

# LES ÉCHELLES DE TEMPS EN RECHERCHE FONDAMENTALE

*« Avant de découvrir la poudre, il faut maîtriser le feu »*

**Clément Sire**

*Laboratoire de Physique Théorique*

*CNRS & Université Paul Sabatier*

*Toulouse, France*

[www.lpt.ups-tlse.fr](http://www.lpt.ups-tlse.fr)

*Voir l'article sur RAGEMAG ([ragemag.fr/author/clement-sire/](http://ragemag.fr/author/clement-sire/))*

# ***Introduction***

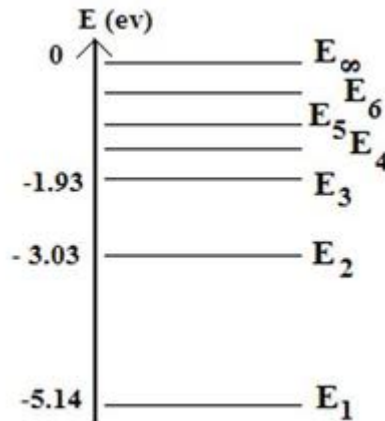
- ***« A quoi ça sert ? »***
- *Savoir apprécier le **temps nécessaire** entre les **découvertes fondamentales** et leurs **applications***
- *Illustration sur les **exemples** suivants :*
  - Le Laser
  - Les cristaux liquides
  - L'électronique
  - La supraconductivité

# Le Laser : introduction à la physique quantique

- Les énergies possibles d'un électron lié à un atome sont **quantifiées** ( $E_n = -E_0/n^2$  pour l'hydrogène, avec  $E_0 \approx 13.6$  eV, et  $n=1,2,3\dots$ )

## Exemple du Sodium

$\text{Na}^{23}$  (11 protons,  
12 neutrons)



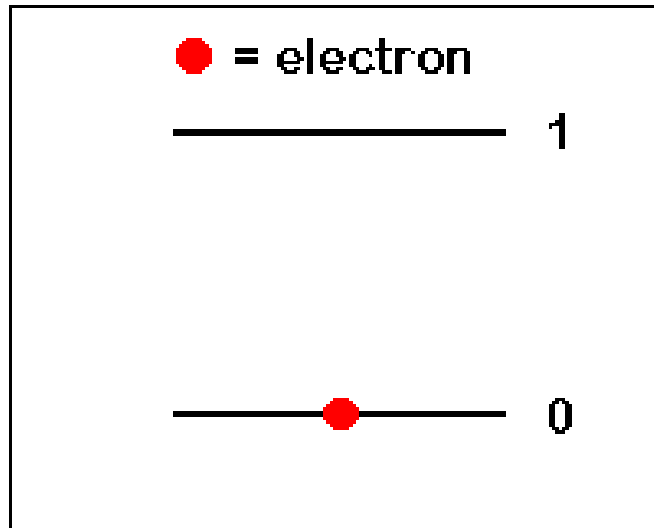
- On peut « exciter » un atome en l'éclairant par de la lumière de fréquence  $\nu$ , correspondant à l'énergie entre deux niveaux d'énergie  $m$  et  $n$  : un électron **absorbe** un photon et gagne l'énergie  $\Delta E = h\nu = E_n - E_m$  ( $h$  est la constante de Planck)

# *Le Laser : introduction à la physique quantique*

- Inversement, un atome se « désexcite » quand un électron passe d'un niveau d'énergie  $n$  à un niveau inférieur  $m$  en émettant un photon d'énergie

$$\Delta E = h\nu = E_n - E_m$$

On parle d'*émission spontanée*

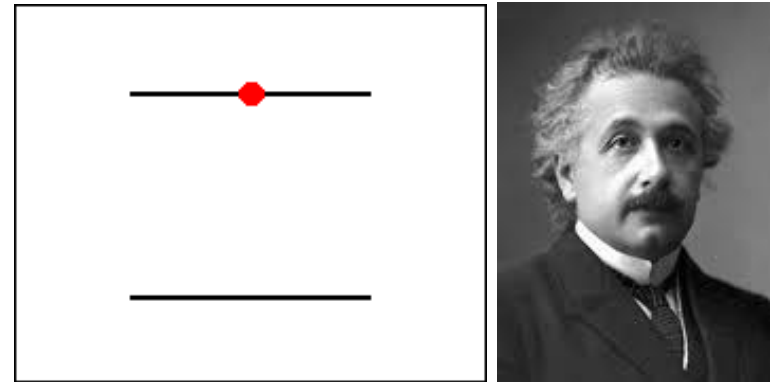


# Le Laser : émission stimulée

- En 1917, Albert Einstein (Prix Nobel 1921) prédit théoriquement que l'on peut **stimuler** la désexcitation d'un atome entre deux niveaux  $n$  et  $m$ , en l'éclairant par de la lumière de fréquence

