

Créditos: Andreas Glindemann, ESO Garching

Astrofotónica

instrumentação óptica avanzada em astronomia

Askari Ghasempour^{1,2}
Paulo V. S. Marques^{2,3}
Paulo J. V. Garcia^{1,4}
António P. Leite³

1. Centro de Astrofísica da Universidade do Porto
2. UOSE-INESC Porto
3. Departamento de Física, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto
4. Departamento de Engenharia Física, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto

Os extraordinários avanços científicos registados na Astronomia, particularmente desde os anos cinquenta do século passado, têm sido sustentados por progressos notáveis nas técnicas e instrumentos de observação.

De facto, na Astronomia como em muitos outros domínios científicos, inovações tecnológicas conduziram a grandes descobertas e, reciprocamente, problemas em aberto na investigação em Astronomia estimularam a invenção de metodologias inovadoras e o desenvolvimento de instrumentação altamente sofisticada [1]. O papel da inovação tecnológica no desenvolvimento da Astronomia não deve, de modo algum, ser esquecido ou minimizado. Aliás, os astrónomos têm estado muito atentos, ao longo das últimas décadas, aos progressos registados em diversas tecnologias, deles retirando partido de imediato.

As observações astronómicas respeitam, essencialmente, à detecção e análise de radiação electromagnética/fotões, em gamas de frequência que abrangem todo o espectro, das radiofrequências à radiação X e gama, de acordo com a Física dos processos sob investigação. As considerações

seguintes, todavia, centram-se na região óptica, normalmente definida como abrangendo os comprimentos de onda no intervalo de $0.3 \mu\text{m}$ (a atmosfera terrestre é opaca no ultravioleta) a $30 \mu\text{m}$. É habitual distinguir-se, nesta gama, as regiões do visível ($0.4 \mu\text{m}$ a $0.7 \mu\text{m}$), do infravermelho próximo ($0.7 \mu\text{m}$ a $5 \mu\text{m}$) e do infravermelho médio ($5 \mu\text{m}$ a $30 \mu\text{m}$).

As observações na região óptica dirigem-se, genericamente, à obtenção de imagens com resolução angular adequada em bandas espectrais de interesse, assim como à análise espectroscópica dessa radiação. Em particular, há grande interesse pelas observações no infravermelho, que fornecem informação fundamental para as investigações sobre o universo primitivo, os exo-planetas, e os núcleos activos de galáxias, entre outros temas.

[1] C.R. Kitchin, "Astrophysical Techniques", 5.th ed., CRC (2009)

TELESCÓPIOS ASTRONÓMICOS: DE LIPPERHEY AO TELESCÓPIO HALE

A invenção do telescópio é geralmente atribuída a Hans Lipperhey (Middelburg, Zeeland, c.1570–1619), que solicitou uma patente em 1608. Com base em informações sobre esta invenção, Galileo Galilei (1564–1642) construiu telescópios que lhe permitiram observar crateras da Lua e satélites de Júpiter, conseguindo atingir uma ampliação de 30. Os telescópios de Galileu eram construídos com uma lente convergente alinhada com uma segunda lente divergente, com pontos focais F comuns.

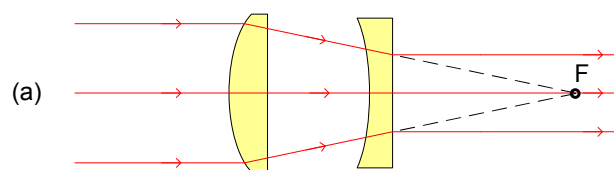


Figura 1. Telescópios refractores. (a) Configuração de Galileu;

Em alternativa, a configuração de Kepler (1571-1630) utiliza duas lentes convergentes, com foco real F comum e ampliação igual à razão das distâncias focais das lentes.

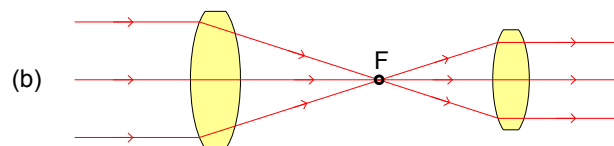


Figura 1. Telescópios refractores. (b) Configuração de Kepler.

