

吴健雄教授的科学贡献

陆 埏[†]

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(粒子-核-宇宙学联合研究中心 南京大学-紫金山天文台 南京 210093)



图1 20世纪50年代的吴健雄

我很高兴来健雄职业技术学院,来太仓,来吴健雄教授的故乡,参加她诞辰95周年纪念座谈会。今年还是她逝世10周年,也正好是她发现宇称不守恒50周年。在这个重要的纪念日子里回顾一下她的科学贡献是有意义的^[1-4]。

吴健雄1912年5月31日生于江苏省太仓县浏河镇。1934年毕业于中央大学(现南京大学、东南大学的前身),两年后进入美国加利福尼亚大学,于1940年获博士学位。1952年任哥伦比亚大学副教授,1958年升为教授,1972年起担任普平(Pupin)讲座教授,直到1980年退休。其间,她1958年被选入美国科学院,1975年任美国物理学会主席。

吴健雄教授一生中获得超过许多奖励和荣誉。1975年,美国总统授予她国家科学勋章,1978年,她又获得了Wolf基金会首次颁发的奖金,1964年,美国国家科学院授予她康斯托克(Cyrue B. Comstock)奖,1990年3月11日,国际小行星中心和小行星命名委员会公布了将紫金山天文台1965年9月20日发现的2752号小行星命名为“吴健雄星”,1991年又获普平奖章。她被北京大学、南京大学和中国科技大学等许多大学授予名誉教授称号。

1 第一个推翻弱作用中的宇称守恒定律

我第一次见到吴健雄这个名字是我在北京大学物理系读书的时候,那时在原子核物理书中看到过“C. S. Wu”。当我读到四年级时,那是1957年的春天,吴健雄的名字突然出现在几乎每天的报刊上,报

道她第一个用实验验证李政道和杨振宁的理论预言,发现那个几乎是天经地义的宇称守恒定律在弱作用中不成立,以及随后全世界许多实验室在各种弱作用过程中也相继证明宇称是不守恒的。这是一个基础科学领域内极为罕见的在新闻界持续了相当长时间的轰动性事件!

20世纪五、六十年代是粒子物理发展的颠峰时期。1956年,为了解释粒子物理上出现的 $\tau-\theta$ 之谜,李政道和杨振宁研究了各种原子核过程和粒子过程,发现那时所有已经做过的实验都没有证明过弱作用中宇称是否守恒,因而建议了一批可以检验弱作用中宇称是否守恒的实验^[5]。为什么以前人们都没有看出这一点,甚至还误认为宇称守恒是早已被验证了的?原因在于,宇称守恒就是左右对称,这个“定律”一直被认为是天经地义、自然成立的。甚至人们在测量 β 衰变发射的 β 粒子角分布时,往往只测左边一半,因为他们认为“右边一半根据宇称守恒定律必定同左边一样,不必再测”!因此,在李政道和杨振宁提出弱作用中宇称可能不守恒后,并不是马上就有人响应去做实验,大物理学家泡利(W. Pauli)甚至写信给另一位大物理学家韦斯科夫(Victor Weisskopf)打赌:如果宇称不守恒,他愿意输一笔巨款。吴健雄却“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。(见杨振宁题词^[6],图2)。正是基于这一认识,她全力投入了这个实验。

原则上,要检验宇称是否守恒,得安排两套实验:一套是另一套在镜子里的像。吴健雄选择的实验是要测量放射性原子核 ^{60}Co 沿自旋方向和相反方向发射出来的 β 粒子数是否一样多,见图3(a)^[7]。图的中间线代表一面镜子,吴健雄测量的正好是镜子两边互为镜像的情形。其实,图3(a)右下部分转 180° 就变成左上虚线所示部分,而这个虚线部分正好就相当于 ^{60}Co 反过来转动的情形。实际上,虚线

[†] Email: l.lu@mail.pmo.ac.cn

吴健雄的工作以精準著称于世，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，此一基本定律也终被测试。这是她过人之處。

