

Journal du Département d'Astrophysique, de physique des Particules, de physique Nucléaire et de l'Instrumentation Associée

## La parité violée : une cinquantenaire bien alerte

Rassurez-vous, chers lecteurs, ScintillationS ne vire pas au journal « pipole ». La parité est aussi une notion fondamentale en physique. Un phénomène respecte la parité non pas lorsque autant de chercheuses que de chercheurs l'étudient, mais lorsqu'il donne les mêmes résultats avec un dispositif expérimental, puis avec un deuxième, symétrique du premier, comme reflété dans un miroir. Un arc-en-ciel vu dans une glace reste un arc-en-ciel avec la même répartition des mêmes couleurs. Le reflet d'un but marqué au foot est observable et c'est aussi un but marqué. Avec une différence : dans un miroir, un buteur droitier se voit gaucher.

On a longtemps cru que tous les processus connus respectaient cette symétrie, appelée parité, « P » pour les intimes. La nature semblait irrémédiablement ambidextre. Mais en 1956, deux théoriciens, Lee et Yang, flairèrent que des phénomènes comme la radioactivité  $\beta$ , découverte au tournant du  $XX^e$  siècle, pourraient « violer » la parité, en différenciant la droite de la gauche. Un an plus tard, une expérience proposée et menée par madame Wu et ses collaborateurs confirme cette prédiction. Pauli aurait alors glissé : « Dieu est faiblement gaucher. »

Pourquoi « faiblement » ? Parce que la radioactivité  $\beta$ , comme d'autres phénomènes, est régie par l'interaction faible, l'une des quatre forces fondamentales de la nature. Or, dans ces phénomènes « faibles », sont impliqués des neutrinos, ces particules neutres, quasi sans masse et si furtives qu'ils peuvent traverser une planète sans aucune interaction. Le rôle de ces neutrinos, restés longtemps inaperçus, est crucial dans la transmutation des noyaux, dans la vie des étoiles, dans leur mort explosive et autres phénomènes incontournables de l'édification de notre monde.

Et pourquoi « gaucher » ? Réponse : un neutrino possède un spin, propriété quantique dont une image classique est la toupie. Quand un neutrino-toupie s'éloigne, si vous le voyez tourner dans le sens des aiguilles d'une montre (comme fait un tire-bouchon qui s'enfonce dans le liège), le neutrino est dit « droitier ». S'il tourne dans l'autre sens en s'éloignant (comme un tire-bouchon « farces et attrapes » qu'on doit faire roter dans l'autre sens pour qu'il s'enfonce), c'est un neutrino « gaucher ». Or, dans notre Univers, on n'observe jamais de neutrino « droitier ». La violation de la parité est maximale car les neutrinos de chez nous sont exclusivement gauchers. C'est parce que l'interaction faible, la seule du monde microscopique qui régit les phénomènes où sont impliqués les neutrinos, ne s'effectue qu'avec des particules gauchères. Jamais avec des droitiers, leur équivalent « de l'autre côté du miroir ».



Arc-en-ciel.



Son reflet dans un miroir qui lui est perpendiculaire.

<http://www.photoastronomie.net/photo.php>



Figure du milieu : Toupie musicale : vous tirez la poignée rouge vers le haut, rien ne se passe. Vous enfoncez la poignée : la toupie se met à tourner dans le sens des aiguilles d'une montre en faisant une jolie musique. C'est une toupie « droitier », tout comme un pas de vis où, pour enfoncez la vis, il faut actionner le tournevis dans le sens des aiguilles d'une montre. La plupart des pas de vis sont « droit(iers) », sauf, entre autres, ceux des détendeurs de bouteilles de butane.

<http://moline1.club.fr/faible.html>

Ainsi, tel un vampire n'ayant, comme chacun le sait, pas de reflet dans une glace, un phénomène uniquement régi par l'interaction faible n'a pas d'équivalent « miroir » : il viole la parité. Cette particularité permet de détecter la plus infime contribution de l'interaction faible à un processus relevant aussi d'autres interactions (électromagnétique ou forte) bien plus intenses et qui la masquent. Des expériences ingénieusement conçues sont capables de mesurer précisément la différence entre un tel processus et son processus miroir.

Dans le dossier (pages 2 à 6), David Lhuillier (SPhN), après avoir précisé certains aspects de

l'interaction faible, narre deux de ces expériences, véritables prouesses qui reviennent à « détecter une luciole gauchère dans la lumière du phare d'Ouessant. »

Joël Martin (SPhN et ScintillationS) Titre de David Lhuillier (SPhN)

# Les électrons ne sont pas ambidextres

Tous les processus physiques connus respectent la symétrie de parité, à l'exception de ceux régis par l'interaction faible (voir l'édito, page 1). La technologie des accélérateurs actuels nous permet d'utiliser cette « bizarrerie » de la nature pour sonder plus finement la structure du nucléon et tester la théorie de l'interaction faible elle-même. C'est-à-dire, en jargon de physicien : contraindre la théorie.

La symétrie de parité assure qu'un processus physique reste identique si l'on inverse le signe des positions et des vitesses de tous ses protagonistes (voir *Scintillation* n° 48). Par exemple, si vous savez faire un point au billard français vous savez faire le même quand les trois boules sont disposées symétriquement par rap-

port au centre du billard<sup>1</sup>. La symétrie de parité relève donc du « bon sens », en accord avec ce que nous observons tous les jours, depuis les distances astronomiques jusqu'aux distances microscopiques : c'est une symétrie fondamentale de la gravitation, de l'électromagnétisme et de l'interaction nucléaire forte.

Mais depuis la découverte de la radioactivité  $\beta$ , les physiciens ont réalisé qu'une quatrième force fondamentale était à l'œuvre : l'interaction faible. Dans la première description théorique de cette nouvelle force, dès 1934, Fermi continue naturellement de vouloir *faire jouer la nature sur le même billard*, en imposant la symétrie de parité. Il propose une formulation de cette interaction calquée sur celle de l'électromagnétisme, avec une intensité bien plus faible. Mais dans les années 50, certains résultats expérimentaux surprennent. En 1956 Lee et Yang tentent une explication : l'interaction faible pourrait violer la parité, et proposent une série d'expériences pour le vérifier.

L'une d'elles, réalisée l'année suivante par l'équipe de madame Wu<sup>2</sup>, démontre sans ambiguïté la violation de parité dans la désintégration  $\beta$  d'atomes de cobalt<sup>3</sup>. Il y a même violation maximale de la parité car seuls des électrons *droits* (leur spin est orienté dans la même direction et dans le même sens que leur vitesse) sont émis, les électrons *gauches*, leurs « frères en parité », sont absents des détecteurs...

Cinquante ans plus tard nous n'avons toujours aucune idée de l'origine de la violation de parité par l'interaction faible mais on a mesuré très précisément ses manifestations. Entre 1961 et 1967, Glashow, Salam et Weinberg élaborent, dans leur *théorie électrofaible*, une description unifiée des forces électromagnétique et faible.

La réunion de la théorie électrofaible et de la *chromodynamique quantique* (QCD), théorie de l'interaction forte, forme le *modèle standard* (voir l'édito du n° 68).

Une conséquence importante de la neutralité électrique commune au Z (*encadré 1*) et au photon est que les processus faibles et électromagnétiques *interfèrent* : tout phénomène électromagnétique s'accompagne d'une composante « faible », la plupart du



Cheng-Ning Yang.



Tsung-Dao Lee.

Physiciens américains d'origine chinoise



Chien-Shiung Wu.

## Encadré 1.

### Quelques ingrédients électrofaibles

Les processus électromagnétiques sont décrits par l'échange de particules électriquement neutres et sans masse, les photons, notées  $\gamma$ . La force faible est portée par des particules très lourdes (l'équivalent de 5 molécules d'eau !) et chargées électriquement : les  $W^+$  et  $W^-$ . Ceux-ci n'interagissent qu'avec les particules *gauches* (et les anti-particules *droites*) et sont responsables de la violation de parité observée dans la désintégration  $\beta$  du cobalt.

La théorie prédit aussi l'existence d'une autre particule lourde messagère de l'interaction faible mais sans charge électrique : le Z, anciennement appelé «  $Z^0$  ».

Succès éclatant : cette dernière prédiction est confirmée par une expérience en 1973, au Cern. Consécration : les messagers « faibles » W et Z sont découverts au même Cern en 1983. Cependant la violation de parité n'est pas maximale : la production de particules gauches ou droites n'est pas équiprobable, mais les deux états restent possibles et se superposent.

