

LA LUMIÈRE

- **sa nature**
- **la lumière blanche**
- **lois de la spectroscopie**
- **spectre du corps noir**
- **quelques applications en astrophysique**

Bernard DELLA NAVE

S.A.L. 18.11.2011

Introduction

I Nature de la lumière

Historique :

Antiquité Démocrite, Aristote,
Platon,

XVII^{ème} et XVIII^{ème} Newton,
Huyghens

XIX^{ème} siècle Fresnel, Young,
Maxwell théorie ondulatoire :

diffraction, interférences

XX^{ème} siècle et la mécanique quantique

Planck, Einstein, mécanique quantique,
théorie corpusculaire effet
photoélectrique

la mécanique ondulatoire Louis de
Broglie

la théorie de l'électrodynamique
quantique

II La lumière blanche

-décomposition

-recomposition

-couleur et longueur d'onde

-spectre continu

III Lois de la spectroscopie : lois de Kirchhoff et Bunsen

1^{ère} loi

2^{ème} loi

3^{ème} loi

IV Le corps noir

-définition et validité du modèle

-rayonnement du corps noir

-loi de Planck

-loi de Wien

-loi de Stefan

V Applications en astrophysique

Conclusion

Bibliographie

La gravitation, les faisceaux de particules et la lumière sont les quelques liens qui nous unissent aux objets de l'Univers.

Que nous apprend la lumière ? Quelles sont les méthodes et les moyens utilisés pour déchiffrer les messages que transporte la lumière, infatigable messenger ?

Allons nous promener pendant quelques instants sur les Chemins de la Lumière.

I. La nature de la lumière

De quoi est faite la lumière ?

L'Homme s'est longtemps posé la question de la nature de la lumière.

Deux conceptions se sont longtemps opposées : la **théorie corpusculaire** et la **théorie ondulatoire**.

Trancher fut longtemps difficile parce que certains faits faisaient pencher d'un côté tandis que d'autres étaient beaucoup plus faciles à interpréter de l'autre.

Très tôt, la lumière est assimilée à un mouvement de projectiles, qu'ils soient émis par les corps lumineux pour **DÉMOCRITE** (460-370 av. J.C.), ou qu'ils soient émis par l'œil pour **EUCLIDE** (III^{ème} siècle av. J.C.).

Chez **PLATON** (428-348 av. J.C.), on trouve même une curieuse situation intermédiaire, rencontre de 2 particules, l'une émise par l'œil, l'autre par l'objet observé.

Il semble que l'idée de la nature ondulatoire de la lumière soit clairement affirmée pour la première fois par les franciscains anglais

Robert GROSSETESTE (1170-1253), et

Roger BACON (1214-1294).

Ce dernier étudie la réflexion, notamment sur les miroirs sphériques.

La physique, au sens moderne du terme, naît avec **GALILÉE (1564-1642)**.

Il décrit des méthodes de mesure de la vitesse de la lumière mais la nature même de la lumière ne semble pas trop le préoccuper.

KEPLER (1571-1630) est connu pour les lois de la mécanique qu'il établit.

Il accorde une grande importance au rayon lumineux si bien qu'on peut supposer qu'il penche plutôt pour la nature corpusculaire de la lumière.

Mais lorsqu'il étudie la formation d'une image à l'aide d'une lentille, il envisage le problème de façon ondulatoire.

DESCARTES (1596-1650) fait connaître les lois de la réfraction établies par **SNELL (1591- 1626)**.

Mais ses théories de la lumière sont confuses et pleines de contradictions. Il semble que la notoriété de l'écrivain philosophe leur ait donné une importance excessive.

Pour lui, en effet, la lumière résulte de frottements entre tourbillons qui font naître de la lumière qui se propage avec une vitesse infinie. Le XVII^{ème} siècle aura beaucoup de mal à se débarrasser des tourbillons de **DESCARTES** ; ce sera l'objet d'un des premiers écrits de **NEWTON**.

Sur le plan expérimental, Isaac NEWTON (1642-1727) étudie la décomposition de la lumière par un prisme.

Il pense que la lumière est constituée de corpuscules qui se propagent plus vite dans un milieu transparent que dans le vide.

L'hypothèse de la nature ondulatoire lui paraît fantaisiste. Pourtant les expériences qu'il réalise par exemple les anneaux d'interférences plaident plutôt en faveur de la seconde.

Mais il préfère compliquer sa théorie corpusculaire, et tente en vain, d'interpréter des phénomènes de nature ondulatoire avec des corpuscules lumineux.

La théorie de NEWTON va résister un siècle. Puis la théorie ondulatoire va revenir sur le devant de la scène.

Le médecin anglais **Thomas YOUNG (1773-1829)** réalise une série d'expériences dont celle, célèbre, qui porte son nom.

Augustin FRESNEL (1788-1827) est l'auteur d'une théorie complète de la lumière. Il est un des premiers physiciens qui se spécialisent réellement en ne s'intéressant qu'à un seul domaine. Sa théorie du vecteur lumineux est impressionnante.

Au milieu du XIX^{ème} siècle, la théorie ondulatoire de la lumière est solidement installée. Les couleurs sont interprétées en termes de longueur d'onde.

Vers 1850, la nature de la lumière semble comprise.

Les physiciens vont évidemment chercher à en savoir plus, notamment sur les phénomènes d'émission et d'absorption.

La connaissance de ces derniers va permettre d'expliquer, au moins en partie, la couleur des corps.

On doit au génie de **MAXWELL (1831-1879)** la compréhension fine des phénomènes ondulatoires.

