

我的学习与研究经历

杨振宁^{1,2}

(1 清华大学 北京 100084)

(2 香港中文大学 香港)

1933年到1937年我在北平崇德中学念了四年书,从中一到中四.崇德中学当时有差不多三百个学生,有一间很小的图书馆,我常去里面翻阅各种杂志和书籍.我第一次接触到二十世纪的物理学就是在那间图书馆内看到了 Jeans 的《神秘的宇宙》中译本(见图1). Jeans 把1905年的狭义相对论、1915年的广义相对论和1925年的量子力学用通俗的语言描述,使得我发生了浓厚的兴趣.

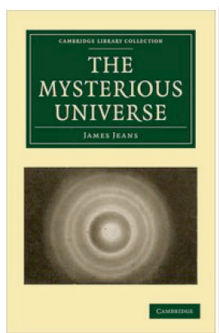


图1 神秘的宇宙

1937年抗日战争爆发,我随父母经过了漫长与困苦的旅程,于1938年春到了昆明.那时流离失所的中学生非常多,所以重庆的教育部准许中学未毕业的学生以同等学力的资格参加大学入学考试(见图2),我就是这样于那年秋天成为了西南联合大学(以下简称联大)第一届新生.



图2 大学入学考试准考证

我没有念过高中物理学,为了参加那次入学考试,借了一本高中物理教科书,闭门自修了几个星期,发现原来物理是很适合我研读的学科,所以在联大我就选择了物理系.记得非常清楚的是,那次我在教科书中读到,圆周运动加速的方向是向心的,而不是沿着切线方向的.最初我觉得这与我的直觉感受不同,仔细考虑了一两天以后才了解,原来速度是一个向量,它不仅有大而且是有方向的.

这个故事给了我很大的启发:每个人在每个时刻都有一些直觉,这些直觉多半是正确的,可是也有一些需要修正,需要加入一些新的观念,变成新的较正确的直觉.我从而了解到:一方面直觉非常重要,可是另一方面又要能及时吸取新的观念修正自己的直觉.

1942年春天,为了准备写一篇当时联大要求的学士毕业论文,我去找吴大猷教授(见图3),请他做我的导师.四十多年以后,我这样描述吴先生怎样给我出了一个题目^[1]:

(他)给了我一本 *Reviews of Modern Physics* (《现代物理评论》),叫我去研究其中一篇文章,看看有什么心得.这篇文章讨论的是分子光谱学和群论的关系.我把这篇文章带回家给父亲看.他虽不是念物理的,却很了解群论.他给了我狄克逊(Dickson)所写的一本小书,叫做 *Modern Algebraic Theories* (《近代代数理论》).狄克逊是我父亲在芝加哥大学的老师.这本书写得非常合我的口味.因为它很精简,没有废话,在二十页之间就把群论中“表示理论”非常美妙地完全讲清楚了.我学到了群论的美妙和它在物理中应用的深入,对我后来的工作有决定性的影响.这个领域叫做对称原理.我对对称原理发生兴趣实起源于那年吴先生的引导.

对称原理是我一生主要的研究领域,占了我研究工作的三分之二.



图3 吴大猷先生(1907—2000)和我(1982年摄于纽约石溪)

1942年秋天我考进了清华大学研究院的物理系做博士生。(那时考入联大的本科生都是联大的学生,可是研究生各自算为北京大学、清华大学、南开大学三个学校的学生,虽然所有课程学习和考试仍然是在一起进行的。)我的导师是清华大学的王竹溪教授(见图4),他的专长是统计力学,是他把我引导进了统计力学的研究领域。今天估计起来我一生的研究工作有差不多三分之一是在统计力学里面。



图4 王竹溪先生(1911—1983)(1980年聂华桐摄)

关于我在联大做研究生的经历,很多年后我作过这样的描述^[2]:

1941年到1942年,我是昆明西南联合大学物理系四年级的学生。这个系比较小,共有约10位教员、10位助教、几位研究生和一些本科生。本科生每班不到20人。1941年秋天开学的时候,一个新的面孔出现了,那就是黄昆。当时,他已经从北京燕京大学获得了物理学学士学位,到联大来做助教。开学不久,我们就熟识起来,开始了我们半个世纪的友谊。

