

LA NAISSANCE DES PLANÈTES

Jérôme Bouvier/Georges Pantolmos/Benjamin Tessore, astrophysiciens.

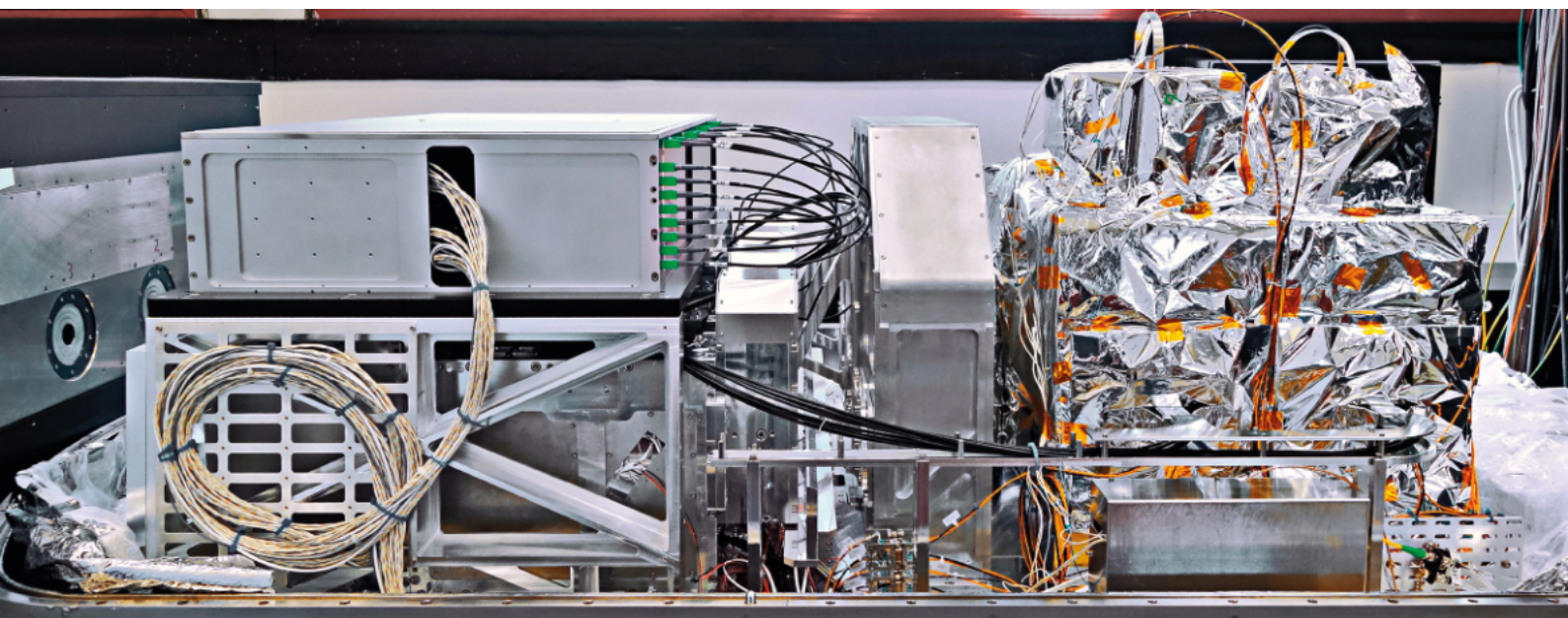
Le prix Nobel de physique attribué en 2019 aux deux découvreurs de la première (51 Pegasi b) planète extra-solaire, Michel Mayor et Didier Queloz, a ravi la communauté des astronomes. Cette avancée exceptionnelle a ouvert un nouveau chapitre de l'astronomie contemporaine : la recherche et la caractérisation des exoplanètes. Ce champ d'investigation permettra de mieux comprendre l'origine de notre propre système solaire, mais aussi d'appréhender la diversité des systèmes exoplanétaires à travers la Galaxie. La problématique de l'origine

des planètes extrasolaires est aujourd'hui au centre de nombreuses études. Plus l'on se rapproche du moment de la naissance des planètes, plus on a de chances de saisir « sur le vif » les processus qui conduisent à leur formation. C'est là l'objectif principal du projet SPIDI, financé par l'Europe. Alors que des milliers d'exoplanètes ont été aujourd'hui repérées autour d'étoiles d'âge respectable (principales cibles des relevés menés jusqu'ici) on compte sur les doigts d'une main celles détectées autour d'étoiles en cours de formation...

