

〔苏〕I. S. 什克洛夫斯基 著

# 恒星的诞生、 发展和死亡



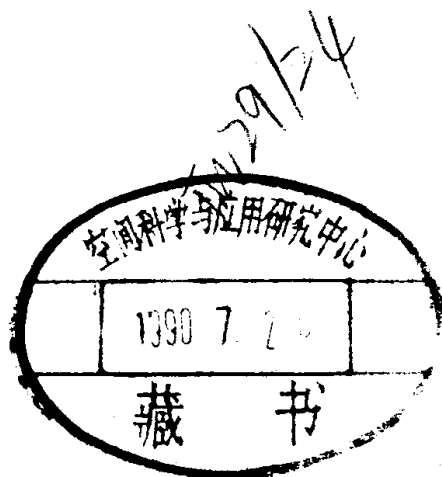
科学出版社

P152

SKLF

# 恒星的诞生、发展和死亡

〔苏〕 I. S. 什克洛夫斯基 著



科学出版社

1986

106056

106056

## 内 容 简 介

恒星是宇宙中最有趣和最重要的天体。本书从最广泛角度探讨了恒星的演化过程,从恒星的诞生、发展到死亡。书中介绍了人们十分关注的白矮星、行星状星云、超新星、中子星、黑洞等奇异天体。本书内容广泛,叙述深入浅出,可供天文工作者、天文系大学生和天文爱好者阅读参考。

I. S. Shklovskii

Stars

Their Birth, Life, and Death

W. H. Freeman and Company, 1978

### 恒星的诞生、发展和死亡

〔苏〕I. S. 什克洛夫斯基 著

黄 磷 蔡贤德 译

责任编辑 夏墨英

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986年3月第1版 开本: 787×1092 1/32

1986年3月第一次印刷 印张: 14 1/4

印数: 0001—2,150 字数: 325,000

统一书号: 13031·3103

本社书号: 4199·13-5

定价: 3.35 元

## 英译本序言

我们是生活在一个恒星世界里。恒星都有其诞生、发展和死亡的过程。恒星的一生往往长达数十亿年；它们的死亡有时是平静的，有时则是以一种惊人的方式告终。宇宙天国中的奇异居民——白矮星和黑矮星、行星状星云、超新星、中子星，也许还有黑洞，看来就是恒星生命过程的最终产物。我们银河系的大部分物质可能是存在于恒星之中；弥漫在银河系的大部分辐射能也是恒星产生的；离我们最近的恒星——太阳，提供了地球上的生命绝对必需的光和热；点缀着夜空的星星更引起人们无边的遐想。

本书从最广泛角度探讨了恒星的演化，叙述明晰而动人，偶而穿插一点幽默，极易为不同学科和不同国家的读者所接受。本书由理查·洛德曼 (Richard B. Rodman) 熟练地从俄文译成英文，并增加了重要而极详细的参考书目，以满足那些愿意继续钻研的读者的需要。恒星是许多人都感兴趣的。本书中有许多东西将会引起非天文专业但有兴趣的读者的注意。而且由于介绍内容的广泛以及有时深入到基础数学的探讨，因而本书的许多内容对天文专业大学生及专业天文学家也是十分有用的。

本书优点很多，但最吸引人的则是它的作者什克洛夫斯基。什克洛夫斯基跻身于世界第一流天体物理学家之列已逾四分之一世纪了。他的贡献几乎遍及现代天文学的所有领域。他在本书中所表现出来的许多激情来源于一个简单的事实，就是他本人在所叙述的许多发现中曾起过重要作用。什克洛

夫斯基在科学普及方面的才能也是誉满苏联的。这在本书中也有充分反映。

我本人同什克洛夫斯基的接触始于六十年代早期，当时经过一些信件交往后，他建议我们合作写一本书，这就是后来出版的《宇宙中的智能生物》(Holden-Day, 1966 年版; Dell Publishing Co., 1967 年版; 以后再版多次)。由于什克洛夫斯基的旅行自由受到限制，到该书完成时，我和他尚未见过面。只是在以后，我才有多次机会，在美国和苏联，结识这位卓越非凡而又忠厚诚实的学者。他的学生在苏联空间科学计划中发挥了很大作用。他的成就得到了全世界的公认，他是苏联科学院通讯院士，美国天文学会仅有的六个名誉会员之一，美国全国科学院国外院士，太平洋天文学会布鲁斯金质奖章获得者，还荣获过列宁奖金。他是我们时代的卓越科学家之一，理所当然为世界各国公众所推崇。

