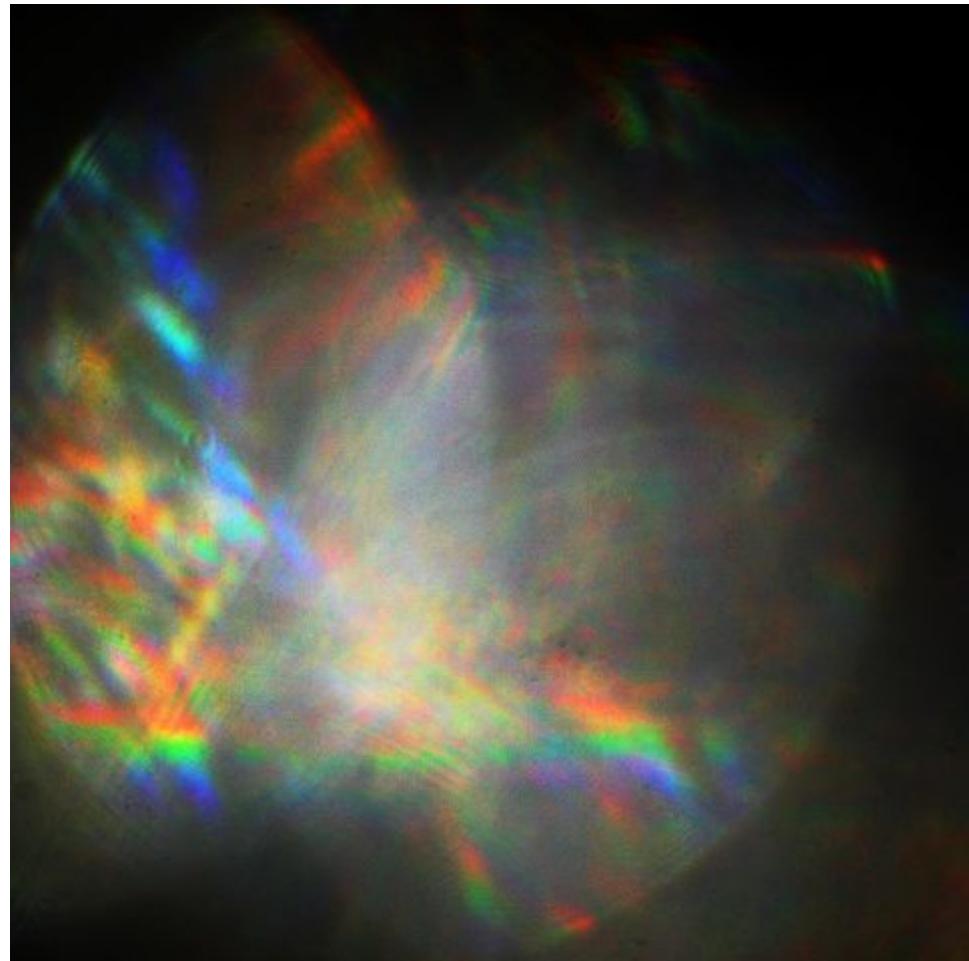


En Toute simplicité...

Physique



La lumière en couleurs

P2 : La lumière en couleurs

Malicia et Neurino sont deux amis qui aiment particulièrement discuter de sujets les plus variés, de la physique à l'économie en passant par les mathématiques, rien ne les arrête.

Malicia est jeune et curieuse futée, ses questions parfois inattendues permettent d'éclairer les sujets traités sous des angles surprenants. Elle joue le rôle du candide et n'a qu'une ambition : comprendre.

Neurino possède une plus grande expérience. Il aime transmettre ses connaissances, notamment à son amie Malicia. Il joue le rôle du professeur.

Nos deux compères, en toute simplicité et en toute complicité nous emmènerons explorer des sujets divers et toujours passionnantes

Le monde est mystérieux, nous sommes un mystère et l'homme pensant recherche inexorablement à percer le fonctionnement de son univers ! Il bâtit les théories les plus folles pour expliquer le monde et quand il pense avoir atteint un objectif de nouvelles découvertes viennent remettre tout en question.

