

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2024.03.002

吴健雄:从量子纠缠到宇称不守恒

施郁^{1,2,3}

- 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院,中国科学技术大学上海研究院,上海 201315
- 中国科学技术大学,安徽 合肥 230026
- 复旦大学物理学系,上海 200438

摘要:本文基于作者2022年5月在“纪念吴健雄先生诞辰110周年学术研讨会”上的演讲,对吴健雄的研究工作进行了全面概览,并重点回顾和分析她关于量子纠缠和宇称不守恒的两项工作。她博士期间关于放射性氙的研究后来在曼哈顿计划中发挥了重要作用,而她在战时关于慢中子效应和放射性探测器的工作在战后1946年到1948年发表。宇称革命之前,吴健雄已经是 β 衰变的顶尖专家,1946年至1956年发表了50多篇 β 衰变论文,其中最重要的是1949年她和学生Albert对费米 β 衰变理论的验证。1950年她和学生Shaknov用正负电子湮没验证量子电动力学的预言,用光子偏振实现了空间分离的量子纠缠态并进行了关联测量。本文还梳理了弱相互作用中宇称不守恒的发现过程。李政道-杨振宁的伟大理论突破开启了宇称革命,但没有宇称是否守恒的明确结论,而吴健雄领导的实验首次发现了弱相互作用中宇称不守恒。Garwin、Lederman和Weinrich得知吴实验的初步结果后,很快得到明确结果,但是吴健雄和合作者仍然坚持对自己的实验完成核实。这一点与吴健雄做此实验的最初决定都体现出,吴健雄首先追求的是物理规律的真相和实验的可靠。本文最后总结了吴健雄作为伟大的实验物理学家的特质。

关键词:吴健雄; β 衰变;宇称不守恒;量子纠缠

中图分类号:O572.23

文献标志码:A

文章编号:2097-1486(2024)03-0225-19

Chien-Shiung Wu: from quantum entanglement to parity nonconservation

SHI Yu^{1,2,3}

- CAS Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Shanghai 201315, China
- University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
- Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200438, China

Abstract: This paper is based on the author's speech at the International Symposium Commemorating 110th Birth Anniversary of Chien Shiung Wu in May 2022. We make an overview of the researches of Chien-Shiung Wu, with emphases on her works on quantum entanglement and on parity nonconservation. Her PhD work on radioactive xeron later became important in Manhattan Project, while her wartime works on slow neutron effect and radioactive detectors were published during the period of 1946 to 1948. Before the Parity Revolution, Wu had already become a top expert on β decay, and had published more than 50 papers on this subject, the most important of which is her test of Fermi's theory of β decay with Albert. In 1950, She and Shaknov tested the predictions of quantum electrodynamics using electron-positron annihilation, realizing quantum entanglement between polarizations of spatially separated photons and measuring the correlation. In particular, we recall the process of the discovery of parity nonconservation. The great theoretical breakthrough of Lee-Yang initiated the parity revolution. However, they did not provide a definite answer on whether the parity is conserved. The experiment led by Wu discovered that the parity is indeed not conserved. After Garwin, Lederman and Weinrich had obtained the positive result on parity nonconservation following the preliminary result of Wu experi-

基金项目:国家自然科学基金专项项目(T2241005)

收稿日期:2024-07-10;**修回日期:**2024-08-13

ment, Wu and her collaborators continued checking their experiment till the result was completely sure. This and her decision to do the experiment in the first place showed her great scientific spirit. Finally we summarize her characteristics as a great experimental physicist.

Key words: Chien-Shiung Wu; β decay; quantum entanglemen; parity nonconservation

在吴健雄(1912.5.31—1997.2.16)诞辰110周年之际,我调研了吴健雄的全部科学工作,系统梳理了她的科学贡献,总结她的科学精神。文章首先对她整个学术生涯做一个全面概览,然后重点评述标题中所指明的她两方面贡献,即量子纠缠和宇称不守恒。前者鲜为人知,后者广为人知,但是细节依然值得考察。另外也有一些新发现,比如她在曼哈顿计划中的工作方面。本文基于我在“纪念吴健雄先生诞辰110周年学术研讨会”上的演讲(东南大学,2022.5.31),以及在山西大学的相同演讲(2022.6.10)。本文扩展了演讲文稿《吴健雄的科学贡献和科学精神:从量子纠缠到宇称不守恒》(墨子沙龙微信,2023.6.2.)。

1 吴健雄的经历和研究工作概览

首先对吴健雄整个学术生涯的研究工作做个全面巡览。

1.1 从中国出发

从上海沿高速公路向西北方向,进入江苏后不久,有一个指示牌写着“浏河”。我每次经过这里都会留意一下,因为浏河镇是吴健雄的故乡。那里还有个长江港口,是郑和下西洋的出发点。郑和的走向世界与吴健雄的走向世界当然没有直接关系,但是给童年吴健雄留下深刻印象。

吴健雄生于1912年5月31日。她的父亲吴仲裔毕业于南洋公学,曾参加爱国学社、同盟会和上海商团,回乡后创办明德学校。吴健雄从父亲那里得到各种知识和进步思想的熏陶,包括自然知识和男女平等的观念。她11岁时,完成了明德学校的学业,前往苏州第二女子师范就读,6年后保送国立中央大学(1949年改称国立南京大学)。由于对师范毕业生的规定,吴健雄先在上海的中国公学学习了一年,因此成为胡适的学生。她说,除了她父亲,胡适对她影响最大^[1]。

1930年,吴健雄来到南京,进入中央大学。1933年,比吴健雄大4岁的施士元在法国获科学博士学位,就任中央大学物理学系教授兼系主任。在巴黎大学,施士元在居里夫人指导下从事核谱学研究^[2]。

放射性原子核发出3种射线, α 射线(氦原子核)、 β 射线(电子)与 γ 射线(光子)。核谱学测量这

些射线的性质,特别是能量的分布,从而推测原子核的性质。施士元做了两个方面的工作。一是 β 射线磁谱,也就是通过 β 射线在磁场中的运动测量 β 射线的动量和能量。施士元研究了钍 $C+C'+C''$ 以及镭 $C+C'+C''$ 的 β 射线磁谱。施士元或其他人提到这些工作时,都没有解释过钍 $C+C'+C''$ 以及镭 $C+C'+C''$ 的意思。它们分别是3种放射性元素的混合,用的是当初的代号,早已不用。笔者查到,钍C是铀212,钍C'是钋214,钍C''是铊208,镭C是铋211。施士元另一个方面的工作是铀系元素的核谱测定。原子核发出 α 射线后,可以处于能量最低的基态,或者处于一个能量稍高的激发态。这称为 α 射线精细结构。处于激发态的原子核可以发出 γ 射线,转变为基态。施士元在铀系元素中发现,两个能态之间的能量差与 γ 射线的能量相等^[2]。这证明了核能级的存在,原子核从高能级跃迁到低能级,能量差就转化为 γ 射线的能量。

在中央大学,吴健雄修了施士元的近代物理课程^[1,3-4],又在他指导完成了本科毕业论文,题目是《晶体中X射线布拉格衍射方程的验证》^[4-5]。当时施士元在从事晶体X射线实验,1936年发表了一篇论文^[6]。这个领域发展成为南京大学长期耕耘的一个强项。

1934年,吴健雄从中央大学本科毕业。她先在浙江大学做了一年助教(据说做过束星北的助教),然后经系主任张绍忠(中央大学校友^[7])推荐,来到位于上海的中央研究院物理研究所(所址现为中国科学院上海微系统与信息技术研究所,对面的兆丰公园就是现在的中山公园)做了一年研究(1935—1936),在顾静微指导下研究气体光谱^[2]。顾静微是中国第一个物理学女博士,博士论文是在密歇根大学分子结构专家丹尼森(David M. Dennison)指导下的光谱工作。

气体光谱基于分子的能量变化所发出的光,与施士元在巴黎研究的核谱学和在中央大学研究的X射线晶体衍射都是谱学,而吴健雄后来耕耘多年的主要领域是 β 射线谱。可以看出,吴健雄在中国初涉的研究领域是X射线晶体衍射和气体光谱,虽然不是后来从事的放射性或核物理方面,但是有很多

相通之处。而且她也可能对施士元以前的核谱学工作有所了解。所以吴健雄最初在中国的物理训练与她后来的 β 射线和核物理研究是一脉相承的。

1936年,在顾静薇的推荐和建议下,吴健雄赴美国自费留学,目的地是密歇根大学。经济资助来自叔叔吴琢之^[1],吴琢之是南京江南汽车公司(南京公交公司前身)创办人^[8]。

吴健雄于1936年8月抵达美国旧金山,短暂停留后赴密歇根大学,其间参观加州大学伯克利分校物理系,特别是劳伦斯(Ernest O. Lawrence)建立的辐射实验室(Radiation Laboratory,就是今日的Lawrence Berkeley国家实验室的前身),内有劳伦斯的回旋加速器,印象深刻^[1]。劳伦斯在1930年代初发明回旋加速器,而且不断建造扩大版。最初只有4英寸,吴健雄在1936年看到的应该是27英寸,1937年达到37英寸,1939年达到60英寸。1939年劳伦斯因回旋加速器获诺贝尔物理学奖。在伯克利逗留期间,吴健雄又了解到密歇根大学有性别歧视,与她从小就形成的平等观念相悖,而且密歇根大学当时中国学生很多,她却不希望来美国与中国同学扎堆。两方面的原因,使得吴健雄希望留在伯克利学习。她成功实现了这个愿望,成为物理系的博士研究生。陪同她参观实验室的袁家骝(袁世凯之孙)后来成为她的丈夫。

1.2 伯克利

1.2.1 博士生和博士后时期的研究工作

吴健雄在伯克利待了6年,4年博士研究生(1936—1940),2年博士后(1940—1942),研究工作是连续的。头两年的课程学习结束后,选择论文导师时,吴健雄曾希望跟随大名鼎鼎的理论家奥本海默(J. Robert Oppenheimer),但是没被选中,而劳伦斯接受她,成了她的导师^[1]。吴健雄将在实验物理的道路上走下去。

1938年,在劳伦斯指导下,她开始在伯克利进行了第一个研究工作,是关于 β 衰变。在弱相互作用主宰下,原子核中的中子转化为质子,发出电子和反中微子,这就是 β 衰变,这里的电子被称为 β 射线。吴健雄研究放射性铅发出的 β 射线所激发的X射线。有趣的是,这部分的博士工作联系了她之前的本科论文工作和她职业生涯的主要领域—— β 衰变,包括宇称不守恒实验。这个工作发表于1941年,文末感谢了劳伦斯的选题和指导^[9]。这是吴健雄职业生涯发表的第一篇论文。也就是说,她在职业之初就进入了她后来的主要领域—— β 衰变。

