



MISSING UNIVERSE:

DARK
MATTER

寻找 缺失的宇宙 —— 暗 物 质

李 金 著

清华大学出版社

MISSING UNIVERSE:

DARK
MATTER

寻找
缺失的宇宙
—— 暗 物 质

李 金 著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

从 20 世纪 40 年代提出暗物质概念以来,宇宙观察中发现的很多引力现象都表明宇宙中隐藏了大量的暗物质,其质量约占宇宙物质总质量的 85%。除了引力外,难道真的没有其它办法“看”到它了吗?为此,从 20 世纪末就开始了一场侦测暗物质的大战。由被动到主动,从地下到水下,从高空到太空的侦测活动不断。科学家们采用了所能想到的各种探测手段,使用了各种可能的辨别或判断暗物质的分析方法,想尽快揭示出深藏在宇宙中的秘密,将暗藏在宇宙中的物质大白于天下。暗物质和暗能量被认为是 21 世纪物理天空中的两朵乌云。揭开这两朵乌云的面纱将会对宇宙、对物质世界的认识带来革命性的突破。我国也不例外,为探知暗物质建立了世界最深的地下实验室,开展了直接寻找暗物质碰撞的实验,发射了专门探测暗物质的卫星,进展异常迅速,举世瞩目。

本书旨在向读者深入浅出、图文并茂地介绍有关“暗物质”的基本知识,了解暗物质的来由、侦测暗物质的方法和手段及其艰苦历程,也展望了暗物质侦测的前景。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

寻找缺失的宇宙——暗物质/李金著. —北京:清华大学出版社,2017
ISBN 978-7-302-47232-2

I. ①寻… II. ①李… III. ①暗物质—研究 IV. ①P145.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第099370号

责任编辑:宋成斌

装帧设计:罗 岚

责任校对:王淑云

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:北京亿浓世纪彩色印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:165mm×235mm 印 张:15.5 字 数:200千字

版 次:2017年5月第1版 印 次:2017年5月第1次印刷

定 价:69.00元

产品编号:070915-01



自序

我是一名高能粒子物理研究员，我的工作就是依据要研究或探讨的粒子物理问题去设计各种实验方案，继而依据实验方案建造不同的实验装置，并通过对实验数据的分析和理解，获得物理问题的答案。1978年，我在美国开始了我的粒子物理实验生涯。第一个是加速器中微子实验，证明一个当时很时髦的理论（弱电统一理论），并成功地测量出该理论中的一个关键参数。1981年回国后，为研究构成物质最基本单元之一的“粲夸克”，我参加了北京正负电子对撞机（BEPC）和北京谱仪（BES）的建造和物理实验，1994年后又主持了BES的升级改造和升级后BES-II的实验研究。BEPC用于产生研究对象——“粲夸克”，BES对“粲夸克”进行实验探测和研究。我的几十年研究工作的目的就是检验“基本粒子标准模型”理论，这是有关“物质基本结构和相互作用”的理论。对这个“标准模型”理论进行实验验证的同时，更希望能获得超出这个“标准模型”理论的实验证据，发现新物理，推动物理向前发展。不幸得很，虽然我和高能所的同行们做了各方面的努力，其中也为“粒子物理标准模型”理论添了不少砖瓦，获得了不少新的数据，也发现了不少新的现象，但都

没有超出“标准模型”理论的范畴，至今发现没有任何新物理的迹象。

20年前，我被“暗物质”一词深深吸引，这是个以前教科书或文献上从来没有提及过的物理概念，也是我从事粒子物理实验研究几十年没有接触过的物理现象。这不就是超出“粒子物理标准模型”理论的实验现象吗？也一定是我日思夜想的新物理吧！于是我走上了侦测暗物质的新征途。从1997年开始，我和台湾中研院物理所的专家合作，共同建立了TEXONO合作研究组，并作为TEXONO合作组大陆方面的发言人，从事中微子和暗物质的实验研究。TEXONO合作可能是两岸基础物理研究方面合作的典范之一，是合作时间最长、人员交流最多的一个项目。从1997年至今仍在继续。2002年后，出于实验技术的共同点和共同的物理目标，我也成为韩国暗物质合作组(KIMs)的成员，这是一个采用碘化铯晶体CSI(Tl)探测技术的暗物质研究团队。

