

IDÉES DE PHYSIQUE

L'œuf dur et la toupie-bascule

Un œuf dur que l'on fait tourner rapidement se redresse spontanément. Un phénomène étonnant, où le frottement se conjugue à des effets gyroscopiques.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Comment distinguer un œuf dur d'un œuf cru ? Facile ! Posez votre œuf sur la table et faites-le tourner à grande vitesse autour de lui-même. Vous constaterez que l'œuf cru poursuivra sa rotation « à plat », tandis que l'œuf dur se dressera spontanément sur l'une de ses extrémités. Ce comportement est apparenté à celui de la toupie tippe-top, popularisée au début des années 1950 et constituée d'une tige emmanchée sur une calotte sphérique : une fois lancée, cette toupie finit par se renverser et part tourner sur son manche ! Le redressement est contre-intuitif, car le centre de gravité de la toupie s'élève. Comment l'expliquer ?

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

une rotation rapide autour de son axe de symétrie (voir la figure ci-dessous). La toupie se retourne et son centre de masse se retrouve au plus haut, la rotation s'effectuant à nouveau autour de l'axe de symétrie. Puisque le centre de masse s'est élevé, l'énergie potentielle de la toupie a augmenté ; et comme aucune énergie n'a été fournie, la hausse de l'énergie potentielle ne peut se faire qu'au détriment de l'énergie cinétique de rotation.

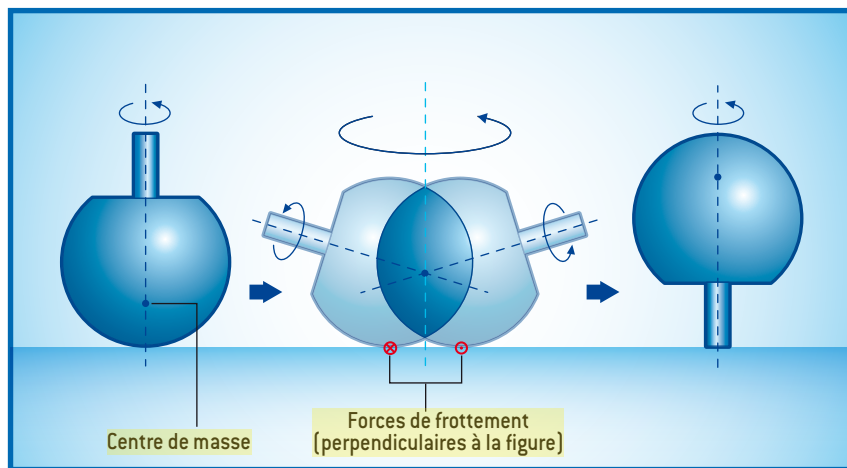
La vitesse de rotation de la toupie a ainsi diminué, ce qui a nécessité l'action d'un couple. Lequel ? Ce couple ne peut provenir du poids, qui est vertical, donc perpendiculaire à la direction de rotation ; le coupable est donc

Frottements redresseurs

Immobile, reposant sur son ventre sphérique et sa petite tige pointant vers le haut, la toupie tippe-top paraît banale. À l'époque de sa diffusion, elle a pourtant attiré l'attention des physiciens, et non des moindres : une photographie célèbre montre ainsi Wolfgang Pauli et Niels Bohr, des lauréats du Nobel, penchés sur la toupie et en pleine interrogation.

Pour comprendre le retournement inattendu et l'élévation du centre de masse, les physiciens se sont rapidement mis d'accord sur le rôle essentiel des frottements entre la toupie et le sol. Un bilan d'énergie va nous en convaincre.

Initialement, la tippe-top repose à l'équilibre sur sa base, le centre de masse étant au plus bas. Dans cette position, on lui imprime



UNE TOUPIE TIPPE-TOP EN ROTATION RAPIDE s'incline peu à peu et finit par se renverser pour tourner sur sa tige. Au cours de ce processus, la hauteur du centre de masse de la toupie augmente. Dans la phase intermédiaire, l'objet donne l'impression de flotter au-dessus du support, car le volume commun aux positions successives de la toupie au cours de son mouvement est légèrement surélevé par rapport au support.

