

*Trou noir, étoile, planète...*

# ON SAIT RECREER L'UNIVERS!

*ENQUÊTE DANS LES LABOS DE L'EXTRÊME*

*C'est tout simplement extraordinaire : dans l'intimité de leurs laboratoires, d'audacieux scientifiques parviennent à recréer, ici une supernova, là des trous noirs, ailleurs des planètes... Leur secret ? Une méthode – l'analogie – et des outils de haute technologie. Et déjà, cette "astrophysique expérimentale" livre la clé de certains des plus grands mystères de l'Univers. Bienvenue dans la nouvelle science de l'extrême.*



PAR MATHIEU  
GROSSON, AVEC  
MATHILDE FONTEZ

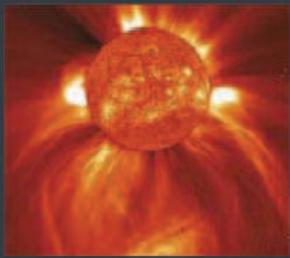
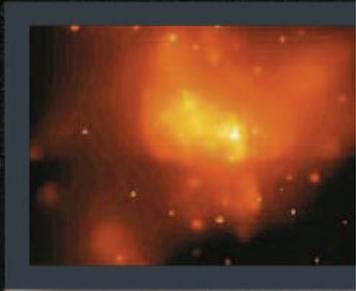
Ils ne sont encore qu'une poignée. Quelques dizaines de physiciens et d'astrophysiciens dans de rares laboratoires à travers le monde. Mais depuis une dizaine d'années, délaissant l'objectif du télescope, ils sont en train d'accomplir d'in vraisemblables prouesses. Pareils à des démiurges, ils recréent dans l'intimité de leur laboratoire tout le bestiaire cosmique. Trous noirs, étoiles à neutrons, supernovae, planètes... ces pionniers réalisent l'exploit de mettre à portée de main les objets les plus incommensurables et les plus inaccessibles de l'Univers. Ils sont ni plus ni moins en train de faire de l'astrophysique une science... expérimentale! Une science qui ne dépend plus seulement de la simple observation par télescope et

de la simulation par ordinateur. Une science qui met la main à la pâte.

Extravagant? Cela ressemble en effet à un délire de savants qui auraient perdu le sens de la mesure, tant les objets de l'astrophysique et les phénomènes cosmiques dépassent tout ce qu'il est matériellement possible de faire tenir sur une paillasse. Le secret de ces chercheurs, pourtant parfaitement raisonnables, tient en un seul mot: analogie. Soit cette possibilité d'étudier les propriétés d'un objet à travers la réalisation expérimentale d'un autre, en apparence totalement différent, mais dont le comportement, du moins pour une part, s'avère exactement identique parce que lié par les mêmes lois. Par leur taille, leur forme et leur matériau, les créations de ces →

# Grands mystères de l'Univers : voici que les astronomes les élucident... en laboratoire

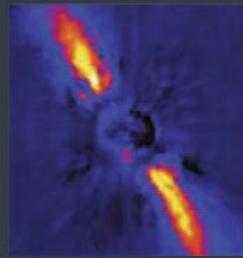
Ils se sont détournés du ciel et de ses feux d'artifice cosmiques pour scruter des lasers et s'atteler à la mécanique de précision. En reproduisant tout le bestiaire cosmique dans l'intimité de leur laboratoire, une poignée d'astronomes est aujourd'hui en passe de résoudre six des plus grands mystères de l'Univers...



## ÉTOILES

### Comment s'enroulent-elles dans un champ magnétique ?

Les gigantesques éruptions de plasma qui agitent la surface du Soleil ont une origine : le champ magnétique généré au cœur de l'étoile. Des mécanismes intimes qu'est en train de dévoiler... une marmite de sodium liquide (p. 50).



## PLANÈTES

### D'où vient la lumière émise par leur berceau de poussières ?

Les étoiles (ici, Beta Pictoris) s'enroulent dans un nuage de gaz et de poussières à l'étrange rayonnement. On vient de découvrir son origine dans une cuve d'eau en rotation (p. 56).

chercheurs ne ressemblent donc pas à leur modèle issu des cieux. Mais en manipulant au fond de leur laboratoire un analogue de trou noir, un analogue d'étoile à neutrons ou de planète, ce sont bien les plus fascinants phénomènes cosmiques qu'ils sont en train de reproduire. Mieux : en offrant toute latitude pour faire varier à l'infini les paramètres de l'expérience, l'analogie devient alors une voie royale pour révéler les secrets que les astrophysiciens n'avaient jusqu'ici jamais pu percer.

Après tout, la démarche n'a rien d'incongru. Comme le souligne Renaud Parentani, au Laboratoire de physique théorique, à Orsay, "en physique, les analogies ont toujours existé et jouent un rôle fondamental". Déjà, en 1815, le savant Augustin Fresnel s'appuyait sur l'étude de la propagation du son pour décrire dans son traité... la "vibration" de la lumière. Tout simplement parce

que de nombreux systèmes physiques de natures très différentes sont exactement régis par les mêmes équations. Or, comme l'a résumé le prix Nobel américain de physique 1965, Richard Feynman : "Les mêmes équations ont les mêmes solutions !"

Ainsi, avant d'être lumineuse, sonore ou électronique, une onde est avant tout... une onde. Et toutes sont suscep-

## LA NATURE EST SIMPLE ET SE RÉPÈTE : L'ANALOGIE PERMET DÈS LORS D'OBSERVER L'INOBSERVABLE

tibles de mettre en œuvre des phénomènes de diffraction ou d'interférences. En clair, il suffit de passer au crible de l'expérience une catégorie d'entre elles pour documenter les propriétés des autres. "Cela tient à ce que les phénomènes physiques obéissent à un tout

petit nombre de très grands principes, précise Renaud Parentani. *Essentiellement ceux de la mécanique quantique, celui de continuité de la matière et celui de réversibilité dans le temps des phénomènes microscopiques.*"

Au-delà de la diversité des phénomènes et des constituants de la matière, les physiciens finissent donc toujours par retomber sur les mêmes équations.

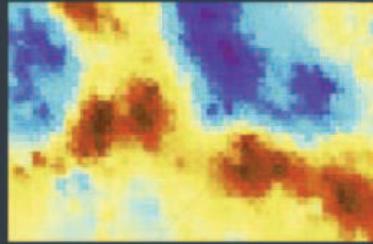
Voilà pourquoi celles qui permettent de décrire les allers-retours d'un pendule s'appliquent au mouve-

ment d'un ressort, aux vibrations dans un solide, aux variations du champ électromagnétique dans une cavité ou au fonctionnement d'un circuit électrique. "La nature est simple et se répète", résume Carlo Rovelli, au Centre de physique théorique de Luminy.

