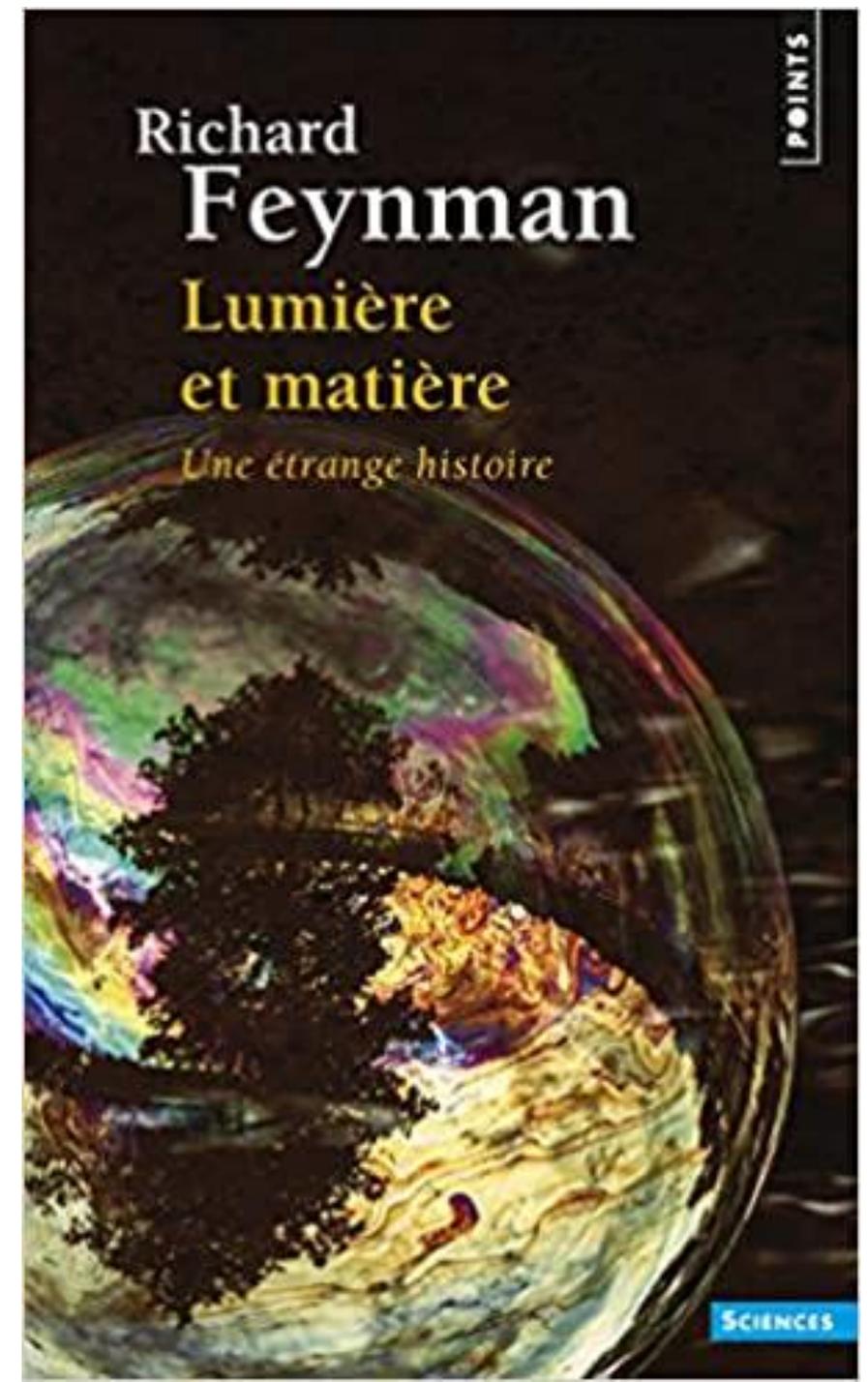


# L'électrodynamique quantique

Cours donné à la SAF. Janvier 2021: par Jacques  
Fric, VP commission cosmologie



# Avant propos

L'objet de cette conférence est de proposer des éléments pour offrir « une grille de lecture » destinée à faciliter l'accès à l'excellent ouvrage de Feynman « Lumière et matière » qui reprend quatre de ses conférences publiques.

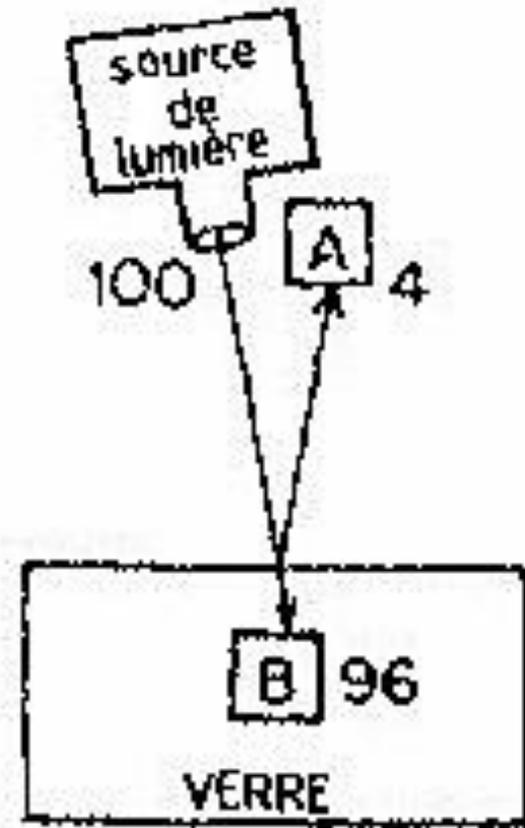
Je vous encourage vivement à lire, c'est un ouvrage de référence abordable même pour un public non spécialiste.

Je ne peux qu'en donner des extraits qui me paraissent significatifs car l'ouvrage, écrit de main de maître, fait tout de même 200 pages. Vous verrez:

- que la réflexion de la lumière, sur la surface de l'eau ou d'une lame de verre, par exemple, fait intervenir bien plus que la surface.
- comment les points de vue microscopiques et macroscopiques se conjuguent.
- qu'à l'échelle microscopique, les photons dans un matériau transparent se propagent à la vitesse de la lumière et que l'indice est lié à un phénomène microscopique impliquant l'interaction avec les atomes du matériau.
- que le procédé qu'il utilise au début pour établir certaines propriétés est ensuite abandonné lorsqu'on examine le problème de manière plus physique.

# Rappels des lois de l'optique : réflexion partielle

**FIGURE 2.** *Expérience mettant en évidence le phénomène de réflexion partielle par une surface de verre. Sur 100 photons qui quittent la source, 4 sont réfléchis par la surface d'entrée du bloc de verre ; les 96 autres sont transmis par la surface et se retrouvent dans le photomultiplicateur B.*



# 1- L'optique en électrodynamique quantique

Réflexion et réfraction en électrodynamique quantique

Un exposé destiné à un large public

# Un phénomène déroutant!

**FIGURE 4.** *Expérience destinée à montrer le phénomène de réflexion partielle par deux surfaces. Les photons recueillis dans le photomultiplicateur A ont été réfléchis soit par la face d'entrée de la lame de verre (« face avant ») soit par sa face de sortie (« face arrière »). Un photon peut également traverser ces deux surfaces et se retrouver dans le photomultiplicateur B. Selon l'épaisseur de la lame, le nombre des photons que l'on recueille en A varie de 0 à 16 %. Ces résultats sont difficilement interprétables à l'aide d'une théorie « raisonnable », telle que celle de la figure 3. Tout se passe comme si la réflexion sur une surface donnée pouvait être soit amplifiée soit éteinte par la présence d'une autre surface.*

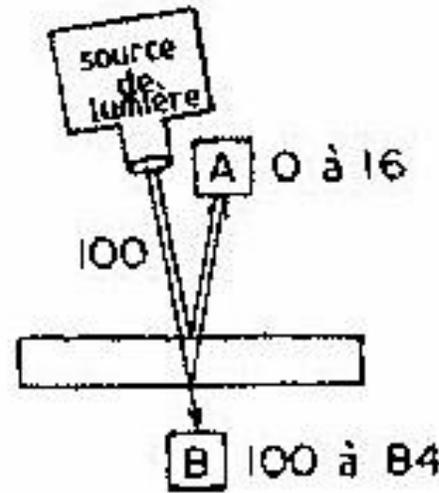


Figure 4

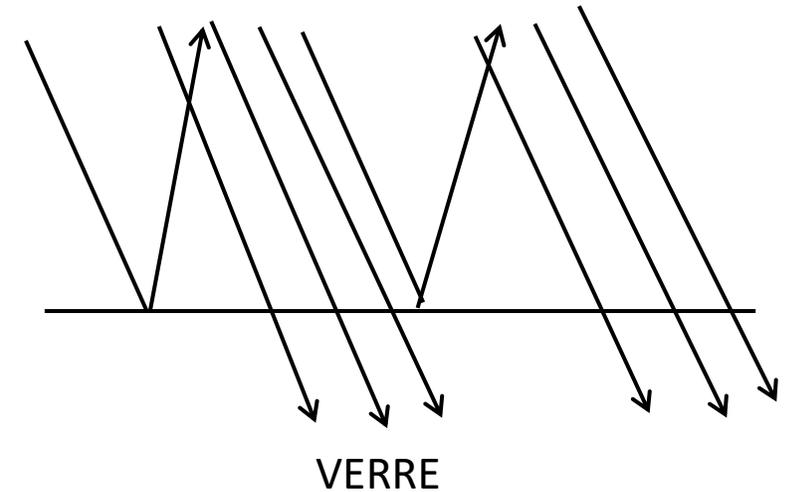


Figure 3

Feynman suggère une explication au phénomène de réflexion partielle. Au niveau microscopique, le verre serait comme une passoire avec beaucoup de trous, la partie solide étant réfléchissante.

# Un procédé simple pour traiter ce phénomène étrange

Ce phénomène est non explicable par l'optique classique car il fait intervenir les propriétés quantiques des atomes du matériau avec lequel les photons interagissent.

Un atome du verre peut absorber un photon, ce qui fait passer un électron de cet atome dans un état excité dont il va spontanément sortir en émettant un photon de mêmes paramètres, mais avec une phase inversée. Autrement dit, les photons réfléchis ne sont pas les mêmes que ceux qui ont été émis (puisqu'ils ont été absorbés) mais, comme ils sont indiscernables, cela n'est pas discernable macroscopiquement.

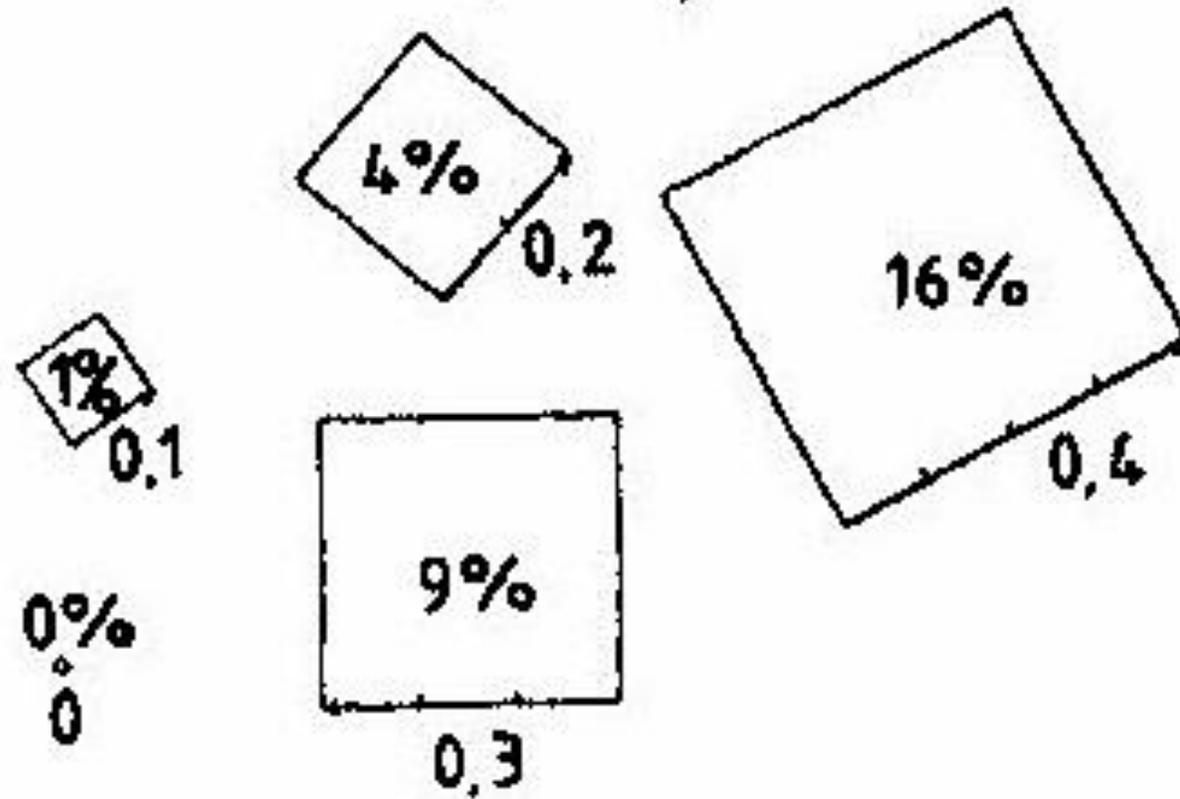
Pour traiter ce phénomène Feynman introduit un procédé simple où il associe à un photon monochromatique un chronomètre, déclenché lors de son émission, dont l'aiguille, qui tourne au fil du temps de vol, indique une direction spatiale qui varie donc périodiquement au cours du vol. Cette direction sera conférée à un vecteur dont les paramètres (directions, module) seront exploités, à certains endroits, pour interpréter les phénomènes optiques. Partant de cette approche simplifiée pour se familiariser avec la méthode, une approche plus approfondie sera présentée ensuite.

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

**FIGURE 6.** *Les caractéristiques étranges du phénomène de réflexion partielle ont obligé les physiciens à abandonner tout espoir de prédictions rigoureuses et à se contenter du calcul de la probabilité de tel ou tel événement. La méthode proposée à cet effet par l'électrodynamique quantique consiste à dessiner des petites flèches sur un morceau de papier! La probabilité d'un événement donné est représentée par l'aire du carré s'appuyant sur la flèche correspondante. Ainsi une flèche représentant une probabilité de 0,04 (4 %), par exemple, a une longueur égale à 0,2.*

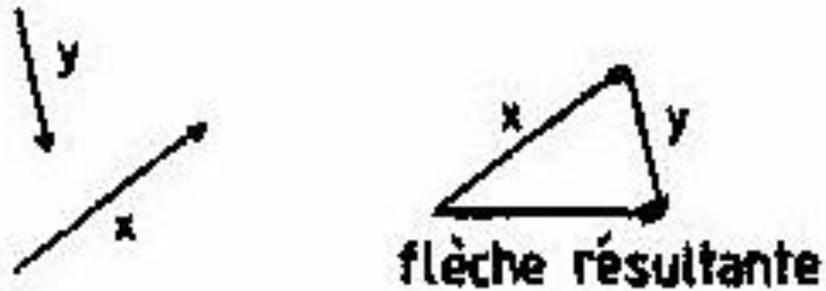


# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique



**FIGURE 7.** *Flèches représentant des probabilités variant de 0 à 16 %; leurs longueurs respectives varient de 0 à 0,4.*

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique



**FIGURE 8.** *Les flèches représentant les diverses modalités selon lesquelles un événement peut se produire sont dessinées puis combinées entre elles (« additionnées », dit-on), selon la règle suivante : on fait coïncider la queue d'une des flèches (ici y) avec la pointe de l'autre (x), sans modifier leurs directions respectives ; on dessine la flèche résultante allant de la queue de la flèche x à la pointe de la flèche y.*

On remarque que ces flèches, associées aux paramètres des modalités (amplitude, direction) sont des vecteurs libres. La méthode décrite est celle de la somme de ces vecteurs libres (géométrie affine).

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique



Ceci est un exemple de somme de ces vecteurs libres.

**FIGURE 9.** On peut, en procédant comme à la figure 8, additionner un nombre quelconque de flèches.

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

Quelles sont les règles qui régissent la longueur et la direction de chacune des flèches dont la combinaison fournit la règle finale ? Dans le cas présent, on n'a en fait que deux flèches, l'une représentant la réflexion sur la face *avant* et l'autre la réflexion sur la face *arrière*.

Commençons par la longueur. Comme l'a montré la première expérience (celle où le photomultiplicateur était placé à l'intérieur du bloc de verre), la surface d'entrée réfléchit environ 4 % des photons qu'elle reçoit. On en déduit que la première flèche, celle représentant la réflexion « avant », a une longueur de 0,2. De même à la face arrière qui réfléchit également 4 % de la lumière correspond une flèche dont la longueur est aussi égale à 0,2.

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

Pour déterminer la direction de chaque flèche, il faut imaginer que l'on chronomètre chaque photon lors de son parcours. Soit donc un chronomètre imaginaire dont l'aiguille tourne très rapidement. Ce chronomètre est mis en route au moment où le photon quitte la source et son aiguille effectue plusieurs tours tandis que le photon avance (environ 15 000 tours par centimètre s'il s'agit de lumière rouge). On arrête le chronomètre à l'instant où le photon atteint le photomultiplicateur. L'aiguille se trouve alors orientée dans une certaine direction qui sera celle de la flèche correspondant au photon considéré.

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

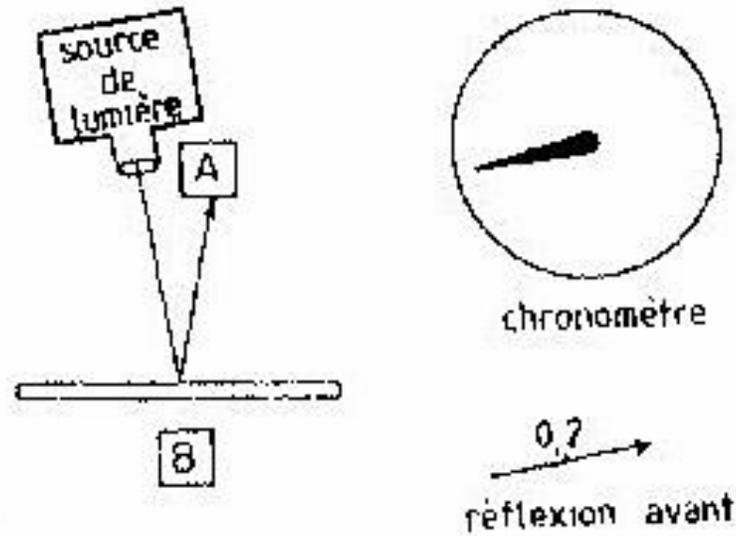
A ce stade, il nous faut encore ajouter une règle supplémentaire pour pouvoir calculer correctement la réponse. Nous convenons que lorsque le photon est réfléchi par la *face d'entrée* (ou face avant), il faut inverser le sens de la flèche. Autrement dit: la flèche correspondant à la réflexion par la face arrière doit être tracée dans la direction de l'aiguille du chronomètre et celle correspondant à la réflexion sur la face avant dans la direction opposée.

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

**Dessinons maintenant les flèches correspondant au cas de la réflexion par une lame de verre extrêmement mince. Afin de pouvoir dessiner la flèche correspondant à la réflexion par la face d'entrée, imaginons un photon qui quitte la source (on met le chronomètre en marche), se réfléchit sur la face d'entrée, et arrive finalement en A (on arrête le chronomètre). Nous dessinons alors une petite flèche de longueur 0,2 dans la direction opposée à celle de l'aiguille du chronomètre (Fig. 10).**

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

FIGURE 10. Analyse de l'expérience mettant en évidence la réflexion par deux surfaces. Un photon peut arriver en A selon deux modalités : via la face d'entrée (face avant) ou via la face de sortie (arrière). A chacune de ces modalités, on associe une flèche de longueur 0,2 ; leurs directions respectives sont déterminées par la position de l'aiguille d'un « chronomètre » qui mesure le temps mis par le photon pour parcourir le trajet correspondant. La direction de la flèche correspondant à la réflexion « avant » doit être dessinée dans la direction opposée à celle de l'aiguille du chronomètre.



