

## 原子核物理学的巨大进展\*

(包括理论与实验)

曹文强 王顺金

吴国华

(兰州大学现代物理系) (中国科学院近代物理研究所)

**摘要:** 本文根据《九十年代的物理学》(美国, 1986年版)一书的内容, 结合我们的看法, 对近十年来原子核物理学所取得的巨大进展、特别是核物理工作者所关心的问题, 进行了简要回顾。

## 一、核结构与核动力学

从理论上讲, 现代核物理开始于壳层模型和平均场概念。它是定量了解原子核能级和其它性质的基础, 它预言了满壳核的稳定性, 并用价核子概念解释了核的许多性质。推广发展起来的广义壳模型, 在平均场外包括了剩余相互作用, 有很大的预言能力。然而, 当价核子较多时, 子空间很大, 数学计算上困难极大。

针对壳模型的数学困难, 产生了各种简化模型。最主要的是: (1) 液滴模型及其几何模型。它的特点是反映了原子核整体行为和集体运动, 能较好地说明原子核的整块性(结合能公式)、裂变及集体振动和转动; (2) IBM理论。它用  $J=0, 2$  的核子对(Boson)来解释偶偶核的低能核谱, 用对称群来处理问题, 其优点是可以建立起集体运动与更基本的壳模型间的联系。

核结构的实验研究目的, 是弄清原子核的能级及其在核反应中的作用。近来, 由于加速器的发展, 炮弹种类和能量大大增加, 外来炮弹(如  $\pi$  介子束)的利用, 使越来越多的原子核能级和内部激发模式, 成为实验研究的对象, 特别有趣的是, 通过控制炮弹种类和

能量, 可以有选择性地激发某种模式, 成为核结构研究的重要工具。

## 1. 基本激发模式

壳模型下的单粒子激发, 液滴模型下的相干激发, 这是人们早已熟悉的两种极端情况下的激发模式。普通空间集体激发(振动和转动)模式也已为人们清楚了解。除这些激发外, 通过对自旋空间的集体运动所引起的自旋(磁矩)取向的集体振荡(Gamow-Teller共振)、以及同位旋振荡这些新激发模式的分析, 可以了解二体相互作用由于第三个核子存在而产生的修正。

(1) 巨电性共振 巨共振是核多体系统的一般特性, 与核的细节性质无关。巨偶极共振(GDR)在40年代末被发现。它的激发能  $E = 23(C) - 14(\text{Pb}) \text{ MeV}$ , 共振宽度  $\Gamma = 3 - 7 \text{ MeV}$ , 寿命  $\tau = 10^{-21} \text{ s}$ 。它是一种集体性很强的运动模式, 表明在  $\gamma$  电场(伴随  $\gamma$  射线的振荡电场)中, 引起核中质子振荡, 而中子不变, 故产生电荷中心相对于质量中心的振动。70年代, 运用  $e^+$  核(Darmstadt)和  $P^+$  核(ORNL)非弹性散射, 发现了其它电多极共振现象。

巨四极共振(GQR)是电荷分布和质量

\* 国家自然科学基金与教委博士点基金资助的课题。

分布在长椭球和扁椭球之间的振动,是几乎所有核子都参与的集体运动。其  $E_c = 10 - 20$  MeV,  $\Gamma = 2 - 8$  MeV, 实验上用  $\alpha$  非弹散射激发 GQR 最为有效。

巨单极共振(GMR)是原子核的呼吸模式,它只在小角度才能与GQR分开(1977年, Texas,  $\alpha + x \rightarrow \alpha' + x'$ , 在  $3^\circ$  发现 GMR)。这是一个重要的激发模式,从中提取的频率  $\omega$  与核的压缩系数直接联系。实验与理论预期的结果是一致的(核物质的抗压缩性比普通物质大  $10^{22}$  倍)。

带电粒子激发几个 GR 模式,可用角分布的  $L$  特征分开。用重离子非弹散射可激发高阶  $L$  的巨共振。

在 GMR 和 GQR 中,质子和中子也可以反向运动。这种模式尚未很好研究过。

用  $\pi^+$  核电荷转移反应,可有选择地激发 GMR。用  $\pi$  做炮弹可以显示质子和中子在核激发中的不同作用,这是因为  $\pi^+ - p$  作用比  $\pi^+ - n$  作用强 10 倍;  $\pi^- - n$  较  $\pi^- - p$  作用强 10 倍。用  $\pi$  作炮弹,发现了轻核中纯质子激发和纯中子激发。

