



# La lumière dans tous ses états...

Courte histoire commentée de la lumière

## 5. La lumière contemporaine

*Charles Hirlimann*

*Directeur de recherche émérite CNRS à l'IPCMS*

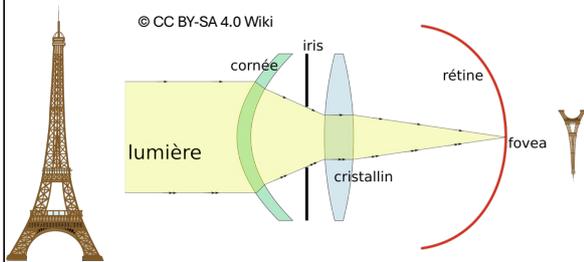
*Membre de l'académie d'Alsace*

*La Physique pour Tous*

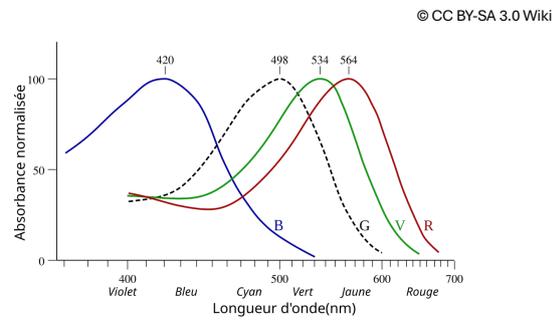


détection de la lumière

## Œil



Modèle simplifié de l'œil humain



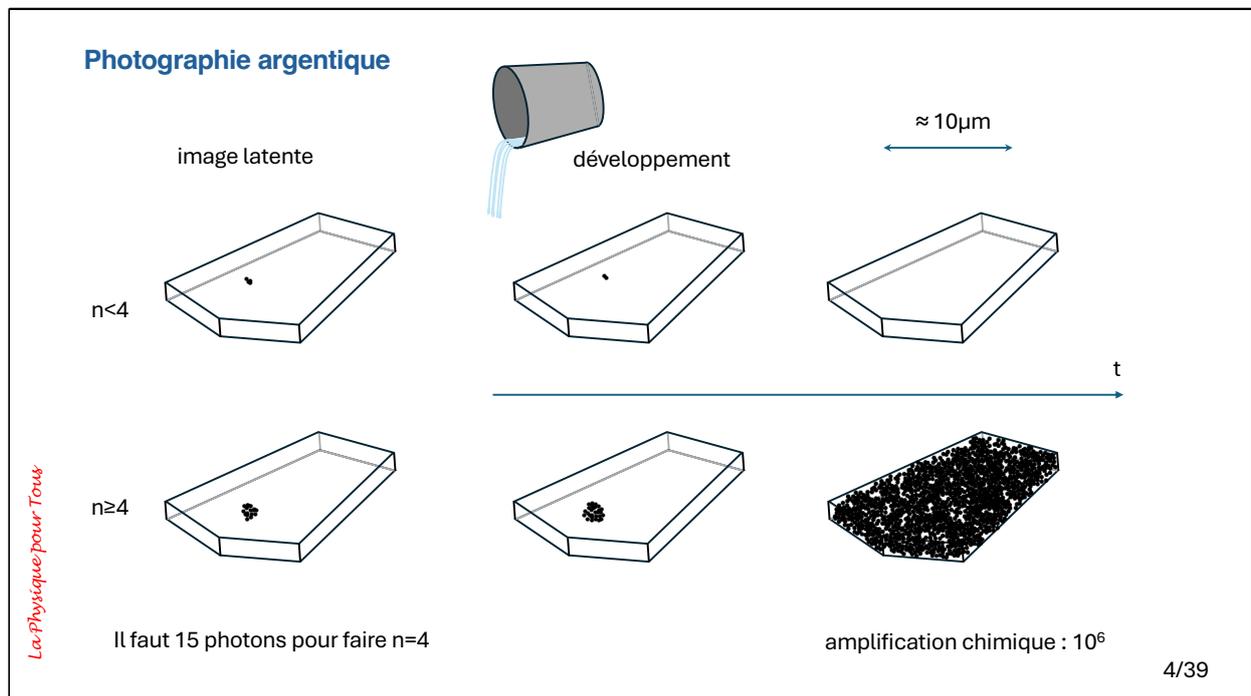
*La Physique pour Tous*

Dans la rétine, les cellules en forme de cône absorbent les lumières rouge, vert, bleu.  
Les cellules en formes de bâtonnets ne sont pas électives et permettent la vision de nuit. Rhodopsine.  
L'œil humain est sensible à  $10^{-14}$  Watts, quelques photons.



Domaine public

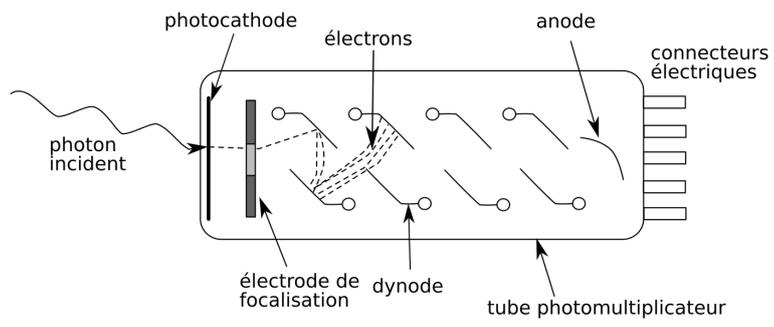
Les coquilles Saint-Jacques sont munies d'yeux catadioptriques, des yeux à miroir !



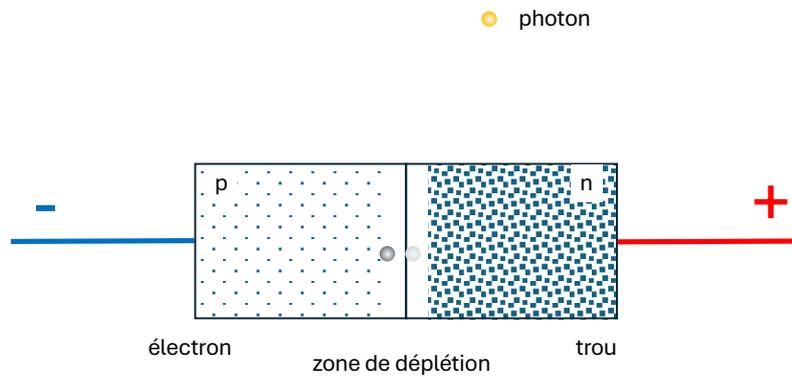
Les plaques photographiques à l'iodure d'argent dans du collodion ont été l'instrument par excellence de détection de la lumière de la fin du XIX<sup>e</sup> au XX<sup>e</sup> siècle.

