

Vérité et fausseté
en physique:
Quelle est la "vraie" nature de la
lumière ?

Claude Fabre

*Laboratoire Kastler Brossel
Université Pierre et Marie Curie et Ecole Normale Supérieure
Paris*

Sur quelle "évidence" se baser pour établir le caractère de vérité et de fausseté d'une explication physique ?

Une illustration par quelques exemples tirés de l'histoire des conceptions de la lumière

depuis Euclide
(300 av JC) ...



...jusqu' à Glauber
(prix Nobel 2005)

les phénomènes lumineux:



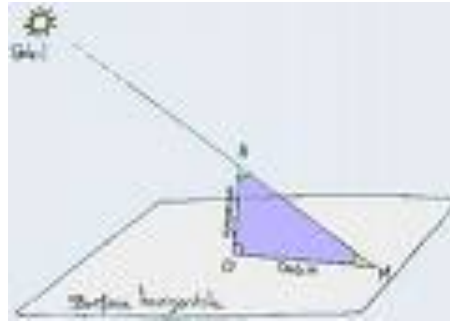
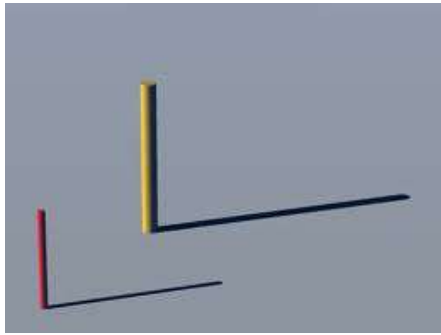
omniprésents

complexes

comment mettre de l'ordre et de la rationalité
dans la multitude des phénomènes lumineux ?

Une première évidence:

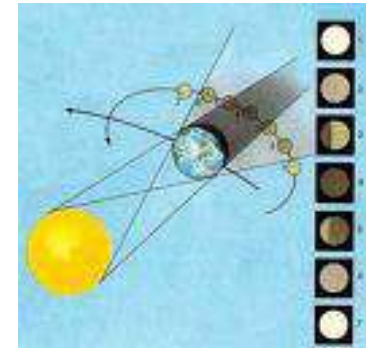
l'ombre



La lumière se propage en ligne droite à partir des sources lumineuses

Babylone -1000, Thalès -600, Chine -300
raisonnements géométriques possibles

Explication des phases de la lune, des éclipses ...

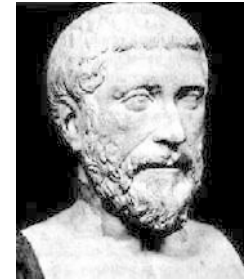


le rayon lumineux, une vérité incontestable, basée sur:

- une "évidence expérimentale"
- une modélisation mathématique
- un pouvoir prédictif

**Une source initiale
de confusions:
la vision**

Pythagore (-600)



Euclide (-300)



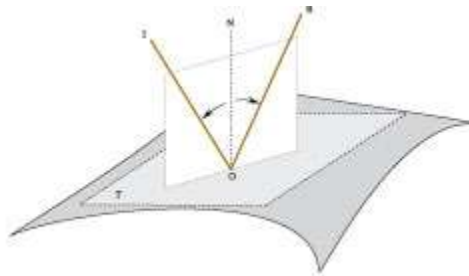
Dans la vision la lumière est quelque chose qui est **émis par l'oeil**

On « jette un coup d'œil », on « porte son regard sur... »

Introduction du **rayon visuel** émis par l'œil
distinct du rayon lumineux

une approche que nous savons "fausse"

- a longtemps prévalu : poids de l'autorité
- compatible avec l'optique géométrique



les rayons de l'optique géométrique
ne dépendent pas du sens de parcours

réfutation de la théorie fausse

Alhazen (1000)

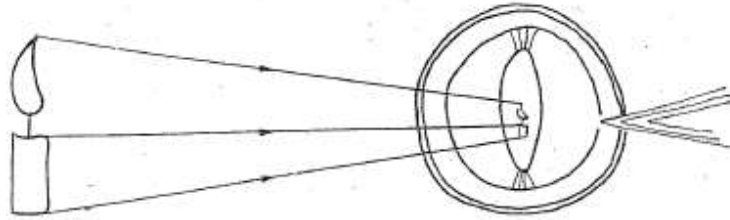
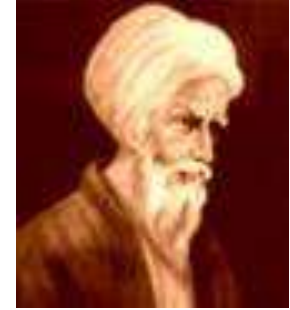


