

Micromegas, un nouveau détecteur de particules

Micromégas, bien meilleur observateur (...), vit clairement que les atomes se parlaient
Voltaire (Contes)

Un nouveau détecteur gazeux est en train de naître dans les pépinières du DAPNIA.

Depuis le prix Nobel de Physique attribué à Georges Charpak en 1992, le grand public a pris connaissance de l'avancée considérable réalisée par les chambres à fils dans le domaine de la détection des particules. En physique corpusculaire, dans les années 70, ces chambres ont rapidement supplanté les détecteurs antérieurs car elles se montrèrent capables d'« encaisser » des flux de particules environ 1000 fois plus intenses que ces derniers, jusqu'à 10 000 par seconde et par cm^2 .

Trente ans après, une nouvelle révolution est en train de se réaliser au DAPNIA grâce au développement de Micromegas (MICROMEsh Gaseous Structure), sous l'impulsion de Yannis Giomataris (SED) et du toujours enthousiaste Georges Charpak.

Il s'agit d'une chambre SANS fils, vous aurez rectifié la coquille de la légende de la figure dans *ScintillationS* n° 36 page 6 (voir Pan ! sur le becquerel, n° 37. Au fait, si on avait eu l'article à la date prévue, votre chambre n'aurait pas eu ces malheurs, NDLR). Elle devrait permettre un nouveau saut d'un facteur mille dans les flux de particules admissibles. Dans l'état actuel du projet il est déjà démontré que Micromegas pourra encaisser sans peine les flux de quelques millions de particules/s/ cm^2 que délivrera le futur LHC, et même des flux beaucoup plus intenses (voir l'encadré).

En quoi Micromegas est-il une révolution ?

D'abord, comme toute invention technique appelée à durer, l'idée de base est simple donc sa mise en œuvre industrielle rapide et peu onéreuse. Et puis, une fois le détecteur construit, sa robustesse est à toute épreuve. Il n'est méca-

niquement pas fragile (sauf peut-être entre les mains de certains physiciens) et subit sans dommage des conditions non-standard de fonctionnement (sauf si les mêmes physiciens se trompent de standard)*.

Pour preuve, une petite anecdote. Lors de mesures effectuées dans les derniers rôles du Tandem de Saclay, les physiciens, rivés à leur écran de contrôle et tout heureux d'observer en direct le signal fourni par Micromegas, ne s'étaient même pas aperçus que le faisceau avait perforé la paroi de l'enceinte gazeuse ! N'en concluez surtout pas que ce détecteur sans fils peut fonctionner sans gaz. N'est magique que le mélange gazeux.

Mais alors, pourquoi a-t-il fallu attendre 30 ans ? Probablement parce que le besoin de telles performances ne se faisait pas sentir. Mais aussi parce que les idées n'avaient pas été poussées jusqu'au bout. Nous y reviendrons dans l'encadré.

Les performances

La précision temporelle – Si vous êtes pressés de traiter une nouvelle impulsion délivrée par le détecteur, munissez-vous d'une électronique très rapide : le « pic » des électrons surgit alors en moins d'une nanoseconde (un milliardième de seconde, soit 10^{-9} s). Pour être rapide c'est rapide ! Et ça n'avait jamais été observé dans aucun détecteur gazeux antérieur où le signal est beaucoup plus large. Merci Micromegas !

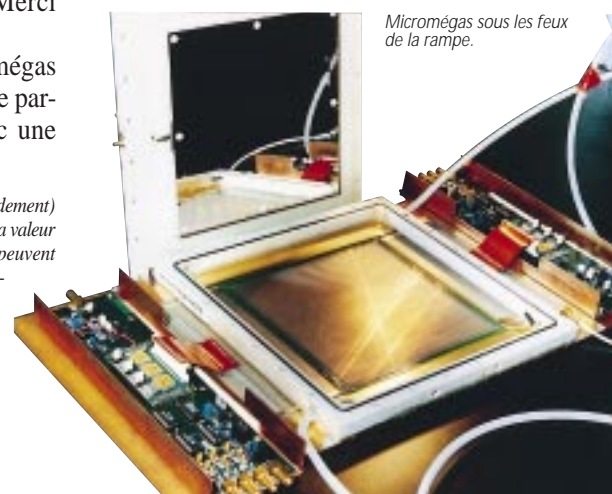
La précision spatiale – Micromégas peut reconstituer la trajectoire d'une particule traversant le détecteur avec une

précision de $55 \mu\text{m}$, à peine plus que l'épaisseur d'un cheveu ($40 \mu\text{m}$), avec un gaz magique, mélange 85 % d'Argon et 15 % de diméthyléther (DME). La précision est limitée par la diffusion des électrons dans le gaz qui a tendance à les disséminer. Mais nous n'avons pas dit notre dernier mot car nous avons quelques idées de gaz moins diffusants. Notre ambition est d'atteindre la précision des détecteurs au silicium ($10 \mu\text{m}$). Les paris sont ouverts !

Mais est-ce si simple ?

Pas encore, ce serait trop beau, car ce détecteur nécessite une électronique très « pointue ». Maintenant que les problèmes de construction sont résolus, il convient d'équiper le détecteur avec une électronique à la hauteur. C'est là le prix à payer, mais on n'a rien sans rien. Le SEI s'est lancé dans la mise en œuvre de préamplificateurs adaptés aux desiderata des physiciens de la future expérience COMPASS qui aura lieu au CERN au siècle prochain et qui sera équipée d'un tapis d'une vingtaine de m^2 de Micromegas avec une centaine de milliers de voies électroniques. Quand c'est parti c'est parti. Ce sera la première expérience pour ce nouveau détecteur et, espérons-le, un point de départ explosif (pas pour la chambre, bien sûr) (suite page 3)

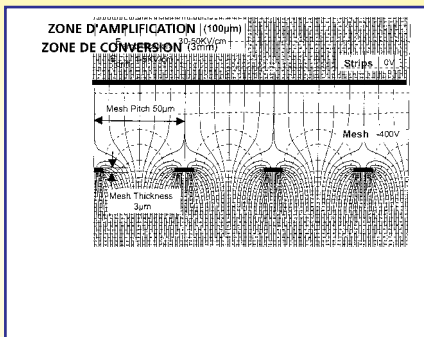
* Si d'aventure, on (les « mêmes physiciens », évidemment) pousse la tension électrique de la grille au-delà de sa valeur nominale, des étincelles, et non des avalanches) peuvent se produire. Elles affectent l'efficacité du détecteur mais ne l'endommagent pas. Un retour aux conditions standard rétablit la situation.



