

张英平

X光透视、拍片子，这是尽人皆知的了。X光为什么能发挥这样大的作用呢？因为它有穿透物体的能力，有使荧光屏发光、照相底片感光的本领。 γ -射线、电子也有这样的本领，也得到了广泛的应用。还有一些粒子，如质子、 α -粒子及其他重离子（氦离子、氙离子等），也能穿透一定厚度的物体，并能使照相底片感光，但是由于它们质量重，在

能量低的时候穿透本领不大，所以应用还不够广泛。随着高能加速器的发展，粒子的能量越来越高，能穿透的物质也就越来越厚，应用也就越来越广。下面介绍重粒子照相的一种——质子照相。

质子照相的基础是它们与物质的相互作用，它比X-光、 γ -射线照相能更好地显示物体的内部结构。质子与物质的相互作用不外乎：质子被物质吸收；被物质中原子核的电荷散射；被原子核的核力散射；以及被原子核俘获，引起核反应。除最后一种情况外，其他三种作用过程，形成三种不同的质子照相原理。这三种照相，各有特点，相互补充，越来越引起人们的兴趣。

吸收照相——质子射程末端的利用

这种照相的特点，是利用质子射程的末端，所以又称射程末端辐射照相。在质子能量小于200—300兆电子伏，它穿进物质时，主要由于电离而逐渐失掉其全部能量，最后被物质吸收。单能质子与X光被物质吸收时，吸收曲线是十分不同的。如果物体的厚度正好与质子的平均射程相当（这可以通过改变质子的能量来达到），那么从图1可以看出，物体厚度的微小变化（ Δm ），引起质子透射率的变化就很大（ ΔN_P ），而X光透射率的变化却很小（ ΔN_X ）。用质子和X光分别对上述物体进行透视照相，显然，质子照相更能显示出物体的厚度（或物体密度）变化。X光照相通常可以发现0.5%—1%的厚度改变，在少数情况下，可以发现0.2%的厚度改变。而质子照相却可以发现0.05%

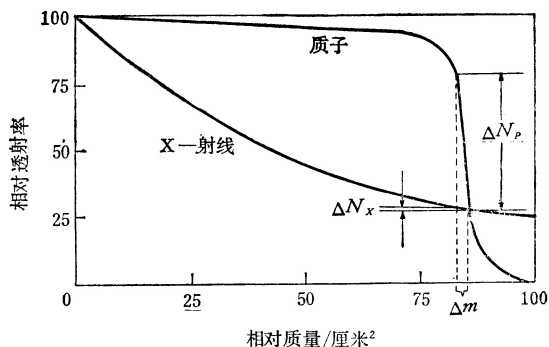


图1. 单能质子与X-光的吸收曲线比较

的厚度改变。如果不直接用底片，而用计量方法，即测量透射粒子的剩余能量，然后再建立像的方法，X光也可以发现厚度0.05%的改变，在实验室的条件下，甚至可以发现0.01%的改变。而计量方法用于质子，可以发现0.002%—0.003%的厚度改变。所以在精细的诊断与探伤中，质子比X光同类技术的结果好十倍左右。

质子在物质中有一定的射程，一定能量的质子只能穿透一定厚度的物质。能量为200兆电子伏的质子，在人体中的射程是26厘米左右，这可以透视人体的任何部位。在工业应用中，需要知道质子在物质中的射程，有系统的资料可以查阅，图2是质子在物质中射程的几个例子。质子吸收照相，在工业上多用于固

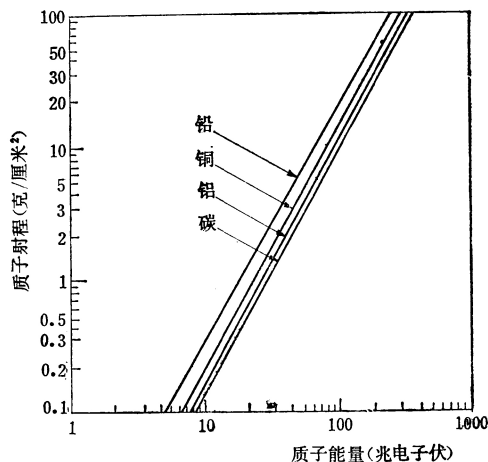


图2. 质子在铅、铜、铝、碳中的射程

体探伤，已探出0.01克/厘米²的厚度或密度变化。在医学上已用于研究人体组织，可以显示人脑中0.01克/厘米²的台阶，脑结构及肿瘤清晰可见。如用于透视人体，根据计算，可以发现直径大于3毫米的脑瘤和直径大于1毫米的乳癌。

