

# de la **PHYSIQUE** *reflets*

n° 51  
décembre 2016

[www.refletsdelaphysique.fr](http://www.refletsdelaphysique.fr)

Revue de la Société Française de Physique

## ► La matière noire, une sombre affaire

### *Avancées de la recherche*

- Changement de rythme dans l'expansion de l'Univers
- Les nouvelles technologies quantiques

### *Au sein et autour de la SFP*

- L'International Physicist's Tournament 2016



[www.sfpnet.fr](http://www.sfpnet.fr)



<http://www.refletsdelaphysique.fr>



## RENCONTRES NATIONALES Physique - Entreprise - Recherche

Doctorants et Post-Doctorants

10 Mars 2017 Hôtel de ville de Paris

[www.rencontresper2017.fr](http://www.rencontresper2017.fr)



## Les rencontres nationales physique-entreprise-recherche Une nouvelle initiative de la Société Française de Physique

La Société Française de Physique (SFP) souhaite créer un pont entre la physique académique et celle du monde de l'entreprise. Dans cet objectif, elle organise un nouvel événement destiné aux doctorants, postdoctorants et aux services de recherche et développement (R&D) des grands groupes, PME et *start-up*. Ce sera la rencontre de deux univers qui doivent apprendre à mieux se connaître et s'apprécier.

La grande majorité des doctorants n'ont qu'une idée assez vague du monde de l'entreprise, même si de nombreux efforts ont été consacrés au rapprochement entre recherches publique et privée. C'est pourquoi la SFP cherche à renforcer les liens entre ces deux mondes, en organisant ces rencontres physique-entreprise-recherche. Celles-ci s'adresseront directement aux jeunes physiciens qui n'ont pas eu l'opportunité de franchir la barrière « virtuelle » entre leur laboratoire et ceux des entreprises. Elles contribueront à montrer que la physique dans le monde industriel est beaucoup plus connectée qu'on le croit à celle que l'on développe dans les universités et centres de recherche. Les jeunes chercheurs verront le caractère varié et vivant de la physique pratiquée dans les entreprises, source inépuisable de sujets de recherche originaux.

Ces rencontres se tiendront dans le cadre prestigieux des salons de l'Hôtel de ville de Paris, le 10 mars 2017, avec la participation d'Albert Fert, prix Nobel de physique 2007 et de Mathias Fink, lauréat de la médaille de l'innovation du CNRS.

Les jeunes chercheurs contribueront aux échanges sous des formes variées : quinze tables rondes, deux conférences plénières et huit conférences thématiques, ainsi que des ateliers au cours desquels ils se pencheront sur des problèmes proposés par les services R&D des entreprises participantes. Des itinéraires de physiciens ayant abouti à la création de *start-up* novatrices seront présentés, et montreront le côté « visionnaire » que donne la formation par la recherche.

Un événement de ce type, portant sur autant de domaines de la physique (matériaux, optique, acoustique, énergie, mécanique...), n'a jamais été organisé à l'échelle nationale. Une soixantaine d'entreprises, des instituts de recherche publique, des universités et des écoles y prendront part. De plus, la Caisse des dépôts, la Mairie de Paris et bien d'autres organismes nous ont rejoints pour participer à cette journée et la financer.

Nous espérons créer ainsi des échanges riches et spontanés entre les intervenants de la R&D des entreprises présentes et les doctorants et postdoctorants.

Les étudiants sont tous invités moyennant une participation minimale de 16 euros ; l'hébergement est offert aux étudiants de province.

Les inscriptions sont ouvertes, et nous comptons sur toutes les sections locales de la SFP et sur nos adhérents pour diffuser l'information aux jeunes physiciens, le nombre de participants étant limité.

**Jean-Jacques Benattar<sup>(1)</sup>, Éric Perez<sup>(2)</sup>, Jacques Prost<sup>(3)</sup> et Michel Spiro<sup>(4)</sup>**

(1) Secrétaire général de la Société Française de Physique

(2) Laboratoire de physique statistique, École normale supérieure de Paris

(3) Institut Curie, membre de l'Académie des sciences

(4) Président de la Société Française de Physique

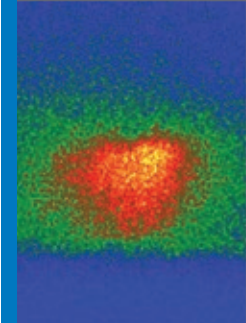
### ► Contact et inscriptions

[rencontresPER2017@sfpnet.fr](mailto:rencontresPER2017@sfpnet.fr)

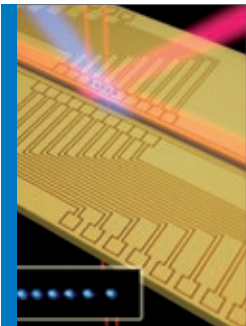
[www.rencontresPER2017.fr](http://www.rencontresPER2017.fr)



▶ p. 13



▶ p. 23



▶ p. 31



▶ p. 40



© NASA, ESA, D. Harlow (fonds photographiques fédéraux de Langens, Strasbourg), P. Massey (Durham University, UK), the Hubble SM4 ERO Team and STScI.

Cartographie de la matière noire (en bleu) dans l'amas de galaxies Abell 370, effectuée par le télescope spatial Hubble. (Voir article p. 4.)

## Éditorial

- 2 Les rencontres nationales physique-entreprise-recherche  
Jean-Jacques Benattar, Éric Perez, Jacques Prost et Michel Spiro

## Images de la physique

- 4 La matière noire, une sombre affaire  
Françoise Combes

## Avancées de la recherche

- 12 Changement de rythme dans l'expansion de l'Univers : un premier rôle pour le côté obscur  
Nathalie Palanque-Delabrouille et Christophe Yèche
- 18 Observation de pentaquarks par l'expérience LHCb  
Patrick Robbe
- 22 Synthèse ultrarapide de nanoparticules par claquage dans des liquides diélectriques  
Thierry Belmonte
- 28 Avec la physique quantique, des technologies nouvelles pour le futur  
Michèle Leduc et Sébastien Tanzilli

## Science et société

- 34 Réforme de l'enseignement de la physique au lycée : repenser les fondements de la formation  
Rémi Barbet-Massin *et al.*

## Au sein et autour de la SFP

- 36 Prix scientifiques
- 40 Retour sur la huitième édition du Tournoi international des physiciens  
Maxime Harazi
- 41 La didactique dans sa relation avec les autres disciplines
- 42 Eva Pebay-Peroula : un parcours original, de la physique atomique à la biologie structurale  
Interview réalisée par Claire Schlenker
- 44 Michel Soutif (1921-2016)  
Michel Schlenker

## Reflets de la physique et ses lecteurs

- 45 Courrier des lecteurs - Remarques sur l'article *Qui a découvert la fission nucléaire ?*, de J. Treiner  
Pierre Radvanyi
- 46 Notes de lecture

### Comité de rédaction

**Président :** Stefano PANEBIANCO  
**Membres :** Michel BELAKHOVSKY - Jean-Marie BROM - David CÉBRON - Françoise COMBES - Nicolas DELERUE - Olivier DULIEU - Titaina GIBERT - François GRANER - Étienne GUYON - Jean-Pierre HULLIN - Agnès JACQUESY - Michèle LEDUC - Arnaud LE PADELLEC - Charles de NOVION - Marios PETROPOULOS - Laurence RAMOS - Sophie REMY - Christiane VILAIN - Paul VOISIN

Ce numéro a été préparé avec la participation de l'Institut de Physique du CNRS.

### Directeur de la publication

Jean-Jacques BÉNATTAR  
**Rédacteur en chef :** Charles de NOVION  
**Conception :** Laetitia MORIN - Keith VILLEMEUR  
**Réalisation graphique :** Laetitia MORIN  
- laetitiamorin-graphiste.fr  
**Suivi de rédaction :** Agathe CYMER  
**Service publicité :** Jessica EKON  
- publicite@edpsciences.org

Dépôt légal : 4<sup>e</sup> trimestre 2016 - ISSN : 1953-793X -  
e-ISSN : 2102-6777 -  
© SFP - Édité à 3200 exemplaires

### Imprimerie Jouve

11, bd de Sébastopol, 75036 Paris Cédex 01  
- Tél. : 01 44 76 54 40

### Société Française de Physique

33, rue Croulebarbe, 75013 Paris  
- Tél. : 01 44 08 67 10 - Fax : 01 44 08 67 19  
e-mail : contact@sfpnet.fr - Serveur : www.sfpnet.fr

**SFP Bulletin**, Institut Henri-Poincaré,  
11, rue Pierre-et-Marie Curie, 75005 Paris  
- e-mail : sfp-bulletin@ihp.fr

**Serveur :** www.refletsdelaphysique.fr

# La matière noire, une sombre affaire

Françoise Combes (francoise.combes@obspm.fr)

Membre de l'Académie des sciences, professeure au Collège de France

LERMA (UMR 8112), Observatoire de Paris, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris

C'est un mystère qui nous accompagne depuis des dizaines d'années : la majeure partie de la matière de l'Univers (soit 83%) nous est invisible, et sa nature complètement inconnue.

Au début on pensait qu'il s'agissait d'astres éteints ou de nuages de gaz au rayonnement trop faible, mais depuis 30 ans on sait que cette matière n'est pas ordinaire. Elle serait au contraire composée de particules entièrement nouvelles, dont la nature n'a jamais été dévoilée ni dans l'espace ni dans les accélérateurs de particules.

Ces particules sont traquées dans les expériences souterraines de détection directe, mais toujours sans succès. Si le neutralino, le candidat favori provenant des théories de supersymétrie, n'est pas au rendez-vous dans les prochaines années, quelles seront les voies de sortie ?

## Un peu d'histoire

C'est dans les années 1930 que les premiers indices sont apparus clairement. Dès que l'astronome suisse Fritz Zwicky essaie de faire le bilan énergétique de l'amas de galaxies de Coma, il s'aperçoit du problème : l'énergie cinétique des galaxies est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à leur énergie potentielle [1]. Pour les maintenir ensemble, il faudrait au moins 100 fois plus de masse que celle visible dans les galaxies. Peu à peu, ce résultat se généralise aux galaxies elles-mêmes. Les astronomes commencent à parler de matière manquante dans tout l'Univers et, à l'été 1961, une conférence se tient à Santa-Barbara en Californie pour discuter des solutions : naines noires, trous noirs, gaz ou grains solides d'hydrogène moléculaire, etc.

Puis dans les années 1970, les physiciens des particules s'en mêlent, et proposent des neutrinos, ou des gravitinos, ou autres cosminos issus des théories de supersymétrie pour rendre compte de la masse manquante [2]. Dans les années 1960-70, les courbes de rotation des galaxies spirales commencent à produire des résultats plus solides et détaillés : d'abord les premiers indices avec les mesures des vitesses Doppler en longueur d'onde visible, notamment par Vera Rubin et son équipe [3], montrent que les étoiles et le gaz ionisé au bord des galaxies tournent beaucoup plus vite que ne le laisse supposer leur masse visible. Puis les vitesses obtenues dans les longueurs d'onde radio avec le gaz d'hydrogène atomique, qui sonde la matière à plus grande distance du centre, montrent définitivement que toutes les galaxies sont entourées d'un halo de matière invisible [4, 5]. Le terme « matière noire » (ou *dark matter* en anglais) commence à apparaître vers la fin des années 1970 [6], mais ne remplacera que très lentement le terme masse manquante, non lumineuse, ou masse invisible.

Jusqu'en 1980, pour la majorité des astronomes la matière noire devait être composée de matière ordinaire, donc de baryons. En 1984, il est définitivement établi que l'essentiel de la matière noire ne peut pas être de la matière baryonique, ceci pour deux raisons. La première est que l'abondance du deutérium et de l'hélium formés dans la nucléosynthèse primordiale n'est compatible avec les observations que si la fraction de baryons ne représente que 5% de la densité critique (la densité nécessaire pour arrêter l'expansion de l'Univers par sa gravité). D'autre part, la formation des structures dans l'Univers sous l'effet de la gravitation est très lente à cause de l'expansion, et la matière ordinaire, ionisée et très couplée avec les photons, prend du retard pour s'effondrer sous l'effet de la gravité. Si l'on attend que la température dans l'expansion tombe en-dessous de 3000 degrés, pour que l'hydrogène se recombine et que le gaz s'effondre, il n'y a plus assez de temps pour former les galaxies. Il est donc nécessaire de disposer de matière exotique, sans interactions avec la lumière, qui peut s'effondrer tôt après le Big-Bang, avant même que la matière ordinaire puisse le faire [7]. Le nom de cette matière devrait alors être matière transparente, plutôt que matière noire : les rayons lumineux la traversent !

Il faut noter aussi que, dès les premières découvertes dans les années 1930, la solution « législative », c'est-à-dire de changement des lois de la physique, a été avancée. Il est toutefois plus facile d'ajouter de la matière invisible à chaque fois qu'il en manque que d'imaginer et d'établir une théorie généralisant la loi de la gravité de Newton et la relativité générale. Une percée a été faite par le théoricien israélien Moti Milgrom dès 1983 [8], avec un modèle de gravité modifiée en champ faible (MOND) qui



**Collision entre deux sous-amas de l'amas de galaxies, dit « le Boulet ».** Sur l'image optique du télescope spatial Hubble montrant les galaxies de l'amas en blanc sur fond noir, sont superposées les images en rayons X du gaz très chaud prises par le satellite Chandra (rose) et la carte de la masse totale déduite des lentilles gravitationnelles (bleu). Le gaz en rose montre nettement à droite une forme de cône, qui est l'onde de choc. L'angle du cône donne la vitesse du choc : Mach 3. (D'après Clowe *et al.* [12].)

rencontre beaucoup de succès à l'échelle des galaxies, mais des problèmes aux grandes échelles. La découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers et de l'énergie noire associée en 1998 (voir article p. 12) a relancé l'intérêt pour les théories modifiées qui, cette fois, seraient beaucoup plus rentables si elles permettaient de résoudre tout le secteur noir (70% d'énergie noire en plus de 25% de matière noire).

### Comment se distribue la matière noire ?

Aujourd'hui, les observations ont énormément progressé, et nous avons un recensement détaillé des régions de l'Univers où il manque de la masse, *i.e.* où la masse dynamique est supérieure à la masse visible. Au niveau des galaxies massives (voir l'encadré), la matière noire apparaît surtout dans leurs régions extérieures, comme un halo entourant le système

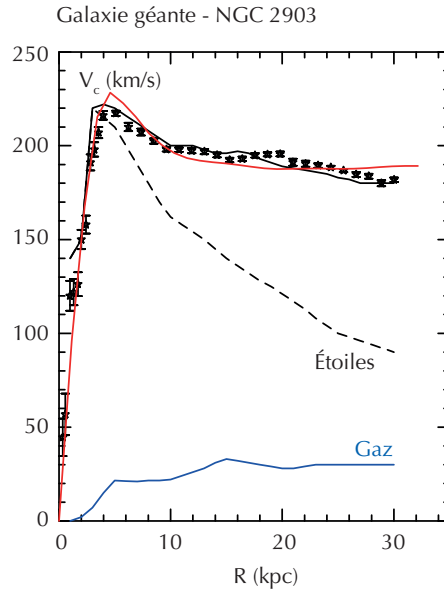
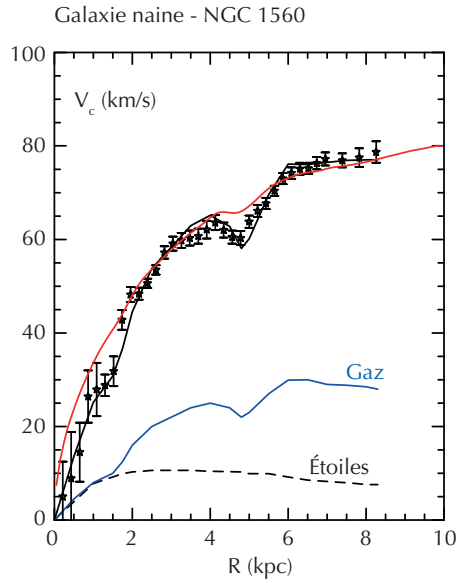
»»»

### ► Les différents types de galaxies

Une galaxie est un ensemble d'étoiles, de gaz et de poussière, supposé entouré d'un halo de matière noire exotique. Il y a plusieurs types de galaxies : spirales avec un disque d'étoiles et de gaz en rotation et un bulbe sphéroïdal au centre, ou elliptiques, avec seulement un sphéroïde d'étoiles vieilles. Les masses stellaires des galaxies varient de  $10^7 M_{\odot}$  (masses solaires) pour les galaxies naines, jusqu'à  $10^{13} M_{\odot}$  pour les géantes (la masse stellaire de notre galaxie, la Voie lactée, est de l'ordre de  $10^{11} M_{\odot}$ ). La proportion de gaz et de matière noire est beaucoup plus élevée dans les galaxies naines. Les galaxies les plus massives sont elliptiques, sans gaz.

Les galaxies se forment peu après la naissance de l'Univers, lorsque du gaz tombe dans les halos de matière noire qui se sont effondrés auparavant, quand toute la matière ordinaire de l'Univers n'était encore que du gaz ionisé. Le gaz s'effondre lui-même pour former des étoiles, et la galaxie commence à briller.

Au cours de la vie d'une galaxie, du gaz s'écoule vers le centre et alimente un trou noir supermassif, de un million à un milliard de masses solaires. Il existe un trou noir supermassif au centre de chaque galaxie, de masse proportionnelle à la masse du bulbe. L'accrétion de gaz par le trou noir produit des phénomènes superlumineux et des vents relativistes qui peuvent éjecter le gaz environnant, et supprimer ainsi la formation d'étoiles. Ces phénomènes de rétroaction modèrent la croissance des galaxies. Une galaxie traversant un tel épisode est appelée galaxie à noyau actif.



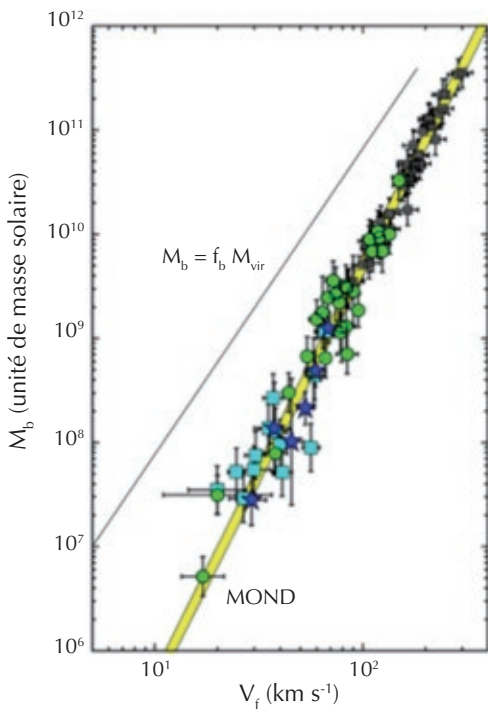
**1. Vitesse de rotation  $V_c$  mesurée à partir de la vitesse Doppler du gaz (symboles avec barres d'erreur) de deux galaxies en fonction de la distance  $R$  au centre (en kiloparsec, 1 pc = 3,26 années-lumière).** La courbe en tirets est la contribution des étoiles, et la courbe bleue la contribution du gaz au potentiel gravitationnel, et donc à la vitesse de rotation. Les courbes  $V_c(R)$  observées tendent toutes (asymptotiquement pour les naines) vers un plateau, à grand rayon  $R$ . Dans la galaxie naine NGC 1560, la masse visible est dominée par le gaz, contrairement à la galaxie géante NGC 2903. Noter que la matière noire domine dès le centre dans la galaxie naine. L'ajustement des observations peut s'effectuer de deux façons : soit de la matière noire est introduite en supplément (courbe rouge), soit les baryons seuls sont considérés dans le cadre d'une théorie de la gravité modifiée (modèle MOND, courbe noire pleine).



visible. Dans notre galaxie, la Voie lactée, le besoin de masse supplémentaire ne se fait sentir qu'au-delà de la position du Soleil, qui est situé à 25 000 années-lumière du centre (soit la moitié du rayon du disque d'étoiles). L'étude détaillée des courbes de rotation de plus d'un millier de galaxies a montré que la proportion de matière invisible est d'autant plus grande que la densité surfacique du système d'étoiles est faible. Pour les galaxies massives, la densité par unité de surface des étoiles est trop élevée au centre pour nécessiter sans ambiguïté de la masse invisible. Par contre dans les galaxies naines, dont la densité surfacique au centre est de un ou plusieurs ordres de grandeur plus faible, la matière invisible domine dès le noyau (fig. 1).

Statistiquement, sur un très grand nombre de galaxies, il existe cependant une très bonne corrélation entre matière noire et matière visible. Depuis Tully & Fisher [9] qui ont mis en évidence une relation très serrée entre vitesse de rotation des galaxies spirales, dépendant de leur halo de matière noire, et leur luminosité totale, de nombreuses versions de cette relation ont été proposées. Les plus précises relient la masse totale ordinaire (gaz et étoiles) à la vitesse du plateau de la courbe de rotation, obtenue à grande distance du centre (fig. 2).

Cette relation suggère que le contenu en matière ordinaire est un indicateur direct de la quantité de matière noire associée, au niveau des galaxies. En est-il de même à plus grande échelle ?



**2. Lien entre la vitesse  $V_f$  du plateau de la courbe de rotation et la masse de baryons  $M_b$  dans les galaxies.** L'axe horizontal est aussi un axe de masse : les galaxies naines sont à gauche et les géantes à droite. Les symboles bleus et verts sont les galaxies spirales dont la masse visible est dominée par le gaz, alors que les carrés gris correspondent aux galaxies dominées par les étoiles. La corrélation correspond à une loi de puissance de pente 4,  $M_b \sim V^4$ . C'est exactement ce qui est prédit par le modèle de gravité modifiée MOND (droite jaune), qui ne contient que des baryons. Dans le cas du modèle standard de matière noire froide, la courbe attendue est la droite noire fine, correspondant à une loi de puissance de pente 3, si la fraction de baryons dans les galaxies est  $f_b = 17\%$ , la fraction de baryons globale dans l'Univers. Des processus de rétroaction dus aux supernovae ou aux noyaux actifs de galaxies sont invoqués pour éjecter les baryons des galaxies, et revenir sur la droite observée, tout en conservant le modèle standard de matière noire froide. (D'après McGaugh [11]).

Dans ce domaine, un outil s'est considérablement développé ces vingt dernières années : les lentilles gravitationnelles [10]. Une galaxie d'arrière-plan voit ses rayons lumineux déviés et son image déformée par une masse importante sur la ligne de visée, comme un amas de galaxies par exemple. En cas d'alignement entre galaxie de fond et lentille, il s'agit du phénomène de lentille forte : on observe de grands arcs gravitationnels (fig. 3), allant jusqu'à l'anneau d'Einstein. Mais en règle générale, les images de toutes les galaxies d'arrière-plan sont déformées, allongées de façon minimale, et c'est l'ensemble statistique de ces centaines ou milliers de déformations qui renseigne sur la quantité de matière noire. C'est le phénomène de lentille faible, ou cisaillement gravitationnel, qui permet de cartographier la matière invisible.



© NASA/ESA

**3. Exemple de lentilles gravitationnelles fortes dans l'amas de galaxies Abell 2218.** Les différents arcs de lumière, de couleur variée, bleue ou orange, sont les images des galaxies d'arrière-plan déformées, car leurs rayons lumineux sont déviés par les fortes masses des galaxies de l'amas d'avant-plan. Il existe aussi des milliers de petites galaxies de fond déformées seulement légèrement, et ce phénomène de lentilles faibles, ou cisaillement gravitationnel, permet statistiquement de cartographier la densité de surface de la matière noire sur la ligne de visée, dans tout l'amas. (Image du télescope Hubble.)

Les cartes de la matière noire obtenues ainsi, à l'échelle des amas de galaxies, correspondent dans la grande majorité des cas aux cartes de matière visible. Il existe pourtant des cas très intéressants de séparation spatiale des deux matières : les collisions violentes entre sous-amas. Le prototype de ces collisions est l'amas dit du Boulet (photo p. 5). Trois sortes de matière sont représentées ici : les galaxies qui se comportent comme un milieu sans collision, la matière noire cartographiée par les lentilles gravitationnelles, et un gaz très chaud, à des millions de degrés, qui émet des rayons X. Le gaz est dissipatif, il est stoppé entre les deux amas par l'onde de choc de la collision. Or dans les amas riches de galaxies, le gaz chaud contient l'essentiel de la masse visible. La matière visible ne coïncide plus avec la matière noire ! Celle-ci reste concentrée sur les galaxies. Cette séparation a permis de conclure à l'existence réelle de matière invisible, pouvant se déconnecter complètement de la matière ordinaire.

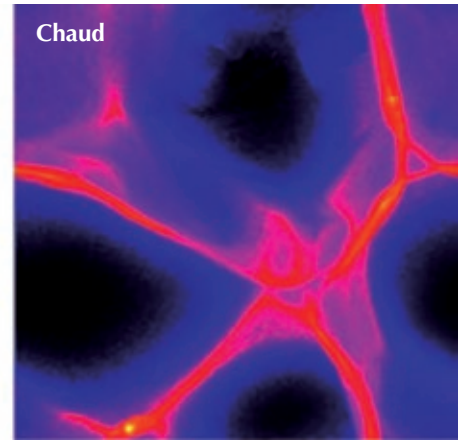
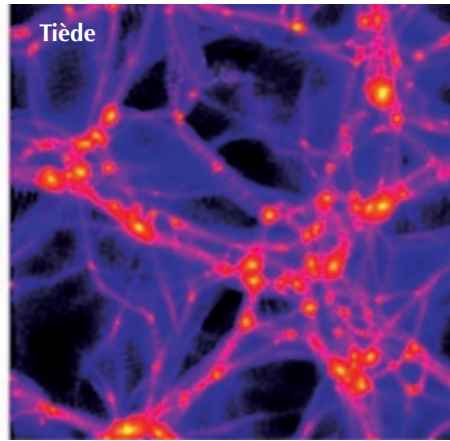
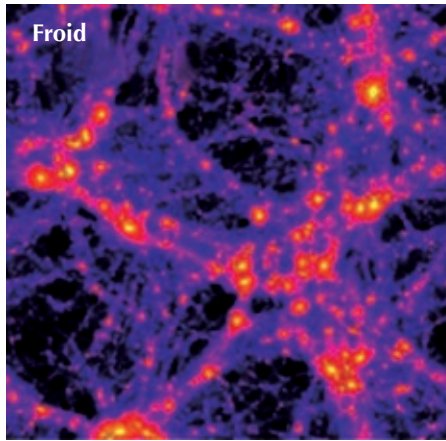
### Les différents modèles de matière noire

Vers la fin des années 1970, les astronomes et physiciens soupçonnent que les neutrinos pourraient avoir une masse, contrairement à ce qui est prédit par le modèle standard des particules élémentaires. Si les trois espèces de neutrinos connus – électroniques, muoniques et tauiques – ont une masse, alors chaque neutrino peut se convertir en neutrino d'un autre type lors de sa propagation. L'existence de ces oscillations entre les trois types de neutrinos a permis de résoudre le mystère des neutrinos solaires (neutrinos électroniques), dont le flux observé est trois fois inférieur aux attentes. Plus tard, dans les années 1990, l'observation de ces oscillations pour les neutrinos atmosphériques a bien été confirmée [13]. Évidemment, dans les années 1980, les neutrinos ont été considérés comme candidats à la matière noire, vu leur abondance dans l'Univers, presque comparable à celle

des photons. Il suffirait que leur masse soit le dix millionième de la masse de l'électron pour représenter toute la matière noire. Aujourd'hui la masse des neutrinos est estimée à 25 fois moins, et ne constituerait donc que 4% de la matière noire tout au plus.

De toute façon, les simulations numériques des années 1980-90 montraient clairement que les neutrinos ne pouvaient pas constituer toute la matière noire, car faisant partie de la matière noire « chaude ». En effet, dès le changement de paradigme de 1984 sur la nature de la matière noire, les divers candidats peuvent être classés selon leur « température ». Le caractère « chaud » ou « froid » repose sur le critère de la vitesse moyenne qu'ont les particules lorsqu'elles se découplent du plasma primitif, où photons, baryons et matière noire sont en équilibre. Selon que les particules sont relativistes ou non lorsqu'elles se découplent de la soupe primitive juste après le Big-Bang, on parle de matière noire chaude (*Hot Dark Matter* ou HDM), ou de matière noire froide

»»»



4. Simulations des grandes structures de l'Univers (échelle des amas et superamas de galaxies), dans le cadre des différents modèles de matière noire : froide (CDM), tiède (WDM) et chaude (HDM). Dans ce dernier modèle, les particules relativistes au début de l'Univers empêchent par leur pression l'effondrement de structures sur des échelles de la taille de l'horizon. Le modèle froid est celui qui représente le mieux les observations à grande échelle de l'Univers. La couleur représente la densité de matière noire : de noir-bleu pour les faibles densités, à jaune pour les plus fortes (les simulations ne considèrent que la matière noire).

>>>

(*Cold Dark Matter* ou CDM). Les neutrinos font clairement partie de la première catégorie (HDM), même si aujourd'hui ils sont complètement ralentis et ne sont restés relativistes que durant les premiers 3-4% de l'âge de l'Univers. La conséquence de leur vitesse relativiste est que ces particules trop chaudes vont empêcher les fluctuations de matière à petite échelle de se concentrer sous l'effet de leur propre gravité. En effet, les particules de matière noire chaude parcourent pratiquement les mêmes distances que les photons : elles ont un libre parcours moyen presque égal à l'horizon<sup>(a)</sup>, et leur « pression » stabilise la matière sur les échelles inférieures. Aux échelles supérieures, la matière pourra s'effondrer sous l'influence de sa propre gravité. Les structures de taille inférieure devront alors se former par fragmentation, dans un schéma *top-down*, du haut vers le bas.

Ce schéma ne correspond pas aux observations, notamment le spectre de masse des galaxies aux différents âges de l'Univers, qui favorisent le schéma contraire *bottom-up*, ou hiérarchique. Les premières structures à se former sont les plus petites structures instables, qui forment ensuite les grandes structures par fusions successives. Les simulations numériques de l'évolution de l'Univers avec les différents types de matière noire (fig. 4) ont montré que le modèle CDM, maintenant appelé modèle standard, est celui qui représente le mieux la formation des grandes structures et explique toutes les observations du fond cosmologique micro-onde, effectuées

par les satellites WMAP et Planck : oscillations acoustiques et anisotropies du champ de photons, structure à grande échelle de la matière, oscillations acoustiques gelées dans la distribution des galaxies.

Pourtant, à l'échelle des galaxies, les prédictions du modèle CDM ne sont plus compatibles avec les observations. En particulier, dans ce modèle, la matière noire standard s'accumule au centre des galaxies, ce qui est contraire à ce que montrent les mesures de courbes de rotation (fig. 1). De plus, les simulations cosmologiques dans le modèle standard (CDM) prédisent l'existence de milliers de galaxies satellites autour des galaxies massives, milliers de galaxies qui ne sont pas observées. Des solutions ont été avancées à partir du constat que la physique de la matière ordinaire, et en particulier celle de la formation des étoiles à partir du gaz, dans les halos de matière noire est mal connue : la première vague de formation d'étoiles au centre des galaxies naines pourrait produire beaucoup de supernovae, et tant d'énergie que tout le gaz serait soufflé, ce qui stopperait la formation de ces galaxies. En effet, les galaxies se forment à partir de gaz qui se transforme en étoiles. La plupart des galaxies satellites resteraient noires ou invisibles. Mais ces hypothèses se heurtent à l'observation des galaxies naines sphéroïdales autour de la Voie lactée : bien qu'en petit nombre, le rapport du nombre d'étoiles comparé à leur matière noire est supérieur de plusieurs ordres de grandeur aux prédictions du modèle CDM.

De l'autre côté du spectre de masse des galaxies, pour stopper la formation des étoiles dans les galaxies massives, l'énergie des flambées d'étoiles est insuffisante. Il faut alors recourir à l'énergie fournie par le trou noir supermassif que l'on sait exister au centre de chaque galaxie. En principe, les phénomènes énergétiques accompagnant la croissance du trou noir massif sont assez puissants pour détruire la galaxie elle-même. Tout le problème est dans le couplage entre le disque de la galaxie et ce flot d'énergie localisée dans le noyau ou dans un jet qui s'échappe du noyau actif et de la galaxie.

