

Mécanique Quantique Complexité et émergence

Bernard DECUGIS
Groupe Complexité et Emergence
17 / 11 / 2008
v6

Des REMERCIEMENTS

- À Michel BLOCH pour m'avoir « vigoureusement » incité à accepter de préparer qq chose sur un sujet qui s'il avait pu accrocher mon intérêt n'était pas et loin s'en faut mon sujet de prédilection. Il l'est devenu depuis , au grand dan de mon épouse qui se trouve du fait réprimandée régulièrement pour arrêter son babil incessant qui ne favorise pas la concentration nécessaire à l'étude –sans même parler de la compréhension – de ces mystères qui nous échappent et dont nous n'avons même pas –à l'instar de Cocteau---la ressource de prétendre en être les « instigateurs ». J'aime bien « instigateurs » , ça a un je ne sais quoi de démiurge qui colle bien avec ces choses déroutantes dont je vais vous entretenir , mais ne nous égarons pas....
- A mon épouse donc , pour avoir « su » et « pu » maîtriser son « doux babil » faute de quoi nous ne serions pas ici et maintenant allant nous entretenant plus de 20 pas en dessous d'elle... Ici et maintenant , étant des choses dont on apprendra ds un instant que contrairement à ce qu'on pense qu'elles revêtent un caractère de profonde « incertitude » non seulement pour mon épouse –chez qui il s'agirait de qq chose plutôt d'ordre génétique, mais pour le reste d'entre nous ds ce monde quantique où nous pensons/croyons vivre et où la réalité est incertaine... Mais n'anticipons pas.
- Et puis allons-y de la phrase rituelle et avançons ds le vif du sujet :
« Remerciements aussi à beaucoup d'autres qu'il serait trop long de citer ici et qui se reconnâitrons.... à l'exception de WIKIPEDIA – pillée plus qu'outrageusement

Un AVERTISSEMENT

Merci de bien vouloir excuser les redites et répétitions, les sources pas tjrs citées , l'auteur n'ayant eu ni le temps ni le courage d'entreprendre une re-composition de l'ensemble , qui vous est livré « brute de fonderie »

Un Préambule *

Ceci fait et avant d'entrer ds le vif du sujet , un infime détour vers la complexité , qui sous-tend toute chose ici bas et cet exposé en particulier , puisqu'il s'inscrit ds le cadre des conférences tenues au sein du Cercle Complexité et Emergence de Paris.

Plus généralement n'est-il pas temps de se poser la question de « l'émergence » de la complexité comme nouveau paradigme de la démarche scientifique ? C'est une des questions que nous posons *rien ne vous sera épargné

La COMPLEXITE : nouveau paradigme scientifique ? (1)

- Apogée de la physique classique « déterministe et réductionniste » à la fin du 19 ème :
- Avènement du 20 ème :
 - De nouveaux phénos → Ebranlement des fdmts de la Phy classique
 - Relativité rest et g'ale : espace et le temps
 - M-Q : glas du déterminisme → incertitude et probabilité
 - La nature même du REEL $\leftrightarrow$ quotidien
- 100 ans + tard : théorie à maturité à portée ses fruits mais
 - Les lacunes majeures demeurent → pas de n'elle percée
- Les phénomènes « hors-équilibre », les plus fréquents et de loin ont été ignorés/contournés par physiciens
 - Difficiles/impossibles à décrire mathmt
 - Problème du temps et des lois physique réversibles (t)
 - » La physique n'a pas de représentation/théorie du temps
 - » Irréversibilité $\leftrightarrow$ Ilya Prigogine
 - Systèmes informatique et puissance d'itération → possibilité de simulation en boucles itératives
 - Une désormais possible **émergence de l'étude de l'émergence....**

« La complexité a longtemps été considérée comme un obstacle qu'il fallait contourner, soit en simplifiant les situations réputées complexes, soit en réduisant celles-ci à l'analyse de leurs composants élémentaires »
L'apprentissage de la complexité / Gérard Clergue , 1997.

En fait on a évité 'les régimes transitoires et syst en mvmt'
→ On a regardé la nature comme elle est en se ramenant à des cas « simples » idéalisés et non comme elle évolue ds Sa complexité due à la multitude d'interactions

La COMPLEXITE : nouveau paradigme scientifique ? (2)

- Phénomènes émergents :
 - **La connaissance de l'équation fondamentale à un niv n'implique pas la compréhension du phéno au niv sup.**
 - Et comme **il n'existe pas de théorie générale des phéno émergents**, il n'existe pas de façon de transférer directement notre connaissance d'un niveau de complexité à un autre.
 - Une nouvelle approche pour chaque problème → efforts considérables
- At the end of the day :
 - 300 ans de réductionnisme
 - La quête du très p+ petit est-elle vouée à l'insignifiance ?
 - + on creuse , + on s'éloigne de la pertinence à l'échelle humaine
 - La théorie de grande unification n'aidera pas à comprendre la vie
 - **Depuis 80 Santa-Fe institute : immense espoir , déçu ?**
 - Oui et non :
 - OUI , rien d'essentiel réellement expliqué par le concept d'émergence : on y fait référence , on le constate mais pas de théorie globale et d'outils de mise en œuvre (déduction de prédictabilité)
 - » Parallèle avec Newton et Galilée
 - NON: Domaine de recherche à part entière , promesses immenses , reconnaissance
 - **Théorie en marche : peu de résultats mais des « promesses »**
- R.Laughlin → le principe d'émergence est à la base des lois de l'Univers et non le contraire
 - ***Chaque loi serait une propriété émergente du niveau inférieur***
 - Le principe d'émergence permet de ***s'affranchir des échelles de grandeur*** =
 - travailler à un niveau très supérieur et unifier les lois de la physique et de la biologie → l'humain revient ds le champ d'étude au lieu de lui demeurer extérieur (réductionnisme).
 - Le XX ème siècle a été « **réductionniste** » , le XXI ème sera « **émergent** »
 - Enjeu des 30 années à venir → une science unifiée par des principes qui transcendent les échelles et les niveaux de complexité

INTRODUCTION

en forme de complément à l'avertissement (un h averti 2 fois en vaut 4)

- « Ce n'est pas parce que les choses sont difficiles que nous n'osons pas , c'est parce que nous n'osons pas qu'elles sont difficiles » (Sénèque)
- Osons donc → un sujet de doctorat en physique
 - À résumer en 2h+,
 - À des tout « aussi analph.. » que moi,
- Bref = qq chose du genre « la M-Q par les nuls pour les nuls » tout en recherchant un exposé :
 - Vivant= le contexte hist. , acteurs , controverses , anecdotes ,
 - Pédagogique : les points clés
 - Simple : exemples et métaphores
 - Documenté (nombreux coupé-collé → merci encore Wiki)
 - A suivre : vous donner envie de « creuser » → bibliographie/liens
- Et pourquoi tout ça ? « Une brève histoire du temps »
 - Un intérêt éveillé il ya longtemps
 - Une tjrs présente fascination envers l'abstraction concrétisée
 - Et envers l'imagination (Sci-fi)
 - Une curiosité naturelle ,réveillée il ya qq années (Dieu et la science)
- Enfin on recherchera pour corser le débat:
 - Lien avec COMPLEXITE (le 3^{ème} ∞ :on est qd m en plein dedans) , et l'EMERGENCE (on y viendra en dernière partie)

INTRODUCTION

- Lord KELVIN le 27/4/1900 = « a clear & bright sky with 2 small remaining clouds »
- « From certainty to Uncertainty » (F.David PEAT)
 - 1900 : » The 20th century will be the age of knowledge & certainty »
- C'est le voyage de 2-3h que je vous propose
 - Un monde où l'on pensait tout pouvoir prédire:
 - NEWTON : les fdmts de la mécanique
 - Laplace et Napoléon
 - Pendant 200 ans =RAS
 - → Notre quotidien extrêmement insensible à ce qui se passe au(x) niveau(x) « en-dessous »
 - Encore 200 ans pour arriver au niveau en-dessous ? (BOHR)
 - Est arrivée la « catastrophe ultra-violette » et l'hyp de PLANCK sur les quanta d'énergie (**1900**) , point de départ de l'aventure quantique.

1900 = un double tournant
Avant ↔ Après

À moins qu'il ne s'agisse d'un voyage vers l'incompréhensible ?

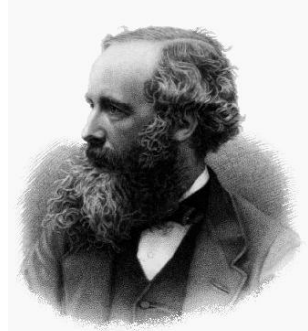
Chp I : La préhistoire

- ARISTOTE : « la chute des graves »(V-65): la force crée le mouvement , la terre attire les corps prop't à leur masse (le gland et la feuille)★
La force crée le mvmt
- GALILEE , prend le contre-pied :
 - la masse n'intervient pas ds la chute des corps : Tour de Pise (boulet – balle mousquet)
 - Principe d'inertie:
 - Principe de relativité (papillon s/bateau)
 - Avait tout compris mais n'avait pas les outils math
- NEWTON , le génie détestable (V-59) :
 - La vitesse de la vitesse $A = F/m$, $F = mA$
 - La vitesse instantanée et le calcul différentiel
 - Application directe → lune et planètes
 - Ch.Huygens : $F = mv^2/R$
 - $F = Gmm'/d^2$
 - Lois de Képler démontrées
 - « La chute des corps et le mvmt des planètes sont 2 manifestations d'une m loi physique : la F de Gravitation »
 - Et en même temps il n'y croit pas !! (V-71) : et pourtant ça marche !!
 - Analogie avec la M-Q
 - Gravité – comment ça marche ? Tjrs un problème → Hypotheses non fingo, , force à distance : je ne feindrai pas ...
- Après Newton :
 - l'irruption des maths ds la physique : Hamilton,Lagrange, Laplace (N) ,..
 - La méca fluides : Pascal,Navier,Stockes,...
- Un 19 éme siècle « inouï » d'avancées sci. : thermodynamique ,électricité,...
- La conviction d'avoir tout expliqué

200 ans de tranquillité et de certitude

Chp II , L'Histoire démarre en cherchant à faire la lumière sur... la lumière

- La lumière= une interrogation de tous temps ...
- Les précurseurs :
 - Snell,Descartes,Fermat,...,Huygens,Newton YOUNG
- Lumière est une onde (vibration verticale à trajet)
- Elle se décompose et se re-compose
 - Les raies noires du Soleil (Franhaufer)
 - Bunsen,Kirshoff : analyse spect
- Vitesse de la lumière ?



James Clerk MAXWELL

C= 299 792 458km/s. = Cte

• Et la M-Q?

- Sautons sur :
 - La thermodynamique,etc..
- Un mot sur la « Fée électricité » car similarité et notion de « champ »: « la découverte la plus extraordinaire, inattendue, importante du 19 ème s » (E.Brezin et les chandelles)
 - Qq noms : Les grecs et l'ambre, B.Franklin ,Aless.VOLTA,Oersted,Hertz,Tesla...
 - et 3 génies = M.FARADAY,AM.AMPERE,et surtout **J-C MAXWELL**→ Electromagnétisme = electricité et magnétisme unifiés

★ Champ = Action à distance –sans contact direct
La réponse à N , sur « comment ça marche? »

- Champ elect/ champ magnet se propage à c
- Le champ interagit (Induction) :
 - » Expériences de Faraday (mise en évidence du « champ »)
 - » « A qui cela servira-t-il M.Faraday ? »
- La lumière est elle-même une onde electro-magnet : transporte de l'energie e-M → chaleur

★ La lumière est une onde électro-magnétique

– Induction & Transformateur → la révolution électrique :

- Moteur électr, →utilisation
- Le générateur = courant alternatif → l'éclairage →production
- Le transport hte –tension (Tesla , Westinghouse) →transport

Chap III Réductionnisme , ordres de grandeur, et matière

- Réductionnisme :Descartes-1637: étudier les composants c'est comprendre le tout -> descente infernale
- Ordres de grandeurs (from JMLL)

	Qd	Echelle
– Niveau	toujours	10-3m
– Matière ordinaire	XIX ème s.	10-10m
– Atomes et molécules	début XX ème s.	10-14m
– Noyaux et electrons	vers 1935	10-16m
– Nucléons et hadrons	vers 1970	10-18m
- Très forte accélération au XIX et encore plus au XX ème s.
 - Pour arriver au niv de l'atome bond de 10-3 → 10-9 = 10-6 (du mm au nano-m) → **plusieurs siècles = fact 1 million**
 - A nouveau gain de **1M pour → 10-15 (fento-m,fermi) qq décennies** → 1913 = le noyau atomique
 - Des 1935 rentre ds noyau → 1950 = 10-16 les hadrons , vers 1970 = les Q et g à 10-18m.
 - **Un siècle = 10-9 à 10-18 = 9 ordre de grandeur = autant que 2000+ ans**
 - On commence à approcher la long de PLANCK 10-34m
- Par contre : si descentes faciles (quoique) → remontées toujours pas « élucidées »
 - Q/g → N/h ??? , N/h → N/é ?? , **N/é → A/M ?** , A/M → M-o ?? , M-o → vivant ????? , vivant → conscient ?????
 - N/é → A/M = M-Q remontée la mieux comprise
 - Emergence pointe son nez : le niveau sup voit émerger des choses non prédictibles au niveau inf
- Encore qq chiffres = la matière , **du vide (l'atome) ds du vide (univers) encore + vide**
 - Atome = 10-10m , noyau = 10 000 à 100 000 fois + petit
 - Si noyau 1-2 m → atome rayon 100 km (Paris –Orleans)
 - Si atome 1m de diamètre → noyau 1/10 mm
 - Neutrino traversent les planètes sans dévier et n'interagissent qu'1 fois sur 1 milliard ds les appareils détecteurs
 - Qd au vide de l'univers il est illustré par la nuit noire au lieu d'être éclatante (E.Poe revu Kelvin)

- **Des particules élémentaires** et leurs anti-part. = 2 types : matière et force

- **Les p - 'matière'** = les fermions (Fermi)

- les 6 **leptons** (é,m,t,3 neutrinos n), 6 quarks Q
 - +les mêmes en anti-xx

- Fermions = statistique FERMI –Dirac

- très individualiste (PAULI) (spin par $\frac{1}{2}$)

- **Les p - 'agents'** transmetteurs de force = les bosons

- Ex = γ , $8g$, w^+ , w^- , Z^0 , $H(?)$, $G(?)$

- Force électromagnétique γ
 - Force nucléaire forte $8g$
 - Force nucléaire faible W^+, W^-, Z^0
 - Gravité $G?$
 - Masse $H?$

- Bosons= statistique BOSE –Einstein $\rightarrow$ très grégaires (spins entiers)

- Ne sont stables que : l'é, le neutrino-é, les Q u & d $\rightarrow$ qui forment la matière connue de l'univers

- **Des particules composées** de quarks = hadrons et leurs anti-part. $\leftarrow$ Q=interaction

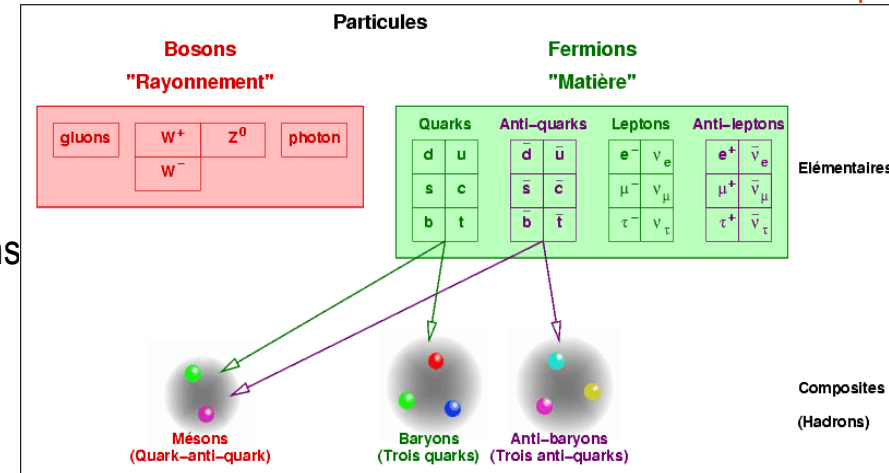
- **Les baryons** (lourds – fermions – id ci-dessus) = 3 Q

- Les + connus = proton ($uud=+1, \frac{2}{3}+\frac{2}{3}-\frac{1}{3}$) et neutron ($udd=0$), delta, sigma
 - Durée de vie 10^{-10} et moins sauf proton (stable) et neutron ($\sim 900s.$)
 - Ex = voir annexe

- **Les mésons** (moyen- bosons – id ci-dessus) = (Q+anti-Q) $\times$ n

- tous instables (10^{-10} à 10^{-23})
 - Ex=pion kaon,

- Ne sont stables que ... le proton (et le neutron ds l'atome)



Un vrai zoo
A visiter en annexe

Matière et lumière (R.Feynman)

- **Tout ce qui se passe ds l'univers, en dehors de la gravité et de la radio-activité est basé sur l'interaction lumière* - matière. (* lumière au sens large, rayonnement E-M)**
- Principaux processus interaction lumière-matière : absorption, émission stimulée, émission spontanée.
- **absorption.** rayonnement électromagnétique (la lumière) $\rightarrow$ atome $\rightarrow$ état n à un état $n' > n$, en prélevant l'énergie correspondante sur le rayonnement. Processus résonnant : fréquence du rayonnement ω doit être proche fréquence de Bohr atomique pour se produire. Fréquences de Bohr atomiques sont définies par $h\nu_{nn'} = E_{n'} - E_n$, où $E_{n'} > E_n$ sont les énergies des états n' et n . **On peut interpréter ce processus comme l'absorption d'un photon du rayonnement (d'énergie $h\nu$) faisant passer l'atome du niveau d'énergie E_n vers le niveau d'énergie $E_{n'}$.**
- **émission stimulée.** Processus symétrique du précédent : atome dans état n' se « désexcite » vers niveau n sous effet une onde électromagnétique, qui sera alors *amplifiée*. Comme pour absorption, ce processus n'est important que si fréquence du rayonnement ω est proche de fréquence de Bohr $\omega_{nn'}$. **On peut l'interpréter comme l'émission d'un photon d'énergie $h\omega$ qui vient s'« ajouter » au rayonnement.**
- **émission spontanée.** Atome dans *état excité* n' se désexcite vers état n , même en absence rayonnement. Le rayonnement est émis dans une direction aléatoire, et sa fréquence est égale à la fréquence de Bohr $\omega_{nn'}$. **On peut interpréter ce processus comme l'émission d'un photon d'énergie dans une direction aléatoire.**

Laser

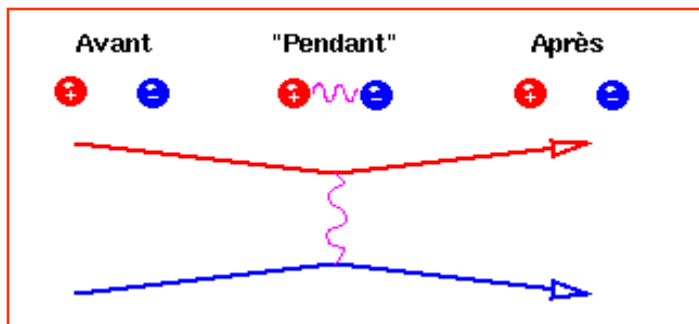
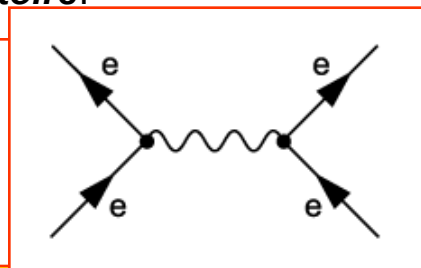


Schéma échange un photon (en magenta) entre deux fermions charges électriques opposées (en rouge et bleu)



3 seq de base $\rightarrow$ tous phéno é-lumière
 -pho va d'un endroit à un autre
 -é va d'un endroit à un autre
 é émet ou absorbe un photon

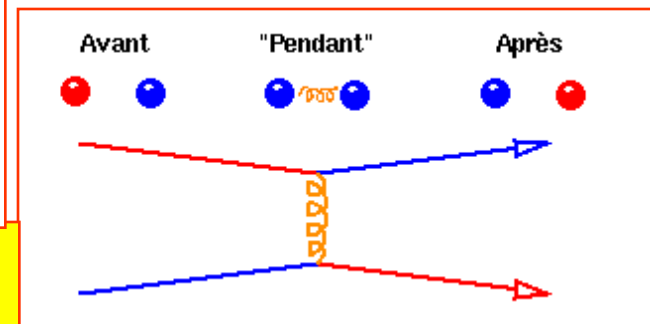


Schéma échange 'un gluon (orange) entre deux quarks de charges couleur différentes $\rightarrow$ échange du gluon permet deux quarks échanger couleurs



Lire « Matière et lumière – R.Feynman

Chp III Ordres de grandeur

Source CERN

The Evolution of the Universe

13.7 billion years

Today



Today, at CERN, we are going back in time to study the origins of matter

-270°C

10 billion years

Life on Earth



A soup of organic molecules appears on Earth, a small blue planet lost in the immense Universe



9.2 billion years

Solar system



Gravity gathers the debris of stars into planets

200 million years

Stars and galaxies



Gravity gathers clouds of atoms into stars

Heavy atoms, the building blocks of life, are synthesized in the hearts of stars

4000°C

380 000 years

Light atoms



Electrons bind to atomic nuclei to form hydrogen and helium atoms

Photons no longer interact with electrons: the Universe becomes transparent and illuminates



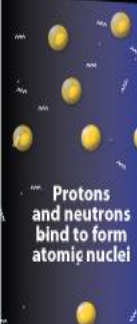
Helium atom



Hydrogen atom

3 minutes

Light nuclei



Protons and neutrons bind to form atomic nuclei

Photons are continuously absorbed and reemitted: the Universe is opaque

2 protons + 2 neutrons = Helium nucleus

1 proton = Hydrogen nucleus

0.01 millisecond

Protons and neutrons



Quarks and gluons bind to form protons and neutrons

The Universe has the size of the solar system

10¹²°C

10⁻¹² seconds

Quark-gluon plasma



Quarks and gluons bind to form protons and neutrons

The Universe has the size of the solar system

10⁻²⁰ seconds

Quark-gluon plasma



Quarks and gluons bind to form protons and neutrons

The Universe has the size of the solar system

10¹⁵°C

10⁻³⁵ seconds

Quark-gluon plasma



Quarks and gluons bind to form protons and neutrons

The Universe has the size of the solar system

10²⁷°C

10⁻⁴³ seconds

Quark-gluon plasma



Quarks and gluons bind to form protons and neutrons

The Universe has the size of the solar system

10³²°C

LHC exploration range

10⁻²⁵ seconds



Superforce

Big Bang

10¹⁷°C

Proton

Neutron

Meson

Quark

Electron

Neutrino

Photon

Weak force

Strong force

Chp IV. Il était une fois 2 nuages ds un ciel serein

- Rappel=Lord Kelvin (27/4/1900):
 - 1/Comment la lumière voyage –t-elle ds l'espace?
 - 2/Comment l'énergie de rayonnement se distribue-t-elle entre molécules en vibration-pb du rayonnmt du corps noir.
- En fait → 2 bombes
- Qui ont donné lieu aux 2 piliers de la physique moderne
 - » Méca quantique
 - » Méca relativiste
- « désamorçées » de façons très # :
 - 1/=relativité = 1 seul : E [Poincaré-Lorentz], soudainement ,1905
 - Ci-après : E le génie absolu
 - 2/=méca-Q= groupe , 20 ans,1900-1925/27+...80 ans
 - » 1900-1913: M.Planck, Einstein, N.Bohr → l'intuition
 - » 1923-1927 : de Broglie , Schrödinger, W.Heisenberg, P.Dirac , → la 1 ère mise en forme math.
 - » 1930-50 : Hilbert, Bohr, Pauli, Bohm, Wheeler,
 - » 1950 et > :Gell-man , Feynman , Everett,... Aspect
 - » Un effort collectif sur une très longue période de « percées successives » → 70-73
 - » Pour aboutir au « joyau de la couronne : le MODELE STANDARD

Chp IV.Einstein le génie absolu

4 petits fascicules
+ une thèse de ~30p

- ↙ Le BBB et l'école Polytech de Zurich et la quest. à 100 Pf?
 - « si je chevauche... »
- 5 publications en 1905-annus mirabilis-26 ans :
publiées ttes 4 par la n°1 sci-revue allemde (Planck)
 - 1/ 3/05 « Sur un point de vue heuristique concernant la production et transformation de la lumière »
→ la lumière est aussi corpusculaire et quantifiée → effet photoélectrique
 - 2/5/05 s/mvmt brownien → chaleur = Perrin 08/09 → preuve existence atomes et molécules
 - 3/ 6/05 « Electrodynamique des corps en mvmt » espace –temps sont liés et relatifs , l'éther n'existe pas
 - 4/ 9/05 l'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie → $E=mc^2$,
équivalence masse-énergie
- 1915 – énonce la R-générale (G) (publiée en 1916)
- 1919 sir Ed Eddington –éclipse soleil → courbure rayons = faux-bon-résultat → E superstar
- E sur 2 branches de la Phys moderne :
 - L'article sur la lumière (3/05) → la M-Q
 - L'article sur la R-restreinte (20/6/05) → Relativité
- Aucune référence entre eux = une même recherche de concilier « le continu et le discontinu »

