

Chaire de Physique Quantique - Cours 2014-2015

Cinquante ans de révolutions en physique atomique et en optique quantique

Notes de cours (documents Pdf) et vidéos des leçons sur le site internet du Collège de France

Sept leçons et cinq séminaires du 10 Mars au 14 Avril 2015

Leçon de clôture de la chaire le 14 Avril 2015 à 11h

Sujet du cours de l'année

Le cours de cette année est le dernier de la chaire de physique quantique, clôturant 15 années d'enseignement portant sur l'optique et l'information quantiques.

Il s'agit d'une rétrospective présentant les principales avancées de la physique atomique et de l'optique au cours des cinquante années de ma carrière de chercheur. Cette période a connu de profondes révolutions dans ces domaines de la physique, largement dues à l'invention au début des années 1960 du laser et des développements que cette source de lumière a connus au cours des décennies qui ont suivi.

Alors que la physique atomique était considérée par certains dans les années 1950 comme une science « achevée », largement assimilée à la spectroscopie classique, et dans laquelle peu de surprises étaient attendues, l'arrivée des lasers a considérablement renouvelé le domaine en faisant de la lumière non seulement une sonde d'exploration de plus en plus précise des niveaux d'énergie des atomes et des molécules, mais aussi un instrument puissant de manipulation de ces systèmes, permettant de les préparer et de les étudier dans des situations « exotiques », ouvrant la voie, dans différents domaines, à une physique nouvelle. Les cours des années passées ont décrit certaines des recherches récentes les plus importantes. Ce cours de conclusion se propose de revenir en amont sur les évolutions qui ont conduit aux derniers développements, de parler des progrès dans des domaines que je n'ai pas eu l'occasion d'aborder dans mes cours passés, et de s'interroger sur l'avenir possible de cette physique.

Plan du Cours 2014-2015

- I. Grandes évolutions de la physique atomique et de l'optique au cours des cinquante dernières années (10 Mars 2015)
- II. Manipulation des atomes par la lumière: les atomes froids (17 Mars 2015)
- III. Les gaz quantiques ultra-froids: condensats de Bose-Einstein et gaz de Fermions dégénérés (24 Mars 2015)
- IV. Contrôle de particules quantiques isolées: atomes et photons (31 Mars 2015)
- V. La passion de la précision et la mesure du temps (7 Avril 2015)
- VI. Observation des phénomènes ultra-rapides et lumière extrême (14 Avril 2015-9h30)
- VII. Leçon de clôture: la physique atomique et les révolutions technologiques du XX^{ème} siècle (14 Avril 2015-11h)

Les séminaires de l'année 2014-2015

10 Mars 2015: Exploring the quantum with ion traps

R.Blatt,
Université d'Innsbruck, Autriche

17 Mars 2015: Hydrogen, Quantum Electrodynamics and the Proton Size Puzzle

T.Udem,
Institut Max Planck d'Optique Quantique, Garching, Allemagne

24 Mars 2015: Les états noirs: de l'optique quantique au refroidissement d'atomes et de molécules

C.Cohen-Tannoudji,
Collège de France et ENS, Paris

31 Mars 2015: Quantum Theory of the Classical I: Decoherence and the Randomness of Quantum Jumps

W.Zurek,
Los Alamos National Laboratory, Albuquerque, Etats-Unis

7 Avril 2015: Quantum Theory of the Classical II: Quantum Darwinism and Objective Reality

W.Zurek,
Los Alamos National Laboratory, Albuquerque, Etats-Unis

1^{ère} Leçon:

Grandes évolutions de la physique atomique et de l'optique au cours des cinquante dernières années

I-A: Une brève histoire des cinq dernières décennies

I-B: Les progrès de la physique atomique mesurés par des gains d'ordre de grandeurs dans différents domaines

I-C: Un concept unificateur: superpositions d'états et interférences quantiques

I-D: Ouverture vers d'autres branches de la physique

I-E: L'instrument de ces révolutions: quelques caractéristiques de la lumière laser

I-A: Brève histoire des cinq dernières décennies

La physique atomique à la fin des années 1950

La structure des atomes et des molécules simples était bien comprise théoriquement (physique quantique et méthodes d'approximations de type variationnelles) et étudiée expérimentalement par la spectroscopie optique et microonde (RMN). La structure fine et hyperfine des états atomiques (interactions entre spin électronique et moment magnétique orbital et interactions avec les spins nucléaires) était également explorée en détail.

L'électrodynamique quantique (perturbations des spectres atomiques liées aux processus virtuels d'émission et d'absorption de photons dans le vide) était également comprise et les expériences confirmaient les effets attendus (Lamb-shift et $g-2$), avec une précision encore modérée.

Le mariage des méthodes de la RMN avec l'optique conduisit dans les années 1950 à l'invention de la double résonance et du pompage optique, un premier exemple de la manipulation des atomes par la lumière.

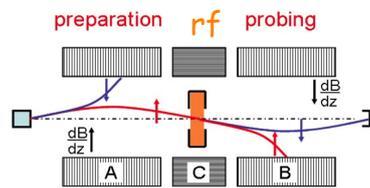
La double résonance (DR) (Brossel et Bitter, 1950)

Comment était détectée la résonance magnétique avant 1950?

Méthode des jets atomiques:
déttection directe des atomes



Rabi

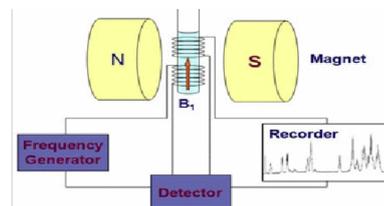


Déttection destructive

RMN: détection du rayonnement radiofréquence des atomes



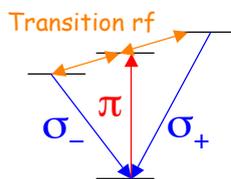
Bloch



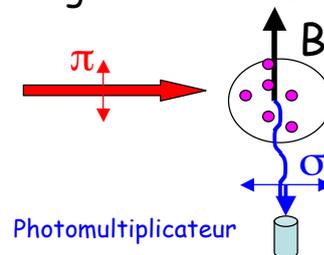
Purcell

Méthode peu sensible à température ordinaire (en champ faible)

Double résonance: détecter la transition entre états excités par un changement de polarisation de la lumière émise: gain de sensibilité



