

# Voyage au pays des Quanta

avec  
**Savantix**  
et  
**Ingénix**



# Voyage au pays des Quanta

avec

*Savantix*

&

*Ingénix*



scientific Web site :

[https://www.researchgate.net/profile/Loys\\_Thimonier](https://www.researchgate.net/profile/Loys_Thimonier)



*...Il y a 50 (+) ans lorsqu' à SupElec il écouta...  
une conférence de **Louis de Broglie**...*

# Caractéristiques des diapos

\* ensemble = fresque "quantique" de l'infiniment petit à l'infiniment grand, avec des repères chronologiques et un minimum de passages mathématiques obligés

\* => 2 niveaux de diapos scientifiques

- **E "élémentaire"** (pas ou très peu de maths) : en **partie I** prévue pour tout public
- **A "avancé"** : si temps et demande, en **partie II** (questions)

\* 2 types de sonorisation pour quelques diapos

- soit **intégrée** : bouton 
- soit brève **improvisation ou interprétation musicale** en *live* (à la guitare : cf <http://www.luiselduende.com>)

# - PROGRAMME -

## \* PARTIE I (1h15)

A - Introduction au monde quantique

B - Bref coup d'œil aux familles de particules

C – Notions mathématiques et physiques pour aborder un monde très différent

D - Aperçu sur la **1<sup>e</sup> révolution quantique** à partir des **années 30**

E - Des relations d'incertitude d'HEISENBERG au "vide" quantique

F - Une **2<sup>e</sup> révolution quantique** depuis la **fin du 20<sup>e</sup> s.** : l'*intrication*

G – Conclusions

\* *ENTRACTE CONVIVIAL*

## \* PARTIE II (45 mn)

Abord de **diapos A** si temps et demande

H - Questions d'actualité

I – Quantique et charlatans

# Partie I

# **A - Introduction au monde quantique**

**A1 - Le terme "quantique"**

**A2 - La physique "quantique"**

**A3 - Notion d'onde**

**A4 - Caractéristiques d'une onde périodique**

**A5 - Fentes de YOUNG : nature ondulatoire de la lumière et dualité onde-corpuscule**

# A1 - Le terme "quantique"

## \* Le terme "*quantique*"

- qualifie le comportement des objets physiques au **niveau microscopique** de la matière et du rayonnement (*atome, noyau, particules: électron, photon...*)

## \* Phénomènes "*quantiques*" **discontinus**

- différence au 20<sup>e</sup> s. avec physique classique **continue** du 19<sup>e</sup> s.

- exemple : énergie **E** rayonnante de la **lumière** (la première à être quantifiée : en **1900**)

=> varie par sauts de façon **discontinue** :

- **E** multiple d'une **plus petite quantité mesurée et indivisible** ou "grain"

(= "*quantum*" en latin : "*combien*", au pluriel = "*quanta*")

grain de lumière appelé *photon* en **1929**

## \* Grandeur "*quantifiée*"

**A** = grandeur physique au niveau microscopique

=> seulement **nombre fini de valeurs** : "*quantifiée*"

## A2 - La physique "quantique"

### \* Terme "*quantique*" : usage incontrôlé !

discours philosophiques souvent confus, **intitulé de pseudo-médecines...**

### \* Physique quantique => foule d'objets industriels et quotidiens

ingénierie "*quantique*" de la matière => composants électroniques, montre à quartz, carte de crédit, ordinateurs et Internet, laser et platines laser pour lire CD et DVD, imagerie médicale par Résonance Magnétique Nucléaire, GPS ...

### \* Recherches quantiques très actives aux financements importants

- motivations : résultats théoriques quantitatifs concordant parfaitement avec mesures très précises et observations expérimentales d'atomes, particules, et rayonnement électromagnétique (*la physique classique ne rendait pas compte des anomalies de comportement constatées*)

- avancées cruciales dans les domaines quantiques de recherches sur la structure de la matière (*chimie, physique, astrophysique*) et l'information (*informatique, cryptographie*)

### \* Mécanique quantique => double aspect du comportement de la matière

- aspect **particulaire**

- aspect **ondulatoire** (1er nom en **1923** par **Louis DE BROGLIE** : **mécanique ondulatoire**)

# A3 – Notion d'onde

## \* Perturbation et ondes

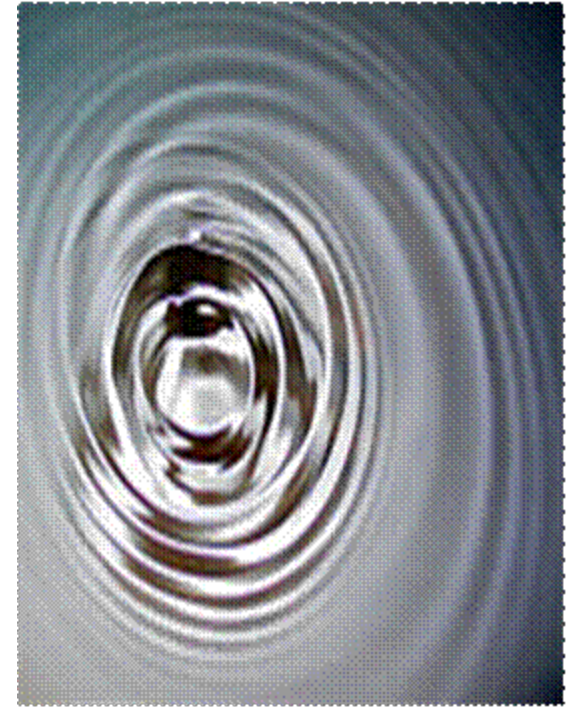
- **perturbation** d'un milieu : modification locale et temporaire
- **onde** = phénomène vibratoire de perturbation qui se propage :
  - . transporte de l'énergie sans transporter de matière
  - . modifie des propriétés physiques en tout point de l'espace

## \* 2 types d'onde : dépendance ou non du milieu

- **mécanique** : de proche en proche dans un milieu matériel associé  
(*vagues, corde vibrante, ondes sismiques, son dans un tuyau*)
- **électromagnétique** : indépendamment de tout milieu matériel  
(*ondes lumineuses et radio ; rayons infrarouges, UV, X...*)

## \* 2 types de propagation d'onde

- onde **transversale** (*vagues, corde vibrante, onde électromagnétique*) :  
perpendiculaire au déplacement du milieu perturbé, zones de crête puis creux
- onde **longitudinale** (*son dans l'eau, déformation d'un ressort tendu, relâchement d'un élastique*):  
parallèle au déplacement du milieu perturbé, zones de compression puis raréfaction



*Ondes de surface sur l'eau : expansion de perturbation causée par un bâton*



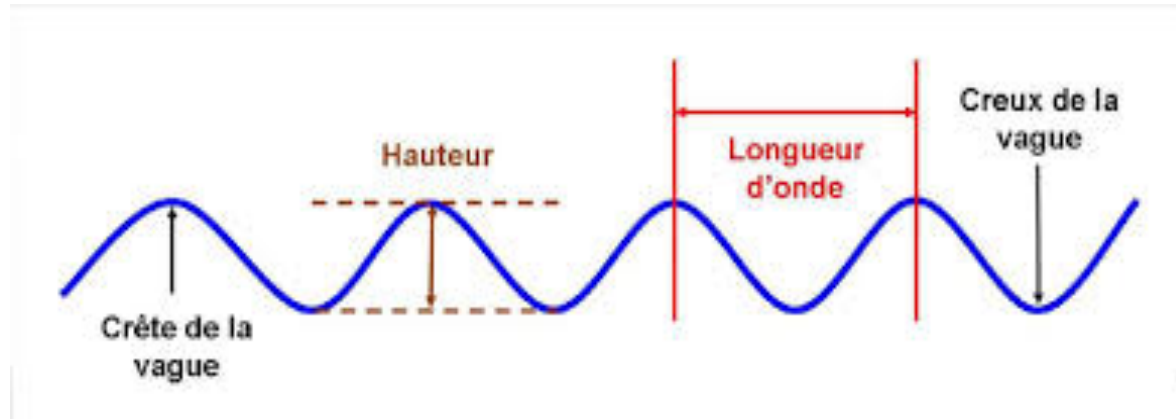
# A4 - Caractéristiques d'une onde périodique (1)

## \* Périodicité temporelle

- onde **non périodique**: bruit, sillage d'un bateau, mascaret, raz de marée
- onde **périodique (sinusoïdale)**: phénomène identique au bout d'une **période temporelle T** (*vagues, corde vibrante*)

Ondulation transversale d'une vague :

(courbe : **sinusoïde**)



## \* Périodicité spatiale

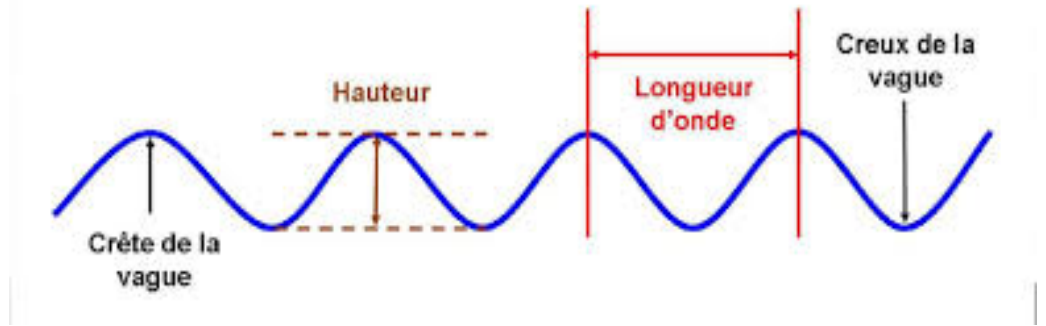
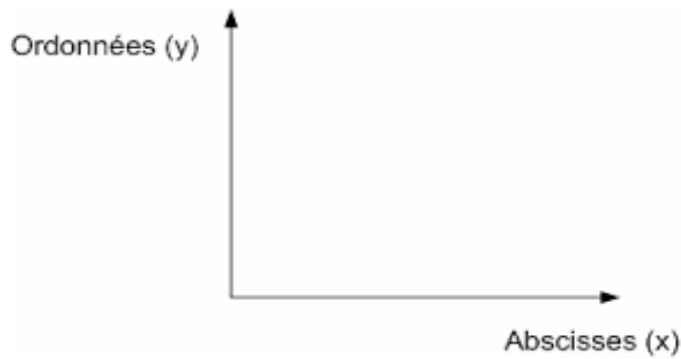
- translation de la **sinusoïde** dans l'espace à une vitesse constante  $v$  :  
 $v =$  vitesse de phase (célérité) = vitesse de la crête
- période spatiale = **longueur d'onde** = distance séparant 2 vagues successives :  $\lambda = v T$

## \* Gammes de longueurs d'onde submillimétriques ( $1\mu\text{m}$ - *micron* = $1/1000$ mm)

- micro-ondes, téléphone mobile... :  $> 1\text{mm}$
- **ultraviolet** ( $< 0,38 \mu\text{m}$ ), **violet** ( $0,38-0,43 \mu\text{m}$ ), **rouge** ( $0,62-0,78 \mu\text{m}$ ), **infrarouge** ( $> 0,78 \mu\text{m}$ )
- **ångström** = unité de longueur atomique :  $1\text{Å} = 1/10\ 000 \mu\text{m}$   
(**rayon atomique** :  $0,25$  à  $3\text{Å}$  - **rayons X** :  $< 0,1\text{Å}$ )

# E

# A4 - Caractéristiques d'une onde périodique (2)



\* **Amplitude  $y$  (ordonnée) d'un point fixé comme origine  $O$**

$y(t, 0) = A \sin \omega t$  ( $A$  = amplitude maximum), avec :

.  $\omega$  **pulsation** (*fréquence angulaire*) du mouvement

.  **$T$  période =  $2\pi / \omega$**  (explication :  $\sin \omega t = \sin (\omega t + 2\pi) = \sin (\omega(t + 2\pi/\omega)) \Rightarrow T = 2\pi/\omega$ )

. **fréquence** = nombre de reproductions du phénomène par unité de temps :  **$\nu = 1/T = \omega/2\pi$**

\* **Amplitude  $y$  (ordonnée) d'un point  $P$  à distance  $x$  (abscisse) de  $O$**

mouvement **sinusoïdal** déphasé par rapport à  $O \Rightarrow$  **angle  $\phi$  (phase)** :  $y(t, x) = A \sin (\omega t - \phi)$

