

基于量子关联的X射线成像

(北京大学 王树峰 编译自 Matteo Rini. *Physics*, August 23, 2019)

第一个量子关联的X射线光子源显示出可增强X射线成像。

量子成像是利用量子的奇特性质在成像系统中提高分辨率及其他特性，该方法已广泛应用于可见光成像。目前有一个团队证明在X射线波段也可以实现这种量子增强。第一个X射线源已经开发出来，它可以在两个光子之间产生距离量子力学关系，即所谓的量子关联。该团队使用这种光子对一个简单的物体成像。结果表明，量子关联提高了所获取图像的清晰度，并表明类似的方法可能会有益于其他基于X射线的研究，例如研究材料中的缺陷或确定生物分子的结构。

科学家们已经知道利用光的量子性可以进行更好的测量，并验证了几种方法。其中一种重要的方法称为量子照明。它可以用很少的光子或在有背景光、烟雾或灰尘的情况下对物体成像。该方案通常利用两个具有强量子关联(称为纠缠)的光子，但是具有较弱关联的光子也可以实现。第一个光子作为参考的“辅助”光子，第二个是“信号”光子，它被发送到要成像的对象。利

用关联敏感检测方案，即使在环境中存在大量背景光子流的时候也可以检出信号光子。

以色列巴伊兰大学的 Sharon Shwartz 说，“将量子关联光子源的想法扩展到X射线波段有很多好处。”例如，X射线可以以原子分辨率成像并且可以探测原子核的结构，这是用可见光进行实验所无法获得的特征。但是，还没有人开发出一种量子相关的X射线光子源。

为了开发这种光源，Shwartz和他的团队利用了一种称为参量下转换的过程，该过程通常用于生成纠缠的可见光子对。在此过程中，一个在晶体中传播的“泵浦”光子被劈裂成两个光子，它们的总能量与泵浦光子的能量相同。在适当的条件下，产生的这两个光子是量子关联的。但是，该过程在X射线波段下效率很低。为了产生足够数量的关联光子对，他们采用了日本 SPring-8 同步加速器产生的光束，这是世界上最明亮的高能X射线源之一。

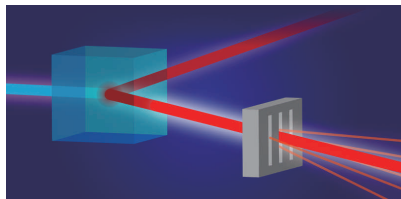
他们使用金刚石晶体产生参量下转换，将加速器产生的明亮的光束，将加速器产生的明亮的22 keV 光子束转换为两个弱得多的光束，它们的光子能量均约为11 keV，并且以不同角度从晶体出射。这两条光束被用作量子照明方案的辅助光束和信号光束。研究人员测量了每个光子的到达时间和能量，发现辅助光子始终与信号光子同步到达，其能量之和总是22 keV。巴伊

兰大学的研究生兼团队成员 Sason Sofer 说：“我们观察到的完美的时间—能量关系只能意味着两个光子是量子关联的。”

该小组对一个简单的物体(包含三个1 mm宽的狭缝的金属薄片)进行成像，图像中每个点大约使用100个光子。他们将利用关联光子获得的图像与使用非关联光子获得的图像进行了比较，发现关联光子产生了更清晰锐利的图像，狭缝和周围的对比度更大。由于诸如X射线荧光等效应，背景光子比信号光子多10000倍，但是关联光子的方案可以将信号光子与背景区分开来。

意大利国家计量研究院的量子光学专家 Marco Genovese 称关联X射线光子源是“技术突破”。他说：“这可能对于只能使用很小数目光子成像的生物样品非常有用，因为生物样品很容易受到X射线辐照而被破坏。”Shwartz还建议使用该技术研究仅在超低温下才能观察到的奇异量子相变。他说，该方案可以通过减少测量所需的光子数防止X射线过度加热样品。

该项目的长期目标是证明光子不仅是量子关联的，而且是完全纠缠的。为此，必须以几百阿秒的精度测量光子的到达时间，这是当前技术所无法达到的。Genovese说：“但是，如果他们能够做到这一点，则无噪声成像和量子增强计量等方法都可以从这种X射线光子中获益。”



量子X射线之眼。新方案将X射线高能光子转换成两个具有量子关联的低能量光子。这种关联可以增强X射线成像装置的性能