

文章编号: 1672-8785(2023)12-0001-06

太周探测: 从 60 年代四大天文发现说起(上)

张永刚^{1,2*} 顾 溢^{1,2,3} 马英杰^{1,2} 邵秀梅^{1,2} 李 雪^{1,2,3} 龚海梅^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 红外探测全国重点实验室, 上海 200083;

3. 无锡中科德芯感知科技有限公司, 江苏 无锡 214135)

摘 要: 人类的探索欲望及数千年来的不断积累促成了 20 世纪 60 年代的四大天文发现, 而大气层对天文观测的一些根本性限制促使人们在 20 世纪冲出地球进入太空。在宽广的波段进行天文观测有着极为苛刻的要求, 新猜想和模型的提出也要求进行新的验证, 这些都促进了观测设备及器件的性能趋于极致。本文旨在对此进行简要的回顾分析并列举一些典型实例, 侧重考察其探测波段、主镜或天线的口径、探测仪器及所用器件的类型和性能等, 以便进行纵向和横向的比较, 温故而思新。

关键词: 天文观测; 红外; 太赫兹; 毫米波; 射频与微波

中图分类号: TN2 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.12.001

Teracycle Detection: Starting from the Four Major Astronomical Discoveries in 1960s (I)

ZHANG Yong-Gang^{1,2*}, GU Yi^{1,2,3}, MA Ying-Jie^{1,2}, SHAO Xiu-Mei^{1,2}, LI Xue^{1,2,3}, GONG Hai-Mei^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai 200083, China;

3. Wuxi Zhongke Dexin Sensing Technology Co., Ltd., Wuxi 214135, China)

Abstract: The explore desires of human being and the accumulations of thousands year causes four major astronomical discoveries in 1960s; whereas some fundamental limitations of our atmosphere on astronomical observation impel us rush out of earth into space. The astronomical observation in such wide of bands arises very critical requirements, new conjectures and models needs new test and verify; all this promote the performance of instruments and devices towards perfection. This article aims to review and analysis the evolution briefly in conjunction with some typical examples, especially their detection bands, diameter of the primary mirror or antenna, types of detection instruments and devices as well as related performances. The purpose is for carry on longitudinal and lateral comparisons easier, and gain new ideas by reviewing old.

Key words: astronomical observation; infrared; terahertz; millimeter wave; radio frequency and microwave

收稿日期: 2023-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(62175250; 62075229; 62174169; 62104238); 上海市重点科研计划项目(2019SHZDZX01); 上海市优秀学科带头人计划项目(21XD1404200); 上海市国际科技合作项目(20520711200)

作者简介: 张永刚(1957-), 男, 上海人, 研究员, 主要从事化合物半导体光电材料、器件及应用研究。

*通讯作者: E-mail: zhangyonggang@mail.sitp.ac.cn

0 引言

1965 年, 美国贝尔实验室两位年轻的无线电工程师彭齐亚斯(Penzias A A)和威尔逊(Wilson R W)在《天文物理》杂志上发表了题为“A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s”的论文^[1]。这是 20 世纪 60 年代(以下简称“60 年代”)四大天文发现的代表性事件。注意到那时论文标题中的频率单位为 Mc/s, 即每秒兆周(Mega-cycle/s)或简称兆周。虽然以赫兹作为频率单位在 20 世纪 30 年代就已提出, 60 年代又由国际标准组织(ISO)推荐, 但实际上 70 年代才开始广泛使用。时至今日, 一些场合仍习惯以周作为频率单位, 如电台呼号中仍有多少千周多少兆周的说法, 照此太赫兹也就是太周了。太者, 高、大、极也; 周者, 环绕、严密、完备也。太周探测狭义上说明如今的探测波段已填满太赫兹波段(0.1~10 THz)间隙, 广义上也就是宇宙探索, 是为题。

