

低能加速器在固体物理、原子物理和材料分析方面的一些应用

叶 铭 汉

(中国科学院原子能研究所)

近年来,低能加速器在固体物理、原子物理、生物学、材料分析、化学工业等方面的应用日益广泛,开辟了一些新的领域。这一发展动向值得我们注意。

低能加速器的价格逐渐降低,在国外,一台500千电子伏以下的小型加速器的价格约在一万至三万美元之间。这对低能加速器的应用的推广也起了一定的促进作用。

我们应该充分利用现有设备,使低能加速器发挥更大的作用,一器多用。加速器除了用来研究原子核物理问题之外,还应用来研究其他学科的问题。

在本调研报告中,只介绍2.5兆电子伏以下的离子加速器在固体物理、原子物理和材料分析方面的一些应用。

一、固体物理

1. 离子渗杂

离子渗杂就是用离子(例如硼离子)去轰击某一种半导体材料(例如硅),离子就作为杂质渗入这种材料。离子的能量一般为几十到几百千电子伏,经常小于400千电子伏。

离子渗杂在半导体器件的生产上已有较广泛的应用。与扩散渗杂相比,离子渗杂有下列优点:渗杂的部位、深度和浓度都可以精确控制;离子能够穿透表面保护层而到达某一深度;可以用不同能量、不同种类离子来分层渗杂而不相互混合;离子和材料的组合可以是多种多样的;可在常温下进行等等。缺点是:离子轰击常使晶格受到破坏;离子的能量一般较低,因此渗杂深度较浅;设备费用较高等等。

离子渗杂只是离子注入的一种,离子注入还有一些值得注意的应用,目前还在试验阶段。下面举几个例子:(1)用离子注入来改变薄膜材料的性质。例如用氧离子来轰击铝薄膜,注入的氧使铝氧化,使薄膜从导体变成绝缘体。或者相反,让金属离子注入绝缘物质内,可以降低绝缘体的电阻率;(2)离子注入是物体表面处理的一种新方法。例如在绝缘体表面上注入金属离子,以后就极易镀上金属。同样处理,可以大大提高真空喷涂到绝缘体表面上的金属分子的凝结率;(3)离子注入可以使金属薄膜对绝缘体衬底粘附的牢固程度提高很多倍。

2. 沟道效应

离子进入晶体时,如果入射方向沿着晶格平面或行列(夹角小于某一临界角度)时,

绝大部分离子在前进过程中与晶格原子的距离较大（大于0.1埃），因而这些离子与内层电子和原子核之间的电磁相互作用比较弱，因此大致保持着原来的方向在行列的间隙中前进。在这种情况下，离子与晶体的相互作用就与无规（随意方向）入射时不同，如离子的卢瑟福散射产额减少数十倍，离子激发的X射线产额减少数十倍，离子在晶体内的单位长度能量损失率减少，射程增加等等。这种现象叫做沟道效应，是在1963年发现的。

图1是研究沟道效应的实验装置示意图，这种安排是用来测量卢瑟福散射产额的变化。只要在平常作核反应的靶室内添加一个能精细转动靶子的装置（可以绕着两个互相垂直的轴转动），就可以进行这方面的工作。对于加速器的要求不高，常用的离子能量从几十千电子伏到一兆电子伏。图2所示是卢瑟福散射产额随离子入射方向的变化⁽¹⁾，入射离子为480千电子伏质子，晶体为钨，沿着〈100〉方向入射的离子与此晶轴的夹角为零度。