什克洛夫斯基还以幽默著称。有一次参加国际科学讨论会时，象通常那样，我们听到了一篇特别有欠思考的报告。报告人争辩说，科学创造力依赖于太阳活动周期的相位，并指出牛顿、达尔文、爱因斯坦等人的主要的创造性发现，就是在出现了许多太阳黑子的太阳活动峰年前后做出来的。“是啊！”什克洛夫斯基对着我故意用使人听得见的低声评论道“可是这篇论文却是在太阳活动极小年臆想出来的。”

《恒星的诞生、发展和死亡》一书是著者在恒星领域里工作一生的结果，经历了太阳活动周的所有相位，然而却丝毫看不出所谓在太阳活动极小期缺乏特色的迹象。读这本书是一种真正的享受。

O. 萨根(Carl Sagan)

美国纽约康奈尔大学

行星研究实验室主任、天文学和空间科学教授

## 原作者为英译本写的序

天文学是最古老然而也是最年轻的科学。史前时代，人们对其切身经验之外的事物茫然无知。一位著名的苏联天文学家对此有过十分精辟的描绘：“人们偶而会抬头看看天空——这件事表明他们有别于动物。”

现在，广大公众从功利出发，把他们的主要兴趣放在“空间”方面（“空间”一词常常不正确地被用来代替“宇宙”）。我同意这种情形可能会影响我们对和谐、美好和永恒的周围世界进行冷静的思考；但即使这样，刚刚过去的几十年，却是天文学异常活跃和富有成果的发展时期。这是我们关于宇宙的概念发生急剧变革的年代。仅仅在第二次世界大战之前，人们还把宇宙看成静止的和无变化的，但今天已经承认它是永恒变化和发展的了。现代天文学是彻底演化的科学，我们已经观察到所有层次的演化，从膨胀的宇宙到碎裂的流星群。

本书讨论的是恒星。在我看来，恒星是宇宙中最有趣和最重要的天体。近来在非可见光天文学方面的发现，包括了一类新的属于恒星的天体：脉冲星和 X 射线源。它们的性质是令人惊异的，它们在恒星演化中的作用是巨大的。因此，不单是天文学家，就是一般注重科学的人，都对它们产生了极大的兴趣。尽管如此，对于象经典恒星那样的天体，仍应进行专题研究；因为没有对这种天体特性的充分理解，就决无希望切实领悟最新天文学所揭示的各种新奇事物。

在本书的这个英译本中，我补充了若干内容，以反映原俄

文版问世三年以来天文学的进展,有些地方还作了必要修改.我特别高兴《恒星的诞生、发展和死亡》一书即将在美国出版,美国是一个对现代天文学的成长,包括对恒星的研究,作出了卓越贡献的国家.这本专著是一本较高深的普及读物,我希望它赢得读者的喜爱.

I .S. 什克洛夫斯基

## 前 言

什克洛夫斯基是为数不多的世界著名的大天体物理学家之一。他的兴趣异常广泛；在许多不同领域中，从最近旁的天体物理学，地球电离层，到银河系中的超新星，进而到宇宙中迄今观测到的最遥远天体——类星体，他都做出了重大贡献。他既精通对物理过程进行细致的专门研究，又擅长对诸如生命起源这类问题的哲理思维。在所有课题上，他都显示出深入问题关键之才能，丰富的想象以及对现象作清晰说明的天赋。他的《恒星的诞生、发展和死亡》一书的英译本，将引导广大读者进入现代天体物理学中最充分发展的一个领域。

除我们熟悉的太阳系天体外，恒星在历史上曾是天文学的中心研究课题，这种地位一直维持到现在。我们知道，正常星系发出的大部分光是星光；我们认为，我们已经懂得了恒星内部产生能量并传输到表面而辐射出去的那些过程；我们也知道了大多数物质（至少在星系的里边部分）集中在普通恒星之内；我们还在某种程度上确信，大多数重于氢和氦的元素（包括我们身体内的大多数原子！）都是以前在恒星内部的热核“高压锅”内制造出来，然后在超新星爆发时驱散到星际介质，从而形成了以后各代的恒星和行星。虽然用新技术发现的若干奇特的银河恒星，显示出一些令人迷惑的新现象（如X射线和 $\gamma$ 射线的“爆发体”），而且甚至许多我们熟悉的已经过多方面研究的天体（从密近双星到I型超新星）的起源，也仍然是个谜，但是我们仍然感到，我们已经得到了不少来之不易的关于最普通恒星生命循环的认识。



