



---

## QUAND LES TROUS NOIRS ÉCLAIRENT LA THÉORIE D'EINSTEIN

SÉANCE DU 15 DÉCEMBRE 2005

*Avec Pierre Binétruy, physicien  
et Gorka Alda, musicien électro-acousticien*

### LYCÉE INTERNATIONAL VICTOR HUGO (COLOMIERS, HAUTE-GARONNE)

C'est dans l'amphithéâtre du Lycée international Victor Hugo de Colomiers que s'est tenue cette XXI<sup>ème</sup> séance de l'Université des Lycéens, dédiée au centenaire de la naissance de la relativité restreinte formulée par Einstein.

150 élèves de 1<sup>ères</sup> et de Terminales S, issus des Lycées Victor Hugo de Colomiers, Joseph Saverne de l'Isle Jourdain et Pierre de Fermat de Toulouse, ont assisté à cette conférence-débat.

[www.agrobiosciences.org](http://www.agrobiosciences.org)





L'UNIVERSITÉ DES LYCÉENS

## **UNE EXPERIENCE PILOTE EN MIDI-PYRENEES POUR METTRE LA SCIENCE EN CULTURE**

*En France et en Europe, la régression des effectifs étudiants dans certaines filières scientifiques préoccupe les pouvoirs publics. Ce phénomène pose à moyen terme le problème du renouvellement des cadres scientifiques et techniques, des enseignants et des chercheurs. De plus, le désintérêt des jeunes à l'égard de la science risque de nuire au débat démocratique sur les choix d'orientation de la recherche et de ses applications.*

### **LA CONNAISSANCE ET LA CULTURE SCIENTIFIQUE AU CŒUR DES RAPPORTS ENTRE LA SCIENCE ET LA SOCIÉTÉ**

La Mission d'Animation des Agrobiosciences (MAA), créée dans le cadre du Contrat de Plan Etat-Région Midi-Pyrénées 2000-2006, a pour vocation, au plan régional et national, de favoriser l'information, les échanges et le débat entre la science et la société. Elle est à l'initiative de l'Université des Lycéens : une série de rencontres visant à rapprocher les chercheurs, les industriels, les lycéens et leurs enseignants. Cette démarche destinée aux lycéens de Midi-Pyrénées, depuis la rentrée 2003-2004, devrait à terme être transposée dans d'autres régions de France, voire en Europe.

### **UNE INITIATIVE POUR SENSIBILISER LES JEUNES A LA CULTURE SCIENTIFIQUE**

Les principaux objectifs de l'Université des Lycéens sont :

- Inscrire les sciences, les technologies et les techniques dans la culture générale afin de permettre aux jeunes de se forger un esprit critique,
- Redonner du sens aux savoirs scientifiques en montrant les passerelles existant entre les disciplines, les relations entre la science et le contexte

socio-économique et culturel, ainsi que les liens entre les savoirs et les métiers,

- Incarner la science à travers l'exemple du parcours de scientifiques venus à la rencontre des élèves pour « raconter » la science et dialoguer.

### **UNE QUESTION, UNE DISCIPLINE, UNE TRAJECTOIRE**

- La découverte d'une discipline scientifique : chaque séance, animée par l'équipe de la MAA, fait intervenir un chercheur, le conférencier principal, qui explore un champ scientifique à travers sa trajectoire individuelle, mais aussi à travers l'histoire collective de sa discipline : les grands enjeux, les questionnements, les perspectives.
- La confrontation des approches et l'interdisciplinarité : en contrepoint du conférencier principal, un intervenant de discipline ou de secteur professionnel autres apporte son point de vue et réagit aux propos du chercheur.
- Un dialogue avec les lycéens : à l'issue de ces exposés, une heure est consacrée au débat entre les lycéens et les intervenants. Ce moment est aussi l'occasion pour les enseignants qui accompagnent les lycéens de faire le point sur les dernières avancées de la recherche en lien avec le programme scolaire.

### **UN ACCOMPAGNEMENT PEDAGOGIQUE DES CLASSES**

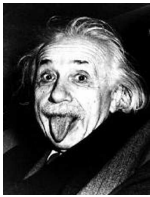
- La diffusion d'un résumé de la conférence, des principaux points de repères sur le sujet et de la biographie des intervenants permet aux enseignants de préparer le débat en amont,
- L'édition ultérieure du contenu des séances est assurée par la mise en ligne gratuite sur le site de la MAA ([agrobiosciences.org](http://agrobiosciences.org)).



LE SUJET

## QUAND LES TROUS NOIRS ECLAIRENT LA THEORIE D'EINSTEIN

### ALBERT EINSTEIN



(14 mars 1879, Ulm, Allemagne – 18 avril 1955, Princeton, Etats-Unis). Physicien allemand, puis apatride, suisse et enfin suisse-américain (1940), Albert Einstein a publié la théorie de la relativité restreinte en 1905 et celle de la

relativité générale en 1915. Le chercheur génial a largement contribué au développement de la mécanique quantique<sup>1</sup> et de la cosmologie. Prix Nobel de physique en 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique, le travail d'Einstein reste notamment connu pour la plus célèbre des équations :  $E = mc^2$  qui explique la puissance de l'énergie nucléaire.

### 2005, CENTENAIRE DE LA NAISSANCE DE LA RELATIVITE RESTREINTE D'EINSTEIN

1905. Un jeune chercheur de 26 ans, alors peu connu, publie quatre articles formulant les trois théories - celles de la relativité, du mouvement brownien et de la photoélectricité - qui vont révolutionner le monde de la physique. C'est l'«Annus Mirabilis» (l'année miracle...) de la physique contemporaine, les deux derniers articles étant directement en relation avec la théorie de la relativité. Dans le premier, Einstein montre que la lumière n'a pas besoin de support pour se propager (alors qu'on pensait jusque-là qu'elle le faisait grâce à un éther...). De là, il lie les théories de la mécanique (mouvement d'un corps « ordinaire ») et de l'électromagnétisme (propre aux ondes, notamment lumineuses) et met en évidence la constance de la vitesse de la lumière, quelque soit le mouvement de sa source.

<sup>1</sup> La mécanique quantique est la théorie mathématique et physique décrivant la structure et l'évolution dans le temps et l'espace des phénomènes physiques à l'échelle de l'atome et en dessous. Elle a été découverte lorsque les physiciens ont voulu décrire le comportement des atomes et les échanges d'énergie entre la lumière et la matière à cette échelle et dans tous les détails (source futurasciences.com)

C'est ce phénomène d'invariance de la vitesse de la lumière qui donne son nom à la théorie de la relativité. La notion d'espace-temps découle aussi de ces données. Quelques mois plus tard, Einstein publie de nouveau un article qui lie deux grandeurs : l'énergie et la masse pour donner la très célèbre équation :  $E = mc^2$  (E représentant l'énergie, m la masse et c la célérité, soit la vitesse, de la lumière). C'est le centenaire de la parution de ces articles qui a été fêté en 2005 et incité l'Unesco à déclarer 2005 Année mondiale de la physique.

### 1905 : LA RELATIVITE RESTREINTE

On nomme Relativité restreinte une première version de la théorie de la Relativité, émise en 1905 par Einstein. Elle introduit pour la première fois la notion d'espace-temps et des phénomènes étonnants, vérifiés expérimentalement, de variation des mesures de longueur et des mesures de durée d'un observateur à un autre, chacun d'eux étant situé sur un référentiel différent. Simple et claire, elle reste la seule théorie utilisable pour représenter les effets lorsque la vitesse devient proche de la vitesse de la lumière.

### 1915 : LA RELATIVITE GENERALE

Considérée comme l'œuvre majeure d'Einstein, qui la publia en 1915, il s'agit d'une théorie de la gravitation qui décrit celle-ci comme une manifestation d'une déformation locale de la géométrie de l'espace-temps.

### LES TROUS NOIRS, DES GLOUTONS HORS DU TEMPS

Au même titre que les étoiles ou les planètes, un trou noir est un objet astronomique. En réalité, il s'agit d'un objet relativiste, au sens où la théorie qui le soutient n'a pris sens et corps que dans le cadre de la Relativité générale d'Einstein. Il est tellement massif (d'une densité de plusieurs milliards de fois supérieure à celle des autres objets célestes connus) que, gobant tout à son approche, même la lumière ne peut y échapper. Les trous noirs observés résultent de l'effondrement d'étoiles sous l'effet des forces gravitationnelles.

