



## I. 电子动量谱学简介

电子动量谱学基于运动学完备的(e,2e)碰撞电离实验，通过符合测量两个出射电子的角度和能量，得到电子结合能和被敲出以前在原子分子中的动量。在适当条件下，测量得到的微分散射截面和动量空间的轨道密度成正比。这一独特的特点使得电子动量谱学成为研究电子结构和电子碰撞动力学强有力的工具。根据能量守恒、动量守恒，有：

$$E_0 = E_1 + E_2 + e_f \quad e_f \text{ 为电子在靶物质中的结合能}$$

$$\vec{p}_0 = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 - \vec{p} \quad \vec{p} \text{ 为电子被敲出前在靶物质中的动量}$$

在非共面对称几何条件下(图1), 有

$$p = \left[ (2p_f \cos\theta_f - p_0)^2 + [2p_f \sin\theta_f \sin(\frac{f}{2})]^2 \right]^{1/2}$$

在平面波冲量近似下，碰撞微分散射截面：

$$\frac{d^3s}{d\Omega_1 d\Omega_2 dE_2} \propto \int d\vec{p} \left| \langle e^{-i\vec{p}\cdot\vec{r}} \Psi_f^{N-1} | \Psi_i^N \rangle \right|^2 \propto \int d\Omega |j(p)|^2$$

初态分子和末态离子的重叠积分  $\langle \Psi_f^{N-1} | \Psi_i^N \rangle$  称为Dyson轨道，可以近似用Hartree-Fock或Kohn-Sham分子轨道  $\phi(\vec{p})$  表示，也可以用多体理论直接计算。因此通过对散射截面的测量，可以得到各个分子轨道在动量空间的密度分布。 $\int d\Omega$  表示对空间随机取向的气体分子的球平均。