Transfo de L

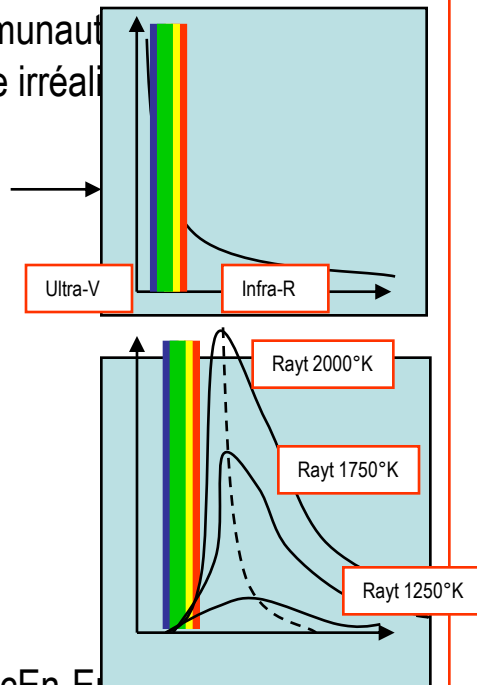
$$x_2 = \frac{x_1 - v_e t_1}{\sqrt{1 - \frac{v_e^2}{c^2}}}$$
$$y_2 = y_1$$
$$z_2 = z_1$$
$$t_2 = \frac{t_1 - \frac{v_e x_1}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v_e^2}{c^2}}}$$
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Le $\gamma \rightarrow m^0 = 0, v=c$

Chp IV : Les autres et la catastrophe ultra-violette

- Cata-UV=si lumière/énergie « continue » → rayonnement = ∞ !!
 - **Max Planck** → « acte désespéré » → $E=hn$? ou $DE=nhn$?
 - → et ça marche!...
 - Pour P et tous = « Artifice math. * » Pas théorie phys. = lui-m n'y croyait pas !!
 - ***Sauf E** → mettre en applic → 1905 = 26ans effet photoélectrique (autre nuage, resistt à tte explication)
 - N'est possible que si les é sont « frappés » par des particules (photons) et non par ondes
 - Un énorme pavé ds la marre = il était 100% établi (M,Fresnel,...) → la lumière = onde e-M
 - Très belle construction de la théorie e-M de M, en danger? Communauté
 - Millikan 1915 « 10 ans: contre tte attente malgré son caractère irréal
 - Prix Nobel → E en 1921 (22) ← effet photo-e
 - ***Sauf Niels BOHR** → modèle atomique:1913
 - Entre-temps la révolution atomique était en marche
 - » Rutherford
 - » Curie
 - » Thomson, etc...
 - 3 élmts clés ds percée de BOHR
 - 1/ la matière est, elle aussi, quantifiée
 - 2/ les RAIES spectrales ← transition entre niveaux d'Eie
 - » Atomes absorb/émettent de l'E lumineuse en passant Etat normal-état excité → position (fréq'ce des raies) → $n(nm)=\frac{c}{\lambda} = \frac{E_n - E_m}{h}$
 - 3/ modèle de l'atome H^2 → marche à 100%
 - » → niv.d'E'ie de l'H
 - » Long d'onde des raies spect.au 1/1000 ↔ $\lambda = \frac{c}{\nu}$ (nm)
 - En fait = pure luck → obscure traversée du désert → 1925

Intensité Rayt prop fréquence
Plus λ court plus E importante



la matière est, elle aussi, quantifiée

Chp V:Naissance de la M-C

- 1923 :l'intuition 'géniale ' de L de B =à toute partic de masse m , vitesse v est 'associée' une onde de long d'onde $\lambda=h/p$ avec $p=mv$
 - E enthousiaste ,mais , comment vérifier ?
Mettre en évidence diffraction ou interférence ?
 - 1927 = Davisson et Germer =diffraction faisceau é sur cristal de Ni
- 1925: 3 contributions décisives
 - E.Shrödinger, W. Heisenberg, P.Dirac ,
 - Puis BORN (interprétation probabiliste) et à nouveau BOHR
- Naissance de la M-Q= •La plus grande conception de l'esprit humain (S.Haroche)
 - La + g'de aventure intellectuelle du 20 è siècle
 - La Th à la base de la compréhension phys. de tout le monde qui nous entoure = du **micro au macro**
 - Si un jour →Th unifiée , sera basée sur M-Q
 - Importance fondamentale ↔ pas connue , mystérieuse , improbable , incroyable,...→ des années de discussion sur son interprétation
 - Et pourtant on 'vit avec' : Mieux : assure la stabilité de la matière !!

JL Basdevant: cours de MQ à l'X
•:E=mc² , au lieu de E=hv
•les 3 dates clés de la physique du XXè s.:
•1905 (R-R)-1915 (R-G)-1925 (M-Q)
•Relativité → 1 NOBEL(33-Taylor/Hulse)
•M-Q→ 120+ NOBEL + 3

La M-Q = une théorie déroutante.

- **La M-Q = une théorie déroutante.**

• Intrinsèquement non-déterministe

- 2 concepts contraire à notre quotidien =
 - Superposition d'états
 - Intrication d'état
- Et leurs conséquences: des phénomènes complètement inconnus ds le 'monde classique'
- Au point que...



- 1927 + 2 ans = Conférence de SOLVAY « électrons et photons » = tout le gratin (E., Heis., de Broglie, Dirac, Schrödinger, Bohr, ...)

- On rejoue les 'classiques' et les 'modernes' avec des '**expériences de pensées**'
- Naissance de la Controverse E-B et du fameux 'Dieu ne joue pas au dés'
 - E = ce que vous formulez est juste, ... Mais incomplet : il doit forcément exister des 'variables cachées'
 - B = Abandonnons la discussion : ça marche, il n'y a pas à chercher à comprendre, c'est comme ça
 - B réfute plutôt bien les 'pièges' d'E ← expériences de pensée

- La controverse a duré qq longtemps

- Objections tjrs plutôt (B qqfois obscur) bien réfutés
- En particulier → paradoxe EPR (1935, voir+ loin)

- Puis s'est arrêtée:

- Autres choses à faire = exploiter la th. qui fonctionnait, et même très bien (tjrs pas prise en défaut + précision jamais atteinte)
- Impossibilité 'tester' exp de pensée = techno pas dispo → aujourd'hui OUI → **ON Y REVIENT !!**

• IRRUPTION DE L'INCERTITUDE D LA CERTITUDE AMBIANTE

• IRRUPTION DE L'IRRATIONEL DS UN MONDE 'CARTESIEN'

ChpV: la M-Q

- Le problème est qu'elle est
 - Au mieux déroutante
 - Au pire incompréhensible → **De toutes façons tjrs et encore inexpliquée**
- Mais la théorie math, le **Modèle standard** fonctionne parfaitement
 - Il est l'aboutissement d'une quête de ~40'ans.
 - Qui a succsmnt intégré
 - L'electromagnétisme
 - La force nucléaire faible
 - La force nucléaire forte = chromodynamique quantique
- Au départ 1926 première ébauche math.
 - 2 théorie math pour une seul Phys-Q sur l'é
 - Shrödinger et Heisenberg → Réconciliation = même th sous 2 aspects <--Dirac
 - Grand succès immé car expliquait bcp = $2H + O \rightarrow$ eau par ex, puis la chimie ds son ensemble
 - Pb avec Maxwell sur interaction mat-lumière → suspicion (M trop belle) → M ajustée → OK
 - 1929 = interactions mat-lumière → QED
 - Vers 35 → structure interne du noyau
 - OK comme approx → impossible d'atteindre g'de précision → Dirac = moment magn de l'é =1
 - 1948 : pas 1 mais 1,00116/8 theor-exp'ces concordent à 3×10^{-5} puis depuis 4×10^{-11} (cheveu)
 - 1950+ → les hadrons ($10^{-16}m$)
 - 1970 → Q et gluons à $10^{-18}m$
 - 1970-73 Mise en forme du Modèle Standard
- Il est toujours incomplet
 - N'intègre pas le mécanisme de **Higgs**
 - N'intègre pas la **gravité**
- Mais permet de décrire quasiment tout (Feynman)
 - Tous les phéno physique sauf effets gravitationnels et le phéno radio-actifs (physique nucléaire), reste:
 - La combustion de l'essence ds les moteurs
 - La formation de bulles ou d'écume
 - La dureté du sel ou de l'acier
 - La chimie, etc.. Demain la vie ?
 - Avec extrême précision ?
 - Non face à situations exp'ales courantes → grosso modo (nombre faramineux d'é – complexité monumentale)
 - En labo et nombre limité → parfait depuis 50 ans → « rien ne cloche » → « **perle de la physique** »

Feynman –conférences publique:
Le cours que je fait à mes étudiants
Nous n'allons pas comprendre pensez-vous
Mon objectif est que vous restiez à m'écouter
Mes étudiants non plus n'y comprennent rien
Pourquoi, parce que m-m je n'y comprend rien
Mais qu'est-ce que comprendre?
La QED → description nature ABSURDE
A prendre telle qu'elle est. Rien à comprendre

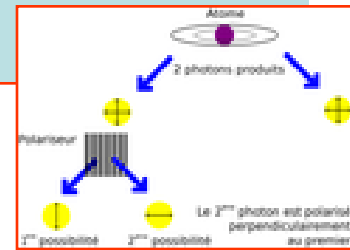
Les 4 forces rappel :
• L'electromagnétisme
• La gravité
• La nucléaire faible
• La nucléaire forte

La précision de la QED est de l'épaisseur d'un cheveu sur la distance LA-NYC -Feynman

Le début des choses déroutantes.....

- La M-Q repose sur une approche probabiliste des choses .
 - Les particules ne sont pas à un instant donné en un point précis =
 - elles ont une probabilité de présence plus ou moins forte ds l'ensemble de l'univers
 - Décrite et mesurée par la fonction d'onde de E.Schrödinger
 - Elles sont donc ...'nulle part et partout' → Elles existent dans " l'enfer des potentialités ".
 - Cette probabilité se calcule – avec précision– et se retrouve par expérimentation
 - C'est cette 1^{ère} incertitude qui avait « fâché » l'Albert.
 - « vous n'êtes pas allé assez loin pour retrouver le déterminisme qui découle du « grand dessin »
 - Votre théorie n'est pas fausse (résultats sont justes) , elle est incomplète : jusqu'à ce qu'il soit 'établi' que l'indétermination et nature probabiliste sont cablées.
- Par contre , dès que l'on mesure quoi que ce soit relativmt à la part. on provoque l'«effondrement du paquet d'onde » → la part. devient 'classique' et se trouve 'ici et maintenant'
 - Toutes les prob sauf 'une' (celle qui correspond à sa localisation) tombent à 0
 - C'est quoi une mesure ? Faisceau laser, détecteur , Écran TV..
 - Ceci constitue ce qu'on appelle « le pb de la mesure quantique » et on ne sait tjrs pas expliquer aussi appelé « la réduction quantique » qui elle , pour le coup , **n'est pas ds les équations.**
- La superposition : du fait que la part est décrite par une fonct d'onde de probabilité cette indétermination s'applique non seulement à sa position et sa vitesse mais à l'ensemble de ses propriétés qui caractérisent sont 'état quantique' :
 - De ce fait ceci entraîne qu'elle n'est pas ds un état précis ou un autre mais ds la superposition de tous ces états
 - C'est la fameuse histoire du chat mort-et-vivant à la fois.
 - En dehors de faire souffrir inutilement les chats cette particularité représente un potentiel très important d'applications :
 - » ds l'ordinateur quantique par ex , une particule dt une caractéristique peut prendre diverses valeurs –ex polarisation du photon—va constituer un Q-bit qui va se trouver ds un état de superposition de toutes ces valeurs ce qui est autrement plus puissant qu'un bit 0-1 classique .
 - Cette histoire de chat a fait couler énormément d'encre et a provoqué une série de controverses
 - En particulier entre AE et NB
 - Qui ont culminé avec le paradoxe EPR
 - » Lequel s'appuie sur 'encore une chose déroutante' → **l'intrication : voir +loin**

L'intrication

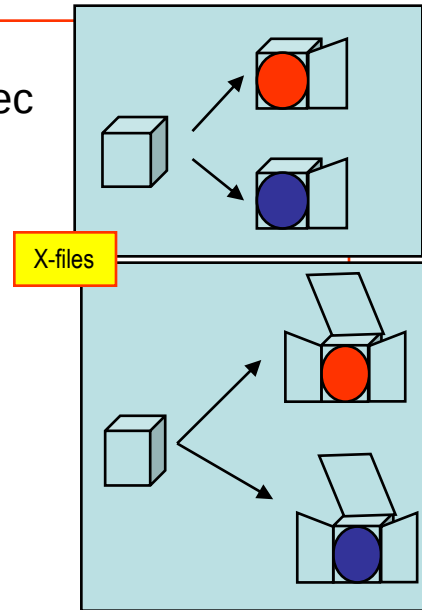


- **Phénomène= corrélations quantiques = Intrication**
 - On peut relativement facilement créer des paires « intriquées » de particules , ou provoquer l'intrication de 2 part.
 - Dès lors que 2 particules sont intriquées :
 - Ce qu'il arrive à l'une arrive , arrive à l'autre → INSTANTANEMENT , qq soit la distance
 - Une paire de photons intriqués :
 - P1 ,ici , P2 vers Jupiter = après 10 j-L change polarisation P1 → P2 change immé
 - Controverse énorme → violation de la Relativité –R → comment le P2 sait-il ? Quel signal ?
 - 80 années de polémique , à commencer par EPR (1935)
- **Paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen- EPR = si deux particules sont émises intriquées :**
 - Mesure s/P1 → 1 état → connaissance de P2 instantanée → avec effondrt même état, même si 10 aL entre P1 & P2
 - P2 ne peut donc absolument pas "être informée"
 - Comment croire, dans ces conditions, que l'état dans lequel on trouve P2 après la mesure n'était pas déterminée dès le départ, en contradiction avec la représentation de Copenhague ?
- **EPR= expérience de pensée → réfuter l'interprétation de Copenhague**
 - → il existe 'var cachées' → pas "d'action surnaturelle à distance".
 - Interprétation de Cop nie existence d'un quelconque état d'1 syst quantique avant toute mesure.
 - Chat vivant **ET** mort , pas OU
 - En effet → pas de preuve que cet état existe avant observation → certaines contradictions.
- **EPR = Contradiction avec 1 des 3 hyp suivantes :**
 - impossibilité pour un signal de dépasser la vitesse c (causalité relativiste) ;
 - la mécanique quantique complète décrit entièrmnt la réalité (pas de variable cachée locale) ;
 - deux particules éloignées forment deux entités pouvant être considérées indépendamment l'une de l'autre, chacune étant localisée dans l'espace-temps (localité).



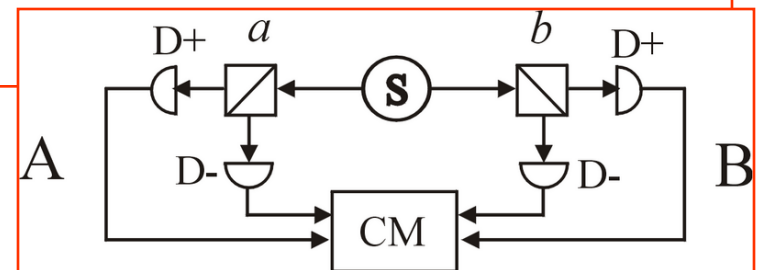
X-files

- **Mulder & Scully (ref=Brian Greene)**
- Scully en vacances , Mulder reçoit 2 jeux de « boîtes extra-t » (BE) avec lettre =sphère S inside → B ou R compltmt au hasard , +n° 1-1000.
 - Envoie un jeu à Scully
 - Si on ouvre la m BE-n° → m couleur SB ou SR
 - Scully navrée = les S sont « programmées » of course
- Mulder rappelle : nouvel arrivage de BE : 3-portes !
 - N'importe quelle porte → SR ou SB
 - Une fois ouverte : impossible savoir « SR/SB si autre porte? »
 - Bien que choix totalmt au hasard si m n° , m porte → m couleur
 - Scully re-navrée , voire irritée
 - Mulder très « frustré » car il y croit mais comment « prouver »?
- Mulder rappelle : il y a un moyen
 - Ce n'est pas les m portes qu'il faut ouvrir , mais « au hasard »
 - Scully très énervée , mais curiosité fém : comment?
 - 9 combi avec portes 1,2,3 → 11,12,13,21,22,23,31,32,33
 - Soit BE-1 : programmée BBR et donc BE-1' aussi BBR
 - Sur 9 → 5 (>50%) sont « même couleur » : 11,22,33,12,21,
 - Ceci est tjrs vrai pas seulement BBR
 - Ex= BBR → tjrs 5 pour « m couleur »
 - Et RRR et BBB → m couleur qq soit la porte donc >>> de 50%
 - Si on ouvre les portes au hasard les concordances – si il ya des variables cachées , c-a-d si les boites ont été programmées-- doivent impérativement être > 50%
 - Si on trouve moins , ex 30 % → c'est que les prémisses sont fausses et qu'il n'y a pas de prog caché.
- Et ont trouvé 30 % !!



Un univers non- local = BELL & ASPECT

- Transposition = Inégalités de BELL en m-1960 , vérifiées en 82 (A.Aspect-Orsay)
- BELL
 - Avant → on ne savait pas produire des photons paire intriqués
 - Quand on l'a su:
 - Montage :
 - On mesure ,on re-mesure , on.... → la réalité est < 50%
 - Donc les prémisses sont fausses : il n'y a pas de programme ,mais « autre chose » ->non localité
- →EINSTEIN A TORT :
 - Mais alors →violation relativité restreinte ? Non, car pas un signal
 - **Univers quantique est non-local**
- →On ne sait tjrs pas comment ca marche , la NON-LOCALITE
- Ceci étant , c'est une réalité qui est utilisée ds des mise -en – applications multiples
 - Ex = crypto-q iordi-q et téléportation-q



- *Expériences d'Aspect 66> confirmation sans ambiguïté de violation inégalités de Bell comme prévu par interprétation de Copenhague, infirmant vision réaliste locale d'Einstein de la mécanique quantique et les scénarios à **variables cachées locales**.*
- *Non seulement violation confirmée mais →exactement de la manière prédite par la mécanique quantique, avec un accord statistique jusqu'à 40 **écart type** !*
- *Après cette expérience → communauté scientifique largement convaincue*

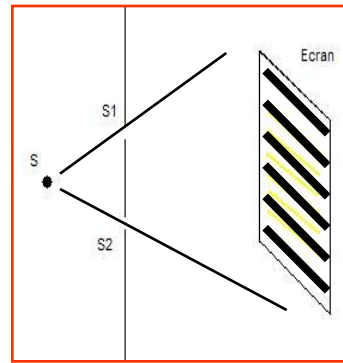
Non-localité –(suite)

- 1998 **Genève** → 2 détecteurs distants de **30 kilomètres**, réseau fibre optique + horloge atomique.
 - violation des inégalités de Bell une nouvelle fois vérifiée dans conditions strictes et presque idéales. Si Aspect impliquait → $2 \times c$, Genève → **10 millions de fois c.**
- **La causalité relativiste est-elle remise en question par l'expérience d'Aspect ?**
- Cette question induite par "un objet quantique présente un état qui dépend instantanément de l'état d'un autre objet avec lequel il a été intriqué".
- Trois possibilités :
 - 1/C'est comme ça → appliquer des calculs qui donnent des résultats en accord expérience, sans se référer à explication tirée de notre logique, "macroscopique" ou autre.
 - Approche, dérivée de l'interprétation de Copenhague,
 - → la plus communément admise parmi les physiciens ("Calcule et tais-toi !",
 - Explication EPR impossible à vérifier – pas réfutable
 - Explications h/ champ de science → éviter « dérives » ci-après
 - 2/intrication a "unifié" les deux objets qui ont été soumis à une interaction : ces deux objets restent "un" malgré leur éloignement spatial et temporel : il est fondamentalement spatio-temporel.
 - Aucune explication n'est, pour le moment, donnée à ce qui est considéré comme un résultat d'expérience → les rationalistes.
 - 3/→changer conception de causalité → principe causalité rétrograde (flux causal venant du futur et allant vers le passé):
 - Causalité s'exerce à contre-courant par rapport à l'écoulement du temps, et qu'elle "s'additionne" éventuellement à la causalité "classique".
 - → irréversibilité du temps ne serait vraie qu'à l'échelle macroscopique (2ème loi thermodynamique),
 - Majorité physiciens 'contre'
 - Sont 'pour' les tenants de l'esotérisme et phénos parapsychos (pré-cog et autres..)
 - En contradiction avec l'exp'ce qui élimine les causes retro-causales
 - Science → Pseudo-science ?
- **Quoi qu'il en soit → Tous physiciens d'accord sur**
 - **EPR et Aspect → pas de remise en cause RELATIVITE ni CAUSALITE**
 - **Intrication quantique ne peut transmettre signaux à $v > c$ car le résultat de la mesure sur la P1 est aléatoire (voir crypto-quantique) ouf !**

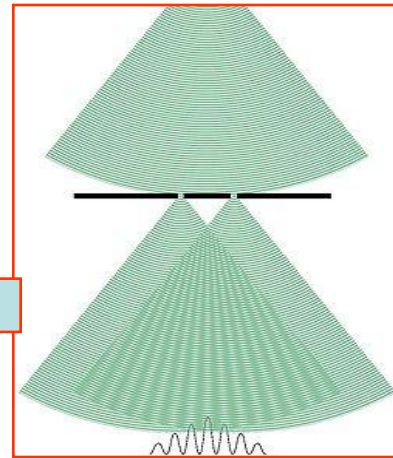
Qu'il y a-t-il donc de si 'irrationnel' en M-Q ?

- Les **fentes de Young**
- Thomas Young en 1801 → comportement et nature de la lumière.
- Mise en évidence la nature ondulatoire de la lumière.
- Egalement avec la matière, comme les électrons, neutrons, atomes, molécules, → on observe aussi des interférences.
- Illustre la dualité onde-particule : interférences montrent que la comportement ondulatoire, mais la façon dont ils sont détectés (impact sur un écran) montre comportement particulaire.

Young , Davisson et Germer

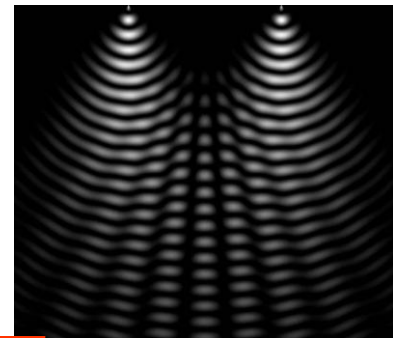


Interprétation classique = lois de FRESNEL



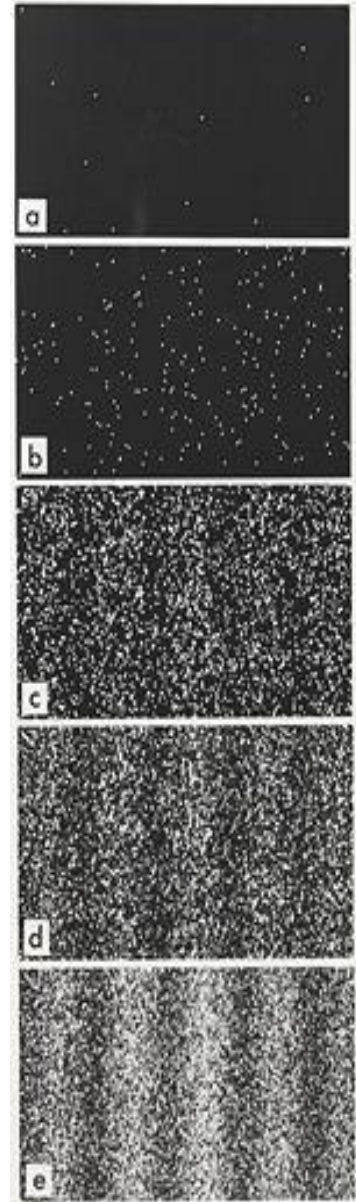
- En physique quantique, **expérience de Davisson-Germer –1927 = interférences d'é**
 - →prouve hypothèse de De Broglie postulant que les particules, comme par exemple les électrons, pouvaient se comporter comme des ondes (dualité onde-corpuscule).
 - →étaye l'acceptation de la mécanique quantique et de l'équation de Schrödinger.
 - →complète l'hypothèse de dualité onde-particule, étape fondamentale dans la construction de la théorie quantique.

