

# 吴健雄和袁家骝的科学贡献<sup>1)</sup>

陆 埏

(南京大学天文系, 南京 210008)

吴健雄(Chien Shiung Wu)教授系江苏省太仓县浏河人, 1912年5月31日生于江苏省上海县(今上海市). 1934年毕业于中央大学(现南京大学的前身), 两年后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. 她1958年被选入美国科学院; 1975年任美国物理学会主席. 她也是南京大学的名誉教授.

袁家骝(Luke Chia Liu Yuan)教授是河南省安阳县(今安阳市)人, 1912年4月5日出生. 1932年毕业于燕京大学(现北京大学的前身之一), 1934年获该校硕士学位, 两年后入美国加利福尼亚理工学院研究院, 于1940年获博士学位. 留校任两年物理研究员后, 去美国无线电公司研究所从事研究工作. 1946—1949年在普林斯顿大学任物理研究员. 此后30年在布鲁克海文国家实验室先后任物理研究员和高级物理研究员, 直到1979年退休. 其间曾任法国萨克莱原子研究中心和欧洲原子核研究中心(1972—1973)以及苏联谢普霍夫高能物理研究所(1979)等访问教授.

吴健雄与袁家骝于1942年在美国结婚.

## 一、吴健雄的科学贡献

吴健雄教授的科学贡献涉及面广, 大多与物理学的基本问题密切相关, 尤其是在 $\beta$ 衰变的实验研究方面, 她是当今这个领域内的第一人.

### 1. $\beta$ 衰变与 $\beta$ 能谱

早在40年代, 吴教授就对 $\beta$ 衰变理论的实际检验作出了细致精密的研究. 那时, 虽然已有不少实验测量了容许型 $\beta$ 能谱, 但低能端往往明显偏离理论. 吴教授和她的合作者精心制备了放射源, 证明这种偏离主要来自放射源及

其衬底物质的吸收和散射效应, 而不是因为理论本身有问题. 当放射源愈薄愈均匀, 这种偏离就愈小. 不过, 容许型 $\beta$ 能谱实际上还只是反映了理论的统计因子和核库仑作用的修正(费米函数), 而并不能反映 $\beta$ 衰变理论的细节.

为了更有效地检验 $\beta$ 衰变理论, 应当进而研究禁戒型 $\beta$ 能谱. 一般地说,  $\beta$ 衰变理论包含有费米(F)跃迁和加莫夫-泰勒(GT)跃迁两类核矩阵元, 给实验检验带来困难. 但是, 存在着一种只包含纯GT的禁戒跃迁, 由此得到的 $\beta$ 能谱称为唯一型禁戒谱, 相对于容许型谱有确定的偏离, 可以提供对 $\beta$ 衰变理论作明确的实验检验. 吴教授和她的合作者早在40年代末、50年代初就详细研究了唯一型禁戒谱, 清楚地表明实验结果与理论计算符合得相当好, 有力地支持了费米提出的 $\beta$ 衰变理论.

### 2. 划时代的实验

吴教授丰富的 $\beta$ 衰变实验研究经验, 使得她完成了1956年极化核( $^{60}\text{Co}$ ) $\beta$ 衰变的复杂而又精细的实验. 这是她的最重要的科学贡献. 这个实验是首次在极低温度下进行的核物理实验, 因为只有在外加强磁场和极低温度下才能获得有效的核极化. 吴教授和她的合作者发现,  $\beta$ 粒子的发射相对于核的极化方向不对称, 换句话说, 反向于核自旋射出的 $\beta$ 粒子比同向的要多得多. 这个事实直接显示了 $\beta$ 衰变规律不具有左右对称性, 从而首次证明了李政道和杨振宁的理论推测, 推翻了宇称守恒定律. 要知道, 左右对称性几千年来一直被认为是自然界天经地义的规律.

