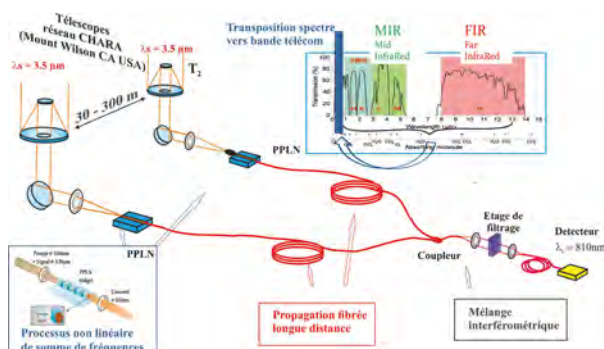


ALOHA : L'OPTIQUE NON LINÉAIRE ET FIBRÉE AU SERVICE DE LA HAUTE RÉOLUTION EN ASTRONOMIE

Ludovic GROSSARD, François REYNAUD

XLIM PhoCal (Photonique Cohérente Non-linéaire et Laser) UMR 7252, CNRS, 87060 Limoges, France

*francois.reynaud@unilim.fr



Le projet ALOHA propose une nouvelle génération d'instruments dédiés à l'imagerie haute résolution en astronomie. Celui-ci a pour objectif de relier un réseau de télescopes hectométrique par fibre optique en utilisant conjointement la somme de fréquence pour adapter le rayonnement astronomique à un dispositif optimisé avec des composants fibrés ou guidés issus de la bande télécom. Ce travail a été effectué au laboratoire XLIM et sur ciel à l'observatoire du Mount Wilson (CA USA).

<https://doi.org/10.1051/photon/202211730>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

L'imagerie à très haute résolution en astronomie nécessite la construction de réseaux de télescopes hectométriques voire kilométriques pour atteindre les résolutions angulaires nécessaires à l'étude d'objectifs astrophysiques tels que les exoplanètes, les noyaux actifs de galaxies ou la formation de jeunes étoiles. Le transport des faisceaux et la minimisation des perturbations de l'environnement constituent des enjeux majeurs pour les performances de l'instrument. L'acheminement de la

lumière des télescopes jusqu'au laboratoire de mélange interférométrique est traditionnellement réalisé par des jeux d'une vingtaine de miroirs plans. Outre les problèmes de réaligements journaliers, cela introduit des aberrations et des pertes qui dégradent significativement la sensibilité de l'instrument. C'est dans ce contexte que notre équipe a développé des techniques de transport de la lumière astronomique en utilisant des fibres optiques unimodales. Cette démarche a abouti en mars dernier aux premières franges d'interférence avec des liens fibrés

de 240 m reliant deux télescopes du réseau CHARA à l'observatoire du Mount Wilson en Californie. Pour étendre la portée de cette technique, nous avons développé en parallèle une méthode de transposition spectrale du rayonnement astronomique vers la plage telecom où les fibres ont des performances inégalées. Pour cela, un processus non linéaire de somme de fréquences est appliqué au rayonnement astronomique de puissance de l'ordre du fW dans un cristal PPLN pompé par un laser 1013 fois plus puissant que le rayonnement à convertir.

C'est le projet ALOHA (Astronomical Light Optical Hybride Analysis) qui associe interférométrie appliquée à l'imagerie haute résolution, optique non-linéaire et détection en régime de comptage de photons [1,2].

PRINCIPE DE LA MESURE ET PARAMÈTRES À MAÎTRISER

Un tel réseau de télescopes ne permet pas d'obtenir directement une image de la source observée mais analyse la cohérence mutuelle des rayonnements collectés par les différents télescopes grâce à un mélange interférométrique. En termes de traitement du signal, cela peut être interprété par la mesure de la corrélation ou degré de ressemblance entre les champs optiques qui permet d'échantillonner le spectre spatial de l'objet. Cela nécessite donc une très grande maîtrise de la symétrie entre les bras de l'interféromètre, constitué principalement par les fibres optiques reliant les télescopes à la station de

mélange interférométrique. Il est donc impératif de minimiser tous les effets différentiels de polarisation, dispersion, la structure spatiale et le temps de propagation. Ce dernier point est géré par des lignes à retard variables en position au cours de la nuit. Le contrôle de la structure spatiale conduit à l'utilisation de fibres unimodales. La maîtrise de la polarisation nécessite d'utiliser des fibres à maintien de polarisation dont les axes neutres sont soigneusement alignés en entrée et en sortie de fibre afin d'assurer la cohérence de polarisation. Pour ce qui concerne la dispersion différentielle, la symétrisation des guides met en œuvre une analyse spectrale afin de supprimer tous les ordres supérieurs ou égaux à 2 de la phase spectrale différentielle. L'ensemble de cette maîtrise instrumentale se traduit par un contraste instrumental qui, dans nos expériences, est supérieur à 90 % donc très proche de la valeur idéale de 1.

