



杨建邨

1925年前后原子物理学所处的状况,海森堡(W. Heisenberg)曾作过生动的比喻,他说:“1924至1925年冬,在原子物理学方面,我们显然到了一个浓雾密布,但是已露出了一线阳光的领域。并且,振奋人心的新前景正在我们面前展现出来。”

从1913年玻尔(N. Bohr)提出氢原子理论以来,历经坎坷。到1925年,玻尔和他的同事们取得了许多关键性胜利,使原子量子化的理论,终于基本确立。但玻尔预订的目的,即首先找到一个理论上具有自洽性的量子论,然后利用它去准确解释原子结构和周期表,在1925年以没有达到。但到了1925年,在一批不到三十岁的年轻物理学家的努力下,新前景开始展现在人们面前:海森堡在玻恩(M. Born)和约丹(P. Jordan)的参与下,提出了矩阵力学;同年,泡利(W. Pauli)又提出了不相容原理。由于有了这两位年轻物理学家的有决定意义的贡献,玻尔的两个目标就基本上实现了。

在这篇文章里,我们尽可能详尽地探讨一下泡利在提出不相容原理后,对电子自旋概念由反对到赞同这一期间的一些具体情形,这不仅饶有趣味,而且对我们将有一定启示。

1922年泡利取得博士学位后,开始研究反常塞曼效应*。根据碱金属和惰性气体的原子光谱所积累的大量经验资料,泡利写了一篇文章:《原子内的电子群与光谱的复杂结构》,并于1924年12月12日寄给了玻尔。在这篇文章中,泡利提出了后来闻名于世的不相容原理。当时泡利认为自己的提法太抽象,所以还拿不定主意。但哥本哈根的反应还不错,玻尔还鼓励他发表这篇文章,于是泡利将这篇文章发表于1925年3月21日出版的《物理杂志》上。在这篇文章里,泡利把不相容原理明确表示为:“在一个原子中,不可能存在两个或更多的等价电子,它们在强外磁场中的所有量子数: n , K_1 , K_2 和 m , 都相同。若在外磁场中,原子中一个电子的这些量子数都有确定的值,那么,由这些量子数所表征的那个(状)态就被‘占满’了。”

泡利由于提出了不相容原理,后来获得了1945年度的诺贝尔物理学奖。泡利的功劳当然是很大的,但正

如我国物理学史家戈革教授所说:“从当时的历史情况来看,这一原理的初步想法却早已包含在玻尔等人的科学著作中。泡利的功劳在于增加了必要的量子数,并且放弃了关于经典解释的寻求而把那种在实验资料中表现得不容否认的‘不相容性’作为原理肯定了下来。”

泡利不相容原理提出以后,玻尔预期的目的之一——准确解释门捷列耶夫元素周期律就顺利完成。这在当时来说,的确是一个非同小可的胜利,物理学家们都为此欢欣鼓舞。但有一个问题仍然没有得到解决。泡利在不相容原理中指出,描述原子中的电子除已有的三个量子数以外,还需要第四个量子数。由这四个量子数所确定的定态,只能为一个电子所具有,也就是说,在一个原子中不可能存在四个量子数完全相同的两个电子。但是,这第四个量子数到底应该怎样从物理意义上加以解释呢?以前的三个量子数都可以在经典物理学中得到解释,而唯独这第四个量子数使人们感到玄妙莫测,泡利为此亦颇感沮丧。他当时只能说,这第四个量子数是“一种经典方法无法描述的、电子的量子理论特性中的二值性”。泡利十分强调“经典方法无法描述”这一点,他根本不相信第四个量子数会象前三个量子数那样,有经典力学的解释,他认为第四个量子数反映了一种“非力学的 Zwang (应力)”。

这时,在德国图宾根有一位美国物理学家克罗尼格(R. Kronig),对于泡利的第四个量子数的物理解释却很有兴趣,这是因为朗德(A. Landé)在1925年1月7日将泡利于1924年11月24日写给他的信给克罗尼格看了。这封信里谈到了原子结构的新思想。据克罗尼格1960年在一次报告中回忆说:“泡利的信给我的印象十分深刻,而且十分自然地使我对原子的每一个电子用量子数描述产生了好奇心。这些量子数,特别是两个角动量 L (早先是 K)和 S (早先是 r)。在强碱金属原子光谱中是时常提及的。显然, S 不能再归因于核,而且我还立即想到,量子数 S 可以看成是一个电子本征角动量。”他之所以得出这样的看法,据他

