

束箔光谱学及其近况

邢磊

(北京师范大学物理系)

于桂菊

(中国科学院物理研究所)

光谱分析自上个世纪正式出现之后,得到了很快的发展。特别是本世纪二十年代,它的发展直接导致了量子理论的诞生,使人类在认识微观世界方面迈出了决定性的一步。但到了三十年代之后,除了采用一些新工艺、新技术(例如单色仪中采用了更大更好的光栅,出现了诸如光电倍增管、象增强管之类灵敏的光检测元件,使用了由经典光谱学发展起来的光抽运、能级交叉法及分子束光谱等新技术)之外,光谱学在原理上几乎没有什么重大的突破。六十年代后,出现了激光、束箔光两种崭新的光源。前者以其单色性好、方向性强和高亮度而衍生出一系列新的光谱技术。束箔光源也由于具有许多独特的性质,很快地发展成为一门独立的多应用的学科。本文首先介绍束箔光谱学实验的基本原理和特点,然后结合一些典型的实验结果来说明它的应用和发展近况。

一、实验原理及特点

束箔光谱的实验装置如图 1 所示。离子源产生的离子经加速、会聚、准直后进入真空靶室(10^{-6} Torr),然后射向安放在靶框上的固体箔(常用碳箔、铝箔等,近年来还出现了工作寿命较长的“乙烯”箔)。离子束在穿过薄箔时,将与箔中密集的费米电子气体发生强烈的库仑作用,产生离子壳层的电子被剥离与再复合过程,于是出射的粒子将有很多处于高电离态和高激发态。离子的人射能量越高,出射离子的电离度和激发量子数也越高。这些被激发的粒子在其后的飞行路程中将自发衰变而发光,这就是束箔光源。由于激发机制的不同,与普通的光源相比,它具有如下特点:

(1) 随着全离子源的出现,人们几乎可以得到周期表中任何一种元素的束箔光谱。离子束的质量分析,保证了它具有同位素纯的光谱,并且无污染。这种光源还具有很低的粒子密度(比普通光源大约低 10^{10} — 10^{16} 倍),因而无自吸收,无碰撞退激发以及无内离子场作用效应。

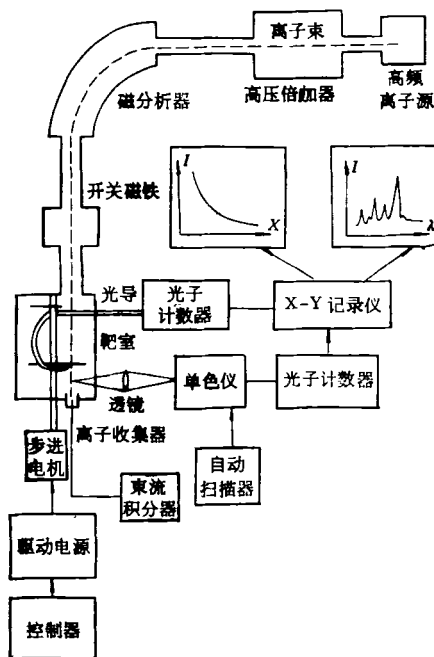


图 1 束箔光谱实验装置示意图

(2) 通过改变加速电压,几乎任何元素的任何电离态均可用这种方法激发,即可以得到任何元素的高电离态光谱。此外,束箔相互作用还大量地产生双重及多重激发态,光谱范围很宽,从近红外一直延伸到软 X 射线波段。

(3) 离子与箔的相互作用时间极短(约 10^{-14} s),可以认为是瞬时激发,再考虑到处于激发态的粒子的自发辐射光强按指数规律减弱,便可由公式

$$I(X) = I_0 e^{-t/\tau} = I_0 e^{-X/\nu\tau} \quad (1)$$

来测量粒子激发态的寿命。

(4) 束箔光源经常展现出相干性，这直接导致了許多类型的实验。此外，束箔作用还是一种非各向同性激发，这种非各向同性还可以通过超精细结构相互作用传给原子核。这对于研究束箔作用机制及在核物理实验中得到极化核束以便进行极化散射实验都是很有意义的。

当然，束箔光源也有一些不利因素。主要是由于发光粒子的高速飞行所造成的较严重的

谱线多普勒展宽。1971年，Stoner 和 Leavitt^[1] 采用了所谓“重新聚焦”方法进行补偿，已使这一问题得到较好的解决。图2是他们的实验结果。另外，束箔光源的低粒子密度导致了它的光强很弱(尽管对每个粒子来说，它的光强比其它光源强得多)。实验中必须采用弱光检测技术，一般是经单色仪后由光子计数器来检测光强，如图1所示。