Le schéma de l'interféromètre implanté sur le réseau de télescopes CHARA du Mount Wilson en Californie [3] est représenté sur la Figure 1. Au niveau des télescopes, un dispositif de suivi de l'étoile et d'asservissement d'injection permet d'injecter la lumière collectée par le miroir primaire de 1 m de diamètre dans la fibre optique de diamètre de mode voisin de 10 μm . Une optique adaptative permet de minimiser la distorsion du front d'onde.

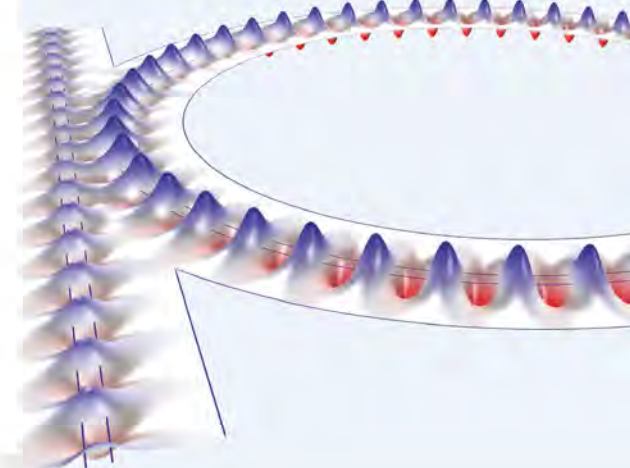
Le transfert de la lumière est assuré par les fibres optiques posées à l'extérieur à même le sol mais protégées par une protection mécanique et une enveloppe isolante. À la sortie des fibres, les lignes à retard de CHARA permettent de compenser le trajet différentiel entre la source et les télescopes. Cette longueur variant au cours de la nuit, les lignes à retard sont constituées de réflecteurs mobiles se déplaçant grâce à des chariots dont la position est programmée en ●●●

