



看见 X 射线的颜色

材料科学与工程学院 杨旸

128 年前的一个夜晚，德国物理学家威廉·康拉德·伦琴在实验室中发现了一个诡异的现象。阴极射线管用黑纸包覆只留一条窄缝，在接上高压电流进行实验时，他发现两米以外的一个涂有亚铂氰化钡的荧光屏发出微弱的浅绿色闪光，一旦切断电源闪光就立即消失。日后的一个多月，执着的物理学家为了捕捉这种神秘现象的来源，最终说服妻子充当实验对象，将手放在荧光屏前，惊奇的一幕被载入史册，荧光屏上显现出手掌的骨骼以及无名指上的那枚戒指，这就是人类历史上第一张 X 光照片。伦琴也凭借 X 射线的发现成为第一位诺贝尔物理学奖获得者。然而直到今天，我们发现常见的 X 光照片仍然都是黑白的，与伦琴当时拍摄的原理其实并无多大差别。

“X 射线的探测与成像其实是一个非常古老的问题，但时至今日仍然有大量的科学挑战在等着我们”，杨旸老师在接受采访时说道。与伦琴那个时代众科学家还在探索 X 射线的物理实质不同，现在我们早已知悉 X 射线的本质，并将其广泛应用于医疗诊断、安全检查、国防工业和科学研究等领域中。与我们日常生活中五颜六色的可见光一样，X 射线也是电磁波，因此 X 射线也具有波长信息，即各种“颜色”。可见光覆盖 400–700 纳米 (nm) 的波长范围，人们从最早的黑白照片，迅速发展出彩色照片，以及后面的多光谱、高光谱成像方式，极大地提升了人类感知世界的能力。在被问到做这个课题的初衷时杨旸老师对我们说：“我们最初的想法就是参照可见光成像技术的发展路线得来，与可见光图像中丰富的色彩信息相比，人们目前对 X 射线“颜色”的感知与利用还处于非常初级的阶段”。

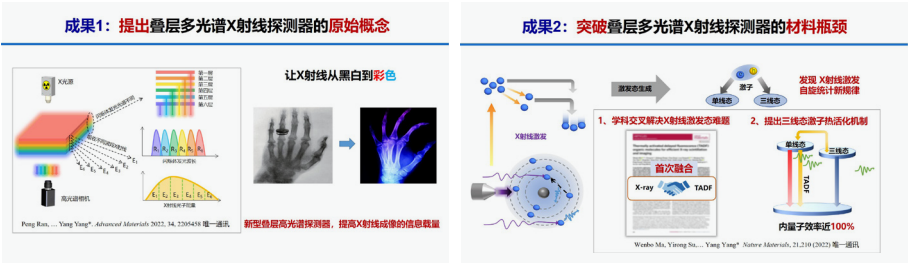
X 射线的波长范围实际上比可见光更广，从 10 皮米 (pm) 到 10 纳米 (nm)，横跨了三个数量级，但为何经过一百多年的发展，我们对 X 射线的使用仍然主要停留在黑白图像的阶段？虽然 X 光和可见光一样都是电磁波，但其频率远高于可见光，从而很难使物质极化，可以轻易穿透物质而不发生相互作用；它在介质中的折射率也几乎都是 1，很难用光学手段调控；因此 X 射线很难像可见光一样用滤光片或者光栅等来实现不同颜色的区分探测，也难以像可见光那样通过设计小巧的光学镜头来实现高分辨成像，而是需要大面积的探测薄膜和器件。常见的 X 射线探测器都是能量积分型，它无区别的将所有不同能量 X 光子吸收并根据它们的总能量转化成图