De Broglie = onde associée $\lambda = \frac{h}{mv}$



Qu'il y a-t-il donc de si 'irrationnel' en M-Q ? → Young ~180 ans après

- **Interprétation quantique du phénomène**
 - 180 ans après on sait fabriquer des photons 1/1
 - On refait l'expérience avec photons 1/1 (ou é)
 - → les impacts re-composent la figure d'interférence
- **Interprétation impossible selon lois classiques.**
- → **L'interprétation quantique** : le quantum émis prend un état superposé lors du franchissement de la plaque :
|quantum passe par S1> + |quantum passe par S2>
fonction d'onde résultante → chaque point de la plaque la probabilité que le quantum y soit détecté. On peut démontrer que la distribution des probabilités suit la figure d'interférence.
- **Autrement dit, le quantum passerait par les deux fentes à la fois, et interfèrerait avec lui-même.**
- **Mais que se passe-t-il si, insatisfait par cette interprétation des choses, on cherche à détecter par quelle fente le photon "est réellement passé" ?**
- → on détecte passage à droite ou à gauche ,OK → mais on détruit l'interférence et donc l'état de superposition.
- 'Chercher à comprendre c'est commencer à désobéir'
- La détection du photon → "effondrement de la fonction d'onde" et de l'état superposé.
- → **mise en évidence le problème de la mesure quantique.**
 - N'est pas ds les équations
 - Qu'est ce qu'une mesure ?
- Jusqu'où ?
 - objets de plus en plus volumineux, atomes, les molécules, → Fullerènes – C60
 - Ces expériences démontrent que la vision purement corpusculaire de la matière n'est pas satisfaisante avec des objets de plus en plus gros, d'où la question récurrente de la dualité onde-corpuscule en physique quantique



Qu'il y a-t-il donc de si 'irrationnel' en M-Q ?

– Expériences avec interféromètre et points d'?

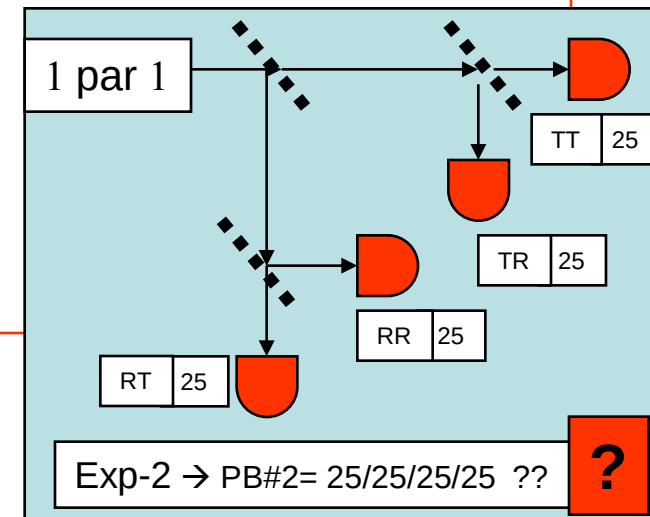
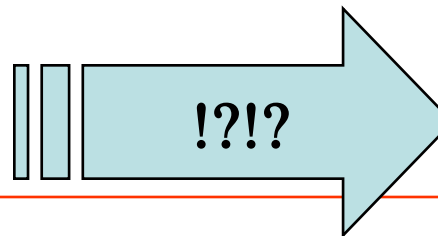
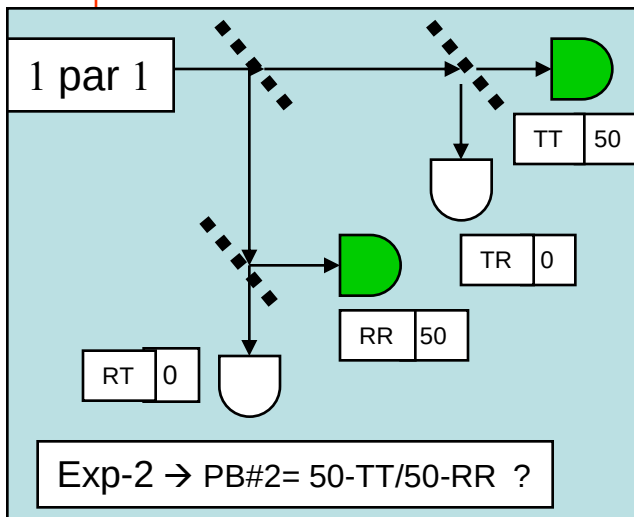
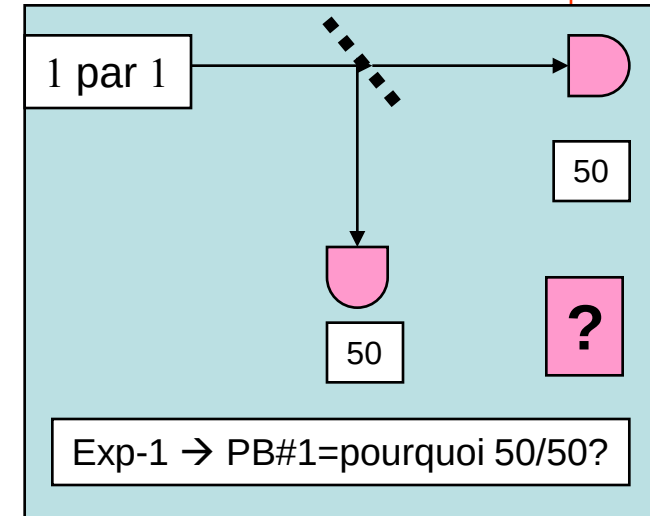
• Exp-1

- 1 par 1 (Voir + loin)
- Détecteurs
 - » jamais en m temps = corpuscule
 - » Pas de 1/2 impact = id
- Au « hasard » ? Id pièce P/F
- **Pb#1 = comment la p « sait-elle »?**
- Q posée il y a 100 ans

• Exp-2

- OK il ya un « code caché » = les T et les R
- On attendrait RR=50 et TT=50
- **Pb#2 = 25-25-25-25 → on a pas tout compris ?**

Juste quelques façons de
Se comporter assez étranges

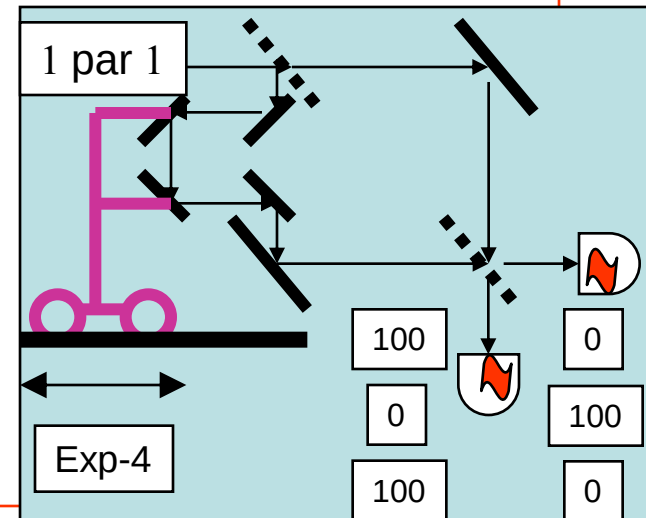
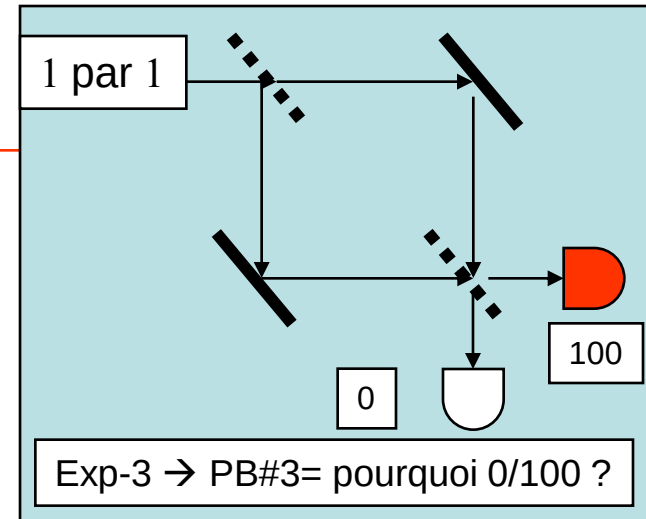


Qu'il y a-t-il donc de si 'irrationnel' en M-Q ?

YOUNG aujourd'hui : Expériences de base II

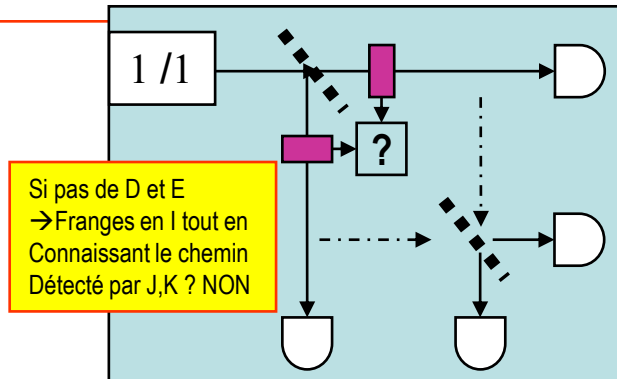
Source = V. Scarani

- Exp-3 = on ferme la boucle :
 - rien ne va plus :
 - **Pb# 3 = pourquoi 100/0 ?**
 - Chercher à approfondir → exp-4
- Exp-4 = on « crée » un chemin + long
 - Incrmt de long → $\Delta l = 0, L, 2L, \text{etc.}$
 - Détecteurs → $D1=100, 0, 100, \dots$
→ $D2=0, 100, 0, \dots$
- Nature ondulatoire
- **Pb# 4 = comment, en ne modifiant qu'un seul chemin peut-on modifier le comportement de TOUTES les particules y/c celles qui passaient par l'autre ch. ?**
 - » Chaque p « explore » / est « informée » de tous les ch. Possibles, sans toutefois les emprunter !!
 - » Ce phéno = « interférence à une particule »
- Exp-5 = encore + fort :
 - **Si on essaie de savoir par où passe la p, elle perd son comportmt « étrange » et on retombe ds un 50/50**
- La plupart des physiciens ont renoncé à expliquer les interférences quantiques (voir interprétations)
- Tous d'accord → Principe d'indiscernabilité
 - Les interférences apparaissent lorsqu'une P peut emprunter divers chemins et que ces ch. sont indiscernables après détection.
 - Plus généralmt dès lors que P laisse « empreinte »

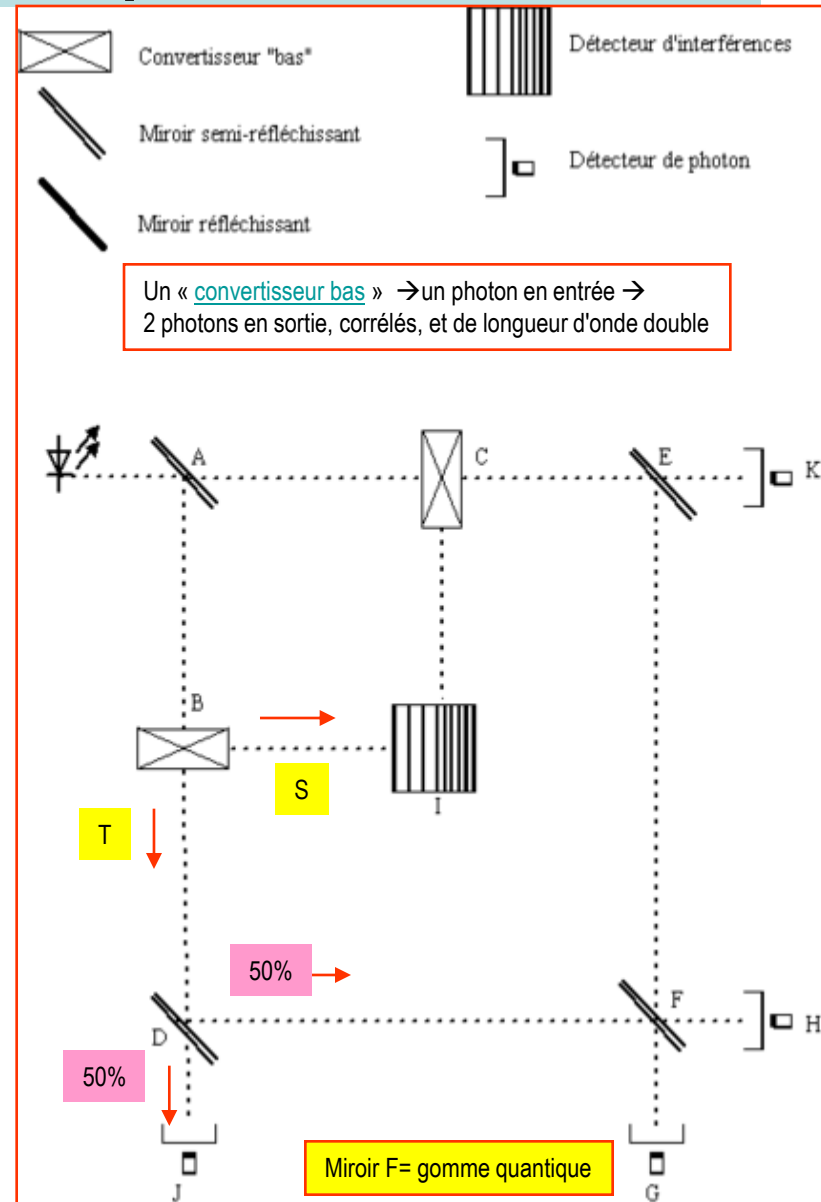


L'expérience de la gomme quantique à choix retardé

- **L'expérience de la gomme quantique à choix retardé**
- Marlan SCULLY = extension d'[Alain Aspect](#) et des [fentes d'Young](#) + ce qui semble être **une rétroaction implicite dans le temps**
- → deux dispositifs similaires aux fentes d'Young en cascade.
- [incertitude quantique](#) concernant le passage de [particules](#) par l'une ou l'autre fente n'est levée que si détection, et subsiste en l'absence de celle-ci non seulement en tant que connaissance de l'expérimentateur, mais bien en tant qu'état du système.
- L'idée de Marlan Scully est de ne décider l'intervention de cet observateur qu'au dernier moment, alors que la particule a déjà franchi la première série de fentes.
- Les équations de la [mécanique quantique](#) imposent à la particule d'avoir vérifié lors du premier passage des conditions qui ne sont pourtant stipulées que postérieurement, par intervention ultérieure du détecteur ou non. **En d'autres termes, cette intervention du détecteur semble modifier le passé de la particule.**
- L'observation confirme pour le moment ce résultat prévu.



Les miroirs D et E "tirent au sort" - en quelque sorte - le destin du photon témoin : 50% devenir un photon dont on connaît le chemin, 50% devenir photon indéterminé. Résultat enregistré en I fixé avant que le photon témoin ait été détecté en J/K, ou G/H. Comment le photon signal "sait-il" que le photon témoin sera détecté en J/K ou non



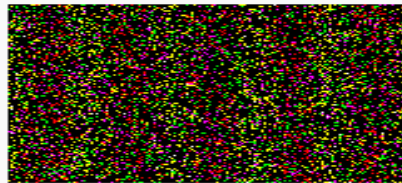
• Expérimentalement → jamais d'erreur : si pho-T détectés en J/K → pho-S → interférences, si pho-T détectés en G/H → pho-S → interférences

L'expérience de la gomme quantique à choix retardé -II

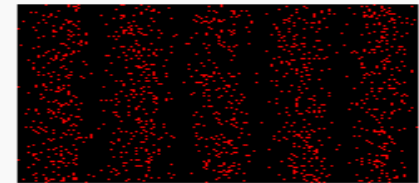
- **Enjeux et interprétations**
- L'aspect le plus spectaculaire de cette expérience = l'interprétation a posteriori de figure d'interférence en I.
- Pourrait-on recevoir des messages du futur ? Par ex envoi photon + message à physicien (à cent années-lumière) « théorie des cordes exacte, oui ou non ? »,
 - Si oui → remplacer D/E par vrais miroirs
 - Si non → enlever D/E- } → alors réponse **immé** en décryptant I.
- « Rétroaction en provenance du futur » ? Possible ? Hélas NON
- I contient infos indécryptables sans infos qui sont ds futur et « classiques » → il faudra 100 a-L pour les recevoir
- Résultat, spectaculaire, mais idem EPR → effondrement côté dispositif → effondrmnt immé de autre côté . Mais on ne peut s'en rendre compte / utiliser qu'avec envoi info classique (reste RR compliant).
- Effet plus frappant encore que l'expérience EPR, → pose avec force plus grande encore question : qu'est-ce que le temps ?



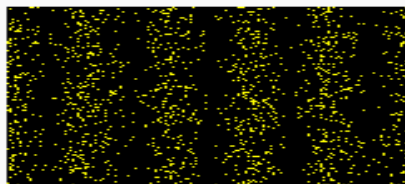
1. La figure telle qu'elle est reçue en I



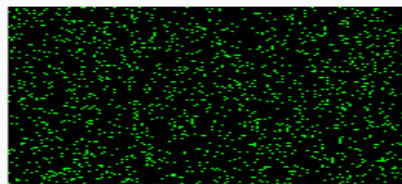
2. Corrélation entre les impacts et les 4 détecteurs



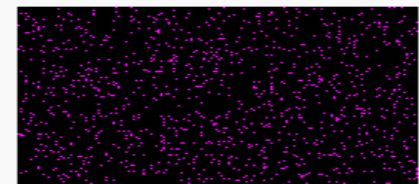
3. Photons corrélés avec le détecteur G



4. Photons corrélés avec le détecteur H



5. Photons corrélés avec le détecteur J



6. Photons corrélés avec le détecteur K

Décohérence

- Décohérence : c'est la perte de l'état quantique (corrélacion ou superposition)
 - Difficulté de maintenir l'état quantique
 - Extrêmement sensible aux interactions de l'environnement
 - Comment s'établit la décohérence : exp'ce récente (S.Haroche -équipe) :
 - Chat = très fortement couplé à l'univers, par toutes sortes de mécanismes de friction. Ces interactions introduisent un " bruit " qui " brouille " les superpositions quantiques. L'alternative quantique (vivant et mort) se transforme très rapidement en une alternative classique (vivant ou mort).
 - Cette transformation, la décohérence, s'effectue d'autant plus vite que la " distance " entre les états de la superposition est plus grande.
 - Cette expérience, qui permet de comprendre comment et pourquoi une superposition quantique ne peut survivre à l'échelle macroscopique

Qu'il y a-t-il donc de si 'irrationnel' en M-Q ?

- Complémentarité (dualité O-C)
- Indétermination
- Superposition d'états
- Effondrement ou Réduction quantique
- Non-localité-Corrélation-Intrication et décohérence
- Dimensions cachées-multivers (univers //)

Bref, un monde fou ,fou, fou...

Qu'il y a-t-il donc de si 'irrationnel' en M-Q ?

Aller d'abord en Annexe- Expérimentations— Expériences de base

- 1- COMPLEMENTARITE
 - Expression usuelle = dualité onde-particule
 - Fausse=
 - Notion de quanton (JC LL)
 - selon l'exp'ce le quanton peut ressembler à une onde ou à une part mais aussi plein d'autre choses. Ils ne sont ni ni , et n'ont pas une nature double. C'est « autre chose »
 - L'histoire de l'ornithorynque - duckmole
- 2- INDETERMINATION
 - Principe d'incertitude = autre expression mal appropriée → indétermination, indéterminude ? (JC LL)
 - Inégalités d'Heisenberg : à partir de l'équation de S , intrinsèques
 - $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$, y , z sur le paquet d'onde
 - Si la localisation précise , Δx très petit , Δp très grand → spectre des vitesses très large
 - Expérience de pensée d'E
 - L'indétermination est construite ds le système , elle ne vient pas de la mesure : propriété intrinsèque de l'état quantique
 - Un é possède un spectre de position
 - Préparez des particules toutes au m point elles auront des v très différentes et inversement
 - Ce qui s'applique à position , q'té de mvmt , s'applique aussi à durée , éne
- 3- SUPERPOSITION d'ETATS
 - Le chat est à la fois 'mort et vivant'
 - Tant qu'il n'y a pas eu de mesure la part est ds une superposition d'états :
 - Elle est passée à la fois à droite et à gauche
 - Principe d'indiscernabilité :
 - Les interférences apparaissent lorsqu'une P peut emprunter divers chemins et que ces ch. Sont indiscernables après détection.

C'en est fini de NEWTON , Laplace , etc...

Qu'il y a-t-il donc de si 'irrationnel' en M-Q ?

- 4- Effondrement ou réduction quantique
 - Voir slide 19 → Par contre, dès que l'on mesure quoi que ce soit relativement à la part. on provoque l'«effondrement de la fct d'onde» → la part. devient 'classique' et se trouve 'ici et maintenant'
 - » Toutes les prob sauf 'une' (celle qui correspond à sa localisation) tombent à 0
 - » C'est quoi une mesure ? Faisceau laser, détecteur, Écran TV..
 - » Ceci constitue ce qu'on appelle « le pb de la mesure quantique » et on ne sait tjrs pas expliquer ce qui est aussi appelé « la réduction quantique » qui elle, pour le coup, n'est pas ds les équations.
- 5- Intrication-corrélation-décohérence-non-localité
 - Particules corrélées/intriquées = voir slide 20
 - » Ce qu'il arrive à l'une arrive, arrive à l'autre → INSTANTANEMENT, qq soit la distance
 - Sans violation de la RR ni de la causalité
- 6- Dimensions cachées – univers multiples
 - Théorie des cordes = + 6 dim d'espaces
 - » Réponse à la prise en compte de la gravité
 - Branes et univers multiples

Aujourd'hui

- On sait envoyer des γ , 1 par 1 (cf annexe)
- On dispose d'outils d'expérimentation
 - Interféromètres, lasers, ...
 - Accélérateurs
- On a quasiment fait le tour de 'la matière' et validé la quasi-totalité des hypothèses hormis
 - Le HIGGS
 - Le graviton
- On a expliqué énormt de choses :
 - Chimie et physique des matériaux
 - Jusqu'à la suprafluidité de l'He liquide
- On a des réalisations concrètes
 - Lasers
 - Transistors
 - Etc..
- Il reste néanmoins des « CHOSES OBSURES » au fond des galaxies.....

Ca m'a un sacré air
de 2 petits nuages ds
Un ciel serein ,non ?



Aujourd'hui

- On ne sait toujours pas :
 - Ce qu'est une particule élémentaire
 - Quelle représentation physique ? Analogie 'Surfer sur vague'
 - La part. a-t-elle une réalité physique ou n'est-ce qu'un concept mathématique ?
 - Comment des « choses intangibles » pourraient –t elles donner corps à du tangible .
 - Ce qu'est l'intrication (voir + loin)
 - Comment fonctionne la non-localité de notre univers (voir + loin)
 - La relativité restreinte est-elle violée ?
 - Ce qui compose les 96 % de la masse de l'univers
 - Qu'est-ce qui donne sa masse au 4% baryonique ← H-boson ?
 - Quid des 96% qui restent ?
 - Comment se produit la décohérence (voir + loin)
 - Comment se produit l'effondrement quantique (voir + loin)
 - Comment fonctionne la gravité
 - Trous noirs
 - Big bang
- On sait par contre :
 - Expliquer/prédire = Modèle standard → une exactitude jamais atteinte
 - Produire :
 - Re-produire :
 - Prédire /découvrir :

Les choses « bluffantes » -I

- L'anti-matière et pourquoi le monde est monde = disparition de l'anti-matière , en quantité égale au départ pourquoi ? Sinon , lumière seulement
- L'irruption du hasard =
 - La part choisit de passer à droite ou à gauche –individuellement totalement aléatoire , globalement parfaitement quantifié
 - La désintégration aléatoire du noyau radio-actif = période de $\frac{1}{2}$ vie très précise et impossible prédire au niveau d'1 noyau (cf le chat)
- L'effet tunnel (principe d'incertitude → passe -muraille
- L'eau : la glace à 0° en structure ordonnée, plus légère (sinon pas de vie), la fluidité,...
- Le γ à masse =0 , en mvmt perpétuel à c (sinon ...)
- Pourquoi les autres p ont-elles une masse ?
- « La force de la force » (si $G =1$, $EM=10+38$, $W=10+35$, $S=10+40$!!!)
 - Brian Greene et son chien
- Le γ à 10,100,1000 années lumière qui actionne instantanément son 'compagnon' sur terre , ou plutôt l'inverse.
- La masse ss masse
- Le multivers s'il existe ,
 - et l'énormité des chiffres qu'il ss-tend
- Le temps ? Ds quoi s'écoule le temps ?
 - Et 10^{-43} s. n'est-ce pas énorme ?
 - Le temps , 1^{er} concept quantique ?

Les choses « bluffantes» -II

- L'histoire du γ qui a traversé l'univers et qui par effondrmt quantique provoquerait la « naissance du monde »
- Rien qui donne $\rightarrow$ 2 particules : c'est vrai ,on le voit sur les photos
- 2 part. de même nature $\rightarrow$ totalement indiscernables (les fermions)
 - Pb de Leibniz sur l'impossibilité de 2 corps identiques
 - Les objets quantique perdent l'ordinalité gardent la cardinalité
- Les particules qui n'ont aucune réalité ni propriétés intrinsèques composent des corps macroscopiques qui eux ont des propriétés bien définies.
 - Ceci est très différent de phéno émergents « classiques » tels que
 - La chaleur c'est de l'agitation moléculaire
 - La vie c'est un ensemble de réactions chimiques (l'amour aussi, paraît-il)
 - Ici , il n'y a rien 'au départ' , ou plutôt qq-chose que nous n'appréhendons pas / pas encore.
- Les 6 dimension d'espace supp de la théorie des cordes , avec lesquelles se sentent confortable leurs inspireurs
- Que les lois de la nature existent , ... et qu'on puisse les comprendre (Eienstein, E.Schrödinger)
- Sans compter les grands mystères
 - Pourquoi ya t il qq chose plutôt que rien ?
 - La masse –qu'est-ce que la- (et celle de l'univers)
 - L'énergie –qu'est-ce que l'E ?
 - Le TEMPS à nouveau ?

