

GRAVITÉ ET UNITÉ

Vous avez dit recherche fondamentale ? Pourquoi fondamentale ? Parce qu'elle vise à connaître les fondements de notre présence dans l'Univers. Et, plus fondamentalement, à connaître les fondements de la présence même de l'Univers. Mais de quel Univers ? Ce que nous voyons, est-ce vraiment TOUT l'Univers ? Ou bien ne voyons-nous qu'une partie de ce tout ? Les acquis de la science nous ont rendus prudents. Nous savons depuis peu que la matière qui brille ne représente que quatre petits millièmes de la matière de l'Univers. Les autres 99,6 %, c'est-à-dire l'essentiel, est invisible pour les yeux. La matière « ordinaire », celle dont nous sommes faits et qui nous est accessible, via télescopes et détecteurs, représente 4 % de la matière du cosmos. Les autres 96 % sont indétectables et l'on n'en voit que des effets indirects. De quoi est faite cette matière noire ? Comment se transforme-t-elle ? D'où vient-elle ? Où se trouve-t-elle ? Dans notre univers, bien sûr. Mais peut-être aussi ailleurs.



Interrogation fondamentale : y a-t-il un ailleurs ? Y a-t-il, lâchons le mot, des dimensions d'univers qui échappent à notre observation ? Certains le supposent. Outre nos bonnes vieilles trois dimensions d'espace et de la quatrième, le temps, il y en aurait une cinquième, voire d'autres, invisibles car « repliées sur elles-mêmes » comme autant de feuilles immensément minces que l'on a roulées si fin qu'on ne les voit même plus. Ou si peu. Car si ces dimensions existent, les chercheurs ont des idées pour les débusquer. La chasse aux dimensions cachées est ouverte. Paradoxe et beauté de la physique : cette quête de la diversité est l'un des volets d'une quête plus vaste et plus profonde : celle de l'Unité. Un thème fondamental auquel tient particulièrement le Dapnia car il implique les deux infinis.

L'unité de notre monde qui s'étend du quark à la bulle univers, nous l'observons, nous la vivons, mais nous ne la comprenons pas. Pire : les deux théories qui expliquent avec une précision hallucinante l'une, l'infiniment petit (la théorie quantique), l'autre, l'infiniment grand (la relativité générale) sont rigoureusement inconciliables. Trouver la théorie qui concilie les deux, c'est la quête du Graal. On entrevoit des pistes. Une théorie est particulièrement prometteuse : la théorie des supercordes¹. Les cordes seraient des entités physiques élémentaires d'une petitesse inconcevable, 10^{-33} centimètres, dont les différents modes de vibrations engendreraient toutes les particules. Mais ces cordes seraient invisibles car, outre leur extrême petitesse, elles se loveraient dans ces dimensions cachées repliées sur elles-mêmes. Merveilleux raffinement : on entrevoit soudain que, tel un voile, notre horizon pourrait se déchirer sur l'ailleurs. Car ces dimensions cachées vont peut-être bientôt se dévoiler, trahies par des phénomènes observables dans l'infiniment grand comme dans l'infiniment petit. C'est ici qu'intervient la gravité.

La gravité est une force qui s'exerce entre les masses. Son intensité est divisée par quatre quand la distance entre les masses double. C'est ce qu'a trouvé Newton². Mais sa loi en « $1/r^2$ » reste-t-elle vraie quand les masses se frôlent ? Des hypothèses sont lancées : si l'espace a plus que trois dimensions, disons $(3+N)$, la loi de Newton est en « $1/r^{2+N}$ » ; la force de gravité décroît plus vite. Pourquoi cette différence ? Parce que la gravité se propagerait dans toutes les dimensions et nous n'en capterions que sa composante – très réduite – dans nos trois dimensions. Ce serait pour cette raison que la gravité est, pour nous, infiniment plus faible que les autres interactions fondamentales. Nous n'en percevrions que la partie émergée dans notre espace familier. Mais si nous arrivions à mesurer que la gravité décroît soudain plus vite quand la distance entre les masses tombe en dessous d'une certaine valeur, cela signifierait que nous accédons indirectement à une dimension supplémentaire dont nous viendrions de mesurer la taille. Nous n'en sommes pas encore là car il s'agit de mesures terriblement délicates, « polluées » par des phénomènes autres que gravitationnels. En outre, ces mesures ne sont concevables que si les dimensions cachées n'ont pas une taille (en gros le rayon de la feuille enroulée) trop petite. Jusqu'à une fraction de millimètre, comme prévu pour un espace à seulement cinq dimensions, c'est jouable ; mais dans un espace à 10 dimensions comme celui de la théorie des cordes, la taille des dimensions cachées serait comparable justement à celle des cordes, et alors adieu la mesure gravitationnelle directe en laboratoire ! Que faire ?

La physique, c'est merveilleux. Car dans cette quête de l'unité, les deux infinis s'épaulent. Comme au Dapnia. Là où une mesure sur de minuscules choses pourrait s'avérer impossible, une mesure sur un objet gigantesque apporte de précieuses lueurs. Cet objet gigantesque : le bulbe central de notre galaxie. Michel Cassé et Jacques Paul (SAp) nous narrent cette belle rencontre entre la gravitation et l'astronomie gamma.



Deux cerises sur le gâteau : dans ce grave numéro voué à l'unité, un grand moment de détente nous est offert par Michel Cribier (SPP), grand pêcheur au neutrino, qui brode de façon incessante avec une verve bien agencée sur les employeurs d'unités qui ne veulent pas l'unité, et un insoutenable suspense est distillé par Pierre Guichon (SPHn) : l'accélérateur Cebaf grisé par ses succès se serait-il mis à voir double ?

Joël Martin (ScintillationS)

(1) On trouve une introduction à cette théorie (en anglais) sur le site <http://superstringtheory.com/index.html>. On peut aussi feuilleter un excellent diaporama de Nicolas Chatillon (SPHt) : « Voyage à travers la 5ème dimension » (<http://nicolas.chatillon.free.fr/1>)

(2) Au moment où une gomme est tombée sur son plan (NDLR).

