

现代物理学

参考资料

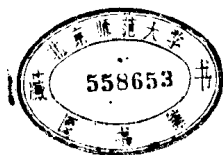
第二集

科学出版社

现代物理学参考资料

第二集

刊1/165/23



科学出版社

1978

内 容 简 介

本译文集主要翻译国外书刊上发表的有关物理学和天体物理学方面综述性和中级科普性的文章,供我国广大科技工作者、高等院校师生和中等文化水平的读者了解这些方面的发展动态时参考。本集选择了十五篇文章,介绍了现代物理学和天体物理学的若干方面,可供对这些方面感兴趣的读者参考。

现代物理学参考资料

第二集

《现代物理学参考资料》编辑组

(中国科学技术大学)

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

天津第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年5月第 1 版 开本: 787×1092 1/16

1978年3月第1次印刷 印张: 8 1/4

印数: 0001—14,000 字数: 185,000

统一书号: 13031·657

丛刊书号: 954·13—3

定价: 0.70 元

限 国 内 发 行

目 录

量子理论对现代物理学的影响	(1)
基本物理常数	(9)
基本常数不变吗?	(21)
氦的低温相	(32)
高温超导电性	(35)
原子、高山和恒星的定性物理学研究	(43)
物理学和天体物理学目前最重要和最有意义的问题是什么?(续一) ...	(58)
地震何时发生?	(67)
宇宙学的最新进展	(72)
空间物理学展望	(77)
高能天文学	(82)
X 射线天文学	(93)
引力塌缩和黑洞	(103)
寻找黑洞	(110)
关于黑洞的一个新观点	(124)

量子理论对现代物理学的影响

V. F. Weisskopf

一、引言

普朗克在本世纪初发现了作用量子，从此开始了科学上最有成果也是最革命性的发展之一。我们关于物质本性和行为的基本观点所发生的变化和发展，很少有象普朗克的发现以后三十年内那样深刻。

随后发现的原子内能量的量子化，光子的存在和被-粒二象性，都和经典物理学的基本概念直接矛盾。非常明显，原子系统的力学所依据的规律，和我们所观察到的支配宏观物体行为的规律是完全不同的。为了描述和了解原子现象，必须找出一种新的力学基础。

大约花费了四分之一世纪才完成了这项任务。在本世纪三十年代，在解决了量子理论的一些佯谬之后，以新的量子力学为基础，对原子系统的动力学行为，建立了一种新的合理的描述方法。这基本上是在1924至1928年这些年内的重大发展中，由少数物理学家共同努力而发现的，其中主要的有玻尔、海森堡、薛定格、玻恩、泡利、德布罗意、狄拉克、约当以及克拉梅斯等人。在这样短时间内，由这么少的人完成了这样多的工作，这是前所未有的情况。

二、量子力学的成就

1. 原子结构

量子力学的第一个重大成就，是对氢光谱的定量解释，从而使玻尔最初提出的初步量子化规则有了一个牢固基础。人们从一个比较简单的理论——单个电子受质子引力场作用的非相对论量子力学，就可推导出氢原子的性质、光谱及其跃迁几率。量子态可用态函数描述，后者又可用已知的数学函数表示；从态函数可导出氢原子的全部性质，但要说明其中的一些细节，例如光谱项的精细结构，则要用到狄拉克的相对论波动方程，我们后面还要讨论它。

量子力学的另一个决定性成就，是对氢原子性质的定量解释。这个问题是玻尔-索末菲早期提出的量子化规则不能解决的，因为氢原子不是一个周期系统。量子力学能够处理有几个电子的问题。虽然有关的态函数不能表成闭合形式，但可以计算到任何所需要的近似。

泡利原理对氢原子动力学起着基本作用。例如在基态时两个电子占据同一轨道，这和氢原子的基态相似。泡利原理要求两个电子的自旋方向相反，只有当两个电子在不同轨道上自旋才是平行的。在激发态中发现了氢原子有两组不同的量子态，一组是电子自旋平

• 1 •

行的态,另一组是电子自旋反平行的态(正氮和超氮)。

初看起来令人奇怪,自旋平行的态和自旋反平行的态非常不同,但电子自旋反向时,电子本身并没有多少差别。磁矩产生的磁力远小于决定量子态性质的电力,而电力并不依赖自旋取向。

量子力学已完全阐明了这个问题。这是泡利原理如何说明了电子自旋的一个特殊例子。它要求在自旋平行和自旋反平行时态函数有不同的对称性。因此,自旋相对取向的改变将引起态函数的显著改变。态函数对平行自旋必须是反对称的,对反平行自旋必须是对称的。对称性的这种差别引起的能量改变,要比磁自旋相互作用所引起的大得多。所以,电子自旋的相对取向获得特殊的刚性,因为通过态函数的对称性,它的改变要影响能量关系。利用这一效应已解释了铁磁性,这种现象是金属内的电子自旋由于这些效应而保持平行,而后者比磁相互作用强得多。在作出定量处理以前很久,海森堡就首先找到了这两个谜——氢光谱和铁磁性的定性解释。

