IRCP | Institut de Recherche de Chimie Paris

Les terres rares, lumineuses matières quantiques

Philippe Goldner

Institut de Recherche de Chimie Paris
PSL University, Chimie ParisTech, CNRS, Paris, France

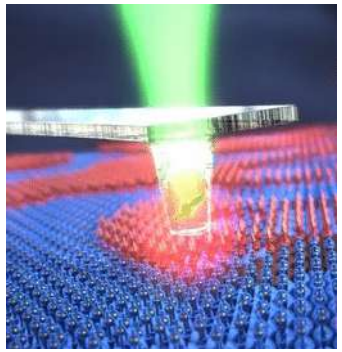
Société philomathique de Paris, 9 octobre 2025

Chimie Paris ParisTech | cnrs | PSL Université Paris

Technologies quantiques

Capteurs quantiques

Magnétomètres à l'échelle atomique



Communications quantiques

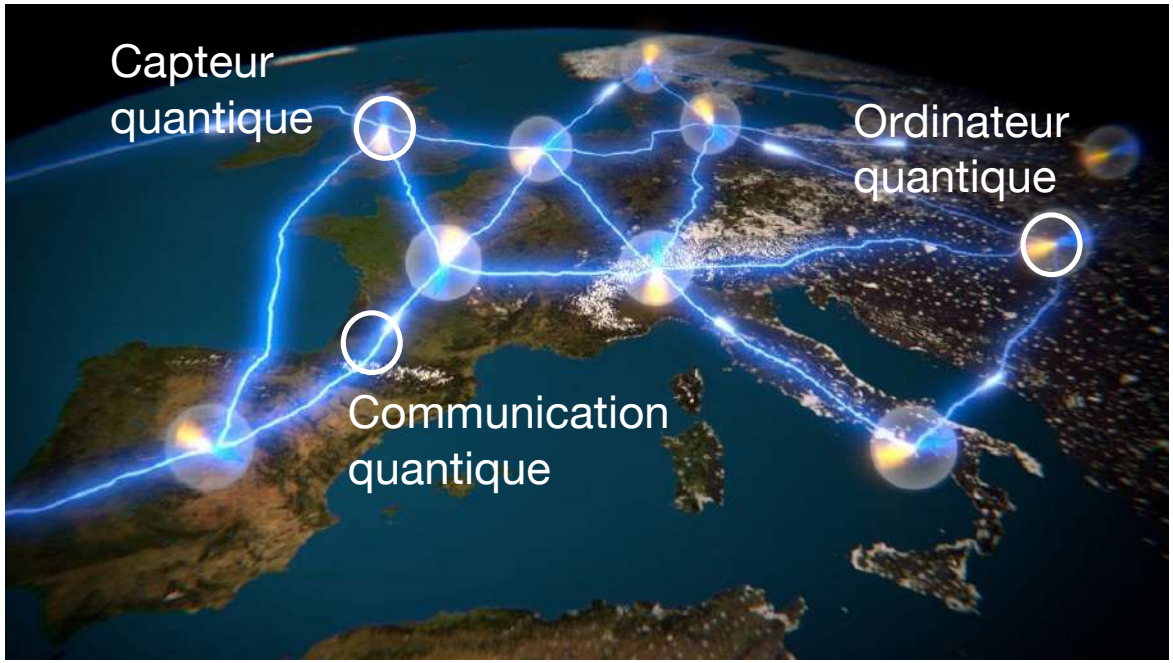
Sécuritée garantie par la physique quantique

