

现代物理学

参 考 资 料

第三集

科 学 出 版 社

内 容 简 介

本译文集主要翻译国外书刊上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,供我国广大科技人员、高等院校师生和中等文化水平的读者了解国外物理学发展动态时参考。第三集选译了物理学中的哲学问题和其他方面的文章共十三篇,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 三 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

石家庄地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1978 年 10 月第一次印刷 印张: 8

印数: 0001—196,130 字数: 184,000

统一书号: 13031·813

本社书号: 1161·13—3

定价: 0.65 元

目 录

基本粒子是什么?	(1)
量子论历史中概念的发展	(9)
宇宙辐射和物理学中的基本问题	(16)
二十世纪物理学中概念的发展	(22)
海森伯与物理概念的发展	(30)
相对论和量子力学	(37)
物理科学中的实验观察、理论和辩证法	(45)
物理学与哲学	(57)
物理学和天文学的未来	(66)
时间的方向性	(73)
我们对于宇宙为什么知道得这样少?	(90)
果真有过大爆炸吗?	(97)
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? (续完) ...	(106)

基本粒子是什么？

W. Heisenberg

本文根据实验事实讨论了有关基本粒子本性的问题，并与哲学思考作了对照。文中强调指出，在亚原子核领域中，某些问题的提法是没有意义的，特别是由于动力学的相对论性结构，要谈什么基本粒子的组成部分，是没有意义的。

“基本粒子是什么？”这个问题当然必须首先由实验来回答，而且必定要涉及哲学思考。因此，我首先要对近五十年来基本粒子物理学的最重要的实验成果作一简要的综合评述，并试图说明：如果人们无成见地考察这些实验，那末这些成果已经在相当大的程度上回答了上述问题，从而理论家也没有什么更多的话可补充的了。然后，我在第二部分将补充探讨与基本粒子概念相联系的哲学问题。因为，我认为，基本粒子理论的某些错误的发展——而我就怕确有这样的错误发展——是由于理论的创立者固执地对哲学漠不关心，可是他们实际上不自觉地坏哲学出发从而由于成见提出了不合理的问题。人们或许可以稍为有点夸张地说，好的物理学不自觉地被坏哲学腐蚀了。最后我将讨论这些成问题的发展，它们可以和我亲身经历过的量子力学的历史中的错误发展相对比，我还将提出人们怎样才能避免这样的错误的一些建议。因此，这个报告的结论应该还是比较乐观的。

最重要的实验结果和它们的理论解释

我首先谈谈实验事实。差不多在五十年前，狄拉克在他的电子论中预言，除电子之外，必定还有它的反粒子——正电子；不多几年之后，安德森和布莱凯特 (Blackett) 用实验证明了正电子的存在(它在电子偶的产生过程中出现)以及所谓反物质的存在。这是头等重要的发现。因为在这以前，人们一般设想有两类基本粒子：电子和质子，它们与一切其他粒子的不同之点是，它们是决不能改变的，因此它们的数目也总是守恒的。正因为如此，人们称它们为基本粒子。一切物质被认为最终都应该由电子和质子组成。电子偶的产生和正电子的实验证明表明，这种设想是错误的。电子既可以产生，也可以湮没；因此它们的数目决不守恒；它们不是原来意义上的基本粒子。

第二个重要步骤是 F. 约里奥和 I. 居里发现人工放射性*。人们从许多试验知道，一个原子核可以通过发射粒子转变为别的原子核，只要能量、角动量、电荷等守恒定律允许这种转变。能量转化为质量，这在爱因斯坦的相对论中早已被认为是可能的，现在就成了经常观测到的现象了。这样也就谈不到什么粒子数的守恒了。可是还有一些可用量子数表

* 原文误为费米发现人工放射性。在美国《今日物理学》(Physics Today) 1976 年 3 月号刊载的题为《基本粒子的本性》的英译文中，改为“F. 约里奥和 I. 居里发现人工放射性。”这里采纳了英译文中的改正。——译者

征的物理性质——例如转动惯量或电荷，它们的量子数可以取正值或负值，而且守恒定律对于它们是有效的。

在三十年代，还有另一个重要的实验发现。人们证实了，在宇宙辐射中有能量很高的粒子，这些粒子和其他粒子碰撞时，例如和照相底片乳胶中的一个原子核*相碰撞时，可以发射出有许多次级粒子的簇射。有一个时期，许多物理学家认为，这种簇射只能由原子核中的一种级联反应而形成；可是后来弄清楚了，实际上仅仅两个高能粒子碰撞也有理论上所预测的许多次级粒子产生。在四十年代末，鲍威耳发现了在这些簇射**中起主要作用的 π 粒子。从而表明，在能量很高的粒子的碰撞中能量转化为物质是十分普遍的决定性过程，因此说什么“初始粒子的分裂”显然已没有什么意义了。“分裂”这个概念在实验上已经失去了意义。

在五十年代和六十年代的实验中，这种新的情况一再被证实；发现了许多长寿命的和短寿命的新粒子，而对于这些粒子由什么组成的问题，不再能作出明确的回答，因为这个问题没有理性的意义。比如说，一个质子可以由中子和 π 粒子或者由 Λ 超子和 K 粒子或者由两个核子和一个反核子合成；或者可以简单地说，一个质子由连续物质所组成；而所有这些陈述都是同样正确或者同样错误。基本粒子和复合粒子的区分从此根本消失了。这或许是近五十年来最重要的实验结果。

由于这种发展，实验迫使人们作这样一种类比：基本粒子多少类似于一个原子或一个分子的定态。有一整套粒子谱，就象铁原子或分子有一套状态谱一样，在最后一个例子中，我们既可以设想为一个分子的不同定态，也可以设想为化学中许多不同的分子。对于粒子我们可以说“物质”谱。实际上，六十年代和七十年代用大加速器所做的实验证明了这种类比符合迄今为止的一切经验。就象原子的定态一样，粒子也可以用量子数来表征，也就是用对称性和变换性来表征，结合这些量子数的精确的或者近似有效的守恒定律决定了转变的可能性。就象一个激发氢原子的空间转动状态决定了它的变换特性，决定了它是否能够通过发射一个光子跃迁到一个较低的态一样，也可以提出这样的问题：一个 φ 玻色子能否发出一个 π 粒子衰变为一个 ρ 玻色子，是不是也是由这样的对称性决定的？就象处于不同定态的同种原子有很不相同的寿命一样，粒子也有很不相同的寿命。一个原子的基态是稳定的，它有无限长的寿命，而电子、质子、氘核等粒子也具有同样的特性。可是这些稳定粒子决不比不稳定粒子更为“基本”。氢原子的基态可由薛定谔方程导出，而氢原子的激发态也由同一个薛定谔方程导出。同样，电子和光子***也决不比一个 Λ 超子更基本。

