



La lumière dans tous ses états...

Courte histoire commentée de la lumière

4. Lasers et compagnie

Charles Hirlimann

Directeur de recherche émérite CNRS à l'institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg

Membre de l'académie d'Alsace des sciences, lettres et arts

La Physique pour Tous

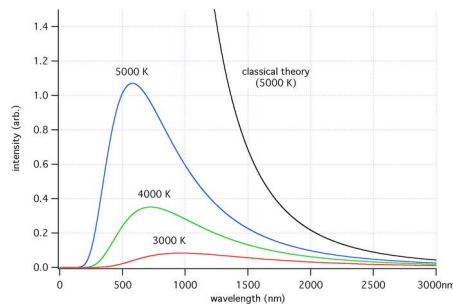


le rayonnement du corps noir

Au croisement de l'optique et de la thermodynamique



Four de verrier



La catastrophe ultraviolette



La Physique pour Tous

3/33

Le XIX^e siècle est le siècle de la thermodynamique (mais pas que), le siècle de l'étude des échanges de chaleur, des transformations de l'énergie. Tout cela poussé par le développement des machines thermiques. On sait alors mesurer la distribution des longueurs d'onde de la lumière émise par un corps chaud en l'occurrence un four avec une petite ouverture que l'on nomme corps noir. Cette distribution a une forme de cloche qui retombe dans le bleu.

Problème : lorsque l'on applique les théories de la thermodynamique à cette émission de lumière on n'obtient pas la retombée dans le bleu de l'amplitude, au contraire, l'amplitude augmente de manière exponentielle. On parle alors de catastrophe ultra-violette.

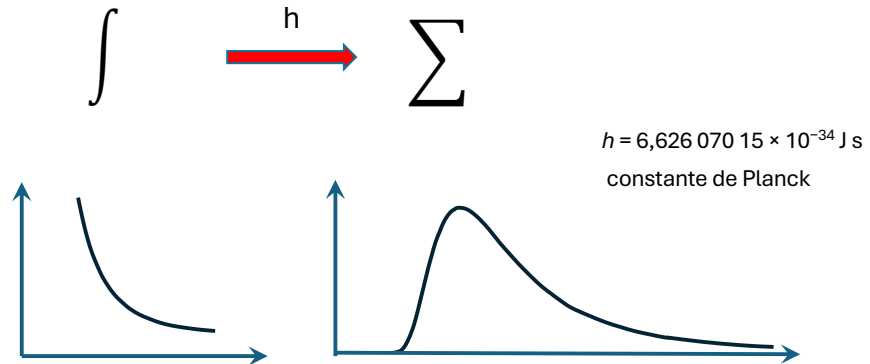
Ce désaccord entre théorie et expérience est l'épine dans le pied d'une époque où le monde scientifique est persuadé d'être arrivé au bout de la science.

De la nécessité d'utiliser des énergies quantifiées ! 1900



Max Planck
1858-1947

La Physique pour Tous



les échanges d'énergie entre les ondes e.m. et la matière se font par paquets d'énergie discrets : les quanta

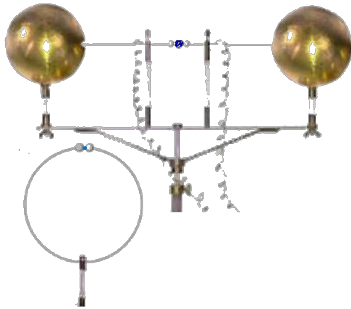
4/33

En décembre 1900, Max Planck publie un article où il montre qu'on peut résoudre la catastrophe ultraviolette en utilisant une astuce mathématique bizarre. Il suffit, dans les calculs, de ne plus considérer l'énergie comme une variable réelle continue mais comme une variable discontinue, multiple entière d'une constante que l'on nommera h constante de Planck. L'idée lui paraît tellement baroque qu'il mettra une dizaine d'année pour accepter que cette idée puisse avoir un sens physique. Sans le vouloir vraiment, il vient de faire entrer la civilisation humaine dans l'ère des quanta.

La mécanique quantique est née

l'effet photoélectrique

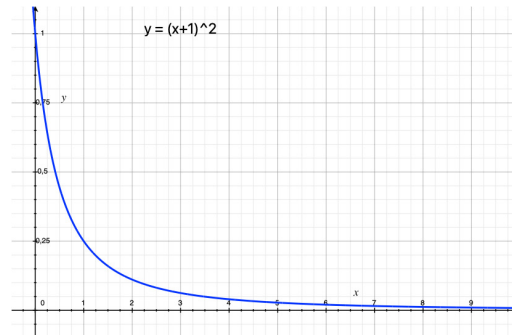
Loi en $1/R^2$



La physique pour Tous

Hertz observa qu'à faible distance ses expériences étaient instables
L'interposition d'une lame de verre montra l'importance des UV émis

L'énergie rayonnée par une source ponctuelle se répartit à la distance R sur la surface $4\pi R^2$.