Figure 4



La vision se fait par des rayons allant de l'objet à l'œil

J. Kepler (1600)

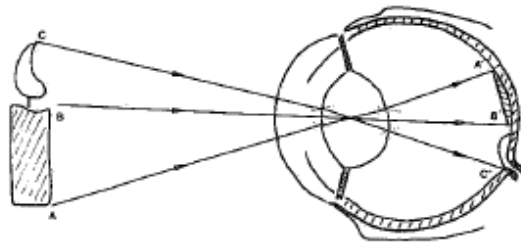


Figure 13



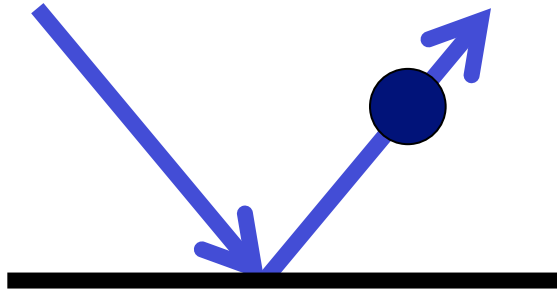
renversement de l'"évidence" antique

le rayon visuel de l'antiquité nous paraît maintenant absurde

**Quelle est la "vraie" nature
de ce qui est émis
par une source lumineuse ?**

la lumière
phénomène local,
individualisé

Alhazen



la lumière est quelque chose qui est émis par l'objet, comme une « balle à l'extrémité d'une flèche »

J. Kepler

« dans la lumière, le mouvement se fait le long d'une droite, et ce qui se déplace est une sorte de surface »

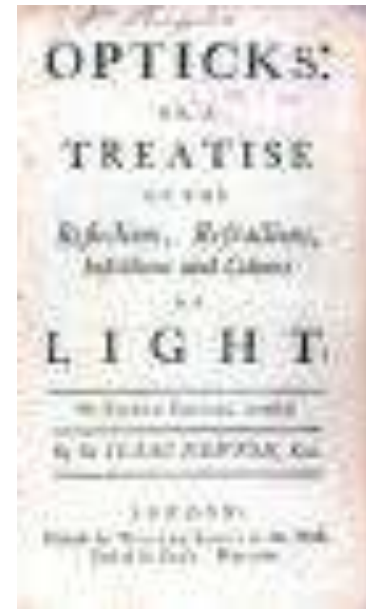


I. Newton

expérimentation méthodique



anneaux
de Newton



Il existe « une **disposition transitoire** qui dans les progrès du rayon **revient à intervalles égaux** »

périodicité : 285 nanomètres pour le jaune

à la fin de l'ouvrage, propose des conjectures :

"I shall not mingle conjectures with certainties"

Query 17

"Lorsqu'un rayon de lumière vient à tomber sur la surface de quelque corps ..., ne peut-il pas être que des ondes soient par là excitées...?"

Query 29:

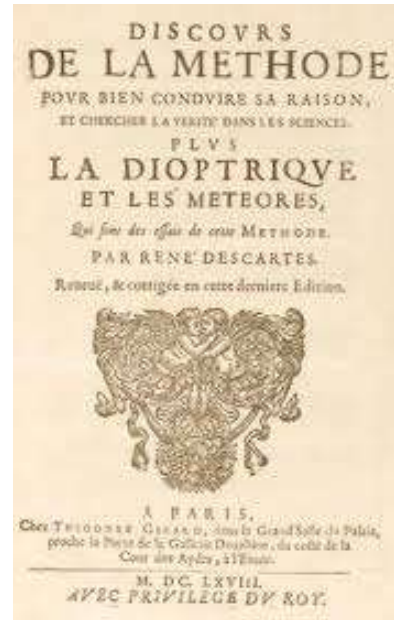
« Les rayons de lumière ne sont-ce pas de fort petits corpuscules élançés ou poussés hors des corps lumineux ? »

une approche mixte:
"caillou dans la mare"

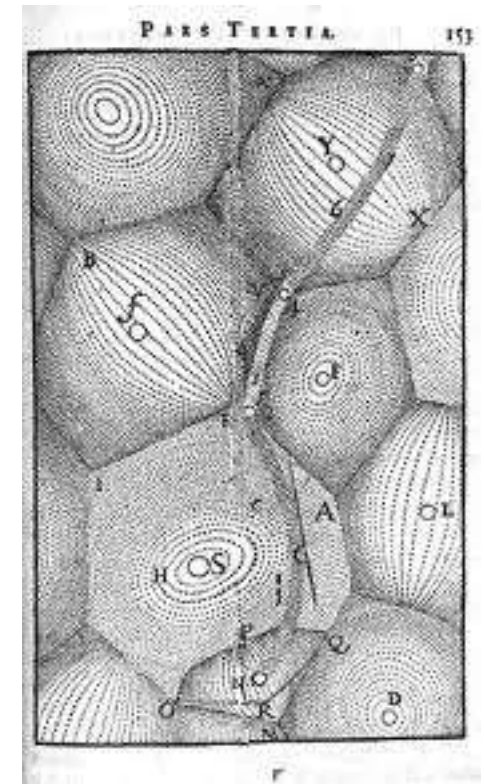


la lumière
phénomène étendu,
délocalisé,
lié à un milieu matériel

R. Descartes

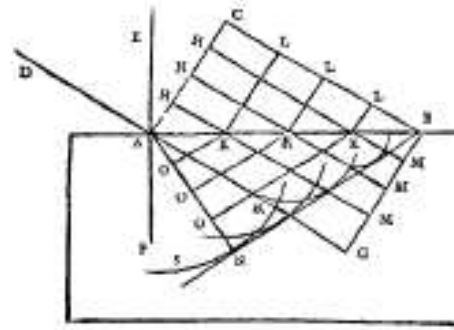


Lumière :
"un certain mouvement,
ou une action reçue
en une matière très subtile"



C. Huygens

La lumière est une sorte d'ébranlement qui se propage en cercles à partir de la source, et qui est capable de se renforcer par addition



Explique les lois de la réfraction, de la réflexion

Bases de la "vérité sur la lumière "