La physique est l'une des sciences qui ébranle les esprits les plus ardus. De l'infiniment petit à l'infiniment grand, les lois de la nature rythment l'expansion des galaxies et la valse des électrons.

Bien sûr qui dit physique dit aussi mathématiques, les matheux pourront se faire plaisir mais, que les autres se rassurent, nos amis Malicia et Neurino développeront les conclusions des calculs dans ce qu'ils ont de plus remarquables sans torturer outre mesure vos méninges.

Partons à l'aventure et laissons la parole à **Malicia et Neurino**.

Aujourd'hui : **La Lumière**

Mais quelle est la nature de la lumière ?

Comment peut-elle se décomposer en différentes couleurs ?



La composition de la lumière

Malicia: Bonjour Neurino, as-tu vu ce splendide arc-en-ciel ?

Neurino: Bonjour Malicia en effet, c'est un spectacle magnifique

Malicia: Mais dis-moi Neurino, pourquoi faut-il que nous ayons simultanément la pluie et le soleil pour apercevoir un arc-en-ciel.

Neurino: C'est une question de décomposition de la lumière par les gouttelettes d'eau.

Malicia: La lumière est donc composée ! mais de quoi ?

Neurino: Nous savons depuis 1864 avec les travaux de James Clerk Maxwell que la lumière n'est autre qu'une onde électromagnétique, (voir cahier P3 : les ondes électromagnétiques) comme les ondes radio. Le soleil émet une lumière blanche, qui est en fait la superposition des différentes couleurs de l'arc-en-ciel.



Malicia: Je comprends, la lumière est donc composée de couleurs

Neurino: En effet et chaque couleur a une longueur d'onde.



Malicia: Longueur d'onde ??

Neurino: Oh ! excuse-moi, la lumière se propage dans le vide comme le ferait une vague, suite à l'impact d'un caillou à la surface de l'eau. La longueur d'onde est la distance qui sépare 2 sommets de l'onde.

Malicia: Et le nombre de sommets en 1 seconde est alors la fréquence. Est-ce la même notion que celle utilisée pour les radios comme par exemple 105.5 pour France info.

Neurino: Je reconnaissais là ta perspicacité, en effet c'est bien la même notion sauf que pour la radio FM les fréquences sont de l'ordre de 100 MHz (Mégahertz) soit pour France info 105.5 millions de sommets par seconde. Alors que pour la

P2 : La lumière en couleurs

lumière la fréquence est beaucoup plus élevée, soit de l'ordre de 10^{15} Hz soit 10 milliards de millions de fois par seconde.

Malicia: Oh là là, c'est énorme !!

Neurino: Et oui, et ce n'est pourtant qu'une toute petite partie du spectre des fréquences.

Malicia: Voilà autre chose ce n'est pas halloween.

Neurino: Le spectre est l'ensemble des fréquences électromagnétiques pour le visible, celles de notre arc-en-ciel vont de 3.7 milliards de millions à 10 milliards de millions de Hz.

Malicia: Dis- moi Neurino, pour revenir à nos vagues, quelle est alors la distance entre 2 sommets ?

Si nous sommes logiques, cela doit être la distance parcourue en une seconde divisée par la fréquence.



Neurino: En effet, soit plus simplement la vitesse de l'onde sur la fréquence

Malicia: Cela fait de très petites distances ?

Neurino: Oui, inférieures au micromètre, plus exactement de 300 nanomètres à 800 nanomètres pour le visible, car le spectre s'étend au delà du violet avec les ultraviolets et en deçà du rouge pour les infrarouges.

| 300nm | 400nm | 600nm | 700nm | 800nm |
|--------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| 10^{15} Hz | $7 \cdot 10^{14}$ Hz | $5 \cdot 10^{14}$ Hz | $4.3 \cdot 10^{14}$ Hz | $3.7 \cdot 10^{14}$ Hz |

Malicia: La vitesse par la fréquence, mais au fait à quelle vitesse va la lumière ?

