

La fourniture primordiale de quarks et de gluons

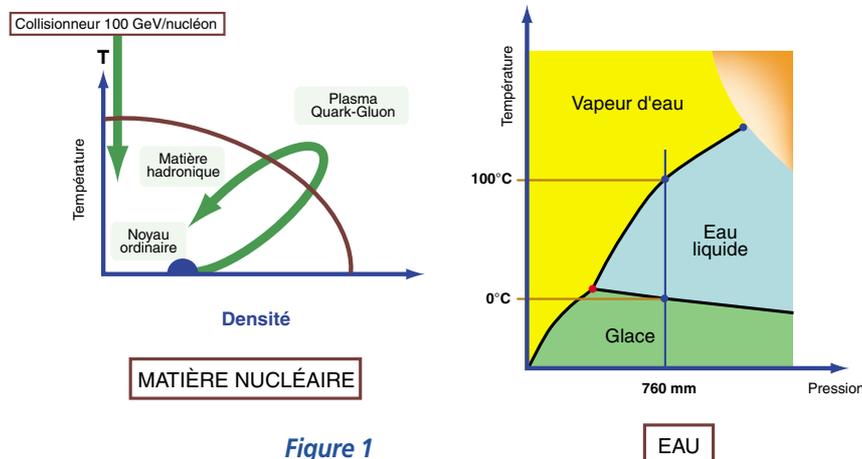
En février 2000, le CERN annonçait la production de la première goutte artificielle de plasma de quarks et de gluons, qui est, dans notre vision actuelle de l'évolution du cosmos, le premier état de la matière créée lors du Big-Bang, (voir ScintillationS n° 46). Quelques dizaines de millièmes de secondes plus tard, la température est descendue à 2000 milliards de degrés. La purée primitive où quarks et gluons s'ébattaient librement va radicalement se transformer par un changement de phase (comme lorsque l'eau liquide dont la température baisse se prend en glace) : les quarks s'agrègent, avec leur cortège de gluons, par trois ou par deux, en nouvelles particules, les hadrons (protons, neutrons, mésons etc.). Les quarks et les gluons ne retrouveront jamais leur liberté, jusqu'à ce que l'homme, à l'aide d'énormes accélérateurs de particules, réussisse à reconstituer les conditions quasi-primordiales de la transformation inverse.

La dernière année de notre deuxième millénaire aura ainsi été le prélude d'une fantastique remontée dans le temps de quelques quinze milliards d'années, jusqu'à frôler nos origines. Cette remontée se poursuit au seuil du millénaire nouveau. Des accélérateurs encore plus performants vont permettre non seulement de produire du plasma quark-gluons en quantités plus importantes, mais d'en étudier les propriétés et de détailler les étapes de ce changement de phase des débuts de l'univers.

C'est un grand pas de plus vers la connaissance de nos origines via celle de l'édification de la matière telle que nous la connaissons aujourd'hui. Dans ce numéro, Hervé Borel (SPhN) a suivi pour nous la 15^{ème} Conférence internationale sur les collisions d'ions lourds ultra relativistes (*Quark Matter 2001*), qui s'est tenue à l'Université de Stony Brook (université d'État de New York) du 1^{er} au 20 janvier 2001. Il nous raconte les dernières avancées qu'ont permis en un temps record les nouveaux collisionneurs d'ions lourds, comme le RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*). Hervé Borel y œuvre au sein d'une équipe du DAPNIA engagée dans l'expérience PHENIX (voir la figure 2) et dans le projet ALICE, au LHC (voir n° 46). Ces collisionneurs sont capables de produire des collisions entre noyaux atomiques d'une telle violence qu'elles reproduisent les énormes densité et température de la matière originelle.

ScintillationS

Un retour (en laboratoire) au plasma originel



Pourquoi reconstituer le plasma quark-gluon ?

Le scénario cosmologique ci-dessus évoqué est en accord avec la théorie de l'interaction forte, la chromodynamique quantique (QCD) qui régit quarks et gluons : cette théorie prédit l'existence du plasma. Vérifier son existence, c'est valider un peu plus cette théorie qui par ailleurs est en accord avec de multiples observations sur la matière hadronique (matière, entre autres, dont sont faits les noyaux des atomes).

En passant des expériences réalisées sur cibles fixes (AGS à Brookhaven et SPS au CERN), à celles auprès du collisionneur RHIC (figure 2), où se rencontrent deux faisceaux de 100 GeV d'énergie par nucléon et par faisceau, on gagne un facteur 10 dans l'énergie disponible (voir l'encadré 1 dans *Scintillation* n° 46). On espère atteindre ainsi une température nettement supérieure à celle du *changement de phase* et produire non plus une goutte mais une quantité notable de plasma, moins éphémère, plus dense et plus chaud. En gagnant un facteur décisif en température, densité, volume et durée de vie de l'éventuel plasma produit, on pourra explorer « le diagramme de changement de phase », exactement comme celui de la transformation d'eau liquide en glace (Fig. 1), et étudier plus en détail toutes les étapes du refroidissement du plasma jusqu'à sa transformation en matière hadronique.

Comment reconstituer le plasma quark-gluon ?

Comme décrit sur la figure 2, des noyaux d'or acquièrent par étapes une énergie de 100 GeV/nucléon. Deux faisceaux d'or tournant chacun dans un sens sont produits et entrent en collision dans quatre zones d'interaction où sont placés les détecteurs.

Que se passe-t-il lorsque deux noyaux se rencontrent ? Ce sont leurs constituants, les nucléons qui s'entrechoquent. Selon que les noyaux subissent une collision frontale ou ne font que s'effleurer, le nombre de nucléons participant à la collision varie : il est important pour les collisions centrales, faible pour les collisions « périphériques » (au billard, on dirait : « pleine bille » ou « fin »). Ces nucléons subissent un ou plusieurs chocs. L'énergie ainsi libérée augmente la température. Cette énergie « thermique » crée les paires de quarks et d'anti-quarks et leur cortège de gluons, l'ensemble formant le plasma. Ce scénario se déroule lorsque la vitesse relative des noyaux se précipitant les uns sur les autres est très grande, presque égale à celle de la lumière. Dans ce cas, bien que ralentis par les chocs, les noyaux – et leurs nucléons – continuent sur leur lancée et ne s'accumu-

les étapes de la transition de phase et du retour vers la matière hadronique

Comme dans le cas vapeur-eau liquide, où la transition de phase (représentée par la frontière entre les zones bleue et jaune sur le dessin de droite) dépend de deux variables la température et la pression, la transition de phase entre plasma et matière hadronique (représentée par le « quart d'ellipse » brun dans le dessin de gauche) dépend de la température et d'une deuxième variable : la densité baryonique, qui reflète la différence entre le nombre de baryons et le nombre d'anti-baryons.

