

## MUSE: une nouvelle fenêtre sur l'univers lointain

Johan Richard

Centre de Recherche Astrophysique de Lyon, Observatoire de Lyon

Depuis 2014, une fantastique machine à remonter le temps a été mise en place sur un des Very Large Telescope, situé dans le désert de l'Atacama au Chili. MUSE, pour Multi Unit Spectroscopic Explorer, est un nouvel instrument avec des capacités uniques. Nous détaillons dans cet article son fonctionnement, ainsi que les tout premiers résultats scientifiques qu'il a déjà permis d'obtenir.

### Un spectrographe intégral de champ de toute dernière génération

En astrophysique, la spectroscopie est une technique fondamentale, car elle permet, en dispersant la lumière des étoiles et galaxies selon leur longueur d'onde, de mesurer un grand nombre de paramètres physiques : vitesse, composition chimique, masse, température, ou encore distance (via le décalage spectral cosmologique). On va ainsi au-delà de la simple mesure photométrique qui se limite à donner la quantité de lumière à une position donnée du ciel.

En spectroscopie classique, on procède en sélectionnant à l'aide d'une ou plusieurs fentes la ou les zones du ciel dont on veut disperser la lumière, puis on collecte les spectres sur un détecteur (figure 1a). Un des inconvénients majeurs de cette technique est la nécessité de présélectionner les objets à observer selon des critères photométriques (couleur, brillance, morphologie), ce qui limite le pouvoir de découverte : on ne mesure que les spectres de sources déjà connues.

Plus récemment s'est développée une nouvelle technique, dite de spectrographie intégrale de champ, qui permet cette fois d'obtenir un spectre en chaque point d'une région du ciel de manière systématique. En particulier, l'utilisation de découpeurs d'images (figure 1b) a permis de développer cette technique tout en conservant une efficacité optique maximale, comme c'est le cas pour MUSE.

Les caractéristiques principales de MUSE sont les suivantes : c'est un spectrographe intégral de champ qui couvre le domaine spectral dans le visible et proche-infrarouge de 475 à 930 nm, avec une résolution spectrale de  $\Delta\lambda = 0.25$  nm ( $R = 1\ 800$  à  $3\ 720$ ), et un champ de vue de  $1 \times 1$  arcmin<sup>2</sup>

échantillonné à 0.2" par pixel, le tout avec une transmission (de l'entrée de l'instrument jusqu'au détecteur) de l'ordre de 60 %. Il est ainsi 3,5 fois plus sensible et couvre un champ 20 fois plus étendu que son prédécesseur sur le VLT.

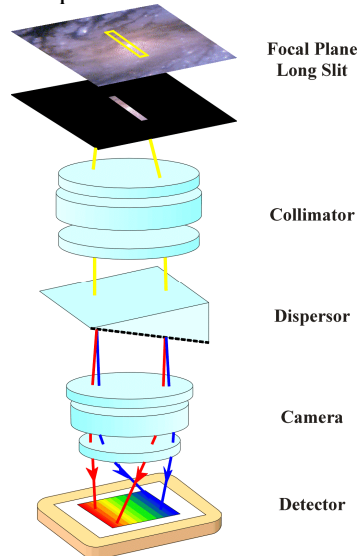


Fig.1. (a) Spectroscopie classique. La lumière d'une fente est collimatée, dispersée par un prisme ou réseau, puis focalisée sur un détecteur.

