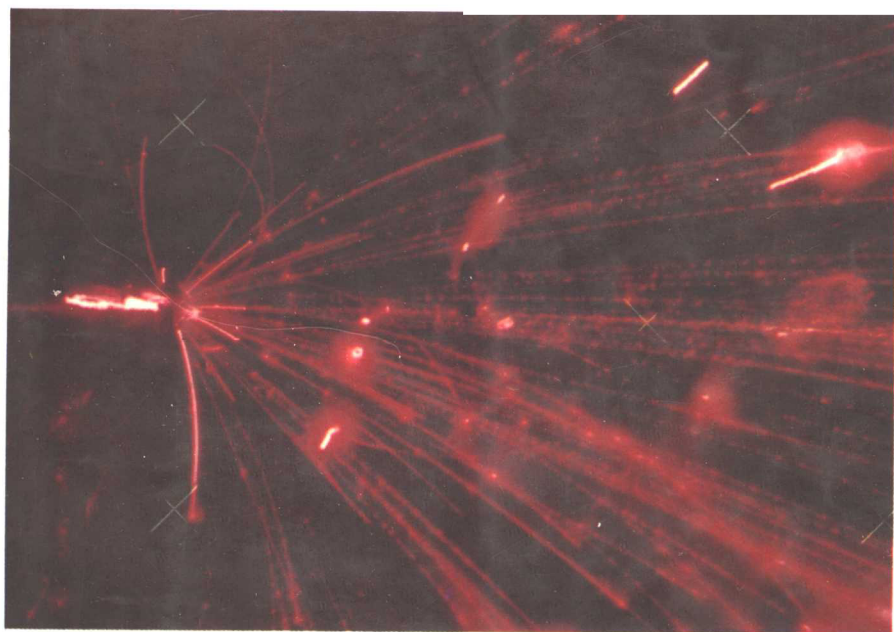


90年代物理学



原子核物理学

(美) 原子核物理学专门小组

科学出版社

90年代物理学

原子核物理学

〔美〕原子核物理学专门小组

丁 鼎 译

汤家镛 王炎森 姜焕清 校

科 学 出 版 社

1 9 9 4

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

美国物理学评述委员会等单位组织许多科学家编写了一套调查报告,名为《90年代物理学》,本书是其中之一。

本书评述了 70 和 80 年代原子核物理学研究领域的主要进展,概述了原子核物理学对核天体物理学、凝聚态物理学、核医学和放射医学等其他学科以及社会的影响和冲击,预测了原子核物理学 90 年代的前沿课题和发展方向。

本书内容深入浅出,没有高深的理论叙述和繁琐的公式。本书是从事核物理研究和教学的人员、核物理专业的研究生、大学生的一本很好的参考书,同时也可供科技管理干部以及对原子核物理学感兴趣的读者使用。

Nuclear Physics Panel
Physics Through the 1990s
NUCLEAR PHYSICS
National Academy Press, 1986

90年代物理学

原子核物理学

[美] 原子核物理学专门小组

丁 鼎 译

汤家镛 王炎森 姜焕清 校

责任编辑 鄢德平

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

*

1994 年 5 月 第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1994 年 5 月 第一次印刷 印张: 7

印数: 平 1—700 插页: 精 2

精 1—450 字数: 177 000

ISBN 7-03-003747-2/O·663 (平)

ISBN 7-03-003591-7/O·635 (精)

平 装 8.60 元
定价: 纸面精装 11.00 元

中译本前言

《90年代物理学》(Physics Through the 1990s)是由美国全国研究理事会(National Research Council)组织,物理学评述委员会(Physics Survey Committee)所写的调查报告。全书共9册,其中6册分别阐述物理学的6个基本领域,即:《原子、分子物理学和光学》(Atomic, Molecular, and Optical Physics),《凝聚态物理学》(Condensed-Matter Physics),《基本粒子物理学》(Elementary-Particle Physics),《引力、宇宙学和宇宙射线物理学》(Gravitation, Cosmology, and Cosmic-Ray Physics),《原子核物理学》(Nuclear Physics)以及《等离子体和流体》(Plasmas and Fluid)。另有3册分别是《总论》(An Overview)、《提要》(A Summary)、《交叉学科和技术应用》(Scientific Interfaces and Technological Applications)。

美国全国研究理事会共组织过三次物理学方面的调查。前两次分别于1966年和1972年完成。这次从1983年初开始,组织了近150位物理学家,耗资70万美元,于1986年4月出版本书。

