

MEC2007 – Tópicos Especiais em Engenharia Mecânica

Técnicas de Medição Baseadas em Imagens

Técnicas Diversas

Fabio J. W. A. Martins

fabiomartins@puc-rio.com

Departamento de Engenharia Mecânica

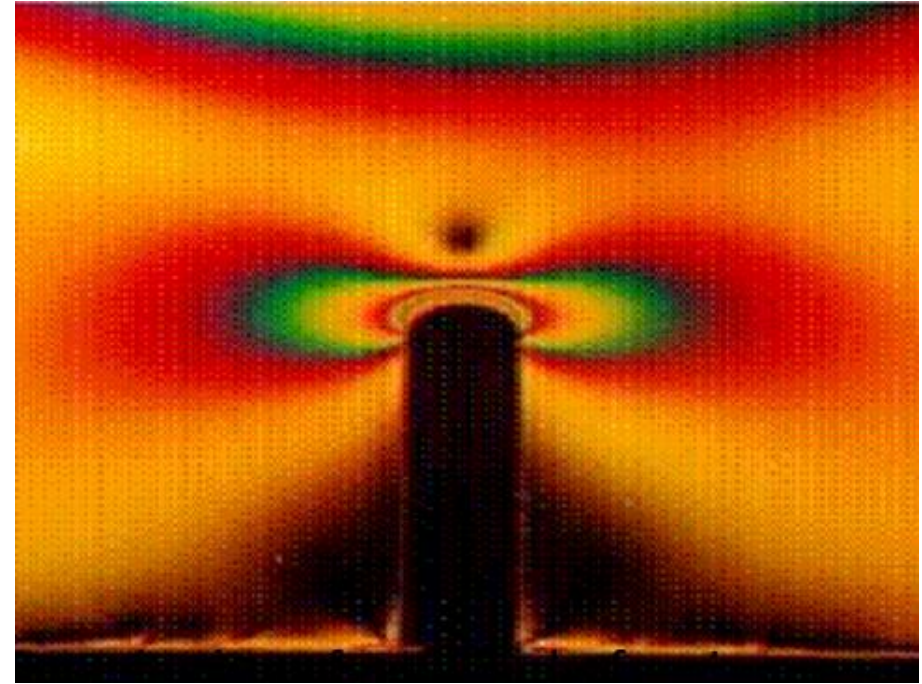


Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

16/10/2025

Fotoelasticidade

- Técnica óptica de campo global para visualização e quantificação de tensões e deformações
- Materiais fotoelásticos são opticamente isotrópicos na ausência de tensão e se tornam birrefringentes (índices de refração diferentes nas direções das tensões principais) quando submetidos a carga
- A luz polarizada atravessa o material com velocidades diferentes nas direções das tensões principais, gerando um atraso de fase proporcional à diferença entre as tensões ($\sigma_1 - \sigma_2$)
- Um filtro polarizador, posicionado após a amostra, produz um resultado visual de franjas (linhas coloridas ou escuras) cuja proximidade entre elas indica regiões de maior gradiente de tensão



Fotoelasticidade

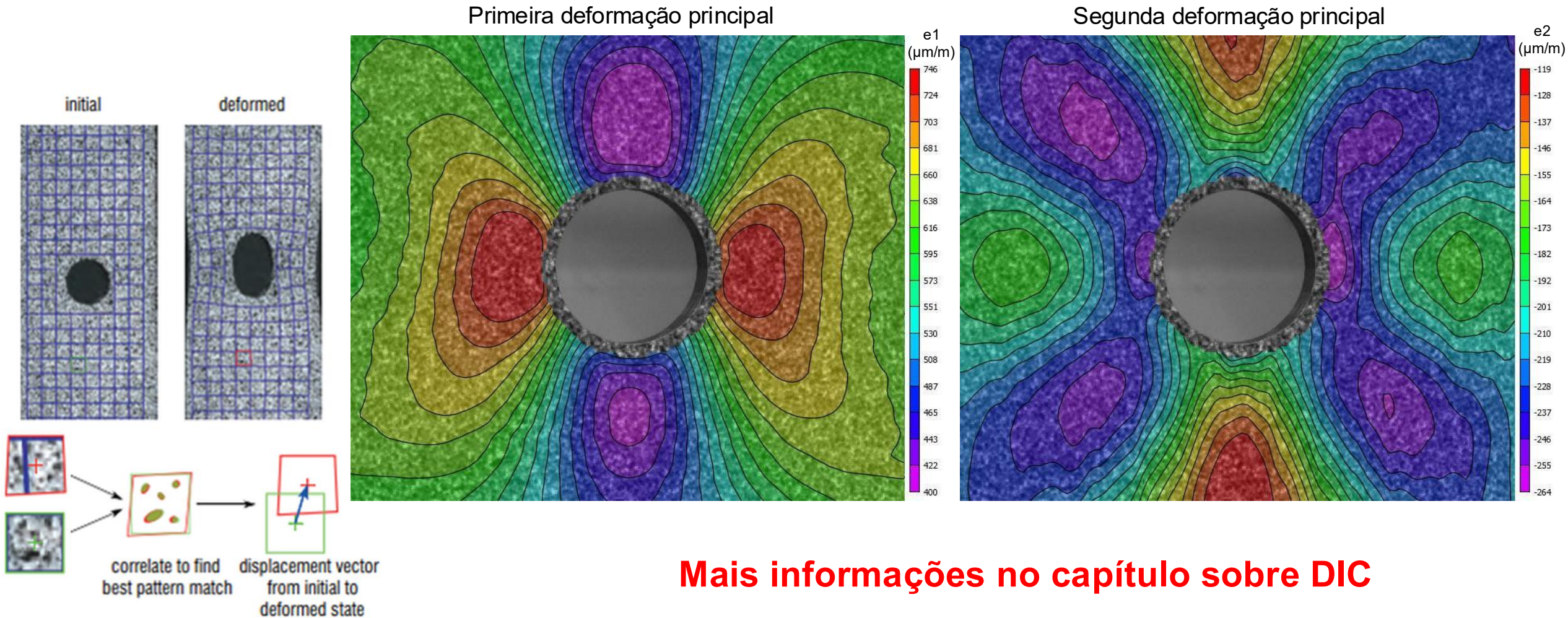
Padrão da luz polarizada em relação a tensão aplicada em diferentes barras



Burns, ME 124 Lab-1A Photoelasticity (2020)

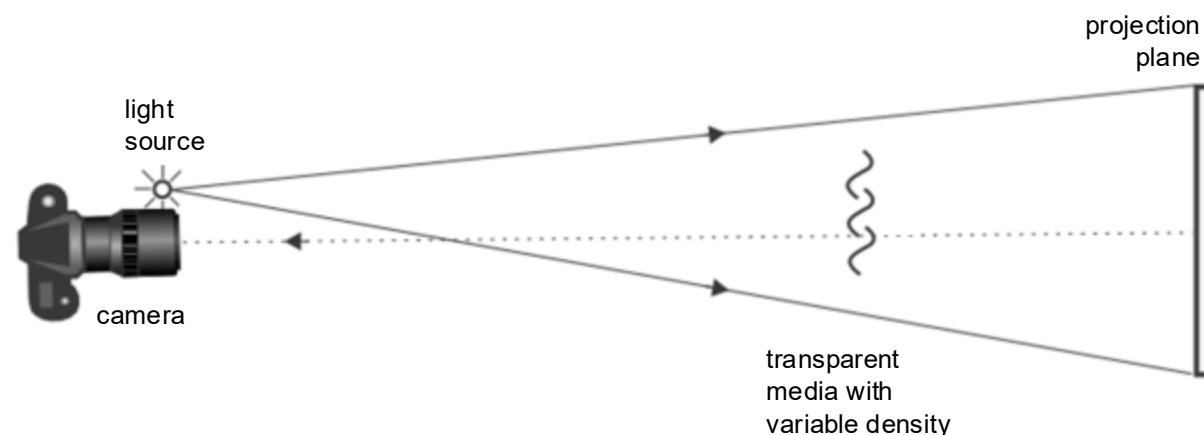
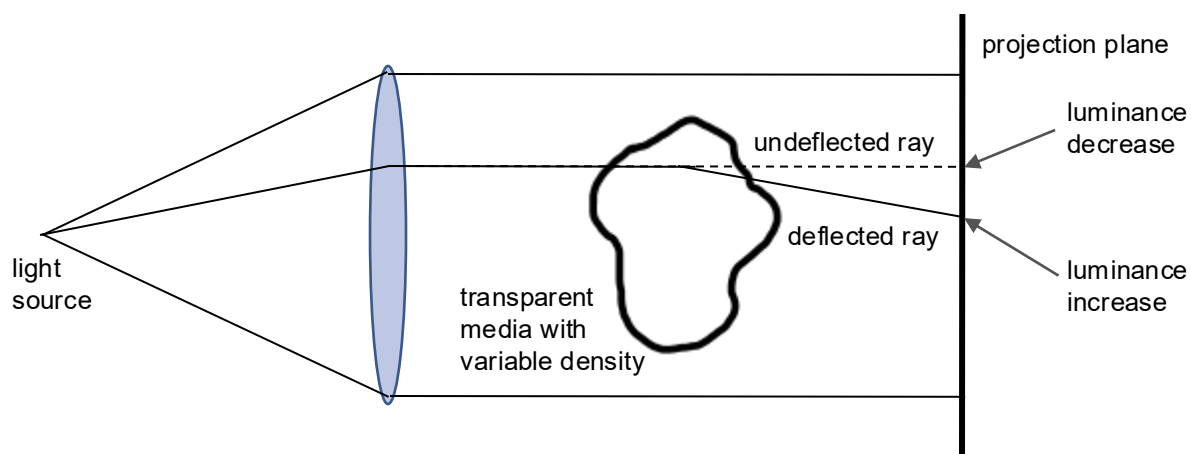
Correlação digital de imagem (*digital image correlation, DIC*)

Método óptico baseado na captura de imagens e em técnicas de correlação para medição de campos de deslocamentos e deformações de objetos sólidos contendo texturas

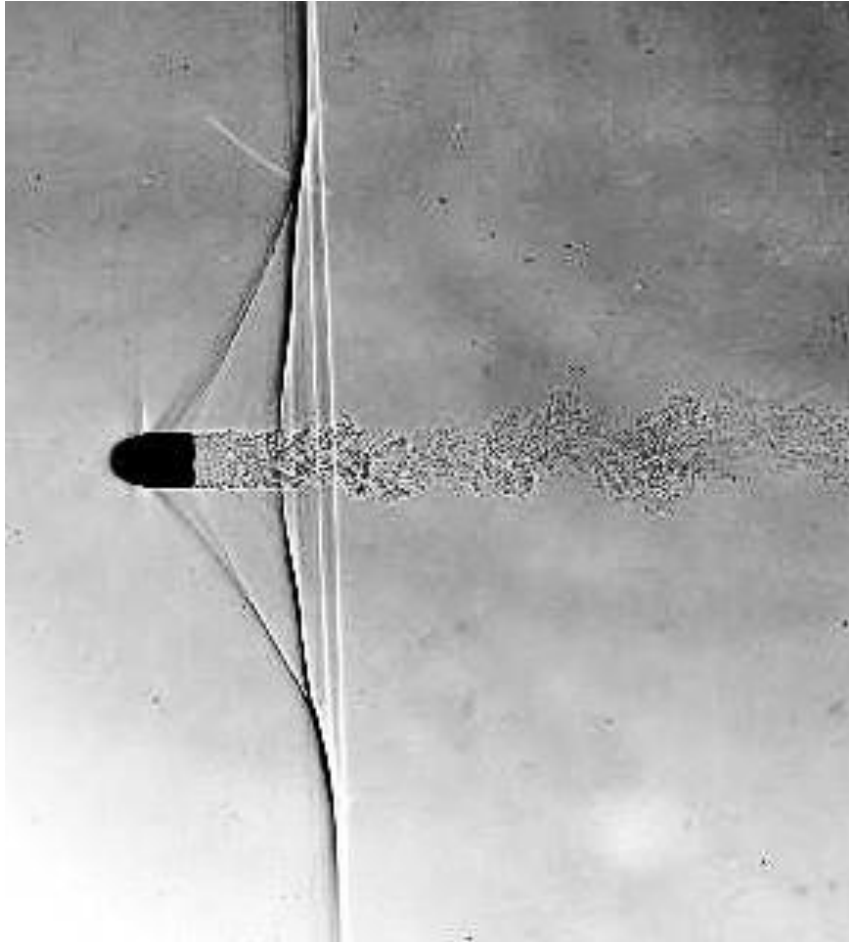


Shadowgraph

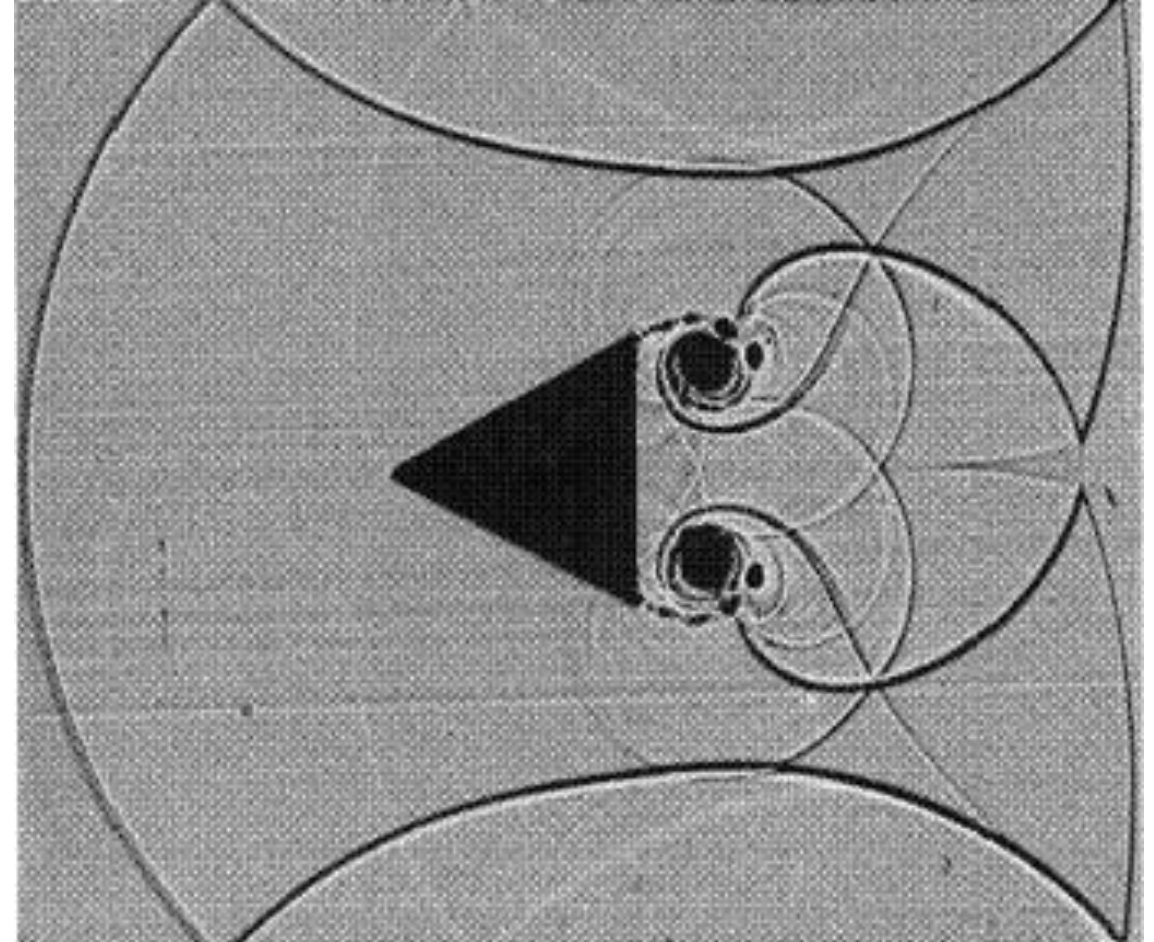
- Método óptico simples e eficaz para visualizar variações locais de densidade em meios transparentes (ex., estudo de escoamentos de fluidos de densidade não homogênea, ondas de choque, sprays, transferência de calor, combustão)
- A deflexão dos feixes de luz produz locais com diferentes intensidades de iluminação, permitindo a observação das variações na segunda derivada da densidade do meio (sensível para detectar mudanças bruscas)
- A variação do índice de refração da luz depende da densidade do meio, que é função da sua composição, temperatura e pressão



Shadowgraph

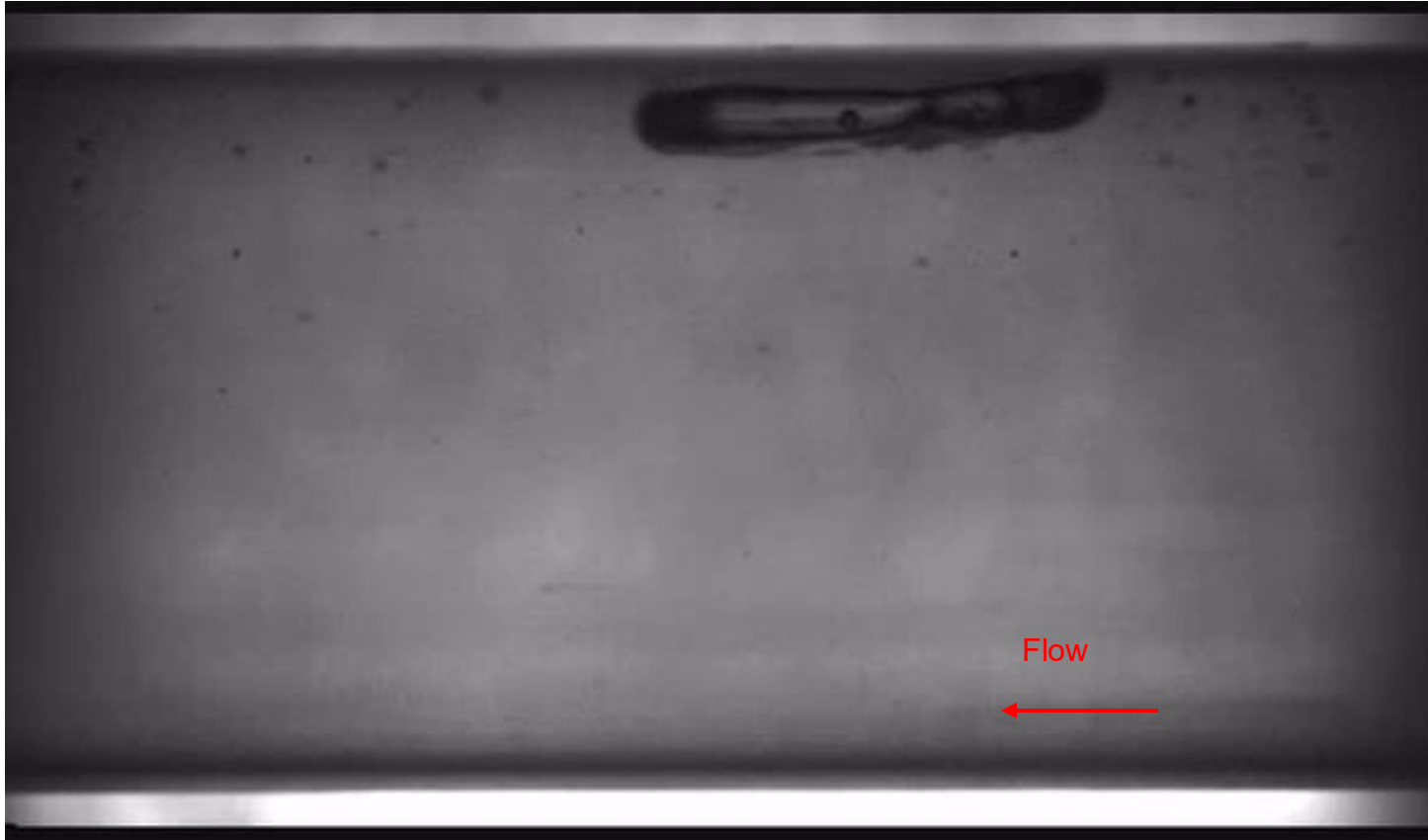


Onda de choque em um projétil (Edgerton)

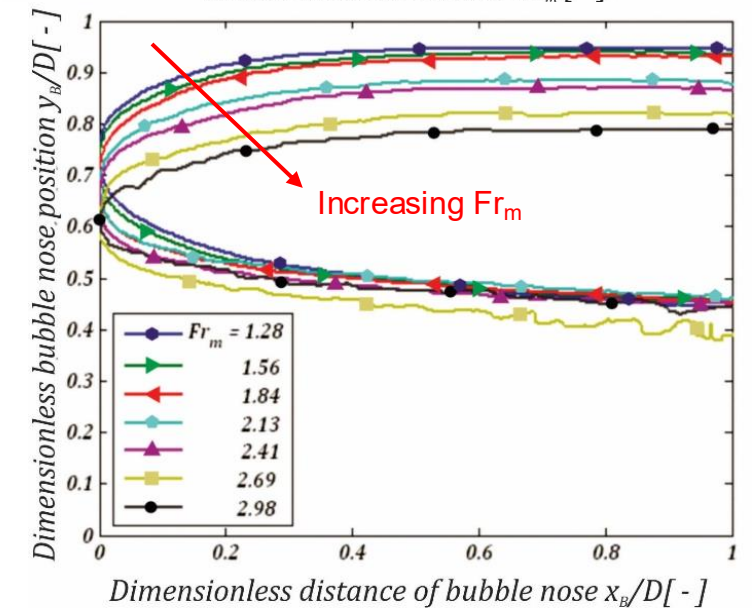
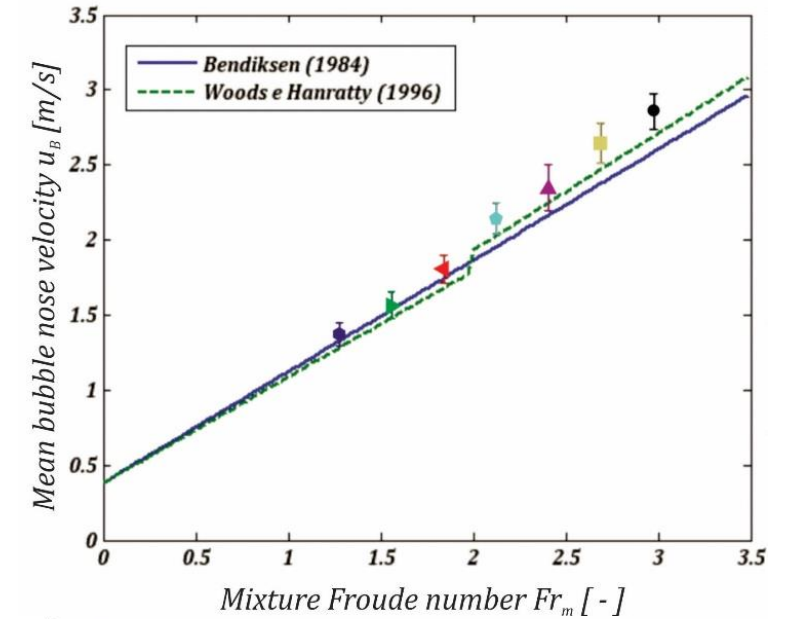


Onda de choque ao redor de um obstáculo triangular
(German-French Research Institute, St. Louis, ISL)

Shadowgraph

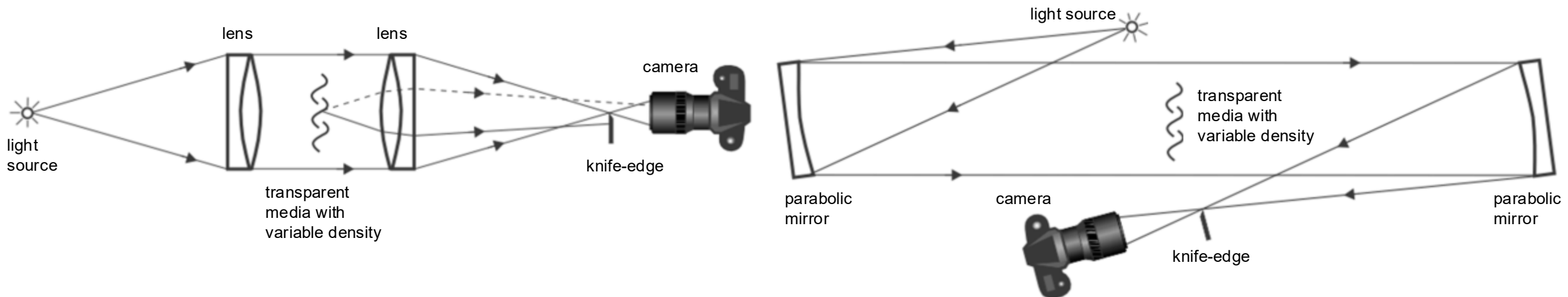


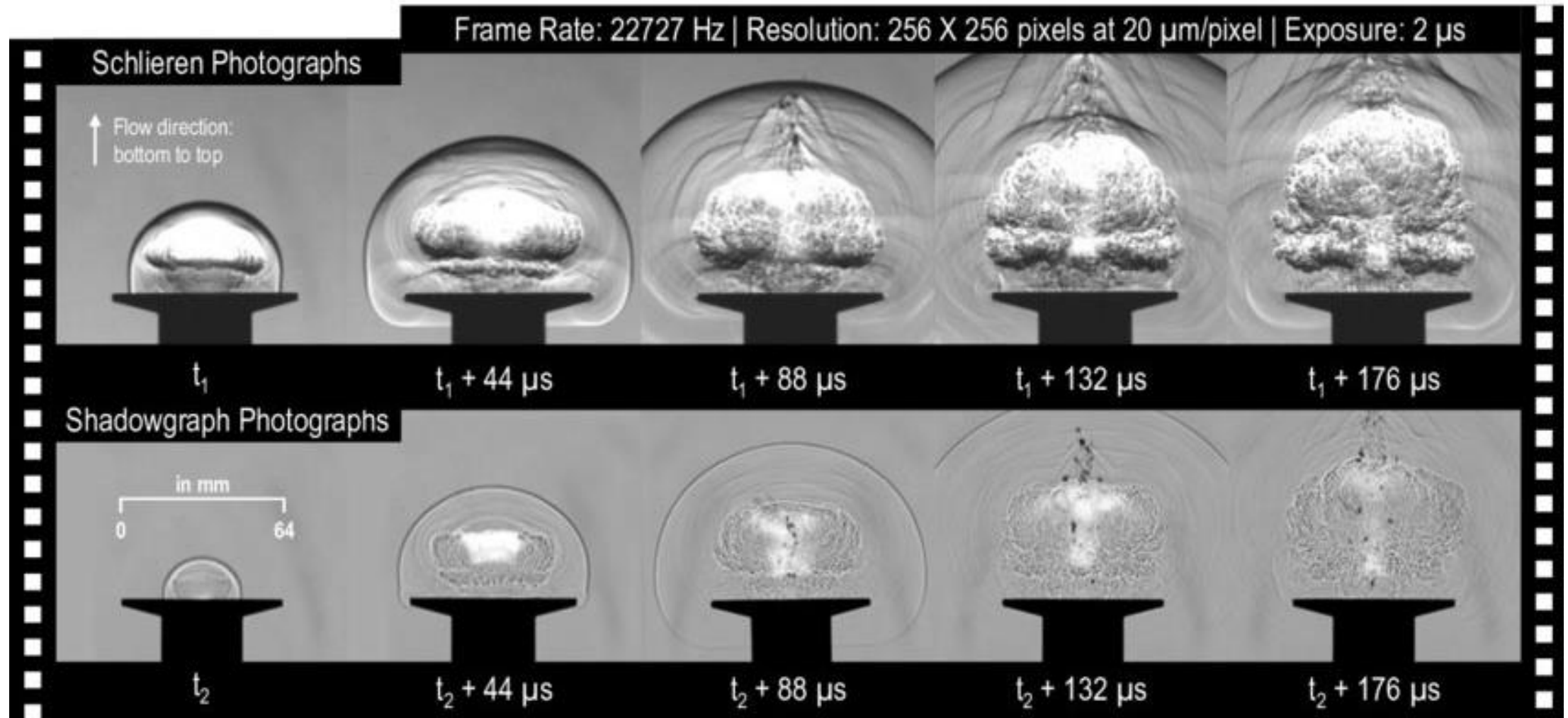
Escoamento bifásico ar-água intermitente (Oliveira et al., IJMF, 2015)



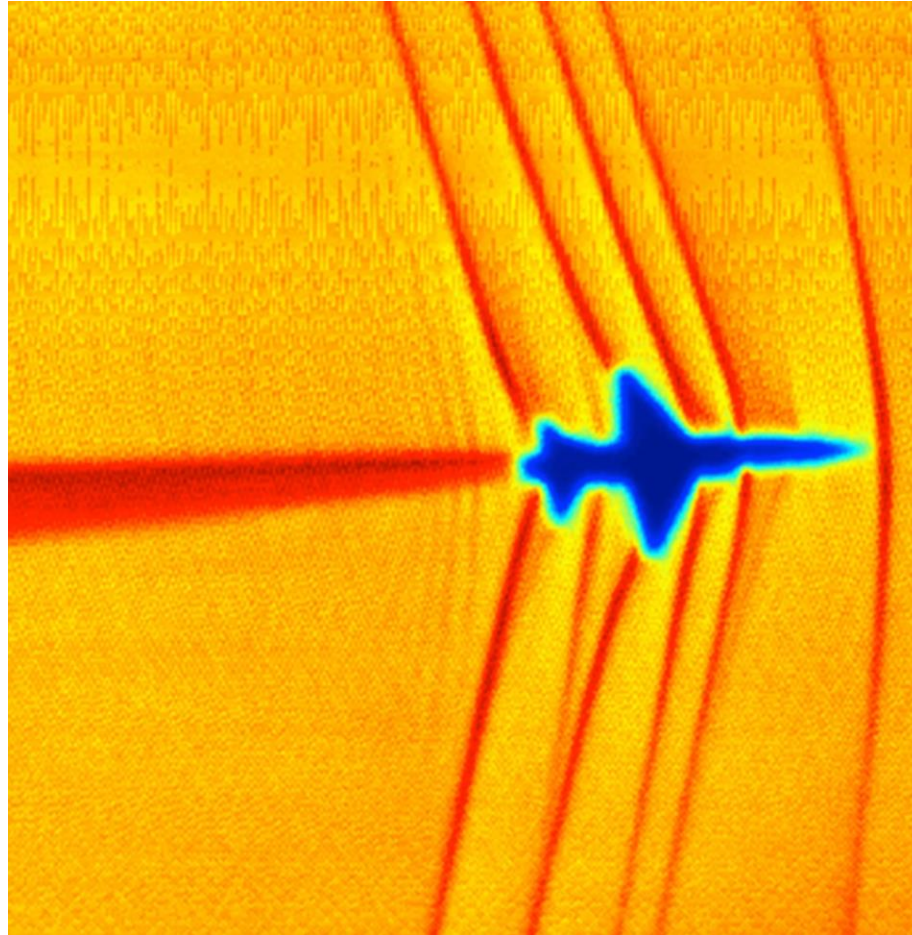
Schlieren

- Método óptico para visualizar variações locais de densidade em meios transparentes
- Uma lente (ou espelho parabólico) é utilizada para colimar os feixes de luz que passam por um meio transparente com densidade variável e são focados através de outra lente (ou espelho) numa lâmina, de modo que parte dos feixes defletidos pelo meio são barrados
- A lâmina cria um alto contraste para visualização das variações de densidade, relacionadas a primeira derivada (maior sensibilidade que a técnica shadowgraph)





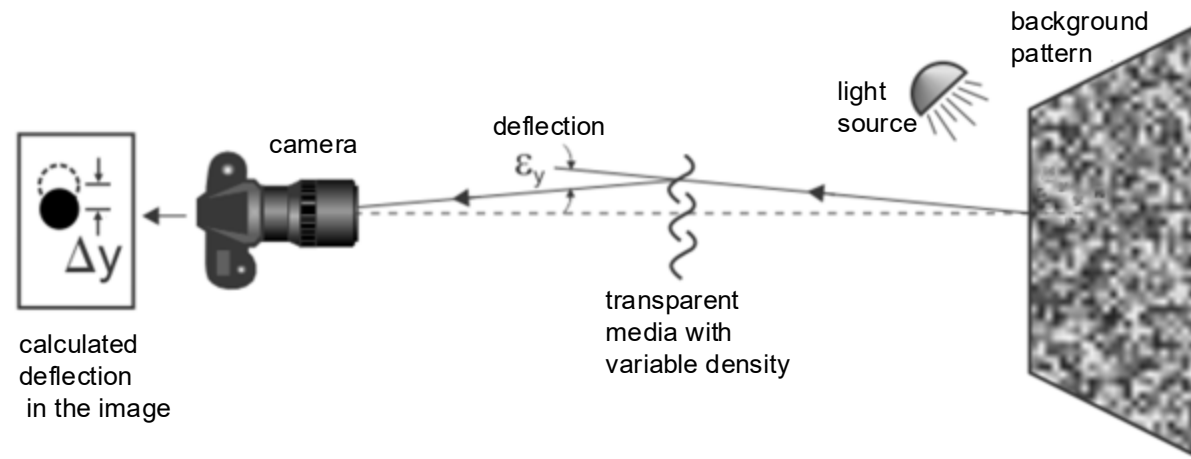
Comparação entre as técnicas de schlieren e shadowgraph na visualização do escoamento de tubo de choque acionado por detonação (Karthick et al., ISSW31, 2019)



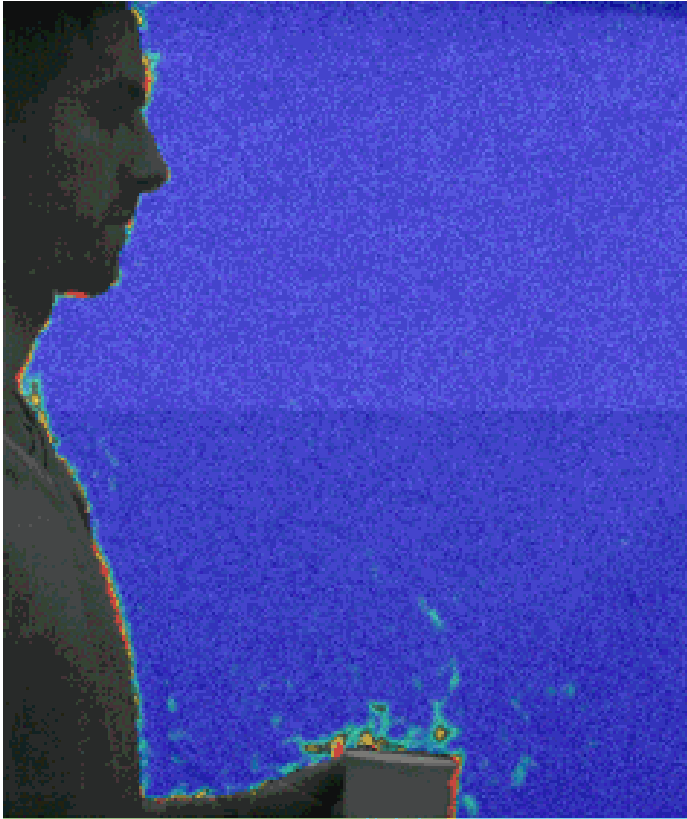
Ondas de choque criadas por um T-38C em voo supersônico visualizadas usando a borda do sol como fonte de luz (NASA)

Schlieren de fundo orientado (*background-oriented schlieren, BOS*)