Ordinateurs quantiques

Très grande puissance de calcul

Technologies quantiques

Le réseau internet quantique

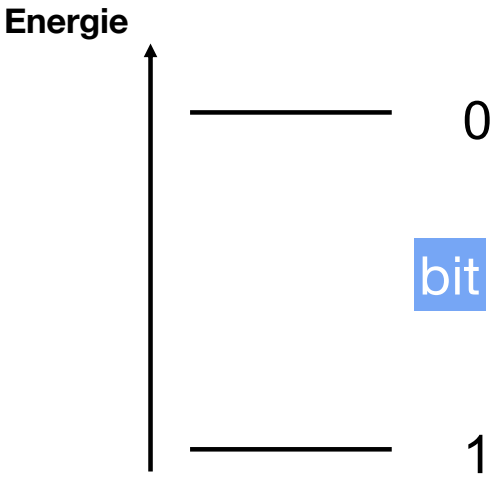


Nouvelles plateformes quantiques : interfaces avec la lumière et grandes capacités

Solides optiquement actifs

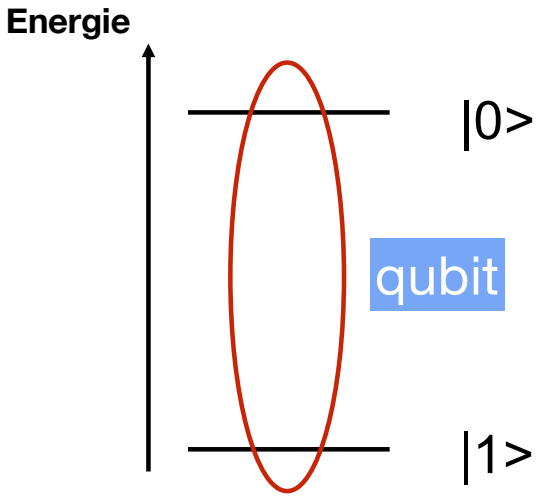
États quantiques

Système classique



2 states: ‘0’ and ‘1’

Système quantique



Etats quantiques :
α|0> + β|1>

Durées de vie

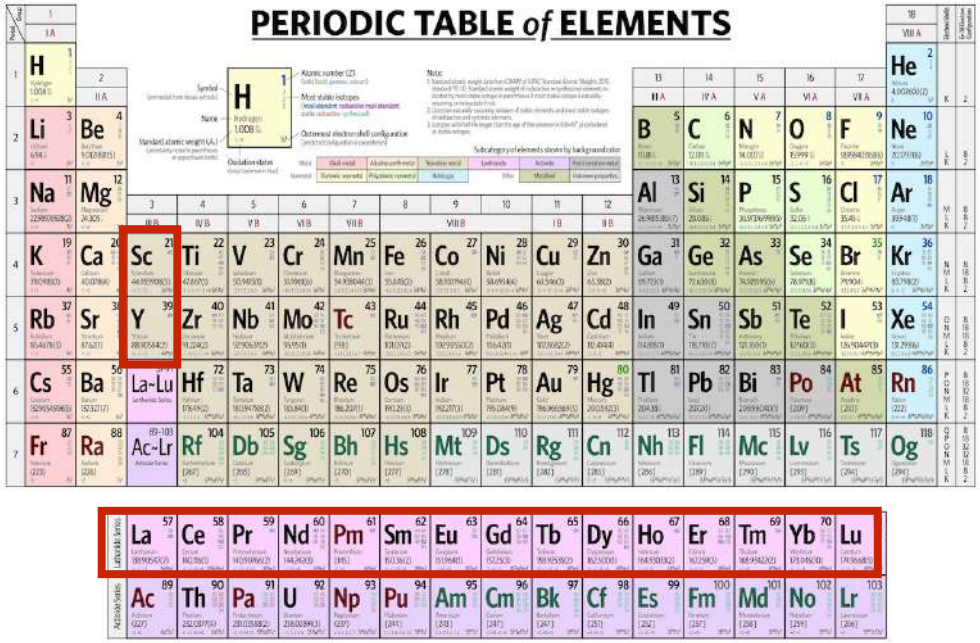
Durée de vie des états quantiques:
temps T_2 (temps de cohérence)

Interactions avec l’environnement :
modification de α,β,
perte de l’état quantique initial