Des microcristaux de sel d'argent sont exposés à la lumière. 15 photons suffisent pour réduire 4 atomes d'argent. L'électrochimie de ces grains change avec leur taille : en dessous de 4 atomes le liquide de révélation les dissout, tandis qu'au-dessus de 4 elle les fait croître. Ce changement de comportement résulte de l'accroissement du rapport surface/volume des grains. Les atomes de surface d'un grain sont moins liés entre eux que les atomes du volume. Les cristaux peu exposés, voient disparaître les atomes d'argent réduits par la lumière, tandis que les autres sont entièrement réduits.

## Effet photoélectrique



## Diode photo détectrice à jonction PN



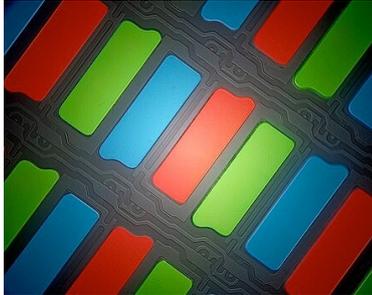
La Physique pour Tous

6/39

Un détecteur à jonction p-n est le symétrique de l'émetteur p-n. La diode est mise sous tension en mode bloquant telle qu'une zone de déplétion se produise à l'interface : une tension négative du côté p « attire » les trous, tandis qu'une tension positive du côté n « attire » les électrons. Les paires électrons-trous dans le dispositif ont une énergie de liaison spécifique : si un photon d'énergie plus grande pénètre la zone de déplétion, il peut disparaître en brisant une liaison et donc en libérant un électron et un trou qui peuvent alors contribuer à un courant dans le circuit.

## Capteurs électroniques

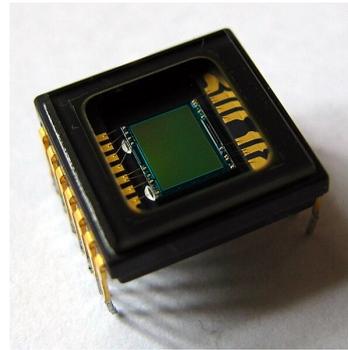
© Wikipedia CC 4.0



Pixels d'un capteur à diode  
 $\approx 3 \times 12 \mu\text{m}^2$

Un capteur 24x36 peut comporter jusqu'à  
24 millions de pixels. Équivalent à l'argentique.

© Wikipedia CC 3.0



Capteur à Diode

unités et ordres de grandeur

## Unités de mesure

**26 mars 1791** : création du système métrique

**1<sup>er</sup> janvier 1840** : système métrique obligatoire en France

**20 mai 1875** : Signature de la Convention du Mètre

**1960** : Adoption formelle du SI avec ses unités de base



CC BY-SA 4.0

Trois pays n'ont toujours pas opté pour le système international d'unités, (SI) : Les USA, le Liberia et Myanmar (Birmanie). Aux USA, les sciences, la médecine et les grosses industries exportatrices, automobile et aéronautique utilisent le SI. La Nasa utilise le Si pour ses opérations internationales. Le ratage de la mission Genini 4 en 1965 et la perte du Mars Climate orbiter en 1999 sont dus à une confusion entre miles marins et miles terrestres.

## Unités de mesure

Grandeur	Symbole de la grandeur	Symbole de la dimension	Unité SI	Symbole associé à l'unité
Masse	$m$	M	kilogramme	kg
Temps	$t$	T	seconde	s
Longueur	$l, x, r...$	L	mètre	m
Température	$T$	$\Theta$	kelvin	K
Intensité électrique	$I, i$	I	ampère	A
Quantité de matière	$n$	N	mole	mol
Intensité lumineuse	$I_v$	J	candela	cd

$c = 299792458 \text{ m/s}$

Le mètre, la seconde et le kilogramme sont définis à partir de  $c$

La Physique pour Tous

10/39

**1 mètre** est la distance que parcourt la lumière dans le vide en **1/299 792 458 secondes**.

Depuis 1967, la seconde est définie comme suit : **1 seconde** est la durée de **9 192 631 770 périodes de la radiation** correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133. Les horloges atomiques qui utilisent cette définition ne perdent ou ne gagnent qu'environ une seconde tous les millions d'années.

## Équations aux dimensions

Énergie cinétique  $E = \frac{1}{2} m v^2$   $[v] = \frac{L}{T}$   $[E] = M \frac{L^2}{T^2}$

Énergie potentielle  $E = m g h$   $[g] = \frac{L}{T^2}$   $[E] = M \frac{L}{T^2} L$   $[E] = M \frac{L^2}{T^2}$

Constante de Planck  $E = h \nu$   $[h] = \frac{[E]}{[\nu]}$   $[\nu] = \frac{1}{T}$   $[h] = M \frac{L^2}{T}$

Plus difficile : déterminer la dimension de la constante universelle de la gravité  $G$

La Physique pour Tous

Force  $\vec{F} = -G \frac{m M}{r^2} \vec{u}$   $[F] = [G] \frac{M^2}{L^2}$

$\vec{F} = m \vec{\gamma}$   $[F] = \frac{ML}{T^2}$

$$[G] \frac{M^2}{L^2} = \frac{ML}{T^2} \Rightarrow [G] = \frac{L^2 ML}{M^2 T^2} = \frac{L^3}{MT^2} = ML^3 T^{-2}$$

11/39

Dans le calcul de la dimension de  $G$ , le vecteur  $\vec{u}$  est un vecteur unitaire, qui donne le sens et la direction de la force, mais qui est de longueur (module) 1 et n'a pas de dimension.