因此，近年来的实验粒子物理学在其发展过程中履行着类似于二十年代初光谱学所履行的任务。就象当时出现了把所有原子的电子壳层的定态收集在内的大表册（叫做帕邢-格采表）中一样，现在也有每年一次的全面的关于粒子性质的概览（Reviews of Particle Properties），其中记载了物质的定态和它们的变换特性。这种编制这样内容丰富的表册的工作，同天文学家的天文观测概览相仿，很自然，每一个观测者希望有时能在他的领域内找到特别有趣味的对象。

* “原子核”原文误为“质子”，此处参照英译文《基本粒子的本性》作了改正。——译者

** 英译文把“簇射”改为“粒子的多重产生”。——译者

*** 在题为《基本粒子的本性》的英译文中，光子改为质子。——译者

但是,在原子的电子壳层物理学和粒子物理学间也有特征性的区别。在原子壳层中,人们所接触的能量是如此之低,以致相对论的特征可以忽略不计;因此人们可以利用非相对论性量子力学来表述。这意味着,以原子壳层物理学为一方,以粒子物理学为另一方,它们的有关对称群是不同的。原子壳层物理学中的伽利略群在粒子物理学中由洛伦兹群来替换;同时,在粒子物理学中加入了象同位旋群这样的新群,它和 SU_2 群是同型的,然后加入了 SU_3 群、标量群以及其他等等。确定粒子物理学中的有关群是一项重要的实验任务,而这在过去的二十年中已经在很大程度上解决了。

从原子壳层物理学我们可以了解到,在明显地只描述近似有效的对称性的那些群中,我们可以区分两种根本不同类型的群。例如我们想到光谱中的空间转动的 O_3 群和与光谱中的多重结构有关的 $O_3 \times O_3$ 群。量子力学方程对于空间转动群是严格不变的,因此具有较高角动量的原子的态是严格地简并的,也就是说,有几个态具有严格相同的能量。只有当原子处于外部电磁场中时,这些态才分裂开,而象塞曼效应或斯塔克效应这些众所周知的精细结构才显示出来。如果系统的基态象一个晶体或一个铁磁体的基态那样对于转动不是不变的,那末这种简并性也可以被破坏。在这种情况下,能级的分裂也会出现;一个铁磁体中的一个电子的两个自旋方向不再严格属于同一能量。此外,按照哥耳德斯通(Goldstone)的著名理论,其能量随着波长的增长而趋近于零的玻色子也是存在的,在铁磁体的场合,布洛赫的自旋波和磁振子代替了哥耳德斯通波。

对于 $O_3 \times O_3$ 群,情况就完全不同了,从这种群产生了光谱的众所周知的多重线。这里涉及到的是近似的对称性,只要在某个范围自旋和轨道相互作用很小,只要人们可以因此把电子的自旋和轨道互不相关地旋转,而不会使相互作用改变多少,这种对称性就实现了。因此这种 $O_3 \times O_3$ 对称性来自系统的动力学,从而它也只是在光谱的某一部分才适用的近似对称性。在经验上,我们可以用这样的办法来最明确地区分两种破坏了的对称性:对于基态的被破坏的基本对称性,必定存在这些按照哥耳德斯通理论其静止质量为零或属于远程力的玻色子。如果人们找到了它们,那末就有理由认为,基态的简并在这里起重要作用。

如果我们把这个原子壳层物理学的经验应用到粒子物理学方面,那末根据实验它们十分接近,洛伦兹群和 SU_2 群即同位旋群被解释为作为自然定律基础的基本对称性。然后电磁力和引力作为与基态的被破坏的对称性相联系的远程力而出现。更高的群 SU_3 , SU_4 , SU_6 或 $SU_2 \times SU_2$, $SU_3 \times SU_3$ 等等这时应当被当作为动力学的对称性,就象原子壳层物理学中的 $O_3 \times O_3$ 群一样。至于膨胀群或标量群,我们可以怀疑,是否应当把它们算在基本对称性之内;它们会由于有限质量的粒子的存在和与宇宙中的大物体有关的引力而被破坏。由于它们和洛伦兹群的密切关系,人们也许应该把它们列入基本对称性。刚才描述的把破坏了的对称性同两种基本类型相等同,如我已经说过的那样,是通过实验结果而逐渐接近的,但是我们也许还不能说最终确定了这些对称性的类型。最重要的是,对于用以分析谱系现象的对称群,我们必须提出(如果可能)也必须回答这样的问题:它们究竟属于两种基本类型中的哪一个。

还需要指出原子壳层物理学的一个特征:在光谱中有一些不能组合或者正确地说只是微弱地组合的谱项系,就象仲氢和正氢光谱那样。在粒子物理学中,人们也许可以把费米子谱分为重子和轻子的这种划分同这种特征相比较。

因此,原子和分子的定态同基本粒子物理学中的粒子间的类比是近乎完备的,从而在我看来,把我在开始时提出的“基本粒子是什么?”这个问题定性而又完全地回答了。但只是定性地回答!于是对理论家提出了进一步的问题:是否这种定性的关系也能够以定量的计算作为基础?为此首先必须回答一个初步的问题:定量地理解一个谱系究竟是什么意思?