Fait remarquable : malgré les caractéristiques hors-norme des trous noirs, il s'agit des objets cosmiques les plus simples possibles, entièrement et seulement déterminés par trois paramètres (masse, moment angulaire, charge électrique), alors que la description d'un simple morceau de bois fait intervenir au minimum des dizaines voire plusieurs milliers de paramètres ! Les trous noirs ont également été parmi les premiers objets cosmiques à être découverts, en premier lieu, par les équations mathématiques et non par observation directe.



---

## PIERRE BINETRUY

Les pieds sur terre, la tête dans les étoiles, Pierre Binétruy est tout à la fois enseignant, physicien théoricien et directeur du laboratoire AstroParticule et Cosmologie (APC)<sup>2</sup> à l'Université Paris 7-Denis Diderot, où il mène ses recherches en physique théorique, plus précisément sur l'énergie noire, les dimensions supplémentaires de l'espace et les ondes gravitationnelles. Côté « terrain », notre chercheur participe à des projets internationaux comme LISA, impliquant trois satellites - dont le lancement est prévu en 2018-, qui devraient permettre de détecter les ondes gravitationnelles prédites dans la théorie de la Relativité générale d'Einstein. Il s'agit tout simplement d'approcher les trous noirs ! Il est aussi l'auteur de très nombreux articles scientifiques et d'ouvrages de vulgarisation pour les enfants et le grand public. Mais qu'est-ce qui peut bien faire vibrer ainsi Pierre Binétruy ?

Scientifique dans l'âme dès sa tendre enfance, le jeune Pierre fait une prépa et intègre l'École normale supérieure. « Puis, j'ai commencé à toucher à la physique des particules au CERN à Genève (Centre européen pour la recherche nucléaire, le laboratoire européen pour la physique des particules), où j'ai fait ma thèse en physique théorique. Ensuite, je suis allé à Berkeley, aux États-Unis, où j'ai commencé à travailler sur l'interface entre les particules (l'infiniment petit) et l'astrophysique (l'infiniment grand). Un certain nombre d'observations très intéressantes sont justement faites sur la relation entre l'infiniment petit et l'infiniment grand.



Ce domaine de recherche est celui des astroparticules (astrophysique et physique des particules). C'est pourquoi, nous construisons un nouveau laboratoire des Astroparticules, au sein duquel peuvent travailler des astrophysiciens, des physiciens théoriciens comme moi et des physiciens des particules, pour mieux comprendre cette interface entre l'infiniment grand et l'infiniment petit. »

Et puis, Pierre Binétruy possède un autre talent : celui de raconter d'une manière lumineuse la relativité qui a bouleversé notre vision du monde et qui sous-tend toute la physique contemporaine. Brillant !

---

<sup>2</sup> Voir le site Internet du Laboratoire : <http://www.apc.univ-paris7.fr/>



LA CONFÉRENCE

EN MISSION VERS UN TROU NOIR

*Pour fêter le centenaire de la relativité restreinte écrite par Einstein en 1905 et l'Année Mondiale de la Physique, l'Université des Lycéens a consacré l'une de ses séances aux théories et à l'héritage scientifique du génial chercheur. « Pour aborder la relativité générale, j'ai choisi de traiter des trous noirs. Comment ces objets sont-ils nés de cette théorie et quelles sont leurs conséquences pratiques ? » interroge Pierre Binétruy. « Car les trous noirs sont l'une des conséquences les plus étonnantes de la relativité générale. Un voyage à l'intérieur d'un trou noir sera*

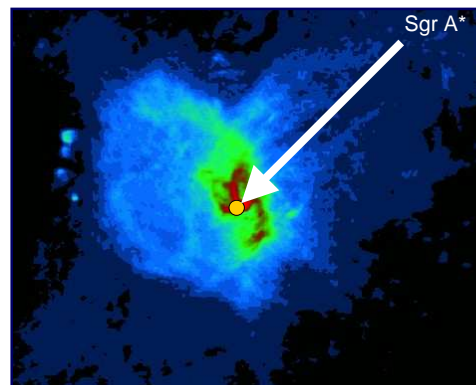
*l'occasion de voir comment la physique du XXIème siècle révolutionne nos notions d'espace et de temps. Cette nouvelle vision de l'Univers est pourtant nécessaire pour comprendre notre environnement : au sein même de notre galaxie, on pense avoir trouvé un gigantesque trou noir dont la masse est plusieurs millions de fois la masse du soleil. » Heureux qui, comme ces lycéens, ont fait ce beau voyage... au cœur des trous noirs, véritables gloutons qui se gavent de matière et de lumière. Des festins gargantuesques qui déforment et rident l'espace-temps. Prêts ?*

On sait aujourd'hui que les trous noirs existent et que l'un d'entre eux se trouve au centre de notre galaxie, la Voie Lactée. Ils ne sont donc pas si loin que ça. L'astrophysique s'intéresse depuis longtemps à ce qui se passe dans cette zone. Récemment, des astrophysiciens ont montré, en étudiant le mouvement des étoiles très proches de ce centre galactique<sup>3</sup>, qu'il s'y trouve une masse très importante et très localisée. Ils en ont déduit qu'en cet endroit, il

existe un trou noir d'une masse très élevée - 3 millions de fois celle du Soleil. Mieux, on pense qu'il existe des trous noirs au centre de presque toutes les galaxies.

<sup>3</sup> **Le centre galactique** est le centre de rotation de notre Galaxie. Il est situé à une distance d'environ 8 kiloparsecs (kpc), [un parsec valant environ 3,26 années lumière], dans la partie la plus brillante de la Voie lactée.

Le centre galactique n'est pas observable en longueur d'onde visibles, ultraviolettes et rayons X, toute l'information connue provenant des grandes ondes (infrarouge, sub-millimétrique, radio) et des ondes courtes (rayons X durs, rayons gamma). La source radio complexe Sagittarius A semble être située presque exactement au centre galactique. Elle contient une puissante source radio ponctuelle nommée Sagittarius A\* (Sgr A\*). De nombreux astronomes pensent qu'elle est associée à un trou noir supermassif, coïncidant exactement avec le centre gravitationnel de la Galaxie.



Sur ce cliché, on peut voir au centre de la galaxie une forte émission d'ondes radio, appelée Sagittarius A\*.



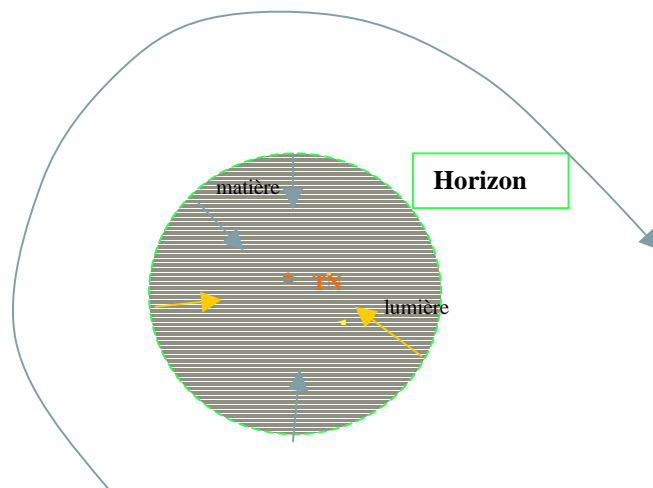
## LE TROU NOIR ? UN LIEU HORS LA LOI

Les trous noirs sont apparus dans la théorie de la relativité, bien qu'Einstein n'ait jamais cru en leur existence. Sur cette question-là, il avait tort.

Le trou noir est une singularité de l'espace-temps, c'est-à-dire un point où les équations ne fonctionnent plus, où les résultats sont toujours infinis. En ce point singulier de l'espace, la masse est tellement concentrée, que la force gravitationnelle, qui se développe autour, est très importante. A l'approche du trou noir, les corps vont donc être sensibles à cette masse, ils vont être soumis à cette force d'attraction gravitationnelle et graviter autour du trou noir. Jusqu'à un certain point, car il existe autour du trou noir, une ligne virtuelle qu'on appelle l'horizon. Tout objet, que ce soit de la matière ou de la lumière, qui franchit cette ligne va tomber de manière inexorable vers le trou noir.

Du coup, vous comprenez mieux l'appellation trou noir : rien n'est émis en ce point, même la lumière tombe dedans.