这种认识是相当晚才取得的。当什克洛夫斯基还是莫斯科大学一个学生的时候,还没有人能够回答“为什么恒星能够发光?”这样的基本问题。开耳芬曾经说过,没有一个当时流行的“自然科学理论可以说明太阳辐射为什么能以目前这样的速率持续数亿年之久”。正是在什克洛夫斯基大学毕业的1938年,魏扎克(C. F. von Weizsäcker)和贝塞(H. Bethe)发表了几篇重要论文,第一次指明热核过程提供了大部分恒星能量。从此,我们的认识才真正以令人吃惊的速度增长起来。

什克洛夫斯基用最先几章讨论星际介质——恒星诞生的环境,把我们带领到昏暗的比较稠密的分子云中,这些云大概就是形成恒星的真正地点。然后,对气体云凝缩成恒星的隐蔽过程进行了一些理论计算。第六章到第十四章以明白易懂和不太专深的语言,勾画出恒星结构和演化的理论,既介绍了已取得的成就,也指出了尚存在的佯谬,其中包括未能探测到太阳中微子这样的困难。以后几章涉及恒星临死的“阵痛”——超新星爆发这一令人激动和重要的课题。正是在这个问题上,什克洛夫斯基对天体物理学作出了他的最重大贡献之一,他提出了关于蟹状星云(公元1054年中国人观测到的一次超新星爆发的残骸)发出的光,并非是普通的热致辐射,而是由在很规则的大范围磁场中以近于光的速度作回旋运动的带电粒子产生的同步加速辐射的观念。在最后六章,什克洛夫斯基讨论了恒星的爆炸死亡过程遗留下来的十分致密的残骸,即脉冲星(中子星)或黑洞。这些目前受到人们密切注意的天体,通常总是表现为射电源和X射线源。从当前的进展速度来看,在不太远将来,可能会真正探测到 $\gamma$ 射线,甚至引力波。

J. P. 奥斯特里克 (Jeremiah P. Ostriker)

美国普林斯顿大学天文台

# 目 录

|          |   |
|----------|---|
| 绪论 ..... | 1 |
|----------|---|

## 第一篇 恒星的诞生

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第一章 恒星的基本观测性质 .....          | 15 |
| 第二章 星际介质的一般知识 .....          | 32 |
| 第三章 星际气体-尘埃复合体: 恒星的发源地 ..... | 60 |
| 第四章 宇宙脉塞 .....               | 78 |
| 第五章 原恒星的演化 .....             | 99 |

## 第二篇 恒星的辐射

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第六章 恒星——平衡状态下的气体球 .....  | 123 |
| 第七章 恒星是怎样辐射的? .....      | 132 |
| 第八章 恒星的核能源 .....         | 146 |
| 第九章 太阳的中微子辐射问题 .....     | 158 |
| 第十章 白矮星是怎样构成的? .....     | 170 |
| 第十一章 恒星的模型 .....         | 182 |
| 第十二章 恒星的演化 .....         | 192 |
| 第十三章 行星状星云、白矮星、红巨星 ..... | 208 |
| 第十四章 密近双星的演化 .....       | 221 |

## 第三篇 恒星的爆发

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第十五章 超新星: 一般性知识 .....         | 233 |
| 第十六章 作为 X 射线源和射电源的超新星残骸 ..... | 246 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第十七章 蟹状星云 .....    | 279 |
| 第十八章 恒星为什么爆炸 ..... | 304 |

## 第四篇 恒星的死亡

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第十九章 中子星·脉冲星的发现.....  | 321 |
| 第二十章 脉冲星和超新星残骸 .....  | 336 |
| 第二十一章 作为射电源的脉冲星 ..... | 357 |
| 第二十二章 脉冲星理论 .....     | 371 |
| 第二十三章 X射线星 .....      | 390 |
| 第二十四章 黑洞和引力波 .....    | 419 |
| 进一步的读物 .....          | 436 |
| 补充读物 .....            | 445 |

## 绪 论

众所周知, 各种各样的天体都能发射(和吸收)范围很广的电磁波谱, 光线只是其中很窄的一部分. 因此, 过去由于只能在可见光的狭窄波段内观测, 天文学家关于宇宙的概念显然只能是片面的. 第二次世界大战以后, 情况有了根本改变: 天文研究开始向整个电磁波谱范围延拓. 首先是射电天文学兴起并得到蓬勃发展, 它在过去三十年内, 以大量头等重要的发现丰富了整个天文学. 今天, 射电天文学拥有世界上最大的天线(直径甚至达到数百米)和迄今最灵敏的接收机, 大大扩展了人类探索遥远空间的眼界. 那么, 射电天文学现在面临着怎样的前景呢?

