

当前核物理研究的发展动向

孙 祖 训

(中国原子能科学研究院)

按照传统的观点,核物理学是相互作用的核子及其体系的物理学,主要研究核力、核性质、核结构及核反应等问题。原子核作为物质结构中一个重要的承上启下的层次,其物理学的研究为自然界的基本相互作用(主要是强及电弱相互作用)为少体及不多不少的多体量子体系以及为基本对称性的研究提供了天然的实验室,对人们理解从微观物质结构到宏观物质世界(天文学及宇宙学)具有极为重要的作用。无疑,核物理学是物理学研究中的重要组成部分。

从七十年代以来,核物理主要向精细核谱学、重离子核反应及中高能探针引起的核反应等三个方向发展。到八十年代以后,这三个方面又互相渗透,而向能量更高及更精细的方向发展。本文将对近年来核物理研究的主要进展及今后的发展趋势作一简要介绍。

一、核结构的研究

核力虽然是强相互作用,但作为零级近似核内核子可看成在平均场中作独立运动的粒子。再考虑核子间的剩余相互作用后即得到熟知的核壳模型。它是核结构理论的基本模型。近年来核壳模型有两个重要发展:(1)大基矢空间的多壳模型计算(Brown, Wildenthal)。这是利用大型计算机进行的较严格的计算,空间很大,例如对 ^{28}Si 核,可看作在 ^{16}O 核芯外有12个核子,共可组成93710个基矢态。两年来在sd壳区取得了相当进展,引出了sd壳的统一唯象相互作用(W相互作用),在预言核谱、Gamow-Teller β 衰变及M1矩阵元、电子散射形状因子等方面与实验符合较好。目前正在探

讨非sd壳波函数对有效算符的贡献及向fp壳区推广。(2)相互作用玻色子近似和模型(IBA及IBM)的提出和发展(Arima, Iachello)。考虑核芯外的核子,两两成对后构成s($L=0$)及d($L=2$)玻色子。利用相互作用玻色子的体系可统一地唯象地解释中重核低集体激发态的许多实验数据。IBA本质上是壳模型空间的切断近似。在代数描述方面,一个s玻色子和五个d玻色子构成六维空间,可用 $U(6)$ 群描述。由 $U(6)$ 群约化为可按角动量分类的 $O(3)$ 群,有也只有三种群链:

$$\text{I } U(6) \supset U(5) \supset O(5) \supset O(3)$$

$$\text{II } U(6) \supset su(3) \supset O(3)$$

$$\text{III } U(6) \supset O(6) \supset O(5) \supset O(3)$$

它们分别对应于几何模型(Bohr-Mottelson模型)中的非谐振动、轴对称转动及 γ -不稳定转子的转动,因此IBA可统一地处理核集体运动。IBA虽取得了较大成功,但也发现了其局限性:有些情况sd空间近似不够,需计入g玻色子;变形核较高激发态有粒子-空穴相互作用,单纯考虑粒子-粒子相互作用的IBA难以解释;玻色子价对数有含糊性,有时需要考虑核芯的贡献。当前IBA研究有两个新动向:一是推广到中高能质子非弹性散射,描述(p, p')中振动及转动四极态的多重激发;二是将低伏集体态与高伏巨共振态统一处理。

在集体运动方面,去年在核高自旋态的研究中出现新的突破性进展: Twin等对 ^{152}Dy 核第一次测到了自旋高达 $60\hbar$ 的分离谱线,得到了变形核长轴与短轴之比为2比1的超形变带证据,自旋值已接近其裂变前的极限值。这主要是实验技术上有重大改进,采用了多磁铁组成的粒子反冲谱仪及50个BGO晶体和12个

反康谱顿高纯锗探测器系统。另外 Lister 等人采用中子-带电粒子- γ 多重符合使有用的谱线从混乱本底中脱颖而出,由此测得了 A (质量数) 在 80 附近的一系列核谱数据;发现 ${}^{80}\text{Zr}$ 不是原预言的满壳附近的球形核,而是大变形长椭球核,以上这些发现对集体运动的研究给予了新的冲击。