Cherchons à donner une image un peu plus fine de l'évolution du milieu formé.

Les deux noyaux entrent en collision pendant une durée extrêmement courte d'environ $3 \cdot 10^{-24}$ secondes (du fait de la contraction relativiste des longueurs, voir « Comment ça marche relativement », page 4), mais cela leur suffit pour atteindre la température nécessaire. Le plasma se forme, chaud et dense, et son temps de vie est environ 3 à 5 fois la durée de la collision.

Puis la boule de feu se dilate très rapidement et se refroidit jusqu'à se condenser en gaz de hadrons. C'est à ce stade qu'apparaissent la plupart des particules que l'on observera plus tard et dont les différentes espèces deviennent immuables. Cet instant où les possibilités de transformation des particules sont « figées » est appelé *gel chimique* et la température correspondante est la *température de gel chimique*. Le nombre de ces particules reflète l'énergie déposée lors de la collision et augmente en même temps que l'énergie du faisceau.

Le milieu continue de se dilater et de se refroidir jusqu'à ce qu'il soit suffisamment dilué et que les hadrons cessent d'interagir entre eux et de se mouvoir les uns par rapport aux autres. C'est le *gel thermique*. La température correspondante est dite *température de gel thermique*. Les hadrons forment alors une sorte de cortège qui se dirige vers les détecteurs et les atteint environ 10^{-9} s plus tard.

Dans le premier cas, nous passons d'un plasma chaud à un gaz de mésons, dans le second, d'un plasma « froid » à un fluide de baryons. Dans les collisions d'ions lourds, les deux effets coexistent, mais on s'attend à ce que le premier soit de plus en plus prépondérant lorsque l'énergie disponible augmente. Rappelons que la collision d'ions lourds de faible énergie ne permet pas d'atteindre une densité suffisante pour créer du plasma.

Comment être certain que du plasma a été créé ?

En d'autres termes, comment à partir de l'observation de grandeurs expérimentales, pouvons-nous remonter aux quantités caractérisant la transition de phase et reconnaître le plasma ?

Les physiciens veulent en particulier mesurer les valeurs de la température et de la densité nécessaires pour former le plasma et les comparer aux valeurs prédites : autour de 2000 milliards de degrés, soit environ 100 000 fois la température régnant au centre du soleil, et une dizaine de fois la densité de la matière nucléaire ordinaire. Malheureusement, les physiciens ne peuvent « voir » que les particules hadroniques qui s'échappent de la boule de feu et atteignent les détecteurs. A partir de ces signaux, ils doivent reconstituer ce qui s'est passé auparavant.

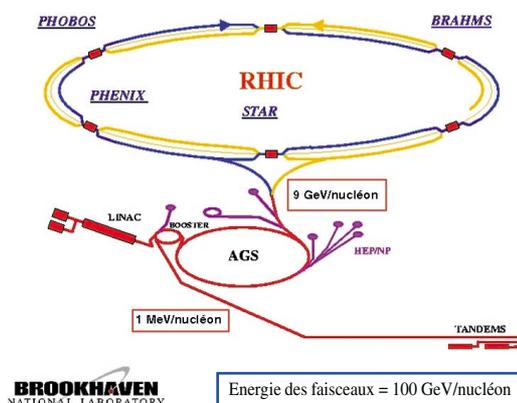


Figure 2

lent pas dans la région de collision. Cette région sera donc remplie autant de quarks que d'anti-quarks qui se regrouperont plus tard pour former principalement des mésons (un méson est formé d'une paire quark-anti-quark).

Une autre manière de former le plasma, sans nécessairement augmenter la température, est de comprimer les nucléons jusqu'à ce qu'ils s'interpénètrent et mettent en commun leurs constituants, les quarks, toujours accompagnés de leur cortège gluonique. La matière qui en résulte est faite de paquets de trois quarks et de leurs gluons : des baryons.

- Un moyen parmi d'autres : comme le nombre d'espèces de particules est figé une fois l'hadronisation achevée (*encadré page 2*), la transition du plasma vers la matière hadronique est effective lorsque ce nombre cesse d'évoluer ; on peut ainsi mesurer la température de la transition.

- Autre moyen : mesurer les quantités de mouvement (produit de la masse par la vitesse) des particules jaillissant de la boule de feu. Or, comme l'énergie, la quantité de mouvement est une grandeur qui « se conserve » dans toute transformation. On peut donc dire que les particules « emportent la mémoire des conditions du gel thermique » et servent ainsi à en déterminer la température.

- Un troisième moyen : *mesurer l'énergie transversale*, l'énergie dissipée dans le plan perpendiculaire à l'axe des faisceaux. Cette énergie, liée à la densité initiale du plasma produit, est indépendante de l'expansion des produits de la collision le long de l'axe des faisceaux, expansion qui fait décroître la densité. Cette énergie transversale témoigne donc de la densité avant expansion.

Les premiers résultats « bruts de décoffrage »

Exposés lors de la conférence QM2001, ces résultats proviennent de l'analyse des premières données enregistrées pendant une courte période de 3 mois de juin à septembre 2000 lors du démarrage « en douceur » du RHIC (faisceaux ayant les 2/3 de l'énergie nominale et la moitié de la luminosité nominale).

Les observations du SPS semblent confirmées : du plasma de quarks et de gluons aurait bien été créé. Mais l'énergie que déploie le RHIC a permis d'aller plus loin dans l'exploration de ce plasma et des modalités de son refroidissement menant à la transition vers la matière hadronique.

- Le nombre de particules créées est de 40% supérieur à celui obtenu au SPS et l'énergie produite par unité de volume est de 50% supérieure.

- Le « potentiel chimique » (grandeur reliée à la différence des nombres d'hadrons et d'antihadrons produits) est presque cinq fois plus faible. Or, les modèles décrivant la transition de phase

s'appliquent lorsque ce potentiel chimique est nul, c'est à dire lorsque le plasma produit contient autant de matière que d'antimatière. Il est donc important de s'approcher de cette condition, ce que réalise le RHIC.

- La température de gel chimique (*encadré page 2*) semble légèrement supérieure à celle obtenue au SPS (180 à 200 MeV¹ contre 170 à 180 au SPS), ce que prévoyaient les modèles.