## TROUS NOIRS

### De la lumière leur échappe-t-elle ?

Ce tourbillon de rayons X (en rouge) révèle au centre de la Voie lactée un trou noir 4 millions de fois plus massif que le Soleil. Mais c'est dans une fibre optique que les astronomes prouvent aujourd'hui qu'un rayonnement lui échappe (p. 48).



## UNIVERS

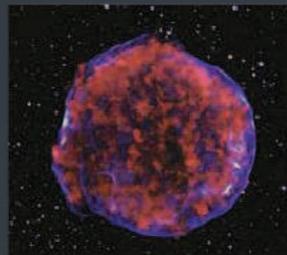
### Pourquoi baigne-t-il dans un champ magnétique ?

La polarisation de la lumière en provenance de galaxies lointaines a permis de mesurer le champ magnétique qui baigne le cosmos. Sa naissance vient d'être reproduite en laboratoire (p. 58).

## ÉTOILES À NEUTRONS

### Quelles lois régissent leur cœur ?

Les étoiles mortes signalent leur présence par de puissantes bouffées de rayons X (en bleu). Mais c'est sur Terre, sous le feu des lasers, que les secrets de leur cœur incroyablement dense se dévoilent (p. 54).



## SUPERNOVAE

### D'où tirent-elles leur énergie ?

La fin des étoiles massives est écrite : elles explosent en laissant un immense nuage de gaz et de poussières dont témoignent les télescopes. En étudiant un simple tourbillon d'eau, un astronome vient de comprendre comment elles rassemblent l'énergie nécessaire à leur bouquet final (p. 52).

Seulement, focalisés qu'ils étaient sur les particularités de leurs objets d'étude (densités colossales, dimensions... astronomiques!), les astrophysiciens n'avaient pas songé à adopter la fructueuse méthode des physiciens. C'est désormais chose faite.

Depuis une dizaine d'années, à force de plonger dans ces mécanismes, à force de s'approcher des limites, tant expérimentales que théoriques, la puissance de l'analogie leur saute au visage. Les astronomes découvrent que les monstres du cosmos sont régis par les mêmes lois que le pendule ou la vague des physiciens; ils réalisent qu'une supernova est semblable à un tourbillon d'eau dans un banal entonnoir; qu'un cœur stellaire se comporte comme une cuve de métal en fusion; que le champ magnétique du début de l'Univers peut naître de manière contrôlée via le faisceau d'un laser; qu'un trou

noir a tout... d'une fibre optique, et que le disque de poussières qui entoure les jeunes étoiles se meut comme un volume d'eau pris entre deux cylindres.

### LES RÉSULTATS PLEUVENT DÉJÀ

Et le plus incroyable est que leur outil n'a d'autres limites... que celles des théories physiques et la capacité des physiciens à trouver les lois universelles de la nature. L'analogie est toute puissante: une étoile à neutrons est physiquement un nuage d'atomes, un trou noir est physiquement une fibre optique. Et grâce à ce formidable principe, les phénomènes du cosmos deviennent terre à terre. Et l'Univers semble à portée de main...

De fait, avant même d'être devenue une discipline constituée (voir p. 60), avec ses centres dévolus et ses spécialistes reconnus comme tels, l'astronomie expérimentale s'est attaquée

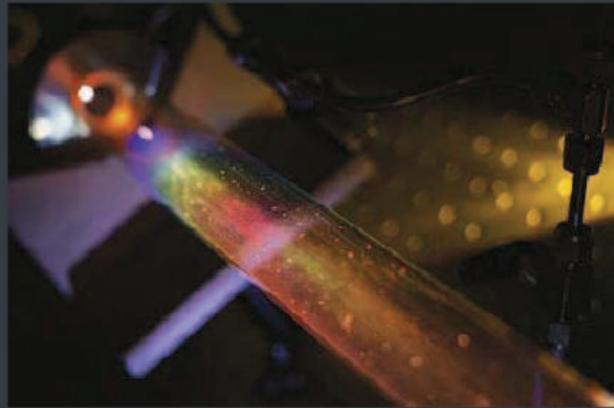
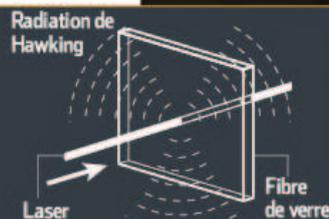
aux mystères emblématiques qui occupent toute la communauté des astronomes... et les résultats pleuvent: les lois qui régissent le comportement de la matière dans une étoile à neutrons viennent d'être élucidées; l'énigme de l'émission lumineuse des nuages de poussières a été résolue; le mystère du champ magnétique de l'Univers s'est dévoilé; l'énergie cachée des supernovae a été retrouvée et la mystérieuse radiation des trous noirs a été captée. En s'équipant des lasers les plus puissants et de matériaux dont les propriétés sont encore à l'étude... mais surtout en multipliant les astuces pour contourner les difficultés techniques, astronomes et physiciens sont parvenus à mettre les milliards de milliards de kilomètres et les millions de degrés sous le microscope. Petit voyage au travers de six laboratoires qui ont mis l'Univers sous cloche.

# Un trou noir dans une fibre

L'écran relié à la caméra révèle des photons. Cette lueur infime constitue néanmoins la plus belle prouesse d'une astrophysique expérimentale en train de naître. La preuve de l'exactitude de l'une des prédictions les plus étonnantes de la physique du XX<sup>e</sup> siècle: les trous noirs, si voraces soient-ils, émettent bien de la lumière. Depuis que, dans les années 1970, Stephen Hawking, intégrant une dose de mécanique quantique dans les équations qui décrivent l'espace-temps, avait prédit qu'une radiation, dite "radiation Hawking", pourrait émerger de ces ogres cosmiques, les astrophysiciens rêvaient d'en prouver l'existence. Mais elle semblait à jamais masquée par le bruit de fond électromagnétique de l'Univers. Jusqu'à ce qu'un physicien de l'université Heriot-Watt d'Édimbourg, Daniele Faccio, parvienne à la capter... à l'intérieur d'une fibre optique! Car, en théorie, rien ne distingue un espace-temps déformé par la gravité, d'un métamatériau: un verre qui perturbe la propagation des ondes lumineuses. "Les deux situations sont décrites par les mêmes équations, précise le chercheur. Si une radiation Hawking est émise par un trou noir, elle devait l'être aussi par une fibre optique." Pari tenu: en 2010, Daniele Faccio parvient à perturber la propagation d'une impulsion lumineuse dans un morceau de verre, tel que peut le faire l'intense champ de gravitation près d'un trou noir. Comme prévu par la théorie, il a vu se former l'équivalent de l'enveloppe d'un monstre cosmique: cette limite derrière laquelle la lumière ne peut s'échapper et que les physiciens appellent "horizon". Restait à recueillir les particules de lumière, première trace d'un rayonnement de Hawking... Cette observation n'est pourtant pas encore directe: le physicien a dû tourner son détecteur à 90° de l'"horizon" pour qu'il ne soit pas ébloui par les impulsions lumineuses nécessaires à l'expérience. Il a donc observé le rayonnement dans une géométrie différente de celle envisagée par la prédiction cosmologique... Mais il travaille déjà à un protocole qui apportera cette fois une preuve définitive: l'observation directe d'un phénomène inobservable.