- observations de phénomènes simples puis expérimentation
- analogie avec d'autres phénomènes
- "hypothèses" en accord avec les lois empiriques, mais peu étayées et fortement subjectives

(Descartes propose plusieurs images physiques)

- prédictions d'autres phénomènes grâce au raisonnement mathématique

XVIII^{ème} XIX^{ème} siècle

- progrès des outils mathématiques
 - poids de l'autorité scientifique de Newton
- l' hypothèse corpusculaire est généralement considérée comme la plus vraie

Pas de consensus

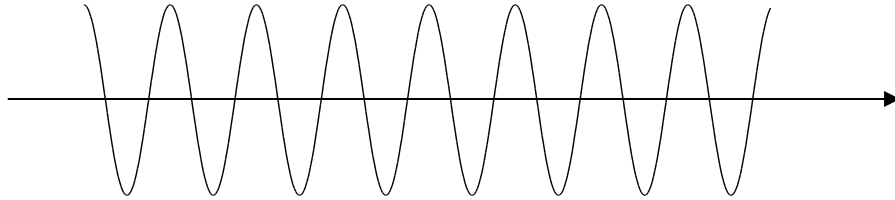
L. Euler : « les rayons de lumière sont des vibrations transmises par l' éther »



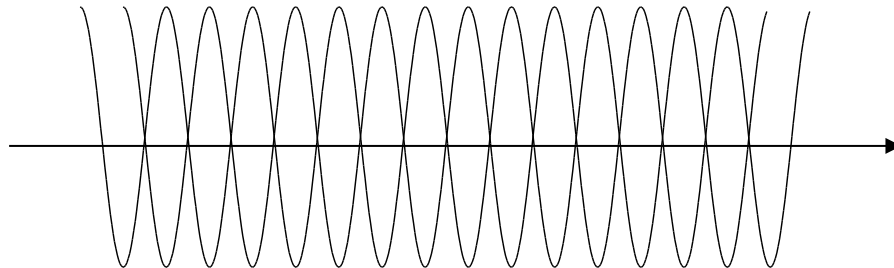
T. Young



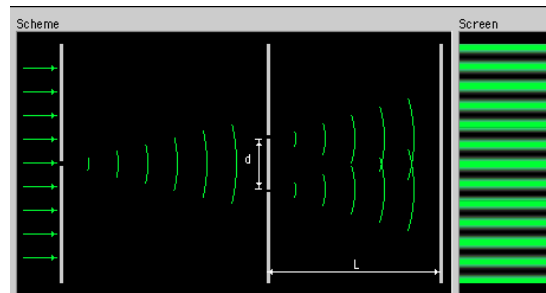
Étudie d'abord l' acoustique



Suppose que la lumière est une **ondulation** avec alternance de parties positives et négatives



Deux ondes lumineuses peuvent **interférer destructivement**



de la lumière plus de la lumière peut donner de l' obscurité !

A. Fresnel

théorie mathématique des ondes de Young



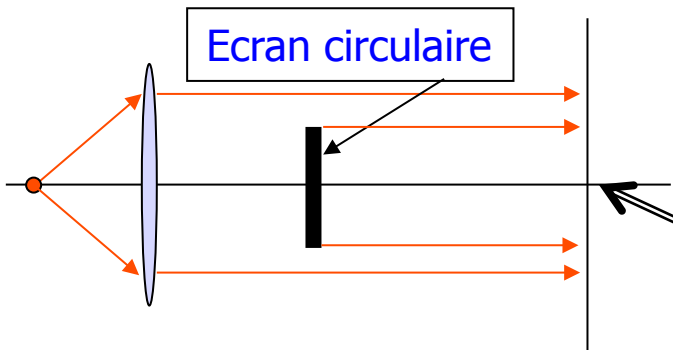
et par conséquent la résultante générale de tous ces petits mouvements, ou l'intensité des vibrations lumineuses au point P, est égale à

$$\sqrt{\left[\int dz \cos \left(\pi \frac{z^2 (a+b)}{ab\lambda} \right) \right]^2 + \left[\int dz \sin \left(\pi \frac{z^2 (a+b)}{ab\lambda} \right) \right]^2}$$

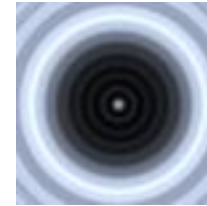
résultats des calculs en parfait accord avec l'expérience

calculé sur les vibrations lumineuses sans connaître leur nature

L'approche ondulatoire se heurte à la « vérité établie »



C. Poisson:
Il doit exister
un point brillant
au centre de
l'ombre !



Il existe !!

