

杨振宁科学成就浅释

厉光烈

(中国科学院高能物理研究所 100049)

一、杨振宁——华人的骄傲

杨振宁,著名理论物理学家,1922年9月22日出生于安徽省合肥市。1942年,毕业于西南联合大学物理系,学士论文指导老师是吴大猷(1907~2000)教授。吴先生让他看的第一篇论文讨论的是分子光谱学和群论的关系,使他初次接触到群论和对称性。同年秋天,他考进该校属下的清华大学研究院,在王竹溪(1911~1983)教授指导下研究统计物理学。杨先生曾经说过:他一生中三分之二的工作与对称性有关,他的群论知识启蒙于他的父亲、数学家杨武之(1896~1973);另外三分之一的工作则与统计物理学有关。1945年,杨振宁赴美,进入芝加哥大学做研究生,深受费米的熏陶,在导师、氢弹之父特勒的指导下于1948年完成了博士论文,获得博士

学位。杨先生曾经不止一次说过:“那时,我是芝加哥大学物理系非常有名的研究生”,“同学们都很佩服我的理论知识,常常要我帮他们做理论习题,可是,大家一致笑我在实验室里笨手笨脚:‘Where there is Bang, there is Yang’(哪里有爆炸,哪里就有杨)!”正是费米让他先跟特勒从事理论物理研究,造就他成为了一代伟大的理论物理学家。

杨振宁对理论物理的贡献范围很广,包括粒子物理、统计力学和凝聚态物理等领域。其中,最杰出的贡献是:1954年,他与米尔斯共同提出杨-米尔斯规范场理论,开辟了非阿贝尔规范场的新的研究领域,为现代规范场论(包括弱电统一理论、量子色动力学、强弱电大统一理论和引力场的规范理论等)奠定了基础;1956年,他与李政道合作,揭示了 θ - τ 之谜,发现了弱作用下宇称不守恒,并于第二年荣获了诺贝尔物理学奖,这是诺贝尔奖历史上从发现到获奖时间最短的一次;1969年,他用Bethe-Ansatz方法求解带有 δ 函数相互作用的一维量子多体问题和各向异性海森伯自旋链创建了后来学术界称之为的杨-巴克斯特(Yang-Baxter)方程,之后,数学和物理学上许多激动人心的进展表明,杨-巴克斯特方程是与许多数学分支有关的一个基本数学结构;1974年,他借助狄拉克1931年引入的依赖路径的复相位因子(即不可积相位因子)写出了杨-米尔斯场的积分形式,还和吴大峻于1975年揭示了规范场就是纤维丛上的联络,对现代几何学的发展做出了重要贡献;此外,他还解决了伊辛模型(二维格点)自发磁化严格解、超导磁通量子化、冷原子(玻色-爱因斯坦凝聚)、非对角长程有序、单位圆定理和相变等统计物理难题。



图1

因对物理学发展做出的杰出贡献,杨振宁曾获得许多奖项或奖章,除1957年诺贝尔物理学奖和美国总统里根授予的1986年国家科学奖章外,还有:拉姆福德奖(1980),富兰克林奖章(1993),鲍尔奖(1994),爱因斯坦奖章(1995),博格留波夫奖(1996),昂萨格奖(1999)和费萨尔国王国际奖(2001)等。

1993年,声誉卓著的美国哲学学会在将该学会颁发的最高荣誉——富兰克林奖章授予杨振宁时,执行官说:“杨振宁教授是自爱因斯坦和狄拉克之后20世纪物理学出类拔萃的设计师”,并指出:杨振宁和米尔斯合作所取得的成就是“物理学中最重要的事件”,是“对物理学影响深远和奠基性的贡献”;1994年,美国费城富兰克林研究所将鲍尔奖金颁发给杨振宁的文告中说:“杨振宁是第一位获此奖金的理论物理学家。他的研究作为宇宙中基本作用力和自然规律提供了解释。”“作为20世纪阐明亚原子粒子相互作用的大师之一,他在过去40年里重新塑造了物理并发展了现代几何。杨-米尔斯规范场理论已经与牛顿、麦克斯韦和爱因斯坦的工作并列,而且必然对未来几代人产生可与这些学者相比拟的影响。”

