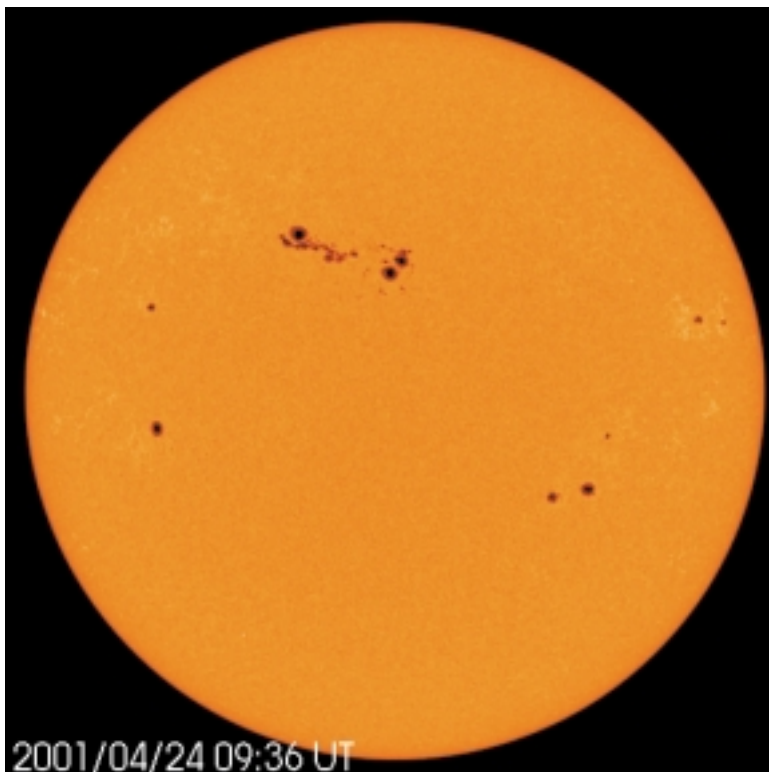


« À l'écoute » du soleil (En direct du satellite SOHO)



Quand on prend un bain de soleil, il fait jour et il fait chaud. Notre bonne étoile prodigue lumière et chaleur. Ce que l'on sait moins, c'est que le Soleil est le siège de vibrations qui l'apparentent à une énorme cloche (voir encadré « ondes sonores et ondes de gravité »). Et c'est bien connu des fondeurs : on teste les cloches en les faisant tinter. Lorsqu'une cloche sonne mal, c'est que sa masse métallique a un défaut quelque part. En étudiant les vibrations d'une cloche, on en explore l'intérieur sans avoir à la casser.

Les astrophysiciens font la même chose en grand avec le Soleil : ils captent et analysent par divers procédés les mouvements de sa surface, témoins des millions de vibrations qui agitent sa masse. Les « acousticiens » du Soleil se font opticiens et sismologues. Ils étudient, osons le dire, les « tremblements de terre » du Soleil et en tirent des informations extrêmement précises sur sa structure interne, l'agitation constante de ses matières, son champ magnétique. Ces mesures à distance qui

laissent le Soleil intact permettent d'améliorer nos connaissances sur la vie des étoiles, la physique des plasmas « quatrième état de la matière », et d'autres propriétés fondamentales de la nature, comme la masse du neutrino. On accède ainsi aux processus physiques internes de notre étoile dont dépend notre vie sur Terre.

La science de ces Haroun Tazieff du Soleil s'appelle l'héliosismologie. Ils disposent depuis cinq ans d'un magnifique outil, l'Observatoire solaire et héliosphérique, SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), en orbite autour du Soleil. Lancé le 2 décembre 1995 (clin d'œil au soleil d'Austerlitz ?), cette station spatiale avec ses 12 instruments embarqués scrute sans relâche notre étoile depuis février 1996. Une équipe du SAp s'est investie dans deux de ces instruments : un franco-espagnol GOLF (Global Oscillation Low Frequency) qui mesure les vibrations globales de basses fréquences, et un américain MDI (Michelson Doppler Instrument) dévolu à la mesure des déformations locales et auquel on doit le beau soleil ci-dessus.

Sylvaine Turck-Chièze présente ici un premier bilan de cinq ans d'écoute de la musique du soleil.

ScintillationS

Pourquoi le Soleil tremble ?

Comme celle de presque toutes les étoiles, la surface du Soleil vibre. Ces pulsations naturelles et permanentes engendrent des ondes qui se propagent dans l'étoile et permettent de l'étudier de la surface au cœur. Notre étoile est un énorme diapason vibrant à trois millièmes de Hertz (période d'oscillation de en gros

5 minutes). Mais ce son « fondamental » a des millions d'harmoniques.

Le phénomène de base, très ténu, est la turbulence de surface. Comme des gouttes de pluie sur la peau d'un tambour, des millions de granules de gaz portées à une température de plusieurs milliers de degrés s'agitent et font naître des ondes qui se propagent dans l'énorme boule gazeuse qu'est le Soleil. Certaines longent la surface et se

réfléchissent en de nombreux points de la sphère. D'autres plongent au cœur du Soleil. Des millions de « modes » sont engendrés à chaque instant. Leur étude révèle des propriétés de cette matière stellaire que nous ne pouvons actuellement reconstituer en laboratoire. Nos mesures à distance ne perturbent pas plus le Soleil qu'une échographie, un bébé. Mais leurs techniques délicates requièrent minutie et astuce⁽¹⁾.

(1) Pour plus d'informations, on peut lire l'article de Roland Lehoucq et de Sylvaine Turck-Chièze (SAp) *L'héliosismologie*, dans la revue *Astronomie* d'août 1997, et les rapports d'activité des dix dernières années du SAp.

Des mesures d'une précision de laboratoire

Pour analyser l'ensemble des modes d'oscillations, *via* le déplacement induit par la superposition de tous les modes présents à chaque instant, on mesure les variations de la vitesse de la surface du Soleil à partir du « décalage Doppler » de raies d'absorption d'éléments chimiques (*encadré ci-dessous*) qui se forment juste au dessus de la *photosphère* (limite visible de notre Soleil).

Avec GOLF, on atteint par cette méthode faisant appel à des propriétés

atomiques une précision « de laboratoire » qui s'améliore au fil du temps : au bout d'un an d'observation, la précision relative sur la fréquence des modes d'oscillation, grandeur décisive pour la finesse de « l'échographie » du Soleil, dépasse le dix-millième.

Après des corrections tenant compte des mouvements de GOLF par rapport au Soleil et des phénomènes magnétiques de surface, on obtient la vitesse de déplacement des couches superficielles. Une analyse de Fourier (comme celle qui décompose un son complexe en ses différents

harmoniques, voir *Scintillation* n° 31) permet d'analyser les caractéristiques de chaque mode acoustique.

Le Soleil, laboratoire de Physique

L'héliosismologie d'avant SOHO avait déjà fourni une moisson de renseignements sur l'état actuel de notre étoile, qui ont été autant de tests des modèles d'évolution stellaire déjà sophistiqués de l'époque⁽²⁾.