吴健雄的另一位导师是塞格瑞(Emilio Segrè),她跟塞格瑞做了几年研究,于1940年博士毕业,接着继续留在那里跟着塞格瑞做了两年博士后。塞格瑞是费米在意大利时期的学生,1938年从意大利来到美国。吴健雄是塞格瑞在美国的第一个学生。吴健雄名义上的博士导师是劳伦斯,但是塞格瑞也是其导师。1959年,塞格瑞因反质子的发现分享诺贝尔物理学奖。

1939至1940年,作为她博士论文工作的另一部分,吴健雄跟随塞格瑞,用37英寸回旋加速器产生的中子研究铀裂变产物,特别是放射性氙。

此前,塞格瑞的博士后兰斯道夫(A. Lansdorf Jr.)发现了一个放射性元素,别人确定是氙的放射性同位素。吴健雄和塞格瑞发现了氙的另一个放射性同位素^[10]。接着,吴健雄确认,这两个放射性同位素分别是氙133和氙135^[11]。但是因为保密,还有一些数据当时并没有发表,打算等战后再发表。正如下文所述,1944年,吴健雄以前在伯克利关于氙135的研究成果对研制原子弹的曼哈顿计划做出了重要贡献。1945年3月,吴健雄和塞格瑞还基于以前在伯克利的工作,发表了一篇论文,系统阐述氙的这两个放射性同位素^[12]。

以上分别由劳伦斯和塞格瑞指导的两方面工作构成了吴健雄的博士论文。吴健雄在博士后期间(1940—1942),与西博格(Glenn Seaborg)的研究生费兰德(G. Friedlander)合作,用回旋加速器产生的中子研究放射性的汞^[13-14]。

1.2.2 友谊

在伯克利,除了劳伦斯、塞格瑞、奥本海默,吴健雄熟悉的教授还有1968年因发现共振态而获诺贝尔物理学奖的阿瓦雷兹(Luis Walter Alvarez)、1951年因发现钷等超铀元素分享诺贝尔化学奖的西博格,熟悉的同学中有后来在哥伦比亚大学的同事——1955年因氢原子光谱的兰姆位移而获得诺贝尔物理学奖的兰姆(Willis Lamb),1939年与导师奥本海默研究恒星引力塌缩形成黑洞的沃尔科夫(George Volkoff),劳伦斯的另一位学生、后来成为费米国家实验室首任主任的威尔逊(Robert R. Wilson),等等。

江才健的《吴健雄传》提到^[1],沃尔科夫提供了一张他与吴健雄及另一位同学的合影(图1),其中吴健雄和那位同学牵着手,说那位同学是法兰克(Stanley Frankel);吴健雄曾向江才健表示,法兰克很聪明却可惜没做出杰出贡献^[1]。其实法兰克是有杰出贡献的,只是不太为人所知。法兰克是奥本海

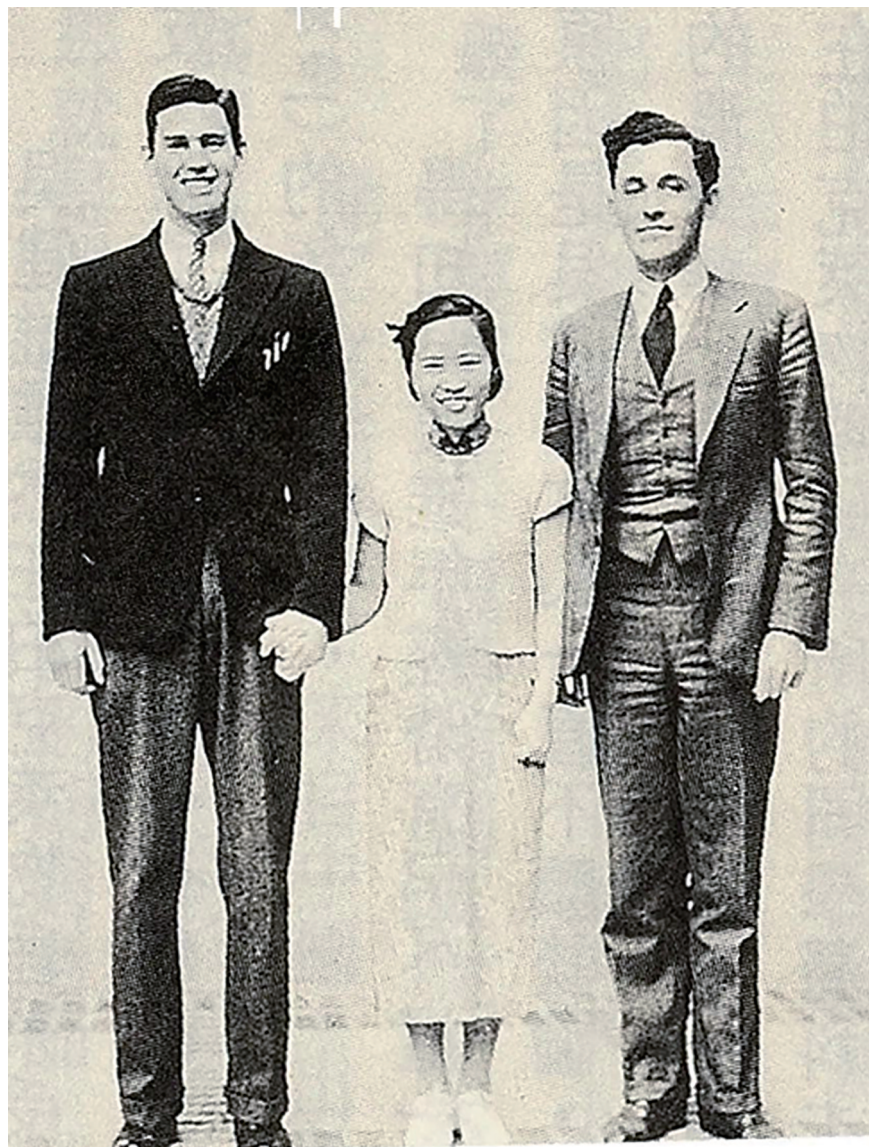


图1 法兰克(左)、吴健雄(中)和沃尔科夫(右)(摄于吴健雄在伯克利期间,由沃尔科夫提供给江才健)^[1]

Figure 1 Stanley Frankel (left), Chien-Shiung Wu (middle) and George Volkoff (right) (during their stay at Berkeley, Courtesy of Volkoff to Tsai-Chien Chiang)^[1]

默的博士后,参加了曼哈顿计划,在原子弹和氢弹的计算方面做出了重要贡献,最早将计算机(IBM机器)引进到洛斯阿拉莫斯实验室做科学计算,后来又使用第一台通用电子计算机ENIAC。1949年,他因为父亲是共产党,被迫离开洛斯阿拉莫斯实验室和保密工作,在蒙特卡罗计算、个人计算机的开发等方面有重要贡献^[15-16]。

但是最近江才健做出更正,1996年杨振宁和他的同学戈德伯格(Marvin L. Goldberger)帮助辨认出,照片中的人应该是克里斯蒂(Robert Christy)。

克里斯蒂是奥本海默的学生,对曼哈顿计划做出重要贡献,特别是在钚弹引爆方面。“氢弹之父”特勒做过奥本海默听证之后,某日见到克里斯蒂,伸手

要握手,却遭到克里斯蒂拒绝。克里斯蒂后来还做过加州理工学院的执行院长,与戈德伯格同事(戈德伯格曾任加州理工学院校长)。他的第二位妻子为他写的传记记载^[17],克里斯蒂说,吴健雄因为字称不守恒得了诺贝尔奖。这当然是弄错了。书中还记载,克里斯蒂对吴健雄的多方面个性印象深刻,关于吴健雄的记忆还使得他让两个女儿学中文。这些情况提示,他确实对吴健雄印象特别。奇怪的是,沃尔科夫说错照片上人是谁,因为他和克里斯蒂太熟悉了,他们都是加拿大英属哥伦比亚大学的本科生,前者比后者早一年,而且克里斯蒂还步沃尔科夫后尘,到伯克利成为奥本海默的学生。有趣的是,不少人误以为吴健雄得过诺贝尔奖。

在伯克利,吴健雄还和从英国剑桥来伯克利访问的生物化学家鲁桂珍成为好友,后来,1942年到1945年,鲁桂珍在哥伦比亚大学工作,又与吴健雄重逢^[1]。在她的导师李约瑟转向中国科技史这件事上,

鲁桂珍是个重要因素。1957年,她回到剑桥,自己也转到中国科技史。《吴健雄传》收入了一张照片(图2),上面有吴健雄、塞格瑞、奥本海默和一位美国女同学,但是没有认出另一位中国女士就是鲁桂珍。



图2 吴健雄(右2)在伯克利时期,与奥本海默(右3)、塞格瑞(右4)、鲁桂珍(右5)和玛格丽特·莱维斯(最左)等人在伯克利国际学生宿舍用晚餐^[1]

Figure 2 Wu (2nd from right) in Berkeley having dinner with J. Robert Oppenheimer (3rd from right), Emilio Segrè (4th from right), Lu Gwei-djen (5th from right) and Margaret Lewis (extreme left) and an unidentified lady (1st from right)^[1]

1.2.3 一份史料

1941年4月25日加州奥克兰的报纸《奥克兰论坛报(Oakland Tribune)》对吴健雄有个报道^[1,18-19](图3)。我找到了这个报道^[19]。当时吴健雄正在作博士后。从中还可以看出来,当时公众已经知道原子核可以提供巨大的能量。从报道中可以窥见一点吴健雄当时的情况。

翻译如下。

标题:娇小的中国女孩展示原子撞击研究

副标题:黑板板书倒写但是结果令科学家满意

伯克利,4月25日。在一个研究撞击原子的实验室,一位娇小的中国女孩与一些美国顶尖物理学家并肩工作。

这位年轻女士叫吴健雄,是加州大学的新加入的物理科研人员。吴小姐,或者更准确地说,吴健雄

博士,看上去似乎像一位演员或者艺术家或者对西方文化感兴趣的富家女儿。

对于陌生人,她看上去害羞寡言。但是面对物理学家和高年级学生,她自信尖锐。

有一天她对这样一批听众评论最近原子核裂变的研究进展。原子核裂变是某种原子核因巨大的力量分裂成两半,目前是原子能的第一希望。为了讲清某一点,她在黑板上写了个公式,但,是从右到左,对于西方写法来说,是反过来了。不过也行。

