



Normale
Physics Review

INIPR

École normale
supérieure

— *Fights Bohr-dom* —

Édito N_{16} : James Webb Space Telescope : the Christmas gift for astrophysicists

Chers lecteurs et lectrices,

La Normale Physics Review vous souhaite ses meilleurs voeux pour cette nouvelle année. Nous espérons qu'elle sera pleine de curiosité, de recherche passionnée, de trouvailles, et d'émerveillements devant les mystères abyssaux que la nature nous a laissés. Nous tenons à mettre à l'honneur la place indispensable que le partage et la collaboration occupent dans le progrès scientifique. C'est en effet dans cet esprit et à petite échelle que notre journal s'inscrit.

Pour illustrer notre propos, nous avons aujourd'hui le plaisir de vous présenter un dossier spécial sur un projet qui n'aurait jamais vu le jour sans la collaboration et la persévérance de milliers de personnes. Vous l'avez sûrement déjà deviné, il s'agit du lancement du nouveau et révolutionnaire télescope spatial : James Webb. Ne vous inquiétez pas, vos rubriques préférées sont toujours là !

Nous saluons enfin le départ de nos rangs de Ludovic Brivadi, co-fondateur de la Normale Physics Review. Un grand merci pour ce que tu as fait !

— *Esteban Foucher pour l'équipe de rédaction*

SOMMAIRE

Class life	2
Visite du LULI	2
Instant vie de promo	2
Dossier James Webb Space Telescope	3
Un peu de contexte sur le James Webb Spatial Telescope	3
Interview de Pierre-Olivier Lagage	5
Interview de Pierre Guillard	8
Physicist's life	12
Présentation du master 2 AAIS	12
Sir, I have a question	12
New problems	12
Answers to previous questions	12
Mystery photo	13
Solution of N_{15}	13
Photo of N_{16}	13
Acknowledgements	13

CLASS LIFE

Visite du LULI

Suite à un séminaire portant sur les recherches autour des lasers à hautes densités d'énergie, quelques L3 sont allés visiter le LULI (Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses) sur le campus de Polytechnique.

Ce laboratoire abrite des lasers pouvant atteindre une énergie de 2 kJ sur des impulsions très courtes : de l'ordre de la nanoseconde, voire même de la picoseconde selon le laser. Cette énorme densité énergétique permet de créer des plasmas chauds ou de comprimer à très haute pression. Cela rend les lasers du LULI très importants pour des recherches sur la fusion par confinement inertiel, mais aussi sur de l'astrophysique de laboratoire (observation de jets de plasmas par exemple) ou de la planétologie de laboratoire (mesure de la courbe de fusion du fer pour étudier le noyau terrestre).

Nous avons pu visiter le hall laser, long de plusieurs dizaines de mètres, dans lequel le faisceau laser est amplifié. Ce faisceau passe dans divers optiques, parfois dans un tube sous vide s'il est utilisé à une puissance suffisante pour ioniser l'air (qui serait deviendrait alors réfléchissant comme un conducteur!).

Le laser arrive ensuite dans les salles où se trouvent la cible, souvent un minuscule dispositif aligné au micron près. La cible est installée dans une sorte de cuve dans laquelle se trouve un vide poussé (figure 1).

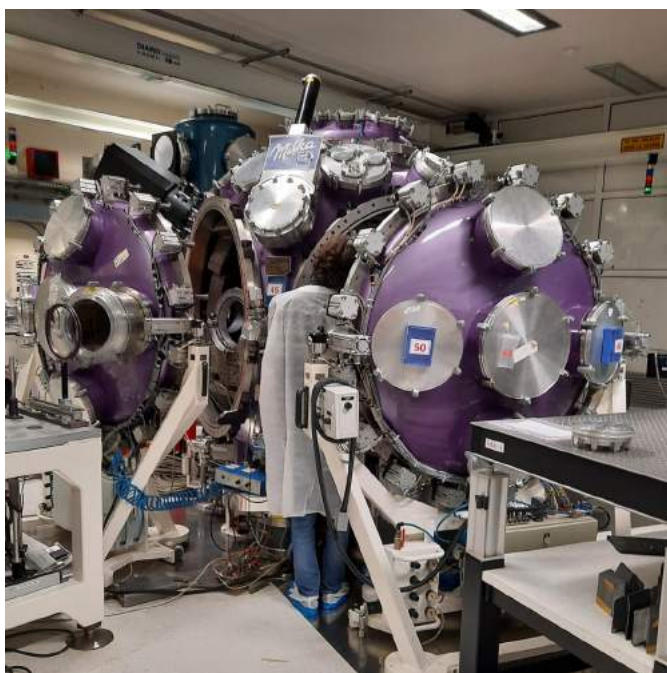


Figure 1 – La cuve violette au nom très approprié, MILKA

Nous avons également eu la chance d'être le premier groupe d'étudiants à visiter un laboratoire annexe où se

trouve le laser Apollon. Ce dispositif, encore en cours d'installation, se trouve plusieurs mètres sous terre dans un bunker appartenant au CEA. Ce laser est encore plus intense et nécessite des protections supplémentaires! Les chercheurs que nous avons rencontré nous ont expliqué qu'ils espéraient à terme pouvoir approcher la limite énergétique permettant la création de paires (photons qui se transforment en paires d'électrons/positrons), une fois le laser entièrement mis en place.



Figure 2 – Le Soleil sur Terre : 10^2 W/m². Apollon : 10^{21} W/m².

– Juliette Savoye

Instant vie de promo

Pour continuer la thématique lasers...



Figure 3 – Partie de laser game entre physiciens : on peut enfin jouer avec des lasers!



LE
JAMES WEBB SPACE TELESCOPE
 ∞ DOSSIER SPÉCIAL

Pour le lancement de ce télescope exceptionnel, qui s'est passé sans encombre ce Noël dernier, la NPR vous propose un dossier spécial : une interview étendue avec le chercheur Pierre Guillard, dont est extraite notamment l'introduction suivante au projet, et un grand entretien avec l'astrophysicien Pierre-Olivier Lagage. Un grand merci à eux deux !

Un peu de contexte sur le James Webb Spatial Telescope

– d'après une interview de Pierre Guillard

Le James Webb Space Telescope (Jwst) est un gros télescope, fruit d'une collaboration à part à peu près égales entre la NASA et l'ESA. L'Agence Spatiale Canadienne a aussi participé en fournissant l'instrument permettant de pointer de manière fine et de faire des images et spectres à basse résolution.

Ce télescope travaille dans l'infrarouge, ce qui le distingue de Hubble : alors que Hubble allait jusqu'à 2 μm (infrarouge proche), le Jwst peut observer entre 600 nm et 30 μm grâce à la caméra infrarouge MIRI (Mid-InfraRed Instrument). On peut voir ce nouveau télescope comme le successeur de Hubble, mais surtout comme celui du Spitzer, un tout petit télescope lancé en 2003 par la NASA. Le Spitzer travaillait sur les mêmes longueurs d'ondes que le Jwst mais ne faisait que 80 cm de diamètre.

Dans cette plage de longueurs d'onde, le Jwst permet de gagner un facteur 7 au niveau du diamètre par rapport au Spitzer, ce qui signifie que 50 fois plus de lumière peut être collectée. Au niveau de la résolution spatiale, autrement dit de la finesse des images que l'on peut observer, on gagne un facteur 10 à 100. En terme de sensibilité, c'est-à-dire en rapport signal sur bruit, c'est un facteur 100 à 1000 que l'on gagne car les instruments embarqués sont plus sensibles. De plus, chaque fois que l'on observe l'univers, on voit des phénomènes différents. Ce télescope gigantesque va donc permettre un réel bond en avant en astronomie.

