



中国原子能科学研究院科学技术丛书

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

中国原子能科学研究院科学技术丛书

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

图书在版编目(CIP)数据

中子物理学——原理、方法与应用/丁大钊等编著. —2版. —北京:

原子能出版社, 2005. 9

(中国原子能科学研究院科学技术丛书)

ISBN 7-5022-3486-1

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(2005)第 095338 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

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100037)

责任编辑 杨树录 张关铭 谭 俊

责任校对 李建慧

责任印制 丁怀兰

印 刷 保定市印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 46

字 数 847 千字

版 次 2005 年 9 月第 2 版 2005 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5022-3486-1

印 数 1—2500

定 价 165.00 元(上、下册)

版权所有 侵权必究

网址: <http://www.aep.com.cn>

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

出版委员会

主 任 赵志祥

副主任 舒卫国 柳卫平

委 员 (按姓氏笔画为序)

万 钢	王 楠	王阿凤	王国保	尹忠红	石永康
叶宏生	叶国安	刘森林	许谨诚	李林虎	李和香
李树源	杨丙凡	杨河涛	张昌明	张和平	张锦荣
张静波	陈建欣	邵焕会	罗志福	赵崇德	姜兴东
夏海鸿	强家华	薛小刚			

编审委员会

顾 问 (按姓氏笔画为序)

王乃彦	王方定	方守贤	阮可强	汪德熙	张焕乔
周永茂	钱绍钧	黄胜年	樊明武		

主 任 赵志祥

副主任 柳卫平 许谨诚

委 员 (按姓氏笔画为序)

勾 成	卢玉楷	叶国安	吕忠诚	朱升云	刘一兵
关遐令	李吉根	杨启法	肖雪夫	张万昌	张天爵
张先业	张伟国	张应超	陈玉宙	陈永寿	陈钟麟
范显华	林灿生	罗上庚	罗志福	竺礼华	金小海
金华晋	周祖英	单玉生	姜 山	贺佑丰	袁履正
顾忠茂	党淑琴	徐 铄	浦胜娣	容超凡	谢建伦
裴鹿成					

办公室

主 任 尹忠红

副主任 李来霞

成 员 (按姓氏笔画为序)

马英霞	王丽英	王宝金	伍险峰	张小庆	竺 琳
韩翠娥					

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

编辑工作委员会

主 任 侯惠群

副主任 杨树录

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 李 宁 李盈安 杨树录 张 辉 张关铭

张铨清 赵守林 赵志军 侯惠群 黄厚坤

编辑工作小组

组 长 杨树录

副组长 张铨清 赵志军

成 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 李 宁 杨树录 张铨清 赵志军

总 序

中国原子能科学研究院创建于1950年,是我国核科学技术的发展地和先导性、基础性、前瞻性的综合性核科学技术研究基地。

在党中央和上级部门的关怀和指导下,中国原子能科学研究院为我国的国防建设、国民经济建设和核科学技术的发展做出了重要贡献,造就了7位“两弹一星”功勋科学家和60多位两院院士,培养了大批科技人才,在核物理、核化学与放射化学、反应堆工程技术、加速器工程技术、同位素技术、核电子学与核探测技术、辐射防护、放射性计量等学科形成了自己的特色和优势,并拥有核科学与技术 and 物理学两个一级学科硕士、博士学位授予权。

为了系统地总结原子能院在核科学技术相关优势学科积累的知识和经验,吸收和借鉴国内外核科学技术最新成果,促进我国核科技事业的发展,我院决定组织出版《中国原子能科学研究院科学技术丛书》,并选定王淦昌、肖伦、丁大钊、王乃彦、阮可强等院士编著的《惯性约束核聚变》、《放射性同位素技术》、《中子物理学——原理、方法与应用》、《新兴的强激光》、《核临界安全》5本专著首批出版,今后还将组织撰写更多的学术专著纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给为我国核科技事业献身的人们!