Perturbations :
vibrations du cristal (phonons) réduites à basse température

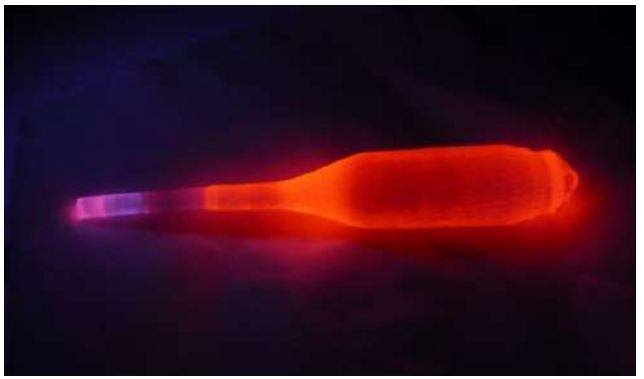
IR CP

Les terres rares



Lanthanides, scandium, yttrium

Dopage : cristaux massifs, films minces, nanoparticules, verres

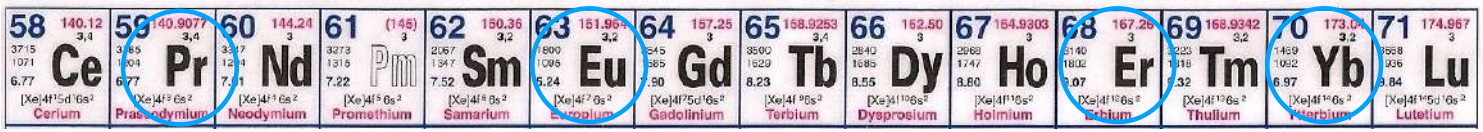


Cristal de silicate d'yttrium dopé par des ions europium sous une lampe UV.

Lasers, affichage, bio-sondes, **technologies quantiques**

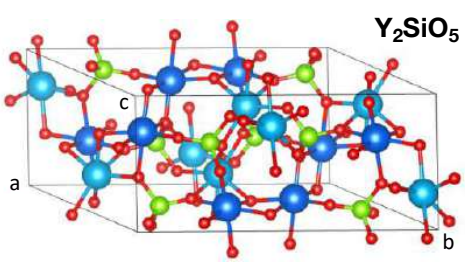
IR CP

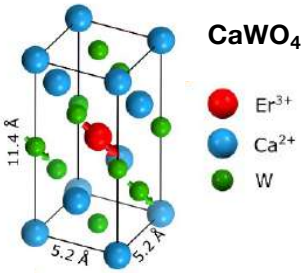
Terres rares et technologies quantiques



Cristaux dopés par des terres rares

- Ecrantage des électrons f, faibles perturbations
- Les plus longs T_2 optiques dans les solides – à basses températures (< 3 K)





Cristaux : Y_2SiO_5, $CaWO_4$, YVO_4, $LiYF_4$, Y_2O_3, …

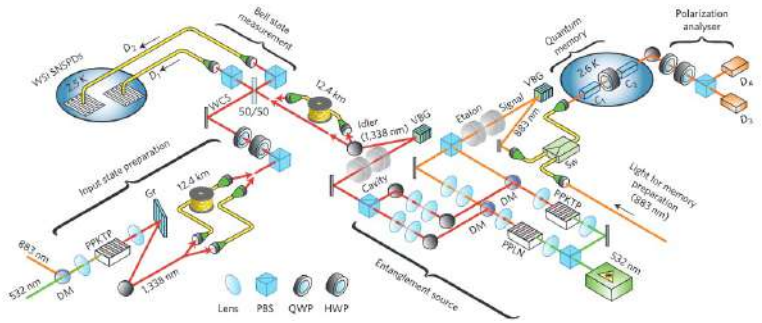
- Terres rares sous forme trivalentes (ex. Yb^{3+})