Physique classique et quantique (L-L)

- **Physique classique : Point et champ**

- particules = point phys → masse, traject, force, vitesse, accél., éq. diff. et calcul integral
 - Newton = ça marche mais ne sait pas comment la lune sent-elle la Terre à 384Kkm ?
 - Pas de contact
 - Et le vide de surcroit
- Onde = champ
 - Maxwell → electro-mag, lumière, ondes radio, puis R- λ
 - Dans quoi se propagent-elles? (id vagues-mer) = ether?
 - Non: le champ existe en tant que tel /→/ pas de substrat sous-jacent (mer)
 - Point + onde expliquent tout
 - La Terre crée un ch. de gravitation qui s'étend → Lune (et +)

Point = matière

Champ = vecteur d'interaction

• Objet	quantité	spacialité
corpuscule	discrète	discrète
champ	continue	continue
quanton	discrète	continue

Pas de vocabulaire adaptée pou décrire la M-Q
Qui reste exposé en référence à la M-classique

- **Physique quantique**

- Lumière est une onde electromagnétique + aussi faite de grains → de même pour l'é (1920, D&G) =
 - On entend les heurter un par un le détecteur = nature corpusculaire
 - Les fentes d'Y mettent en évidence la nature ondulatoire.
 - On peut prendre le quanton/ornithorynque pour l'un ou l'autre selon l'exp'ce MAIS sa nature profonde/essence est tout autre

- **Problème : comment des « choses » aussi 'différentes' peuvent-elles s'assembler pour former la matière 'classique' que nous voyons/touchons/sentons/...**

Physique classique et quantique (L-L)

- La matière au niveau classique possède des qualités premières :
 - La solidité
 - Spacialité
 - Massivité
 - Impénétrabilité
 - » Ne veulent plus rien dire au niv quantique
 - » Un atome est PLEIN de VIDE , il est pénétrable ,sa masse est répartie ,et il occupe un espace flou
 - » Reste =conservation d'E,, de charge é,..
 - La figure (forme géom)
 - Ne veut rien dire en M-Q = onde/champ n'a pas de forme
 - Reste = symétrie
 - L'étendue
 - Id
 - Reste = interaction electro-m ou nucléaire forte = domaine d'attraction infini pour l'une , 10-15 pour l'autre
 - Le mouvement
 - Il n'y a pas de mvmt (trajectoire) pour un quanton (spacialité continue)
 - autre chose type propagation des ondes

Chp VI: Les Interprétations de la M-Q c'est là que ça devient drôle

- Ceux qui comme –E– «théorie incomplète → var. cachées », retournent à vos chères études
 - Une réalité invraisemblable :
 - «croyez-vous vraiment que la Lune n'est là que si on la regarde? »
- Ceux qui comme –B– à l'époque :« utilise et tais toi »
 - BOHR = positiviste , gardien de la loi, obscur à dessin, ... Si personne ne regarde la Lune alors il n'y a aucun moyen de se poser la question de savoir si elle est là ou pas, alors à quoi bon discuter
 - L'interprétation de Copenhague : spéculations sur l'état d'un objet quantique avant sa mesure sont non-scientifiques
- Ceux qui comme –F– aujourd'hui « utilise et ne cherche pas à comprendre parce que ça nous dépasse » (agnostiques) « tais toi et calcule »
 - Feynman= 'si l'on vous dit comprendre la M-Q ..', les P se comportent ..., 'Moi-m je n'y comprends rien..'
- Ceux qui cherchent à comprendre « ds le cadre »
 - BOHM (~50+)= pousser à bout l'onde-pilote-de B
 - Modèle à variable cachées → compatible , mais au prix de non-localité encore + forte
- Ceux qui ont recours à la conscience et à la métaphysique
 - Wigner , la conscience provoque l'effondrement, la lune n'est pas là si je lui tourne le dos.
 - L'ami de Wigner....?
- Les 'fous furieux' qui cherchent à comprendre « hors du cadre »
 - le Multivers
 - Hugh Everett III, John Wheeler, D. DEUTSCH = 'ce serait bien la 1 ère fois, ...'
 - les 'cordes' et les 'branes'

L'homme de la 3 ème voie ds le débat E-B

In some string theory models, familiar particles are described by strings which are localized in a subspace of spacetime (a slice of a larger universe), while gravity propagates through the whole spacetime. Different slices would be analogous to different parallel universes, which can interact with each other only through gravity.

- Penrose et le « ah » quantique :

There are two main viewpoints which assert that quantum collapse and consciousness are essentially connected. The first view holds that consciousness causes quantum collapse (von Neumann 1955; Wigner 1967; Stapp 1996). The second view holds that quantum collapse generates consciousness (Hameroff and Penrose 1996).

Le MULTIVERS (H.Everett III, J.Wheeler, D.Deutsch)

Cf D.Deutsch sur ce sujet

- Ré-interpréter les interférences à 1 part. à travers le concept d'univers multiples :
 - On constate que le comportmt des objets observés ne peut s'expliquer que si il existe des objets non observés .
 - Les phéno à une part. excluent de considérer l'U tangible comme le tout de ce qui existe
 - Entité interférente → photon fantôme qui interfère avec le photon tangible
 - Un P est tangible ds un certain U , fantôme ds tous les autres
 - Ceci est vrai pour les autres part.(é,n,etc..)→ la réalité est bcp vaste qu 'elle n'apparaît.
 - C'est le concept de 'multivers'
 - « Les exp'ces à un seul P montrent que le multivers existe bel et bien » (DD-III)
 - 2 U // interfèrent d'autant plus qu'ils sont proches , a fortiori si séparés par 1 seul photon.
 - H.Everett 30 ans après , en 57 le 1^{er} à réaliser que M-Q décrit un 'multivers'
- Mondes multiples = supposons les maths correctes → 3 phénomènes **émergents** = intrication, décohérence , histoires cohérentes
 - H.Everett =
 - Pourquoi supposer qu'il y ait une réduction quantique qui n'est pas ds les équations ?
 - Pourquoi ne pas croire ces équations = l'univers balaie toutes les histoires possible plutôt qu'une seule privilégiée
 - Jugée extravagante par l'immensité de la multiplicité « extravagance ontologique »
 - Par ailleurs impossible à tester , ces autres réalités étant inaccessibles;
 - Sondage de M.Tegmark
 - Copenhague = 4
 - R.Penrose – Shrödinger modifiée = reduire la réduction = 4
 - BOHM-Ondes pilotes = 2
 - Mondes multiples = 30
 - + 50 → pas d'opinion
 - Impossible à prouver → sauf mitrailleuse quant de Tegmark

Cf Colin BRUCE sur ce sujet

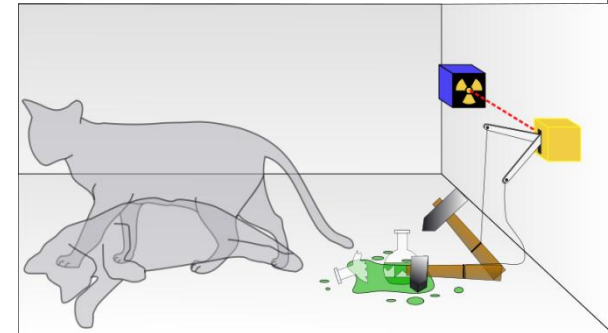
'La théorie q des U// n'est pas le pb → elle est la solution' 5DB-III-p61) , la seule explication d'une réalité contre-intuitive.

Chp VI: Les Interprétations de la M-Q

c'est là que ça devient drôle

D'après Wikipedia

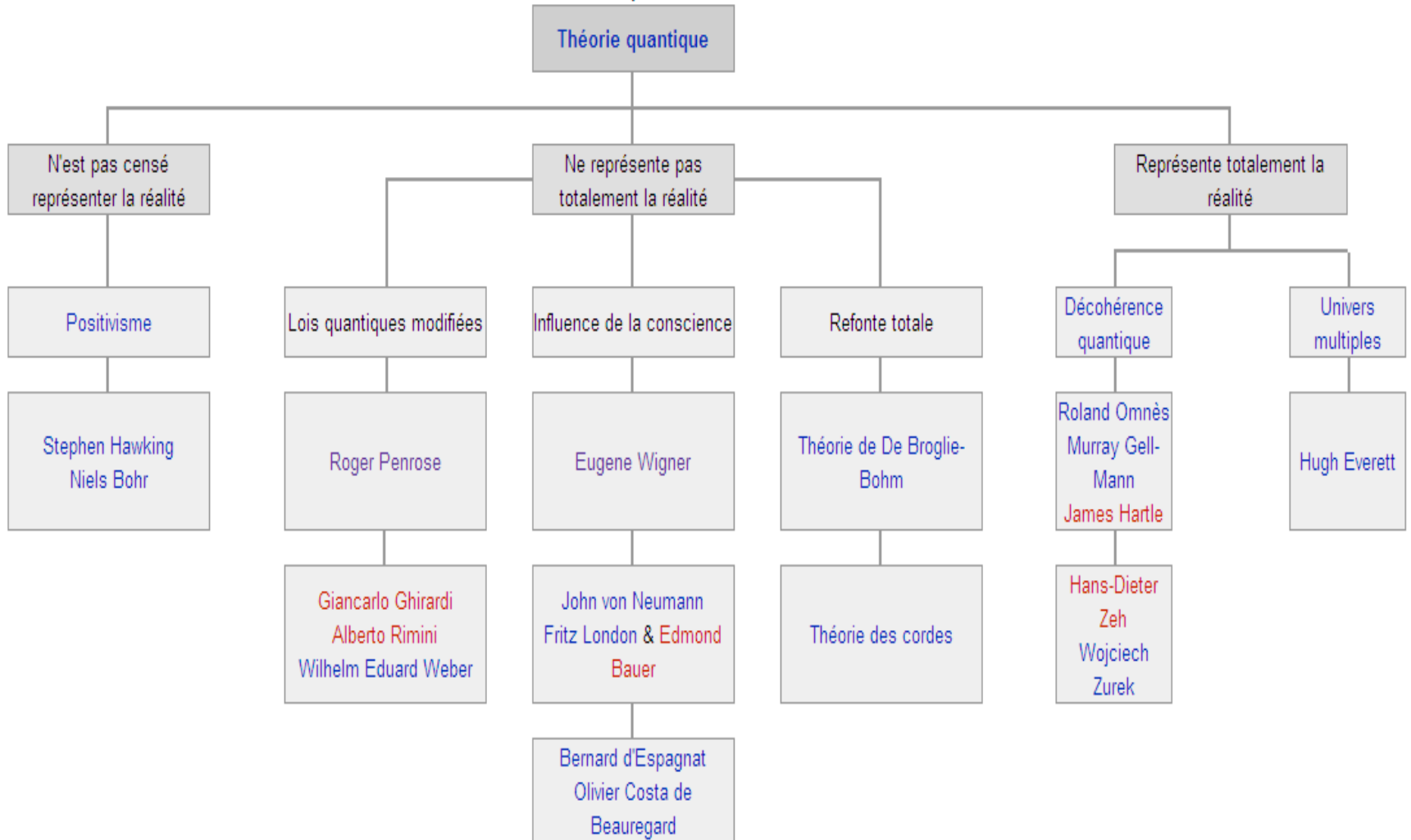
- Aujourd'hui :
 - Théorie de la décohérence – M Gell-Mann, Omnes
 - La rupture est provoquée non par action consciente mais par interaction avec l'environnement
 - Théorie de la décoh à param. Cachés-Penrose, Rimini, Ghirardi, Weber
 - Les lois MQ, non-linéaires ne peuvent expliquer la décoh non linéaire
 - Nécessité de param physiques supp (Penrose=gravitation,...) = compatibles exp'ce mais non intégrés ds théorie globale.
 - RGW = ajoutent terme non-linéaire à équat.d'ES → convergence superposition des q dimensions → macroscopiques, sans rien changer au niv micro.
 - Approche positiviste – W H Shawkins
 - le Ψ ne décrit pas la réalité mais ce que nous en connaissons (cf –Kant)
 - Les lois MQ sont utiles pour prédire mais non pour décrire
 - L'effondrmt n'a pas de réalité mais traduit le chgmt de connaissance que nous avons du système → pas de paradoxe
 - Théorie des univers parallèles H Everett
 - Le Ψ décrit bien la réalité et toute la réalité
 - Il n'y a pas réduction du P-d'onde à une seule possibilité mais division de l'ensemble 'objet mesuré + appareil de mesure' en 2 ensemble appartenant à 2 univers //
 - 2 états simu traduisent 2 univers //
 - Aussi difficile à réfuter qu'à y souscrire (E.Klein)
 - La théorie alternative à var cachées D. BOHM
 - Inspiré de LdB = le surfeur + var cachées non-locales
 - Reformule complémt
 - en éliminant le paradoxe du chat
 - Pas non plus d'effondrmt
 - Fonctionne sans défaut mais sans bcp supporters
 - Théorie de la « conscience » E. Wigner
 - La conscience de l'obs est l'agent déclenchant
 - Ne tient pas la route en « différé » → rétro-actions temporelles
 - Ami de Wigner



La question demeure :
Où se situe la frontière entre le microscopique et le macroscopique ?
À quel niveau de complexité se trouve le poste frontière et la barrière ?
Langue au chat, pour l'instant.....

En.....résumé

Arbre des solutions du problème de la mesure



La théorie du TOE / tout

- Pourquoi une TOE
 - Intellectuellement par souci de complétude
 - Tradition scientifique
 - « Connaître l'esprit de Dieu »
 - Saisir le tableau ds son ensemble
 - ..
- Parce que R-générale et M-Q sont incompatibles
 - Et alors ?
 - $RG \rightarrow \infty$ grand
 - $MQ \rightarrow \infty$ petit
 - Sauf que , il ya un moment ou l' ∞ grand était ds l' ∞ petit
 - Astrophysique $\rightarrow$ univers
 - Soupe baryonique
 - Acquisition de masse (mécan. de Higgs)

A quoi tout ça sert-il *?

- L'existant

- Transistor à effet tunnel
- Microscope à ET
- Laser
 - » Télécoms
 - » Médecine
 - » DVD, CD
 - » Guidage
 - » Signalisation
 - » Etc... voir fiche sur le LASER
- Chimie
 - » Réactions
- Physique
 - » Caract des éléments
- Astrophysique
 - » Pourquoi les étoiles brillent-elles?
 - » L'origines de l'univers
 - » etc;...
- Nano-tech
- Optoélectronique
- Etc...

- Future

- La crypto-Q
- L'ordinateur-Q
- La téléportation-Q

•*Le roi à Faraday:« Ne vous en faites pas , Sire, Certains trouveront bien comment Gagner de l'argent avec ça.... »
•Ça , c'était la plus belle invention du siècle
•Bcp ont gagné de l'argent , pas tous autant que
•Edison (GE)
•Westinghouse –(Tesla(radio))
•Marconi-N09
•Etc...

~30% du PNB US (JL Basdevant)

Retour vers le FUTURE
A voir en annexe

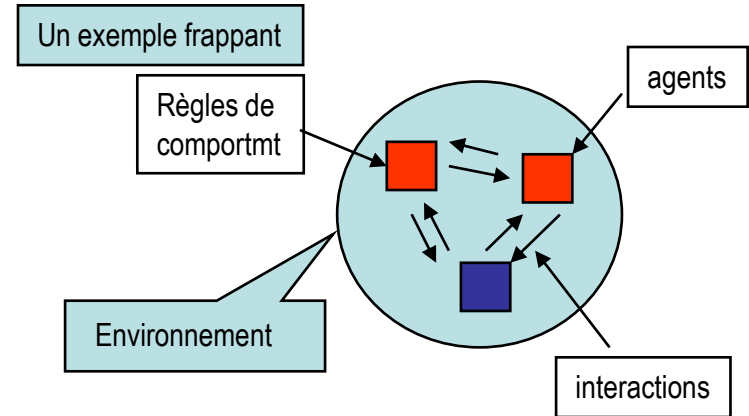
Et si on revenait à notre chère COMPLEXITE

Sans oublier la complexité* , parce que jusque là... c'était simple....part-I

*Michel BLOCH notre respecté Président a dû me rappeler
Une bonne douzaine de fois qu'il s'agissait de parler de complexité,
Ce qui je l'avoue n'était pas ma motivation 1 ère , ce qu'il a bien
Du sentir ... Toujours est-il qu'en creusant la question il m'est
Apparu qu'il serait difficile de trouver un meilleur exemple que la
M-Q pour illustrer la complexité et son nécessaire avènement.
Au point que → Cette conférence aurait du s'intituler

'De la mécanique quantique comme parfaite illustration de la Complexité-Emergence'

Et michel BLOCH m'aurait laissé en paix ds les affres de ma préparation...



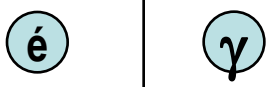
- La complexité ne fait aucun doute
 - Des agents obéissant à des lois simples :
 - Nombre limité de caract.
 - Masse, spin/polarisation , charge, traject-vitesse
 - Règles de comportmt simples (1 à 1)
 - Conservation de l'E et autres invariants
 - 1 à 1 (ds le vide) les choses sont « relativmt » simples
 - En nombre considérable :
 - 1 cm cube de liquide = 10^{22} atomes
 - À l'équilibre chaque atome suit trajectoire chaotique → 10^{23} équations !!?
 - Réduire la complexité à traitement statistique ↔ BOLTZMANN n'a pas vécu assez longtemps
 - Interactions multiples, Non-réversibles, Non représentables mathématiquement
- Exemples chiffrés
- Tout ça devrait bien donner un peu d'émergence ,non ?
 - **La matière tangible émerge en effet d'une soupe intangible et improbable essentiellement constituée de vide et de champs**
 - **Et c'est totalement incompréhensible , mais c'est comme ça.....**

Sans oublier la complexité* , parce que jusque là... c'était simple....part-II

- En fait on se retrouve avec toutes les caractéristiques d'un syst complexe

Système classique	Système complexe	M-Q
•Simple ou simplifié •Déterministe •Reproductible •Linéaire	•Complexe •Non-déterministe •Irréversible •Non-linéaire	👍 👍 👍 👍

Et bien entendu l'EMERGENCE sans laquelle tout ça serait..VAIN?

Agents-Acteurs	Agents - interaction	Resultats → Interactions → règles simples	Emergence? : un peu , mon neveu !
Part.élem matière 	Part élem force 	γ et é essentiellmt 'J' te passe un photon rend moi un neutrino pour faire bon poids'	Plein de choses qui n'ont rien à voir avec ce qu'on avit mis ds la marmite : Propriétés chimiques des corps - affinité , valences , ... Propriétés physiques des corps - ductilité ,dureté, etc... - conductivité elect, calorifique , etc....

Lumière et
Matière
(Feynman)



L'EMERGENCE quantique

- Thèse de Laughlin

- Auteur du livre Un Univers différent, le Nobel Robert Laughlin est devenu le chantre du concept d'« émergence » en sciences physiques. Il l'a utilisé pour élaborer une théorie novatrice sur les fluides quantiques.

Vous avez dit émergence ? Défendue avec passion par le Prix Nobel Robert Laughlin, rejoint par d'autres scientifiques de premier plan, une théorie novatrice est en train de bousculer la physique.

Ces iconoclastes déclarent dépassé le réductionnisme qui appréhende le monde sensible à partir de quelques lois fondamentales. Ils postulent au contraire une physique en forme de poupées russes, où chaque loi est propre à un niveau d'organisation particulier. Une science pour le siècle à venir, qui se préoccuperait davantage ***des phénomènes observables à l'échelle humaine.***

- David Deutsch

- L'unification des 4 théories conduira à une explication de la conscience .
 - Analogie au pb de savoir ce qu'est la vie ?
 - Darwin → conséquence émergente des lois de la physique
 - Les lois de la phys n'ont pas créé la forme de l'éléphant ou du paon
 - Kepler / Newton : K décrit des ellipses , N énonce des lois qui conduisent à des ellipses
 - De même la réponse à « qu'est-ce que la conscience ? » relève de la théorie quantique
← émergence quantique

- R. Penrose

- Le « ah » éclair d'intuition / compréhension est une émergence analogue à la réduction quant.

CONCLUSION-1

- Un exposé sur la M-Q ds le cadre d'un G'pe COMPLEXITE ?
 - La M-Q n'aurait-elle pas été le « déclencheur » de l'intérêt pour la COMPLEXITE
 - Il était une fois un monde déterministe et « parfait »
 - Un monde aseptisé, stérilisé, sans frotts, sans ... =
 - les choses étaient à leur place et il n'y avait pas de place pour le hasard
 - Les choses étaient prédictibles et reproductibles
 - La science avait « compris » la nature en la « karchérisant »
 - Tout fonctionnait bien → expériences elles-mêmes étaient faites « pour »
 - Un monde sans incertitude, ss ambiguïté, ss complexité (THX1138)
 - Ce monde avait « culminé » avec N et M
 - Mécanique (partclrt « céleste ») et elec/magn sont prtclrt « clean »
 - Et avait commencé à percevoir le coté complexe avec
 - Thermodynamique et mécanique des fluides
 - BOLTZMANN, Navier-Stokes, etc..->méca stat → E
 - H.POINCARÉ
 - Jusqu'à ce que la M-Q → fasse éclater le paradigme
 - Très exactmt → non pas B mais Heisenberg :1925
 - Force à « sortir du cadre »
 - Id: irrégularités ds traject Mercure
 - » Ds cadre → instisft → h/cadre → E-relativité
- La nature est complexe ds ses détails, imprévisible et souvent incontrôlable
- Une nouvelle science est à inventer
 - Refermer la boucle :
 - Recherche actuelle n'est-elle pas trop conduite par notre culture, ds le cadre réductionniste
 - A quoi cela servira-t-il de trouver la clé de l'unification si elle n'opère que ds le 10^{-18}
 - La théorie des cordes → postule 6 dimensions cachées supp ds l'infiniment petit
 - Attention aussi au « à quoi cela servira-t-il ? » → Bell-telephone, Faraday- electricité
 - Ne convient-il pas d'aborder les pb's « autrement », en dehors du cadre ?

CONCLUSION-2

- Qq questions , pistes de reflexion
 - Les maths sont-elles la réalité ou un outil d'interprétation de la réalité ?
 - Le principe d'incertitude concerne –t-il ce que l'on sait de la réalité ou décrit-il la r-elle-même
 - La réalité est-elle une émergence?
 - La décohérence, responsable de la transition quantique/classique, peut être expliquée par la mécanique quantique. La réalité classique que nous percevons **émergerait** naturellement d'une description fondamentalement quantique, réconciliant ces deux visions d'un même monde.
 - Les lois de la nature « émergent-elles » d'un niv n à $n+1$?
 - Robert Laughlin mars 2005 (Un Univers différent) → ' toutes les lois de la nature sont « émergentes »' . Elles résultent d'un comportement d'ensemble, et sont pratiquement indépendantes de celles qui régissent les processus individuels sous-jacents.
 - « expliquer du visible compliqué par de l'invisible simple »
 - Les 4 fils de l'étoffe de la réalité (David DEUTSCH) :
 - 1 - l'Evolution avec Dawkins
 - 2 – la Physique quantique avec Everett
 - 3 – la Connaissance avec Popper
 - 4 – le Calcul avec Turing
 - Conscience et M-Q = 2 « émergences » remarquables – seraient-elles liées (Penrose)
 - La vie et l'évolution autres émergences remarquables
 - La physique des part. et l'évolution : 2 théories intrinsèquement liées ? (selon M.Gell-Mann)
 - E=« Le plus incompréhensible ds l'univers est qu'il soit compréhensible par l'homme »
- La théorie de la COMPLEXITE est-elle un outil suffisamment élaboré
 - Apport de l'informatique et de la simulation , certes , mais
 - La puissance de calcul et la rapidité d'itération sont-elles suffisantes
 - L'ordinateur quantique sera-t-il la réponse ?