Estes **telescópios refractores** apresentam limitações importantes:

- para processar fluxos elevados de radiação, o diâmetro D da lente primária deve ser grande, o que implica dificuldades de fabricação, massa significativa e consequentes problemas de deformação mecânica;

- para atingir resolução angular elevada, é essencial que sejam corrigidas as aberrações ópticas geométricas (através de formas optimizadas e precisas das superfícies ópticas das lentes) e eliminadas as aberrações cromáticas (devidas à dispersão introduzida pelos vidros, cujo índice de refração varia com o comprimento de onda) [2].

Esta última limitação é muito séria.

Para ultrapassar estes problemas, foram desenvolvidos **telescópios reflectores** de vários tipos,

como o de Isaac Newton (1642-1727), e o de Cassegrain (c. 1625–1693), cujas diversas variantes são adoptadas nos modernos telescópios.

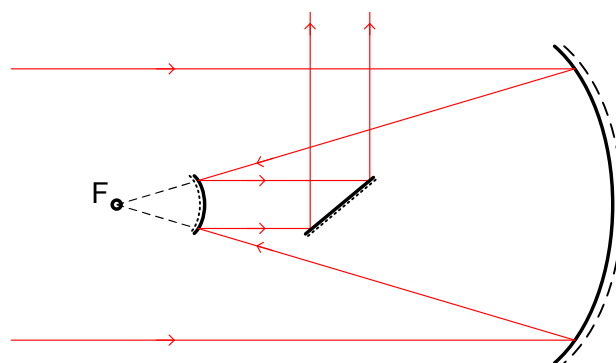


Figura 2. Telescópio reflector, configuração do tipo Cassegrain.

O carácter acromático da reflexão óptica é a vantagem fundamental dos telescópios reflectores, mantendo-se todavia a exigência de superfícies ópticas optimizadas e precisas para eliminar as aberrações geométricas [2]. Um diâmetro elevado do reflector primário (D) é essencial para captar fluxo de radiação suficiente e ser obtida elevada resolução angular.

Quanto à resolução angular, embora a óptica geométrica (aproximação correspondente ao limite de comprimento de onda da radiação λ nulo) preveja, para um telescópio reflector sem aberrações, uma imagem pontual de um objecto pontual no infinito, os efeitos de difracção estudados pela Óptica Física (λ não nulo) resultam efectivamente numa imagem não pontual desse objecto, conhecida por **padrão de Airy**.

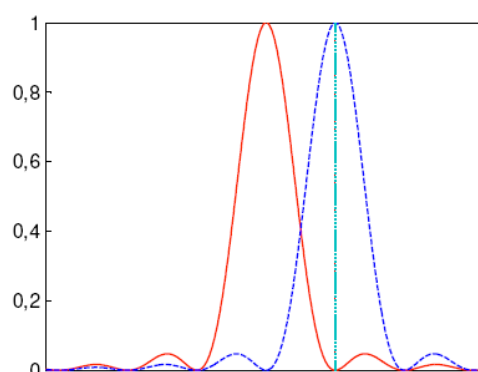


Figura 3. Padrão de Airy. Perfis de intensidade óptica das imagens de dois objectos pontuais no infinito, produzidos por um sistema óptico sem aberrações, no limite de resolução de Rayleigh.

A resolução angular $\Delta\theta$, adoptando o critério de Rayleigh, é dada por $\Delta\theta=1.22\lambda/D$; decorre imediatamente a necessidade de D elevado. O telescópio Hale ($D=5.1\text{m}$), que foi o maior telescópio terrestre entre 1948 e 1993, apresenta uma resolução angular teórica de 130 nrad, ou seja, 27 mas (1 mas = 1 milissegundo de arco). Em comparação, a resolução do olho humano é de 1.5 a 3.0 mrad.

[2] E. Hecht, "Óptica", 2ª ed., Fundação C. Gulbenkian (2002)

GRANDES TELESCÓPIOS TERRESTRES

Sucederam ao telescópio Hale, nos últimos 25 anos, diversos grandes telescópios com valores de D na gama de 8–10 m [1], de que são exemplos: Subaru, Keck I e Keck II, Large Binocular Telescope LBT, Gran Telescopio de Canarias GTC e Very Large Telescope VLT (constituído por 4 telescópios UT, $D=8.2$ m) [3].