这是一个划时代的实验. 这项成就远远超出了核物理的范围, 甚至也远远超出了物理学

1) 本文原载《半个世纪的科学生涯——吴健雄、袁家骝文集》(冯端、陆埏主编, 南京大学出版社1992年出版), 本刊转载时作了少量删节. ——编者注

的范围。这是人类认识史上的一块新的里程碑。

吴教授的极化核采用的是<sup>60</sup>Co,这是纯GT跃迁,使得不对称性可以充分地反映出来。事实上,他们测得的计数率不对称高达25%,经核极化度 $\langle J_z \rangle / J \approx 0.65$ ,电子速度比 $v_e/c \approx 0.6$ 以及反散射修正(30~35%)后,不对称系数A非常大,近于最大不对称: $A \approx -1$ 。

我们知道,从普遍的协变性考虑, $\beta$ 衰变可以包含五个系数,即 $C_S, C_V, C_T, C_A$ 和 $C_P$ ,相应于标量、矢量、张量、轴矢量和赝标量五种耦合。考虑到宇称不守恒后,还可以再增加相反宇称的五种耦合的系数 $C'_S, C'_V, C'_T, C'_A$ 和 $C'_P$ 。因此, $\beta$ 衰变的作用可表为

$$H_\beta = \sum_i (\bar{p} O_i n) (C_i \bar{e} O_i \nu + C'_i \bar{e} O_i \gamma_5 \nu) + \text{共轭}.$$

这些系数在P(宇称)、C(电荷共轭)、T(时间反演)守恒的条件下,具有表1中的性质。对于纯GT跃迁的<sup>60</sup>Co,理论上得到的不对称系数A应为

$$A \approx \{2\text{Re}(C_T C'_T{}^* - C_A C'_A{}^*) - (Z e^2 / \hbar c p) 2\text{Im}(C_T C'_A{}^* + C'_T C_A{}^*)\} / \{|C_T|^2 + |C'_T|^2 + |C_A|^2 + |C'_A|^2\}.$$

由于 $Z e^2 / \hbar c p$ 为小量,吴教授的实验结果 $A \approx -1$ ,不仅推翻了宇称(P)守恒,而且也排斥了电荷共轭(C)不变性(因为 $C_i$ 和 $C'_i$ 一为实数,一为虚数,不可能给出大的A值),却又能保持时间反演(T)不变性或CP守恒。

在宇称不守恒被发现以前,人们致力于确定系数 $C_i$ ,似乎已倾向于只存在 $C_S$ 和 $C_T$ 两项。有趣的是,在宇称不守恒被发现以后,人们发现这个确定错了,甚至弄反了。根据 $\beta$ - $\nu$ 关联实验, $C_T$ 应当很小,甚至为零。因此,吴教授的不对称系数可写为

$$A \approx -2\text{Re}(C_A C'_A{}^*) / (|C_A|^2 + |C'_A|^2) \approx -1$$

由此可得  $C_A = C'_A$   
可见,轻子部分是以 $(e O_i (1 + \gamma_5) \nu)$ 形式参与耦合的。这明显地表明,中微子总是左旋的(反中微子总是右旋的),具有二分量子性质,因而宇

物理

表 1

变换	$C_i$	$C'_i$	守恒条件
P	$C_i$	$-C'_i$	$C'_i = 0$ 或 $C_i = 0$
C	$C_i^*$	$-C'_i$	$C_i, C'_i$ 一实一虚
T	$C_i^*$	$C'_i$	$C_i, C'_i$ 均为实
CPT	$C_i$	$C'_i$	自动满足

称不仅不守恒,而且是最大的不守恒。同时,宇称不守恒的发现激发了人们去测量各种极化关联,致使短短的一年多时间内就弄清了 $\beta$ 衰变不应当是S和T,而应当是V和A,且取V-A的形式。就是说, $\beta$ 衰变作用取如下形式:

$$H_\beta = \sum_i \{ \bar{p} \gamma_\mu (C_V - C_A \gamma_5) n \cdot (\bar{e} \gamma_\mu (1 + \gamma_5) \nu) \} + \text{共轭}$$