ÉTUDE DE CAS

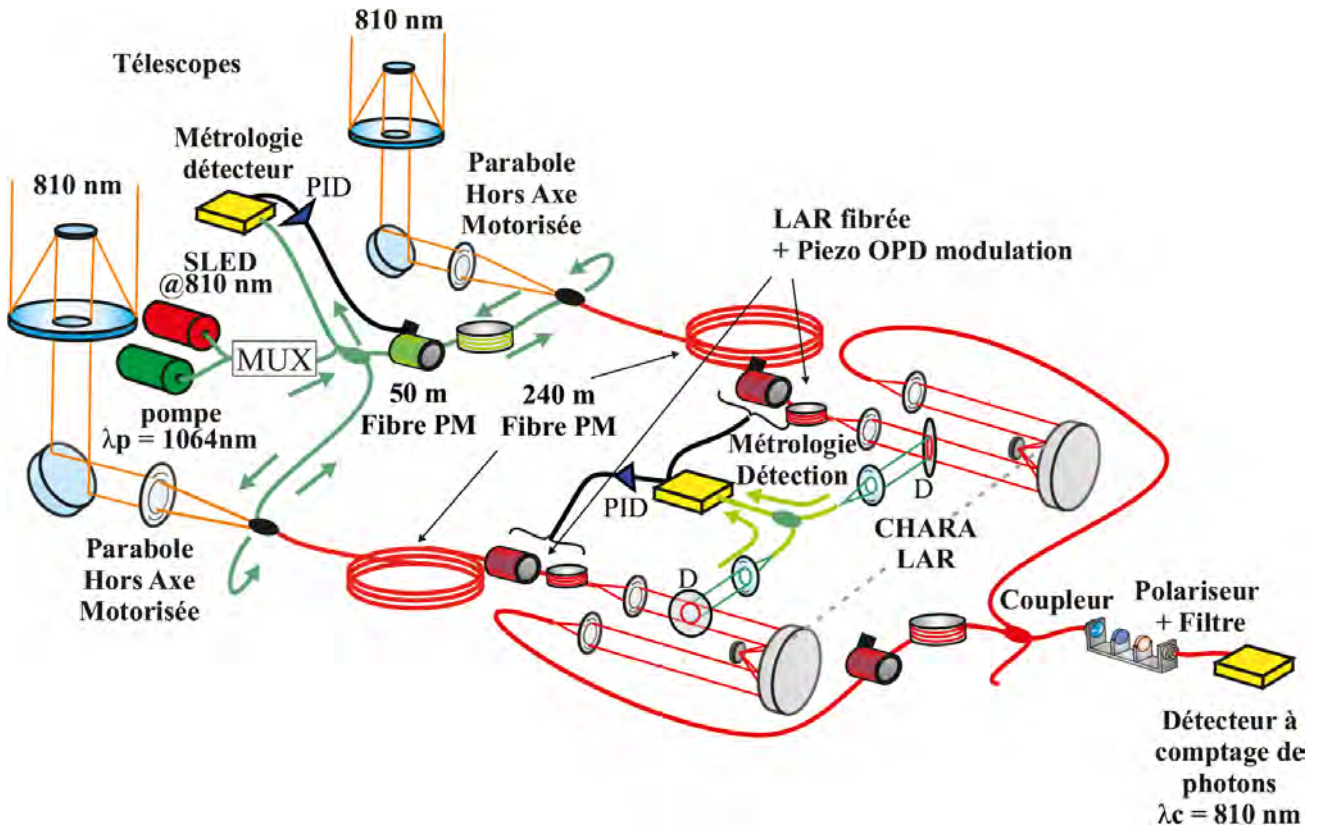
Tout a commencé avec deux seaux d'eau...

En 1870, un scientifique du nom de John Tyndall a essayé de contrôler la lumière en utilisant deux seaux d'eau, illustrant la réflexion interne totale à un public fasciné. Aujourd'hui, les chercheurs disposent d'outils plus avancés. Lorsqu'ils fabriquent et analysent des prototypes de guides d'ondes optiques, les ingénieurs actuels utilisent des logiciels de simulation numérique pour accélérer le processus de conception.

EN SAVOIR PLUS comsol.blog/silicon-photonics



Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.



fonction de la position de la source et des télescopes utilisés. Le mélange interférométrique est ensuite réalisé par un coupleur et une variation linéaire de chemin optique au cours du temps grâce à un modulateur fibré permet de visualiser les franges temporellement.

UN INTERFÉROMÈTRE HECTOMÉTRIQUE EN PLEIN AIR !

La mise en œuvre d'un interféromètre ayant des bras fibrés de 240 m installés en plein air s'accompagne inévitablement de fluctuations de chemin optique induites par les variations de température, les vibrations et les contraintes mécaniques subies par les guides optiques. Une compensation en temps réel est donc nécessaire. Pour ce faire, nous avons développé des systèmes d'asservissement permettant de comparer les longueurs de chemins optiques des bras de l'interféromètre par une méthode interférométrique grâce à un laser de métrologie se propageant conjointement avec le signal astronomique. Ce laser est soit une source purement dédiée soit une pompe utilisée pour générer les effets non-linéaires présentés dans le paragraphe suivant. Toute variation du chemin induit donc une fluctuation

Figure 1. Schéma de principe de l'interféromètre implanté sur le réseau CHARA au Mount Wilson. La lumière de la source astronomique à 810 nm est collectée par des télescopes de 1 m de diamètre puis injectée dans des fibres optiques de 240 m de long. La lumière est ainsi acheminée vers le laboratoire de mélange où des lignes à retard compensent le chemin optique différentiel entre les télescopes. La recombinaison est assurée par un coupleur, dont la sortie est filtrée et envoyée vers un détecteur à comptage de photons. Simultanément, une source de laser de métrologie est injectée dans les deux bras de l'interféromètre pour stabiliser les trajets optiques avec une précision nanométrique.

