

现代物理学前沿

THE FRONTIER OF MODERN PHYSICS

本刊编译组

一、引言

物理学的基本课题是发现支配自然界事物动态的基本自然定律，借以解释已观察到的和预测未知的自然现象。物理学的领域广大，研究各种表象不一的自然现象，除了在每类自然现象里寻求基本的定律，还要求不断扩大这些定律的范畴，最终的目标是寻求具有统一性的原理，对各种表象不一的物理现象有一个根本而全面的了解。在表一里面我们列出物理学发展史上几个划时代的统一性原理 (unifying principle)。每一个统一性原理的发现都代表物理学发展中最有意义的大飞跃。从以牛顿运动三定律和重力场论为起端的经典物理，发展到以量子理论为基础的现代物理，每当有大飞跃的阶段，很多先前被认为互不相通的物理学科，都先后地被统一成为新一代里同一个领域的部门。特别值得指出来的是“统一性”的发展过程目前还在延续开展，随着实验技术的进步和理论概念上的创新，具有统一性的原理将会继续被发现。

表一里已经提明量子力学是现代物理学中的一个统一性原理。根据这个理论，动力系统可以按照它

的激发阈能 (threshold energy of excitation) 来划分；阈能值随动力系尺度 (dimension) 的减小而增高。因此，物理现象的总体可以依据动力系的尺度大小或阈能值高低的顺序，被区分成不同的现象

领域，以下称之为“量子梯阶” (quantum ladder)——见表二。一般地说，属于同一“量子梯阶”的物理过程，其典型的交换能量 (exchange energy) 数值大小相近，但是属于不同“量子梯阶”的

表一 物理学上的统一性原理

统一性原理	理论和创始人 (年代)
1. 天体物理和地球物理的统一	牛顿的运动三定律和引力场论
2. 热学和力学的统一	焦耳和梅亚的热能和力能相当性
3. 电学、磁学和光学的统一	法拉弟和麦克斯韦的电磁学论
4. 时间、空间、物质和引力的统一	爱因斯坦的相对论
5. 物理、化学和材料科学的统一	薛丁格和海森堡的量子力学理论
6. 原子物理、核物理和基本粒子物理的统一	狄拉克，海森堡等的量子场论

表二 现代物理的量子梯阶

现象领域和课题	动力系尺度 (公分)	动力系阈能 (eV)	
一、原子和分子领域： 化学，光学，物性学，生物学……，	$\geq 10^{-8}$	$\sim 10^3$	太阳系和其他恒星系
二、原子核领域： 放射性，核反应，核分裂，核聚变……，	$\sim 10^{-8} - 10^{-13}$	$\sim 10^5 - 10^7$	
三、亚核领域： 反物质，强子，轻子，夸克，胶子……，	$\geq 10^{-15}$	$\geq 10^8$	

物理过程，其交换能值则相差几个数量级。在通常情形下，当考虑低阶段的物理过程时，高阶段的物理过程往往不受激活，因而可以忽略不计。（在此，依阈能的高或低，定义阶段的高或低）。

在表二中粗分成三个“量子梯阶”，依阈能值的增加而排列：分子和原子物理，原子核物理，及亚核物理（或“基本”粒子物理）。这三个“量子梯阶”，在不同的阈能领域里各自形成基本的物理学科。从探讨具有统一性的根本物理原理来说，亚核物理是关键的领域。但是，分子和原子物理跟我们日常生活的自然环境有最密切的关系，不仅包罗气体、液体和固体的各种各样原子和分子现象，甚至连生命现象的研究也原则上属于这一个“量子梯阶”的物理领域。毫无疑问的，从对国计民生的观点来看，分子和原子物理是最丰富的基本学科。

在各个“量子梯阶”的物理领域里，实验和理论工作齐头并进，取得了很多重要的成就。在微观方面，探索活动已深入到亚核层次的“基本”粒子的结构；在宏观方面，已扩展到距离地球一百亿光年的宇

宙空间。过去二、三十年间，很多实验上的新发现和理论上的新创见，使现代物理有飞跃的进步。从本质上说，物理学的进步一定要靠理论和实验的协调并行；也要配合科学技术的发展。工业先进国家在一些重要的科学领域中居于领先地位并非偶然的。以下几项代表性的现代科学技术和新仪器设备，都已发展到成熟阶段，已得到物理学家的充分应用。因鉴于本刊以后将陆续有较详细的专题介绍，这里只很简单地加以列举。

