



航天科技图书出版基金资助出版

深空飞行和通信 ——太阳引力透镜的利用

[意大利] 克劳迪奥·马克尼 (Claudio Maccone) 著

翁惠焱 庄逢源 蔡国飙 译

 Springer PRAXIS

 中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

深空飞行和通信 ——太阳引力透镜的利用

[意大利] 克劳迪奥·马克尼 (Claudio Maccone) 著

翁惠焱 庄逢源 蔡国飙 译



中国宇航出版社

· 北 京 ·

Translation from the English language edition;
Deep Space Flight and Communications. Exploiting the Sun as a Gravitational
Lens By Claudio Maccone

Copyright © Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2009

Praxis Publishing Ltd. Is part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

本书中文简体字版由著作权人授权中国宇航出版社独家出版发行, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

著作权合同登记号: 图字: 01-2014-3164 号

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

深空飞行和通信: 太阳引力透镜的利用 / (意) 马
克尼 (Maccone, C.) 著; 翁惠焱, 庄逢源, 蔡国飙译
--北京: 中国宇航出版社, 2015. 1

书名原文: Deep space flight and communications:
exploiting the sun as a gravitational lens

ISBN 978-7-5159-0679-9

I. 深... II. ①马... ②翁... ③庄... ④蔡... III.
①日地关系—引力—透镜—应用—航天通信 IV.
①TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 105599 号

责任编辑 曹晓勇

封面设计 文道思

出版
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号
(010)68768548

邮编 100830

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)68371900

(010)88530478(传真)

(010)68768541

(010)68767294(传真)

零售店 读者服务部

(010)68371105

北京宇航文苑

(010)62529336

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2015 年 1 月第 1 版

2015 年 1 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230

开本 1/32

印张 14.375

字数 414 千字

书号 ISBN 978-7-5159-0679-9

定价 78.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

译者前言

《深空飞行和通信——太阳引力透镜的利用》一书，是国际宇航科学院秘书长简·米歇尔·康坦特（Jean-Michel Contant）博士向我们推荐的，希望将该书介绍到中国来。我们愉快地接受了这个建议，并承担了本书的翻译工作。

本书作者克劳迪奥·马克尼（Claudio Maccone）是国际宇航科学院院士，国际宇航科学院空间科学探索技术部主任，由于他在空间科学领域的出色工作，国际天文学联合会于2001年9月2日将第11264号小行星命名为 Claudio Maccone。

2002年4月27日，国际地外智能探索团队授予他“Giordano Bruno Award”（布鲁诺奖），以表彰他在技术方面对地外智能探索的卓越贡献。1999年他在美国出版的《太阳作为引力透镜：建议的太空任务》（The Sun as a Gravitational Lens: Proposed Space Mission）一书，被国际宇航科学院授予1999年工程科学图书奖。

2009年3月，本书由 Praxis-Springer 出版社出版，内容涉及面广，从广义相对论的引力透镜、星际航行动力学、太阳帆推进、星际远程通信、优化远程通信的 KL 变换，到空间智能生命探索等都有论述。本书几乎涉及数、理、化、天、地、生命基础科学和工程科学的各个方面，对于将来的深空探测是很有启发性和前瞻性的著作。

国家天文台邹振隆研究员审阅了本书第一部分——飞往太阳引力焦点（500~1 000 AU）的太空任务及附录 A，B 和 E。

北京航空航天大学电子信息工程学院王祖林教授审阅了本书第二部分——最优 KL 变换远程通信以及附录 F 到 K 的译稿。

清华大学航天航空学院李俊峰教授和曾祥远博士研究生审阅了

附录 C——应用太阳帆的太阳引力透镜焦点任务。

他们对本书的译文提出了很多宝贵的意见，我们对他们的帮助表示衷心的感谢。

北京航空航天大学宇航学院研究生赵胜、杨进慧、侯金丽参与了翻译工作和文字、公式、图表的制作，中国航天科技集团公司为本书出版提供了出版基金资助，中国宇航出版社的邓宁丰社长、本书责任编辑曹晓勇对此书的出版花费了大量心血，在此一并表达我们深切的谢意。

