

核科学技术丛书

中子物理学

——原理、方法与应用

(上册)

丁大钊 叶春堂 赵志祥 等 编著

原子能出版社

核科学技术丛书

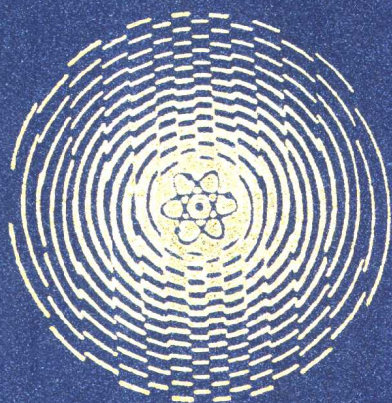
中子物理学

—原理、方法与应用

(下册)

丁大钊 叶春堂 赵志祥 等 编著

原子能出版社



ISBN 7-5022-2198-0/O571.5 定价: 78.00 元 (上、下册)

0571.5
S

中 子 物 理 学

——原理、方法与应用

(上册)

丁大钊 叶春堂 赵志祥 等 编著

原 子 能 出 版 社

北 京

0571.5
X

中 子 物 理 学

——原理、方法与应用

(下册)

丁大钊 叶春堂 赵志祥 等 编著

原 子 能 出 版 社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

中子物理学——原理、方法与应用/丁大钊、叶春堂、赵志祥等编著. —北京: 原子能出版社, 2001.7

(核科学技术丛书)

ISBN 7-5022-2198-0

I. 中… II. 丁… III. 中子物理学 IV. O571.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 74786 号

内 容 简 介

本书以中子在有关学科中的应用为主线。全书分四篇, 分别冠以基础篇、微观篇、宏观篇和应用篇等篇名, 论述了有关中子学科的基本实验方法、中子与原子核的相互作用、中子在物质中输运与中子在相关学科与技术中的应用。各章、节的作者努力做到结合自身的研究工作简要而全面地论述有关专题的基础知识、已取得的成果及近期的发展方向。

本书可作为有关研究工作者、大学物理专业教师及研究生与高年级学生的参考用书。

中子物理学——原理、方法与应用

丁大钊 叶春堂 赵志祥 等 编著

责任编辑: 谭 俊

封面设计: 崔 彤 版式设计: 崔 彤

责任校对: 李建慧 责任印制: 刘芳燕

原子能出版社出版 发行

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

北京朝阳科普印刷厂印刷 新华书店经销

开本: 850×1168mm 1/32 印张 31.625 字数 806 千字

2001 年 7 月北京第 1 版 2001 年 7 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000

定价: 78.00 元 (上、下两册)

核科学技术丛书

编辑工作委员会

主任:孙家辉

副主任:张铎清

委员:(以姓氏笔画为序)

乐俊楚 孙家辉 李 镁 李盈安

张本东 张铎清 赵守林 姜 樾

编辑工作小组

组长:张铎清(兼)

副组长:李 镁

成员:张铎清 李 镁 赵志军

序

核科学技术，是一门新兴的尖端科学技术，包括核物理、核化学等基础学科以及为实现核裂变和核聚变直接相关的核资源勘查、核原料开采与加工、同位素分离、核燃料元件制造、核反应堆、乏燃料后处理、加速器、核动力和同位素与辐射技术等应用核技术。

自从1896年发现天然放射性，1934年发现人工放射性和1938年发现核裂变以来，核科学技术发展速度惊人，成果辉煌：1942年建成第一座核裂变反应堆，紧接着，于1945年美国爆炸了第一颗原子弹，1952年氢弹试验成功，1954年苏联建成了世界上第一座核电站，1959年美苏核动力船只先后下水……目前全世界有400多座核电机组正在运行，其发电量占世界总发电量17%；非动力核技术也为人类健康、经济发展和社会进步做出巨大的贡献。