Pour mieux comprendre cette notion d'horizon, prenons la métaphore de la cascade. Imaginez que vous nagez dans une rivière, sans vous soucier de savoir s'il y a une chute d'eau plus loin. Si vous êtes à 50 km de la cascade, vous n'avez pas trop de risque d'être entraîné par le courant, que vous vous pouvez remonter sans problème. En revanche, à un certain moment- vous ne savez pas exactement quand- vous êtes trop près de la cascade, vous avez franchi une ligne virtuelle (l'horizon de la cascade), et, même si vous êtes le meilleur nageur du monde, vous ne pouvez plus faire marche arrière : vous allez tomber dans la singularité de la cascade.



*Les trous noirs (TN) sont des singularités de l'espace-temps prédites par la théorie de la relativité générale : au-delà de la ligne virtuelle nommée horizon, tout (lumière, matière...) est absorbé par le trou noir. A l'extérieur, les objets orbitent autour du trou noir.*

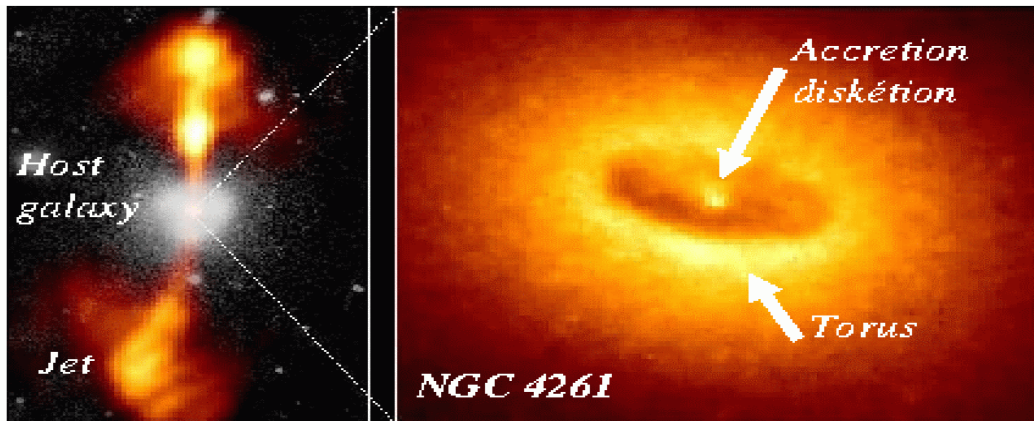
## COMMENT PEUT-ON VOIR UN TROU NOIR ?

Si les trous noirs absorbent même la lumière, comment se fait-il, alors, que les chercheurs en détectent de plus en plus ? Simplement parce qu'ils observent dans le voisinage du trou noir (à l'extérieur de l'horizon) des phénomènes très violents qui, eux, sont visibles (voir cliché ci-dessous). Car un trou noir est entouré de matière (tore de matière, disque d'accrétion) et émet des jets de particules très énergétiques qu'on peut parfois détecter sur Terre.

On rencontre ce genre de phénomènes violents un peu partout dans l'Univers. Ainsi, dans les sursauts-gamma<sup>4</sup> - des flashes de lumière très puissants-, c'est ce type de phénomène qui se produit.

<sup>4</sup> Pour en savoir plus sur les sursauts-gamma : [http://www.astronomes.com/c3\\_mort/p327\\_sursaut\\_gamma.html](http://www.astronomes.com/c3_mort/p327_sursaut_gamma.html)





Un trou noir est entouré par une région d'intense activité.

*Cliché vu par un télescope sur Terre ; le même vu par le télescope Hubble.*

*Ce trou noir est environné d'un disque de matière. De part et d'autre, on observe deux jets de particules très énergétiques, qu'on peut détecter sur Terre, si on se trouve dans la direction d'émission.*

### COMMENT SE FORMENT LES TROUS NOIRS ? PAR IMPLOSION D'ÉTOILES !

Sachez d'abord qu'une étoile est soumise à deux forces différentes. A l'intérieur du Soleil, par exemple, les réactions thermonucléaires, dégageant de l'énergie, ont tendance à augmenter le volume de l'étoile : si l'étoile n'était soumise qu'à ces réactions thermonucléaires, son volume augmenterait donc. A l'inverse, selon la loi d'attraction gravitationnelle, les masses s'attirent. En conséquence, différentes parties de l'étoile ont tendance à s'attirer, donc à provoquer un effondrement de l'étoile sur elle-même et à en diminuer le volume. Dans une étoile « en vie », ces forces - celles qui ont tendance à augmenter la taille et celles qui la diminuent - s'équilibrent. Le Soleil garde en moyenne une taille fixe.

Mais lorsque ces forces ne s'équilibrent plus, par exemple quand l'astre a consommé tout son carburant nucléaire, les réactions thermonucléaires s'arrêtent. Dès lors, seules les forces gravitationnelles agissent, provoquant un effondrement gravitationnel. Avec ce résultat : l'étoile s'effondre sur elle-même. Dans certains cas, le phénomène se stabilise au stade d'étoile à neutrons ; dans d'autres cas, il ne s'arrête jamais : toute la masse de l'étoile se concentre alors en un seul point (la singularité du trou noir), qui sera « entouré » d'un horizon. C'est ainsi, pense-t-on, que se sont formés les trous noirs que nous observons aujourd'hui.

### LES AMÉRICAINS, LES RUSSES ET LES PETITS HOMMES VERTS

Les sursauts-gamma, par exemple, sont les explosions les plus violentes que l'on observe dans l'Univers : elles ne durent que quelques secondes et fournissent une énergie phénoménale. Pendant 2 à 3 secondes, la lumière envoyée par un sursaut-gamma est aussi importante que la lumière envoyée par l'ensemble de la Voie Lactée. On pense que ces émissions sont dues principalement à l'implosion d'étoiles qui se transforment en trous noirs, par effondrement gravitationnel. Le sursaut-gamma serait donc le témoin visible de la formation des trous noirs.

Ce phénomène a été découvert, dans les années 60, par un satellite envoyé, au-dessus de l'Union soviétique par les Américains qui cherchaient à savoir si les Russes procédaient à des essais nucléaires. Les Américains ont peut-être vu des explosions nucléaires sur le sol soviétique, mais ce qu'ils ont découvert alors les a surpris plus encore : ils ont repéré des explosions nucléaires très très loin dans le ciel. Pendant dix ans, ils ont gardé l'information secrète, se demandant peut-être s'il n'existait pas, quelque part dans l'Univers, des extra-terrestres qui faisaient des essais nucléaires.

En réalité, ils avaient découvert le sursaut-gamma. Maintenant que vous comprenez mieux ce que sont les trous noirs, je peux aborder



quelques notions de relativité restreinte et de relativité générale.

### LA RELATIVITÉ RESTREINTE ?

Einstein aimait bien les comparaisons avec les trains. Suivons cet exemple pour expliquer la relativité restreinte. Imaginez que vous êtes dans un train qui roule à vitesse constante. Vous fermez tous les rideaux. Si vous laissez tomber une balle, elle va tomber à la verticale. Cette expérience ne permet pas de savoir si vous êtes en mouvement ou si le train est arrêté. Einstein généralise en disant qu'aucune expérience physique ne peut nous indiquer que nous sommes dans un train en mouvement tant que la vitesse est constante. Dans ce cas, les lois de la physique sont identiques. Mais, attention, ce n'est plus vrai si le train accélère ou décélère, bref si la vitesse n'est pas constante. Vous êtes alors projeté en avant ou en arrière, et la balle ne tombe pas suivant une ligne verticale.

Einstein va plus loin et énonce le principe de relativité suivant : toutes les lois de la physique sont identiques dans des référentiels (le train, par exemple, est un référentiel) en mouvement uniforme les uns par rapports aux autres, c'est-à-dire qui se déplacent les par rapport aux autres à vitesse constante. On appelle ces référentiels, des référentiels galiléens. Cette expérience dans le train qui roule à vitesse constante a des conséquences extrêmement importantes car je peux, de la même façon qu'avec la balle, réaliser une expérience de propagation d'ondes électromagnétiques dans ce train. Et Einstein dit que rien ne pourra me dire que je suis dans un train en mouvement quand la vitesse est constante. En conclusion, si toutes les lois de la physique sont les mêmes dans ces référentiels galiléens, alors, les ondes électromagnétiques se propageant à la vitesse de la lumière, on peut en conclure que la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels galiléens (dans le train et dans la pièce où vous vous trouvez actuellement). Les conséquences de ce simple principe sont fondamentales.

