

Enjeux et avancées de l'instrumentation optique pour l'astronomie

Daniel ROUAN – LESIA (Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation pour l'astrophysique),
Unité mixte CNRS / Observatoire de Paris / Université Paris-Diderot / UPMC
daniel.rouan@obspm.fr

La communauté des astronomes a récemment fêté le quadri-centenaire de ce qui doit bien être considéré comme la première mise en œuvre d'un instrument d'observation en astronomie. C'est en effet en 1609 que Galilée, pointant sa lunette vers les planètes du système solaire, puis vers la Voie lactée, faisait au moins cinq découvertes cruciales qui ouvrirent la voie à l'astrophysique moderne et modifièrent profondément la vision de l'humanité quant à sa place dans l'Univers.

Jusqu'au milieu du vingtième siècle, les progrès portèrent essentiellement sur la taille des collecteurs et l'introduction de la spectroscopie et de la photographie, en se limitant au seul domaine spectral du visible. C'est l'avènement de l'ère spatiale et l'héritage du radar, développé durant la seconde guerre mondiale, qui ouvrirent largement les fenêtres sur les autres domaines du spectre électromagnétique en offrant à l'astronome de remplacer sa modeste octave du visible par un clavier qui en comporte pas moins de 70, si on considère qu'il va des rayons gamma de quelques TeV jusqu'aux ondes radio hectométriques !

En se limitant au domaine, plus familier aux lecteurs de Photoniques, du visible et de l'infrarouge proche, cet article se propose de faire un survol des enjeux qui guident aujourd'hui le développement de l'instrumentation pour répondre aux besoins de l'astrophysique et sur les tendances qui se font jour, en examinant trois branches : les collecteurs, l'imagerie et la spectroscopie.

Les besoins des astrophysiciens

Des mots et des concepts aux résonances un peu étranges, comme énergie noire et matière sombre, assemblage de la masse des galaxies, caractérisation des planètes extrasolaires et recherche de la vie, formation des protoétoiles, physique des objets ultra-denses, donnent un aperçu des thèmes de recherche parmi les plus en pointe auxquels les astrophysiciens se consacrent aujourd'hui. Une recherche où l'observation est cruciale, car l'astronome est bel et bien tributaire de la collecte de ces signaux que nous envoie l'Univers : il ne peut prétendre comme son collègue physicien de laboratoire, à expérimenter sur les objets de l'Univers puis observer leur réponse à ses stimuli. La seule exception notable concerne les corps du système solaire qui font bel et bien maintenant l'objet d'expérimentations, si l'on pense par exemple

aux rovers martiens qui sont équipés pour gratter le sol et l'analyser chimiquement et physiquement.

Dans le cycle répété observation/analyse/théorie/prédiction, il ne fait guère de doute que c'est l'observation qui a été le plus souvent la source principale dans le bouleversement des idées, et ce n'est pas tout à fait un hasard si deux seulement parmi les 18 lauréats d'un prix Nobel de physique en lien avec l'astronomie, sont de purs théoriciens, les autres devant leur reconnaissance à des découvertes observationnelles. La décennie récente ne fait pas exception : l'accélération de l'expansion de l'Univers ou la découverte de planètes extrasolaires très proches de leur étoile sont deux exemples caractéristiques dans lesquels des idées préconçues ont été bousculées.

À côté de l'indispensable collecteur de photons, le télescope, le traditionnel couple d'instruments de l'observateur est

constitué de l'imageur et du spectrographe. Le premier permet bien souvent la phase préliminaire de la découverte, puis de préciser structure et morphologie des objets, tandis que le second permet d'aborder la richesse de la physique d'un astre en donnant accès à des grandeurs aussi diverses que sa vitesse et la distribution de vitesse de ses composantes, sa composition atomique ou moléculaire, l'état de cette matière – ionisé, atomique, moléculaire, solide, gazeuse –, sa température, sa densité, sa pression, l'intensité et la direction du champ magnétique qui le baigne.

Quelles ont été les avancées majeures dans ces différents domaines de la collecte, de l'imagerie et de la spectroscopie ?