Gravitons galactiques et dimensions cachées

Selon des théories modernes (voir l'éditorial, page 1), l'Univers posséderait d'autres dimensions spatiales que les trois qui nous sont familières (longueur, largeur, hauteur). Ces dimensions repliées sur elles mêmes seraient de taille finie. Michel Cassé et Jacques Paul (SAP) avec Gianfranco Bertone et Günter Sigl (Institut d'astronomie de Paris), viennent de montrer que l'on pouvait tester cette hypothèse de façon originale grâce à l'émission de rayons gamma de hautes énergies par la Galaxie. Ces spécialistes de l'astronomie gamma (voir ScintillationS n° 41, 45, 52 et 56) ont pu, en prime, donner des limites supérieures pour les tailles de ces dimensions « cachées », en fonction de leur nombre supposé.

Gravitation et gravitons

La force de gravité est de très loin la force la plus faible des quatre interactions fondamentales : interaction forte, interaction faible, interaction électromagnétique, interaction gravitationnelle (voir le glossaire, n° 42 et le tableau récapitulatif, page 3). Pour cette raison, son unification avec les autres forces reste très difficile à réaliser. Dans la théorie des supercordes cette unification est peut-être possible si l'espace-temps possède plus de quatre dimensions (trois dimensions spatiales, plus une dimension temporelle).

Les dimensions supplémentaires de l'espace seraient repliées sur elles-mêmes jusqu'à n'occuper que de très petites tailles impossibles à mettre en évidence dans le monde ordinaire. Une conséquence importante de la présence de ces dimensions « cachées » serait l'existence de *gravitons massifs*, outre le graviton de masse nulle particule encore hypothétique qui, dans notre univers « classique », transmettrait la force de gravité tout comme la particule de lumière, le photon, transmet la force électromagnétique. Certains scénarios prédisent la production d'une grande quantité de gravitons massifs lors de l'apparition d'une supernova, explosion d'une étoile massive au cours de laquelle le cœur de l'étoile est transformé en un petit astre dense, une étoile à neutrons (voir n° 41).

Les astrophysiciens Hannestad et Raffelt² ont montré en 2003 que de ces gravitons massifs produits en grand nombre lors de l'explosion peuvent survivre très longtemps en orbite autour de l'étoile à neutrons nouvellement formée. Ils se désintègrent lentement en produisant des paires électron-positon et des rayons gamma de haute énergie (de l'ordre de 100 mégaelectronvolts, soit cent millions de fois plus énergiques que les rayons de lumière visible). Le flux attendu de rayons gamma dépend en particulier du nombre exact de dimensions supplémentaires de l'espace et de leurs tailles.

Émission gamma de la Galaxie

C'est en utilisant les résultats du satellite CGRO-Compton (illustration de gauche) de l'agence spatiale américaine NASA travaillant sur l'émission gamma du centre de la Galaxie, que nous avons obtenu des limites supérieures des dimensions cachées d'une précision inédite.

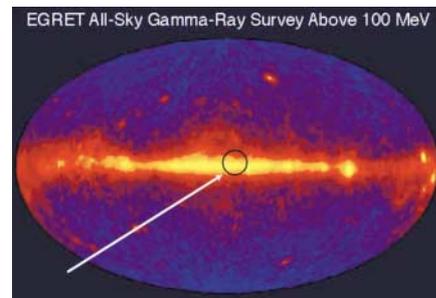
Le bulbe central de notre galaxie est en effet peuplé de ses plus vieilles étoiles. Un grand nombre y a déjà explosé, laissant derrière elles près d'un milliard d'étoiles à neutrons dans un rayon d'environ 5 degrés autour du centre (la sphère de la figure de droite, d'un diamètre de quelques milliers d'années-lumière). Comme les hypothétiques gravitons peuvent survivre jusqu'à plusieurs milliards d'années autour de ces astres denses, cette région précise de la galaxie devrait donc produire un important flux de rayons gamma, preuve de la désintégration lente des gravitons. En considérant que le flux de rayons gamma mesuré par l'instrument EGRET (Télescope de l'expérience de rayons gamma énergétiques) à bord du satellite CGRO Compton correspond à la valeur maximale de l'émission par les gravitons, nous en avons déduit la taille maximale des dimensions cachées. Hannestad et Raffelt² avaient obtenu un tel résultat en analysant l'émission gamma individuelle d'étoiles à neutrons isolées, mais notre statistique bien plus abondante provenant d'une collection de plus d'un milliard de telles étoiles permet d'obtenir un résultat beaucoup plus précis.

Cette taille maximale des dimensions cachées varie selon le nombre de dimensions supplémentaires. Avec seulement une dimension supplémentaire (espace-temps à 5 dimensions), la taille maximale est de 400 milliardièmes de mètres, une distance pour laquelle la force de gravité commence à pouvoir être étudiée en laboratoire (voir l'édito). Pour un espace-temps à 6 ou 7 dimensions cachées, tel que prévu par la théorie des cordes, la taille limite calculée est en revanche très petite, d'environ 5 ou 3 10^{-14} m (soit quelques dizaines de fois le rayon du proton). Il s'agit de la limite la plus coercitive obtenue jusqu'ici sur les dimensions cachées de l'Univers.

Michel Cassé et Jacques Paul (SPP)



Le satellite CGRO-Compton (photo NASA).



Carte de l'émission de rayons gamma de haute énergie de la Galaxie (photo NASA).