Pour interpréter ces observations, le Z et le photon sont considérés comme un mélange de deux messagers neutres « de base », cocktail caractérisé par un paramètre : l'angle de mélange, dit « de Weinberg »,  $\theta_W$ . Ce paramètre joue comme un doseur du cocktail. La valeur de cet angle déduite de l'expérience est ensuite injectée dans le bouillon théorique.  $\theta_W$  est un paramètre du modèle standard au même titre que les masses des particules. Une fois toutes ces quantités fixées par des mesures, la théorie permet d'en prédire beaucoup d'autres. L'accord avec les résultats expérimentaux est sans faille... jusqu'à présent.

(1) Le jeu de billard se déroule dans un plan. L'analogie n'est valable que dans cet « espace à deux dimensions », sinon il faudrait aussi inverser l'accélération de la pesanteur et les billes « tomberaient » sur le plafond, rendant l'exécution du point « miroir » nettement plus difficile...

(2) Seuls, messieurs Lee et Yang reçurent le prix Nobel de physique en 1957 et pas madame Wu. Ce n'est pas une violation de la parité, au sens sociologique, car l'expérience dite de Mme Wu a été menée aussi par MM. Ambler, Hayward, Hoppes et Hudson. Trop de « nominés » pour un prix attribué au plus à trois lauréats par an et par discipline.

(3) Pour les fans : Physical Review 105, 1413 (1957).

temps minuscule, et donc viole un peu la parité. Faiblement peut-on dire...

Aux énergies mises en jeu en physique atomique et nucléaire, la force faible est bien moins intense que la force électromagnétique. C'est une conséquence de la masse très importante du Z qui limite la portée de l'interaction qu'il véhicule à environ  $2 \cdot 10^{-18}$  m, mille fois moins que la taille du proton<sup>4</sup> ! On comprend pourquoi la parité a longtemps été considérée comme une symétrie exacte de la nature. On ne voyait pas alors assez fin...

### Les nouveaux « supermicroscopes »

À présent, on y parvient. Les expériences décrites ici mesurent précisément l'échange de Z dans l'interaction d'électrons de quelques gigaélectronvolts (1 GeV =  $10^9$  électronvolts) avec une cible (noyau atomique ou électron). Parmi tous les électrons diffusés, bien peu passent à portée d'interaction faible de leur cible. Parmi tous les « événements » comptabilisés, la plupart sont « électromagnétiques », donc impliquent l'échange de photons. Extrêmement peu d'événements sont « faibles », donc échangent des Z : on compte environ un Z pour un million de  $\gamma$ . Autant chercher une luciole gauchère dans

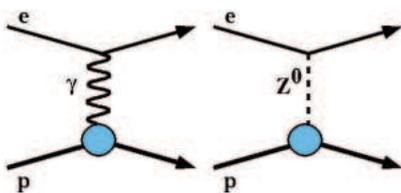


Figure 1 : Diagramme de la diffusion d'un électron sur un proton. À gauche, la composante électromagnétique où les deux particules échangent un photon. À droite, la composante faible où un Z est échangé. Seule cette dernière viole la parité. Les deux processus se mélangent dans des proportions dépendant de l'énergie de l'électron incident : plus elle est élevée, plus grande est la proportion du processus faible.

le phare d'Ouessant ! C'est désormais possible grâce aux développements technologiques de la dernière décennie.

Mais comment mesurer un processus et son processus « miroir » sans retourner l'accélérateur ? L'astuce est la suivante : on utilise un faisceau d'électrons polarisés. Dans de tels faisceaux, quasiment tous les électrons sont comme des toupies

dont l'axe de rotation pointe dans leur direction commune de propagation (on parle de polarisation « droite ») ou dans la direction opposée (polarisation « gauche »). *Inverser la polarisation du faisceau équivaut à retourner l'accélérateur.* On passe ainsi « à travers le miroir »...

Les électrons diffusés sont collectés par un détecteur placé à angle fixe. Si  $N_D$  est le nombre d'électrons « droits » et  $N_G$  le nombre d'électrons « gauches » détectés sur une durée égale, la différence  $N_D - N_G$  caractérise la différence entre le processus et son « reflet miroir ». Cette différence est proportionnelle au nombre de Z échangés puisque seule la violation de parité qu'ils induisent peut engendrer une différence entre  $N_D$  et  $N_G$ . C'est une manière de voir ce qu'il y a quand on éteint le phare... Bien sûr, cela n'augmente pas pour autant la contribution de l'interaction faible et l'asymétrie  $A_{PV}$ , écart relatif entre  $N_D$  et  $N_G$ , est très petite, de l'ordre du millionième ( $10^{-6}$ ). Cette valeur correspond

au rapport du nombre des Z échangés sur le nombre des photons échangés. Cette quantité minimale a été mesurée à quelques pourcents près. Pour cela, il a fallu accumuler un grand nombre d'électrons diffusés, quelque chose comme  $10^{15}$ , soit un million de milliards d'électrons (!) comme l'exigeaient les lois de la statistique (encadré 2).

Ces mesures sont rendues possibles parce qu'on sait maintenant produire des faisceaux intenses presque totalement polarisés. Les électrons sont extraits de la surface d'un cristal d'arséniure de gallium à l'aide d'un faisceau laser (voir fig. 3 page 5). La polarisation gauche ou droite des électrons est déterminée par la polarisation circulaire gauche ou droite de la lumière laser. Ce dispositif permet d'accumuler la quantité suffisante d'électrons diffusés en quelques mois, une durée courante pour la plupart des expériences auprès d'accélérateurs.

Un autre défi technique de taille est de

#### Encadré 2.

#### Asymétrie et pile ou face

Pour jouer honnêtement et équitablement à pile ou face, il faut que la pièce ait autant de chance de tomber du côté pile que du côté face. Un matheux vous dira que la différence entre la probabilité « pile » et la probabilité « face », toutes deux égales à 50 %, est nulle. Il parlera d'équiprobabilité. Ça, c'est la théorie. Car dans la pratique, on constate, au cours d'une partie de pile ou face que la pièce tombe plus souvent d'un côté que de l'autre. C'est d'ailleurs l'intérêt du jeu. Mais cette apparente asymétrie vient du fait que la partie est limitée dans le temps. Si on ne joue qu'une fois, et si pile sort, on peut croire que la « probabilité pile » est 100 %, et la « probabilité face » est 0 %. Mais si on joue dix fois, il est rarissime que pile sorte les dix fois. Il peut arriver que pile sorte sept fois et face trois fois. Si on joue cent fois, ce peut être du 56 % - 44 %. Plus on joue longtemps, plus on se rapproche du « fifty-fifty », c'est à dire de l'équiprobabilité théorique. Si l'on joue dix millions de fois, l'écart à l'équiprobabilité sera infime, de plus en plus infime si l'on joue de plus en plus longtemps. Les mathématiciens énoncent : « L'écart relatif entre pile et face converge vers zéro. »

Sauf si la pièce est truquée, car votre adversaire, ce vil tricheur, aura tapissé d'une très mince couche d'or le côté pile d'une pièce en laiton. Comme l'or est bien plus dense que le laiton, la pièce aura tendance à tomber de façon que pile, le côté doré, donc plus lourd, soit en bas donc caché. Face a alors plus de chances d'advenir que pile. Les deux événements ne sont plus équiprobables. Une méthode – un peu longue, mais infaillible – de trouver si une pièce est truquée est de jouer avec à pile ou face quelques milliers, mieux, quelques millions de fois en comptant le nombre de « pile » et le nombre de « face », que vous diviserez par le nombre de parties pour en déterminer la probabilité. Si, à mesure que le nombre de parties augmente, l'écart relatif entre pile et face ne tend pas vers zéro mais vers une valeur non nulle, c'est que la pièce est truquée. La mesure de son asymétrie sera d'autant plus fiable que vous aurez accumulé de la statistique. Les physiciens ne procèdent pas autrement en comptant le plus grand nombre possible d'événements. J. M.

(4) Pour prévenir une personne qui ne peut vous entendre d'avoir à se déplacer pour éviter une tuile qui lui tombe dessus, vous pouvez écrire le message sur une balle de tennis et l'envoyer à une centaine de mètres. Si vous l'écrivez sur un boulet en fonte qu'ensuite vous lancez, votre message n'ira pas beaucoup plus loin que le bout de vos pieds (prudence !). Dans les deux cas, votre message agit comme une force à distance puisqu'il entraîne un déplacement du destinataire. La « portée » (le rayon d'action) de cette force est inversement proportionnelle à la masse du message. Ainsi en est-il des forces fondamentales de la nature. Le messageur de la force électromagnétique, de portée infinie, est le photon de masse nulle. Celui de la force faible, de très courte portée, est le très massif Z. J. M.