可见,吴教授的极化<sup>60</sup>Co实验事实上包含着许多重要的新结果,并且很快导致了 $\beta$ 衰变作用正确形式的获得。

### 3. 弱矢量流守恒定律

人们也研究了 $\mu$ 衰变过程

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu e^- \bar{\nu}_e.$$

发现它也可以类似的作用形式

$$H_\mu = \{ \bar{\nu}_\mu \gamma_\alpha C_V^{(\mu)} (1 + \gamma_5) \mu \} (\bar{e} \gamma_\alpha (1 + \gamma_5) \nu_e) + \text{共轭}.$$

来描写。与 $H_\beta$ 比较,可知相当于 $C_A^{(\mu)} = -C_V^{(\mu)}$ ,与V-A结构一致。令人惊异的是, $C_V^{(\mu)}$ 的测量值与 $\beta$ 衰变中的 $C_V$ 几乎相等(后者只比前者略小约1%)。不妨将 $\mu$ 衰变与中子衰变

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e.$$

作一比较。中子具有强作用,它时时通过虚过程而变成虚质子加虚 $\pi^-$ 介子: $n \rightarrow p \pi^-$ 。当处在虚质子状态时就不会有 $\beta$ 衰变。这样, $C_V$ 应比 $C_V^{(\mu)}$ 小得多才是。为什么 $C_V$ 几乎与 $C_V^{(\mu)}$ 相等呢?这里存在着深刻的新规律! Feynman和Gell-Mann,以及更早些的Gershtein和Zeldovich,提出了一个十分有意思的想法。他们考虑电磁作用中的一个类似问题:为什么质子的电磁作用与正电子的一样?这个道理很简单。质子也时时发生着虚过程: $p \rightarrow n \pi^+$ 。

虚过程的作用是一种重正化效应。质子变成了中子,不带电了,自然就失去了电磁作用。然而,伴随着中子也产生了 $\pi^+$ ,这时 $\pi^+$ 的电荷承担起与质子一样的电磁作用。可见,这里电荷守恒(也称电流守恒)起了保证作用。电流是矢量流。因此,他们设想在弱作用中也许同样存在着这类守恒定律,称之为矢量流守恒。实际上,弱矢量流和电磁矢量流只是同一同位旋矢量流的不同分量而已。再用上面的例子,可以说,为了使 $C_V$ 几乎与 $C_V^{(p)}$ 相等,当中子通过虚过程变成质子和 $\pi$ 介子( $n \rightarrow p\pi$ )时, $\pi$ 也应承担起与中子一样的弱衰变,即

$$\pi^- \rightarrow \pi^0 e^- \bar{\nu}_e$$

这是一个可资实验检验的结果。

同样,由于虚过程不只保持电荷守恒,而且可引起附加的磁作用。事实上,中子和质子的反常磁矩也是虚过程的重正化结果。矢量流守恒建立了弱作用与电磁作用之间的联系,因此,也会在弱作用中出现反常弱磁矩项。这是另一个可资实验检验的结果。

实验检验在于比较同位旋三重态(自旋宇称为 $1^+ : ^{12}\text{B}$ 基态,  $^{12}\text{C}$ 的 $15.11\text{MeV}$ 激发态和 $^{12}\text{N}$ 基态)向同位旋单态(自旋宇称为 $0^+ : ^{12}\text{C}$ 基态)的跃迁,测定 $^{12}\text{B}$ 和 $^{12}\text{N}$ 衰变的 $\beta$ 能谱的形状修正因子,并作出比较。虽然在此之前已有人做过这种实验,但终未获确切结论,或者未能给出理论所预言的 $^{12}\text{B}$ 和 $^{12}\text{N}$ 的 $\beta$ 谱偏离的相反符号,或者只给出了谱形状因子的比值而未能给出其单个谱形状因子的偏离。吴教授和她的合作者首次成功地完成了这个实验,测得了 $^{12}\text{B}$ 和 $^{12}\text{N}$ 单个谱形状因子的偏离,两者偏离方向相反,得到了两形状因子的比值,均与理论预言一致,确证了矢量流守恒理论是正确的(1963, 1977)。这不仅建立了一条新的守恒定律,而且也为弱作用和电磁作用统一的成功铺设了第一块基石。