Micromégas sous les feux de la rampe.

Comment ça marche Micromegas ?

Voici d'abord le principe des chambres à fils. Une chambre à fils est une sorte de peigne formé de fils métalliques plus fins qu'un cheveu, tendus parallèlement à une plaque métallique et baignant dans un gaz « magique ». On applique une tension de quelques 2 000 volts entre les fils fonctionnant comme anode et la plaque, la cathode. Il règne alors entre le plan des fils et la plaque un *champ électrique* de plus en plus intense à mesure qu'on s'approche des fils. Lorsqu'une particule chargée ou un rayon X traverse la chambre, l'énergie déposée dans le gaz est assez élevée pour arracher des électrons d'atomes du gaz (on dit que le gaz est *ionisé*). Ces porteurs de charge négative sont accélérés dans le champ électrique et dérivent vers les fils d'anode un peu comme tombe une masse accélérée dans le champ de pesanteur terrestre. Lorsque les électrons arrivent à quelques micromètres du fil, leur vitesse augmente fortement et leur énergie cinétique devient à son tour suffisante pour arracher d'autres électrons au gaz, lesquels, à leur tour sont accélérés etc. Il se développe alors une avalanche d'électrons dont le cortège est très rapidement collecté par l'anode tandis que les ions positifs (atomes privés d'une partie de leurs électrons) remontent lentement vers la cathode. La zone autour du fil à l'intérieur de laquelle peut se développer l'avalanche est la *zone d'amplification*. C'est l'encombrement par les ions de l'espace de la cellule de chaque fil qui limite le flux que peut supporter le détecteur. Le signal détecté sur le fil d'anode, qui sera ensuite amplifié dans un dispositif électronique, est le signal induit par la remontée des ions. Le signal du courant induit par les électrons est beaucoup trop bref pour pouvoir être détecté même par les électroniques actuelles.



Effet « entonnoir »
Les lignes qui se resserrent d'une zone à l'autre sont les lignes de champ électrique. Les électrons se meuvent le long de ces lignes de champ, et donc s'engouffrent dans les trous de Micromesh comme dans un entonnoir.

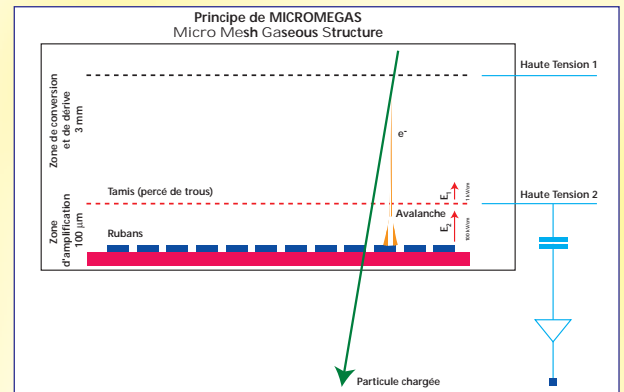
La vertu d'un détecteur à fils, qui est de provoquer une avalanche électronique grâce au champ électrique, devient vite un handicap car on ne maîtrise pas l'intensité de ce champ. La conception de Micromegas fait que le problème de l'encombrement ionique est évacué et que le signal électronique est détectable avec des flux de particules beaucoup plus intenses.

Le principe de base de Micromegas est de découpler électriquement la zone de dérive de la zone d'amplification, avec des intensités de champ électrique qui deviennent non seulement ajustables mais, de plus, uniformes dans l'espace que baigne le gaz.

L'idée n'est pas nouvelle. Elle avait germé lors de la conception des chambres à face parallèles à plusieurs étages. Seulement voilà, elle était insuffisante car le problème de l'encombrement des ions restait un obstacle pour encaisser de hauts flux. Entre des électrodes planes le champ est uniforme et son intensité est réglable par la différence de potentiel appliquée. Gros progrès par rapport aux chambres à fils, mais sans suite. En effet, à cause de la difficulté à maintenir constant l'espace d'amplification pour de grands détecteurs et sa grande sensibilité aux variations de la pression du gaz, le gain n'était pas uniforme et donc le gain maximal que l'on pouvait atteindre avant l'apparition d'étincelles était trop faible. Jusqu'à l'invention du mini-intervalle d'amplification, une exclusivité Micromegas.

Micromegas est donc un détecteur gazeux à faces parallèles où toute l'astuce réside dans l'introduction d'une grille conductrice percée d'une multitude de trous (typiquement, un trou tous les 50 µm !). Cette grille sépare le détecteur en deux zones 1 et 2, où règnent des champs électriques uniformes E_1 et E_2 (Fig. 1) : l'espace de conversion de quelques mm où sont libérés les électrons lorsqu'une particule traverse le détecteur, et le mini-espace d'amplification (de 50 à 100 µm) où se développe l'avalanche.