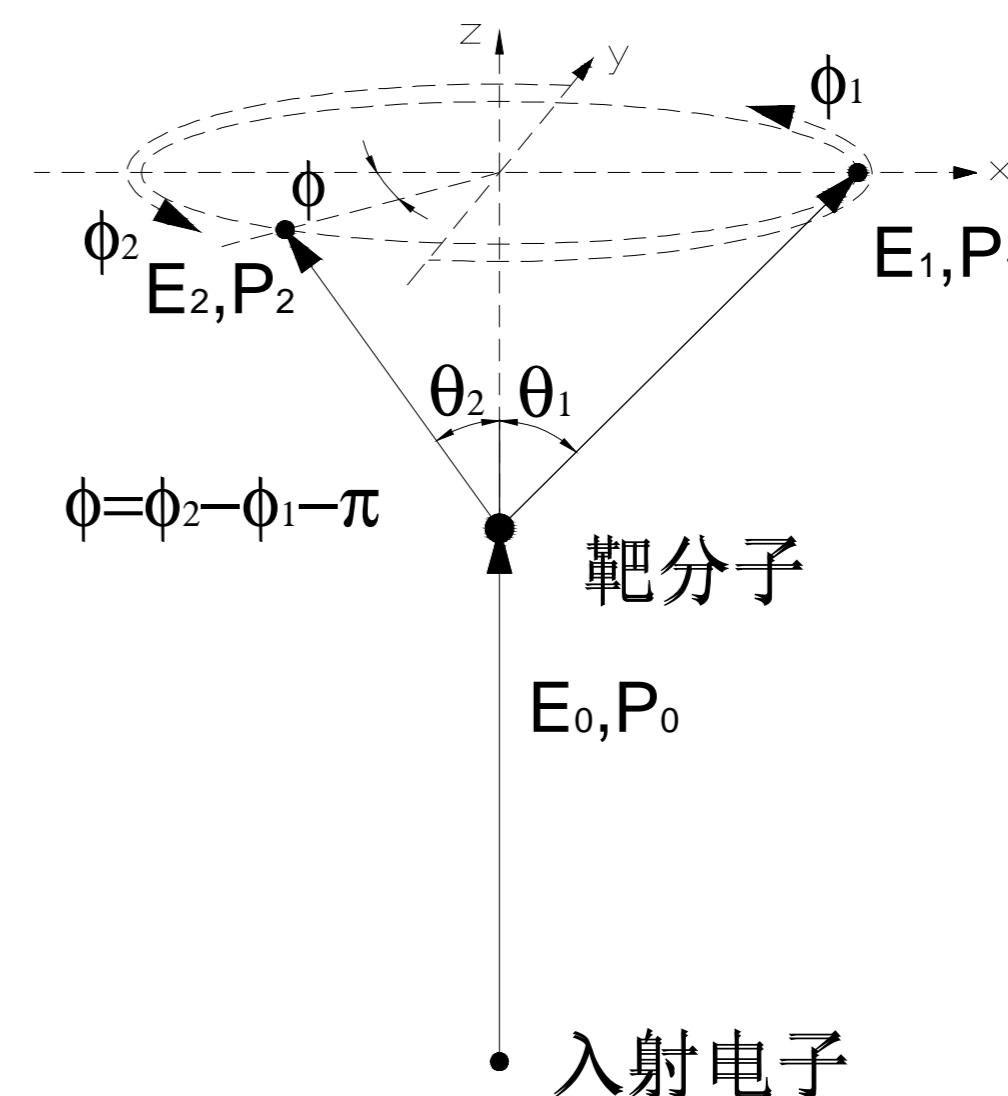


图1 (e, 2e) 反应的非共面对称几何条件。

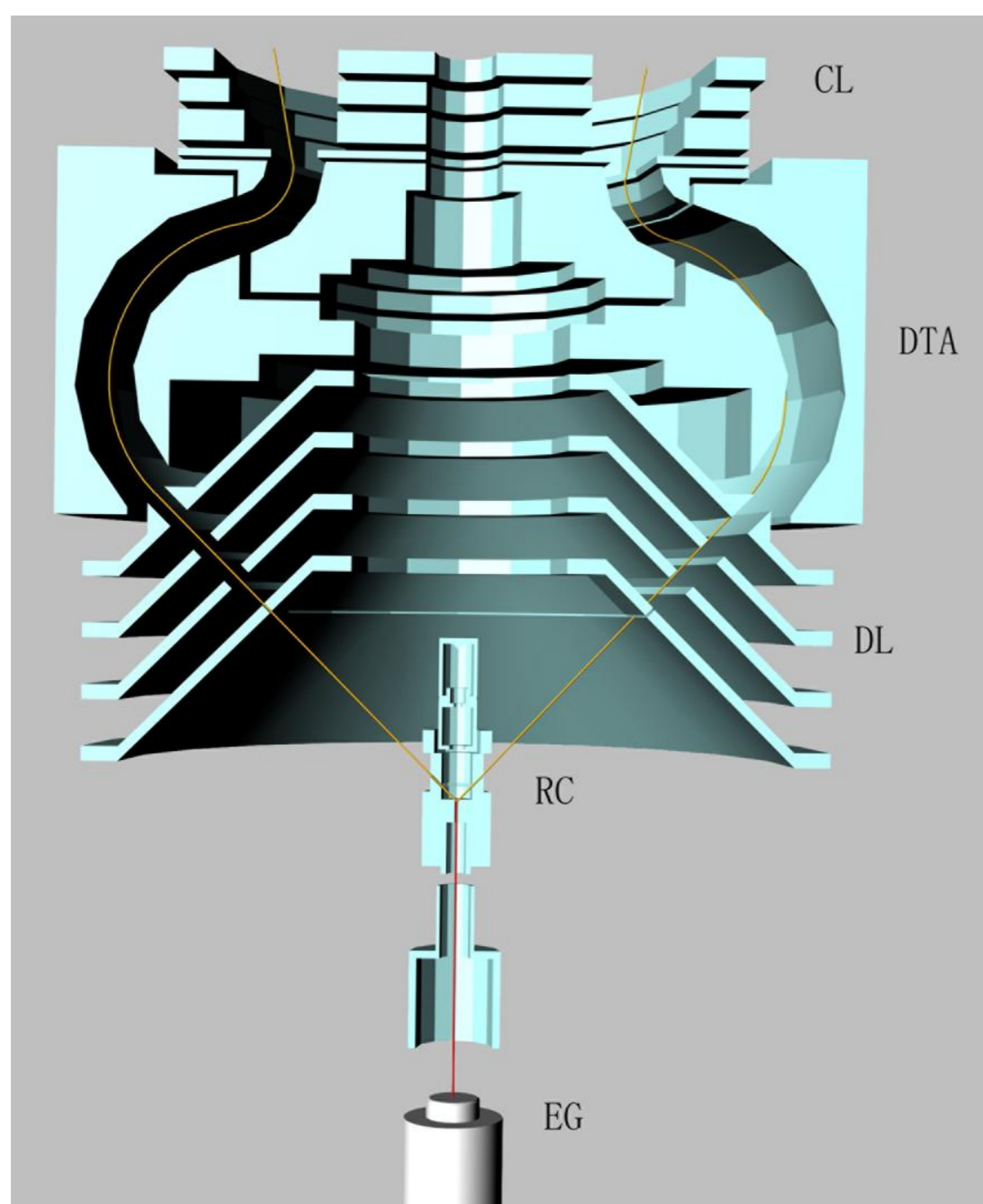


图2 本实验室研制的高分辨第三代电子动量谱仪。  
EG: 电子枪; RC: 碰撞室; DL: 圆锥减速透镜  
DTA: 双环形分析器; CL: 修正透镜

