

作为核结构探针的质子非弹分析新进展

安 竹

陈 泉

(四川大学原子核科学技术研究所 成都 610064)

(中国原子能科学研究院物理所 北京 102413)

摘 要 本文概述了质子非弹性散射分析的新方法——LEA方法. LEA方法从实验上得到了有效相互作用的准确知识,为有效相互作用的理论研究提供了实验依据;同时,它也被用于提取中子过剩核的中子跃迁密度,为核结构模型提供了新的严格检验.

关键词 质子非弹性散射, LEA方法, 经验有效相互作用, 中子跃迁密度.

1 引 言

本文的讨论仅限于中高能质子(100~500MeV)非弹性散射. 质子非弹性散射一直是人们广泛使用的核结构探针之一,因为它反应机制简单,所涉及的二体有效相互作用研究得比较深入,微观计算易于进行. 特别是近年来出现的质子非弹性散射分析的LEA (Linear Expansion Approach)方法,使质子非弹性散射能够提供关于核结构和有效相互作用更准确更细致的信息. 本文简单介绍近年来这方面的研究进展.

2 以前的研究状况

在中高能质子非弹性散射分析中使用最多的方法是DWBA理论. 它又分为宏观和微观两种. 采用宏观DWBA理论只能得到非常有限的核结构知识. 比如,可得到变形长度,它与电磁测量得到的跃迁几率相结合,可给出多极矩阵元之比 M_n/M_p ,通过与 N/Z 的比较可判断激发态的同位旋性质. 对于有效相互作用,它几乎给不出什么信息. 随着研究的深入,微观DWBA逐渐被广泛用于质子非弹性散射的分析. 在它的分析中涉及两个因素:靶核的核结构信息(跃迁密度)和两体有效相互作用. 在这两个因素中,只有知道了一个以后才能确定另一个.

就二体有效相互作用的研究而言,它主

要来源于理论计算^[1~5]. 例如,早期的M3Y,是通过求解束缚边界条件下的Bruckner-Goldstone方程(B-G方程)得到的,是实数,且与能量和密度无关. 此外,还有ATB和HKT及JLM和CEG有效相互作用. Brieva和Rook第一次求解了散射边界条件下的B-G方程,得到了复数的、与能量和密度相关的有效相互作用. 以上提到的有效相互作用都是采用较早的自由空间核子核子力来计算的. 目前最好的自由空间核子核子力是Paris和Bonn势,这两种势已用于中高能区有效相互作用的计算,如PH和NL有效相互作用. 在有效相互作用的理论计算中存在如下一些问题^[4,6,7]:由不同的自由空间核子核子力计算出的有效相互作用存在明显差别. 即使对同一自由空间核子核子力,采用不同的计算方法也产生不同的结果. 另一方面,在计算中存在一些近似方法,人们往往难以估计其近似程度. 这些问题使理论的有效相互作用不足以用来精确提取核结构信息. 第一个来自实验的有效相互作用是Austin得到的,但是比较粗糙^[7]. 在核结构方面,微观DWBA所需的核结构跃迁密度大都是通过理论计算得到的. 在有限模型空间中计算这些跃迁密度涉及到芯极化问题,处理是比较复杂的. 随着电子非弹性散射数据的丰富,可以从中提出质子的跃迁密度,但中子的跃迁密度仍不能从实验得到.

基于前面所述情况, 质子非弹性散射的微观 DWBA 分析基本上是这样进行的: 选择一个或几个认为较好的有效相互作用和核结构模型进行计算, 然后与实验微分截面的第一个峰值相归一, 再判断理论结果与实验的符合程度. 或者, 质子跃迁密度 ρ_p 取从电子非弹性散射得到的实验值, 而中子跃迁密度由下式确定

$$\rho_n = \rho_p N/Z \quad (1)$$

从该分析, 只能得到一些核结构模型或有效相互作用性质的模糊的定性判断. 无更强有力的分析手段是得不到更多结果的. 约在 1984 年, Kelly 等人提出了质子非弹性散射分析的 LEA 方法^[8], 经过几年的工作已取得了不少成果.

3 LEA 方法

LEA 方法的基本思想如下: 选择一系列自共轭核 ($N=Z$) 的同位旋标量态, 通过电子非弹性散射从实验上得到可靠的质子跃迁密度 ρ_p , 由电荷对称性可准确知道中子的跃迁密度 ρ_n , 即 $\rho_p = \rho_n$. 对有效相互作用作线性展开, 拟合实验数据, 便可得到所谓的经验有效相互作用, 又可去提取中子过剩核 (nucleus with a neutron excess) 的中子跃迁密度.