L'importance de ces phénomènes de rétroaction de la part des supernovae ou des noyaux actifs pour modérer ou stopper la formation d'étoiles et éloigner la matière ordinaire des galaxies est bien quantifiée dans la figure 2. Si tous les baryons se trouvaient dans les galaxies, avec la même fraction  $f_b = 17\%$  que dans tout l'Univers, les observations devraient se trouver sur la droite notée  $M_b = f_b M_{vir}$ , où la masse visible ( $M_b$ ) est proportionnelle à la masse totale (masse virielle  $M_{vir}$ ) des galaxies, avec ce facteur universel  $f_b$ . Le fait que les observations s'alignent en dessous, d'un facteur 100 pour les galaxies naines, jusqu'à un facteur 3 pour les plus massives, nous indique que 99% des baryons doivent être éjectés des galaxies naines, et 2/3 des galaxies géantes. Cette éjection serait le fait des supernovae pour les galaxies de petite masse, et des noyaux actifs pour les galaxies massives.

L'autre problème du modèle standard CDM est l'accumulation des particules de matière noire au centre des galaxies, en un pic de densité qui n'est pas observé. Pour le résoudre, il a été proposé un modèle de particules de matière noire qui entrent en collisions entre elles. Ces collisions agiraient surtout dans les parties les plus denses au centre, et auraient pour effet de disperser les particules et de rendre leurs trajectoires aléatoires dans cette région. Elles se distribueraient alors selon un nuage étendu, un « cœur », au lieu d'un pic de matière noire. Il reste toutefois beaucoup de problèmes à résoudre pour expliquer la taille des cœurs différente d'une galaxie à l'autre. D'autre part, une limite supérieure de la section efficace de collisions entre particules de matière noire a été déduite des amas de galaxies en collision, comme le Boulet (photo p. 5).

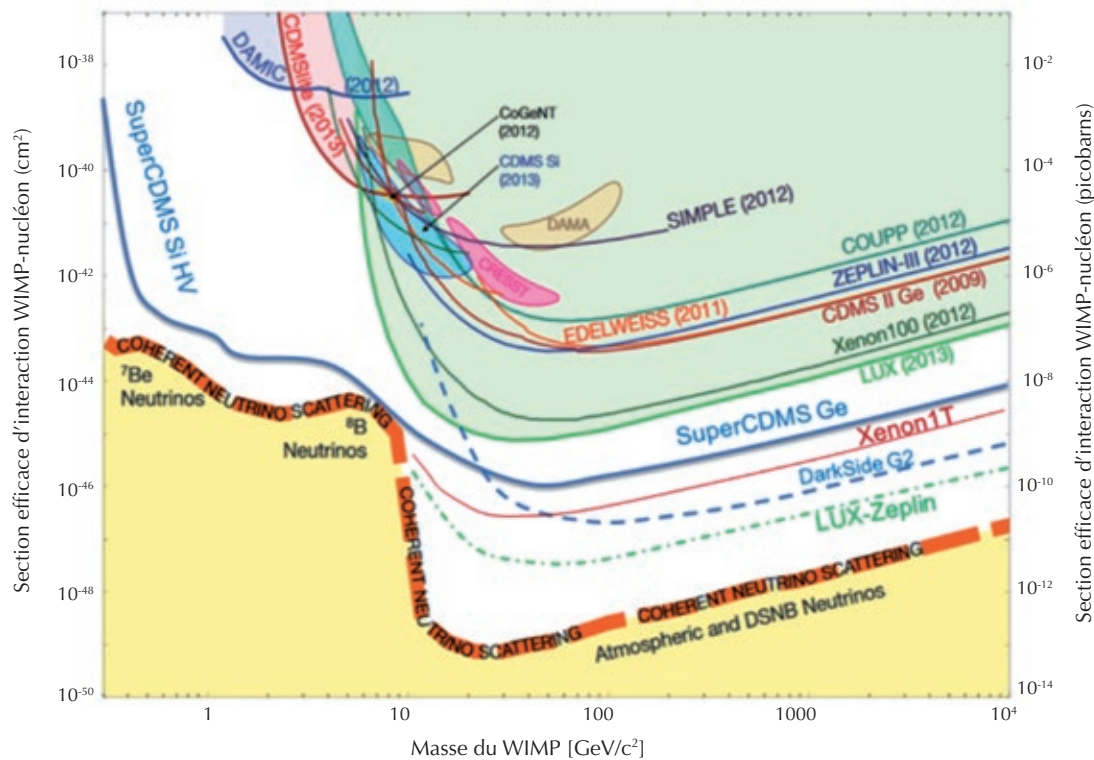
Enfin, d'autres solutions sont explorées pour résoudre le problème des galaxies satellites manquantes : recourir à la matière noire « tiède » (fig. 4). Les structures à très petite échelle sont alors supprimées, mais une grande partie du modèle hiérarchique subsiste.

## Recherche expérimentale des particules candidates à la matière noire

Il est remarquable que la masse des particules de matière noire ne soit pas connue à plusieurs ordres de grandeur près. On sait toutefois que ces particules n'interagissent que très faiblement entre elles, d'où leur nom de WIMP ("Weakly Interacting Massive Particle").

Depuis 1985, juste après le changement de paradigme qui a fait de la matière noire une matière exotique et transparente, les astronomes et physiciens cherchent à détecter les particules qui la composent par leur interaction, même très faible, avec de la matière ordinaire. La matière noire devrait exister partout autour de nous, et les particules de matière noire traverser la Terre en étant parfois diffusées par un noyau d'atome. C'est cette interaction que les expériences de détection souterraine, situées à l'abri des rayons cosmiques parasites dans les tunnels du Fréjus ou du Grand Sasso par exemple, essaient d'identifier. L'expérience la plus performante aujourd'hui est située

aux États-Unis (LUX, Large Underground Xenon experiment), avec un détecteur de 370 kg de xénon liquide. Les interactions éventuelles produisent des électrons et de la lumière, détectée par des tubes amplificateurs de lumière. Jusqu'à présent, seules des particules de fond (neutrons, matière ordinaire) ont été détectées, mais aucune particule de matière noire. La prochaine étape aura lieu dans le tunnel du Grand Sasso, où a été inaugurée, en novembre 2015, l'expérience Xenon1T, dont le détecteur est constitué de trois tonnes de xénon, objet d'une collaboration entre laboratoires américains et européens (dont des Français). Il a commencé à collecter des données au printemps 2016. Plusieurs autres expériences sont prévues dans les années futures, notamment LUX-Zeplin, qui contiendra 7 tonnes de xénon. La figure 5 représente l'état de l'art en fonction de la masse supposée du WIMP dans le domaine le plus probable. Les limites supérieures éliminent déjà une grande partie des valeurs possibles de la section efficace d'interaction entre les WIMPs et la matière ordinaire. Bientôt la limite du



5. Limites supérieures pour la détection directe de particules de matière noire ou WIMPs, dans le diagramme masse - section efficace d'interaction avec les nucléons (matière ordinaire), en  $\text{cm}^2$  à gauche, ou picobarns à droite ( $1 \text{ pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$ ). Aujourd'hui, la meilleure limite est donnée par LUX (les zones colorées sont éliminées). Les expériences futures (SuperCDMS, Xenon1T, DarkSide G2, LUX-Zeplin) s'approchent du plancher des neutrinos (ligne orange), c'est-à-dire de la région du diagramme où les neutrinos provenant des supernovae, du Soleil ou de l'atmosphère, diffusés élastiquement par les nucléons, rendent la détection directe de WIMPs quasiment impossible. (Adapté de Billard *et al.* [15].)



fond de neutrinos sera atteinte, et la détection des WIMPs ne sera plus possible en raison de la confusion avec l'interaction des neutrinos et des nucléons.

Pendant toutes ces années, le principal candidat à la matière noire froide (CDM) a été le neutralino. C'est une particule hypothétique qui fait partie de l'extension au-delà du modèle standard des particules élémentaires, permise par la théorie de supersymétrie. Chaque particule connue aurait une particule supersymétrique partenaire, plus massive, et de *spin* complémentaire (*i.e.* un fermion pour un boson, et réciproquement). Le neutralino est la particule la plus stable de cet ensemble, dans lequel les autres particules supersymétriques se désintègrent. Le neutralino est une combinaison linéaire de trois particules : le zino, le photino et le Higgsino, superpartenaires de bosons (Z, photon et Higgs). Selon les facteurs de cette combinaison, on peut former quatre types de neutralinos stables. Pour une masse de l'ordre de 100 fois la masse du proton, une coïncidence encourageante favorise les neutralinos : ces particules WIMP sont leurs propres anti-particules et s'annihilent entre elles dans les premiers instants de l'Univers, avec une section efficace qui est celle de l'interaction nucléaire faible. Lorsque leur densité décroît avec l'expansion de l'Univers, si bien que le taux d'annihilation devient négligeable, leur abondance est gelée à une densité relique qui correspond bien à celle de la matière noire aujourd'hui. C'est le miracle du WIMP. Bien que le LHC n'ait pas mis en évidence ces particules jusqu'à présent, on peut encore espérer les découvrir à plus haute énergie.

Si l'annihilation est stoppée pratiquement dans tout l'Univers à cause de sa faible densité, il existe aujourd'hui quelques régions de surdensité où les annihilations pourraient reprendre, et les rayons gamma qui en résulteraient représentent un moyen de détection indirecte. Vers le centre de la Galaxie par exemple, les spectres des rayons gamma émis ont été étudiés en détail, mais ont toujours été expliqués par une source astrophysique : aucune détection indirecte de matière noire n'a pu être reportée de façon convaincante.

## Alternatives sans nouvelles particules

Après trente ans de tentatives infructueuses de détection directe de particules de matière noire, et l'absence de détection de nouvelles particules au-delà du modèle standard au LHC du CERN, certains astronomes commencent à explorer de nouvelles pistes pour résoudre le mystère de la matière noire. Et si finalement il n'existait pas de matière inconnue, mais qu'une modification de la théorie de la gravité pouvait résoudre le problème de la masse manquante dans les galaxies et de la formation des structures de l'Univers ? À l'échelle des galaxies, le modèle de gravité modifiée qui représente le mieux les observations est celui de M. Milgrom, MOND, qui reproduit les courbes de rotation des naines aux géantes, de même que les relations d'échelle (fig. 1 et fig. 2). En champ de gravité faible, la force de gravité ne décroît alors plus avec la distance en  $1/R^2$ , mais en  $1/R$ . C'est dans le cadre de ce modèle qu'une théorie covariante relativiste a été construite par Bekenstein

en 2004 [14], comprenant des champs tensoriel, vectoriel et scalaire (TeVS). Mais cette théorie a des difficultés pour les amas de galaxies et les structures à très grande échelle. De plus, la théorie relativiste n'est pas exempte d'instabilités internes.

Certains étudient les théories covariantes "Einstein aether", d'autres considèrent des dimensions supplémentaires à l'Univers, dans lesquelles la gravité pourrait se déployer, ce qui donnerait une masse apparente plus grande aux particules que nous connaissons. Certains n'hésitent pas non plus à combiner les avantages de l'existence de matière noire avec ceux d'une théorie de gravité modifiée. De cette floraison d'idées, va-t-il enfin émerger la théorie miraculeuse qui va nous faire sortir du noir ? ■

(a) L'horizon est défini à chaque instant par la distance parcourue par la lumière pendant l'âge de l'Univers  $t$ , soit  $ct$  ( $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide).

## Références

- 1• F. Zwicky, *Astrophys. J.* **86**, (1937) 217.
- 2• H. Pagels et J.R. Primack, *Phys. Rev. Lett.* **48** (1982) 223.
- 3• V.C. Rubin *et al.*, *Astrophys. J.* **225** (1978) L107.
- 4• M.S. Roberts, *Astron. J.* **74** (1969) 859.
- 5• A. Bosma, *Astron. J.* **86** (1981) 1825.
- 6• S.D.M. White et M.J. Rees, *MNRAS* **183** (1978) 341.
- 7• G.R. Blumenthal *et al.*, *Nature* **311** (1984) 517.
- 8• M. Milgrom, *Astrophys. J.* **270** (1983) 365.
- 9• R.B. Tully et J.R. Fisher, *A&A* **54** (1977) 661.
- 10• Y. Mellier, *Reflète de la Physique* **1** (2006) 5.
- 11• S.S. McGaugh, *Astron. J.* **143** (2012) 40.
- 12• D. Clowe *et al.*, *Astrophys. J.* **604** (2004) 596.
- 13• S. Lavignac et M. Zito, *Reflète de la Physique* **50** (2016) 4.
- 14• J.D. Bekenstein, *Phys. Rev. D* **70** (2004) 083509.
- 15• J. Billard *et al.*, *Phys. Rev. D* **89** (2014) 023524.



## Le CNRS lance *Carnets de science*

sa première revue d'information scientifique, destinée au grand public

Nourrie de reportages, de diaporamas, d'entretiens, de points de vue, cette revue propose aux citoyens en recherche d'informations des analyses et des décryptages sur l'actualité scientifique et les grandes questions de société.

Son credo : replacer les résultats scientifiques et leurs retombées potentielles dans un contexte plus large, en décryptant les enjeux du domaine, ses thèses émergentes, mais aussi ses controverses, et en donnant la parole aux chercheurs eux-mêmes.

Revue semestrielle

Parution du premier numéro : 3 novembre 2016

Format : 20 x 25,5 cm – Prix : 12,50 € – 200 pages – 100 illustrations et photos en couleur

ISBN : 978-2-271-09348-6

En vente dans certains Relay, en librairie et disponible sur abonnement.

En savoir plus : [carnetsdescience-larevue.fr](http://carnetsdescience-larevue.fr)

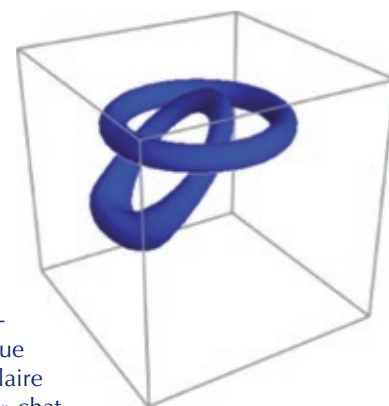
## Des chats de Schrödinger pour mesurer le champ électrique d'un électron unique

Extrait de l'actualité scientifique du CNRS (INP) du 14 juillet 2016

Il est aujourd'hui possible de détecter la présence d'un seul électron dans un circuit électronique miniaturisé, avec un dispositif incorporant un transistor à électron unique. Des physiciens du laboratoire Kastler Brossel viennent de développer une nouvelle approche qui repose sur l'utilisation d'atomes très excités, dits atomes de Rydberg, placés dans une superposition quantique d'états connue sous le nom de « chat de Schrödinger » [1]. La sensibilité de ces mesures est comparable à celle des transistors à électron unique, tout en étant beaucoup moins invasive, et nécessite des températures cryogéniques beaucoup moins contraignantes.

Au début de chaque séquence de mesure, une impulsion laser et un champ radiofréquence appliqués à un jet d'atomes très peu dense permettent de porter un atome unique dans un état de Rydberg, dans lequel l'électron externe a un mouvement orbital circulaire à grande distance du cœur de l'atome. C'est alors que les chercheurs préparent leur « chat de Schrödinger » : une impulsion micro-onde et un champ radiofréquence transforment cet état électronique en une superposition quantique de deux états correspondant à une orbite circulaire horizontale et une orbite elliptique très inclinée (fig. 1), très sensible au champ électrique. L'électron sonde alors le champ électrique ambiant pendant une durée de l'ordre de la centaine de nanosecondes, durant laquelle les deux états de la superposition accumulent des phases quantiques différentes. Les chercheurs recombinent enfin les deux états avec une nouvelle impulsion micro-onde. La détection finale de l'état atomique permet de mesurer la différence des phases accumulée entre les deux composantes du chat de Schrödinger et de là, d'en déduire la valeur du champ électrique vu par l'atome.

Le dispositif actuel permet de détecter en une seconde un champ électrique de 3 millivolts par mètre, soit la valeur du champ créé par un seul électron à une distance de trois quarts de millimètre. Cette méthode permet d'envisager de détecter en seulement une microseconde un électron unique à une centaine de micromètres de distance.



1. Représentation de la fonction d'onde de l'électron dans l'état « chat de Schrödinger ».

### Référence

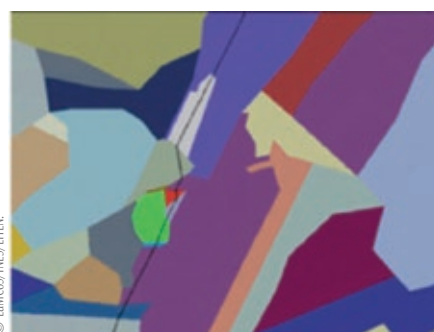
[1] A. Facon *et al.*, *Nature* **535** (2016) 262-265.

### Contact

**Sébastien Gleyzes** (gleyzes@lkb.ens.fr)

## Prédire les fissures et leur propagation dans les matériaux polycristallins

Ce travail a fait l'objet d'un communiqué de presse INSA-CNRS-CEA (3 novembre 2016)



© LaMCoS/INES/UTEN.

1. Chemin de fissuration (ligne noire) dans un échantillon de silicium polycristallin. Les grains sont représentés par les zones de couleur.

Dans les matériaux polycristallins (ce que sont la plupart des métaux et des céramiques), constitués d'une multitude de cristaux de taille et d'orientation différentes, prédire où peuvent se créer des fissurations était jusqu'ici impossible.

Dans le cadre d'une collaboration, des chercheurs du Laboratoire de mécanique des contacts et des structures (LaMCoS, CNRS UMR5259/INSA Lyon) ont, pour la première fois, réussi à reproduire des chemins de fissuration dans des matériaux polycristallins, et à les prédire numériquement en prenant en compte les joints de grain, c'est-à-dire les interfaces entre grains d'orientations différentes.

L'étude a été effectuée sur des échantillons de silicium polycristallin de qualité photovoltaïque, de dimension  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ , soumis à des essais de flexion. L'orientation des grains a été déterminée par diffraction des rayons X (méthode de Laue) au CEA-INES, à Chambéry. Les chemins de fracture observés expérimentalement ont été trouvés en très bon accord avec ceux obtenus (fig. 1) par simulation numérique (méthode des éléments finis étendus). On a constaté que

la fracture du silicium polycristallin est complètement déterministe, c'est-à-dire qu'elle suit le même chemin dans deux échantillons jumeaux, essentiellement les plans cristallins (111) et parfois les plans (110). Le changement d'orientation des plans cristallins aux joints de grains peut faire dévier la fissure à partir de la surface d'énergie minimum. Il a été également observé que les joints de grains ralentissent ou arrêtent brièvement la propagation des fissures.

### Référence

[1] Lv Zhao *et al.*, *J. Phys. D: Applied Phys.* **49** (2016) 475601.

### Contact

**Daniel Nélias** (daniel.nelias@insa-lyon.fr)

# Changement de rythme dans l'expansion de l'Univers

## Un premier rôle pour le côté obscur

Nathalie Palanque-Delabrouille (nathalie.palanque-delabrouille@cea.fr) et Christophe Yèche  
Service de physique des particules, Irfu, CEA-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

L'évolution et la composition de l'Univers sont deux caractéristiques apparemment indépendantes et pourtant intrinsèquement liées.

La première nous apprend que l'Univers est en expansion à un rythme variable, la seconde qu'il est constitué majoritairement de composantes non lumineuses et de nature inconnue, baptisées « matière noire » et « énergie noire ».

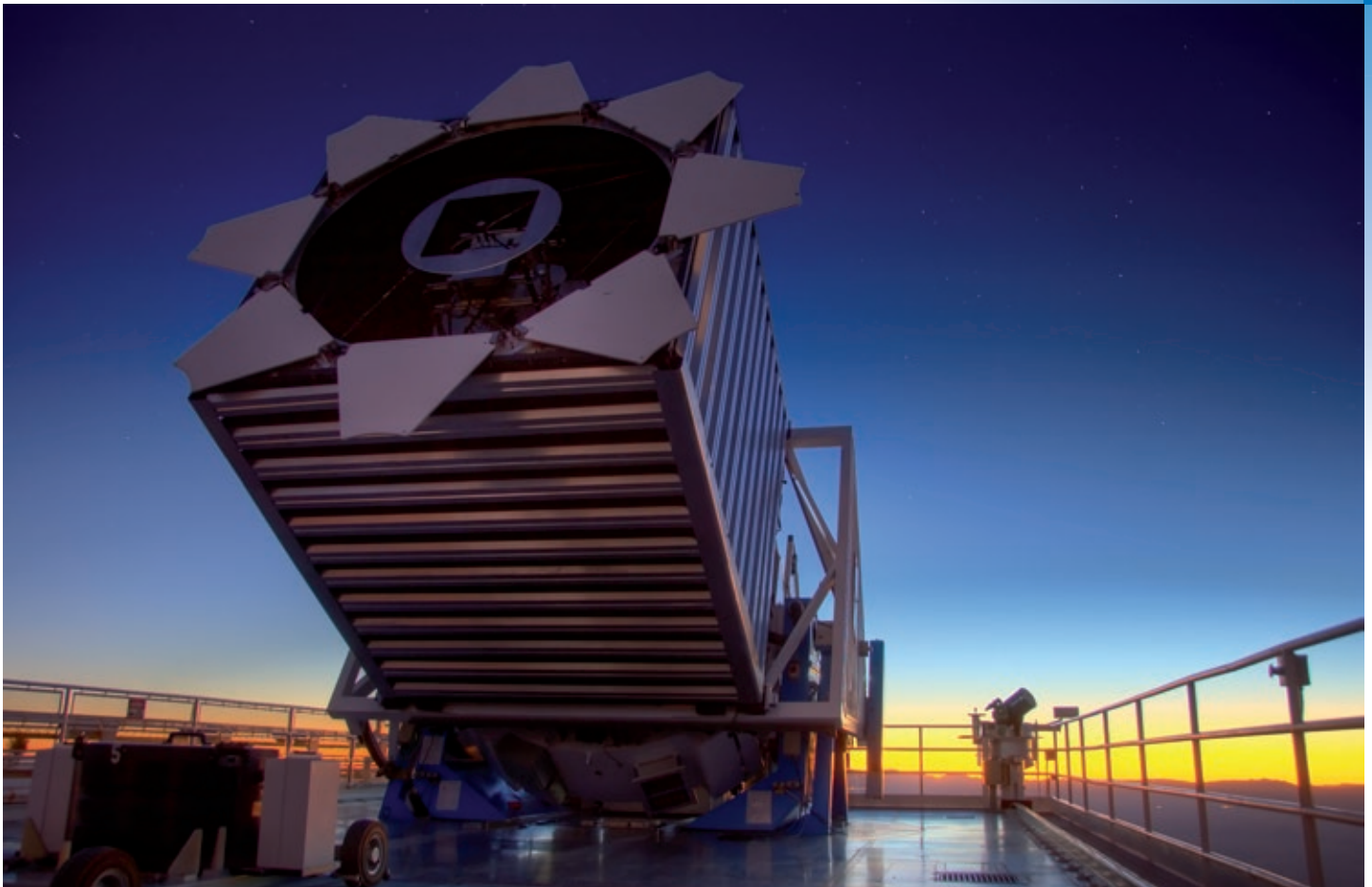
Afin d'apporter de nouvelles pierres à l'édifice cosmologique, les chercheurs s'attachent à mieux comprendre comment évolue l'expansion de notre Univers au moyen d'expériences de plus en plus ambitieuses. Tirant profit de la dualité entre géométrie et contenu de l'Univers, ils quantifient ainsi toujours plus précisément le rôle joué par les composantes sombres, espérant en dévoiler un jour la nature.

### Un Univers en expansion accélérée

Si l'on exclut Einstein qui avait en son temps suggéré l'hypothèse d'une constante cosmologique pour de mauvaises raisons (il cherchait à rendre l'Univers statique), les chercheurs se sont longtemps accordés à dire que les observations de notre cosmos pouvaient toutes être interprétées en ne faisant appel qu'à de la matière et à une faible quantité de rayonnement. L'expansion de notre Univers était connue depuis 1929, lorsque l'astronome Edwin Hubble constata que les galaxies s'éloignent toutes les unes des autres. Sous l'effet attractif de la gravité, cette expansion de l'espace semblait ne pouvoir que ralentir. Cette conviction est brusquement ébranlée en 1998, quand deux équipes indépendantes étudient des supernovae lointaines précisément dans le but de mesurer ce ralentissement et démontrent, sans ambiguïté, que l'expansion de notre Univers allait au contraire en s'accélération.

Tentons de comprendre ce dont il s'agit. Les supernovae thermonucléaires ou SNIa (par opposition aux supernovae gravitationnelles ou SNII, plus fréquentes, issues d'étoiles massives s'effondrant sur elles-mêmes), trouvent leurs précurseurs dans les systèmes stellaires constitués d'une étoile peu dense, telle une géante rouge, et d'une naine blanche, petit astre ayant achevé sa phase de combustion nucléaire. La supernova résulte de l'explosion cataclysmique de la naine blanche lorsque sa masse devient trop importante, suite à l'accrétion de la matière provenant de l'étoile compagnon, pour que l'équilibre gravité-pression soit maintenu. L'explosion se produisant à une masse prédéfinie de 1,4 fois la masse du Soleil, la luminosité émise est rigoureusement déterminée et la

mesure de la luminosité observée est donc un indicateur direct de la distance de l'objet (d'après la loi de décroissance du flux comme l'inverse du carré de la distance). Par ailleurs, des observations spectroscopiques permettent de déterminer le décalage spectral  $z = (\lambda_{\text{reçu}} - \lambda_{\text{émis}}) / \lambda_{\text{émis}}$  entre les longueurs d'onde  $\lambda$  reçue et émise, communément appelé "redshift" de la supernova. En effet, conséquence directe de l'expansion de l'Univers, les raies d'absorption caractéristiques des éléments chimiques qui composent étoiles et galaxies apparaissent à des longueurs d'onde décalées vers le rouge par rapport à celles qu'on leur connaît en laboratoire, de façon analogue à l'effet Doppler pour le son lors du déplacement relatif entre émetteur et récepteur. Pour les supernovae les plus proches, on retrouve la fameuse loi de Hubble, relation linéaire entre *redshift* et distance  $d$  d'un astre,  $z = H_0 d/c$ , où  $H_0$  est la constante de Hubble et  $c$  la vitesse de la lumière. Par conséquent, plus un objet est éloigné de nous, plus son *redshift* est grand et plus la lumière qui nous en parvient a été émise tôt dans l'histoire de l'Univers. À plus grande distance, cette relation n'est plus linéaire, et l'écart à la linéarité est dicté par le contenu énergétique de l'Univers (matière, rayonnement...). Le paramètre  $H(z)$  qui décrit le taux d'expansion de l'Univers n'est plus constant mais dépend du *redshift* ;  $H_0 \approx 70 \text{ km/s/Mpc}$  est la valeur qu'il prend aujourd'hui. Conformément à l'intuition, un Univers composé exclusivement de matière, freiné par la gravitation, verrait son taux d'expansion décroître avec le temps. Contre toute attente, les observations de supernovae ont toutefois indiqué une **accélération** et non une décélération de cette expansion, impliquant une révision en profondeur de notre compréhension du cosmos.



© SDSS / David Kirkby

Le télescope de 2,5 m de diamètre du SDSS à Apache Point, au Nouveau-Mexique, vu au crépuscule.

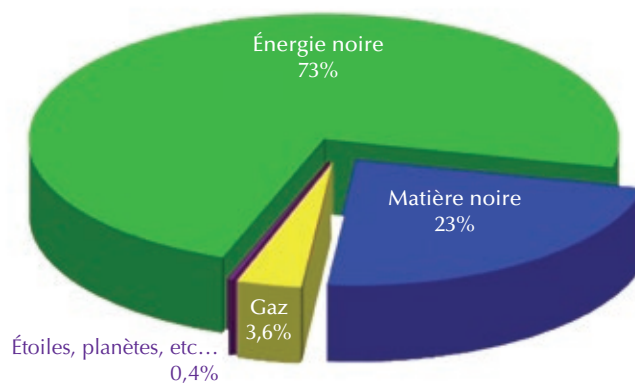
## Énergie noire

En cosmologie, c'est la révolution, et trois prix Nobel (Brian Schmidt et Adam Riess pour le projet High-z Supernova Search Team, et Saul Perlmutter pour le Supernova Cosmology Project [1]) viennent immédiatement couronner cette surprenante découverte. Mais tout reste encore à comprendre. Faut-il développer une nouvelle théorie de la gravité qui ne se réduirait à la relativité générale que dans certaines limites particulières, ou considérer une forme d'énergie nouvelle, baptisée « énergie noire », de pression négative et agissant sur l'espace comme on pourrait imaginer que le ferait une gravité répulsive ? Cette énergie noire est-elle de densité constante pendant toute l'histoire de l'Univers, à l'instar de la constante cosmologique qu'Einstein avait introduite dans ses équations, ou est-ce une forme plus complexe d'énergie ? À elle seule, l'énergie noire est aujourd'hui invoquée pour représenter 73% du contenu énergétique de notre Univers (fig. 1), soit plus que la matière (qu'il s'agisse de matière baryonique ou d'une matière noire non identifiée à ce jour mais répondant à la gravitation de façon identique à la matière habituelle [2])

ou que le rayonnement (tels les photons), dont les densités diminuent (par dilution) avec l'expansion de l'Univers contrairement à celle de l'énergie noire. Pourtant, l'énergie noire n'en demeure pas moins étonnamment furtive et n'est incluse que depuis peu dans le panorama des composantes du cosmos.

Afin d'en cerner les caractéristiques, de nombreuses expériences étudient l'histoire

de l'expansion de l'Univers et de son contenu énergétique. Parmi elles, le Sloan Digital Sky Survey (SDSS) qui, depuis l'observatoire d'Apache Point au Nouveau-Mexique, cartographie la répartition en 3D de plus d'un million de galaxies et de près de deux cent mille quasars, afin d'y déceler l'empreinte de l'Univers primordial et d'y découvrir les secrets de sa composition.



**1. Répartition de la densité d'énergie de l'Univers** après la découverte de l'accélération de son expansion, grâce à l'étude des supernovae lointaines. L'énergie noire en est aujourd'hui la composante majoritaire. La matière visible (étoiles, planètes...) n'en représente que 0,4%.



## Structures de l'Univers sous le regard inquisiteur de SDSS

Depuis une quinzaine d'années, le télescope de 2,5 m de diamètre du SDSS au Nouveau-Mexique scrute un quart de la voûte céleste, autrement dit quasiment tout le ciel extragalactique non obstrué par la Voie lactée, observable depuis un point quelconque de la Terre. Après plusieurs années consacrées à l'obtention des images qui permettent de connaître la luminosité de l'ensemble des sources détectables compte tenu des limites techniques du télescope (en termes de flux, de qualité optique et de temps d'exposition en accord avec les objectifs du projet), l'instrument est à présent métamorphosé en spectrographe. Il permet l'obtention simultanée des spectres électromagnétiques de mille objets préalablement sélectionnés grâce aux observations photométriques. De ces spectres sont extraits les *redshifts* des sources, eux-mêmes liés à leur distance grâce à la loi de Hubble, ou plus précisément à son extrapolation aux objets lointains. De quelle façon un tel relevé va-t-il nous aider à améliorer notre connaissance de l'Univers ?

D'après les modèles cosmologiques actuels, la répartition de toute la matière de l'Univers – galaxies, amas de galaxies, mais aussi filaments ou nuages d'hydrogène – est héritée de l'Univers primordial. Le moteur de l'évolution de ces structures dans le temps est la gravitation, dont l'action est différente sur la matière (qu'elle soit lumineuse ou sombre) et sur l'énergie noire. Inversement, il est donc possible, en étudiant la répartition de la matière, d'en déduire des propriétés de l'Univers comme, par exemple, sa composition ou son taux d'expansion.