Changement de paradigme et de vérité:

la lumière est un phénomène ondulatoire

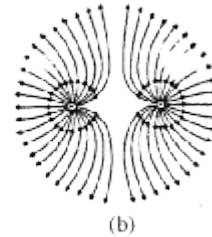
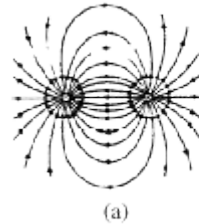
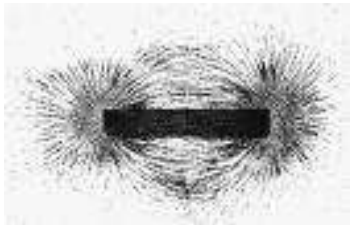
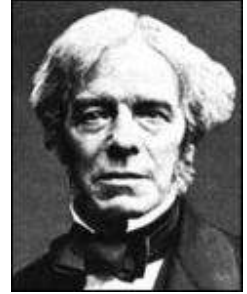
**Une question demeure:
la lumière est une onde,
mais de quoi ?**

vibration d'un milieu "matériel" : l'éther

M. Faraday

En 1840, introduit un nouvel "élément de vérité"

le champ (« lignes de forces »)



objet physique qui existe en tout point de l'espace

le champ électro-magnétique

concept nouveau, image physique nouvelle

- inconcevable auparavant:
n' a pas besoin de support matériel
- appelé à être l'élément central de la nouvelle vérité
- une évidence pour le physicien actuel

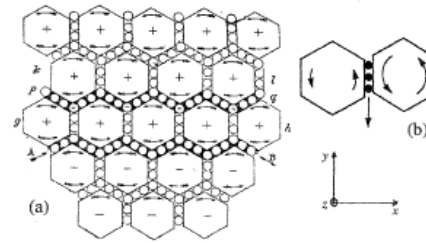
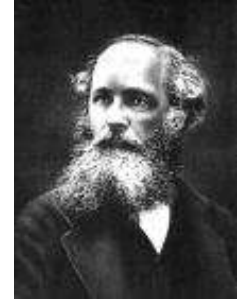


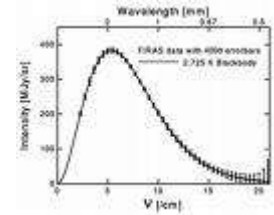
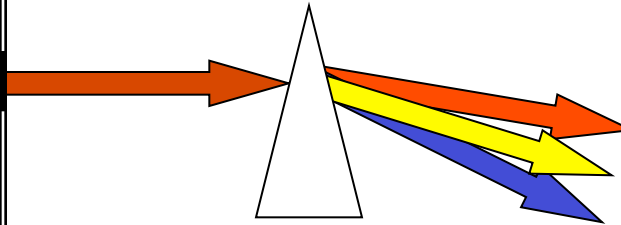
FIG. 4.4. Maxwell's cells and idle wheels (Maxwell 1861: 488 for (a) with mistakes in the arrows from the MCP reprint; Siegel 1991: 69 for (b), used by permission of Cambridge University Press).



la lumière est une
onde de champ électromagnétique

A t-on atteint la vérité ultime sur la lumière ?

Rayonnement
d'un corps
chauffé



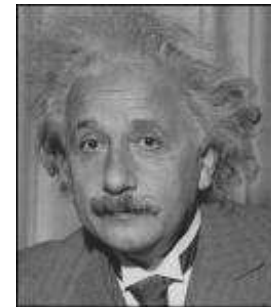
M. Planck

Trouve une formule mathématique pour la répartition spectrale du rayonnement d'un corps chauffé hors "onde de Maxwell"



A. Einstein

Montre que les propriétés thermodynamiques de ce rayonnement sont identiques à celle d'un gaz particules d'énergie $h\nu$

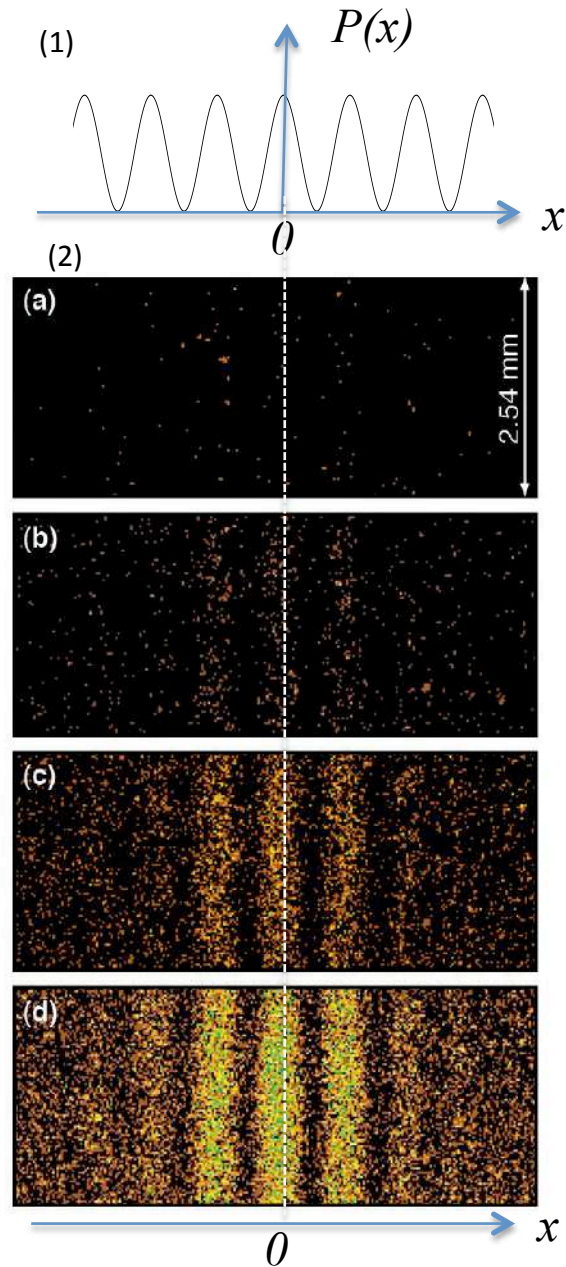


« L' énergie de la lumière émise par une source ponctuelle n' est pas continûment distribuée dans l' espace, mais consiste en un **nombre fini de quanta d' énergie** qui sont localisés en des points de l' espace, qui **se déplacent sans se diviser**, et qui ne peuvent **être produits et absorbés qu' en unités complètes.**»

un retour à l'approche "fausse"
de Newton ?

