

# 略谈奇特原子化学

## ——基本粒子化学

王 蕴 玉

### 一、奇特原子化学是基本粒子物理与化学相互渗透的边缘学科

奇特原子化学是随着基本粒子物理的发展和高能加速器的建造而兴起的一个新的化学分支。最初主要是研究 $\mu$ 子和 $\pi$ 介子、 $K$ 介子引起的化学效应和介子原子的形成与化学性质之间的关系，统称为“介子化学”。随着基本粒子家族的扩大，七十年代已观测到反质子原子和超子原子的形成，这些原子均属于奇特原子。奇特原子化学就是研究它们的化学效应和它们的形成与化学性质之间的关系。最终的目的是为了利用更多的基本粒子来定性、定量地分析物质的组成；更详细地研究分子的结构和化学动力学过程；阐明至今用其它方法尚不能解答的化学问题。

奇特原子有两类。一类是指原子轨道上的一个负电子被其它荷负电的粒子代替，例如，以负 $\mu$ 子代替一个电子形成的原子称为 $\mu$ 原子，以负 $K$ 介子代替一个电子的称为 $K$ 原子；另一类奇特原子是指原子核不是由质子和中子组成，而是由 $e^+$ 、 $\mu^+$ 或正超子等正粒子组成。这类原子一般是在该基本粒子的英文名称后加“ium”，例如，“Positronium”、“Muonium”等，可译成正子素、 $\mu$ 子素。

### 二、奇特原子的形成和特性

**1. 奇特原子的形成** 用中、高能加速器产生的二次粒子，如 $\mu^-$ 、 $\pi^-$ 、 $K^-$ 、 $\bar{p}$ 或负超子等射到被研究的物质中，负粒子经过慢化，被俘获在原子轨道上，形成高激发态的奇特原子，然后经释放一系列特征的X射线，跃迁至基态（图1）。

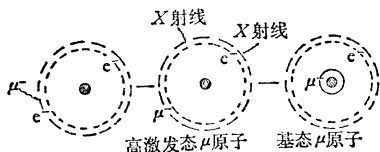


图1 负 $\mu$ 子被原子俘获形成高激发态奇特原子，经释放X射线跃迁至基态奇特原子，然后经释放一系列特征的X射线，跃迁至基态（图1）。

正子素和 $\mu$ 子素的形成则是用 $e^+$ 或 $\mu^+$ 射入物质，它们与一个电子结合形成一种类似氢原子的体系



图2 正子素和 $\mu$ 子素的示意图

（图2）。

**2. 奇特原子的特性** 由负粒子形成的奇特原子具有两个重要的特性：

（1）奇特原子比普通原子小得多，已知原子轨道上的负粒子运动半径与负粒子的质量成反比：

$$a_n \sim \hbar^2 n^2 / (m Z e^2) \quad (1)$$

式中， $a_n$ ——主量子数为 $n$ 的轨道半径  
 $\hbar$ ——普朗克常数/ $2\pi$   
 $m$ ——轨道上负粒子的质量  
 $Z$ ——原子序数  
 $e$ ——电子电荷量

由于组成奇特原子的负粒子的质量均比电子质量大得多。如 $\mu$ 子的质量为电子质量的207倍， $K$ 介子几乎比电子重一千倍，超子的质量更大。故，在 $n$ 相同时， $\mu$ 子的轨道半径是电子轨道半径的 $1/207$ ；在 $K$ 原子中，负 $K$ 介子距原子核的距离比电子的距离小一千倍。已知正常原子的半径和原子核的半径分别是 $10^{-8}$ 和 $10^{-12}$ 厘米的数量级。所以， $K$ 原子的大小与原子核的大小已相差不多； $K$ 介子距原子核的表面很近，利用奇特原子的这一特点来研究核的表面性质是很有效的。

从（1）式可看出，在 $\mu$ 原子中，由于 $\mu$ 子质量是电子质量的207倍，即使 $n=1$ 的基态电子轨道，对于 $\mu$ 子，还相当于 $n_\mu = \sqrt{207} \sim 14$ 。也就是说，在电子轨道上的 $\mu$ 子都处于高激发态。它要往低能态跃迁，从而释放出很丰富的 $\gamma$ 射线。

（2）奇特原子的能级比正常原子的能级大；负粒子向低能态跃迁时，释放的X射线比电子跃迁释放的X射线能量高。

\*  $\mu$ 子不是介子，属于轻子类。

已知原子的能级与其负粒子的质量成正比:

$$E_n \sim -mZ^2e^4/(2\hbar^2n^2)$$

式中符号意义同(1)式。 $K$ 介子比电子重一千倍,在 $K$ 原子中, $K$ 介子从一个能级跳到另一能级时释放(或吸收)的能量是电子做同样跃迁的一千倍.一般正常原子放出的电子 $x$ 射线,能量最高也只有几千电子伏,而奇特原子放出的介子 $x$ 射线可达几百万电子伏以上.研究奇特原子主要即根据测这些高能量的 $x$ 射线.