## LE PRINCIPE

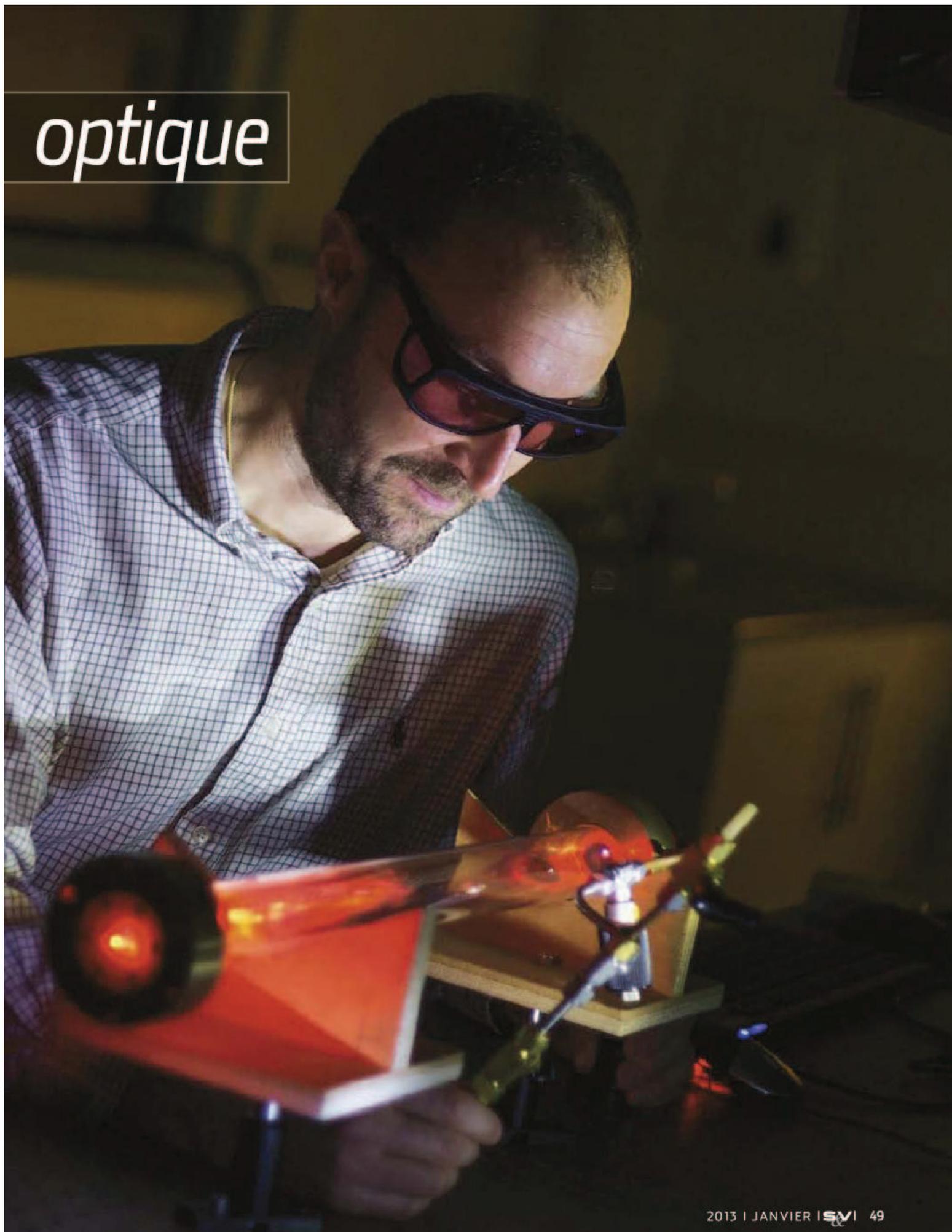
Lorsqu'il pénètre dans un métamatériau, ici un verre dont l'indice de réfraction est variable, le faisceau d'un laser se perturbe. Il se forme alors une zone qui emprisonne toute la lumière... ou presque: l'analogue d'un trou noir, le rayonnement pressenti par Hawking est alors visible.



➤ En dirigeant la lumière d'un laser dans des fibres optiques à l'université d'Heriot-Watt d'Édimbourg, Daniele Faccio a vu naître une infime lueur: une lumière qui, selon la théorie, parviendrait à s'échapper des trous noirs.



*optique*



# Une étoile dans une centrifuge

Tout à coup, des lignes de champ émergent, puis se structurent jusqu'à former des arcs réguliers et caractéristiques: pour la première fois, un champ magnétique stellaire est né en laboratoire! Stellaire, car depuis des décennies, les astrophysiciens observent qu'étoiles et planètes s'enroulent dans de puissants champs magnétiques. Or, équations et modèles suggèrent que ces boussoles pourraient naître des bouillonnements de métal brûlant ou de plasma électrisé au cœur des astres. Mais comment valider cette intuition? Les astrophysiciens ont alors l'idée... d'agiter une marmite de métal en fusion. En effet, les lois de la magnétohydrodynamique étant universelles, le sodium liquide, comme le plasma stellaire, est le siège de champs électromagnétiques "et les équations qui décrivent la rotation d'un cylindre et celle d'un astre présentent les mêmes symétries spatiales", ajoute Bérengère Dubrulle, qui participe à l'expérience entamée au CEA, à Cadarache.

Concrètement, en faisant tourner à plus de 1000 tours/min deux turbines placées aux deux bases d'un cylindre rempli de 160 litres de sodium liquide, les chercheurs réunis au sein de la collaboration Von Karmann Sodium (VKS) ont reproduit le mouvement global du cœur d'une étoile ou d'une planète... Et ont assisté, en 2006, à la naissance d'un champ magnétique. La chercheuse se rappelle, que dès le lendemain, ils ont eu l'idée d'appliquer des vitesses différentes aux deux bases du cylindre. Bingo! Les lignes de champ se sont mises à s'agiter... et se sont retournées! Une première... qui en vaut deux: c'était la première fois que les chercheurs observaient en direct une inversion du champ magnétique, comme le Soleil en subit tous les 11 ans. "On a alors compris que c'est un phénomène d'écoulement turbulent qui est à l'origine des champs magnétiques stellaires et planétaires, explique Yannick Ponty, de l'Observatoire de la Côte d'Azur. Reste à en découvrir les détails." Depuis, ils ont mesuré que selon la vitesse de rotation, ils pouvaient donner naissance à des inversions aléatoires, comme dans le cas de la Terre, ou régulières, comme dans le Soleil. Bref, les boussoles astrales sont en train de livrer leurs secrets...