That's all folks

Merci de votre attention

Ouf



Allez, une aspirine et au lit.
Et pas de questions , surtout

ANNEXES

- I-Notes
- II-Bibliographie-Liens
- III-Les expérimentations
 - Des photons un par un
 - Expériences
 - Les accélérateurs
 - L'incontournable « chat quantique »
- IV-Qq sujets clés
 - La matière
 - Les 4 forces de la nature
 - La lumière
 - Intrication et Décohérence
 - Complexité et Emergence
 - Le 'Modèle Standard'
- V-Qq utilisations actuelles ou futures
 - Le laser
 - La Cryptographie quantique
 - L'Ordi quantique
 - La Télé-portation quantique
- VI-Les ACTEURS clés
- VII-Ils ont dit

I-Notes-1

- Holisme = **Holisme** est la francisation de **holism**, un néologisme forgé en 1926 par l'homme d'État Sud-africain Jan Christiaan Smuts pour son ouvrage « Holism and Evolution1 »

La première définition historique du holisme est : « the tendency in nature to form wholes that are greater than the sum of the parts through creative evolution », dont une traduction satisfaisante est : « la tendance dans la nature à constituer des ensembles qui sont supérieurs à la somme de leurs parties, au travers de l'évolution créatrice ». C'est à dire, la tendance de l'univers à construire des unités structurales de complexité croissante mais formant chacune une totalité (a whole)

- **L'amas thématique des MATHÉMATIQUES** (E;Klein VIII-3) – la toute puissance mathématique en MQ
« on ne peut plus parler d'atome en langage ordinaire .
La M-Q a emporté les chercheurs ds l'abstraction math la + totale .
Pour la science moderne , il n'y a plus d'objet matériel à la base , mais des structures mathématiques , des symétries, autrement dit , de pures création intellectuelles qui seules semblent capable de refléter le réel. »
« La science construit de belles cathédrales, vastes et raffinées , mais que très peu de gens peuvent visiter »
→ au propre comme au figuré : qui visite le LHC et comprend ce qu'il s'y passe?
- Cette avalanche mathématique est « bornée » → **Théorème de Gödel** . Kurt Gödel ds les années 30 : « crise des fondements » en maths ← théorème d'incomplétude ou d'indécidabilité : Il est impossible de prendre un nombre fini d'axiomes de telle sorte que toute question soit décidable. L'instrument infallible de l'esprit humain comporte une limite interne indépassable !!

I-Notes-2

- Autres histoires bizarres et les boîtes à \$1Mles ou les chèvres et la Corvette*
 - Probabilité = Problème de Monty Hall
 - Cf Colin BRUCE sur ce sujet
 - 3 boîtes
 - L'une contient \$1M
 - Les 2 autres sont vides
 - Vous choisissez une boîte en la désignant (n°1)
 - » Parmi les 2 qui restent j'en enlève une que je sais vide (n°2)
 - » Je l'ouvre et vous montre qu'elle est vide
 - Je vous propose de changer votre choix initial ou de le conserver :
 - » Que répondez-vous ?
 - Le raisonnement à éviter
 - Que la boîte du milieu (celle qui reste n°3) contienne ou non l'argent ne peut être modifié par l'ouverture de la boîte n°2.
 - Il reste 2 boîtes et donc 50% de chances ? FAUX
 - La situation physique n'a pas changé mais votre d° d'ignorance a été sensiblement réduit et ça justifie de changer votre choix :
 - Tjrs 1 chance s/ 3 que la boîte n°1 contienne \$1M.
 - » Ceci se produit 1 fois sur 3
 - Si par contre n°1 vide → vous êtes sûr à 100% que l'argent est ds n°3
 - » Ceci se produit 2 fois sur 3
 - Vous avez donc 2 fois + de chances en changeant votre choix.

*la même histoire existe avec des chèvres et une « Vette »

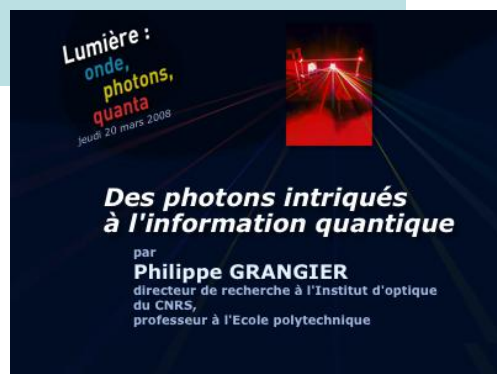
Notes -III

- **Choix retardé : quand la mécanique quantique "agit" sur le passé**
Par Laurent Sacco, Futura-Sciences
- La magie de la [mécanique quantique](#) semble inépuisable si on la prend vraiment au sérieux. Une expérience récente, effectuée par [Jean François Roch et ses collègues](#) de l'ENS Cachan, a permis de réaliser, bien mieux qu'auparavant, l'expérience dite du choix retardé proposée il y a moins de 30 ans par le [grand John Wheeler](#).
- Jusqu'à présent, les notions de temps et d'espace viennent de se briser avec cette expérience, à l'échelle humaine. C'est peut être encore acceptable. Passons maintenant avec John Wheeler à l'échelle des galaxies ! Plus précisément, observons avec deux télescopes un effet de lentille gravitationnelle où une galaxie à un milliard d'années-lumière dédouble l'image d'un quasar situé à deux milliards d'années-lumière. On est encore dans un cas avec deux trajectoires possibles pour les photons émis par le quasar. En répétant l'expérience de Wheeler c'est, cette fois-ci, au niveau des galaxies et à un milliard d'années dans le passé qu'un observateur humain va déterminer le chemin pris par un photon !
- Plus fort encore, et toujours selon Wheeler. Si j'imagine qu'il y a une fonction d'onde de l'Univers, alors, peut être que ce qui a provoqué sa réduction, et la naissance de notre Univers classique à partir d'une « particule quantique » de la taille de la [longueur de Planck](#) il y a 13,7 milliards d'année, c'est justement le fait qu'il y aurait plus tard des systèmes classiques collecteurs d'informations, comme les êtres humains, et effectuant une observation sur celui-ci ! Après tout, EPR nous avait déjà habitué à une non-localité dans l'espace, dans un Univers avec [espace-temps](#) il est somme toute logique que la non-localité soit aussi dans le temps !
- Cette théorie peut sembler complètement folle, mais elle l'est assez pour être exacte, et comme le fait remarquer [Andrei Linde](#), qui peut savoir [le rôle exact de la conscience](#) dans la structure physique de l'Univers ?

II-BIBLIOGRAPHIE

- Le TOP , les incontournables , faciles à lire, mais niveau très correct :
 - La magie du cosmos - Brian Greene –VI-1***
 - L'univers élégant –Brian Greene –VI-2
 - Un peu de science pour tout le monde – Claude Allègre—V ***
- Pour ceux qui veulent creuser la question ss équations :
 - L'étoffe de la réalité –David Deutsch-III ***
 - De la matière de J-M Levy-Leblond-IV ***
 - Lumière et matière de R.Feynman –VII-0 ***
 - Les lapins de M.Schrodinger - Colin Bruce ***
 - Une brève histoire de l'univers – S.Hawkins XII
 - Le facteur temps sonne jamais 2 fois- Etienne Klein-VIII-1
 - Les tactiques de chronos
 - Conversation avec le shinx ***
 - L'atome au pied du mur
 - Même pas fausse(théorie des cordes) Peter Woit-XIV
 - Dieu et la science – Bogdanoff et Guiton-XV
 - From certainty to uncertainty – D.Peat-I ***
 - Pour un principe matérialiste fort – JP Basquiat-XX ***
 - Le cantique des cantiques –Sven Ortoli-JP Pharabod-XIX
 - La physique quantique (Petit précis de M-Q) –John Gribbin XI ***
 - Initiation à la mécanique quantique V.Scarani-XVI
 - Poussière d'étoiles H.Reeves-XII
 - Les 2 infinis –R.Penrose –XXI ***
 - Entre le temps et l'éternité –Priogine - XXIII
- Pour se spécialiser , avec des équations a gogo
 - Mécanique quantique – le cours de R.Feynman –VII-2
 - Mécanique –le cours de Feynman-VII-1***
 - Le cours de JL-Basdevant à l'X-XVIII
 - Le PENROSE , le cours-XXII
 - Quarks & leptons –F.Halzen,A.D.Martin-XVII

II-LIENS



<http://vpod.tv/dfailly/201962/videoPlayer> DE ROSNAY SUR COMPLEXITE

http://www.dailymotion.com/video/x6fr8u_ce-qu-einstein-ne-savait-pas-

video en 3 seances sur "string theory" par Brian GREENE

http://www.colorado.edu/physics/2000/science_trek.html

cours très imagé , interactive et simplifié de l'univ du Colorado _ super

<http://narjesbbs.googlepages.com/intro>

site spécialisé sur la complexité

www.techno-science.net Voir le sujet - Citations quantiques

Antony Garrett Lisi - Wikipédia

Accueil Assoc pensee complexe

The World Knowledge Dialogue - The World Knowledge Dialogue

<http://www.automatesintelligents.com-biblionet-2007-avr-pmf.html>

Automates Intelligents Robotique, intelligence artificielle, vie artificiell...

Canal-U - A la poursuite de la particule fantôme (1997)

Canal-U - Albert Fert, médaille d'or 2003 du CNRS

Canal-U - Cordes, les instruments de l'ultime

Canal-U - Einstein aujourd'hui

Canal-U - Electromagnétisme (2003)

Canal-U - Et si Dieu jouait aux dés (2000)

Canal-U - La lumière

Canal-U - La physique quantique

Canal-U - Le proton nous enterrera tous (1985)

Canal-U - Les cyclotrons du Collège (2006)

Canal-U - Les tests et effets de la physique quantique

Canal-U - Nanotechnologies la prochaine révolution industrielle

Canal-U - Qu'est-ce qu'une particule (les interactions des particules)

Conférences de la Cité des Sciences et de l'Industrie - Paris

Google

Vitória Vers une nouvelle espèce

Dossier LHC une clé pour le futur

Problème de la mesure quantique - Wikipédia

André Lévesque

Canal-U - La physique quantique (2005)

The Official String Theory Web Site

Canal-U - Pourquoi les particules ont une masse

David Bohm, ordre implié et holomouvement - science et conscience

Edoc Force sur les interactions à voir

Le modele standard

Modèle de Bohr - Définition - Encyclopédie scientifique en ligne

La Recherche

La théorie des supercordes - Introduction

Le Boson de Higgs La Recherche, l'actualité des sciences

L'interprétation de la Physique quantique

Masse des particules élémentaires

Quelle est la masse d'un photon

Rayon Z

Résultats Google Recherche d'images correspondant à <http://www.di...>

Science Daily News & Articles in Science, Health, Environment & Te...

Simulations numériques

Sujets divers

The Particle Adventure

VIDEO CLIPS FROM ICCS2002

Vitesse de la lumière - Définition - Encyclopédie scientifique en ligne

Alain Connes -- Documents

arXiv.org e-Print archive

Canal-U - Accueil

Dailymotion - Ce Qu Einstein Ne Savait Pas Encore - 11eme Dimensi..

dualité onde-particule - MSN Encarta

CENTRALE-physique

Feynman Online

<http://narjesbbs.googlepages.com-intro>

http://www.dailymotion.com-video-x6fr8u_ce-qu-einstein-ne-savait-pas-

http://www.dailymotion.com-video-x6frv_ce-qu-einstein-ne-savait-pas-

http://www.dailymotion.com-video-x6fs7s_ce-qu-einstein-ne-savait-pa-

http://www.quantum-physics.polytechnique.fr-fr-propa_wp.html

Jeu de la vie

La physique quantique - De l'atome aux supercordes

III-Les EXPERIMENTATIONS

- Des particules une par une : comment?
- Expériences avec interféromètres
- A plus grande échelle et pour qq \$\$ de plus...
 - Les accélérateurs : LEP, Fermilab, LHC
 - Le LHC et son objectif
- Ou ds son lab et entre voisins
 - Aspect à ORSAY s/ la « non-localité »
- Et puis ...l'incontournable chat quantique de Mr Schrödinger

Des particules une par une = c'est possible-I

Canon à photons existe : depuis ~20 ans

- Lampe = 10^{20} - 10^{21} γ /s.
- Noir = 1 γ de temps en temps
- Comment réaliser 1 γ 'on demand'
 - Atome excité $\rightarrow$ émet 1 γ $\leftrightarrow$ $h\nu = E_1 - E_2$
 - Le diamant = cristal de C pur
 - Impureté/défaut = centre NV
 - N = azote / V = vacancy
 - Répartis de façon discrète, donc localisable avec précision
 - Un seul atome émetteur
 - Éclaire – laser bleu
 - Récupère γ rouge
 - Vérifiable 1 à la fois

(Source Ph.GRANGIER)

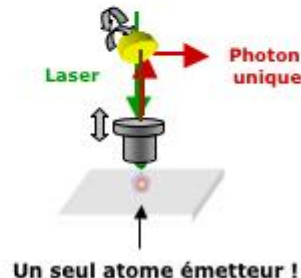
Schrödinger –encore lui—disait qu'on
Ne pourrait jamais tester / valider la MQ ds
Ce qu'elle a d'in vraisemblable car on ne
Pouvait pas envoyer des γ , 1 par 1 et qu'on
Serait tjrs noyé par le « bruit » ambiant.

Sources à un seul photon

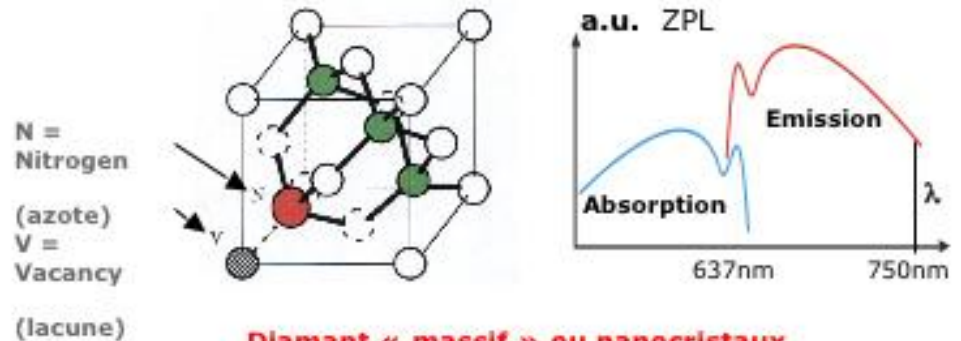


Une source lumineuse
ordinaire émet 10^{20}
photons par seconde

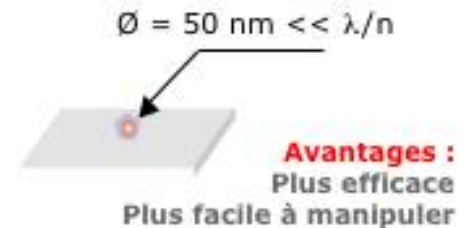
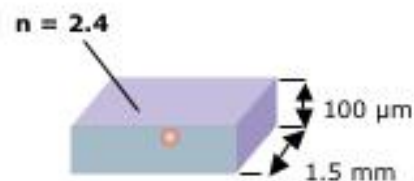
Comment en avoir
un seul à la fois ?



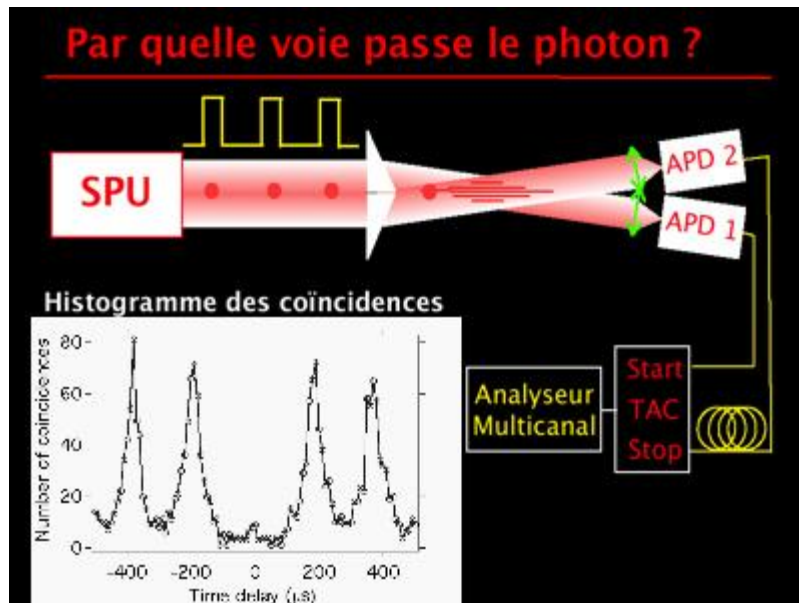
Centres « NV » dans le diamant



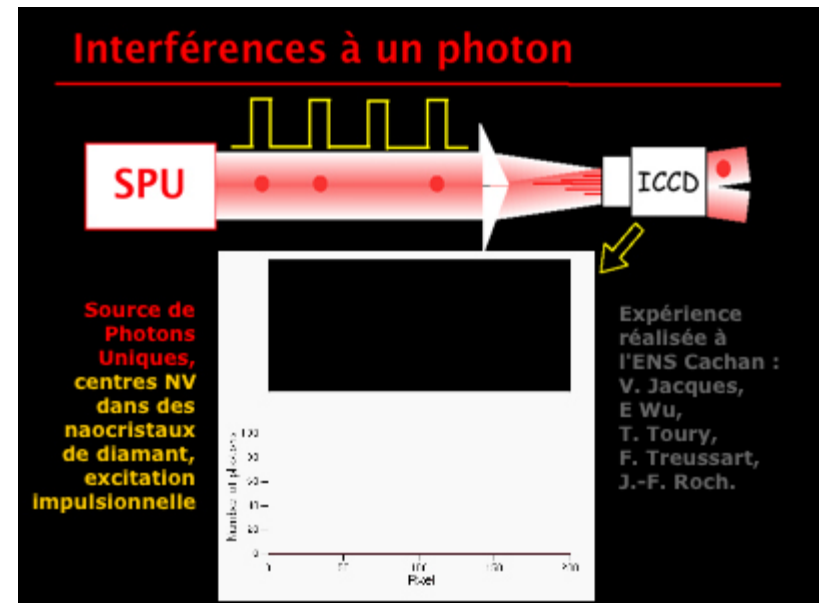
Diamant « massif » ou nanocristaux



Des particules une par une = c'est possible - II



Contrôle un seul Photon à la fois



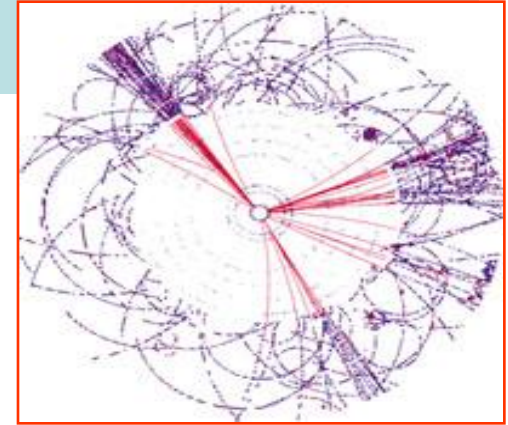
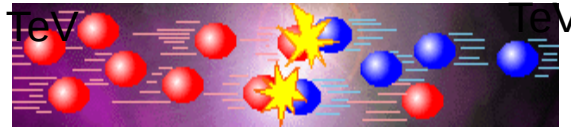
Interference à un photon

Les accélérateurs de particules

Pourquoi tout ça ?

Protons de 7

Protons de 7



But des accélérateurs : explorer la matière à des échelles de 10^{-15}m et au-delà et prouver les théories / prédictions (voir fiche CERN en annexe)

Fonctionnement : ils accélèrent des particules (électrons, protons) à l'aide de puissants champs électromagnétiques

Au LHC $\rightarrow$ ~ 600 million collisions /second
Chacune est une 'expérience'

Et pourquoi pas un microscope ?

- 1/ La longueur d'onde de la lumière visible est de 10^{-6}m (1 micron)
 $\Rightarrow$ elle ne peut donc pas être utilisée pour observer l'infiniment petit (10^{-15}-fermi)
- 2/ Les énergies nécessaires $\rightarrow$ nécessitent des « cathédrales »
 $\rightarrow$ inflation continue (voir chart) :
 - énergies en jeu $\rightarrow$ casser l'incassable = $7+7$ TeV
 - temps d'obs $\rightarrow$ 10-30 s.
 - nombre d'événmts $\rightarrow$ tris informatique
- $\rightarrow$ contenir le faisceau accéléré
 - cercle $\rightarrow$ déviation Magnét $\rightarrow$ aimants supraconduct; $\rightarrow$ ds l'He liquide

At the end of the day = un Graal qui coute ...un max !

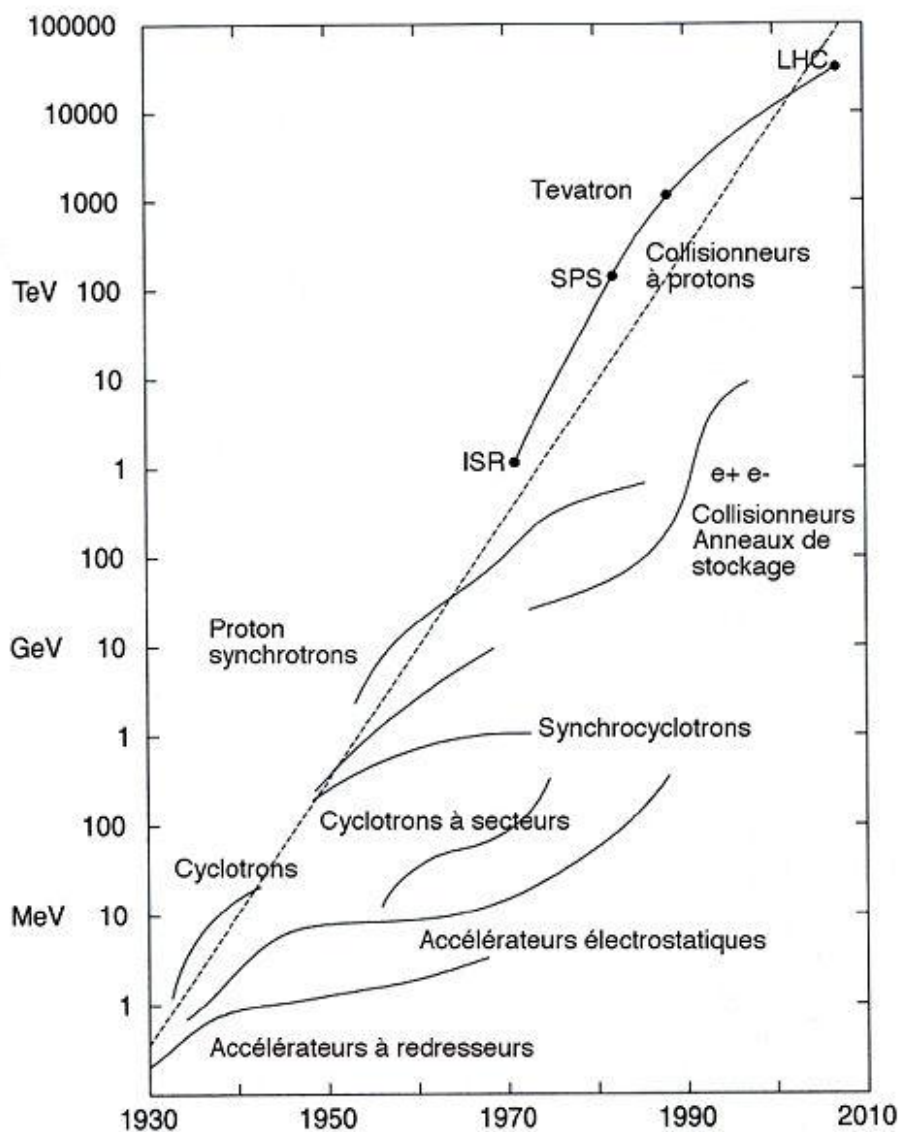
Les grands accélérateurs (~100 ds le monde)

Vous avez dit cathédrale ?