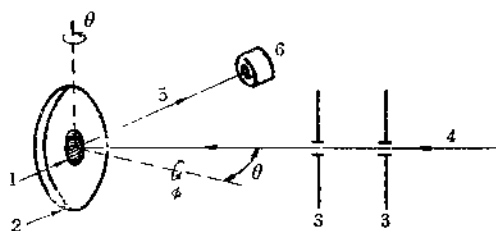


图1 测量卢瑟福散射的沟道效应实验装置示意图

1——晶体；2——测角仪；3——靶室；4——入射离子；5——散射离子；6——半导体探测器。

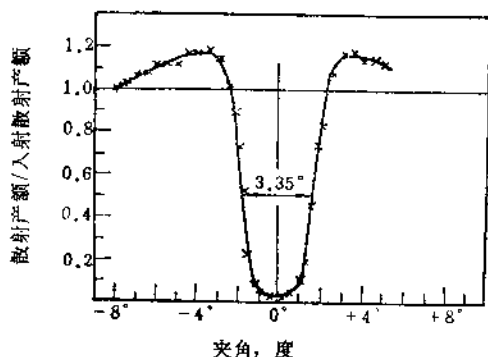


图2 卢瑟福散射产额随离子入射方向的变化

沟道效应提供了一个研究晶体结构的新方法，有很广泛的应用范围。当晶体有缺陷时，有些原子不在晶格上，或者离子渗杂后，一部分杂质原子不在替代位置上而在间隙位置上，沟道效应就不明显，甚至消失。根据沟道效应的变化，可以推断出是否有原子在某一间隙位置上。

图3是用沟道效应测定杂质原子位置的原理图。为了简单起见，把晶格简化为两度点阵。假定杂质原子分别有三种可能的位置。第一种情况是在位置1上，这时杂质原子真正替代了原来的原子。离子不论是沿着〈01〉或者〈11〉方向入射都不受到阻挡，因此都有沟道效应。第二种情况是在位置2上，沿着〈11〉方向入射的离子不受阻挡，仍有沟道效应，而沿着〈01〉方向入射的离子受到阻挡，沟道效应消失。第三种情况是在位置3上，此时一半杂质原子在晶格行列上，另一半在间隙上，后者正好破坏了沿着〈11〉方向入射的沟道效应。对于沿着〈01〉方向入射的离子而言，一半杂质原子无影响，另一半有影响，因此沟道效应减弱一半。选择几个入射方向，比较沟道效应的变化，就

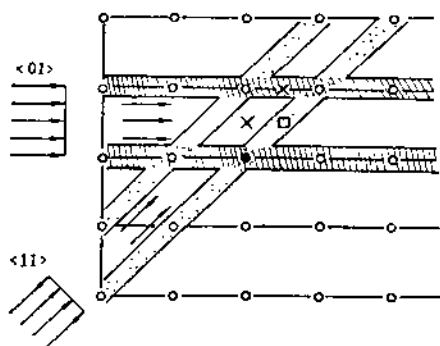


图3 用沟道效应测定杂质原子位置原理图

●——1；□——2；×——3。

有可能确定杂质原子的分布情况。近来,在分析硅、锗晶体中的渗杂情况时,已有不少人利用这个效应来确定最佳的渗杂条件等(例如文献〔2〕)。

与沟道效应相联系,有堵塞效应。当离子穿透薄晶体或者从晶体中放射出来时,受晶格平面或行列上的原子的阻挡,因此在此方向通过或放射出来的粒子的数量就大大减弱。在核物理研究中,有人利用堵塞效应测定了 10^{-18} 秒数量级的能级寿命(例如文献〔3〕)。

3. 离子激发的特征X射线

离子激发的特征X射线早在1912年就发现了,但直到最近十年来才受到重视。用离子来激发特征X射线有它独特的优点。用电子来激发时,除了特征X射线外,还伴随着韧致辐射和散射电子。用X射线来激发时,有散射X线本底。用离子来激发时,几乎没有本底。为什么长期以来这个优点未被重视,原因之一是过去缺少价格比较低的低能离子加速器。这个情况现在已经改变,因此这方面的工作开展较快。

质子能量从25—250千电子伏之间,斯特克(Sterk)等^{〔4〕}得到厚靶X射线产额的经验公式如下:

$$N = kZ^{0.82}(\exp 0.062E_p),$$

式中: N 是每个质子所产生的X射线光子数; k 是常数,对于K, L, M系X射线分别为 1.9×10^{-1} , 1.0×10^{-2} 和 3.4×10^{-3} ; Z 是靶子的原子序数; E_p 是质子能量,以千电子伏为单位。表1所列是康(Khan)等^{〔5,6〕}的数据,是厚靶K系X射线的产额(每个质子所产生的X射线光子数)。斯特克等的结果与康等的不大符合,看来这方面还有工作可做。

