

高等物理精编

天体物理 电路分析 脉冲分析

周又元
全茂达 编著
马善贤

中国科学技术大学出版社



55.3
357
15

《高等物理精编》卷五

天体物理 电路分析 脉冲分析

周又元 仝茂达 马善贤 编著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

《高等物理精编》丛书共分五卷，内容涉及大学物理基础教学的各个方面。本丛书是在中国科学技术大学物理辅导班讲义的基础上进一步加工选编而成的，是教师们综合国内外先进教学经验并结合自己的教学、科研成果而撰写的。它力图从更高、更新、更综合的角度来阐述基础物理内容，并强调实际动手能力。多年的实际检验表明它是一套行之有效的教材。

本卷内容包括：天体物理、电路分析和脉冲分析。

《高等物理精编》卷五 天体物理 电路分析 脉冲分析

周又元 全茂达 马善贤 编著

责任编辑：胡升华 封面设计：王瑞荣

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路96号)

中国科学院开封印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

开本：850×1168/32 印张：8.5 字数：171千

1990年7月第1版 1990年7月第1次印刷

印数：1—5000册

ISBN 7-312-00151-8/O·68 定价：3.00元

前 言

从1979年到1988年,由诺贝尔奖金获得者、著名物理学家李政道教授倡导,国家教委举办了中国-美国联合招考物理研究生项目(China-United States Physics Examination and Application Program),简称CUSPEA。这是一个在全国范围内挑选赴美攻读物理博士学位研究生的竞赛活动,它也是我们的高等教育从某一个侧面显示力量走向世界的一个机会,国内各主要高等院校均曾积极投入。10年来,通过这种选拔,我国共派出赴美留学生915人。这些学生在美国几十所著名的大学里,在与美国的以及来自世界各地的大学学生的角逐中,勤奋好学,谦恭聪慧,成绩突出,表现非凡,引起了美国教授们和各界人士的惊讶和赞叹。

和国内其他兄弟院校一样,中国科技大学也把CUSPEA看作是立足国内、走向世界的渠道之一,是总结自己经验、吸取外国长处,提高物理教学水平,培养有国际竞争能力的高水平大学生的一个契机。几年来,结合我校教育改革,我们搜集了大量美国及其他西方国家教育方面的资料,研究了他们的教学计划、教学方法、课程设置、教材教学法、试题安排等。在此基础上,我们一方面重点地剖解了美国主要院校的研究生入学试题,其结果便是我校出版的7卷《美国物理试题与解答》;另一方面,我们集中钻研了美国及其他西方国家的流行教材,参考了近代的有关文献和试题,结合自己的实际经验和我校学生的特点,编写了一套讲义,在我校的物理辅导班上付诸实践。10年来,中国科技大学共考取CUSPEA留学生219名,占全国总录取人数的23.9%;学校的物理教学水平普遍大为提高,其他学科也相应取得效益。

中国科技大学物理辅导班是教育改革的试验,它的目的是使有了一定大学物理基础的同学,经过强化培训,物理水平得到大范

围、大幅度的提高。因此这套讲义不同于一般的教材,它是在稍高层次上的一个精深循环。我们力求使它能新一些,融合进世界科技的最新发展,把物理前沿的课题或发现经适当加工或简化后作为基础物理的例题;宽一些,尽量打破物理各学科之间的界限而着重交叉衔接,综合地采用物理中的内容和手段;高一些,从更高的观点来统一地分析以前学过的种种物理规律和问题;实一些,强调灵活应用物理基本原理去分析解决具体的问题,注重实际动手能力。总之,这套讲义力图使我们的物理教学更物理化,更近代化,因而也就更国际化了。

这套丛书《高等物理精编》就是从我校物理辅导班的讲义中选出来的一部分。它对一般理科大学的学生特别是打算深化自己物理知识的同学们是很好的参考资料,对志愿报考研究生或准备出国留学的同学是一本难得的复习精要,对物理教师和其他领域的物理工作者也会起到有益的借鉴作用。