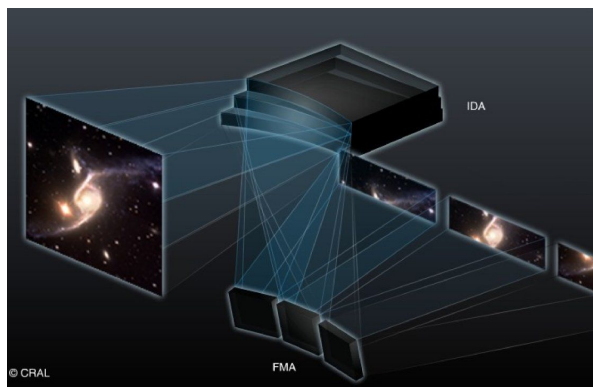


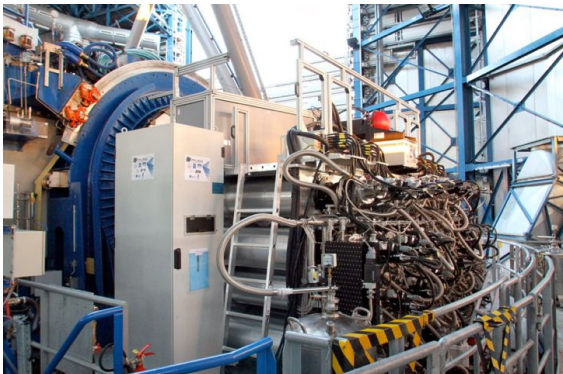
Fig.1. (b) Ci-dessus : principe du découpeur d'images. Un champ de vue couvrant une galaxie illumine un empilement de miroirs sphériques (IDA) qui le découpe en plusieurs faisceaux qui sont ré-imaginés par des miroirs plans (FMA).

Pour arriver à de tels chiffres, ce sont plusieurs milliers de pièces opto-mécaniques de haute technologie qui sont assemblées en une impressionnante machine pesant près de 7 tonnes (figure 2a). Au cours de son trajet dans l'instrument, la lumière provenant du télescope va ainsi être séparée en 24 faisceaux couvrant une partie du champ de vue.

Un jeu de miroirs va renvoyer les rayons dans 24 modules (ou unités) identiques, chacun opérant sur une fraction du champ (figure 2c). D'où le nom donné à MUSE : explorateur spectroscopique multi-unités. À l'intérieur de chacun de ces 24 modules, on opère un second découpage de chaque portion de ciel avec un petit découpeur d'image, qui permet de réaligner 48 fentes en entrée du spectrographe. Ces 48 faisceaux sont alors dispersés par un réseau puissant et les spectres obtenus envoyés sur un détecteur ultrasensible.

On obtient au final 24 images de  $4\,096 \times 4\,096$  pixels, soit environ 380 millions de pixels.

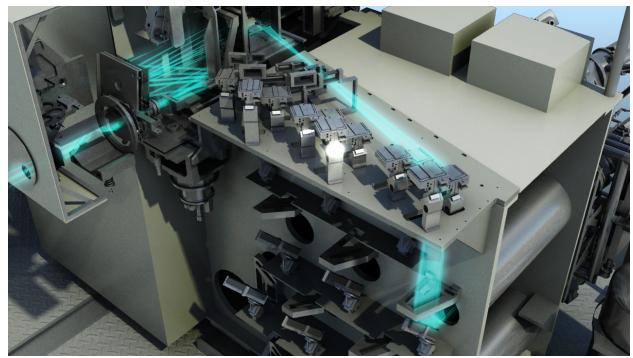
Un énorme travail informatique permet ensuite de reconstituer le puzzle et de remonter à un cube d'information : les deux dimensions spatiales sur le ciel et la troisième dimension donnant la longueur d'onde.



**Fig.2a.** Vue générale de l'instrument MUSE sur le Very Large Telescope. Crédits : P. Caillier.



**Fig.2b.** Mise en place de l'instrument sur le télescope. Crédits : E. Le Roux / UCBL.



**Fig.2c.** Illustration du découpage de champ de MUSE et des optiques relais.

Conçu par un consortium d'instituts astrophysiques européens regroupant le Centre de Recherche Astrophysique de Lyon (qui est le pilote du projet), l'Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie à Toulouse, les instituts astrophysiques de Göttingen et de Potsdam en Allemagne, l'observatoire astronomique de Leiden aux Pays-Bas et l'institut ETH à Zurich en Suisse, le projet instrumental MUSE a débuté en 2001. La construction, l'assemblage final et les tests se sont achevés en 2013 sur le site de l'observatoire de Lyon à Saint-Genis-Laval, puis l'instrument a été démonté et envoyé au Chili. Il a été remonté et testé à nouveau sur place avant d'être mis sur le télescope en janvier 2014. Tâche délicate, il a fallu le suspendre au bout d'une grue pour le faire rentrer par l'ouverture du télescope ! (figure 2b).