泡利原理对了解有几个电子的原子结构也起着基本作用。原子基态利用每个电子的独立“轨道”能最好地描述。每个轨道上有两个电子,依能量增加顺序,直到把全部电子放进去(玻尔结构原理)。定性讨论这一简单原理的结果,直接导致对1870年门德列夫发现的元素周期律提供令人信服的解释。这些轨道的系统性几乎自动地重现出元素之间熟知的周期性和相似性。只要在最低轨道上集中了一定数量的电子,位形就成为一个特别对称的圆形状,通常称为闭合壳层。在门德列夫周期表各周期末端的元素,是化学上的惰性气体。在这些闭合壳层上加入一个、两个或三个电子,就得到化学性质相似的原子,例如碱金属、碱稀土金属等。1922年,量子力学和泡利原理还未提出,玻尔就已经正确地给出了这一解释的主要特征及其大部分细节,这至今仍然是直觉想象力的非凡功绩。

今天我们对所有原子的结构、动力学及其能谱有了很好的了解,很少有任何重大问题没有或不能用量子力学的数值方法解决了。

2. 分子结构

量子力学最广泛的成就,也许是化学和物理的统一:对化学键性质的了解。

当两个原子从比它们的大小大得多的距离相互靠近时,由于引起电子轨道形变,总能量随着距离而改变。如果在结合距离上能量减至最小值,就形成键。如果能量一直增加,就不能形成键。在大多数情况下发生前一种情况,特别是当外电子自旋方向相反,使一对电子构成一个共同轨道时尤其如此。于是两个电子受到两个核吸引,而形成的结合力比原子核间不可避免的电力强得多。

原子互相靠近时形成共同轨道(同极键),并不是导致总能量最小的唯一机制。当一个原子有一个束缚很松的电子,而另一个原子对外加电子具有很强的亲和力,则出现另一种简单机制(离子键),于是原子相互靠近时交换一个电子,形成异号的离子而相互吸引,构成离子键。

还有其他许多机制也导致原子之间的成键,但所有这些情况,都可以看成是被结合的电子和原子核,在相互的电力和斥力作用下,形成了一个公共量子态,这个量子态的能量小于分立原子的能量之和。

量子力学以非常简单的方式说明了化学键的形成,它被看成是纯静电效应。在成键

条件下,核和电子之间的静电吸力有净增加,这是由于复合系统的量子态包含了重新排列的轨道而引起的。因此,变化万千的化合物,都是自然界一种简单基本力——电荷粒子静电相互作用的不同表现。这是量子力学所提供的最有意义的了解之一。

3. 固体结构

认识了原子间各种键的本性,就可以使我们了解固体晶体结构的构造,最简单的例子是离子晶体。它们是两种类型原子构成的材料,每一种原子都趋向于变成电荷相反的离子。在有规则的点阵排列下,正、负离子由静电吸力保持在一起,当离子的电子心相互接触时达到平衡。根据泡利原理,这时引起一个很强的斥力,因为该原理禁止电子占据空间同一区域。

在大多数其他固体材料中,结合力来源于下列事实:在紧密堆积时,原子的外层电子能够从一个原子运动到另一个原子内,因此它们受到一个以上原子核的吸力,使吸力胜过斥力,把材料结合在一起。量子力学对于了解这种固体的性质提供了一个概念框架。它依据电子在有规则排列的正离子所形成的有序晶格内运动时出现的两种量子效应。第一种效应是波动不受规则排列的障碍物散射。因此,电子通过晶格好象在一个空的空间内运动。电子只是受到热运动引起的晶格的微小不规则性或杂质的散射。第二种效应是,在晶格内自由运动电子的量子态分成几个组,其动能从零到某一个最大值。由于在一组内各态的能量几乎连续分布于最小值与最大值之间,因此,把这些量子态组称为“能带”是非常恰当的。如果能带内各态是部分填满的,这种材料就成为金属导体,外加电场很容易使电子运动而形成电流。电子在电场方向以较高速度逐步跃迁到空态。如果能带被完全填满,材料就成为绝缘体,于是泡利原理不允许态有任何变化,也就不能产生净电流了。

利用完全填满或部分填满的电子“带”概念,有助于解释大量观测到的有关金属和绝缘体的电学、磁学和光学性质。它不但说明了半导体的存在,而且还由此制成了新型半导体和设计出了新器件,例如晶体管。

金属的量子力学最新成就之一,是对超导电性现象的说明,超导电性现象是一些金属在低温下电阻完全消失,尽管还存在晶格的不规则性。它被认为是电子之间的相互作用效应,是由于对晶格产生的共同变形作用而引起的。描述这些效应需要创造出一种新语言,以讨论相互作用电子的集合行为。这种语言对了解低温下其他类似的集合效应,例如液氮的超流性,也同样有效。

4. 核物理学

到此为止,我们介绍了量子力学对原子和分子问题的应用,也就是电子在原子核电场内的运动。原子核比原子小得多,大约为 10^{-13} 厘米数量级。就原子及其复合体的动力学而言,原子核象是一个很重的荷电的质点,有时具有磁多极距或电多极距。由于按照量子力学,在一个系统的尺寸和能量之间有一个基本关系,因此,任何内部的动力学结构对原子物理学都没有什么影响。动力学系统的激发能为各组分动能 K 的数量级。从系统的线度 d ,可推导出动能 K 的下限为 $K \geq \hbar^2/(2md^2)$, 此处 m 是组分的质量,代入核子质量和原子核的大小,得到 $K \geq 10^6 \text{eV}$, 它远大于原子的激发能。因此,在原子物理学中,允许把原子核看成是一个没有任何内部结构的惯性体,看成是一个基本粒子。