我国核科学技术，自1955年以来，经过近40年的努力，发展迅速，成绩卓著，蜚声中外。1964年10月16日，我国第一颗原子弹爆炸成功，1967年6月17日氢弹试验成功，紧接着，我国第一艘核潜艇下水，我国自行设计建造的秦山核电厂并网发电，广东大亚湾核电站建成发电，投入商业运行，受控核聚变研究取得可喜成果，同位素与辐射技术广泛应用于科学研究、医学诊断与治疗 and 工农业生产。

我国核科技事业的发展，推动和促进了整个科学技术和国民经济的发展，大大增强了我国综合国力，提高了我国的国际地位。

我国广大核科技工作者，尤其是老科学家、老专家，为我国核科学技术和核工业，做出了突出贡献。在中国核工业总公司领导和支持下，原子能出版社在经费十分拮据的情况下，千方百计

筹措资金，组织出版这套《核科学技术丛书》，总结他们毕生从事核科技事业所做出的贡献、经验和智慧，大力宣传推广核科学技术，纠正人们头脑中核科学技术只与核武器相联系的不正确想法，消除公众对核科技不必要的疑虑，使核科学技术在我国核工业第二次创业中发挥出巨大的力量，这是难能可贵的了不起之举。我衷心祝贺《核科学技术丛书》的出版。

王淦昌

1994年9月19日

前 言

当我们翻阅历年诺贝尔物理奖与化学奖清单时，可以看到中子与很多获奖项目有关。从 1935 年 J. Chadwick 因发现中子获奖到 1994 年 B. N. Brockhouse 与 C. G. Shull 因发展中子散射的应用而获奖，共有七项直接或间接地与中子有关；学科领域涉及核物理、核化学、天体物理及核技术应用。

中子的发现是原子核物理及其应用发展史的一个里程碑。中子作为原子核的组成粒子，可通过核反应产生成为中子束流。这种电中性、与原子核有强相互作用的探针在原子核结构及核反应规律的研究中取得了许多具有基本意义的成果，使核物理研究发展到一个新阶段。在 20 世纪 60 年代以前，中子核反应是原子核基础研究的主要方面。现在，虽然中子物理学已成为核物理中一个成熟的领域，但在对核反应的复杂过程作概念“自治”的统一、定量描述及利用某种核反应过程研究原子核结构等两方面，研究工作仍在深入进行。

1938 年发现中子诱发核裂变现象，不仅开拓了核物理研究的新领域，而且为核能应用奠定了物理基础。链式反应的实现则使核能应用成为现实。研究中子在大块物质中的运输过程是个非常复杂的物理过程的综合性学科领域。以中子核反应及原子核的有关数据作为输入量求解中子运输方程，因核反应截面、核结构数据的不完整、不精确及解运输方程时数学处理的近似方法均可能使导出的结果与实际有偏差。中子输运理论的研究及通过积分

实验作宏观检验构成了中子物理学中一个极具实用价值的分支——宏观中子物理学。

中子是构成物质的微观粒子，是物质结构的一个重要层次。它与粒子物理和天体现象有密切的关系。中子是研究强相互作用与弱相互作用的有力工具，也是研究自然界基本对称性的独特的“实验室”。中子核反应在漫长的天体演化过程中对天体元素组分的形成起着重要作用。有些恒星演化最终将因引力塌缩而形成具有特殊性质的中子物质——中子星。从物质世界的时空尺度来看，中子关联着“极早”与“极晚”、“极小”到“极大”的运动变化规律。

慢中子凸现的波动性在凝聚态、生物分子等物质结构研究与 X 射线相互补充。因为中子具有静止质量、磁矩、极强的穿透能力，它与原子核的相互作用因元素的同位素而异，所以它与 X 射线（电磁辐射）相比具有独特性。电磁辐射的技术发展程度相对比较成熟，由于激光、同步辐射、自由电子激光等光源的开发，使电磁辐射的波段及亮度已大大超出了常规的 X 射线源。与之相比，慢中子的应用开发程度显得有些“弱势”，这主要是受目前可供使用的中子源强度所限。随着 21 世纪初几台脉冲强流散裂中子源的陆续建成，慢中子散射的应用必将出现新的局面。超冷中子技术的进一步发展和极化中子束的应用将会开拓前所未见的 ứng dụng 前景。