杨振宁 九七年四月

图 2 杨振宁题词

部分正好可以将 ^{60}Co 原子核的自转反个方向而后仍用左下的探测器来测量。 ^{60}Co 原子核自转方向的改变可用线圈电流方向控制。因此，吴健雄的实验只需要用一个探测器，见图 3 (b)，其中葱晶体就是测量 β 粒子的探测器，而两块 NaI 晶体是通过测量同时放射出的 γ 射线来监测 ^{60}Co 原子核极化程度的。在线圈电流改变方向前后各测一次，就相当于进行了图 3 (a)左右两边的测量。吴健雄测出的结果显示两者差别很大，表明左右很不对称，从而推翻了宇称守恒定律。

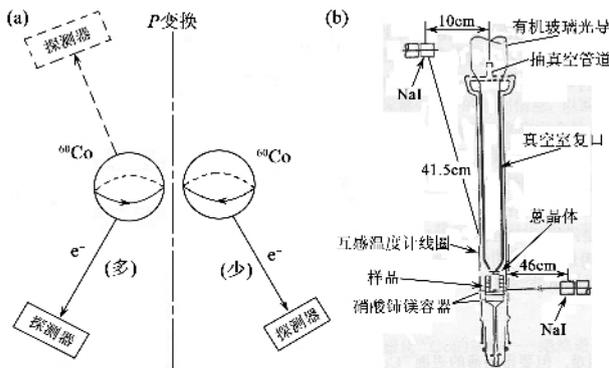


图 3 吴健雄实验的示意图

这个实验有一定难度。为了把 ^{60}Co 的核自旋整齐地排列起来，使得 ^{60}Co 的核极化，必须把它们放置在很强的磁场中，且保持在 0.01K (离绝对零度只有约百分之一度) 的极低温度下，否则热运动会破坏核的整齐排列。在 ^{60}Co 原子核整齐排列的情况下，测量衰变放射出的向上和向下的 β 粒子数是否一样多，就可以判定宇称是否守恒。她与美国国家标

准局的四位学者(安勃勒(E. Ambler)、海华德(R. W. Hayward)、豪泊斯(D. D. Hoppes)和胡德森(R. P. Hudson))合作，利用那里的低温设备，经过约半年的努力，在 1957 年初明确地测出了沿 ^{60}Co 的自旋方向发射出的 β 粒子计数率远比相反方向的少得多，从而得到了宇称不守恒的确凿结论(这个实验同时也确凿地推翻了电荷共轭对称性)^[8]，轰动了整个物理学界，使杨振宁和李政道当年就获得了诺贝尔物理奖。这个发现也使人们对中微子的认识有了很大改变，原来认为是 4 分量的，现在却发现只有 2 分量。那位首先提出中微子概念并为宇称守恒打赌的大物理学家泡利在得知吴健雄发现宇称不守恒的实验结果后感慨地写信给吴健雄说：“无论如何，我祝贺你(与我自己的情形相反)。这小粒子中微子(对此我并不陌生)仍然纠缠着我。”在那期间，吴健雄常被邀请去作各种报告，讲解宇称问题。1 月底在纽约召开的美国物理学会年会上，也为这个题目特别安排了一场讲演。

李政道为吴健雄墓(在江苏省太仓市浏河镇明德学校)所作的物理设计见图 4，中间的玻璃板象征一面镜子，两边的石球代表 ^{60}Co 原子核，它们向相反方向旋转，正表示互为镜像。两个石球向上喷的水柱代表发射的 β 粒子数，左右两边水柱高度明显不同，象征 β 粒子数相差很大，正表示了宇称不守恒。

吴健雄的这一工作完全达到了诺贝尔奖水平。至于为什么没有授予她，众说纷纭。谜底也许不久就会透露出来，因为诺贝尔奖的档案 50 年后才能解密。杨振宁和李政道 1957 年获奖的档案，今年(2007)应该就可以解密。当时曾有一种说法，说是因为有许多实验几乎同时都证明宇称不守恒，同一项目的诺贝尔奖不可能给许多人。比如与吴健雄的文章发表在同期刊物上，且紧靠着，仅一页之差，就有另一篇加尔文(R. L. Garwin)、勒德曼(L. M. Lederman)和温利希(M. Weinrich)的验证宇称不守恒的文章^[9]。不过，请注意，在加尔文等人的文章中明确写明，他们是在得知吴健雄等实验的初步结果后才决定做实验的。同一刊物的下一期发表的伏利德曼(J. I. Friedman)和特勒格迪(V. L. Telegdi)的文章^[10]又写明他们的实验是在得知加尔文等人的结果后才完成的。所以，吴健雄是第一个用实验来验证宇称不守恒的人，所有其他实验都是在得知她的实验结果后才开始做的，她的首创性没有任何疑问。