Dessins de Bruno Vacaro

la composante horizontale de la réaction du support, qui comprend la force de frottement. Cette dernière à la fois ralentit la rotation et crée un « couplage », une dépendance, entre la rotation propre de la toupie et la rotation à l'origine du redressement.

Pour comprendre ce couplage, observons une tippie-top en fin de redressement, quand elle tourne sur sa tige. Elle se comporte alors comme une toupie ordinaire qui, initialement inclinée, se redresse peu à peu vers la verticale. Pourquoi se redresse-t-elle ? Le mouvement d'une toupie inclinée est la combinaison d'une rotation rapide autour de l'axe de symétrie (la rotation propre de la toupie), et d'un lent mouvement de rotation de cet axe autour de l'axe vertical, la précession (voir la figure ci-contre). On montre que ce dernier engendre un couple dit gyroscopique, qui compense le couple dû au poids et empêche la toupie de tomber (voir *Batailles de toupies, Pour la Science* de décembre 2014).

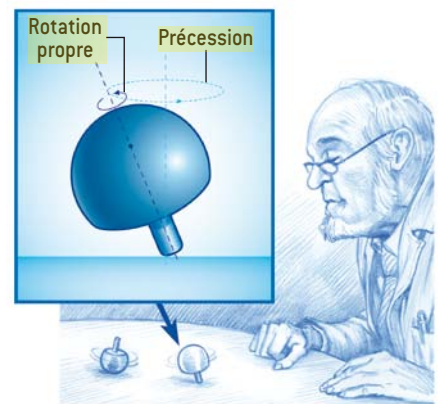
Or lorsque la pointe de la toupie est sphérique ou cylindrique, son point de contact avec le support est animé d'une certaine vitesse en raison de la rotation propre de la toupie. Il en résulte une force de frottement qui ralentit la rotation propre et, ce qui est beaucoup moins évident, accélère la précession. À cause du couple gyroscopique, on montre que l'effet de cette force est un redressement de l'axe de la toupie vers la verticale.

propre est converti en précession autour de la verticale. De plus, à cause de la faible courbure au point de contact et de la rotation autour du centre de masse, ce couplage induit une précession en sens inverse de ce qui se passe avec la toupie classique ; il a donc un effet déstabilisant : l'axe de rotation s'incline de plus en plus.

Ensuite, pendant que la toupie s'incline, la rotation propre décroît, s'annule lorsque la toupie est horizontale et repart en sens inverse lors du redressement : le sens de la rotation propre par rapport à l'axe de symétrie de la toupie s'est inversé.

Malgré le caractère dissipatif du frottement, certaines grandeurs se conservent dans cette évolution. Ainsi, dans le cas général d'un solide en rotation rapide et présentant un axe de symétrie, le Britannique Keith Moffatt et le Japonais Yutaka Shimomura ont montré en 2002 que le produit de la vitesse angulaire de rotation du solide (par rapport à la verticale) par la hauteur du centre de gravité est une constante, dite de Jellet. Il s'ensuit que, comme le frottement freine la rotation, le centre de masse doit nécessairement s'élever.

Il faut enfin ajouter que, pour la tippie-top, il arrive un moment où, lorsqu'elle est suffisamment inclinée, la tige elle-même vient toucher le sol. On a alors non plus

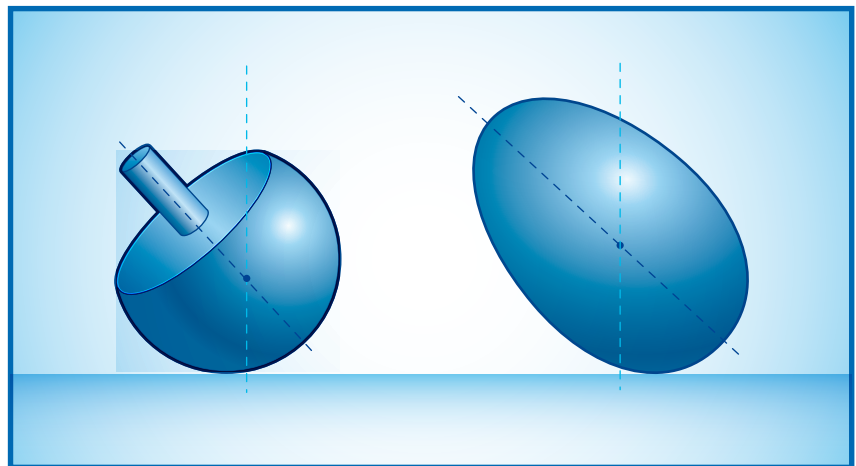


LA PRÉCESSION est la rotation de l'axe de symétrie de la toupie autour de la verticale. Ce mouvement engendre un couple dit gyroscopique, qui conduit au redressement de la toupie tippie-top dans la seconde phase de son basculement.