我们所读的课程里,两个是吴大猷教授教的经典力学和量子力学。量子力学是一个革命性的新发展。在1925年到1927年间起源于德国、瑞士、英国和丹麦。吴教授是中国的物理学家中,在20世纪30年代到40年代训练了最多量子力学学生的教授。我记得当时许多关于量子力学的讨论都是在吴教授的演讲之后进行的。通过这些讨论,我开始认识了黄昆

的为人和他学物理的态度。

一年后,在1942年的夏天,黄昆和我都注册为联大的研究生。黄昆跟着吴大猷教授做有关天体物理学里原子和分子问题的论文,我跟王竹溪教授做有关统计力学的论文。当时研究生的补助金是不够的,所以我们都在找教学职位来增加我们的收入。我父亲的朋友徐继祖先生,是昆华中学的校长,他安排黄昆、我和张守廉(另一位物理学研究生)(见图5),到昆华中学教书。三个人分了一个教师的位置,而学校安排了一座新建筑角落里的一间房间给我们三人住。



图5 黄昆、张守廉和我(1992年6月1日摄于北京大学为周培源先生举行的生日会上)

那所中学距离联大差不多三公里。我们三人白天经常在大学校园里上课、吃饭、上图书馆,晚上才回到我们的房间睡觉。因为大学校园内没有供应饮水的设施,所以我们养成了一个习惯:每天晚饭后,回到中学以前,花一个或两个小时在茶馆里喝茶。那些茶馆集中于大学附近的三条街上。通过那些喝茶的时间,我们真正认识了彼此。我们讨论和争辩天下一切的一切:从古代的历史到当代的政治,从大型宏观的文化模式到最近看的电影里的细节。从那些辩论当中,我认识黄昆是一位公平的辩论者,他没有坑陷他的对手的习惯。我还记得他有一个趋向,那就是往往把他的见解推向极端。很多年后,回想起那时的情景,我发现他的这种趋向在他的物理研究中似乎完全不存在。

茶馆的客人包括种种人物,有不少学生。可是大多数的茶客是镇民、马车夫和由远处来的商人们。大家都高谈阔论,而我们通常是声音最大的。有时候,正当我们激烈地辩论时,会突然意识到我们的声音太大,大家都在看着我们(这种意识并不一定使我们停止辩论)。可是一般来说,学生们和其他茶客之间并没有不和的气氛。

在茶馆中,我们曾经目睹一些永远不能忘记的情景和事件:好几次坐在凤翥街的茶馆里,我们看见一队一队的士兵押着一些犯人向北方走去,走向昆

明西北郊的小丘陵地带,那里满布着散乱的野坟,每一个犯人都背着一块白色的板子,上面写着他们的名字和罪行。大多数的罪犯都静静地跟着士兵走,有少数却喊着一些口号,像:“二十年后,又是一条好汉!”每一次当这种队伍走过时,茶馆的喧闹声就会突然止息。然后,远处预期的枪声响了,我们都静静地坐着,等待着士兵们走回来,向南方回到城里去。

衬着这种背景,我们无休止地辩论着物理里面的种种题目。记得有一次,我们争论的题目是关于量子力学中“测量”的准确意义。这是哥本哈根(Copenhagen)学派的一个重大而微妙的贡献。那天,从开始喝茶辩论到晚上回到昆华中学;关了电灯,上了床以后,辩论仍然没有停止。

我现在已经不记得那天晚上争论的确切细节了,也不记得谁持什么观点,但我清楚地记得我们三人最后都从床上爬起来,点亮了蜡烛,翻看海森堡(Heisenberg)的《量子理论的物理原理》来调解我们的辩论。

我们的生活是十分简单的,喝茶时加一盘花生米已经是一种奢侈的享受。可是我们并不觉得苦楚:我们没有更多物质上的追求和欲望,我们也不觉得颓丧;我们有着获得知识的满足和快慰。这种十分简单的生活却影响了我们对物理的认识,形成了我们对物理工作的爱憎,从而给我们以后的研究历程奠定了基础,这是我们当时所没有认识到的。

与黄昆和张守廉的辩论,以及我自己做教授以后的多年经验,都告诉我:和同学讨论是极好的真正学习的机会。

张守廉后来改念电机与控制论,在美国得到博士学位,现在还健在,是纽约州立大学石溪分校退休教授。黄昆后来在英国得到博士学位,在固体物理方面有重要贡献。于1950年代初回国,引进半导体物理学到国内,开启了中国的半导体研究。他于2001年获中国最高科技奖,于2005年去世。