$\phi$  proportionnel à  $x$  :  **$\phi(x) = k x \Rightarrow y(t, x) = A \sin(\omega t - k x) = A \sin \omega(t - k x / \omega)$**

$v = \omega/k \Rightarrow$   **$y(t, x) = A \sin \omega(t - x/v)$**  : dimension de **vitesse** pour  $v =$  **vitesse de phase**

\* **Longueur d'onde** = distance à l'instant  $t$  séparant 2 points de même amplitude :  **$\lambda = vT$**

**A**

# A5 - Fentes de YOUNG : lumière de nature ondulatoire et dualité onde-corpuscule (1)

## \* Ondes en phase ou en déphasage

interaction (*2 vagues identiques se croisent*) :

. ondes s'additionnant si en phase

(crêtes en correspondance => résultante 2 fois plus haute)

. ondes s'annulant si déphasage

(crête de l'une = creux de l'autre)

## \* Expérience des fentes de YOUNG (1801)

lumière de longueur d'onde (couleur) donnée,

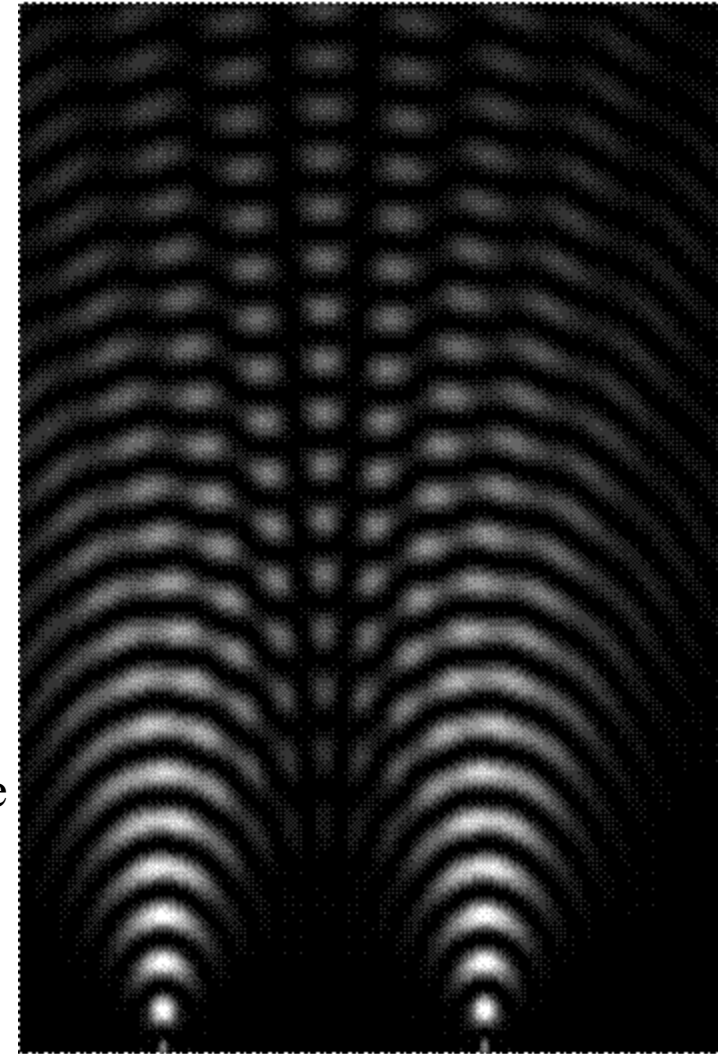
. émise par source S

. passant par 2 fentes S1, S2 percées dans 1 plaque opaque

. projetant 2 faisceaux sur 1 écran :

=> **diffraction avec motif d'interférences**

**alternant franges sombres et claires**



*Simulation des fentes de Young  
(sources de lumière en bas)*

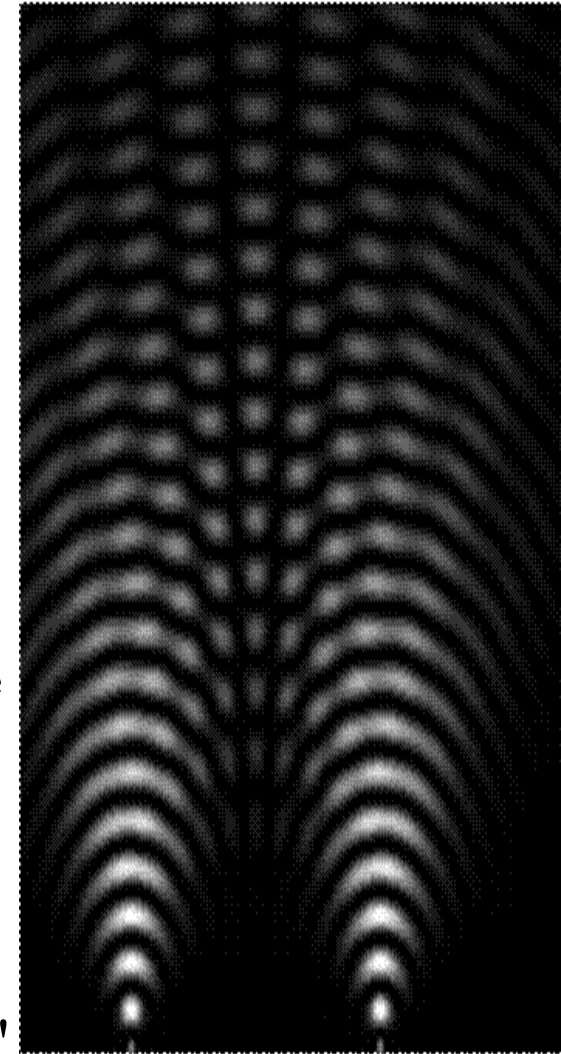
## A5 - Fentes de YOUNG : lumière de nature ondulatoire et dualité onde-corpuscule (2)

### \* Interprétation au 20e s. : dualité onde-corpuscule

- . même expérience dans les années 1960 =>  
même résultat avec électrons, atomes , molécules
- . détection par impact sur écran => comportement **particulaire**
- . **interférences observées => nature ondulatoire de la lumière** :
  - soit ajout de 2 ondes :  
**frange claire** => différence de phase =  $2k\pi$
  - soit annulation de 2 ondes :  
**frange sombre** => différence de phase =  $(2k+1)\pi$

### \* Onde et particule, 2 aspects d'un même objet quantique

- en mécanique classique, **distinctes**
- en mécanique quantique, 2 facettes d'un même objet (**quanton**) :  
expérimentalement, lumière = **particules (photons)**  
ou **onde (rayonnement produisant des interférences)**
- modélisation mathématique (cf plus loin): "**fonction d'onde**"



# **B - Bref coup d'œil aux familles de particules**

**B1 - Recherches au CERN (Centre Européen de Recherches Nucléaires)**

**B2 - Les 4 interactions fondamentales de la Nature**

**B3 - Du noyau à la périphérie de l'atome**

**B4 - Atomes et généalogie de la matière**

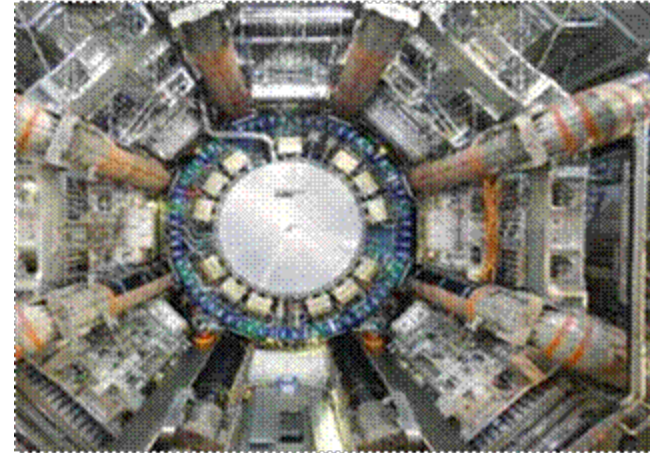
**B5 - Fond diffus cosmologique, matière noire, énergie sombre**

**B6 - Des particules instables (résonances) aux vagues scélérates**

# B1 - Recherches au CERN (Centre Européen de Recherches Nucléaires)

## \* Mission globale du CERN

- créé en 1954, près de la frontière franco-suisse
- recherches, expériences : l'Univers infiniment petit ou grand
- . état de la matière après le **Big Bang** : plasma **quarks-gluons**
- . particules pouvant constituer la **matière noire** ...
- . **accélérateurs** : collisions de particules à hautes énergies



*Caverne à 100 m sous terre : détecteur ATLAS de 7000 tonnes sondant les particules fondamentales*

## \* LHC (Large Hadron Collider)

- "Grand Collisionneur de **Hadrons**"

**hadrons** = composés de particules liées par **interaction forte** :  
**quarks**, **antiquarks** et **gluons** liant les **quarks** ensemble

- accélérateur de particules le plus puissant du monde :  
anneau de 27 km, aimants supraconducteurs => hautes énergies  
=> mise en évidence du **boson de HIGGS**



*Tunnel du LHC avec tube contenant les électroaimants supraconducteurs*

# B2 - Les 4 interactions fondamentales de la Nature

## \* Le spin

- "particule" => **propriété purement quantique** : le "**spin**" (*anglais* : tourner)  
(suggère une sorte de **moment angulaire de rotation** de la particule sur elle-même)
- chaque interaction fondamentale entre **particules de matière** (constituants de l'atome) :  
**fermions**, de "**spin**" **demi-entier**, suivant la **statistique** de **FERMI-DIRAC**  
(**principe d'exclusion** de **PAULI** : **1 seul fermion possible dans le même état quantique**)
- chaque interaction fondamentale utilise des **particules messagers** transporteuses d'énergie :  
**bosons**, de "**spin**" **entier**, suivant la **statistique de BOSE-EINSTEIN**  
(non soumis au **principe d'exclusion** : **plusieurs bosons possibles dans le même état**)

## \* 4 interactions fondamentales

- **nucléaire forte** => cohésion du noyau atomique  
messagers = **11 bosons** (**3 mésons  $\pi$**  : pions ; **8 gluons**)
- **électromagnétique** => lumière, électricité, magnétisme  
 $10^2$  fois moins puissante que l'**interaction forte**, messenger = **1 boson** (**photon** :  $\gamma$ )
- **nucléaire faible** => radioactivité bêta (désintégration), échanges entre noyau et périphérie  
 $10^{-13}$  fois moins puissante que l'**interaction forte**, messenger = **3 bosons intermédiaires**
- **gravitationnelle** => attraction réciproque des corps massifs  
 $10^{-38}$  fois moins puissante que l'**interaction forte**, messenger = **1 boson** inconnu : **graviton**, de **spin 2**  
(mais *ondes gravitationnelles découvertes début 2016*)

# B3 - Du noyau à la périphérie de l'atome

## \* **Quarks** dans le noyau de l'atome

- noyau constitué de **nucléons** (proton : p - neutron : n) , chacun formé de 3 **quarks**
- il existe 6 **quarks** différant selon leur saveur (*propriété purement quantique*), qui présente 3 "couleurs" (*propriété purement quantique*)

## \* Chaque interaction fondamentale => une "charge"

- "couleur" (*interaction forte*), charge électrique (*interaction électromagnétique*), "isospin faible" (*interaction faible*), masse (*interaction gravitationnelle*)
- chaque particule admet une **anti-particule** de charge électrique opposée :  
*électron*  $e^-$  -> *positron*  $e^+$ , *quark*  $q$  -> *antiquark*  $\bar{q}$

## \* **Leptons**, particules à la périphérie de l'atome

*leptons* = **électron** – **muon** - **tau**, différant suivant leur **saveur** associée à un **doublet** :

- . 1 particule chargée et massive, de même nom (**électron**  $e^-$ , **muon**  $\mu^-$ , **tau**  $\tau^-$ )
- . 1 particule neutre et presque non massive : **neutrino** (**électronique**  $\nu_e$ , **muonique**  $\nu_\mu$ , **tau**  $\nu_\tau$ )

## \* **Interaction faible** entre noyau et périphérie de l'atome

exercée entre **fermions** : **quarks** (*constituants des particules du noyau*) et **leptons**

=> échanges d'énergie, masse, charge électrique - changements de famille et **saveur** ...