本丛书是我国“改革、开放”政策的产物,是我国高等教育面向世界、面向未来、面向现代化的大潮中的一朵浪花。抛砖引玉,我们希望它能在促进我国物理教学的改革,提高物理教学水平,推动物理教材的更新和建设作出一定的贡献。当然,囿于水平和时间,错误或不当之处在所难免,我们随时准备听取读者诸君的宝贵意见。

本丛书共分5卷。各卷内容和作者分别为:第一卷,经典力学、电磁学、电动力学(程稼夫、胡友秋、尤峻汉);第二卷,相对论物理、热力学、统计物理(张家铝、曹烈兆、陈兆甲);第三卷,光学,原子物理(郭光灿、金怀诚、谢建平);第四卷,量子力学、核物理、粒子物理(朱栋培、张永德、徐克尊、范扬眉、许咨宗);第五卷,天体物理、电路分析、脉冲分析(周又元、仝茂达、马善贤)。

《高等物理精编》丛书编委会

1989年6月

目 录

前言	(i)
----	-------

第一篇 天体物理

1 引论	(3)
1.1 天体物理学特点与本篇选题	(3)
1.2 天文学的观测渠道	(4)
1.3 各种天体的尺度与结构	(8)
2 用物理方法确定天文学量	(11)
2.1 距离	(11)
2.2 尺度	(13)
2.3 描述辐射场强度的量	(16)
2.4 黑体辐射	(18)
2.5 视光度与光度	(21)
2.6 表面温度	(24)
2.7 质量	(27)
2.8 天体系统轨道的突变	(28)
3 有关恒星的物理问题	(30)
3.1 恒量的能源	(30)
3.2 恒星内部的温度	(31)
3.3 白矮星	(32)
3.4 中子星与脉冲星	(34)
3.5 黑洞	(38)
3.6 吸积过程中的能量释放	(42)
3.7 Eddington极限	(44)
3.8 致密天体附近吸积辐射谱	(45)
3.9 气体动力学方程	(46)
3.10 稳定绝热流与等温流	(48)
3.11 声波	(49)

3.12	球对称稳定吸积数学解的性质	(51)
3.13	超新星的爆发机制和中微子发射	(54)
4	星系物理和宇宙学	(59)
4.1	红移	(59)
4.2	类星体	(62)
4.3	引力透镜	(65)
4.4	宇宙学原理	(68)
4.5	宇宙的膨胀	(68)
4.6	宇宙度规	(70)
4.7	牛顿宇宙学	(73)
4.8	大爆炸宇宙学简述	(81)
5	物理方法的应用	(83)
5.1	量纲与单位	(83)
5.2	Virial定理	(88)

第二篇 电路分析

1	电路的基本定理和基本元件	(99)
1.1	电路中的几个术语和参考方向	(99)
1.2	基尔霍夫定律	(100)
1.3	基本元件特性	(102)
2	基本分析方法和网络定理	(106)
2.1	节点分析法	(106)
2.2	回路分析法	(108)
2.3	含有受控源电路的分析	(111)
2.4	网络定理	(112)
3	动态电路	(118)
3.1	换路定则	(118)
3.2	一阶动态电路	(119)
3.3	二阶和高阶电路方程的编写	(125)
4	正弦稳态电路	(129)
4.1	正弦量的相量表示法及复阻抗和复导纳	(129)
4.2	有效值和功率	(132)
4.3	正弦稳态电路分析	(136)

5 部分国外试题解答	(141)
------------------	-------

第三篇 脉冲分析

1 理论提要	(157)
1.1 电路微分方程的直接求解	(158)
1.2 Laplace 变换用于脉冲电路分析	(161)
2 若干例题分析	(169)
3 脉冲的产生和变换	(179)
4 用传输线成形脉冲	(190)
4.1 简单传输线理论——电报方程及其求解	(190)
4.2 传输线用于脉冲成形	(196)