Lorsque le rapport des champs E_2/E_1 est supérieur à 20, la grille devient entièrement transparente aux électrons ! Chaque électron libéré dans l'espace de dérive se précipite, par effet d'entonnoir (Fig. 2), à travers un trou de la grille et passe dans le mini-espace d'amplification où il va dévelop-



per une avalanche. Les ions remontent vers la grille, certes lentement, mais sur une distance faible, le mini-espace, ce qui ne leur prend que 100 nanosecondes (un dix-millionième de seconde). Comme il y a quelques 40 000 trous par cm², les flux admissibles peuvent atteindre 400 milliards de particules par seconde et par cm². Et voilà résolu le problème de l'encombrement des ions. Ces flux considérables feront éclater les anciennes bornes.

La recette Micromegas

Ingrédients : des bouteilles de gaz, un gâteau d'abeilles, des feuilles, de la peinture, de la résine, une feuille filtrante, du doigté.

- 1 - Préparer, la veille de préférence, un bon mélange gazeux
- 2 - découper le gâteau à la dimension désirée
- 3 - recouvrir le gâteau d'une feuille mince
- 4 - peindre sur la feuille un dessin au goût de vos invités
- 5 - saupoudrer de plots de résine préalablement calibrés
- 6 - déposer délicatement sur les plots la feuille filtrante
- 7 - recouvrir d'une troisième feuille en laissant un petit espace
- 8 - plonger le tout dans le mélange
- 9 - laisser cuire doucement quelques instants....

C'est prêt... et c'est très léger.

Jacques Derré (SPP)

(suite de la page 1) à l'image des chambres à fils.

D'ailleurs, la technique de Micromegas est simple et peu coûteuse, ce qui a permis de la transférer rapidement à l'industrie. Il y a un an déjà, l'entreprise EURISYS MESURES a, été capable en quelques mois de surmonter les difficultés de construction d'un détecteur de 15 x 15 cm². Depuis, des Micromegas ont été vendus en Europe et aux USA.

Une autre entreprise, BIOSPACE, a l'ambition de lancer plusieurs projets : la radiographie médicale à faible dose ;

la radiographie de grands objets qui nécessite de très hauts flux pulsés de gammas (bientôt on contrôlera l'intérieur d'un camion ou d'un wagon entier et vous pourrez traverser la Manche sans crainte de possibles attentats !) ; la cristallographie des protéines en rayons X, etc.

Où en est la concurrence ?

Dans la perspective du LHC, de nombreuses études ont été entreprises dans divers laboratoires. Dans la panoplie des détecteurs qui tentent de lever l'impasse des

chambres à fils, on est bien obligé de constater que, après bientôt une dizaine d'années, ceux qui donnent les meilleurs résultats sont ceux qui s'approchent le plus du concept de Micromegas. Alors pourquoi pas Micromegas lui-même ?

Espérons que la rapidité (démontrée) de Micromegas permettra au DAPNIA de lever le handicap du départ tardif de ce détecteur dans la course au LHC. Quoiqu'il en soit, de nombreuses autres applications lui sont offertes. Mais nous ne les dévoilerons pas tout de suite... (À suivre)

Jacques Derré (SPP)

Une étrange corrélation

(un test concluant de la mécanique quantique)

Deux jumeaux naissent. Ils sont semblables génétiquement, ils se ressemblent comme deux gouttes d'eau. Mais ils ne sont pas le calque (ni le clone) l'un de l'autre. Même s'ils ont la même tache de naissance sur le mollet gauche (ou droit), ils ne sont pas identiques. Même s'ils sont étroitement liés, ils ont des comportements différents. Même s'ils ont des modes de pensée très proches, il est hautement improbable qu'ils prononcent les mêmes mots exactement au même moment. Si l'un tient des propos étranges, l'autre peut aussi en tenir, mais il n'y a pas de relation de cause à effet. En d'autres termes, si nos deux jumeaux sont hors de la vue l'un de l'autre et ne communiquent pas, le comportement de l'un ne détermine pas celui de l'autre et rien ne l'un ne saurait être instantanément transmis à l'autre.

Tout le monde sait cela, sauf ceux qui croient à la télépathie ou la téléportation. Or nous sommes tous faits de particules. Intuitivement, nous avons tendance à penser que les particules même jumelles, c'est-à-dire de même parenté et produites exactement au même instant, n'ont, une fois émises, plus aucune corrélation et que leur séparation est définitive. Et pourtant, la mécanique quantique, théorie du monde des particules, jamais encore mise en défaut, **prédit le contraire**. De telles particules restent statistiquement corrélées quelle que soit leur distance, comme si chacune était instantanément renseignée sur ce que fait l'autre. Simplement, la mécanique quantique considère ces deux particules comme faisant partie d'un même *état quantique*, en fait, un objet unique, à contre-sens de l'intuition commune. Ce phénomène, appelé parfois *non*

séparabilité ou encore *non localité*, semble violer le sacro-saint principe de causalité qui exige qu'aucune information ne puisse être transmise à une vitesse supérieure à celle de la lumière, ce qui revient à dire que l'effet ne peut précéder la cause. Cette apparente violation de la causalité s'appelle le *paradoxe EPR* du nom des trois savants qui l'ont formulé : Einstein, Podolsky et Rosen.

En 1980, le physicien Alain Aspect et son équipe de l'Institut d'Optique d'Orsay montra par toute une série d'expériences sur les photons, grains élémentaires de lumière, que la mécanique quantique avait raison contre le « bon sens ». Cela permit aux « quantistes » de damer le pion aux « déterministes ». Mais le paradoxe EPR reste en travers de la gorge des seconds, et la polémique demeure. C'est pourquoi, des physiciens du monde entier cherchent à faire des

expériences permettant d'infirmier ou de confirmer celles d'Aspect. Mais jusqu'à présent, toutes les mesures constituant autant de « tests », ont confirmé la mécanique quantique capable, en l'état, d'expliquer les phénomènes nouvellement observés, alors que pour y parvenir, les théories déterministes doivent intégrer de nouvelles complications.