P. Goldner, A. Ferrier, and O. Guillot-Noël, in Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, vol. 46, 2015

IR CP

Applications

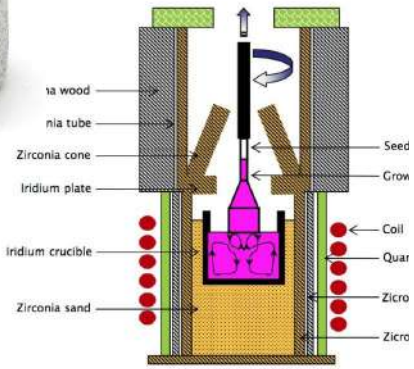
- Communications : mémoires quantiques, sources de photons uniques
- Ordinateurs quantiques : processeurs de grande capacité à l'échelle atomique
- Interfaces : convertisseurs micro-ondes / optiques pour les ordinateurs quantiques



Nat. Photonics 2014.

Elaboration de cristaux

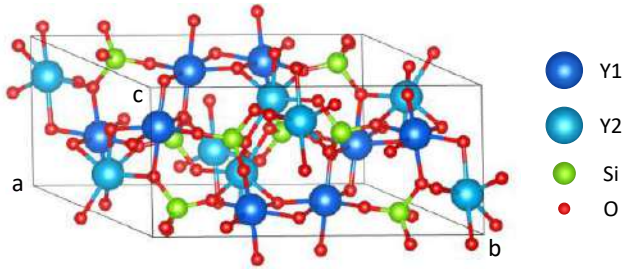
Croissance



Monocristal de silicate d'yttrium Y_2SiO_5 :
$(1-x)Y_2O_3+xYb_2O_3+SiO_2 \rightarrow Yb:Y_2SiO_5$ ($x \approx 10^{-6}$)
Tirage à partir d'un bain fondu à 2000 °C

IR CP

Orientation, découpe, polissage

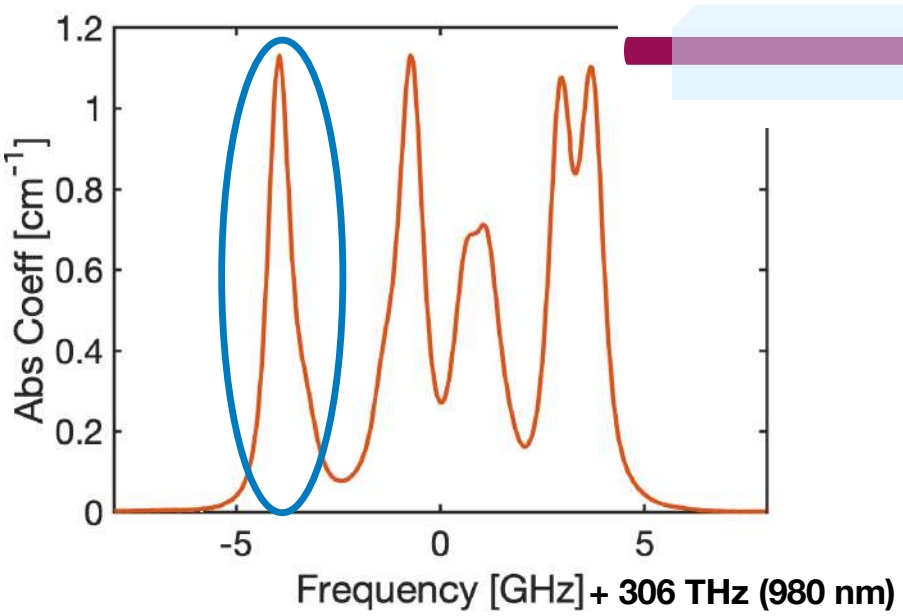


Echantillons de haute qualité optique et structurale

Propriétés optiques

Spectre d'absorption – Yb:Y_2SiO_5

Infrarouge proche (980 nm)