Le chronomètre fictif qui régit la direction du vecteur est associé au temps de parcours du photon qui se propage à la vitesse de la lumière.

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

Pour dessiner la flèche correspondant à la réflexion par la face arrière, nous imaginons qu'un photon quitte la source (on met en marche le chronomètre), traverse la face d'entrée, se réfléchit sur la face arrière et arrive en A (on arrête le chronomètre). Dans le cas considéré, la direction de l'aiguille du chronomètre est approximativement la même que celle de tout à l'heure. La raison en est que la distance parcourue par le photon qui se réfléchit sur la face arrière est à peine supérieure à celle que parcourt le photon réfléchi par la face d'entrée : elle n'en diffère que par deux fois l'épaisseur (extrêmement faible) de la lame. Nous dessinons une deuxième flèche de longueur 0,2 dans la direction de l'aiguille du chronomètre (Fig. 11).

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

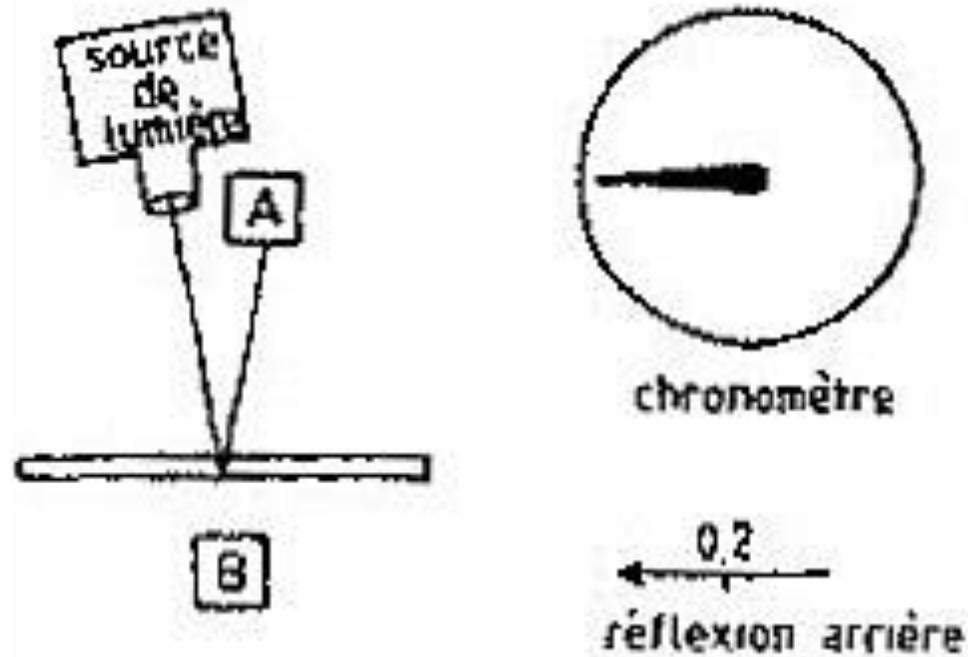
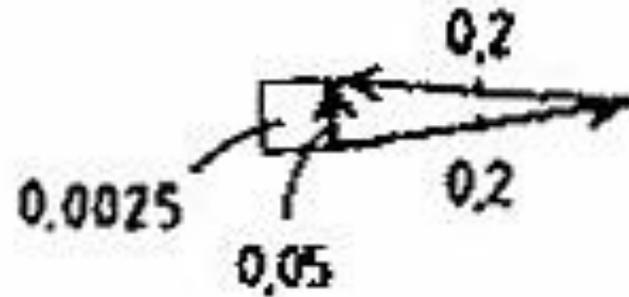


FIGURE 11. *Un photon réfléchi par la face arrière de la lame de verre met un peu plus de temps pour aller en A qu'un photon réfléchi par la face avant. L'aiguille du chronomètre, une fois arrêtée, indique donc une direction légèrement différente de celle correspondant à la réflexion « avant ». La flèche correspondant à la réflexion « arrière » est, quant à elle, dessinée dans la direction de l'aiguille du chronomètre.*

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

Maintenant il nous faut combiner ces deux flèches. Comme elles ont même longueur et des directions approximativement opposées, la flèche résultante a une longueur presque nulle; quant au carré de cette longueur, il est encore plus proche de zéro. La probabilité que la lumière soit réfléchiée par une lame de verre mince est donc quasiment nulle (Fig. 12).

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique



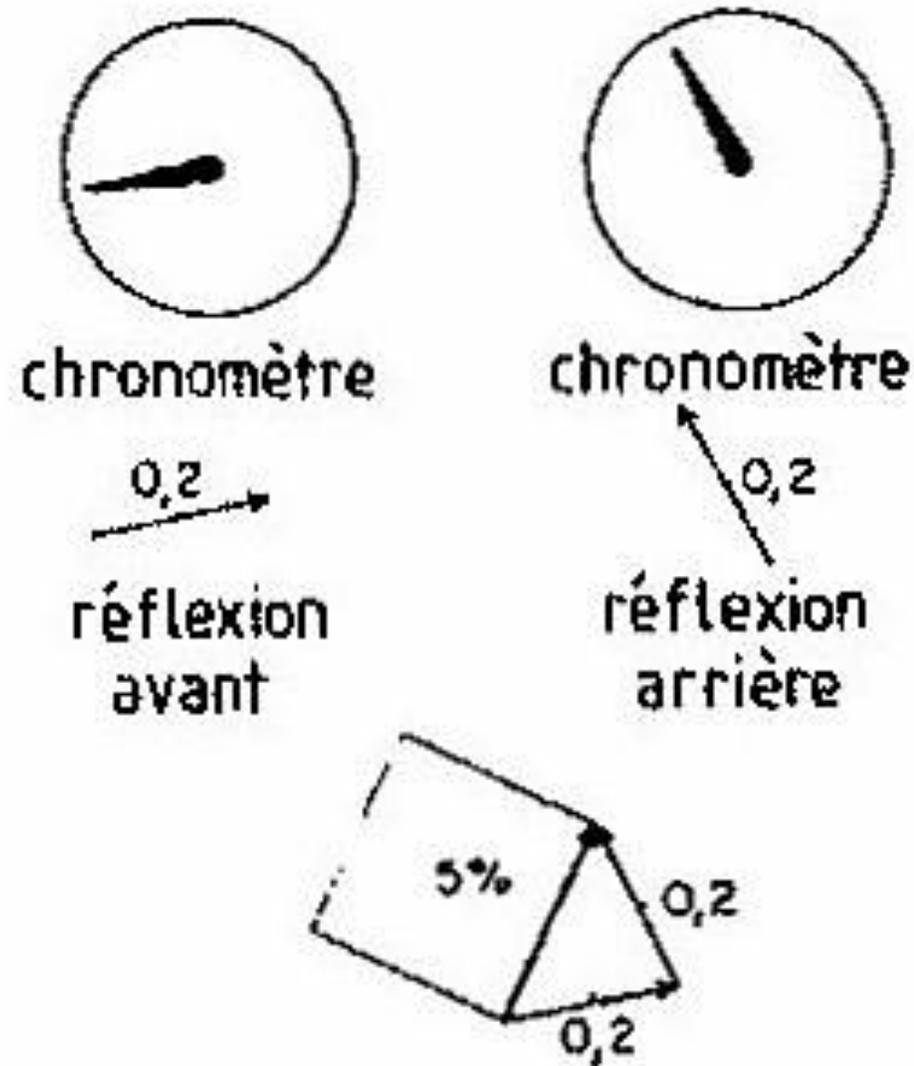
**FIGURE 12.** *La flèche résultante, dont le carré représente la probabilité de réflexion par une lame de verre extrêmement mince, est obtenue en additionnant la flèche correspondant à la réflexion « avant » à celle qui correspond à la réflexion « arrière ». Le résultat est proche de zéro.*

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

Si nous remplaçons la lame de verre extrêmement mince par une autre un peu plus épaisse, le photon qui se réfléchit sur la face arrière parcourt, avant d'atteindre A, un chemin un peu plus long que dans le premier cas ; l'aiguille du chronomètre a donc tourné un peu plus avant de s'arrêter et la flèche correspondante fait un certain angle avec celle qui est associée à la réflexion par la face d'entrée ; la flèche résultante est donc plus longue que précédemment ; il en va de même de son carré (Fig. 13).

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

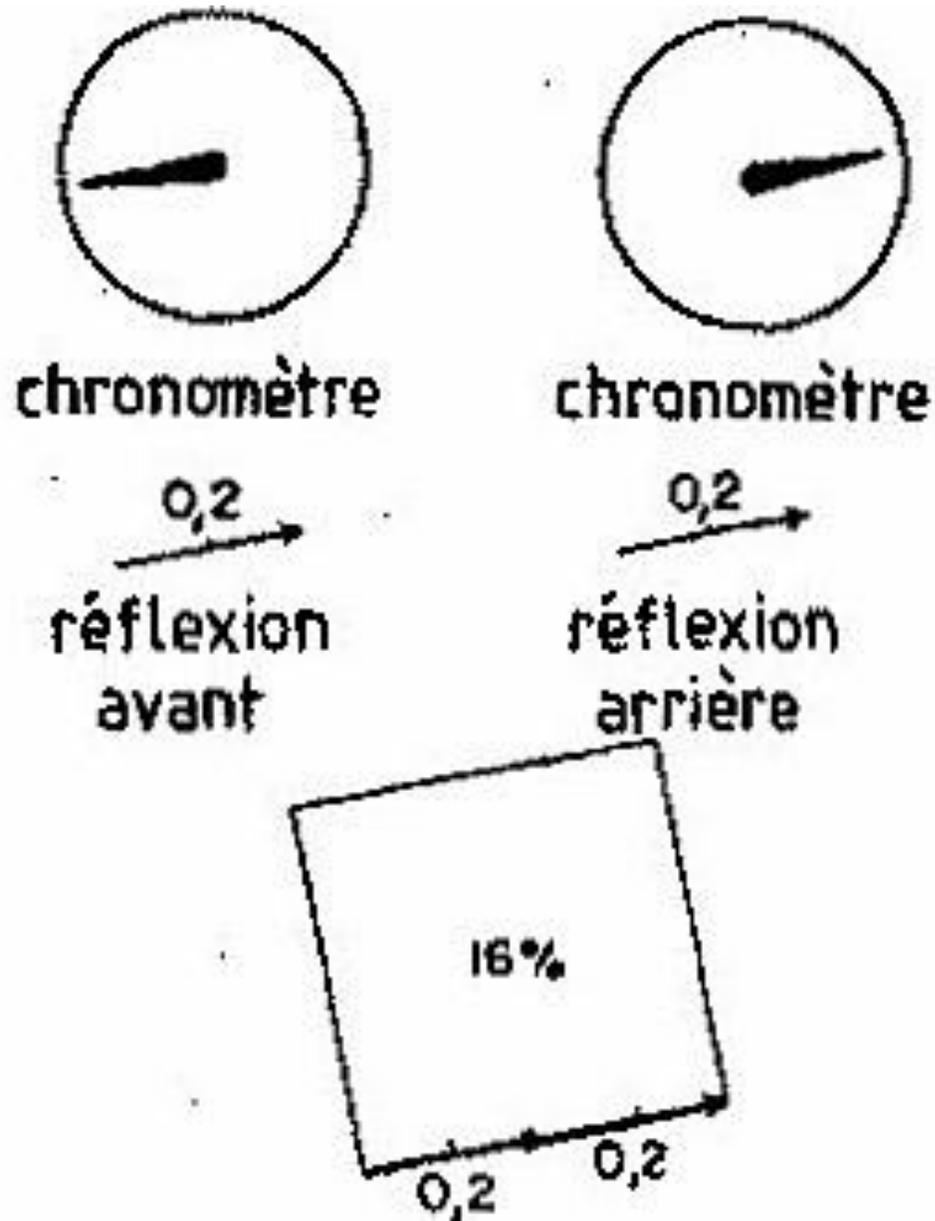
FIGURE 13. La flèche résultante correspondant à une épaisseur de verre un peu plus grande est un peu plus longue du fait que l'angle entre les deux flèches (réflexion « avant » et réflexion « arrière ») est lui-même un peu plus grand. Cette augmentation de l'angle provient de ce que le photon réfléchi par la face arrière met un peu plus de temps que précédemment pour aller en A.



# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

**Prenons un autre exemple, celui d'une lame de verre qui a juste l'épaisseur requise pour que l'aiguille du chronomètre imaginaire fasse un demi-tour pendant le temps que met le photon à traverser la lame, se réfléchir sur la face arrière et revenir. Dans ce cas, la flèche correspondant à la réflexion sur la face arrière est exactement dans la direction de la flèche correspondant à la réflexion sur la face avant. Si nous combinons ces deux flèches, nous obtenons une flèche résultante de longueur 0,4 qui, une fois élevée au carré, donne une probabilité de 16 % (Fig. 14).**

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

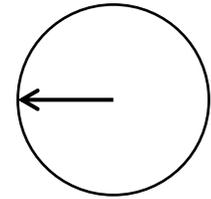


**FIGURE 14.** Quand le verre a une épaisseur telle que l'aiguille du chronomètre fasse, dans le cas de la réflexion « arrière », un demi-tour de plus que dans le cas de la réflexion « avant », les deux flèches correspondantes sont alignées. La flèche résultante a donc une longueur égale à 0,4 ; la probabilité est de 16 %.

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

Si nous augmentons encore l'épaisseur de la lame de verre, de façon que l'aiguille qui chronomètre le photon allant se réfléchir sur la face arrière fasse un tour complet, nous obtenons de nouveau deux flèches dans des directions opposées et donc une flèche finale de longueur nulle (Fig. 15). Continuons à augmenter l'épaisseur de la lame de verre. La même situation se répète chaque fois que le trajet supplémentaire que doit accomplir le photon correspond exactement à un tour de l'aiguille du chronomètre imaginaire.

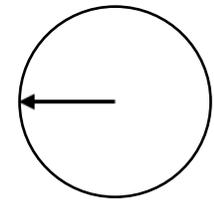
Figure 15



Chronomètre

Résultat de la réflexion avant

0,2  
→



Chronomètre

0,2  
←

Résultat de la réflexion arrière

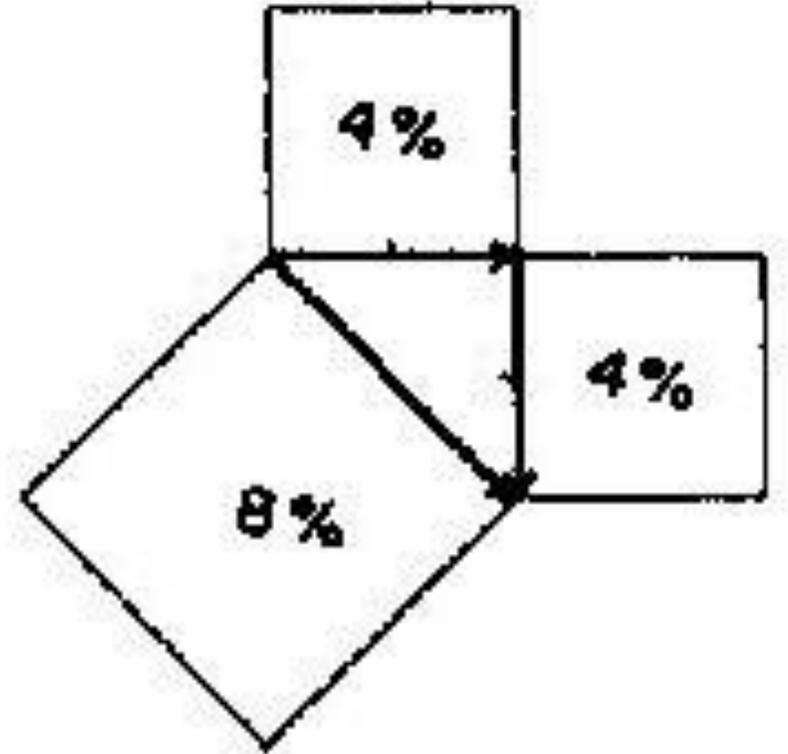
Résultat global: La somme des 2 modalités est nulle

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

Si cette augmentation de trajet correspond à un quart de tour ou trois quarts de tour supplémentaires, les deux flèches à additionner font entre elles un angle droit et la flèche résultante est l'hypoténuse d'un triangle rectangle. Comme, d'après le théorème de Pythagore, le carré de l'hypoténuse est égal à la somme des carrés des côtés de l'angle droit, la probabilité, dans ce cas, a bien une valeur égale à 8 % (4 % + 4 %) (Fig. 16).

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

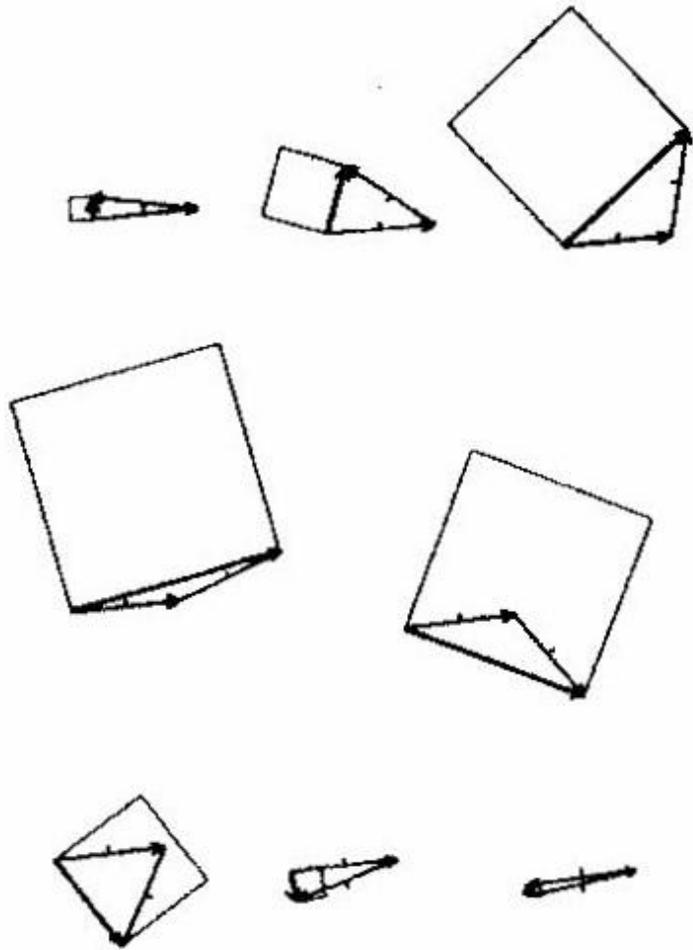
**FIGURE 16.** *Lorsque les flèches correspondant aux réflexions « arrière » et « avant » sont perpendiculaires, la flèche résultante est l'hypoténuse d'un triangle rectangle. Le carré de la flèche résultante est alors simplement la somme des carrés des deux flèches composantes.*



# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

Remarquez que la flèche correspondant à la réflexion par la face avant ne change pas de direction au fur et à mesure qu'on augmente l'épaisseur de la lame ; c'est la direction de la deuxième flèche, celle qui correspond à la réflexion « arrière », qui tourne progressivement. Il en résulte une variation de l'angle que font entre elles les deux flèches et partant, une modification de la longueur de la flèche résultante qui évolue de façon cyclique entre zéro et 0,4. Le carré de cette longueur évolue lui aussi de façon cyclique, entre zéro et 16 %. C'est précisément ce que nous avons observé lors de nos diverses expériences (Fig. 17).