从2001年起，我受邀为客座教授在清华大学工程物理系开展了多层阻性板(MRPC)探测器、时间投影室(TPC)和高纯锗(HPGe)半导体探测技术发展与应用的研究。在参与KIMs的地下实验室暗物质研究的同时，我和清华大学的专家们在地下实验室开始了我们自己独立的暗物质研究。韩国的地下实验室只有700米深，虽然比台湾的地表实验要好，但实验条件较差，深度也不够，给实验带来了诸多困难。我特别期望能在国内开展地下实验，也不断调查在国内建立地下实验室的可能。

“机会总是留给有准备的人”一点不假。2008年8月10日，新华网发布了一条不太起眼的消息：“8月8日，北京奥运会开幕式前两小时，连接四川锦屏一、二级‘双子星座’电站的锦屏山隧道，在历时近5年建设后实现双洞贯通”，“世界第二深埋隧

道——锦屏山交通隧道全线贯通”消息，引起我和清华大学研究暗物质的同行们的极大关注。这可能是我国建设自己的极深地下实验室的一个良好契机，我国没有地下暗物质实验室的情况也极有可能因此被改变。本人向清华工程物理系领导建议在锦屏山交通隧道建设我国的地下实验室。

同年12月在三亚召开的中韩暗物质合作研究国际会议上，我和岳骞老师等分别做了有关“在锦屏山隧道为暗物质研究建设我国地下实验室”的报告，对外公开了这一激动人心的消息。2009年，清华大学和雅砻江水电开发公司开始了地下实验室的建设。从地下实验室的设计、建造，实验室物理参数的测量直到实验室能够满足实验的要求，仅仅用了一年半的时间，2010年12月实验室正式投入使用。有人说这是“中国速度”，我说，这也是“清华速度”。从此，我和清华大学的专家们开始了在我国锦屏山地下实验室开展暗物质的侦测工作，与四川大学、南开大学、原子能研究院等单位的同行们共同建立了CDEX暗物质实验研究合作组。CDEX合作组在国内国际刊物上多次发表研究成果，短短几年内就走到世界暗物质实验研究的前列，让我十分欣慰。

在实验室建设施工中，在实验设计和设备的建造中，不免会遇到各行各业的人员，有老师、学生，也有工人和普通市民。当他们听说“暗物质”后都好奇地问这问那。当离开建设地下实验室的工地时，工人们好奇地问我们暗物质是什么样的？还说“告诉我们，好让我们看到通知你们……”这也许是开玩笑，但也不乏对暗物质的兴趣。在成都大学宾馆的电梯里偶遇几位旅游者，也在好奇地谈论暗物质“听说四川有暗物质……”。在国外的一些产品包装盒上也标有“暗物质”的字样，比如在清华大学我们的办公室里还保存了一瓶印有“暗物质”商标的红酒。

在过去的几年里，有十多所大学或研究所邀请我去给大学生或研究生做有关“暗物质”的通俗讲座或科学报告。报告过程非常热烈，结束后许多人还舍不得离开，有提问题的，有想办法的，也有提建议的……。虽然在国内外一些学报或报刊上也有不少有关暗物质方面的介绍，但大多篇幅所限，很难做到全面、系统、图文并茂又能由浅入深地讲解暗物质的来龙去脉。于是我就萌生了写这本通俗读物的念头。希望通过对本书的阅读，对暗物质有兴趣的读者能有所收获，也希望能有更多的人对“暗物质”产生兴趣，开阔眼界并从中受益。本人知识有限，再加上时间仓促，书中不免有误，敬请见谅。