二、原子、离子光谱与能级

由于激发机制的不同，即使对一些比较简单的原子，如 C, N 和 O 也常常会发现许多用其他方法所观察不到的辐射跃迁。通过有选择地加速不同元素的离子，人们已填补了大量的原子、离子的能级结构和电离能的空白数据，尤其是稀土元素的数据。这方面的研究主要有以下几个方面：

(1) 用束箔光源可以研究前人研究得不完全的光谱和能级。例如，Jupén^[2] 在1981年对 Cl VIII 等电离态的束箔光进行了精密的测量(如图3所示)，其精度达 $\pm 0.06 \text{ \AA}$ 。对更重的元素，如 I^[3]，Xe^[4] 等人们也做了很多类似的

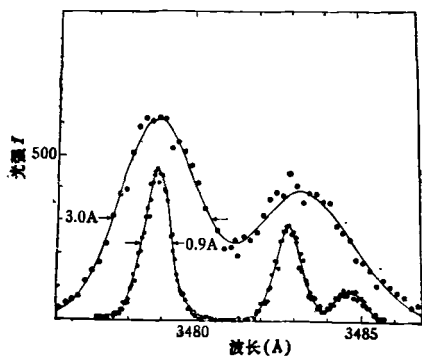


图2 4.07MeV N⁺束的 NIV $\begin{cases} 3478.71 \text{ \AA} \\ 3482.99 \text{ \AA} \\ 3484.96 \text{ \AA} \end{cases}$ 2s3s³S—2s3p³P⁰ 跃迁的束箔光谱谱线(上面曲线未经处理,下面曲线经“重新聚焦”)

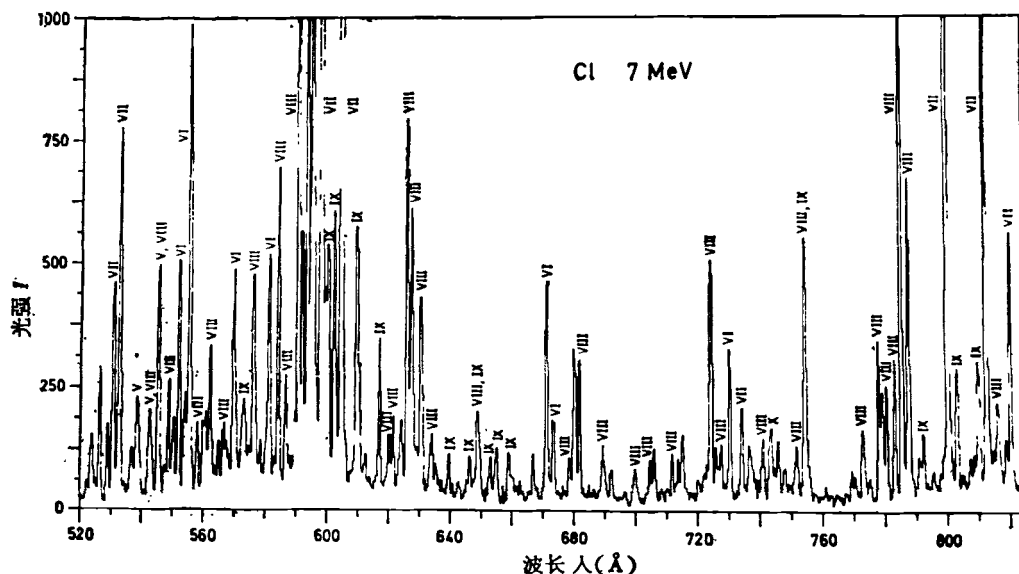


图3 Cl 的束箔光谱(大多数跃迁在其它光源中都未曾观察到)