Todos estes grandes telescópios são sistemas complexos, constituídos por uma fusão de componentes mecânicos, ópticos, optoelectrónicos, electrónicos e computacionais, e recorrem a tecnologias avançadas. Dois tipos de elementos merecem destaque particular:

- Reflector primário: três soluções diferentes foram desenvolvidas, recorrendo a espelhos monolíticos *honeycomb* (LBT), a reflectores monolíticos de pequena espessura e controlo activo de forma (VLT), e a reflectores segmentados – matrizes de dezenas de elementos reflectores hexagonais com posicionamento activo (GTC).
- Detectores: foram desenvolvidas matrizes CCD de elevada dimensão ($>10000 \times 10000$ elementos) em silício, funcionando com baixo ruído e elevada gama dinâmica ($>10^5$ vs. 10^3 no caso de chapas fotográficas). Nas regiões do infravermelho, são correntemente usadas matrizes de outros elementos semicondutores (2000×2000 elementos).

Um aspecto fundamental da construção e operação destes grandes telescópios centra-se na compensação dos efeitos da turbulência atmosférica. De facto, considerando a frente de onda óptica plana proveniente de um objecto pontual no infinito, ocorre deformação dessa frente de onda (variável rapidamente no tempo) devido à turbulência da atmosfera no caminho óptico da radiação. Define-se, habitualmente, o comprimento de coerência de Fried (r_0) como a dimensão transversal em que o desvio da frente de onda relativamente à frente de onda ideal plana é inferior a 1 rad; no visível, $r_0 \sim 12$ cm tipicamente. Assim, a utilização directa de D elevado aparece comprometida, surgindo duas estratégias possíveis:

- **Telescópio espacial:** desaparece, obviamente, o problema da turbulência atmosférica, sendo possíveis resultados espectaculares como foi demonstrado com o telescópio espacial Hubble ($D=2.4$ m), lançado em 1990 [4]. Contudo, a complexidade tecnológica é muito elevada, tal como o custo de construção (o custo de um telescópio espacial é de várias vezes o de um telescópio de grande abertura (ELT), i.e. da ordem dos G€) e manutenção.

- **Óptica adaptativa (AO):** é incorporado no grande telescópio terrestre um sistema optoelectrónico, que opera em ciclo fechado e com tempo de resposta muito curto, capaz de compensar as deformações introduzidas pela turbulência atmosférica na frente de onda óptica (Fig. 4).

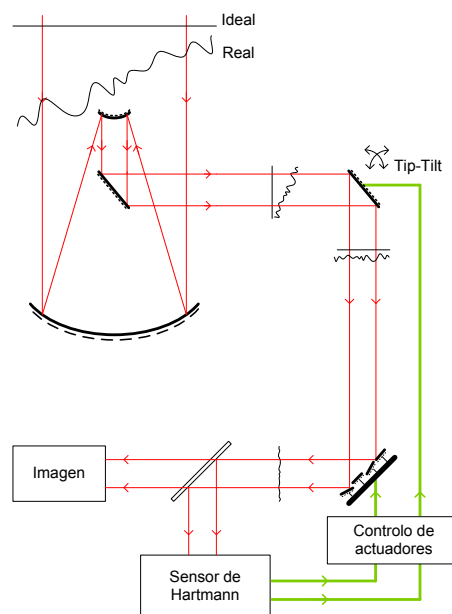


Figura 4. Correção da frente de onda deformada (inclinação, corrugação) pela turbulência atmosférica pelo espelho de *tip-tilt* e pelo espelho deformável, a partir da informação do sensor.