Brossel

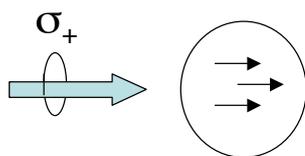


Le pompage optique (PO) (Kastler et Brossel, 1950)

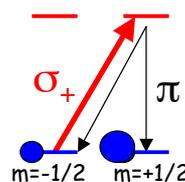
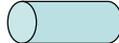
Extension de la double résonance aux états fondamentaux des atomes



A.Kastler



Lorsque le gaz est orienté, il devient transparent pour la lumière de pompage



Après quelques cycles d'absorption-fluorescence, les atomes sont pompés dans l'état $m=+1/2$: orientation du moment magnétique atomique

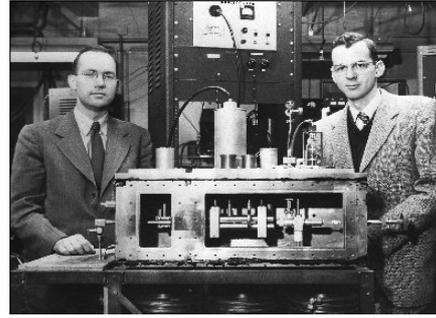
La lumière change la distribution des populations atomiques: premier exemple de manipulation des atomes par la lumière

Un gain de sensibilité énorme pour la RMN en phase gazeuse: la polarisation atomique atteint $\sim 100\%$ par PO alors qu'elle est très petite à température ordinaire dans des champs magnétiques faibles (facteur de Boltzman)

Le pompage est contrecarré par un champ rf résonant sur des transitions entre sous-niveaux: spectroscopie hertzienne des états fondamentaux par PO et des niveaux excités par DR. Un gain de précision important pour la mesure des facteurs de Landé et des structures fines et hyperfines (effet Doppler négligeable)

Les années 1950 annoncent l'avènement des lasers

Le maser à ammoniac
(Townes et Gordon, 1954)



La théorie du "maser optique" (Townes et Schawlow, 1958)



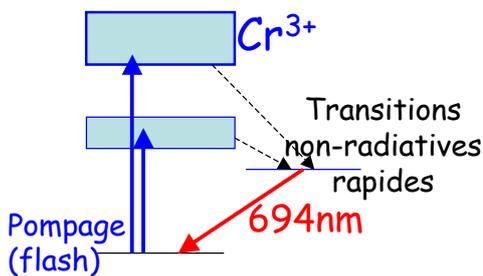
Charles Townes
(1915-2015)



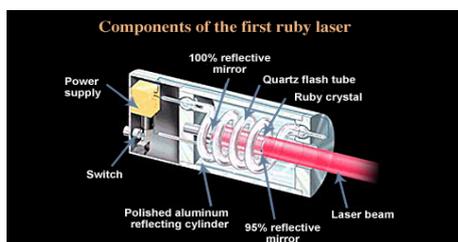
Arthur Schawlow
(1921-1999)

Les années 1960: débuts du Laser

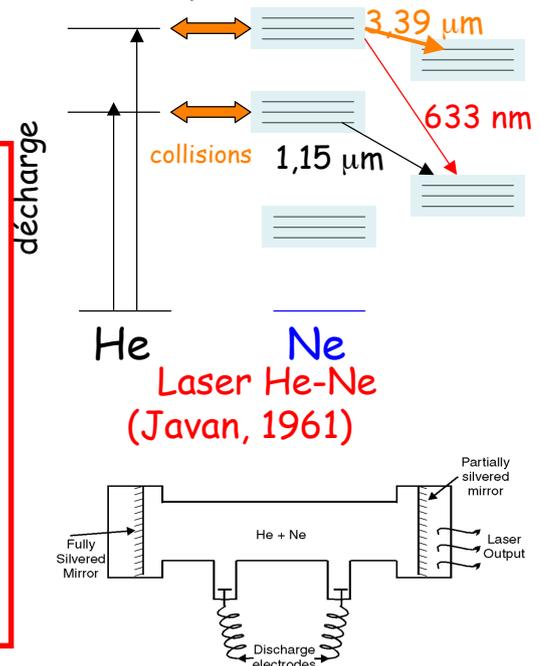
Les 1^{ers} lasers, extensions à l'optique des masers microonde des années 1950, avaient des fréquences fixes, correspondant à des transitions atomiques particulières pour lesquelles un pompage efficace était possible.



Laser à Rubis
(Maiman, 1960)



Spectroscopie par coincidence avec raies atomiques ou moléculaires: exemple de la raie du méthane à 3,39mm (88THz)



Laser He-Ne
(Javan, 1961)



P. Franken

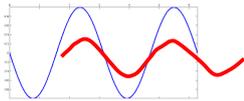
Les années 1960: débuts de l'Optique Non-Linéaire



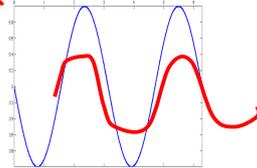
N. Bloembergen

La grande intensité des lasers de fréquence fixe permet les premières observation d'effets d'optique non-linéaire dans des cas non résonnants (dispersifs) ou, s'il y a coïncidence accidentelle entre laser et fréquences moléculaires, dans le cas résonnant.

Génération d'harmonique (milieu non résonnant transparent):



A faible intensité de E , le dipôle atomique D suit linéairement



A forte intensité de E , D sature et est écrété: apparition d'harmoniques

Dans un milieu dense, les dipôles induits rayonnent de façon cohérente un champ harmonique (si condition d'accord de phase remplie)

Grande intensité: $E \sim E_{\text{atom}}$ ou $D.E \sim \hbar\omega_{\text{atom}}$ (correspond à $\sim 10^{13} \text{ W/cm}^2$)

Symétrie: pour atomes ayant la symétrie d'inversion par rapport au noyau, seulement harmoniques impairs. Harmonique pairs avec atomes dans cristaux créant un environnement atomique non symétrique par inversion.