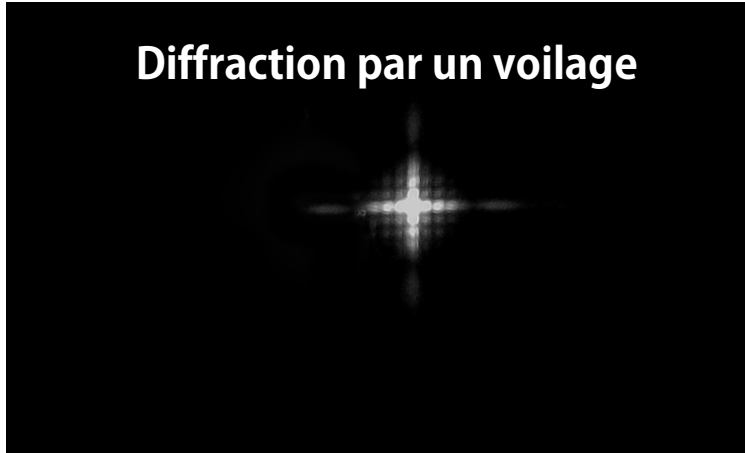
Les célèbres équations, qui portent son nom, permettent d'identifier la grandeur qui se propage (un champ électromagnétique).

La lumière est considérée, définitivement et exclusivement, croit-on alors, comme une onde électromagnétique.

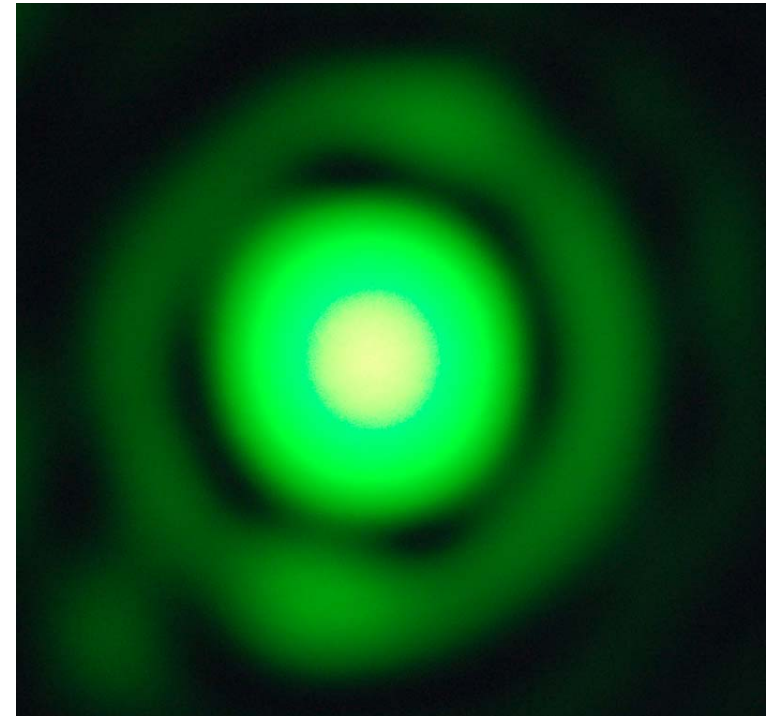
C'est l'apogée de la physique classique, nom qu'on donne en général à la physique des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles.

Figures de diffraction

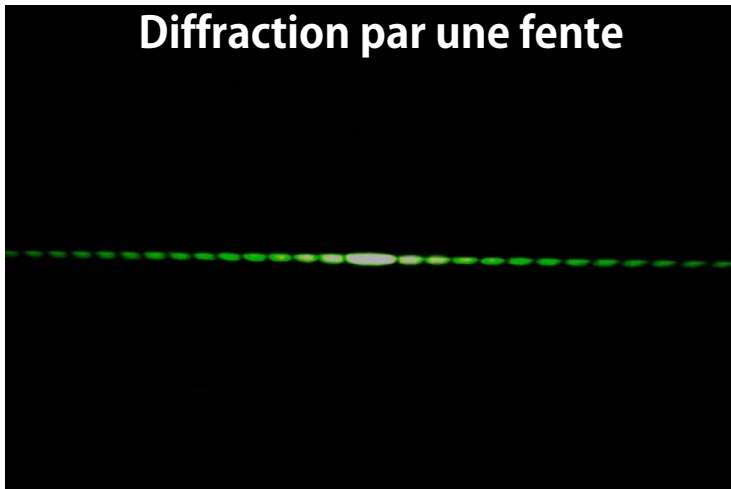
Diffraction par un voileage



Diffraction par un trou circulaire



Diffraction par une fente



La révolution quantique

Elle commence en 1900 avec **Max PLANCK** (1858-1947) qui propose le postulat de la quantification de l'énergie véhiculée par les ondes électromagnétiques.

Cette énergie ne peut s'échanger que par «quanta» (ou paquets d'énergie.)

PLANCK met du temps à admettre la nature corpusculaire de la lumière.

Il y est poussé par Albert **EINSTEIN** (1877- 1955) qui montre en 1905 que les lois de l'effet photoélectrique (arrachage des électrons d'un métal par la lumière) établies par Philip **LENARD** (1862-1947), ne peuvent raisonnablement s'interpréter que si l'on introduit un corpuscule, le photon dont l'énergie est :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Dans le domaine du visible, les photons les plus énergétiques donneront une sensation physiologique de lumière violette, alors que les moins énergétiques du spectre seront perçus comme une lumière rouge.

Le photon serait à la fois une onde et un corpuscule.

On sait, avec Louis DE BROGLIE, que toutes les particules présentent une telle dualité.

Il n'en reste pas moins que pendant longtemps cette dualité est inconfortable pour le physicien.

Les expériences d'interférences, notamment, sont particulièrement rebelles à une interprétation corpusculaire, même si on adopte un point de vue statistique, car on sait maintenant faire arriver les photons un par un.

Entre 1945 et 1950, Richard FEYNMAN, Sin Itiro TOMONAGA et Julian SCHWINGER développent la théorie de l'électrodynamique quantique (élaborée par Dirac) qui permet une interprétation cohérente des phénomènes ondulatoires et corpusculaires.