## Préfixes du système international

Préfixes du Système international d'unités et nombres correspondants

Préfixe			Nombre correspondant		
Nom	Symbole	Date	Puissance	Notation décimale	Nom du nombre
			de 10		
Péta	P	1975	$10^{15}$	1 000 000 000 000 000	Billiard
Téra	T	1960	$10^{12}$	1 000 000 000 000	Billion
Giga	G	1960	$10^9$	1 000 000 000	Milliard
Méga	M	1960	$10^6$	1 000 000	Million
Kilo	k	1795	$10^3$	1 000	Millier
Hecto	h	1795	$10^2$	100	Centaine
Déca	da	1795	$10^1$	10	Dizaine
(aucun)	—	—	$10^0$	1	Unité
Déci	d	1795	$10^{-1}$	0,1	Dixième
Centi	c	1795	$10^{-2}$	0,01	Centième
Milli	m	1795	$10^{-3}$	0,001	Millième
Micro	$\mu$	1960	$10^{-6}$	0,000 001	Millionième
Nano	n	1960	$10^{-9}$	0,000 000 001	Milliardième
Pico	p	1960	$10^{-12}$	0,000 000 000 001	Billionième
Femto	f	1964	$10^{-15}$	0,000 000 000 000 001	Billiardième

La Physique pour Tous

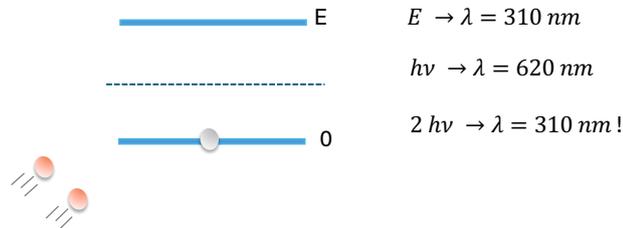
12/39

optique non-linéaire

*La Physique pour Tous*

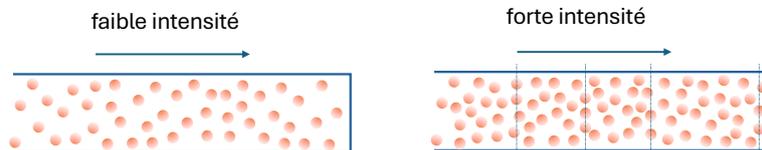
13/39

## Absorption à 2 photons, 1929, 1963



Maria Goeppert-Mayer  
1906 - 1972

La Physique pour Tous



14/39

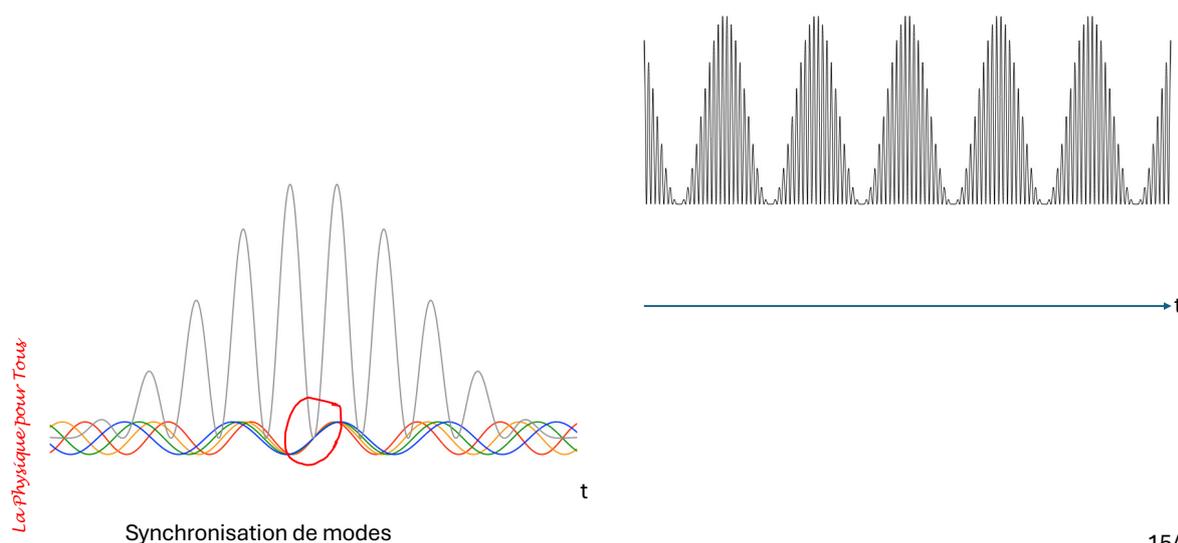
- En 1929, pendant son travail de thèse, Maria Goeppert-Mayer, découvre l'absorption à deux photons, en introduisant un terme d'ordre supérieur dans les équations de Maxwell. Dans ce processus, lorsque deux photons tombent simultanément sur une transition électronique dont ils possèdent la moitié de l'énergie ils permettent la transition de l'électron associé de son niveau d'énergie le plus bas à son niveau excité.

Supposons un matériau présentant une transition électronique E telle que la longueur associée à cette énergie soit de 310 nm. Supposons encore que nous disposions de photons de 620 nm de longueur d'onde ; leur énergie est 2 fois trop faible pour permettre la transition électronique. Cependant si 2 photons se présentent simultanément dans le matériau alors leur énergie globale est suffisante pour provoquer la transition : c'est le mécanisme de l'absorption à 2 photons.