对于翻译工作中可能出现的错误，希望读者不吝指出，译者不胜感谢。

翁惠焱 庄逢源 蔡国飙

北京航空航天大学

2013年7月30日

引 言

这是一本涉及在太阳系的边界以及更远的深空进行无人航天任务的书。

读者可以先阅读《太阳作为一个引力透镜的概述》所讨论的科学技术问题。

同时，读者不妨索取作者于1999年8月18日在美国国家航空航天局（NASA）喷气推进实验室（JPL）演讲的DVD光盘。演讲的题目是“太阳的引力透镜效应及其对于星际探测的应用”（时长约80分钟）。

该DVD可以通过电子邮件向作者索取：

Dr. Claudio Maccone, email: clmaccon@libero.it

当作者未能回复时，可以向以下合作者索取：

1) Dr. Luca Derosa, email: spacecraft@libero.it

2) Dr. Nicolo' Antonietti, email: n.antonietti@libero.it

本书是作者之前出版的两本篇幅较小书的综合。第一本书是《太阳作为引力透镜：航天任务计划》（The Sun as a Gravitational Lens: Proposed Space Missions），相当于本书的第一部分；第二本书是《无线电通信，KLT和相对论》（Telecommunications, KLT and Relativity），加以修订和更新后对应于本书的第二部分。

如果NASA或者欧洲空间局（ESA）决定在未来的几十年中资助距离超过550甚至是1000个天文单位的首次“先驱性星际任务”，那么本书的目的也就达到了。

Claudio Maccone

托里诺（都灵），意大利

2009年1月23日

早期工作简介

我最初遇到 Frank Drake 教授是在匈牙利巴拉顿湖 (Balatonfüreden) 召开的第二届生物天文学国际会议上 (官方名称为国际天文联合会第 99 次专题讨论会, 于 1987 年 6 月 22—27 日举行)。通过他对生物天文学有了初步的了解。生物天文学是一个新的科学分支, 旨在探讨在地球以外的地方是否存在生命。据我们所知, 目前生命可以各种形式, 包括在生物学上比人类更加高等以及更加低等的形式存在。与生物学家当前试图 (例如在火星上) 探测最初级的生命形式一样, 我们也有理由相信, 在银河系中可能存在着比我们更加高等的文明。如果这种情况是存在的, 那么我们就可以尝试利用地球上已有的几台大型射电望远镜来接收围绕着附近恒星的行星可能泄露出的无线电信号; 正如在约公元 1900 年人类发明了无线电通信技术后, 地球不断地向宇宙空间发射大量的无线电波一样。

在 1960 年, Frank Drake 是第一个尝试探测环绕两个近邻类太阳恒星 (波江座 ϵ 和鲸鱼座 τ) 的行星是否在发射“智能”无线电信号的科学家。这便是奥兹玛计划 (Project Ozma), 它标志着对地外智能的探索 (Search for Extra-Terrestrial Intelligence, SETI) 开始了。从那时起, 这种探索一直在一些科技发达的国家中持续进行着, 如美国、俄罗斯、法国、意大利、日本、澳大利亚和阿根廷。

在 1987 年的巴拉顿湖会议上, Frank Drake 做了一个名为“恒星的引力透镜效应”的演讲, 给我留下了很深的印象。他描述了太阳的引力场对来自太空 (例如银心) 的无线电波或是光线巨大的放大作用 (即非常强烈的聚焦作用)。无线电波带着原有的信息, 跨越广阔的银河空间掠过太阳表面, 然后因太阳的引力发生偏转, 在距离太阳 550 个天文单位距离的延长线上汇聚。如果能建造一艘可以

到达 550 个天文单位乃至 1 000 个天文单位距离的飞船，那么就能将位于太阳另一侧极远处经过极大放大过的射电波图像传送回地球。我将这艘飞船和整个太空任务称为“焦点”(FOCAL)。

