

核物理的发展现状与新挑战

杨 立 铭

(北京大学物理系)

核物理的发展正进入一个新的阶段,它所面临的物质结构已深入到下一个层次,它的研究领域已有了极大的扩充。核物理是以研究强作用物质结构为其主要任务。由于它涉及到各类基本相互作用,它的研究也同时起着检验与发展基本相互作用理论的作用。原子核在三个不同层次上(核子、强子、夸克-胶子)的运动规律适用于不同的物理条件。它们之间的关系更多的是互相补充而不是互相代替。本文还扼要地介绍了国内近年来核物理实验条件的改进以及部分实验和理论的研究成果。

一、核物理的基本任务与研究

核物理在过去一个时期曾被部分人认为已进入一个低潮,它所面临的重要问题已基本解决。现实情况远不是这样。近来的发展已使核物理面目一新。

核物理的基本任务是要弄清原子核这一物质结构层次的物理性质。近年来这一领域的研究有了很大变化。这主要表现在它所研究的物质的结构层次在不断深化,以及它的研究领域在迅速扩充。

核物理的研究从发展上看可以分为三个层次。首先,从30年代以来,人们已确认原子核是由质子和中子组成的。50年代以来,由于实验数据的积累,对核内核子的运动规律已经有了较好的掌握,提出了壳模型与集体模型,对原子核低激发态的性质有了较好的理解。核子间相互作用是由唯象势表示,它主要是一种由介子传递的短程相互作用力。在低能区,介子自由度在当时尚未见明显表现。几十年来原子核物理是以非相对论量子力学为基础,将原子核看成是核子多体系,并结合大量实验来进行研究的,这些研究取得很大成就。60年代以来,人们逐渐认识到原子核内还具有更多的自由度,从此开始了对原子核的第二层次的研究。原子核被看成是一个由多种强子(重子与介子)组成的多体系,并用相对论场论方法进行理论研究。

这些新自由度是在中、高能电子,光子,质子和次级 π 介子等与原子核碰撞中显示出来的。J. D. Walecka 等人逐渐发展起一套处理这类多体系的理论,这是量子电动力学的一种推广。以各类介子 $\pi, \sigma, \rho, \omega, \dots$ 来传递重子间相互作用的定域场论,称为量子强子动力学(QHD)^[1]。随着弹核能量近进一步提高,发现核子和介子内部还有新的自由度,它们都是复合粒子。考虑到核子和介子内部结构,亦即必须从夸克-胶子这些结构层次上来研究原子核的性质,这就进入第三个层次的原子核研究。由于电弱作用在原子核动力学中起着重要的作用,目前对原子核的研究要求建立在所谓“标准模型”的基础上。标准模型包括统一电弱作用理论模型以及强作用基本理论模型即量子色电动力学(QCD),前者是以光子 γ 及中间玻色子 W^{\pm}, Z^0 来传递电弱相互作用,后者则是以带色的胶子来传递夸克间强相互作用。这个模型确实取得了很大的成就,但还有待于进一步考验和发展。原子核正好是考验与发展这一模型的独特场所。

以上是从物质结构的不同层次上进行分析,可以看出核物理研究是在逐步深入。与此同时,核物理的研究领域也得到很大的扩充。这可以从核物质的相图上看出来(见图1)。传统核物理只局限在零温下 $\rho = \rho_0$ (ρ_0 为正常核密度)这个小区域里。随着弹核能量的提高及类型的扩充,现已将核物理的研究扩展到相图上

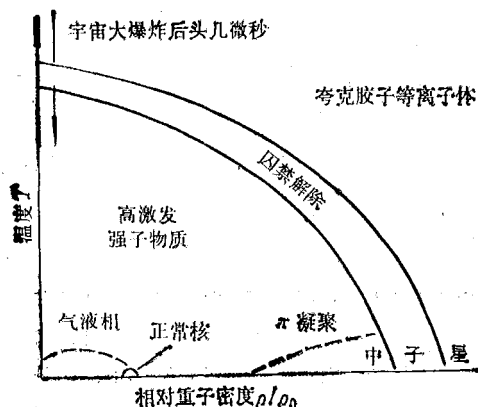


图1 核物质的相图

更大的区域中去。有些区域的研究可借助于天体,有些则可通过高能重粒子碰撞来进行研究。即使在 $T = 0$ 、 $\rho = \rho_0$ 附近,原子核研究也有很大的扩充。例如,超铀核及超重核(?), $Z = 105, 106, 107, 108, 109, \dots (114?)$; 远离 β 稳定区核 (${}^4\text{Li}$, ${}^{20}\text{F}$, ${}^{24}\text{Na} \dots$); 高自旋态; 超核 (奇异数 $\neq 0$, 如 ${}^9\text{Be}$, ${}^8\text{Si}$, ${}^{20}\text{Y} \dots$) 等。