吴博士1914年生于上海,21岁前在中国的学校获得硕士学位(注:原文如此,应为学士),然后来到美国继续学术教育。

但是她的心在中国。当她谈论“中国和民主”时,她周围有了战斗的气氛。她准备回到她的祖国,希望为中国服务。



图3 奥克兰论坛报(Oakland Tribune)对吴健雄的报道^[19]

Figure 3 Oakland Tribune's coverage of Chien-Shiung Wu^[19]

1.3 战时工作

1.3.1 史密斯学院和普林斯顿

1942年,吴健雄结束博士后工作。尽管被《奥克兰论坛报》报道(见本文最后一章),吴健雄还是没能留在伯克利,也没有在其他地方找到研究职位。袁家骝在普林斯顿的美国无线电公司(RCA)找到工作。吴健雄去马萨诸塞州北安普顿的史密斯学院(Smith College)任教。这是一个女子学院,当时南希·里根正在那里学戏剧。吴健雄去这个学校,是因为史密斯学院的安斯洛(Gladys Anslow)教授到伯克利来访问研究,与吴健雄成为朋友,邀请吴健雄将来去史密斯学院工作^[1,15]。安斯洛当时使用伯克利的回旋加速器研究蛋白质分子,被称为第一个在此加速器上工作的女科学家^[18]。后来安斯洛做过谢希德的硕士导师^[1]。

史密斯学院和吴健雄彼此很友好,但是缺少吴健雄需要的科研条件。在波士顿的一个会议上,吴健雄遇到劳伦斯,表示了不能做研究的烦恼。于是劳伦斯将吴健雄推荐给东部的8所大学,它们都接

受了吴健雄的申请^[1]。当时大量物理学家为战争服务,很多大学也需要物理学家。

1943年,吴健雄去了家附近的普林斯顿大学,成为该校历史上第一位女讲师。但是她这里的工作仍然不是科研,而是给一批海军军官教书。

1.3.2 哥伦比亚大学和曼哈顿计划

几个月后,也是在劳伦斯推荐下,哥伦比亚大学参与曼哈顿计划的部门请吴健雄去面试^[1]。曼哈顿计划是二战期间研制世界上第一颗原子弹的计划。这个部门的代号是替代合金材料(Substitute Alloy Materials)实验室(SAM)。1944年3月,吴健雄加入哥伦比亚大学,在SAM的第一部门工作。这个部门的负责人是邓宁(John R. Dunning)^[20]。可以说,曼哈顿计划给吴健雄带来了科研机会,她成为参与曼哈顿计划的唯一华人。其实,吴健雄离开伯克利时,曼哈顿计划已经开始,她的很多老师同学就参与其中,导师劳伦斯和塞格瑞都是曼哈顿计划中的重要人物。显然,吴健雄在伯克利时没有被吸纳,与她是一个中国公民有关。

美国的核裂变实验研究正是从哥伦比亚大学开始。1930年代,邓宁向劳伦斯学习,在哥伦比亚大学建造了一个37英寸的回旋加速器。1939年1月25日,费米、邓宁和学生安德森(Herbert Anderson)在这个加速器中验证了核裂变^[22]。费米1月2日刚到纽约,是从斯德哥尔摩领取诺贝尔奖后,逃到美国(他的夫人是犹太人)。

1938年圣诞节前,柏林的哈恩(Otto Hahn)和斯特拉斯曼(Strassman)在约里奥·居里(J. Joliot-Curie)和伊雷娜·居里(I. Joliot-Curie)夫妇的工作基础上,发现中子轰击铀核,产生了钡核,质量数比铀小很多。他们将实验现象告诉刚逃到斯德哥尔摩的犹太同事梅特娜(Lise Meitner)。圣诞假期中,她和来自哥本哈根的外甥费里希(Otto Frisch)给出了物理解释,指出是铀原子核俘获中子后发生了裂变。早在1935年诺达克(I. Noddack)就曾经提出裂变可能性,但是未受重视。1月6日,费里希回到哥本哈根与尼尔斯·玻尔(Niels Bohr)讨论。第二天,在火车站给了玻尔两页草稿,玻尔要去美国普林斯顿访问。玻尔将核裂变的消息带到普林斯顿。兰姆从普林斯顿将消息带给费米。于是有了25日费米、邓宁和安德森的实验,他们是用云雾室验证了裂变产物因为有那么高的能量,导致很大的光脉冲。其实这是在不知道的情况下,重复了费里希13至14日做的实验。费里希借鉴细胞分裂的英文名词,命名为“裂

变”(fission),16日投出两篇论文。

1.3.3 老数据的新贡献

就在吴健雄来到东海岸的那一年,1940年年底,就在哥伦比亚大学,塞格瑞、劳伦斯与费米讨论了铀239的裂变可能性。后来正是塞格瑞和西博格在伯克利观察到铀239的裂变^[15]。1944年9月27日,作为曼哈顿计划一部分,汉福德(Hanford)的B核反应堆开始工作,从天然铀生产铀239。这为后来胎死腹中的原子弹“瘦子”、首次试爆的原子弹和扔在长崎的原子弹“胖子”提供了原料。

当初哈恩等人发现核裂变后,西拉德(Leo Szilard)和费米的理论分析和约里奥·居里等人的实验发现表明,核裂变所产生的中子,又引起更多的铀核裂变,从而发生链式反应。因此核反应堆和原子弹的一个关键是链式反应,而链式反应需要大量中子。

但是汉福德的B核反应堆运行几小时后,达到一定功率就停止了。这被称为“中毒”。费米和惠勒发现,这是因为核反应产生了氙135,吸收了大量中子,而中子是维持链式反应所必需的,所以中子被氙135吸收后,链式反应就缺少足够的中子,不能持续下去。所以他们需要氙同位素对中子吸收方面的数据。

塞格瑞告诉他们,吴健雄和他战前的工作恰恰获得了这些数据。所以吴健雄提供了她1939到1940年关于氙135中子吸收截面的数据,对解决反应堆“中毒”问题做出了重要贡献。1945年,吴健雄和塞格瑞又用当年的实验结果发表了一篇论文^[6]。所以吴健雄对曼哈顿计划的贡献之一是,用博士生期间的工作对铀239的生产做出了贡献。

1.3.4 慢中子效应和放射性探测器

吴健雄在黑汶斯(William W. Havens Jr.)领导的小组中工作,合作者还有雷恩沃特(James Rainwater)。雷恩沃特和黑汶斯都是邓宁的学生。战后,吴健雄和他们都留在哥伦比亚大学。他们在1946年获得博士学位,博士论文解密,并在《物理评论》(Physical Review)发表,分别以本人为第一作者,另一人为合作者。1952年,他们两人成为教授,吴健雄成为副教授。雷恩沃特1950年做了个原子核结构的理论工作,1975年分享诺贝尔物理学奖。

战后,吴健雄与邓宁、黑汶斯和雷恩沃特将曼哈顿计划里的一些工作解密发表,并有延续的研究。笔者查阅Web of Science,发现他们在1946年到1948年发表了一系列论文,一方面是关于氢和其他

元素的慢中子效应,有大约8篇论文;另一方面是以吴健雄为主所研究的灵敏的放射性探测器,用来探测 β 射线(也就是电子)、光子和其他粒子,有大约7篇论文。这些研究反映了吴健雄在曼哈顿计划中做的工作。而且这些工作经验对吴健雄后来的职业生涯有很深的影响。

在中国打下基础,在伯克利受到大师的指导和一流的科研训练,并在前沿工作。经历两年的教学工作,又在曼哈顿计划中工作了两年,吴健雄为她未来的一系列精准实验工作打下了基础。

1.4 战后的研究工作

1.4.1 β 衰变

战后,吴健雄也开始开辟新的领域,就是 β 衰变。她研究 β 衰变的物理,注重与理论比较,成为 β 衰变的顶尖专家。在发现弱相互作用宇称不守恒之前,吴健雄就已经有50多篇的 β 衰变的文章,以及与 β 衰变密切相关的论文,比如关于电子俘获,即原子核俘获电子,虽然不是 β 衰变,但与其密切相关。李政道曾经说过,在 β 衰变领域,没有人能够跟吴健雄相比^[23]。不过她在1952年才成为副教授^[1]。李政道说,吴健雄是在宇称不守恒发现之后才于1958年成为正教授^[23],这大概也反映了她受到不公正待遇。

这个时期,吴健雄的最重要的工作是1949年和学生阿尔伯特(R. D. Albert)验证了费米的 β 衰变理论^[24]。这个理论是物理学史上一个伟大的理论,是费米最大的理论贡献,将量子电动力学推广到能量较低时的弱相互作用。从费米 β 衰变理论开始,量子场论从最初由Wigner和Pauli提出的形式理论,成为一个物理理论,使粒子的产生和湮没成为物理概念,最终成为粒子物理的理论框架。当时还有一些与费米 β 衰变理论竞争的理论,比如Konopinski和Uhlenbeck的理论。吴健雄发现,以前的验证实验做得不好,样品太厚。在她自己的实验中,将钴60(^{60}Co)附着在一个薄层上,她的实验非常仔细精巧,另外她有做仪器的经验和装配操作仪器的技能。这些都对她的工作起了很大的作用,这些长处也是她后来成功的很重要的因素。用杨振宁先生的话说:“费米的理论被证明正确!吴成为 β 衰变实验领域的领头科学家”^[25]。

1.4.2 正负电子湮没与量子纠缠

在发现宇称不守恒之前的时期,吴健雄还有一些其他工作,数量相对少一点,是研究正负电子湮没。正负电子可以像质子和电子那样,形成一个类

似原子的结构,叫正负电子偶素。正负电子碰到一起则发生湮没。

吴健雄在此方面的第一个工作,是与学生 Irving Shakhnov 准确验证了量子电动力学的预言^[26]。现在回过头来看,这个工作与目前物理学一个活跃领域密切相关,就是实现了光子偏振的量子纠缠。当初吴健雄和合作者做这个研究的时候,是为了验证量子电动力学的预言,但是事实上成了量子纠缠的先驱性工作。后面我用一章专门谈这个工作。

1.4.3 宇称不守恒

当然,吴健雄最重要的工作是她和合作者1956年到1957年初做的宇称不守恒实验,被称为吴实验。1956年,杨振宁和李政道先生共同提出,弱相互作用中宇称有可能不守恒,并建议了几个实验^[30]。其中一个建议是极化钴60原子核的衰变,这个建议的提出也受益于与吴健雄等人的讨论。

