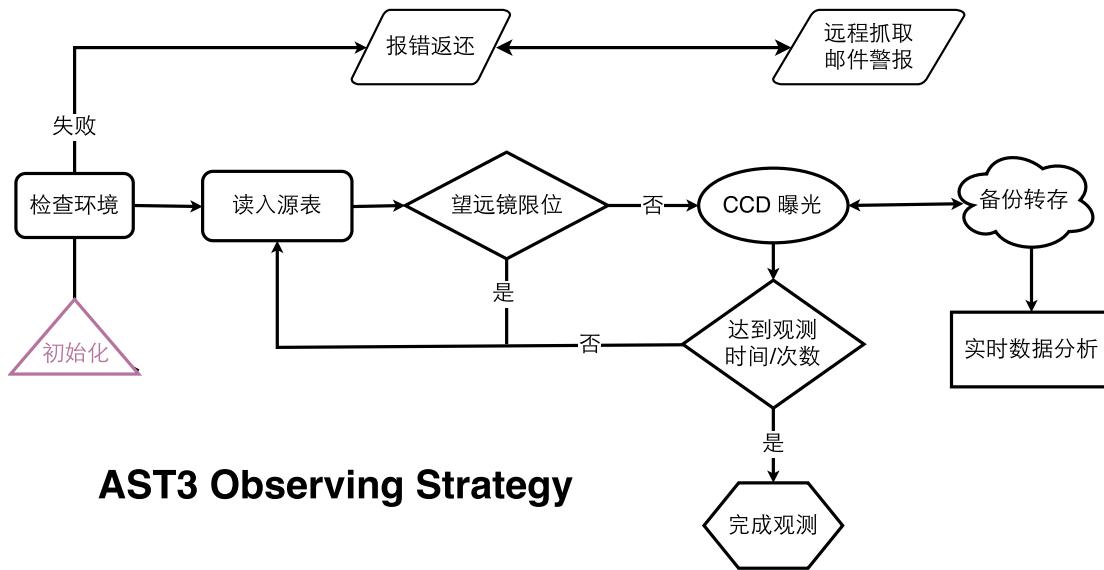


图 2-12: AST3-2 观测策略。整体流程包括初始化输入，观测，容错以及数据处理共四个环节。

中断观测并向远程（如南京大学天文与空间科学学院远程观测实验室本地终端）传送错误信息。本地系统抓取到错误后也会立即通过邮件系统通知相关人员。

充分完善以上流程对于保证观测（尤其是极地环境连续黑夜）非常重要，尤其是在 § 1.3.2.4 提到的极短周期行星探测以及性质刻画。经过以上的充分实验，我们也完全有理由相信，随着今年科考人员采集数据归来，一批新的科学成果即将涌现。现有的包括 CSTAR 和 AST3 在天穹 A 台址的天文望远镜必然会助力今后昆仑暗宇宙巡天望远镜 KDUST。前人的观测以及数据处理作为试金石，铺垫南极科学日益精进。

第三章 利用掩星搜索双星中的原 行星盘

Transitional Disk

第四章 基于热类木星系统的统计 性质

热木星

形成

[Fe/H] Relation

若按照热类木星的定义，其准确叫法应为近距离类木星，因为行星的有效温度不仅仅与主星的距离有关，而且还与主星的有效温度有关。

第五章 总结与展望

系外卫星
最终命运
逼近系外地球
Warm Jupiter
系外行星大气
Internal Structure.
系外生命 Habitability
人工智能分析数据
星震学
Citizen Science

致 谢

参考文献

- [1] 宣煥灿. 天文学史 [M]. [S.l.]: 北京高等教育出版社, 1992.
- [2] Wikipedia contributors. 天文学家 [EB/OL]. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2015 [2017/02/12].
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_astronomers.
- [3] COPERNICUS N. De revolutionibus orbium coelestium[EB]. Johannes Pe-
treius, 1543.
- [4] BRUNO G. De l'Infinito, Universo e Mondi[EB]. 1584.
- [5] Woolf N, Angel J R. Astronomical Searches for Earth-Like Planets and Signs of
Life[J/OL]. ARA&A, 1998, 36 : 507 – 538.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.astro.36.1.507>.
- [6] Stern A, Mitton J. Pluto and Charon: Ice Worlds on the Ragged Edge of the Solar
System[M]. 2005.
- [7] Baraffe I, Chabrier G, Barman T S, et al. Evolutionary models for cool brown
dwarfs and extrasolar giant planets. The case of HD 209458[J/OL]. A&A, 2003,
402 : 701 – 712.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20030252>.
- [8] Jacob W S. On certain Anomalies presented by the Binary Star 70 Ophi-
uchi[J/OL]. MNRAS, 1855, 15 : 228.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/15.9.228>.
- [9] Moulton F R. The limits of temporary stability of satellite motion, with an ap-
plication to the question of the existence of an unseen body in the binary system
70 Ophiuchi[J/OL]. AJ, 1899, 20 : 33 – 37.
<http://dx.doi.org/10.1086/103096>.

- [10] van de Kamp P. Astrometric study of Barnard's star from plates taken with the 24-inch Sproul refractor.[J/OL]. AJ, 1963, 68 : 515 – 521.
<http://dx.doi.org/10.1086/109001>.
- [11] Struve O. Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work[J]. The Observatory, 1952, 72 : 199 – 200.
- [12] Latham D W, Stefanik R P, Mazeh T, et al. The unseen companion of HD114762 - A probable brown dwarf[J/OL]. Nature, 1989, 339 : 38 – 40.
<http://dx.doi.org/10.1038/339038a0>.
- [13] Wolszczan A, Frail D A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12[J/OL]. Nature, 1992, 355 : 145 – 147.
<http://dx.doi.org/10.1038/355145a0>.
- [14] Walker G A H, Walker A R, Irwin A W, et al. A search for Jupiter-mass companions to nearby stars.[J/OL]. Icarus, 1995, 116 : 359 – 375.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1995.1130>.
- [15] Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star[J/OL]. Nature, 1995, 378 : 355 – 359.
<http://dx.doi.org/10.1038/378355a0>.
- [16] Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results[J/OL]. Science, 2010, 327 : 977.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1185402>.
- [17] Perryman M. The Exoplanet Handbook[M]. 2014.
- [18] Udry S, Mayor M, Clausen J V, et al. The CORALIE survey for southern extrasolar planets. X. A Hot Jupiter orbiting HD 73256[J/OL]. A&A, 2003, 407 : 679 – 684.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20030815>.
- [19] Eggenberger A, Mayor M, Naef D, et al. The CORALIE survey for southern extrasolar planets. XIV. HD 142022 b: a long-period planetary companion in a wide binary[J/OL]. A&A, 2006, 447 : 1159 – 1163.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20053720>.