$$h\nu = E_n - E_m$$

On parle d'**émission stimulée**

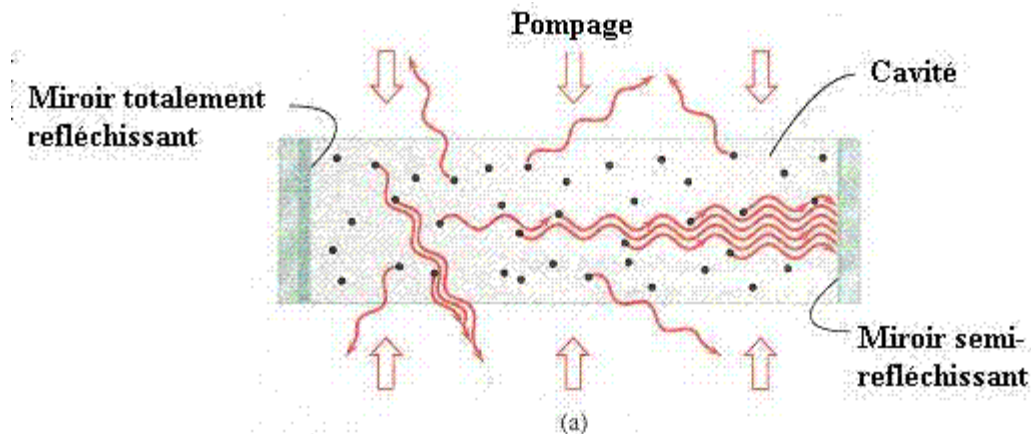


- Le second photon émis est « **identique** » (énergie, direction, phase, polarisation) à celui ayant stimulé la désexcitation

***La lumière est amplifiée de manière cohérente***

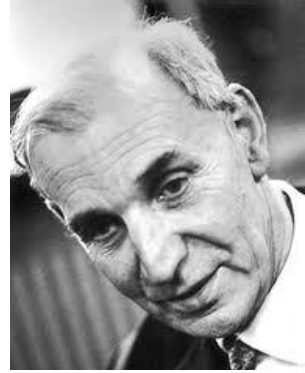
# Le Laser : émission stimulée et pompage optique

- De 1928 (Rudolf Ladenburg) à 1947 (Willis Lamb), la **réalité expérimentale** de l'émission stimulée est confirmée. En 1939, Valentin Fabrikant prédit l'utilisation effective de ce phénomène pour amplifier la lumière
- En 1950, Alfred Kastler (Prix Nobel 1966) à l'ENS Paris propose la méthode du **pompage optique** pour entretenir l'émission stimulée



# Trois Prix Nobel français au Laboratoire Kastler-Brossel (ENS Paris) et un Prix Wolf (Institut d'Optique) autour de la physique des lasers

- **Alfred Kastler** (Prix Nobel 1966) pour « *la découverte et le développement de méthodes optiques pour étudier les résonances dans les atomes* »
- **Claude Cohen-Tannoudji** (Prix Nobel 1997 avec S. Chu et William D. Phillips) pour « *le développement de méthodes pour refroidir et piéger des atomes par le rayonnement laser* »
- **Serge Haroche** (Prix Nobel 2012 avec D. J. Wineland) pour « *des avancées expérimentales fondamentales permettant de mesurer et de manipuler des systèmes quantiques individuels* »
- **Alain Aspect** (Prix Wolf 2010, après **Albert Fert** en 2007 et **Pierre-Gilles de Gennes** en 1990) pour ses « *avancées conceptuelles et expérimentales aux fondations de la physique quantique par l'exploitation des propriétés d'intrication quantique* »
- Ajoutons une petite pensée pour **Georges Charpak** (Prix Nobel 1992) pour « *son invention et le développement des détecteurs de particules* », au CERN



# *Le Laser : découverte du Maser et du Laser*

- En 1953, Charles Hard Townes *et al.* (Prix Nobel 1964) à Bell Labs créent le premier amplificateur de micro-ondes (Maser)



- En 1960, Theodore Maiman, fait fonctionner le premier Laser, un terme inventé par Gordon Gould, en 1959 :

***Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation***



# ***Le Laser : applications***

- **1965** : perçage de diamants industriels (4,7mm x 2mm) en 15 minutes, au lieu de 24 heures
- **1967** : première prototype de tête de découpe industrielle (découpe de plaques d'acier de 2.5mm d'épaisseur à 1m/min).  
Les premières plates-formes industrielles apparaissent à la fin des années 70 (1980, en France).
- **~1970** : premières applications ophtalmologiques du Laser ; LASIK en 1989
- **1974** : lecteur de codes barres
- **1975** : première imprimante Laser industrielle (IBM ; inventée par Xerox en 1971) ; première imprimante commerciale en 1981 (Xerox ; 17000\$)
- **1978** : introduction du Laserdisc (brevet 1961), puis en 1982 du Compact Disc (application à la musique par Sony en 1976 et Phillips en 1979)
- ...