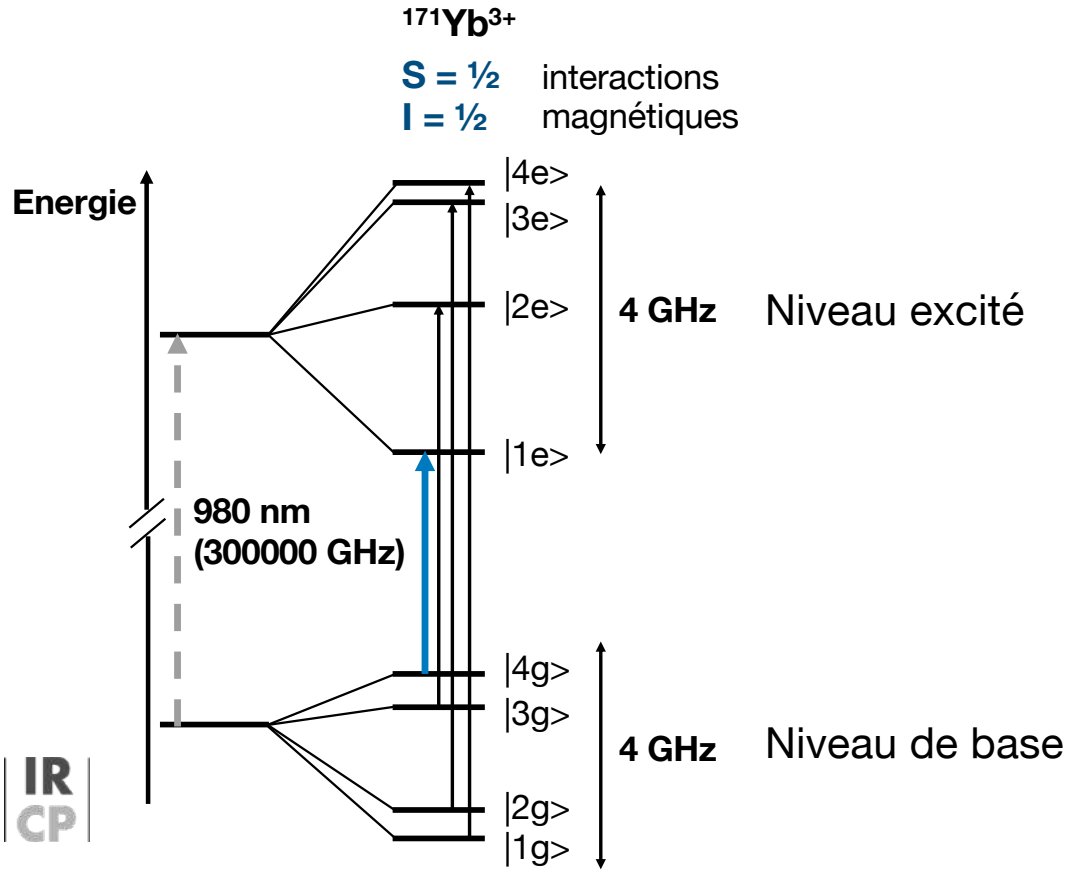


Dopage par l'ytterbium :