Dans ce contexte, la collaboration CP LEAR (PS195), au CERN, rassemblant 17 laboratoires dont le DAPNIA/SPP, et qui, afin de dépister d'éventuelles subtiles différences entre la matière et l'antimatière, étudie des symétries fondamentales telle que les invariances par *conjugaison de charge* (le remplacement d'une particule par son antiparticule, en abrégé : *C*), par *parité* (en gros, le changement droite/gauche, désigné par *P*, le *C* et le *P* étant accolés dans

le sigle « CP LEAR », et par renversement du sens du temps (T), a entrepris de tester EPR en complément de son programme principal.

Ce test a été proposé et analysé par des physiciens du DAPNIA/SPP. Il a permis de mettre en évidence la non-séparabilité dans un système

formé d'une certaine particule, le méson neutre (on dit aussi *kaon*) K^0 et de son antiparticule, autrement dit, sa jumelle d'antimatière. C'est le premier test EPR jamais effectué concernant une propriété autre que la polarisation (voir n° 12 et 30). En l'occurrence, il s'agit de l'étrangeté,

grandeur dont la mécanique quantique prévoit qu'elle varie au cours du temps dans le cas du système K^0 -anti- K^0 (voir l'encart). Cette variation et sa corrélation entre les deux particules a été mesurée pour la première fois, et ce, pour des distances entre le K^0 et l'anti- K^0 de plusieurs

Une des originalités de l'expérience CP LEAR (PS195), qui produit ces mésons par des antiprotons arrêtés dans de l'hydrogène, a été de mesurer l'étrangeté d'un couple K^0 -anti- K^0 en mesurant l'étrangeté des particules secondaires produites par chacun des deux K au moment où ils percutent chacun un absorbeur. On a mesuré les corrélations d'étrangeté dans les deux situations suivantes que permettait de distinguer la géométrie du dispositif expérimental :

a) les deux K de la paire (qui sont émis à la même vitesse dans deux directions opposées) ont interagi dans deux absorbeurs équidistants du point d'émission de la paire, donc au même instant vu qu'ils sont de même vitesse. Ils doivent donc être d'étrangeté opposée.

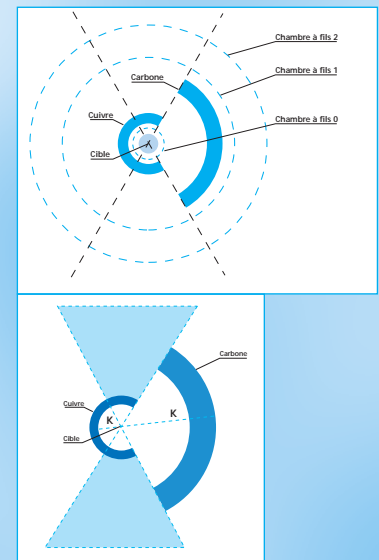
Les deux K ont interagi dans deux absorbeurs non équidistants du point d'émission, donc à des temps différents. Ils peuvent être de même étrangeté.

Dans cette expérience, on peut déterminer au moment de l'interaction si les deux K avaient la même étrangeté ou des étrangetés opposées. On évalue alors les probabilités respectives de chaque cas et on compare aux pré-

dictions de la mécanique quantique. Le résultat est sans appel : la non-séparabilité est vérifiée avec une probabilité de 99,99 %, en accord quasi-parfait avec la mécanique quantique.

Il est à noter que l'expérience BABAR où est impliqué le DAPNIA pourra étudier ces effets de non-séparabilité avec beaucoup plus de précision, en utilisant non plus l'étrangeté, mais une autre grandeur physique, la beauté, que porte un autre des 6 quarks (voir *ScintillationS* n° 19). Les BABAR's boys (and girls) comptent même se servir de ces effets pour identifier quelle sorte de beauté portent à un instant donné certaines particules produites. Il sera possible d'étiqueter une particule par la seule mesure de la beauté de sa particule jumelle. Ce qui était au départ un simple test de la mécanique quantique deviendra une méthode expérimentale, et pour-

rait s'appliquer dans un futur plus ou moins proche à l'informatique ou au cryptage totalement inviolable.



Le détecteur CP Lear (sans son aimant).

Les deux K sont émis à partir de la cible dans deux directions opposées. S'ils sont émis dans le secteur bleuté, ils sont tous deux absorbés dans le cuivre, en deux points équidistants du point d'émission, donc au même instant. (cas a) Ils doivent alors être d'étrangeté opposée. Si, en revanche, les deux K sont émis dans l'autre secteur, l'un est absorbé dans le cuivre, l'autre dans le carbone plus éloigné de la cible (cas b). Ils se désintègrent donc à deux instants différents et peuvent alors être de même étrangeté.

Suite de l'article de Chris Llewellyn-Smith

Nous publions dans ce numéro la quatrième et avant-dernière partie de l'article

« À quoi sert la recherche de base ? »

du Directeur Général du CERN, dont la parution a débuté dans le n° 34.

4. Pourquoi les gouvernements doivent financer la science de base

Le financement de la science de base est important pour la société dans son ensemble, mais n'est pas dans l'intérêt d'un investisseur individuel. Les auteurs de découvertes fondamentales n'en récoltent généralement pas les bénéfices - les lois de la nature ne peuvent être protégées et les

applications sont trop imprévisibles et à trop longue échéance - et les bénéfices pour la culture ou l'éducation n'engendrent pas de profits immédiats

Les héritiers de Newton (s'il en avait eu) seraient riches s'il avait été possible de breveter le calcul infinitésimal et s'ils percevaient des redevances chaque fois qu'il est utilisé, mais les lois mathématiques ne sont pas brevetables.