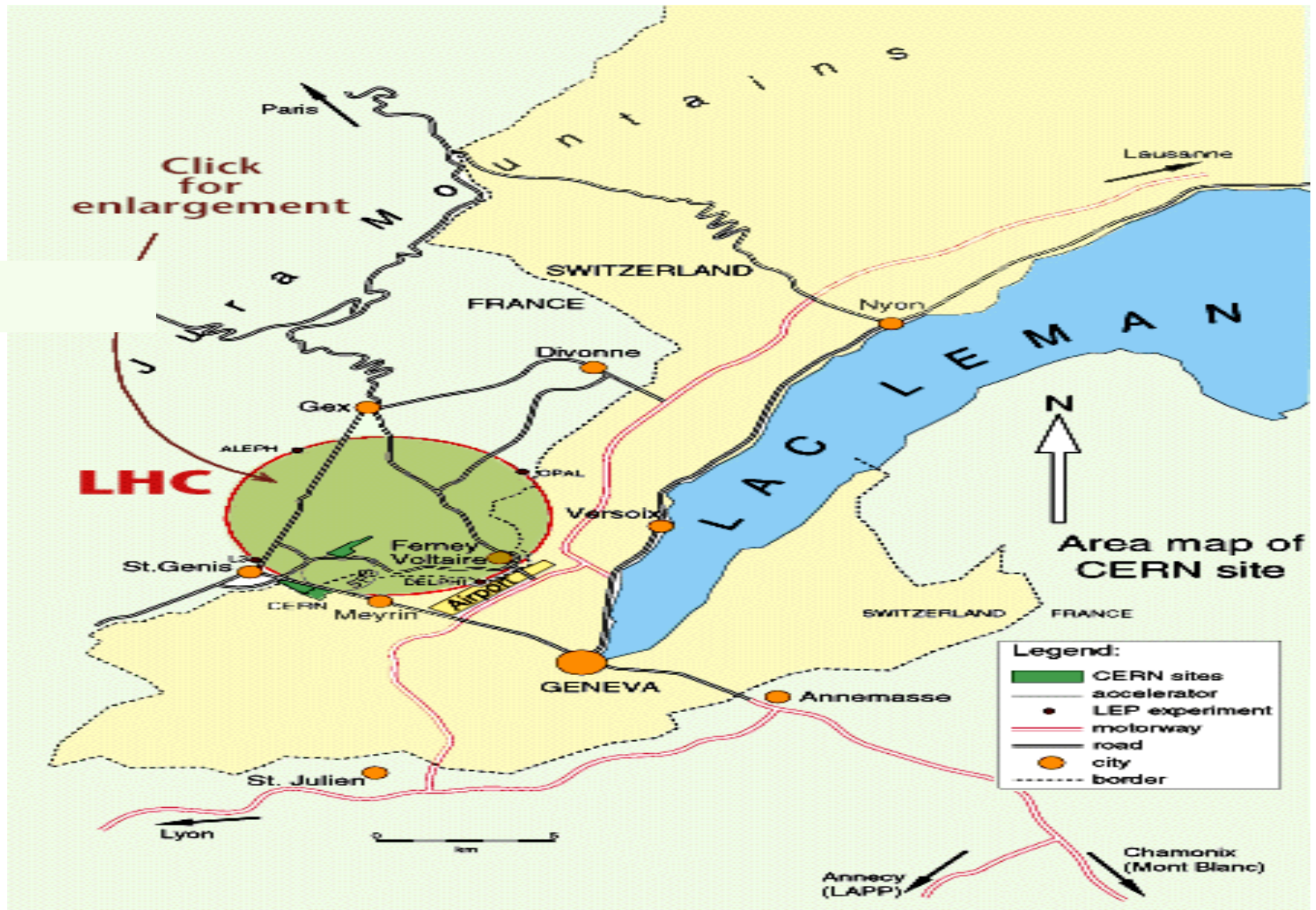
Le LHC en chiffres

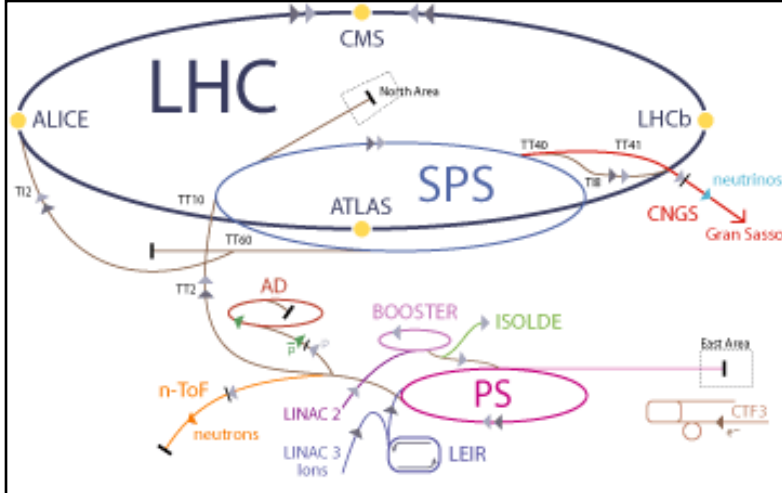
- Un anneau de **26 659 m** de circonférence enterré à une profondeur comprise entre 50 et 175 m (**100 m en moyenne**).
- Vitesse des protons : **99,9999991 %** de la vitesse de la lumière ; chaque particule effectuera plus de 11 000 tours par seconde dans l'anneau !
- Collisions frontales de **14 TeV**.
- Pression interne de **10⁻¹³ atm (ultravide)**, soit dix fois moins que sur la lune.
- **9300 aimants refroidis à -271.3 °C** par **60 tonnes d'hélium** liquide ; le système d'aimantation contient **10 000 tonnes** de fer, soit plus que pour la tour Eiffel.
- **400 lentilles magnétiques** pour focaliser les faisceaux
- Les données de chaque expérience pourraient remplir 100 000 DVD chaque année.
- Durée de vie du LHC : environ 15 ans.

Merveilleux exemple de foi en la science...



Le collisionneur de particules LHC au CERN

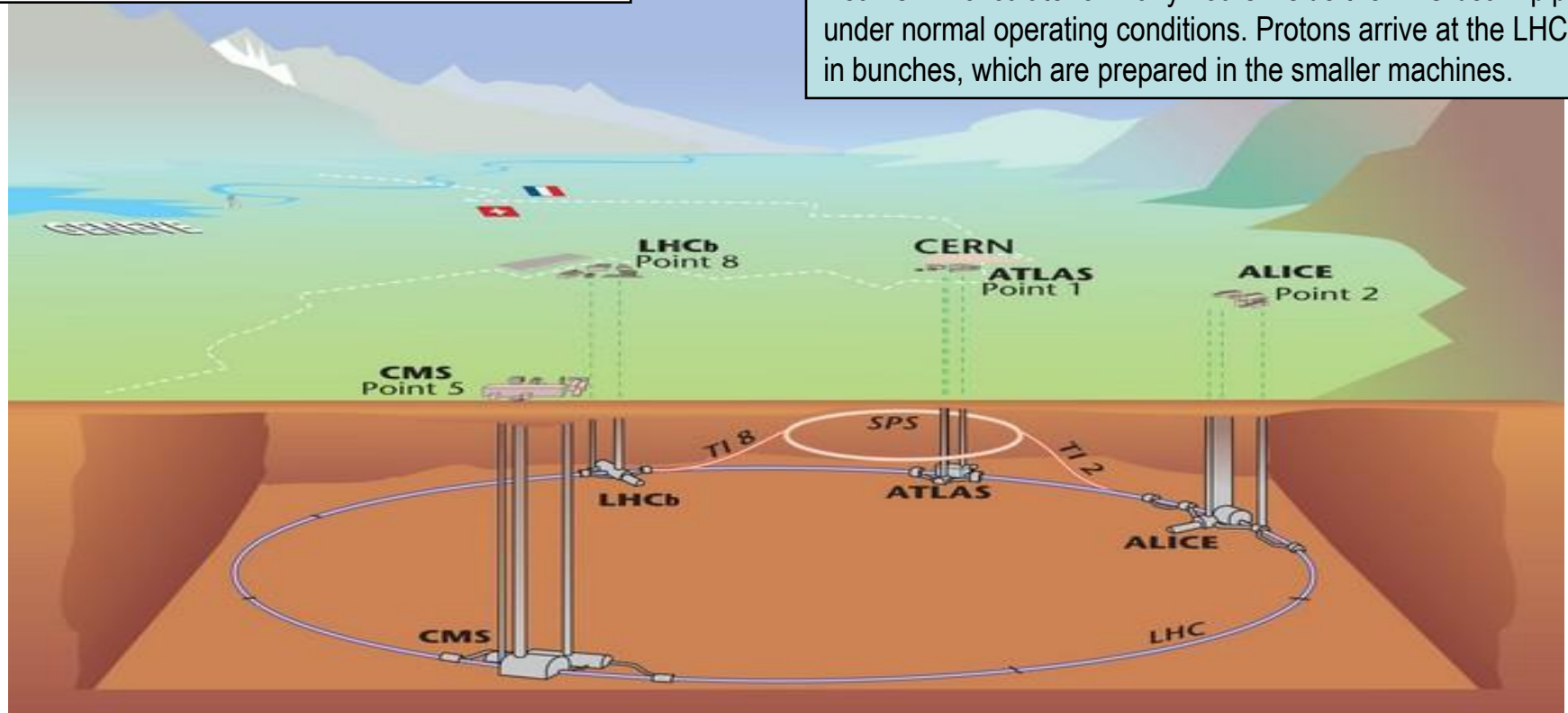




Le LHC

The booster accelerates them to 1.4 [GeV](#). The beam is then fed to the Proton Synchrotron (PS) where it is accelerated to 25 GeV. Protons are then sent to the Super Proton Synchrotron (SPS) where they are accelerated to 450 GeV.

They are finally transferred to the LHC (both in a clockwise and anticlockwise direction, the filling time is 4'20" per LHC ring) where they are accelerated for 20 minutes to their nominal 7 TeV. Beams will circulate for many hours inside the LHC beam pipes under normal operating conditions. Protons arrive at the LHC in bunches, which are prepared in the smaller machines.

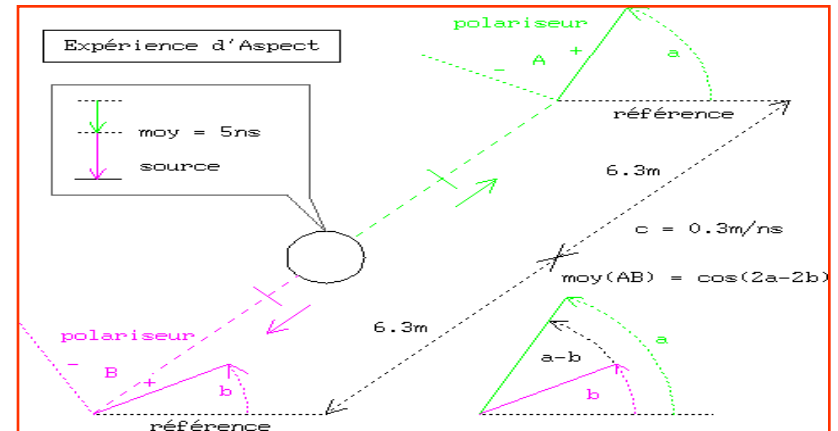
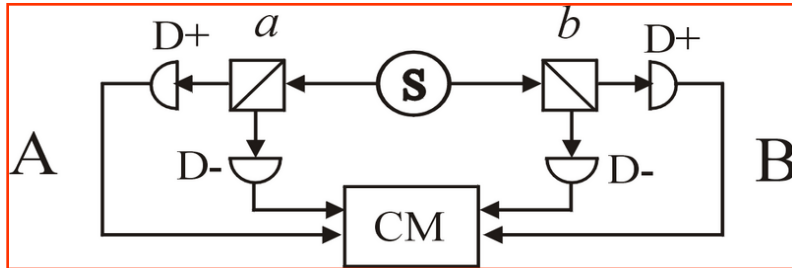


LHC un mot sur ses enjeux

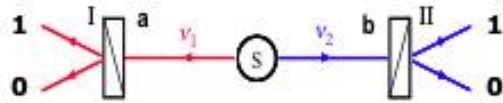
- Construit sur l'ancien LEP -27 km
- Daniel Treille raconte le LEP (années 80-00) (liens)
 - pouvait être sensible :
 - Au train électrique qui passait vers Genève → interférences s/aimants
 - A la 'marée terrestre' qui déformait la circonférence de 1/3 de mm
 - En hiver → + d'eau dans le lac → 1/3 mm
 - Depuis 89 :
 - Des Z⁰ en grande série (20M)
 - Mesure de la masse de Z⁰ à 20ppm
 - Avec + d'énergie → paires W⁺- et mesure m(0,5ppm)
 - Approche du X (Energie insuff.), en// avec Chicago
 - Energies =
 - LEP → 100 GeV ↔ réaction fusion ~10MeV
 - LHC → 7+7=14TeV (14 000 GeV)
 - Depuis 45 ans → toutes les particules fabriquées au CERN=1 mg
- 3 enjeux clés pour le LHC :
 - Le fameux boson de HIGGS
 - Ils y étaient presque semble-t-il au LEP avant l'arrêt décalé de 6 mois (5/2001)
 - Course de vitesse avec le Tevatron
 - La masse des 4%
 - Le reste des 96 %
 - 2-3 choses qui indirectement conforteraient 'les cordes'

L'intrication : ASPECT et les autres-I

• L'intrication



1964 : (Source Ph. GRANGIER) Les Inégalités de Bell



Il n'existe **aucune théorie locale à paramètres supplémentaires** (dans l'esprit des idées d'Einstein) reproduisant les **prédictions quantiques** pour les corrélations EPR pour l'ensemble des orientations possibles des polariseurs.

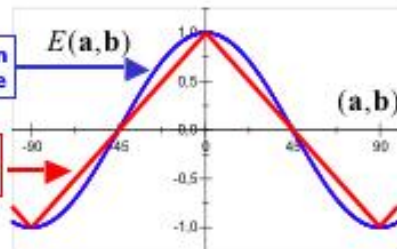


Prédictions "irréconciliables" : inégalités mathématiques, qui peuvent être testées expérimentalement !

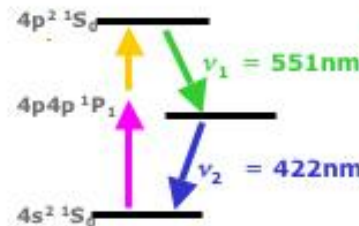
Verdict de l'expérience ?

Prédiction quantique

Exemple de TLPS



Une source de photons intriqués
« Expérience d'Aspect », Orsay 1982



* Paire de photons émis dans une cascade radiative atomique excitée par deux lasers.

* Les polarisations de ces deux photons sont très fortement corrélées : il est impossible de les décrire par un modèle « réaliste local »

Violation des Inégalités de Bell
(même avec "choix retardé" de la mesure)

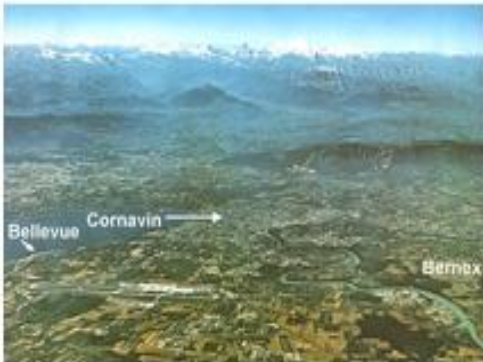
Jet atomique de Calcium 40



L'intrication : ASPECT et les autres-II

Expériences à grande distance

Photons intriqués émis dans des directions contrôlées :
Injectables dans des fibres optiques.
Intrication à grande distance



Expérience de Genève
(1998)

- Utilisation des fibres optiques du réseau commercial
- mesures séparées de 30 km

Accord avec MQ.

Expérience d'Innsbruck (1999)
polariseurs variables basculés de façon vraiment aléatoire
(propagation sur plusieurs centaines de mètres).

Accord avec MQ.

Questions...

Que peut-on en conclure ?

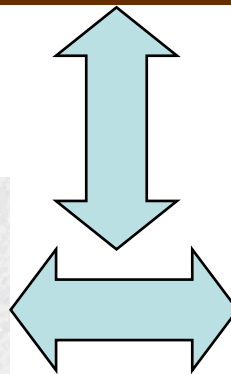
- Deux particules (*photons*), même très éloignées, forment un seul objet quantique. Il est "interdit" (*impossible, contradictoire...*) d'attribuer des propriétés séparées à ces deux particules.
- La mécanique quantique ne contredit pas la relativité restreinte, mais il faut abandonner la notion de "réalité physique locale" chère à Einstein, qui est contredite par l'expérience...
- Il existe dans la nature de très nombreux systèmes intriqués à l'échelle microscopique (*atome d'Helium...*), mais peut-on contrôler et utiliser des systèmes intriqués "à grande échelle" ?

L'incontournable* « chat quantique » mort-vivant de Schrödinger

Le dispositif



L'observation déclenche l'effondrement quantique



* J'aurais tout fait pour l'éviter.. Mais suis hélas tombé sur site sympa →

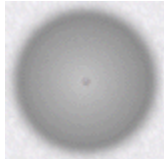
Source=<http://molaire1.club.fr/chat.html>

L'incontournable « chat quantique » mort-vivant de Schrödinger – qu'en penser ?

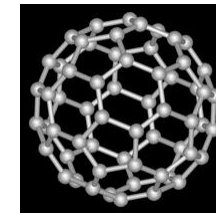
- Quel est le problème posé
 - C'est tout d'abord le pb de la superposition
 - Le fonction d'onde de prob s'ajoutent simplmt
 - L'ornytorinque est duck et mole --l'un et l'autre
 - C'est surtout le problème de la mesure quantique
 - Effondrmt fonct d'onde
 - Observer c'est « détruire »
 - Pas parce que par principe l'observation interagit
 - Mais parce que c'est « construit » comme ça
- Pourquoi n'y a-t-il pas de « chat quantique » ?
 - C'est le pb de la « décohérence »

» La superposition d'état concerne en fait des particules totalement isolées. A l'échelle quantique, les particules évoluent dans un grand vide et les rencontres sont assez rares. A notre échelle, c'est très différent: notre chat respire les milliards de molécules d'air qui sont dans la boîte, sans compter tout ce qui inonde notre univers: les ondes radio, infrarouges ou les rayons cosmiques... Ces milliards d'êtres quantiques incontrôlables percutent notre matou et interagissent des milliards de fois par seconde avec lui. L'état superposé "vivant ET mort" dans lequel se trouve le chat ressemble à une bulle de savon: une bulle est éphémère et est détruite à la moindre interaction. La décohérence des objets macroscopiques est quasi-immédiate. Ouf! notre logique a eu chaud...

- En fait tout est quantique mais « décohère » hyper-vite
- Jusqu'où est-on quantique « ~stable » ?
 - Molécule C60-world cup fullèrenes
- Ca peut aller très loin
 - Wigner et son « ami » : c'est la conscience humaine qui tue le chat
 - Il y a un chat vivant et un mort ds 2 univers parallèles
- Il y a aussi l'autre chat quantique = celui qu'on jette du 3 ème avec une tartine beurrée attachée sur le dos – beurre en l'air.

orbitale électronique	électron observé
nature ondulatoire	nature corpusculaire
	

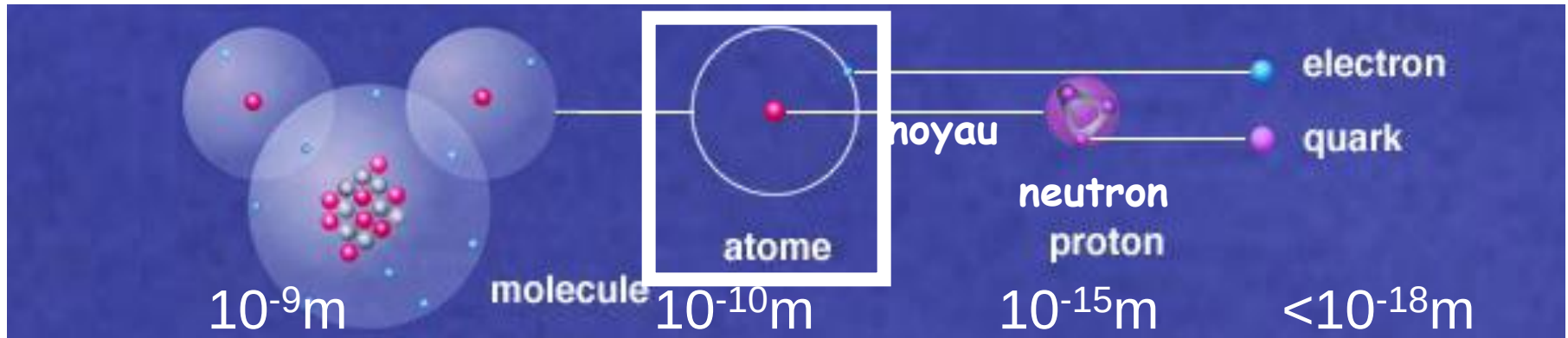
Seulement un chat fictionnel
Le chat du Cheshire chez Lewis
Carroll –dans Alice..sourire ss chat



IV-Qq sujets clés

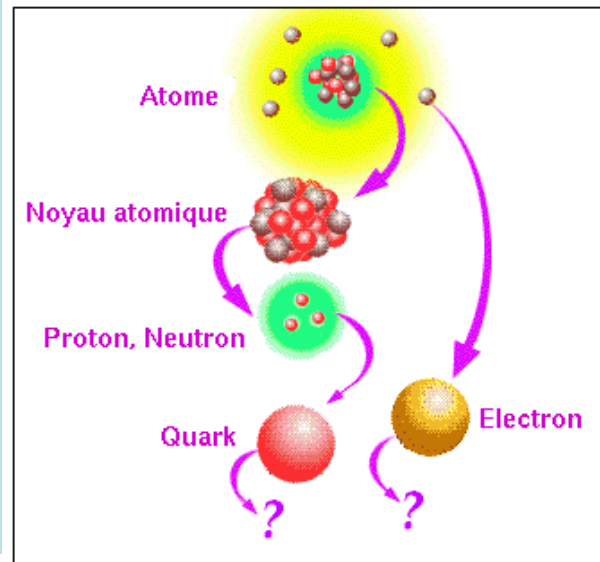
- La matière
- Les 4 forces de la nature
- La lumière
- Intrication et Décohérence
- Complexité et Emergence
- Le 'Modèle Standard'

C'est quoi la matière ?



Matière et Univers

- 4% = Matière barionique
 - Nous, notre galaxie, étoiles, etc... nuages gazeux
 - Émet rad eM (lum-vis, IR, X-rays, Gamma-rays)
 - Détectable, mesurable
- 26% = Matière noire
 - Contenue ds part avec très peu d'interaction
 - N'émet rien
 - Produit néanmoins des effets → gravit'els:
 - Les galaxies tournent + vite qu'elles ne le devraient (!)
 - Déviation de la lumière
 - Ceci permet est. de 26%
 - Hyp = part très massive, super-sym, $\text{ch}=0 \leftarrow \text{LHC?}$
 - Au passage = si LHC prouve = rencontre fasc de 2 ∞
- Reste = 70% = énergie noire : pas de part : €'ie du vide ?
 - Corresp à C'te cosmo d'E
 - Accélère l'expansion de l'univers → mesure → est. 70%



l'atome :
Démocrite - 440
Avogadro 1776 - 1856
Mendeleïev 1834 - 1907

l'électron :
Thomson 1897

le noyau :
Rutherford 1911

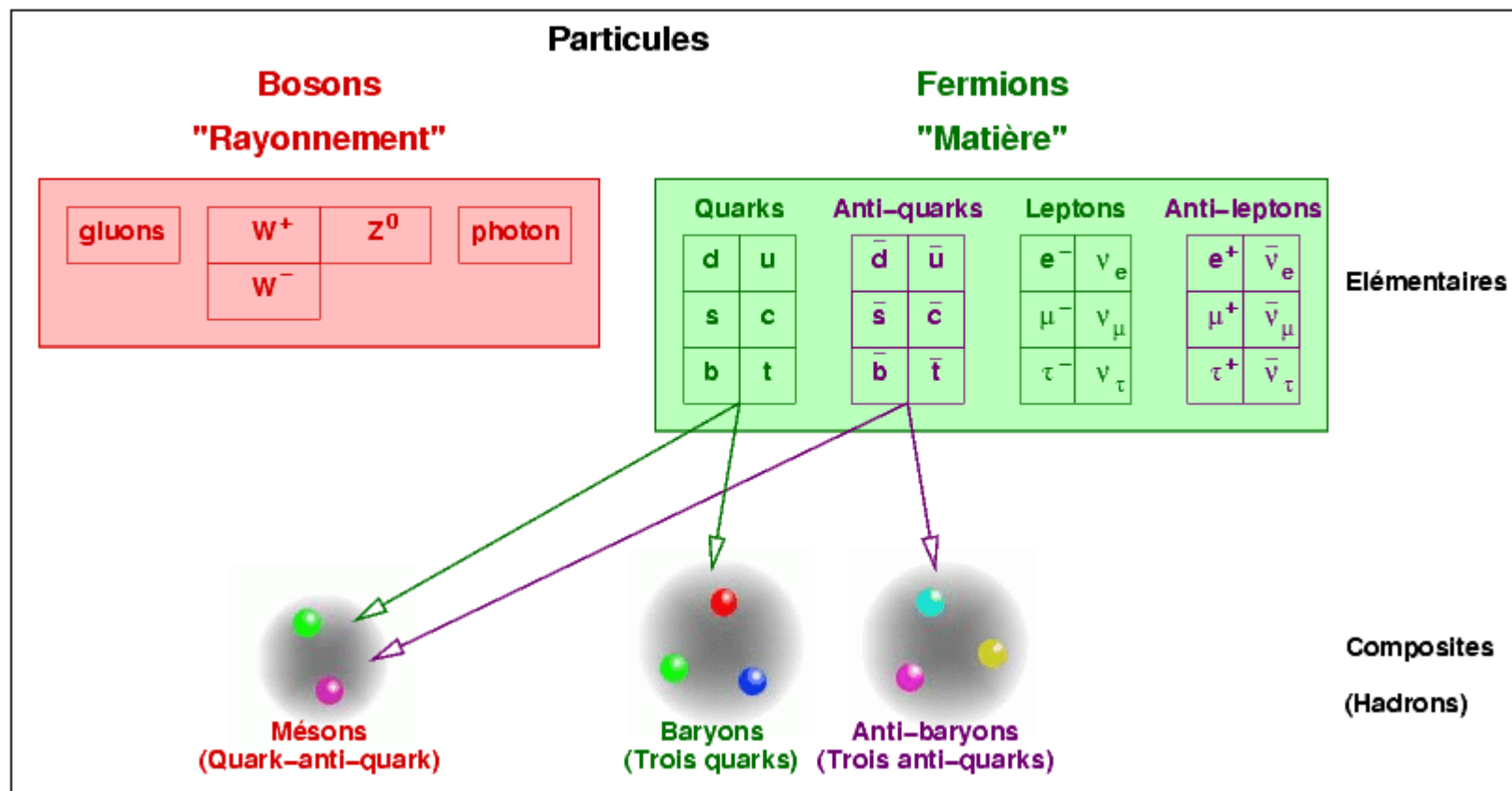
le proton :
Thomson 1916

le neutron :
Chadwick 1932

les quarks u et d :
Gellmann 1961 (Théorie)

- La masse sans masse = à développer

C'est quoi la matière ?