吴健雄与美国标准局的几位低温物理学家合作,完成了极化钴60原子核的衰变,发现宇称确实不守恒^[31],这当然是一次革命性突破。极化的意思是,自旋是确定的。宇称是否守恒在这里的表现是,衰变出的电子中,沿着和逆着原子核自旋方向的电子数目是否相等。吴实验发现不相等。后文我用一章专门谈宇称不守恒的发现。

1.5 β 衰变工作延续与矢量流守恒

在宇称革命之后,吴健雄主要在 β 衰变方面继续耕耘了很多年。不过也有一些其他工作,例如1957年她发表了一篇关于探测慢中子的气体闪烁计数器的论文。

1960到1980年代,她继续在 β 衰变方面发表了好多工作,包括双 β 衰变方面开拓性的工作。双 β 衰变现在还是粒子物理的一个前沿,因为如果双 β 衰变里没有中微子的话,可以证明中微子是Majorana型的费米子(反粒子是自身,从而一个 β 衰变产生的中微子立即被另一个 β 衰变吸收),这到目前为止还没有结论,实验还在做。这个时期,吴健雄在 β 衰变方面最重要的工作是,她和学生1963年验证的所谓矢量流守恒理论。

1956年杨振宁和李政道提出宇称不守恒的可能性,然后吴健雄领导的实验发现宇称确实不守恒。那么弱相互作用的理论究竟是什么样的?如何给出弱相互作用理论?怎么把费米的 β 衰变理论推广改进成一般的弱相互作用理论?当时有三组科学家提出矢量-轴矢量理论,也叫普适费米相互作用理论。其中一组是Feynman和Gell-Mann,他们的理论有

一个关键的假设,叫做矢量流守恒,解释了不同弱衰变(比如 β 衰变和缪子衰变)的耦合常数是相等的。这是因为原子核中的质子和中子要重正化,会产生一些虚粒子,这些虚粒子也要参与弱相互作用,所以最后就使得矢量流是守恒的,导致 β 衰变跟缪子衰变的耦合常数是一样的。Gell-Mann指出,矢量流守恒理论假设导致所谓弱磁,类似于量子电动力学中的质子跟中子的磁矩差,可以用 ^{12}B 和 ^{12}N 的衰变直接在实验上测量验证。但是他人的实验不成功。1963年,吴健雄与学生Y. K. Lee和L. W. Mo完成了这样的实验^[32],证实了弱磁,从而验证了矢量流守恒,促进了电弱统一理论的建立。吴健雄曾经总结:“弱相互作用的矢量流守恒得到了实验证实,成为当代强与弱作用的规范理论的指导原理,是矢量规范理论的必要后果”^[33]。吴健雄作为实验物理学家,站在前沿。

1.6 1970年之后的工作

吴健雄与时俱进,也做了很多其他工作。上面已经提到,1970年代时,吴健雄又回到正负电子湮没,做了一些工作。

吴健雄还研究原子核定向的技术。1957年她领导的宇称不守恒实验中,很重要的一点,是把原子核极化,或者说,原子核要定向,即把自旋方向确定下来,这是通过低温技术实现的。后来吴健雄专门研究了这项技术及其在核物理中的应用,特别是用来研究核结构。

在1970年代后期,她还做了很多用穆斯堡尔(Mössbauer)效应研究血红蛋白或其他材料的工作。所以吴健雄也是生物物理领域的先驱。

二十世纪七八十年代她还研究所谓奇异原子,这是用其他粒子,比如缪子、 π 子或其他介子来取代某个电子,研究它跟原子核的相互作用。吴健雄在这方面发表了很多文章。

吴健雄1975到1976年担任美国物理学会主席。在她的文章中,有一篇是她作为美国物理学会主席的离职演讲^[34]。从中我们可以了解到,当时美国物理学家在做什么。核物理:通过电子散射了解原子核电荷分布;质子被原子核散射;原子核吸收 π 子而跃迁到转动高激发态;缪原子(一种奇异原子,用缪子代替原子中的一个电子)验证量子电动力学;核子散射中的宇称不守恒;重离子碰撞研究快速转动的原子核、核分解。宇宙线:可能的磁单极。同步辐射应用于生物学、固体物理、化学。生物物理:在蛋白质分子中加入重原子,X射线衍射;关于血红蛋白,

同步辐射与哥伦比亚组的穆斯堡尔谱结果都揭示了各种情况的不同。固体物理:用缪子测量固体中的局域磁场。粒子物理:缪子的g-2实验检验轻子普适性;正负电子偶素;粲偶素(J/ψ)。

在上面提到的领域中,吴健雄组参与了奇异原子的研究;磁单极至今还没有找到;用穆斯堡尔谱研究血红蛋白是吴健雄组的结果;缪子的g-2实验检验轻子普适性是延续至今的一个研究领域,最近有一些进展;粲偶素(由粲夸克和反粲夸克组成)是丁肇中实验组和里希特(B. Richter)组1974年发现的,分别命名为J和 ψ ,正式名称 J/ψ ,二人分享1976年诺贝尔物理学奖。

2 正负电子湮灭与量子纠缠

1946年,为了验证量子电动力学,惠勒(John Wheeler)建议研究正负电子偶素的湮没,探测产生的光子。湮没主要来自正负电子偶素的自旋单态,即总自旋为0的量子态,因此如果轨道角动量也为0,那么总角动量即为0,从而湮没所产生的相背运动的两个光子的线偏振方向必须互相正交。用今天的话说,这两个光子是量子纠缠的。

惠勒考虑每个光子分别进入一个晶体,被电子散射,运动方向发生改变,然后分别被探测。每个光子被散射后的方向有各种可能性。他计算了两个光子的散射角(与散射前的方向的偏离)相等的情况下,散射方向垂直的概率与相同的概率之间的反对称性(二者之差除以二者之和)。非对称性既与散射角有关,也与两个光子的方位角差别有关。沃德(J. C. Ward)和普赖斯(M. Pryce)小组以及斯奈德(H. Snyder)、帕斯特纳克(S. Pasternack)和奥恩博斯特(J. Hornbostel)小组分别又做了仔细计算。

在吴健雄之前,已经有人做过实验,但是做得都不好。1950年,吴健雄和萨克洛夫(I. Shakhnov)的光子探测器的敏感度是别人的10倍,他们一锤定音,将实验做出来了,与理论值符合非常好^[26]。今天看来,这个实验结果说明两个光子确实是量子纠缠的,也就是说,这两个光子的量子态是一个整体,不能分成互相独立的各个光子的单独量子态。1935年,爱因斯坦(Albert Einstein)、波多尔斯基(Boris Podolsky)和罗森(Nathan Rosen)提出,量子力学不满足所谓的局域实在论。局域实在论类似于经典概率论,概率背后是有客观实在的,虽然我们不知道某些变量的取值。量子力学是不是也可以归结于这样的情形?爱因斯坦说不行。但是他觉得局域实在论总

是成立的,不可能违反,所以他就说,量子力学有问题,还不是完备的理论。他们的论证用到了量子纠缠态,虽然他们没有用量子纠缠这个名词。他们论文发表后,薛定谔(Erwin Schrödinger)发明了量子纠缠这个名词。

1957年,也就是宇称不守恒被发现的那一年,玻姆(David Bohm)和他的学生阿哈罗诺夫(Yakir Aharonov)指出^[27],吴健雄和萨克洛夫的实验实现了光子偏振的纠缠态。玻姆和阿哈罗诺夫用“关联”代表量子纠缠,证明了,如果光子不纠缠,就不可能出现吴健雄和萨克洛夫的实验结果。这就是为什么吴健雄的这项工作与量子纠缠关系很大。吴健雄和萨克洛夫的实验是第一次在实验上实现了一个明确的空间分离的量子纠缠态。

1960年代,贝尔(John Bell)提出局域实在论总是满足的一个不等式,后来被称作贝尔不等式(Bell inequality),而量子力学里的一些纠缠态,违反贝尔不等式,所以如果实验上证明贝尔不等式确实被违反,与量子力学一致,那说明局域实在论有问题。

为了检验贝尔不等式,实验装置需要满足一定的条件,两边测量的偏振方向,既不平行也不垂直。而吴健雄和Shakhnov实验装置所测量的方向互相平行或者互相垂直,所以不能用来检验贝尔不等式。1975年,吴健雄决定回到这个领域,和两个学生卡仕达(L. R. Kasday)、乌尔曼(J. D. Ullman)测量两个光子既不平行也不垂直的情况,得到了实验结果^[28]。他们希望测试贝尔不等式。但是这个结果并不能用来检验不等式,因为这里对光子的探测是通过康普顿散射,而康普顿散射以后,光子的飞行方向与偏振方向并不是一一对应的,而是有一个概率分布的情况。但是实验结果展示了量子纠缠。如果做两个额外假设:(1)偏振可以完美测量,(2)康普顿散射的量子力学公式是正确的,那么实验结果与量子力学一致,而与贝尔不等式不一致。

后来研究纠缠光子是用低能的光子,可以直接用偏振片测量。而高能光子能将偏振片击穿。现在量子信息科学正在蓬勃发展,低能光子是一个主要的系统。

我对于吴健雄的这部分工作做了更详细的介绍^[29]。

3 宇称不守恒的发现

3.1 θ - τ 之谜与奇异粒子

1956年,粒子物理前沿的一个谜团是 θ - τ 之谜。

θ 和 τ 似乎是两种奇异粒子(某一类粒子,具有一种叫做“奇异数”的性质,在强相互作用和电磁相互作用支配的过程中,奇异数之和保持不变),质量和寿命都一样,但是衰变不一样,分别衰变成2个和3个 π 子。每个粒子的内禀宇称用1或-1代表,衰变产物的总宇称是各个粒子的宇称相乘。每个 π 子的宇称是-1,因此如果假设衰变过程中宇称守恒,可以推论, θ 和 τ 的宇称分别是1和-1,不一样。所以有两个可能。一个可能是,两种粒子其实是同种粒子,但是宇称不守恒;另一个可能是,宇称是守恒的, θ 和 τ 这两种粒子确实不同,那么就很难理解它们质量和寿命完全一样。

1956年4月3日至6日,第6届罗切斯特会议(这个系列会议后来称作国际高能物理大会)上,杨振宁做了关于奇异粒子的综述报告。随后费曼帮布洛克(M. Block)问了上面所说的第一种可能。杨振宁说,他和李政道研究过这个问题,但是没有明确的结论^[35]。李政道在1986年的回忆中,也确认这一点,并说当时他们考虑到,如果假定宇称不守恒只是发生在 θ - τ 的弱衰变,那么可测量的效应正是已经观察到的现象^[36]。

θ 的产生途径之一是由 π^- 与质子碰撞。这个碰撞可以产生奇异粒子 Λ^0 和 θ^0 , Λ^0 又衰变为 π^- 与质子。当时关于 Λ^0 的产生平面和衰变平面之间的夹角有很多讨论。

