

Mécanique Quantique 1

Thierry Lahaye

thierry.lahaye@institutoptique.fr

5 séances de deux heures

- Vendredi 2 octobre, 13h30-15h30
- Mardi 6 octobre, 15h45-17h45
- Vendredi 9 octobre, 8h00-10h00
- Lundi 12 octobre, 14h00-16h00
- Jeudi 15 octobre, 8h00-10h00

Transparents disponibles sur [discord](#) et à l'adresse :

www.thierry-lahaye.org/teaching

Plan du cours

1. Equation de Schrödinger dans des potentiels à 1D
2. Systèmes à deux niveaux
3. Particules identiques
4. Dualité onde-particule

Remarques préliminaires

- Rappels simples, outils de base (~L3)
- Privilégier les **concepts** par rapport aux **calculs**
- Importance des **ordres de grandeur** (cf. rapports de jury)
- Accent mis sur les liens avec optique, électromag., phys. stat...

Remarques préliminaires

- Rappels simples, outils de base (~L3)
- Privilégier les **concepts** par rapport aux **calculs**
- Importance des **ordres de grandeur** (cf. rapports de jury)
- Accent mis sur les liens avec optique, électromag., phys. stat...

Posez des questions !

Bibliographie – conseils de lecture

- Basdevant & Dalibard ~ niveau de ce cours
- Cohen-Tannoudji, Diu, Laloë détails de calculs / formalisme
- Le Bellac, Aslangul... applications un peu + détaillés
- Feynman, cours de Berkeley... « culture » + certains points précis
- Landau & Lifchitz, Messiah détails de calcul, approx. WKB...

Prélude

Valeurs numériques à connaître

Constantes fondamentales

Constante	Valeur
Vitesse de la lumière	$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \simeq 3 \times 10^8 \text{ m/s}$
Constante de Boltzmann	$k_B \simeq 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Constante de Planck	$h \simeq 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ $\hbar \equiv h/(2\pi) \simeq 1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Charge élémentaire	$q_e \simeq 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Masse de l'électron	$m_e \simeq 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masse du proton	$m_p \simeq 1836m_e$
Magnéton de Bohr	$\mu_B = \frac{\hbar q_e}{2m_e} \simeq 9.274 \times 10^{-24} \text{ J/T}$ $\mu_B/h \simeq 1.4 \text{ MHz/G}$
Constante de structure fine	$\alpha \equiv \frac{q_e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \simeq \frac{1}{137}$

Valeurs numériques à connaître

Constantes fondamentales

Constante	Valeur
Vitesse de la lumière	$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \simeq 3 \times 10^8 \text{ m/s}$
Constante de Boltzmann	$k_B \simeq 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Constante de Planck	$h \simeq 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ $\hbar \equiv h/(2\pi) \simeq 1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Charge élémentaire	$q_e \simeq 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Masse de l'électron	$m_e \simeq 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masse du proton	$m_p \simeq 1836m_e$
Magnéton de Bohr	$\mu_B = \frac{\hbar q_e}{2m_e} \simeq 9.274 \times 10^{-24} \text{ J/T}$ $\mu_B/h \simeq 1.4 \text{ MHz/G}$
Constante de structure fine	$\alpha \equiv \frac{q_e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \simeq \frac{1}{137}$

Unités atomiques

Dimension Unité atomique

Longueur	$a_0 = \frac{\hbar}{m_e c \alpha} \simeq 0.53 \text{ \AA}$
Masse	m_e
Énergie	$Ha = 2E_I \simeq 27.2 \text{ eV} = m_e c^2 \alpha^2$
Vitesse	ac

Valeurs numériques à connaître

Constantes fondamentales

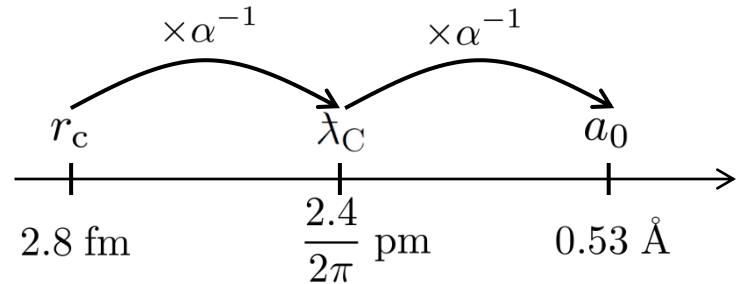
Constante	Valeur
Vitesse de la lumière	$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \simeq 3 \times 10^8 \text{ m/s}$
Constante de Boltzmann	$k_B \simeq 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Constante de Planck	$h \simeq 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
	$\hbar \equiv h/(2\pi) \simeq 1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Charge élémentaire	$q_e \simeq 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Masse de l'électron	$m_e \simeq 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masse du proton	$m_p \simeq 1836m_e$
Magnéton de Bohr	$\mu_B = \frac{\hbar q_e}{2m_e} \simeq 9.274 \times 10^{-24} \text{ J/T}$ $\mu_B/h \simeq 1.4 \text{ MHz/G}$
Constante de structure fine	$\alpha \equiv \frac{q_e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \simeq \frac{1}{137}$

Unités atomiques

Dimension Unité atomique

Longueur	$a_0 = \frac{\hbar}{m_e c \alpha} \simeq 0.53 \text{ \AA}$
Masse	m_e
Énergie	$Ha = 2E_I \simeq 27.2 \text{ eV} = m_e c^2 \alpha^2$
Vitesse	αc

Hiérarchie de longueurs



Valeur exacte de la constante de Planck

Redéfinition du kilogramme :



→ balance de Kibble

Depuis le 20 mai 2019,
h est fixée (comme c)

$$h = 6.626\ 070\ 150 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Conférence Générale des Poids et Mesures : 16 novembre 2018



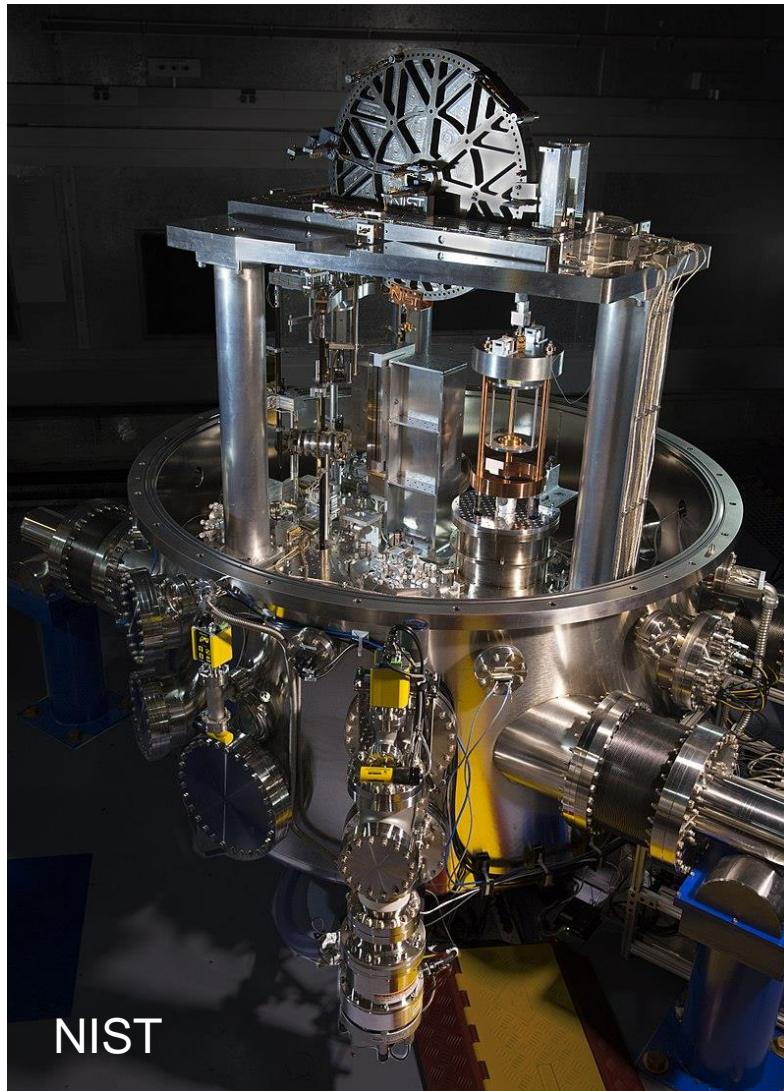
<https://www.youtube.com/watch?v=qA67T7FPBME>

1:40:08 "Measuring with fundamental constants; how the revised SI will work" by Bill Phillips (Nobel laureate, NIST, Gaithersburg)

Balance de Kibble (ou balance du watt)

Relier une puissance mécanique
et une puissance électrique

$$m g v = U I$$



Oublions les nm, passons aux THz !

La fréquence est plus fondamentale que la longueur d'onde :

- Indépendante du milieu
- Mesures les plus précises (peignes de fréquence + horloges optiques : 10^{-18})

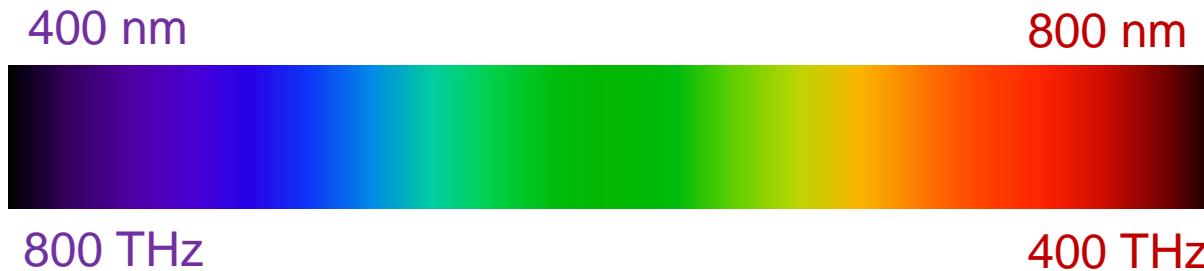
Oublions les nm, passons aux THz !

La fréquence est plus fondamentale que la longueur d'onde :

- Indépendante du milieu
- Mesures les plus précises (peignes de fréquence + horloges optiques : 10^{-18})

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad 1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$$

$$\lambda/\text{nm} \simeq \frac{300\,000}{\nu/\text{THz}}$$



Oublions les nm, passons aux THz !

La fréquence est plus fondamentale que la longueur d'onde :

- Indépendante du milieu
- Mesures les plus précises (peignes de fréquence + horloges optiques : 10^{-18})

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad 1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$$

$$\lambda/\text{nm} \simeq \frac{300\,000}{\nu/\text{THz}}$$



Conversions

$$1 \text{ eV} = 1240 \text{ nm} = 242 \text{ THz} = 12\,000 \text{ K}$$

Cours 1 : Potentiels 1D

1. Puits de potentiel 1d

- 1.1 Puits infini
- 1.2 Puits fini
- 1.3 Puits « semi-infini »

2. Marches de potentiel

- 2.1 Marche attractive
- 2.2 Marche répulsive

3. Barrières de potentiel et effet tunnel

- 3.1 Barrière carrée
- 3.2 Barrière arbitraire (WKB)
- 3.3 Applications

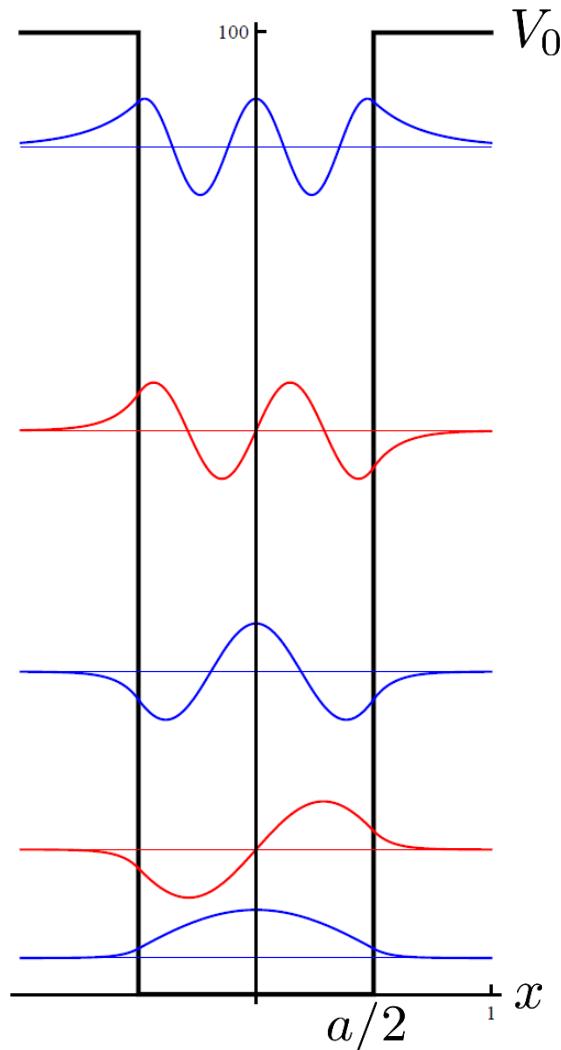
Puits de potentiel fini

Résolution graphique

Voir BD, chapitre 4, section 3.2

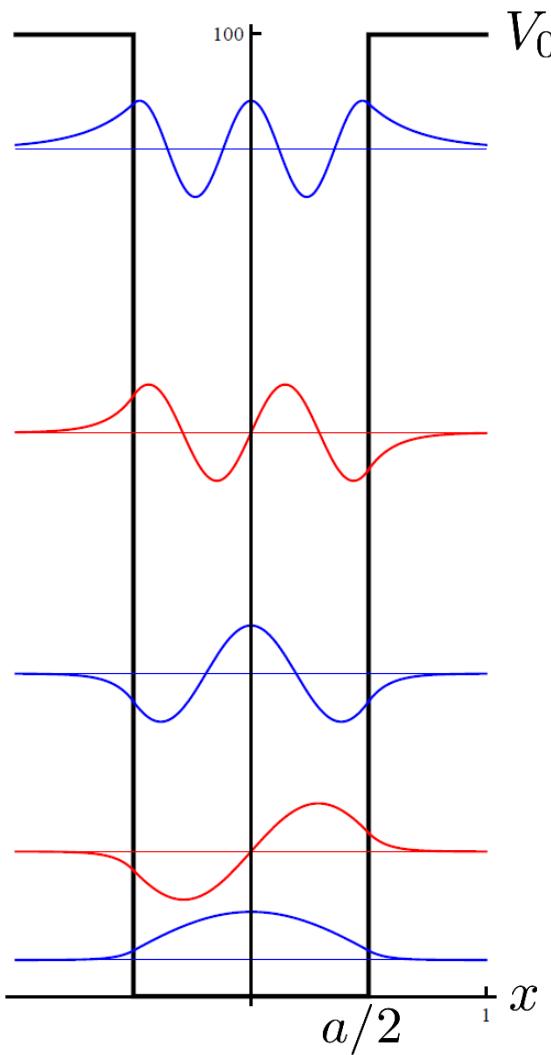
Exemple : $V_0 = 100 \frac{\hbar^2}{2ma^2}$

5 états liés



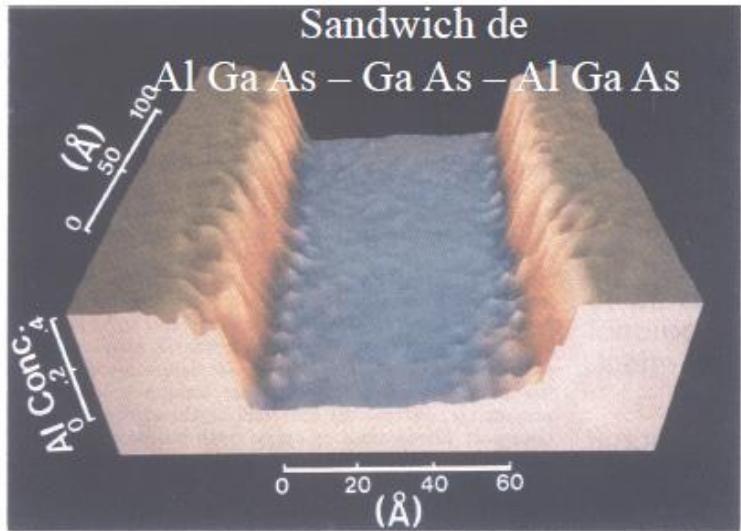
Puits de potentiel fini

Voir BD, chapitre 4, section 3.2

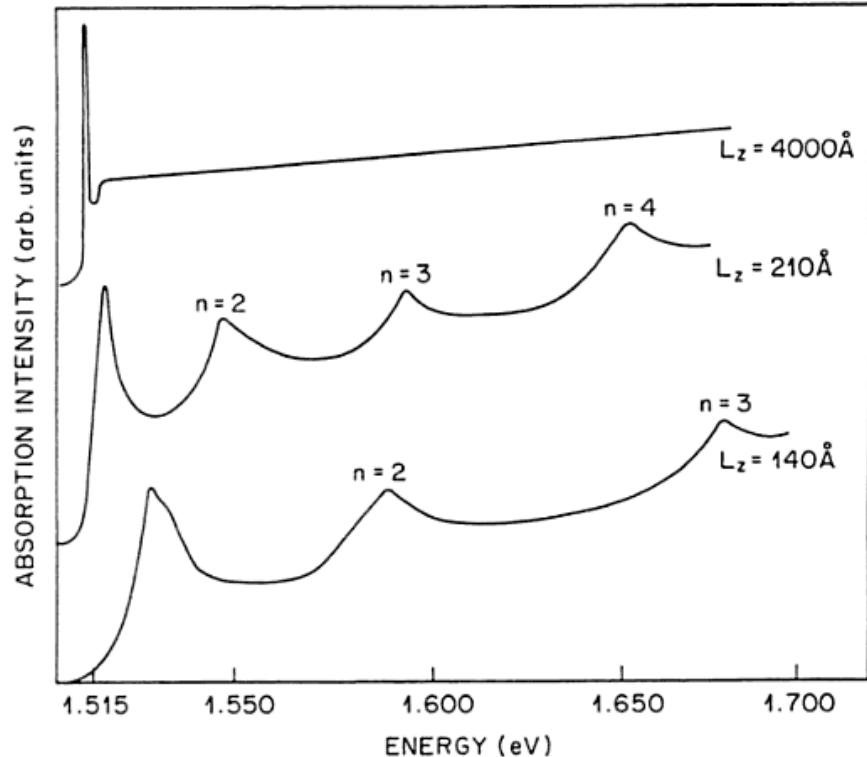


- On retrouve le puits infini pour $V_0 \rightarrow \infty$
- Il existe toujours au moins un état lié (toujours vrai à 1D si $U(-\infty) = U(+\infty)$)
- Alternance niveaux pairs et impairs
- Fondamental : pas de nœud
Premier état excité : un nœud
...
(cf. Sturm-Liouville)

Doubles hétérostructures semi-conductrices



J.-L. Basdevant, J. Dalibard, *Mécanique Quantique*



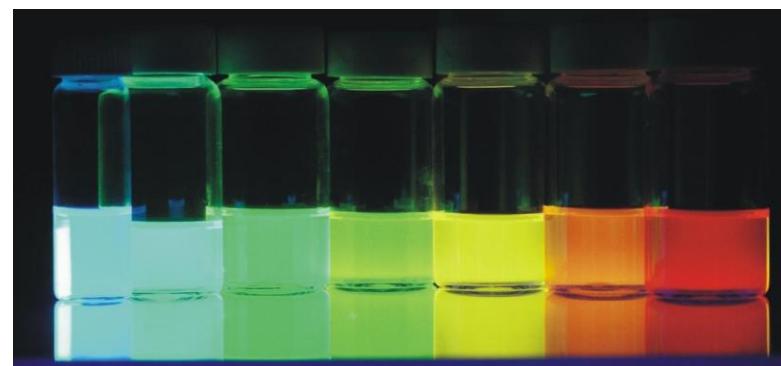
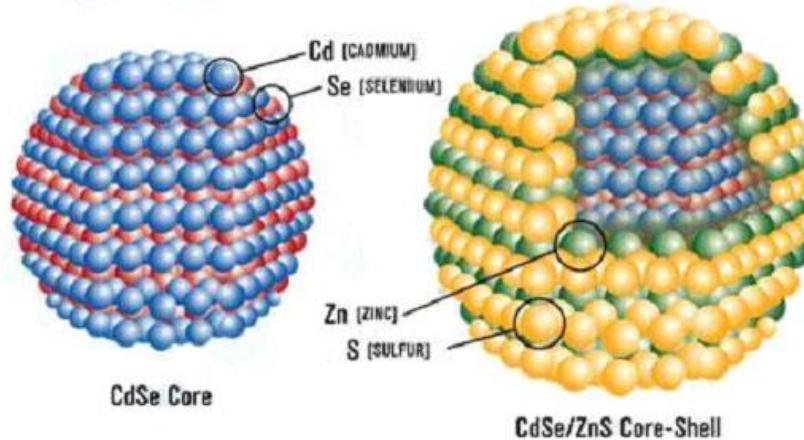
P. S. Zory, Jr. (ed.) *Quantum well lasers*
Academic Press (1993)



Krömer et Alferov
Prix Nobel de physique 2000

Quantum dots (boîtes quantiques)

Exemple : nanoparticules de CdSe

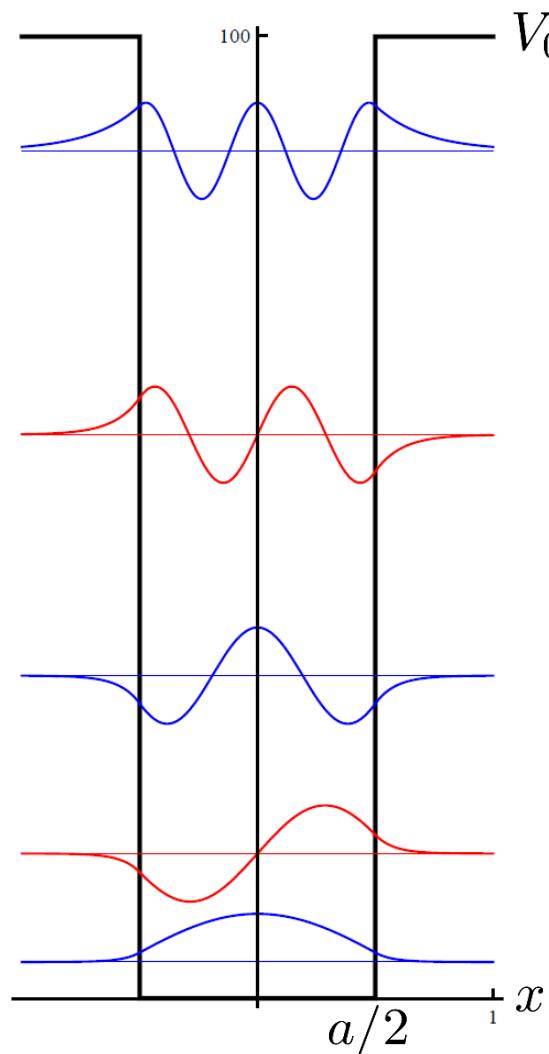


2.3 → 5.5
Size (nanometers)

Du puits fini au puits « semi-infini »

