

海森堡和量子统一场论

杨建邨

(华中理工大学物理系 武汉 430074)

古希腊有位作家名叫阿泰拉奥斯(约公元2~3世纪),他曾写了一个故事,说的是埃及法老泰俄斯原以为斯巴达王阿革西拉乌斯一定相貌堂堂,一表人才,但亲眼看见斯巴达王以后却大为失望,于是他当面讽刺说:“山怀孕了,万神之王宙斯大吃一惊,但山却生了一个小老鼠。”阿革西拉乌斯针锋相对地回答说:“你把我看作老鼠,但总有一天,你会把我看成狮子。”

有趣的是,爱因斯坦的统一场论也有与斯巴达王相似的经历。原来认为爱因斯坦研究统一场论纯粹是场悲剧的玻恩,到了70年代才认识到,统一场论并不像他原来想象的那样,是一只令人讨厌的和令人厌恶的小老鼠,事实证明他还颇有雄狮的那种威风。玻恩承认,近代科学正沿着爱因斯坦指出的统一理论方向走去。1979年第21期美国《科学新闻》(Science News)上登载过一篇纪念爱因斯坦诞辰100周年的文章,其中有一段话写道:“现在有望了,统一场论正风靡一时,这是量子统一场论(不是爱因斯坦研究的那一种)。……他们表现了解决问题和提供爱因斯坦所希望的宏伟的统一的可能。”杨振宁教授于1979年也指出:“爱因斯坦的统一场论……这种固执观念与对理论物理的基本结构的理解应当是有深刻联系的。而我还要补充一点,这种深刻理解更是今天物理研究的课题。”那么,这一切又是怎么发生的呢?说来也真令人深思,因为统一场论的进一步发展,恰恰是由于被爱因斯坦轻视的量子力学和基本粒子物理学迅速发展的结果。

从不顾此失彼。费米学派理论与实验并重的科研作风,符合现代科学发展的趋势。现代科学理论越来越高深,实验越来越精细,科研工作者如果没有理论知识与实验技能的融会贯通,要

量子力学和基本粒子物理学的迅速发展,对爱因斯坦的几何统一场论既是一个沉重的打击,也是一个巨大的促进。一方面,强、弱相互作用的发现,使统一场论由统一电磁、引力2个相互作用,增加到要统一4个相互作用,这就使得原来已经困难重重的几何统一场论处于更加窘迫的地位;另一方面,量子力学的发展,又不得不求助于统一场论的建立。这也就是说,虽然困难越来越大,但需要却越来越迫切。这是因为本世纪20年代以后,大量新的基本粒子不断被发现,这对物理学家来说是提出了一个相当难于克服的难题。

我们知道,每一个基本粒子,它既有粒子性又有场的性质。量子场论认为,有一种粒子就有一种场,粒子是场的激发态。例如,电子是电子场的激发态,光子是电磁场的激发态,介子是介子场的激发态。描述不同的粒子需要不同的场论,描述光子用的是量子电动力学,而对介子则要用介子场论。当基本粒子到50年代已出现到40多种时,物理学家显然不能满意这种穷于对付的状态,他们理所当然地想用一种统一的场论描述日益增多的粒子。另一方面,量子力学用于电磁场时,出现了发散的困难。所谓发散的困难是指当人们考虑交换场粒子实现相互作用后,如果只考虑低级近似常常与实验结果相符,但每当进一步作高级近似时,得到的结果却与实验结果不符,而且其结果无穷大!为了克服上述种种困难,物理学家想了许多方法,其中有一种方法就是想用统一场论来摆脱困

想取得大的突破是不太可能的。这就要求科研工作者在从事科学研究工作时,既要重视理论知识的学习,又要重视实验技能的培养,做到理论与实验并重。

境。这样，统一场论又获得了新的动力，开始了一个为时不长的中兴时期。

历史是不可能完全重复的。物理学家已经十分清楚，爱因斯坦的设想，即从几何统一场论中自动地导出量子力学，是完全不可能的。量子效应是微观世界的根本效应，不是宏观世界的次级效应，因而在统一场论中兴时期，物理学家认为应该从量子力学的角度去建立新的统一场论。我们感兴趣的是海森堡的量子统一场论，因此下面我们大致描述一下这个理论的始末。