(2) 巨自旋共振 这是一种自旋和磁矩的集体运动模式。Indiana 大学用 100 - 200 MeV 的质子束改变核中核子的自旋和同位旋取向( $n \rightarrow p$ )、激发了纯粹的 Gamow-Teller 共振。G-T 激发的几率是计算几率的 50 - 75%, 这可能是由于夸克和  $\Delta$  共振态参与了这一过程。这一问题尚未解决。

Michigan 大学与 Orsay 合作,发现了核电荷保持不变的 G-T 激发模式。

(3) 核中的  $\Delta$  共振  $\Delta$  是重子的高能激发态,质量  $m_\Delta = 1.23$  GeV, 寿命  $\tau_\Delta$  极短,与核子  $m_N = 0.94$  GeV 相比较,这样大的质能,使得  $\Delta$  穿不过核的线度就衰变( $\Delta \rightarrow \pi +$  核子)。  $\Delta$  在核现象中虽扮演重要角色,但就  $\tau_\Delta$  而论,不能视为实际粒子。

实验表明,  $\pi$  (几百 MeV) + 核子(吸收  $\pi$ )  $\rightarrow \Delta$ , 即在原来核子处,出现  $\Delta$  - hole,  $\Delta$  - hole 系的动力学,研究  $\Delta$  - N 相互作用

以及  $m_\Delta$ 、 $\tau_\Delta$  在核介质中的改变。 $\Delta$  感受的平均场不如核子强,其中自旋有关的平均场与核子感受到的可以相比较。别的重子共振态在核中传播的问题,刚刚开始研究。

(4) 电子散射结果 由于作用清楚,用高能电子散射研究核结构可得出确切知识;改变  $\Delta p$  (电子转移给核的动量),可探测电荷、电流密度分布达  $10^{-13}$  cm 范围。质子、中子的磁矩,  $\pi^+$  流,均对电子与核的电磁作用有贡献。 $\Delta p$  小时,主要是电偶极跃迁;  $\Delta p$  大时,可研究高阶矩跃迁,在磁性高自旋态、极高能量的电子和极大的  $\Delta p$  时,可看到 N、P 中的点状夸克。e 的弹性散射,可测量核基态的电荷分布、核的大小和形状,还可研究核子轨道运动产生的电荷分布细节(要求能量分辨率达到 1/20000)。通过比较邻近核的电荷分布,可测出附加质子轨道电荷分布及外层核子引起的变形,实验测得的附加质子电荷分布的峰值较小,表明必须考虑壳模型外的因素。

通过后角弹散,可测得核内磁化密度分布,了解最后一个价核子的贡献,从而了解价核子的运动情况。

(5) IBM 互作用玻色子模型(IBM)的几何对称性可描述核的一些性质;动力学对称性则可描述核的另一一些性质。

偶偶核的能级和衰变,可用  $J=0, 2$  的核子对(Boson)的动力学对称性加以描述,把振动、转动和过渡区的低能核谱统一了起来,进而可望把集体模型与壳模型统一起来。

包括奇数核子后,IBM 推广为超对称性模型,但由于超对称性发生实质性的破坏,而不那么成功。现尚不知是由于模型本身的问题还是我们不善于组织实验数据以显示超对称性。即使存在超对称性,该区域的核谱仍值得深入研究,弄清奇  $A$  核与偶  $A$  核谱的联系及费米子与玻色子之间的联系。

## 2. 宏观核动力学

重离子碰撞涉及众多核子相互作用,影响核的形状、中质比和内部激发,可用来研究

宏观核性质及包括众多核子的协同运动现象。

通常将重离子碰撞划分为三个不同能区: 低能区( $< 20\text{MeV/u}$ ); 中能区( $20\text{MeV/u} - \text{GeV/u}$ ); 高能区( $> \text{GeV/u}$ )。

在重离子碰撞中, 出现了许多新的现象, 如大块物质的熔合、分裂和碎裂, 大的  $J$  转移及形成不稳定核素等。

低能重离子碰撞分类为: 弹性、擦边、深度非弹和熔合。熔合用于产生外来核素, 确定大的自旋值, 阐明裂变动力学机制。相对论性对头碰撞, 导致核的粉碎。

(1) 重离子系中的共振, 核分子态。  $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$  出现宽的不规则峰, 与满壳附近单粒子能级稀疏有关。  $^{18}\text{O} + ^{18}\text{O}$  出现光滑峰, 与价核子的密集能级有关。  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  核分子的  $\tau \sim 10^{-21} - 10^{-22}\text{s}$ , 与吸力和斥力的平衡有关。

