

Chapitre 1

Introduction à la Physique Atomique

1.1 Qu'est-ce que la physique atomique?

On peut la définir comme la partie de la physique qui s'occupe de comprendre la structure des atomes et des molécules, les processus et propriétés physiques et chimiques à l'échelle microscopique, les interactions avec le rayonnement électromagnétique.

Historiquement cette discipline est à l'origine de toute la physique des quanta, et elle a joué un rôle absolument déterminant dans la physique de tout le 20^{ème} siècle. De nos jours cette discipline couvre un champ très vaste et ses développements se trouvent finalement dispersés dans de nombreuses spécialités. Par exemple: le magnétisme, les propriétés optiques des solides, l'analyse chimique, l'imagerie par résonance magnétique, les lasers...

Il importe de remarquer que les universitaires français se prétendant "atomistes" sont rattachés à une section du Ministère des Universités intitulée "Milieux dilués, optique". Cela pour souligner la liaison particulièrement forte entre l'"optique", c'est à dire l'ensemble des sciences et technologies impliquées dans la production, la manipulation et l'utilisation de la lumière, et la physique atomique. Outre atlantique, la Société Américaine de Physique possède de façon similaire une "Division of Atomic, Molecular and Optical Physics".

Schématiquement on peut distinguer plusieurs aspects dans la physique atomique:

1.1.1 Physique "de" l'atome

On s'intéresse dans ce cas à la constitution de l'atome pris à l'état isolé:

- ses niveaux d'énergie, liés aux "mouvements internes" à l'atome
- ses fonctions d'onde (ou "orbitales"), liées à la "forme" de l'atome
- son interaction avec des champs extérieurs, magnétiques ou électriques, statiques ou oscillants (rayonnements électromagnétiques, optiques, X...): processus d'absorption et d'émission, diffusion, photoionisation

1.1.2 Physique "avec" des atomes

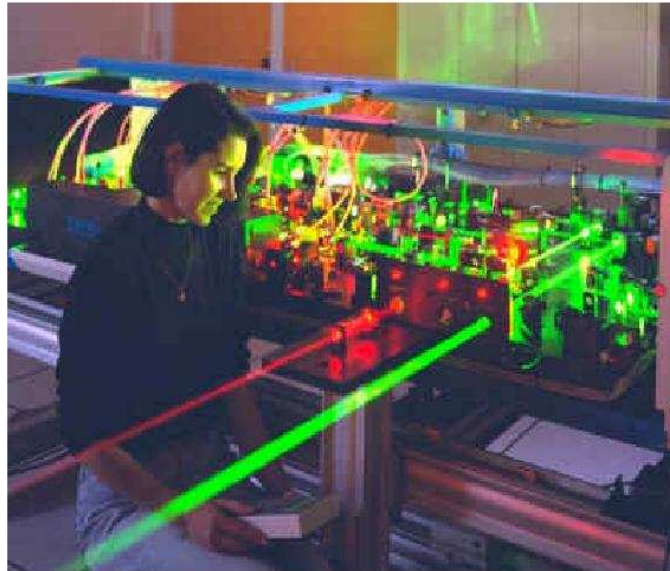
Il s'agit de l'étude des objets et processus où interviennent plusieurs atomes:

- physique des molécules: structure (forme), vibrations...
- processus interatomiques: collisions avec diverses particules, réactivité chimique élémentaire
- physique du solide: inclusions atomiques dans un solide, propriétés individuelles des atomes dans un solide

1.1.3 Applications (sciences fondamentales et appliquées)

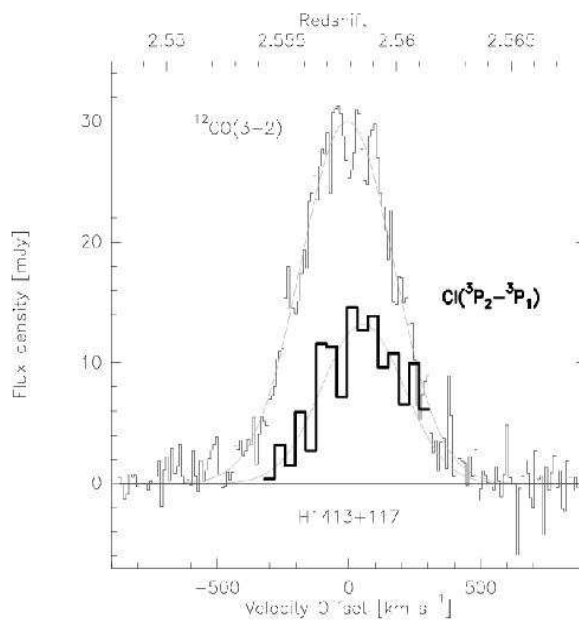
Elles sont innombrables: mentionnons par exemple:

- "électronique quantique" c'est à dire les lasers et leurs applications. (Champ incroyablement vaste!)
 - exploration de milieux hostiles ou lointains au moyen du rayonnement émis, absorbé diffusé (flammes, atmosphères terrestre ou planétaires, étoiles et nuages interstellaires, plasmas et décharges...), détection ultra sensible de molécules à l'état individuel
 - test de théories fondamentales (mesures à ultra-haute précision et électrodynamique quantique, expériences sur des systèmes simples et concepts quantiques). Exemple: mesure de la constante de Rydberg par spectroscopie ultra-précise des niveaux de l'atome d'hydrogène (cf B. de Beauvoir, F. Biraben et al Eur. Phys. J. **D 12**, 61-93 (2000)):
 $R_\infty = m_e c \alpha^2 / 2h = 109\,737,315\,685\,5\ (11)\ \text{cm}^{-1}$
- manipulation de la matière au moyen de faisceaux lumineux
- calculs de forces intra et intermoléculaires
- RMN et applications à l'analyse chimique et à l'imagerie
- séparation isotopique de l'uranium
- magnétométrie (mesure de faibles champs magnétiques à ultra-haute précision)
- Horloges atomiques et GPS



Systeme laser à 2 couleur dont une accordable, développé par l'ONERA pour des expériences de Diffusion Raman Anti-Stokes Cohérente

<http://www.onera.fr/dmph-en/cars/index.html>



A. Weiss et al, 2003,
 Institut de Radio-
 Astronomie Millimétrique

cf <http://www.iram.fr> et
<http://www.iram.es>

Comparaison des profils de raie d'émission de la molécule CO et de l'atome de Carbone tracés en fonction de leur décalage Doppler

« redshift » = $(v_0 - v_{\text{reçu}}) / v_{\text{reçu}}$ provenant d'un quasar. Ce décalage donne la distance du quasar (1,5M années-lumière via la loi de Hubble) et la distribution de vitesse des molécules et atomes émetteurs dans le quasar

Piège « magnéto-optique » contenant un nuage d'atomes de strontium très froids (2mK), visibles par leur fluorescence
 réalisé au Bureau National de Métrologie
http://opdaf1.obspm.fr/www/sr/1e_strontium.html

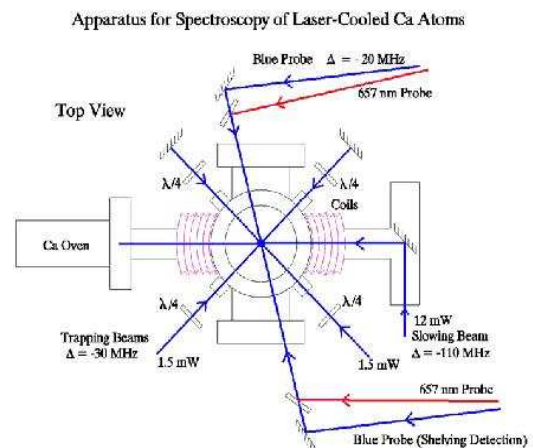
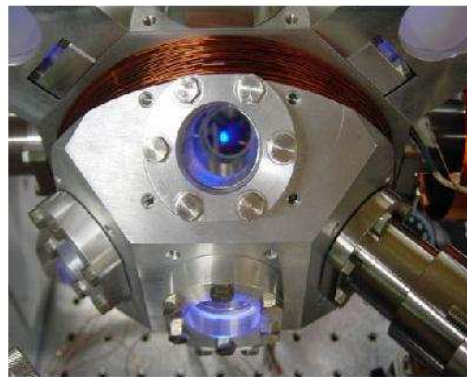