Découverte de l'effet photoélectrique

7/33

L'énergie rayonnée par une source ponctuelle se répartit uniformément sur une surface sphérique, dont l'aire croît avec le carré de la distance ($4\pi R^2$). La conservation de l'énergie implique qu'à mesure que la distance R augmente, l'énergie est répartie sur une surface plus grande, ce qui entraîne une décroissance de l'intensité du rayonnement proportionnelle à $1/R^2$.

Au cours de ses expériences sur les ondes e.m. Heinrich Hertz, se trouva gêné lorsque son détecteur était proche de l'émetteur, l'étincelle du récepteur avait un comportement erratique rendant les expériences non reproductibles.

Interposer sur le trajet entre émetteur et récepteur une plaque de quartz ne changeait rien au problème, par-contre une lame de verre permettait de stabiliser l'étincelle du récepteur. Le quartz est transparent aux UV pas le verre, ce qui indiquait clairement que les UV avaient un effet sur le métal des boules du récepteur. L'effet photoélectrique était découvert.

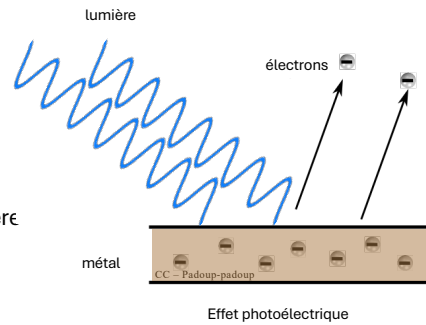
L'effet photoélectrique, 1887

Métal	W (eV)	λ (nm)
Sodium (Na)	2,28	544
Potassium (K)	2,3	539
Calcium (Ca)	2,87	432
Césium (Cs)	3,89	319
Aluminium (Al)	4,28	290
Zinc (Zn)	4,31	288
Fer (Fe)	4,5	276
Cuivre (Cu)	4,7	264
Or (Au)	5,1	243
Platine (Pt)	6,35	195
Nickel (Ni)	7,63	162

Pour un métal donné

\exists une couleur λ_s telle que :

- pour $\lambda > \lambda_s$ pas d'électrons extraits quelle que soit l'intensité de la lumière
- pour $\lambda < \lambda_s$ effet photoélectrique
- les e^- extraits ont une énergie $E > W$
- W travail d'extraction



\exists = il existe



8/33

Au cours de ses expériences sur les ondes e.m. Heinrich Hertz, se trouva gêné lorsque son détecteur était proche de l'émetteur, l'étincelle du récepteur avait un comportement erratique rendant les expériences non reproductibles. Interposer sur le trajet entre émetteur et récepteur une plaque de quartz ne changeait rien au problème, par-contre une lame de verre permettait de stabiliser l'étincelle du récepteur. Le quartz est transparent aux UV pas le verre, ce qui indiquait clairement que les UV avaient un effet sur le métal des boules du récepteur. L'effet photoélectrique était découvert.

dualité onde-corpuscule

1905 : annus mirabilis d'Albert Einstein



Albert Einstein
1879 - 1955

La Physique pour Tous

Prix Nobel en 1921

- Effet photoélectrique
- Mouvement Brownien : atome
- Relativité restreinte : $c = \text{constante}$
- $E = mc^2$

Einstein reprend les idées de quanta de Planck : la lumière est composée de « grains » d'énergie. Appliquant la conservation de l'énergie il écrit :

$$E = h \nu$$

$$E_{cin} = h\nu - W$$

La lumière est corpusculaire !

10/33

L'année 1905, est pour Albert Einstein une annus mirabilis : il publie des articles qui sont tous d'une importance considérable.