海森堡给人们的印象是十分深刻的，当他刚满 20 岁还在慕尼黑大学读书时，就有资格被人视为物理学家了。后来，他进入当时德国最负盛名的物理学家之一索末菲的研讨班。不到 4 周他就被获准独立进行课题研究。由于他与经典物理没有心理上的联系，再加上他的勤奋、聪敏，他很快就显示出不同一般的才华。有一次他因为提出半整数量子数而使他的导师索末菲大光其火，但他坚决认为：“如果要想圆满解释塞曼效应，就得抛弃现有物理学相当一部分内容。”当以无视经典观念而著称的泡利都为他担心时，海森堡却回答得十分干脆：“只要能获得成功，可以不择手段。”年轻时的海森堡简直锐不可当，但到了老年以后，他与爱因斯坦一样，迷恋于统一场论，尽管原来的好朋友一个一个地离他而去，他却坚持孤独地干下去，直到去世。

大约从 1950 年开始，海森堡就开始集中精力研究统一场论了。在基本粒子不断被发现、每一个粒子又需要一个特定的场来加以描述的情形下，要想找到某个“基本场”来描述基本粒子的场，其难度可说大得可怕。但海森堡却不乏勇气，承担了这个令人生畏的难题。开始，他打算用“自旋场”加上一些适当条件，希望以此得到各种基本粒子，如像量子力学中的量子条件可以给出原子的线光谱一样。1957 年以后，由于杨振宁、李政道否定了弱相互作用中的宇称守恒的教条，物理学家对于对称原理发生了异乎寻常的兴趣。于是，海森堡也开始设想，是

不是可以利用对称性来解决统一场论的问题呢？他在他的回忆录《物理学及其他》(Physics and Beyond) 一书的第 19 章“统一场论”中写道：“我不遗余力地想探索一个决定物质场内部相互作用的场方程，如果可能的话，它应该可以描述自然界所有能够观察到的对称性。作为一种模型，我利用了 β 衰变相互作用的特性，因为它简单而且已被人们普遍接受，再加之有李政道、杨振宁的发现，使这个模型有可能容易确定。”

1957 年下半年，研究似乎有较大的进展，海森堡发现了一个方程，似乎有希望对统一场论作出决定性贡献。下面是海森堡写下的颇为动情的回忆：

“1957 年秋，为了和泡利进行讨论，我在苏黎士作了短暂的停留。泡利鼓励我努力干下去，这对我实在太需要了。在此后几周内，我继续考察大量不同的物质内部相互作用形式，突然，我在这众多不同相互作用形式中，发现了一个具有高度对称的波动场方程，它并不比狄拉克电子运动方程更复杂。……它不仅包含洛伦兹群，而且还包含同位旋群。换句话说，它好像可以说明自然界中发现的大量对称性。我把这些进展告诉泡利，他也同样非常兴奋。……于是，我们决定探索这个方程能不能成为一个基本场方程，为统一场论作出贡献。泡利建议，应该把一直遗漏的几个对称性作为分度过程方法补在后面。”

海森堡还进一步设想，那唯一的场有 4 个分量，分别代表自旋变量和同位旋变量。在最简单的情形时，基本的场方程只包含一个非线性的耦合项，这一项的系数是整个理论中唯一的参量。泡利对海森堡的进展十分兴奋，据海森堡说，“我从没有看到过他对物理学这么兴奋”。当然，泡利没有忘记坚持以严格的挑剔和怀疑的态度对待新理论，而这也正是海森堡所需要的。在经过一番挑剔、怀疑之后，场方程似乎颇能经受考验，这使泡利对海森堡的场方程更加信任和更加有兴趣了。海森堡说，“泡利开始坚定地相信我们的场方程”，“场方程的简单

性和高度对称性,对于基本粒子的统一场论是很好的出发点”,他们两人被这“独一无二的场方程”的魅力强烈地吸引着,有如《一千零一夜中的阿里巴巴找到了打开宝库的咒语“芝麻,开门!”一样。