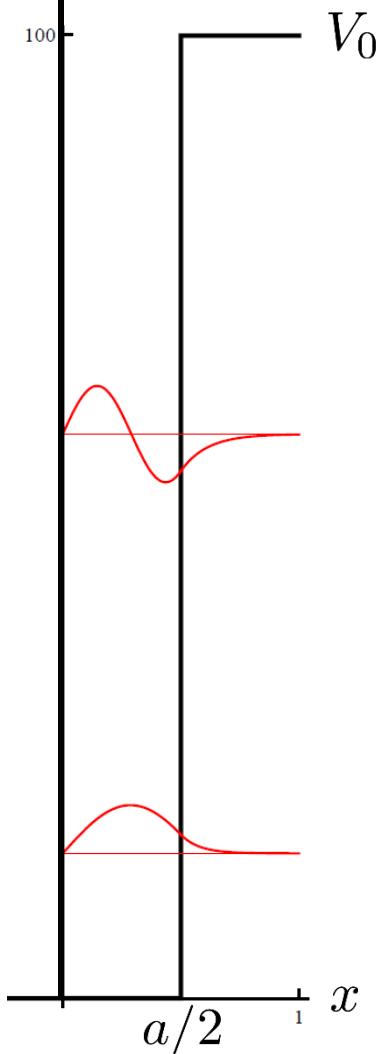
Puits fini $V_0 = 100 \frac{\hbar^2}{2ma^2}$

5 états liés

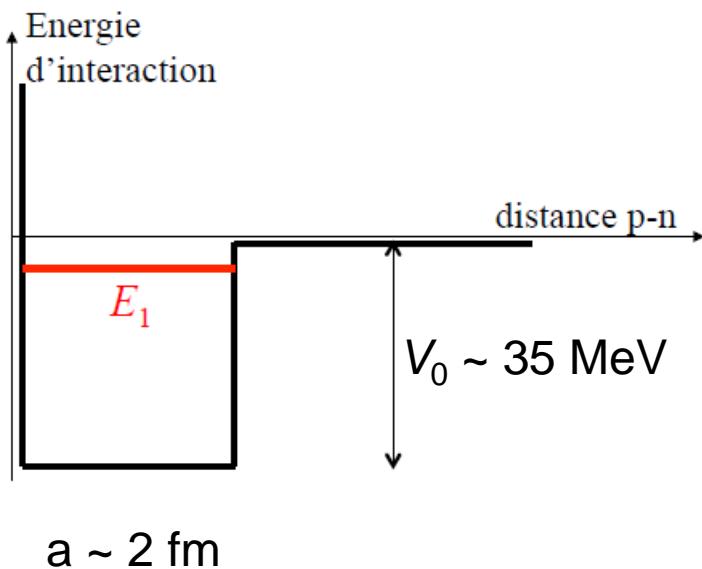


Puits semi-infini largeur $a/2$

2 états liés



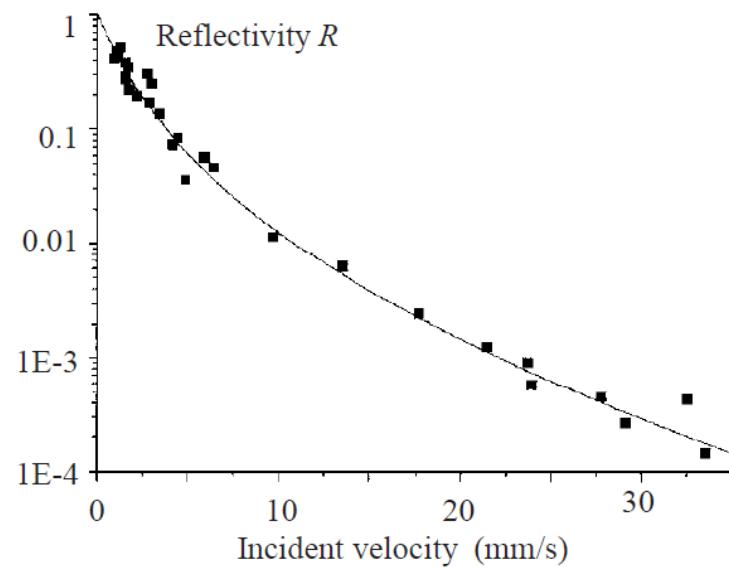
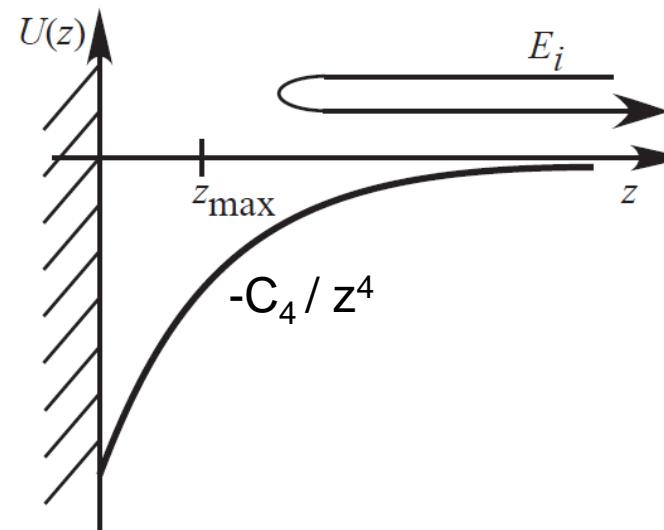
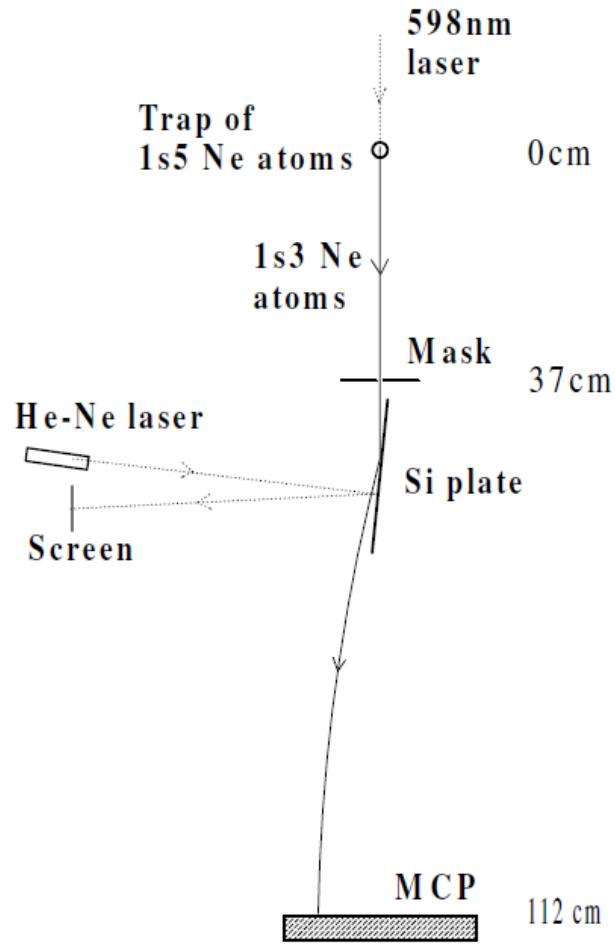
Puits semi-infini : interaction forte p-n



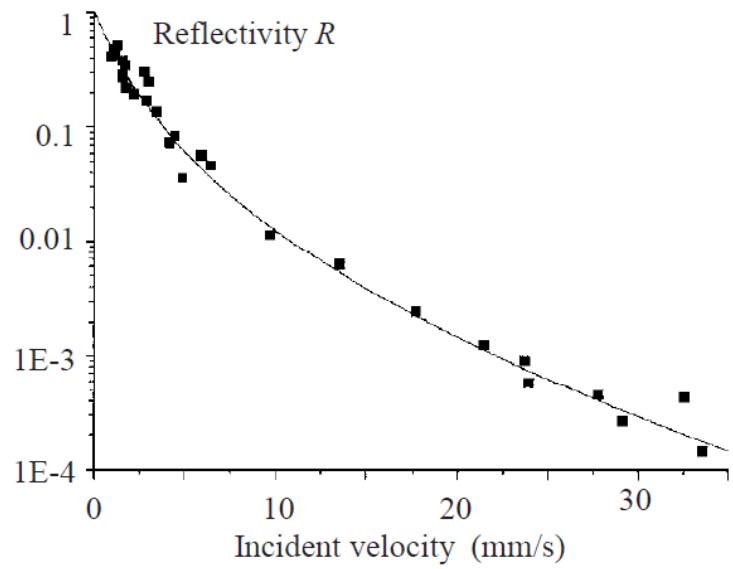
Etat lié
(énergie de liaison $\sim 2 \text{ MeV}$)
Noyau de deutérium

Réflexion quantique d'atomes froids sur une surface de Si

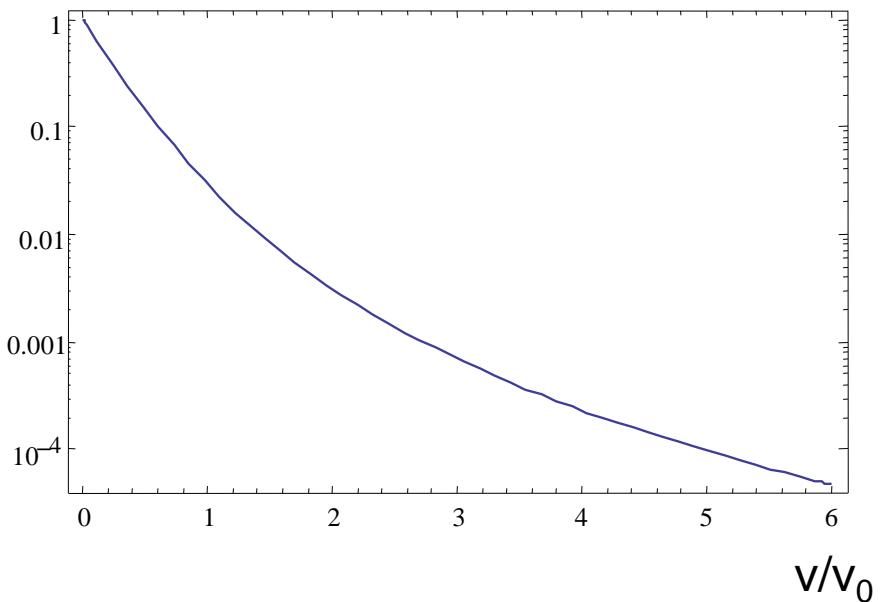
F. Shimizu, PRL **86** 987 (2001)



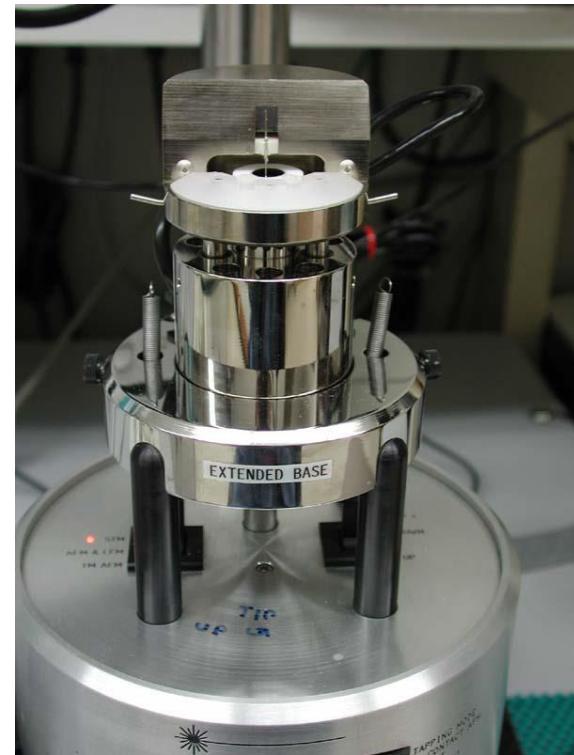
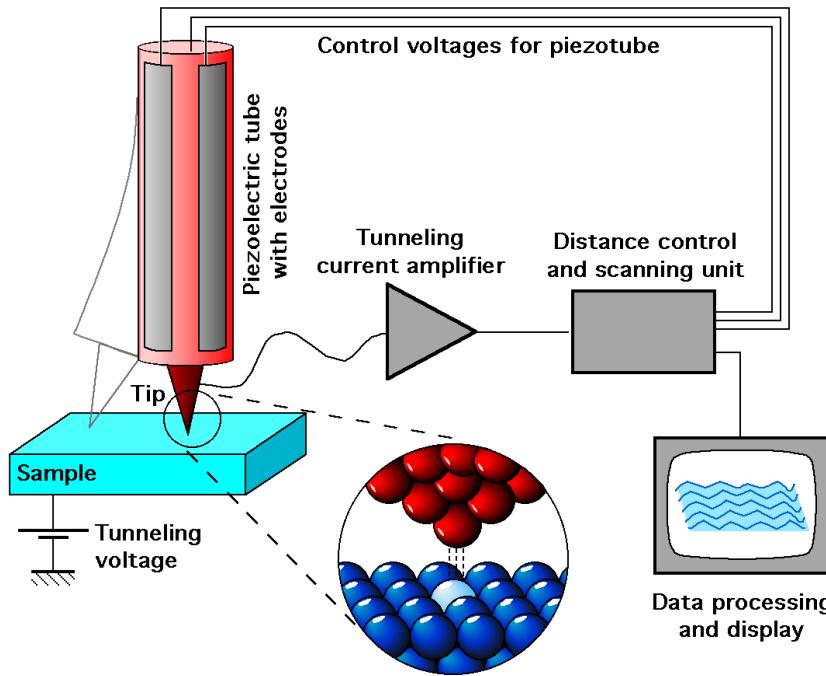
Comparaison au modèle d'une marche « carrée »



$R(v)$



Microscopie à effet tunnel



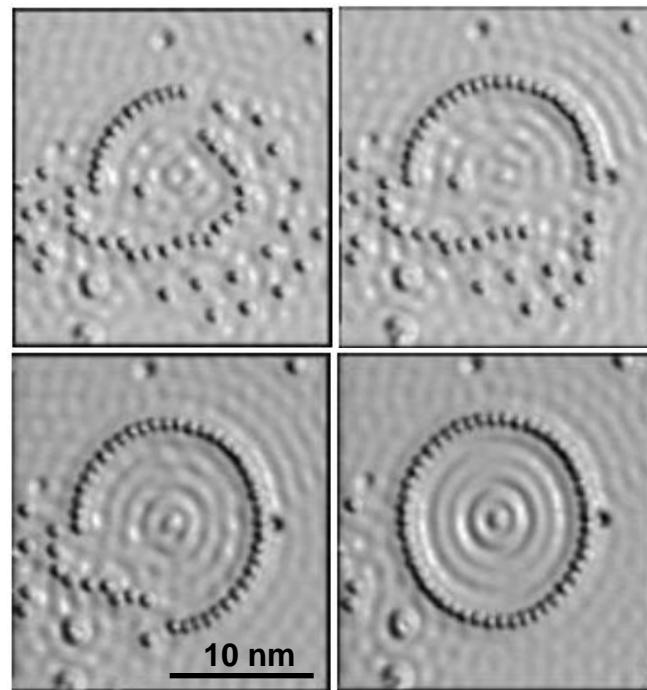
Résolution : 0.1nm (latérale) 0.01 nm (verticale)



Prix Nobel de Physique 1986
Gerd Binnig & Heinrich Rohrer

Microscopie à effet tunnel

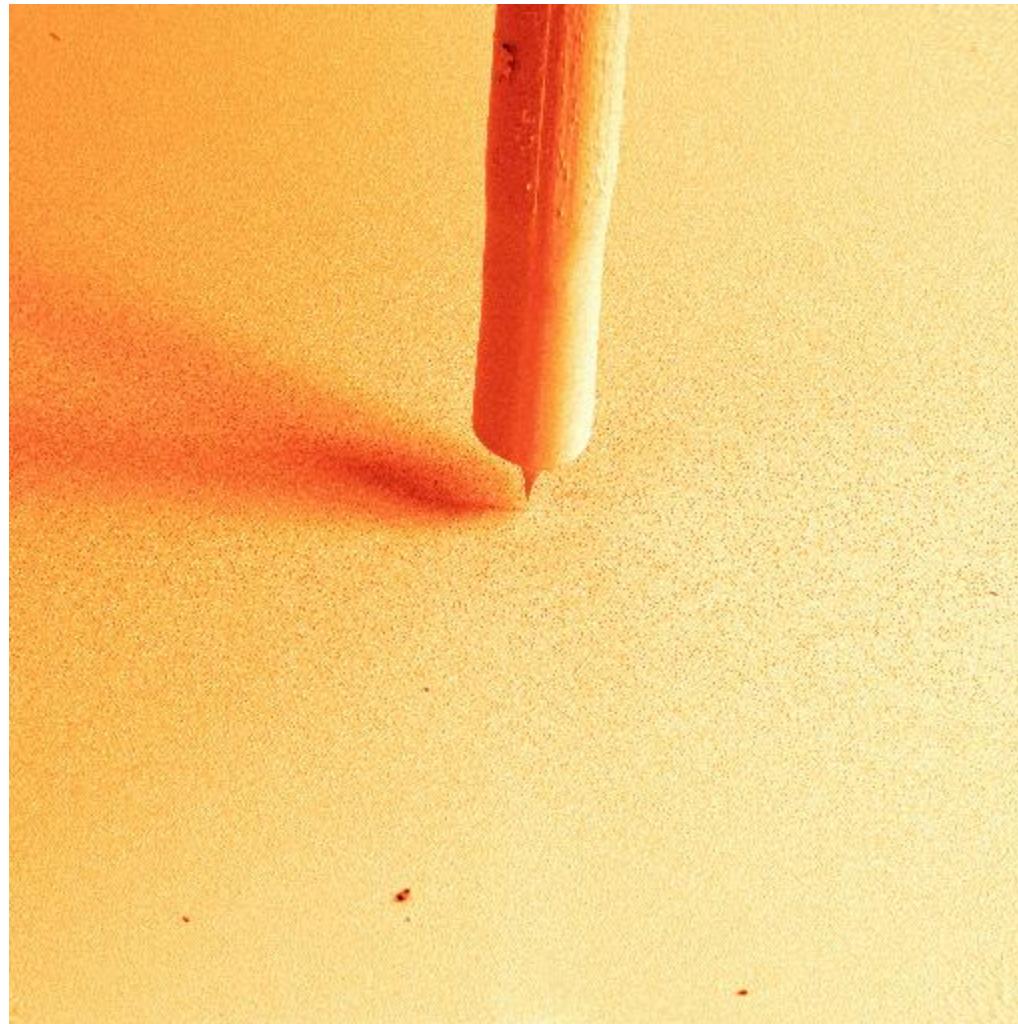
Atomes de Fe sur surface de Cu



Microscopie à effet tunnel

Microscope électronique “filmant” un STM en action (FZ Jülich)

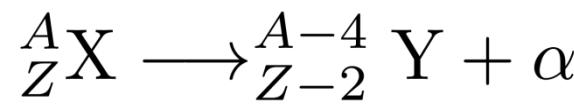
Micro-gouttelettes de Pb sur surface de Ruthénium



Radioactivité alpha

Désintégration alpha :

(noyaux lourds : U, Th...)

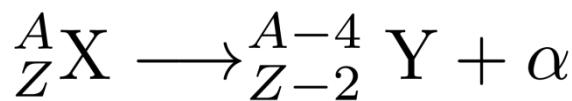


Noyau d'hélium (2p,2n)
Energie E (4 à 10 MeV)

Radioactivité alpha

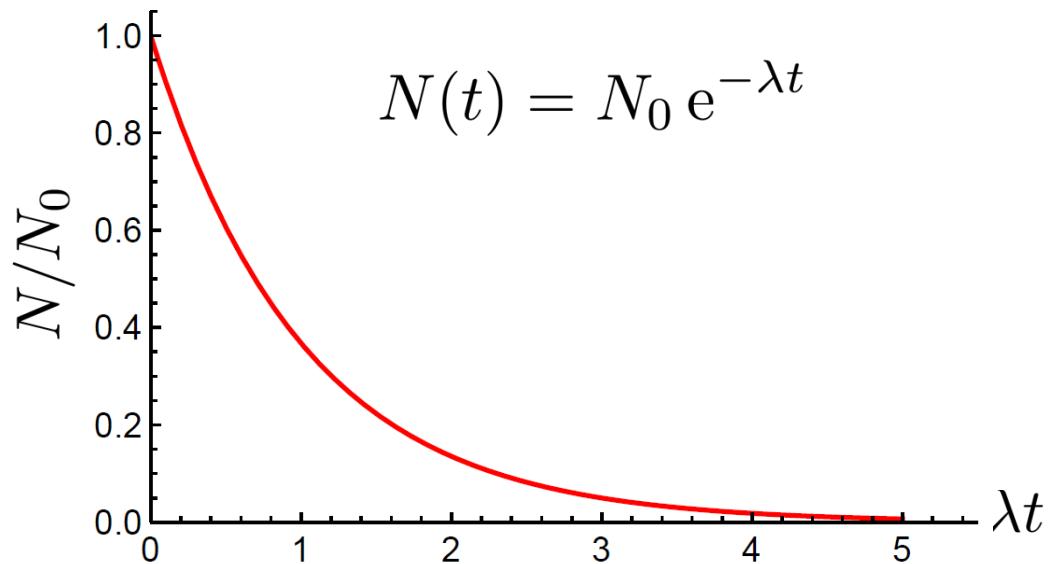
Désintégration alpha :

(noyaux lourds : U, Th...)



Noyau d'hélium (2p,2n)
Energie E (4 à 10 MeV)

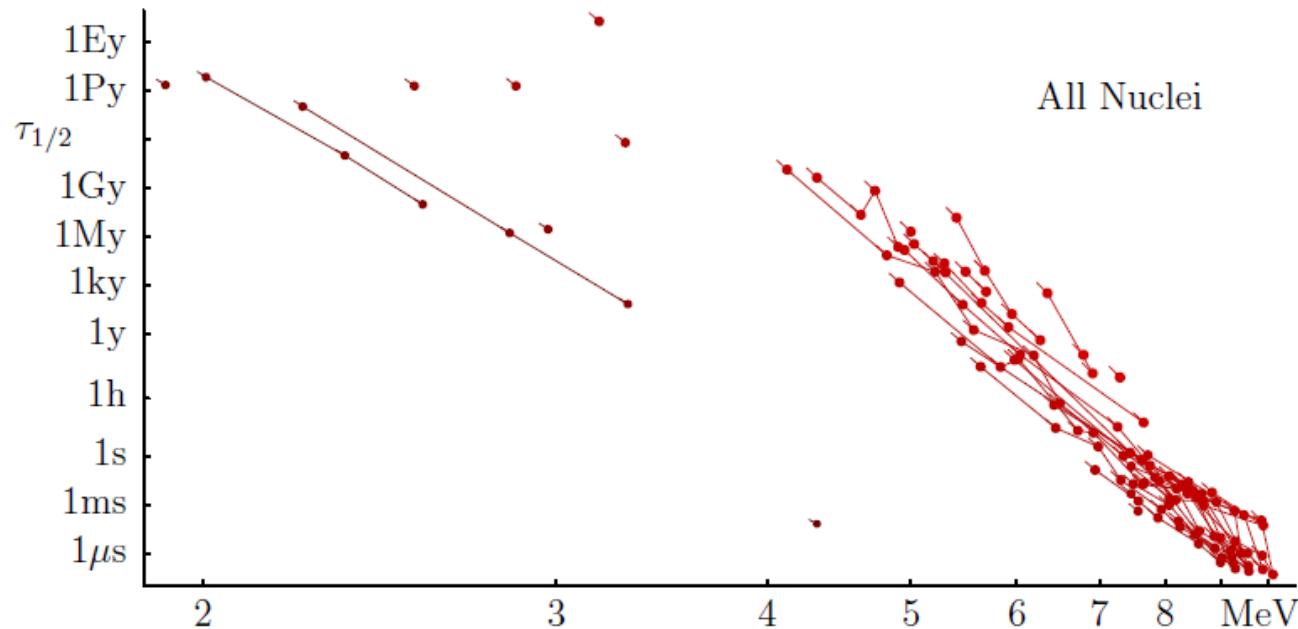
Décroissance exponentielle :



$$\text{Demi-vie : } \tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

De quelques μs à des Ga
selon les noyaux !