这套书详尽地叙述了1985年前的十几年中物理学和与物理学有关的交叉学科所取得的重大进展以及物理学对其他学科、社会发展和人类进步的影响。本书还对美国物理学在世界上的地位、物理人才的培养和现代大型设备在物理学研究中的作用等作了详细的分析,并预测了20世纪90年代物理学的前沿课题及发展方向。

这套书的内容深入浅出,有一定的权威性,相信它将有助于我国物理学工作者了解当代物理学的重大进展、前沿课题及发展趋势。同时,本书对地球物理、生物物理、材料科学、化学、数学、微电子学、能源与环境科学、光信息技术、国防和医学等与物理有关的

交叉学科的研究和教学人员也有很大的参考价值。此外，对负责制定科技政策的各级政府领导和科研管理部门了解物理学的现状和发展，制定学科发展规划和基金指南等，也有一定的帮助。中国科学院数学部和复旦大学共同组织翻译了此书，将陆续出版。我们坚信，本书的出版将有助于推动我国物理学的发展。

在本书的翻译出版工作中，得到了科学出版社、复旦大学出版社、复旦大学物理系、中国科学院物理研究所、高能物理研究所和等离子体研究所等单位的大力支持，在此仅表谢意。

谢希德 周光召 章 铤

前 言

美国全国研究理事会 (National Research Council) 于 1983 年成立了物理学评述委员会 (Physics Survey Committee), 本书正是物理学评述委员会的原子核物理学专门小组 (Panel on Nuclear Physics) 的报告。这一报告, 介绍过去 10 年间原子核物理学中的许多主要进展, 概括地叙述了原子核物理学对其他学科以及对社会的影响, 同时还描述了这一学科当前的各个前沿领域。最后一章, 提出了我们认为这一学科应优先考虑的一些事情。

原子核物理学专门小组提出的这一报告, 曾在 1983 年 5 月和 1984 年 1 月的小组会议上讨论过, 并且还通过通信广泛地征求过意见。1983 年 7 月, 我们还参加了能源部 (the Department of Energy) 和国家科学基金会 (National Science Foundation) 的原子核科学咨询委员会 (Nuclear Science Advisory Committee, NSAC) 的一个为期一周的专题讨论会, 会上拟就了原子核科学咨询委员会 1983 年长远规划的主要内容。附录 B 列出了出席这次专题讨论会的人员名单, 包括原子核科学咨询委员会成员和我们小组成员外的其他主要参加者。

在本报告的草案中采纳了 11 位审议者的大部分的评审意见, 这些审议者提供了原子核科学界代表性的观点。草案于 1984 年 5 月呈报全国研究理事会进一步审核。其后, 又采纳了其他的审议意见, 而这份报告的定稿是在 1984 年 8 月呈报的。

在如此篇幅的报告中要对原子核物理学这一学科给予全面完整的阐述, 显然是不可能的。必然, 我们只能对所选的各个专题给出一个综述; 同时, 我们小组也力求在各个专题之间保持合理的平衡。尽管这一报告没有明显地提到核化学本身, 但是, 众所周知, 核化学家和核物理学家都在为同一个目标——了解原子核而工

作,他们有许多共同的兴趣和使用着相同的实验设备。

我们小组感谢全体审议者、物理学评述委员会全体人员和全国研究理事会的物理学和天文学委员会 (Board on Physics and Astronomy of the National Research Council) 全体人员,以及许多其他的人,在我们完成这一任务中所给予的帮助。我们在这一报告的技术性的修改和编辑中,得到了 F. Raab 的卓有成效的帮助,为此我们特别对他表示衷心的感谢。

目 录

中译本前言

前言

总纲	1
1 原子核物理学简介	10
原子核	10
核多体问题	13
基本力	15
基本粒子	17
轻子	19
夸克	20
基本矢量玻色子	23
守恒定律和对称性	26
加速器和探测器	30
入射粒子和靶	31
能量	32
核相互作用	34
粒子探测器	34

I 原子核物理学的主要进展

2 核结构和核动力学	36
激发的基本模式	38
巨电共振	39
巨自旋振动	43
原子核内的 Δ	44
电子散射的结果	45
相互作用玻色子模型	48

宏观核动力学	50
重离子系统中的共振态	53
深度非弹性碰撞	55
核多体问题	58
三核子原子核和无限核物质	59
有限原子核的性质	60
中能区的有效核子-核子 (NN) 相互作用	62
传统的多体理论的扩展	64
3 原子核内的基本力	66
原子核的非核子成分	66
利用轻子来探索夸克结构	68
超核物理学	72
低能时的量子色动力学	74
作为基本对称性实验室的原子核	75
β 衰变中的右旋玻色子	78
中微子的质量	79
中微子振荡	80
双 β 衰变	82
原子核内的宇称破坏	84
4 极端条件下的原子核	86
在高温和高密度下的原子核	86
高核温度	88
高核密度	89
核物质的状态方程	91
超重的元素	92
新的超铀元素	92
寻找超重元素	95
高度不稳定的原子核	96
奇异的放射性	97
长同位素序列	99
具有极高自旋的原子核	101