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》出版委员会

2005年9月1日

再版说明

本书已于 2000 年首次出版发行。值此中国原子能科学研究院建院 55 周年之际,被收入《中国原子能科学研究院科学技术丛书》再次出版。

此次出版保留了本书主编丁大钊院士撰写的第一版前言;勘正了第一版的文字错误,并对部分内容做了少量的增补和修改。书中不当之处,恳请批评指正。

作者

2005 年 9 月 25 日

第一版前言

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“自洽”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输运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输运方程,因核反应截面、核结构数据的不完整、不精确及解输运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有的应用前景。

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 50 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^①。但据我们所知,迄今还没有一本集中地讨论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。40 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 世纪的科学发 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

① The Neutron and Its Applications, 1982
ed. P. Schofield
Institute of Physics Conf. Series No. 64(1983)

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。

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 40 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	(1)
I.2 中子作为认识自然界的探针	(6)
I.3 中子作为改造自然界的工具	(16)
I.4 中子与自然界	(22)
参考文献	(29)

基 础 篇

第1章 中子的产生	包宗渝 赵志祥(35)
1.1 中子源及其主要指标	(35)
1.2 放射性核素中子源	(40)
1.3 加速器单能中子源	(43)
1.4 加速器白光中子源	(56)
1.5 裂变反应堆中子源	(72)
1.6 超冷中子源	(76)
1.7 中子源按能区分类和中子参考辐射场	(84)
参考文献	(86)
第2章 中子探测	唐洪庆(92)
2.1 概述	(92)
2.2 中子探测的基本原理和方法	(92)
2.3 常用中子探测器	(95)
2.4 新型中子探测器	(101)
2.5 n - γ 鉴别技术	(105)
2.6 特定对象的中子探测	(108)
参考文献	(118)
第3章 中子谱学	唐洪庆(123)
3.1 慢中子谱学	(123)
3.2 快中子飞行时间法	(123)

3.3 利用核反应的快中子谱仪	(138)
3.4 反冲质子谱仪	(139)
3.5 Bonner 球中子谱仪	(141)
3.6 用阈探测器测快中子能谱	(142)
3.7 其他测量中子能谱的方法	(144)
参考文献	(145)
第 4 章 中子注量率测量	包宗渝(148)
4.1 定义、单位、计算和测量	(148)
4.2 绝对测量原理和方法(1)——标准截面法	(149)
4.3 绝对测量原理和方法(2)——伴随事件法	(161)
4.4 中子注量率绝对测量的其他方法	(170)
4.5 放射性核素中子源强度的测量	(171)
参考文献	(172)

微 观 篇

第 5 章 中子与原子核相互作用	周祖英(177)
5.1 基本物理量	(178)
5.2 核反应机制	(182)
5.3 中子-核作用截面的实验测量	(191)
5.4 中子核数据库	(206)
参考文献	(210)
第 6 章 原子核的统计性质及核反应统计理论	张竞上(212)
6.1 原子核的统计性质及复合核假设	(212)
6.2 能级密度	(214)
6.3 Hauser-Feshbach 平衡态统计理论模型	(217)
6.4 Hauser-Feshbach 模型的角分布公式	(221)
6.5 宽度涨落修正	(227)
参考文献	(231)
第 7 章 核反应平衡和预平衡的理论统一描述	张竞上(233)
7.1 核反应的非平衡态特征和激子模型	(233)
7.2 统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论	(239)
7.3 单粒子发射双微分截面	(247)

7.4 复杂粒子发射的双微分截面	(252)
7.5 γ 退激的级联过程及同质异能态	(268)
7.6 核反应的能量平衡	(271)
参考文献	(283)

第8章 中子辐射俘获反应 γ 谱学与核结构

研究	石宗仁 丁大钊(285)
8.1 (n, γ) 反应 γ 谱学的实验方法	(286)
8.2 建立原子核的能级纲图	(301)
8.3 (n, γ) 反应 γ 谱学检验核结构微观模型	(312)
8.4 原子核低激发能级纲图的统计分析	(326)
8.5 (n, γ) 反应的非复合核统计机制	(332)
参考文献	(338)

第9章 原子核裂变

韩洪银(342)

9.1 引言	(342)
9.2 核裂变模型理论	(343)
9.3 裂变核从基态到断点运动	(355)
9.4 断裂后裂变现象	(361)
9.5 裂变中子和 γ 光子发射	(370)
9.6 三分裂变现象	(378)
参考文献	(386)

宏 观 篇

第10章 中子的输运

刘桂生(391)