从 1957 年 1 月 2 日至 8 日这一个星期是吴健雄在美国国家标准局与其他 4 位合作者进行实验检

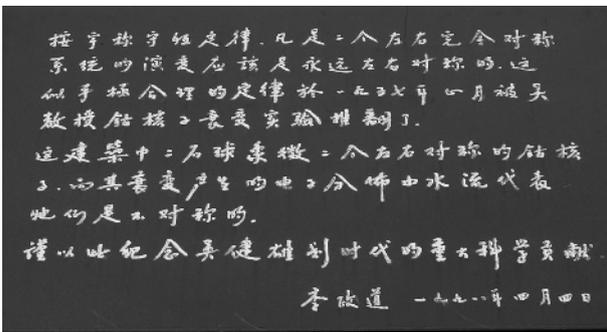
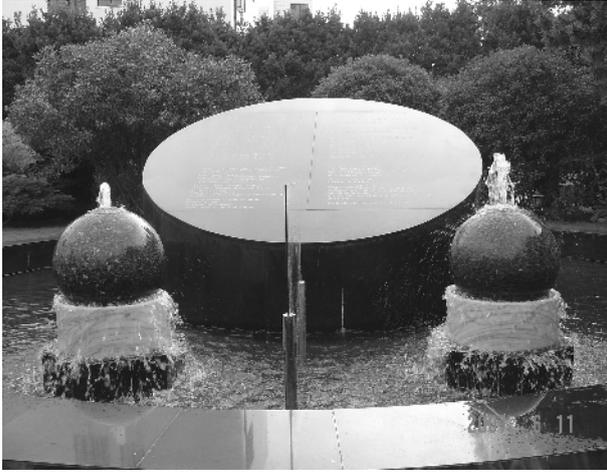


图4 吴健雄墓及李政道写的碑文

验最紧张的一段时间。1月9日凌晨2点,他们小组举行了组内庆祝。1月10日夜,吴健雄匆匆赶回哥伦比亚大学。1月15日下午,哥伦比亚大学物理系召开紧急会议,向公众宣告宇称守恒定律被推翻。

2 β 能谱学的精确研究

吴健雄所以能作出如此重大的发现,是与她极好的实验基础分不开的。事实上,早在20世纪40年代,她已经是一位出色的实验核物理学家,尤其是在 β 衰变的实验研究方面。

β 衰变是三种放射性现象中最神奇、最微妙、也最富有革新内容的一种,它是核物理中的一种典型的弱作用过程。它的连续谱特性甚至使玻尔(N. Bohr)等人怀疑过能量是否守恒!为了挽救能量守恒,泡利(W. Pauli)提出了令人难以捉摸的中微子假设。在吴健雄开始研究 β 衰变时,人们已经知道费米(E. Fermi)在中微子假设基础上提出的 β 衰变理论,但是这个理论在那时还没有被证实,中微子也还没有被发现。费米理论所预言的 β 能谱包括有容许谱以及各级禁戒谱。那时人们的实验结果甚至与

最简单的容许谱也不相符合,特别是其低能端有过剩电子。吴健雄与艾伯特(R. D. Albert)合作,将放射源做得足够均匀、足够薄,对 ^{64}Cu 的 β 谱进行了仔细的测量,消除了低能电子过剩,得到的结果与费米理论预言的容许谱符合得非常好。这个结果很快得到了许多人的证实。为了对费米理论进行彻底检验,还必须对各种禁戒谱进行测量。吴健雄与她的合作者进行了一系列的实验,对禁戒谱(特别是唯一禁戒谱)的测量,也支持了费米的 β 衰变理论。吴健雄的这些工作澄清了当时存在的许多严重分歧,对于 β 衰变机制的确立起了关键性的作用^[11]。