- [20] Tamuz O, Ségransan D, Udry S, et al. The CORALIE survey for southern extra-solar planets. XV. Discovery of two eccentric planets orbiting <ASTROBJ>HD 4113</ASTROBJ> and <ASTROBJ>HD 156846</ASTROBJ>[J/OL]. *A&A*, 2008, 480 : L33–L36.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20078737>.
- [21] Perryman M. Resource Letter Exo-1: Exoplanets[J/OL]. *American Journal of Physics*, 2014, 82 : 552–563.
<http://dx.doi.org/10.1119/1.4830455>.
- [22] Murphy M T, Udem T, Holzwarth R, et al. High-precision wavelength calibration of astronomical spectrographs with laser frequency combs[J/OL]. *MNRAS*, 2007, 380 : 839–847.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12147.x>.
- [23] Seager S. *Exoplanets*[M]. 2010.
- [24] Henry G W, Marcy G W, Butler R P, et al. A Transiting “51 Peg-like” Planet[J/OL]. *ApJL*, 2000, 529 : L41–L44.
<http://dx.doi.org/10.1086/312458>.
- [25] Charbonneau D, Brown T M, Latham D W, et al. Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star[J/OL]. *ApJL*, 2000, 529 : L45–L48.
<http://dx.doi.org/10.1086/312457>.
- [26] Alonso R, Brown T M, Torres G, et al. TrES-1: The Transiting Planet of a Bright K0 V Star[J/OL]. *ApJL*, 2004, 613 : L153–L156.
<http://dx.doi.org/10.1086/425256>.
- [27] McCullough P R, Stys J E, Valenti J A, et al. The XO Project: Searching for Transiting Extrasolar Planet Candidates[J/OL]. *PASP*, 2005, 117 : 783–795.
<http://dx.doi.org/10.1086/432024>.
- [28] Bakos G Á, Noyes R W, Kovács G, et al. HAT-P-1b: A Large-Radius, Low-Density Exoplanet Transiting One Member of a Stellar Binary[J/OL]. *ApJ*, 2007, 656 : 552–559.
<http://dx.doi.org/10.1086/509874>.

- [29] Pollacco D L, Skillen I, Collier Cameron A, et al. The WASP Project and the SuperWASP Cameras[J/OL]. *PASP*, 2006, 118 : 1407 – 1418.
<http://dx.doi.org/10.1086/508556>.
- [30] Barge P, Baglin A, Auvergne M, et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. I. CoRoT-Exo-1b: a low-density short-period planet around a G0V star[J/OL]. *A&A*, 2008, 482 : L17 – L20.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:200809353>.
- [31] Gaia Collaboration, Prusti T, de Bruijne J H J, et al. The Gaia mission[J/OL]. *A&A*, 2016, 595 : A1.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201629272>.
- [32] Seager S, Deming D. Exoplanet Atmospheres[J/OL]. *ARA&A*, 2010, 48 : 631 – 672.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081309-130837>.
- [33] Marois C, Zuckerman B, Konopacky Q M, et al. Images of a fourth planet orbiting HR 8799[J/OL]. *Nature*, 2010, 468 : 1080 – 1083.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature09684>.
- [34] Marois C, Macintosh B, Barman T, et al. Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799[J/OL]. *Science*, 2008, 322 : 1348.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1166585>.
- [35] Kalas P, Graham J R, Chiang E, et al. Optical Images of an Exosolar Planet 25 Light-Years from Earth[J/OL]. *Science*, 2008, 322 : 1345.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1166609>.
- [36] Lagrange A-M, Bonnefoy M, Chauvin G, et al. A Giant Planet Imaged in the Disk of the Young Star β Pictoris[J/OL]. *Science*, 2010, 329 : 57.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1187187>.
- [37] Chauvin G, Lagrange A-M, Dumas C, et al. Giant planet companion to 2MASSW J1207334-393254[J/OL]. *A&A*, 2005, 438 : L25 – L28.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:200500116>.

- [38] Macintosh B, Graham J R, Ingraham P, et al. First light of the Gemini Planet Imager[J/OL]. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2014, 111: 12661 – 12666.
<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1304215111>.
- [39] Einstein A. Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field[J/OL]. *Science*, 1936, 84: 506 – 507.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.84.2188.506>.
- [40] Mao S, Paczynski B. Gravitational microlensing by double stars and planetary systems[J/OL]. *ApJL*, 1991, 374: L37 – L40.
<http://dx.doi.org/10.1086/186066>.
- [41] Udalski A, Paczynski B, Zebrun K, et al. The Optical Gravitational Lensing Experiment. Search for Planetary and Low-Luminosity Object Transits in the Galactic Disk. Results of 2001 Campaign[J]. *AcA*, 2002, 52: 1 – 37.
- [42] Bond I A, Udalski A, Jaroszyński M, et al. OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53: A Planetary Microlensing Event[J/OL]. *ApJL*, 2004, 606: L155 – L158.
<http://dx.doi.org/10.1086/420928>.
- [43] Ford E B, Rowe J F, Fabrycky D C, et al. Transit Timing Observations from Kepler. I. Statistical Analysis of the First Four Months[J/OL]. *ApJS*, 2011, 197: 2.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/197/1/2>.
- [44] Xie J-W. Transit Timing Variation of Near-resonance Planetary Pairs: Confirmation of 12 Multiple-planet Systems[J/OL]. *ApJS*, 2013, 208: 22.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/208/2/22>.
- [45] Silvotti R, Schuh S, Janulis R, et al. A giant planet orbiting the ‘extreme horizontal branch’ star V391 Pegasi[J/OL]. *Nature*, 2007, 449: 189 – 191.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature06143>.
- [46] Murphy S J, Bedding T R, Shibahashi H. A Planet in an 840 Day Orbit around a Kepler Main-sequence A Star Found from Phase Modulation of Its Pulsar