- Pour expliquer l'effet photo-électrique, mis en évidence par Hertz, il utilise la quantification de l'énergie de Planck pour expliquer l'existence d'un seuil en énergie à surmonter pour extraire des électrons d'un métal. La lumière est constituée de grains d'énergie bien définie par la fréquence, si cette énergie est inférieure au seuil pas d'extraction d'électrons, si elle est supérieure au seuil, des électrons s'échappent du métal. Cela montre au passage que l'énergie des électrons dans le métal est elle-même quantifiée puisqu'il existe un seuil.
- Interprétant le mouvement brownien d'un grain de pollen dans l'eau comme étant la résultante aléatoire de la somme des chocs des molécules d'eau sur le grain il conforte la théorie atomique de la matière qui a du mal à émerger.
- Pour résoudre le paradoxe de l'induction magnétique, il utilise le changement de référentiel introduit par Lorentz et en fait un principe de relativité qui nécessite l'invariance de la vitesse de la lumière observée par Michelson et Morley.
- Dans son développement de la relativité, Einstein introduit le principe d'inertie

de l'énergie et utilise la formule de Poincaré $E = mc^2$.

- En 1905, on assiste à un spectaculaire retour en arrière d'un siècle : la lumière est de nouveau particulaire.
- Contrairement à une idée reçue, le mot photon a été créé en 1926 par le chimiste Gilbert Lewis à partir du mot grec "**phōs**" (φῶς) qui désigne la lumière.

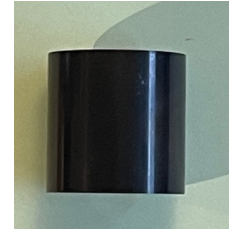
Dualité onde-corpuscule

- Contradictoire avec la mesure de c dans l'eau ?

non, seule la théorie a été falsifiée.

La lumière est à la fois ondulatoire et corpusculaire

La Physique pour Tous



11/33

L'objet présenté dans la figure est un cylindre dont la hauteur égale le diamètre. En observant ce cylindre suivant son axe on observe un disque et si on l'observe perpendiculairement à son axe on voit un carré, ce cylindre est dual disque-carré.

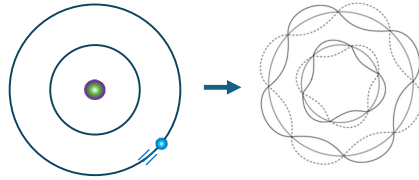
Je peux le faire passer dans un trou circulaire de son diamètre lorsque qu'il se présente suivant son axe, mais l'opération n'est pas possible s'il est présenté orthogonalement à son axe. Ses propriétés dépendent de l'aspect que l'on considère.

le laser

La Physique pour Tous

12/33

Ondes matérielles, 1924



lumière $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$ $\lambda = \frac{c}{\nu} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$

matière $p = mV \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{mV}$



Louis de Broglie
1892 - 1987

p = quantité de mouvement

La Physique pour Tous

les ondes matérielles sont des ondes de probabilité

13/33

La dualité onde-corpuscule de la lumière a conduit de Broglie en 1924 à émettre l'hypothèse de son universalité et donc de proposer que les particules, comme les électrons soient dotées d'un caractère ondulatoire. Sachant que pour la lumière un traitement relativiste d'une particule sans masse conduit à la relation $\lambda = \frac{h}{p}$ entre longueur d'onde et quantité de mouvement (aussi nommée impulsion). En analogie pour la matière avec l'impulsion égale au produit de la masse par la vitesse $p = mV$ de Broglie a défini une longueur d'onde pour la matière $\lambda = \frac{h}{mV}$.

Les ondes associées à des particules sont des ondes de probabilité elles sont complexes $f(z)=u(x,y)+iv(x,y)$ avec $i^2=-1$. Elles n'ont pas de réalité physique seul leur carré en a un. Les ondes associées aux photons sont elles réelles, ce sont les ondes électromagnétiques.

Interaction lumière-matière

À l'échelle des atomes la matière à un comportement discontinu, l'énergie d'un électron ne peut avoir que certaines valeurs particulières.

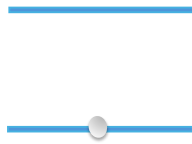


La barre horizontale « 0 » est un état où l'énergie d'un électron dans la matière est nulle, tandis qu'il possède une énergie potentielle « E » quand il est dans l'état du haut.

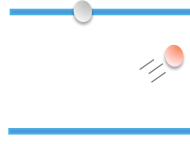
À l'échelle des atomes le comportement de la matière est discontinu, l'énergie d'un électron ne peut avoir que certaines valeurs particulières. Il en va de même dans la matière. Sur la figure ci-dessus, la barre horizontale marquée « 0 » symbolise l'état d'énergie le plus bas pour un électron dans la matière et « E » une niveau d'énergie positive permis.