### LA VACHE, LE TRAIN ET LE TEMPS

Einstein aimait bien faire des petites expériences par la pensée. Faisons comme lui. Vous êtes toujours dans ce train qui roule à vitesse constante. Avec une lampe de poche, vous envoyez un signal lumineux vers un miroir et vous chronométrez le temps ( $t$ ) que met la

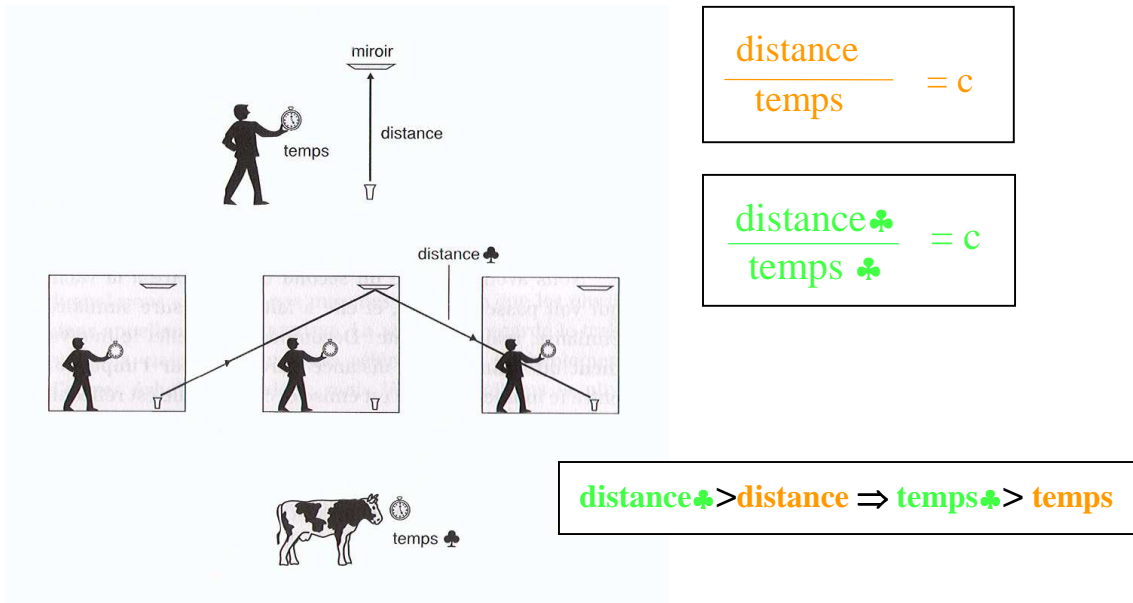
lumière pour aller au miroir (distance  $d$ ) et revenir à la lampe de poche (encore la distance  $d$ ). Il s'agit évidemment d'un temps trop court pour réaliser l'expérience, mais imaginez que vous ayez suffisamment de réflexe et un chronomètre assez performant. Vous savez que la vitesse se mesure par une distance divisée par un temps. Dans le cas présent, on obtient la vitesse de la lumière,  $c = 2d/t$ .

Reconsidérons la même expérience, mais cette fois, du point de vue d'une vache qui rumine du trèfle dans un pré (un autre référentiel), le long de la voie ferrée (voir schéma page suivante). Durant cette expérience, le train est en mouvement : pour la vache, donc, la lampe de poche a bougé et le miroir aussi. Pour notre animal, la distance ( $d_{\clubsuit}$ ) est plus grande. Pour que la vitesse de la lumière  $c$  reste égale dans les deux référentiels (le train et le pré),  $c = 2d_{\clubsuit}/t_{\clubsuit}$ . Résultat le temps  $t_{\clubsuit}$  que mesure notre vache pour que la lumière atteigne le miroir est supérieur au temps  $t$  mesuré dans le train.

C'est une conséquence très importante de la relativité : le temps physique que vous mesurez – il ne s'agit pas de temps psychologique - est différent selon le référentiel dans lequel on se situe. Celui qui mesure une succession d'événements dans le train trouve un temps différent de celui qui mesure une succession d'événements dans le pré. Donc la même succession d'événements prend moins de temps dans les référentiels en mouvement. Une autre façon de le dire : les horloges qui sont en mouvement semblent donc aller plus lentement dans les référentiels en mouvement.

Cette contraction du temps relativiste a été vérifiée. Pas dans un train, car la vitesse du train n'est pas assez grande pour que l'effet soit significatif : plus la vitesse est proche de celle de la lumière, plus l'effet est important. Pour cela, les chercheurs ont synchronisé deux horloges de façon très précise. Ils en ont laissé une au sol et en ont mis l'autre dans un avion B52, qui a volé pendant 24 h autour de la Terre. Quand le B52 s'est posé, ils ont comparé les temps mesurés par les deux horloges. Elles affichaient effectivement une petite différence qui était celle prédite par la relativité. On le voit : la notion de temps est une notion relative dépendant du référentiel dans lequel vous êtes.





*Le temps  $t \clubsuit$  que mesure notre vache pour que la lumière atteigne le miroir est supérieur au temps  $t$  mesuré dans le train.*

### LA RELATIVITE GENERALE ? LE LIEN FONDAMENTAL ENTRE ACCELERATION ET GRAVITATION

Passons maintenant à la relativité générale. Cette fois-ci, nous ne sommes plus dans un train, mais dans un ascenseur en chute libre. Que se passe-t-il ?

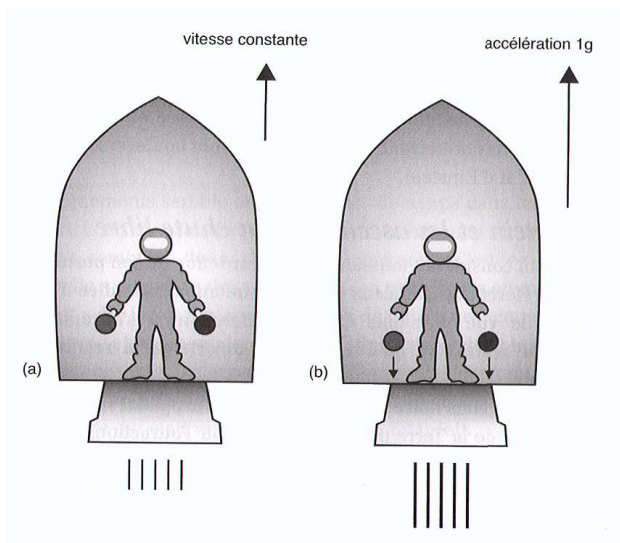
Vous ne serez pas collé au sol, ni au plafond, mais vous serez en état d'apesanteur. Bref, vous allez tomber en même temps que l'ascenseur et vous allez même y flotter. Il se passe exactement la même chose quand vous êtes dans un satellite, qui n'est rien d'autre qu'un objet en chute libre, en mouvement circulaire autour de la Terre. C'est pourquoi, les astronautes sont en état d'apesanteur dans leur vaisseau spatial. Einstein s'est demandé ce qu'il se passerait si, tout à coup, les fusées sont mises en marche : il y a une accélération. L'astronaute est alors collé au sol, comme s'il était en état de pesanteur, bref comme nous le sommes à chaque instant puisque nous sommes soumis à l'attraction gravitationnelle de la Terre. Einstein a donc établi un lien entre l'accélération et la gravitation. C'est le principe fondamental de la relativité générale.

Regardons cela en détail dans un vaisseau spatial qui tourne, d'abord, à vitesse constante en orbite autour de la Terre. Vous êtes donc en état d'apesanteur. Vous avez une balle dans chaque main. Si vous les lâchez, que se passe-t-il ?

Elles restent immobiles puisque, comme vous, elles sont en état d'apesanteur. Maintenant, on met les moteurs. Le vaisseau accélère et les balles, qui étaient immobiles relativement au vaisseau spatial, accélèrent aussi et tombent au sol.

Que dit Einstein ? S'il n'y a pas de hublot pour voir ce qui se passe à l'extérieur, vous ne pouvez pas savoir, dans cette situation-là, si vous êtes dans un vaisseau spatial qui accélère avec une accélération de  $1g$  ( $10 \text{ ms}^{-2}$ ) ou bien si vous êtes simplement sur Terre.