(1) The Gamma rays from the Galactic bulge and large extra dimensions, à paraître dans Physical Review Letter (2004), http://fr.arxiv.org/PS_cache/hep-ph/pdf/0309/0309173.pdf

(2) Supernova and neutron-star limits on large extra dimensions reexamined, Physical Review D76, 125008, <http://fr.arxiv.org/abs/hep-ph/0304029>

Tableau récapitulatif*

Interaction	Particules régies**	Particules messagères	Portée	« Charge » spécifique	Intensité relative
Gravitationnelle Pesanteur, les marées, les trajectoires des planètes...	Toutes les particules	Graviton (?)	infinie, décroît avec la distance	 Masse	10^{-40}
Électromagnétique Quasiment tous les phénomènes de la vie courante	Quarks, leptons chargés et bosons intermédiaires chargés***	Photon	infinie, décroît avec la distance	 Électricité	10^{-2}
Forte Cohésion des noyaux atomiques	Quarks	Gluon	10^{-15} m, croît avec la distance	Couleur	1
Faible Radioactivité bêta, soleil	Leptons et quarks	Bosons intermédiaires chargés (W^+ , W^-)*** et neutre (Z^0)	10^{-18} m	Faible	10^{-7}

* http://www.cerimes.education.fr/e_doc/forces/ (un peu rebricolé). La photo de l'éclair jaillit du site <http://www.lafoudre.com/photo.htm>
 ** Voir le tableau des particules dans *ScintillationS* n° 5, 19 ou 47.

Conflit d'unités au Daphnia ?

Des menaces planent sur le Daphnia où se posent avec acuité des problèmes d'unité ! Lecteurs sensibles, ne tournez pas précipitamment la page. Cet article N'EST PAS l'une de ces diatribes enflammées dont l'auteur est coutumier. Que nenni ! Les unités qu'il présente ne soudent pas mais divisent le Daphnia. Car ce sont les unités de mesure.

Tout étudiant qui arrive dans un laboratoire de recherche découvre, stupéfait, que les unités de base, le mètre, le kilogramme, le joule, etc., qu'on lui a inculquées sont, pour la plupart, ignorées des chercheurs. En effet, les physiciens d'une discipline s'ingénient à créer leur propre système d'unités, rendant pour le moins la communication difficile entre spécialistes de domaines différents, sans parler du grand public.

Ainsi pour un astrophysicien l'unité de masse est celle du Soleil : $1,989 \cdot 10^{30}$ kg. Curieuse unité puisque qu'elle diminue de $1,35 \cdot 10^{17}$ kg par an, compte non tenu de la perte de masse due au « vent solaire ». C'est déprimant pour les personnes au régime, car si elles expriment leur masse en fraction de masse solaire, elles ont l'impression de grossir sans avoir pris un gramme... Au SPP, on mesure les masses en GeV¹. Cette unité, qui vaut $1,78 \cdot 10^{-27}$ kilogramme n'est guère qu'à 57 ordres de grandeur de (traduisez : elle est 10^{57} fois

plus petite que) celle des collègues du SAp. De plus, par confusion de langage, ce même mot, GeV, sert aussi d'unité d'énergie et même de quantité de mouvement. D'où de nombreuses erreurs qui guettent l'étudiant et même parfois le physicien le plus aguerri.

Tout le monde apprend, en lisant les notes de bas de page, que l'électronvolt (eV) est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de un volt. Cette définition fait jaillir en moi irrésistiblement l'image d'un petit électron au bord de l'une des pattes des piles Wonder, hésitant à plonger pour gagner l'autre patte. Mais il se sent si faible depuis qu'il sait que son énergie n'est qu'un six milliardième de milliardième de l'énergie cinétique d'un piaf de 20 grammes volant à 36 km/h, c'est-à-dire 1 joule ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ joule} = 1/6 \cdot 10^{18} \text{ J}$) !

Restons en physique des hautes énergies. Surprise : les chocs titanesques qui seront provoqués dans le LHC ne sont que

l'équivalent de la collision frontale de deux escargots lancés au galop. Il est vrai qu'imaginer deux hordes de 100 milliards d'escargots se ruant ventre à terre les uns contre les autres donne le frisson...



En dépit du fait que les rayons cosmiques les plus énergiques dépassent la dizaine de joules, le SAp et le SPP s'accordent, pour une fois, à les compter en électronvolts, bien qu'il faille utiliser des centaines de milliards de milliards d'eV

(1) Plus précisément en GeV/c². Le GeV, c'est l'unité d'énergie. Mais Albert (Einstein) nous a appris que masse et énergie c'était pareil. Enfin, pareil, au facteur c² près. Les physiciens sont de drôles de gens : c², le carré de la vitesse de la lumière, a beau valoir 90 millions de milliards en unités légales (mètre carré/seconde carrée), ils s'obstinent à utiliser un système d'unité où c = 1. Il leur est alors un peu trop facile, en exprimant la masse en unité d'énergie, d'instiller la confusion voire l'angoisse dans les neurones d'infortunés stagiaires venant juste de comprendre que l'angle droit ne bout pas à 90 degrés.

pour exprimer ces quantités. Mais aussi énergiques soient-ils, ces rayons n'ont pu élever que de quelques dix microdegrés la température du bain d'Archimède, qui n'en a rien su.

Une supernova de type II délivre en explosant la respectable énergie d'environ $3 \cdot 10^{46}$ joules, que néanmoins il est de bon ton d'exprimer en ergs (1 joule vaut 10^7 ergs). Mais il est vrai qu'avec de tels grands nombres on ne sait plus trop où l'on en est...

Un sommet d'incompréhension est atteint quand un physicien nucléaire désireux de construire un détecteur va voir son collègue du Drecam² spécialiste de la supraconductivité ; comme en ont besoin pour se comprendre des Chinois de Pékin et de Canton, il faut recourir à l'écriture pour dissiper les malentendus entre les MeV (10^6 eV) du premier et les meV (10^{-3} eV) du second.

Seule α , la constante de structure fine, semble faire l'unanimité. Mais c'est un nombre sans dimension, donc sans unité. Unanimité d'ailleurs toute relative, car α

est plus connue pour valoir $1/137$ que $7,2973503 \cdot 10^{-3}$, voir la note n° 9, page 6) et la formule mathématique qui exprime α n'est pas la même dans les différents systèmes d'unités utilisés. Dans le vieux système CGS (centimètre, gramme, seconde, où l'unité de force est la dyne, qui équivaut donc à un poids), $\alpha = e^2/\hbar c$. Mais dans le système international SI, avatar moderne du système MKSA (mètre, kilogramme, seconde, ampère), $\alpha = e^2/4\pi \epsilon_0 \hbar c$. Et dans le SPh (système des physiciens, où pratiquement tout, du moins \hbar et c , est égal à 1), $\alpha = e^2$. Bon courage³ !

