

物理学手册之一



原子与原子核 物理学手册

主编 陈辰嘉

北京出版社

物理学手册之一

原子与原子核物理学手册

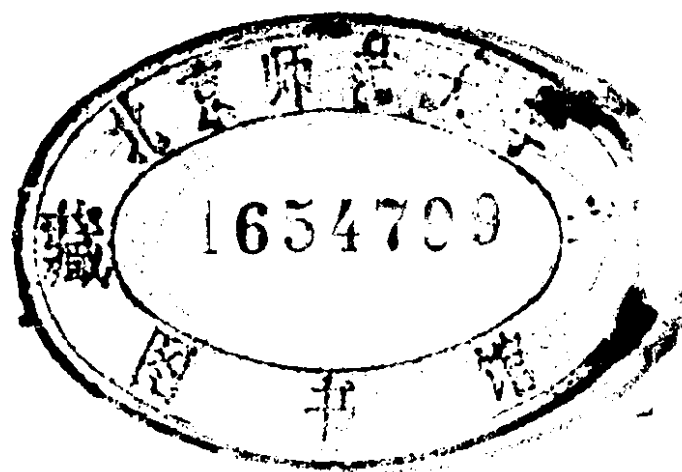
主 编 陈辰嘉

副主编 周治宁 刘洪涛

编写者 陈辰嘉 周治宁 刘洪涛

张树霖 刘继周

74/157/11



北 京 出 版 社

(京) 新登字200号

原子与原子核物理学手册

YUANZI YU YUANZIHE WULIXUE SHOUC

主编 陈辰嘉 副主编 周治宁 刘洪涛

*

北 京 出 版 社 出 版

(北京北三环中路6号)

邮政编码: 100011

北 京 出 版 社 总 发 行

新华书店北京发行所经销

北 京 市 朝 阳 北 苑 印 刷 厂 印 刷

*

850×1168毫米 32开本 21印张 527 000字

1993年6月第1版 1993年6月第1次印刷

印数 1—450

ISBN 7-200-01794-9/TL·1

定 价: 13.60元

序

人们常常把原子能的释放和利用看作是进入原子时代的标志。从物理学的观点看，原子、原子核和粒子物理的发展，是物理学从宏观到微观世界的一次重大的飞跃，是经典物理到近代物理的过渡。粗略地说，这一发展过程在本世纪初就开始了。当时所谓“物理学危机”，实际上也就是微观物理学产生的“阵痛”。随着实验技术的进步和认识的日益深入，原子和原子核物理在广大科技部门的影响也日益显著。原子能的释放和利用，正是这种发展的一个重要的里程碑。

当然，里程碑是很重要的，但那也仅仅是以原子和原子核物理为基础的宏伟的科技大厦的一个侧面。在此基础上，或在其影响下，发展起来的新科技部门、仪器、设备已经多得不可胜数。在这本手册里，为篇幅所限，这些应用和设备不能一一介绍，只能简略地谈谈原子和原子核物理和目前受到普遍重视的所谓“高科技”领域的关系。

信息科学是受到人们重视的高科技领域，有人甚至认为本世纪末或下世纪初，人类将进入信息社会。的确，计算机和计算技术的发展极大地提高了人们贮存和处理各种信息的能力，给予了所有科技、生产和生活部门以极大的冲击。不说更新的发展，即使把现有的计算技术的作用充分发挥出来，也会给科技和生产带来十分巨大的变化。但是，今天科技界对如此巨大信息贮存和处理能力还不能很快地适应，这是阻碍计算机充分发挥作用的一个重要原因。计算机既不能自己产生有用的信息，也不能根据某种固定不变的程序去处理各门学科的信息，更不能根据处理结果对外界作出反应。实际上，人们只能利用原子和核技术，例如利用

激光束、电子束和离子束等才能获得对研究对象最详尽最细致的知识；处理这些信息则需要精湛的原子物理知识；也只有利用原子和核技术才能对研究对象作最精密的加工处理。不难预见，在信息社会里，由于上述的需要，原子和原子核物理及技术，将会得到更大的发展。当然，也要看到，作为计算机的元件，微电子器件的发展，也要依赖于原子物理的发展和核技术的应用。

到二十一世纪，能源将成为很迫切的科技问题。从目前看，聚变能源是最具有吸引力的新能源，人们正在这一方面进行着大量的基础和技术研究，原子和核物理及技术是其中的一个主要学科领域。深入钻研原子物理的有关理论在这方面有可能起重要的作用。