Dans son livre « Lumière et matière une étrange histoire » Richard Feynman (prix Nobel 1965) nous dit :

« [...] une période où l'intelligence des physiciens fut mise à rude épreuve : la lumière, disait-on, doit être considérée soit comme une onde, soit comme un ensemble de particules... selon les situations expérimentales. C'est ce qu'on a appelé la "dualité onde-corpuscule. »

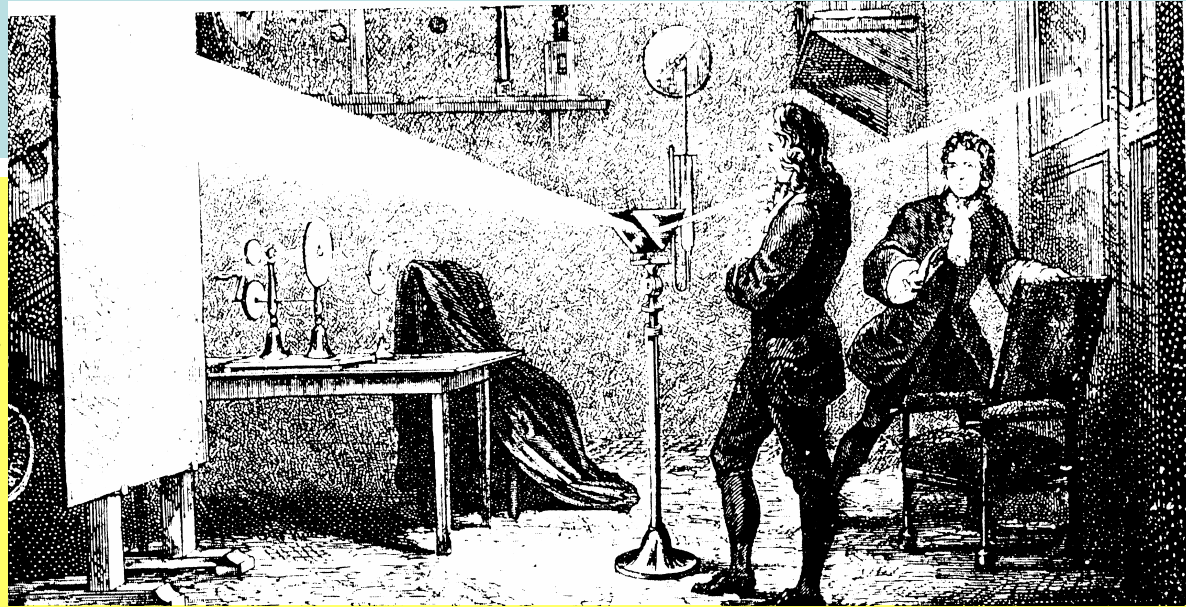
« [...] à cette époque la lumière était une onde les lundis, mercredis et vendredis, et un ensemble de particules les mardis, jeudis et samedis. Restait le dimanche pour réfléchir à la question. Mon intention ici est précisément de vous montrer comment ce mystère a finalement été élucidé. »

Lors d'une de ses nombreuses conférences , il déclare au public :

« Précisément, je me suis fixé comme objectif que vous restiez ici à m'écouter. Car, pour ne rien vous cacher, les étudiants non plus n'y comprennent rien. Pourquoi ? Tout simplement parce que je n'y comprends rien moi-même. Personne d'ailleurs n'y comprend rien. »

« La théorie de l'électrodynamique quantique nous fournit une description de la nature qui est absurde du point de vue du sens commun. Mais elle est en accord parfait avec l'expérience. J'espère donc que vous accepterez la nature telle qu'Elle est : absurde. »