实验上利用双环形能量分析器(图2)分析电子的能量和角度，通过两个电子位置灵敏探测器进行符合测量(图3)，得到被敲出前电子的结合能和动量。

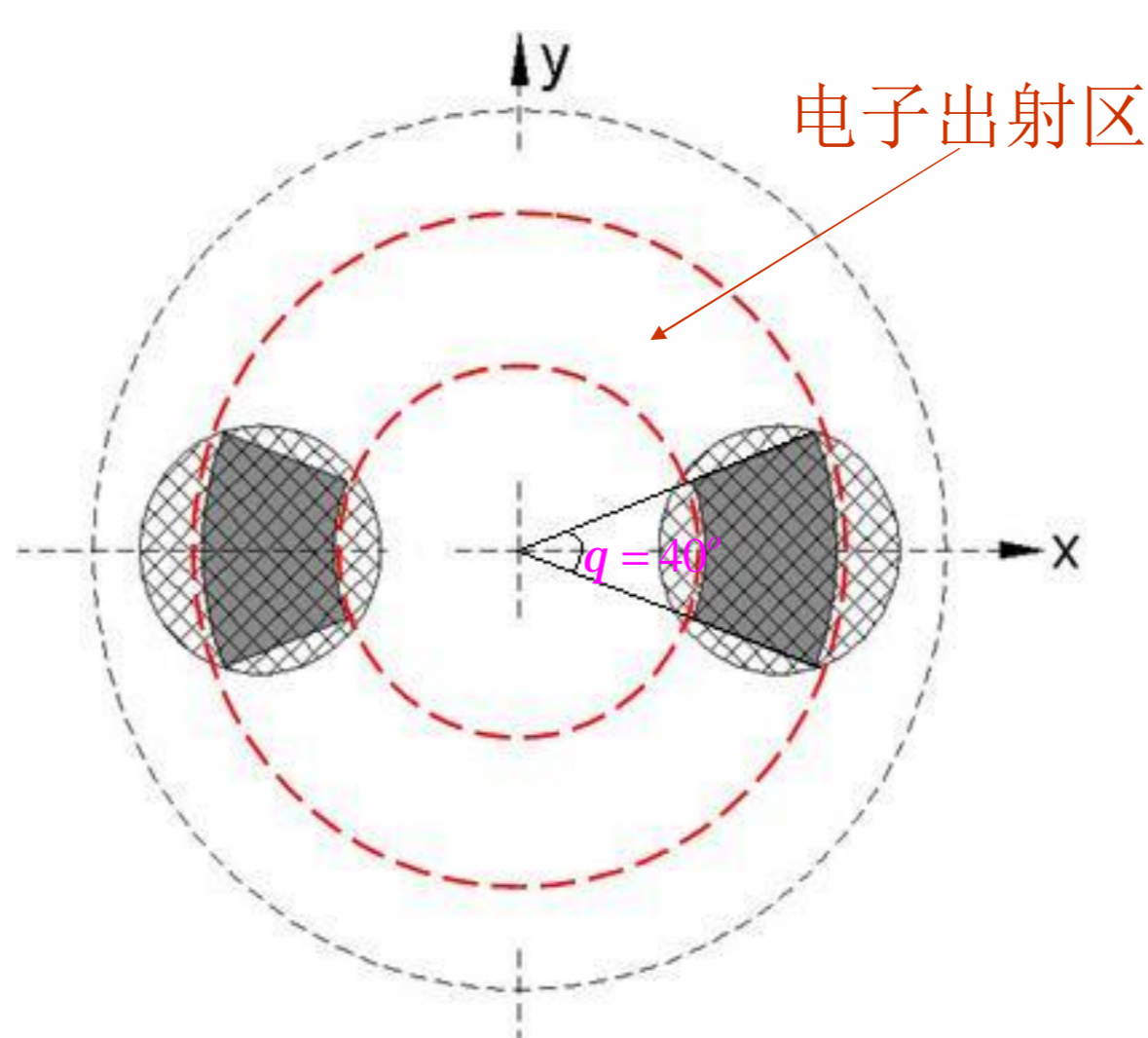


图3 (e,2e)符合测量的两个二维位置灵敏探测器和探测面

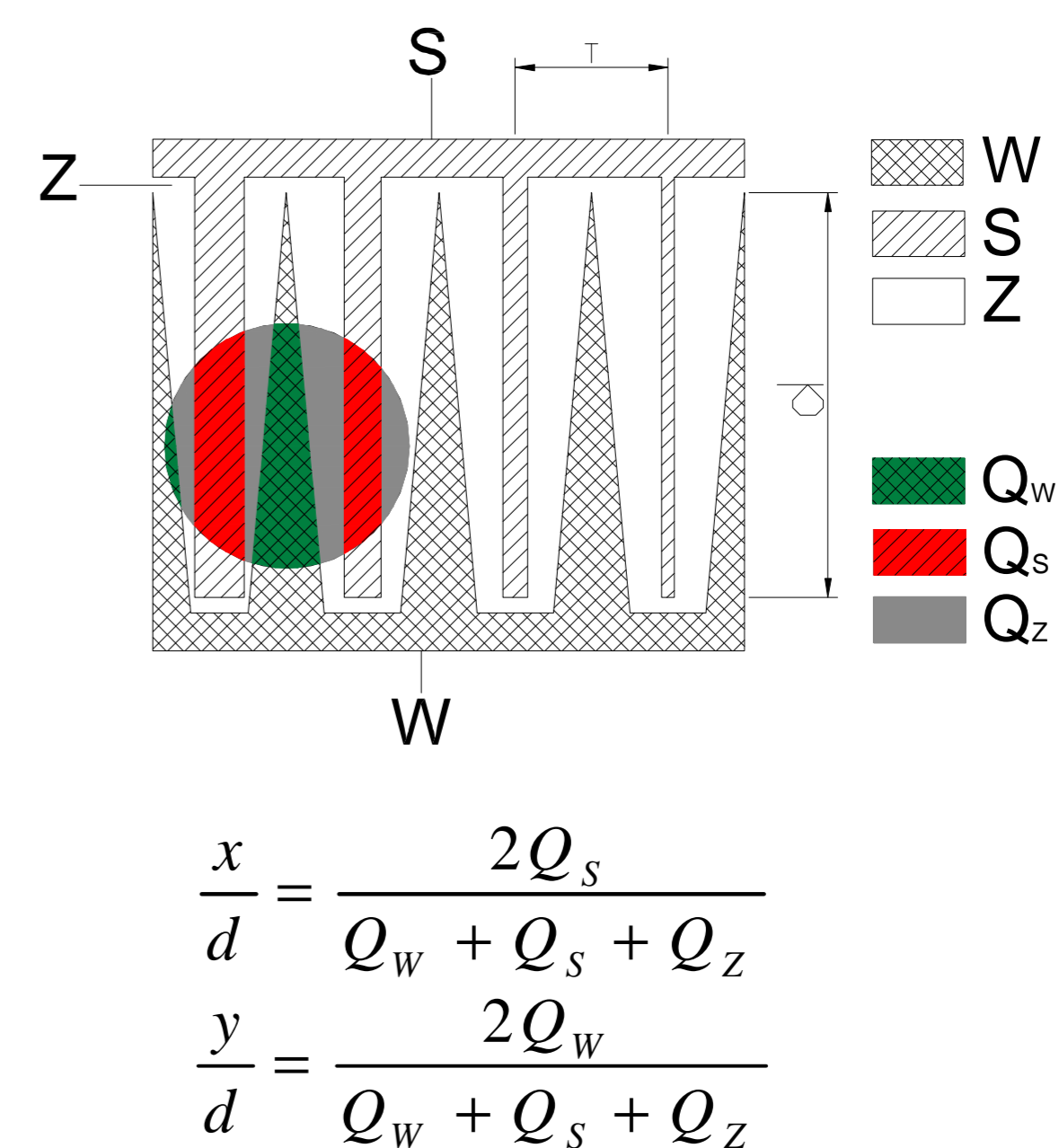


图4 楔条型二维位置灵敏探测器的测量原理

符合测量系统采用快慢符合的方式，时间符合分辨率可以达到~1ns，可以有效地排除偶然符合的影响，提高(e,2e)事件测量的信噪比。对慢信号(代表位置的电荷信号)的幅度测量可以实现对电子的能量和角度的高精度测量，目前位置分辨率可以达到150μm。图5是探测器的刻度(前景)和实时数据获取界面(背景)。获取到的数据采用逐一事件方式(event by event)记录，供后续离线分析。图6是测量得到Ar的电子动量谱。Ar常被用来检测谱仪的性能。

由于采用了双环形分析器和大面积位置灵敏探测，使得第三代电子动量谱仪的效率比单角度扫描式的第二代谱仪高了两个数量级以上。我们研制的谱仪还可以在多个入射能量下进行实验，目前可以在400—2400 eV可调，因而还可以开展碰撞动力学研究。