## LE PRINCIPE

Emprisonné dans un cylindre dont les bases sont en rotation, le sodium liquide porté à 180 degrés devient turbulent et donne naissance à une multitude de lignes magnétiques... qui finissent par se ranger en deux pôles, de la même façon que le plasma au cœur d'une étoile.

Arcs magnétiques



Cuve de sodium en fusion

USE



<A Dans leur laboratoire de Saclay, les membres de l'expérience VKS règlent l'arbre qui va faire tourner la cuve de sodium liquide, faisant apparaître des champs magnétiques identiques à ceux des étoiles.

À LA  
**UNE**

*Une*

# supernova dans un entonnoir

L'eau s'agite, une perturbation se propage, irrégulière, des tourbillons se forment... Voilà que se dévoile le secret de l'événement le plus violent de l'Univers: l'explosion d'une étoile massive ! Il paraissait pourtant impossible d'observer le dernier soubresaut de ces étoiles agonisantes, de comprendre comment elles concentrent leur énergie en se ramassant sur elles-mêmes avant d'exploser. "La clé du mécanisme manquait : la manière dont les gaz collectaient assez d'énergie pour engendrer l'explosion", raconte Thierry Foglizzo. C'est tout bonnement en regardant de l'eau s'écouler dans un entonnoir que ce théoricien du CEA, à Saclay, a trouvé la réponse. Car les équations qui décrivent les ondes de pression qui se propagent dans un gaz brûlant s'effondrant dans le champ gravitationnel d'une étoile sont les mêmes que celles qui dictent le comportement des vagues à la surface d'une eau peu profonde s'engouffrant dans un trou. Or, en filmant les tourbillons d'une fontaine, le physicien a assisté à la naissance d'une instabilité qui s'est propagée à l'opposé de l'écoulement du liquide... l'analogue parfait de l'onde de choc qui, selon les modèles, naît lorsque l'étoile se contracte brutalement. Pour Thierry Foglizzo, cette instabilité présente d'importantes hétérogénéités spatiales : elle se déploie irrégulièrement autour du centre de l'étoile et, sous son joug, l'eau tourbillonne au lieu de plonger en ligne droite vers le trou. Voilà, selon lui, d'où les étoiles tirent leur énergie : s'attardant au bord du cœur au lieu d'y chuter en ligne droite, leurs gaz ont le temps de se gorgier de l'énergie de particules, les neutrinos, émis par le cœur de l'étoile. "Cet analogue ne rend pas compte de la source d'énergie de l'explosion : les neutrinos, explique le chercheur, mais démontre expérimentalement le mécanisme qui leur permet de transférer leur énergie au gaz de l'étoile, rendant possible l'explosion." Une nouvelle expérience en préparation permettra de mettre l'ensemble du dispositif en mouvement, afin de reproduire la rotation des étoiles sur elles-mêmes au moment de leur mort. Avec l'espoir d'élucider la fin de l'histoire: la contraction finale des supernovae et la naissance des étoiles à neutrons.

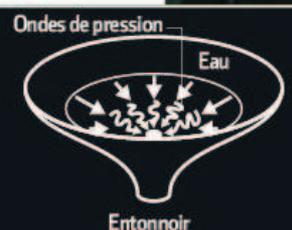


⚡ Thierry Foglizzo n'a eu qu'à faire tourner un réservoir d'eau autour d'un trou au CEA, à Saclay, pour former des tourbillons identiques à ceux qui agitent le plasma des étoiles mourantes.

LVILLERET/DOLCE VITA

## LE PRINCIPE

Lorsqu'elle s'écoule dans un trou, une nappe d'eau devient instable. Des ondes de pression se propagent et des tourbillons se forment... analogues à ceux qui agitent le plasma d'une étoile quand elle s'effondre sur elle-même avant d'exploser.



# Une étoile à neutrons dans un

Sous les faisceaux des lasers, les atomes de lithium s'agitent et interagissent. Dans l'ordinateur qui contrôle l'expérience, les mesures s'accumulent... Quand il y pense, l'idée lui donne presque le vertige. En étudiant les propriétés quantiques de ce nuage d'atomes ultra-froids qu'on appelle condensat de paires de fermions, Christophe Salomon, du laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure de Paris, est en train de sonder l'un des objets les plus exotiques de l'Univers. Une étoile morte, si dense qu'elle menace de déchirer l'espace-temps : une étoile à neutrons. Tout semble pourtant distinguer les deux objets : la densité des étoiles à neutrons atteint le milliard de tonnes par centimètre cube et leur température avoisine dix millions de degrés, alors que les condensats tutoient le zéro absolu et sont si dilués et légers qu'ils flottent dans un piège laser... *"Mais l'équation qui lie les paramètres caractérisant les deux systèmes, l'équation d'état, est strictement la même"*, précise Christophe Salomon. Car neutrons et atomes de lithium appartiennent à la même famille de particules quantiques : les fermions. De plus, les interactions entre les neutrons au cœur d'une étoile d'une part, et les atomes de lithium dans une enceinte refroidie d'autre part sont donc formellement les mêmes. Ainsi, en pointant une multitude de faisceaux lasers sur un condensat, le physicien est parvenu en 2010 à mesurer la pression du condensat en fonction de l'interaction entre les atomes, et il en a déduit celle des neutrons au sein d'une étoile du même nom. Un paramètre vital pour affiner les modèles théoriques et valider les simulations numériques des astrophysiciens. *"Au départ, les spécialistes des étoiles à neutrons n'étaient pas demandeurs ; mais ils sont désormais clients !"*, s'amuse l'expérimentateur. Preuve en est : grâce à ces mesures, ils sont déjà en train de réévaluer le rayon et la température de la fameuse étoile... et de pénétrer, enfin, au cœur du monstre cosmique.

## LE PRINCIPE

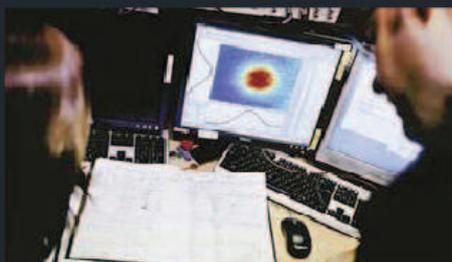
Les lasers du laboratoire Kastler-Brossel, à Paris, sont en train de mesurer la pression d'un nuage d'atomes de lithium à une température proche du zéro absolu, livrant celle des étoiles à neutrons, l'un des objets les plus étranges de l'Univers.