Bien peu de scientifiques ont la prémonition de Faraday qui, à la question de Gladstone « À quoi peut servir l'électri-

cité ? » répondit « *Un jour, sir, vous pourriez la taxer* ». Plus symptomatique est cette remarque de Rutherford, le découvreur du noyau, qui, jusqu'au milieu des années 1930, affirmait : « *Quiconque attend une source d'énergie de la transformation des atomes raconte des sornettes.* »

La mécanique quantique est à la base de l'électronique moderne et des lasers, mais, même vu avec recul, l'investissement dans la recherche qui a abouti à la mécanique quantique n'aurait pas été rentable commercialement; les connaissances sous-

centimètres, une immensité à leur échelle : cela correspondrait à deux gouttes d'eau aux antipodes de l'orbite terrestre !

La mesure donne raison sans ambiguïté à la mécanique quantique qui en sort ainsi confortée. Mais pas la téléportation : il n'y a pas d'évi-

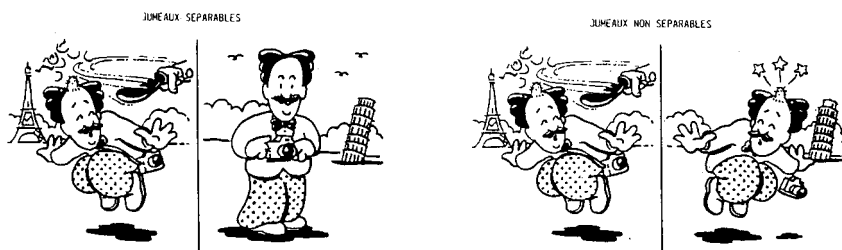
dence de transport de signal, ni, *a fortiori*, de transport de matière, d'une particule à l'autre.

Armand Muller (SPP), tél. 01 69 08 23 87,
e-mail : muller@hep.saclay.cea.fr

Avec la participation de Joël Martin (SPhN)
et d'Yves Sacquin (SPP)

On pourra lire avec profit l'excellent petit livre (d'où est tiré le dessin des jumeaux à Paris et à Pise) de Franco Selleri : **Le grand débat de la Mécanique Quantique**, édité chez Flammarion, dans la collection « Champs ».

Si nos deux jumeaux se séparent, il est évidemment impossible de transporter instantanément l'un près de l'autre. Toutefois, le deuxième des petits dessins ci-dessous imagine des jumeaux quantiquement non-séparables. Tout se passe comme si l'information « coup sur le crâne » avait voyagé instantanément de Paris à Pise faisant naître également une bosse sur le cuir chevelu du jumeau photographe victime de la corrélation quantique. Ce phénomène n'a aucune chance de se produire dans notre monde quotidien où même les jumeaux homozygotes ne sont pas quantiquement corrélés et la bosse n'a pas été transmise instantanément de l'un à l'autre. Mais contrairement aux jumeaux, êtres macroscopiques qui se trouvent chacun à un endroit précis et gardent leur identité, les particules ont une probabilité non nulle d'être n'importe où dans l'univers, on ne connaît en un point donné que leur probabilité de présence (voir ScintillationS n° 21) et elles peuvent être un mélange de particules (plus précisément d'« états quantiques ») avec un dosage variable avec le temps. C'est cela qui change tout. Ce qui est inconcevable dans le monde à notre échelle est possible dans le monde des particules.



Il peut être dangereux d'être des jumeaux quantiques. Dessin de P. Racano, extrait du livre cité en référence.

Le méson neutre K^0 et son antiparticule, le méson anti- K^0 sont particulièrement adaptés à l'examen de prévisions de la mécanique quantique. Ces mésons, porteurs d'étrangeté (nombre quantique – voir *ScintillationS* n° 22 – porté par un des 6 quarks actuellement connus, le quark étrange), sont produits, le plus souvent par paires, avec des étrangetés opposées, +1 pour le K^0 , -1 pour l'anti- K^0 . Au cours du temps, il apparaît de l'étrangeté négative dans le K^0 et de l'étrangeté positive dans l'anti- K^0 . Chacun des K est donc un mélange d'étrangeté qui oscille au cours du temps. La Mécanique Quantique prédit que les deux mélanges d'étrangeté restent corrélés lorsque les deux K s'éloignent l'un de l'autre.

Conséquence pratique : si les deux K ne peuvent se trouver dans le même état de mélange d'étrangeté au même instant, cela est possible à des instants différents. Ces deux mélanges restent corrélés lorsque les deux K s'éloignent l'un de l'autre. Ainsi, la mesure de l'étrangeté du second au même instant, même s'il est à grande distance du premier. On peut donc prédire avec certitude, et sans mesure, l'état d'une particule éloignée : tout se passe comme si le résultat de la mesure du premier K était instantanément transmis au second, déterminant ainsi sa nature, en contradiction avec la causalité. Il s'agit là d'un des... Aspects du paradoxe EPR.

jacentes ne pouvaient pas être brevetées, le décalage en temps fut trop long et les résultats étaient trop aléatoires.

Ainsi, l'investissement dans la science de base ne présente aucun intérêt pour une entreprise individuelle, mais il est cependant très important pour la société dans son ensemble. La science de base est ce que les économistes appellent un « bien public ». Les biens publics, comme les phares et la défense nationale, sont coûteux à produire, mais une fois créés, ils sont par essence automatiquement à la disposition de tout un chacun, y compris de ceux qui ne souhaitent pas les financer¹. D'une façon générale, il est probable que ces biens ne peuvent qu'être financés collectivement par les gouvernements.

Les gouvernements doivent soutenir la science de base, en raison des bénéfices que constituent la connaissance directement acquise, les retombées et la formation, autant que pour des raisons culturelles. Chaque fois qu'un profit est facilement prévisible, l'industrie investira et le gouvernement peut se tenir à l'écart, bien que les deux puissent jouer un rôle, par exemple en encourageant les contacts et la collaboration entre les industries et les universités. Une grande part de la recherche appliquée est par conséquent du ressort de l'industrie. Cependant la situation n'est pas nettement tranchée, puisqu'on ne peut pas toujours prévoir si une recherche appliquée rapportera des profits directs; par exemple, la recherche sur une maladie cardiaque

peut aboutir à des médicaments brevetés, ou bien à la prescription d'un meilleur régime alimentaire et de plus de sport.