Radioactivité alpha : demi-vie vs énergie



L. Van Dommelen, Quantum Mechanics for engineers, p. 699
En ligne à <http://www.eng.fsu.edu/~dommelen/quantum/>

Loi empirique de Geiger-Nuttall (1911)

$$\ln \lambda = -a_1 \frac{Z}{\sqrt{E}} + a_2$$

Radioactivité alpha : modèle de Gamow (1928)



George Gamow (1904-1968)

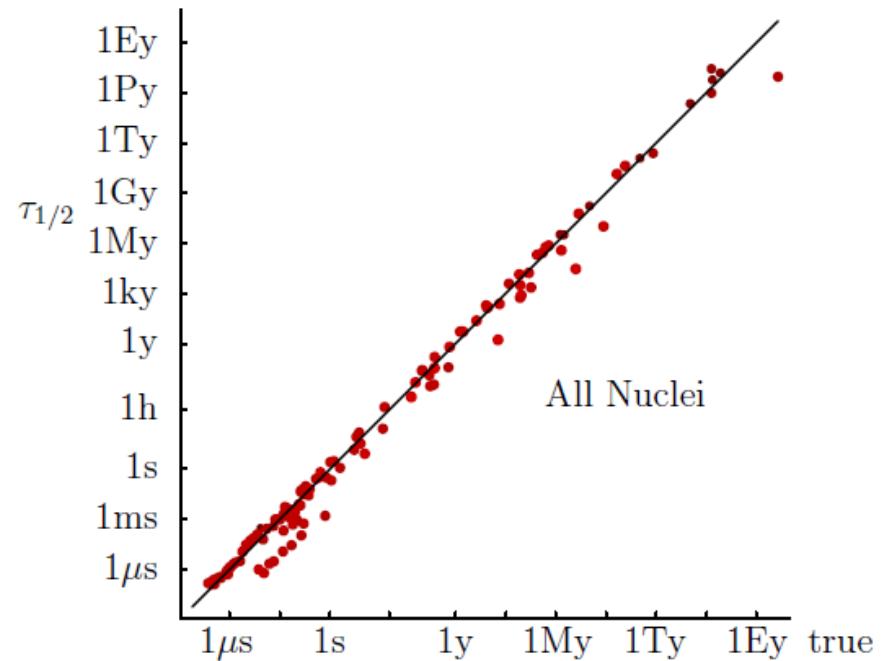
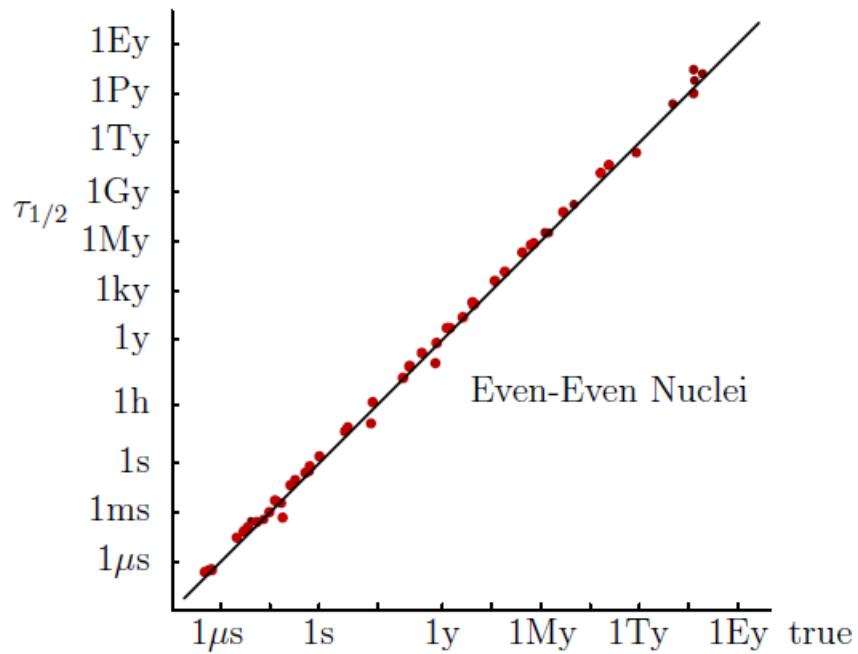
Zur Quantentheorie des Atomkernes.

Von G. Gamow, z. Zt. in Göttingen.

Mit 5 Abbildungen. (Eingegangen am 2. August 1928.)

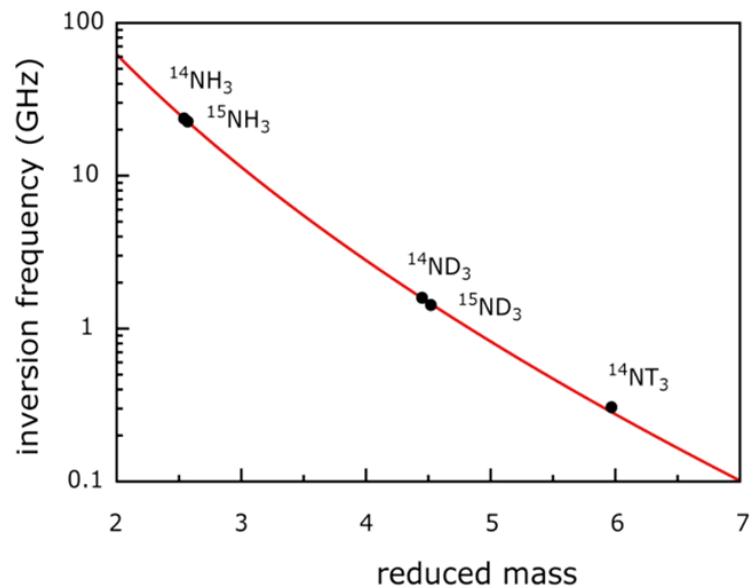
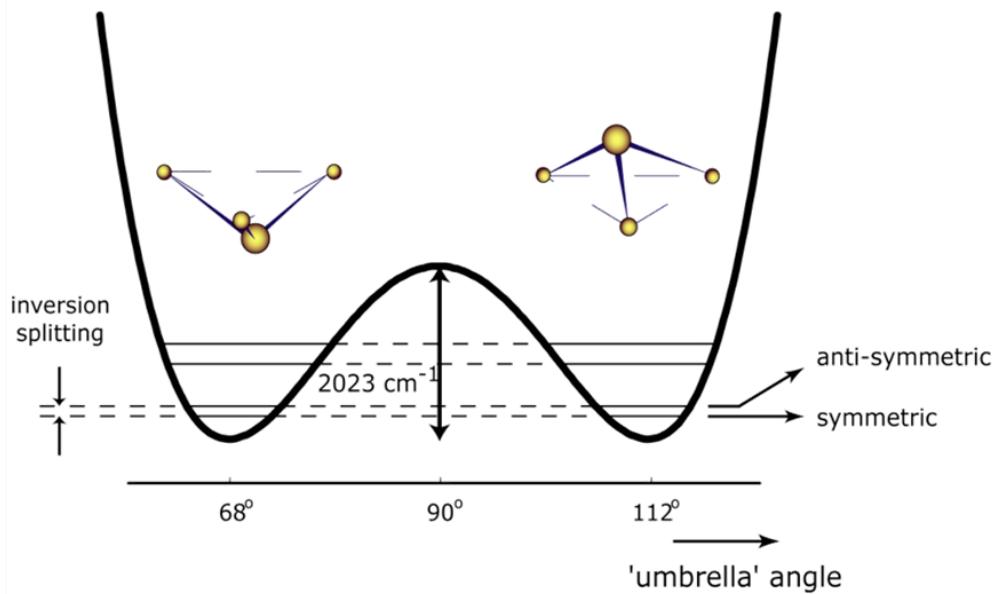
Es wird der Versuch gemacht, die Prozesse der α -Ausstrahlung auf Grund der Wellenmechanik näher zu untersuchen und den experimentell festgestellten Zusammenhang zwischen Zerfallskonstante und Energie der α -Partikel theoretisch zu erhalten.

Comparaison expérience-théorie



L. Van Dommelen, Quantum Mechanics for engineers, p. 704
En ligne à <http://www.eng.fsu.edu/~dommelen/quantum/>

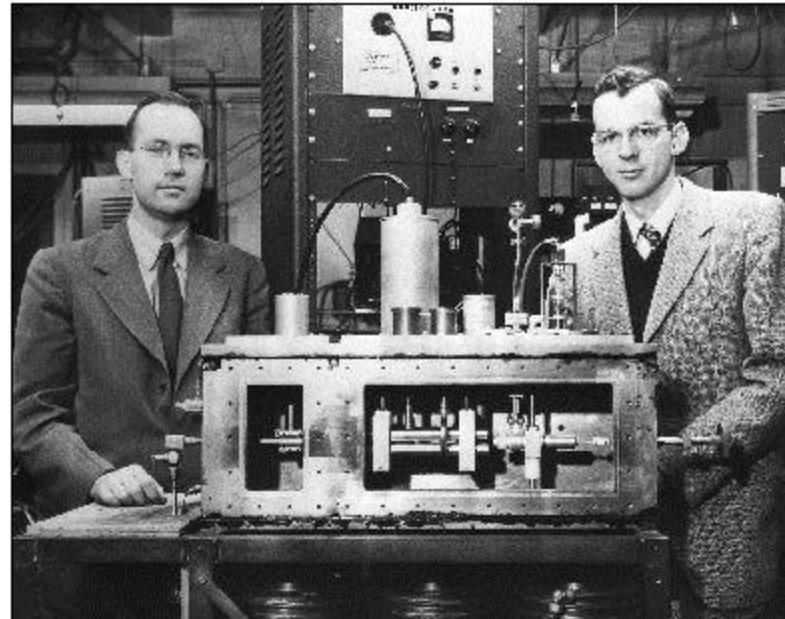
Double puits et molécule d'ammoniac



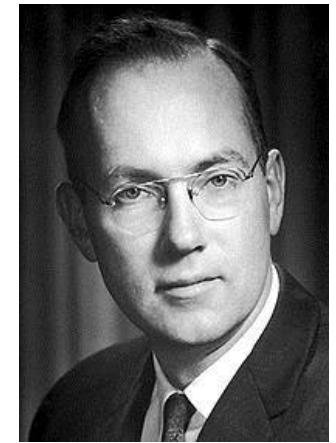
BD, chap. 4 § 5
CDL, compl. G_{IV}

Maser à ammoniac

1954 Gordon-Townes



Voir traitement simple dans BD, chap. 6.



Charles H. Townes (1915-2015), Prix Nobel 1964



Cours 2 : Systèmes à deux niveaux

1. *Deux niveaux et couplage constant*

- 1.1 Motivation, états propres
- 1.2 Oscillation de Rabi
- 1.3 Opérations sur la sphère de Bloch

2. *Deux niveaux et couplage sinusoïdal*

- 2.1 Atome à deux niveaux, approximation de champ tournant
- 2.2 Quelques applications

3. *RMN*

- 2.1 Approches classique et quantique
- 2.2 RMN en pratique : des jets atomiques à l'IRM

Etats propres et énergies propres

Dans la base $\{ |a\rangle, |b\rangle \}$:
$$H = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} -\Delta & \Omega \\ \Omega & \Delta \end{pmatrix}$$

Valeurs propres :
$$E_{\pm} = \pm \frac{\hbar}{2} \sqrt{\Delta^2 + \Omega^2}$$

Vecteurs propres :
$$|\psi_+\rangle = \sin \theta |a\rangle + \cos \theta |b\rangle$$
 où $\tan 2\theta = \frac{\Omega}{\Delta}$
$$|\psi_-\rangle = \cos \theta |a\rangle - \sin \theta |b\rangle$$

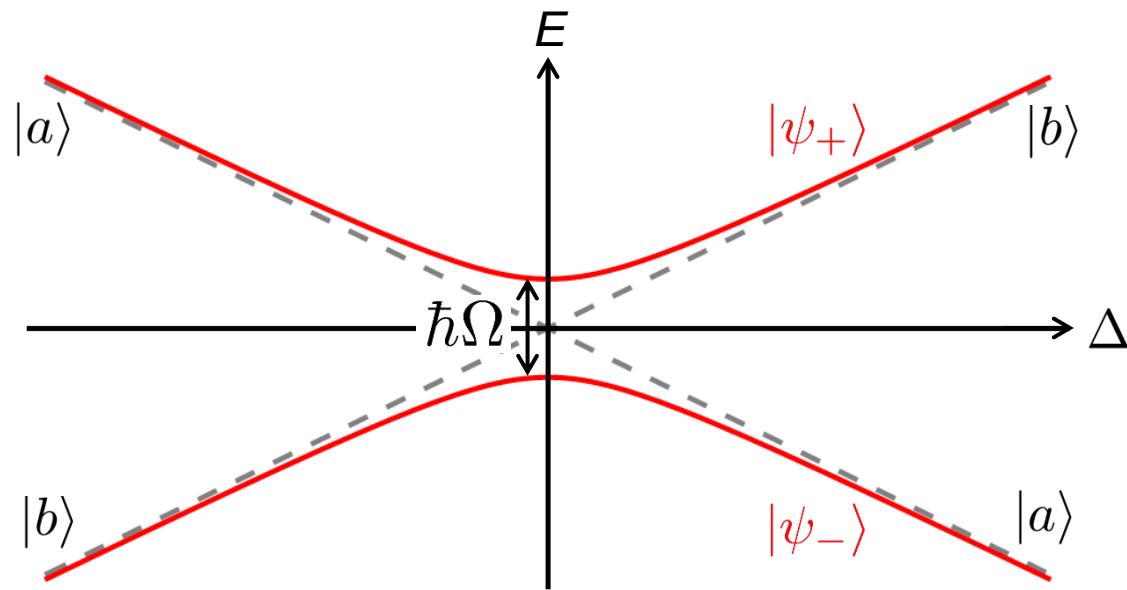
Etats propres et énergies propres

Dans la base $\{ |a\rangle, |b\rangle \}$:

$$H = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} -\Delta & \Omega \\ \Omega & \Delta \end{pmatrix}$$

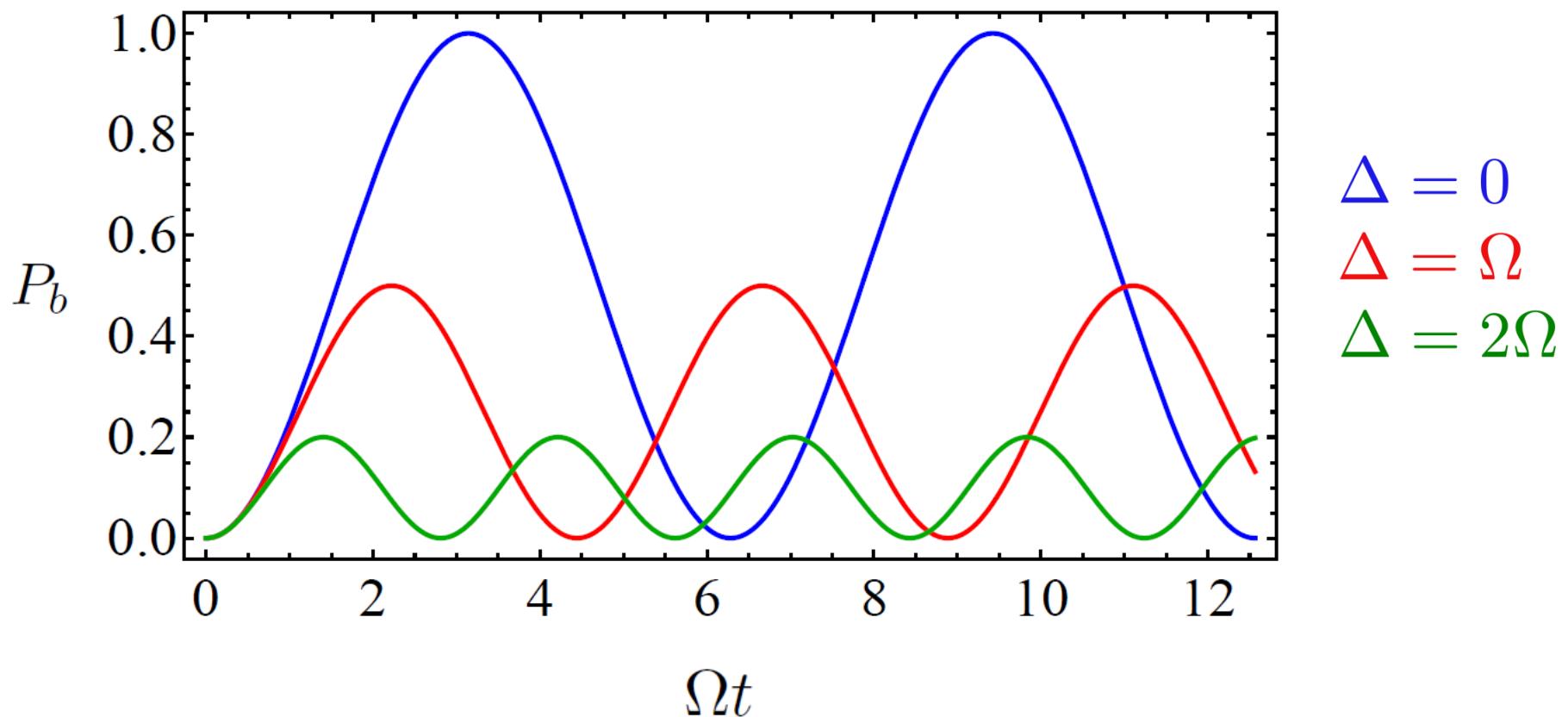
Valeurs propres : $E_{\pm} = \pm \frac{\hbar}{2} \sqrt{\Delta^2 + \Omega^2}$

Vecteurs propres : $|\psi_+\rangle = \sin \theta |a\rangle + \cos \theta |b\rangle$ où $\tan 2\theta = \frac{\Omega}{\Delta}$
 $|\psi_-\rangle = \cos \theta |a\rangle - \sin \theta |b\rangle$



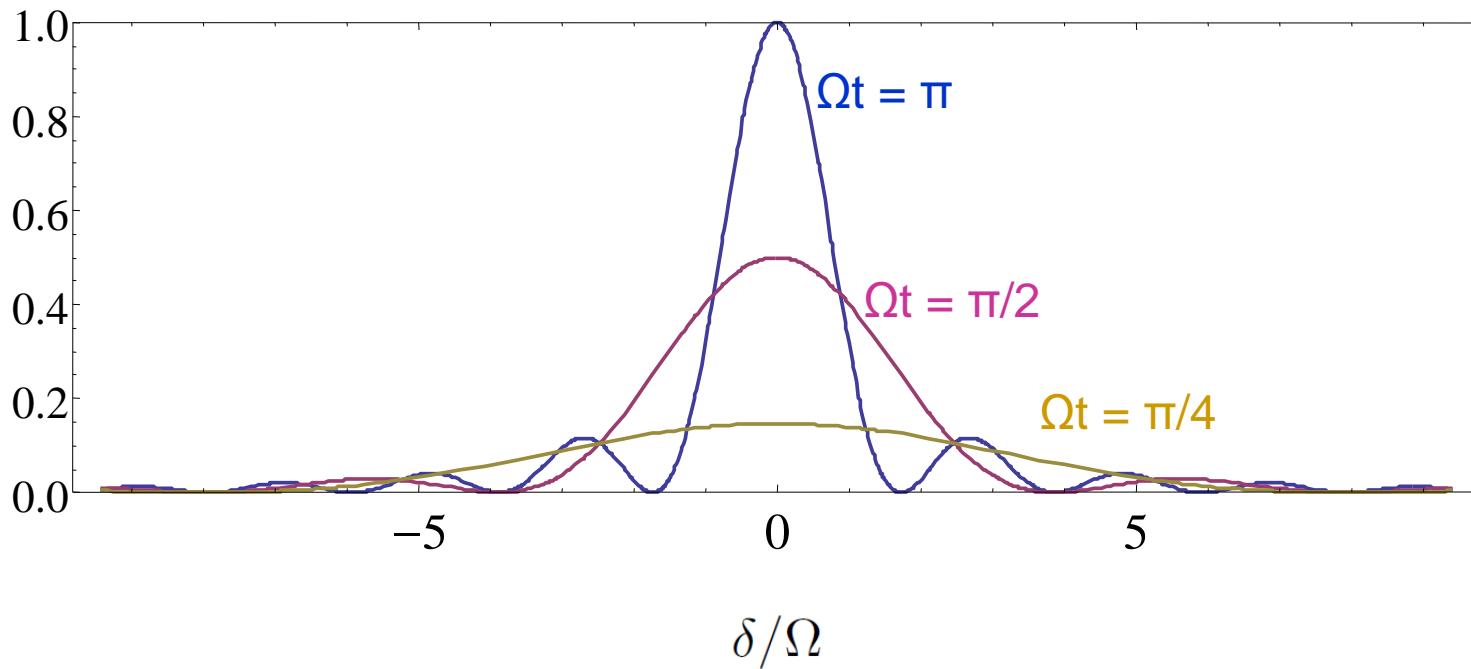
Formule de Rabi : domaine temporel

$$P_b(t) = \frac{\Omega^2}{\Omega^2 + \Delta^2} \sin^2 \left(\sqrt{\Omega^2 + \Delta^2} \frac{t}{2} \right)$$



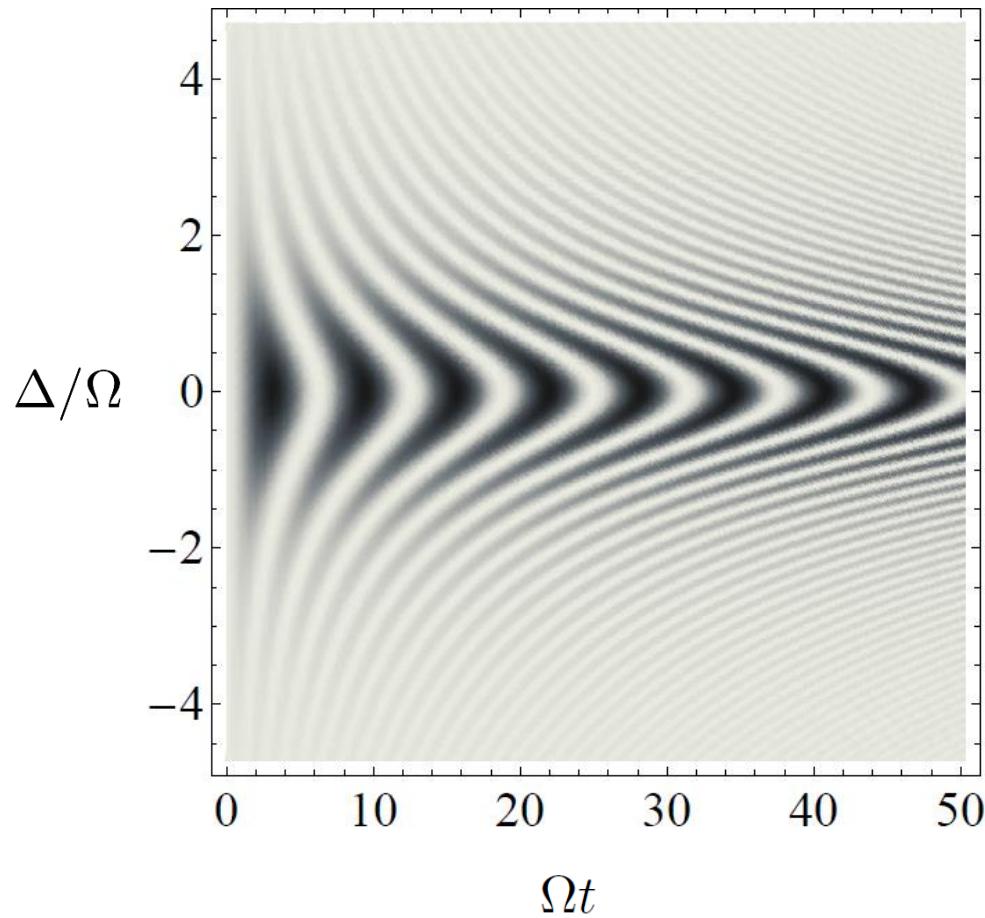
Formule de Rabi : domaine fréquentiel

$$P_b(t) = \frac{\Omega^2}{\Omega^2 + \Delta^2} \sin^2 \left(\sqrt{\Omega^2 + \Delta^2} \frac{t}{2} \right)$$