1945年抗战结束后,我乘很小的DC3飞机飞到加尔各答。等了几个月的船位,于那年10月乘船经过红海、苏伊士运河和地中海,于11月24日到达纽约。1946年初我注册成为芝加哥大学物理系的博士生,去芝加哥的主要原因是我想跟恩里科·费米(Enrico Fermi, 1901—1954, 见图6)写一篇实验方面的博士论文。

2001年是费米诞生100周年,在芝加哥和罗马都举办纪念他的学术会议。我在会议上宣读的文章里有这样一段^[3]:

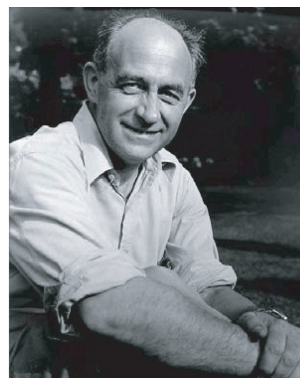


图6 恩里科·费米(摄于1940年代)

恩里科·费米是二十世纪所有伟大的物理学家中最受尊敬和崇拜者之一。他之所以受尊敬和崇拜,是因为他在理论物理和实验物理两方面的贡献,是因为在他领导下的工作为人类发现了强大的新能源,而更重要的是因为他的个性:他永远可靠和可信任;他永远脚踏实地,他的能力极强,却不滥用影响,也不哗众取宠,或巧语贬人。我一直认为他是一个标准的儒家君子。

当时芝加哥大学的物理系是全世界数一数二的。除费米以外,另外一位重要的理论物理教授是特勒(Edward Teller, 1908—2003, 见图7),在物理与化学领域做过重要的工作,是天才型的物理学家。后来在1950年代,他发现了制造氢弹的方法,一跃而成世界名人。



图7 爱德华·特勒与我(摄于1982年)

我本来想跟费米做实验物理学的研究,可是那个时候他的实验室在阿贡(Argonne),当时是保密的,我不能进入,所以费米推荐我先跟特勒做理论工作。

1946年上半年,我是特勒的研究生。记得他给我的第一个研究题目是关于Be与BeO的K-电子湮没的几率问题。他建议我用Thomas—Fermi—Dirac与Wigner—Seitz的近似方法做计算。几个星

期以后,我给他看我的计算结果,他很高兴地安排我做报告,那是我在美国第一次做学术报告.记得那天在座十几个人中有好几位重量级人物,如费米、特勒、尤里(Harold Clayton Urey)和迈耶夫妇(Mayer)等.报告以后大家的反应都非常好,特勒要我写此计算写成一篇文章.于是我花了一星期来做此工作,可是写来写去始终觉得不能完全掌握我的计算的可靠性,因为其中用了好几种不同的近似方法,所以写不下去了.特勒倒也不在意,给了我另外一个关于核物理的题目.

特勒当时有六七个研究生,我们每周一次或两次聚在一起和他讨论,也常常和他共进午餐.特勒的新见解非常之多,对于当时的核物理学、凝聚态物理学、宇宙射线问题等等都非常有兴趣.可是我渐渐发现,他的研究方法与我所喜欢的研究方法不一样.所以我虽然继续参加他的讨论会,可是开始自己找理论题目.

1946年秋天,费米介绍我去做艾里逊(Allison)教授的研究生,他是核试验物理学家,当时正在建造一台400千伏的Cockroft-Walton加速器.他的实验室里有五六个研究生,我就成为其中一员,虽然我仍然继续参加特勒的讨论会.

当时我在芝加哥大学的物理系是非常有名的研究生,因为我在联大所学到的基本理论物理已达到了当时最前沿的标准,可是我的动手能力非常蹩脚.同学们很佩服我的理论知识,常常要我帮他们解决理论习题,可是大家一致笑我在实验室里笨手笨脚.“Where there is Bang, there is Yang!”

1947年对我是一个不快活的一年.那时黄昆在英国做研究生,我给他的信中就曾用“Disillusioned”(幻想破灭)来描述我当时的心情.为什么呢?因为一方面我虽然努力,可是没有做实验的天分,而理论方面呢,几个自己找的题目都没有成果.

博士生为找题目感到沮丧是极普遍的现象.