正是由于她在 β 衰变实验研究方面造诣很深,且精通这个领域的实验技巧,又有持之以恒的毅力,才使她能够第一个作出推翻宇称守恒定律的划时代贡献。

3 第一个证明弱矢量流守恒定律

在宇称不守恒被发现以前,弱作用被误认为由标量(S)和张量(T)两种流产生,但在宇称不守恒被发现以后,弱作用的正确形式就很快确定了下来,它是由矢量(V)流和轴矢量(A)流产生的。众所周知,电磁作用是电流与电磁势相耦合。电流是一种矢量流,这种流是守恒的(即电荷守恒)。最早,葛尔希坦(S. S. Gershtein)和泽尔多维奇(I. B. Zeldovich)于1955年提出了弱矢量流也守恒的可能性^[12],但那时人们甚至还不知道弱作用中是否有矢量流参与。只有到宇称不守恒被确立以后,人们才知道弱流由矢量流和轴矢量流组成(即所谓的V-A理论)。1958年,在宇称守恒被推翻以后,费曼(R. P. Feynman)和盖尔曼(M. Gell-Mann)再一次提出弱矢量流守恒的假设^[13]。

弱矢量流守恒定律的实验检验在于比较同位旋三重态(自旋宇称为 1^+ , ^{12}B 的基态、 ^{12}C 的15.11 MeV激发态和 ^{12}N 的基态)向同位旋单态(自旋宇称为 0^+ , ^{12}C 的基态)的跃迁,测定 ^{12}B 和 ^{12}N 衰变的 β 能谱的形状修正因子,并作出比较。虽然已有人做过这种实验,但终未获确切结论。1963年,吴健雄和她的合作者首次成功地完成了这个实验,确证了弱矢量流守恒。这个实验的意义非常深刻,它不仅建立了一条新的守恒定律,而且也弱作用和电磁作用的统一成功地铺设了第一块里程碑。

这里有一段有趣的插曲。无论弱矢量流,还是弱轴矢量流,均可以有G宇称不同的项。所谓G宇

称,是指电荷对称和电荷共轭的联合作用。弱流中具有与通常项的 G 宇称相反的项就称为第二类弱流。吴健雄和她的合作者验证弱矢量流守恒的实验同时也证明不存在第二类弱流。20 世纪 70 年代,吴健雄和她的合作者 1963 年的那个著名实验^[14]受到了两方面的指责:一方面,有人声称在一些实验中存在着不小的第二类弱流;另一方面,还有人指责她们在分析数据时用了有些问题的 Bhalla - Rose 的 β 衰变 Fermi 函数。1977 年,吴健雄等人仔细地研究了这个问题,发现当改用正确的 Behrens - Janeoke 的 β 衰变 Fermi 函数重作计算,固然会大大改变 $^{12}\text{B} - ^{12}\text{N}$ 的 β 能谱的形状因子,然而当实验中所用的分支比和 ft 值等参数也改用更好的新值后,却正好对该形状因子产生了相反的影响,使弱矢量流守恒的结论依然成立^[15]。显然,1963 年的那篇文章,问题仅仅出在所用别人的结果,吴健雄等人的实验数据本身精确无误。这再一次告诉我们,吴健雄的实验是可靠的。同时,许多实验也明确否定了第二类弱流的存在。

1977 年 9 月在东京的一次核结构国际会议上,道依奇(Deutsch)曾十分风趣地借用莎士比亚的一部戏剧的名称“无事生非,劳而无功”(Much Ado About Nothing)来概括这阵关于第二类弱流可能存在的风波。吴健雄非常确切地进一步借用莎士比亚的另一部戏剧的名称“圆满收场,皆大欢喜”(All's Well That Ends Well)来描述这阵风波所导致的满意而且和谐的研究结果。

4 吴健雄的科学贡献是多方面的

吴健雄的科学贡献涉及面广,大多与物理学的基本问题密切相关。特别是在 β 衰变的实验研究方面,她是 20 世纪这个领域内的第一人。上面列举的推翻宇称守恒定律、 β 能谱的精确研究和验证弱矢量流守恒等是她最主要的三项贡献,其中任何一项都足以使人名垂史册。