II 原子核物理学的冲击

5 核天体物理学	104
在极端天体物理学条件下的原子核	105
轻元素的核合成	105
超新星爆发和中子星的形成	107
超新星内的弱相互作用过程	110
恒星内的核反应	111
太阳中微子问题	112
恒星的演化	115
6 科学和社会的得益	117
凝聚态物理学	117
原子物理学	120
地质学和宇宙学	122
核医学	124
材料改性和分析	127
能量技术	128
美术	129

III 当前原子核物理学的前沿

7 探索夸克-胶子等离子体	132
核物质态	133
到达夸克解除禁闭	136
探测夸克-胶子等离子体	140
其它相对论性重离子物理学	142
8 改变核物质的描述	145
原子核内的夸克	146
原子核内的介子和重子共振态	149
在极端条件下的核性质	151
9 弱电统一和超出	155

标准模型.....	155
中微子束物理学.....	157
检验大统一理论.....	158
时间反演不变性破坏.....	159
中子的电偶极矩.....	159
稀有 μ 子衰变和 K (介)子衰变.....	161
10 建议原子核物理学优先考虑的事情.....	164
原子核物理学中的加速器.....	165
现有的装置.....	166
规划的连续电子束加速器装置.....	167
下一个主要的倡议: 相对论性核碰撞机.....	168
原子核科学咨询委员会(NSAC) 1983 年长远规划提出的建 议.....	170
连续电子束加速器装置(CEBAF)和相对论性核碰撞机(RNC) 相互补充的方面.....	171
进一步的建议.....	173
添加装置的科研机会.....	173
核仪器.....	174
核理论.....	176
加速器的研究和发展.....	177
培养新的科学家.....	179
浓缩稳定同位素.....	180
核数据汇编.....	181
附录.....	182
A. 国家和大学专用加速器装置.....	182
B. 顾问和审议者.....	190
文献目录.....	194
词汇注释.....	196

总 纲

原子核物理学的今天

原子核物理学研究原子核的性质、结构和相互作用,以及支配原子核组元之间作用力的规律。原子核内部相互作用的根源在于基本粒子——夸克和胶子的相互作用,夸克和胶子一起构成核物质。但是,长期来所知的在原子核内存在着的附加的动力学力,则不可能单单借助基本粒子来了解,就像已知在宏观物质中存在的新的合作相互作用 (cooperative interaction),不能借助原子核和原子来认识一样。

今日的原子核物理学面对的各种基本问题,涉及的范围广泛,包括强相互作用和弱电相互作用,这些基本问题包括了物理世界从核力的微观尺度一直到宇宙的大尺度结构的各种性质。原子核物理学涉及到强相互作用的多体情况。它还涉及对基本理论和对称性的检验。此外,原子核物理学在天体物理学和宇宙学领域中也起了重要的作用。

我们对核结构和核动力学的认识在不断深入。一些新的简单的激发模式已经出现;新的对称性正在发现,而一些完全新的现象也正在发现中。

举例来说,在本世纪 70 年代,利用带电粒子与靶原子核的非弹性散射技术,发现了几种新的核振动模式。其中巨单极振动特别有意义,因为它与核物质的至今仍未能测量的压缩系数直接有关。在类似的研究中,利用 π 介子作为入射粒子,我们已经获得了核振动中关于质子和中子相对作用的重要信息,而且还获得了称为 Δ 的核子激发态的重要信息。

利用高能电子与原子核的散射,揭示了核结构的详细情况,其

精细程度是前所未有的,不仅是从核子的角度,而且是从存在于核内的介子,以及初步地从构成所有这些粒子的夸克的角度揭示核结构。这类研究是当今原子核物理学的主要的前沿领域之一。

入射粒子大小的另一个极端,则是越来越普遍地使用重离子,尤其是把它用作研究核动力学的多用途的探针。重离子在靶核上的沉重的碰撞 (massive impact), 可以引起各种各样的核激发和核反应,对这些激发和反应进行分析,则对了解核内核子的各种不同种类的运动是极有价值的。重离子碰撞,对于产生许多奇特的原子核类,包括过去10年间所得到的4个新的化学元素(原子序数106到109),同样也是必不可少的。