回想起来,那一年我自己找的理论题目包括下面四项:(1)1944年Onsager的关于Ising Model的文章;(2)1931年Bethe的关于Spin Wave的文章;(3)1941年Pauli的关于场论的综合报告;(4)1943年以后,许多关于角分布的文章.这四个题目中前两个是统计力学里面的问题,我对它们感兴趣是受了王竹溪先生的影响.后两个题目与对称性密切相关,我对它们发生兴趣是受了吴大猷先生的影响.

在这四个题目中,前三个当时芝加哥大学没有别人感兴趣,我自己一个人在图书馆中研读,求了解,求发展.每一项都花了几个星期的努力,都以无

成果而告终.只有第四项是特勒极感兴趣的研究.当时这方面的理论论文很多,可是都不够严谨.我花了几个星期用群论分析“物理规律旋转不变”(Invariance of Physical Laws under Space Rotation)的意义,得出了几个漂亮的定理,写成一篇短文.特勒很喜欢这篇文稿.恰巧在1948年春天,全系师生都知道杨振宁在艾里逊实验室的工作不成功.于是特勒主动来找我^[4]:

有一天,特勒来找我.他问,你做的实验是不是不大成功?我说,对了.他说:“你不必坚持一定写出一篇实验论文.你已写了理论论文,那么就用一篇理论论文来作毕业论文吧.我可以做你的导师.”我听了这话很失望,因为我确实是一心一意想写一篇实验论文的.我说需要想一想.想了两天,决定接受他的建议.作了这个决定以后,我如释重负.这是我今天不是一个实验物理学家的道理.有的朋友说这恐怕是实验物理学的幸运.

那么我的一年多的实验经历是否白费了呢?不是,绝不是:我从中了解到,实验工作者的价值观与理论工作者不同,这一点影响了我以后的许多工作,最显著的是1956年的宇称可能不守恒的文章与1964年的CP不守恒的唯像分析^[5](phenomenological analysis).

我的博士论文是我进入对称与不变性(Invariance)领域的第一篇文章.紧接着又发表了我在该领域中第二篇文章,是关于 π^0 的自旋的工作,其中仔细分析了场论中不变性的群论表示.这两篇文章使我一跃而成为用群论与场论分析对称的专家.那时此领域才刚刚开始,能在那时进入此领域是极幸运的.

最好在领域开始时进入一个新领域.

1948年夏得到博士学位以后,芝加哥大学留我做教员(Instructor).我那时想学习重整化理论,而当时在芝加哥,费米、特勒和文策(Wentzel)三位教授都不研究此理论,所以一年以后我就申请去普林斯顿的IAS(Institute for Advanced Study).费米说去IAS很好,但那里的工作太理论化,像中古的修道院,要我只去IAS一年,即回到芝加哥.我当然很同意他的劝告,可是^[6]后来因为找女朋友的压力,我没有回芝加哥,结果在IAS共呆了十七年,1949—1966.

在这十七年间,我在芝加哥自己找四个题目都开花结果了.其中第一项,Ising Model,我是在偶然的机会找到了突破口^[7]:

1949年11月初的一天,在往返于普林斯顿大学对面的巴尔麦广场与研究所之间的街车(2011年注:

应为面包车)上, Luttinger(路丁格)偶尔和我谈及 Ising 模型. Luttinger 说, Bruria Kaufman(考夫曼)已经把昂萨格的方法简化, 因而他的解可以通过 $2n$ 个一系列反对易厄米矩阵而搞清楚. 我对这种表象了解得很多, 因而很容易就掌握了昂萨格—考夫曼方法的要点. 一回到研究所, 我就推导出昂—考解法的基本步骤, 并为终于理解了昂萨格的解法而高兴.

.....

我感到, 利用隐藏在昂—考方法中的其他信息, 便能把这个矩阵元计算出来.

.....

经过大约 6 个月断断续续的努力, 终于, 所有的片断突然融合在一起, 产生了奇迹般的各项相消的情形.

我眼睁睁地盯着出奇的简单的最后结果.

为什么我能够“很容易就掌握了昂萨格—考夫曼方法的要点”呢? 回答: 一方面我对“反对易厄米矩阵的表象”在昆明研读 Dirac 方程时就有了透彻的了解, 而更重要的是我在芝加哥大学曾花了数星期去研究昂萨格的 1944 年的文章, 虽然当时没有出成果, 但是对其中的主要难懂的地方为什么难懂有了深入的认识, 所以听到 Luttinger 的几句话就很容易地完全了解昂萨格解的真正精神.