（一）激光技术：激光（laser）技术在物理学上的应用最为广泛。各种激光器可以产生高密度的高度激励态原子、分子和强度极高的电磁能。很适合于研究光在各种物质内的非线性效应，或观测象超发光（superradiance）的集合现象。

（二）等离子技术：新的等离子技术的广泛发展，一方面发现了新的不稳定状态，另一方面也研究了被俘粒子群的各种效应。

（三）低温技术：低温技术在超导体和超流体领域里已经开辟了新世界。特别是利用约瑟夫森结效应（Josephson-junction effect）所研制的超精密低温电子器件，促

使了很多基础研究的突破。

（四）火箭技术：火箭技术的广泛应用改变了天体物理学的全貌。目前已经可以在地球大气层外作更精密的空间观测。近年来太空船成功地完成太阳系几个行星的近距离观测，全依赖火箭导弹把太空船带出地球引力场。

（五）加速器技术：最新的加速器已经可以产生能量高达 10^{12} 电子伏特的质子射束。电子射束和质子射束相碰撞的技术和新型粒子探测器的应用，使得高能物理实验有很多新的发现，实验结果也具有极高的精密度和敏感度。

（六）显微镜技术：包括扫描显微镜、聚焦粒子束和影像加强器等。这类技术可以用来研究物质小区域的精细结构和组成。

（七）电子计算机技术：各种硬件和软件的改进已经可以处理极大量的数据和资料。上述各项技术都需要使用电子计算机。同时电子计算机也大量使用在各种数学模型和模拟实验的研究上，促进了对各种复杂的物理问题的基本认识。现代物理学的研究如果没有电子计算机是不可想像的。

二、第一量子梯阶的现代物理

这一梯阶现代物理学的主流是凝聚物质物理和非线性物理的研究。这一阶段的研究成果，所有仪器和技术都和科学技术的发展有直接的相互关系。以下就有代表性的几项分别介绍。

（一）集合现象（collective phenomena）：复杂的多体问题在物理学上是很普遍的；从天体物理到亚核物理领域，集合现象的例子比比皆是，而且很多都是未解决的问题。在第一“量子梯阶”里最好的例子是超流体氦-3的研究。在超低温（千分之一开）的实验揭露了超流体氦-3的很多不寻常的特性，足以表明超流动性现象比预期的内容还要丰富。实验上观测到了几个新的液态相和它们相互间的转

变；促成这种新相的分子作用似乎也会引起氢核自旋的调准排列。在其他液态和固态物质上，这类极复杂的集合现象也发现了很多，理论上的了解在目前很多还只是片面的。

（二）无序性（disorder）现象：物理学家很早就知道如果固态晶体稍为偏离理想的秩序，对他的物性就有决定性的影响。可是理论上仍然没有一个系统的方法来描述像晶粒边界、位错和其他晶格亏损的效果，或是预测它们发生的情况。同样地，物理学家也发现很多非晶形固体呈现以前认为只有晶体才会有的许多性质，其中缘由直到最近才开始了解。液态晶体（简称液晶，liquid crystal）的发现虽

然很早（1888年），但对这个打破物理学家关于物质（固、流、气）三态的常规概念的物态，直到近年来因科学技术的发展才开始有比较具体的了解。液晶的分子排列状态很容易受外场的影响，所以利用液晶敏感的电光效应，可以作各种各样的显映材料，应用性很广，将来的前景更广。可是对液晶很多宏观特性的基本机制的认识，目前还是不够深刻。此外值得注意的是在生命过程中许多像生物膜、各种类脂和视干细胞等结构都有液晶的性质，所以要了解生命现象的本质，有关生物液晶的研究是重要的课题之一。一位著名物理学家认为下一个十年很可能是理论物理史上最“无序”的十年。

