

超快即超好

(西安交通大学 陈峰 编译自 Charalamos Tsoumpas. *Physics World*, 2020, (6): 41)

我曾在 YouTube 网站上看到过一段令我感到惊讶的视频。这段视频是 2011 年由 Ramesh Raskar 和他的同事在麻省理工学院拍摄的。视频中记录了一束亚皮秒激光脉冲穿过一个空塑料汽水瓶的过程，光线最终从瓶盖散射了出来，制造出了一个令人眼花缭乱的精彩画面。拍摄这一过程需要上百万次的重复记录，成像技术异常的复杂，但却成功实现了太赫兹 (THz, 10^{12} /s) 帧率的超快成像。

这个视频中所展示的结果只是近年来追求超快成像技术诸多探索中的一个。超快成像的故事最早可以追溯到 1878 年拍摄马匹奔跑的影像以及之后拍摄到子弹超音速飞行的影像。近几十年来，随着 CCD 和 CMOS 技术的快速发展，现在已经能够以 10^7 帧/秒的速度来观察快速变化的过程。2011 年的这个视频中则

展示出了 10^{12} 帧/秒的超快成像速度。

然而在麻省理工学院的这个超快成像研究中，必须不断地去重复同一个实验，才能逐帧建立一个完整的超快过程。相机的曝光与激光脉冲产生的时间必须非常严格的同步，同时还需要采用大量先进的光学组件和异常精细的机械控制。所以，尽管激光脉冲在塑料瓶中的运动仅经历了 1 个纳秒，采集数据却需要花费整整一个小时。连 Raskar 自己也戏称，这是一台“世界上最慢的超快相机” (图 1)。

2014 年，华盛顿大学圣路易斯分校的科学家又发明了一种新的超快成像技术。这种被称为压缩超快成像 (CUP) 的技术只需要进行一次实验就能够记录整个超快过程，摄像帧率可以达到 10^{11} 帧/秒。研究者采用这种技术成功捕捉到了单个光束的运动，意味着通过类似 CUP 这种新的技术，有可能观察到宇宙中一些转瞬即逝的超快物理现象。

医学魔法

随着新的超快成像技术不断涌现，人们也开始去探索它们一些潜在的重要应用，比如说研究细胞内的超快现象。但目前的超快成像技术通常工作在可见光波段，是否能够工作在 X 射线或者 γ 射线等高能光子所在的波段呢？由于这些高能光子具有更高的时间和空间分辨率，因而在医学物理领域也更具价值。

高能光子已经在 X 射线断层扫描 (CT) 以及正电子辐射断层扫描

(PET) 等诊断技术中扮演着非常关键的角色，可以拍摄到诸如血液流动和新陈代谢等动态的过程。通过更高的时间和空间分辨来探测高能光子，则可以对人体进行更深入的动态观测。

正电子辐射断层扫描 (PET) 就是一个非常典型的应用。先将放射性示踪剂如氟-18 注射到患者体内，放射性同位素产生的正电子会与患者体内组织中的负电子发生碰撞，正负电子湮灭后会产生一对能量为 511 keV 的 γ 光子。所产生的 γ 光子会被闪烁晶体所捕捉，随后闪烁晶体会释放低能光子，并最终由光电探测器转化为电信号。通过观测上述湮灭过程的时间和位置信息，就可以判断出放射性示踪剂在某一时刻的空间分布。这能显示出示踪剂在体内不同组织及器官中的移动速度，帮助医生监测人体内部的生物化学过程，从而对正常与反常的生理现象做出准确判断。

目前临床最先进 PET 扫描仪的空间分辨率大约为 3—4 mm，可以持续观测 1—2 分钟，同时有相对较好的能量分辨率 (约 10%)。如果采用更先进的设备，如渡越时间正电子辐射断层扫描技术 (TOF-PET)，则可以获得更高质量的医学图像。TOF-PET 能够区分出两个发生时间非常接近的湮灭事件。目前世界上最快速的商用 TOF-PET 扫描仪 (Siemens 公司) 时间分辨率大约为 200 皮秒 (图 2)。

动态 PET 设备不仅时间分辨率

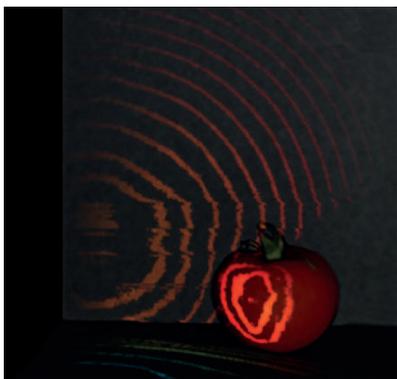


图 1 快但却很难——“最慢的超快成像技术”。麻省理工学院的超快成像系统可以拍摄到固体表面下光的散射过程，如图中番茄的光散射，但它的数据采集方式却是异常的复杂

高, 信噪比与传统的静态PET设备相比也能提高2.5倍。如果TOF-PET时间分辨率能够更进一步, 达到10皮秒水平的话, 那么相比于静态PET的信噪比将可以提升12倍。