Nuage d'atomes  
de lithium

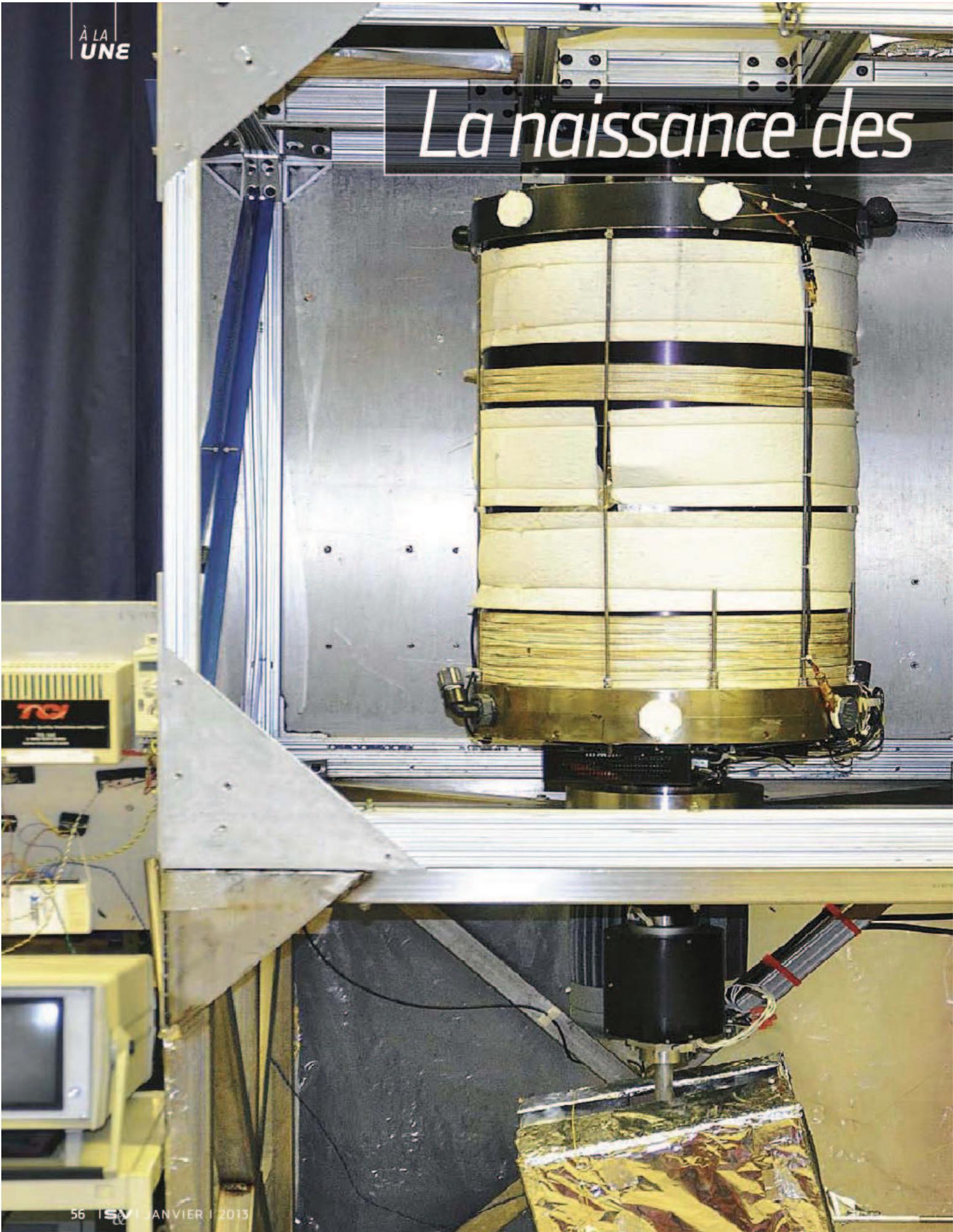


# nuage de lithium

>v Cette forêt de laser, dirigée vers un nuage d'atomes de lithium, a dévoilé ses propriétés sous l'œil de l'équipe du laboratoire Kastler-Brossel, à Paris.



# La naissance des



# planètes dans une cuve d'eau



◀ Via un liquide coincé entre deux cylindres tournant de manière opposée, Dan Lathrop, à l'université du Maryland, a recréé les phénomènes en jeu dans la formation des étoiles.

Un tourbillon se forme. Puis deux. Puis une infinité: le fluide s'agite en une somme de mouvements désordonnés... révélant le secret de l'étrange luminosité des cocons poussiéreux des planètes! Car les astronomes le savent depuis les années 1960, le cœur nucléaire des astres n'a pas l'exclusivité de la production de lumière: ce disque ténu de gaz et de poussière qui enveloppe les étoiles durant les premières dizaines de millions d'années de leur vie émet lui aussi son lot de rayonnements. Jusqu'ici, les astrophysiciens pensaient que ces émissions de lumière résultaient de la chute du gaz et de la poussière vers le centre du disque; oui, mais les seules collisions des particules du disque ne pouvaient suffire à en expliquer l'intensité. Et le phénomène de garder jalousement son mystère, jusqu'à ce qu'il y a un an, Dan Lathrop, physicien à l'université du Maryland ne parvienne tout bonnement à le reproduire en laboratoire. Car qu'il s'agisse de particules quantiques, de circuits électroniques ou de fluides, les lois de la turbulence sont universelles. "La contrainte de la gravité sur un disque d'accrétion peut être reproduite par les contraintes dynamiques imposées sur un fluide par deux cylindres coaxiaux!", explique-t-il. Mesurant précisément la turbulence et le transport dans un liquide coincé entre deux énormes cylindres métalliques, le chercheur, a ainsi pu dévoiler le fin mot de l'histoire il y a un an: ce sont des tourbillons de matière qui sont responsables de l'intense émission lumineuse. "Nous avons montré que la turbulence dans un disque d'accrétion autour d'une étoile est la cause d'un important transport de matière, qui explique quantitativement l'émission de lumière observée", résume Bérengère Dubrulle, au CEA, à Saclay, qui a participé à l'analyse des données. Forts de ce succès, les chercheurs pensent à généraliser leur méthode et s'attaquer aux disques autour de trous noirs, des pulsars et autres objets célestes... toujours sans lever le nez vers le ciel.