#### 4. 第二类弱流

按照 Lorentz 协变性,矢量流和轴矢流中均可以包含G宇称不同的项。比如,在矢量流中可以出现与通常项的G宇称相反的诱导标量

项;在轴矢流中也可以出现与通常项的G宇称相反的诱导张量项。这种G宇称相反的项,称为第二类弱流。如果观测到第二类弱流存在,就表明G宇称不守恒。所谓G宇称,指的是电荷对称和电荷共轭的联合作用,也是一种基本对称性。实际上,吴教授和她的合作者所作的 $^{12}\text{B}-^{12}\text{N}$   $\beta$ 能谱实验,证实了弱矢量流守恒理论,也排除了诱导标量项,支持了不存在第二类弱流的观点。70年代曾出现过一场宣称第二类弱流存在的风波,有一些实验似乎表明有不小的诱导张量项。那时,Calaprice和Holstein也指出1963年 $^{12}\text{B}-^{12}\text{N}$   $\beta$ 能谱实验中所用Bhalla和Rose的 $\beta^+$ 衰变Fermi函数有误,从而影响到其关于矢量流守恒和不存在第二类流(这里指诱导标量项)的结论。所幸这场风波并未持续多久。短时间内就有多方面的实验确证第二类弱流不存在。吴教授和她的合作者也重新分析了他们1963年的实验数据,发现改用正确的Behrens-Janeoke  $\beta^+$ 衰变Fermi函数后固然大大改变了 $^{12}\text{B}-^{12}\text{N}$   $\beta$ 能谱的形状因子,然而实验中所用的分支比和 $f_t$ 值等参数改用更好的新值后却正好对其 $\beta$ 能谱形状因子产生了大小相当而方向相反的影响,因而总效果仍然同样好地证实了矢量流守恒理论,也仍然同样好地支持了不存在第二类弱流的观点。

1977年9月在东京的一次核结构国际会议上,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)来概括这场关于第二类弱流可能存在的风波。吴教授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)来描述这场风波所导致的满意而且和谐的研究结果。

#### 5. 双 $\beta$ 衰变

吴教授对双 $\beta$ 衰变也有重要研究。双 $\beta$ 衰变有双中微子和无中微子两种可能模式,与中微子质量是否为零和轻子数是否守恒这些问题密切相关。吴教授早在60年代就用 $^{48}\text{Ca}$ 做双 $\beta$ 衰变实验,后来又用 $^{82}\text{Se}$ 做实验,均没有

发现无中微子双 $\beta$ 衰变,测量得到的相应寿命下限 $\sim 10^{24}$ 年。

## 6. Mössbauer 效应

在 Mössbauer 效应刚被发现不久,吴教授和她的合作者(1960)就充分利用这个效应的高灵敏性,清晰地展示了共振线频率分布相对于时延的变化,也明晰地显示了能量与时间之间的测不准关系。

$^{57}\text{Fe}$ 是最典型也最理想的 Mössbauer 同位素,而铁又是血液中的重要成分。用 Mössbauer 效应研究血液应是一项有成效的课题。比如,去氧血红蛋白的氧亲和性低,而离析的 $\alpha$ 和 $\beta$ 亚单位的氧亲和性高,Perutz曾认为氧的亲性和电子状态有关。吴教授和她的合作者成功地离析了血红蛋白中的 $\alpha$ , $\beta$ 亚单位,并对它们进行了 Mössbauer 测量,研究了与温度的关系。其实验结果,无论同质异能移还是电四极分裂,均没有发现这三种蛋白之间有什么差别。因而证明了,去氧血红蛋白与其被离析的亚单位间巨大的氧亲和性差别,并不来自 $\text{Fe}^{2+}$ 离子的不同电子结构。

## 7. 利用 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 稀释致冷机作物理研究

吴教授和她的合作者成功地用  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  稀释致冷机冷却放射源,获得了 mK 级超低温,从而完成了一些重要的超低温核物理实验。他们研究了  $\text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  的 Mössbauer 谱,在无外磁场情形下,发现它在  $0.024 \sim 0.029\text{K}$  间存在一个磁相变。当外加磁场时,出现明显的依赖于磁场和温度的弛豫效应。他们还研究了超低温极化核  $^{110}\text{Ag}^m$  的衰变,测量了其 $\beta$ 衰变子体  $^{110}\text{Cd}$  一些激发态跃迁的 E2/M1 混合比。通过  $r$ - $r$  方向关联的测量,验证了时间反演不变性,精度有了大幅度提高,达到  $10^{-3}$  水平。