为此目的,不仅在经典物理学中而且在量子力学中都有一系列例子。我们可以设想一个钢片的弹性振荡谱。如果人们不满足于定性的理解,那末我们必须从钢片的弹性出发,这种弹性应当用数学加以表述。在这一点做到之后,人们还必须加上边界条件,比如说钢片是圆的或是方的,它是被绷紧的还是没有被绷紧,由此人们至少可以在原则上算出弹性或声学振荡的谱系。诚然,由于问题的复杂程度,确实不能严格算出一切振荡,但是总能够算出那些具有最少的波节数的最低的振荡。

因此,为了做到定量的理解,有两个要点是必不可少的:关于钢片的动力学关系的严格数学表述的知识和边界条件,后者人们可以看作是“偶然的”,也就是说是由附近的环境来确定的;人们也可以把钢片切割成别的形状。空腔共振器的电动力学振荡的情况与此相仿。麦克斯韦方程确定了动力学行为,空腔的形状规定了边界条件。铁原子光谱的情况也相类似。一个原子核和 26 个电子的系统的薛定谔方程确定了动力学行为,至于这个例子中的边界条件,它表明在无穷远的波函数应当为零。如果原子封闭在一个小箱中,光谱就会有一些变化。

如果我们把这些知识转用到粒子物理学上,那末首要的问题就是用实验方法求得成体系的物的动力学性质,并把它们用数学表述出来。然后必须加上作为偶然因素的边界条件,在这里这些条件包含的内容主要是关于所谓空虚空间的陈述,也就是关于宇宙和它的对称性的陈述。无论如何,第一步必须是试图用数学来表述自然定律,它确定了物质的动力学。第二步,人们必须作出关于边界条件的陈述。因为没有这些边界条件就完全不能确定谱系。例如,我可以揣测,在今天天体物理学的“黑洞”中,基本粒子谱将完全不同于我们所看到的。遗憾的是,我们对此不能进行实验。

可是,我现在还要就决定性的第一步,也就是动力学定律的表述问题,补充一句话。有一些粒子物理学的悲观主义者,他们认为,这样的确定物质的动力学性质的自然定律根本不存在。坦白地说,我完全不能从这样的观点出发。因为,无论如何,还是必需有物质的动力学,否则就不会有谱系;并且人们还应该能用数学描述它。悲观主义者的观点意味着,整个粒子物理学归根结蒂只不过是记载物质的尽可能多的定态、跃迁几率等资料的巨大的表册,即粒子性质的超级概览 (Super-Review of Particle Properties),因此是其中没有东西可以进一步理解因而也很少有人阅读的这样一本表册。但是,这种悲观主义没有一点儿理由,这方面我可以提出很多的证明。因为人们已观测到具有锐线的粒子谱,因而也就是间接地观测到了严格确定的物质的动力学。我在前面简要描述的实验结果也已包含了关于基本的自然定律的基本不变性的很确定的提示,并且关于这些定律所包含的因果性的程度,我们从色散关系已经知道了不少。因此,自然定律的主要的确定部分已在我们手中,因为在我们终于在某种程度上对物理学中那么多别的谱系达到了定量的理解之后,尽管粒子谱有高度复杂性,它在这方面也应当能够被理解。我不想在这里讨论(由于它的复杂性)很久以前我和泡利提出的关于基本自然定律的数学表述的具体建议,关于这个建议

我至今仍认为,它有最大的可能是正确的。但是我想特别强调指出,这样一个自然定律的数学表述有一个不可改变的前提,这就是人们对基本粒子谱系的(定量的)理解。其他一切都谈不上是理解,只不过是翻阅表册,可是我们作为理论家至少不应该满足于这种情况。

哲 学 问 题

现在我要开始讨论哲学了。哲学,不管自觉不自觉,总是支配着基本粒子物理学的发展方向。二千五百年以来,哲学家和自然科学家一直在讨论这个问题:如果人们试图把物质一次又一次地不断分割下去,将出现什么情况?什么是物质的最小成分?不同的哲学家对这个问题作出了很不同的回答。所有这些回答都对自然科学的历史产生了影响。最著名的回答是哲学家德谟克利特的回答。在一次又一次不断地把物质分割下去的尝试中,人们最终会遇到不可分的、不变的对象,即原子,而一切物质都是由原子组成的。原子的位置和运动决定了物质的性质。对于亚里士多德和他的中世纪的继承者,最小粒子的概念表达得不那么明确。在他们看来,每一种物质确有最小的粒子,进一步分割下去就不再显示该物质特有的特性了。但是,这些最小的粒子同物质一样是可以连续地改变的。因此,在数学上物质是可以任意分割的,物质被想象为连续的。

对德谟克利特采取明确的反对态度的是柏拉图。按照柏拉图的意见,在把物质一次又一次地分割下去的尝试中,人们最终遇到的将是数学形式:立体几何学的正多面体,它们可以由它们的对称性来确定,而人们可以用三角形来合成它们。这些形状本身不是物质,但是它们构成物质。比如说,元素土就以立方体的形状为基础,元素火以四面体为基础。所有这些哲学家有一点是共同的,他们不管怎样都想解决无限小的二难推论,众所周知,康德对这个问题作了详尽的讨论。

当然,过去有过现在也有要把这个二难推论合理化的朴素的尝试。就象有些生物学家提出了这样的观念,在苹果的种子中包含了不可见的小苹果树,这棵树上也开花结果,在这个果子中又藏着种子,在这个种子中又藏着一颗更小的苹果树,如此等等,以至无穷。有趣的是,在玻尔-卢瑟福把原子当作小行星系的理论的早期,我们同样发展了这种论题:在这个小行星系的行星——电子上,也住着很小的生物,它们造房子,耕作土地,研究原子物理学,而在他们的论文中又把它们原子看作是小行星系,如此等等,以至无穷。如我们已经说过的那样,这里在暗中总是隐藏着康德的二难推论:一方面很难设想物质总是可以一次又一次地分割下去,但是另一方面也很难设想,这种分割必然有朝一日到一个终点。而我们今天知道,这个二难推论最终是来源于,我们错误地认为我们的直观也能够应用到很小很小的环境中去。在上一世纪,给予物理学和化学以最强的影响的无疑是德谟克利特的原子论。这种观点允许对微小尺度的化学过程作直观的描述。原子可以同牛顿力学的质点相比较,并且这样的类比导致一个令人满意的热的统计理论。实际上,化学家的原子还不是质点,而是小的行星系,而原子核又是由质子和中子复合而成的。可是人们曾这样认为,电子、质子可能还有中子,仍然可看作是真正的原子,也就是物质的最后的不可分割的建筑砖石。因此,德谟克利特的原子观念成了上世纪物理学家的唯物主义世界观的不可缺少的组成部分。这种原子观念容易理解而且比较直观,它决定了物理学家的思想方法,甚至决定了那些不愿与哲学打交道的物理学家的思想方法。在这里我可以

论证我的主题,今天在基本粒子物理学中,好的物理学不自觉地被坏的哲学腐蚀了。

我们不可避免地在使用一种渊源于这种传统哲学的语言。我们问:质子由什么东西组成?人们能够分割电子吗?抑或它是不可分的?光量子是简单的还是复合的?如此等等。但是,所有这些问题的提法都是错误的,因为“分割”或“组成”等词已在很大程度上失去了它们的意义,因此我们的任务,是要使我们的语言和我们的思想,也就是说,还有我们的自然科学哲学,适应这种由实验所造成的新形势。但是遗憾的是,这很困难。所以错误的问题和错误的观念总是一再潜入粒子物理学中并导致错误的发展,我马上就要讲到这一点。可是在这以前,我还要对直观性作一点评述。