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique



**FIGURE 17.** *Au fur et à mesure que l'on augmente l'épaisseur de la lame de verre, la direction de l'aiguille du chronomètre correspondant à la réflexion « arrière » tourne; l'angle des deux flèches augmente en conséquence. La flèche résultante change donc de longueur et son carré varie de façon cyclique de 0 à 16 %.*

# Méthode proposée par l'électrodynamique quantique

**Je viens donc de vous montrer comment calculer précisément les diverses caractéristiques de la réflexion partielle, rien qu'en dessinant des petites flèches sur une feuille de papier. Ces flèches, en termes techniques, représentent des « amplitudes de probabilité ». Dire que l'on calcule « l'amplitude de probabilité de tel ou tel événement », ça fait évidemment plus chic et plus sérieux ; mais j'aime mieux être honnête avec vous : nous n'avons fait que déterminer la flèche dont le carré représente la probabilité de l'événement en question.**

# Loi de la réflexion sur un miroir

## Physique classique

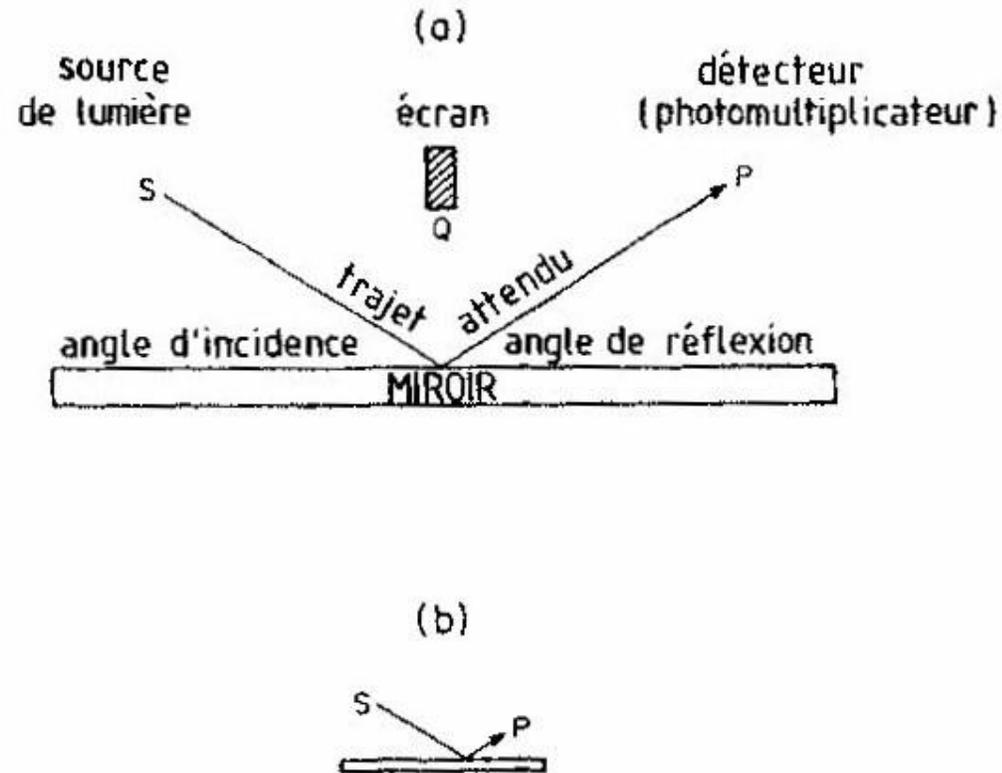


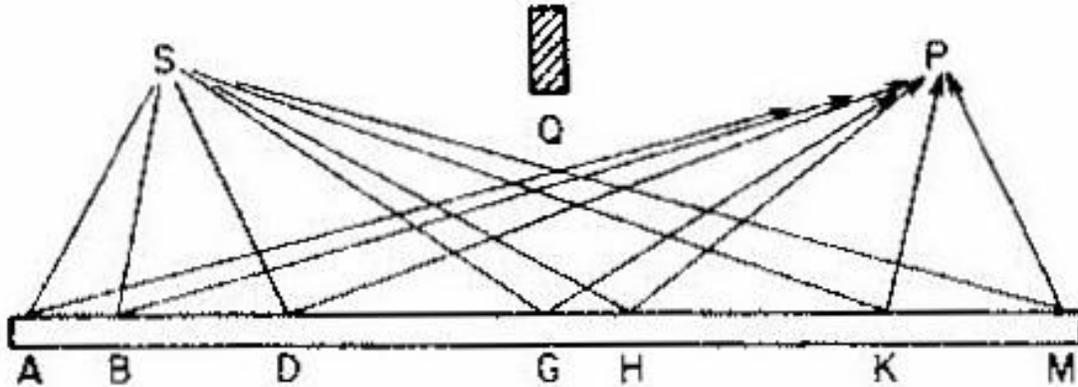
FIGURE 19. Selon la conception classique, le miroir réfléchit la lumière de manière à ce que l'angle de réflexion soit égal à l'angle d'incidence, et cela même si, comme en (b), la source et le détecteur ne se trouvent pas au même niveau.

# Explication de la loi de réflexion sur des miroirs

- Cette partie traite de la réflexion seulement. Pour simplifier, on peut donc considérer des miroirs classiques. Mais ce qui est dit est aussi valable pour la réflexion partielle sur une surface d'eau ou de verre par exemple.
- Premier point à préciser, **la source lumineuse**, même si c'est un seul photon, n'a pas de direction privilégiée: elle n'est pas collimatée par un système de lentilles. **Elle éclaire toute la surface du miroir.** Rappelons nous les fentes de Young, où les franges d'interférences sur l'écran montrent que le photon (du moins son onde associée) est passé par les deux fentes; l'aspect corpusculaire ne peut se manifester que lors d'une expérience où, par exemple, il est capturé.
- Dans la description classique de la réflexion on suppose que le photon qui doit se réfléchir au milieu du miroir (voir figure de la diapo suivante) vise ce milieu et y rebondit pour atteindre le détecteur. On invoque l'extremum de chemin, ce qui est exact, mais il reste à démontrer pourquoi! En fait le photon qui atteint le détecteur n'est pas celui issu de la source. D'où la nécessité de l'électrodynamique quantique pour décrire le phénomène, ce que Feynman se propose de faire.

# Loi de la réflexion sur un miroir

## Physique quantique (approche globale)



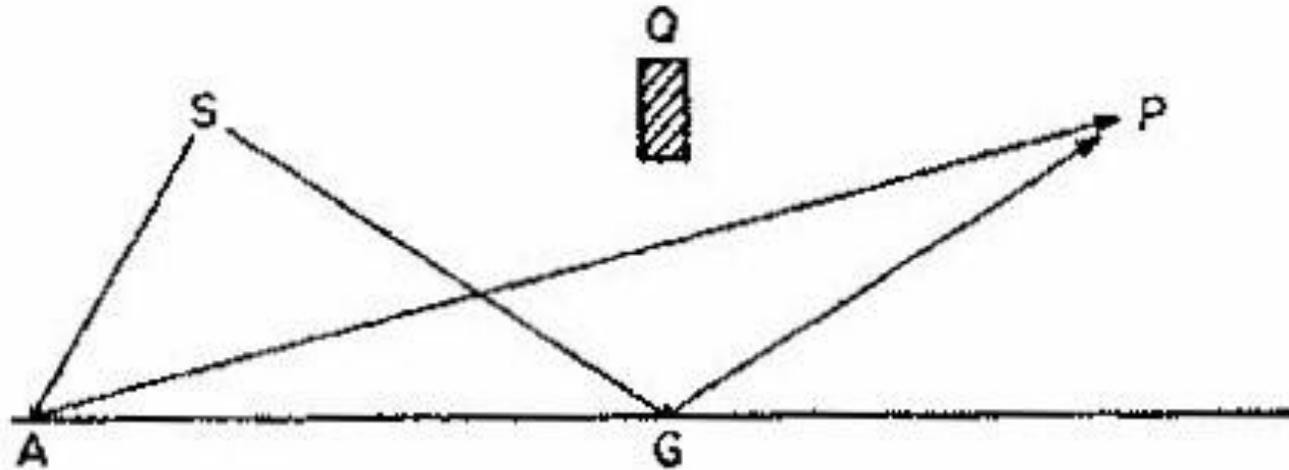
**FIGURE 20.** Selon la conception quantique, la lumière est réfléchi par toutes les parties du miroir, de A en M, avec la même amplitude de probabilité.



**Figure 21:** Pour simplifier, on considère une bande étroite de miroir que nous divisons en petits rectangles où chaque rectangle est associé à un trajet possible de la lumière

La source éclaire tout le miroir, tous les trajets indiqués existent physiquement en électrodynamique quantique.

# Loi de la réflexion sur un miroir Physique quantique (approche globale)

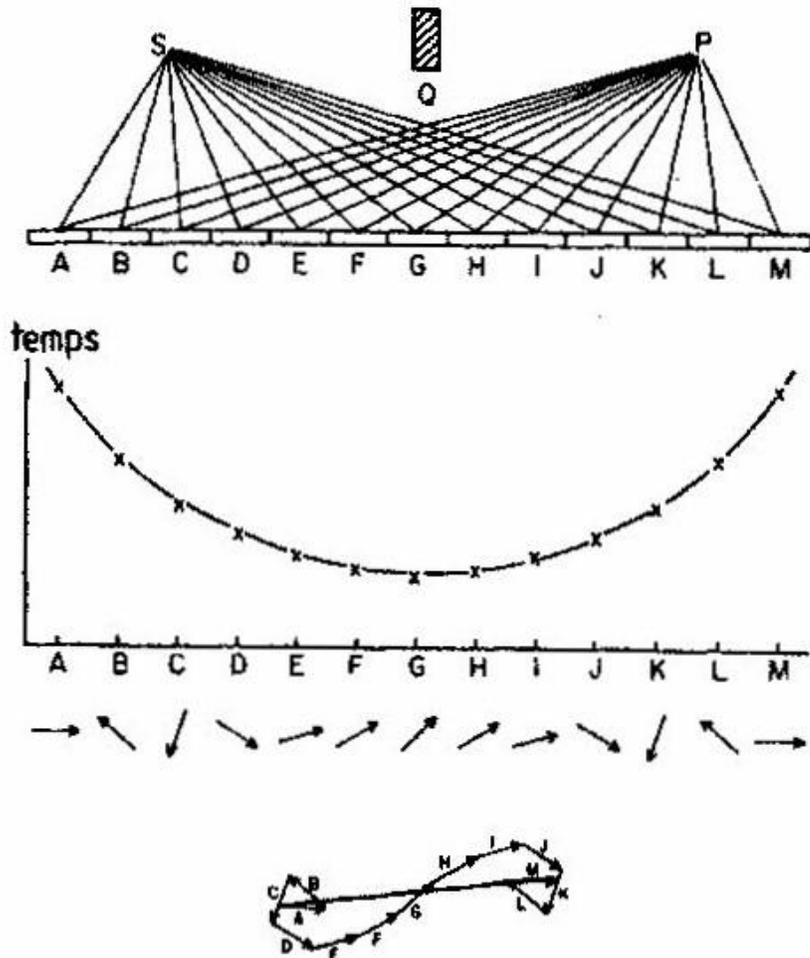


**FIGURE 23.** *Les flèches ont toutes la même longueur (en première approximation); en revanche, leurs directions sont très différentes car le temps de parcours dépend beaucoup du trajet suivi. Ainsi, le trajet SAP est-il nettement plus long que le trajet SGP.*

# Loi de la réflexion sur un miroir

## Physique quantique (approche globale)

LES PHOTONS : DES PARTICULES DE LUMIÈRE 65



**FIGURE 24.** Chacun des trajets que peut emprunter la lumière (compte tenu des simplifications déjà mentionnées) est représenté par le schéma du haut. Au-dessous, on a porté, à l'aplomb de chacun des points du miroir, le temps mis par la lumière pour aller de  $S$  à  $P$  en se réfléchissant sur le miroir au point considéré. En bas, on a dessiné les flèches correspondant aux divers trajets envisagés ainsi que la flèche qui résulte de leur addition. On voit très clairement que ce sont les flèches correspondant aux points situés entre  $E$  et  $J$  qui contribuent le plus à la flèche résultante. Ceci est dû au fait que ces flèches ont pratiquement toutes des directions voisines, et donc en dernière analyse au fait que les temps de parcours le long de ces trajets sont sensiblement égaux. Dans la mesure où cette circonstance se produit là où le temps de parcours est minimal, on peut dire, en première approximation, que le trajet effectivement emprunté par la lumière est celui « de moindre temps ».

Où on montre que les bords du miroir sont bien éclairés. Zoom sur le bord ABC de la figure 24.

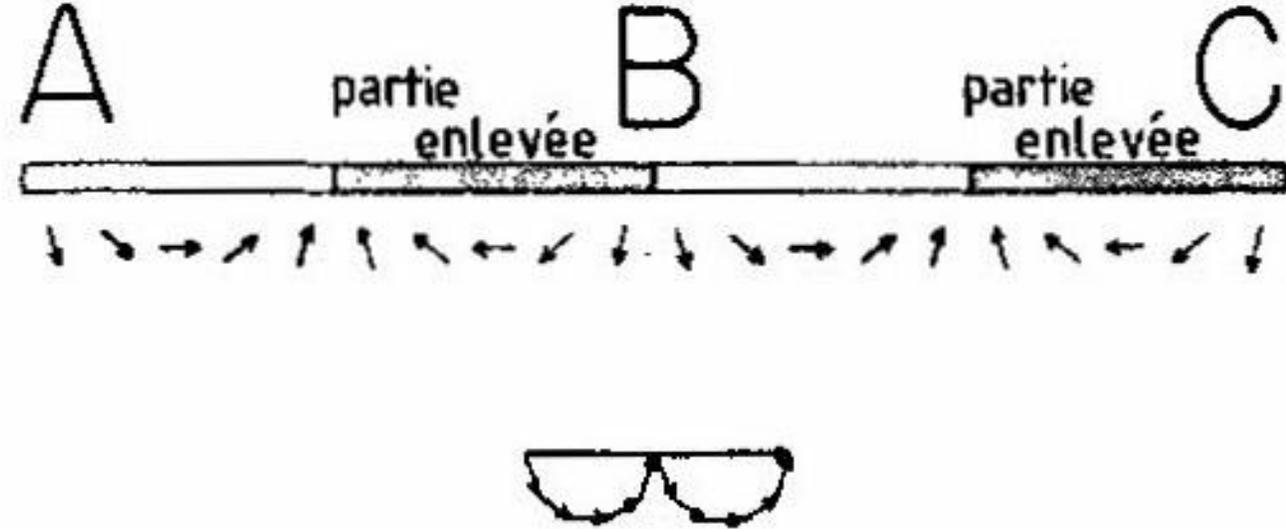
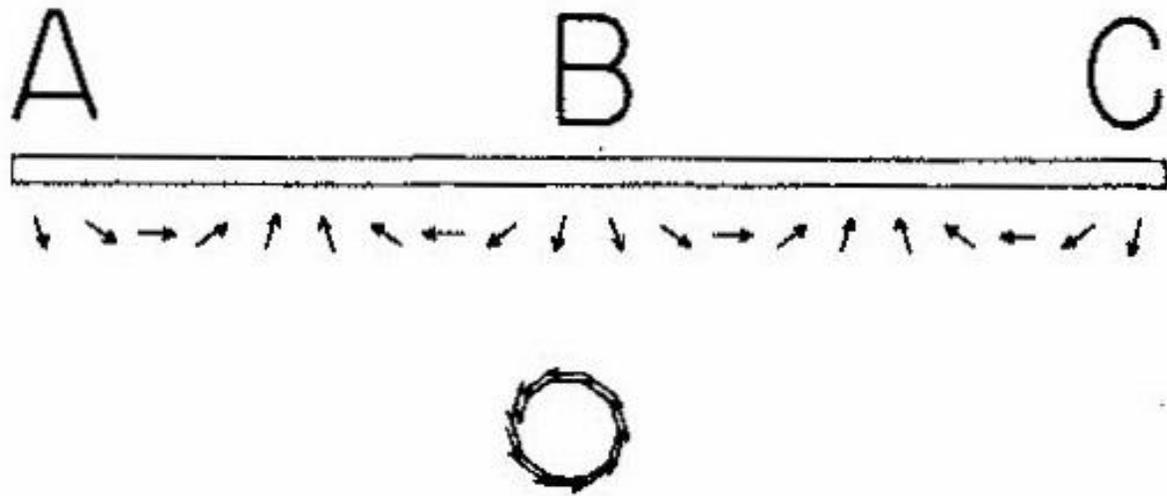
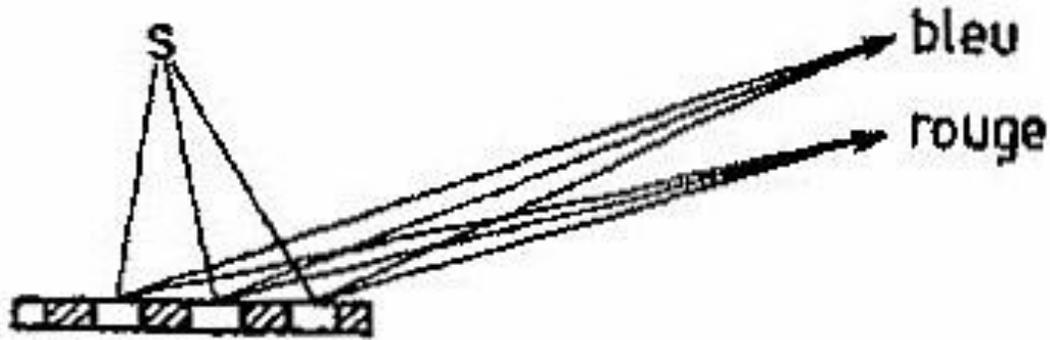


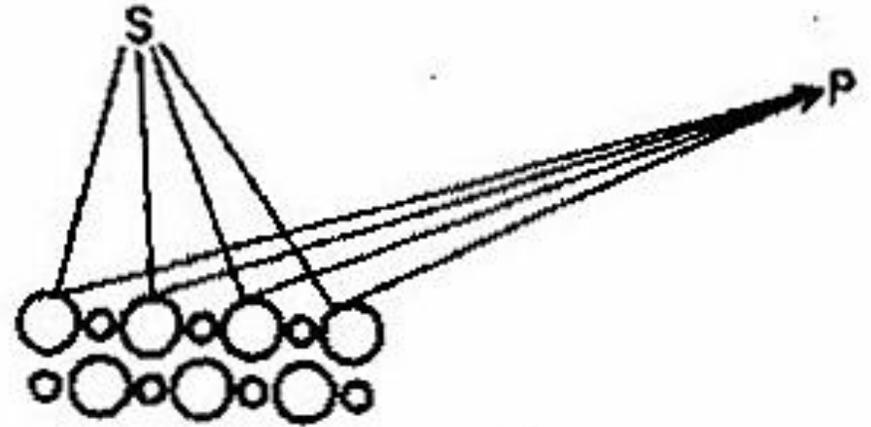
FIGURE 25. Afin de mettre à l'épreuve l'idée selon laquelle il y a réflexion aussi sur les bords du miroir (bien qu'au total les diverses contributions s'annulent les unes les autres), on fait se réfléchir la lumière sur un miroir qui n'est pas situé « au bon endroit » (compte tenu des positions respectives de la source S et du photomultiplicateur P). Ce miroir est divisé en petits rectangles de façon plus fine que dans l'expérience précédente (Fig. 21), de sorte que le temps de parcours ne varie que très peu d'un trajet au trajet voisin. On constate, une fois additionnées toutes les flèches, qu'elles décrivent un circuit fermé; leur somme est donc quasiment nulle.