库仑散射照相——多次小角度散射的利用

库仑散射照相与吸收照相比较，从成像原理到照

片风格都截然不同。当质子在物质中穿行时,因受到原子核电荷的推斥,质子不断改变着自己的方向,质子束在物质中穿行一段距离后,束径就会变大,这种现象称为多次库仑散射。

一束平行的质子,垂直入射到一个由 A、B 两部分组成的板状物体上(图 3a)。因为库仑散射的存在,质子束穿过 A 部分后,就形成一个方均根散射角 θ_A ; 质子束穿过 B 部分后,就形成一个方均根散射角 θ_B 。在距离物体 L 处,放一照相底片 FF, 照片(图 3b)表明,质子束穿过 A 与 B 后的总强度不变,但在 A、B 的交界处,透射束的强度分布呈双相,其中心为 A、B 间的几何边界。如果 $\theta_B = 2\theta_A$, 那么双相的峰谷间的强度差为 $0.33I$ (I 为远离 A、B 边界处透射质子束的强度)。这种透射强度在边界处的双相特点,叫做亮线——暗线效应,它把照片上物体的边界戏剧性地显示了出来,结果像笔画的一样清晰,所以有人称这种技术为质子描线术。

图 4 是质子库仑散射照相和 X 光照相的比较。库仑散射照相不打开表盖就能检查内部机件的组装情况,所拍老鼠的照片,不但显出了骨骼,而且也显出了

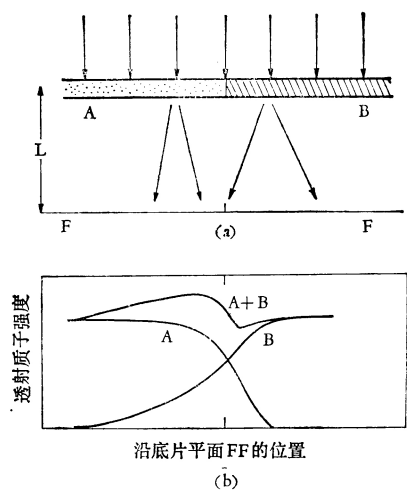


图 3. 库仑散射照相原理图

皮肤、软组织的结构和各种膜,这是 X 光照相无法达到的。

但是,不是凡能穿透物体的质子束都能进行库仑散射照相的。质子能量小于 50 兆电子伏时,能考察的

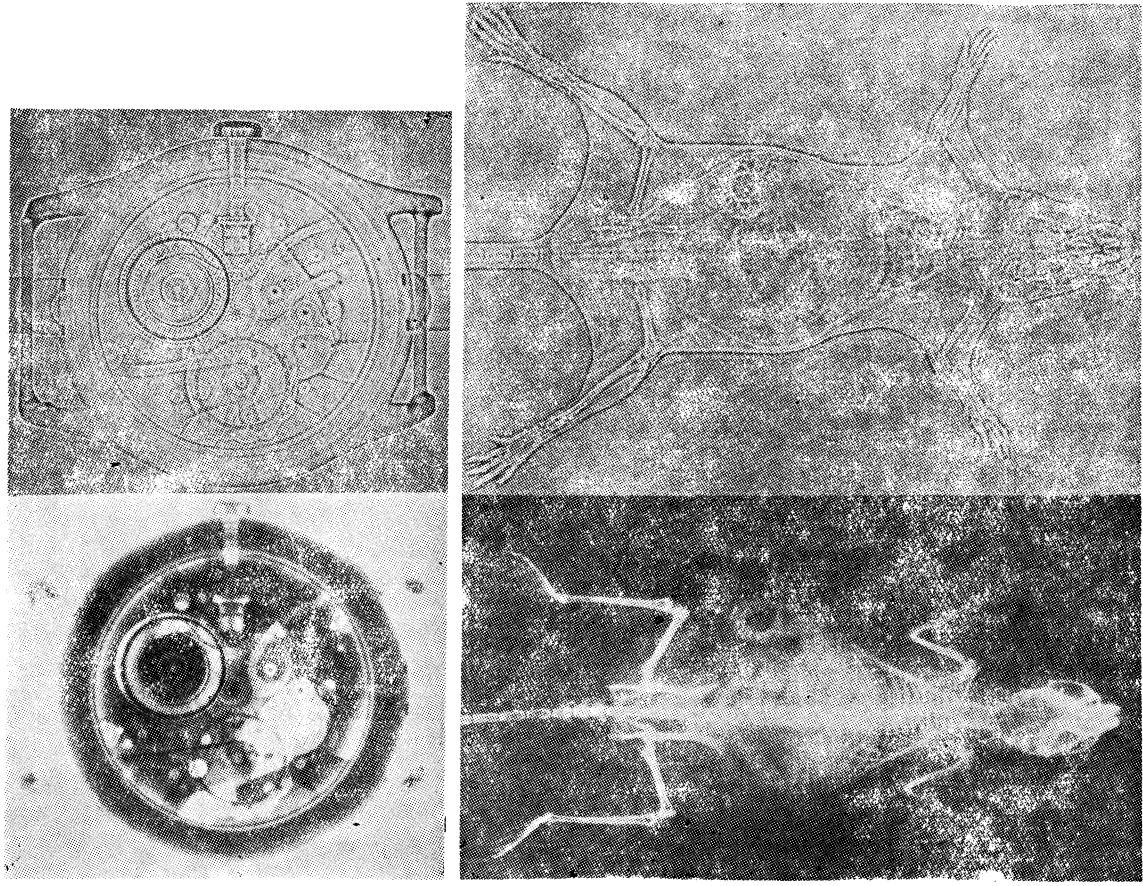


图 4. 左上是手表的质子照相,质子能量是 160 兆电子伏;下面是同一手表的 x 光照相。
右上是一只老鼠的质子照相,质子能量 160 兆电子伏,下面是同一老鼠的 X 光照相。

最大厚度太小了；而质子能量大于 25,000 兆电子伏时，也不能很好地进行这种照相。从库仑散射角的公式，加上能看清物相边缘的经验公式，可以算出库仑散射照相，能够清楚显示内部结构的物体的最大厚度。下面的附表就是对一些物质计算的结果。物体厚度按厘米计算。

质子能量 (兆电子伏)	聚乙烯	碳	铝	铁	锡	铅
50	1.4	1.1	0.8	0.5	0.4	0.3
160	2.8	2.3	1.6	1.0	0.8	0.7
600	6.2	5.1	3.6	2.1	1.8	1.4
7,000	25	21	14	8	7	6
25,000	56	46	32	19	16	13