En fait si on considère les quatre paramètres de base d'un instrument : pouvoir collecteur, champ, résolution angulaire et résolution spectrale, on se rend compte qu'un grand nombre des progrès récents

Définitions

Naine brune. Une naine brune est une étoile ratée, ou plus précisément une étoile de masse suffisamment faible pour que les réactions nucléaires ne puissent s'allumer en son cœur ; elle rayonne cependant suffisamment d'énergie (qui provient de la contraction gravitationnelle) pour se distinguer d'une planète de plus petite masse.

Cisaillement cosmique. Le cisaillement cosmique est la très légère déformation apparente de l'image d'une galaxie sous l'effet de lentille gravitationnelle produit par la masse invisible (d'où le qualificatif de matière noire) et de nature inconnue, qui peuple sous forme de grands halos 85 % de l'Univers.


ont été le résultat d'une combinaison de gains simultanés en performance de plusieurs de ces paramètres. Les astronomes sont devenus en effet de plus en plus exigeants en réclamant, par exemple, la spectroscopie dans un grand champ et/ou en tous points d'un objet étendu, du pouvoir collecteur ET du champ, comme si la barrière de l'étendue optique était élastique, de la haute résolution angulaire ET du champ, etc...

La collecte des photons


Dans le domaine des grands collecteurs, la course au gigantisme symbolisée par les télescopes de la classe 8-10 mètres de la précédente décennie, dont la solution pour le primaire est basée soit sur la combinaison monolithique / optique active (VLT européen), soit sur la segmentation (Keck américain), est relancée avec des projets qui franchissent désormais la barrière des 30 mètres de diamètre. Les deux projets majeurs de la communauté, très avancés aujourd'hui même si leur financement n'est pas encore consolidé, soit reprennent un concept éprouvé comme c'est le cas pour le TMT américain, de fait une copie mise à l'échelle du Keck télescope et de son primaire segmenté, soit tablent sur une conception optique plus ambitieuse mettant en jeu jusqu'à 5 miroirs actifs, dont un adaptatif, dans le cas du projet européen du E-ELT de 38 mètres de diamètre [1]. Les avancées majeures pour ces projets ambitieux sont probablement à rechercher dans le domaine de la réalisation des miroirs asphériques et des miroirs actifs et adaptatifs, avec par exemple le polissage sous contrainte de composants optiques de très grande dimension, une technique où la région marseillaise a une jolie carte

à jouer [2]. La mise en phase de tous les segments du miroir primaire est également un enjeu d'importance puisque la limite de diffraction (25 nano-radians pour un télescope de 38 mètres !) est l'une des spécifications majeures, inatteignable sans un parfait phasage optique.

Dans un autre registre, la recherche du très grand champ combiné à une large surface collectrice est devenue un autre type des combinaisons d'exigences mentionnées plus haut. Cette demande découle d'une évolution qui a vu l'astronomie statistique s'imposer comme un élément clef de l'astronomie moderne : elle s'appuie sur la considération que la recherche d'objets très rares comme la naine brune ou d'effets très ténus comme un cisaillement cosmique (voir encadré Définitions) ne peut être faite qu'en considérant des échantillons contenant un très grand nombre d'objets (étoiles ou galaxies), d'où le besoin d'un très grand champ. Cette spécification a par exemple conduit à une combinaison optique aussi élaborée que celle du *Large Synoptic Survey Telescope* (LSST) qui, avec trois miroirs dont un monolithique primaire/tertiaire de 8,4 mètres et une combinaison dioptrique de 3 lentilles, fournit un champ impressionnant de 3,5° (figure 1 ; voir aussi [3]). On notera que d'autres solutions originales pour le très grand champ combiné à la grande surface sont à l'étude, mais avec une spécification de qualité d'image bien plus réduite, car elles sont en fait destinées à des télescopes très particuliers. Ce sont ceux qui cherchent à détecter la fugace lumière Cerenkov émise par les gerbes de particules relativistes produites par les rayons gamma arrivant dans la haute atmosphère de la Terre. Un des concepts est ainsi basé sur le schéma Schwarzschild-Couder qui met en jeu deux miroirs, tous deux asphériques mais



Introducing a new member of the NIRQuest family




Models	Wavelength range
NIRQuestS12-1.7	900-1700 nm
NIRQuestS12-1.9	1100-1900 nm
NIRQuest256-2.1	900-2050 nm
NIRQuestS12-2.2	900-2200 nm
NIRQuestS12.2.5	900-2500 nm
NIRQuest256-2.5	900-2500 nm

With 5 detector types, 8 types of gratings and 5 different slits, there is always a configuration for your NIR application.