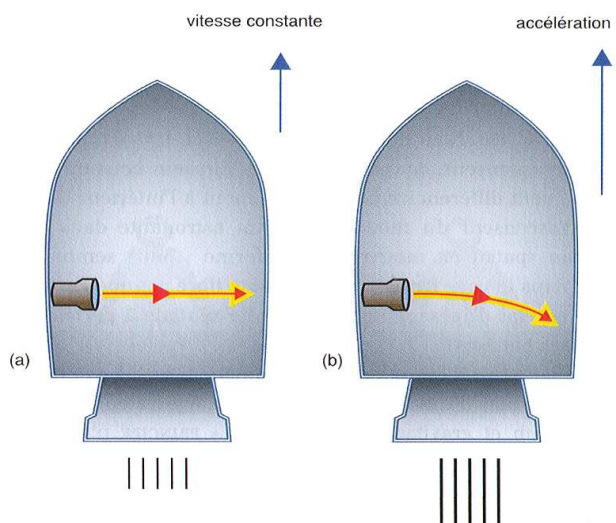
Einstein a donc postulé le principe d'équivalence selon lequel les observations réalisées dans un référentiel en accélération sont absolument identiques à celles qui sont faites dans un champ de gravitation. Il y a donc équivalence entre accélération et gravitation et cela a des conséquences extrêmement importantes.



Principe d'équivalence  
Les observations faites dans un référentiel en accélération sont indistinguables de celles faites dans un champ de gravitation

Un autre exemple pour en revenir aux trous noirs. Imaginez maintenant que vous êtes dans un vaisseau spatial à vitesse constante. Avec une lampe de poche, vous envoyez un faisceau de lumière horizontalement. Sachant que les lois de la physique sont toutes les mêmes dans les référentiels galiléens, la lumière se propage en ligne droite. Si on soumet maintenant l'engin à une accélération, la trajectoire de la lumière semble courbée relativement au vaisseau spatial. Vous pouvez me rétorquer que tout cela est relatif au mouvement du vaisseau.

C'est vrai, mais n'oublions qu'Einstein dit qu'il y a équivalence entre accélération et gravitation. Donc, si le faisceau de lumière a l'air relativement courbé par rapport au vaisseau spatial, cela veut dire que dans un champ de gravitation, le faisceau de lumière sera aussi courbé. Ainsi, si la lumière passe suffisamment près du soleil, elle ne va plus se propager en ligne droite mais de façon courbée. On a effectivement observé une déviation des faisceaux lumineux dans le champ de gravitation du Soleil, qui courbe les rayons lumineux.

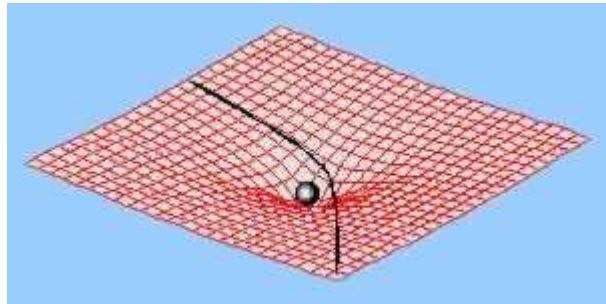


Sachant qu'il y a équivalence entre accélération et gravitation, si le faisceau de lumière a l'air relativement courbé par rapport au vaisseau spatial, cela veut dire que dans un champ de gravitation, le faisceau de lumière sera aussi courbé.



Un exemple pour mieux comprendre. Si vous envoyez une petite balle le long d'un matelas bien lissé, elle se propage en ligne droite avec un mouvement uniforme. Maintenant, vous posez une grosse pierre au milieu du matelas et vous lancez la balle : sa trajectoire va être courbée.

Que s'est-il passé ? La grosse pierre a déformé le matelas. L'interprétation en relativité générale, c'est qu'une masse comme le Soleil déforme l'espace-temps. C'est ce qui est responsable de la trajectoire courbe des rayons lumineux.



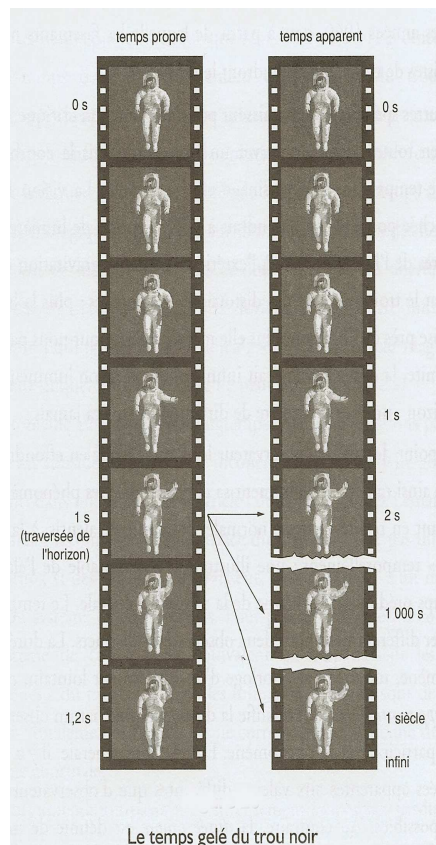
*La pierre a déformé le matelas comme le Soleil déforme l'espace-temps*

*Modélisation d'un espace-temps courbé*

Ainsi, lorsqu'on dit que la lumière tombe dans un trou noir, c'est cet effet de la relativité générale qui est en cause. La lumière qui passe à proximité d'un trou, dont la masse

importante est très localisée, est soumise à son champ gravitationnel. Si elle passe très près (et franchit l'horizon), sa trajectoire se courbe tellement qu'elle ne peut en réchapper.

### EN MISSION VERS UN TROU NOIR...



Imaginez encore un vaisseau spatial qui se dirige vers un trou noir. Que se passe-t-il quand il arrive au bord de l'horizon ? Vous le savez maintenant, les effets gravitationnels deviennent très intenses et le temps devient une notion extrêmement surprenante. Rappelez-vous l'expérience de la vache et du train : le temps dépend de l'endroit où vous êtes, en particulier quand les objets sont en mouvement les uns par rapport aux autres. Dans le cas de notre vaisseau spatial en accélération vers le trou noir, le temps mesuré dans le vaisseau et celui mesuré sur Terre peuvent être complètement différents. Et les effets très importants.

Pour l'astronaute dans le vaisseau, il ne se passe rien de spécial. Au bout de, disons, une seconde, sa montre lui indique qu'il a passé l'horizon. Mais le film tel qu'il nous parvient sur Terre est bien différent. Au début, il n'y a pas d'énormes différences de temps, puis, au fur et à mesure que le temps passe, sur les images qui nous parviennent du vaisseau, les gestes de l'astronaute se ralentissent et les images sont de plus en plus floues, car les photons du signal électromagnétique envoyé sur Terre tombent dans le trou noir alors que le vaisseau franchit l'horizon. On ne verra jamais l'astronaute traverser réellement l'horizon, puisqu'une fois qu'il l'aura traversé, on ne recevra plus de signal.

**LISA, POUR VOIR LES TROUS NOIRS**



Pour conclure, j'aimerais vous parler de l'expérience LISA<sup>5</sup> dans laquelle je suis impliqué. Le but : voir les trous noirs ! Je vous ai montré des clichés de trous noirs, mais en réalité ce ne sont pas eux que l'on voit, mais les phénomènes très violents qui ont lieu autour, et que nous tentons d'étudier par des moyens divers dans mon Laboratoire. Comment peut-on voir un trou noir ?

Vous connaissez les ondes électromagnétiques, les ondes acoustiques, mais il existe aussi des ondes gravitationnelles, ces dernières étant une des prédictions de la relativité d'Einstein.

L'idée, c'est que l'espace-temps<sup>6</sup> qui est formé de l'espace que nous connaissons tous et du

---

<sup>5</sup> Lire la description du projet LISA sur le site du laboratoire de Pierre Binétruy joliment illustré : [http://www.apc.univ-paris7.fr/SPIP/article.php3?id\\_article=73](http://www.apc.univ-paris7.fr/SPIP/article.php3?id_article=73)

<sup>6</sup> La notion d'espace-temps a été introduite par Minkowski en 1908 dans un exposé mathématique sur la géométrie de l'espace et du temps telle qu'elle avait été définie par la théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein. Selon cette théorie, un événement se positionne dans le temps et dans l'espace par ses coordonnées  $ct$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  qui dépendent toutes du référentiel. Il est très difficile de s'imaginer que le temps ne soit pas le même suivant le référentiel dans lequel on le mesure et ceci est pourtant bien confirmé expérimentalement en particulier dans les accélérateurs de particules du CERN (où a travaillé Pierre Binétruy). En effet, le temps dépend du référentiel dans lequel il est mesuré et n'est donc pas absolu. Il en va de même pour l'espace. La longueur d'un objet peut être différente selon le référentiel de mesure.