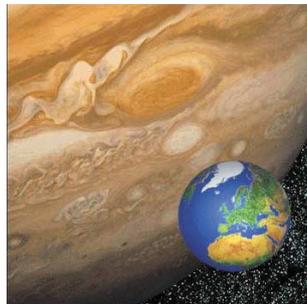
Force est de constater qu'au Dapnia, seuls les ingénieurs et les techniciens des services techniques utilisent les unités de base et celles dérivées de ce système international SI. En dépit de son gigantisme, l'unité de capacité (non pas en Droit mais celle d'un condensateur), le farad, est utilisé avec les préfixes appropriés (micro, nano, par ci, pico, femto, par là). Le tesla semble avoir définitivement triomphé au SACM dans sa lutte contre le gauss. Sans doute parce

que nos cryomagnéticiens flirtent avec la trentaine de teslas, soit quelques 300 000 gauss, en gros 600 000 fois le champ magnétique terrestre. Quelques exceptions subsistent au Sédi et ailleurs, où l'influence américaine sur les tiroirs électroniques et les écrans d'ordinateurs conduit à mettre les pouces⁴ en place des centimètres.

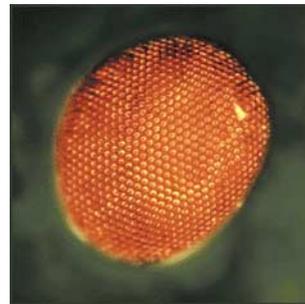
Nous ne sommes pas les seuls à nous isoler derrière nos unités. La DAM et les militaires explosent en kilotonnes ; ce n'est pas la masse des armes de destructions massives, mais l'énergie qu'elles peuvent libérer : une kilotonne vaut 4,18 térajoules ($4,18 \cdot 10^{12}$ J). Nonobstant, la DAM a décidé de baptiser son nouveau bibelot : laser Mégajoule (LMJ), respectant ainsi les unités légales. Au passage, et même si le LMJ arrive un jour à produire 10 fois plus d'énergie que celle qu'on lui injecte pour qu'il fonctionne, cela ne sera jamais que l'énergie que dépense un être humain en une journée à ne rien faire. On néglige la transpiration secrétée par la lecture du présent article.



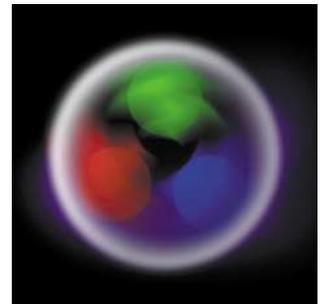
50 000 parsecs



50 000 kilomètres



1 millimètre

1 femtomètre⁵

Pour conclure, moins de 3 kilomètres séparent le SPP du SAp et du SPhN, soit une centaine de femtoparsecs (10^{-15} pc⁶). Je laisse au lecteur le soin de calculer la somme (en zlotys) qu'il dépense en essence pour parcourir cette distance astronomique, sachant que sa voiture consomme $5 \cdot 10^{-8}$ m², l'équivalent des 5 litres aux 100 kilomètres du garagiste⁷.

Si des garagistes étaient d'anciens physiciens des particules, ils ne manqueraient pas d'exprimer la consommation de carburant dans leur unité de surface favorite, le barn, qui vaut 10^{-24} cm². Nous pourrions alors parler de voiture économique à propos d'une voiture consommant 500 milliards de milliard de barns de carburant⁸.

Donc, veillons ! La disparité des unités peut transformer le Dapnia en tour de Babel, foyer d'incompréhension, sinon de zizanie. Créons d'urgence au Dapnia un deuxième CU (Conseil d'unités).

Michel Cribier (SPP)

[Iconographie, grains de sel et notes de bas de page de Joël Martin, (SPhN)]

(2) Département de recherche sur l'état condensé, les atomes et molécules, partie de la DSM (Direction des sciences de la matière) au CEA.

(3) \hbar est la constante de Planck divisée par 2π et vaut $1,0545716 \cdot 10^{-34}$ joule.seconde, ou bien $6,582119 \cdot 10^{-22}$ MeV.s ; ϵ_0 est la permittivité diélectrique du vide, qui vaut : $8,854187817 \cdot 10^{-12}$ farad/mètre ; on en use aussi sous la forme $1/4\pi \epsilon_0 \cdot 9 \cdot 10^9$ m/F.

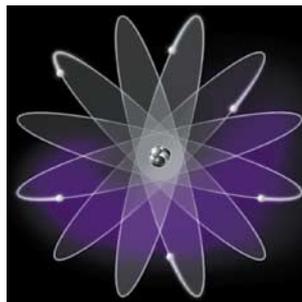
(4) Ah ! ces unités anglo-saxonnes : la livre est à la fois unité monétaire et unité de masse.

(5) Le femtomètre vaut 10^{-15} mètres. On l'appelait naguère « fermi » du nom d'Enrico Fermi (1901-1954). Prix Nobel de physique en 1938, il réalisa la première pile atomique en 1942 sur un terrain de volley sis sous le stade de Chicago. Chance incroyable pour les victimes de la dictature des Unités, « femtomètre » et « fermi » ont le même symbole « fm ».

(6) Le parsec vaut 3,26 années-lumière, soit $3,08568025 \times 10^{16}$ mètres. Ne pas confondre son symbole « pc » avec « pC », symbole du picocoulomb (10^{-12} C). Le coulomb (C) est l'unité de charge électrique, valant environ $6 \cdot 10^{18}$ fois la charge élémentaire du proton (ou de l'électron, avec un signe moins). Un picocoulomb, c'est donc la charge totale de quelque six millions de protons (ou d'électrons).

(7) La consommation d'un véhicule s'exprime (chez nous) en litres aux 100 km. C'est un volume divisé par une distance, donc une surface : $5 \cdot 10^{-8}$ m² équivaut à $5 \cdot 10^{-3}$ m³ par mètre parcouru, soit $5 \cdot 10^{-5}$ litres/m, donc $5 \cdot 10^{-5} \times 10^3$ pour parcourir 10^3 m, c'est-à-dire 100 km. Donc $5 \cdot 10^{-8}$ m² est bien l'équivalent des « 5 litres au cent » de notre garagiste, CQFD.

