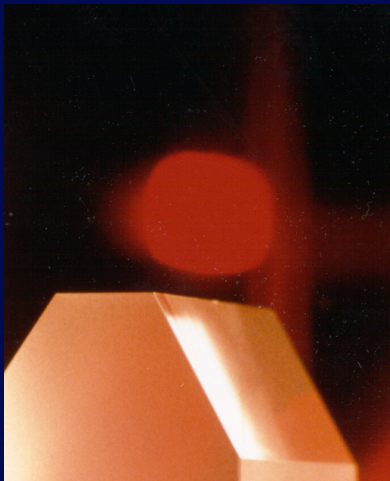


Les atomes froids : un outil pour explorer le monde quantique



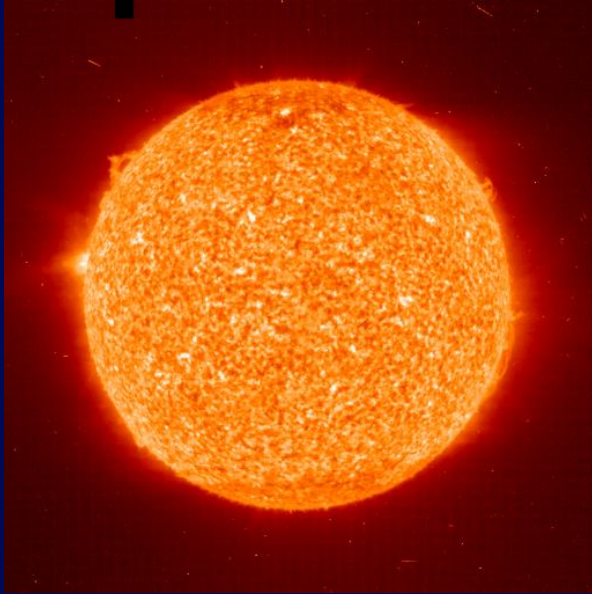
*Comment utiliser la lumière pour générer
de nouveaux états de la matière*

Jean Dalibard,
Congrès UdPPC
La Rochelle, 28 octobre 2015



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Lumière = source d'information sur la matière

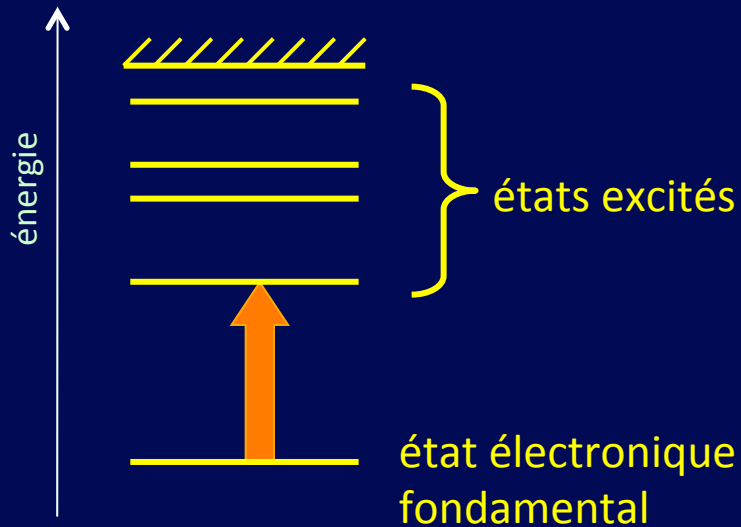


La lumière émise par une étoile ou par une flamme nous renseigne sur la composition de la matière



Comment utiliser la lumière pour “agir” sur la matière ?

Processus élémentaire dans l'interaction atome-lumière



*niveaux d'énergie interne
pour un atome*

L'atome peut sauter d'un niveau d'énergie à un autre en absorbant ou en émettant un photon.

Lors de ce processus, la vitesse de l'atome change :

$$v = \frac{\hbar k}{M}$$

vitesse de recul, 3 cm/s pour l'atome de sodium

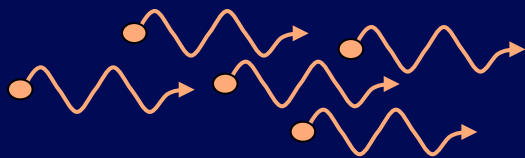
La force de pression de radiation

La répétition de ces « chocs » élémentaires crée une force sur les atomes



Kepler :
orientation de la queue des comètes
par rapport au Soleil

Avec un laser dont la couleur est ajustée, la force est beaucoup plus importante



photons résonnants

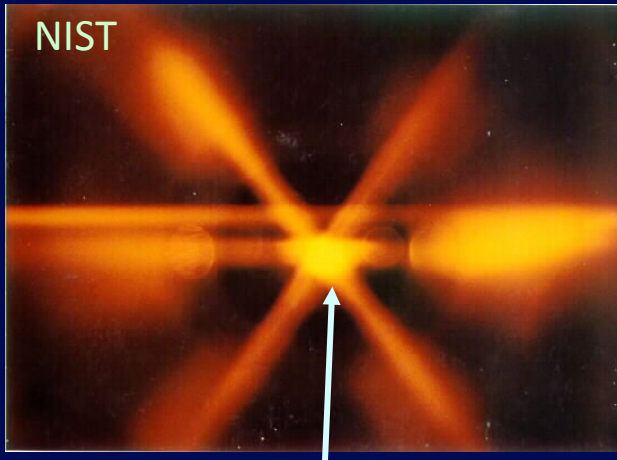


atome

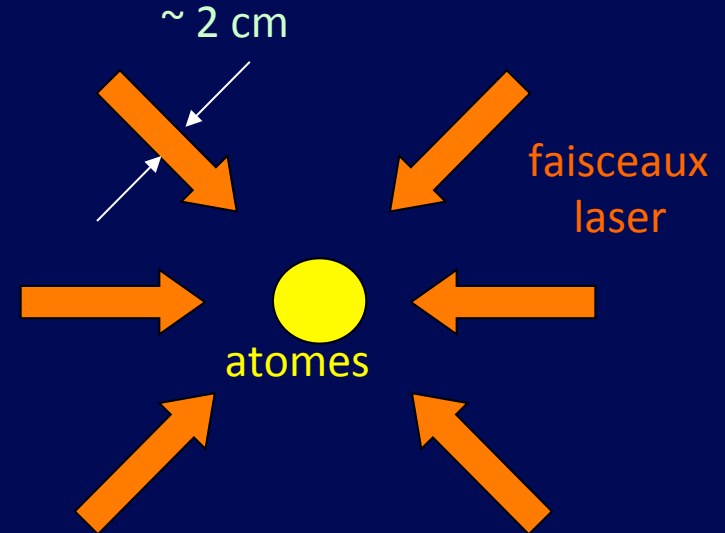
accélération de 10^4 à $10^5 g$

La vitesse passe de 100 m/s à 0 m/s sur une distance \approx cm.