* 即光谱线在外磁场中因劈裂而显示复杂谱线的现象。

自己回忆说是因为“在量子力学出现以前，模型是讨论问题唯一的基础，就此意义而言，第四个量子数只能看成是电子绕自身轴的自旋。”

克罗尼格十分清楚，这种模型会带来一些意料不到的严重困难，但这个想法太吸引人了，他舍不得扔掉。就在11月24日当天下午，他立即用这一模型推导出了一些结论，这些结论非常鼓舞人心。例如，仅从这一模型出发，不需要任何相对论的考虑，克罗尼格竟得出了一个十分重要的相对论公式：双线能态之差服从 Z^4 定律，而 Z^4 定律是由实验数据得出并由相对论理论预言了的，并与朗德的“相对论劈裂规则”一致。克罗尼格兴奋地将这一结果告诉了朗德，朗德也表示十分欣赏。正好，泡利第二天要到图宾根来。他们两人非常迫切地希望听到这位被誉为“物理学的良心”和“上帝的鞭子”的知名物理学家的意见。

不幸的是，泡利这次犯了他一生很少犯的错误。当克罗尼格瞅住机会把自己的想法告知泡利时，泡利的回答使克罗尼格大为失望。泡利说：“你的想法的确很聪明，但大自然不喜欢它。”

显然，泡利是不相信电子可能会有本征角动量的，这是为什么呢？原来他以前对相对论性电子和塞曼效应作过深入的研究。他的研究表明，一个绕轴自旋的电子其旋转速度接近光速，所以其磁矩就不会如克罗尼格所推断的那样是一个常量，而与质量的相对论性增量有关。另外，大约也是最根本的原因是泡利认为，解决原子问题应该从量子理论概念中去寻找。在后来他的诺贝尔获奖演讲中曾回忆说：“由于它的经典力学特性，一开始我就强烈地怀疑这一想法的正确性……”按泡利当时的意见，所有经典模型都应该坚决舍去。事实上，泡利曾下决心要把经典形象统统从量子物理学中赶出去，但这显然不是一件轻而易举的事情。他开始也许把事情想得容易，所以曾在玻尔面前夸过海口：“我不会碰到物理学方面的困难的……。”到1925年，在他屡遭挫折之后，也不得不叹息道：“……物理学对我来说太难了。”他甚至感到物理学又一次被逼进死胡同。

由于泡利的反对，朗德私下对克罗尼格说：“如果泡利这么说，那么，大自然一定是不喜欢它的。”在当时，泡利的意见是很有分量的，物理学家们甚至认为“泡利在判断和发现任何理论的弱点上，差不多是具有传奇式的能力的。因此除非能得到泡利的赞同，很少有人对他们本身的工作感到完全有把握。”罗森菲尔得(A. Rosenfield)也说：“在物理学家的心目中，无论谁的赞誉都抵不上泡利所赐的首肯。这对玻尔也不例外。”

年轻的克罗尼格见泡利坚决反对，在哥本哈根那边也没有积极的反响，再加上计算中遇到一些困难，于是他放弃了自己的想法，以后甚至连提都不提了。

但是，大约在半年之后，与克罗尼格相同的想法，被荷兰著名物理学家埃伦菲斯特(P. Ehrenfest)的两个学生又重新提出来了。这两位学生就是乌伦贝克(G. Uhlenbec)和高斯密特(S. Goussmit)。他们在原先并不知道克罗尼格的工作的情形下，提出应该将泡利的第四个量子数与“电子的本征自转”联系起来。他们的意见肯定也会遭到反对，但比克罗尼格幸运的是，他们的导师埃伦菲斯特十分支持他们，再加上下面将要提到的一些机遇，他们的想法最终得到了包括泡利在内的一致承认。