- tions[J/OL]. ApJL, 2016, 827 : L17.
<http://dx.doi.org/10.3847/2041-8205/827/1/L17>.
- [47] Holman M J, Murray N W. The Use of Transit Timing to Detect Terrestrial-Mass Extrasolar Planets[J/OL]. Science, 2005, 307 : 1288 – 1291.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1107822>.
- [48] Perryman M A C. Extra-solar planets[J/OL]. Reports on Progress in Physics, 2000, 63 : 1209 – 1272.
<http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/63/8/202>.
- [49] Spitzer L. Physical processes in the interstellar medium[M/OL]. 1978.
<http://dx.doi.org/10.1002/9783527617722>.
- [50] Lequeux J. The Interstellar Medium[M/OL]. 2005.
<http://dx.doi.org/10.1007/b137959>.
- [51] Andre P, Ward-Thompson D, Barsony M. From Prestellar Cores to Protostars: the Initial Conditions of Star Formation[J]. Protostars and Planets IV, 2000 : 59.
- [52] Armitage P J. Astrophysics of Planet Formation[M]. 2010 : 294.
- [53] Armitage P J. Lecture notes on the formation and early evolution of planetary systems[J]. ArXiv Astrophysics e-prints, 2007.
- [54] Pringle J E. Accretion discs in astrophysics[J/OL]. ARA&A, 1981, 19 : 137 – 162.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.aa.19.090181.001033>.
- [55] Johnstone D, Hollenbach D, Bally J. Photoevaporation of Disks and Clumps by Nearby Massive Stars: Application to Disk Destruction in the Orion Nebula[J/OL]. ApJ, 1998, 499 : 758 – 776.
<http://dx.doi.org/10.1086/305658>.
- [56] Hollenbach D, Johnstone D, Lizano S, et al. Photoevaporation of disks around massive stars and application to ultracompact H II regions[J/OL]. ApJ, 1994, 428 : 654 – 669.
<http://dx.doi.org/10.1086/174276>.

- [57] Shakura N I, Sunyaev R A. Black holes in binary systems. Observational appearance.[J]. *A&A*, 1973, 24 : 337 – 355.
- [58] Gammie C F. Layered Accretion in T Tauri Disks[J/OL]. *ApJ*, 1996, 457 : 355.
<http://dx.doi.org/10.1086/176735>.
- [59] Jr Haisch K E, Lada E A, Lada C J. Disk Frequencies and Lifetimes in Young Clusters[J/OL]. *ApJL*, 2001, 553 : L153 – L156.
<http://dx.doi.org/10.1086/320685>.
- [60] Williams J P, Cieza L A. Protoplanetary Disks and Their Evolution[J/OL]. *ARA&A*, 2011, 49 : 67 – 117.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102548>.
- [61] Hernández J, Hartmann L, Megeath T, et al. A Spitzer Space Telescope Study of Disks in the Young σ Orionis Cluster[J/OL]. *ApJ*, 2007, 662 : 1067 – 1081.
<http://dx.doi.org/10.1086/513735>.
- [62] Weidenschilling S J. The distribution of mass in the planetary system and solar nebula[J/OL]. *Ap&SS*, 1977, 51 : 153 – 158.
<http://dx.doi.org/10.1007/BF00642464>.
- [63] Hayashi C. Structure of the Solar Nebula, Growth and Decay of Magnetic Fields and Effects of Magnetic and Turbulent Viscosities on the Nebula[J/OL]. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 1981, 70 : 35 – 53.
<http://dx.doi.org/10.1143/PTPS.70.35>.
- [64] Ida S, Lin D N C. Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. I. A Desert in the Mass and Semimajor Axis Distributions of Extrasolar Planets[J/OL]. *ApJ*, 2004, 604 : 388 – 413.
<http://dx.doi.org/10.1086/381724>.
- [65] Dullemond C P, Dominik C. Dust coagulation in protoplanetary disks: A rapid depletion of small grains[J/OL]. *A&A*, 2005, 434 : 971 – 986.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20042080>.

- [66] Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al. Protostars and Planets VI[J/OL]. Protostars and Planets VI, 2014.
http://dx.doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816531240.
- [67] Weidenschilling S J, Spaute D, Davis D R, et al. Accretional Evolution of a Planetesimal Swarm[J/OL]. Icarus, 1997, 128 : 429–455.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1997.5747>.
- [68] Blum J, Wurm G. The Growth Mechanisms of Macroscopic Bodies in Protoplanetary Disks[J/OL]. ARA&A, 2008, 46 : 21–56.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.astro.46.060407.145152>.
- [69] Safronov V S. Evolution of the protoplanetary cloud and formation of the earth and planets.[M]. 1972.
- [70] Goldreich P, Ward W R. The Formation of Planetesimals[J/OL]. ApJ, 1973, 183 : 1051 – 1062.
<http://dx.doi.org/10.1086/152291>.
- [71] Youdin A N, Shu F H. Planetesimal Formation by Gravitational Instability[J/OL]. ApJ, 2002, 580 : 494 – 505.
<http://dx.doi.org/10.1086/343109>.
- [72] Chiang E, Youdin A N. Forming Planetesimals in Solar and Extrasolar Nebulae[J/OL]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2010, 38 : 493 – 522.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-earth-040809-152513>.
- [73] Greenberg R, Hartmann W K, Chapman C R, et al. Planetesimals to planets - Numerical simulation of collisional evolution[J/OL]. Icarus, 1978, 35 : 1 – 26.
[http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(78\)90057-X](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(78)90057-X).
- [74] Kokubo E, Ida S. On Runaway Growth of Planetesimals[J/OL]. Icarus, 1996, 123 : 180 – 191.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1996.0148>.
- [75] Rafikov R R. The Growth of Planetary Embryos: Orderly, Runaway, or Oligarchic?[J/OL]. AJ, 2003, 125 : 942 – 961.
<http://dx.doi.org/10.1086/345971>.