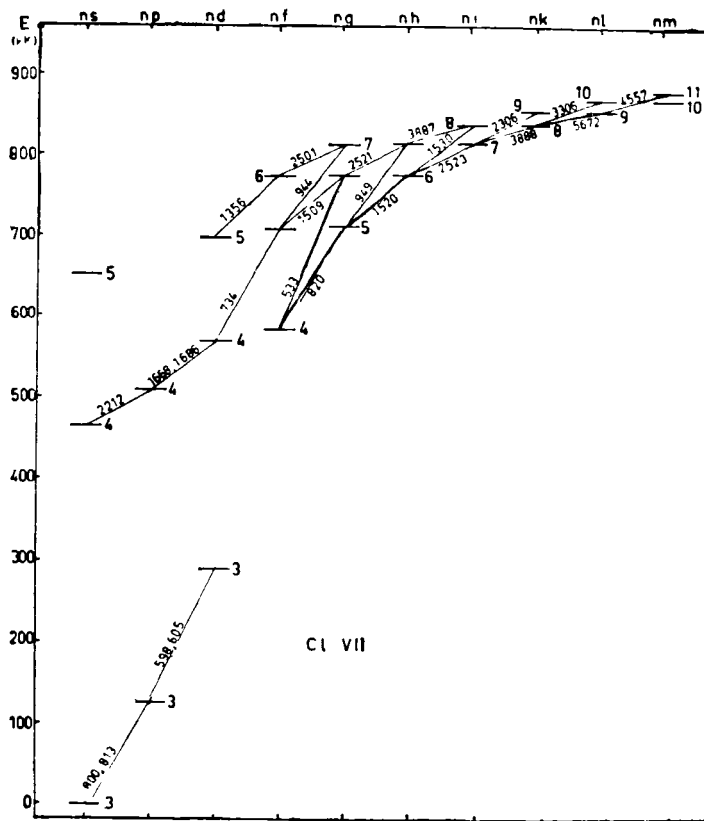


图4 Cl VII 的能级跃迁图

工作。

(2) 可研究高主量子数 n 和高角量子数 l 的能级和光谱。如前所述，在这方面束箔光谱是得天独厚的。图4是用束箔光谱测得的 Cl VII 的能级和跃迁图^[9]。它包括有很多高 n 和高 l 态间的跃迁，没有一条在其他光源中观察到。在这种类碱离子的光谱项中，除了应包括相对论修正项外，还应包括原子实极化项，即

$$T = R\zeta^2/n^2 + \Delta_{rel}(n, l) + \Delta_{pol}(n, l), \quad (2)$$

其中 ζ 是原子实的电荷数。这些光谱的研究对于确定原子实处于高激发态的价电子作用下的极化效应及其对能级的影响是很有用的。

(3) 内壳层激发、双重及多重激发态的研究。十多年以前人们就已认识到束箔作用产生这种激发态的截面很大，文献[6—8]曾对这一问题进行了详细的研究，认为离子在比弛豫时间短得多的时间内的高碰撞率对这一现象起着重要的作用。在理论及实验上，人们对 He I 的

双激发态研究得最为透彻，曾得到一个包含有 21 条双重激发态的跃迁能级图^[9]。最近，Brooks 和 Pinnington^[10] 又对 He I 在 2050—3600 Å 范围内的双重激发态谱线进行了更精确的测量，并发现了两条原来未报道过的谱线。另外，人们对 Li I 及一些高电离度的类 Li 离子，如 OVI, FVII, ClXV, ArXVI 等也进行了不少双激发态测量。对其他元素离子的双重、多重激发态的研究也有不少成果。

这种激发的离子系统，其激发能比第一电离能还要高几十电子伏特，即在能量的连续区之上还存在着许多分立的能级，而且多重激发态还常常展现出电子相关性。因此，这些数据的获取不仅直接为其他学科提供了大量有用的信息，而且对现代的原子结构理论也是很重要的。实验上，多重激发态的测量常常要将光谱测量技术与俄歇电子测量技术结合起来，互相补充。

三、原子、离子激发态寿命的测量

在图 1 中, 由控制电路来控制步进电机的正、反转及转动步数, 它带动螺杆转动, 使靶在螺杆方向上平动, 这样便可记录下光强随 X 变化的衰变曲线 $I(X)$ 。按(1)式, 它应是指数衰减的。将此曲线在半对数坐标纸上取直后, 由斜率便可得出激发态的寿命。这就是束箔法测量原子激发态寿命的基本原理。图 5 是一个具体的例子^[11]。

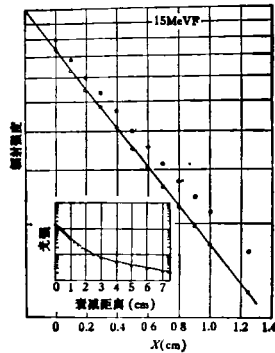


图 5 束箔激发的 Fe VIII 的 $1^4S_0-2^3P_1$ 跃迁的衰变曲线 [小方框内为实验测得的指数衰变曲线, 圆点为它在半对数坐标上取直的结果, 圆圈是扣除本底计数后在半对数坐标上取直的结果, 图中直线是由实验点(扣除本底计数)进行最小二乘法直线拟合得到的]