改革开放后,我与中国原子能科学研究院李祝霞、北京大学戴远东和杨威生通过教育部考试成为公派前往杨振宁所在的纽约州立大学石溪分校物理系的第一批访问学者。记得,一天傍晚,杨先生带我去附近一家中餐馆吃饭。听闻杨先生到来,餐馆老板亲自出面招待。他先给杨先生倒了一杯酒,对他说:“这是我敬你的,不收费,因为你是我们华人的骄傲。”令我既诧异又感动。杨先生也曾说过:“我一生最重要的贡献是帮助改变了中国人自己觉得不如人的心理作用。”

二、对称性支配相互作用

杨振宁对人类,具体地说,对物理学的最大贡献是揭示了自然力的本质——“对称性支配相互作用”。

人类在探索自然界奥秘的过程中,逐步认识到

主宰宇宙间物质运动的是四种自然力,或称四种基本相互作用,即作用在一切物体(包括星体)之间的引力,作用在带电(或磁矩)物体之间的电磁力,以及作用在微观粒子之间的强力和弱力。科学家一直期盼能统一这四种自然力:17世纪,“苹果落地”使牛顿联想到万有引力,将“天上力”和“地上力”统一了起来;19世纪,法拉第和麦克斯韦等通过引入场的概念将“电力”和“磁力”统一了起来;20世纪,爱因斯坦在提出狭义和广义相对论完善地描述了电磁场和引力场之后,一直试图统一它们,但至死未能如愿。使他没想到的是,杨振宁,受外尔规范变换的启发,认识到“对称性支配相互作用”,与米尔斯一起创建了非阿贝尔规范场理论,为自然力“走向”统一指明了方向。

非阿贝尔规范场理论的创建,起初并不顺利。杨振宁先类比用 A_μ 描述的、保持电荷守恒的电磁场方程,试图导出用 B_μ 描述的、保持同位旋守恒的规范场方程。头几步运算很顺利,待到要作推广时,总是导出一个冗长的、丑陋的公式,使得他不得不把这个想法暂时搁置下来。后来,随着越来越多的介子被发现,以及对各种相互作用进行更深入的研究,他感到迫切需要一种在写出各类相互作用时大家都应遵循的原则。因此,在布鲁克海文访问期间,他再一次回到把规范不变性推广出去的念头上来。这次,他是和同办公室的米尔斯一起进行讨论。他们决定:先在电磁场强 $F_{\mu\nu}$ 上尝试加一个二项式,如果不行再加三项式等。没有想到,加上一个简单的二项式之后:

$$F_{\mu\nu} = \frac{\partial B_\nu}{\partial x_\mu} - \frac{\partial B_\mu}{\partial x_\nu} + i\varepsilon[B_\mu, B_\nu]$$

便没有再出现以前遇到的越来越复杂的项,反而“越算越简单”,很快找到了使 $F_{\mu\nu}$ 保持不变的规范变换,他们意识到“挖到了宝贝!!!”于是,顺利地写出了《同位旋守恒和一个推广的规范不变性》和《同位旋守恒和同位规范不变性》两篇文章,分别发表在《物理学评论》1954年95和96两卷上。正如杨振宁和米尔斯在他们的论文中所指出的,他们的理论

“很容易推广为其他类型的非阿贝尔规范理论”，故通常将非阿贝尔规范场统称为杨-米尔斯场。它是继麦克斯韦的电磁场和爱因斯坦的引力场之后提出的一种新的规范场。派斯(A.Pais, 1918~2000)在《基本粒子物理学史》一书中评价杨-米尔斯规范场理论的重要价值时说：“杨振宁和米尔斯的两篇杰出文章奠定了现代规范理论的基础”。

