

Do Rubi ao Attossegundo Como o Laser Aprendeu a Medir o Tempo

Autoras:

Cristina Vasconcelos
Gabriela Meirelles

Quando Theodore Maiman operou o primeiro laser de rubi, em 1960, dificilmente imaginaria que estava a criar um dos instrumentos mais revolucionários da física contemporânea. O feixe vermelho emitido pelo laser — inicialmente visto como curiosidade de laboratório — abriu caminho a seis décadas de inovação que hoje atravessam a medicina, as telecomunicações, a indústria e a investigação fundamental.

As primeiras gerações de lasers — como o He-Ne de Ali Javan, o Nd:YAG de Geusic ou o laser de CO₂ de Kumar Patel — funcionavam em modo contínuo ou com pulsos longos, na escala dos nanossegundos.

Eram adequados para cortar, medir e comunicar, mas demasiado lentos para observar fenómenos ultrarrápidos como vibrações moleculares (fs-ps), transferências de carga em semicondutores (fs) ou dinâmica eletrónica intra-atómica (attossegundos).

Nos anos 1960 e 70 surgiram dois avanços decisivos: o Q-switching, que permitiu gerar pulsos intensos e curtos, e o mode-locking, que reduziu ainda mais a sua duração. Com o laser de corante (Sorokin, 1966) e o laser de fibra (Snitzer), a comunidade científica passou a dispor de novos comprimentos de onda e da possibilidade de sintonização fina, expandindo as aplicações em espectroscopia, medicina e metrologia.

A mudança de paradigma chegou com os lasers de Ti:safira, inventados por Peter Moulton (1982). Graças

à sua grande largura espectral, tornou-se possível gerar pulsos de femtossegundos. Em paralelo, o Chirped Pulse Amplification (CPA), proposto por Donna Strickland e Gérard Mourou (Prémio Nobel da Física 2018), tornou possível amplificar estes pulsos ultracurtos sem danificar o meio ativo, estabelecendo as bases da ótica ultrarrápida moderna.

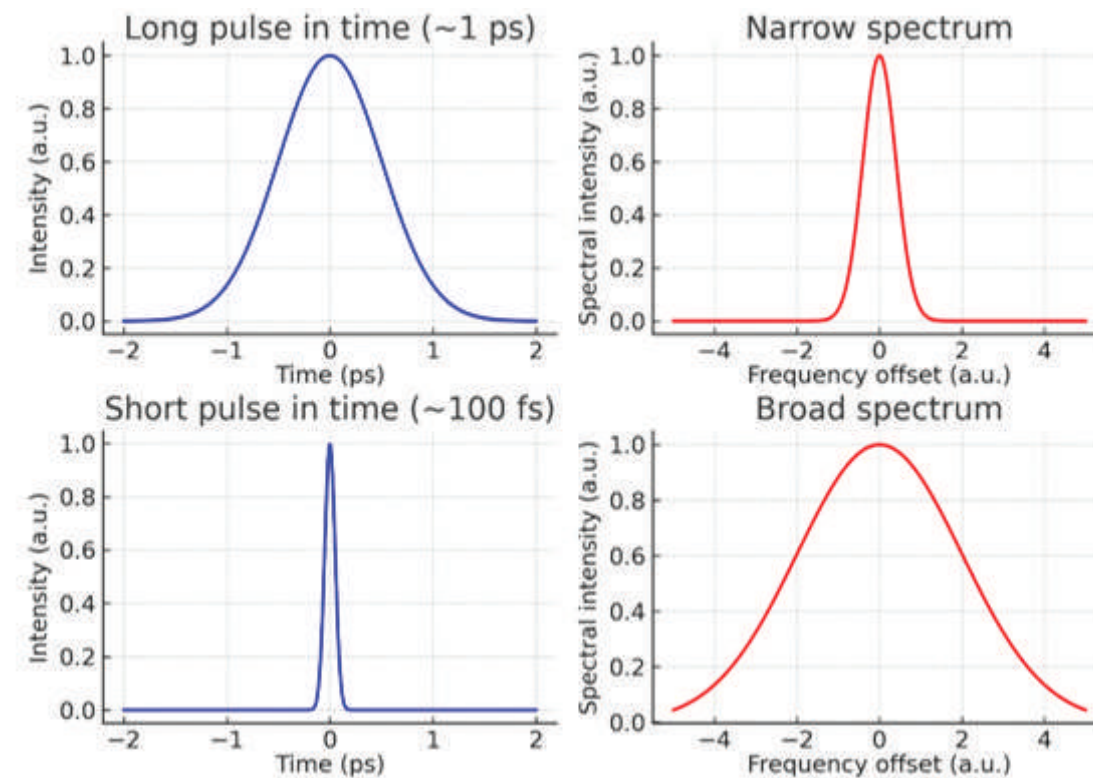
Na década de 1990 consolidaram-se técnicas de Kerr-lens mode-locking (Spence, Kean, Sibbett) e espelhos de dispersão do tipo *chirped mirrors* (Szipócs); surgiram arquiteturas eficientes — lasers de disco fino (Giesen) e fibras dopadas com itérbio (Yb) — e, crucial para as telecomunicações, os amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFA), que suportaram a multiplexagem em comprimento de onda (WDM) e a expansão da rede de fibra ótica.