在 1987—1992 年间，我自己对 FOCAL 任务进行了初步研究，总结出五个基本结论(后述)。其间，我在与 FOCAL 太空任务相关领域的科学家、工程师和专家进行研讨后，第一次组织了为期一天的关于 FOCAL 的国际会议。会议名为“第一届太空任务与天体动力学会议”(Space Missions and Astrodynamics I Conference)，会议于 1992 年 6 月 18 日在都灵理工大学(Politecnico di Torino，位于我家乡意大利都灵的工科大学)举行。之后我校订了这次会议的论文，将其发表在英国星际学会会刊上(Journal of the British Interplanetary Society，1994 年 2 月和 11 月刊)。至此科学家和工程师们对 FOCAL 的兴趣已经有了极大增长，向一家主要航天局提出正式提案的时机已经成熟。机会出现在 1993 年初，欧洲空间局发布征集新任务目标。我在 1993 年 5 月 20 日，代表一大批来自欧洲和美国的科学家和工程师向欧洲空间局递交了一份 50 页的 FOCAL 项目提案，后者将该提案列入“视野扩展 2000(Horizon plus 2000)”计划任务第 24 号复函(详见欧洲空间局 ESA SP—1180，1995 年 8 月，115 页，24 号)。之后法国的教授、欧洲空间局科学项目的主任 Roger Bonnet 诙谐地评论说：如果 FOCAL 项目被批准，那么将会为这一代欧洲航天局的雇员，乃至他们的子孙后代提供众多工作岗位。

Bonnet 的评论明确地指出了执行一次像 FOCAL 一样的深空任务所需要的巨大的工作量。但是，已经很难阻止具有长远眼光的科学家和工程师对这种深空任务进行设想。我继续在 1994 年和 1995 年 10 月召开的第二、三届空间任务和天文动力学会议(Space Missions and Astrodynamics II and III Conferences)上推行 FOCAL 任务。1995 年 10 月，在奥斯陆举行的国际宇航联合会(International Astronautical Federation Congress)上，国际宇航科学院(International Academy of Astronautics, IAA)同意并于 1996 年的 6 月 25—27 日

在都灵理工大学举行第一届国际宇航科学院外太阳系太空任务的座谈会 (First IAA Symposium on Missions to the Outer Solar System and Beyond)。来自美国国家航空航天局喷气推进实验室 (NASA-JPL)、俄罗斯和欧洲各国的大约 50 名专家聚集在一起, 讨论未来外太阳系探测的前景。会上 FOCAL 任务被认为是任何距离太阳 1 000 个天文单位以上的深空任务设想的“必要”前提。

以下是 FOCAL 空间任务重要性的五个基本结论:

1) FOCAL 将必然成为人类第一个先驱性的星际任务。事实上, 550 个天文单位约是太阳和冥王星之间距离的 14 倍, 因此 FOCAL 将超越目前所有进行中的其他深空任务 [如旅行者 (Voyagers) 1 号和 2 号, 先驱者 (Pioneer) 10 号和 11 号] 和计划进行的深空任务 [NASA-JPL 的冥王星快车 (Pluto Express)]。更好的一种提法是, 未来人类的任何星际任务都将是一个 FOCAL 任务, 因为距离太阳 550 个天文单位之外的任何空间点的位置, 太阳总可看成为某个方向上的透镜。

2) 达到 550 个天文单位需要很长的时间。这样的飞行需要多长时间取决于所采用的推进系统 (可能是核电推进、太阳帆、电磁帆或是几种的组合)。目前可以预测飞行将需要 10 年至 50 年的时间。不必在 550 个天文单位处停下 FOCAL, 因为在超过 550 个天文单位之后直线轨道上的任意一点都是太阳的焦点。这为一个更加雄心勃勃、但耗时更长的计划铺平了道路——飞到 800~1 000 个天文单位处。在 20 世纪 80 年代, JPL 有一个类似的课题, 名为 一千天文单位 (Thousand Astronomical Units, TAU)。这项任务将通过对恒星视差、日球层^①、日球顶层^②、星际介质和可能探测到的引力波的观测得到大量的科学结果, 因此 FOCAL (或 TAU) 任务并不局限于

