

非核子自由度与发展核基本理论的 ABC 计划

张启仁

(北京大学技术物理系, 北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

摘 要 在分析核内运动, 特别是其中非核子自由度的基础上提出了一个分三步发展原子核基本理论的 ABC 计划.

关键词 量子强子动力学(QHD) 量子原子动力学(QAD) 量子口袋动力学(QBD) 量子色动力学(QCD)

1 追溯核基本理论的历史及其启示

自贝克勒(Becquerel)发现放射性至今, 原子核物理已有一百年的发展史. 不论就对物质结构和微观运动规律的认识, 还是就实际应用而言, 它都有丰硕的成果. 特别是巨大原子能的释放, 深刻地影响着社会的发展和人们的生活, 使它一度成为人类科学皇冠上的一颗耀眼宝石. 然而与此不相称的是, 至今尚未建立起原子核的基本理论. 对原子核的理解仍只能靠一个个彼此并不完全相洽的模型理论. 这些理论推动着核物理的发展, 并作出了许多有意思的预言. 然而由于它们并非建立在一个统一的基本理论之上, 由之作出的预言可信度受到质疑, 发展也就变得犹豫、迟缓. 因此, 发展原子核的基本理论是当前物理学的一项重大任务.

核物理学家为建立原子核的基本理论曾作不懈的努力. 1932 年恰德威克(Chadwick)一发现中子, 海森伯(Heisenberg)和伊凡年科(Ivanenko)就提出了原子核由中子与质子组成的学说. 原子核的基本理论被设想为中子与质子在核力作用下的非相对论量子多体理论. 之所以将其设想为非相对论的是因为核激发能为 MeV 的量级, 而中子与质子的静止质量为 10^3 MeV 量级, 相差千倍. 之所以认为核内只有中子与质子则是因为最轻的强作用粒子即 π 介子的质量约 140 MeV, 要比核激发能的量级大得多. 介子被认为冻结在核子周围, 在核内不构成独立的自由度. 最初的希望是模仿原子的理论. 特别由于壳模型

的成功使人们认为平均场理论能用于原子核. 只是由于核力为短程强作用, 核子间的关联不能忽略. 于是理论核物理学家将哈特瑞(Hartree)-福克(Fock)方法发展为哈特瑞-福克-布鲁克勒(Brueckner)方法, 将关联反映到平均场中使关联的计算简化. 经三十余年的不懈努力却发现这一设想并不成功^[1], 采用符合二核子系实验数据的核力(实在核力)进行的这种复杂而详尽的量子多体计算结果不能符合核物质的基本数据, 即每核子结合能和平衡密度. 经对强子场论的深入研究, 人们理解了这一失败是由于设想的出发点并不成立. 介子并不一定以粒子数确定的状态在核内存在; 它们可以位相确定的状态, 即相干态的形式在核内存在. 由于它们与核子的作用, 这种态不仅不会增加核物质的能量, 反而可能降低核物质的能量. 可见核内可以有介子, 核内存在介子自由度. 一般地说, 核内可以存在非核子自由度. 这是原来没有想到的. 介子相干态在核内的存在还可以降低其中核子的质量, 增加核子的动能, 使核子动能靠近核子的静止能量, 从而使相对论成为重要的.

基于这种认识, 人们开始尝试用相对论强子场论研究原子核^[2]. 研究中发现, 定域强子场论与实验有明显分歧^[3], 而一经考虑核子的有限大小, 问题就迎刃而解^[4]. 强子的扩张结构是其内部夸克运动的结果^[5]. 强子的有限大小的效应可视为其中夸克效应的外部表现. 经核子有限大小效应修正后的强子场论的结果与实验相符甚好, 除自然地符合包

括压缩模数 $K=240\text{MeV}$ 在内的全部核物质数据^[6,7]外,还符合有限核的表面能数据^[6,8].由此还导出了一个核表面能与标量介子质量的关系^[8].用这个关系可由核表面能定出负责核结合的标量介子质量.由非相对论理论算得的标量介子质量为 472MeV ^[8],由相对论理论算得的标量介子质量为 687MeV ^[6].值得注意的是,它们都落在核力介子理论 OBEP 要求的区间 $400\sim 700\text{MeV}$ 的范围内.这表明,这个理论有可能成为核力和核结构理论的共同基础,发展成原子核的一个统一的基本理论.

强子由夸克构成,由强子组成的核自应有其夸克结构.问题是核内强子的夸克结构与真空中强子的夸克结构是否相同,核内有没有不能归结为单个强子结构的夸克结构.如果答案是肯定的,则称存在核内夸克自由度.一般认为,EMC 现象^[9]是存在核内夸克自由度的证据.要了解核内夸克自由度,同时也为了深刻了解强子层次上的核规律,应建立夸克层次上的原子核的基本理论.一般相信量子色动力学(QCD)是夸克系统的基本理论,因而也就是强作用的基本理论.只是由于非亚贝尔性和非线性,这一理论甚难求解.一个变通办法是建立符合 QCD 精神的模型理论.口袋模型^[5,10]即为其中的一种.为了将它用于强子动力学,进而用到核物理中,要发展量子口袋动力学(QBD),这方面已有一个框架^[11],但要能实用还需大量工作.