La mélasse optique



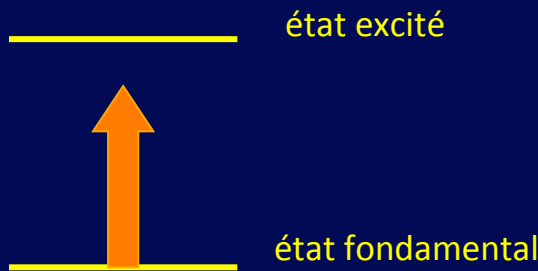
un milliard d'atomes de sodium
au centre d'une enceinte à vide



Dans cette configuration, les atomes sont refroidis à des températures extrêmement basses

- Quel mécanisme est à la base de ce refroidissement ?
- Comment mesure-t-on ces températures ?
- A quoi ça sert ?

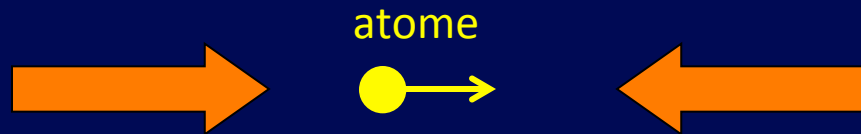
Un des principes de la mélasse optique : l'effet Doppler



On utilise un laser dont les photons ont à peine l'énergie suffisante pour faire passer l'atome de l'état fondamental à un état excité

Grâce à l'effet Doppler, la transition va quand même se faire... mais pas n'importe comment !

Modèle uni-dimensionnel :



Refroidissement Doppler : un atome allant vers la droite interagit davantage avec l'onde venant de la droite (et idem pour la gauche)

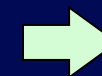
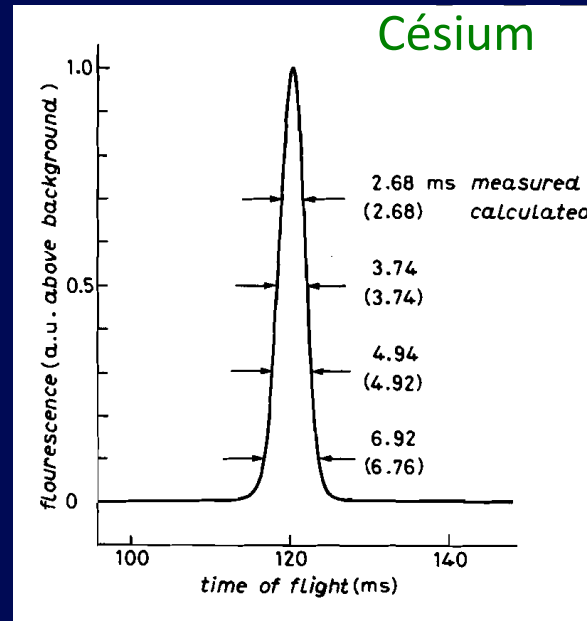
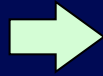
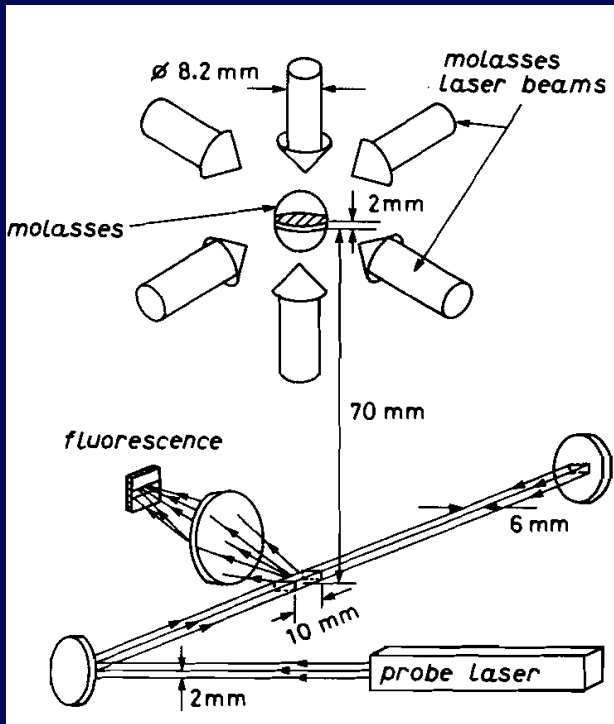
Force de friction qui diminue la vitesse de chaque atome, quelle que soit sa direction



réduction de l'agitation thermique, refroidissement

Comment mesurer la température des atomes ?