表1 厚靶K系X射线产额

质子能量, 千电子伏	靶 子 材 料			
	碳, 光子/质子	镍, 光子/质子	铝, 光子/质子	铜, 光子/质子
50	3.28×10^{-5}	1.02×10^{-7}	3.97×10^{-8}	
100	4.93×10^{-4}	3.56×10^{-6}	1.61×10^{-6}	
200		8.13×10^{-5}	4.14×10^{-5}	1.73×10^{-8}
300		4.79×10^{-4}	2.58×10^{-4}	2.09×10^{-7}
400		1.44×10^{-3}	8.39×10^{-4}	1.08×10^{-6}
500	3.43×10^{-2}	3.07×10^{-3}	2.07×10^{-3}	3.45×10^{-6}
1000	5.21×10^{-2}	2.28×10^{-2}	1.51×10^{-2}	

可以利用离子激发的特征X射线来分析物体表面的成分, 这种方法是很灵敏的。约翰森(Johansson)等^{〔7〕}把一片厚约40微克/厘米²的炭膜在户外大气中放置一天, 让它吸附空气, 然后用1.5兆电子伏的质子轰击, 流强为2.5微安。轰击60分, 测出X射线能谱。从能谱测定出炭膜所吸附的空气中的杂质, 见表2。一次实验测出了13种元素的含量, 而且灵敏度达到 10^{-11} 克。用这种方法来研究大气的污染或物体表面的细微的动态变化(例如

表2 炭膜所吸附的空气中的杂质

元素	磷	硫	钙	钛	钒	铬	锰	铁	铜	锌	镉	钴	铅
含量 毫克	1	20	100	1	<0.02	0.06	0.15	8.5	0.02	0.04	0.07	0.2	0.3

表面氧化过程等)是很方便的。离子的能量一般用几十到几百千电子伏就可以了。

跟X射线荧光分析方法相比较,离子激发的X射线分析方法比较适宜于用来分析较轻的元素(对于很轻的元素,X射线能量很低,探测方面不太方便),这是由于X射线的产额跟原子序数的高次方成反比,产额太低时探测有困难。X射线荧光分析则相反,当原子序数减小时,产额下降很快。

沟道效应也表现在X射线产额的减少上,产额随离子入射方向的变化跟卢瑟福散射产额的变化十分相似。利用沟道效应来测定晶体中杂质原子的位置时,可以通过测量散射的离子,也可以通过测量激发的X射线来达到同样的目的。

用重离子来激发时,凯恩斯(Cairns)等⁽⁸⁾发现,对于每一种靶的某系X射线有它各自的阈能,重离子的能量如低于这个能量,X射线产额就极其微小。我们可以利用这个特点,选择某一能量的某一种离子,使它在一个由两种元素组成的系统中只能激发其中一种元素的特征X射线。这样就更便于观察少量杂质的特征X射线。

可以利用离子激发的X射线来测量薄膜或表面层的厚度,用100千电子伏质子,对于铝膜,测量范围从1.5—4000埃⁽⁹⁾。这一范围的厚度,用其他方法来测量是比较困难的。

一台低能离子加速器是一个能量单一的低能X射线源,例如锡的K系X射线的能量是29千电子伏。利用这种能量单一的X射线可以拍摄分辨率很高的X射线照片,这在医学和冶金学上都很有用。

4. 离子激发的电子

当用光子、电子或离子轰击时,受激的原子可以放出光子或电子。关于光子或电子激发的电子谱的研究已经开辟了一种新的分析方法,可以很灵敏地分析物体表面的成分、化学结构等⁽¹⁰⁾。这种电子谱仪在化学分析上极为有用。用离子(几十到几百千电子伏)也可以激发,这方面的工作现在刚开始,限于离子与气体分子的碰撞⁽¹¹⁾。

二、原子物理

1. 束箔光谱学

束箔光谱学是光谱学中一个新发展的部门,束是指离子束,箔是指薄膜。让高速离子通过一层薄膜(一般常为厚约10微克/厘米²的碳膜)或气靶,离子与薄膜中的原子发生碰撞,因而激发或电离。通过薄膜后的离子束中含有不同程度电离或激发的离子和原子,激发的离子或原子放出光辐射而衰变。加速器在这里实质上就是起作为光谱仪的光源的作用。