Couplage entre rotation propre et précession

Que peut-on en déduire pour la tippie-top ? Comme avec la toupie ordinaire, le frottement de la tippie-top avec le support crée un couplage entre la rotation propre et le mouvement de précession, et le couple gyroscopique associé à cet effet entraîne un basculement de l'axe vers la verticale.

Cependant, la tippie-top ne se comporte comme une toupie ordinaire qu'après s'être redressée. Détaillons les conséquences du frottement durant la phase précédente, lorsque la tippie-top repose encore sur sa partie sphérique. L'observation et des simulations numériques indiquent que le couplage entre rotation propre et précession est si fort que l'essentiel de la rotation



LE REDRESSEMENT D'UN ŒUF DUR en rotation rapide, très similaire à celui d'une toupie tippie-top, peut s'expliquer par un calcul montrant que le produit de la vitesse angulaire de rotation autour de la verticale par la hauteur du centre de masse est approximativement une constante. Comme le frottement freine la rotation, le centre de masse doit alors s'élever pour que le produit reste inchangé.

BIBLIOGRAPHIE

H. K. Moffatt et Y. Shimomura, *Spinning eggs – a paradox resolved*, *Nature*, vol. 416, pp. 385-386, 2002.

R. J. Cohen, *The tippe top revisited*, *American Journal of Physics*, vol. 45(1), pp. 12-17, 1977.

W. A. Pliskin, *The tippe top (topsy-turvy top)*, *American Journal of Physics*, vol. 22, pp. 28-32, 1954.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

une, mais deux forces de frottement, de même sens, qui tendent donc à incliner la toupie encore plus. En raison du caractère brutal de cet ajout, il est fréquent que la tippe-top bondisse sur sa tige.

Qu'en est-il pour l'œuf ? Comme pour la tippe-top, le détail des forces et des couples est très délicat à analyser, mais l'existence de la constante de Jellet permet de comprendre en partie le redressement.

Il y a toutefois des différences avec la toupie. D'abord, l'œuf part à plat. Par conséquent, au cours de son redressement, son moment d'inertie par rapport à la verticale (qui mesure la répartition des masses par rapport à l'axe de rotation) varie beaucoup. Malgré le frottement, surtout s'il est faible, sa rotation propre peut accélérer dans certaines phases, comme un patineur qui ramènerait ses bras le long de son corps.

Par ailleurs, lorsque la rotation initiale est très rapide (1 600 tours par minute dans les expériences de Y. Shimomura !), les petites asymétries de l'œuf suffisent pour qu'il effectue des petits bonds, de l'ordre d'un dixième de millimètre.

Enfin, on peut s'interroger : pourquoi l'œuf cru ne se redresse-t-il pas ? La rotation de la coquille ne se communique que progressivement au liquide interne, comme lorsqu'on fait tourner une cuillère dans une casserole d'eau. Cependant, la viscosité du liquide est si élevée que la résistance à l'écoulement dissipe vite l'énergie de rotation, laquelle devient insuffisante pour faire monter l'œuf. En revanche, si on arrête brusquement l'œuf, l'œuf cru redémarrera un peu après avoir été relâché (au contraire de l'œuf dur), car son intérieur est, lui, resté en rotation. ■

Toutes les ARCHIVES

- Pour la Science
- Dossier Pour la Science

depuis

1996



maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr*

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.

QUESTION AUX EXPERTS

Pourquoi l'IRM est-elle si bruyante ?

Le bruit résulte des vibrations des bobines conductrices servant à localiser l'origine des signaux IRM émis.