Température = mesure de l'agitation des atomes du gaz

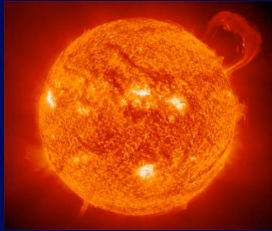


largeur en vitesse
1 cm/s

$$\frac{1}{2} m \Delta v^2 = \frac{1}{2} k_B T$$

$T = 2$ microkelvins

Température des mélasses optiques

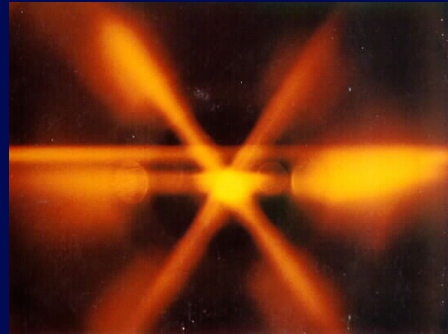


centre

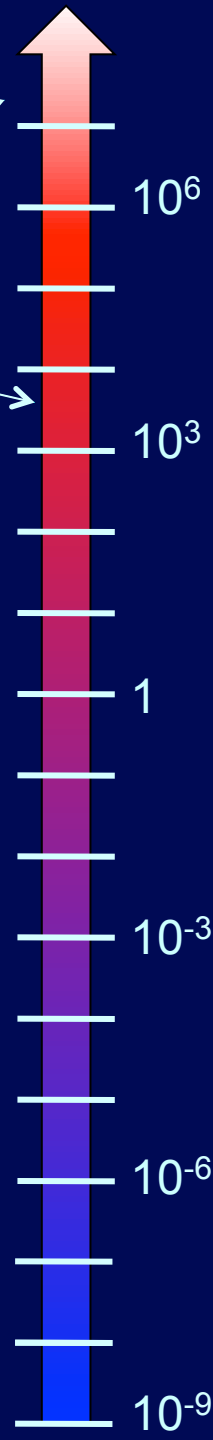
surface



azote
liquide



refroidissement
par laser
et par évaporation



Hélium liquide,
cryogénie moderne

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

1	IA	1	1,00794	H <i>Hydrogène</i>	2	IIA	2	4,0026	He <i>Hélium</i>																																																		
3	6,941	Li <i>Lithium</i>	4	9,01218	Be <i>Béryllium</i>	14	IVA	6	12,0107	C <i>Carbone</i>	13	IIIA	5	10,811	B <i>Bore</i>	14	IVA	6	12,0107	C <i>Carbone</i>	15	VA	7	14,0067	N <i>Azote</i>	16	VIA	8	15,9994	O <i>Oxygène</i>	17	VIIA	9	18,9984	F <i>Fluor</i>	18	VIIIA	10	20,1797	Ne <i>Neon</i>																			
11	22,9898	Na <i>Sodium</i>	12	24,305	Mg <i>Magnésium</i>	21	IIIIB	3	44,9559	Sc <i>Scandium</i>	22	47,867	Ti <i>Titane</i>	23	50,9415	V <i>Vanadium</i>	24	51,9961	Cr <i>Chrome</i>	25	54,9380	Mn <i>Manganèse</i>	26	55,845	Fe <i>Fer</i>	27	58,9332	Co <i>Cobalt</i>	28	58,6934	Ni <i>Nickel</i>	29	63,546	Cu <i>Cuivre</i>	30	65,38	Zn <i>Zinc</i>	31	69,723	Ga <i>Gallium</i>	32	72,63	Ge <i>Germanium</i>	33	74,9216	As <i>Arsenic</i>	34	78,96	Se <i>Sélénium</i>	35	79,904	Br <i>Brome</i>	36	83,798	Kr <i>Krypton</i>				
19	39,0983	K <i>Potassium</i>	20	40,078	Ca <i>Calcium</i>	37	85,4678	Rb <i>Rubidium</i>	38	87,62	Sr <i>Strontium</i>	39	88,9058	Y <i>Yttrium</i>	40	91,224	Zr <i>Zirconium</i>	41	92,9064	Nb <i>Niobium</i>	42	95,96	Mo <i>Molybdène</i>	43	{ 98 }	Tc <i>Technetium</i>	44	101,07	Ru <i>Ruthénium</i>	45	102,905	Rh <i>Rhodium</i>	46	106,42	Pd <i>Palladium</i>	47	106,868	Ag <i>Argent</i>	48	112,411	Cd <i>Cadmium</i>	49	114,818	In <i>Indium</i>	50	118,71	Sn <i>Étain</i>	51	121,76	Sb <i>Antimoine</i>	52	127,6	Te <i>Tellure</i>	53	126,905	I <i>Iode</i>	54	131,293	Xe <i>Xénon</i>
55	132,905	Cs <i>Césium</i>	56	137,327	Ba <i>Baryum</i>	72	178,49	Hf <i>Hafnium</i>	73	180,948	Ta <i>Tantale</i>	74	183,84	W <i>Tungstène</i>	75	186,207	Re <i>Rhénium</i>	76	190,23	Os <i>Osmium</i>	77	192,217	Ir <i>Iridium</i>	78	195,084	Pt <i>Platine</i>	79	196,967	Au <i>Or</i>	80	200,59	Hg <i>Mercure</i>	81	204,383	Tl <i>Thallium</i>	82	207,2	Pb <i>Plomb</i>	83	208,98	Bi <i>Bismuth</i>	84	{ 209 }	Po <i>Polonium</i>	85	{ 210 }	At <i>Astate</i>	86	{ 222 }	Rn <i>Radon</i>									
87	{ 223 }	Fr <i>Francium</i>	88	{ 226 }	Ra <i>Radium</i>	104	{ 266 }	Rf <i>Rutherfordium</i>	105	{ 268 }	Db <i>Dubnium</i>	106	{ 269 }	Sg <i>Seaborgium</i>	107	{ 270 }	Bh <i>Bohrium</i>	108	{ 269 }	Hs <i>Hassium</i>	109	{ 278 }	Mt <i>Meitnerium</i>	110	{ 279 }	Ds <i>Darmstadtium</i>	111	{ 281 }	Rg <i>Röntgenium</i>	112	{ 285 }	Cn <i>Copernicium</i>	113	{ 284 }	Uut <i>Ununtrium</i>	114	{ 289 }	Fl <i>Flerovium</i>	115	{ 288 }	Uup <i>Ununpentium</i>	116	{ 293 }	Lv <i>Livermorium</i>	117	{ 294 }	Uus <i>Ununseptium</i>	118	{ 294 }	Uuo <i>Ununoctium</i>									
57	138,906	La <i>Lanthane</i>	58	140,116	Ce <i>Cérium</i>	59	140,908	Pr <i>Praséodyme</i>	60	144,242	Nd <i>Néodyme</i>	61	{ 145 }	Pm <i>Prométhium</i>	62	150,36	Sm <i>Samarium</i>	63	151,964	Eu <i>Europium</i>	64	157,25	Gd <i>Gadolinium</i>	65	158,925	Tb <i>Terbium</i>	66	172,5	Dy <i>Dysprosium</i>	67	174,930	Ho <i>Holmium</i>	68	175,054	Er <i>Ér</i>	69	175,054	Tm <i>Thulium</i>	70	175,054	Yb <i>Ytterbium</i>	71	174,967	Lu <i>Lutécium</i>															
89	{ 227 }	Ac <i>Actinium</i>	90	232,038	Th <i>Thorium</i>	91	231,036	Pa <i>Protactinium</i>	92	238,029	U <i>Uranium</i>	93	{ 237 }	Np <i>Neptunium</i>	94	{ 244 }	Pu <i>Plutonium</i>	95	{ 243 }	Am <i>Americium</i>	96	{ 247 }	Cm <i>Curium</i>	97	{ 247 }	Bk <i>Berkélium</i>	98	{ 251 }	Cf <i>Californium</i>	99	{ 252 }	Es <i>Einsteinium</i>	100	{ 257 }	Fm <i>Fermium</i>	101	{ 258 }	Md <i>Mendélievium</i>	102	{ 259 }	No <i>Nobelium</i>	103	{ 262 }	Lr <i>Lawrencium</i>															

14 IVA
 6 12,0107
C
Carbone
 2
 SYMBOLE : C
 NOM DE L'ÉLÉMENT : CARBONE
 NUMÉRO ATOMIQUE : 6
 MASSE ATOMIQUE : 12,0107
 GROUPE : 14 (IUPAC) - IVA (CAS)
 PÉRIODE : 2
 • MASSES ATOMIQUES DES ISOTOPES LES PLUS STABLES ENTRE ACCOLADES
 • MASSES ATOMIQUES DONNÉES À 6 CHIFFRES SIGNIFICATIFS

- NON MÉTAUX
- MÉTAUX ALCALINS
- MÉTAUX ALCALINO-TERREUX
- MÉTAUX DE TRANSITION
- MÉTAUX PAUVRES
- MÉTALLOÏDES
- HALOGENES
- GAZ NOBLES
- LANTHANIDES
- ACTINIDES

A quoi ça sert ?