- La valeur de la température de gel thermique semble, elle, très légèrement inférieure et la vitesse d'expansion semble plus élevée, jusqu'à 0,6 fois la vitesse de la lumière (180 000 km/s), contre 0,4 à 0,5 (120 000 à 150 000 km/s) pour le SPS.

Ces résultats demandent confirmation, car les incertitudes dues aux modèles confèrent un certain flou aux mesures. Mais on peut d'ores et déjà raisonnablement penser que les résultats de RHIC sont dans la continuité de ceux du SPS et en accord satisfaisant avec les prédictions.

Mais RHIC apporte aussi du nouveau : l'émergence des processus « durs » représentant les collisions non plus entre les nucléons mais entre les quarks eux-mêmes. Les quantités mesurées ne sont plus seulement fonction du nombre des nucléons ayant interagi, mais aussi du nombre de collisions entre quarks. Les produits de ces chocs sont eux-mêmes des quarks ou des gluons qui s'hadronisent pour donner un jet de particules. Mais quarks et gluons interagissent plus fortement avec le plasma, milieu formé aussi de quarks et de gluons, qu'avec la matière hadronique. Les premiers chocs consomment plus d'énergie que les seconds. L'énergie des jets issus des premiers est donc inférieure à celle des jets issus des seconds. Cette différence d'énergie s'observe d'autant plus nettement que les collisions sont « centrales ».

Et maintenant ?

A-t-on vraiment recréé le plasma primordial ? Si oui, quelle proportion des particules produites en proviennent ? Le gel chimique signe-t-il sans équivoque le changement de phase ? Les fortes présomptions doivent devenir des preuves.

Outre explorer la phase hadronique, il faut capter des signaux caractéristiques de la transition de phase et du plasma créé. L'extrême rareté de ces signaux impose d'accumuler une grande quantité d'événements. Pour avoir une signature nette, les processus étudiés doivent sonder le plasma avant qu'il ne refroidisse et se mue en matière hadronique. Ce sont donc des processus entrant en jeu très tôt après la collision qu'il faut être capable de détecter et d'analyser. L'étude de ces signaux, en particulier le nombre de particules charmées produites, dont le « déficit » signale la production de plasma (voir n° 46), est au programme des prochaines années.

C'est sur cette promesse de résultats à venir que s'est terminée la conférence QM 2001, et sur l'annonce, très applaudie, de la tenue de QM 2002 à Nantes, pays de bonne chère et de bons vins.

La soupe primordiale n'en sera que meilleure...

Hervé Borel (SPhN)

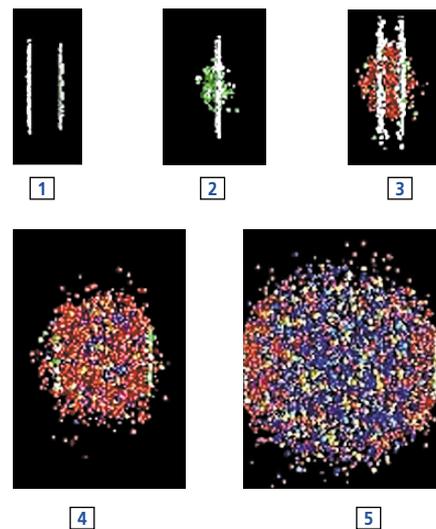


Figure 3 : Vue d'artiste de la collision de deux noyaux « ultrarelativistes » et de ce qu'il s'ensuit :

- 1) Les deux noyaux très aplatis par la contraction relativiste (voir « Comment ça marche », page 4) s'approchent l'un de l'autre (traits blancs)
- 2) Ils entrent en collision et un début de plasma se forme
- 3) Les nucléons n'ayant pas interagi continuent sur leur lancée (traits blancs) et le plasma de quarks et de gluons (boule rouge et bleue) commence son expansion
- 4) Le plasma poursuit son expansion pendant que les nucléons survivants s'éloignent
- 5) idem

(1) Aucun thermomètre ne résisterait à la plongée dans une telle fournaise ! Aussi, on a coutume d'exprimer les très hautes températures en unités d'énergie. Les deux grandeurs sont liées car plus la température d'un gaz ou d'un plasma est élevée, plus la vitesse dite « d'agitation thermique » des particules qui les composent est élevée. Il en est donc de même pour l'énergie cinétique de ces particules. Ainsi, une température de 2000 milliards de degrés correspond à une énergie cinétique moyenne de particules en gros égale à 150 MeV.

Comment ça marche (relativement...)

Aux vitesses presque lumineuses, le temps se dilate, la longueur se contracte

Un récent ScintillationS, (n° 49, page 4) évoquait la surprenante longévité des particules qui volent presque aussi vite que la lumière. Cette « dilatation du temps » s'analyse dans le cadre de la Relativité restreinte d'Einstein. Voici la suite de feuilleton de ces bolides « relativistes » dont le comportement a bouleversé notre vision de l'univers : plus ils vont vite, plus « leur » temps nous semble s'écouler lentement. Et aussi, on va le voir, plus ils paraissent aplatis. Retour sur les fulgurances de l'absolument génial Albert, qui a découvert que des choses qu'on croyait absolues : le temps, la simultanéité, la distance, le mouvement étaient en réalité, relatives. Tout cela, parce que dans notre univers rien ne se transmet instantanément : il n'existe pas de vitesse infinie et aucun signal ne va plus vite que la lumière.

Mobile ou immobile ?

Quand vous démarrez sec en voiture, votre passager prend votre atlas de la route sur les pieds. Quand vous virez serré, des bagages valdinguent. Mais plus rien de tel ne se produit quand vous roulez à vitesse constante sur une route toute droite. Si votre passager met ses boules « Quiès® » et pique un petit somme, lorsqu'il se réveillera, les yeux encore clos, il ne saura pas si vous roulez ou si vous êtes arrêté. Autre observation courante : vous voyez, en gare, bouger le train à côté du vôtre. Est-ce votre train qui démarre (assez doucement pour que vous n'ayez pas senti le départ) ou bien est-ce l'autre train qui part dans l'autre sens ? Pour le savoir, il faut regarder la gare : si elle bouge par rapport à vous, c'est que vous bougez *relativement à elle*.

Autrement dit :

1) **Un lieu réputé immobile ne l'est que relativement à un autre.** Illusion bien connue, la lune que vous admirez derrière un voile nuageux poussé par le zéphyr semble défilier derrière ces nuées que, littéralement, vous fixez du regard. Il vous suffit de « cadrer » la lune entre deux branches d'un arbre pour vous convaincre que ce sont les nuages qui défilent...