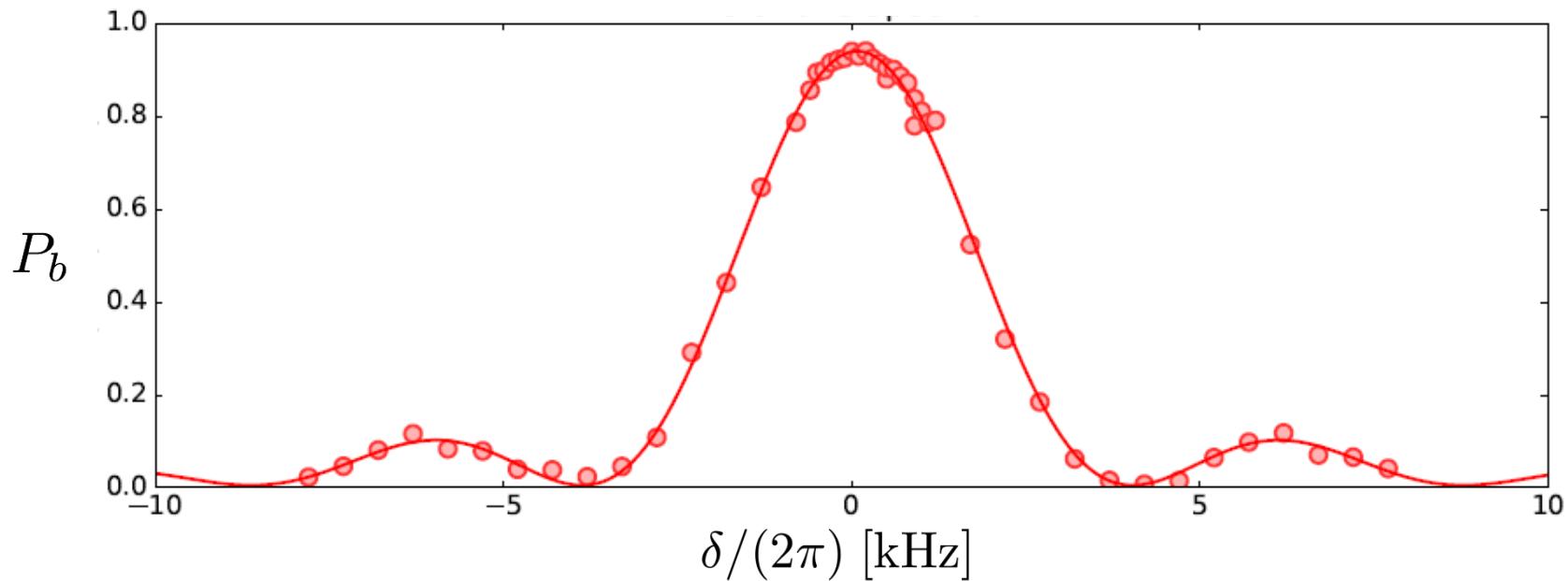
Formule de Rabi

$$P_b(t) = \frac{\Omega^2}{\Omega^2 + \Delta^2} \sin^2 \left(\sqrt{\Omega^2 + \Delta^2} \frac{t}{2} \right)$$



Oscillations de Rabi d'un atome unique

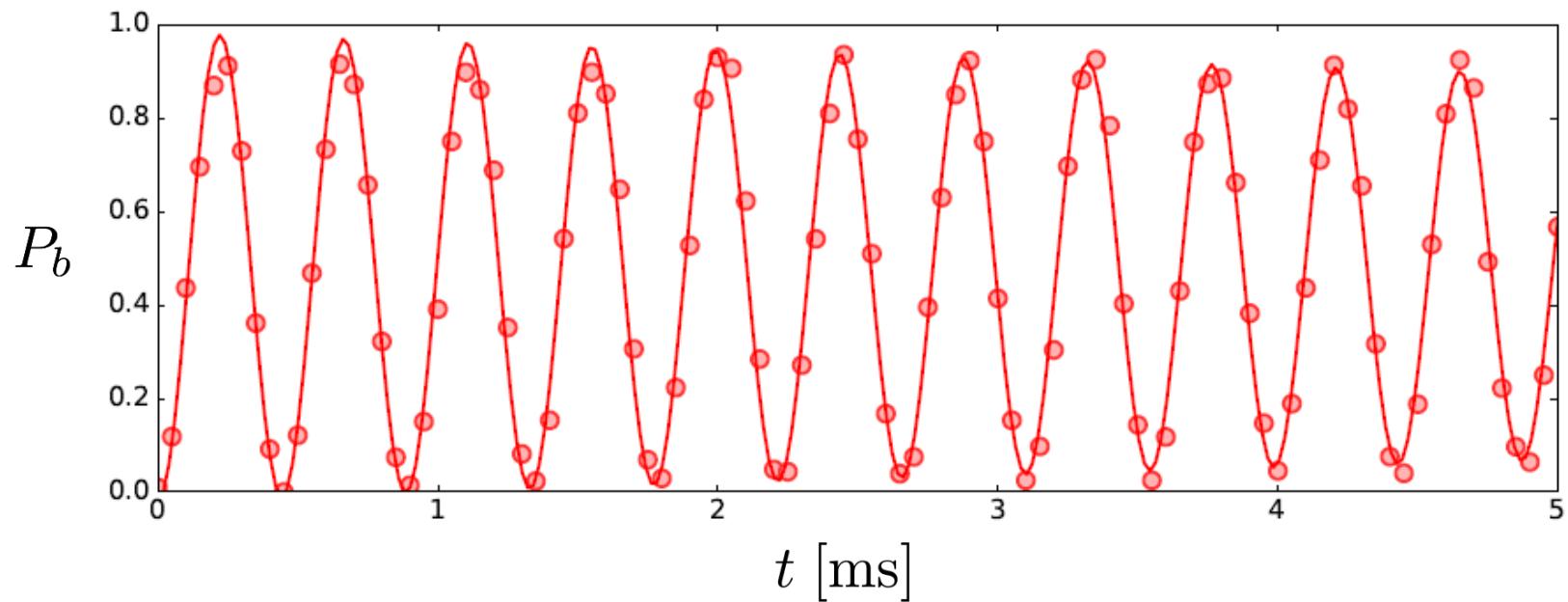
$$P_b(t) = \frac{\Omega^2}{\Omega^2 + \Delta^2} \sin^2 \left(\sqrt{\Omega^2 + \Delta^2} \frac{t}{2} \right)$$



Spectre de la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental du ^{87}Rb (Institut d'optique, Palaiseau)

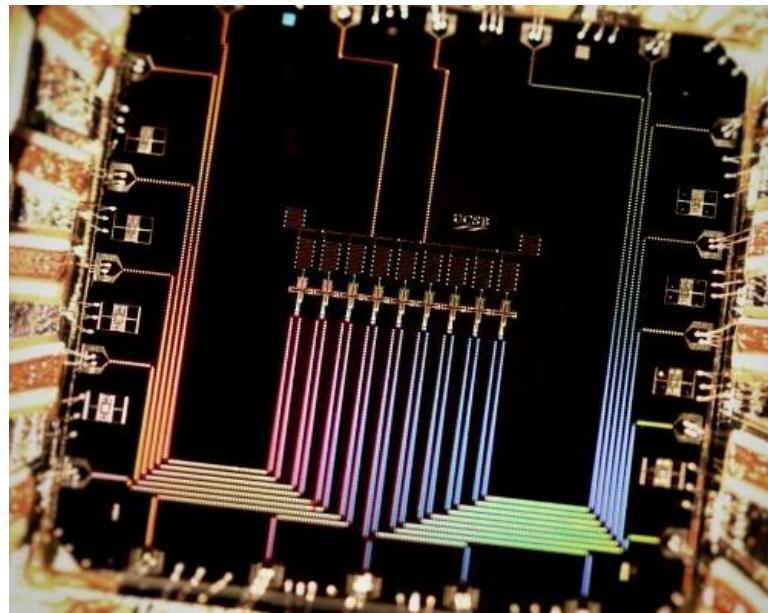
Oscillations de Rabi d'un atome unique

$$P_b(t) = \frac{\Omega^2}{\Omega^2 + \Delta^2} \sin^2 \left(\sqrt{\Omega^2 + \Delta^2} \frac{t}{2} \right)$$

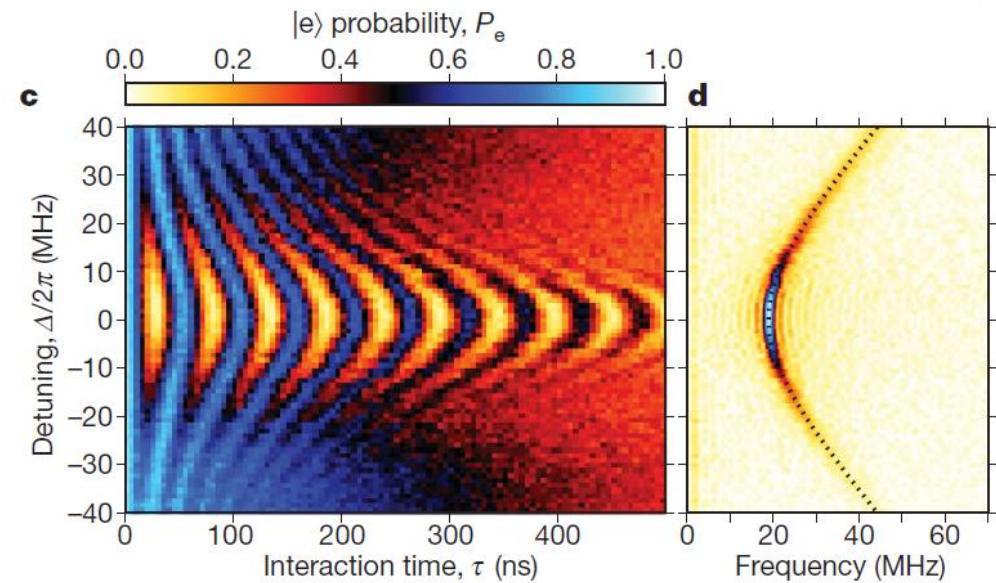


Oscillation de Rabi entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental du ^{87}Rb (Institut d'optique, Palaiseau)

Oscillations de Rabi d'un qubit supraconducteur

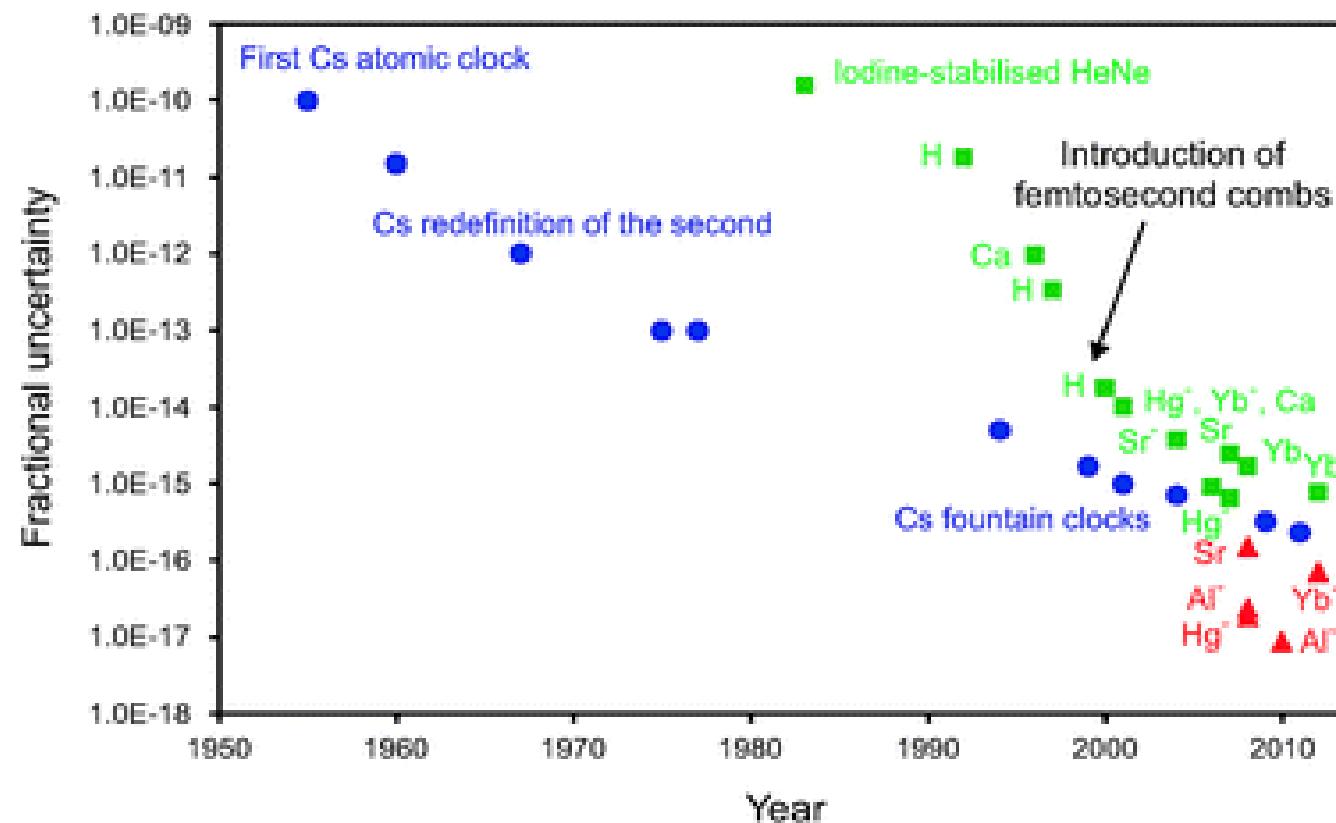


9 qubits supraconducteurs
(John Martinis, UCSB)



Synthesizing arbitrary quantum states in a superconducting resonator
Nature **459**, 546 (2009).

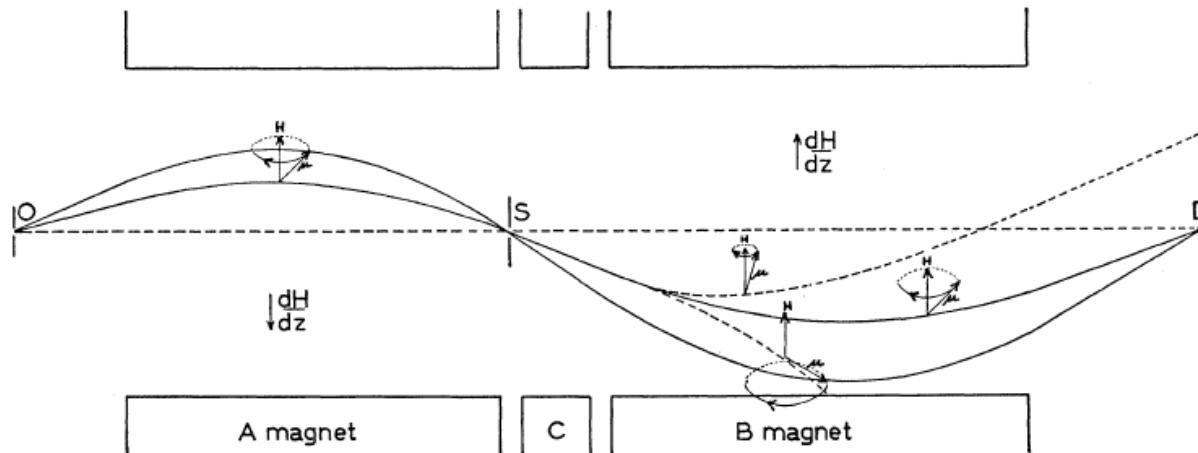
Précision des horloges atomiques



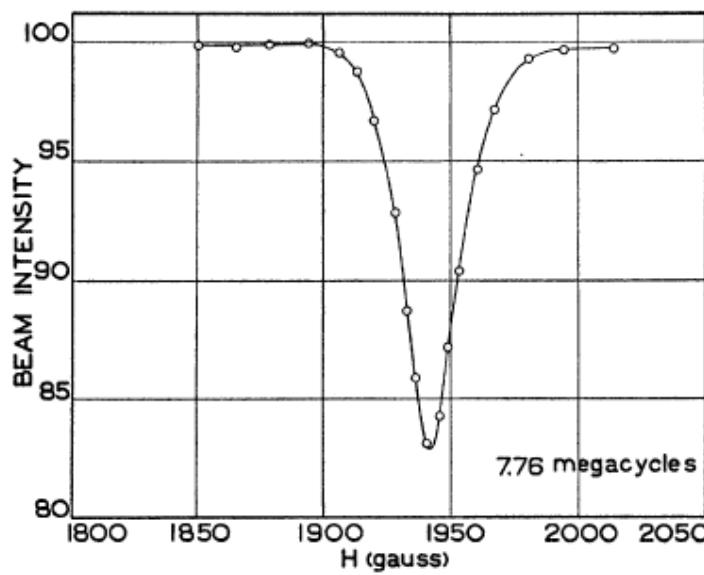
Applications : Physique fondamentale, GPS,...

Horloges optiques : précision actuelle 10^{-18} (horloge au Sr)
Probable redéfinition de la seconde dans les 10 ans qui viennent...

RMN : dans des jets moléculaires (Rabi)



I. I. Rabi et al.,
Phys Rev 55, 526 (1939)



I.I.Rabi (1898-1988),
Prix Nobel de Physique 1944

RMN : dans les solides et les liquides: Purcell et Bloch

F. Bloch, W. W. Hansen, and M. Packard
Phys. Rev. **70**, 474 (1946)

Signal de RMN du proton dans l'eau

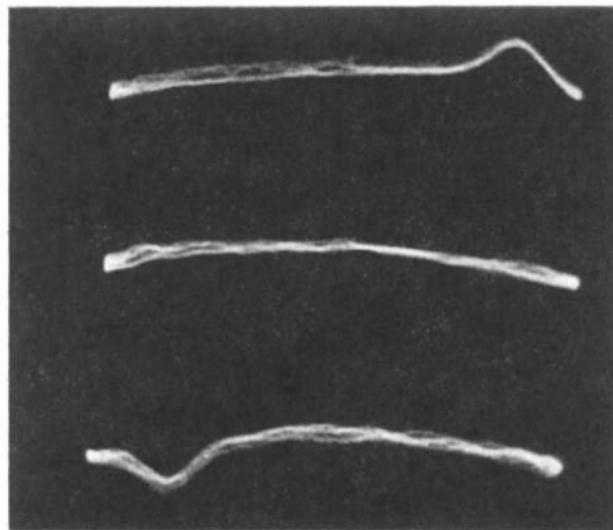


FIG. 8. Photographic record of the proton signal from water. The three traces from top to bottom correspond to the situation *a*, *b*, *c* of Fig. 7.

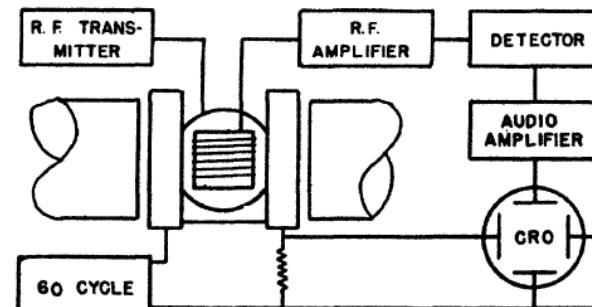
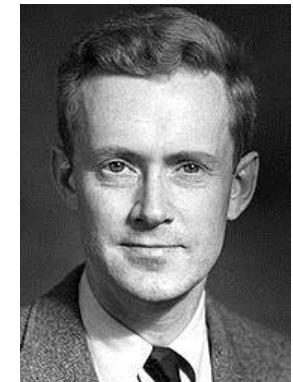
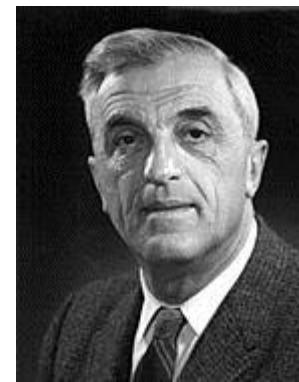


FIG. 3. Block diagram of apparatus.