Neurino: A près de 300 000 km/s dans le vide, c'est une des constantes de la physique que l'on appelle « c » pour célérité mais c'est une longue histoire...

La vitesse de la lumière

Malicia: Une constante ? Tu veux dire dans un lieu donné, car la vitesse de la lumière sera vue différemment par un voyageur dans un train qui allume sa lampe de poche et par un observateur fixe resté sur le quai de la gare qui regarde cette même lampe.

Neurino: Eh bien non... Pour les deux ce sera la même vitesse : c.

P2 : La lumière en couleurs

Malicia: Je ne comprends pas la vitesse vue par l'observateur fixe devrait être : c plus ou moins la vitesse du train selon le sens !

Neurino: non, je te confirme pour les deux c'est c.



Malicia:

Neurino: Je comprends ton désarroi mais cela est la base de la relativité restreinte, dont nous reparlerons si tu veux (voir cahier P5 : la relativité restreinte).

Malicia: Mais comment a-t-on pu vérifier cela ?



Neurino: Ce sont deux scientifiques américains

Albert Michelson et Frank Morley qui en 1887 en menant une expérience sur l'existence de « l'éther » qui vérifieront cette réalité physique.

Malicia: L'éther, cela me rappelle une odeur très forte.

Neurino: Ici il s'agit du support « supposé » qui aurait permis la propagation des ondes électromagnétiques. Revenons à notre expérience, elle consiste à comparer la vitesse de la lumière sur un mobile se déplaçant dans le sens de la lumière puis dans le sens perpendiculaire au déplacement.

Malicia: Je vois, comme cela l'observateur sur le quai devrait voir dans le sens du train la vitesse de la lumière plus la vitesse du train et dans l'autre il ne devrait voir que la vitesse de la lumière.

Neurino: Tu es prodigieuse, tu m'étonneras toujours.

Malicia: Euh... Merci, mais sachant que la vitesse de la lumière est de 300 000 km par seconde, il faut un mobile particulièrement rapide pour obtenir des résultats significatifs ?

Neurino: Ne connais-tu pas un mobile qui circule à 30 km par seconde.

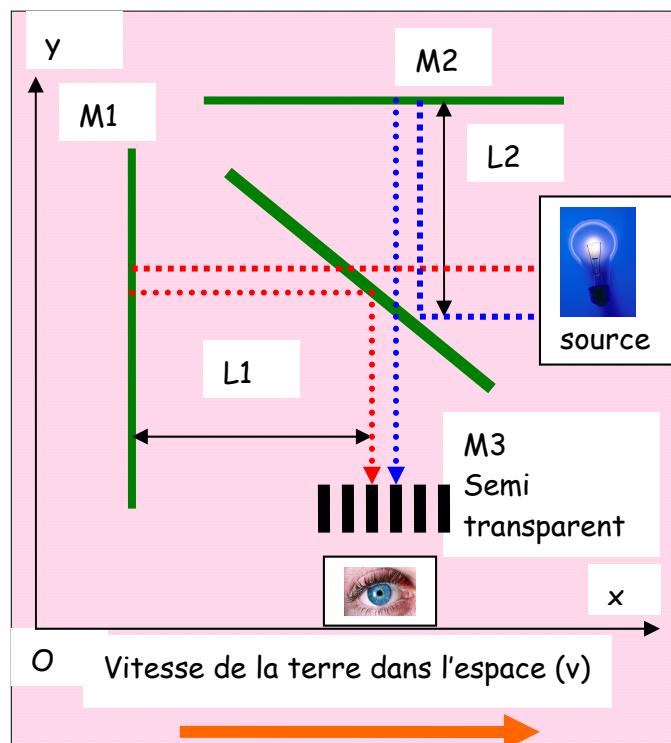
Malicia: Pas vraiment.

Neurino: Tu as les pieds dessus !

Malicia: Notre Terre mais c'est bien sûr...