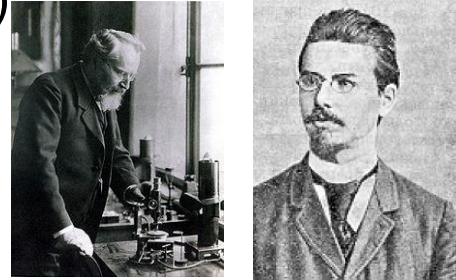
# Le Laser : applications

- **Scientifiques** : spectroscopie, refroidissement laser, interférométrie, métrologie, microscopie, fusion nucléaire, astronomie...
- **Médicales** : chirurgie, ophtalmologie, dermatologie...
- **Industrielles et commerciales** : découpe, gravure, photolithographie, mesures de précision, communications optiques, diodes laser, électronique grand public, événementiel...
- **Militaires** : pointage et guidage, arme, contre-mesure...



# Les cristaux liquides : historique

- Dans les années (18)80, **Otto Lehmann** (Strasbourg) et **Friedrich Reinitzer** (Prague) étudient des esters de cholestérol présentant un état « trouble » entre la phase liquide et cristalline. **Daniel Vorländer** (Halle-Wittenberg) synthétise jusqu'en 1935 la plupart des cristaux liquides connus à l'époque



- Ce nouvel état de la matière reste incompris jusqu'aux études structurales de **Georges Friedel** (Strasbourg !) dans les années (19)20



- La compréhension profonde des phases de cristaux liquides est fournie par **Pierre-Gilles de Gennes** (Orsay ; Prix Nobel 1991) dans les années 60, qui exploite l'analogie avec le magnétisme et prévoit de nouvelles phases (la dernière observée en 1989)



# Les cristaux liquides : propriétés

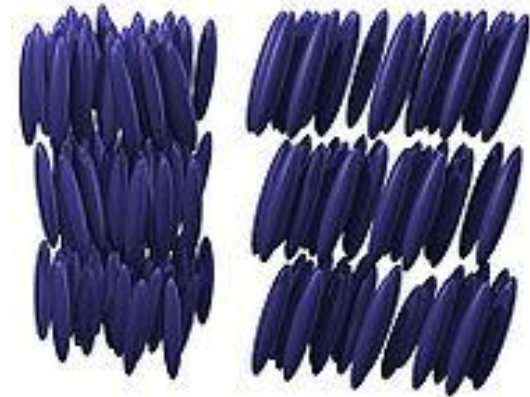
- Les cristaux liquides sont composés de molécules en forme de « bâtonnets »
- Les différentes phases correspondent à des arrangements **plus ou moins ordonnés** de ces molécules :



*Nématique*



*Cholestérique*



*Smectique A et C*

- **Propriétés optiques** : biréfringence, double réfraction, dépendance à la température (thermographie)

# *Les cristaux liquides : applications*

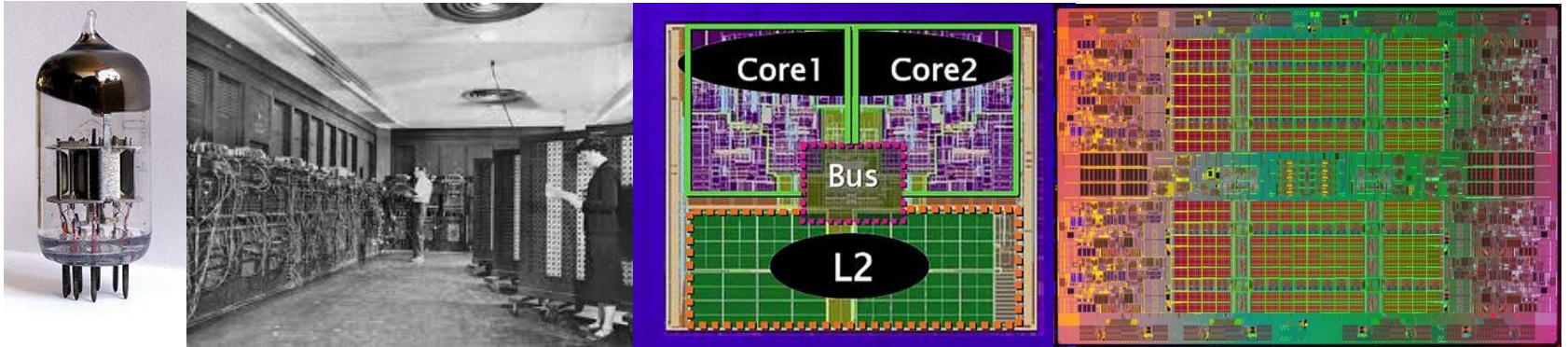
- **1969** : première montre à cristaux liquides, et première montre à quartz et à cristaux liquides en 1975
- **1972** : premier « écran » LCD, une technologie qui décolle véritablement à partir de la fin des années 1990, jusqu'aux écrans LCD-LED actuels (LED découvertes en 1907 par H. J. Round, et brevetées en 1927 par O. V. Losev...)
- **Autres applications actuelles** : détecteurs de température et de pression (notamment dans le domaine médical), verres devenant transparents ou opaques en fonction de l'application d'une tension ou de l'illumination...