Features:
 InGaAs array detector
 On-board thermoelectric cooling
 Crossed Czerny-Turner optical bench
 Various trigger modes
 Custom gratings for high resolution
 (< 1 nm FWHM)

www.oceanoptics.eu/nir
 Ocean Optics
 Contact IDIL for more information



Contact us today to learn more about our complete NIR spectrometer offerings:
 T: 02 96 05 40 20
 info@idil.fr | www.idil.fr

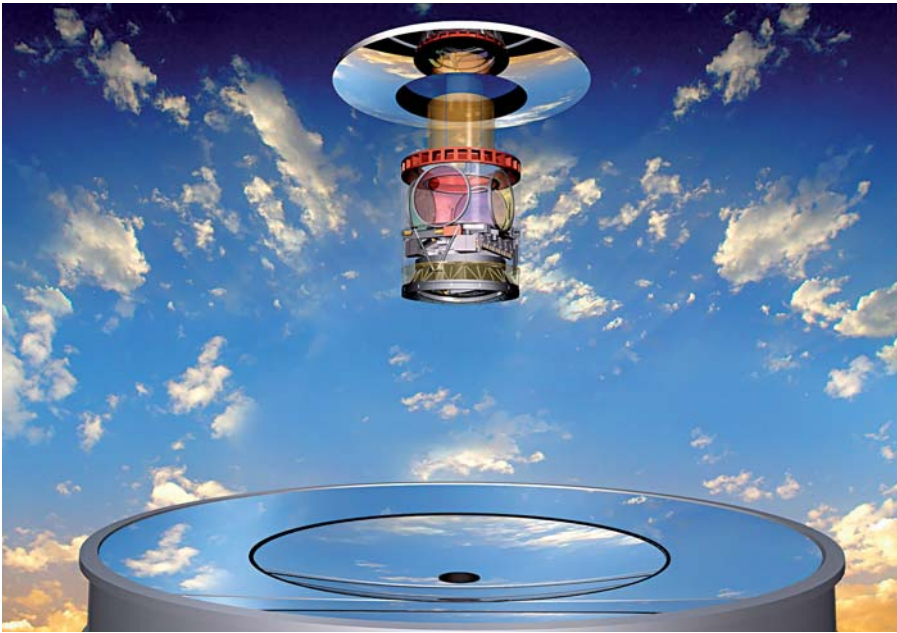


Figure 1. Le projet américain du LSST (Large Synoptic Survey Telescope) possède une configuration optique originale pour atteindre l'objectif d'une grande surface (primaire de 8,4 mètres de diamètre) et d'un très grand champ ($3,5^\circ$). Cette vue d'artiste, qui fait abstraction des montures, montre en particulier l'impressionnant ensemble monolithique des miroirs concentriques M1 et M3, le miroir M2 de 4 mètres et le groupe final de lentilles qui alimente la caméra de 3,5 Gigapixels.

heureusement d'une qualité de surface peu exigeante car il s'agit au final d'obtenir de grands entonnoirs à lumière allant jusqu'à la vingtaine de mètres de diamètre, mais dotés d'un très grand champ.

Imagerie

Depuis la planétologie jusqu'à la mise en évidence de gigantesques structures en filaments ou en feuillet dans l'Univers, l'image a joué un rôle majeur en astronomie. Améliorer la qualité de cette image demeure un moteur puissant de la recherche instrumentale. Aujourd'hui la quête de la plus haute résolution angulaire couplée à la plus grande dynamique est un des champs les plus porteurs. En particulier, l'optique adaptative a bouleversé le paysage : on a d'ailleurs fêté il y a peu les 20 ans de la première image corrigée en temps réel de la turbulence atmosphérique, obtenue par une équipe franco-européenne à l'Observatoire de Haute Provence. Afin de pouvoir répondre aux requêtes des astronomes, l'optique adaptative s'est désormais éclatée en un arbre