束箔光谱学有它独特的优点:(1)可以研究多重电离离子的光谱,光谱学的其他方法很难产生多重电离离子,这是束箔光谱学独占的领域。(2)由于它的几何条件,以薄膜作为起点,用来测量能级寿命(跃迁几率)比较方便也比较准确。(3)离子束经过分析器后才通过薄箔,离子的纯度极高,可以免除杂质谱线的干扰。(4)易于对光源(受激离子束)加上电场或磁场。(5)离子的能量可变,不同能量的离子束通过薄膜后的激发状态不同,便于选择实验所需要的状态。(6)光谱仪可以直接接到靶室,便于研究紫外光谱。

原子光谱学的研究虽已历史久远,但过去由于光源所限,有些数据很缺(例如多重电离离子光谱),有些数据不够精确(例如一些能级的跃迁几率)。束箔光谱学正好补上了这些很重要的缺口。

下面举一个例子来说明束箔光谱学所起的作用。大家知道,原子能级的跃迁几率是很重要的,这些数据在天体物理学方面极为重要,关系到宇宙起源的问题。惠林(Whaling)等^[12]在1969年测量了铁的一些能级的寿命,发现要比过去的测定长5—20倍之多。这一结果就要求对太阳中铁的含量重新估计。铁的含量增加就要求提高对太阳中心温度的估计,并且牵涉到其他一些问题。这一测定结果的影响十分广泛,要求我们对太阳和星体的结构全部重新估计。这仅仅是束箔光谱学的一个实验结果的影响。

束箔光谱学约自1963年开始,发展很快,提供了很多数据。束箔光谱学所用的离子能量从几百千电子伏到几十兆电子伏,离子流强度从0.1微安到几微安。一个几百千电子伏的小加速器也可以开展这方面的工作。

2. 原子碰撞过程

近年来,原子碰撞过程的研究发展很快,可以分为原子在固体中和气体中的碰撞过程两大类。前者属于固体物理的范围,内容很广泛,例如沟道效应、辐射损伤、溅射、电子和光子的激发、离子在物质中的能量损失等等。后者属于原子物理的范围。

原子在气体中的碰撞过程所提供的有关数据对于一些近来蓬勃发展的学科十分重要。在受控热核反应方面,高温等离子体中离子的电荷交换和损失过程等。在空间物理方面,大气层物理的一些问题,例如极光的形成等。在加速器技术方面,加速器和离子源中带电粒子的产生和损失,例如离子束与气体原子碰撞后的电荷分布等。这些原子碰撞问题都是上述学科的基础,因此近来很受重视。

研究原子在气体中的碰撞过程,需要测定碰撞过程的截面、碰撞后离子束的电荷分布和角分布、次级粒子的产生等等。离子的能量范围从几电子伏到几兆电子伏,离子的种类从氢到很重的元素,很多工作是用低能小加速器做的。国外有些实验室的加速器专作这方面的工作。

三、材料分析

利用低能加速器可以进行多种分析工作。前面已经提到,利用沟道效应和离子激发的X射线可以作一些特殊的分析工作。这里再提出三种:中子活化分析、卢瑟福散射、带电粒子瞬间反应分析。对于已有加速器的实验室而言,进行这三项分析,不必添加设备,也不必作任何改动。