十余年来,同标及同矢、电及磁多极巨共振的相继发现是核物理的一大进展。这些巨共振对核集体及单粒子运动提供了新信息,其中巨单极共振即呼吸模式态的发现使得对核物质的可压缩性有了直接的量度。近年来主要进展是 Goodman 等用极化核反应的方法发现了巨自旋共振,即 Gamow-Teller 共振。它是核内核子自旋及同位旋的双倒向的集体过程,不涉及核子空间运动的变化。实验中发现在 (p, n) 反应中只测到 GT 共振求和定则的 60%,所以强度有丢失。有两种解释:一是由于 Δ -空穴组态混合,这与核中夸克有关;另一是由于 $1p-1h$ GT 态本底与 $2p-2h$ 态混合。从去年的实验结果看来有利于后者。

二、重离子核反应的研究

库仑位垒下重离子之间的熔合截面比位垒穿透的计算大 1—2 个量级,是多年来困惑核物理学家的一大难题。近两年又系统研究了 ${}^{16}\text{O}$ 及 ${}^{40}\text{Ar}$ 与 Sm 及 Sn 的一系列从球形到变形过渡的同位素核的垒下熔合激发函数,说明变形效应使位垒下降。穿透机率提高是这类核截面增大的重要原因,中子数的改变,不是直接原因,但具体理论计算还不能与实验很好符合。在纯球形核系统的碰撞中,一些数据表明在熔合前先有转移过程,使熔合时的位垒发生变化。对更大质量的系统,如 $\text{Zr} + \text{Zr}$ 系统,去年 Keller 的实验表明与轻质量系统不一样,发现中子数改变影响较大。总之垒下熔合现象迄今仍没有一个较好的统一解释。

重离子核反应中的共振现象又是一个复杂问题,如何理解激发函数中的粗糙、精细及中间

共振,它们与核集团模型与核分子态现象有什么关系? ${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O}$ 中的宽结构用离子-离子势中的准束缚态还可以理解,而 ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$ 则很复杂。Betts 等近年来用 α 集团模型来解释 ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$ 现象。将共振与核结构结合起来有一定进展。实验上发现对 $4N$ 核系统, ${}^{28}\text{Si} + {}^{28}\text{Si}$, ${}^{24}\text{Mg} + {}^{24}\text{Mg}$ 及 ${}^{24}\text{Mg} + {}^{28}\text{Si}$ 有共振现象,而 ${}^{28}\text{Si} + {}^{32}\text{S}$, ${}^{32}\text{S} + {}^{32}\text{S}$ 没有,因此理论上不仅要解释某些系统的共振现象,而且要说明为何有的系统有而有的系统无,这是一个困难的任务。

重离子反应在能量更高后出现准弹性散射、深度非弹性散射及不完全熔合等现象,若干年来对能量小于 10MeV /核子的能区及随后对能量在 100MeV /核子到几 GeV /核子的能区都有不少研究。三年前,法国 GANIL 重离子加速器打开了中能重离子反应的研究领域,能区是 10 到 100MeV /核子。目前美国 MSU 也加入了此行列。正在建造的同类加速器有我国兰州的一台及意大利、日本及美国各一台,研究中能的结果发现:在中心碰撞中不完全熔合愈益增加,集体性仍很重要,可形成 very hot 核,甚至达到 60MeV /粒子;对擦边碰撞,出现碎片化,但集体效应仍很强。现在要问碰撞中核热化到什么程度?实验上可通过测中子多重性研究激发能,测蒸发谱形状研究温度。下一步要研究极热核物质的性质及其衰变性质以及可能出现的相变,为此要发展新的探测装置进行多参量遍举实验。理论方面在几年实验基础上形成了一个新分支——热核平均场物理学。

三、中高能核物理的研究

目前利用的中高能探针包括质子、 π 介子、电子及光子、奇异粒子及重离子等,利用这些探针进行研究是最近几年核物理研究中最活跃的领域。

在中能质子散射和反应方面,几年来实验上的主要倾向是从分立态(包括巨共振)的测量过渡到连续谱的测量;从截面测量过渡到极化观测的测量。目前采用磁谱仪焦面极化仪测

质子极化度的有 LAMPF TRIUMF, IUCF, RCNP 等实验室,能测中子极化度的有 IUCF, RCNP 及 LAMPF 等实验室. 理论上主要进展是中能实验中相对论效应重要性的发现及 Dirac 方程的应用; 建立了强子反应与电弱实验中有关算符间的联系; 建立了对连续区非弹性散射与电荷交换反应的描述.