第一篇 天体物理

周又元 编著



1 引 论

1.1 天体物理学特点与本篇选题

习惯上认为天体物理是天文学的一个分支,是应用物理学技术、方法和理论研究天体的形态、结构、分布、化学组成和演化规律的学科.由于物理学规律的应用,古老的天文学从观测天体的位置、形态、距离发展到研究天体表面状态、内部结构、化学组成和演化序列.例如,原子、离子谱线的研究促进了近代天体物理学的诞生;河外射电源连续谱分布多借助于高能电子的非热致辐射机制来解释;物理上中子星的预言早在脉冲星发现30年以前,而脉冲星确认为自转中子星是用物理规律解释天文观测结果的最好事例;大爆炸宇宙学对早期状态的推测多基于核物理和粒子物理的结果;许多类型的天体和弥漫介质性质的阐明都基于流体力学和等离子体的概念和方程;星系形成的主要依据是引力成团性.60年代以来现代天文学进入了新的飞跃发展阶段,其重要特点是与物理学更紧密的结合.天体物理学不仅是天文学中的核心部分,而且也是物理学中最热门最有前途的领域之一.近年来,天文新发现以很高的速率出现,它引起物理学家的浓厚兴趣.一般讲来,天体中所具有的各种极端条件,如极高温、极低温、极大密度、极稀薄、极高能、极强磁场和极长时标的演化等等往往是地球实验室中难以实现的,因此天体物理中某些研究对象和领域必然是地面实验物理和与它紧密相关的理论物理的重要补充.天体观测与地面实验同是物理的研究手段,又是理论的检验方法.天体物理不仅是天文学分支,也是物理学分支,而且是推动整个物理学发展的必不可少的分支.严格地说天体物理学是天文学与物理学的边缘学科,其命名恰如其分表达了这点.

作为“高等物理精编”一书,介绍天体物理理所当然.比之古

老的天文学和源于伽利略—牛顿时代的传统物理学,其历史甚短,但鉴于它研究的天体对象各种各样,又涉及众多物理分支,加之近年来新的天文观测手段不断扩大和更新,新的天文现象层出不穷,可以说是物理中内容最丰富的领域.从我国高等学校物理教学中遗漏或忽视了这些内容的现状看有必要作些改进.本篇的目的就是企图对此做一点弥补.我们不可能在较小篇幅内全面地介绍它,只能谈一些点滴,即以大学基础物理内容为限,选用一些事例说明物理概念如何解释天体的观测事实,也介绍现代天体物理的一些最新发现,以便读者了解这些天文背景知识后能自行对某些现象作出解释和对一些天体量进行估算.另外,考虑到并非所有读者都对天文学有相当了解,也少量补充介绍天文学常用的量、方法和手段.向非天文系大学生介绍天体物理,而且要在短短的几种讲座内完成,只是尝试,因此不可能顾及天体物理学本身的系统性,而且不足和遗漏肯定存在,希望广大学者和读者指正和建议,以期再版时修正和完善.黄润乾教授通读全稿,提出不少建议和指正,科大天体物理中心同人关心和支持是完成本书不可少条件,作者在此谨致衷心的感谢.

1.2 天文学的观测渠道

天文学与天体物理学都是观测的科学,正如人有视、听、味、嗅、触觉一样,天文学通过各种天文仪器来实现这些感觉——观测.人们通过四种渠道来了解来自天体的信息,即电磁波、宇宙线、中微子探测和引力波.电磁波手段类似人类的视觉、宇宙线好似人类的嗅觉、引力波感生机械运动,可类似于听觉,而中微子探测应属第六感觉了.

人类对天体信息了解主要来自它们发射的电磁波.电磁波按频率又可划分为射电波、红外线、可见光、紫外线、X射线和 γ 射线等.描述电磁波波动特征量可采用: 1) 频率 ν , 2) 波长 λ , $\lambda = \frac{c}{\nu}$,

3) 光子能量 $E, E = h\nu$, 4) 温度 $T, kT = h\nu$, 它是二自由度热运动能量为光子能量时相应的热平衡温度. 四个量描述完全等效, 但习惯上射电天文用频率或波长, 可见光与紫外光往往用以 \AA 为单位的波长来表征, 红外光往往用 μ 为单位的波长来表征. 而 X 射线往往用光子能量 $0.2 \sim 100 \text{keV}$ 表示, γ 射线的光子大于 100keV . 可见光的光子热温度约为 $5 \times 10^4 \text{K}$, 而 X 射线光子在 $5 \times 10^6 \text{K}$ 到 10^9K 之间.