一般说来, 限制天文观测能力的主要因素有: 能够检测出的极限辐射强度, 极限波谱分辨率(用比值  $\Delta\nu/\nu = \Delta\lambda/\lambda$  来表示, 其中  $\Delta\nu$  和  $\Delta\lambda$  分别代表可区分开的最小频率差和最小波长差), 以及极限角分辨率(即测量宇宙发射源或其组成部分时能分辨出来的最小角直径). 在所有这些指标上, 射电天文并不比光学天文逊色.

事实上, 今天最大的光学望远镜(美国加州帕洛玛山的 5 米和苏联高加索的 6 米反射望远镜), 能够探测到的最暗恒星或星系的星等为 23.5. 这样一个暗弱天体射至地球的光学辐射总流量密度约  $3 \times 10^{-14}$  尔格·厘米<sup>-2</sup>·秒<sup>-1</sup>, 这就是最低可测量值. 然而, 现代巨型射电望远镜的灵敏度, 已高到可以记录单位频率间隔的极限流量密度约达  $10^{-29}$  瓦·米<sup>-2</sup>·赫<sup>-1</sup>, 即

$10^{-3}$  詹斯基\*。若取接收带宽  $\Delta\nu \approx 300$  兆赫, 可求出射电天文学(在波长为 100 厘米附近)能够探测到的极限辐射流量密度接近于  $3 \times 10^{-21}$  瓦/米<sup>2</sup> =  $3 \times 10^{-18}$  尔格·厘米<sup>-2</sup>·秒<sup>-1</sup>——比光学天文学的探测极限弱 10,000 倍! 当然我们应该记住, 在光学波段, 最亮恒星比最暗恒星(后者的数目大大超过前者)亮  $10^{10}$  倍左右; 而在射电波段, 从天空中最强的源到达我们的辐射流量密度仅约为最弱源的  $10^6$  倍。由此可见, 可观测的宇宙射电源比光学天体少得多。尽管如此, 现代大型射电望远镜的极高灵敏度无疑是令人吃惊的<sup>1)</sup>。

同样给人深刻印象的, 是射电天文学探测波谱中各别细节所达到的频率分辨率。例如, 在宇宙微波激射源 18 厘米波长(OH 分子)射电谱线轮廓中, 很容易分辨出窄于 1 千赫的细节, 由此可算得波谱分辨率  $\Delta\nu/\nu \approx 3 \times 10^{-7}$ ; 而在光学波段, 恒星光谱的分辨率  $\Delta\nu/\nu \approx 10^{-4}$  就算不错了。

射电天文学在其发展早期的唯一致命弱点是射电望远镜的分辨本领太低。我们可以取中心衍射环的角直径  $\lambda/D$  作为角分辨率的一种自然极限。这里的  $\lambda$  是辐射的波长,  $D$  是望远镜面的直径。在光学天文,  $\lambda$  的典型值是  $4 \times 10^{-5}$  厘米, 衍射效应决定的大光学望远镜的分辨本领为百分之几弧秒。然而, 地球大气的扰动及望远镜镜面的缺陷, 使这一分辨率无法达到。大光学望远镜的分辨率实际上极少优于 0''.5。那么射电望远镜的角分辨本领有多高呢? 即使反射面直径达 100 米的巨大射电望远镜, 其衍射环角直径在 10 厘米波长约为 3 弧分。在射电天文学刚获得发展的五十年代早期, 角分辨率低到了好几度。

\* 1 詹斯基(Jansky) =  $10^{-26}$  瓦·米<sup>-2</sup>·赫——译者注

1) 自从射电天文学诞生以来, 全部现有射电望远镜从所有宇宙射电源(太阳除外)“捕获”到的总能量大约是  $10^3$  尔格, 这一能量刚刚够用来把一杯水的温度升高  $10^{-7}$  度。读者也许有兴趣估计一下这一能量的代价。