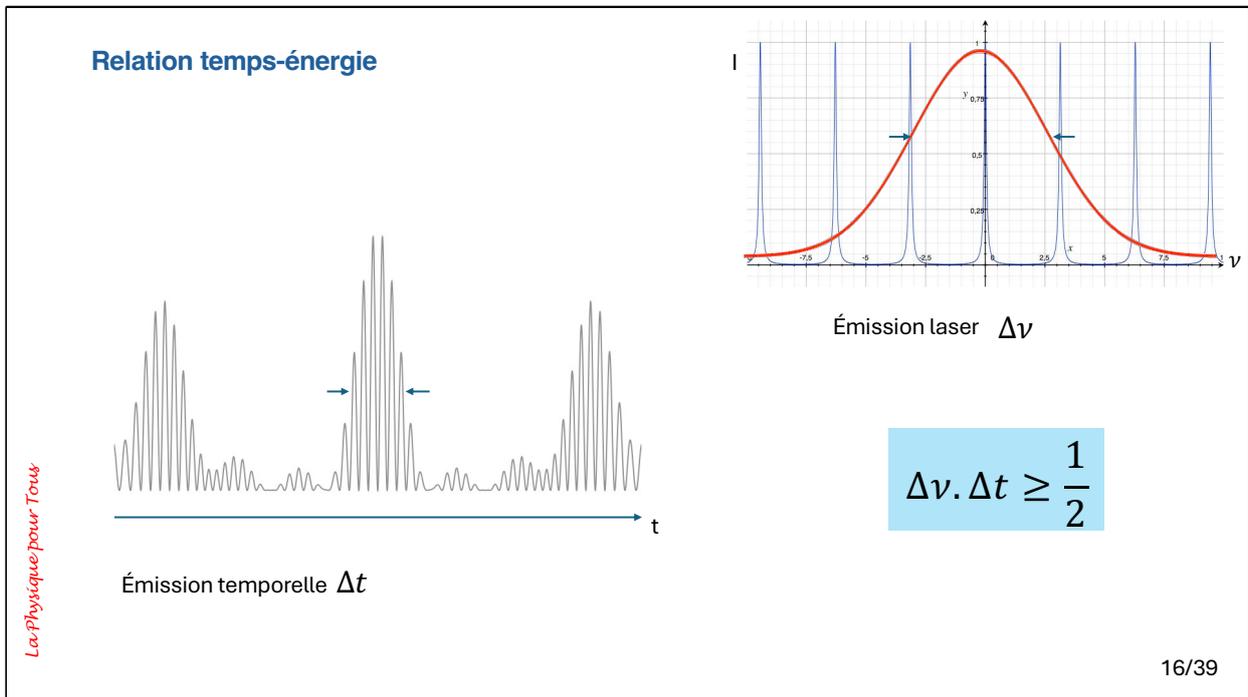
Pour que la probabilité que 2 photons se présentent simultanément sur un même plan transverse à un faisceau laser soit significative il faut augmenter la densité de photons. L'absorption à deux photons s'observe à l'aide d'impulsions lasers courtes dont la puissance crête permet d'atteindre ce régime. C'est pourquoi il a fallu attendre 30 ans et l'invention du laser pour que l'effet soit observé expérimentalement.

- Maria Goeppert-Mayer obtient en 1963, le prix Nobel de physique pour le modèle en couches du noyau atomique. Elle est la seconde femme à l'obtenir après Maria Skłodowska Curie, elle est aussi la seule physicienne amateur à l'avoir obtenu.

## Battements, génération d'impulsions lumineuses



Un moyen d'obtenir de fortes intensités lumineuses est de faire produire à un laser des impulsions de lumière. À énergie constante plus les impulsions seront courtes dans le temps plus sera grande la puissance crête et le nombre de photons instantané. Le battement de fréquences est l'équivalent dans le temps du processus d'interférence. Si on additionne deux fréquences légèrement différentes, ces fréquences battent entre elles.

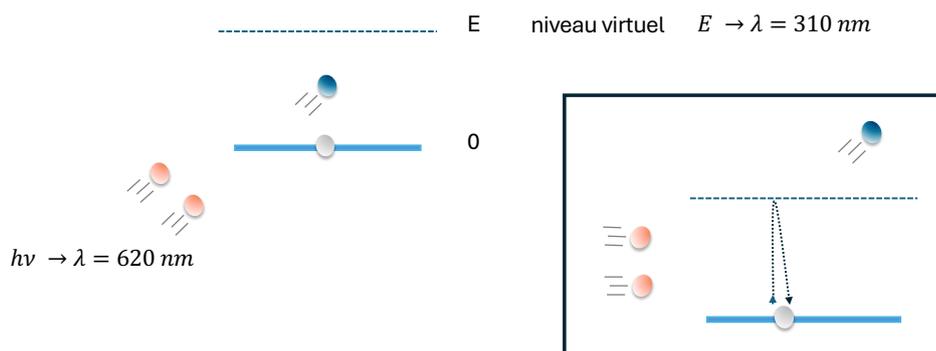


La relation  $\Delta \nu \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2}$  lie la largeur spectrale d'un train d'impulsions à sa durée. Cette relation est purement classique et elle a servi de modèle à Heisenberg pour la relation d'incertitude qui lie vitesse et position d'une particule :  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$  ou celle qui lie énergie et temps :  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$ .

Pour ce qui concerne les lasers impulsionnels la relation  $\Delta \nu \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2}$  montre que plus une impulsion est courte plus le spectre lumineux qui la construit est large. Ainsi une impulsion lumineuse de 10 femtosecondes « consomme » 41% du spectre visible total.