哥伦比亚大学的斯坦伯格(J. Steinberger)研究组在布鲁克海文实验室做实验,研究了这个过程,但是“没有观测到产生和衰变的角关联有明显各向异性”,文中有个注释“我们这里希望感谢李政道就这些问题的非常有帮助的讨论以及卡普拉斯的通讯(We wish here to acknowledge some very helpful discussions with T. D. Lee on these questions, and a communication from R. Karplus)”^[37]。此文1956年6月15日收稿,9月15日发表,没有被李政道-杨振宁的诺奖论文(一周后,即6月22日收稿,10月1日发表,1957年10月获诺贝尔奖)引用^[38]。

3.2 李政道-杨振宁的理论突破

当时杨振宁在普林斯顿高等研究院,4月17日开始,在布鲁克海文实验室长期访问,李政道在哥伦比亚大学。他们的想法如下^[1-2]:将两种过程的宇称情况区分开来,一种是由强相互作用主宰的粒子产生过程,其中宇称确实是守恒的,另一种是由弱相互作用主宰的粒子衰变过程,其中宇称是否守恒需要核实;将 θ - τ 之谜扩展为一个弱相互作用普遍性问

题,就是说是整个弱相互作用的问题,所以他们考察“宇称在强相互作用与电磁相互作用中守恒,但在弱相互作用中也许不守恒”的可能,这样也就可以通过研究其他的弱相互作用过程获得知识;如果弱相互作用是违反宇称守恒的,那么 θ 和 τ 就可以是同一种粒子,只是衰变成宇称不同的末态,那么 θ - τ 之谜就迎刃而解。

他们将问题理出了头绪,并转而研究其他由弱相互作用主宰的系统,因为这是弱相互作用的普适问题。弱相互作用中研究得最多的过程就是 β 衰变,所以他们研究 β 衰变中宇称是否守恒。这是一个重大战略转移,对最后的胜利起到关键作用。

首先,他们去检查以前关于 β 衰变的实验,有没有确定宇称是否守恒。他们做了具体的理论计算:在弱相互作用中,在宇称守恒的项上,加上宇称不守恒的项,然后计算以前的实验观测量,特别是衰变发出的电子的分布。

吴健雄也在哥伦比亚大学。李政道去和她讨论,吴健雄借给李政道西格班(K. Siegbahn)编的 β 衰变文集^[36]。

杨振宁1950年和蒂欧姆诺(Jayme Tiomno)合作研究过 β 衰变,经验和结果都派上用场。在李政道-杨振宁诺奖论文中,谈到宇称守恒和不守恒的区分时,引用了杨振宁-蒂欧姆诺论文^[39]。

杨振宁和李政道的计算表明,不论宇称是否守恒,都不影响以前的实验结果,因此这些实验结果不能作为宇称是否守恒的证据。杨振宁1983年回忆,他在布鲁克海文做了个学术报告,塞诺夫(W. Selove)问,为什么以前的实验不能证明 β 衰变中宇称是否守恒,一两天后,杨振宁和李政道一起研究这个问题,领悟到,以前实验上测量的物理量都是标量,在空间反演下总是保持不变,而不涉及赝标量,所以以前的实验没有真正检验宇称是否守恒;如果实验上测量的物理量是赝标量,空间反演下是否不变就取决于宇称是否守恒了,这就是实验需要检验的^[35]。

李政道1986年回忆:“当我们停止计算,开始思考,在很短的时间里就清楚,没有证据的原因是一个简单的事实,即没人试图从一个本来似乎左右对称的装置中观测一个物理的赝标量”^[36]。

他们注意到,有一个赝标量是螺旋度,或者说自旋-动量关联。是某个动量在某个自旋方向的分量的平均值。如果宇称守恒,螺旋度为0;如果宇称不守恒,螺旋度不为0。他们想到,一个简单的验证方法是,对于一个自旋给定的原子核(叫做极化原子

核),测量它 β 衰变向上发出的电子与向下发出的电子是不是一样多。如图4所示,向右上和向左下这两个过程互为宇称变换(P),如果宇称守恒,两个过程的概率相等,也就是说,在很多这样的原子核发出很多电子时,这两个方向发出的电子数相等。实验上,可以测量非对称性,定义为两种电子数之差除以两种电子数之和。

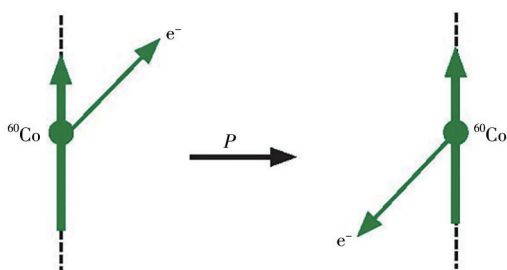


图4 极化原子核钴60的 β 衰变

左右两个情况中,电子(e^-)向相反方向发出。两者互为宇称(P)变换^[40]

Figure 4 β decay of a polarized nucleus

Left and right situations transform to each other under parity transformation^[40]

在布鲁克海文实验室,哥德哈伯(Maurice Goldhaber)向杨振宁建议用极化钴60原子核的 β 衰变来做这个实验,因为前几年牛津大学的一个低温物理研究组用低温技术实现了极化^[35]。

在哥伦比亚大学,李政道再次找吴健雄讨论,问她有没有人测量过螺旋度这样的赝标量。吴健雄说没有,建议用极化钴60原子核,因为她对这项技术已经关注了几年,而钴60的自旋性质不会导致衰变时降低可能的非对称性^[41]。1980年代,李政道回忆了第一次与吴健雄讨论时,吴健雄借书给他;第二次,与吴健雄讨论自旋-动量关联的测量^[36],所以吴健雄1973年关于赝标量讨论的回忆是指第二次,她没有提第一次借书之事^[41]。

所以极化钴60成了杨振宁和李政道的论文里面讨论的一个可能的实验系统。他们还讨论了介子和超子作为可能的实验系统^[38]。首先,宇称不守恒会给 Λ 超子带来电偶极矩。第二,考虑 π 子撞击质子,产生 Λ 超子,然后 Λ 超子衰变成 π 子和质子,用入射 π 子、 Λ 超子和产物 π 子这三个粒子的动量构成三重积,这是一个赝标量,测量这个赝标量的取值分布是不是对称的,就可以检验宇称是否守恒。杨振宁受某个讨论启发^[1],又加入了第三个实验,考虑 π 衰变为 μ ,再衰变为电子,如果宇称不守恒, μ 的自旋

多半沿着运动方向,从而类似极化原子核,电子的分布也就不对称,还提到类似过程衰变为,再衰变为质子。

在密切的科研合作中,常常合作者不分彼此,一人说出的论断可能建立在合作者的想法和意见之上,一人的反对也可能像自己的慎重考虑,甚至为了周全而故意提出反对意见,被称作“魔鬼代言人(devil's advocate)”。

3.3 吴实验的准备

吴健雄建议用极化钴60后,立即想到,这个实验对于一个 β 衰变实验家来说,是一个黄金机会,不应该放弃,即使实验做出来后,宇称是守恒的,也是有意义的,因为给出了一个宇称破坏的上限。她还觉得,自己必须在物理学界其他人意识到重要性之前,立即做这个实验。为此她放弃了原定的参加日内瓦的国际会议,然后回远东的旅行计划,而让她的丈夫袁家骝独自去,即使这本来将是她离开中国20年后第一次回去^[41]。

然后她就开始准备实验。她注意到新版的核数据改变了钴60的自旋,如果确实,这意味着钴60并不像她原来考虑的那样适合用来检验宇称是否守恒。她与助手通过实验,确定了新版的自旋是不对的,原来的是对的。这也反映了吴健雄的科学精神,不人云亦云。

吴健雄还向本系的低温组同事,特别是研究生布鲁斯·比尔瓦蒂(Bruce Biavati)了解低温技术,布鲁斯是她的研究生玛丽恩·比尔瓦蒂(Marion Biavati)的丈夫^[41]。

极化的方法是将钴60原子嵌于顺磁晶体中,具体来说是硝酸铈镁(cerium magnesium nitrate,简写CMN)晶体。低温下,较弱的磁场就使得顺磁晶体中的未配对电子沿某个方向排列,从而通过超精细相互作用,使得原子核的自旋确定在这个方向。这就是所谓的Rose-Gorter方法。通过绝热退磁实现低温,因为绝热情况下,温度正比与磁场。极化的程度通过 β 衰变产生的 γ 射线的各向异性来探测。吴健雄发现,这个实验面对两个挑战,一个是要将电子探测器放在液氮温区的低温恒温器中工作,另一个是要将钴60放在薄的CMN晶体表面层,极化要维持足够长的时间^[6]。也就是说,低温技术必须与 β 衰变研究有效地结合。

吴健雄曾邀请伽温(Richard Garwin)合作进行这个实验,因为他正在做退磁制冷机。但是伽温没有接受,因为忙于超导计算机项目(2022年我和伽

温交流过他在宇称不守恒发现过程中的工作)^[42]。伽温是费米很赏识的实验方面的学生^[43],杨振宁和李政道的同学,1949年毕业后留校任教,博士生阶段发明的“伽温符合电路”被业界广泛使用(也将在他后来参与的宇称不守恒实验中发挥作用),1952年应特勒要求,设计了第一颗氢弹,1952年底加入IBM Watson研究所,转向低温物理等领域,同时是哥伦比亚大学兼职教授。

1956年6月4日,吴健雄打电话给华盛顿的国家标准局的安伯勒(Ernest Ambler),邀请他合作,安伯勒热心地接受^[41]。在此几年前,牛津大学的柯蒂(Nicholas Kurti)领导的低温物理小组实现钴60的低温极化时,论文第一作者正是安伯勒,他是柯蒂的研究生^[44]。

6至7月,吴健雄和研究生玛丽恩做了一些准备工作,包括测试 β 探测器,考虑很多技术问题,如哪种闪烁计数器适合、光导头的形状、如何将有机玻璃光管道引出低温恒温器,能否将计数器留在低温恒温器里,磁场如何影响计数,等等^[41]。这期间,李政道-杨振宁论文6月22日收稿。

7月24日,吴健雄致信安伯勒,告知液氦温区下的 β 粒子探测实验的进展。31日安伯勒寄来低温恒温器的粗略图,然后去度假了两周。8月,吴健雄又研究磁场对 β 计数的效应、 β 粒子被CMN晶体的散射^[41]。安伯勒也做了一些准备工作,并于8月28日访问了吴健雄^[45]。