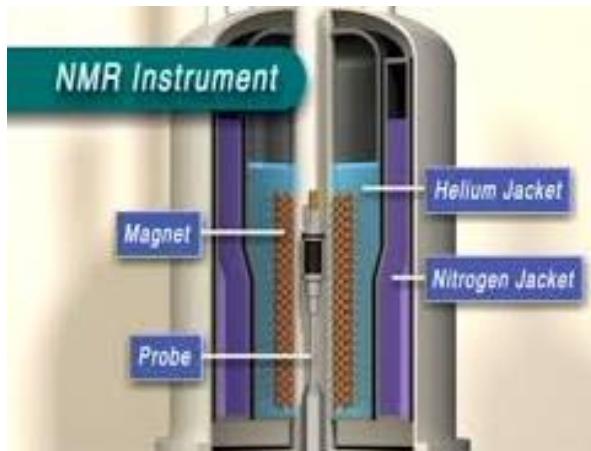
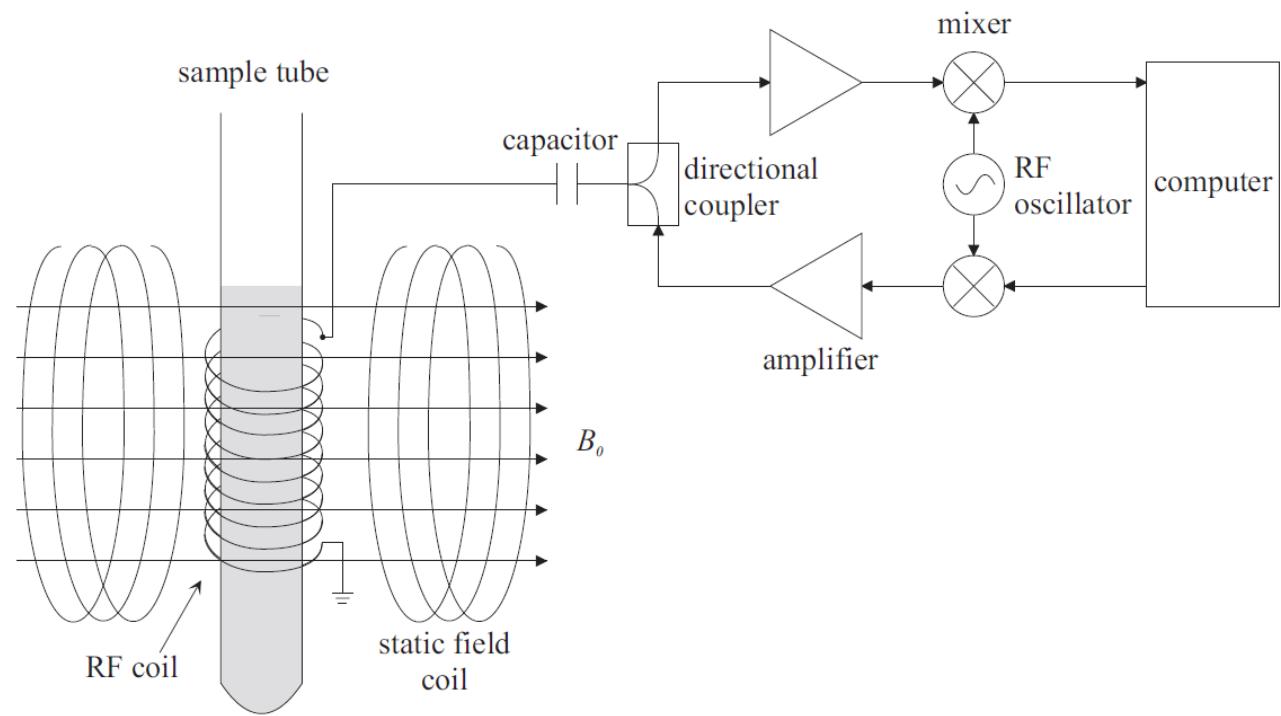


Felix Bloch Edward M. Purcell
(1905-1983) (1912-1997)

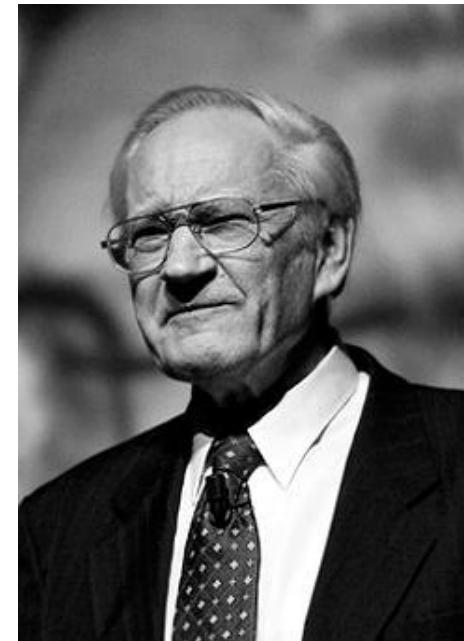
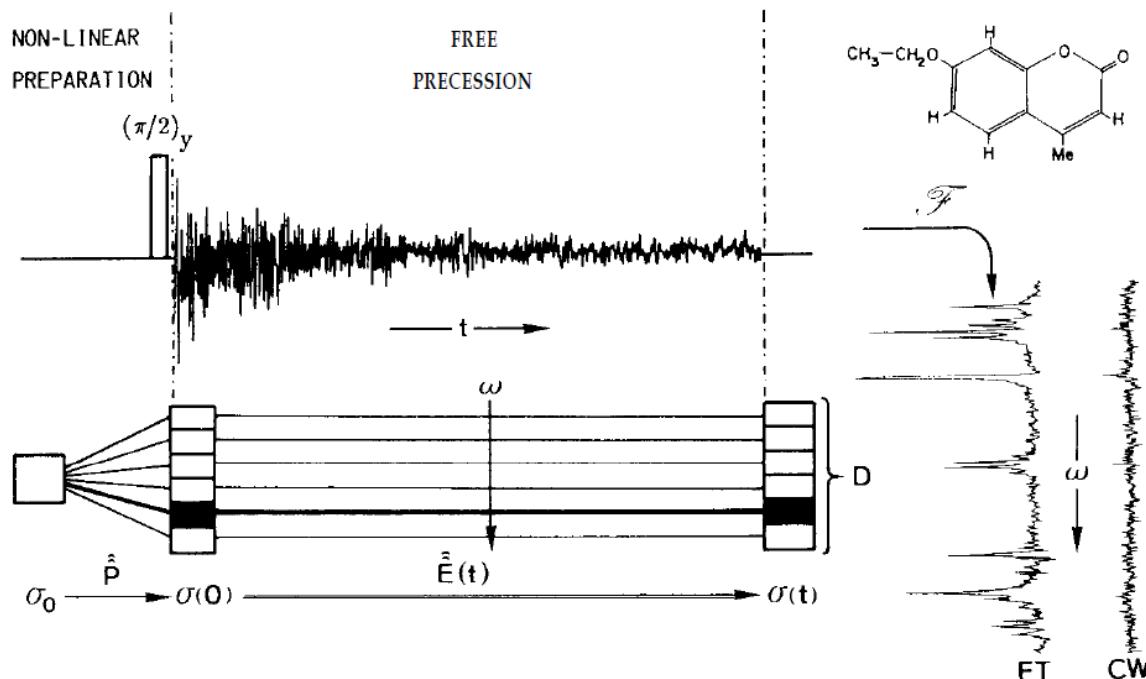


Prix Nobel de Physique 1952

Spectroscopie RMN



RMN : spectroscopie haute résolution en chimie



R.R. Ernst (1933-)
Prix Nobel de Chimie 1991



Nobel lecture :

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1991/ernst-lecture.pdf

RMN : application en chimie



$B = 5 \text{ T}$ (aimant supraconducteur)

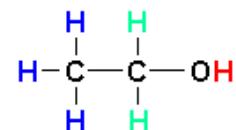
$$\hbar f = 2 \mu \text{B}$$

Protons : $\mu = 1.5 \cdot 10^{-3} \mu_B$

$$f = 200 \text{ MHz}$$

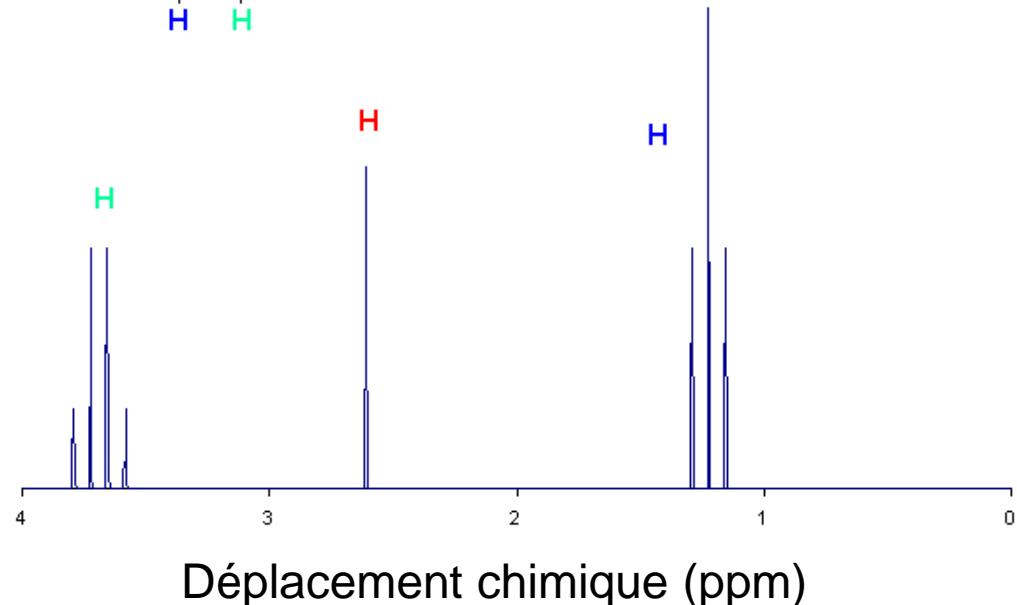
Commercial, $\sim 20\,000 \text{ €}$ d'occasion

Ethanol

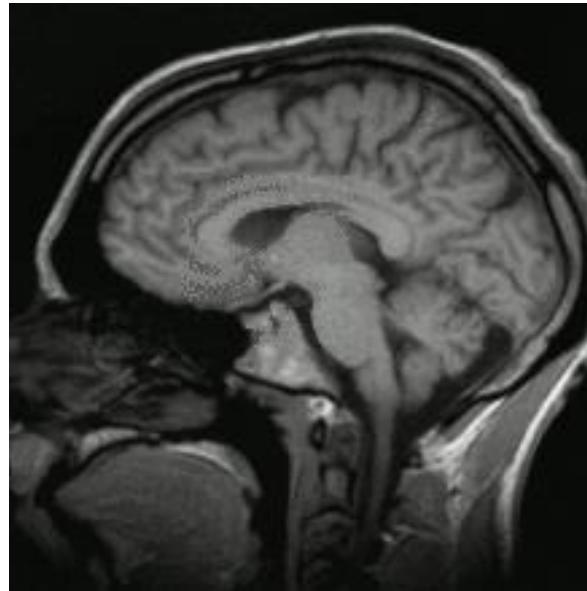


Pulse $\pi/2$
Free-induction decay (FID)
Transformée de Fourier rapide

Spectre → structure de la molécule



RMN : imagerie médicale (IRM)



Sélection spatiale :

gradients de champs selon plusieurs axes
et séries de pulses : très versatile.

Intérêt :

Matière « molle » : cerveau, moelle épinière...
(au contraire des rayons X : os,...)

IRM fonctionnelle du cerveau (neurosciences)



Paul C. Lauterbur



Sir Peter Mansfield



Prix Nobel de Physiologie
Médecine 2003

***Cours 3 : Particules identiques.
Applications***

Cours 3 : Particules identiques. Applications

1. Rappels

- 1.1 Indiscernabilité en mécaniques classique et quantique
- 1.2 Postulat de symétrisation
- 1.3 Connexion spin-statistique
- 1.4 Particules composites

2. Applications

- 2.1 Classification périodique
- 2.2 Interaction d'échange ; origine microscopique du ferromagnétisme
- 2.3 Gaz quantiques dégénérés

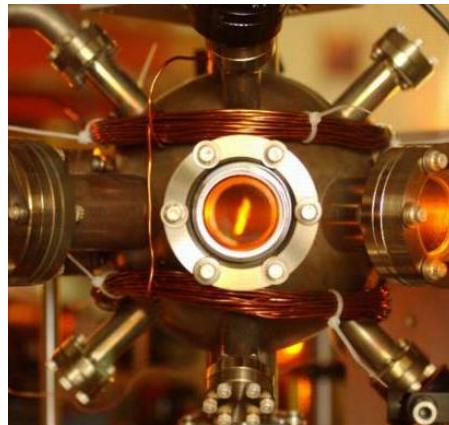
Refs. générales :

BD chap. 16, CDL chap. 14

La route vers la condensation de Bose-Einstein

1. Refroidissement laser (piège magnéto-optique)

$N \sim 10^9$ atomes,
 $T \sim 100 \mu\text{K}$,
 $n\lambda^3 \sim 10^{-6}$



Steven Chu



Claude Cohen-Tannoudji



William D. Phillips



Prix Nobel de Physique 1997

2. Refroidissement par évaporation dans un piège conservatif (magnétique ou optique)

$N \sim 10^6$ atomes,
 $T \sim 100 \text{nK}$,
 $n\lambda^3 \sim 1$



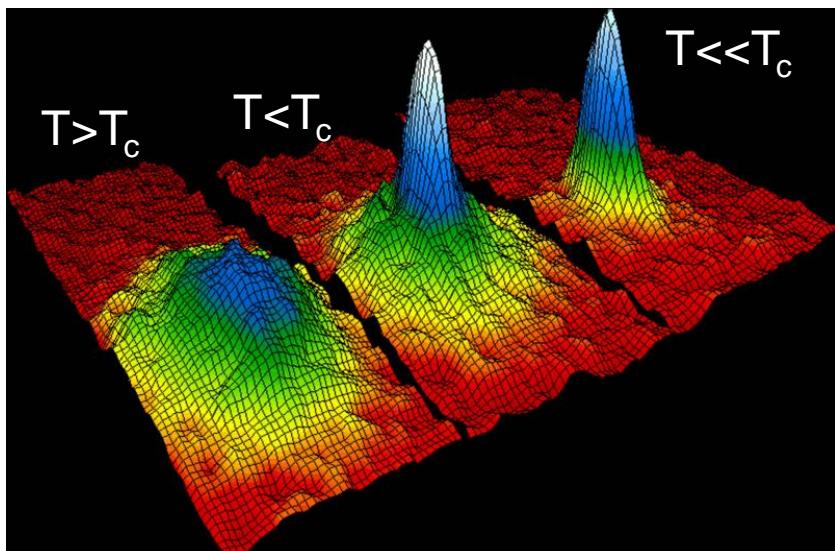
Condensation de Bose-Einstein de vapeurs atomiques

1995 : CBE dans vapeurs de Rb et Na.

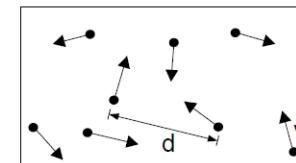
E. A. Cornell, C. E. Wieman (Boulder)

W. Ketterle (MIT)

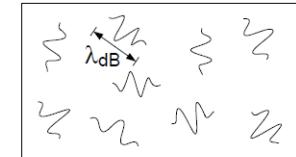
Distribution de densité après temps de vol :
distribution des vitesses initiales



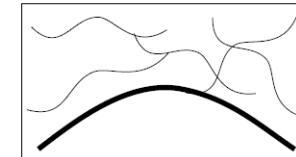
W. Ketterle, Nobel lecture



High Temperature T :
thermal velocity v
density d^{-3}
"Billiard balls"

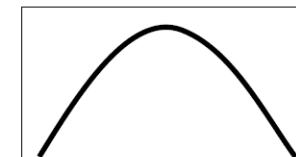


Low Temperature T :
De Broglie wavelength
 $\lambda_{dB} = h/mv \propto T^{-1/2}$
"Wave packets"



$T = T_c$:
BEC

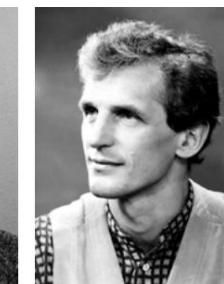
$\lambda_{dB} \approx d$
"Matter wave overlap"



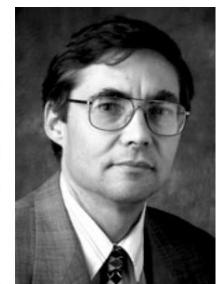
$T = 0$:
Pure Bose condensate
"Giant matter wave"



Eric A. Cornell



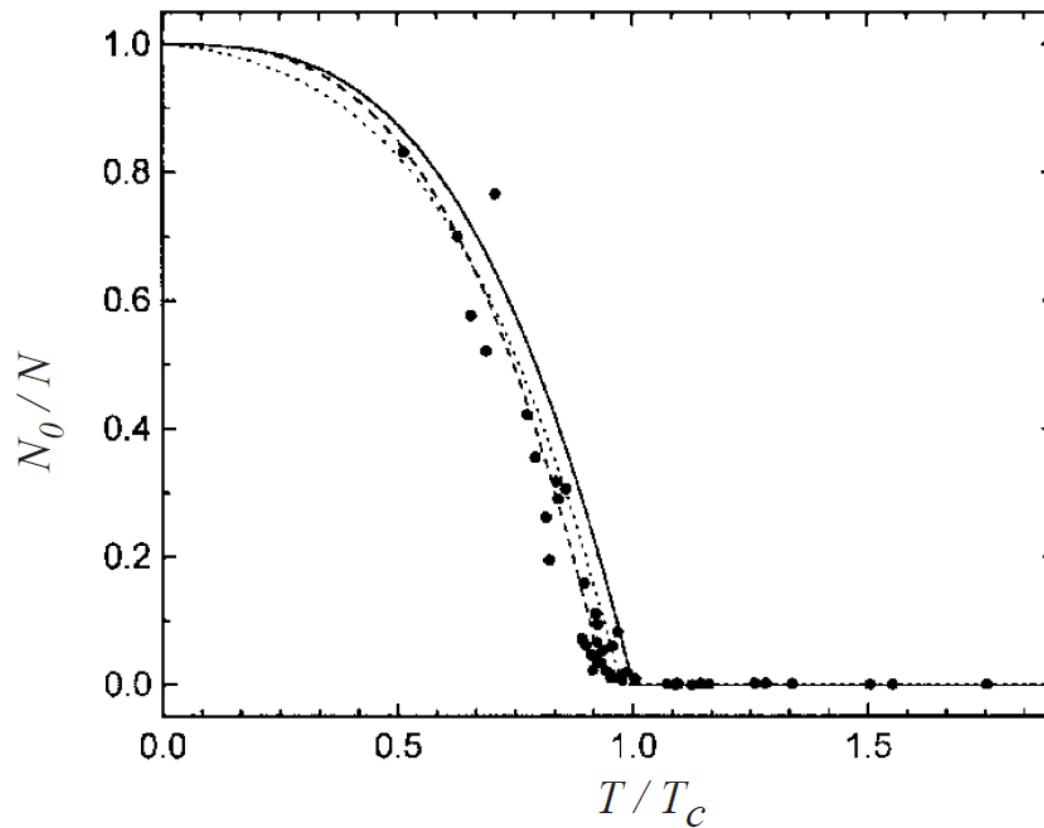
Wolfgang Ketterle



Carl E. Wieman

Nobel de Physique 2001

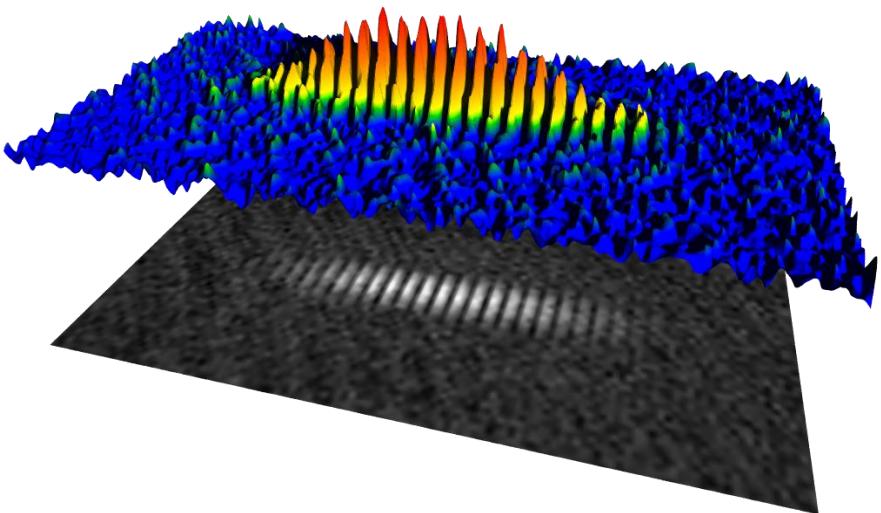
Un exemple expérimental : fraction condensée vs T



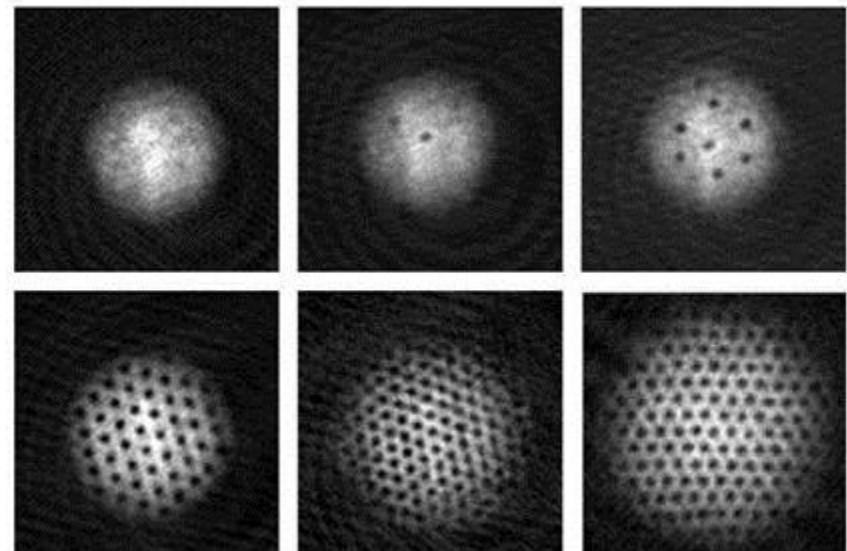
R. Enscher *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77**, 4984 (1996).

Interférences de CBE, tourbillons quantiques

Franges d'interférences de deux condensats de Cr indépendants



CBE en rotation : flot irrotationnel (superfluidité) → réseaux de « vortex »
[N.B. interactions entre atomes nécessaires]



Analogie avec les réseaux d'Abrikosov (supraconducteurs de type 2)

Domaine en pleine expansion aujourd'hui

- Fermions, réseaux optiques, contrôle des interactions entre atomes
- Systèmes quantiques à N corps fortement corrélés
- Simulation de problèmes de matière condensée

Quelques références

Généralités sur les particules identiques en MQ

- Cohen-Tannoudji, Diu, Laloë, chap. XIV.
- Basdevant, Dalibard, chap. 16.

Lien spin-statistique

I. Duck & E. C. G. Sudarshan, *Toward an understanding of the spin-statistics theorem*, Am. J. Phys. **66**, 284 (1998).

Interaction d'échange et ferromagnétisme

- Diu, Guthman, Lederer, Roulet, *Physique Statistique*, Comp. IIIJ, § I.4.
- Ashcroft, Mermin, *Solid-state physics*, chap. 32.