de puissance lumineuse à la sortie de l'interféromètre permettant, après passage dans un filtre PID et un amplificateur, de générer un signal de correction actionnant des modulateurs de chemin optique implantés sur les fibres optiques. En situation réelle, sur le site du Mount Wilson, nous avons pu stabiliser l'interféromètre avec une précision de 3 nm. Une telle performance est largement suffisante pour garantir l'observation de franges dont le contraste sera quasi uniquement le fait de l'analyse de la cohérence spatiale qui constitue le fondement de cette méthode de mesure. En mars 2022 nous avons ainsi pu obtenir des franges d'interférence sur l'étoile Véga observée simultanément par les télescopes Sud1 et Sud 2 du réseau CHARA (voir Figure 2). Ce résultat constitue le point de départ d'une nouvelle

génération d'instruments géants. Les réseaux de télescopes kilométriques sont maintenant envisageables grâce à notre méthode de liaison par fibres optiques. Nous participons activement au projet de l'équipe de Georgia State University, en charge de l'instrument CHARA pour étendre leur réseau de télescopes afin de proposer à la communauté astronomique un instrument unique dont la résolution angulaire sera décuplée par rapport aux instruments développés au XX^e siècle.

ÉTENDRE NOTRE DISPOSITIF VERS LE MOYEN INFRAROUGE GRÂCE À LA CONVERSION DE FRÉQUENCES

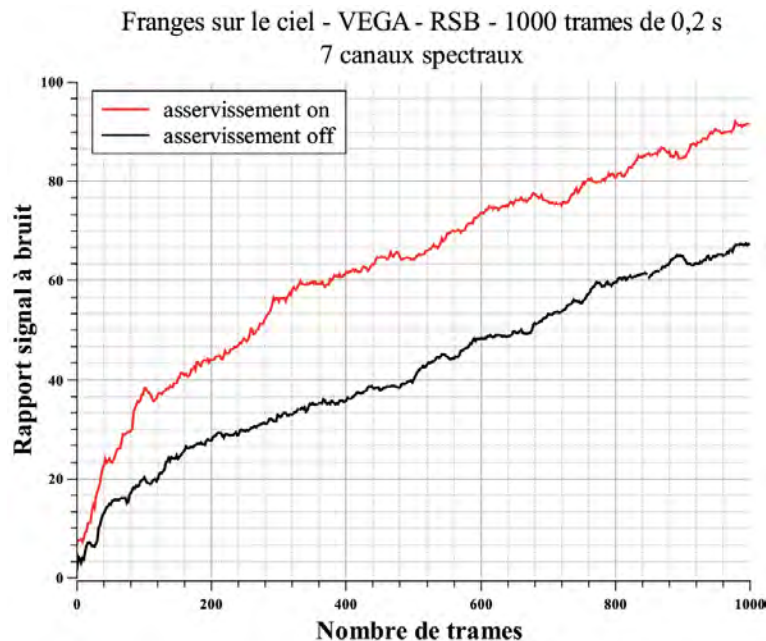
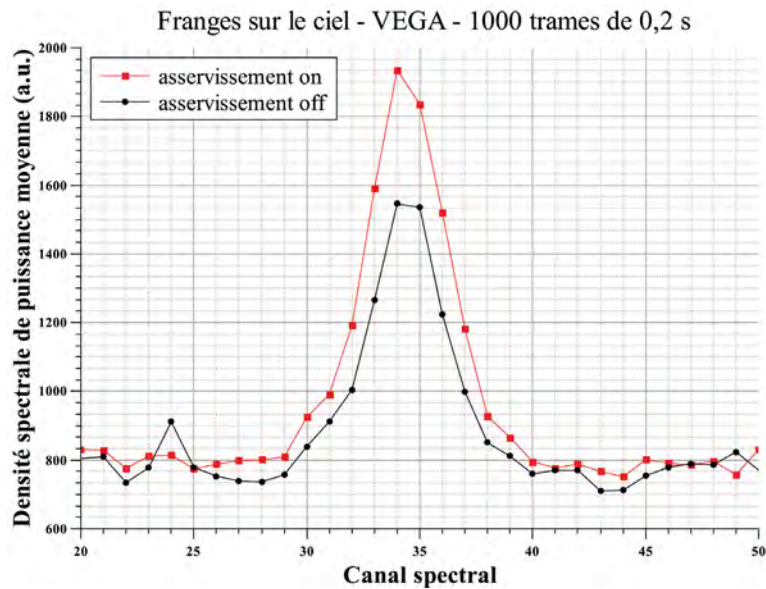
En parallèle du développement des liaisons fibrées grande distance pour les réseaux de télescopes, nous avons exploré la possibilité d'utiliser de tels