1932年,查德维克发现了中子,十分明显,原子核是由质子和中子(核子)构成的系统,由自然界一种新的力结合在一起,这种力比电力强得多。深入地研究原子核的散射和简单核的性质,已揭示出核力的一些性质。它是一种作用在核子对之间的短程力,作用范围是 10^{-13} 厘米,它可用一种势近似表示,而这种势在大部分范围内是吸力,在较小距离时转变为斥力,其定量细节依赖于两个核子的自旋相对取向和态函数的对称性。核力看来是一种十分复杂的现象,象是间接地反映了一个尚未了解的层次上的更基本的效应,它和化学力反映了原子组分间的静电相互作用是相似的。

把核力看成由经验决定的势能后,核动力学就代表粒子主要受吸力作用的典型的量子力学情况。诚然,核结构理论的发展,证明了是量子力学的又一功绩,其结果和原子动力学有某些相似性。但是,和原子世界比较,有两个特点限制了核现象的多样性。一个特点是核力是短程力,它排除了氦核(核物理学中的“氢原子”)内存在稳定的激发态,氦核只有一个稳定的量子态,即基态。另一个特点是质子和中子的任何组合都带正电荷,这使得很大的复合体是不稳定的。因此,使得在较长时间内结合在一起的粒子数 A 有一个极限值($A \sim 250$)¹⁾。

原子核动力学和原子的或分子的动力学有许多相似性。激发态能谱在量子数和辐射跃迁几率方面呈现出若干相似性,存在相似的“结构”原理。这导致核性质形成周期性系统,“闭壳层”核系列类似于惰性气体。由于作用力的性质不同,特别是由于它们对相对自旋取向的奇异依赖关系、构成闭壳层的组分不是相同的。已发现了原子核的转动和振动能谱,和分子系统的相似。

在原子核物理学中还发现了一些新现象,在原子过程中没有类似现象。最有意义的是放射性衰变时出现的弱相互作用,其中最简单的是中子衰变为质子、中子的质量比质子约大1.2MeV。

在放射性衰变中,相应的能量差和电荷差以粒子对形式放射出来,例如放出一个电子和一个反中微子: $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$ 。和其他核反应时间比较,这是一个非常缓慢的过程。中子的半衰期是12分。相反的过程是: $p \rightarrow n + e + \nu$,放出一个正电子 e 和一个中微子。但是,这种衰变过程只发生在原子核内,条件是质子转变为中子在能量上有利,从而可以弥补中子重于质子这一事实。此处质子和中子被认为是同一粒子的两个量子态,带不同电荷。上述两个衰变过程是这些态之间的跃迁,同时放出轻子对(电子、中微子和它们的反粒子都是轻子)。把量子态概念扩展后,也可以包括电荷不同的态。

弱相互作用过程最令人惊异的特点之一,是不存在镜像对称,在左和右之间有根本差别。例如,发射中微子时自旋相对其传播方向完全是左旋的,而发射反中子完全是右旋的。其他自然现象都不出现这种反对称性。

三、今后发展

1. 相对论量子力学

量子力学对原子、原子复合体和原子核的应用,绝大多数处理的都是粒子的相对速度

1) 只有铁(54个核子)前面的元素是长期稳定的。如果 $A > 250$,衰变前的平均寿命可用年(或小一些)表示当 A 达到 10^{10} 时,引力效应产生稳定性。在所谓中子星内也许存在这种巨大的核。

小于光速的情况,因而可以略去相对论效应。量子力学的大部分成就都是依据上述事实,略去相对论效应,不但可以简化量子力学的应用,而且还可以避免尚未解决的某些概念困难。这些困难与粒子间的相互作用以有限速度传播有关,目前对此还只有比较粗糙的处理方法。但是,在量子力学中,已采取了许多成功的步骤来考虑相对论效应。而且建立符合相对论的量子力学的尝试,已使我们对物质的基本性质有了新的了解,直接导致了“反物质”概念及其产生和湮灭的过程。

早在1927年,狄拉克就提出了处理一个带电粒子在电磁场内运动的相对论量子力学。这个方程指出粒子具有自旋和磁矩,其大小和从电子观测到的相同。自旋及其磁性质是波动方程的基本特征。把这个方程应用于电子在固定点电荷场内的运动,得到的态函数能精确地描述氢原子光谱的精细结构以及其他观测到的相对论效应。由于这种场的静态性质,在这一问题中,并不出现相互作用以有限速度传播的困难。

狄拉克方程有一个重要特征,当时并没有立即了解它的意义。它包含了看来对应于负动能态的解,显然,这种态在物理上是不可能的。但是不久就了解到,这些态是有物理意义的,只是必须用不同方式解释,即它们是正动能的态,代表电荷和磁矩都相反的电子,即正电子。因此,狄拉克方程隐含了反粒子的存在。而且方程还指出了自然界的确存在的粒子-反粒子对的产生和湮灭过程。例如,能量相当大的光子被原子核的电场吸收后,产生电子-正电子对。反过来,电子和正电子本身在碰撞后又可以转变为光子。在正电子在自然界被发现以前,这一理论就已经预言了它的存在,这至今仍然是狄拉克方程的简明性和深刻性的一个令人惊异的见证。

粒子-反粒子的二象性和这些粒子对的产生和湮灭过程,不只是如狄拉克方程所描述的,只是电子或自旋为 $1/2$ 的粒子出现。它们是相对论量子力学的一个普遍结果:任何粒子,不论自旋如何,都有两种形态——粒子和反粒子¹⁾,在适当条件下它们一起产生和相互湮灭。粒子和反粒子具有相同的质量和自旋,但电荷和在产生与湮灭过程中守恒的任何其他量必须是相反的。