实际上, 由于束箔相互作用能同时形成许多激发态, 所以同其他测量寿命方法一样, 级联效应很难避免。此时, (1)式不再成立, 而应用下式代替:

$$I(X) = \sum_j C_j \exp(-X/v\tau_j). \quad (3)$$

这样, 在半对数坐标纸上得到的不再是一条直线。近年来, 为了消除级联效应的影响, 很多人在理论上和实验上做了大量的工作。理论上, 人们综合考虑各能级的级联跃迁, 把各能级的寿命作为可调参数, 将测得各条跃迁谱线和衰变曲线作为数据输入, 然后在计算机内调节寿命参数, 使理论与实验得到最佳拟合, 得出各级联能级的寿命值。常用的 M-E 拟合法和 ANDC 法即属此类。1981 年在加拿大召开的

第六次国际快离子束光谱会议上, Engström^[12] 报告了一个用 ANDC 法处理级联跃迁的通用程序, 已用于许多实验, 结果令人满意。

实验上, Andrā 等人^[13] 提出了束-激光测量法, 即用激光束代替箔的作用, 使离子束有选择地激发到高能态上, 从而避免了级联效应。但这种方法目前只适用于那些与基态或亚稳态有偶极允许跃迁的高能态, 克服这一局限性的工作仍在进行中。此外, 还有一种采用光学符合技术来直接消除两能级级联跃迁影响的实验装置^[14], 其办法是测量两种跃迁光子的符合率。

在束箔实验中, 光学系统至少可以分辨出在离子飞行路程中相隔 1mm 的光强变化, 而离子的速度被限制在光速和能使离子穿过箔面而出射的最低速度(约 10^6 m/s) 之间, 因此束箔实验的寿命测量范围一般是 10^{-11} — 10^{-5} s。通过改进光学系统的空间分辨率及采用一些其他技术, 还可使测量范围扩展为 10^{-14} — 10^{-5} s。1978 年 Stellan^[15] 曾对这一问题进行了全面的评述。

人们在实验中发现, 随着原子结构的复杂化(例如铁族元素), 级联效应的影响可以忽略^[11], 所以束箔法测量原子、离子(特别是离子)的激发态寿命是非常适宜的。目前, 它和电子延迟符合测量法一起, 已成为测量激发态寿命的主要方法。

四、精细、超精细结构和兰姆位移的测量

束箔激发的时间非常短(约 10^{-14} s), 由测不准关系, 频率的不确定度为 $\Delta\nu \approx 10^{14}/2\pi$, 已超过原子的精细、超精细结构的裂距。因此, 束箔激发是相干激发, 出射粒子的量子态将是一些精细或超精细能态的相干叠加, 这些能态跃迁所产生的光将因为相干而产生拍频, 使得相应谱线的 $I(X)$ 成为振荡的指数衰减形状。对于两能级的相干, 它满足 $\Delta\nu \cdot \lambda = v$ (其中 λ 是量子拍波长, v 是粒子的速度)。根据此式可通过实验曲线 $I(X)$ 来计算能级差^[16]。但目前更为常用的数据处理方式是对测得的 $I(X)$ 进行傅里叶变换, 然后得到相应的频率谱。这