C'est quoi la matière ?

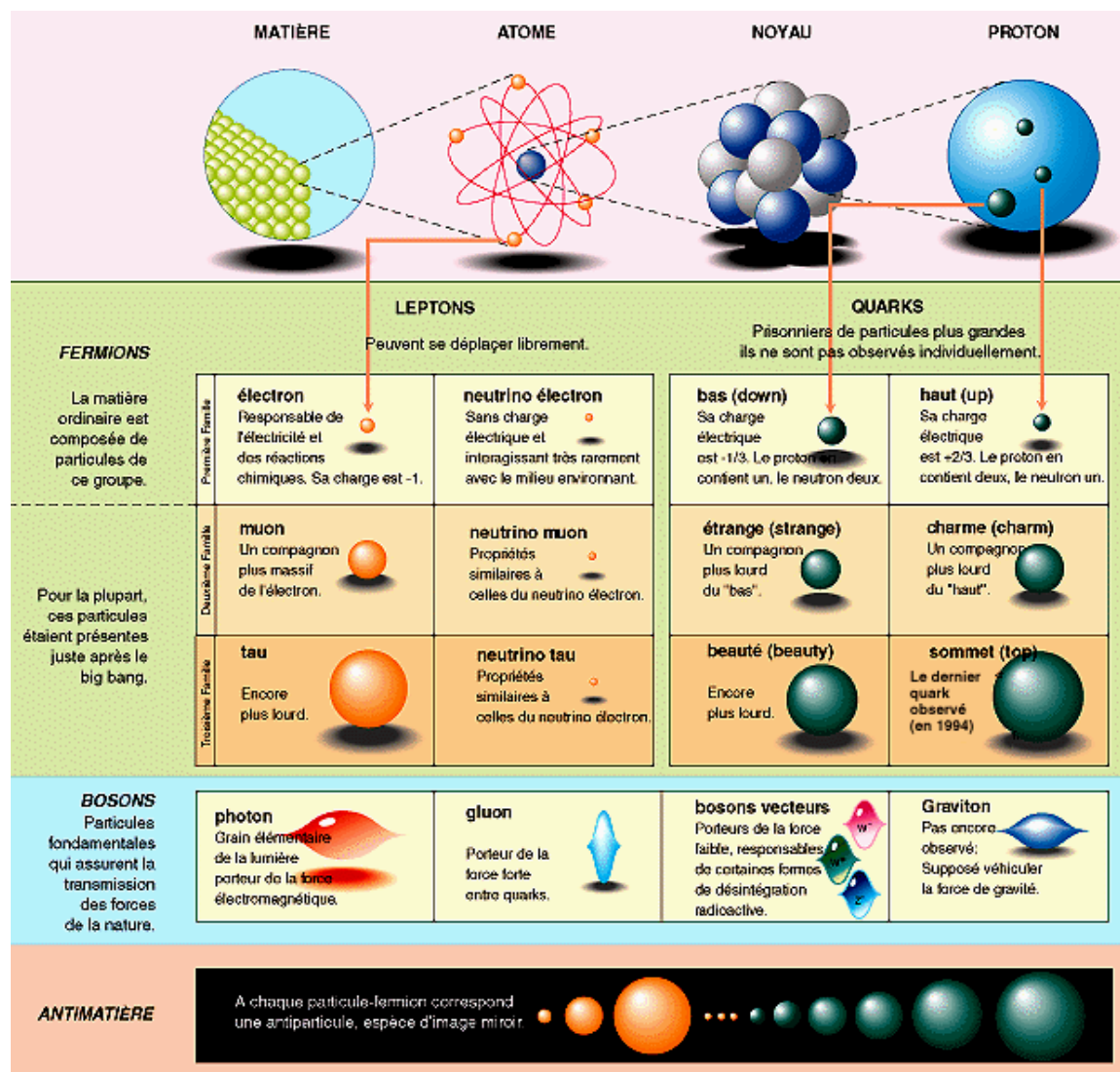
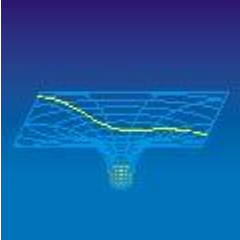
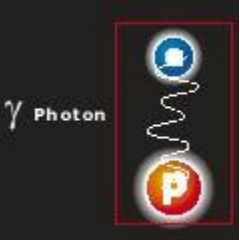


**Tableau
récapitulatif**

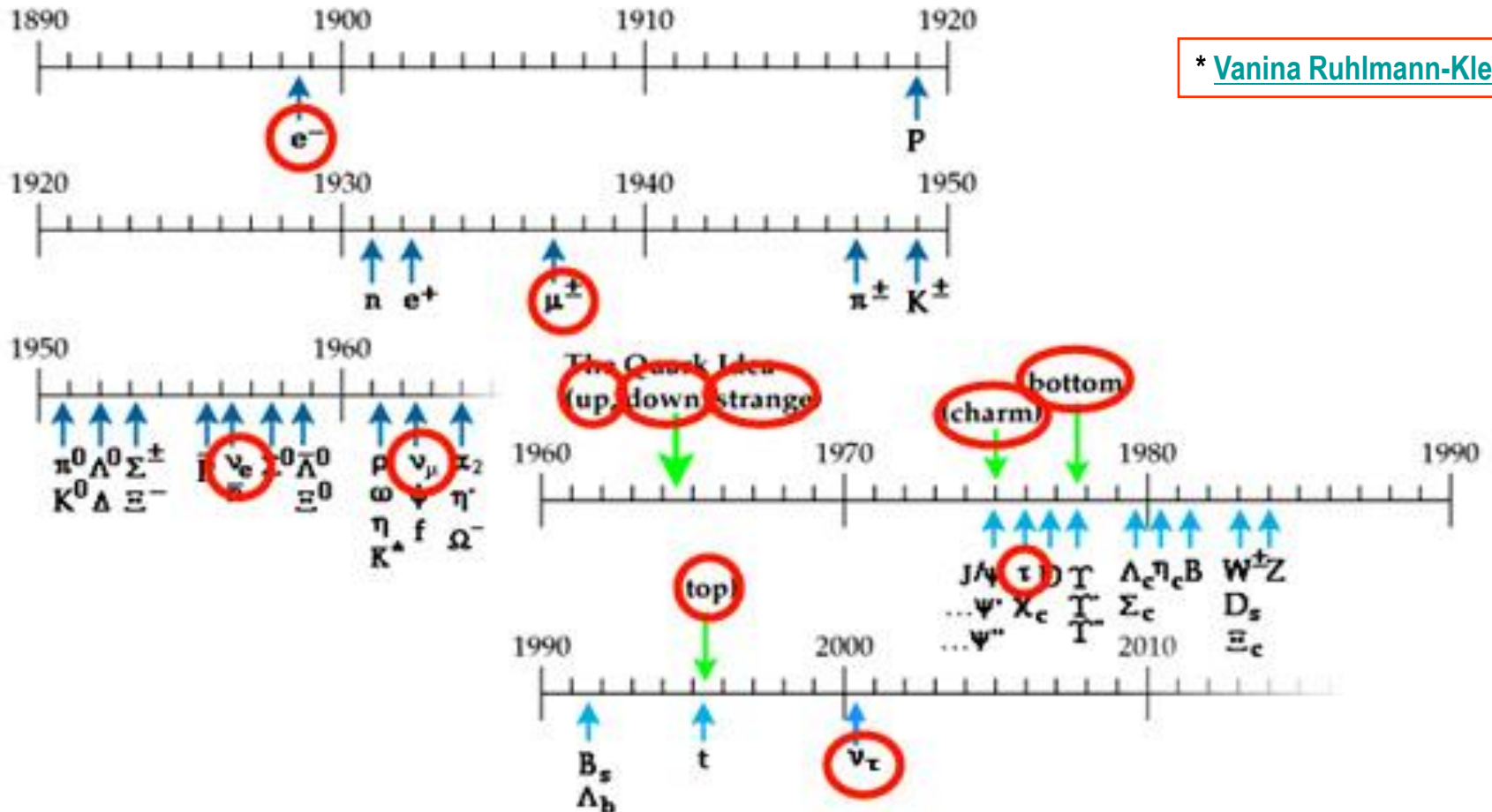
	Interaction	Fermions	Bosons	Portée	Charge spécifique	Intensité relative
	<u>Gravitationnelle</u> Pesanteur, les marées, les trajectoires des planètes...	toutes les particules	graviton (?)	infinie, décroît avec la distance	masse	10^{-36}
	<u>Electromagnétique</u> Quasiment tous les phénomènes de la vie courante	leptons chargés et quarks	photon	infinie, décroît avec la distance	électricité	10^{-2}
	<u>Forte</u> Cohésion des noyaux atomiques	quarks	gluon	10^{-13} cm, croît avec la distance	couleur	1
	<u>Faible</u> Radioactivité beta, Soleil	leptons et quarks	boson (W^+ , W^- , Z^0)	10^{-16} cm	faible	10^{-7}

•Fermions ("briques" concernées) : particules de spin 1/2 entier
Leptons : particules libres : électron, neutrino
Quarks : particules prisonnières des protons et des neutrons

•Bosons ("ciment" messenger) : particules de spin entier
 (photon, gluon, W, Z^0 , Higgs)

« La saga des particules* »

* **Vanina Ruhlmann-Kleider**



Le tableau ci-dessus résume les découvertes de particules faites au cours du temps : l'explosion à l'avènement des accélérateurs est clairement visible. La majeure partie de ces particules devait par la suite s'avérer composites et seuls 12 constituants de matière peuvent être déclarés élémentaires dans l'état actuel des moyens d'investigation expérimentaux. Il s'agit de **six leptons**, l'électron, le muon, le **tau** et les trois neutrinos qui leur sont associés, et de **six quarks**, appelés up, down, strange, charm, bottom et top. Toutes les autres particules de matière sont des assemblages de quarks (c'est le cas par exemple du proton et du neutron) ou des assemblages de quarks et d'antiquarks (par exemple, les kaons ou les pions).

Les particules

La matière ordinaire -atome --est constituée de quarks up et down, d'électrons qui constituent avec les neutrinos la 1ère famille = ces part sont stables

L'anti-matière : chaque particule possède une anti-particule identique en "tout" mais ayant des charges opposées
(Postulé par Dirac(1925)→découverte de l'anti-électron par Anderson en 1933)

Famille	Les QUARKS		Les LEPTONS	
1	 up	 down	 e - neutrino	 electon
	1956	1956	1956	1897
Les physiciens des particules ont découvert 2 nouvelles familles :				
	1974	1947	1962	1937
2	 charm	 strange	 μ - neutrino	 muon
3	 top	 bottom	 τ - neutrino	 tau
	1994	1977	2001	1974
1	 up	 down	 e - neutrino	 electon
2	 charm	 strange	 μ - neutrino	 muon
3	 top	 bottom	 τ - neutrino	 tau

Les 4 FORCES de la nature

Les forces fondamentales de l'univers

la force de gravitation : elle s'exerce sur toutes les particules proportionnellement à leur masse ;

la force électromagnétique : elle s'exerce sur les particules de matière électriquement chargées ;

la force nucléaire faible : elle concerne seulement certains quarks et leptons et est responsable des radioactivités β^- et β^+ .

la force de couleur, qui s'exerce entre les quarks, et dont dérive la force nucléaire, qui assure la cohésion du noyau atomique ;

Ces quatre forces sont décrites respectivement par quatre théories :

la relativité générale,

l'électrodynamique quantique,

la théorie électrofaible (en fait, elle associe force faible et force électromagnétique et englobe donc l'électrodynamique quantique),

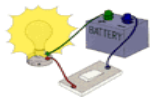
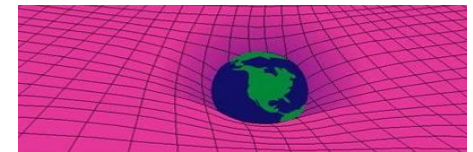
la chromodynamique quantique,

les trois dernières étant regroupées dans le « **modèle standard** ».



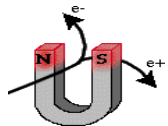
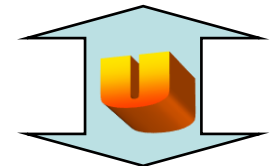
Gravitation :
Newton 1642-1727

⇒ Relativité Générale
Einstein 1915



Electricité :
Coulomb 1736-1806

⇒ l'électromagnétisme
Maxwell 1831-1879



Magnétisme :
Faraday 1791-1867

⇒ force nucléaire faible
Fermi 1933
⇒ force nucléaire forte
1967-1970

Modèle standard



Radioactivité :
Becquerel 1896
P. et M. Curie 1898

Les forces et les particules

Les BOSONS

Il y a 4 forces dans la nature qui régissent les interactions entre elles : la gravitation, la f e-M, la f nucléaire faible, et la f nucléaire forte

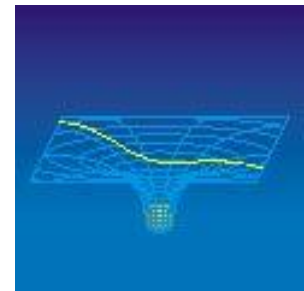
A chaque force est associée une ou plusieurs particules, les bosons : Leur rôle est de transmettre cette force → Rôle de vecteur de transmission = l

E-magnétisme

Nucléaire forte

Nucléaire faible

Gravitation



On a alors 12 nouvelles particules :

Les BOSONS

le photon γ 1905

les 8 gluons g
1975

les W^+ W^- et le
 Z^0
1983

le graviton G
???

Elles interagissent avec les autres particules :

toutes les particules
de charge + ou -

tous les quarks

toutes les
particules
de matière

trop faible pour
avoir encore été
observée...

Les particules en résumé

3 familles de 4 particules constituent la matière : les fermions **quarks + leptons**



13 particules transmettent les 4 forces : **Les BOSONS**



+ Une particule encore jamais observée manque : Le boson de Higgs, l'origine de la masse ?

Plus un très grd nombre d'instable –éphémères
-mésons
-...

les **leptons** (du grec *leptos* = léger), comme l'électron ou le **neutrino** ;
les **mésons** (du grec *mesos* = moyen), comme le méson π ;
les **baryons** (du grec *barys* = lourd), comme le proton ou le neutron
Les hadrons

Tous les mésons sont instables et possèdent une **durée de vie moyenne** très courte $\rightarrow 10^{-8}$ à 10^{-23} s

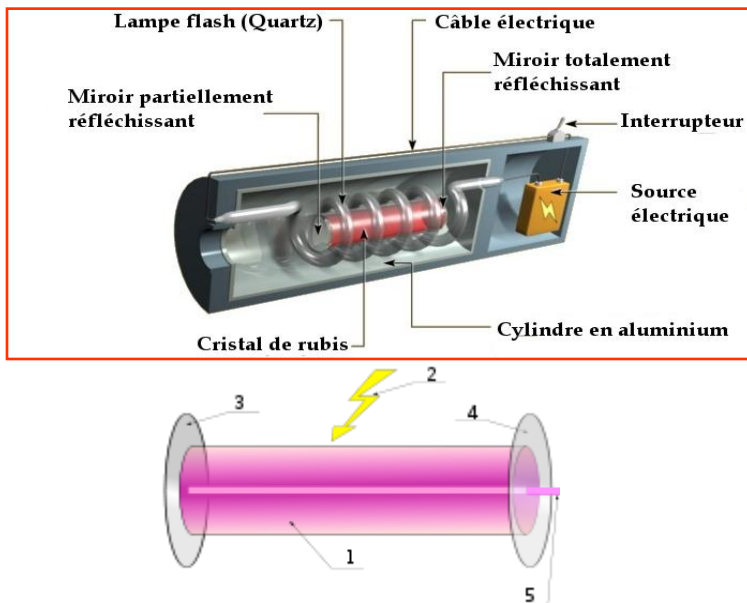
Le « modèle standard », MS

- Le **modèle standard** de la physique des particules
 - théorie qui décrit les interactions forte, faible et électromagnétique,
 - ainsi que l'ensemble des particules élémentaires qui constituent la matière.
 - Développé entre les années 1970 et 1973, c'est une théorie quantique des champs qui est naturellement compatible avec les principes de la mécanique quantique et de la relativité.
 - Force E-M et nucléaire faible → QED-EDQ
 - Force nucléaire forte → CDQ – QCD
 - interactions sont expliquées par l'échange de bosons de jauge
 - À ce jour (2008) → bon accord avec les prédictions.
 - Le modèle standard reste théorie incomplète des interact. fondamentales → manque f. de gravitation.
 - Le modèle standard prédit aussi l'existence boson de Higgs, particule qui permet de donner une masse aux autres particules de la théorie. Cette particule n'a pas encore été découverte.
- Le **modèle standard est le fruit de plus de quarante années de recherche théorique et expérimentale**.
 - Point de départ est QED, 1948 et 1949, qui est la théorie quantique et relativiste de l'interaction électromagnétique.
 - En 1954, C. N. Yang et R. Mills généralisent QED
 - 1961 = première tentative d'unification des interactions faible et électromagnétique en une théorie électrofaible par S. L. Glashow
 - Problème principal de théorie électrofaible-Glashow → particules décrites sans masse, ce qui est en désaccord avec la réalité.
 - En 1967, S. Weinberg et A. Salam modifient modèle en incorporant boson de Higgs → masse aux particules de la théorie.
 - Finalement, en 1970, S. L. Glashow, J. Iliopoulos et L. Maiani intègrent quarks à la théorie électrofaible en prédisant existence du quatrième quark, le charme.
 - Quelques années plus tard, QCD est ajoutée théorie électrofaible pour expliquer interaction forte : le modèle standard est achevé.
- Une des principales prédictions théorie électrofaible → existence de l'interaction faible par courant neutre, découverte quelques années plus tard, en 1973, ce qui confirme de manière éclatante ce modèle. L'autre prédiction très importante est l'existence des bosons de jauge W et Z0 responsables des interactions faibles. Découverte en 1983 couronne succès du modèle standard qui reste pour le moment la seule théorie valable.
 - Gde prédictibilité = l'abstraction math → induit l'existence de partic non découvertes vérifiée a posteriori = (Q:S → C, B → T)

V-Qq utilisations actuelles ou futures

- Le laser
- La Cryptographie quantique
- L'Ordi quantique
- La Télé-portation quantique

- Un laser = *amplificateur* de lumière (fonctionnant grâce à l'émission stimulée) dont la sortie est branchée sur l'entrée.
 - Amplificateur de lumière basée sur « émission stimulée » (voir 'matière')
 - Pompage optique = faire monter les atomes vers niv excité n' par flash, laser,..
 - Les atomes excités relache des Ph. en retombant en niv n (fréq wnn')
 - Si on fait passer un rayonnt de f proche de w → résonnance : un petit apport à même f donne de grands effets → grande amplification
 - Pour encore augmenter l'amplification → on boucle en partie la sortie sur l'entrée → l'autre partie sort sous forme d'un rayon de lumière cohérente (car mono-f) très concentrée
 - On peut ainsi construire un rayonnement extrêmement important, même à partir d'un rayonnement extrêmement faible (comme un seul photon émis spontanément dans la cavité).



Principe de fonctionnement du laser : 1 - milieu excitable
 2 - énergie de pompage 3 - miroir totalement réfléchissant
 4 - miroir semi-réfléchissant 5 - faisceau laser

Le laser

Transfert d'information

Téledétection

Collimation d'instrument optique (ex : télescope newton)

Granulométrie et vélocimétrie

Holographie

Lecture et enregistrement de support optique numérique (CD, DVD, Laser Disc...)

Mesure de distance (télémétrie par interférométrie)

Spectacle « son et lumière »

Télécommunications via réseaux de fibres optiques

Transmission inter-satellitaire

Vibrométrie

Désignateur laser de cibles lors d'attaques aériennes

Étude de l'atmosphère (Lidar)

Transfert de puissance

Refroidissement d'atomes par laser

Imprimerie : périphériques d'écriture de plaques offset (CtP)

Caractérisation des matériaux par ellipsométrie ou spectroscopie

Procédés laser et matériaux

Fusion superficielle de matériaux

Soudure de matériau homogène ou hétérogène

Découpe

Perçage par trépanation ou percussion

Décapage de surface

Durcissement de surface

Choc par Ablation laser (test d'adhérence à l'interface de matériaux hétérogènes...)

applications Médicales

Ophtalmologie

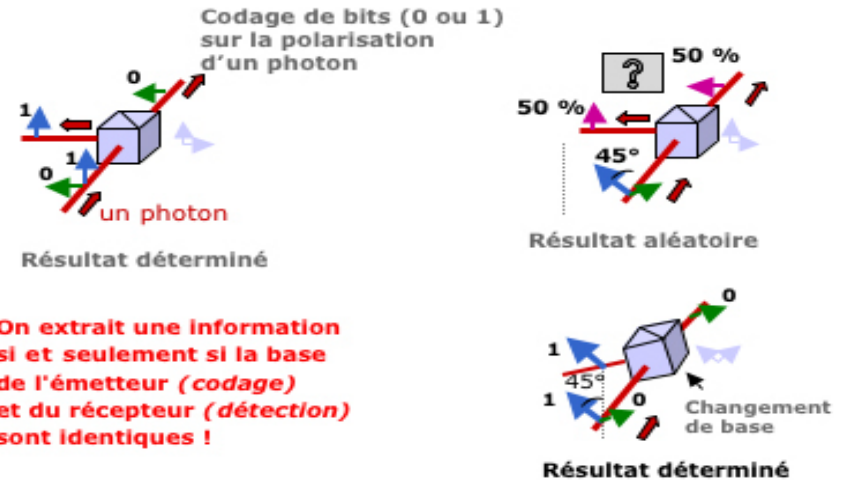
Cryptographie quantique-1

(Source Ph.GRANGIER)

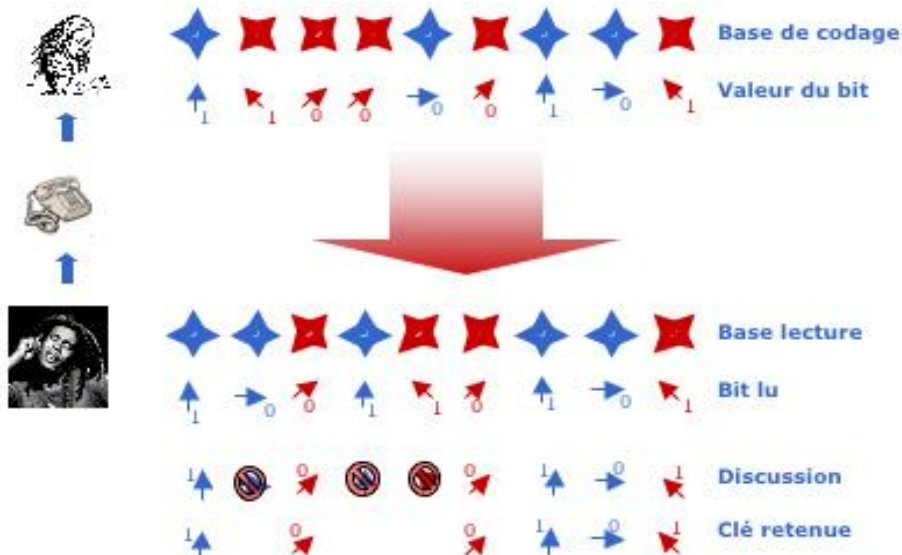
Cryptographie à clé secrète : one-time pad (G. Vernam, 1917)



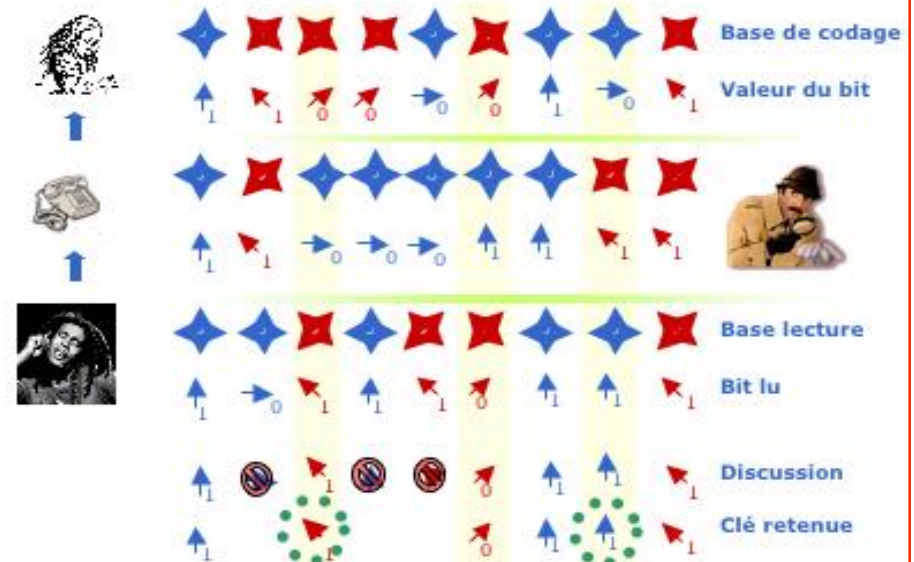
Polarisation d'un Photon Unique



Protocole « BB84 » (Bennett et Brassard, 1984)



Protocole « BB84 » (Bennett et Brassard, 1984)



Cryptographie quantique-2

(Source Ph.GRANGIER)

Cryptographie quantique : questions...