Le rapport entre les mesures d'espace et temps donné par la constante universelle  $c$  (vitesse de la lumière dans le vide) permet de décrire une distance  $d$  en terme de temps :  $d = ct$  avec  $t$  le temps nécessaire à la lumière pour parcourir  $d$ . Le Soleil est à 150 millions de kilomètres c'est-à-dire à 8 minutes-lumière de la Terre. En disant "minutes-lumière", on parle d'une mesure de temps multiplié par  $c$ , et on obtient une mesure de distance, dans ce cas-ci, des kilomètres. Autrement dit  $c$  sert à convertir des unités de temps en unités de distance. Kilomètres et minutes-lumière sont donc deux unités de mesure de distance.

Ce qui unifie espace et temps dans une même équation, c'est que la mesure du temps peut être transformée en mesure de distance (en multipliant  $t$ , exprimé en unités de temps, par  $c$ ), et  $t$  peut donc de ce fait, être associé aux trois autres coordonnées de distance dans une équation où toutes les mesures

temps, est déformable, élastique et que cette déformation peut se propager.

### QUAND L'ESPACE-TEMPS SE RIDE...

Comme à la surface de l'eau, caressée par le vent, ces ondes, généralement provoquées par des explosions importantes, se propagent dans l'Univers. Ces déformations sont des rides de l'espace-temps.

Un exemple de source gravitationnelle : imaginez un système binaire, composé d'un trou noir à côté duquel se trouve une grosse étoile. Du fait de l'attraction exercée par le trou noir, la masse de l'étoile va être attirée vers ce trou noir, de plus en plus fortement au fil du temps. Cela va provoquer des phénomènes violents qui vont produire des déformations de l'espace temps qui vont se propager. C'est que nous essayons d'observer dans mon Laboratoire essaie d'observer.

Il est relativement facile de détecter des trous noirs dans des systèmes binaires. En effet, lorsqu'une étoile est proche d'un compagnon invisible (trou noir ou étoile à neutron), elle lui cède de sa matière, qui est inexorablement attirée par ce compagnon parasite. Bref, elle lui tourne autour, avant de disparaître. L'amas de matière qui s'accumule autour du compagnon obscur est appelé disque d'accrétion. Plus la matière s'approche du centre, plus elle s'échauffe et émet des rayons X. C'est eux que l'on sait détecter.

Autre exemple : deux trous noirs, qui tournent l'un autour de l'autre, deviennent à un certain moment tellement proches, qu'ils finissent par tomber l'un sur l'autre. C'est le phénomène dit de coalescence<sup>7</sup>. Ils vont se coller l'un à l'autre et ne plus former qu'un seul trou noir. Ce phénomène extrêmement violent va provoquer,

lui aussi, une déformation de l'espace-temps autour de lui, qui va se propager jusqu'à nous.

L'un des buts de l'expérience LISA est d'étudier ces déformations de l'espace temps.

---

sont en unités de distance. En ce sens on pourrait dire que le temps, c'est de l'espace ! (source wikipédia)

<sup>7</sup> - **Coalescence** : phénomène par lequel deux substances identiques, mais dispersées, ont tendance à se réunir. On peut citer à titre d'exemple les gouttes de mercure qui lorsqu'elles viennent à se toucher se rassemblent subitement pour n'en faire qu'une seule.





Cette mission spatiale, assez ambitieuse, qui est en cours de réalisation sera lancée, nous l'espérons, en 2018. Il s'agit de trois vaisseaux spatiaux, orbitant autour du Soleil, dans le sillage de la Terre, en formant entre eux un immense triangle de 5 millions de km de côté. Imaginez dans l'espace, ces trois satellites qui règlent leur distance très précisément à quelques dizaines de picomètres<sup>8</sup>, grâce à des interférences entre des faisceaux lasers qu'ils échangent. Cela permet de mesurer les déformations de l'espace temps qui est circonscrit par le triangle. Notre idée est, en observant ces déformations, de trouver ces fameuses ondes gravitationnelles et leurs sources.

### TELESCOPAGE DE GALAXIES

LISA devrait fonctionner environ 5 à 10 ans. On s'attend, dans cette période, à ce que quelque part dans l'Univers deux galaxies, au centre desquelles je vous rappelle que l'on trouve ces fameux trous noirs entourés de disques de matière, entrent en collision. Ce serait alors des milliards d'étoiles qui rentreraient en collision<sup>9</sup>. Les trous noirs centraux vont alors se mettre à orbiter l'un autour de l'autre, comme s'ils dansaient. Au fil du temps, leur distance va diminuer, de l'énergie va être perdue et être envoyée sous forme d'ondes gravitationnelles. Enfin, le mouvement va s'accélérer et, dans une phase finale qui dure quelques heures, ils vont rentrer l'un dans l'autre, pour ne former plus qu'un seul trou noir, qui continue à envoyer des ondes durant quelque temps.

Cet événement exceptionnel nous apprendra beaucoup sur la structure des trous noirs. LISA sera capable de mesurer les ondes gravitationnelles engendrées par un tel phénomène. Quelques mois ou quelques années avant l'événement, nous serons capables de dire qu'il va y avoir coalescence de deux trous noirs. On peut imaginer que les télescopes les plus puissants du monde seront alors fixés dans la région qui aura été identifiée pour observer exactement quels phénomènes y sont associés.

<sup>8</sup> - 1 picomètre =  $10^{-12}$  m

<sup>9</sup> - Une galaxie compte plusieurs centaines de milliards d'étoiles !

### GORKA ALDA LE REGARD DU MUSICIEN

Non, gamin, Gorka Alda n'était pas un fou de physique. Plutôt artiste dans l'âme, il se destine à des études d'écriture musicale en Espagne puis, ayant décroché une bourse du Ministère de la Culture et de la Francophonie et du Ministère d'éducation espagnol, et continue sa formation à Paris. Premier succès, premier prix de composition dans la classe du compositeur Alain Roizenblat... Le jeune Gorka écrit principalement ses premières œuvres, plutôt classiques, pour voix et piano, mais son passage éclair au célèbre GRM, Groupe de Recherches Musicales, ce centre pionnier de la recherche musicale, agit sur lui comme une onde de choc, un coup de foudre, pour la musique électroacoustique.

Aujourd'hui, Gorka Alda écrit des pièces électroacoustiques seules ou mixées, avec des instruments plus classiques, et collabore, à la hauteur de son talent et de sa générosité, avec des artistes d'autres disciplines, des poètes, des peintres, des sculpteurs, des vidéastes et des danseurs. Mariant les arts et les lieux, le musicien emplit les espaces qui le séduisent par leur musicalité, faisant dialoguer les corps, les images et les sons, jouant sur la dualité du vide et du plein. Car aujourd'hui, c'est dans la physique qu'il puise son inspiration. Et son talent ne cesse d'être confirmé par les prix qu'il reçoit et les espaces qu'il occupe.

En 2002, la Fondation Eduardo Chillida lui décerne le Prix « Rencontre entre les Arts » pour son installation sonore « Con el aire cortado el hierro », une pièce de musique électroacoustique et instrumentale en dialogue et en plein air avec les sculptures du Musée se propagent dans l'Univers il lui revient de clôturer le Festival International de Musique espagnole de Cadix, en Andalousie, avec sa pièce « Aura » pour violoncelle, électroacoustique et danse. Avec Gorka, l'esprit de la physique s'offre un nouveau souffle.