由此可见,当代的原子核研究领域要比以前广阔得多,并面临着许多新的挑战;核物理学界正以迫切的心情期待着激动人心的新发现的到来。

二、核物理近年来若干重要进展

1. 核态及激发态模式

通常认为核内存在着单粒子运动,但这只是零级近似,粒子间的关联是很重要的。近来发现,在假定核内存在角动量为 0 与 2 的关联对的基础上,可以解释大量低激发态的性质^[2]。核内还存在类 α 粒子关联,它可以形成很重要的子结构。

就激发模式来讲,很多低激发态可以归结为价核子激发,但在满壳核附近,夸壳激发是很重要的。在低能区还发现一种剪刀式振动 (scissor mode), 即轴对称变形的中子、质子分布在重合位置附近振动,能量只有 3 MeV 左右^[3]。核内还存在所谓巨共振,它的振动频率 ($\hbar\omega \sim$ 二十几 MeV—十几 MeV) 随着核子数 A 的改变有缓慢的变化,但不随着价壳的填充

发生明显变化。核的这种振动受到的阻尼很大,宽度有 3—7 MeV,寿命只有约 10^{-21} s。已发现了很多种这样的振动,可按同位旋标量(质子与中子同相振动)与同位旋矢量来分类,还可以用角动量来分类, $\lambda = 0, 1, 2, 3, \dots$ 。最近还发现自旋同位旋巨共振,其中 $\lambda = 0$ 部分即所谓 Gamow-Teller 振动。这些振动虽然可以在壳模型基础上得到初步解释,但也发现有明显差异。例如上述 GT 跃迁强度有明显削弱,这可能与核内亚核子自由度有关。

近来在重粒子反应中还发现核中存在着高达 $60\hbar$ 的高自旋态 (${}^{152}\text{Dy}$), 并且还发现在原子核的自旋由低向高的过渡中存在着一种相变,原子核的转动惯量突然增大,它与核内存在的关联对在高速转动下受到破坏有关。

2. 核内存在亚核子自由度的实验证据

核内亚自由度在基态性质上也有所表现。例如原子核的磁矩,按简单的壳模型(即 Schmidt 模型)预言,理论值与实验值有一定差距。Arima 等人提出应在第一层次范围内改进计算,然后再考虑其它自由度。他认真计算原子核核心极化的贡献,仍不能与实验相符。只有考虑了核内介子流的贡献后才能与实验有较好符合^[4]。热中子被质子的辐射俘获是另一个例子,其俘获截面 $\sigma_{\text{实验}} = 334.2 + 0.5 \text{ mb}$,而在核子自由度范围内最好的理论值只有 302.5 mb。这 10% 的误差只能来自新的自由度。

高能电子(或其它轻子)与核子的散射是研究原子核结构最有利的工具之一^[5]。图 2 给出了在一定动量转移 q 下,截面随能量转移 ω 增加而变化的情况,可以看出,在不同能区有一些共振结构。在巨共振以上, $\omega \approx q^2/2M$ (M 为核子质量)处有一个准弹性散射峰,能量转移增高到 $\omega \approx 300 \text{ MeV}$ 处又有一个峰,相应于核子激发态 Δ 产生,其自旋与同位旋都为 $3/2$, Δ 衰变成核子并放出一个 π 介子。如将此峰与电子和质子碰撞中产生的相应的峰对比,发现两者峰值有差异,说明在核内的 Δ 与自由的 Δ 在结构上可能已有所改变。这是一个有趣的但尚未弄清的问题。 ω 再增加时,还会有更多的核子