为了解决日益增长人口的吃穿用问题，为了保护人民的健康和优良的生态环境，生命科学的发展是十分重要的。作为基础学科，现代生物学的前沿是分子生物学，从应用技术来说，以改变基因组合为主要内容的遗传工程受到很大的重视。在这里，原子结构仍然是理论的最终基础；而原子和核物理技术则是最重要的研究手段。在现代农业、医学等学科中，不但广泛应用各种以原子和核技术为基础的设备，而且由于核技术的广泛利用而发展了核农学和核医学等边缘学科。

现代社会，需要大量的钢铁、有色金属以及各种非金属材料，这些都取自地下矿藏。资源有限，寻找合适的代用材料，创造具有特殊性能的新材料和大大提高现有材料的利用率，这些就是现代材料科学迫切要解决的问题。作为理论基础，现代材料科学离不开以原子为基础的现代固体和表面物理，而原子和核技术则提供了主要的研究手段。

这些简单的介绍，足以说明原子和原子核物理在现代科技领域的重要作用。展望未来，不管是信息社会也好，新的技术革命也好，原子和原子核物理都将起到越来越大的作用。然而，人们在谈到现代科学技术，特别是所谓“高科技”时，却很少提到原

子或原子核物理。好像这些不过是一些过时的学科，对现代科技的发展已无关紧要。产生这种误解，可能有几方面的原因。从事这些方面研究的专家学者，他们的研究工作往往并不直接与高技术挂钩；对于在其它科技部门工作的人，往往只关心引进国外已经开发的商品仪器来使用，很少过问仪器的工作原理。这种状况，对我国的科技发展是很不利的。原子和原子核物理还有很多问题需要研究，也是开发新的科技领域的基础和源泉。忽视这方面的研究工作，会使我国科技长期落后，只能靠引进或仿制国外的商品仪器。这样，在科技领域的对外开放，就会变成对外依赖。在其它科技领域工作的人，如果只关心使用仪器设备，不注意它们所根据的原理和技术，也往往不能充分发挥设备的作用，错过很多创造或发展这些技术和设备的机会，甚至造成仪器的搁置和误用。

由此可见，为了适应时代的要求，为了实现四个现代化，我们既要大力开展原子和原子核的基础理论和应用技术的研究，又要大力普及原子和原子核物理知识。编辑一本原子和原子核物理学手册，将会对普及这种现代化建设所需要的知识有所贡献。手册不是教科书，也不是科普读物，读者用不着从头到尾读下去。它可供有需要的读者查阅，往往查看几个条目，就会获得初步的知识和数据。书后的参考书目，既说明了资料的来源，也可供要求进一步了解的读者参考。

作为一名读者，我很高兴能见到这本书，并感谢编者。北京出版社愿意出版这样一套物理学手册，也是应该受到称赞的。原子和原子核物理确实是现代科学技术的一个无尽的宝藏。这本书，以及其它中外有关的图书，只能作为开发这个宝藏的小引，真正做到取宝致用，还有赖于广大读者的智慧和钻研精神。

胡济民

1989年2月

目 录

第一篇 词 条

第一章 原子的一般性质

原子····· (1)	原子实····· (12)
原子物理学····· (1)	氢原子····· (12)
原子常数····· (4)	单电子原子····· (13)
原子序数····· (4)	氘····· (13)
原子质量数····· (5)	重氢····· (13)
原子量····· (5)	重水····· (13)
原子质量单位····· (5)	正氢····· (14)
原子质量····· (5)	仲氢····· (14)
原子体积····· (6)	氦原子····· (14)
原子半径····· (6)	仲氦····· (14)
原子大小····· (6)	正氦····· (14)
原子频率····· (7)	X射线····· (14)
原子单位····· (7)	伦琴射线····· (14)
电子····· (8)	放射性元素····· (15)
电子经典半径····· (9)	天然放射性元素····· (15)
价电子····· (10)	人工放射性元素····· (15)
自由电子····· (10)	折合质量····· (16)
正电子····· (10)	约化质量····· (16)
电子对产生····· (10)	玻尔原子····· (16)
电子对湮没····· (10)	亚稳原子····· (16)
元素周期表····· (11)	里德伯原子····· (16)
周期律····· (11)	电子偶素····· (17)

奇特原子.....	(18)	轻子原子.....	(18)
强子原子.....	(18)	μ 原子.....	(18)