9月中旬,吴健雄去华盛顿的国家标准局,与安伯勒会面。胡德森(R. P. Hudson)、海伍德(R. W. Hayward)、霍普斯(D. D. Hoppes)后来也加入合作。胡德森是安伯勒的上司,也是柯蒂的学生。吴健雄第三次去标准局时,带去两个嵌有钴60原子核的CMN晶体,一个是薄的,其中钴60原子核均匀分布;另一个是厚的,钴60原子核只嵌于表面^[41]。前者发出的光子的各向异性分布将给出钴60原子核极化的信息,后者发出的电子的分布就给出宇称的信息。

3.4 吴实验的进行

10月1日,吴健雄和其研究生在哥伦比亚大学准备的恒温器和光导管被带到华盛顿的标准局,实验开始^[45]。10月份进行了多次退磁实验。整个合作组都付出很大努力。吴健雄和研究生比尔瓦蒂夫妇经常来到标准局参加实验工作。

12月上旬,实现了厚的CMN晶体中的钴60的极化,但是却不能实现薄的CMN晶体中的钴60的极化。为解决这个问题,他们决定将薄的CMN晶

体放入大的CMN单晶做的“房子”中。在哥伦比亚大学,借助化学助理弗莱什曼(Herman Fleishman)找到的信息,玛丽恩·比尔瓦蒂和吴健雄生长了所需要的晶体^[41]。12月13日,在标准局。用这些晶体做成了“房子”,吴健雄亲自分析测量数据^[45]。

吴健雄1973年回忆^[41],1956年12月中旬合作组首次看到很大的非对称信号,就是说,向上和向下发出来的电子数目大不一样。但是吴健雄认为,在对外宣布前,需要做系统的核实,排除其他因素。某个周四,在哥伦比亚物理楼经过李政道办公室时,遇到李政道和杨振宁,被问起实验情况,告诉他们效应很大,而且可重复,但是交代,这只是初步结果。杨振宁问,有没有人计算伽莫夫-特勒作用项和费米作用项的干涉。吴健雄说她组里的莫里塔(M. Morita)算过,她很高兴钴60 β 衰变纯粹是伽莫夫-特勒型,否则观测到的非对称性会大减。一周后,合作组开始排除其他可能因素。

根据实验组的记录本^[44],12月22日,吴健雄在场时,合作组观察到一些 β 衰变各向异性的迹象,但是还不能重复。

吴健雄1973年回忆,她1956年圣诞节前夜在纽约火车站给李政道打电话,告知实验上得到了可以重复的不对称^[41],李政道也说“我记得清楚极了,那是圣诞节前夜”^[23]。吴健雄的这个回忆有偏差,受到质疑^[45],因为圣诞夜没下雪,而且实验记录本上没有23至26日的工作记录。但这可能只是记忆上的小差错,吴健雄或许因为其他原因坐了火车,具体日期也可能是22或者23日,根据实验组记录本判断,电话告知的应该是22日观察到的各向异性迹象。

12月27日,合作组终于观察到明确的 β 衰变不对称,即宇称不守恒的迹象。当时吴健雄并不在场。胡德森回忆,28日安伯勒电话告知吴健雄,吴健雄又将消息告诉李政道和杨振宁^[45]。

伽温1973年回忆:“哥伦比亚大学物理系的很多关于物理的面对面交流发生于星期五的一个中餐馆午餐桌。1956年12月底,在这样的一次午餐中,我们得知了吴教授的钴60实验中的宇称不守恒的正结果”^[46]。

12月底的周五正好就是12月28日,所以如果胡德森和伽温的回忆都无误,可以推测,吴健雄12月28日从安伯勒电话中得到消息,可能同事们从当天的午餐会上就知悉了宇称不守恒迹象的消息。伽温在1996的一个电子邮件中说,12月28日吴健雄本

人简要汇报了实验结果^[45]。不过2022年我问伽温,是不是12月28日的午餐会上就有吴健雄实验正结果的消息,他说:“我不知道。”所以,“12月底”之说也不无可能是粗心写下,实指1月4日。莱德曼还曾在1996年的一个电子邮件说,在1956年的圣诞晚会上,人们谈论吴的实验,李政道出席了^[45]。这个“圣诞晚会”不无可能也是1月4日的午餐会。

杨振宁1983年回忆:“1956年秋,吴健雄领导的哥伦比亚-标准局实验令人满意地取得进展。她往返于纽约和华盛顿,保持让我们了解实验进展。圣诞节前后,她终于说,他们正在得到表明 β 衰变中宇称不守恒的非对称性,但是她警告说结果还很初步,因此我们不应该传播消息。我们没有,但是小道消息还是传播起来,我们接到好多电话询问或提供信息。更多的检查证实了初步的结果,吴和她的合作组揭开了保密的面纱,冲击波传遍了物理学界。那是1957年新年前后”^[35]。

1957年1月2日至12日,吴健雄在标准局^[44]。1月4日,根据实验结果,吴健雄计算出非对称参数几乎达到-1,也就是说,绝大部分电子都向与钴60极化方向相反的方向运动。

吴健雄一定当天将结果立即告知了李政道和杨振宁,因为莱德曼(Leon Lederman)回忆,1月4日李政道在周五同事午餐会上介绍,吴实验的效应很大^[47]。

1983年杨振宁说:“1月5日,我给在维京(Virgin)岛度假的奥本海默发了个电报:‘吴实验给出了大的非对称性,说明G和G'相等。因此中微子是二分量波函数’”^[35]。

最近我得到这份电报的照片(图5)。电报正文中还有一句:“这是一个纯粹的螺丝(This a pure screw)。致意(Greeting)。”“纯粹的螺丝”意思是中微子全是左旋的,螺旋度总是等于动量值;反中微子全是右旋的,螺旋度总是等于负动量值。这就是中微子的二分量理论。

DOMESTIC SERVICE		WESTERN UNION		INTERNATIONAL SERVICE	
Check the class of service desired; otherwise this message will be sent as a full rate telegram.		1206 10-21		Check the class of service desired; otherwise the message will be sent at the full rate.	
FULL RATE TELEGRAM				FULL RATE	
DAY LETTER				LETTER TELEGRAM	
NIGHT LETTER				SHIP RADIOGRAM	
NO. WORDS/CL. OF SVC.	FD. OR COLL.	CASH NO.	CHARGE TO THE ACCOUNT OF	TIME FILED	

Send the following message, subject to the terms on back hereof, which are hereby agreed to

Princeton, New Jersey, 5 January 1957

Dr. Robert Oppenheimer
Club Comanche
Christiansted
St. Croix
Virgin Islands

Wu's experiment yielding large asymmetry showing G equal to G prime STOP.
Therefore neutrino is a two component wave function STOP. It is a pure screw. Greetings. Frank

图5 杨振宁1957年1月5日发给奥本海默的电报(照片由朱安远和刘金岩提供)

Figure 5 The telegram from C. N. Yang to J. R. Oppenheimer on January 5, 1957 (Courtesy of Zhu Anyuan and Liu Jinyan)

吴实验的结果说明中微子二分量理论的正确。杨振宁和李政道在夏天已经做了宇称不守恒前提下的中微子二分量理论,但是没有投稿,因为实验上还不知道宇称是否守恒。现在他们将此文章投出,1月10日收稿^[48]。另一方面,根据李政道、欧米(Reinhard Oehme)和杨振宁三人刚完成的关于3种分立

对称性(宇称、时间反演、电荷共轭,即正反粒子)的分析,吴实验发现的那么大的宇称非对称性也说明电荷共轭对称也是违反的。他们三人的理论文章1月7日收稿^[49]。因此,吴实验不仅发现了宇称确实不守恒,还推动了杨振宁和李政道的理论工作。

3.5 后续

前面提到,杨振宁和李政道的文章里,还建议了用 π 衰变为 μ ,再衰变为电子这样的级联衰变过程($\pi-\mu-e$),宇称不守恒就导致电子的分布也不对称。他们敦促莱德曼做这个实验,因为他在哥伦比亚大学的Nevis实验室经常与这个过程打交道。莱德曼不大愿意做,因为忙于其他实验,也因为担心宇称破坏效应很小,在级联衰变中效应也就更小^[36]。杨振宁在布鲁克海文实验室遇到莱德曼时,莱德曼还曾开玩笑说,如果有一个聪明的研究生奴隶,他就回去做^[35]。

莱德曼1994年回忆:“李宣布吴正在得到的大的对称破坏的结果,而之前人们认为宇称破坏的是小的。因此,那天晚上在开车去Nevis实验室时,我思考了大的效应对 $\pi-\mu-e$ 级联过程的后果。到实验室后,我检查了温瑞奇(Marcel Weinrich)的缪子寿命实验后,我意识到,我们可以简单地将这个实验改为检验宇称”^[47]。

伽温1973年的回忆中,在上面“12月底”之说后面,又写道:“1月4日,我在Poughkeepsie,没参加每周一次的午餐。我8点左右回到家时,接到莱德曼的电话。他想出一个方法,利用以下熟知的事实,即从飞行的 π 子向前发出的缪子的能量比向后发出的缪子的能量高,得到极化的缪子……如果宇称真的不守恒,这些缪子已经极化了!我建议我们15分钟后在回旋加速器碰面”^[46]。

当晚,莱德曼与伽温、温瑞奇立即开始实验。这一夜主要用于摸索实验方法。早晨6点,因为到了周末,机器停下。周一白天又是机器维护,他们半夜才开始数据采集。凌晨3点,还没看到宇称破坏的迹象,莱德曼回家。但是3个小时后,宇称不守恒以22个标准偏差呈现出来,证明了宇称不守恒^[46]。莱德曼立即打电话给李政道:“宇称定律已死。”这是8日凌晨6:00^[47]。

现在出现了一个危机,吴实验推进了杨振宁和李政道的理论,引发了 $\pi-\mu-e$ 实验,伽温-莱德曼-温瑞奇结果已出,但是吴实验本身结论还没有完成最后确认!这段时间是合作组最紧张的阶段,但是合作组不松懈,直到排除其他因素,完全确认结果。10号凌晨庆祝宇称破坏。后面2天又做了对照实验。12号下午,合作组对论文最后定稿^[45]。

13日上午^[45],在哥伦比亚大学物理楼831房间^[22],吴健雄、安伯勒、海伍德、胡德森、伽温、莱德曼、李政道、杨振宁开了一次会,由哥伦比亚大学物

理系元老拉比(I. Rabi)主持。

1月15日,哥伦比亚大学在拉比的办公室召集了新闻发布会,拉比主持,吴健雄、安伯勒、海伍德、胡德森、伽温、莱德曼、李政道参加。次日纽约时报头条报道。两个组的论文1月15日投稿,2月15日背靠背同时发表,吴组的文章在前。吴组的论文是吴健雄起草的,她将自己名字放在首位,遗憾和不公的是,没有署研究生比尔瓦蒂夫妇的名字,而且后来还让玛丽恩换了博士论文题目。