aux branches multiples et aux noms étranges comme MOAO, MCAO, GLAO, XAO qui traduisent les besoins en imagerie multi-objets, en imagerie grand champ, en imagerie à très grand rapport de Strehl (correction extrême), sans oublier la spectro-imagerie. Cela a donné lieu à toute une famille de solutions (voir l'article de Gérard Rousset et coll. dans ce numéro) utilisant des combinaisons d'étoiles artificielles, obtenues par un tir laser sur la couche de sodium atmosphérique à 80 km d'altitude, ou naturelles et employant des miroirs déformables multiples pour corriger tout le volume turbulent qui devient immense, compte tenu de la taille toujours croissante des télescopes. Le concept de correction en boucle ouverte pour la MOAO est l'un des derniers avatars apparus et sans doute l'un des plus prometteurs.

L'introduction des micro-miroirs déformables basés sur des MOEMS (*Micro Opto Electro Mechanical Systems*) est une autre facette de l'évolution actuelle : elle ne fera que se renforcer.

Le développement de caméras sensibles ultra-rapides pour l'analyse en temps

réel du front d'onde traduit un autre des besoins de la haute résolution angulaire : aussi la belle réussite de la caméra européenne Ocam, capable de prendre 1500 images/s est-elle à saluer [4].

L'interférométrie longue base à plusieurs télescopes, une autre voie pour accéder à la très haute résolution angulaire, n'a cessé d'affirmer sa place en devenant maintenant une technique solidement établie, à la production scientifique en très forte croissance. Le VLTI (*Very Large Telescope Interferometer*) européen en est certainement l'exemple le plus marquant : permettant la recombinaison cohérente des 4 télescopes de 8 mètres du VLT et de 4 télescopes mobiles de 1,80 mètre, il s'appuie en particulier sur la mise au point de nouvelles techniques en matière de recombinaison des faisceaux utilisant les fibres optiques monomodes ou l'optique planaire intégrée. L'article de Pierre Kern et Jean-Baptiste Le Bouquin dans ce même numéro détaille ces avancées récentes.

Très liée à la haute résolution angulaire, l'imagerie à très haute dynamique est un autre domaine où la recherche est particulièrement active car elle est motivée par une thématique en développement exponentiel, celui de la détection directe des exoplanètes, un enjeu extrêmement compétitif. Malgré les difficultés immenses (un contraste allant de dix mille à dix milliards entre l'éclat de la planète et celui de son étoile et une distance angulaire entre les deux très largement sub-arcseconde), cette motivation a suscité depuis le début de ce siècle une explosion de concepts pour masquer au mieux la lumière de l'étoile sans atténuer celle de la planète. On a affaire aujourd'hui à tout un bestiaire de combinaisons de masques pupillaires et focaux, qu'ils soient de phase ou d'amplitude (voir l'exemple de la **figure 2**) ; les améliorations des performances en laboratoire puis sur télescope ont suivi de façon spectaculaire et des réjections de plusieurs dizaines de millions sont obtenues en laboratoire. L'article d'Alexis Carlotti dans ce même numéro détaille ce sujet, aussi suffit-il de dire que l'ère de la détection directe des exoplanètes, qui vient de commencer avec les premiers résultats obtenus en