(2) DIC(深度非弹) DIC 的碰撞参数为:  $b_c > b > b_c$ 。DIC 出现的新现象涉及不同的裂变机制, 但可控制。在 DIC 中, 极大的能量损失表明存在激烈的碰撞, 而记忆效应(碎片接近碰撞核)表明碰撞比较温和, 形成了矛盾的碰撞机制。

用集体变量描述 DIC 的输运模型, 涉及集体变量的动力学与单粒子运动的统计性之间的交织。

趋于平衡的过程需要趋动机制。不同趋动机制导致不同的趋向平衡的速率:  $Z/N$  比最快, 能量耗散次之, 再次是角动量耗散, 质量趋向平衡最慢(50 倍慢于  $Z/N$  速率)。

用转动角度测量反应时间, 可追踪 DIC 时间进程。

描述 DIC 更基本的理论是 TDHF, 其简化形式是 Window formula。

现遗留的问题是额外能量耗散的机制是什么? 如何把 TDHF 推广到高能? 角动量耗散和经粒子瞬息发射机制是什么?

介于 DIC 与熔合之间的碰撞, 可用来研究不稳定核系统的长期动力学行为。

### 3. 原子核多体问题

核物理学的基本目标是建立核结构和核反应的微观理论。其困难是核力的细节不清楚以及多体问题的数学困难。

核多体理论的进展表明: 传统核力不能解释核性质的细节, 必须考虑以下修正: 多体力, 相对论效应, 虚介子效应, 核子的夸克-胶子结构, .....。现在需要有一个包括上述修正的原子核多体理论。

(1) 三体系统与无限核物质 三体系统与无限核物质是检验核多体理论的两个极端情况。  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$  三体系统, 已知核力后, 可精确计算结合能、电荷、磁矩、质量分布及各种反应截面。研究表明, 与实验相比较, 二体核力给出的三体系统的结合能小  $1 - 2\text{MeV}$ , 核半径大 9%。无限核物质在自然界中只存在于中子星, 但可以从真实核的测量来推断其特性。其中特别感兴趣的是核物质的密度  $\rho = 0.161/\text{fm}^3$ , 平均结合能  $B = 15.8\text{MeV}$ 。

多体数学方法的进步, 消除了过去计算方法的不一致性, 但计算结果与实验值的分歧仍然存在。这需发展多体理论来消除这一分歧。

(2) 有限核的性质 有限核理论处理的重要进展是密度有关的 HF(DDHF) 方法。它通过密度有关的等效核力, 考虑核介质对  $N-N$  核力的影响。研究表明, 短程斥力十分重要, 需加可调节的经验项。

在实验方面, 用电子散射可以测量所有元素的电荷分布细节, 了解核子运动的壳结构。实验与 DDHF 符合很好, 但存在系统分歧。用质子-核散射, 可测出核物质分布, 补充电子散射数据。总的说来, DDHF 可以再现核物质分布, 能更精确计算相邻核的核物质分布之差。电子散射可测量单个质子、中子的分布, DDHF 再现了这些分布。

分歧来自相对论性修正及介子交换时对电磁性质的修正。

(3) 中能等效  $N-N$  相互作用 多体理论必须估计核介质对  $N-N$  核力的影响(包

括泡利阻塞效应)。

决定 N-N 核力的因素很多。运用相关的实验,可以研究其中一个因素,快质子的电荷交换反应就是这类实验。它把靶核中的一个中子变成一个质子,这类反应涉及带电  $\pi$  介子交换,对核内  $\pi$  介子场很灵敏。通过选择靶核、入射能量、反应类型,可使剩余核处于某确定的状态,从而使 N-N 作用中某个因素起主要作用。

常使用 100-400MeV 的中能质子束,因在此能区 N-N 作用最弱,多体力修正也较小,入射质子只与靶中一个核子相互作用。而这个核子进一步的情况还可通过电子非弹或  $\beta$  衰变实验来了解。

相互补充的质子非弹和电子非弹的能量分开率(0.1%)实验,提供了对核子-原子核相互作用的定量的微观了解。核介子密度,对 N-N 核力的自旋、同位旋无关的部分,有特别重要的影响。对于与自旋有关的部分,理论与实验有小的分歧,但分歧的原因与核理论缺点间的关系尚不清楚。

N-N 相互作用中自旋有关和同位旋有关分量,在  $P + {}^{14}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + n$  反应中,不仅核子的同位旋反转,且自旋也反转了(G-T 反应), ${}^{14}\text{N}$  处于较高的激发态。当  $E_p$  从 60MeV 增加到 200MeV 时,同位旋反转反应的重要性减小,而自旋反转反应的重要性增加。这表明 N-N 力的自旋有关分量和同位旋有关分量,具有不同的能量依赖关系。这与自由 N-N 力类似。但由于介质影响  $\pi$  交换过程,自由 N-N 力不能解释核内 N-N 相互作用。