(8) Avez-vous remarqué que votre consommation d'énergie électrique n'est pas exprimée en joules, mais en kilowatt.heure ? Ils sont malins à EDF : un kWh c'est énorme, c'est 3,6 millions de joules ! Plus de trois mégajoules, et sans laser ! Économisons l'énergie !



Cette pâquerette contient environ cent mille fois plus d'atomes qu'il s'est écoulé de secondes depuis le Big-Bang.

La pâquerette est cueillie à l'adresse : <http://mes.photoz.free.fr/SousPage/Fleur.html>

Les photos galactique et zoologique (œil de mouche) et les vues d'artiste planétaires et quarkoatomiques ont été pêchées sur le site : <http://microcosm.web.cern.ch/Microcosm/P10/french/P0.html>

Le détecteur à escargots est un « éclaté » d'Alice, destiné à détecter du plasma quark-gluon au LHC

L'accélérateur qui voit double

Pour observer la forme des particules élémentaires, les physiciens utilisent de gigantesques microscopes électroniques, les accélérateurs d'électrons. Mais quand, avec le même appareil, deux observateurs voient deux images complètement différentes du proton, on commence à se poser des questions. Pierre Guichon (SPhN) et Marc Vanderhaeghen (université de Williamsburg) proposent une explication.

[On peut d'abord lire ou relire les numéros 42 et 54 de ScintillationS.]

Parmi les particules élémentaires, le proton joue un rôle central car il constitue, sous forme d'hydrogène¹, la quasi-totalité de la matière visible de l'univers. C'est aussi, *grosso modo*, la moitié des constituants des noyaux atomiques, l'autre moitié étant les neutrons. Il est donc normal qu'on s'intéresse de près à cette particule qui n'est pas si élémentaire que ça, bien que son rayon soit inférieur à un millionième de millionième de millimètre. Pour l'examiner, il faut un microscope électronique à énorme grossissement : c'est l'accélérateur d'électrons. Actuellement il n'en existe que deux capables de fournir une image raison-

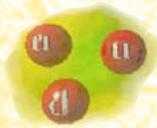
nablement précise (précision meilleure que le trentième de femtomètre, environ $3 \cdot 10^{-17}$ m, soit en gros un quarantième du rayon du proton). Ils sont tous deux américains : le quadragénaire Slac² en Californie, et le fringant Cebaf, situé au laboratoire Jefferson (JLab) en Virginie³. L'Europe, qui naguère eut un projet ambitieux, Elfe⁴, se contente d'envoyer des physiciens travailler outre-Atlantique⁵.

Le proton est constitué de particules plus petites dont certaines, les quarks, portent une charge électrique. Quand un électron, catapulté par l'accélérateur, arrive au voisinage du proton, sa charge électrique négative est attirée par les charges des particules internes au proton. Cela infléchit la

trajectoire de l'électron et, avec un appareil de détection idoine, on détermine la probabilité pour qu'il soit dévié dans telle ou telle direction. On appelle cela mesurer la *section efficace de diffusion*. Cette mesure permet de reconstituer la répartition des charges ce qui donne une image « électrique » de la forme du proton, que les physiciens appellent *facteur de forme électrique* et notent G_E . Elle permet aussi de reconstituer les mouvements des charges à l'intérieur du proton, mouvements qui engendrent des courants électriques, eux-mêmes générateurs de magnétisme. La répartition de ce magnétisme au sein du proton, c'est le *facteur de forme magnétique* G_M (voir *ScintillationS* n° 54).

Afin de « voir » la structure interne du proton, l'électron doit pouvoir s'en approcher suffisamment avant que la force électrique n'infléchisse sa trajectoire. Il faut donc qu'il ait une énergie assez élevée pour que sa déviation ne s'amorce que lorsque le proton lui apparaît non plus comme un point mais comme un objet possédant un certain volume. À l'intérieur de ce volume, chaque particule porteuse d'une charge occupe une position différente. Ainsi, la distance entre l'électron et chacune de ces charges est différente. Et comme l'intensité de la force électrique entre deux charges est inversement proportionnelle au carré de leur distance, la contribution de chacune des charges du proton à la déviation de l'électron est particulière. En analysant finement le processus de diffusion et en mesurant le nombre d'électrons déviés dans telle ou telle direction en fonction de leur énergie incidente, les physiciens sont capables, en (très) gros, de détailler l'apport de chaque charge à cette déviation.

Résumons : la vision en détails du proton est d'autant plus fine et précise que l'électron a eu le loisir de s'approcher le plus possible du proton avant d'être dévié. Les physiciens expriment cela par la poétique formule : « *Les facteurs de forme sont fonction de la variable Q^2 , combinaison de l'énergie de l'électron incident et de l'angle dont il dévie.* » Plus Q^2 est grand, meilleure est la définition de l'image finale. Il faut donc des accélérateurs capables de communiquer une énergie élevée aux électrons, au minimum plusieurs milliards d'électronvolts.



(1) Le noyau de l'atome d'hydrogène est précisément constitué d'un proton.

(2) Stanford Linear Accelerator, voir n° 48.

(3) Continuous electron beam accelerator facility. Voir *ScintillationS* n° 20, 26, 30, 31, 40, 42, 50. Premier faisceau : 1996.

(4) Voir *ScintillationS* n° 5, 8 et 22.

(5) Des physiciens des particules américains travaillent au Cern depuis la mort prématurée de leur monstre de 87 kilomètres de tour, le SSC (Superconducting Super Collider), d'autres disposent du Tevatron au Fermilab près de Chicago. La mondialisation de la recherche n'a pas attendu la mondialisation commerciale.