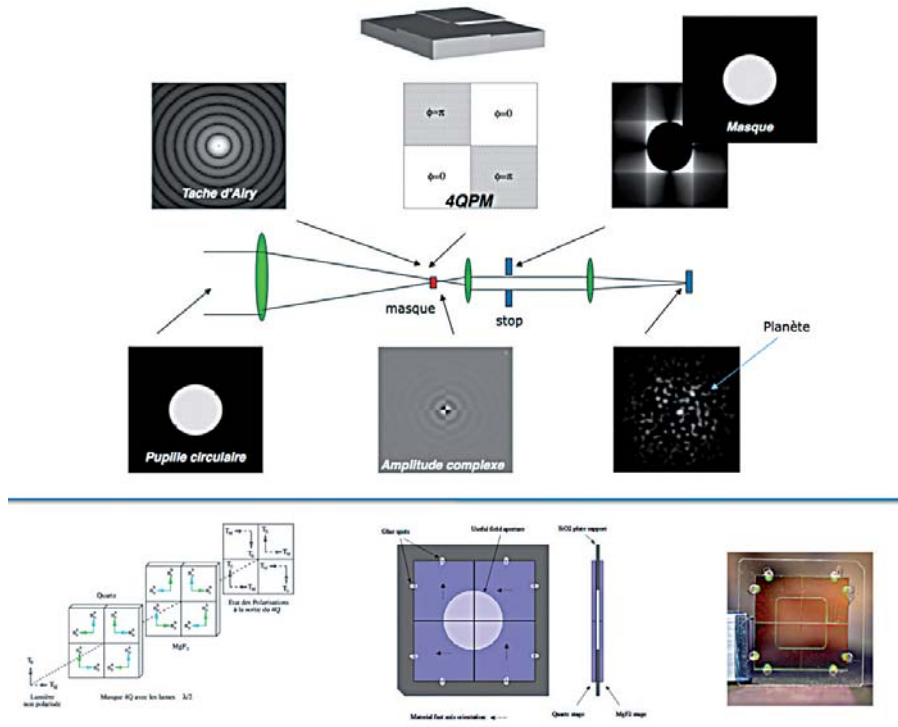


Figure 2. Le schéma supérieur décrit le principe de fonctionnement du coronographe à masque de phase quatre quadrants (ou 4QPM pour 4 Quadrants Phase Mask). Il est basé sur un composant comportant quatre lames transparentes disposées en quadrants. Deux des lames opposées par la diagonale présentent une sur-épaisseur égale à $\lambda/(n-1)$ et introduisent donc un déphasage de π par rapport aux deux autres lames. Si l'image d'une étoile, avec un rapport de Strehl élevé, est formée exactement au centre du composant, alors les interférences destructives vont produire une image pupillaire possédant un disque noir de la taille de la pupille d'entrée, la lumière étant rejetée totalement à l'extérieur de ce disque. Il suffit de masquer par un diaphragme physique cette zone périphérique pour bloquer la lumière de l'étoile. Un compagnon de l'étoile, comme une planète, du fait de sa position excentrée sur le composant n'est que très peu affecté par l'effet d'interférences destructives et son image se reforme normalement. Les trois images de la partie inférieure illustrent une solution d'achromatisation basée sur des lames demi-ondes achromatiques, et sa réalisation pour l'instrument SPHERE du VLT. Ces développements sont menés au LESIA (Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation pour l'astrophysique).

2009 (figure 3), sera probablement très productive dans la décennie qui vient grâce à des instruments complètement dédiés, comme SPHERE sur le VLT.

En ce qui concerne les caméras d'imagerie classique, l'amélioration des capteurs photoniques est aussi un enjeu de taille, c'est le cas de le dire puisque les besoins en imagerie grand champ ont réclamé des plans focaux de plus en plus grands où le milliard de pixels devient la règle (3,5 Gigapixels pour la caméra qui équipera la *Large Synoptic Survey Telescope*), mettant en jeu des dizaines de CCD amincis, fortement multiplexés et aboutés. Le domaine infrarouge n'est pas en reste et l'étape du megapixel atteinte

depuis quelques années, par exemple avec la caméra WIRCAM au télescope de 3,6 mètres CFHT, augure bien de celles à venir dans lesquelles des caméras 256 fois plus grandes, en général de technologie MOS-MCT (mercure cadmium tellure - HgCdTe), sont désormais envisagées pour les ELT.

Spectroscopie

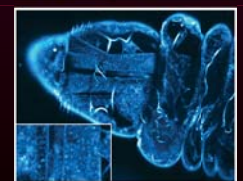
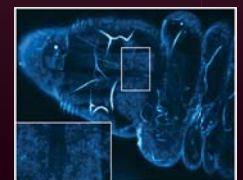
Au cours de la décennie précédente, des solutions originales ont été apportées aux exigences des astronomes par les différentes variantes de spectrographes multi-objets et celles encore plus diverses

Optique adaptative en microscopie

mirao 52-e



Le miroir déformable mirao 52-e, avec ou sans analyseur de surface d'onde HASO, avec nos logiciels CASA ou GENAO, offre la meilleure capacité de correction et permet d'améliorer la résolution de l'image de manière spectaculaire.



En haut, image d'une larve de drosophile en microscopie THG non-corrigée. En bas, image du même échantillon corrigée avec l'optique adaptative.