中能核子核反应可以作为选择性过滤器,用于研究核内 N-N 力的各种成分,且这一技术还可以推广应用。

(4) 扩展传统的多体理论 传统多体理论的特点是:核子无结构;二体核力;非相对论量子理论。这导致了理论计算与实验数据的分歧,急需运用强作用的新知识加以改进。

改进的主要方向,是从量子核子动力学 QND 向量子强子动力学 QHD 发展。在核力中,考虑介子( $\pi$ 、 $\Sigma$ 、 $\rho$ 、 $\Omega$  等)交换;对核子,应考虑  $\Delta$  共振,把核子推广成重子及其共振态。由于  $\Delta$  态可与第三个核子作用,就导致了三体力,可以消除一些分歧,例如  ${}^3\text{He}$  电荷分布  $\rho_c$  的中心下陷问题。

进一步的发展是考虑强作用的量子场论,自旋相互作用会自然出现,可预言核子质量的改变,对排斥力的来源有显著影响。这是长远目标,即从 QCD 给出 QHD 及 QND。

当前,介子-重子场论( $\pi$ 、 $\rho$ 、 $\Sigma$ 、 $\Omega$ 、 $p$ 、 $n$ 、 $\Delta$ )已在结构和反应两方面取得相当的成功。核多体理论的中心课题是:① 夸克和色力对核多体系统的贡献;② QCD 与 QHD 的关系;③ 完全的 QCD 核多体理论。也就是说,要将  $QND \rightleftharpoons QHD \rightleftharpoons QCD$  三个方面在核系统中的关系,相互促进发展等,综合加以考虑。

## 二、原子核中的基本力

核子由夸克组成,核子间的核力由介子传递。但通常介子、夸克自由度被隐藏了起来,只有少数实验才显示它们的存在。这类类似于化学中满壳层内的电子,虽影响化学键力,但通常被隐藏了起来。

核的电磁性质具有丰富的信息,因为许多基本组元是带电的。测量变化中核的对称性破坏,也可以得到许多信息,因对称性破坏可追踪到基本粒子。这节研究核的性质与基本粒子及其相互作用的关系。

### 1. 原子核的非核子组元

在非核子组元中, $\pi$  的作用最显著,因为它最轻。长程核力由虚  $\pi$  交换产生,带电  $\pi$  流产生电磁效应。用高能核子散射可研究核中的  $\pi$  效应。例如核子擦边碰撞可研究  $\pi$  云的掠射效应。 $\pi$  的散射与吸收,可提供强子相互作用知识,表明夸克物理学中体现的对称性适用于介质中的  $\pi$  介子。

核子和  $\pi$  本身也是复合粒子,由夸克组成,是一种多体夸克态,加之其它激发态,其总体构成重子或强子族。

在能区或非 N-N 相互作用中可观测核的非核子组元。用高能散射、仔细考查核中非核子组元的产生、直接研究外来核子的相互作用等方法,来研究非核子效应。

探测核中小结构,要用高能粒子束(波长足够短),电子是最好的选择之一。

在核中渗入非核子重子,研究核的响应。如用  $\Lambda$ 、 $\Sigma$  代替核子,不改变其轨道,但相互作用改变,可提取这方面的信息。 $\Lambda$ 、 $\Sigma$  含奇异数,是超子。含  $\Lambda$ 、 $\Sigma$  的核叫超核。

运用中能  $P + \bar{P}$  碰撞,可检验介子交换理论和 QCD。

#### (1) 用轻子探测核的夸克结构

轻子  $e$ 、 $\mu$ 、 $\tau$  及中微子,只有弱电力 (electroweak),不会显著改变核子在核内的运动状态,可以探测到原子核的自然状态,甚至散射体的性质。过去 30 年,高能电子散射已提供了关于核的电荷分布、磁分布和介子对电荷分布的贡献,中子、中性介子对磁分布贡献等方面的大量知识。

$^3\text{He}$  的实验结果,不能用两个质子和一个中子的电磁性质来解释,必须考虑介子( $\pi$ 、 $\rho$ ) 的交换效应。

轻子还用来研究强子(量子数和介子)的夸克结构。夸克通过胶子产生强的色作用,其强度在靠近时为零,而远离时愈来愈强。这就称为长距离下夸克禁闭、短距离下渐近自由。反映这一特点的强子的夸克模型,有袋模型和弦模型。