Neurino: Reprenons l'expérience de Michelson et Morley :

Une source lumineuse monochromatique (une seule fréquence) se divise en 2 rayons respectivement réfléchis par les miroirs M_1 et M_2 , avant de rejoindre la cible. L'axe Ox est orienté suivant la vitesse v de la terre dans l'espace. Il se produit sur la cible des franges d'interférence



Malicia: C'est quoi, des franges d'interférence ?

Neurino: Comme la lumière est de nature ondulatoire et que les chemins L_1 et L_2 sont différents, il y a à l'arrivée addition des deux rayons. Quand les maxima sont en phase, il y a une frange claire et quand les deux rayons sont en opposition ils s'annulent et sans lumière la frange est sombre.

Malicia: C'est un peu quand 2 petites vagues se rencontrent, cela produit des ondulations

Neurino: Tout à fait, on règle alors les miroirs (L_1 et L_2) afin que la frange centrale soit au centre de la cible, ce qui signifie que les durées de parcours sont identiques.

Malicia: Comme cela les deux rayons arrivent donc en phase au centre de la cible

Neurino: Michelson pensait qu' en faisant pivoter l'appareil de 90° donc en inversant les chemins L_1 et L_2 que les franges se déplaceraient par l'impact de la vitesse (v) de la terre dans l'éther.

Malicia: Et alors ?

Neurino: Pas de modification !

Malicia: Donc la vitesse de la terre n'a pas d'impact sur le temps que met la lumière à parcourir L_1 ou L_2 qu'ils soient ou non dans le sens de la vitesse de la terre.

Neurino: En effet ce qui implique que sa vitesse soit constante. On dit que : « **La propagation de la lumière est isotrope pour un observateur terrestre** ». Cela a été depuis largement confirmé par des expérimentations plus précises

Malicia: Et l'éther dans tout cela ?

Neurino: Du coup, aucune démonstration de son existence !

Malicia: Mais dis-moi Neurino, si « c » qui est une vitesse donc une distance par un temps est constante il faut bien que pour l'observateur, soit la distance varie ou le temps varie relativement au passager.

Un peu de Mathématiques

En ne considérant que les différences de chemin des 2 rayons, les temps respectifs T_1 et T_2 liés à ces chemins différents et Ox orienté dans le même sens que v nous avons :

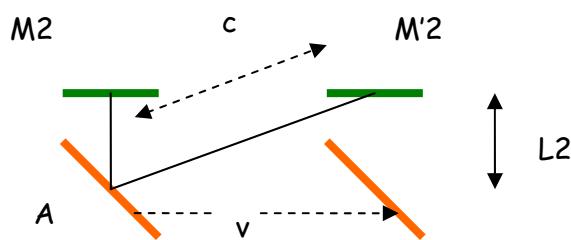
Rayon vers M_1 le temps :

$$T_1 = (L_1/c+v) + (L_1/c-v)$$

$$T_1 = 2L_1c / (1 - \beta^2)$$

Rayon vers M_2 : posons $T_2 = 2\theta$

Après le temps θ , la terre a avancé de $v\theta$ en M'_2 et la lumière a parcouru en fait AM'_2 à la vitesse c



dans le triangle $AM_2M'_2$ nous avons donc

$$c^2 \cdot \theta^2 = v^2 \cdot \theta^2 + L_2^2$$

$$\theta^2 = L_2^2 / (c^2 - v^2)$$

$$T_2 = 2\theta = 2L_2 / (c^2 - v^2)^{1/2}$$

$$T_2 = 2L_2 / (1 - \beta^2)^{1/2}$$

Le réglage sur la frange centrale entraîne

$$T_1 = T_2 \text{ donc } L_1/L_2 = (1 - \beta^2)^{1/2}$$

En faisant pivoter l'appareil de 90° autour de O : Ox est perpendiculaire à v et :

$$T_1 = 2L_1 / (1 - \beta^2)^{1/2} \text{ et } T_2 = 2L_2 / (1 - \beta^2)$$

On aurait du avoir un glissement de frange Δp $de = c\Delta T / \lambda$ (λ = longueur d'onde).

$$\Delta p = c(T_2 - T_1) / \lambda$$

$$\Delta p = 2 / \lambda (L_2 / (1 - \beta^2) - L_1 / (1 - \beta^2)^{1/2})$$

Neurino: En effet et ceci aura permis à Einstein en 1905 de bâtir la théorie de la relativité restreinte.