- [76] Lissauer J J. Planet formation[J/OL]. *ARA&A*, 1993, 31 : 129 – 174.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.aa.31.090193.001021>.
- [77] Mizuno H. Formation of the Giant Planets[J/OL]. *Progress of Theoretical Physics*, 1980, 64 : 544 – 557.
<http://dx.doi.org/10.1143/PTP.64.544>.
- [78] Bodenheimer P, Pollack J B. Calculations of the accretion and evolution of giant planets The effects of solid cores[J/OL]. *Icarus*, 1986, 67 : 391 – 408.
[http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(86\)90122-3](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(86)90122-3).
- [79] Pollack J B, Hubickyj O, Bodenheimer P, et al. Formation of the Giant Planets by Concurrent Accretion of Solids and Gas[J/OL]. *Icarus*, 1996, 124 : 62 – 85.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1996.0190>.
- [80] Chambers J E, Wetherill G W. Making the Terrestrial Planets: N-Body Integrations of Planetary Embryos in Three Dimensions[J/OL]. *Icarus*, 1998, 136 : 304 – 327.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1998.6007>.
- [81] Walsh K J, Morbidelli A, Raymond S N, et al. A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration[J/OL]. *Nature*, 2011, 475 : 206 – 209.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature10201>.
- [82] Morbidelli A, Levison H F, Tsiganis K, et al. Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System[J/OL]. *Nature*, 2005, 435 : 462 – 465.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature03540>.
- [83] Gomes R, Levison H F, Tsiganis K, et al. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets[J/OL]. *Nature*, 2005, 435 : 466 – 469.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature03676>.
- [84] Raymond S N, O'Brien D P, Morbidelli A, et al. Building the terrestrial planets: Constrained accretion in the inner Solar System[J/OL]. *Icarus*, 2009, 203 : 644 – 662.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2009.05.016>.

- [85] Cumming A, Butler R P, Marcy G W, et al. The Keck Planet Search: Detectability and the Minimum Mass and Orbital Period Distribution of Extrasolar Planets[J/OL]. *PASP*, 2008, 120 : 531.
<http://dx.doi.org/10.1086/588487>.
- [86] Rowan D, Meschiari S, Laughlin G, et al. The Lick-Carnegie Exoplanet Survey: HD 32963 – A New Jupiter Analog Orbiting a Sun-like Star[J/OL]. *ApJ*, 2016, 817 : 104.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/817/2/104>.
- [87] Kuiper G P. On the Origin of the Solar System[J/OL]. *Proceedings of the National Academy of Science*, 1951, 37 : 1 – 14.
<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.37.1.1>.
- [88] Cameron A G W. Physics of the primitive solar accretion disk[J/OL]. *Moon and Planets*, 1978, 18 : 5 – 40.
<http://dx.doi.org/10.1007/BF00896696>.
- [89] Boss A P. Giant planet formation by gravitational instability[J/OL]. *Science*, 1997, 276 : 1836 – 1839.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.276.5320.1836>.
- [90] Durisen R H, Boss A P, Mayer L, et al. Gravitational Instabilities in Gaseous Protoplanetary Disks and Implications for Giant Planet Formation[J]. *Protostars and Planets V*, 2007 : 607 – 622.
- [91] Haghighipour N. Super-Earths: a new class of planetary bodies[J/OL]. *Contemporary Physics*, 2011, 52 : 403 – 438.
<http://dx.doi.org/10.1080/00107514.2011.598370>.
- [92] Batalha N M, Rowe J F, Bryson S T, et al. Planetary Candidates Observed by Kepler. III. Analysis of the First 16 Months of Data[J/OL]. *ApJS*, 2013, 204 : 24.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/204/2/24>.
- [93] Guillot T. THE INTERIORS OF GIANT PLANETS: Models and Outstanding Questions[J/OL]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2005, 33 :

- 493–530.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.earth.32.101802.120325>.
- [94] Lissauer J J, Ragozzine D, Fabrycky D C, et al. Architecture and Dynamics of Kepler's Candidate Multiple Transiting Planet Systems[J/OL]. ApJS, 2011, 197 : 8.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/197/1/8>.
- [95] Terquem C, Papaloizou J C B. Migration and the Formation of Systems of Hot Super-Earths and Neptunes[J/OL]. ApJ, 2007, 654 : 1110 – 1120.
<http://dx.doi.org/10.1086/509497>.
- [96] Kennedy G M, Kenyon S J. Planet Formation around Stars of Various Masses: Hot Super-Earths[J/OL]. ApJ, 2008, 682 : 1264 – 1276.
<http://dx.doi.org/10.1086/589436>.
- [97] Ida S, Lin D N C. Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. V. Accumulation Near the Ice Line and Super-Earths[J/OL]. ApJ, 2008, 685 : 584 – 595.
<http://dx.doi.org/10.1086/590401>.
- [98] Laughlin G, Bodenheimer P, Adams F C. The Core Accretion Model Predicts Few Jovian-Mass Planets Orbiting Red Dwarfs[J/OL]. ApJL, 2004, 612 : L73 – L76.
<http://dx.doi.org/10.1086/424384>.
- [99] Kennedy G M, Kenyon S J, Bromley B C. Planet Formation around Low-Mass Stars: The Moving Snow Line and Super-Earths[J/OL]. ApJL, 2006, 650 : L139 – L142.
<http://dx.doi.org/10.1086/508882>.
- [100] Hansen B M S, Murray N. Testing in Situ Assembly with the Kepler Planet Candidate Sample[J/OL]. ApJ, 2013, 775 : 53.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/775/1/53>.

- [101] Chiang E, Laughlin G. The minimum-mass extrasolar nebula: in situ formation of close-in super-Earths[J/OL]. *MNRAS*, 2013, 431 : 3444–3455.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stt424>.
- [102] Boss A P. Rapid Formation of Super-Earths around M Dwarf Stars[J/OL]. *ApJL*, 2006, 644 : L79–L82.
<http://dx.doi.org/10.1086/505533>.
- [103] Lissauer J J, Dawson R I, Tremaine S. Advances in exoplanet science from Kepler[J/OL]. *Nature*, 2014, 513 : 336–344.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature13781>.
- [104] Borucki W J, Koch D G, Basri G, et al. Characteristics of Planetary Candidates Observed by Kepler. II. Analysis of the First Four Months of Data[J/OL]. *ApJ*, 2011, 736 : 19.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/736/1/19>.
- [105] Fabrycky D C, Lissauer J J, Ragozzine D, et al. Architecture of Kepler's Multi-transiting Systems. II. New Investigations with Twice as Many Candidates[J/OL]. *ApJ*, 2014, 790 : 146.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/790/2/146>.
- [106] Lithwick Y, Wu Y. Resonant Repulsion of Kepler Planet Pairs[J/OL]. *ApJL*, 2012, 756 : L11.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/756/1/L11>.
- [107] Lee M H, Fabrycky D, Lin D N C. Are the Kepler Near-resonance Planet Pairs due to Tidal Dissipation?[J/OL]. *ApJ*, 2013, 774 : 52.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/774/1/52>.
- [108] Batygin K, Morbidelli A. Dissipative Divergence of Resonant Orbits[J/OL]. *AJ*, 2013, 145 : 1.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/145/1/1>.
- [109] Baruteau C, Papaloizou J C B. Disk-Planets Interactions and the Diversity of Period Ratios in Kepler's Multi-planetary Systems[J/OL]. *ApJ*, 2013, 778 : 7.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/778/1/7>.