Un autre point important est que l'astronomie infrarouge est très complémentaire de celle dans les longueurs d'onde optiques : le Jwst va permettre de faire des choses totalement différentes de Hubble. En effet, les longueurs d'onde optiques retracent surtout l'émission des étoiles, car leurs longueurs d'onde se trouvent principalement dans l'Uv et le visible : par exemple, le Soleil a un pic de luminosité autour de 600 nm, ce qui explique entre autres pourquoi notre œil est plus

sensible près du orange. Quant à l'astronomie infrarouge, elle permet de sonder les nuages de gaz qui entourent les étoiles et les processus de formation des étoiles. Il est évidemment possible d'étudier les étoiles dans l'infrarouge puisqu'elles émettent dans cette gamme de longueurs d'onde, qui encode la température des corps astrophysiques. Mais par rapport aux longueurs d'onde optiques, ce genre d'étude permet surtout de retracer l'émission des gaz, des étoiles et des poussières. En effet, dans le milieu interstellaire, les nuages qui permettent la formation d'étoiles contiennent de la poussière. Chauffés par le rayonnement des étoiles, ces grains de poussières réémettent dans l'infrarouge. Par exemple, on remarque ainsi que selon la longueur d'onde d'observation, les images de nébuleuses ont des aspects très différents. De même, en regardant la voie lactée à l'œil nu, on observe des bandes noires qui sont en fait des zones de poussières interstellaires absorbant dans le visible et réémettant dans l'infrarouge.

Quels sont les objectifs scientifiques liés à l'observation dans l'infrarouge ?

Celle-ci a plusieurs conséquences, à différentes échelles de l'univers.

Un premier objectif se trouve dans l'univers proche : observer le processus de formation des étoiles. A cause du *redshift*, le décalage vers le rouge dû à l'effet Doppler, les longueurs d'onde optiques et Uv qui sont émises par les étoiles de galaxies très lointaines nous arrivent finalement dans l'infrarouge. Ce redshift est mesuré par $z = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0) / \lambda_0$ et constitue une limitation pour Hubble, qui ne peut aller que jusqu'à des redshift $z = 7, 8, 9$. Avec le Jwst, on aimerait détecter des galaxies avec un redshift allant de 10 à 20. Cela serait un exploit puisqu'un redshift de 20 correspond à un univers extrêmement jeune, de seulement 100 millions d'années

après le Big Bang. Avec de telles mesures sur les premières galaxies, on va pouvoir tester les modèles de leur formation.

L'autre objectif concerne les exoplanètes. Dans ce domaine aussi, l'infrarouge est très complémentaire de l'optique. En effet, avec des longueurs d'onde optiques, l'imagerie directe des exoplanètes et leur spectroscopie sont très compliquées à cause d'un contraste de plus d'un milliard entre la planète et l'étoile autour de laquelle elle gravite. Dans l'infrarouge, ce contraste est de l'ordre de grandeur du million ce qui facilite l'observation. Le JWST permet principalement une imagerie directe et une caractérisation spectroscopique de planètes gazeuses – les planètes telluriques pourront peut-être être caractérisées plus tard. L'objectif est surtout de caractériser les atmosphères exoplanétaires, c'est-à-dire de chercher du méthane, de l'ammoniac et des molécules organiques complexes qui peuvent constituer des traces de biosignatures. Cela pourrait être une révolution pour ce nouveau télescope.

Il n'y aura a priori pas de preuve directe de signes de vie, mais il est possible de trouver des gaz qui en seraient des signes indirects. Tout le bruit autour de ce sujet est cependant à prendre avec des pincettes car la chimie des atmosphères d'exoplanètes est complexe : des gaz considérés comme des biosignatures sur certaines planètes telluriques comme la nôtre pourraient ne pas en être sur d'autres planètes. C'est le cas de Vénus qui contient du méthane mais absolument pas de vie. Du fait de dégénérescences en chimie, la présence de ces gaz n'est pas une preuve unique de vie.

Le JWST va permettre une spectroscopie plus précise et plus robuste. Ce gain en sensibilité et en résolution spatiale va

pouvoir confirmer – ou infirmer – toutes les hypothèses faites sur ces sujets. Avec les spectrographes beaucoup plus puissants embarqués sur le télescope, des études de dynamique et de spectroscopie beaucoup plus détaillées seront possibles.

Quel est le rôle de Pierre Guillard dans cet énorme projet ?

Il travaille sur l'instrument MIRI qui permet les observations à plus grande longueur d'onde, de 5 à 30 μm . Le MIRI embarque une caméra qui fait une image, ainsi que d'autres outils très particuliers comme les coronographes qui permettent l'imagerie d'exoplanètes. Ces dispositifs permettent en effet de bloquer la lumière de l'étoile autour de laquelle gravitent les exoplanètes pour augmenter le contraste, afin de détecter et de caractériser ces exoplanètes. Ils ont été inventés à l'observatoire de Meudon, et les français sont mondialement reconnus pour cela.

Le dispositif total comprend donc la caméra MIRI avec les coronographes, ainsi que deux spectrographes dont l'un permet de faire à la fois des spectres et des images. Il y a aussi un miroir segmenté très complexe, avec une tâche de diffraction qui l'est tout autant. Pierre Guillard travaille sur la caractérisation à très grande finesse de cette qualité d'image. Il doit réaliser les caractérisations permettant de contrôler cette qualité : il est responsable des activités de mise en service. Autrement dit, il a la responsabilité de fournir l'instrument qui respecte les critères. Pierre Guillard a également une implication scientifique dans le projet. Vous en saurez plus dans l'interview à la fin de ce dossier !



Figure 4 – James Webb en salle blanche (photo NASA)

Interview de Pierre-Olivier Lagage



NPR : *Pouvez-vous vous présenter et expliquer votre rôle au sein du projet ?*

Pierre-Olivier Lagage : Je suis astrophysicien au CEA et j'étais parmi les premiers astrophysiciens dans les années 98 à travailler sur le développement d'un instrument de mesure pour le JWST dans l'infrarouge thermique. En terme de longueurs d'onde c'est de 5 à 28 μm . Il y avait déjà des instruments pour les plus courtes longueurs d'onde : de 0,6 microns à 5 microns. Mais il n'était pas acquis d'avoir un télescope dans l'infrarouge moyen. Nous étions quelques-uns en Europe et aux États-Unis à voir tout le potentiel d'un tel instrument.

À l'époque j'étais responsable scientifique d'un instrument nommé le VISIR sur le Very Large Telescope (VLT) au Chili. C'était un grand télescope de 8m avec une très bonne résolution angulaire. Le télescope étant très grand on a une tâche de diffraction plus petite que pour les petits télescopes, cela permet d'avoir une bonne résolution angulaire. J'avais vu l'avantage d'avoir un grand télescope, par contre quand on est au sol on est gênés par l'atmosphère pour les observations. Au-delà de 13 μm l'atmosphère est opaque, on ne voit plus rien. J'avais donc le rêve d'avoir un instrument dans l'IR moyen dans l'espace sur un grand télescope. On a donc commencé à développer cet instrument.