Les mesures de la vitesse du son dans les différentes profondeurs du Soleil, véritable échographie de notre étoile, ont révélé un

Mesures de vitesses par décalage Doppler de raies spectrales

Décalage Doppler – Une sirène qui arrive s'entend plus aiguë. On l'entend plus grave quand elle s'en va. La fréquence d'une même vibration est perçue plus élevée (son plus aigu, lumière plus bleutée) quand elle approche, et plus faible (son plus grave, lumière qui rougeoie) quand elle s'éloigne. C'est l'*effet Doppler* (voir le glossaire, n° 41 et la « sirène optique tournante », n° 49). Plus vite se déplace la source, plus grand est le décalage ; le mesurer, c'est mesurer la vitesse de la source.

Raies spectrales – Lorsqu'on regarde la lumière du soleil dans un *spectrographe*, qui décompose la lumière en ses différentes longueurs d'onde, on voit une bande arc-en-ciel zébrée de traits noirs plus ou moins fins, que les physiciens nomment *raies d'absorption*. Chaque raie correspond à une longueur d'onde et elle témoigne de l'absorption de photons de cette longueur d'onde par des atomes. Chaque élément possède ainsi sa signature optique, une sorte de « code barre » fait de l'ensemble de ses raies d'absorption. C'est en observant cette signature que l'astronome constate qu'un astre renferme l'élément en question. C'est de l'analyse chimique à distance. Exemple : une raie centrée sur 589 nanomètres (dans la partie jaune de l'arc-en-ciel) signale du sodium. Si un paquet de sodium oscille, par exemple à la surface du soleil, cette raie (et les autres du sodium) oscille en cadence. On peut alors mesurer à chaque instant la vitesse du paquet de sodium et la périodicité de ses oscillations.

Zoom optico-magnétique – Plus la source est lente, plus le déplacement des raies est ténu. Or les fluctuations de vitesse que l'on cherche à mesurer peuvent descendre à quelques millimètres par seconde. Les choses se compliquent car une raie d'absorption a une « largeur » correspondant à un flou dans la longueur d'onde des photons absorbés. Or, le décalage Doppler qu'on veut mesurer est beaucoup plus faible que la largeur de la raie. On ne voit pas plus la raie bouger, qu'on ne distinguerait le léger tremblement d'un pilier noir aux contours flous. Une solution : peindre des traits fins sur le pilier. Cela revient à sélectionner, dans le flou des longueurs d'onde des photons absorbés, une plage beaucoup plus étroite de longueurs d'onde. Le tri se fait en trois étapes (Fig. 1) :

1) **Filtre optique et atomique** - On recueille un rayon de soleil après passage dans un filtre jaune dans une cellule remplie de vapeur de sodium. Excités par la lumière, des électrons d'atomes de sodium jouent au yoyo entre deux orbites, absorbant et réémettant des photons d'énergie égale à la différence d'énergie des

deux orbites. Pour le sodium, cette énergie correspond à une longueur d'onde dans le jaune.

2) Filtre magnétique

On plonge la cellule dans un champ magnétique. Ce champ agit sur les électrons, porteurs de magnétisme. Or, la moitié des électrons tournent sur eux mêmes dans un sens, mettons « droit », et l'autre moitié dans l'autre sens, disons « gauche ». L'énergie échangée entre le champ et les électrons diffère légèrement d'une catégorie à l'autre. Bilan énergétique : les photons émis par les électrons « droits » ont une énergie, donc une longueur d'onde, légèrement différente de celle des photons émis par les électrons « gauches ». Ces deux énergies encadrent l'énergie des photons émis sans champ magnétique. En outre, le champ magnétique n'agit que sur des électrons bien précis qui émettent des photons d'une énergie, donc d'une longueur d'onde bien précise. Il supprime donc le flou sur la longueur d'onde. Résultat : il apparaît sur les flancs de la raie deux raies très fines, placées symétriquement (Fig. 2). Voilà peints les traits fins.

3) **Filtre polarisant** - Les photons émis par les électrons « magnétisés » sont *polarisés circulairement*, les uns à droite, les autres à gauche (n° 42). On complète donc le dispositif par : a) un polariseur que l'on peut régler pour qu'il laisse passer soit les photons « droits » soit les photons « gauches », b) deux photomultiplicateurs (compteurs à photons) placés de chaque côté de la cellule (Fig. 1).

On met ainsi en évidence, deux raies très fines disposées symétriquement sur une raie « patateïde ». Le dispositif permet de comparer le nombre de photons de ces deux raies, nombre identique si la source est immobile. Mais le moindre déplacement de la source (un paquet de sodium à la surface du Soleil) provoque un décalage Doppler qui se manifeste par l'apparition d'une légère asymétrie dans la position des deux raies fines et donc une différence du nombre des photons comptés. Ce dispositif d'une incroyable sensibilité décele des fluctuations de vitesse de l'ordre du millimètre par seconde ! Cela permet d'analyser les modes d'oscillations avec une finesse et une précision inégalée. Bravo les artistes !

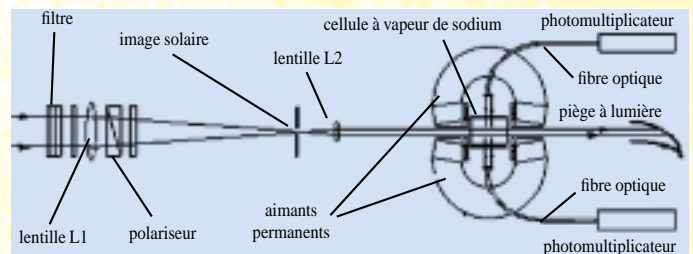


Figure 1 - Schéma du dispositif de mesure des vitesses par déplacement Doppler de raies spectrales.

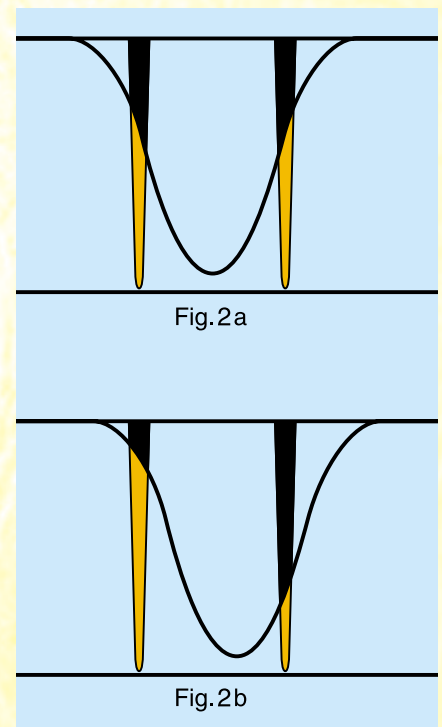


Figure 2 - Principe de l'expérience : les deux raies fines (en noir) apparaissent sur les flancs de la grosse raie (représentée ici par une courbe en cloche). Ces deux raies sont symétriques lorsque la source est immobile et correspondent chacune au même nombre de photons absorbés (Fig. 2a). Lorsque la source bouge, la grosse raie se déplace et les deux raies fines, calées sur le champ magnétique, ne bougent pas, mais se retrouvent dissymétriques (Fig. 2b). Cela entraîne un comptage de photons différent d'une raie fine à l'autre.