有这样的哲学家,他们主张直观性是一切真正理解的前提。例如,慕尼黑的哲学家丁格勒(Dingler)针对相对论就表示了这样的观点,他认为直观的欧几里得几何学是唯一真正的几何学,因为我们在建造我们的量度仪器时是以它的正确性为前提的;关于后一点,丁格勒当然是对的。因此,他这样说,人们不能用背离欧几里得几何的一般黎曼几何来描述作为广义相对论基础的实验经验;因为,否则人们就要陷入矛盾。但是这种要求显然是过分了。为了证明我们用实验做的那些事是正确的,只要知道在我们的仪器的尺度内欧几里得几何是足够好地近似正确就行了。因此我们必须容忍这样的事情,就是在十分小和十分大的尺度内的实验经验不再提供我们直观的图象。然后我们才能理解前面说过的无限小的二难推论在基本粒子物理学中已以一种非常微妙的方式解决了,这是一种既非康德也不是古代哲学家所能想到的方式:这就是说,“分割”一词失去了它的意义。

如果人们一定要把今天粒子物理学的认识同任何以往的哲学相类比的话,那末只有柏拉图的哲学才能相比;因为现代物理学中的粒子是对称群的表示(量子论就是这样说的),在这方面它类似于柏拉图学说中的对称体。

基本粒子物理学中成问题的问题提法

但是我在这里并不是要讨论哲学,而是要讨论物理学,因此我现在要谈谈在我看来是从错误的问题提法出发的那些理论基本粒子物理学的发展。首先就是这样的命题:象质子、 π 粒子、超子以及许多其他粒子那样的已被观测到的粒子,是由更小的、未被观测到的粒子——夸克,或者还有部分子、胶子,聚粒子以及一切不管叫什么的这类假想粒子——所组成。显然,这里提出了这样一个问题:质子是由什么组成的?但是提问者忘了,“组成”一词只有当粒子能以比它的静止质量小得多的能量消耗分裂为它的组成部分时才多少有一点意义,否则“组成”一词就丧失了它的意义。对于质子也是这种状况。为了说明一个好像是明确定义了的词会失去它的意义,我不得不重述玻尔在这种场合乐于引用的一个故事。一个小孩跑到一家店铺中,手中拿着两个芬尼*跟店员说,我要买两芬尼的杂拌糖。店员给他两块糖并对他说,你自己可以把它们杂拌起来。对于质子,“组成”这一概念同这个小孩的故事中的“杂拌”的概念具有同样的意义。

对此会有许多反对的意见:夸克假说也是从实验经验中得来的,也就是说,从 SU_3 群的经验关系的证实中得来的,甚至超出 SU_3 群的适用范围它也能成功地解释许多实验。这

* 芬尼是德国的辅币,等于百分之一马克。——译者

确不能否认。但我可以根据我亲身经历的量子力学的历史提出一个反证，这个反证可以明显地揭示出这种论证的弱点。在玻尔的理论提出之前，有许多物理学家主张，一个原子必定由一些谐振子所组成。因为光谱中包含了只能由谐振子发射出来的锐线。而这些振子的电荷必须对应于不同于电子电荷的 e/m 值，此外，因为在光谱中有许许多多谱线，就必须假设有许许多多振子。

尽管有这些困难，沃耳德玛·福格特 (Woldemar Voigt) 1912 年在哥丁根以下列方式建立了一个关于钠光谱 D 线的反常塞曼效应的理论：他假定有两个耦合的振子，它们在没有外部磁场的情况下发射出两条 D 线。他把振子的相互耦合以及它们和外场的耦合作了这样的安排：在弱磁场的情况下真正出现反常塞曼效应，而在很强的磁场下也可以正确描述帕邢-伯克效应。对于中等场的中间范围，由很长和复杂的平方根给出频率和强度，虽然是非常繁杂的公式，可是显然很好地符合实验结果。十五年后，约尔丹和我根据量子力学的微扰理论费力地计算了同一问题。引起我们很大惊讶的是，我们得到的正好是福格特的关于频率以及强度的老公式，而且也包括关于中间场的复杂部分。其理由，如我们后来所了解的，纯粹是由于形式上的数学方法的缘故。量子力学微扰理论导致一个耦合线性方程组，方程组的本征值确定了频率。一个耦合谐振子系统在经典理论中同样导致这样一个耦合线性方程组。因为在福格特理论中人们已校正了最重要的参数，所以，用不着奇怪会得到正确的结果。但是，福格特理论没有对理解原子结构作出贡献。

为什么福格特的尝试在一方面如此成功，在另一方面又如此无用呢？因为福格特只考察 D 线，而没有掌握整个线性光谱的知识。福格特现象论地应用了振子假说的某一方面，而忽略了这一模型的其他的不合理方面，并且有意识地把这个问题留下来不作明确解答。实际上，他并没有十分严肃地对待他的假说。我怕夸克假说的创造者们也同样没有严肃对待他们的假说。关于夸克的统计学问题，关于把它们结合在一起的力的问题，与这种作用力相对应的粒子的问题，为什么夸克从不作为自由粒子出现的原因问题，夸克粒子在基本粒子内部成对产生的问题，所有这些问题都还或多或少没有作出明确解答。如果人们真要严肃对待夸克假说的话，那末就必须作出关于夸克的动力学和把夸克结合在一起的力的一个准确的数学假说，并证明，至少定性地证明，这些假说可以真正再现基本粒子物理学今天已知的特征。在基本粒子物理学中不应当有不能够应用这个假说的问题。我还不知道有这样的尝试，并且我还怕，每一个这样的用精确的数学语言描述的尝试都会很快导致矛盾。因此，我可以用问题的形式来表述我的反对意见：“难道夸克假说对粒子谱的理解比当时福格特的振子假说对原子壳层结构的理解会作出更多的贡献？在夸克假说后面不是又隐藏着那个早被实验否定了的观念，即人们可以区分简单和复合粒子的那个观念吗？”