pics fins en absorption

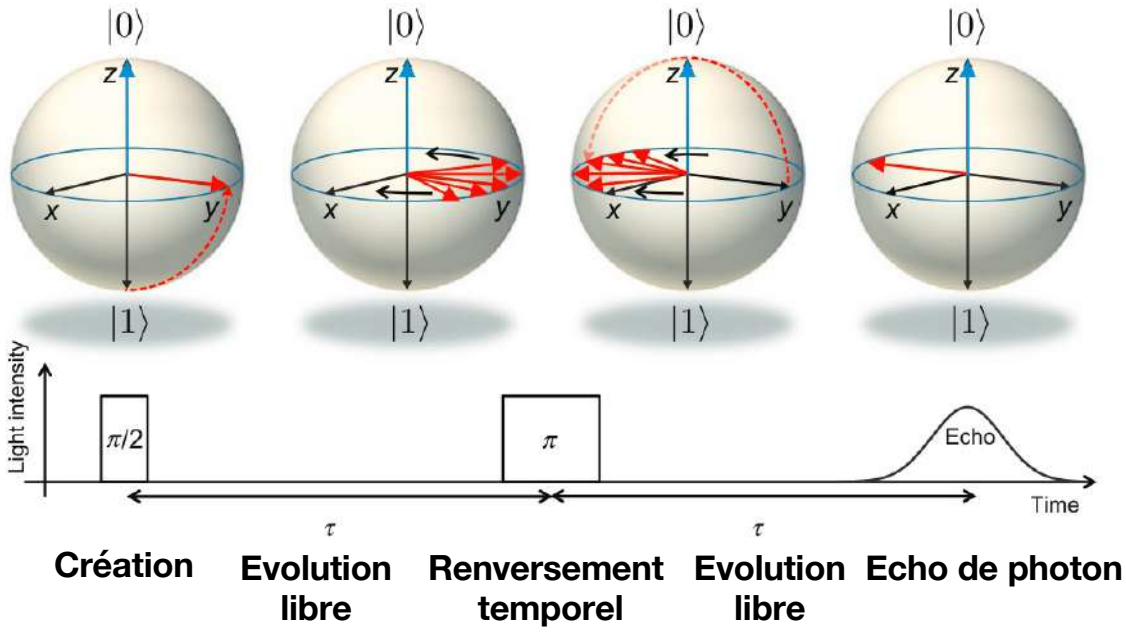
Phys. Rev. B 2016, 2017, 2018 – Opt. Mat. X 2022.

Niveaux d'énergie



Echos de photons

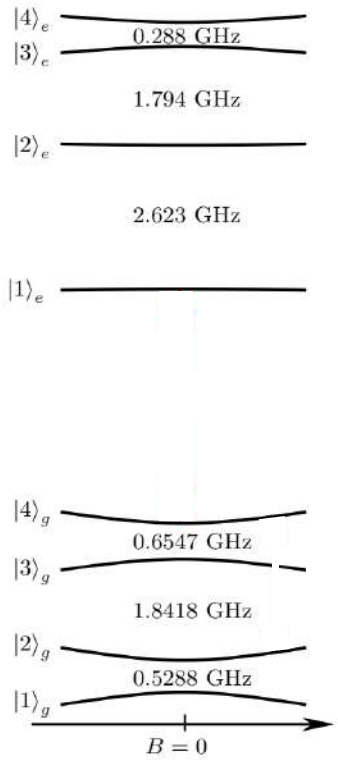
Lumière et états quantiques : création et manipulation



$$I_{echo} = I_0 \exp(-4\tau/T_2)$$

$^{171}Yb^{3+}$: Etat quantiques optiques

Effet d'un champ magnétique



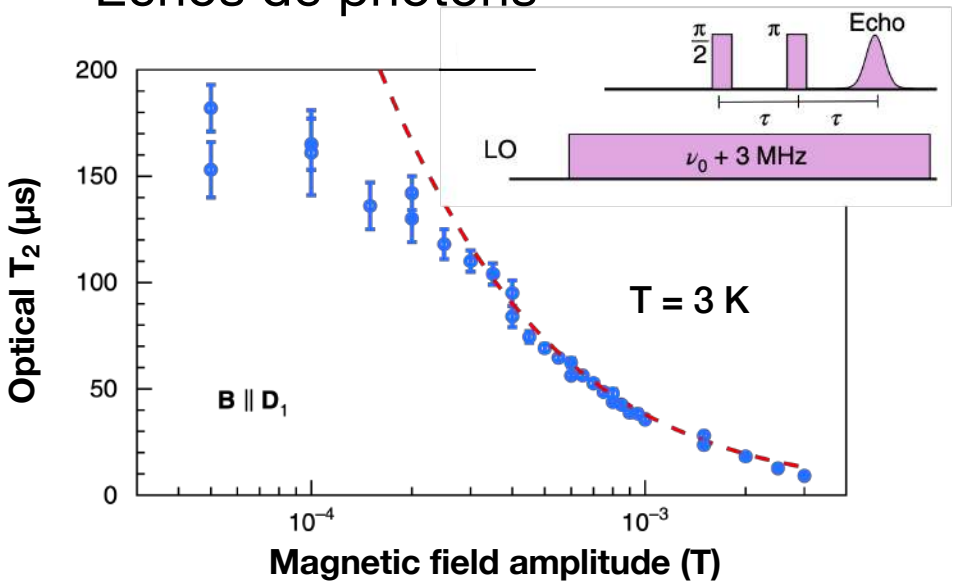
A champ nul:

$$\delta E = \cancel{S_1 \delta B} + S_2 \delta B^2$$

Fluctuations d'énergie réduites en présence de bruit magnétique (spins de la matrice ^{89}Y)