# B4 - Atomes et généalogie de la matière

## \* Code d'un atome

- ${}_Z^A X$  : X symbole de l'atome, A nombre de masse (nombre de **nucléons** : protons + neutrons)  
Z numéro atomique (nombre de protons = nombre d'électrons => A-Z = nombre de neutrons)
- **isotope**  ${}_Z^{A'} X$  : même nombre de protons, mais nombre de neutrons différent

## \* Synthèses successives des nucléons dans l'Univers

### - début de l'Univers (13,8 milliards d'années avant)

**1 milliard de degrés après 1 s** => mélange lumière + nucléons (interactions de particules élémentaires) :  
hydrogène H : 1 proton / hélium He :  ${}^4\text{He} = 2$  protons + 2 neutrons isotope ,  ${}^3\text{He} : 2$  protons + 1 neutron  
deutérium  ${}^2\text{H}$  (ou D) : 1 proton + 1 neutron / lithium  ${}^7\text{Li} : 3$  protons - 4 neutrons

### - quelques minutes après

expansion de l'Univers => mélange dilué et refroidi => fin de production, limitée aux noyaux les plus légers

### - quelques centaines de millions d'années plus tard

réactions thermonucléaires au cœur des premières étoiles => noyaux plus lourds : carbone C , oxygène O

- étoiles les plus massives => fin d'évolution explosive : **supernova** => noyaux plus lourds que le fer

### - système de 2 étoiles à neutrons et ondes gravitationnelles

• étoile à neutrons : par effondrement du cœur de fer d'une étoile massive avant l'explosion en supernova

• 2 étoiles à neutrons se rapprochent : émission d'**ondes gravitationnelles** (récemment détectées) =>

- nucléosynthèse explosive formant tous les noyaux plus lourds que le fer (**or , plomb...**)

- **trou noir** et émission de bouffée de lumière à très haute énergie (**sursaut gamma**)

# B5 - Fond diffus cosmologique, matière noire, énergie sombre

## \* Fond diffus cosmologique

(*rayonnement fossile*) = rayonnement électromagnétique issu (cf *modèle standard de la cosmologie*) de l'époque passée dense et très chaude de l'Univers au **Big Bang**

- . dilué et refroidi par l'expansion de l'Univers : température de **-270,424 °C**
- . domaine de longueur d'onde = **micro-ondes** (entre infra-rouge et ondes radio)
- . infimes *fluctuations de température* et d'intensité selon la direction => informations sur l'Univers jeune

## \* Matière noire

(*dark matter*) ou **matière sombre** = matière invisible *hypothétique* invoquée pour rendre compte :

- . de la stabilité de l'édifice cosmique, avec la masse observée des galaxies et amas de galaxies
- . des fluctuations du **fond diffus cosmologique**

## \* Energie sombre

(*dark energy*) = énergie *hypothétique* invoquée pour rendre compte de l'*expansion accélérée de l'Univers* :

- . emplit uniformément l'Univers
- . avec *pression négative*, telle une **force gravitationnelle répulsive**
- . satellite **PLANCK** => répartition de la *densité d'énergie totale de l'Univers* :  
**68 % d'énergie sombre** - **27 % de matière noire** - **5 % de matière ordinaire**
- . de nature inconnue : plusieurs hypothèses, notamment modélisation différente de la *gravitation* (choix futur lié aux contraintes apportées par l'observation)

# B6 - Des particules instables (résonances) aux vagues scélérates

## \* Résonances (particules à vie extrêmement courte)

- accélérateur : collisions à hautes énergies de particules stables

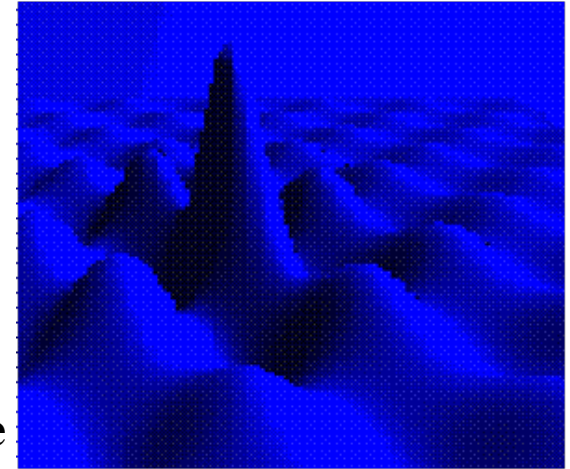
⇒ nouvelles particules instables n'existant pas à l'état naturel

choc ⇒ énergie ⇒ masse ( $E=mc^2$ ) ⇒ nouvelles particules

- **résonances = particules instables** à vie très courte :

. des centaines (durée  $\approx 10^{-23}$  s, typique de l'interaction forte)

. juste un temps d'assemblage : pic autour d'une énergie obtenue



## \* Vagues scélérates

- vague océanique soudaine et rare, en eau normalement agitée

hauteur: **30 m**, pression: **100 tonnes/m<sup>2</sup>** ⇒ aucun navire ne résiste

- venue liée au caractère **non-linéaire** de l'équation du modèle,  
ressemble à l'équation quantique linéaire de **SCHRÖDINGER**

- phénomène de **résonance** après :

. interférence entre 2 trains de houle d'orientation différente

. transmission d'énergie d'une vague à une autre



**E**

# **C - Notions mathématiques et physiques pour aborder un monde très différent**

**C1 - Premières différences**

**C2 - Nombres complexes au lieu de réels**

**C3 – Dérivée 1e d'une fonction d'une seule variable**

**C4 – Dérivée 2nde d'une fonction d'une seule variable**

**C5 – Notions de dérivée partielle à plusieurs variables et d'équation d'onde**

**C6 - Espace vectoriel de dimension finie, ou infinie (espace fonctionnel)**

**C7 - Opérateurs commutant ou non en algèbre et géométrie élémentaires**

# C1 – Premières différences

## \* Monde physique usuel

- Nombres souvent **réels**
- opérations souvent **commutatives**
- contexte souvent **déterministe**

## \* Monde quantique

- nombres toujours **complexes**
- opérations souvent **non commutatives**
- contexte toujours **probabiliste**

**E**

# C2 - Nombres complexes au lieu de réels (1)

## \* De $i = \sqrt{-1}$ aux nombres imaginaires

- appris à l'école : - le carré  $r^2$  d'un nombre réel  $r$  ne peut être que positif
- un nombre  $p$  réel positif a 2 racines (solution de  $r^2 = p$ ) :  $r_1 = \sqrt{p}$ ,  $r_2 = -\sqrt{p}$

$i^2 = -1$  ! : inventé en pleine Renaissance italienne au 16<sup>e</sup> s. par **CARDAN**

racines carrées de nombres négatifs  $\Rightarrow$  résolution de l'équation du 3<sup>e</sup> degré  $x^3 + px + q = 0$

nombres considérés d'abord comme "*imaginaires*", "*inconcevables*", voire "*diaboliques*"

## \* Nombres complexes : contiennent les réels

s'écrivent  $z = x + i y$ , où  $x$  et  $y$  sont réels,  $i = \sqrt{-1}$  :

$x = \text{Re}(z)$  : partie réelle /  $y = \text{Im}(z)$  : partie imaginaire

$z = |z| [ \cos(\text{Arg}(z)) + i \sin(\text{Arg}(z)) ]$

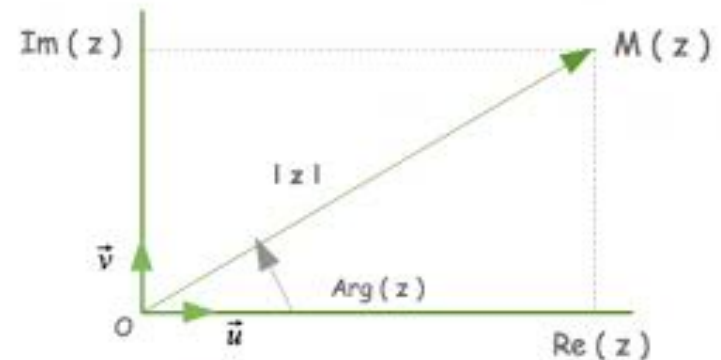
## Applications nombreuses à partir du 19<sup>e</sup> s.

- résolution d'équations en physique : électricité, magnétisme, fluides...

-  $z = x + i y$  correspond au vecteur  $\mathbf{OM}(x, y)$

- multiplication par un complexe de module 1 : correspond à une **rotation** d'angle  $\text{Arg}(z)$

REPRÉSENTATION D'UN NOMBRE COMPLEXE  
DANS UN REPÈRE ORTHONORMÉ



## C2 – Nombres complexes au lieu de réels (2)

### - Application : formules de **CARDAN** pour l'équation du 3e degré -

\* "Rappel" : équation du 2<sup>e</sup> degré

$ax^2 + bx + c = 0$  :  $\Delta = b^2 - 4ac > 0 \Rightarrow$  solutions réelles =  $x_1, x_2$  :

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a} \quad \text{et} \quad x_2 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a}.$$

\* Equation du 3<sup>e</sup> degré (*résolution pour  $\Delta < 0$  via le nombre imaginaire  $\sqrt{\Delta} = i\sqrt{-\Delta}$* )

$x^3 + px + q = 0$  :  $\Delta = p^3/27 + q^2/4 < 0 \Rightarrow$  solutions réelles =  $x_1, x_2, x_3$  :

$$X_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}}$$
$$X_2 = -\frac{1}{2} \left( \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}} \right) + i \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}} \right)$$
$$X_3 = -\frac{1}{2} \left( \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}} \right) - i \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}} \right)$$

# C3 – Dérivée 1e d'une fonction d'1 seule variable

## \* Courbe associée à une fonction “usuelle” d'une variable réelle

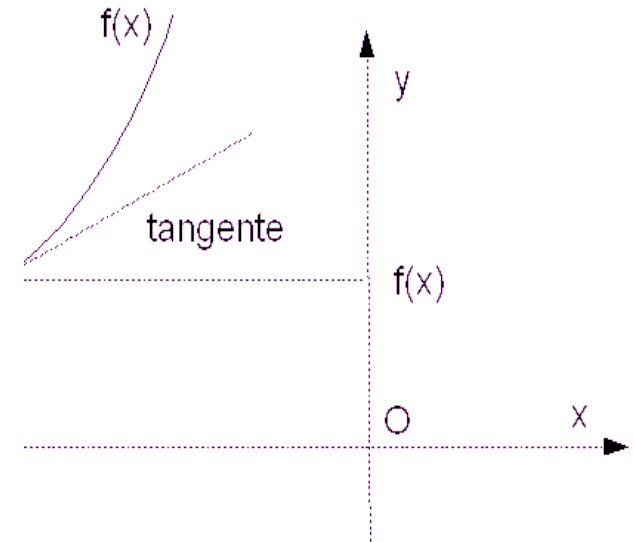
- fonction  $f : x \text{ réel} \rightarrow y = f(x) \text{ réel} \Rightarrow M$  (abscisse  $x$ , ordonnée  $y$ ) sur **courbe plane C** associée
- fonction “usuelle”  $\Rightarrow \exists$  **tangente**  $M_0T$  en chaque point  $M_0(x_0, y_0)$  de C  
(= limite  $M \rightarrow M_0$  de  $M_0M$  sécante de C en M et  $M_0$ )

## \* Pente d'une droite D du plan

- droite **D** d'origine  $M_0$ ,  $M(x, y)$  variable sur **D**  $\Rightarrow$  (théorème de **THALÈS**):  
 $(y-y_0)/(x-x_0) = \text{constante } m = \text{pente de D}$   
 $M, M_0 \in C \Rightarrow y = f(x), y_0 = f(x_0)$

## \* Dérivée d'une fonction f d'une variable

- $f : x \rightarrow y = f(x) : \{(x, f(x))\} = \text{courbe C dans le plan } xOy$
- $f'(x_0)$  dérivée de  $f$  en  $x_0 = \lim_{x \rightarrow x_0} \text{pente de } M_0M \text{ coupant C}$   
 $= \text{pente de la tangente à C en } M_0$
- fonction  $f'$  (notée aussi  $df/dx$ ) dérivée de  $f : x \rightarrow f'(x)$



