

核少体问题研究进展简况

张本爰

(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

摘要 本文概要介绍了近几年来国防上关于核少体问题研究方面的进展状况及新动向。

关键词 核少体问题, 核力, 法捷也夫方程。

核少体问题作为少体物理的重要内容之一,是目前低能核物理研究中的一项热门课题.它以为数不多(三至六或更多个)的核子参与的体系作为研究对象,着重点是从动力学角度探讨其结构和碰撞特性.此研究同探索轻核结构、反应机制及核力性质等紧密相关,其科学意义是十分明显的;对于实际应用来说,由于它密切联系轻核的中子截面数据和聚变反应率参数等理论计算与评价,因此也有相当重要的实际意义。

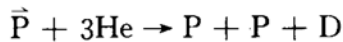
从理论观点看,少体核物理是量子力学中有重要用途的研究领域.当微观粒子(或内部运动自由度冻结的粒子团)之间的有效作用完全确定后,通过求解少体系统的量子力学运动方程,原则上可确定系统的一些结构特性(束缚态问题),或所发生过程的跃迁矩阵(散射态或反应问题),由后者能进一步定出过程的双微分截面和极化分析本领等.在非相对论近似水准上,核三体动力学问题的严格理论方法是求解法捷也夫方程^[1](分解型波函数所满足的)或求解前者的变型形式 AGS 方程^[2](跃迁振幅所满足的).应该说,这两种都是以 Schrödinger 方程为基础导出的,但 AGS 形式更适合于短程势的可分展开近似,已证明它可处理含有两对粒子间存在长程库仑作用的情况.三十多年来,三体系统涉及的量子力学计算研究已取得重要进展,尤其是数值结果的精度不断提高.关于三体散射态问题数值解方面的进展,1993年已由德国 Ruhr 大学的 W. Glöcke 教授作了详细评述^[3];至于三核子束缚态问题的研究状况,

前不久中国台湾大学的 S. N. Yang 教授作了专门的介绍^[4].多于三个粒子的少体问题,如四体问题,早有 Yakabovski^[5]给出了以作者合名的四体方程进行描述,这是沿三体法捷也夫型分解的思路推广建立起来的;这种推广方法可运用到更多粒子数的体系,从而建立相应的 N 体方程.但前提条件是要把 $(N-1)$ 体的全部 t 矩阵视为已知.核子系统的五体、六体问题的详细理论表述工作均已展开,例如核六体问题的全部作用矩阵元已由乌克兰专家小组导出^[6].

在少体核反应研究的新进展方面,除了质子或中子同氦核作用发生破裂反应涉及不少新工作外,氦核的光致分裂也被进一步研究,即对反应 $\gamma + t \rightarrow n + d$,德国一个小组基于 AGS 方程和可分势近似进行了精确的数值计算研究^[7],同实验结果比较,发现反应的积分截面计算值在 30~90MeV 间能很好地符合实验.但 30MeV 以下偏离实验很大.分析原因,可能是由于所用 Paris 势参数在低能区不甚理想。

随着极化束流技术的发展,近几年极化束参与的少体核反应(或散射)实验工作多了起来,并带动了理论研究.例如,日本 Kyushu 大学的串列加速器已配备极化质子和氦的强束流源^[8],用 \vec{P} 打 D 靶已完成 $E_p \leq 18\text{MeV}$ 能区的不少能点实验测量,由弹性散射实验测得极化矢量分析本领(记为 A_y)其精度在 2~18MeV 区已达到万分之几的水平;同时采用严格的法捷也夫方程进行理论分析,发现 A_y 的理论值在低能区同实验结果相

比存在颇大分歧,从而暴露出目前现实核力参数化描述仍有较大的缺陷.该实验室还用极化氘束作($\vec{d}+p$)的弹性散射实验,相应于 $E_d=14\text{MeV}$,给出了极化张量分析本领.极化束参与的少体核物理实验研究,可促进非微扰三体理论方法的进展.对三核子系统作极化分析本领的精确测量目前已是一种新动向,据悉日本有关研究组对此已作安排,拟通过这种类型的实验探讨对三体力、离壳相互作用以及电荷对称性破缺力等的新信息.为解释 Paris 势下三体量子力学计算在低能段同实验偏差较大,人们提出过一种修正方案,即在 Paris 势中添加一项低强度的奇宇称三重态 LS 耦合作用,数值结果表明,对微分截面影响并不大,但可大大改善极化分析本领计算值同实验结果的符合程度.上述极化实验的理论分析,除严格的法捷也夫方法外,还可采用准自由近似等别的方法简便而快地给出一些定性的或局部性的结果.日本京都大学的 Kakigi 不久前曾用准自由近似法分析了



实验, $E_p=65\text{MeV}$,可满意地解释所测得的极化分析本领,并发现弹性散射的计算结果也同实验相一致,这个结论在 $E_p=75\text{MeV}$ 下的 ${}^4\text{He}(\vec{P}, Pt){}^1\text{H}$ 反应研究中也出现.