Après un ultime alignement de l'instrument avec le télescope, c'est le moment magique dit de la "première lumière" : le 31 janvier 2014, MUSE a observé sa toute première étoile. Le choix s'est porté sur une petite étoile de la constellation du Peintre, nommée étoile de Kapteyn. En effet, distante de 13 années-lumière, les photons recueillis par MUSE ont mis autant de temps à voyager que la durée de réalisation du projet... Tout un symbole !

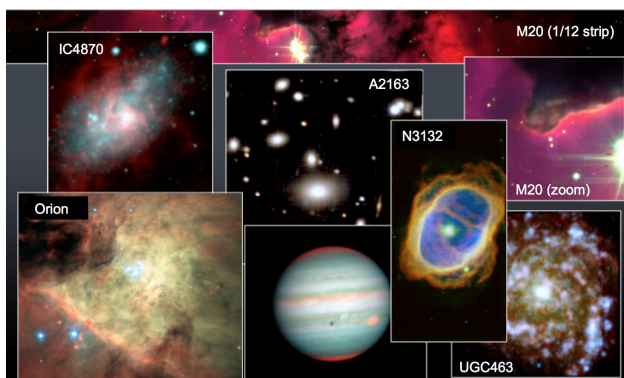
## Des résultats scientifiques impressionnants

### Commissioning

Entre février et août 2014 ont ensuite eu lieu toute une série de tests intensifs de l'instrument avec le télescope, sous forme de trois séries de 10 à 15 nuits d'observation chacune : c'est la phase dite de "commissioning". Dès les premières nuits d'observation qui ont suivi la première lumière, MUSE a montré ses capacités exceptionnelles en fournissant des données de très grande qualité et exploitables par la communauté scientifique. Parmi les tests auxquels a été soumis l'instrument,

beaucoup concernaient la qualité des données et leur calibration, en particulier la correction des effets de l'atmosphère, la stabilité de l'instrument sur de longs temps de pose et dans le temps, et l'efficacité du système de guidage qui permet de conserver une position précise sur le ciel.

Les sources astrophysiques observées pendant le commissioning vont des planètes géantes (Jupiter, Saturne) aux galaxies les plus distantes, en passant par les amas globulaires, nébuleuses planétaires et galaxies proches. Toutes offrent des images magnifiques et riches d'informations : pour chacune des images de la "grande galerie de MUSE" (figure 3), il faut garder en tête que la troisième dimension spectrale nous offre encore plus d'informations que ce que peuvent montrer ces images.



**Fig.3.** La grande galerie de MUSE : images de planètes, nébuleuses et galaxies prises pendant le Commissioning.

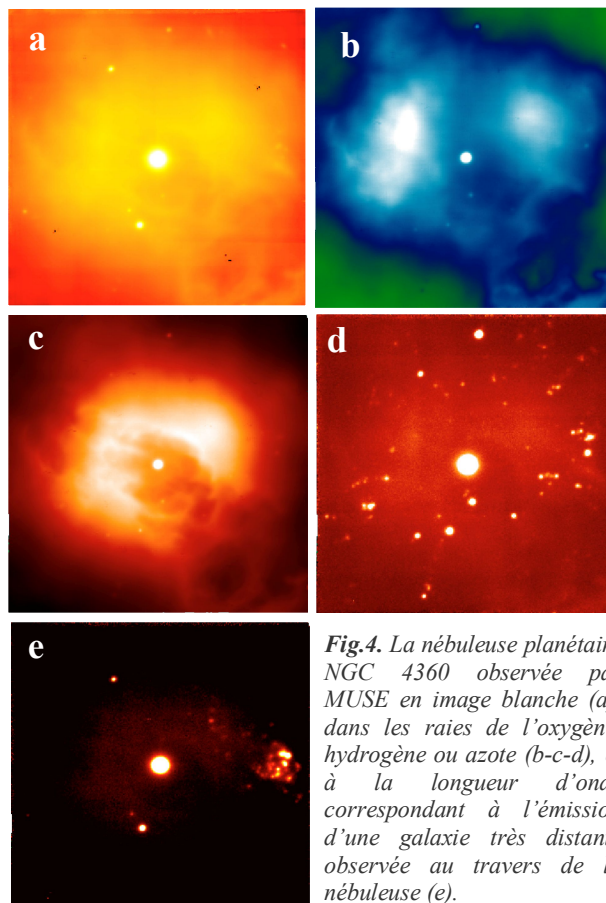
Mais un des résultats les plus spectaculaires qui est ressorti du commissioning est le pouvoir de découverte de MUSE. Au cours de l'observation d'une nébuleuse planétaire brillante, couvrant l'ensemble du champ de vue par des raies d'émission de gaz d'hydrogène, oxygène ou azote, une source en arrière-plan, inconnue jusqu'alors, est apparue dans le cube de données à une longueur d'onde ne correspondant à aucune émission de la nébuleuse (figure 4).