Interaction lumière-matière

Absorption



Émission

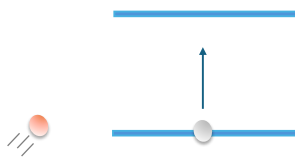


La Physique pour Tous

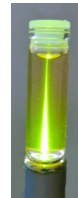
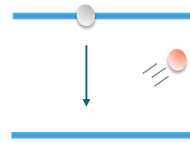
15/33

Interaction lumière-matière

Absorption



Émission



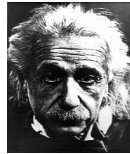
La Physique pour Tous

16/33

On distingue deux processus fondamentaux dans l'interaction de la lumière avec la matière.

- Absorption : un photon pénétrant la matière disparaît en transférant son énergie à un électron si $h\nu = E$. L'équivalent dans la matière de l'effet photoélectrique.
- Émission : un électron dans l'état d'énergie E retombe sur son niveau fondamental en transférant son énergie à un photon $h\nu = E$. Un effet qui correspond à la phosphorescence.

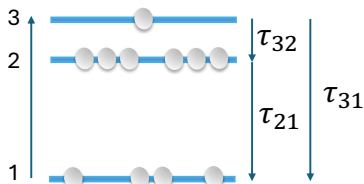
Émission stimulée



Albert Einstein
1879 - 1955

En 1917, Einstein, dans le cours de ses travaux sur l'interaction lumière-matière, est amené à introduire un troisième mécanisme de transfert d'énergie entre photons et électrons. Dans un système où un électron se trouve dans un état excité d'énergie E , l'arrivée d'un photon résonnant ($h\nu = E$) avec l'énergie potentielle de l'électron déclenche la chute de cet électron sur son niveau fondamental et un photon jumeau du photon incident est émis. Les deux photons émergents ont strictement les mêmes propriétés : même direction et sens de propagation, même énergie, même polarisation. Ce mécanisme est un mécanisme d'amplification de la lumière.

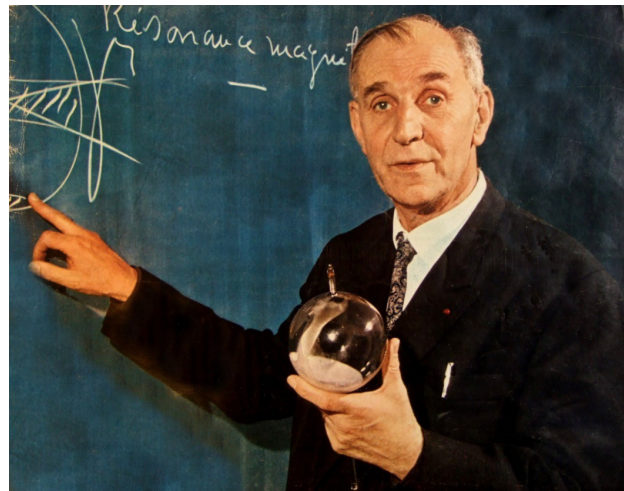
Pompage optique



$$\tau_{32} \gg \tau_{31}$$

$$\tau_{21} < \tau_{31}$$

Inversion de population



Alfred Kastler, 1902 (Guebwiller) - 1984

En 1958, Alfred Kastler démontre la possibilité d'inverser optiquement une population d'électrons

18/33

Afin de pouvoir utiliser l'émission stimulée pour amplifier de la lumière, il faut disposer d'un milieu dans lequel une importante population d'électrons se trouve dans un état d'énergie supérieure à celle d'une population sur un niveau d'énergie inférieure. Cette disposition ne peut pas être obtenue dans un système à 2 niveaux car le niveau excité se vide aussi rapidement qu'il peut être peuplé. Il faut au minimum un système à 3 niveaux comme indiqué sur la figure ci-dessus. Une source extérieure d'énergie (lumière, décharge électrique, réaction chimique) transfère rapidement des électrons du niveau 1 au niveau 3. Ces électrons doivent descendre très rapidement sur le niveau 2 en battant de vitesse la retombée sur le niveau fondamental 1. À condition que les électrons du niveau 2 ne se désexcitent pas trop rapidement on peut alors obtenir une inversion de population entre les niveaux 1 et 2.

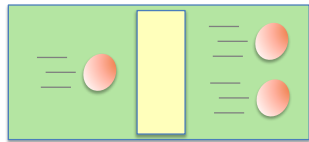
Alfred Kastler est né à Guebwiller en 1902. Physicien des atomes, il obtint le prix Nobel de Physique en 1966 pour ses travaux sur l'inversion de population. L'inversion de population est un ingrédient essentiel au fonctionnement des

lasers car il permet l'émission stimulée à grande échelle.