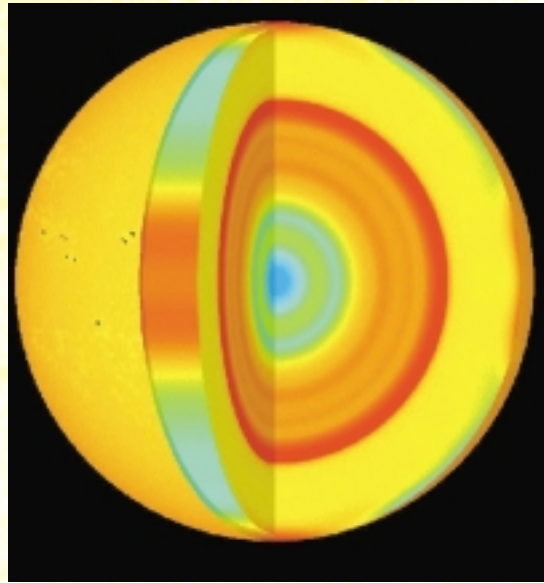
Joël Martin (SPhN)

(2) La modélisation rend compte des phénomènes qui régissent les grandes étapes de l'évolution d'une étoile : gravité, interactions forte et faible, transport d'énergie ; elle utilise aussi des informations d'ensemble sur la masse, le rayon, l'âge et les abondances détaillées des éléments dans la photosphère. Le calcul est déjà extrêmement sophistiqué puisqu'il inclut les connaissances les plus complètes en physique atomique, physique nucléaire et physique des plasmas, accumulée depuis les années 1920.

Ondes « sonores » et ondes « de gravité »

Le Soleil n'est pas sonore au sens où, habituellement, on l'entend (si l'on ose dire) : les fréquences sont beaucoup trop basses et le son ne se propage pas dans le vide. Il n'en reste pas moins qu'une partie des ondes qui font vibrer notre étoile sont de même nature que les ondes sonores : une déformation née d'une compression locale que compense immédiatement une détente crée une oscillation qui se propage de proche en proche dans la matière solaire.

Le Soleil est aussi le siège d'une autre sorte d'ondes dont le « moteur » est une force qui tire : la gravité du Soleil, associée à une force de rappel : la poussée d'Archimède due à des différences locales de densité. Ce sont les *ondes de gravité*. Ces ondes, de basse fréquence, restent confinées dans la zone interne du Soleil, la *zone radiative*, car elles sont fortement amorties en passant dans la



zone convective externe (voir Fig.3). Elles sont donc extrêmement difficiles à détecter, mais lorsqu'on y parvient, c'est un moyen privilégié de mieux connaître le cœur solaire

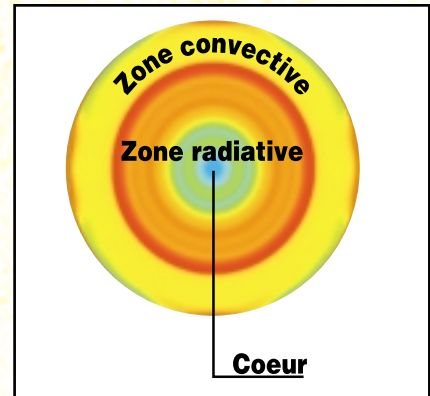


Figure 3 : « Eclaté » du Soleil. On distingue à partir du centre : le cœur, limité par un cercle vert, la zone radiative, qui s'arrête à la grosse couronne rouge, et la zone convective, externe. Le cœur fait partie de la zone radiative, mais a le monopole des réactions nucléaires. C'est la chaudière de l'étoile et le creuset de l'alchimie stellaire. Les couleurs de cette vue d'artiste reflètent les différences entre la vitesse du son mesurée et celle prévues par un modèle solaire (en jaune). Rouge et orange : la vitesse mesurée est plus élevée que la vitesse prévue; bleu et vert, c'est l'opposé. On voit bien les discontinuités, en particulier, la zone Tachocline, frontière entre les zones radiative et convective.

accord assez bon avec ces modèles. Mais les différences se sont révélées riches d'enseignement. Deux exemples.

1) La vitesse du son dans une région du plasma solaire renseigne sur la proportion de chaque élément chimique présent dans la région explorée. Or, les mesures ont donné une proportion d'hélium en surface plus faible que prévu. On a corrigé le tir en prenant en compte la lente migration gravitationnelle des éléments (10% des éléments pour le Soleil), infirmant l'hypothèse que les abondances de surface témoignent des abondances présentes lors de la formation de l'astre. Retombée : une meilleure évaluation de l'âge des étoiles.

2) Un changement de milieu change la vitesse du son. Les mesures de ces discontinuités renseignent sur les phénomènes de transition d'un milieu à l'autre. On a déterminé ainsi la position précise de la frontière entre la *zone radiative*, où l'énergie est transportée par l'interaction photons-matière, et la *zone convective*, où elle est transportée par de vastes mouvements de masses homogènes.

Ces premiers succès témoignent de la puissance d'investigation de l'héliosismologie qui utilise le Soleil comme un véritable laboratoire de sismologie, d'acoustique, d'optique, de magnétisme, de physique atomique, de physique nucléaire. Et c'est un bel exemple de complémentarité théorie-expérience : comme les modèles étaient insuffisants

pour expliquer les mesures, on y a incorporé des phénomènes majeurs, observés sur d'autres étoiles, mais trop ténus pour qu'on en ait jusqu'alors tenu compte. Ce qui, en passant, permet de mieux comprendre l'évolution des étoiles les plus anciennes, celles des amas globulaires, et aussi de mieux dater notre Univers...

Et alors, SOHO est arrivé !

SOHO, l'âge d'or de la sismologie

SOHO, satellite de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), est une sonde lancée il y a un peu plus de cinq ans, en décembre 1995 à 1,5 millions de kilomètres de la Terre au point de Lagrange L1 (point où les attractions gravitationnelles du Soleil et de la Terre se compensent exactement) afin d'étudier le Soleil en permanence dans des conditions de stabilité parfaite (voir *ScintillationS* n° 25 et 40).

Prévue pour observer pendant 8 à 10 ans, presque un cycle solaire (11 ans), SOHO a encore probablement un quinquennat pour engranger d'autres résultats majeurs. Mais d'ores et déjà, GOLF et MDI nous donnent une vision nouvelle du Soleil. Notre étoile nous apparaît non plus comme une boule de feu figée, mais comme une sphère composée de zones qui bougent les unes par rapport aux autres. GOLF exploite à fond le fait que le Soleil est son propre « sonar ». En mesurant les variations de la vitesse du son selon la

Abondance et durée de vie

Une étoile naît d'une masse de gaz interstellaire dont les constituants s'agglomèrent par attraction gravitationnelle. L'étoile devient un creuset où se forment, par fusion de noyaux atomiques, des éléments chimiques à partir du plus léger : l'hydrogène. Au cœur de l'étoile (la zone centrale limitée par la couronne bleu-vert de la fig.3) des noyaux disparaissent et il s'en forme d'autres. L'hydrogène fabrique de l'hélium, lequel fabrique des éléments plus lourds etc. Ces *fusions thermonucléaires*, qui fournissent son énergie à l'étoile, modifient sa composition initiale, celle du gaz dont elle est née. La proportion de chaque élément (appelée aussi *abondance*) varie au cours du temps. C'est une donnée essentielle sur l'évolution de l'étoile.