弱相互作用中宇称不守恒是由吴健雄小组首先发现的。伽温-莱德曼-温瑞奇实验是在知道吴健雄的结果以后才做的。他们的文章最后声明:“我们感激吴健雄教授关于钴60的初步结果的报告,这在本实验前于哥伦比亚大学的讨论中扮演了重要角色”^[50]。1997年,伽温和莱德曼重申,他们的实验是由吴在1月4日星期五的午餐报告激发,并从当天晚上到1月8日做出来的,同时也作证吴是钴60实验的发起者^[51]。这里说的吴的午餐报告应是李政道的,因为莱德曼的书上有详细描述,而且吴健雄那几天在华盛顿。

另外,芝加哥大学的泰莱格第(Valentine Telegdi)和弗里德曼(Jerome Friedman)从夏天开始独立进行 $\pi-\mu-e$ 实验,但是进行很慢。他们的探测基于乳胶法,而伽温-莱德曼-温瑞奇实验的探测是基于伽温符合计数器等电子学方法。泰莱格第和弗里德曼在知道有关吴健雄实验和伽温-莱德曼-温瑞奇实验的消息后,匆忙投稿,但是置信度不够,所以经改进后,迟了一期才发表^[52-53]。

1957年,李政道、杨振宁、斯坦伯格、芬博格(G. Feinberg)、卡比尔(P. Kabir)和合作者仔细分析了超子衰变的宇称问题^[54]。接着,斯坦伯格组实验确认,在超子衰变中宇称确实不守恒^[55]。理论文章引用了斯坦伯格组1956年的文章,实验文章反而没有引用。

1957年到1958年,有一些 β 衰变电子的双散射实验也展现出宇称不守恒。莫特(N. Mott)1928年指出,由于自旋-轨道耦合,电子相继被两个库伦电场散射时,散射截面正比于由电子源和两个散射点所决定的一个矢量与自旋的标量积,这就是一个赝标量,因此它在两个相反方向的不相等就代表了宇称不守恒。

1958年,哥德哈伯、格罗津斯(L. Grodzins)、桑亚尔(A. Sunyar)用中微子的纵向极化研究宇称不守恒的程度。格罗津斯想到,会不会有早期的 β 电

子其实已经显示宇称不守恒。他查到^[56],1928年至1930年考克斯(R. Cox)和他的学生蔡斯(C. Chase)关于 β 电子双散射的一系列实验确实已经显示宇称不守恒^[57]。他们用放射性镭发出的 β 电子。但是,这些工作太超越时代,超越当时的物理,以至于被忽略。

3.6 关于宇称不守恒的小结

1956年,杨振宁和李政道经具体计算发现,以前并没有实验证明在弱相互作用中宇称是否守恒,并指出几类弱相互作用关键性实验,以测试弱相互作用中宇称是否守恒,但是他们并没有说宇称一定守恒或者不守恒^[22]。事实上他们当时也提出了宇称守恒框架下的宇称双重态来解决 θ - τ 之谜。宇称是否守恒需要实验裁定。

长期以来,宇称守恒有着直觉吸引力,被当作自然、神圣的,而且非常有用,特别是在核物理方面。因此李政道-杨振宁的论文受到普遍的轻视、异议乃至嘲弄^[57]。吴健雄决定做钴60的 β 衰变实验,这需要极大的勇气。如果李政道-杨振宁论文对宇称是否守恒给出明确的理论预言,那么反而会有很多人抢做实验。

吴健雄最初决定去做这个实验,以及伽温-莱德曼-温瑞奇实验结果出来后吴健雄坚持继续对吴实验完成核实,都体现出吴健雄伟大的科学精神。合作者的贡献必不可少、非常重要,他们中有这样那样的不快,对吴健雄有意见^[1],而且吴健雄对低温技术不熟悉,对参与宇称工作的研究生不公,她的回忆也有这样那样的问题^[44]。但是最重要的事实是,吴健雄发起、组织和领导了这个实验,是这个实验的灵魂人物。因此,这个实验被称为“吴实验”是恰当的。

杨振宁说:“吴健雄的工作以精准著称于世,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守恒的实验,为什么她肯去做此困难的工作呢?因为她独具慧眼,认为宇称守恒即使不被推翻,此一基本定律也应被测试。这是她的过人之处”^[58]。

李政道说:“我对健雄讲了一下高能物理中K介子的 θ - τ 之谜,同时也讲了一下原因可能是宇称不守恒。假如宇称不守恒, β 衰变中一定可以做出结果的。怎么去检验?那天我们讨论了很多方案,用 ^{60}Co 是健雄提出来的。我离开以后,她认为这是一个‘黄金机会’,也是对她的一个挑战。因为这类实验从来没有人做过,虽然宇称这个观念在 β 衰变里已经用得很多了,而且大家都以为宇称守恒当然

是对的,可是从来没有被检验过。所以这个实验是很难的,是一个挑战……健雄是个事业心很强的女性,她的个性、决断力也是很强的,而且极有毅力,为了科学事业她是很能舍却自己的利益的”^[23]。宇称不守恒被发现后,人们知道 θ 和 τ 是同一种粒子,叫做K介子。

吴实验证明弱相互作用中宇称确实不守恒,引起整个物理学界的巨大震荡,成为20世纪物理学最重要的实验之一。克罗宁(James W. Cronin)因发现电荷共轭-宇称联合不守恒而获得1980年诺奖,他曾经说:“吴健雄的伟大发现开启了粒子物理的黄金时代。”当然,这个实验发现的缘起是杨振宁和李政道伟大的开创性的理论突破。

我在南京大学读书的时候,有幸听过吴健雄作为校友的演讲,还记得当时的情景,她用英文单词ball来描述一个球,现在想来,大概她谈到钴60原子核。

4 吴健雄:伟大的实验物理学家

我们可以总结出吴健雄的一些特质:聪慧、沉静、勤奋、努力、专注、不畏困难、献身科学。她做到了儿时听她父亲所说:“不怕困难、埋首努力、前行不止”^[1]。

正如杨振宁所说,“吴健雄以实验精准著称”。这有中国女性特长的成分,更是科学精神的体现。希望这一点能鼓励更多的女性,特别是中国女性,投身科学。

她的研究领域和成就与她的多年积累和专长密切相关。她重视发展实验技术和仪器,又重视物理意义,掌握重要理论,并用实验验证理论。她从学生时代一直就工作在相关领域,特别是 β 衰变。

她的实验工作有重大理论意义,如验证费米的 β 衰变理论、量子电动力学对光子符合的预言、宇称不守恒、矢量流守恒、双 β 衰变,说明她一直追踪当时的前沿理论。

无论是要证伪还是证实某个重要理论,她都去做,认为即使常识上似乎是显然的,如果缺少实验证据,就值得去做。

我认为最可贵的一点是:将科学严谨置于竞争和荣誉之上。这充分表现了她的科学精神。她是有竞争心的,但是即使优先权和功劳面临危险,却仍然要规范在科学的严谨性之下。在优先权和功劳面临危机时,别人已经得到非常清楚的实验结果时,还要坚持仔细核实自己的结果。这是非常可贵的。事实



图6 1958年普林斯顿大学授予吴健雄(前左二)、杨振宁(前右二)、李政道(前右一)等人名誉博士学位^[1]

Figure 6 C. S. Wu (front row, second from left), C. N. Yang (front row, second from right), T. D. Lee (front row, first from right) and others received honorary doctoral degrees from Princeton University in 1958^[1]

上,宇称不守恒的吴实验虽然在发表上受到尊重,但独创性确实受损。这也是她失去诺奖的重要因素之一。如果不存在 Garwin-Lederman-Weinrich 实验,她有极大可能分享诺奖,未获诺奖的诸种原因就难以起作用。1978年,吴健雄成为首位沃尔夫奖获得者。

前面引用了杨振宁对吴健雄的评价,那段话是杨振宁先生1997年4月为吴健雄85周岁所写。后来,杨振宁又写过“我曾经说过科学研究要成功,有三个必要的条件:眼光、坚持、动力。吴健雄是三者具备。她的关于宇称不守恒的实验进行起来困难非常多,《吴健雄传》的第九章生动地描述了她如何坚持,与如何以动力克服了种种困难。而最重要的是她的眼光:当时许多别的一流物理学家都认为这么困难的实验,做出来只不过是再证明宇称确实是守恒,不值得去做。可是她‘独具慧眼’,认为在弱相互作用中宇称守恒不守恒过去既未被人研究过,那么不论结果如何,这就是值得做的实验。这是她眼光过人的地方”^[59]。

李政道说:“她是20世纪最杰出的物理学家之一,在实验物理学研究上取得了伟大的成就,对当代物理学的发展起了极重要的推进作用”^[23]。

李政道还说:“爱因斯坦曾写过这样一段话‘我们不要只记得她对人类工作上的贡献。比起她纯学

识上的成功而言,她在道德上、人格上的崇高品质对将来、对历史的作用更为重要……她的力量、她的愿望的单纯……她的科学客观的认识,她的坚忍不拔,这些优秀品格每一样都难能可贵,而集中在一个人身上更是非常非常难得的……一旦她认定了一条路是正确的,她就坚决地走下去,绝不改变。’我认为,我们怀念吴健雄,把爱因斯坦称赞居里夫人的话用在她身上是再恰当不过了”^[23]。

1958年,李政道、杨振宁、吴健雄同时获得普林斯顿大学名誉博士学位(图6)。

吴健雄的科学人生处于20世纪中国和世界历史背景中。吴健雄的老师 Segrè 说(杨振宁演讲中引述过):“这三位中国物理学家(注:指吴健雄、杨振宁、李政道)显示未来中国对物理学的贡献可以多大,如果这个伟大的国家度过革命骚乱的时期,回到以前欧洲旅行者惊讶目睹到的文明领袖之一的角色”^[60]。

参考文献:

- [1] 江才健. 吴健雄:物理科学的第一夫人[M]. 上海:复旦大学出版社,1997.
- [2] 施士元. 施士元:回忆录及其他[M]. 南京:南京大学出版社,2007.
- [3] 王凡. 追忆施士元先生[J]. 现代物理知识,2007,19