A transição para o século XXI trouxe o controlo da fase *carrier-envelope* (CEP) e os combs de frequência (Hänsch e Hall, Nobel de 2005), abrindo caminho aos relógios ópticos de alta precisão. Hoje, a fronteira situa-se nos attossegundos (10⁻¹⁸s): técnicas como a geração de harmónicos de alta ordem (HHG) — que estende o espectro até ao ultravioleta extremo (XUV) — e a física de pulso único, consolidada por Anne L’Huillier, Pierre Agostini e Ferenc Krausz (Nobel 2023), permitem seguir movimentos eletrónicos em tempo real e controlar processos à escala quântica, revelando o movimento dos eletrões em tempo real. Em paralelo, novas plataformas — como os lasers Ho:YAG e Ho:CALGO a 2,1 μm, os sistemas de disco fino com energias de pulso de mJ, podendo atingir dezenas de mJ, e as fontes compactas de raios X geradas por interação laser-eletrão — demonstram que a fotónica extrema começa a ultrapassar o domínio laboratorial, encontrando aplicação em áreas como a micromaquinação de precisão, a cirurgia refrativa e a caracterização avançada de materiais.

Também na Universidade dos Açores, a investigação acompanha esta evolução. As autoras estudam, por modelação e simulação, a resposta de iões de terras raras — em particular Yb³⁺ — quando excitados por pulsos de femtossegundos. O estudo baseia-se em modelos cinéticos que descrevem a evolução temporal das populações eletrónicas, incluindo absorção multifotão ($W \propto I^m$),



Prémio Nobel da Física 2023: distinção pelos avanços na ciência dos **atossegundos**, revelando o movimento dos eletrões em tempo real.



Relação Tempo-Frequência: Porque é que a Largura de Banda Importa: Um pulso longo (~1 ps) corresponde a um espectro estreito; um pulso curto (~100 fs) corresponde a um espectro largo (Vasconcelos & Meirelles, UFO2025)

canais de relaxação radiativos e não-radiativos e transferência de energia entre iões. As simulações mostram que a elevada intensidade de pico dos pulsos de fs desencadeia relaxações multi-exponenciais e alarga o espectro de emissão, fornecendo largura de ganho efetiva para amplificação de pulsos ultracurtos sem alongamento — em conformidade com a relação tempo-largura espectral dos pulsos gaussianos ($\Delta t_{FWHM} \cdot \Delta \nu_{FWHM} \approx 0,441$). Este enquadramento teórico sustenta o design de amplifica-

dores *broadband* baseados em terras raras e prepara a validação por fluorescência resolvida no tempo e pump-probe.

Em pouco mais de meio século, o laser passou de curiosidade experimental a plataforma essencial na investigação e na tecnologia.

É hoje um instrumento de precisão para medir, caracterizar e manipular sistemas físicos, e continuará a abrir novas possibilidades científicas e industriais.

Ultrafast Optics
UFO XIV

A conferência Ultrafast Optics XIV (UFO 2025) decorreu de 5 a 10 de outubro de 2025, nas Furnas, em São Miguel (Açores), sob coordenação

Ultrafast Optics XIV - 5 a 10 de outubro de 2025, Furnas, em São Miguel (Açores)

conjunta da Sphere Ultrafast Photonics (Portugal) e da Central Laser Facility (STFC, Reino Unido). As autoras colaboraram na organização local deste prestigiado evento internacional dedicado à ótica

ultrarrápida, que contou com a presença de grandes especialistas mundiais, incluindo Anne L’Huillier, laureada com o Prémio Nobel da Física de 2023. Saiba mais em <https://ufo2025.fc.up.pt/about/>