Images de E. Beaurepaire, D. Débarre et N. Olivier, Ecole Polytechnique, LOB

Venez nous voir à Optitec du 22 au 25 mai 21 & 22 janvier et à Francfort.

Pour plus d'informations, appelez +33 (0)1 64 86 15 60, ou visitez:

imagine-optic.com

Imagine Optic™



©2011 Imagine Optic. Tous droits réservés. M. PUB Photoniques 58 1203

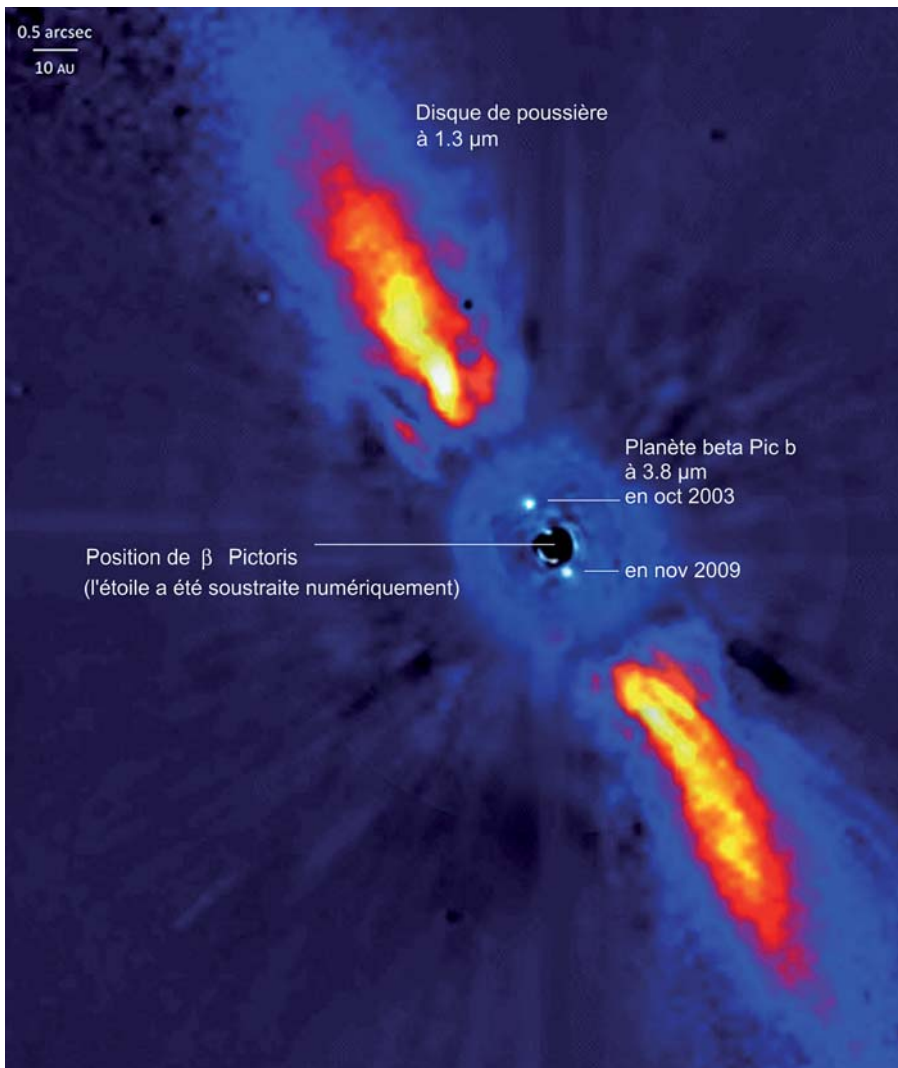


Figure 3. La détection directe des exoplanètes est désormais une réalité comme l'illustre cette image obtenue par une collaboration française menée par Anne-Marie Lagrange de l'IPAG grâce à l'instrument d'optique adaptative NACO installé sur le VLT. La planète détectée est située autour de l'étoile Beta Pictoris, une étoile très jeune encore entourée des débris du disque proto-planétaire formé simultanément avec l'étoile il y a quelques millions d'années seulement. Sur ce montage on distingue le disque de poussière sous forme de deux langues légèrement vrillées, et la planète à deux époques séparées de 6 années, et donc en deux positions. L'orbite déduite correspond à celle de Saturne dans notre système solaire. L'étoile est masquée par une technique de soustraction numérique très précise. Malgré le contraste élevé entre étoile et planète, la détection en infrarouge ($\lambda = 3,8 \mu\text{m}$) a été facilitée par la température élevée de la planète qui, très jeune et donc encore dans une phase de contraction, libère son énergie gravitationnelle par rayonnement.