Malicia: Dont nous reparlerons, je sais mais cela ne me dit pas comment la lumière est décomposée par les gouttelettes d'eau.

Neurino: oui, il faut que je te parle de prisme...

Pour β petit $(1 - \beta^2)^{-1/2} \approx 1 + 1/2 \beta^2$ et $(1 - \beta^2)^{-1} \approx 1 + \beta^2$ $L_1 \approx L_2 \approx L$

$$\Delta p = L\beta^2 / \lambda$$

Pour une vitesse minimale de la terre autour du soleil de 30 km s^{-1} donc $\beta = 10^{-4}$ $L = 30 \text{ m}$

$$\lambda = 0.6 \times 10^{-6}$$

$$\Delta p = 0.5 \text{ m donc largement détectable}$$

Or il n'y a aucun décalage des franges d'interférence !!!

Les lois de la réfraction

Malicia: J'ai vu cela au lycée, c'est ce petit polyèdre qui ressemble à un gros diamant

Neurino: La comparaison est assez juste, car en effet l'éclat du diamant provient des effets de la décomposition de la lumière par le diamant correctement taillé. Et bien le prisme décompose la lumière comme le font des gouttelettes d'eau de pluie.



Malicia: Mais que ce passe t-il à l'intérieur du prisme ?

Neurino: Pour mieux comprendre je te propose une petite devinette.



Malicia: Avec plaisir

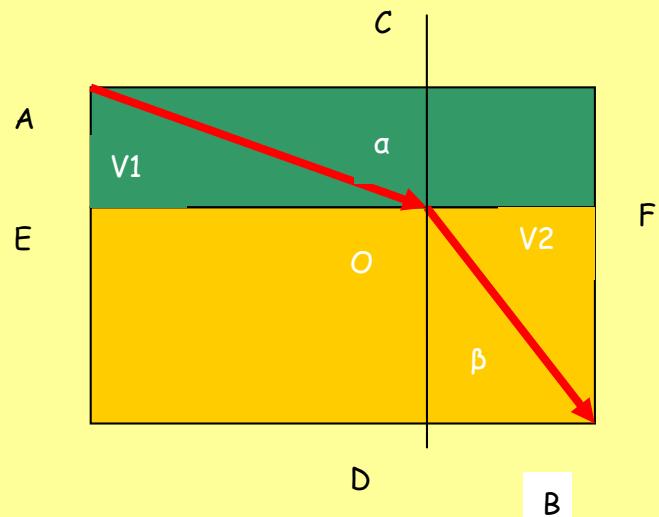
Neurino: Imagines que tu sois au point A et que tu veuilles rapidement rejoindre le point B. Pour cela tu dois courir sur le gazon à la vitesse V1 puis dans la boue à la vitesse V2.

Quelle est la trajectoire la plus rapide ?

Malicia: La ligne droite ?

Neurino: Ce serait le cas si la vitesse était constante mais dans ce cas V1 est plus grand que V2

Malicia: Oui bien sûr...voyons...si V1 est plus grand, je dois en principe parcourir un chemin plus long sur le gazon.



Et cette fois ci comme V_1 est constant sur le gazon, je dois parcourir une ligne droite. Le problème est de déterminer ou atteindre le terrain boueux.

Neurino: Tu es sur la bonne voie, si j'ose dire ! Pour faciliter ta réflexion appelles T_1 et T_2 les temps parcourus relativement sur le gazon et la boue.

Malicia: Comme la vitesse c'est une distance par un temps (mètre par seconde) le temps total T qui doit être minimum est la somme de T_1+T_2 soit $T=AO/V_1 + OB/V_2$



Neurino: C'est très bien, je vais maintenant t'aider un peu. Que ferait un accroissement de ΔT de T

Malicia: Eh bien $T+\Delta T = (\Delta OA+AO)/V_1 + (OB+\Delta OB)/V_2$
Soit $\Delta T = \Delta OA/V_1 + \Delta OB/V_2$

Neurino: C'est parfait, maintenant si le temps est minimum comment doit être ΔT ?