# C4 – Dérivée 2nde d'une fonction d'1 seule variable

## \* Dérivée seconde

dérivée seconde  $f''$  (notée aussi  $d^2f/dx^2$ ) = dérivée de  $f'$

## \* Interprétation graphique

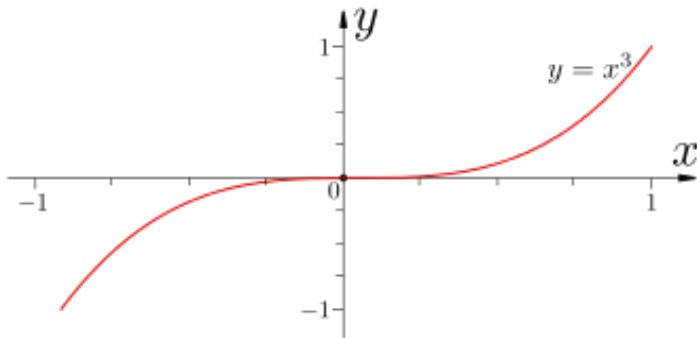
$f''$  indique la variation de la pente sur un intervalle  $[a, b]$  :

$f''(x) > 0$  sur  $[a, b] \Rightarrow$  la pente augmente, courbure vers le haut, fonction dite *convexe* sur  $[a, b]$

$f''(x) < 0$  sur  $[a, b] \Rightarrow$  la pente diminue, courbure vers le bas, fonction dite *concave* sur  $[a, b]$

$f''(x) = 0$  sur  $[a, b] \Rightarrow$  courbe localement rectiligne

$f''(x)$  s'annule et change de signe sur  $[a, b] \Rightarrow$  *point d'inflexion* : la courbure de la courbe s'inverse



fonction  $x \mapsto x^3$  avec un point d'inflexion en  $(0, 0)$

# C5 – Notions de dérivée partielle à plusieurs variables et d'équation d'onde

## \* Dérivation partielle

dérivation partielle par rapport à  $x$  d'une fonction  $f(x, y, z)$  de plusieurs variables :

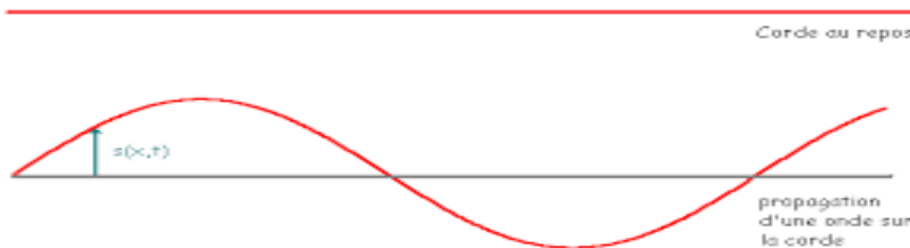
$\partial/\partial x f(x, y, z)$  = dérivée partielle de  $f$  par rapport à  $x$ , les autres variables supposées constantes

## \* Dérivation partielle du 2<sup>e</sup> ordre

. dérivation partielle d'une dérivée partielle

. exemples :  $\partial/\partial x (\partial/\partial x) f(x,y) = \partial^2/\partial x^2 f(x,y)$  -  $\partial/\partial y (\partial/\partial x) f(x,y) = \partial^2/\partial y \partial x f(x,y)$

## \* La plus simple des équations d'onde classiques : *corde vibrante*



- déplacement (**amplitude** : *ordonnée*  $z$ ) de la corde = fonction  $z(x, t)$  /  $x$  : *abscisse*,  $t$  : temps

- **équation d'onde** de D'ALEMBERT à 1 dimension :

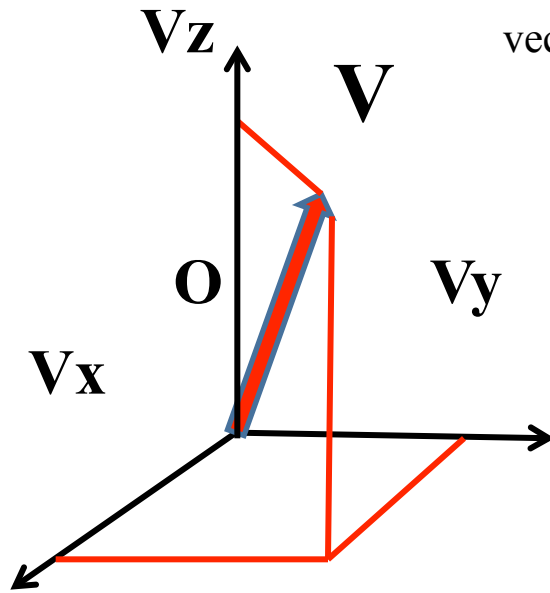
$$(v = \text{vitesse de propagation}) \quad \partial^2/\partial x^2 z(x,t) = (1/v^2) \partial^2/\partial t^2 z(x,t)$$

- comparer plus loin cette équation avec l'équation quantique de SCHRÖDINGER



# C6 - Espace vectoriel de dimension finie, ou infinie (espace fonctionnel)

## \* Espace vectoriel $S$ de dimension finie



vecteur  $V$  : 3 composantes selon 3 directions indépendantes  
(base de  $S$  de **dimension 3**)

## \* Espace vectoriel $F$ (fonctionnel) de dimension infinie

- vecteur = notion généralisable en **dimension "infinie" = fonction**
- **opérateur** d'un espace  $S$  = transformation associant à tout élément de  $S$  un autre élément de  $S$
- espace  $F$  de dimension infinie des fonctions  $f$  admettant une dérivée  $f'$   
vecteurs = fonctions  $f$  sur lesquelles agissent l'**opérateur** de dérivation :  $f \rightarrow f'$
- **espace  $E$  des états** d'un système quantique = de dimension infinie (espace de **HILBERT**) :  
vecteurs = fonctions  $\psi$  sur lesquelles agissent l'**opérateur**  $\hat{A}$  associé à chaque grandeur  $A$

**E**

# C7 - Opérateurs commutant ou non en algèbre et géométrie élémentaires (1)

## - Opérateurs en algèbre élémentaire -

espace des nombres entiers  $\Rightarrow$  opérateur = **opération**

### \* **2 opérateurs de même type (multiplication) commutent**

multiplication par **3** suivie de multiplication par **2**  $\Rightarrow$  multiplication totale par **6**

multiplication par **2** suivie de multiplication par **3**  $\Rightarrow$  multiplication totale par **6**

### \* **2 opérateurs de type différent (addition, multiplication) peuvent non commuter**

l'addition de **2** suivie de la multiplication par **3** :  $3(x + 2) = 3x + 6$

$\Rightarrow$  **résultat différent** de la multiplication par **3** suivie de l'addition de **2** :  $3x + 2$

# C7 - Opérateurs commutant ou non en algèbre et géométrie élémentaires (2)

## - Opérateurs en géométrie élémentaire -

espace plan, ou à 3 dimensions : opérateur = **transformation**

### \* 2 transformations de même type (ex. : rotation) commutent

rotation  $R_{\pi/3}$  de  $60^\circ$  suivie de rotation  $R_{\pi/6}$  de  $30^\circ \Rightarrow$  rotation totale  $R_{\pi/2}$  de  $90^\circ$

rotation  $R_{\pi/6}$  de  $30^\circ$  suivie de rotation  $R_{\pi/3}$  de  $60^\circ \Rightarrow$  rotation totale  $R_{\pi/2}$  de  $90^\circ$

### \* 2 transformations non de même type (rotation, symétrie) peuvent non commuter

rotation  $R_{\pi/2}$  de centre  $O$

suivie d'une symétrie  $S_x / O_x$  :

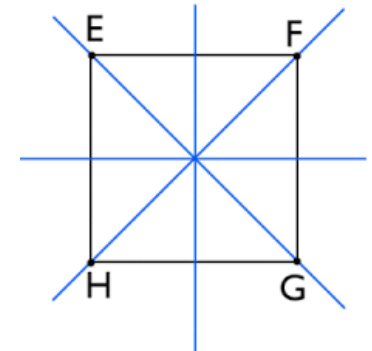
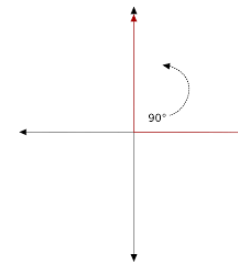
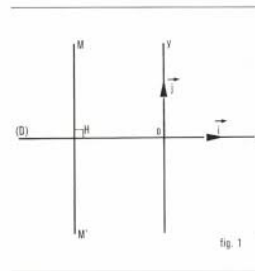
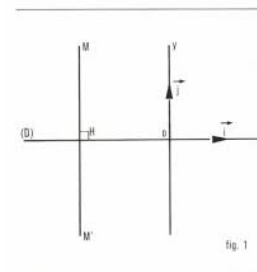
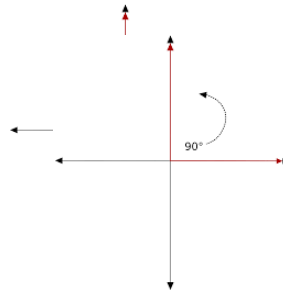
**F** vient en **E**, puis en **H**

$\Rightarrow$  **résultat différent**

de la symétrie  $S_x / O_x$  suivie

de la rotation  $R_{\pi/2}$  de centre  $O$  :

**F** vient en **G**, puis en **F**



# **D – Aperçu sur la 1<sup>e</sup> révolution quantique à partir des années 30**

**D1 - Dualité onde-corpuscule : "fonction d'onde" dans l'espace de HILBERT**

**D2 - Grandeurs quantifiées en opérateurs sur des fonctions d'onde**

**D3 - L'état quantique : superposition d'états, évolution temporelle déterministe**

**D4 - Inaccessibilité de l'état quantique : une mesure intrinsèquement probabiliste**

# D1 - Dualité onde-corpuscule : fonction d'onde dans l'espace de HILBERT

## \* Espace des états d'un système quantique

- système quantique : particule ou système de particules
- espace des états = espace de HILBERT :  
espace vectoriel  $E$  des états à une infinité de dimensions

## \* "Fonctions d'onde"

- composantes des vecteurs de  $E$  = nombres complexes au lieu de nombres réels
- état du système = vecteur de  $E$  (*vecteur d'état*)  $|\psi\rangle$  correspondant à une "fonction d'onde"  $\psi$  :  
4 coordonnées réelles d'espace et temps  $(x, y, z, t) \rightarrow$  nombre complexe  $\psi(x, y, z, t)$
- un opérateur  $\hat{A}$  (= observable) associé à chaque grandeur  $A$  agit sur  $|\psi\rangle$

## \* Produit scalaire de fonctions d'onde

- propriété des fonctions d'onde = du type "de carré sommable" ( $\Rightarrow$  notion d'intégrale :  $\int_K$ )
- propriété permettant de définir le "produit scalaire"  $\langle \psi_1 | \psi_2 \rangle$  de 2 fonctions  $\psi_1$  et  $\psi$  :  
analogue au produit scalaire de 2 vecteurs dans l'espace à 3 dimensions (avec angle et modules)  
fait intervenir une intégrale :  $\langle \psi_1 | \psi_2 \rangle = \int_K \psi_1(x) \underline{\psi_2(x)} dx$   
( $\underline{z} = a-ib$  conjugué de  $z=a+ib$  ;  $K$  région de l'espace-temps où évolue le système quantique)

# D2 - Grandeurs quantifiées en opérateurs sur des fonctions d'onde (1)

## \* Grandeurs observées dans le domaine quantique

- grandeurs classiques connues (*position*, *vitesse*, *énergie*...)
- nouvelles grandeurs propres au monde quantique

(exemple : *spin*, sorte de "moment angulaire" associé à la rotation de la particule sur elle-même)

## \* Opérateurs quantiques associés aux grandeurs

- dans l'espace  $\mathbf{E}$  des états quantiques, à 1 grandeur physique  $\mathbf{A}$  est associé 1 opérateur  $\mathbf{A}^\wedge$  (= *observable*) qui agit sur la fonction d'onde (**dérivation partielle** sur plusieurs variables)
- exemples :  $\mathbf{A} = \mathbf{x}$  (*position*)  $\Rightarrow \mathbf{A}^\wedge = \mathbf{x} \cdot$  ;  $\mathbf{B} = \mathbf{v}$  (*vitesse*)  $\Rightarrow \mathbf{B}^\wedge = (-i \hbar/m) \partial/\partial \mathbf{x}$   
( $\hbar$  = constante de **PLANCK** réduite)
- Cas où 2 opérateurs  $\mathbf{A}^\wedge$  et  $\mathbf{B}^\wedge$  **commutent** :  
appliquer un opérateur puis l'autre ne change rien en procédant dans l'ordre inverse en général
- en général 2 observables **ne commutent pas**

cf le **mathématicien (médaille Fields 2001) Alain CONNES**

(*géométrie non commutative reliant physique classique et quantique non commutative*) :