2) **Une expérience faite en un lieu immobile se reproduit à l'identique si le lieu se déplace en ligne droite à vitesse constante (en mouvement rectiligne et uniforme).** Par exemple, si, dans le train où vous voyagez, vous lancez une balle à la verticale, elle retombe de même, que le train soit arrêté ou qu'il roule tout droit à vitesse constante, et cela, quelle que soit cette vitesse.

Conclusion (connue depuis quatre siècles grâce à Galilée inspiré par Giordano Bruno) :

- *L'immobilité ou le mouvement ne peuvent être définis que relativement à un repère particulier.*

- *Les lois de la mécanique (en fait, de toute la physique) sont les mêmes pour tous les observateurs en mouvements rectilignes et uniformes les uns par rapport aux autres.*

Son et lumière, l'espace d'un instant...

On mesure l'éloignement d'un orage en comptant les secondes à partir de la perception de l'éclair jusqu'à celle du coup de tonnerre. Le son se propage en gros à 330 m/s. Si vous comptez six secondes, l'orage est à deux kilomètres. Ce faisant, vous considérez que le « top chrono », l'instant zéro, c'est lorsque vous voyez l'éclair. Vous considérez donc que la lumière se transmet instantanément. Sur deux kilomètres, vous ne vous trompez que d'un peu plus de six millièmes de seconde. C'est imperceptible. La lumière va bien trop vite pour que vous perceviez ce micro délai.

En revanche, si vous envoyez une impulsion laser sur la Lune qui vous la renvoie, la navette prend deux secondes et demi. La lumière ne se propage pas instantanément. Sa vitesse n'est pas infinie mais égale à 300 000 km/s. On la symbolise traditionnellement par la lettre *c*.

Au fait, cette vitesse de 300 000 km/s, c'est par rapport à quoi ? Car enfin, si vous vous éloignez d'un orage en TGV roulant à 80 m/s, le son vous parvient à $330 - 80 = 250$ m/s, et à $330 + 80 = 410$ m/s, si vous foncez vers l'orage. Notre perception quotidienne nous montre que les vitesses s'ajoutent. Un passager d'une fusée trouant l'espace à 270 000 km/s s'attendrait donc à voir foncer vers lui la lumière d'un phare cosmique à 570 000 km/s, puis « se traîner » à 30 000 km/s une fois le phare dépassé. Eh bien, ce passager a tout faux : dans les deux cas, la lumière vient vers lui immuablement à 300 000 km/s (plus précisément, à 299 792,458 km/s). En 1881, un physicien, Michelson, détermine avec une extrême précision que la mesure de la vitesse de la lumière dans un laboratoire terrestre n'est pas affectée par le mouvement du laboratoire qu'entraîne la révolution de notre planète autour du Soleil.

Conclusion :

Pour tous les observateurs, quels que soient leurs mouvements respectifs, la vitesse de la lumière a une valeur absolue, constante et

universelle. La vitesse de la lumière ne dépend ni du mouvement de la source lumineuse, ni de celle du récepteur. **Aucune vitesse ne peut se cumuler avec celle de la lumière, qui s'avère donc une vitesse limite. Aucune propagation ne peut être plus rapide.** Aucun signal ne va plus vite que la lumière dans le vide. *L'instantanéité n'existe pas.*

Le coup de génie d'Einstein

Cela donne le vertige : comment concilier cette invariance avec l'addition des vitesses ?

Einstein était un génie : son vertige lui inspira une « expérience de pensée » : associer une horloge à chaque observateur et déterminer comment chacune d'elles évolue en tenant compte du fait que, malgré leurs mouvements différents, la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs. Il arriva au résultat que les horloges fonctionnent à des cadences différentes, autrement dit, que la perception du temps n'est pas la même pour des observateurs en mouvement les uns par rapport aux autres.

Le coup de génie d'Albert est d'avoir vu que cette flexibilité du temps provient à la fois du caractère absolu de la vitesse de la lumière et du fait qu'aucun signal ne peut aller plus vite. Einstein a perçu que la conjonction de l'invariance de *c* et de l'absence d'instantanéité a la conséquence cruciale suivante : la simultanéité n'est pas une notion absolue.

Or, toute mesure du temps est basée sur celle de la durée qui sépare deux séries d'événements simultanés (par exemple le passage d'un coureur interrompt un faisceau lumineux sur la ligne de départ puis sur la ligne d'arrivée). Et si la simultanéité n'est pas absolue, la perception du temps ne l'est pas non plus. Pour s'en faire une petite idée, voici les aventures de Claudie et Xugloub...

Une soucoupe volante croise le long d'une station spatiale dans laquelle Claudie déclenche un flash équidistant de deux miroirs plans verticaux (c'est une station à pesanteur artificielle) perpendiculaires à la direction du

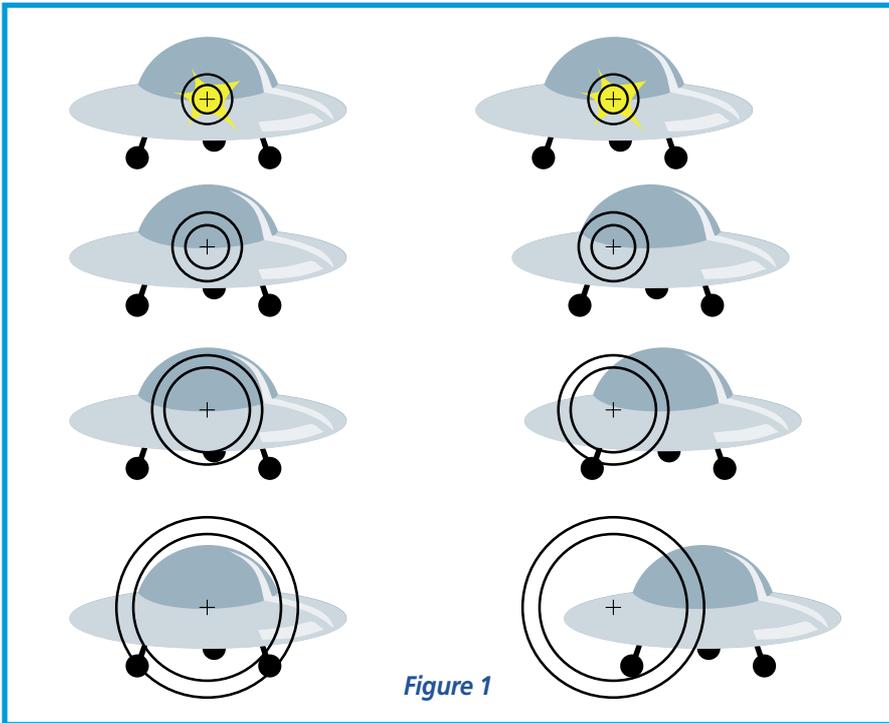


Figure 1

vol de la soucoupe par rapport la station. La lumière, qui se propage à la même vitesse dans toutes les directions touche les deux miroirs exactement au même instant. Les physiciens énoncent : « *Le front d'onde sphérique se développe et touche les deux miroirs au même instant.* » (tout comme, à deux dimensions, le rond dans l'eau déclenché par la chute d'une balle touche en même temps les deux bords de la piscine si la balle est tombée juste au milieu). Les instruments de Claudie enregistrent cette simultanéité.