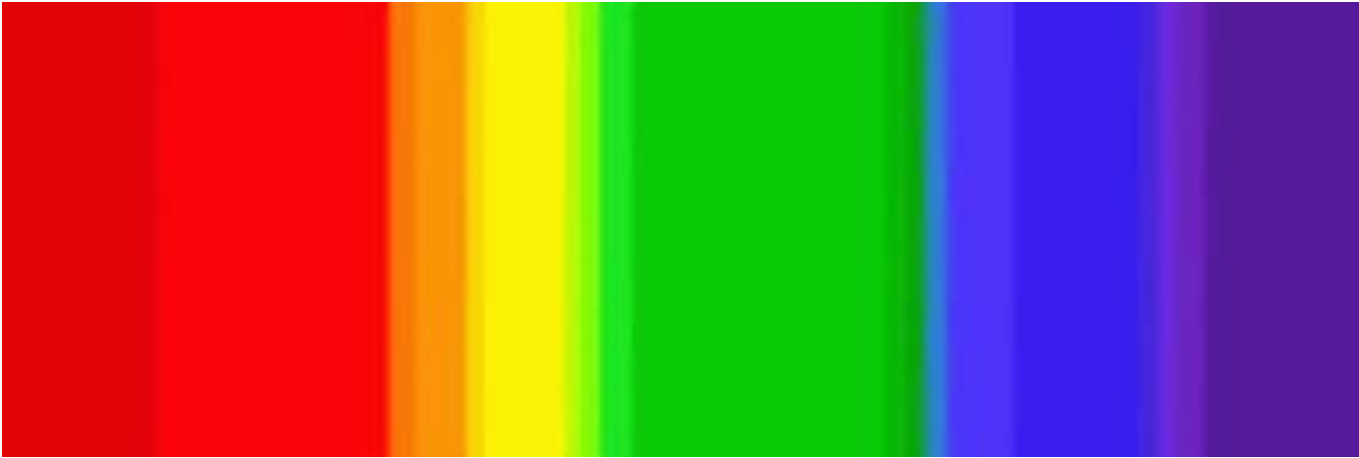
II. La lumière blanche



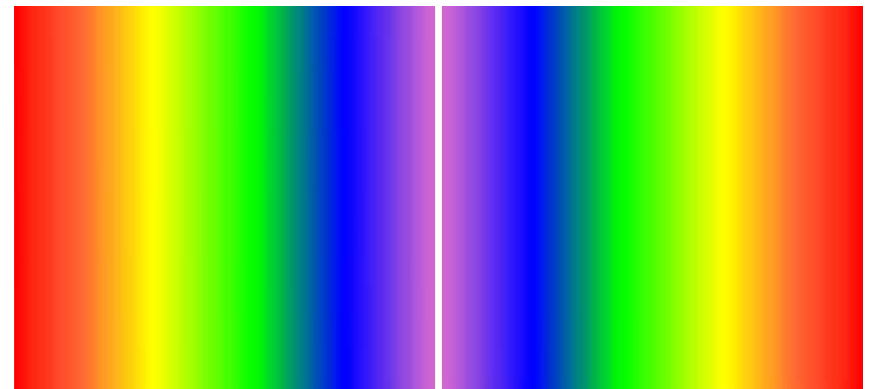
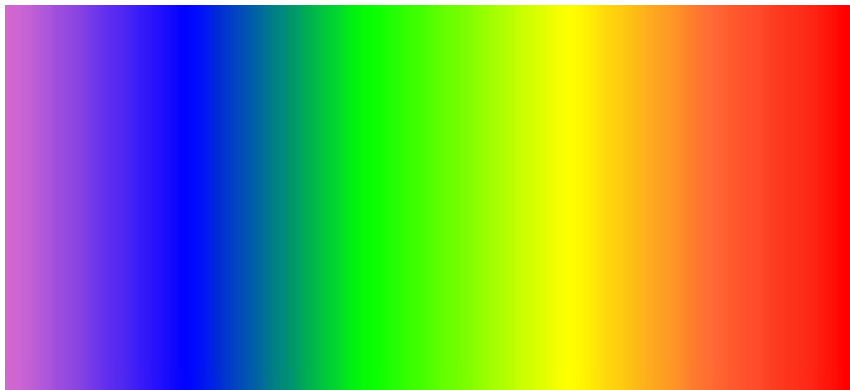
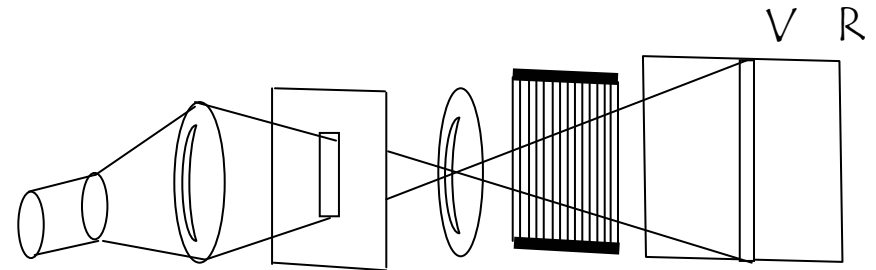
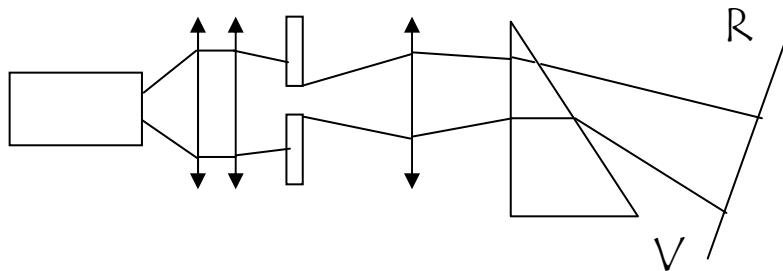
Expérience de Newton 1666
Isaac NEWTON est le premier
à donner une explication correcte
de la décomposition de la lumière blanche

- « Au début de l'année 1666, je me procurai un prisme de verre pour réaliser la célèbre expérience des couleurs. Ayant à cet effet obscurci ma chambre et fait un petit trou dans les volets pour laisser entrer une quantité convenable de rayons de soleil, je plaçai mon prisme contre ce trou pour réfracter les rayons sur le mur opposé. Ce fut d'abord très plaisant de contempler les couleurs vives et intenses ainsi produites. »
- La lumière est un mélange de lumières simples

Newton obtient un spectre continu dont les couleurs s'étalent du rouge au violet

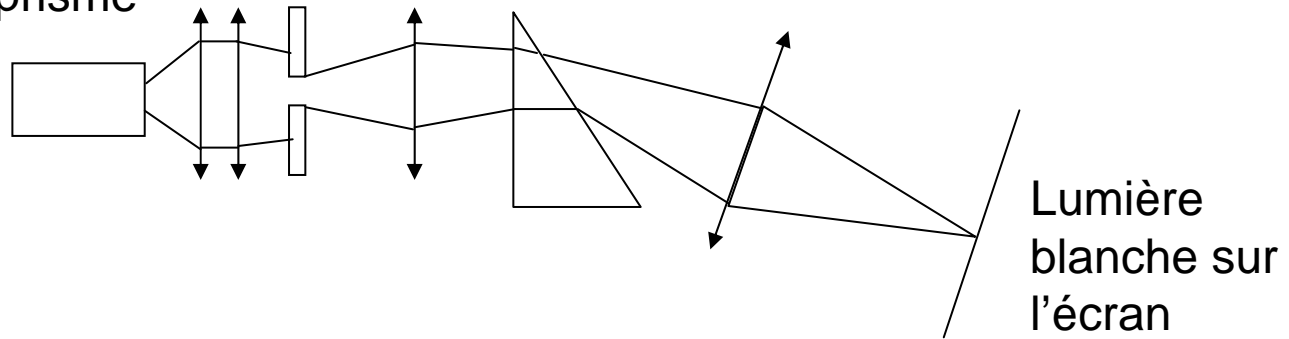


**Différents dispositifs permettant de décomposer la lumière blanche
à gauche, un spectroscopie à prisme et à droite un spectroscopie à réseau**