Les choses se compliquent car les éléments se forment exclusivement à l'intérieur du cœur de l'étoile, d'accès peu commode par définition. Or, dans le Soleil, par pur effet de gravité, les éléments migrent différemment de la surface vers l'intérieur. Mais cela leur prend des millions et des millions d'années, et pendant la migration, les transformations nucléaires continuent. L'abondance en surface ne témoigne pas de l'abondance initiale. Toute information directe sur le cœur et sur l'abondance de surface est donc la bienvenue pour, entre autres, mieux connaître l'âge de l'étoile.

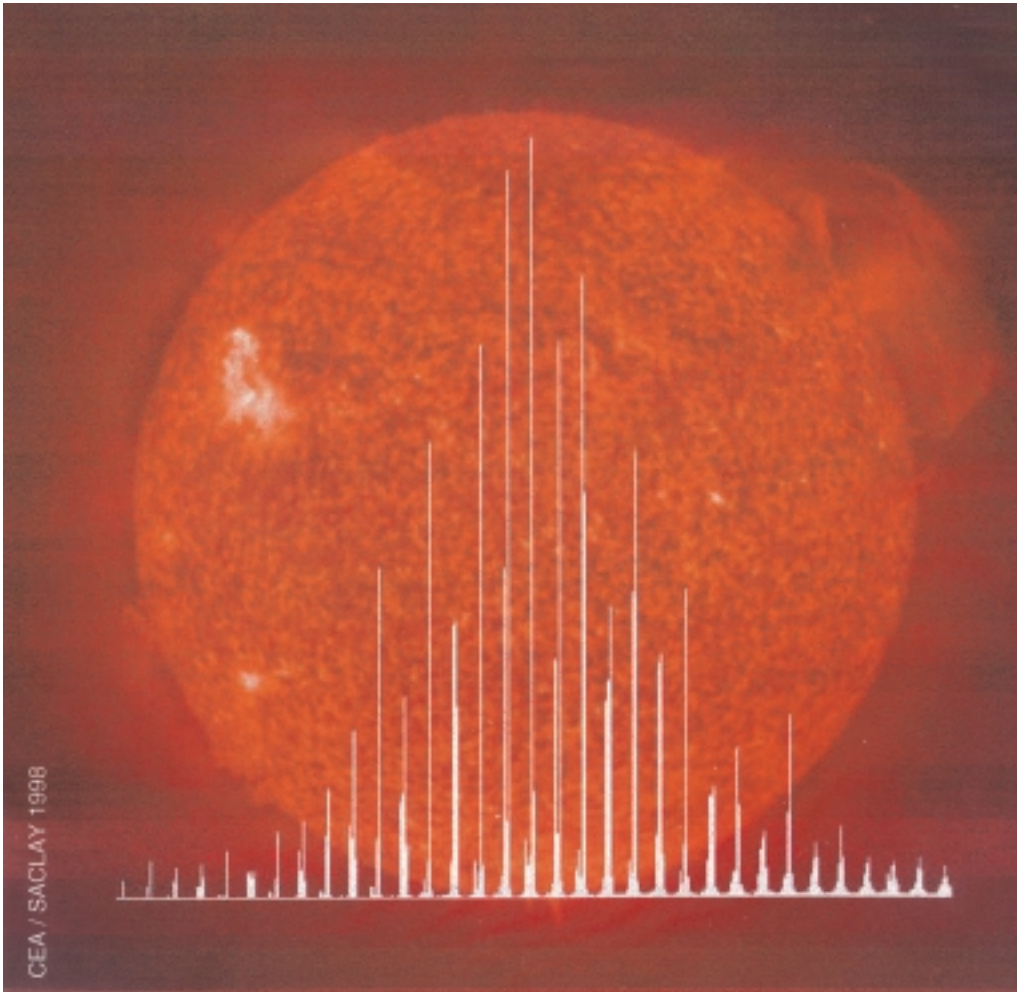


Figure 4 - Spectre de fréquence des oscillations obtenues par GOLF en surimpression sur une image de la surface granuleuse du Soleil au moment d'une éruption (visible en haut à droite du cliché), observée par EIT, télescope à imagerie en ultraviolet lointain embarqué sur SOHO.

profondeur, ainsi que les variations de la densité de la matière solaire et celles de sa rotation à différentes latitudes, on connaît mieux la très importante région *tachocline*, frontière entre la zone convective proche de la surface, où des couches de latitude différentes tournent à différentes vitesses, et une zone plus profonde quasi rigide qui colle à la rotation équatoriale de la surface du Soleil. Dans cette nouvelle vision

dynamique de notre étoile, deux grands oubliés de l'évolution stellaire, la rotation et le magnétisme commencent à révéler leur rôle⁽³⁾. En effet, bien que l'on sache que tous les systèmes astronomiques tournent plus ou moins vite et que le champ magnétique joue un rôle crucial dans l'histoire de l'Univers, les manifestations de ces deux phénomènes dans l'évolution stellaire étaient exclues des équations, ren-

dant difficile l'étude unifiée de cette évolution. Ainsi, déceler et comprendre finement l'**effet dynamo** (la rotation engendre l'électricité et le magnétisme) fait mieux connaître l'ensemble de la vie d'une étoile. SOHO va permettre de mieux comprendre des phénomènes solaires majeurs comme les éruptions (Fig. 4), ou le cycle de 11 ans.

Autres fruits de SOHO

L'étude fine du cœur nucléaire solaire, enfin permise par SOHO, valide certaines hypothèses sur le plasma et donne l'espoir de répondre un jour à des questions comme : « *Des électrons libres du plasma accélèrent-ils des réactions nucléaires ?* » Bientôt le Laser Mégajoule, à Bordeaux épaulera cette recherche en recréant un bref instant un plasma stellaire. Mais en attendant ces gouttes de soleil en laboratoire, la sismologie des étoiles est un puissant moyen de tester les hypothèses utilisées pour simuler la production d'énergie nucléaire. En 10 ans, nous avons réduit d'un facteur 10 le désaccord entre modèle et mesures sur la vitesse du son dans le Soleil. Actuellement, la

structure observée est si proche de celle obtenue avec une physique détaillée mais classique, que toutes les propositions plus exotiques ont été rejetées (WIMPS⁽⁵⁾ au centre du Soleil, migration des éléments lourds, turbulence centrale...). Toutefois il faut être prudent, ce n'est vrai que dans le cadre du modèle. Ces conclusions sont importantes pour l'Astrophysique mais aussi pour la Physique des Particules qui

Rotation, magnétisme et cycle solaire

L'héliosismologie d'aujourd'hui révèle les phénomènes de rotation et de magnétisme et montre qu'ils induisent des instabilités, sources de turbulence et de mélange, dans les couches les plus externes mais aussi aux abords de la zone convective (Fig.3). On tente d'ailleurs, au DRECAM et à l'Orme des merisiers (on peut visiter) de reproduire et d'étudier de telles instabilités en laboratoire. Ces mélanges entraînent la destruction du lithium, ce qui expliquerait enfin sa faible abondance en surface. Les astro-

physiciens introduisent cette instabilité dans leurs modèles, et supposent que le champ magnétique de surface est transporté dans toute la région convective, probablement amplifié à la base de celle-ci et restitué à la surface en engendrant des cycles magnétiques. C'est la source probable du cycle solaire de 11 ans. D'autres instruments de SOHO, permettent de suivre les arches de matière à l'extérieur du Soleil et l'on aimerait prévoir leurs éruptions car elles ont des incidences sur Terre : poussées

glaciaires, changements de climat etc. On sait déjà que ce cycle perturbe la vie en altitude et les communications. C'est pourquoi ce phénomène doit être de plus en plus surveillé. Vivre avec une étoile et grâce aux étoiles n'est pas forcément aussi paisible qu'il était apparu au siècle passé, d'où l'idée d'adjoindre à SOHO un ensemble, nommé CLUSTER, de quatre satellites de surveillance de la Terre.