Par une extraordinaire coïncidence, Xugloub, le pilote de la soucoupe, passe au niveau du flash de Claudie au moment exact de son déclenchement. Il voit la sphère de lumière se développer exactement comme Claudie la voit. Mais pour Xugloub, la station défile (comme défile, selon vous dont le train vient de partir, le train resté en gare). Et, nouveau Michelson, Xugloub observe que le mouvement de la station n'entraîne pas la sphère de lumière. *La sphère de lumière est immobile à la fois pour Claudie et pour Xugloub à cause de l'invariance de c* (voir figure 1). Pour Xugloub, les deux miroirs et l'ampoule de flash de Claudie dérivent mais pas la sphère lumineuse. Cette dérive est observable *parce que la lumière ne se transmet pas instantanément, mais il faut aussi que la vitesse relative de la soucoupe et de la station soit une fraction notable de la vitesse de la lumière*¹. Si bien que Xugloub et ses instruments de bord voient le front d'onde atteindre un miroir avant l'autre.

Ce qui est simultanément pour Claudie ne l'est pas pour Xugloub !

N'ayant pas la même perception de la simultanéité, Claudie et Xugloub n'ont pas la même perception du temps, **Le temps ne s'écoule pas de la même façon pour l'un et pour l'autre.**

Le cosmos n'est pas un métronome universel (voir l'encadré page 6).

« Petit homme vert, pourquoi ta montre retarde-t-elle autant ? »

Sidérés par ce décalage temporel qui n'est pas dû au mal de l'espace (puisque'il est noté par les instruments de bord de chacun), Claudie et Xugloub décident de le confirmer par une autre expérience. Claudie conçoit une horloge optique : un flash lumineux va et vient verticalement entre deux miroirs horizontaux (c'est une station à pesanteur artificielle), et un dispositif en compte les allers et retours. Pour Claudie, immobile (stationnaire) par rapport à son horloge, l'éclair met un temps Δt_S pour aller du miroir bas au miroir haut, à la vitesse de la lumière, et parcourt donc la distance $c \Delta t_S$. Mais Xugloub, dans sa soucoupe volante qui défile devant la station à une vitesse v , voit l'éclair partir du miroir bas quand lui, Xugloub, se trouve en un certain point. Et comme sa soucoupe file à une fraction notable de la vitesse de la lumière, Xugloub a parcouru une distance notable quand il voit l'éclair toucher le miroir haut. Claudie voit un trajet lumineux vertical, mais Xugloub, pour qui l'horloge s'est déplacée, voit un trajet lumineux oblique, plus long (figure 2). Le chronomètre de bord de la soucoupe indique le temps du trajet

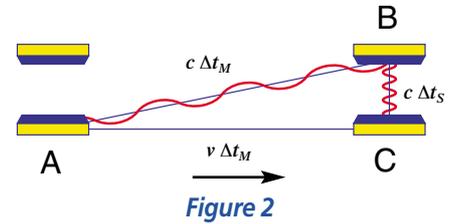


Figure 2

lumineux : Δt_M , supérieur à Δt_S .

Cela paraît banal qu'un trajet plus long prenne un temps plus long.

Le hic, c'est que le trajet tel que le voit Claudie et le trajet tel que le voit Xugloub ne font qu'un. Physiquement, c'est rigoureusement le même et c'est uniquement parce que sa vitesse par rapport à la station est une fraction suffisamment notable de c que Xugloub voit un trajet lumineux notablement différent de celui que voit Claudie.

Mais la vitesse de la lumière est la même pour tout le monde quelle que soit sa propre vitesse. **Alors pourquoi, Xugloub mesure-t-il un temps plus long pour le même trajet parcouru à la même vitesse ? Une seule possibilité : pour lui, le temps s'écoule plus lentement.** Il vit dans un temps dilaté par rapport à celui de Claudie¹, *et réciproquement car, pour Xugloub, c'est Claudie qui bouge.*

« Ralentis, sinon on va s'aplatir ! »

Ce conseil angoissé que donne la personne assise à la place du mort est superflu pour Xugloub. Parce que l'aplatissement de la soucoupe volante et de son pilote est déjà effectif (et indolore) pour tout observateur les voyant défilier à une vitesse proche de celle de la lumière. La raison de cet aplatissement : les distances parallèles à la direction du mouvement paraissent rétrécies à cet observateur, alors que les distances transversales par rapport au mouvement restent inchangées.

Ce phénomène est directement lié à la dilatation du temps. Dans le cadre de leur nouvelle amitié interstellaire, nos deux astronautes collaborent dans une mesure de la vitesse de la lumière. Ils procèdent ainsi : ils orientent chacun une règle de longueur L dans la direction du mouvement relatif de la soucoupe et de la station, et mesurent le temps que met un signal lumineux pour aller d'un bout à l'autre de la règle. L'horloge de Claudie lui donne un temps $t = L/c$, ce qui peut s'écrire : $L = ct$.

Mais cette fine mouche a regardé l'horloge de bord de la soucoupe qui défile devant elle à la vitesse v . Et qu'a-t-elle vu ? L'horloge de Xugloub, qui a fait rigoureusement la même mesure, indique un temps *inférieur*. C'est

(1) Cet effet « relativiste » est pratiquement imperceptible aux vitesses « ordinaires ». Tant que les vitesses sont très petites par rapport à c , la loi habituelle d'addition des vitesses s'applique quasi parfaitement. Infinitésimale pour deux TGV qui se croisent, l'erreur avoisine le cent millionième à 100 000 km/h (environ 0,01% de c), la vitesse la plus rapide que l'homme ait jamais imprimée à des objets macroscopiques (sondes spatiales), et elle atteint environ 1% pour des particules filant à dixième de c . En fait, la loi d'addition classique des vitesses n'est qu'une approximation d'une loi plus compliquée dont l'effet est le suivant : lorsque l'on cumule n'importe quelle vitesse avec c , le résultat est c !

normal puisque, vu de la station, dans la soucoupe qui bouge le temps s'écoule plus lentement et donc les horloges vont plus lentement. Or, on le sait, *la vitesse de la soucoupe ne s'ajoute pas à la vitesse de la lumière*. Pour Claudie, le signal lumineux de Xugloub fait du 300 000 km/s, tout comme le sien ! Alors ?..