日新月异

提升超快 γ 射线探测器的时间分辨率将为医学的发展带来许多益处。临床医生能更为快速的诊断, 同时也能减少同位素的使用剂量, 而且医学影像质量、分辨率、准确性和精度都将会大幅度提升。不仅如此, 在生物、天文学、粒子物理以及激光雷达等方面上述工作也具有重要的意义。

欧盟也因此启动了快速先进闪烁体计时项目(FAST)。FAST项目从2014年一直延续至2018年, 由欧洲核子研究组织(CERN)的物理学家Etiennette Auffray-Hillemanns领导, 研究成员包括来自25个国家的几百名研究者。这个跨学科研究项目也是欧洲科学合作计划(COST)的一部分, 我也有幸在项目中担任联络经理。该项目的研究目标是创造出亚100皮秒时间分辨率的快速闪烁体探测器。

FAST的研究工作聚焦在三个方面: 第一是寻找更快速产生低能量光子的闪烁材料; 第二是要尽量缩短光束在闪烁晶体材料中的传播时间; 第三点最为关键, 是要提升光电探测器的探测速度。

在光电探测器的探测速度方面, 固态硅基光电倍增管的出现使快速光电转化成为了可能。硅基光电倍增管由数以千计的单光子雪崩二极管(SPADs)组成, 它的时间分辨率记录正在不断被刷新。

闪烁晶体的选取方面, 掺杂铈

元素和钙元素的硅酸镨晶体(LSO:Ce:Ca)经过前端电子学处理之后, 可以区分出两个发射间隔极短的湮灭光子。例如, 当晶体厚度为2 cm时, 两个湮灭光子到达的时间差(也被称为同步时间分辨率CTR)可以达到98皮秒。而当晶体厚度为3 mm时, CTR可以进一步降低到58皮秒。

另一种常用的闪烁晶体是锗酸铋(BGO), 晶体厚度为2 cm时, CTR值为277皮秒。晶体厚度为3 mm时的CTR值为158皮秒。相比于LSO晶体, BGO晶体会降低成像速度, 但它却非常廉价。BGO晶体的另一个优点是它有更大的密度, 这意味着当 γ 射线与BGO晶体相互作用时, 大部分的光子会消耗掉全部能量, 可以显著提高闪烁光的信号强度。BGO晶体的弱点是它的时间分辨率。如果通过切伦科夫辐射来提取时间信息, BGO晶体也许将会更适用于TOF-PET技术, 也更经济实用。

通过采用直接带隙半导体作为闪烁晶体, PET扫描设备的CTR有望降至10皮秒。这也是FAST中的一个选择方案。氧化锌和镓组成的高发光度纳米晶体, 将其嵌入到闪烁聚苯乙烯基质中。聚苯乙烯基质中的激子经过几个皮秒的衰减以后将能量转移到纳米晶体中, 从而产生闪耀光子。另一个小组的方法是采用基于InGaN/GaN的多量子阱异质结构实现了发光激子的超快激发, 激发态的上升和延迟时间也在皮秒量级。

千帆竞渡

在提升探测器时间分辨率的工作上, FAST项目无疑远远超出了人们的预期。目前已经验证了58皮秒

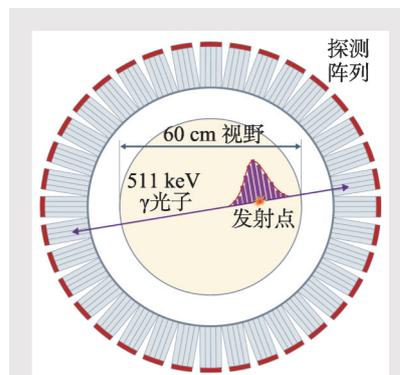


图2 渡越时间正电子辐射断层扫描(TOF-PET)。 γ 射线的快速探测对于医学成像具有极高价值, 尤其是在PET技术基础上发展出的TOF-PET技术。PET将放射性示踪剂注入患者体内, 示踪剂产生的正电子和电子发生湮灭而辐射出一对511 keV的 γ 光子。 γ 光子沿相反方向传播, 并最终被闪烁晶体捕获, 促使闪烁晶体释放出闪烁光子, 并最终被光电探测器转化为电信号。得益于固态硅基光电倍增管的快速发展, TOF-PET相比于传统PET具有更高的灵敏度。这使得医生能够更清楚的得知示踪剂最终到达体内何处, 实现对临床疾病更为精确的诊断

CTR的可行性, 正朝着10皮秒的目标迈进, 这无疑对基础和应用科学都有着不可估量的价值。我相信这一目标能在不远的将来实现, 当然挑战仍旧十分艰巨。

FAST项目2018年11月结束, 其研究工作仍在CERN“Crystal Clear Collaboration, CCC”计划中延续着, 而这些研究人员均在FAST项目中担任过关键的角色。尽管充满了挑战, 现在已经开始了一场率先实现10皮秒时间分辨率超快探测装置的科技竞赛。回顾以往那些影响深远的科技竞赛, 我相信这场竞赛会加速核仪器技术与应用的快速发展。随着更多研究组的加入, 我们也将更有希望在这一伟大的探索中获得成功。