L'information cosmologique la plus précise se trouverait dans l'étude de la répartition de la matière noire, puisque celle-ci est bien plus abondante que la matière baryonique. Étant cependant, par définition, non lumineuse (c'est bien pour cela qu'elle est ainsi dénommée), on ne peut la cartographier directement. Une approche indirecte consiste à reconstruire les contours de densité de la matière noire à partir des déformations gravitationnelles qu'elle engendre sur des galaxies en arrière-plan : c'est le principe des lentilles gravitationnelles que nous ne détaillerons pas ici [2].

Une autre approche est de se focaliser sur les astres visibles. Comme le confirment

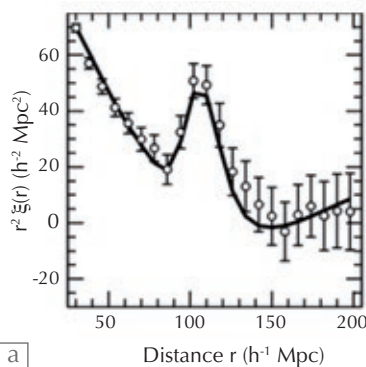
les simulations numériques de notre Univers, matière baryonique et matière noire sont distribuées de façon comparable. On peut donc étudier l'une pour comprendre l'autre. Les chercheurs choisissent dans un premier temps de se concentrer sur des galaxies anciennes, rouges et particulièrement lumineuses, les LRG (pour "luminous red galaxies"). Ces LRG se trouvent au cœur des amas de galaxies et présentent l'intérêt d'être de bons marqueurs de la densité de matière. Leur *redshift*, indicateur de distance comme nous l'avons vu plus haut, est déterminé à partir de leur spectre lumineux. La lumière qui nous en parvient a été émise il y a près de quatre milliards d'années pour les galaxies sélectionnées dans les premières études (*redshift* moyen de 0,35) et jusqu'à six milliards d'années pour celles de la phase la plus récente du projet (*redshift* de 0,57), soit près de la moitié de l'âge de l'Univers (estimé à 13,8 milliards d'années). Le *redshift* vient compléter les deux coordonnées transverses données par la position de la LRG sur la voûte céleste. La carte en 3D peut ainsi être dressée au fil des observations.

En 2005, lors des premiers pas dans cette quête, la carte obtenue à partir de cinquante mille galaxies a conduit à la première indication d'une distance de séparation privilégiée de l'ordre de 150 megaparsecs (1 parsec, ou pc, équivaut à 3,3 années-lumière) dans la répartition des galaxies (fig. 2a). L'excès était à peine perceptible [3] (d'une signification statistique de  $2,5\sigma$  seulement, soit une probabilité de 98,9% de fiabilité,

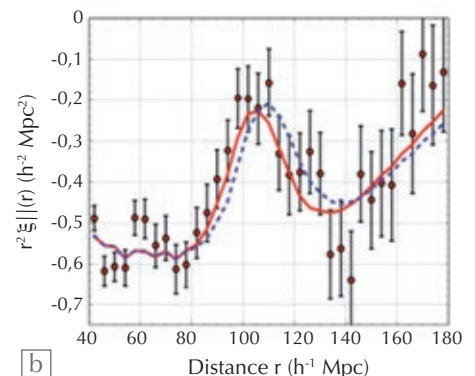
alors que l'on considère qu'il faut au moins  $5\sigma$ , soit une probabilité d'erreur inférieure à un millionième pour permettre l'annonce d'une découverte). Aujourd'hui, avec plus d'un million et demi de LRG, ce n'est plus une simple indication, c'est un signal indubitable. D'où vient cette distance privilégiée ? Pourquoi les galaxies ne se forment-elles pas aléatoirement dans l'Univers ? Que nous apprend ce résultat sur la matière et l'énergie noires ?

## Des ondes sonores qui font vibrer les baryons (ou BAO, pour Baryon Acoustic Oscillations)

Dans le plasma chaud et dense de l'Univers primordial, l'attraction gravitationnelle des régions les plus denses est compensée par la pression radiative du gaz ionisé. Cette pression est si importante que les pics de surdensité, que l'on pense issus de fluctuations quantiques dans les premières secondes de l'Univers, se propagent en oscillant telles des ondes sonores au lieu de croître sous l'effet de la gravité. En raison de son expansion, l'Univers se refroidit au fil du temps et à l'âge de 380 000 ans, sa température chute en dessous du seuil minimal pour le maintenir à l'état de plasma ionisé : les électrons s'associent aux protons pour former des atomes d'hydrogène, et le plasma initial se mue brutalement en un milieu neutre. La lumière qui diffusait inlassablement sur les électrons est à présent libre de se propager. Détectée par le satellite Planck, elle nous apporte



a



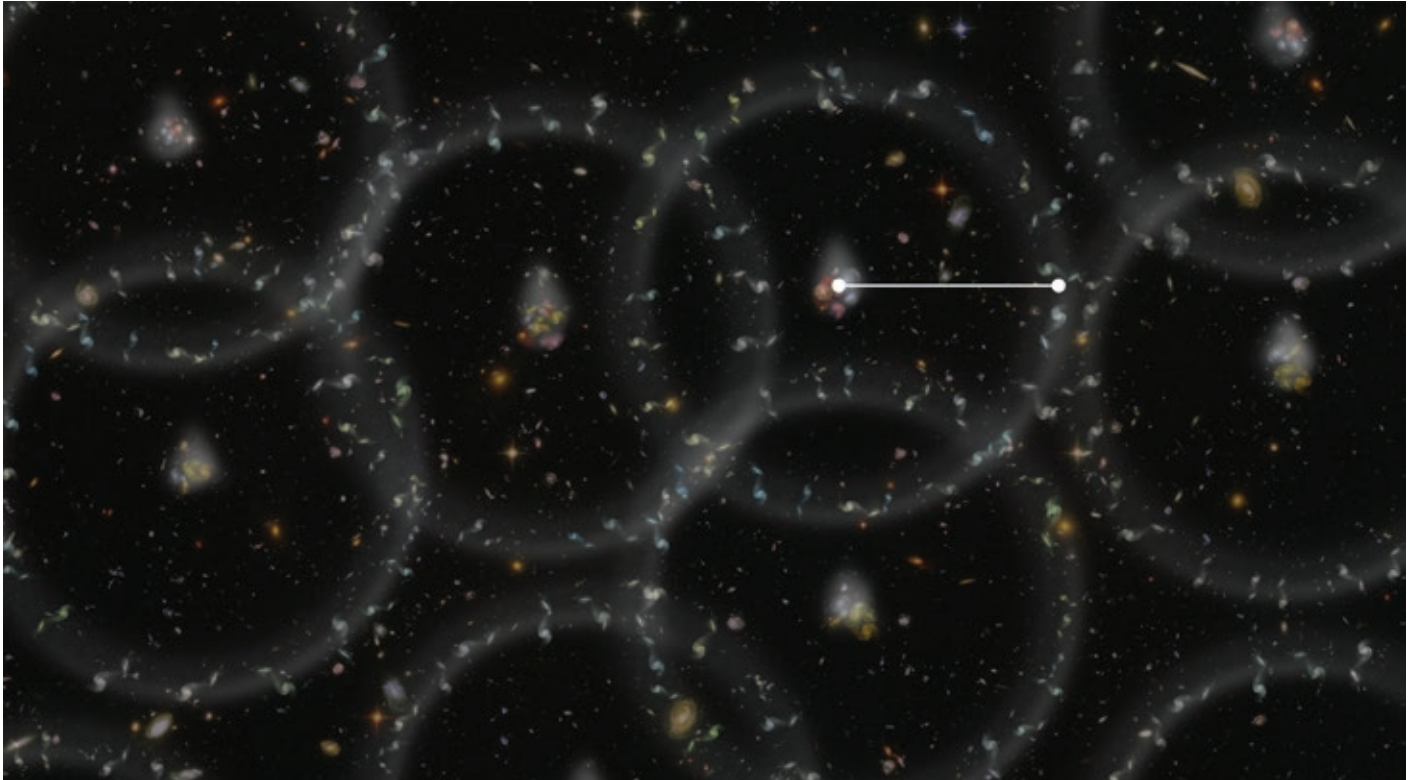
b

### 2. Mise en évidence expérimentale d'une distance caractéristique imprimée sur la trame cosmique de l'Univers.

(a) Fonction de corrélation  $\xi(r)$  de la répartition des galaxies rouges de l'Univers, correspondant à l'histogramme des distances  $r$  entre une galaxie quelconque et les autres galaxies du relevé.

(b) Idem pour l'hydrogène intergalactique repéré par les absorptions de la forêt Lyman- $\alpha$  (voir la section « Les quasars traquent l'expansion de l'Univers »).

Les ondes acoustiques qui se sont propagées dans l'Univers primordial engendrent un pic à 150 Mpc (soit à 105 Mpc/h sur la figure, où  $h$ , valeur actuelle de la constante de Hubble en unité de 100 km/s/Mpc, est égal à 0,7 environ).



© BOSS Collaboration.

3. Vue d'artiste de l'empreinte des BAO (Baryon Acoustic Oscillations, sphères grises) sur la répartition des galaxies (points blancs) dans l'Univers. Au centre de chaque sphère se trouve le pic initial de surdensité, essentiellement composé de matière noire. La ligne blanche donne la taille des sphères.

l'image des fluctuations de température que les oscillations du plasma ont engendrées. La distance sur laquelle les ondes acoustiques ont eu le temps de s'étendre avant de se retrouver figées est déterminée par le produit de la vitesse du son dans le plasma (vitesse de la lumière divisée par racine carrée de 3) par l'âge de l'Univers à ce moment-là (380 000 ans), soit une distance d'environ 150 Mpc aujourd'hui, compte tenu de l'expansion de l'Univers. Ainsi, autour de chaque pic initial de surdensité essentiellement composé de matière noire, donc qui ne se propage pas, se trouve un petit excès concentrique causé par l'onde de photons et de matière baryonique qui en est issue. Par la suite, chacune de ces surdensités est plus à même d'attirer gravitationnellement la matière environnante, si bien qu'aujourd'hui ces régions sont celles dans lesquelles il est plus probable de trouver des galaxies (fig. 3). L'effet des oscillations du plasma, ou BAO, est donc aujourd'hui observable dans la distribution des structures de l'Univers. C'est pourquoi les physiciens recherchaient son empreinte dans la distribution des LRG notamment. Pour la repérer, ils ont répertorié la distance séparant chaque galaxie de

toutes les autres. Dans l'histogramme ainsi obtenu, une séparation privilégiée, à la position attendue de 150 Mpc, est clairement visible (fig. 2a), avec une signification statistique excédant  $7\sigma$ .

Cette distance caractéristique imprimée sur la trame cosmique est un *Graal* pour les chercheurs. À l'instar d'un motif imprimé sur un tissu extensible, la mesure de cette distance étalon à différentes époques est un marqueur de l'étirement subi par le tissu, autrement dit de l'expansion de l'Univers, dont le taux dépend de la quantité et de la nature de ses diverses composantes et notamment de la part relative de matière et d'énergie noire. Pour les LRG, par exemple, 10% d'énergie noire en plus diminuerait de 6% le taux d'expansion de l'Univers  $H(z)$  au *redshift* de 0,57 où ces galaxies sont observées, et augmenterait de 4% la taille de la distance BAO. Obtenue aujourd'hui avec une précision de l'ordre du pourcent, la mesure des BAO permet de contraindre fortement la quantité d'énergie noire dans l'Univers.

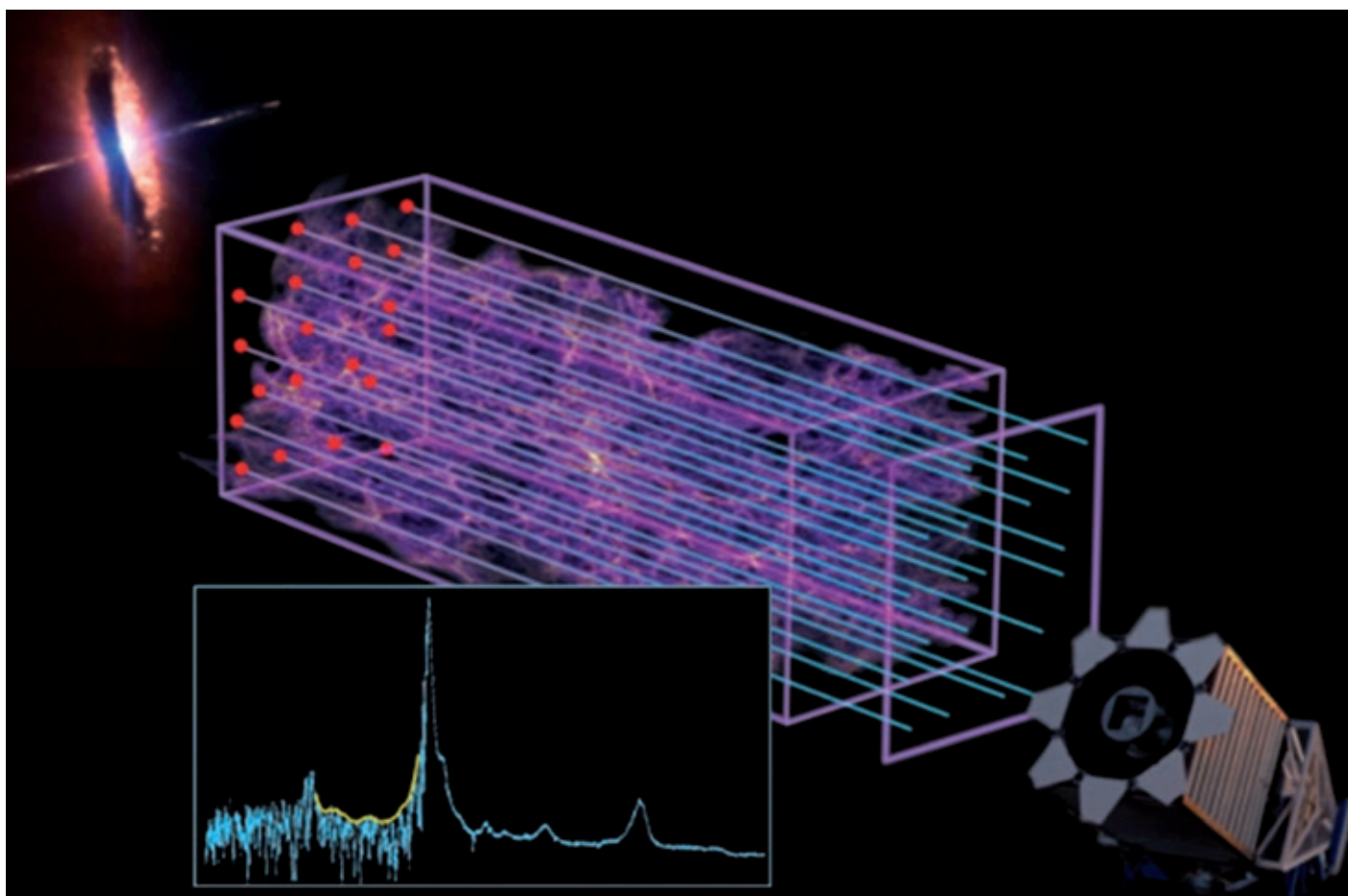
Le projet SDSS s'est à présent diversifié. Les chercheurs ont décidé de mesurer l'évolution du cosmos, non seulement dans la répartition de galaxies rouges et

vieilles, mais également dans celle de galaxies jeunes en pleine activité stellaire, de quasars ultra-lumineux, voire même dans la répartition des nuages ténus d'hydrogène. Depuis 2009, à travers les projets BOSS (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey) puis eBOSS (extended-BOSS), les chercheurs explorent l'Univers de plus en plus lointain et de plus en plus jeune. Nous avons dit que la longueur de notre règle étalon portait l'empreinte de l'expansion de l'Univers. L'historique de sa taille apparente est donc un remarquable indicateur de l'évolution des composantes de notre cosmos. C'est pourquoi le SDSS étend son domaine d'étude à des astres permettant de sonder toujours plus loin dans le passé.

## Les quasars traquent l'expansion de l'Univers

L'histoire de l'expansion de l'Univers ne se résume pas à l'accélération récente découverte grâce aux supernovae et aux mesures des ondes baryoniques acoustiques. La phase d'accélération ne remonte en effet qu'aux six derniers milliards d'années environ, alors que durant les premiers huit milliards d'années ou presque, l'expansion,





4. Transmission de la lumière d'un quasar (en haut à gauche) au télescope SDSS (en bas, à droite). La lumière du quasar distant (les points rouges à gauche) est partiellement absorbée lorsqu'elle traverse des nuages d'hydrogène intergalactique (au centre). Ce phénomène crée une « forêt » de raies d'absorption visible, sur le spectre en encart, dans la région à gauche du pic intense provenant de l'émission du quasar lui-même, et qui permet de dresser une carte 3D du gaz intergalactique.

### >>>

freinée par la gravitation, devait ralentir comme prévu dans un Univers alors majoritairement composé de matière. La mesure précise de l'évolution de l'expansion de l'Univers avec le temps étant un formidable outil pour traquer la contribution de l'énergie noire et déterminer l'époque à laquelle elle devient dominante, le SDSS étudie les BAO à diverses époques. Bien que très brillantes, les LRG ne sont toutefois visibles que sur les derniers six milliards d'années-lumière environ. Quels astres vont nous permettre d'explorer l'Univers plus jeune ?

Une avancée considérable a été accomplie en faisant appel à des quasars, objets parmi les plus lumineux de l'Univers : il s'agit de galaxies abritant en leur cœur un trou noir de plusieurs millions, voire plusieurs milliards de fois la masse du Soleil. Le disque d'accrétion qui gravite autour du trou noir central est chauffé à des températures telles que la lumière émise, excédant celles

des galaxies les plus brillantes, est visible à travers tout l'Univers. Le flux perçu en provenance du quasar est encore détectable par SDSS, même après s'être répandu dans l'Univers pendant plus de douze milliards d'années. À cette époque reculée, les quasars sont insuffisamment nombreux pour être utilisés en tant que marqueurs de la matière, comme cela avait été fait pour les LRG. Cependant, jouant le rôle de puissants phares cosmiques, les quasars vont illuminer le milieu intergalactique, et notamment les nuages ténus d'hydrogène gazeux qui s'y trouvent. De densité extrêmement faible, typiquement un million de fois plus petite que celle d'une galaxie (on trouve environ 0,25 atome d'hydrogène par mètre cube aujourd'hui, ce qui, l'Univers étant plus dense par le passé, correspond à quelques atomes par mètre cube à l'époque ici concernée), ce brouillard d'hydrogène n'en est pas moins la forme la plus fréquente sous laquelle se trouve la matière baryonique.

Porte-t-il lui aussi l'empreinte des ondes acoustiques de l'Univers primitif, ou ce signe distinctif est-il réservé aux structures les plus massives ?

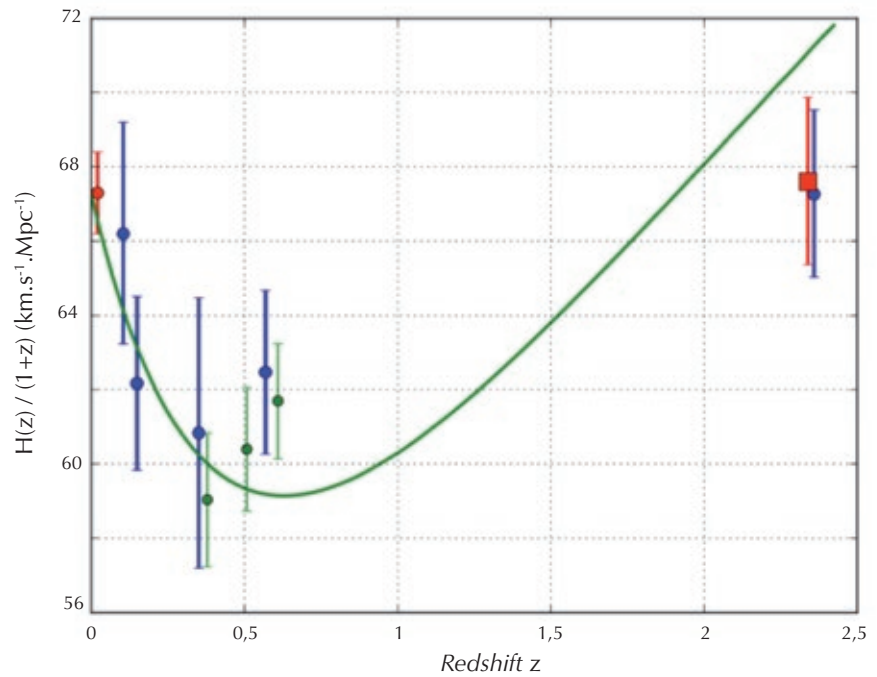
Ce sont de nouveau les spectres mesurés par SDSS qui vont nous apporter la réponse. La lumière émise par le quasar est plus ou moins absorbée selon la densité d'hydrogène neutre intergalactique qui se trouve sur sa trajectoire. L'absorption se produit localement à la longueur d'onde  $\lambda$  caractéristique de la transition électronique la plus courante de l'hydrogène (appelée transition Lyman- $\alpha$ , pour laquelle  $\lambda = 121,6$  nm), mais le *redshift* associé au site où cette absorption a lieu imprime le spectre à une longueur d'onde d'autant plus grande que le nuage est lointain. Le spectre du quasar, quand il est finalement observé sur Terre, comporte ainsi une succession de pics d'absorption, nommée « forêt Lyman- $\alpha$  » qui retrace les variations de densité rencontrées sur la ligne de visée

(fig. 4). Le projet SDSS a mesuré les spectres de plus de 170 000 quasars. L'analyse de ces absorptions a permis de réaliser une carte 3D de l'hydrogène dans l'Univers tel qu'il était un à trois milliards d'années après le *Big Bang*. Malgré la faiblesse du signal dans cet Univers si jeune et dans un milieu aussi dilué que le milieu intergalactique, une équipe internationale, emmenée par des chercheurs français du CEA (Saclay) et du CNRS, a réussi à mettre en évidence dans cette carte la même empreinte de la règle étalon (fig. 2b) que celle identifiée avec les LRG [4]. Comme illustré sur la figure 5, les résultats confirment pour la première fois que l'Univers a bien d'abord connu une époque de décélération, lorsque la matière était bien plus abondante que l'énergie noire, suivie de la phase d'accélération récente. Alors que le cosmos a débuté dans un bain de rayonnement et de matière, nous vivons aujourd'hui dans un Univers essentiellement composé d'énergie noire !

## Regards vers le futur

La précision de ces résultats est remarquable, quelques pourcents sur la mesure du taux d'expansion de l'Univers à diverses époques. L'histoire de l'expansion qui en découle est en accord avec les modèles actuels de la cosmologie, et n'indique aucun écart significatif à l'hypothèse la plus simple de la constante cosmologique introduite par Einstein au siècle précédent. Pour progresser sur le dossier de l'énergie noire, il va falloir faire appel à une autre génération de projets, au sol (avec DESI ou LSST) ou dans l'espace (avec Euclid).

Doté cette fois d'un télescope de 4 m de diamètre installé au Kitt Peak, en Arizona aux USA, et d'un tout nouveau spectrographe capable de mesurer simultanément les spectres de 5000 objets, le projet DESI est l'ultime traque de l'énergie noire depuis un observatoire terrestre. Équipé de plus d'un robot pour positionner automatiquement les fibres optiques au plan focal du télescope, DESI peut obtenir une nouvelle série de spectres toutes les 20 minutes. Les premières observations débuteront au cours de l'année 2019. Et c'est au total plus de vingt millions de galaxies et de quasars que les chercheurs auront à leur disposition après cinq années de fonctionnement, pour retracer l'histoire de l'énergie noire et de la matière au cours des douze derniers milliards d'années de



**5. Vitesse relative de l'expansion de l'Univers,  $H(z)/(1+z)$ , en fonction du redshift.** Le long de l'axe horizontal, le temps croît vers la gauche (*redshifts* décroissants). Les mesures obtenues à partir de la répartition 3D des galaxies LRG sont représentées en bleu ou vert à gauche sur le graphique. L'Univers passe d'un régime dominé par la matière à un régime dominé par l'énergie noire à un âge d'environ six milliards d'années. La mesure effectuée à partir des « forêts » Lyman- $\alpha$  correspond au carré rouge et au rond bleu à droite de la figure (deux analyses), sondant la structure de l'Univers à une époque où son expansion était encore en train de ralentir, soit il y a environ onze milliards d'années. La courbe est une prédiction tenant compte des densités de matière et d'énergie noires observées par le satellite Planck. Le léger désaccord entre cette mesure et la courbe montre qu'il faut continuer à observer de nouveaux quasars pour savoir si c'est réel, et donc annonciateur d'une révolution en cosmologie, ou une simple fluctuation statistique.

l'Univers. Pour la première fois, l'époque à laquelle l'énergie noire prend le dessus sur la matière, lorsque l'Univers était âgé d'environ sept milliards d'années, pourra être étudiée avec précision (fig. 5).

Depuis l'espace, le spectrographe infrarouge du satellite Euclid (programme de l'agence spatiale européenne ESA), dont le lancement est prévu en 2020, poussera encore plus loin les limites des grands relevés 3D de galaxies. Euclid observera plus de 30 millions de galaxies, jusqu'à la lisière où les forêts Lyman- $\alpha$  des quasars observés par DESI prendront la relève.

Enfin, le LSST, un nouveau télescope de 8 m de diamètre, installé sur le Cerro Pachón au Chili, sera pleinement opérationnel à partir de 2022. Il étudiera les oscillations baryoniques par une méthode différente. Le *redshift* sera obtenu à partir du flux de lumière mesuré dans six filtres allant de l'UV à l'infrarouge proche. La moins bonne détermination du *redshift* par cette

approche est compensée par un bien plus grand nombre de galaxies observées, soit plusieurs dizaines de milliards à la fin du projet.

Ces trois projets internationaux vont aborder de façon complémentaire notre étude sur l'énergie noire. Mais au-delà de cette quête, les chercheurs espèrent que ces observations permettront de répondre aux grandes questions qui se posent aujourd'hui sur la relativité générale, clef de voûte de tout l'édifice actuel de la cosmologie. ■

## Références

- 1• S. Perlmutter *et al.*, *Astrophys. J.* **517** (1999) 565 et A. Riess *et al.* *Astron. J.* **116** (1998) 1990.
- 2• F. Combes, ce numéro, p. 4.
- 3• D. Eisenstein *et al.*, *Astrophys. J.* **633** (2005) 560.
- 4• N. Busca *et al.*, *A&A* **552** (2013) A96 et Y. Delubac *et al.*, *A&A* **574** (2015) A59.

# Observation de pentaquarks par l'expérience LHCb

Patrick Robbe (robbe@lal.in2p3.fr)

Laboratoire de l'accélérateur linéaire, UMR8607, Université Paris-Sud, BP 34, 91405 Orsay Cedex

L'expérience LHCb a mis en évidence l'existence d'une nouvelle particule en analysant l'ensemble des données enregistrées lors des collisions au LHC en 2011 et 2012.

Cette particule a l'originalité d'être formée de cinq quarks, dont deux quarks charmés. Même si cette combinaison n'est pas interdite par la théorie des interactions fortes, c'est la première fois qu'elle est observée expérimentalement de façon non ambiguë.

Plusieurs interprétations existent pour décrire la manière dont sont liés les quarks entre eux dans ces pentaquarks et prédisent l'existence d'autres particules similaires.

## L'interaction forte

Il existe quatre forces fondamentales dans la nature : les forces gravitationnelle, électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte. C'est cette dernière qui explique que les quarks, particules élémentaires de la matière (dont la liste est donnée dans le tableau 1), sont confinés dans des particules composites appelées hadrons. En effet, cette interaction est si forte que les quarks ne peuvent se trouver isolés. La charge associée à l'interaction nucléaire forte est appelée « couleur » et peut prendre trois valeurs pour un quark, nommées conventionnellement « bleu », « vert » ou « rouge », et trois valeurs pour un antiquark, la particule d'antimatière associée au quark : « anti-bleu », « anti-vert » ou « anti-rouge ».

Le modèle des quarks [1] du Modèle Standard de la physique des particules explique leur confinement par le postulat que seuls des états liés incolores peuvent exister. Ainsi, les états liés d'un quark et d'un antiquark (appelés mésons) ou les états liés de trois quarks (appelés baryons, tels le proton ou le neutron) existent, alors que des états liés de deux quarks n'existent pas. Par exemple, une association d'un quark « rouge » et d'un antiquark « anti-rouge » est incolore, alors que celle de deux quarks « rouges » ne le serait pas. De la même

façon, un baryon formé d'un quark « rouge », d'un quark « bleu » et d'un quark « vert » est incolore, l'analogie avec la couleur ayant été utilisée pour illustrer ce principe.

L'existence d'états liés contenant plus de quarks que dans ces combinaisons minimales à deux ou trois quarks (mésons et baryons) est prévue par ce modèle, puisque des combinaisons telles que deux quarks et deux antiquarks (« tétraquarks ») ou quatre quarks et un antiquark (« pentaquark ») sont également incolores. Cependant, aucune preuve expérimentale confirmée n'existait jusqu'à récemment.

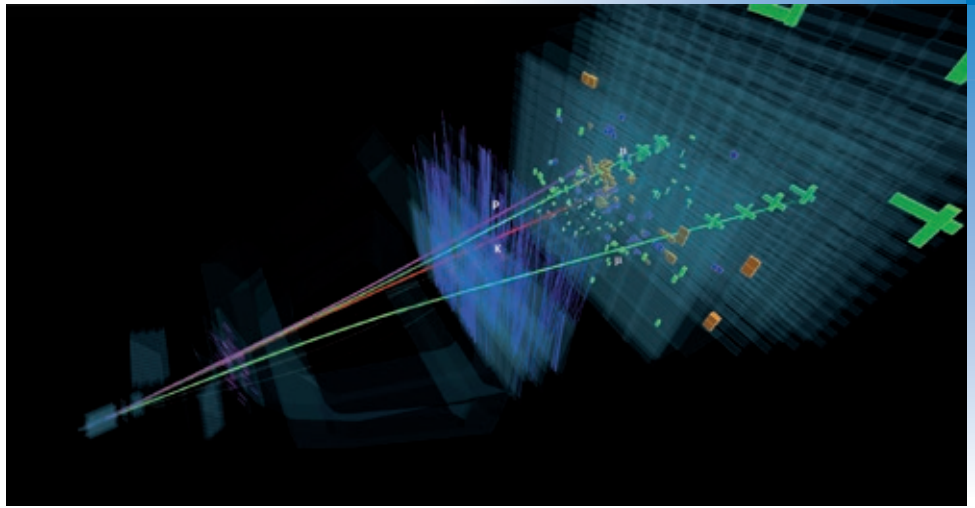
## Les états exotiques

Les calculs de QCD (*Quantum Chromodynamics*, ou théorie des interactions fortes) permettent de prédire de façon exacte les spectres de masse des états liés de quarks, que sont les mésons et baryons.

Cependant, des particules ont été observées expérimentalement, dont la masse n'apparaît pas dans ces spectres prédits par la théorie, et sont appelées « états exotiques ». Les plus récents et les plus spectaculaires proviennent du spectre des états liés  $c\bar{c}$ , formés d'un quark charmé ( $c$ ) et d'un antiquark charmé ( $\bar{c}$ ), qui sont des quarks lourds. (*Les particules conventionnelles de ce spectre, prévues par la*

Quark	Masse (GeV/c <sup>2</sup> )	Charge électrique	Antiquark	Charge électrique
u ( <i>up</i> )	0,002	+ 2/3	$\bar{u}$	- 2/3
d ( <i>down</i> )	0,005	- 1/3	$\bar{d}$	+ 1/3
c ( <i>charmé</i> )	1,3	+ 2/3	$\bar{c}$	- 2/3
s ( <i>étrange</i> )	0,1	- 1/3	$\bar{s}$	+ 1/3
t ( <i>top</i> )	173	+ 2/3	$\bar{t}$	- 2/3
b ( <i>beau ou bottom</i> )	4,2	- 1/3	$\bar{b}$	+ 1/3

Tableau 1. Liste des quarks et antiquarks. Un quark et son antiquark (par exemple u et  $\bar{u}$ ) ont la même masse.