(三) 表面物理: 目前固体物理学正从静态转入动态的研究,同时也从体内的微观规律转向表面的微观规律的研究。物理学家正利用新技术和仪器设备,对各种物质的表面结构和组成进行精密的实验研究,同时理论方面也用新方法来处理这个领域的各种问题。比如,某一种原子在晶粒间界面的聚集,金属表面的氧化和腐蚀,触媒或涂料在表面的吸附和凝聚等表面现象的研究,都已经有了相当的成果。很显然,这个领域的物理研究不仅在物理学基础上具有重大意义,而且也酝酿着新科学技术的突破,值得特别注意。另外值得一提的,是近年来物理学家正力图突破超低温的框框,研究临界温度较高的一维超导

体。

(四) 非线性物理 (nonlinear physics): 发生于物理学上的种种非线性关系,通常都是很难得到数学上的了解。所以在描述自然现象时,一般的理论方法是先从线性关系特别突出的局部,或非线性小的地方开始着手;把非线性效果考虑成为扰动,用逐步近似法处理。量子力学理论就是建立在这个基本概念上的。根据量子力学波函数叠加原理,很多简单物理体系的行态可以用线性关系加上非线性微扰来描述。电磁作用是量子力学领域里最为重要的相互作用,但因为电磁耦合常数很小 ($\sim 1/137$),电磁作用效应一般都可用逐步近似法处理。可是遇到现代物理经常见到的

问题,逐步近似方法往往不适用。每当非线性关系变成重要时,因各类型不稳定性的发生而导进各式各样的新行态。这种例子在物理学每一分支里都不难找到;最古老而尚未解决的例子便是湍流(turbulent flow)。等离子物理学领域里这种不稳定性效应特别多。控热核聚反应的理论和实验的研究必然会有很重要的突破,对物理上的和工业上能源的深远意义是显然的。另外凝聚物质物理学目前正开始研究更为复杂、更高聚的物质动态;各样非平衡态也可能属于非线性物理领域。总而言之,处理非线性关系的理论方法,将是了解许多未获解释的自然现象的重要关键。

三、第二量子梯阶的现代物理

这一梯阶现代物理的主流是重离子物理和天体物理。

(一) 重离子物理(heavy-ion physics): 重核间高能碰撞的研究开辟了核物理的一个新天地。比如,(1)在高度压缩下的核物质状态现在已可以实地作实验观测。在高压下因为有受激核子和 π 介子的出现,所谓 π 介子的凝缩现象可以发生,核物质不能再被考虑成为质子和中子的集合体。事实上以单纯的质子和中子体系来描述核物质的理论方法,目前已无法解释关于普通原子核电荷分布的精确实验测量。将来物理学家要研究核结构时,就必须考虑到受激核子和介子的存在;也就是说核结构物理将会比现在更接近基本粒子物理。(2)原子序数(Z)高的核间碰撞,至少短暂地会创生 Z 值异常高(Z 值大于150)的原子核。根据量子电动力学理论,如果电荷浓度很高时,不仅真空受偏极化,也有负电子云的出现,原子核的有效电荷因此会减小。很多奇异和不寻常的效应应该发生。将来的实验可以确定这些结论的真实性。

(二) 天体物理: 现代科技的进步,对天体物理的影响特别深。今日的天体物理已非往昔可比。比

如,(1)太阳中微子实验: 恒星体(包括太阳)体内能量的产生一向被认为是相当于一个由氢变到氦的聚变过程。十多年来在美国一个地下金矿场里,实验物理学家不断检测起源于太阳内部,由铍原子 β 衰变产生的中微子。所测得十分可靠的中微子通量,低于理论预测值甚多;这个事实到目前还没有一个完满的解释。不久的将来如果可以另外测定由两个质子聚变成氦核过程中所产生的中微子通量,检测结果会是更有决定性的;因为这个聚变过程是属于太阳能量产生的直接过程中的一个步骤。万一这种中微子同样地也不被检测到,则物理学家对星体结构的整个见解将会大受动摇。(2)残余黑体辐射: 充满整个宇宙空间的 3°K 黑体辐射的发现是偶然的,但是结果是划时代的。从理论观点来说, 3°K 辐射可确定一个绝对坐标系;在这坐标系内 3°K 辐射呈示各向同性。天体物理学家所观测到的与各向同性的小偏离,可以解释成为太阳系相对于这座坐标系的绝对运动。这种运动不仅包括太阳系环绕银河系中心的旋转,也包括整个银河系向(Virgo)星系群的运动。 3°K 辐射谱目前被解释成为约150