Cette analyse conduit à poser deux questions :

i) Si le financement n'est pas rentable à l'échelon individuel, l'est-il à celui d'un pays ?

ii) Comment choisir quoi financer, et à quel niveau ?

La première question appelle plusieurs réponses. Premièrement, j'estime que les pays développés ont le devoir de financer la science de base dans l'intérêt de la société dans son ensemble. Deuxièmement, une recherche de base active soutient et nourrit le développement technologique.

Le rôle de la recherche dans la formation de scientifiques qui poursuivent leur activité dans l'industrie, et dans la création de réseaux, est extrêmement important. La proximité géographique des centres de recherche offre certains avantages pour l'exploitation de leurs résultats et des retombées et il est plus que probable que les entreprises exploitantes s'installent dans le voisinage. Ce n'est pas un hasard si la Silicon Valley est proche de l'Université de Stanford, ou qu'un énorme essaim de sociétés de haute technologie se soit constitué près de Boston (il n'est malheureusement pas aussi facile de trouver de tels exemples en Europe, en raison du moindre développement de l'esprit d'entreprise dans les universités et les centres de recherche européens).

Néanmoins, on peut se demander ce qu'il en est du Japon ?

5. Peut-on laisser faire les autres ? Leçons du Japon ?

La question de savoir si la recherche fondamentale peut être laissée à d'autres a commencé à se poser dans les années 1980, en particulier aux Etats-Unis d'Amérique, à une époque où de nombreux marchés à fort substrat scientifique ont été perdus au profit du Japon, notamment dans des domaines très pointus comme les mémoires dynamiques à accès aléatoire. On s'interrogeait même, alors, sur la capacité de survie de l'industrie américaine des semi-conducteurs. Le Japon (avec Singapour, Hong Kong et la Corée du sud) était souvent cité comme un pays très performant économiquement, qui avait remporté des marchés de haute technologie, mais qui avait financé la recherche appliquée et le développement de produits plutôt que la recherche de base.

En réalité, l'industrie américaine des semi-conducteurs n'a pas péri, et pendant que des commentateurs prédisaient son extinction, des chercheurs américains créaient de nouveaux marchés révolutionnaires en biotechnologie, multimédia, logiciels informatiques et communications numériques, etc. Dans le même temps, l'économie japonaise, de son côté, connaît un relatif déclin depuis 1989.

En tout état de cause, le Gouvernement japonais n'a nullement l'intention d'abandonner à d'autres la recherche fondamentale et le plan de base pour la science et la technologie, publié en 1996, prévoit un accroissement de 50 % du financement de la science dans les cinq prochaines années (même si le taux initial d'accroissement n'a pas été maintenu). En outre, les arguments antérieurs reposant sur la comparaison des niveaux d'investissement dans la R & D en pourcentage du PIB aux Etats-Unis et au Japon ont été réexaminés ^[17].

Les données suivantes :

- USA, 2,7 % (53 % privé) : beaucoup pour la défense, 0,5 % pour la recherche de base,
- Japon, 2,9 % (8 % privé - plus que les USA en chiffres absolus), peu pour la

recherche de base avaient été utilisés pour affirmer que l'investissement japonais plus important dans la science appliquée et la technologie était à l'origine du succès économique du Japon dans les années 1980. Cependant, les pourcentages d'investissement global en capitaux hors résidences, ramenés en pourcentage du PIB :

	1980	1990
USA	13 %	→ 10 %
Japon	15 %	→ 19 %

suggèrent une conclusion différente. Les facteurs qui alimentent la croissance économique sont l'approvisionnement en travail et en capital. Les marchés du travail ayant été stables, on pourrait s'attendre à ce que la croissance soit proportionnelle au total des investissements, et donc, sur la base des chiffres ci-dessus, une fois et demie plus élevée au Japon qu'aux Etats-Unis. Pourtant, le taux de croissance soutenu est estimé à 3 % au Japon contre 2,5 % aux Etats-Unis.

Il semble donc que l'économie japonaise soit sensiblement moins efficace que celle des Etats-Unis (de manière similaire, à Singapour par exemple, la croissance a été trois fois supérieure à celle des Etats-Unis, alors que l'investisse-



Elément de BABAR en cours de montage.

ment y était quatre ou cinq fois plus élevé). Au rebours de l'argument traditionnel, il a même été suggéré⁽¹⁷⁾ que l'inefficacité relative de l'économie japonaise est due aux faits qu'une moindre importance est accordée à la recherche de base et que les universités japonaises sont d'un niveau moins élevé que celles des Etats-Unis !

Cet argument n'est pas particulièrement convaincant (maints autres facteurs macro-économiques entrent en jeu, le moindre n'étant pas que la banque nationale du Japon a même damé le pion à la Bundesbank en refusant de relancer l'activité en période de récession). Il n'en reste pas moins que

l'exemple du Japon ne peut être utilisé pour soutenir la thèse qu'une réduction du financement public des universités ou une moindre importance accordée à la recherche de base serait une politique économique avisée.

Traduction d'Yves Sacquin

Références :

- 1) Science Policy and Public Spending, J.A. Kay & C.H. Llewellyn Smith, Fiscal Studies, Vol. 6, n° 3, p. 14, 1985.
- 4) The Relationship Between Publicly Funded Basic Research and

Economic Performance: A SPRU Review (prepared for H.M. Treasury), B. Martin et al, Science Policy Research Unit, University of Sussex, April 1996.

- 17) An Economic Case for Basic Research, E. Wong, Nature 381, 187, 1996.