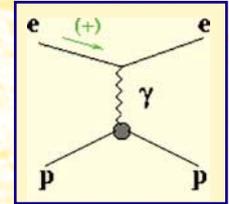
La connaissance fine de ces deux facteurs de forme procure des informations fondamentales sur la structure du proton et

c'est pourquoi l'on continue de consacrer des efforts importants à leur détermination expérimentale par la diffusion d'électrons

de haute énergie (voir aussi *ScintillationS* n° 55).

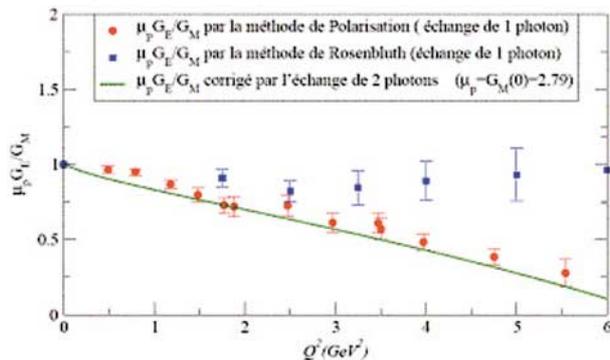
La mesure des facteurs de forme électrique et magnétique

La méthode « de Rosenbluth » – Le principe de la mesure repose sur un « modèle » assez simple : l'électron incident émet un photon « virtuel » qui est absorbé par la particule cible (*schéma*). On peut alors montrer que la probabilité de diffusion est une combinaison de G_E et G_M . En variant l'énergie du faisceau et l'angle de diffusion à Q^2 constant, on change les coefficients de cette combinaison, ce qui permet d'extraire séparément G_E et G_M . C'est cette méthode qu'a utilisé le Slac.



La méthode « de polarisation » – La méthode de Rosenbluth fut la seule praticable à grand Q^2 jusqu'à l'avènement des faisceaux d'électrons polarisés⁶ au JLab. Lorsque l'électron est polarisé, le photon échangé lors de la diffusion transmet une partie de cette polarisation à la cible. En mesurant la polarisation transférée, on accède directement au rapport G_E/G_M (voir n° 54), toujours en supposant l'approximation d'échange d'un seul photon.

Les premiers résultats du JLab utilisant une nouvelle méthode dite « de polarisation » (voir l'encadré page 6) ont été publiés vers la fin des années 90 et complétés par la suite. Or, ils sont manifestement incompatibles avec le même rapport mesuré au Slac par la méthode traditionnelle de Rosenbluth (*encadré*). Le graphique montre l'ampleur du désastre : les résultats s'écartent de plus en plus à mesure que croît Q^2 . Lorsque cette variable atteint 5 GeV^2 , le résultat du Slac est le triple de celui du JLab !



Rapport des deux facteurs de forme, électrique et magnétique, du proton en fonction de Q^2 multiplié par μ_p , moment magnétique du proton, qui équivaut à $G_M(0)$, facteur de forme magnétique pour $Q^2 = 0$. En rouge, la mesure de JLab ; en bleu, celle du Slac. La courbe verte est une courbe théorique tenant compte des derniers raffinements (voir plus loin).

Curieusement il n'y eut pas vraiment de réaction devant cette contradiction. L'avis général et tacite était que la méthode de Rosenbluth est si difficile à mettre en oeuvre à grand Q^2 qu'il valait mieux jeter

le voile pudique de l'oubli sur les résultats du Slac. Les résultats du JLab prirent donc le devant de la scène et déclenchèrent une pluie de spéculations car cette décroissance de G_E/G_M (ronds rouges sur le graphique) était inattendue pour les théoriciens.

Patatras ! Au printemps 2003 une expérience du JLab utilisant cette fois la technique de Rosenbluth vient confirmer les anciens résultats du Slac pour le rapport G_E/G_M . Qu'un même laboratoire produise des résultats complètement différents pour

la même quantité faisait un peu désordre et un certain malaise fut perceptible chez les physiciens qui annoncèrent la chose à l'atelier de Trente (Italie) en avril 2003.

Très vite les soupçons se portèrent sur l'approximation d'échange d'un seul photon, en dépit des tests que cette approximation avait réussi dans le passé. Il faut dire qu'après avoir vérifié tout le formalisme, on ne voyait plus rien

d'autre à mettre en cause dans l'analyse théorique... Mais abandonner cette approximation n'est pas une mince affaire car on ne sait pas évaluer l'échange de deux photons sans faire apparaître de nou-

velles inconnues en plus des facteurs de forme que l'on veut mesurer.

Plutôt que d'ouvrir cette « boîte de Pandore », Marc Vanderhaeghen et moi avons proposé une analyse, publiée récemment⁷, où il n'est pas nécessaire de calculer les effets impliquant l'échange de plusieurs photons. Si l'on abandonne l'approximation d'échange d'un seul photon, que se passe-t-il ? On se retrouve à calculer l'amplitude de diffusion électron-proton⁸ la plus générale. Or cette amplitude n'est pas si compliquée et l'on trouve qu'elle ne dépend en fait que de trois inconnues. Les deux premières sont, à peu de chose près, les facteurs de forme que l'on veut mesurer. Seule la troisième inconnue est une quantité nouvelle qui n'existe que si plusieurs photons sont échangés pendant la diffusion. L'idée s'impose alors d'elle-même : il suffit de combiner judicieusement les données de la méthode de Rosenbluth et celles de la méthode de polarisation pour extraire cette inconnue qui mesure l'erreur due à l'approximation d'échange d'un seul photon. La bonne surprise fut de trouver que cette quantité est très petite, validant ainsi notre analyse. En effet par rapport à l'échange d'un seul photon, l'échange de deux photons est un mécanisme « d'ordre supérieur » bien plus faible que le premier⁹. Une fois cette inconnue fixée par la combinaison des deux expériences, on peut l'uti-

(6) La polarisation est évoquée dans les numéros 42, 54, 55 et 60 de *ScintillationS*.

(7) Dans la revue *Physical Review Letters*, volume 91, n° 14.

(8) C'est la grandeur physique qui mène à l'évaluation de la probabilité de la diffusion fonction de l'énergie de l'électron incident et de son angle de déviation.