2. 场论

相对论量子力学所面临的问题,是相互作用的有限传播速度。相互作用力——电磁场、核力、弱相互作用,不能看成只是相互作用粒子的简单属性,这些相互作用具有自己的动力学结构。对这些场的动力学及其与其他粒子的耦合,已应用了量子力学的概念。这些“场论”中最成功的,是荷电子粒子例如电子和质子间的电磁相互作用的量子力学,称为量子电动力学。

在场论中,“粒子”和“作用场”的差别已大部分被消除。粒子是场,也即是粒子波场的量子,而作用场的量子化构成“粒子”,即场量子,例如电磁场的光子,核力场的介子。

场论的典型特征是粒子和反粒子的数目不是固定的,场量子被发射和吸收,电子或质子等粒子与其反粒子一起产生和湮灭。只有当能量交换小于静质能,也即是在非相对论条件下,粒子数目才是固定的。显然,因为光子的静质量为零,光子的数目不是固定的。

1) 光量子和某些不带电介子有着特殊位置,在这些情况下,粒子和反粒子是相同的。

可惜,我们目前还不能始终一贯地应用场论。甚至量子电动力学,也仍然存在一些来源于带电粒子电磁自能的内在困难。有一些困难在电子的经典理论中已经存在;它们和电子的尚未了解的内部结构有联系。一个无限小的带电粒子(点电荷)导致无限大的自能。在点电荷紧邻近,库仑场能量变为无穷大。一个大小有限的粒子对于任何相对论性理论都带来严重困难。甚至在今天这些问题也尚未解决,但已找到一种权宜之计——重正化,能把场论应用于任何实际目的,只是不能用来计算自能及其有关量(例如质量和有效电荷)。

尽管出现了质量和电荷无穷大,但从场论求得结果的方法,在量子电动力学中仍是非常成功的。例如,用它可算出电子和 μ 介子的磁矩与狄拉克值的某些偏差,并且和测量值惊人地符合。另一个例子是计算氢和其他原子的量子态能量的小位移(称为兰姆移动),也和实验值非常符合。但是,必须着重指出,“实际”应用场论的这些方法,都是依据耦合常数很小,而耦合常数是表征场与场源耦合强度的一个量,在电磁场情况下,这个常数为 $e^2/\hbar c$ (此处 e 是电子电荷, $\hbar$ 是普朗克常数, c 是光速),其数值为 $1/137$,而且耦合是很简单的。

对其他类型的相互作用,情况没有这样好,核力的性质尚未了解清楚,把它表述成场论的任何尝试,都导致大的耦合常数,因而应用重正化很困难。虽然弱相互作用的耦合常数很小,但相互作用形式似不够简单,也不能构成重正化的场论。

3. 高能物理学

在过去二十年内,已能把粒子加速到几百亿电子伏,超过了质子和中子的静质能。把这种能量的粒子束打到物质上,发现了许多令人惊异的新现象。在加速器的靶上出现了一个丰富多采的世界,其中有没有预料到的粒子、反应和相互转变。

在这新的现象领域内,我们所面临的情况是粒子对产生和湮灭的现象增加,出现许多各种各样的粒子和反粒子,并且相互转变。而且,象质子和中子等粒子,好象出现许多不同的量子态;这些量子态之间的跃迁,伴随着放出和吸收一种新粒子或量子,即所谓介子。介子也出现许多不同的量子态。在不同的量子态内,介子和核子似乎有强相互作用,而核力是这种强相互作用的一种表现。

今天描述这些现象,除了采用量子力学和场论的语言外,尚无其他手段。我们正处在日益恶化的形势下;出现的现象虽颇类似于强相互作用所预料到的情况,但概念上的困难不允许我们验证或者否定量子场论在这现象领域内的有效性。目前完全不能肯定,量子力学和场论究竟是一种适当的形式体系,还只是代表一种用了错误语言描述未知现象的失败的尝试。

弱相互作用在这些过程中似乎起着重大作用。许多粒子衰变为其他粒子的现象以及某些散射现象,都被证认为相互作用的不同表现,和发射电子-中微子对的现象相类似。如果在弱相互作用或电磁相互作用中能量交换足够高,将产生电子的一种新的重形态—— μ 介子。我们还不了解通常电子的这个伙伴有什么意义,它与电子的唯一差别是质量要重200倍。

在高能过程中,弱相互作用也表现出缺乏当粒子和反粒子交换位置时在相反方向出现的左右对称性。因此,只有世界同时变成反世界,似乎自然界才对左右交换是对称的

最近发现,甚至这种对称性,在某些弱相互作用过程中也被破坏。

四、结 束 语

量子理论使我们对物质世界的观点发生了革命性变化,它已渗透到了自然科学的各个领域。说明自然现象的语言也发生了彻底变化。量子态、激发能、跃迁几率、波函数、轨道、共振态、光电子等概念,已取代了经典力学和经典电动力学的概念。

量子力学最广泛的成功,是说明原子和分子的现象,它们的交换能低于核激发能。这里达到了一种非凡的统一。依据一种了解得很清楚的简单力——电子和原子核之间的电磁相互作用力,能够了解原子、分子及其复合体的结构和动力学以及性质和行为。