埃伦菲斯特将这两个学生组合在一起，实在高明。他们两人互相取长补短，不到几个月的功夫，就提出了电子自旋的惊人之见。

有一次，高斯密特向乌伦贝克介绍泡利不相容原理，这给乌伦贝克留下了深刻的印象。他觉得泡利的理论体系与玻尔的原子模型之间缺乏最起码的联系，并觉得泡利的理论过于形式化了。乌伦贝克擅长用经典统计力学处理问题，所以他很自然地想到，前三个量子数都对应电子的一个自由度，那么第四个量子数就应该意味着电子还有一个自由度，换句话说，电子必须自转。乌伦贝克把这个想法告诉给高斯密特听时，高斯密特问：“什么是自由度？”这使乌伦贝克大吃一惊。等乌伦贝克把自由度解释清楚以后，高斯密特立即十分赏识这一看法。在迅速作了一些计算之后，他认为如果电子的角动量是 $\hbar/2$ ，那么电子相对于轨道运动就有两种转动，由此即可对反常塞曼效应的分裂作出圆满的解释。如果角假定自旋转动的回磁比是经典值(电子轨道运动)的两倍，那么其磁矩 $2 \cdot \frac{e}{2m_e c} \cdot \frac{\hbar}{2}$ 就

正好等于一个玻尔磁子！这样一来，以前由核来确定的一些特性，现在可由电子特性加以描述了，泡利的思想也就更明确、更令人易于理解。对此，高斯密特曾回忆说：“当他谈到自旋以后，我立即认识到，现在完全可以弄清楚为什么 m_s^* 总是 $+\frac{1}{2}$ 或 $-\frac{1}{2}$ ，而且可

以更进一步地将整个玻尔磁子(即： $\frac{e\hbar}{2m_e c}$)的磁矩用到电子上面。这样，塞曼的分裂就可以得到解释。另外，可以明显看出，自旋与我们对氢(光谱)的新解释完全一致。”

但他们两人没有把握，不知道新的假设是否导致新的困难。他们将他们的想法告诉了埃伦菲斯特。埃伦菲斯特听了以后，认为这一想法可能十分重要，当然也可能是胡说八道。他说：“我要问问洛伦兹先生。”10月16日，埃伦菲斯特给洛伦兹写了信。与此同时，埃伦菲斯特又嘱咐高斯密特和乌伦贝克把他们的想

* 即第四个量子数——作者注。

法,计算写一篇短的论文,他要推荐给《自然杂志》。

洛伦兹(H. A. Lorentz)当时已退休,但他每周星期一上午十一点到莱顿大学作有关物理最新进展的报告。乌伦贝克在10月19日乘洛伦兹来校作报告的火车,将他们的新设想告诉了洛伦兹。洛伦兹是当时全世界公认的伟大物理学家。他对乌伦贝克非常和蔼,对乌伦贝克的想想法也表示很感兴趣,但他得回家去想一想才能提出意见。10月26日,洛伦兹带来了一大迭写满了算式的稿子。他向乌伦贝克说,如果电子的半径是 $r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2}$,并且以角动量 $\frac{\hbar}{2}$ 自转,那么其

表面速度将为真空中光速的十倍左右!如果电子磁矩为 $\frac{e\hbar}{2m_e c}$,为保证其质量为 m_e ,其磁能大到使其半径至少为 r_0 的十倍。

乌伦贝克听后大吃一惊,这才知道困难竟如此严重。他立即找到埃伦菲斯特,要取回投给《自然杂志》的稿子,乌伦贝克认为,他们的想法很可能真是一些胡说八道。埃伦菲斯特的回答使乌伦贝克大吃一惊,他说他已经将稿子寄出去了,可能即将出版。乌伦贝克感到很狼狈,但埃伦菲斯特平静地安慰他说:“你们还很年轻,干点蠢事也没有什么关系!”

文章于11月20日刊印出来了。第二天,海森堡从哥廷根给高斯密特写了一封信。他与高斯密特以前就有学术上的交往,彼此可以说十分熟悉。在信中,他钦佩他们的想法,并认为利用自旋-轨道耦合作用,可以解决泡利理论中所有的困难。但他提出了一个使乌伦贝克和高斯密特感到十分棘手的问题,那就是如何解释在双线公式中多出来的一个因子2。对这一困难,他们无法回答。他们没有计算过双线公式,甚至根本不知道如何进行计算。