de spectrographes dits « intégral de champ ». Dans le premier cas, la compétition entre le mode multi-fentes où une mince plaque métallique placée au plan focal est préalablement ciselée par de fines fentes grâce à un laser de puissance, et le mode à fibres optiques, où les têtes de fibres sont positionnées par un robot sur une plaque aimantée, s'est soldée par

un match nul. Plus précisément, chaque solution a trouvé sa niche, la première se spécialisant sur la spectroscopie basse résolution ($R = 200\text{--}2000$) d'objets faibles comme les galaxies distantes, tandis que la solution à fibres s'est consacrée à la spectroscopie plus résolutive (typiquement $R = 10\ 000\text{--}30\ 000$) et s'est adjointe une capacité de spectroscopie

intégrale de champ en regroupant en paquets une vingtaine de fibres dont les têtes sont disposées au foyer d'un petit réseau de microlentilles. Les instruments VIMOS et GIRAFFE du VLT européen sont de bonnes illustrations de ces deux concepts.

L'espace n'est pas en reste pour ce qui est de l'innovation en matière de spectroscopie multi-objets et on se doit de citer la solution adoptée dans l'instrument NIRS-PEC qui équipera le *James Webb Space Telescope* de 6,50 mètres de diamètre (lancement en 2018) dans lequel c'est un MOEMS comportant quelques milliers de micro-obturbateurs, chacun fin comme un cheveu, qui réalise la fonction d'isoler les portions de ciel qui seront analysées spectroscopiquement.

La solution du paquet compact de fibres pour réaliser la spectroscopie en tout point d'un objet étendu n'est pas la seule. Parmi les autres solutions mises en œuvre, on mentionnera l'avènement du dissecteur d'image à l'optique particulièrement délicate à réaliser où un miroir à facettes, placé au plan focal du télescope, est usiné avec précision pour que chacune de ses cellules redirige la lumière de la portion d'image qu'elle échantillonne, vers une section de la fente d'entrée du spectrographe. Ce concept démontré dans l'instrument SINFONI du VLT est également à la base de l'impressionnant spectrographe MUSE bientôt en service sur le même VLT (figure 4) et du probable futur instrument HARMONI de l'E-ELT.

Dans le domaine de la très haute résolution spectrale ($R > 80\ 000$), requise en particulier pour la détection des exoplanètes par la méthode des vitesses radiales, les progrès récents se sont concentrés sur la stabilité de l'instrument, pas vraiment sur l'optique, à l'exception toutefois de la révolution apportée par les réseaux de phase holographiques en volume (VPH) dont le gain en efficacité est incontestable. Pour l'avenir, le besoin en stabilité ne cessant de se renforcer, le renouveau passe par l'introduction dans le dispositif d'une des conquêtes récentes de la physique des lasers – le peigne de fréquences laser : utilisé comme source ultra-précise d'étalonnage en longueur d'onde, il va permettre un saut quantitatif