Physique quantique « à une particule »

Senseurs du temps et de l'espace

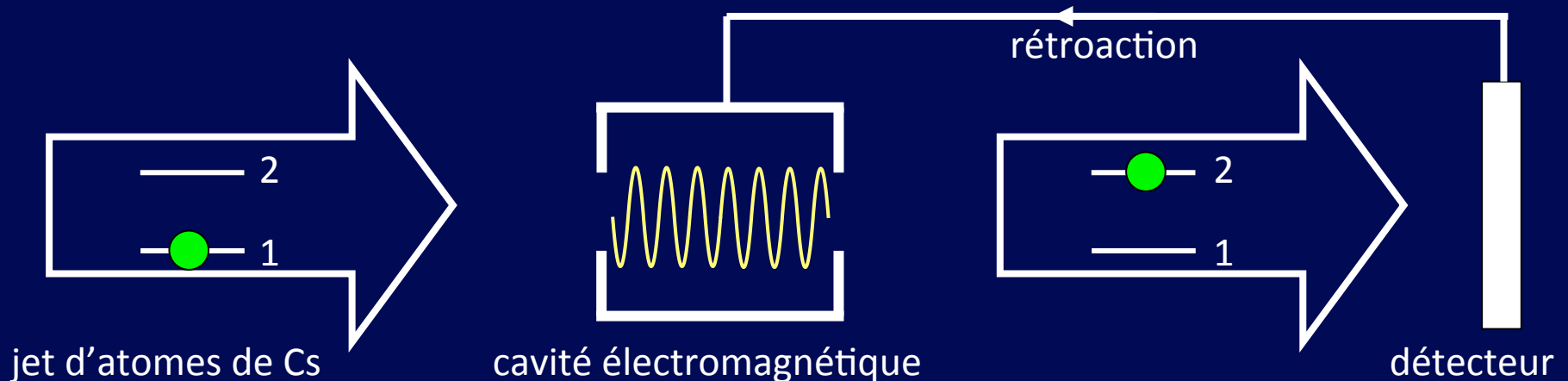
Principe d'une horloge atomique

1967 : définition de la seconde (unité de temps) à partir d'une référence atomique

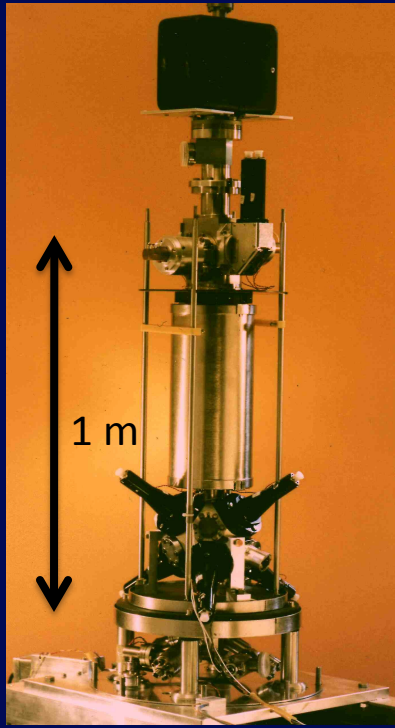


1 et 2 sont les deux niveaux d'énergie les plus bas de l'atome de césium (isotope 133)

L'onde électromagnétique résonnante avec la transition 1 – 2 effectue 9 192 631 770 oscillations par seconde



La fontaine atomique



Parmi les nombreux avantages liés à l'utilisation d'atomes froids :

Réduction de l'élargissement dû à l'effet Doppler

Réduction de la largeur intrinsèque de la raie

$$\Delta\nu \times T_{\text{interaction}} \sim 1$$

Observatoire de Paris (SYRTE)

Précision relative de l'horloge $\approx 10^{-16}$

Retarde ou avance de moins d'une minute depuis le Big-Bang

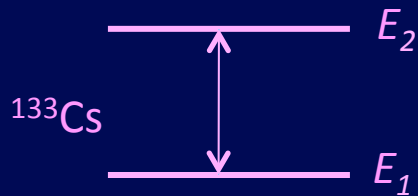
Navigation, positionnement, géodésie, télécommunications

Interférométrie à très longue base (astronomie)

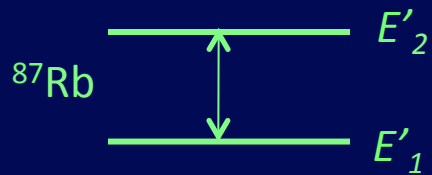
Tests de physique : relativité

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{gH}{c^2} \approx 10^{-16} \quad \text{pour} \quad \begin{cases} g = 9.8 \text{ m/s}^2 \\ H = 1 \text{ m} \end{cases}$$

Les horloges indiquent-elles toutes le même temps ?



horloge à césium : 9 192 631 770 oscillations / seconde



horloge à rubidium : 6 834 682 610, 904 ... oscillations / seconde

La comparaison des oscillations des « balanciers » de deux espèces différentes est une simple règle de trois, faisant intervenir le quotient entre $E_2 - E_1$ et $E'_2 - E'_1$.

Ce quotient est une fonction de constantes fondamentales sans dimension comme :