1 60 年代四大天文发现

60 年代最重要的天文发现无疑是宇宙微波背景辐射。在 30 年代甚至更早, 就已提出了宇宙大爆炸理论或者说是猜想。如果大爆炸是存在的, 那么必然会留下某些痕迹或“回声”。背景辐射的存在从逻辑上看是很自然的, 早期也有按某种模型对辐射温度做出的粗略估计, 认为其可能在几开、十几开甚至几十开范围, 但都无法证实。其时彭齐亚斯和威尔逊利用贝尔实验室的 20 英尺微波号角天线系统开展了无线电测量方面的实验。此天线系统原来是用于卫星通信研究的, 频率覆盖了后来上行常用的 C 波段, 但其时与射电天文并无关联。那时晶体管虽已发明了, 但还没有能工作到如此高频率的高电子迁移率晶体管(High-Electron-Mobility Transistor, HEMT)之类的器件, 参量放大器所需的器件也还在发展中。因此用于接收的是脉泽(Maser)放大器^[3], 其工作温度为 4.2 K, 中心频率为 4170 MHz, 增益约

为 34.5 dB, 带宽约为 25 MHz, 系统采用先放大再变频的方案。它也就是后来激光器和光放大器的前身, 只是工作在微波频率。

他们在实验中发现天线系统的噪声温度总是高于预期, 天空中似乎存在一种各向同性、非极化且与季节无关的噪声源, 为此设计了一系列实验特别是用液氮冷却的标准噪声源进行标定^[4], 由此来估计“天空噪声源”所引起的天线噪声温度增量。前期对此的估计约为 4 K, 这也就是后来 4 K 宇宙背景辐射说法的由来。二人最后将天线系统的“过剩”噪声温度定为 3.5 ± 1 K^[1]。这个“过剩”的噪声正中大爆炸研究者之下怀^[2], 也就被认定为微波背景辐射了, 可谓无心插柳^[11], 二人因此获得 1978 年的诺贝尔物理学奖。

图 1 给出了 4 K 和 2.7 K 下黑体辐射按光子频率(THz)的强度分布, 上部坐标轴为其对应的波长(mm)。黑体辐射公式是一个精确的公式, 其中的几个物理常数也都已有足够精确的数值, 因此是可以用于绝对定标的。由图 1 可见, 2.7 K 黑体辐射的峰值波长约在 1 mm, 据此测量背景辐射时波长短些是有利的, 实际上 60 年代也在从约 21 cm 到 2.6 mm 的多个波长上进行了测量分析^[5-10], 如图 1 中标示; 再根据其变化斜率进一步确认背景辐射具有确定温度的黑体辐射性质。应指出的是, 受当时测量条件特别是探测器件所限, 尚不能直接在毫米波段进行测量。约 2.6 mm 波长上的结果是通过测量蛇夫座 ζ 星(天市右垣十一)和英仙座 ζ 星(天船/卷舌四)在可见光(含近紫外)波段的照相光谱精细结构和相对强度分析间接得到的^[9-10]。测量宇宙背景辐射时观测者自己也是沉浸于这个宏大的背景之中的, 其与测量理想黑体辐射源的差别也需要修正。宇宙背景辐射的温度后来逐步确定为 ~ 3 K、 ~ 2.7 K 直至 2.72548 ± 0.00057 K, 这已足够精确不得不信了。

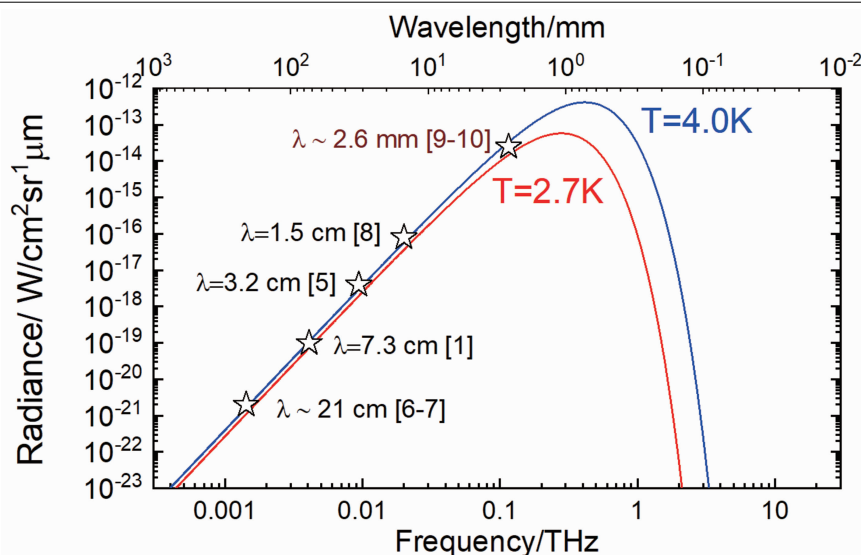


图 1 黑体辐射在 2.7 K 和 4 K 下按光子频率(THz)的强度分布, 上部坐标轴为其对应的波长(mm)。图中也标出了 60 年代宇宙微波背景辐射测量方面的代表性工作