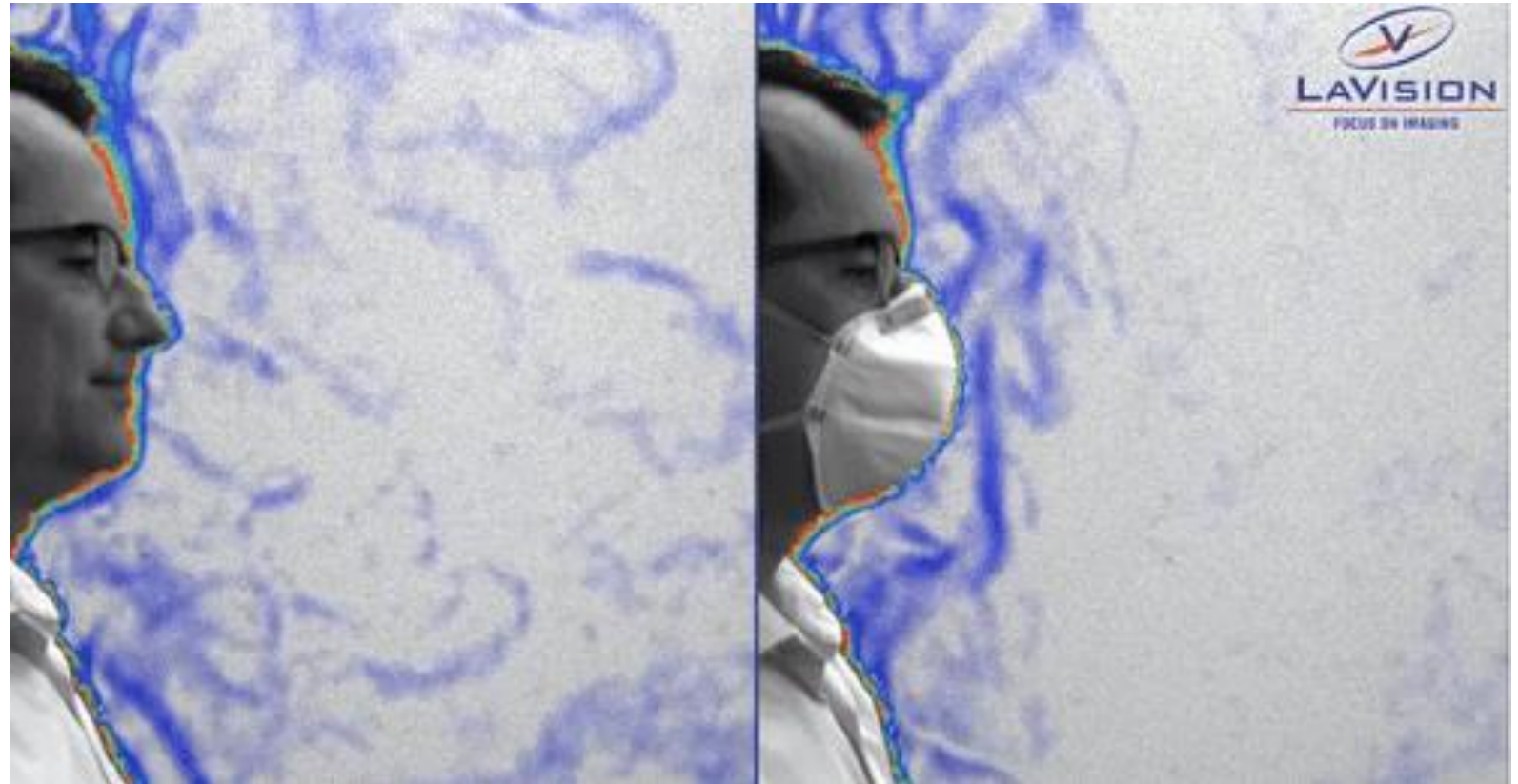
- Método óptico eficaz para quantificar variações locais de densidade em um meio transparente
- Configuração óptica mais simples que o schlieren tradicional
- Utiliza uma textura de fundo com um padrão aleatório
- A imagem do padrão inalterado (referência) é comparada com a imagem com distorções ópticas (teste) devido à deflexão da luz em função da variação de densidade do meio
- A correlação entre subregiões destas imagens fornece a magnitude local e a direção do desvio da luz (processamento semelhante ao de PIV)



Schlieren de fundo orientado (*background-oriented schlieren*, BOS)

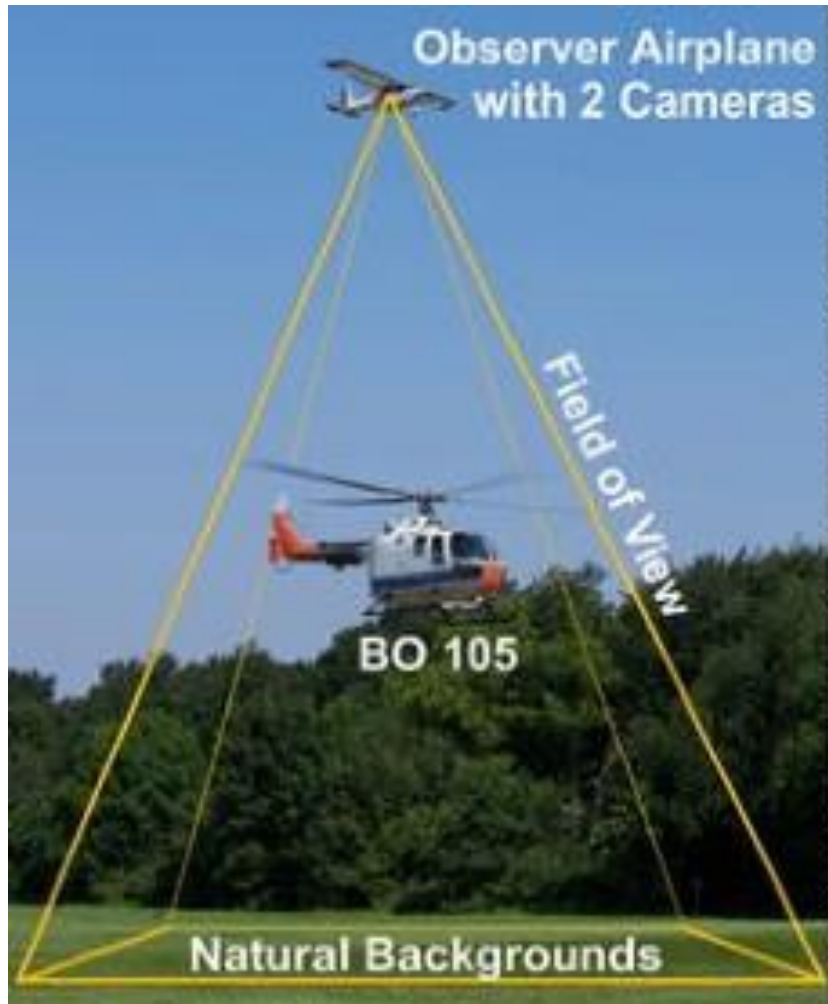


Visualização da convecção natural num copo de café (Analytical Technologies)

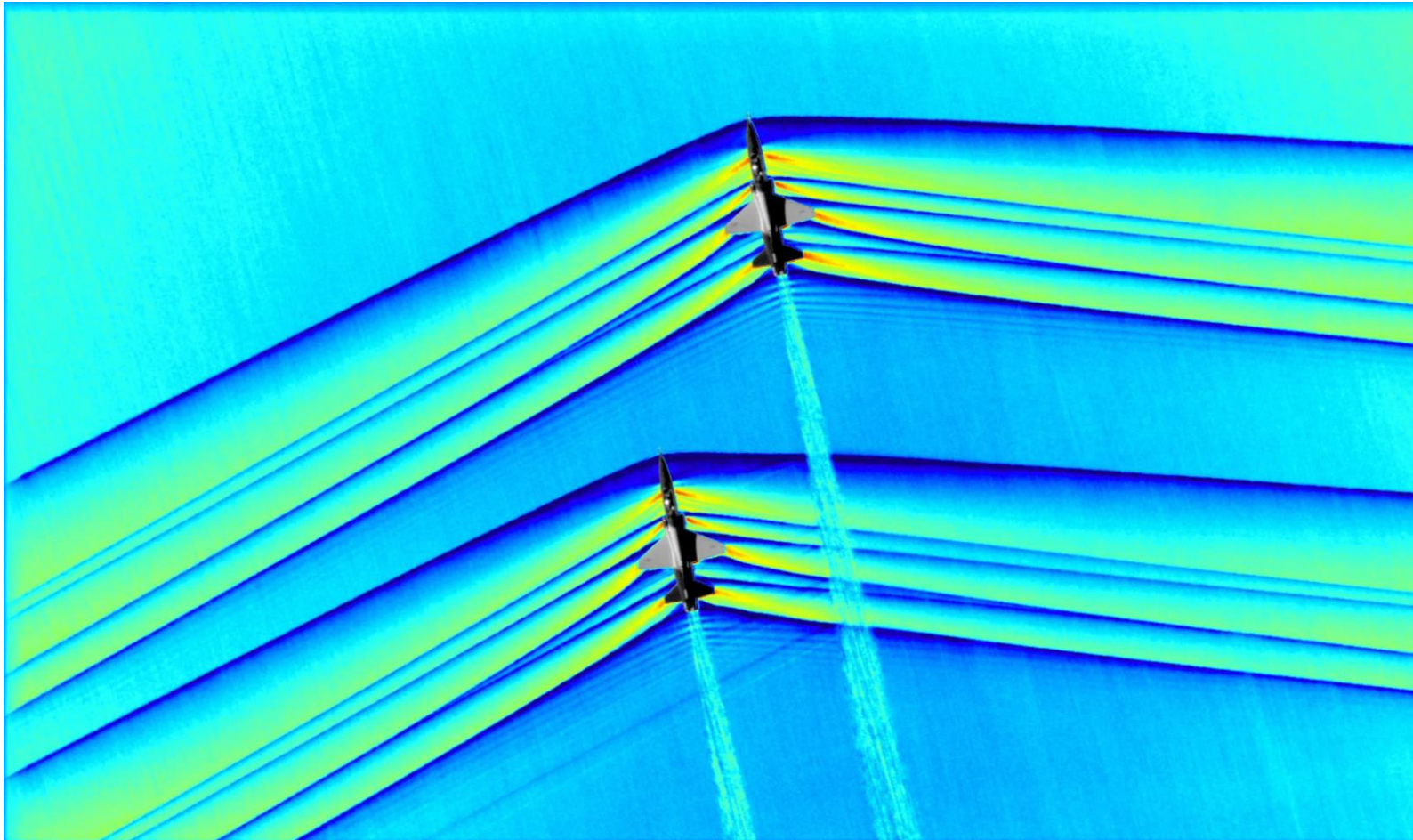


Visualização de espalhamento de potenciais partículas infecciosas em aerossol liberadas durante a respiração e a fala com e sem o uso de máscara.

Schlieren de fundo orientado (*background-oriented schlieren*, BOS)



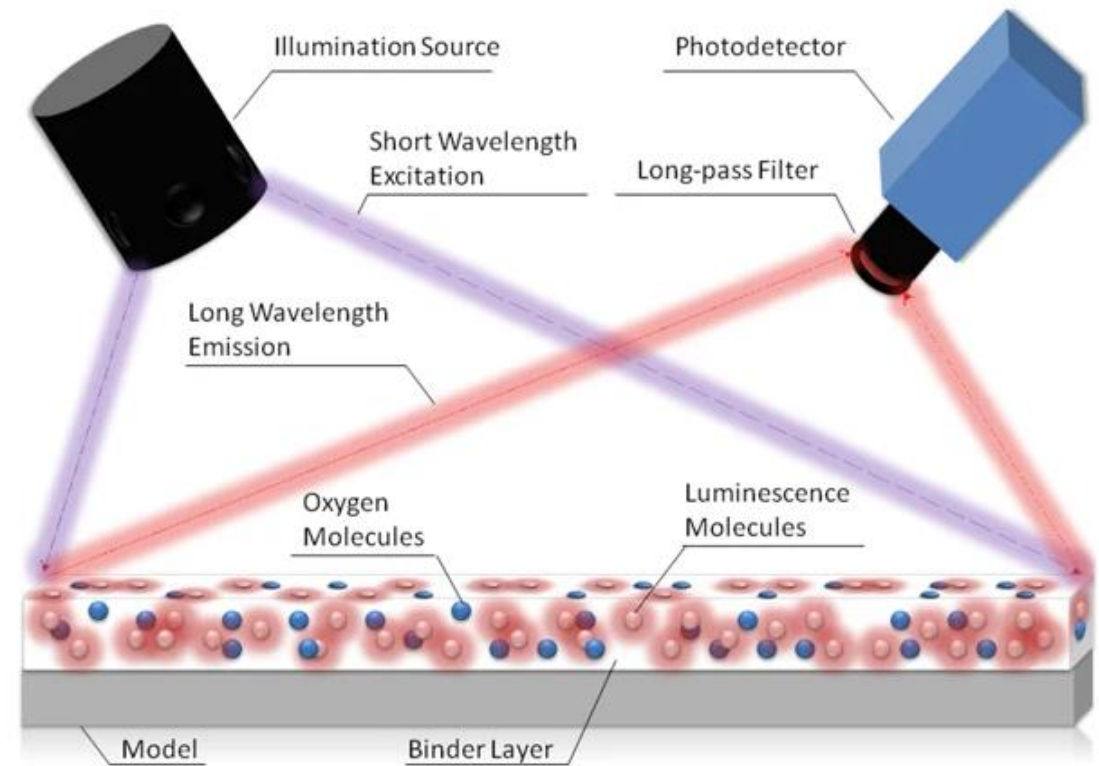
Schlieren de fundo orientado (*background-oriented schlieren*, BOS)



Air-to-Air Background Oriented Schlieren para visualização de ondas de choque de vôo supersônico de dois T-38 através de imagens adquirida por um B-200 voando a cerca de 30.000 pés (NASA)

Tinta sensível a pressão (*pressure sensitive paint, PSP*)

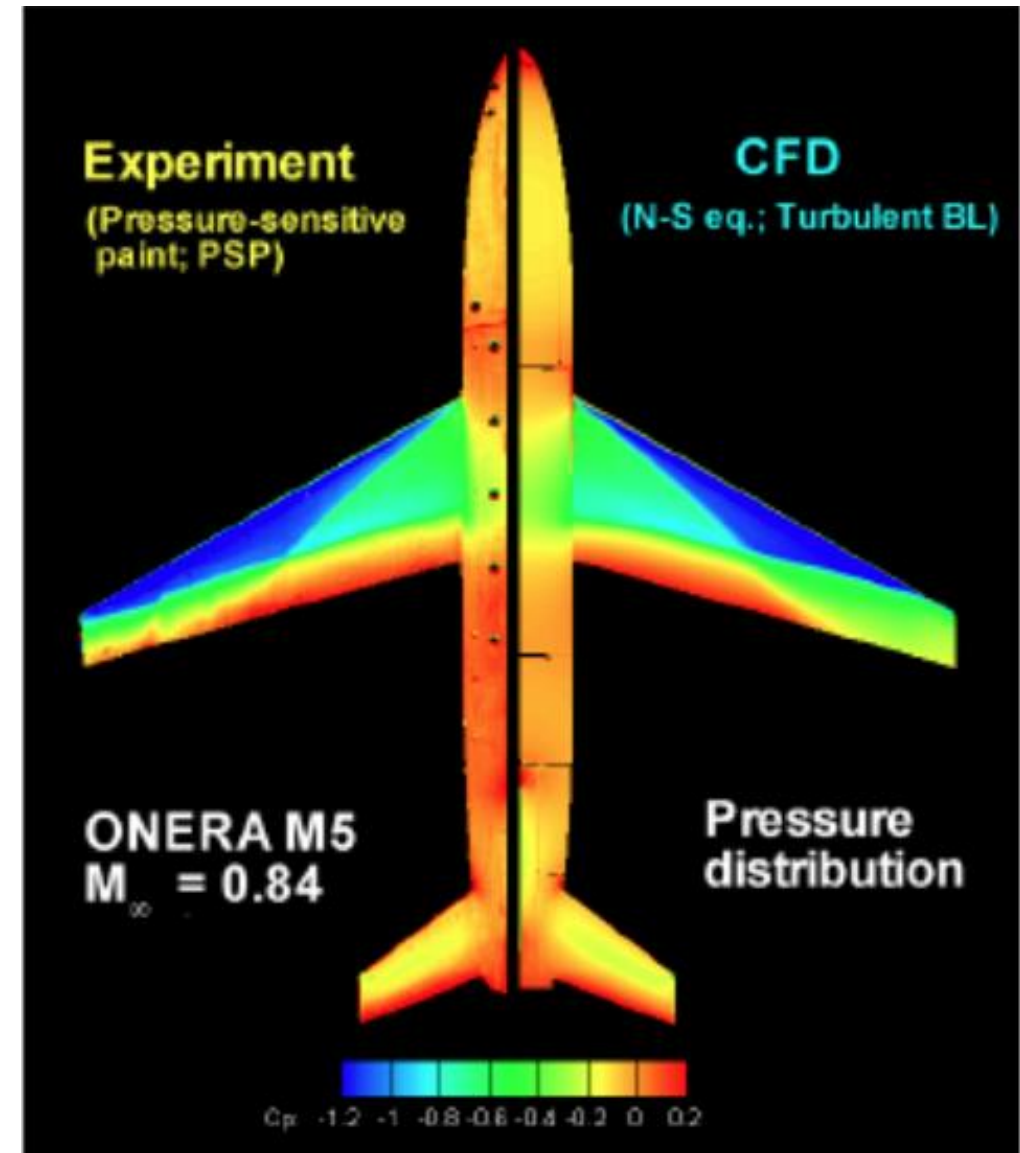
- Medição de campo de pressão superficial baseado na atenuação pelo oxigênio da luminescência emitida por certas moléculas
- As moléculas luminescentes da tinta são excitadas pela absorção de luz (UV-azul) e depois retornam ao seu estado fundamental emitindo luz (vermelha) ou interagindo com moléculas de oxigênio sem emitir luz (*oxygen quenching*)
- A taxa na qual esses dois processos competem depende da pressão parcial de oxigênio na superfície, que altera a concentração de oxigênio na PSP, estando diretamente relacionada à pressão barométrica local



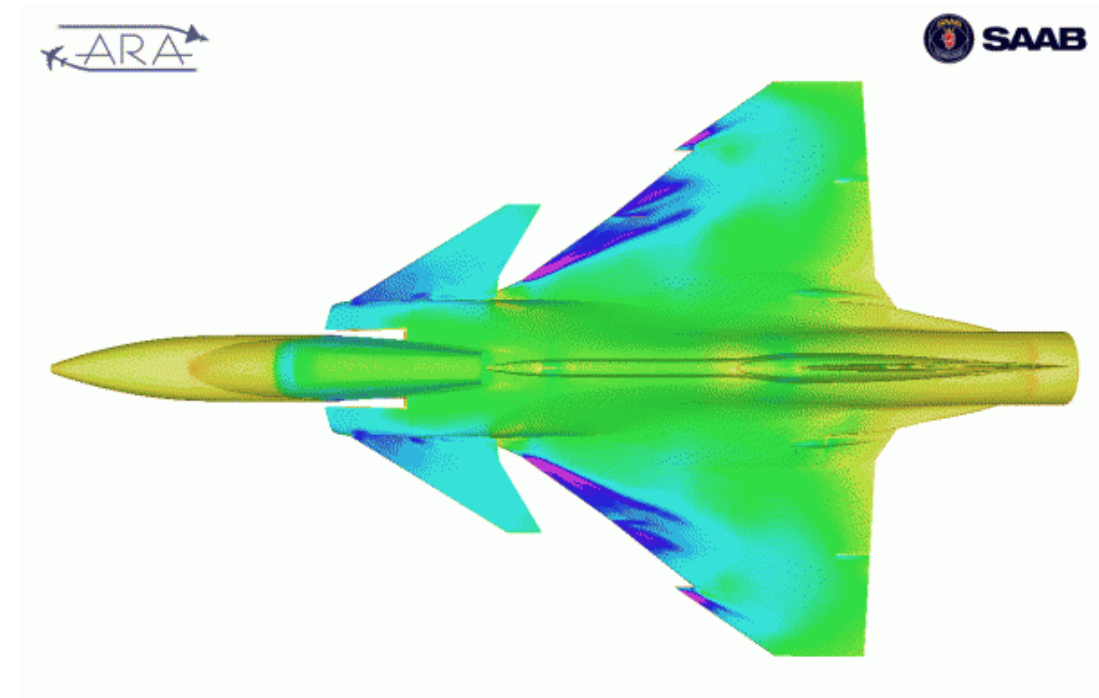
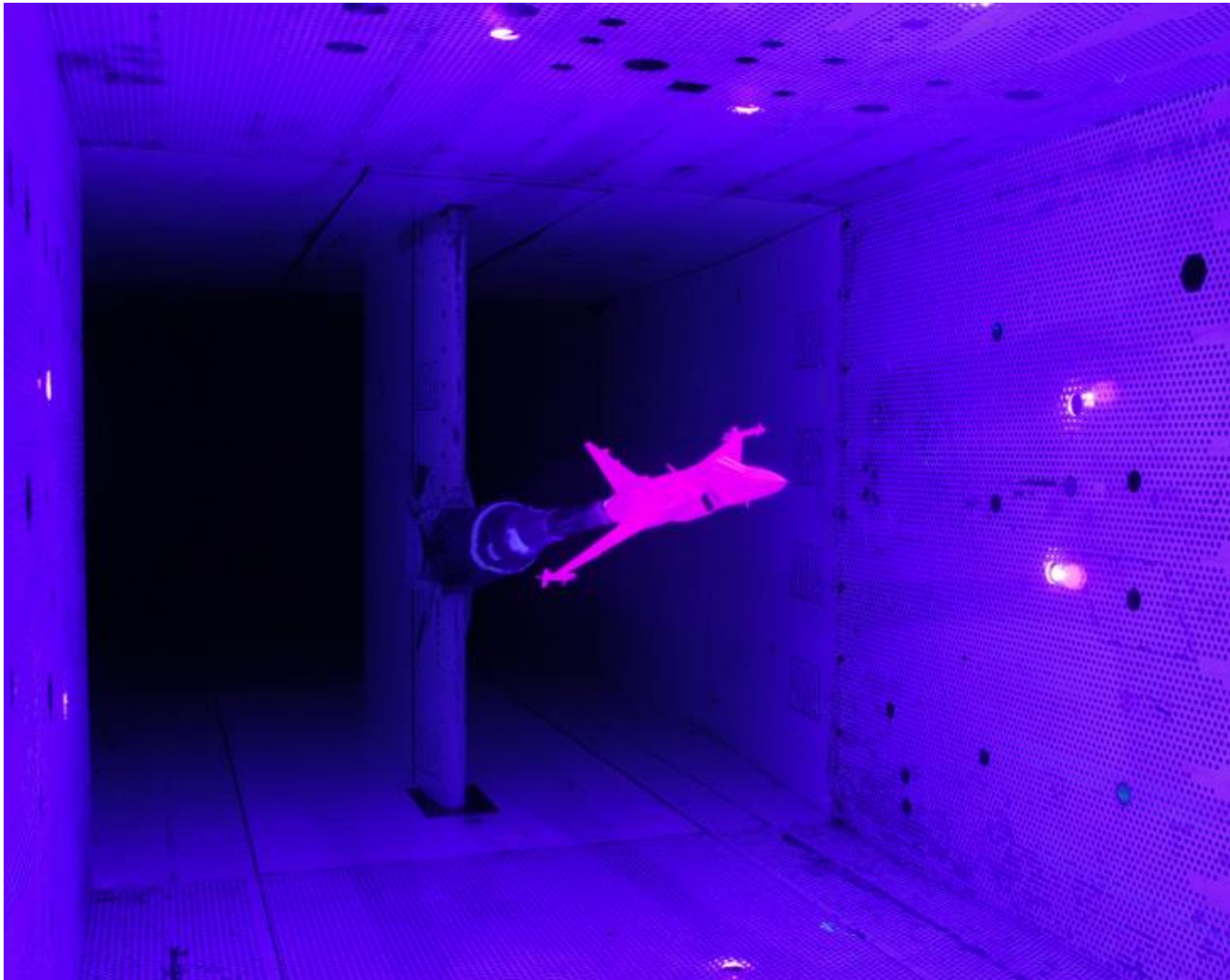
<https://blog.mide.com/pressure-sensitive-materials-paint-film-and-polymers-overview>

Tinta sensível a pressão (*pressure sensitive paint*, PSP)

- Vantagem sobre o método tradicional de tomadas de pressão, que mede a pressão apenas nos pontos onde as tomadas existem
- A fluorescência das partículas também pode variar com a temperatura e concentração de oxigênio do ar, portanto o método é indicado em escoamentos com grande diferenças de pressão no objeto (ex., escoamentos com alta velocidade)



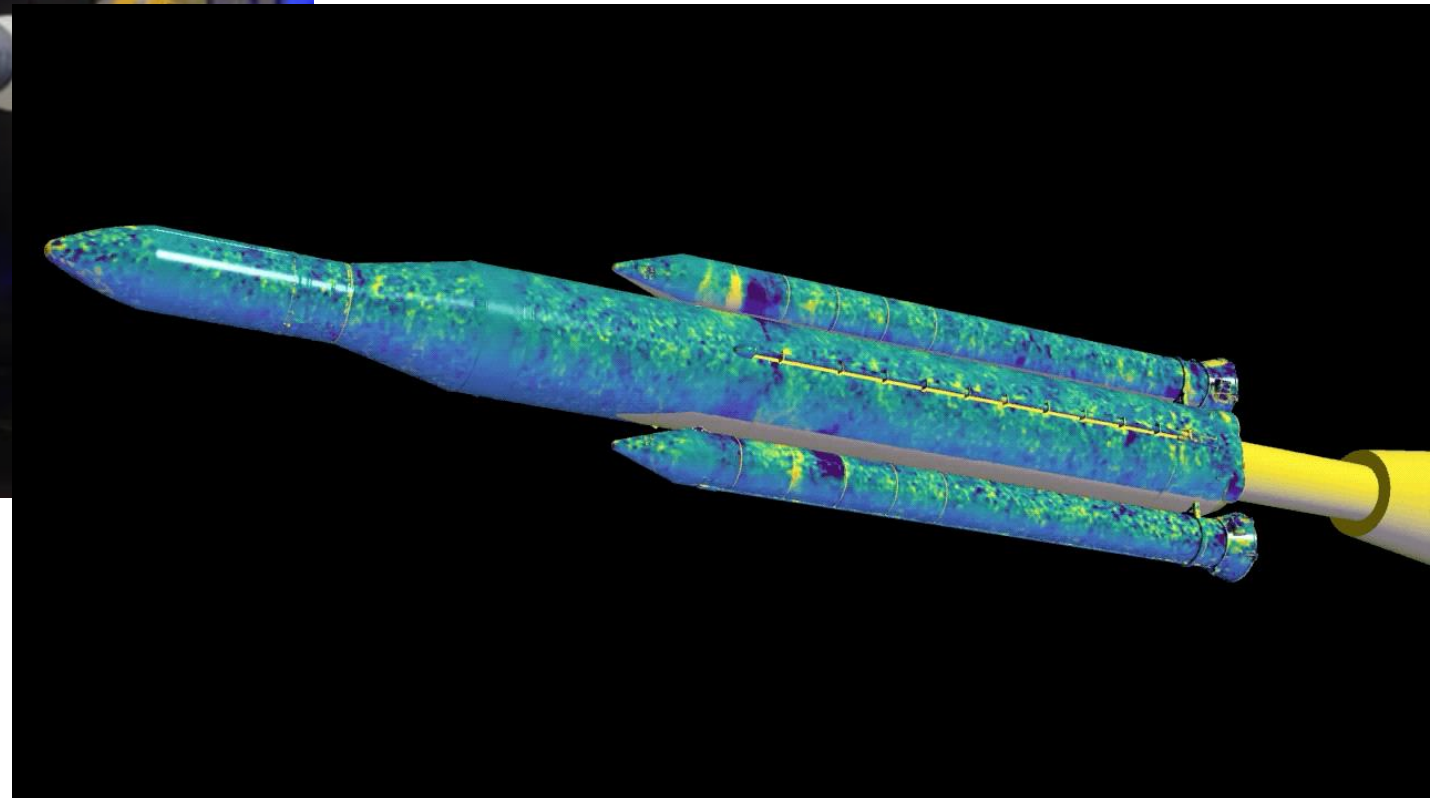
Tinta sensível a pressão (*pressure sensitive paint, PSP*, PSP)



Tinta sensível a pressão (*pressure sensitive paint*, PSP)



Distribuição da pressão na superfície resolvida no tempo do Sistema de Lançamento Espacial da NASA utilizando PSP

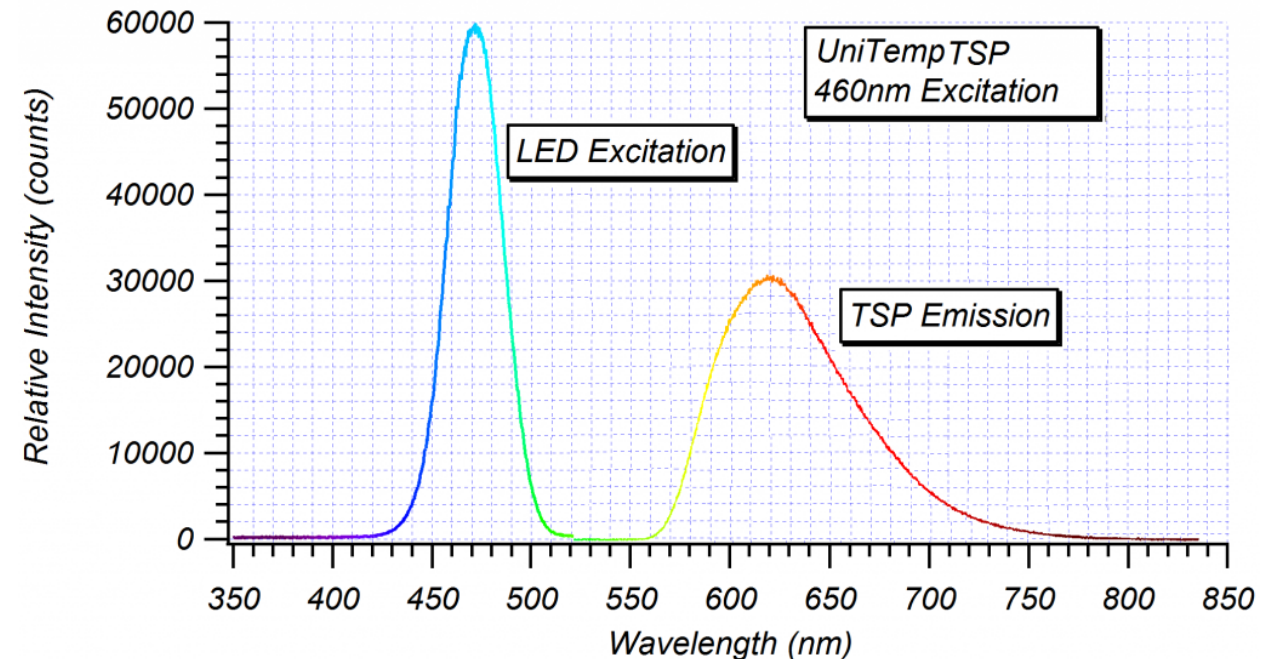
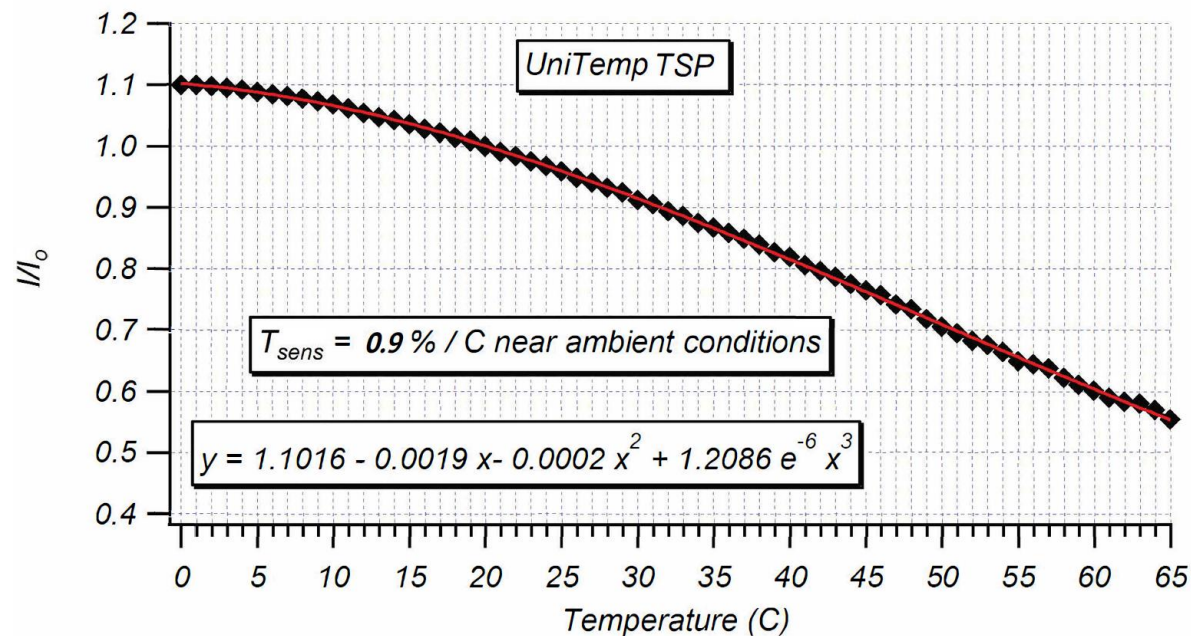


Tinta sensível a temperatura (*temperature sensitive paint*, TSP)

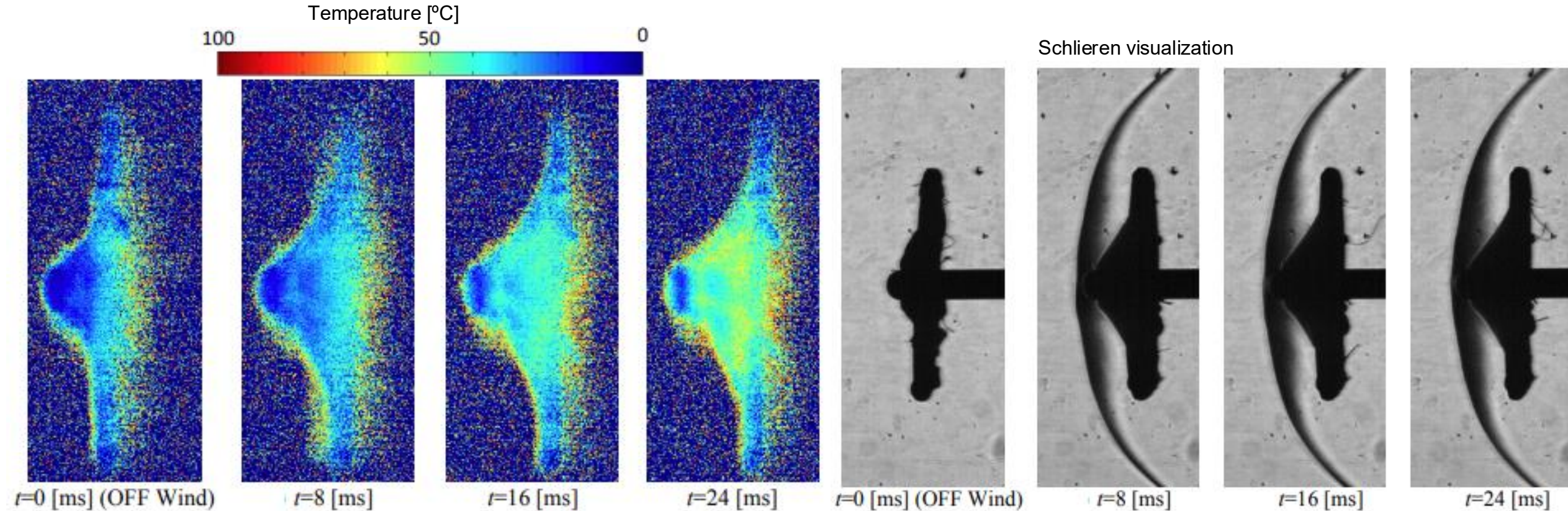
- Medição de campo de temperatura superficial baseado na luminescência emitida por moléculas sensíveis à temperatura
- As moléculas luminescentes da tinta são excitadas pela absorção de fótons (geralmente luz UV-azul) e depois retornam ao seu estado fundamental emitindo ou não fótons (comprimento de onda maior)
- O aumento na temperatura da molécula luminescente aumenta a probabilidade de que ela retorne ao estado fundamental por um processo sem radiação (*thermal quenching*), fazendo com que a intensidade da imagem da fluorescência seja relacionada com a temperatura

Tinta sensível a temperatura (*temperature sensitive paint*, TSP)

- A relação entre intensidade e temperatura é realizada através de calibração, submentendo uma amostra TSP a uma série de temperaturas conhecidas e registrando a intensidade
- A intensidade da imagem também é função da intensidade da iluminação de excitação, da espessura da camada de tinta e do arranjo óptico, portanto recomenda-se a medição através da razão da imagem na condição de teste