10.1 一般分析	(391)
10.2 中子与介质相互作用的物理过程	(391)
10.3 中子输运方程	(398)
10.4 中子的扩散	(414)
10.5 微扰理论和灵敏度分析方法	(419)
参考文献	(423)

第11章 多群常数

刘桂生(425)

11.1 群常数制作方法的发展过程	(425)
11.2 群常数制作过程	(427)

11.3	快堆群常数制作	(433)
11.4	热堆群常数制作	(435)
11.5	不同权重谱对积分量计算结果的影响	(438)
11.6	群常数制作的国际动态和发展趋势	(440)
	参考文献	(444)
第 12 章	宏观检验	刘桂生(447)
12.1	宏观检验工作的意义	(447)
12.2	基准实验	(447)
12.3	宏观检验的理论方法	(454)
12.4	评价核数据库的宏观检验	(457)
12.5	评价核数据库的调整	(462)
12.6	宏观检验的国际动态和发展情况	(465)
	参考文献	(467)

应 用 篇

第 13 章	中子散射技术 I ——基本原理	叶春堂(473)
13.1	引论	(473)
13.2	中子散射的基本理论	(478)
13.3	晶体对中子的散射	(483)
13.4	Van Hove 关联函数	(487)
13.5	准弹性散射	(495)
13.6	磁散射	(497)
13.7	中子光学基础	(505)
	参考文献	(509)
第 14 章	中子散射技术 II ——实验设备和实验方法	叶春堂(511)
14.1	中子源	(511)
14.2	冷中子源	(520)
14.3	高温中子源	(528)
14.4	中子导管	(532)
14.5	中子超镜	(540)
14.6	中子束的准直	(543)
14.7	中子束的单色化	(545)
14.8	中子束的过滤	(551)

14.9	位置灵敏探测器	(554)
14.10	中子衍射	(559)
14.11	液体及非晶态物质的结构测定	(569)
14.12	中子小角散射	(571)
14.13	声子色散关系的测定及三轴谱仪	(578)
14.14	飞行时间谱仪	(584)
14.15	中子反射仪	(588)
14.16	中子自旋回波谱仪	(589)
14.17	各类谱仪适用的 Q, ω 空间	(592)
	参考文献	(592)

第 15 章 中子散射技术Ⅲ——在基础研究及工业上的

	应用	叶春堂(599)
15.1	结构和磁结构研究	(599)
15.2	磁形状因子测定	(603)
15.3	磁元激发	(604)
15.4	磁临界现象及相变	(605)
15.5	晶格动力学及其相关的某些典型研究	(607)
15.6	中子分子谱学	(609)
15.7	生物分子研究	(610)
15.8	工业应用	(618)
	参考文献	(621)

第 16 章 中子活化分析 田伟之(627)

16.1	利用反应堆中子的元素分析	(628)
16.2	利用快中子的元素分析	(673)
16.3	利用同位素中子源的元素分析	(676)
	参考文献	(682)

第 17 章 中子治癌、中子测井和中子照相 朱升云(687)

17.1	中子治癌	(687)
17.2	中子测井	(693)
17.3	中子照相	(701)
	参考文献	(708)

I. 绪 论

中子的发现是 20 世纪物理学发展中一个极重要的事件,它与核反应诱发人工放射性、发明带电粒子加速技术并列为 20 世纪 30 年代原子核研究发展中的三个里程碑。

把中子应用于研究物质结构的各门学科中,不仅引起原子核物理研究质的飞跃,而且因建立原子核是由质子与中子通过强相互作用构成的量子多体体系的认识,以及对介子场理论研究和实验研究的深入而促成粒子物理学的发展。把中子应用于研究内容广袤的复杂结构物质,则促进了一系列交叉学科的发展。30 年代后期划时代的核裂变现象的发现,不仅为核物理研究开辟了一个重要的分支领域,而且进一步促进核物理与化学的紧密结合,形成核化学这一交叉学科。至于核裂变的应用已成为众所周知的对社会及经济发展具有深远影响的核能发展的基础。