S. T.-C

(3) Voir *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, Institute of Physics*, Janvier 2001

(4) Voir le site de l'ESA : <http://sci.esa.int/home/soho/>

(5) WIMPS : Weak Interaction Massive Particles, hypothétiques particules régies par l'interaction faible qui contribuent peut-être à la matière sombre de l'univers.

utilise le Soleil comme une source de neutrinos électroniques dont des propriétés restent à découvrir. Si l'astrophysicien pouvait mesurer « sur place » le flux de neutrinos émis et l'environnement dans lequel ils se déplacent, le mystère du déficit de neutrinos détectés au sol pourrait s'éclaircir.

L'exploration du cœur du Soleil par SOHO est une grande première à double titre. Jusqu'alors nous ne savions que mesurer la luminosité de la photosphère, témoin de ce qui se passe au cœur du Soleil, mais qui met 1 million d'années à nous parvenir. SOHO sonde notre étoile en direct. En outre, c'est la première fois que l'on travaille sur l'infiniment loin avec des précisions de laboratoire.

L'avenir de SOHO

La deuxième partie de la mission SOHO sera consacrée à l'étude des « variabilités ». En effet, si l'instrument MDI a mis en évidence de façon éclatante la dynamique de la région convective, externe, la région interne contenant plus de 80 % de la masse du Soleil apparaît toujours statique. Réalité ou manque de précision des mesures actuelles, il est trop tôt pour le dire. Pour reconstituer le passé des étoiles, il manque un élément essentiel : l'*histoire du moment angulaire*. La formation des étoiles est très dynamique avec ses deux épisodes, « accréation » puis éjection de matière. Lorsque l'étoile se désolidarise du disque de poussières qui l'entoure (voir *ScintillationS* n° 49) elle se met à tourner beaucoup plus vite sur elle-même⁽⁶⁾. Le Soleil jeune tournait-il très vite (plusieurs centaines de km/s en surface⁽⁷⁾) ou lentement comme aujourd'hui (environ 2 km/s en surface,

tout de même, soit environ un tour par mois terrestre) ? On a besoin de le savoir pour comprendre le rôle et la production du champ magnétique. La sismologie du Soleil et celle d'autres étoiles plus jeunes ou de masse légèrement différentes apportent un certain nombre de réponses. Ces indicateurs et d'autres comme la teneur en lithium dans la photosphère (voir plus haut) nous feront mieux appréhender le rôle de notre étoile dans notre vie sur terre, nous emmenant ainsi vers nos origines via la formation des galaxies, des étoiles et des planètes.

Distinguer les effets magnétiques de surface et profonds nous aidera à prévoir l'évolution de notre étoile sur quelques générations humaines. Comprendre dans le détail les modes acoustiques solaires sera précieux pour explorer d'autres étoiles. De plus SOHO nous laisse un profond espoir d'accéder à des modes de vibrations d'amplitude plus faibles régis par la gravité. Il aura ainsi fait œuvre de défricheur avant de passer le témoin à une

nouvelle génération d'instruments qui exploreront encore plus finement et profondément le cœur de notre étoile.

Les résultats de GOLF ont fait l'objet de plus d'une trentaine d'articles, ceux de SOHO avec ses 12 instruments, environ 500. 2001 est une grande année pour présenter les résultats de SOHO. Nous avons fêté dans toute l'Europe⁽⁸⁾ et aux États-Unis les 26 et 27 Avril les 5 ans de SOHO. Le lancement réussi de CLUSTER II le 15 Juillet 2000 permet enfin d'associer ces deux grands projets pour suivre la relation du Soleil et de la Terre. Il est probable que sauf problèmes particuliers, SOHO saura jouer les prolongations pour encore plus de retombées scientifiques.

Sylvaine Turck-Chièze (SAp)



Des tempêtes solaires éjectent de notre étoile toutes sortes de particules. Certaines atteignent notre atmosphère, créant de magnifiques voiles de lumière, les aurores boréales. C'est un bel exemple de l'influence de la « vie » solaire sur la vie terrestre.

(6) Faites l'expérience : asseyez-vous sur un tabouret tournant bien huilé, en tenant une pile de gros bouquins d'astronomie, et mettez-vous à tourner. Lâchez ensuite les bouquins, vous verrez que vous tournez subitement plus vite. C'est que l'énergie que vous avez dépensée pour acquérir votre rotation vous reste acquise, et comme ce qui est sur le tabouret est subitement moins massif, le nouvel ensemble tourne subitement plus vite. Plus précisément, vous avez emmagasiné un certain capital de « moment angulaire », produit de la masse en rotation, de la vitesse de rotation et, disons en très gros, de l'extension spatiale de ce qui tourne. Ce capital se conserve. Lorsque la masse qui tourne diminue, la vitesse augmente d'une quantité telle que le produit reste constant. Vous pouvez aussi tourner, les jambes tendues à l'équerre, puis replier subitement les jambes (c'est ce que font les patineurs à glace avec une seule jambe) : comme votre extension spatiale a diminué, vous tournez plus vite, le produit restant constant. Cette constance est une loi fondamentale de la nature : la *conservation du moment angulaire*. Tous les objets de la nature obéissent à cette loi universelle. En particulier, une étoile et le disque de matière qui l'entoure. Tant que l'étoile est liée au disque, l'ensemble tourne à une certaine vitesse. Mais dès que l'étoile se désolidarise (les astronomes disent : « se découple ») du disque, elle se met à tourner plus vite (Voir aussi la note 2, page 6). (Note du « scintillateur »)

(7) Le Soleil a un rayon d'environ 700 000 kilomètres, un peu plus de cent fois celui de la Terre.

(8) La Cité des Sciences de la Villette accueille du 24 au 28 avril un cycle de conférences sur SOHO et une expo jusqu'au 7 mai.