Um sistema AO tem três componentes fundamentais: sensor de frente de onda, espelho deformável e espelho de *tip-tilt*, e controladores/actuadores de resposta rápida. O sensor determina a deformação da frente de onda de uma fonte pontual de referência, suficientemente intensa e angularmente próxima do objecto sob observação. Na ausência de uma tal fonte, pode ser usada uma solução fotónica, recorrendo a um feixe laser potente (tip. 10 W, $\lambda=589$ nm - coincidente com a linha D do sódio), enviado por um telescópio auxiliar. O feixe laser forma uma estrela artificial por excitação/emissão óptica na alta atmosfera (tip. 90 km), numa orientação angular próxima do objecto. O sensor de Hartmann (Fig. 5.a) é constituído por uma matriz de lentes associada a uma matriz de fotodetectores; cada lente forma uma imagem, correspondente à secção da frente de onda na sua abertura, sobre uma célula de 4 fotodetectores (detector de quadrantes). Não existindo erro na frente de onda (Fig. 5.b), os sinais dos quatro fotodetectores de cada célula estão equilibrados; ocorrendo erro na frente de onda, o desvio da imagem na respectiva célula (Fig. 5.c) fornece indicação do tipo de erro. Um desvio global devido a inclinação simples da frente de onda conduz a uma actuação num espelho corrector de *tip-tilt* (Fig. 4). Corrigido esse desvio angular médio, os erros restantes de corrugação da frente de onda são determinados e constituem o sinal de actuação rápida (por actuadores piezoeléctricos) sobre o espelho deformável, que imprime uma corrugação à frente

[3] <http://subarutelescope.org>; <http://www.keckobservatory.org>; <http://lbtwww.arcetri.astro.it>; <http://www.gtc.iac.es>; <http://www.eso.org>
[4] <http://hubblesite.org>

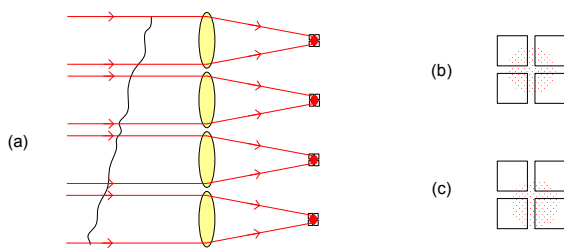


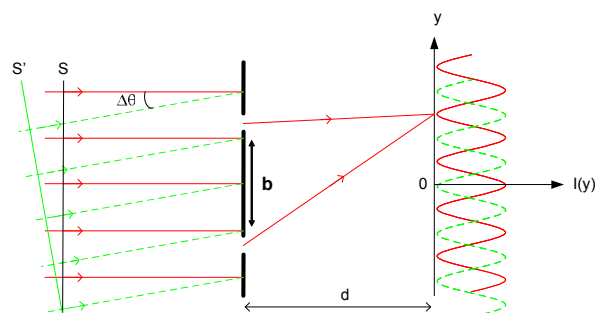
Figura 5. Sensor de Hartmann. (a) Matrizes de lentes e fotodetectores de quadrantes. Imagens sobre o fotodetector de quadrantes da secção de frente de onda (b) sem erro e (c) com erro.

de onda oposta à causada pela atmosfera, cancelando-a desse modo.

A instalação de sistemas AO nos modernos grandes telescópios permite atingir resoluções angulares próximas do valor teórico imposto pela difracção. Contudo, questões importantes ainda em aberto na Astronomia exigem aberturas ainda maiores (ELTs) e resolução angular mais elevada, bem como espectroscopia multiplexada de alta resolução, donde a necessidade de novas soluções tecnológicas. Em anos recentes, tem-se assistido ao desenvolvimento de um novo domínio - a Astrofotónica, entendida como a aplicação dos conceitos, princípios e dispositivos da Fotónica à Astronomia [5]. São exemplos a utilização de lasers, de fibras ópticas de diversos tipos, e a aplicação de dispositivos integrados ópticos.

INTERFEROMETRIA ÓPTICA EM ASTRONOMIA

Um exemplo de técnica de observação avançada que permite resolução angular elevada, com resultados demonstrados e que já recorre a dispositivos fotónicos, é a interferometria óptica. Num sistema interferométrico, radiação proveniente de vários telescópios (localizados num observatório a distâncias mútuas que podem atingir centenas de metros) é combinada de modo coerente, ou seja, mantendo a informação de fase das ondas ópticas captadas por cada um dos vários telescópios [6]. Em termos muito gerais, pode assimilar-se o conjunto de telescópios combinados interferometricamente a uma abertura óptica sintética com dimensão correspondente à distância entre telescópios do sistema (logo proporcionando elevada resolução angular, tipicamente melhor que 5 nrad, ou 1 mas). Foi implementado um número já significativo de interferómetros ópticos astronómicos, desde o GI2T (1985) até ao VLTI-UT (Paranal, ESO, 2001) e VLTI-AT [7]. A bem conhecida experiência das fendas de Young [2] ajuda a compreender o essencial das características de um interferómetro astronómico (Fig. 6).