# *Le transistor électronique et les mémoires modernes*

- L'électronique est la « fille » de la physique quantique et son développement a accompagné celui de ce domaine de la physique
- En 1947, John Bardeen, William Shockley et Walter Brattain réalisent le premier transistor à Bell Labs, ce qui leur a valu le Prix Nobel 1956
- L'électronique naît vraiment avec le remplacement des tubes à vide par le transistor (commercialisation du Radio Transistor en 1954)



- L'ENIAC comportait 17000 tubes à vide, le premier processeur Intel 4004 (1971), 2300 transistors, et le 62-core Xeon Phi (2012), 5 000 000 000 transistors

# Le transistor électronique et les mémoires modernes

- A la suite de la découverte de la **magnétorésistance** (W. Thomson/ Lord Kelvin 1857) à effet tunnel par Michel Jullière (INSA Rennes) en 1975, Albert Fert (Orsay) et Peter Grünberg (Cologne) découvrent la **magnétorésistance géante** en 1988. Cette découverte a lancé le domaine de la « **spintronique** » et leur a valu le Prix Nobel 2007



- La magnétorésistance se manifeste comme une variation de la résistivité d'un matériau sous l'effet d'un champ magnétique
- Depuis le milieu des années 2000, les mémoires des appareils électroniques (ordinateurs, lecteurs MP3, appareils photo...) utilisent désormais cet effet : **ko** (1980) → **Mo** (1990) → **Go** (2000) → **To** (2010)

# ***La supraconductivité : la prochaine révolution ?***

- **En 1911**, Kamerlingh Onnes (Prix Nobel 1913) découvre que la résistance du mercure refroidi à  $-271^{\circ}\text{C}$  s'annule totalement
- **En 1933**, Walther Meissner et Robert Ochsenfeld découvrent que les supraconducteurs repoussent un champ magnétique
- **En 1950**, l'école russe réalise des contributions décisives : Lev Landau (Prix Nobel 1962), Vitaly Ginzburg, Alekseï Abrikosov (tous les deux Prix Nobel 2003)
- **En 1957**, John Bardeen (encore lui !), Leon Cooper et Robert Schrieffer donnent une explication (théorie BCS) à ce phénomène et obtiennent le Prix Nobel 1972

***Fin de l'histoire ?***



# *La supraconductivité : la prochaine révolution ?*

- En 1986, J. Bednorz et K. Müller (Prix Nobel 1987) observent la supraconductivité à  **$-230^{\circ}\text{C}$**  dans un matériau (de type « cuprate ») découvert par B. Raveau (Caen). De nombreux autres matériaux sont ensuite découverts, poussant la température critique jusqu'à  **$-140^{\circ}\text{C}$** .  
***La théorie BCS ne s'applique pas*** à ces matériaux !
- En 2011, la ***supraconductivité a fêté ses 100 ans*** et reste un domaine extrêmement actif de recherche (voir le [site web dédié](#))
- **Les applications actuelles restent dans le domaine de la très haute technologie** : trains à suspension magnétique, stockage d'énergie, composants électroniques très rapides, magnétomètres, production des plus forts champs magnétiques actuels (IRM, RMN, accélérateurs de particules...).



# Conclusion en forme de réflexion

- La recherche fondamentale permet de **découvrir et comprendre** des nouveaux phénomènes encore inconnus. **Leur étude prend du temps...**
- Les applications technologiques les plus spectaculaires sont le fruit de **recherches fondamentales longues et maîtrisées** qui n'ont pas forcément pu (ou même cherché à) **anticiper** les applications futures  
**« Avant de découvrir la poudre, il faut maîtriser le feu »**
- Trop **aiguiller la recherche fondamentale** vers les applications réduit le champ d'investigation. Les applications futures sont souvent **inimaginables** au moment de la découverte fondamentale
- Nécessité de développer les liens entre recherche fondamentale et recherche appliquée, sans pourtant dévoyer la mission de la première : **faire avancer le front de la connaissance**
- Attention : notre société est de plus en plus **impatiente et motivée par le pur progrès technologique** (démantèlement de la recherche fondamentale aux Bell Labs et dans la plupart des laboratoires privés, financement de la recherche publique sur des contrats de 3-4 ans...)