第二章 原子结构

原子模型.....	(19)	激发态.....	(28)
汤姆孙原子模型.....	(20)	受激态.....	(28)
原子的核式结构		亚稳态.....	(28)
模型.....	(20)	原子的电离.....	(29)
卢瑟福的核原子		电子碰撞电离.....	(29)
模型.....	(20)	光致电离.....	(29)
有效截面.....	(21)	彭宁电离.....	(29)
微分截面.....	(21)	自电离.....	(30)
卢瑟福散射公式.....	(22)	玻尔—索末菲理论	
原子的行星模型.....	(23 )	.....	( 30)
玻尔假设.....	(23)	能级.....	(31)
玻尔原子模型.....	(23)	能级图.....	(31)
玻尔频率条件.....	(23)	空间量子化.....	(32)
玻尔氢原子理论.....	(24)	泡利不相容原理.....	(32)
玻尔理论.....	(24)	空间简并化.....	(33)
玻尔轨道.....	(26)	简并度.....	(33)
玻尔半径.....	(26)	退化度.....	(33)
对应原理.....	(27)	电子云.....	(33)
电离电势.....	(27)	电子自旋.....	(34)
激发电势.....	(27)	电子壳层.....	(35)
共振电势.....	(27)	闭合壳层.....	(35)
第一激发电势.....	(27)	原子壳层模型.....	(35)
中肯电势.....	(27)	电子态.....	(37)
定态.....	(28)	电子组态.....	(37)
基态.....	(28)	原子态.....	(37)

原子的矢量模型····· (38)	原子实极化····· (43)
LS 耦合····· (38)	贯穿轨道····· (43)
j _j 耦合····· (38)	有效电荷数····· (43)
对耦合····· (41)	屏蔽常数····· (44)
朗德间隔定则····· (41)	多电子原子····· (44)
洪德定则····· (41)	全同粒子不可分辨性
等效电子····· (42)	····· (45)
同科电子····· (42)	哈特里理论····· (45)
碱金属原子····· (42)	哈特里—福克理论
量子数亏损····· (43)	····· (45)
有效量子数····· (43)	自洽场近似法····· (45)

第三章 原子光谱

原子光谱····· (47)	光谱项····· (55)
原子发射光谱····· (47)	巴耳末公式····· (56)
原子吸收光谱····· (47)	巴耳末系····· (56)
线状光谱····· (48)	线系限····· (56)
共振荧光····· (48)	赖曼系····· (57)
精细结构····· (49)	帕邢系····· (57)
精细结构常数····· (49)	布喇开系····· (57)
超精细结构····· (50)	芬德系····· (59)
氢原子光谱····· (50)	汉弗莱系····· (59)
氢原子光谱的精细结	汉森—斯特朗系····· (59)
构····· (52)	里德伯常数····· (59)
氢原子光谱的超精细	类氢离子光谱····· (60)
结构····· (53)	皮克林系····· (61)
共振光谱线····· (54)	碱金属原子光谱····· (62)
兰姆移位····· (54)	主线系····· (62)
里兹组合原则····· (55)	第一辅线系····· (64)

漫线系·····	(64)	吸收限·····	(75)
第二辅线系·····	(65)	质量衰减系数·····	(76)
锐线系·····	(65)	质量吸收系数·····	(76)
伯格曼线系·····	(65)	质量散射系数·····	(76)
基线系·····	(65)	原子衰减系数·····	(77)
碱金属原子光谱的精		原子吸收系数·····	(77)
细结构·····	(66)	原子散射系数·····	(77)
氢原子光谱·····	(67)	俄歇效应·····	(77)
多重态·····	(69)	俄歇电子·····	(78)
单一态·····	(69)	莫塞莱定律·····	(79)
双重态·····	(69)	康普顿效应·····	(79)
三重态·····	(69)	康普顿散射·····	(79)
复双重线·····	(70)	康普顿反冲电子·····	(79)
复三重线·····	(70)	康普顿波长·····	(81)
超多重线·····	(70)	康普顿位移·····	(81)
受激态原子寿命·····	(70)	汤姆孙散射·····	(81)
选择定则·····	(71)	自然线宽·····	(81)
容许跃迁·····	(71)	谱线自然宽度·····	(81)
X射线谱·····	(72)	多普勒增宽·····	(82)
X射线发射谱·····	(72)	压力增宽·····	(83)
韧致辐射谱·····	(72)	碰撞增宽·····	(83)
标识谱·····	(73)	斯塔克效应·····	(83)
特征谱·····	(73)	原子钟·····	(84)
X射线吸收谱·····	(75)	原子频标·····	(84)

第四章 原子磁性

原子磁矩·····	(85)	矩·····	(85)
电子磁矩·····	(85)	电子自旋磁 (偶极)	
电子轨道磁 (偶极)		矩·····	(85)