本书的写作得到清华大学李元景老师、李玉兰老师的极大支持和鼓励，并在出版工作方面大力协助。岳骞老师对书的写作提出不少建议并做了许多修正。本人在此表示感谢。兰江西女士在图稿、表格收集整理工作外，承担了全部家务，让我集中力量写作，在此表达对她的感激之情。

2017年3月

前言

人类借助于各种波段的电磁波，从极其短波长X射线、紫外线，到可见光，再到无线电波来观察和认识宇宙。然而，有一些物质既不发射任何波段的电磁波，也不与这些电磁波发生作用。这些用任何波段电磁波都“看”不见而又暗藏在宇宙中的物质，称为暗物质。

大约在80年前，费里茨·兹威基惊奇地发现，大型星系团内的星系具有极高而又难以理解的运动速度，单靠我们观测到的星系团的引力作用根本不可能束缚住这些星系在星系团内的高速运动，除非在星系团中还有“看不见”的物质产生强大引力。此后，天文学家依据螺旋星系旋转速度的测量、引力透镜的观测、大尺度宇宙结构形状以及微波背景辐射等研究中的“奇特”现象，大胆地猜想，宇宙中可能暗藏有大量“看不见”却又能通过引力作用而被感知的暗物质，而且占的比例很大（据计算约占整个宇宙物质总量的85%）。

暗物质到底是什么？它为什么那么诡异？它暗藏在宇宙中什么地方？它在宇宙的形成和演化中扮演什么角色？是暗物质天体还是暗物质粒子？它们是否是我们已经知道的基本粒子，还是未

曾发现的粒子？这些问题都对目前人们已经构造的天体理论和基本粒子模型理论提出严重挑战。

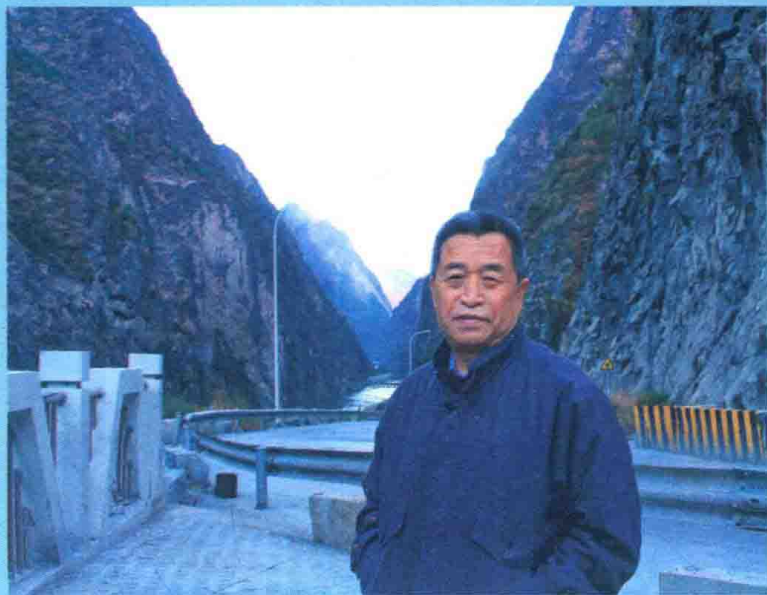
暗物质的侦测与研究具有跨学科的重大科学意义，它关系到我们对微观基本粒子和宏观宇宙的构成、宇宙的演化以及基本相互作用的认知，是从微观到宏观直至宇观的重大前沿课题。

然而，到目前为止，暗物质还只是基于天文宇宙观察到的引力效应推测出来的大胆猜想，并没有真正直接实验侦测到它的存在。要想真正侦测到“看不见”的暗物质，即找到暗物质与普通物质之间所有的相互作用关系，就必须发展新的探测原理和新的探测技术，就必须在物理概念和理论上有所突破。