la dualité
onde corpuscule

L'intensité
de l'onde
de Maxwell
donne la
probabilité
de trouver
le photon



l'onde "guide" la particule

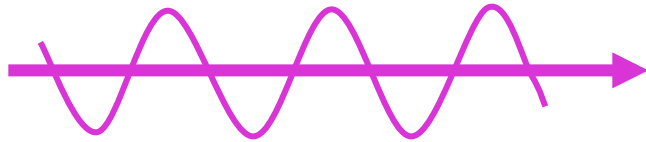
1924-26 De Broglie, Heisenberg, Schrödinger

avènement de la mécanique quantique

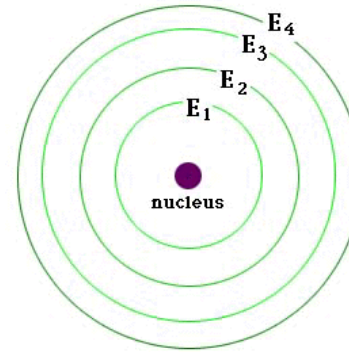
permet de développer rigoureusement
deux approches possibles
pour les phénomènes lumineux



1) l'approche semi-classique



Onde lumineuse classique



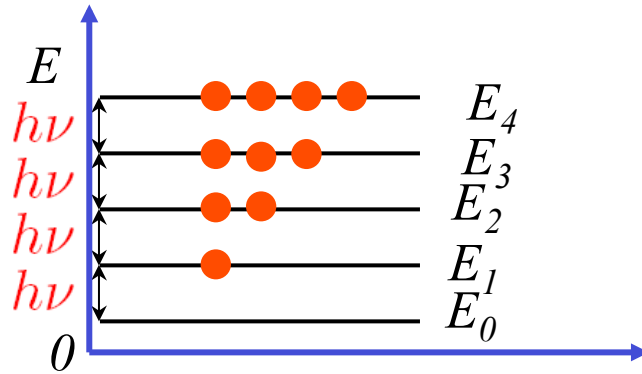
Atome quantique

1924-26 De Broglie, Heisenberg, Schrödinger

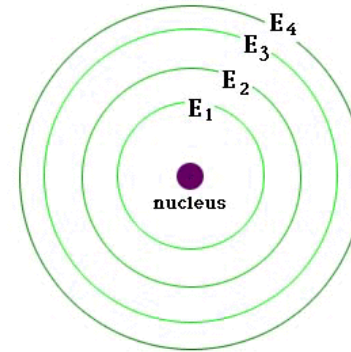
avènement de la mécanique quantique

permet de développer rigoureusement
deux approches possibles
pour les phénomènes lumineux

2) l'approche purement quantique



Champ électromagnétique
quantifié



Atome quantique

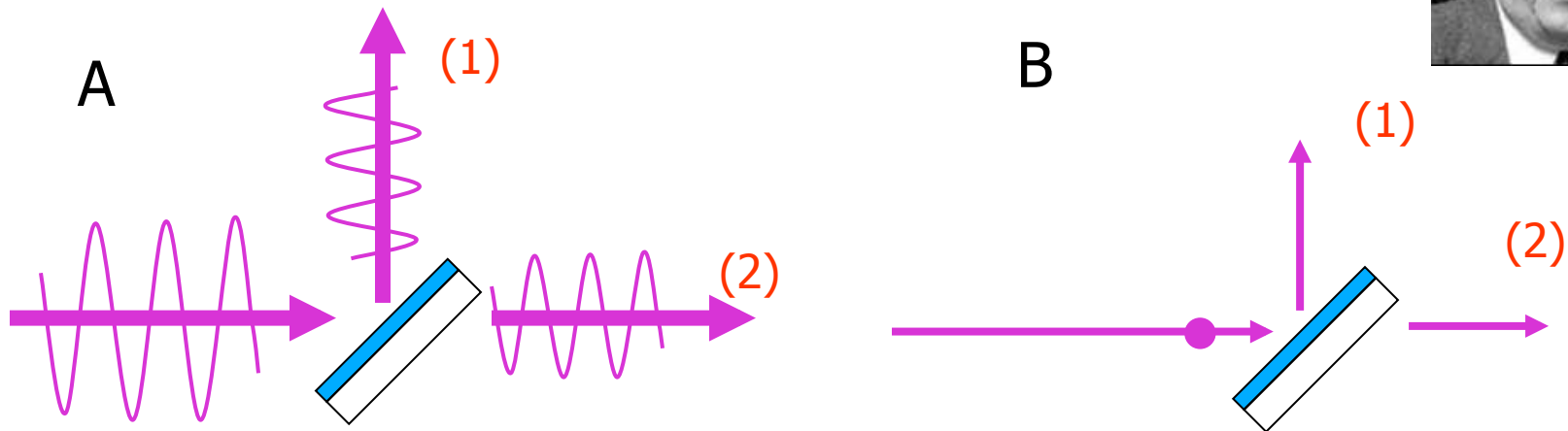
Les deux approches
aboutissent à des **prédictions identiques**
pour la plupart des phénomènes



Les phénomènes optiques ont encore deux interprétations
l'une corpusculaire, l'autre ondulatoire

Comment trancher entre les deux vérités concurrentes ?