C'est comme ça que je suis devenu ce qu'on appelle le CoPr, le Co-Principal Investigateur français de l'instrument MIRI, le Mid-InfraRed Instrument. Miri est développé par un consortium de laboratoires européens et aux États-Unis. Au niveau français les laboratoires se sont concentrés sur une partie de l'instrument : l'imageur nommé MIRIM. Comme tous les instruments spatiaux, MIRIM a été développé sous l'égide du CNES. Et au CEA on avait la maîtrise d'œuvre, on est responsables de la réalisation et des performances de MIRIM.

J'ai donc commencé à travailler sur le James Webb en 1998. À l'époque il devait d'ailleurs être lancé en 2007, le lancement a été très vite décalé en 2011. Et il a enfin été lancé avec beaucoup de retard. Mais ce retard n'a pas été pénalisant pour moi, pour ma thématique scientifique qui est les atmosphères d'exoplanètes car c'est un domaine qui avance très vite. En 2011 on n'avait pas les exoplanètes rocheuses qu'on connaît aujourd'hui. On a donc de bien meilleures cibles maintenant. On a développé des méthodes pour enlever les bruits parasites et on est bien mieux préparés. Il est donc temps que le télescope parte et que nous ayons des données.

NPR : *Est-ce que le fait qu'il y ait tant de retard a pu être décourageant ? Vous êtes-vous dit que ça ne marcherait jamais ?*

P-O L. : On a eu très peur en 2011 car il faut savoir qu'aux États-Unis, ils n'hésitent pas à arrêter des projets, contrairement à l'Europe. L'arrêt du projet a été débattu au congrès et ça s'est joué à pas grand-chose. Il y a heureusement eu une mobilisation des astrophysiciens américains et européens autour de ce projet qui est unique. En effet ce projet concerne quasiment toutes les thématiques astrophysiques, il va apporter des observations uniques dans beaucoup de domaines. Il permet de remonter très tôt dans le temps, d'avoir des observations sur la formation d'étoiles et de planètes, sur l'évolution des galaxies, sur les disques dans lesquels se forment les exoplanètes et sur les exoplanètes elles-mêmes et leur atmosphère. Un peu comme Hubble il y a toute une gamme d'utilisation, cette fois dans l'infrarouge, et avec un potentiel de découvertes énorme.

Je n'ai donc pas été découragé. Et en réalité on ne fait pas que ça. Quand je travaillais au début sur le JWST, j'avais les données de l'VISIR. Et maintenant qu'on va avoir les données du JWST, je travaille sur la prochaine mission spatiale de l'ESA dédiée aux exoplanètes, qui s'appelle ARIEL. Ce télescope va uniquement étudier les atmosphères d'exoplanètes avec une approche statistique par l'observation d'un millier d'atmosphères d'exoplanètes pour essayer de comprendre les lois physico-chimiques à l'œuvre dans les atmosphères. Le but ultime étant après ARIEL de pouvoir trouver des biosignatures.

NPR : *Avez-vous voulu faire de l'astrophysique dès le début ?*

P-O L. : Non, j'ai fait l'ENS Saint-Cloud et j'ai fait un DEA de physique théorique. J'étais pas du tout quelqu'un qui s'intéressait au ciel à l'époque. Je me suis tourné vers l'astrophysique car c'est un laboratoire où on peut tester la physique dans des conditions qu'on ne peut pas reproduire sur Terre. En terme de physique nouvelle, il y a deux grandes énigmes que nous apporte l'astrophysique : la matière noire et l'énergie noire, nécessaires pour comprendre la structuration et l'évolution de l'univers en expansion.

J'y suis donc allé en me disant que c'était un très bon laboratoire de physique et j'ai commencé par des études d'astrophysique théorique sur l'accélération du rayonnement cosmique dans des ondes de chocs de supernova. Ma directrice de thèse m'a proposé d'être embauché au CEA. Et comme le département s'orientait vers l'infrarouge alors qu'au départ c'était sur les hautes énergies, elle m'a proposé de prendre en charge le nouveau laboratoire qui allait faire des petites caméras qui s'occupaient d'observer au sol avant d'observer avec

le télescope Iso, le premier télescope européen infrarouge. C'est comme ça que j'ai commencé à diriger une équipe de quelques personnes qui a développé des petites caméras infrarouges. On en a ensuite fait pour des télescopes au Chili, aux Canaries, à Hawaii.

C'était assez génial comme première période, on a vu les régions internes du disque de poussière autour de l'étoile Beta Pictoris a mis en évidence un vide de matière pouvant être interprété comme une empreinte d'exoplanète. Un autre moment passionnant a été l'observation en direct du crash d'un des fragments de la comète Shoemaker-Levy sur Jupiter.

Comme les petites caméras marchaient bien, j'ai été chargé de conduire le développement d'un instrument pour le VLT. Et j'ai continué à observer les disques de poussière, notamment un disque protoplanétaire pour lequel nous avons pu montrer qu'il avait une forme évasée, en très bon accord avec les modèles. Cela m'a aussi amené à être directeur de laboratoire pendant 12 ans. Côté exploitation scientifique du JWST, j'ai pris la coordination des observations d'exoplanètes qui seront conduites dans le cadre du temps garanti MIRI. Il y a notamment une exoplanète que j'ai en ligne de mire, c'est TRAPPIST-1 b dont je veux qu'on ait les données parce qu'elle est tempérée, elle est rocheuse, c'est passionnant.

NPR : *Vous travaillez sur quelle partie du développement du MIRI ?*

P-O L. : En ce moment on est sur la simulation, les observations, le traitement des données et l'interprétation des données qui vont arriver. Avant, en temps que garant des performances scientifiques, j'ai suivi le développement et les tests instrumentaux à Saclay avant de livrer MIRIM. Départ vendredi (17 décembre, NDLR) à Kourou pour voir une fusée décoller pour la première fois !

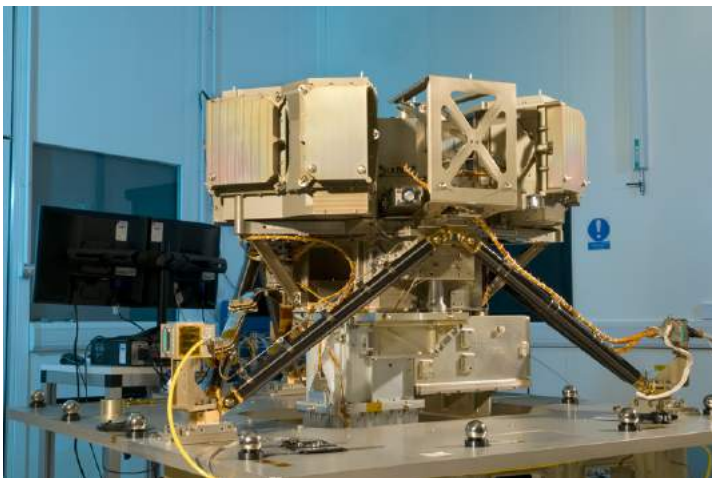


Figure 5 – L'instrument MIRI (photo NASA)

NPR : *Comment se déroule la collaboration internationale autour de ce projet ?*

P-O L. : On collabore en effet beaucoup. Tout au long du développement on avait des réunions de consortiums, tous les 3 mois où on se retrouvait tous pour discuter des progrès. En Europe beaucoup de pays ont contribué : le Royaume-Uni, l'Irlande, la Suède, le Danemark, les Pays-Bas, l'Allemagne, la France, l'Espagne, la Suisse, la Belgique. Ça étonne toujours un peu les États-Unis de comment on a managé tous ces pays mais ça marche.