综上所述,原子核基本理论至今未能确立并非核物理学家未付出足够的艰辛,实由于核物理内容太丰富深刻,且由于强作用各部分各层次间难以彼此孤立开来.核子与介子场的强作用使核内核子自由度不能孤立出来,这一强作用也使低能非相对论领域与高能相对论领域界限模糊.这就导致以非相对论核子多体量子论为目标的第 1 次建立原子核基本理论的努力失败.夸克结构导致强子的有限大小,而这种有限大小是有实际效应的.可见,即使忽略强子内的夸克结构,这种

结构外部效应的有限大小也使核物理的强子层次不能从夸克层次完全孤立出来.这使得定域强子场论同样不能成为原子核的基本理论.现在终于看到了大海的尽头.作为强作用基本理论的 QCD 可以作为建立原子核基本理论的基础.然而量子色动力学究竟并非原子核的基本理论,就象量子电动力学并非原子的基本理论一样.原子核的基本理论应以原子核为直接的研究对象,并且对这个对象要简单、明了、适用.为此,还需要大量工作和一条达到这一目标的正确路线.

2 QAD、QBD、QCD 和发展核基本理论的 ABC 计划

在强子场论的基础上作有限重子大小的修正,现已取得良好进展;除较好符合实验数据外,理论基础方面已做到了相对论统计力学的程度^[7].为了将它发展成一个基础理论,在理论方面要研究有限尺度强子相互作用的相对论形式.作为第 1 步可仍设介子为点粒子,研究有限尺度重子发射和吸收介子的元过程.在此基础上可研究两核子系统和核结构中的核子关联,探讨全面符合从二核子系统到有限核和核物质的所有实验数据的可能性.如上节所述,这种可能性是存在的.若果真实现,就是强子层次上的原子核基本理论.为区别于定域强子场论的相应理论 QHD(量子强子动力学),可称之为 QAD,是量子原子动力学的意思.这里的原子不是通常所指的意思,而是指有限尺度的强子,这就是发展原子核基本理论的 A 计划.

QAD 自然不可能用来研究核内夸克自由度.由于强子层次不能从夸克层次孤立出来,它对核内强子自由度的诸现象也不可能彻底理解.理论的定量方面会是粗糙的,误差可能较大,至多能期待理论的定性方面大体与实验相符.例如,作为强子夸克结构外部表现的强子有限尺度可能随核环境,例如核密度和核温度等而变.这种变化在 QAD 中至多只能作唯象的描述而不可能得到微观解释.

为了研究核内夸克自由度, 就必须将原子核的基本理论建立在夸克层次上. 目前实际的做法是采用模型, 例如采用口袋模型. 这种模型用装有夸克的口袋代表强子. 强子系就是这类口袋的集合体, 强子间相互作用和这种作用下的强子运动就是量子口袋动力学 QBD. 充实 QBD 的框架^[11]并将它发展成一个可实际计算原子核各种动力学变量的理论, 即是一个建立在夸克层次上的原子核基本理论. 这就是 B 计划. B 计划可从两方面来实现. 一是从框架出发建立描述重子口袋发射和吸收介子口袋元过程的动力学, 再依傍 QAD 发展 QBD 的相应理论. 在实现了 A 计划的基础上有目的地发展 QBD, 发展其中计算在 QAD 中只能唯象描述的量的手段. 在这种意义上, B 计划是 A 计划的后继计划. 另一方面, 也可以从一些现有的夸克层次上的核模型, 例如核物质的口袋晶体模型^[12]出发, 按 QBD 的精神将它完善化, 使之能同时表达夸克层次和强子层次的动力学.

原子核的基本理论最终应建立在 QCD 的基础上, QCD 的低能行为复杂, 用于原子核问题时微扰法失效, 严格求解目前尚做不到. 在这个范围内比较可信的办法是将时空连续统一上的场论用有限格点上的场论近似替代, 将不可数无限自由度的问题近似为有限自由度的问题. 这就是格点 QCD. 用这种方法取得过一些有意义的成果. 如强子质量的计算和到夸克-胶子等离子体相变的预言, 都大体与经验无矛盾. 但要用这种方法求解原子核问题, 则还需大量工作. 原子核理论有自己的工作方法和标准. 例如要求定义明确的单核子态, 两核子态和多核子态. 如何在格点 QCD 中定义这种态和计算它们的动力学是一个艰巨而又有意义的课题. 这就是 C 计划的内容.