Petit trou noir et grande tache rouge

(L'activité cyclique des micro-quasars)

Les micro-quasars, ces systèmes binaires dont l'une des étoiles est devenue un trou noir et mange petit à petit sa voisine (Fig. 1), ont de nombreux secrets à nous révéler. Découverts en 1994 par Félix Mirabel (SAP) et son collaborateur Louis Rodriguez (Université de Mexico), ils se caractérisent par un disque d'accrétion⁽¹⁾ et un jet relativiste (voir *ScintillationS* n° 36). Ces éjections donnent même parfois

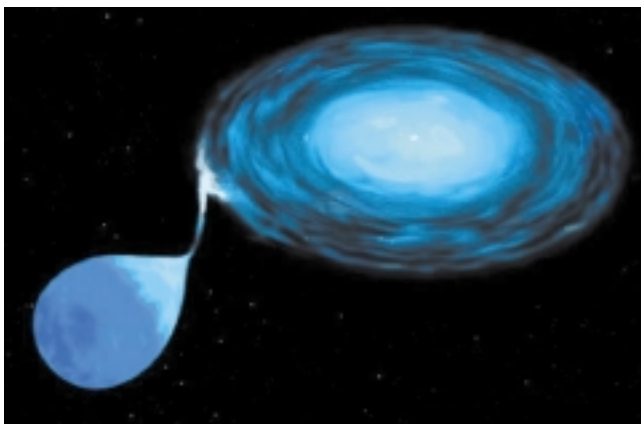


Fig. 1 : Vue d'artiste d'une étoile (à gauche) phagocytée par son compagnon, un trou noir (qu'on ne voit pas car même la lumière n'en peut ressortir). La présence du trou noir est révélée par son disque d'accrétion (la galette qu'on voit à droite). Le filament reliant les deux astres est constitué de la substance de l'étoile aspirée par son vorace et massif compagnon.

l'illusion relativiste de se déplacer plus vite que la lumière (*ScintillationS* n° 21). Les micro-quasars sont d'excellents prototypes pour l'étude des phénomènes d'accrétion-éjection (éjections diverses de matière et de rayonnement), car le carrousel du gaz autour du trou noir avant d'y être englouti ne prend que quelques centièmes de secondes, au lieu de plusieurs jours pour les quasars et autres noyaux actifs de galaxies (NAG). Le plus spectaculaire des micro-quasars, GRS 1915+105, présente ainsi des cycles d'une trentaine de minutes, qui prendraient des centaines d'années dans un NAG (n° 36).

Cette cadence rapide permet d'accéder à des informations impossibles à obtenir ailleurs. En particulier, les micro-quasars présentent des oscillations quasi-périodiques, au rythme d'environ une par seconde, manifestation de phénomènes se produisant dans le disque à quelques dizaines ou centaines de kilomètres du trou noir. Une sorte de pulsation cardiaque...

En 1999, Michel Tagger (SAP) et René

Pellat (notre HC...) avaient montré qu'un disque d'accrétion pouvait former une spirale analogue à celle des galaxies, mais due à des forces d'origine magnétique plutôt que gravitationnelle. Cette structure spirale, en rotation autour du trou noir, semblait un bon candidat pour expliquer ces « battements cardiaques » d'un micro-quasar. Elle se développe spontanément en se couplant à un tourbillon de Rossby, cousin éloigné de la Grande Tache Rouge de Jupiter. La spirale pompe de l'énergie et du moment angulaire⁽²⁾ du disque et les stocke dans le tourbillon. Le gaz du disque, en tournant moins vite, est ainsi aspiré vers le trou noir comme par une tornade : c'est ce qu'on appelle l'accrétion. Le tourbillon, lui, peut restituer ce stock d'énergie et de moment angulaire sous forme d'ondes d'Alfvén, qui se propagent vers la couronne du disque et alimentent un vent ou un jet. La structure

complète de l'instabilité est donc composée d'une onde de compression (analogue à une onde sonore), qui n'est autre que la spirale se propageant dans le disque, d'un tourbillon de Rossby (sorte de tornade engendrée par les différences de vitesse au sein du disque), et d'une onde d'Alfvén, correspondant à une torsion qui se propage le long des lignes de champ magnétique.

Dans une série de travaux récents, Peggy Varnière, Jérôme Rodriguez, Stuart Caunt, Philippe Durouchoux et Michel Tagger ont poursuivi l'étude théorique, la simulation numérique de cette « Instabilité d'Accrétion-Éjection » et sa confrontation avec les observations. L'étude détaillée de ses propriétés montre qu'elle est le meilleur candidat pour expliquer le « pseudo-battement cardiaque ». On peut alors construire un scénario de « crues magnétiques », où c'est une accumulation de flux magnétique qui détermine le cycle (de 30 minutes dans le cas de GRS 1915+105) et, avec lui, le stade final de l'accrétion vers le trou noir,

ainsi que les éjections relativistes. Le mécanisme serait le suivant : le flux magnétique s'accumule dans le disque, soit lors du mouvement d'aspiration par le trou noir du gaz de l'étoile-compagnon, soit par effet dynamo⁽³⁾. Lorsque le champ magnétique devient suffisant, l'instabilité se déclenche et entraîne le flux vers le bord interne du disque où il sera détruit par « reconnexion magnétique », provoquant des éjections analogues aux éruptions solaires (Fig. 2).

On pourrait construire des clignotants, peut-être un peu coûteux, sur ce principe...

Michel Tagger (SAP)

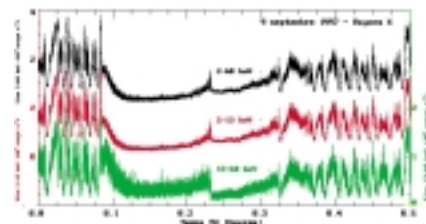


Fig. 2 : Le cycle de 30 minutes de GRS 1915, observé par Félix Mirabel et ses collaborateurs, est présenté dans la thèse de Sylvain Chaty (SAP). Les courbes traduisent le flux du rayonnement X reçu en fonction du temps.

Rouge : rayons X d'énergie comprise entre 2 et 13 keV (1 keV = 1000 électron-volts) ; vert : X compris entre 13 et 60 keV ; noir : l'émission totale (entre 2 et 60 keV). Les mesures s'étalent entre $t = 0$, début du cycle, et la fin du cycle à $t = 0,5$ heure, soit une demi-heure plus tard. La source X passe d'un état de haute activité à un presque calme plat vers $t = 0,1$ (6 minutes), puis reprend son activité vers $t = 0,3$ (18 mn). L'oscillation quasi périodique (environ une oscillation par seconde, qu'on ne peut distinguer à cette échelle car une seconde est représentée par moins d'un dixième de millimètre sur l'axe des temps) est observée pendant la phase calme jusque vers $t = 0,22$ (13 mn 12 s). À cet instant, l'émission en X de basses énergies du disque d'accrétion montre une pointe d'activité (le « pic » sur les courbes rouges et noires), probablement lié à une reconnexion magnétique violente donnant lieu à une éjection massive (observée au même moment à d'autres longueurs d'onde). Au même moment, l'émission à haute énergie disparaît presque totalement (le « ressaut » sur la courbe verte), indiquant que c'est probablement le gaz de la couronne du disque, plus chaude, qui est éjecté... Le boulimique éjecte ainsi toutes les demi-heures la masse d'une montagne, à une vitesse proche de celle de la lumière ...

(1) L'accrétion : capture, stockage, et absorption de matière par un trou noir.

(2) Le moment angulaire (appelé aussi moment cinétique ou moment de quantité de mouvement) d'un objet qui tourne autour d'un axe est le produit de la masse de l'objet, de sa vitesse et de sa distance à l'axe. Voir aussi la note n° 6 dans l'article « À l'écoute du Soleil », page 5 de ce numéro.