亿(15×10^9)年前宇宙大爆炸灼热状态产生光子群留下来的遗迹。将来的观测和理论研究,可以决定这种解释是否正确。同时也可以解决以下几个基本问题:(a)了解宇宙大爆炸瞬间状态;(b)确定宇宙平均质量密度,从而决定宇宙究竟会无止境的膨胀,或是会周期性膨胀和收缩,中间相夹着大爆炸系列;(c)推定宇宙的进化在本质上是否与现代物理的看法有根本的不同。最后这个问题的可能性是不可忽视的。(3)现代天文学: 无线电天线、红外线接收器、X-射线望远镜、火箭、空间望远镜等新技术的广泛应用,大大开扩了天文学的“视界”。对宇宙的新发现已不断发生,也将继续发生。很多中子星已被鉴定。最近发现的许多X-射线根源,可能也是中子星,甚至也可能是黑洞(black hole)。

中子星(Neutron Star)的存在开始于脉冲星的发现;中子星理论的研究不仅导致了很多关于极高度核物质的新观念,而且导致了关于一个恒星如何在用尽核燃料时,向内外爆炸终于因引力塌缩而形成中子星或超新星的新见解。在中子星形成过程当中,可以产生很高的

磁场 (约 10^{12} 高斯), 足够使原子畸变成像拉长的电子管。这种现象的研究将有助于了解超新星爆炸的物理过程。另外, 黑洞的存在是从爱因斯坦的引力场论推测出来的。

这是一个十分罕见的例子; 因为这个推测远超出理论合法性已确立的领域。虽然如此, 很多物理学家认为爱因斯坦的想法十分可信服, 因

此黑洞真的也可以存在。目前已经有很多关于黑洞物理的理论; 很多结论将来都可以由太空观测来证实或否定。

四、第三量子梯阶的现代物理

这一梯阶现代物理的主流是 (一) 解释强作用粒子 (以后简称强子) 结构的夸克模型, (二) 描述强作用的量子色动力学理论, (三) 统一弱作用和电磁作用的规范场论。

(一) 夸克 (quark) 模型: 约十五年前当Gellman 和 Zweig 提出这个模型时, 很多物理学家认为它仅是一个强子系的简单排序法, 与物理真实不太相关。可是, 今天夸克的存在几乎已不容置疑。这个转变的一个重要关键是十年前在美国史坦福直线型加速器中心 (SLAC) 作出的高能电子和质子的深度非弹性散射实验。——这个实验实际上是亚核物理领域中的卢瑟福 (Rutherford) 实验。实验结果证实这些高能电子确实因电磁作用而受比质子更小、带有分数电荷的亚核粒子的散射, 与理论的猜测即核子是三个夸克的结合体相符合。类似的中微子——核子散射实验也接着作出 (这里, 中微子是因弱作用而受夸克散射), 实验结果不仅证实电子散射实验正确, 也把夸克论推广到弱作用领域。

夸克的基本性质在表三列出。为了解释各种实验结果, 至少需引

进五“味” (flavor) 的夸克, 而且每一“味”的夸克还有三个不同的“色” (color) 态。不用“味”的夸克可以因弱作用相互转变。到目前为止, 实验尚一直无法使任何一个强子“离子化”, 即将一个夸克从强子中解放出来使成为一个自由粒子。不过在很多高能碰撞实验当中, 有高动量介子喷射流 (JET), 正确地在夸克应该被弹射出来的方向被观测到; 这可以被解释成为被弹射出夸克所创生夸克和反夸克对的痕迹。这种种夸克的行态导致如下结论: 夸克间的结合力在高传递动量 (近距作用) 域是弱的, 在低传递动量 (远距作用) 域是强的。夸克的禁闭性 (confinement, 即不可离子化性) 实际上表示夸克间距离增大时, 其结合力的势能也随着趋近无穷。

(二) 量子色动力学 (quantum chromodynamics): 这是一个用非亚培式规范场论 (non-Abelian Gauge field theory) 来描述强作用的理论体系; 其数学结构基础就是杨振宁——密尔斯 (Mills) 方程式。夸克是“胶子”场的源头, 所带的“色荷”便是它的三值色自由度。胶子 (gluon) 场也带色荷,