在连续区研究中,目前正在探索 Gamow-Teller 共振强度丢失的原因; (p, p') 小角测量所发现的小共振的起源,探索是 M1 巨共振还是小动量转移区的自旋倒向附加强度; 寻找核中过量的 π 介子,探讨 EMC 效应在质子散射中的表现以及利用连续区极化量研究核介质对 N-N 核力的影响等等. 由于引入了极化自由度,使研究更加深入到较细微和敏感的方面.

相对论效应在质子与自旋为零的靶核散射所得极化观测量中有明显的表现. 极化量包括矢量分析本领与自旋转动参数. 开始采用微观非相对论光学模型“ ρ ”近似,但符合不好,后发展了相对论冲量近似,对自旋转动参数符合大为改善. 近年来发现负能波函数的引入是相对论与非相对论结果差异的根源. 在此计算中,不能简单地利用从实验引出的正能 NN 幅度,而应使用 Dirac 空间的完整 NN 幅度. 去年 Tjon 和 Wallace 的结果表明,在小于 300MeV 时此效应十分重要. 目前相对论效应研究还停留在质子与自旋为零的靶核散射上,准备推广到其它反应. 此外理论上还要考虑核介质对 NN 幅度的影响.

π 核相互作用中双电荷交换反应 (DCX) 及双同位旋相似态 (DIAS) 激发的机制仍不清楚. 如对 $^{12}\text{C}(\pi^+, \pi^-)$, 1984 年 Miller 用六个夸克所作的解释与实验不符,后来有人用 Δ -空穴激发计算,只在定性上与实验趋势一致,因此仍是个未解决的问题.

近年来高能轻子散射研究工作取得了重要的成绩. 首先是高能电子散射,特别是对磁形状因子及 $D(e, e')np$ 反应,随着电子能量的提高,电子动量转移的增大,将不同类型的介子交换流一层一层揭开,形象地呈现出随着电子-核

子距离的接近,不同基本粒子逐渐登上舞台. 1973 年, Hockert 等人考虑 π 介子交换,在电子动量转移 $q^2 < 10f_m^2$ 区得到理论与实验拟合很好时,被认为是首次看到 π 交换效应的重要突破. 当时看到的最短相互作用只是 π 交换. 而现在,实验上已可观测到 0.3 到 1fm 距离. 通过对大动量转移区的研究发现主要是 ρ 交换的贡献,而在小动量转移区 ρ 交换与 Δ 流是互相抵消的,因此从不同动量转移区的 $D(e, e')np$ 可研究不同介子交换项的贡献. 目前研究重点是设法推移到更高动量转移区,以便探索迄今还不清楚的极短程核力.

另一个重要贡献是从 μ 介子与核的深度非弹性散射得到的 EMC 效应. 铁核中与氦核中的结构函数不一样,表明夸克可能存在. 当然,近年来新的数据表明效应并没有最初观测的强,此外理论上也有不用夸克的尝试,还需要更多的在不同靶核上的数据.

相对论重离子物理是近年来发展最快的一个领域,也是今后若干年最重要的研究方向之一. 它主要研究在极高温(1—2GeV/核子即可达到 10^{10}K , 约为太阳中心温度的 60000 倍)及极高密度(10倍于正常核物质密度)下的物质性质及物质从核物质(强子物质)态向夸克物质(夸克-胶子等离子体)态的相变. 这将对宇宙大爆炸后最初瞬间的模拟,对超新星及中子星等天体的起源及演化的理解将具有重要的意义. 每核子 0.4GeV 能量的 $\text{Ca} + \text{Ca}$ 及 $\text{Nb} + \text{Nb}$ 的实验表明,较轻质量系统 ($\text{Ca} + \text{Ca}$) 即使是中心碰撞也未达到热力学平衡,而 $\text{Nb} + \text{Nb}$ 基本趋于平衡. 更重系统的碰撞易于平衡,其一部分碰撞能将转化成粒子质量(如 K 介子、 π 介子),其中 K 介子最热,质子次之, π 介子更次之. 因此, K 介子可反映火球演化的较早较热的阶段, π 介子则反映较迟较冷的阶段. 弄清核物质及夸克物质的态方程及相变条件是今后的重要课题.