1 – Si les résultats de la recherche scientifique de base sont en général à la disposition de tous, l'assimilation des publications scientifiques et l'exploitation des découvertes scientifiques exige des spécialistes extrêmement qualifiés. Dans ce sens, les résultats de la science de base ne sont pas un « bien public gratuit ». J'estime néanmoins que le bénéfice global (apports de la recherche, retombées, formation de base nécessaire à l'exploitation des résultats, etc.) est un bien public.

BRÈVES ... BRÈVES ... BRÈVES ... BRÈVES ...

Les neutrinos ont-ils une masse ?

La nouvelle a fait le tour du monde, le jeudi 5 juin 1998, annoncée par l'équipe nippon-américaine qui mesure les flux des neutrinos solaires à l'aide du détecteur Superkamiokande. Il s'agirait de rien de moins que la première observation du phénomène d'*oscillations de neutrinos** signalée par une anomalie dans la distribution des neutrinos muoniques* atmosphériques. Ce phénomène, s'il était confirmé, donnerait enfin la certitude que les neutrinos ont une masse (il ne « resterait plus » qu'à mesurer lesdites masses). L'annonce a été faite lors de la grande conférence « Neutrino 98 » qui se tenait précisément au Japon, à Takayama à 300 km de Tokyo. Lieu bien choisi car proche du village de Kamioka près duquel se trouve le détecteur en question. Quelques éminents « neutrinistes » du DAPNIA ont vécu l'événement qui a suscité dans toute l'assistance une indéniable émotion. Superkamiokande est le plus grand détecteur jamais construit (50000 tonnes d'eau enterrés sans une mine, 12000 photomultiplicateurs de 50 cm de diamètre), et il commence à porter de beaux fruits. Mais l'analyse des données est difficile, et il reste encore un certain nombre de points à préciser, car ce résultat n'est pas totalement compatible avec les précédents. Certains détails « chiffonnent » les experts, en particulier

quelques flous sur les flux des différentes sortes de neutrinos. Alors, effet d'annonce, d'autant plus efficace que la nouvelle est plus qu'aléchante, ou information scientifique majeure ? Il est trop tôt pour le dire. La science, en particulier la recherche fondamentale, avance à petits pas et bien malin qui pourrait prévoir le jugement de la postérité. Quant au problème de la masse des neutrinos, aux implications cosmologiques d'une extrême impor-



Trois hommes dans un bateau et dans la «grotte» du détecteur Superkamiokande. Avec l'aimable autorisation de l'I.C.R.R. (Institute for Cosmic Rays Research), Université de Tokyo.

tance, il serait trop long de le développer ici. Cette annonce montre en tout cas que les neutrinos ont encore beaucoup de choses à nous apprendre, et renforce encore l'enthousiasme des physiciens du DAPNIA engagés dans cette physique, à travers les expé-

riences NOMAD**, ANTARES*** et le projet LENS d'un détecteur à l'ytterbium de type GALLEX (n° 18, 19, 22) capable de mesurer en temps réel le flux et les énergie des neutrinos solaires ν_e .

Yves Sacquin (SPP)

* C'est la transformation d'un des trois types de neutrinos, électronique, muonique et tauonique (ν_e , ν_μ et ν_τ) en un autre type (voir le tableau des particules, n° 19 et le glossaire page 8, n° 29).

** Expérience au CERN sur les oscillations de neutrinos μ et τ , voir n° 22.

*** Mesure de neutrinos de très haute énergie venant du cœur des galaxies, n° 33.

Va-et-vient

Mars 1998 – Gabriel Bertalmio (SED, antenne CERN), Jean-Claude Gelebart (STCM) et Joël Gobin (SEA) partent en retraite. On la leur souhaite longue et joyeuse. Bienvenue aux quatre recrutés du mois : Stéphane Fartouk (SEA), Jean-Paul Le Fèvre (SEI), Philippe Querre (SEI) et Stéphane Schanne (SEI), et aux deux mutés que nous amène le printemps : Emmanuel Fressange (de UEP/STT/FAR au DAPNIA/DIR) et Michel Painchault (de DCC/DPE au SEA).

Avril 1998 – Philippe Brossier (DIR) est muté à DSM/DIR. Fabrice Leroux (SEI) est muté au DRFC/Cadarache. Georges Gourcy (SIG), Jean-Claude Lottin (STCM) et Armand Muller (SPP, voir son article sans ce numéro) partent en retraite qu'on leur sou-

haite active et prolongée. Les deux recrutés d'avril n'ont pas eu de poisson, vu qu'ils sont bien là : Adrien Forgeas (STCM) et Xavier-François Navik (SED). Soyez les bienvenus.

Mai 1998 – Damien Neyret est recruté au SPhN et Bernard Pindivic (ex LNS) est muté au SEA. Bienvenue à tous deux.

La nuit de la caustique

Il ne s'agit pas d'une star aux nocturnes propos acides, mais d'une courbe lumineuse comme on peut en observer dans son bol de café quand il est éclairé. C'est une concentration de lumière que pourraient produire deux loupes placées côte à côte. Remplacez votre lampe par une étoile du Petit Nuage de Magellan, une galaxie voisine, vos loupes par une étoile double du type naines brunes gravitant dans le halo galactique et qui vient à s'interposer entre Magellan et vous, et votre bol par un télescope ; et si vous regardez au bon moment (ça ne dure pas plus d'une journée), vous verrez une superbe caustique cosmique défiler sur votre optique à mesure que défile la double naine brune, qui en vertu de la Relativité Générale (qui a prédit le phénomène dès 1912), joue le rôle d'une double loupe gravitationnelle (voir n° 16 et 31). Ce passage se traduit par une soudaine et brève amplification de *soixante fois* la lumière reçue de l'étoile-source.

