

粒子物理学和核物理学的相互交叉

黄 涛

自从 1911 年卢瑟福用 α 粒子作为炮弹轰击金属薄箔发现了原子核,核物理学发展为物理学的一个重要分支。进入 20 世纪 50、60 年代以后,由于高能加速器的迅速发展,人们对物质结构的认识又深入到更深层次,基本粒子的种类多达几百种,粒子物理学成为探索微观世界的最前沿的一个学科。粒子物理学的诞生和发展深受核物理学的影响,而粒子物理学的发展反过来又影响着核物理学的某些基本问题的研究。

一、原子核的新自由度

1932 年查德威克发现了原子核内除了有质子外还有中子,接着海森堡提出了原子核是由质子和中子组成的,质子和中子一直是组成原子核的基本组成成份。原子核内的质子、中子结合很紧,那么是什么样的核力使它们聚集在一起。1935 年汤川秀树提出了 π 介子传递了这种相互作用,这就预言了原子核内除了质子、中子以外还有 π 介子。随着粒子物理学的发展,实验上揭示了原子核内还有更多的新成份,例如 π 介子, ρ 介子,各种核子的激发态 Δ 粒子, σ 粒子等。原子核内除了质子、中子传统自由度,还有更多的新自由度,这一思想在今天有了进一步发展。人们正在从理论上和实验上寻找核内夸克自由度,核内胶子自由度以及核内颜色激发自由度等。这就更丰富了原子核物理学的基本内容。

原子核由质子和中子组成,质子、中子又分别是由三个带颜色的层子(夸克)组成的。例如质子 p 内部的三个夸克分别是两个上(u)夸克和一个下(d)夸克,中子 n 内部的三个夸克分别是一个上夸克和两个下夸克组成。三个夸克分别携带不同的颜色,使得质子和中子处于颜色单态(即无色态),简单记为

$$p = (uud)_1, \quad n = (udd)_1$$

这样,由质子和中子组成的氘核 d 可以记为

$$d^{(1)}_1 = (pn) = ((uud)_1(udd)_1)_1$$

这表明氘核是由六个夸克组成的,三个夸克一团构成色单态的质子和中子。显然若三个夸克重新组合成团,仍能构成氘核的新形态,例如

$$d^{(1)}_1 = ((uuu)_1(ddd)_1)_1 = (\Delta^{++}\Delta^-)$$

这就是通常所说氘核中可能存在的 isobar 成份。其实,由于原子核内夸克自由度的存在,氘核的内容就更

丰富了。例如氘核内三个夸克一团不是构成颜色单态,而是处于颜色激发态(八重态),总的构成颜色单态的氘核,即

$$d^{(8)}_1 = ((uud)_8(udd)_8)_1 = (p_8 n_8)_1$$

$$d^{(1)}_1 = ((uuu)_1(ddd)_1)_1 = (\Delta^{++}\Delta^-)_1$$

又如氘核内三个夸克成团还产生一对正反夸克对($q\bar{q}$)也形成新的形态 $((uudq\bar{q})_1(uddq\bar{q})_1)_1, \dots$, 再如传递夸克之间相互作用的胶子 g 也可以参与每一团之中形成氘核的新形态 $((uudg)_1(uddg)_1)_1, \dots$ 因此量子色动力学理论给出氘核有无穷多种的新形态。然而并不是这样多种新形态对氘核都很重要,其实传统的

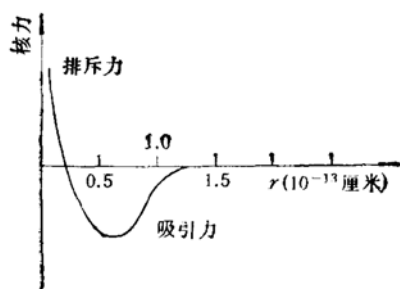
$$d^{(1)}_1 = (pn)$$

是占有绝对主要的成份, $d^{(1)}_1 = (\Delta^{++}\Delta^-)$ 只占百分之几,而其余的新成份在正常情况下则可以忽略不计。人们正在研究在什么样的条件下可以使这些新形态表现出来。最简单的氘核如此,庞大的原子核家族的所有成员也是如此复杂,如此丰富多彩。

二、核力新探

自从发现中子以后,原子核由质子和中子组成也得到了实验的证实,但人们不知道是什么样的力量使质子和中子聚集在一个很小的空间而密度又那样地大。事实上原子核的大小仅是原子大小的十万分之一,而它几乎集中了原子的全部重量,人们称使质子和中子聚集在原子核内的作用力为核力,显然核力很强,称为强相互作用。强相互作用不仅作用强度高而且力程短,仅在原子核大小范围内起作用,也就是说力程约是 10^{-13} 厘米。正是根据这一点,1935 年日本著名理论物理学家提出传递核力的媒介子是质量约为 140 MeV 的 π 介子。质子、中子间是通过传递 π 介子而紧密地结合在一起,这的确在探讨核力起源上起了很大的作用,它解释了核力的长程部分。