Ch. Bordé

Autre effet d'optique non-linéaire: L'absorption saturée



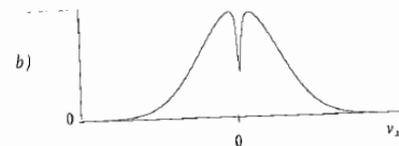
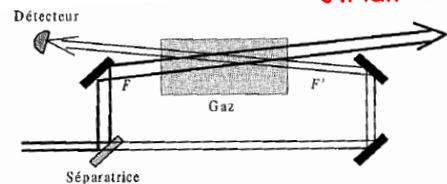
J. Hall

Propagation dans un gaz de 2 faisceaux laser le long de Oz, de directions opposées et de même fréquence

Fréquences vues par un atome de composante de vitesse v_z le long de Oz:

$$\omega_+ = \omega_L - \frac{\omega_L v_z}{c} \quad ; \quad \omega_- = \omega_L + \frac{\omega_L v_z}{c}$$

Les atomes de vitesse telle que $\frac{\omega_L |v_z|}{c} > \Gamma$ interagissent avec un seul des 2 faisceaux (Γ : largeur naturelle). Les atomes de faible v_z interagissent avec les deux faisceaux à la fois. Si le faisceau + est intense et le faisceau - de faible intensité (sonde), l'absorption de ce dernier est complètement supprimée pour les atomes de $v_z=0$. Il y a pour la sonde un creux d'absorption de largeur de l'ordre de Γ au centre du profil Doppler.

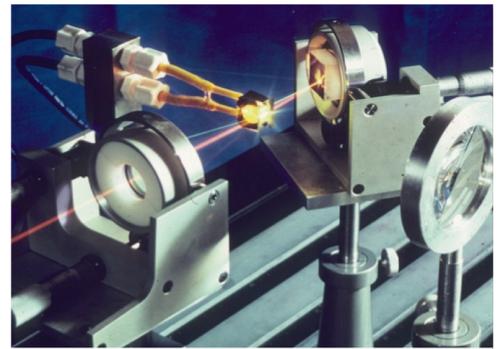
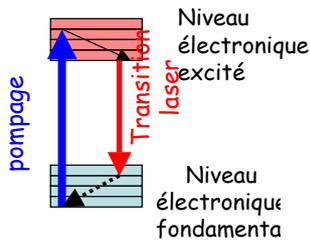


La condition de saturation $D.E > \hbar\Gamma$ demande des intensités beaucoup plus faibles que pour la génération d'harmonique

Effet utilisé pour éliminer la largeur Doppler et stabiliser des lasers (par exemple laser He-Ne sur transition moléculaire de CH_4)

Les années 1970: lasers accordables et spectroscopie de haute résolution

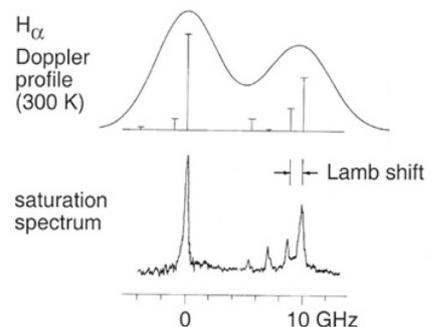
L'avènement des lasers à colorants pompés par un laser de fréquence fixe (laser à N₂ ou Ar)



Des éléments dispersifs dans la cavité (réseau, filtre d'interférence) permettent de balayer la longueur d'onde

Sources monochromatiques intenses balayables en fréquence:

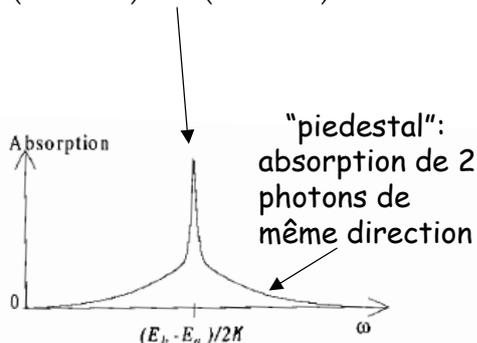
Spectroscopie par absorption saturée de l'hydrogène avec résolution optique du Lamb-shift (Hänsch et Schawlow-1972)



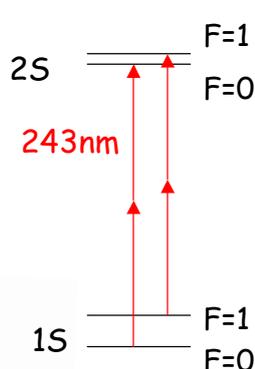
Les années 1970: spectroscopie à 2 photons sans effet Doppler (Grynberg, Cagnac, Chebotaiev)

Absorption non-linéaire de deux photons de même fréquence se propageant dans des directions opposées: suppression de l'effet Doppler:

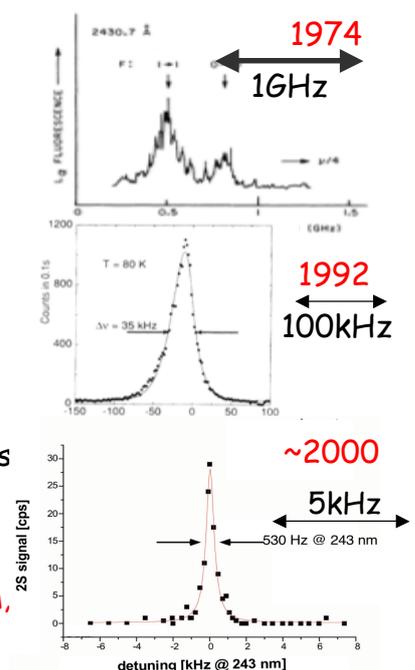
$$\omega_a = \omega(1 - v/c) + \omega(1 + v/c) = 2\omega \quad (\nabla v)$$



Pour la transition 1s-2s de H, laser à colorant (486nm) doublé en fréquence. D'abord lasers en impulsion, puis continus....



Progrès de la spectro à 2 photons de l'Hydrogène (T.Hänsch, F.Biraben); (Séminaire T.Udem, 17 Mars).



Les années 1980: refroidissement atomique, optique quantique & premières observations de systèmes quantiques individuels

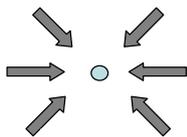
Les progrès des lasers accordables (colorants, diodes à semi-conducteurs) ont permis le développement de méthodes en germe dans la décennie précédente. L'idée de manipuler les degrés externes des atomes par la lumière remonte aux années 1960 (travaux d'Ashkin) et 1970 (propositions par Hänsch, Schawlow, Dehmelt et Wineland du refroidissement Doppler).

L'optique quantique consistant à étudier les propriétés statistiques des photons émis par des sources classiques ou par des atomes se base sur les travaux théoriques des années 1960 (R.Glauber notamment).

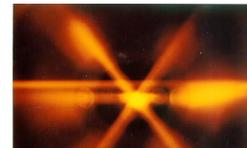
L'étude des systèmes quantiques isolés est la suite naturelle des expériences pionnières de Dehmelt sur un électron piégé dans les années 1960 et 1970.