- [110] Delisle J-B, Laskar J, Correia A C M. Resonance breaking due to dissipation in planar planetary systems[J/OL]. *A&A*, 2014, 566 : A137.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201423676>.
- [111] Chatterjee S, Ford E B. Planetesimal Interactions Can Explain the Mysterious Period Ratios of Small Near-Resonant Planets[J/OL]. *ApJ*, 2015, 803 : 33.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/803/1/33>.
- [112] Marcy G W, Butler R P, Fischer D, et al. A Pair of Resonant Planets Orbiting GJ 876[J/OL]. *ApJ*, 2001, 556 : 296–301.
<http://dx.doi.org/10.1086/321552>.
- [113] Rivera E J, Laughlin G, Butler R P, et al. The Lick-Carnegie Exoplanet Survey: a Uranus-Mass Fourth Planet for GJ 876 in an Extrasolar Laplace Configuration[J/OL]. *ApJ*, 2010, 719 : 890–899.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/719/1/890>.
- [114] Kley W, Nelson R P. Planet-Disk Interaction and Orbital Evolution[J/OL]. *ARA&A*, 2012, 50 : 211–249.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081811-125523>.
- [115] Zhang H, Zhou J-L. On the Orbital Evolution of a Giant Planet Pair Embedded in a Gaseous Disk. I. Jupiter-Saturn Configuration[J/OL]. *ApJ*, 2010, 714 : 532–548.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/714/1/532>.
- [116] Lissauer J J, Fabrycky D C, Ford E B, et al. A closely packed system of low-mass, low-density planets transiting Kepler-11[J/OL]. *Nature*, 2011, 470 : 53–58.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature09760>.
- [117] Zhou J-L, Xie J-W, Liu H-G, et al. Forming different planetary systems[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12 : 1081–1106.
<http://dx.doi.org/10.1088/1674-4527/12/8/010>.
- [118] Mahajan N, Wu Y. Stability of the Kepler-11 System and Its Origin[J/OL]. *ApJ*, 2014, 795 : 32.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/795/1/32>.

- [119] D'Angelo G, Bodenheimer P. In Situ and Ex Situ Formation Models of Kepler 11 Planets[J/OL]. *ApJ*, 2016, 828 : 33.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/828/1/33>.
- [120] Lovis C, Ségransan D, Mayor M, et al. The HARPS search for southern extra-solar planets. XXVIII. Up to seven planets orbiting HD 10180: probing the architecture of low-mass planetary systems[J/OL]. *A&A*, 2011, 528 : A112.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201015577>.
- [121] Hatzes A P, Cochran W D, Endl M, et al. A Planetary Companion to γ Cephei A[J/OL]. *ApJ*, 2003, 599 : 1383 – 1394.
<http://dx.doi.org/10.1086/379281>.
- [122] Doyle L R, Carter J A, Fabrycky D C, et al. Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet[J/OL]. *Science*, 2011, 333 : 1602.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1210923>.
- [123] ANON. Planets in Binary Star Systems[M/OL] // Haghighipour N. *Astrophysics and Space Science Library*, Vol 366 : Planets in Binary Star Systems. 2010.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-8687-7>.
- [124] Naef D, Latham D W, Mayor M, et al. HD 80606 b, a planet on an extremely elongated orbit[J/OL]. *A&A*, 2001, 375 : L27 – L30.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20010853>.
- [125] Tamuz O, Ségransan D, Udry S, et al. The CORALIE survey for southern extra-solar planets. XV. Discovery of two eccentric planets orbiting <ASTROBJ>HD 4113</ASTROBJ> and <ASTROBJ>HD 156846</ASTROBJ>[J/OL]. *A&A*, 2008, 480 : L33 – L36.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20078737>.
- [126] Pont F, Hébrard G, Irwin J M, et al. Spin-orbit misalignment in the HD 80606 planetary system[J/OL]. *A&A*, 2009, 502 : 695 – 703.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/200912463>.
- [127] Lidov M L. The evolution of orbits of artificial satellites of planets under the action of gravitational perturbations of external bodies[J/OL]. *Planet. Space Sci.*,

- 1962, 9 : 719 – 759.
[http://dx.doi.org/10.1016/0032-0633\(62\)90129-0](http://dx.doi.org/10.1016/0032-0633(62)90129-0).
- [128] Kozai Y. Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity[J/OL]. AJ, 1962, 67 : 591.
<http://dx.doi.org/10.1086/108790>.
- [129] Wu Y, Murray N. Planet Migration and Binary Companions: The Case of HD 80606b[J/OL]. ApJ, 2003, 589 : 605 – 614.
<http://dx.doi.org/10.1086/374598>.
- [130] Sanchis-Ojeda R, Rappaport S, Winn J N, et al. Transits and Occultations of an Earth-sized Planet in an 8.5 hr Orbit[J/OL]. ApJ, 2013, 774 : 54.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/774/1/54>.
- [131] Charpinet S, Fontaine G, Brassard P, et al. A compact system of small planets around a former red-giant star[J/OL]. Nature, 2011, 480 : 496 – 499.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature10631>.
- [132] Lopez E D. Born Dry in the Photo-Evaporation Desert: Kepler's Ultra-Short-Period Planets Formed Water-Poor[J]. ArXiv e-prints, 2016.
- [133] Moutou C, Donati J-F, Lin D, et al. The magnetic properties of the star Kepler-78[J/OL]. MNRAS, 2016, 459 : 1993 – 2007.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stw809>.
- [134] Hatzes A P, Guenther E W, Endl M, et al. A giant planet around the massive giant star HD 13189[J/OL]. A&A, 2005, 437 : 743 – 751.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20052850>.
- [135] Sato B, Kambe E, Takeda Y, et al. Radial-Velocity Variability of G-Type Giants: First Three Years of the Okayama Planet Search Program[J/OL]. PASJ, 2005, 57 : 97 – 107.
<http://dx.doi.org/10.1093/pasj/57.1.97>.
- [136] Johnson J A, Butler R P, Marcy G W, et al. A New Planet around an M Dwarf: Revealing a Correlation between Exoplanets and Stellar Mass[J/OL]. ApJ, 2007,