1957年圣诞节前后,泡利怀着兴奋的心情连续给海森堡写了两封信,表达了他“希望新年将给我们带来对于基本粒子物理学更圆满的认识”的愿望。在第2封颇具诗意的信中,他写道:

“每一件事物都处于不断的演变之中,因而我们对自然图景的认识也一直在变动。虽然目前尚没有什么进展,但前景肯定是无量的。没有人能准确预计会出现什么奇迹,我正在努力学习,但愿幸运伴随我。理智在指导我们,希望之花将再次为我们开放。我们必须寻找生命的小溪。啊!生命之源!我们精神之支柱!让我们在黎明之前去迎接1958年的曙光吧!……它是一条通向梯珀拉里的长路,是一条通向未来的大道。

您真挚的泡利”

可惜,泡利在1958年初的美好祝愿和期望,就像暑热天气的雷阵雨,来得快而猛,去得也迅速而彻底。1958年初,泡利要按原先的约定去美国讲学三个月。海森堡耽心处于狂喜心情的泡利在美国遇到清醒的“美国实用主义”,会热情衰退,影响他们开端不错的合作,因而劝泡利暂时不要去美国。但劝告没有成功。

海森堡的估计,真不幸而言中。

泡利曾写信给他以前的学生,当时在哥伦比亚大学任教的吴健雄,请吴健雄邀请几个人,“我愿和大家讨论海森堡和我(关于统一场论)的这个理论”。原来泡利的意思是只请几个人在哥伦比亚作一个“秘密演讲”,但报告那天却来了400多人!由此可见,远隔重洋的美国科学家对这两位德高望重的科学家是如何翘首以待。但遗憾的是等他讲完以后,不仅400多听众大失所望,都认为他在台上胡说八道,连他自己也越讲越糊涂,几乎下不了台。当时有位物理学家说:“假如他们这两位像今天这样乱搞的

话,也许我们应该回去研究研究,他们在1925年所做的工作是不是也是不对的。”从那次尴尬得令人脸红的演讲后,泡利几个月前几乎热到沸点的态度一下子降到了冰点。海森堡在回忆中写道:

“我们被分隔在大西洋两岸,而泡利总是隔很久才来一封信。……后来,他十分突然地写给我一封使我十分惊诧的信,他说他决定从我们两人的合作中退出来,对准备发表的草案他也不加入其内。……他给了我可以自由行事的权利。从此以后,我们之间的通信中断了,我一直不知道他为什么突然改变主意。”

但海森堡并没有因泡利的中途退出而丧气,虽然这对他无疑是一次严重的打击。他一直对泡利的退出表示遗憾和不解。如果说因为缺乏清晰的思想,那30年代中期的情形比当前更混乱,不也艰难奋斗过来了吗?就海森堡自己感觉而言,困难的处境更给了他激励,他认为他的职责应该促使他承担这一难以想象的重任。这种神圣的理想,大约与爱因斯坦当年的想法是一致的。

灵感似乎不断使海森堡极为兴奋,他几乎有些无法自持。他的夫人在回忆录中曾回忆道:

“在一个月明星稀之夜,海森堡完全为他所拥有的幻觉所激动,他同我一起走过哥丁根的海因山,一路上他试图给我解释他的那些新认识。他谈到对称性的奇妙在于可以把它看作万物的原型,谈到和谐,谈到‘单一’的美和它内在的真实性。这是一个历史时刻。”

这是不是一个“历史时刻”,我们不敢妄加断言,但海森堡非常相信自己的统一场论这个事实,大约是不必怀疑了。1958年1月海森堡在给夫人姐姐的信中写道:“……最近几个星期以来,我确实满怀激情,我自己在这里所经历的,或许能用一幅图像来把它说清楚。我在最近的整整5年里,曾经以极大的努力试图寻找一条以往从不知道的攀登原子理论中心顶端的路,而今已贴近这顶端地方,原子理论中各种联系的整片田野忽然清楚地横贯在我眼帘之

前。……当然,还有许多细节工作要做。……”