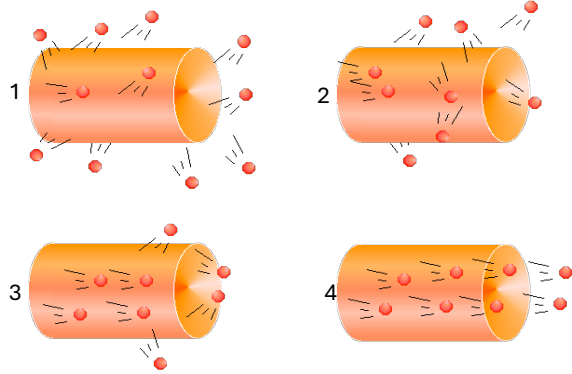
Alfred Kastler était un expérimentateur fondamental qui s'intéressait aux mécanismes d'interaction de la lumière avec la matière. Bien que nommé « père du laser » par la presse française, il a toujours rejeté cette appellation. Il n'en reste pas moins que ses travaux ont été nécessaires à la compréhension profonde du fonctionnement des lasers.

J'ai eu le plaisir de suivre son cours de thermodynamique en 1967-1968 et de le côtoyer durant la semaine des prix Nobel de Lindau en 1972.

Amplification de la lumière par émission stimulée



Milieu en inversion de population



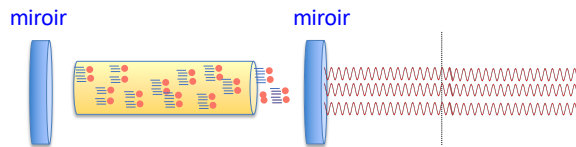
Fluorescence stimulée

La Physique pour Tous

19/33

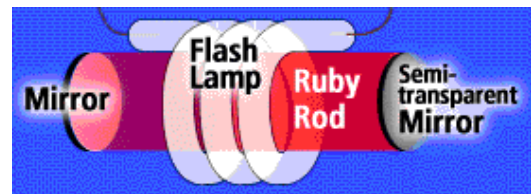
Mécanisme de l'amplification de lumière par émission stimulée. *Laser = Light amplification by Stimulated Emission Radiation.*

Dans un milieu en inversion de population de forme allongé, tout photon émis spontanément depuis le niveau d'inversion est multiplié exponentiellement lors de sa propagation dans le milieu. Un photon spontané à une extrémité du milieu se propageant selon son axe subira l'amplification la plus forte possible et provoquera une surintensité de la lumière émise dans l'axe, on parle de fluorescence stimulée.



Les ondes émises ont la même fréquence, la même direction, elles sont en phase, elles ont la même polarisation. L'émission est dite cohérente.

Amplification lumineuse par émission stimulée



En plaçant le milieu en inversion de population entre deux miroirs le processus d'amplification est multiplié par un facteur considérable et après un temps très court tous les photons se propagent selon l'axe du milieu. Un des deux miroirs laisse passer une fraction de la lumière (Quelques %) sous la forme d'un faisceau unidirectionnel de lumière de mêmes fréquence, phase et polarisation. Le laser est né.



Le laser est le résultat d'une compétition féroce entre de grands labos industriels et le monde académique.