在对中子的基本性质尚未了解清楚之前,它巨大的科学价值与社会影响就已广泛地显示出来。

有关中子的基本性质及中子与原子核相互作用的部分知识,在 1939 年前主要是属英国剑桥大学 Cavendish 实验室及罗马大学 Fermi 研究组的贡献。在 E. Amaldi 的专著中对发现中子的有趣的历程及随后若干年内对中子性质、中子与原子核相互作用及中子的输运研究作了很详细的介绍^[1],在下面将介绍的关于中子的粒子性中的部分数据所依据的实验方法基本上仍然是以这些早期工作所确立的方法为基础的改进与发展。Fermi 研究组早期所发展的研究中子输运的方法——后来被称为年龄-扩散方法——亦被证明在一些应用中是有成效的。

本章的阐述将以此为线索结合近几十年的发展展开。

I.1 中子的粒子性与波动性

I.1.1 中子的粒子性

质量 Chadwick 发现中子的工作,实质上是通过测量 α 粒子轰击 Be 核所发射的“未知”射线与 H, Li, Be, B, C 及 N 等轻原子核碰撞所产生的反冲核能量,通过能量、动量守恒规律推算该射线粒子质量的实验完成的。通过某些有中子产生

(或吸收)的核反应,根据运动学关系求出中子质量或中子质子质量差值,是确定中子质量的基本方法。现有中子质量的数据中,最精确的数值是通过慢中子 $n+p \rightarrow D+\gamma$ 反应中 γ 射线能量的精确测量所定出的氘核结合能,再结合质谱法测定的 $H_2^+-D^+$ 的质量差中求出的中子与氢原子质量差的方法求出的, $m_n - m_p = (1\,293.331 \pm 0.017)\text{keV}$ 。

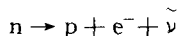
自旋 根据所有奇质量数原子核均服从 Fermi-Dirac 统计及慢中子在仲氢上相干散射实验结果,表明中子的自旋为 $\frac{1}{2}\hbar^{[2]}$ 。

磁矩 氘核的磁矩小于质子磁矩,表明中子具有与质子反号的磁矩。利用核磁共振谱仪,测量中子束通过时的共振谱,以与中子束交替通过的水流(质子)共振谱作为校准磁场的基准,由此推算出中子磁矩为

$$\mu_n = -1.913\,043\,01(54)\mu_N^{[3]}$$

电中性的中子有磁矩表明中子内部有结构。在夸克模型中,中子是由 u, d, d 三个夸克组成的,分别具有 $\frac{2}{3}e$ 及 $-\frac{1}{3}e$ 电荷。假定中子磁矩由其组成夸克的磁矩合成,且夸克的磁矩正比于其电荷。据此简单的模型,得到 $\frac{\mu_p}{\mu_n} = -\frac{3}{2}^{[4]}$,此值与实验值 -1.46 相符合。

中子寿命 中子的质量大于质子与电子的质量和,Chadwick 在 1935 年即指出,在自由状态下中子是不稳定的^[5],其衰变式为:



根据中子与氢原子的质量差,可以推断衰变电子能谱的端点为 $(782.318 \pm 0.017)\text{keV}$,实验上观察到中子衰变是通过从反应堆中子束经电偏转引出正离子,并鉴定正离子为质子而被确认的。实验估算出中子衰变的半衰期在 $10 \sim 25\text{min}$ 之间^[6]。

因为中子寿命值对于天体物理及导出弱相互作用基本常数的重要性,所以对中子寿命的测量工作几十年来一直未间断过,并不断改进。图 I.1 上表示测量数据的变迁。现在的评价值为 $\tau_n = (896 \pm 10)\text{s}$ 。

测量中子寿命的方法有两种。根据中子衰变规律 $N(t) = N_0 \exp(-t/\tau_n)$,第一种方法是测量在已知注量 N 中子束的一定体积内的衰变率 $\dot{N}$, $\tau_n = \frac{N}{\dot{N}}$;第二种方法是在中子瓶中贮存 N_0 个中子,测量剩余中子数 $N(t)$ 随贮存时间的关系, $\tau_{st} = \frac{t}{\ln \frac{N_0}{N(t)}}$,而 $\frac{1}{\tau_{st}} = \frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_{los}}$,此处 τ_{los} 为贮存中子的漏失时间常数,例如被瓶壁所吸收。第一种方法需对中子束注量及衰变中子数(通过测衰变质子或电子)作绝对计