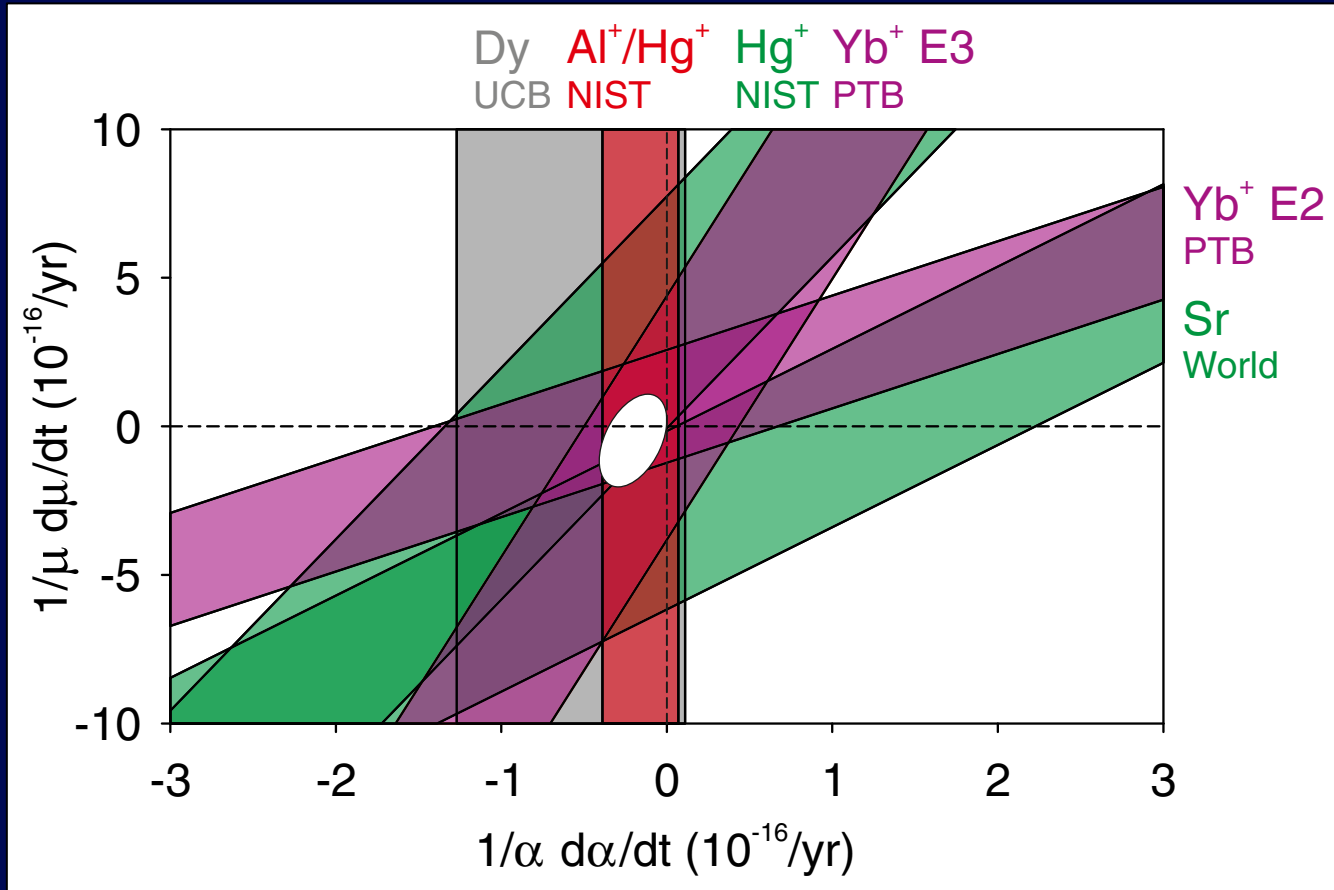
$$\frac{m_{\text{proton}}}{m_{\text{électron}}} \approx 1836$$

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad \text{constante de structure fine}$$

Mais les constantes fondamentales sont-elles vraiment immuables ?

Contraintes sur la variation des constantes fondamentales

$$\mu = \frac{M_p}{M_e}$$



$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$$

figure extraite de E. Peik et al, PRL 2014

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} < 4 \cdot 10^{-17} / \text{an}$$

Matière classique ou quantique ?

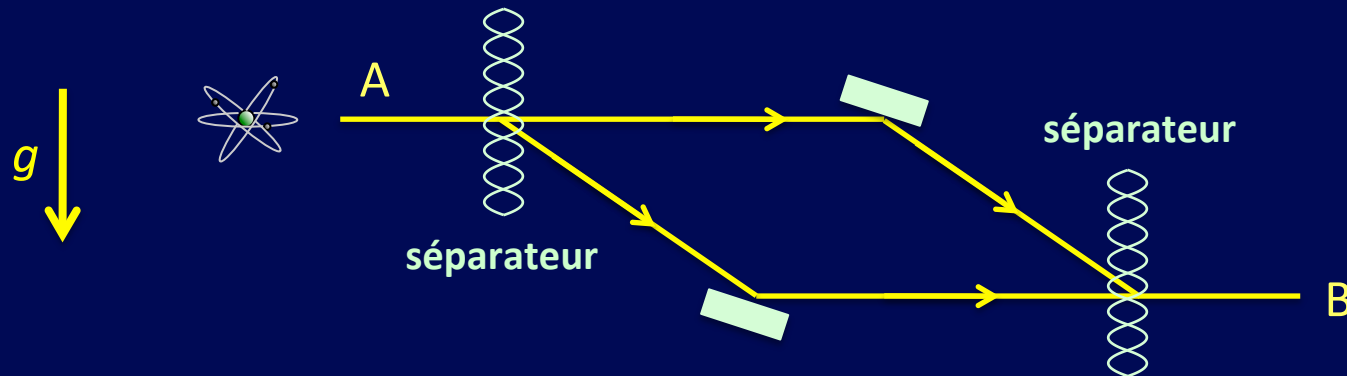
A toute particule matérielle de vitesse v , on peut associer une onde de longueur d'onde λ proportionnelle à $1/v$

Sodium à température ordinaire : $\lambda = 0,2$ angström

Plus petite que la taille d'un atome : difficilement détectable

Sodium refroidi par laser : $\lambda = 0,1$ à 1 micromètre

Interféromètre à onde de matière



Précision
meilleure
que $10^{-9} g$

A quoi ça sert ?

Physique quantique « à N corps »

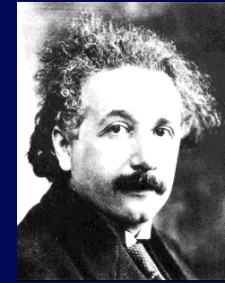
Condensats de Bose-Einstein et simulateurs quantiques

Les deux classes de particules dans la Nature

Les bosons, particules au comportement grégaire, qui peuvent s'accumuler en nombre arbitrairement grand dans le même état

photons, objets « composites » de spin entier :
atomes d'hydrogène, de lithium-7, de rubidium-87,...

Pour les photons, cette accumulation est à l'origine du laser !



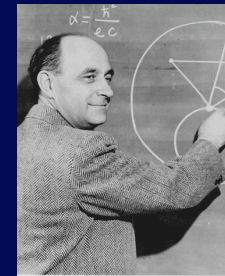
Einstein



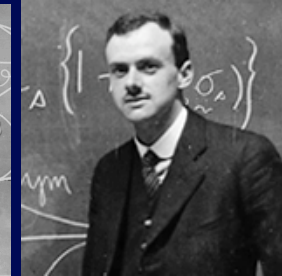
Bose

Les fermions, particules au comportement individualiste :
jamais deux particules dans le même état

électrons, quarks, objets composites de spin demi-entier:
atomes de deutérium, de lithium-6, de potassium-40,...