**Mai 1960
premier laser**

T H Maiman



21

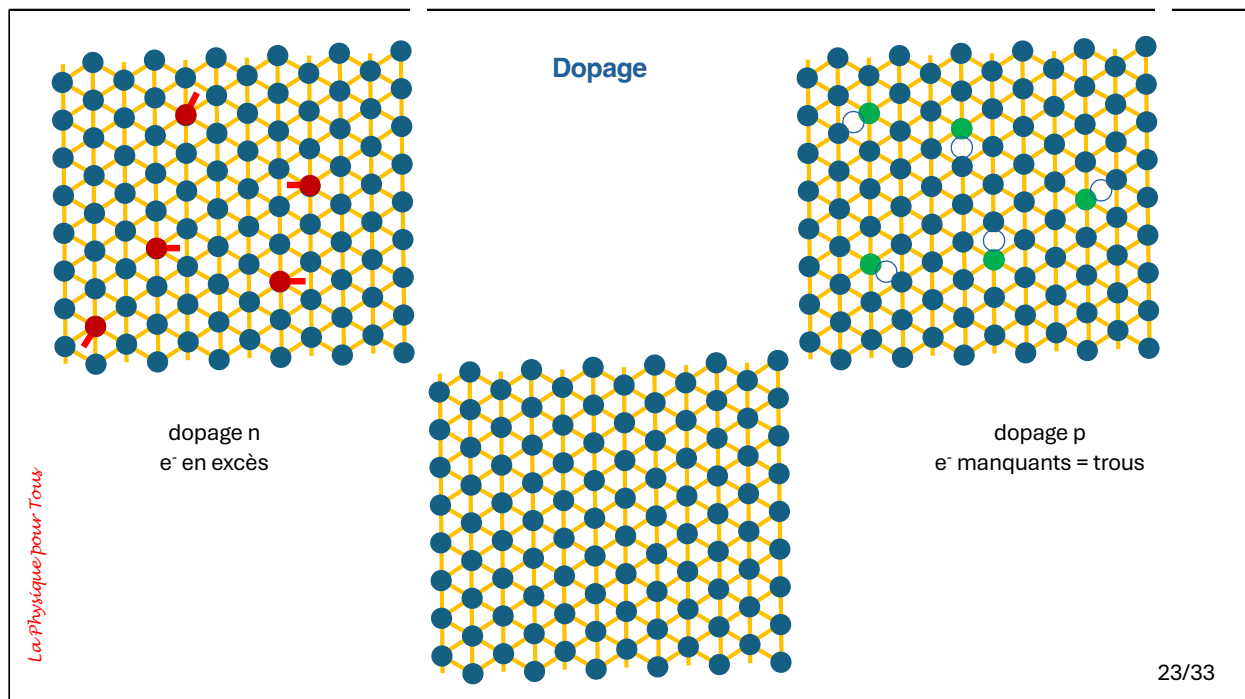
21/33

Le premier laser a été réalisé dans les laboratoires de la compagnie Hughes Aircraft et présenté en 1960, par Theodor Maiman. Maiman a réalisé le premier laser fonctionnel en utilisant un cristal de rubis comme milieu actif et une lampe flash pour stimuler les atomes dans le cristal. Ce laser à rubis émettait une lumière rouge intense et cohérente à la longueur d'onde de 694 nm.

Le rubis est un cristal d'alumine Al_2O_3 dans lequel des impuretés chrome sont dissoutes à proportion de 0,05% dans les expériences de Maiman. Les niveaux énergétiques des atomes de chromes forment un système à 3 niveaux permettant le pompage optique. Une lampe flash à décharge réalise l'inversion de population dans le cristal. L'interféromètre était constitué par les deux faces extrêmes du cristal polie de manière à être parfaitement parallèles ; l'une des faces était couverte d'une couche d'aluminium réfléchissant presque 100% de la lumière tandis que l'autre était partiellement transparent à hauteur de 5% pour laisser sortir le faisceau laser.

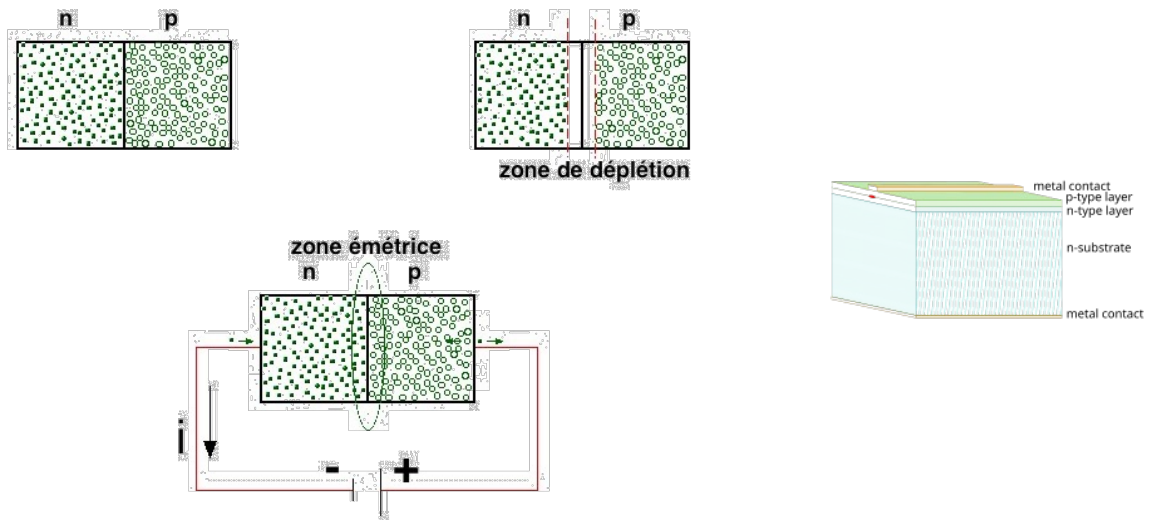
Un milieu laser à 3 niveaux est moins efficace qu'un milieu à 4 niveaux, c'est pourquoi le laser à rubis ne peut fonctionner qu'en mode impulsionnel.