Au niveau scientifique ceux qui ont construit les instruments ont du temps d'observation garanti. Là j'ai établi des collaborations avec mes collègues des instruments à plus courtes longueurs d'onde pour couvrir toute la gamme de longueurs d'onde. C'est important quand on regarde les atmosphères d'exoplanètes d'avoir toutes les longueurs d'onde car on voit les raies de molécules à différentes longueurs d'ondes et on ne sonde pas les mêmes couches dans l'atmosphère. Pour avoir une vision globale il faut combiner les différentes observations.

Il y a deux aspects : un aspect compétitif entre certains collègues tout de même. Et un aspect très collaboratif. Pour le temps d'observation garanti on a été très collaboratif. Mais il reste un aspect compétition. Quand il y a eu l'appel aux astrophysiciens à proposition pour le cycle 1 des observations du JWST, il y avait un facteur de pression de 4 à 5. Vu qu'il y a 5 fois plus de demandes que de temps d'observation, il y a là réellement une compétition.

NPR : *Avez-vous aussi collaboré avec des entreprises privées ? Et comment s'est déroulé le développement global ?*

P-O L. : Oui. Tout ce qui est la conception, design optique et mécanique, a été fait au CEA. Cependant tout ce qui est réalisation a été sous-traité dans différents pays. Par exemple tous les miroirs ont été réalisés en Belgique, les filtres en Suède et en Irlande. Après tout revient au CEA à Saclay où on intègre tout et on fait les tests. Il faut reproduire les conditions de froid et de vide dans l'espace et on doit faire un simulateur de télescope pour tester la qualité image de l'optique.

Au Royaume-Uni la partie imageur a été intégrée à la partie spectrographe pour faire MIRI qui a été testé en Angleterre. Puis envoyé au Goddard Space Centre, un centre NASA près de Washington, où le MIRI a été intégré avec les 3 autres instruments et testé sous cryogénie et dans le vide : 7 K pour MIRI et 50 K pour les autres. Puis ça a été couplé au télescope et envoyé à Houston pour tester le télescope et les instruments tous ensemble dans une grande cuve qui avait servi au programme Apollo. Une partie de notre équipe a suivi tous les tests. Puis le tout est parti en Californie pour être

couplé au satellite et aux grands écrans thermiques. Et enfin envoyé en bateau à Kourou pour y être envoyé.

NPR : *Pourquoi le MIRI doit-il être à 7 K et non à 50 K comme les autres instruments ?*

P-O L. : Il y a deux raisons :

Il faut voir comment marche un détecteur : la lumière fait passer un électron d'une bande à l'autre pour avoir un courant. Les photons infrarouges ont moins d'énergie et donc les bandes des matériaux sont proches. Et à cause de l'agitation thermique, on peut avoir un courant d'obscurité. Il faut refroidir suffisamment pour que ce courant ne gêne pas les observations. Comme MIRI observe dans les plus grandes longueurs d'ondes de la plage du James Webb, il faut le refroidir plus.

L'autre raison est qu'il faut que l'instrument lui-même soit froid pour ne pas émettre. D'après la loi de Planck, le pic d'émission varie en fonction de la température. Il faut donc refroidir MIRI à au moins 20 K pour que ça ne gêne pas les observations dans l'infrarouge moyen.

Les autres détecteurs sont plongés dans l'espace et protégés par un grand écran qui empêche les rayonnements de la Terre et du Soleil d'aller chauffer, et atteignent passivement une température de 50 K. Pour MIRI il y a cependant besoin d'une machine pour le refroidir. Les machines pour refroidir sont des Joule-Thomson.

NPR : *Est-on limité par la quantité de carburant ?*

P-O L. : Pour bouger le télescope, il y a des gyroscopes et il y a besoin de gaz propanol. Avec son grand écran thermique, le télescope est aussi soumis à la pression de radiation du Soleil qui a tendance à pousser le télescope et l'éloigner. Donc il faut le maintenir et il faut maintenir son orbite au point de Lagrange et il faut du gaz. Cela risque de limiter sa durée de vie, qui est nominale de 5 ans. Mais il y a des consommables pour 10 ans.

NPR : *Certains perçoivent l'astrophysique comme un domaine qui fait rêver mais qui coûte cher et qui n'a pas forcément de conséquences directes sur notre vie par rapport à des sciences comme la climatologie. Pensez-vous que cela peut nuire à l'astrophysique ou est-ce que cela va continuer à se développer autant ?*

P-O L. : C'est le problème général de la recherche fondamentale. Tout est relatif au niveau du coût, c'est peu par rapport au militaire par exemple. En plus ça fait vivre l'industrie spatiale, qui est une industrie stratégique, ce n'est pas simplement pour nos beaux yeux de recherche fondamentale. Pour moi les instruments scientifiques sont des prototypes qui font

avancer les développements technologiques, ça pousse les détecteurs à leur limite.

Et en recherche fondamentale on ne sait jamais ce que peuvent donner les découvertes. Il faut revendiquer la recherche fondamentale, ne serait-ce que pour alimenter les livres des écoliers, pour le futur. C'est le propre de l'homme de pouvoir se poser des questions et essayer d'y répondre sur ses origines. C'est pour ça qu'il faut défendre la recherche fondamentale en tant que telle.

NPR : *Est-ce qu'envoyer des télescopes dans l'espace vous a fait réfléchir sur des questions comme la place de l'homme dans l'univers et nos origines ?*

P-O L. : Oui, pour moi c'est une vraie leçon d'humilité. On ne sait pas dire si on est tout seul ou pas, mais quand on regarde cette immensité, pas mal de petites choses sur Terre nous apparaissent dérisoires. Le mot c'est l'humilité face à cet espace.

NPR : *Comment vous sentez-vous en travaillant à cet immense projet international ? Fier ? Stressé ?*

P-O L. : Vu les retards, je me suis un peu blindé. Je n'y croirai vraiment que quand j'aurai vu le lancement je pense.

Il n'y pas eu de problème sur la collaboration internationale. Quelques fois il y a vraiment un nombre énorme de personnes, plus d'un millier, sur les grosses manip de physique des particules par exemple. En astro ça reste à des tailles raisonnables. C'est vrai que pour certaines missions il y a une tendance à avoir de grands groupes. Mais pas pour la plupart des missions, ARIEL par exemple ça reste à l'échelle de la centaine de personnes. Au contraire c'est un avantage d'être en collaboration internationale avec différentes compétences.

Après pour les questions de fierté on est une équipe. Je dirai plutôt que j'ai eu de la chance de travailler sur plusieurs projets, et que j'ai su attraper cette chance.

NPR : *Avez-vous remarqué des différences entre la recherche en France et à l'étranger ? Plus de liberté ?*

P-O L. : À un moment il y avait plus de postes permanents que de postes non permanents en France. Maintenant il y a beaucoup de guichets où on peut chercher des financements. Cet aspect recherche de financements a beaucoup augmenté ces dernières années. On n'est pas encore au niveau des Us. Je n'ai jamais eu à me plaindre de source de financement quand on travaille sur des projets spatiaux. Y'a le CNES en France. Il y a peut-être un peu moins de flexibilité pour changer de projet en France. Même si ça évolue.