那时,海森堡就像猎人在接近他们的猎物时那样,聚精会神而又心情紧张,要想最终捕获到猎物,他当然还得像猎人那样耐心地、静悄悄地接近目标……。不幸的是新闻记者捕获了这个信息。1958年初,海森堡在一次学术报告会上介绍自己最近的研究进展,报告后的第二天,一家报纸就在一篇耸人听闻的文章中宣称,海森堡已经找到了一个可以解决所有尚未解决的问题的“世界方程”。这使我们想起了爱因斯坦在20多年前碰到的同样的麻烦。海森堡对这件事十分生气,但又无可奈何。他在给泡利的信中写道:

“最近几天,这里的报纸引起了许多麻烦。关于我们的工作我已经报告过几次,什么问题也没发生,前不久洪德要求我在较正式的大学报告会上谈一谈。在报告时来了许许多多,据后来情形看,里面肯定有记者,但我并不知道。后来这些记者发表了骇人听闻的什么‘物理学的终结’之类的胡说八道。接着有几百次电话来问这件事。我只好让我的女秘书宣布了我口授的话,我特别声称,我们的工作‘给一个统一场论提出了一些新建议,它们正确与否要通过此后的研究才能决定’。……我希望,你没有像我一样生这么多的气!”

但泡利还是非常生气。他在看了美国报纸迅速转登的德国报上有关世界方程的消息以后,立即写了一封措辞尖锐刺人的信给海森堡,他说:“我完全不同意你昨天的讲话。”报上还报道说,海森堡认为他们的基本理论已经完成了,只是有些细节还得等此后填充进去。泡利对这一报道,更是怒不可遏,他肯定以为这是海森堡的想法,于是在信上画了一个方框框,框里空空如也,什么也没有。泡利讽刺地写道:“我的画画得与著名画家琴德洛特的一样好,只不过有些细节还没有画上去。”

1958年7月,在日内瓦国际高能物理学会议上,海森堡正式提出了自己的理论。他的理论要点概括起来有以下几点:(1)基本粒子是由

一种更基本的无结构的“元物质”构成,这种元物质有自旋,与它对应的场是一种量子化了的统一的自旋场。各种基本粒子都是这种场在不同具体情况下的激发态;(2)从物理发展中,我们可以看到一个非常令人瞩目的现象,那就是伴随一个新的物理理论的出现总会有一个新的普适常数出现,例如,牛顿万有引力理论中有引力常数 G ,相对论的建立出现了真空中的光速 c ,而普朗克数 h 的确认导致了量子力学的建立,等等。海森堡相信自己的量子统一场论是量子力学后又一崭新的理论,那就也必然有一个普适常数。他果然找到了一个,那就是所谓“最小长度常数 l_0 ”。按海森堡推算, $l_0 = 10^{-13}$ cm,与 l_0 相应的基本时间 $\tau_0 = l_0 / c$ 。利用 l_0 这一“普适常数”,海森堡相信建立一个新的统一场论是可能的;(3)量子统一场论同几何统一场论一样,强调对称性是建立统一场论的主要方法,其场方程也是非线性的。泡利也参加了这次会议。据参加这次会议的杨振宁教授回忆,海森堡一讲完,泡利立刻对他发动了毫不留情的攻击,其攻击之凶猛,令与会者惊诧万分。杨振宁写道:“这是我从来没有见到过的、两个重要的物理学家当众这样不留情地互相攻击。当时给我的印象非常深的就是海森堡对这个问题的处理方法。他非常安静。泡利越是不客气,讲话越是尖锐,海森堡就越安静。给人一种看法,似乎是泡利不太讲理。”海森堡在《物理学及其他》一书中也回忆过这件事,他写道:“在那个会议上,我被约定作一个关于有争论的场方程研究情况的报告。泡利对我的态度几乎可以说是敌对的。……我认为有一些批评完全不合理,我好不容易才说服了他,使他能比较平静地和我讨论一些问题。”

接着,在维也纳基本粒子学会议上,泡利对海森堡的态度有了好转。据海森堡回忆说:泡利又兴高采烈地来了,他好像变了一个人。在湖畔、花丛中,我们边谈边看蔚蓝色的湖水和四周的山峰,美好的景色一定感染了他,我们又谈到我们的工作、希望。泡利对我说:“我认为你应该继续研究下去。还有多少事情去做啊,