天体电磁辐射可见光与紫外波段包括连续谱与叠加其上的线谱两部分. 经典天文学研究天体的发光强度及由之表现出的天体的位置、形态、变化和颜色等, 这些主要由连续谱贡献. 天体物理学更多地借用物理学的实验方法与理论工具, 对天体的谱线的证认与分析往往是天体物理学的特征与标志. 但这种粗略的划分在其他频段如射电、X 波段就不明显了, 观测量的归算、分析、理论弥合要更多借助物理学的方法.

电磁波具有很宽的波长范围, 从长达数百米的无线电波到 10^{-4}\AA 的 γ 射线. 由于大气吸收, 地面观测只能通过 3000\AA 到 7000\AA 的可见光窗口, 几十米到几毫米的射电窗口以及近红光的一些小窗口. 空间天文兴起, 使得观测范围几乎包括从射电至 γ 射线的全波段. 但现今长时运行的空间探测器的观测仍存在三个空白区, 即极远红外区 ($100 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$), 软 X 紫外区 (XUV 区从 0.05keV , 亦 250\AA 到 1000\AA), 高能 γ 射线区. 大部分的空间探测仪器在运转时间, 灵敏度, 角分辨率, 能量分辨率都尚不及地面光学设备, 有待不断完善. 未来天文学和天体物理学将以全面的空间天文为其特征. 即将投入运转的空间望远镜在某些重要指标上已达到或远超过地面系统, 它的进入轨道和投入使用将成为天文学和天体物理发展的里程碑.

宇宙线的探测, 尤其是大气层外原初宇宙射线的探测对研究天体中高能粒子, 特别是极高能粒子的行为有重要意义. 例如现今可测到能量大于 1000GeV 电子的流量分布. 应用同步加速辐射解释射电源的频谱分布中最重要的假设是认为高能电子具有幂律

能量分布。原初宇宙射线中电子能谱分布直到 1000 GeV 遵从幂律,这是对射电谱同步加速辐射机制的较直接支持。另外,从银河内射电辐射谱与原初宇宙线电子能谱的比较,可以推出银河内磁场较均匀,其数值约为 $2 \times 10^{-6} G$,用宇宙线去探测具体天体的性质存在极大困难,这在于带电粒子轨道在磁场中的偏转影响对发射天体的证认和推测。

天体发射中微子的探测有其独特的意义。因为中微子只参与弱相互作用,它可以几乎不吸收地从恒星内部核反应处穿透出来。因此来自太阳和恒星的中微子辐射直接给出核反应区的信息。而几乎所有电磁波在恒星内部都是不透明的,表面辐射的光子是经过长达数百万年多次吸收再发射而产生的。研究太阳中微子发射是对恒星内部核反应过程和内部状态预言的直接检验。另外,某种超新星爆发时星体塌缩为中子星释放出大量引力能,这种能量主要是以发射中微子释放的。超新星爆发时中微子能谱和产生时间对了解爆发最初时刻的性质是很重要的。按照大爆炸宇宙论,微波背景 3K 辐射反映氢复合期辐射场与荷电粒子电磁相互作用平衡时的性质,那么现在存在的中微子背景辐射应反映 μ 复合与正负电子复合期的信息,亦即宇宙早期温度为 $10^{11} K$ 和 $5 \times 10^9 K$ 的性质。这种中微子背景场平衡温度为 1.9K。遗憾的是现在的观测手段还远不足把它们决定出来。但是,太阳中微子观测和超新星中微子探测都已成功。

检测太阳中微子常用 Cl^{37} 的逆 β 衰变



由于此反应几率极小,需用庞大的含氯液体与之反应。为防止宇宙线的影响,实验装置建在 1.5km 深的矿井中,采用 610 吨 C_2Cl_4 循环。由检测放射性惰性气氩求出每秒内每个氯核与之反应的中微子数,实验值为 1.2×10^{-36} 。由太阳中核反应产生的中微子数估算值至少为观测值的 5 倍。太阳中微子短缺有各种各样的解释,包括中微子物理和恒星中核反应细节知识,但似乎较大的可能在后者。宇宙中微子首次检测是在 1987 年 2 月在大麦哲伦云中一次超