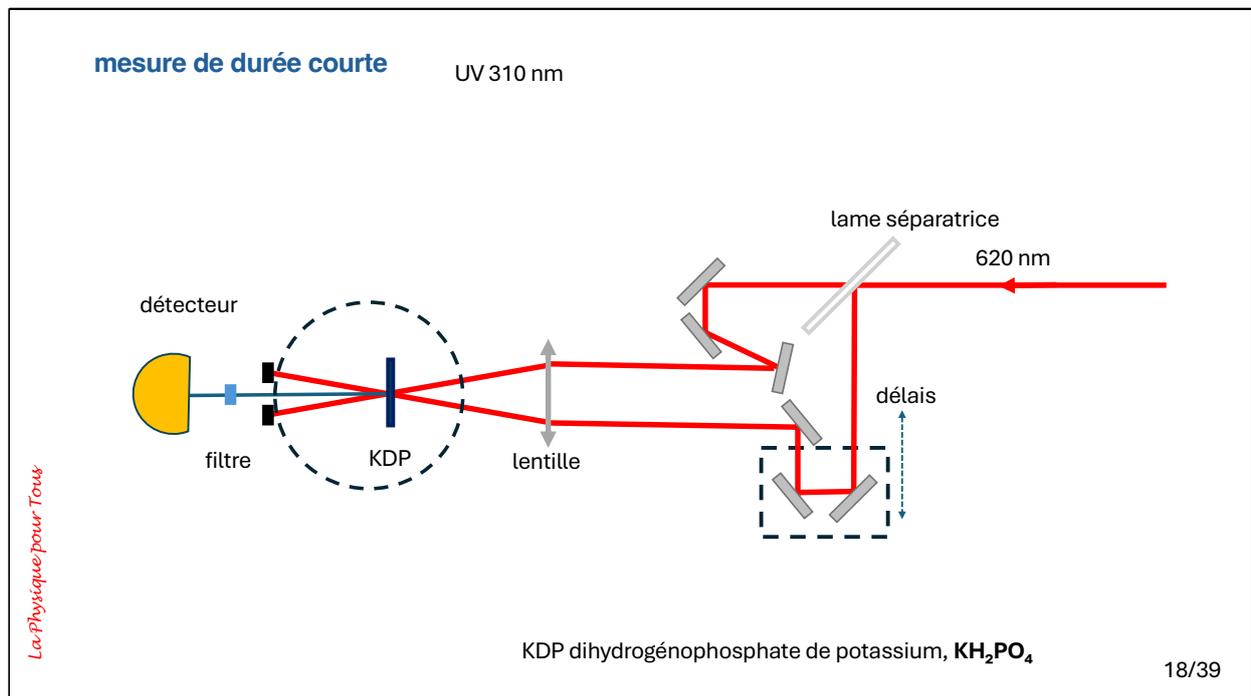
## Doublage de fréquence

La Physique pour Tous



17/39

Doublage de fréquence. Certains cristaux transparents n'ayant pas de centre symétrie ont la particularité de réaliser le doublage de fréquence. Dans ce processus optique non-linéaire deux photons élèvent l'énergie d'un électron qui atteint ce que l'on nomme un niveau virtuel. Cet électron en retombant immédiatement sur son niveau fondamental émet un seul photon ayant le double de l'énergie des photons incidents.



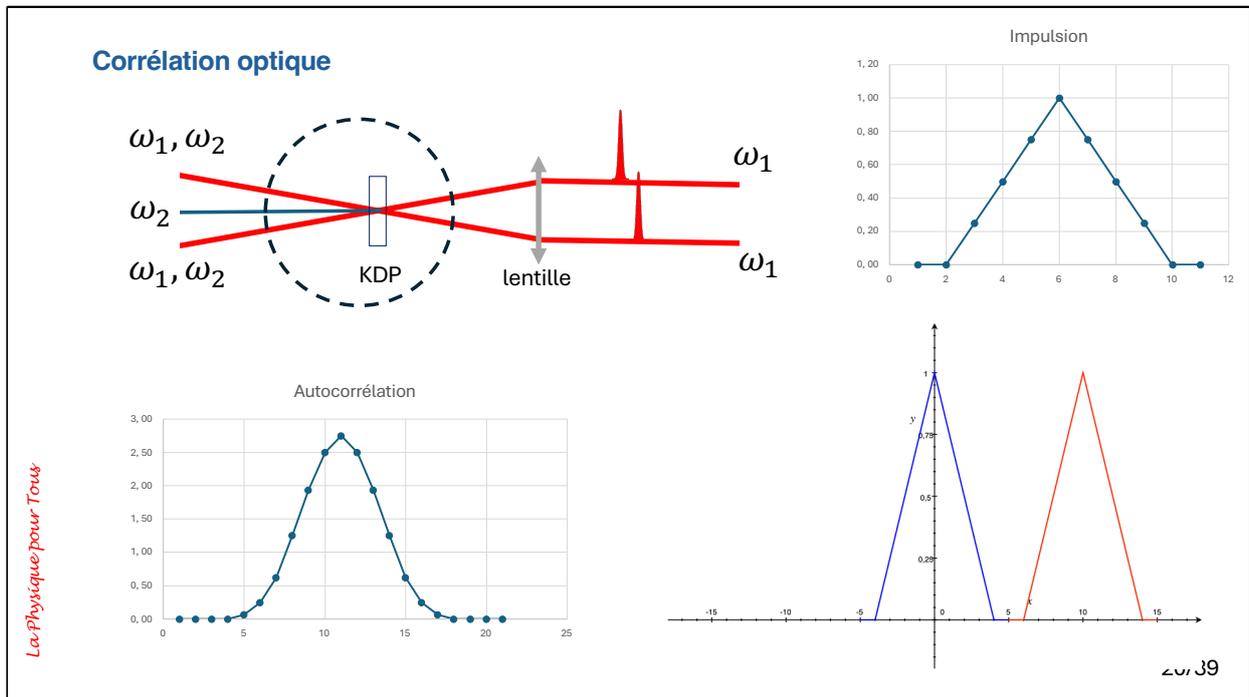
La mesure de la durée d'impulsions lumineuses courtes peut se faire à l'aide de l'effet de doublage de fréquence décrit précédemment. Les impulsions à mesurer sont coupées en 2 par une lame séparatrice. Les deux faisceaux obtenus sont focalisés sur le cristal doubleur. L'une des deux impulsions passe par une ligne à retard.

## Ligne à retard optique



unité de translation pas-à-pas

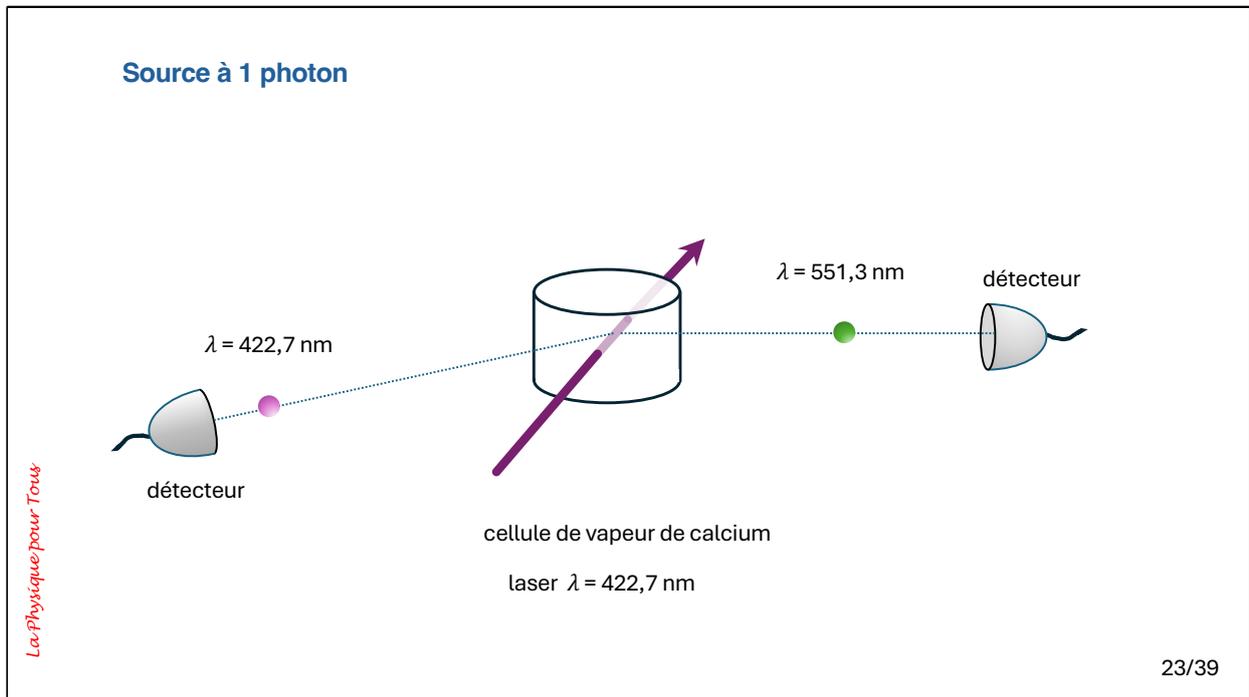
Une unité de translation pas-à-pas : une vis engrenée dans un chariot mobile permet des déplacements microniques du chariot.