Les débuts de l'Electrodynamique en Cavité (atomes interagissant un à un avec des photons dans une cavité) sont la suite des expériences des années 1970 sur les atomes de Rydberg préparés par lasers.

Refroidissement et piégeage des atomes et des ions



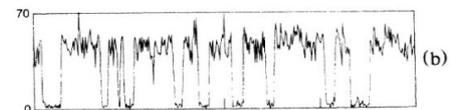
Mélasse optique et piège magnéto-optique



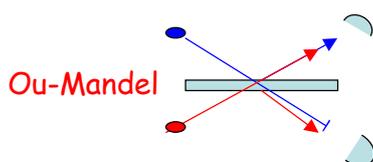
Premières observations de particules quantiques individuelles



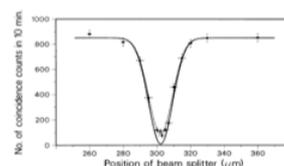
Observation d'ion isolé et sauts quantiques



Optique quantique et corrélations de photons

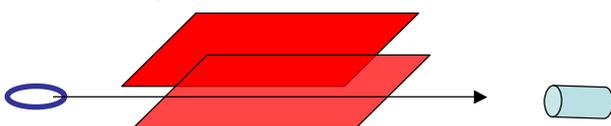


Interférence de deux photons identiques sur une lame semi-réfléchissante



Anticoïncidence si les 2 photons arrivent en même temps

Electrodynamique quantique en Cavité



Modification et contrôle de l'émission spontanée d'atomes de Rydberg en cavité

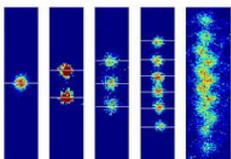


Les années 1990: information quantique et nouveaux états de la matière

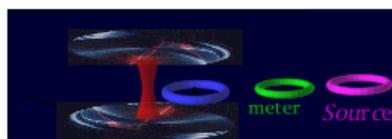
La décennie a été marquée par la manipulation des systèmes quantiques isolés: démonstration d'opérations de calcul et de communication exploitant les superpositions d'état et l'intrication, exploration de la limite classique - quantique et de la décohérence. Là encore, ces développements se sont appuyés sur les avancées pionnières de la période précédente (expériences d'intrication et de violation des inégalités de Bell sur des paires de photons dans les années 1970 et 1980, étude théorique de la décohérence dans les années 1980).

Un autre développement essentiel des années 1990 a été la découverte des condensats de Bose-Einstein, puis des gaz de Fermi dégénérés, ouvrant la voie à l'étude de nouveaux états de la matière ultra-froide. Ces recherches sont le prolongement direct des études sur les atomes refroidis par laser des années 1980.

Intrication quantique, téléportation, communication quantique



Intriquer des ions...
(Séminaire R.Blatt)



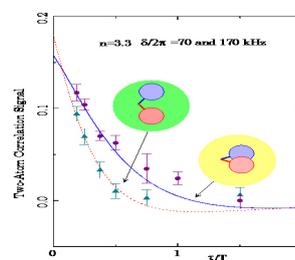
..des atomes



..ou des photons

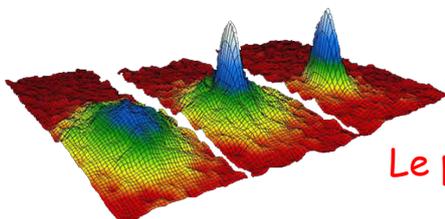
Limite classique-quantique et décohérence

Décohérence d'un
chat de
Schrödinger
photonique

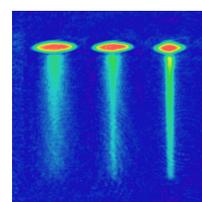


(Séminaires de W.Zurek,
les 31 Mars et 7 Avril)

Condensation de Bose Einstein et nouveaux états de la matière



Le premier condensat et le "laser à atomes"



2000-2015: révolution dans la mesure des temps et fréquences, convergence entre physique des atomes et des solides

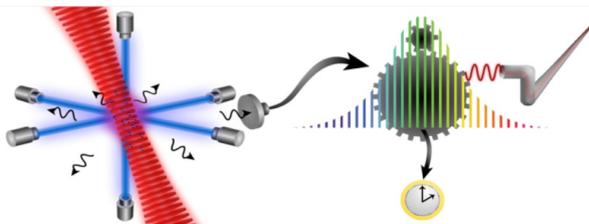
Des lasers émettant des impulsions ultra-brèves dont le spectre présente un peigne étendu de fréquences ont révolutionné la mesure des temps et des fréquences et ouvert la voie à l'exploration de phénomènes atomiques ultra-rapides (atto-science). Là encore, il s'agit du prolongement de travaux antérieurs sur les lasers à modes verrouillés (années 1970 et 1980) et sur la méthode d'amplification d'impulsions brèves des années 1980...

L'étude de condensats de Bose-Einstein et de gaz de Fermi dégénérés permet d'explorer de nouvelles phases quantiques. Les atomes ultra-froids simulent ainsi des effets se produisant à d'autres échelles d'énergies et de distances en physique des solides.

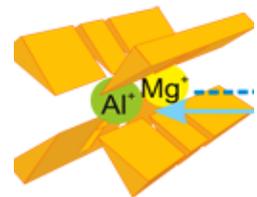
En information quantique, des atomes "artificiels" (quantum dots ou jonctions Josephson) remplacent dans certains dispositifs les atomes ou les ions. L'électrodynamique des circuits généralise à ces systèmes les idées de l'électrodynamique quantique en cavité.

Tous ces développements témoignent d'une convergence remarquable entre physique atomique et physique des solides.