Considera-se, por simplicidade, uma análise a duas fontes pontuais no infinito separadas angularmente de $\Delta\theta$.
Figura 6. Experiência das fendas de Young. Padrões de interferência sobrepostos, correspondentes a fontes pontuais no infinito separadas angularmente de $\Delta\theta$.

dimensões. Uma fonte pontual no infinito e centrada (S) emite radiação (onda plana axial, comprimento de onda λ) que é captada por duas fendas (distância b) e daí radiada e combinada ao longo de uma orientação de observação (y) à distância d . Sendo I_0 a intensidade da radiação de cada fenda na região de combinação, resulta um padrão de interferência para uma fonte S centrada dado por

$$I_S(y) = 4I_0 \cos^2 \left[\frac{\pi b}{d\lambda} y \right]$$

Note-se que o padrão de interferência depende do comprimento de onda. Considerando agora uma fonte S' deslocada angularmente de $\Delta\theta$, o padrão de interferência resultante $I_{S'}(y)$ é deslocado no eixo y . Existindo, simultaneamente, as fontes S e S' , mutuamente incoerentes e de igual intensidade, resulta uma sobreposição de padrões de interferência, e uma intensidade ao longo do eixo y que é a soma das respectivas intensidades. A intensidade total $I(y)$ será constante ao longo de y (donde visibilidade nula do padrão de interferência global) quando $\Delta\theta = \lambda/2b$. Assim, a observação de $I(y)$ permite distinguir fontes separadas angularmente de $\lambda/2b$; sendo $\lambda = 1 \mu\text{m}$, resulta $\Delta\theta = 5 \text{ nrad}$ num interferómetro em que $b = 100 \text{ m}$. Recorde-se que, para um telescópio único, a resolução angular é da ordem de λ/D ; resulta $\Delta\theta = 100 \text{ nrad}$ num telescópio em que $D = 10 \text{ m}$.

Uma fonte não-monocromática e emitindo num certo intervalo angular produzirá um padrão de interferência com características relacionadas com essa extensão angular e espectro de emissão. Uma análise detalhada [6] permite verificar que a recolha de informação a partir do padrão de interferência entre pares de feixes de um conjunto de telescópios (e ao longo de posições resultantes do seu movimento diurno) fornece o espectro de Fourier bidimensional da densidade espectral de potência (bidimensional, em coordenadas no céu) do objecto astronómico. Assim, é possível obter a imagem do objecto por síntese de Fourier dos dados interferométricos. A resolução da imagem reconstruída é elevada, de acordo com a distância típica de

[5] J. Bland-Hawthorn, P. Kern, "Astrophotonics: a new era for astronomical instruments", *Opt. Express* 17, 1880-1884 (2009)

[6] A. Labeyrie, S. G. Lipson, P. Nisenson, "An introduction to optical stellar interferometry", Cambridge U. Press (2006); J. D. Monnier, "Optical interferometry in astronomy", *Rep. Prog. Phys.* 66, 789-857 (2003)

[7] <http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/telescopes/vlti/index.html>

centenas de metros entre telescópios. A turbulência atmosférica também limita o desempenho dos sistemas interferométricos, através da flutuação rápida da fase relativa da radiação proveniente de cada par de telescópios. Técnicas de referenciação de fase, de *closure phase* e de *fringe tracking* têm sido estudadas e implementadas [6].