Grâce à la ligne à retard l'impulsion 2 balaye dans le temps l'impulsion 1. À la sortie du cristal doubleur seul importe le faisceau situé sur la bissectrice de l'angle que forment les deux faisceaux incidents. Ce faisceau contient les photons doublés provenant de la combinaison de photons provenant de chacune des impulsions incidentes. L'intensité de ce faisceau est proportionnelle au produit des intensités des deux impulsions qui se recouvrent. Un balayage complet produit une courbe qui est appelée fonction d'autocorrélation des impulsions à partir de laquelle il est aisé de retrouver leur durée.

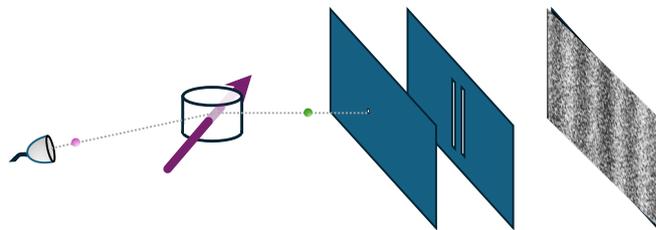
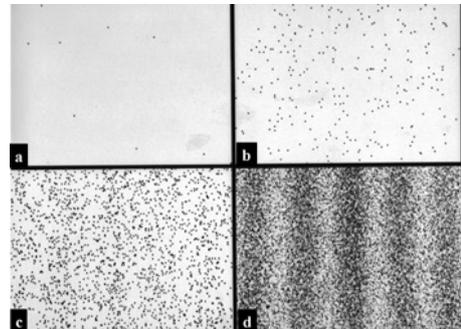
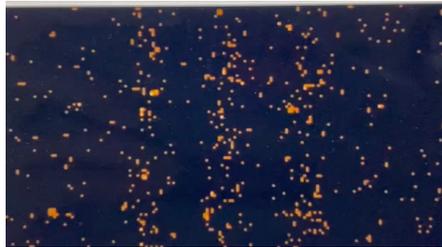


dualité onde-corpuscule, expérience d'Aspect et Grangier



En éclairant une cellule contenant de la vapeur de calcium on déclenche l'émission successive de deux photons dans deux directions corrélées. En atténuant suffisamment cette émission on peut s'assurer que, dans une direction donnée, les photons sont émis statistiquement l'un après l'autre, ce qui peut être assuré en détectant l'autre photon de la paire.

### Interférences à 1 photon !



On peut utiliser la source lumineuse à 1 photon décrite précédemment pour reproduire l'expérience des fentes de Young. Le caractère corpusculaire des photons est mis en évidence par les impacts ponctuels qu'ils déclenchent sur le détecteur ultrasensible utilisé. Ce qui apparaît, au début de l'expérience comme une distribution aléatoire de points d'impact (Figure a à c) se met peu en forme pour reproduire les franges d'interférence caractéristique de l'aspect ondulatoire de la lumière.

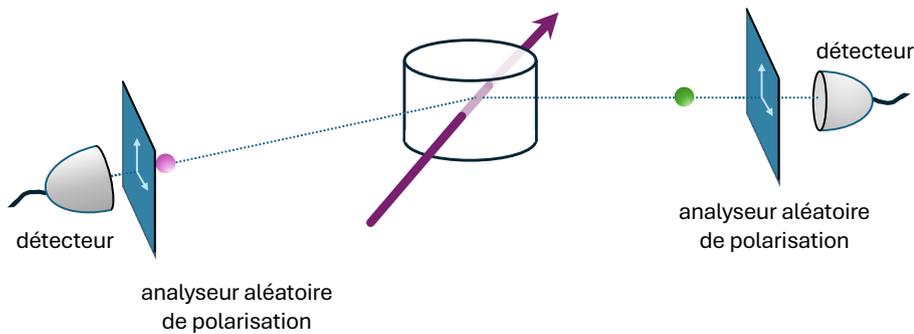
Einstein remettait en question l'idée d'une description probabiliste et non déterministe de la réalité, telle qu'introduite par la mécanique quantique.

vérification des inégalités de Bell, prix Nobel d'Aspect



Alain Aspect  
1947 -

## Test des inégalités de Bell, 1982



La Physique pour Tous

la physique quantique est non locale 26/39

En 1935, EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) contestaient le bien-fondé de la mécanique quantique telle qu'elle était interprétée par l'école de Bohr. Ils croyaient au principe de localité, selon lequel deux objets séparés dans l'espace ne peuvent pas instantanément s'influencer l'un l'autre, en contradiction avec l'interprétation. Ils en concluaient qu'il devait exister des variables locales cachées devant rendre compte de la réalité.

En 1964, John Bell a proposé un jeu d'inégalités entre des variables de la mécanique quantique permettant de tester par l'expérience l'existence de variables cachées décrivant la réalité locale.