这个经过可以浓缩为: 王竹溪先生使我对统计力学发生兴趣. 芝加哥时候的努力不成功, 可是做了必要的准备工作. 最后吸收了新方法, 就开花结果了. 这个过程: 兴趣→准备工作→突破口, 我认为多半研究工作必经的三部(步)曲.

在上述这个过程中, 最后的突破口, 是由新的外来的启示引导出来的(Luttinger 的几句话). 可是在多半的情形下, 启示是自己“顿悟”出来的; 在准备工作后, 脑子里面下意识仍在寻找新的观念组合, 最后突然找到了正确的组合, 就顿悟了. Poincaré^[8] 曾把此顿悟叫做 Sudden Inspiration, 他说是 unconscious work 的结果.

我在芝加哥找的第三个题目是关于 Pauli 的有名的综合报告中关于电磁学之规范不变性(Gauge Invariance). 这是外尔(Weyl, 见图 8)于 1918—1929 年间发现的. 我对此很妙的不变性非常感兴趣, 想把它推广.(为什么当时我的同时代的研究生们没有也这么想呢? 我猜是因为我对群论与不变性特别有兴趣, 而他们多半对此没有什么兴趣.)

我把电磁学中的重要公式

$$F_{\mu\nu} = A_{\mu,\nu} - A_{\nu,\mu}, \quad (1)$$



图 8 外尔(Hermann Weyl, 1885—1955)

推广为

$$F_{\mu\nu} = B_{\mu,\nu} - B_{\nu,\mu}, \quad (2)$$

其中 B_{μ} 是一个 2×2 的矩阵, 不像 A_{μ} 只是一个简单的 1×1 的矩阵. 这个很自然的推广, 却引导出越来越复杂的计算, 所以最后只好放弃, 那是 1947 年. 那时我的目的是想把当时新发现的许多粒子, Δ, K 等等用推广了的规范不变性来创建它们之间的相互作用. 那时的几页杂记 V5 到 V6a 现在复印于图 9.

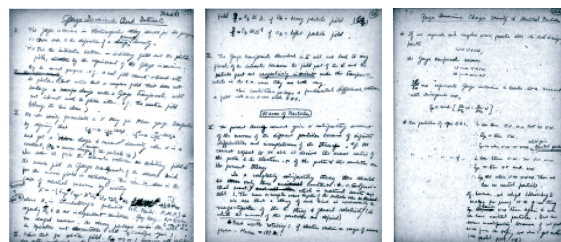


图 9 1947 年的几页杂记

以后的几年新发现的粒子越来越多, 所以我数次回到这项尝试, 每次都因同一原因: 越算公式越复杂, “越丑陋”, 而作罢. 1953—1954 年, 我到 BNL (Brookhaven National Laboratory) 去访问一年, 同办公室有两位年轻人, 一位叫米尔斯(Robert Mills, 1927—1999, 见图 10), 是 Norman Kroll (1922—2004) 的学生, 那时即将得博士学位. 另外一位是实验物理研究生 Burton Richter (1931—), 后来于 1976 年与丁肇中同时获得诺贝尔奖.



图 10 米尔斯和我(1999 年 5 月 22 日摄于石溪)

我很自然地就和米尔斯谈到了关于推广规范不变性的不成功的尝试. 有一天, 我们说(2)式虽然很自然, 但是也许应修改为

$$F_{\rho\nu} = B_{\mu,\nu} - B_{\nu,\mu} + (B_{\mu} \text{ 与 } B_{\nu} \text{ 的多项式}) . \quad (3)$$

当时决定先尝试二次的多项式, 如果不行, 就尝试三次的, 等等. 幸运地, 很快我们就发现如果把(2)式加上极简单的二次多项式, 即

$$F_{\rho\nu} = B_{\mu,\nu} - B_{\nu,\mu} + B_{\mu}B_{\nu} - B_{\nu}B_{\mu} , \quad (4)$$

以后的计算就**越算越简单**. 我们知道我们挖到宝贝了!!!