- (6): 66-67.DOI:10.13405/j.cnki.xdwz.2007.06.015.
- [4] 杨慧. 居里夫人的中国弟子[J]. 现代物理知识, 2007, 19(6): 67-68.DOI:10.13405/j.cnki.xdwz.2007.06.016.
- [5] 肖太桃. 吴健雄: 于纷繁复杂中发现简单图景[N]. 中国科学报, 2019-2-20(5).
- [6] SZE S Y. Theory of the effect of thermal agitation on the reflection of x-rays by crystals[J]. *Chinese Journal of Physics*, 1936 (2): 124-127.
- [7] 施郁. 中央大学和金陵大学的物理学科[J]. 新兴科学与技术趋势, 2023, 2(3): 298-321.DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2023.03.007.
- [8] 王伟. 著名实业家吴琢之和享誉东南的江南汽车公司[N]. 江苏经济报, 2017-09-29(5).
- [9] WU C S. The Continuous X-Rays Excited by the Beta-Particles of $^{15}\text{P}32$ [J]. *Physical Review*, 1941, 59(6): 481-488.DOI:10.1103/PhysRev.59.481.
- [10] SEGREGRE E, WU C S. Some Fission Products of Uranium[J]. *Physical Review*, 1940, 57(6): 552.DOI:10.1103/PhysRev.57.552.3.
- [11] WU C S. Identification of Two Radioactive Xenons from Uranium Fission[J]. *Physical Review*, 1940, 58(10): 926.DOI:10.1103/PhysRev.58.926.
- [12] WU C S, SEGREGRE E. Radioactive Xenons[J]. *Physical Review*, 1945, 67(5-6): 142-149.DOI:10.1103/PhysRev.67.142.
- [13] WU C S, FRIEDLANDER G. Radioactive Isotopes of Mercury[J]. *Physical Review*, 1941, 60(10): 747-748.DOI:10.1103/PhysRev.60.747.
- [14] FRIEDLANDER G, WU C S. Radioactive Isotopes of Mercury[J]. *Physical Review*, 1943, 63(7/8): 0227-0234.DOI:10.1103/PhysRev.63.227.
- [15] FEYNMAN R P. Surely You're Joking, Mr. Feynman![J]. *American Journal of Physics*, 1985, 53(12): 1214-1216.DOI:10.1119/1.14087.
- [16] 词条“Stan Frankel”. 维基百科[Z/OL].[2024-06-06].https://en.wikipedia.org/wiki/Stan_Frankel.
- [17] CHRISTY I J. Achieving the Rare: Robert F Christy's Journey in Physics and Beyond[M]. Singapore: World Scientific, 2013.
- [18] MCGRAYNE S B. Nobel Prize Women in Science[M]. Washington D C: Joseph Henry Press, 1998.
- [19] Petite Chinese Girl Shows Research in Atom Smashing[N]. *Oakland Tribune*, 1941-04-25.
- [20] 词条“Gladys Anslow”. 维基百科[Z/OL].[2023-10-16].https://en.wikipedia.org/wiki/Gladys_Anslow.
- [21] ANDERSON H L. John Ray Dunning 1907-1975, Biographical Memoirs[J]. *National Academy of Sciences* 58, 1989:163-186.
- [22] Rhodes R. The Making of The Atomic Bomb[M]. New York: Simon & Schuster, 1986.
- [23] 李政道. 吴健雄与宇称不守恒实验[J]. 科学, 1997, 49(5): 3-10+2.
- [24] WU C S, ALBERT R D. The Beta-Ray Spectra of $\text{Cu}64$ and the Ratio of $N + /N - [J]$. *Physical Review*, 1949, 75(7): 1107.
- [25] YANG C N. C. S. Wu's Contributions: A Retrospective in 2015[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2015, 30(20): 1530050. DOI:10.1142/S0217751X15300501.
- [26] WU C S, SHAKNOV I. The Angular Correlation of Scattered Annihilation Radiation[J]. *Physical Review*, 1950, 77(1): 136.
- [27] BOHM D, AHARONOV Y. Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky[J]. *Physical Review*, 1957, 108(4): 1070-1076.
- [28] KASDAY L R, ULLMAN J D, WU C S. Angular correlation of compton-scattered annihilation photons and hidden variables[J]. *Il Nuovo Cimento B* (1971-1996), 1975, 25(2): 633-661.
- [29] 施郁. 粒子物理中量子纠缠的历史起源[J]. 物理学进展, 2023, 43(3): 57.DOI:10.13725/j.cnki.pip.2023.03.001.
- [30] LEE T D, YANG C N. Question of Parity Conservation in Weak Interactions[J]. *Physical Review*, 1956, 104(1): 254-258.
- [31] WU C S, AMBLER E, HAYWARD R W, et al. Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay[J]. *Physical Review*, 1957, 105(4): 1413-1415.
- [32] LEE Y K, MO L W, WU C S. Experimental Test of the Conserved Vector Current Theory on the Beta Spectra of $\text{B}12$ and $\text{N}12$ [J]. *Physical Review Letters*, 1963, 10(6): 253-258.
- [33] WU C S. The Universal Fermi Interaction and the Conserved Vector Current in Beta Decay[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1964, 36(2): 618-632.
- [34] WU C S. The state of US physics—1976[J]. *Physics Today*, 1976, 29(4): 23-30.
- [35] YANG C N. Selected Papers, 1945-1980, with Commentary[M]. Maryland: Freeman W H, 1983.
- [36] LEE T D. Selected Papers: Weak Interactions and Early Papers[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 1986.
- [37] BUDDE R, CHRETIEN M, LEITNER J, et al. Properties of Heavy Unstable Particles Produced by 1.3-Bev π^- Mesons[J]. *Physical Review*, 1956, 103(6): 1827-1841.

- [38] LEE T D, YANG C N. Question of Parity Conservation in Weak Interactions[J]. *Physical Review*, 1956, 104(1): 254-258.
- [39] YANG C N, TIOMNO J. Reflection Properties of Spin $\frac{1}{2}$ Fields and a Universal Fermi-Type Interaction[J]. *Physical Review*, 1950, 79(3): 495.
- [40] SHELDON E. Nuclear and Particle Physics: An Introduction, 2nd edition, by B.R. Martin[J]. *Contemporary Physics*, 2010, 51(4): 369-370. DOI: 10.1080/00107510903223576.
- [41] WU C S. One Researcher's Personal Account, Discovery Story I, Adventures in Experimental Physics[M]. Singapore: World Science Communications, 1972.
- [42] HARGITTAI I, HARGITTAI M. Candid Science VI[M]. Singapore: World Scientific, 2006.
- [43] BROAD, WILLIAM J. "Physicist and Rebel Is Bruised, Not Beaten" [N]. *The New York Times*, 1999-11-16.
- [44] AMBLER E, GRACE M A, HALBAN H, *et al.* Nuclear Polarization of Cobalt 60 [J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1953, 44(349): 216-217.
- [45] ZHU Y. Chien-Shiung Wu: An Intellectual Biography [M]. Cambridge: Harvard University, 2001.
- [46] GARWIN L R. One Researcher's Personal Account, Discovery Story II, Adventures in Experimental Physics [M]. Singapore: World Science Communications, 1972: 124-127.
- [47] LEDERMAN L M, TERESI D. The God Particle: If the Universe is the Answer, what is the Question? [M]. Delta: Mariner Books, 1994.
- [48] LEE T D, YANG C N. Parity Nonconservation and a Two-Component Theory of the Neutrino [J]. *Physical Review*, 1957, 105(5): 1671-1675.
- [49] LEE T D, OEHME R, YANG C N. Remarks on Possible Noninvariance under Time Reversal and Charge Conjugation [J]. *Physical Review*, 1957, 106(2): 340-345.
- [50] GARWIN R L, LEDERMAN L M, WEINRICH M. Observations of the failure of conservation of parity and charge conjugation in meson decays: the magnetic moment of the free muon [J]. *Physical Review*, 1957, 105(4): 1415-1417.
- [51] GARWIN R L, LEDERMAN L M. History of parity violation experiment [J]. *Nature*, 1997, 386(6625): 542-543.
- [52] FRIEDMAN J I, TELEGGI V L. Nuclear Emulsion Evidence for Parity Nonconservation in the Decay Chain [J]. *Physical Review*, 1957, 105: 1681.
- [53] GOUDSMIT S. One Researcher's Personal Account, Discovery Story II, Adventures in Experimental Physics [M]. Singapore: World Science Communications, 1972: 137.
- [54] LEE T D, STEINBERGER J, FEINBERG G, *et al.* Possible Detection of Parity Nonconservation in Hyperon Decay [J]. *Physical Review*, 1957, 106(6): 1367.
- [55] EISLER F, PLANO R, PRODELL A, *et al.* Demonstration of Parity Nonconservation in Hyperon Decay [J]. *Physical Review*, 1957, 108(5): 1353.
- [56] GRODZINS L. One Researcher's Personal Account, Discovery Story II, Adventures in Experimental Physics [M]. Singapore: World Science Communications, 1972: 154.
- [57] COX. One Researcher's Personal Account, Discovery Story II, Adventures in Experimental Physics [M]. Singapore: World Science Communications, 1972: 145.
- [58] 施郁. 物理学之美: 杨振宁的13项重要科学贡献[J]. *物理*, 2014, 43(1): 57-62. DOI: 10.7693/wl20140107.
- [59] 杨振宁. 曙光集: 生活·读书·新知 [M]. 北京: 三联书店, 2008.
- [60] SEGRÈ E. From X-rays to Quarks [M]. New York: Dover Publications, 2007.



施郁,男,教授。1989年本科毕业于南京大学物理系,此后曾在该校天体物理专业和理论物理专业读研究生。1994年获理论物理博士学位。此后在复旦大学物理系、巴伊兰大学物理系、剑桥大学卡文迪许实验室凝聚态理论组、剑桥大学应用数学与理论物理系高能物理组、科隆大学理论物理研究所引力物理组、伊利诺伊大学物理系以及清华大学高等研究中心工作。2005年起,任复旦大学物理系教授、博士生导师。其中2010至2011年,曾作为“杰出青年数学物理高级研究学者”在得克萨斯大学奥斯汀分校工作。2023年4月起,任中国科学技术大学人文学院与物理学院双聘教授;社会兼职:*International Journal of Modern Physics B*; *Modern Physics Letters*;《物理》编委;全国量子力学研究会副理事长;他的理论物理工作涉及量子物理与量子信息、凝聚态物理和粒子物理等领域,作为通讯作者,在国际SCI期刊发表论文约100篇。在物理学史方面,他对现当代物理学史以及爱因斯坦、杨振宁等现当代物理学家有一定的研究,独立发表物理学史和物理科普文章约150篇。Email:yu_shi@ustc.edu.cn

(责任编辑:彭 鹏)