标准夸克模型要求夸克的自旋为  $1/2$ , 电荷为分数 ( $s, d: -e/3; u: \frac{2}{3}e$ )。比较  $e$ 、 $\mu$  的小角散射与大角散射,可消去电效应只留下磁效应。在适当能量下,夸克的磁效应与  $S=1/2$  的点粒子的结果一致。夸克的分数电荷要基于夸克禁闭才能解释。电子对  $H$  和  $D$  (Stanford) 以及氟的碳氢化物 (CERN in Geneva) 的散射结果,与夸克具有  $-1/3(d, s)$ 、

$2/3(u)$  分数电荷一致。总之,轻子散射实验支持了夸克模型和原子核的多夸克禁闭态。核内核子紧密相靠,可以把几个夸克袋子连在一起,形成多夸克禁闭态(大的夸克袋)。 $\mu + D$  与  $\mu + \text{Fe}$  散射截面比值显示出 EMC 效应 (CERN): Fe 中的夸克分布不同于自由核子中的分布,核内夸克禁闭弱一些。对此有几种解释: ① 核子因相互作用膨胀(袋变大); ② 夸克渗透; ③ 虚  $\pi$  产生额外夸克。

(2) 超核物理学 核介质强烈改变粒子的性质(如中子),嵌入核内的粒子也会改变核的性质。把超子植入核内形成超核。超核物理学集中研究  $\Lambda$ -核相互作用。 $\Lambda$  最接近核子,其  $Q=0, M_\Lambda/M_N=1.2$ 。 $\Lambda$ -N 作用较 N-N 作用稍弱一点。

产生  $\Lambda$  超核的方法:  $\kappa^- + N \rightarrow \Lambda + \pi^-$ 。现已生成二十多个不同  $\Lambda$  超核(主要是轻核,直到 O)。从测量  $\Lambda$  对基态核的结合能,可知: ①  $V_{\Lambda N}(S \text{ 无关}) = \frac{2}{3} V_{NN}(S \text{ 无关})$ ; ②  $V_{\Lambda N}(S \text{ 有关})$  更弱一些。 $\Lambda$  超核激发态能级研究正在进行。

$\Sigma$  超核的研究规模小些 (CERN, Brook Haven)。但发现奇特现象:  $\Sigma$  衰变成  $\Lambda$  的寿命很短,却有长寿命的  $\Sigma$  替换态! 尚不清楚是由于轻核具有禁止  $\Sigma$  衰变的机制还是核物质的一般性质。

(3) 低能量子色动力学 在高能渐近自由区, QCD 计算与实验符合很好。在低能、大距离时,作用强度很大,计算困难。目前采用的是点阵规范理论,急需实验数据来检验。最好的实验是  $P(udu) + \bar{P}(\bar{u}\bar{d}\bar{u}) \rightarrow \Lambda(uds) + \bar{\Lambda}(\bar{u}\bar{d}\bar{s})$  (CERN) 和  $P(udu) + \kappa$ 。

#### 2. 用核来研究基本对称性

许多极重要的物理定律以守恒律和对称性的形式表现出来,如  $Q$ 、 $E$ 、 $P$ 、 $J$  守恒等。基本力在极高能量时所具很高的对称性,在较低能量下破坏,从而使原子核成为研究基本力及对称性(及破坏)的极好实验室。

1964 年,在  $\kappa^0 \rightarrow \beta^\pm$  衰变中发现时间反

演守恒 T 破坏(两种衰变比为 1.0067 而不是 1)。弱作用宇称  $\pi$  不守恒的宇宙学含义表明,物质多于反物质,辐射多于物质。这就把核物理与宇宙学联系起来,把最小与最大的东西联系起来。

人们正努力实现自然力的大统一,核物理能提供某些暗示。

弱电理论+QCD = 标准模型。它仍不完全,表现在:①不能解释  $\pi$ 、T 破坏;②不能统一引力和弱电力;③不能预先说明电磁力和弱力相对强度的差异。大统一理论(GUT)应能说明所有自然力、对称性及其破缺。

(1) $\beta$  衰变中的右旋玻色子 左旋中微子必导致  $\pi$  破坏,若假定  $W^\pm$  左旋, $Z^0$  一部分左旋,自动得中微子左旋。别的理论假定  $W^\pm$ 、 $Z^0$  有左、右旋分量,但右旋分量较左旋分量占支配地位,如右旋 Boson 存在,应有大的物理效应在  $\mu$  和  ${}^{10}\text{Ne}$  核衰变中表现出来。