Un tel phénomène, rarissime, vient d'être observé les 17 et 18 juin, par les équipes de plusieurs observatoires de l'hémisphère sud d'où est visible Magellan, parmi lesquelles la collaboration EROS où est impliqué le DAPNIA*. Ces chercheurs traquent sans cesse et sans fin depuis près d'une décennie ces phénomènes de lentilles gravitationnelles afin de détecter des objets célestes qui pourraient être des constituants de la matière cachée de l'Univers et dont le nombre permettrait

d'évaluer la quantité totale de matière «noire» constituée de ces naines «brunes» (la terminologie scientifique a de ces petites bizarreries...). C'est un enjeu majeur car la matière sombre représente plus des neuf dixièmes de la masse de tout l'Univers.

Mais pour ne pas faire d'erreurs dans les comptes, il faut être sûr de la place exacte de ces lentilles cosmiques. Sont-elles dans le halo de notre Voie Lactée ou dans celui du Petit Nuage de Magellan ? Une bonne façon de le savoir est de mesurer la vitesse de défilement de la lentille, qui dépend de la durée de l'amplification de la lumière de l'étoile source. Mais cette durée dépend aussi de la masse de la lentille. L'amplification par une seule lentille, qui peut durer plusieurs mois, ne permet pas d'estimer séparément ses masse, vitesse et position. En revanche, et c'est ce qui en fait tout l'intérêt, la brièveté et l'intensité (du fait de la caustique) de l'amplification par la lentille double permettra de mesurer sa vitesse, et donc sa position, car une étoile de notre galaxie a une vitesse apparente bien supérieure à celle d'une étoile de Magellan. Mais il faudra le temps de comparer les mesures des différents observatoires et de les analyser ensemble. Ce sera un pas vers une meilleure connaissance de la matière sombre entourant notre galaxie. D'ores et déjà, *ScintillationS* prend rang pour un bel article.

Bravo à ces patients observateurs internationaux capables d'observer au bon moment une balle de tennis se déplaçant sur Mars d'un centimètre à l'heure en la photographiant tous les millimètres !

D'après un communiqué par Alain Milsztajn (SPP)

* EROS (Expérience de recherche d'Objets Sombres), collaboration Chili, Danemark, USA, France (DAPNIA, LAL d'Orsay, CNRS), depuis 1990.

* Autres équipes : MACHO (Massive Astronomical Compact Halo Objects), depuis 1992, et PLANET (Probing Lensing Anomalies NETWORK) qui coordonne depuis 1995 les observations de divers télescopes et se concentre sur les événements annoncés par les deux autres groupes.

prise de se voir muté d'office au SAp. Mutation virtuelle, car Philippe est bien au SEI.

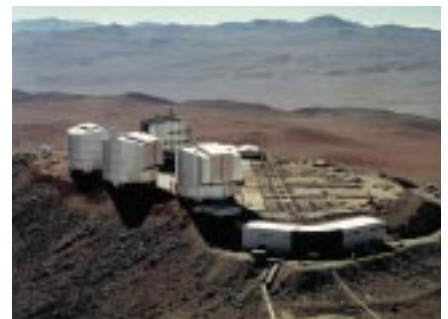
Dans le « Va-et-vient » du même numéro, le nouveau service de Philippe Chesny est le STCM et non le SEA tandis que l'ancien service du vaillant retraité Paul Le Marec est le même STCM, et non le SEI.

Enfin, le découvreur injustement oublié du « Gluon d'Honneur » sur les marées est Alain Milsztajn (SPP), dans le civil découvreur de naines brunes doubles (avant bouteille).

Toutes les excuses de l'habituel coupable, qui tient les habituelles bouteilles à la disposition de ses nombreuses victimes. Ce manieur de becquerels va finir fauteur de beuveries au DAPNIA...

Première lumière du VLT

Le premier télescope de 8 m du projet européen Very Large Telescope conduit par l'ESO, a fourni ses premières images. Elles ont été présentées lors d'une conférence de presse le 6 mai dernier. Dès sa mise en opération, le système de contrôle actif du miroir



primaire a parfaitement fonctionné. Des images avec une résolution de 0,5 seconde d'arc ont été obtenues pratiquement immédiatement. C'est un magnifique succès qui laisse bien augurer de la réussite finale de ce projet. Rappelons que le DAPNIA construit un instrument infrarouge, VISIR, qui sera installé sur le troisième télescope du VLT en 2001.

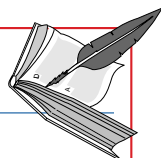
Plumes du DAPNIA

Jacques Paul (SAP)

publie chez Odile Jacob un très beau livre sur sa quête des trous noirs :

L'homme qui courait après son étoile

L'auteur y montre un beau talent d'homme de sciences et de vulgarisateur, mais aussi une vraie plume d'écrivain. Cet ouvrage qui fourmille de traits d'humour et de savoureuses anecdotes, s'avale d'une traite. Bravo Jacques, tu ne trahis ni ton sujet ni le lecteur et tu sais parler de ces troublants trous noirs avec la poésie d'un trouvère...



Pan ! sur le Becquerel

Deux « gentils organisateurs des journées » CEA-jeunes ont subi d'odieuses agressions sémantiques dans le dernier *ScintillationS*. Fabienne Orsini (SEA) s'est retrouvée baptisée François, et Philippe Bizeul (SEI) s'est retrouvé avec un « o » incongru dans son patronyme (devenu Boizeul) et il a eu la sur-

CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Joël FELTESSE
COMITÉ ÉDITORIAL : Joël MARTIN (porte-parole), Claire ANTOINE, Pierre BORGÉAUD, Michel BOURDINAUD, François BUGEON, Rémi CHIPAUX, Nathalie COLOMBEN, Thierry FOGLIZZO, Elizabeth LOCCI, Marc PEYROT, Franck QUATREHOMME, Yves SACQUIN, Angèle SÉNÉ, Hubert VAN HILLE, Christian VEYSSIÈRES
SÉCRÉTAIRE DE RÉDACTION : Maryline BESSON
MAQUETTE : Christine MARTEAU
MISE EN PAGE : TOTEM

Dépôt légal juillet 1998