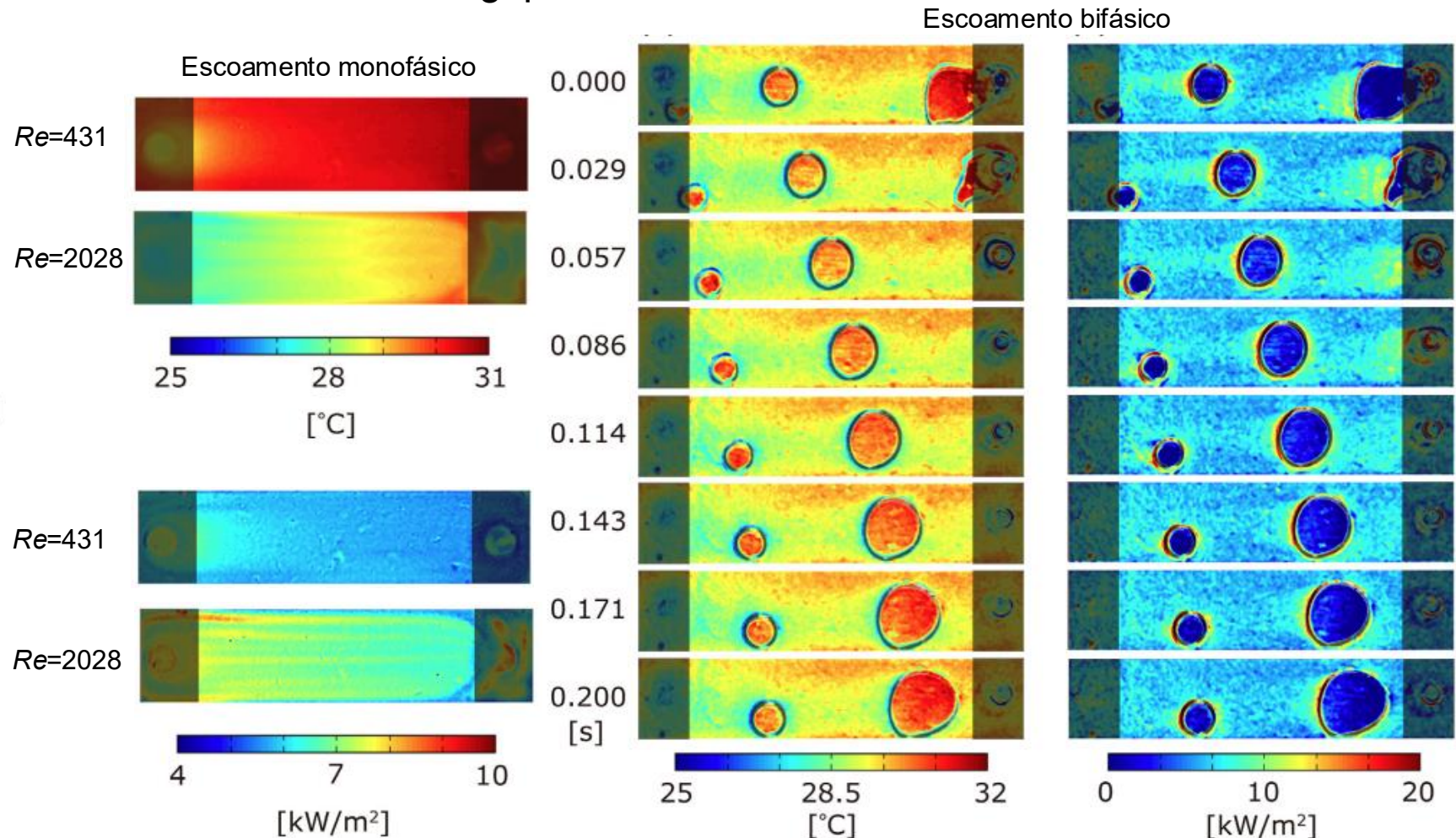
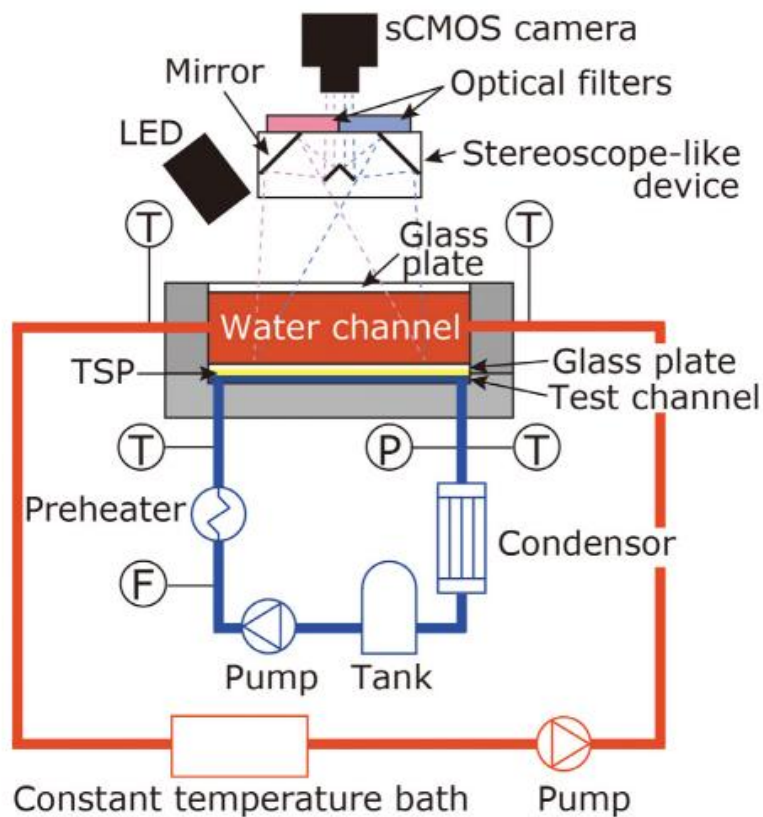
Tinta sensível a temperatura (*temperature sensitive paint, TSP*)



Distribuição de temperatura superficial e visualização da variação de densidade ao redor de modelo flare-typed membrane aeroshell em escoamento hipersônico com $M=8.1$ (Taguchi et al., 2016)

Tinta sensível a temperatura (*temperature sensitive paint*, TSP)

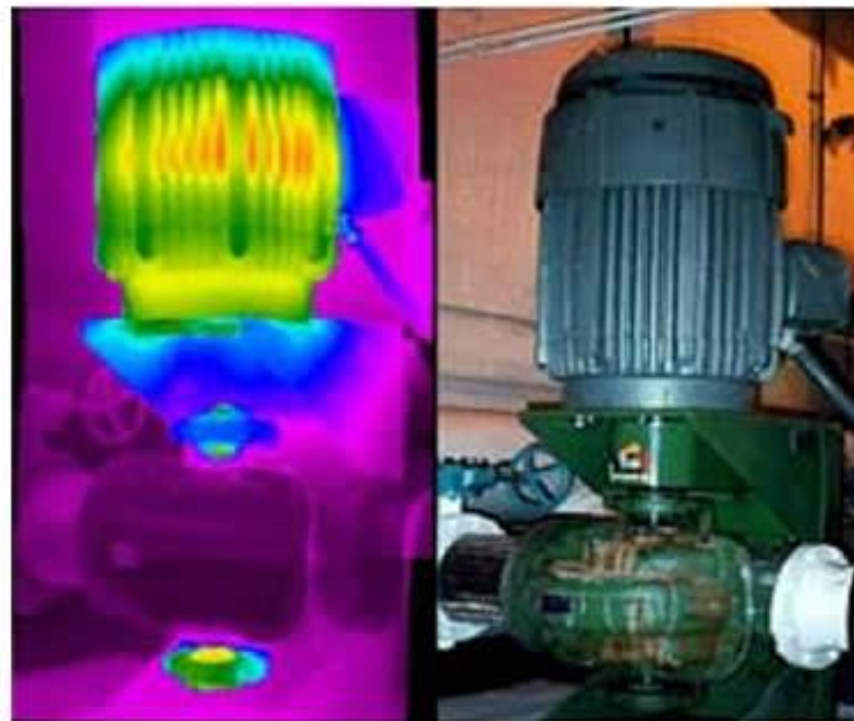
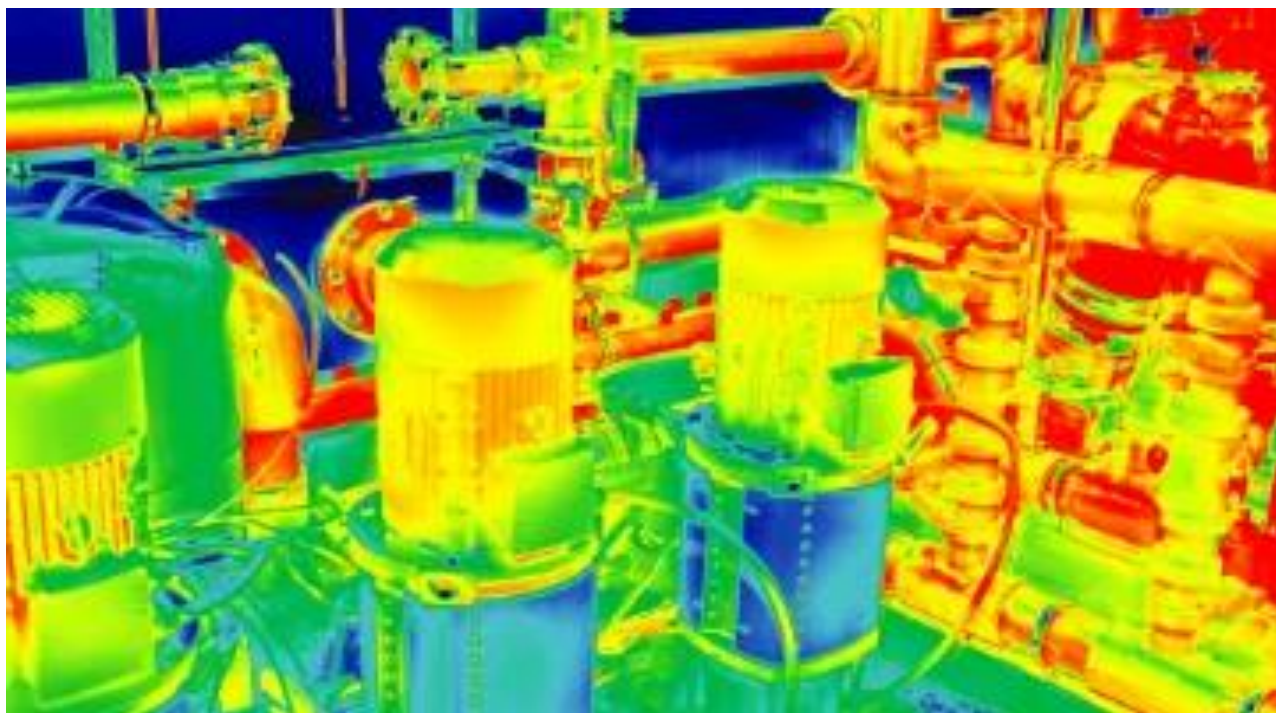
Medição simultânea da distribuição de temperatura na superfície aquecida, distribuição do fluxo de calor (equação de condução de calor + balanço de energia) e movimento da interface gás-líquido (distorções por variação de índice de refração) de escoamentos bifásicos em canal microgap



Matsuda et al., Int. J. Heat Mass Transf. (2020)

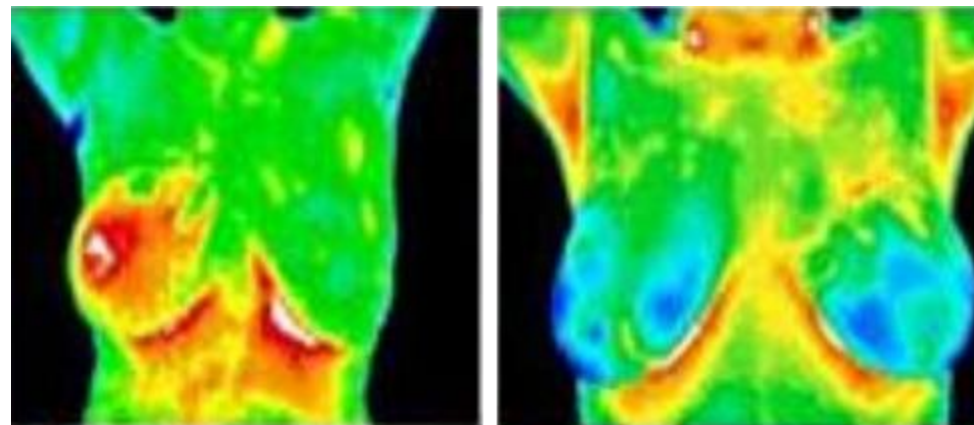
Termografia infravermelha

- Medição de campo de temperatura superficial baseado na radiação infravermelha emitida por objetos
- A intensidade da radiação infravermelha (invisível ao olho humano) é medida através de uma câmera termográfica, convertida em temperatura através de calibração (dependente da emissividade da superfície) e visualizada através de um mapa de cores (termograma)



Termografia infravermelha

- Aplicações:
 - Indústria: monitoramento de equipamentos e detecção de anomalias mecânicas e elétricas antes que causem falhas, otimizando as intervenções preventivas
 - Segurança: detecção de pessoas, incêndios, vazamentos de gás e falhas elétricas
 - Construção: avaliação da eficiência energética de construções e identificação de problemas de isolamento térmico
 - Temperatura corporal: prevenção da propagação de doenças infecciosas, análise de inflamações, vascularização, detecção de tumores
 - Pesquisa: medição de temperaturas em experimentos no campo da engenharia, medicina, biologia, química, física, etc.

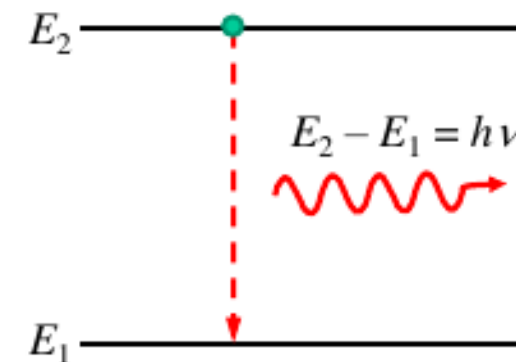


Burity Filho, R. L., UFPB (2019)



Medição da radiação eletromagnética emitida

- Um átomo ou molécula emite radiação eletromagnética na forma de fótons em um espectro de frequências específico ao passar de um estado de alta energia para um estado de energia mais baixa
- Átomo/molécula transicionam para um estado excitado (alta energia) por:
 - Interação com radiação eletromagnética (ex.: fluorescência, fosforescência)
 - alta temperatura (ex: chama, plasma)
 - reação química (ex: quimioluminescência)



Medição da radiação eletromagnética emitida

- Emissões luminosas espontâneas das chamas:
 - Quimioluminescência: emissão por espécies eletronicamente excitadas (ex.: OH^* , CH^* , C_2^* , CO_2^*) devido à reações químicas de combustão
 - Radiação térmica da fuligem: emissão de espectro contínuo por partículas de carbono incandescentes que se formam e aquecem em uma chama
 - Emissão de átomos/moléculas adicionados: emissão por átomos/moléculas eletronicamente excitados devido à temperatura
 - Fotoluminescência: átomos/moléculas absorvem radiação eletromagnética e a reemitem de forma rápida (fluorescência) ou lenta (fosforescência)



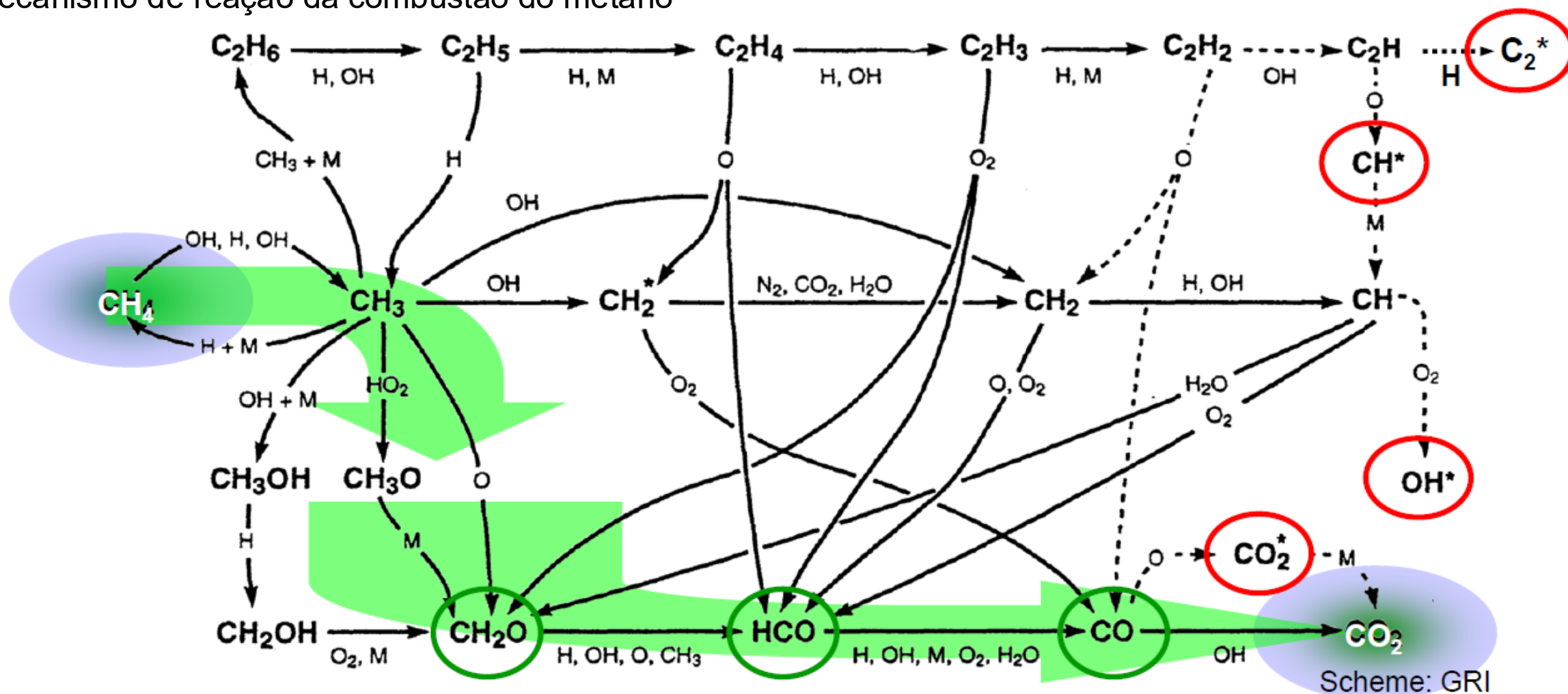
Excited radicals observed in typical industrial flames [183]

Radical	Transition	λ (nm)
OH^*	$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi(\Delta\nu = 1)$	282.9 (Q2)
OH^*	$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi(\Delta\nu = 0)$	308.9 (Q2)
CH^*	$B^2\Sigma^- \rightarrow X^2\Pi$	387.1
CH^*	$A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$	431.4
C_2^*	$A^3\Pi_g \rightarrow X^3\Pi_u$ (Swan)	516.5
CO_2^*	Continuum	350 $\rightarrow$ 500

N. Docquier et al.: Progr. Energy Combust. Sc. **28**, 107 (2002)

Quimioluminescência da chama

Mecanismo de reação da combustão do metano

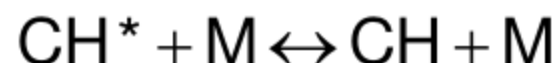
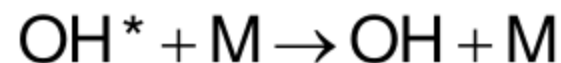
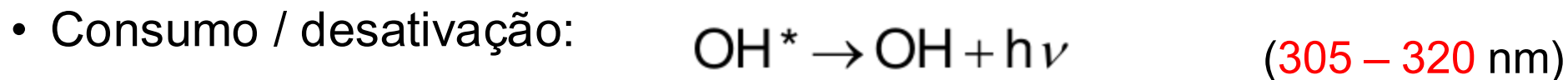
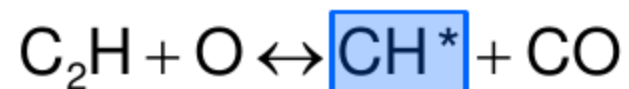
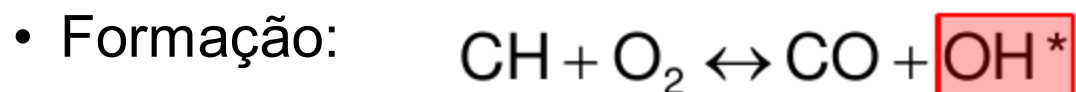


Espécies em estado fundamental são medidas através de técnicas ativas (ex.: absorção, fluorescência)

Espécies luminosas aparecem apenas em caminhos secundários!

Quimioluminescência da chama

- Equação de combustão completa do metano: $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
- Modelado através de um sistema de reações elementares de formação e consumo de espécies intermediárias eletronicamente excitadas



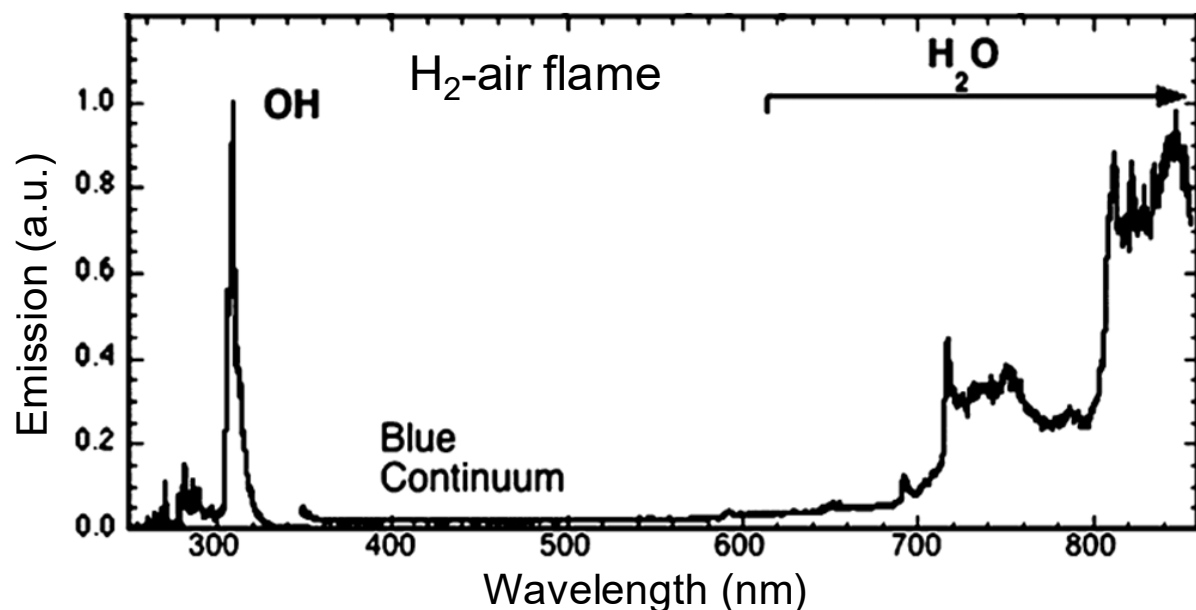
Quimioluminescência da chama

- Visualização da zona de combustão
 - Morfologia da chama
 - Frente de chama (OH^* , CH^* , C_2^*)
- Presença / ausência de combustão (sensor de chama para segurança)
- Determinação da região de maior taxa de calor liberado (*heat release rate*) através dos picos de intensidade
- Razão de equivalência ϕ entre combustível/oxidante (ex: razão de intensidade OH^* / CH^*)

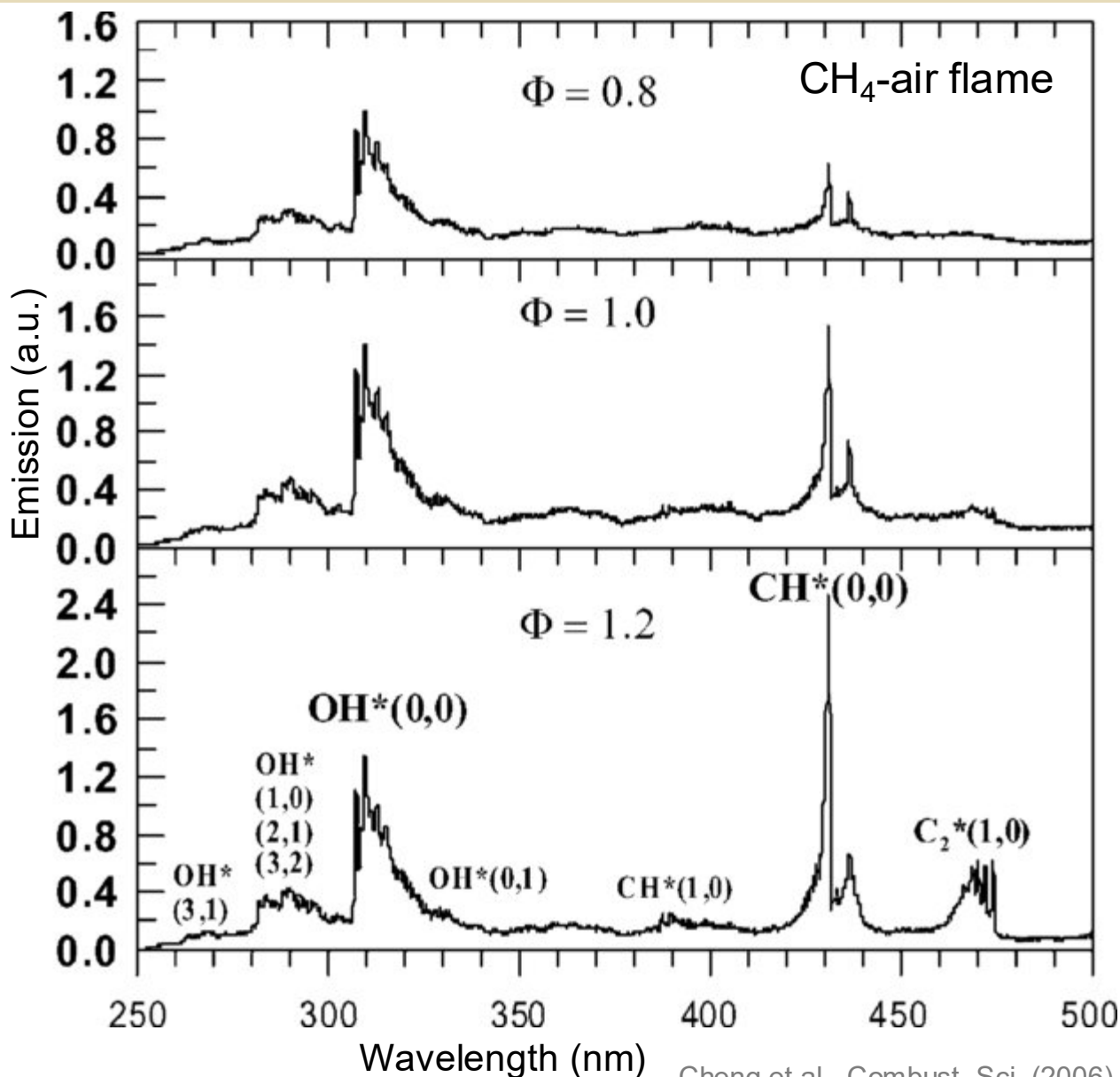


Quimioluminescência da chama

- A quimiluminescência da chama é influenciada por: razão de equivalência ϕ entre combustível/oxidante (chamas ricas vs pobres), concentração e tipo dos reagentes, temperatura, composição do gás e pressão (extinção colisional, *quenching*) e características do escoamento



Schefer et al., Comb. Flame (2009)

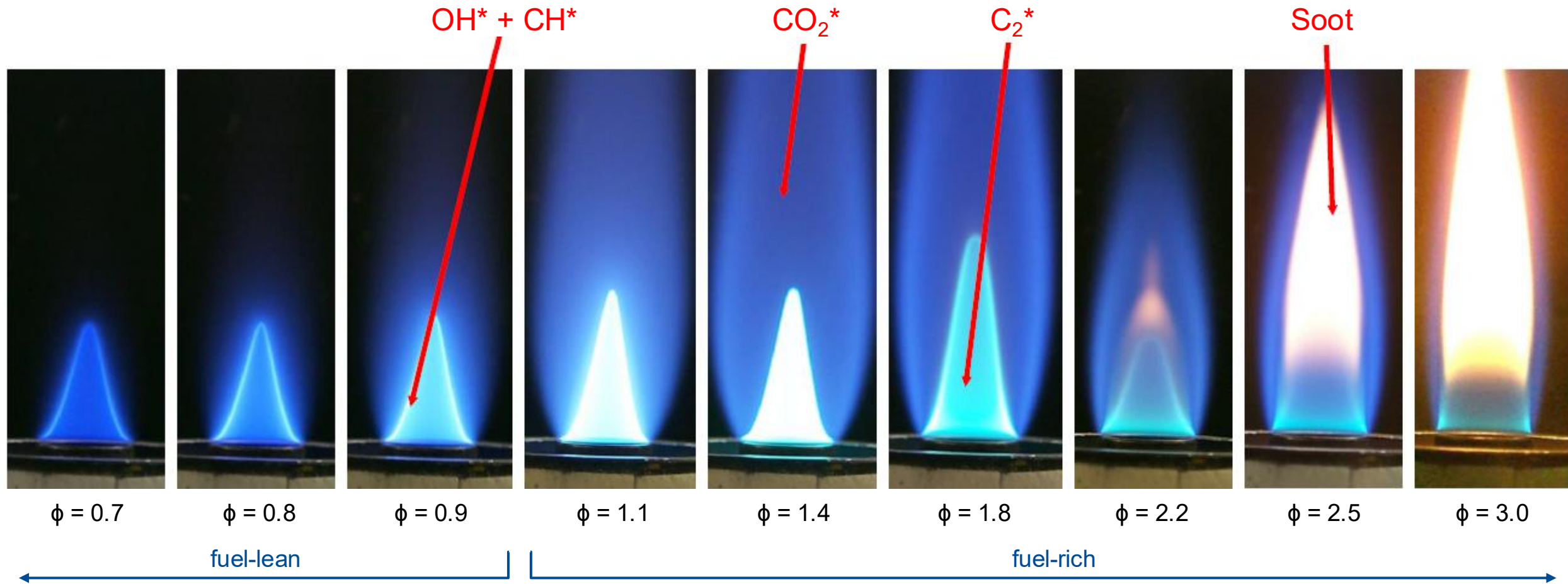


Cheng et al., Combust. Sci. (2006)

Emissão da chama

Quimioluminescência + emissão da fuligem

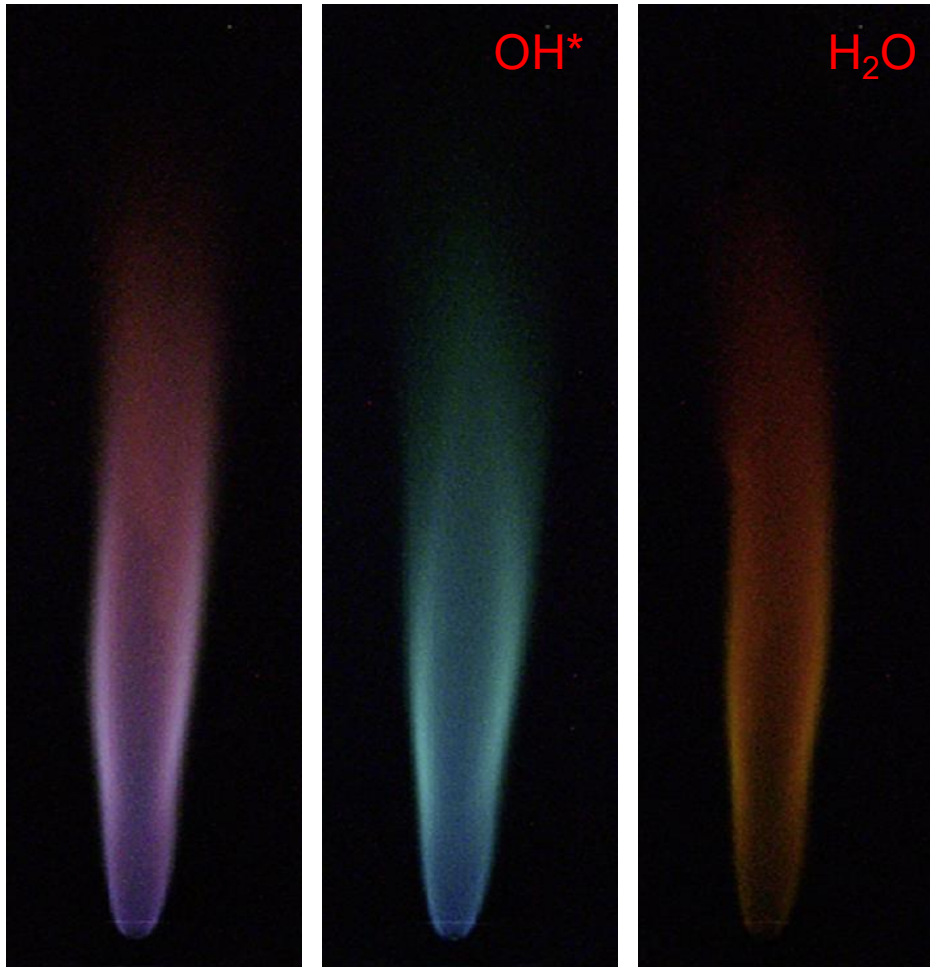
Premixed CH₄-air flame



Torsten, Laser Spectroscopy Course (2024)

Emissão da chama

Laminar diffusion H_2 flame



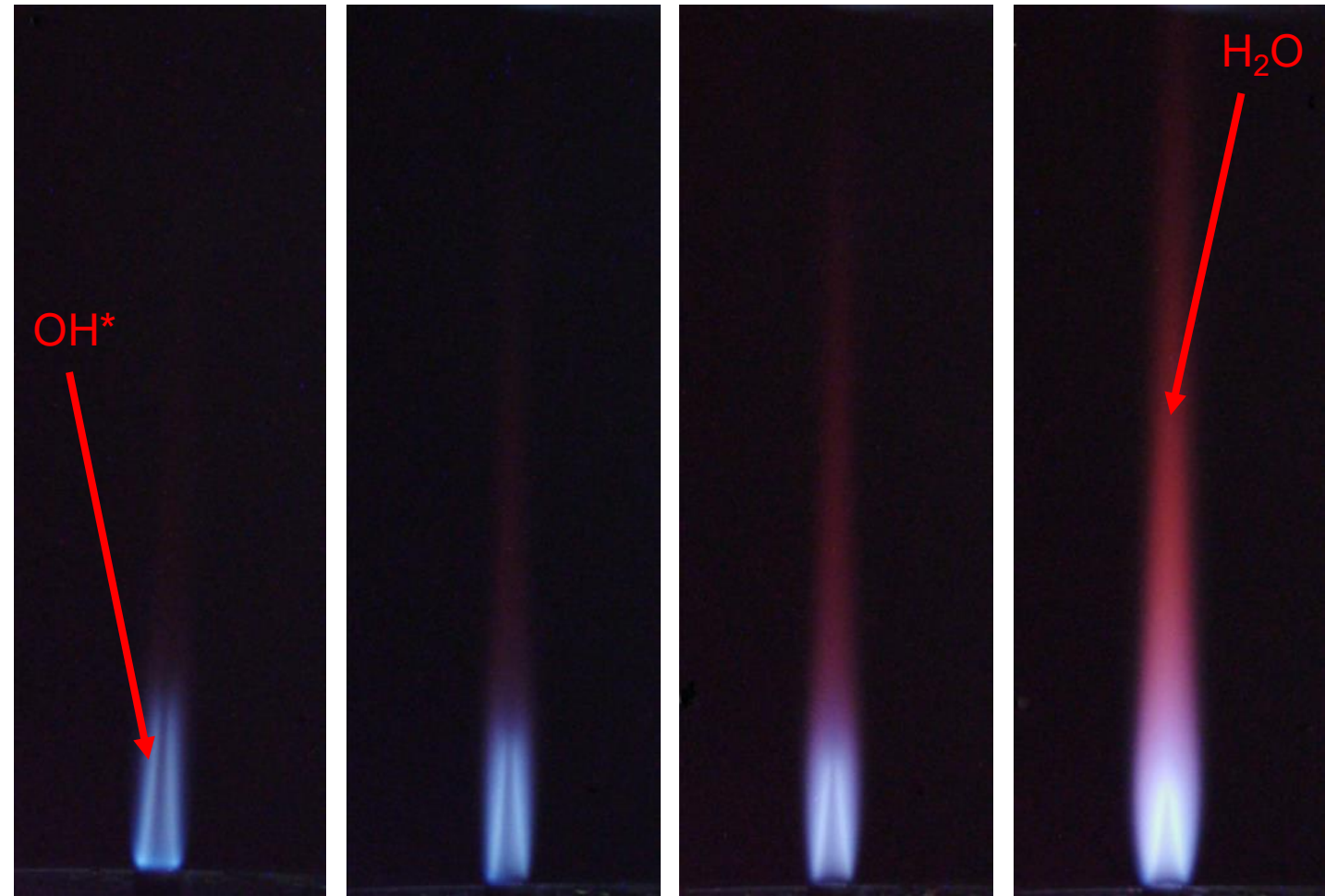
Unfiltered

Shortpass filter
(cut-off: 550 nm)

Longpass filter
(cut-off: 530 nm)