此外,吴健雄还有许多其他贡献^[1],比如,她在内韧致辐射、 ^{135}Xe 对核裂变链式反应的重大影响、双 β 衰变、奇特原子、穆斯堡尔谱学、血红蛋白、量子力学的隐参量问题、正电子偶素、超低温核物理、核能级图、仪器以及探测方法等方面都做过不少重要且具有基本意义的工作。

早在吴健雄读研究生的时候,她已经开始研究了一些韧致辐射和核裂变方面的问题。她在原子核

的电子俘获过程的内韧致辐射等方面做出了很出色的研究。她们关于 ^{37}A 和 ^{55}Fe , ^{131}Cs 和 ^{204}Tl 的研究成果,已经被好几本教科书引用。她们在低能中子激活铀裂变中发现了氙(^{135}Xe),对识别在华盛顿的核反应堆中引起减慢甚至最终导致终止链式反应的物质起了相当大的决定性作用。

吴健雄在双 β 衰变方面也做了许多工作。双 β 衰变有同时放射双中微子和不放射中微子的两种可能模式,与中微子质量是否为零和轻子数是否守恒密切相关。她们用 ^{48}Ca 和 ^{82}Se 做双 β 衰变实验,均没有发现无中微子的双 β 衰变,测量得到的相应寿命下限 $\sim 10^{21}$ 年,轻子数不守恒的上限 $\sim 3 \times 10^{-4}$ 。

吴健雄还在奇特原子领域作了深入的研究。所谓奇特原子,指的是某个原子中的电子被另一个带负电的粒子取代而成的原子。比如,某原子中的电子换成 μ^- ,就成为 μ 原子;换成 π^- 或 K^- ,就成为 π 或 K 原子等。由于 μ^- 、 π^- 或 K^- 均比电子重得多,它们离原子核的距离应小得多,原子核的形状、结构等性质会对原子有很大影响,而且奇特原子的能级间距也要大得多,因此,跃迁放出的光子往往在 X 射线波段,通过测量它们的 X 射线,可以研究原子核的许多性质。吴健雄的研究不仅测定了一些粒子的基本性质,研究了一些真空极化效应,还检验了一些基本理论,精度提高了不少。

吴健雄对物理学的基本问题一向非常敏感。在穆斯堡尔(R. L. Mössbauer)效应刚发现不久,她和她的合作者(1960)利用这个效应的高灵敏性,清晰地显示了能量与时间之间的测不准关系。

去氧血红蛋白的氧亲合性低,而离析的 α 和 β 亚单位的氧亲合性高。Perutz 曾认为氧的亲合性与电子状态有关。吴健雄注意到铁是血液中的重要成分,而它的同位素 ^{57}Fe 正好是最典型也最理想的穆斯堡尔核素,她与她的合作者就利用穆斯堡尔效应作了研究,证明去氧血红蛋白及其被离析的亚单位之间氧亲合性的巨大差别并不来自 Fe^{2+} 离子的不同电子结构。

吴健雄和她的合作者还利用 ^3He - ^4He 稀释致冷机,完成了一些超低温核物理实验研究。她们研究了 $\text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 的穆斯堡尔谱,在无外磁场时,发现它在 0.024—0.029K 之间存在一个磁相变;有外磁场时,出现明显依赖于磁场和温度的弛豫效应。此外,还研究了超低温极化核 $^{110}\text{Ag}^m$ 的衰变,验证了时间反演不变性,精度提高到了 10^{-3} 水平。

围绕量子力学的基本问题,出现过爱因斯坦与

玻尔之间的十分尖锐、十分深刻的论战,特别是关于 EPR 之谜(Einstein-Podolsky-Rosen Paradox)的解释。开始的时候,主要是哲学性的、思辩性的。1964 年,贝尔(J. S. Bell)证明了一个关于关联量的不等式。定域隐参量理论给出的关联量遵循此不等式,而量子力学却可以不遵循。在某种意义上,贝尔不等式把这场哲学论战还原到了可用实验检验的物理领域。吴健雄和她的合作者(Kasday, 1975)利用 ^{64}Cu 的 β^+ 放射性,测量了 e^+e^- 湮灭放出的两个光子的极化关联。她们的实验结果不遵循贝尔不等式,却与量子力学符合得非常好。值得指出的是,早在 1950 年,在贝尔不等式出现前 14 年,吴健雄和她的合作者已经做过此类关联实验(Wu, 1950),上面的实验正是在此基础上完成的。