Fermi

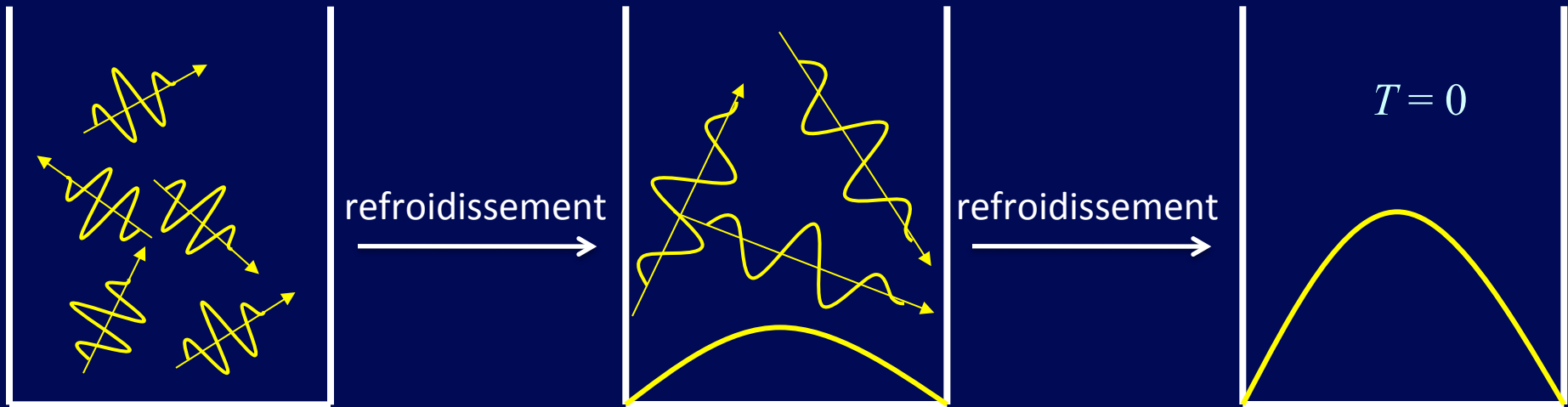
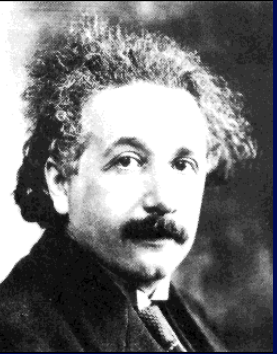


Dirac

${}^6\text{Li}$: 3 électrons + 3 protons + 3 neutrons, soit 9 particules de spin $\frac{1}{2}$: spin total demi-entier

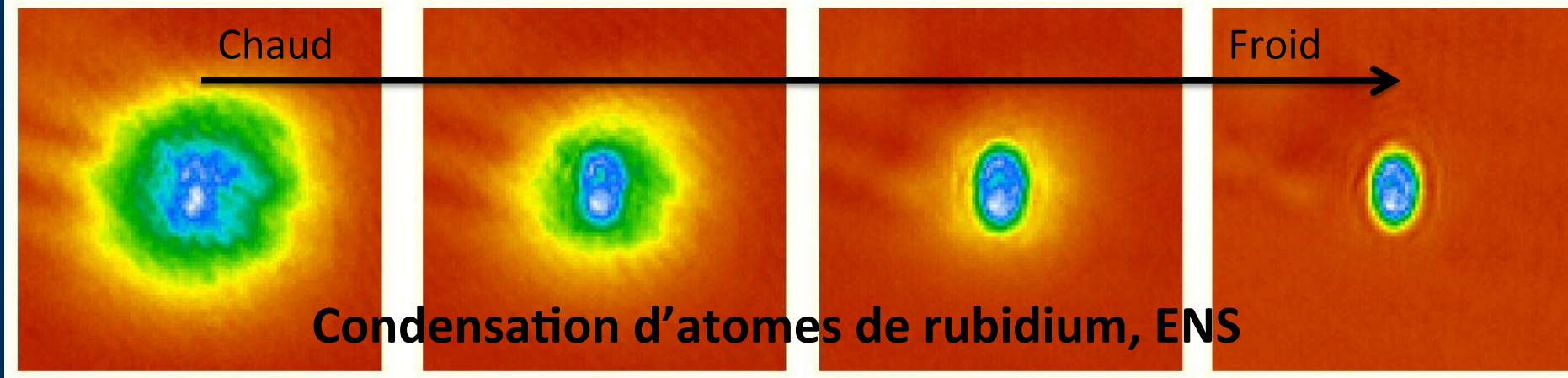
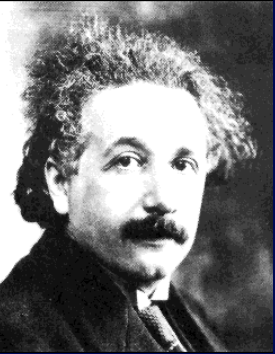
${}^7\text{Li}$: 3 électrons + 3 protons + 4 neutrons, soit 10 particules de spin $\frac{1}{2}$: spin total entier

La condensation de Bose-Einstein (1924)



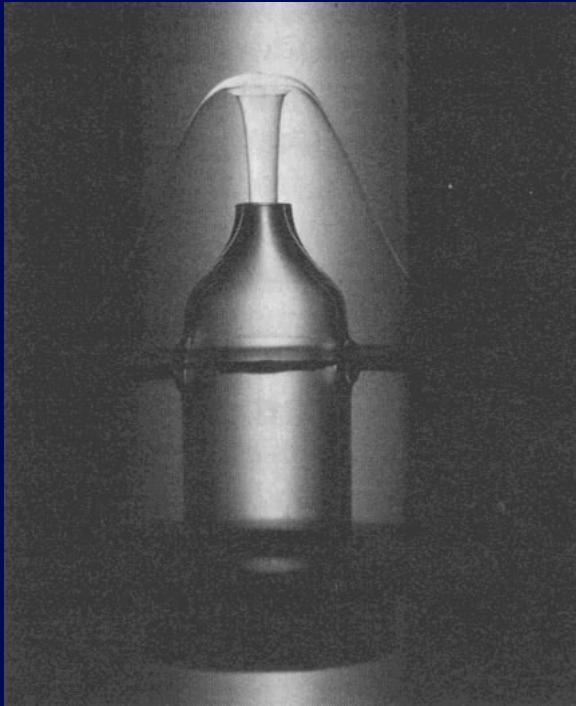
Seuil pour la condensation de Bose-Einstein :
la longueur d'onde devient aussi grande que la distance moyenne entre atomes

La condensation de Bose-Einstein (1924)