应当指出,杨-米尔斯场与电磁场不一样:电磁场本身不带电荷,只能和带电粒子相互作用,并不存在自作用;而杨-米尔斯场本身带有同位旋,除了和费米子相互作用以外,还存在自作用。另外,电磁场只有一个传递相互作用的规范量子,即光子;而杨-米尔斯场有三个规范量子,其中一个带正电,一个带负电,还有一个不带电。费米子场通过交换这些规范量子引起新的相互作用,这是在爱因斯坦利用广义协变原理(也是一种定域对称性原理)得到引力作用之后,理论物理学家又一次纯粹利用对称性原理给出具体的相互作用规律,用杨振宁的话说,就是“对称性支配相互作用(Symmetry Dictates Interaction)*”(这句话出自杨振宁 1979 年 7 月为庆祝爱因斯坦百年诞辰在特里亚斯特(Trieste)举行的第二届马赛尔·格罗斯曼会议上所作的报告:“爱因

斯坦对理论物理的影响(Einsteins impact on theoretical physics)”,文章后来发表在《今日物理(Physics Today)》1980年6月号上(见图2)。

但是,杨-米尔斯场和电磁场一样,不能有静止质量,或者说,杨-米尔斯场的三个规范量子 and 光子一样没有静止质量,这使杨-米尔斯场的实际应用受到了很大的影响。在 20 世纪 50 年代,杨振宁和米尔斯的规范场理论几乎没有引起太多的注意。爱因斯坦和外尔大概在去世之前也都不知道他们的工作,直到 20 世纪 60~70 年代,自发对称破缺和希格斯机制的提出导致温伯格、格拉肖和萨拉姆建立弱电统一理论以后,属于它的时代才真正到来:荣获 1979、1999 和 2004 年三次诺贝尔物理学奖的工作都以杨-米尔斯场为其理论基础,使杨-米尔斯规范场理论最终成为强力、弱力和电磁力大统一的理论基础。

三、弱作用下宇称不守恒

在 1954~1956 年间,出现了一个令人困惑的“ θ - τ ”之谜:有一种粒子衰变为两个 π 介子,另一种粒子衰变为三个 π 介子,它们分别被称为 θ 介子和

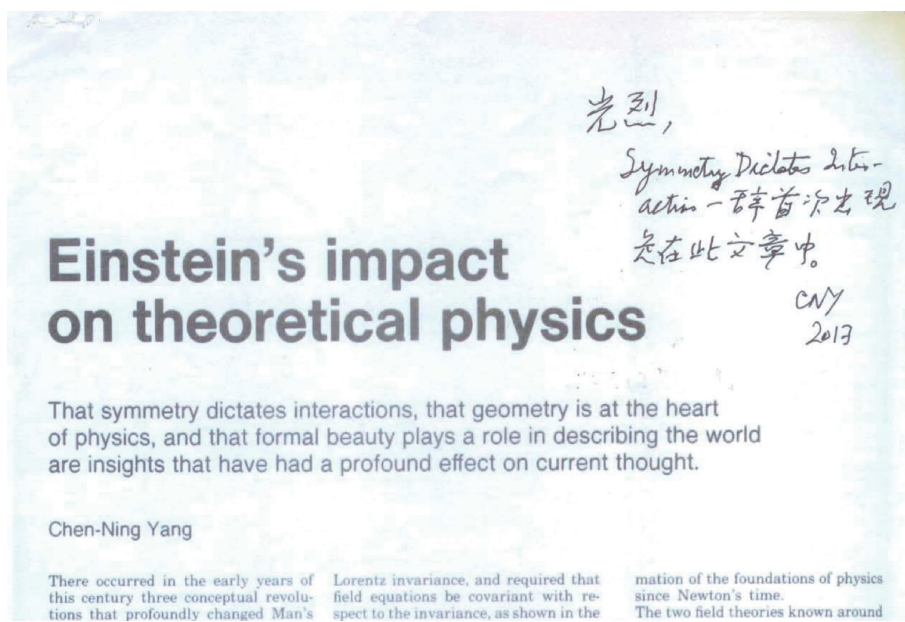


图2

τ 介子。由于 π 介子带有负宇称,所以这两种粒子分别带有正宇称和负宇称。后来,随着实验精确度的提高,人们进一步发现, θ 和 τ 除了宇称不相同外,其他物理性质(例如质量和寿命)都完全相同。这就出现了一个疑难:如果说它们是不同的粒子,它们的物理性质又如此相似;如果说它们是同一种粒子,那么一会儿衰变为两个 π 介子,一会儿衰变为三个 π 介子,又违背宇称守恒定律。