Condensation de Bose-Einstein

- Cohen-Tannoudji, Dalibard, Laloë, *La condensation de Bose-Einstein dans les gaz*, in Einstein aujourd'hui, CNRS Editions & EDP Sciences, Paris, 2005.
En ligne à http://www.phys.ens.fr/~dalibard/publications/einstein_2005.pdf

Cours 4: Dualité onde-particule

Cours 4 : Dualité onde-particule

1. Aspects corpusculaires du rayonnement (survol historique)

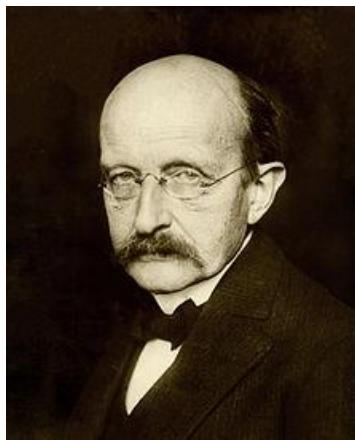
- 1.1 Corps noir
- 1.2 Effet photo-électrique
- 1.3 Effet Compton

2. Aspects ondulatoires de la matière

- 2.1 Relation de de Broglie
- 2.2 Diffraction d'électrons, de neutrons, d'atomes...
- 2.3 Interférométrie à ondes de matière

3. Complémentarité

Rayonnement du corps noir

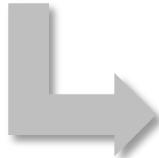


Max Planck (1858-1947)
Nobel de physique 1918

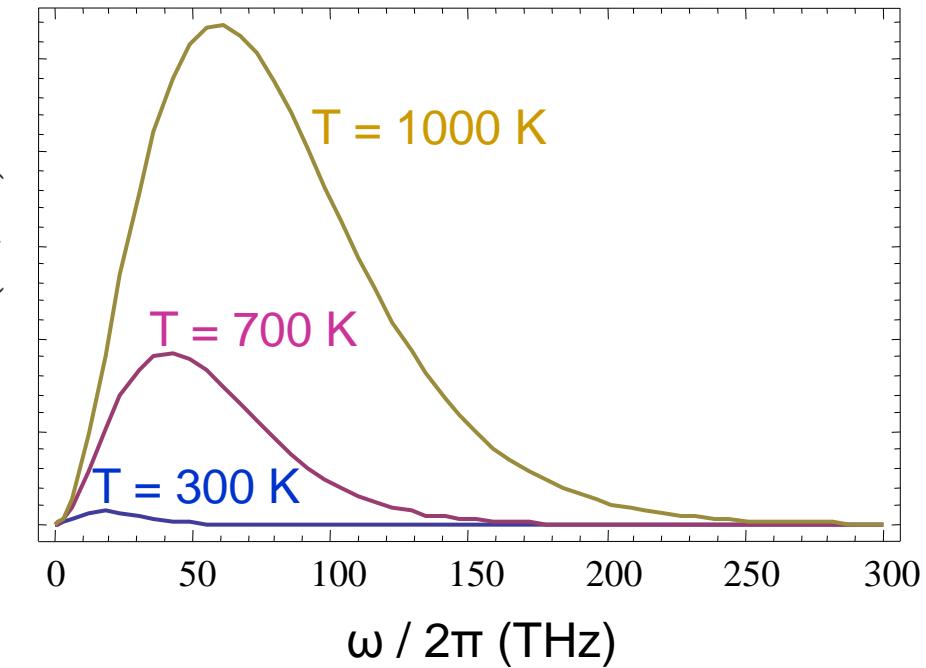


Hypothèse *ad-hoc* :

$$E = n\hbar\omega$$



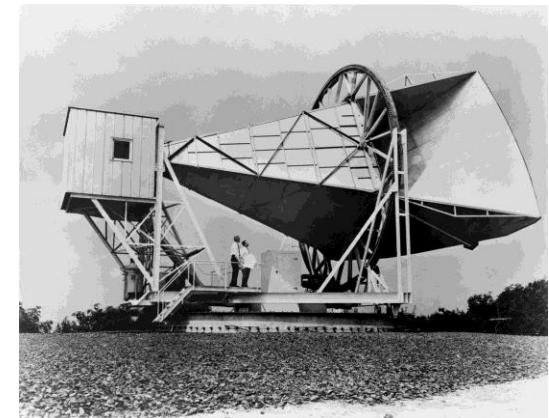
$$u_{\omega}(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{\exp(\hbar\omega/k_B T) - 1}$$



cf. également le problème des chaleurs spécifiques

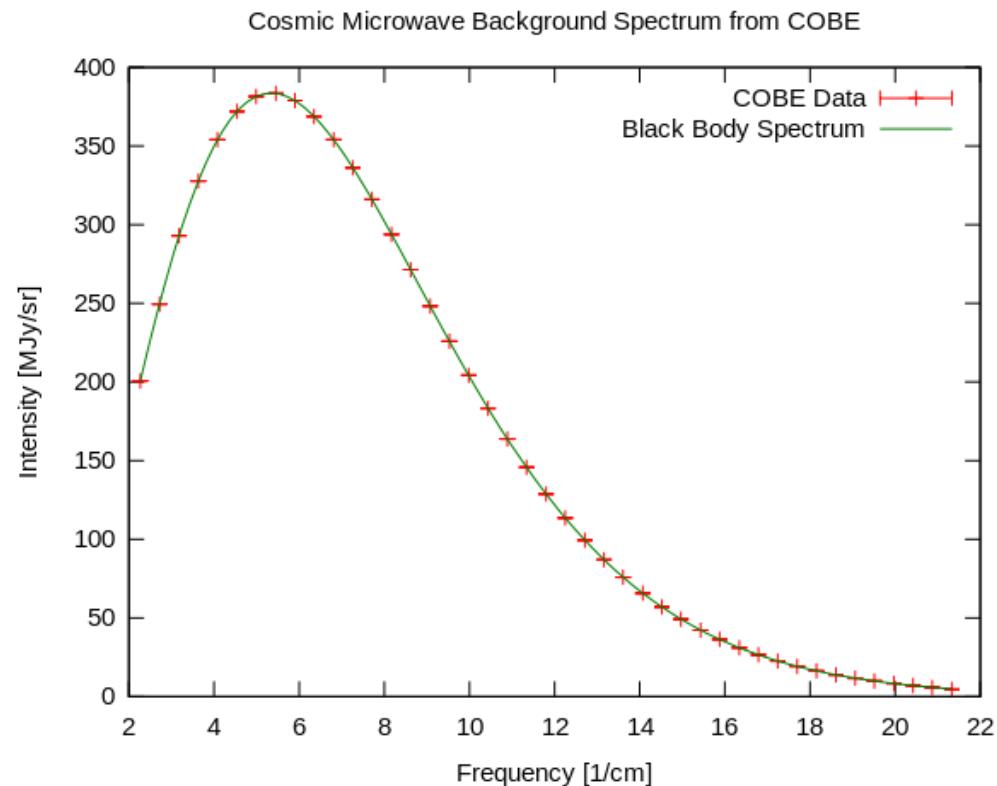
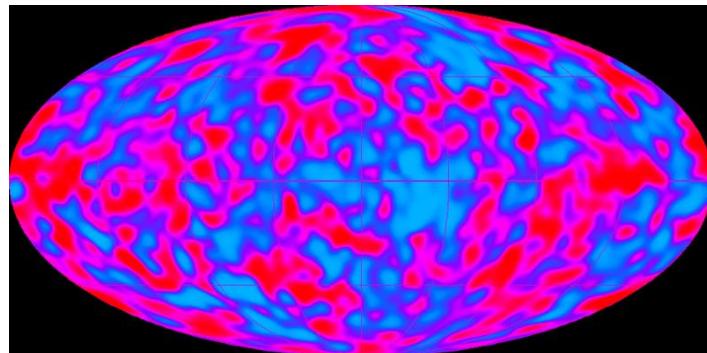
Rayonnement de fond cosmologique à 3 K

1965 A. Penzias et R. Wilson
Argument fort pour le Big Bang
Prix Nobel de physique 1978



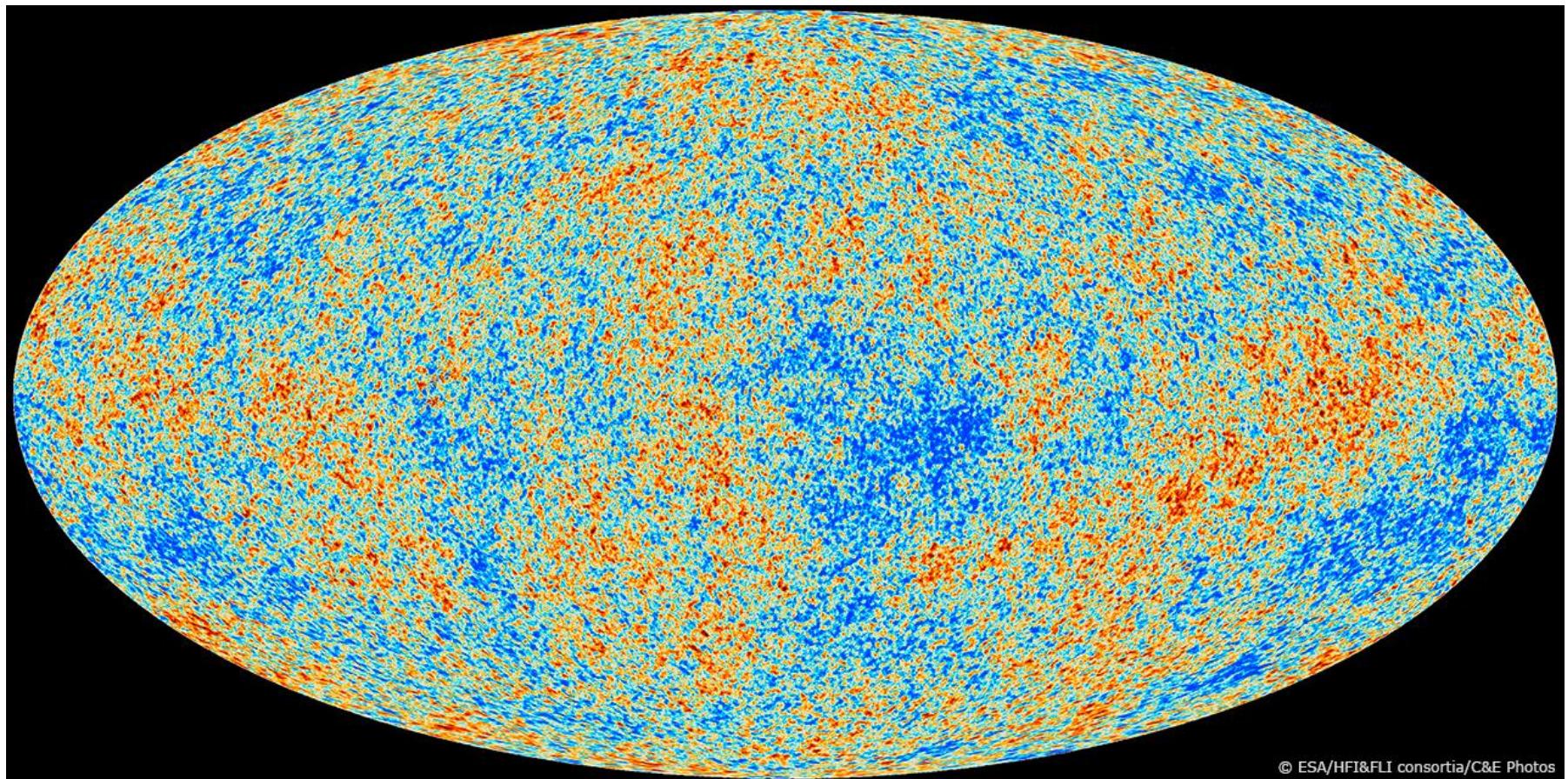
Satellite COBE

Prix Nobel de physique 2006
G. F. Smoot
J. C. Mather



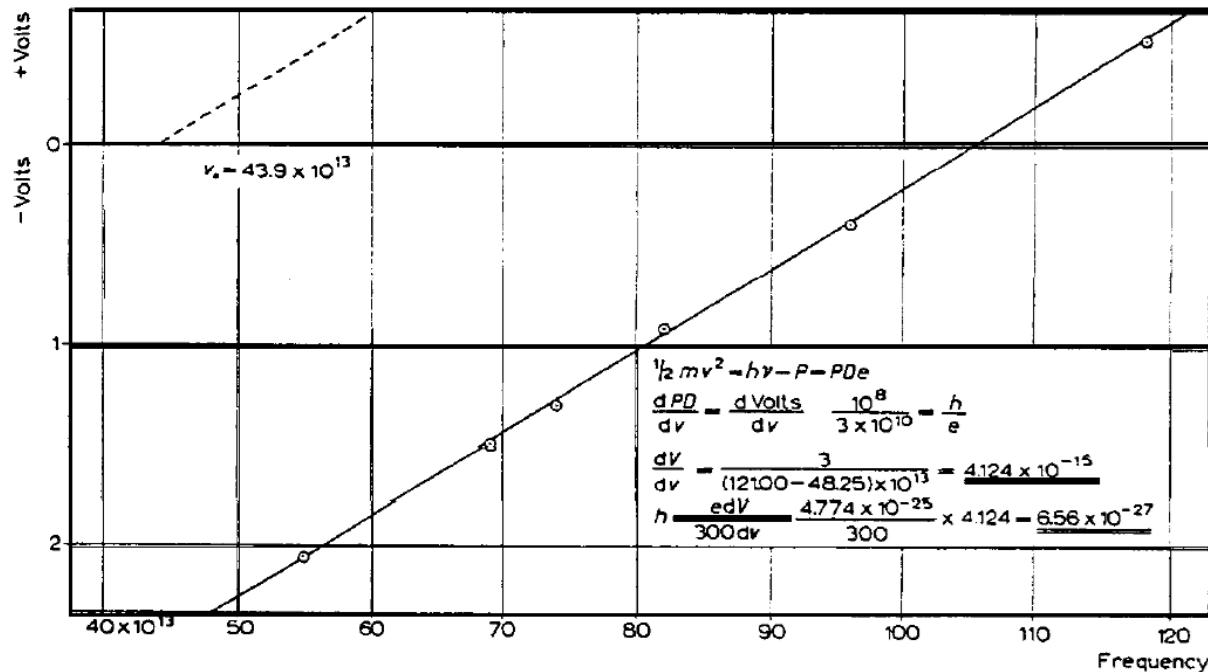
Rayonnement de fond cosmologique à 3 K

Résultats récents : satellite européen Planck (2013)

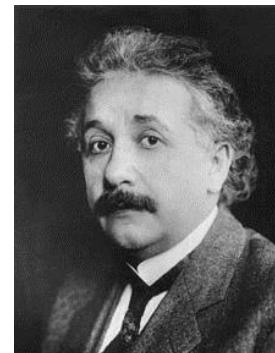


© ESA/HFI&FLI consortia/C&E Photos

Effet photoélectrique



Heinrich Hertz
(1857-1894)



Albert Einstein
(1879-1955)
PN 1921

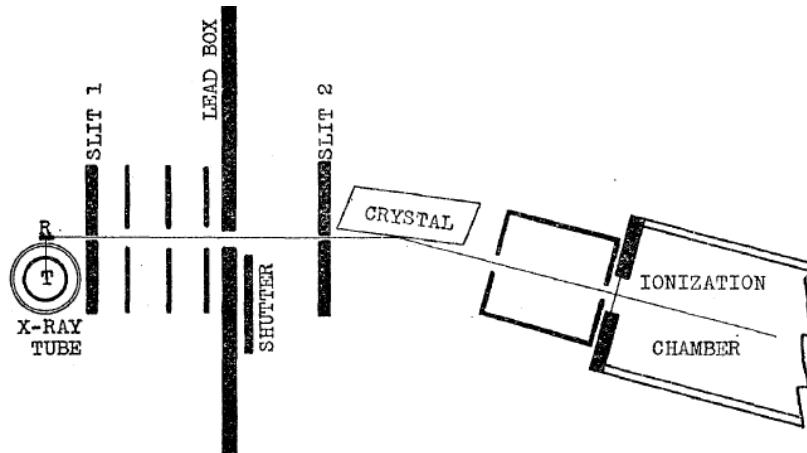


Robert A. Millikan
(1868-1953)
PN 1923



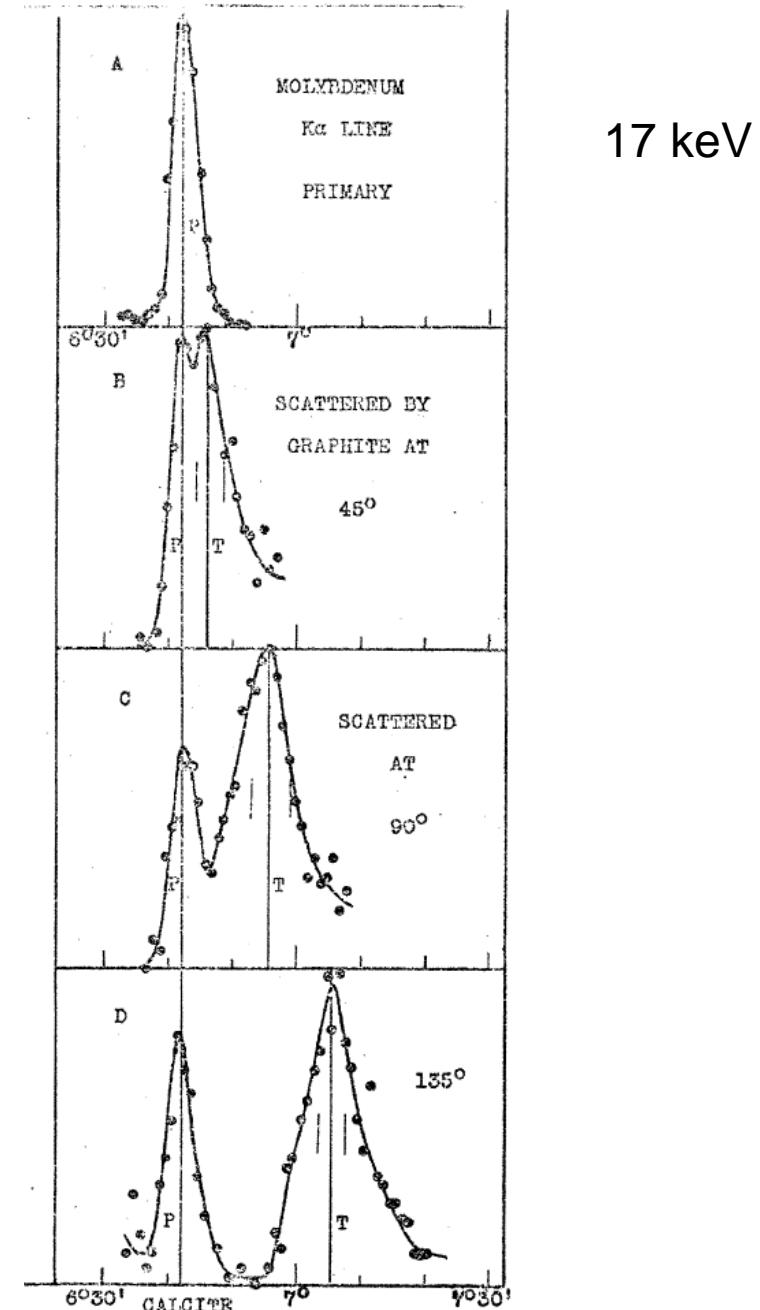
Effet Compton: diffusion inélastique de photons X

A. H. Compton, Phys.Rev. **22**, 409 (1923)



Arthur Holly Compton (1892-1962)

Prix Nobel de physique 1927



Longueur d'onde de de Broglie

RECHERCHES SUR LA THÉORIE DES QUANTA

Par M. Louis de BROGLIE

Annales de Physique — 10^e Série — Tome III — Janvier-Février 1925



envisagées plus haut. Si les vitesses sont assez faibles pour permettre de négliger les termes de Relativité, la longueur d'onde liée au mouvement d'une molécule dont la vitesse est v , sera :

$$\lambda = \frac{c}{\frac{\beta}{m_0 c^2}} = \frac{h}{m_0 v}$$

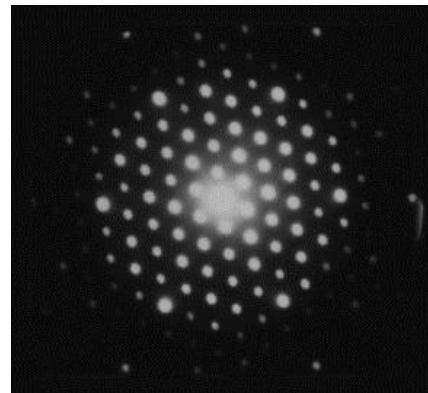
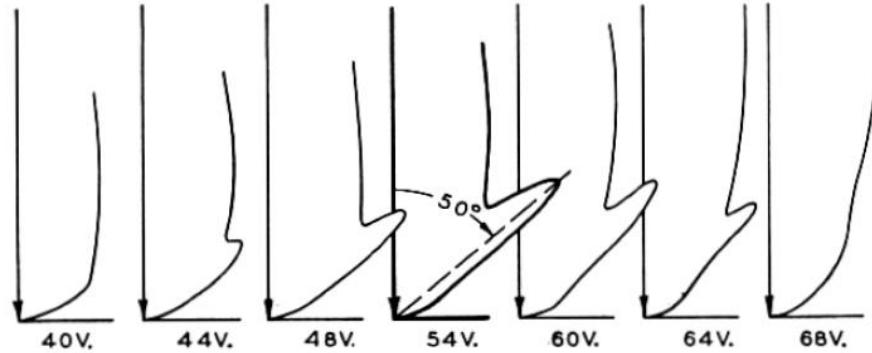
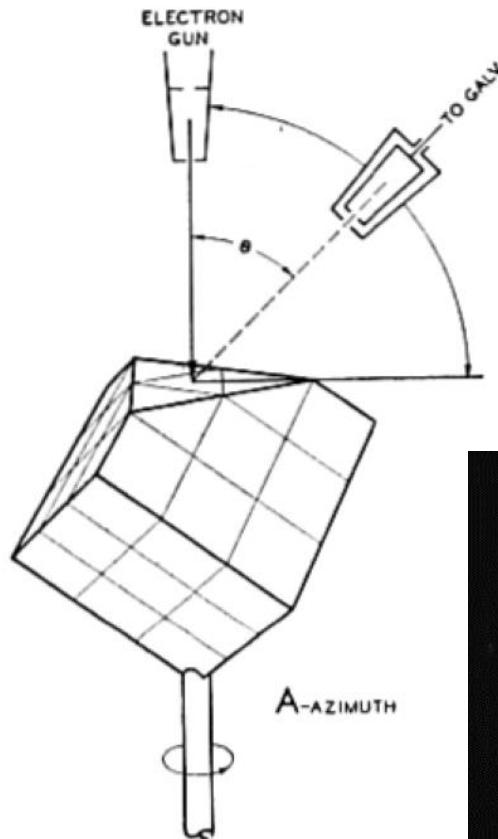
Louis de Broglie (1892-1987)

Prix Nobel de physique 1929



Expérience de Davisson et Germer

C. Davisson and L.H. Germer, 1927



C. Davisson et G.P. Thomson
Prix Nobel de physique 1937

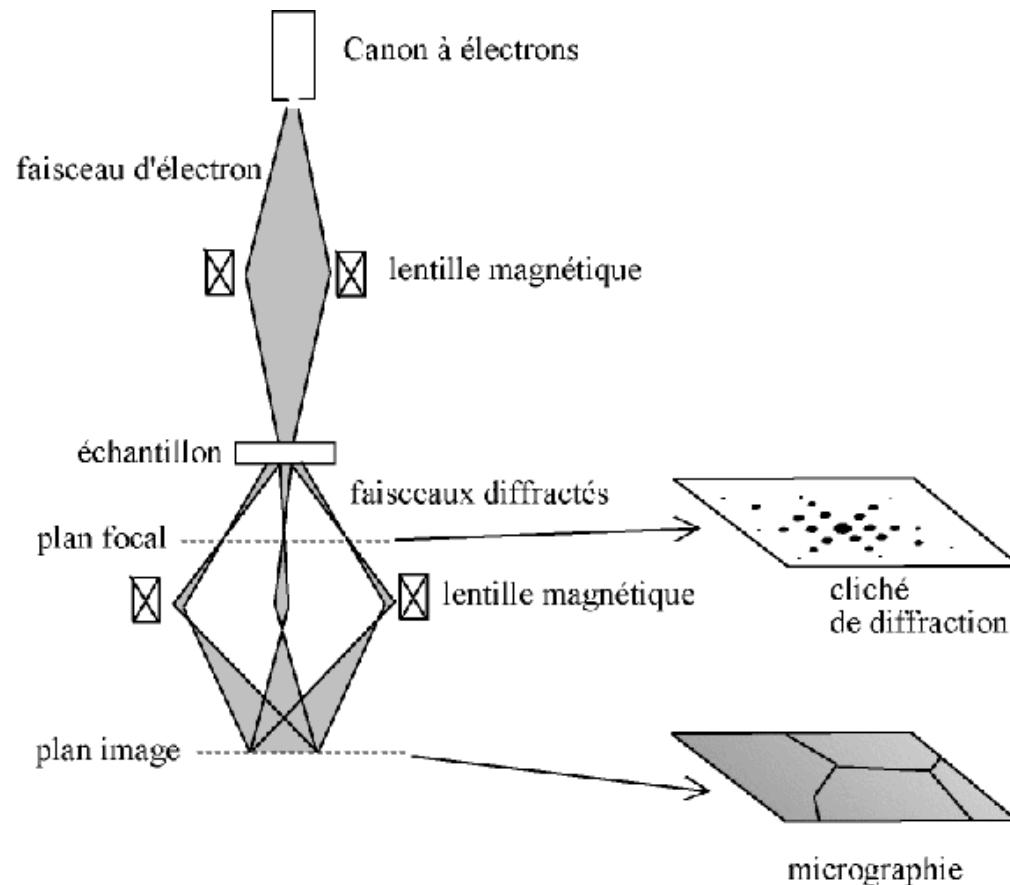
Microscope électronique (à transmission)