Augmentation de la durée de vie des états quantiques

Echos de photons

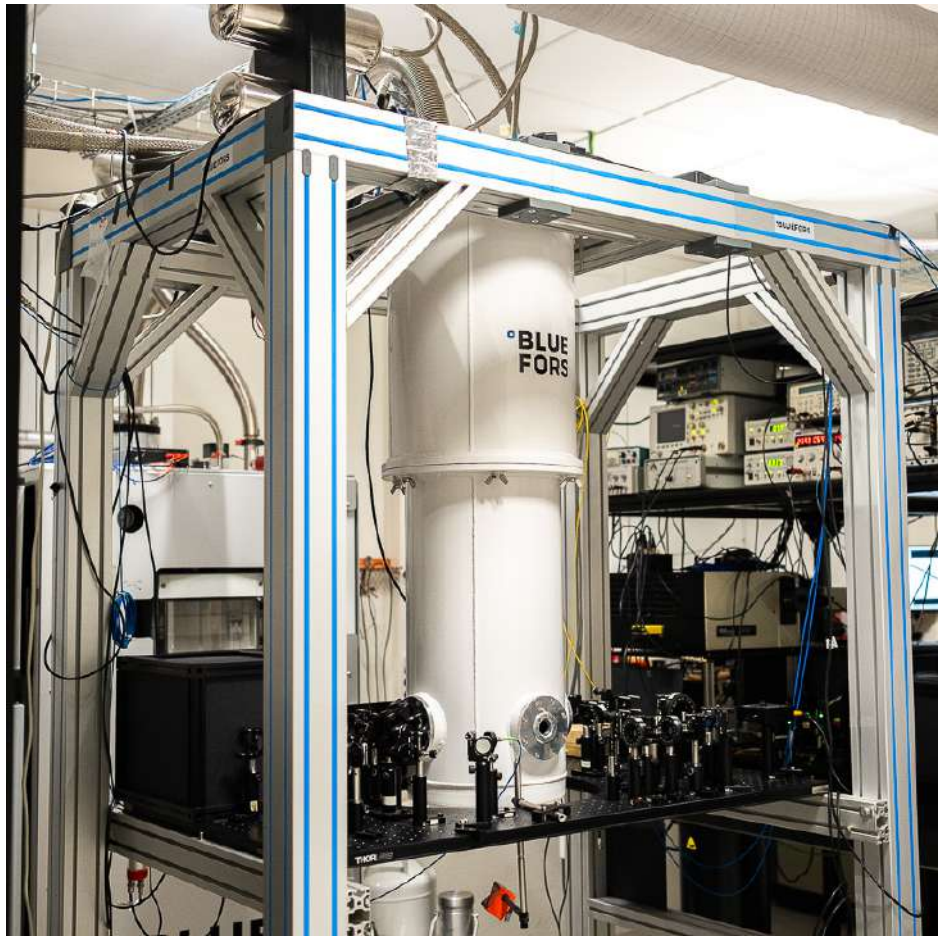


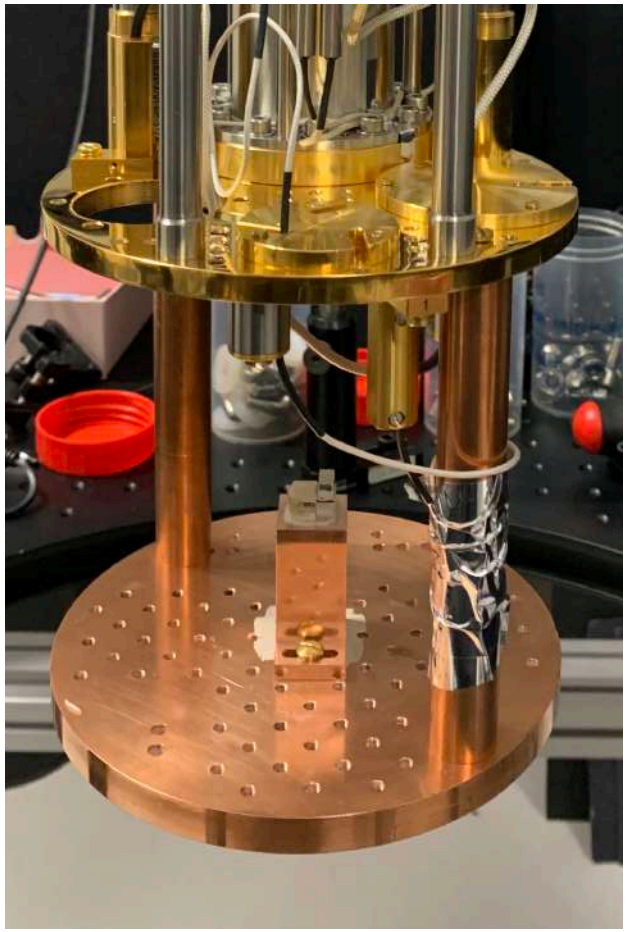
Valeurs de T_2 jusqu`à 1 ms (^{174}Yb (spin nul) < 1 µs)

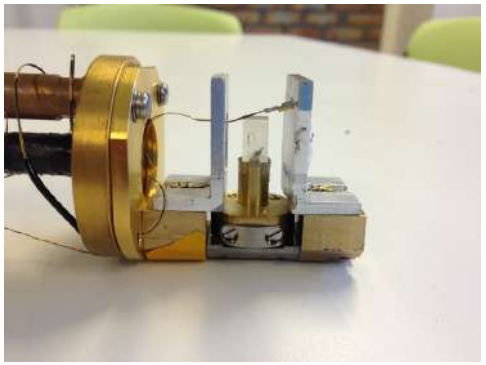