## 8. Einstein-Podolsky-Rosen 实验

围绕着量子力学的基本问题,出现过十分尖锐、十分深刻的 Einstein 与 Bohr 之间的论战。这场论战集中反映在对于 EPR(Einstein-Podolsky-Rosen) 之谜(1935)的解释。这里涉及到一些基本观点,比如,是否存在超距作用,决定论还是非决定论……。其间出现过建立所

谓隐参量理论的种种努力,试图把量子力学的统计性归之于存在一些未知的更深层次的隐参量。1964年, Bell 证明了一个关于关联量的不等式,定域(指非超距)隐参量理论给出的关联量必须遵从此不等式,而量子力学却可以不遵从。Bell 不等式把这场哲学论战(至少在定域隐参量意义下)推到了可用物理实验来进行检验的前沿。对于这样重要的基本问题,吴教授是不会放过的。她和她的合作者(1975),利用  $^{64}\text{Cu}$  的  $\beta^+$  放射性,在  $e^+e^-$  湮没时放出两个光子,测量了它们的极化关联。这些实验结果不遵从 Bell 不等式,却与量子力学符合得很好,从而否定了任何形式的定域隐参量理论。值得指出的是,早在 1950 年,在 Bell 不等式出现前 14 年,吴教授与她的合作者已经做过此类关联实验,上面的实验就是在此基础上进一步完成的。

## 9. 奇特原子

吴教授的另一大类贡献是关于奇特原子的研究。所谓奇特原子,是指普通原子中的轨道电子用别的负电粒子代换,比如换成  $\mu^-$ ,  $\pi^-$ ,  $\text{K}^-$ ,  $\Sigma^-$  甚或反质子 P 等。这些负电粒子的最大特点是比电子重得多,因而其轨道十分靠近核,更有利于研究与核的作用。加之粒子品种繁多,可用来研究许多问题,甚至把化学、原子物理、核物理以至粒子物理都串了起来。吴教授在这方面做了大量工作,不仅测量了粒子的一些基本性质(如介子的质量、磁矩等),还研究了一些真空极化效应(用氢、氦,甚至用铅、汞等来做实验,效果非常显著),检验了一些基本理论(如量子电动力学),精度提高了不少。

## 二、袁家骝的科学贡献

袁家骝教授的科学贡献也是多方面的。他不仅在高能物理和宇宙线领域有重要建树,而且在高能加速器、粒子探测系统和调频雷达系统的建造和发展方面也有突出成就。

### 1. 宇宙线中子成分的起源

袁教授早在普林斯顿大学工作期间,就用自动跟踪设备和分析系统,探测分析宇宙射线。

袁教授对宇宙射线中的中子成分的起源作了深入的研究。那时已经知道中子是不稳定粒子,自由中子会进行 $\beta$ 衰变,因而不会是宇宙射线的初级成分。但是,前人高空探测的结果却表明,随着高度的增加,慢中子强度是指数式上升的,这似乎难以说明中子是宇宙射线初级粒子在大气中产生的次级成分。为了解决这个矛盾,袁教授用气球把三氟化硼( $\text{BF}_3$ )正比计数器送到更高的高空去探测,直到30000m的高度,终于发现了慢中子强度在上升到一个极大值后就开始回落。这个实验事实清楚地表明,中子确实不是来自宇宙空间,而是产生于大气层内的次级粒子。

中子不带电,如果中子是来自大气层外宇宙空间,那么,中子射向地球时不会被地磁所偏转。因此,在不同的地磁纬度去进行测量,中子强度应不会有明显差别。袁教授乘坐B-29型轰炸机作7600m等高度的不同地磁纬度的飞行测量。为了切实模拟自由空间情形,在飞机内得寻找并创造一个与自由空间等效的中子环境,工作是十分细致的。测量结果发现,不同地磁纬度的中子强度有明显差别。在地磁北纬 $20^\circ$ 至 $50^\circ$ 间飞行,中子强度可以相差到近三倍。这进一步表明,中子应是由宇宙射线初级带电粒子在大气层中碰撞产生的。