Limite de résolution : $\sim \lambda / 2$

Microscope optique : 300 nm

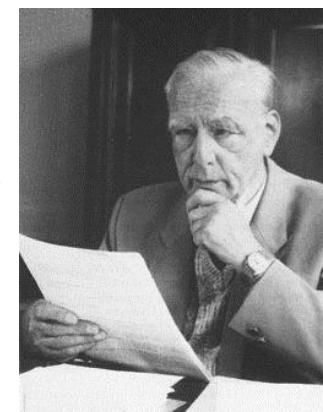
Microscope électronique @ 100keV :

$\lambda \sim 2 \text{ pm}$, mais résolution $\sim 0.1 \text{ nm}$ (aberrations)

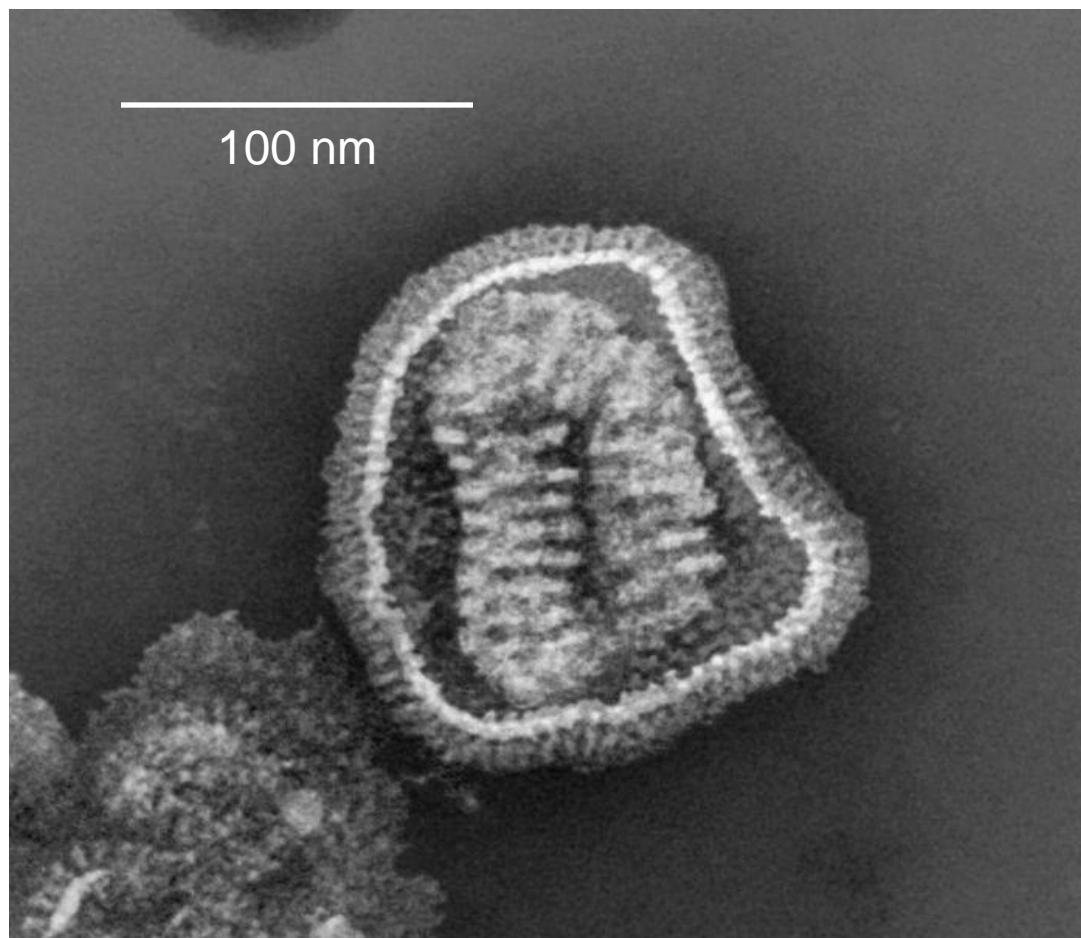


Ernst Ruska (1933)

Prix Nobel de physique 1986

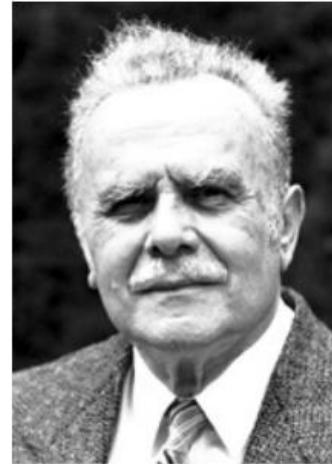


Un objet familier...



Diffracti^{on} de neutrons

- Nécessite une source de neutrons : développement 40s-50s
(réacteur nucléaire, ex : Institut Laue-Langevin, Grenoble)
- Neutrons sensibles aux noyaux
- Sensibles à l'ordre magnétique via μ (ex : antiferromagnétisme)
- Applications industrielles



Bertram N.
Brockhouse



Clifford G. Shull



Prix Nobel de physique 1994

Mise en évidence de l'ordre antiferromagnétique

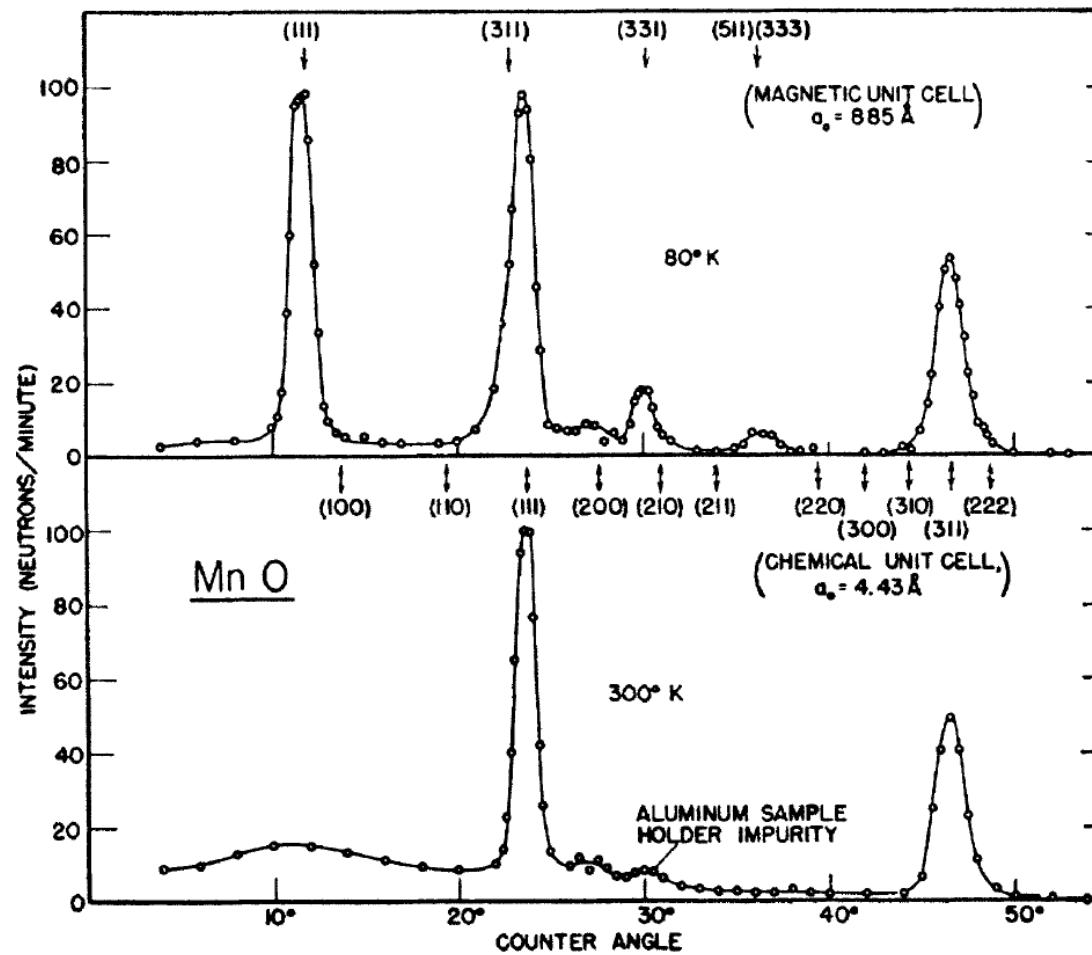


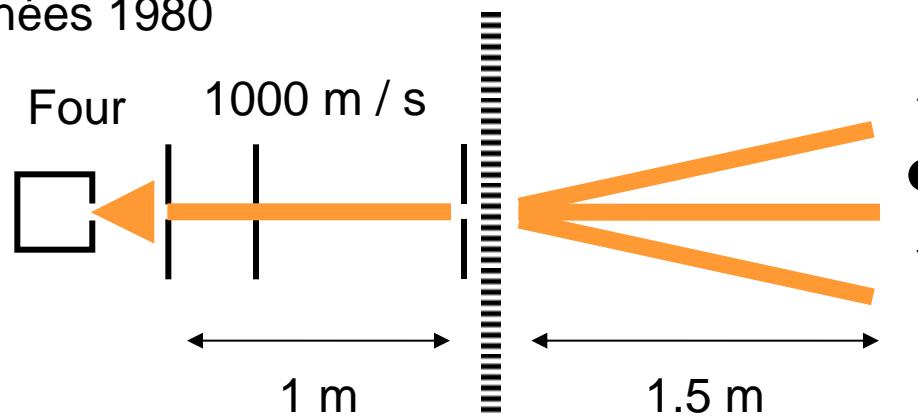
FIG. 1. Neutron diffraction patterns for MnO at room temperature and at 80°K.

C. G. Shull, W. A. Strauser, and E. O. Wollan
Phys. Rev. 83, 333 (1951)

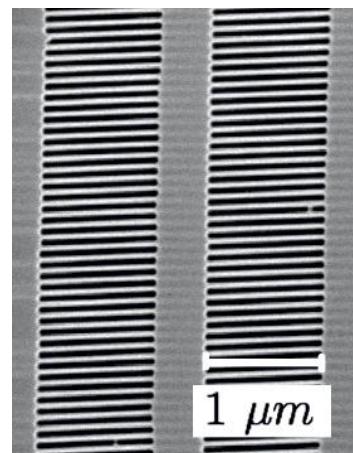
Diffraction d'atomes par un réseau matériel

Mlynek (Konstanz), Pritchard (MIT)

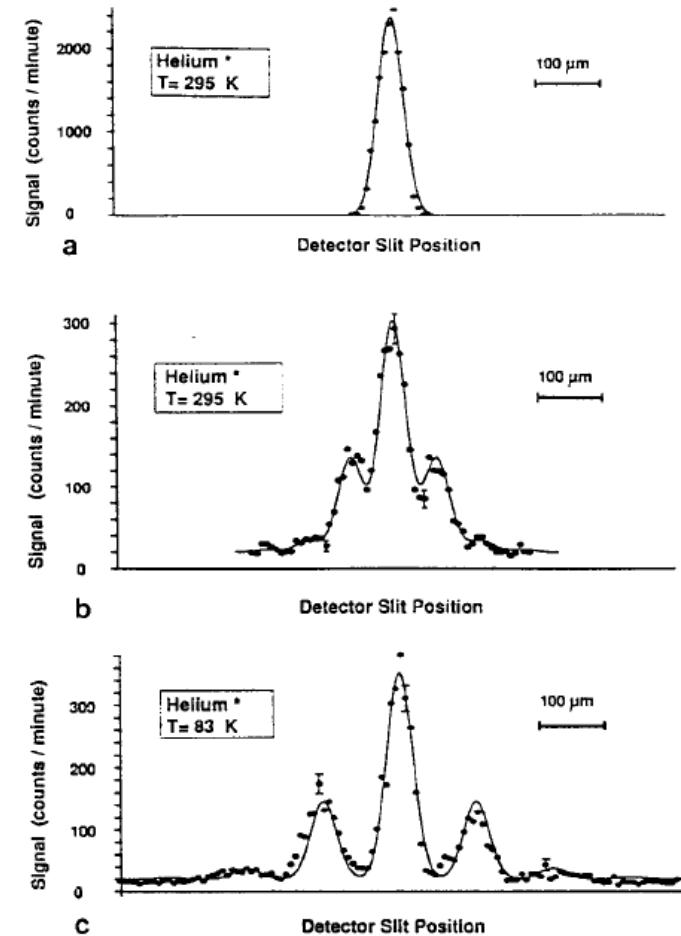
Années 1980



Réseaux matériels
(SiN_x , technologies de nanofabrication)



Autre possibilité :
réseaux lumineux (onde stationnaire
non résonante).



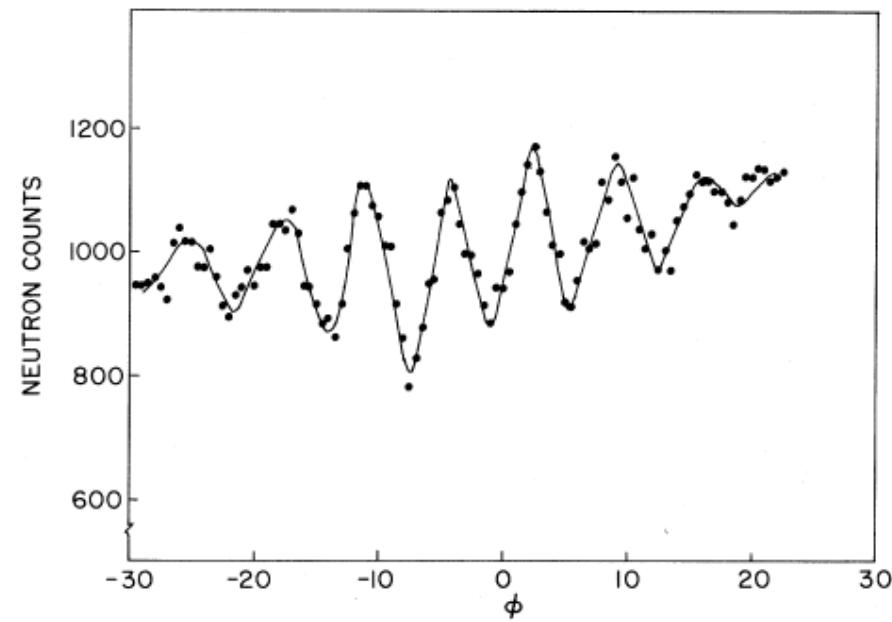
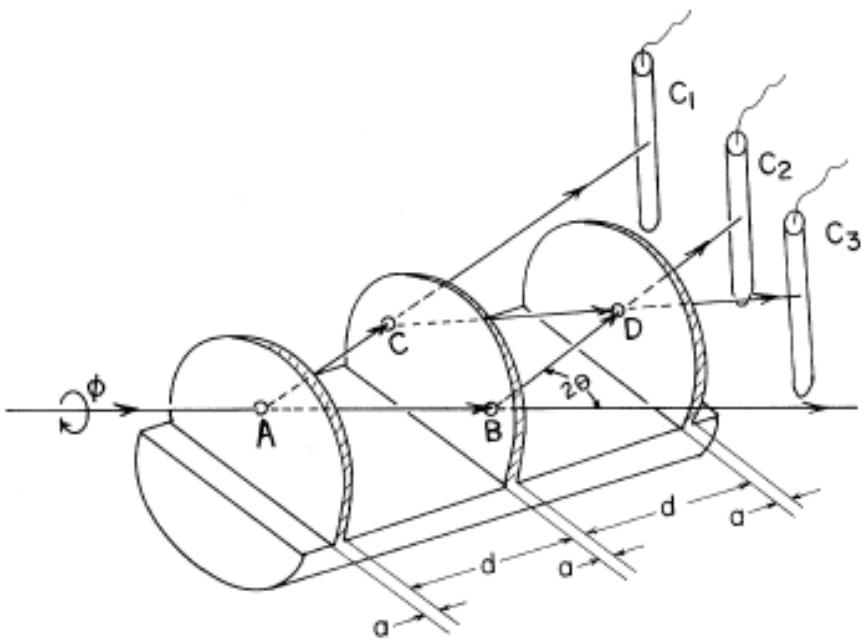
Experimental data. a Intensity distribution of the undiffracted beam in the detector plane, b diffraction pattern at a nozzle temperature $T = 295 \text{ K}$ ($\lambda_{dB} = 0.56 \text{ Å}$), c diffraction pattern at $T = 83 \text{ K}$ ($\lambda_{dB} = 1.03 \text{ Å}$)

Interférométrie à ondes de matière

Interféromètre de Mach-Zehnder

Neutrons : (années 70)

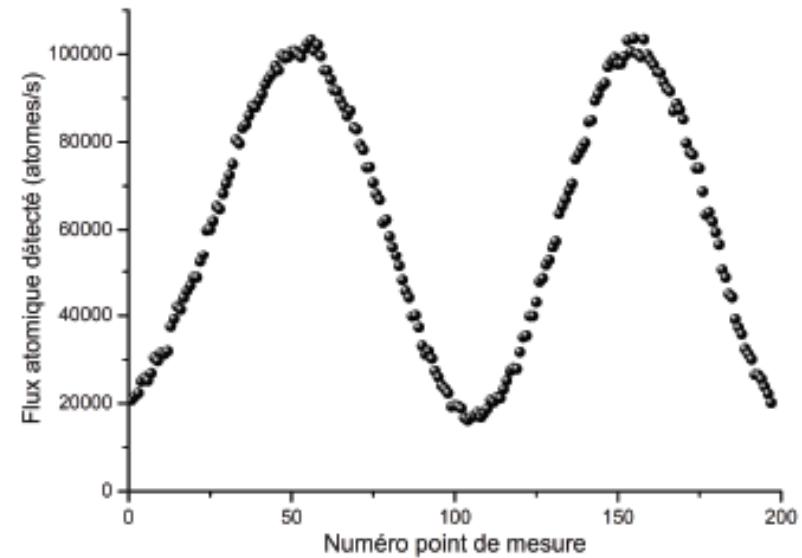
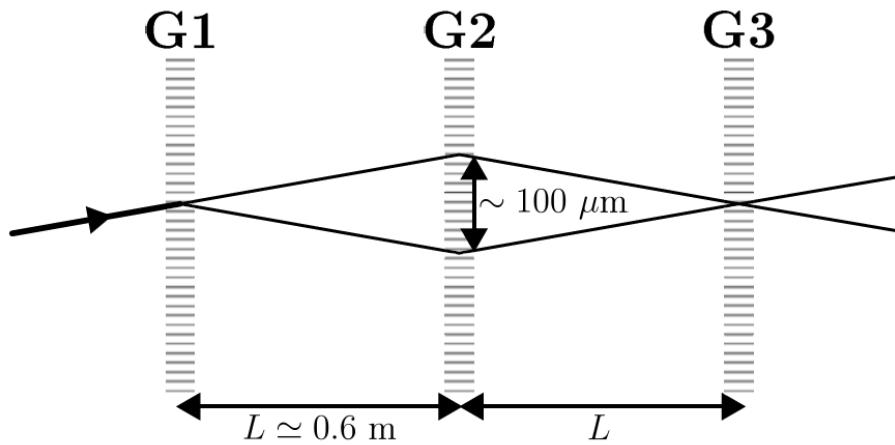
Collela-Overhauser-Werner, PRL 34, 1472 (1975).



Interférométrie à ondes de matière

Atomes :

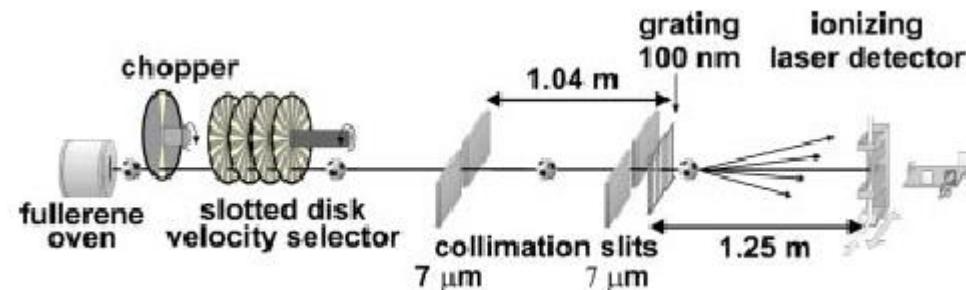
- Jets atomiques (années 80 - 90)
Pritchard (MIT), Mlynek (Konstanz), Vigué (Toulouse)...
- Atomes froids (années 90 - présent)
Chu, Kasevich (Stanford), SYRTE...