有效磁矩.....	(86)	托马斯进动.....	(89)
朗德因子.....	(86)	拉莫尔旋进.....	(90)
g 因子.....	(86)	拉莫尔频率.....	(90)
玻尔磁子.....	(87)	回磁比.....	(90)
核磁子.....	(88)	塞曼效应.....	(90)
自旋轨道相互作用		正常塞曼效应.....	(90)
.....	(88)	反常塞曼效应.....	(90)
自旋轨道相互作用		帕邢—巴克效应.....	(93)
能量.....	(88)		

第五章 量子物理初步

量子论.....	(95)	物质波.....	(105)
旧量子论.....	(95)	德布罗意波.....	(105)
黑体辐射.....	(96)	不确定关系.....	(105)
瑞利—金斯公式.....	(97)	测不准原理.....	(105)
普朗克公式.....	(98)	并协原理.....	(106)
普朗克假设.....	(98)	互补原理.....	(106)
普朗克常数 h	(98)	态叠加原理.....	(106)
光电效应.....	(99)	波函数.....	(107)
爱因斯坦光电方程		量子力学的统计解	
.....	(99)	释.....	(107)
光量子.....	(101)	几率波.....	(107)
光子.....	(101)	波包.....	(109)
普朗克—爱因斯坦关		算符.....	(110)
系.....	(102)	对易算符.....	(110)
光的波粒两象性.....	(102)	反对易算符.....	(110)
量子力学.....	(102)	线性算符.....	(111)
波动力学.....	(103)	厄密算符.....	(111)
矩阵力学.....	(104)	转置算符.....	(111)

复共轭算符.....	(112)	狄喇克符号.....	(121)
厄密共轭算符.....	(112)	一维定态问题.....	(123)
转置复共轭算符.....	(112)	一维方势阱问题.....	(123)
算符的本征值和本征 函数.....	(112)	一维方势垒问题.....	(126)
力学量的算符表示	(113)	隧道效应.....	(126)
期望值.....	(113)	一维谐振子.....	(127)
薛定谔方程.....	(114)	中心力场.....	(128)
与时间无关的薛定谔 方程.....	(115)	库仑场.....	(131)
定态.....	(115)	氢原子的量子力学解	(132)
守恒量.....	(116)	微扰论.....	(135)
宇称.....	(116)	非简并微扰论.....	(135)
对称波函数.....	(117)	简并微扰论.....	(137)
反对称波函数.....	(117)	含时间微扰论.....	(139)
费米子.....	(117)	跃迁.....	(140)
玻色子.....	(117)	跃迁几率.....	(140)
共同本征函数.....	(118)	跃迁矩阵.....	(140)
力学量完全集.....	(118)	常微扰.....	(141)
量子数.....	(118)	费米黄金定则.....	(141)
好量子数.....	(118)	周期性微扰.....	(142)
表象.....	(119)	光的吸收和发射.....	(143)
表象变换.....	(120)	跃迁定则.....	(144)
么正变换.....	(120)	禁戒跃迁.....	(144)
薛定谔表象 (绘景)	(121)	散射理论.....	(144)
海森伯表象 (绘景)		散射截面.....	(146)
		总截面.....	(146)
		分波法.....	(146)

第六章 原子核的基本性质

原子核物理学..... (148)	 (156)
原子核..... (149)	内禀电四极矩..... (156)
原子核半径..... (150)	原子核的宇称..... (158)
原子核质量..... (151)	同位旋..... (158)
质量公式..... (153)	同位旋空间..... (159)
结合能公式..... (153)	同位素..... (160)
原子核的角动量..... (154)	丰度..... (160)
原子核的磁矩..... (155)	同中子异荷素..... (161)
核磁子..... (155)	同质异位素..... (161)
原子核的回转磁比	同质异能态..... (161)
..... (155)	同质异能素..... (161)
原子核的电四极矩	

第七章 放射性

放射性..... (162)	α 衰变..... (171)
原子核衰变..... (162)	α 射线..... (171)
原子核蜕变..... (162)	α 粒子..... (173)
原子核嬗变..... (162)	α 粒子的射程..... (173)
半衰期..... (163)	α 衰变的Q值..... (174)
衰变常数..... (163)	α 粒子的发射..... (176)
衰变分支比..... (164)	α 衰变的禁戒因子
衰变纲图..... (164)	 (178)
放射系..... (166)	β 衰变..... (178)
连续衰变..... (167)	β 衰变几率..... (180)
放射性平衡..... (169)	β 衰变的Q值..... (181)
放射活度..... (171)	β 衰变能谱..... (182)

β 粒子.....	(183)	γ 跃迁几率.....	(187)
β 粒子的射程.....	(183)	内转换.....	(188)
居里标绘.....	(184)	内转换系数.....	(189)
γ 跃迁.....	(185)	γ 射线的角关联.....	(190)
γ 衰变.....	(185)	穆斯堡尔效应.....	(191)
γ 辐射.....	(186)	放射性测年.....	(193)
γ 射线.....	(186)		