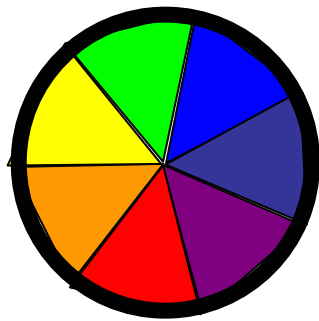


Newton réussit même à recomposer la lumière blanche en mélangeant les lumières colorées obtenues à l'aide d'un prisme. Pour ceci il utilise deux dispositifs

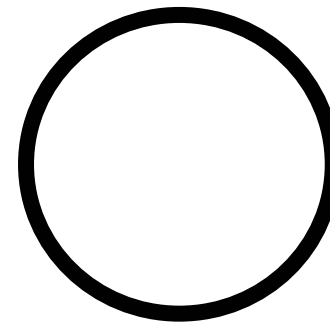
- Avec une lentille convergente qui va mélanger le faisceau coloré à la sortie du prisme



- A l'aide d'un disque, portant des secteurs colorés, en rotation rapide



Disque arrêté



Disque en rotation

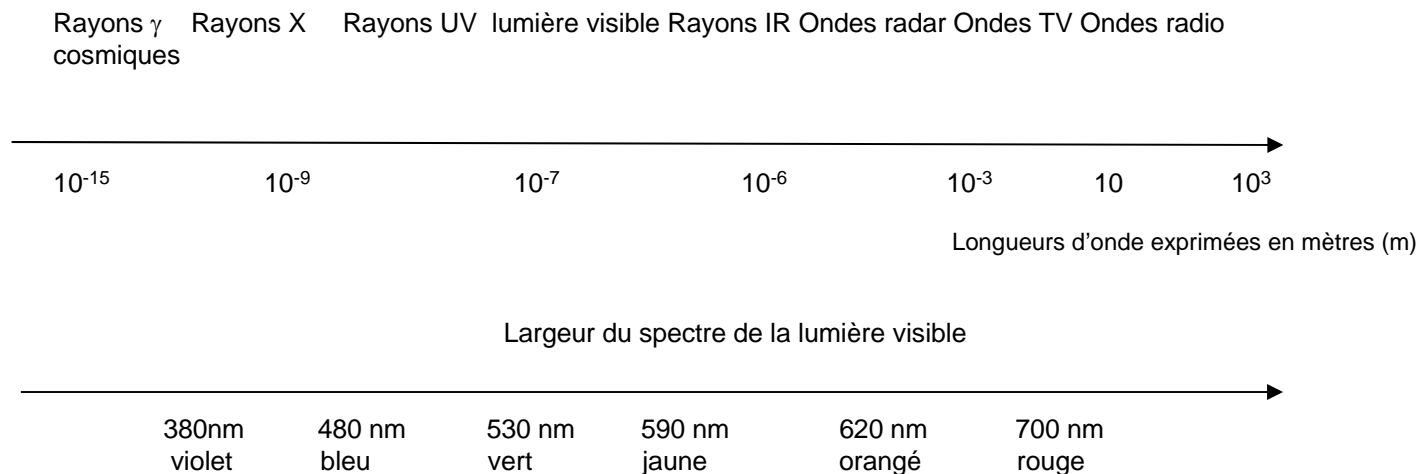
La lumière est constituée de particules les photons. Chaque photon est associé à une onde, elle-même est caractérisée par une longueur d'onde.

A chaque longueur d'onde correspond une sensation physiologique qui est la couleur de la lumière.

Le domaine des ondes électromagnétiques est très vaste puisqu'il s'étend des rayons γ cosmiques (de longueur d'onde de l'ordre de 10^{-15} m) jusqu'aux ondes radio dont les longueurs d'onde peuvent aller jusqu'à quelques kilomètres.

La lumière visible n'occupe qu'une fenêtre très étroite de 400 nanomètres à 800 nanomètres environ. Dans tout ce qui va suivre, chaque couleur d'un spectre de lumière sera associée à une longueur d'onde λ exprimée en nanomètres.

(1 nm = 1 milliardième de mètre soit $1. 10^{-9}$ m).



**III Lois de la spectroscopie :
lois de Kirchhoff et Bunsen**

En 1859, un savant allemand, Gustav Robert KIRCHHOFF en collaboration avec Robert Wilhelm BUNSEN son compatriote, propose trois lois concernant les spectres lumineux.

D'importants progrès ont été faits dans ce domaine depuis cette date.

Cependant, nous pourrions utiliser ces lois pour expliquer de manière simple un certain nombre de résultats.

LES TROIS LOIS FONDAMENTALES DE LA SPECTROSCOPIE

LES TROIS LOIS FONDAMENTALES DE LA SPECTROSCOPIE

LES TROIS LOIS FONDAMENTALES DE LA SPECTROSCOPIE

LES TROIS LOIS FONDAMENTALES DE LA SPECTROSCOPIE

LES TROIS LOIS FONDAMENTALES DE LA SPECTROSCOPIE

LES TROIS LOIS FONDAMENTALES DE LA SPECTROSCOPIE

LES TROIS LOIS FONDAMENTALES DE LA SPECTROSCOPIE

1ère loi

Spectres continus

Un gaz soumis à une pression élevée, un solide ou un liquide chauffés, émettent un rayonnement qui contient toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

Exemples : spectre du filament chaud d'une lampe à incandescence, spectre d'une étoile

Spectres de raies d'émission

Un gaz chaud, soumis à une pression faible, émet un rayonnement pour certaines couleurs bien particulières caractéristiques des atomes contenus dans le gaz