DISPOSITIVOS FOTÓNICOS EM INTERFERÔMETROS ÓPTICOS ASTRONÔMICOS

Um interferômetro astronômico permite atingir resoluções angulares excelentes, mas é um instrumento muito complexo constituído por vários sub-sistemas [8] (Fig. 7):

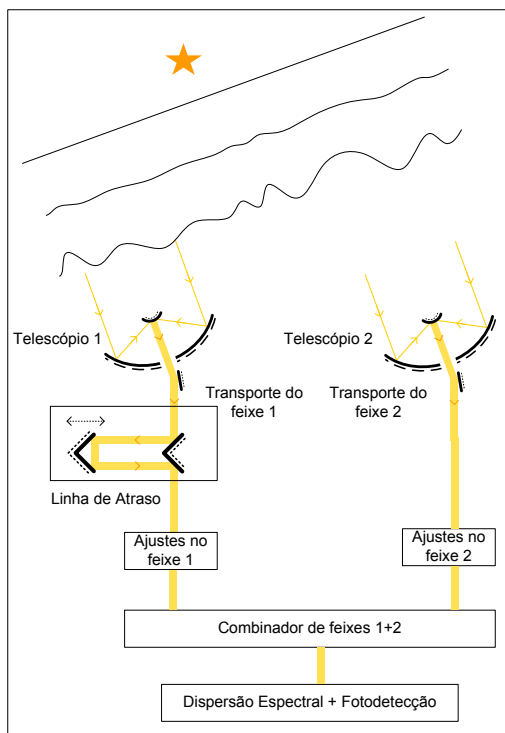


Figura 7. Esquema simplificado de um interferômetro astronômico (representados apenas dois dos telescópios do sistema de vários telescópios).

- telescópios: montagem geralmente alt-az (altitude-azimute), incluindo sistema de *tip-tilt* de correção de movimentos rápidos e óptica adaptativa; no caso do VLTI, até oito telescópios podem ser combinados, a distâncias de centenas de metros;
- transporte dos feixes dos telescópios: centenas de metros até ao combinador, exigindo alta eficiência, conservação de polarização e baixa dispersão cromática;
- linhas de atraso ópticas: capacidade de ajustar a diferença de percurso óptico entre cada par de feixes de telescópios, de modo a obter interferência;
- correção das frentes de onda: *fringe tracking*, controlo de polarização, filtragem espacial;
- combinação de feixes: incluindo calibração fotométrica, para compensação de diferenças de intensidade entre os

feixes combinados;

- dispersão espectral e fotodeteção.

Dada a complexidade do interferômetro, o recurso a dispositivos fotônicos na implementação de certos sub-sistemas é muito atractivo e tem sido investigado em anos recentes [8].

As fibras ópticas de sílica e de vidros fluoretos têm sido investigadas para o transporte de radiação e construção de linhas de atraso temporal rapidamente ajustável [9]. A eliminação de erros de fase na frente de onda de cada feixe do interferômetro exige a sua filtragem espacial. Esta é bem desempenhada por fibras ópticas monomodo, no acoplamento do feixe óptico ao modo quase-gaussiano da fibra; as flutuações de intensidade resultantes no acoplamento à fibra e devidas às deformações da frente de onda do feixe óptico são compensadas pela calibração fotométrica implementada no combinador de feixes.

A combinação dos feixes de telescópios através de dispositivos integrados ópticos foi já demonstrada com sucesso [10]. Os dispositivos integrados ópticos permitem a construção de combinadores de feixes muito compactos e estáveis, substituindo sistemas ópticos muito complexos, volumosos e instáveis, baseados em componentes ópticos tradicionais. Nestes dispositivos planares, guias de onda ópticos monomodo recebem a radiação de fibras ópticas e produzem a interferência óptica correspondente, além de fornecerem saídas (fotometria) usadas para calibração do padrão de interferência independente da intensidade relativa dos feixes. Estes dispositivos têm sido investigados pelos autores, em diversas configurações [11], com exemplos representados na Figura 8.

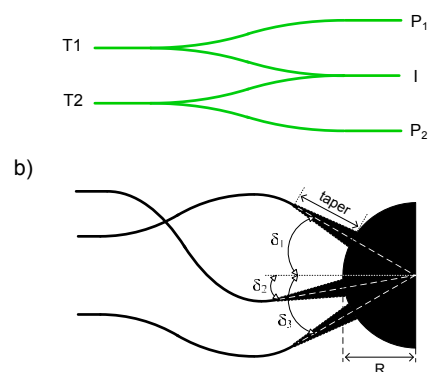


Figura 8. Esquemas de combinadores de feixes de telescópios implementados como dispositivos integrados ópticos na U. Porto. (a) Combinador coaxial 2T; (b) Combinador multiaxial 3T.