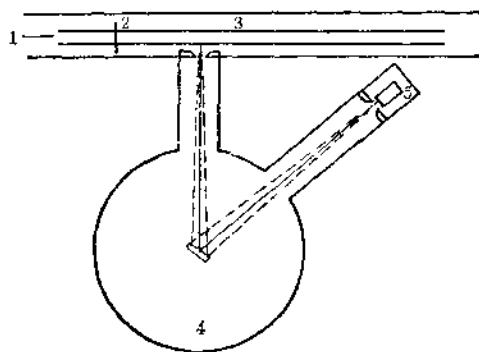


图4 束箔光谱学实验装置示意图

1——离子束; 2——炭膜; 3——受激离子束;
4——光谱仪; 5——记录装置(光电管或照相底片)。

1. 中子活化分析

中子活化分析近年来应用十分广泛,它具有灵敏度高(对于若干种元素)、有一定的精确度、速度快、不破坏样品、可以自动化等特点。除了用反应堆所产生的中子来活化外,加速器也可用来进行中子活化分析工作。一台 200 千电子伏,1 毫安的小加速器每秒可以产生约 10^{11} 个 14 兆电子伏的快中子(即氘-氘反应所产生的中子),经过减速后可以得到约 10^8 中子/厘米²·秒的热中子流。这样的中子流要比反应堆所产生的弱很多,但是用小加速器来作中子活化分析工作有它的优点。虽然中子流较弱,影响灵敏度,但是它的设备费用较低,一般大学和工厂企业都能够添置,而且计数设备可以放在样品旁边,离子束一切断就可以马上测量寿命非常短促的放射性衰变。样品可以是大块的,这样可以提高探测的灵敏度。除了可以利用慢中子以外,还可以利用不同能量的快中子来作活化分析,这样可以选择比较有利的条件。有一些常见元素的分析,例如氧和氮,用快中子来活化则灵敏度要高得多。快中子活化所产生的放射性元素的寿命一般较短,便于在工业生产上使用。有一个缺点应该指出,常用的氚靶的寿命有限,因此往往限制了离子流的强度和照射时间(一般限于几分钟以内)。

用低能加速器进行活化分析的探测极限见表 3^[13]和表 4^[14]。这些极限都是假定无干扰时比较理想的情况。表 3 是用 14 兆电子伏的快中子,流强为 2×10^8 中子/(厘米²·秒),照射时间和测量时间都为 5 分钟或以下。探测器用两个 3 吋×3 吋的碘化钠晶体。表 4 是用热中子,流强为 10^8 中子/厘米²·秒,照射时间为 5 分钟或以下。探测器只用一个 3 吋×3 吋

表 3 快中子活化探测极限

探测极限, 毫克	元 素
0.01—0.03	Pr
0.04—0.09	Ag, Ba, Br, Cu, P, Si
0.1—0.3	Al, Cd, Ce, Cr, Dy, Ga, Ge, In, Na, Nd, O, Rb, Sb, Se, V, Zr
0.4—0.9	Au, B, F, Hg, Mn, N, Ni, Pd, Sm, Sr, Ta, Tb, Y, Zn
1.0—3.0	Er, Eu, Fe, Hf, K, Mg, Mo, Ru, Sm, Ti, W
4.0—9.0	As, Cs, Cl, Co, Lu, Pb
10—30	Gd, Ir, Nb
>300	Bi, Ca, Ho, S, Tu

表 4 慢中子活化探测极限

探测极限, 毫克	元 素
0.0001—0.0003	Dy
0.004—0.009	Ag, Hf, Mn, Rh
0.01—0.03	Eu, In, Kr, Sc, V
0.04—0.09	Au, Cs, Ho, Ir, Lu, Re, Sm
0.1—0.3	Al, Ba, I
0.4—0.9	As, Br, Cu, Ga, La, Na, Nb, Os, Sr, U, W, Y
1—3	Co, Er, Ge, Hg, Nd, Pd, Pt, Ru, Sb, Te, Xe, Yb
4—9	A, Cd, Gd, Mg, Mo, Pr, Ta
10—30	Ce, Cl, F, Se, Sn, Th, Ti, Zn
40—90	Ca, K, Ne, Ni, Tm, Rb

的碘化钠晶体。

现在估计全世界约有 200 台小加速器分布在研究机构和工厂企业内作活化分析工作^[15]，分析的范围非常广泛，例如月球岩石、海底泥沙样品、古代铜器、矿石成分、饲料中蛋白质的含量等的分析。在工业、地质上，活化分析往往限于分析样品中的一种或几种元素，因此较易做到快速和自动化。比利时一家钢厂有一台小加速器在生产线上作钢中氧的含量的检验工作，测一个样品，只需约 30 秒。

2. 卢瑟福散射

可以利用几百千电子伏到几兆电子伏的带电粒子的卢瑟福散射来进行物体表面成分的分析。早在 1957 年就有人用质子的卢瑟福散射来分析金属的表面^[16]，他用重粒子谱仪测量散射质子的能谱，设备既贵，实验又很费时间，因此无法推广。直到有了半导体探测器以后，这个方法才得到推广。它所要求的条件不高，离子流强度有 0.1 微安就可以了。分析的灵敏度也还相当高，可以做到微克/厘米²的水平。但是有一个很大的限制，这种方法只适宜于分析在较轻元素所构成的母体表面上的重元素。因为如果母体很厚，则散射粒子的能谱是连续谱，比母体轻的元素的散射粒子谱就被盖住了，不易看出来。但如样品是薄膜，那就没有这个限制。还有一点，对元素的质量的分辨本领受到探测器分辨本领的限制，因此只适用于几种元素的质量相差一定程度的场合。