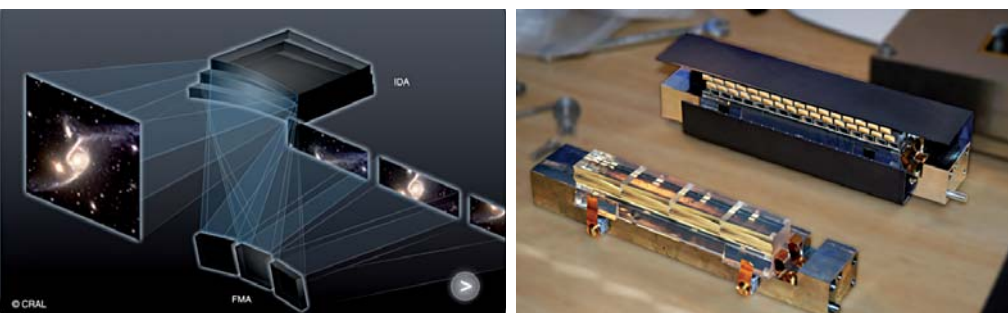


Figure 4. L'instrument MUSE qui va permettre la spectroscopie intégrale de champ, c'est-à-dire la spectroscopie simultanée de tous les points d'un champ étendu, fait un usage important des dissecteurs d'image. À un premier niveau dans le plan focal pour l'éclater en sous-champs (schéma de gauche) puis pour re-séparer ceux-ci en fines régions rectangulaires ré-imaginées et alignées sur la fente d'un spectrographe. La photographie du bas de la figure montre le composant complexe qui assure ce deuxième étage. On distingue en haut à droite la matrice de miroirs secondaires de focalisation et en bas à gauche le miroir dissecteur d'image. Le spectrographe MUSE est en grande partie développé au CRAL, un laboratoire mixte de l'Observatoire de Lyon et du CNRS.

important. Le projet d'instrument CODEX pour l'E-ELT envisage ainsi d'offrir un pouvoir de résolution de 150 000 avec une stabilité telle que des vitesses d'étoiles ou de galaxies pourront être mesurées avec une précision de 10 cm/s sur plusieurs décennies, une performance inimaginable il y a quelques années seulement.

Vers de nouvelles avancées...

Ce bref tour d'horizon est bien sûr très incomplet et ne rend pas justice à des pans entiers de la recherche instrumentale où l'innovation, l'imagination et l'accès à des techniques nouvelles, comme par exemple les nano-composants, permettent des avancées spectaculaires. On en donnera pour illustration la mise au point à Grenoble d'un recombineur interférométrique utilisant une technologie d'optique intégrée planaire, tenant dans une boîte d'allumettes, et assurant pour chaque paire de télescopes recombinaés quatre sorties en quadrature de phase pour échantillonner au mieux les franges d'interférences. Ce recombineur équipera l'instrument GRAVITY, destiné au VLT, qui vise l'exploration de l'environnement très proche du trou noir massif de quatre millions de masse solaire qui règne en maître sur la gravitation au centre de la Voie lactée, notre galaxie, un laboratoire unique pour tester des théories non clas-

siques de la gravité. On voit là une belle illustration de ce principe général et somme toute assez logique : les développements instrumentaux les plus en pointe sont souvent motivés par les quêtes les plus fondamentales de la physique et de l'astrophysique.

L'astronomie-astrophysique du début de ce 21^e siècle n'a ainsi clairement rien perdu de son appétit toujours aussi aiguisé d'une performance extrême en matière d'observation : un moteur qui motive les efforts de plusieurs communautés, en particulier celle des opticiens, qui accompagnent les astronomes dans cette quête. Finalement on n'oubliera pas que la société civile bénéficie souvent, certes avec quelques années de décalage, de ces avancées en performances : l'exemple est devenu désormais classique de l'optique adaptative, née du besoin des astronomes et qui permet aujourd'hui d'imager la rétine in vivo en ophtalmologie clinique.

Références

- [1] E-ELT, le futur télescope géant européen, Thierry Fusco et Jean-Gabriel Cuby, Photoniques n°48
- [2] <http://lam.oamp.fr/research/optics-and-instrumentation-loom/article/optique-active>
- [3] http://www.lsst.org/lsst/science/optical_design
- [4] <http://www.insu.cnrs.fr/ama09/la-camera-astronomique-la-plus-rapide-et-la-plus-sensible-au-monde>



Evaluations des nouvelles générations d'éclairage



T-10A
Luxmètre



CL-500A
Spectroradiomètre portable

PRECIS / PERFORMANT
FIABLE / FACILE / RAPIDE

- **T-10A**
 - Conforme aux normes JIS et DIN
 - Mesure multi-points (2 à 30)
 - Compatible PWM
 - Liaison USB
- **CL-500A**
 - Mesures d'éclairement, de couleur, de température de couleur, d'indice de rendu des couleurs, d'IRC, de pureté, de longueur d'onde dominante

SciencTec c'est aussi ...

- Sources de référence
- Vidéocolorimètres
- Photomètres
- Chromamètres



+33 (0)1.64.53.27.00
info@sciencTec.fr / www.sciencTec.fr