质子库仑散射照相，除适合检查内部机件组装外，还特别适用于检查焊缝的焊接情况。如果用荧光电视系统来观察焊接质量，更是方便、快速，结果可靠。这种照相与质子吸收照相不同之处，是能检查出物体的一个边缘，但对物体内部的弥漫性区域无能为力。另一缺点是，对一个物体虽能穿透，但不一定能照相。这两个缺点又正好被质子吸收照相所补救。而吸收照相的最大缺点是要求质子能量可任意调节，库仑散射照相却不要求这样。

核力散射照相——大角度散射的利用

前面已经提到，当质子束射入物体后，基本上是向前飞行的，一部分质子因受核电荷的散射，与入射方向偏离一个小的角度，还有一部分质子，因受到原子核核力（原子核中核子之间的强相互作用力）的巨大作用，使出射方向与入射方向偏离很大，这现象叫核力散射。被核力散射的质子数，正比于物体中原子核的密度。如果在质子束的路程上，在散射体的两边，分别放上多丝正比室或漂移室（这种探测器能定出质子的空间位置），用计算机处理前后两组探测器的数据，就能够定出散射体中任何部位原子核的密度，也就是定出一种三维空间密度分布的图画。这是新近才出现的一

种技术，因它不是用底片直接拍照物体，而是用算得的数据把像建立起来，有人称这种技术为辐射检查法。

入射质子被物质中的“自由”质子（氢原子的核）散射的情况，与被原子核内核子（质子或中子）散射的情况不同，辐射检查法可以区别这种差异。所以核力散射照相，原则上可以给出物质化学元素成分的情况。

已用能量为 540—1000 兆电子伏的质子（在此范围内能量的改变，效果差别不大），对鸡蛋作过辐射检查，所得三维图片可以区别蛋黄和蛋白，空间分辨达 1 立方毫米。蛋黄、蛋白密度相近，这是 x 光所不能分辨的。还以低于人体剂量的入射束，对兔子和老鼠进行过辐射检查，效果与对鸡蛋的检查相近。这种方法可以得到立体图象，同时被检查物所受的剂量也比 x 光照相小得多。

以上讲了照相原理和应用，关于像的获得，也可分三种情况：

1. 二维（平面）像片：可用底片来拍照。底片可以是普通光学片或 x 光片。黑白、彩色片都行，只是用质子拍彩色片，产生的点多为蓝色，有时蒙以淡紫色。

也可以用荷电的硒干板代替底片，这种作法快速而又便宜。

用固体径迹探测器（大部为塑料片）也可以，优点是不怕光，不衰退。显影也很简单，在一定浓度和温度的氢氧化钠溶液中，浸泡一定的时间就可以。

2. 二维动态像：有时需要观察物体内部的动态变化。某种小探测器的镶嵌方阵可以观察动态像，不过不精密。有一种荧光电视动态系统，是将硫化锌（银）荧光物质涂在玻璃板上，质子束打出的荧光输入电视机来显像，可显动态的影像。

3. 三维（立体）动态像：有时不允许用不同方向上得到的二维像，来了解物体的空间结构，这就需要三维动态显示法。上面核力散射照相中所提到的就是一种。三种照相方法，现在都能够做到三维动态显示。

质子照相是新技术，虽然还刚刚开始，但已经显示了它的优越性，可以预料，质子照相的应用，有着十分广阔的前景。