(2)中微子的质量 标准模型认为  $m_\nu=0$ ,GUT 允许  $m_\nu=10^{-8}-1\text{eV}$ 。 $m_\nu$  关系到  $\nu$  的手征性。其宇宙学问题是: $m_\nu \neq 0$ ,宇宙将失去质量。要解释宇宙现在的膨胀速度,要求  $m_\nu < 30\text{eV}$ 。1980 年,苏联人从  ${}^3\text{H} \rightarrow \beta^- + \bar{\nu} + {}^3\text{He}$  的  $\beta^-$  能谱定出  $m_{\nu_e} \sim 15-50\text{eV}$ ;1987 年 2 月,超新星爆发给出  $m_\nu \sim 7\text{eV}$ 。

(3)中微子振荡 标准模型要求三类轻子  $e$ 、 $\mu$ 、 $\tau$  ( $\nu_e$ 、 $\nu_\mu$ 、 $\nu_\tau$ ) 数分别守恒;中微子振荡则意味看不分别守恒而可相互转化。GUT 允许三类轻子数改变, $\nu_e$  向  $\nu_\mu$  或  $\nu_\tau$  转化。轻子数的变化像量子拍振动的消涨一样,其变化率依赖轻子质量差。 $\Delta m$  很小意味  $\nu$  振荡很慢。一般反应堆中强  $\nu_e$  流或加速器产生  $\nu_\mu$  流,飞行长度  $\sim 46\text{m}$ 。目前尚未观察到  $\nu$  振荡。太阳产生的  $\nu$  飞行了  $1.5 \times 10^8\text{km}$ ,实验值是理论值的 1/4,有人试图用  $\nu$  振荡来解释。由于  $\nu$  探测器仅对某种能量  $\nu_e$  灵敏,实验误差很大。

(4)双  $\beta$  衰变 从质能守恒可预言双  $\beta$  衰变核的存在: ${}^{82}\text{Se} \rightarrow \text{Kr} + 2\beta^- + 2\bar{\nu}$ ,  ${}^{130}\text{Te} \rightarrow \text{Xe} + 2\beta^- + 2\bar{\nu}$ 。由于过程涉及两个电子及  $2\bar{\nu}$ ,几率很小( $\tau \sim 10^{20}-10^{25}\text{Y}$ )。

若双  $\beta$  衰变不发射反中微子,则几率大很多,但破坏轻子数守恒律。然而,两步过程也能实现无中微子的双  $\beta$  衰变:

$$x \rightarrow \beta^- + \bar{\nu} + Y \quad \bar{\nu} + Y \rightarrow \beta^- + Z$$

这要虚中微子是部分右旋的(部分左旋的),即破坏了中微子的手征性。

(5)核中宇称破坏 夸克通过交换胶子参与强作用,保持宇称守恒;交换  $W^\pm$ 、 $Z^0$  参与弱作用,破坏宇称守恒。交换  $W^\pm$  的一对核子,同位旋改变  $\Delta T=0,2$ ;交换  $Z^0$  的一对核子, $\Delta T=0,1,2$ 。

适当选择核可以区分上述两种弱作用分量。 ${}^{19}\text{F}$ 、 ${}^{20}\text{Ne}$  相同 J 不同  $\pi$  的能级相距很近,有利于弱作用把两种宇称混合起来。 ${}^{19}\text{F}$  观测到而  ${}^{20}\text{Ne}$  未观测到宇称混合,对前者,是带电和中性两种弱作用分量的贡献相加;后者,是相抵消。实验结论是:①核子之间存在  $Z^0$  交换;② u、d 夸克质量接近理论估计值。

### 三、极端条件下的原子核

在中高能重离子反应中,产生了高温、高密度、新元素、外来同位素、高激发态和大变形的原子核态。在相对论性碰撞中,发现一些反常现象,不能用现有理论解释。在极高温度和密度下,核物质可能发生相变,出现夸克-胶子等离子体。

#### 1. 高温度和高密度下的原子核

为了解超新星和中子星,需在实验室产生高温、高密度的核物质。这要用相对论性重离子碰撞,才能在较大的体积内积存大量能量,达到高温和高密度。

1974 年,LBL 的 Bevalac 投入运转,可把重似 Fe 的离子加速到  $2.1\text{GeV/u}$ ,从而开始了相对论性重离子物理学。1982 年,进而



加速所有重离子,对U可达1GeV/u。现在,BNL可把 $^{16}\text{O}$ 、 $^{32}\text{S}$ 和 $^{197}\text{Au}$ 加速到15GeV/u,CERN可把 $^{16}\text{O}$ 、 $^{32}\text{S}$ 加速到60GeV/u。拟在BNL建造的RHIC,可达100GeV/u的能量。在未来15年,相对论重离子物理学将会有重大进展。