可以看出,吴健雄的实验研究的面很宽,思想非常敏锐,同时紧紧抓住了物理学的基本问题。因此,她的许多实验都是意义重大的。

5 为人、学风、榜样

上面介绍的主要是吴健雄的一些科学研究成果。其实,她的为人、她的品格、她的作风都是我们学习的榜样。

她发现宇称不守恒的那一年,正是我在北京大学物理系读书即将毕业的时候。那时,人民日报上几乎天天有关于宇称不守恒研究进展的报道,我们也天天处于兴奋状态。其实,她们的实验在 1956 年 12 月已经完成,但在发表之前她们还是反反复复进行检验,直到检验结果完全可靠后才决定发表。这种严谨、踏实的作风,给我们后辈树立了很好的榜样。

勒德曼(L. M. Lederman)为 1997 年夏在南京状元楼宾馆召开的纪念吴健雄逝世的题为“宇称对称破坏以来的物理学”的国际会议文集撰写了一篇短文,讲述了吴健雄生活中的一个星期的故事^[6]。那是在 1957 年 1 月初,吴健雄与她合作者的实验经过约半年的艰苦工作,已经取得初步结果,明显表示有大的不对称性。这个结果激励了加尔文、勒德曼和温利希等人,使他们意识到,在他们的 π 介子、 μ 子、电子($\pi-\mu-e$)衰变链中也应有大的不对称性。于是,他们立刻去做这个衰变链的实验。要知道,这个衰变链的实验比吴健雄的极化 ^{60}Co 的实验要简单得多,几乎“24 小时”就可出结果。果然,他们的实验很快也显示出大的不对称性。正当他们写出文章打

算要去发表的时候,吴健雄却表示她还要仔细检查她的结果后才能投寄出去。加尔文等人的实验是在得知吴健雄等人实验的初步结果后才开始做的,道义上讲至少应当与她的文章同时发表。但是他们的实验容易做,不仅已经完成,而且文章也已经写好。特别是考虑到吴健雄等人的初步实验结果已经传开出去,而且,全世界当时至少有 8 个加速器可以产生 π 介子,他们都将是这个项目的竞争者。其中要有 2、3 或 4 个竞争者也去做这种“24 小时”的实验,那将是非常“危险”的。因此,加尔文等人不得不等待着这些难熬的日子。但是,作为一位科学家,吴健雄坚持要再严格检查她的实验,不愿匆忙拿出去发表。等到吴健雄仔细检查妥当,又等了一个星期。勒德曼讲完这则故事,他深深地感受到,这一个星期的痛苦等待对他实在是一个很好的教育,使他懂得了怎样才是一位伟大的科学家。这则故事,对于年轻一代也有重要的教育意义。

1990 年 8 月,我正在美国参加学术会议,有机会到吴健雄家访问。我去的时候,只吴健雄在,她丈夫袁家骝出去修理新买的汽车。当晚我就住在她家的书房里,并与她们老两口谈了几个小时,畅谈了她们的过去做实验的种种经历。她们深入细致的工作作风,确实十分感人。图 5 就是在那次访问过程中,她带我到哥伦比亚大学普平物理楼时,在楼前的合影。



图 5 1990 年,吴健雄教授与本文作者合影于美国哥伦比亚大学普平物理楼前

大约在 20 世纪 80 年代末,冯端先生提议与我一起主编一本吴健雄和袁家骝文集,起名为《半个世纪的科学生涯》^[1]。图 6 就是吴健雄、袁家骝与文集编辑委员会成员的合影。编委会为此收集了不少有关吴健雄和袁家骝的资料。本文内容不少可以从这本文集中找到。