télécommunications optiques



Les semiconducteurs, ainsi nommé à cause de leur forte résistance au passage d'un courant électrique sont, discrètement, la base même de notre civilisation. À l'état pur ils sont isolants, mais l'apport de très peu d'impuretés dans leur réseau les rend conducteur. Si l'impureté comporte un électron de plus que le nombre de liaisons d'un atome avec ses voisins, un électron libre de participer à un courant électrique est disponible. Si l'impureté compte un électron de moins que les atomes du cristal, un « trou » se forme avec une charge positive due à la charge d'un proton du noyau qui n'est pas compensée. injecter des électrons permet de combler des trous qui se reforment d'une impureté à la suivante.

Light Emitting Diode, LED

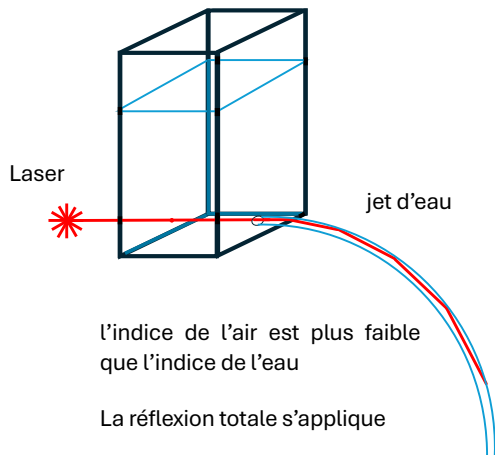


La Physique pour Tous

24/33

Lorsque l'on accole un semiconducteur de type « n » à un semiconducteur de type « p », les électrons excédentaires de la zone n combent les trous de la zone p à l'interface entre les deux, créant une zone sans charge. En appliquant une tension telle que les électrons et les trous s'annihilent au niveau de l'interface on peut, avec les bons matériaux obtenir une zone émettrice de lumière pouvant servir de milieu de gain pour une cavité laser. La cavité Fabry-Pérot des lasers à semiconducteur est obtenue par un simple clivage du cristal qui produit des faces parallèles suffisamment réfléchissantes.

Guidage optique



La Physique pour Tous

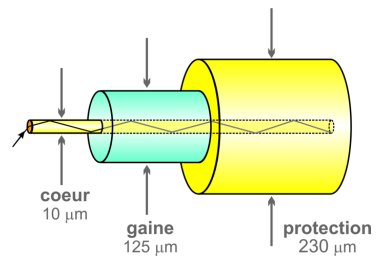


Fontaine lumineuse

25/33

Si on éclaire un jet d'eau de l'intérieur, si le rayon de courbure du jet n'est pas trop grand, les rayons lumineux se réfléchissent sur le dioptre eau-air sous un angle qui n'admet que la réflexion totale. Dans cette condition le jet d'eau « guide » les rayons lumineux.

Fibre optique



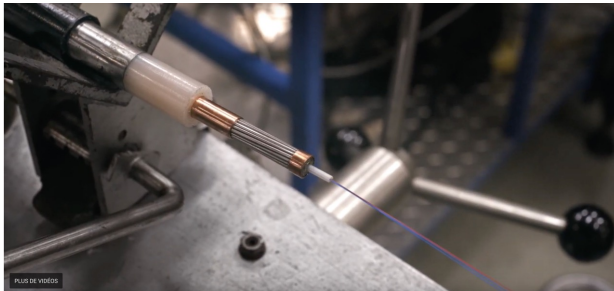
La réflexion totale est le mécanisme de propagation de la lumière dans une fibre optique

Il en est de même dans les fibres optiques.

MAREA, dernier câble optique transatlantique

MAREA : mise en œuvre en 2017
Relie la Virginie à l'Espagne (6600 km)

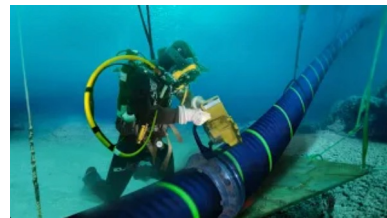
117 amplificateurs espacés de 56 km



La Physique pour Tous



© : Telxius



27/33

Le plus long câble tout optique

SEA-ME-We-3
39 000 km



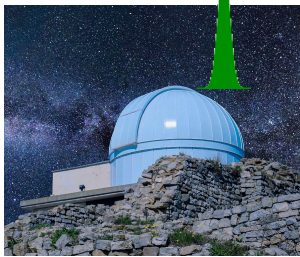
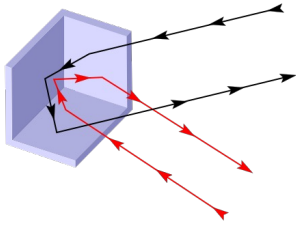
La Physique pour Tous