Aperture: $f/2.4$ | Exposure time: 90 ms

Turbulent premixed H_2 flame



$\phi = 0.6$

$\phi = 0.7$

$\phi = 0.8$

$\phi = 1.0$

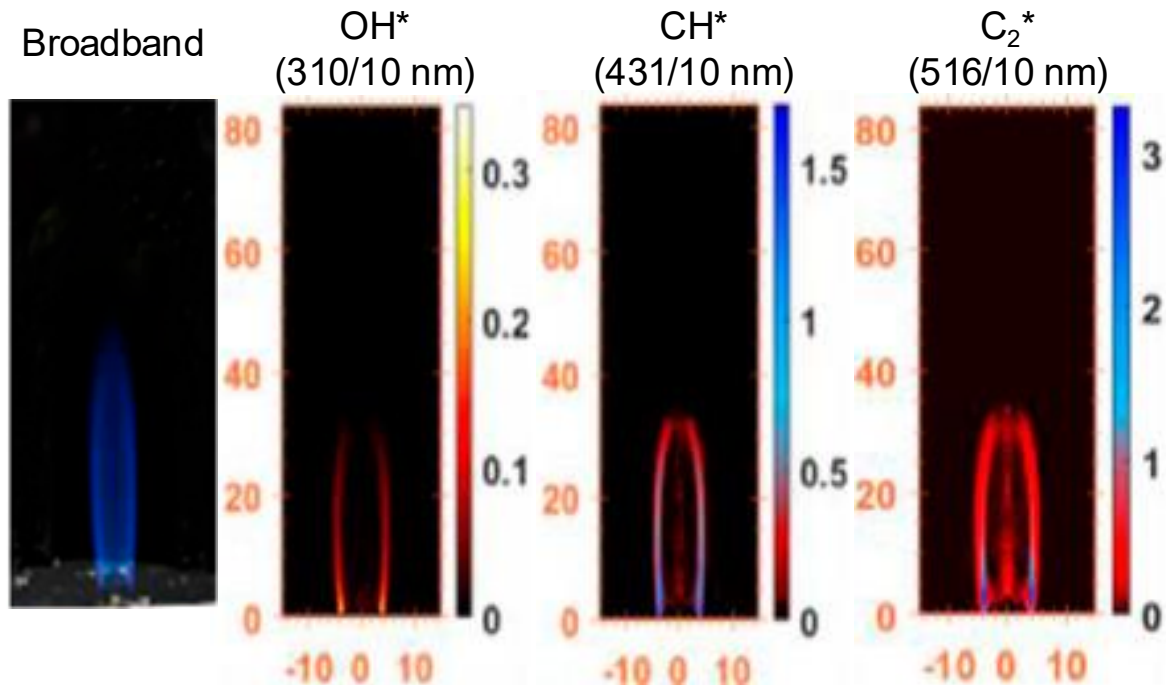
Aperture: $f/2.4$ | Exposure time: 4 s

Schefer et al., Comb. Flame (2009)

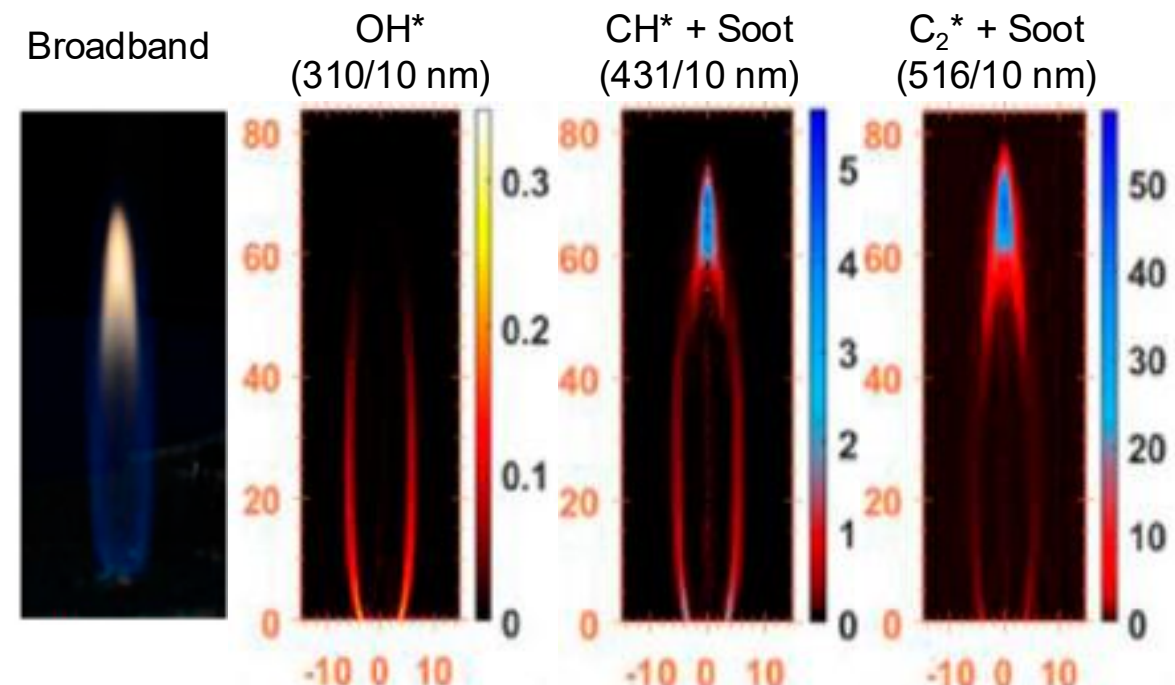
Emissão da chama

Quimioluminescência + emissão da fuligem

Laminar dimethyl ether-N₂ flame ($\alpha=0.25$)



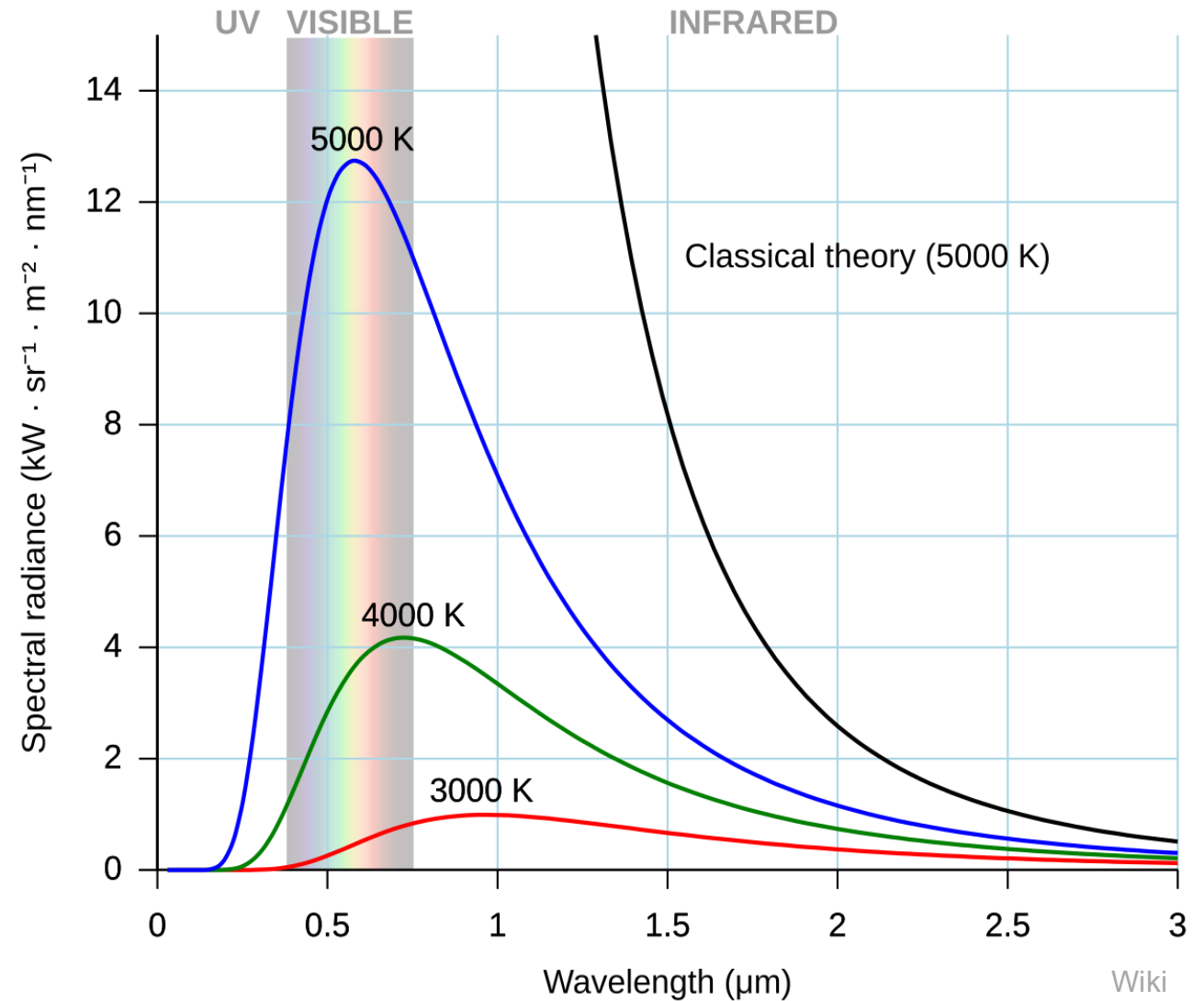
Laminar dimethyl ether-N₂ flame ($\alpha=0.75$)



Saleh et al., Frontiers in Fuels (2024)

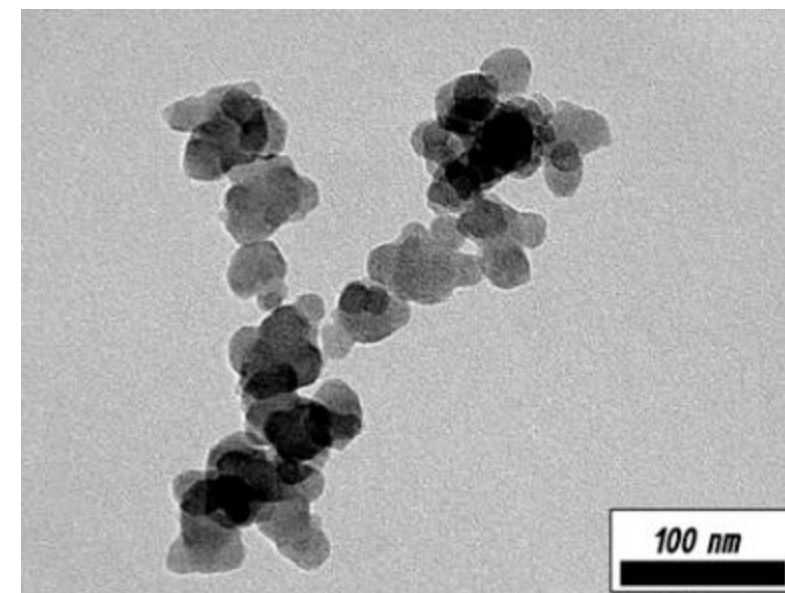
Emissão da chama

- A **radiação térmica** emitida pela fuligem é modelada como radiação de um **corpo negro**
- A intensidade da radiação térmica aumenta com o aumento da temperatura e seu máximo se desloca para comprimentos de onda mais curtos



Pirometria de duas cores

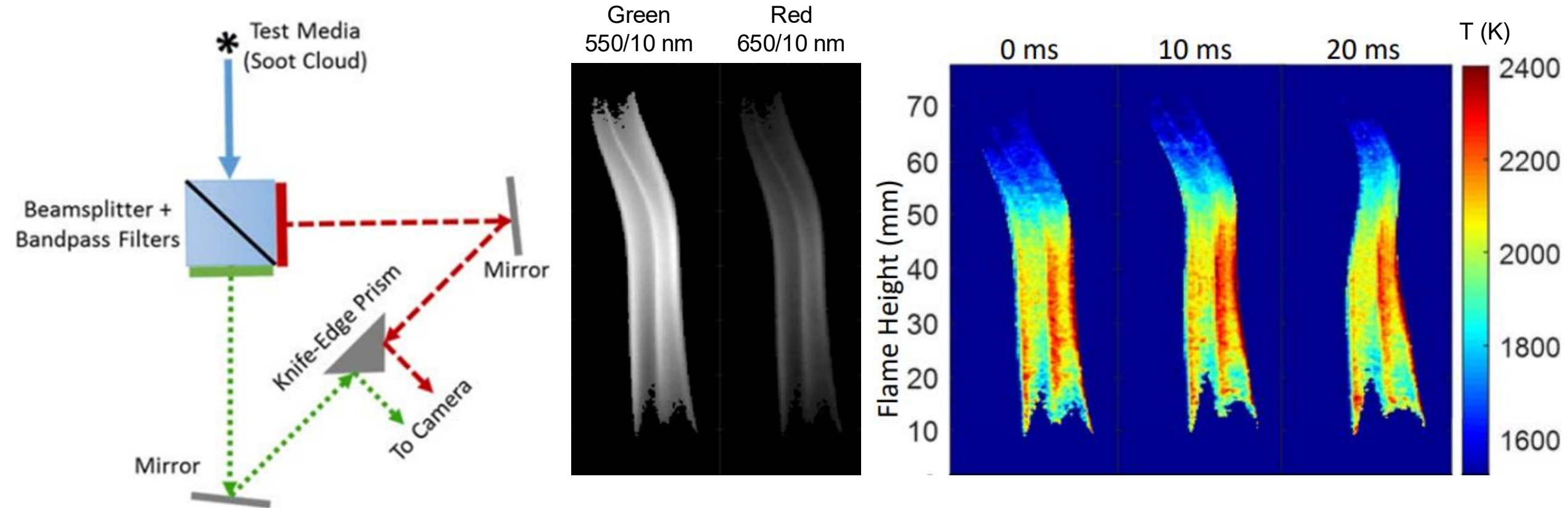
- Técnica de campo não intrusiva e passiva para medição da temperatura e concentração de material particulado na chama
- Baseia-se na radiação térmica (luz visível e infravermelha) emitida pela fuligem (carbono negro) e outras nanopartículas presentes na chama ($\sim 1500\text{ K}$ – 2500 K)
- A razão entre as intensidades da radiação emitida em dois comprimentos de onda distintos (duas cores) independe do valor absoluto da emissividade ou da concentração das nanopartículas
- A temperatura das partículas (igual à temperatura local do gás) é determinada assumindo a emissão teórica de um corpo negro e utilizando as equações da Lei de Planck
- Pode sofrer interferência da radiação de fundo



Exemple of TEM image of a soot particle
(Lang et al., Appl. Phys. B, 2024)

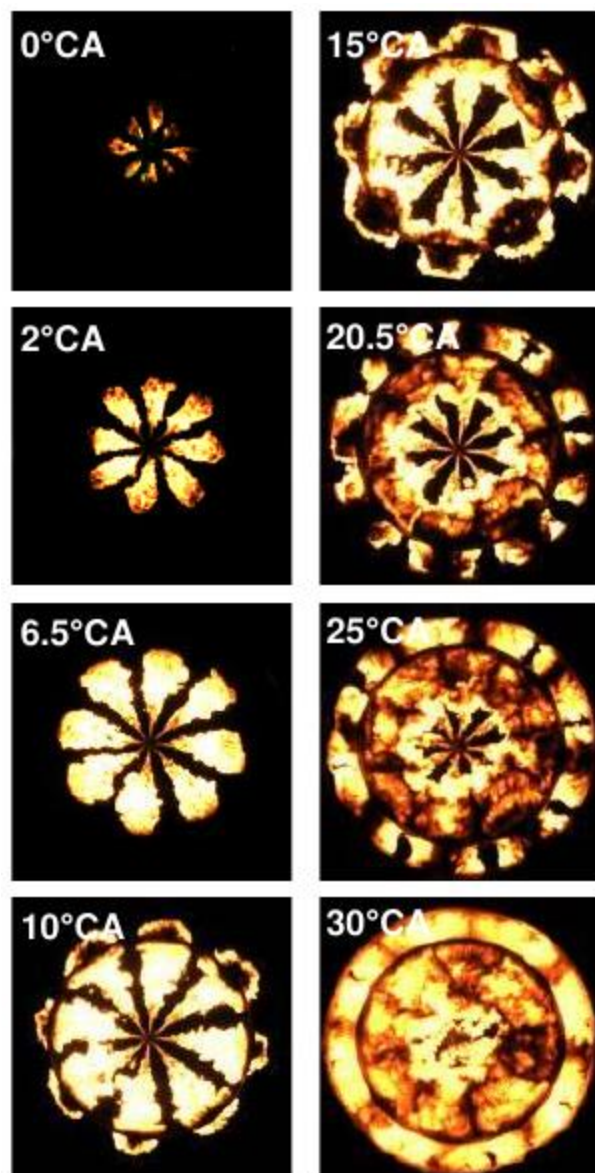
Pirometria de duas cores

Temperatura em chama de pavio a diesel a partir da luminosidade da fuligem

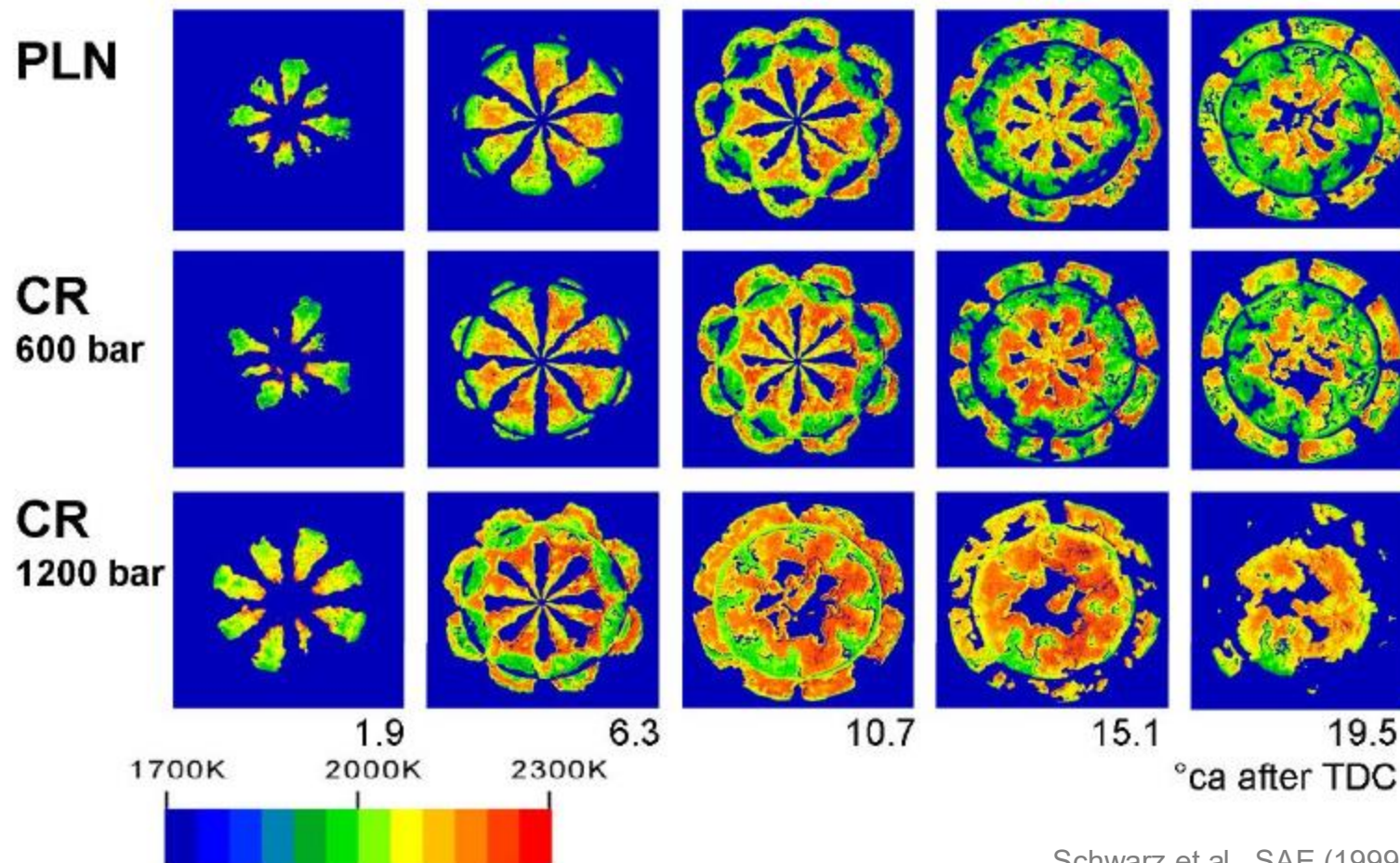


Reggeti et al., Appl. Opt. (2019)

Pirometria de duas cores



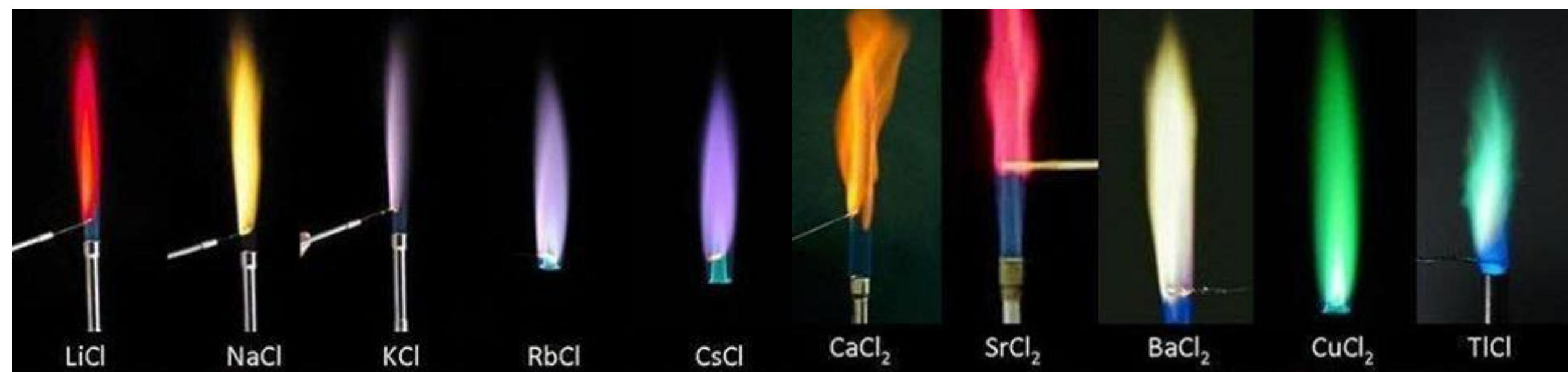
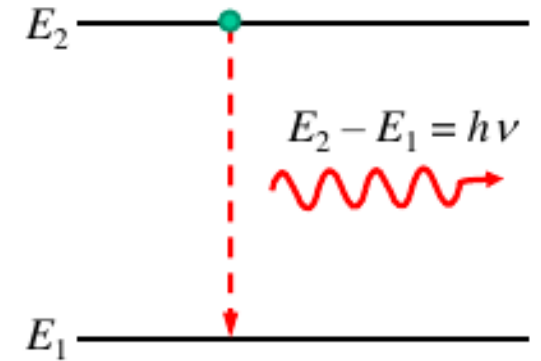
Temperatura na câmara de combustão de motor diesel
a partir da luminosidade da fuligem



Schwarz et al., SAE (1999)

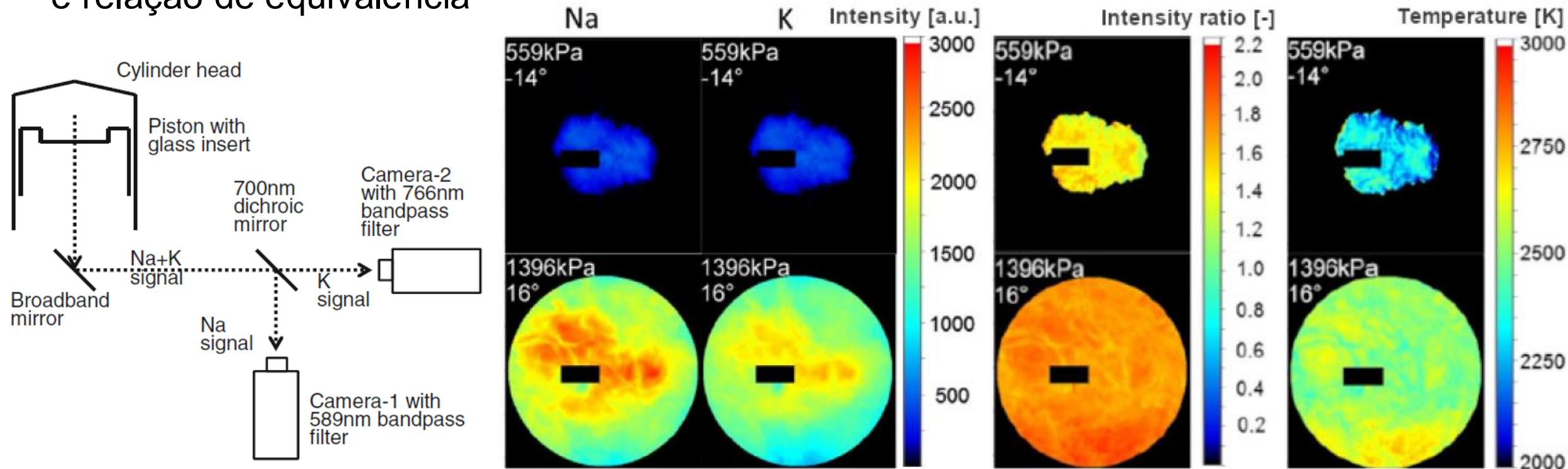
Emissão de metais em chamas

- Emissão de átomos/moléculas sintetizados na chama a partir de sais metálicos adicionados
- Sistema inicialmente no estado excitado devido à temperatura da chama retorna a estado de menor energia, liberando fótons
- Visualização da região dos produtos em temperatura elevada, separação de diferentes regiões do escoamento, morfologia da chama, medição de temperatura e razão de equivalência ϕ



Medição de temperatura através de emissão de metais em chama

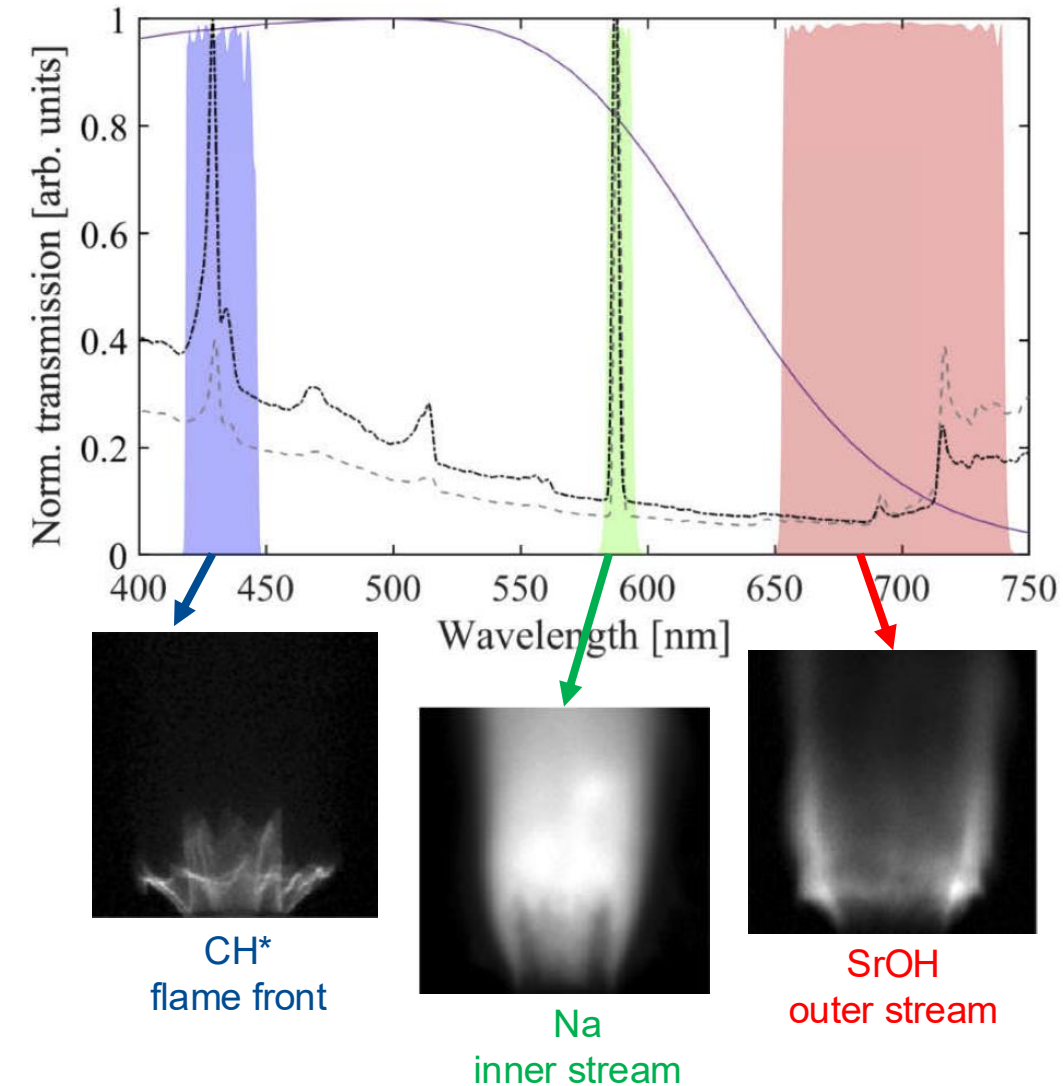
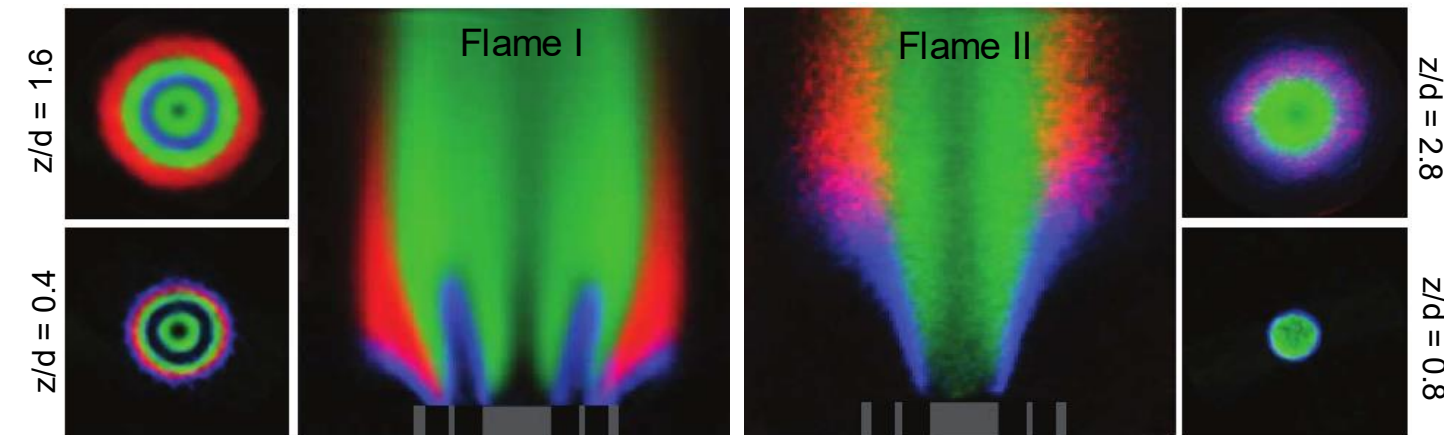
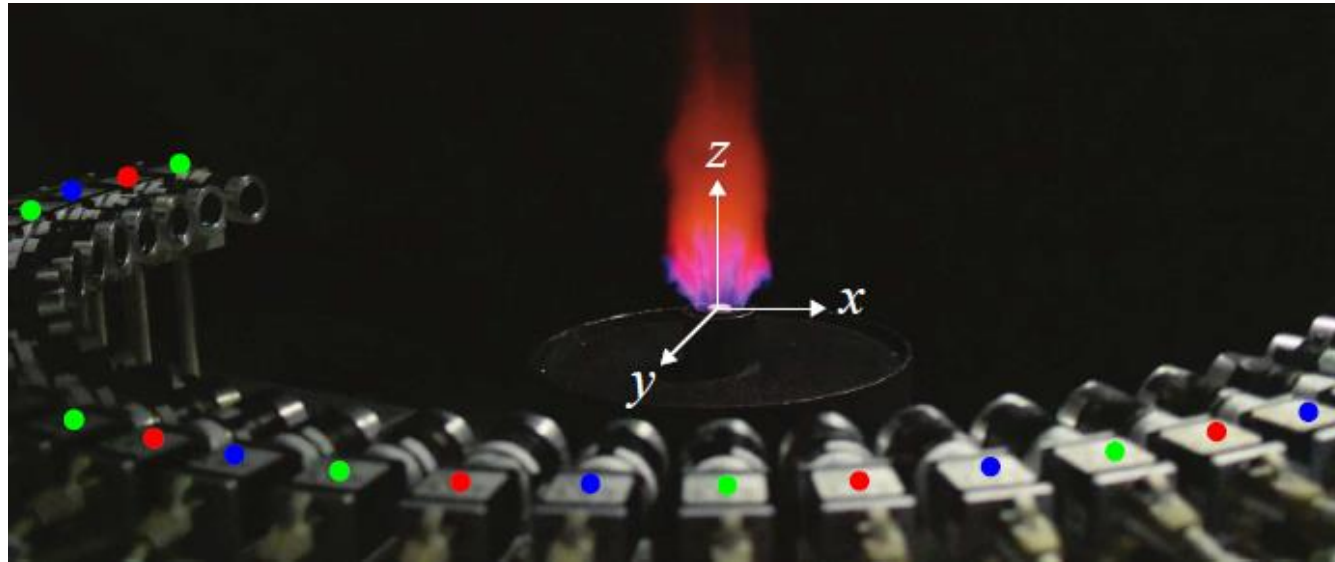
- Emissões de metais alcalinos provenientes de sais adicionados podem ser utilizadas para medições de temperatura através de razão entre emissões em diferentes regiões do espectro na condição de equilíbrio termodinâmico
- As emissões de uma determinada espécie são proporcionais a população eletronicamente excitada em equilíbrio termodinâmico, que depende da temperatura do gás, pressão e relação de equivalência



Mosburger et al., Appl. Phys. B (2013)

Visualização de regiões da chama através de tomografia de emissões

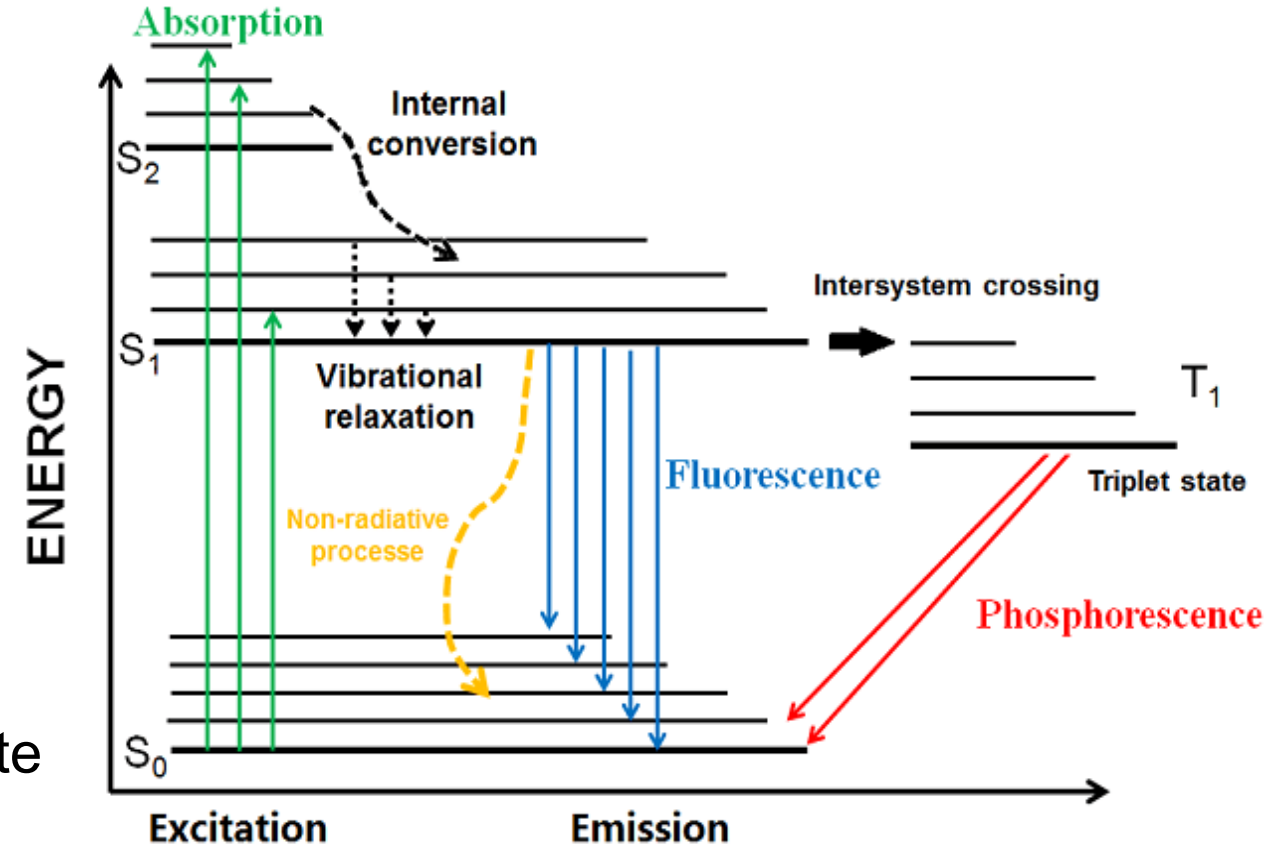
29 câmeras com filtros ópticos para reconstrução do campos 3D instantâneos relacionados a 3 emissões



Foo et al., Opt. Express (2021)