- 670 : 833–840.
<http://dx.doi.org/10.1086/521720>.
- [137] Jones M I, Jenkins J S, Bluhm P, et al. The properties of planets around giant stars[J/OL]. *A&A*, 2014, 566 : A113.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201323345>.
- [138] Johnson J A, Fischer D A, Marcy G W, et al. Retired A Stars and Their Companions: Exoplanets Orbiting Three Intermediate-Mass Subgiants[J/OL]. *ApJ*, 2007, 665 : 785–793.
<http://dx.doi.org/10.1086/519677>.
- [139] Bowler B P, Johnson J A, Marcy G W, et al. Retired A Stars and Their Companions. III. Comparing the Mass-Period Distributions of Planets Around A-Type Stars and Sun-Like Stars[J/OL]. *ApJ*, 2010, 709 : 396–410.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/709/1/396>.
- [140] Hellier C, Anderson D R, Collier Cameron A, et al. Seven transiting hot Jupiters from WASP-South, Euler and TRAPPIST: WASP-47b, WASP-55b, WASP-61b, WASP-62b, WASP-63b, WASP-66b and WASP-67b[J/OL]. *MNRAS*, 2012, 426 : 739–750.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21780.x>.
- [141] Becker J C, Vanderburg A, Adams F C, et al. WASP-47: A Hot Jupiter System with Two Additional Planets Discovered by K2[J/OL]. *ApJL*, 2015, 812 : L18.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/812/2/L18>.
- [142] Sanchis-Ojeda R, Winn J N, Dai F, et al. A Low Stellar Obliquity for WASP-47, a Compact Multiplanet System with a Hot Jupiter and an Ultra-short Period Planet[J/OL]. *ApJL*, 2015, 812 : L11.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/812/1/L11>.
- [143] Neveu-VanMalle M, Queloz D, Anderson D R, et al. Hot Jupiters with relatives: discovery of additional planets in orbit around WASP-41 and WASP-47[J/OL]. *A&A*, 2016, 586 : A93.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201526965>.

- [144] Steffen J H, Ragozzine D, Fabrycky D C, et al. Kepler constraints on planets near hot Jupiters[J/OL]. Proceedings of the National Academy of Science, 2012, 109 : 7982–7987.
<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1120970109>.
- [145] Lucas P W, Roche P F. A population of very young brown dwarfs and free-floating planets in Orion[J/OL]. MNRAS, 2000, 314 : 858–864.
<http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.2000.03515.x>.
- [146] Bihain G, Rebolo R, Zapatero Osorio M R, et al. Candidate free-floating super-Jupiters in the young σ Orionis open cluster[J/OL]. A&A, 2009, 506 : 1169–1182.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/200912210>.
- [147] Sumi T, Kamiya K, Bennett D P, et al. Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing[J/OL]. Nature, 2011, 473 : 349–352.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature10092>.
- [148] Adams F C. The Birth Environment of the Solar System[J/OL]. ARA&A, 2010, 48 : 47–85.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081309-130830>.
- [149] Liu H-G, Zhang H, Zhou J-L. Configurations of Bounded and Free-floating Planets in Very Young Open Clusters[J/OL]. ApJ, 2013, 772 : 142.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/772/2/142>.
- [150] Burton M G. Astronomy in Antarctica[J/OL]. A&A Rv, 2010, 18 : 417–469.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00159-010-0032-2>.
- [151] Lawrence J S. Infrared and Submillimeter Atmospheric Characteristics of High Antarctic Plateau Sites[J/OL]. PASP, 2004, 116 : 482–492.
<http://dx.doi.org/10.1086/420757>.
- [152] Bonner C S, Ashley M C B, Cui X, et al. Thickness of the Atmospheric Boundary Layer Above Dome A, Antarctica, during 2009[J/OL]. PASP, 2010, 122 : 1122.
<http://dx.doi.org/10.1086/656250>.

- [153] Rauer H, Fruth T, Erikson A. Prospects of Long-Time-Series Observations from Dome C for Transit Search[J/OL]. PASP, 2008, 120 : 852.
<http://dx.doi.org/10.1086/590519>.
- [154] Indermuehle B T, Burton M G, Maddison S T. The History of Astrophysics in Antarctica[J/OL]. PASA, 2005, 22 : 73 – 90.
<http://dx.doi.org/10.1071/AS04037>.
- [155] Grec G, Fossat E, Pomerantz M. Solar oscillations - Full disk observations from the geographic South Pole[J/OL]. Nature, 1980, 288 : 541 – 544.
<http://dx.doi.org/10.1038/288541a0>.
- [156] Abe L, Gonçalves I, Agabi A, et al. The secondary eclipses of WASP-19b as seen by the ASTEP 400 telescope from Antarctica[J/OL]. A&A, 2013, 553 : A49.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201220351>.
- [157] Crouzet N, Guillot T, Agabi A, et al. ASTEP South: an Antarctic Search for Transiting ExoPlanets around the celestial south pole[J/OL]. A&A, 2010, 511 : A36.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/200913629>.
- [158] Saunders W, Lawrence J S, Storey J W V, et al. Where Is the Best Site on Earth? Domes A, B, C, and F, and Ridges A and B[J/OL]. PASP, 2009, 121 : 976.
<http://dx.doi.org/10.1086/605780>.
- [159] Lawrence J S, Ashley M C B, Hengst S, et al. The PLATO Dome A site-testing observatory: Power generation and control systems[J/OL]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(6) : 064501 – 064501.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3137081>.
- [160] Yang H, Allen G, Ashley M C B, et al. The PLATO Dome A Site-Testing Observatory: Instrumentation and First Results[J/OL]. PASP, 2009, 121 : 174.
<http://dx.doi.org/10.1086/597547>.
- [161] Yuan X, Cui X, Liu G, et al. Chinese Small Telescope ARray (CSTAR) for Antarctic Dome A[C/OL] // Proc. SPIE, Vol 7012 : Ground-based and Airborne