为了揭开“ θ - τ ”之谜,物理学家们产生了很大的争论。许多物理学家想在不违背宇称守恒定律的前提下解答这个难题。杨振宁和李政道就曾设想每一种奇异粒子都是宇称的双子,形成一种他们称之为“宇称共轭”的对称性,并认为 θ 和 τ 就是某种奇异粒子的宇称双子,但是,不久实验就发现另一种奇异粒子 Λ^0 并不存在这种宇称双子。就在第六届罗彻斯特会议上杨振宁和李政道提出宇称双子的建议后,费曼发言说,他和同室的布洛克(M. Block)讨论过好几夜,布洛克提出了一个想法: θ 和 τ 会不会是同一种粒子但具有不同的宇称态。杨振

宁回答说,他和李政道也曾考虑过,但还未做出定论。与会的维格纳也表示或许一种粒子就会有两种宇称。这两位著名物理学家的热情鼓励使杨振宁和李政道意识到:问题或许并不在 θ 和 τ ,而在宇称守恒定律本身。假如宇称守恒定律有时也可以违背的话,“ θ - τ ”之谜便可迎刃而解了。1956年夏天,杨振宁和李政道在检查了当时已有的关于宇称守恒的实验基础以后,得到了下述结论:虽然在强作用和电磁作用中宇称守恒已为实验所证实,但是,在弱作用中宇称守恒定律仅仅是一个推广的“假设”而已,并没有被实验所证实。如果左右对称在弱作用中并不成立,那么宇称的概念就不能应用在 θ 和 τ 的两种衰变机制中。这样, θ 和 τ 就可以是同一种粒子(即 K 介子)的两种弱作用衰变方式,“ θ - τ ”之谜也就不复存在了。显然,问题的关键在于如何从实验上去证实,在弱作用中左右对称是可以不成立的。