60 年代另一重要天文发现是脉冲星。其时采用高灵敏天线系统在射频和微波波段探测天体的辐射信号已是射电天文台的常规做法, 且已发现了众多射频天体。1967 年, 英国剑桥大学卡文迪许实验室的研究生贝尔(Bell S J, 即后来的 Bell Burnell D J)用山上的 470 m 干涉电线阵(相当于分集接收或综合孔径天线), 在 81.5 MHz 频率上探测银河系中发出的射频信号。她在处理所接收的数据时发现其中存在周期为 1.377 s 的射电脉冲, 且具有极高的周期稳定度($\delta < 10^{-7}$), 由此导致了脉冲星的发现^[12], 并将其与可能存在的成对高速旋转中子星相关联。在此之后不同区域中各种不同类型的脉冲星被不断发现, 极高的周期稳定度是其显著特征。1974 年, 她的导师休伊什(Hewish A)与发展综合孔径天线的赖尔(Ryle M)因此获得诺贝尔物理学奖。

60 年代的另两项天文发现是类星体和星际有机分子。类星体 Quasar 或 QSO (Quasi-Stellar Object) 简而言之就是似星非星的物体。这个似与非无疑是与当时的天文观察能力相关联的。早期一些无法被确认为恒星或行星的物体当然也都是“类星体”。1961 年, 美国加州理工学院的桑德奇(Sandage A R)等测得了一个射电源 3C 48^[13]。相对于“大小”或“远

近”而言, 其射电强度显著高于预期, 且光谱“奇怪”无法指认, 也未能找到相应的可见光物体。同时期还发现了不少类似的射电源。1963 年, 施密特(Schmidt M)等指认其光谱就是具有非常大红移的氢发射光谱^[13-16], 方使人恍然大悟, 这无疑也是支持大爆炸理论的合理解释。而且, 其后也找到或确认了一些射电源的相应光学物体^[17]; 这些可说是类星体发现或研究中的代表性工作。高亮度和大红移乃是类星体的两个显著标志^[18-19]。随着观察手段的提升, 似是而非的东西总会逐步被看得更清楚, 类星体也许会被具体指认为星系、星团、星云、黑洞或暗能量等等。

星际有机分子的发现可以追溯到更早。三四十年的天文观察中就有一些星际分子谱线的报道, 被指认出是 CH、OH、NH、CN 和 CO₂ 等^[20-22]。人们对此的基本兴趣无非是探索宇宙和生命的起源, 因此会关注星际间的无机物、有机物、大分子、蛋白质直至生命体, 也希望人类在宇宙中不是孤独的。作为碳基生命的人类认为有机物必须含碳, 是此链条上的重要一环, 但有些分子或基团虽然含碳却也并不被认为是有机物(有些人为因素)。60 年代末期一些“重要”的星际分子被相继发现。例如, 美国加州大学伯克利分校的 Cheung A C

等采用 6 m 射电天线和 Dicke 射频辐射计在 1.25 cm 波段测得了银河系中氨气和水汽等的发射谱^[23-25]，其装置实际也用于微波背景辐射测量^[8]。这些虽然还不是有机分子但无疑也十分重要。1969 年，美国国家射电天文台(NRAO)的 Snyder L E 等报道了主反射面直径为 43 m、高度为 60 m 的射电天线以及致冷参量放大器系统。他们在 4830 MHz 频率上测得了银河系中甲醛的吸收谱^[26]，确认了星际中存在真正被人类认可的有机分子，由此汇齐了 60 年代的四大天文发现。

2 宇宙探索波段及其应用的可能性与基本限制

人类显然希望能利用整个电磁频谱来探索宇宙，这应该是最高效的“非接触式”方法，但有两个最基本的限制是必须考虑的；其一，希望所观察的波段对观察者来说应该是透明的，至少衰耗不太大，使得用当时的技术有可能进行测量；其二是所能观察的波段中有东西可看，或者说这个波段的电磁辐射能与某种“物质”产生相关作用，使观察者能够感受到其存在；这当然还包括有意识和“无意识”地去看。大气层是生活在地球上的人类生存所必需的。因此，电磁辐射与大气中的主要几种气体分子的这种“最简单的”相互作用(特别是吸收)是首先必须考察的。