© : Telegeography

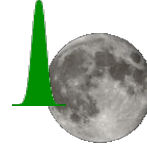
28/33

applications spectaculaires des lasers

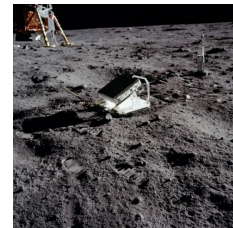
Mesure de la distance de la Terre à la Lune



La Physique pour Tous



D



catadioptrés Appolo 11

$$D = c.T \sim 300\,000 \text{ km}$$

$$T \sim 1 \text{ s}$$

30/33

On peut effectuer une mesure de la distance Terre-Lune par télémétrie laser en envoyant une impulsion laser (un flash) se réfléchir sur les miroirs catadioptriques déposés sur notre satellite par les Russes et les Américains. La distance de la terre à la Lune varie de 350 000 km à 400 000 km. Pour un faisceau d'environ 30 cm de diamètre, le diamètre de la tache sur la Lune n'est que de 6 km. Sur les milliards de photons contenus au départ dans les impulsions seuls quelques dizaines reviennent à la source, cela suffit néanmoins à la mesure de la distance Terre-Lune avec une précision de 1 à 2 mm ! On sait ainsi que la Lune s'éloigne d'environ 3,8 cm par an ! La durée des impulsions utilisées est de l'ordre d'une dizaine de nanosecondes (milliardièmes de secondes).

Le projet VIRGO

Advanced Virgo

West End Test Mass

West arm, 3km

North Arm, 3km

Input Test Masses

Beam Splitter

Power Recycling Mirror

Input Mode Cleaner

Laser source

SR lens

Squeezed Vacuum Injection

Detection

Virgo 14 août 2017

Normalized Amplitude

Time [s]

σ_{noise}

CC BY-SA 4.0

31/33

La physique pour Tous

L'instrument Virgo est la combinaison d'un interféromètre de Michelson dont les deux bras sont un interféromètre de Fabry-Pérot.

L'instrument Virgo est la combinaison d'un interféromètre de Michelson dont les deux bras sont un interféromètre de Fabry-Pérot. Chacun des bras de l'interféromètre est un tube à vide long de 3 km à l'intérieur desquels les faisceaux lasers font environ 300 aller-retours dans une cavité Fabry-Pérot. L'instrument permet de mesurer une variation de longueur des bras de 10^{-21} m beaucoup plus petite que la taille d'un proton. Les miroirs sont des blocs de silice de 42 kg suspendu par des fils de silice. Toute variation de longueur des bras se transforme en variation d'intensité lumineuse à hauteur du détecteur. VIRGO et LIGO ont ouvert une toute nouvelle forme d'astronomie : l'astronomie gravitationnelle.

Cette expérience vérifie très largement celle de Michelson et Morley. Les corrections de rotation et de translation de la Terre dans la composition des vitesses seraient largement plus grandes que les signaux mesurés si la vitesse de la lumière n'était pas un invariant absolu.



Vue aérienne de l'instrument VIRGO, situé en Italie.

Toujours plus gros



33/33

L'**Extreme Light Infrastructure - Nuclear Physics (ELI-NP)**, situé près de Bucarest, en Roumanie, est l'un des projets scientifiques les plus avancés en physique nucléaire et photonique. Cet instrument est conçu pour produire des faisceaux laser ultra-intenses et des rayons gamma de haute énergie, permettant des expériences pionnières en physique fondamentale et appliquée. ELI-NP explore les interactions entre la lumière et la matière à des intensités extrêmes, avec des applications potentielles dans la médecine, la science des matériaux et la sécurité nucléaire.

L'instrument est capable de produire des impulsions de lumière d'une puissance de 10^{23} à 10^{24} W/cm², en régime femtoseconde à des longueurs d'onde du proche infra-rouge entre 800 et 1030 nm. Une de mes idées de traitement des déchets nucléaires par laser, abordée dans la deuxième moitié des années 1990 y a été reprise.



À suivre ...

Charles.Hirlimann@ipcms.unistra.fr

Charles@Hirlimann.net



La Physique pour Tous