3 理论基本性的绝对含义与相对含义

一个理论是否为基本理论有其绝对标

准. 它必须有一个统一的基本出发点, 或称为基本假设, 它的结论应从这个出发点逻辑地导出. 推导可采用近似方法, 但其中不能随意修改出发点, 不能随意更改或增删假设. 按此标准, 以库伦作用相束缚的核与电子多体系的非相对论量子理论组成原子、分子和固体的基本理论. 而原子核则至今没有类似的基本理论. 任何理论都只是对客观世界的近似描写, 都是有误差的. 基本理论也是如此, 例如非相对论量子力学给出与实验很好相符的氢原子能谱. 然而这种相符也不是绝对的, 与实验相比仍有偏差. 其中包括相对论修正(精细结构)与零点场修正(Lamb 移动). 将原子理论直接建立在量子电动力学的基础上可消除这种偏差. 然而已知量子电动力学只是弱电统一理论的一个方面, 弱作用对原子性质的影响已成为当前研究的课题. 不会有人相信弱电统一理论是终极的, 它会被更完善的理论所替代. 可见, 就其内容和与实验相符的程度而言, 任何理论, 即使是基本理论, 都是相对的, 了解了这一点就可消除对基本理论的苛求, 即使对核理论, 一个基本理论也不是不可企及的. 而一个建立在统一的基本出发点上的基本核理论, 即使比较粗糙, 也能比较放心地应用. QAD, QBD 和 QCD 应当是原子核的一系列越来越深刻, 越来越精确和越来越可靠的基本理论. 逐一实现它们, 就是发展原子核基本理论的 ABC 计划.

参 考 文 献

- 1 Pandharipande V R, Wiringa R B. *Rev. Mod. Phys.* 1979, 51: 821. Day B D. *Phys. Rev. Lett.* 1981, 47: 226
- 2 Sawyer D P. *Phys. Rev. Lett.* 1972, 29: 382
Scalapino D J. *Phys. Rev. Lett.* 1972, 29: 386
Lee T D, Wick G C. *Phys. Rev.* 1974, D9: 2291
Waloeka J D. *Ann. Phys.* 1974, 83: 491
- 3 Glendenning N K. *Nucl. Phys.* 1988, A480: 597
Rischke D H, Gorenstein M I, Stocker H, et al. *Z. Phys.*, 1991, C51: 485
- 4 Zhang Q R, Ma B Q, Greiner W J. *Phys.* 1992, G180: 2051

- Ma B Q, Zhang Q R, Rischke D H, et al. Phys. Lett., 1993, B315:29
- 5 Chodos A, Jaffe R L, Johnson K, et al. Phys. Rev. 1974, D9:3471
- 6 Zhang Q R, Li X G. Z. Phys., 1992, A343:337
- 7 Zhang Q R. Z. Phys., 1995, A351:89
- 8 张启仁. 高能物理与核物理, 1979, 3:75
- 9 Aufert J J, et al. Phys. Lett., 1983, B123:275
- Clark A R, et al. Phys. Rev. Lett., 1983, 51:1826
- Bodek A, et al. Phys. Rev. Lett., 1983, 50:1431
- Arnold G R, et al. Phys. Rev. Lett., 1984, 52:727
- 10 DeGrand T, Jaffe R L, Johnson K, et al. Phys. Rev. 1975, D12:2060
- 11 Zhang Q R. J. Phys., 1990, G16:545
- Zhang Q R, J. Phys. 1990, G16:559
- Zhang Q R. Comm. Theor. Phys., 1991, 16:223
- 12 Zhang Q R, Derreth C, Schafer A, et al. J. Phys. 1986, G12:1.19
- Zhang Q R, Liu H M. Phys. Rev., 1992, C45:2294

Non-nucleon Degrees of Freedom in Nuclei and ABC Plan for Developing Fundamental Nuclear Theories

Zhang Qiren

(*Institute for Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871*)

Abstract We emphasize that to develop a fundamental nuclear theory one has to consider various non-nucleon degrees of freedom in nuclei and to make the theory relativistic. A three step ABC Plan for this Purpose is proposed. The A plan is to reform the relativistic hadron field theory by taking the finite baryon size into account. We call finite size baryons atoms in contrast with points. The fundamental nuclear theory in this form is therefore a quantum atom dynamics (QAD). The B plan is to reform the bag model for hadrons by making it be quantum bag dynamics (QBD). This is a model fundamental nuclear theory on the quark level. The fundamental nuclear theory should eventually be developed on the basis of quantum chromodynamics (QCD). This is the C Plan.

Key Words QHD QAD QBD QCD

(上接第 22 页)

Low Energy Experimental Nuclear Physics and Its Application

Lu Xiting

(*Department of Technical Physics, Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871*)

Abstract Some recent studies on the low energy experimental nuclear physics and its applications at the Department of Technical Physics and the Institute of Heavy Ion Physics of Peking University are briefly introduced in this paper.

Key Words carbon radioactivity DSA B-H nuclear reaction cross section hydrogen profiling boron profiling stopping power