*"Ouvrir une canette de bière puis la boire est différent d'essayer de la boire puis de l'ouvrir !"*

# E

## D2 - Grandeurs quantifiées en opérateurs sur des fonctions d'onde (2)

\* Théorème (cas le plus simple) : position  $A$ , vitesse  $B \Rightarrow A^{\wedge}, B^{\wedge}$  non commutables

Preuve (niveau terminale scientifique) :

- idée : appliquer  $A^{\wedge} B^{\wedge}$  à une fonction  $f$  ; appliquer  $B^{\wedge} A^{\wedge}$  à  $f \Rightarrow$  résultat différent

- détails :

.  $A = x$  (position)  $\Rightarrow A^{\wedge} = x \cdot$  ;  $B = v$  (vitesse)  $\Rightarrow B^{\wedge} = (-i \hbar/m) \partial/\partial x = k \partial/\partial x$  avec  $k = -i \hbar/m$

$(A^{\wedge} B^{\wedge})(f) = A^{\wedge}(B^{\wedge}(f)) = x k \partial f/\partial x$  ;  $(B^{\wedge} A^{\wedge})(f) = B^{\wedge}(A^{\wedge}(f)) = k \partial/\partial x (xf) = k f + k x \partial f/\partial x$

(règle usuelle de dérivation  $\Rightarrow$  dérivée de  $u v =$  (dérivée de  $u$ )  $v + u$  (dérivée de  $v$ ))

conclusion :  $A^{\wedge} ( B^{\wedge}(f) ) \neq B^{\wedge} ( A^{\wedge}(f) )$

\* Commutateur  $C^{\wedge}$  de deux opérateurs  $A^{\wedge}$  et  $B^{\wedge}$

.  $C^{\wedge} = [A^{\wedge}, B^{\wedge}] = A^{\wedge} B^{\wedge} - B^{\wedge} A^{\wedge} = 0$  ssi  $A^{\wedge}$  et  $B^{\wedge}$  commutent

. exemple :  $A = x$  (position)  $\Rightarrow A^{\wedge} = x \cdot$  ;  $B = v$  (vitesse)  $\Rightarrow B^{\wedge} = (-i \hbar/m) \partial/\partial x$

$\Rightarrow$  (cf calcul précédent)  $[A^{\wedge}, B^{\wedge}] = i \hbar/m$

. cas particulier où 2 opérateurs **commutent** : important ensuite (*théorème de HEISENBERG*)

# D3 - L'état quantique : superposition d'états, évolution temporelle déterministe (1)

## - L'état quantique superposition d'états mesurables -

### \* Vecteur d'état $|\psi\rangle$ d'un système quantique dans l'espace $E$ des états

le système possède *avant toute mesure* d'un observateur un état physique intrinsèque :

- concentration d'énergie en un "paquet d'ondes"
- vecteur  $|\psi\rangle$  de l'espace  $E$  de **HILBERT des états**, associé à une fonction  $\psi(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, t)$
- $|\psi\rangle$  état "superposé" : superposition simultanée d'états dits **mesurables**  $|\psi_i\rangle$

### \* $|\psi\rangle$ superposition simultanée d'états mesurables $|\psi_i\rangle$

-  $|\psi\rangle$  est mathématiquement une combinaison linéaire d'états  $|\psi_i\rangle$  :

$$\mathbf{a}_i = \text{nombre complexes } \mathbf{a}_i \Rightarrow |\psi\rangle = \sum_i \mathbf{a}_i |\psi_i\rangle$$

- cas le plus simple pour réaliser les **bits quantiques** (*qubits*) d'un **ordinateur quantique** : système quantique avec une propriété à 2 états mesurables possibles (exemple : *polarisation* d'une particule)

**E**

# D3 - L'état quantique : superposition d'états, évolution temporelle déterministe (2)

## - Evolution temporelle déterministe de l'état quantique -

- \* **Vecteur** d'état quantique  $|\psi\rangle$  de l'**espace E des états**, associé à une "*fonction d'onde*"  $\psi$  :  
4 coordonnées **réelles** d'espace et temps  $(x, y, z, t) \rightarrow$  nombre **complexe**  $\psi(x, y, z, t)$
- \* **Fonction d'onde**  $\psi$  régie par l'**équation aux dérivées partielles de SCHRÖDINGER**  
(*équation non relativiste d'évolution temporelle*)
  - .  $\hat{H} |\psi\rangle = i \hbar \partial/\partial t |\psi\rangle$ , s'écrivant :  $f(\psi(x, y, z, t)) = 0$  (\*)  
où  $f(\psi(x, y, z, t)) \equiv i \hbar \partial/\partial t \psi(x, y, z, t) - \hat{H} \psi(x, y, z, t)$
  - .  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\pi$  nombre **Pi**,  $\hbar$  constante de **PLANCK**,  $\hbar$  constante de **PLANCK réduite** :  $\hbar/2\pi$
  - . opérateur agissant dans **E** :  $\hat{H}$  **hamiltonien**, associé à la grandeur **H énergie** totale du système
- \* **Linéarité de (\*)** :  $f(\psi_1 + \psi_2) = f(\psi_1) + f(\psi_2)$ ,  $f(k \psi) = k f(\psi)$   
 $\psi_1$  et  $\psi_2$  solutions  $\Rightarrow \psi$  de la forme  $a \psi_1 + b \psi_2$  (**combinaison linéaire**) = 1 solution  
(vectoriellement,  $|\psi\rangle = a |\psi_1\rangle + b |\psi_2\rangle$ )

## D4 - Inaccessibilité de l'état quantique : mesure intrinsèquement probabiliste (1)

\* **Mesure probabiliste** par l'observateur => valeur pour la grandeur quantique **A**

- **A** associée à une **observable** (*opérateur*)  $\hat{A}$
- obtention avec une certaine **probabilité** d'une valeur  $\lambda$  mesurée de **A** :
  - $\lambda$  dans un ensemble de valeurs dépendant de  $\hat{A}$
- valeur  $\lambda$  mesurée = "**valeur propre**" de  $\hat{A}$  :
  - . il existe un vecteur  $|\psi_i\rangle$  de l'**espace E des états** tel que  $\hat{A} |\psi_i\rangle = \lambda |\psi_i\rangle$
  - . chaque  $|\psi_i\rangle$  est dit "**vecteur propre**" de  $\hat{A}$

\* **Impossibilité de mesurer l'état quantique intrinsèque d'un système**

- observation impossible de l'état associé à la fonction d'onde  $|\psi\rangle$  :
  - mesure** d'une grandeur **A** par un **observateur**
  - => **projection immédiate** avec une **probabilité de l'état intrinsèque  $|\psi\rangle$  sur un état  $|\psi_i\rangle$**
- $|\psi_i\rangle$  = état dit **mesurable**, "vecteur propre" de  $\hat{A}$

**E**

## D4 - Inaccessibilité de l'état quantique : mesure intrinsèquement probabiliste (2)

\* **Etats mesurables**  $|\psi_i\rangle =$  “vecteurs propres” de  $\hat{A}$  ( $\hat{A} |\psi_i\rangle = \lambda |\psi_i\rangle$ )

**souvent on dit que l'état quantique = "à la fois" tous les états propres  $|\psi_i\rangle$**

=> aussi **absurde** que dire qu'un vecteur du plan = ses 2 projections sur Ox et Oy

( **il n'est pas** à la fois ses 2 projections, **il a** 2 projections distinctes !)

\* **Un (mauvais) trop fameux exemple : le "chat de SCHRÖDINGER"**

- imaginé par SCHRÖDINGER en vue de lacunes possibles dans l'interprétation de la mesure : processus **microscopique** indéterministe survenant, impliquant un événement **macroscopique**

- chat dans boîte fermée avec flacon de gaz mortel, matière radioactive, mécanisme

le désintégration d'un des noyaux radioactifs => mécanisme => flacon brisé => **mort du chat !**

- désintégration d'un noyau radioactif = processus quantique probabiliste

probabilité connue (ex. : 1/2) qu'une proportion de noyaux soit désintégrée après un temps  $t$

=> après un temps  $t$ , chance 1/2 pour que le chat soit mort, chance 1/2 pour qu'il soit vivant

\* **Une interprétation quantique (école de Copenhague) provocatrice non fondée**

- avant mesure, état **quantique** dans une superposition d'états, chacun avec une probabilité :

transposé au chat **macroscopique**, on dirait : **état = superposition des états mort et vivant ?**

**-état macroscopique du chat : non superposé, non simultanément "mort" et "vivant" !**

=> physicien HAWKING : *Quand j'entends le mot "chat de Schrödinger", je sors mon revolver!*



# **E - Des relations d'incertitude d'HEISENBERG au "vide" quantique**

**E1 - Grandeurs simultanément mesurables et théorème de HEISENBERG**

**E2 – Relations d'incertitude de HEISENBERG**

**E3 - Evolution de la valeur moyenne d'une grandeur (EHRENFEST)**

**E4 - Relation de HEISENBERG d'étalement temps-énergie :  $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$**

**E5 - Du "vide" antique au "vide" quantique**

**E6 - Création/annihilation de particules dans le "vide" quantique**

**E7 - Fluctuations du vide quantique : rayonnement d'évaporation d'un trou noir**

**E8 - Fluctuations du vide quantique : rayonnement d'évaporation d'un trou noir**

# E1 - Grandeurs simultanément mesurables et théorème de HEISENBERG

## \* Mesure précise d'une seule grandeur A

valeur précise  $\lambda$  d'une grandeur A obtenue uniquement si :

- .  $\lambda$  **valeur propre** de l'observable (*opérateur*) associée  $\hat{A}$
- . système dans un état correspondant  $|\psi\rangle$ , **vecteur propre** de  $\hat{A}$  pour  $\lambda$  :  $\hat{A} |\psi\rangle = \lambda |\psi\rangle$

## \* Mesure précise simultanée de 2 grandeurs A et B ?

- mesure de valeurs précises simultanées de A et de B obtenue si

le système est dans un état propre  $|\psi\rangle$  simultané des opérateurs  $\hat{A}$  et  $\hat{B}$

- A et B sont “*simultanément mesurables*” (ou **compatibles**) si

$\hat{A}$  et  $\hat{B}$  possèdent un système complet commun de vecteurs propres

## \* Théorème de HEISENBERG

. rappel :  $[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A} \hat{B} - \hat{B} \hat{A}$

. **A et B simultanément mesurables  $\Leftrightarrow [\hat{A}, \hat{B}] = 0$  :  $\hat{A}$  et  $\hat{B}$  commutent**

# E2 - Relations d'incertitude de HEISENBERG

## \* Mesures d'1 grandeur A sur un système "conditionné" dans l'état quantique $|\psi\rangle$

- mesure de A sur un système dans l'état  $|\psi\rangle \Rightarrow$  valeur  $a_i$

état du système : perturbé  $\Rightarrow$  système à "reconditionner" dans l'état  $|\psi\rangle$  avant de remesurer A

- N valeurs mesurées  $a_i$  de A (état  $|\psi\rangle$  du système )  $\Rightarrow$  valeur moyenne de A :  $\langle A \rangle = \sum_i a_i / N$

- N valeurs dispersées autour de  $\langle A \rangle \Rightarrow$  écart quadratique moyen :  $\sigma_A = \sqrt{\langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2}$  :

$\sigma_A$  assimilé à l'incertitude  $\Delta A$  commise sur la mesure de la grandeur physique A

## \* Inégalité d'incertitude de HEISENBERG

- 2 grandeurs A et B incompatibles ( $C^\wedge = [A^\wedge, B^\wedge] \neq 0$ ), et état quantique  $|\psi\rangle$

$\Rightarrow$  **inégalité d'incertitude de HEISENBERG** :  $\sigma_A \sigma_B \geq (1/2) |\langle C^\wedge \rangle|$

(via l'inégalité de CAUCHY-SCHWARZ :  $|\langle v|w \rangle| \leq \|v\| \|w\|$ , où  $\|v\| = \sqrt{\langle v|v \rangle} =$  norme de v)

-  $\Rightarrow$  **impossibilité de mesurer exactement simultanément 2 grandeurs A et B incompatibles** :

grande précision sur la mesure de A  $\Rightarrow$  précision médiocre sur la mesure de B, et vice versa