QCD, sont connues avec une bonne précision, la première d'entre elles, le  $J/\psi$ , ayant été découverte en 1974.) Ces particules exotiques dans le spectre  $c\bar{c}$  ont été d'abord observées au début des années 2000 [2] dans des expériences à relativement basse énergie (de l'ordre de 10 GeV), BABAR (aux USA), BELLE (au Japon) et BES (en Chine), enregistrant des collisions d'électrons et de positons, mais également dans des expériences à très grande énergie (de l'ordre de 1 TeV), dans des collisions de protons ou d'antiprotons (Tevatron aux USA et LHC à Genève). À présent, une dizaine de ces états exotiques  $c\bar{c}$  ont été découverts, dont une grande partie par différentes expériences de façon indépendante, ne laissant donc aucun doute quant à leur existence. L'hypothèse que ces états soient des « tétraquarks », des états liés de deux quarks et deux antiquarks, est une de celles les plus souvent avancées pour décrire ces particules. La confrontation des résultats des différentes expériences, ainsi que l'amélioration de la précision des mesures des caractéristiques de ces particules, permettront de tirer des conclusions définitives.

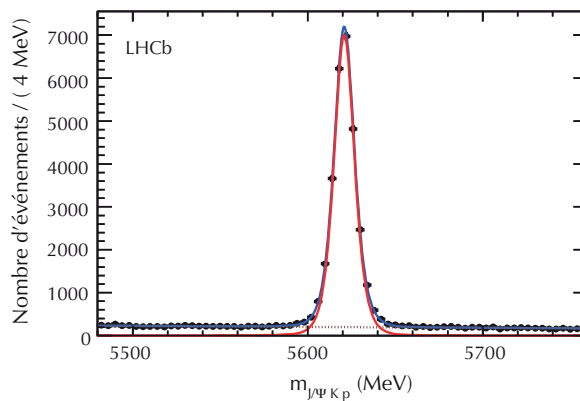
### L'expérience LHCb

L'expérience LHCb est un détecteur de physique des particules situé dans un des points d'interaction du LHC, au CERN [3]. Cette expérience est spécialisée dans l'étude des mésons et baryons formés des quarks c et aussi des quarks lourds b (« beaux »), qui sont créés lors des collisions du LHC. Pendant la première campagne de fonctionnement de l'accélérateur, entre 2010 et 2012,  $2 \cdot 10^{12}$  particules contenant un quark b ont été produites dans l'expérience, et c'est parmi leurs désintégrations qu'ont été découverts des pentaquarks. La figure 1 montre un événement contenant un pentaquark, enregistré en 2012 par l'expérience.

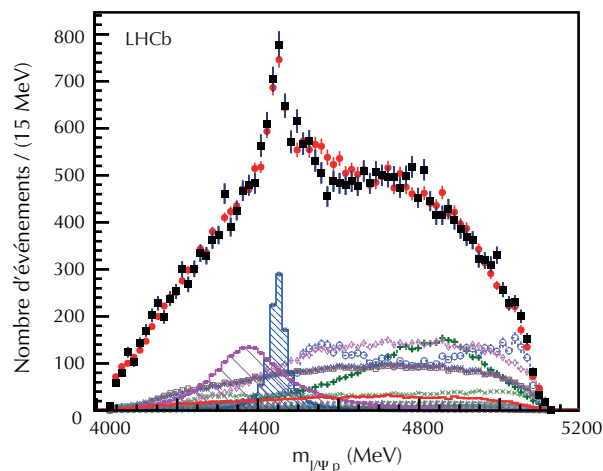


#### 1. Reconstruction d'un événement contenant un candidat pentaquark dans le détecteur LHCb.

Les trajectoires reconstruites des particules produites dans la désintégration du pentaquark,  $P_c \rightarrow J/\psi p$ , sont montrées : en vert pour les deux muons de la désintégration du  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ , en violet pour le proton p. Ce pentaquark provient de la désintégration d'un  $\Lambda_b \rightarrow P_c K$ , la trajectoire du  $K$  est représentée en rouge. Les particules p,  $\mu^+$  et  $\mu^-$  proviennent potentiellement de la désintégration d'un pentaquark, car l'événement a été sélectionné parmi ceux pour lesquels la masse invariante calculée pour le  $\Lambda_b$  se situe dans le pic visible sur la figure 2, et la masse invariante calculée pour le  $P_c$  dans le pic visible sur la figure 3.



#### 2. Distribution de la masse $\Lambda_b^0$ (nombre de recombinaisons reconstruites par intervalles de 4 MeV).



3. Distribution de masse invariante de la combinaison  $J/\psi p$  (nombre de combinaisons reconstruites par intervalles de 15 MeV). La contribution du pentaquark de masse 4450 MeV est montrée par l'histogramme bleu, celle du pentaquark de masse 4380 MeV par l'histogramme violet. Les autres combinaisons qui contribuent à cette distribution proviennent de désintégrations non résonantes dans la chaîne de désintégration  $J/\psi p K$ , ou bien de résonances connues  $\Lambda^* \rightarrow p K$ , dont les réflexions sont indiquées par les autres histogrammes.

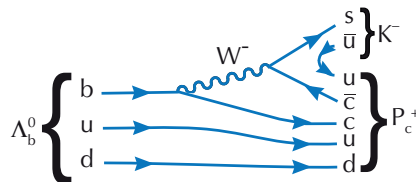
## La découverte des pentaquarks

Les états pentaquarks ont été découverts par hasard, au cours d'une analyse pour mesurer le temps de vie de la particule  $\Lambda_b$  [4]. Cette particule est un baryon contenant un quark b et deux quarks légers, u et d, et de temps de vie de l'ordre de 1,5 ps. Elle se désintègre par interaction faible dans un grand nombre de modes différents, dont le mode de désintégration  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ , utilisé dans cette analyse. Le proton p et le kaon  $K^-$  (méson formé par un quark s et un antiquark  $\bar{u}$ ) sont détectés directement dans le détecteur, et la particule  $J/\psi$  (méson formé d'un quark c et d'un antiquark  $\bar{c}$ ) est détectée dans le mode de désintégration  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  (un muon et un antimuon). Un très grand nombre de désintégrations (26 000) sont ainsi détectées avec très peu de bruit de fond, comme le montre la figure 2, qui est le spectre de masse invariante des combinaisons  $J/\psi K^- p$ . La masse invariante est calculée à partir des masses et des impulsions des produits de désintégration, mesurées dans le détecteur. Pour des combinaisons provenant de la désintégration de vrais  $\Lambda_b^0$ , cette masse est proche de la masse connue du  $\Lambda_b^0$  (environ 5620 MeV), alors que pour des combinaisons aléatoires ne provenant pas de cette désintégration, sa valeur est arbitraire. Ceci explique le pic visible sur la figure 2 autour de la masse du  $\Lambda_b^0$ , contenant les  $\Lambda_b^0$  reconstruits dans l'expérience, et indiqué par la courbe rouge. La forme de ce pic est due à la précision de la mesure des impulsions par le détecteur, qui n'est pas parfaite et introduit des différences entre la mesure expérimentale et la vraie masse de la particule.

Cette désintégration avec trois particules dans l'état final peut se produire par l'intermédiaire d'une autre particule, de temps de vie très court, appelée résonance et notée  $P_c$  dans ce cas, c'est-à-dire avec une désintégration en deux corps, suivie par une autre désintégration en deux corps de cette résonance pour obtenir l'état final. Dans le cas présent, il s'agit de  $\Lambda_b \rightarrow P_c K^-$ , suivie de la désintégration  $P_c \rightarrow J/\psi p$ . Ceci est généralement mis en évidence en regardant le spectre en masse invariante de ces deux particules,  $J/\psi$  et p. La figure 3 représente ce spectre mesuré par LHCb, les carrés noirs montrant la distribution observée dans les données. On y remarque un pic inattendu.

Des vérifications détaillées des données ont permis d'exclure que ce pic soit dû à des réflexions d'autres résonances connues, ou à des erreurs d'identification des particules de l'état final. Ces observations permettent de conclure qu'il s'agit bien d'une nouvelle particule, de masse  $4380 \pm 30$  MeV, de largeur de résonance  $205 \pm 88$  MeV, de spin 3/2 et de parité négative. Les données montrent aussi la présence d'une seconde résonance, avec une masse de  $4450 \pm 3$  MeV et une largeur plus petite, de  $39 \pm 20$  MeV. Ces deux résonances correspondent à deux états d'une nouvelle particule qui a été nommée  $P_c^+$ . Les cercles rouges sur la figure 3 montrent l'ajustement des données par le modèle à deux résonances.

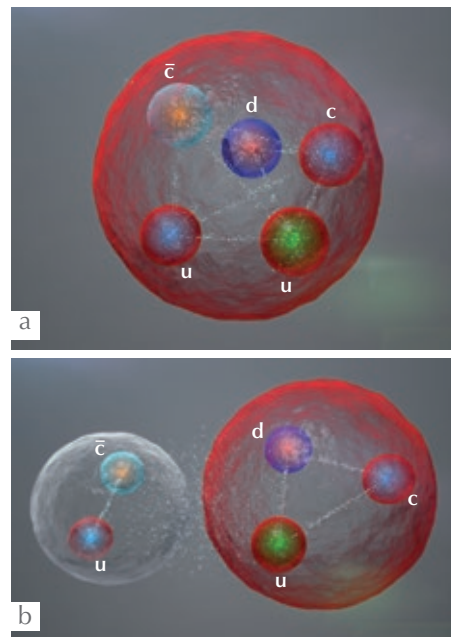
### Les différentes interprétations et perspectives



4. Diagramme de la désintégration  $\Lambda_b^0 \rightarrow P_c^+ K^-$ .

Le diagramme en quarks de la désintégration du  $\Lambda_b$  est donné dans la figure 4. Le  $P_c^+$  se désintègre en  $J/\psi p$ , par interaction forte. Puisque le  $J/\psi$  est un état lié  $c\bar{c}$ , le  $P_c^+$  doit contenir aussi ces deux quarks ; le proton p de l'état final étant un baryon, le  $P_c^+$  doit contenir au moins ses trois quarks. Le contenu minimum en quarks du  $P_c^+$  est donc  $c\bar{c}uud$ , c'est-à-dire cinq quarks. Ces quarks peuvent être liés entre eux de façon forte et confinés dans un volume unique. Mais ils pourraient aussi former des « molécules » associant deux particules traditionnelles (un baryon et un méson) faiblement liées. La figure 5 illustre schématiquement ces deux possibilités.

D'autres expériences au LHC (ATLAS et CMS) enregistrent également des données en même temps que LHCb et pourraient aussi observer ces pentaquarks et améliorer la précision sur la mesure de leurs masses. Pour pouvoir en apprendre plus sur les pentaquarks, il faut en découvrir d'autres qui se désintègrent de manière différente ; la construction expérimentale de leur spectre en masse, de leur largeur et de leurs propriétés intrinsèques permettront d'apprendre comment ils sont formés.



5. Illustration d'un pentaquark formé de cinq quarks liés fortement (a) ou d'une molécule formée d'un méson et d'un baryon contenant aussi au total cinq quarks (b).

Jusqu'à présent, ces pentaquarks ont été observés dans un mode de désintégration d'un hadron contenant un quark b, mais ils pourraient aussi être produits de façon directe ; si c'était le cas, cela permettrait de distinguer parmi les hypothèses théoriques la nature exacte de ces particules.

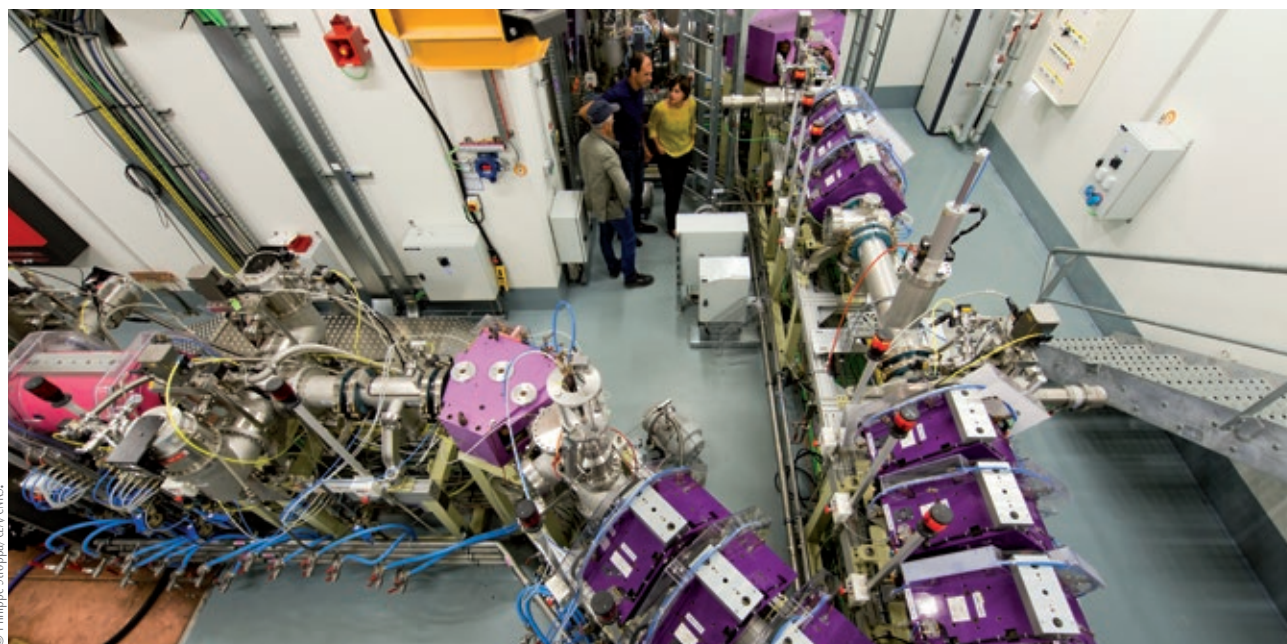
Le relevé de données au LHC a redémarré en 2015, et une grande quantité de collisions ont été déjà enregistrées. Leur analyse devrait permettre d'apprendre beaucoup plus sur les pentaquarks et sur le mécanisme exact qui lie ces quarks entre eux. ■

### Références

- 1• M. Gell-Mann, "A schematic model of baryons and mesons", *Phys. Lett.* **8** (1964) 214.
- 2• S.-K. Choi *et al.* (BELLE Collaboration), "Observation of a narrow charmoniumlike state in exclusive  $B^\pm \rightarrow K^\pm \pi^+ \pi^- J/\psi$  decays", *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 262001.
- 3• F. Machefert, « Recherche d'une physique au-delà du modèle standard et étude de la violation de CP avec l'expérience LHCb au CERN », *Reflets de la physique* **43** (2015) 18.
- 4• R. Aaij *et al.* (LHCb collaboration), "Observation of  $J/\psi p$  resonances consistent with pentaquark states in  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$  decays", *Phys. Rev. Lett.* **155** (2015) 072001.

## Avec Spiral2, la France double ses capacités expérimentales en physique nucléaire

Communiqué de presse CEA-CNRS du 3 novembre 2016



© Philippe Stropasz/CEA-CNRS

Salle source de deutons / protons de Spiral2.

Avec son nouvel accélérateur de particules Spiral2, inauguré à Caen le jeudi 3 novembre en présence du président de la République, François Hollande, le Ganil (CNRS/CEA) produira des faisceaux d'ions radioactifs d'une intensité inégalée. Il doublera ainsi son potentiel d'expérimentation en physique nucléaire, en particulier pour la recherche sur le noyau atomique et sur les mécanismes des réactions nucléaires, comme celles se déroulant au sein des étoiles. Les premières expériences devraient s'y dérouler mi-2017.

Étudier les noyaux atomiques est primordial, car ils concentrent l'essentiel de la masse des atomes. L'installation Spiral2 (« Système de production d'ions radioactifs de 2<sup>e</sup> génération ») permettra donc de sonder le cœur de la matière. Destinée à produire en abondance des noyaux dits « exotiques » (car n'existant pas à l'état naturel sur Terre), elle autorisera la réalisation d'expériences inédites en physique et en astrophysique nucléaires. À Spiral2 seront également menées des recherches appliquées pluridisciplinaires, dans les domaines de la santé (radiothérapie, diagnostic et recherche biomédicale), des matériaux pour la microfiltration (membranes pour l'agro-alimentaire et la santé), de l'électronique, de l'aérospatiale et du nucléaire de fission et de fusion.

Spiral2, dont la construction a débuté en 2011, s'inscrit parmi les six plus importants projets de recherche en physique nucléaire dans le monde. Sa mise en service, prévue en 2017, permettra à la France de continuer à occuper le devant de la scène internationale dans ce domaine.

Actuellement le Ganil<sup>(1)</sup>, très grande infrastructure de recherche commune au CNRS et au CEA, attire chaque année à Caen plus de 700 chercheurs originaires de 30 pays différents.

D'un coût de plus de 138 millions d'euros<sup>(2)</sup>, le projet Spiral2, mené par le CNRS et le CEA, bénéficie notamment du soutien de l'État français, de la ville de Caen, de la communauté d'agglomération Caen-la-mer, du département du Calvados, de la région Normandie et de l'Union européenne.

Sa conception et sa construction ont impliqué de nombreux laboratoires de recherche publics (notamment du CEA et du CNRS) et d'entreprises de haute technologie en France et en Europe.

(1) Le Ganil, Grand accélérateur national d'ions lourds, a été créé en 1976 par le CEA et le CNRS. En physique nucléaire, il a d'ores et déjà permis de nombreuses découvertes sur la structure du noyau de l'atome, sur ses propriétés thermiques et mécaniques et sur ces noyaux que l'on dit exotiques, car ils n'existent pas à l'état naturel.

(2) Sans compter la main d'œuvre fournie par le CNRS et CEA, évaluée à 60 millions d'euros.

### ► Le monde de la physique nucléaire réuni pour inaugurer Spiral 2

Jeudi 3 novembre, 570 personnes étaient réunies au Ganil à Caen pour inaugurer le nouvel accélérateur du projet Spiral2. L'événement a bénéficié de la présence du président de la République (à gauche sur la photo) et des élus régionaux, départementaux et locaux. Parmi les invités, des représentants du CNRS et du CEA, des membres des laboratoires qui ont contribué à la construction de l'installation, des partenaires académiques et industriels français et étrangers. L'occasion de fêter l'accomplissement prochain de dix ans de travail, avant le démarrage courant 2017.



© Amélie Bonin

# Synthèse ultrarapide de nanoparticules par claquage dans des liquides diélectriques

**Thierry Belmonte** (thierry.belmonte@univ-lorraine.fr)

Institut Jean Lamour, Département CP2S, UMR 7198 CNRS-Université de Lorraine,  
Parc de Saurupt, CS 50840, 54011 Nancy Cedex

Les récents progrès sur la compréhension des décharges produites dans les liquides diélectriques entre deux électrodes dont on choisit la composition, ouvrent des perspectives nouvelles dans la maîtrise de l'élaboration de nanoparticules. De telles décharges permettent de synthétiser des nanoparticules ayant des diamètres caractéristiques compris entre 2 et 10 nm. Surtout, elles permettent d'atteindre des rendements de production remarquablement élevés, de l'ordre de la centaine de grammes par heure.

La difficulté principale consiste à maîtriser ce procédé qui est basé sur un phénomène stochastique : le claquage d'un diélectrique, qui permet la formation d'une décharge électrique.

L'étude des décharges produites entre deux électrodes dans des liquides diélectriques a longtemps été l'apanage des électrotechniciens, qui cherchaient à améliorer les disjoncteurs de forte puissance. En observant que les électrodes s'érodaient lors de chaque décharge, les ingénieurs ont pensé à exploiter ce phénomène pour améliorer l'usinage des métaux. C'est ainsi que l'usinage par électroérosion est apparu et a été développé pour atteindre aujourd'hui des records de résolution, avec une précision de l'ordre du micromètre au niveau industriel. Des dispositifs basés sur des microscopes à force atomique permettent même d'obtenir aujourd'hui des nanotrous en laboratoire. La pointe de l'instrument est alors utilisée comme électrode de haute tension pour éroder la contre-électrode à très petite échelle.

Plus récemment, ce domaine a connu un regain d'intérêt en raison de l'apparition de nouvelles applications potentielles comme la synthèse de nanoparticules, l'oxydation électrolytique d'alliages métalliques ou le traitement de l'eau et des effluents. Ces développements s'accompagnent d'une redécouverte de ces décharges à haute pression, dont la physique nécessite d'être approfondie. En effet, les décharges dans les liquides créées entre deux électrodes ont un comportement fondamentalement stochastique : il est impossible de reproduire une décharge exactement à l'identique, effet qui a longtemps limité leur étude par détection synchrone. Cela résulte principalement de l'étape liée à l'injection de charges, qui sera décrite ultérieurement. Néanmoins, l'apparition de générateurs d'impulsions nanoseconde et même picoseconde fonctionnant à haute tension (de 1 à 100 kV suivant les cas) a permis

d'améliorer grandement la caractérisation de ces milieux ionisés, comme nous allons le voir.

## Phénoménologie des décharges

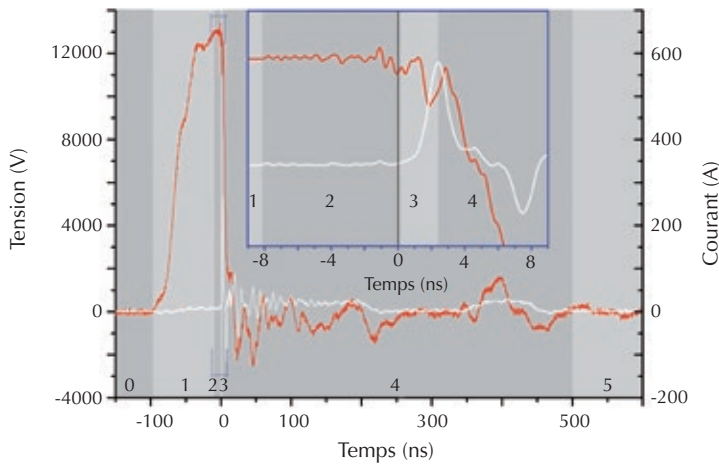
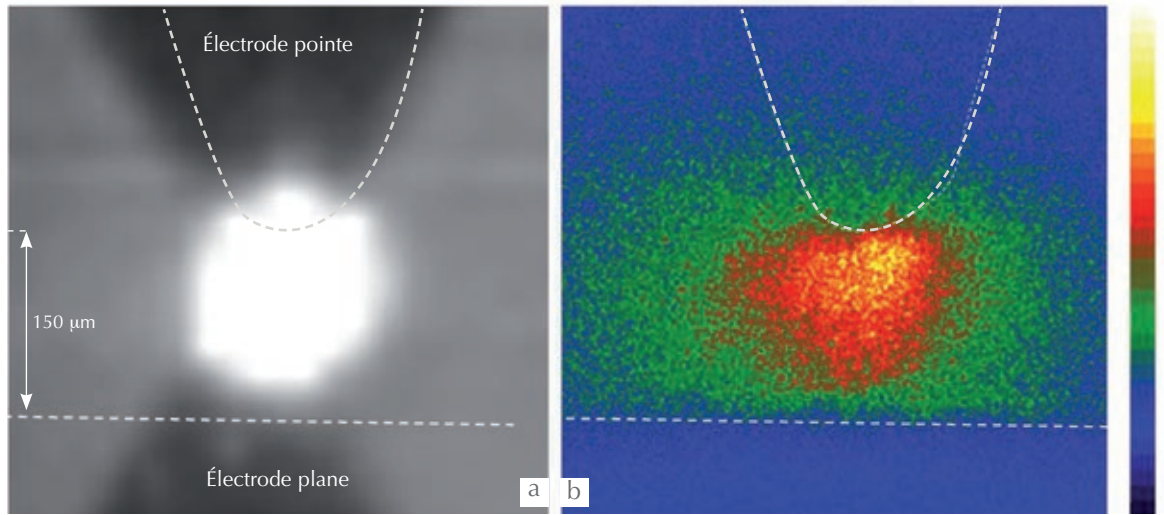
La formation d'une décharge dans un liquide diélectrique implique un nombre important de phénomènes, de sorte qu'en démêler l'écheveau est particulièrement complexe. On distingue cinq étapes principales au cours d'un événement, chacune associée à un comportement électrique spécifique (fig. 1) :

- 1) La première phase consiste à mettre le liquide sous contrainte mécanique, en élevant la tension jusqu'à une valeur qui permet de réaliser la rupture du diélectrique. Typiquement, pour l'eau distillée, le champ électrique de claquage est de l'ordre de quelques  $\text{MV}\cdot\text{cm}^{-1}$ .
- 2) La phase de préclaquage correspond à une injection de charges du métal vers le liquide, qui se traduit par des oscillations de la tension électrique (encart, fig. 1). Elle peut s'accompagner, sur des temps de quelques dizaines de nanosecondes, d'un mouvement du liquide induit par un phénomène électrohydrodynamique (distinct du phénomène d'électrostriction qui se produit sur des temps plus courts, inférieurs à la nanoseconde), au cours duquel des particules ionisées lourdes vont se déplacer sous l'effet du champ électrique et déplacer avec elles le liquide alentour. Cette étape contribue, par des mécanismes différents selon la vitesse de montée en tension, à créer une zone de moindre densité, qui va permettre l'amorçage de la décharge.
- 3) La phase d'amorçage correspond à l'émission par le liquide comprimé



**Distribution spatiale de l'émission de lumière à 15 kV, lors d'une décharge dans l'heptane.**

(a) Intensité enregistrée après le claquage, avec une caméra ultrarapide. Résolution temporelle : 1,9  $\mu$ s.  
 (b) Intensité enregistrée après le claquage, avec une caméra iCCD. Résolution temporelle : 2,0 ns.



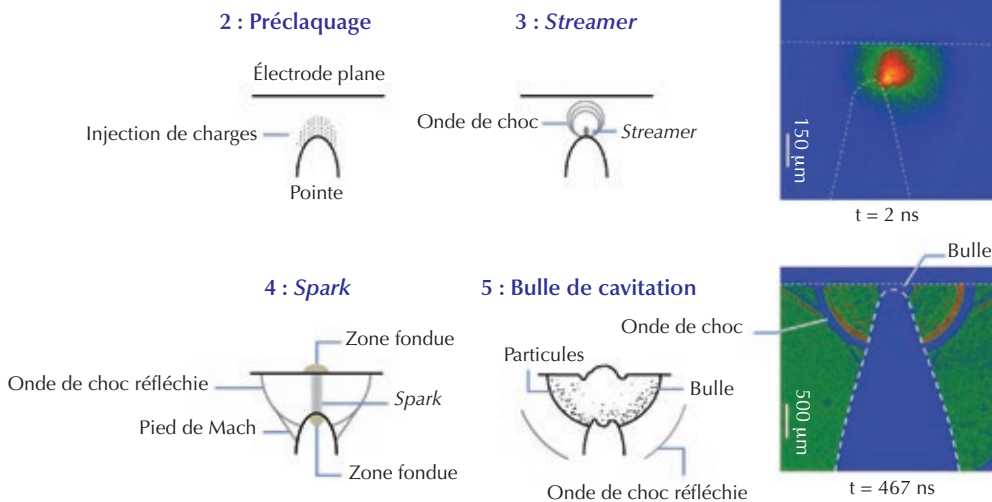
- 0 : Liquide au repos
- 1 : Montée en tension
- 2 : Préclaquage
- 3 : *Streamer*
- 4 : Décharge *spark*
- 5 : Postdécharge

**1. Évolution de la tension (en rouge) et du courant (en blanc) au cours du temps, lors d'un événement de décharge dans un liquide diélectrique.**

Le carré bleu est un zoom entre -8 et +8 ns. On distingue cinq phases principales : 1) la mise en tension du liquide (d'une durée d'environ 90 ns) ; 2) l'injection de charges ou préclaquage (~ 8 ns) ; 3) la phase de développement du *streamer* (~ 2 ns) ; 4) la décharge *spark* (~ 500 ns), et 5) la post-décharge (qui dure quelques  $\mu$ s).

**2. Schématisation des différentes étapes d'une décharge en condition pointe-plan.**

Le temps d'origine est défini lorsque l'intensité du courant mesuré entre les électrodes se met à croître fortement. La phase de préclaquage est associée à une injection de charges. Le développement du *streamer* a lieu après l'émission d'une onde de choc, avec des vitesses pouvant atteindre plusieurs  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ . Expérimentalement (image en haut à droite), on observe au moyen d'une caméra intensifiée l'amorçage du *streamer* mais pas l'onde de choc, en raison de l'émission lumineuse intense du plasma qui masque le rayonnement de la lampe flash servant à l'observer par ombroscopie (du rouge au bleu : intensité d'émission optique décroissante). Lors de la phase de postdécharge, l'absence de rayonnement issu du plasma permet la visualisation de l'onde de choc après qu'elle a été réfléchi sur l'électrode plane. Sur l'image en bas à droite, on distingue nettement la bulle qui a succédé à la décharge et commence une phase d'expansion (du rouge au vert puis au bleu, densité du milieu croissante).



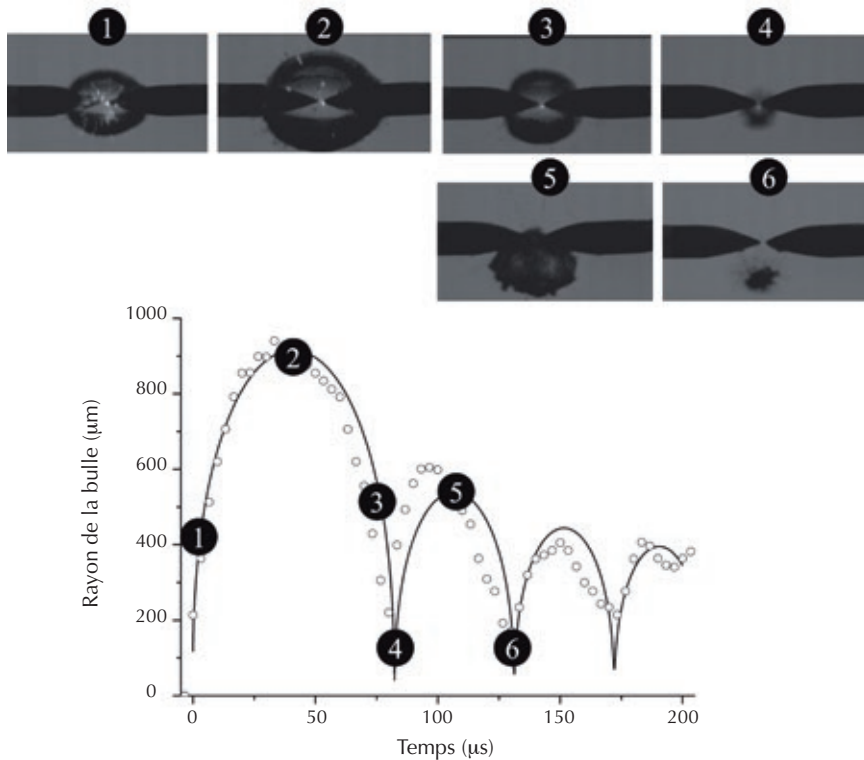
## ► Oscillations d'une bulle de cavitation

Une bulle de cavitation oscille au cours du temps et voit son diamètre augmenter puis décroître plusieurs fois avant de se stabiliser (fig. E1). Si la pression initiale dans la bulle n'est pas trop forte, les propriétés thermodynamiques du milieu ne dépendent pas de la pression. L'évolution du rayon de la bulle est alors fournie par l'équation de Rayleigh-Plesset :

$$R\ddot{R} + 3\dot{R}^2/2 = P_i/\rho_0,$$

qui relie les dérivées temporelles  $\dot{R}$  et  $\ddot{R}$  du rayon  $R$  de la bulle à la pression initiale  $P_i$  et à la densité du liquide  $\rho_0$ . En revanche, lorsque la pression est élevée, la variation des propriétés du milieu avec la pression est marquée, et il faut recourir à une autre équation, l'équation de Gilmore, pour décrire le mouvement de la bulle.