instruments dans le domaine des plus grandes longueurs d'onde. Au-delà de 2,5 μm , deux phénomènes vont influencer sur la conception de tels interféromètres. D'une part, le rayonnement thermique ambiant commence à perturber fortement les mesures. Pour s'imaginer l'analogie en visible il faudrait chauffer l'ensemble de l'instrument au rouge et essayer d'observer une source astronomique malgré

tout. La méthode classique pour travailler au-delà de 2,5 μm consiste donc à implanter le plus grand nombre de composants dans un cryostat. D'autre part, les fibres en silice sont fortement absorbantes au-delà de 2,5 μm .

Ces deux raisons nous ont conduit à proposer d'adapter le rayonnement astronomique à notre instrument plutôt que de modifier les composants et utiliser ●●●

Figure 2. (Gauche) Pic correspondant aux franges sur le ciel par moyennage de la densité spectrale de puissance du signal interférométrique détecté en régime de comptage de photons. (Droite) Cette méthode permet d'augmenter le rapport signal sur bruit au cours du temps d'intégration.



TOPTICA

par **OPTON LASER**
INTERNATIONAL

LASERS Monofréquence CW
Puissance - Cohérence - Stabilité

TOPMODE

- ▲ 405nm 50mW - 100mW TEM00
- ▲ Longueur cohérence >25m
- ▲ Largeur raie <5MHz



TOPWAVE

- ▲ 228.5nm 10mW
- ▲ 257nm 15mW
- ▲ 266nm 150mW-300mW
- ▲ 405nm 1W
- ▲ Longueur cohérence >100m
- ▲ Largeur raie <1MHz