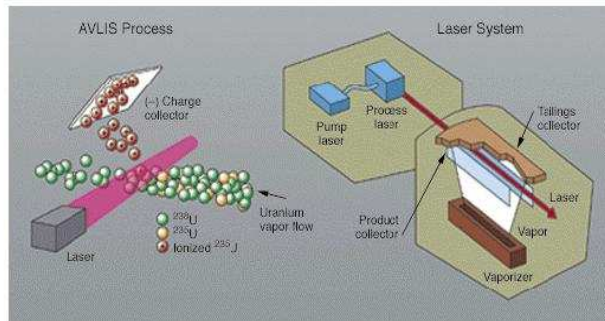
Schéma d'un piège magnéto-optique pour atomes de Calcium
 (National Institute of Standard and Technology, USA)
<http://www.boulder.nist.gov/timefreq/ofm/index.html>

Université Joseph Fourier
 Maîtrise et Magistère de Physique 2002-2003

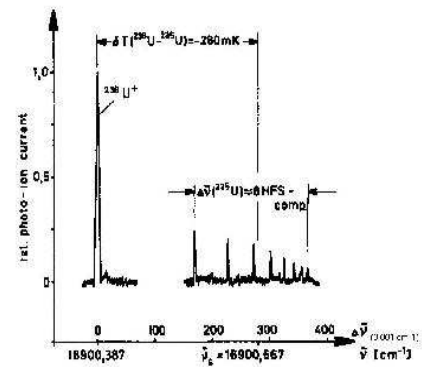
Examen de Physique Atomique
19 février 2003

Durée: 3h. Calculatrice et règle graduée indispensables
 Seul document autorisé: 1 feuille A4 manuscrite recto-verso
 Les questions sont très largement indépendantes.

Séparation isotopique de l'Uranium par laser

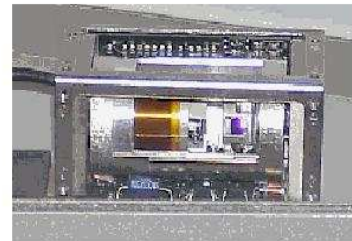
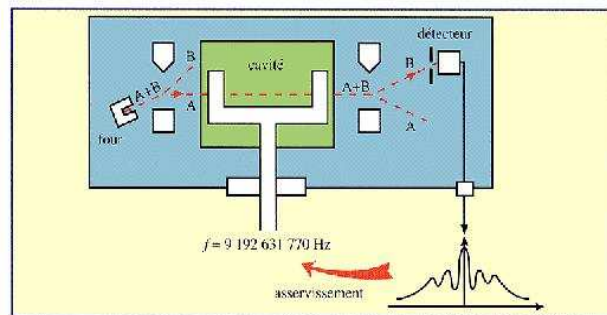


In the laser system used for the LIS uranium enrichment process (right), electrons from the ^{235}U atoms are separated (left), leaving positively charged ^{235}U ions that can be easily collected for use.



<http://www.llnl.gov/str/Hargrove.html>

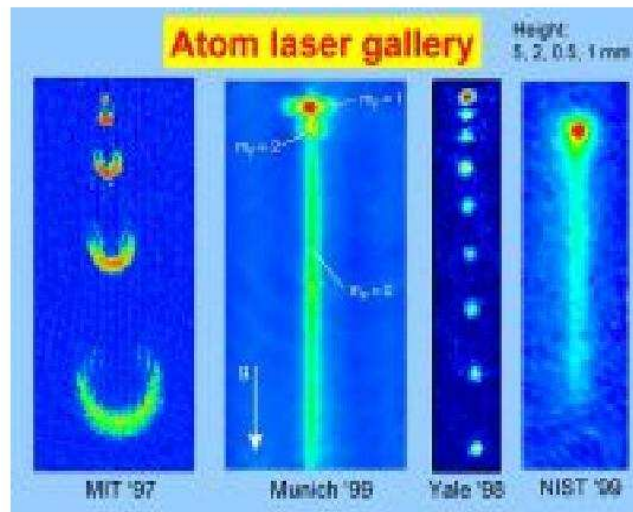
Horloge atomique au Césium



calée sur la transition hyperfine $F=3$ $F=4$ de l'état électronique fondamental $^2S_{1/2}$. Précision 10^{-13} soit environ 1s/300 000 ans.