En 1982, Alain Aspect et ses collègues ont testé les inégalités de Bell en utilisant la source à 1 photon décrite plus haut. Les paires de photons émis par cette source sont corrélées, on dit qu'elles sont « intriquées », elles se comportent comme un objet quantique unique. Les paires de photons intriqués sont signalées par la coïncidence de leur détection. Devant chaque détecteur est placé un analyseur aléatoire de polarisation qui laisse passer au hasard une polarisation verticale ou horizontale de la lumière. Le choix de l'état de détection de la polarisation est déclenché pendant le temps de vol des photons pour éviter tout biais dû à l'observateur. De plus les deux détecteurs sont distants de plus de 10 mètres, une distance trop grande pour qu'ils puissent échanger

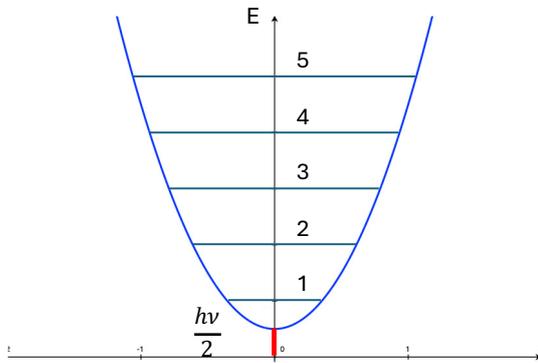
l'information de leur état de polarisation à la vitesse de la lumière.  
L'analyse statistique de cette expérience a montré clairement que lorsque les deux détecteurs sont parallèles les mesures sont parfaitement corrélées. Autrement, la probabilité de corrélation dépend du **cosinus du double de l'angle** entre les orientations de mesure pour les deux détecteurs. Ce résultat ne peut être obtenu que par un calcul quantique. La physique est donc non locale.

## la force de Casimir



Hendrik Casimir  
1909 - 2000

## Le vide n'est pas le rien



La Physique pour Tous

En physique quantique  
l'énergie de l'oscillateur  
harmonique est quantifiée

$$E = h\nu\left(N + \frac{1}{2}\right)$$

les photons dans une cavité laser sont  
représentés par un ensemble N  
d'oscillateurs harmoniques avec leurs  
niveaux d'énergie

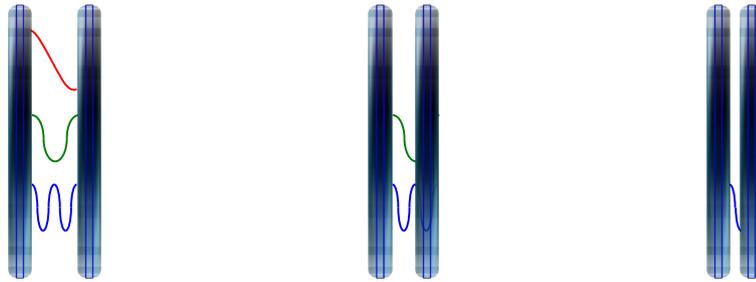
$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \text{ et } \omega = 2\pi\nu \Rightarrow \hbar\omega = h\nu$$

28/39

On représente le champ électromagnétique dans une cavité laser, par exemple, par un ensemble d'oscillateurs harmoniques quantifiés, qui laissent chacun dans le vide un demi-quantum  $\frac{h\nu}{2}$ . Le vide est rempli de tous les demi-photons de toutes les ondes e. m. qui s'y propagent. Pendant des durées très courtes les  $\frac{1}{2}$  photons forment des photons entiers, ce processus constitue ce que l'on appelle les fluctuations du vide.

### Fréquence de coupure du Fabry-Pérot

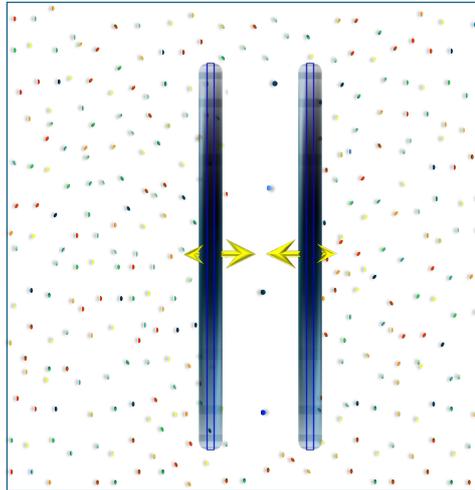
*La Physique pour Tous*



29/39

Comme vu plus haut, l'interféromètre de Fabry-Pérot est passant pour les rayons lumineux dont un nombre demi-entier de longueurs d'onde s'insère entre les miroirs (épaisseur  $d$ ) pour former une onde stationnaire.

## Force de Casimir



*La Physique pour Tous*

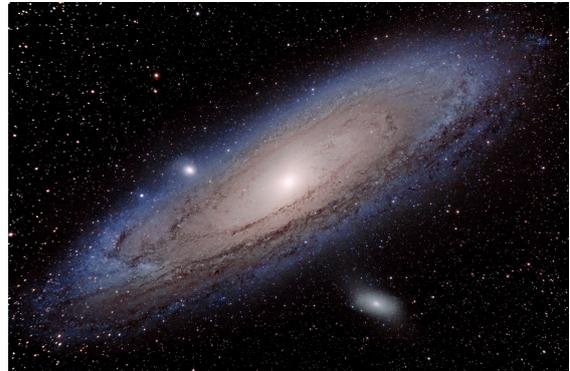
30/39

Deux miroirs très proches dans le vide subissent à l'extérieur plus de fluctuations du vide que sur leur face intérieure. Il en résulte une force nette (très faible) qui les rapproche, la force de Casimir du nom du physicien Hollandais qui l'a découverte en 1949.

## Énergie du vide

- densité d'énergie quantique =  $10^{113} \text{ J/m}^3$
- densité d'énergie cosmologique =  $10^{-9} \text{ J/m}^3$

122 ordres de grandeur de différence !!!



Galaxie d'Andromède

CC BY 4.0

La Physique pour Tous

Ère de la catastrophe cosmologique

31/39

Suivant que l'on fait une estimation de l'énergie du vide dans le cadre de la physique quantique ou dans celui de la relativité, on trouve 122 ordres de grandeur de différence. Cela fait dire à certains que nous sommes dans l'ère de la catastrophe cosmologique. Ce désaccord reflète l'incompatibilité entre les deux corpus théoriques qui régissent la physique : le quantique et la relativité, le très petit et le très grand. La physique classique continue d'être finement adaptée à la description de l'univers à notre échelle humaine.