### Encadré 3. Contre-réaction et asservissement libérateur...

Dans les anciens postes de radio, on cherchait une station en tournant un bouton qui permettait de « balayer les fréquences ». Entre deux stations, on entendait un infâme gargouillis, que subitement remplaçait une jolie chanson lorsqu'on avait « accroché » l'onde porteuse de l'émission. Mais les réflexes ne sont pas instantanés et, le temps qu'on arrête de tourner le bouton, on avait dépassé le bon réglage. On tournait alors le bouton dans l'autre sens, on retrouvait la station mais on tournait souvent un chouïa de trop. On rechangeait de sens et au bout de quelques va-et-vient d'amplitude décroissante, on obtenait le bon réglage. Voilà un exemple de « contre-réaction » où l'action mécanique du poignet est « asservie » à l'écoute. L'asservissement libère l'opérateur radio de son angoisse d'avoir l'écoute brouillée\*.

L'angoisse du physicien cesse lorsqu'il est sûr que l'asymétrie qu'il mesure n'est due qu'au faisceau et non en partie à une asymétrie du système optique. Pour obtenir une « asymétrie optique » nulle (ou plutôt : négligeable) et avoir l'esprit libéré, il asservit son dispositif en jouant sur la polarisation circulaire de son laser. Pour cela, des *moniteurs* mesurent le courant du faisceau dans le hall d'expérience pour chaque période de quelques millisecondes correspondant à un certain état de polarisation ( $I^+$  et  $I^-$ ). Pour chaque paire de mesures, on peut former l'asymétrie  $A_I$ , écart relatif entre  $I^+$  et  $I^-$ , l'équivalent de  $A_{PV}$  pour le courant. On cumule les mesures de  $A_I$  pendant quelques minutes afin d'avoir suffisamment de précision statistique et on obtient une  $A_I$  moyenne. Si elle est non nulle on induit une asymétrie de même amplitude, mais de signe opposé, dans l'intensité du faisceau laser de la source polarisée. On recommence une nouvelle mesure pendant quelques minutes et rebelote...

\* Ne pas confondre cet asservissement « radio » avec celui du collier électronique autour du poignet d'un détenu à moitié libéré. Il s'agit alors de l'anneau du radius et non plus de l'... (Ndlr)

maintenir la stabilité du faisceau lors du renversement de la polarisation des électrons. Jusqu'à présent nous avons considéré le renversement comme une parfaite symétrie de parité. En pratique, la transition entre une lumière circulaire gauche et droite du laser de la source nécessite d'agir sur un élément optique dans le trajet du laser et chaque renversement change légèrement les paramètres du faisceau d'électrons (intensité, position, énergie...). On comprend aisément que si, par exemple, le courant du faisceau (proportionnel au nombre des électrons) change entre deux états de polarisation, les comptages  $N_D$  et  $N_G$  seront différents, mais cela n'aura rien à voir avec l'échange de Z. On parle de *fausses asymétries*, engendrées par les défauts de l'appareillage. Pour les minimiser, les renversements sont effectués très souvent, ici environ 30 fois par seconde, afin de supprimer l'effet des dérives lentes. Les fausses asymétries résiduelles sont mesurées en permanence et annulées par des systèmes de contre-réaction (encadré 3) agissant au niveau du laser de la source d'électrons. On arrive aujourd'hui à contrôler les fausses asymétries à quelques  $10^{-8}$  près, c'est-à-dire quelques cen-

tièmes de  $A_{PV}$ , la déjà minuscule asymétrie que l'on mesure !

### Le retentissement de Cebaf

Pour les expériences de diffusion d'électrons, une telle précision permet de

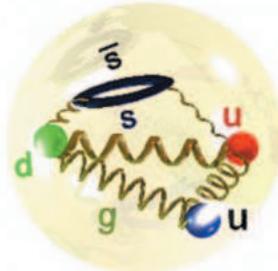


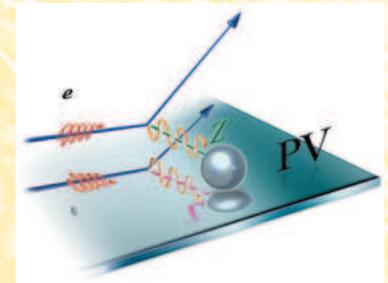
Figure 2: Illustration des trois quarks de base uud du proton. L'interaction des quarks entre eux est représentée par l'échange de gluons, messenger de l'interaction forte. La présence de quarks étranges est illustrée par la fluctuation d'un gluon en une paire de quarks étranges  $ss$ .

considérer le Z comme une nouvelle sonde de la matière, au même titre que le photon. Une équipe du SPhN est ainsi impliquée dans le programme HAPPEX (Hall A Proton Parity Experiment), qui se déroule dans le hall A du Jefferson Laboratory, en Virginie. Un faisceau polarisé d'électrons de 3 GeV est envoyé sur une cible d'hydrogène liquide. Le dispositif de

détection des électrons diffusés sélectionne ceux qui ont rebondi sur un proton, noyau de l'atome d'hydrogène.

Dans le cas d'une interaction électromagnétique, ce processus est étudié depuis presque 50 ans. L'échange de photons nous donne une image de la répartition des constituants chargés électriquement dans le volume du proton : les quarks. Dans sa représentation la plus simple, le proton est formé de deux quarks *up* ( $u$ ) et un quark *down* ( $d$ ), liés par l'interaction forte, comme par une corde (pas celle de la théorie des cordes...): quand la distance entre les deux particules est inférieure à un femtomètre ( $10^{-15}$  m), en gros, la taille du nucléon, la corde est « détendue » et les quarks apparaissent comme « libres », c'est-à-dire qu'aucune force ne les lie. Mais contrairement à l'intuition, plus les quarks s'éloignent, plus leur interaction est intense (plus la corde se tend et plus la force de rappel devient importante). Résultat : les quarks ne peuvent pas

Ainsi, Happex entre en scène dans une sorte de saga du nucléon, qui débuta vers 1985 avec la « crise du spin » : on ne comprenait pas, entre autres, comment les spins des quarks et des gluons contribuent au spin du nucléon, lequel, on s'en est vite aperçus, n'est pas la somme des spins de ses trois quarks. Depuis, on cherche comment interviennent les gluons, puis comme cela ne suffit pas, la mer des quarks et antiquarks. On débroussaille peu à peu cette jungle grouillant de bestioles plus ou moins virtuelles qu'est l'intérieur d'un nucléon.



On espère y voir encore plus clair, grâce entre autres aux expériences de violation de parité, sensibles à des effets plus « exotiques », au sein du nucléon, que le spin de ses trois quarks de base...

La Rédaction

s'éloigner de plus que la taille du nucléon. Ils y restent donc confinés. Et plus l'interaction est forte, plus la création d'une paire quark-antiquark (figure 2) par « fluctuations quantiques » (voir « Comment ça marche », page 7) devient probable. Les trois quarks de base apparaissent ainsi entourés d'une « mer » de paires de quark-antiquark ( $q\bar{q}$ ). Nous savons que cette mer contribue aux caractéristiques fondamentales du nucléon mais la théorie n'est à ce jour pas capable de décrire précisément le contenu du nucléon. Une des motivations d'Happex est de mesurer précisément la contribution de cette « mer » pour permettre aux théoriciens d'affiner leur description.

Par des mesures combinées sur le proton et le neutron, l'interaction électromagnétique nous permet déjà d'extraire la contribution des quarks  $u$  et  $d$  (un proton est équivalent à un neutron dans lequel on a changé les  $u$  en  $d$  et les  $d$  en  $u$ ). Mais Happex permet de compléter la mesure en « éclairant » le proton avec un  $Z$  : ce deuxième éclairage fournit une troisième combinaison de la contribution de tous les quarks, ce qui permet d'« isoler » celle des quarks étranges ( $s$ ). Ce type de quark n'est pas présent dans le « triplet de base » d'un nucléon ( $uud$  pour le proton ou  $ddu$  pour le neutron). Il ne peut apparaître que par des fluctuations de la mer, sous forme de paires  $s\bar{s}$  (voir figure 2). Il peut cependant contribuer notablement aux propriétés du proton car, hormis  $u$  et  $d$ , il est le plus léger, ce qui lui laisse une probabilité non négligeable d'apparaître dans les fluctuations  $q\bar{q}$ . En effet, plus la paire est légère, plus longtemps elle émerge et elle est observable. Le quark étrange, le plus léger des quarks « exotiques », est ainsi le candidat le plus pratique pour comprendre le rôle de la mer dans la structure du proton. Bel éclairage, pour une luciole ! Il n'y a pas que le phare qui éclaire la mer...