NPR : *Aimeriez-vous bien faire un vol dans l'espace ?*

P-O L. : Quand j'étais plus jeune oui (*rires*). Maintenant moins mais je comprends que ça soit attirant. Par contre le tourisme dans l'espace, ce n'est pas ma tasse de thé. Tous ceux qui pensent que la Terre est plate devraient être envoyés dans l'espace !

NPR : *Un conseil pour des étudiants en physique ?*

P-O L. : Venez en astro ! C'est l'âge d'or de l'astrophysique

avec de nombreuses découvertes concernant les trous noirs, l'évolution des galaxies, la formation des étoiles et des planètes, les exoplanètes et beaucoup d'autres découvertes à venir sur des questions fondamentales sur l'énergie noire, la matière noire, sur la question de la vie ailleurs. Après il y a aussi tout ce qui est bio qui est très intéressant à découvrir. Il n'y a pas tant de places que ça en astro mais si vraiment on est passionné par l'astrophysique, il faut s'accrocher parce qu'il y a de réelles possibilités pour devenir astrophysicien ou astrophysicienne et une bonne base en physique est essentielle !

Interview de Pierre Guillard



NPR : *Quel-est votre rôle dans le projet James Webb ?*

Pierre Guillard : Dans ce projet j'ai un double rôle.

J'ai une casquette science : je fais partie de l'équipe de préparation et d'exploitation scientifique de l'instrument MIRI. Je suis impliqué dans plusieurs programmes d'observation de temps garanti : les équipes qui ont construit des instruments ont une fraction garantie du temps d'observation. Je pilote deux programmes d'observation de temps garanti sur des galaxies proches et sur des régions de formation d'étoiles dans notre galaxie, notamment dans la nébuleuse d'Orion et une galaxie proche qui s'appelle Centaurus A.

J'ai une seconde casquette plus technique et instrumentale où j'ai la responsabilité de la qualité image de la caméra MIRI, de la partie imagerie de cet instrument. Je suis responsable d'un programme de mise en service et de vérification des performances. Le but est de faire des observations dédiées pour vérifier la performance de l'instrument : tester l'acuité de la PSF, Point Spread Function ou fonction d'étalement de point, qui est la réponse instrumentale en vérifiant qu'elle est la plus proche des modèles optiques de l'instrument.

Depuis le début de ma thèse j'ai participé à la création d'un banc de test optique au sol pour tester les performances de la caméra. J'ai aussi participé à l'assemblage de la caméra au CEA, à la vérification de ses performances et à la modification de son design. C'est une partie de mon travail plutôt orientée ingénierie où on réalise des tests au sol pour vérifier les performances de l'instrument, et les confronter au modèle optique. On simule des observations au sol et on essaiera de faire les mêmes dans l'espace ; le but est de comparer les jeux de données dans l'espace, les jeux de données au sol et le modèle optique. Le tout pour vérifier que l'instrument se comporte bien au niveau de l'optique et des détecteurs.

NPR : *Les données de l'espaces vous ne les avez pas encore...*

P. G. : Exactement, pour cela on fait de la modélisation. Je

participe à des simulations où à partir des caractéristiques des observations que l'on veut faire et à partir des modèles des instruments, on simule des images. On teste nos algorithmes de contrôle qualité d'image sur ces simulations. Ensuite on sera prêts à analyser des données prises depuis l'espace.

Je ne suis pas opticien. Je travaille avec des opticiens, des ingénieurs au CEA, des experts des détecteurs. J'ai une expertise sur la reconstruction de cette PSF, la réponse instrumentale. Pendant ma thèse j'ai mis au point des algorithmes pour faire de la super-résolution. C'est ce qui est fait dans les smartphones ou les appareils numériques : on prend plusieurs images légèrement décalées et on en reconstruit une avec une résolution meilleure. On est capable de battre la diffraction car on a de la redondance dans les données, ainsi qu'une connaissance a priori de la physique et de l'optique de l'instrument. C'est utile pour James Webb car, aux plus courtes longueurs d'ondes, la PSF est très mal échantillonnée sur le détecteur : une image d'une étoile sur le détecteur MIRI correspond à à peine plus d'un pixel. La PSF n'est donc pas échantillonnée au critère de Nyquist : on fait alors du suréchantillonnage. C'est ce que je fais dans ce projet - mais on commence à rentrer dans les détails !

NPR : *Vous travaillez plutôt en laboratoire ou bien dans un bureau où vous faites des simulations sur ordinateur ?*

P. G. : Maintenant je suis quasiment exclusivement derrière un écran dans un bureau. Je ne vais plus en salle blanche dans un laboratoire car l'instrument est fini et livré. Je participe à des campagnes de tests et j'ai passé peu de temps en salle blanche de manière générale. Je fais plutôt des simulations et des modèles physiques. En tant qu'astrophysicien, mon intérêt principal est l'exploitation et l'interprétation physique des données de l'instrument, mais pendant ma thèse on m'a proposé de participer à cet aspect technique de préparation et ça m'a intéressé surtout sur le développement d'algorithmes de reconstruction d'images. Je me suis dit pourquoi pas ! Et

puis j'ai mis le doigt dedans et... c'est un engrenage qui m'a mené jusque-là!

NPR : *Quelle est la structure du télescope?*

P. G. : Dans ce télescope, le faisceau principal optique arrive sur le miroir primaire de 25 m² puis est réfléchi sur le miroir secondaire de 2 m de diamètre puis sur le miroir tertiaire à l'intérieur du miroir primaire (il y a un trou au milieu du miroir primaire). La force de ce télescope est que le faisceau est séparé par un système particulier et peut aller dans plusieurs instruments à la fois, typiquement un spectrographe proche IR et une caméra IR MIRI en parallèle. Bien sûr, on n'observe pas exactement la même région du ciel avec deux instruments pour une même direction de pointage mais on peut observer deux régions simultanés avec deux instruments. Ce qui n'était pas le cas de Hubble.



Figure 6 – Les miroirs du JWST (photo NASA)

NPR : *Comment le projet est-il organisé?*

P. G. : C'est un projet qui se répartit entre la NASA et l'ESA.

L'Europe fournit tout ce qui est lanceur (Ariane 5). Mais elle fournit également deux instruments. Le NIRSpec : le spectroscopie proche IR fabriqué aux Pays-Bas par l'ESA. Et l'instrument MIRI : fabriqué par un consortium de laboratoires européens. Sa majeure partie a été construite à Saclay au CEA (partie à laquelle j'ai participé). Le spectrographe de MIRI a été fabriqué en partie aux Pays-Bas, en partie en Angleterre... MIRI est en fait un conglomérat de la participation de dizaines de laboratoires européens! L'Europe fournit aussi du support : en tant que membre de l'équipe MIRI, je dois me rendre où est piloté le télescope pour vérifier les performances de l'instrument, pour monitorer l'instrument quand il est allumé. L'ESA fournit du staff aux Us pour piloter les instruments et faire de la vérification de performance. Le télescope est piloté depuis le *Space Telescope Science Institute* à Baltimore, qui a aussi piloté scientifiquement le télescope Hubble.

La NASA fournit le télescope et le spacecraft. La partie du refroidissement de MIRI a aussi été faite par la NASA. MIRI, travaillant dans l'IR moyen, doit en effet être davantage refroidi que les autres instruments. Il faut le refroidir activement à l'hélium pour le maintenir à 4 K. La moindre perturbation thermique nous aveugle et la température des miroirs eux-mêmes nous aveuglerait sans refroidissement. Les autres instruments sont refroidis passivement à 40K.