Cyril POUPON



Si vous avez déjà passé un examen par IRM, vous avez entendu, quand vous étiez allongé dans l'appareil, une série de claquements. Cessons sont graves pour une IRM anatomique, destinée à visualiser une partie du corps, et aigus pour une IRM fonctionnelle, qui visualise l'activité du cerveau. D'où provient ce bruit ?

L'IRM (imagerie par résonance magnétique) exploite les propriétés magnétiques des noyaux d'hydrogène de l'eau contenue dans les tissus biologiques. Au cours d'un examen, l'organe à explorer est plongé dans un champ magnétique intense (1,5 à 3 teslas, soit plus de 100 000 fois celui de la Terre). Ce champ magnétique statique (constant dans le temps) est créé à l'aide d'un électro-aimant, constitué d'une bobine de conducteur électrique plongée dans de l'hélium liquide. Ce bain, à une température de 4,2 kelvins (4,2 degrés au-dessus du zéro absolu), rend le matériau supraconducteur, c'est-à-dire annule sa résistance électrique (ce qui permet au courant, très intense, de circuler sans perte).

Les tissus mous contiennent une quantité importante d'eau (jusqu'à 80 % dans le cerveau), dont les molécules se comportent comme de petits aimants, nommés spins. Ceux-ci s'orientent dans la direction du champ magnétique statique lorsqu'ils sont placés au centre de l'électro-aimant. À leur état d'équilibre, les spins tournent autour de l'axe du champ (mouvement dit de précession) à une fréquence proportionnelle à

l'amplitude de ce dernier. Grâce à une antenne placée autour de l'organe exploré, on émet alors une onde radio de même fréquence, qui agit sur les spins. Ceux-ci entrent en résonance avec l'onde radio (d'où le nom de cette modalité d'imagerie), ce qui se traduit par un basculement du spin par rapport au plan perpendiculaire au champ magnétique ; quand le spin revient à sa position initiale, il émet une onde électromagnétique, captée par une antenne réceptrice.

Les propriétés magnétiques des tissus contenant l'eau perturbent les spins et influent sur l'amplitude du signal recueilli, ce qui crée le contraste dans les images d'IRM. Dans le cas de l'IRM fonctionnelle classique, les propriétés magnétiques du sang varient quand il apporte de l'oxygène aux aires cérébrales qui s'activent, d'où une modification du signal.

Des bobines secouées

Pour localiser le point d'émission du signal, on utilise trois bobines dites de gradient de champ magnétique, alignées le long d'axes différents. Ces bobines font varier localement le champ magnétique, de sorte que la fréquence de précession et l'orientation des spins deviennent spécifiques de leur position. La fréquence de l'onde émise par un spin est alors caractéristique de la localisation de ce dernier. En pratique, l'antenne reçoit un mélange des signaux émis par tous les points. Par un traitement informatique reposant sur une analyse dite de Fourier,

on décompose le signal en ses éléments de différentes fréquences, ce qui permet de reconstituer une image de l'organe exploré.

Les bobines de gradient sont alimentées par des courants électriques alternatifs de plusieurs centaines d'ampères, qui ne durent que quelques millisecondes. Le champ magnétique statique agit sur ces courants et engendre des forces mécaniques radiales (dites forces de Laplace), faisant vibrer les bobines. Ainsi, à chaque fois qu'une image est prise, il se produit un train de vibrations qui émet un claquement sonore, dont la fréquence est égale à celle des vibrations. Le bruit est plus aigu pour une IRM fonctionnelle car il faut faire varier les courants plus vite pour acquérir de nombreuses images et suivre l'évolution de l'activité cérébrale, d'où des vibrations de plus haute fréquence.

C'est donc le processus de lecture tridimensionnelle du signal qui crée du bruit. À trois teslas, ce bruit peut atteindre 125 décibels, équivalant à l'intensité perçue lors d'un concert de rock. Des protections acoustiques, tels des bouchons d'oreille ou des casques, s'imposent alors. Ces protections sont conçues pour ramener le niveau de bruit en deçà de 99 décibels, maximum autorisé par l'administration sanitaire américaine (la Food & Drug Administration, ou FDA). ■

Cyril POUPON est directeur de l'Unité d'imagerie par résonance magnétique nucléaire et de spectroscopie (UNIRS) du centre NeuroSpin du CEA à Gif-sur-Yvette.