Eh bien la conclusion s'impose : Claudie a vu le flash de Xugloub réaliser, sur une règle identique, un temps plus court que son propre flash qui va pourtant à la même vitesse c , tout simplement parce que, *vue de la station, la longueur de la règle en mouvement est plus petite* (voir l'encadré).

Rappelons que pour Xugloub, c'est Claudie qui bouge (tels les trains dont chaque passager croit que c'est l'autre qui part) : l'horloge de Claudie lui paraît plus lente et sa règle moins longue.

Au pays des ions lourds, on voit des noyaux aplatis !

Revenons sur Terre, dans les entrailles du RHIC (voir l'article d'Hervé Borel pages à 3), où se ruent les uns sur les autres des paquets de noyaux dont chaque nucléon est animé de l'énergie de 65 GeV. Cela correspond à un γ de 65 et une vitesse égale à 99,23 % de c , pour le chercheur immobile dans le labo. Mais un nucléon voit un collègue foncer vers lui en sens inverse à une vitesse égale à 99,997 % de c , soit un γ de quasiment 130 (129,93 pour les épris de précision). Il verra donc ce collègue aplati d'un facteur 130 dans la direction de leur parcours (voir figure 3 page 3). On comprend mieux l'extrême brièveté du temps d'interpénétration des deux paquets de noyaux.

Joël Martin (SPhN et Scintillations)

Merci à Eugen Hecht (auteur du traité « Physique », aux éditions De Boeck) et à Alain Milsztajn (SPP)

Pour en savoir plus : « La Relativité aujourd'hui » de Jean-Marc Lévy-Leblond, (La Recherche de janvier 1979)



Encadré pour le bonheur des matheux (mais pas besoin de cent leçons pour calculer)

De combien le temps est-il dilaté ?

On peut faire un petit calcul genre théorème de Pythagore : la figure 2 page 5 représente les deux positions de l'horloge de Claudie vue par Xugloub entre le départ et l'arrivée du flash ; le point A de départ du flash sur le miroir du bas, le point B d'arrivée sur le miroir du haut et le point C, position finale de A, forment un triangle rectangle dont l'hypoténuse AB est le trajet du flash vu de la soucoupe, de longueur Δt_M ; AB est la distance parcourue par la soucoupe à la vitesse v pendant le temps Δt_M , soit : $v \Delta t_M$, et CB est le trajet du flash, vu par Claudie, de longueur $c \Delta t_S$.

D'après Pythagore (« Le carré de l'hypoténuse est égal, si je ne m'abuse etc. ») :

$$AB^2 = AC^2 + BC^2$$

Ce qui donne, en remplaçant chaque longueur par sa valeur :

$$(c \Delta t_M)^2 = (v \Delta t_M)^2 + (c \Delta t_S)^2$$

On en déduit :

$$\Delta t_M = \Delta t_S / \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad \text{Avec : } 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2} = \gamma \quad \text{on trouve : } \boxed{\Delta t_M = \gamma \Delta t_S}$$

Comme c est supérieure à toute autre vitesse, v^2/c^2 est inférieure à 1, la racine carrée aussi. Et comme cette racine figure au dénominateur, γ est supérieur à 1 et Δt_M est supérieur à Δt_S .

Pour Claudie, le temps de Xugloub est dilaté d'un facteur γ

En fait, la soucoupe croise à 244 800 km/s. On peut s'amuser à vérifier, en remplaçant v par cette valeur, que $\Delta t_M = 2 \Delta t_S$. En vitesse de croisière, Xugloub vit deux fois plus lentement que Claudie. Mais il est venu plein pot, à 99,90 % de c , de β -Pictoris (voir ScintillationS n° 20) distante d'une cinquantaine d'années-lumière. À cette vitesse, le temps s'écoule 22 fois plus lentement que celui de Claudie, ce qui lui a permis de parcourir les 50 années-lumière en ne vieillissant qu'à peine plus de deux ans.

Claudie, elle, n'est pas décalée car elle n'a pas été en fusée...

De combien les longueurs sont-elles rétrécies ?

On peut calculer facilement de quel facteur la règle est rétrécie en se rappelant que le temps de Xugloub est dilaté du facteur γ : là où Claudie avait trouvé t , elle a vu Xugloub, avec son horloge qui va γ fois plus lentement, trouver la valeur t/γ . Pour elle, la règle de Xugloub a donc la longueur $L_x = ct/\gamma$, soit :

$$\boxed{L_x = L/\gamma}$$

Pour Claudie, la règle de Xugloub est rétrécie du même facteur γ

Cruel dilemme pour le ventripotent Xugloub : plus il voudra paraître mince à Claudie, plus il devra passer vite devant elle. Le temps d'un éclair...

Le pôle de visite du SIG

C'est un concept ludique qui a été choisi pour présenter les métiers et les compétences du SIG, le Service d'Instrumentation Générale.

Le visiteur a la possibilité de se mesurer à un automate programmable pour réaliser une régulation de température. Ses armes sont une résistance chauffante et un ventilateur, les mêmes que celles de l'automate, mais ses chances ne sont pas les mêmes. L'automate fait la démonstration que la « logique floue » (voir ScintillationS n° 36) est bien plus efficace que la main de l'homme pour stabiliser la température. Il est ensuite possible de réaliser cette même démonstration via le réseau Internet à partir d'un PC situé dans un autre endroit. Cette option intéresse au plus haut point les physiciens désireux de suivre et piloter leurs expériences à distance.

Ce démonstrateur illustre les compétences du SIG dans les domaines de l'informatique industrielle, de la mesure, de l'électronique analogique, numérique et de la réalisation en électrotechnique. Il a séduit et séduira encore toutes sortes de visiteurs, depuis les collégiens qui se prennent au jeu de la régulation, jusqu'aux spécialistes des domaines techniques précités (sous-traitants, industriels ou futurs utilisateurs des services de physique).