La première expérience Happex, menée en 1998-99, n'a pas vu de signal des quarks étranges, mais elle a montré que le faisceau de l'accélérateur de JLab avait les qualités requises pour mesurer un tel signal. Motivation puissante pour mener une mesure plus précise. Elle vient de s'achever. Précisons, en passant, que le Dapnia est impliqué depuis le début de ce programme expérimental avec la réalisation du polarimètre Compton (appareillage qui mesure la polarisation du faisceau d'électron) et la réalisation des détec-



Figure 3 : Source de lumière laser polarisée de l'expérience Happex

teurs d'électrons (ScintillationS n° 42).

Résultat préliminaire : les quarks étranges contribuent peu à la distribution de charges du proton mais ils portent  $8 \pm 4\%$  de son aimantation. C'est une surprise, car les modèles théoriques prédisaient un effet beaucoup moins important et de signe opposé. Lorsqu'on aura analysé toutes les données, l'incertitude sera réduite à 1,5 - 2 %, au lieu des 4 % actuels, ce qui permettra de confirmer ou non ce surprenant résultat.

Le  $Z$  devient ainsi une nouvelle sonde du nucléon, au même titre que le photon puisqu'il a la capacité de sonder le système des quarks internes au nucléon, enrichissant ainsi notre connaissance de sa structure.

### Vers une « nouvelle » physique ?

La précision des mesures de la violation de parité par diffusion d'électrons offre une autre possibilité : tester l'interaction faible elle-même. Si la cible est parfaitement connue, le modèle standard prédit complètement le taux d'interaction. Tout écart entre l'expérience et la théorie signifierait que notre actuelle description de

l'interaction faible n'est qu'une approximation et qu'une physique « au delà du modèle standard » pourrait bien se révéler.

La quête de cette nouvelle physique est la motivation de E158, une expérience menée auprès de l'accélérateur d'électrons de Stanford (Slac) et dans laquelle le Dapnia était aussi impliqué. La cible utilisée ici est un autre électron, dont la structure est connue puisqu'il n'en a pas, contrairement au nucléon. Mais c'est au sens « classique » du terme. La physique quantique prédit en effet qu'une particule ponctuelle, telle que l'électron, est entourée d'un nuage de paires particule-antiparticule, créées et annihilées en permanence. Ce phénomène relève aussi des fluctuations quantiques. Suivant la finesse d'observation de l'électron (voir « Comment ça marche ») on pénètre plus ou moins ce « nuage de fluctuations » et, à mesure qu'on perce cet écran, les propriétés de la particule observée se rapprochent de celles de la particule « nue ».

Ainsi en est-il de sa charge électrique et de sa « charge faible », que le modèle standard relie à l'angle de mélange  $\theta_W$  (voir page 2). L'évolution de ce paramètre suit donc celle de la charge faible, en fonction de l'énergie, mais la théorie ne

<http://www-project.slac.stanford.edu/e158/parityviolation.html>



Figure 4 : Une expérience magique de violation de la parité avec des réveils. Dans chaque illustration, le réveil du milieu est notre objet de référence du monde réel. Le réveil de droite, son reflet dans un miroir, est son image par parité, reflet « parfait » dans un monde où la symétrie de parité ne serait pas violée. Le réveil de gauche est son image miroir telle qu'elle apparaîtrait dans le monde réel, dans lequel l'interaction faible viole la symétrie de parité. Cette « brisure de symétrie » se traduit par un retard du réveil. Si cette asymétrie est du même ordre que celle mise en évidence à E158 ( $1,3 \cdot 10^{-7}$ ), au bout de 1000 ans, le réveil de droite ne retardera que d'une heure sur le réveil « de référence » !

peut prédire sa valeur à partir de ses seuls principes fondamentaux. En revanche, si l'on dispose d'une mesure expérimentale « de référence » pour une certaine échelle d'énergie, le modèle standard prédit la valeur de  $\sin^2\theta_W$  pour toutes les autres énergies. Autrement dit, le modèle donne l'allure de l'évolution de  $\sin^2\theta_W$ , c'est la courbe de la *figure 5* et la mesure de référence permet de « caler » la courbe sur des valeurs chiffrées. On obtient ainsi un  $\sin^2\theta_W$  calé sur l'expérience, que les physiciens dans leur poétique jargon appellent «  $\sin^2\theta_W$  effectif »,  $\sin^2\theta_W^{\text{eff}}$ , pour les intimes. C'est l'évolution chiffrée de ce  $\sin^2\theta_W^{\text{eff}}$  en fonction de la quantité de mouvement transférée (grandeur que l'on peut relier à l'énergie, voir « *Comment ça marche* »), que donne la courbe de la *figure 5*.

Le point de référence est celui des expériences auprès du grand collisionneur électron-positron, le LEP au Cern et l'accélérateur Slac à Stanford. La violence des collisions dans ces machines est telle que l'on atteint un domaine où électrons et positrons interagissent principalement par échange de Z. La luciole éclaire mieux que le phare ! Des mesures très précises de  $\sin^2\theta_W^{\text{eff}}$  sont alors possibles, à mieux que 0,1 % près.

En se plaçant à un transfert de quantité de mouvement 1000 fois plus petit, E158 n'a aucune chance de faire mieux, car, dans ce domaine, l'échange de Z devient extrêmement rare, dix fois plus rare que dans l'expérience Happex : un Z pour

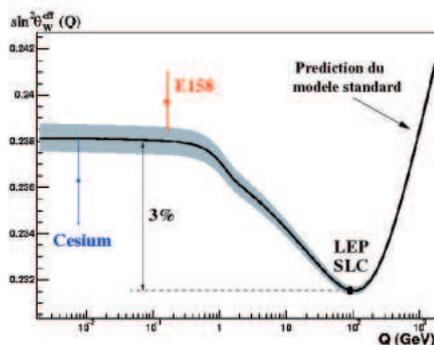


Figure 5 : Évolution de  $\sin^2\theta_W^{\text{eff}}$  en fonction de la quantité de mouvement transférée, à partir du point de référence (le point noir en bas à droite du graphique) des mesures du LEP et du Slac (courbe noire). L'échelle « verticale » est démesurément dilatée : la variation du paramètre n'est que de 3 % sur trois ordres de grandeur (un facteur 1000) ! Le point de E158 (en rouge), mesurée à une quantité de mouvement transférée mille fois plus faible confirme (si ! si ! un petit bout de la barre d'erreur trempe dans le grisé de la courbe théorique) la prédiction du modèle standard. Le point bleu est une mesure, à encore plus basse énergie, de la violation de parité dans des transitions atomiques du césium. Cette mesure est complémentaire de E158 car elle est sensible à d'autres scénarii de « nouvelle physique ».

10 millions de photons ! C'est le prix à payer pour tester la théorie aux énergies de la physique nucléaire. Cette quasi-disparition du Z est compensée par une précision record sur la mesure de l'asymétrie de violation de parité : on trouve  $0,13 \cdot 10^{-6}$ , soit un peu plus d'un dix-millionième, avec une incertitude de  $0,017 \cdot 10^{-6}$ , de l'ordre du cent-millionième.

La précision sur la valeur de  $\sin^2\theta_W^{\text{eff}}$  que l'on déduit de cette mesure atteint 0,5 %. Elle met clairement en évidence une évolution du paramètre par rapport au point de référence, compatible avec la prédiction théorique (*figure 5*). Le modèle standard est, là encore, confirmé. Du moins pour le moment, car le fait que E158 n'observe pas de déviation signifie peut-être que la mesure n'est pas encore assez précise pour dégager d'éventuels effets d'une nouvelle physique.

Et si d'aventure, la « barre d'erreur » du point rouge de E158 s'amenuisait sans que ne change la position du point moyen, jusqu'à sortir complètement de la courbe noire ? Cela voudrait dire que la valeur

mesurée dévie de la prédiction théorique. Nous aurions donc *omis* d'inclure certaines espèces de particules et d'antiparticules dans le calcul des fluctuations quantiques, à moins qu'il faille tenir compte d'une nouvelle interaction entre électrons, encore jamais observée.

La méthode que nous venons de décrire est bel et bien un *test indirect* de la présence d'une nouvelle physique qui ne peut, pour l'instant, que se manifester par les perturbations qu'elle induit sur l'évolution de  $\sin^2\theta_W^{\text{eff}}$ .