处理原子动力学的新方法,使我们对原子世界的特性有三个重要认识。

第一,对支配原子现象的尺度和能量的典型大小有了一个概念。了解了它们的尺寸和量度。核静电引力限制的电子波大小一定是玻尔半径的数量级 $a_0 = \hbar^2/mc^2$, 它们的能量是里德伯单位数量级 $R = \frac{mc^2}{2\hbar^2}$, 因此,原子尺度成了基础的基本常数。量子力学也确

定了核现象的典型长度和典型能量。但是,由于核力的性质尚未了解清楚,因而不能用基本常数表示它。考虑到这种力的强度和特性的经验知识,我们得到核现象的自然尺度是:特征长度为 10^{-13} 厘米,特征能量为 10^6 eV。

第二,量子力学引进了一个“形态”特征,它在过去的物理学中是不存在的,但在自然界并不缺乏。原子世界有许多特征形态、典型特性、重现性质,从同类原子的全同性到生命物质的真实复现。这种形态特征来源于电子波函数,它具有的特定形态和花样,决定于电子在原子内受到的电场作用。这些花样是每一类原子和分子的特征,反映了它们的特殊对称性。它们是构成我们周围一切物质的基本形态,只要原子处于相同条件下,总是相同的、不变的,而与它们过去的历史无关。值得注意的是,我们在原子世界里实际上发现了毕达哥拉斯和开普勒在行星运动中要找而未找到的东西。他们曾认为地球和其他行星在特定轨道上运动,每个行星有一个特定轨道,它由某一个根本原理决定,这个根本原理既和我们行星系的特定命运无关,也和它们过去的历史无关。实际上,行星运动中并不存在这种原理,但却有一个原理支配着粒子在原子和原子核内的运动。

量子力学带来的第三个新认识,是关于量子态性质的,量子态是一个完全确定的不可分的实体,但是有些测量结果只能用几率分布表示。这里缺乏完全的预言性,是由于测量与系统相互干扰,破坏了量子态的独立个性。这种情况通常称为因果性破坏,因为量子态的完全知识并不能精确预言全部测量结果^{*}。这是经典描述与量子力学描述一个重大差别。前者认为系统状态的每个细节都能精确测量;后者则把系统描述为处于特定的量子态内,不是每次测量结果都是确定的。一个系统的详细结构包含在全部量子态内,这反映了一个事实:在给定量子态内不确定的某一特性,对它进行测量时将引起跃迁到其他量子态。这种情况最突出的一个例子,是基态下原子核的放射性衰变,人们不能精确预言衰变时间。深入了解原子核内部的动力学,以找出是什么引起了单个衰变这样的尝试不

^{*} 这里指的是经典物理学中的机械因果律破坏,实际上,量子力学的规律,反映了微观现象中必然性和偶然性的对立统一,它是普遍因果关系的另一种表现形式,只是否定了那种完全排斥偶然性的机械因果律(译者)。

可避免地使原子核跃迁到它的许多激发态,因而将完全改变它的衰变。

量子力学的成就充分地证明了,量子革命所引进的概念大大地加深了我们对物质行为的了解,为合理地描述原子世界,创造了一种新语言,并且使我们对自然界塑造构成一切物质单元的方式,得到了一个更深入的认识。目前我们的知识还是很不完全的,有两个不同的前哨阵地,可以探索新的知识和更深入的了解,这就是“内部”前哨阵地和“外部”前哨阵地。前者研究我们目前尚未了解的复杂原子复合体的结构和行为,尽管对支配原子结构和相互作用的原理,已有了很好的了解。

目前结构大部分尚未了解的例子,有非晶态物质、薄膜、高电离态物质(等离子体物理)和复杂大分子,后者在适当环境下产生各种生命现象。目前处理复杂的和高度组织化的物质形态还只有极粗糙的方法,因为在这些物质形态内,在有关各量之间一般存在非线性关系,出现新的超结构。这种情况和完全分开的原子或简单的原子复合体的行为是完全不同的,其中各个量子态的能量差距非常大,不易受到干扰。因此,必须有新的概念,新的思想方法和描述方法,才能更深入地了解自然界所发现的结构层次。

物理学的“外部”前哨阵地是研究原子及其复合体范围以外的现象,也即是研究不能用带电粒子间的电磁相互作用解释的现象。它们是核物理学、高能物理学和天体物理学的前哨阵地。在这些领域内,支配各种过程的原理还大部分尚未了解。我们还不了解核力的性质,弱相互作用的性质,对高能下发现的各种现象、各种新粒子和反粒子,也还深感迷惑不解。天文学的发现也提供了许多新现象,它们的意义和起源也尚未完全了解,例如类星体、脉冲星、星系爆炸等。一些新发现有可能利用量子力学概念得到解释,但是另一些新发现也可能指明了自然行为的新样式,利用目前的概念还不能理解。

(吕德文译自西德《Die Naturwissenschaften》1973年10月号)

基本物理常数

B. N. Taylor, D. N. Langenberg, W. H. Parker

跟流行的见解相反,物理学通常并不是一门十分精确的科学。如果一位物理学工作者测量某些物质的性质时准确度能够达百分之几,并发现测量结果和理论预言之间的差别范围也只是百分之几,他往往就非常高兴了。在某些情况下,发现相符程度在一个数量级(一个10的因数)范围内,就是一个相当大的成绩。测量精度比较低主要有两个原因:其一,大多数实验须和复杂的系统打交道,其中常常涉及各种各样相互联系而往往又不十分了解的一些现象;其二,有关的理论通常只是提供一些基于系统的简化模型而得到的近似。