Christian Veysière (SIG)

Pour en savoir plus sur la logique floue, faites quelques balades autour des sites du SIG :

http://www.dapnia.cea.fr/Phys/Sig/ACTIVITES/LOGIQFLOU/HTML/index_logiflou.htm

(1) Le point de visite a déjà accueilli une bonne centaine de visiteurs. Il est toujours ouvert au public (tél. azur : 0810-555-222 qui pointe sur la DCom. Les gens de la DCom sont également en mesure de proposer 22 autres sites de visite)

Avis de recherche sur l'antimatière

L'étai se resserre autour des responsables de sa disparition

Résumé du chapitre précédent - *Le numéro 48 de ScintillationS*, posait la question : « Qu'est devenue l'antimatière ? ». Une réponse possible : la production, juste après le big-bang, d'un très petit excédent de matière par rapport à l'antimatière. Cet excédent aurait seul survécu à la grande annihilation primordiale matière-antimatière. Un des responsables de ce favoritisme pro-matière : la violation de la symétrie CP, l'opération qui change une particule en son antiparticule-miroir, sorte de passage entre matière et antimatière. La violation de CP a été mise en évidence pour la première fois en 1963-64 en observant certains modes de désintégrations de kaons qui n'auraient pas dû se produire si CP était respectée (n° 48, pages 2 à 6).

Pourtant les physiciens restaient sur leur faim : ils voulaient une preuve autre qu'une légère entorse aux règles de la physique, et observer directement une différence de comportement entre la matière et l'antimatière. Ainsi s'expliquerait pourquoi la première fut produite un peu plus que la seconde. En outre, les expériences ne portaient que sur les seuls kaons. D'où la question : CP est-elle violée par d'autres particules ?

L'année 2001 voit une spectaculaire progression de l'enquête. Deux résultats tombent : la preuve de la violation directe de CP par les kaons, et la première évidence de la violation de CP par d'autres particules, les mésons B, particules porteuses de « beauté ».

Une preuve directe de la dissymétrie kaons-antikaons

Les kaons font partie des « mésons », particules constituées d'un quark et d'un anti-quark, c'est-à-dire d'un morceau de matière et d'un morceau d'antimatière. Ce sont en quelque sorte des particules frontalières. S'il y a une différence entre la matière et l'antimatière, les mésons sont aux premières loges pour y être sensibles. Ce sont donc de bons cobayes pour mettre au jour cette différence et pour ce faire, les physiciens ont eu l'idée de mesurer si le kaon neutre se désintègre à une cadence différente de celle de son antiparticule, l'antikaon neutre. Simple sur le papier. Mais cette différence est extrêmement ténue et pour la voir, il faut mesurer un minuscule paramètre, $Re(\epsilon'/\epsilon)$ pour les intimes : s'il est non nul, CP est directement violée dans cette désintégration.

Toute mesure est entachée d'incertitudes expérimentales que l'on peut réduire grâce aux qualités de l'appareillage et en répétant énormément de fois la mesure. Il faut des détecteurs ultra précis et des accélérateurs délivrant des Niagara de particules pour pouvoir stocker le plus vite possible le grand nombre de mesures nécessaire. C'est spécialement crucial lorsqu'on mesure un très petit paramètre, car il arrive que l'incertitude soit plus grande ou du même ordre que la valeur qu'on mesure. C'est

ennuyeux lorsqu'on veut déterminer si le paramètre est nul ou non (voir le schéma). Voilà pourquoi il a fallu attendre quelques décennies après la première expérience de violation de CP, pour que les progrès des accélérateurs et des détecteurs permettent de réduire les incertitudes et les rendre nettement plus petites que la valeur du paramètre (voir les valeurs ci-contre et sur le schéma).

Abondance de biens ne nuit pas, deux grands laboratoires viennent d'acquérir pratiquement en même temps la preuve directe tant convoitée : le Cern, à Genève, et Fermilab, à Chicago.

L'expérience du Cern, NA48 (n° 7, 13, 22, 48), dans laquelle le DAPNIA s'est fortement engagé, a obtenu, après trois ans d'accumulation de données, la mesure avec la marge d'erreur la plus petite à ce jour de $Re(\epsilon'/\epsilon)$. Ce résultat ne laisse place à aucun doute et confirme à lui seul la violation directe de CP par les kaons neutres. Il établit avec une précision d'environ un millionième la différence des taux de désintégrations en deux pions (voir n° 48) du kaon neutre et de l'antikaon neutre.

Valeurs mesurées de $Re(\epsilon'/\epsilon)$
 NA48 : $(15,3 \pm 2,6) \times 10^{-4}$
 KTeV : $(20,7 \pm 2,8) \times 10^{-4}$
 Moyenne : $(17,2 \pm 1,8) \times 10^{-4}$

Cette mesure a été confirmée tout récemment par un résultat de l'expérience KTeV du Fermilab, compatible avec la mesure européenne. Le résultat combiné américano-européen fournit une valeur si précise qu'elle entérine définitivement la violation directe de CP par les kaons et antikaons neutres.



Une des grandes chambres à fils octogonales du NA48, réalisées au DAPNIA

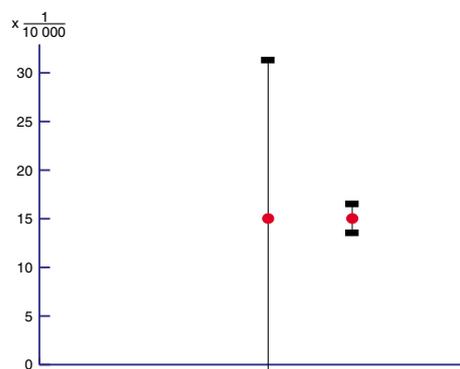


Figure 1a : Le point rouge représente-t-il une valeur non nulle ? A gauche les « barres d'erreurs » sont trop grandes pour conclure. A droite il est certain que la valeur est non nulle.

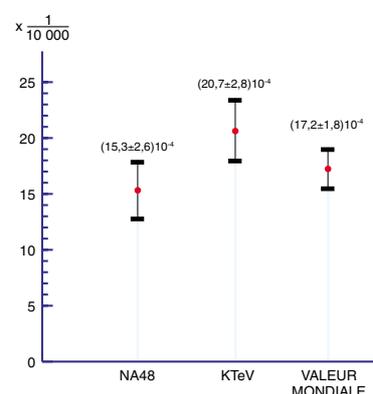


Figure 1b : Les mesures de NA48 et KTeV et leur combinaison.

Preuve directe, mais partielle. Comme tous les mésons, les kaons sont composés d'un quark et d'un antiquark. Le K^0 contient un quark *down* et un antiquark *étrange*. L'antikaon neutre renferme un antiquark *down* et un quark *étrange*. Or il existe six « saveurs » de quarks (*schéma*), avec leurs équivalents pour les antiquarks, quarks d'antimatière. La violation de CP prouvée pour des mésons porteurs d'étrangeté concerne-t-elle des particules porteuses d'autres saveurs ?