随着实验研究的深入,发现核力的力程虽短,但随着核子(质子和中子的总称)间的距离变化呈现复杂的关系,分为短程、中程和长程部分(见下页)。核力的单 π 介子交换给出合理的长程部分;双 π 介子交换或 σ 介子交换给出合理的中程部分;矢量介子(ρ 和 ω 介子)交换可以部分地解释短程部分,但远不能解释短程排斥心。



核力随距离的关系

既然 π 介子、 ρ 介子、 ω 介子、 σ 介子都是由正、反夸克组成的，而夸克之间是通过交换胶子进行相互作用，近年来人们试图从物质的基本组成夸克间的相互作用来探讨核力。大家知道，夸克和胶子相互作用遵从的动力学是量子色动力学理论。按照该理论，夸克和胶子在小距离下是渐近自由的，而在大距离下是囚禁的。因此所有的夸克和胶子都被囚禁在强子（所有参与强相互作用的粒子的总称）内部，人们无法观察到自由的夸克和胶子。正是由于囚禁的动力学还没有一个可靠的理论，因此人们还不能精确描述在强子内部的夸克和胶子的动力学规律性，也就不可能从量子色动力学基本理论出发来得到核力的基本理论。然而，由于重夸克（例如粲夸克和底夸克）的势模型理论很好地描述了由重夸克组成的强子态，近几年来人们利用势模型理论在夸克模型的基础上对核力进行了新的探讨。

简单地说，重夸克之间的相互作用势是由两部分组成的：短程的矢量库仑势和长程的标量线性势。前者是由渐近自由性质决定的，后者是由囚禁性质决定的。在夸克模型基础上，考虑到交换胶子，正、反夸克对效应等，对核力的中程和短程排斥心部分有了新的认识。可见原子核物理中早在30年代就提出的核力问题与现今的粒子物理学中的量子色动力学理论是紧密相关联的，核力新探正吸引着核物理学家和粒子物理学家去共同完成。

为了检验量子色动力学理论，人们常利用电子或中微子去打击核靶，这就必然涉及到原子核的结构问题。随着实验的精确测量，也揭示出原子核的内部结构的新现象。例如著名的EMC效应就揭示出原子核内的核子可能变“胖”这一奇妙现象，这就是说原子核内的核子要比自由核子的半径大。关于原子核内结构是否存在新现象还可以在质子打击靶核的Drell-Yan过程中进行检验。人们正试图在量子色动力学理论基础上对核力和核结构进行新的探讨。

三、核物质的新形态

量子色动力学是强相互作用的基本理论。它描述

了组成强子物质的夸克和胶子间的相互作用。原子核内的核子是由夸克组成的，核子间的相互作用将由量子色动力学理论确定。这种相互作用的强度在动量迁移很大时变小，可以应用微扰量子色动力学方法处理，然而对于动量迁移小的软过程，相互作用强度变得很大，微扰量子色动力学不再适用，非微扰量子色动力学的一个基本方法——格点规范理论——已取得了重要的进展。例如格点规范理论预言当强子物质体系的温度 T 高于某一临界温度 T_c ($T_c \sim 200 \text{ MeV}$) 时，强子内夸克可能会解除禁闭，成为夸克、胶子等离子体。这就是说核物质从普通的强子相转变为夸克、胶子等离子相。

按照大爆炸理论，早期宇宙在大爆炸的 10^{-5} 秒内，其温度高达200 MeV以上，很可能就是夸克、胶子等离子体，逐渐冷却后才转变为普通的强子物质。

近几年来，人们对高能重离子碰撞实验给予了足够的重视，美国布鲁克海文实验决定建造相对论重离子对撞机（RHIC），投资约4亿美元，将于1996年建成。一个重要的目的在于研究在高温、高密度的条件下是否存在从普通核物质到夸克、胶子等离子体的相变。目前实验上正在进行的高能重离子碰撞能量已经实现每核子能量大于10 GeV的重原子核之间相撞，实验结果发现了一些反常现象。例如重原子核相撞中 J/ψ 产额压低现象和原子核相撞中 K^+/π^+ 产生比例显著上升现象等。人们正密切注视这些现象，进行认真的分析讨论。有些人认为这些反常现象表明在重离子碰撞中已出现了夸克、胶子等离子体的信号，但更多的人认为这些现象还不足以说明出现了核物质的新形态。

总之，高能重离子碰撞的研究刚刚开始，已引起了国际上粒子物理和原子核物理学家的重视，可以毫不夸张地说，高能重离子碰撞研究是今后十年、二十年内国际上一个新的有生命力的前沿领域，也是粒子物理和原子核物理学的相互交叉领域，这一领域将揭示出核物质的新形态。

四、对称性和守恒律

自然界千变万化，自然现象复杂而又奥妙，然而支配这一切的自然规律应是简朴、和谐的。众所周知，自然界存在着很多对称性质，例如一个物理实验所揭示的物理规律不会因为在北京做还是在广州做而改变，这就是空间平移不变性，类似地还有空间转动不变性；又如在微观世界中有空间左、右对称性和时间反演不变性等。这些对称性都与自然界中的守恒定律相对应。1956年李政道、杨振宁教授所发现的宇称不守恒定律就是与空间左、右不对称性相联系的。