中子及其应用的涵盖面非常广泛，包括众多学科的许多研究领域。通常在中子物理的名称下指的是中子核物理，宏观中子物理则包括在反应堆物理基础之中；中子的应用及交叉学科则常常作为一种工具或讨论专题包容在有关学科中。在中子发现五十周年时，曾举行过一次纪念性学术会议，会上发表的论述各专题成

果及可能发展方向的文章集中在一文集中^{*)}。但据我们所知,迄今还没有一本集中地论述中子及其在各学科领域应用的专著来“填补”基础知识与专门的研究文献之间的“间隙”。中国原子能科学研究院是我国长期从事中子物理及中子应用研究唯一的学术机构。四十年来取得了不少进展,建成了若干研究基地,培养了一支研究队伍,有些研究成果处于国际前列的地位。展望 21 世纪的科技发展态势,中子物理及其应用必将在深度、广度及精度诸方面继续发展,并在有关的应用领域中发挥更大的作用。因此我们认为组织有关专家合作撰写一本中子及其应用的专著是适当和有价值的。

本书的撰写以中子在有关学科中的应用为主线。全书分四篇,分别冠以基础篇、微观篇、宏观篇和应用篇等篇名,论述了有关中子学科的基本实验方法、中子与原子核的相互作用、中子在物质中输运与中子在相关学科与技术中的应用。因此,本书的风格与一般核物理或其他学科的专著有所不同。各章、节的作者努力做到结合自身的研究工作简要而全面地论述有关专题的基础知识、已取得的成果及近期的发展方向。我们希望本书能对有关研究工作者、大学物理专业教师及研究生与高年级学生起导引的作用,成为有用的参考书。

本书各章的作者均标在目录中。此外,赵志祥同志组织了全书的撰写并拟定了全书总纲;丁大钊、叶春堂与赵志祥同志承担了全书的编定及通校工作。

*) The Neutron and Its Applications, 1982
ed. P. Schofield
Institute of Physics Conf. Series No. 64 (1983)

在撰写本书的时候，正值我国第一座重水研究反应堆和第一台回旋加速器在中国原子能科学研究院建成四十周年。1958年10月《人民日报》曾以“我国进入原子能时代”为题记述了“堆-器”建成这一盛事。我国的中子物理及应用研究从那时起始并逐步扩展，为我国的核科学技术与核工业的发展作出了重要贡献。我们谨以此专著向为我国核科学研究发展作出历史性贡献、我国中子科学的奠基人钱三强教授表示深切的怀念与崇敬，同时向长期以来关心并指导我们工作的何泽慧教授致敬。我们希望本书的出版，能为我国中子科学研究在前辈开创的基础上进一步发展起一点促进作用。

编著者

2000年1月31日

目 录

I. 绪论	丁大钊 (1)
I.1 中子的粒子性与波动性	(2)
I.2 中子作为认识自然界的探针	(8)
I.3 中子作为改造自然界的工具	(21)
I.4 中子与自然界	(29)
参考文献	(39)

基 础 篇

第一章 中子的产生	包宗渝 赵志祥 (47)
1.1 中子源及其主要指标	(47)
1.2 放射性核素中子源	(54)
1.3 加速器单能中子源	(60)
1.4 加速器白光中子源	(78)
1.5 裂变反应堆中子源	(100)
1.6 超冷中子源	(106)
1.7 中子源按能区分类和中子参考辐射场	(117)
参考文献	(122)
第二章 中子探测	唐洪庆 (129)
2.1 概述	(129)
2.2 中子探测的基本原理和方法	(130)
2.3 常用中子探测器	(133)
2.4 新型中子探测器	(142)
2.5 n - γ 鉴别技术	(147)
2.6 特定对象的中子探测	(151)