四、核物理总的发展趋势

1986 年 8 月底,在英国 Harrogate 召开了

IUPAP A 级国际核物理会议。从会议所反映的情况看,今后低能核物理主要是向精细核谱学及多道关联测量发展,但核物理总的趋势是向中高能以至更高能量方向发展,传统的核物理领域已受到猛烈的冲击。有人认为,核物理学已不仅仅是相互作用核子及其体系的物理学,而是强相互作用基本粒子及其体系的物理学。核结构的基础将是“标准模型”:由六个夸克 $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$ 和六个轻子 $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$ 所组成,相互作用是统一力,即电弱加强相互作用并过渡到大统一相互作用。从核物理看,该模型可用于所有强子(重子、介子、核、中子星等)的结构及强子间的散射与反应。从粒子物理看,将提出更进一步的问题:为何有如此多的夸克和轻子?有多少代夸克?夸克和轻子质量的起源?有没有更好的方法解释规范对称性?(有没有 Higgs 粒子?在 $\sim 1\text{TeV}$ 附近有多少态?)有没有更大的统一?(超对称?超弦?)。

建立在新基础上的核物理学应包含以下内容:

(1) 强子物理学:研究核子次结构及夸克禁闭对核动力学的影响,需要中能电子及质子加速器。

(2) 多夸克谱学:研究介子、重子及其它简单的夸克集团的结构,需要电子-正子对撞机及 K 介子工厂。

(3) 夸克-胶子物质研究:研究高温高密度下物质的新状态,需要高能重离子加速器。

新核物理学至少有以下课题:

(1) NN 力的起源及描述。

(2) 用相互作用的多核子体系描述低能现象的物理基础及局限性。

(3) 中能实验中呈现夸克自由度的新的核性质的研究。

(4) 非相对论夸克模型及标准模型在介子及重子谱学中的应用。

(5) 高温高密度下核物质及夸克物质的性

质及相变。

为了研究这些新课题,国际上正在或准备建立一系列新的大型加速器。

1. 电子加速器

(1) 用于次核子物理研究。电子动量转移大于 $1\text{GeV}/c$ 。研究核子结构、核介质中核力的修正、核介质对夸克禁闭的影响等。计划建造的有美国 4GeV 的 CEBAF 连续波电子加速器。

(2) 用于强子物理研究。电子动量转移在几百 MeV/c 到几 GeV/c 之间。研究介子及激发核子在核响应中的作用。加速器有西德 800MeV 的 MAINZ 及美国 MIT 的 1GeV BATES 电子加速器,有极化束+内极化靶。

(3) 用于核物理研究。电子动量转移小于几百 MeV/c 。研究核子系统的单核子及集体运动。

2. 重离子加速器

将为极高能量相对论性重离子物理打开崭新的领域。现有的及计划建造的加速器有美国 Brookhaven 的 AGS 及 RHIC, 西欧中心 CERN 及西德的 GSI 重离子加速器。对 RHIC, 用固定靶时为 $10\text{GeV}-1\text{TeV}/\text{核子}$; 用作对撞机时为 $1-15\text{TeV}/\text{核子}$ ($A < 180$)

3. 质子加速器

利用强流高能质子束 ($I \sim 100\mu\text{A}$, $E \sim 30-45\text{GeV}$) 研究强子谱学、夸克结构函数及超核物理等课题。计划建造中的加速器有 TRIUMF, LAMPF-II 及 EHF。

五、我国核物理研究的展望

由于国防建设及核能、核技术应用发展的需要,我国已建立起一支有相当力量的能协同作战的实验和理论核物理科研队伍,同时在加速器、核电子学及探测技术等方面也有很强的力量。

核物理学界团结协作的一个成功例子是十年前在核工业部领导下为配合军用民用而建立的全国核数据协作网;参加协作网的有 20 余所

高等院校和科研机构。这一卓有成效的工作，为建立我国的核数据库作出了重要贡献，同时推动了我国核数据的测量工作，巩固和发展了我国核理论研究队伍，特别是在低能核反应理论方面有一定建树。他们的工作得到了用户的较高评价，在国际交流中也赢得了荣誉。