**3. 正子素和 $\mu$ 子素的特性** 正子素和 $\mu$ 子素是指正电子或正 $\mu$ 子与电子组成的结合体 $e^+-e^-$ 和 $\mu^+-e^-$ .从化学观点看,它们都是氢的同位素,但比氢原子轻得多. $e^+$ 和 $e^-$ 相遇要发生湮没,放出两个511keV的 $\gamma$ 射线. $e^+$ 发生湮没的几率、放出 $\gamma$ 射线的能量和角度分布都与电子的状态直接有关.此外,在不同的物质中形成正子素的几率也与物质的化学结构和性质密切相关.所以 $e^+$ 已成为研究物质微观结构的探针,称为正电子湮没技术(PAT).

$\mu^+$ 是由 $\pi^+$ 衰变得到的.它有一个重要的性质,即行进方向与自旋方向相反,称为纵向极化.这种极化的 $\mu$ 子通过物质时,由于受电子自旋磁矩的作用而发生退极化.根据 $\mu$ 子极化度的改变可以了解物质的结构特征,特别适用于研究材料的磁性质.这种技术与核磁共振(NMR)、电子自旋共振(ESR)有相似之处,称为“ $\mu$ 子自旋共振”( $\mu$ SR)或“ $\mu$ 子自旋转动”.近年来,这种新的核技术在固体物理和化学研究中已发挥了引人注目的作用.

### 三、奇特原子化学的研究内容

1.早在1947年费米-泰勒通过研究金属合金对 $\mu$ 子的俘获,发现各种原子俘获 $\mu$ 子的几率与原子序数 $Z$ 成正比,提出:

$$W_Z/W_{Z'} = jZ/kZ'$$

式中 $W_Z$ 和 $W_{Z'}$ 分别代表在 $Z_1Z'_k$ 型化合物中元素 $Z$ 和 $Z'$ 对 $\mu$ 子的俘获几率. $j$ 和 $k$ 分别代表 $Z$ 和 $Z'$ 原子的数目.

这就是费米-泰勒的 $Z$ 定律.为了验证这个定律,二、三十年来做了大量的实验,研究了在金属合金、混合气体、离子化合物、氧化物和有机分子等各种体系中,各元素俘获负介子或负 $\mu$ 子的相对几率与原子序数 $Z$ 的关系.实验结果表明, $Z$ 定律并不是一个普遍适用的定律.除了金属合金、惰性气体混合物和一部分离子化合物之外,在许多情况下,形成介子原子的几率与 $Z$ 之间并不是简单的正比关系,这是由于化学结构对奇特原子的形成还有着影响.这种影响有时表现十分强烈.但是,早期的工作并未考虑此因素.

1965年Zinov详细地研究了从氧化铍( $Z=4$ )直到氧化钋( $Z=84$ )一系列氧化物.根据测定形成 $\mu$ 原子时释放的特征 $x$ 射线,发现各种原子对 $\mu^-$ 的

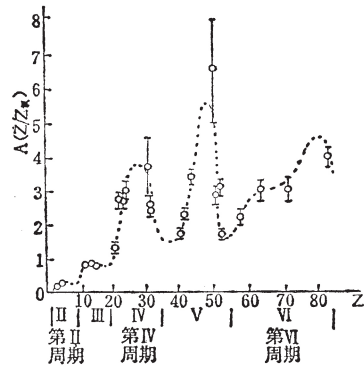


图3 在氧化物 $Z_1O_k$ 中, $Z$ 原子俘获 $\mu^-$ 的相对几率 $A(Z/Z_{\text{氧}})$ 随 $Z$ 呈周期性变化

相对俘获几率 $A(Z/Z_{\text{氧}})$ 随 $Z$ 的变化并不是直线的,而是周期性的(图3),其周期与元素周期表的周期一致.俘获几率的最小值都在每一周期的开始.表明离子性越强的氧化物, $Z$ 原子俘获 $\mu^-$ 的几率越低.该实验结果显示了奇特原子的形成与

分子的电子结构有联系.1968年Au-Yang等提出由于组成分子的原子的有效电荷发生变化而影响该原子对介子的俘获.当金属形成氧化物时,电子云移向氧原子,导致金属原子俘获介子几率的降低.据此可以解释氧化物中 $Z$ 原子俘获介子相对几率所呈现的周期性.

在随后的一系列实验中均证实了分子结构对奇特原子的形成有影响.例如,同一金属在不同价态的氧化物中,俘获 $\mu$ 子的几率明显的不同.如 $Sb_2O_3$ 和 $Sb_2O_5$ ,虽然 $Z_{Sb}/Z_O$ 均等于6.4,但在这二种氧化物中 $Sb$ 原子对 $\mu$ 子的相对俘获几率却相差一倍多.