- exemple : A = x (position)  $\Rightarrow A^\wedge = x \cdot$  ; B = v (vitesse)  $\Rightarrow B^\wedge = (-i \hbar/m) \partial/\partial x$

$C^\wedge = [A^\wedge, B^\wedge] = i \hbar/m \Rightarrow (1/2) |\langle C^\wedge \rangle| = \hbar/2m \Rightarrow \sigma_x \sigma_v \geq \hbar/2m$  :

= **relation d'incertitude de HEISENBERG sur position et vitesse** :  $\Delta x \Delta v \geq \hbar/2m$

# E3 - Evolution de la valeur moyenne d'une grandeur (EHRENFEST)

## \* Pas d'opérateur temps en mécanique quantique

- physique relativiste => coordonnées d'espace et de temps mélangées

- mécanique quantique non relativiste (mais différent en théorie quantique relativiste)

=> . **temps** = **paramètre** continu de l'histoire d'un système quantique,

qui précise l'instant particulier où on a mesuré une propriété du système

. **temps** lié à l'opérateur **hamiltonien** (*énergie*) par :  $\mathbf{H}^{\wedge} = i \hbar \partial/\partial t$

pas d'observable  $\mathbf{t}^{\wedge}$  (opérateur associé) tel que valeurs mesurées de  $\mathbf{t}$  = valeurs propres de  $\mathbf{t}^{\wedge}$

=> **pas l'inégalité d'incertitude** pour 2 opérateurs  $\mathbf{A}^{\wedge}$  et  $\mathbf{B}^{\wedge}$  incompatibles ( $[\mathbf{A}^{\wedge}, \mathbf{B}^{\wedge}] \neq 0$ )

## \* Evolution de la valeur moyenne d'une grandeur (EHRENFEST)

- on se limite ici au cas où la grandeur **A** est indépendante du temps

- sa valeur moyenne  $\langle \mathbf{A} \rangle$  varie avec le temps

- **théorème d'EHRENFEST** :  $d\langle \mathbf{A} \rangle / dt = (1/i \hbar) \langle [\mathbf{A}^{\wedge}, \mathbf{H}^{\wedge}] \rangle$

(preuve : dérivation de l'expression de  $\langle \mathbf{A} \rangle$ , utilisation de l'équation de **SCHRÖDINGER**)

**A**

# E4 - Relation de HEISENBERG d'étalement temps-énergie : $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$

## \* Rassemblement préalable de résultats

. écarts quadratiques moyens des mesures de  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{B}$  :  $\sigma_A$  et  $\sigma_B$

$$C^\wedge = [A^\wedge, B^\wedge] = A^\wedge B^\wedge - B^\wedge A^\wedge$$

inégalité d'incertitude de HEISENBERG :  $\sigma_A \sigma_B \geq (1/2) |\langle C^\wedge \rangle|$

.  $\sigma_A$  assimilé à l'incertitude  $\Delta A$  commise sur la mesure de la grandeur physique  $A$

$$\Rightarrow \Delta A \Delta B \geq (1/2) |\langle [A^\wedge, B^\wedge] \rangle| \quad (*)$$

. théorème d'EHRENFEST :

$$v = \text{vitesse d'évolution de } \langle A \rangle = d\langle A \rangle / dt = (1/i \hbar) \langle [A^\wedge, H^\wedge] \rangle$$

$$\Rightarrow |v| = (1/\hbar) |\langle [A^\wedge, H^\wedge] \rangle| \Rightarrow |\langle [A^\wedge, H^\wedge] \rangle| = |v| \hbar \quad (**)$$

## \* Inégalité d'étalement temps-énergie $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$

.  $H^\wedge$  = observable (opérateur) associé à la grandeur énergie  $E$

. (\*) et (\*\*)  $\Rightarrow \Delta A \Delta E \geq (1/2) |\langle [A^\wedge, H^\wedge] \rangle| = 1/2 |v| \hbar \Rightarrow (\Delta A / |v|) \Delta E \geq \hbar/2$  :

$$\tau_A \Delta E \geq \hbar/2, \text{ avec } \tau_A = \Delta t = \Delta A / |v| :$$

$$\text{développement limité au 1}^\text{er} \text{ ordre } \Rightarrow \Delta A = (d\langle A \rangle / dt) \Delta t = v \Delta t$$

.  $\tau_A = \Delta t$  homogène à un temps, dit **temps caractéristique d'évolution** de la grandeur  $A$  :

$\Rightarrow$  le centre  $\langle A \rangle$  de la distribution probabiliste des valeurs mesurées de  $A$  bouge de  $\Delta A$

= étalement dans le temps pour que cette distribution soit notablement modifiée

# E5 - Du "vide" antique au "vide" quantique

\* Dans l'Antiquité et jusqu'au 19<sup>e</sup> s.

"vide", avec absence de toute chose (matière et énergie),  
supposé "entre des grains de matière"

\* 1929-1931: DIRAC, du vide-énergie à l'antimatière

- 1928 - modélisation du comportement de l'électron par  
**équation relativiste** compatible avec mécanique quantique,  
dont une partie des solutions est d'**énergie négative**

- 1930 : **modélisation associée** du vide quantique

("mer de *DIRAC*") avec des trous d'énergie négative

- => 1931 prédiction de l'existence du **positron**

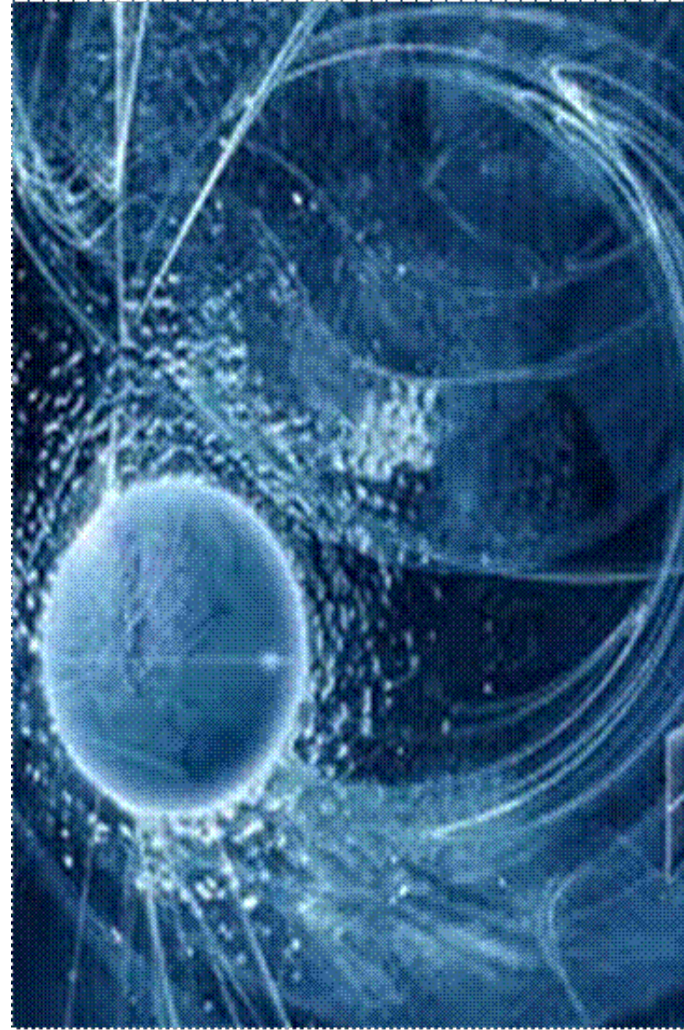
\* **L'antimatière**

- **positron** antiparticule de l'électron :

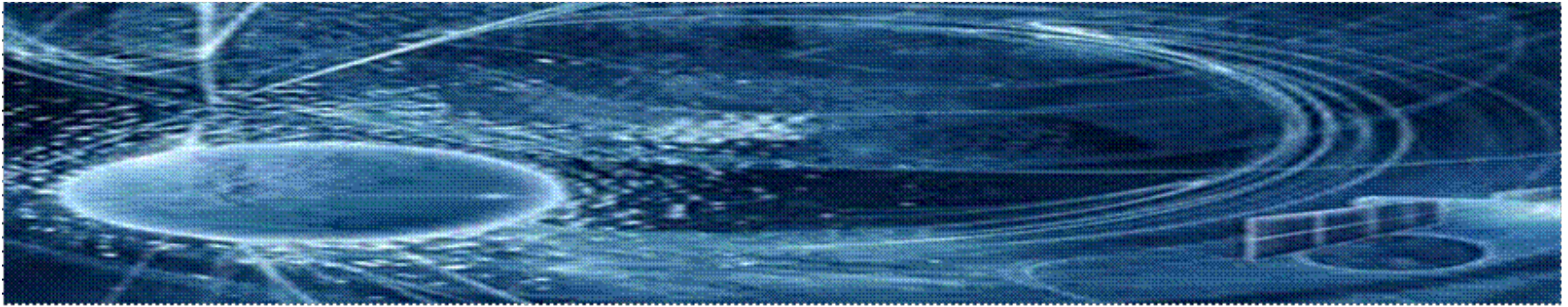
jumeau de **charge opposée** (découvert effectivement en 1932)

- une particule et son antiparticule s'annihilent au contact

=> conversion en énergie radiative (2 photons) via  $E = m c^2$



# E6 - Création/annihilation de particules dans le "vide" quantique



## \* "Vide" quantique "actif"

- (*théorie quantique relativiste*) pendant instants très brefs **création** et **annihilation** permanentes (*opérateurs*) de paires de **particules/antiparticules** virtuelles (pas observables directement)
- valeur moyenne **0** du nombre de particules, mais **activité détectée** par compteur **GEIGER** !

## \* Fluctuations d'énergie du "vide quantique" : **relation d'étalement temps énergie**

- **relation de HEISENBERG d'étalement temps énergie** :  $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2 \Rightarrow \Delta E > 0$   
 $\Rightarrow$  pendant un temps infime en un point du "vide", impossible d'avoir  $\Delta E = 0$  :  
en ce point l'espace contient de l'énergie, de grande **fluctuation**  $\Delta E$  au cours du temps  
 $E = mc^2 \Rightarrow$  énergie = masse  $\Rightarrow$  apparitions/disparitions de **particules**
  - si  $\Delta E$  supérieure à la masse d'1 couple **particule-antiparticule** : **création** possible d'1 couple  
si  $\Delta E$  redevient inférieure à la masse d'1 tel couple par **fluctuation** d'énergie :  
**annihilation** immédiate du couple qui restitue son énergie de masse
- $\Rightarrow$  **"vide quantique" = "mousse" avec création et destruction constantes de paires de particules**

# E7 - Fluctuations du vide quantique : rayonnement d'évaporation d'un trou noir (1)

## - Séparation particule/antiparticule au voisinage de l'horizon d'un trou noir -

Au voisinage de l'**horizon des événements** d'un **trou noir** :

très intenses forces de marée générées par le champ gravitationnel du **trou noir** =>

- . éloignent dans chaque couple la particule de son antiparticule avant qu'elles ne s'annihilent
- . 1 particule **P** s'échappe à grande distance emportant une énergie positive  $\Delta E$
- . antiparticule restante **P\*** absorbée par le **trou noir** avec une énergie négative  $-\Delta E$



*Effets de courbure de l'espace-temps par un trou noir (simulation : Alain RIAZUELO)*

# E7 - Fluctuations du vide quantique : rayonnement d'évaporation d'un trou noir (2)

## - Rayonnement d'évaporation en provenance du trou noir -

- la particule **P** qui s'échappe ne peut plus se recombinaison avec son antiparticule **P\***  
=> devient réelle, apparaissant à un observateur distant comme émise par le **trou noir**
- l'énergie positive  $\Delta E$  emportée par **P** doit être compensée (conservation de l'énergie)  
=> (énergie négative  $-\Delta E$  de **P\***) perte de  $\Delta E$  par le **trou noir** => diminution de sa masse
- résultat : apparition d'un rayonnement d'évaporation (**rayonnement de HAWKING**)  
émis par l'**extérieur** du **trou noir**
- (*calcul*) possède le spectre d'un **rayonnement thermique**, caractéristique d'un corps à une température donnée => celle-ci = **température du trou noir** (**rien à voir avec l'intérieur**)