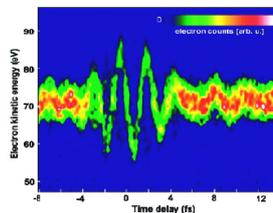
Peignes de fréquence et horloges atomiques optiques



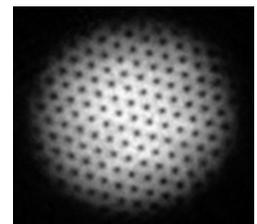
Horloges à atomes neutres froids ou à ion unique piégé



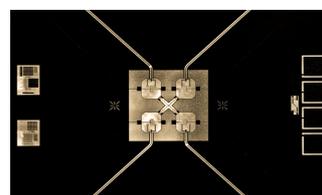
Physique des atto-secondes



Nouvelles phases de la matière ultra-froide



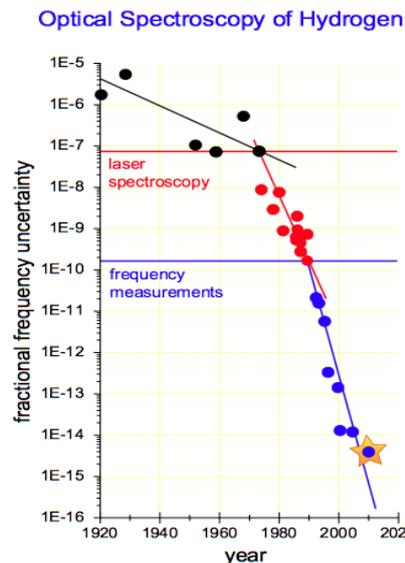
Information quantique avec des atomes artificiels



I-B: Progrès en ordres de grandeurs de la physique atomique

("plus d'un milliard de fois mieux" dans différents domaines)

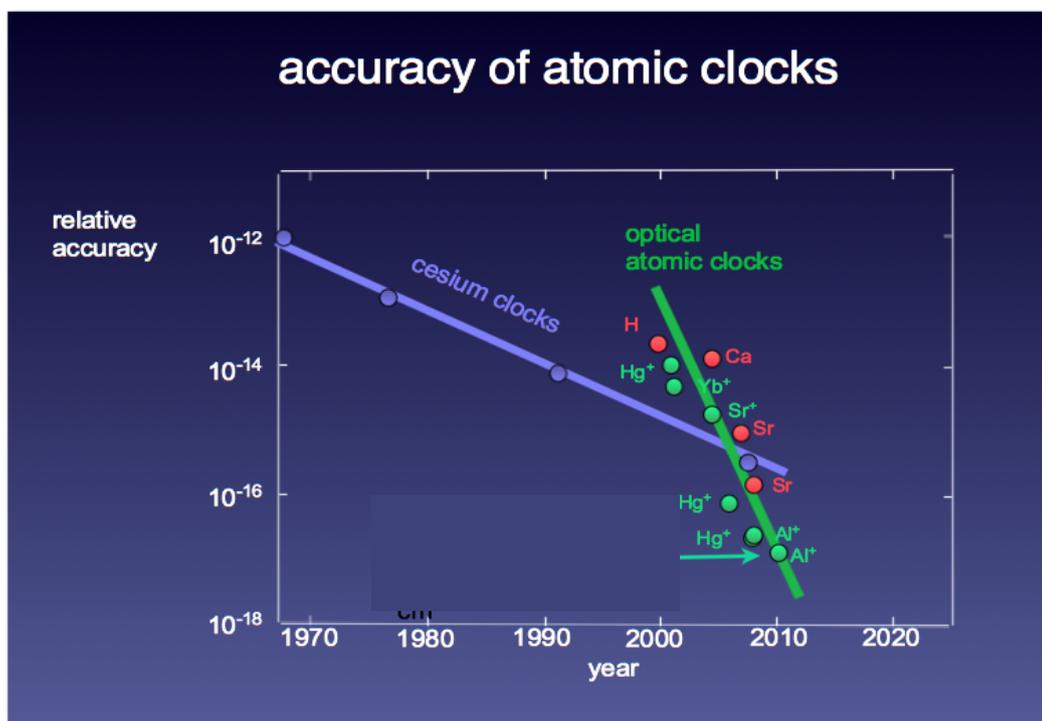
La précision spectroscopique



Neuf ordres de grandeur gagnés depuis les années 1950 sur la précision de la spectroscopie optique de l'Hydrogène

Précision des Horloges

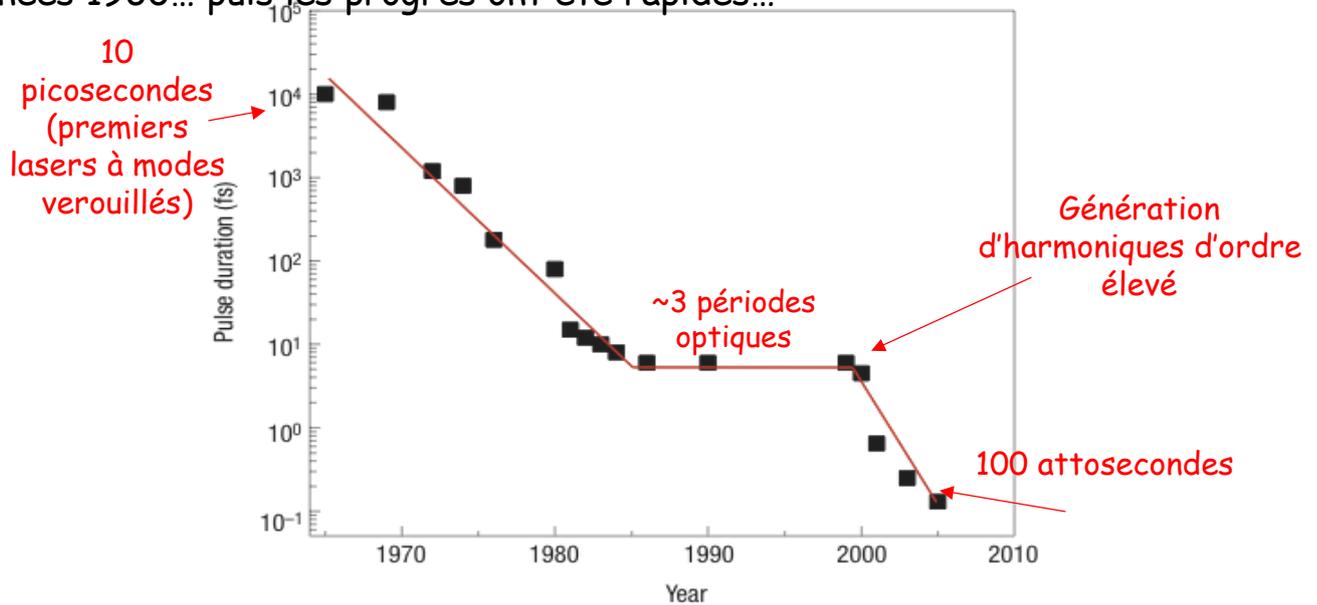
accuracy of atomic clocks



Les horloges atomiques de laboratoire de 2015 sont 10^{10} fois plus précises que les meilleures horloges à quartz (précision $\sim 10^{-8}$) des années 1950...