值得注意,迄今为止几乎所有的原子核物理学的研究,只可能在低核温和平常核密度条件下的原子核这一极其有限的范围内进行。对范围非常大的高温、高密度核物理学的探索,最近才刚刚开始,利用的是相对论性能量的重离子炮弹。这同样是原子核物理学当前的一个主要前沿领域。

毫无疑问,出现的十分重要的新问题需要我们去了解原子核物理学。例如,尽管我们现在知道如何用在核内除了存在中子和质子外还存在介子来解释某些核现象,但是,我们至今还不能解出对应的量子色动力学方程(相信这些粒子相互作用的方式受这种量子场论的支配),以描述所研究的效应。

当前的努力对解决这一问题尤为重要,因为这些努力有希望对自然界的基本力之一,即所谓的强力,有新的了解。事实上,原子核通常表现为一个无与伦比的、不花钱的实验室,供研究各种基本力之间的相互关系,以及研究作为一切物理现象基础的对称性原理。在形成我们眼前的这个宇宙中,它的关键作用在核天体物理学领域中是显而易见的,核天体物理学为我们了解天体和宇宙本身的形成和演化提供了必需的信息。同时,在地球上,核医学(包括供诊断和治疗用的专门制备的放射性同位素和加速器粒子束的开发和使用),核动力(裂变和聚变),材料的改性和分析(例如,离子注入和半导体微型电路的制作),放射性示踪(应用于很多

的研究领域,从地球物理学一直到医用物理学),以及许多传统工业上的应用(包括,例如在试验性的钻井中利用小型化的核加速器进行测井记录,利用辐射保鲜食品,利用离子注入使模具硬化而减少磨损),甚至对艺术品进行分析,这些是已经看到的原子核物理学的研究成果如何大量而有效地、有时是意想不到地应用于其他基础学科和现代技术中的若干例子,其中的许多应用已经对整个社会产生了直接而意义深远的影响。

原子核物理学的大部分的研究是利用各种类型的粒子加速器进行的。有关研究需要有一支庞大的研究人员的队伍和高能加速器,一般由国家实验室管理;另一面,与此同时的低能研究在高等院校进行,一般由一位教授带几名研究生利用小型加速器或大学实验室规模的设备进行的。这两方面的研究使原子核物理学获得了根本性的进展。

这种需要投入极大量的设备和人力的研究,正是原子核物理学的异乎寻常的特点之一。为了使这一领域全面地发展,必须保持大型小组和小型小组的研究计划之间的适当平衡。同样重要的是,要保持实验研究和理论研究之间的平衡,以及保持为各自的研究计划可利用的现代化设备的能力和计算机的能力之间的平衡。

原子核物理学过去十年的主要进展和它的激动人心的前景——以及原子核物理学已经对其它学科和整个社会产生冲击的种种方式——正是这次原子核物理学调查的主题。

对原子核物理学将来的建议

在拟订对原子核物理学今后的建议时,如前所述,原子核物理学专门小组得益于其成员与参加美国能源部和国家科学基金会的原子核科学咨询委员会(NSAC)的1983长远规划专题讨论会的人员之间广泛交换意见。

加速器是原子核物理学研究的基本工具。有一流的加速器及其辅助实验设备的规划、设计和建造,对整个核物理学界已变得越

来越重要了。为了支持在关键性的研究领域中最可能获得新结果的那些研究计划的进行,以及为了满足最大多数用户的需要,加速器的设计必须尽可能完善。目前原子核科学咨询委员会已经建议建造两台主要的加速器,它们的特性相互补充。

规划的连续电子束加速器装置

在1983年3月,原子核科学咨询委员会建议建造一台占空系数(duty factor)100%、40亿电子伏的直线加速器/展宽环(stretching)全套设备,现在所称的连续电子束加速器装置(Continuous Electron Beam Accelerator Facility, CEBAF),它是由东南大学研究协会(the Southeastern Universities Research Association)提议的。从1984年财政年度开始为这一机器提供研究和试制经费,在1987年财政年度申请建造经费。预计这台加速器的总耗资为2.25亿美元(按实际年度美元计算),包括初期的实验设备费用0.4亿美元。原子核物理学专门小组赞同建造这台CEBAF。

在CEBAF上核物理学研究的中心课题,则是利用电子束作为探针,以外科手术般的准确性探查整个原子核内的详细的粒子动力学,由此研究核物质的微观的夸克-胶子情况(高能、大动量传递和小距离上的情况)。然而,其中研究核物质的重子-介子情况(较低能、较小动量传递和较大距离上的情况)也是极重要的。尤其,研究从核子-核子相互作用的低能区转变到重子共振态和介子交换流的中能区,再转变到夸克和胶子的高能区的转变特性,则是最有价值的了;低能区用由核结构的独立粒子模型很好地描述,中能区用核内的强子相互作用的量子场论描述,而高能区则是用量子色动力学描述。