为了从实验上证实弱作用中宇称不守恒,李、杨建议人们测量由实验可以测量的物理量所组成

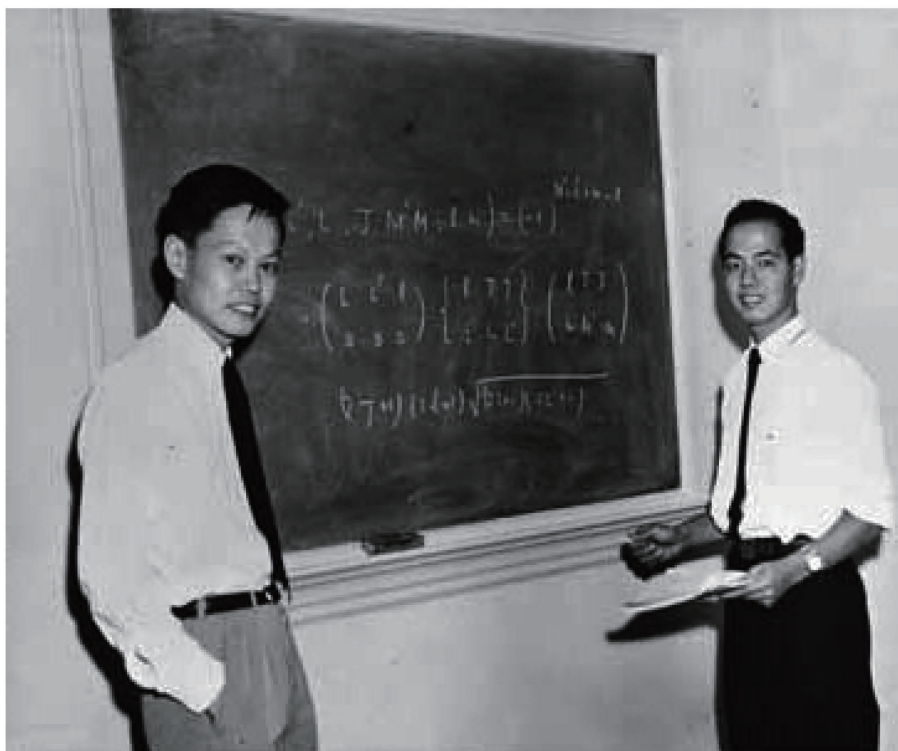


图3 杨振宁和李政道

的在空间反射($r \rightarrow -r$)变换下改变符号的赝标量。例如,可以测量极化原子核在 β 衰变时放出的电子的角分布。如果 θ_β 表示原子核自旋的取向和电子动量之间的夹角,那么 θ_β 处和 $(180^\circ - \theta_\beta)$ 处分布的不对称性,就将是 β 衰变中宇称不守恒的无可置疑的证据。根据杨振宁和李政道的建议,实验物理学家吴健雄等作了 β 衰变实验。这个实验是在极化 ^{60}Co 的 β 衰变中看向两边发射的电子数目是不是对称。他们采用戈特-罗斯方法来极化 ^{60}Co ,即先用绝热退磁方法把含有放射性的 ^{60}Co 的顺磁盐冷却到绝对温度 0.01° 左右,以尽量减少破坏极化的热运动,然后用弱磁场把 ^{60}Co 的顺磁盐离子中电子的自旋排列起来。这些未满壳层的电子可以产生一个很强的内磁场(约105高斯),使原子核 ^{60}Co 的自旋随着电子自旋取向。由于温度对物体的放射性是没有什么影响的,因此那些冷却了的整齐排列的 ^{60}Co 仍旧继续衰变和发射电子。根据宇称守恒定律,这些电子应该沿着原子核的取向以同样数目朝着上、下两边发射。他们用电子闪烁计数器记录了向上、下两边发射的电子数目,结果发现上、下两边的电子数目是不相等的。这样,吴健雄等便通过实验发现了 β 衰变中的宇称不守恒,首次成功地证实了杨振宁和李政道的预言。随后不久,伽温(R.L.Garwin)等测量了 π 介子弱衰变中放出的电子的角分布,发现在这些弱衰变中宇称也不守恒,于是再次证实了杨振宁和李政道的预言。因此,杨振宁和李政道荣获了1957年度诺贝尔物理学奖。

长期以来,源自对称性的各种守恒定律一直被人们视为毋庸置疑的普遍规律,特别是在玻尔为解释 β 衰变连续谱提出能量不守恒被泡利引入中微子否定后,守恒定律更被看作是物理学中无需证明的公理。“弱作用下宇称不守恒”的发现首次打破了这一观念,将多年来一直奉为物理学基本规律的宇称守恒定律下降为只适用于强作用和电磁作用的一般规律。这一发现不仅表明,在弱作用中不存在左右对称,它还促使人们重新检查在弱作用中其他守恒定律是否仍然有效。首先受到怀疑的是电荷共

扼(C)不变性(即物理规律在粒子 \rightarrow 反粒子变换下不变)和时间反演(T)不变性(即物理规律在时间倒向变换下不变)。实际上,吴健雄等人的实验不仅证实了 β 衰变中宇称(P)不守恒,而且证实了C也不守恒。但是,当时人们以为CP混合宇称是守恒的。后来,克里斯坦森等在1964年又发现在长寿命的中性K介子的弱衰变中混合宇称也不守恒。根据粒子物理中的CPT守恒定律(即物理规律在C、P、T同时变换下保持不变),由CP不守恒可以导出T也不守恒。到了1970年,T不守恒也得到了实验证实。这样,在弱作用中只剩下了CPT守恒。

上述两项贡献:前者揭示了主宰人类生存其间的物质世界的四种自然力的本质;后者让人们最终认识到这个物质世界只有正物质没有反物质或者说在宇宙演化过程中能够剩下这个正物质世界是因为对称性破缺。鉴于“对称与破缺”涉及到人类生存其间的这个正物质世界的组成和由来,因此,这两项贡献在人类认识史上是无与伦比的。