Il s'agit en fait d'une galaxie distante, située à 300 millions d'années-lumière (par rapport à la distance de la nébuleuse qui est de 3 900 al), et qui apparaît au travers de son émission d'hydrogène décalée vers le rouge. Cette galaxie n'aurait jamais pu être détectée sans la capacité de MUSE à sélectionner une longueur d'onde particulière.

Depuis septembre 2014, MUSE est passé en mode opération. Entre les mains expertes des astronomes de l'observatoire Paranal, il est régulièrement utilisé par la communauté scientifique pour diverses observations. Nous présentons ci-après quelques-

uns des résultats majeurs obtenus après un an d'opérations.

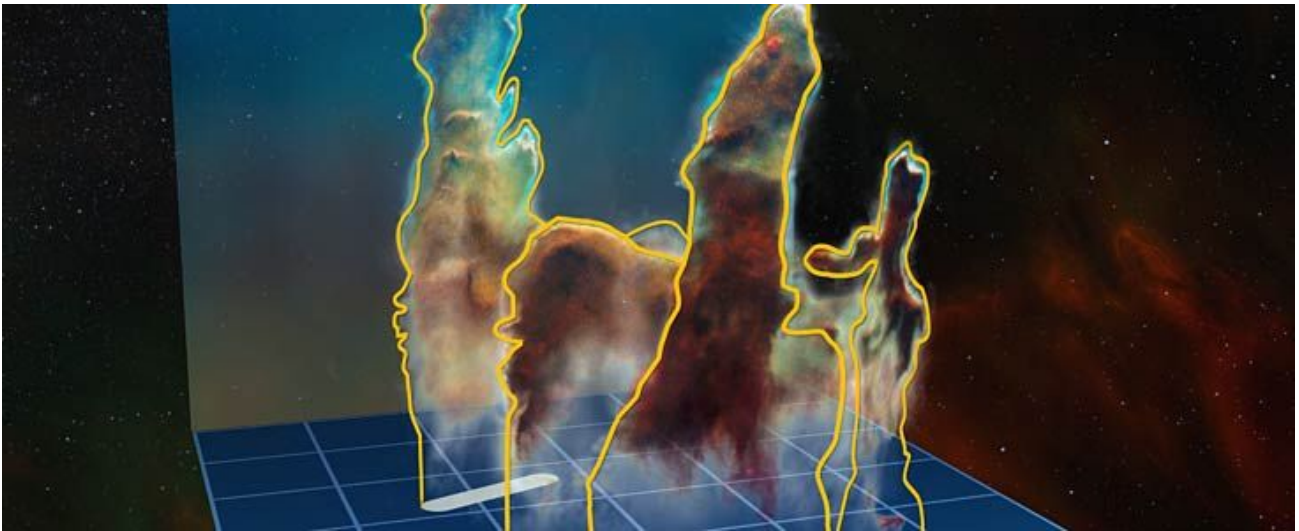
## Nébuleuses



**Fig.4.** La nébuleuse planétaire NGC 4360 observée par MUSE en image blanche (a), dans les raies de l'oxygène, hydrogène ou azote (b-c-d), et à la longueur d'onde correspondant à l'émission d'une galaxie très distante observée au travers de la nébuleuse (e).