上述这些研究以及其他的研究,所需的CEBAF电子束能量的可调节范围为0.5—4.0吉电子伏。而且,为了能作符合测量,占空系数必需100%(即连续波运行);这些对孤立的特定的反应道也是必需的,同样也是为了能适应研究的变化。可见,CEBAF的

独特的性能,为在不同层次的结构上更详细地考察核物质,提供了前所未有的机会。

下一个主要的倡议: 相对论性核碰撞机

在原子核科学咨询委员会的 1983 长远规划 (*A Long Range Plan for Nuclear Science: A Report by the DOE/NSF Nuclear Science Advisory Committee*, December 1983) 中,建议建造一台能量可调的、相对论性重离子对撞束加速器。原子核科学咨询委员会认为,在 CEBAF 竣工以后,在原子核科学中最优先考虑的重大的新倡议便是这一机器。建议这台对撞机的每一束流的能量约为 30 吉电子伏每核子,预计耗资约 2.5 亿美元(按 1983 年财政年度的美元计算)。

这台加速器承担的一个主要的科学任务,则来自量子色动力学的最引人注目的预言之一: 在核物质的温度和密度足够高的条件下,就会发生受激的强子物质转变为夸克-胶子等离子体;在这种等离子体中,构成强子的夸克、反夸克和胶子都被“解除禁闭”,能自由地动来动去。相信在大爆炸后的头几个微秒内存在着这种夸克-胶子等离子体;今日的中子星核内可能也存在着这种等离子体,不过在地球上却从来没有发现过这种等离子体。因此,在实验室里产生出夸克-胶子等离子体将是一个重大的科学成就,将把原子核物理学、粒子物理学、天体物理学和宇宙学的各种原理联系在一起。

要达到夸克解除禁闭所必需的条件,当前唯一可想到的办法是使极其重的原子核在相对论性能量上对头碰撞,由此在这两个核的一个较大的体积内处处产生巨大的核温和能量密度。在这一体积内夸克和胶子动来动去的能力,就能对量子色动力学在大距离上的基本方面作出检验。据信,可能观测到解除禁闭的夸克物质的各种奇特性质,譬如大量的“奇异”粒子和反重子的产生。

除了进行对撞束实验外,这一相对论性核碰撞机(RNC)在束流能量可调、固定靶型下运行,则它就能为高能原子核物理学、

核天体物理学和原子物理学提供各种各样重要的研究计划。其中最有价值的研究之一，则旨在提供有关高温和高密度十分重要的核物质的状态方程的新信息。

原子核物理学专门小组赞同原子核科学咨询委员会 1983 长远规划中关于规划建设这样一台加速器的建议。建造应尽快开始，这与上面所述的 4 吉电子伏的电子加速器的建造并不矛盾。由于目前的资金水平只能勉强适应在现有的装置上这个领域面对的各种激动人心的科学研究机会，我们建议对原子核物理学增加足够的运行费用，以确保加速器的研究和开发，以及在这两个新装置竣工后的运行和在它们上面的各种研究计划的进行。

添加装置的科研机会

原子核物理学(包括核天体物理学)当前所面对的主要问题都是针对许多重要的科学研究机会的，而这些科学机会超出了现有的和在建造中的所有实验装置的研究范围。其中很多的机会，只需对现有装置的研究能力作一些改进和增加就可实现，因此，看来它们中的合情合理的部分在目前所设想的这一基本方案中是能够达到的。关于相对优先考虑的事情，必须在稍后适当的时间作出。

值得指出，大量的这类重要的研究机会可以用另一个第一流的新的多用户加速器来包容，这个加速器由一个同步加速器后接一个展宽环构成，同步加速器产生能量直到几十吉电子伏的极强的质子束流；展宽环产生近于连续流出的质子，它们产生 π 介子、K 介子、 α 子、中微子和反核子这类次级束流。这些次级束流的强度，一般要比在其它地方获得的强 50 到 100 倍，因此，对于原子核物理学和粒子物理学之间的交叉领域的一大类重要实验来说，精确度和灵敏度得到实质性的改善。

尽管原子核科学咨询委员会并没有建议为这个加速器提供资金，但是对上面所述的电子和重离子两个装置却给予肯定，由于这个加速器将提供各种独特的研究机会，因而可以把它保留作为将