Approche complexe

Comment débusquer les planètes naissantes ? De multiples approches existent, alliant des systèmes optiques ultra-sophistiqués (par ex. l'instrument VLT/ SPHERE,) l'interférométrie dans les domaines infrarouge et ondes radio (notamment les interféromètres VLTI/Gravity et ALMA au Chili,) et les observatoires spatiaux existants ou à venir (Kepler, JWST.) Une panoplie d'instruments est mise à contribution pour sonder les disques constitués du matériau primordial, gaz et poussières,

► *Jeune planète en cours de formation dans le disque interne.*



► *Le nouvel instrument Gravity au VLTI.*



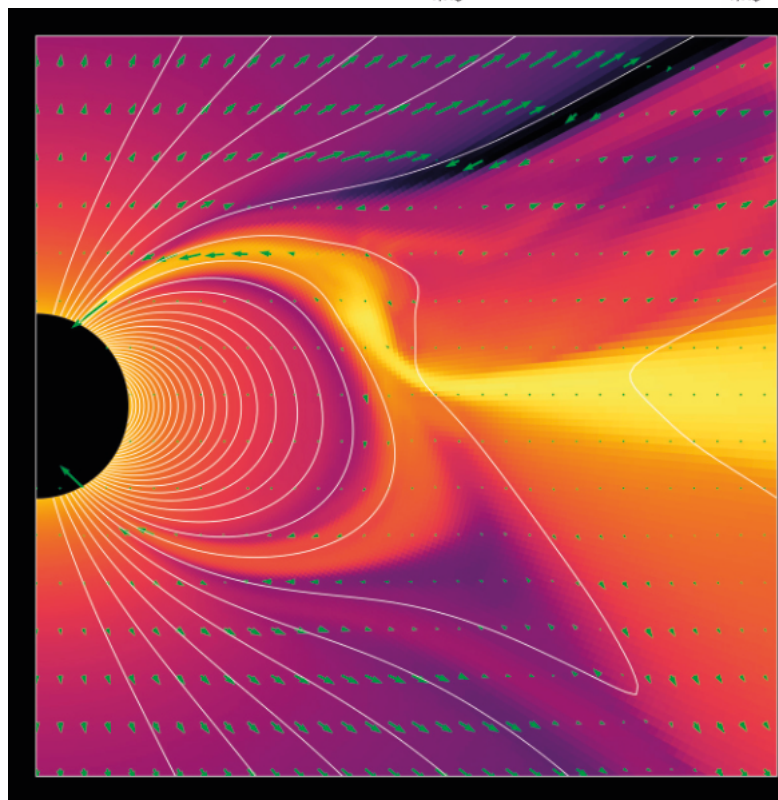
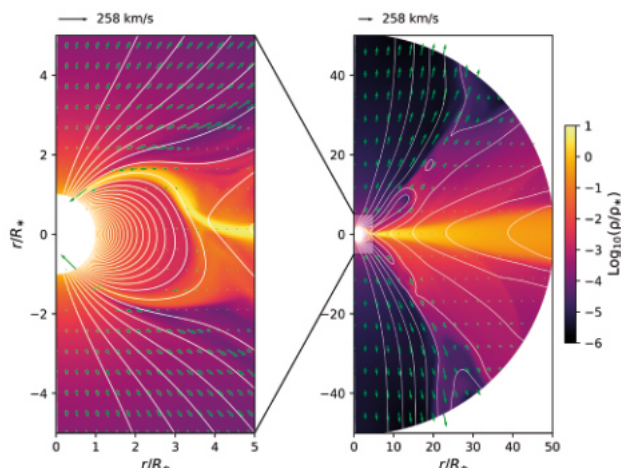
► *Interférométrie au VLTI, l'équivalent d'un télescope de 100 m de diamètre.*