Malicia: « Nul » donc $\Delta OA/V_1 = -\Delta OB/V_2$ ou $V_1/V_2 = -\Delta OA/\Delta OB$

Neurino: Formidable, il faudrait maintenant expliciter ΔOA et ΔOB .

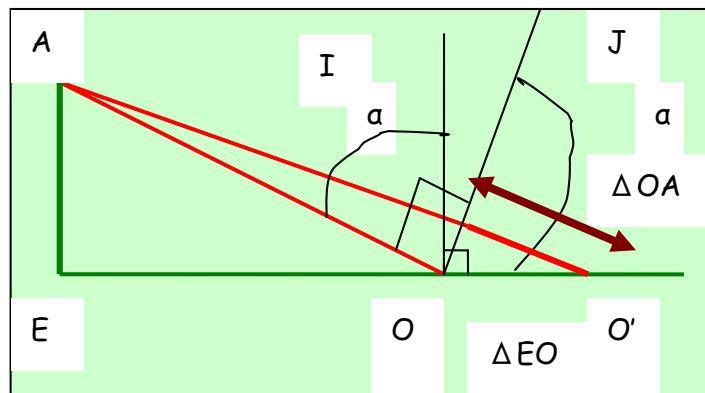
Pour t'aider agrandissons ΔOA . ΔOA est l'accroissement de OA

On remarque que l'angle $AOI = \alpha = O'PJ$

(angles à cotés perpendiculaires)
donc $\sin\alpha = \Delta OA / OO'$, or $OO' = \Delta OE$ donc $\sin\alpha = \Delta OA / OO' = \Delta OA / \Delta OE$

De la même façon $\sin\beta = \Delta OB / \Delta OF$
EF étant constant $\Delta OE = - \Delta OF$

Et donc $\sin\alpha / \sin\beta = - \Delta OA / \Delta OB = V1/V2 \dots \text{CQFD.}$



Malicia: Ouf...je les retiens tes devinettes toi !!!

Neurino: $\sin\alpha / \sin\beta = V1/V2$ ne te rappelle-t-il rien ? ... Penses à $n1/n2$

Malicia: Ne serait ce pas, une des lois d'optique de Descartes. ?

Neurino: On ne peut rien te cacher

Malicia: Mais alors, un rayon lumineux qui traverse un prisme se comporte

comme moi qui vais du gazon au terrain boueux. ?

Neurino: C'est bien cela et donc $\sin\alpha / \sin\beta = V1/V2 = n2/n1$

Malicia: Ou $n1\sin\alpha = n2\sin\beta$, mais pourquoi $n2/n1$ et non $n1/n2$.

Neurino: En fait $V1 = C/n1$ et $V2 = C/n2$.
Et ce fameux indice des lois de Descartes n'est rien d'autre que le coefficient réducteur de la vitesse de la lumière dans le prisme.

Un peu plus de Mathématiques

(La même démonstration en utilisant les différentielles)

Pour que le temps soit minimum, il faut que la différentielle de T soit nulle et comme V1 et V2 sont constants nous avons :

$$dT = 0 = d(AO)/V1 + d(OB)/V2.$$

Nous avons d'autre part :

$$EF = EO + OF = \sqrt{(AO^2 - OC^2)} + \sqrt{(OB^2 - OD^2)}$$

$EF = \text{constante}$ donc $d(EF) = 0$ or $d(EF) = d(AO) / \sqrt{(AO^2 - OC^2)} + d(OB) / \sqrt{(OB^2 - OD^2)}$

et en définitive comme $\sqrt{(AO^2 - OC^2)} / AO = \sin\alpha$ et que $\sqrt{(OB^2 - OD^2)} / OB = \sin\beta$

nous avons : $\sin\alpha / \sin\beta = V1/V2$

Malicia: C'est bien joli tout cela, je sais maintenant que la lumière est composée de différentes couleurs, que sa vitesse est constante dans le vide et enfin que la réfraction est simplement dû au ralentissement de la lumière dans le prisme tout comme moi quand je cours moins vite dans la boue que sur le gazon. Mais je ne sais toujours pas, par quel miracle il y a un arc en ciel à la sortie du Prisme.