这里着重介绍一种守恒律，它是与粒子数守恒相联系的。原子核的组成成份质子和中子，它们的自旋



编者按:

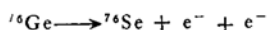
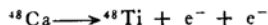
我国老一辈物理学家余瑞璜说过:“我自中学以来热爱物理,从来没有一秒钟的闪念,后悔学物理。六十年来,除了有旁的事外,从早上六点到下午五点半,一直就追求隐藏在自然界的深处的真理而从来不申请奖金”。那么,八十年代的大学生、中学生,是否也象老一辈物理

学家那样,对物理这门学科感兴趣?是否出自对真理的追求,选择研究物理这一艰难的道路?本刊将陆续发表同学们的来信,人们从中会得到肯定的答案。

为 $1/2$, 遵从费米统计,大家熟悉的电子和中微子的自旋也是 $1/2$, 也遵从费米统计,把这些粒子统称为费米子,它们的反粒子称为反费米子。如果令费米子数为 1 , 反费米子数为 -1 , 实验发现任何一个物理过程都遵从费米子数守恒律。如果将质子、中子那些参与强相互作用的重费米子称为重子,将电子、中微子那些不参与强相互作用的轻费米子称为轻子,实验也发现任何一个物理过程既保持重子数守恒又保持轻子数守恒,无一例外。

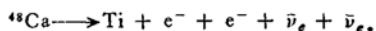
大统一理论预言质子会衰变,其寿命在 10^{30} 年到 10^{31} 年,这就是说重子数不守恒、轻子数也不守恒。然而迄今为止的实验已测到质子寿命大于 10^{32} 年仍未发现质子会衰变。

进一步的理论研究表明如果存在重的马约纳拉中微子,那么在弱衰变过程中,中微子可以作为中间态出现而不被发射出来,实验上将会观测到终态粒子中轻子数不守恒的过程。这一现象在某些原子核中可能发生,这些原子核的单 β 衰变禁戒,二级弱相互作用过程允许终态粒子中不出现中微子而观测到轻子数不守恒过程,例如



可以见到这一类过程初态轻子数为零,终态轻子数为 2 , 显然是轻子数不守恒过程。

近年来原子核物理学家和粒子物理学家正以极大的兴趣对原子核中无中微子的双 β 衰变过程进行研究,企图从实验上和理论上探讨轻子数不守恒规律。从实验上讲为了探测无中微子双 β 衰变过程必须分出那些有两个中微子的双 β 衰变过程,



从理论上讲为了确定无中微子双 β 衰变过程的寿命,既依赖原子核的结构和马约纳拉中微子的质量,又

物理——我最好的伴侣

上海南汇周中高三 金波军

编辑同志,您好!我是个将要进入高三的学生,也是个物理爱好者。自从一年前我喜欢上物理,我就知道物理将伴随我的终身。宇宙是如此的深不可测。爱因斯坦的相对时空及量子世界的怪诞性,把我领进一个神奇的世界。于是我放弃了我所有的其它爱好。物理书成了我最好的伴侣。虽然一夜四个小时的睡眠累得我疲倦不堪,(编者注:希望注意休息)但我却感受到我以前从未感受过的充实,我真正认识到了人活着的意义。

赖于双 β 衰变的机制。

在探测自然界对称性的守恒和破坏方面,从来就是粒子物理和原子核物理相互结合的成果。例如 50 年代的 τ - θ 之谜是从粒子物理中 κ 介子的衰变模式中发现的,李政道和杨振宁教授由此而提出了宇称不守恒的假说。吴健雄教授从钴原子核的 β 衰变实验证实了宇称不守恒的假说。同样可以相信原子核双 β 衰变的研究将导致自然界中另一个重要定律是否保持守恒的重要发现。

五、结 语

随着自然科学的飞速发展,物理学已分为若干有生命力的分支学科,原子核物理学和粒子物理学是探索物质结构和微观世界的两个最前沿的分支学科。然而,自然界是统一的,在探索自然规律的研究过程中,各分支学科的交叉和综合又是必然的。以上仅就当前几个前沿研究领域介绍了原子核物理和粒子物理的相互交叉,其实相互交叉的现象和相互交叉的学科远不止这些。自然科学的发展必然出现新的分支学科,也必然会促使各个分支学科的相互交叉和综合。

• 简讯 •

本刊聘请首批通讯员

(本刊讯)据本刊记者报道:为了进一步沟通编读联系,及时报道国内外物理学新动态,《现代物理知识》编辑部决定,聘请 12 名同志为本刊首批通讯员。他们是:黄影芳(华东师大)、黄光荣(南京大学)、罗成林(南京师大)、李光海(西安 69 信箱)、金皓明(复旦大学)、王兆鸿(南京教育学院)、冯佩霞(东南大学)、孙仲田(郑州大学)、杨化中(兰州大学)、刘小伟(中山大学)、胡际璜(复旦大学)、刘建明(湖南大学)。