像信号,因此只能实现黑白灰度成像,缺乏 X 射线的能量(光谱)信息,即没有“颜色”。

彩色相机技术瞬间颠覆了黑白成像领域,彩色电视的出现也迅速淘汰了黑白电视。可想而知,假如我们可以把丰富的光谱信息也引入到 X 射线成像中,一定会大大增强 X 光在医学诊断、安全检查等应用中的信息感知能力。目前广泛使用的 X 射线成像仪通过测量穿透物体的总 X 射线剂量来形成图像对比度,相近原子序数和密度相似的材料在这种成像方法中几乎没有对比衬度,比如常规灰度 X 射线成像可以清楚地分辨骨骼和肌肉,但是无法看清软骨组织。在 0–200keV 范围内, X 射线光子通过物体后的衰减主要由光电效应和康普顿散射引起,这两种相互作用机制都与 X 射线光子的能量密切相关,不同物质对 X 光子的吸收具有很强的光谱或能量依赖关系。在这种情况下,能谱分辨将“颜色”信息添加到 X 射线图像中,可以帮助我们看清那些在能量积分型 X 射线灰度成像中无法看到的信息,大大增强对不同物质的分辨能力。“如果说传统的能量积分型 X 射线成像能够使我们初窥物体的内部结构,那么能量分辨 X 射线成像将增加一个新的信息维度,即光谱,来向我们进一步精准地展现物体内部世界”,杨旸老师展望能谱分辨 X 射线成像技术时说道。

我国在很多领域已经逐渐成为科技大国,甚至强国,但在 X 射线探测核心元器件方面我们和科技大国的距离还很远。在专利数量上,美国是我国的 10 倍,而高端的 X 射线和 CT 成像设备几乎被美国通用、德国西门子等公司垄断,这些探测器的材质和制备工艺都是核心机密。国产医学影像设备的市场占有率不足三成,其中大部分核心元器件也主要依赖进口。科技日报、新华网等官方媒体把 X 射线探测器件列为 35 项卡脖子技术之一。“能谱分辨无疑将会成为下一代 X 射线成像技术的关键,我们不仅要努力实现 X 射线探测器的国产化,更要积极探索这些先进的 X 射线探测技术”,杨旸老师在与 X 射线探测器相关研制企业座谈时说道。在 X 射线医疗影像设备领域,GPS(GE, Philips, Siemens)都已明确将在各自的下一代高端 CT 中引入多能谱 X 射线探测器。

X 射线光谱或者说能谱的测量手段其实已经存在了,目前主流的 X 射线能谱探测主要依赖光子计数探测器(PCD),具体而言,由于不同能量 X 射线光子与 PCD 晶体作用后产生的电脉冲信号强度不同,因此可以通过测量每个入射 X 光子产生的电



提出叠层多光谱 X 射线探测器的原始概念

突破叠层多光谱 X 射线探测器的材料瓶颈

脉冲信号强度,来对每个光子按能量通道进行分类,从而实现能量分辨,最先进的是 CZT(CdZnTe) 或者 CdTe 晶体探测器。虽然光子计数的概念已经应用于核医学 PET、SPET 成像系统,但是许多难以避免的缺陷限制了它在更多更常见的 X 射线影像设备上的广泛应用。首先,在高通量 X 射线下各光子到达探测器的时间间隔极短,产生电脉冲相互叠加的效应(脉冲堆积“pile-up”)。这也是光子计数虽然早已在 PET 等低计数率场合成熟地应用于临床,而在 CT 和平板型成像等高通量 X 射线场合下迟迟未能推广的最大原因;其次,光子计数探测器的性能非常依赖于高纯度的光谱级单晶,而生长高质量 CZT 单晶成本高昂、技术困难,目前只被少数的公司所垄断;此外,CZT 单晶有效探测区域的尺寸一般只有 1–2cm,而且每个 CZT 探测器单元都需要一个复杂的电路读取系统,因此其像素集成度很低,远远无法和高集成度的硅基探测技术相比,常见的探测芯片的像素数一般只有 16*16 到 64*64 之间,因此无法在单次 X 射线曝光的条件下一次性获得大面积 X 射线图像,只能通过扫描探测器或是扫描物体的方式多次曝光后拼接成像,这大大增加了成像时间和成像所需辐射剂量。目前这类光子计数型探测器只能在基于高速扫描模式的螺旋 CT 等领域进行实验临床研究,很难直接应用于更常见的大面积平板型 X 射线成像(Flat-panel X-ray imaging, 缩写为 FPIXI)领域。目前市场上还没有能够在单次 X 射线曝光下实现多光谱、大面积的 FPIXI 设备和技术。

针对这些问题，杨旸老师团队提出了一种具有原创性的多光谱、大面阵、低剂量的动态 FPXI 成像方法。这种新型探测方式的核心思路是将难以测量的 X 射线光谱信息编码成易于测量的可见光参量信息，这也是该课题拟解决的关键科学问题。