但我不怀疑正确的解答总有一天可以得到。我们共同的希望也许会实现，你的信心将会得到报偿。去年圣诞节我还认为我可以做任何事情，但现在我觉得我没有这个能力了。希望你坚持下去……。”

不久，在1958年年底，泡利因病去世了。海森堡不仅失去了一个诤友，而且他的量子统一场论由于负几率和不能自然地推出同位旋、奇异数等重要量子数，困难越来越明显而严重；尤其是由他的统一场论算出的精细结构常数 $\alpha = 1/267$ ，与实验值 $1/137$ 相差太远。进一步的研究更表明，这一理论根本无法把所有的粒子和它们之间的四种相互作用都统一起来。于是一度中兴的统一场论又冷了下去。在海森堡去世前18年，他几乎与爱因斯坦晚年一样，孤独而艰难地探索那诱人而又无情的统一场论，他的合作者大概只剩下杜尔一人了。

量子统一场论短暂的中兴虽然以失败告终，但也给物理学家留下了有益的启示。量子统一场论与几何统一场论相比较，有共同之点，但也有不同之点。相同之点是都承认统一场是肯定存在的；都以对称性思想作为指导思想去建立场方程；场方程都是非线性的，等等。魏扎克在一篇回忆海森堡的演讲中曾指出，海森堡的目标是要建立包括一切场的统一场论，这个理论要能解释基本粒子的存在和特性。

但两者不同之点显然更加重要。海森堡的量子统一场论试图从量子场论的角度重建统一场论，但他走了一条与几何统一场论相反的极端道路，他否定了从几何统一角度建立统一场论的可能性，试图只从物质属性的角度去统一各种基本粒子和四种相互作用，而不去考虑时空影响。对此，魏扎克作了生动的说明。他写道：“他优先选择了一条思索途径，按照这一途

径，甚至他作为出发点的各种对称性，都可以从量子场论的选择对象里推导出来。所有这些理论导致数学上的复杂情况，使思想对立的两个学派的一方至今还不能提出结论性的选择。航海者发现了海岛，它们是正在逼近的大陆的前沿或者只不过是珊瑚礁呢？

“随着年岁的增长，海森堡的科学进展使人想起了上了年纪的爱因斯坦。他们两个都把最后的精力用于研究统一场论。爱因斯坦要把量子论从基础理论中排除出去；他不希望把不确定性原理看成基本的真理。比爱因斯坦晚一辈的海森堡，则把量子论作为他的出发点。”

爱因斯坦认为世界上存在着的任何现象都可以用纯粹的几何学方法去描述。从哲学观点看，物质完全几何化是不大可能的，因为空间只是物质的属性之一，不能把物质所有其他属性（运动、因果性、相互作用等等）都归结于空间。但爱因斯坦对理论物理的基本结构的洞察力是不能忽视的，这种洞察至今仍然是物理学重大研究课题。现代物理的发展证明，物理几何化的倾向是有效的，物理学理论的进一步发展，不能不考虑几何化思想的合理内容。海森堡的失误，正在于他走了极端，忽视了几何统一场论的合理内容。

几何统一场论和量子统一场论都先后由于无法统一基本粒子及其相互作用而被人们冷落，但他们的努力反映了物质、时空和运动日趋统一，这无疑是物理学进步的标志。而且，他们的努力给后继者以启迪；他们的信念，给后继者以鼓励。经过几代人的努力，物理学家们终于在前人失败的地方找到了进一步实现统一的方向。这个统一场既非几何统一场，也非量子统一场，它是由韦尔、福克、伦敦、杨振宁、希格斯等人在30多年里逐渐发展起来的规范场。

亿公里的航程后，于美国东部时间1997年7月4日下午1时7分在火星表面安全着陆。数小时后开始传回火星表面彩色图像，这些照片展示了雄伟的火星阿瑞斯峡谷以及广阔的红色大地边缘横亘着绵延不尽的群山和高原。

(卞吉 秦宝 编)

✦ 科苑快讯 ✦

探路者号飞船 成功着陆火星

据《科技日报》报道：美国航空航天局于1996年12月4日发射的探路者号(Pathfinder)火星探测飞船经过7个月的时间、8000