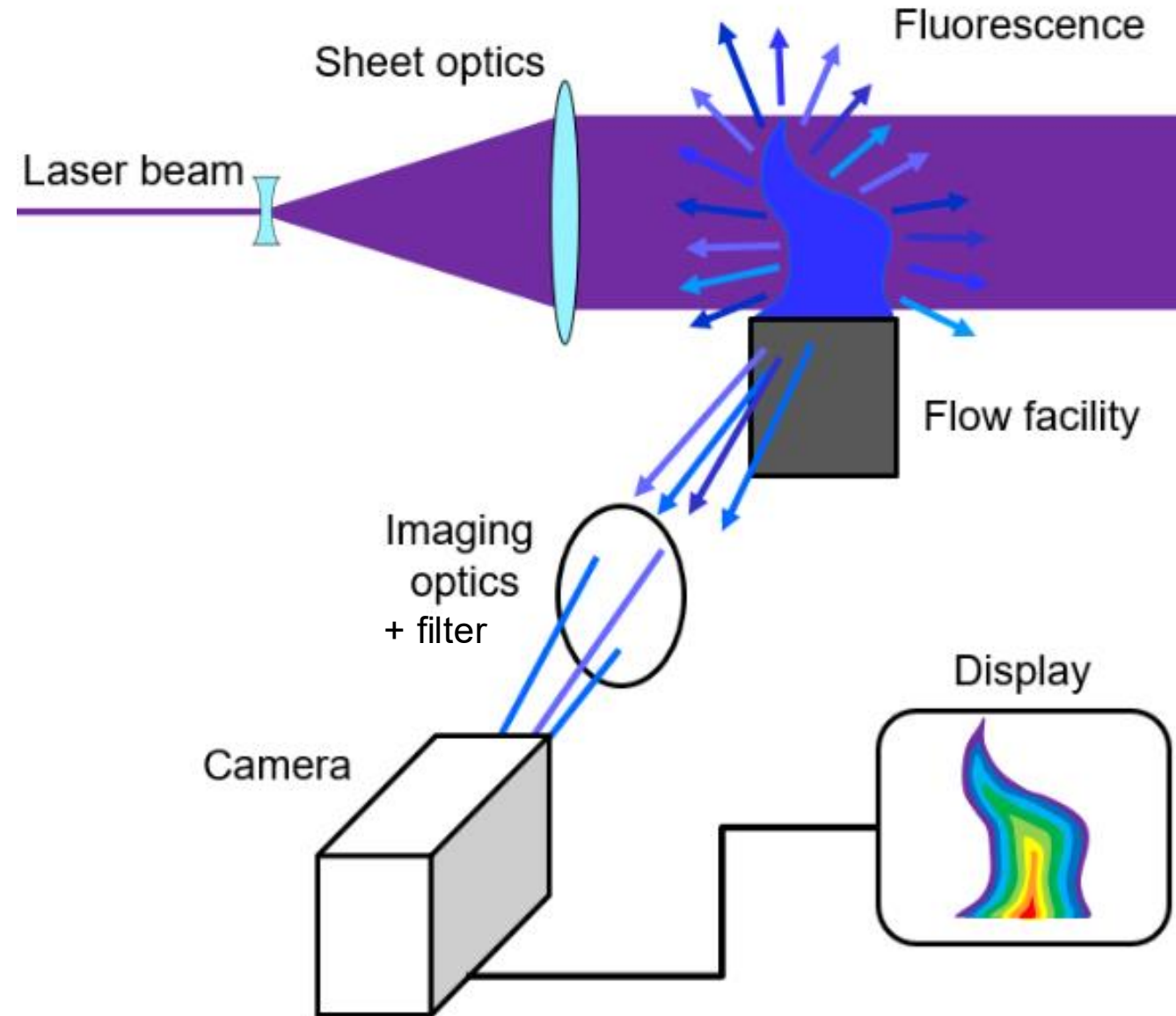
Fluorescência induzida por laser (*laser-induced fluorescence, LIF*)

- 1ª etapa: excitação eletrônica via laser (ou LED)
 - Sintonizar o comprimento de onda para a transição de absorção (UV/VIS)
 - Formar um plano ou volume de luz dependendo da modalidade (2D ou 3D)
- 2ª etapa: emissão espontânea de luz
 - Fluorescência: tempo de vida do estado excitado curto (ns)
 - Fosforescência: tempo de vida do estado excitado longo (μs –min)
- A luz fluorescente tem o espectro geralmente deslocado para o vermelho em relação ao de absorção



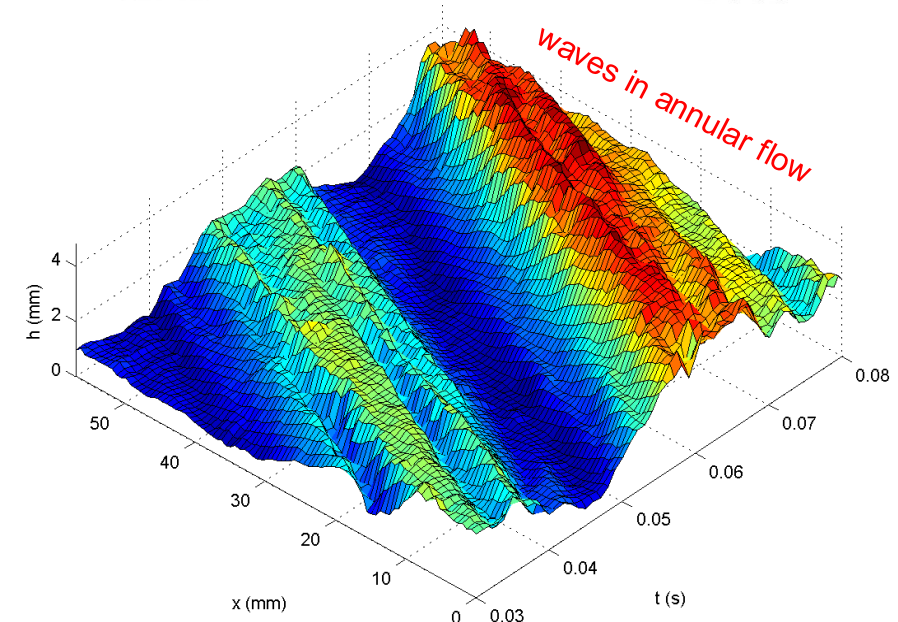
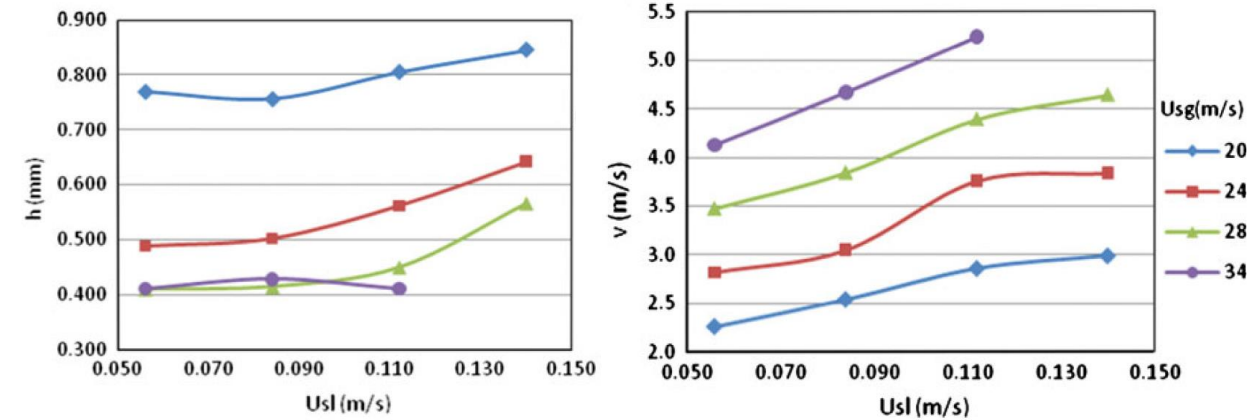
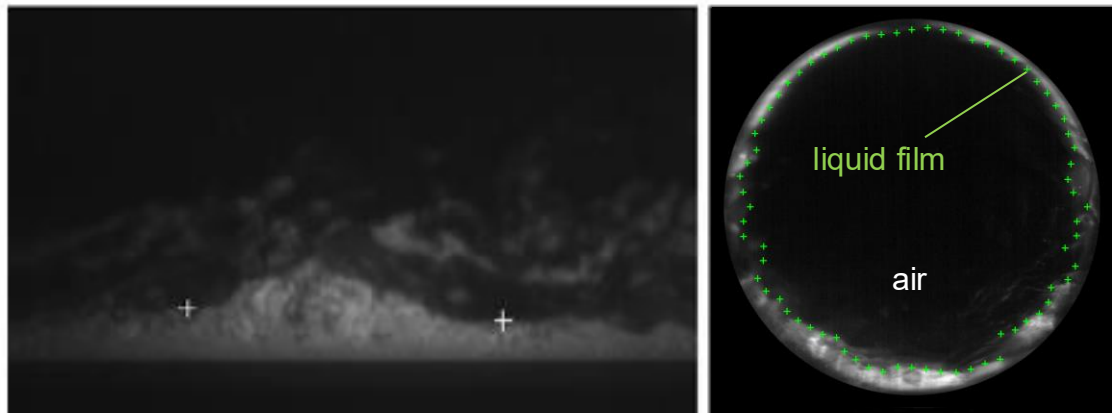
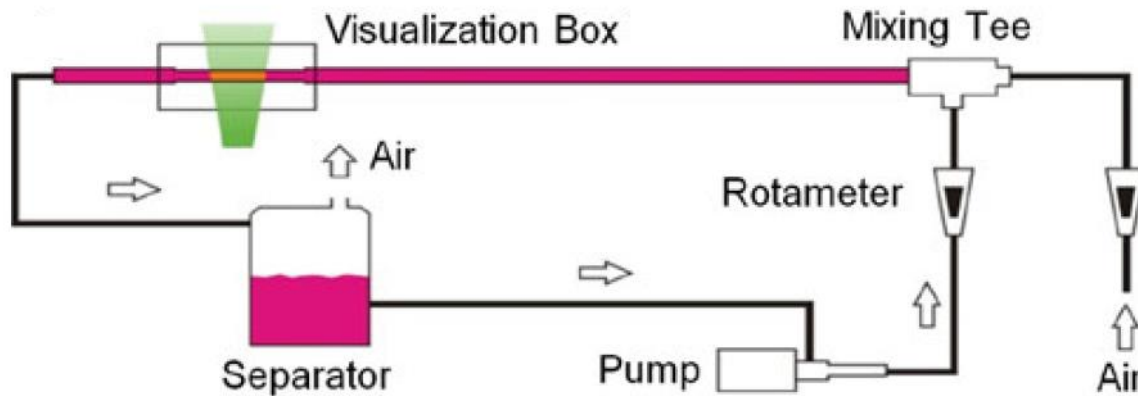
Fluorescência induzida por laser (*laser-induced fluorescence, LIF*)

- Átomos/moléculas presentes no escoamento ou acrescentados a ele (ex.: H, OH, NO, tolueno, acetona) são excitados eletronicamente através de radiação eletromagnética
- A transição para um estado eletrônico de menor energia emite luz (fluorescência)
- A fluorescência é capturada por uma câmera, podendo ser usada na visualização do escoamento com supressão de reflexões indesejáveis (paredes, interfaces, etc.) ou na extração de quantidades escalares do meio



Fluorescência induzida por laser (*laser-induced fluorescence, LIF*)

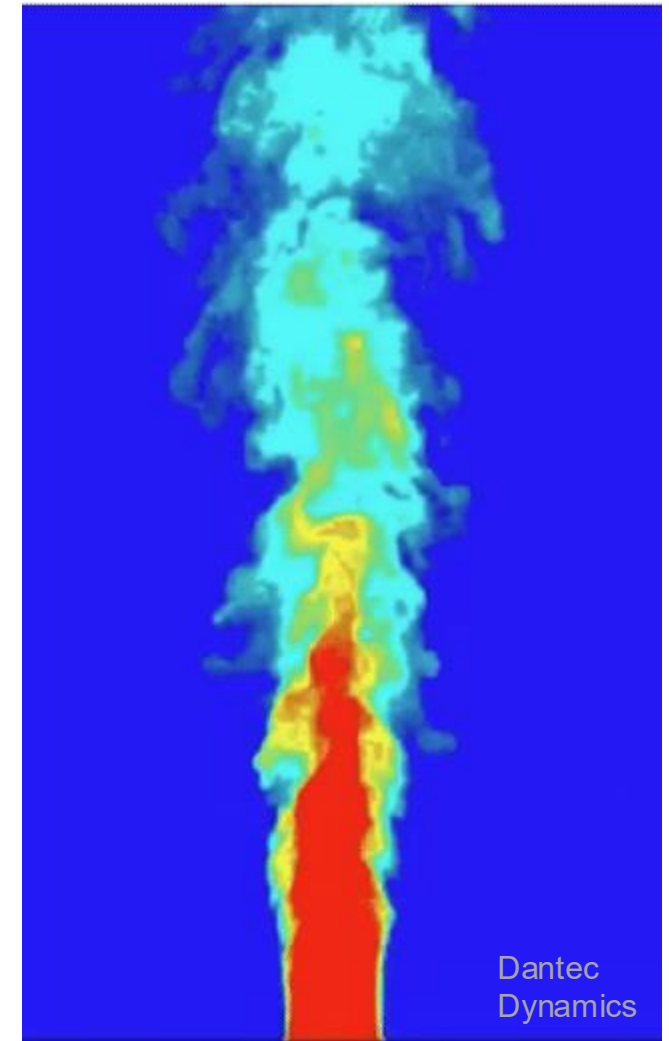
Corante fluorescente Rodamina + filtro óptico para visualização de escoamentos bifásicos (ex.: escoamento anular)



Farias et al., Exp Fluids (2011)

Fluorescência induzida por laser (*laser-induced fluorescence*, LIF)

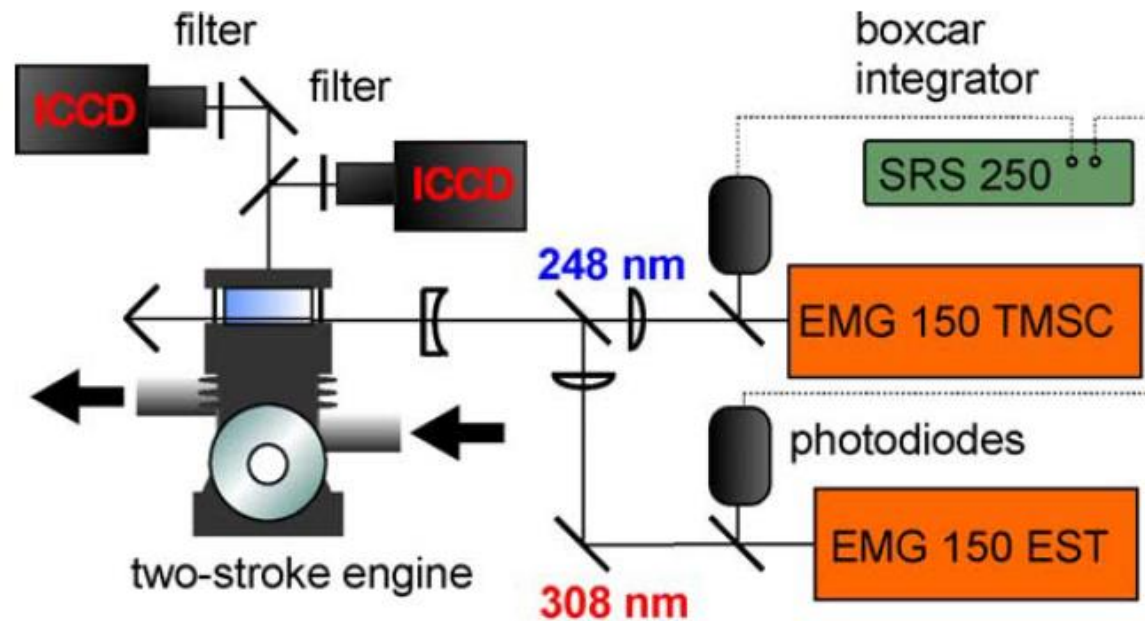
- Variedade de átomos e moléculas pode ser medida, incluindo radicais da chama (espécies intermediárias)
- LIF tem alta sensibilidade, sendo capaz de detectar radicais de chama e espécies poluentes em níveis de ppm
- Aplicação da técnica requer conhecimento sobre espectros de absorção/fluorescência
- Visualização do escoamento e medição de propriedades:
 - Concentração de espécies
 - Temperatura (relação de intensidade de sinal ou ajustes de curvas espectrais)
 - Velocidade (medição de formas/mudanças de linha ampliada por Doppler)
 - Densidade / Mistura
 - pH em líquidos



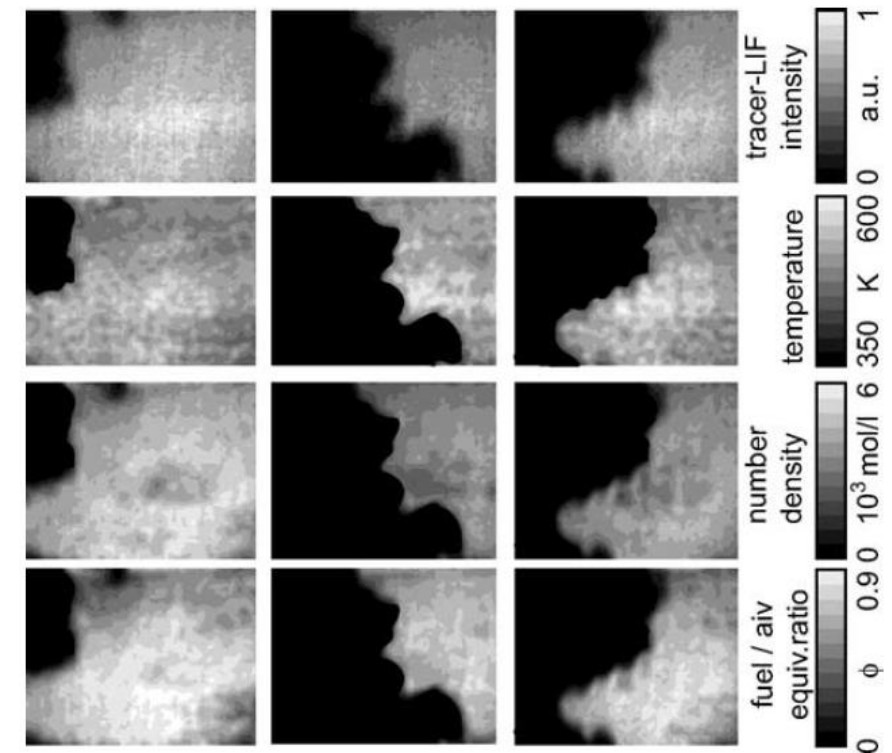
Jato de ar com traçador acetona

Fluorescência induzida por laser (*laser-induced fluorescence, LIF*)

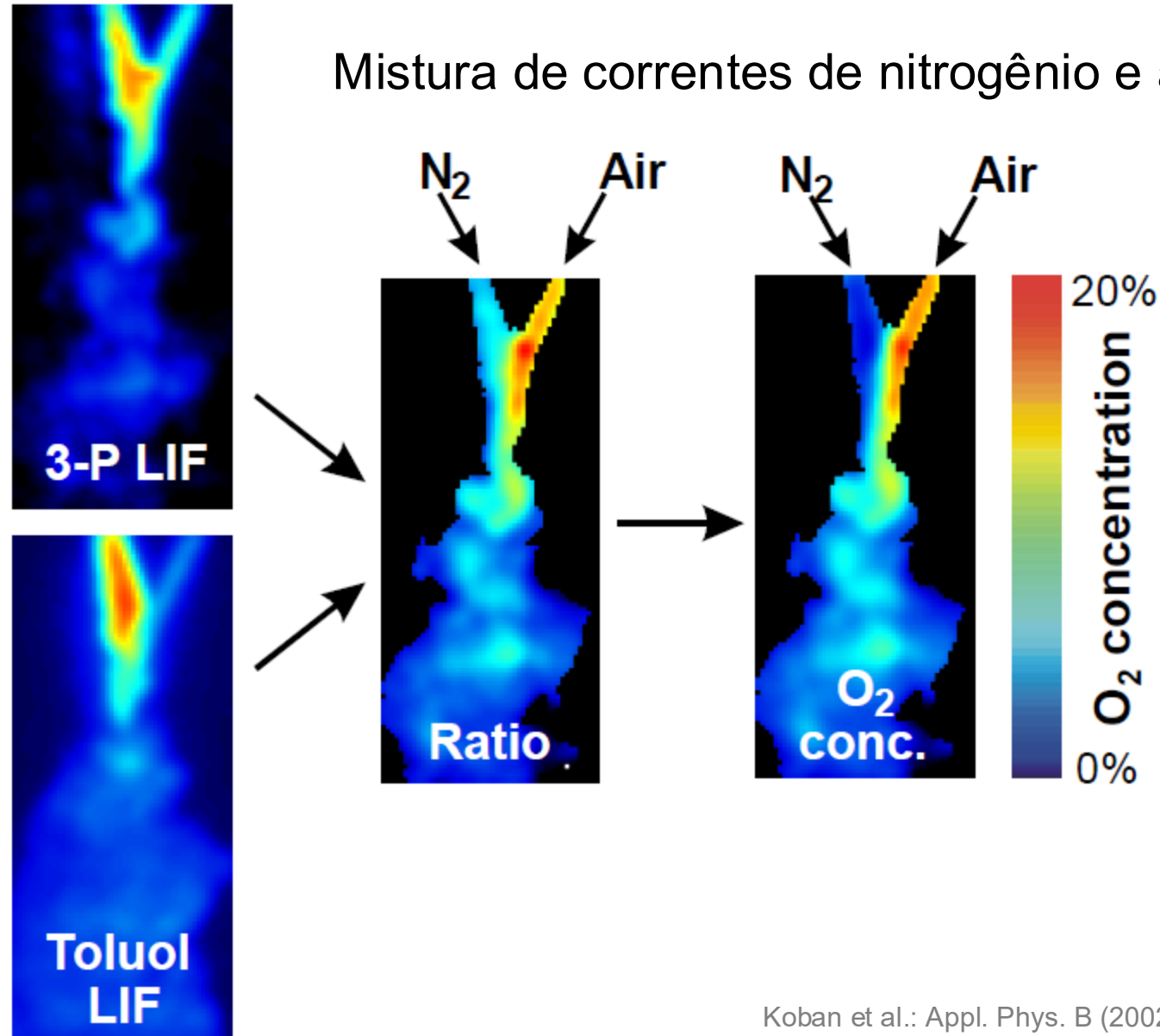
- Medições LIF em motor monocilíndrico de dois tempos alimentado com iso-octano dopado com 3-pentanona
- Temperatura (razão entre os sinais excitados com 248 e 308 nm), densidade absoluta (sinal excitado com 308 nm corrigido pela temperatura e calibrado), razão de equivalência (hipótese de que os gases de escape não causam distribuição não homogênea de oxigênio dentro do cilindro)



Einecke et al., Appl Phys B (2000)



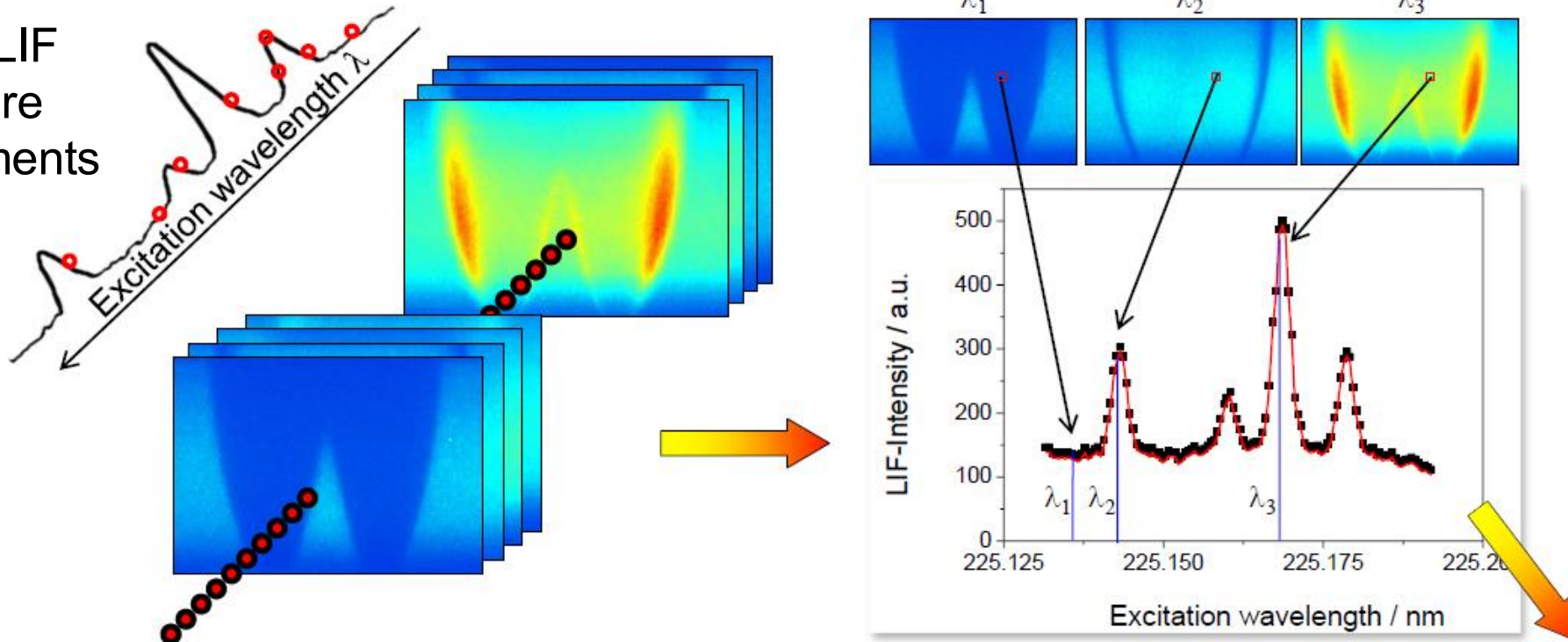
Fluorescência induzida por laser (*laser-induced fluorescence, LIF*)



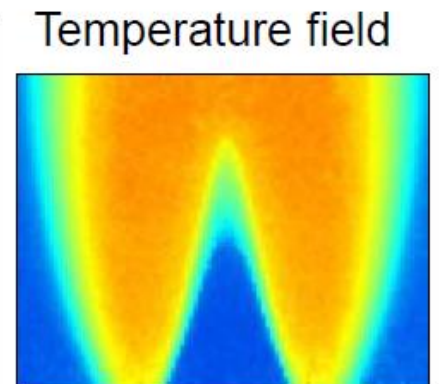
Koban et al.: Appl. Phys. B (2002)

Fluorescência induzida por laser (*laser-induced fluorescence, LIF*)

Multi-line LIF
temperature
measurements



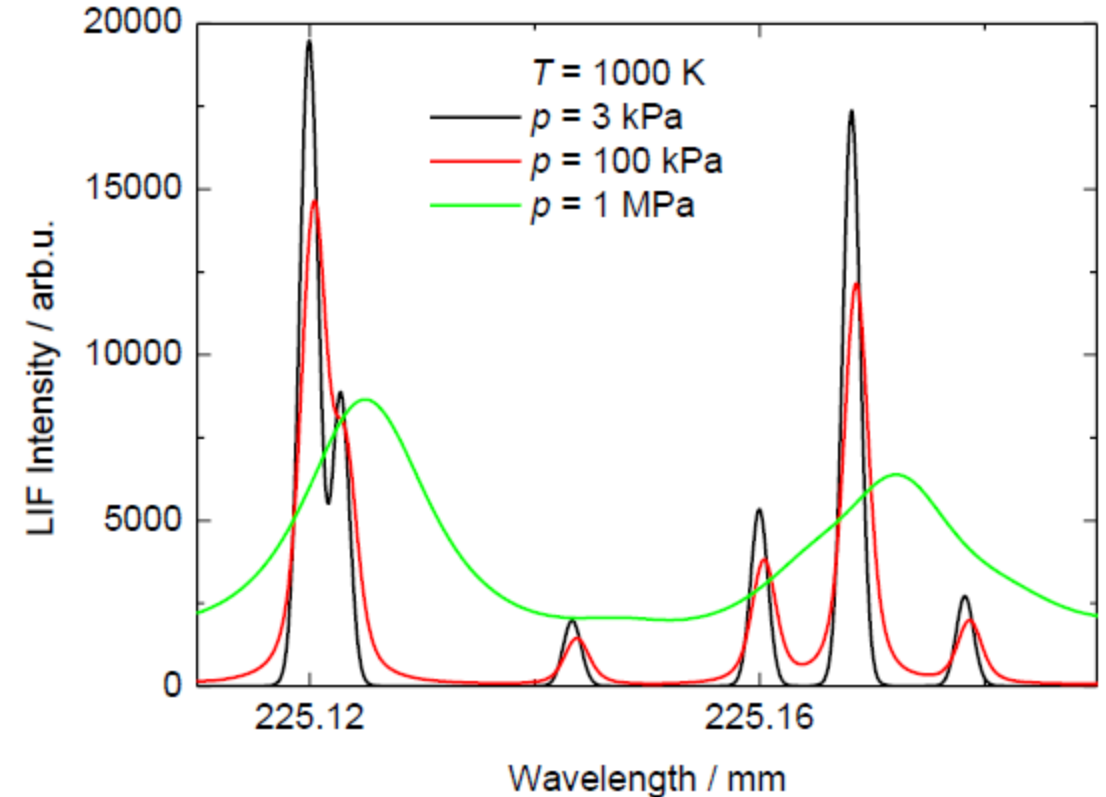
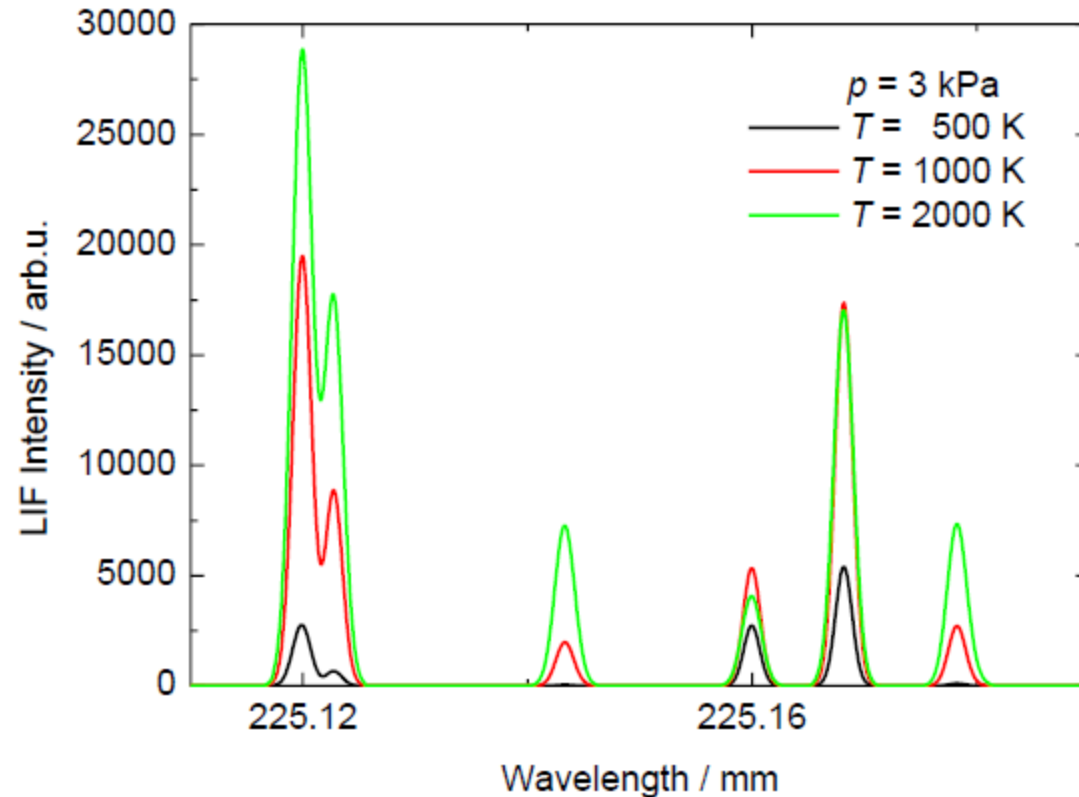
- Excitação em faixa espectral selecionada
- Para cada pixel, gera-se o espectro de excitação a partir da pilha de imagens LIF (classificadas por comprimento de onda de excitação)
- Os espectros simulados são ajustados as medições usando a temperatura como parâmetro variável (ex.: www.lifsim.com)



Torsten, Laser Spectroscopy Course (2024)

Fluorescência induzida por laser (*laser-induced fluorescence, LIF*)

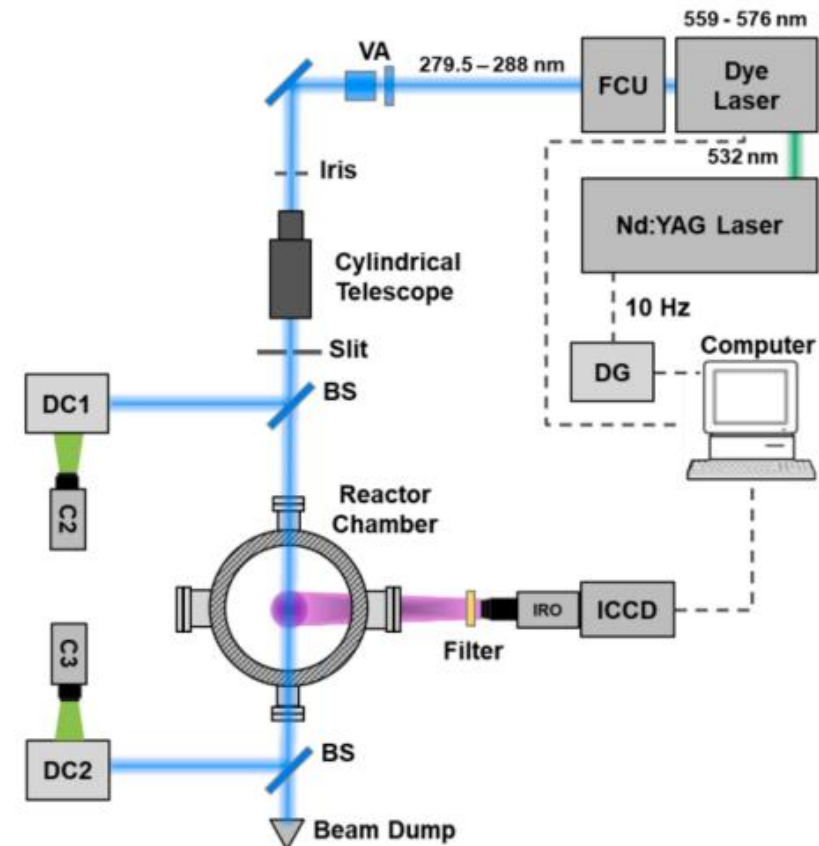
O espectro de fluorescência varia com a espécie, temperatura e pressão



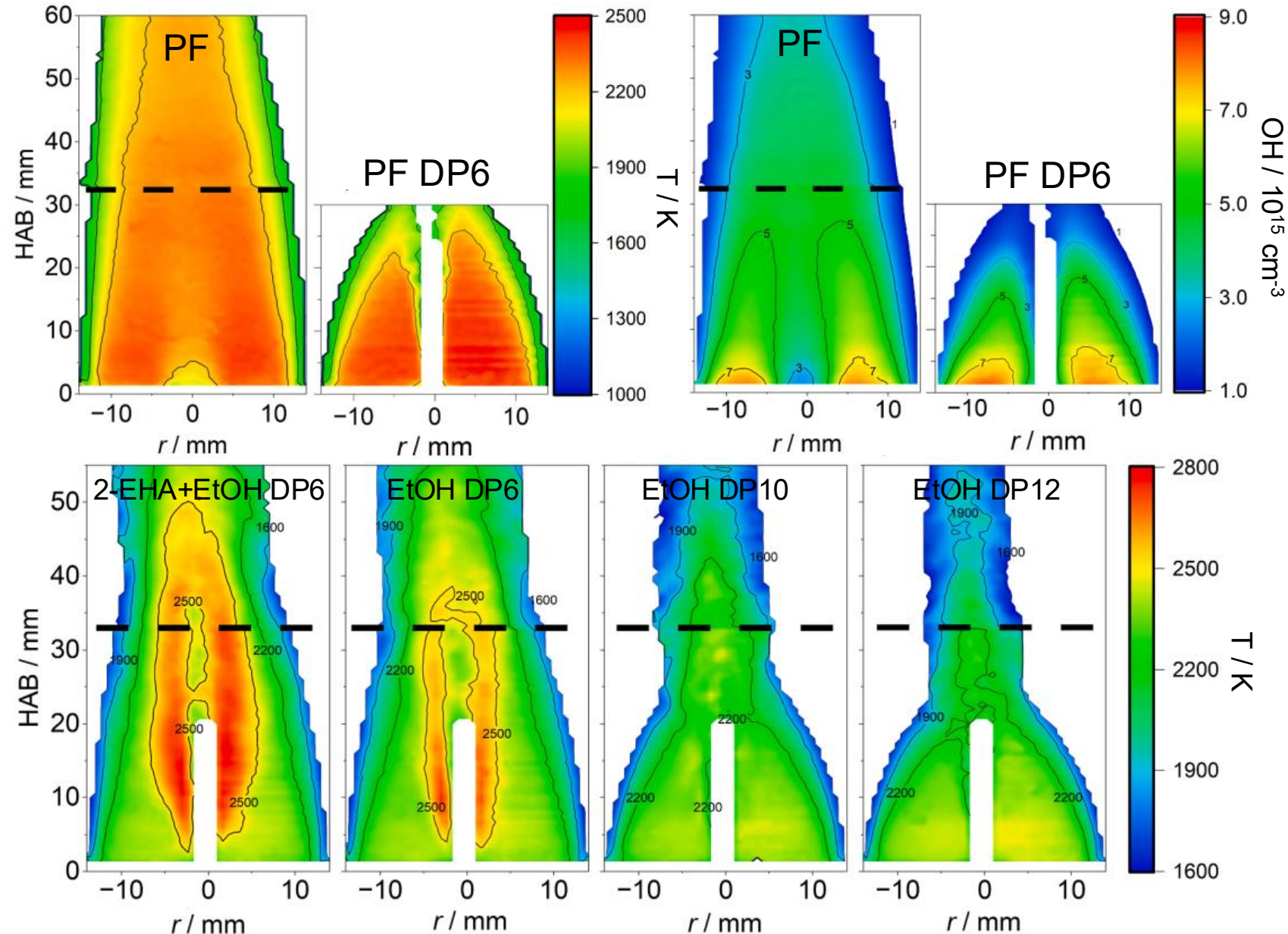
H. Kronemayer (Diss. 07)