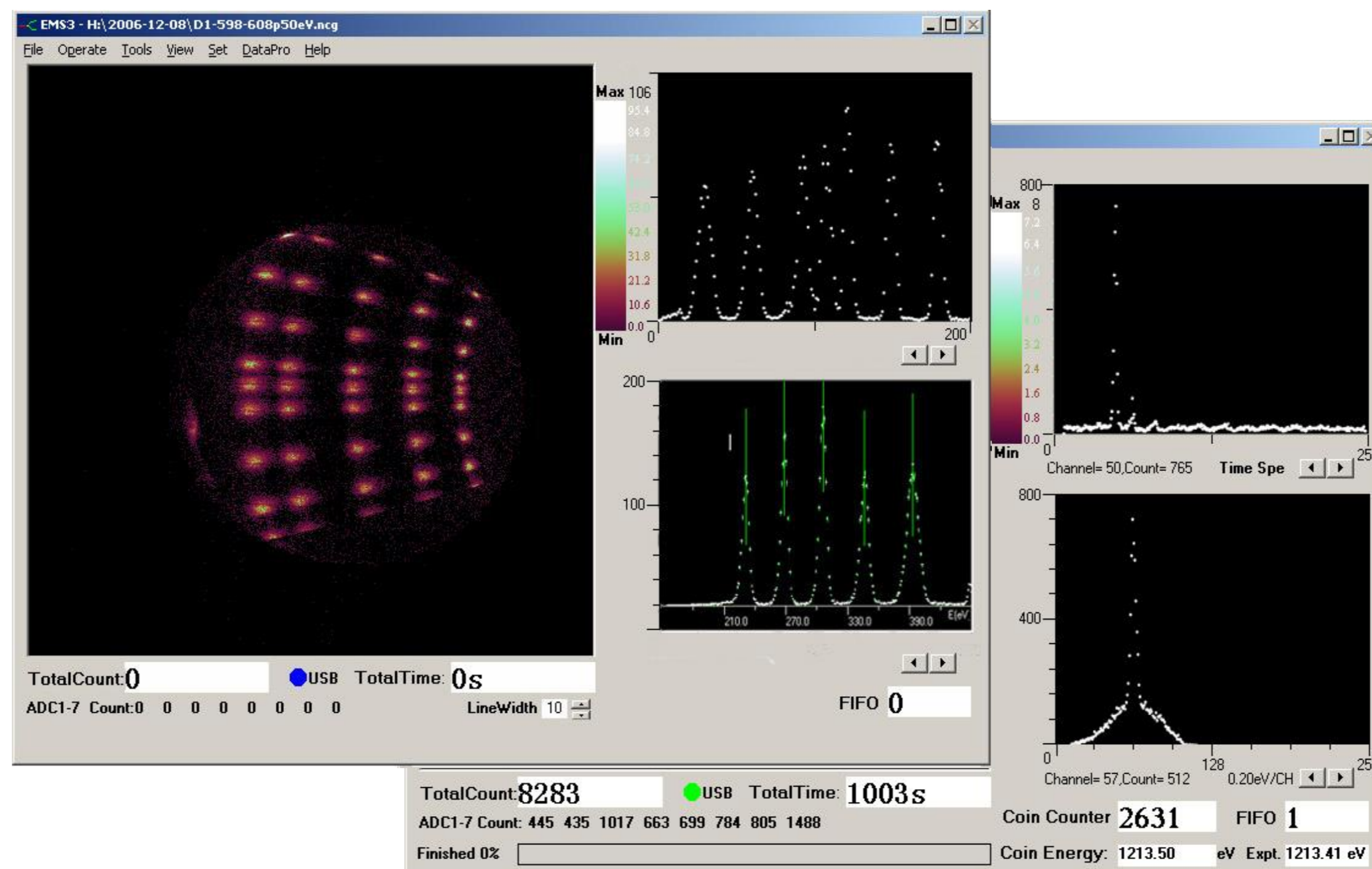


图5 探测器的刻度和数据获取



# Electron Momentum Spectroscopy

## II. 谱仪的性能：氩原子的电子动量谱

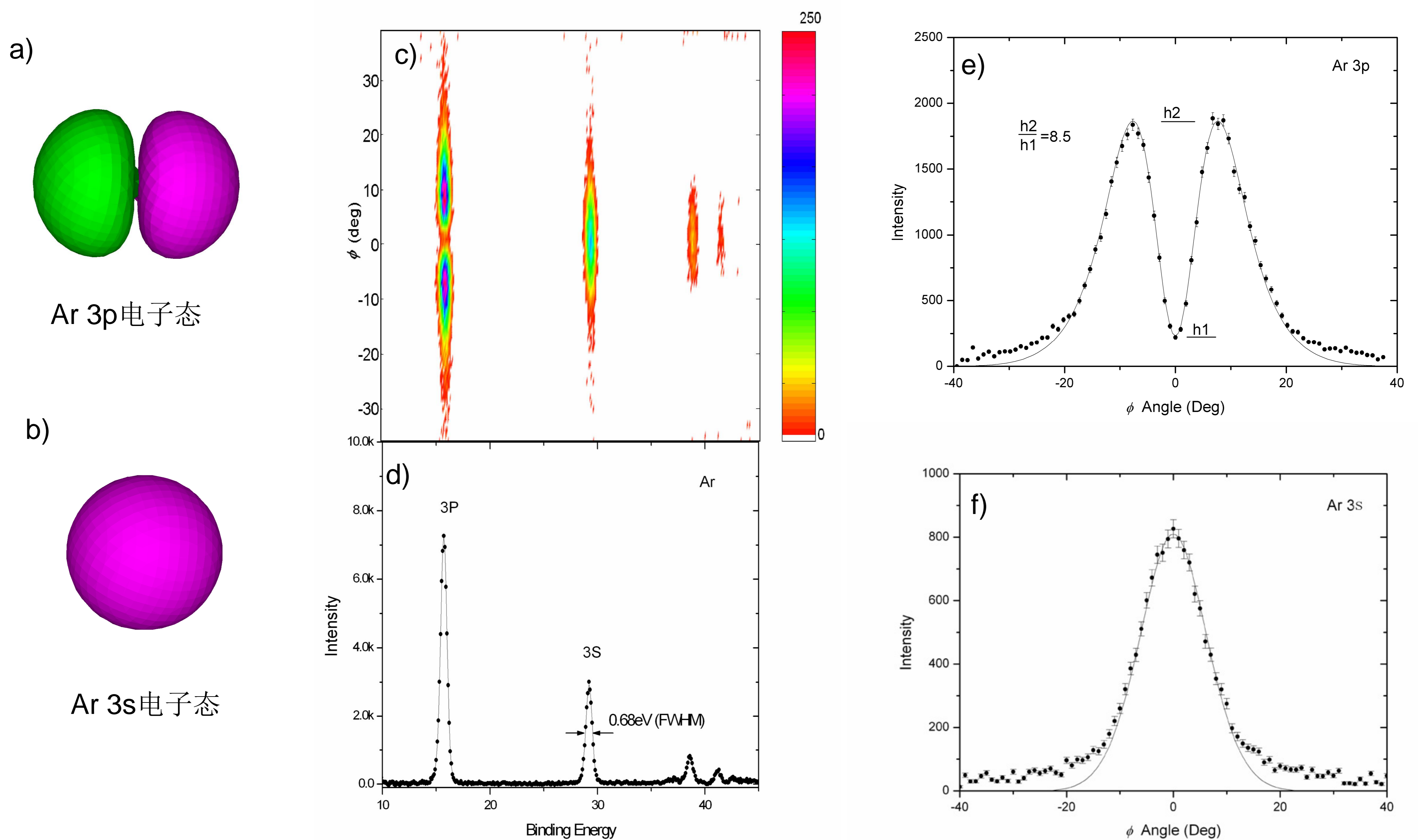


图6 入射能为1200 eV时测量得到的氩原子电子动量谱。a) Ar 3p轨道图； b) Ar 3s轨道图； c) 测量得到Ar的角度-结合能二维密度分布； d) 所有角度加和以后的结合能谱； e) Ar 3p轨道的动量谱； f) Ar 3s轨道的动量谱。

目前，谱仪的能量分辨为 $\Delta E = 0.68$  eV (FWHM)，方位角的分辨率 $\Delta f = 0.84^\circ$  (一个标准偏差)，而极角的接受范围 $\Delta q = 0.53^\circ$  (一个标准偏差)。图6 e)中Ar 3p的峰谷比是反映动量分辨率的最直接的实验指标，我们可以达到8.5: 1。如果进入分析器的电子被进一步减速，从现在的通过能50 eV减速到30 eV，还可以进一步提高能量分辨，如图7所示，能量分辨率达到了0.45 eV，可以分辨Kr的4P<sub>3/2</sub>和4P<sub>1/2</sub>的旋轨劈裂。