*Fin*

[Charles.Hirlimann@ipcms.unistra.fr](mailto:Charles.Hirlimann@ipcms.unistra.fr)

Charles@Hirlimann.net

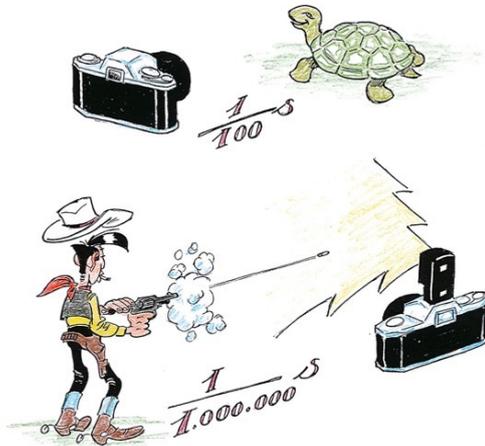


*La Physique pour Tous*



<https://ipcms-cloud.u-strasbg.fr/owncloud/s/FILvRruIXuTx8ix>

## Toujours plus court



© Jean-Luc Loison



[Céréales Killer sur Wikipédia français.](#)

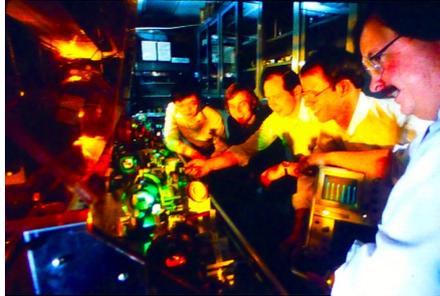


[Image de upkvak sur Freepik](#)

34

Pour prendre une photo nette d'une tortue en mouvement,  $\frac{1}{100}$  s de temps d'exposition de la pellicule/détecteur suffit, pendant ce temps l'image sur le détecteur ne bouge que de quelques microns. Pour voir une image nette de la balle tirée par Lucky Luke il faut l'éclairer pendant un temps beaucoup plus court de 1 millionième de seconde et aussi synchroniser le déclenchement du flash avec le passage de la balle devant l'objectif qui reste ouvert dans le noir. Pour étudier le mouvement des électrons dans la matière il faut utiliser des « flashes » de 1 millionième

de milliardième de seconde.

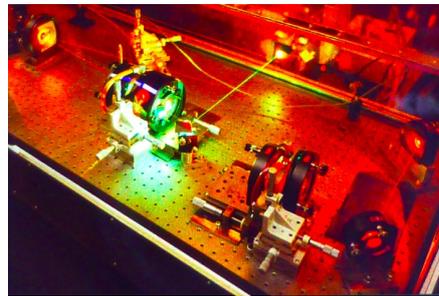


Charles V. Shank

*La Physique pour Tous*

## Premier laser femtoseconde

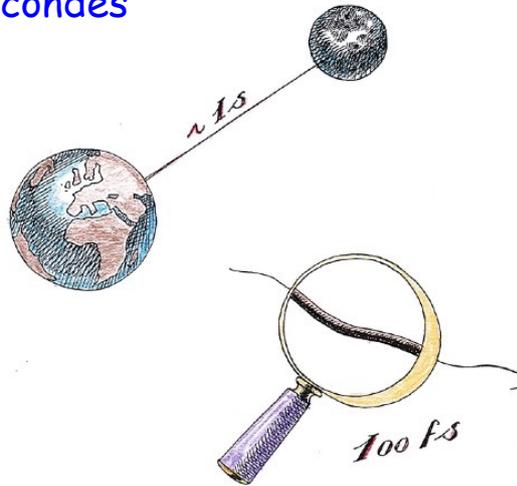
millionième de milliardième de seconde



35/39

EN 1981, l'équipe de Charles Shank (à droite), aux Bell Labs à Holmdel, NJ, met au point un laser à colorant produisant des impulsions d'une centaine de femtosecondes (cent millièmes de milliardièmes de secondes). Quelques années plus tard, après d'importantes améliorations cette famille de lasers a atteint la durée de seulement 8 fs. D'après une confidence de Fred Beiser (3<sup>e</sup> à partir de la droite sur la photo) les durées très courtes n'étaient obtenues que pendant la ½ heure suivant les changements des colorants utilisés dans le laser. Photo prise en 1982, votre serviteur en 2<sup>e</sup> à partir de la gauche.

## Impulsions femtosecondes



© Jean-Luc Loison

36

Il ne faut qu'environ une seconde à la lumière pour parcourir la distance de la Terre à la Lune, c'est la durée d'un battement de cœur. 100 femtosecondes est le temps qu'elle met pour parcourir l'épaisseur d'un cheveu.

quelques réflexions personnelles

## Réflexions personnelles

- Les lois de la physique sont supposées universelles ; elles s'appliquent partout dans l'univers.
- Il ne faut pas confondre la science et la recherche. La science est un corpus stable de connaissances établies, la recherche est la période au cours de laquelle les connaissances sont établies et durant laquelle plusieurs hypothèses sont testées.
- Le propre de la science est de tester des hypothèses nouvelles pouvant, soit expliquer un phénomène connu, soit prédire un phénomène nouveau. L'activité principale des chercheurs consiste à essayer de falsifier les théories découlant de ces hypothèses.
- Des faits nouveaux sont intégrés dans le corpus scientifique lorsqu'une, ou plusieurs théories non falsifiées les expliquent et font consensus parmi les scientifiques. Si plusieurs théories coexistent, la théorie la plus économe en moyens est retenue (principe du rasoir d'Ockham).
- La science ne répond pas aux questions « pourquoi », elle essaye de répondre aux questions « comment ».
- La science est justifiée par ses conséquences opérationnelles reproductibles (les équations de Maxwell permettent de construire des communications par ondes e. m. et en retour le succès des communications radio justifient les équations de Maxwell).
- Jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle, les philosophes se sont chargés d'explorer toutes les idées possibles pouvant expliquer le monde qui nous entoure. À partir de la révolution industrielle au XIX<sup>e</sup> siècle ce rôle est rempli par les auteurs de science-fiction.
- La population de physiciens et chimistes vivants en 2020 peut être estimée entre 1,4 et 2 millions de personnes. La population totale de ces scientifiques depuis l'aube de l'humanité jusqu'à l'année 1950 de n. è., peut être estimée entre 50 000 et 100 000 personnes.

## Réflexions personnelles

- *Nanos gigantum umeris insidentes*. Des nains sur les épaules de géants est une métaphore attribuée à Bernard de Chartres philosophe platonicien français du XII<sup>e</sup> siècle.
- Dans sa forme industrielle, la science progresse grâce à d'innombrables cohortes, mêmes si les mérites restent attribués à des individus.
- La science du XXI<sup>e</sup> siècle est mélange étrange de compétition et de collaboration.