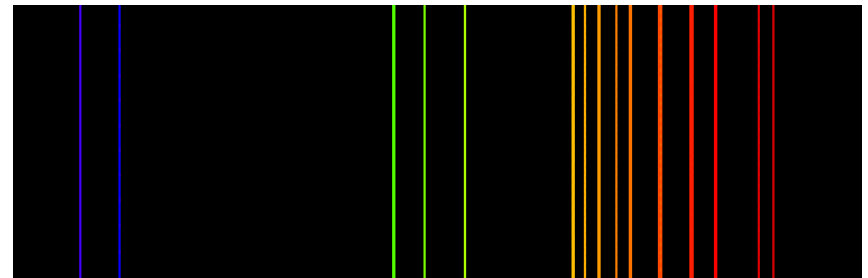
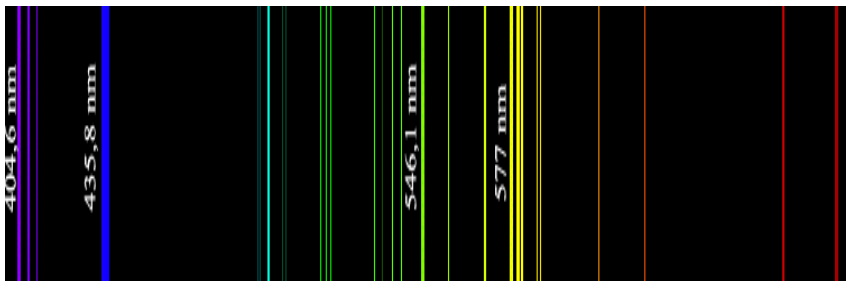
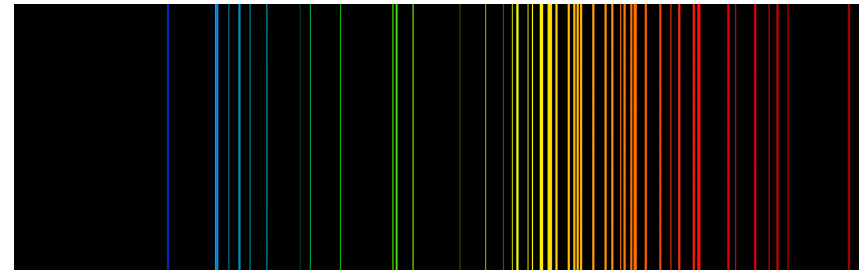
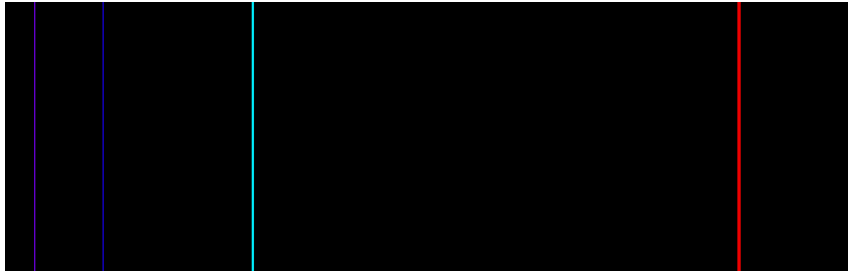
Le spectre obtenu présente des raies colorées appelées raies d'émission : c'est un spectre de raies d'émission.

Exemples : spectre d'une lampe au néon, spectre d'un tube fluorescent, spectre de la partie externe d'une étoile

Spectres atomiques

Hydrogène
Mercure (étalon)

Néon
Oxygène



3^{ème} loi

Spectres de raies d'absorption

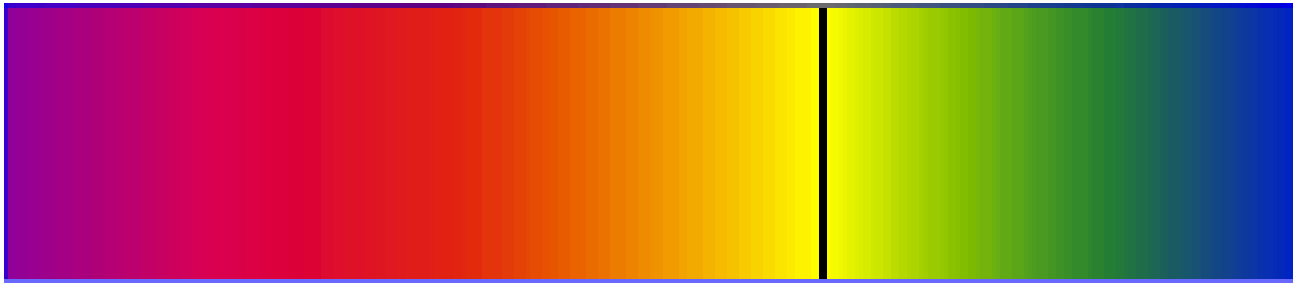
Un gaz froid, soumis à une basse pression, éclairé par une source de lumière blanche, absorbe certaines couleurs.

Ce gaz absorbe les mêmes couleurs qu'il émettrait s'il était chaud.

Un observateur, recevant la lumière transmise par ce gaz, voit un spectre qui présente des raies noires correspondant aux couleurs absorbées par le gaz. Le spectre est un spectre de raies d'absorption.

Exemples : spectre du sodium

Spectre d'absorption du sodium
Spectre d'émission du sodium



IV. Le corps noir

- En physique, un **corps noir** désigne un objet idéal totalement isolé dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température.

- En physique, un **corps noir** désigne un objet idéal totalement isolé dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température.
- Les parois de l'intérieur de l'enceinte émettent un rayonnement à toutes les longueurs d'ondes : théoriquement des ondes radio aux rayons X.

Cette émission est due à l'agitation des atomes. En effet, la température mesure l'agitation des atomes (ceux-ci " oscillent " autour de leur position). Ce faisant, chaque atome se comporte comme un dipôle vibrant (dipôle formé par le noyau et le nuage électronique), qui rayonne donc de l'énergie.

- En physique, un **corps noir** désigne un objet idéal totalement isolé dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température.
- Les parois de l'intérieur de l'enceinte émettent un rayonnement à toutes les longueurs d'ondes : théoriquement des ondes radio aux rayons X.

Cette émission est due à l'agitation des atomes. En effet, la température mesure l'agitation des atomes (ceux-ci " oscillent " autour de leur position). Ce faisant, chaque atome se comporte comme un dipôle vibrant (dipôle formé par le noyau et le nuage électronique), qui rayonne donc de l'énergie.