当用来分析晶体的表面时，利用前面所提到的沟道效应，就有可能分析表面上质量比晶体母体轻的元素。图 5 是一个例子^[2]，用 1 兆电子伏氮离子轰击硅晶体。当无规入射时，

散射粒子谱看不出有其他元素的散射峰。当沿〈111〉方向入射时，散射粒子谱前沿的产额因沟道效应而降低约 35 倍，曲线上可以看出有三个峰，它们各自相当于质量为 28, 16, 12 的元素，即硅、氧和炭所散射的氮离子。它们的产额小，原来被硅所散射的氮离子盖住了，看不出来，现在由于沟道效应，硅晶体所散射的氮离子的产额减少了，因此才能显示出来。晶体表面上有一层氧化硅，氧化硅中的硅是无规则的，没有沟道效应，所以散射产额不变。可以估计出这一层内的硅原子的数量为 8×10^{15} 原子/厘米²，氧原子的数量为 7.5×10^{15} 原子/厘米²。这一层氧化层厚约 0.28 微米。炭原子是在测量过程中在表面上沉积的炭。从这个例子可以看出，卢瑟福散射方法在一定条件下是很灵敏的。

如果样品的成分是均匀的，则卢瑟福散射也可以测定整块样品的成分。

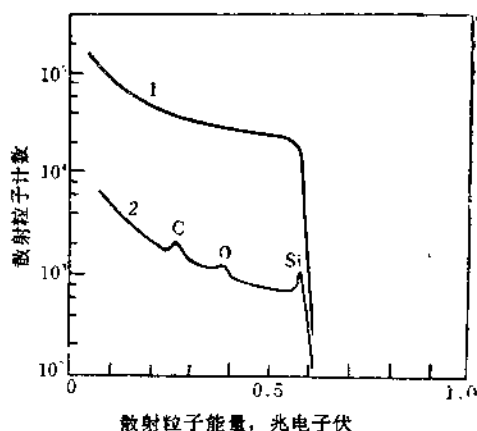


图 5 卢瑟福散射产额

1——无规入射；2——沿〈111〉方向入射。

3. 带电粒子瞬间分析

物体表面的分析还可以利用带电粒子所引起的核反应来进行，测量核反应瞬间放出的带电粒子、中子或 γ 射线。就能量在 2.5 兆电子伏以下的质子或氦核而言，适合于用来分

析轻元素。有些轻核的反应的 Q 值较高, 探测很方便。中重核和重核由于库仑位垒关系, 2.5 兆电子伏以下的质子或氦核不易引起核反应, 因此与卢瑟福散射相反, 这种方法适宜于在重的母体内探测轻元素杂质, 灵敏度一般可达 10^{14} 原子/厘米²。测量所需的时间, 跟卢瑟福散射差不多, 一般可以在几分钟内得到结果。

离子束可以聚焦得很细, 可以对样品表面逐点进行分析。现在有人把带电粒子瞬间反应分析方法叫做“核微探针”。改变离子的能量, 可以在一定的深度范围内测量某种元素的深度分布, 例如利用炭的 (p, γ) 反应测量钢的表面层 20 微米内含炭量的变化^[17]。