众所周知，大气的主要成分为氮气(~78%)、氧气(~21%)和水汽(0~3%)。氮气虽然浓度最高，但其在整个电磁波谱上基本是惰性的，只是在约 3.8~5 μm 的很小范围内存在极微弱的吸收，其吸收线的绝对强度比水汽约低 10 个量级以上，因此一般不考虑其影响；氧气也有较高浓度，且其含量相当稳定，因而容易了解其影响；大气中的水汽含量虽不高，但可在约 0~3% 范围内大幅波动，吸收特性也更复杂，往往难以准确估计其影响。

图 2 示出了沿天顶方向射频辐射大气衰耗特性分布的国际电联(ITU)数据，频率范围为

0~1000 GHz，对应的最短波长为 0.3 mm。其下部曲线(红色)为不含水汽的干空气，上部曲线(蓝色)为标准空气。水汽含量按 7.5 g/m³ 设定，约相当于 15℃ 和标准大气压 1013 hPa 下 60% 的相对湿度，按重量的绝对含水量约为 0.6%。此衰耗分布是根据 HITRAN^[27] 的吸收线强度数据模拟得出的，且其中已考虑了温度和压力增宽以及频率色散等的影响。氮气本身虽然在此频段没有吸收，但其较高的分压引起的压力增宽可造成基线抬高并倾斜，对线形也有一定影响。由图 2 可见，整体上看衰耗(包括其基线)随频率的增加呈上升趋势，在约 50 GHz 以下衰耗就很低了(<1 dB)。图 2 下部的曲线其实反映的是氧气吸收的影响，呈三组较尖锐的特征吸收峰，对应氧气分子的不同转动能级；上部曲线则主要反映水汽特征吸收的影响，氧气的影响叠加其上；高频侧的吸收显然由水汽主导，低频侧(<150 GHz)则是氧气吸收仍起主导作用，而这是实际中更常涉及的频段。

图 2 的模拟结果对估计实际衰耗是有效的，但其中并未考虑大气中常存在的尘埃、水滴、冰晶等强散射因素以及空气湍流和瞬时不均匀等方面的影响。粗略地看，此类散射与波长及颗粒大小呈强相关，一般当波长与颗粒尺寸相近或可比拟时会造成很大衰耗。例如，常规雨滴的直径大约在 0.3~3 mm 范围内，这样在射频低端(如无线广播电视信号)雨衰一般并不会造成明显影响，但到高频段(如对卫星通讯和 GPS 信号等)就会有一定影响。尘埃的尺寸一般更小一些，主要对光波起作用。

因此，天文台无论是光学台还是射电台，都会选址在海拔较高、天气常年晴好且空气干燥质量优秀的山上，还要尽量避开城市以减小各种杂散光和电磁干扰。纵观 60 年代的四大天文发现，其主要都是在射频低端(如 <10 GHz)进行的，辅以传统的光学(可见光及拓展到近紫外近红外)观测。这一方面是当时设备特别是接收(常对 RF 而言)及探测(常对光而