- En se réfléchissant de paroi en paroi, cette radiation se verra absorbée et réémise continuellement sur les parois internes du four, jusqu'à que l'objet atteigne l'équilibre thermique.

- En physique, un **corps noir** désigne un objet idéal totalement isolé dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température.
- Les parois de l'intérieur de l'enceinte émettent un rayonnement à toutes les longueurs d'ondes : théoriquement des ondes radio aux rayons X.

Cette émission est due à l'agitation des atomes. En effet, la température mesure l'agitation des atomes (ceux-ci " oscillent " autour de leur position). Ce faisant, chaque atome se comporte comme un dipôle vibrant (dipôle formé par le noyau et le nuage électronique), qui rayonne donc de l'énergie.

- En se réfléchissant de paroi en paroi, cette radiation se verra absorbée et réémise continuellement sur les parois internes du four, jusqu'à que l'objet atteigne l'équilibre thermique.
- La forme de ce spectre (c'est-à-dire la répartition de la quantité d'énergie en fonction de la longueur d'onde) est la signature d'un rayonnement d'origine thermique, s'appelle donc **spectre du corps noir**, et ne dépend que de la température du corps noir.

Loi de Planck

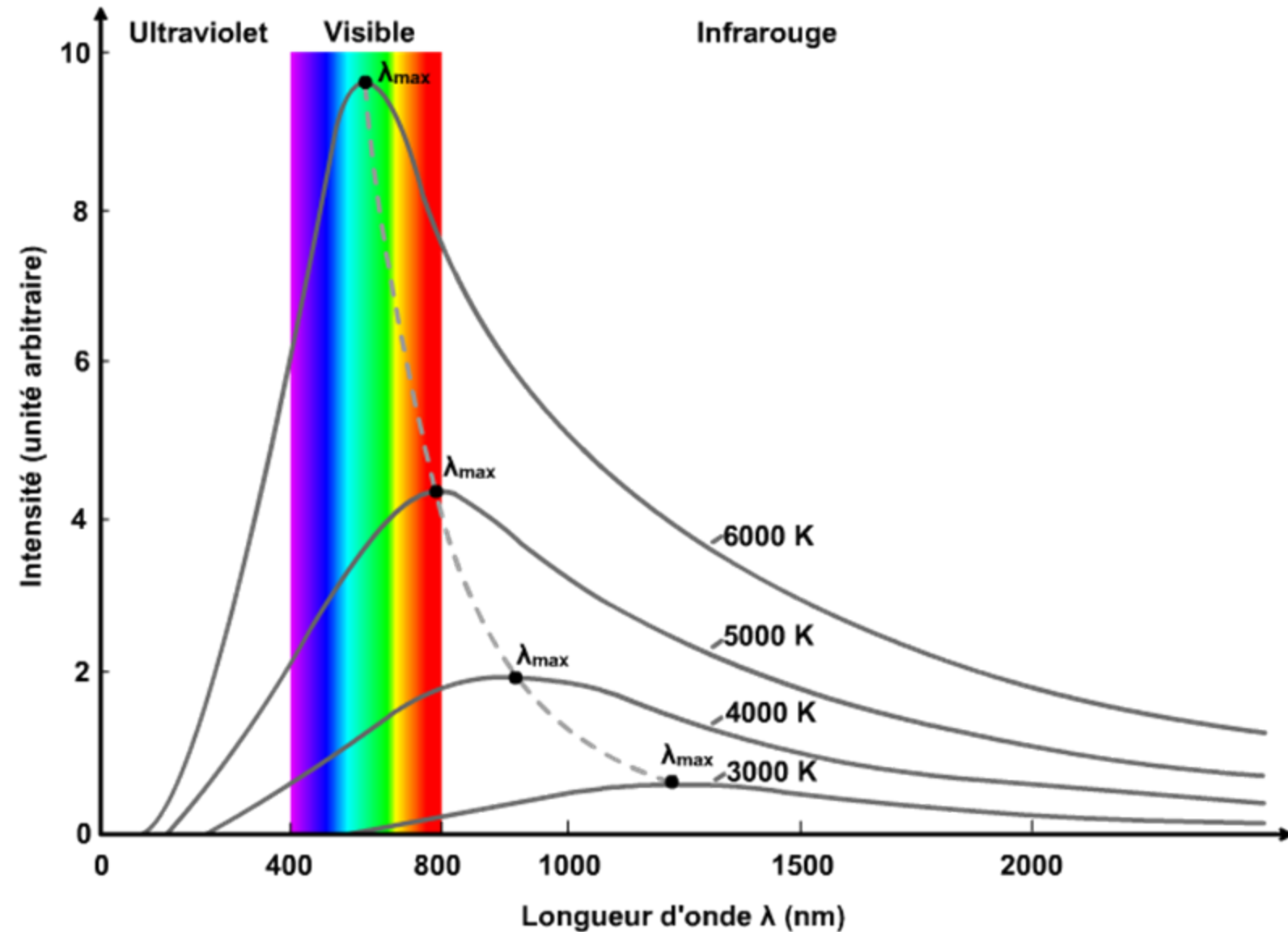
La luminance spectrale pour une longueur d'onde λ donnée (ou densité spectrale d'émission) du corps noir est donnée par la loi de Planck :