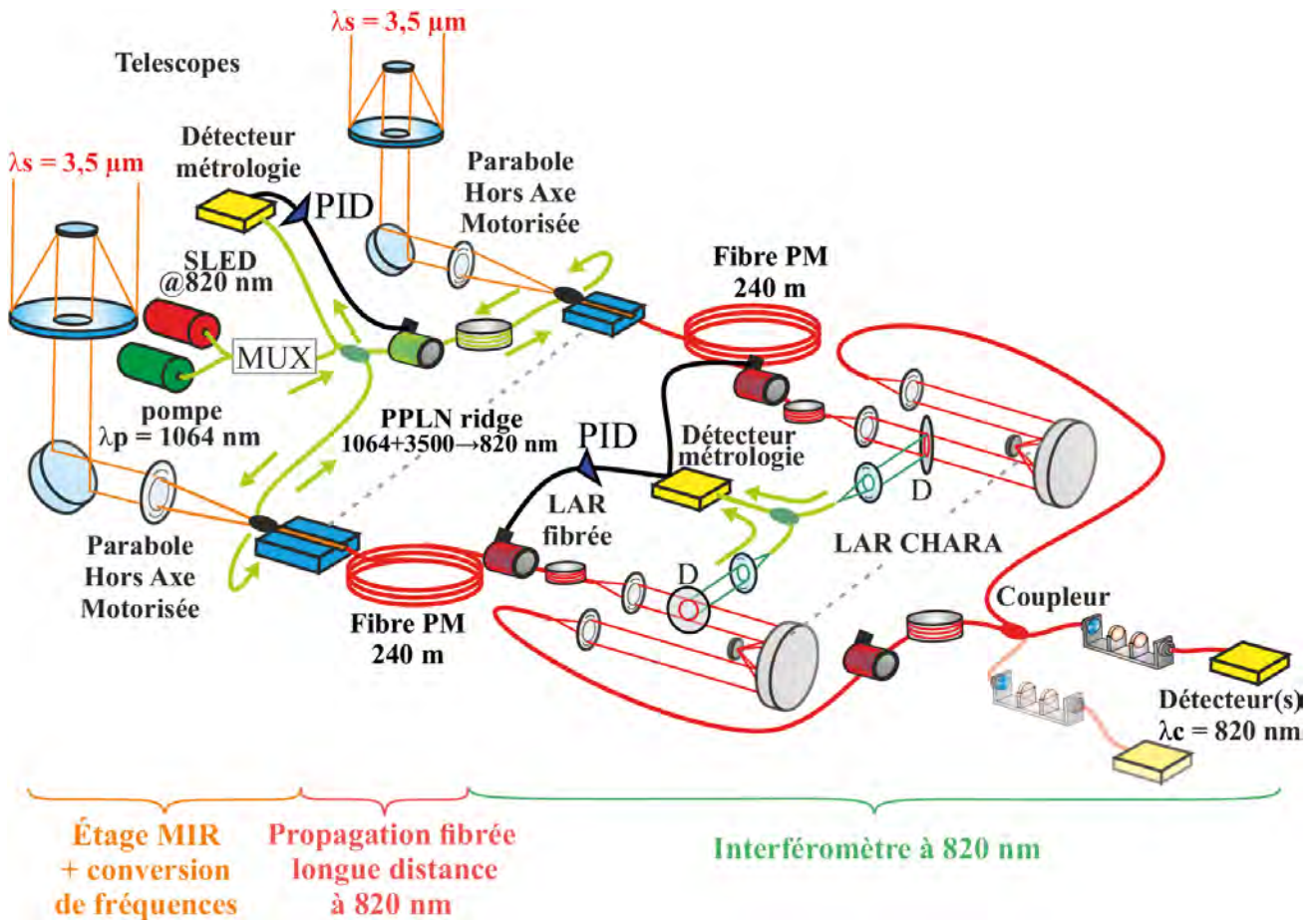


Votre contact :

Laurence.Duchard@optonlaser.com



www.optonlaser.com



une cryogénie. Ce dernier point est particulièrement avantageux si l'on envisage une mission spatiale où la cryogénie est très pénalisante par sa masse, ses vibrations, sa durée de vie et sa consommation énergétique.

La figure 3 présente un schéma de principe de l'instrument ALOHA que nous implantons à l'observatoire du Mount Wilson. Cette nouvelle configuration reprend tous les éléments de la figure 1 en lui adjoignant, dans chaque bras, un étage de conversion de fréquences. Le rayonnement astronomique autour de $3,5 \mu\text{m}$ est injecté dans un guide PPLN de section $8 \times 8 \mu\text{m}$ simultanément avec le flux d'une diode laser DFB de pompe d'une puissance de 30 mW par bras à 1064 nm afin d'obtenir la somme de fréquences autour de 820 nm [4,5].

CONCLUSION

Nous développons actuellement l'instrument ALOHA permettant de proposer une nouvelle approche pour mettre en réseau un ensemble de télescopes dédiés à la haute résolution en astronomie. La première

Figure 3. Schéma de principe de l'interféromètre intégrant l'étage de conversion non-linéaire. Les champs collectés par les télescopes sont mélangés avec un faisceau de pompe dans des cristaux sommeurs de fréquences. La lumière moyen infrarouge ainsi convertie à 820 nm peut se propager dans des guides optiques jusqu'à la station de recombinaison où est effectué le mélange interférométrique.

nouveauté réside dans l'utilisation de liens fibrés hectométriques entre les télescopes et la station de mélange interférométrique. Ce dispositif unique a été testé avec succès sur le réseau de télescopes CHARA (CA USA) de l'université de Géorgie. Ce succès constitue le socle du futur projet d'extension du réseau CHARA au


Mount Wilson avec des bases kilométriques. L'utilisation de la somme de fréquences en astronomie constitue la deuxième nouveauté qui pourrait révolutionner l'astronomie moyen infrarouge, en s'affranchissant de nombreux problèmes liés au fond thermique tels que la cryogénie ou le transport des faisceaux. ●

RÉFÉRENCES

- [1] L. Lehmann *et al.*, *Experimental Astronomy* **46** (3), 447 (2018)
- [2] P. Darré *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 233902 (2016)
- [3] J. Magri *et al.* soumis à *Experimental Astronomy*, preprint : <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2014442/v1>
- [4] L. Lehmann *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **485**, 3595 (2019)
- [5] L. Lehmann *et al.*, *Opt. Express* **27**, 19233 (2019)



New Decade
New Logo
Same Mission



Driving competitiveness of the european photonics industry

EPIC is the world-leading industry association that promotes the sustainable development of organizations working in the field of photonics in Europe. We foster a vibrant photonics ecosystem by maintaining a strong network and acting as a catalyst and facilitator for technological and commercial advancement.