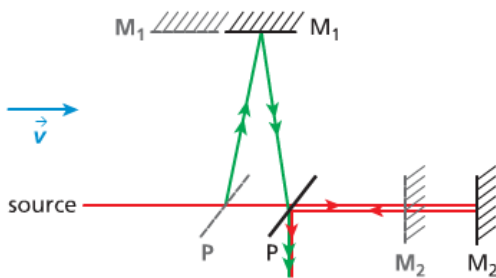
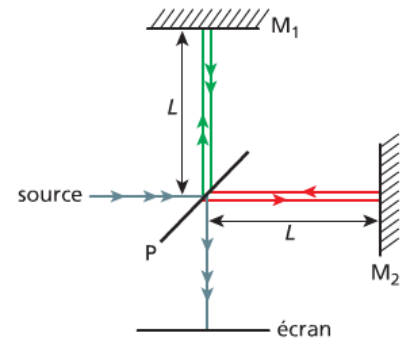


## L'expérience de Michelson et Morley

Jusqu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, la lumière était supposée se propager dans un milieu appelé éther, par analogie avec les ondes mécaniques qui font vibrer un milieu matériel à leur passage. La célérité de la lumière dans le référentiel terrestre devait donc être différente de sa célérité dans le référentiel de l'éther.

Pour vérifier cela, les physiciens américains Albert Michelson (1852-1931) et Edward Morley (1838-1923) étudièrent les variations de la vitesse de la lumière à l'aide d'un appareil utilisant les interférences lumineuses.

L'interféromètre de Michelson est constitué d'une lame semi-réfléchissante séparant un faisceau lumineux en deux, et de deux miroirs  $M_1$  et  $M_2$  placés à égale distance  $L$  de la lame. Les deux faisceaux réfléchis sont recombinaés par la lame semi-réfléchissante et leur figure d'interférence est observée sur un écran.



En supposant l'interféromètre en mouvement à la vitesse  $v$  constante dans le référentiel de l'éther, la lumière parcourt, sur un trajet (en vert), la distance  $L_1$  et sur l'autre (en rouge) la distance  $L_2$ .

Pour le trajet en vert, perpendiculaire au déplacement, le théorème de Pythagore donne

$$L_1 = \frac{2L}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Le trajet rouge est couvert sur la durée

$$\Delta t_2 = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v}$$

$$\Delta t_2 = \frac{L(c-v) + L(c+v)}{(c+v)(c-v)} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2} = \frac{2L}{c \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right)}$$

La distance  $L_2$  correspond alors à

$$L_2 = \frac{2L}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

Questions

1. Sachant que la distance moyenne Terre-Soleil est de 150 millions de kilomètres, estimer la vitesse  $v$  de la Terre par rapport à l'éther.
2. Quelle serait la différence de marche au centre de l'écran (correspondant aux rayons en incidence normale sur les miroirs) si l'interféromètre était immobile dans le référentiel de l'éther ? Le centre de l'écran serait-il sombre ou lumineux ?
3. Répondre aux mêmes questions en considérant cette fois la différence de marche  $\delta = L_2 - L_1$ . L'intensité lumineuse au centre de l'écran est-elle maximale ?

L'expérience de Michelson et Morley, réalisée en 1881 et 1887, reproduite de nombreuses fois depuis, n'a jamais montré de différence dans la figure d'interférences entre les deux situations. Ceci permet d'émettre plusieurs hypothèses,

- La mesure n'est pas assez précise
  - Le référentiel terrestre est immobile par rapport à l'éther
  - La célérité de la lumière est  $c$  dans l'éther et dans le référentiel terrestre
4. Sachant que les physiciens sont capables de mesurer des distances très inférieures à la longueur d'onde, quelle hypothèse semble vraisemblable ?
  5. Montrer alors, à l'aide de la figure 1, que la différence de marche est bien nulle si la vitesse de la lumière est égale à  $c$  dans tous les référentiels.

## Vers une révolution physique ?

Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, la physique est ébranlée par deux révolutions,

- L'une, dite relativiste sous sa forme restreinte en 1905 puis généralisée en 1915, qui a bouleversé les concepts d'espace et de temps ;
- L'autre, dite quantique, qui, dans les années 1920, a dynamité la vision traditionnelle de la matière

Au sein de la communauté scientifique, un étrange parallèle se dessine avec la situation de la physique aujourd'hui. Dressons-le en trois points.

### Des résultats déconcertants

Le statut de l'erreur est souvent peu enviable, dans l'enseignement comme dans la recherche. Pourtant, la science doit faire aujourd'hui en se confrontant au silence de machines.