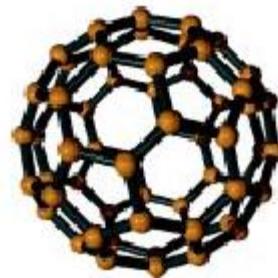
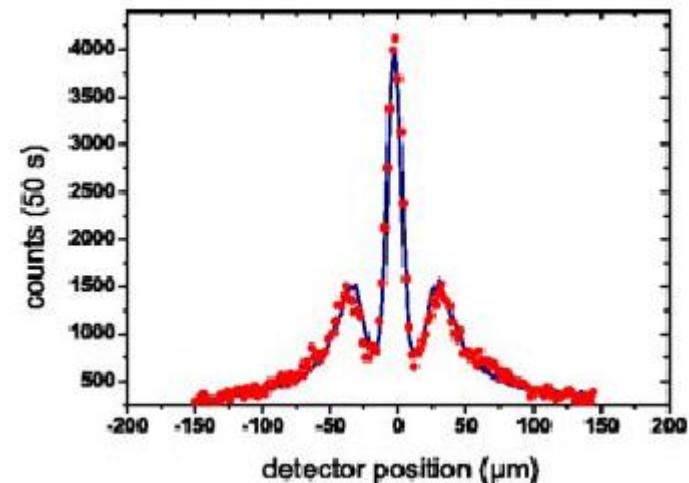
Grande sensibilité aux champs inertIELS (accélérations, rotations...)
Gravimètres, gyromètres

Diffraction de grosses molécules

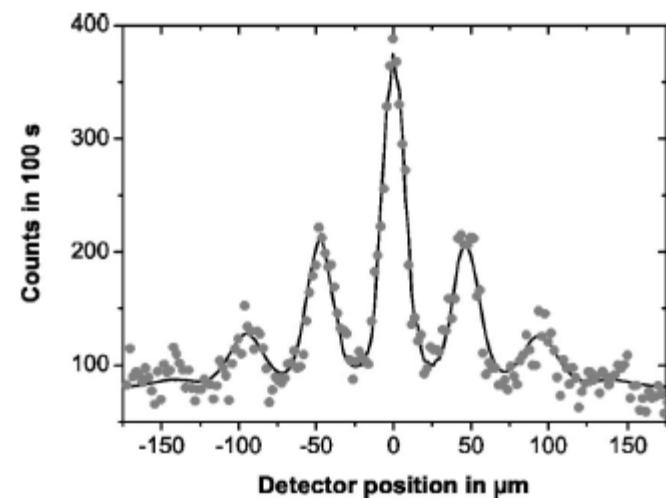
A. Zeilinger, M. Arndt (Vienne) 1999



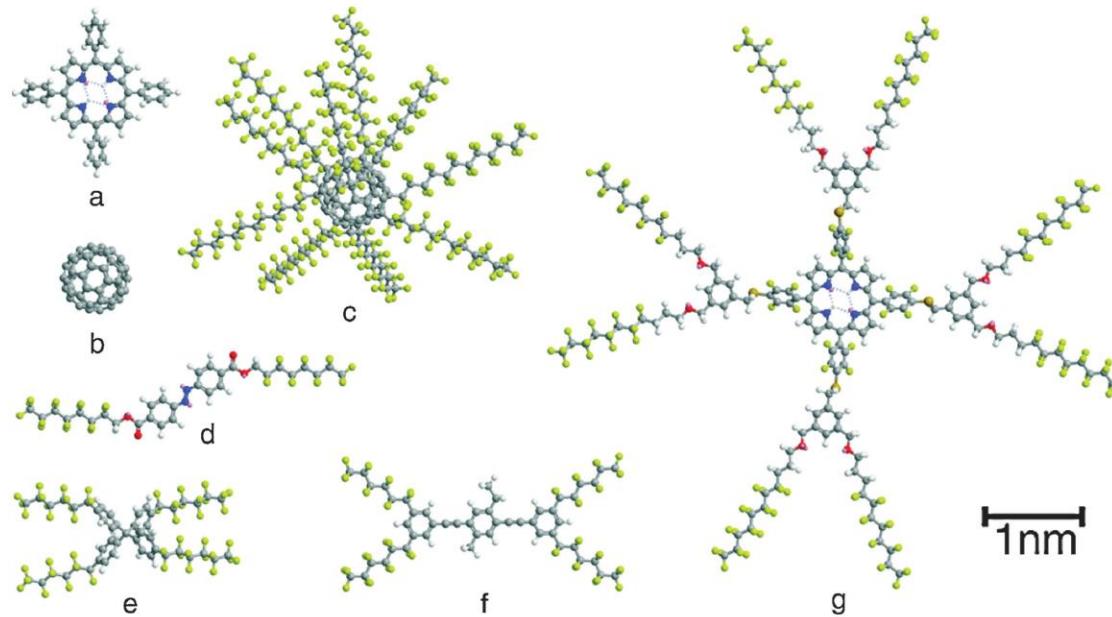
$v = 200 \text{ m / s}$



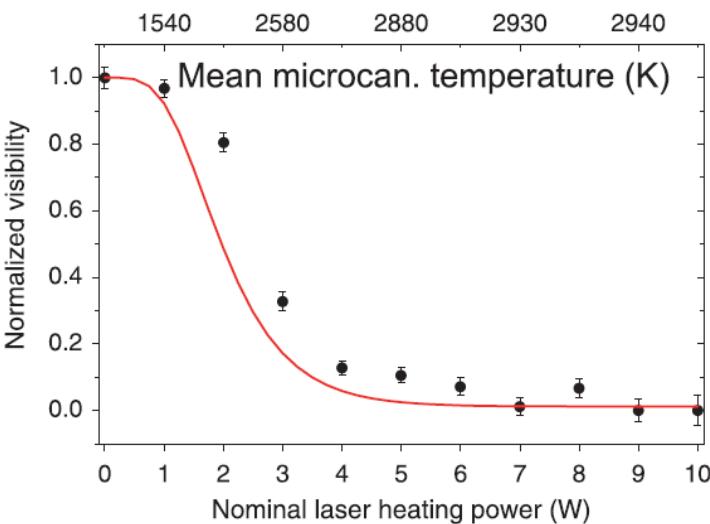
$v = 140 \text{ m / s}$



Diffraction (et interférences) de grosses molécules

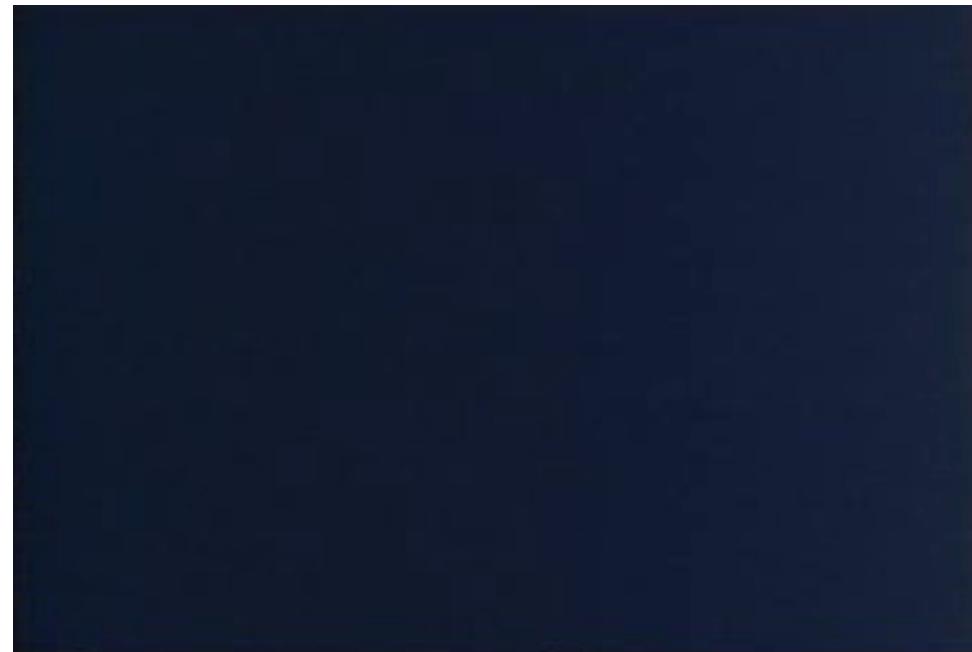
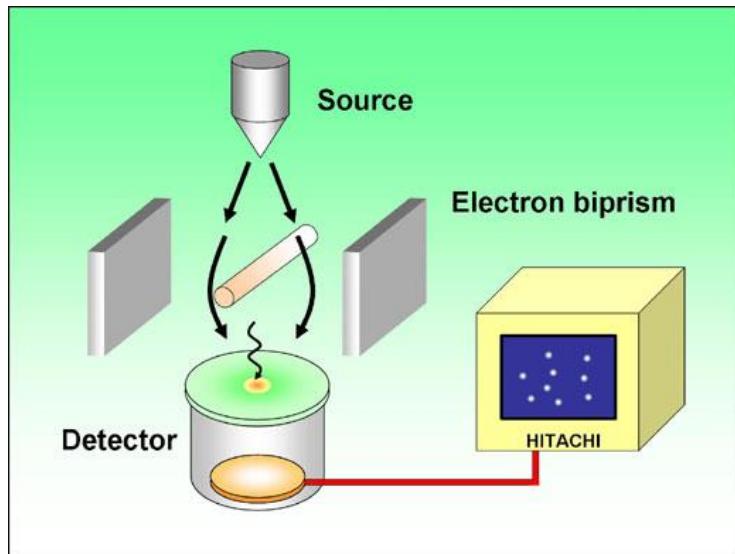


Décohérence due à l'émission
de photons thermiques



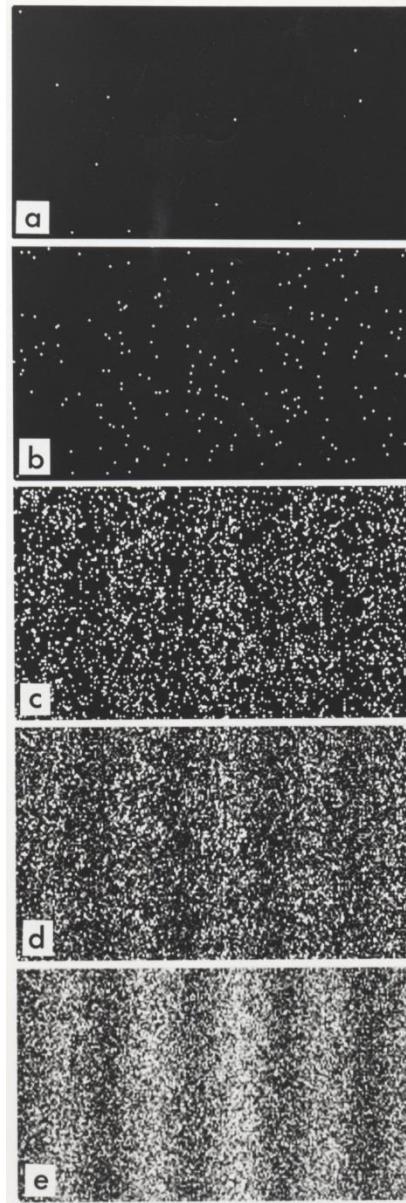
Anton Zeilinger, Markus Arndt (Vienne)

Expérience des Fentes d'Young avec des électrons « uniques »



Akira Tonomura, Hitachi

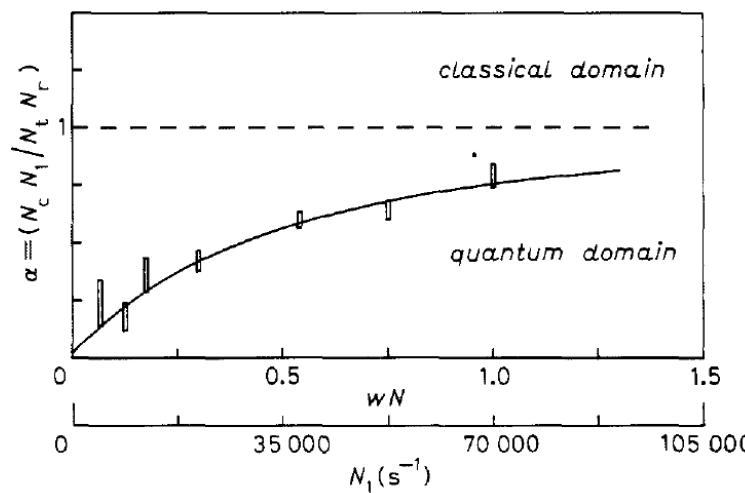
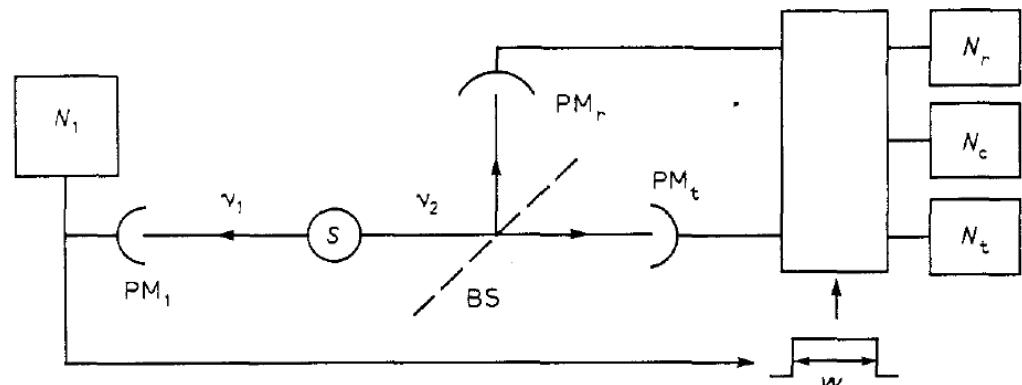
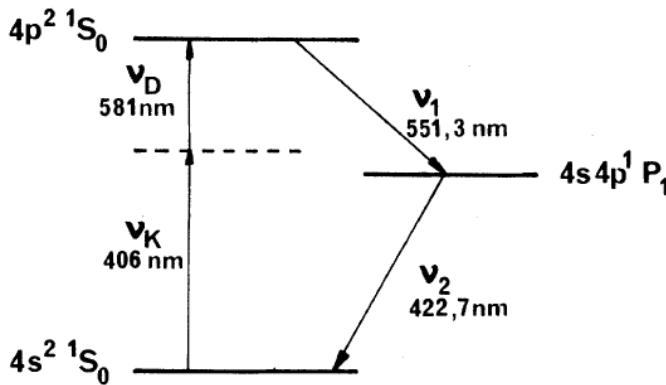
Expérience des Fentes d'Young avec des électrons « uniques »



Interférences de photons uniques

Grangier, Roger, Aspect, Europhys. Lett. 1, 173 (1986).

Vraie source de photons uniques : cascade radiative dans un atome de calcium

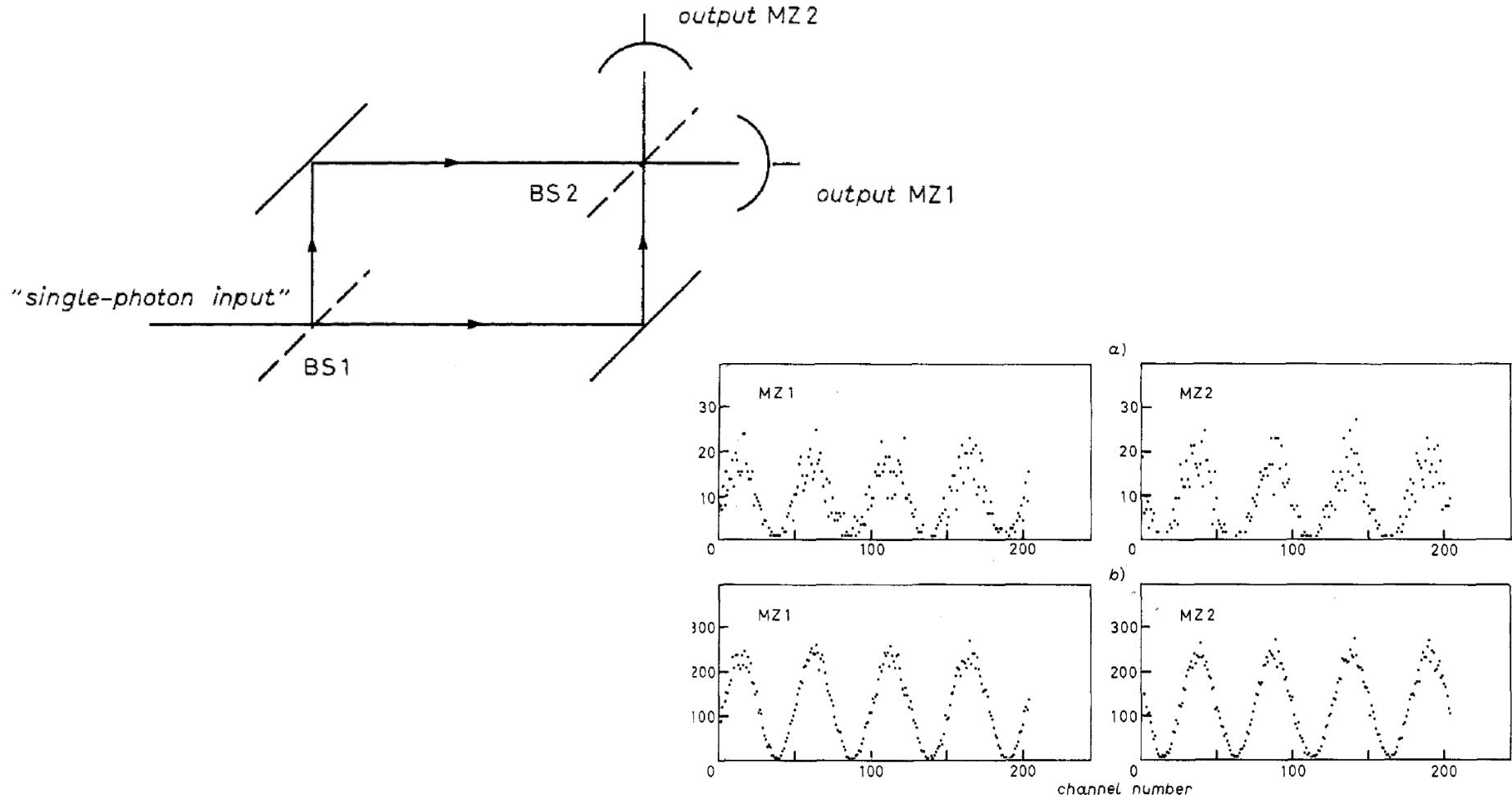


Anti-corrélation : le photon est bien une particule...

Interférences de photons uniques

Grangier, Roger, Aspect, Europhys. Lett. 1, 173 (1985).

Vraie source de photons uniques : cascade radiative dans un atome de calcium

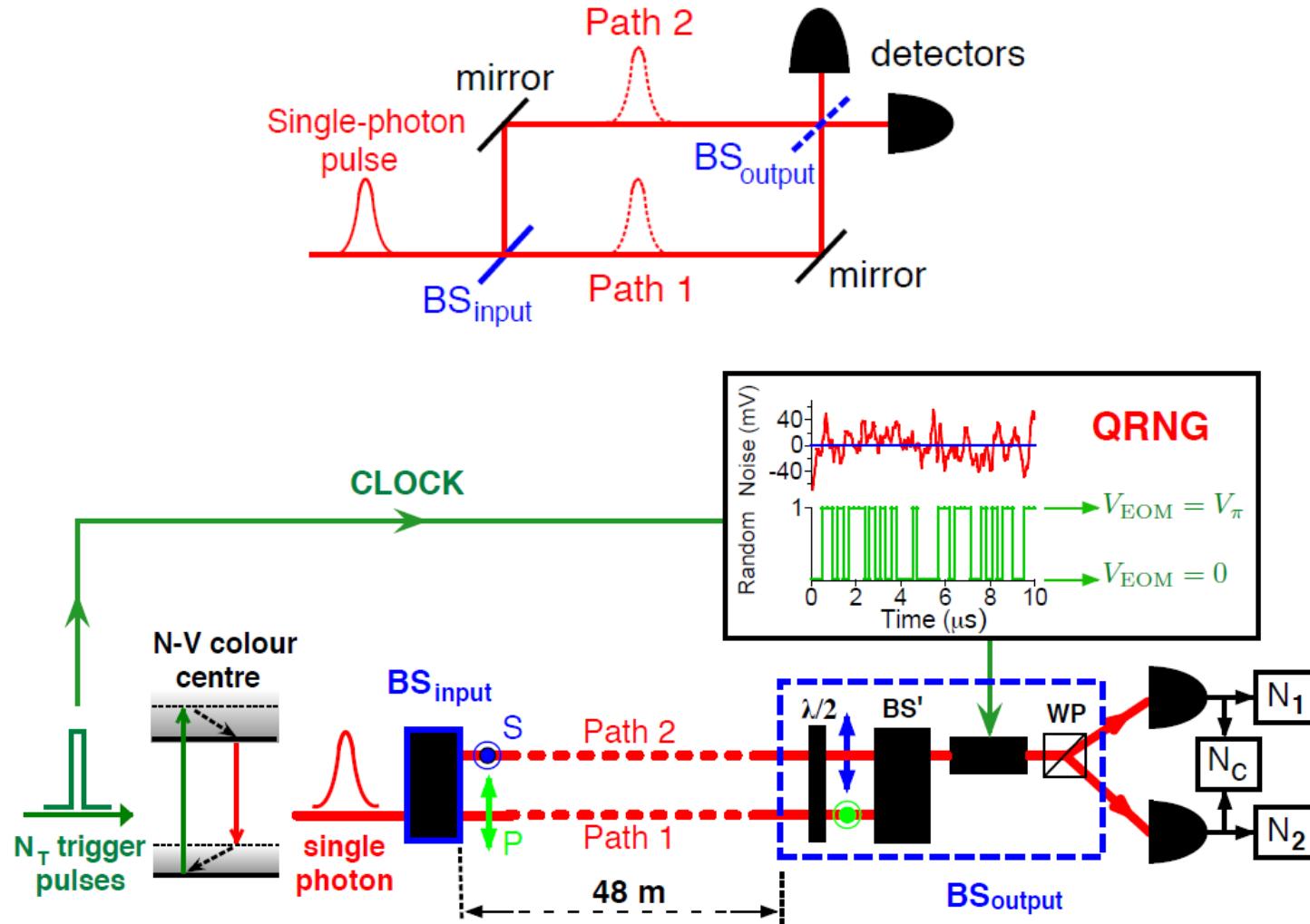


Franges : la lumière est bien une onde ! Complémentarité

Expérience à choix retardé de Wheeler

(LPQM)

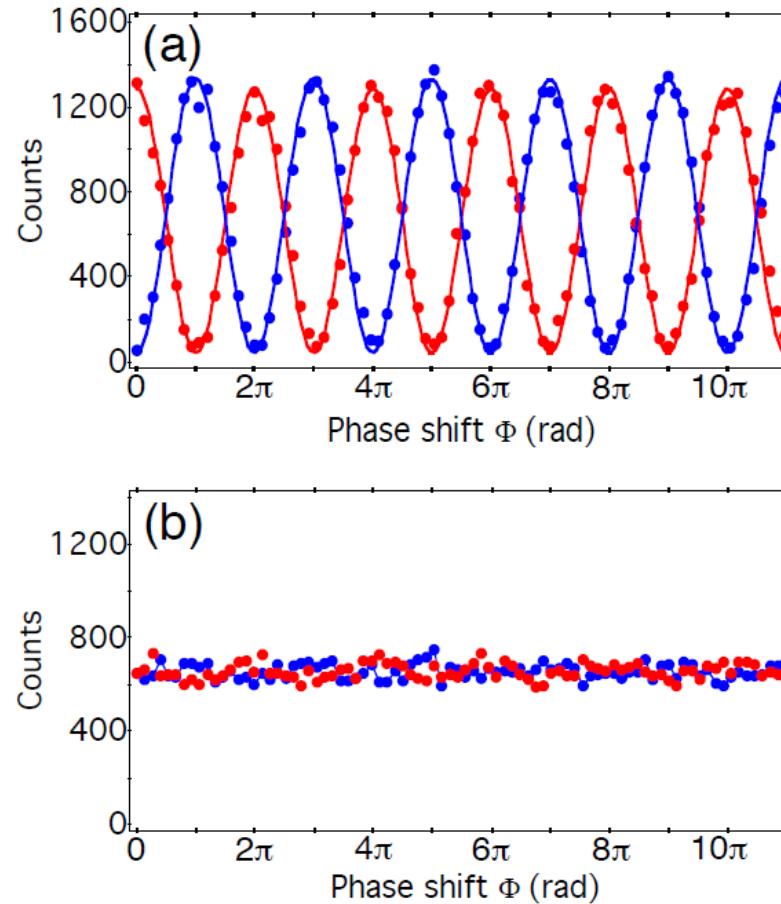
V. Jacques et al., Science 315, 5814 (2007).



Expérience à choix retardé de Wheeler

(LPQM)

V. Jacques *et al.*, Science **315**, 5814 (2007).



Tous mes vœux de réussite !