本书在介绍暗物质的来由、宇宙中隐藏有暗物质的依据、侦测和研究暗物质的科学意义的基础上，着重描述侦测诡异暗物质粒子的实验方略，探测暗物质的基本原理和技术，前赴后继的侦测活动和所采用的庞大而又复杂的探测装置或设备，实验探测研究的进展、最新研究状况以及未来的前景，并特别介绍了在我国锦屏大山中建设的世界上最深的地下实验室——中国锦屏地下实验室和我国正在进行的暗物质探测研究。

这是一本通俗科普读物，没有过多的理论或定量的说明，也没有数学推导或分析表达式，采用了尽量多的图表或照片，以便于一般读者的阅读。希望这本读物有助于读者对暗物质的基本概念略有理解，增加对侦测暗物质的真正含义、实验方法和重大意义的认识，并能概括了解国内外侦测暗物质的实验研究现状和未来发展前景。

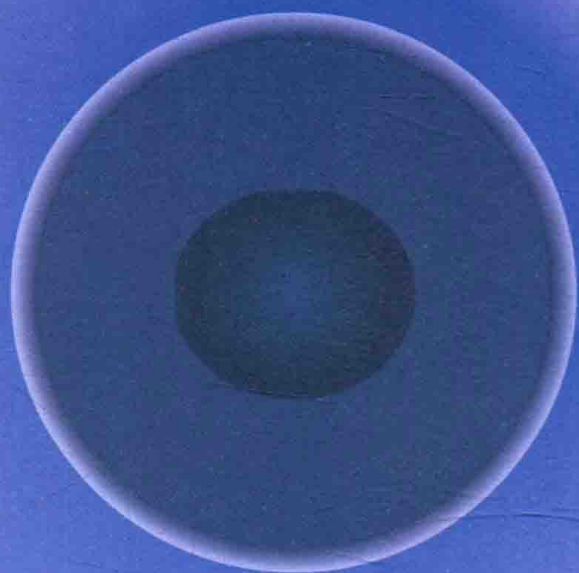
2016年5月



李金，河北张家口人，1964年毕业于中国科学技术大学原子核物理系。中国科学院高能物理所研究员，博导。1964—1974年在中国科学院原子能所从事低能核物理研究，1974—2004年在高能物理所从事粒子物理实验研究。曾任中国科学院高能物理所北京谱仪（BES）升级工程总师，粒子物理实验研究室主任，BES国际合作中方发言人。曾以访问学者或客座教授身份在美国、日本、英国、法国等国从事高能物理研究工作多年；从1997年开始，先后在国内外多地如台湾、韩国等开展中微子和暗物质的实验研究；2001年至今受聘于清华大学。50多年来从事核反应研究、核辐射测量、粒子与核探测技术研究、高能粒子对撞机谱仪的研制、正负电子对撞物理实验研究、中微子和暗物质实验等前沿课题研究；曾获得国家自然科学二等奖、国家科学技术进步二等奖、中国科学院自然科学一等奖、吴有训物理奖和“中青年有突出贡献专家”称号。

第1章

诡秘暗物质的由来



目录

第1章 诡秘暗物质的由来

- 1.1 什么是暗物质? /5
- 1.2 诡异的暗物质真的存在吗? /12
- 1.3 可能的暗物质 /26
- 1.4 为什么要探寻和研究暗物质 /30

第2章 暗物质的侦测方略

- 2.1 暗物质粒子的基本性质 /45
- 2.2 暗物质粒子的侦测方略 /49
- 2.3 暗物质粒子 WIMP 的直接探测 /56
- 2.4 暗物质粒子 WIMP 的间接探测 /72
- 2.5 人工产生暗物质粒子 /79

第3章 侦测行动前赴后继

- 3.1 寻找碰撞的直接侦测 /88
- 3.2 寻找湮灭的间接侦测 /115
- 3.3 人工产生暗物质的尝试 /131

第4章 找到暗物质粒子了吗?