幸运的是正在这时,爱因斯坦到莱顿大学作每年为时一月的访问。他们提供了一个重要的解决办法:在相对于电子静止的坐标系里,运动原子核的电场 \mathbf{E} 将按照相对论的变换公式产生一个磁场 $\mathbf{E} \times \mathbf{V}/c$,其中 \mathbf{V} 是电子的速度。但是,用这种方法进行计算,双线公式倒是得出来了,但因子2的困难仍然没有解决。对这一困难,无论是爱因斯坦,还是12月初到莱顿参加庆祝洛伦兹获得博士学位五十周年纪念活动的玻尔,对这一困难虽然也持慎重态度,但同时认为以后会有更好的计算解决这一困难的。

由于有了爱因斯坦和玻尔这两位物理巨匠的支持,电子自旋的假说就基本上被物理学家们接受了,但泡利仍然不同意这一假说,他继续采用一种纯量子理论描述进行研究,坚持认为任何一种经典的模型都是“错误的教条”。玻尔从莱顿返回哥本哈根时途经柏林,参加了12月18日德国物理协会举行的庆祝量子理论诞生25周年纪念活动。在柏林玻尔见到了泡利,但

玻尔不仅没有说服泡利,相反,泡利还回敬了玻尔一些不客气的话:“一种新的 Irrlehre (邪说)将被引入物理学”。不过,这时泡利的反对,正如玻尔在一封致埃伦菲斯特的信中所说,已经“不是决定性的”了。在物理大师们的鼓舞下,乌伦贝克和高斯密特接连又在《物理杂志》(1925年11月25日)和《自然》(1926年2月)上发表了他们进一步研究的成果。

但因子2仍然是一个谜。但到了1926年2月,这个谜被一位正在哥本哈根工作的英国物理学家托马斯(L. H. Thomas)顺利解决了。托马斯于1921年至1925年在剑桥大学研究物理,他曾经听过爱丁顿(A. S. Eddington)的演讲,对狭义相对论十分熟悉。1925年秋天他到哥本哈根时,知道了自旋电子模型中因子2的困难,他立即问道:“那么,为什么不用相对论的理论来研究呢?”克拉末斯(H. A. Kramers)回答说:“那只能作一个小小的修正。”托马斯没有听信这一回答,他记得爱丁顿在他的《相对论的数学理论》一书中曾计算过关于月亮交点(Moon's nodes)的狭义相对论效应。托马斯立即查阅了这本书,并将其计算方法用于电子自旋中。到第三天,他解决了这个谜。原来问题出现在坐标系的变换上。当人们将运动的电子和静止的核这个坐标系变换为电子静止而核运动这样一个坐标系时,忽略了一个重要的相对论效应。这一效应的起因是电子具有加速度,它应该折合为一个内磁场 \mathbf{H}_i 发生作用。托马斯还进一步指出,电子本征自转的角度 ω 不是 $(-e/m_e c^2)(\mathbf{E} \times \mathbf{V})$,而是

$$\omega = \frac{-e}{m_e c} (\mathbf{E} \times \mathbf{V}) - \frac{1}{2c^2} (\mathbf{V} \times \mathbf{f})$$

由第一级近似,他得到了

$$\omega = -\frac{e}{2m_e c} (\mathbf{E} \times \mathbf{V})$$

这样,长期令人迷惘的2这个因子就在相对论效应的考虑中自然而然地解决了!(注:上式中 \mathbf{f} 是代表电子的加速度, \mathbf{V} 是电子的速度。)

乌伦贝克后来回忆说:“当我第一次知道托马斯的想法时,我几乎不相信一个相对论的效应能给出一个因子2,我原以为它只能给出 v/c 这样一个数量级。”其实,不仅乌伦贝克没想到这一点,甚至一些十分精通相对论的人(包括爱因斯坦)都对这一结果感到相当的惊诧。

托马斯将自己详尽的计算发表在《哲学杂志》上,玻尔立即表示十分信服。不久,海森堡和约当又用一种纯量子力学的计算得到了同样的结果。

泡利开始有几个星期仍然持怀疑态度,1926年3月8日,泡利在给克拉末斯的信中还说:“在这场争论中,我完全是正确的。”但到了3月12日,他的态度来了一个大转向,他在那天给玻尔的信中说:“现在,对我来说,只有完全投降。”3月13日给高斯密特的信