# **F - Une 2<sup>e</sup> révolution quantique depuis la fin du 20<sup>e</sup> s. : l'intrication**

**F1. Invention du concept d'intrication (EINSTEIN, années 30)**

**F2. Etats intriqués observés et applications à partir des années 80**

**F3. De l'intrication à l'inséparabilité et à la décohérence**

# F1 - Invention du concept d'intrication (EINSTEIN, années 30)

\* “*Expérience de pensée*“ d'EINSTEIN remettant en cause la mécanique quantique

- EINSTEIN (avec PODOLSKY et ROSEN) : 1935 => fameux paradoxe **E. P. R.**

- EINSTEIN n'appréciait pas le côté probabiliste de la Mécanique Quantique :

“*expérience de pensée*“ sur la mesure de grandeurs associées à 2 photons

=> ? contradiction dans la **M. Q.** , avec une règle violée parmi les 2 suivantes :

1. impossibilité pour un signal de dépasser la vitesse **c** de la lumière (***causalité relativiste***) ;
2. indépendance l'une de l'autre en tant qu'entités de deux particules éloignées, chacune localisée dans l'espace-temps (***localité***)

\* **Notion d'intrication quantique**

**intrication quantique** (***quantum entanglement*** : enchevêtrement quantique) :

- . l'état de chaque objet d'un système quantique **ne peut** être décrit indépendamment
- . l'état quantique - **état intriqué** (***entangled state***) - du système **doit** être décrit globalement , sans pouvoir distinguer un objet d'un autre bien qu'ils puissent être spatialement séparés
- . corrélations existantes entre **propriétés** physiques (*spin, polarisation...*) observées des objets : elles n'existeraient pas si l'on pouvait attribuer des **propriétés** individuelles à chacun d'eux

## F2 - Etats intriqués observés et applications à partir des années 80

### \* Technologie à partir des années 80 => confirmation de l'existence de l'intrication

- expérience décisive d'**Alain ASPECT *et al.* (1982)**

=> dans des conditions déterminées 2 particules communiquent entre elles :

**instantanément et quelque soit la distance**

- états **intriqués** effectivement observés en laboratoire :

comportement en accord avec celui prévu par la mécanique quantique

### \* Apparition du domaine de l'information quantique à partir des années 90

intrication utilisée ensuite en traitement et transmission de l'information :

- nouveaux horizons d'applications pour physiciens, mathématiciens, et informaticiens

- utilisation de propriétés spécifiques de la mécanique quantique =>

émergence de **l'informatique et de la cryptographie quantiques** :

. nouveaux procédés de calcul plus efficaces qu'avec les ordinateurs classiques

. protocoles de communication révolutionnaires avec cryptage à sécurité garantie

# F3 - De l'intrication à l'inséparabilité et à la décohérence

## \* **Inséparabilité quantique**

- une paire de photons préparés dans un état quantique **intriqué** se comporte comme un système unique, même si les deux objets sont très éloignés l'un de l'autre : **inséparabilité quantique**
- conséquence = caractère de **non-localité** :  
corrélations de phénomènes sans relation causale ni de possibilité de connexion par un signal

## \* **Une "gémellisation" inexplicable**

- 2 systèmes quantiques intriqués => même résultat de mesure sur chacun d'une même grandeur
- **"gémellisation" instantanée quelque soit la distance** :
  - . résultat expérimental **très précis** encore inexplicable
  - . comportement de 2 photons intriqués : pas de points communs déterminés à l'avance (alors que le patrimoine génétique identique "explique" le comportement de 2 jumeaux humains...)

## \* **Phénomène de décohérence**

- mesure d'une observable => projection immédiate probabiliste de l'état intrinsèque superposé sur un seul autre parmi un ensemble d'états possibles dépendant de l'opérateur associé :  
= phénomène de **décohérence** inhérent à la mesure, indépendant du soin pris par l'expérimentateur
- facteur de difficulté pour réaliser un **ordinateur quantique** :
  - . **centaines** de qubits intriqués nécessaires
  - . réussite actuelle avec juste une **quinzaine** de qubits
  - . extrême fragilité du maintien de l'intrication

# **G – Conclusions**

- G1. Unification quantique des 4 interactions fondamentales ?**
- G2. Difficultés d'interprétation en théorie quantique des champs**
- G3. Inadaptation quantique du concept de particule**
- G4. Difficulté de représentation quantique du concept de champ**
- G5. Un monde quantique de propriétés et non d'objets ?**
- G6. Bilan et perspectives**

# G1 - Unification quantique des 4 interactions fondamentales ?

## \* Description unifiée\*des 3 interactions forte, faible, électromagnétique

**modèle standard (1997)**

=> prédictions vérifiées à une très grande précision dans les accélérateurs de particules

## \* Unification à terme des 4 interactions ?

### . cas particulier de la gravitation :

ondes gravitationnelles récemment détectées, mais **graviton (*spin 2*)** pas encore

. théories en cours, basées sur des **symétries** de l'espace du modèle, décrivant l'univers via les mouvements d'objets de dimension **1** : **cordes**, ou de dimension supérieure : **(mem)branes**

## G2. Difficultés d'interprétation en théorie quantique des champs

### \* Un formalisme quantitatif très précis sans apport d'explications qualitatives

- 4 types de champs de force – médiateurs des 4 interactions fondamentales
- 3 premiers champs unifiés du **modèle standard** : fondements conceptuels = **théorie quantique des champs**
- modèle permettant quotidiennement des calculs extrêmement précis pour des problèmes récurrents  
(*collisions de particules, étude du noyau atomique, du Big Bang, etc...*)
- **mais formalisme mathématique sophistiqué sans aucune explication sur la nature profonde des phénomènes**

### \* Interdépendance des notions de particule et de champ

les notions de particule et de champ s'entremêlent en théorie quantique des champs, avec :

- un champ particulier associé à chacun des nombreux types de particules élémentaire,
- une particule associée à chaque champ de force d'une interaction fondamentale  
(exemple : photon pour le champ électromagnétique)

# G3. Inadaptation quantique du concept de particule

## \* Concept classique de particule

particule **classique** = boule minuscule (atomisme de l'Antiquité – **NEWTON** fin du XVIIe s.)  
constituant de matière individualisé et localisé

## \* Particule en théorie quantique des champs :

4 caractéristiques classiques absentes :

### \* 1 particule classique est localisée (position déterminée, variant continûment au cours du temps)

. détecteur de particules (chambre à bulles) => points traces d'excitations isolées (bulles) reliés : *trajectoires*

théorie quantique des champs : une "particule" n'a pas de position définie

(un observateur voulant la mesurer a une probabilité faible non nulle de la détecter aux confins de l'Univers)

### \* le vide classique - état de l'espace à zéro particule - ne présente aucune activité

d'après théorie quantique des champs, un détecteur (compteur Geiger) dans le vide grésille, signe d'activité

### \* 1 particule classique en tant qu'objet réel existe pour tout observateur, ou n'existe pas

d'après théorie quantique des champs,

observateur immobile : vide froid autour => observateur en accélération : gaz chaud de particules autour

### \* 1 particule classique a toujours des propriétés bien déterminées (énergie, quantité de mouvement...)

**intrication quantique** entre des particules => chacune perd son individualité, et devient **indistinguable**

(système plus gros devenu un tout indivisible où : individualité abolie, mêmes propriétés pour tous éléments)

# G4. Difficulté de représentation quantique du concept de champ

## \* Concept classique de champ

- champ **classique** = associe à chaque instant à tout point de l'espace une **grandeur mesurable  $\mathbf{A}$** 
  - => champ : **scalaire** (température), **vectorel** (champ électrique), **tensoriel** (Relativité)...
- champ électrique (vecteur  $\mathbf{E}$ , d'intensité  $E$  module de  $\mathbf{E}$ ) en un point où se trouve une particule de charge  $q$ 
  - => force électrique exercée sur cette particule :  $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$  (loi de **COULOMB**).

## \* Le champ en théorie quantique

- . **opérateur** dans un espace  $S$  = transformation associant à tout élément de  $S$  un autre élément de  $S$   
(exemple : dérivation associant à chaque fonction  $f$  sa dérivée  $f'$ )
- . **champ quantique** : associe à tout point de l'espace-temps un **opérateur  $\hat{\mathbf{A}}$**  dans un espace de **HILBERT**  
probabilité de mesurer une valeur de  $\mathbf{A}$  : appliquer  $\hat{\mathbf{A}}$  à la fonction d'onde, vecteur d'état du système
- . => notion de champ quantique difficile à se représenter

# G5. Un monde quantique de propriétés et non d'objets ?

## \* Rôle fondamental des propriétés des objets quantiques

- propriétés intrinsèques (*charge électrique*) de 2 particules **intriquées** + propriétés extrinsèques (*position*)  
=> ne détermine pas l'état complet du système intriqué : plus de *propriétés* que la réunion de ses parties

- unités fondamentales du monde matériel en théorie quantique des champs

= entités individuelles persistantes (particules, champs) avec des faisceaux de **propriétés** :

. **électron** = faisceau de trois *propriétés* essentielles fixes (masse, charge, spin) et de *propriétés* changeantes (position, vitesse ...).

. **vide** contenant des *propriétés* : une particule apparaît quand des *propriétés* se groupent d'une certaine façon (apparition / disparition subite de particules : création / annihilation en permanence)

## \* Rapport avec des courants philosophiques

- **PLATON** : *propriétés* existant indépendamment du monde de l'espace et du temps, dans un autre monde

- grand mathématicien **Alain CONNES** (médaille Fields 1982) :

objets mathématiques en théories quantiques : non localisables dans l'espace temps, réalité "ailleurs"

- **réalisme structurel** : réalité caractérisée par des **structures** comptant plus que la nature des objets en relation  
*propriétés* = catégorie d'entités individuelles, existant indépendamment des objets les possédant

*objets* = faisceaux de *propriétés*

# G6 – Bilan et perspectives

## \* Architecture mathématique très subtile en filigrane de l'univers matériel

modélisation des résultats successifs de l'exploration technique avancée de l'infiniment petit (grand) : constructions mathématiques de plus en plus sophistiquées reliées par la physique quantique

## \* Complexité croissante des outils mathématiques nécessaires en modélisation quantique

- **mécanique quantique** : “*grandeurs*” ( vitesse, énergie...) → **opérateurs** d'un espace de **HILBERT**
- **théorie quantique des champs** (mécanique quantique et relativité restreinte => les particules connues) :
  - . équation de **SCHRÖDINGER** de la fonction d'onde : généralisée à un nombre arbitraire de particules  
chaque particule = excitation (*onde*) d'un champ fondamental où seule l'énergie de l'onde est détectable
  - . concept de **champ de particules** => (*transformées de FOURIER*)  
définition d' **opérateurs de création et d'annihilation** de particules en tout point de l'espace :  
le champ lui-même devient un opérateur

## \* Cordes tissant infiniment petit et infiniment grand

- *théorie des cordes* microscopiques pour tenter d'unifier gravitation et mécanique quantique
- *corde cosmique* : issue de l'Univers primordial ("défaut" de cet Univers, encore jamais détecté) :
  - . **effet gravitationnel** : tenir compte des *ondes gravitationnelles* à l'existence récemment confirmée
  - . modèle d'Univers *ekpyrotique* (du grec "*ekpyrosis*" : *embrasement*) du cosmologue **Neil TUROK** :  
Univers "*à l'éternel retour*" : précédent => effondré avant de rebondir (nouveau cycle au **Big Bang**)

# Partie II

# H - Questions d'actualité



## *Préambule guitaristique*

- *présentation de la guitare de concert créée par le luthier d'art Frédéric BEAUDOIN*
- *improvisation à la guitare, évoquant ondes, résonances, harmoniques...*

**H1. Les qubits, base de l'ordinateur et de l'algorithmique quantiques**

**H2. L'ordinateur quantique**

**H3. La machine “pseudo-quantique” D-Wave 2X**

**H4. Notions sur la cryptographie contemporaine**

**H5. Succès industriel de la cryptographie quantique**

# H1. Les qubits, base de l'ordinateur et de l'algorithmique quantiques

## \* Qubit, élément de la sphère unité $S^3$ de $R^4$

- système quantique  $S$  à **2 états** mesurables possibles d'une grandeur (*polarisation, spin...*) :

$|0\rangle$  et  $|1\rangle$  base orthonormée d'un espace de **HILBERT** complexe  $E$  de dimension **2**