四、杨对现代几何的贡献

1991年,杨振宁在接受《20世纪数学经纬》主编张奠宙采访时谈道:“20世纪60年代末期,我开始用不可积相因子的方法重新建立规范场论。有一个学期,我正在讲授广义相对论,突然注意到规范场论中的公式

$$F_{\mu\nu} = \frac{\partial B_\nu}{\partial x_\mu} - \frac{\partial B_\mu}{\partial x_\nu} + i\varepsilon(B_\mu B_\nu - B_\nu B_\mu)$$

与黎曼几何中的曲率公式

$$R^l_{ijk} = \frac{\partial \Gamma^l_{ij}}{\partial x^k} - \frac{\partial \Gamma^l_{ik}}{\partial x^j} + \Gamma^m_{ik} \Gamma^l_{mj} - \Gamma^m_{ij} \Gamma^l_{mk}$$

不仅十分相似,而且,只要把二者的符号正确地等同起来,它们便是完全一样的。当我理解到这一点时,内心的震撼是难以形容的。”

为了弄清规范场理论的几何意义,杨先生向纽约州立大学石溪分校数学系主任赛蒙斯(J.Simons)请教。这位杰出的几何学家告诉他:规范场理论一定与纤维丛上的联络有关。1975年初,杨邀请赛蒙

斯教授做了一系列有关微分形式和纤维丛理论的午餐演讲。这些演讲让他和曹宏生弄懂了美妙的“陈(省身)-韦伊(Chern-Weil)定理”,促使他和吴大峻“理解了物理学中 Aharonov-Bohm 实验和狄拉克磁单极的量子化条件的数学含义”。在他和吴大峻合写的著名论文《不可积相因子的概念与规范场的整体表述》中,他们展示了将规范场术语与纤维丛术语联系起来的“吴-杨字典”,指出了规范场就是纤维丛上的联络。随后,阿蒂亚(M.F.Atiyah)、希钦(N.J.Hitchin)和辛格(I.M.Singer)的工作,特别是阿蒂亚爵士的专题研究报告:“杨-米尔斯场论的几何学”,引发了许多数学家对规范场的兴趣,最终导致唐纳森(S.Donaldson)在 1986 年于伯克利举行的国际数学家大会上获得菲尔兹奖。

差不多同一时期,杨-巴克斯特方程成为非线性可积性数学物理领域中一个重要的方程:1967 年,杨用 Bethe-Ansatz 方法求解带有 δ 函数相互作用的一维量子多体问题和各向异性海森伯自旋链时首先将其作为自洽条件提了出来的;1972 年,澳大利亚物理学家巴克斯特(R.J.Baxter)在研究统计力学中的二维精确可解模型时,为了对角化他所定义的转移矩阵,从不同的角度独立地得到了类似的关系;1980 年,以法捷耶夫(L.D.Faddeev)为首的前苏联列宁格勒学派在研究量子逆散射问题时进一步发展了这些方法,将杨和巴克斯特引入的这种关系系统称为“杨-巴克斯特关系”或“杨-巴克斯特方程”。之后,数学和物理学上许多激动人心的进展表明,杨-巴克斯特方程是与许多数学分支有关的一个基本数学结构。这些分支包括:纽结和辫群理论、算子理论、Hopf 代数、量子群、三维拓扑、微分方程的单值化等,就这些课题而发表的研究成果造成了文献“大爆炸”,以至于在 1990 年国际数学家大会四位菲尔兹奖得主中有三位:德林费尔德(V.Drinfeld)、琼斯(V.F.R.Jones)和威腾(E.Witten)的工作都跟杨-米尔斯规范场或杨-巴克斯特方程有关。