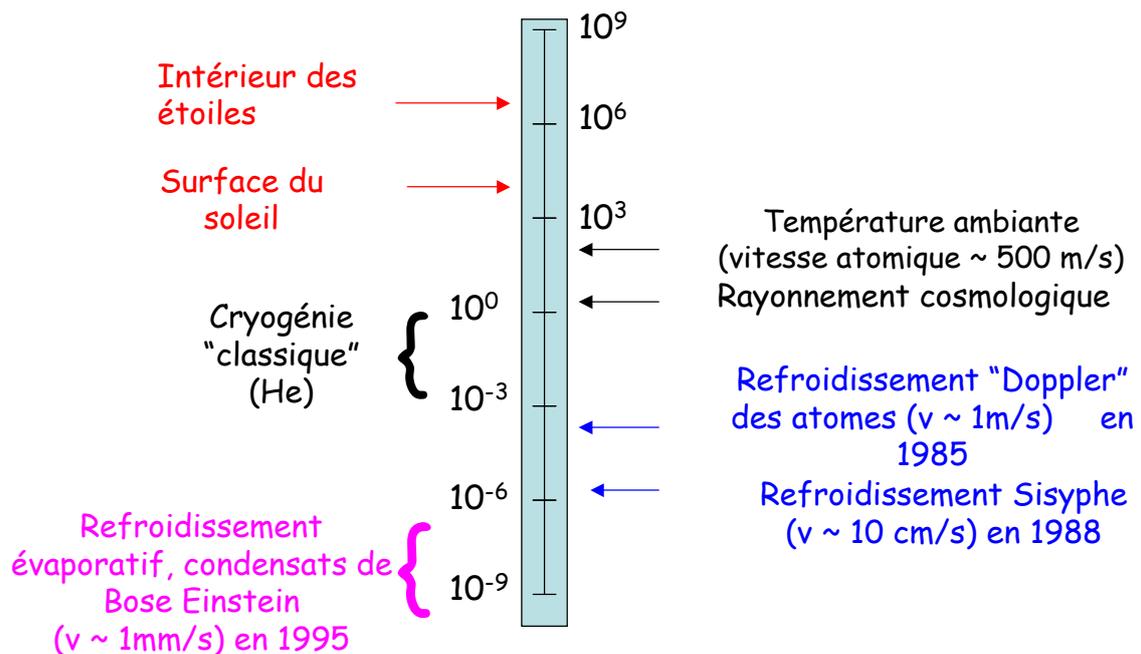
Durée des impulsions lumineuses

Avant les lasers, la durée des impulsions lumineuses les plus brèves (lampes à arc électrique) était de l'ordre de 1 microseconde. Les lasers Q switch, puis à modes bloqués, ont réduit cette durée à 10 picosecondes dès les années 1960... puis les progrès ont été rapides...



10 ordres de grandeurs gagnés depuis l'arrivée des lasers!

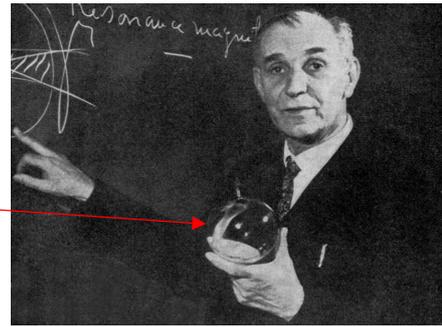
Température des atomes (en K)



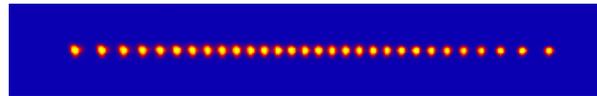
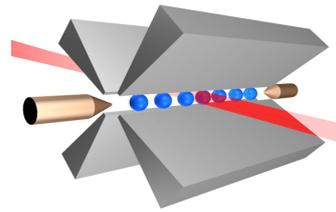
Onze ordres de grandeur sur la température des atomes et 5 à 6 ordres de grandeur sur leur vitesse depuis 1960-70

Sensibilité de la détection atomique

Expérience de pompage optique avec une lampe: cellule contenant $\sim 10^{10}$ atomes



Expérience d'ions ou d'atomes piégés: détection de particule unique



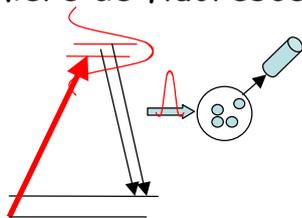
10 ordres de grandeur sur la sensibilité de la détection!

I-C: Un concept unificateur: superpositions d'états et interférences quantiques

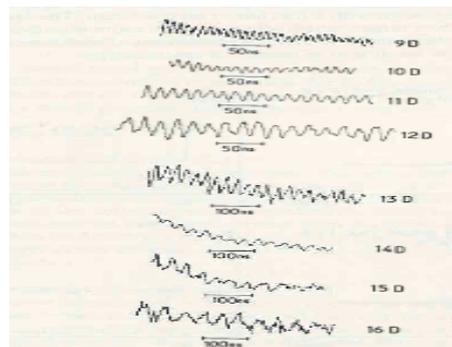
Les superpositions d'états et les interférences entre amplitudes de probabilité qui leur sont associées jouent un rôle essentiel dans tous les domaines de la physique atomique.

Spectroscopie de fluorescence (exp. pre-laser par Dodd et Series-1964)

Méthode des battements quantiques: excitation impulsionnelle par laser en raie large d'une superposition d'états et observation de la modulation de la lumière de fluorescence émise.



Interférence entre chemins indistinguables conduisant de l'état initial à un même état final

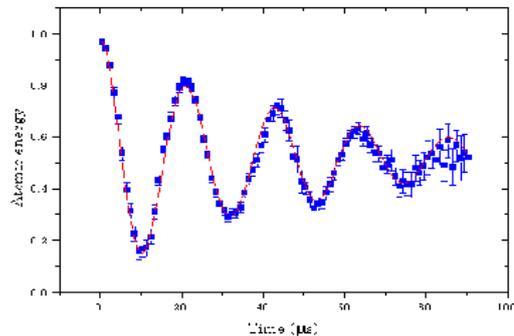


Battements entre niveaux de structure fine des états nD du Sodium Spectre par transformée de Fourier (Gross, Fabre et Haroche 1975)

Cas particulier des battements à fréquence nulle: spectroscopie de croisements de niveaux (Franken-1961).