有了这项突破, 我们循着麦克斯韦(Maxwell, 1831—1879)理论的发展方法, 很快就写下了很漂亮的规范场方程式. 可是新问题出现了: 这些方程式似乎显示要有带电荷而质量为零的粒子, 这是没有见过的粒子, 也是理论上讲不通的. 这个问题给我们带来了大半年的复杂而未能解决问题的计算, 中间还有一段 Pauli 为难我的故事^[9]. 最后我们决定虽然此问题没有解决, 但整个想法太漂亮, 应该发表, 于 1954 年 6 月写了一篇文章寄给 *Physical Review*, 幸而立刻被接受了, 于 10 月初发表.

这篇文章是我一生最重要的工作. 虽然未竟全功, 但是决定当时发表是极正确的. 我从而认识到: **物理中的难题, 往往不能求一举完全解决.**

关于质量为零的粒子问题, 后来于 1970 年前后引进了对称破缺的观念而发展成极成功的标准模型. 我当时不喜欢在基础物理理论中引进对称破缺^[10], 所以失去了在这方面做贡献的机会.

关于米尔斯和我的合作, 五十多年以后, CCTV 的王志先生于 2005 年 1 月 26 日在电视访问中曾问过我, 为什么我的很多工作都是跟人合作的. 我的回答^[11]:

合作有很多的好处, 因为你知道你在讨论一个问题, 有时候走不通了, 你的想法都走不通了, 那个时候假如另外有一个人跟你讨论讨论, 问你几个问题, 或者想出来一个新的方向, 于是你就又起劲了, 这是很重要的一个研究的途径.

所以我认为: **和别人讨论往往是十分有用的研究方法.**

1954—1956 年间, 新实验发现了更多新粒子, 而奇怪的是其中两个粒子, θ 与 τ 的性质: 它们衰变成不同数目的 π :

$$\begin{aligned} \theta &\rightarrow \pi + \pi , \\ \tau &\rightarrow \pi + \pi + \pi . \end{aligned}$$

越来越多与越来越准确的实验, 都显示二者其实是一个粒子, 只是有两种不同的衰变. 这本来没有什么稀奇, 可是物理学中有一项“宇称守恒”定律, 是金科玉律. 根据此定律, 两个 π 的“宇称”是 +1, 而三个 π 的“宇称”是 -1. 如果 θ 与 τ 是同一粒子, 那么它既能衰变成 +1 的宇称, 又能衰变成 -1 的宇称, 宇称就不守恒了, 这是绝对不可能的!

这个问题当时叫 $\theta-\tau$ 谜, 是 1954—1956 年间基本物理学中最困扰人们的问题. 后来在 1957 年的一篇文章中^[12]我说:

那时物理学家们的处境曾被描述为一个被关在黑屋子中的人. 他知道在某一个方向一定有一个门可以走出去, 但是这个门在哪个方向呢?

1956 年夏天, 李政道和我(见图 11)为了找这个门, 在**仔细检验**过去五类所谓证明弱相互作用中宇称守恒的试验后, 发现原来它们都**并没有证明**宇称守恒: 它们都不够复杂. 我们也从而指出几类够复杂的试验可以检测**宇称在弱相互作用中^[13]究竟是否守恒.**

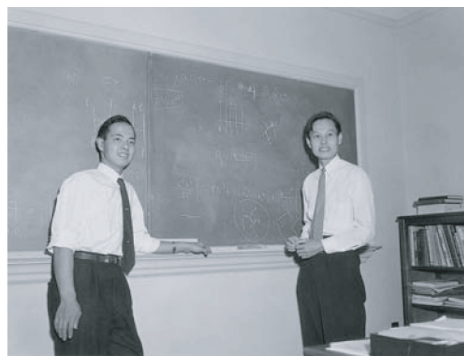


图 11 李政道和我(1957 年摄于普林斯顿高等研究所)

那年 6 月我们把这些结果写成预印本, 寄去 *Physical Review*, 也寄了很多份给同行们. 很快就收到, 与听到, 一致的回应: **宇称绝对不会不守恒**, 杨李所建议的实验都是浪费时间与资源! 只有吴健雄(1912—1997, 见图 12)独具慧眼, 她虽然受了 Pauli 的影响也不相信宇称会不守恒, 可是她认为既然过去在 β -衰变中并没有证明宇称是否守恒, 那么现在就应该用实验去测试这个基本定律.