(3) C'est le même effet qui contribue à créer le champ magnétique terrestre par des mouvements de convection au sein du noyau liquide de fer et de nickel de notre planète.

Brèves... Brèves... Brèves... Brèves... Brèves...

Un résultat de CLAS

Le détecteur CLAS (Cebaf Large Acceptance Spectrometer) implanté dans le hall B de CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility, voir ScintillationS n° 20, 22, 40 et 47) vient d'ouvrir un domaine vierge de la physique hadronique.

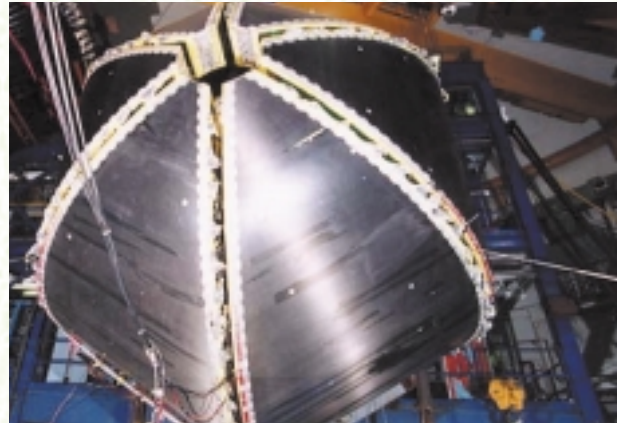
La cohésion d'un noyau atomique vient de l'interaction forte ou force nucléaire forte (voir n° 42), par laquelle ses nucléons (protons et neutrons) s'attirent. Cette force est transmise par des mésons. L'interaction entre deux nucléons est donc liée à celle qui s'exerce entre un nucléon et le méson messenger. Un nucléon est composé de quarks liés par la force de couleur que véhiculent les gluons (n° 27 et 28). Quel est l'influence de la force de couleur sur l'interaction forte qui en est la manifestation à l'échelle du noyau ? C'est tout l'objet de la physique hadronique.

Un noyau c'est un peu comme un mur, il y a les briques (les nucléons) et le ciment (les mésons). Si l'on sait comment le ciment tient à la brique, on sait comment deux briques tiennent l'une à l'autre. En outre, une bonne connaissance de la structure et de la composition des briques ainsi que de celles du ciment permet de connaître plus en finesse comment tient le mur. De même, pour connaître mieux les mécanismes profonds de la force qui fait tenir le noyau, on étudie des effets liés aux constituants des nucléons et des mésons : les quarks et les gluons.

CEBAF dispose pour cela d'une sonde très fine et pénétrante : des faisceaux de photons dont l'énergie est de plusieurs GeV. Si un tel photon heurte un noyau, le grain d'énergie déposée est si concentré qu'il peut ne toucher qu'un seul nucléon du noyau et provoquer un remue-mé-

nage très local de ses quarks. Cette frappe chirurgicale éjecte du nucléon une paire quark-antiquark qui se recombine en un méson. L'observation en détail d'un tel processus aide à déterminer l'influence des quarks et des gluons sur l'interaction nucléon-méson, et donc sur l'interaction nucléon-nucléon. À CEBAF, l'énergie est suffisante pour extraire des mésons lourds, en particulier des mésons F. C'est cette réaction de « photoproduction des mésons F » qui vient d'être étudiée auprès du détecteur CLAS, sur le noyau d'hydrogène, fait d'un seul proton. Il est bon de comprendre le simple avant d'aller vers le complexe.

Or, les mésons F sont composés exclusivement d'une paire quark-antiquark étranges, alors que les nucléons portent très peu d'étrangeté. Cela implique qu'il y a très peu d'échanges de quarks lors de l'émission d'un F, et donc que les gluons y jouent le rôle principal. Observer ces étranges mésons, c'est une façon d'isoler la contribution des gluons à l'interaction forte. CLAS a permis de préciser que le phénomène dominant est l'échange de deux gluons entre les deux quarks



Le détecteur CLAS

étranges du méson et les trois quarks de valence (voir l'article de Jean-Marc Laget, n° 22) du nucléon.

Dans un prochain numéro, Jean-Marc Laget (SPhN) détaillera cette expérience, proposée en 1993 par un groupe du SPhN qui a participé à la mise au point du dispositif expérimental, puis conduit l'analyse des résultats et leur publication. L'auteur expliquera en quoi elle ouvre la voie à l'étude d'une partie de l'interaction nucléon-nucléon dite du type Van der Waals⁽²⁾.

J. M

Les lauriers du daphnia

Le Prix de la Communication du DAPNIA 2000 a été décerné à Roland Lehoucq (SAP) et Alain Milsztajn (SPP) qui ont bien voulu se prêter aux jeux des questionnaires. Merci et vives félicitations !

ScintillationS : *Qu'est-ce qui vous pousse à communiquer ?*

Roland Lehoucq : Je m'intéresse depuis longtemps à la diffusion des sciences. Pour partager passion et connaissances, mais aussi pour mon équilibre de chercheur. Expliquer simplement au grand public des choses compliquées oblige à clarifier sa propre pensée. Même s'il y a encore des progrès à faire, cette activité est, au plan professionnel, de plus en plus reconnue comme une de nos missions par notre hiérarchie. Témoin, ce



Roland Lehoucq

prix. Et c'est le moindre des choses d'expliquer aux contribuables ce que nous faisons de leur argent. Autant le faire de façon claire et attrayante. Le citoyen ainsi informé est mieux armé pour s'exprimer dans les débats de sociétés que suscitent nos activités. Je pense aussi que prendre conscience des beautés souvent insoupçonnées de la Nature peut être, pour tous, une forme d'évasion loin des soucis quotidiens. **Alain Milsztajn** : Le public est avide de science et j'aime en apporter à des auditeurs souvent passionnés par son côté créatif, culturel et ludique, en particulier aux écoliers du primaire, pleins d'inventivité et de fraîcheur. J'ai aussi la conviction que la science n'est pas assez reconnue comme pan important de la culture. Nous avons la

chance d'habiter un pays où existe une recherche fondamentale. Il est juste de la mettre à la portée des citoyens qui la financent. En outre, je trouve gratifiant d'éveiller à la science des personnes qui n'ont aucune base scientifique. Complémentaire de l'oral



Alain Milsztajn

où le « retour » est immédiat, l'écrit, qui touche plus de monde, est aussi pour moi une forme de lutte contre une certaine pensée unique. Mes contacts avec des journalistes scientifiques me permettent de compléter, de diversifier, voire de tempérer des dépêches d'agences

(1) Dans Physical Review Letters (27/11/2000, page 4682). Voir aussi l'excellente thèse d'Eric Anciant (SPhN).

(2) En physique atomique, les forces de van der Waals sont des forces attractives entre molécules. Ces forces, à faible rayon d'action, sont « la partie visible de l'iceberg », la manifestation à l'échelle des molécules de la force électromagnétique plus profonde qui s'exerce à l'intérieur de l'atome entre son noyau et les électrons. L'analogie est frappante avec le tandem que forment la force de couleur qui régit la cohésion du nucléon et la force nucléaire forte qui gouverne celle du noyau : la force forte, elle aussi de faible rayon d'action, est la manifestation extérieure au nucléon de la force de couleur, plus « profonde ».

ou de grandes institutions dont le but n'est pas toujours exclusivement l'information scientifique.