L'agence Canadienne fournit l'instrument NIRISS qui est un spectroscopie proche IR et le FGS (Fine Guidance Sensor), l'instrument qui permet de pointer le télescope. Ce système de pointage est bien meilleur que celui de Hubble : on est capable de pointer l'instrument en utilisant les images des instruments eux-mêmes alors que sur Hubble on utilise un plus petit télescope à côté. On pourrait pointer à une précision comparable à la taille d'une abeille sur la Lune, et on pourrait détecter sa signature thermique. Ça donne une idée de la précision diabolique de James Webb!

NPR : *Avez-vous beaucoup de contact avec les autres laboratoires du MIRI?*

P. G. : Oui bien sûr! On est en contact très très étroit. Toutes les semaines on a des téléconférences. L'ensemble de l'équipe qui a participé à la fabrication de l'instrument et qui maintenant se démène pour finir les programmes de vérification sont en contact avec nous quasi quotidiennement. Je travaille aussi avec des experts de traitement du signal notamment des gens du laboratoire de Supélec et du laboratoire des signaux et systèmes à côté à Saclay. Ce sont eux qui m'aident dans mes tâches de reconstruction d'images. C'est une collaboration entre astrophysiciens, ingénieurs de traitement du signal

et opticiens. Il y a vraiment un corps de métier très large pour une sous-tâche, une infime partie de toute la vérification des performances du télescope. Le projet global a une organisation complexe, c'est un peu tentaculaire !

NPR : *Quelle est la place des entreprises extérieures dans ce projet ? Y a-t-il un rôle joué par le privé ou bien est-ce un projet très institutionnel ?*

P. G. : Bien sûr, c'est pas du tout cloisonné.

Il y a beaucoup de contrats industriels qui sont passés entre les laboratoires et des entreprises privées notamment du secteur de l'électronique et de l'optique. Il y a beaucoup de choses que les laboratoires ne savent pas faire. Certaines cartes électroniques sont faites par une entreprise en Italie, des modules d'alimentation sont fabriqués en Angleterre, des parties optiques sont faites en Allemagne par notamment Schott. Ces derniers travaillent notamment sur les traitements de surface de certaines optiques à l'intérieur des caméras. La roue à filtres qui équipe MIRI est fabriquée par un laboratoire en Allemagne. Il y a des centaines de contrats industriels qui sont passés, c'est extrêmement collaboratif.

NPR : *Que ressentez-vous en participant à un projet d'une aussi grande envergure ?*

P. G. : C'est une question intéressante. Je me sens à la fois comme un tout petit rouage dans un ensemble hyper complexe : comme l'impression d'être un tout petit pignon dans un moteur de F1 ! Ça peut être vécu comme une difficulté : je me sens à la fois très responsable de l'instrument et comme un tout petit acteur qui apporte sa petite pierre à l'édifice. Ce qui m'impressionne toujours quand on fait partie d'un tel projet c'est de voir à quel point les gens de différents labos, de différentes cultures, des gens avec des mentalités complètement différentes sont capables de travailler ensemble. On parle de chercheurs, d'ingénieurs, de techniciens, d'électroniciens, d'opticiens qui n'ont pas du tout la même approche.

C'est grâce à la persévérance de ces gens que le projet arrive à terme en fait. Il y a eu énormément de problèmes pour mettre au point ce télescope, et à chaque fois on a fait des plans, on a résolu puis de nouveaux problèmes sont arrivés... ça n'a pas arrêté pendant 20 ans. C'est cette persévérance qui m'impressionne et je me sens tout petit là-dedans ! Des milliers de personnes sont sur ce projet et c'est une belle métaphore de « l'union fait la force ».



Figure 7 – Une équipe américaine devant une maquette 1 :1 du JWST (photo NASA)

NPR : *En effet, pour repousser les limites de la science il faut de plus en plus collaborer à une échelle mondiale, on peut en cela comparer le James Webb à des projets comme le LHC ou bien l'équipe Event Horizon Telescope qui a capturé le premier trou noir en 2019 et encore bien d'autres. On ne peut plus faire les choses tout seul comme il y a 200 ans et la communauté scientifique est devenue beaucoup plus organique. James Webb en est-il le meilleur exemple aujourd'hui ?*

P. G. : Oui c'est vrai aussi pour James Webb. Il a rassemblé des communautés différentes. La communauté des astronomes opticiens qui ont beaucoup travaillé sur Hubble et les télescopes optiques. Et la communauté des astronomes IR. Jusqu'à maintenant c'était deux communautés assez différentes et disjointes : on n'étudie pas les mêmes choses en IR et en visible. James Webb a mis ensemble tout ça et la même chose s'est passée quand la photo du trou noir a été prise : la communauté des phénomènes de hautes énergies s'est rassemblée avec la communauté des très basses énergies des ondes radio. C'est assez génial de voir des gens de deux communautés qui n'échangeaient pas beaucoup avant se parler maintenant. Je travaille avec des collègues qui ont travaillé sur des anciens télescopes IR en Iso... Et ils ont une super expérience à apporter à un télescope qui est présenté comme le successeur d'Hubble mais qui est en fait tout un héritage de l'astronomie IR.

NPR : *Êtes-vous stressé ? (La question suscite un rire)*

P. G. : Jusqu'à maintenant j'avais la tête dans le guidon. Auparavant on avait un problème très concret, on devait le résoudre, on était vraiment dans les données, dans les programmes. Et d'un seul coup on relève la tête et on se dit « je suis responsable de ce truc et il faut que ça marche » ! Quand

le lancement approche on sent la pression oui! C'est les premières semaines où je ressens ça. Mais c'est aussi beaucoup d'excitation, ça fait tellement longtemps que ça traîne qu'on a hâte de jouer avec de vraies données maintenant.

NPR : *Quel est l'avenir de ces données? Et qui peut utiliser le télescope et comment?*

P. G. : Il y a une partie directement reliée au financement et à la construction des instruments : l'Europe a une fraction du temps d'observation de garantie d'un minimum de 15 %, dans ce cas les données collectées sont privées pour quelques mois. C'est la partie réservée pour la construction technique de l'instrument. L'autre partie est complètement ouverte à toute la communauté astronomique (les 85 % restants). Chaque année il y a un appel à propositions auquel les chercheurs répondent. Ils montent des dossiers. Toutes ces propositions sont évaluées par des experts qui les notent et les classent. Enfin les 6000 h d'observation annuelles sont attribuées aux meilleurs. Ici le temps propriétaire des données est d'un an. Au terme du temps propriétaire des données, celles-ci sont rendues publiques et n'importe qui peut les exploiter et publier un papier avec.

NPR : *En terme de propulsion, le télescope n'a pas de système durable, quelle espérance de vie attendez-vous du James Webb?*

P. G. : Exactement, pour faire des corrections de trajectoire ou des gros écarts de pointage on utilise du gaz (azote). Ce gaz étant en quantité finie dans les réservoirs, c'est ça et uniquement ça qui limite la durée de vie de la mission : maintenir le télescope sur son orbite autour du point de Lagrange 2. Nominale, il y a de quoi prévoir pour 5 ans. Mais si Ariane 5 place le télescope sur une orbite parfaite, comme ça a été le cas pour le satellite Planck, le James Webb pourrait durer jusqu'à 10 ans.