举足轻重的物理常数

郭奕玲

物理常数在科学技术各个部分都有重要意义。特别是物理学,物理学研究的是“物”及其运动,就要了解和观测“物”在其运动中的变革,并把握其变革的数量关系,于是就会遇到许多与物性有关的物理量,例如:温度、压强、比热、导热系数、电阻率、电阻温度系数、折射率等等。量与量之间有某种函数关系,在函数关系中必然会出现一系列常数,以表征物质的固有特性,这就叫物质常数。

还有一类常数与具体的物质特性无关,是普适的,例如光在真空中的速度 c 、基本电荷量 e 、普朗克常数 h 、精细结构常数 α 等等,人们称之为基本物理常数。这些常数出现在许多不同部门的物理问题中,通过物理学一系列定律和理论彼此密切联系,构成了物理学框架中不可缺少的一些关节点。

基本物理常数大多与原子物理学和粒子物理学有关,其数目可以列出三、四十个。随着物理学的领域向纵深发展,基本物理常数涉及的范围越来越广,数目越来越多,测量方法日新月异,结果也越来越精确。一个物理量往往可以用几个不同的方法测定,这样就发生了数据之间是否协调的问题。如果不协调,就会阻碍科学成果的交流,产生互相矛盾的结果,引起严重后果。

1929年,伯奇(R. T. Birge)发表了著名的论文:《普通物理常数的可几值》,系统地对基本物理常数进行分析评定,对不同来源的数据进行对比,加以校正,求其最可几值,由此向公众提供了一套可靠的基本物理常数,深受科技界的欢迎。尽管伯奇1929年的工作尚属初步,但他开创了用最小二乘法平差(即调整,

adjustment)求得常数的最佳值,为以后的常数评定工作奠定了基础。后来,他和另外一些学者继续改善评定工作,不断整理和发表基本物理常数的推荐值,形成了一门独特的科学事业。

基本物理常数的评定工作受到科技界的普遍重视,因为一套举世公认的基本物理常数必然反映了当代物理理论和科学实验的新进展。也反映了技术领域的新成果,从数据的角度对科学技术的进步作出总结,也为科学技术工作提供了科学的、统一的、精确的数据资料,对科学技术的发展有重要的促进作用。有关基本物理常数的工作,从测量到评定,从实验到理论,在现代和当代物理学中占有重要地位。

基本物理常数的评定工作,主要包含以下内容:

1. 检验实验数据的合理性,澄清理论和实验之间的不协调,对比各种不同方法所得结果,作出科学的评价;
2. 保证实验数据的可靠性,剔除或修正有疑问的数据;
3. 对选取的数据加权后进行平差处理,求出最可几值;
4. 经过计算,推荐一套自洽的基本常数,并分别给出不确定度。

最近一次平差作于1986年,由柯恩和泰勒主持,他们经过五年的工作,对大量数据进行研究和分析,从中间选出十五个物理量作为辅助常数,例如真空中的光速 c 、质子、电子质量比 m_p/m_e 、里德伯常数 R_∞ 、电子的 g 因子等等,这些辅助常数不参加平差,不确定度均不大于 0.02ppm (ppm 表示百万分之一)。另选 38

中,泡利写道:“我今天首先应告诉你的是,从哥本哈根得到的最近的报告,使我相信反对托玛斯是错误的。我现在相信他的相对论性考虑是完全正确的,无可置疑,精细结构的问题现在可以被认为得到真正满意的解释。”

泡利在接受了电子自旋理论以后,立即试图将电子自旋与量子力学更深刻的特征结合起来。在这方面,玻尔的结论一定使泡利感到满意,玻尔说:“电子自旋不能用经典方法可以描述的实验来测定(例如在外磁场中电子束的偏转)。因此,我们必须考虑电子的量子力学本质。”

关于自旋的本质,本文不再探讨下去。最后应该

指出的是,总的说来,泡利并没有错。1940年他进一步证明自旋是出于量子场论的需要,正如荷兰著名科学史家范德瓦登(Van de Waerden)明确指出的那样:“自旋是不可能由经典力学的模型来描述的,因为这样一个模型永远也不可能导出旋转群的一个双值表示。”而且对自旋两种状态想作更进一步描述,直到今天仍然是不可能的。但另一方面,电子自旋概念的提出,的确又如玻尔当然所说,解决了当时原子理论中大部分令人头痛的难题,在量子物理几乎“被逼进死胡同”的时刻,拯救了量子物理。这真是有点令人不可思议!