S. : *Voyez-vous une différence entre enseignement et communication ? Entre pédagogie et vulgarisation ?*

R. L. : Seuls changent la méthode et l'auditoire. Le but est le même, transmettre et expliquer les connaissances. Enseignement et vulgarisation pour moi se rejoignent lorsque je donne des conférences à des jeunes des lycées, ou lorsque je convie chaque mois les lecteurs de « Pour la Science » à une promenade intellectuelle autour d'un thème de physique.

A. M. : Je distingue l'enseignement spécialisé destiné à former des professionnels d'une discipline en leur donnant les savoirs et les techniques adéquats, et l'enseignement généraliste visant à expliquer l'état des connaissances sur tel ou tel sujet et donner l'envie d'aller plus loin. Le deuxième est très proche de la communication, il en diffère surtout par l'auditoire, et les deux

activités requièrent les qualités communes au pédagogue et au vulgarisateur : être particulièrement clair, dire simplement de quoi on va parler, pourquoi c'est intéressant, et comment l'humanité y est parvenue, sans occulter les erreurs ni les tâtonnements.

S. : *Avez-vous ou allez-vous écrire un ou des livres ?*

R. L. : Je prépare un ouvrage dans la collection *Dominos* (Flammarion) sur la topologie de l'Univers.

A. M. : J'ai traduit avec Jean-Louis Bobin, professeur à Paris VI, spécialiste des plasmas, et Yves Sacquin (SPP) l'ouvrage de Frank Close : *Asymétrie, la beauté du diable*, à paraître dans la collection *Bulles de Sciences* (EDP Sciences). Voilà des bulles modernes !

S. : *Avez-vous des violons d'Ingres ?*

R. L. : Oui : la physique en général et l'astrophysique en particulier. Je m'intéresse aussi à la gnomonique, art de calculer et de fabriquer les cadrans solaires. J'ai notam-

ment étudié le « scaphé de Carthage », un magnifique cadran solaire daté du 4^{ème} siècle de notre ère, d'un type très rare, et dont la théorie n'avait jamais été faite. Il est exposé au Louvre, dans le département des antiquités romaines. Je travaille actuellement à la restauration du cadran solaire de l'abbaye de Saint-Wandrille, creusé à même une colline. On chôme peu sur cette colline...

A. M. : La vulgarisation est l'une de nos missions mais elle est aussi pour moi un hobby. J'ai un violon d'Ingres : les cordes vocales. Je fais partie de « Pythagore », un groupe de quatorze chanteuses et chanteurs qui commet des concerts et enregistre des œuvres du 16^{ème} au 20^{ème} siècle (CD disponibles). J'aime aussi faire la cuisine, improviser des recettes « sucrées salées » comme ma compote de foies de volailles et de quetsches.

Propos recueillis par Joël Martin (ScintillationS) qui n'avait encore jamais fait de papier sur une compote ni parlé des métaux du scaphé.

Va et vient

Janvier 2001 – Les premiers retraités du millénaire : Jean-Claude Derost (DIR) (qui a eu de bons vécus au niveau de la Sécurité) et René Gaubert (STCM) (un bon coureur de fond). Bon millénaire à vous deux. Les mutés du mois : Philippe Leconte passe de DAPNIA/DIR à DEN (Direction de l'Energie Nucléaire, le nouveau pôle) ; Danielle Leclerc est mutée de EGD au SDA ; Joël Beltramelli, Jean-Dominique Douarin et Serge Palanque quittent DAPNIA/DIR pour respectivement le SGPI, le SGPI et le SEA ; Thierry Morin nous vient de la DRN et intègre le SEI. Ont-elles l'air félines, les personnes qui bénéficient des mutations et rugissent-elles quand on les fait muter ? Deux recrutements pour bien commencer le siècle : Stéphane Carré vient renforcer le STCM et Frédéric Masset, le Sap.

Février 2001 – Roman Tirler (SEI) est détaché à la commission européenne. Robert Rothenflug quitte DAPNIA/DIR pour retourner dans les étoiles et au Sap. Il trouvera au Sap un petit nouveau, Benoît Horeau. Bonne chance aux détachés, mutés, recrutés.

Mars 2001 – Nicole Lelièvre part en retraite. Nos plus vifs et chaleureux souhaits, Nicole, et merci de ta collaboration si humaine à ce

journal. Laurence Zeitoun quitte une direction pour une autre : celle du département en direction de celle de la direction. Bon, je vois que c'est pas clair, je recommence : Laurence va de DAPNIA/DIR à DSM/DIR. Nos meilleurs vœux, et bosses grises à Alexis. Deux mutés pas embêtés, euh, pardon, deux mutés pas embêtants nous arrivent : Paul Giovannoni va de DEN/DIN/DIR (c'est très musical !) vers le SEA et Patrice Micolon croise Laurence (si c'est toujours pas clair, Patrice va de DSM/DIR à DAPNIA/DIR). C'est un retour au bercail. Bienvenue à tous les deux.

Pan ! sur le becquerel !

Décalé bien qu'il n'ait pas été en fusée, le porte-parole s'est légèrement emmêlé les millénaires et a situé le dernier numéro de *ScintillationS* en février 2000. Il ne s'agit pas d'un paradoxe temporel dû à un voyage intergalactique à une vitesse quasi lumineuse, ni d'un transfert par les replis d'une dimension cachée, mais tout simplement des séquelles du passage au millénaire nouveau, abondamment mouillé au pomero.

Les plus plates excuses dudit porte-parole, et merci aux nombreux et attentifs lecteurs qui ont repéré d'un œil de lynx cette apparente singularité de l'espace-temps...

Perle sur le neutrino pêchée par un autre œil de lynx :

« Le neutrino, particule hermaphrodite qui oscille dans l'espace, excite beaucoup les physiciens ! »

Étymologiquement, *hermaphrodite* est un hybride entre Hermès et Aphrodite (pour les Latins et autres astrophysiciens, il s'agit de Mercure et Vénus). Ça ne fait que deux neutrinos ! Où est passé le troisième ? Ah !, l'étymologie des mythologies... Mercure et autres dieux, on ne craint pas les neutrinos, videz vos poches !

CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Joël FELTESSE

COMITÉ ÉDITORIAL : Joël MARTIN (porte-parole),

Claire ANTOINE, Jean-Marc BONNET-BIDAUD,

François BUGEON, Rémi CHIPAUX, Nathalie

COLOMBEL, Antoine DAEL, Christophe MAYRI,

Yves SACQUIN, Jean-Luc SIDA, Angèle SÉNÉ,

Thierry STOLARCZYK, Christian VEYSSIÈRE

MAQUETTE : Christine MARTEAU

MISE EN PAGE : GRAPHOTEC

CONTACT : Joël MARTIN

Tél. 01 69 08 73 88 – Fax : 01 69 08 75 84

E-mail : jmartin@cea.fr

<http://www-dapnia.cea.fr/Com/ScintillationS/>

Dépôt légal Mai 2001

12!