化学结构除了对形成奇特原子的几率有影响之外,对它释放的 $x$ 射线的结构也有影响,例如,同一元素以纯金属形式存在时,它的 $K_\alpha$ 线在 $K$ 系总强度中的相对强度明显的大于氧化态和其他化合态形式.这就提供了一种可能性:根据释放的 $x$ 射线的结构变化来研究物质的化学状态.

实验结果已表明,在复杂的化合物中, $\mu$ 子被不同原子俘获几率的比对应于原子的有效半径之比,因此,通过观测化合物中各种原子俘获 $\mu$ 子的相对几率,可以研究分子中电子密度的分布,并有可能定量地测定化学键的离子化程度.

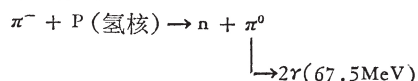
2.各种元素形成奇特原子时,都放出具有确定能量和特征结构的 $x$ 射线.根据测定 $x$ 射线的结构和强度,可以做材料的定性和定量分析.由于 $\mu$ 子或介子的能量可以调节,可使其停在被测物体的指定深度,而它释放的高能量的 $x$ 射线穿透力很强,可以从大体积的被测样品的深部穿出.所以,利用 $\mu$ 子或介子可以做深部和局部分析,例如,用 $\mu$ 子束射入人体的指定部位,做病变或肿瘤检查,称为“介子诊断”.近年来,这一技术已引起重视.

3.奇特原子中的 $\mu$ 子跃迁至低能态时,由于距原子核很近,受原子核的影响,低能态的能级发生畸变.

这种畸变对于重元素更明显，导致放出的 X 射线的能量发生变化，如果两个同位素核的形状不同，对能级造成的畸变也不同，放出的 X 射线的能量就有差别。例如， $^{235}\text{U}$  和  $^{238}\text{U}$  的  $K_{\alpha}$  线的能量相差 30keV。所以，根据测定  $\mu$  原子的 X 射线可以做重元素的同位素分析。

4. 奇特原子化学中一个引人注目的课题是利用负  $\pi$  介子研究含氢材料。

负  $\pi$  介子的一个重要特性是它被氢核俘获后产生一个很特征的辐射——在相反的方向上同时放出两个 67.5MeV 的  $\gamma$  射线



上述反应称为电荷交换反应\*。在一未知体系中，如能同时测到两个 67.5MeV 的  $\gamma$  射线，即可靠的表明该体系含有氢。因为除氢原子核外，其它原子几乎都不发生此反应，所以干扰极少。

前边已经讲到化学状态对原子俘获介子的几率有影响。当  $\pi^{-}$  被原子俘获时，这种影响表现得最强烈。自由的氢一旦参与化学反应进入化合态，它俘获  $\pi^{-}$  的几率即陡然降低。例如，在气体  $\text{N}_2 + 2\text{H}_2$  的混合物中与成份完全相同的化合物  $\text{N}_2\text{H}_4$  (胍) 中，氢俘获  $\pi^{-}$  的几率相差达 30 倍，

$$W_{(\text{N}_2\text{H}_4)} / W_{(\text{N}_2 + 2\text{H}_2)} \sim 1 / 30$$

在化合物  $\text{NH}_3$  中的氢，俘获  $\pi^{-}$  的几率比成分相同

的混合气体  $\text{N}_2 + 3\text{H}_2$  中的氢俘获  $\pi^{-}$  的几率小 10 倍。

实验测得，在  $\text{Z}_1\text{H}_k$  型化合物中，氢原子俘获  $\pi^{-}$  的几率  $W_{(\text{Z}_1\text{H}_k)}$  不是与  $Z$  的一次方成反比，而是与  $Z$  的 3 次方成反比：

$$W_{(\text{Z}_1\text{H}_k)} \sim a(k/j)Z^{-3}$$

式中  $a$  称为电荷交换反应系数。由此可见，在化合物中氢原子俘获  $\pi^{-}$  的几率受到强烈的抑制。与为了解氢原子俘获  $\pi^{-}$  的几率与化学性质之间的关系，曾观测了系数  $a$  与含氢化合物的各种化学参数之间的关系，如诱导系数、酸的解离常数等与  $a$  值的联系，以求从现象上找出规律。

在 1977 年召开的国际高能物理与核结构会议上，H. Schneuwly 提出用价电子的空间分布来预言氢原子俘获  $\pi^{-}$  的几率，比从现象上寻找化学参数与  $a$  值之间的联系前进了一步。

奇特原子化学中有实用前景的一些研究课题，像利用  $\mu$  子做材料的非破坏分析和研究化学结构；利用负  $\pi$  介子研究含氢物质，鉴别成键的氢和自由态的氢，进而研究催化过程和吸附机制等问题已引起化学家的重视和兴趣。近年的试验表明，利用更多种类的基本粒子做为探针来解决至今用其它方法不能解决的化学问题是大有可能的。

随着我国高能物理事业的发展和高能加速器的建造，奇特原子化学的研究也应提上日程。

\* 除上述反应外还产生  $\pi^{-} + p \rightarrow n + \gamma$  反应。