- 4.1 实验证据的表述 /142
- 4.2 暗物质粒子的迹象或证据 /144
- 4.3 没有看到任何“暗物质痕迹” /156
- 4.4 目前还很难回答的问题 /165
- 4.5 展望未来 /169

第5章 在世界最深的地下寻找暗物质

- 5.1 最深的地下物理实验室——中国锦屏地下实验室 (CJPL) /185
- 5.2 CJPL 开展的两个直接探测暗物质的实验 /204
- 5.3 中国锦屏地下实验室的未来发展——CJPL-II /214

后语 /223

参考文献 /225

图片来源 /232



1.1 什么是暗物质？

“暗”的广泛含义

历史上的“暗”物质事件

1.2 诡异的暗物质真的存在吗？

不好理解的旋转曲线

星体光被严重弯曲

奇特的大尺度星系团

子弹星系团的碰撞

宇宙中有多少暗物质？

1.3 可能的暗物质

暗物质天体

暗物质粒子

特别关注的 WIMP 粒子

1.4 为什么要探寻和研究暗物质

暗物质密切关系到宇宙的生成与演变

梦寐以求的基本粒子

小结

出于求知欲和好奇心，千百年来人类从未间断对天文和宇宙的观察与探求，从地面到高山，从高空到太空，从地下到海底。特别是近几十年来，近百个不同类型的观测设备被发射升空，实现了人类对宇宙的全方位和全波段的观察。图 1.0.1 列出了在地面、空中和太空观察宇宙的各类望远镜及其相应的探测波段。特别是 1990 年由太空航天飞机发射升空的高分辨率哈勃望远镜（见图 1.0.2），它拍摄的照片和提供的信息为我们释疑了很多宇宙疑团，让我们进入到宇宙观测的新高峰，宇宙观测的新时期。我们不仅认识了距我们最近的地球、月球、太阳和银河系，我们还知道了类星体、超新星和脉冲星……也看到了非常遥远的星系、星云、星系团……观测范围几乎要到达约 150 亿光年¹甚至更远的宇宙边缘。利用不同波段光的观察可以绘制出不同类型的宇宙（即不同波段的宇宙）：可见光宇宙、红外宇宙、紫外宇宙、射电及微波宇宙、X 射线及高能宇宙。放眼多波段宇宙，可以将丰富多彩的宇宙层层剥开，探索到包括恒星、星云和星系的宇宙的每个层次。

今天，我们已经信心满满地观察到几乎所有不同波段的宇宙，可以说是一览无遗地“看”到了整个宇宙。但万万没想到，随着宇宙观测和天文学的发展，我们意识到我们所看到的浩瀚宇宙竟然只是宇宙很小的一部分，大部分是没有观察到的暗物质和暗能量。