Fluorescência induzida por laser (*laser-induced fluorescence, LIF*)

Medição da temperatura e concentração de OH em spray flamejante SpraySyn através de multi-line OH-LIF

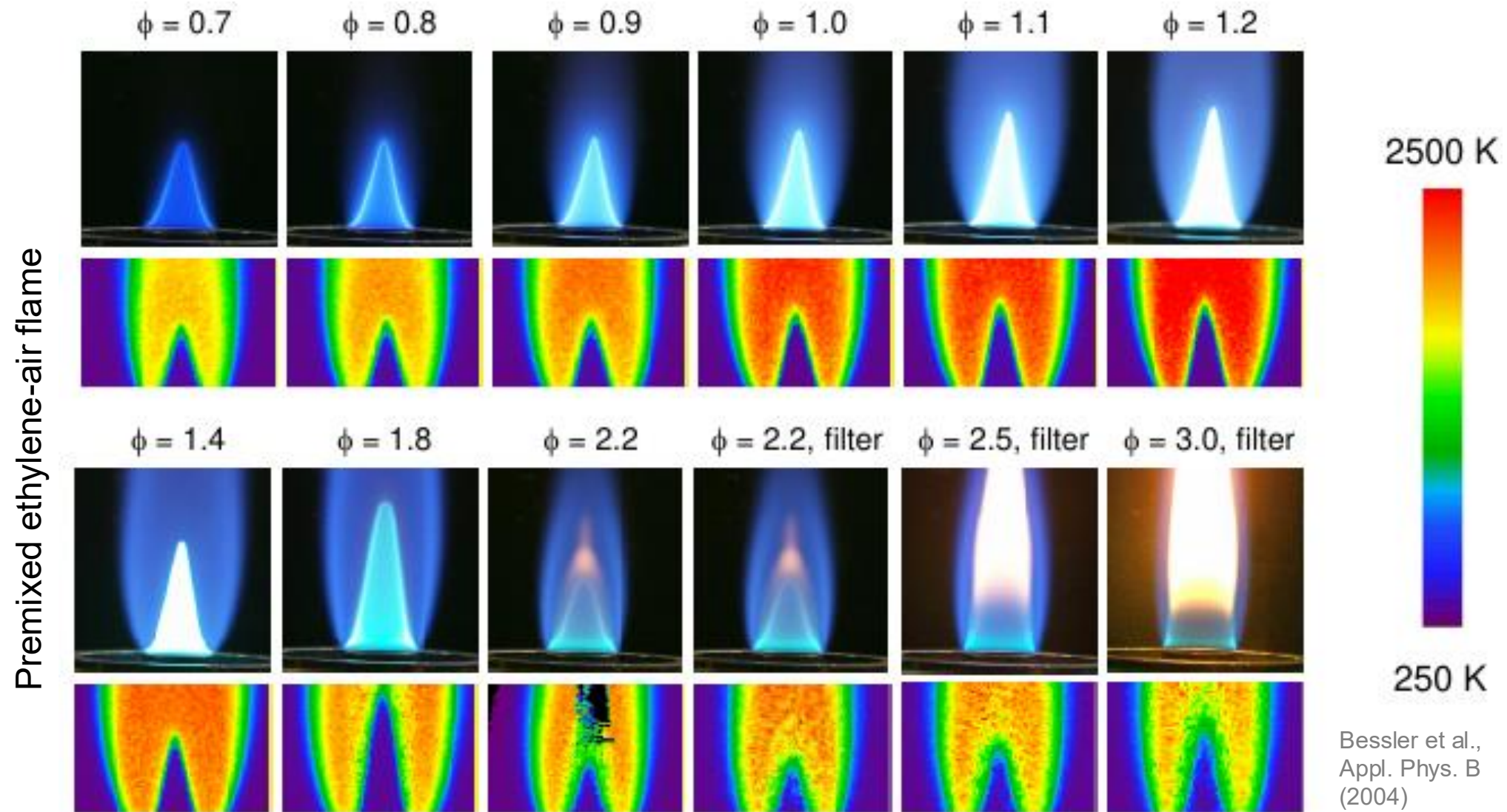


Karaminejad et al., Appl. Energy Combust. Sci. (2023)



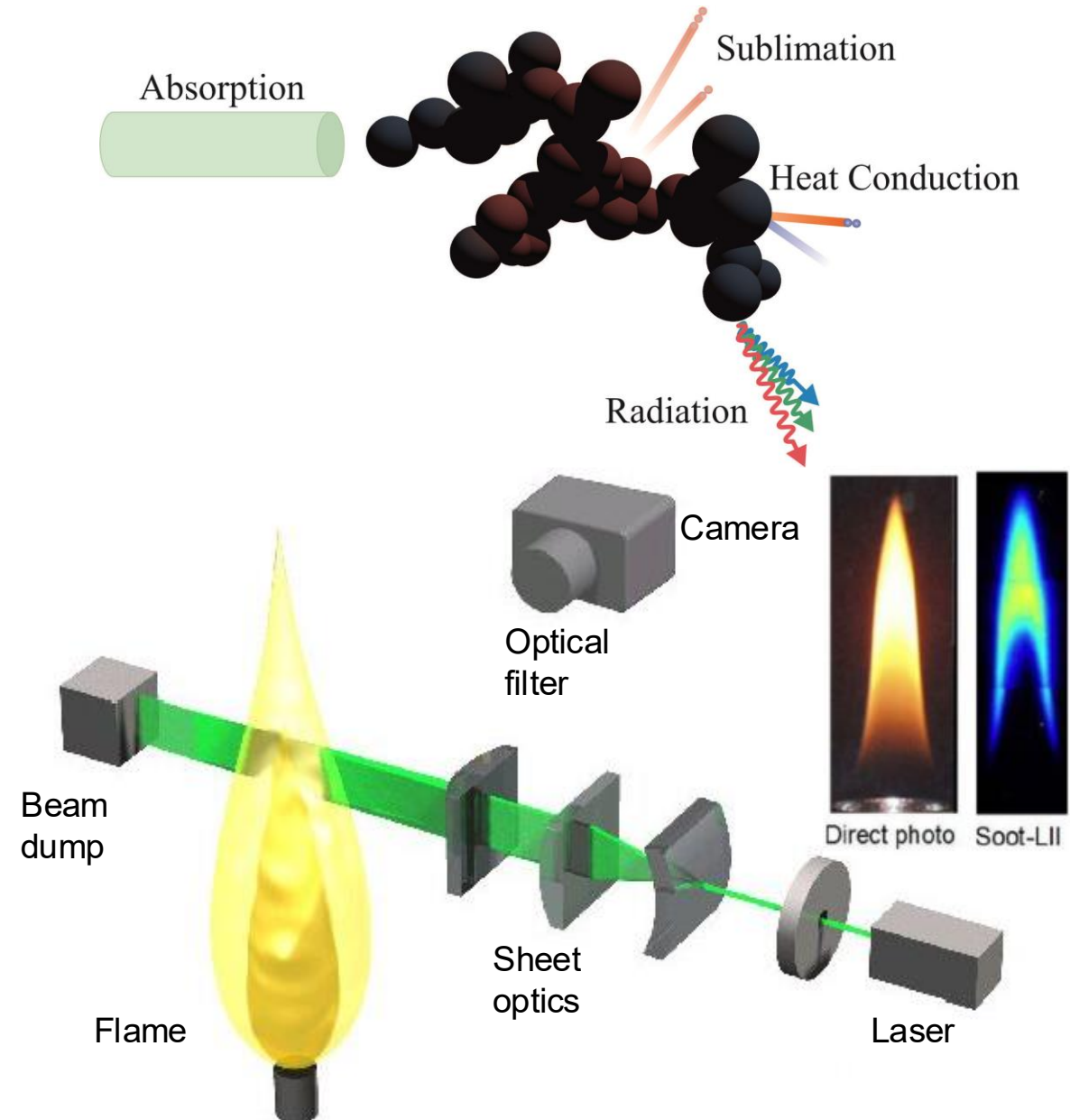
Fluorescência induzida por laser (*laser-induced fluorescence, LIF*)

Medição da temperatura através da técnica de multi-line NO-LIF



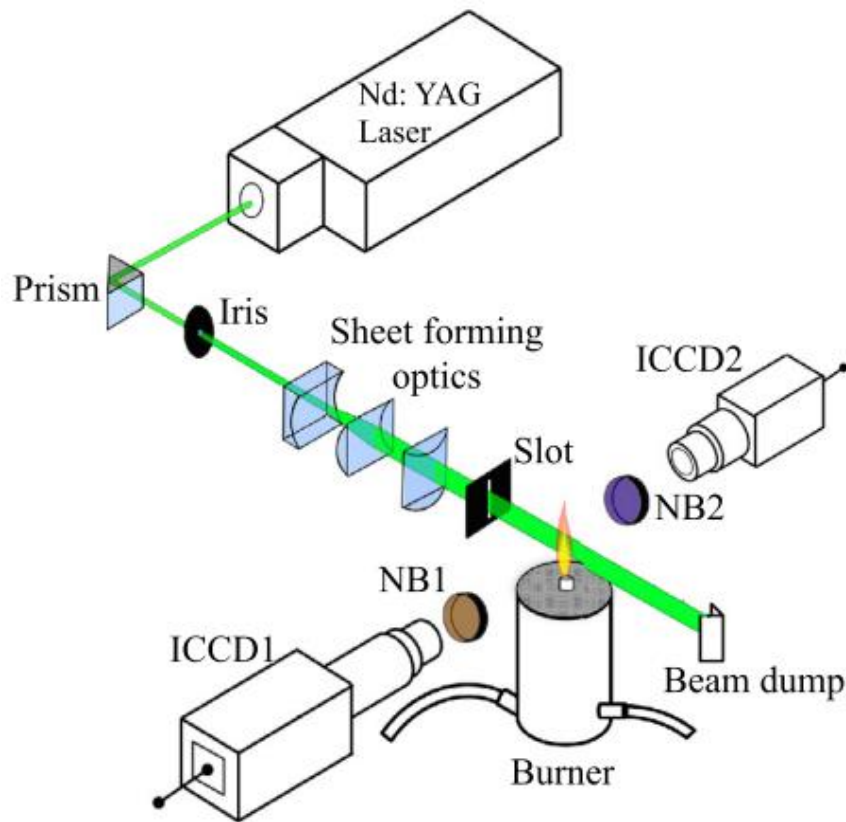
Incandescência induzida por laser (*laser-induced incandescence, LII*)

- Técnica não intrusiva e ativa com alta resolução espacial e temporal para medição de propriedades de nanopartículas e temperatura
- Baseia-se no superaquecimento transitório ($\sim 3000\text{K}$ – 5000K) de partículas de fuligem ou outras nanopartículas sólidas através de laser pulsado de alta energia e monitoramento da luz emitida (incandescência) enquanto esfriam
- As partículas superaquecidas emitem intensa luz (incandescência de corpo negro), que é ordens de magnitude mais forte do que a incandescência térmica natural da chama
- Detecta-se a emissão num comprimento de onda diferente da luz do laser para filtrar o espalhamento Rayleigh, Mie e reflexos

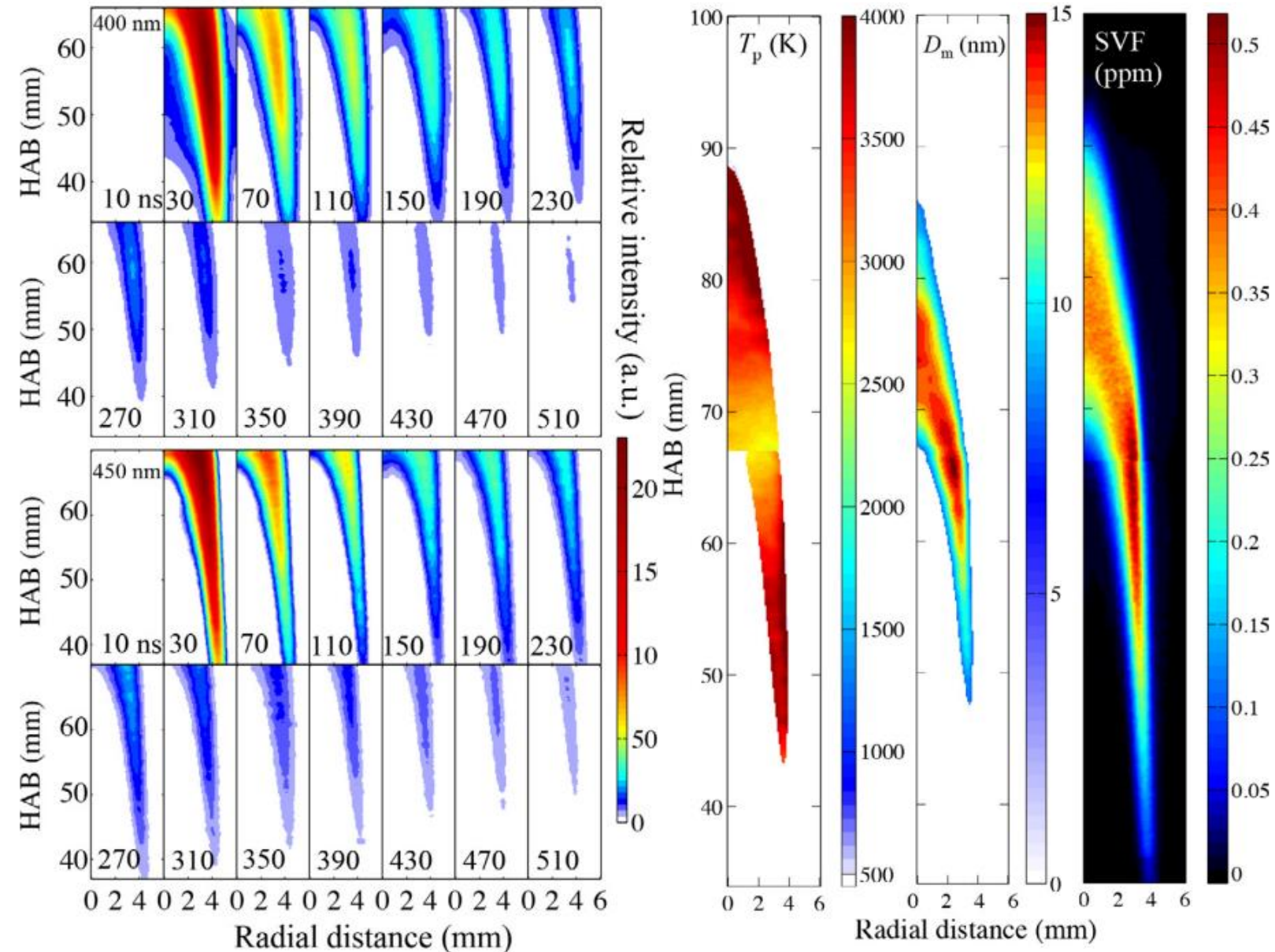


Incandescência induzida por laser (*laser-induced incandescence, LII*)

LII de duas cores resolvido no tempo aplicado em chama de difusão de CH_4

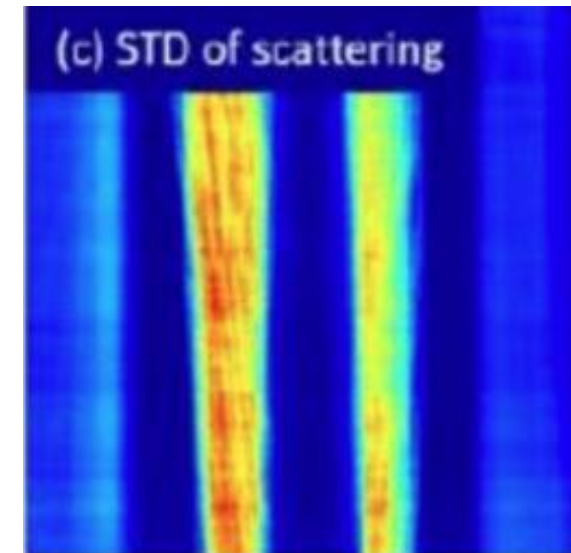
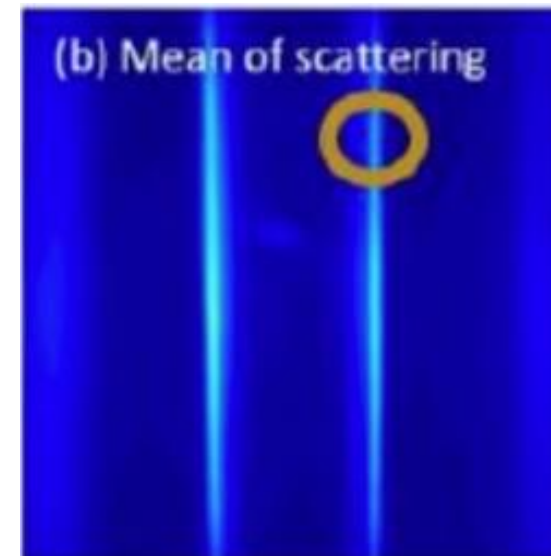
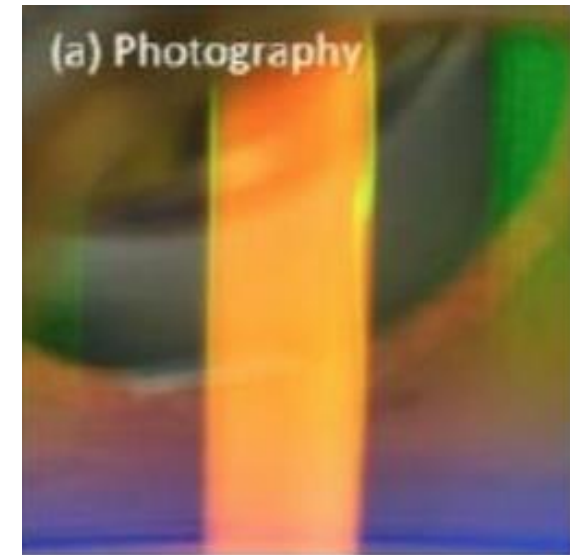


Tian et al., Proc. Combust. Inst. (2023)



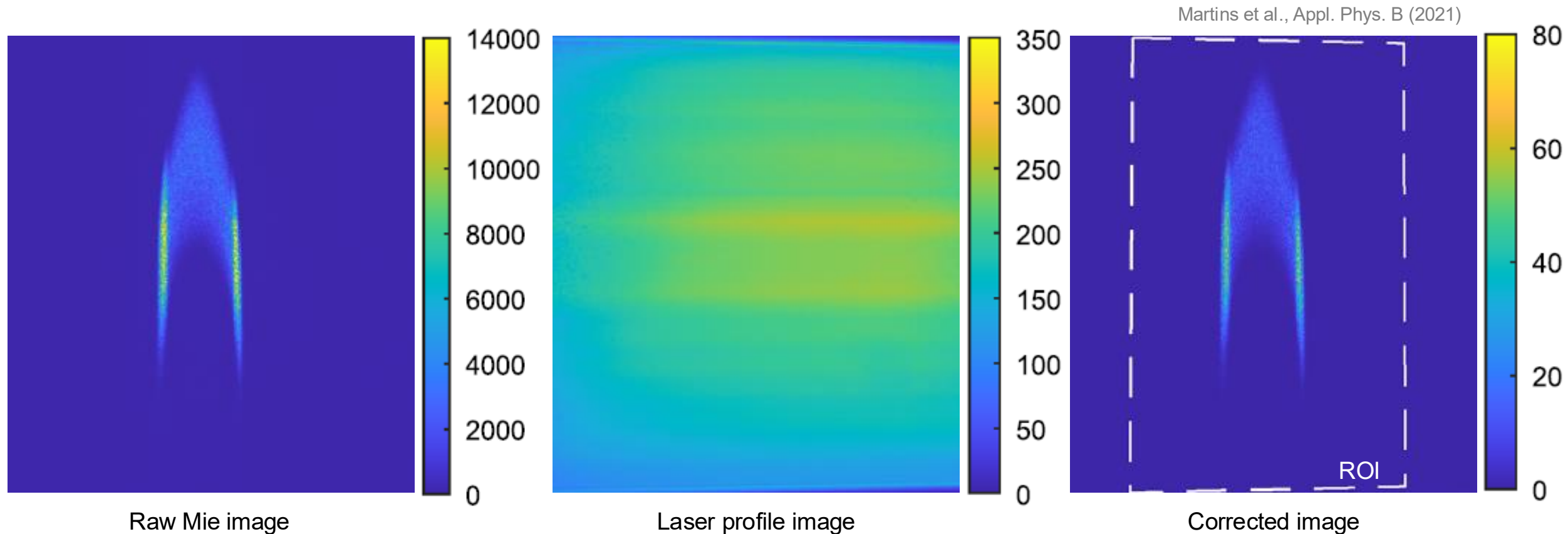
Espalhamento Rayleigh (*Rayleigh scattering*)

- Técnica não intrusiva para medição de densidade, temperatura e velocidade em fluidos
- Baseia-se na espalhamento elástico Rayleigh: quando o comprimento de onda da luz incidente é muito maior que o diâmetro de nanopartículas ou moléculas ($\lambda \gg d$)
- Medição da **densidade** (relacionada a composição, temperatura e pressão) através da intensidade da luz espalhada, **velocidade** do escoamento através do deslocamento da frequência do sinal espalhado em relação a luz incidente (efeito Doppler) e **temperatura** através do alargamento do espectro da luz espalhada



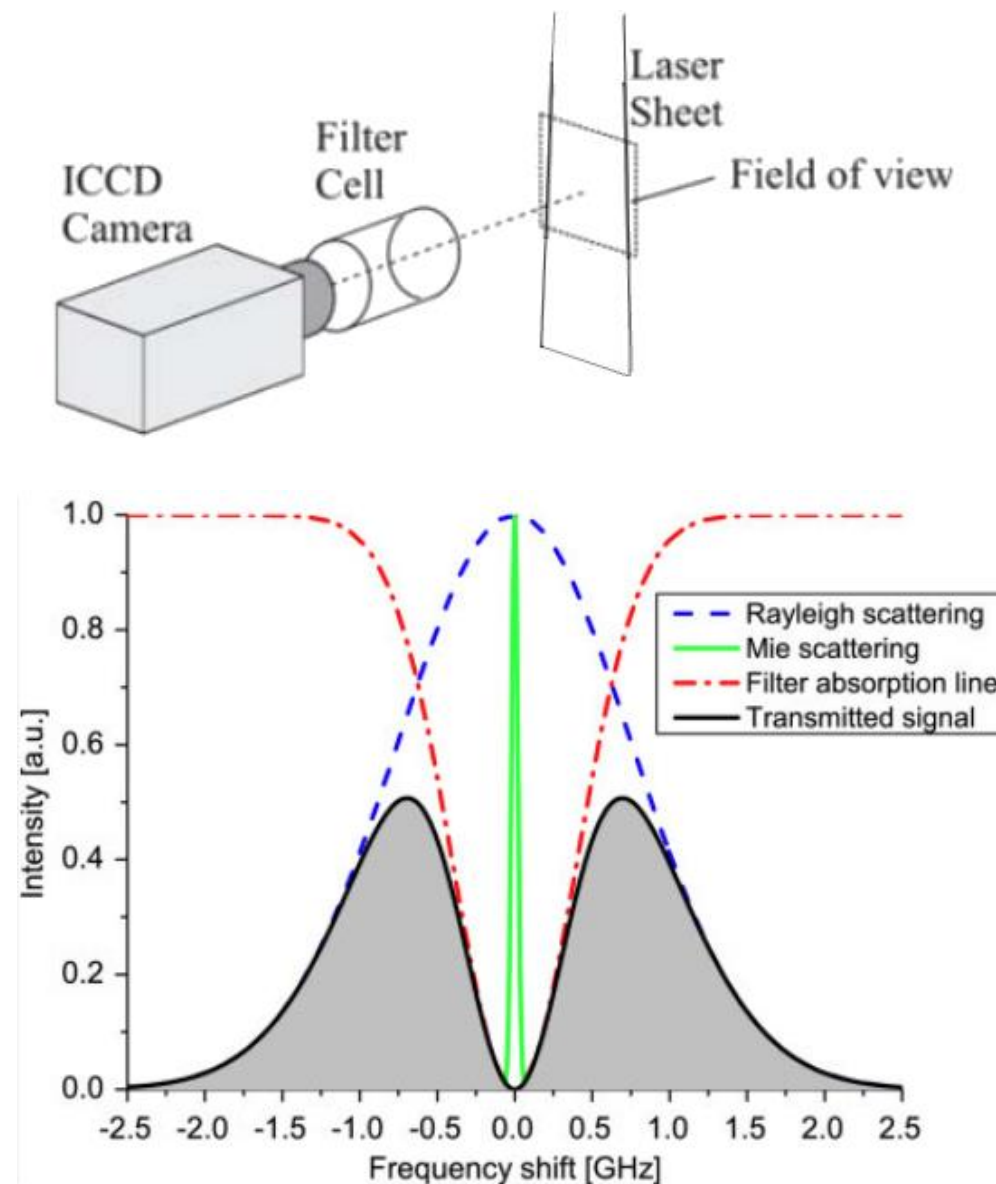
Espalhamento Rayleigh (*Rayleigh scattering*)

Correção de iluminação não-homogênea (perfil do plano de laser) e diferenças devido ao setup óptico (sensibilidades do sensor, transmissividade das lentes, filtros, etc.) através da divisão (sensor linear) da imagem original pela imagem do espalhamento Rayleigh das moléculas de gás em região com distribuição homogênea



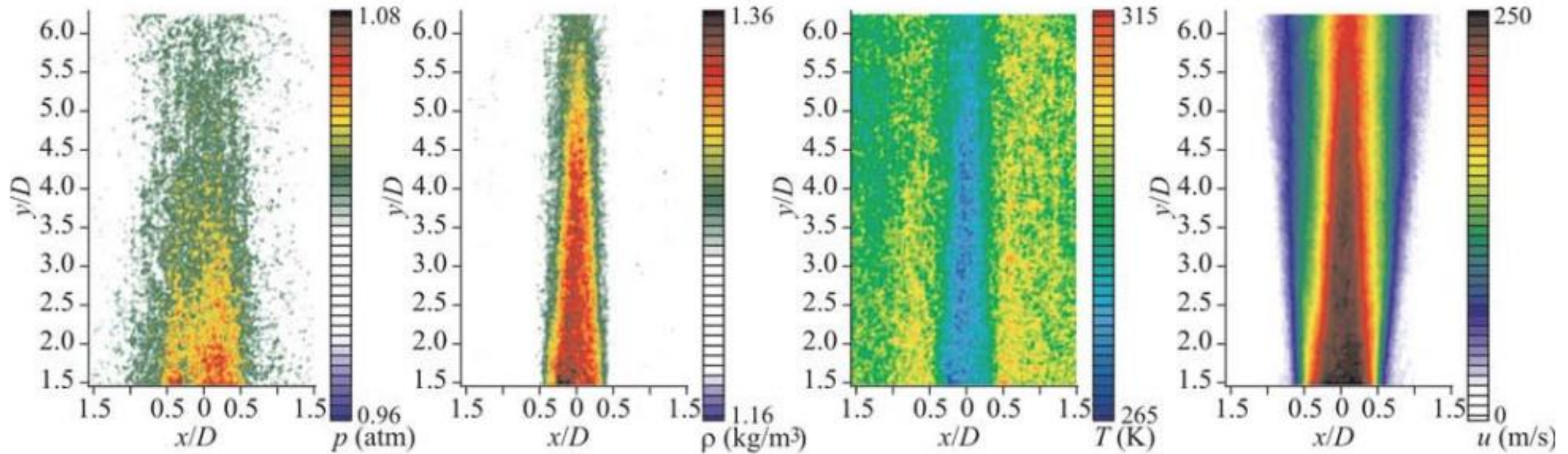
Espalhamento Rayleigh (*Rayleigh scattering*)

- A técnica de espalhamento Rayleigh filtrado utiliza um filtro óptico de absorção (geralmente uma célula de vapor de iodo) para bloquear o comprimento de onda do laser incidente (espalhamento Mie e reflexões estúrias), enquanto permite a passagem da luz espalhada Rayleigh alargada spectralmente pelo movimento térmico das moléculas
- A forma do espectro de frequência depende da temperatura, pressão, desvio Doppler e composição do gás
- Temperatura, pressão, velocidade e densidade podem ser obtidos variando a frequência do laser e conhecendo a composição do gás e o espectro de absorção da célula



Espalhamento Rayleigh (*Rayleigh scattering*)

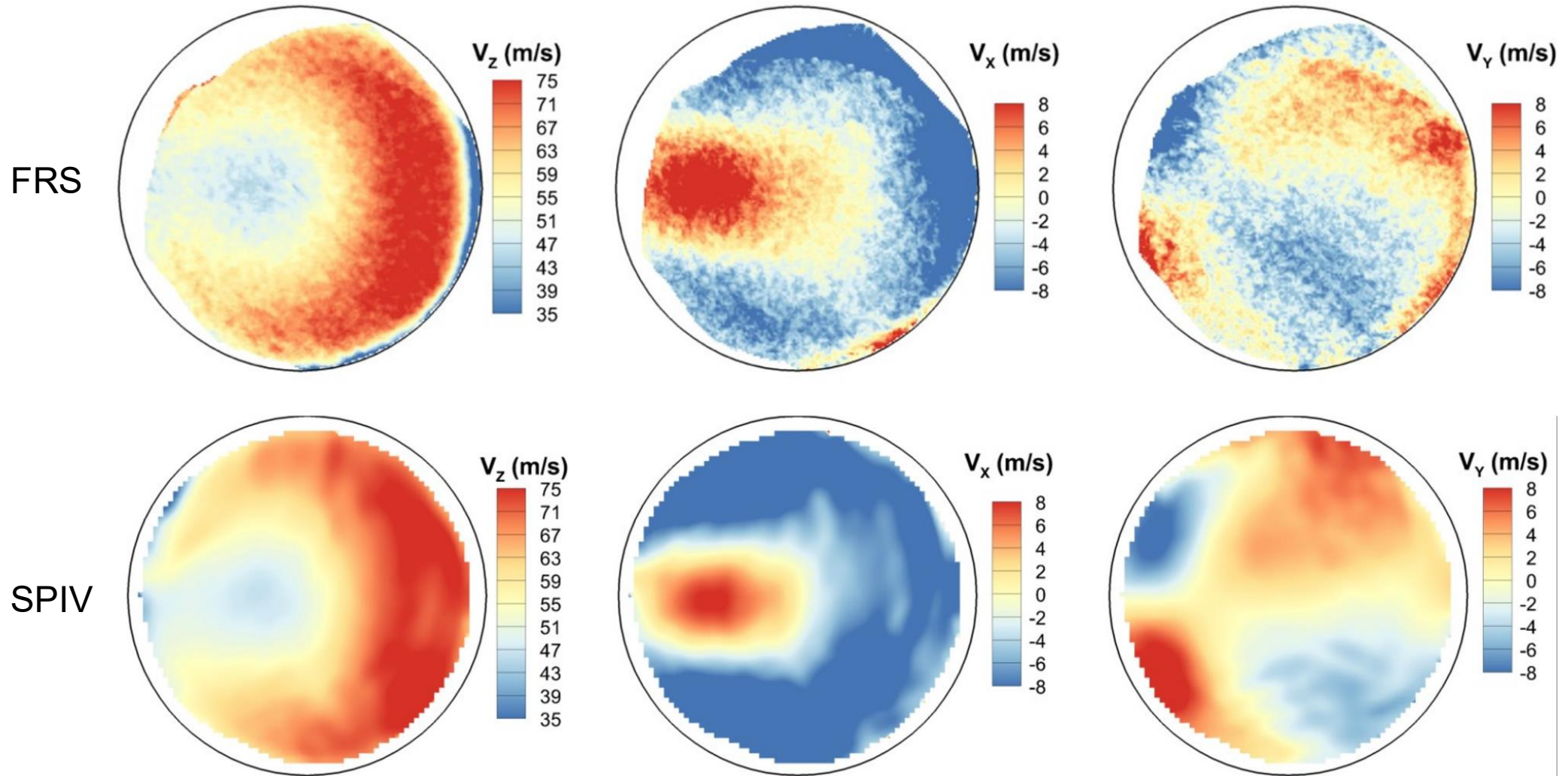
Filtered Rayleigh scattering for measurements in compressible flows and thermal fields



Boguszko et al., Exp. Fluids (2005)

Espalhamento Rayleigh (*Rayleigh scattering*)

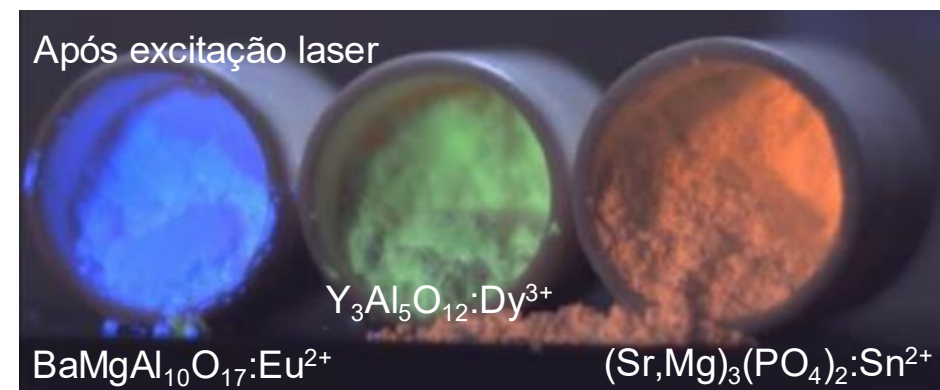
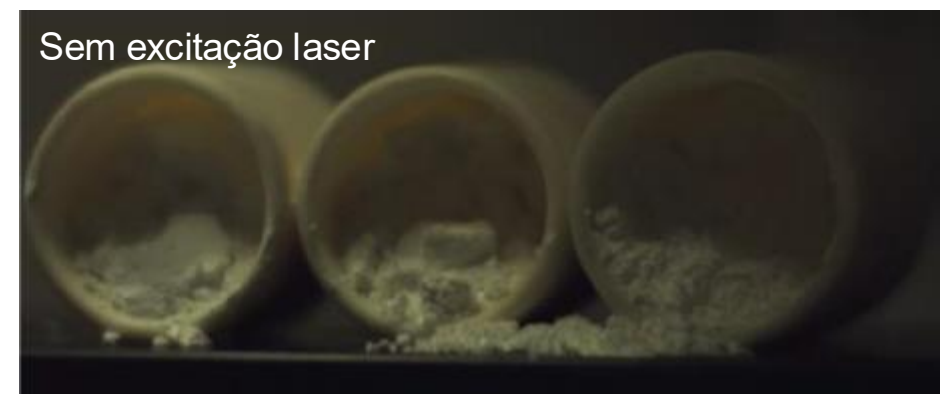
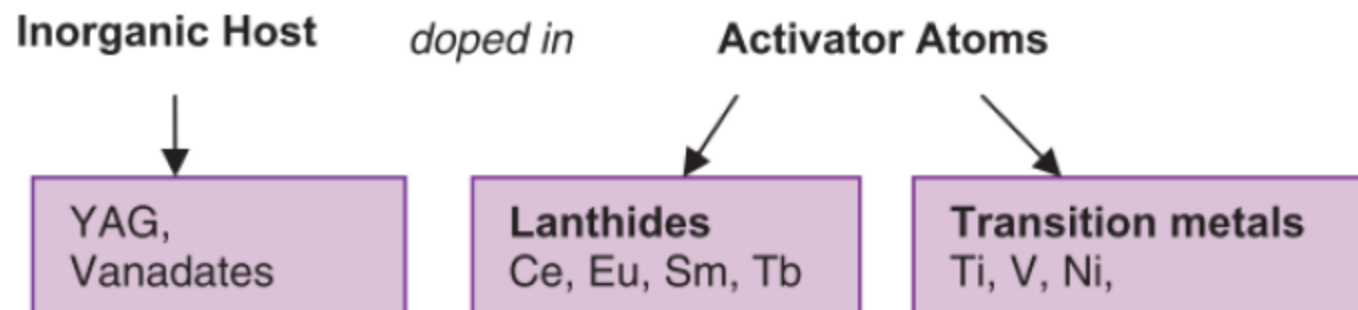
Filtered Rayleigh scattering (FRS) for measurements of an S-Duct diffuser