① 日球层 (heliosphere) 是围绕着太阳系的、太阳风支配星际等离子的区域。尽管名称中含有“球 (sphere)”的意思, 但这个区域并不是球形的, 而是在前方大致延伸出 150 个天文单位或更远。

② 日球顶层 (heliopause) 是想象中包围的日球层的表面。

对引力汇聚效应的研究。

3) 哪些科学和技术团体的成员会对 FOCAL 任务提供的结果感兴趣? 首先, 天体物理学家会非常乐意得到一张银河系中心 (以下简称银心) 的详细射电图, 那里被怀疑有一个巨大的黑洞存在, 并且那里的恒星是如此的靠近, 有可能显示出出乎意料的物理现象。这种高分辨率的射电图只有当利用太阳的引力透镜效应并且飞船能够测得氢线 (1 420 MHz) 或相似的频率 (OH 微波激射的 1.6 GHz、水微波激射的 22 GHz 等) 才能得到。其次, 一艘穿越柯伊伯带的飞船, 能使行星科学家得到在 40~100 个天文单位间观测最近发现的绕太阳运动天体的绝佳机会。最后, 其他重要的研究领域, 如日球层和日球顶层的等离子物理、恒星视差的测定、由检测到的轨道干扰而可能发现新天体等, 都有待科学家去探索。但容我最后提醒大家, 太空工程师和技术人员必须先克服一系列挑战, 如选择最佳的推进系统、如何在这样史无前例的距离上和飞船保持联系以及如何最大限度地压缩信息以使数据能从 FOCAL 飞行器传回地球。拥有先进技术的公司将支持被航天局批准的 FOCAL 任务, 以使改进后的技术有用武之地。

4) 地外智能的探索 (SETI) 值得单独提出来讨论。正如 Frank Drake 在 1987 年所说, 只有利用太阳的引力透镜效应我们才可能检测到来自银河系中如此遥远之处的极微弱信号。参考 NASA 曾有的一个 SETI 定向探索计划 (在 1993 年 10 月被美国国会以“必要的预算削减”为由突然终止了)。该计划的目标是通过地球上最大射电望远镜的接收面积所提供的尽可能高的灵敏度, 来观测 773 个类太阳恒星区域 [例如在波多黎各的阿雷西伯 (Arecibo) 望远镜, 加州莫哈韦沙漠中的 70 米金石 (Goldstone) 深空通信网络天线, 法国的南塞射电望远镜, 澳大利亚的帕克斯天线等]。由于这些望远镜接收面积的限制, 能够看到的目标恒星的距离没有超过 100 光年的。但这个距离与银河系的尺度 (直径 100 000 光年) 相比是非常小的, 所以即使 NASA 的 SETI 计划得以继续实施, 所能检测的银河系区域

也是非常小的。换句话说，现在存在的问题是地球上的射电望远镜的接收面积无法过多超越当前水平，因此无法检测更微弱的信号。我们可以说这一代来自美国的 Frank Drake 教授、俄罗斯的 Nikolai Kardashev、法国的 Jean Heidmann 等探索地外智能的科学家们已经在地球表面尽了最大努力。现在是太空科学家提出第一次 FOCAL 太空任务、在 SETI 中取得领导地位的时候了。FOCAL 飞行器能够探测到比地球上可探测信号弱 2~3 个数量级的信号，因此能够将文明探索范围延伸到银心周围约 32 000 光年处，甚至更远的位置，大大增加了人类和外星人第一次接触的可能性。

5) 一个高水准的政治家，也可能有兴趣支持像 FOCAL 这样具有划时代意义的太空任务来提升个人威望。实际上，一次这样先驱性的星际任务所需要花费很难由单独一个国家的航天局来承担，国际性的合作是必须的。美国政府和 NASA 至少可以提供喷气推进实验室和深空网络技术，俄罗斯可以提供发射器，欧洲和日本可以负责科学有效载荷等。最后，联合国成员国也可以为 FOCAL 这样作为人类第一次向太阳系以外扩张的艰辛而宏伟的太空任务提供支持。