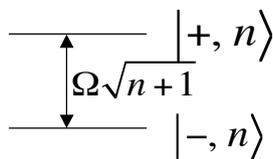
Oscillation de Rabi, superpositions d'états et interférence quantique de l'atome "habillé"

Oscillation entre les états $|e,0\rangle$ et $|g,1\rangle$ dans une cavité (en général oscillation entre les populations de deux états atomiques en interaction avec une onde monochromatique contenant n photons: oscillation $|e,n\rangle \rightarrow |g,n-1\rangle$).



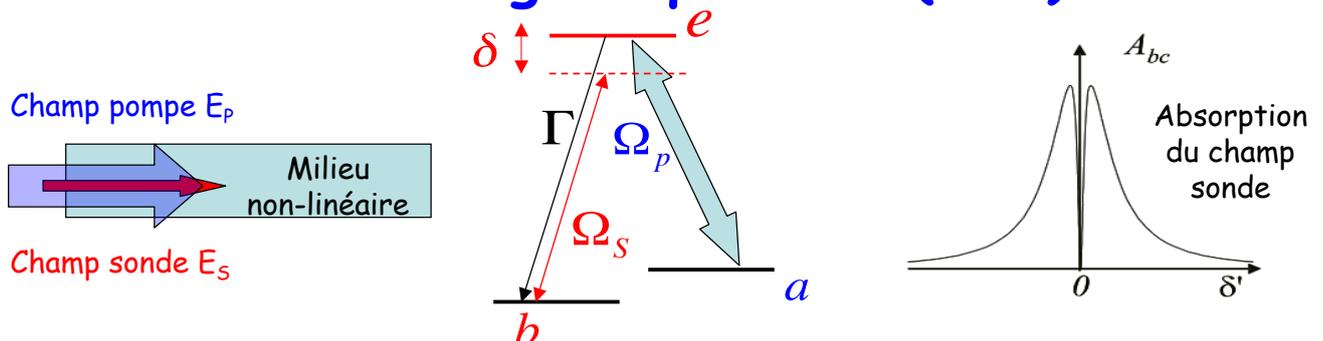
L'état initial $|e,n\rangle$ est la superposition symétrique des états d'énergie propres du système atome champ (atome habillé):

$$|\pm, n\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|e, n\rangle \pm |g, n+1\rangle) \quad ; \quad |e, n\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+, n\rangle + |-, n\rangle)$$



La préparation à $t=0$ dans $|e,n\rangle$ excite une superposition des états habillés dont la phase évolue à la fréquence $\Omega\sqrt{n}$. L'amplitude de probabilité de trouver le système à t dans la superposition orthogonale (état $|g,n+1\rangle$) oscille à la fréquence de Rabi, comme dans une expérience de battement quantique.

Superposition d'états et interférence en optique non-linéaire: la transparence induite électromagnétiquement (EIT)



L'absorption du champ sonde est supprimée quand la condition de résonance Raman est satisfaite:

$$\omega_S - \omega_P = \omega_{ab}$$

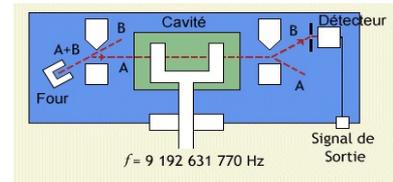
L'interaction avec la pompe (forte) et la sonde (faible) crée une superposition d'états entre $|a\rangle$ et $|b\rangle$:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{\Omega_S^2 + \Omega_P^2}}(-\Omega_S |a\rangle + \Omega_P |b\rangle)$$

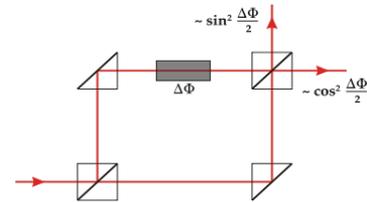
Les atomes dans l'état $|\Psi\rangle$ ne peuvent interagir avec les champs (état noir): absorption supprimée par interférence destructrice. Cours 2013-2014 (leçon 6).

