



穆斯堡尔谱学三十年

K. J. Anderson

穆斯堡尔在阅读自己关于 ^{191}Ir 共振的第一篇文章时突然意识到,他可以直接由多谱勒位移实验来确定自然宽度的谱线——他预见到会有一场竞争。他把文章送到在他看来“没有多少人阅读的德文《自然科学》杂志上”发表。当立即有二百多人来索取复印本时,他“迅速意识到这竟是犯了一个多么大的错误”。他因发现这种“无反冲 γ 射线共振吸收效应”,获得 1961 年诺贝尔物理学奖。

鲁道夫·路德维希·穆斯堡尔生于 1929 年 1 月 31 日。他在一些工业实验室花费了一年时间,后来进入慕尼黑工业大学,1952 年完成学位课程,1954 年完成了他的论文。1955—1957 年,他到马克斯-普朗克医学研究所从事研究工作,1958 年在慕尼黑工业大学获得博士学位。

穆斯堡尔的博士论文叙述了 γ 射线无反冲发射的实验。五年以前他就开始研究对 γ 射线在物质中的吸收,尤其是核共振吸收。

瑞利曾在 19 世纪预言过光共振,伍德 1904 年在钠的火焰中发现了光共振,1929 年(穆斯堡尔出生的那年)其他研究人员试图实现 γ 射线荧光而未获成功。

1946 年, Ya. I. 巴里特和 M. I. 波德戈雷斯基指出,发射 γ 射线时由于原子核的反冲造成能量损失,破坏了预期的 γ 共振。其他研究人员试图用加热或运动的办法来补偿反冲的能量损失——一种办法是把

^{198}Hg 加热到 1100°C ,另一种办法是让 γ 源沿靶的方向快速转动(试图使发射的 γ 射线发生蓝移*,以回到共振能量),不过这些实验都没有成功。他们遇到的问题在于多谱勒谱线的热增宽的程度破坏了他们希望实现的高分辨率。这些实验在当时太困难了,除了少数核谱实验室外,感兴趣的人并不多。

1957 年,鲁道夫·穆斯堡尔在研究 ^{191}Ir 的 129keV γ 射线时发现,当他把发射源的温度从 300K 降低到 88K 时,共振吸收大大增加了,他猜想,只要温度降到足够低时,晶体中的原子便有效地“冻结”在晶格中,这样,核的反冲便通过整个晶格得到衰减。

“发射” γ 射线的原子核反冲力与用手枪射击的情况很相似:如果你不握紧手枪就扣动扳机,手枪的反冲力就很大。但是如果你把手枪固定在一个混凝土墩上——或者把原子冻结在晶格里——这支手枪或原子核就不能反冲了。在这种情况下,反冲对发射的 γ 射线能量的影响便可以忽略不计;而其他原子核所吸收的这种无反冲 γ -射线,其波长正是共振吸收的精确值。

因为共振吸收截面峰宽集中在很窄的能量区间,所以 γ 能量的细微变动也会造成很大的不同。穆斯堡尔发现,使 γ -源相对靶核运动,即使运动的速度低到

* (蓝移为向短波谱位移,红移为向长波谱位移——译注)

面态。I-S 界面的界面态是由在能量上 U 字形分布的界面态和缺陷引起的高密度能态的叠加而成的。

C. “统一 DIGS 模型”: 1986 年日本北海道大学的长谷川教授领导的研究小组提出界面态起因于界面附近的结合键无序层。在界面形成时,向不同化学键的过渡,应力、化学配比的破坏,杂质的侵入,悬挂键及各种点缺陷的存在,晶格失配等一系列因素导致在 I-S 界面附近形成一个结合键短距无序层。作为安德森局域化的结果,无序层的形成在禁带内引入 U 字形分布的界面态。从束缚近似的观点来看,界面态的产生是在无序层中成键态与反键态无法完全分离的结果。在禁带中的导带一侧为反键态(受主型),价带一侧为成

键态(施主型),其电中性点由混成轨道能量决定。晶格无序层在界面两侧各有一定厚度,因此界面态是在界面附近的,在空间上和能量上的连续分布体。

目前,关于界面态的起源尚无普遍接受的定论。从模型上看,上述模型的前两个在统一解释界面态特征上遇到的困难较大,很难系统地理解一节中叙述的界面基本电学特征。“统一 DIGS 模型”揭示了界面态在空间上连续分布的可能性,打开了统一地理解基本电学性质的大门。国际上一些不同研究小组从不同角度的工作证实了“统一 DIGS 模型”的可能性,使该模型成为说明界面态起源的较有希望的模型之一。

(待续)

4cm/s,多普勒效应引起的微小能量变动就足以再次破坏共振。

在随后的暑期里,其他研究人员证实了穆斯堡尔的工作。后来发现这种效应在 ^{57}Fe 中比穆斯堡尔使用的同位素 ^{191}Ir 中明显得多。迄今已在一百多种同位素中发现了穆斯堡尔效应,最常用的是 ^{57}Fe 和 ^{119}Sn 。

1960年,穆斯堡尔效应首次在直接检验爱因斯坦的广义相对论中起了重大的作用。过去对相对论的所有检验都是在天体范围进行的(水星近日点的进动,1919年爱丁顿测量日蚀时光经过太阳的偏转,1925年亚当斯测量的白矮星光引力红移)。而利用穆斯堡尔效应,实验人员可以在实验控制的条件下直接测出相对论性的移动。