FIGURE 26. Si l'on n'additionne que les flèches ayant une certaine inclinaison, soit vers la droite (comme ici), soit vers la gauche, celles dont l'inclinaison est opposée ayant été éliminées (en grattant la surface réfléchissante du miroir aux endroits correspondants), on obtient une réflexion non négligeable, bien que le miroir ne soit toujours pas « au bon endroit ». Un miroir sur lequel on a ainsi creusé des sillons est appelé « réseau de diffraction ».

# Loi de la réflexion sur un miroir Physique quantique (approche globale)

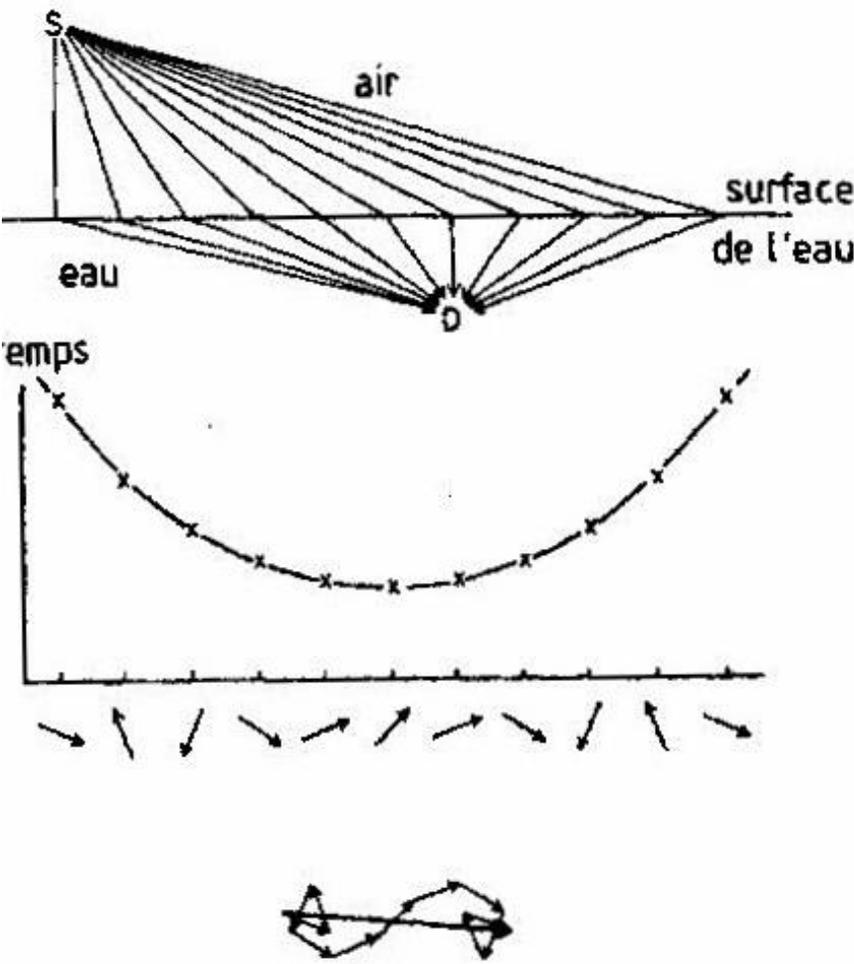


**FIGURE 27.** *Un réseau de diffraction dont les sillons sont espacés de la distance qui convient pour la lumière rouge peut également fonctionner pour des lumières d'une autre couleur, à condition de déplacer le détecteur. C'est la raison pour laquelle on voit sur une surface portant des sillons (telle la surface d'un disque) des couleurs qui varient suivant l'angle sous lequel on regarde la surface.*



**FIGURE 28.** *La Nature a fabriqué Elle-même de nombreux réseaux de diffraction : les cristaux. Un cristal de sel réfléchit les rayons X (c'est-à-dire une lumière pour laquelle l'aiguille du chronomètre imaginaire tourne beaucoup plus vite, environ 10.000 fois plus vite que pour la lumière ordinaire dans différentes directions). On peut en déduire la position exacte des atomes à l'intérieur du cristal.*

Physique quantique (approche globale). La réfraction aussi d'un milieu transparent est expliquée par le procédé.



**FIGURE 29.** Selon la théorie quantique, la lumière peut emprunter plusieurs chemins pour aller de la source située dans l'air au détecteur placé dans l'eau. Faisant les mêmes simplifications que dans le cas de la réflexion par un miroir, on trace la courbe représentant les variations du temps de parcours suivant les divers trajets et l'on dessine (graphique du bas) les flèches correspondant à ces divers parcours. La principale contribution à la flèche finale provient, une fois de plus, des trajets dont les flèches ont presque la même direction ; ces trajets correspondent à des temps de parcours pratiquement égaux ; ils se situent encore au voisinage du trajet de moindre temps.

# Une variante « multiplicative » de la méthode

- En utilisant toujours les flèches, Feynman nous propose de décomposer le trajet total en étapes successives de natures différentes, de caractériser chaque étape par une transformation en module et en phase (angle) du vecteur de propagation du photon et de les enchaîner en combinant ces transformations pour aboutir à l'état final.
- Partant d'un vecteur de module 1 et orienté à midi, les rotations aux différentes étapes doivent être additionnées et les facteurs de multiplication du module multipliés.
- Les phénomènes fondamentaux présentés précédemment sont exposés à nouveau dans cette variante qui permet aussi d'aller plus loin.

# Application à la réflexion-réfraction Physique quantique (approche globale)

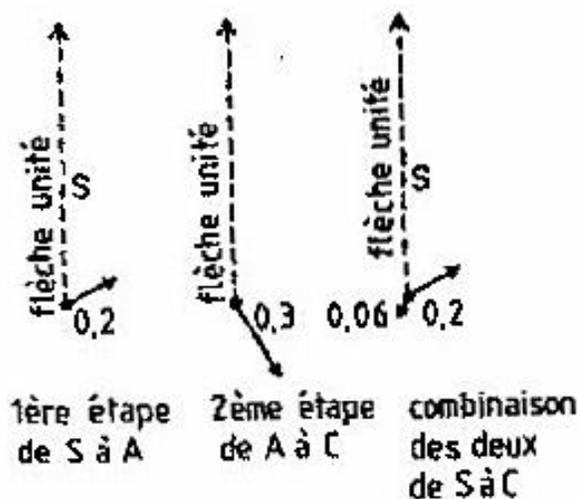
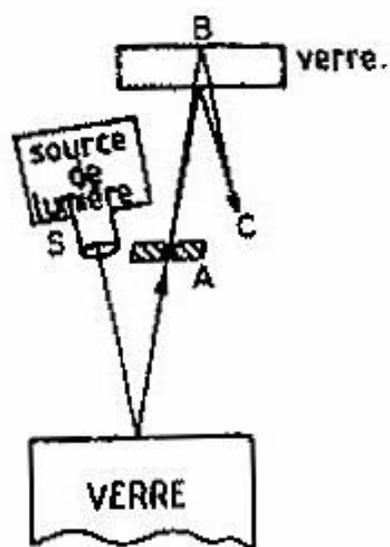
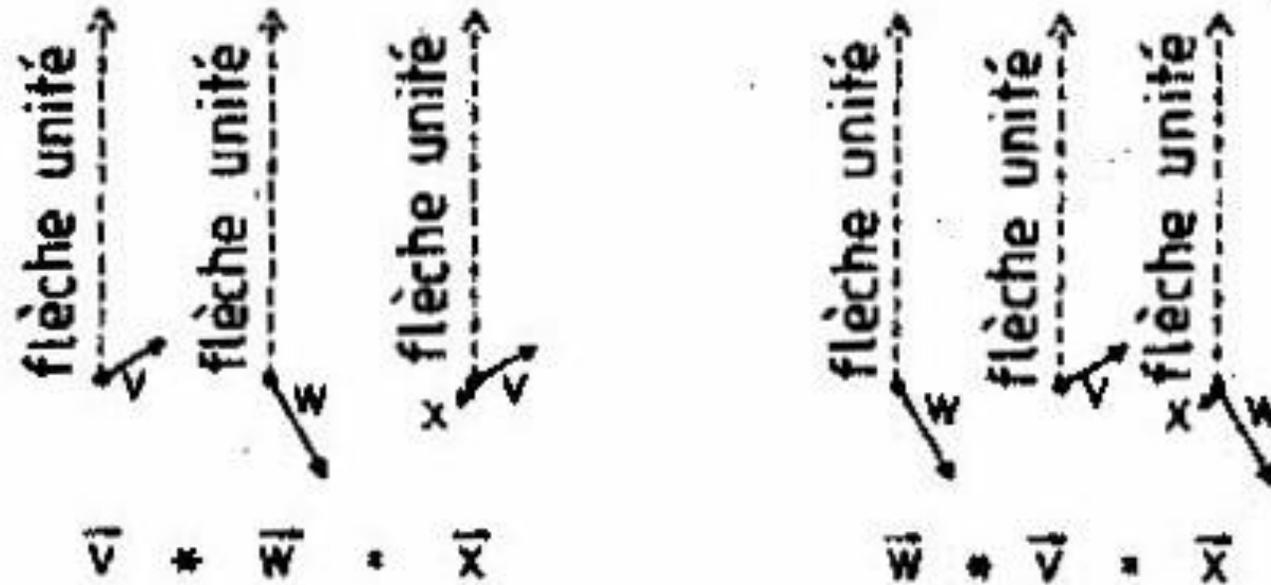


FIGURE 37. Un événement composé peut être analysé en une succession d'étapes. Dans cet exemple, le trajet du photon qui va de S à C peut être décomposé en deux étapes : 1) le photon va de S à A, et 2) le photon va de A à C. Chaque étape peut être analysée de façon séparée. La flèche correspondante peut aussi être considérée (c'est une autre manière de voir les choses) comme le résultat sur la flèche unité (longueur égale à 1 et pointant dans la direction de la petite aiguille d'une horloge à midi) d'une opération combinant une réduction de longueur et une rotation. Dans l'exemple ci-dessus, la réduction correspondant à l'étape 1 est d'un facteur 0,2 et la rotation amène la flèche de midi à 2 heures. La réduction opérée par l'étape 2 est de 0,3 et l'angle de la rotation est équivalent à cinq heures. L'amplitude correspondant à l'ensemble des deux étapes est obtenue en effectuant les opérations ci-dessus les unes après les autres : la flèche unité est d'abord réduite de 1 à 0,2 et tournée de midi à 2 heures. On opère ensuite sur cette flèche comme s'il s'agissait de la flèche unité ; c'est-à-dire qu'on la réduit d'un facteur 0,3 (ce qui donne une longueur de 0,06) et on la tourne de cinq heures (on obtient donc une flèche pointant à 7 heures). L'opération qui vient d'être décrite est appelée « multiplication ».

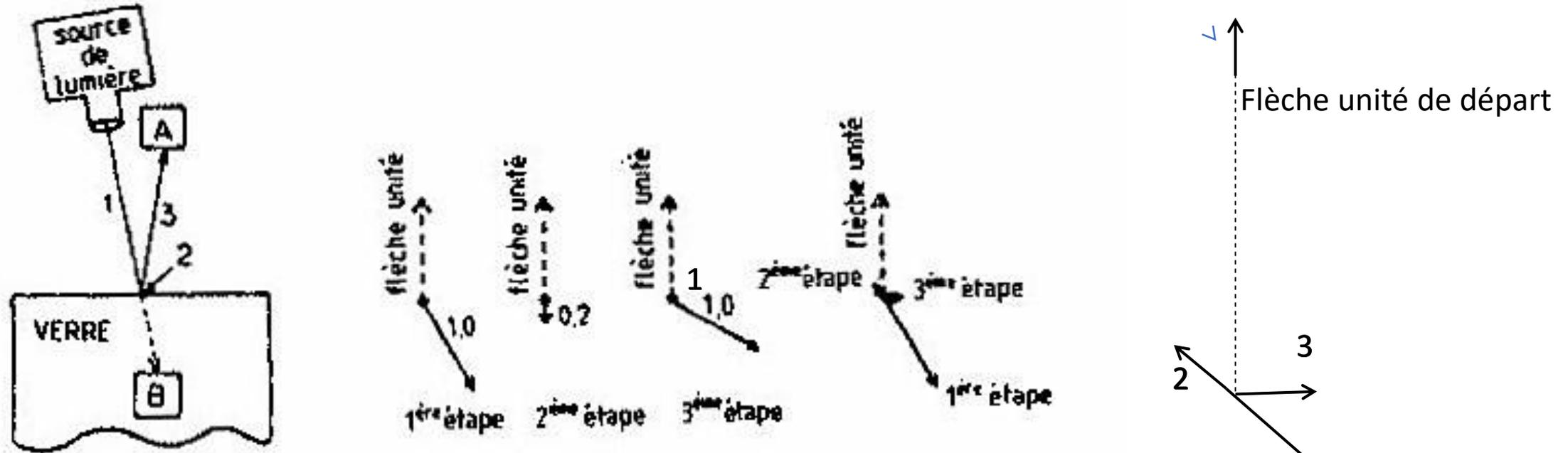
# Exposé de la variante Physique quantique (approche globale)



**FIGURE 39.** *Du point de vue mathématique, la multiplication des flèches peut également être considérée comme une suite de transformations (dans notre cas, il s'agit de réductions et de rotations) affectant la flèche unité. Tout comme pour la multiplication ordinaire, l'ordre des transformations est sans importance : la flèche  $X$  peut aussi bien être obtenue en multipliant la flèche  $V$  par la flèche  $W$  qu'en multipliant  $W$  par  $V$ .*

# Application à la réflexion-réfraction

## Physique quantique (approche globale)



**FIGURE 40.** *La réflexion par une surface unique peut être décomposée en trois étapes successives, chacune produisant sur la flèche unité une réduction et/ou une rotation. On obtient une flèche de longueur 0,2, la même que celle que l'on a obtenue lors de la première conférence ; mais l'analyse effectuée ici est plus profonde.*

Zoom sur figure de droite

# Application à la réflexion-réfraction Physique quantique (approche globale)

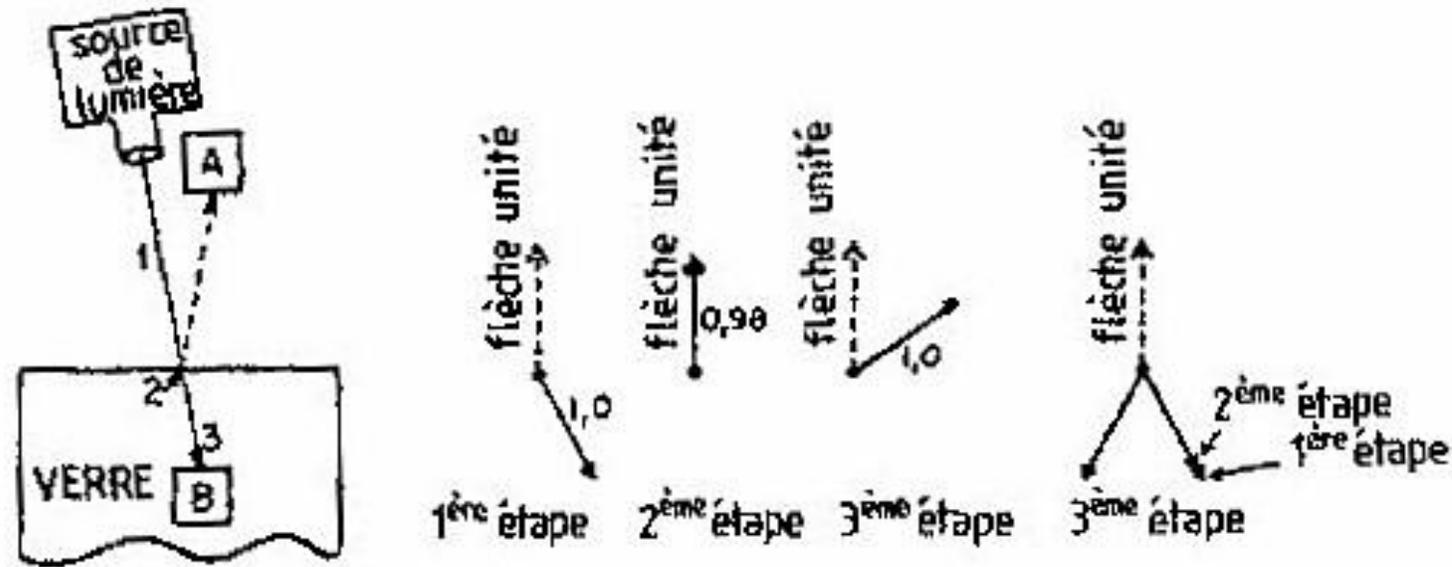
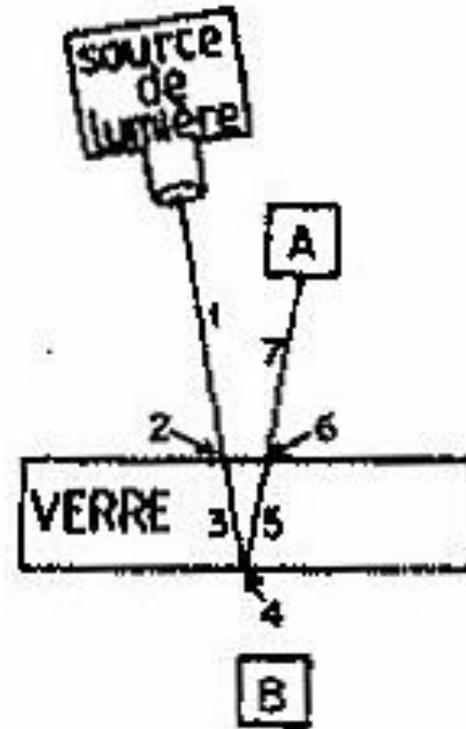


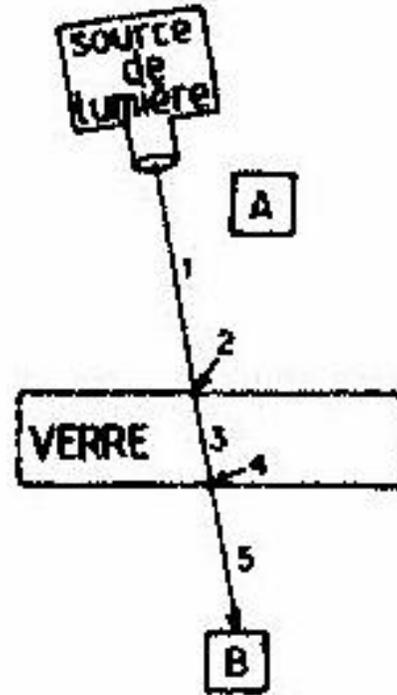
FIGURE 41. La transmission par une surface unique peut également être décomposée en trois étapes successives, chacune produisant sur la flèche unité une réduction et/ou une rotation. On obtient une flèche de longueur 0,98 qui, élevée au carré, donne une probabilité de transmission de 0,96. En ajoutant cette probabilité à la probabilité de réflexion (4 %), on obtient bien une probabilité totale de 100 %.