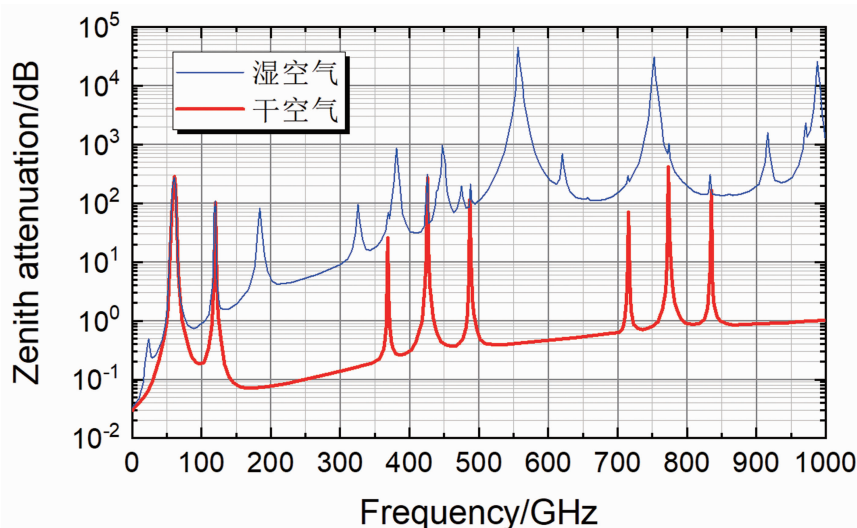


图 2 沿天顶方向 0~1000 GHz 电磁辐射的大气衰减特性分布:下部曲线(红色)为不含水汽的干燥空气,上部曲线(蓝色)为湿空气(标准空气,水汽含量 7.5 g/m^3 , 15°C 及 1013.25 hPa 标准大气压下约相当于 60% 的相对湿度)

言)器件的限制,另一方面当然也是从地球上进行观测时的大气衰减的根本性限制,非不为也实不能也。在当今诸如 4G、5G 充斥着地表和近地轨道上已呈泛滥之势的星链卫星之类电磁环境下,60 年代那种射电观察已很难进行了,现实中就有指认微波炉为疑似天外信号的趣闻。

电磁辐射所涉及的频谱极其宽广,人类所涉及的频率范围已达约 19 个量级,超过 60 个倍频程^[28]。目前实际天文观测最常用的频率范围约涉及 7 个量级,在此范围的大气吸收是首先要考虑的。图 3 示出了射频至远红外波段水汽(蓝色)和氧气(红色)的吸收线强度按光子频率(THz)的分布;图 4 为中红外至近紫外波段;其上部的坐标轴分别为相应按 mm 及 μm 的波长,射频和微波(RF-MW, $<30 \text{ GHz}$)、毫米波(MMW, $30 \sim 300 \text{ GHz}$)、亚毫米波(SMMW, $300 \sim 1000 \text{ GHz}$)、远红外(FIR, $25 \sim 300 \mu\text{m}$)、中红外(MIR, $2.5 \sim 25 \mu\text{m}$)、近红外(NIR, $0.7 \sim 2.5 \mu\text{m}$)、可见光(VIS, $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$)和近紫外(NUV, $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$)的波段划分也在图中示意;这是光谱学上的划分,虽然也可能存在不同的划分方法,但其基本特点是各个波段必须连续分布,完全衔接且

无重叠,以满足人类探索世界的完备性要求。除此之外,横跨 FIR、SMMW 和 MMW 的太赫兹波段(THz, $0.1 \sim 10 \text{ THz}$, $30 \mu\text{m} \sim 3 \text{ mm}$)是由于这个间隙中技术上的欠缺而人为划分出来的;航天遥感方面的短波红外(SWIR, $1 \sim 3 \mu\text{m}$)、中波红外(MWIR, $3 \sim 5 \mu\text{m}$)和长波红外(LWIR, $8 \sim 14 \mu\text{m}$)等则是根据水汽吸收较弱的大气窗口按实用要求规定的,彼此可以不衔接;此外还有光通信方面的长波长($1.31 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ 等)和短波长($0.85 \mu\text{m}$)等^[29],这类波段的划分都是出于实用上的考虑,命名上也有约定俗成。图 3 和图 4 中水汽和氧气的吸收线强度覆盖了约 10 个量级,也来自于 HITRAN 数据库^[27]。

对于水汽和氧气吸收,地球上从毫米波到近红外的宽广范围都不是天文探索的理想观测波段,虽然其间也存在一些衰减较小的可观测窗口。从图 3 和图 4 看,约 20 GHz 以下的射频和微波一侧是很干净、没有任何吸收的波段,约 $0.7 \mu\text{m}$ 以下的可见光和近紫外波段一侧总体上吸收很小,这也正是地球上传统的天文观测在这两侧进行的根本原因,前提是这里有东西特别是常有“新东西”可看;地球上与远距离传输相关的应用也青睐