La dynamique de l'interface gaz-liquide est affectée par différents phénomènes. Par exemple, au voisinage d'une paroi, la quantité de mouvement du liquide entre la bulle et la paroi est différente de celle au-dessus de la bulle. Il faut alors prendre en compte ce que l'on nomme l'impulsion de Kelvin pour décrire la dynamique spécifique de la bulle dans ce cas. La génération d'une nouvelle bulle, si elle a lieu suffisamment tôt, induit un champ de pression dans le liquide qui peut aussi conduire à modifier la forme de la bulle précédente, voire même à la fragmenter.



**E1. Évolution temporelle du rayon d'une bulle produite à partir d'une décharge *spark* entre deux électrodes en forme de pointe.** La bulle circonvoit les électrodes et son diamètre, dans le plan de la photo, se confond avec l'axe interélectrode. Il s'agit d'un cas semblable à ceux observés sur les figures 1 et 2. En trait continu, on indique le résultat du modèle de Rayleigh-Plesset. Les ronds blancs désignent les points expérimentaux mesurés dans ce cas. Ce phénomène a été observé au moyen d'une caméra rapide ayant une résolution de 500 000 images par seconde. On observe une succession de phases d'expansion et de contraction. L'interface gaz-liquide, qui est le siège d'instabilités, se déforme au cours du temps. Dans les photos, les électrodes apparaissent en sombre et le liquide apparaît en clair.



d'une onde de choc et à la formation, à l'arrière de cette onde où la densité est plus faible, de ce que l'on nomme un *streamer*, c'est-à-dire une décharge filamentaire transitoire qui part d'une électrode et se propage vers la contre-électrode. Ce *streamer* – de quelques  $\mu\text{m}$  de diamètre – est un milieu dense, où la pression peut atteindre quelques centaines de MPa. Le courant augmente alors fortement et peut atteindre des centaines, voire des milliers d'ampères suivant la puissance du générateur utilisé. Lorsque l'espace entre les électrodes est assez grand, la propagation du *streamer* donne lieu à du branchage, c'est-à-dire une division du *streamer* père en plusieurs *streamers* fils, comme cela se produit communément avec la foudre. Plusieurs modes de propagation peuvent alors être observés selon la vitesse du *streamer* : on parle de propagation en forme de buisson, d'arbre ou de filament. Si l'espace entre les électrodes est trop grand, le *streamer* peut cesser de se propager à une distance appelée distance d'arrêt.

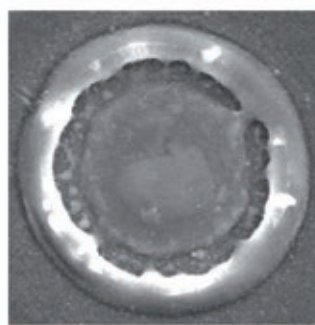
4) Lorsque le *streamer* atteint la contre-électrode, la tension chute fortement du fait de l'établissement d'un canal de plasma conducteur qui correspond à ce que l'on nomme une décharge *spark*, laquelle se distingue d'une décharge d'arc essentiellement par sa durée. On considère en effet que la décharge *spark* n'atteint pas l'état d'équilibre thermodynamique local, état qui caractérise les décharges d'arc. Le courant chute et se met à osciller à une fréquence de quelques MHz. Les électrodes se mettent à fondre, les températures pouvant alors atteindre quelques milliers de degrés, et émettent une vapeur métallique qui va modifier le plasma et dont la condensation va conduire à la formation de particules pour la plupart nanométriques.

5) Lorsque la décharge s'arrête, l'énergie contenue dans le volume du plasma (gaz ionisé) se relaxe en produisant une bulle de cavitation – *i.e.* sans élévation sensible de la température du liquide environnant – qui va se mettre à osciller selon une dynamique qui répond au premier ordre à l'équation de Rayleigh-Plesset (voir encadré), suivant des phases de contraction et d'expansion qui pourront être le siège d'instabilités complexes de l'interface gaz-liquide. Surtout, suite à des travaux récents [4] que l'on décrira plus loin, il se trouve

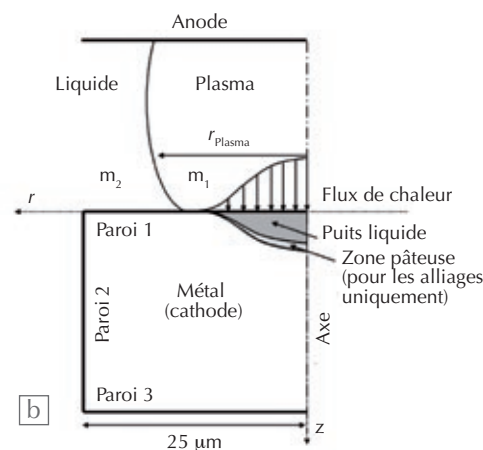
que la manière dont les nanoparticules formées passent depuis la bulle de gaz vers le liquide diélectrique est totalement différente de ce que l'on imaginait jusqu'à il y a peu.

Tous ces phénomènes sont fortement affectés par la polarité de la tension appliquée, selon qu'elle est positive ou négative, par la polarisabilité du liquide utilisé, sa pureté, etc. Récemment, de nouvelles études ont été engagées pour étudier les premiers instants du claquage dans de l'eau soumise à des impulsions picosecondes de l'ordre de 200 kV. À cette échelle, toute expansion hydrodynamique du liquide est impossible parce que la durée de l'impulsion est trop courte. Par conséquent, la densité du milieu reste proche de sa valeur initiale et la décharge est formée directement dans la phase liquide sans qu'il y ait transformation de phase [1]. Lorsque la durée de l'impulsion augmente, l'existence d'une zone de compression induite par électrostriction a pu être démontrée [2]. Cette zone de haute densité est suivie d'une autre, dite de raréfaction, qui serait alors le siège de l'amorçage du *streamer* dans ces conditions très particulières. Sur des échelles de temps plus longues, une couche de vapeur se forme autour de l'électrode et permet l'amorçage du *streamer* [3].

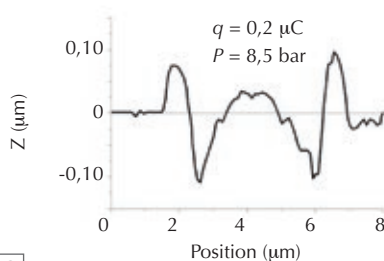
L'une des questions fondamentales qui se posent sitôt que l'on cherche à modéliser la formation d'un *streamer* est celle du comportement d'un milieu ionisé porté à très haute pression. Peu d'approches convaincantes sont disponibles à ce jour. Une difficulté majeure réside dans le fait que le milieu est optiquement épais lors des premiers instants de la décharge, du fait de la haute pression qui y règne. La lumière produite par le *streamer* est en grande partie piégée dans le milieu dont la densité contribue à élargir les transitions optiques, de sorte que l'observation de la lumière émise se limite à de larges continuums dont l'origine est complexe à établir. L'information fournie par l'émission de lumière est alors très pauvre. En effet, plusieurs phénomènes d'importances similaires peuvent être la source de la lumière émise, comme l'émission de corps noir (dû à l'émission de lumière produite par un corps chaud), le rayonnement de *bremsstrahlung* (dit aussi rayonnement de freinage, dû aux électrons libres entrant en collision avec les ions) ou le rayonnement



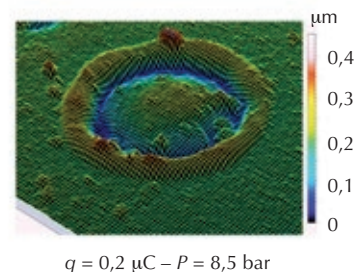
a)



b)



c)



d)

**3. L'interaction d'une décharge spark conduit à la formation d'une zone érodée sur la surface**, dont on peut apprécier en a) une vue de dessus obtenue par microscopie électronique à balayage. L'impact est généralement caractérisé par un bourrelet externe formé par effet Thomson-Marangoni. L'interaction décharge-surface peut être décrite qualitativement et de manière simplifiée selon le schéma b).  $m_1$  et  $m_2$  désignent respectivement le plasma, au-dessus du puits de métal liquide, et le liquide diélectrique qui est ici de l'eau distillée. La distance interélectrode est de 100  $\mu\text{m}$ . Les électrodes sont en aluminium. Des mesures par microscopie à force atomique permettent d'accéder à des profils 2D en c) et 3D en d), afin d'estimer précisément le volume de matière déplacée ou érodée.  $q$  désigne la charge délivrée par le générateur à la décharge.  $P$  est la pression initiale estimée du plasma.

issu de la recombinaison électron-ion, notamment. Par conséquent, on ne dispose que de peu d'information sur cette étape de la décharge. De plus, elle est totalement hors équilibre et nécessite un traitement adapté qui ne peut être celui que l'on applique classiquement pour modéliser un arc, lequel nous l'avons vu est à l'équilibre. L'utilisation de l'équation de Saha notamment, qui établit le lien entre température, densité et degré d'ionisation d'un plasma à l'équilibre, est proscrite dans ce cas.

Enfin, des phénomènes spécifiques se produisent du fait des très fortes pressions appliquées. Par exemple, l'énergie d'ionisation des atomes diminue, de sorte que l'énergie requise pour former  $\text{H}^+$  n'est plus de 13,6 eV, mais de 8,7 eV à une

pression de 1000 atm et une température de 10 000 K. C'est la raison pour laquelle seule la transition  $\text{H}\alpha$  de la série de Balmer est observable dans le cas des décharges dans l'eau, les autres transitions comme  $\text{H}\beta$ ,  $\text{H}\gamma$ , etc. ayant lieu à partir d'états excités dont l'énergie est alors supérieure à celle de l'ion.

### Formation des nanoparticules

Il n'est donc pas étonnant, à la lumière de ce qui vient d'être décrit, que la décharge formée puisse, en raison des conditions extrêmes dont elle est le siège – forte température, forte pression –, éroder les électrodes qui servent à la générer, comme le montre la figure 3.



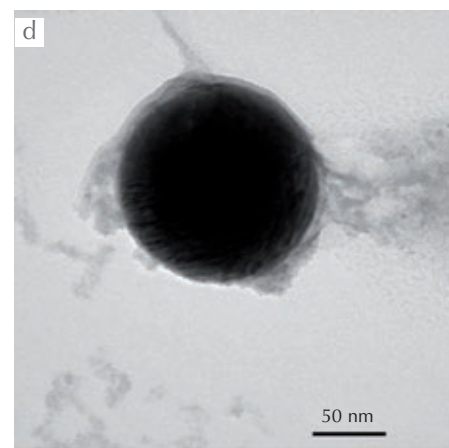
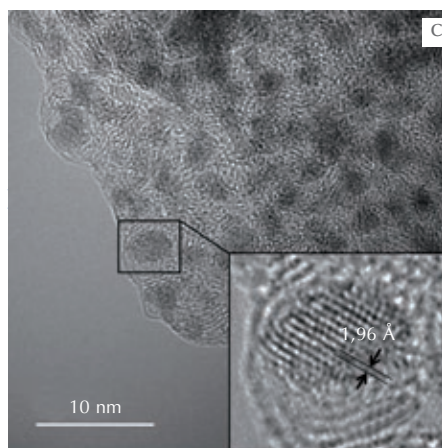
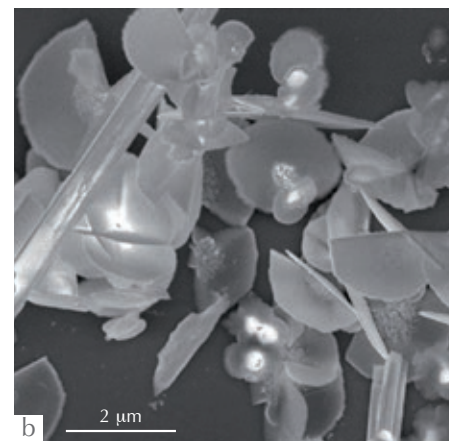
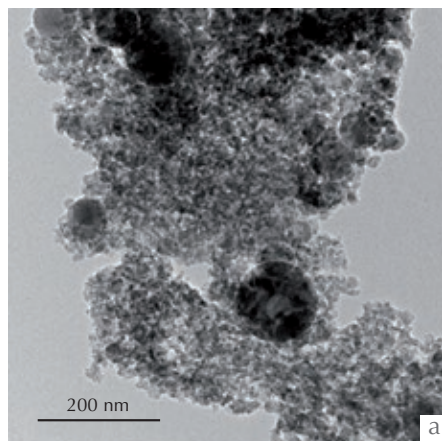
La synthèse de nanoparticules à partir des vapeurs produites par l'érosion des électrodes fait actuellement l'objet de nombreuses études. L'interaction *spark*-surface présente beaucoup de points communs avec l'interaction arc sous vide-surface, utilisée dans certains procédés industriels pour purifier les métaux (refusion à l'arc sous vide) ou pour déposer des films minces (dépôt par arc cathodique).

L'électrode soumise à un courant intense et à la radiation de la décharge s'élève en température et se met à fondre. Si l'électrode est un alliage, le puits liquide formé est séparé de la phase solide par une région dite pâteuse, dont la description est complexe. Le bain liquide est brassé par la force de Thomson-Marangoni qui résulte de la variation de tension superficielle du liquide induite par un gradient thermique. Si le courant est suffisamment intense, le champ magnétique induit peut également contribuer à brasser le liquide. Enfin, la pression du plasma peut permettre l'éjection de particules d'une taille en général submicrométrique (de quelques centaines de nm). Lorsque le plasma n'est plus entretenu, c'est-à-dire lorsque le courant s'annule, la température décroît très rapidement ( $\sim 10^8 \text{ K s}^{-1}$ ) et le bain liquide se fige pour adopter une géométrie finale qui est du type de celle présentée en figure 3.

Ces différents phénomènes conduisent à la formation de trois familles de particules :

- des nanoparticules de diamètres compris entre 2 et 10 nm et formées dans la décharge ;
- des particules de l'ordre de 20 à 100 nm synthétisées en dehors de la décharge, dans les zones plus denses à l'interface avec le liquide ;
- des particules micrométriques produites par l'éjection de métal fondu hors du puits liquide.

Des travaux récents [4] exploitant la diffusion des rayons X aux petits angles et réalisés au moyen d'un rayonnement synchrotron ont permis de montrer que la plupart des nanoparticules étaient piégées dans la bulle de cavitation et ne passaient pas dans le liquide lors de la contraction de la bulle, contrairement à la vision qui était admise jusqu'ici. Ce résultat est essentiel, car il explique que l'agglomération des nanoparticules est dramatiquement plus efficace que celle qui se produit dans le seul liquide.



#### 4. Exemples de nanoparticules formées par des décharges en phase liquide.

- a) Nanoparticules d'alumine formées dans l'eau entre deux électrodes d'aluminium. On distingue nettement deux distributions de tailles :  $\sim 100 \text{ nm}$  pour les sphères gris foncé et  $\sim 5 \text{ nm}$  pour les petits grains autour.
- b) Nanofeuillets d'oxyde de plomb formés dans l'azote liquide entre deux électrodes de plomb.
- c) Nanoparticules de platine (taches sombres) dans une matrice de carbone amorphe hydrogéné (zone plus claire) formées dans l'heptane, un alcane de formule  $\text{C}_7\text{H}_{16}$ , entre deux électrodes de platine. Encart : zoom d'une nanoparticule montrant les plans atomiques de platine séparés de  $1,96 \text{ \AA}$ .
- d) Nanocomposite formé d'un cœur de  $\text{Cu}_2\text{O}$  (sphère sombre) entouré d'une coquille de ZnO (zone plus claire autour de la sphère). Synthèse réalisée dans l'azote liquide, entre deux électrodes de cuivre (1000 décharges), puis entre deux électrodes de zinc (1000 décharges).

Les décharges peuvent être réalisées dans des liquides diélectriques réactifs, comme l'eau qui permet de produire des oxydes (e.g.  $2\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2$ , lorsque les électrodes sont en aluminium), ou les alcanes qui donnent lieu, outre les nanoparticules issues de l'érosion des électrodes, à des nano-carbones (l'ensemble des formes nanométriques que le carbone peut adopter, comme par exemple des nanotubes, des fullerènes, du graphène ou autres), voire à du diamant si les décharges sont assez puissantes.

Elles peuvent aussi être réalisées dans des liquides non réactifs comme les liquides de gaz rares (argon ou hélium liquide) ou

l'azote liquide. Ces liquides non réactifs offrent la possibilité de conserver la nature métallique des nanoparticules.

Grâce à la meilleure compréhension du comportement des décharges dans les liquides, la synthèse de nanoparticules peut être améliorée en :

- dissipant une charge plus faible par impulsion, de manière à réduire la pression du plasma sur le puits liquide et limiter la formation de particules submicrométriques ;
- exploitant la dissymétrie du courant qui oscille entre les électrodes pour chauffer de préférence une électrode plutôt que l'autre, et favoriser la formation d'alliages ;

- favorisant les instabilités de bulles pour accroître la surface d'échange gaz-liquide et permettre un transfert plus efficace des nanoparticules de la bulle vers le liquide. Ceci peut être réalisé, par exemple, en générant la décharge près d'une paroi, ce qui déclenche une impulsion de Kelvin (voir encadré) qui augmente l'interface gaz-liquide. En ce sens, l'utilisation de microréacteurs pourrait permettre de limiter l'agglomération des nanoparticules et tendre vers des distributions de taille plus proches de la monodispersité.

Il est alors possible de former (fig. 4) :

- des nanoparticules de métaux simples ou de leurs oxydes ;
- des nanocarbones, comme des nanofils, des nano-oignons (sortes de fullerènes imbriqués les uns dans les autres ayant l'aspect d'un oignon), des nanocornes (sortes de structures creuses de diamètre variable ayant la forme d'une corne), etc. ;
- des structures dites cœur-coquille, où une nanoparticule d'un matériau donné est enveloppée dans une couche d'un matériau différent. Dans ce cas, on réalise une première série de décharges pour produire des particules du matériau des électrodes choisies ; puis on change d'électrodes et l'on réalise une nouvelle série de décharges pour produire dans le même liquide où se trouvent les premières nanoparticules en suspension une vapeur qui viendra les recouvrir pour former la coquille du composite élaboré. Cette vapeur peut également donner lieu à des nanoparticules simples, mais de manière d'autant plus marginale que la densité de nanoparticules formant le cœur de la structure est grande.

Si la formation de composites est assez simple, celle d'alliages métalliques est, en revanche, particulièrement complexe.

On peut, pour cela, choisir de travailler avec deux électrodes faites de matériaux différents. Dans ce cas, la première difficulté vient de ce que, pour des systèmes binaires comme, par exemple, le zinc et le cuivre qui constituent la base des laitons, les points de fusion des deux métaux sont très différents (419°C pour le premier contre 1085°C pour le second). Leurs fusions ne se produisent donc pas simultanément, ce qui limite leur interaction. Lorsque les points de fusion sont proches, les éléments ne sont pas nécessairement miscibles et l'on obtient au mieux des biparticules formées

par la juxtaposition de deux particules de natures différentes. Enfin, lorsque les éléments sont miscibles, il se produit un phénomène de ségrégation de surface des éléments lorsque la taille des nanoparticules diminue suffisamment, ce qui modifie naturellement la composition des matériaux sélectionnés et surtout leur catalycité, c'est-à-dire leur propension à orienter certaines réactions chimiques qui peuvent se dérouler à leur surface.

Par ailleurs, il est possible d'utiliser directement des électrodes d'alliages métalliques. Dans ce cas, il est fréquent de former, outre la phase recherchée, des phases intermédiaires présentant différentes compositions, ce qui complexifie fortement la récupération de la phase attendue.

Dans tous les cas, les nanoparticules doivent être fonctionnalisées en surface après leur élaboration pour éviter leur coalescence. Cela permet de les conserver individuellement et donc de préserver les propriétés associées à leur taille nanométrique. Cette fonctionnalisation peut être réalisée, par exemple, en ajoutant des tensio-actifs qui modifient la tension superficielle entre deux surfaces de nanoparticules. Cette ingénierie de surface est essentielle pour produire des nanofluides où les particules ne s'agglomèrent pas et donc ne décantent pas, mais restent en suspension. De tels fluides ont des propriétés fortement anisotropes sitôt que l'on applique un champ électrique, les nanoparticules s'alignant alors et modifiant par exemple la viscosité du milieu dans le sens du champ appliqué. Ce principe a été utilisé récemment pour équiper les chars de l'armée américaine de nouveaux systèmes hydrauliques permettant, au moyen d'une boucle d'asservissement contrôlant l'intensité du champ électrique appliqué, d'absorber parfaitement les chocs d'une route accidentée.

## Conclusion

La redécouverte des décharges dans des liquides diélectriques pour des applications inédites a permis d'ouvrir de nouvelles perspectives. Même si une description satisfaisante des premiers instants du claquage n'est toujours pas disponible, des progrès importants ont été accomplis.

Ainsi, la description de l'interface décharge-liquide a beaucoup bénéficié d'expériences réalisées en microgravité. Actuellement, de nombreux travaux s'orientent vers la formation de décharges dans des bulles présentes dans les liquides. On a en effet remarqué qu'il était possible de créer des décharges dans un gaz confiné dans un liquide et que cela pouvait être utilisé pour valoriser certains gaz, comme le méthane notamment. On a également observé qu'il était possible de synthétiser des molécules rares, comme les « diamantoides » qui constituent un petit groupe de composés tridimensionnels ayant une structure semblable au diamant et pouvant servir à la synthèse de nouvelles molécules thérapeutiques. Comme dans certaines conditions on observe une propagation de la décharge à l'interface gaz-liquide, des travaux ont été entrepris pour étudier la formation de décharges sur des bulles de liquides, et même sur des mousses. Ceci pourrait trouver des applications dans le domaine des tensio-actifs utilisés dans des industries comme les biotechnologies ou l'emballage, et dont l'efficacité pourrait être améliorée grâce à la synthèse d'espèces actives produites par les décharges [5].

Les perspectives offertes par les décharges dans les liquides sont considérables, ce qui motive de nombreuses études fondamentales en vue d'améliorer notre maîtrise de ces milieux complexes. ■

## Références

- 1• A. Starikovskiy *et al.*, "Non-equilibrium plasma in liquid water: dynamics of generation and quenching", *Plasma Sources Sci. Technol.*, **20** (2011) 024003.
- 2• M. Pekker *et al.*, "Initiation stage of nanosecond breakdown in liquid", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **47** (2014) 025502.
- 3• L. Schaper *et al.*, "Vapour layer formation by electrical discharges through electrically conducting liquids—modelling and experiment", *Plasma Sources Sci. Technol.*, **20** (2011) 034003.
- 4• P. Wagener *et al.*, "Dynamics of silver nanoparticle formation and agglomeration inside the cavitation bubble after pulsed laser ablation in liquid", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **15** (2013) 3068-3074.
- 5• Yu. Akishev *et al.*, "The interaction of positive streamers with bubbles floating on a liquid surface", *Plasma Sources Sci. Technol.*, **24** (2015) 065021.

# Avec la physique quantique, des technologies nouvelles pour le futur

Michèle Leduc<sup>(1)</sup> (michele.leduc@lkb.ens.fr) et Sébastien Tanzilli<sup>(2)</sup>

(1) Directrice de recherche émérite CNRS au Laboratoire Kastler-Brossel (ENS, UPMC, CNRS) à Paris. Ancienne directrice de l'IFRAF (Institut Francilien de Recherche sur les Atomes Froids).

(2) Directeur de recherche CNRS au Laboratoire de Physique de la Matière Condensée à l'Université Côte d'Azur (UCA) et directeur du GDR IQFA (Ingénierie Quantique des aspects Fondamentaux aux Applications).

La seconde révolution quantique utilise aujourd'hui les concepts quantiques de superposition ou d'intrication d'objets microscopiques que l'on a appris à contrôler individuellement.

Les capteurs tels que gyromètres, gravimètres, horloges à atomes froids fournissent déjà des outils d'une sensibilité insurpassable. Des problèmes impliquant un grand nombre d'objets quantiques en interaction, inaccessibles aux supercalculateurs, trouvent des solutions avec des méthodes de simulation quantique, tandis que les travaux sur l'ordinateur quantique se multiplient. Enfin, les communications à distance vont bientôt pouvoir être mieux sécurisées grâce aux progrès de la cryptographie quantique.

## La seconde révolution quantique

La mécanique quantique a constitué, avec la relativité, une des deux révolutions majeures de la physique du XX<sup>e</sup> siècle. C'est aujourd'hui une vieille dame de cent ans, pas encore réconciliée avec la gravitation relativiste et qui fait toujours beaucoup parler d'elle. Bien que cette théorie n'ait jamais été mise en défaut, la signification de ses concepts fait toujours débat. Pourtant ses applications, parfaitement maîtrisées, continuent de se multiplier.

Les découvertes fondamentales de la mécanique quantique résultent des travaux de Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Dirac, Pauli, de Broglie et bien d'autres au XX<sup>e</sup> siècle. Elles ont permis la compréhension des lois de la constitution de la matière et ont conduit à des avancées technologiques qui ont révolutionné notre vie quotidienne, telles que le transistor, les microprocesseurs, les lasers, le GPS, etc. Les extraordinaires progrès expérimentaux des dernières décennies permettent aujourd'hui d'observer des particules telles que des photons, des atomes ou des ions que l'on a appris à contrôler individuellement aussi bien que collectivement. On peut alors les préparer et les manipuler en utilisant les concepts de superposition d'états quantiques ou d'intrication (voir l'encadré, p. 30). Il en découle un ensemble de nouvelles applications si prometteuses que les États-Unis et la Chine en font des programmes prioritaires, tandis que la Commission européenne lance un nouveau *Flagship* (projet qui sera doté d'un milliard d'euros au total, dont 300 à 500 millions de fonds publics européens)

sur le thème des *quantum technologies*, dont nous évoquons ici plusieurs secteurs où des résultats spectaculaires sont attendus à court ou long terme.

## Des capteurs quantiques pour la métrologie de haute précision

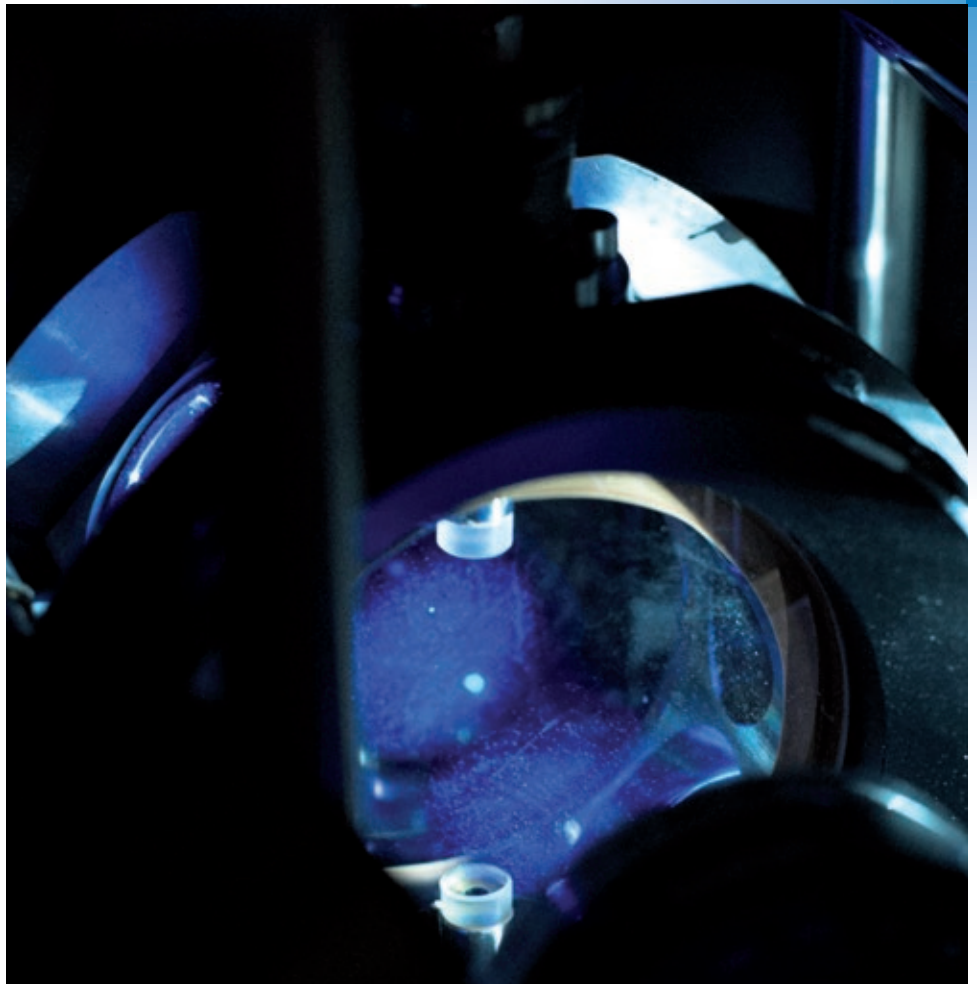
La superposition d'états quantiques est très sensible à l'environnement classique et fournit des capteurs d'une grande précision. Les accéléromètres et gyromètres à atomes froids sont fondés sur l'interférométrie atomique. Ils détectent le déphasage entre les ondes de matière parcourant les deux bras de l'interféromètre (fig. 1). Ce déphasage varie lorsque l'appareil se déplace. On peut ainsi mesurer avec une grande précision l'accélération ou la rotation, et constituer des gyromètres ou des accéléromètres de grande fiabilité pour la navigation inertielle.

Le gravimètre est une variante de ces systèmes interférométriques quand ils sont disposés en position verticale : les atomes tombent sous l'effet de l'accélération de la pesanteur  $g$  que l'on mesure ainsi en valeur absolue en continu et sans limitation de durée, avec une incertitude relative inférieure au milliardième. Les applications attendues concernent la sismologie ou la prospection des ressources minières et pétrolières : l'important programme britannique *Quantum Technology Strategy Initiative* va jusqu'à inclure la relocalisation des canalisations d'eau oubliées dans le sous-sol de la ville de Londres.

Les horloges atomiques (photo ci-contre) sont des systèmes quantiques mesurant la fréquence d'une transition atomique, qui

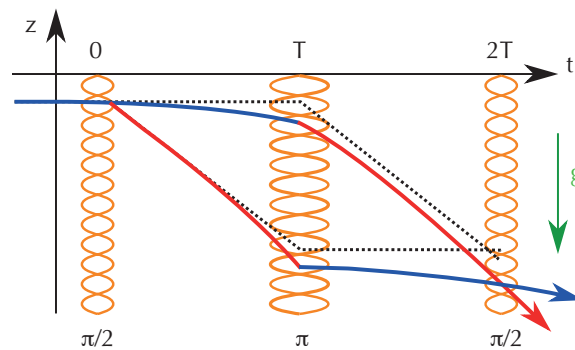
font également usage de l'interférométrie. Les nouvelles générations d'horloges à atomes ou ions froids fonctionnent maintenant dans le domaine optique et atteignent des exactitudes spectaculaires (une seconde de dérive par rapport à l'âge de l'Univers !). Leurs applications sont multiples, couvrant la définition du temps universel impliquant la synchronisation de toutes les horloges sur la Terre, l'amélioration du GPS et la navigation spatiale. Leur sensibilité au déplacement gravitationnel en fait des instruments complémentaires des gravimètres, qui seront utilisés dans le futur pour améliorer notre connaissance du géoïde. Tous ces instruments quantiques de laboratoire vont être rendus plus compacts. Ils sont pour certains en phase de valorisation, comme les gravimètres fabriqués par la société *Muquans* à Bordeaux.

Les progrès croissants dans le contrôle et la réduction des sources de bruits classiques permettront bientôt d'amener la sensibilité de ces capteurs à la limite fondamentale du bruit quantique standard. Les recherches actuelles portent sur la façon de dépasser cette limite en exploitant certains états quantiques du rayonnement ou de la matière, par exemple des états de *spin* dits « comprimés » (*spin squeezing*) : on peut en effet, par des méthodes optiques appropriées, réduire les fluctuations d'intensité d'un faisceau lumineux au détriment de celles de la phase, ou encore celles de la position des atomes d'un gaz au détriment de celles de leur vitesse. Notons que ces mêmes idées de compression des fluctuations quantiques vont être mises en œuvre prochainement pour augmenter la sensibilité



**Photographie de l'horloge optique à strontium.** La lumière bleue est la fluorescence, à une longueur d'onde de 461 nm, des atomes froids de strontium maintenus au centre d'une cavité en ultraviolet. Le nuage atomique (la petite tache bleue au centre) est placé dans un réseau optique 1D créé par un faisceau laser rétro-réfléchi de longueur d'onde 813 nm (non visible sur la figure), qui crée une onde stationnaire dans laquelle les atomes sont piégés. Les petits éléments circulaires blancs au-dessus et en dessous du nuage atomique sont des miroirs dichroïques qui permettent à la fois de former le réseau optique à 813 nm et une cavité à 461 nm pour la détection non destructive des atomes, ce qui va permettre de mettre en œuvre des méthodes d'ingénierie quantique.