(9) C'est un peu comme en maths, où l'on fait des approximations du genre $(1 + \epsilon)^2 \approx 1 + 2\epsilon$, quand ϵ est petit devant 1 car on peut négliger le troisième terme égal à ϵ^2 : si $\epsilon = 1/100$, cela équivaut à dire que $1,0101 \approx 1,0100$. Or, le paramètre-clé dans le calcul des processus que régit la force électromagnétique, c'est la constante de structure fine α , égale à $1/137$. En gros, le processus à un photon est proportionnel à α , celui à deux photons, à α^2 , etc.

liser pour déterminer un rapport G_E/G_M expérimental, corrigé en tenant compte de l'effet d'échange de plusieurs photons. Le résultat est donné par la courbe verte continue du graphique. On constate alors que la valeur de G_E/G_M ainsi obtenue coïncide pratiquement avec celle mesurée par la méthode de polarisation. En d'autres termes, la correction due aux échanges de plusieurs photons a un effet négligeable quand on utilise cette méthode, alors qu'il est énorme, à grand Q^2 , dans le cas de la méthode de Rosenbluth.

Ces processus si longtemps négligés impliquant l'échange de deux photons recèlent peut-être de nouvelles informations sur la structure du proton. De pro-

chaines expériences vont les étudier systématiquement. L'avenir de ce domaine inexploré reste à écrire grâce à l'avènement de cette technique moderne de mesure par polarisation. Cette *terra incognita* n'aurait jamais été entrevue sans les qualités d'un accélérateur moderne comme Cebaf.

C'est parce qu'il ne voit pas trouble que Cebaf a momentanément vu double. Le don de double vue permet parfois de voir au-delà du visible.

Pierre Guichon (SPhN)

Pour en savoir plus, on peut lire le « fait marquant » : http://www.dapnia.cea.fr/Faits_marquants/53/



Photo aérienne de Cebaf (Continuous Electron Beam Accelerator Facility), du laboratoire Jefferson (Jlab), en Virginie (États-Unis). L'espèce d'hippodrome en pointillés rouges localise l'accélérateur et les trois cercles rouges signalent les trois halls expérimentaux.

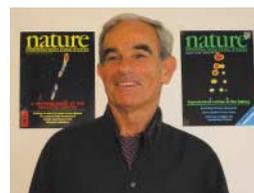
Les lauriers du Dapnia



Vanina Ruhlmann-Kleider (SPP) vient d'obtenir la médaille d'argent 2003 du CNRS qui « *distingue des chercheurs au début de leur ascension, mais déjà reconnus sur le plan national et international pour l'originalité, la qualité et l'importance de leurs travaux.* » Vanina, qui a œuvré sur le détecteur Delphi du LEP (*ScintillationS* n° 12, 26, 28, 43, 49), a donné le 22 janvier 2004, un remarquable séminaire sur l'histoire de ce « *Large Electron Positron Collider* », suivi

d'un bien sympathique apéritif. Cette médaille récompense une physicienne talentueuse dont l'activité s'étend, au delà de sa discipline, à la défense du Dapnia. Avec sa médaille d'argent, Vanina est une preuve vivante de l'étroite symbiose, méconnue par certains, du Dapnia avec le CNRS.

Félix Mirabel (SAP), dont *ScintillationS* (n° 21, 50, 52, 56, 57, 59) et, accessoirement, *Nature*, relatent régulièrement les hauts-faits en matière de microquasars et autres trous noirs baladeurs plus ou moins catapultés par des supernovæ, vient d'être fait docteur *honoris causa* de l'université de Barcelone le 25 février 2004. Il se retrouve en bonne compagnie, puisque au cours des vingt dernières années, seule-



Félix Mirabel

ment deux physiciens ont reçu la même distinction : en 1990, Évry Schatzmann, que d'aucuns considèrent comme le fondateur de l'astronomie moderne en France et, en 1996, Steven Weinberg, prix Nobel de Physique 1979. Nos félicitations les plus chaleureuses et réitérées, puisque notre collègue vient aussi de recevoir le prix Rossi de la Société américaine d'astronomie. Le Dapnia qui rayonne jusque là-bas est donc tout, sauf isolé...

Vanina, Félix, vos lauriers sont un baume sur les plaies du Dapnia...

Va-et-vient

Décembre 2003 – En cette fin d'année 2003, saluons le départ de Philippe Lavocat (SAP) mis à la disposition du Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL) d'Orsay (CNRS), dont il devient directeur technique adjoint. Bravo pour cette accélération de carrière et tous nos vœux de réussite. Michel Masson (SIS) part en retraite. Gérard Tarte (Sédi) part en « départ négocié », et Michel Wallet (Sédi) part en « NIG 119 ». On leur souhaite fructueuse et harmonieuse route. Ces quatre départs s'ac-

compagnent de deux recrutements : Olivier Gévin, au Sédi, et Koryo Okumura au SAP. La plus chaleureuse bienvenue à ces ultimes embauchés de 2003.

Janvier 2004 – Une embauche : Carine Van Hille est recrutée au SIS. Cinq mutations : Gilles Bondis quitte le SDA pour la DEN¹, Simone Peresse ainsi qu'Alain Le Saux migrent du SDA à Dapnia/DIR, Philippe Fontaine passe du SPhT (Service de physique théorique, DSM) au SIS, et Michel Talvard vient renforcer le SAP,

venant de la DRT². Le détachement de Thierry Montmerle (SAP) comme directeur du Laboratoire d'astrophysique (CNRS) de Grenoble, annoncé dans notre n° 59, prend effet en cette aube de l'an nouveau. Ainsi se confirme de façon éclatante le goût permanent (quoique ça et là ignoré) du Dapnia pour une forte symbiose avec le CNRS, dont Thierry, un des pionniers de *ScintillationS*, et Philippe Lavocat (voir décembre 2003 de ce Va-et-vient) se révèlent d'éminentes preuves. Bienvenue et/ou

(1) Précisément (merci, Armelle !) pour DEN/DSRN/SAGD (Direction de l'énergie nucléaire/Département des réacteurs et services nucléaires/Service d'assainissement et de gestion des déchets).