在采访结束之前,张莫宙要杨先生谈谈“您在物理上的工作为什么会对数学产生这么大的影

响?”杨回答说:“这是一个很难回答的问题。幸运是一个因素。除此之外,以下两点可能有关:首先,如果你选择去做原始的问题,那么,你就有较大的机会接触到数学的基本结构;其次,你必须对数学的价值观有某种程度的欣赏。”接着,他对于第二点做了进一步的阐述:“我的物理学界同事大多对数学采取功利主义的态度。也许因为受我父亲的影响,我较为欣赏数学。我欣赏数学家的价值观,我赞美数学的优美和力量:它有战术上的技巧与灵活,又有战略上的雄才远虑。而且,堪称奇迹中奇迹的是,它的一些美妙概念竟是支配物理世界的基本结构。”他还谈到了陈-韦伊定理:“我在懂得这深奥美妙的定理后,真的有了触电的感觉。这个感受犹胜于 20 世纪 60 年代了解外尔(H.Weyl)计算群表示的特征标公式和彼得-外尔(Peter-Weyl)定理之后的喜悦。为什么呢?可能是因为陈-韦伊定理更‘几何’一点吧。”“我的感受并不止于此,还有更深刻、更触及心灵深处的地方:到头来忽然领悟到,客观的宇宙奥秘与纯粹用逻辑和优美的这些概念发展出来的数学概念竟然完全吻合,那真是令人感到悚然。我曾经在一篇文章中描述过这种感受:在 1975 年,明白了规范场和纤维丛理论之间的关系之后,我非常激动。我开车到陈省身教授在伯克利附近的 El Cerrito 寓所……我对他说:“物理学上的规范场正好是纤维丛上的联络,而后者是在不涉及物理世界的情况下发展出来的,这实在令我惊讶。我还加了一句:‘这既令我惊讶,也令我迷惑不解’,因为你们数学家凭空梦想出这些概念。”陈省身当即提出异议:“非也,非也,这些概念并非凭空梦想出来的,它们既是自然的,也是实在的。”

五、心系祖国的赤子之情

杨振宁对祖国有一颗赤子之心,是美籍华裔学者中访问新中国的第一人。其实,早在 1957 年,杨振宁在瑞典斯德哥尔摩领取诺贝尔物理学奖时,就曾与我国驻瑞典大使馆有过联系。这在当时,是难能可贵的。他于 1971 年首次访华回美后,对促进中

美建交、中美科技和教育交流以及两国人民的相互了解,都做出了重要的贡献。

1979~1981年,我第一次访问石溪期间,当地华人不止一次对我说起,他们当年跟随杨先生为中国重返联合国奔走呼吁的故事;1985~1986年,我第二次访问石溪期间,还曾听说另一个故事。有一次,杨先生应邀去麻省理工学院访问,一位美国教授对他说:中国大陆来的访问学者,在一起议论他们的

国家,常常很激烈,甚至会骂街,但是,只要我们的人参与其中,指出他们国家的不是,他们马上一致对外,群起而攻之,不依不饶。我们很不理解,他们为什么会这样?!杨先生对他说:你们美国才200年历史,我们中国有5000年历史,我们对国家、对民族的这种“恨铁不成钢”的感情,你们确实难以理解。

在石溪访问期间,我曾多次聆听杨先生的教诲,有些话语,至今难忘……



图4

改革开放后,杨先生应陈省身先生邀请于1986年在陈先生创立的南开数学所中建立了理论物理研究室,在他指导下,该室开始了我国数学物理的新方向,从零开始,在不到十年的时间里,就在国际上占有了一席之地,成为了国际上该领域的研究重镇;20世纪80~90年代,杨先生特别关注清华物理的发展,并于1997年担任清华大学高等研究中心名誉主任,他亲自培养博士生,给大学生讲基础物理,邀请国际一流学者去高等研究中心讲演……

杨振宁先生对科学的贡献是巨大的,也是多方面的。不仅如此,在增进中西方科学交流,促进我

国物理科研和人才培育等方面,他同样做出了卓越的贡献。

2004年,杨先生与翁帆女士结婚后,定居于儿时生活过的魂牵梦绕的清华园,化解了他毕生的“清华情结”。杨先生的后半生终于实现了与挚友邓稼先共同期盼的“但愿人长久,千里共同途”的夙愿。

这些年,我常想,什么是爱国?

像杨先生这样,为国家争光,为民族争气,对祖国的爱始终如一:一片赤诚、无怨无悔,这才是真正的爱国!