为了深入了解相对论效应,在核少体动力学问题理论研究中,探索相对论量子力学的应用已开始,当然技巧上存在不少困难.关键困难在于既要考虑系统的少粒子特性,又要维持各个单体之间的相对运动应按 Dirac 方程控制.迄今严格的相对论量子力学三体理论模型还未能建成,不过基于包含有三体型作用顶点(即所谓 φ^3 型)的量子场论,有人已提出建立维协变式三体方程的框架^[9],能处理各种可能出现的两体作用,还证明了只要三体力不存在或能完全显式地被规定,该框架下的方程组是完备的.这一工作看起来可作为核三体问题的相对论量子力学描述研究的好起点.以微扰近似为基础的少体理论

方法研究也有进展,例如已提出了三体反应(或散射)的相对论性平面波冲量近似表述方案^[10],采用的主要技巧是光滑化两体传播子方法,实质上是把作用势、两体传播子同束缚态波函数的连乘积用一个只含波函数的因子替代了.这种替代是相当近似的,为合乎相对论性要求,它利用了如下事实:光滑化传播子能生成满足 Dirac 方程的波函数.

三体力是否存在,其强度如何,这是少体核物理中特别引人关心的问题.人们用严格的法捷也夫方法,选择几种常用的不同形式现实核力(不包括 Bonn 势)对三核子系统作了计算考察,耦合道数由过去的十几个已增加到三十多个,所算得的氘束缚能量值分散在 $7.3\sim 7.7\text{MeV}$ 之间.同实验值(8.49MeV)相比,理论结果显然偏低约 1MeV .这种偏差许多人认为是由于未计三体力所致,但更全面地分析其它类型的实验(包括形状因子实验),上述看法还不能得到更广泛的确认,因此特别希望有反应方面的进一步精确实验信息及相应的理论分析来判断.对三体力本身的理解,除传统的双 π 交换为基础的微观图像外,用折叠势模型来处理是种新途径^[11],但迄今缺乏数值结果.

除上述以严格动力学为基础的传统研究外,近年来还出现了一些有意义的新方法,包括采用某些特殊的数学技巧与近似方法,考察少粒子体系的整体构形和运动特征.例如,从量子系统的一些对称性要求出发,探讨微观少体系统在几何结构上和内部运动模式上的特征^[12],这种探讨可借助群论知识确立少体几何构形的波函数变换性质及通过波函数确立相应的关联密度函数等手段实现.

参 考 文 献

- 1 Sov. Phys., TETP 1961,12: 1014
- 2 Nucl. Phys., 1967,B2: 167
- 3 "Contemporary Topics in Medium Energy Physics" 1993,235
- 4 Nucl. Phys., 1994,A570: 395C (下转 36 页)

温催化氧化氟的技术以及新的含氟空气净化技术的探索,深化已开展的研究工作.

2 田中知. 核融合研究,1986,56(5): 318
 3 材料科学应用研究文集. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所编,1994年9月出版
 4 Kopasz J P, et al. Journal of Nuclear Materials, 1991, 179: 816

参 考 文 献

1 Holtslander W J. ISPP-5,1989,23

Study on Tritium Technology and Tritium Breeding Material for Fusion-fission Hybrid Reactor

Cao Xiaohua

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

Abstract In this paper the recent status and unsolved problems on tritium technology and tritium breeding material study for fusion-fission hybrid reactor (FFHR) are described. The achievements in the research area in our institute are briefly introduced.

Some suggestions on further tritium research are given.

Key Words fusion energy, fusion-fission hybrid reactor, tritium technology, tritium breeder.

(上接 20 页)

5 Sov. J. Nucl. Phys. , 1967,5 : 937	9 Nucl. Phys. , 1994, A574 : 814
6 ITF 93- 12R(1993)	10 Nucl. Phys. , 1993,A565 : 740
7 Bonn-IR-93-30 (1993)	11 J. Phys. , 1994,G20 : 407
8 CONF-9106379	12 Few-body Sytems. 1993,14 : 25

An Overview of Recent Research Developments in Nuclear Few-body Problem

Zhang Benai

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

Abstract The current status and progress are outlined in few-body nuclear physics research. Latest trends in this field are reviewed as well.

Key Words nuclear few-body problem, nuclear force, Faddeev equation.