Ainsi, grâce à des mesures complémentaires des tentatives d'observation directe (tentatives qui deviendront de véritables observations quand entrera en service le grand collisionneur de hadrons du Cern, le LHC), les physiciens arrivent à tester leurs modèles de plus en plus « durement » en réduisant petit à petit les incertitudes sur des paramètres fondamentaux. Ce qu'ils appellent dans leur jargon : « contraindre de plus en plus la théorie ».

David Lhuillier (SPhN)

## Petite conclusion détendue

(l'inconscient auteur a laissé la bride sur le cou au porte-parole)

Ainsi, malgré sa contribution extrêmement faible, l'interaction du même nom se révèle un outil puissant pour détecter des phénomènes qui mettent la puce à l'oreille des physiciens expérimentateurs et poussent les théoriciens dans leurs retranchements : ont-ils mis dans leur chaudron théorique tous les ingrédients pour que leur soupe particulière « modèle » ait la même saveur que celle que nous observons ? Une subtile différence de goût, et hop ! Pourquoi ne pas essayer une pincée de matière noire ? Une incertitude sur sa texture : on touille faiblement la soupe avec un tamis aux mailles d'une finesse inédite. Plus sérieusement, l'interaction faible est un outil d'une grande force car elle possède l'exclusivité d'un phénomène unique, révélateur d'effets ténus et subtils indétectables sans elle : la violation de la parité. Ces effets, autant de tests très durs pour le modèle standard, sont peut-être un prélude à son perfectionnement. Ainsi vont les progrès de notre connaissance du monde.

Grains de sel, encadrés 2 et 3, notes et conclusion de Joël Martin (SPhN et ScintillationS)



Les mains d'Escher.

# Comment ça marche

## Les fluctuations quantiques

*C'est connu, la mécanique quantique résiste à la vulgarisation. On ne compte plus les épiques controverses entre physiciens, y compris dans notre comité de rédaction, selon qu'ils sont partisans de dire les choses d'une façon ou d'une autre. Les images que nous avons choisi d'utiliser dans ce « Comment ça marche » reflètent très imparfaitement la « réalité » telle que nos connaissances actuelles nous permettent de l'appréhender, car les phénomènes quantiques défient nos sens et « le sens commun ». Mais, au fait, c'est quoi, la réalité ? Nous n'en savons rien car ce que nous percevons de cette réalité n'est que l'image que nous en donnent nos observations (et nos théories). S'approcher de mieux en mieux de la réalité est l'une des ambitions du chercheur. Une autre est d'expliquer comment au plus large public.*

La Rédaction

Les deux expériences, que narre David Lhuillier dans le dossier qui précède, poursuivent deux buts différents : celle de Cebaf vise à mieux connaître l'intérieur du nucléon, celle du Slac cherche à affiner notre connaissance de l'interaction faible. Mais ces expériences ont au moins deux points communs : un même outil d'investigation, la violation de la parité dans les phénomènes que régit l'interaction faible, et l'indispensable prise en compte de l'apparition éphémère de paires de particules et d'antiparticules<sup>1</sup> surgies du néant avant d'y replonger presque instantanément.

Le néant n'est pas le mot juste car le vide n'est pas le néant. Ou, plutôt, c'est un néant fécond où, sans cesse et sans fin, surgit et disparaît en un éclair de temps un fluctuant grouillement de ces paires de particules et d'antiparticules. Nous l'observerions, ce grouillement, si nous disposions d'une super caméra ultra rapide et sensible à toutes les longueurs d'onde. Faute de cet appareillage, nous ne détectons rien de cette effervescence subliminale<sup>2</sup>. Ce faux vide globalement neutre, grouille de particules neutres ou électriquement chargées apparaissant trop fugacement pour être observables – on les appelle *particules virtuelles*.

Mais d'où ces particules tirent-elles l'énergie nécessaire à leur matérialisation<sup>3</sup>, alors que nous avons appris à l'école que « l'énergie se conserve », et, d'après Lavoisier : « Rien ne se perd, rien ne se crée » ? C'est un phénomène qui relève de la physique quantique : *la loi de conservation de l'énergie apparaît violée pendant un temps limité*. Cette entorse à

la loi peut être d'autant plus importante qu'elle est brève, de même que votre banquier tolère un découvert élevé à condition qu'il dure très peu. Précisément, le produit de l'excédent d'énergie et de la durée de l'infraction est une constante universelle, la *constante de Planck* :  $h = 0,00000000000000000000000000000000663$ , soit  $10^{-34}$  joule.seconde ( $h$  est une grandeur physique produit d'une énergie et d'un temps, qu'on appelle l'*action*). Conséquence : une énergie ne peut être parfaitement déterminée. Elle n'est connue qu'à un « flou quantique » près, relié à la durée de la mesure. La valeur minuscule de  $h$  explique que, dans notre monde macroscopique le flou quantique est imperceptible. Cela fut formulé par Heisenberg dans l'une de ses deux célèbres *relations d'indétermination* (appelées



Werner Heisenberg (1901-1976). Prix Nobel de physique en 1932. Il établit ses fameuses relations d'indétermination en 1927.

aussi : « relations d'incertitude ; nous verrons l'autre un peu plus loin » :

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq h/4\pi$$

Ainsi, la violation de la conservation de l'énergie peut se manifester par la matérialisation de particules d'autant



Fluctuations quantiques symbolisées par un lac de lave en fusion.

plus massives que leur présence est brève. Le vide « quantique » est une sorte de « mer » pleine d'une énergie qui fluctue en fonctions de « prélèvements » qu'effectue le hasard. Un peu comme l'écume de la vague, ou les incandescences élaboussures jaillissant soudain d'un lac de lave trompeusement tranquille (*photo ci-dessus*).

Ce sont ces sortes d'ondulations de la « mer » sporadiquement matérialisées qu'on appelle *fluctuations quantiques*. Elles se traduisent par la brève apparition de paires *virtuelles* « particule-antiparticule » (*note 1*), comme les paires quark-antiquark étranges  $s\bar{s}$  de l'article de David Lhuillier, qui hantent l'intérieur d'un nucléon et participent à son comportement. D'autres paires de quarks plus lourds y participent, mais plus brièvement. Leurs effets s'observent encore plus difficilement.

(1) Des lois fondamentales de la nature imposent que lorsqu'il se crée une particule à partir d'énergie, il se crée automatiquement son antiparticule. En particulier, lorsqu'un électron  $e^-$  se matérialise, il est toujours accompagné d'un antiélectron : le positon  $e^+$ , de charge électrique égale positive. De la sorte, à partir d'énergie électriquement neutre, il se forme une paire «  $e^+ e^-$  » de charge totale nulle. La charge électrique « est conservée ». On ne connaît aucune exception à cette loi universelle de la Nature.

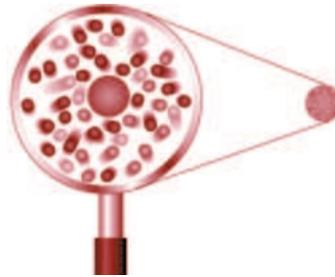
(2) Un peu comme lorsque s'ouvre et se ferme une fenêtre sur notre écran d'ordinateur. Nous ne la voyons et que si elle y reste assez longtemps pour que notre œil (et/ou notre cerveau) ait le temps de réagir. Sinon, notre écran nous paraît vide.

(3) Toujours ce bon vieil Albert et son équation,  $E=mc^2$ , où l'énergie se fait masse et réciproquement.

Les fluctuations quantiques jouent un rôle-clé dans le monde subatomique. Les paires qui surgissent puis disparaissent créent une sorte de nuage autour des particules de matière. Ce n'est pas la particule « nue » qu'on voit, mais la particule « habillée ». Si on veut mesurer au plus près les « nues-propriétés » de la particule il faut percer son nuage de plus en plus profondément en s'approchant de plus en plus près de la particule.