Dans les années 1880, les physiciens s'étaient convaincus de l'existence des ondes électromagnétiques, mais ne parvenaient pas à comprendre comment elles pouvaient se propager : c'est la raison d'être de l'éther comme milieu hypothétique et de nature inconnue supposé porter la lumière de la même manière que l'eau ou l'air supportent les ondes mécaniques (sonores, etc.). L'expérience de Michelson et Morley a été mise au point pour mettre en évidence l'existence de cet éther mais, à la stupéfaction générale, le détecteur resta muet. Si le résultat fut vécu comme un drame à l'époque, nous sommes aujourd'hui conscients que l'expérience constitue le résultat négatif le plus important de l'histoire de la physique : il portait en lui les germes de la Relativité restreinte qui, introduite par Einstein en 1905, dynamitait l'éther en même temps qu'elle révolutionnait les notions d'espace et de temps.

Les résultats obtenus au LHC sont peut-être du même ordre.

Si l'idéal porté par le grand collisionneur de hadrons était la découverte du boson de Higgs, il s'agissait également d'ouvrir les portes d'un continent jusque-là inexploré du monde décrit par le modèle standard et dont les théoriciens théorisaient la richesse depuis plus de quarante ans. On pensait même initialement que l'accélérateur dessinerait les contours d'une nouvelle physique avant de donner des informations sur l'hypothétique Higgs. Comme dans le cas de l'expérience de Michelson et Morley, le silence est inattendu.

De la même façon, les premiers résultats issus de l'analyse des clichés du satellite Planck : en captant les toutes premières particules de lumière, le satellite a divulgué des informations inédites sur l'inflation, cette phase d'expansion vertigineuse au cours de laquelle les dimensions de l'Univers auraient été multipliées par dix millions de milliards de milliards, entre  $10^{-38}$  et  $10^{-30}$  seconde après la supposée étincelle initiale. Les caractéristiques révélées de cette étape primordiale se sont avérées incompatibles avec les plus simples des modèles d'inflation, alors que de nombreuses théories plus exotiques attendaient LE signe en leur faveur.

Silence radio, également, dans les expériences de détection directe de la matière noire.

Faut-il voir dans ce mutisme celui qui précède les grandes révolutions ? Derrière l'échec de Michelson et Morley, il y a eu Einstein... Ce dernier n'a pas fait de révolution à partir de la découverte expérimentale d'un nouvel ingrédient de la nature permettant l'extension des théories en place, mais après une profonde réorganisation des concepts et équations existants : en ce sens, le silence des machines peut se révéler stimulant pour l'imagination des théoriciens.

### Euphorie et désillusion

A la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, le grand Lord Kelvin lançait : « *La science physique forme actuellement, pour l'essentiel, un ensemble harmonieux, un ensemble pratiquement achevé !* » A l'époque, pour lui comme pour la plupart de ses pairs, les grands principes et les lois gouvernant l'Univers ont été décryptés.

- James Clerk Maxwell a montré que les phénomènes électriques et magnétiques sont en réalité les manifestations différentes d'un ensemble de lois pouvant être décrites conjointement dans une unique théorie : l'électromagnétisme.
- La théorie newtonienne de la gravitation fait des merveilles pour prédire le mouvement des astres, allant jusqu'à permettre à la découverte d'une nouvelle planète, Neptune, à partir des perturbations observées dans l'orbite d'Uranus.
- La thermodynamique donne une vision unifiée de l'énergie et des phénomènes thermiques, en même temps qu'elle justifie l'existence des atomes, dans sa version microscopique.

Et pourtant, quelques décennies plus tard, tout est balayé par les révolutions relativiste et quantique. Dans les années 1970, les physiciens mettent sur pied le modèle standard, qui intègre dans un formalisme commun – avec une précision diabolique – l'ensemble des particules connues et des forces fondamentales qui se manifestent à l'échelle microscopique ; dans le même temps, la Relativité générale, formulée par Einstein en 1915, permet aux cosmologistes d'écrire l'histoire de l'Univers avec un luxe de détails, tous confirmés par l'observation. Le modèle standard cosmologique, allié à son alter ego pour le monde microscopique, offre une vision unifiée de la matière, de l'espace et du temps à partir du Big Bang.

Dès lors, de nombreux physiciens ont pensé qu'ils n'étaient plus très loin d'une « théorie du tout », un Graal permettant de donner une vision unifiée de l'ensemble des phénomènes physiques de l'Univers. La théorie des cordes a enfoncé le clou, en allant jusqu'à réconcilier – sur le papier – les sœurs ennemies que sont la mécanique quantique et la relativité générale. A l'instar de Lord Kelvin, le brillant Stephen Hawking, successeur de Newton à la chaire de mathématiques de Cambridge, écrit en conclusion de son best-seller *Une brève histoire du temps* (1988) : « Si nous trouvons la réponse à cette question [celle de l'unification de la mécanique quantique et de la relativité générale], ce sera le triomphe ultime de la raison humaine – à ce moment, nous connaissons la pensée de Dieu »...