对于多分裂能级相干的数据处理尤为重要。

利用量子拍频现象，人们已测量了大量能级的精细、超精细结构，塞曼效应，斯塔克效应及 LS 耦合的 Landé g 因子。图 6 是 Wittmann

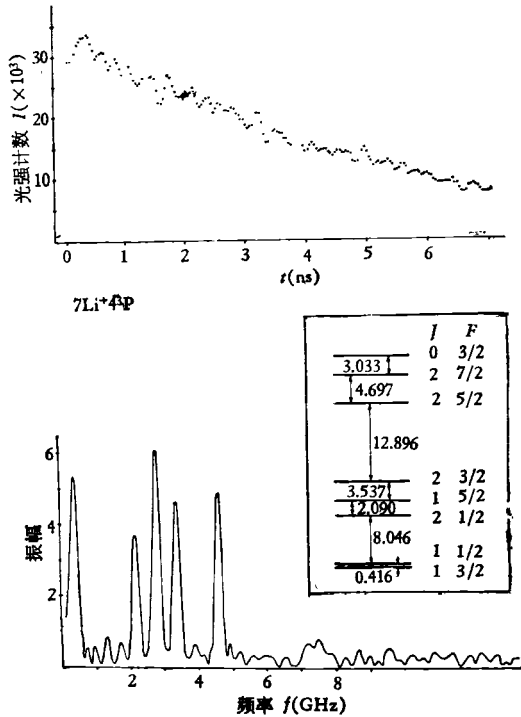


图 6 ${}^7\text{LiII}4^3\text{P}$ 的量子拍及傅里叶变换等^[17]测得的 ${}^7\text{LiII}$ 的 4^3P 能级的精细能态相干所形成的量子拍及相应的傅里叶变换谱。

从量子电动力学知道，类氢、类氦离子的兰姆位移与 Z^4 成正比(严格地说，这是最低阶效应)。在 Z 很大时，双电子体系的兰姆位移甚至可达几 \AA 。下面我们以类氢离子为例，简要说明类氢离子兰姆位移的测量方法。

对于类氢离子， $n = 2$ 的能级如图 7 所示。其中 $2^2\text{S}_{1/2}$ 是亚稳态，实验时要用斯塔克猝灭

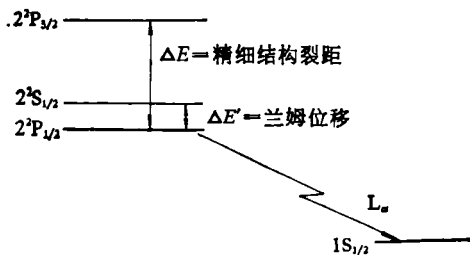


图 7 类氢离子的兰姆位移

技术使它与 $2^2\text{P}_{1/2}$ 态混合，以产生 $2^2\text{S}_{1/2}$ 的 L_α 跃迁。这时 L_α 线的跃迁寿命介于未受微扰时 $2^2\text{P}_{1/2}$ 和 $2^2\text{S}_{1/2}$ 的寿命之间，它对能级分裂的变化很灵敏，通过测量这个寿命值，在已知电场强度的情况下便可计算出兰姆位移值^[18]。Leventhal^[18] 曾用此法测得了好几种类氢离子的兰姆位移，与理论符合的较好。Berry 等人^[19]对 $Z = 2-26$ 范围内的类 He 离子的 $1s2s^3\text{S}_1-1s2p^3\text{P}_{0,2}$ 跃迁的兰姆位移实验值与理论值进行了比较，有些达到了千分之几的精度。

五、其它

近年来，在束箔光谱学中，关于束箔激发机制的研究也非常活跃。这主要包括出射粒子的电荷态、相对能级布居的测量以及辐射的角分布和偏振态的测量。特别是后者，由于这种角分布和偏振态是束箔激发的非各向同性所造成的，从这些量的测量可以推算出发光原子的非各向同性，进而研究束箔激发过程。1974 年后，Berry 等人^[20]把原来垂直于束流的箔倾斜放置，发现束箔光由原来的线偏振变成了椭圆偏振。理论分析指出，这是由于激发原子从排列态过渡到取向态所致。这一发现为这类测量提供了新的内容。

除了上面提到的几个方面外，束箔光谱学在等离子体物理、天体物理、激发物理等方面有许多具体的应用，它大大地促进了这些学科的发展。随着科学技术的发展，束箔光谱学的重要性必将会进一步显现出来。

本文曾得到北京师范大学物理系汪端伟老师的帮助，谨致感谢。

参 考 文 献

- [1] J. O. Stoner, Jr. and J. A. Leavitt, *Appl. Phys. Lett.*, **18**(1971), 368.
- [2] C. Jupén, *Nucl. Inst. Meth.*, **202**(1982), 25.
- [3] J. A. O'Neill, E. H. Pinnington et al., *Phys. Scr.*, **20**(1979), 60.
- [4] J. A. Kernhan et al., *J. Opt. Soc. Am.*, **70**(1980), 1126.