NPR : *Selon vous quel est l'avenir de l'astrophysique face à des sciences plus appliquées à la vie quotidienne? L'astrophysique coûte beaucoup d'argent. Quelle est sa place dans la société?*

P. G. : En explorant d'autres mondes, de notre système solaire aux galaxies très lointaines, l'astronomie est à la recherche de nos origines. Elle a donc une place centrale dans l'histoire de l'homme, c'est d'ailleurs la plus vieille science! Et par ailleurs, elle a de nombreuses retombées pratiques dans notre vie courante. Je pense à la navigation par exemple : on

en sait mieux sur la Terre et sur notre propre monde grâce à l'astronomie... Je pourrais aussi citer l'invention de la CCD qui équipe maintenant tous nos appareils photo qui a été inventée par les astronomes. Envoyer des rovers sur Mars nous apprend énormément sur la formation de la Terre elle-même, sur l'apparition de la vie. Les sondes qu'on envoie sur les comètes pour caractériser les molécules organiques nous apprennent aussi sur la contamination de la Terre.

L'astronomie est une science à la recherche de nos origines de manière générale, de notre place dans l'Univers, mais elle a aussi beaucoup de retombées concrètes sur notre vie courante. L'astronomie est aussi pour moi une contemplation de la nature au sens cosmogonique du terme, et participe à la création du "beau". Donc l'astronomie continuera à avoir une place centrale dans l'histoire de l'homme et je pense que l'astrophysique va toujours continuer à se développer.

Il y a de plus en plus de perméabilité entre ce qui s'y fait et ce qui est fait dans les sciences du climat ou la physique non-linéaire. Par exemple, les algorithmes des grosses simulations numériques qu'on utilise pour faire des modèles océan-atmosphère sont les mêmes que ceux utilisés pour faire de la formation de galaxie. La manière d'implémenter cette physique dite « sous grille » est la même que celle pour faire des simulations cosmologiques. C'est je pense ce qui fait une des forces de ce domaine qui regroupe beaucoup de physiques différentes : physique non-linéaire, thermodynamique, rayonnement, mécanique quantique...

Un télescope comme James Webb c'est environ 10 milliards de dollars, 30 ans d'exploitation, des milliers de salaires sur 40 ans. Ça représente 0,60 dollars par an par *tax payer* américain, j'ai fait le calcul. Si l'on compare au budget militaire américain et européen, JWST, et la recherche en astronomie de manière générale sont une goutte d'eau!

NPR : *Ce qui sauve l'astronomie, c'est aussi qu'elle fait rêver. Quand les gens pensent à la science ils ont souvent en tête des images venues du ciel.*

P. G. : C'est vrai qu'il y a une part de rêve et de beauté. L'astronomie est aussi la contemplation de la beauté de l'Univers (car oui, il est beau!). Cette beauté, et cette part de rêve, peuvent être des leviers pour amener le grand public à s'ouvrir à la science, et l'astronomie est efficace à cela. Parler d'astronomie c'est parler de plein de physiques différentes. C'est aussi un juste retour des choses que de partager cette science au grand public : ça coûte de l'argent donc il faut que ça cascade sur notre connaissance et sur le bonheur des gens.

– propos recueillis par
Oriane Devigne et Esteban Foucher

PHYSICIST'S LIFE

Présentation du master 2 Aais

C'est durant les froids jours d'hiver à Montrouge, durant mon stage de M1, que je me suis posé pour la première fois une question qui m'a taraudé des mois durant par la suite : quel M2 choisir ? Au lieu du M2 physique théorique, c'est finalement le M2 Aais (Astronomie, Astrophysique et Ingénierie Spatiale) que j'ai choisi pour l'année qui a suivi. La principale raison ? Ma passion pour l'espace. Je voulais appliquer mon attrait pour la physique à mon thème de recherche préféré. Et j'ai été bien servi : le M2 permet d'aborder la plupart des thématiques liées à l'espace (exoplanètes, relativité générale), et traite toutes les optiques possibles, de l'expérimental (astrophysique de laboratoire !) à la théorie (cosmologie...) en passant par l'observationnel (instrumentation...) et le numérique (simulations).

En astrophysique, il est important d'acquérir une large culture des thèmes et méthodes pour un travail efficace ; c'est l'avantage de ce large panel de cours, dans lequel nous sommes invités à piocher de par l'organisation du M2. Des modules auxiliaires viennent compléter l'ensemble de cours magistraux : cours-TP pour se former à la programmation, projets sur plusieurs mois qui donnent un aperçu guidé du travail de recherche, et stages d'observation d'une semaine en mars, à Nice, Saclay, ou Grenade en Espagne !

Cependant, on se spécialise également dans un thème et une méthode de travail, avec en tête le choix d'un stage, et plus tard d'une thèse : c'est l'objectif de la majorité des étudiants du master, afin de continuer ensuite dans l'enseignement et/ou la recherche (enseignant-chercheur, chercheur, ou astronome) ; cependant, certains sortent du cadre académique et sont rapidement recrutés dans le milieu privé (aérospatial, ou même des sujets qui n'ont rien à voir avec l'espace). Ces cours et modules complémentaires servent notamment à donner un aperçu de nos connaissances dans différents domaines, puisque nous sommes à la frontière de l'inconnu, c'est-à-dire de la recherche !

Ces quelques mois de M2 m'ont notamment permis de dépasser mon indécision ; comme beaucoup, je ne savais pas exactement dans quelle direction aller : ainsi, parti pour travailler sur les ondes gravitationnelles, je vais finalement m'orienter vers un travail numérique sur les systèmes à trois corps dans un contexte tout ce qu'il y a de plus classique ! Mais en outre, j'ai pu rencontrer des personnes, des amis aux parcours parfois très différents du mien (par exemple, un ingénieur ayant décidé de se spécialiser). Le programme du master est chargé, mais la charge de travail est gérable et permet une belle vie étudiante à côté.

D'un point de vue plus concret, le master est divisé en deux parcours, AA (Astronomie et Astrophysique) et Dsg (Dynamique des Systèmes Gravitationnels), mais les cours

sont partagés entre les deux. Le parcours Dsg a une thématique plus mathématique, mais c'est par exemple exactement celui qui me convenait. Pour s'inscrire, vous recevrez un message en cours d'année pour débiter le processus ; pour toute question, n'hésitez pas à me contacter ou à envoyer un message à François Levrier (francois.levrier@phys.ens.fr), responsable du master pour l'Ens.

– Alexandre Prieur (alexandre.prieur@ens.fr)

SIR, I HAVE A QUESTION

New problems

If you enjoy scratching your head on deep questions about the nature of the universe or simply giving a think to fun, everyday problems, this section is for you!

Here is a selection of 10 questions that may tickle your brain...

- I :** What is the order of magnitude of the energy one needs to cut something ?
- II :** It is raining and I have forgotten my umbrella. Is it better to run or to take my time if I want to minimize the amount of water that touches me ?
- III :** In many canteens, one may find knives with a thicker handle which are magnetic and can stick to spoons... Why could that be ?
- IV :** Is it possible to actually lock a door using a chair stuck between the door and its handle ? What are the limits to this method ?
- V :** Give an estimate of the order of magnitude of Santa's speed to deliver all the gifts in time.
- VI :** How does the obliquity of the Earth evolve ?
- VII :** What is the pairwise interaction potential between two charges in a 2D space ?
- VIII :** What are the effects of the finite size of a ferromagnetic many body system on its phase transition feature ?
- IX :** How would you prove that the Earth is round, theoretically or experimentally ?
- X :** Can a quantum system make a phase transition at a non zero temperature ?