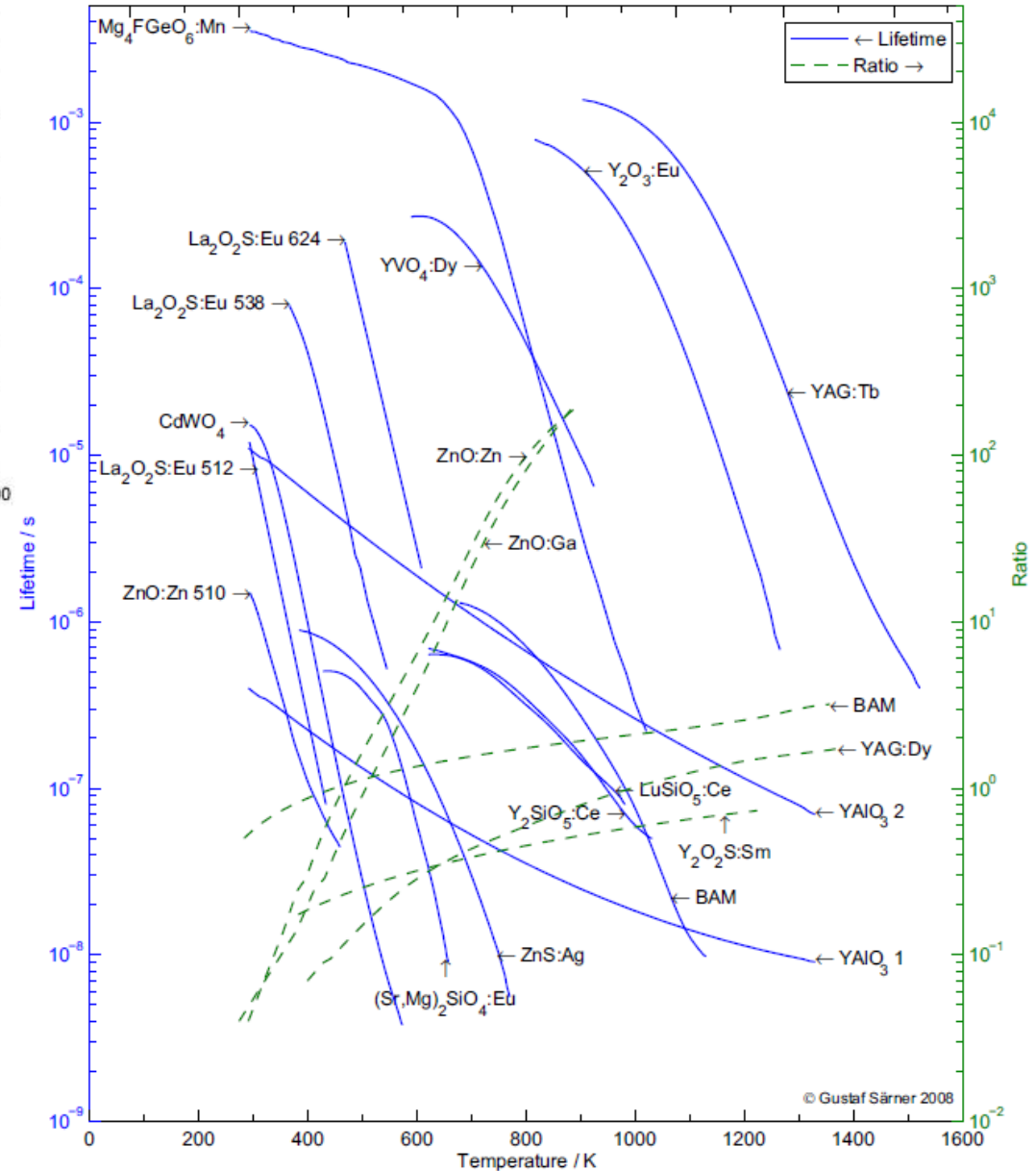
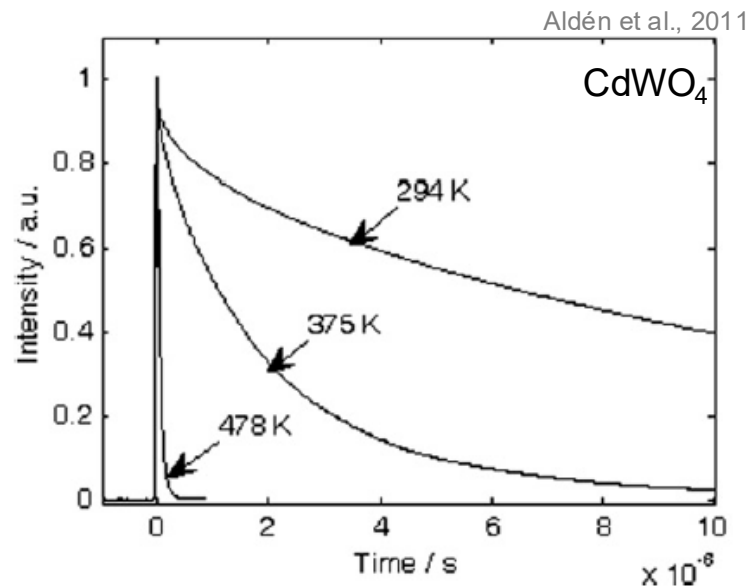
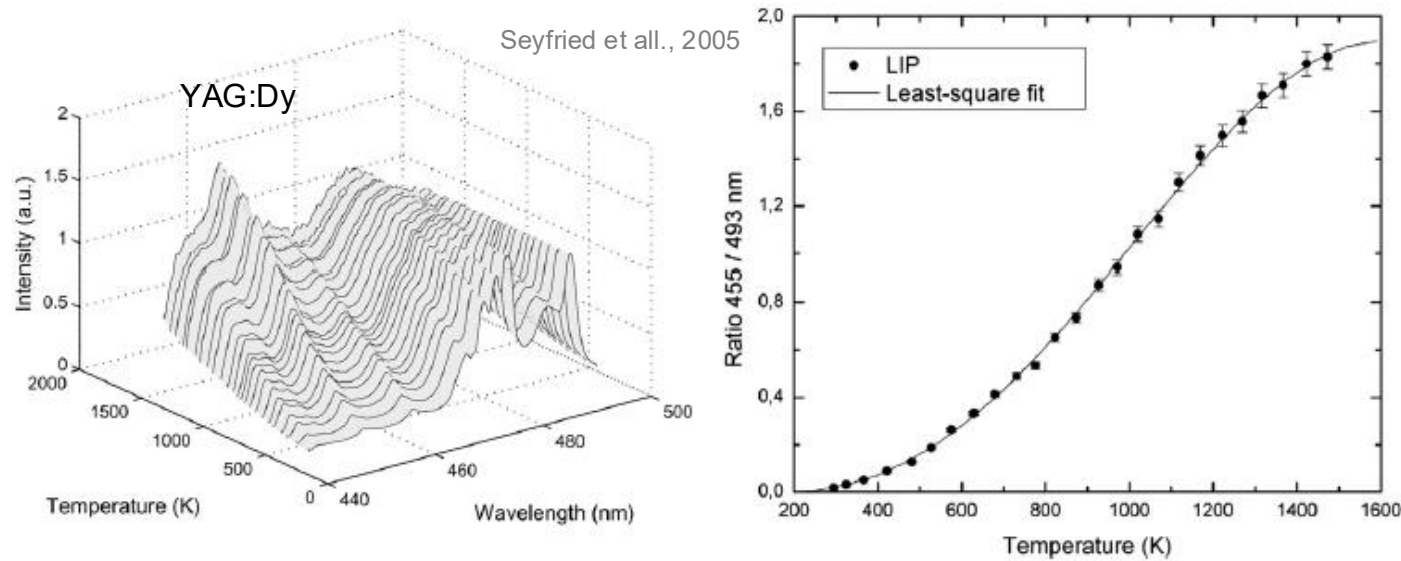
<https://ila-rnd.com/frs/>

Termometria de fósforo (*phosphor thermometry*)

- Método de medição de campo de temperatura na superfície ou no fluido baseado na variação da luminescência de um material fosforescente com a temperatura
- Fósforos termográficos (*thermographic phosphors*, TP) são aplicados à superfície ou adicionados ao escoamento que se deseja medir
- Os TP apresentam fosforescência após excitação por uma fonte de luz, cuja luminescência dependentes da temperatura:
 - Variação espectral
 - Variação no tempo de decaimento (*life-time*, τ)
- Os TP são materiais cerâmicos compostos por:

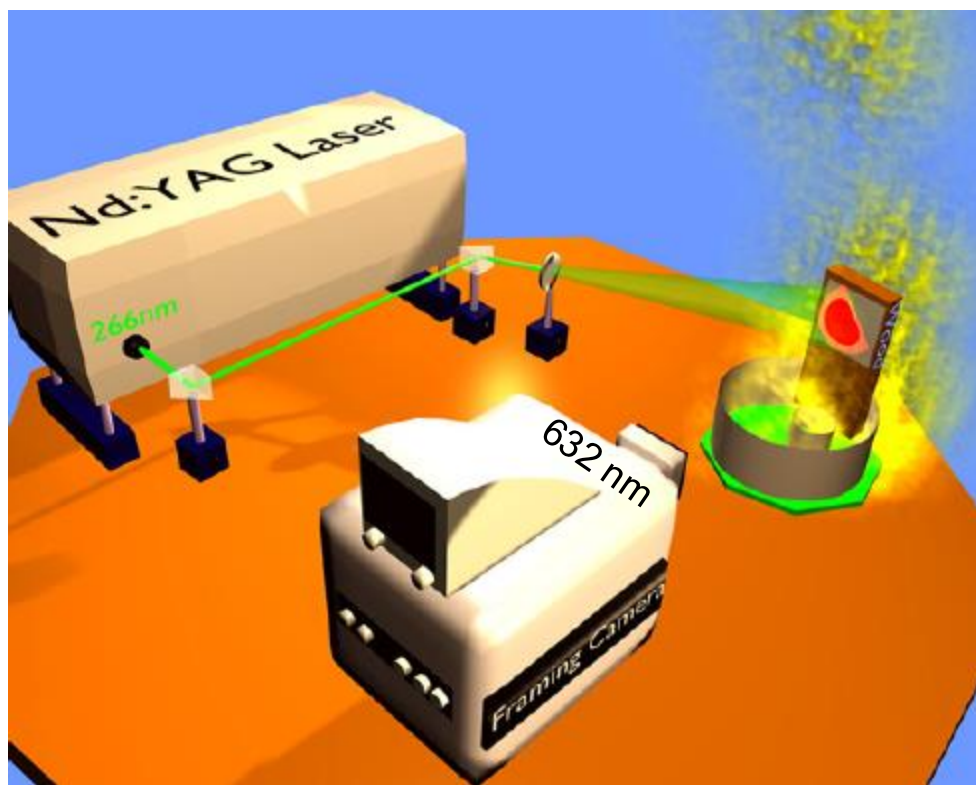


Termometria de fósforo (*phosphor thermometry*)

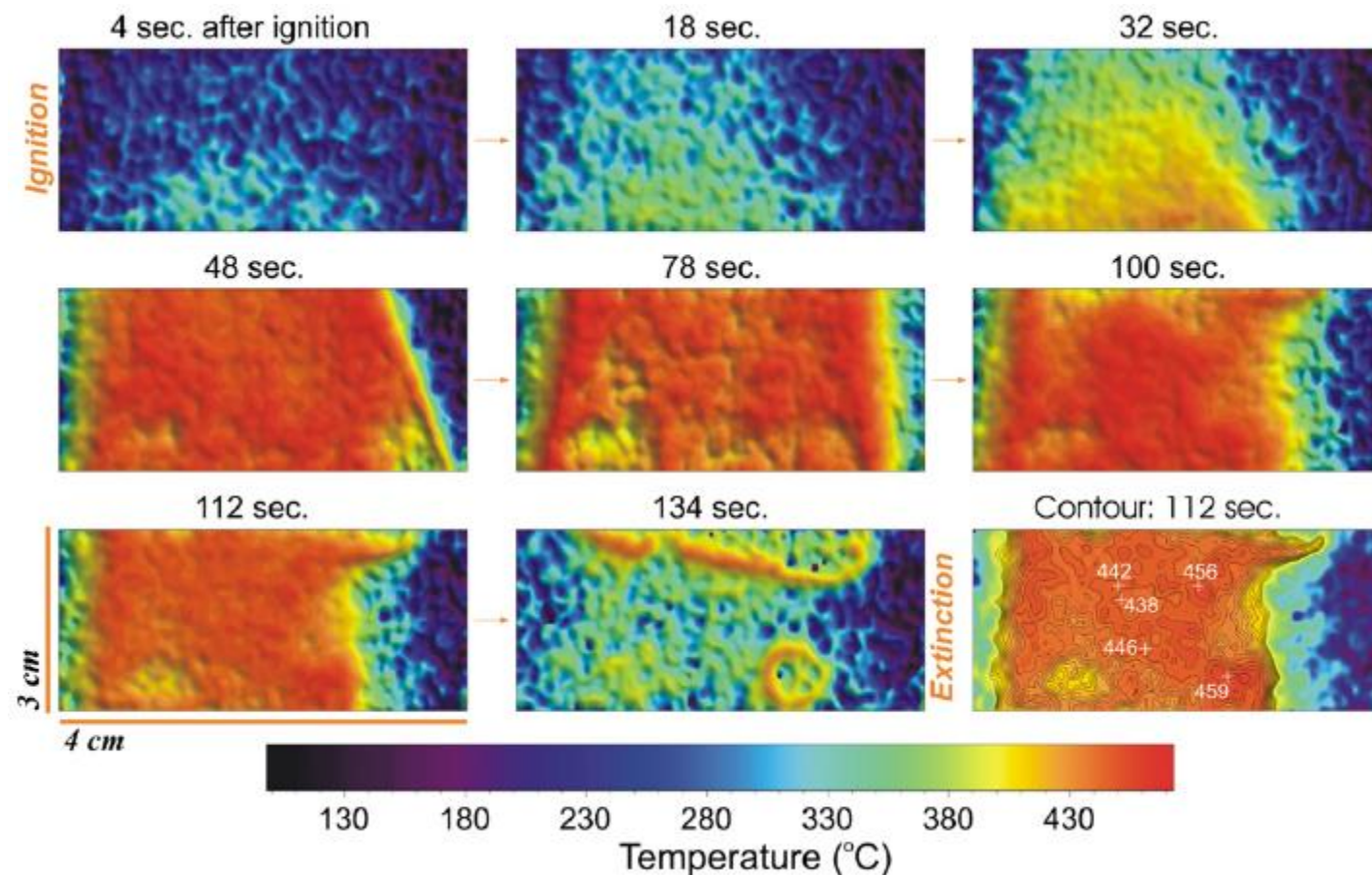


Termometria de fósforo (*phosphor thermometry*)

Temperaturas superficiais de painel de fibra de baixa densidade desde a ignição até à extinção através da técnica de tempo de decaimento de partículas de fósforo termográfico ($\text{Mg}_4\text{FGeO}_6\text{:Mn}$)

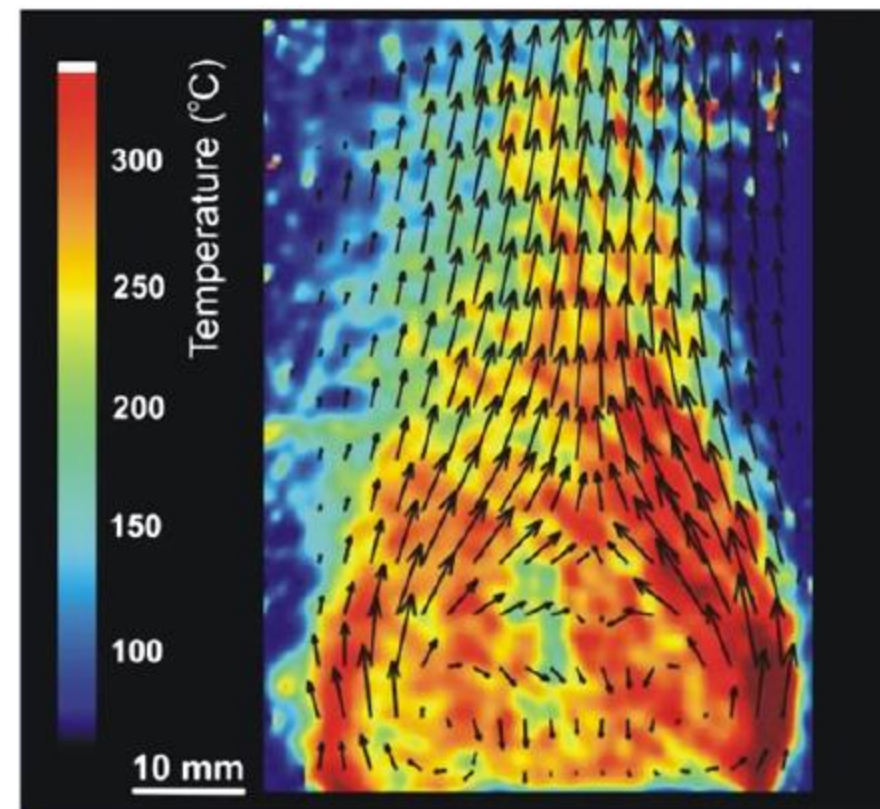
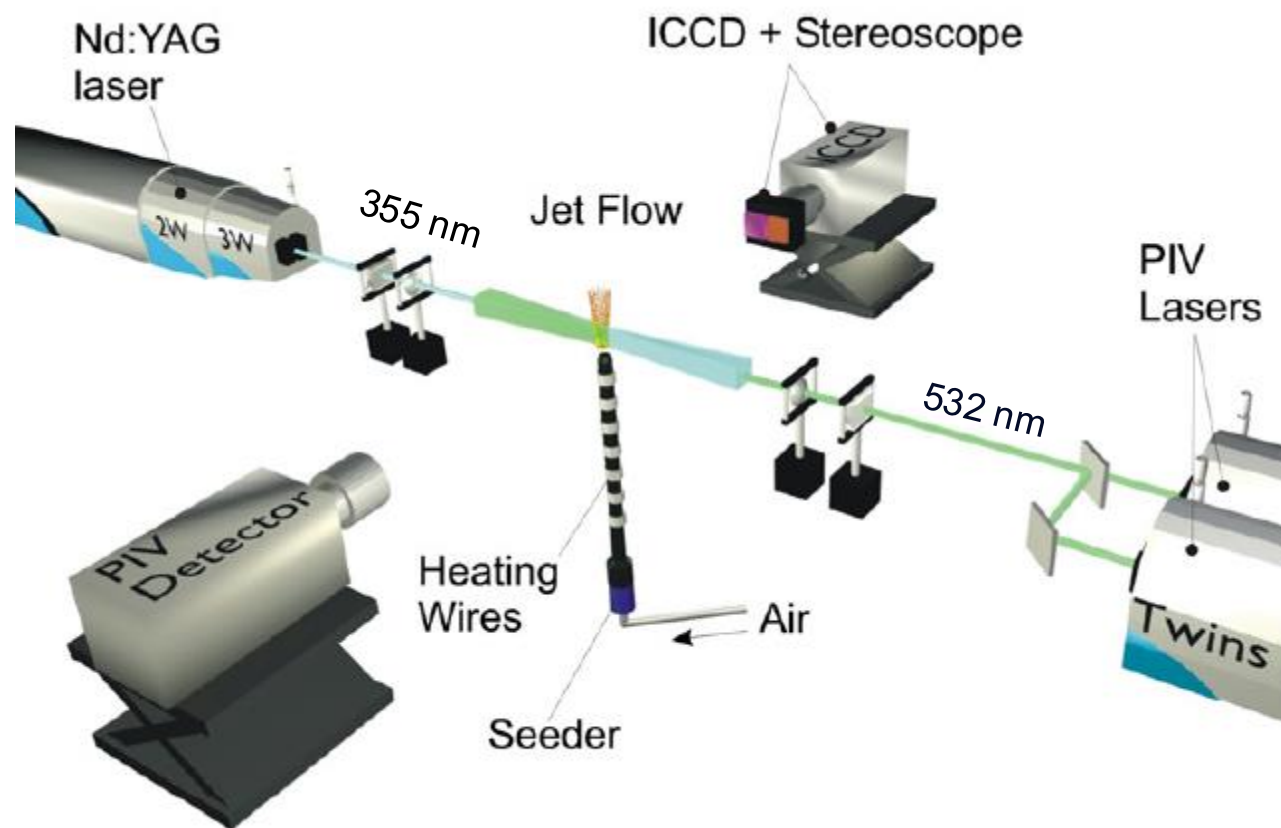


Omrane et al., Proc. Combust. Inst. (2002)



Termometria de fósforo (*phosphor thermometry*)

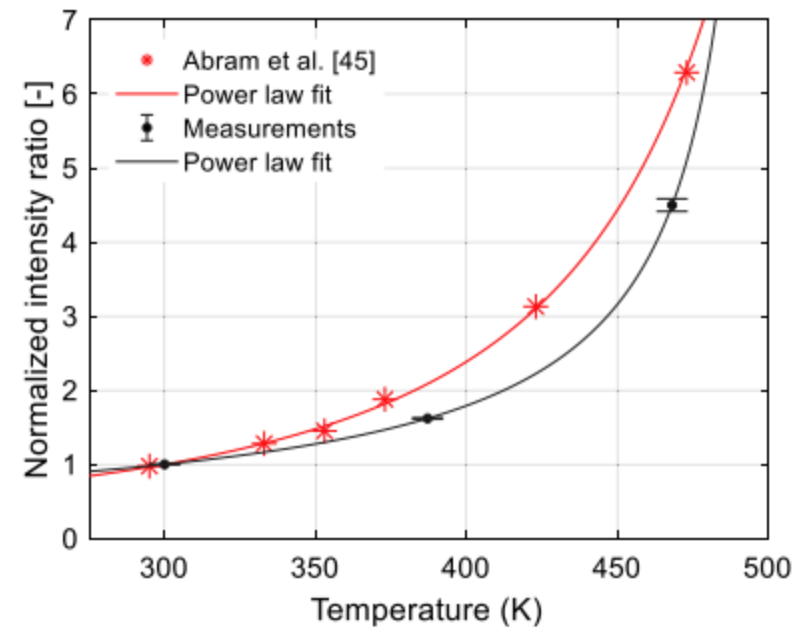
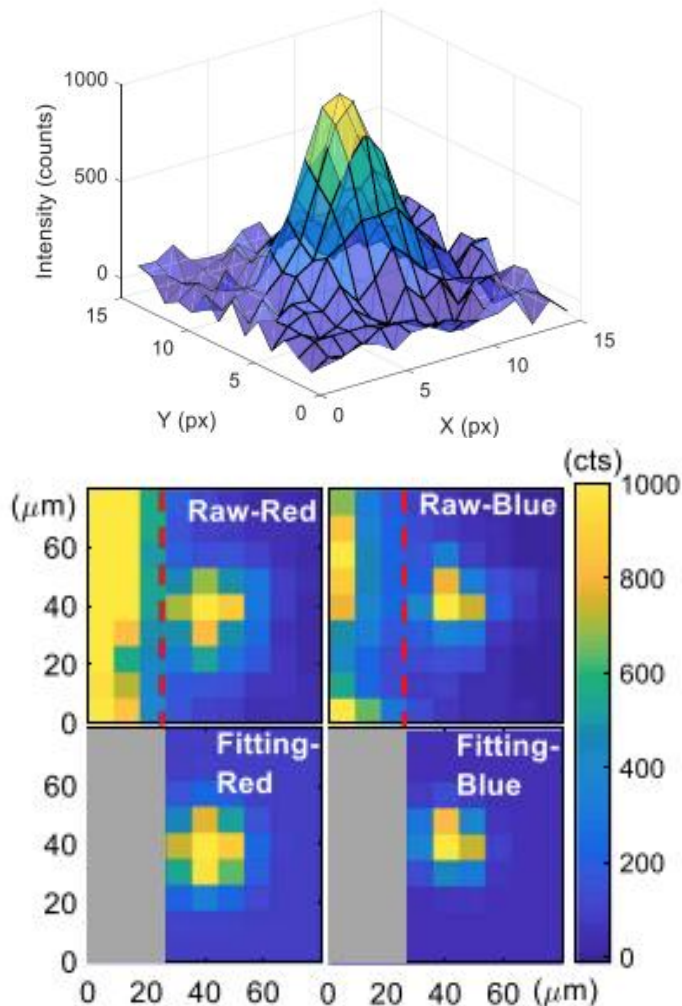
Medições simultâneas de temperatura (termometria de fósforo de duas cores) e velocidade (PIV) do fluxo turbulento atrás de um corpo cônico usando partículas de fósforo termográfico Mg_4FGeO_6



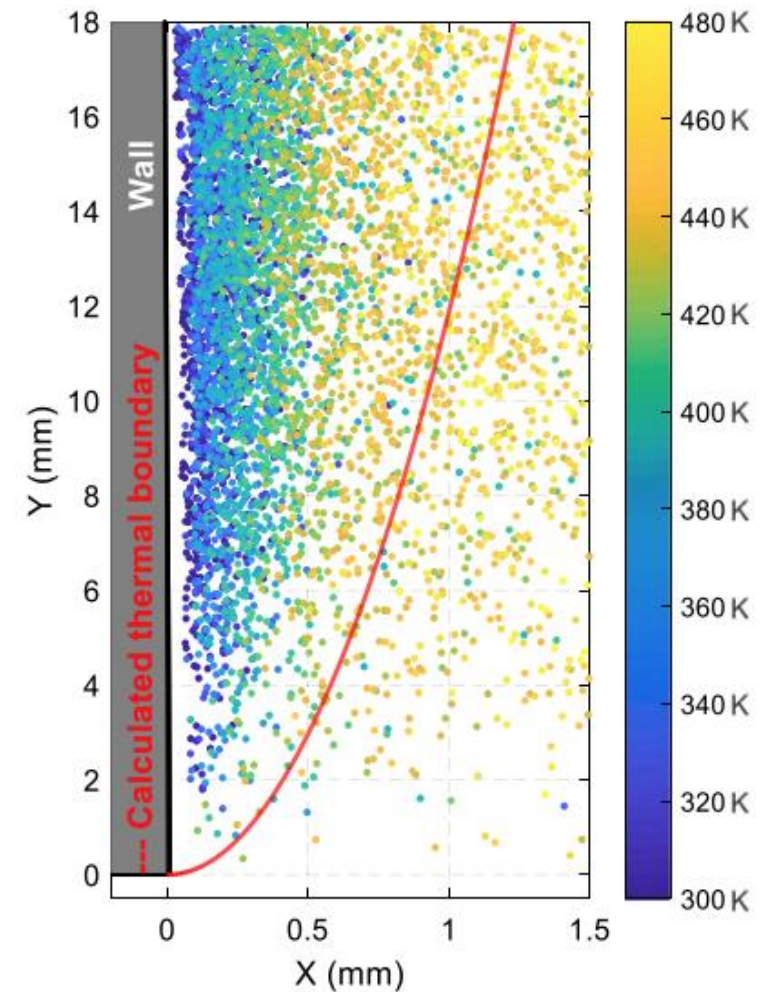
Omrane et al., Appl. Phys. B (2008)

Termometria de fósforo (*phosphor thermometry*)

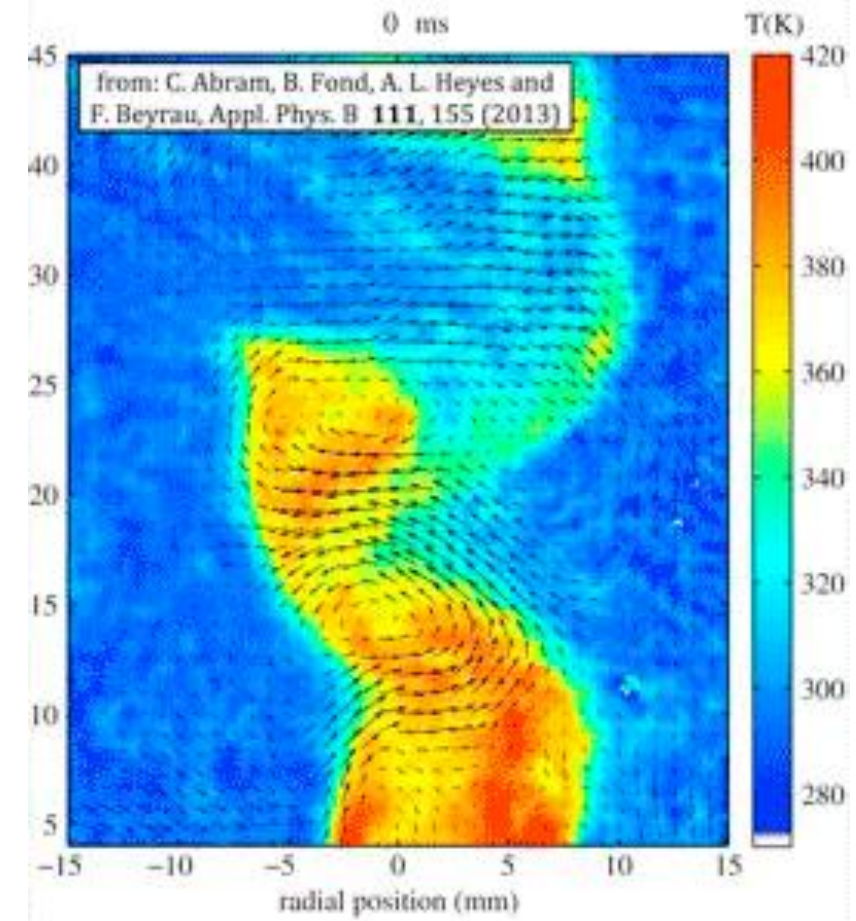
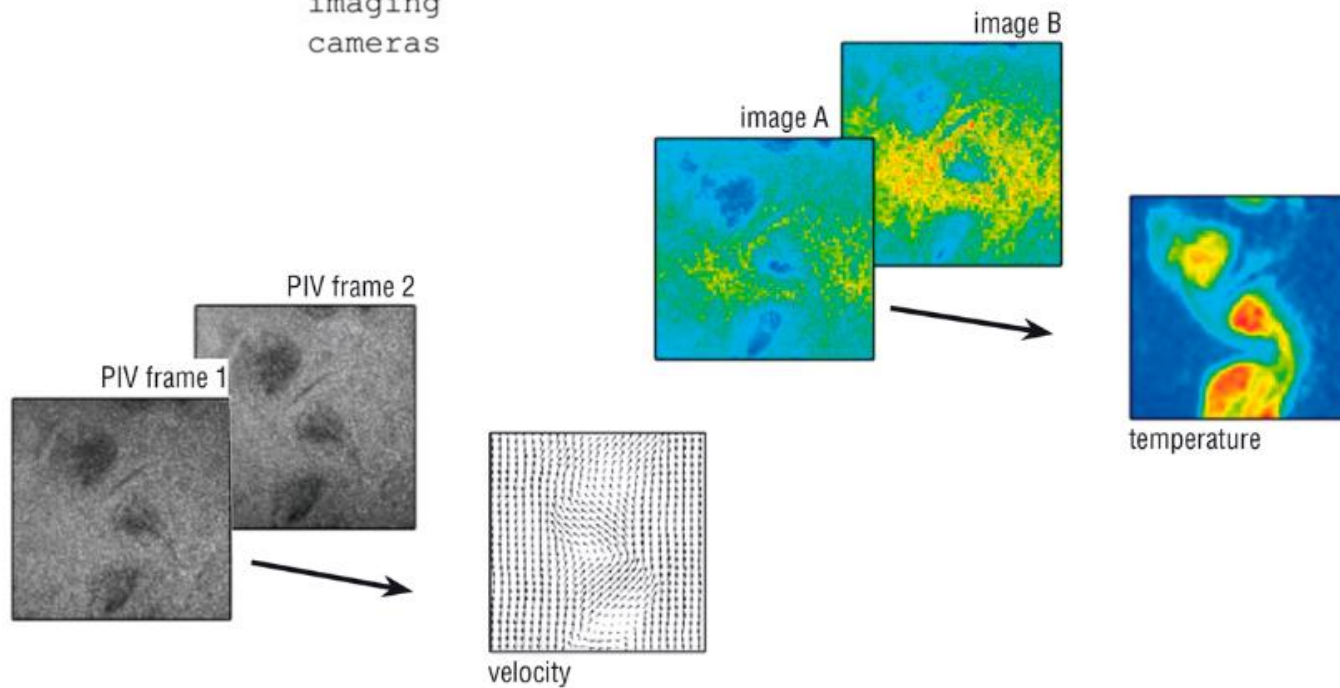
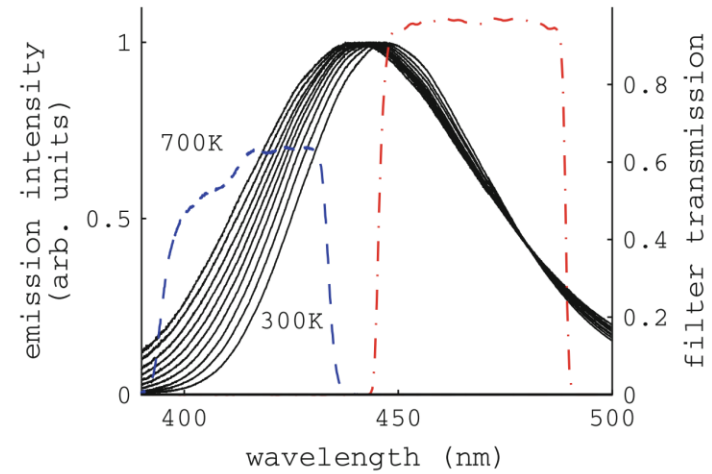
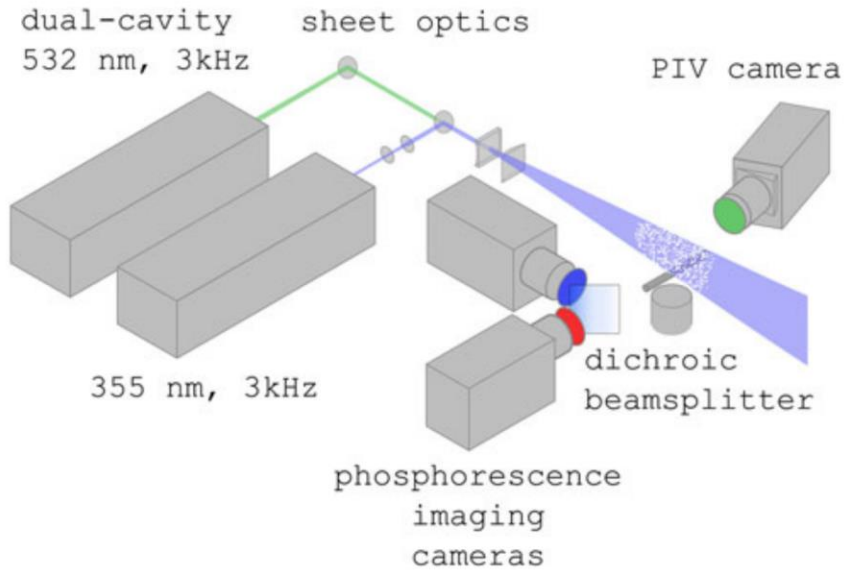
Termometria com alta resolução espacial em camadas limite por imagem macroscópica de partículas individuais de traçador de fósforo



Xuan et al., Exp. Therm. Fluid Sci.(2023)



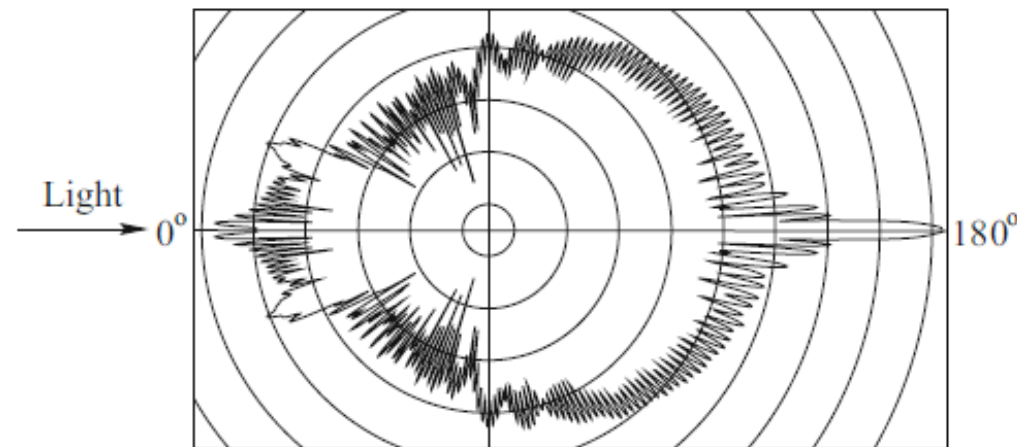
Thermographic particle image velocimetry