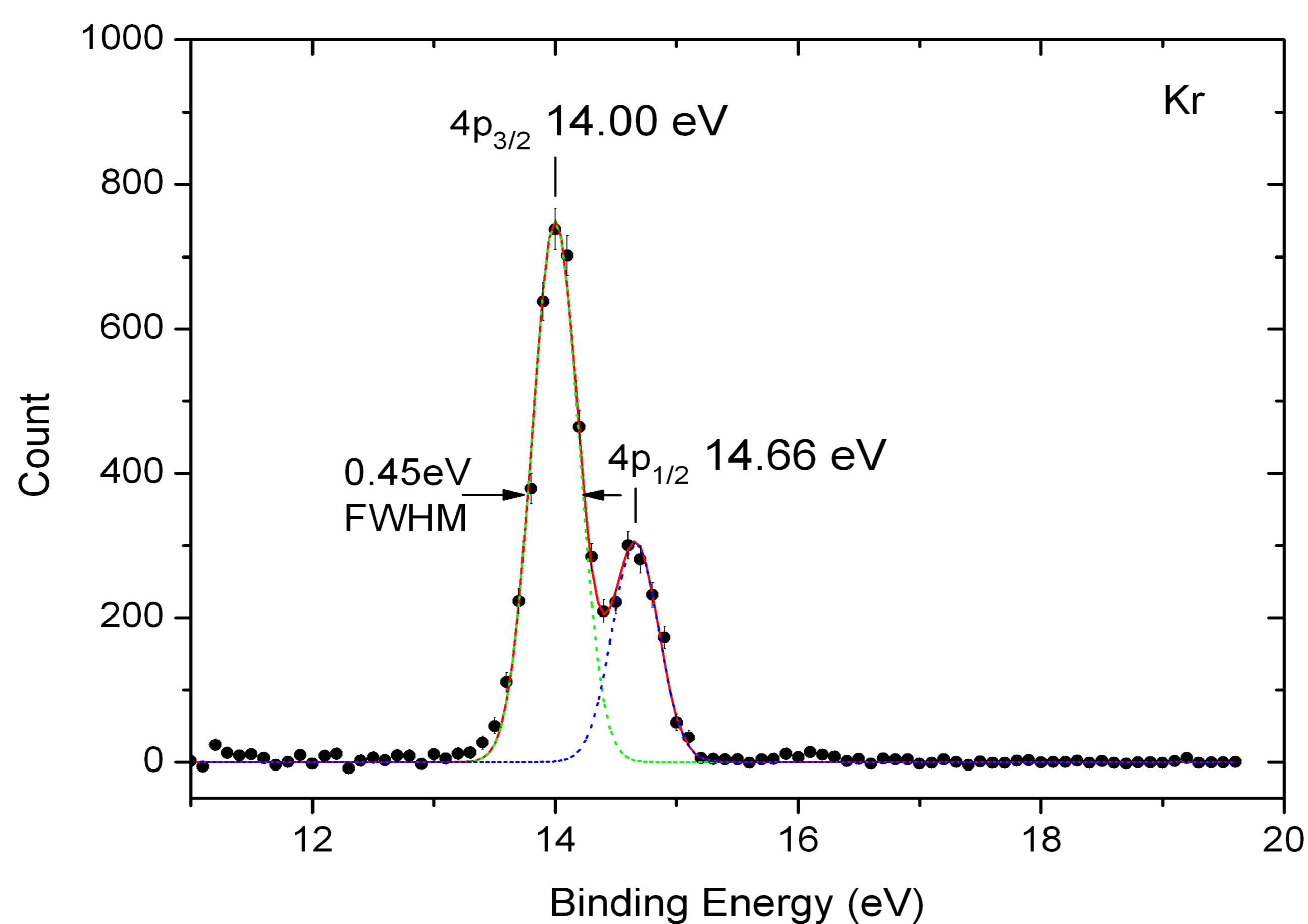


图7 Kr原子4P电子结合能谱

Ning *et al* Chin. Phys. B17, 1729 (2008)  
Ren *et al* Rev. Sci. Instrum. 76, 063103 (2005)  
Ning *et al* Rev. Sci. Instrum. 75, 3062 (2004)