我还想简要地讨论一些专门的问题。如果 SU_3 在粒子谱的结构中起着重要的作用，并且如果根据实验的证据人们必须接受它的话，那末，它究竟是一种作为自然规律基础的基本对称性呢，还是一种从一开始就只是近似地有效的动力学对称性呢，对此作出判定，那就很重要了。如果这个判定悬而未决，那末关于作为粒子谱基础的动力学的一切其他假设都无法判定，从而人们也不能有更多的理解。象 SU_4 , SU_6 , SU_{12} , $SU_2 \times SU_2$ 等等这种更高的对称性有更大的可能性是属于动力学对称性，它们在描述现象中可能是有用的；但是，它们的启发性价值，在我看来，同天文学中托勒玫的本轮和均轮的启发性价值差不

多。它们只给出关于基本自然规律的结构间接结论。

最后还要谈一谈近年来的最重要的实验结果。这就是新近发现的具有比较大的质量(约为 30—40 亿电子伏)和较长寿命的玻色子。这样的状态在原则上是绝对有人预料到的,就象迪尔(Dürr)曾特别强调指出过的那样,是否人们可以根据它们的长寿命的特点,近似地把它们解释为由其他已知的长寿命粒子所合成呢,这确实是一个困难的动力学问题,在这个问题中多体物理学的全部复杂性都将起作用。当然,在我看来,为此又一次引进新粒子,把已知对象假设为由新粒子所组成的那种尝试是一种完全无用的思辨。因为这又是错误地提出问题,它无助于对粒子谱的理解。

近年来,人们用日内瓦的储存环和巴达维亚加速器测量了很高能量的质子-质子碰撞的有效总截面。得到的结果是,有效截面大约随能量对数的平方而增长,这种行为早就在有关渐近区的理论中被预测到了。其他粒子的碰撞也得到同样的结果,因此这多少表示,在大加速器中已经到达了渐近区,从而人们在那里不用再期望会有什么令人惊讶的奇迹。

一般人们不应当期望用新实验得到一种“解围的神力”(Deus ex machina),它可以立即导致对粒子谱的理解。因为近五十年的实验对“基本粒子是什么?”这个问题已经定性地作出了十分令人满意的、不自相矛盾的、完满的回答。至于定量的细节,只能(就象量子化学中那样)随着岁月的流逝通过许多物理学和数学的更为细致的工作来加以阐明,而不可能立即做到。

因此,我能够以一种预期粒子物理学发展将取得成功的乐观的展望来作结束。新的实验结果总是有价值的,它们首先就扩大了粒子的表册;但当它们回答了理论的关键问题时,它们就特别有意义了。在理论中人们必须尝试作出物质的基本的动力学的精确假设,而不带任何哲学的偏见。人们必须充分严肃地对待这个动力学问题,而不应当满足于含糊的假说,而对主要问题不作明确的解答。因为粒子谱只有当人们认识了物质的基本动力学时,才能真正理解;这个动力学是中心问题。动力学以外的一切只是数据表册的一种字面的描述,即使数据表册也许会比字面描述具有更多的内容。

(范岱年译自《Die Naturwissenschaften》1976 年 1 月号)

量子论历史中概念的发展

W. Heisenberg

普朗克在一次关于物理学发展的演讲中说过：“在科学史中，一个新概念从来都不会是一开头就以其完整的最后形式出现，象古希腊神话中雅典娜一下子从宙斯的头里跳出来那样。”物理学的历史不仅是一连串实验发现和观测，再继之以它们的数学描述的序列，它也是一部概念的历史。为了理解现象，第一个条件就是引入适当的概念。只有借助于正确的概念，我们才能真正知道观察到了些什么。当我们进入一个新的领域时，常常需有新的概念。照例，新的概念总是先以不甚清楚、不很全面的形式出现。之后它们被修改，有时几乎被完全抛弃，并为一些更好的概念所取代，最后才成为清晰而明确的概念。我准备用三个实例来说明这种发展，这三个实例对我自己的工作一直是重要的。第一个是分立定态的概念，这显然是量子论中的一个基本概念。其次是态——不一定是定态或分立的态——的概念，它是只有在量子力学和波动力学发展了以后才能理解的概念。最后，与前面二者紧密连系着的，是基本粒子的概念，这是直到现在还有争议的概念。

分立定态的概念是尼尔斯·玻尔于1913年引入的。这是他的原子理论的中心概念，它的意思玻尔用如下的话作了说明：“必须弄清楚，这个理论不打算在以往的物理学中所使用的“解释”一词的意义上解释现象，它只打算把各种看来不相联系的现象联结起来，并指出它们是有联系的。”玻尔说，只有在建立起这种联系以后，才有希望给出一种在以往物理学中所指的“解释”那种意义上的解释。必须联系起来的现象主要有三个。第一是原子的稳定性这个奇特的事实。一个原子可以受到扰动，这种扰动或者由于化学过程，或者由于碰撞，或者由于辐射，或者由于其他任何原因，然而它总得回到它的原来的状态——它的正常态。这是以往的物理学不能满意地解释的一桩事实。其次是光谱定律，特别是有名的里兹定律：一个光谱中谱线的频率可以写成光谱项之差。这些光谱项必须看作是原子的标征特性。最后是卢瑟福的实验，这些实验引导他得出了他的原子模型。

上面这三组事实必须联结起来，而我们知道，分立定态的观念就是把它们联结起来的出发点。首先，我们不得不相信，原子处在分立定态的行为能够用力学来解释。这是必要的，否则就同卢瑟福模型联系不起来，因为卢瑟福实验是以经典力学为根据的。其次，也必须把分立定态同光谱的频率联结起来。这里就得应用里兹发现的定律，这个定律现在写成如下形式： h 乘以谱线频率等于始态与末终态能量之差。但这定律最好用一个玻尔不肯接受的假设来解释，这就是爱因斯坦关于光量子的概念。玻尔有很长一段时期不愿相信光量子，所以他采取如下的看法：电子在它的绕原子核运动的轨道上由于辐射失去能量，而定态则有如电子作运动时的中间站。其假设是：在辐射过程中，电子在称为分立定态的一些中间站上停止辐射。由于某些未知原因，它在这些中间站上不辐射，而最后一个站就是原子的正常态。当发生辐射时，电子从一个定态走到另一个去。