La déviation des rayons

Neurino: Jusqu'à présent, je t'ai parlé de réfraction d'une lumière d'une seule couleur (monochromatique) et je t'ai dit que $V = c/n$ n : indice du milieu à l'intérieur du prisme qui est constant. Or comme nous l'avons vu $\lambda = VT$ (λ et T étant respectivement la longueur d'onde et la période) et aussi $\lambda_0 = cT$ avec λ_0 longueur d'onde dans le vide.

D'où $\lambda_0 / \lambda = c/V$.

Malicia: Ah je vois, $V = c (\lambda / \lambda_0)$ comme c et λ_0 sont constants la vitesse du rayon ne dépend que de la longueur d'onde. Plus λ est grande plus la vitesse est grande. C'est un peu comme les personnes plus elles ont de grandes jambes, plus elles vont vite.



Neurino: La comparaison est osée mais il y a de ça....

Malicia: Maintenant tout s'explique : La lumière blanche étant composée de différentes couleurs donc de longueurs d'onde différentes, les vitesses seront différentes et comme l'angle d'incidence dépend de la vitesse, les rayons se divisent.

Neurino: Tu as tout compris, et peux tu me dire la couleur qui prendra le chemin le plus court.

Malicia: Heu..., comme V sera plus rapide pour λ plus grand le passage du rayon sera plus court, soit pour le rouge.

Neurino: En effet le rouge sera moins dévié que le bleu.

L'Energie du rayonnement

Malicia: Dis-moi Neurino, Pourquoi attrapons-nous des coups de soleil quand nous restons trop longtemps au soleil ?

Neurino: Cela peut être d'ailleurs beaucoup plus grave, le rayonnement du soleil peut occasionner de graves brûlures voire des cancers dans les fréquences les plus élevées, Nous verrons cela une autre fois si tu veux.



Malicia: Oui bien sûr, c'est dangereux le soleil.

Neurino: Je ne te le fais pas dire, bon revenons à ta question, il faut que tu saches que le rayonnement solaire et plus restrictivement la lumière transporte de l'Energie.

Malicia: C'est pour cela que ça chauffe.

Neurino: Entre autres, en fait tout corps qui reçoit de la lumière en absorbe une partie et réfléchit le reste

Malicia: Que fait-il de la partie absorbée ?

Neurino: C'est tout le nœud du problème, cette partie excite les électrons de la matière ce qui fait augmenter la température.

Malicia: Dis moi si je comprends bien, un corps吸 une partie de la lumière et restitue l'autre partie mais quelles sont ces parties ?

Neurino: Tu as la réponse ma petite Malicia ?



Malicia: ...Ah bon...que veux-tu dire ?

Neurino: A ton avis pourquoi l'herbe est verte et le ciel bleu ?

Malicia: Tu veux me faire dire que la lumière arrive sur l'herbe absorbe les bleus, rouges...bref les couleurs complémentaires au vert et réfléchit le vert

Neurino: Tout à fait, tout comme l'atmosphère ne laisse passer que le bleu.

Malicia: Quelque chose me chiffonne...la lumière transporte de l'Energie me dis-tu...mais avons-nous une idée de la quantité d'Energie ?

Neurino: Oui très précisément, le soleil est en fait une énorme lampe de 383 mille milliards de milliards de kW

Malicia: C'est vertigineux.

Neurino: Certes, mais il illumine tout l'espace et nous recevons sur terre, en France en moyenne 1300kWh par an et par m^2 soit l'équivalent pour alimenter un radiateur électrique durant 1000 heures.



Malicia: C'est pas mal, je comprends que l'Energie solaire ait de l'avenir.