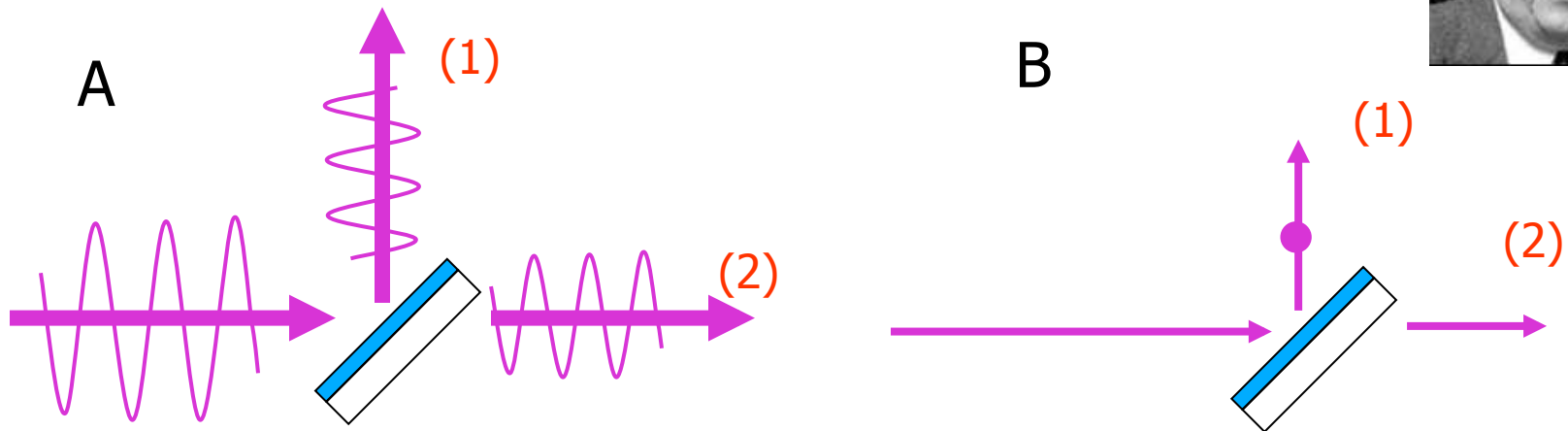
R. Glauber 1962



Une lame semi-réfléchissante
divise une onde en deux parts égales,
mais ne peut pas couper un photon en deux !

Comment trancher entre les deux vérités concurrentes ?

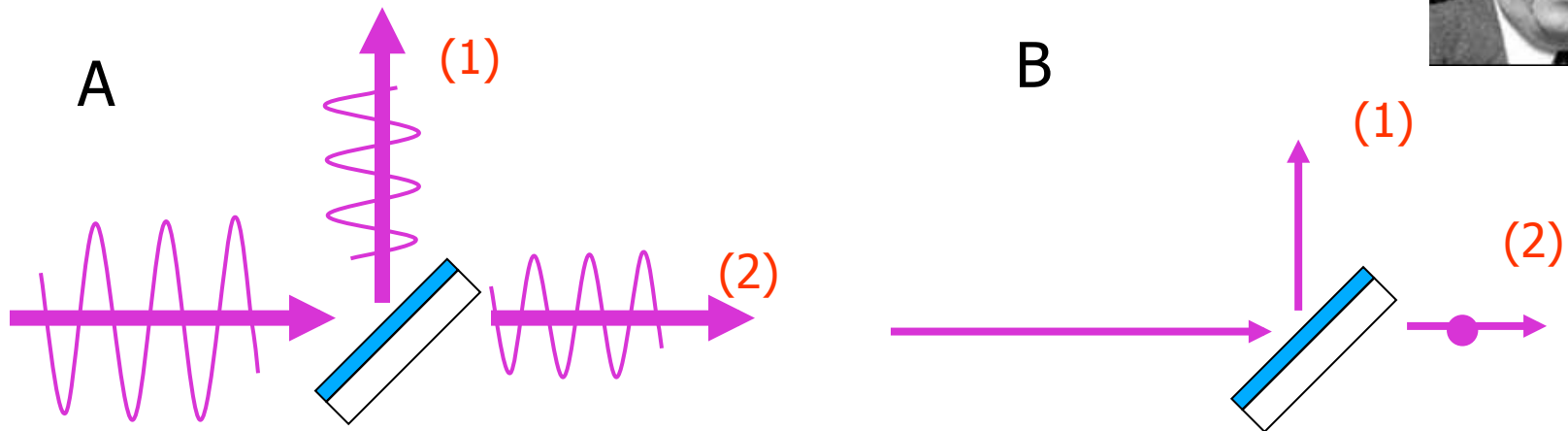
R. Glauber 1962



Une lame semi-réfléchissante
divise une onde en deux parts égales,
mais ne peut pas couper un photon en deux !

Comment trancher entre les deux vérités concurrentes ?