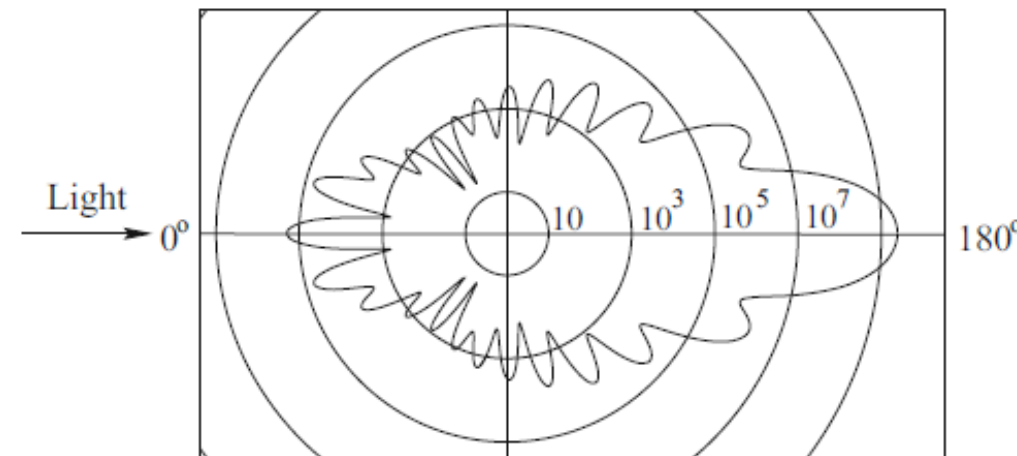
Espalhamento Mie (*Mie scattering*)

- Técnica não intrusiva para medição de propriedades de partículas (como tamanho e concentração) suspensas em um meio líquido ou gasoso (ex.: aerossóis, fuligem, gotículas de spray)
- Baseia-se no espalhamento elástico Mie: quando o comprimento de onda da luz incidente é menor que o diâmetro das partículas ($\lambda < d$)
- O espalhamento Mie é altamente direcional (ao contrário do Rayleigh) e sensível ao diâmetro da partícula
- Visualização da distribuição de partículas ou gotículas e medição do tamanho de partículas (medição da intensidade da luz espalhada em mais de um ângulo)

Raffel et al., Book (2018)



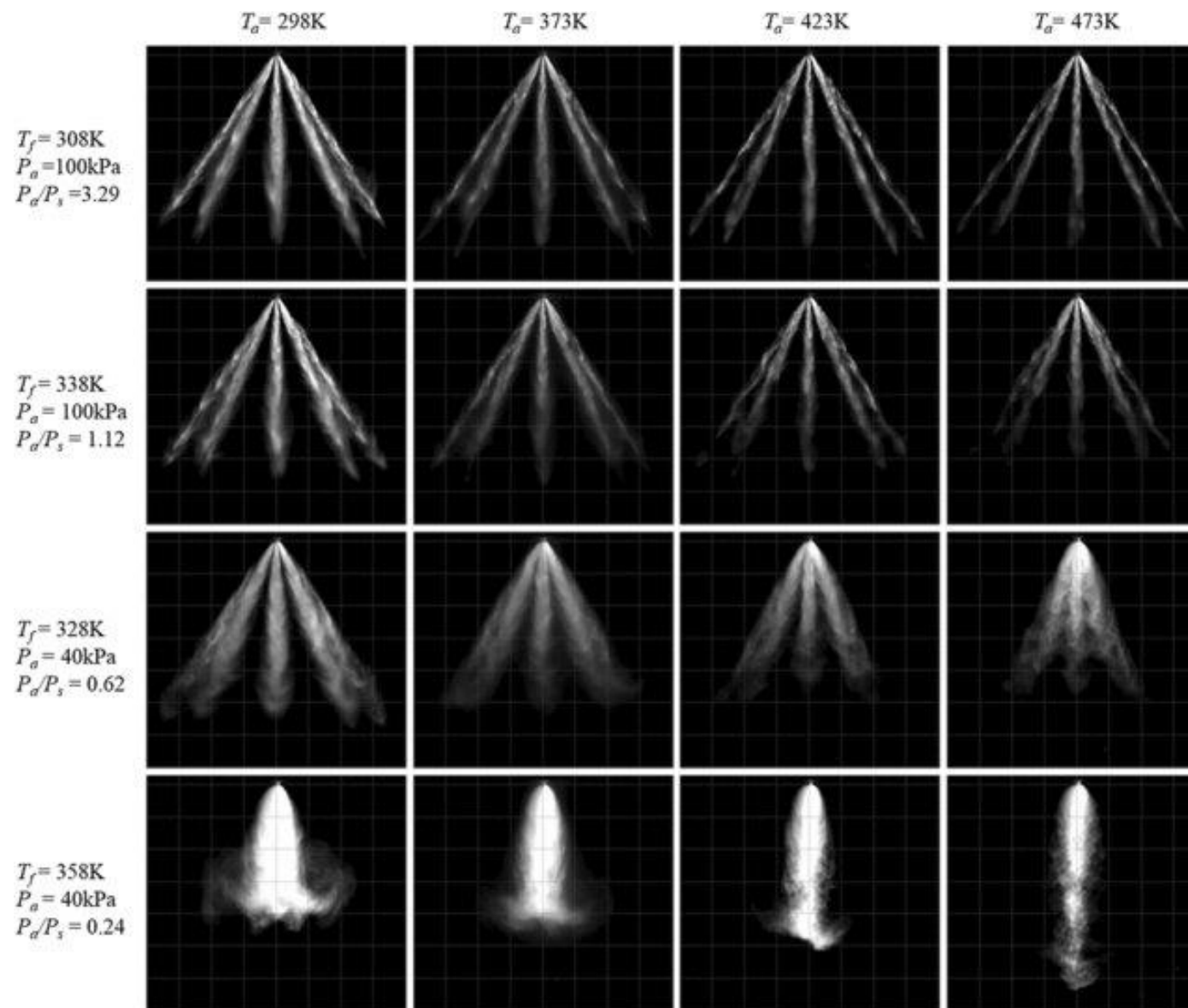
Partícula de óleo de 10µm em ar



Partícula de óleo de 1µm em ar

Espalhamento Mie (*Mie scattering*)

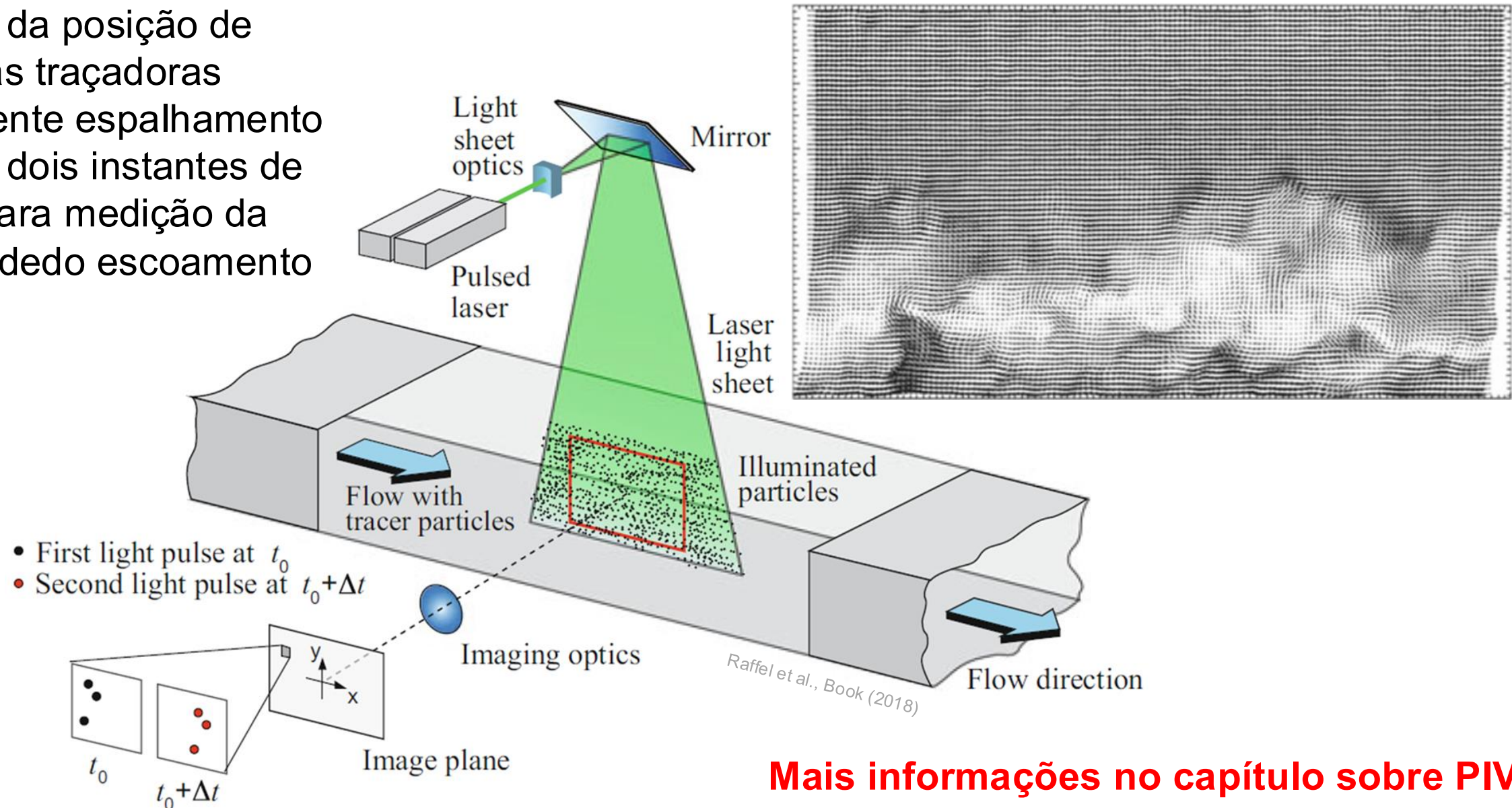
Visualização de pulverizações de combustível em várias condições



Li et al., Exp Fluids (2019)

Velocimetria por imagem de partículas (*particle image velocimetry, PIV*)

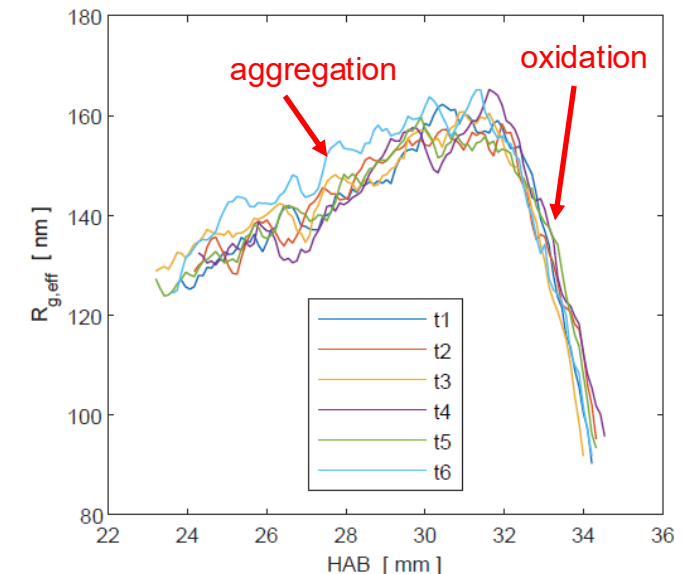
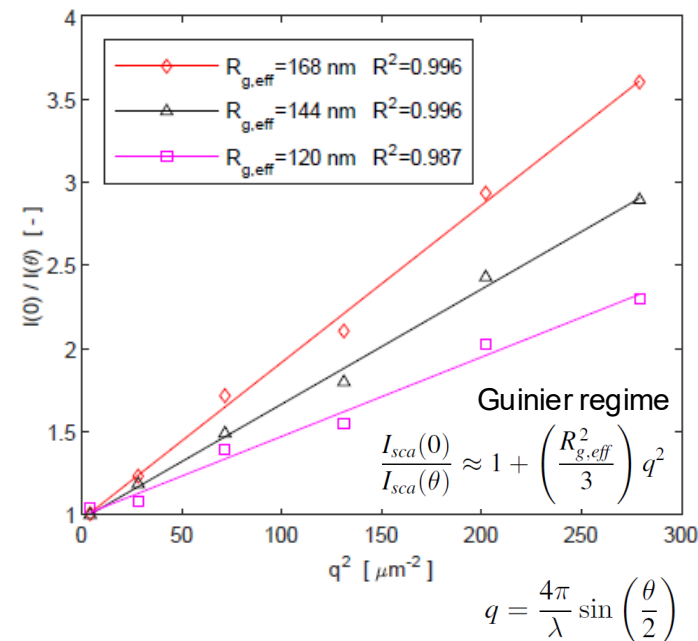
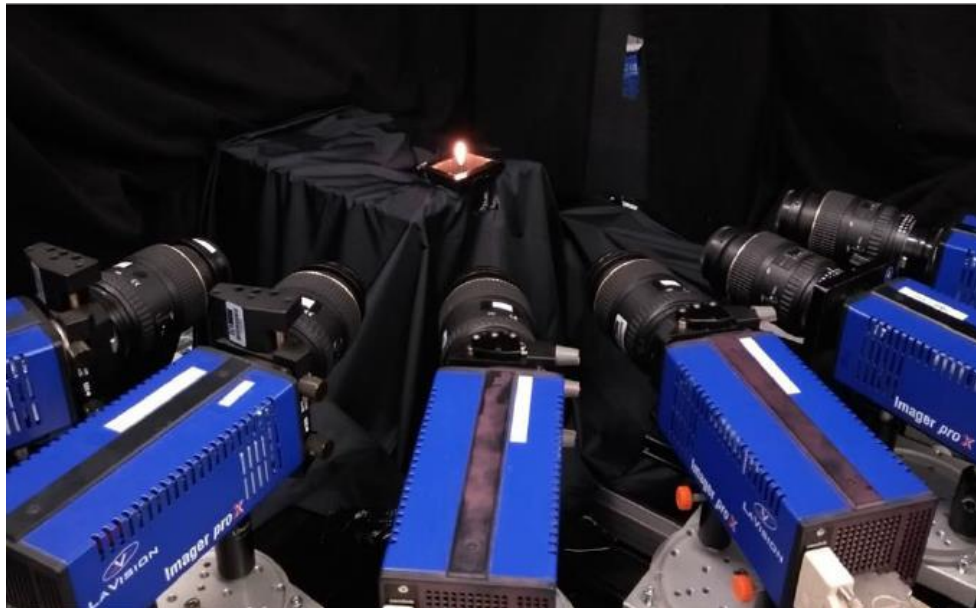
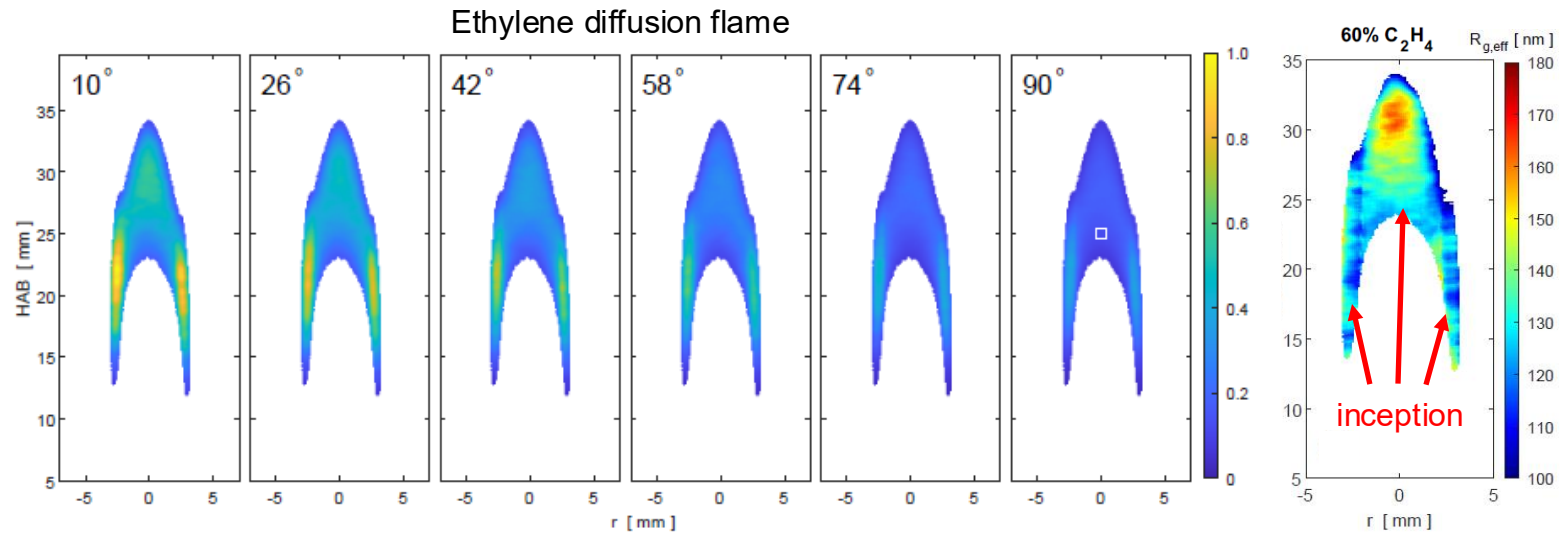
Imagem da posição de partículas traçadoras (geralmente espalhamento Mie) em dois instantes de tempo para medição da velocidade do escoamento



Mais informações no capítulo sobre PIV

Single-shot two-dimensional multi-angle light scattering (2D-MALS)

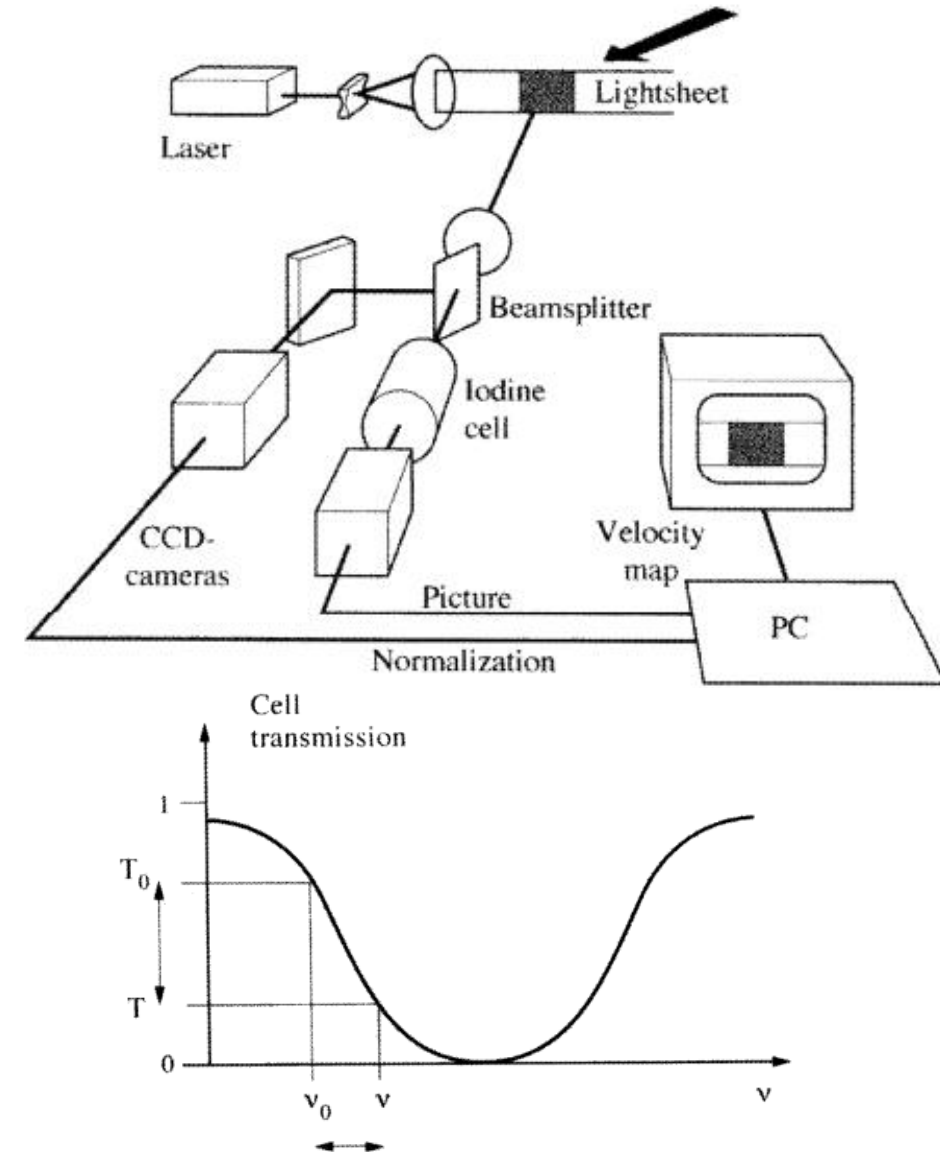
Campos instantâneos de raio de giro efetivo para monitorar a formação de fuligem e a síntese de nanopartículas em chamas



Martins et al., Appl. Phys. B (2021)

Doppler global velocimetry (DGV) ou planar Doppler velocimetry (PDV)

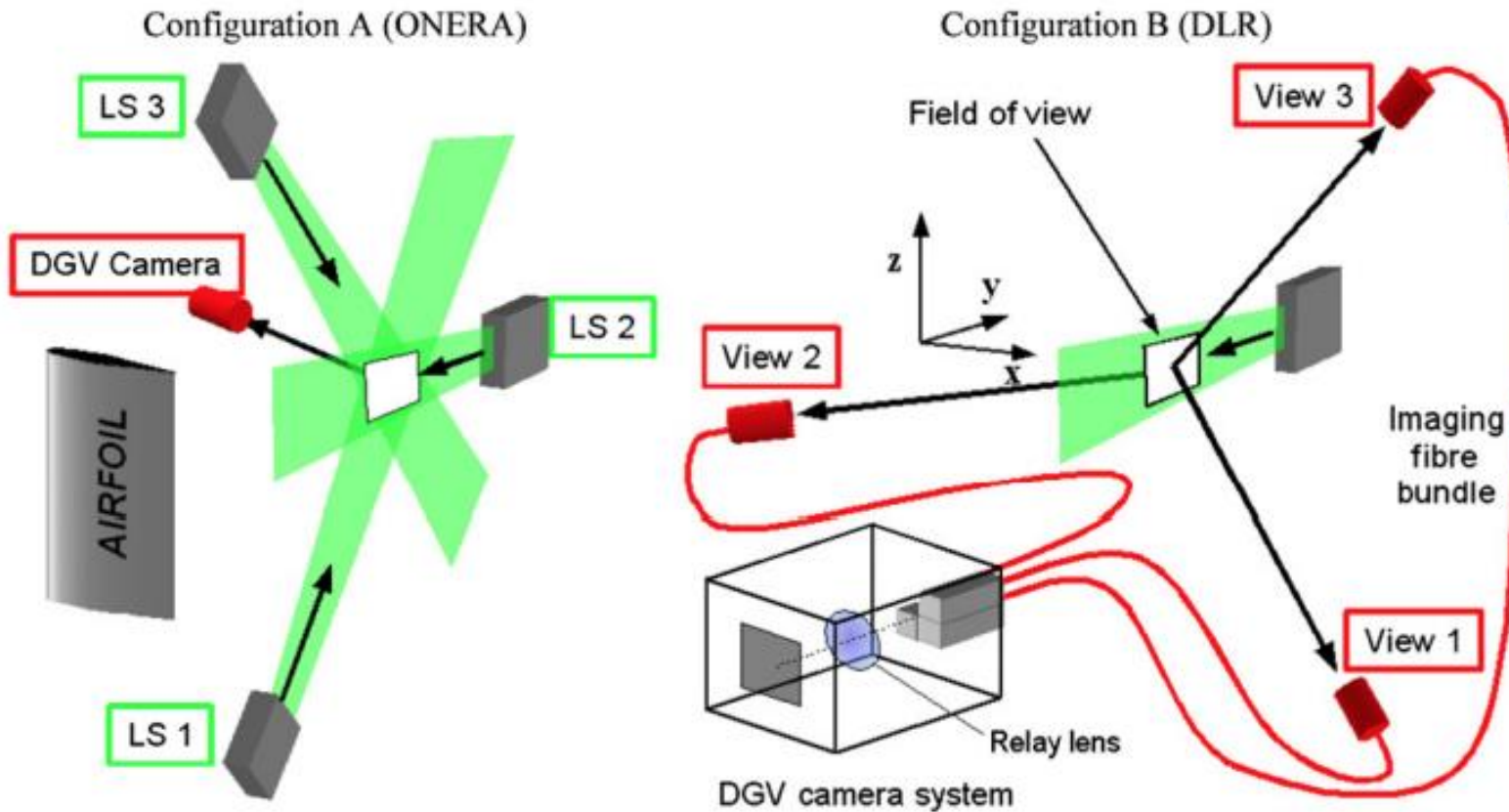
- Técnica não intrusiva para medição de velocidade no plano em escoamento de fluidos
- Baseia-se no efeito Doppler: a frequência da luz laser espalhada por partículas traçadoras é deslocada proporcionalmente à velocidade da partícula
- O escoamento é iluminado por um plano de luz e o deslocamento de frequência é medido através da variação de intensidade luminosa registrada por uma câmera equipada com um filtro de absorção molecular (ex.: célula de iodo)
- Mede-se a magnitude da velocidade pela razão entre a intensidade filtrada e não filtrada (câmera de referência)
- Determina-se a direção do vetor velocidade pela direção da luz incidente e direção de observação da câmera



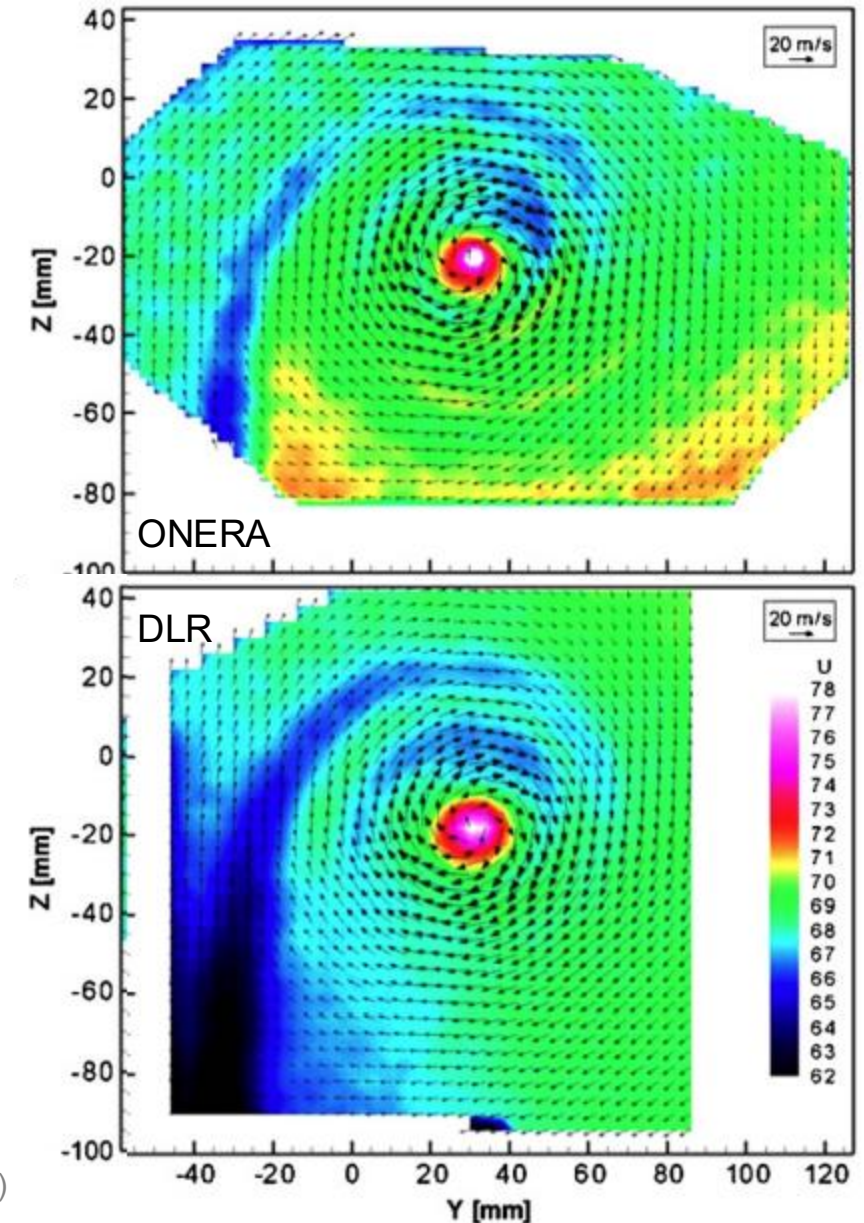
Schodl et al., Aerospace Science and Technology (2002)

Doppler global velocimetry (DGV) ou planar Doppler velocimetry (PDV)

Medição das três componentes de velocidade no plano em escoamento a jusante de uma aerofólio com $U_\infty = 67 \text{ m/s}$ e $\alpha = 8,5^\circ$ usando DGV



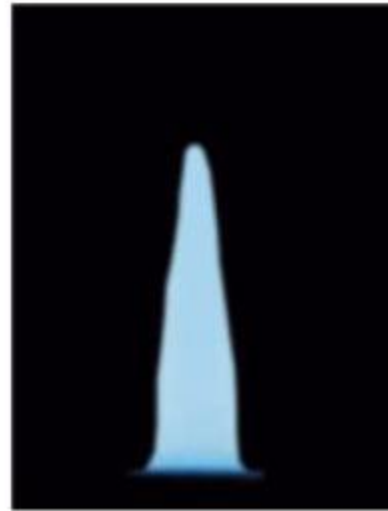
Willert et al. Mes. Sci. Technol. (2007)



Combinação de diferentes medições



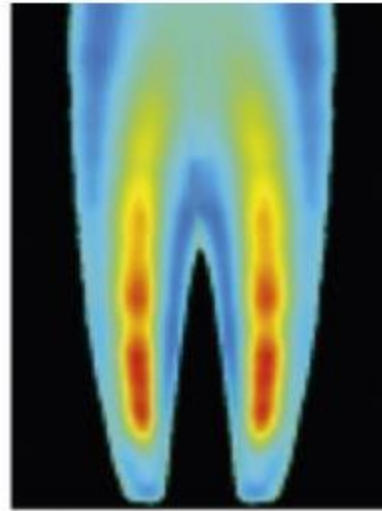
Photo



Tracer-LIF
(Toluol)

Fuel

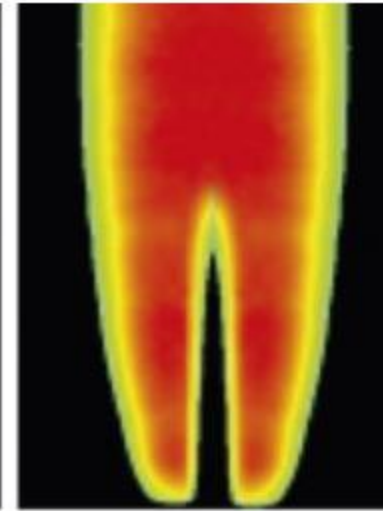
Zone in front
Flame Front



OH-LIF

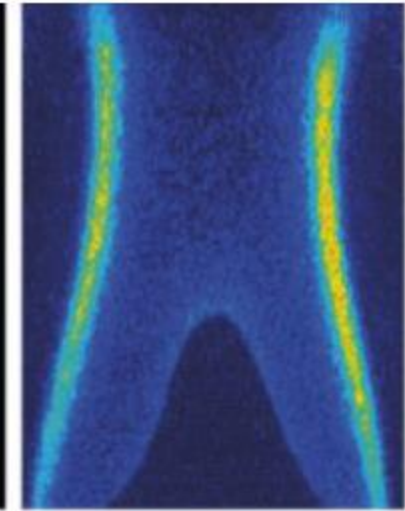
OH

Zone Behind
Flame Front



Rayleigh-
Scattering

Temperature

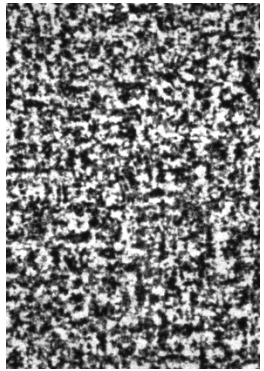


LII

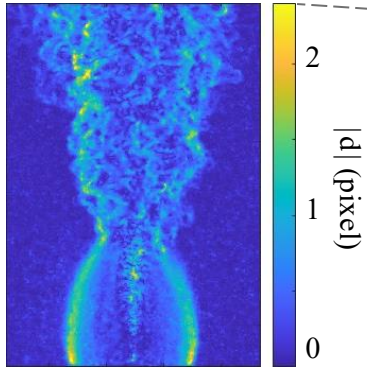
Soot

Combinação de diferentes medições

Background-oriented schlieren tomography

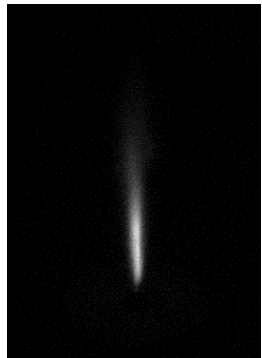


Pattern image

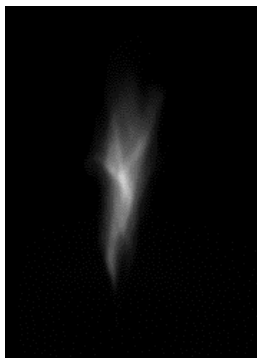


Deflection field

Emission tomography

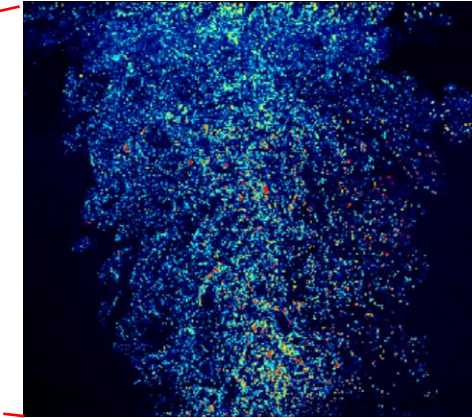


CH* image

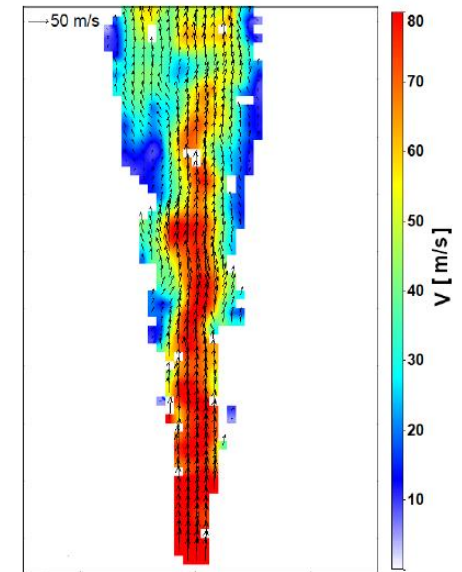


SrOH image

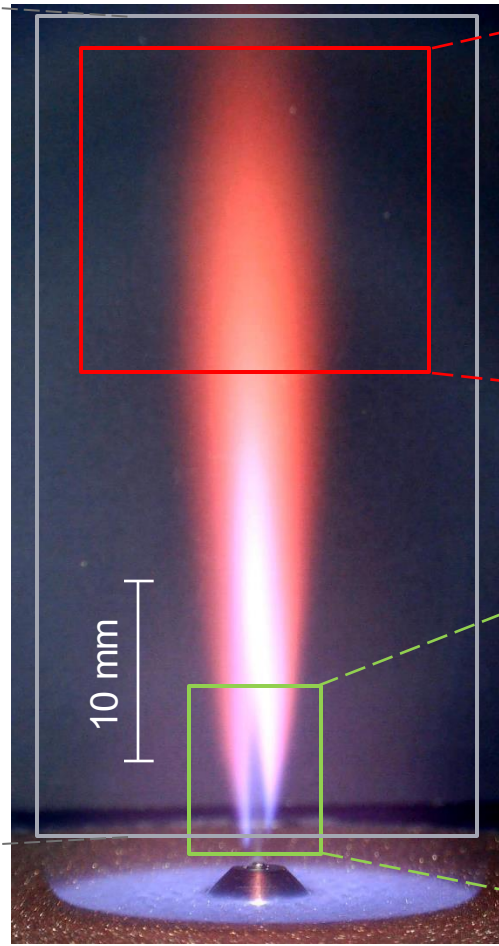
Mie scattering from aggregates
(0.2 mol/L iron pentacarbonyl in ethanol)



Particle image velocimetry (PIV)



Mie scattering from spray



SpraySyn burner