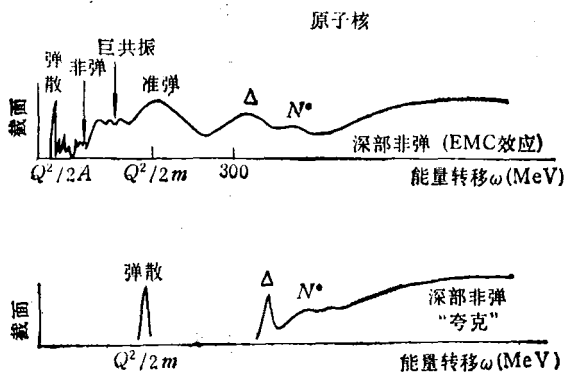


图2 电子与原子核及质子的散射截面示意图

激发态出现,但当 ω 增加到1GeV以上,虚光子波长 $\ll 1\text{fm}$,又出现了新的截面行为.虚光子开始能分辨核子内的“点”粒子,电子好象被存在于核内的“点”粒子所散射,截面出现一定的度标行为.进一步分析发现,这些“点”粒子所携带的分数电荷与夸克模型所给出的相符,并且从总角动量分析来看,带电点粒子并未携带所有的角动量,另外一部分(大约一半左右)是由一种不带电的“点”粒子所携带.人们认为这些“点”粒子就是胶子.最近通过极化电子束与极化靶的散射实验,进一步发现核子的自旋也有一部分由胶子携带.

3. 原子核作为研究基本相互作用的实验室

原子核内有各种相互作用在起作用.研究原子核结构与反应对检验与探索各种相互作用的特性(包括各类对称性)能起重要作用.核环境对置身于其中的强子能起很大的影响.例如,自由中子的寿命只有 $17 \pm 0.4\text{min}$,但在核内中子是稳定的;有的重子如 Δ ,可以植入原子核内代替一个中子,它在核内的寿命有 10^{-10}s ,足够用来研究 Δ -N相互作用,其中与自旋无关部分约为N-N相互作用的 $2/3$,而与自旋相关部分则要小得多.

原子核对研究由弱相互作用引起的对称性破坏很有用.例如关于衰变的宇称不守恒问题,最早就是在原子核 ^{60}Co 中得到验证的.按标准模型,核子是由夸克组成的,夸克间的强相互作用是宇称守恒的,但夸克也参与弱作用.夸克模型预言,交换 W^\pm 粒子能使核力中加进一

项小的宇称不守恒的弱作用力, $\Delta T = 0, 2$;如交换的 Z^0 粒子,则 $\Delta T = 0, 1, 2$.原子核中有大量核态具有一定宇称与同位旋,通过适当选择核态,可以区别两类不同的弱作用力. ^{19}F 与 ^{21}Ne 各有一对 J 相同能级非常接近的态,它们的同位旋允许两类弱作用存在.实验测得 ^{19}F 中的这对态有宇称相混,这是由于两类弱作用相互加强,但在 ^{21}Ne 中这对态却没有测到,这是由于两类弱作用正好相消^[6].

4. 处于极端情况下的原子核

在高能重离子(每核子能量1GeV以上)对心碰撞中,温度可达100MeV或10K(比太阳中心温度要热6万倍),大部分动量用来产生 K, π 等介子,在Nb-Nb的对碰撞中,质心系角分布接近于各向同性,可见已接近平衡.由这些粒子的动量估计温度,发现由 K 介子估计出的温度大于由 π 介子估计出的温度.这是由于 K 介子是在碰撞较早期放出,而 π 介子则在较晚期放出.后期的膨胀使温度降低了.

通过测量放出的质子对或 π 介子对的相干效应,可以定出碰撞中形成的火球的大小.例如 $\text{Ar} + \text{Ar}$,每个核子的能量约1GeV,测得的火球大小是2—4fm,并估计出平均密度约为正常密度的四倍(这些估计还很粗,可能相差两倍).在高温高密度下核物质的物态方程具有重要意义.从 $\text{Ar} + \text{Ar}$ (0.36—1.8GeV/N)实验中发现 π 产额相当低,这可能是由于相当一部分动量 Q 转换成为压缩能.与理论计算相配合能得出一个密度为 $2-4\rho_0$ 附近的物态方程.

由重离子反应能产生大量高度不稳定核(可能有8000种).已产生出了约2700种,其中300种是稳定的,其余是不稳定的.这些高度不稳定核能提供新的异常的衰变模式的信息:如 $^8\text{Li}(\tau = 8.7\text{ms})$ 产生 β 延迟的 $2n$ 衰变, $^{28}\text{Al}(\tau = 70\text{ms})$ 产生延迟的 $2p$ 衰变;也有基态发射质子的,如 $^{147}\text{Tm}, ^{151}\text{Lu}$.另外还发现Ra虽然通常是通过发射 α 进行衰变,但有时也通过发射 ^{14}C 进行衰变.这些奇异性质对于检验核模型大有帮助.当重离子反应中产生的高自旋态退激发时,自旋逐步减小,大约在