1 光年是距离的单位，1 光年是光在 1 年中走的距离。光在 1 秒中走的距离是 30 万千米，一年有 3153 万秒之多，1 光年约为 9.4 亿千米。

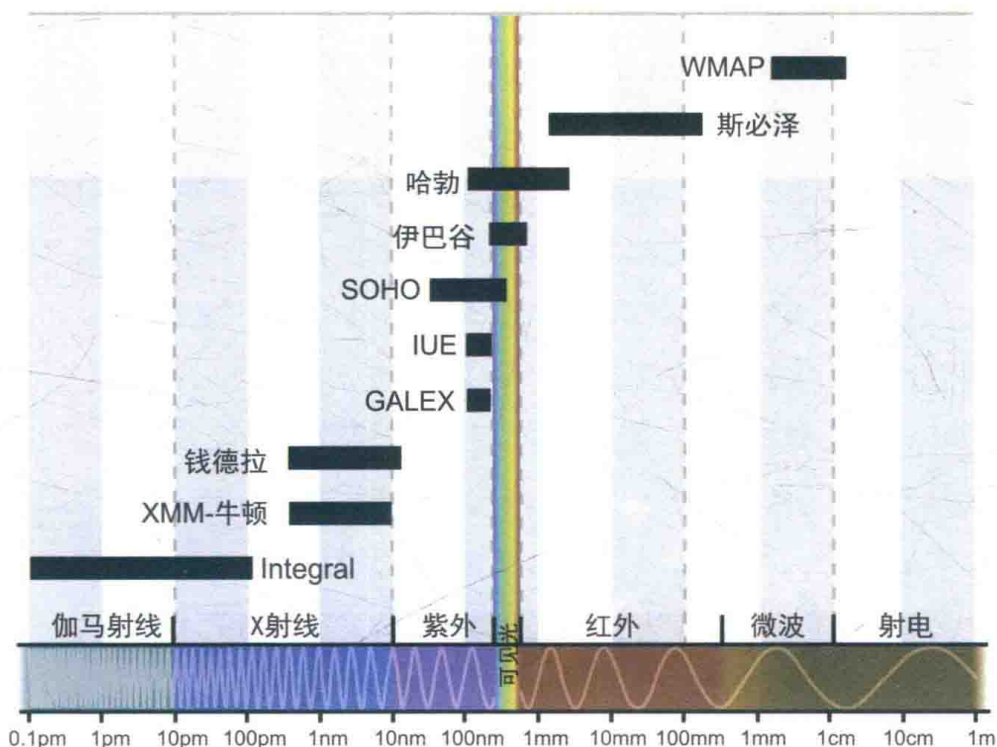


图 1.0.1 观察宇宙的望远镜及相应的波段

图中的望远镜依次为：

微波各向异性探测器 (The Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, **WMAP**)；

斯必泽红外天文空间望远镜 (Spitzer Space Telescope)；

哈勃太空望远镜 (Hubble Space Telescope)；

伊巴谷 (Hipparcos) 高精度视差采集卫星；

太阳和太阳风层探测器 (The Solar and Heliospheric Observatory, **SOHO**)；

国际紫外探测器 (The International Ultraviolet Explorer, **IUE**)；

轨道运行的紫外望远镜 (The Galaxy Evolution Explorer, **GALEX**)；

钱德拉 X 射线观察站 (Chandra X-ray Observatory)；

X 射线空间观察站 (High Throughput X-ray Spectroscopy Mission and the X-ray Multi-Mirror Mission)；

伽马射线空间望远镜 (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory, **INTEGRAL**)。