qui entourent les étoiles à leur naissance. C'est au sein de ces disques circumstellaires que se forment les planètes, sur une échelle de temps de quelques millions d'années, par agglomération lente des grains de poussière. Ce phénomène est semble-t-il extrêmement répandu dans la Galaxie, puisque l'on dénombre aujourd'hui quasiment un système planétaire par étoile. La plupart de ces systèmes sont constitués de planètes du type « super-Terre » ou « mini-Neptune » orbitant à proximité immédiate de leur étoile-hôte, souvent situées à une distance moindre que l'orbite de Mercure, avec des périodes orbitales courtes, de l'ordre du jour ou de la semaine. Les planètes naissantes sont d'autant plus difficiles à repérer qu'elles sont encore enfouies dans leur cocon, le disque circumstellaire qui leur a donné naissance. L'approche poursuivie dans le cadre du projet SPIDI (Star-Planet-Inner Disk Interactions) consiste à les détecter non pas directement, mais par le biais de leur interaction avec ce disque et l'étoile hôte. Ainsi, alors que le disque circumstellaire est relativement stable en l'absence de perturbation, la présence d'une ou plusieurs planètes modifie sa structure et son comportement avec l'étoile. Ce sont ces signatures indirectes (présence de planètes dans les régions internes des disques circumstellaires de jeunes étoiles) que le projet vise à mettre en évidence.

Simulation et observation

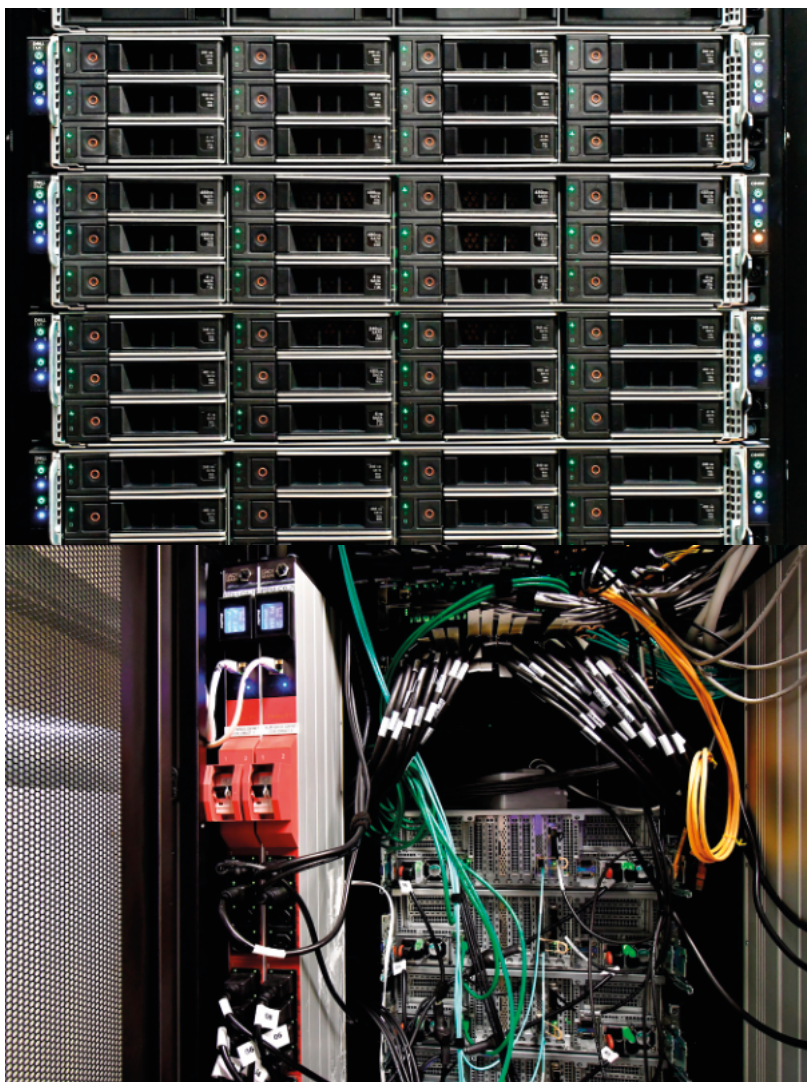
Pour cela, il est nécessaire de développer des modèles numériques décrivant le système complet et ses interactions, afin d'être en mesure de prédire les indices de perturbations planétaires attendues. Parallèlement, il s'agit de mettre en œuvre les moyens d'observation les plus puissants pour dénicher ces signatures, qui émergent à peine de l'activité intense des