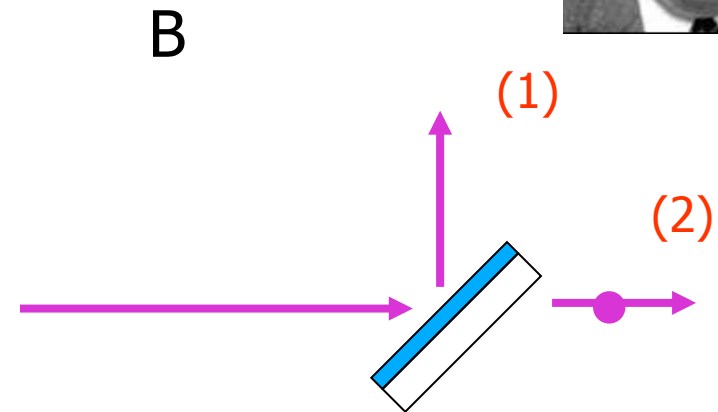
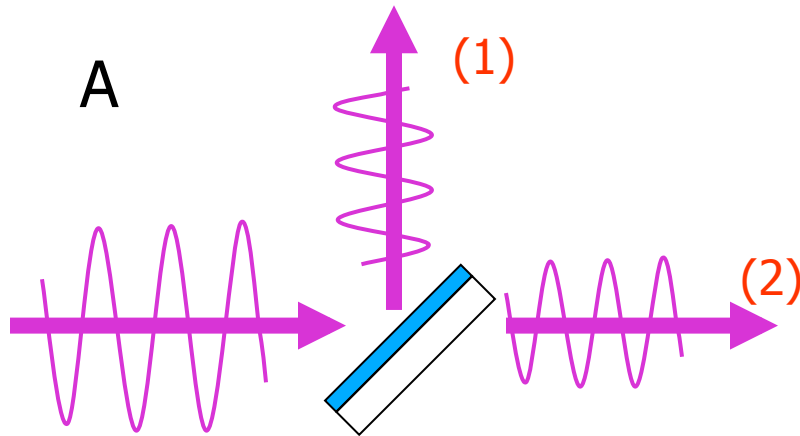
R. Glauber 1962



Une lame semi-réfléchissante
divise une onde en deux parts égales,
mais ne peut pas couper un photon en deux !

Comment trancher entre les deux vérités concurrentes ?

R. Glauber 1962



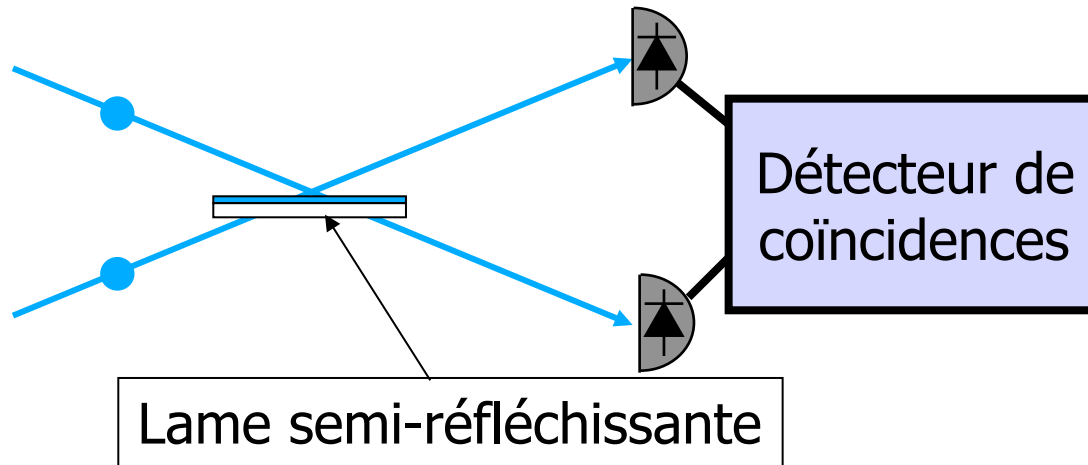
Kimble, Dagenais, Mandel 1977

l'expérience tranche en faveur de (B)