(Cortoisie Rodolphe Le Targat, Laboratoire SYRTE, Observatoire de Paris.)

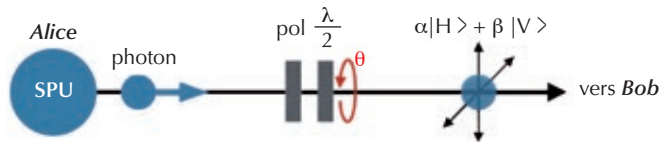


**1. Schéma de principe d'un interféromètre à atomes froids en chute libre.** L'axe  $z$  est orienté selon la direction verticale d'accélération de la pesanteur  $g$ . Les ondes de matière qui arrivent de gauche interagissent trois fois avec des ondes laser stationnaires (en orange sur la figure), qui leur communiquent des impulsions. Après une première impulsion laser, l'onde de matière subit un déphasage de  $\pi/2$  (on parle alors d'impulsion  $\pi/2$ ), lui offrant deux voies de propagation matérialisées par les faisceaux rouge et bleu. Les deux couleurs représentent les deux états quantiques couplés par les lasers, qui diffèrent par leur état d'impulsion. L'impulsion laser  $\pi$  suivante joue le rôle d'un miroir qui redirige les deux composantes de l'onde de matière. Après l'impulsion laser  $\pi/2$  finale, les ondes de matière sortantes interfèrent avec la différence de phase accumulée le long des deux bras de l'interféromètre. Ce déphasage serait nul sans la gravitation (trajets en pointillés). Mais les atomes tombent verticalement : le déphasage est proportionnel à l'accélération de la pesanteur  $g$ , et on le mesure par le déplacement des franges d'interférence. On réalise ainsi un gravimètre.

(Cortoisie : Franck Pereira dos Santos, laboratoire SYRTE, Observatoire de Paris.)

## ► Superposition cohérente d'états, qubits et intrication

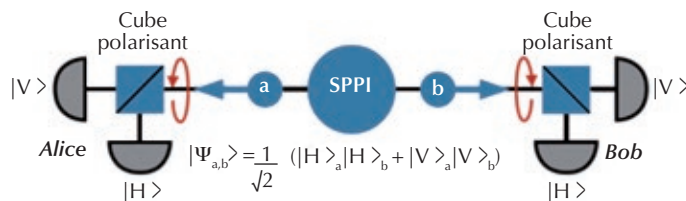
L'informatique classique fonctionne à l'aide de bits qui peuvent prendre des valeurs 0 ou 1, correspondant à des états notés  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ . La physique quantique offre une infinité de possibilités, grâce à l'ensemble des combinaisons données par la *superposition cohérente de deux états de base*  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ . Par exemple, considérons un photon de polarisation horizontale après avoir traversé un polariseur (fig. E1). Si l'on ajoute une lame demi-onde qu'on fait tourner d'un angle  $\theta$  (indiqué en rouge sur la figure E1), on obtient une superposition  $\sin\theta |H\rangle + \cos\theta |V\rangle$  des états de polarisation horizontale  $|H\rangle$  et verticale  $|V\rangle$ . Ceci se traduit par l'obtention d'un *qubit* (contraction des mots *quantum bit*) sous la forme  $\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$ , les poids relatifs  $\alpha$  et  $\beta$  variant avec l'angle  $\theta$  tout en respectant la règle de normalisation  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ .



**E1. Obtention d'un qubit photonique par superposition cohérente de deux états quantiques.** SPU représente une source de photons uniques, située ici chez Alice. La flèche bleue représente la direction de propagation des photons depuis Alice jusque vers Bob. Les flèches à 90° l'une de l'autre sur le photon envoyé vers Bob représentent les deux états de polarisation horizontale et verticale. Les qubits sont codés sur l'observable polarisation par le biais d'un polariseur (pol) et d'une lame demi-onde ( $\lambda/2$ ).

Les qubits photoniques codés sur l'observable polarisation sont couramment utilisés pour la cryptographie quantique, au même titre que les observables temps et fréquence. Des qubits peuvent être constitués à partir de tout système quantique, particule naturelle ou artificielle, présentant deux états distincts qu'on peut produire dans un état de superposition.

L'*intrication* représente la généralisation à deux ou plusieurs systèmes quantiques de la superposition cohérente d'états définis pour la constitution d'un qubit. Pour rester dans le domaine optique (fig. E2), considérons une source (SPPI) qui émet des paires de photons intriqués. La façon la plus courante pour créer une telle source est d'utiliser un cristal non linéaire (non représenté sur la figure E2) qui transforme un photon unique en une paire de photons d'énergie moitié. La paire de photons intriqués doit être considérée comme un tout, c'est-à-dire un système quantique unique composé de deux sous-systèmes, depuis son instant de création jusqu'aux instants où les photons sont détectés, même s'ils sont à grande distance l'un de l'autre. Lorsqu'une mesure est effectuée sur l'un des deux photons, le résultat de la mesure sur l'autre est immédiatement déterminé.



**E2. Obtention d'une paire de qubits photoniques intriqués.**

Ici une source (SPPI) émet une paire de photons (a et b) intriqués, sur laquelle l'information quantique est codée sur l'observable polarisation. La paire de photons est alors préparée dans un état bien défini  $|\Psi_{a,b}\rangle$ , alors que les états des photons individuels ne le sont pas. En d'autres termes, l'information quantique est codée sur l'objet quantique composé des deux photons, depuis la création de la paire jusqu'à sa détection : on parle de *qubits intriqués*. Expérimentalement, les photons sont envoyés à deux utilisateurs distants, Alice et Bob, qui possèdent chacun un cube séparateur de polarisation suivi de deux détecteurs à 90° l'un de l'autre. Ceci leur permet de projeter l'état du photon reçu dans une base d'analyse, ici la base des polarisations horizontale et verticale. En tournant la lame demi-onde (flèche rouge), ils peuvent changer de base d'analyse. Le point crucial est que tant que Bob n'a pas fait de mesure, le photon d'Alice ne possède aucune polarisation définie, puisque seul l'état de la paire compte du point de vue de l'information. Ces propriétés peuvent être exploitées par les deux interlocuteurs pour établir des clés secrètes utiles aux opérations de cryptographie.

>>>

des grands interféromètres optiques LIGO et Virgo qui détectent les ondes de gravitation. Enfin, mentionnons que des techniques spécifiques aux capteurs formés d'objets quantiques uniques sont aussi étudiées en utilisant des effets d'intrication quantique, fournissant des méthodes nouvelles pour l'imagerie ou la résonance paramagnétique électronique.

## La simulation quantique de phénomènes complexes

La conception de nombreux objets complexes de la vie courante, tels que les voitures, les avions, ou les bâtiments publics, fait appel à des ordinateurs très puissants, les supercalculateurs. À l'inverse, ceux-ci sont impuissants pour décrire le comportement de systèmes formés de plus de quelques dizaines d'atomes et pour prédire s'ils vont conduire l'électricité, devenir magnétiques ou produire des réactions chimiques inattendues. L'objectif des programmes de simulation quantique est de répondre à ces questions inaccessibles en mettant en œuvre des méthodes de simulation « à la Feynman », qui parlait déjà de construire « *a quantum machine that could imitate any quantum system, including the physical world* ». Différentes plateformes peuvent être utilisées pour mieux comprendre le comportement de systèmes formés d'objets quantiques en interaction dans des conditions inatteignables avec le système initial. Dans ce domaine, théoriciens et expérimentateurs travaillent conjointement. L'idée générale est que le système artificiel de la simulation quantique obéit aux mêmes équations de la physique quantique que le système initial : il fournit ainsi un résultat transposable pour les propriétés de ce dernier, pour lequel *a priori* le contrôle de chaque élément individuel ne serait pas possible.

Parmi les différentes approches exploitées aujourd'hui pour la simulation quantique, le domaine des atomes froids fournit des outils de choix, autorisant la mise en œuvre d'expériences modèles. En effet, on piège les atomes dans des réseaux optiques créés par des ondes stationnaires issues de faisceaux laser rétro-réfléchis, idéalement un par site du réseau, ou encore on les maintient individuellement en position de réseau avec des pinces optiques (fig. 2). On peut partir d'atomes bosoniques, par exemple initialement dans un état condensé de Bose-Einstein, ou bien d'atomes fermioniques, dégénérés si la température est

abaissée en dessous de la température de Fermi. On simule ainsi les propriétés des électrons fortement corrélés et mobiles à l'intérieur d'un matériau solide.

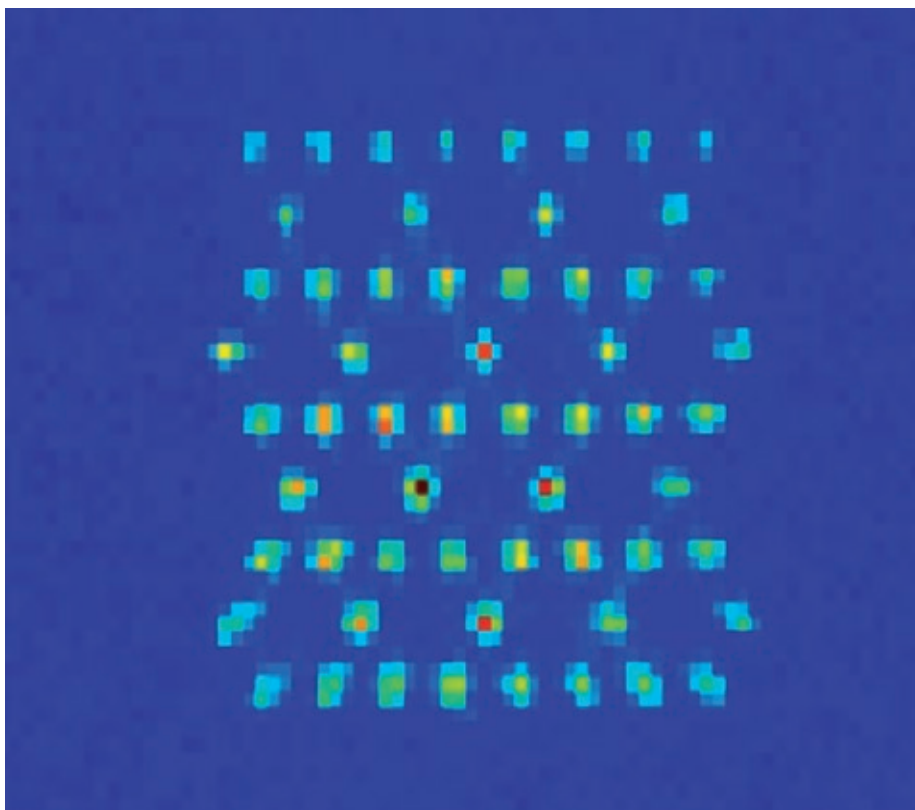
Il existe bien d'autres plateformes expérimentales pour la simulation quantique : des ions froids piégés (fig. 3) ou des molécules froides, des polaritons ou des excitons dans les semi-conducteurs, des réseaux de qubits supraconducteurs ou de boîtes quantiques, ou encore des photons intriqués dans des réseaux de guides d'onde couplés.

Chacune des plateformes mentionnées ci-dessus permet de faire varier à volonté un certain nombre de paramètres associés à la simulation (la température, le nombre des particules, la géométrie du réseau, la portée et même le signe des interactions entre les particules, le couplage éventuel à l'environnement, etc.), mais aucune d'entre elles, et ce quelle que soit l'approche, ne les maîtrise tous à la fois.

On peut simuler ainsi de nombreuses propriétés de la matière : les nouvelles phases quantiques à basse température, le magnétisme, les systèmes quantiques hors équilibre, notamment le transport en présence de désordre, les phases topologiques, les matériaux, etc. Le *Graal* est d'approcher les conditions d'apparition de la supraconductivité à haute température critique, dont l'origine reste encore mystérieuse. L'enjeu est évidemment considérable, car on entrevoit la possibilité de concevoir de nouveaux matériaux capables de conduire l'électricité sans perte à température ambiante, ce qui aurait d'énormes conséquences dans le domaine du transport de l'énergie. Des interfaces se développent aussi avec la chimie quantique, les hautes énergies ou l'astrophysique.

## Le rêve de l'ordinateur quantique

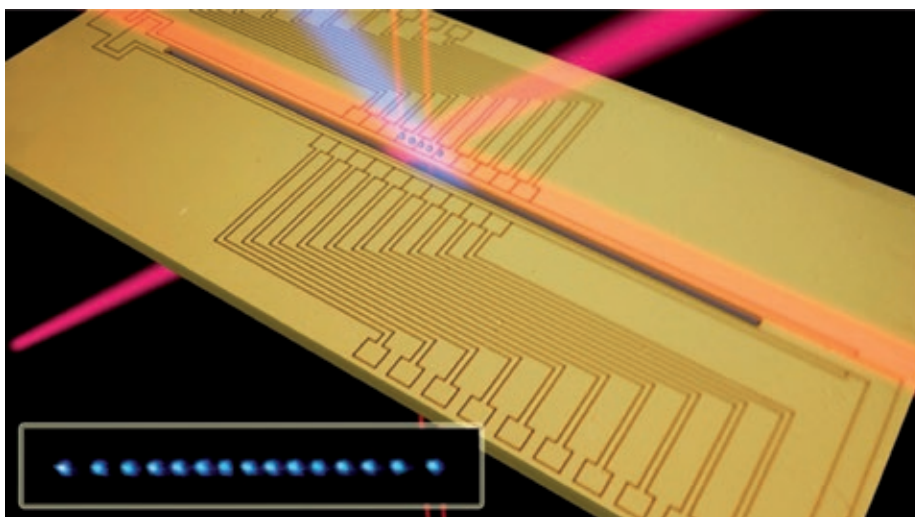
À côté de la simulation quantique, d'autres voies sont aujourd'hui étudiées avec l'ordinateur quantique pour dépasser les limites bientôt atteintes des supercalculateurs classiques. Les enjeux de l'ordinateur quantique sont tels qu'ils suscitent des efforts de recherche considérables dans le monde entier, aussi bien dans le milieu académique que dans les grandes entreprises de l'informatique comme IBM et même d'internet comme Google, qui y investissent des moyens considérables. L'idée est de réaliser des calculs massivement parallèles,



**2. Image de fluorescence d'atomes froids de rubidium maintenus en position par des pinces optiques.**

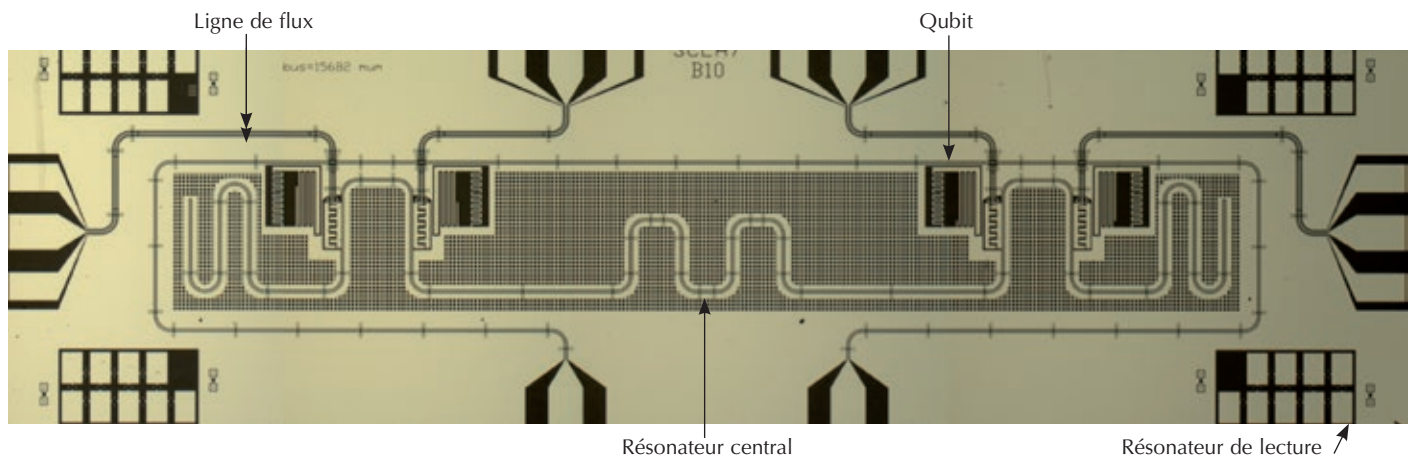
On peut construire avec ces atomes des réseaux 2D de taille micrométrique en choisissant à volonté la géométrie du réseau, ici hexagonal. Deux atomes voisins piégés dans le réseau sont séparés par une distance d'environ 5  $\mu\text{m}$ . Le gradient de couleur au sein des sites (du bleu au rouge) indique la probabilité de présence d'un atome.

(Courtoisie : Antoine Browaeys, laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique Graduate School. Voir aussi son article dans le numéro 47-48 de *Reflets de la physique*, pp. 36-40.)



**3. Image d'ions calcium en ligne, refroidis et contrôlés dans un piège électromagnétique** (on parle de piège de Paul). Au sein du piège, deux ions voisins sont séparés par 10-20  $\mu\text{m}$ . Le piège est réalisé sur une puce électronique, où des fils parcourus par des courants créent les champs électriques et magnétiques nécessaires au piégeage. Les ions à l'intérieur du piège sont détectés par fluorescence à l'aide d'un faisceau laser (ici en bleu). Le système sert pour la simulation et le calcul quantiques.

(Courtoisie : Rainer Blatt, IQOQI, Innsbruck.)



**4. Prototypage de processeur quantique supraconducteur universel à quatre qubits, muni d'une lecture individuelle des qubits.** Des jonctions Josephson entre éléments supraconducteurs et des photons micro-ondes sont les ingrédients de ce processeur, dont la longueur totale est d'environ une dizaine de mm. Chacun des quatre qubits (les petits rectangles au milieu de la figure) est une boîte à paires de Cooper réglable indépendamment en fréquence par une ligne de flux connectée à gauche, en haut ou à droite de la puce. Pour la lecture, la fréquence d'un qubit est approchée de celle du résonateur micro-onde anharmonique auquel il est couplé (carrés avec des zones isolantes noires aux quatre coins de la figure). Chaque qubit est ajustable en fréquence, est équipé d'un résonateur permettant de lire son état quantique et est couplé à un résonateur central utilisé pour les portes logiques à deux qubits.

(Courtoisie : Daniel Estève, groupe Quantronique, SPEC, CEA-Saclay. Voir Dewes *et al.*, *Phys. Rev. B* **85** (2012) 140503.)

### >>>

avec un nombre exponentiellement croissant d'opérations effectuées en même temps. Toutefois, pour définir un champ d'application à ce type d'ordinateur, il faut construire en même temps l'algorithme de calcul quantique approprié. Pour l'instant, on n'a trouvé qu'un petit nombre d'algorithmes pour lesquels le calcul quantique se montre plus efficace que son équivalent classique : les plus connus sont celui de Shor pour factoriser des grands nombres, et celui de Grover pour trouver rapidement une entrée dans une base de données non triées.

Le concept sous-jacent repose sur l'exploitation de qubits (voir l'encadré). Pour construire un calculateur quantique, on fait évoluer avec des portes logiques quantiques un registre des qubits intriqués. Le problème principal réside dans le phénomène de décohérence, qui tend à détruire l'intrication des qubits pendant l'opération de calcul sous l'effet des interactions avec l'environnement. Des briques de base très variées sont explorées pour réaliser ces qubits élémentaires et construire des systèmes suffisamment résistants à la décohérence. Beaucoup s'apparentent aux systèmes déjà décrits plus haut pour la simulation quantique. Le record actuel consiste en une chaîne linéaire d'une vingtaine d'ions calcium refroidis, avec lesquels divers processus élémentaires ont été démontrés (fig. 3). Récemment, des

processeurs quantiques avec des portes logiques à deux qubits ont été réalisés, avec des systèmes supraconducteurs utilisant l'effet Josephson (fig. 4) ou encore à l'aide de systèmes photoniques. Pour tous les systèmes envisagés, une première difficulté est dans la montée en taille du dispositif. Une autre difficulté est de maîtriser les erreurs introduites par les constituants imparfaits du dispositif expérimental, qui font chuter la fiabilité du système. Le nombre d'erreurs augmente extrêmement vite avec le nombre de portes logiques, et des algorithmes de plus en plus sophistiqués sont construits théoriquement pour détecter et corriger ces erreurs. Ajoutons que la programmation d'un ordinateur quantique diffère profondément de celle d'un ordinateur classique et nécessite des recherches nouvelles de la part des informaticiens.

En résumé, si les technologies à développer pour l'ordinateur quantique semblent d'une difficulté extraordinaire, aucune loi fondamentale de la physique n'interdit de les envisager. La compagnie *D-wave* s'est d'ailleurs déjà lancée sur ce marché. Quant aux applications, elles restent encore à déterminer ; certains pensent que c'est la chimie quantique qui devrait en être un important bénéficiaire, d'autres supposent que la puissance de calcul d'un tel ordinateur permettra un jour de casser les méthodes de chiffrement à clé publique de la cryptographie classique.

## Les communications quantiques sécurisées entre villes

Les modes de communication et de traitement de l'information classique ont révolutionné la société depuis quelques décennies : les cinq continents sont reliés par des câbles optiques, l'information est manipulée à très haut débit sans perte sur des distances quasi illimitées. Toutefois, une limitation forte existe s'il s'agit de communiquer l'information de façon sécurisée. Aujourd'hui, elle intervient à chaque instant dans de très nombreux domaines de la vie privée ou publique et devient un problème de société d'importance stratégique pour les particuliers, les entreprises et l'État.

Le domaine de la cryptographie a un long passé qui remonte à l'Antiquité. Les protocoles utilisés pour le chiffrement et le déchiffrement des messages utilisent des codes de plus en plus complexes avec des clés de plus en plus longues, à mesure qu'augmente la puissance des ordinateurs capables de les casser. Une autre stratégie est nécessaire, et la physique quantique intervient alors pour assurer l'inviolabilité des communications à distance sur le long terme.

À l'instar du chiffrement classique, la cryptographie quantique repose sur l'échange de bits générés aléatoirement, sauf que les bits 0 ou 1 deviennent des

superpositions d'états (ou qubits) (voir l'encadré). Pour envoyer des qubits sur de grandes distances, il est approprié d'utiliser des photons comme support, en encodant l'information sur des observables telles que la polarisation de la lumière (voir les figures de l'encadré). Les photons sont émis un à un par des sources dites de photons uniques, à partir par exemple de centres colorés dans le diamant ou d'atomes artificiels basés sur des boîtes quantiques semi-conductrices (*quantum dots*). Les protocoles variés d'établissement quantique de clés de chiffrement utilisent des qubits individuels, d'autres des paires de qubits intriqués, ce qui permet alors de doubler la distance de propagation possible.

L'inviolabilité de la cryptographie quantique résulte de deux théorèmes très fondamentaux, qui régissent les lois suivies par les états quantiques et empêchent leurs utilisateurs de prédire, connaître, ou manipuler le système à leur guise : le premier prédit qu'une mesure unique produit un résultat aléatoire sur un objet quantique préparé dans une superposition de deux états ; le second, dit théorème de non-clonage, montre qu'il n'est pas possible de cloner parfaitement une superposition d'états inconnue au préalable.

La cryptographie quantique sert à générer des clés utilisées ensuite dans des protocoles classiques. C'est une technologie déjà relativement au point, qui donne lieu à des dispositifs produits par quelques petites entreprises. La société suisse ID-Quantique l'a utilisée à plusieurs reprises dans la « vraie vie » et l'a testée, par exemple, pour la distribution des informations sur le vote en ligne dans le canton de Genève. Notons aussi que la ville de Tokyo béné-

ficie depuis 2011 d'un véritable réseau de cryptographie quantique permanent et éprouvé, et que la Chine vise une connexion quantique entre Pékin et Shanghai. Pourtant la méthode ne peut fonctionner actuellement que sur des distances limitées à quelques dizaines de km (un record de 200 km a été enregistré), en l'absence de répéteurs sécurisés. Toute une recherche se développe pour concevoir de tels répéteurs quantiques permettant par exemple de stocker des états intriqués photoniques bipartites en deux endroits distants, puis de synchroniser la réémission des photons.

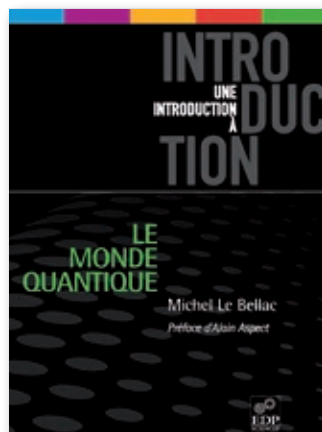
Les recherches actuelles visent à augmenter l'efficacité des sources de photons uniques et de paires de photons intriqués, et aussi de perfectionner leurs détecteurs, dont les pertes peuvent créer des failles dans l'inviolabilité. Aussi, grâce aux récents progrès expérimentaux relatifs à la manipulation cohérente de l'intrication, les chercheurs envisagent aujourd'hui des protocoles quantiques de communication indépendants des systèmes matériels employés (sources et détecteurs). Par ailleurs, de nouveaux protocoles informatiques sont sans cesse inventés : certains visent à introduire la cryptographie quantique dans les systèmes télécom, d'autres envisagent des solutions postquantiques à base de cryptographie classique actuellement non attaquables par l'ordinateur quantique. Enfin, évoquons le rêve que les distances de transmission sécurisée deviennent sans limite avec la téléportation quantique par satellite, envisagée déjà par la Chine. Des années de R&D sont encore nécessaires avant que le grand public dispose d'un internet quantique sécurisé.

## Quel progrès pour l'humanité ?

Pour conclure, on constate que toutes les technologies quantiques évoquées ici étaient inimaginables il y a seulement trente ans. Elles représentent des rêves de physiciens et d'informaticiens, impliquant théories subtiles et expérimentations sophistiquées. On ne sait pas à quelle échelle de temps elles vont déboucher sur des produits commerciaux, mais il est certain qu'elles vont modifier notre vie quotidienne. Est-ce que ce sera pour le plus grand bien de l'humanité ? La sécurité totale et garantie des communications est-elle réellement souhaitable actuellement à l'heure du terrorisme ? À l'inverse, s'il devient possible de casser un jour les clés classiques de sécurité des secrets des États, la géopolitique mondiale s'en trouvera bouleversée. À l'extrême, si la sécurité de l'internet classique utilisé par chacun de nous n'est plus garantie, quelles en seront les conséquences pour le monde dans lequel nous évoluons aujourd'hui ? Les règles éthiques d'utilisation pertinente de toutes ces nouvelles technologies quantiques restent encore à définir. ■

### Pour en savoir plus

- M. Le Bellac, *Le monde quantique*, EDP Sciences (2010).
- F. Bretenaker et N. Treps, *Le laser*, EDP Sciences (2016)
- J. Dalibard, Cours du Collège de France « *Atomes et rayonnement* », [www.college-de-france.fr/site/jean-dalibard/](http://www.college-de-france.fr/site/jean-dalibard/).
- S. Tanzilli, Thèse d'habilitation à diriger des recherches, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00845762/document>.
- M.H. Devoret et R.J. Schoelkopf, "Superconducting Circuits for Quantum Information: An Outlook", *Science* **339** (2013) 1169.



## Le monde quantique

Michel Le Bellac – Préface d'Alain Aspect

EDP Sciences, collection « Une introduction à... », 232 p., 2010, 25 € (version papier), 16,99 € (eBook, pdf)

Notre vie quotidienne est, depuis une trentaine d'années, bouleversée par une révolution technologique qui s'appuie sur des objets comme le transistor ou le laser. Cela n'aurait guère été possible sans l'apport de la physique quantique.

Dans un ouvrage destiné à tout public cultivé mais pas nécessairement scientifique, l'auteur se propose de donner les clés pour comprendre le fonctionnement d'objets emblématiques créés par l'ingénierie quantique, entre autres les horloges atomiques, ou les enjeux de recherches récentes sur les atomes froids, le tout évitant un certain formalisme mathématique élaboré.

Il explore en profondeur les principes de ce qu'Alain Aspect a baptisé la « seconde révolution quantique » fondée sur le concept d'intrication, en traitant aussi bien de questions fondamentales comme la non-localité que des développements récents de la cryptographie et du calcul quantiques.

# Réforme de l'enseignement de la physique au lycée

## Repenser les fondements de la formation

La Commission Enseignement de la Société Française de Physique (SFP) participe aux travaux d'un groupe interassociation en partenariat avec l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie (UdPPC) et l'Union des Professeurs de classes préparatoires Scientifiques (UPS). Nous avons lancé une réflexion autour du programme de lycée et des prérequis pour une formation scientifique fondamentale. Nous avons synthétisé ces réflexions dans une lettre qui a reçu le soutien des physiciens de l'Académie des sciences et est publiée dans le *Bulletin de l'Union des Physiciens* de juillet 2016 et ci-dessous. Cette lettre a été adressée par Sylvie Bonnet, présidente de l'UPS, Michel Spiro, président de la SFP et Vincent Parbelle, président de l'UdPPC, au Conseil supérieur des programmes.

La réforme des programmes de physique-chimie au lycée introduite en 2010 et l'application qui en a été faite ont profondément modifié la formation des jeunes dans ce domaine et creusé le fossé entre la terminale et le supérieur. Nous dressons un bref bilan des effets de cette réforme et soulignons la nécessité d'une action urgente pour les corriger. Plusieurs pistes sont suggérées, qui permettraient d'évoluer vers une situation plus satisfaisante.

### I - Les constats

#### I-1. Une articulation lycée / enseignement supérieur problématique

La situation de l'enseignement de la physique au lycée est actuellement très préoccupante, suite à la mise en place de nouveaux programmes à la rentrée 2010 en classe de seconde. D'une part, les enseignants de lycée constatent qu'une fraction non négligeable des élèves initialement motivés par la physique et capables de réussir s'en détournent. D'autre part, les professeurs de physique-chimie enseignant dans le cycle terminal S, en licence universitaire, en IUT et en CPGE rencontrent de grandes difficultés devant les nombreux étudiants ne possédant pas les capacités transversales (raisonnement et argumentation logique, maîtrise des outils mathématiques élémentaires...) pour construire les apprentissages visés. Ces difficultés, ressenties par la plupart des étudiants dès leur entrée dans le cycle terminal puis dans le cycle post-bac de leur choix, les empêchent de s'investir avec succès dans ces formations alors même que les contenus post-bac ont été revus à la baisse en 2013 en prévision de l'arrivée des nouveaux bacheliers.

#### I-2. Des programmes de physique-chimie pour le plus grand nombre, mais à quel prix et pour quels objectifs ?

Les programmes actuellement en vigueur au lycée mettent l'accent sur l'impact sociétal de la physique, ses aspects historiques et ses développements récents, l'ensemble étant abordé de manière souvent qualitative. Le nombre toujours plus grand de sujets traités dans un horaire disponible toujours plus réduit conduit à des présentations et apprentissages superficiels, basés

principalement sur l'analyse de documents, ce qui entraîne pour beaucoup d'enseignants un sentiment de désarroi et de frustration. Bien que ce programme puisse éveiller l'intérêt de certains élèves et développer leur curiosité, il leur donne une vision naïve de la physique loin de la véritable rigueur scientifique et du recours au minimum de formalisme mathématique que requiert la discipline, particulièrement dans le supérieur. De plus il n'est pas prouvé, et les observations en classe laissent à ce sujet sceptique, que les élèves seraient davantage intéressés par les applications des sciences que par les questions scientifiques en elles-mêmes. De fait, un nombre significatif d'étudiants s'orientant vers la physique découvrent durant leur première année après le bac qu'ils ont fait leur choix sur la base d'une vision erronée. Par ailleurs, les programmes de mathématiques et de physique-chimie ont été conçus indépendamment l'un de l'autre alors qu'une bonne coordination de l'enseignement de ces deux disciplines est essentielle pour chacune d'elles.