► **MHD. Développement complexe de simulation numérique du système, avec plusieurs niveaux de zoom.**



jeunes étoiles et de leur disque. La clef de ces modélisations réside dans la description des interactions gravitationnelles et magnétiques entre étoile, disque interne, planètes. La dynamique des fluides et la magnéto-hydrodynamique (MHD) sont ici à l'œuvre, décrites par les équations qui gouvernent les courants de matière et d'énergie s'établissant au sein du système. La résolution de ces équations complexes et interconnectées est confiée à des codes numériques sophistiqués développés au niveau international, tel le code MHD PLUTO déployé dans le cadre du projet SPIDI vers le super-calculateur DAHU

de l'Université Grenoble-Alpes. La résolution des équations du problème fournit une « carte » de la distribution de matière autour de l'étoile centrale, dans la magnétosphère et jusqu'au disque interne. Y apparaît la dynamique des flots de matière qui les traversent, contrôlés en partie par les lignes de champ magnétique. Cette modélisation du système illustre la complexité de l'interaction magnétique entre étoile et disque, elle offre un aperçu de l'environnement dynamique dans lequel les planètes se forment. Une fois le système étoile-disque-planètes ainsi modélisé, reste à calculer les observables qui en résultent, autant de signatures potentielles qu'il faudra ensuite aller glaner



```

PLUTO v. 4.3

> System:
USER:          gantolines
SYSTEM_NAME:   Linux
MODEL_NAME:    r-dahu
ARCH:          x86_64
BYTE_ORDER:    little

- Basic data type:
  o sizeof (char)      = 1
  o sizeof (uchar)     = 1
  o sizeof (short)     = 2
  o sizeof (ushort)    = 2
  o sizeof (int)       = 4
  o sizeof (long)      = 8
  o sizeof (uint)      = 4
  o sizeof (float)     = 4
  o sizeof (double)    = 8
  o sizeof (*double)   = 8

- Structure data type:
  o sizeof (CMD_LINE)  = 60
  o sizeof (Data)      = 272
  o sizeof (Grid)      = 1048
  o sizeof (FLOAT_VECT) = 12
  o sizeof (IMAGE)     = 856
  o sizeof (OUTPUT)    = 1768
  o sizeof (RGB)       = 3
  o sizeof (RUNTIME)    = 46944
  o sizeof (RESTART)    = 128
  o sizeof (TIME_STEP) = 128
  o sizeof (RBOX)      = 112
  o sizeof (State)     = 128
  o sizeof (Sweep)     = 512

> Local time:   Mon Jul 29 15:31:18 2019
> Cmd line args:
> Header configuration:
  PHYSICS:      MHD [div.B: Divergence Cleaning (Extended GLM)]
  DIMENSIONS:   3
  COMPONENTS:   3
  GEOMETRY:     Spherical
  BODY_FORCE:   EXPLICIT
  