干涉技术应用到射电天文研究以后,情况立即根本改观.这种技术是用两台射电望远镜同时接收宇宙射电波.这时,在衍射环角直径的表达公式中,需要用两望远镜之间的距离代替望远镜的直径,而这一距离可以安排得非常遥远.通过相隔洲际距离的天线进行的干涉测量,已获得了创纪录的角分辨率<sup>1)</sup>.例如,已经使用过基线从美国到苏联克里米亚和从美国到澳大利亚的干涉仪,这些干涉观测在最短波长达到的角分辨率为  $10^{-4}$  弧秒!射电天文观测的角分辨本领现在反而远远超过了光学观测的角分辨本领了!

但是迄今为止,只是在少数几种实验中,而且是对某些特殊的角直径很小的源(如类星体、射电星系的核及宇宙微波激射源),才达到了上面提到的极高射电分辨本领.通常,射电源是或大或小的延伸源.尽可能详细地了解源中亮度分布是十分重要的,也就是说,我们需要得到这些延伸源在两个坐标方向上都具有最高角分辨率的射电象.目前适合于这种目的的最好的装置是设在荷兰韦斯特博克(Westerbork)的综合孔径射电望远镜.这个系统由 12 面直径各为 25 米的反射镜组成,彼此相隔适当的距离并联成一条 1.6 公里长的直线.在 21 厘米波长,该系统的分辨本领为  $20''$  左右.天文学家正迫切期待着将于 1981 年前完成的美国甚大望远镜阵(Very Large Array, 缩写为 VLA)\*,它的设计方案与荷兰的相似,但却大得多(参见图 3.3).该天线阵设在美国新墨西哥州,共有 27 个抛物面反射镜,每个直径也是 25 米,在一个半径 21 公里的地点排列成 Y 形.此系统在 6 厘米波长的分辨本领将

---

1) 这种用独立的、相距很远的天线进行干涉测量的概念,是苏联射电天文学家首先提出来的.

\* 这架甚大望远镜阵已经建成,并且取得了巨大的成就,详情见有关书刊,例如,北京天文台在 1982 年台刊副刊登载的美国天文学调查研究委员会报告:“八十年代的天文学和天体物理学”.——译者注

是  $0''.6$ , 这比帕洛玛山天文台孜孜不倦工作多年所得的著名光学巡天图集的分辨率还要高一倍。

天文学进展中的崭新一步是进入空间, 这是火箭技术在战后得到迅猛发展的结果。这门新的大气外天文学, 同射电天文学一样, 与经典天文学是大不相同的。利用安装在空间飞行器上的科学仪器(如光子计数器和望远镜), 天文学家摆脱了能将宇宙电磁辐射中的短波部分(紫外辐射、X射线和 $\gamma$ 射线)完全吸收掉的地球大气的严重束缚, 这就有可能去研究太阳、恒星、星云和星系的短波(“硬”)辐射, 从而大大增进了我们对这些天体的本质的认识。例如, 各种元素及其离子的几乎所有“共振”谱线都在紫外光谱区, 而如果我们想详细了解恒星和星际介质的化学组成, 就绝对必须分析这些谱线。

为了说明现代空间天文学的潜力, 我们简单介绍一下安装在美国一个专用地球卫星上的望远镜的特点。这个卫星的轨道相当高( $\approx 750$  公里), 近于圆形。虽然它的正式名称是第三轨道天文台(OAO-3), 但人们更习惯于称它为哥白尼卫星, 因为在它运转的 1972—1973 年, 天文学家纪念了伟大的波兰先驱者哥白尼(N. Copernicus)的五百周年诞辰。哥白尼卫星采用了当时最先进的设计, 其主要仪器是用作紫外分光仪的望远镜。卡塞格林光学系统的主镜的直径为 80 厘米, 这一口径即使在地面也是很可观的。光谱仪用了一块凹面衍射光栅, 第一级光谱的色散度为 4.2 埃/毫米( $1 \text{ 埃} = 10^{-4} \text{ 微米} = 10^{-8} \text{ 厘米}$ )。在 950—1450 埃范围内, 光谱分辨率  $\Delta\lambda$  约达 0.05 埃。扫描光谱时, 望远镜跟踪待测星的精度高得令人吃惊: 在十分钟的观测时间内, 望远镜瞄准方向的漂移角度不大于  $0''.02$ ! 根据地面指令, 望远镜可以对准任何一颗天文学家感兴趣的星(亮于 5 等), 然后记录它的光谱, 并将数据通过遥测系统发回地面。哥白尼卫星取得了科学价值极高的结果,