参考文献	(164)
第三章 中子谱学	唐洪庆 (169)
3.1 慢中子谱学	(169)
3.2 快中子飞行时间法	(169)
3.3 利用核反应的快中子谱仪	(189)
3.4 反冲质子谱仪	(192)
3.5 Bonner 球中子谱仪	(195)
3.6 用阈探测器测快中子能谱	(196)
3.7 其它测量中子能谱的方法	(198)
参考文献	(200)
第四章 中子注量率测量	包宗渝 (203)
4.1 定义、单位、计算和测量	(203)
4.2 绝对测量原理和方法 (1) ——标准截面法	(205)
4.3 绝对测量原理和方法 (2) ——伴随事件法	(221)
4.4 中子注量率绝对测量的其他方法	(234)
4.5 放射性核素中子源强度的测量	(235)
参考文献	(237)

微 观 篇

第五章 中子与原子核相互作用	周祖英 (243)
5.1 基本物理量	(245)
5.2 核反应机制	(250)
5.3 中子-核作用截面的实验测量	(263)
5.4 中子核数据库	(283)
参考文献	(289)
第六章 原子核的统计性质及核反应统计理论 ...	张竞上 (292)
6.1 原子核的统计性质及复合核假设	(292)
6.2 能级密度	(295)

6.3	Hauser-Feshbach 平衡态统计理论模型	(299)
6.4	Hauser-Feshbach 模型的角分布公式	(305)
6.5	宽度涨落修正	(312)
	参考文献	(319)
第七章 核反应平衡和预平衡的理论统一描述 ··· 张竞上 (321)		
7.1	核反应的非平衡态特征和激子模型	(321)
7.2	统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论	(330)
7.3	单粒子发射双微分截面	(336)
7.4	复杂粒子发射的双微分截面	(343)
7.5	γ 退激的级联过程及同质异能态	(365)
7.6	核反应的能量平衡	(369)
	参考文献	(386)
第八章 中子辐射俘获反应 γ 谱学与		
	核结构研究	石宗仁 丁大钊 (387)
8.1	(n, γ) 反应 γ 谱学的实验方法	(389)
8.2	建立原子核的能级纲图	(409)
8.3	(n, γ) 反应 γ 谱学检验核结构微观模型	(424)
8.4	原子核低激发能级纲图的统计分析	(442)
8.5	(n, γ) 反应的非复合核统计机制	(452)
	参考文献	(460)
第九章 原子核裂变		
		韩洪银 (464)
9.1	引言	(464)
9.2	核裂变模型理论	(467)
9.3	裂变核从基态到断点运动	(483)
9.4	断裂后裂变现象	(491)
9.5	裂变中子和 γ 光子发射	(504)
9.6	三分裂变现象	(515)
	参考文献	(526)

宏观篇

第十章 中子的输运	刘桂生 (533)
10.1 一般分析	(533)
10.2 中子与介质相互作用的物理过程	(534)
10.3 中子输运方程	(543)
10.4 中子的扩散	(566)
10.5 微扰理论和灵敏度分析方法	(575)
参考文献	(579)
第十一章 多群常数	刘桂生 (582)
11.1 群常数制作方法的发展过程	(582)
11.2 群常数制作过程	(585)
11.3 快堆群常数制作	(594)
11.4 热堆群常数制作	(597)
11.5 不同权重谱对积分量计算结果的影响	(600)
11.6 群常数制作的国际动态和发展趋势	(603)
参考文献	(610)
第十二章 宏观检验	刘桂生 (614)
12.1 宏观检验工作的意义	(614)
12.2 基准实验	(615)
12.3 宏观检验的理论方法	(623)
12.4 评价核数据库的宏观检验	(627)
12.5 评价核数据库的调整	(633)
12.6 宏观检验的国际动态和发展情况	(637)
参考文献	(640)