```

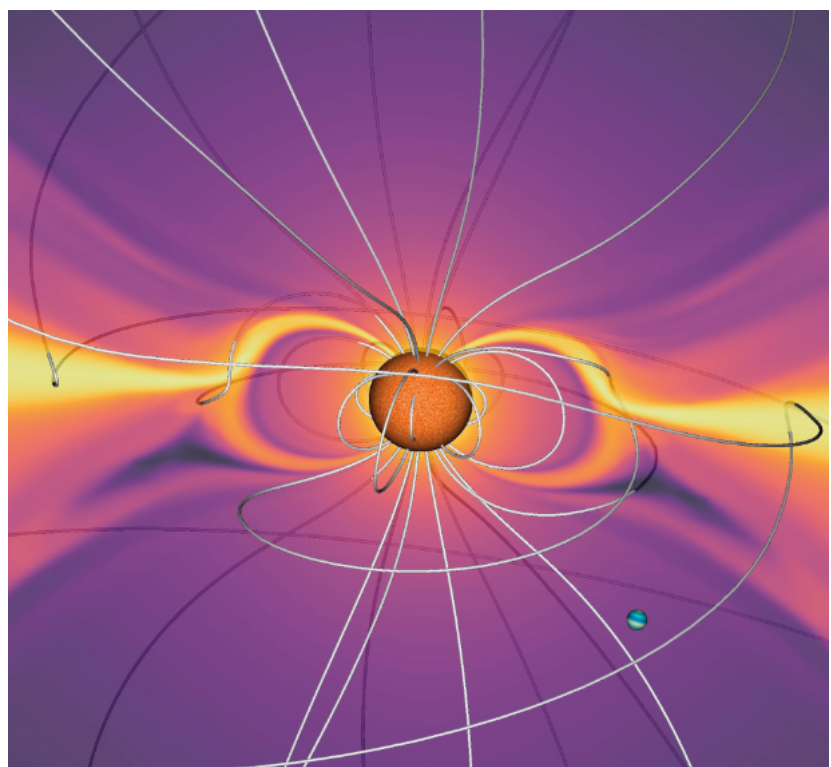
▲ **Démarrage du code PLUTO pour une simulation MHD.**

► **Supercalculateur DAHU, Université Grenoble-Alpes.**

aux instruments. Par exemple, à quel type d'émission lumineuse peut-on s'attendre ? Dans quel domaine de fréquence ? Peut-on calculer une image de synthèse, propre à être comparée avec celle que l'on pourra obtenir sur les plus grands télescopes ?

Sonder la lumière

C'est là le rôle d'une seconde étape de modélisation. Le transfert de rayonnement consiste, sur la base des propriétés structurales et thermodynamiques du système issues de la modélisation MHD, à calculer l'émission lumineuse qu'il engendre. Le développement d'un outil permettant de modéliser la lumière émise par une étoile et son environnement complexe est une composante essentielle de la recherche. A cette étape, il s'agit d'établir et valider le lien entre les modèles numériques et les observations. Il faut pour cela résoudre l'équation de transport du rayonnement, qui décrit comment le champ de radiation émergeant



► **Le code numérique de transfert de rayonnement est appliqué à des modèles étoile-disque-planètes pour synthétiser des images et spectres théoriques qui représentent ce que nous nous attendons à observer.**



► **M42. Observation CFHT Hawaii. Crédit : Jean-Charles Cuillandre/Canada-France-Hawaii. Telescope/Coelum.**

d'un point du système se modifie en interagissant avec son environnement, puis se propage finalement jusqu'à l'observateur. Pour un système complexe tel que celui considéré, la lumière va être absorbée puis réémise par les différents atomes qui constituent l'environnement de l'étoile et de ses éventuelles planètes. Les signatures associées apparaissent sous forme de raies d'absorption ou d'émission dans le spectre de la lumière, autant de diagnostics qu'il est possible de déchiffrer pour révéler les processus physiques sous-jacents. C'est par l'analyse des raies spectrales et de leur variation temporelle observées au télescope que l'on peut remonter jusqu'aux propriétés du système, espérant y détecter la présence discrète de planètes enfouies.