- [5] J. Bromander, *Nucl. Inst. Meth.*, **110**(1973), 11.
- [6] N. Andersen et al, *Phys. Scr.*, **3**(1971), 255
- [7] N. Andersen et al., *Z. Physik*, **253**(1972), 53
- [8] I. Martison, in *Beam-Foil Spectroscopy* (ed. by S. Bashkin), Spring-Verlag, (1976), 33.
- [9] I. Martison, in *Beam-Foil Spectroscopy* (ed. by Bashkin), Spring-Verlag, (1976), 52.
- [10] R. Brooks, E. H. Pinnington, *Phys. Rev. A*, **22** (1980), 529.
- [11] J. R. Mowat et al., *Phys. Rev. A*, **8**(1973), 145.
- [12] L. Engström, *Nucl. Inst. Meth.*, **202**(1982), 369.
- [13] H. J. Andrä et al., *Phys. Rev. Lett.*, **31**(1973), 601.
- [14] K. J. Masterson, J. O. Stoner, *Nucl. Inst. Meth.*, **110**(1973), 441.
- [15] I. A. Stellin, *Structure and Collisions of Ions and Atoms*, Spring-Verlag, (1978), 273.
- [16] B. I. Deutch, 刘崇恒、陆福全等, *复旦学报* **18-2** (1979), 205
- [17] W. Wittmann et al., *Nucl. Inst. Meth.*, **110** (1973), 305.
- [18] M. Leventhal, *Nucl. Inst. Meth.*, **110**(1973), 343.
- [19] H. G. Berry et al., *Nucl. Inst. Meth.*, **202**(1982), 95
- [20] H. G. Berry et al., *Phys. Rev. Lett.*, **32**(1974), 251.



国际纯粹和应用物理学联合会简介

国际纯粹和应用物理学联合会 (International Union of Pure and Applied Physics, 简称 IUPAP) 是国际科学联合会理事会 (International Council of Scientific Unions, 简称 ICSU) 下属二十个科学联合会之一。它受到联合国教科文组织 (UNESCO) 的资助, 是一个非政府性的国际学术组织。其宗旨是鼓励和促进物理学的国际合作, 赞助适当的国际会议, 并协助会议的组织委员会工作, 支持论文摘要的准备和出版, 促进国际上接受所有的符号、单位、命名和标准, 支持科学家自由交往, 鼓励科研和教育。

IUPAP 于 1922 年在布鲁塞尔成立, 现有 44 个国家和地区的物理学学会参加: 阿根廷、澳大利亚、奥地利、比利时、玻利维亚、巴西、保加利亚、加拿大、智利、中国、中国台北、古巴、捷克斯洛伐克、丹麦、埃及、芬兰、法国、民主德国、联邦德国、匈牙利、印度、爱尔兰、以色列、意大利、日本、南朝鲜、利比亚、墨西哥、荷兰、新西兰、挪威、波兰、葡萄牙、罗马尼亚、南非、西班牙、瑞典、瑞士、叙利亚、土耳其、苏联、英国、美国、南斯拉夫。

联合会的最高权力机构是全体大会, 一般每三年召开一次。联合会现设 19 个专门的国际委员会 (C.1 财务, C.2 符号、单位、命名、原子质量和基本常数, C.3 热力学和统计力学, C.4 宇宙线, C.5 极低温物理, C.6 出版, C.7 声学, C.8 半导体, C.9 磁学, C.10 凝聚物质的结构和动力学, C.11 粒子和场, C.12 核物理, C.13 物理开发, C.14 物理教育, C.15 原子和分子物理和光谱学, C.16 等离子体物理, C.17 量子电子学, C.18 数学物理, C.19 天体物理) 和两个附属委员会 (A. C.1 光学, A. C.2 广义相对论和引力)。

在 IUPAP 的历届主席、副主席、秘书长和执委会中有不少国际上最知名的杰出物理学家, 如 W. 布喇格, H. A. 洛仑兹, R. A. 密立根, E. 费密, H. A. 克喇末等。六十多年来 IUPAP 在推动物理学界的国际合作和物理学的进步方面作出了重大的贡献。

(赵凯华)



国际纯粹和应用物理学联合会 (IUPAP) 接纳中国物理学会为会员

国际纯粹和应用物理学联合会于 1984 年 10 月 8—11 日在意大利的里雅斯特 (Trieste) 召开了第十八次全体大会, 中国物理学会派遣周光召、赵凯华和杜祥瑞组成的代表团参加了大会。大会通过决议, 接纳中国物理学会为会员 (四票表决权)。与此同时, 中国台北物理学会保留席位 (一票表决权)。大会改选了领导成员和各专门的委员会委员, 我国有四名学者分别被选入半导体 (黄昆)、凝聚物质的结构和动力学 (于渌)、粒子和场 (周光召)、物理开发 (章综) 等委员会。

(赵凯华)