## LE PRINCIPE

Un liquide emprisonné entre deux cylindres concentriques en rotation opposée forme des tourbillons, qui engendrent des courants locaux. Ce liquide est soumis aux mêmes contraintes dynamiques que les nuages de poussière qui entourent les jeunes étoiles.



# Le champ magnétique



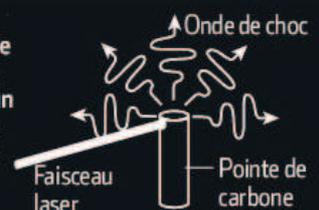
« En dirigeant un puissant laser sur une pointe de carbone, Alessandra Ravasio, à Palaiseau, a donné naissance à une minuscule boucle magnétique, identique au champ magnétique cosmique.

# du cosmos au bout d'un laser

On la voit ! Là, en lisière de l'explosion ! Une boucle magnétique minuscule. Une "graine", disent les physiciens : pour la première fois, un champ magnétique est né de l'effondrement de la matière sur elle-même en laboratoire... et avec lui, une piste pour comprendre l'origine du champ magnétique qui baigne tout l'Univers. "On observe ce champ magnétique à toutes les échelles de l'Univers, précise Alessandra Rivasio, physicienne au Laboratoire pour l'utilisation de lasers intenses, à Palaiseau. Or, on sait qu'à l'origine, il n'y en avait pas." Les astrophysiciens avaient bien des hypothèses : s'effondrant sur elle-même pour donner naissance aux galaxies, la matière aurait pu engendrer des ondes de choc créant des champs magnétiques locaux... Seulement, leurs machines à remonter le temps, les télescopes, étant bien loin de pouvoir observer l'Univers protogalactique, moins de 500 millions d'années après le big bang. En janvier dernier, Alessandra Rivasio a pourtant observé le phénomène à l'œil nu, simplement en illuminant une pointe de carbone. Car, là encore, l'astrophysique expérimentale a trouvé l'analogie pour résoudre l'énigme : les équations qui décrivent la propagation des ondes de choc dans un gaz sont identiques à celles qui ont régi les ondes de matière formées par la gravité dans l'Univers encore vide de toute galaxie. En focalisant l'énergie d'une puissante impulsion lumineuse au centre d'une enceinte contenant un gaz, la physicienne a donc provoqué une explosion, une onde de choc... et a assisté à la naissance d'un germe de champ magnétique au niveau du front de l'onde. "Nous avons donc mis en évidence un mécanisme qui a pu être à l'origine des champs magnétiques observés aujourd'hui dans les galaxies ou les amas de galaxies", se félicite-t-elle. Reste maintenant à reproduire en laboratoire les mécanismes permettant, à partir de ce germe magnétique, d'amplifier le champ magnétique de l'Univers jusqu'à la valeur qu'on lui connaît... "Les mécanismes existent", assure la chercheuse. L'Univers protogalactique est à portée de laser.

## LE PRINCIPE

Quand le laser fait exploser la pointe de carbone, une onde de choc se propage dans le gaz environnant, engendrant un champ magnétique. Une onde de choc analogue à celle d'un effondrement de matière dans l'Univers...



# L'ASTRONOMIE EXPÉRIMENTALE EST NÉE

*En parvenant à tester en laboratoire des phénomènes cosmiques, les astronomes s'émancipent des limites de la modélisation. A la clé? L'invention d'une nouvelle science.*

"Les astronomes fabriquent de nouveau des astrolabes!" En contemplant les lasers puissants, les capteurs ultra-précis et les cuves de métal liquide que manipulent dans leurs laboratoires les astrophysiciens expérimentateurs, Franck Varenne, épistémologue à l'université de Rouen, ne peut s'empêcher d'y voir les équivalents modernes des disques gradués que l'on fabriquait il y a 2000 ans pour reproduire la dynamique des astres. Sauf qu'aujourd'hui, de tels outils ne servent plus simplement à mesurer la position des étoiles, mais à fonder une nouvelle façon de résoudre quelques-uns des grands mystères de l'Univers (voir pages précédentes).

## L'ENTRÉE DANS UNE NOUVELLE ÈRE

Alors qu'ils disposent de centaines de télescopes dont le regard, plus aiguisé que jamais, scrute les monstres du cosmos; alors qu'ils exploitent la puissance de calcul colossale des dizaines de milliers de processeurs des supercalculateurs, c'est en façonnant dans leur laboratoire, quasiment de leurs mains, des expériences physiques, que les astronomes sont en train de percer les secrets des trous noirs, des étoiles à neutrons ou des supernovae. Fruit d'une lente métamorphose qui a commencé au XVIII<sup>e</sup> siècle, voici donc que l'astronomie s'empare du dernier outil encore réservé aux physiciens: elle expérimente. Ce qui la fait entrer ni plus ni moins dans une nouvelle ère.

A vrai dire, les astronomes sont avant tout des physiciens. Et ce, depuis trois

cent cinquante ans. Depuis qu'Isaac Newton a fait entrer l'astronomie dans le champ des sciences modernes en réunissant sous les mêmes lois le ciel et la Terre, la science des phénomènes célestes ne se contente plus de décrire ou de mesurer avec précision la trajectoire des astres pour la prédire. Les astronomes s'attellent à définir les mouvements des fluides au cœur d'une étoile, à comprendre comment des milliards de collisions de boules de roches donnent naissance à des planètes, à décrypter les rapports intimes entre les particules... "L'objectif de la physique, qui est de dégager des lois essentielles à partir des principes les moins compliqués possibles, est devenu celui de l'astronomie", résume Christophe Salomon, physicien au Laboratoire Kastler Brossel, à Paris. Il ne faut donc plus s'étonner que les astronomes soient confrontés aux mêmes difficultés que les physiciens.

## L'ASTRONOMIE S'EMPRE DES OUTILS DES PHYSICIENS: ELLE EXPÉRIMENTE!

Car ceux-ci savent depuis longtemps combien il est difficile de décrire avec précision la trajectoire de plus de trois corps en interaction, de suivre les mouvements turbulents d'un fluide, d'un gaz ou d'un plasma, de prédire l'évolution non linéaire d'un système aussi complexe que le climat. Et cette épine est désormais aussi fichée dans le

pied des astronomes: en tentant de réduire les extravagances cosmiques aux lois les plus terre à terre, l'astrophysique se heurte à l'impossibilité de décrire exactement la complexité du monde.