这是非亚培式场论的特性。由于实验并未观测到带色荷的强子, 这个理论的第一课题是解释“色荷禁闭性”。到目前为止禁闭机制尚未能用这个理论导出, 但是也没有一个证明说这个理论无法解释禁闭性。最近在德国汉堡加速器实验室已观测到两个和三个喷射流的过程, 分别是夸克和胶子存在的有力证据。

在夸克和胶子动力领域里, 目前还不能解释或预测“味”的总数。上节已提到, 根据实验结果至少有五“味”的夸克存在。在一般状况下, 自然界里的核物质是由质量最轻的两个夸克, 即“上”和“下”夸克结合成的。质量较重的“奇” (strange) 和“粲” (charm) 夸克则结合成那些高能碰撞中产生的、寿命短的“ Λ ”和“ Σ ”强子。第五味“底” (bottom) 或“美” (beauty) 夸克的存在是最近由“ γ ”粒子的发现而推定出来的。至于弱作用和电磁作用的统一理论 (见下节) 中所预言的第六味“顶” (top) 或“真” (truth) 夸克, 实验物理学家正在努力探索中。

(三) 弱作用和电磁作用的统一理论, Glashow、Salam 和 Weinberg (本期另有专访 Glashow 和 Weinberg 纪要) 所提出的弱作用和电磁作用统一理论, 是基于引进传递这两种作用的规范场来达成统一目的。其中一个规范场描述光子, 是电磁作用的载体, 另外一种规范场则描述“居间玻色子” (intermediate boson), 是弱作用的载体。这两种规范场混合之后, 将电磁作用和弱作用“统一”起来, 这不仅解决了先前弱作用理论中的几个内在矛盾, 而且也预测中性弱电流即不传递电荷弱作用过程的存在。果然几年内在欧洲核子中心 (CERN)

表三 基本粒子 (1979)

费密子				玻色子 (费密子间相互作用载体)		
夸克 (三值色态) (自旋 $\frac{1}{2}$)		轻子 (无色) (自旋 $\frac{1}{2}$)		作用 类型	作用源头	作用载体
味类	电荷	味类	电荷	强	夸克色荷	胶子 (?) (自旋 1)
上 (u)	$\frac{2}{3}$	电子 (e)	-1	电磁	带电粒子	光子 (自旋 1)
下 (d)	$-\frac{1}{3}$	电子中微子 (ν_e)	0	弱	所有粒子 (弱荷)	居间玻色子 (?) (自旋 1)
奇 (s)	$-\frac{1}{3}$	μ 介子 (μ)	-1	引力	质, 能	引力子 (?) (自旋 2)
粲 (c)	$\frac{2}{3}$	μ 中微子 (ν_μ)	0			
顶 (美) (t)	?	重电子 (τ)	-1			
底 (真) (b)	$-\frac{1}{3}$	τ 中微子 (ν_τ)	?			

? 表示未经实验证实。

实验室和美国费米 (Fermi) 国立实验室,用中微子引起的反应中,证实了中微子和核子间中性流弱作用的存在。美国史坦福直线加速器中心 (SLAC) 的偏化电子——质子散射实验里,用违背奇偶性的效应更进一步证实了电子和质子间中性流的存在。上面所提几个实验都是极困难、需要高度精密度的实验。试想在前研究弱作用的八十年中,这类中性流弱作用过程始终未被觉察,其难度可见一斑。同时需要特别指出的是,实验结果都和理论预测值在量上是符合的。弱作用载体,即居间玻色子,共有三类:两类带电,另一类是中性。它们的存在目前还没有实验的证实。这是当前弱作用和电磁作用领域里极其重要的课题之一。同样地统一理论里不可缺的另一新粒子,即“希克”玻色子 (Higgs boson),也尚未被发现。如果统一理论是对的话,则