另一方面,物理学中有一些特殊的量能够而且必须有更高的准确度,这些就是基本物理常数。它们包括象下列一些量:真空中的光速 c 、普朗克常数 h 、电子电荷 e 、电子质量 m_e 和精细结构常数 α 。我们之所以选择这五个常数,而不选择重要性相似的其他量,是由于以它们为例子来说明基本常数的各种来源特别适合。

有一些量是物理学基本理论数学表述式中自然出现的,光速和普朗克常数就是一些例子。比如,在爱因斯坦的相对论中,一个原子的能量 E 和质量 m 是由著名的方程 $E = mc^2$ 联系的,而在量子理论中,一个光子的能量 E 和频率 ν 是用方程 $E = h\nu$ 联系的。

电子的电荷和质量是另一类常数的例子,它们除了表征这一特定的基本粒子之外,本身还是一些基本单位,其倍数可用来描述组成物质的所有其他的基本粒子。比如说,一个 α 粒子的电荷是电荷基本单位的两倍(即 $2e$),而中性 π 介子的质量是质量基本单位的 264.1 倍(即 $264.1m_e$)。

精细结构常数 α 是基本常数的又一种类型的例子。它可以表示为其他一些常数的组合($\alpha = 2\pi e^2/hc$)。因为这种组合总是严格地以相同方式出现在许多理论方程中,因此,这一组合本身实际上就成了基本常数。精细结构常数是量子电动力学的基本常数,量子电动力学是描述基本粒子和电磁场之间相互作用的量子理论(α 是这些相互作用强度的量度)。这类基本常数的另一个例子是里德伯常数 R_∞ ,它等于 $2\pi^2 m_e e^4/h^2 c$,它规定了原子(例如氢原子)中所容许的电子能级的尺度。

当然,在自然界还有许多其他量,也可以高度准确地测量出来,例如某一特殊金片的密度,或地球到太阳的距离。但这种量一般不认为是基本常数,因为它们跟所测量的物质或系统的某些特性的关系太大了。不同的金片样品会给出不同的结果,火星无疑地将争辩说:火星到太阳的距离与地球到太阳的距离同样是基本的。这样的量本质上缺乏普遍性。它们不是前后一致地出现于物理学的基本理论方程中。它们也不是物理学的基本粒子的性质。本质上它们是宏观量,因而具有特殊性,而不是微观量,因而不具有一般性。(某些理论物理学家曾考虑到基本常数可能随时间而变化,例如 1870 年的 c 跟 1970 年的

ϵ 、稍有不同。但现在还没有具体的实验证据表明基本常数不是恒定不变的,我们不对此作进一步的讨论了。)*

表 1

常数名称	符号	单位	数值	不确定度 $\times 10^{-4}$
真空中光速	c	10^8 米/秒	2.9979250(10)	33
电子电荷	e	10^{-19} 库仑	1.6021917(76)	4.4
普朗克常数	h	10^{-34} 焦耳·秒	6.626196(50)	7.6
电子质量	m_e	10^{-31} 公斤	9.109558(54)	6.0
精细结构常数的倒数	α^{-1}		137.03602(21)	1.5
里德伯常数	R_∞	10^7 /米	1.09737312(11)	10

表中列出了本文所讨论的六个基本常数的目前最佳值。表内列出精细结构常数的倒数 α^{-1} , 而没有列出 α , 这是因为 α^{-1} 的数值比较简单。左起第三行列出各个常数的单位, 而 α^{-1} 是纯数, 故无单位。“数值”栏中括号内的数字表示主值中最后二位数字的不确定度。表中最后一行给出相应的不确定度, 其单位为百万分之一。

一、准确度的重要性

为什么以很高准确度测量基本常数的数值是很重要的呢? 首先, 物理学基本理论的定量论断取决于理论中出现的常数数值。假如我们希望对物理世界得到一个准确的定量描述, 那么, 准确地知道这些数值就是必不可少的了。更为重要的是, 仔细研究从不同物理学领域的实验测得的这些常数数值, 反过来又可以检验物理学基本理论本身的总体一致性和正确性。试观察一下物理学的整个结构就会看到, 表面上看来显得很分散的各个领域组成了一个广泛的阵列: 固体物理学、原子物理学、核物理学、基本粒子物理学等等。把所有这些领域联结在一起的统一因素是理论: 量子力学、电磁理论、狭义相对论、统计力学等所包含的基本概念, 在所有这些领域中都出现。在这种把物理学各部分结合在一起的理论网上, 基本常数是网上的定量链环。因此, 把这些常数的测量提到更高的准确度, 就是很重要的了。这不仅仅是因为增加了一位小数, 而是因为增加了这一位小数, 可能使我们在对自然世界的物理描述中发现过去未知的一些矛盾, 或者解决已知的一些矛盾。

目前测量许多基本常数的准确度已可达百万分之几, 这里所说的准确度的意义是: 为表示任何量的给定值对真值的可能偏离程度所必须给出的该值的相对不确定度。这个不确定度是对该值的可疑范围的定量估计。最常用的不确定度是标准误差 σ , 它表示真值与给定值之差落在 $+\sigma$ 到 $-\sigma$ 范围内的几率约 68%。例如, 如果测量某物体长度 10 次, 得到的平均长度为 100 ± 3 厘米, 具有与 σ 为 3 厘米相应的不确定度, 那末真正的长度落在 97 厘米和 103 厘米之间某处的几率为 68%。又真值落在 $+2\sigma$ 和 -2σ (94 厘米和 106 厘米) 之间的几率是 95%, 而真值落在 $+3\sigma$ 和 -3σ (91 厘米和 109 厘米) 之间的几率为 99.7%。

实际上, 百万分之一的准确度确实是相当好的了。它相当于测量一个足球场的长度

*参阅本期“基本常数不变吗?”一文(译者)。

准确地印刷这篇文章的一页纸的厚度。有几个量实际上已被测到接近于 1×10^{-12} 的准确度。这相当于在测定横贯亚洲大陆的距离时,准确到比这页纸的十分之一厚度还小的程度!