## QUAND LA PHYSIQUE OUVRE DE NOUVEAUX HORIZONS

Prenez un amphî bondé de lycéens. Eteignez les lumières. Branchez le vidéo projecteur et projetez sur l'écran géant des images du spectacle « La structure du vide » que Gorka Alda a réalisé dans la carrière espagnole de Buruntza et qu'il a mis en scène de concert avec Santiago Ydáñez : pour l'occasion, le plasticien avait créé des tableaux géants, inquiétants visages en noir et blanc de 8 mètres par 15, projetés sur la roche ocre de la carrière. « Ces visages représentaient pour moi des hauts-parleurs virtuels d'où sortirait un chant cosmique. Dans cette musique, vous entendrez des fluctuations, des sons qui peuvent vous faire penser au vide, au blanc, à l'énergie du vide » explique Gorka. « Les figures figées sous l'assaut des particules symbolisent l'homme face à l'immensité de l'univers. »  
Musique !

**Aux hurlements de sirènes** succèdent un crépitement, un grésillement. Crépitation de particules, sensation d'être lancé à vitesse astronomique à travers le cosmos...

Bruissement dans l'amphî... Commentaire de l'artiste : « Vous entendez les fluctuations des particules. Je ne sais pas si vous savez que les particules et les antiparticules<sup>10</sup> vont très très vite et remplissent le vide. Le ton monte, orgues rugissantes d'une cathédrale cosmique, bombardement sidéral... Sidérés, les lycéens ! Fin, sous un tonnerre d'applaudissement... Remerciements et commentaires de l'artiste. « Quand je découvre un lieu qui m'inspire musicalement, j'essaie de trouver une analogie avec une notion de physique. Par exemple, j'avais trouver, en Espagne, une carrière physiquement vide, et je voulais montrer que virtuellement elle était pleine. C'est pourquoi j'ai travaillé à partir de la pierre. J'ai créé une interprétation musicale de ce que peut être les fluctuations des particules et l'énergie du vide, pour que le public installé dans cet espace à ciel ouvert sente vibrer ces notions. Pour cela, j'essaie de comprendre les théories de la physique, de les interpréter de manière très

subjective. Une conférence comme celle que vient de tenir Pierre Binétry est une source d'inspiration immense, sans fin d'éléments à explorer : les trous noirs, la dilatation du temps, l'horizon du trou qui est sa fragilité, la chute des corps, les contrastes de lumière noire et blanche, c'est très enrichissant musicalement. Je prends ces éléments pour en faire un projet. De manière subjective. »

Mais n'est-ce pas paradoxal de s'adresser de la sorte à des lycéens à qui l'on demande tant de rigueur en physique ? « Pas tant que ça », répond Pierre Binétry. « Déjà, il y a pour moi, en tant que physicien, une résonance dans cet échange et de ce regard d'un artiste. On a souvent l'impression au lycée que la physique, c'est rébarbatif. Je crois qu'il faut être conscient que cette discipline ouvre des horizons. La physique du 20<sup>ème</sup> siècle nous a montré aussi bien l'infiniment petit que l'infiniment grand, que l'Univers n'est pas du tout tel que nos sens nous le représentent. La physique quantique est complètement contradictoire avec notre expérience de tous les jours. Je suis sûr que la physique des trous noirs vous a un peu fait pensé à de la science fiction.

Je voulais insister sur le fait que la physique nous ouvre des horizons et qu'il faut en tenir compte dans notre relation au monde. Cela inspire aussi les artistes, qui ont une façon d'appréhender le monde différente de celle des physiciens. Mais cela a un intérêt. Un exemple. Vous connaissez peut être les montres molles de Dali. Le peintre était au courant des théories d'Einstein et c'est justement cet aspect relatif du temps qui l'a inspiré pour peindre son tableau. La physique n'est pas qu'un « truc » où il faut se casser la tête avec des formules – bien que les formes sont importantes-, elle nous ouvre aussi d'autres horizons. Et, typiquement, les trous noirs sont un exemple d'un autre horizon qui se dessine.

<sup>10</sup> Pour en savoir davantage sur les antiparticules : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Antiparticule>



QUESTIONS ET REPONSES

**PAS DE TROUS DE MEMOIRE POUR NOS LYCEENS !**

*Vigilants, pointus, certains diraient pointilleux, pertinents, les cent cinquante lycéens présents dans l'amphi n'ont rien laissé passer. Insatiables, ils ont cuisiné Pierre Binétruy durant une heure, cherchant à mettre à mal les théories développées par le physicien... Tout, ils voulaient tout savoir sur les trous noirs. Mais le temps nous étant compté, le débat dut cesser. Nous les renvoyons ci-après sur un guide ressources documentaires pour aller plus loin dans ce magnifique voyage interstellaire.*

**Quand des trous noirs rentrent en collision pour en former un nouveau, est-ce que le nouveau trou noir est différent des précédents ou bien est-il comme les autres ?**

Un trou noir est un objet très simple. Les physiciens traduisent cela en disant : « Un trou noir n'a pas de cheveux ». Le trou noir est caractérisé par sa masse, sa charge – certains trous noirs sont chargés électriquement- et son moment cinétique, qu'on appelle parfois spin. Voici les trois seuls éléments qui caractérisent les trous noirs, rien de plus, au point qu'on les a parfois comparés à des particules. Alors que si vous voulez donner toutes les caractéristiques du Soleil, par exemple, vous devez décrire aussi ce qui se passe à sa surface, à l'intérieur, sa composition, etc.

Quand deux trous noirs se rapprochent l'un de l'autre, ils sont donc caractérisés chacun par ces trois caractéristiques. Quand ils vont se rapprocher, le nouveau trou noir qu'ils vont former sera lui aussi sera caractérisé par ces trois éléments : la masse du nouveau trou noir sera à peu près égale à la somme des anciens, la charge et le moment cinétique également.

On dit que le trou noir perd ses cheveux, car un trou noir est aussi simple qu'un crane chauve. Quand vous avez deux trous noirs, cela fait deux cranes chauves, c'est déjà plus compliqué. Et quand ils en forment un seul, ce dernier perd toutes ces complications. Comprenez : à partir d'un objet complexe -deux trous noirs -, il n'en reste qu'un seul qui perd un certain nombre de propriétés, sous forme d'ondes gravitationnelles. Le trou noir final est donc aussi simple que les trous noirs initiaux. C'est pourquoi il est si intéressant d'observer ce phénomène.

**Vous avez parlé de l'expérience LISA faite, entre autre, pour observer la collision de deux galaxies. Est-on sûr d'observer une collision de galaxies durant cette période relativement courte de 5 à 10 ans ?**

Des galaxies rentrent en collision en permanence dans l'Univers. On pense que dans une période de 5 ans, 5 à 10 galaxies seront en collision dans leur phase finale. Certes, la collision de galaxies dure longtemps, mais la phase finale, quand les deux trous noirs centraux sont suffisamment proches pour tomber rapidement l'un vers l'autre, s'opèrent en quelques mois. Ce qui est remarquable, c'est qu'en phase finale des processus phénoménaux se passent en quelques heures. Alors pour revenir à votre question, j'étais justement aux Etats-Unis au California Institute of Technology, la Caltech, le week-end dernier, et on a beaucoup discuté pour savoir si ce nombre de galaxies en collision serait de 5 à 10, de 20 à 25 ou de 2 ou 3 ? Pour l'instant, on pense que c'est entre 5 et 10, en phase finale.



### **En quoi consiste votre métier et quelles études avez-vous fait pour en arriver là ?**

J'ai fait des études scientifiques, une classe « prépa », l'École Normale Supérieure, mais tout le monde ne fait pas ça pour devenir physicien. Certains passent par l'Université, d'autres vont à l'étranger. J'ai commencé à faire de la physique des particules au Centre européen pour la recherche nucléaire (CERN), à Genève, qui est le laboratoire européen pour la physique des particules. Ensuite, je suis parti un an à Berkeley, aux Etats-Unis, puis j'ai fait une thèse en physique théorique. C'est là où j'ai fait la connexion avec l'astrophysique.

De plus en plus, un certain nombre d'observations très intéressantes ont lieu justement sur cette connexion entre la physique des particules (celle de l'infiniment petit) et l'astrophysique (celle de l'infiniment grand).

Je vous donne un exemple de connexion, en lien avec la présentation de Gorke, sur le vide quantique. Comme il vous l'a fait sentir, le vide quantique est une notion extrêmement complexe, des particules et des antiparticules apparaissent et s'annihilent en permanence. Le vide est donc rempli de ces fluctuations de la matière qui apparaît et disparaît très rapidement. C'est ce que la physique quantique nous a appris. Et cela a une certaine énergie. Or, dans la théorie de la gravitation, l'énergie provoque l'expansion de l'Univers. On pense donc que cette énergie du vide provoque une expansion de l'Univers. On pense même l'avoir mesurée récemment. C'est ce qu'on appelle parfois l'énergie noire qui serait donc responsable d'une expansion de l'Univers plus rapide que prévue. Vous voyez le lien entre quelque chose de macroscopique, même cosmologique - l'évolution de l'Univers dans son ensemble- et les notions qui en

sont responsables et qui sont issues de la physique de l'infiniment petit.