# Application à la réflexion- face arrière Physique quantique (approche globale)

**FIGURE 42.** *Le phénomène de réflexion par la face postérieure d'une lame de verre peut être décomposé en sept étapes successives. Les étapes 1, 3, 5 et 7 ne produisent que des rotations de la flèche unité; les étapes 2 et 6 produisent une réduction de 0,98, et l'étape 4 produit une réduction de 0,2. Finalement, on obtient une flèche de longueur 0,192 (valeur arrondie à 0,2 lors de la première conférence), et tournée d'un angle donné par la position de l'aiguille du chronomètre qui mesure le temps mis par la lumière pour accomplir tout le trajet de S en A.*

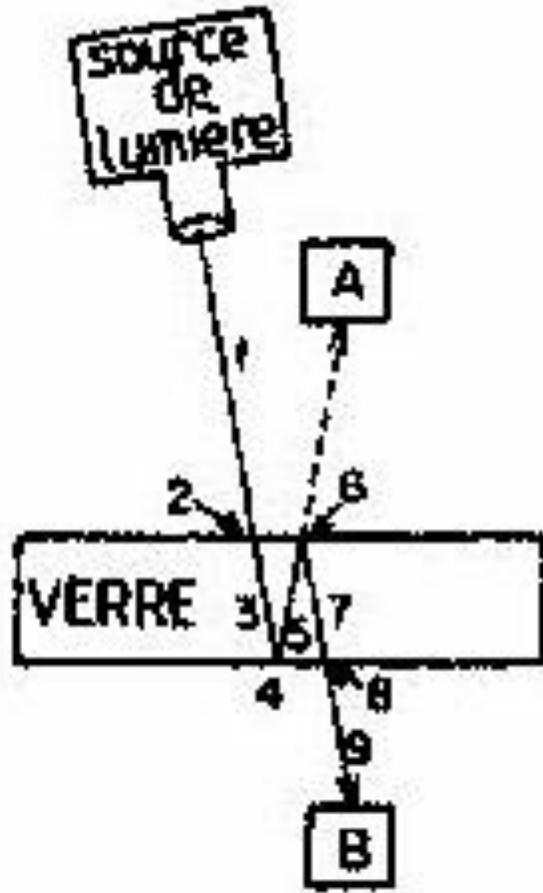


# Application à la réfraction Physique quantique (approche globale)



**FIGURE 43.** Le phénomène de transmission par deux surfaces peut être décomposé en cinq étapes successives. Lors de l'étape 2, la flèche unité est réduite à 0,98 de sa longueur; l'étape 4 opère la même réduction de 0,98, mais sur le résultat que l'on vient d'obtenir; soit au total une réduction à 0,96 environ. Les étapes 1, 3 et 5 ne produisent que des rotations. La longueur de la flèche finale, 0,96, une fois élevée au carré, donne pour la probabilité de transmission par deux surfaces une valeur d'environ 92 %. A ce taux de transmission correspond un taux de réflexion de 8 %. Mais on sait que cela ne se produit que « deux fois par jour ». Lorsque l'épaisseur de la lame est telle que son taux de réflexion soit de 16 %, le raisonnement précédent est en défaut: un taux de réflexion de 16 %, associé à un taux de transmission de 92 %, donne un total supérieur à 100 %!

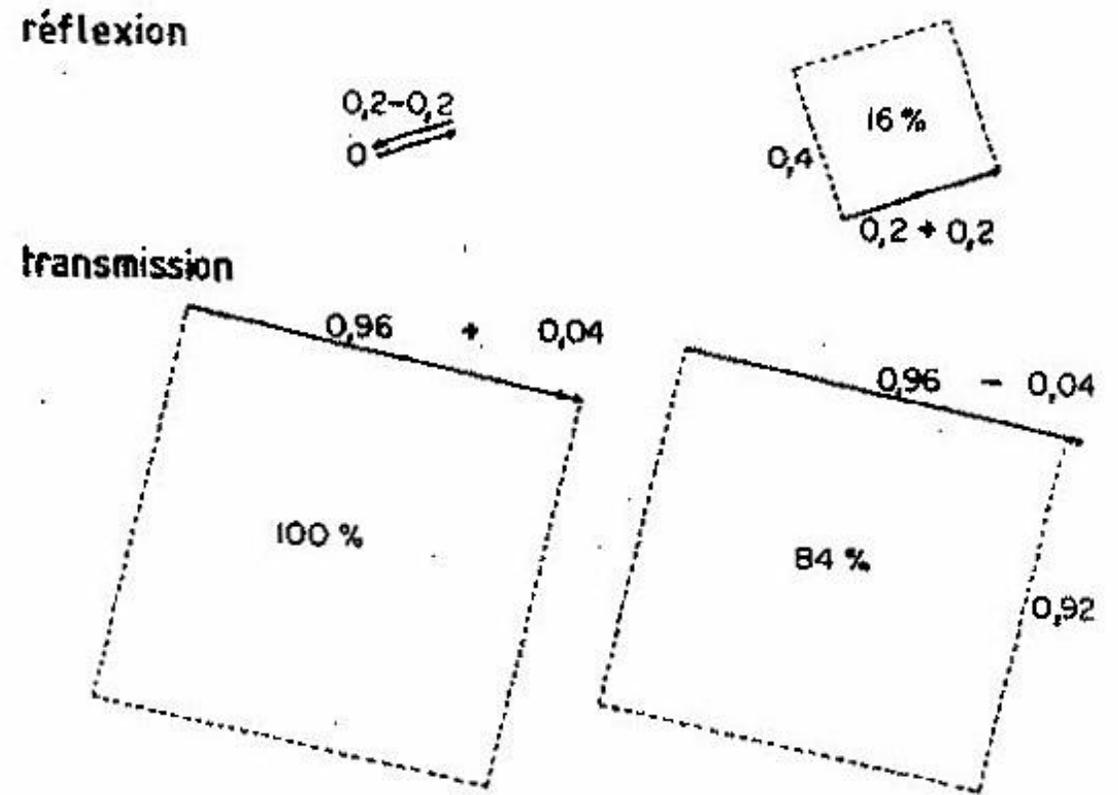
# Prise en compte de réflexions-réfractions multiples. Physique quantique (approche globale)



**FIGURE 44.** *Le calcul doit être refait de façon plus précise. Il faut introduire une autre modalité de transmission de la lumière. Cette seconde modalité met en jeu deux réductions de 0,98 (étapes 2 et 8) et deux réductions de 0,2 (étapes 4 et 6). On obtient ainsi une flèche finale de longueur 0,0384 (arrondie à 0,04).*

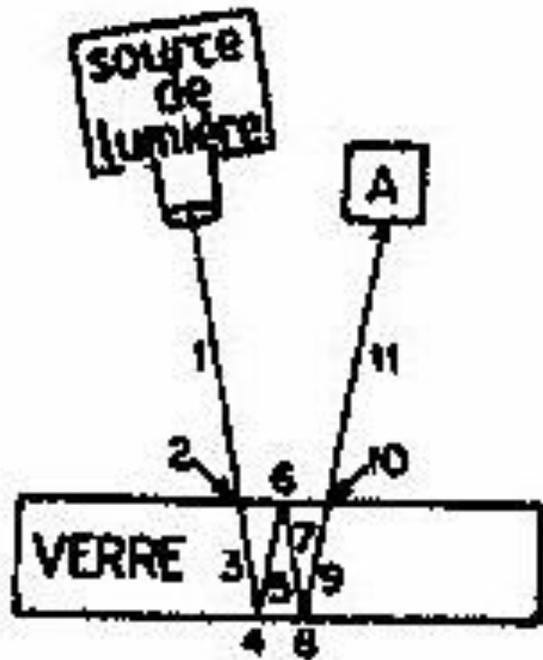
# Loi de la réflexion- réfraction sur lame de verre

## Physique quantique (approche globale)



**FIGURE 45.** *La Nature s'arrange toujours pour que la probabilité de transmission ajoutée à la probabilité de réflexion donne 100 %. Lorsque l'épaisseur de la lame est telle que les amplitudes de transmission s'ajoutent de façon cumulative, les amplitudes de réflexion s'annulent l'une l'autre. Inversement, lorsque ce sont les flèches correspondant à la réflexion qui s'ajoutent de façon cumulative, les flèches correspondant à la transmission sont égales et opposées.*

# Prise en compte des réflexions-réfractions multiples. Physique quantique (approche globale)

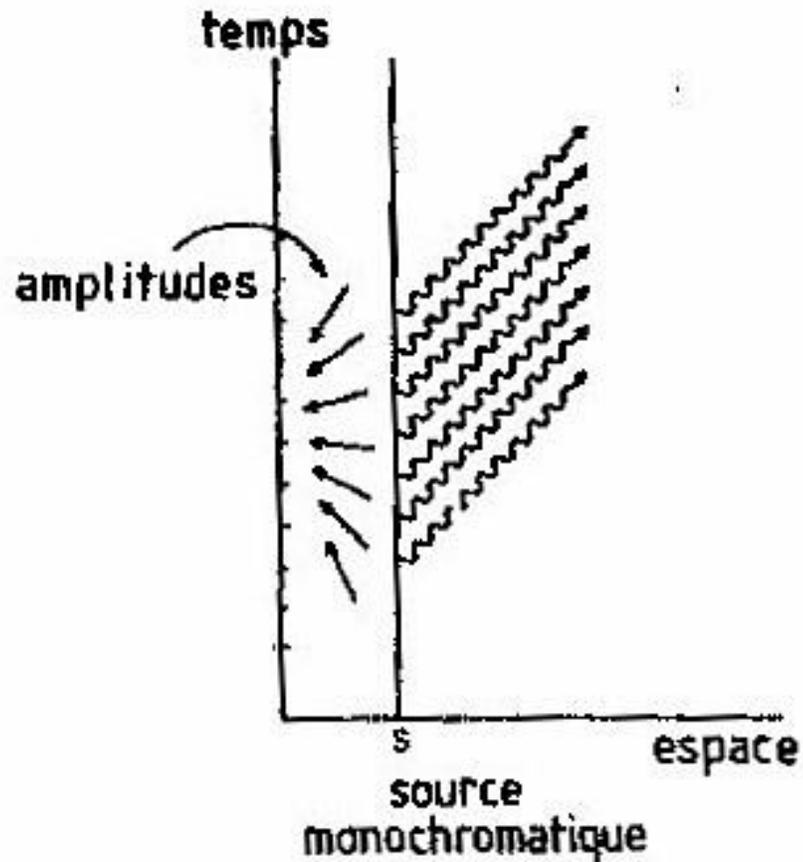


**FIGURE 46.** Il faudrait, si l'on voulait faire un calcul rigoureux, considérer également d'autres modalités pour la réflexion. Ici on a représenté l'une de ces modalités, faisant intervenir des réductions de 0,98 (étapes 2 et 10) et de 0,2 (étapes 4, 6 et 8). On obtient finalement une flèche de longueur 0,008 environ. Puisqu'il s'agit là d'une autre modalité possible pour la réflexion, cette flèche doit être ajoutée aux autres flèches de longueur 0,2 (réflexion par la face avant) et 0,192 (réflexion par la face arrière).

# Une description plus physique et détaillée des phénomènes de réflexion et de réfraction

- Les diapositives précédentes, si elles donnent des résultats corrects, ont occulté le fait qu'une partie des photons interagissent avec les atomes dans tout le milieu transparent (le verre par exemple), et pas seulement à leur surface avec l'air.
- La plupart des photons ne va pas interagir avec le verre s'il est transparent; ils vont traverser « librement » la lame de verre.
- Par contre, ce qu'on considère comme les photons réfléchis ne sont pas des photons incidents, qui ont été absorbés par les atomes du verre, mais des photons émis par des électrons excités des atomes du verre, suite à cette absorption.
- En effet, une émission spontanée de photons de mêmes caractéristiques mais de phases opposées se produit pour revenir à l'état fondamental. Certains de ces photons peuvent retourner vers la surface d'entrée pour contribuer à la réflexion et d'autres continuer vers la sortie pour contribuer à la réfraction.

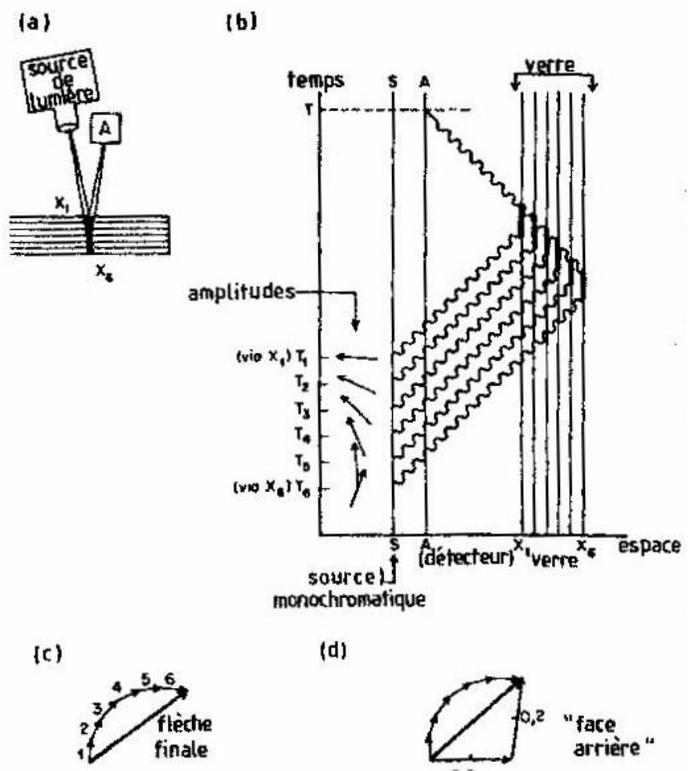
# Matière et lumière, photons et électrons



**FIGURE 67.** *Une source monochromatique est un appareil merveilleusement conçu pour émettre un photon selon une modalité bien précise: l'amplitude d'émission d'un photon à un instant donné tourne, en fonction de cet instant, en sens inverse des aiguilles d'une montre. L'angle de l'amplitude d'émission d'un photon à un instant ultérieur est donc plus petit. Nous supposons que toute la lumière émise par la source va à la vitesse  $c$  (hypothèse des grandes distances).*

Dans cet exemple, on ne prend pas en compte la rotation de phase pendant la propagation car, nonobstant ce que les illustrations précédentes laissaient à penser, quand on regarde de plus près, en fait elle ne change pas. C'est donc le déphasage relatif initial qui importe.

# Matière et lumière, photons et électrons



**FIGURE 68.** Dans cette nouvelle analyse de la réflexion partielle, on commence par décomposer une lame de verre en un certain nombre de couches (six dans le cas présent), puis on examine les différentes modalités selon lesquelles la lumière peut aller de la source au verre et parvenir au détecteur en A. Les seuls domaines importants dans le verre (où les amplitudes de diffusion de la lumière ne s'annulent pas) sont situés au milieu de chaque couche; les points correspondants,  $X_1$  à  $X_6$ , sont représentés en (a) dans la lame de verre, et en (b) par des lignes verticales sur le graphe d'espace-temps. L'événement dont on calcule la probabilité est que le détecteur en A se déclenche à un certain instant, T. Cet événement est donc représenté par un

point (à l'intersection des droites A et T) sur le graphe d'espace-temps.

Chacune des différentes modalités selon lesquelles l'événement peut se produire exige la réalisation de quatre étapes successives, auxquelles correspondent donc quatre flèches à multiplier. Les étapes sont représentées sur la figure (b): 1) un photon quitte la source à un instant donné (les flèches aux instants  $T_1$  à  $T_6$  représentent les amplitudes d'émission à ces instants); 2) le photon se rend de la source en un point du verre (les six modalités possibles sont représentées par les lignes ondulées qui montent vers la droite); 3) un électron en ce point diffuse le photon (étape représentée par un court trait vertical; et 4) un nouveau photon part vers le détecteur où il arrive au temps prescrit, T (étape représentée par une ligne ondulée qui monte vers la gauche). Les amplitudes des étapes 2, 3 et 4 sont les mêmes pour les six modalités possibles, alors que les amplitudes correspondant à l'étape 1 diffèrent. Par rapport à un photon diffusé par un électron à la surface du verre (en  $X_1$ ), un photon diffusé plus profondément dans le verre — en  $X_2$ , par exemple — doit quitter la source plus tôt, à  $T_2$ .

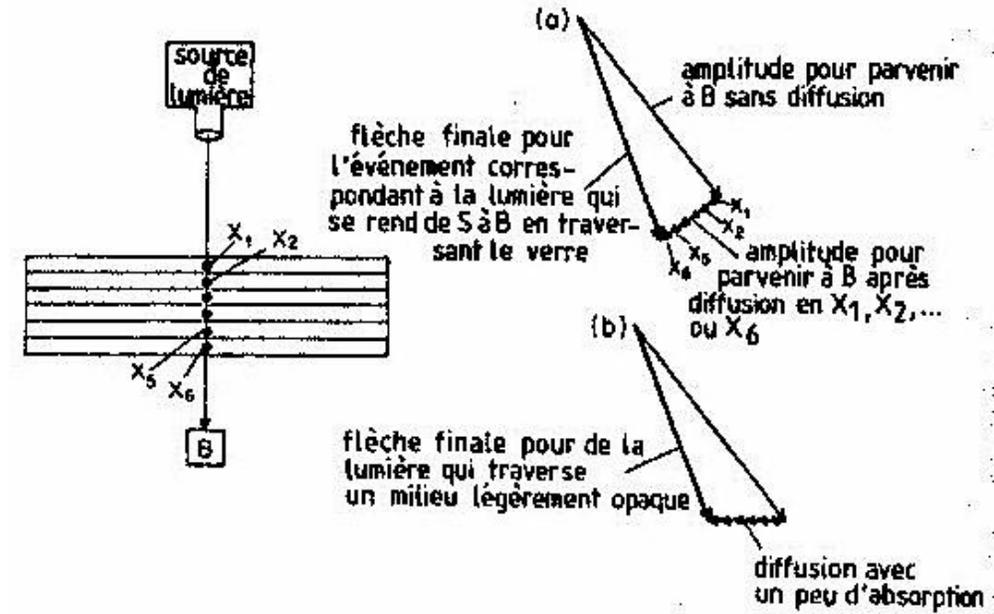
Pour chaque modalité, il faut faire le produit des quatre flèches correspondant aux quatre étapes intermédiaires; les flèches résultantes associées à chaque modalité et visibles en (c) sont plus courtes que les flèches initiales, représentées en (b); chaque flèche a aussi été tournée de  $90^\circ$  (à cause des propriétés de diffusion des électrons dans le verre). Lorsqu'on additionne les six flèches dans l'ordre, elles forment un arc; la flèche finale est la corde de cet arc. On peut obtenir la même flèche finale en dessinant deux flèches radiales, voir (d), et en les « soustrayant » (c'est-à-dire en faisant faire demi-tour à la flèche correspondant à la « face avant » et en l'ajoutant à la flèche correspondant à la « face arrière »). C'est le raccourci que j'avais utilisé pour simplifier les choses, lors de ma première conférence.

# Matière et lumière, photons et électrons

**FIGURE 69.** C'est le processus sans diffusion par les électrons du verre, représenté en (a), qui donne la plus grande contribution à l'amplitude de transmission de la lumière à travers la lame de verre jusqu'au détecteur B. On ajoute à cette flèche six petites flèches pour la diffusion de la lumière par chacune des couches représentées par les points  $X_1$  à  $X_6$ . Ces six flèches ont même longueur (car l'amplitude de diffusion est la même en tous les points du verre) et pointent dans la même direction (car la longueur de tous les chemins de la source jusqu'à B, en passant par un point  $X$ , est la même). Après addition des petites flèches à la grande, on trouve que la flèche finale pour la transmission de la lumière à travers une lame de verre est tournée par rapport à la flèche associée au trajet direct. La lumière nous semble, pour cette raison, mettre plus de temps à traverser le verre que le vide ou l'air. La rotation de la flèche finale, qui est due aux électrons du matériau, s'appelle « l'indice de réfraction ».

Dans le cas des matériaux transparents, les petites flèches sont perpendiculaires à la flèche principale (en fait, elles s'incurvent lorsque l'on inclut les doubles et triples diffusions, de façon à empêcher la flèche finale d'être plus longue que la flèche principale : la Nature se débrouille toujours pour que l'on n'obtienne pas plus de lumière que l'on n'en a mis). Dans le cas des matériaux partiellement opaques — qui absorbent un peu la

lumière — les petites flèches, représentées en (b), s'inclinent vers la flèche principale, et la flèche finale est un peu plus courte que prévu. Cette flèche finale écourtée représente la probabilité, réduite, qu'un photon soit transmis à travers un matériau partiellement opaque.