常用的核反应见表 5^[18-20]。

表 5 带电粒子瞬间反应分析常用反应

元 素	常 用 反 应
D ²	D ² (d, p)T ³
Li ⁶	Li ⁶ (d, α)He ⁴
Li ⁷	Li ⁷ (p, α)He ⁴
C ¹²	C ¹² (d, p)C ¹³ , C ¹² (p, γ)N ¹³
C ¹³	C ¹³ (p, γ)N ¹⁴
N ¹⁴	N ¹⁴ (d, α)C ¹² , N ¹⁴ (d, p)N ¹⁵ , N ¹⁴ (d, n)O ¹⁵ , N ¹⁴ (d, n γ)O ¹⁵ , N ¹⁴ (d, p γ)N ¹⁵
O ¹⁶	O ¹⁶ (d, p)O ¹⁷ , O ¹⁶ (d, n)F ¹⁷ , O ¹⁶ (d, p γ)O ¹⁷
O ¹⁸	O ¹⁸ (p, α)N ¹⁵
F ¹⁹	F ¹⁹ (p, α)O ¹⁶ , F ¹⁹ (p, $\alpha\gamma$)O ¹⁶ F ¹⁹ (d, α)O ¹⁷
Al ²⁷	Al ²⁷ (p, γ)Si ²⁸

带电粒子瞬间反应还有一个新的应用, 用于稳定同位素示踪方法。有些轻元素缺少合适的放射性同位素来作示踪原子, 现在用同位素丰度小的稳定同位素作为示踪原子, 以后用核反应去辨认。例如常用作碳的示踪原子的 C¹⁴ 的寿命太长 (半衰期为 5700 年), 用起来不方便, 现在有人用稳定同位素 C¹³ 作为示踪原子 (在天然碳中, C¹³ 的丰度为 1.11%)。让 C¹³ 进入生物体内, 然后测定样品中 C¹³/C¹² 的比例的变化。可以利用 C¹²(p, γ) 和 C¹³(p, γ) 反应来测定, 质子能量从 0.7—1 兆电子伏就可以了^[21]。

参 考 文 献

- [1] J. U. Andersen, *Mut. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.*, **36**, No 7 (1967).
- [2] J. A. Davies et al., *Can. J. Phys.*, **45**, 4053 (1967).
- [3] M. Maruyama et al., *Nucl. Phys.*, **A145**, 581 (1970).
- [4] A. A. Sterk, C. L. Marks and W. P. Saylor, *Advances in X-Ray Analysis*, Vol. 10, p. 399, Plenum Press, New York, 1967.
- [5] J. M. Khan and D. L. Potter, *Phys. Rev.*, **133**, A890 (1964).
- [6] J. M. Khan, D. L. Potter and R. D. Worley, *Phys. Rev.*, **139**, A1735 (1965).
- [7] J. B. Johansson, R. Akseissson and S. A. E. Johansson, *Nucl. Instrum. Methods*, **84**, 141 (1970).
- [8] J. A. Cairns et al., *Atomic Collision Phenomena in Solids*, *Proceedings of an Inter-*

- national Conference Held at Brighton, England, p. 541, 1969; North-Holland Pub. Co. Amsterdam, 1970.
- [9] L. J. Christensen, J. M. Khan and W. F. Bruner, *Rev. Sci. Instrum.*, **38**, 20 (1967).
- [10] Kai Siegbahn et al., Atomic, Molecular and Solid State Structure Studied by Means of Electron Spectroscopy, Almqvist and Wiksells Boktryckeri Ab, Uppsala, 1967.
- [11] M. E. Rudd, Proceedings of the Second Oak Ridge Conference on the Use of Small Accelerators for Teaching and Research, CONF-700322, p. 305, (1970).
- [12] W. Whaling et al., *Astrophys. J.*, **158**, 389 (1969).
- [13] M. Cuypers and J. Cuypers, *J. Radioanalytical Chem.*, **1**, 243 (1968).
- [14] V. P. Guinn, Proceedings of the Conference on the Use of Small Accelerators for Teaching and Research, CONF-680411, p. 1, (1968).
- [15] S. S. Nargolwalla, Proceedings of the Second Oak Ridge Conference on the Use of Small Accelerators for Teaching and Research, CNOF-700322, p. 185, (1970).
- [16] S. Rubin et al., *Anal. Chem.*, **29**, 736 (1957).
- [17] D. Brune and R. Hellborg, *Anal. Chim. Acta*, **52**, 109 (1970).
- [18] G. Amsel et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **92**, 481 (1971).
- [19] D. J. Macey and W. B. Gilboy, *Nucl. Instrum. Methods*, **92**, 501 (1971).
- [20] W. J. Naude et al., *J. Radioanalytical Chem.*, **1**, 231 (1968).
- [21] E. Ricci, *Anal. Chem.*, **43**, 1866 (1971).