- **qubit** (*quantum bit*) = état superposé de  $S$  (fonction d'onde  $\psi$  dans  $E$  :  $|\psi\rangle$  vecteur d'état **unitaire**)

combinaison linéaire à coefficients complexes ( $u = x + i y$ , où  $i = \sqrt{-1}$ )  $|\psi\rangle = u|0\rangle + v|1\rangle$ , avec :

$|u|^2 + |v|^2 = 1$ ,  $|u|^2$  (resp.  $|v|^2$ ) probabilité d'obtention de  $|0\rangle$  (resp.  $|1\rangle$ ) :  $|\psi\rangle \in S^3$  ( $1 = |u_1|^2 + |u_2|^2 + |v_1|^2 + |v_2|^2$ )

## \* Etat porté par un qubit, élément de la sphère unité $S^2$ de $R^3$ de centre $O$

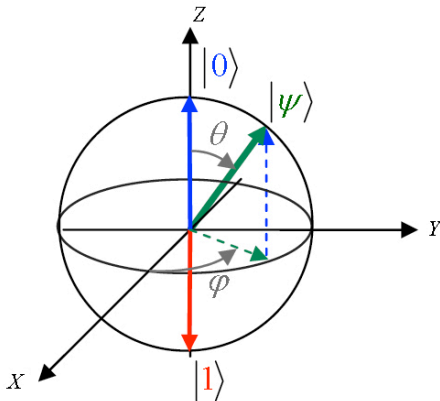
- on prouve que  $|\psi\rangle$  est défini à un facteur **complexe unitaire**  $\lambda$  près ( $\lambda = e^{i\gamma} = \cos \gamma + i \sin \gamma$  : de module **1**) :

$|\psi\rangle$  s'écrit  $\cos \theta/2 |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \theta/2 |1\rangle$ , si  $\theta =$  *angle azimutal* de  $|\psi\rangle$  avec  $Oz$ ,  $\varphi =$  *angle polaire* avec  $Ox$

de la projection de  $|\psi\rangle$  sur le plan  $xOy$  : coordonnées sphériques ( $r=1, \theta, \varphi$ ) d'un **point** de  $S^2$

=> **infinité de valeurs** possibles : on va de l'une à l'autre par une rotation autour d'un axe passant par  $O$

- **bit** ordinaire de l'informatique classique : seulement **2 valeurs**, associés aux pôles Nord et Sud de  $S^2$



## \* Etapes d'un algorithme quantique

chacune applique une **porte quantique** (opérateur unitaire = transposé conjugué) à un système de *qubits*

# H2 - L'ordinateur quantique

## \* Nombre nécessaire de qubits à intriquer

- nombre maximum de qubits qu'on arrive réellement à intriquer : actuellement **une quinzaine**
- **plusieurs centaines** requises pour réaliser un vrai ordinateur quantique :  
coordonner les qubits intriqués afin que chacun soit parfaitement isolé de son environnement immédiat (sinon risque de perdre toute propriété quantique du fait de la **décohérence** qui survient)

## \* Retarder le plus possible la décohérence

2 stratégies parallèles nécessaires :

- maintenir l'environnement à l'écart de toute excitation thermique :  
température extrêmement proche du **zéro absolu** : **-273,15 °C** (**D-Wave 2X** : cryostat à dilution d'hélium)  
mais ceci n'élimine pas toute décohérence
- conserver l'information durant un temps suffisamment long pour effectuer des calculs :  
l'encoder dans plusieurs particules intriquées entre elles via un codage distribué  
=> application d'un algorithme rectifiant les erreurs dues à la décohérence : le **code correcteur quantique**

## \* Codes correcteurs quantiques

théorie => codes correcteurs très efficaces (7 ou 9 qubits), que les physiciens ne savent pas implémenter (on sait implémenter avec des codes restreints à seulement 3 qubits, ne corrigeant que certains types d'erreur)

## \* Quand un vrai ordinateur quantique ?

vrai ordinateur quantique conçu quelque part => la communauté des chercheurs le saura assez vite (probablement certains résultats resteront un temps sous le sceau du secret industriel ou militaire)

# H3. La machine "pseudo-quantique" D-Wave 2X

## \* Apparition en 2013 de la machine "pseudo-quantique" de D-Wave System (Canada)

simulateur basé sur un circuit annoncé de "calcul quantique", fonctionnant à une température cryogénique proche du zéro absolu pour éviter le phénomène de décohérence, utilisant des systèmes supraconducteurs : principe de fonctionnement en fait différent, pas des qubits intriqués d'un ordinateur quantique .

## \* Nouvelle machine "pseudo-quantique" D-Wave 2X en 2015

- énorme armoire de métal impénétrable, avec froid proche du zéro absolu, vide quasi-parfait (coût > **10<sup>7</sup> \$**)  
- **en aucun cas un ordinateur** (qui est un calculateur universel) :

ne fonctionne qu'avec un unique algorithme de "recuit simulé"

*(méthode empirique issue de l'alternance réchauffement-refroidissement minimisant l'énergie du matériau en métallurgie : introduction d'un paramètre fictif de température pour **optimiser** un système)*

avec "calcul quantique adiabatique"

*(système dans un état excité avec niveau d'énergie associé à un **hamiltonien** : modification graduelle des conditions externes => évolue vers l'hamiltonien d'un état fondamental stable de niveau d'énergie plus bas)*

- **en aucun cas un ordinateur quantique** :

- . manipule un millier de pseudo-qubits associés à des éléments supraconducteurs
- . puissance beaucoup plus faible, ne pouvant briser les programmes de cryptage de données

## \* Avis des chercheurs européens experts consultés par Bruxelles

- D-Wave annonce un gain de rapidité d'un facteur  $10^8$  sur un seul algorithme classique peu performant : il en existe d'autres bien meilleurs, par rapport auxquels ce gain annoncé s'évanouit

- avis très réservé, seulement intérêt relatif "boostant" les recherches en vue d'un vrai ordinateur quantique

# H4 – Notions sur la cryptographie contemporaine

## \* Cryptographie classique

Antiquité => besoin de brouiller les messages qu'on ne souhaite pas voir interceptés par autrui

*cryptographie* = art de transmettre secrètement de l'information

## \* Cryptage et décryptage

- algorithmes avec hautes mathématiques (théorie des nombres, probabilités, fonctions logiques) :

*cryptage* : transforme par une opération le message lisible par tous en message codé

*décryptage* : fait l'opération mathématique inverse pour décoder

- algorithmes connus de tous, utilisant une **clé** (suite de nombres aléatoires)

puis message crypté diffusé sur une ligne de communication publique

## \* Pas de confidentialité absolue

cryptographie classique : algorithmes toujours révélés cassables dans des cas particuliers

# H5 - Succès industriel de la cryptographie quantique

## \* Principe de la *cryptographie quantique* (protocole de BENNETT-BRASSARD, 1984)

- ne nécessite pas l'**intrication de qubits** comme l'ordinateur quantique
- associe à chaque bit d'information un photon dans un état quantique particulier de *polarisation*
- utilise le caractère probabiliste quantique de la détection de photons émis, polarisés de 2 façons différentes :  
soit **HV** : *horizontale* ( $\rightarrow$ ) ou *verticale* ( $\uparrow$ ) , soit **DA** : *diagonale* ( $\nearrow$ ) ou *antidiagonale* ( $\nwarrow$ )
- un filtre Polaroid placé sur le trajet des photons modifie leur polarisation
  - . photons polarisés **HV** => ceux de même orientation que celle du filtre le traversent, ceux perpendiculaires sont bloqués
  - . photons polarisés **DA** => comportement quantique face au filtre :  
si filtre orienté verticalement : **1** chance sur **2** d'être repolarisés correctement suivant la verticale et de traverser le filtre,  
**1** chance sur **2** d'être bloqués

## \* **Transmission de l'information**

- information : transmise sur les fibres optiques standards installées dans les réseaux optiques de communication
- méthode de transmission : garantit la distribution secrète des clés de cryptage , débit voisin du **kilobit/s sur 100 km**
- relais nécessaires posant encore un **problème de physique et technologie pour les échanges intercontinentaux**

## \* **Confidentialité absolue des messages garantie par les lois de la mécanique quantique**

codage de chaque bit constituant la clé de cryptage sous la forme d'un état quantique prédéterminé d'un photon  
intrus cherchant à intercepter la transmission => perturbe irrémédiablement l'état du photon associé au bit de cryptage  
(*mécanique quantique* : tout observateur faisant une mesure physique d'un phénomène le perturbe )  
l'interception déclenche un signal d'erreur chez le destinataire du message qui sait alors que la ligne est écoutée

# **I – Quantique et charlatans**

**I1. Le charabia quantique de Deepak CHOPRA**

**I2. L'imposture scientifique des jumeaux BOGDANOV**

# I1 –Le charabia quantique de Deepak CHOPRA

## \* Le "*mysticisme quantique*"

- "*quantique*" => science, mystère, complexité intellectuelle ...
  - développement du "*mysticisme quantique*" (1975, livre "*Le Tao de la physique*" de Fritjof CAPRA) :
    - . la mécanique quantique confirme les enseignements de traditions orientales
    - . la conscience humaine est inextricablement liée à l'Univers, et détermine la réalité
    - . **fonction d'onde quantique** = vibration réelle d'un éther universel se répandant dans le cosmos
- => **confusion** entre théorie quantique et conscience humaine vue comme connectée à la fonction d'onde
- (fonction d'onde quantique : **≠ objet physique tangible** manipulable par l'esprit humain
- = **outil mathématique abstrait** faisant ce que les équations lui disent

## \* Les thérapies "*quantiques*"

- "*quantique*" = vocable de *pseudothérapies* piratant les concepts quantiques à des fins mystico-médicales (années **1980** aux Etats-Unis, années **1990** en France)
- nombreux ouvrages associés, notamment ceux du "gourou" **Deepak CHOPRA** (médecin endocrinologue et ayurvédique : "*quantique*" à gogo(s) = empire financier (**15 millions \$ /an**) langage pseudo-scientifique de la guérison "*quantique*" - l'esprit guérit toutes maladies, donne l'immortalité :
  - . la physique quantique explique une "*communication intercellulaire*"
  - . dualité quantique onde-particule = analogie de la dualité corps-esprit, source du réveil d'énergies curatives
  - . principe d'incertitude d'**HEISENBERG** + textes sacrés de l'*Ayurveda* => règles pour atteindre le bien-être
  - . rôle quantique crucial de l'observateur => sa conscience influe sur la matière, donc sur la guérison

# I2 - L'imposture scientifique des jumeaux BOGDANOV

## \* Le travail de thèse des BOGDANOV

- débuts en 1993 : Université de Bourgogne, 2 directeurs successifs physiciens mathématiciens :
  - . **Moshé FLATO**, membre du comité Nobel, soudainement décédé en **1998**
  - . puis son collègue et directeur de recherches au CNRS **Daniel STERNHEIMER**
- **l'avant Big-Bang** : l'Information règne (après Big Bang : l'Energie règne, masse et structures ordonnées) au fil du temps, dégradation de l'ordre vers le désordre associée à la croissance de l'entropie  
(*analogie avec trou noir : avant d'arriver au centre, énergie, masse, dimensions, structures ordonnées...  
après arrivée au centre, pas d'énergie, de masse, seul règne de l'Information*)
- **l'ère de PLANCK** : période de  $10^{-43}$  s dans l'histoire de l'Univers au cours de laquelle les 4 interactions fondamentales (*électromagnétisme, interaction faible, interaction forte, gravitation*) étaient unifiées
- étude des BOGDANOV : l'Univers supposé concentré dans un unique objet mathématique ponctuel pendant cette ère et avant le Big Bang, à l'aide de l'équilibre thermodynamique des systèmes quantiques

## \* L'impact nul des soutenances de thèse des BOGDANOV

- **Grichka** : 1993-1999 (maths) "*Fluctuations quantiques de la signature de la métrique à l'échelle de Planck*"
- **Igor** : 1993-2002 (physique) "*Etat topologique de l'espace-temps à l'échelle zéro*"
- **contestation des travaux** par des scientifiques => demande par l'Université de Bourgogne d'avis CNRS  
=> rapport scientifique fracassant en **2003** des sections 01 et 02 du CNRS sur les 2 "thèses" :  
travaux sans aucuns résultats personnels et très incomplets, ne pouvant valider leur modèle
- en fait *vulgarisateurs / animateurs*, voulant auprès du public passer pour des experts scientifiques,  
**condamnés** (Paris 2015) à verser **2000 €** au CNRS (ils lui **demandaient 1 200 000 €** de préjudice moral !)