## 2- Matière et lumière

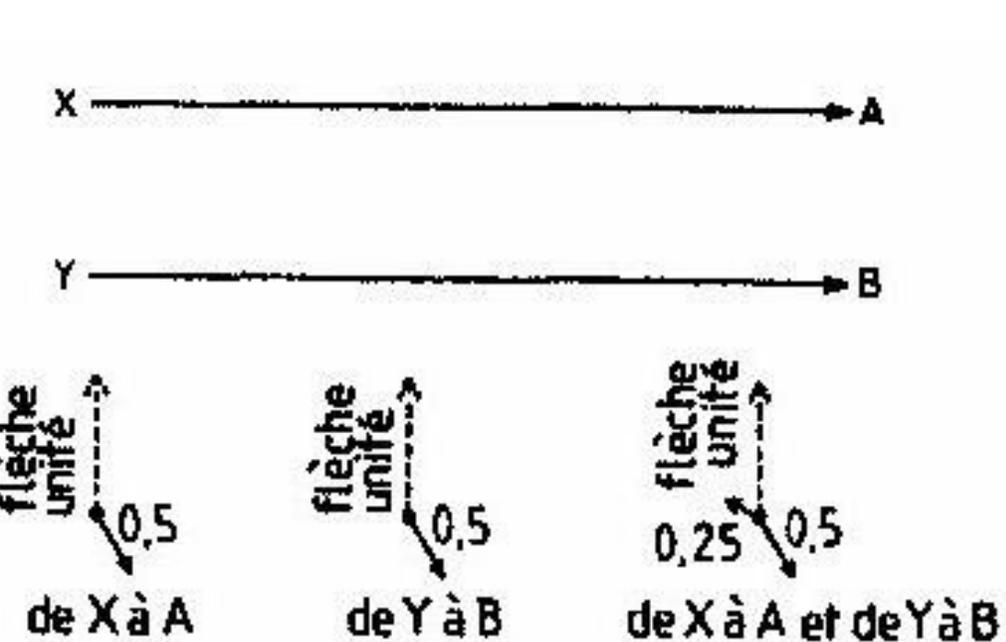
### Interactions entre photons et électrons

Cette partie est beaucoup plus technique que la précédente. La présentation sera limitée à quelques éléments de base et à quelques exemples.

Feynman consacre une longue introduction à l'exposé des particularités de la mécanique quantique en particulier de la diffraction, des interférences et du rôle que joue un détecteur de photons dans le résultat des expériences avec des fentes de Young (il utilise des trous, mais cela revient au même), qui a été exposé en détail dans le cours de mécanique quantique, je vous renvoie vers ce cours. <http://www-cosmosaf.iap.fr/M%C3%A9canique%20quantique-1.pdf>

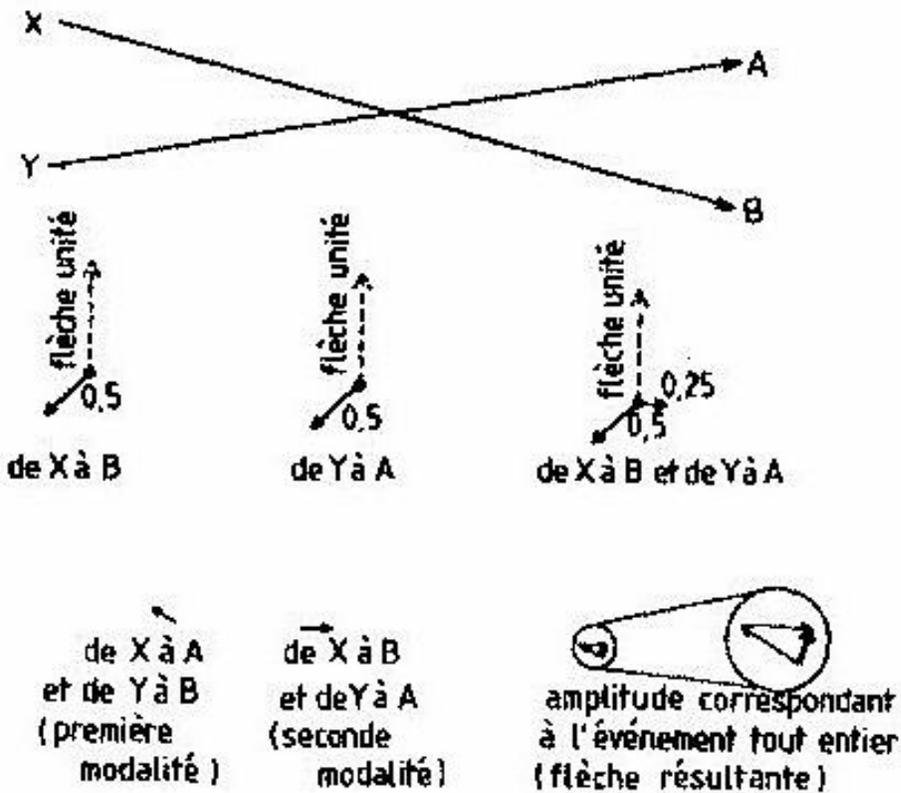
# Modalités de compositions d'événements

Cette diapo et la suivante sont importantes car ce sont elles qui définissent la loi de composition des événements fondamentaux, probabilité pour deux photons d'aller vers 2 points, soit distincts soit confondus, et de même pour les électrons, que Feynman va exposer dans cette partie



**FIGURE 47.** Si l'une des modalités selon lesquelles un événement peut se produire met en jeu plusieurs processus se déroulant de façon indépendante, alors l'amplitude correspondant à cette modalité se calcule en multipliant l'une par l'autre les amplitudes correspondant à ces processus indépendants. Ici, l'événement final peut être décrit ainsi: chaque fois que les sources X et Y lâchent un photon, les photomultiplicateurs A et B font « clic ». Première modalité: un photon va de X à A et un photon va de Y à B (deux « sous-événements » indépendants). On calcule la probabilité correspondant à cette première modalité en multipliant l'une par l'autre les flèches associées aux deux « sous-événements » indépendants (de X à A, et de Y à B). On obtient ainsi l'amplitude de probabilité pour la première modalité. (Voir la suite du raisonnement sous la figure 48.)

# Modalités de compositions d'événements



**FIGURE 48.** Deuxième modalité selon laquelle peut se produire l'événement défini figure 47 : un photon va de X à B, et un photon va de Y à A. Ici encore, on a deux « sous-événements » indépendants ; l'amplitude correspondant à cette deuxième modalité se calcule en multipliant les flèches associées aux deux « sous-événements ». Puis les flèches correspondant aux deux modalités sont additionnées pour obtenir la flèche finale relative à l'événement considéré. Remarquez que la probabilité qu'un événement se produise est toujours représentée par une seule flèche finale, quel que soit le nombre des flèches dessinées et quelles que soient les opérations d'addition et de multiplication que l'on effectue sur elles.

# Les 3 séquences de base qui donnent naissance à tous les phénomènes lumineux et électroniques

Séquence 1: Un photon va d'un endroit à un autre.

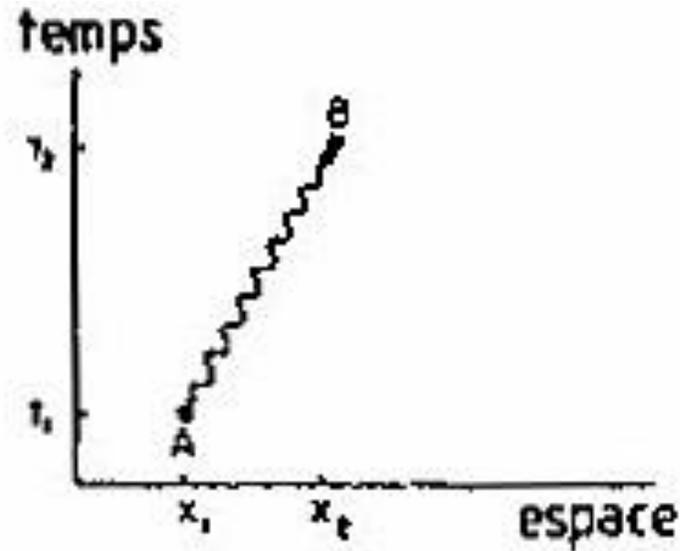
Séquence 2: Un électron va d'un endroit à un autre.

Séquence 3: Un électron émet ou absorbe un photon (interagit avec un photon).

Il y a une amplitude (une flèche) pour chacune de ces séquences, calculée selon des règles déterminées. La suite va exposer ces règles, qui sont les lois, à partir desquelles on peut bâtir tout l'univers (à part les noyaux atomiques et la gravitation, comme d'habitude!).

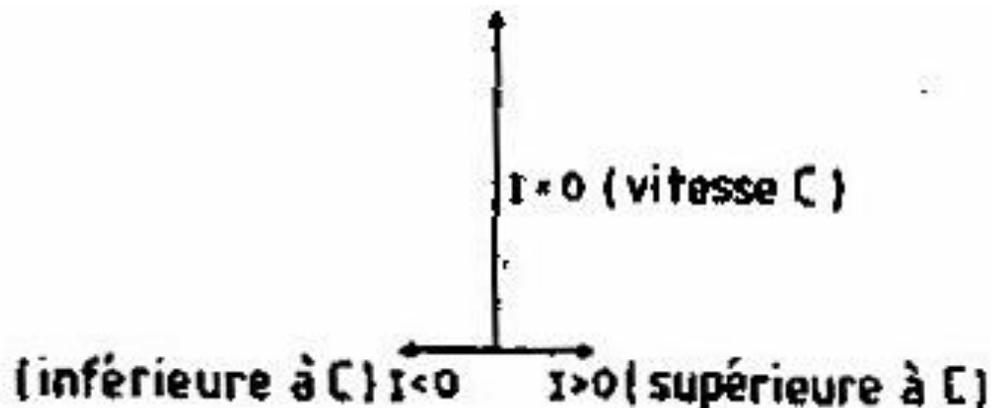
Ces séquences se déroulent dans l'espace-temps à 4 dimensions dont 3 d'espace et 1 de temps, mais dans les diagrammes et les graphes qui seront décrits nous réduirons l'espace à 1 dimension.

# Matière et lumière, photons et électrons



**FIGURE 55.** Un photon (représenté par une ligne ondulée) a une certaine amplitude de passer d'un point A de l'espace-temps à un autre point B. Cette amplitude, que j'appellerai  $P$  (A à B), se calcule à partir d'une formule qui ne dépend que de la différence de position —  $(X_2 - X_1)$  — et de la différence de temps —  $(T_2 - T_1)$ . La formule est en fait une fonction simple, à savoir l'inverse de la différence de leurs carrés, un « intervalle » que l'on appelle  $I$  et qui peut s'écrire  $(X_2 - X_1)^2 - (T_2 - T_1)^2$ .

# Matière et lumière, photons et électrons

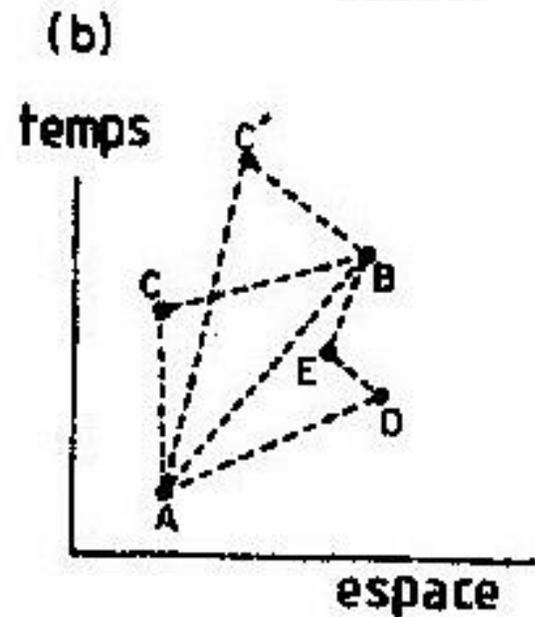
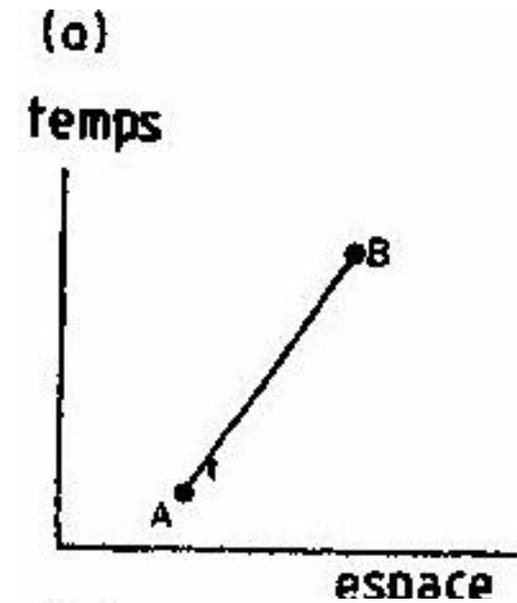


**FIGURE 56.** Lorsque la lumière va à la vitesse  $c$ , « l'intervalle »  $I$  est nul et l'on obtient une contribution importante qui pointe à midi. Lorsque  $I$  est positif, on obtient une contribution dirigée à 3 heures, inversement proportionnelle à  $I$ ; lorsque  $I$  est négatif, on obtient une petite contribution analogue dirigée à 9 heures. Ainsi, la lumière a une amplitude non nulle d'aller plus ou moins vite que la vitesse  $c$ , mais ces amplitudes s'annulent lorsque les distances parcourues sont grandes.

Ne pas se soucier des problèmes dimensionnels car on pose  $c = 1$  pour simplifier les notations, comme  $c$ 'est souvent l'usage.

On rétablit  $c$  à la fin des calculs ou de la démonstration si  $c$ 'est nécessaire.

# Matière et lumière, photons et électrons, ça se complique!

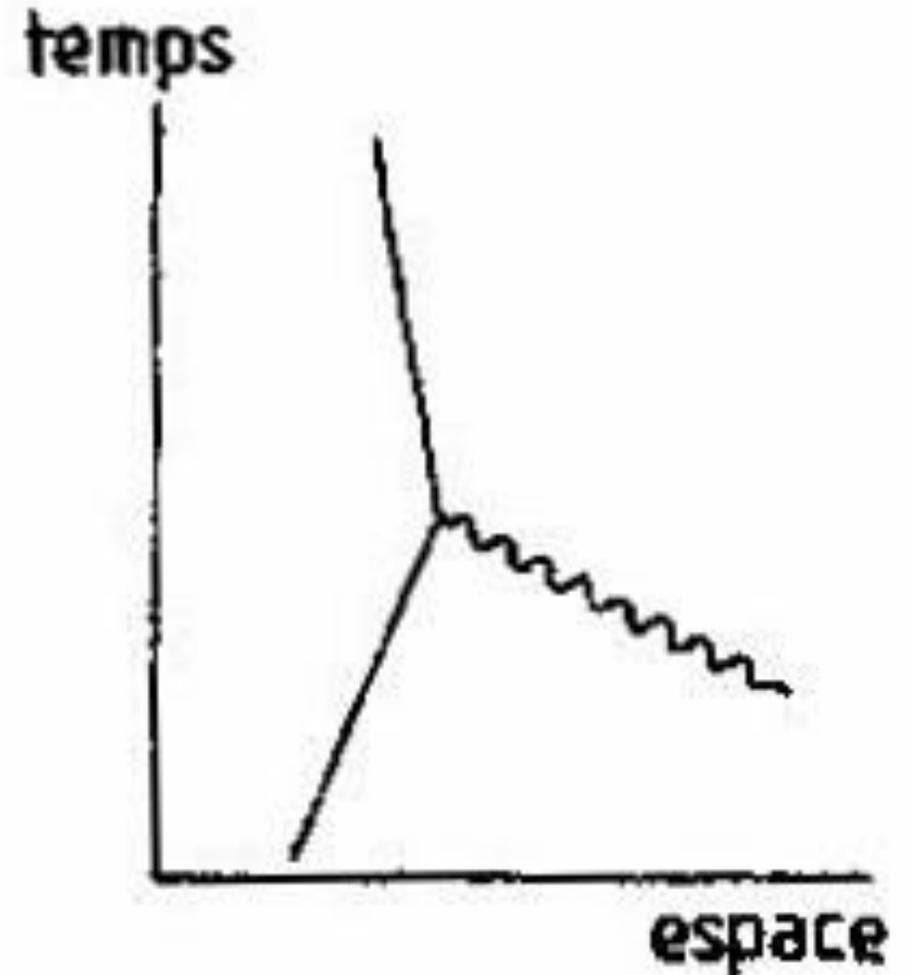


**FIGURE 57.** Un électron a une amplitude pour aller d'un point à un autre dans l'espace-temps, que j'appellerai «  $E(A \text{ à } B)$  ». Bien que je représente  $E(A \text{ à } B)$  par une ligne droite entre deux points (a), on peut l'imaginer comme une somme de plusieurs amplitudes (b) — parmi lesquelles, entre autres, l'amplitude pour que l'électron change de direction dans l'espace-temps (c'est-à-dire pour que sa vitesse dans l'espace change en direction ou en grandeur) aux points C ou C' au cours d'un chemin en « deux bonds », ou encore l'amplitude pour changer de direction en D et en E au cours d'un chemin en « trois bonds » — en plus du chemin direct de A à B. Il peut y avoir n'importe quel nombre de changements de direction, de zéro à l'infini, qui peuvent être disposés d'une infinité de façons entre A et B. Toutes ces contributions sont incluses dans  $E(A \text{ à } B)$ .