Claudio Maccone

国际宇航科学院星际空间探索委员会
秘书长和地外智能搜索委员会成员

鸣 谢

作为国际宇航科学院两个委员会——地外智能探索 (SETI) 委员会和星际空间探索委员会 (Interstellar Space Exploration Committee, ISEC) ——中的一员, 我从同事间许多有益的讨论中获益, 并得到他们的鼓励来出版这本书。

在 SETI 国际委员会中, 我很荣幸地得到了与已故的、无与伦比的 Carl Sagan 以及 SETI 试验的创始人 Frank Drake 讨论太阳引力透镜效应的机会。1996 年 10 月, Nikolai Kardashev 给了我在莫斯科斯登堡天文研究所 (Sternberg Astronomical Institute) 展示我对 FOCAL 任务看法的机会。对这三位科学家, 我表示最深切的感谢。SETI 研究所的科学家和工程师们, 如 Jill Tarter, Kent Cullers, Seth Shostak 和 Tom Pierson 等, 教了我很多知识; 很多人在 SETI 试验上是我的老师; 同时 Laurance Doyle 和另一些人在可居住区域和系外行星探索方面也是我的老师。John Billingham, NASA-Ames 研究所 SETI 的前主管, 国际宇航科学院 (IAA) SETI 委员会的协调人, 无论是从 FOCAL 计划到准备中的月球背面射电望远镜计划, 还是那个“疯狂的”借助虫洞 (Wormholes) 进行 SETI 的话题, 总是鼓励我进行 SETI 的相关研究。在欧洲, 法国的 Jean Heidmann 和匈牙利的 Ivan Almar 都有鼓舞人心的行为。他们参加了我在都灵举行的会议, 并做出了杰出的贡献。我同样应该提到法国的 Fran Biraud 和俄亥俄州立大学的 Robert S. Dixon, 他们和我一样, 在 1983 年独立地预见到了 SETI 的工作将会因 KL 变换 [Karhunen-Loève Transform (KLT)] 取代了快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 而得到极大的促进。最后, 我要感谢加州大学伯克利分校 (UC Berkeley) 的 Stuart Bowyer 和 Dan

Werthimer 对 SETI 工作的杰出贡献，感谢纽约的 Paul Shuch 和唯一的 SETI 试验大师，意大利博洛尼亚 (Bologna) 的 CNR 射电天文研究所 (CNR Radio Astronomy Institute) 的 Stelio Montebugnoli，以及罗马 CNR 的 Cristiano Cosmovici。

我参加的另一个 IAA 委员会是首席英国物理学家 Leslie Shepherd 于 1984 年创立的星际空间探索委员会 (Interstellar Space Exploration Committee, ISEC)。对于他以及我现在的合作者，来自罗马 Telespazio 公司的 Giovanni Vulpetti，对他与我之间关于星际航行 (包括相对论航行) 的激动人心的对话，我都心怀感激。我在此特别提到 Giovanni 在 1992—1995 年间的杰出发现：一艘使用太阳帆飞越过太阳的飞船，将以比之前设想的大得多的速度被抛出太阳系。如果 FOCAL 飞行器采用了太阳帆，它将在 25~30 年间抵达 550 个天文单位远处。纽约大学的 Gregory Matloff 是委员会中太阳帆技术领域的佼佼者，我也十分感谢他的建议、友谊和热情好客。在委员会中我还要感谢的一个人是 Macgregor S. Reid，他是喷气推进实验室主任的技术执行助理，在喷气推进实验室多次接待我，并帮我联系了那里许多的杰出专家。其中之一是 Rob Stahle，冥王星快车项目的主任，他所遇到的问题显然与 FOCAL 任务中的非常相似。