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom

La « beauté » dissymétrique

Pour en avoir le cœur net, les physiciens ont voulu savoir si d'autres mésons, porteurs de « beauté » (renfermant des quarks et antiquarks « beaux », ou « bottom ») violaient eux aussi CP. Ils ont construit au SLAC, à Stanford en Californie, une " usine de beauté ", capable de produire en quantité ces mésons « beaux » : les B et anti B.

Une équipe internationale forte de 600 chercheurs, parmi lesquels des membres du DAPNIA, travaillant sur le collisionneur PEP-II au SLAC où est implanté le

détecteur BaBar (*n° 19, 48*), vient de mettre en évidence la violation de CP par les particules belles, en mesurant un autre paramètre dont la non-nullité caractérise cette violation ; cette fois, le paramètre répond au doux nom de sinus de deux bêtas ($\sin 2\beta$). La valeur trouvée : $0,59 \pm 0,14$ s'écarte suffisamment de zéro pour établir la violation.

Ainsi va l'étrange et belle histoire de l'antimatière disparue...

Sources SPP : Edoardo Mazzucato pour NA48, Roy Aleksan pour BaBar

Va et vient

Avril 2001 – Jean-Paul Leray (SAP), Bao Phung Ngoc (SEA) et Aimé Soutoul (SAP) partent en retraite. Bonne chance à vous trois ! Édouard Audit (bon sang ne saurait mentir) est recruté au SAP et Anne-Claire Gouze est mutée de DRHRS à la direction du DAPNIA. Elle remplace Laurence Zeitoun. Bienvenue au club à toute et à tous !

Mai 2001 – Jacques Aiguespares (SPhN) part en retraite. Reviens nous voir, Jackie ! Hervé Dzitko mute du SAP vers la DAM, et Emmanuel Fressange, de DAPNIA/DIR vers la DTI. Bonne chance à vous trois sur vos nouvelles trajectoires. Deux mutés arrivants (et non : deux mutants arrivés) : Hervé Bervas passe de DEN/DPI (l'ancienne DTI) à DAPNIA/DIR et Jean-Christophe David arrive au SPhN en provenance de RSN/SIRE. Stéphane Pacary est recruté au SGPI. Bienvenue à vous trois.

Les lauriers du DAPNIA

Maud Baylac, qui fit sa thèse au SPhN dans l'équipe « Violation de parité-Polarimètre Compton » (voir *Scintillation n° 42*) et obtint en 2000 son titre de docteur avec les félicitations du jury, ne s'est pas arrêtée en si bon chemin : elle a été embauchée à CEBAF en janvier 2001 et dès juin, elle recevait le prix SURA 2000 pour l'ensemble de son œuvre. Nous au SPhN, qui connaissons la probité de Maud, savons bien qu'elle a obtenu ces distinctions sans avoir eu besoin de faire sa pub avec sa thèse. On salue la belle série : une thèse tout sauf aberrante, une embauche dans la foulée aux États-Unis ce qui est encore plus rare qu'en France, et un prix américain récompensant la toute première mesure sans altération du faisceau de la polarisation du faisceau de CEBAF. Bravo Maud ! Nous sommes heureux et fiers de porter à la connaissance de nos hautes autorités cette éclatante et réconfortante reconnaissance outre-

Atlantique de cette nouvelle grande réussite de la synergie instrumentalo-physicienne du DAPNIA, maître d'ouvrage et maître d'œuvre du polarimètre et de la mesure.

Calendrier du projet de réorganisation des services d'instrumentation du dapnia

- **9 avril** : Réunion des chefs de service et chefs de groupe du DAPNIA en présence du Directeur de la DSM
- **19 juin** : Diffusion du projet de réorganisation avec demande de réaction aux chefs de groupe et aux membres du CU du DAPNIA
- **26 juin** : Réunion des chefs de service et chefs de groupe
- **28 juin** : Diffusion du projet de réorganisation avec demande de réaction aux chefs de projet du DAPNIA
- **2 juillet** : Réunion spéciale du Conseil d'Unité du DAPNIA [compte-rendu déjà disponible]
- **Mi-juillet** : Réponse écrite de la direction du DAPNIA aux nombreux commentaires qu'elle a reçus

DAPNIA/DIR

Le gluon d'honneur

D'un scientifique à « *Maman les p'tits bateaux* », l'excellente émission de France-Inter, le 24/6 : « *Si on pouvait (mais on ne peut pas) creuser un puits traversant la Terre de part en part, et y lâcher un caillou, le caillou ressortirait-il de l'autre côté (aux antipodes) ? Eh bien non, car au fur et à mesure que le caillou s'enfoncerait, il rencontrerait une gravité de plus en plus faible et lorsqu'il parviendrait au centre de la Terre où la gravité est nulle, n'étant plus attiré par rien, il s'arrêterait et n'irait pas plus loin.* »

Entendant cela, un jeune auditeur a cru que le

caillou serait freiné jusqu'à s'arrêter au centre. Or, si l'attraction de la gravité diminue jusqu'à s'annuler au centre de la Terre, elle reste positive et tant que le caillou n'a pas atteint le centre, il continue d'être accéléré. Gravité nulle signifie accélération nulle, mais pas vitesse nulle. Le caillou gagne en vitesse jusqu'au centre qu'il dépasse « à toute blinde », puis ralentit en « remontant » vers les antipodes. Il fait alors le yoyo, un yoyo dont l'amplitude décroît avec le temps à cause de la résistance des gaz qu'il rencontre. Il finira donc par s'arrêter au centre de la Terre, mais, pas à son premier voyage.

Erreur ou présentation maladroite ? Contacté via France-Inter, le scientifique, un distingué géophysicien, ancien directeur de la Recherche, n'a pas (encore ?) répondu aux demandes de précisions. Dommage pour le jeune auditeur à qui il a donné des idées fausses. On se met dans de mauvais cas quand on est un peu faible sur la chute...

CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Joël FELTESSE

COMITÉ ÉDITORIAL : Joël MARTIN (porte-parole),

Claire ANTOINE, François BUGEON, Rémi

CHIPAUX, Nathalie COLOMBEL, Philippe

CONVERT, Christian GOUIFFES, Christophe

MAYRI, Yves SACQUIN, Jean-Luc SIDA, Angèle

SÉNÉ, Christian VEYSSIÈRE, 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/Com/ScintillationS/>

Dépôt légal juillet 2001