Nouveaux horizons

Toutes les simulations numériques réalisées dans le cadre du projet SPIDI représentent la résolution d'équations impliquant des milliards d'opérations. In fine, la confrontation entre modèles numériques et résultats d'observation permettra de valider les processus physiques à l'œuvre au moment de la naissance des systèmes planétaires. La découverte de planètes en cours de formation autour d'autre soleils viendra éclairer l'adolescence des exomondes. Et par ricochet, celle de notre propre vaisseau cosmique...■

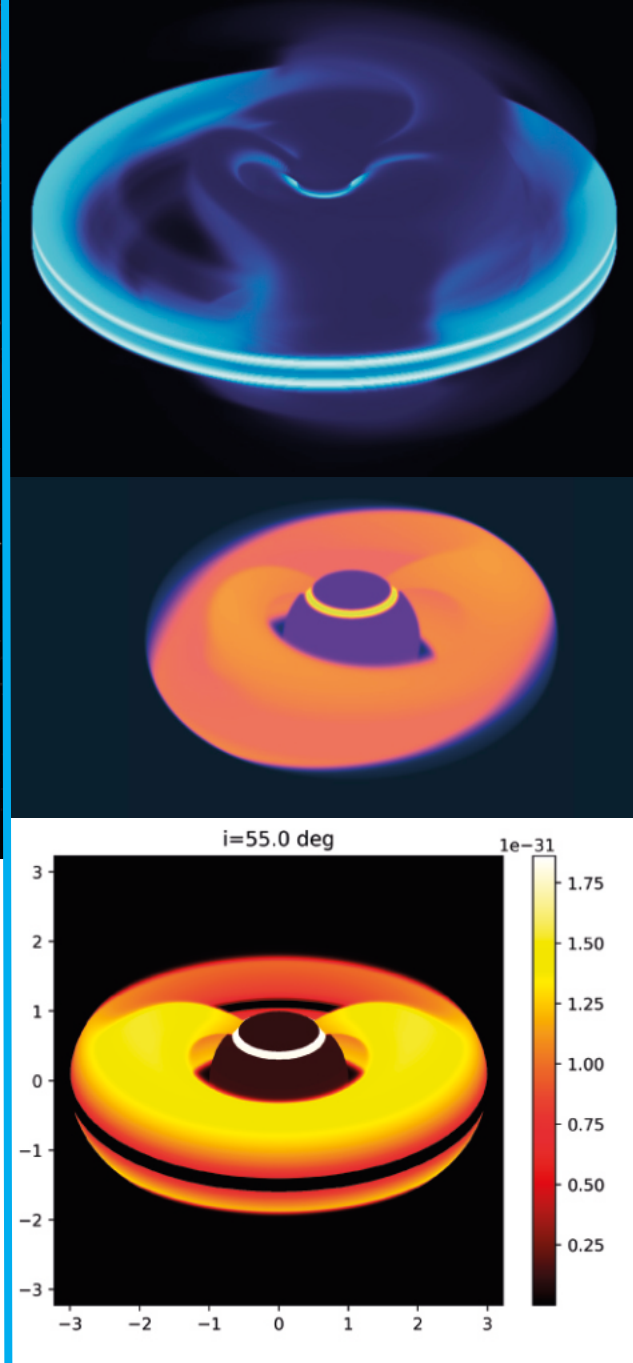


► **NGC6559. Observation CFHT Hawaii. Crédit : Jean-Charles Cuillandre/Canada-France-Hawaii. Telescope/Coelum.**



▲ NGC6357. Observation CFHT Hawaii. Crédit : Jean-Charles Cuillandre/Canada-France-Hawaii. Telescope/Coelum.

► Une image synthétique de la magnétosphère de l'étoile, située entre la surface de l'étoile et le bord interne du disque, calculée ici dans une raie d'émission d'hydrogène présente dans le spectre des jeunes étoiles. Sur cette image, l'étoile est obscurcie par le gaz environnant, sauf deux anneaux brillants qui représentent le point d'impact du gaz tombant du disque sur l'étoile.



Pour en savoir plus

www.spidi-eu.org