新星爆发中实现的。这将在3.13节专门叙述。

引力波是1918年 Einstein 提出的。用引力波去探测天体性质是自然的想法。由于其太弱,至今尚未对任何天体有肯定的检测,引力波天文学仍处于孕育阶段。理论上对引力波是肯定的,引力场方程在小扰动线性化下可化为常见的波动方程,因此引力波可以存在,而且像电磁波一样以光速传播。带电粒子有加速度时产生电磁辐射,类似地,有质量物体有加速度时产生引力辐射。物体加速度大,产生的引力辐射也强。超新星爆发时引力塌缩过程在几秒之内实现,应有极大的加速度。1987年超新星 A 爆发是探测的极好机会,可惜当时探测器都未进行记录。引力辐射极其微弱,其原因是引力作用远小于电磁相互作用,而且电磁辐射中最强的成分,电偶极辐射无对应的引力辐射。因为质量恒正,孤立系统的质量偶极矩——质心坐标是无加速度的,引力偶极辐射永为零。

现有的引力波探测器主要是两类。一是采用巨大的“天线”,例如重达数吨的铝棒,把引力波引起的“天线”的变形和扭曲转化为电信号再检测。另一类是长光程激光干涉仪。就在地面引力波探测系统不断改进中,对天体的观测却证明了引力波的存在。1974年发现一个脉冲星 PSR1913 + 16 (PSR 表示脉冲星,19 是位置的赤经度数,13是赤经分数的约数,+ 16是赤纬度数的约数),它是由两个脉冲星组成的密近双星。它被称为“空间引力实验室”。证明引力辐射存在主要物理思想是,引力辐射将引起微小但不为零的系统能量减小,对于双星则使其公转周期变短。这颗双星被认为“空间引力实验室”理由在于,第一,两个子星相距近,加速度大,公转周期短,使得引力辐射功率既大,又便于利用积累法较精确地决定周期变率;第二,它的偏心率大, $e=0.62$,在近日点加速度特大,引力波发射集中在这段附近,因此发射频率增大,而且决定公转周期的准确度提高;第三,亦即最重要一点,是由两个脉冲星组成的双星,脉冲星间物质交流极少,潮汐作用也大为减少,因而公转周期变化主要是引力辐射能量损失造成的。PSR1913 + 16轨道周期不

足 8 小时,经过10年积累观测,测出周期变率为

$$\frac{dP}{dt} = (-2.40 \pm 0.09) \times 10^{-12}.$$

按 Einstein 广义相对论的预言值为

$$\frac{dP}{dt} = -(2.403 \pm 0.002) \times 10^{-12}.$$

这证实了引力波的存在,也表明广义相对论是引力理论中的成功者.最近,又发现另一个新的毫秒脉冲双星,其偏心率也很大,人们在期待这个“空间引力实验室”的新成果.

1.3 各种天体的尺度与结构

几乎所有天体物理研究都脱离不了天体的尺度、结构与距离.所谓“天文数字”其中就有指尺度与距离的成分.

地球不小,它的质量为 $6 \times 10^{24} \text{kg}$,它的半径为 6370km. 日地距离比它大的多,为 38 万公里. 阿波罗飞船走数天距离也只有 1 光秒稍多,比之地球到太阳距离 1.5 亿公里(8.3光分)要小的多. 日地平均距离被用作为天文尺度标准称为天文长度单位,简称 AU. 太阳是被研究的最多的恒星,而且在众多恒星中它的很多性质居其中间,故天文学中光度和质量都以太阳数据为基准. 太阳质量 $M_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{g}$,太阳光度 $L_{\odot} = 4 \times 10^{33} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$,太阳半径 $R_{\odot} = 7 \times 10^{10} \text{cm}$ (习惯上以 \odot 表太阳). 冥王星与地球距离为 60 亿公里,为 5.5 光时,距太阳最近恒星是 4.3 光年,因此太阳系尺度在 1 光天到 1 光年之间.