(C. Bennett et G. Brassard, 1984)

1. Si Bob révèle la base qu'il a utilisée, pourquoi Eve a-t-elle moins d'information que Bob ?
Parce qu'elle doit faire une mesure « **au moment où le photon passe** », et qu'à ce moment là elle ne connaît pas la base commune utilisée par Alice et Bob (*cette information arrive trop tard pour elle !*). On montre alors que **plus Eve acquiert d'information, plus elle crée d'erreurs dans la ligne !**

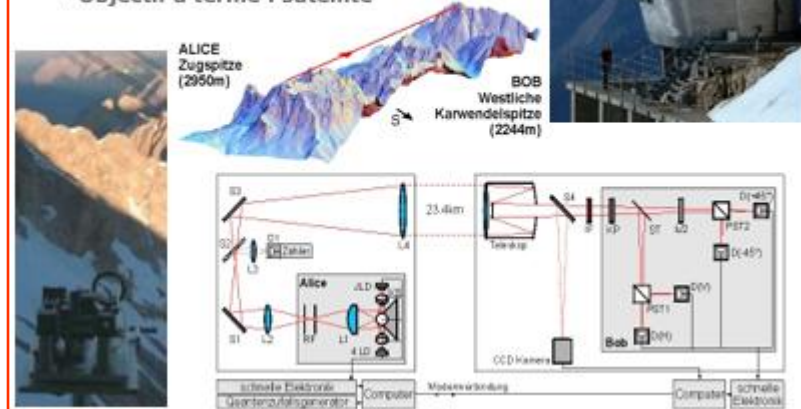
2. Comment Alice et Bob évaluent-ils les erreurs ?
Après l'échange initial, Alice et Bob **mesurent le taux d'erreur** en comparant publiquement une partie des bits échangés
-> évaluation de l'information (*peut-être*) connue d'Eve

3. Quel est le rôle des erreurs ? (*Il y a toujours des erreurs !*)
Alice et Bob « traitent » leur données avant utilisation, et **la clé finale est toujours sans erreur et parfaitement sûre**.
Les erreurs réduisent la taille de clé, mais n'affectent pas sa confidentialité : **plus il y a d'erreurs, plus la clé finale est petite, mais elle reste toujours parfaitement sûre.**

Cryptographie quantique en espace libre

C. Kurtsiefer et al, Nature 419, 450 (2002)

- * BB84, impulsions laser très atténuées
- * Distance de propagation 23.4 km
- * Objectif à terme : satellite



Potentiel industriel à moyen et long terme ?

*actuellement 2 startups commercialisent des systèmes



**IdQuantique
(Genève)**



**MagiQ Technologies
(New York)**

* Intense activité aux USA (*surtout militaire*) et au Japon (NEC, Fujitsu...)

* « Projet Intégré » Européen : 40 équipes, 4 ans, 12 M€

SECOQC : « Secure Communication based on Quantum Cryptography ».

... validation des objectifs et des méthodes en cours, conclusion fin 2008 !



Le système QKD (Quantum Key Distribution) de Toshiba utilisé dans le réseau à Vienne

A Vienne, en Autriche, des groupes de recherche européens viennent de faire la démonstration d'un échange de données avec cryptage quantique à grande échelle, le long de 200 kilomètres de fibres optiques existantes. Octobre 2008

Ordinateur quantique-1

(Source Ph.GRANGIER)

QUBITS

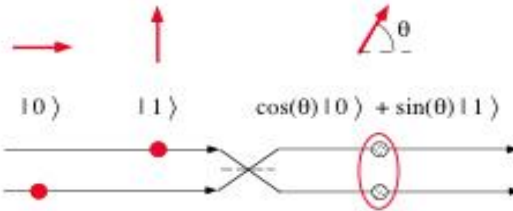
Bit Classique : 2 états 0 et 1

Bit Quantique : 2 états $|0\rangle$ and $|1\rangle$, et superpositions linéaires :

$$|\psi\rangle = \cos(\theta) e^{i\varphi} |0\rangle + \sin(\theta) e^{-i\varphi} |1\rangle$$

Exemples simples :

Photon polarisé



"Photon partagé"

-> très utile pour la cryptographie quantique

CALCUL QUANTIQUE : REGISTRES

Equivalent à un ordinateur classique "analogique" ? : non !

N bits prenant les valeurs 0 et 1

Registre : $\boxed{\varepsilon(1)} \boxed{\varepsilon(2)} \boxed{\varepsilon(3)} \boxed{\varepsilon(4)} \dots \boxed{\varepsilon(N)}$ ($\varepsilon=0$ ou 1)

Etat d'un ordinateur analogique classique : N variables continues $\varepsilon(i)$

Etat possible du ordinateur : $|\varepsilon(1), \varepsilon(2), \varepsilon(3), \varepsilon(4) \dots \varepsilon(N)\rangle$ ($\varepsilon=0$ ou 1)

Etat général du ordinateur : $\sum c_x |\varepsilon(1), \varepsilon(2), \varepsilon(3), \varepsilon(4) \dots \varepsilon(N)\rangle$

Etat du ordinateur quantique : 2^N variables complexes continues c_x !!!

Les états du ordinateur appartiennent à un espace de dimension 2^N

La plupart de ces états sont "intriqués" (perte d'individualité des qubits)

CALCUL QUANTIQUE : REGISTRES

Etat général du ordinateur : $\sum c_x |\varepsilon(1), \varepsilon(2), \varepsilon(3), \varepsilon(4) \dots \varepsilon(N)\rangle$

(superposition linéaire de tous les états possibles du registre)

- Le calcul va impliquer l'ensemble des 2^N états $|\varepsilon(1) \dots \varepsilon(N)\rangle$

-> "parallélisme quantique"

- Lorsque l'état du ordinateur est "observé", un état binaire est détecté (les probabilités des autres s'annulent : "réduction du paquet d'onde")

-> on conserve les avantages d'un calcul binaire.

Mélange très original d'ingrédients binaires et analogiques !

"Les portes peuvent être ouvertes et fermées en même temps"

LE CALCUL QUANTIQUE

L'ordinateur quantique peut effectuer certains calculs très efficacement...

- algorithme de factorisation (Shor 1994) : gain exponentiel

- algorithme de tri (Grover 1996) : gain quadratique

... mais il est extrêmement difficile à réaliser

- les états de la forme $\sum c_i |\varepsilon(1), \varepsilon(2), \varepsilon(3), \varepsilon(4) \dots \varepsilon(N)\rangle$ avec N grand sont très sensibles aux interactions avec l'environnement : "**décohérence**"

- l'interaction des "qubits" entre eux et avec l'extérieur doit être parfaitement contrôlée, pour éviter la décohérence tout en effectuant des calculs

Quelques résultats encourageants ...

- tout calcul peut s'effectuer à partir d'opérations logiques à 1 ou 2 qubits

- il est possible de concevoir des "codes correcteurs d'erreurs" quantiques

Ordinateur quantique-2

(Source Ph.GRANGIER)

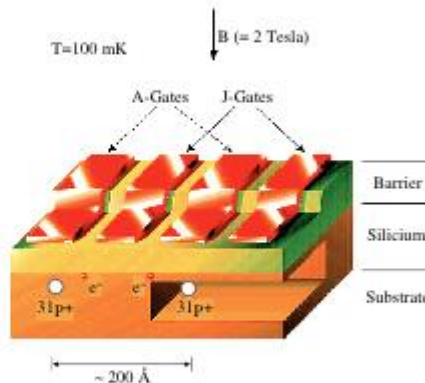
ORDINATEUR QUANTIQUE DANS DU SILICIUM

Qubit : moment magnétique d'atomes de phosphore implantés individuellement sous des électrodes

"A" : contrôle d'un qubit
"J" : couplage de 2 qubits

* Techniquement faisable

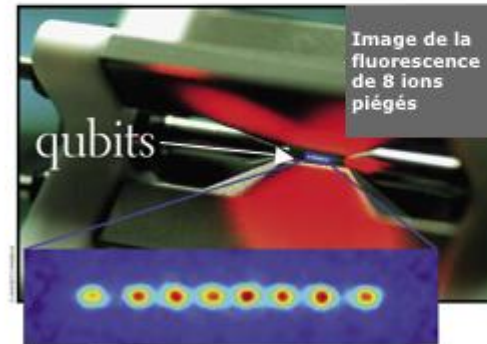
* Décohérence ???



B. E. Kane, "A silicon-based nuclear spin quantum computer", Nature, Vol. 393, p. 133, 1998

Pièges ioniques linéaires

- Confinement par des champs électromagnétiques : « chaîne » d'ions piégés
- Refroidissement laser : ions dans l'état fondamental du piège harmonique



Ions isolés dans le vide : décohérence beaucoup plus faible que dans un solide...

« Octet Quantique » (Innsbruck, 2005)



Registre quantique de 8 qubits

Contrôle du « calcul » effectué en appliquant des faisceaux lasers

Préparation et lecture de l'état :

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{8}} (|10000000\rangle + |01000000\rangle + |00100000\rangle + |00010000\rangle + |00001000\rangle + |00000100\rangle + |00000010\rangle + |00000001\rangle)$$

... Difficile à dessiner !

Conclusion

* Progrès lents mais incontestables des idées et des techniques en direction d'une utilisation de la mécanique quantique en cryptographie.

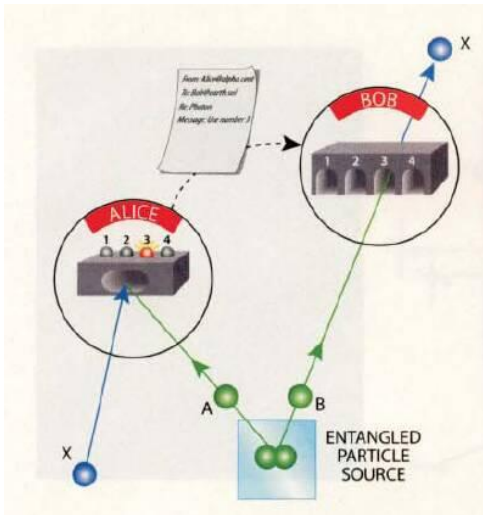
* L'ordinateur quantique est un système encore plus "étrange" :
-> par principe ne peut pas fonctionner à l'échelle macroscopique, systèmes microscopiques difficiles à contrôler...
-> "échelle mésoscopique" ?

* Objectivement, un ordinateur quantique utilisable et "compétitif" n'est pas pour les toutes prochaines années.

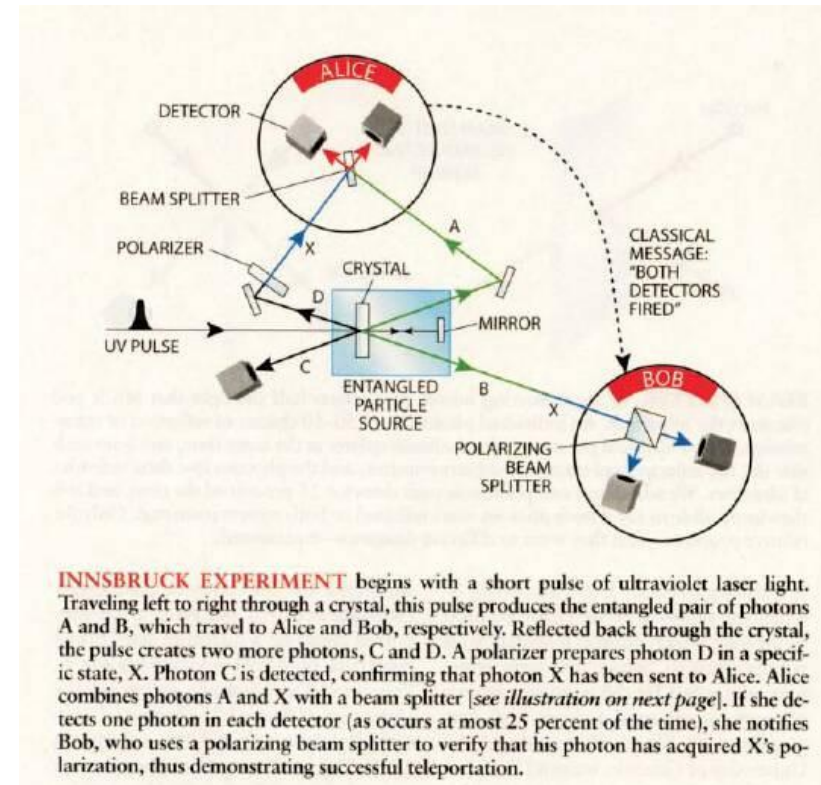
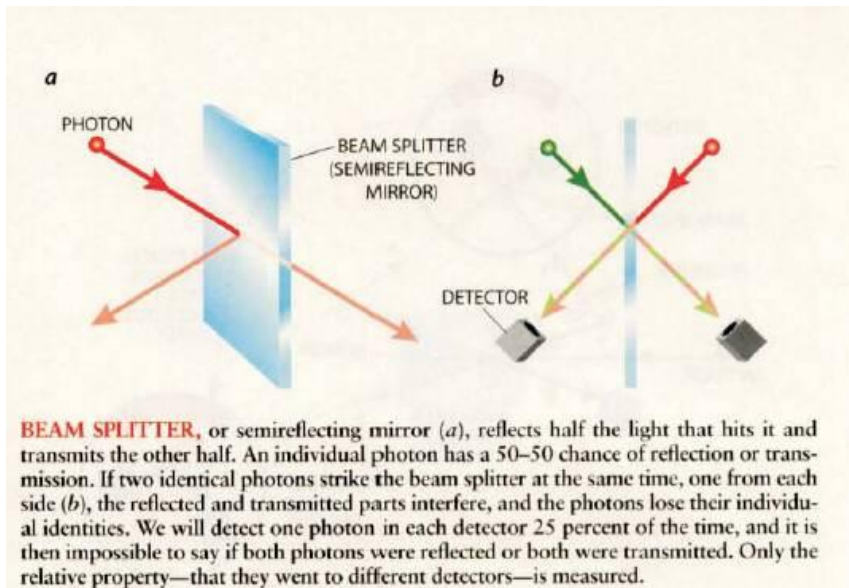
Mais ... exploration de nouveaux problèmes ouverts en
-> mécanique quantique (« principes », théorie, expériences)
-> théorie de l'information (algorithmes, corrections d'erreurs)
Nouveau langage « interdisciplinaire » commun à tous les qubits !

Télé-portation quantique

Source Scientific American



- PRINCIPE de l'expérience :
- X est le P cible
- On génère une paire de P intriqués A,B dont l'un A est amené en corrélation avec x
- De ce fait il calque son état sur X et le transmet à B
- l'arrivée tout se passe comme si X avait été téléporté



VI-Les acteurs et expériences clés

Source Dan Styer A brief history of quantum mechanics - amendé

- Galilée	1604	principe de relativité, concept de v instantanée
- I.Newton	1666	invente la mécanique classique et les outils math nécessaires
- A.Volta	1800	invente la pile voltaïque ou batterie électrique
- J.Young	1805	les fentes qui jetèrent l'obscurité sur la lumière
- M.Faraday	1838	découvre les rayons cathodiques (entre autres) expérimentateur de génie
- L-A.Ampère		théorise les exp'ces du sus-nommé
- J.C. Maxwell		ramasse la mise en unifiant l' electro-magnétisme ds une théorie fort élégante et précise
- L.Boltzmann	1877	père de la méca statistiq -précurseur de complexité ? suggère états d'E 'discrets' : se suicide par incompréhension
- W.Crookes	1879	le tube =courbe les R-cath par champ magn → pas lumière
- J.Balmer	1885	Spectre de l'H → 4 bandes
- H.Hertz	1892	l' Ω des ondes, R-cath traversent la matière (Or= Au)
- H.Becquerel	1896	découvre la radioactivité → rayons α, β, γ
- J.J.Thomson	1897	invente l'é → modèle 'plum pudding'
- M.Planck	1900	invente le quantum et sa constante → $E=h\nu$, grace au 'corps noir'
- A.Einstein	1905	explique l'effet photoélectrique (entre autres) : la lumière est quantique
- E.Rutherford	1907	découvre le noyau et sa charge +
- N.Bohr	1913	propose l'atome de BOHR – type syst solaire + niv. d'énergies / niv orbites
- Stern & Gerlach	1922	découvrent le spin de l'é
- L de Broglie	1923	propose l'onde associée de long $\lambda=h/mv$
- W.Pauli	1925	énonce principe d'exclusion → fermions individualistes vs bosons grégaires
- E.Schrodinger	1926	l' Ω de l'équation de la « fonction d'onde » : probabilité de présence
- L.Pauling	1928	M-Q appliquée à la chimie = liaisons chimiques déduites
- W.Heisenberg	1932	formalise l'expression math = pb à 2 é

LES EXPERIENCES CLES

- Fentes d'Young	1805	la lumière est une onde
- La radioactivité	1896	H. Becquerel par hasard (N1903)
- Les rayons cath	1897	tube de Thomson → l'é
- Le corps noir	1850/00	pb de calcul du rayonnmt → petit nuage
- Effet photo-é	1905	La lumière est aussi quantifiées (N1922)
- Goutte d'huile	1909	Millikan = quantification de la charge électrique (N1923) charge de l'é (visqueusement sous-évaluée..)
- Exp de Rutherford	1911	invalide le plum-pudding→ noyau concentré , le reste est vide
- Stern & Gerlach	1920	le spin est une caract des part (fermions = ½ entier—bosons = entier)
- L'é: aussi une onde	1927	Davisson et Germer → nature ondul de l'é
- Le neutrino	1955	C.Cowan & F.Reynes le découvre
- Effet HALL	1980	version quantique , par K.von Kitzing
- Intrication quantique	1982	A. Aspect à Orsay (Ph.Grangier) = Dieu joue bien aux dés et la lune n'est peut-être pas là ..

VII-Ils ont dit

- " Eppur, si muove!" Galilée
- « Quiconque n'est pas choqué par la théorie quantique ne la comprend pas. » N.BOHR
- Lors d'un débat, Niels Bohr se disputait avec [Albert Einstein](#) à propos de la réalité de la physique quantique. À un moment donné Einstein, excédé, jeta à Niels Bohr : « Dieu ne joue pas aux dés ! », ce à quoi Bohr répondit : « Qui êtes-vous Einstein, pour dire à Dieu ce qu'il doit faire ! »
- « *Shut up and calculate!* » (« Ferme-la et calcule! »). (R.Feynman)
- Physics is like sex. Sure it may have some practical results, but that's not why we do it R. Feynman
- "I'm smart enough to know that I'm dumb." Richard Feynman
- " Les poètes sont les physiciens du sens. Ils prennent les mots pour instrument d'investigation de l'au-delà des mots. Nature universelle dont l'univers physique n'est qu'une des facettes." Basarab Nicolescu- physicien des particules élémentaires, in " Théorèmes Poétiques.
- *"La science est une chose merveilleuse...tant qu'il ne faut pas en vivre A Einstein*
- Il est absolument possible qu'au delà de ce que perçoivent nos sens se cachent des mondes insoupçonnés. A Einstein
- " Les difficultés qu'éprouvent les physiciens et bien d'autres personnes à accepter la réalité quantique me rappellent la façon dont réagissent les enfants lorsqu'ils sont confrontés à un concept qu'ils n'ont pas encore assimilé." [L'Univers Quantique] Heinz Pagels
- " A l'échelle cosmique, l'eau est plus rare que l'or." Hubert Reeves
- " En physique comme en toute autre science, la logique seule ne règne pas, il y a aussi la raison." Max Planck
- Ce n'est pas le moindre charme d'une théorie que d'être réfutable, F. Nietzsche.
- " Il n'y a pas que les visionnaires qui créent." LOUIS DE BROGLIE
- *"A la triple questions : Qui suis-je ? D'où je viens ? Et où vais-je ? Je réponds, je suis moi, je viens de chez moi et j'y retourne"* Pierre DAC
- " Si la science ne s'intéresse pas aux choses délirantes, elle risque fort de passer à côté de choses intéressantes." Antoine Labeyrie (ast)
- " Ce que nous observons, ce n'est pas la Nature en soi, mais la Nature exposée à notre méthode d'investigation." W. Heisenberg
- *"Le soleil, avec toutes ces planetes qui gravitent sous sa gouverne, prend encore le temps de murir une grappe de raisin, comme s'il n'y avait rien de plus important. " Galilee*
- "On fait la science avec des faits comme on fait une maison avec des pierres ; mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison." [Henri Poincaré]
- "Je ne cherche pas, je trouve" Pablo Picasso
- A moins d' avoir beaucoup bu, on ne peut distinguer les photons à l' oeil nu. (Jean Yanne) (la grenouille le peut , elle) 89

Et aussi....

- " Si la vie est complexe, c'est parce qu'elle a une partie réelle et une partie imaginaire." Marius Sophus Lie Celui là même des « groupes de Lie » qui sous-tendent la théorie de cordes , rien moins ! Mathématicien norvégien (1842-89)
- Pour qu'une technologie réussisse, la réalité doit prendre le pas sur les relations publiques, car la nature ne peut pas être dupée." R. Feynman → commission d'enquête sur perte de la navette CHALLENGER (86)
- "For a successful technology, reality must take precedence over public relations, for nature cannot be fooled."
- La vérité ne triomphe jamais, mais ses adversaires finissent par mourir." Max Planck
- J'affirme que le sentiment religieux cosmique est le motif le plus puissant et le plus noble de la recherche scientifique. A.Einstein
- Une expérience scientifique est une expérience qui contredit l'expérience commune. Gaston Bachelard
- La théorie du chaos a été inventé par les scientifiques qui paniquaient à l'idée que le public commençaient à comprendre les anciennes. Mike Barfield
- Nobody feels perfectly comfortable with it. Murray Gell-Mann
- Les objets quantiques sont dingues, mais au moins, ils sont tous dingues de la même manière. Richard Feynman
- I can safely say that nobody understands quantum mechanics. R.Feynman
- Mathematics, rightly viewed, possesses not only truth, but supreme beauty a beauty cold and austere, like that of sculpture, without appeal to any part of our weaker nature, without the gorgeous trappings of painting or music, yet sublimely pure, and capable of a stern perfection such as only the greatest art can show. The true spirit of delight, the exaltation, the sense of being more than Man, which is the touchstone of the highest excellence, is to be found in mathematics as surely as in poetry. --BERTRAND RUSSELL, Study of Mathem
- It is not at all natural that "laws of nature" exist, much less that man is able to discover them E.Schrödinger
- « Quand j'entends « chat de Schrödinger », je sors mon revolver » S.Hawkins
- Quiconque n'est pas choqué par la mécanique quantique ne la comprend pas N.BOHR

Et encore

- " Les histoires de soucoupes volantes résultent plus probablement des caractéristiques irrationnelles connues de l'intelligence terrestre que des efforts rationnels inconnus d'une intelligence extra-terrestre." R.Feynman
- " Le temps, c'est ce qui empêche tous les événements de l'Univers de se produire en même temps." John Wheeler
- Il est plus difficile de désagréger un préjugé qu'un atome." Albert Einstein
- Il n'est rien qui fasse obstacle à l'infinité des mondes." EPICURE
- Un mathématicien qui n'est pas aussi quelque peu poète ne sera jamais un mathématicien complet." Karl Theodor Wilhelm Weierstrass . Celui là même du **THÉOREME DE BOLZANO WEIERSTRASS** , dont l'énoncé ci-après est d'une grande poésie ,jugez-en : 'Soit (*un*) une suite **bornée** de réels. Alors, on peut extraire de (*un*) une sous-suite convergente'.

- In [science fiction](#), the **Three Laws of Robotics** by [Isaac Asimov](#), from his book "I,robot"
 - A robot may not injure a human being or, through inaction, allow a human being to come to harm.
 - A robot must obey orders given to it by human beings, except where such orders would conflict with the First Law.
 - A robot must protect its own existence as long as such protection does not conflict with the First or Second Law.

- [Arthur C. Clarke](#) formulated the following three "[laws](#)" of [prediction](#):
 - When a distinguished but elderly scientist states that something is possible, he is almost certainly right. When he states that something is impossible, he is very probably wrong.
 - The only way of discovering the limits of the possible is to venture a little way past them into the impossible.
 - Any sufficiently advanced technology is indistinguishable from magic.

Bon scénario de « complexité »

Agents banalisés

3 lois simples

Grande quantité d'agents et d'interaction

→ Diversité de situations

→ Emergence de la citoyenneté et guerre de domination