在更高能域 (约千亿电子伏特)里,不仅弱作用和电磁作用应该会合并为一,很多新现象的特性也会与现阶段所熟知的有所不同。

在弱作用和电磁作用领域里,另有一个重要的实验发现,即质量约 2 GeV 的 τ 粒子 (重轻子) 的发现,它的性质和电子及 μ 介子相若;至于 τ 粒子是否像电子和 μ 介子一样,有它自己的中微子,必须由将来的实验来答复。重轻子的发现必然地引起不少基本问题,比如(1)为什么有不同轻子核的存在?除了质量不同以外,带电轻子的弱作用和电磁作用本质上有普遍性 (universality) 的;(2) τ 粒子 (或其他未被发现的重轻子) 存在的真正理由又是什么?现在都没有合适的解释。有些理论试图从天体物理学中找寻答案。不过,尚待进一步的发展。

(四) 大统一理论:这是以非

亚培式规范场论为理论基础,试图大统一强作用、电磁作用和弱作用的大胆概念。这一理论体系将已知夸克和轻子都归属于同一粒子族,因此重子恒守性已不存在,质子可以衰变。理论预测的质子寿命 ($10^{32} \sim 10^{33}$ 年) 正好在目前实验技术能力可以探测的范畴以外,所以美国物理学家已在一地下金矿 (即太阳中微子实验地点) 开始用上百吨水的检测器设法观测质子衰变的产物 (比如正电子和 π 介子)。这一系列实验的结果,对于亚核物理发展的方向,会有决定性的影响。

总的来说,近十年来亚核物理的进展日益显示出杨振宁——密尔斯型规范场的重要性。不论是强作用中的色动力学,电—弱统一场论,或是强—电—弱大统一理论,理论的数学结构都是以规范场理论作基础。规范场理论已隐隐然形成一个具有“统一性”的原理。

五、结语

本文因资料、时间和篇幅关系,只能介绍现代物理学范畴里的几个代表例子。本刊以后会有专题的文章对现代物理学的分支作简介。

本文对现代物理学的介绍是在“统一性”概念的基础上,强调物理范畴里三个“量子梯阶”间的相互关系,我们也强调基础物理的研

究和科学技术发展二者之间相辅相成的关系。物理研究的健全发展,在于在各项分支里均衡地奠定深厚的根基。

· 上接 82 頁 ·

哈洛夫妇由这一系列研究中得到下列结论。婴儿期的社会经验对恒河猴成年以后的社会行为有很大的影响。在婴儿期的社会经验中,与母亲的交往固然重要,但更重要的是有年纪相若的玩伴。与玩伴相处的经验,即使每天只有短短的二十分钟也可以在相当程度上弥补小猴失去母亲可能造成的后果。

哈洛夫妇的“恒河猴发展研究”的一系列实验在一九六〇年代中先后发表以后,一时洛阳纸贵,各学术杂志,及各大学教科书,均争相转载,在心理学及教育学界都起了很大的影响。这一系列的实验本身固然有趣,但更重要的是哈洛夫妇由这些实验中有系统地证明了婴儿期社会环境对恒河猴社会行为发展的影响。恒河猴的行为和人类的十分类似,由此指出了一个更重要的可能性:人类的母性、母子之情和社会行为是不是也可能受早期生活社会环境的支配呢?这是个值得我们探讨的问题。另一个更值得我们注意的事情是:心理学,虽然研究的是心理状况,但这种种心理状况往往可以由具体的行为中观测出来。从哈洛氏这一系列的研究中,我们可以清楚地看出科学方法在心理学上的运用了。 ㊟

· 上接 90 頁 ·

的 0.2%,社会问题的研究远比自然科学复杂,研究的结果也不如自然科学肯定,因此这方面的发展本身也是问题。

最后要提的是农业研究,美国不是以农业为主要经济活动的国家,因此农业研究也处于次要的地位,只占全国投资的 2%,这种比率较之中国是不相称的。由此我们也可看出对美国科研的分布,只能提供一个借鉴,真正的分布还要根据中国的经济活动和成长而定。 ㊟

参考文献:

- An Analysis of Federal R & D Funding by Function
National Science Foundation 1978
- National Patterns of R & D Resources
National Science Foundation 1977
- Statistical Abstract of the United States 1978
U. S. Department of Commerce, Bureau of the
Census
- Research Center Directory 1979
Gale Research Company, Detroit, Michigan
- Directory of Federal R & D Installations
National Science Foundation 1970 ㊟