Cf <http://opdaf1.obspm.fr/>

« Faisceaux laser » d'atomes extraits de condensats de Bose-Einstein ($T \sim \text{nanoKelvin}$) préparés par refroidissement et piégeage par des faisceaux laser (cf http://cua.mit.edu/ketterle_group/ ainsi que La Recherche janvier 1994, septembre 2003 et <http://atomoptic.iota.u-psud.fr>, ainsi que <http://www.lkb.ens.fr/recherche/atfroids/welcome.html>)



1.2 Quelques développements récents

A titre d'illustrations, mentionnons sans prétendre être exhaustif, et en fonction d'un choix assez arbitraire:

- nouveaux systèmes:
 - atomes et molécules "de Rydberg"
 - atomes "creux"
 - molécules très peu liées (He-I_2 , $\text{Ar-C}_6\text{H}_6$), "souples", inattendues (ArH_3^+ , MgNC) ou inconnues (ScC)
 - physique des agrégats (de l'atome au matériau massif)
- manipulation des atomes par le rayonnement:
 - atomes ultra-froids (200nK), condensation de Bose-Einstein et "lasers à atomes"
 - atomes immobiles et horloges atomiques ultra-précises
 - optique atomique

- test de théories fondamentales:
 - mise en évidence des effets de l'interaction faible dans des édifices atomiques
 - spectroscopie du positronium, antihydrogène, électron isolé...
 - états quantiques "intriqués" entre 1 atome et 1 photon

- laser, optique non linéaire, optique quantique
 - lasers ultra-brefs (quelques oscillations optiques) et ultra intenses (10^{15}W)
 - états non classiques du champ électromagnétique
 - laser X

1.3 But de ce cours

Ce cours a pour but de présenter un ensemble de concepts et de notions liés à la physique atomique. Cependant, nous essaierons souvent de replacer ces concepts dans un contexte aussi large que possible. Souvent nous emprunterons à d'autres domaines de la physique, voire de la science, en mentionnant parfois certains aspects techniques sans lesquels notre connaissance du monde n'aurait pu progresser et/ou n'aurait pas eu d'applications. Voici une liste non limitative de ce que nous aborderons:

- structure des atomes

- éléments de physique des molécules (en fait les molécules prises à l'état isolé peuvent souvent être considérées comme de gros atomes...)

- propriétés du photon et son interaction avec les atomes et les molécules. Le laser

- illustration de quelques concepts quantiques

- quelques méthodes expérimentales

- méthodes de raisonnement "semiquantitatives" et ordres de grandeur.

Les connaissances nécessaires pour aborder ce cours comprennent:

- bases de physique générale (principes de la mécanique, électromagnétisme)
- notions élémentaires de mécanique quantique
- notions élémentaires en chimie physique et en physique

1.4 Ouvrages généraux suggérés

- B. Cagnac et J.C. Pébay-Peyroula, *Physique Atomique* (Dunod,1982) (Nouvelle édition par B. Cagnac, L. Tchang-Brillet et J.C. Pébay-Peyroula, (Dunod 2005,2006))
- H. Haken et H.C. Wolf, *The Physics of Atoms and Quanta* (Springer,1993)
- J.M. Hollas, *Spectroscopie* (Dunod, 1998)
- P.W. Atkins, *Physical Chemistry* (Oxford University Press,1992)
- C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë, *Mécanique Quantique*(Hermann, 1976) (1999)

Pour finir mentionnons le site web de l'agence gouvernementale américaine "NIST" (National Institute for Standards and Technology), où l'on trouvera (entre autres) un grand nombre de données sur les niveaux d'énergie et processus atomiques et moléculaires, sections efficaces etc.... Une mine d'informations hautement recommandable pour tous les domaines de la physique (pas seulement atomique et moléculaire)!

<http://physics.nist.gov/>

<http://physics.nist.gov/PhysRefData/>