二、历史的教训

回顾一下测定电荷基本单位的历史,可以找到一个易于理解的实例,说明改进实验方法准确地重新测定基本常数,能够更好地认识某一特定的物理现象。R. A. 密立根大约从 1907 年到 1917 年进行了他那著名的油滴实验,测定了电荷 e 的数值。这个实验方法,是让带有微弱电荷的小油滴在两个水平放置的金属平板间的空气中上下运动,观测这种运动随时间的变化。首先,测量某一油滴只受重力作用时下降一定距离所需的时间;然后,在两金属平板间加上一个电位差,作用在荷电油滴上的合力就使油滴上升(即沿着与重力相反的方向运动),再测油滴上升一定距离所需的时间。于是,对不同油滴作这些测定之后,根据这些测定,就能计算出 e 值(还须利用其它有关量的数据,例如,当地的重力加速度、平板间的距离、板间电位差、空气的压强和粘滞系数、油的密度等等)。密立根在 1917 年报告的最终值是 $4.774 \pm 0.002 \times 10^{10}$ 静电单位。

但是,在三十年代发展了测定 e 的新方法之后,才弄清楚这个数值的误差是很大的。新方法是分别测定另外两个物理量:阿伏伽德罗数 N 和法拉第常数 F 。阿伏伽德罗数是一摩尔中所含有原子或分子的个数,摩尔的定义是以克表示的、数值上等于物质的原子或分子量的质量。法拉第常数是为了在溶液中电解沉积一摩尔元素所必须通过溶液的电荷量。这两个量以简单的等式 $F = Ne$ 联系起来。因此, $e = F/N$ 。如果知道 F 和 N ,就能得出 e 。阿伏伽德罗数是通过仔细测量某种物质的密度、原子量,并用 X 射线技术测得晶体的晶格间距(原子平面间的距离)而测定的。法拉第常数是已知电流流过含有某物质的溶液一定时间后,量得在一个电极上所析出的该物质质量而测定的。

用这种方法得出的 e 值是 $4.8021 \pm 0.0009 \times 10^{10}$ 静电单位,和密立根的数值比较,相差很大。后来发现,这个令人烦恼的差异的主要原因,来自密立根用了一个不正确的空气粘滞系数值。密立根用的这个数值几乎全是根据他的一个学生测量的,但后来发现这个学生犯了一个难以觉察的错误。他在做粘滞系数测定实验时,为了测量所用的金属丝的扭转常数,竟采用了和实验时在金属丝上所悬挂的全然不同的质量,而后来发现,金属丝的扭转常数是随它所悬挂的质量大小和几何形状而变化的。一经采用了正确测定的空气粘滞系数数值后,对密立根的数据加以重新定值,所得到的 e 值就和用阿伏伽德罗数和法拉第常数计算的间接值吻合了。

这件事说明了一个普遍事实,即实验测定的常数随着每次测定而发生变化。其理由是,很难把任何量值都测到很高的准确度;可能影响结果的每个可想到的因素,都必须仔细而耐心地予以考虑。即使这样,也往往会有某个重要因素被忽视了。

另一方面,有时也会出现正好相反的倾向。对某一特定的量一次又一次地进行几种实验测定,其结果会彼此符合得非常好。可是,后来用改进的方法做新的一系列测量,却表明以前的方法所获得数值是不正确的。新值和旧的“一致”值之间的差,竟比对旧值所规定的不确定度大好多倍。(这种现象尤其容易在下述情况下出现,即旧值是由一位著名

的物理学家而不是由一位比较有名的物理学家所获得的。)光速的相继测量就是一个很好的例子。直到约 1950 年为止,做了几个不同的和显然可信的 c 的测量,彼此都十分相符。然而,五十年代做的更精密的测量证明,以前的测量是不正确的,相差约大到为旧值所规定的不确定度的四倍。

对这个所谓“智力锁相”(或者有时称为明白的“捏造”)的现象, E. O. 劳伦斯(回旋加速器发明人)提供了一个可能的解释。他指出,任何高精度的实验装置一旦安装起来投入使用时,就会有許多仪器上和技术上的困难,使测量的数值偏离通常的公认值(或者偏离按实验者所预期的这个量应有的数值)。于是,实验者就检查其装置,千方百计寻找不一致的原因,直到使所得到的结果接近公认值或期望值,这样他才罢休! 问题当然就出在他可能忽视了那些庸人的引起误差的因素。这类情况很好地说明了,为什么几个不同的实验结果起初十分吻合,到后来却发现它们都有不小的错误。然而,正是常数测量值所发生的这些变化,往往提供出研究实验和(或)理论错误的重要线索。