LEA 方法有如下几个要点. (1) LEA 方法是基于 Petrovich 等人发展的动量空间 DWBA 理论^[9], 它通过对质子非弹性散射中核子交换效应的定域动量近似处理, 把所有观察量表示成“ $t\rho$ ”的形式, 其中 t 表示有效相互作用, ρ 表示跃迁密度. Love 的分析表明在中高能区这种定域动量近似是完全可行的. (2) 要把有效相互作用和跃迁密度线性参数化. 参照理论计算的有效相互作用的特点, 可把有效相互作用参数化成如下形式

$$t_i(q, k_F) = (S - dk_F^2)t_i(q, 0) + k_F^2 q^\delta \sum_n a_n \left[1 + \left(\frac{q}{\mu_n}\right)^2\right]^{-\beta} \quad (2)$$

其中 $k_F = K_F/1.33$, 表示定域费米动量与饱和核物质费米动量之比, $t_i(q, 0)$ 是零密度的有

效相互作用, 它通过把理论有效相互作用外推到零密度得到. (2) 式是设有效相互作用为 Yukawa 形式, 因此对于有效相互作用中心项、自旋轨道项和张量力项, β 分别为 1、2、3. 同样的理由, 对中心项和自旋轨道项, $\delta=0$; 而对张量力项 $\delta=2$. 与理论有效相互作用比较发现, $\alpha=\gamma=2$ 对描述有效相互作用虚部是合适的, 而 $\gamma=3$ 对实部是合适的. Yukawa 参数 a_n 和 μ_n 表示短程修正, d 称为阻尼因子, 表示对中心项虚部的 Pauli blocking 修正, S 称为标度因子. 由 (2) 式可见, 固定参数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 和力程参数 μ_n , 那么有效相互作用对于参数 S, d, a_n 就是线性的. 对于核结构跃迁密度可参数化成如下形式

$$\rho_L(r) = \sum_n a_n f_{nL}(r) \quad (3)$$

其中, 基函数 $f_{nL}(r)$ 常用的有 Fourier-Bessel 形式和 Laguerre-Gaussian 形式. 最后, 需要选取合适的激发态, 这些激发态的跃迁密度要覆盖核的中心 (高密度区) 和边缘 (低密度区) 部分, 以便使经验有效相互作用能同时反映其在高、低密度下的特性. 通过与所选核激发态的实验数据 (微分截面、分析本领等) 相拟合, 可以得到 (2)、(3) 式中的参数. 在获取经验有效相互作用的拟合过程中, 可以同时包含几个核的若干激发态的实验数据.

到目前为止, 在 130~500 MeV 范围内, 利用 ^{16}O 、 ^{28}Si 和 ^{40}Ca 的实验数据, 采用 LEA 方法提取了一系列能量点下的有效相互作用^[6], 这些有效相互作用与现有理论计算的有效相互作用比较, 为有效相互作用理论的进一步发展和完善提供了实验依据. 另外, 利用这些经验有效相互作用, 又可提取中子过剩核的中子跃迁密度. 目前, 已把这种方法应用于 ^{18}O 、 ^{30}Si 、 ^{48}Ca 和 ^{88}Sr 等核^[10], 提取出了其中子跃迁密度, 并与现有核结构模型进行了比较. 比如, 文献^[10]把 ^{30}Si 的采用 LEA 方法得到的中子跃迁密度与 Brown 等人的 sd 壳模型结果进行了比较, 认为需要更复杂更细致的核结构计算. 另外, 由 LEA 方法得到的

经验有效相互作用已用于其它方面的研究, 比如(e, e'n)和微观耦合道计算.

4 结束语

从以上叙述可见, LEA 方法使人们第一次从实验上得到了有效相互作用的准确知识, 为有效相互作用的理论研究提供了实验依据. 另一方面, 它又使质子非弹性散射成为可靠的核结构探针, 特别是它能够获得中子跃迁密度, 为核结构理论提供了新的严格检验. 当然, LEA 方法目前的应用还仅限于有效相互作用同位旋标量中心成分和同位旋标量自旋轨道成分. LEA 方法本身是普适的, 它的进一步应用应该是扩展到核有效相互作用的其它成分上以及其它核结构探针.

参 考 文 献

- 1 Bertsch G, et al. Nucl. Phys., 1977, A284 : 339
- 2 Anantaraman N, et al. Nucl. Phys., 1983, A398 : 269
- 3 Hosaka A, et al. Nucl. Phys., 1985, A444 : 76
- 4 Yamaguchi N, et al., Prog. Theor. Phys., 1983, 70 : 459
- 5 Nakayama K, et al. Phys. Rev., 1988, C38 : 51
- 6 Kelly J J, et al. Phys. Rev., 1991, C44 : 2602
- 7 Austin S M. The (p, n) reaction and nucleon-nucleon force, Plenum, N. Y., 1980, p. 203
- 8 Carr J A, et al. Neutron-nucleus collision—A probe of nuclear structure, 1984, AIP Conf. Proc., No. 124, p. 123
- 9 Petrovich F, et al. Nucl. Phys., 1984, A425 : 609
- 10 Kelly J J, et al. Phys. Rev., 1990, C41 : 2525 and references therein

New Progress in Analysis of Proton Inelastic Scattering as a Probe of Nuclear Structure

An Zhu

(Institute of Nuclear Science & Technology of Sichuan University, Chengdu 610064)

Chen Quan

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract A new analysis method, LEA method, in the proton inelastic scattering has been briefly reviewed. By the LEA method, the detailed information of effective interaction is obtained experimentally for the first time. This new method has been also used to extract neutron transition densities for nuclei with a neutron excess. All these provide the experimental basis for theoretical study of effective interaction and critical new tests for nuclear structure model.

Key Words proton inelastic scattering, LEA method, empirical effective interaction, neutron transition density.