### (1) 高核温度

高能对心重离子碰撞,在 $\sim 10^{-22}\text{s}$ 内,数百个核子发生碰撞,产生极高温度的火球。这可用核热动力学描述。所发射的数百个粒子可用 $4\pi$ 探测器记录(Plastic ball, GSI)。0.4GeV/u的Ca+Ca碰撞尚未达到平衡,而Nb+Nb近乎平衡。这表明,为达平衡需尽可能多的核子参与碰撞。1-2GeV/u的中心碰撞可产生 $T=100\text{MeV}$ 高温,测 $\kappa$ 、 $\pi$ 的动量可知温度。测量表明 $T_\kappa > T_\rho > T_\pi$ ,且通常 $\kappa$ 先产生, $\pi$ 后产生。不同粒子可作为核时钟的指针。

(2) 高核密度 测密度的困难在于:① 对非中心碰撞,存在旁观区与碰撞区,有很大的密度差;② 碰撞区的体积大小不知道。借用天文学测银河系大小的强度干涉测量术(intensity interferometry),可作间接测量。从产生的全同粒子(如 $\pi$ )的关联确定源的时空大小,可达2-4fm的精度。计算表明(INC(核内级联模型)与FDM(流动动力学模型)的结果一致),在1-2GeV/u时,Ar+Ar中心碰撞使 $\rho = 4\rho_{\text{normal}}$ ,外推到重核, $\rho = 5-6\rho_{\text{normal}}$ 。

(3) 核物态方程 知道 $T$ 、 $\rho$ ,可研究物态方程。最近0.36-1.8GeV/u能量的Ar+Ar研究,可讨论很高 $T$ 、 $\rho$ 时的物态方程。测得较低 $\pi$ 产额表明,大部分动能用于核的压缩(而非产生 $\pi$ )。运用INC计算,可提取 $\rho = 2-4\rho_{\text{normal}}$ 时的物态方程的重要知识:① 这可把FDM与BUU间的间隙连接起来;② 检验一些理论想法,如密度异构(isomers), $\pi$ 冷凝(Condensates);③ 可计算粘滞系数与导热率等宏观量。

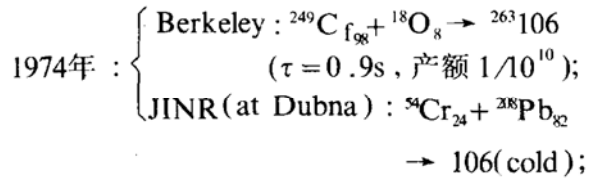
对轻系统,如Ar+Ar,压缩随 $E_\perp$ 平滑变化,没有发现不连续性或新的核态和相变。

对重系统,在更高能量下,可能发生热强子物质 $\rightarrow$ 夸克-胶子等离子体的相变。

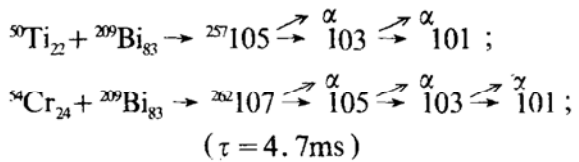
## 2. 最重的元素

### (1) 新的超铀元素的发现

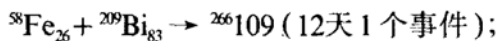
1961年, $z=103$ ;



1981年,GSI(西德)合成105及107:



1982年8月,GSI合成109



1984年3月,GSI: $Z=108$ ,三个事件。

(2) 寻找超重元素 60年代中期,理论预言超重岛的存在( $Z=114, N=184$ )。用 $^{48}\text{Ca}_{20} + ^{248}\text{Cm}_{96}$ 没有发现超重元素。有希望的反应是 $^{48}\text{Ca}_{20} + ^{254}\text{Es}_{99} \rightarrow$ 超重核。为什么未发现超重元素——是方法不好还是根本不存在?