第八章 核 力

核力.....	(195)	镜核.....	(202)
核力的力程和强度		同位旋相似态.....	(203)
.....	(196)	自旋—轨道耦合力	
中心力和非中心力		.....	( 204)
.....	(197)	核力的排斥心.....	(204)
交换力.....	(199)	唯象核力.....	(206)
核力的饱和性.....	(201)	单 π 交换势.....	(209)
核力的电荷无关性		单玻色子交换势.....	(210)
.....	(201)		

第九章 原子核结构

原子核结构.....	(211 )	.....	( 217)
核模型.....	(212)	壳层效应.....	(218)
原子核的液滴模型		球形核.....	(223)
.....	(212)	超重核稳定岛.....	(225)
费密气体模型.....	(213)	对关联.....	(225)
核能级密度.....	(214)	对能.....	(226)
核温度.....	(216)	核结构的BCS理论	
幻数.....	(217 )	.....	( 227)
原子核的壳层模型		原子核的组态.....	(228)

偶偶核.....	(229)	本体坐标系.....	(238)
奇 A 核.....	(229)	原子核的转动惯量	
奇奇核.....	(230 )	.....	( 238)
费密面.....	(231)	转动带.....	(240)
单粒子 (空穴) 激发		尼耳逊模型.....	(241)
态.....	(231)	高自旋态.....	(243)
形变核.....	(232)	转晕态.....	(243)
核心极化.....	(233)	回弯现象.....	(243)
原子核的集体运动		原子核的集体振动	
.....	(233 )	.....	( 244)
原子核的集体转动		形变核的振动.....	(245)
.....	(234)	原子核中的声子.....	(245)
形变参数.....	(235)	原子核的综合模型	
原子核的转动自由度		.....	( 247)
.....	(236)	相互作用玻色子模型	
转动能级.....	(236 )	.....	( 248)

第十章 原子核反应

原子核反应.....	(249)	分截面和总截面.....	(255)
核反应中的守恒定律		核反应的微分截面...	(255)
.....	(250)	角分布.....	(256)
反应道.....	(250)	实验室系和质心系	
核反应类型.....	(250 )	.....	( 256)
核反应 Q 值.....	(251)	L 系和 C 系的转换关	
实验 Q 值.....	(252)	系.....	(257)
非相对论 Q 方程.....	(252)	激发函数.....	(261)
能量角分布.....	(253)	核反应产额.....	(261)
阈能.....	(254)	带电粒子反应产额	
核反应截面.....	(254 )	.....	( 261)

中子反应产额.....	(262)	裂变中子.....	(274)
细致平衡原理.....	(263)	平均中子数.....	(275)
复合核反应.....	(263)	裂变液滴模型.....	(276)
复合核寿命.....	(264)	链式反应.....	(278)
布雷特—威格纳单能 级公式.....	(264)	聚变反应.....	(278)
直接核反应.....	(265)	受控聚变反应.....	(280)
直接核反应类型.....	(266)	重离子核反应.....	(280)
光学模型.....	(267)	重离子反应特征.....	(281)
核裂变现象.....	(268)	重离子反应经典近似	(281)
自发裂变.....	(268)	重离子反应分类.....	(282)
诱发裂变.....	(270)	重离子反应截面.....	(283)
裂变位垒.....	(271)	全熔合反应.....	(284)
裂变碎片和产物.....	(272)	全熔合截面.....	(284)
裂变碎片质量分布	(273)	G—M 模型.....	(285)
裂变碎片总动能.....	(274)	深部非弹性碰撞.....	(287)
		超铀元素.....	(288)

第十一章 基本粒子和中高能核物理

相互作用分类.....	(292)	K介子.....	(296)
高能物理.....	(292)	J/ ψ 粒子.....	(298)
粒子物理.....	(292)	重子.....	(298)
基本粒子.....	(293)	强子.....	(298)
光子.....	(293)	质子.....	(298)
轻子.....	(294)	中子.....	(299)
中微子.....	(294)	核子.....	(299)
μ 子.....	(295)	超子.....	(300)
介子.....	(295)	共振态.....	(300)
π 介子.....	(296)	轻子数.....	(301)

重子数.....	(301)	层子模型.....	(304)
奇异粒子.....	(301)	粒子的味和色.....	(304)
奇异数.....	(301)	量子色动力学.....	(305)
反粒子.....	(302)	中高能核物理.....	(305)
夸克.....	(303)		