- Telescopes II. 2008 : 70124G.
<http://dx.doi.org/10.11117/12.788748>.
- [162] Zhou X, Wu Z-Y, Jiang Z-J, et al. Testing and data reduction of the Chinese Small Telescope Array (CSTAR) for Dome A, Antarctica[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2010, 10 : 279 – 290.
<http://dx.doi.org/10.1088/1674-4527/10/3/009>.
- [163] Zou H, Zhou X, Jiang Z, et al. Sky Brightness and Transparency in the i-band at Dome A, Antarctica[J/OL]. AJ, 2010, 140 : 602 – 611.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/140/2/602>.
- [164] Zhou X, Fan Z, Jiang Z, et al. The First Release of the CSTAR Point Source Catalog from Dome A, Antarctica[J/OL]. PASP, 2010, 122 : 347.
<http://dx.doi.org/10.1086/651526>.
- [165] Wang L, Macri L M, Krisciunas K, et al. Photometry of Variable Stars from Dome A, Antarctica[J/OL]. AJ, 2011, 142 : 155.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/142/5/155>.
- [166] Wang S, Zhou X, Zhang H, et al. The Inhomogeneous Effect of Cloud on CSTAR Photometry and Its Correction[J/OL]. PASP, 2012, 124 : 1167.
<http://dx.doi.org/10.1086/668617>.
- [167] Wang S-H, Zhou X, Zhang H, et al. The correction of diurnal effects on CSTAR photometry[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14 : 345 – 356.
<http://dx.doi.org/10.1088/1674-4527/14/3/008>.
- [168] ANON. UKSTU handbook: the U.K. Schmidt telescope of the Royal Observatory, Edinburgh[M/OL]. 1983.
<https://books.google.com.hk/books?id=80YoNQEACAAJ>.
- [169] Zhou X, Ashley M C B, Cui X, et al. Progress and Results from the Chinese Small Telescope ARray (CSTAR)[C/OL] // Burton M G, Cui X, Tothill N F H. IAU Symposium, Vol 288 : Astrophysics from Antarctica. 2013 : 231 – 238.
<http://dx.doi.org/10.1017/S1743921312016936>.

- [170] Liang E-S, Wang S, Zhou J-L, et al. Stellar Flares in the CSTAR Field: Results from the 2008 Data Set[J/OL]. AJ, 2016, 152: 168.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-6256/152/6/168>.
- [171] Wang S, Zhang H, Zhou J-L, et al. Planetary Transit Candidates in the CSTAR Field: Analysis of the 2008 Data[J/OL]. ApJS, 2014, 211: 26.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/211/2/26>.
- [172] Cui X, Yuan X, Gong X. Antarctic Schmidt Telescopes (AST3) for Dome A[C/OL] // Proc. SPIE, Vol 7012: Ground-based and Airborne Telescopes II. 2008: 70122D.
<http://dx.doi.org/10.1117/12.789458>.
- [173] Li G, Fu J, Liu X. Variable stars observed with the AST3-1 telescope from dome A of antarctica[J]. ArXiv e-prints, 2015.
- [174] Wang L, Ma B, Li G, et al. Variable Stars Observed in the Galactic Disk by AST3-1 from Dome A, Antarctica[J/OL]. AJ, 2017, 153: 104.
<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/153/3/104>.
- [175] 李竟, 余恒, 崔辰州. 英汉天文学名词 An English-Chinese Dictionary of Astronomy[M]. [S.l.]: 中国科学技术出版社, 2015.
- [176] NEWTON I. Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica[M] // . 1687.
- [177] Murray C D, Dermott S F. Solar system dynamics[M]. 1999.
- [178] Apai D, Lauretta D S. Planet Formation and Protoplanetary Dust[M] // Apai D A, Lauretta D S. Protoplanetary Dust: Astrophysical and Cosmochemical Perspectives. 2010: 1–26.

附录 A 文内常用约定

A.1 物理符号含义

a	轨道半长径
d	质点二体间距离
P	轨道周期
e	轨道偏心率
i	轨道倾角
M_{\odot}	太阳质量
M_s	恒星质量
R_{\odot}	太阳半径
R_s	恒星半径
M_J	木星质量
M_{\oplus}	地球质量
M_p	行星质量
m	视星等

A .2 首字母缩写

本文首字母缩写主要参考自书籍 [175]，按照字母先后顺序排列如下：

AST3	南极巡天望远镜
CCD	电荷耦合器件
CSTAR	南极之星望远镜阵列
FFP	自由飘游行星
FOV	视场
GB	银核球
GD	银盘
GI	引力不稳定
IAU	国际天文学联合会
MMR	平运动共振
MMSN	最小质量原行星盘
NIAOT	南京天文光学技术研究所
OGLE	光学引力透镜实验
PPD	原行星盘
RV	视向速度
TNO	海外天体
TTV	凌星计时变化
YSO	初期恒星体