Les nouveaux enseignements ont été pensés avec l'intention louable de s'adresser à tous, mais il s'avère qu'ils ne préparent pas les élèves s'orientant vers des études scientifiques post-bac de manière satisfaisante, car ils ne leur donnent que très peu d'éléments solides pour atteindre le niveau d'approfondissement demandé dans l'enseignement supérieur. Le fossé entre la terminale et la première année du supérieur s'est considérablement creusé, entraînant un accroissement du nombre d'échecs. L'assimilation des concepts fondamentaux de la physique et des éléments formels nécessaires pour aborder la modélisation mathématique des phénomènes nécessite manifestement une imprégnation précoce : c'est seulement grâce à une fréquentation répétée des notions sur plusieurs années, avec un degré d'approfondissement croissant et une pratique régulière, que les élèves peuvent s'approprier ces éléments pour aborder progressivement les sujets délicats qui constituent le cœur d'un programme de licence. Il serait inexact de penser qu'un tel enseignement construit sur la rigueur intellectuelle n'aurait de sens que pour des élèves poursuivant en physique au-delà du bac. En effet, de nombreuses notions sont transdisciplinaires, telle celle de « bilan » (étude de la variation absolue ou relative d'une grandeur, de son taux de variation, etc.) ; la rigueur et la capacité de raisonnement que nécessite la maîtrise

*« Si elle se poursuivait, l'évolution actuelle aurait de graves conséquences sur la formation des jeunes, ce qui aurait pour effet d'accentuer le déficit d'ingénieurs prévu dans les années à venir. À terme, elle menacerait la place du pays dans les nombreux champs de recherche se rapportant à la physique. »*

de ces concepts sont des atouts essentiels et valent dans tous les domaines vers lesquels les élèves s'orientent après la terminale ; à l'heure où l'on parle de démocratie participative, il est essentiel de former par les sciences en posant les bases d'une démarche rationnelle qui donnera à terme aux élèves la capacité d'analyser de façon critique des arguments, tout en illustrant comment l'expertise scientifique peut contribuer à certains débats de société.

Par ailleurs, concernant l'approche expérimentale, les programmes actuels mettent en avant la démarche d'investigation et la formation à l'autonomie pour résoudre des problèmes, mais sans donner suffisamment les bases pratiques concrètes préalables et la structuration nécessaire à l'acquisition de celles-ci. En outre, la part de l'horaire dédiée à l'approche expérimentale est laissée à l'appréciation des chefs d'établissement, ce qui engendre de fortes disparités.

## II - Quelques propositions

### II-1. Des propositions qui émanent d'un collectif

La présente analyse a été discutée au sein d'un groupe de réflexion inter-associations (UdPPC, UPS, SFP) qui s'est constitué en juin 2014. Sans nier l'intérêt d'aborder les enjeux de société concernés par les sujets traités, ni d'enrichir l'enseignement en montrant le développement historique de la discipline, il apparaît aujourd'hui aux membres de ce groupe ainsi qu'à une large majorité des enseignants concernés que la « démathématisation » a été poussée bien trop loin et qu'il est indispensable de trouver rapidement un meilleur équilibre en redonnant une place suffisante aux « fondamentaux » pour poser dès le lycée les bases d'une réelle formation scientifique. Dégager ces piliers fondamentaux n'est pas contradictoire avec une approche pluridisciplinaire et un décloisonnement des disciplines scientifiques qui viseraient à illustrer comment un problème scientifique peut être abordé de façon complémentaire par différentes disciplines.

Si elle se poursuivait, l'évolution actuelle aurait de graves conséquences sur la formation des jeunes, ce qui aurait pour effet d'accentuer le déficit d'ingénieurs prévu dans les années à venir. À terme, elle menacerait la place du pays dans les nombreux champs de recherche se rapportant à la physique.

### II-2. Que faire pour améliorer la situation ?

Ce collectif n'a jamais adopté une position nostalgique qui consisterait à scander que « c'était mieux avant ». Il se place au contraire dans une logique constructive qui vise à penser l'évolution de l'enseignement de physique. Les réflexions menées au sein du groupe ont ainsi conduit à proposer plusieurs actions :

- demander la publication des conclusions de l'étude détaillée menée en 2015 sur les programmes de physique-chimie de 2010 ;
- préparer un nouveau programme, en prenant le temps de la réflexion et de la concertation avec les autres disciplines ainsi qu'avec les enseignants sur le terrain ;

- rétablir dans ce programme un « noyau structurant » ; viser une bonne cohérence sur l'ensemble des trois ans du lycée afin d'approfondir les notions essentielles pour bien les ancrer et permettre aux élèves d'acquérir une réelle autonomie ;
- repenser les relations entre disciplines pour faire en sorte que lorsque des notions identiques sont abordées dans des matières distinctes, les enseignements se renforcent mutuellement ; accorder une place toute particulière à la rénovation et au renforcement des enseignements de mathématiques, en envisageant également une initiation plus précoce aux techniques de modélisation numérique ;
- faire apparaître explicitement les capacités expérimentales attendues (les « gammes ») dans une partie dédiée des programmes, afin de mettre en valeur leur caractère indispensable dans la formation scientifique ;
- prévoir qu'en première et terminale une partie de l'horaire dédié à l'approche expérimentale soit consacrée à la réalisation de projets cadrés développant l'initiative et l'autonomie, en s'appuyant sur les capacités acquises les années précédentes ; cette approche expérimentale doit pouvoir être mise à contribution, en cours de formation, pour la résolution de problèmes ;
- réfléchir aux contours des séries actuelles de première et de terminale afin de mettre en place une filière moins généraliste que la section S actuelle, avec une orientation scientifique plus affirmée. ■

#### Membres du groupe inter-association

- Rémi Barbet-Massin** (Professeur CPGE, Lycée Henri IV, UPS, Commission Enseignement SFP)  
**Patrick Boissé** (Université Pierre et Marie Curie, Commission Enseignement SFP)  
**Guy Bouyrie** (Professeur à Talence, Bureau de l'UdPPC)  
**Yann Brunel** (Professeur CPGE, Lycée Henri IV, Comité de l'UPS)  
**Nicolas Decamp** (Université Paris-Diderot)  
**Denis Dumora** (Université de Bordeaux, Commission Enseignement SFP)  
**Denis Gratias** (CNRS Émerite, Commission Enseignement SFP)  
**Bernard Julia** (LPT, ENS, Commission Enseignement SFP)  
**Stéphane Olivier** (Professeur CPGE, Lycée Louis-le-Grand, UPS, Bureau de l'UdPPC)  
**Jérôme Pacaud** (Université de Poitiers, Commission Enseignement SFP)  
**Jacques Vince** (Professeur formateur, ESPE de Lyon, Lycée Ampère, Bureau de l'UdPPC)

#### Ce texte a bénéficié des suggestions et recueilli le soutien des membres de l'Académie des sciences ci-dessous :

Alain Aspect, Alain Benoit, Roger Balian, Sébastien Balibar, Christian Bordé, Marie-Anne Bouchiat, Hélène Bouchiat, Yves Bréchet, Édouard Brézin, Bernard Castaing, Françoise Combes, Thibault Damour, Jean Dalibard, Michel Davier, Bernard Derrida, Daniel Estève, Pierre Fayet, Gérard Férey, Albert Fert, Matthias Fink, Antoine Georges, Étienne Ghys, Thierry Giamarchi, Maurice Goldman, Serge Haroche, Jean-Paul Hurault, Jean Iliopoulos, Denis Jérôme, Daniel Kaplan, Guy Laval, Pierre Léna, Yves Meyer, Jacques Prost, Yves Quééré, Didier Roux, David Ruelle, Erich Spitz, Jacques Villain, Jean Zinn-Justin.



## Prix Gentner-Kastler 2016 (conjoint DPG-SFP) : Astrid Lambrecht

Astrid Lambrecht a 49 ans. Après des études en médecine puis en physique à l'université d'Essen, elle a effectué sa thèse en physique quantique en France, et l'a soutenue en 1995 à l'Université Pierre et Marie Curie. Recrutée chargée de recherche CNRS au Laboratoire Kastler Brossel en 1996, elle a été promue directrice de recherches en 2007. A. Lambrecht a reçu le prix Aimé Cotton de la SFP (2005) et la médaille d'argent du CNRS (2013). Elle est directrice adjointe scientifique de l'Institut de physique du CNRS depuis début 2016.

Astrid Lambrecht a obtenu des résultats remarquables dans des travaux tant expérimentaux que théoriques dans les domaines de l'optique quantique et des atomes froids. Son activité porte principalement sur l'étude des fluctuations du vide, en particulier des forces de Casimir statique et dynamique. Elle a produit depuis une vingtaine d'années des résultats impressionnants par leur qualité, leur originalité et leur variété, résultats qui lui ont valu une reconnaissance internationale exceptionnelle dans la communauté qui travaille sur l'effet Casimir. Plusieurs de ses articles et ouvrages sont aujourd'hui des références dans leur domaine, ainsi ceux

sur l'effet Casimir statique entre deux miroirs métalliques ou celui sur l'effet Casimir dynamique.

La trajectoire d'Astrid Lambrecht est un bel exemple de la capacité que procurent l'optique et la physique atomique d'explorer tous les horizons de la physique, depuis les plus fondamentaux jusqu'aux applications. La force de Casimir, qui est un effet quantique et relativiste dû aux fluctuations du vide, joue un rôle important dans les micro ou nanosystèmes, parce qu'elle domine les autres interactions à cette échelle. À travers ses connections avec la force de van der Waals, elle joue aussi un rôle déterminant

dans de nombreux systèmes d'intérêt chimique ou biologique, et plusieurs des projets d'Astrid Lambrecht sont orientés dans cette direction.

Le rayonnement d'Astrid Lambrecht est également attesté par ses nombreuses collaborations avec des équipes internationales, ainsi que par son rôle remarquable dans l'organisation de conférences de haut niveau et la mise en place d'un réseau européen qui a animé le domaine depuis une dizaine d'années. C'est pour l'ensemble de ces raisons que le prix Gentner-Kastler 2016 lui a été décerné.



## Prix Holweck 2016 (conjoint IoP-SFP) : Zoran Hadzibabic

Zoran Hadzibabic a obtenu son doctorat (PhD) en physique en 2003 dans le groupe de Wolfgang Ketterle (prix Nobel de Physique 2001) au MIT (États-Unis). À l'issue de son doctorat, il a effectué de 2003 à 2007 un séjour postdoctoral au Laboratoire Kastler Brossel (ENS Paris), en collaboration avec Jean Dalibard. Il a ensuite rejoint le Laboratoire Cavendish de l'Université de Cambridge au Royaume-Uni, où il a été nommé professeur en 2014.

Lors de sa thèse au MIT, Z. Hadzibabic a obtenu un résultat majeur, qui a constitué une première mondiale : la condensation de Bose-Einstein d'un gaz de bosons ultrafroids composites, des molécules diatomiques faiblement liées.

Dès son arrivée à Cambridge en 2007, il a formé en quelques années un groupe de réputation mondiale dans le domaine très compétitif de la recherche sur les gaz quantiques dégénérés d'atomes ultrafroids.

Il est remarquable qu'à chaque étape de sa carrière, Zoran Hadzibabic ait obtenu un résultat exceptionnel unanimement reconnu. En 2006, au LKB, il a mis en évidence expérimentalement un résultat théorique

vieux de plus de 30 ans : il a démontré qu'un fluide à deux dimensions (en l'occurrence, un gaz quantique de bosons) peut subir une transition de phase vers un état superfluide, la transition dite de Berezinskii-Kosterlitz-Thouless.

En 2013, il a proposé et mis en place dans une expérience une configuration uniforme dans l'espace de piégeage d'atomes froids qui permet de les étudier sans que le potentiel de piégeage ne les perturbe, ce qui correspond à la réalisation d'un système quantique dont les conditions initiales sont proches d'une situation idéale.

Son résultat le plus récent est la mise en évidence de la dynamique d'une brisure

spontanée de symétrie dans un gaz d'atomes ultrafroids possédant une interaction à courte portée, lors de la transition vers la phase de condensat de Bose-Einstein. La théorie prévoit l'existence d'un exposant dynamique critique universel qui a été effectivement mesuré dans l'expérience.

Entre 1999 et 2014, Z. Hadzibabic a publié 33 articles dans des journaux internationaux, et a contribué à cinq chapitres de livre ou articles de revue. Ce parcours remarquable d'un chercheur reconnu, à la fois créatif et rigoureux, a motivé l'attribution du Prix Holweck 2016 à Zoran Hadzibabic.



## Prix Louis Ancel 2015 (matière condensée) : David Rodney

Ancien élève de l'École des Mines de Paris, David Rodney a effectué sa thèse au Service de Recherches de Métallurgie Physique du CEA/Saclay, sous la direction d'Yves Bréchet et encadré par Georges Martin, thèse soutenue en 1999. Depuis 2013, il est professeur à l'Université Claude Bernard de Lyon, Institut Lumière-Matière, après avoir été maître de conférences à l'Institut polytechnique de Grenoble.

Son travail de thèse, très remarqué à l'époque, sera l'amorce des développements ultérieurs de sa recherche : comprendre les mécanismes élémentaires de la déformation plastique des solides *via* des simulations numériques de type dynamique moléculaire, paramétrées à partir de calculs *ab initio*. Il a en particulier abordé la notion de force sur une dislocation, en calculant explicitement les forces entre atomes du solide contenant

la dislocation, et a fait le lien avec l'approche mésoscopique de Benoît Devincré.

Aujourd'hui, D. Rodney poursuit son travail en l'étendant vers les verres et, récemment, les matériaux fibreux (laine de verre ou laine métallique).

Pour mener à bien tous ces thèmes de recherche au-delà de sa charge d'enseignement, David Rodney poursuit de nombreuses collaborations avec des laboratoires français

et étrangers (séjours sabbatiques au MIT et à l'Université de Chicago).

Il a dirigé 14 thèses et publié plus de 80 articles. Sur un plan plus général, il est un aussi remarquable enseignant que chercheur, toujours enthousiaste et souriant, d'une insatiable curiosité scientifique : en bref, David Rodney est un magnifique prix Ancel.



## Prix Aimé Cotton 2015 (physique atomique, optique) : François Courvoisier

François Courvoisier a 37 ans. Diplômé de l'ENS de Cachan, il a effectué sa thèse de doctorat, soutenue en 2005, sous la direction de Jean-Pierre Wolf (LASIM, Université Lyon 1) sur la spectroscopie ultrabrève de particules d'aérosols et de biomolécules. Il est, depuis 2006, chargé de recherches CNRS à FEMTO-ST (à Besançon), où il est responsable de l'activité laser femtoseconde de puissance.

À son arrivée à l'institut FEMTO-ST en Franche-Comté, François Courvoisier a amorcé un nouveau champ de recherche sur l'optique non linéaire ultrarapide et ultra-intense appliquée à l'ablation laser, combinaison qui n'a pas d'équivalent au niveau international. Il a obtenu des résultats très originaux sur la mise en forme d'impulsions laser pour contrôler la filamentation dans les diélectriques, et ainsi

uniformiser le dépôt d'énergie et optimiser l'ablation.

Ses travaux récents sur l'utilisation de faisceaux non diffractants et de faisceaux accélérants, appliqués au micro et au nano-usinage par laser, constituent une vraie nouveauté et ouvrent des voies en nanophysique et en nanotechnologie. Il a notamment réussi à obtenir des nanopercages extrêmement profonds dépassant l'état de

l'art et les prédictions les plus établies. Ces travaux ont attiré l'attention de la communauté scientifique mondiale.

Auteur de 34 publications dans des revues à comité de lecture, de trois brevets et de 23 conférences invitées, François Courvoisier possède des qualités rares de physicien et d'innovateur. Pour ces avancées remarquables, le jury lui a attribué le prix Aimé Cotton 2015.



## Prix Joliot-Curie 2015 (physique des particules) : Maarten Boonekamp

Physicien expérimentateur des particules élémentaires, expert de l'étude des interactions électrofaibles, Maarten Boonekamp a soutenu en 1999 sa thèse effectuée au Service de Physique des Particules (SPP) du CEA Saclay, sur le sujet de la recherche des bosons de Higgs  $h$  et  $A$  avec le détecteur DELPHI du LEP au CERN. Il est maintenant physicien au SPP.

Maarten Boonekamp s'est ensuite impliqué dans l'expérience ATLAS, où il s'est focalisé sur la mesure de la masse du boson intermédiaire  $W$  chargé. En effet, une amélioration de la précision de cette mesure est importante pour mieux contraindre le Modèle Standard, mais représente un défi majeur dans un collisionneur hadronique. Il a entrepris un travail de longue haleine, minutieux et complexe, impliquant la

maîtrise et la compréhension de nombreux aspects expérimentaux et théoriques. Il a dans ce cadre dirigé plusieurs groupes de travail d'ATLAS, ainsi que celui sur l'interaction électrofaible étendu à l'ensemble des expériences du LHC.

En résumé, Maarten Boonekamp a su développer et mettre en œuvre un projet de recherche de longue durée très pertinent, mais aussi très exigeant. Il est actuellement

coordonnateur d'un projet ERC, pour lequel il s'est entouré d'une équipe dynamique et créative. Il a également su encadrer avec succès quatre doctorants et trois post-doctorants. Il jouit d'une excellente réputation dans la communauté internationale de la physique des particules.

Toutes ces qualités lui permettent de figurer dignement dans le palmarès prestigieux du prix Joliot-Curie de la SFP.



## Prix de thèse René Pellat 2015 (physique des plasmas) : Stéphane Cuynet

Titre de la thèse : *Étude des conditions d'élaboration d'électrodes de pile à combustible PEMFC par procédés plasma*, préparée à Orléans au Groupe de recherche sur l'énergétique des milieux ionisés (GREMI), en cotutelle avec le CEA-Le Ripault, sous la direction conjointe de Pascal Braut (GREMI) et Pierrick Buvat (CEA), et soutenue le 22 octobre 2014.

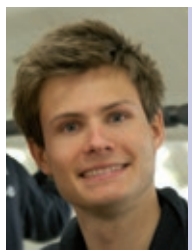
L'objectif de cette thèse était de mettre au point un nouveau dispositif plasma d'élaboration et traitement des composants de cœur de piles à combustible, pour améliorer leurs performances. S. Cuynet a développé et mis en œuvre une source de pulvérisation plasma originale ainsi que les diagnostics du plasma, en particulier l'analyse résolue en temps, en énergie cinétique et en masse des ions de catalyseur pulvérisés, dans le but de réduire la quantité

de catalyseur déposée, tout en améliorant les performances des piles à combustible. Son apport a également concerné l'étude du rôle de la nanostructuration de l'électrolyte polymère de la pile.

Stéphane Cuynet a apporté une contribution exceptionnelle sur ce sujet très interdisciplinaire, mêlant physique, chimie, science des matériaux, électrochimie et ingénierie, en maîtrisant le développement et l'optimisation de nombreux outils originaux allant de

l'alimentation électrique du plasma à la caractérisation des piles à combustible, en passant par un analyseur de distribution d'énergie résolu en temps des ions en post-décharge. Les résultats remarquables qu'il a obtenus permettent d'envisager des applications avec un coût réduit des piles à combustible.

Stéphane Cuynet effectue actuellement un stage postdoctoral à l'Institut National de la Recherche Scientifique, à Varennes (Québec).



## Prix Branly 2015 de la F2S : Rémi Geiger

Diplômé en 2008 de l'École supérieure d'électricité (Supélec) après une spécialisation en physique théorique à l'Université technologique de Berlin, Rémi Geiger a effectué sa thèse de doctorat au sein du laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'optique (Palaiseau). Il est depuis 2013 maître de conférences à l'université Pierre et Marie Curie, et conduit ses recherches au laboratoire Systèmes de Référence Temps-Espace (SYRTE) de l'Observatoire de Paris.

La thèse de Rémi Geiger portait sur l'étude d'un accéléromètre à ondes de matière fonctionnant à bord d'un avion effectuant des vols paraboliques et permettant des expériences en microgravité (0-g). Un interféromètre à atomes de  $^{87}\text{Rb}$  refroidis par laser, et dont les états quantiques sont manipulés à l'aide de transitions Raman stimulées, constitue l'élément physique du capteur. R. Geiger a démontré pour la première fois le fonctionnement aéroporté d'un senseur inertielle à ondes de matière, à la fois en 0-g et durant les phases de gravité des vols (1-g). Il a expliqué comment bénéficier du haut niveau de sensibilité de l'interféromètre dans l'avion, et indiqué des voies d'améliorations significatives de ce dispositif pour le futur. Dans une seconde partie de sa thèse, il a contribué à une expérience d'interférométrie atomique pour un test du principe faible d'équivalence (universalité de la chute libre) avec un double accéléromètre à atomes froids de  $^{87}\text{Rb}$  et de  $^{39}\text{K}$  dont on mesure la différence d'accélération en microgravité.

Après sa thèse, soutenue le 17 octobre 2011 à l'Université Paris Sud 11 (Orsay), Rémi Geiger a effectué un stage postdoctoral à l'Université Technologique de Vienne (Autriche). Ses recherches actuelles, au laboratoire SYRTE, portent sur l'interférométrie atomique et ses applications, les capteurs inertiels et la détection d'ondes gravitationnelles.

Le prix Branly de la Fédération Française de Sociétés scientifiques (F2S) est attribué conjointement avec la branche française de l'association IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) et avec l'Association des amis d'Édouard Branly. Ce prix récompense un-e jeune chercheur-se pour des travaux remarquables dans le domaine des sciences physiques, notamment celui des ondes, de l'optique ou de l'électronique, avec éventuellement une perspective d'application sociale. Une part importante du travail récompensé doit avoir été effectuée en France.

Le prix Branly a honoré de brillants lauréats, comme Rémi Geiger.

### ► Marion Tournon-Branly



De gauche à droite : Étienne Guyon, Rémi Geiger, Marion Tournon-Branly et Georges Salmer, président du jury du prix Branly, lors de la conférence de R. Geiger en janvier 2016 sur l'interférométrie et ses applications.

Marion Tournon-Branly nous a quittés le 15 mai 2016. Membre de l'Académie d'architecture – elle travailla avec Auguste Perret, l'architecte inspiré du Havre –, notre communauté la connut lorsqu'elle s'adonnait à faire vivre la mémoire de son grand-père Édouard Branly, médecin et physicien, renommé pour le cohéreur, le premier récepteur à être utilisé pour les ondes radio. À l'Institut Catholique où il joua un rôle essentiel, elle fut attachée à faire vivre le laboratoire de son aïeul que son père Paul Tournon – grand prix de Rome – avait réalisé. C'est cette femme âgée mais si jeune de cœur et si alerte, qui a soutenu et fait vivre depuis plusieurs décennies le prix Branly.

# GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

## Les derniers titres labellisés par *Grenoble Sciences*

Des ouvrages originaux de niveau LMD  
ou pour un public cultivé  
(Collection *Grenoble Sciences*,  
blanche et colorée)



Des titres « *Selected by Grenoble Sciences* »  
(en anglais, roumain, chinois...)



Un ouvrage  
sur un thème éclairé  
par des expertises variées

■ GRENOBLE SCIENCES



Retrouvez tous les titres sur notre site  
[www.grenoble-sciences.fr](http://www.grenoble-sciences.fr)

Grenoble Sciences, Université Grenoble Alpes, Bât. B de Phitem,  
230 rue de la Physique – CS 40700 38058 Grenoble cedex 9  
Tél. (33)4 76 51 46 95

Email : [Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr](mailto:Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr)

AUVERGNE – Rhône-Alpes

# Retour sur la huitième édition du **Tournoi international des physiciens**



© Jean-François Dais.

Les participants de l'IPT 2016.

## **IPT 2016 : un grand succès**

Du 17 au 23 avril 2016 s'est déroulée à l'ESPCI Paris la huitième édition du Tournoi international des physiciens ("International Physicists' Tournament", IPT, <http://iptnet.info>). Organisé par une dizaine de membres de la Commission Jeunes de la Société Française de Physique, le tournoi se déroulait pour la première fois en France, et a rassemblé environ quatre-vingt-dix étudiants et trente encadrants issus de quatorze pays différents, réunis en quinze équipes (dont deux équipes françaises).

Les étudiants ont présenté, sous la forme de joutes oratoires, leurs réponses à dix-sept problèmes expérimentaux sur lesquels ils avaient travaillé durant neuf mois dans leurs universités. Soutenu par plus de vingt partenaires, pour un budget total d'environ 115 k€ clôturé à l'équilibre, ce projet a été une grande réussite.

La semaine du tournoi a été ponctuée de visites de laboratoires de la région parisienne ainsi que de visites culturelles, permettant à de nombreux jeunes de découvrir Paris et la recherche qui s'y fait. Des animations à destination du grand public avaient aussi été organisées, notamment au Palais de la découverte et à l'Espace des Sciences Pierre-Gilles de Gennes (ESPCI Paris).

Le dernier jour, la finale\* a rassemblé les équipes de Russie (Université d'État de Voronej), de Pologne (Université de Varsovie et Club scientifique Fenix) et une des deux équipes françaises (ENS de Lyon). Au terme de trois heures intenses de joutes, c'est l'équipe française qui a été sacrée championne, suivie par l'équipe polonaise puis par l'équipe russe (le classement complet des quinze équipes est donné dans l'encadré). De nombreux lots ont été remis, en présence notamment d'Alain Schuhl (directeur de l'Institut de physique du CNRS), Jean-François Joanny (directeur de l'ESPCI Paris), Yves Bréchet (Haut-Commissaire du CEA) et

Sébastien Balibar (responsable de la section physique de l'Académie des sciences et président du jury de l'IPT 2016).

L'équipe de l'ENS Lyon et les organisateurs ont par la suite été reçus à l'Académie des sciences lors d'une séance de la section physique, pour présenter leurs résultats et expliquer en détails les concepts du tournoi aux académiciens. De plus, les deux équipes françaises sont invitées à visiter un laboratoire du CEA de leur choix : nous irons donc tous ensemble prochainement visiter le Laser Mégajoule (près de Bordeaux), grand instrument de la défense nationale.

### ► IPT 2016 – Classement

- |   |  |
|---|--|
|  | 1 – <b>France</b> – École normale supérieure de Lyon                   |
|  | 2 – <b>Pologne</b> – Université de Varsovie et Club scientifique Fenix |
|  | 3 – <b>Russie</b> – Université d'État de Voronej                       |
|  | 4 – <b>France</b> – École normale supérieure de Paris                  |
|  | 5 – <b>Allemagne</b> – Université Goethe de Francfort                  |
|  | 6 – <b>Royaume-Uni</b> – Université de Nottingham                      |
|  | 7 – <b>Grèce</b> – Université de Crète                                 |
|  | 8 – <b>Suisse</b> – École polytechnique fédérale de Lausanne           |
|  | 9 – <b>Suède</b> – Université de technologie de Chalmers               |
|  | 10 – <b>Ukraine</b> – Université nationale polytechnique de Lviv       |
|  | 11 – <b>Colombie</b> – Université de Los Andes                         |
|  | 12 – <b>Chine</b> – Université de Nankai                               |
|  | 13 – <b>Australie</b> – Université de Queensland                       |
|  | 14 – <b>Iran</b> – Université Azad et Université Sharif                |
|  | 15 – <b>Espagne</b> – Université Complutense de Madrid                 |

La prochaine édition du tournoi se déroulera en Suède du 8 au 13 avril 2017 (voir <http://2017.iptnet.info/>), et de nombreux nouveaux pays devraient rejoindre l'aventure (Népal, Vénézuéla, Pérou, Brésil et Croatie, notamment).

## French Physicists' Tournament 2017

Le "French Physicists' Tournament" est la version française de l'IPT, et permet notamment de sélectionner l'équipe qui représentera la France lors de la compétition internationale. Organisée par la Commission Jeunes de la SFP, la prochaine édition se déroulera les 3 et 4 février prochain à l'École normale supérieure de Paris. Neuf équipes sont inscrites, et la rencontre s'annonce palpitante ! Les joutes sont publiques, et nous invitons donc tous les curieux à nous rejoindre (informations sur <http://france.iptnet.info/>).

Le tournoi est un événement fédérateur des universités et grandes écoles au niveau français, mais aussi bien sûr au niveau international. De plus, c'est une façon originale de valoriser le travail des étudiants, notamment grâce à des publications qui suivent généralement. À ce titre, nous sommes en train de lancer avec EDP Sciences une revue innovante, spécifiquement orientée pour ce type d'événement (la parution du premier numéro est prévue en janvier 2017).

## Appel aux responsables pédagogiques

Nous mettons beaucoup d'efforts dans la diffusion du tournoi auprès des universités, et notamment en régions. Les établissements participant au tournoi reconnaissent tous la préparation du French Physicists' Tournament au même titre qu'un cours, en délivrant à ce titre des points ECTS à leurs étudiants et en attribuant des heures d'enseignement (monitorat, par exemple). La préparation du tournoi remplace la plupart du temps des projets expérimentaux ou des travaux pratiques, ce qui permet aux étudiants de ne pas alourdir leurs emplois du temps.

Si vous êtes responsables de formation, nous vous invitons à vous rapprocher dès maintenant du comité d'organisation du tournoi ([fpt@sfpnet.fr](mailto:fpt@sfpnet.fr)) pour préparer votre participation en 2018, le travail des étudiants devant démarrer dès septembre/octobre 2017.

**Maxime Harazi**

Président du French Physicists' Tournament et de l'IPT 2016 ([fpt@sfpnet.fr](mailto:fpt@sfpnet.fr))  
Président de la Commission Jeunes de la SFP ([jeunes@sfpnet.fr](mailto:jeunes@sfpnet.fr))

\* disponible en intégralité sur notre site.



L'équipe gagnante (ENS Lyon). De gauche à droite : Nicolas Taberlet (encadrant), Jérémy Sautel, Andréane Bourges, Axel Guittonneau, Arsène Chemin, Corneliu Malciu, Clément Gouiller, Nicolas Plihon (encadrant), Aude Caussariou (encadrante).

## La didactique dans sa relation avec les autres disciplines

3<sup>e</sup> week-end des jeunes chercheurs de l'ARDIST

L'ARDIST (Association pour la Recherche en Didactique des Sciences et des Technologies), créée en 1998, est une association francophone qui regroupe des chercheurs, des enseignants-chercheurs, mais aussi des enseignants, formateurs et médiateurs, et qui a pour but de promouvoir la recherche sur l'apprentissage, l'enseignement, la diffusion des sciences et des technologies, et sur la formation qui s'y rattache. On compte en France dix-huit laboratoires comportant des chercheurs en didactique des sciences et des technologies.

Depuis 2014, l'ARDIST organise des week-ends des jeunes chercheurs (WEJCH), doctorants et docteurs en attente de CDI concernés par la didactique et l'enseignement des sciences expérimentales et de la technologie. Le travail y est orienté sur trois axes : donner l'occasion aux jeunes participants de faire une communication ; échanger avec des experts sur le thème du WEJCH et la formation professionnelle ; tisser un réseau et connaître les travaux des autres laboratoires.

Cette année, le WEJCH s'est tenu du 14 au 16 octobre, au centre UCPA de Bois-le-Roi (77590). Le thème retenu était l'interdisciplinarité au sens large de « La didactique dans sa relation avec les autres disciplines » : relations entre la didactique et sa discipline de référence, entre didactiques, entre la didactique et les autres champs des sciences humaines et sociales.

Il était proposé aux jeunes chercheurs de présenter et/ou de discuter de la façon dont leur recherche entre en relation avec d'autres disciplines, à travers les questionnements suivants :

- Comment l'autre discipline, par ses caractéristiques propres, influence-t-elle votre recherche en didactique ? Qu'en est-il de la relation inverse ?
- Quels apports et difficultés la communication entre ces champs vous paraît-elle susciter ?
- Quelles sont les conséquences méthodologiques de cette « interdisciplinarité » sur votre travail ?

Le WEJCH a reçu 25 inscriptions pour 20 présents et 17 communicants, incluant les participations de chercheurs belges, espagnols, suisses, ainsi que de Tunisie et du Cameroun (communication par Skype). Le séminaire a bénéficié de plusieurs subventions, dont celle de la Société Française de Physique.