哈佛大学的庞德和里布卡做了一次实验,从杰斐逊物理实验室22.6米高的塔顶上向底部送出一束 γ 射线。因为建筑物的底部比顶部更接近地心,重力场强稍有增加, γ 射线感受到的微小引力红移,可以用穆斯堡尔谱学方法加以测量。

三十年来,穆斯堡尔效应已运用于很多不同的领域,贡特·韦特海姆1964年(在穆斯堡尔获诺贝尔奖仅三年之后)在有关穆斯堡尔谱学的一本早期教科书的序言中说:“[穆斯堡尔效应]迅速引起大批科学家的想象力,他们利用这种效应在过去已知的技术所达不到的地方进行了实验。”早在1968年一些研究人员就已经折服了。某综合性刊物的两位编辑V. I. 戈丹斯基和R. H. 赫伯评价说:“的确,这个领域在过去这几年来发展得如此迅速,人们已经越来越难以跟上目前的进展,甚至对穆斯堡尔谱学家来说也是如此,更不用说这一行的‘局外人’了”。

在材料研究方面,实验人员可以把同一种穆斯堡尔核素嵌在两个固体上。一个放入的是基态的核(靶或吸收体),另一个放入由放射性母核衰变造成的激发态核(源)。源和靶之间的共振效应十分灵敏,二者之间通过多普勒效应能感知极其微小的,例如0.1cm/s的运动。

在固态物理方面,穆斯堡尔效应已经被用来研究晶格动力学。研究人员可以确定沿特定晶向上的运动,从而对给定的某种动力学模型作出详细的检验。穆斯堡尔谱学还用来研究磁性材料的超精细磁相互作用,如铁磁、反铁磁和亚铁磁。这种技术的分辨力将提供磁离子在晶格中的位置、磁相互作用以及它们对压力和温度的依赖性的信息。这对铁合金冶炼过程进行诊断是重要的(就是说内部磁场是怎样随成分、压力和温度变化的),从而使材料研究人员可以在冶金中找到有用的高压加工工艺。

利用内转换电子谱学(在这种情况下,探测的讯号是原子核无反冲吸收后衰变发射的电子)研究物质表层的穆斯堡尔效应,可以使穆斯堡尔技术用作无损伤

检验的一种手段。更好的了解材料在活性环境中表层的变化。

在化学方面,人们经常利用穆斯堡尔效应来研究同质异构体位移和四级分裂。如用穆斯堡尔谱学测量到同质异构体位移参数后即可确定锡在不同化合物中的氧化状态。这种技术还用来分析笼合物、催化剂、甚至玻璃,只要它含有少量穆斯堡尔同位素。

穆斯堡尔技术的高分辨力,能够为聚合材料的结构提供细节。这方面的研究澄清了许多在合成方面和工业上具有重要性的化合物结构,如塑料工业的稳定剂和钎的各种化合物。

穆斯堡尔谱曾用来在极低的温度下检验一些材料的超导转变, $\text{TaS}_2:\text{Sn}$, $\text{TaS}_2:\text{Sn}_{1/3}$ 和 Nb_3Sn (后一种材料广泛用于超导磁体的制备)等材料都用穆斯堡尔同位素 ^{119}Sn 检验过。

早在1961年,穆斯堡尔效应就用来研究过含铁的生物材料,如血红素蛋白、铁硫蛋白、铁的储存和运输蛋白。自冈泽、格兰特和克雷戈兹德1963年出版了《穆斯堡尔效应与血液研究》的著述以来,已经出现了差不多一千篇有关的技术论文。生物学研究人员利用这种技术了解这些复杂系统中铁的结构和结合键。因为穆斯堡尔同位素(就是 ^{57}Fe)作为生物过程的“示踪”元素。研究人员可以把含有顺磁性铁化合物的材料冷却到磁有序化温度以下,来确定作用到大生物分子里单一铁原子上的磁场的方向和大小,这类大分子的重置可高达50000。

考古学家(利用粘土中天然存在的某些穆斯堡尔同位素的特征和数量作为不同地域的“指纹”),用穆斯堡尔谱学来确定希腊陶器的地理分布,还利用无损穆斯堡尔谱学查明这些陶器从原料(所用的粘土和各种釉)开始,经过陶器制作过程,以及日后经过若干世纪来的变质和暴露在环境中发生的变化。研究人员通过这些分析,就可以更多地了解古代陶器制作确切的加热程序和使用的材料。

古代绘画使用的许多颜料含有某些穆斯堡尔同位素,也已作了同样的分析。此外只要查明公元初几个世纪绘画使用的材料,查明某些签字在不同的地区和时代使用的颜料,就提供了辨认赝品的办法。

在穆斯堡尔获诺贝尔奖二十周年时,一份综合性刊物就说过:“不管怎么说,这个领域的直接研究工作还没有做完,还没有开始厌倦,新的应用仍然继续出现”。的确,人们把穆斯堡尔谱学作为一种工具,既用它对月球上的岩石作详细的分析,也用它来分析深海中心的标本。1968年一些研究人员甚至用 ^{119}Sn 的穆斯堡尔效应去探测蚂蚁腹部的微小呼吸运动。

这表明,仅仅三十年,穆斯堡尔效应就已经被证明是二十世纪最重要的,当然也是用途最多的科学发现之一。

(程毓燕译)