De nombreux chercheurs se retrouvent donc à cette interface entre l'infiniment grand et l'infiniment petit. Ce domaine est celui des astroparticules, celui de l'astrophysique et de la physique des particules.

Pour en revenir à mes recherches, le laboratoire de l'Université Paris 7, où je travaille, a été créé pour réunir astrophysiciens, physiciens théoriciens et physiciens des particules et leur permettre de mieux comprendre ensemble l'interface entre l'infiniment grand et l'infiniment petit.



---

## QUELQUES RESSOURCES DOCUMENTAIRES

### DANS LES LIVRES

---

#### **Graines de sciences 4**

Sept thèmes sont traités dans le quatrième volume de *Graines de science- La main à la pâte*, dont celui de **la gravitation**.

De Galilée à Einstein, de la cage d'ascenseur au trou noir du centre de notre galaxie, P Binétruy nous invite à un voyage dans le temps et dans l'espace pour comprendre la gravitation.

[http://serieslitteraires.org/publication/article.php3?id\\_article=395](http://serieslitteraires.org/publication/article.php3?id_article=395)

#### ***Qu'est-ce que la relativité ?***

François Vanucci, chercheur et professeur de physique à l'Université Paris VII-Denis Diderot. Ed. Le Pommier, coll. Les Petites Pommes du Savoir n°63 (2005)

#### ***La théorie de la relativité restreinte et générale***

Dunod (2004)

Paru pour la première fois en 1905, ce texte fondamental est aussi un texte exemplaire de la littérature scientifique, et s'adresse à toute personne intéressée, même si elle ne possède pas l'appareil mathématique de la physique théorique.

#### ***Il était sept fois la révolution : Albert Einstein et les autres***

Etienne Klein, Flammarion (mars 2005)

Présente la vie et l'œuvre de sept physiciens qui par leurs

travaux pendant la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle ont contribué à la découverte de l'antimatière, à la mise au point des théories de la relativité, du big-bang, de la physique des particules, etc.

#### ***Le temps existe-t-il ?***

Etienne Klein, physicien au CEA et docteur en philosophie.

Les Petites Pommes du Savoir n°1 (2002)

#### ***Si Einstein m'était conté***

Thibault Damour. Ed : Le Cherche Midi (2005)

Présentation de l'intérêt philosophique ou conceptuel des idées d'Einstein pour les sciences et les technologies actuelles. En 7 chapitres, l'ouvrage propose des scènes illustrant différents moments de la recherche menée par le scientifique.

#### ***Einstein aujourd'hui***

A. Aspect, F. Bouchet, E. Brunet... Ed. EDP Sciences (2005)

Les travaux les plus importants d'Einstein et de leur impact sur la physique d'aujourd'hui : intrication de systèmes quantiques, condensation de Bose-Einstein, émission stimulée et laser, fluctuations et mouvement brownien, relativité générale, cosmologie.

#### ***Le mythe Einstein***

Gero von Boehm. Ed. Assouline (2005)

L'auteur analyse la personnalité d'Einstein, en retraçant sa vie à partir de

documents et de photographies inédits.

#### ***Einstein : le père du temps moderne***

Silvio Bergia, Ed. Belin-Pour la science. (2004)

Présentation détaillée des travaux d'Einstein, replacés dans le contexte de l'époque et confrontés aux idées de ses contemporains et à l'évolution actuelle de la science. La naissance de sa théorie unifiée de la gravitation et de l'électromagnétisme et ses idées sur la mécanique quantique sont notamment abordées à l'aide de schémas retraçant ses expériences.

#### ***L'Univers élégant,***

Par le physicien Brian Greene, éd. Gallimard, 2005.

Le 20<sup>ème</sup> s. a vu naître les deux plus belles théories physiques jamais inventées. La première, la relativité générale, est l'œuvre du seul Einstein. Son domaine d'application est l'infiniment grand. La seconde, la mécanique quantique, est l'œuvre collective de certains des plus grands esprits du 20<sup>ème</sup> s. Son domaine d'application est l'infiniment petit. Mais ces deux théories sont incompatibles entre elles. Cherche-t-on à les réunir dans ce qu'on appelle « la théorie du tout », on se heurte à d'insurmontables difficultés. Aujourd'hui, la « théorie des cordes » semble en passe de réussir là où toutes les précédentes théories ont échoué.



DANS LES REVUES

---

**La Recherche**

Hors série n°18 –  
L'héritage Einstein  
1905 - 2005 Un siècle de  
physique.

**Pour la Science**

- N° décembre 2004

Numéro spécial : "L'Ere  
Einstein".

Dossier : Einstein au  
quotidien ; la relativité à  
l'épreuve ; le défi quantique;  
Einstein et la théorie  
unitaire...

- N° octobre 2008

Dossier astrophysique, trous  
noirs et autres singularités  
de l'Univers extrême  
<http://www.pourlascience.com/index.php?ids=axUiTJlhMhsExdHucgDm&Menu=Pls&Action=I&idn1=151>

**Ciel et espace**

*Einstein, l'homme qui a  
inventé l'Univers*

Hors série - 2004

[http://www.la-boutique-astro.com/boutique/fiche\\_produit.cfm?type=26&ref=88&code\\_lg=lg\\_fr&pag=1&num=1](http://www.la-boutique-astro.com/boutique/fiche_produit.cfm?type=26&ref=88&code_lg=lg_fr&pag=1&num=1)

**Science et Vie junior**

N° 59 - Hors série

Einstein - 100 ans de  
révolution.

SUR LA TOILE

---

***Une énergie dont on ne connaît pas la nature,***

une interview de Pierre  
Binétruy dans TDC (Textes  
et documents pour la classe,  
revue éditée par le Sceren  
<http://www.cndp.fr/RevueTDC/886-68547.htm>

***Pour les acharnés : voyage vers la 5<sup>ème</sup> dimension***

Science et Avenir,  
<http://sites.estvideo.net/kakik/5emesuite.htm>

***28 septembre 1905, Albert Einstein découvre la relativité***

Sur le site Herodote.net

L'histoire d'Einstein jalonnée de ses découvertes scientifiques, de ses doutes et de ses engagements politiques.

<http://www.herodote.net/19050928.htm>

***Un cours sur les trous noirs***

Et des réponses claires, qui viennent enrichir la conférence de Pierre Binétruy.

[http://cours.cstj.net/203-gjl-j.1/%C3%89volution%20stellaire/les\\_trous\\_noirs.htm#Commentien%20ytienne\\_Klein](http://cours.cstj.net/203-gjl-j.1/%C3%89volution%20stellaire/les_trous_noirs.htm#Commentien%20ytienne_Klein)

**Le site Web cieletespace.fr**

Edité par l'Association française d'astronomie, dispose d'une recherche par mots-clés : une mine.

<http://www.cieletespace.fr/>

MULTIMEDIA

---

**Einstein**

Françoise Balibar et  
Thibault Damour.

Ed : De vive voix (2004). 2  
CD audio.

Dans ce récit à deux voix, les physiciens Françoise Balibar et Thibault Damour nous racontent comment un homme, Albert Einstein, a élaboré la physique du XX<sup>ème</sup> siècle et comment ses découvertes ont profondément modifié notre conception du monde et permis l'avènement de notre univers technologique (électronique, énergie nucléaire etc.).

Egalement savant engagé, Einstein a choisi d'agir en citoyen : paix en Europe, lutte contre le développement des armes nucléaires... Ses préoccupations restent d'actualité, ses théories n'ont pas, pour l'essentiel, été démenties. Il y a un avant et un après Einstein... qui retrace la vie et l'œuvre scientifique révolutionnaire d'Einstein, père fondateur à 26 ans de la théorie quantique et inventeur de la théorie de la relativité. Téléchargeable au prix de 9,90 euros au format WMA ou MP3 à l'adresse : [http://www.numilog.com/fiche\\_livre.asp?PID=37565](http://www.numilog.com/fiche_livre.asp?PID=37565)