► Informations, adhésion à l'ARDIST et contact :

[www.ardist.org](http://www.ardist.org)

# Eva Pebay-Peroula : un parcours original, de la physique atomique à la biologie structurale

Interview réalisée par Claire Schlenker, de la commission Femmes et Physique (F&P) de la Société Française de Physique, le 4 mai 2016, dans les nouveaux locaux spacieux de l'Institut de Biologie Structurale (IBS), sur le campus EPN (European Photons and Neutrons) du Polygone scientifique de Grenoble. Ce campus regroupe l'ILL (Institut Laue-Langevin, source de neutrons), l'ESRF (source européenne de rayonnement synchrotron), ainsi qu'un laboratoire de l'EMBL (European Molecular Biology Laboratory).

**F&P :** Eva, tu as 59 ans, tu es professeure à l'Université Joseph Fourier (Université Grenoble Alpes), spécialiste de biologie structurale. Ta brillante contribution à la compréhension des fonctions des protéines membranaires t'a conduite à l'Académie des sciences. Peux-tu nous expliquer comment est née ta vocation scientifique ?

**Eva Pebay-Peroula (EPP) :** Mon parcours n'a pas été direct. J'étais très intéressée par les sciences dès mes études secondaires au lycée Stendhal de Grenoble. Je me suis donc orientée vers les classes préparatoires aux grandes écoles. Passionnée par la météorologie, je suis entrée dans une école de météo. Déçue par ce domaine, j'ai démissionné au bout d'une année. Je me suis réorientée vers des études de physique à la Faculté des Sciences de Grenoble, en vue d'une carrière dans l'enseignement. Après une maîtrise de physique, j'ai été reçue à l'agrégation de sciences physiques. J'ai ensuite enseigné deux ans dans l'enseignement secondaire. Lors de mon congé d'une année pour la naissance de mon premier enfant, j'ai entrepris la préparation d'un DEA de physique, matière et rayonnement (Master 2). Ce n'est que le jour de ma soutenance de stage de DEA que, frappée par l'intérêt du jury pour mes travaux, un déclic s'est produit, et j'ai alors décidé de m'orienter vers la recherche. J'ai ensuite préparé une thèse en physique atomique sous la direction de Rémy Jost, au sein du Service national des champs intenses (maintenant le laboratoire LNCMI).

**F&P :** Quelle est l'origine de ton orientation vers la biologie structurale ?

**EPP :** Comme il y avait alors très peu de postes en physique atomique, j'ai d'abord été détachée de l'enseignement secondaire au CNRS pendant une année. J'ai ensuite obtenu pendant cinq ans un poste de scientifique à l'ILL, alors que je n'avais aucune compétence en diffusion neutronique. Je me suis orientée vers la biophysique, guidée par Jo Zaccai, puis introduite à la biologie structurale par Mogens Lehmann et Claudine Cohen-Addad. Après deux années, j'ai pu obtenir en 1989 un poste de Maître de conférences en physique/biologie structurale à l'Université Joseph Fourier (UJF), tout en poursuivant mes recherches à l'ILL. J'ai rejoint l'Institut de Biologie Structurale qui a été créé en 1992. L'atmosphère qui régnait à l'ILL dans les années 1989-92 était très stimulante, en particulier sous l'impulsion de Bernard Jacrot qui a beaucoup œuvré pour l'interface physique-biologie et la biologie structurale, et grâce au rôle moteur de Dick Wade.

**F&P :** Comment s'est déroulée ensuite ta carrière ?

**EPP :** J'ai pu développer dans les années 90 deux nouveaux sujets, sans beaucoup de contrainte, car nous étions alors des pionniers. Mon sujet principal était l'étude des protéines membranaires, sujet que j'ai mené en collaboration avec J.P. Rosenbusch de l'Université de Bâle, en commençant avec des porines bactériennes. J'ai aussi abordé le problème des ribosomes, en collaboration avec



Eva Pebay-Peyroula est née en 1956.

## Parcours

- 1979 Agrégation de sciences physiques
- 1979-1981 Professeure de lycée
- 1986 Thèse de doctorat en physique atomique, soutenue à l'UJF
- 1986-1987 Détachement au CNRS, Service national des champs intenses, Grenoble
- 1987-1992 Scientifique à l'Institut Laue-Langevin
- 1989-1995 Maître de conférences, puis, depuis 1995, Professeure à l'UJF
- 2004-2014 Directrice de l'Institut de Biologie Structurale (IBS)
- Depuis 2006 Membre de l'Institut Universitaire de France (IUF) senior
- 2010-2012 Présidente du Conseil d'administration de l'Agence nationale de la recherche (ANR)

## Distinctions

- 2004 Membre de l'Académie des sciences
- 2005 Médaille d'argent du CNRS
- 2016 Officier de la Légion d'honneur

[eva.pebay-peyroula@ibs.fr](mailto:eva.pebay-peyroula@ibs.fr)

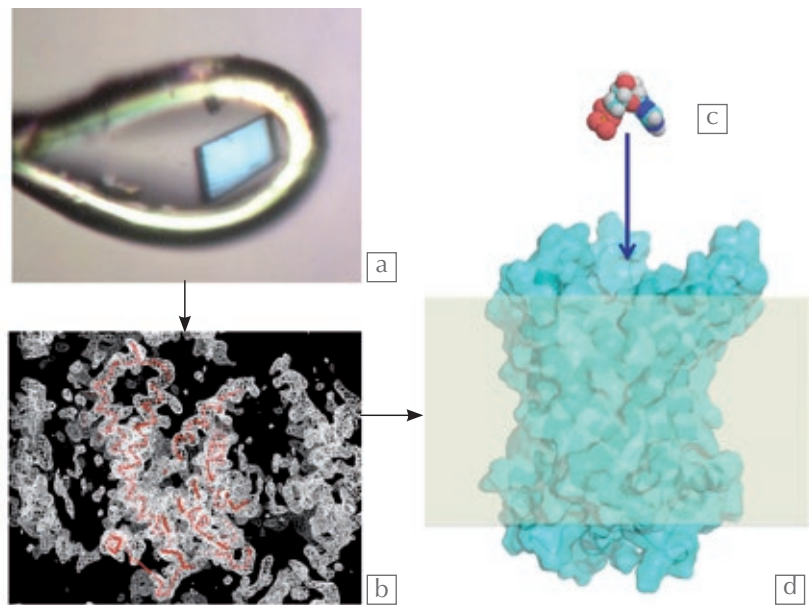
### 1. Illustration d'un mécanisme cellulaire : le transporteur AAC permet aux nucléotides ATP et ADP de traverser la membrane qui protège la mitochondrie, un des compartiments internes de la cellule.

(a) Le cristal de AAC, d'environ  $40 \times 20 \times 5 \mu\text{m}$ , maintenu dans une boucle de nylon, est placé dans le faisceau de rayons X sous un flux d'azote refroidi à 100 K, pour limiter les dégâts d'irradiation pendant l'enregistrement des données de diffraction.

(b) La carte de densité électronique expérimentale (en blanc), obtenue grâce au rayonnement synchrotron de l'ESRF, a permis de tracer les hélices formées par l'enchaînement des acides aminés de AAC (en rouge), dévoilant ainsi le squelette d'une grande partie de la protéine.

(c) Schéma d'une molécule d'ADP, à la même échelle que la molécule AAC en (d).

(d) Structure atomique de AAC, obtenue avec une résolution de 2,2 Å. AAC comporte 293 acides aminés et plus de 4000 atomes. La surface de la protéine est représentée en cyan et laisse montrer par transparence son squelette. La structure a révélé une cavité ouverte vers l'extérieur (en haut sur la figure) prête à recevoir une molécule d'ADP (représentée en (c)) et permettre son passage de l'autre côté de la membrane (schématisée par le rectangle beige). La flèche bleue montre comment le nucléotide va entrer dans la cavité du transporteur.



Ada Jonath (Prix Nobel de chimie en 2009). En 1995, j'ai obtenu un poste de professeure à l'UJF et ai été de 1994 à 1999 membre junior de l'Institut Universitaire de France. J'ai poursuivi l'étude des membranes et ai pu créer à l'IBS une jeune équipe universitaire, grâce au soutien de Daniel Bloch et Claude Feuerstein, alors présidents de l'UJF. En 1995, une nouvelle approche de cristallisation de protéines membranaires a été inventée par l'équipe de J. Rosenbusch. Dans les années 1995–2000, j'ai collaboré avec cette équipe pour participer au développement de cette méthode. J'ai étudié, toujours en collaboration avec J. Rosenbusch, des rhodopsines bactériennes, protéines qui ont la capacité d'absorber la lumière visible et d'utiliser cette énergie pour des processus cellulaires importants. L'une d'elles réalise, grâce à cette énergie, la synthèse de l'adénosine triphosphate (ATP), ce qui constitue le premier maillon de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique utilisable par la bactérie.

#### F&P : Quelles sont tes activités de recherche plus récentes ?

EPP : J'ai étudié ensuite un transporteur mitochondrial, appelé AAC, qui permet d'exporter l'ATP synthétisé dans la mitochondrie. La molécule d'ATP s'hydrolyse en ADP en libérant de l'énergie. La plupart des réactions enzymatiques réalisées dans la cellule utilisent cette énergie. La mitochondrie, compartiment cellulaire dans lequel s'effectue la régénération d'ADP en ATP, est donc une véritable usine énergétique de la cellule. Les résultats obtenus, notamment grâce aux études à l'ESRF, étaient les premiers sur cette famille de transporteurs. La résolution de la structure, publiée en 2003, avait bénéficié d'une excellente collaboration avec G. Brandolin, biochimiste au CEA Grenoble. La structure a permis de comprendre comment l'ADP peut entrer dans une énorme cavité (fig. 1). Grâce à la collaboration avec l'équipe de C. Chipot, chimiste théoricien de Nancy, nous avons pu comprendre que l'ADP, molécule portant trois charges négatives, est attiré grâce au potentiel électrostatique créé par le

transporteur AAC. Nous avons aussi pu expliquer les causes moléculaires de dysfonctionnement dû à des mutations de ce transporteur, identifiées chez des personnes atteintes de certaines formes de myopathies. Avec mon équipe, je poursuis ces études sur d'autres types de transporteurs.

#### F&P : Quelles responsabilités as-tu eues au cours de ta carrière ?

EPP : J'ai dirigé mon équipe de recherche depuis les années 1990, avec d'abord trois à quatre personnes et aujourd'hui une dizaine. J'ai été directrice adjointe de l'IBS de 2002 à 2004, puis directrice de 2004 à 2014. J'ai aussi été présidente du Conseil d'administration de l'Agence nationale de la recherche (ANR), de 2010 à 2012.

#### F&P : Comment as-tu réussi à concilier vie familiale et vie professionnelle ?

EPP : J'ai trois enfants et j'ai dû changer de thématique dans les années 80 car je ne pouvais quitter Grenoble, mon mari étant en poste dans cette ville. J'ai dû sacrifier des loisirs lorsque mes enfants étaient petits. Je suis très organisée et mon mari a toujours participé aux tâches familiales. J'ai limité les déplacements et n'ai effectué que de courts séjours à l'étranger. Je suggère qu'on développe l'organisation de vidéoconférences, qui peuvent éviter des déplacements fatigants. J'ajoute que j'ai dû me « battre » pour m'imposer dans le milieu de la biologie structurale. Bien qu'il y ait environ 50% de femmes à l'IBS, il n'y a aujourd'hui que trois femmes sur dix-huit responsables de groupe.

#### F&P : Quels conseils donnerais-tu aux jeunes filles ?

EPP : Je leur recommanderais d'être très persévérantes. La période la plus difficile pour une mère de famille est quand ses enfants sont très jeunes. Mais cette période est limitée. Mener de front une carrière et des responsabilités familiales permet d'avoir une vie riche et équilibrée. ■

**Michel Soutif (1921-2016)***Souvenirs personnels d'un étudiant grenoblois vers 1960*

Michel Soutif en 2004.

Michel Soutif s'est éteint le 28 juin 2016, à l'âge de 94 ans. Pour la Société Française de Physique, dont il fut président en 1971, c'est la perte d'un immense pédagogue, d'un grand physicien et d'un très grand administrateur de la science ; pour beaucoup de ses membres, celle d'un grand monsieur, accessible, amical, enthousiaste et chaleureux.

Arrivé à Grenoble en 1951 avec son équipe de résonance magnétique du laboratoire d'Yves Rocard à l'École normale supérieure, dont il était sorti cacique (premier) de l'agrégation de physique, il dirige à partir de 1958 le Laboratoire de Physique Générale de la Faculté des Sciences, et est *ipso facto* le responsable de l'enseignement de la Licence de Physique, où le jeune étudiant que j'étais en septembre 1959 voulait s'inscrire. Et là, premier choc mémorable et positif : Monsieur Soutif, comme sa secrétaire, avaient travaillé les « trombinoscopes » constitués des photos d'identité demandées ; moi qui me croyais complètement anonyme, je suis accueilli par un « Bonjour Monsieur Schlenker » de la secrétaire d'abord, du directeur de la Licence ensuite. Une année plus tard, accédant aux enseignements (mécanique physique et optique) de la Licence où intervenait Monsieur Soutif, deuxième choc : des cours de rêve, tellement clairs, appuyés par des gestes et un

langage imagé, qu'il me semble évident que je n'ai pas besoin de prendre des notes puisque tout coule tellement de source. Bien entendu, essayer de reconstituer l'enchaînement une fois de retour dans ma chambre était une autre affaire, et je compris alors le mode d'emploi pour un étudiant lambda comme moi : ne surtout pas se laisser aller à l'impression de compréhension inéluctable que donnait son exposé lumineux, et se forcer à prendre au moins quelques notes !

Pendant sa retraite, M. Soutif continue d'enseigner autour des sciences et de l'Extrême-Orient, dont les cultures le passionnent, soit dans le cadre universitaire ou dans celui de l'UIAD, université inter-âges du Dauphiné ; des livres<sup>(1)</sup>, toujours clairs comme ses exposés oraux, accompagnaient ces enseignements. Il a aussi mis ses talents au service de l'Académie Delphinale, dont il fut président de 2004 à 2006.

Michel Soutif avait coutume de dire qu'il serait fini le jour où il ne pourrait plus enseigner. Il n'a pas connu cette déchéance, et a continué jusqu'à la fin ses cours à l'UIAD, éblouissant ses auditoires par sa maîtrise, sans notes, des noms chinois, en transcription pinyin comme en idéogrammes.

Président du Département de Physique, il instaure un style de direction qui marquera l'université : aller jusqu'au bord de l'administrativement correct pour mener à bien les actions qu'il estime nécessaires et justes, que ce soit pour des institutions ou pour des individus. Ainsi, il contribue à la création en 1963 d'une Section Préparatoire à l'Enseignement et à la Recherche (SPER), expérience d'avant-garde de sélection d'étudiants brillants. La joie d'avoir trouvé une astuce pour dépasser l'administrativement correct, à la manière d'un bon canular, se lisait sur son visage.

Il est élu en 1971 premier président de l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble (USMG), devenue ensuite l'Université Joseph Fourier (UJF), intégrée maintenant à l'Université pluridisciplinaire de Grenoble Alpes. Il en fut aussi vice-président chargé des relations internationales, conduisant des coopérations de long terme avec le Mali comme avec la Chine et bien sûr avec des pays européens, dépassant largement le cadre de la physique. Ainsi il existe un hôpital francophone, fondé sur les coopérations avec la partie médicale de l'USMG, à Shanghai.

En 1966, l'année même où il obtient pour l'ensemble de ses travaux de résonance magnétique le Grand Prix Félix Robin de la Société Française de Physique, il fonde le Laboratoire de Spectrométrie Physique, qu'il dirigera jusqu'en 1977, et dont le caractère pluridisciplinaire justifiera largement le passage à un nouveau nom : le LIPHY (Laboratoire Interdisciplinaire de Physique). Les thèmes de ce laboratoire couvrent, entre autres, la spectroscopie des ondes centimétriques et leurs applications aux télécommunications (thème initial de Michel Soutif), la cristallographie des matériaux d'intérêt biologique et la planétologie ; et le laboratoire est fortement impliqué dans les trois Grands Instruments internationaux de Grenoble : l'Institut de Radioastronomie Millimétrique IRAM, l'Institut Laue-Langevin (neutrons) et l'ESRF (source européenne de rayonnement synchrotron).

Michel Soutif fut aussi un promoteur des relations entre laboratoires de recherche universitaires et industrie, avec une équipe industrielle installée dans son laboratoire dès 1958. Il consacra beaucoup d'énergie à encourager la création d'une industrie française de l'instrumentation scientifique.

Il avait été très affecté, en octobre 2015, par le décès de son épouse Ruth.

Michel Soutif a énormément apporté à la communauté des physiciennes, physiciens... et historiens des sciences. Ce fut un scientifique brillant, original, et une personnalité très présente, pètrie d'humanité. Nous avons tous bénéficié de ses talents de physicien et de bâtisseur qui ont contribué, avec d'autres personnalités, dont Louis Néel qui l'attira à Grenoble, à construire un site original tant de physique académique que de physique dans l'entreprise.

**Michel Schlenker**  
Membre de la SFP

(1) Parmi les livres de Michel Soutif, signalons plus particulièrement *Vibrations, propagation, diffusion* (Dunod, 1970), *L'Asie, source de sciences et de techniques* (EDP Sciences, 1995), *Fondements des civilisations de l'Asie : Science et Culture* (EDP Sciences, 2009), *Naissance et diffusion de la physique* (EDP Sciences, 2014).

## Remarques sur l'article *Qui a découvert la fission nucléaire ?* paru dans le numéro 50 de *Reflets de la physique*, page 30

Jacques Treiner a écrit un article fort documenté sur la découverte de la fission nucléaire. Je souhaite apporter quelques compléments et ajouter quelques commentaires.

À partir de l'automne 1934, Lise Meitner et Otto Hahn décident de reprendre leur collaboration physicienne-chimiste, interrompue depuis plusieurs années, pour tenter de démêler l'écheveau des multiples radioactivités observées par Enrico Fermi *et al.* lors du bombardement de l'uranium par des neutrons et attribuées à des éléments transuraniens. Les chercheurs de Berlin s'efforcent d'identifier ces transuraniens potentiels et de comprendre leurs désintégrations successives. Leurs résultats donnent lieu à plusieurs publications.

Au début de 1938, à Paris, à l'Institut du Radium, Irène Joliot-Curie et Paul Savitch découvrent, par une méthode différente, un nouveau corps radioactif de période 3,5 heures, ressemblant à du lanthane, non encore observé à Berlin (*CRAS*, 206 (1938) 906). L. Meitner et O. Hahn ne croient pas à ce résultat.

Cependant, en mars 1938 a lieu « l'Anschluss » de l'Autriche par l'Allemagne. Lise Meitner, Autrichienne d'une famille d'origine juive, va se trouver menacée ; après de multiples démarches infructueuses d'Otto Hahn et de plusieurs de ses collègues, elle est contrainte de fuir et de s'exiler aux Pays-Bas le 13 juillet 1938, puis en Suède. Par la suite, Hahn et Meitner demeureront en étroit contact épistolaire.

Fin juillet, paraît un article beaucoup plus détaillé de I. Curie et P. Savitch sur leurs résultats (*J. de Physique*, 9 (1938) 355). Cette fois O. Hahn et son jeune collaborateur Fritz Strassmann sont convaincus ; ils orientent alors leurs expériences de chimie vers des éléments de numéro atomique inférieur à celui de l'uranium. Ils pensent d'abord avoir affaire à un isotope du radium, mais L. Meitner, que Hahn rencontre à Copenhague, lui indique pourquoi un tel processus semble impossible.

Hahn, de retour à Berlin, veut élucider complètement avec Strassmann leurs résultats précédents par des séparations chimiques encore plus poussées. Stupéfaits, ils constatent que leur « radium » est en fait du baryum, son homologue chimique inférieur. Il écrit aussitôt le 19 décembre 1938 du labo à Lise Meitner : « ... Nous arrivons toujours à la terrible conclusion : nos isotopes du radium ne se comportent pas comme du radium, mais comme du baryum... D'autres éléments chimiques sont hors de question... Peut-être peux-tu proposer quelque explication formidable. Nous savons bien nous-mêmes qu'en principe il [l'uranium] ne peut pas éclater en baryum. » Hahn et Strassmann publient leur résultat avec la même prudence (*Naturwissenschaften*, 27 (1939) 11). C'est pour tous les physiciens nucléaires de l'époque la découverte de la fission. Aucun physicien n'avait encore imaginé un tel processus, du fait de l'importance des forces nucléaires. On comprend la fierté des chimistes lors de l'attribution du prix Nobel de chimie de 1944.



Lise Meitner, d'abord dubitative, va trouver une explication. À la lecture de la lettre de Hahn, elle lui fait confiance : il est sans doute le meilleur radiochimiste de son temps. Elle se souvient pour le noyau du modèle de la goutte liquide de Niels Bohr et réalise qu'une telle goutte, gagnant de l'énergie par l'absorption d'un neutron, peut se déformer jusqu'à ce que les forces coulombiennes répulsives de longue portée l'emportent sur les forces nucléaires attractives de courte portée, conduisant à la fission du noyau. C'est là le grand mérite de Lise Meitner. Son neveu, le physicien Otto Frisch, est présent et lui pose les bonnes questions. Tout physicien nucléaire de l'époque savait évaluer l'énergie libérée par la fission – une fois admis l'éclatement du noyau d'uranium (par exemple : F. Joliot, *CRAS*, 208 (1939) 341). En effet, Aston en 1927 (*Proc. Roy. Soc.* A115 (1927) 487) avait déjà constaté par ses mesures précises de masse que les noyaux moyens étaient davantage liés que les noyaux légers et lourds ; il représentait cette énergie de liaison par une "packing fraction", qui figura ensuite dans tous les traités de radioactivité de l'époque (par exemple, E. Rutherford, J. Chadwick et C.D. Ellis, *Radiations from radioactive substances*, Cambridge University Press, 1930, fig. 137). Bien sûr, L. Meitner, en vacances à la neige, n'avait pas de traité de radioactivité sous la main et devait retrouver et calculer de mémoire cette énergie de liaison. Niels Bohr apportera par la suite davantage d'éléments quantitatifs à la théorie de la fission (N. Bohr, *Phys. Rev.*, 55 (1939) 418 ; N. Bohr et J.A. Wheeler, *Phys. Rev.*, 56 (1939) 426).

J. Treiner écrit qu'un résultat expérimental sans explication ne constitue pas encore une découverte. Je soutiens pour ma part qu'il existe des découvertes expérimentales sans explication immédiate. Un exemple bien connu est celle qui a conduit au premier prix Nobel de physique : W. C. Röntgen et les rayons X ; son auteur les a justement appelés ainsi par ce qu'il n'avait pas d'explication ! En revanche, je suis d'accord avec Jacques Treiner lorsqu'il dit que sans Hitler et le nazisme Lise Meitner et Otto Hahn auraient continué à travailler et à publier ensemble ; ils auraient reçu ensemble le prix Nobel. Aurait-ce été alors le Nobel de physique ou celui de chimie ? Probablement celui de chimie... tout comme pour Rutherford et les Joliot-Curie.

Pierre Radvanyi

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay



## Une énergie, des énergies – Comment fonctionne le monde ? Collectif, sous la direction de Béatrice Salviat, Brigitte Proust et Katia Allégraud

(Belin, collection *Bibliothèque scientifique*, 2015, 352 p., 26,50 €)

Cet ouvrage de la remarquable *Bibliothèque scientifique* de Belin offre, comme les volumes précédents, une présentation richement illustrée, répartie en courts chapitres qui peuvent être consultés séparément. Son titre indique bien que, à côté du concept fondamental – l'Énergie – il sera question des diverses formes d'énergie, de leur production et de leur utilisation. Pour cette raison, sa préparation a fait appel à des contributions de nombreux spécialistes en physique, chimie, science de la vie et de la terre (SVT), et en technologie. Le résultat, rassemblé et mis en forme par les coordinatrices de l'ouvrage, propose un regard croisé et multidisciplinaire, en faisant chaque fois appel à des anecdotes, des références historiques, des prolongements et de nombreuses illustrations. Il montre un souci constant, au-delà de la diversité des thèmes, de ne pas perdre le fil conducteur – l'énergie. Il s'agit d'un véritable ouvrage de référence pour un large public curieux.

Ce projet a son origine dans l'expérience de l'Enseignement Intégré de Science et Technologie (EIST) mis en place pour les premières années de Collège, en prolongement de la Main à la pâte pour l'École primaire. Dans plusieurs centaines de collèges, des équipes constituées de trois enseignants (physique-chimie, SVT et technologie), assurent chacun un même enseignement au long de l'année au même groupe d'élèves. Le travail en équipe leur permet de préparer les enseignements qui ne sont pas de la discipline de départ de l'enseignant. Cette expérience est un réel succès. Elle a conduit à mettre en place des ouvrages qui ne sont pas des livres du maître, mais qui, néanmoins, constituent des ressources pour eux-mêmes et les autres curieux d'aborder l'énergie de façon interdisciplinaire.

Un premier volume, *Matière et matériaux – De quoi est fait le monde ?*, publié en 2010, avec la même incitation EIST, avait été construit avec une même structure en trois parties que celui-ci : l'énergie (antérieurement la matière) à différentes échelles ; les transformations de l'énergie et son utilisation (correspondant aux utilisations de la matière). Enfin, la troisième partie propose de donner les clés de l'énergie (de la matière).

Pour avoir sévi dans le premier volume (avec en particulier Béatrice Salviat qui est, par ailleurs, directrice adjointe de la Fondation La main à la pâte), je conçois que le projet du présent thème était plus délicat encore à gérer que celui sur la matière et sa diversité. Le pari tenu est gagné, à la lecture de ce livre.

Pour compléter cette démarche de grande interdisciplinarité, un nouveau projet est attendu autour de l'*Information* qui fera suite à ceux sur la *Matière* et l'*Énergie*. Souhaitons lui la même réussite.

**Étienne Guyon**

Physique et mécanique des milieux hétérogènes, ESPCI



## Vulgarisation scientifique, mode d'emploi

Cécile Michaut

(EDP Sciences, 2014, 160 p., 16 €)

Voici un livre rafraîchissant et agréable à lire. Il ne s'adresse pas aux vulgarisateurs chevronnés, mais à ceux qui souhaitent se lancer ou se perfectionner. Cécile Michaut, chimiste d'origine, et journaliste scientifique depuis 1998, a déjà une large expérience derrière elle et a interviewé des chercheurs de différentes disciplines. Dans ce « mode d'emploi » elle donne de judicieux conseils, non sans humour. Elle intercale dans ses chapitres de courts portraits de différents vulgarisateurs aguerris, d'Étienne Klein à Roland Lehoucq et de Julien Bobroff à Cédric Villani, rendant compte de leurs manières particulières de faire et de ses entretiens avec eux. Ces portraits sont vivants et bien faits, grâce à ses interviews. Sont particulièrement intéressants, à des titres différents, ceux de Claire Le Lay, de Marie-Odile Monchicourt et de Jean Jouzel.

L'auteure met en avant le plaisir qu'a un bon vulgarisateur de partager ses connaissances et sa passion avec le plus grand nombre. Son deuxième chapitre traite des différentes formes de vulgarisation, dont j'ai particulièrement apprécié « L'audiovisuel : l'école de la concision ». Le troisième chapitre s'efforce de répondre à la question : « Comment vulgariser ? », dont j'ai bien aimé « Les pièges à éviter » ; leur énumération est parlante : les mots



## Chercheur au quotidien

Sébastien Balibar

(Éditions du Seuil, collection *Raconter la vie*, 2014, 80 p., 5,90 €)

Cet ouvrage de la collection *Raconter la vie* des éditions du Seuil, nous conte l'aventure d'un chercheur d'aujourd'hui, Sébastien Balibar, et son enquête scientifique au sujet des propriétés aussi insoupçonnées qu'étonnantes des cristaux d'hélium !

Ce livre se lit d'un seul trait, comme un roman policier. On y découvre les coulisses de la recherche fondamentale dans une équipe de quelques personnes composée de physiciens expérimentés, de jeunes talentueux et d'indispensables techniciens. Le suspense est partout : la recherche de financements, les défis techniques de l'expérience aux limites du possible, les interrogations face à des résultats inattendus, le dénouement.

À l'opposé d'un ouvrage scientifique, sans aucune équation ni aucune formulation théorique, l'histoire se recentre sur une aventure scientifique et surtout sur les aspects humains qui lui sont intimement liés. On partage le doute, l'anxiété, les tensions mais aussi l'excitation, les palpitations, l'euphorie du narrateur et de son équipe. On découvre l'importance des personnes souvent laissées dans l'ombre, comme les techniciens, toujours présents, dont le savoir-faire acquis sur le terrain est indispensable. On vit les relations du scientifique expérimenté avec ses jeunes collaborateurs très brillants qui se succèdent au gré des contrats, les âpres discussions, les partages de savoir, les fusions d'idées. On ressent la concurrence entre spécialistes de renommée internationale, rivalités qui finissent cependant par s'estomper ici au profit de la connaissance scientifique et de la joie du travail accompli. On prend la dimension des aspects cosmopolites de la recherche fondamentale d'aujourd'hui. On frémit à l'incertitude liée aux financements et autres moyens matériels. On retient son souffle lorsque tout ne se passe pas comme prévu et on soupire de soulagement lorsque l'alerte est passée.

Loin d'être un ouvrage de spécialiste, ce récit écrit par un chercheur à la pointe de la physique fondamentale actuelle, montre au public néophyte à quel point rien n'est acquis d'avance lorsqu'on explore les frontières de la connaissance. Tels les explorateurs des temps anciens, on ne sait pas ce que l'on va trouver quand on avance vers l'inconnu. C'est cela la « recherche » ! Ce livre nous montre également qu'en science il n'y a pas de cloisonnement. L'auteur est un physicien dit « expérimentateur », qui manipule aussi bien le tournevis que les équations les plus complexes. Il met la main à la pâte, bricole des solutions techniques, mais sans jamais être déconnecté des aspects théoriques les plus subtils. En filigrane de l'ambiance de laboratoire, nous découvrons aussi un être humain qui nous confie ses petites joies personnelles comme circuler en vélo dans Paris au petit matin... Comme dans les contes de fée, l'histoire finit bien.

*Chercheur au quotidien* est un livre à mettre entre toutes les mains, à offrir aux petits et grands, et surtout aux non-scientifiques qui comprendront peut-être mieux les humeurs des physiciens partis à la conquête du savoir.

**Sophie Remy**

Professeure de physique en CPGE au lycée Gay-Lussac à Limoges

compliqués, le jargon, les mots soit disant connus (exemple l'ADN), la simplification à outrance, les raccourcis, le cours magistral (celui qui écoute vient volontairement...), jusqu'aux exagérations qui ont souvent un effet redoutable. Bien sûr, on doit chercher à faire comprendre ce qu'est la démarche scientifique. Évidemment, comme l'écrit l'auteure, « le scientifique... qui vulgarise un thème polémique marche sur des œufs » ; mais cela en vaut la peine !

Dans la suite du livre sont discutés aussi, entre autres, le journalisme scientifique et la communication. Parmi les musées scientifiques, Cécile Michaut ne cite que les grands musées comme le Palais de la découverte ; il y a cependant aussi de bons musées plus spécialisés comme le Musée Curie ou l'Espace P.G. de Gennes, à Paris. Je regrette également qu'une demi-page seulement soit consacrée à la vulgarisation par l'histoire des sciences.

Je recommande ce livre à tous ceux qui s'intéressent à la vulgarisation des sciences.

**Pierre Radvanyi**

# RENCONTRES NATIONALES PHYSIQUE- ENTREPRISE- RECHERCHE

## Doctorants et post-doctorants

**10 mars 2017**  
Hôtel de ville de Paris

**Conférences, tables rondes, échanges**

avec la participation de Mathias Fink  
et Albert Fert, Prix Nobel de Physique 2007

**Inscriptions sur**  
[www.rencontresPER2017.fr](http://www.rencontresPER2017.fr)  
(nombre de places limité)



Société Française  
de Physique

MAIRIE DE PARIS