经过六个月的努力, 她于 1957 年初宣布: 在弱相互作用中**宇称并不守恒**, 而且是极度不守恒. 这项结果影响了物理学里面的多个领域: 粒子物理、核物理、原子与分子物理, 所以**震惊了整个物理学界**. 至于为什么物理世界既有极准确的左右对称(宇称守恒), 又有微小的左右不对称(宇称不守恒), 至今仍是一个未解之谜.

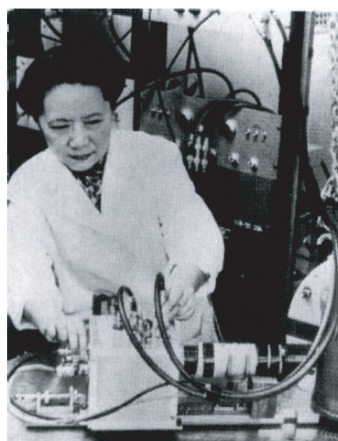


图 12 吴健雄(1912—1997)

吴健雄的工作以精準著称於世，但是她的成功还有更重要的原因：一九五六年大家不肯做测试宇称宇恒的实验，為什麼她肯去做此困难的工作呢？因为她独具慧眼，认为宇称宇恒即使不被推翻，此一基本定律也已被测试。这是她过人之处。
 杨振宁 九七年四月

图 13 吴健雄去世后我写的一段话

吴健雄的巨大成功给她的启示是^[14]：

永远不要把所谓“不验自明”的定律视为是必然的。

宇称不守恒给了物理学界，尤其是 Heisenberg (1901—1976)与 Pauli(1900—1958)那一代人，极大的震撼。他们似乎觉得整个物理学基础都动摇了。1957年1月15日哥伦比亚大学召开记者会，宣布吴健雄的结果，次日《纽约时报》头版登载此消息，说 Rabi(1898—1988)在会上说：

“可以说一个完整的理论体系从基础上被打碎了，我们不知道如何把碎片重新拼起来”。

受了宇称不守恒的震撼，Heisenberg 和 Pauli 重新合作，于 1957—1958 年间尝试解决当时物理学中几个极基本的问题，如精细结构常数 $\alpha \sim 1/137$ 等。这段不成功的合作的奇怪历史我曾在^[15]1986 年一个演讲中作过描述。显然他们二位认为基本物理

原理又动摇了，又回到了 1924—1925 年前后的极端紊乱状态，又需要大胆的新的理论框架，又需要大胆的新的猜测。他们二人这一年多的合作研究的态度与方法，和我这一代物理学家所熟悉的完全不同。我认为科学史家从他们这次合作细节中，也许能够窥测到 1924—1925 年间，他们创建 Exclusion Principle(不相容原理)，与创建矩阵力学时的心理状态。这项研究历史细节的工作我以为极值得做，但是至今还没有人做过。

1961 年夏天，我到斯坦福大学访问，恰巧 Fairbank 和 Deaver 在做超导圈中磁通量子化的实验。这个实验把我引入超导领域，后来从而发展出 ODLRO 观念。1963 年开始，为了寻找确有 ODLRO 的数学模型，我和吴大峻、杨振平做了许多计算，又回到我在芝加哥时研究过的第二个题目：Bethe 的 1931 年文章。可是这一次我们是从扩大了的角度研究 Bethe 的问题，所以自然地引入了延拓(Continuation)的观念。用此观念，Bethe 的复杂的方程式就受到控制了，就可以向许多方向发展了。1966—1969 年间，杨振平和我利用此观念，写了好几篇颇有份量的文章。事后分析一下，这次经过仍然是上文所提到的

兴趣→准备工作→突破口

模式，可是“准备工作”与“发展”之间有了外来的新因素：从扩大了的角度研究 Bethe 的方程式。所以，把问题扩大往往会引导出好的新发展方向。

事实上，1954 年米尔斯和我所做的工作，把电磁学的规范不变观念扩大到非阿贝尔规范不变，就是扩大问题的另一个实例。

1966 年我离开普林斯顿，接受纽约州立大学(SUNY)新创建的石溪(Stony Brook)分校的聘任。在石溪我开始与研究生接触。我自己很少收研究生，一生只毕业过大约十个博士生。不过我影响了好几位不是我自己的石溪博士生。他们本来都想搞理论高能物理，我告诉他们理论高能物理在 50 年代到 70 年代虽有辉煌的成就，但是到了 70 年代末一个年轻人就很难搞进去。而且进入 80 年代，因为大加速器太昂贵，识者认为前途堪忧。但是年青人不了解这一点，以致全世界聪明的研究生进入这一行的特多，造成粥少僧多的现象。