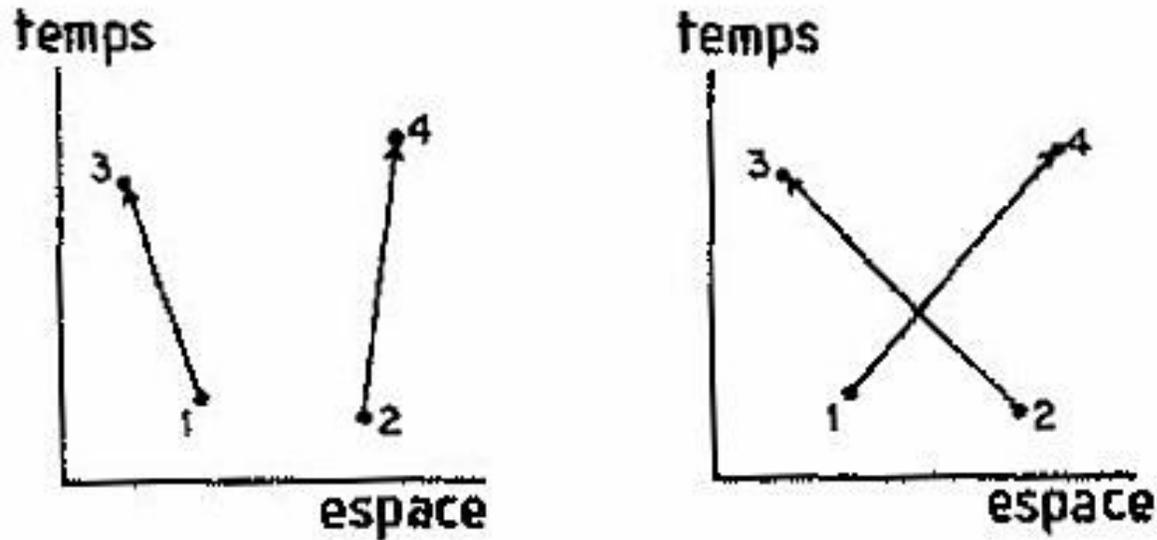
Les trajets représentés par ces graphes vont être classés en fonction du nombre de « vortex » qui sont les sommets notés par des lettres ici. Plus il y en a, moins leur occurrence est probable

# Matière et lumière, photons et électrons

**FIGURE 58.** *Un électron, représenté par une ligne droite, a une certaine amplitude d'émettre ou d'absorber un photon, représenté par une ligne ondulée. Puisque les amplitudes d'émission et d'absorption sont les mêmes, je parlerai de « couplage » dans les deux cas. L'amplitude de couplage est un nombre que je désignerai par  $j$ ; il vaut environ  $-0,1$  pour l'électron (ce nombre est parfois appelé la « charge »).*



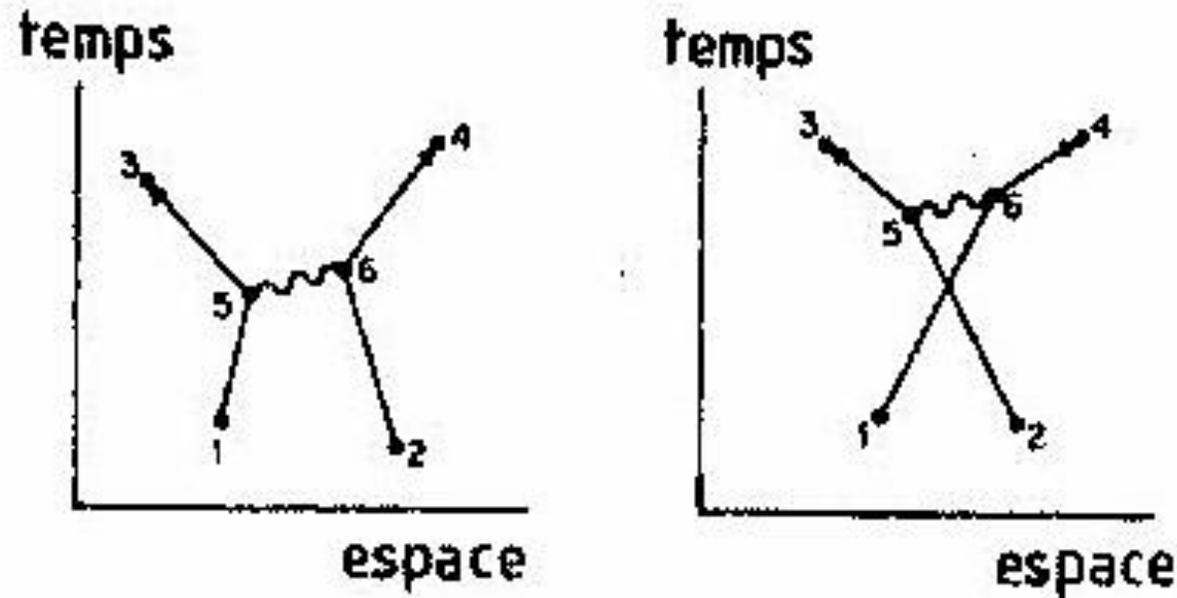
# Matière et lumière, photons et électrons



Ceci est une application des figures 47 et 48.

**FIGURE 59.** Pour évaluer la probabilité que des électrons, démarrant aux points 1 et 2 dans l'espace-temps, parviennent aux points 3 et 4, il faut calculer la flèche correspondant à la « première modalité » (passages de 1 à 3 et de 2 à 4) à l'aide de la formule donnant  $E(A \rightarrow B)$ ; on calcule ensuite la flèche correspondant à la « deuxième modalité » (passages de 1 à 4 et de 2 à 3, avec « croisement »). Enfin, on additionne les deux flèches; on obtient ainsi avec une bonne approximation la flèche finale. (Ceci est vrai pour notre électron factice, simplifié, de « spin zéro ». Si l'on avait tenu compte de la polarisation de l'électron, il aurait fallu soustraire, plutôt qu'ajouter, les deux flèches.)

# Matière et lumière, photons et électrons



**FIGURE 60.** Deux « autres modalités » selon lesquelles l'événement de la figure 59 pourrait se produire : dans chaque cas un photon est émis en 5 et absorbé en 6. Les situations finales correspondant à ces deux possibilités sont les mêmes que dans les autres cas — deux électrons à l'entrée, deux électrons à la sortie — et donc indistinctes. En additionnant les flèches correspondant à ces « autres modalités » aux flèches correspondant aux modalités de la figure 59, on obtient une meilleure approximation de la flèche finale de l'événement.

# Matière et lumière, photons et électrons

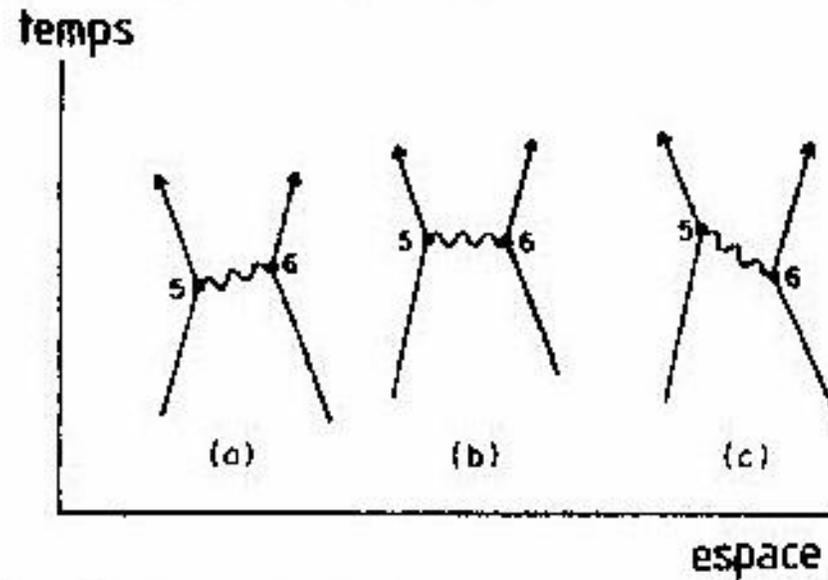


FIGURE 61. *Puisque la lumière a une amplitude pour aller plus ou moins vite que sa vitesse conventionnelle, on peut imaginer que les photons des trois exemples ci-dessus sont émis au point 5 et absorbés au point 6, même si le photon de l'exemple (b) est émis en même temps qu'il est absorbé, et si le photon (c) est émis après avoir été absorbé — une situation que vous auriez peut-être préféré décrire en disant que le photon est émis en 6 et absorbé en 5 pour lui épargner d'avoir à remonter le cours du temps ! En ce qui concerne le calcul (et la Nature) cela revient au même (et est tout aussi possible) ; on se contente donc de dire que le photon est « échangé », et d'introduire dans la formule pour  $P(A \text{ à } B)$  les valeurs des positions dans l'espace-temps.*

# Matière et lumière, photons et électrons

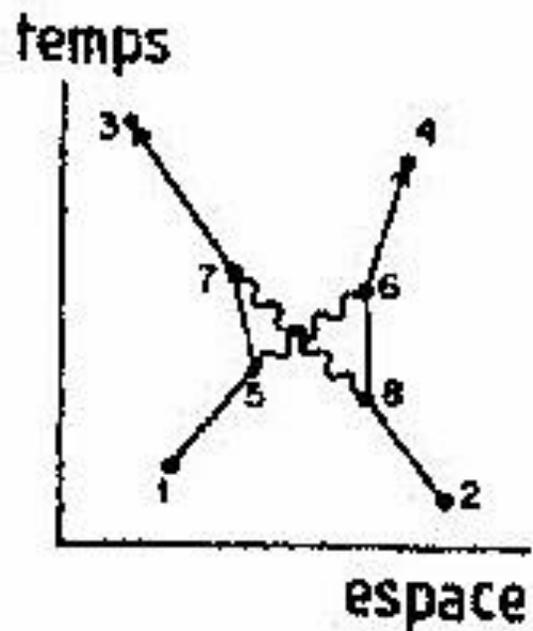
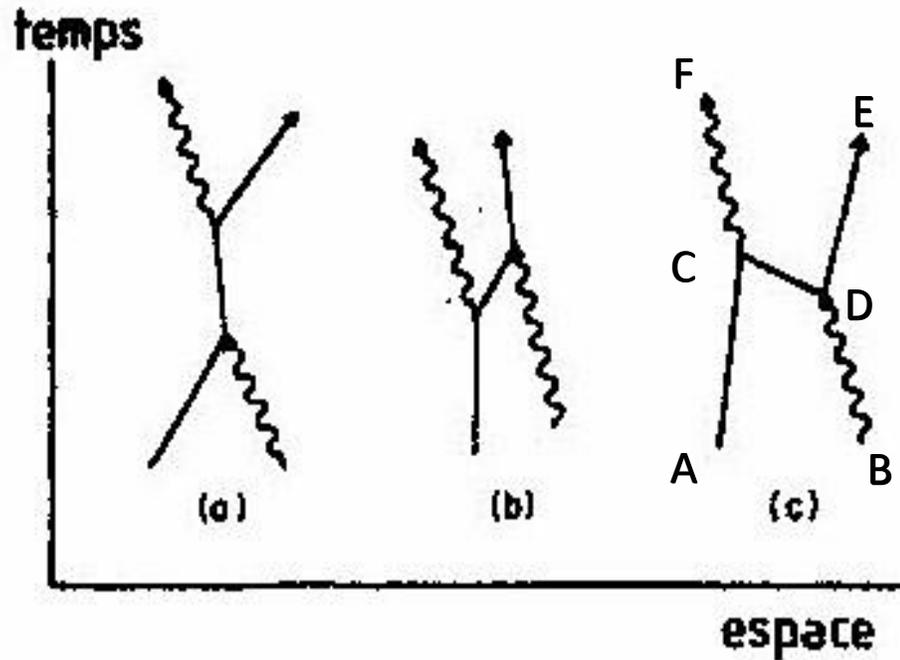


FIGURE 62. L'événement de la figure 59 peut aussi se produire selon des modalités comportant l'échange de deux photons. De nombreux diagrammes de ce type sont possibles (comme on le verra plus loin et plus en détail); l'un d'entre eux est représenté ici. La flèche de ce processus met en jeu tous les points intermédiaires 5, 6, 7 et 8 possibles, et son calcul est très difficile. Comme  $j$  est inférieur à 0,1, la longueur de cette flèche est généralement inférieure au dix-millième (car il y a quatre couplages) des flèches correspondant à la première et à la deuxième modalités, représentées figure 59, et qui ne contenaient aucun  $j$ .

# Matière et lumière, photons et électrons

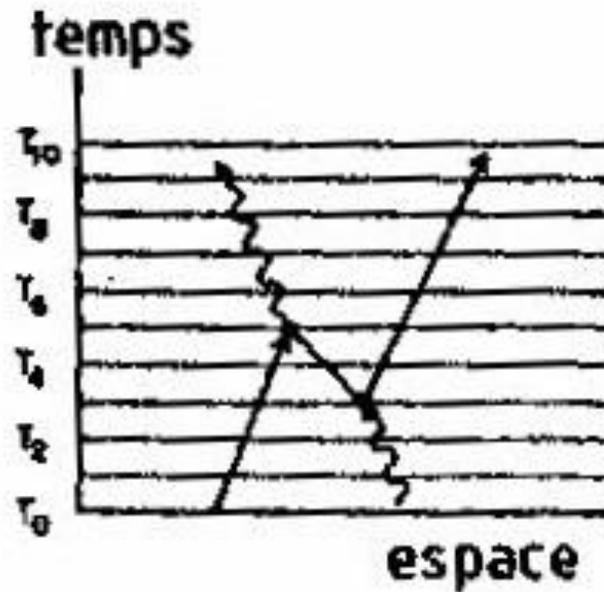


**FIGURE 63.** *La diffusion de la lumière fait intervenir un photon incident sur un électron, et un photon sortant — mais pas nécessairement dans cet ordre, comme on le voit sur l'exemple (b). L'exemple (c) représente une possibilité étrange mais réelle : l'électron émet un photon, se replonge dans le passé pour absorber un photon et s'élance à nouveau vers l'avenir.*

L'exemple (c), où un électron partant de A se dirige vers C où il émet un photon vers F, **puis remonte le temps** pour aller en D où il va absorber un photon émis en B et aller ensuite en E, semble impossible à première vue, pourtant il existe. Voir figure 64.

En effet on peut décrire ce diagramme différemment : tandis qu'un électron part de A vers C, un photon part de B vers D où il se désintègre en une paire électron-positron, ce qui est possible si l'énergie du photon est supérieure à 2 fois l'énergie de masse de l'électron (le positron est un anti-électron). Tandis que l'électron créé en D continue vers E, le positron se dirige vers C où il va s'annihiler avec l'électron créant un photon. Ceci fait dire qu'un positron apparaît comme un électron qui remonte le cours du temps.

# Matière et lumière, photons et électrons

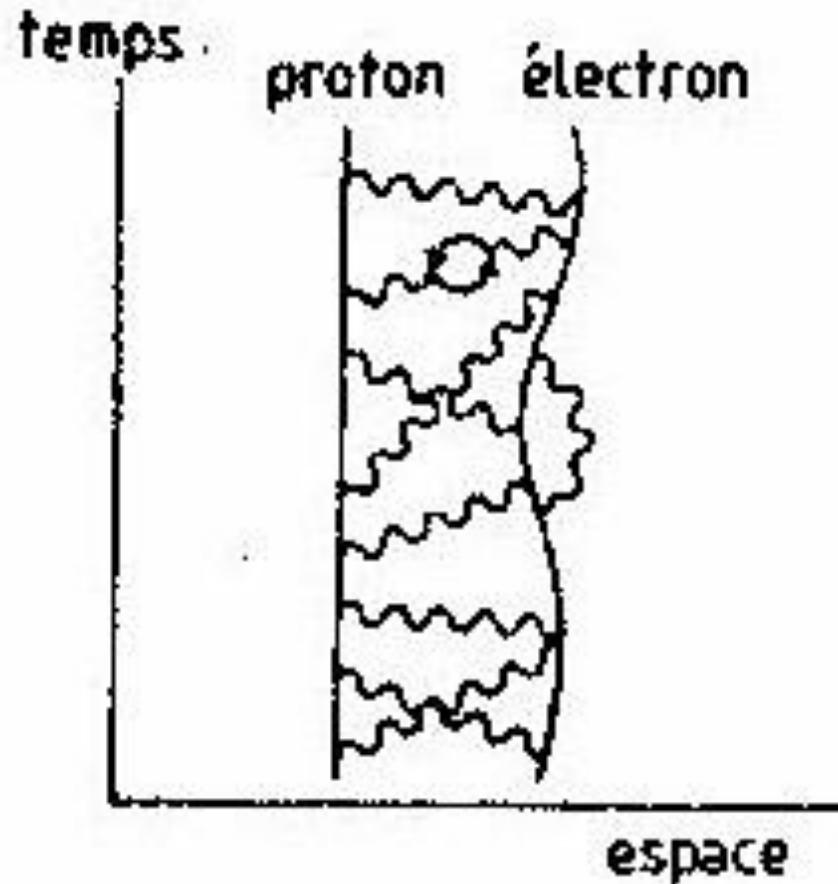


**FIGURE 64.** Examinons l'exemple (c) de la figure 63, en allant dans le sens ordinaire de l'écoulement du temps (comme nous sommes bien forcés de le faire en laboratoire). De  $T_0$  à  $T_3$ , nous voyons l'électron et le photon aller l'un vers l'autre. Tout à coup, à  $T_3$ , le photon se « désintègre » et deux particules apparaissent — un électron et une nouvelle sorte de particule (appelée « positron »),

qui est un électron évoluant en sens inverse du temps et qui semble se diriger vers l'électron initial lui-même ! Le positron s'annihile avec l'électron original, à  $T_5$ , pour produire un nouveau photon. Pendant ce temps, l'électron créé par le photon initial continue vers l'avenir dans l'espace-temps. Cette suite d'événements est observable en laboratoire, et elle est automatiquement prise en compte dans la formule de  $E(A \text{ à } B)$ , sans aucune modification.

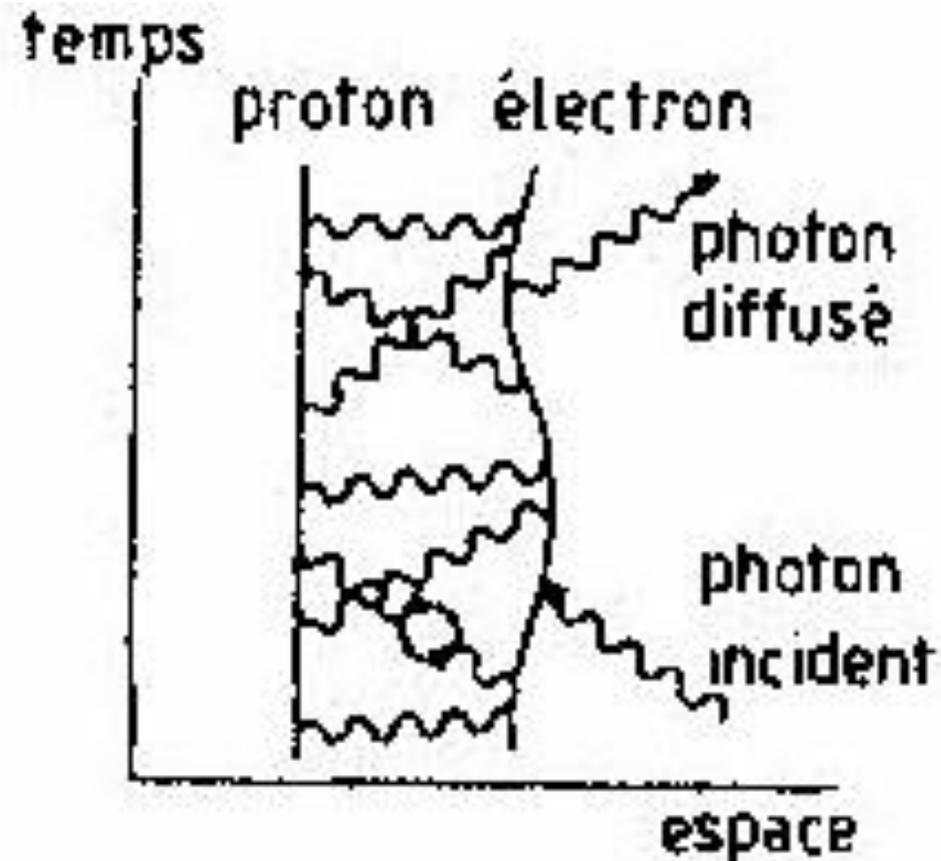
# Matière et lumière, photons et électrons

**FIGURE 65.** *Un électron est maintenu à une certaine distance du noyau d'un atome par échanges de photons avec un proton (une « boîte de Pandore » que nous ouvrirons au chapitre 4). Pour l'instant, le proton peut être approximativement représenté comme une particule immobile. On a ici un atome d'hydrogène, constitué d'un proton et d'un électron qui échangent des photons.*