(2) Précisément (re-merci, Armelle !) de DRT/DECS/SE2M (Direction de la recherche technologique/Département d'élaboration et de la recherche des structures/Service d'élaboration et de la mise en forme des matériaux).

bonne chance à toutes et à tous. Six départs en ce début d'hiver et de gel annoncé des embauches : Nicole Fabre quitte le SIS en « départ négocié », Françoise Gaulier part du SAp pour jouir d'une retraite que l'on conjecture fort active, Jean-Pierre Auclair et Denis Thomas partent du SACM en retraite « IG 213 ». Michel Rouger tire sa révérence au Sédi, Armand Zylberstejn tire la sienne au SPP et tous deux entament une retraite classique. On la leur souhaite jubilatoire, ainsi qu'à celles et ceux qui partent aussi. Le Dapnia les voit s'éloigner avec un petit pincement au cœur. Comme toujours, et surtout à présent...

Février 2004 – Stéphane Carré démissionne du SACM. Bonne chance sur sa nouvelle route.

Un déclassement classé sûr

Le décret interministériel n° 2004-48 autorisant la mise à l'arrêt définitif et le démantèlement de l'INB³ 43, l'ancien accélérateur linéaire de Saclay (ALS, voir *ScintillationS* n° 1) a été signé le 12 janvier 2004. Paru au *Journal officiel* du lendemain, p. 991, il peut se lire *in extenso* sur le site : <http://www.legifrance.gouv.fr/WAspad/UnTexteDeJorf?numjo=INDI0301929D>



Le tunnel de feu de l'Accélérateur Linéaire de Saclay (ALS) enterré sous l'Orme des Merisiers, en cours de démontage.



Manutention lourde sur le spectromètre 600 (plus de 100 t) de HE1, l'une des salles expérimentales de l'ALS.

La méthodologie mise en oeuvre lors des opérations de mise à l'arrêt définitif et de démantèlement de l'accélérateur Saturne de Saclay – l'INB 48 – a été donc une nouvelle fois récompensée par l'obtention d'un décret interministériel (signé Jean-Pierre Raffarin, Nicole Fontaine, Francis Mer et Roselyne Bachelot) autorisant ces mêmes opérations pour l'accélérateur linéaire de Saclay (ALS) – l'INB 43.

Ce feu vert est la reconnaissance officielle de l'expertise des équipes du Service de déclassement des accélérateurs (SDA) du Dapnia. Cette expertise en matière de sûreté nucléaire s'appuie sur l'ensemble des compétences du Dapnia, et s'exerce d'ores et déjà sur des projets comme Spiral2, auxquels participe le département. Elle est également valorisée dans d'autres secteurs du CEA comme le Département « patrimoine et assainissement » de la Direction de l'énergie nucléaire (DEN). Cela témoigne de l'engagement du Dapnia dans le domaine de l'énergie nucléaire, comme dans d'autres domaines qui ne relèvent pas seulement de la recherche fondamentale.

Contact : Danielle Leclerc (SDA)
(01 69 08 40 96 ; leclerc@dapnia.cea.fr)

L'anti-gluon d'honneur

Il est décerné d'enthousiasme à l'auteur de cette phrase d'une brûlante actualité : « *Il n'existe pas une catégorie de sciences auxquelles on puisse donner le nom de sciences appliquées. Il y a la science et les applications de la science, liées entre elles comme le fruit à l'arbre qui l'a porté.* » Cette phrase fut prononcée en 1871 par un certain Louis Pasteur⁴. Elle est à méditer par tout maraîcher contraint d'acheter ses fruits à d'autres, faute d'avoir su conserver son arbre.

Alain Bugat au CERN

Alain Bugat, administrateur général du CEA, accompagné de Philippe Thiébaud, directeur des relations internationales, François Gounand, directeur des sciences de la matière (DSM) et Jean Zinn-Justin, chef du Dapnia, a visité le Cern le 19 février 2004 sous la conduite de Robert Aymar, directeur général du Cern et ancien directeur de la DSM lors de la fondation du Dapnia. Cette visite a porté sur des réalisations opérationnelles ou en projet, dans lesquelles le Dapnia est très fortement impliqué, en symbiose



L'arbre de la connaissance (« Heures de Rohan », vers 1430, Bibliothèque nationale.

étroite avec d'autres instituts français et internationaux. Alain Bugat a pu mesurer cette très forte implication.

Au programme du matin : présentation de NA 48/2 (pour NA48, voir *ScintillationS* n° 48), d'Atlas et de CMS. Puis visite du hall d'assemblage de CMS. L'après-midi, visite de Compass (voir n° 54 et 60), du hall de test des aimants supraconducteurs du LHC, de la « caverne » du futur détecteur Alice, et enfin du hall d'assemblage d'Atlas.

Lors du déjeuner, une discussion franche et animée s'est engagée, principalement entre Robert Aymar et Alain Bugat, où chacun a défendu ses idées sur le rôle et l'importance de la recherche fondamentale dans la chaîne qui va de l'acquisition des connaissances à la mise sur le marché des applications qui en sont issues. D'après certains convives, un important rapprochement reste à effectuer entre deux conceptions.

Espérons que cette visite contribuera à réorienter la position de l'actuelle direction du CEA sur la mission de recherche fondamentale du Commissariat.

ScintillationS

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 GOUJFFES, Pierre GUICHON, Christophe MAYRI, Alain MILSZTAJN, Xavier-François NAVICK, 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 : jmartin@dapnia.cea.fr

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

Dépôt légal mars 2004

7!

(3) INB : installation nucléaire de base.

(4) Louis Pasteur (1822-1895), magnifique exemple du savant qui ne cessa jamais de cultiver l'arbre une fois cueillis ses premiers fruits. Cela lui permit d'en cueillir bien d'autres. Ce bienfaiteur de l'humanité commença sa carrière en triant à la pince des petits cristaux, occupation qui serait peut-être aujourd'hui taxée de raffinement. On peut lire la suite à l'adresse : <http://ambafrance-ca.org/HYPERLAB/PEOPLE/pasteur.html>