## 2. 参与布鲁克海文国家实验室高能加速器的建造

1949年美国布鲁克海文国家实验室要建造一台高能质子加速器,袁教授参加了这项重大工程。这台加速器的能量达到了3GeV,是当时能量最高的,已属于宇宙射线的能量,因此被称为宇宙加速器(Cosmotron)。这是一种圆轨道加速器。最早,劳伦斯(Lawrence)正是利用了带电粒子(电荷为 $e$ ,质量为 $m$ )垂直于磁场( $B$ )运动时所受到的洛伦兹力可以保持带电粒子作圆周运动,而且在磁场恒定下角速度 $\omega = v/R = eB/mc$ 也保持不变这一特点,建造成功了第一台回旋加速器。这里,用与角速度相匹配的固定频率交变电场就可以达到不断加速带电粒子的目的。

但是,这一特点只有在非相对论情形( $m = \text{常数}$ )下才存在。当能量增高到相对论情形时, $m$ 将不断上升, $\omega$ 不再能保持不变。特别重要的是,轨道半径 $R$ 也在变化,随着能量的不断上升而增大。能量很高时, $R$ 将非常大。在加速的过程中,粒子轨道由小变大,用以产生磁场的电磁铁将大到无法实现。为了节省电磁铁,就必须使带电粒子保持在固定轨道上运动。这样,在加速过程中,磁场 $B$ 与频率 $\omega$ 都得变。从劳伦斯的原始回旋加速器不断向高能发展时,电、磁场的特种设计就变得十分重要。袁教授在参加建造宇宙加速器时,就负责设计并建成了一台要求在一秒内频率增加13倍的特殊变频高频系统,这是这台加速器的关键部件之一。

## 3. 首次证明强子共振的存在,并发现了两个新粒子

正是因为参加了这台加速器的建造,袁教授因而获得了优先使用这台加速器的权利。在1953年这台加速器运转成功后,袁教授与Lindenbaum就利用加速器质子束轰击靶子而产生 $\pi$ 介子,用它来研究 $\pi$ 与核子的散射。当时,安德逊、费米等人已经研究了 $\pi$ 介子与质子之间的散射。由于他们的加速器能量比较低, $\pi^+$ 的动能只做到135MeV,而 $\pi^-$ 的动能只做到200MeV。他们发现 $\pi^+$ 和 $\pi^-$ 与质子的散射截面均随能量的增大而很快上升,则在上升之后出现平坦区,但均未能达到显示共振峰的能区。理论上,Brueckner等人研究了存在共振的可能性。由于布鲁克海文国家实验室的宇宙加速器可以产生更高能量的 $\pi$ 介子,袁教授和Lindenbaum的 $\pi^+$ 和 $\pi^-$ 动能可以一直延伸到750MeV,他们很快发现, $\pi^\pm$ 与质子的散射截面在高能量下迅速下降。这就是说,他们明确找出了散射截面峰值之所在,这是共振存在的清晰证据。实际上,他们发现了两个新的粒子, $\pi^+$ 与质子的共振对应于粒子 $\Delta^{++}$ ,而 $\pi^-$ 与质子的共振对应于粒子 $\Delta^0$ 。由共振峰所对应的 $\pi$ 介子能量折算出 $\pi$ 介子与质子在质心系统中的总能量,就得到 $\Delta$ 粒子的质量为1232MeV。由共振曲线的宽度(115MeV)可根据能