Bien sûr, face à cette difficulté, les astronomes utilisent depuis un demi-siècle la même astuce que les physiciens: la modélisation numérique. Tout comme les météorologues ont recours à des simulations parce qu'ils ne peuvent connaître le comportement de ce système dynamique, évolutif et dépendant des conditions initiales qu'est l'atmosphère, les astronomes modélisent à tour de bras pour décrire la naissance des planètes autour des étoiles, l'évolution des étoiles dans les nuages de gaz, le passé et l'avenir de l'Univers... "Les principaux phénomènes qui occupent les astrophysiciens aujourd'hui obéissent à des corpus de lois physiques qui n'ont pas de solution analytique, conclut Franck Varenne. Ils ne peuvent obtenir une formule explicite de la solution et doivent donc lui substituer une expression approchée... calculée par un modèle numérique."

Seulement, les modèles numériques eux-mêmes ont leurs limites... "Les simulations sont loin d'être toutes puissantes, précise, tout de go, Sacha Brun, spécialiste de la modélisation des étoiles au CEA, à Saclay. Elles échouent dès que l'on s'attaque, par exemple,



## YANNICK PONTY

PHYSICIEN À L'OBSERVATOIRE DE LA CÔTE D'AZUR

*Seule l'expérience a la capacité de mettre tout le monde d'accord*

## FRANCK VARENNE

ÉPISTÉMOLOGUE À L'UNIVERSITÉ DE ROUEN

*On ne comprend vraiment que ce que l'on façonne*

aux phénomènes de turbulence. Même avec 100 000 processeurs, on ne peut pas reproduire le profil de rotation d'une étoile!" "C'est lié à un problème de fond, renchérit Guillaume Aulanier, astrophysicien à l'Observatoire de Paris. Nous sommes confrontés à des mécanismes physiques intriqués à petite et à grande échelles, ce qui est particulièrement coûteux en temps de calculs." Les physiciens l'avaient expérimenté, les astronomes sont en train de s'en rendre compte: pour tous les phénomènes mettant en jeu la mécanique des fluides, la physique des plasmas, la dynamique des corps en interaction... un modèle réel, quoique simplifié, reste plus proche de la réalité qu'une simulation forcément approximative, faute de pouvoir être reproduite avec assez de finesse.

Or, justement, le fonctionnement du cœur magnétique des étoiles est un problème... de turbulence. Le champ magnétique de l'Univers? Un problème de physique des plasmas. Les mécanismes des supernovae? Un problème de turbulence, encore. Le cœur des étoiles à neutrons? Des interactions dynamiques entre particules. Le rayonnement d'un trou noir? Des ondes dans un milieu non linéaire. →



**DANIELE FACCIO**

PHYSICIEN À L'UNIVERSITÉ D'EDIMBOURG (ÉCOSSE)

**La preuve expérimentale, même analogique, est supérieure à la modélisation**

→ La naissance des planètes? La turbulence, toujours. *“La majorité des phénomènes qui nous occupent actuellement sont décrits par des équations qui ne peuvent être résolues analytiquement, ni simulées correctement par des modèles numériques, conclut Yannick Ponty, théoricien à l’Observatoire de la Côte d’Azur. Et il y en a d’autres : on pressent par exemple qu’en tenant compte de la turbulence, on parviendra à comprendre comment des poussières de l’ordre du micromètre se sont agglomérées autour du Soleil juste après sa naissance pour former des corps de l’ordre du mètre... C’est la grande question qui reste sur la formation des planètes telluriques.”*

**LA NÉCESSAIRE ÉPREUVE DU RÉEL**

Ainsi, lorsqu’il s’agit de reproduire les tourbillons des fluides au cœur d’une planète, les expériences reproduisent presque fidèlement le cas réel astronomique, alors que les simulations les plus puissantes restent largement à la traîne. *“Ce n’est pas pour rien que l’industrie aéronautique continue de procéder à des essais en soufflerie, remarque Yannick Ponty. En simulant sur ordinateur la rotation d’un liquide, on atteint à peine le niveau d’une cuillère dans une tasse de café!”*

C’est donc par pur pragmatisme que les astronomes appliquent la méthode qui a marché en physique. Et cette nouvelle démarche expérimentale n’a pas fini d’être prolifique. *“Pour ce qui est de la question des plasmas, astronomes et physiciens commencent tout juste à se parler, remarque Alessandra Ravasio, physicienne au Laboratoire pour l’utilisation de lasers intenses,*

*à Palaiseau. On sent que la démarche analogique n’est pas encore culturelle chez les astrophysiciens. Mais il y a de moins en moins de réticences.”*

D’autant que dans le même temps, de plus en plus de physiciens et d’astrophysiciens s’aperçoivent que les simulations numériques ont un côté trouble. *“Ce revirement vers des expériences réelles arrive à un moment clé dans l’histoire des sciences, remarque Franck Varenne. La puissance des modèles informatiques devient telle*

**L'EXPÉRIENCE RAMÈNE LES PHÉNOMÈNES ASTROPHYSIQUES À DES ÉCHELLES HUMAINES**

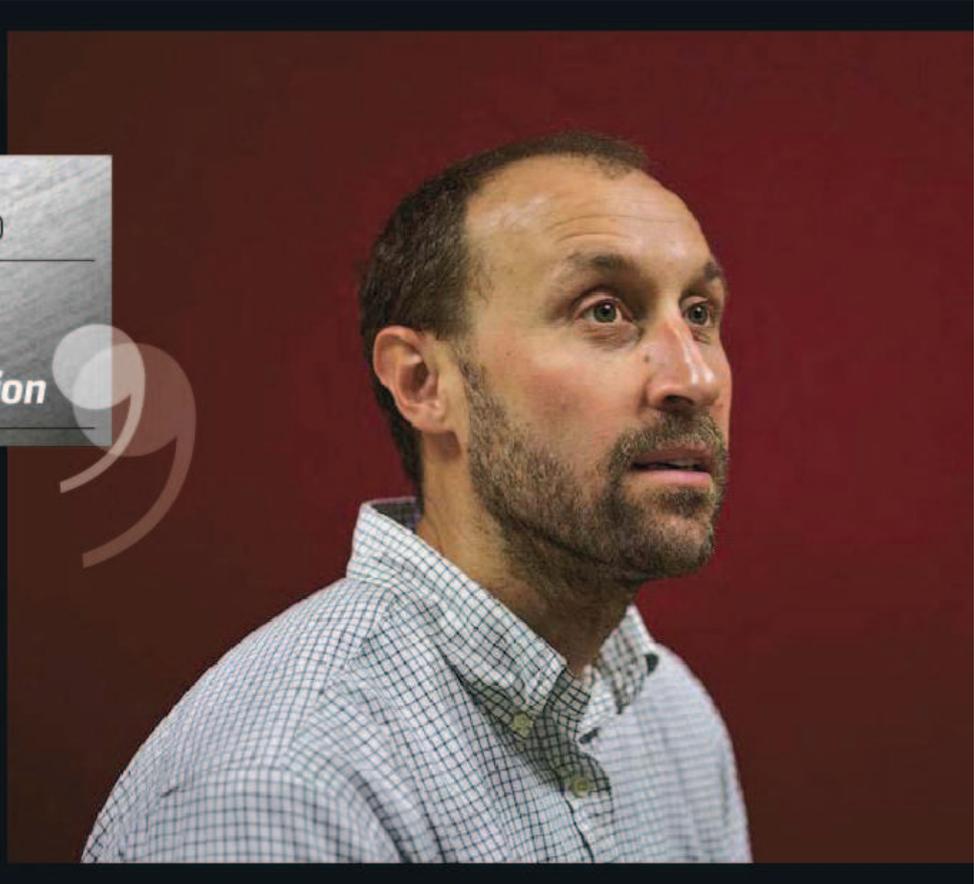
*que l’on commence à s’inquiéter de savoir s’il s’agit toujours de donner des preuves scientifiques ou bien de développer une pensée en la basant sur un corpus théorique...”*