吴健雄与袁家骝非常关心祖国的科学和教育事



图 6 前排右起冯端、吴健雄、袁家骝、陆埏，后排右起包世同、秦涛、沙振舜、夏元复、方杰

业，非常关心人才的培养，差不多年年都要回国来看看，用他们的积蓄对祖国的许多学校、研究所给予各种各样的支持和帮助。在南京大学、东南大学和明德学校先后设立了“吴健雄奖学金”。南京大学、东南大学是她的母校，他们为母校建立了一笔基金，邀请名家来校讲学。明德学校溯源于她父亲吴仲裔在 1913 年创办的明德女子职业学校，现在已经发展成为集幼教、小学、初中、高中于一体的明德系列学校。她于 1988 年还设立了“纽约吴仲裔奖学基金会”，奖励明德学校的优秀师生。

由于她的贡献，她获得了许多的奖。为纪念她，许多地方还用她的名字来命名。1992 年，南京大学物理系建立了“吴健雄图书馆”，东南大学建立了“吴健雄实验室”。1997 年吴健雄逝世后，1998 年“吴健雄墓园”就在明德学校内建成。2002 年，东南大学建立了“吴健雄纪念馆”，袁家骝先生和美国哥伦比亚大学已将吴健雄的遗物（包括奖章、手稿、书信、图片、声像资料、实验设备、起居用品等），无偿捐献给了吴健雄纪念馆收藏。明德学校还建立了“吴健雄科技楼”、“明德楼纪念馆”。其实，这里所述还只是一小部分。

综上所述，吴健雄不仅是一位杰出的实验物理学家，她第一个推翻了宇称守恒定律和电荷共轭守

恒定律，导致了弱作用规律的最终解决。她第一个验证了弱矢量流守恒定律，为弱电统一理论的建立铺设了第一块里程碑，而且她也是一位爱国者，十分关心祖国科学事业的发展，十分关心年轻一代的培养和成长，用她的个人积蓄，设立了不少奖励基金，鼓励年轻人的蓬勃向上。她赢得了大家的尊敬和爱戴，人们以各种各样的形式来纪念她。她的精神将激励一代又一代人的成长。

参 考 文 献

- [1] 冯端，陆埏主编. 半个世纪的科学生涯 - 吴健雄、袁家骝文集. 南京：南京大学出版社，1992. 7 [Eds. Feng D, Lu T. Scientific Careers of Half a Century - Selected papers and lectures of Chien Shiung Wu and Luke C. L. Yuan. Nanjing : Nanjing University Press ,1992. 7 (in Chinese)]
- [2] 陆埏. 物理，1992，21 :752 [Lu T. Wuli (Physics) ,1992 , 21 :752(in Chinese)]
- [3] 陆埏. 现代物理知识，1998，10(2) :43 [Lu T. Modern Physics ,1998 ,10(2) :43(in Chinese)]
- [4] Lu T ,Wang F. AAPPS Bulletin 2007 ,submitted
- [5] Lee T D ,Yang C N. Phys. Rev. ,1956 ,104 :254
- [6] Lederman L M. Ed. Wang F. Proceedings of the International Conference on Physics since Parity Symmetry Breaking in Memory of Professor C. S. Wu. Singapore :World Scientific ,1998. 661
- [7] 陆埏，罗辽复. 从电子到夸克. 北京：科学出版社，2005 [Lu T ,Luo L F. From Electrons to Quarks. Beijing Science Press , 2005 (in Chinese)]
- [8] Wu C S ,Ambler E ,Hayward R W ,Hoppes D D ,Hudson R P. Phys. Rev. ,1957 ,105 :1413
- [9] Garwin R L ,Lederman L M ,Weinrich M. Phys. Rev. , 1957 ,105 :1415
- [10] Friedman J I ,Telegdi V L. Phys. Rev. ,1957 ,105 :1681
- [11] Wu C S. Rev. Mod. Phys. ,1950 ,22 :386
- [12] Gershtein S S ,Zeldovich I B ,Zh. Eksperim. i Teor. Fiz. 1955 ,29 :698
- [13] Feynman R P ,Gell - Mann M. Phys. Rev. ,1958 ,109 :193
- [14] Lee Y K ,Mo L W ,Wu C S. Phys. Rev. Lett. ,1963 ,10 : 253
- [15] Wu C S ,Lee Y K ,Mo L W. Phys. Rev. Lett. ,1977 ,39 :72