按照这个图象，处于定态的时间，要比从一个态到另一个态所需的时间长得多。但这

两时间之比当然绝未明确过。

关于辐射本身又怎样呢?我们可以使用麦克斯韦理论的一般概念。从这个观点看来,原子与辐射之间的相互作用似乎是一切困惑的根源。在定态时,不存在这样的相互作用,因此看来可以用经典力学来处理。但能不能应用麦克斯韦的辐射理论呢?我不妨提一句,采取这种观点大概是不必要的。人们本来可以更认真地采用光量子的观点。本来可以说,我们看到的光的干涉条纹,是由于对光量子运动的一些附加条件而产生的。我隐约记得早年同温采尔(Wentzel)的一次讨论,那次他向我解释过,有可能使光量子的运动量子化,从而得以解释干涉条纹。但不管怎样,这不是玻尔采取的观点。无论从哪里开始,总要碰到一大堆困难,所以我想比较详细地谈一下这些问题。

首先,曾有强大的论据支持定态的力学模型。我已提到过卢瑟福的实验。于是,原子中电子的周期性轨道就很容易同量子条件联系起来。因此,定态的概念可以同电子的特定椭圆轨道的概念联结起来。玻尔在他早期的演讲中,常常展示电子在它们绕原子核的许多轨道上运动的图象。

在好些有趣的场合,用这模型可处理得很圆满。首先是在氢光谱中。再有索末菲关于氢光谱线相对论性精细结构的理论,以及所谓斯塔克效应——在电场中谱线的分裂。因之,大量材料似乎表明,量子化轨道同分立定态的这种联系是正确的。

另一方面,也有其他理由反驳说,这样的图象不会是正确的。我记起同斯特恩的一次谈话。他在1913年告诉我,当玻尔的第一篇论文发表后,他曾对一个朋友说,“要是玻尔刚发表的那些谬论是正确的话,我就不想再当物理学家了。”

现在我来指出这个模型的困难和错误。最严重的困难或许是如下所述。电子在这模型中作由量子条件规定的周期运动,因而它要以一定的频率绕原子核运动。然而,这个频率绝不会在观察中出现。我们决不会看到它。我们看到是些不同的频率,每一频率决定于从一个定态到另一定态的跃迁中的能量差。还有关于简并性的一个困难。索末菲引进了磁量子数。按照这种量子条件,当某方向有磁场时,原子绕这个磁场的角动量必须为 ± 1 或0。但如在另一方向取一不同磁场,就必须对这个不同的方向进行量子化。然而,可以先在某一方向有一极其微弱的磁场,而在很短时间之后变为另一方向。磁场是太弱了,不足以使原子转过去。因之同量子条件的矛盾看来无法避免。

正好五十年前我同玻尔的第一次讨论,就是围绕着这些难点之一进行的。玻尔在哥丁根作过的一次讲演中说过,在一恒定电场中,可以按量子条件算出定态的能量,而克拉末(Kramers)关于二次斯塔克效应的最近计算可能给出正确结果,因为在其他场合这个方法很成功。另一方面,恒定电场与缓变电场的区别实在很小。若一电场不是变化得很缓慢,而是以一(比方说)很接近轨道频率的频率在变化,那末,我们知道,谐振当然并不是在外电场频率等于轨道频率时发生,而是当它等于在光谱中观察到的、由跃迁决定的频率时发生。

当我们讨论这问题时,最后玻尔试图解释说,一当电场随时间变化时,辐射力便出现,因而用经典方式把结果算出来大概就不可能了。但同时他当然会看到,在这一点上求助于辐射力是有些不自然的。所以我们很快便倾向于认为,分立定态的力学模型中必定有点什么东西是错误的。还有一篇非常关键性的论文没有提到。那是泡利关于 H_2^+ 离子的一篇论文。泡利想过,如果有一个像氢那样具有周期轨道的明确模型,我们也许能应用玻尔-索末菲量子化规则,但对于一个复杂的模型,比方说氦原子,其中有两个电子绕原子

核运动,那就恐怕不能应用了,因为这时我们将碰到三体问题中的一切可怕的数学困难和繁冗。另一方面,若有两个固定中心,两个氢核和一个电子,则电子的运动仍然是很好的周期运动,且可以计算出来。对于其他,这模型已经是太复杂了,所以它可用来作为一种校验,看看旧规则是否真的在这样一种中间状况下适用。泡利把这模型算了出来,发现他的计算果然得不出 H^+ 的正确能量。因此对于用经典力学计算分立定态的疑虑增加了,而注意力越来越转到了定态之间的跃迁。我们已经懂得,为了获得现象的完整解释,只算出能量是不够的,还必须算出跃迁几率。我们从爱因斯坦 1918 年的论文知道,跃迁几率是规定为与始态、终态两个态有关的量。玻尔曾在其对应原理中指出,跃迁几率可以与电子轨道傅里叶展开式的高次谐波的强度联系起来,从而加以估计。想法是:每条谱线对应于电子运动展开式的一个傅里叶分量,由其幅度的平方便可算出强度。当然,这强度不能与爱因斯坦的跃迁几率马上联系起来,但是它与之有关,因此可对爱因斯坦的量作某种估计。循此思路,注意力逐渐从定态的能量转移到定态之间的跃迁几率,而正是克拉末,开始认真研究原子的色散,并将玻尔模型在辐射时的行为与爱因斯坦系数联结了起来。

在写出色散公式时,克拉末的指导思想是,原子中虚谐振子对应于谐波。之后,克拉末同我还讨论了散射光频率与入射光频率不同的散射现象。在这种现象中,散射光量子与入射光量子不同,因为当散射时原子从一个态跃迁到另一个态。这种现象那时刚被喇曼在带光谱中发现。在这些场合要写出色散公式时,就不单要谈到爱因斯坦的跃迁几率,而且也要谈到跃迁振幅,必须给振幅以相位,并且须将两个振幅相乘——比方说,从态 m 到态 n 的振幅乘上从态 n 到态 k 的振幅等等,然后对中间态 n 求和。只有做了这些以后,才得出色散的合理公式。

这样,我们看到,不把注意力集中到定态的能量而是集中到跃迁几率和色散以后,结果得出一条探索事物的新途径。事实上,如我适才所说,克拉末和我写入我们的色散论文中的这些乘积之和,差不多已经就是矩阵之积。从那里只要再走很小一步就可以说,好吧,让我们抛弃电子轨道的整个想法,让我们简单地用相应的矩阵元来代替电子轨道的傅里叶分量吧。我必须承认,在那时我还不知道矩阵为何物,不知道矩阵乘法规则。但我们可以从物理中学到这些运算,尔后发现那正是数学家所熟知的矩阵乘法。