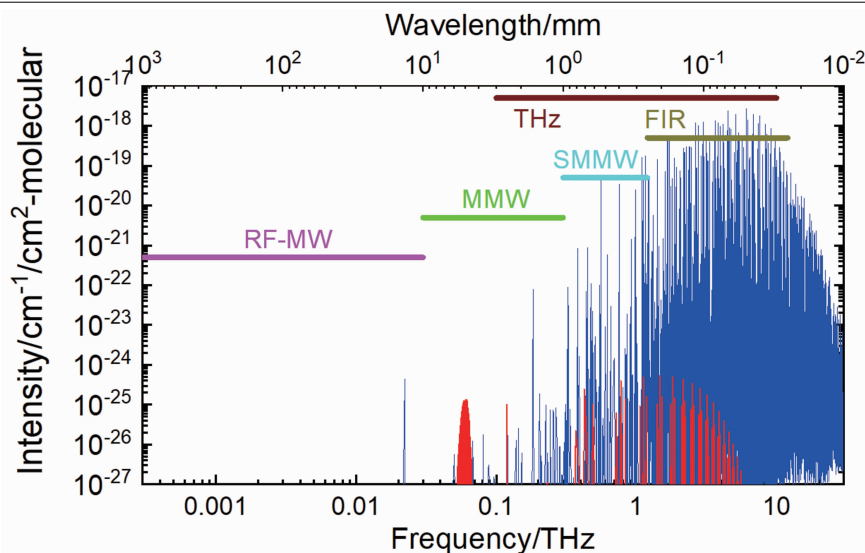


图 3 射频至远红外波段水汽(蓝色)和氧气(红色)的吸收线强度按光子频率(THz)的分布:
上坐标轴为对应的波长(mm)

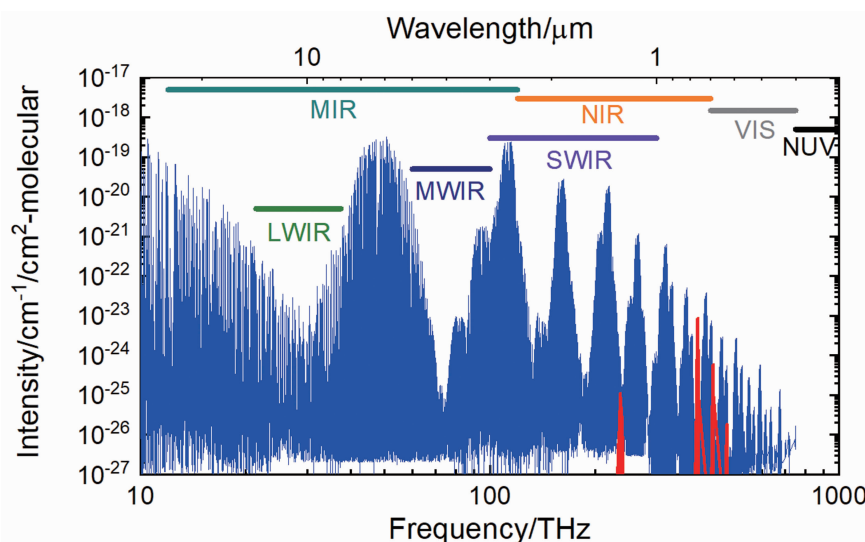


图 4 中红外至近紫外波段水汽(蓝色)和氧气(红色)的吸收线强度按光子频率(THz)的分布:
上坐标轴为对应的波长(μm)

这些波段。对于宇宙探索,人们对介于此二者之间的其他波段更有兴趣。这是因为,气体分子的特征振动能级主要集中在中红外(MIR)波段,其谐波会拓展到近红外(NIR)波段,特征转动能级则主要集中在远红外(FIR)和太赫兹(THz)波段并拓展到毫米波(MMW)乃至射频微波(RF-MW)波段;此外,随着分子量的增加,例如探索向有机物、长碳链乃至蛋白质等发展,其特征波长也会有相应增加的趋势。从图 3 和图 4 看,即使不考虑探测设备和器件方面的因素,在地球上进行这样的探索也会受到

极大的限制,很多时候甚至是完全不可能的。除此之外,大气折射和湍流等造成的像差等也是影响观测质量的重要因素,还有夜天光(主要是高能粒子使高层稀薄大气电离产生的辉光,极光可说是很强的局部夜天光)背景的影响等,更不用说地面及其附近的各种干扰了。而到了大气层之外,这样的根本性限制将会自然解除,这就使人类在天文观测上有了冲出地球的动机。

(未完待续)