Le champ de vue de MUSE, utilisé en mode mosaïque, permet de couvrir des nébuleuses diffuses avec une finesse de détails impressionnante (voir la nébuleuse d'Orion figure 3). Deux résultats importants ont été obtenus sur de telles nébuleuses :  
 - l'observation des "piliers de la création" une nébuleuse diffuse célèbre pour ses images prises par Hubble, permet d'analyser l'émission nébulaire et de séparer les piliers suivant leur position tridimensionnelle (figure 5). Ces nouvelles données suggèrent que les piliers seront détruits d'ici quelques millions d'années seulement.

- la nébuleuse d'Orion, une des nébuleuses les plus célèbres visibles à l'œil nu, révèle une quantité importante d'éléments chimiques, avec notamment un grand nombre de raies d'émission faibles non identifiées jusqu'à présent. MUSE permet aussi d'étudier plus précisément les "proplyds", qui sont des cocons d'étoiles en formation.



*Fig.5. Reconstitution tridimensionnelle des "piliers de la création".*

### Amas globulaires

Les amas globulaires, ces concentrations de plusieurs milliers d'étoiles, sont également des sujets de choix pour MUSE, qui a la capacité de faire plusieurs centaines de spectres d'étoiles en une seule pose (figure 6).



*Fig.6. Image couleur d'un amas globulaire observé par MUSE.*

L'analyse de ces données est complexe, car elle demande de "démêler" le signal des différentes étoiles. Mais l'intérêt est d'étudier les vitesses des étoiles dans l'amas, de regarder la distribution des éléments chimiques les plus lourds en fonction de la distance au cœur de l'amas, et par conséquent de comparer ces résultats avec les mécanismes de formation des amas globulaires.

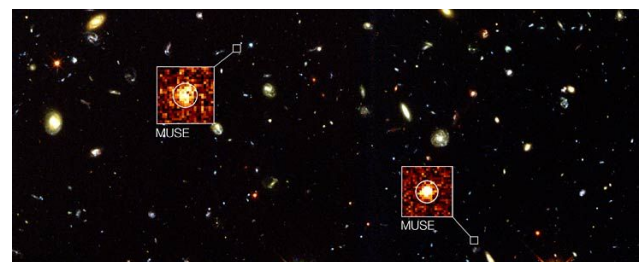
En conclusion, MUSE est clairement une révolution en matière d'instrumentation astronomique. Il a des capacités uniques pour un télescope de cette taille,

et un potentiel de découverte inégalé. Nous attendons davantage de résultats impressionnants avec l'observation du champ "Ultra-Profond" de Hubble (UDF), prévu dans les prochaines années.

### Galaxies distantes

Comme nous l'avons montré, MUSE est un instrument particulièrement polyvalent, mais il a été optimisé en prévision de l'observation de champs de galaxies très profonds. En effet, sa résolution et sa sensibilité lui permettent de repérer les galaxies les plus distantes au travers de leur émission dans la raie de l'hydrogène Lyman- $\alpha$  (1 216 angströms au repos), et ce jusqu'à des distances de 12 milliards d'années-lumière.

Un des premiers résultats dans ce domaine a été l'observation du champ profond de Hubble Sud (HDFS). Les données MUSE ont permis de mesurer la distance de plusieurs centaines de galaxies, dont certaines très distantes. Mais le résultat le plus impressionnant a été la découverte de plus d'une vingtaine de galaxies très distantes que le télescope spatial Hubble n'avait pas pu identifier dans ses images très profondes (figure 7). Ce résultat est essentiel pour obtenir un recensement plus complet des galaxies dans l'Univers distant.



*Fig.7. Exemple de détections de galaxies distantes avec MUSE, là où l'image Hubble ne révèle aucune galaxie.*