受了我的影响好几位石溪博士生与博士后改入了别的领域，例如加速器原理和生物物理，今天十分成功，他们都很感激我早年给他们的劝告。这个经验所给的启发是：

一个研究生最好不要进入粥少僧多的领域。



图 14 范曾于 2004 年所作大画

上面讲到了好多项我个人多年来得到的启发与感受:

- (1) 一方面直觉非常重要,可是另一方面又要及时吸取新的观念修正自己的直觉.
- (2) 和同学讨论是极好的真正学习的机会.
- (3) 博士生为找题目感到沮丧是极普遍的现象.
- (4) 最好在领域开始时进入一个新领域.
- (5) 兴趣→准备工作→突破口
- (6) 物理中的难题,往往不能求一举完全解决.
- (7) 和别人讨论往往是十分有用的研究方法.
- (8) 永远不要把所谓“不验自明”的定律视为是必然的.
- (9) 把问题扩大往往会引导出好的新发展方向.
- (10) 一个研究生最好不要进入粥少僧多的领域.

其中我觉得特别值得注意的是:兴趣→准备工作→突破口.下面我对此项从兴趣到准备工作到突破口的三步曲做两点补充:

(1) 我父亲是研究数学的,我小时候他很自然地给我讲了一些“鸡兔同笼”、“韩信点兵”等四则问题.我学得很快,他很高兴.很多年以后在美国,我有三个孩子,他们小时候我也介绍给他们“鸡兔同笼”、“韩信点兵”等问题,他们也都学得很快,我也很高兴.可是我与他们有一个区别:我父亲介绍给我四则问题之后,过了一年他再问我,我都记得很清楚;我的孩子们,我一年后再问他们,他们就把四则问题完全忘得精光.结论:外来的信息如果能够融入个人脑子里面的软件之中,就可能“情有独钟”,有继续发展的可能,像是一粒小种子,如再有好土壤、有阳光、有水,就可能发展成一种偏好(taste),可以使这个

人喜欢去钻研某类问题,喜欢向哪些方向去做“准备工作”,如果再幸运的话,也就可能发展出一个突破口,而最后开花结果.

(2) 诗人、画家范曾于 2004 年作了一张大画(见图 14)送给南开大学陈省身数学研究所.画上他题了一首诗,其最后七个字是锤炼出来的美丽诗句:真情妙悟铸文章.范曾从来没有和陈先生、也没有和我,谈起科学创作的过程.他的诗句似乎表明艺术家的创作过程也和科学家一样遵循同样的三步曲吧.

参考文献

- [1] 杨振宁. 读书教学四十年. 香港三联书店, 1985. 114
- [2] 张奠宙. 杨振宁文集. 华东师范大学出版社, 1998. 705
- [3] 杨振宁. 曙光集. 三联书店, 2008. 311—312
- [4] 杨振宁. 读书教学四十年. 香港三联书店, 1985. 118
- [5] 请参阅 Cronin 的 1992 年演讲《C. N. Yang and CP Violation》. 见《Chen Ning Yang, A Great Physicist of the Twentieth Century》, Ed. C. S. Liu and S. T. Yau, International Press, 1995
- [6] 杨振宁. 读书教学四十年. 香港三联书店, 1985. 120
- [7] 张奠宙. 杨振宁文集. 华东师范大学出版社, 1998. 21
- [8] Poincar Henri. Science and Method. Dover, 1952. 56
- [9] Yang C N. Selected Papers 1945—1980 With Commentary. World Publishing Corporation, 1994, 20
- [10] Yang C N. Selected Papers 1945—1980 With Commentary. World Publishing Corporation, 1994, 67
- [11] 杨振宁. 曙光集. 三联书店, 2008. 364—365
- [12] Yang C N. Selected Papers 1945—1980 With Commentary. World Publishing Corporation, 1994, 241
- [13] 弱相互作用包括 θ 、 τ 、 β 等衰变
- [14] 江才健. 《吴健雄》. 复旦大学出版社, 1997. 193
- [15] 杨振宁. 物理, 1986, 15(11): 690; 张奠宙. 杨振宁文集. 华东师范大学出版社, 1998. 530