Comment savoir exactement à quelle distance la particule sonde s'est approchée de la particule cible ? Réponse : on ne peut connaître exactement aucune distance. Là aussi, la nature impose un flou quantique : on ne peut à la fois connaître exactement la position  $x$  et la vitesse  $v$  (ou de la quantité de mouvement  $p$ , produit de la vitesse et de la masse) d'une particule. C'est ce que traduit l'autre relation d'indétermination de Heisenberg :  $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$ . Or, on peut jouer sur ce flou pour voir presque net : quand  $\Delta x$  est grand,  $\Delta p$  est petit, puisque leur produit est constant. Faisons diffuser un électron sur une autre particule. Comme au billard, on peut jouer fin ou pleine bille. En physique quantique, ça se passe ainsi : lorsque peu de quantité de mouvement est « transférée » lors du choc (l'électron joue fin), il y a une grande incertitude sur l'endroit exact dudit choc. En revanche, plus la quantité de mouvement transférée est grande, plus précisément on sait où l'on a frappé. C'est un des buts de la course aux grandes énergies des accélérateurs : arriver aux frappes les plus « chirurgicales ». En augmentant l'énergie (reliée à la quantité de mouvement) mise en jeu dans le choc, on précise de mieux en mieux le lieu du choc. Voilà pourquoi, plus on veut « voir » petit, plus il faut d'énormes accélérateurs. Le LHC fait 27 kilomètres de tour. C'est seulement 5 de moins que le boulevard périphérique parisien...

Revenons à notre électron nimbé de particules quantiquement intermittentes. En augmentant l'énergie du faisceau (de l'accélérateur), on perce de plus en plus son nuage et les grandeurs qu'on mesure se rapprochent de plus en plus de celles de l'électron « nu ». On peut ainsi voir l'évolution d'un processus en fonction de l'énergie à laquelle on l'étudie. Ainsi en est-il de la violation de la parité étudiée par diffusion d'électrons. Plus grande est l'énergie de l'électron incident, mieux il vise, plus se fait sentir l'influence de l'interaction faible, la seule qui s'accompagne de violation de la parité. Cette influence se mesure à la valeur du paramètre  $\sin^2\theta_W$  (voir le dossier pages 2 à 6). Par ailleurs, à mesure que l'énergie augmente, il faut



Une particule physique c'est une particule « nue » entourée d'un nuage de particules virtuelles.

<http://www.astrosurf.org/lombry/quantique-particules2.htm>

tenir compte de nouvelles paires de plus en plus lourdes entrant dans la composition du nuage. Pour préserver son accord avec l'expérience, la théorie doit inclure ces nouvelles particules dans la formule qui rend compte de  $\sin^2\theta_W$ . L'évolution de  $\sin^2\theta_W$  en fonction de l'énergie reflète celle de la physique en œuvre dans l'interaction. Mesurer ce paramètre du modèle standard sur une gamme d'énergie de plus en plus large et non aux seules hautes énergies, c'est mieux connaître la gamme des particules du nuage, c'est « voir » ce nuage sous différents éclairages. Comme le raconte le dossier, c'est aussi « voir » comment le Z, messenger de l'interaction

faible « sonde » le nuage, depuis les rarissimes apparitions du Z à basse énergie, jusqu'à sa présence en hordes serrées aux hautes énergies. Cette affluence naît du fait que les électrons incidents ont une bien plus grande probabilité de passer à moins de  $10^{-18}$  mètres de leur cible, « à portée d'interaction faible ».

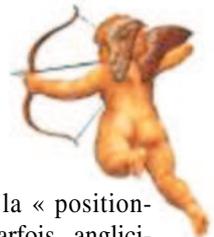
Le but est d'obtenir des mesures de plus en plus précises sur la plus large gamme d'énergie possible, jusqu'à ce qu'elles semblent en désaccord avec le modèle standard. Il faudrait alors, pour « rétablir » l'accord sans remettre en cause le modèle, impliquer des particules jamais observées. L'Histoire des sciences se répète parfois : c'est en constatant que l'orbite d'Uranus semblait en désaccord avec les lois de la gravitation universelle que Adams et Le Verrier découvrirent Neptune.

Modernes Le Verrier (et Adams), les violeurs de parité seraient-ils sur la trace de nouvelles particules ?

Joël Martin (SPhN)

Grains de sel de David Lhuillier (SPhN)

#### A N E C D O T E



Deux relations, donc : la « position-quantité de mouvement (parfois anglicisée en impulsion) » :  $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$ ; et la « temps.énergie » :  $\Delta t \cdot \Delta E \geq h/4\pi$ . Voilà pourquoi la légende prétend que Madame Heisenberg était frustrée. En effet, son mari soupirait souvent : « *Quand j'ai la position, je n'ai pas l'impulsion, et quand j'ai le temps, je n'ai pas l'énergie...* ».

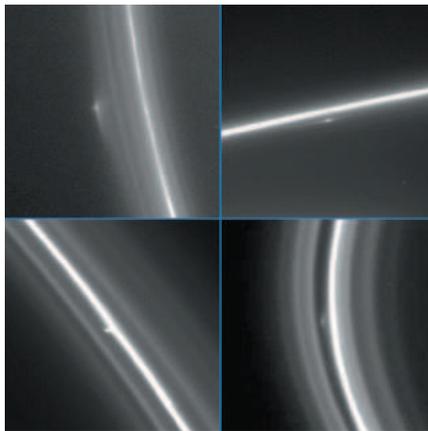
#### Site à déballer :

<http://www-project.slac.stanford.edu/e158/Default.htm>

# Une spirale autour de Saturne

*Une équipe d'astrophysiciens du Dapnia, de l'Université Paris 7 et du CNRS<sup>1</sup> a découvert, grâce à la sonde Cassini (voir ScintillationS n° 64), que l'un des anneaux de Saturne est enroulé en spirale<sup>2</sup>. C'est peut-être le résultat d'une collision avec une petite lune récemment constituée. Une aubaine pour les chercheurs qui soupçonnent cet anneau d'être le seul lieu de notre système solaire où se forment encore des corps célestes. L'observation de cette pouponnière à bébés lunes nous éclairera sans doute sur les processus de formation des planètes et des satellites.*

Bien qu'ils semblent continus vus depuis la Terre, les anneaux de Saturne, entrevus comme deux compagnons en 1610 par Galilée grâce à la lunette qu'il venait d'inventer, et vus comme anneaux 50 ans plus tard par Huygens, sont composés de poussières et de glace en rotation autour de la planète. Ces petites particules innombrables possèdent chacune une orbite indépendante. Leur taille va du centimètre à plusieurs mètres, atteignant parfois le kilomètre. Les anneaux ont été nommés de A à G, dans l'ordre de leurs découvertes. L'anneau F est le plus externe des anneaux principaux de Saturne. Situé à 140 000 km de la planète (presque la moitié de la distance Terre-Lune), il est composé d'un anneau central brillant, le « cœur », et de petits anneaux concentriques, les « filaments » ou « tresses » (voir note 2). Grâce à Cassini, les astrophysiciens ont découvert que ces filaments forment une seule spirale, s'enroulant au moins 3 fois sur elle-même. D'autres planètes du système solaire possèdent



Quelques petites lunes de Saturne, responsables présumées de l'anneau en spirale.

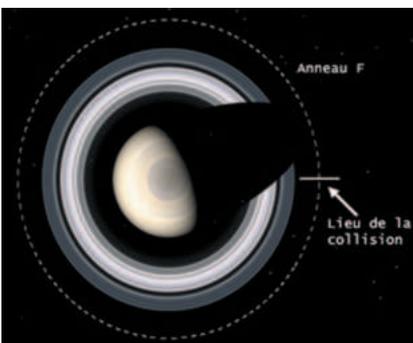
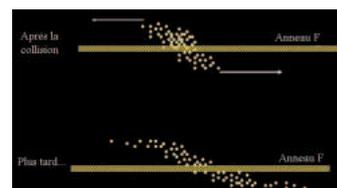
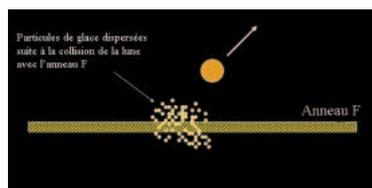
des anneaux (Uranus, Neptune et Jupiter), mais cette spirale autour de Saturne n'a pas d'équivalent connu.

Cause possible : une collision entre le cœur de l'anneau F et une petite lune en formation dans cet anneau par « accréation » (agglomération gravitationnelle) de particules de l'anneau. Traversant l'anneau, cette petite lune récente en chasse-

rait des particules qui s'étaleraient autour de Saturne. Conséquence des lois de la gravitation, ce nuage de poussières s'enroulerait naturellement en spirale (*encadré*). Plusieurs lunes pointées par Cassini au voisinage de l'anneau F pourraient être à l'origine du phénomène, mais on ne sait pas encore laquelle. Vu la proximité de la planète géante, la gravité est si forte que ces bébés lunes atteignent à peine 1 ou 2 km de diamètre avant d'être pulvérisées (voir le n° 64). L'anneau est ainsi une pouponnière permanente de petites lunes éphémères. Ces observations confirment des calculs menés de longue date.