其中一些将在本书第一篇讨论。更大的空间望远镜也在考虑之中，镜面直径有大到三米的\*。利用这些望远镜，将能研究暗得多的恒星和星云的至为重要的紫外光谱，在这些恒星和星云中有许多最令人感兴趣的天体。

对于1973—1974年间美国载人天空实验室所作的杰出研究，人们是记忆犹新的，勇敢的宇航员们在太阳物理学方面完成了卓著成效的工作。

研究天体的X射线和 $\gamma$ 射线，也是十分重要的。X射线天文学已取得了引人注目的进展。对有些天体，不论是在软X射线(光子能量数百电子伏)还是在较硬的X射线(光子能量从几千到几十万电子伏)波段，都积累了十分丰富的资料。X射线天文学的基本重要意义，在于它使人们有可能研究那些处在极端物理条件(如气体温度高达几千万度到几亿度，或本书稍后要介绍的猛烈爆炸过程等)下的天体。如同在射电波段一样，许多源在X射线波段发出的不是热辐射，而是具有极高的超相对论性能量的电子运动时产生的特殊的“非平衡”辐射。在这方面，光学天文的能力是十分有限的。

由此可见，光学、射电和X射线天文学并非彼此重复，而是积极地相互补充。有些天体，包括大多数普通恒星，主要产生光学辐射；另一些天体则主要发出射电波或X射线；还有些天体能够同时发出所有这三种辐射，尽管三种辐射的强度可能不等。最后这类天体是特别重要的，需要对它们进行多方面的综合研究。

著名的美国“乌呼鲁”卫星(Uhuru，又叫“自由号”)充分显示了X射线天文学的威力。这颗专用卫星于1970年12月发射到一个赤道轨道，持续运转了许多年，卫星上装有两个X

---

\* 后因经费缩减，这台大空间望远镜(记为LST)的口径已减至2.4米。——译者注



射线探测器，面积各为 840 厘米<sup>2</sup>；探测器是带有厚约 0.1 毫米铍窗口的 X 射线比例计数器，它们的视场分别为  $5^\circ \times 5^\circ$  和  $0.5^\circ \times 5^\circ$ ，并指向相反的方向。“乌呼鲁”配备了磁制导系统，其中包括校准卫星纵轴相对于地磁场方向的电磁线圈。当卫星以每秒  $0.1^\circ$ — $0.5^\circ$  的速率绕轴缓慢旋转时，一个飞轮可使其保持稳定。制导系统还包括若干星光镜以测定绕自转轴转过的角度。用这个卫星可以研究光子能量范围在 2—20 千电子伏、流量密度低达  $0.005$  光子·厘米<sup>-2</sup>·秒<sup>-1</sup> 的分立 X 射线源，每个源用一个八通道脉冲高度分析器进行测量，以便确定其能谱。

$\gamma$  射线天文学用的技术十分特殊，现在还很不成熟。极硬的光子一般用火花室探测。这些装置非常重，很难用在空间飞船上。其实，火花室并非必须送入太空，把它放在升到 25—40 公里高空的气球上也能工作。不过最好还是用专门的卫星。1972 年 11 月，美国发射了一个此种类型的小天文卫星 SAS-2，其目的是研究能量高于 30 兆电子伏、极限流量密度为  $10^{-6}$  光子·厘米<sup>-2</sup>·秒<sup>-1</sup> 的宇宙  $\gamma$  射线。已经肯定观测到了一种弥漫的、普遍存在的、在银道面上显得比较强的  $\gamma$  射线背景辐射，还有一个被认为是一种特殊星云（即恒星爆发的残骸——见第十六章）的分立  $\gamma$  射线源。关于气球观测曾经报道过的宇宙  $\gamma$  射线“点”源的存在，天文学家正怀着急切的心情，期待着进一步的证实。

空间天文学的另一重要领域是红外和“亚毫米”巡天。在这个困难的波段范围的观测，在某种程度上，可以通过地球大气若干“透明窗口”（如在波长 8—13 微米和 20—25 微米）而在地面进行。利用高空飞机上的实验室和气球的观测计划，已提供了宝贵的资料。专门设计一个红外天文卫星将是十分有用的，但至今还没有。天文学的这一领域的主要成就是发展

• • •