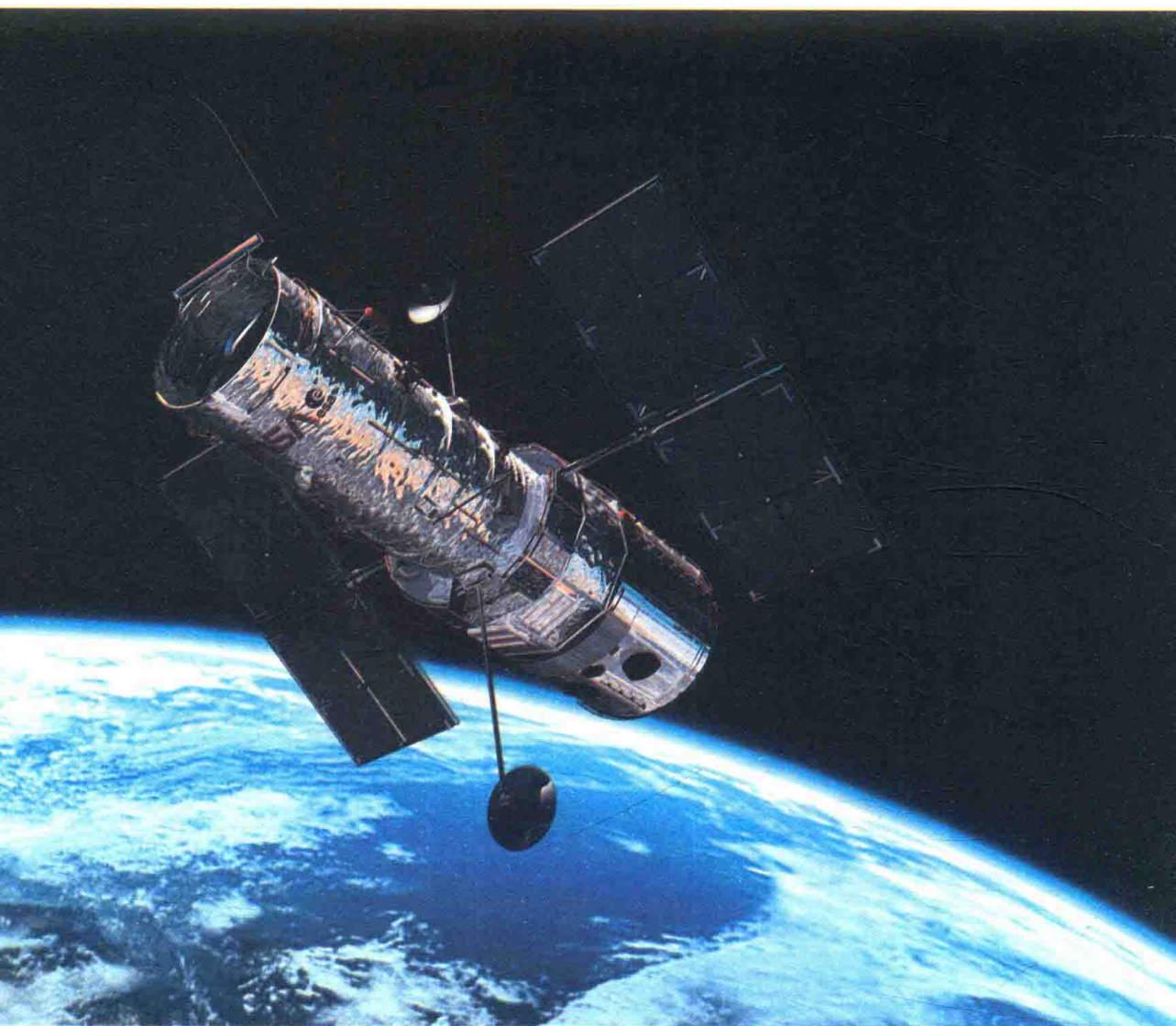


图 1.0.2 太空中的哈勃望远镜

1.1

什么是暗物质？

我们知道宇宙中有两类天体：一类是像太阳那样的发光的天体，在没有光的环境中能被我们看到；另一类像月亮那样，虽然不发光却可以反射或吸收光，在有光照的环境中也能被我们看到。但是人们发现，还有一类很诡异的物质暗藏在宇宙中。它既不发光，也不和光发生吸收、反射或折射等作用，不仅在没有光的黑暗中看不到它，在有光线的环境中完全透明，同样看不到它。这种不发光又绝对透明，在任何环境下都无法看到却又有质量的物质，被称为暗物质，即暗藏在宇宙中的物质。

当然，这里说的“光”不仅仅是指可见光，而是包括几乎所有波段的“光”；这里说的“看”也不仅仅是用人的眼睛看，它包括了所有形式的现代望远镜或探测器的观察。因此，在暗物质的研究中，“暗”具有更为广泛的含义。

“暗”的广泛含义

“暗”的广泛含义是什么？更广泛意义的“暗”是基于更广泛意义的“光”。光是什么？光实质上是电磁波。科学家通常依据波长把光（或称电磁波）划分为7个区段：无线电波、微波、红外线、可见光、紫外