une autre expérience fondamentale

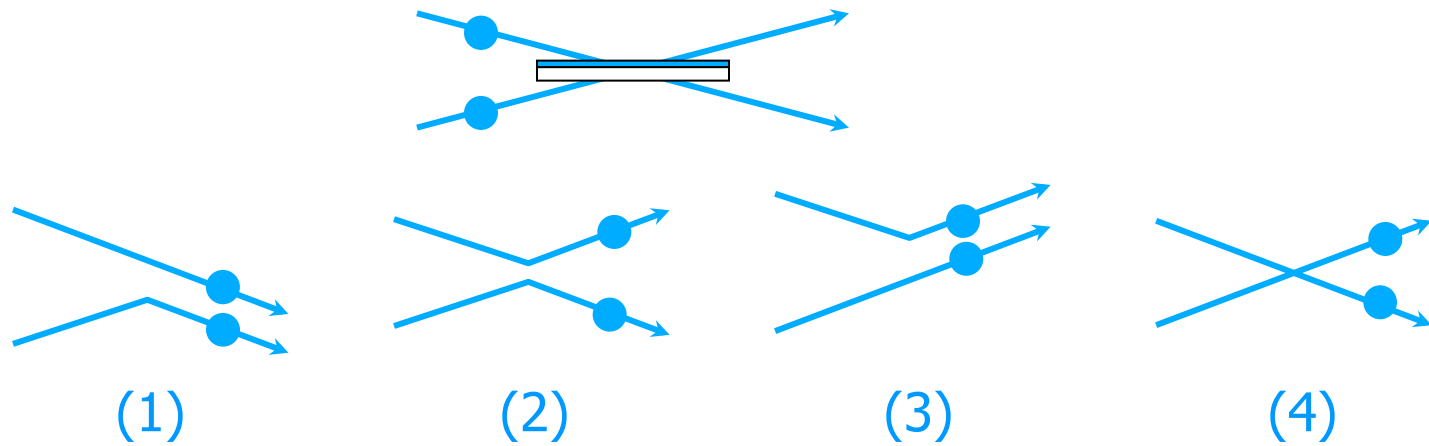
Hong, Ou, Mandel 1986



Pas de coïncidences mesurées
quand les photons arrivent exactement en même temps
sur la lame semi-réfléchissante

**les images physiques
des opticiens quantiques**

Quelle est la "vraie" image physique dans ce cas ?



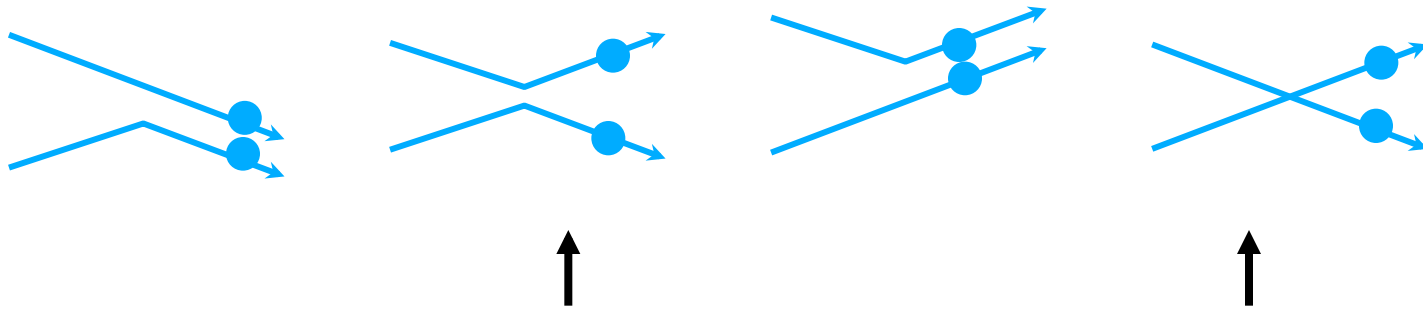
(2) et (4) donnent lieu à coïncidences !

Dans cette expérience,

- la lumière ne se comporte pas comme une onde classique
- la lumière ne se comporte pas comme un ensemble de particules classiques

elle est un "objet quantique" sans équivalent classique

Quelle représentation mentale adopter ?

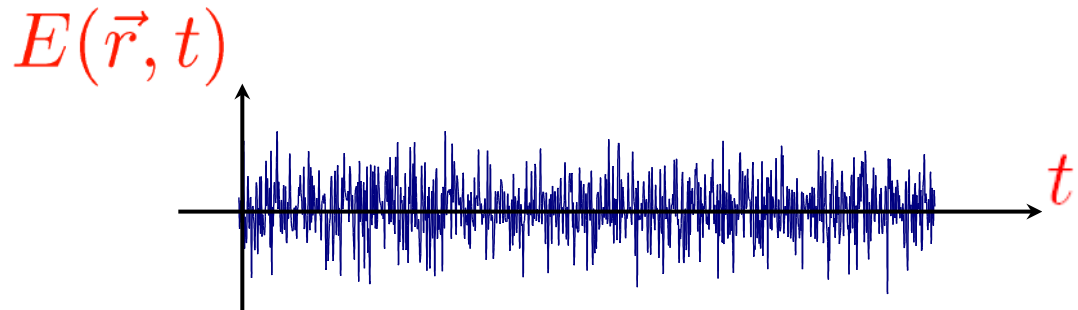


Deux processus différents conduisent au même état final
Il y a **interférence destructive** entre ces deux
processus quantiques

Dans le monde quantique,
de la probabilité plus de la probabilité
peut donner une probabilité nulle !!

Autre image physique possible

Champ électrique lorsque toutes les sources sont éteintes:



L'obscurité totale n'existe pas !

Existence des « fluctuations du vide »

La lumière a des propriétés quantiques même quand il n'y a pas de photons

on continue à trouver de nouveaux états de la lumière sans équivalent classique, et de plus en plus étranges

La théorie quantique explique quantitativement tous les phénomènes observés



on continue à trouver de nouveaux états de la lumière sans équivalent classique, et de plus en plus étranges

**La théorie quantique explique quantitativement
tous les phénomènes observés
jusqu' à présent**



- la vérité actuelle s'est construite sur un socle de théories avérées fausses à partir d'un certain moment
- démontrer la fausseté d'une approche est fructueux: on sait ce que la lumière n'est pas

- **Les vérités incontestables:**
 - les résultats expérimentaux
 - les équations de la théorie quantique

- **Les vérités relatives:**
 - ce que les professeurs enseignent (école de pensée)
 - "images physiques" que les physiciens ont dans la tête
représentation mentale subjective, à validité limitée,
mais indispensable comme support de l'intuition

on n'a certainement pas atteint la
vérité ultime sur la nature de la lumière

l'approche actuelle est très certainement "fausse"