三、重新测定 e/h

最近几年,能够说明极准确地重新测定基本物理常数将会产生重大影响的最好例子,也许是本文作者和他们的同事 A. 台奈斯坦小组所作的 e/h 测定。这个工作是应用低温固体物理实验的方法进行的,而它所作出的重要贡献已远远超出固体物理范围,而涉及

到了基本粒子物理学、量子电动力学、X 射线物理学和原子物理学等领域。这一测定是根据超导体中的著名现象即交流约瑟夫森 (Josephson) 效应而进行的。

交流约瑟夫森效应是由剑桥大学 B. 约瑟夫森在 1962 年首先预言的。他在理论上指出,假如两块超导体(即在温度接近绝对零度时对电流不存在电阻的物质)“弱”连接在一起,当它们之间保持一定的电位差 V 时,它们之间就会产生一个交变的无电阻的电流,或称“交流超导电流”。约瑟夫森预言,交流超导电流的频率 ν 与电位差 V 成正比,比例常数就是 $2e/h$ 。因此有 $\nu = (2e/h)V$ 。比值 $2e/h$ 也即

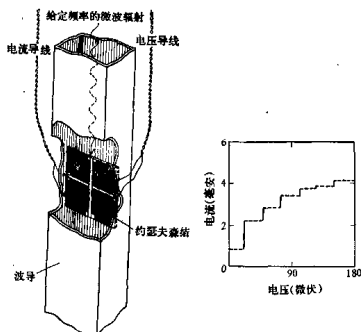


图1 用已知频率的微波激发约瑟夫森结,测定 e/h 值。约瑟夫森结放在装有液氮的杜瓦瓶内的波导里。微波感生电流在电流-电压图上形成阶梯,这是约瑟夫森结的特征(见右图)。通过电流导线加一“偏压”到结的这些阶梯之一上,办法是用可调节的电流源(用几个可变电阻与一个电池组),通过电压导线加上去的。阶梯的电压可用电位计测定。微波频率与此阶梯电压成正比,比率就是 $2e/h$ 。

在一微伏电位差时超导电流频率的数值,等于 484 兆赫。约瑟夫森效应的频率-电压关系,可以从关于超导体的一些十分一般的假设中得出。一般认为它是非常精确的并与各种实验条件如温度、磁场和超导体的类型都无关。

这样,比值 e/h 的测定就比其他许多基本常数的实验测定更为简单,只需要测量两个超导体之间的电位差及交变超导电流的振荡频率。实际上,测量所涉及的小电压(只有一伏的千分之几)要求准确到百万分之几,这是一个挑战性的但却是可以解决的技术问题。相反,现代电子计算技术却可以将频率测准到 10^{-8} 量级或更好。测量的最终结果是 $2e/h = 483.5976 \pm 0.0012$ 兆赫/微伏,这里具有的不确定度为 ± 0.0012 , 相当于百万分之 2.4 的相对不确定度*。这个 e/h 值,比过去用 X 射线实验测定的最好值还要准确 20 倍左右。

四、更好的 e/h 值可得出更好的 α 值

以约瑟夫森效应测量 e/h , 或许是对量子电动力学领域的一次最大冲击。如上所述,量子电动力学是描述基本粒子和电磁场相互作用的量子理论。精细结构常数 α 是这个相互作用强度的量度。量子电动力学是现代最重要的物理学理论之一,也是能够作出高准确度预言的少数几个物理学理论之一。然而,只有当有准确的 α 值可供采用时,这样的预言才成为可能。这是因为描述各个有关物理量(例如,氢原子中的某些能级差)的理论,一般都是含有 α 的数学表示式。为此, α 的准确值对于量子电动力学的理论预言和实验之间的验证,是不可或缺的。

在此以前, α 的最准确值曾由一些实验并借助于理论方程而得出,这些理论方程包括了从量子电动力学本身而得到的一些重要结果。由于理论必须用实验得出的 α 值来计算,这就使理论预言和实验结果的明确比较发生困难。因此,这样的比较只限于在这种类型的各个实验之间检验其内在一致性。然而,现在使用从约瑟夫森效应实验得到的 e/h 值,并与其它某些常数的测量值相结合,实质上不必应用任何量子电动力学的理论,就能得到高准确度的 α 的间接值。这样一来,在量子电动力学的理论和实验之间,就可以进行直接而明确的比较了。

实际上,从 e/h 得出 α 的间接值可以有几种数学方法。一种方法是把 α 和几个很准确知道的常数(例如 R_{∞} 和 c)和质子旋磁比 γ_p 相结合。 γ_p 可通过测量质子自旋轴在磁场中的“进动”速度而获得(图 2),其准确度足以和 e/h 相比拟。为了准确地测定 γ_p , 必须做一个用单层导线绕成的精密螺线管(螺旋线圈磁体),其尺寸经过准确测定。螺线管在电流通过其绕线时建立起一个已知磁场,场强可以从螺线管尺寸和电流算出,然后利用标准的电子技术测量螺线管内水样品中的质子进动频率。这称为测定 γ_p 的弱场方法;所用磁场仅比地球磁场约

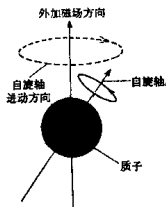


图2 质子的自旋轴围绕外加磁场方向的进动,类似于陀螺的摆动。进动频率与外加磁场强度之比称为质子的旋磁比(γ_p)

* 目前发表的最高水平为 $2e/h = (483593.606 \pm 0.020)10^3$ 赫/伏,相对不确定度为 4×10^{-6} (薄著)。