“我们希望能够像拍可见光彩色照片一样方便的得到“彩色”的 X 射线图像”，参与该课题的学生冉鹏在接受采访时说道。与传统 X 射线探测只用一种闪烁体不同，该策略是将多层不同特性的闪烁体通过堆叠形式来协同实现 X 射线光谱的探测和成像。具体方案是把对 X 射线吸收能力不同、闪烁发光波段不同的多种闪烁体通过特殊的排列顺序叠合形成多层复合结构，从而将 X 射线光谱的探测问题转化成可见光的光谱探测问题。顶层闪烁体主要负责吸收低能 X 射线并发射最长波段(如近红外光)的闪烁光，下一层主要吸收次高能量的 X 射线，并发出次短波段的闪烁光(如黄光)，依此规律类推，最底层的闪烁体吸收最高能量 X 射线并发出最短波段的闪烁光(如蓝光)。这样对 X 射线光子能量的识别，就自然地转化成了对每一层闪烁体发光的可见光谱识别，这就有可能通过目前很成熟的硅基多光谱 – 高光谱相机并配合一定的光谱计算方法来实现。现有的光子计数方法需要长时间 X 射线曝光，探测器需要不断扫描物体获得图像，而该方法可以很好地兼容目前成熟的硅基可见光探测技术，如基于单晶硅的 CMOS 和基于非晶硅的 TFT 阵列。因此可以通过一次 X 射线照射就完成 X 射线光谱信息的读取和空间位置的成像，大大提升了成像速度和成像视场。

“我们的思路就是通过创新的器件结构将难测的 X 射线信息编码成易测的可见光信息，然后对其进行计算解码，还原出多彩的 X 射线图像”，基于这种“化难为易”的思路，他们还提出了一种基于侧照闪烁体的多能 X 射线线阵探测器，它可以通过可见光图像传感器轻松地获取 X 射线光谱信息。典型的能量积分 X 射线成像系统中，闪烁体平面垂直于 X 射线入射方向，与此不同的是，该方法中的多能闪烁体探测器(被称为侧照 X 射线闪烁体)，与入射 X 射线束平行放置。这种独特的放置导致闪烁体表面闪烁光分布不均匀，这是由于高能 X 射线光子的穿透深度较长，而低能 X 射线的穿透深度较短。结合 X 射线衰减定律，通过分析闪烁光的强度分布，就可以重构入射 X 射线的能谱。在数学上建立模型并实验验证了基于侧照闪烁体多能探测器识别 X 射线光谱信息的方法，并成功实现了具有 8 个能量通道的多能 CT 成像系统

的概念演示。该方法为计算机断层扫描(CT)成像装置中常用的 X 射线线阵探测器提供了额外的能量解析能力，超越了传统能量积分方法的效果，并且所有这些都不需要额外的硬件组件。

“杨老师非常鼓励我们自由探索与学科交叉的研究”，如课题组的一位学生所说，杨旸老师正是将光学、信息和材料多学科内容融合，去解决一个古老又常见的难题。也正是在这种突破传统思维框架的情况下，才能迸发出有趣的灵感。无论是基于单一的光学方法、材料学方法还是电子学方法，都很难同时实现多光谱、实时动态、大视场的 X 射线成像。而是需要材料创制、器件创新和光谱计算协同作用，才能在实现多光谱探测的同时兼得实时动态与大视场。科学技术不断发展进步，到今天很多问题都无法基于单一学科的研究范式去解决，具备多学科交叉研究的思路和能力变得越来越重要。如北宋王安石在《游褒禅山记》中所说，“古人之观于天地、山川、草木、虫鱼、鸟兽，往往有得，以其求思之深而无不在也”，深邃且广泛的思考应该是每一位科研人员所追求的，也是杨旸老师对于自己 and 学生的要求。

“X 射线的故事才刚刚开始，我们所做的内容只是冰山的一角”，杨旸老师回顾与展望 X 射线探测技术时说道。X 射线不仅有波长信息，同样具有相位、偏振等信息，可见光探测技术早已将这些信息维度开发应用成熟，给我们的生活带来了极大的发展与便利，而 X 射线同样丰富的信息维度还是尚未开发的瑰宝。“希望有一天，我们能够像运用可见光一样全方位驾驭 X 射线，造福于国家和社会”。

(供稿人：冉鹏、马文博、苏一榕、杨旸)