Pourtant, aujourd'hui, les détracteurs de la théorie des cordes se font de plus en plus nombreux, lui reprochant de prédire tout et n'importe quoi. Plus que cette théorie, c'est le projet d'unification qui est remis en cause : s'il a été un guide fructueux, plusieurs spécialistes s'accordent sur la nécessité d'un changement de paradigme. Nous ne sommes peut-être pas loin de l'histoire de l'avance du périhélie mercurien, à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle : bien que peu élégants, les modèles avancés pour expliquer les anomalies fines de l'orbite de Mercure rendaient assez bien compte des données astronomiques, bien que l'anomalie ne fût réellement comprise que dans le cadre de la relativité générale.

### **Le poids des constantes**

Avec le recul, on peut voir la révolution du début du XX<sup>ème</sup> siècle marquée par la redécouverte du rôle fondamental des constantes universelles. Ainsi, la vitesse de la lumière, associée à la relativité, a pris la signification de limite infranchissable. De même, la mécanique quantique stigmatise la constante de Planck pour indiquer qu'il est impossible de réaliser une mesure sur un système physique sans le perturber. Or, depuis la découverte de l'expansion de l'Univers (1998), c'est la très controversée constante cosmologique qui fait son retour dans les équations de la cosmologie : initialement introduite par Einstein pour contrebalancer l'expansion d'un

Univers qu'il supposait statique, elle avait été reniée depuis... La révolution viendra peut-être de la prise en compte du rôle fondamental de cette constante.

Combien d'idées révolutionnaires seront nécessaires pour résoudre les difficultés auxquelles la physique fondamentale est aujourd'hui confrontée ? La découverte de nouvelles entités peut-elle donner un visage totalement cohérent à la matière ? L'espace possède-t-il des extensions parallèles ? Faut-il remodeler le temps ? Doit-on repenser la mécanique quantique ? Dépasser la physique relativiste ?

Dans le cas de l'expérience de Michelson et Morley, il a fallu attendre dix-huit ans avant qu'Einstein comprenne comme se passer de l'éther. Dans le cas de l'émission de la lumière par les atomes, dont les savants du XIX<sup>ème</sup> siècle s'étonnaient qu'elle ne se fasse qu'à des fréquences bien précises, le mystère a perduré pendant quatre-vingts ans. Que penser du silence du LHC ou du satellite Planck ?

Aucun principe n'indique que la capacité de la physique mathématique à décrypter les lois de la nature soit sans limite : lorsqu'on fait face à quelque chose que l'on ne comprend pas, la première hypothèse raisonnable est bien sûr de considérer que l'on n'a pas tout essayé, que de nouveaux objets ou concepts sont à introduire. Mais si, d'ici un siècle, nous ne parvenons toujours pas à décrire convenablement la gravité quantique, par exemple, peut-être faudra-t-il se dire qu'il n'est pas exclu qu'une partie de la réalité se ne laisse pas appréhender par la physique...

### **Une idée : admettre que la gravité n'est qu'une illusion**

Ce que nous appelons constituants fondamentaux de la matière – les particules élémentaires et les quatre interactions fondamentales – a en réalité été introduit de façon *ad hoc*, ce qui les rend parfaitement réfutables. La gravitation, par exemple, pourrait n'avoir aucune existence à l'échelle microscopique.

La pression au sein d'un ballon n'a d'existence qu'à notre échelle, en tant que propriété collective des atomes du gaz enfermé qui entrent en collision, et s'évanouit dès qu'on pénètre l'intimité de la matière. Ce concept est pourtant bien utile à l'échelle macroscopique...

La gravitation pourrait, elle aussi, être la manifestation macroscopique de micro-phénomènes sous-jacents. Toutefois, la pression résulte de chocs entre particules matérielles ; la gravitation serait-elle alors le résultat d'un flux de phénomènes se déroulant en marge de la réalité ?

A l'appui de cette vision, l'étonnant lien formel entre la relativité générale et la thermodynamique, qui décrit les propriétés d'un système en faisant abstraction des détails microscopiques. En 1995, l'énoncé du principe holographique stipule que la description complète de tout système physique occupant une région de l'espace peut être donnée par une théorie ne décrivant que sa seule frontière : peut-être existe-t-il des paramètres évoluant dans la frontière – abstraite – de notre Univers et encodant une certaine quantité d'information. Cette information est peut-être modifiée par les changements de position des objets possédant une masse : à ces modifications de l'information pourrait être associée, par réaction, une force – celle que nous nommons, dans notre Univers, gravitation...

Cette vision holographique pourrait valoir également pour les autres interactions fondamentales.