$$L_{\lambda}^{\circ} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}$$

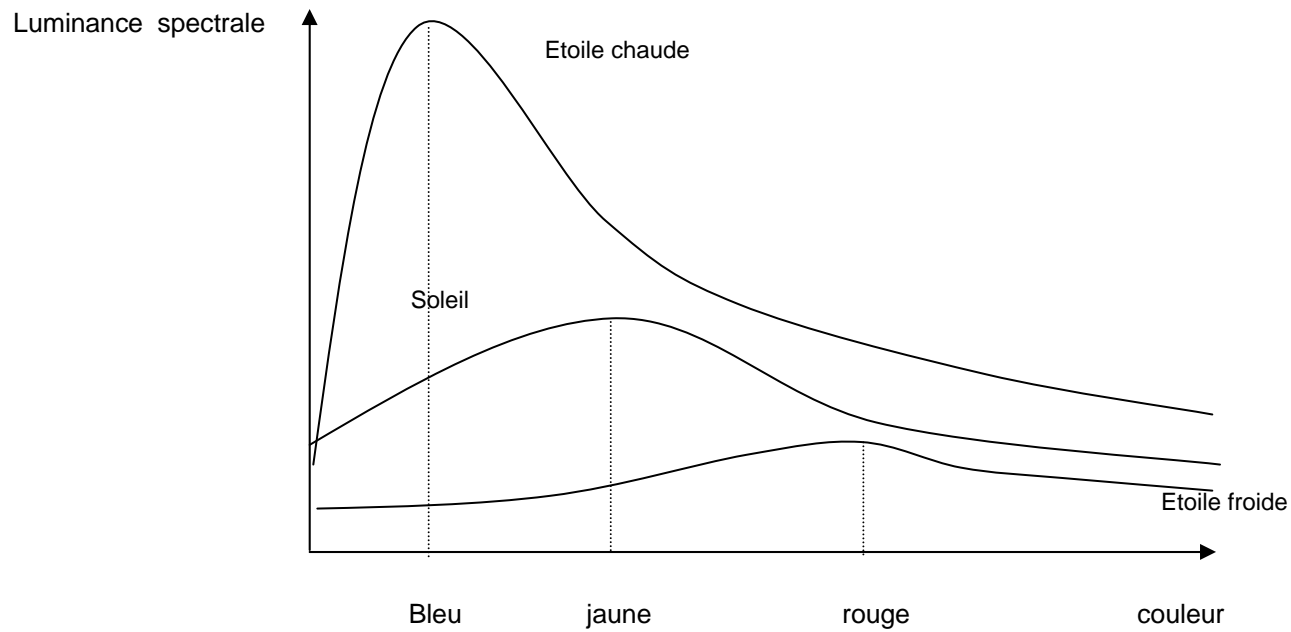
C'est une puissance rayonnée par unités d'angle solide, de surface et spectrale avec L_{λ}° en $W.m^{-2}.sr^{-1}.m^{-1}$.

où c est la célérité de la lumière dans le vide, h est la Constante de Planck et k_B est la constante de Boltzmann.

Spectre du corps noir



Le diagramme ci-dessous montre la répartition spectrale pour trois types d'étoiles, une froide, le Soleil et une étoile chaude



Ce qu'il convient essentiellement de retenir dans cette loi, c'est que les courbes décrivant la lumière spectrale de corps noirs à différentes températures (en fonction de la longueur d'onde) ont toutes la même forme et sont "emboîtées" les unes dans les autres.

On notera que la luminance d'un corps noir est d'autant plus grande que la température est plus élevée.

La loi de Planck montre également que le rayonnement du corps noir est le même dans toutes les directions : il est isotrope.

Réalisons le spectre de la lumière émise par le filament d'une lampe porté à différentes températures : de 3000°C passons graduellement à 600°C

La lumière émise par un corps (gaz fortement comprimé, liquide ou solide) dépend donc de la température à laquelle est porté ce corps

Loi de WIEN

Il existe une relation température-couleur de la lumière émise par un tel corps dans de telles conditions : c'est la loi de WIEN

$$\lambda_m \cdot T = 2900 \mu\text{m.K}$$

Un corps porté à très haute température rayonnera surtout dans le bleu, le violet et l'ultraviolet. Un corps porté à haute température apparaît blanc, car il rayonne dans toutes les couleurs. Un corps un peu moins chaud rayonnera surtout dans le jaune, le rouge et l'infrarouge.

Loi de Stefan

La puissance totale L (ou luminance) rayonnée par un corps noir dans toutes les longueurs d'onde et dans toutes les directions est proportionnelle à sa surface S du corps noir et à la quatrième puissance de sa température :

$$L = \sigma S T^4$$

$L : W, S : m^2, T : K, \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ u S.I.}$

V L'astrophysique utilise la spectroscopie pour

- évaluer la température de surface d'une étoile

$\lambda_m \cdot T = 2900 \text{ (}\mu\text{m.K)}$ loi de Wien

La spectrophotométrie indique que le maximum du spectre du Soleil est aux environs de 470 nm (0,470 μm).

Quelle est l'estimation de la température de surface du Soleil ?

$$T \simeq \frac{2900}{0,470} \simeq 6200K$$

Soit R le rayon du Soleil (supposé sphérique)

La loi de Stefan $L = \sigma S T^4$ devient :

$$L = 4 \pi R^2 \sigma T^4$$

La connaissance de L et de R permet de calculer T .

On obtient $T \simeq 5800K$

Cette valeur est légèrement différente de la précédente car le Soleil n'est un corps noir qu'en première approximation.

La puissance totale rayonnée par le Soleil est de $4 \cdot 10^{26}$ W.

$$T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}} \simeq \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 10^{26}}{4 \cdot \pi \cdot (6,96 \cdot 10^8)^2 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}}} \simeq 5800K$$

La spectroscopie permet aussi

- D'expliquer la couleur de certaines nébuleuses
- De mettre en évidence les éléments chimiques présents dans la partie externe d'une étoile, dans une nébuleuse ou dans l'atmosphère d'une planète
- De déterminer la masse d'un objet
- D'estimer une distance, une vitesse ...

En conclusion

La spectroscopie (étude des spectres de la lumière émise par les astres) et la photométrie (étude des quantités de lumière émise par ces corps) sont de puissants moyens d'étude de l'univers proche ou lointain.

Bibliographie

- La lumière et la matière : une étrange histoire (Richard Feynman)
- La nature de la physique (Richard Feynman)
- Méthodes de l'astrophysique (Lucienne Gouguenheim)
- Cours de physique générale :
thermodynamique (Georges Bruhat)
- Le chaos et l'harmonie (Trinh Xuan Thuan)
- Documents internet

FIN