### 3. 高度不稳定的核

核结构理论预言存在8000种核素,迄今只发现2700种,其中300种是稳定的,其余2400种为放射性核素,已通过加速器和反应堆人工合成,大约每年发现30~40种。

对于大部分外来核,可研究核基态性质与 $N/Z$ 比的关系。研究外来核能谱可检验核模型,研究新的衰变方式。

(1) 外来放射性 早已知道 $\beta$ 延迟粒子发射。现可观测 $\beta$ 延迟的双中子、三中子及双质子发射。 $\beta$ 延迟裂变是另一辐射性的外来形式。这种衰变模式可把裂变扩展到远离 $\beta$ 稳定线区域。而该区域裂变位垒的知识对天体元素合成的了解十分重要。

在宇宙中所发现的令人惊异的衰变  
(下转21页)

## 七、结 语

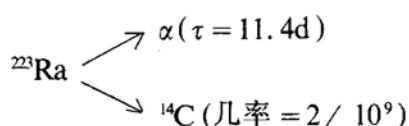
本文评述了 NMF 研究的进展及有希望的研究线。OP 的实部和虚部被 DR 联系,利用 DR 分析实验结果,特别是研究费米面效应取得了可喜的进展。DR 应用于 NMF 的研究,使之有可能利用束缚态及散射态两方面的信息确定它,并很好地描述核结构和核反应现象。NMF 的统一是“传统”核物理在近年取得的一个重要进展。当然,目前的研究也还有不少问题。例如,有关平均场的信息目前只在有限能区,而 DR 式的积分限是  $(-\infty, \infty)$ , 这给 DR 的应用带来不确定性。OP 是否满足(8)式及其应用也值得探讨,对非(邻近)满壳核推广的可能性及在实际核数据计算中的应用,……: 都有待进一步研究。

### 参考文献

[1] M. Bauer et al., J.Phys. G8,525 (1982)  
 [2] G. E. Brown et al., Nucl. Phys., A330,290 (1979)  
 [3] C. Mahaux et al., Phys. Lett., B100,285 (1981)

[4] B. C. Sinha et al., Phys. Lett., B31,273 (1970);  
 Ibid B35,391(1971)  
 [5] R. W. Finlay et al., Phys. Lett., 155B, 313 (1985),  
 J. R. M. Annand et al., Nucl. Phys., A443,249 (1985)  
 [6] P. G. Young, Proc. of Specialists Meeting on Use of  
 Optical Model for Calculations of Neutron Cross Sec-  
 tion Below 20MeV, Paris, 1985, P. 125.  
 Su Zongdi, JNDC (CPR) — 013/LI, INT (88) —  
 1, 1988  
 [7] C. Mahaux et al., Nucl. Phys., A378, 205 (1982)  
 [8] I. Ahmad et al., J. Phys., G2, L157 (1976)  
 [9] J. P. Delaroche et al., Phys. Lett., B203, 4 (1988)  
 [10] A. B. Smilh et al., Nucl. Phys., A455, 344 (1986)  
 Phys. Rev., C34, 1599 (1986); Phys. Rev., C36, 1298  
 (1987)  
 [11] C. Mahaux et al., Phys. Rev. Lett., 57, 3015 (1986);  
 Nucl. Phys., A458, 25 (1986); Ibid A460, 446 (1986);  
 Ibid A468, 193 (1987); Phys. Rev., C36, 1777 (1987);  
 Nucl. Phys., A484, 205 (1988); Ibid A516 (1990)  
 [12] C. H. Johnson et al., Phys. Rev., C36, 2252 (1987)  
 [13] Su Zongdi et al., J. Phys., G14, 1485 (1988)  
 [14] J. P. Delaroche et al., Phys. Lett., B203, 4 (1988);  
 Ibid B218, 26 (1988); W. Tornow et al., Phys. Rev.,  
 C42, 693 (1990).  
 [15] R. W. Finlay et al., Phys. Rev., C42, 1013 (1990)

(上接 7 页)



也应在自然界中存在,因为  ${}^{235}\text{U}$  衰变会产生  ${}^{223}\text{Ra}$ 。

(2) 长的同位素序列 改变 N 或 Z, 可研究核性质变化, 检验核模型, 例如改变 N, 可观察核形状由球形  $\rightarrow$  变形的变化。对极不稳定核, 可用原子束或激光测其自旋、磁矩和寿命, 且十分精确。

(3) 极高自旋的原子核 重离子反应产生高自旋态原子核, 通过向基态退激, 可了解

高自旋态下各种力的竞争, 离心力与柯氏力对结构的影响。离心力使核形变, 到一定程度, 发生裂变, 可了解最大 J 值; 柯氏力使个别核子自旋沿核转动轴排列(类似回转罗盘沿地球转动轴排列), 使集体转动减弱, 而离心力使集体转动稳定, 两者作用相反。

回弯现象是内部排列使转动惯量减小,  $\omega$  增加。核震、地震、星震的原因不同, 但却有相似性。核震与核内核子的成对效应有关, 震级极大。星震是内部涡流造成, 但了解不多。这些表现了物理定律的普适性及推广我们对事物的认识远远超越一般经验的巨大威力。