Les astrophysiciens espèrent ainsi mieux comprendre les mécanismes de formation des corps célestes de notre système solaire. En 2009, la grande lune Prométhée entrera en collision avec l'anneau F. Grâce à Cassini, il y aura de fortes chances d'assister en direct à la formation et à l'évolution de nouvelles spirales.

Contact : Sébastien Charnoz (SAP)



© Science. Réalisation Frédéric Durillon (Animea)

Les étapes de la « spiralisation » de poussières arrachées à l'anneau par le passage d'une petite lune. L'artiste a fortement dilaté le « pas » de l'enroulement spiral.

(1) Avec l'institut Ciclops, de Boulder, dans le Colorado.

(2) Résultats publiés le 25 novembre 2005 dans *Science*. La tresse avait été entrevue par la sonde Voyager vers 1980, mais Cassini a permis de préciser que cette tresse était en réalité une spirale.

### Comment se forme une spirale annulaire saturnienne ?

Il n'est pas difficile de « mettre en équation » un objet satellisé autour d'une planète qui décrit un cercle (d'autres peuvent décrire une ellipse), comme, par exemple, un satellite géostationnaire dont la distance au centre de la terre ne varie pas.

Mais si c'est un nuage de poussières qui est en orbite, cela se complique.

Imaginons un fort peloton de coureurs à pied entamant une course de fond au stade. Le peloton s'étire et au bout d'un certain temps, les plus rapides prennent un tour aux plus lents. Et si, comme au Téléthon, ça dure 24 heures, les retardataires vont prendre dans la vue deux, puis trois tours, etc. Fair-play, les lambins laissent « la corde » aux rapides en faisant « les extérieurs ». Le rayon de leur trajectoire est alors plus grand et ils ont plus de chemin à parcourir (ça n'arrange pas leurs affaires).

Pas de fair-play dans l'espace. Mais le phénomène est un peu le même. Certes, chaque poussière décrit un cercle. Mais le nuage n'est pas ponctuel. Chacune de ses poussières orbite à une distance de la planète différente de celle de sa voisine. Suivant les lois de Newton\*, la poussière la plus proche tourne le plus vite sur l'orbite la plus courte. Comme au stade. Ainsi, les poussières du nuage les plus proches de Saturne prennent de l'avance sur les autres. Le nuage globalement s'étire en spirale.

Et, comme au stade, les poussières les plus rapides prennent un tour, puis deux, puis trois aux plus lentes. Le nuage forme une spirale qui s'enroule sur elle-même une fois, puis deux, puis trois... Et comme l'arbitre Cassini n'est pas près de siffler la fin de la course, la spirale va s'enrouler de plus en plus sur elle-même. Or sa largeur reste constante (de même que la piste du stade reste à huit couloirs). Les enroulements vont donc être de plus en plus serrés et au bout d'un certain temps, on aura un anneau circulaire.

Les anneaux circulaires de Saturne formés il y a quelques milliards d'années ont peut-être débuté leur carrière comme spirales.

Merci à Sébastien Charnoz

\* Un objet en orbite autour d'une planète ne lui tombe pas dessus malgré l'attraction gravitationnelle car sa rotation tend à l'en éloigner par effet de « fronde ». Les deux forces, gravité et « fronde », se compensent. Mais plus un objet est proche de la planète, plus fort il est attiré. Donc plus la « force fronde » (la bien connue « force » centrifuge) doit être intense pour qu'il ne tombe pas. Or ladite force est proportionnelle au carré de la vitesse orbitale de l'objet. Pour compenser une attraction gravitationnelle plus forte, le satellite doit donc tourner plus vite. Képler n'a pas observé autre chose : plus les planètes sont proches du Soleil, plus vite elles lui tournent autour.

#### Site à déballer :

[http://www.aim.ufr-physique.univ-paris7.fr/CHARNOZ/homepage/SPIRAL/spiral\\_fr.htm](http://www.aim.ufr-physique.univ-paris7.fr/CHARNOZ/homepage/SPIRAL/spiral_fr.htm)

### **Gluon d'honneur ? Non : appel à nanosolidarité**

Notre excellent confrère *Le Journal du CNRS* se lit d'un bout à l'autre de façon fort agréable et fructueuse. Les sujets sont variés, la vulgarisation est de qualité. C'est bien écrit, clair, précis. Bref, on y apprend beaucoup, tout en en se distrayant.

La page 5 du numéro 189 d'octobre dernier propose ainsi un éditorial parlant nanosciences et nanotechnologies. Sujet sur lequel on se rue, tant il est passionnant (voir l'illustration). Traité par *Le Journal du CNRS*, ce doit être un régal.

Douche écossaise ! Voici ce qu'on lit, colonne 2, paragraphe 3 :

« Les nanosystèmes : un enjeu important concerne les recherches sur les architectures et les méthodologies de modélisation et de conception permettant d'explorer des ruptures scientifiques et technologiques pour acquérir, manipuler et échanger des grandeurs mécaniques, physiques et chimiques dans des environnements enfouis et hétérogènes. »

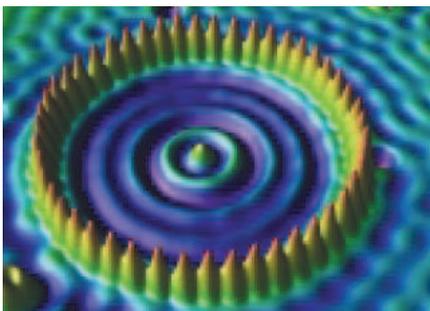
On se frotte les yeux, on relit une fois, deux fois, on se pince, on vérifie qu'on a bien entre les mains *Le Journal du CNRS*. Pas d'erreur. Cette phrase « brute de charabia » s'étale bel et bien dans un éditorial de notre excellent confrère, qui n'a peut-être pas eu le droit de la retoucher. Et elle n'a l'air ni d'un pastiche, ni d'un rébus, ni d'un texte crypté pour égayer d'éventuels espions industriels.

Mais alors, que diable signifie cette avalanche de substantifs et d'adjectifs, qui peut figurer dans n'importe quelle pub pour n'importe quelle technologie innovante ? Qu'ont voulu dire ses auteurs, tous deux directeurs scientifiques au CNRS (on leur a demandé, sans réponse à ce jour) ? Quelle est l'information scientifique et/ou technique ? C'est quoi un « environnement enfoui » ?

S. O. S. ! On demande d'urgence un décrypteur. Amis du Drecam, nos rois des nanotubes, ne nous laissez pas dans l'obscurité ! Aidez-nous à désenfouir notre environnement nanoconceptuel, actuellement en rupture de ban non encore explorée !

Merci de nous apporter vos (nano)lumières, nous n'en scintillerons que mieux.

Joël Martin (SPhN et ScintillationS)



Glanée dans une très pédagogique plaquette<sup>1</sup>, cette image du « corral quantique » (cercle de 48 atomes de fer sur un support de cuivre), obtenue au microscope à effet tunnel, montre que les électrons se comportent comme des ondes : ils forment un nuage concentrique qui ondule comme la surface de l'eau dans laquelle on a jeté un caillou. Le « corral » a un diamètre d'environ 15 nanomètres. C'est une des plus remarquables visualisations directes des lois de la mécanique quantique (qui régissent aussi le fonctionnement du microscope à effet tunnel).

(1) <http://www.nanomicro.recherche.gouv.fr/docs/plaq.nanomonde.pdf>.

## Du « soleil » en bouteille à l'Assemblée nationale

Le 11 octobre 2005, s'est tenue une journée Iter (voir *ScintillationS* n° 67) à l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques (OPECST). Notre Haut-commissaire, Bernard Bigot, était présent au colloque et en fit la synthèse. Au menu : les enjeux scientifiques, technologiques et économiques de ce projet mondial<sup>1</sup> implanté à Cadarache.

À la tribune : deux sénateurs, deux députés, un membre de l'Académie des sciences, le président de la Commission particulière du débat public, un économiste, des experts de la fusion dont Jean Jacquinet, ancien chef du Département de recherches sur la fusion contrôlée (DRFC) et conseiller de Bernard Bigot. Dans la salle, Pascale Antoni, directrice de Cadarache, des chercheurs, des ingénieurs, des journalistes... Et deux têtes familières au Dapnia : Sylvaine Turck-Chièze et Michel Cassé du SAP, Soleil oblige. Pas le synchrotron, notre étoile, dont une superbe photo illuminait la première diapo de Jean Jacquinet<sup>2</sup>.