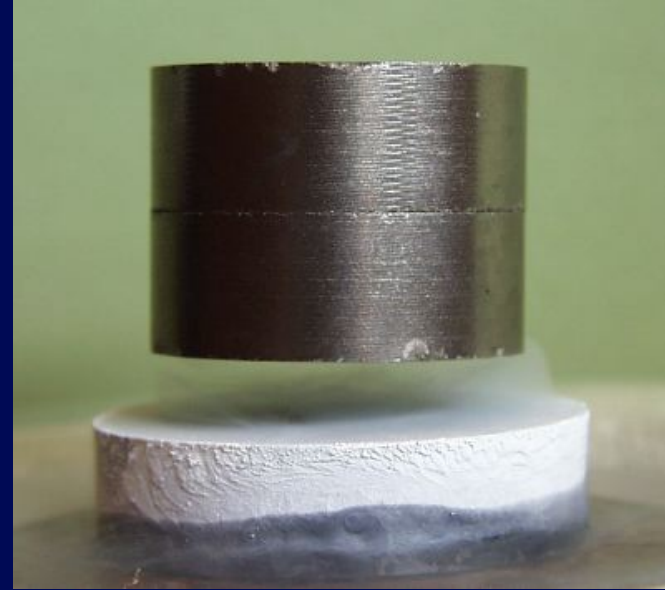


Seuil pour la condensation de Bose-Einstein :
la longueur d'onde devient aussi grande que la distance moyenne entre atomes

Physique quantique à l'échelle macroscopique



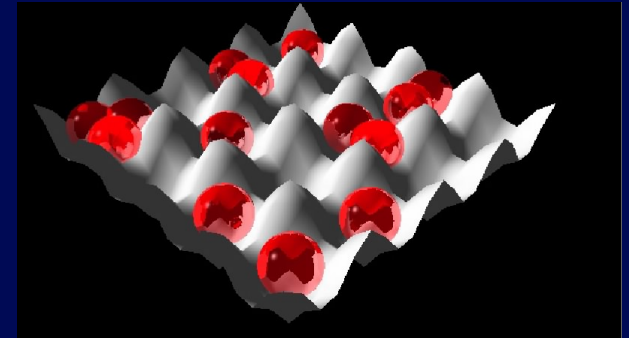
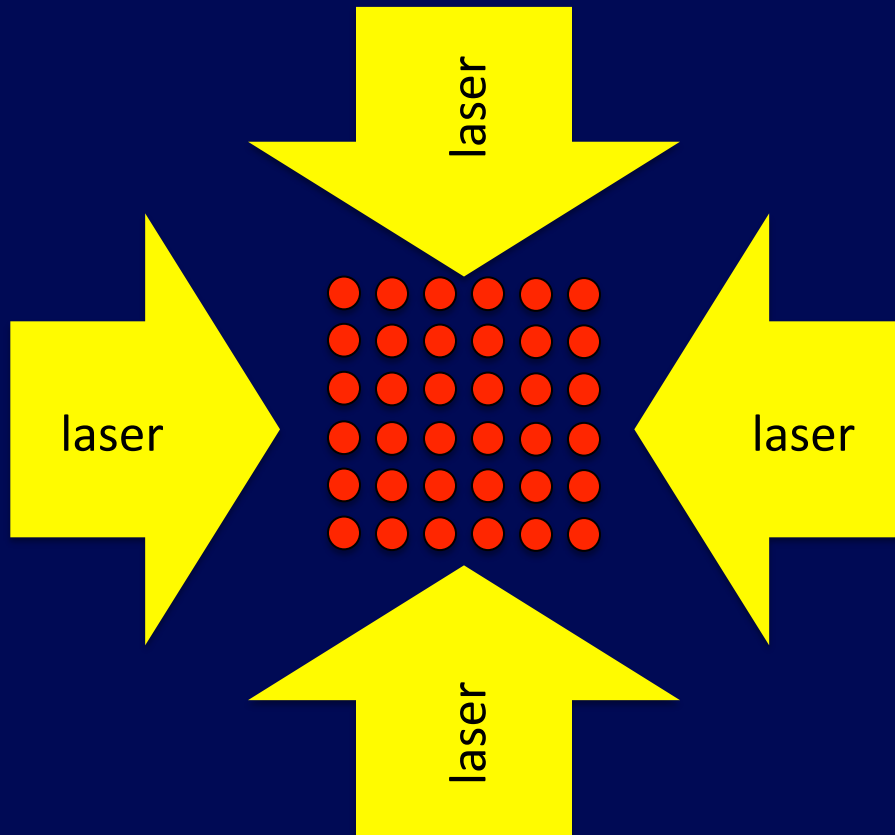
Superfluidité de l'hélium



Supraconductivité électrique

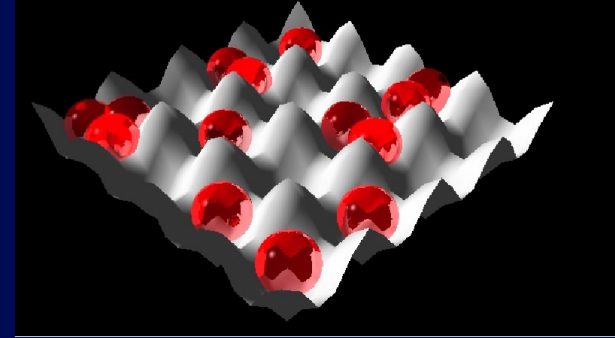
Les réseaux optiques

Système d'ondes lumineuses stationnaires, dans lequel les atomes s'accumulent aux « ventres » d'intensité



« boîte à œufs » pour atomes

Le potentiel dipolaire



Interaction dipolaire électrique entre l'atome et le champ lumineux

$$V = -\vec{D} \cdot \vec{E}_{\text{laser}}$$

Si la lumière n'est pas trop intense, le dipôle atomique moyen est proportionnel au champ électrique