这时我们可看到,与分立定态联系着的电子轨道的概念,实际上已被抛弃了。然而分立定态的概念仍保存着。这概念是必要的,它在观测中有其根据。但电子轨道不能同观测联系起来。所以它被抛弃了,留下的是这些坐标的矩阵。

似乎应当提一下,在 1925 年发生这些之前,玻恩于 1924 年在哥丁根讨论班上已强调指出,把量子论的困难单单归诸辐射与力学体系间的相互作用,是不正确的。他宣传了这种想法:力学必须加以改造,必须用某种量子力学来代替,方能提供理解原子现象的基础。之后,矩阵乘法也规定了。玻恩与约尔当,和狄拉克独立地发现,在我第一篇论文中加于矩阵乘法的那些附带条件,实际上可写成 $pq - qp = h/2\pi i$ 这样精致的形式。这样一来,他们便能为量子力学建立起一个简单的数学方程。

但即便到这时候,谁也说不出分立定态究竟是什么,所以现在来谈谈我这个报告的第二部分——态的概念。在 1925 年,确实已有了计算原子分立能量值的方法。并且至少在原则上,也已有了计算跃迁几率的方法。但原子的态是什么呢?怎样才能描述它呢?它不能根据电子轨道来描述。直到此时,态只能用能量和跃迁几率来描述,但原子的图象却

一点也没有。何况也很显然,有时还有非定态。最简单的非定态的例子,是穿过云室的电子。因此问题实质上是,怎样处理这种可在自然界中出现的态。穿过云室的电子的径迹这样的现象,能不能用矩阵力学的抽象语言来描述呢?

幸而,那时薛定谔已经发展了波动力学。在波动力学中,事物看起来很不相同。在那里,对分立定态可以定义一个波函数。有一段时间薛定谔想过,分立定态可发展成如下图象:一个三维驻波,它可以写成一个空间函数与一时间周期函数 $e^{i\omega t}$ 的乘积,这个波函数绝对值的平方意味着电子密度。这种驻波的频率则使之等同于光谱定律中的项。这是薛定谔概念中决定性的崭新之点。那些项并不一定意味着能量,却是意味着频率。因此薛定谔走到了分立定态的一个新的“经典”图象,起初他相信,真的可以把这个图象应用于原子理论的。但没多久便看出,那也还是不行。1926年夏,在哥本哈根曾有十分激烈的争论。薛定谔认为,物质按波函数环绕原子核连续分布的原子波动图象,可以代替量子论的旧模型。但是与玻尔讨论导致的结论却是,这种图象甚至不能解释普朗克定律。对这种诠释,十分重要的是应当说,薛定谔方程的本征值不仅代表着频率,——它们实际上是能量。

这样一来,当然就回到了从一个定态到另一定态的量子跳跃的概念,薛定谔对于我们讨论的这种结果十分失望。但即便我们知道了这一点,接受了量子跳跃,我们也并不知道“态”这个词能意味着什么。当然,我们可以试试看,能否用薛定谔方程去描述穿过云室的电子。很快作了这种尝试,结果表明那是不行的。在初始位置时,电子可用波包来表示。波包要向前运动,于是我们获得了有些象穿过云室的电子径迹的东西。但困难的是,波包要越变越大,以致如果电子的行程足够长的话,它就会有一厘米或甚至更大的直径。这肯定不是在实验中观察到的现象,所以这种图象仍然必须抛弃。在这种情况下,当然我们作了许多讨论,而且是很困难的讨论,因为我们都感到,量子力学或波动力学的数学程式已是最终的了。它无法再改变,我们不得不按这个程式进行一切计算。另一方面,却没人知道在这程式中,怎样去表示象穿过云室的电子径迹这样简单的事例。玻恩迈出的第一步是:从薛定谔理论算出碰撞过程的几率;他引进了一个概念:波函数的平方并不是薛定谔所认为的电荷密度,而是代表在某给定地点找到电子的几率。

之后狄拉克和约尔当的变换理论也出来了。在这理论中,可以从 $\psi(q)$ 变换到(比如说) $\psi(p)$,而且很自然地可以认为,平方值 $|\psi(p)|^2$ 应当是找到动量为 p 的电子的几率。因此我们逐渐获得这样的概念:波函数的平方意味着某种几率,顺便提一下,这并非三维空间中的波函数,而是在位形空间中的波函数。有了这种认识以后,我们再回到云室中的电子。会不会是我们问了错误的问题?我记得,爱因斯坦告诉过我:“正是理论决定什么是可以观测的。”那意味着,如果认真一点讲,我们不应当问:“我们怎样才能表示云室中电子的径迹?”而应当问:“在自然界中,是否真的只有那些能用量子力学或波动力学表示的情况才会出现?”

围绕这个问题,我们立刻看到,云室中电子的径迹并不是具有明确位置和速度的一条无限细的线,实际上云室中的径迹是一系列点,这些点是由水滴不太精确地确定的,而速度也同样不能太精确地确定的。因此我简单地提这个问题:“如果从‘只有能用量子力学的数学程式表示的那些情况,才能在自然界中找到’这样的基本原则出发,那么,当我们想知道一个波包的速度同时又想知道它的位置时,所能获得的最佳准确度是怎样的呢?”这是一个简单的数学问题,其结果便是测不准原理,它看来与实验情况相符。我们终于知道

了怎样表示电子径迹这类现象，但又一次付出了很高的代价。就是说，这个解释意味着，表示电子的波包在每个观察点都在变化，也就是在云室中的每个水滴处都在变化。在每一点上，我们获得关于电子态的新信息，所以必须把原来的波包代以一个新波包，以表示这种新的信息。

这样表示的电子态，不允许我们赋与轨道中的电子以确定的性质，如坐标、动量等等。我们所能做的，仅仅是谈到几率：在适当的实验条件下，于某点找到电子的几率，或找到电子速度为某一值的几率。因此，最后我们得到的态的定义，比原来的电子轨道抽象得多。数学上，我们用希耳伯特空间中的一个矢量来描述它，并且这个矢量决定了在这个态时进行的各种实验的结果的几率。每一个新的信息，都会使态改变。