$J=12-14\hbar$ 时就出现“核振”(nuclear quake), 转动周期突然变小, 这实际上是一种相变。对关联在转动减慢时得到恢复, 转动惯量突然变小, 导致转速加大。

三、核物理的重要若干前沿领域

1. 核物理的新形态——夸克、胶子等离子体(QGP)的探索

通常的核物质是由强子构成的, 但组成强子物质的夸克和胶子是禁闭在强子内部, 超强作用不允许这些带色的粒子分开。这是 QCD 的特征, 实验表现也如此。在地球上从未见过大范围的夸克、胶子退禁闭的情况, 而在天体里(例如在中子星中)则可能有, 在宇宙大爆炸初期更是大量存在。研究 QGP 的性质既是天体物理的重大课题, 也是检验 QCD 的长程行为所必须的。理论估计在 $\rho \cong$ 几个 ρ_0 , 能量密度 $\epsilon \cong 14\epsilon_0$ (正常核能量密度 $\epsilon_0=0.15\text{GeV}/\text{fm}$), 核温度 $T \sim 200\text{MeV}$ 时有可能出现 QGP。

在温度足够高时, q, \bar{q} 产生如此之多, 以致它们之间的距离变得非常小, 这属于渐近自由区。这时点粒子好象自由粒子一样, 按斯忒藩-玻耳兹曼定律, $\epsilon \sim T^4$, 通过 QCD 格点计算也得出了这一规律。

温度升高时, 核物质首先变为强子气体, 主要是核子与 π 介子, 核子的能量主要用来产生更多的 π 介子。当温度再升高时, 有可能达到 QGP。另外, 当原子核的密度足够高时, 核子重叠得很多以至失去了边界, 许多核子熔合成夸克与胶子等离子体。图 1 就是在这种估计下给出的。在实验室内若能制造出这些物质新形态, 那将是物理学前沿的重大突破。

极高能重离子碰撞能否制造出这些核物质的新形态呢? 这正是近年来极为热门的研究课题^[7]。在美国布鲁克海文国家实验室, 1986 年 10 月首次产生出 $14.5\text{GeV}/N$ 的 ^{16}O 束, 以后又产生了同样能量的 ^{26}Si 束。计划中的相对论重离子对撞机将产生 $100\text{GeV}/N$ 的 ^{238}U 束。在欧洲核研究中心, 1986 年 9 月首次产生了 $60-200\text{GeV}/N$ 的 ^{16}O 束, 以后又产生了 ^{32}S 束, 将

来拟建造能加速 ^{208}Pb 束的加速器。到目前为止, QGP 形成的最明显信号是 J/ψ 粒子产生截面的削弱已被观测到。通常认为这种削弱是由于在 QGP 中, c, \bar{c} 被其它夸克所屏蔽, 但由于理论与实验上存在的不确定性, 目前对此仍未作出结论。

2. 核内夸克效应

现在在各类实验探索核内夸克效应, 轻子-原子核深部非弹实验是做得最多的一种。这些实验发现原子核中核子内的夸克分布与自由核子内的夸克分布有区别。这个结果首先是由欧洲 μ 介子研究协作组发现, 并被称为 EMC 效应。近来人们采用极化电子和极化靶, 能进一步获得核内自旋分布的信息。此外, 在高能电子与原子核的散射实验中, 除了测末态电子外还可测其它粒子(如 J/ψ)。这样可以获得更多的信息。例如, 高能虚光子在核上所产生的 Drell-Yan 过程。

研究核内可能存在六夸克集团是另一个重要课题。有人想用高能电子从核中打出一对核子, 并认为在高于 1GeV 的 N-N 碰撞中有可能产生双重子共振。

利用次级 K 介子束撞击原子核, 可以将奇异重子植入核物质中, 甚至可以有两个超子植入核内。这将为研究超子与核子的相互作用及检验它们的夸克结构提供重要的信息。

利用反质子束冲击原子核能提供强子结构的有用信息。 $p+p$ 有很多反应道, 现已测到不少分支比, 有些数据尚不自洽, 解释这些实验将是对各种强子模型的最好检验。

3. 有限温度强子核物质的性质

如图 1 所示, 在强子相中存在着各种不同组成与不同性质的核物质。在低温、低 ρ 下, 会发生气液相变或气-集团-液相变。在低温、高 ρ 下, 可能产生 π 凝聚相, 它可能存在于中子星中, 但至今尚未在实验室找到证据。在高温(几十个 MeV) 下, 核物质主要是由核子与 π 介子组成, 它的物态方程和可能发生的相变是很有趣的问题。高能重离子反应能提供这方面的有用的信息。

