

# 用 $^1\text{H}(^{19}\text{F},^{16}\text{O}^*)\alpha$ 反应分析氢分布

乔颖<sup>1</sup>

1. 北京大学物理学院, 海淀区 北京 100871;

## 1 原理

### 1、共振核反应选择

本实验采用  $^1\text{H}(^{19}\text{F},^{16}\text{O}^*)\alpha$  共振核反应来测量氢在样品中的分布。

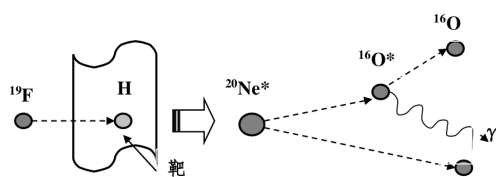


图 1  $^1\text{H}(^{19}\text{F},^{16}\text{O}^*)\alpha$  共振核反应

入射粒子  $^{19}\text{F}$  轰击靶核, 生成处于激发态的  $^{20}\text{Ne}^*$  核, 它退激后发射  $\alpha$  粒子和处于激发态的  $^{16}\text{O}^*$  核,  $^{16}\text{O}^*$  核退激后回到基态同时发射  $\gamma$  光子。该共振态的末态有  $\alpha$  和  $\gamma$  粒子。测量必须在真空下进行。我们只需测量  $^{16}\text{O}^*$  核退激发射的  $\gamma$  光子产额, 以确定样品中氢的含量。

反应截面随入射粒子能量变化的曲线称为核反应的激发曲线。 $^1\text{H}(^{19}\text{F},^{16}\text{O}^*)\alpha$  的激发曲线如图所示。

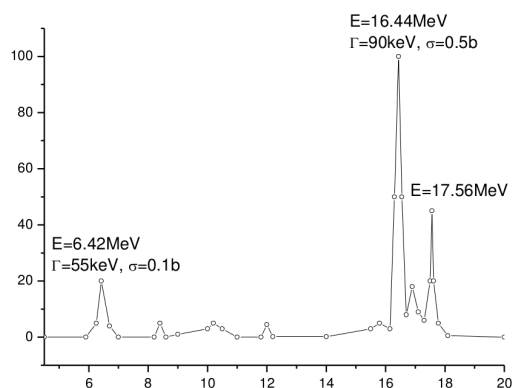


图 2  $^1\text{H}(^{19}\text{F},^{16}\text{O}^*)\alpha$  共振核反应激发曲线

对不同的入射离子能量, 该核反应主要有两个主要的共振峰, 分别在 6.42MeV 和 16.44MeV。共振峰的形状用 Breit-Wigner 公式描述:

$$\sigma(E) = \frac{\sigma_R}{1 + \left(\frac{E - E_R}{\Gamma/2}\right)^2} \quad (1)$$

其中  $\Gamma$  为共振峰宽度,  $E_R$  为共振能量,  $\sigma_R$  为共振截面。实验采用 6.42MeV 的共振 ( $\Gamma=55\text{keV}, \sigma=0.1\text{b}$ ) 测量氢分布。

6.42MeV 的共振核反应产生的  $^{16}\text{O}$  处于激发态, 退激时发出能量分别为 6.13, 6.92, 7.12MeV 的  $\gamma$  光子其中 6.13MeV 的光子的分支比为 97%, 因此测量时不考虑其他两种光子。

### 2、氢分布分析原理

入射能量为  $E_0$  (高于共振能量) 的 F 离子打到样品上, 进入样品后逐渐损失能量。设在深度  $x$  处, F 离子的能量损失了  $\Delta E$  后变为  $E$ 。

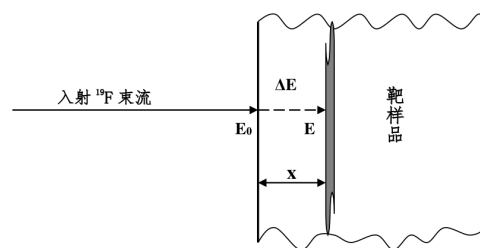


图 3 氢分布分析示意图

## a、深度分析

F 离子只有其能量为  $E_R$  时才和样品中的氢发生反应，

$$E = E_0 - \Delta E \approx E_0 - \left| \frac{dE}{dx} \right| \times x = E_R \quad (2)$$