附录 B 二体运动示意图

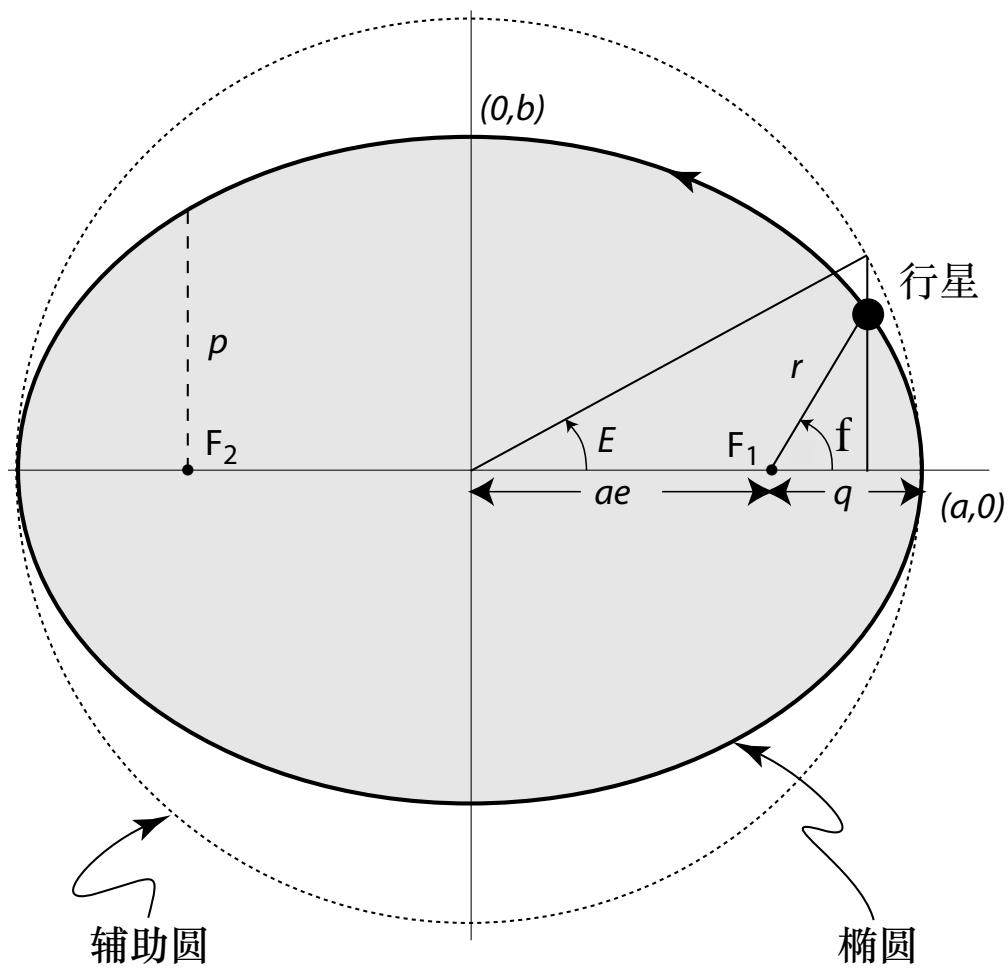


图 B-1: 二体在轨道平面内的椭圆运动示意图, 图片来源 Perryman。

在次方反比的中心引力作用下, 二体的运动轨迹为封闭的圆锥曲线^[176]。图 B-1 和 B-2 展示的是椭圆二体运动示意图, 其中 $a, e, i, \omega, \Omega, f$ 被称作描述椭圆二体运动的六个轨道常数, 文内符号几乎均沿袭自书本 [177]。在中心天体坐标系中, 行星距离主星的标量距离 r 可表示为:

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f} \quad (\text{B-1})$$

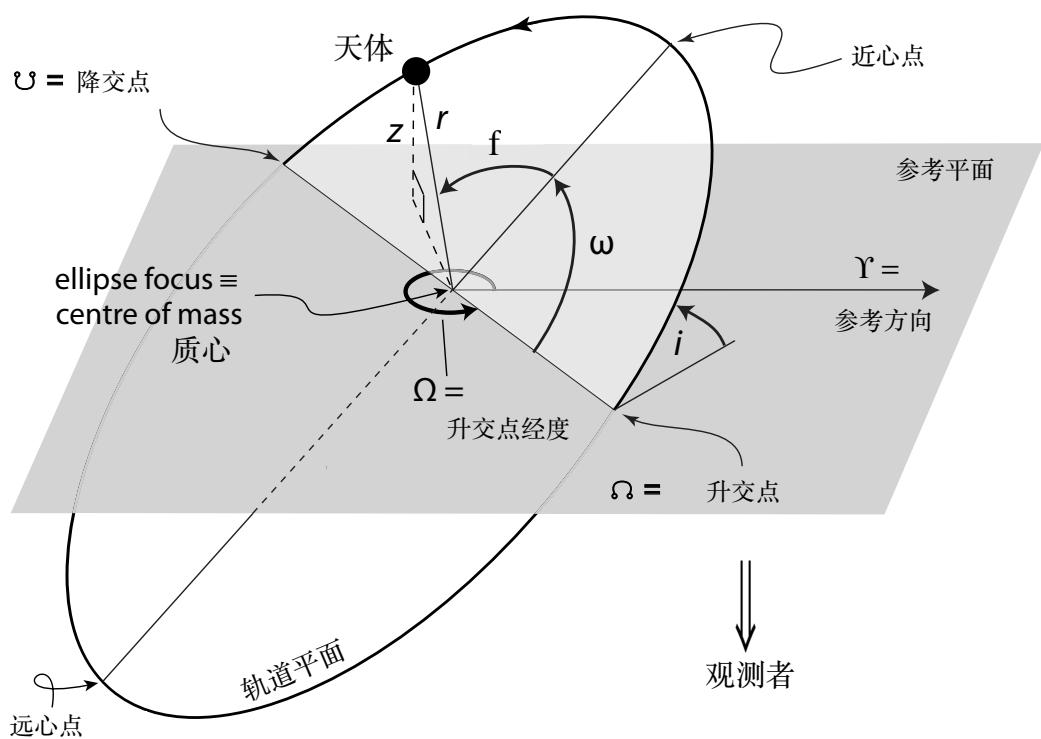


图 B-2: 椭圆二体运动轨道在三维空间内的示意图，图内标识分别为轨道参数与参考系。
图片来源 Perryman。

简历与科研成果

学位论文出版授权书

本人完全同意《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》（以下简称“章程”），愿意将本人的学位论文提交“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”在《中国博士学位论文全文数据库》、《中国优秀硕士学位论文全文数据库》中全文发表。《中国博士学位论文全文数据库》、《中国优秀硕士学位论文全文数据库》可以以电子、网络及其他数字媒体形式公开出版，并同意编入《中国知识资源总库》，在《中国博硕士学位论文评价数据库》中使用和在互联网上传播，同意按“章程”规定享受相关权益。

作者签名：_____
____年____月____日

论文题名	(论文标题)				
研究生学号	DG1326007	所在院系	天文与空间科学学院	学位年度	2013
论文级别	<input type="checkbox"/> 硕士 <input type="checkbox"/> 硕士专业学位 <input checked="" type="checkbox"/> 博士 <input type="checkbox"/> 博士专业学位 (请在方框内画勾)				
作者电话	15950459632	作者 Email	mengzy1989@gmail.com		
第一导师姓名	周济林 教授	导师电话	13512540416		

论文涉密情况：

不保密

保密，保密期：____年____月____日至____年____月____日

注：请将该授权书填写后装订在学位论文最后一页（南大封面）。