上面提到的在我家乡都灵组织的那次会议，没有 Giancarlo Genta 坚定的支持是不可能举办的。他之前是都灵理工大学力学系 (Mechanical Department) 的主任，现在是 G. Colombo 天文动力学中心 (Center for Astrodynamics) 的主席。同样地，1996 年 6 月 28 日在都灵科学院组织的搜索地外智能日 (SETI-Day) 活动得到了我另一个朋友，都灵市和平观察委员会 (Peace Watch Committee) 的 Danilo Noventa 的大力帮助。我还要特别感谢国际纳米生物试验台 (International Nanobiological Testbed, INT) 罗马分公司的 Salvatore Santoli 长久友好的合作，他是英国星际学会志 (Journal of the British Interplanetary Society, JBIS) 地外生物学版

(Exobiology Section) 的编辑, 纳米技术的主要专家。同样感谢我之前的学生 Michele Piant, 与我分享了对 FOCAL 太空任务研究的兴趣, 帮助我准备了本书中的图表。

在本书出版过程中, 我需要特别强调科罗拉多斯普林斯市 (Colorado Springs) Colorado 大学 (University of Colorado) 的 Richard A. Blade 教授对 FOCAL 太空任务的重视以及编辑、支持本书在 Springer-Praxis 出版。

作者希望对出版商 Clive Horwood 和 Praxis 的首席学科咨询编辑 Dr. John Mason 同意将之前两本书 (对应于本书的第一、第二部分) 合并出版表示感谢。作者同样希望感谢 OPS Ltd. 的 Neil Shuttlewood 对书中方程进行了推导, 这不是一个简单的工作。

当然, 我对 Alenia Aerospazio (Divisione Spazio) 空间公司为我提供研究机会表示感谢, 我在该公司从 1985 年工作至今。

最后, 我要感谢我的父母, 尽管他们经济状况一般, 多年来仍然鼓励支持我的研究。

Claudio Maccone

意大利都灵, 1997 年 8 月 24 日

前 言

如果太空中有和我们一样的智慧生物，他们也将和我们一样，去探索和认识我们的宇宙。我们和他们都希望能以自然定律所允许的最大清晰度来观测宇宙的最深处。为了这个目的，我们以巨大的代价在地球上，现在是在空间中，建造功能强大的各种望远镜。每一类文明的知识积累到一定程度，就如我们现在一样，就会认识到他们被赠与了一个无与伦比的礼物：一个如此强有力的透镜以至于任何合理的技术都不可能复制或超越它。这个透镜就是该文明所对应的恒星，对我们而言，就是太阳。每一颗这样的恒星的引力都会扭曲空间，进而改变了波和粒子的路径，最终成像，就像普通的透镜所做的一样。

这种透镜所成的像要用数千个常规望远镜才能产生。它能为遥远恒星和星系最细微的细节成像。每一类文明都将最终发现这个现象，并一定会将开发这种透镜放在极高的优先级上。人们想知道此刻有多少这样的透镜正在被用来观察宇宙，捕捉着我们时代大量的物理和生物信息。

我们正在开始认识这种透镜的力量，同时关注着它的开发。在本书中描述了该透镜的理论和潜在的性能，不只是对光和射电波而言，还有对引力波和中微子的作用。但是要利用这种透镜需要克服一个主要的挑战：这个挑战来自于这样一个事实，即透镜所成的任何放大的电磁波（包括光和射电波）图像，距离太阳至少有 550 个天文单位才能形成。所以，此时此刻拥有极佳的清晰度和亮度的图像正形成在太空的深处。我们面临的挑战是将适当的探测器送到这个距离上去捕捉这些图像。

在本书中，作者描述了这个技术挑战，以及 FOCAL 任务可能解决这个问题的方法。他指出除了引力透镜以外还将有许多附加的科学成果将从这个任务中获得。书中有对该任务具体的技术要求，以及衡量透镜成像能力的严格精确的定量值。

从长远来看，这也许是一本关于我们将要进行的最重要的空间任务的技术性开山之作。本书的读者可以在阅读时设想一下，在漫长的时间里，有多少这样相同的论著在其他的行星中被创造出来，又有无数的恒星此时已经作为遥远行星上生物的超强巨眼，观察着这个宇宙。

Frank D. Drake

加利福尼亚大学圣克鲁兹分校

天文学和天体物理学教授

前自然科学部主任