因此发生核反应的深度  $x$  为：

$$x = \frac{E_0 - E_R}{\left| \frac{dE}{dx} \right|} \quad (3)$$

F 离子束流能量  $E_0$  和加速器高压的关系为  $E_0 = HV \times (4+1) \text{MeV}$ ，则

$$x(A) = \frac{[HV \times (4+1) - 6.42] \times 10^6 (eV)}{|dE/dx| (eV/A)} \quad (4)$$

改变加速器能量  $HV$ ，不同入射能量的 F 离子就会和不同深度的氢发生核反应，记录反应后产生的光子产额，就可以得到样品中的氢分布。

## b、含量分析

假设标准样品中，氢沿深度均匀分布，且氢含量  $C_{st}$  已知，测得  $\gamma$  光子计数为  $N_{st}$ ，测得未知样品中的  $\gamma$  光子数为  $N$ ；则待测样品的氢含量为

$$C = C_{st} \times \frac{\left| \frac{dE}{dx} \right|_{E=E_R} \times N}{\left| \frac{dE}{dx} \right|_{st(E=E_R)} \times N_{st}} \times \frac{\rho_{st}}{A_{st}} \times \frac{A}{\rho} \quad (5)$$

对公式 5 的理解：

探测到的  $\gamma$  光子的数量  $N$  可以写为

$$N = \frac{\phi_F S \sigma C \rho}{A} \times dx \quad (6)$$

其中  $\phi_F$  为入射 F 离子数量， $\sigma$  为反应截面， $S$  为束流面积， $dx$  为在材料中能发生反应的厚度。设在共振能量  $\Delta E_R$  的范围内能发生反应，则  $dx = \frac{\Delta E_R}{\left| dE/dx \right|_{E=E_R}}$ 。因此可以得到式 5。

## 2 实验步骤

## 1、测量标准样品

标准样品所含的氢均匀分布在  $2\mu\text{m}$  的非晶硅层，含氢原子比为 13.9%。标准样品的测量数据如下：

表 1 标准样品测量数据

电压/MV	电流/nA	时间/s	计数
1.30	260	77	2294
1.35	260	75	2310
1.40	260	80	2415
1.45	260	76	2336
1.50	260	78	2545

## 2、测量待测样品 (样品 10)

10 号待测样品是不锈钢，具体的测量数据如下表所示：

表 2 10 号待测样品测量数据

电压/MV	电流/nA	时间/s	计数
1.26	260	78	176
1.29	225	89	1467
1.32	270	78	1199
1.35	270	77	1102
1.38	280	72	835
1.41	300	68	288
1.44	310	66	99

## 3 数据分析

首先是对标准样品的分析。标准样品的含 H 量为 13.9%，利用 SRIM 程序可以得到能损本领和能量之间的关系。cubic 插值之后可以得到在我们感兴趣的 6.42MeV 能量处的能损。能损为 173.28eV/A。

标准样品的 H 分布是均匀的，所以可以得到其平均计数为 2380。因此可以得到公式 5 中的各个参数。有

$$C_{st} = 0.139$$

$$N_{st} = 2380$$

$$\left| \frac{dE}{dx} \right|_{st(E=E_R)} = 173.28 eV/A$$

$$\rho_{st} = 2.0085$$

$$A_{st} = 24.147$$

因此可以根据公式 5 来计算待测样品的具体结果。当电压为 1.26MV 时加速器得到的能量小于共振

能量，因而不会发生共振，所以不与考虑，其他电压情况下可以根据迭代法得到氢含量和电压的关系，数据表如下所示：

表 3 10 号待测样品氢含量信息

电 压/MeV	氢含 量/%	能损本 领/ $\text{eV}\cdot$ $\text{\AA}^{-1}$	对应深 度/ $\text{\AA}$
1.26	-	-	-
1.29	12.26	426.6900	70.31
1.32	10.25	434.9050	413.88
1.35	9.49	438.0130	753.40
1.38	7.33	446.8270	1074.24
1.41	2.64	466.1560	1351.48
1.44	0.92	473.2780	1648.08

由此可以得到样品的氢含量，可以看到随着深度逐渐的加深，氢含量急剧的减少。这样符合待测样品（不锈钢）的特性。

4 参考文献

[1] Peking Unviersity, Fudan University Nuclear Experiment Nuclear Publishing House, 1989 (in Chinese)  
(北京大学，复旦大学. 原子核实验 原子能出版社, 1989)