Answers to previous questions

Question **III** of N_{13} :

We can setup a rather simple model of the situation (which is, by many aspects, « très taupin »). Taking the pool to have a uniform temperature $T(t)$ (which is reasonable for our time scale and purpose), it acts as a thermal reservoir

with capacity $C = cV\rho$, where the specific thermal capacity of water $c = 4.19 \text{ J/g/K}$ is well known, volume V can be estimated as $V = 10 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 100 \text{ m}^3$ and $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$.

The system is being forced by the sunlight cycle, which at simplest can be thought of as an incoming sinusoidal power $P_{\odot}(t) = P_{\odot,S}S(1 + \cos(2\pi t/\tau))/2$ with the surface $S = 10 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 50 \text{ m}^2$ and the period $\tau = 24 \text{ h}$. Power per unit surface $P_{\odot,S}$ varies depending on the latitude and various factors (obviously, clouds and the weather) but ignoring clouds, its average value on Earth is 342 W/m^2 (a good estimate of this value can actually be found using the Stefan-Boltzmann law on the surface of the Sun and taking in count its distance to the Earth).

Losses and radiation are crucial to finding the temperature of the system but not can be ignored as a first approximation when it comes to its variations, thus we can neglect them if we replace $P_{\odot}(t)$ by $\delta P_{\odot}(t) = P_{\odot,S}S \cos(2\pi t/\tau)/2$.

Then, $T(t)$ can be found using the following equation :

$$C \frac{\partial T}{\partial t}(t) = P_{\odot,S}S \cos(2\pi t/\tau)/2.$$

Thus over the course of a day, $T(t)$ varies sinusoidally with amplitude $P_{\odot,S}S\tau/(4\pi C) \approx 0.3 \text{ K}$. This varies reasonably since C/S does not depend on S but underestimates the result because we neglected power losses due to interaction with the environment, which tend to make T closer to the temperature of the surroundings, which changes more dramatically during the day-night cycle due to air's lower thermal capacity. Sadly this is much harder to estimate from scratch and we would either need a much more complex model or to use an experimental value for the temperature variations of the atmosphere.

– Victor Lequin

MYSTERY PHOTO

Solution of N_{15}

This photo shows a homemade tuning-fork Atomic Force Microscope (AFM). The sensor is a standard 32 kHz quartz monocrystalline tuning fork, widely used by the watch industry and that you could buy for the price of 0.1 €. Following Franz Giessibl [1] at the end of the nineties, the AFM community started using these very high-quality resonators as force sensors. Indeed, the tuning fork shows many advantages when compared to a silicon cantilever. Its main benefit is its very high stiffness allowing to measure very large forces with great sensitivity. Moreover, the electrodes that you can see on the quartz crystal allow one to measure its oscillation with a simple amplifier, getting rid of the standard laser and photodiode used in conventional AFMs.

In the experiment presented here, a tungsten tip has been glued on the tuning fork which is placed above a mica sample. Eventually, a thin liquid layer will be confined between the tip and the sample. By driving and monitoring the vertical oscillation of the tip, we measure the conservative and dissipative response of the liquid when varying the film thickness. From this hydrodynamic drainage measurement, we expect to extract the liquid-sample friction coefficient.

Indeed, while an infinite friction (or no-slip) boundary condition is usually assumed between liquid flows and solid surfaces, there is no physical force ensuring that water molecules stick to the surface. And what can happen will happen : liquids in fact slip on surfaces [2] on distances ranging from a few nanometer (e.g. : water on a hydrophobic surface) to several microns (e.g. : polymers on various surfaces). Since a few years, carbon nano-channels have proven exceptional water permeability and ionic selectivity [3]. These channels could for instance help to design new membranes for water desalination or harvesting of osmotic energy. However, despite these rapid developments, the understanding of water-carbon interactions remains surprisingly poor. This home-made AFM experiment is designed to help understanding the unique water-graphite friction and should eventually allow measurements on graphene. More to come in the next months!

References :

- [1] Giessibl, RSI (2019)
- [2] Bocquet, Charlaix, Chem. Soc (2010)
- [3] Secchi et al, Nature (2016)

– Mathieu Lizee

Photo of N_{16}

Pour cette spéciale James Webb, la photo mystère (figure 8) reste dans le thème : saurez-vous retrouver quel élément du télescope occupe le cliché et deviner quelle opération est réalisée? Des éléments de réponse se trouvent dans notre dossier! Réponse le mois prochain.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank our contributors for their wondrous articles and questions. We also thank everyone who sent us their feedback and encouragements. And as always thank you, dear reader!

We need you! If you would like to contribute or support us, don't hesitate to contact us :

- Lauritz Hahn $\varphi 20$:
lauritz.hahn@gmx.de
- Juliette Savoye $\varphi 21$:
juliette.savoye@ens.fr

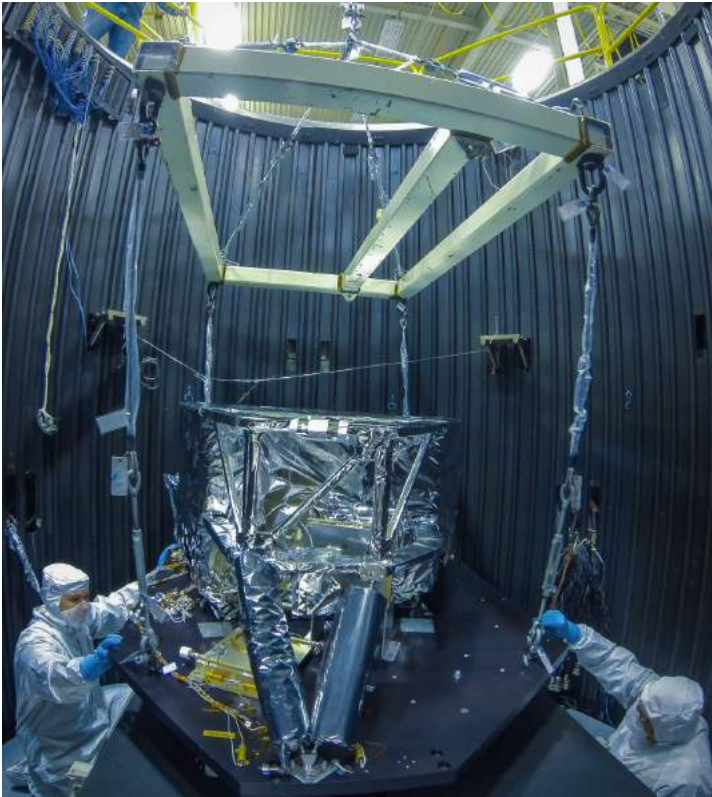


Figure 8 – (Crédits NASA)

- **Victor Lequin** φ_{21} :
victor.lequin@ens.fr
- **Oriane Devigne** φ_{21} :
oriane.devigne@ens.fr
- **Esteban Foucher** φ_{20} :
esteban.foucher@ens.fr
- **Rodrigue Orageux** φ_{20} :
rodrigue.orageux@ens.fr
- **Basile Dhote** φ_{19} :
basile.dhote@ens.fr
- **Guillaume de Rochefort** φ_{19} :
guillaume.de.rochefort@ens.fr

(The Editorial Board)

<https://normalephysicsreview.netlify.app>