从以上简要的介绍可以看出,核物理正在进入一个全新的广阔的未知领域。它与粒子物理有很多交叉。标准模型成了它们共同的基础,但两者的重点不一样。后者是要向标准模型的下一步发展,因为目前的标准模型存在不少缺点:未能包括重力场,在电弱统一理论中,电与弱作用的相对强度仍然是外加的,它也不能解释宇称与时间反演的破坏。核物理正在对这一问题进行探索,如有关中微子的质量的测量,中微子振荡的测量,双 β 衰变的研究,核内宇称守恒问题等。但核物理更多地注意物质结构的研究,从强子构成的各种形式的物质,从研究各种物质形式的性质来进一步阐明物质运动的规律及其遵守的各种对称性规律。毫无疑问,近期内将出现一个核物理迅速发展的局面。

核物理近年来对相邻学科的影响很大,特别是对天体物理。在某种意义上说,天体可以称为核物理的天然实验室。一个叫做天体核物理的分支学科已经诞生。此外,核物理的技术对凝聚态物理、原子物理、材料科学、地质学、医学、微量分析及考古等都起了很大的作用。最后,核物理对新能源的发展也起着极为重要的作用。

国内核物理研究近年来也取得了较大进展。在实验设备方面,中国科学院兰州近代物理研究所已建成扇聚焦回旋与分离扇回旋串列加速器,可提供 100 MeV/A 轻离子束及 10MeV/A 重离子束(直到氩),可进行中、低能重离子反应工作。中国原子能科学研究院已有一台较先进的 2×13 MV 的串列静电加速器在正常运转,可进行低能重离子及轻离子反应的研究工作。中国科学院上海原子核研究所与北京大学各有一台 2×6 MV 串列静电加速器。其它小型加速器有 30 台以上,可供核技术应用于各领域时使用。国内几个大研究所均已配备了较先进的实验终端、探测器和计算机等,在国内开展中、低能核物理实验及核技术应用工作已具备了一定的物质基础。

解放以来,国内核物理工作者在逐步建立实验设备的过程中进行了大量的研究工作(包

括理论、实验和应用),为我国原子能事业作出了重要贡献。开放政策大大促进了我国核物理的发展。目前我国在重离子反应机制、高自旋态等方面的实验及理论研究都有较强的队伍,并取得了有意义的成果。在多体理论方面应用格林函数方法提出了计算核内单粒子势高级近似的有效方法。对低激发区的集体激发建立了较系统的微观理论,对原子核在低激发区近似存在的动力学对称性进行了广泛细致的探讨。在中、高能核物理领域中,我国已有了一支不小的精干队伍,在核力、强子结构、超子、高能轻子与核子和核的碰撞等课题的探索中取得了不少有意义的成果。在原子核的统计理论方面也有一支不弱的队伍。我国在核技术应用特别是在穆斯堡尔谱学、离子束注入、活化分析等方面,开展了很多重要工作。

总之,在当前核物理的许多前沿领域中都有我国核物理工作者参加探索,其中部分工作已达到国际先进水平。有些工作由于国内暂时还缺乏条件,是通过国际协作在国外进行的,如 β 延迟的双质子衰变模式,重离子反应中一种新反应机制——非完全深部非弹的测定等。这样的国际协作可望在近期内得到加强。我们有理由相信,我国核物理工作者在现有的基础上将能对核物理未来的重大发展作出自己的贡献。

- [1] J. D. Walecka and B. D. Serot, *Adv. in Nucl. Phys.*, eds. J. W. Negele and E. Vogt, Plenum Press, **16** (1986), 1.
- [2] F. Iachello, *Conf. Proc. 1st Int. Spring School on Nuclear physics*, eds. A. Covello, Italian Physical Society, (1986), 213.
- [3] D. Bohle et al., *Phys. Lett.*, **137B** (1984), 27; **148B** (1984), 260.
- [4] A. Arima et al., *Adv. in Nucl. Phys.*, eds. J. W. Negele and E. Vogt, Plenum Press, **18**(1987), 1.
- [5] B. Frois and C. N. Papanicolas, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, eds. J. D. Jackson et al., *Annual Reviews INC*, **37** (1987), 133.
- [6] W. C. Haxton, *Int. Nucl. Phys. Conf.*, Harrogate, U. K. (United Kindom), IOP Publishing Ltd., (1986), 415.
- [7] S. Nagamiya, *3rd Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions*, Saint Malo, France (1988), Preprint.