量与时间的测不准关系定出  $\Delta$  粒子的寿命, 为  $6 \times 10^{-24}$ s. 这是寿命极短的粒子. 比如  $\Delta^{++}$ , 它刚从  $\pi^+$  与 p 碰撞产生, 立刻就衰变为  $\pi^+$  与 p. 所以, 它只能在共振过程中表现出来, 称为共振子(或称共振态). 在粒子物理中, 这是一类极其重要的粒子. 至今, 人们已经发现了 400 余种粒子, 90% 为共振子, 此其一. 粒子物理发展到今天, 已经进入夸克-轻子时代, 而夸克又是在强子(其中主要是共振子)的分类研究中揭示出来的, 此其二. 强作用是四种基本作用中研究最困难的, 长期进展缓慢. 自从夸克的概念提出以后, 进展就十分迅速, 很快形成了标准的量子色动力学. 色的概念就是在共振子的研究中获得. 最明显的例子是  $\Delta^{++}$ , 其自旋为  $\frac{3}{2}$ , 是由自旋平行的三个 u 夸克组成. 只有引进色的概念, 认为组成  $\Delta^{++}$  的三个 u 夸克是不同色的, 才能避免违背泡利原理, 此其三. 可见, 共振子的研究在粒子物理的发展中起了十分重要的作用. 袁教授和他的合作者正是首次从实验上观察到了共振子, 揭开了共振子物理的序幕.

袁教授与他的合作者还研究了 K-p 和 p-p 等散射过程, 测量了这些过程的截面及其与能量的关系.

#### 4. 用实验证实穿越辐射的原理, 并研究利用这种辐射作高能粒子探测器

袁教授在高能粒子探测器方面也有很多研究和贡献. 他最早将电子技术运用于高能粒子探测器, 也是早期运用闪烁计数器描述仪和自动化数据采集技术的物理学家之一. 随着粒子能量的不断提高, 探测器的能量分辨本领越来越低, 分辨粒子种类也变得十分困难. 为了解决这个问题, 袁教授对于利用穿越辐射作探测器进行了深入研究. 这是高能带电粒子穿越两种不同介电常数的介质界面时产生的一种辐射. 这种辐射具有连续能谱, 主要集中在 X 射线能区, 总辐射能量正比于入射带电粒子的洛伦兹因子  $\gamma$ , 即粒子能量与其静止能量之比  $E/mc^2$ . 这个特征使得穿越辐射探测器可以分辨粒子能

量, 如果与磁谱仪相配合, 可以同时分辨粒子种类及其能量. 不过, 穿越辐射通常十分微弱, 用许多薄片形成许多界面可以显著提高探测灵敏度. 对于穿越辐射探测器的材料及其性能还进行了多方面的研究和改进. 近年来, 采用低温超导微粒(半径  $5 \sim 25 \mu\text{m}$ )来作高能粒子探测器, 初步试验已获成功, 可望达到良好性能, 正在研究发展中.

上面所述, 只是对吴、袁两位教授的科学贡献作了一些很不完全的、粗略的介绍. 他们不仅在物理学上作出了许多重大贡献, 其影响十分深远, 有些还远远超出了物理学的范围. 而且, 他们的严谨学风和诲人不倦的精神也给我们留下了深刻的印象.

吴、袁两位教授在物理学方面写了许多学术论文, 这是他们研究成就的结晶. 此外, 他们还有如下著作:

· 袁家骝和吴健雄:《实验物理学方法——原子核物理学》, Academic Press, New York, (1961).

· 袁家骝:《物质的本性; 高能物理学的目的》, (1964).

· 吴健雄和 S.A. 莫斯科夫斯基:《 $\beta$  衰变》, Wiley-Interscience, New York, (1966).

吴、袁两位教授对祖国的科学事业十分关心, 他们经常回国访问. 凡有机会, 他们的学术活动我总是参加的, 每次都获益不浅.

由于吴、袁两位教授在科学上作出的许多重大成就, 他们获得了许多荣誉和奖励. 1975 年, 美国总统授予吴教授国家科学勋章; 1978 年, 她又获得了 Wolf 基金会首次颁发的奖金; 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 2752 号小行星(紫金山天文台 1965 年 9 月 20 日发现)命名为吴健雄星; 1991 年又获普平奖章. 1961 年, 袁教授获得了驻美中国工程师协会科学成就奖. 他们还获得过许多大学(也包括南京大学)的名誉博士学位, 并受聘为许多大学的名誉教授.

谨以此文庆祝吴健雄和袁家骝两位教授双双 80 寿辰和结婚 50 周年(金婚).