Num combinador coaxial do tipo *all-in-one* construído num circuito integrado óptico (Fig. 8.a), obtém-se na saída a interferência de todos os pares de feixes; a modulação temporal e o varrimento das linhas de atraso permitem discriminar o interferogra-

[8] F. Malbet *et al.*, "Integrated optics for astronomical interferometry", A&A Suppl. Ser. 138, 135-145 (1999)

[9] S. Vergnole *et al.*, "Calibration of silica fibers for the optical hawaiian array for nanoradian astronomy (OHANA): temperature dependence of differential chromatic dispersion", Opt. Commun. 251, 115-123 (2005)

[10] J.-B. Lebouquin *et al.*, "Integrated optics for astronomical interferometry VI", Astron. Astrophys. 450, 1259-1264 (2006)

[11] A. Ghasempour *et al.*, "Hybrid sol-gel planar optics for astronomy", Opt. Express 17, 1970-1975 (2009)

ma de cada par de feixes. Num combinador multiaxial em óptica integrada (Fig. 8.b), os guias de onda monomodo conduzem a radiação a uma região de expansão transversal (*taper*), de onde são propagadas, para uma região de interferência, ondas guiadas quase colimadas. Na faceta de saída do “chip óptico” é gerado um padrão de interferência espacial para cada par de feixes, com período espacial das franjas directamente associado ao ângulo de convergência mútuo entre feixes.

A análise espectral da saída interferométrica do combinador, recorrendo também a dispositivos integrados ópticos, foi investigada recentemente [12]. Num guia de onda integrado monomodo, a radiação sob análise é propagada em sentidos opostos. Resulta um padrão de interferência espacial estacionário ao longo do guia de onda, cuja frequência espacial e distribuição de amplitude de modulação são dependentes do espectro da radiação. O padrão de intensidade óptica resultante é detectado com recurso a uma rede periódica de nano-fios de ouro adjacentes ao guia de onda, que permite extrair uma pequena porção da intensidade e assim amostrar o padrão de inter-

ferência. Resulta um espectrómetro integrado, sem partes móveis, compacto e integrável com outros sub-sistemas do interferómetro.

A espectroscopia Doppler de elevada resolução, utilizada na investigação de exo-planetas, exige a definição de frequências ópticas estáveis e rigorosas para a calibração de espectrómetros. Investigações recentes demonstraram, através da combinação de um “pente de frequências” (obtido através de tecnologia laser ultra-rápida) com uma cavidade óptica de Fabry-Pérot, capacidades adequadas à medição de desvios de frequência correspondentes a velocidades radiais de cm.s^{-1} [13].

CONCLUSÃO

Os elevados desempenhos instrumentais requeridos por investigações em tópicos avançados de Astronomia exigem a introdução de tecnologias inovadoras. Diversas aplicações de tecnologias fotónicas foram demonstradas recentemente, e são objecto de continuado esforço de investigação.



Askari Ghasempour é aluno do Programa Doutoral em Astronomia da U. Porto, em que investiga dispositivos ópticos integrados para aplicações em interferometria astronómica, numa colaboração entre o Centro de Astrofísica da Universidade do Porto, o INESC-PORTO e o Departamento de Física da FCUP.

António P. Leite é Professor Associado e Director do Mestrado Integrado em Engenharia Física do Departamento de Física da FCUP. A sua actividade docente e de investigação centra-se na óptica, em particular fibras ópticas e micro-dispositivos ópticos.

Paulo V. S. Marques é Professor Auxiliar no Departamento de Física da FCUP e Investigador da Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos do INESC-PORTO. Os seus trabalhos de investigação centram-se no domínio da Óptica Integrada.

Paulo J. V. Garcia é Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Física da FEUP e investigador na unidade Laboratório de Sistemas, Instrumentação e Modelação em Ciências e Tecnologias do Ambiente e do Espaço. Realiza investigação em astrofísica instrumental e observacional.

[12] P. Kern *et al.*, “On-chip spectro-detection for fully integrated coherent beam combiners”, *Opt. Express* 17, 1976-1987 (2009)

[13] C.-H. Li *et al.*, “A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of 1 cm.s^{-1} ”, *Nature* 452, 610-612 (2008)