Interférences quantiques & "outils standard" de la physique atomique

Interféromètre de Ramsey et horloges atomiques



Interféromètre de Mach-Zehnder et optique quantique

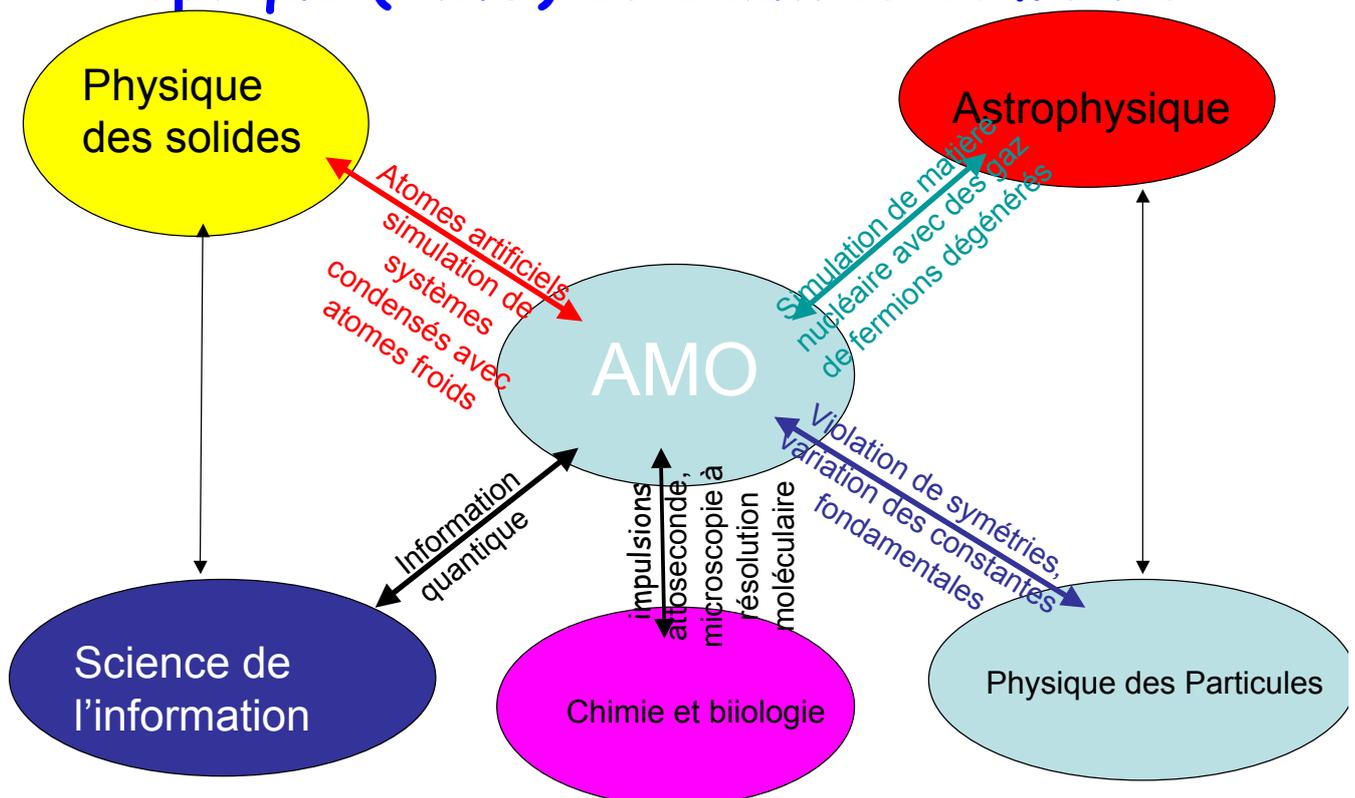


Interféromètres à atomes froids (gravitomètres, gyromètres à effet Sagnac)

Exemple: Fontaine atomique de 10m de haut de Stanford (groupe Kasevich) pour détecter par interférométrie le déphasage des franges dû à la gravité (sensibilité $10^{-12}g$)

Pour plus de détails sur états noirs et interférences quantiques, séminaire du 24 Mars par C.Cohen-Tannoudji

I-D. Relations entre la physique atomique et optique (AMO) et d'autres domaines



Relation avec l'informatique

Manipulation et contrôle de systèmes quantiques isolés pour démontrer des procédés d'information et de communication quantique

Relations avec la physique des solides

Physique des atomes artificiels (jonctions Josephson, boîtes quantiques) imitant la physique atomique; simulation avec atomes froids de situations de physique de la matière condensée.

Relations avec la chimie et la biologie

Stroboscopie atto-seconde de processus électroniques dans les atomes et les solides; microscopie au delà de la limite de diffraction permettant de suivre des processus moléculaires d'intérêt biologique (Nobel de Chimie 2014).

Relations avec la cosmologie et l'astrophysique

Tests à l'aide d'horloges atomiques de l'invariance des constantes fondamentales et comparaison avec les données cosmologiques. Simulation de matière neutronique avec des fermions froids.

Relation avec la physique des particules

Tests de violation de symétries en physique atomique comparés avec les résultats des expériences sur accélérateurs à haute énergie. Projets d'accélérateurs d'électrons par champs laser intenses...

I-E. Quelques ordres de grandeur sur les lasers comparés aux sources classiques

Lumière continue

Soleil



Four solaire géant (Odeillo) de 1MW

$\sim 10^3 \text{ W} / \text{cm}^2$

Laser



Laser à CO₂ continu 50kW

$\sim 10^{10} \text{ W} / \text{cm}^2$

Lumière extrême en impulsion (voir leçon 6)

Installations universitaires « table top »:

Lasers d'impulsions de quelques dizaines de femtosecondes:
puissance crête $\sim 10^{14} \text{ W}$

$\rightarrow 10^{21} \text{ W} / \text{cm}^2$

Grandes installations:

Lasers « petawatt » avec impulsions de quelques dizaines de femtosecondes ou de quelques nanosecondes (Laser MégaJoule):
puissance crête: $1 \text{ pW} = 10^{15} \text{ W}$

$\rightarrow 10^{22} \text{ W} / \text{cm}^2$

Projet de laser européen ELI de 200 pW $\rightarrow 10^{24} \text{ W} / \text{cm}^2$!

Largeur spectrale comparée d'une (très bonne) source classique et d'un (très bon) laser

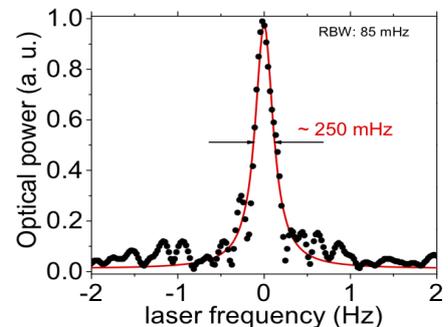
Lampe à Krypton à 605 nm
(Définition du mètre en 1960):

Largeur de raie
 $\Delta = 8.10^8 \text{ Hz}$

Longueur de cohérence de
l'ordre de 1 mètre

Laser à colorant à 578 nm
stabilisé en fréquence sur
cavité ultra-stable
(NIST-Boulder)

$\Delta = 0,25 \text{ Hz}$



Y.Y Jiang et al, Nature photonics,
5, 158 (2011)

Longueur de cohérence de
 10^6 kms , plus que la distance
Terre-Lune aller retour!

Outil idéal pour la spectroscopie de haute résolution et les horloges atomiques optiques (voir leçon 5)

Conclusion de la première leçon

L'avènement des lasers a révolutionné la physique atomique et l'optique au cours des 50 dernières années, permettant la mise en oeuvre de méthodes nouvelles pour la manipulation des atomes et des photons ainsi que des mesures spectroscopiques ultra-précises. Dans différents domaines, environ dix ordres de grandeur ont été gagnés par rapport aux performances de l'ère pré-laser.

Comme nous le verrons dans les prochaines leçons, les champs d'études ouverts par l'utilisation des lasers ont rapproché la physique atomique de celle de la matière condensée, ainsi que de l'astrophysique, de la chimie et des sciences de l'information.

Nous consacrons l'essentiel de ce cours aux progrès de la physique atomique en recherche fondamentale. Les développements de cette physique au cours du XX^{ème} siècle, et tout particulièrement ceux des lasers depuis un demi-siècle, ont eu également un impact déterminant sur la recherche appliquée, conduisant à des technologies nouvelles qui ont révolutionné notre vie quotidienne. J'en parlerai dans la leçon de clôture du Cours, le 14 Avril à 11h, en m'adressant à cette occasion à un public non spécialisé.