Les modèles numériques ne se contentent pas de faire tourner les équations. Ils font aussi appel à des milliers de paramètres et d’hypothèses, qui disparaissent au fur et à mesure que le programme se complexifie. *“La question*

*de la non-reproductibilité des simulations numériques se pose, convient Yannick Ponty. Bien sûr, on s’efforce qu’elles soient reproductibles... mais cela devient confus lorsque l’on y met trop de choses en même temps : on crée des sortes de boîtes noires, des éléments qui participent au calcul, mais dont les mécanismes sont impénétrables.”* Au point que leur évaluation elle-même devient un terrain de recherche auquel épistémologues et physiciens commencent à s’atteler. *“Il*

*y a un énorme travail à mener pour distinguer dans les programmes numériques ce qui est de l’ordre de l’hypothèse de ce qui découle directement de la théorie, détaille Franck Varenne. Tout ce que l’on peut dire pour le moment, c’est que leur degré d’ancrage dans le réel, et donc de confiance que l’on peut accorder à leurs résultats, varie beaucoup...”*

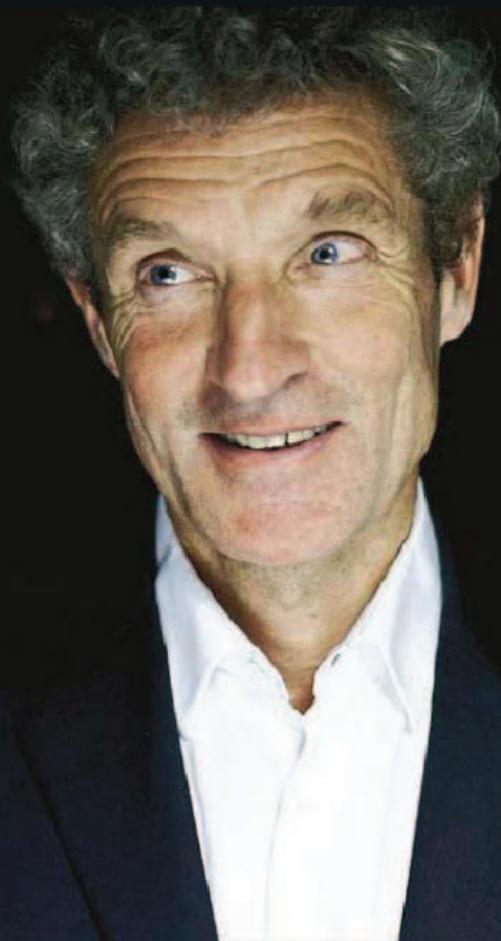
En tentant de devenir plus réalistes, les modèles pourraient donc se détourner du monde réel. On comprend dès lors mieux que dans l’échelle de valeurs des physiciens, l’expérience ait



**CHRISTOPHE SALOMON**

PHYSICIEN AU LABORATOIRE KASTLER-BROSSEL (PARIS)

*Aujourd'hui, étudier  
l'astronomie, c'est faire  
de la physique...*



repris la première place... Et que les astronomes leur emboîtent le pas: "Seule une expérience que l'on peut reproduire et falsifier permet de mettre tout le monde d'accord", tranche Yannick Ponty. "Démontrer un effet avec une expérience analogique, ce n'est bien sûr pas la même chose que le système original... mais c'est en tout cas plus intéressant que de faire une simulation numérique", renchérit Daniele Faccio, physicien à l'université d'Edimbourg.

Pour être sûr d'être dans le "vrai", les scientifiques ne peuvent se passer de

l'épreuve du réel, donnant raison à un précepte épistémologique formulé par Robert Boyle dès le XVII<sup>e</sup> siècle: on ne peut bien comprendre que ce que l'on sait reproduire. "On ne connaît et on ne comprend vraiment que lorsque l'on agit sur un phénomène ou un objet, que l'on peut le façonner et le transformer, paraphrase Franck Varenne. Cet argument épistémologique paraît éculé, mais je m'aperçois qu'il est plus que jamais ancré dans les convictions profondes de beaucoup de chercheurs." Et Thierry Foglizzo, astrophysicien au

## LE JOUR OÙ LES ASTRONOMES SONT DEVENUS PHYSICIENS

Le premier fait tomber la Terre dans le ciel. Le second fait tomber le ciel sur Terre. Et les deux font entrer l'astronomie dans le champ des sciences modernes. En 1610, Galilée découvre que la Lune a une surface constellée de cratères et le Soleil des taches qui évoluent au fil des jours: le monde sublunaire n'est plus immuable, comme le pensaient les savants grecs, mais il est aussi corruptible que la Terre. En 1666, Isaac Newton soumet la Lune et les pommes à une même loi: la gravitation. L'astronomie, qui jusque-là s'était contentée d'observer béatement (ou avec inquiétude) la nature, de décrire passivement le mouvement des corps célestes, peut enfin prétendre en expliquer les causes. "Ce corpus empirique qu'est l'astronomie devient ainsi falsifiable, c'est-à-dire susceptible d'être infirmé par des observations", explique Franck Varenne. En accédant aux modèles mathématiques et physiques, l'étude du ciel devient une véritable science et laisse l'astrologie à ses prédictions. Grâce à Galilée et Newton, l'astronomie est devenue astrophysique...

CEA, de lui donner raison: "Ces expériences ramènent les phénomènes astrophysiques à des échelles humaines. Elles les rendent de nouveau accessibles à l'intuition physique."

En même temps qu'ils deviennent des physiciens de haute volée et qu'ils accèdent à des modèles numériques réalistes, les astronomes se voient donc aujourd'hui obligés de retomber sur terre pour voir, vraiment, comment les choses fonctionnent. Bref, ils sont rattrapés par l'impérieuse nécessité de mettre la main à la pâte. **M.F.**