宇宙结构的下一层次是星系. 例如我们的银河由 10^{11} 个恒星组成,最大直径约为 6~10 万光年,其光度为 $10^{11} L_{\odot}$,质量为 $1.4 \times 10^{11} M_{\odot}$. 其他河外星系的光度,尺度与银河系在量级上相同或差别不大,可见星系是远大于恒星的天体层次. 星系形态多种多样,有如旋涡,有延伸的旋臂(称旋涡星系),间或其中有棒(称棒旋星系),或如椭球(称椭圆星系),也有的形状极不规则(称不规则星系). 旋涡星系,例如银河系,在其中心为核,稍大还有实,这些基

本上球对称。再外是盘，而旋臂平卧在盘中，在盘外天球中有许多由数十万到数千万恒星组成的球状星团。

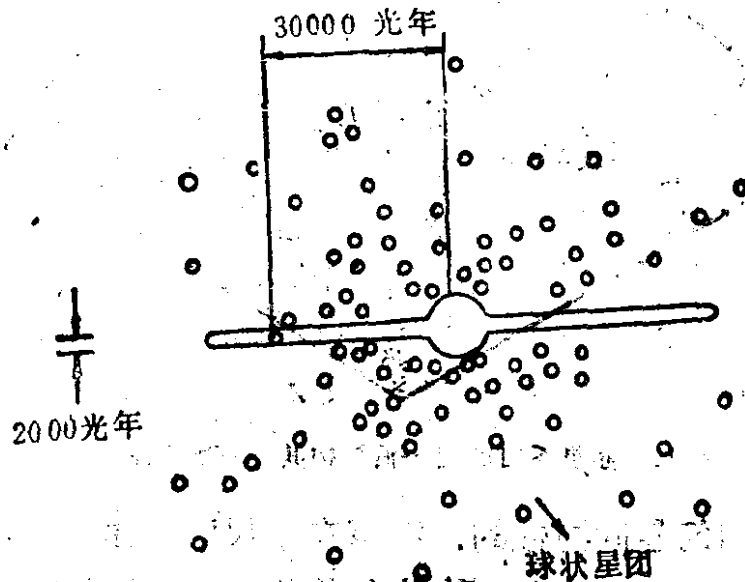


图 1.1 银河结构图

星系分布不是均匀的，而构成较小尺度约百万光年的星系群，如银河所居的本星系群由17个星系组成。星系形成的更大尺度的结构是星系团，它的尺度为千万光年，通常由几十到几百甚至几千星系组成（见图 1.2）。

是否有更大尺度的结构？这个问题直到八十年代才肯定。所谓大尺度结构问题，即超星系团的结构，观测表明它是由星系组成的泡和几乎没有星系的巨洞组成。超星系团中主要空间是洞，体积占90%以上，而星系只有5%。一反从恒星到星系团都有质量向心的集中性，超星系团中心是空的（见图 1.3）。它的尺度达亿光年。

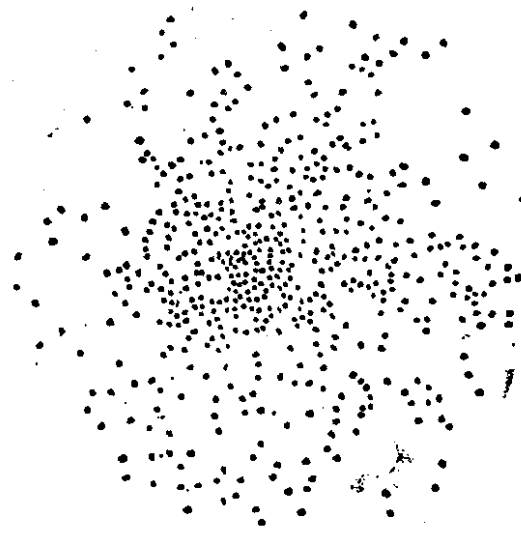


图 1.2 一个富星系团，中心有一特亮星系

结构的最后层次是宇宙整体，尺度达百亿光年。观测表明在超