$$\langle \vec{D} \rangle = \alpha \vec{E}_{\text{laser}}$$

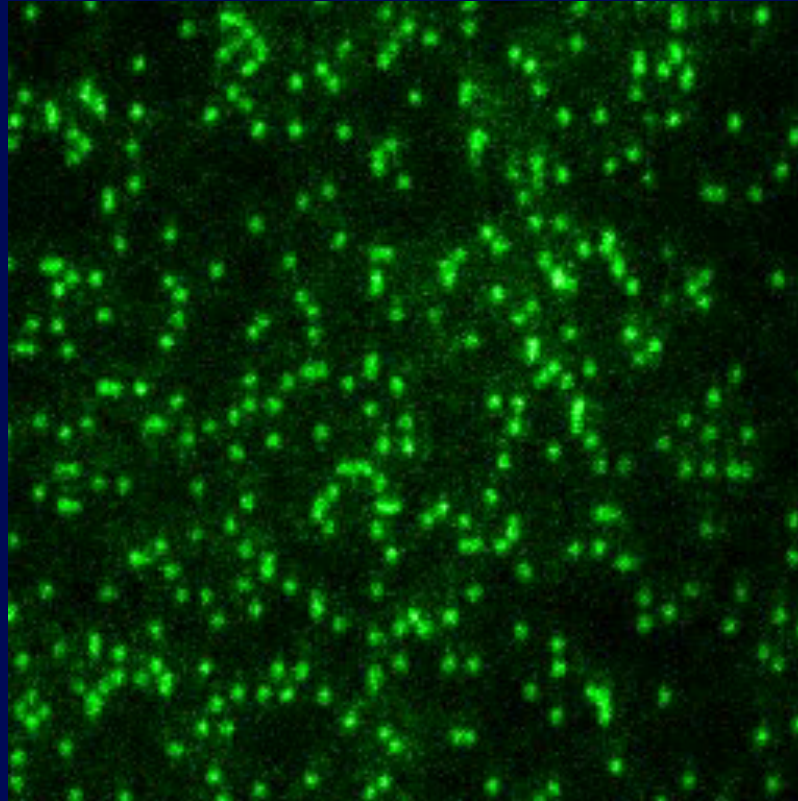
où la polarisabilité α est positive si la fréquence de la lumière est inférieure à la fréquence de résonance de l'atome (et négative dans le cas opposé)

Energie moyenne :
$$V_{\text{dipolaire}}(\vec{r}) = -\frac{1}{2} \alpha \vec{E}_{\text{laser}}^2(\vec{r})$$

Si $\alpha > 0$, l'atome est attiré vers les régions de grande intensité lumineuse

Visualisation des atomes dans un réseau optique

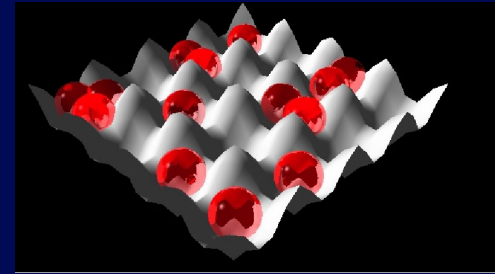
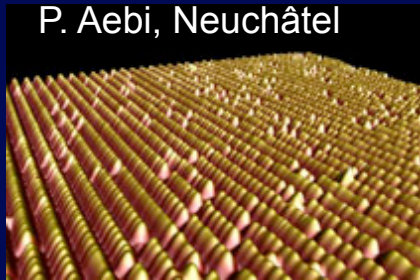
Markus Greiner, Harvard 2009



*Chaque point est
un atome unique*

Le mouvement d'atomes froids dans un réseau optique présente de fortes similitudes avec celui des électrons dans les solides : système modèle pour étudier la conduction de l'électricité

Simulation de la conduction électrique ?



Distance d entre sites

$$3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$\times 10^3$$



$$3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Masse m
électron

$$\times 10^5$$



atome

Température

$$300 \text{ K}$$

$$\times 10^{-11}$$



$$3 \text{ nK}$$

Longueur d'onde de de Broglie

$$3 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$\times 10^3$$



$$3 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Même nombre caractéristique λ / d pour les deux situations

Simulation quantique avec des atomes froids

Suivant l'idée visionnaire de Feynman :

Utiliser un autre système (ici le fluide d'atomes froids) pour « résoudre » des problèmes qui sont trop ardues sur le plan calculatoire pour être traités sur des calculateurs habituels



horloge astronomique

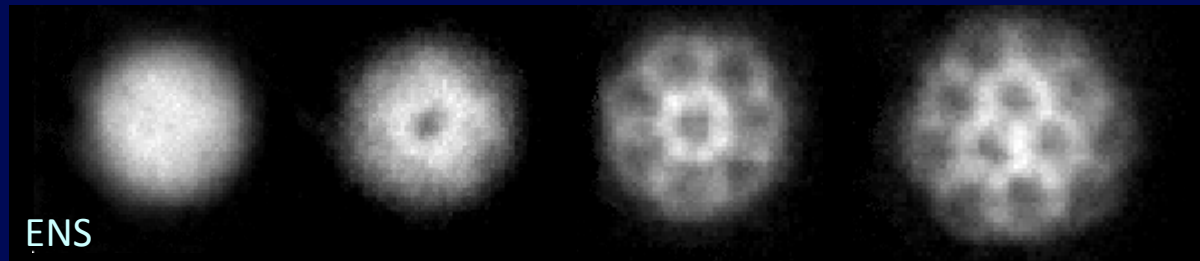
Un système quantique à N corps peut être décrit avec quelques paramètres

- Nature statistique des particules : OK, par exemple ${}^6\text{Li}$ (fermion) vs. ${}^7\text{Li}$ (boson)
- « Paysage de potentiel » : OK grâce à la lumière
potentiel uniforme, harmonique, périodique
- Energie d'interaction vs. énergie cinétique : OK grâce à des résonances de diffusion
- Magnétisme et force de Lorentz : pas évident car nos atomes sont neutres, mais on sait désormais créer des champs magnétiques artificiels...

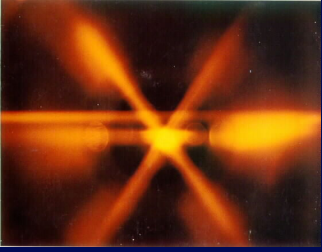
Un exemple de champ magnétique artificiel

Mise en rotation d'un condensat de Bose-Einstein neutre : équivalent à appliquer un champ magnétique sur un fluide chargé (théorème de Larmor)

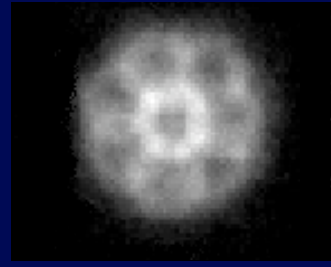
$$\vec{F}_{\text{Coriolis}} = 2m \vec{v} \times \vec{\Omega} \quad \longleftrightarrow \quad \vec{F}_{\text{Lorentz}} = q \vec{v} \times \vec{B}$$



Mise en évidence de vortex (tourbillons) quantiques, similaires à ceux d'un supraconducteur dans un champ magnétique



Perspectives



→ Horloges, gravimètres, gyromètres : stade de production industrielle

→ Gaz quantiques d'atomes froids et aspects collectifs :

- Vers un simulateur « universel » d'autres systèmes quantiques ?

conduction électrique des solides, objets astrophysiques

- Chimie ultra-froide : formation d'assemblage d'atomes au microkelvin