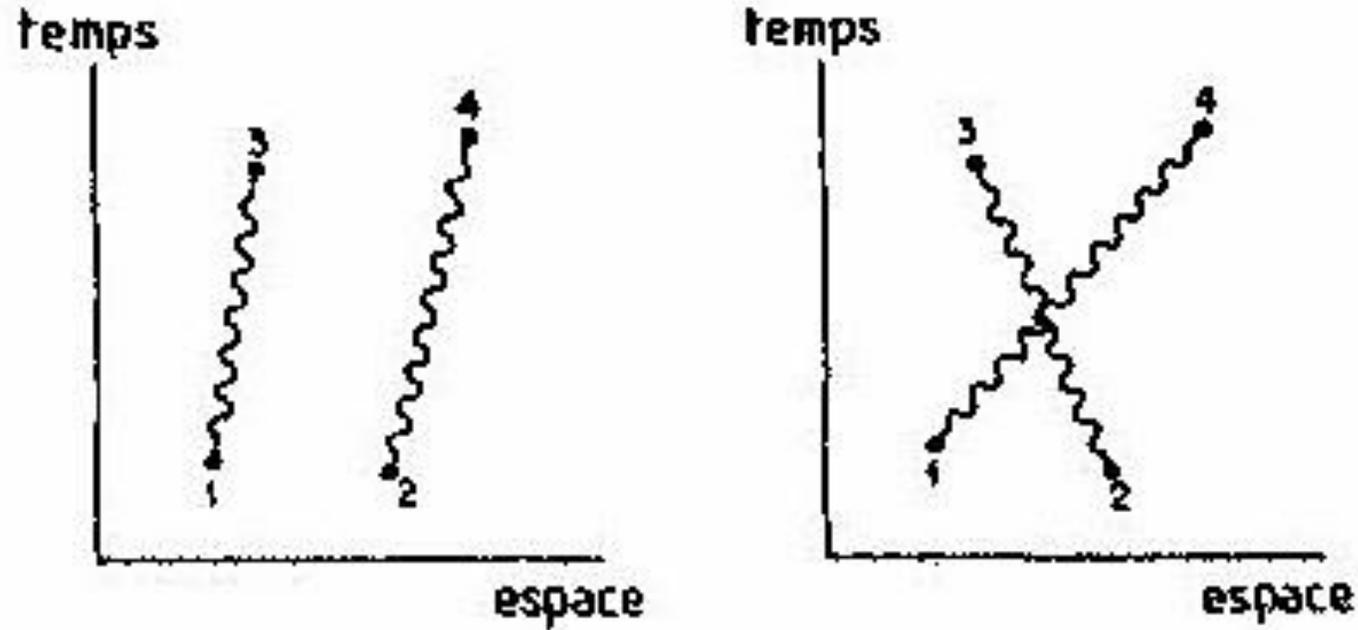


# Matière et lumière, photons et électrons

**FIGURE 66.** *Le phénomène de diffusion de la lumière par un électron dans un atome rend compte de la réflexion partielle par une lame de verre. Le diagramme représente l'une des modalités selon lesquelles cet événement peut se produire dans le cas d'un atome d'hydrogène.*

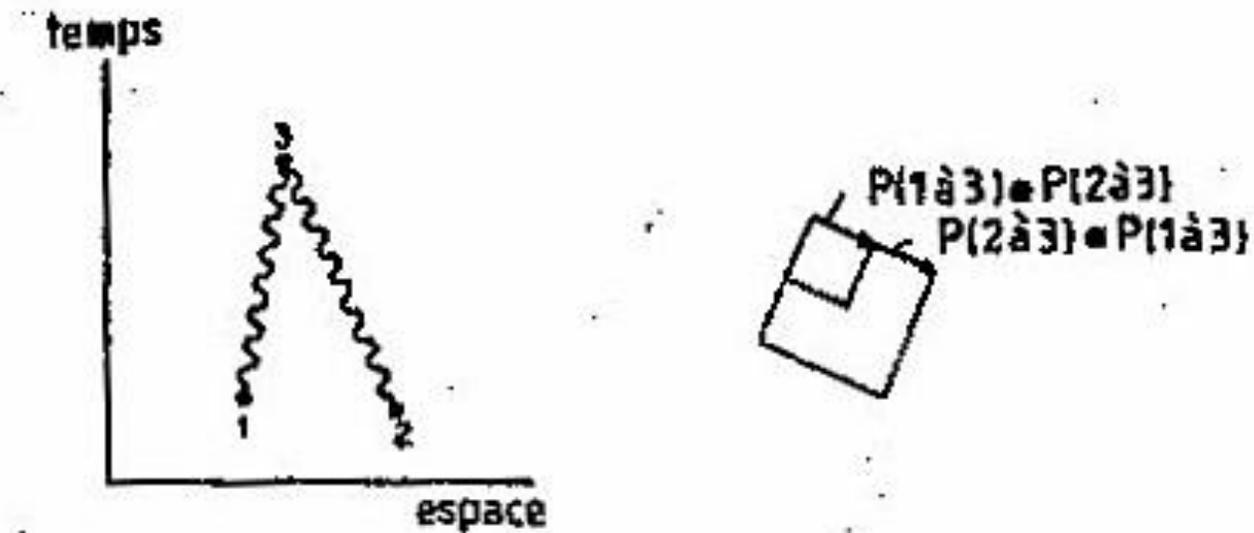


# Matière et lumière, photons et électrons



**FIGURE 70.** On peut évaluer approximativement l'amplitude pour que des photons situés aux points 1 et 2 parviennent aux points 3 et 4 de l'espace-temps, en considérant les deux modalités principales selon lesquelles l'événement peut se produire :  $P(1 \text{ à } 3) \times P(2 \text{ à } 4)$  et  $P(1 \text{ à } 4) \times P(2 \text{ à } 3)$ , représentées ci-dessus. Il y a des interférences, dont le taux varie selon les positions relatives des points 1, 2, 3 et 4.

# Matière et lumière, photons et électrons



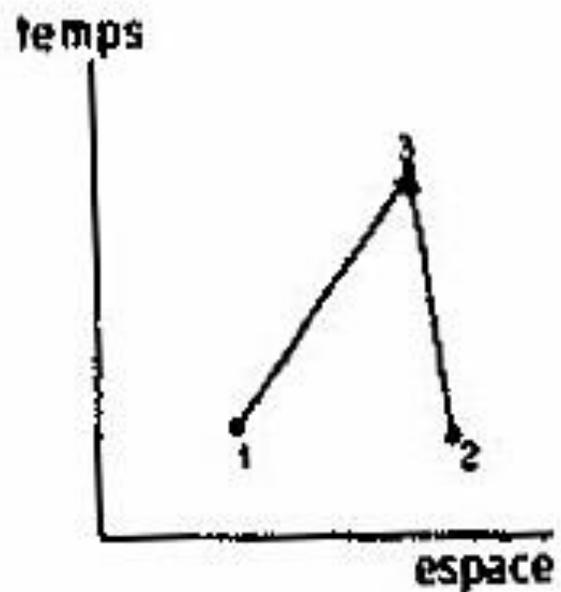
**FIGURE 71.** Lorsque les points 3 et 4 sont confondus, les deux flèches —  $P(1 \text{ à } 3) \times P(2 \text{ à } 3)$  et  $P(2 \text{ à } 3) \times P(1 \text{ à } 3)$  — ont mêmes longueur et direction. Quand on les ajoute, elles « s'alignent » toujours pour former une flèche de longueur double, et de carré quadruple. Les photons ont donc tendance à se rendre au même point de l'espace-temps. Cet effet est d'autant plus marqué qu'il y a plus de photons. Le laser fonctionne selon ce principe.

Ce diagramme montre pourquoi les photons qui sont des bosons ont tendance à s'assembler : effet laser.

Rappelons que les flèches sont liées aux modalités qui vont déterminer les probabilités.

# Matière et lumière, photons et électrons

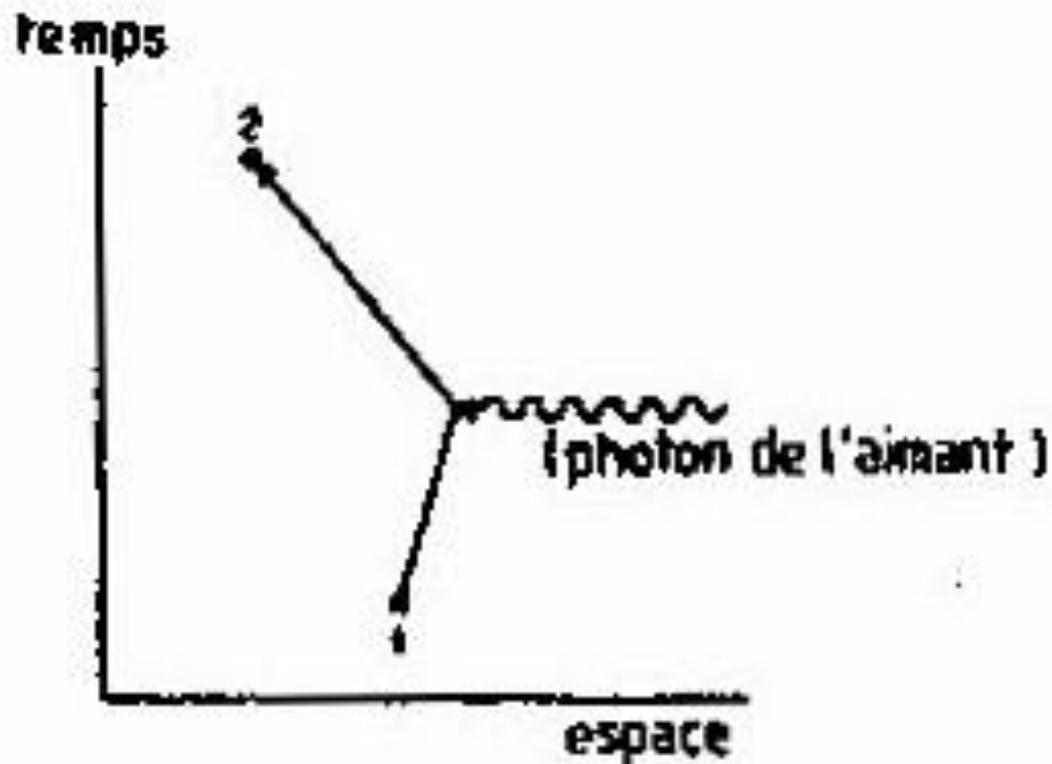
**FIGURE 72.** Si deux électrons (de même polarisation) tentent de se rendre en un même point de l'espace-temps, l'interférence est toujours négative à cause des effets de polarisation : la soustraction des deux flèches identiques —  $E(1 \text{ à } 3) \times E(2 \text{ à } 3)$  et  $E(2 \text{ à } 3) \times E(1 \text{ à } 3)$  — conduit à une flèche résultante de longueur nulle. Cette horreur des électrons pour une position commune dans l'espace-temps est baptisée « Principe d'exclusion » ; elle explique la grande diversité des atomes rencontrés dans l'univers.



$$E(1 \text{ à } 3) \times E(2 \text{ à } 3) - E(2 \text{ à } 3) \times E(1 \text{ à } 3) = 0$$

Ce diagramme explique pourquoi les électrons qui sont des fermions ne peuvent pas s'assembler : Principe d'exclusion de Pauli

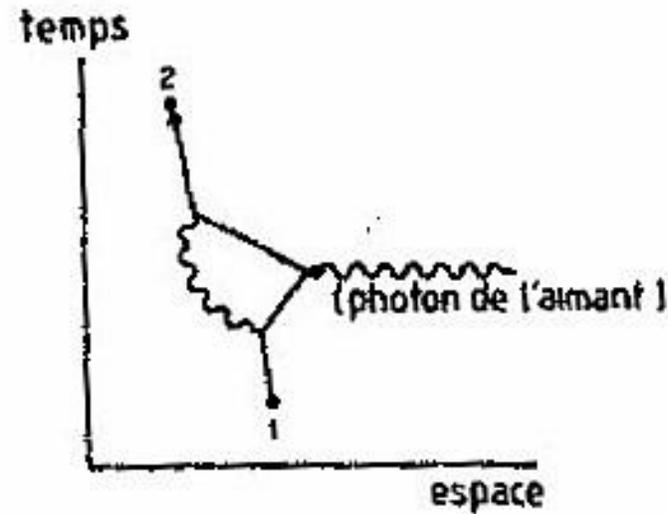
# Matière et lumière, photons et électrons



**FIGURE 73.** *Le diagramme correspondant au calcul effectué par Dirac pour le moment magnétique d'un électron est très simple. On attribuera la valeur 1 au résultat correspondant à ce diagramme.*

# Matière et lumière, photons et électrons

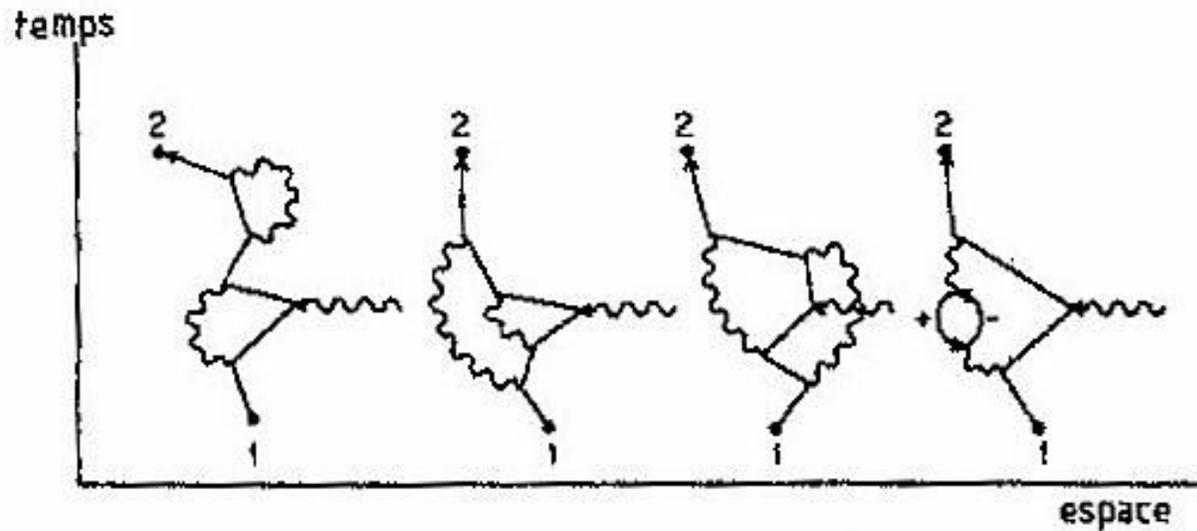
## Il faut aussi considérer des graphes plus complexes



**FIGURE 74.** *Les expériences montrent que la vraie valeur du moment magnétique de l'électron n'est pas exactement 1, mais un peu plus. Cela résulte de l'existence de modalités alternatives : l'électron peut émettre un photon puis l'absorber — ce qui nécessite deux  $E(A \text{ à } B)$ , un  $P(A \text{ à } B)$ , et deux  $j$  supplémentaires. La correction due à cette modalité, calculée par Schwinger, est de  $j \times j$  divisé par  $2\pi$ . Comme cette modalité est expérimentalement indiscernable de la première — un électron démarre au point 1 et aboutit au point 2 — il faut additionner les flèches correspondant aux deux modalités, et il y a interférence.*

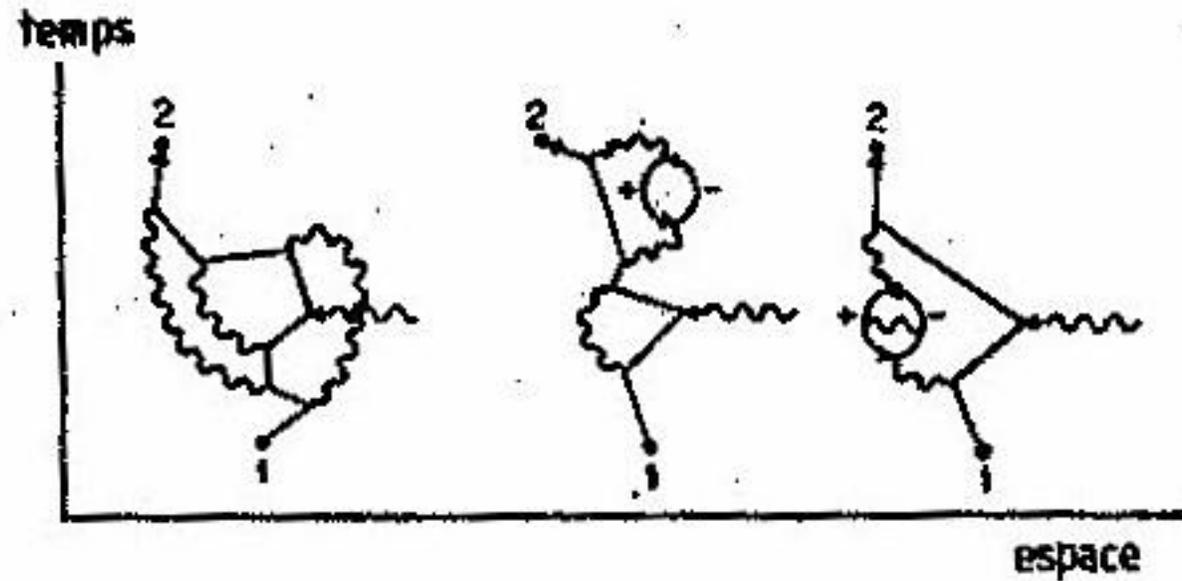
# Matière et lumière, photons et électrons

Pour obtenir une précision suffisante il faut faire des calculs sur un grand nombre de graphes



**FIGURE 75.** *Les résultats expérimentaux sont devenus si précis qu'il a fallu calculer d'autres modalités, mettant en jeu quatre couplages supplémentaires (et cela pour tous les points intermédiaires possibles de l'espace-temps) ; quelques-unes sont représentées ici. Dans l'alternative représentée à droite, un photon se désintègre en une paire électron-positron (processus décrit figure 64) qui s'annihile pour donner un nouveau photon finalement absorbé par l'électron.*

# Matière et lumière, photons et électrons



**FIGURE 76.** Des calculs destinés à améliorer encore la précision de la valeur théorique sont actuellement en cours. La contribution suivante à l'amplitude, qui représente toutes les possibilités avec six couplages supplémentaires, implique environ 70 diagrammes, dont trois sont représentés ici. En 1983, le nombre théorique était 1,001 159 652 46, avec une incertitude d'environ 20 sur les deux derniers chiffres ; le nombre expérimental était 1,001 159 652 21, avec une incertitude d'environ 4 sur le dernier chiffre. Cette précision est équivalente à la mesure de la distance de Los Angeles à New York, soit plus de 5.000km, à l'épaisseur d'un cheveu près.

En guise de conclusion Feynman déclare

**Il reste dans toute cette histoire quelque chose de particulièrement irritant : les masses  $m$  observées pour les particules. Aucune théorie ne parvient à expliquer ces nombres de façon satisfaisante. Toutes nos théories utilisent ces nombres, mais on n'y comprend rien — ni leurs valeurs, ni d'où elles viennent. D'un point de vue fondamental, il s'agit, je crois d'un problème aussi grave que passionnant.**

Pour enfoncer le clou, ajoutons que pour le nombre de familles de particules, c'est le même problème, nous en connaissons 3, mais nous ne savons pas s'il y en a plus, même si des contraintes au niveau de la cosmologie semble les limiter à 3, mais cette existence de 3 familles pour une même particule ne résulte d'aucune théorie connue.

# Conclusion

Comment l'utilisation de flèches (vecteurs) qu'on doit simplement additionner permet-elle de représenter un problème aussi complexe que l'électrodynamique quantique?

La lumière possède un caractère corpusculaire et un caractère ondulatoire qui se manifestent à travers les différentes expériences. Un vecteur est un objet qui possède une longueur (module qui est un scalaire: un nombre) et une orientation dans l'espace (et aussi dans l'espace-temps s'il est spatio-temporel).

Ce vecteur peut rendre compte d'un phénomène qui possède un paramètre scalaire (une masse par exemple) mais aussi une phase, liée à un caractère ondulatoire.

C'est la clé du succès de cette représentation, l'outil incorpore l'information nécessaire à la description du phénomène. Cela rejoint l'analyse que nous avons faite à propos du concept de groupe de symétrie qui pouvait s'appliquer à des objets qui ne semblaient pas avoir de lien entre eux.