Tout fut intéressant. Mais un point mérite d'être mis en vedette, pour nous, gens du Dapnia. Dressant un panorama de la fusion dans l'Univers et sur Terre, l'académicien Guy Laval a relevé que les conditions thermonucléaires n'étaient pas les mêmes au cœur du Soleil et dans un réacteur terrestre. En effet, la chaudière thermonucléaire solaire fonctionne à une température de 15 millions de degrés sous une pression énorme, celle qu'exercent les couches externes du Soleil sur son cœur, et les réactions de fusion sont nombreuses et variées. En revanche, un réacteur terrestre a besoin d'au moins 100 millions de degrés pour fonctionner et une seule réaction est utilisée : la fusion deutérium-tritium (d-t)<sup>4</sup>. D'autres différences existent qu'on ne peut développer ici. Donc,

selon Guy Laval, ce n'est pas la même physique des plasmas (état de la matière très chaude où les atomes sont dissociés).

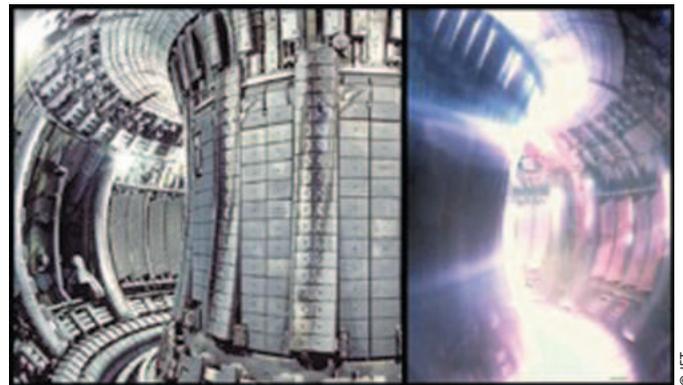
Pas si simple, rétorquent de la salle Sylvaine Turck-Chièze, puis Jean Jacquinet de la tribune. Les recherches fondamentales des spécialistes des plasmas et de la fusion rejoignent celles des spécialistes du Soleil car il s'agit aujourd'hui dans les deux cas de comprendre les instabilités liées au champ magnétique et leurs conséquences. Une mise en commun des acquis et des méthodes ne pourra être que fructueuse.

Est-ce la naissance d'une collaboration entre astrophysiciens avides de connaître l'Univers pour faire reculer l'horizon de notre ignorance et « fusionneurs » dont les travaux visent à domestiquer une source d'énergie fabuleuse et quasi inépuisable (enfin presque) ? Le Dapnia ne peut que se sentir à l'aise dans cette synergie entre recherche cognitive, recherche appliquée et projet hypertechnologique, puisque c'est son pain quotidien. D'autant que l'histoire de la fusion, dont Jean Jacquinet a rappelé les grandes étapes, a montré que la recherche fondamentale en physique des plasmas était un préalable incontournable à l'obtention et à la conservation « d'un morceau de soleil » en bouteille (magnétique). C'est toujours d'actualité.

*Joël Martin (envoyé spécial de ScintillationS, gracieusement invité par la direction de Cadarache)*



Protubérance éruptive du Soleil photographiée par le satellite TRACE le 19 septembre 2000.



Intérieur du JET<sup>3</sup> (Culham, Royaume Uni).  
À droite, le plasma dont on ne voit que le rayonnement visible en haut et en bas. Dans la zone du grand cercle du tore, le rayonnement, plus énergétique, plus visible, sort du domaine visible. Mais le plasma est bel et bien présent.

- (1) Trente pays totalisant deux milliards d'habitants sont impliqués : Chine, Corée du sud, États-Unis, Japon, Russie, et les 25 membres de l'Union européenne. Et peut-être bientôt un milliard de plus avec l'Inde. Le Brésil, le Canada et la Suisse seraient sur les rangs pour devenir « associés ».
- (2) Il fut l'un des artisans de l'implantation d'Iter à Cadarache. Évoquant les grandes étapes de l'âpre compétition franco-japonaise, il a parlé de « bataille de sites » (*ndlr*).
- (3) Joint European Torus, actuellement le plus gros réacteur à fusion du monde.
- (4) À la différence d'autres processus de fusion dans le Soleil, la fusion d-t ne s'accompagne pas d'émission de neutrinos. Elle n'est pas tributaire de l'interaction faible.

## Va-et-vient

**Octobre 2005** – Aubrey Poulizac est recrutée au SACM, Henri Bachacou, au SPP, Walid Benzarti, au Sédi, Javier Castillo-Castellanos, au SPhN et Julien Noury, au SIS. Emmeric Dupont passe du Département d'étude des réacteurs de Cadarache au SPhN. Olivier Meunier arrive au Sédi en provenance de la DEN (précisément, du Service de chimie physique et analytique, Laboratoire interaction laser-matière). Enfin, *last but not least*, Antoine Daël, après un bon bain de Soleil, revient au SACM dont il prend la tête. Côté départs, Pascal Debu quitte la tête du SACM pour prendre la direction du Laboratoire de physique nucléaire des hautes énergies (IN2P3-CNRS-Universités Paris VI et Paris VII), « mis à disposition » de son ancien chef au Dapnia, Michel Spiro. Mais Pascal reste « SACM ». Alain Aspart (SACM) et Gérard Marel (SPP) partent en retraite. Comme d'habitude, *ScintillationS* souhaite à toutes et à tous, partant(e)s comme arrivant(e)s, très bonne chance, joies et épanouissement dans leur nouvel horizon.



**Novembre 2005** – Jean-Claude Launay nous quitte en « départ négocié ». Luciano Moscoso part en retraite. Séverine Langlois arrive au SACM en provenance de la DEN, plus précisément du SAGDS (Service d'assainissement et de gestion des déchets de Saclay). Les becquerels n'ont plus qu'à bien se tenir<sup>1</sup> ! Cinq recrutements

en cette période de Noël : Lise Béraud, au Sénac, Sylvain Broussard au SIS, Jean-Baptiste Melin, au SPP, Yassir Moudden, au Sédi et Stefano Panebianco, au SPhN. Bon nouveaux chemins à ceux qui vont, bienvenue à celles et ceux qui viennent, et joyeuses fêtes à tous (et à toutes).

## Les lauriers du Dapnia

La Helmholtz Association et la fondation Alexander von Humboldt viennent de décerner leur Research Award à Joël Feltesse, ancien chef du Dapnia. Ce prix, créé en 2004, est en principe attribué à six scientifiques de réputation internationale résidant hors d'Allemagne. En 2005, il n'y en a eu que quatre.

Le prochain numéro racontera les belles choses qui ont valu cette récompense à notre Joël (inter)national.



Joël Feltesse.

## (Auto) plume du Dapnia

Ce ne peut être que pure jalousie envers l'ami Roland Lehoucq du SAp, qui publie plus vite que son ombre (*voir ScintillationS n° 68*) : trois mois et demi après un « Que sais-je ? » voué à l'art de décaler les sons (*n° 67 et Les Défis du CEA n° 109*), paraît fin août aux Éditions First, signé du spécialiste des « ndlr » du présent journal, un petit fascicule à trois sous, pardon, trois euros (2,90, exactement). Ce petit livre propose quelques 250 exemples en 160 pages, certains convenables (« *Ce videur a du bol : ce voleur a du bide.* »), d'autres un peu moins (« *Ne confondons pas les vases de Bush et les bouses de vaches !* »), d'autres enfin franchement rabelaisiens : quelques grands classiques (« *Les nouilles cuisent au jus de cane* ») et beaucoup d'inédits (« *La Reine veut encore Blair mais qui va l'apaiser ?* »)

Ou encore celle-ci, dédiée aux chers collègues : « *Ces matheux font converger leurs sommes.* »

Car au Dapnia, on ne manque pas d'ingénieurs matheux...

La Rédaction



(1) Ce peut être dangereux de manier des becquerels, sauf peut-être pour un prêtre qu'assiste la Providence dès qu'il manie les becquerels... (ndlr)

### CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Jean ZINN-JUSTIN

COMITÉ ÉDITORIAL : Joël MARTIN (porte-parole), Claire ANTOINE, François BUGEON, Rémi CHIPAUX, Philippe CONVERT, Françoise GOUGNAUD, Christian GOUFFES, Pierre GUICHON, Christophe MAYRI, Alain MILSZTAJN, Xavier-François NAVICK, Yves SACQUIN, Angèle SÉNÉ, Didier VILANOVA

MAQUETTE : Christine MARTEAU

MISE EN PAGE : GRAPHOTEC

CONTACT : Joël MARTIN - Tél. 01 69 08 73 88 -

Fax : 01 69 08 75 84 - E.mail : joel.martin@cea.fr

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