态的这个定义，对自然现象的描述作了一个巨大变革，或者如狄拉克所说是一个巨大的跳跃；并且我怀疑，爱因斯坦、普朗克、冯·劳埃和薛定谔的不愿接受它，是否可以单纯归结为偏见。偏见这个字眼在这里是太消极了，并没有概括所有情况。当然那也是真实的，例如爱因斯坦就以为，必然能够在旧物理学同样的意义上，对原子态这种事情给出一种客观描述。放弃这种观念的确非常难，因为我们的所有语言都同客观性的概念紧紧地连结在一起。所以在物理学中用来描述实验的字眼，例如测量、位置、能量、温度等等，都是以经典物理和它的客观性概念为根据的。宣称在原子世界中这种客观描述成为不可能，而只能用希耳伯特空间中的一个方向来规定一个态，这样的讲法实在是太革命性了；我想那时的许多物理学家干脆不愿接受它是并不奇怪的。

1954年，爱因斯坦死前几个月，他同我讨论了一下这问题。那是我同爱因斯坦渡过的一个愉快的下午，但一当谈到量子力学的诠释时，仍然是他不能说服我，我也不能说服他。他总是说：“是的，我承认，凡是能用量子力学算出结果的实验，是如你所说的那样出现的，然而这样的方案不可能是自然的最终描述。”

现在来谈我要讨论的第三个概念：基本粒子的概念。1928年以前，每个物理学家都知道，基本粒子意思指的是什么。电子和质子是最明白的例子，那时我们喜欢简单地把它们当作点电荷：体积无限小，仅由它们的电荷与质量所确定。我们不得不勉强地承认，它们必须有一半半径，因为它们的电磁质量应当是有限的。这类对象应有半径之类的性质这样的想法，我们是不喜欢的；但至少它们看来似乎像球一样完全对称，所以我们还算高兴。然而以后发现了电子自旋，使这个图象大大改变了。电子并不对称。它有一根轴，并且这结果突出地指出，恐怕这种粒子具有更多的性质，它们并不是简单的，不像我们原先所想的那样基本。1928年狄拉克发展了电子的相对论理论并发现了正电子，情况又完全改变了。一个新观念不可能在一开始时就十分清楚的。狄拉克起初想，他理论中的负能量空穴可以等同于质子；但后来很明显，它们应当具有与电子相同的质量，最后在实验中发现了它们，并称之为正电子。我觉得这个反物质的发现恐怕是本世纪物理学中所有巨大跃进中的最大的跃进。这是一个无比重要的发现，因为它把我们关于物质的整个图景改变了。在我这次谈话的最后部分里，我想对此作较详尽的说明。

开始狄拉克提出：这种粒子可能在成对产生过程中产生出来。一个光量子，能把真空中的一个虚电子从一些负能态中的一个提到较高的正能量，这就意味着，光量子产生了一对电子和正电子。但这立刻意味着，粒子数不再是个好量子数了，没有关于粒子数的守恒律了。例如，按照狄拉克的新观念，我们可以说氢原子不一定要由质子和电子构成。它

也可暂时由一个质子,两个电子,一个正电子构成. 实际上,在考虑到量子电动力学的更精细的细节时,这些可能性确实起一些作用.

在辐射与电子相互作用的场合中,成对产生这种现象是会出现的. 但这样就可很自然地假设,类似过程可能在远为广泛的物理领域中出现. 1932 年时我们已知道,原子核里没有电子,原子核是由质子和中子构成的. 但后来泡利提出: β 衰变也许可以这样来描述,就是说一个电子与一个中微子在 β 衰变中产生了出来. 后来费米在他的 β 衰变理论中表述了这种可能性. 由此可见,早在那时候粒子数守恒律就已完全被抛弃了. 我们知道,在有些过程中,粒子是从能量产生出来的. 当然,这种过程的可能性,在狭义相对论中已经给出: 能量在转化为物质,但它的实在性却是联系到狄拉克关于反物质和成对产生的发现而首次出现的.

β 衰变的理论,是费米在 1934 年发表的. 不多几年后,连系着宇宙辐射我们提出一个问题:“如果两个基本粒子以很高能量相碰,将发生什么?”自然的回答是,没有什么良好理由可以认为,在这样的过程中不应当产生许多粒子. 所以,实际上,在狄拉克的发现之后,高能碰撞中粒子多重产生的假设是十分自然的. 十五年后,当人们研究极高能量的现象并能够在加速器中观察到这些过程时,才对这个假设作了实验验证. 但是,如果我们知道,在极高能量的碰撞中,任何数目的粒子都可能产生,唯一条件是初始的对称性与最终的对称性相同,那么我们还得假定,任何粒子实际上是一个复杂的复合体系,因为在某种程度的真实性上我们可以说,任何粒子实际上是由任何数目的其它粒子所构成. 当然,我们还得承认,把一个 π 介子看作仅由核子和反核子所构成大概是合理的近似,我们无须考虑更高级的结构了. 但那只是个近似,如果我们一定要讲得严谨的话,那么我们应当说,对任一 π 介子,我们有几个粒子甚至任意多个粒子的多种组态,只要总的对称性与 π 介子的对称性一样就行了. 所以狄拉克的发现的最惊人结果之一是: 基本粒子的旧概念完全崩溃了. 基本粒子不再是基本的了. 它实际上是一个复合体系,说得更确切些是个复杂的多体体系,它所具有的复杂性完全不下于分子或任何其他这类物体真正具有的复杂性.

狄拉克理论还有另一个重要结果. 在旧理论中,我们说的是在非相对论性量子论中,基态是一个极简单的态. 它就是真空,空的世界,没有任何别的东西,所以它有最高可能的对称性. 狄拉克理论中的基态就不同了. 它是一个充满着看不到的负能粒子的客体. 除此以外,如果引入了正反粒子对产生的过程,我们就可以预期,基态必须包含几乎无穷多个虚正电子、电子对或虚粒子反粒子对;因此马上可以看出,基态是个复杂的动力学体系. 它是基本自然定律所确定的本征解之一. 如果基态按这种方式解释,我们可以进一步看到,在基本自然定律群中,它不需要是对称的. 事实上,电动力学最自然的解释看来是: 在同位旋群里,基本自然定律是完全不变的,而基态却不然. 因而在同位旋空间里的旋转中基态是简并的假设,按照哥耳德斯通的一个定理,要求远程力或静止质量为 0 的粒子的存在. 库伦相互作用和光子或许也应当以这种方式来解释.

最后,狄拉克根据他的空穴理论在 1941 年的贝克讲座里阐述了一种思想: 在相互作用的相对论场理论中,应当使用不定度规的希耳伯特空间. 究竟通常的量子理论的这种推广是否真正必要,这仍是个有争执的问题. 但在近数十年内经过许多讨论后,我们已不能怀疑,不定度规的理论确可以前后一贯地建立起来,并可导致合理的物理诠释.