Neurino: Le problème est qu'elle est très difficilement récupérable, C'est Max Planck en 1900 qui le premier a mesuré la quantité d'Energie emmagasinée par un corps noir.

Malicia: Ca y est on retombe dans le mystique, c'est quoi un corps noir ?

Neurino: A-t-on avis, quand tu es au soleil, es-tu mieux protégée par des habits blancs ou des habits noirs ?

Malicia: Intuitivement je dirai par des habits blancs, mais je ne vois pas le rapport !

Neurino: Blancs en effet car le blanc rediffuse une grande partie de l'énergie reçue...

P2 : La lumière en couleurs

Malicia: Alors que le noir absorbe tout.

Neurino: Parfaitement, l'expérience de Planck consistait à exposer un corps noir isolé thermiquement et de vérifier ce qu'il rediffusait ? Il réussit à montrer que l'Energie échangée se faisait par quantum égaux : $E=hf$
 f étant la fréquence de radiation et h une constante = à $6,62 \cdot 10^{-34}$

Malicia: Tu veux dire que les échanges d'Energie se font par paquets

Neurino: C'est bien cela, Max Planck venait de poser la première pierre de la mécanique dite « quantique » que nous verrons une autre fois (voir cahier P9)

Malicia: Bien...si je peux résumer, le soleil ou une source lumineuse émet de l'Energie sur les différentes fréquences du spectre et cette Energie s'échange avec les obstacles par paquets qui correspondent à la fréquence multipliée par une constante.

Neurino: Bon résumé, mais il faut ici entendre source lumineuse au sens large car le rayonnement s'étend en déca du rouge, dans les infrarouges et les ondes radio et delà du violet dans les ultra violets, les rayons X et le très Energétiques rayons gamma.

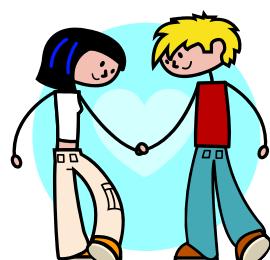


Malicia: Si j'avais su qu'un simple arc-en-ciel nous amènerait aussi loin, j'aurais posé la question plus tôt.

Neurino: Et encore de nombreux autres secrets se cachent dans la lumière, la composition de la matière, la distance des astres, le temps....

Malicia: Il faudra donc que nous en reparlions, pour aujourd'hui j'ai fait le plein....

Neurino: Mais quand tu voudras Malicia



P2 : La lumière en couleurs

Diffusion

J'autorise et j'encourage la diffusion et la reproduction de ces documents.

Je sais qu'ils peuvent rendre service et aider à comprendre des points qui pour certains semblent « nébuleux » et qui pourtant sont en fait relativement simples !

Notamment abordés sous cette forme pédagogique utilisée en son temps par Galilée avec ses personnages « Salviati » et « Simplicio » pour expliquer l'héliocentrisme.

Par contre je vous remercie de bien vouloir me communiquer en retour vos avis, vos remarques, vos critiques tant positives que négatives afin que je puisse apporter toutes les améliorations possibles pour que Neurino et Malicia puissent continuer à répondre à toutes vos questions et à bien d'autres ?

Alain Bellevergue

Adresse mail pour envoyer avis, pour demander à être sur la liste de diffusion ou demander un numéro déjà paru : al.bellevergue@orange.fr

Bibliographie et Illustrations :

Clipart : <http://office.microsoft.com/fr>

Wikipedia: <http://fr.wikipedia.org>

Les numéros parus:

PHYSIQUE

P1 : La gravité

P2 : La lumière en couleurs

P3 : Les ondes électromagnétiques

P5 : Relativité restreinte

P6 : Relativité générale

P9 : La mécanique quantique

Les numéros en préparation :

PHYSIQUE

P4 : La lumière onde ou particule

P7 : La matière

P8 : L'Univers

MATHEMATIQUES

M1 : Gradient - Divergence - Rotationnel

P2 : La lumière en couleurs

M2 : Les dérivées et Intégrales

ECONOMIE

E1 : La croissance - PIB

E2 : La monnaie - Inflation