为贯彻科学研究面向国民经济建设的方针，几年来一部分核物理工作者转向核技术应用，以便直接为国民经济做出贡献。与此同时，基础研究继续得到重视。少而精地有重点地开展一些基础研究，对我国核科学技术的发展将具有重要的战略意义的。纵观核物理的发展趋势，在低能核物理方面，看来主要是向精细核谱学及多道关联测量方向发展。我国在今后几年内可在理论与实验结合的基础上利用极化轻粒子及重离子所引起的反应开展 IBA（包括微观基础、唯象及超对称等方面）、重离子碰撞垒下融合、在束 γ 谱学（重点是高自旋态）及重离子准弹性散射和准分子共振等方面的课题。有关实验工作主要依靠已建成的中国原子能科学研究所的 HI13 串列加速器、正在建设的中国科学院上海原子核研究所的 2×6 串列加速器和正在北京大学技术物理系安装的 2×6 串列加速器进行。这些研究在国际上仍有一些单位在搞，还有一些尚待解决的问题。

但是，从总的发展趋势看，核物理已不可逆转地向更高能量方向发展，并日益与粒子物理结合起来。在中能重离子物理方面，由于国际上的研究工作也刚开始几年，因此尽快建成中国科学院兰州近代物理研究所的重离子加速器

HIRFL，并积极开展中能重离子物理的研究，对我国核物理学科的发展是有重要意义的。HIRFL 将提供 10—100MeV/核子的重离子束，研究课题包括新核素的产生及其性能和衰变规律研究，中能重离子反应机制的研究，高自旋态、巨共振及反应核谱学的研究等等。

在中高能探针引起的核反应及次核子物理等方面，利用中国科学院高能物理研究所的 2.2GeV 电子-正子对撞机可进行 1.1—1.4GeV 电子散射实验及某些 π 核相互作用实验，可以填补我国在这方面的空白。

目前国际上发展最快投资最多的是相对论性重离子物理研究。对这个重要的研究方向我国也应密切注视，并在力所能及的条件内作出应有的贡献。在 RHIC, CERN 和 GSI 的装置建成后，将会出现大量前所未有的新实验数据，这将为探索新概念、建立新理论和开辟新领域创造很多机会，值得我们关注。

总之，在今后几年随着几个大型加速器和配套实验装置的建立，我国的核物理研究必将走上一个新的台阶。我们相信，在中国物理学会、中国核学会及中国核物理学会的学术领导、组织和协调下，只要全国核物理学界的理论和实验工作者继续发扬团结一致、大力协同的优良传统，大型设备进一步向全国各高等院校及科研机构开放，使人尽其才，物尽其用，有重点、有选择地瞄准几个重要课题，深入探讨，我国核物理研究一定会提高到一个新水平，并在国际上取得与我国相称的地位，反过来也会推动我国核能和核技术应用的进一步发展。

（上接第 562 页）

琨), K. H. Kuo (郭可信), *Script. Met.*, **20**(1986) 1155.

[6] GVS. Sastry et al., *J. Met. Res.*, **1**(1986), 274.

[7] K. H. Kuo (郭可信), D. S. Zhou (周大顺) and D. X. Li (李斗星), *Phil. Mag. Lett.*, **55**(1987), 33.

[8] S. J. Poon et al., *Phys. Rev.*, **55**(1985), L2324.

[9] Z. Zhang (张泽) and K. H. Kuo(郭可信), *Phil. Mag.*, **B54**(1986), L83.

[10] K. Urban et al., *Phys. Stat. Sol. (a)*, **91**(1985), 411.

[11] K. H. Kuo (郭可信), *Key Eng. Mat.*, (1987), to be Published.

[12] P. Bak, *Phys. Rev. B*, **32**(1985), 5764.

[13] C. Berger et al., *J. de Phys.*, **47**(1986), C3—489.

[14] P. Sainfort, B. Dubost, *J. de Phys.*, **47**(1986), C3—321.

[15] N. G. de Bruijn, *J. de Phys.*, **47**(1986), C3.

[16] V. Elser, *Acta. Cryst.*, **A42**(1986), 36.

[17] P. A. Bancel and P. A. Heiney, *J. de Phys.*, **47**(1986), C3—341.

[18] Z. Zhang(张泽), and K. H. Kuo(郭可信) *J. Microscopy*, (1987), in the Press.

[19] L. Pauling, *Phys. Rev.*, **58**(1987), 365.

[20] H. Q. Ye (叶恒强), D. N. Wang(王大能) and K. H. Kuo (郭可信), *Ultramicroscopy*, **16**(1985), 273.