IR CP

Phys. Rev. B 2024, Nature Materials, 2018.

Dispositifs expérimentaux

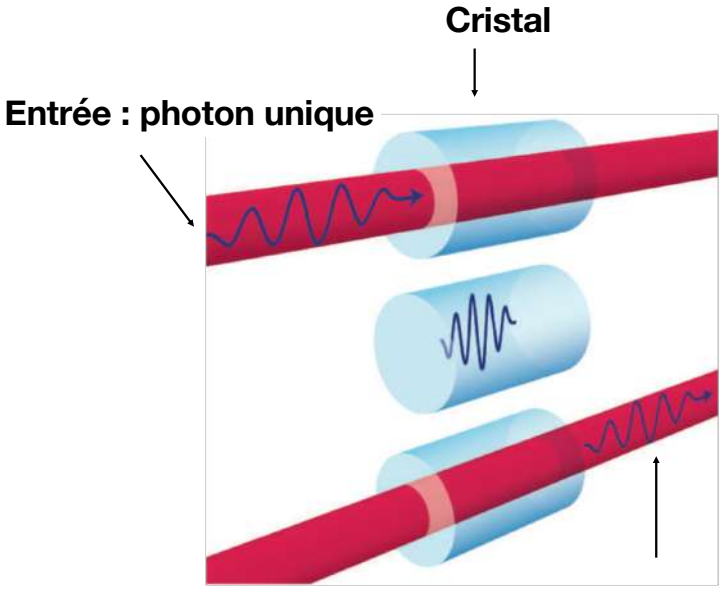






Mémoires quantiques

L'echo de photons : **une mémoire quantique** élémentaire



Sortie : photon unique identique à l'entrée !

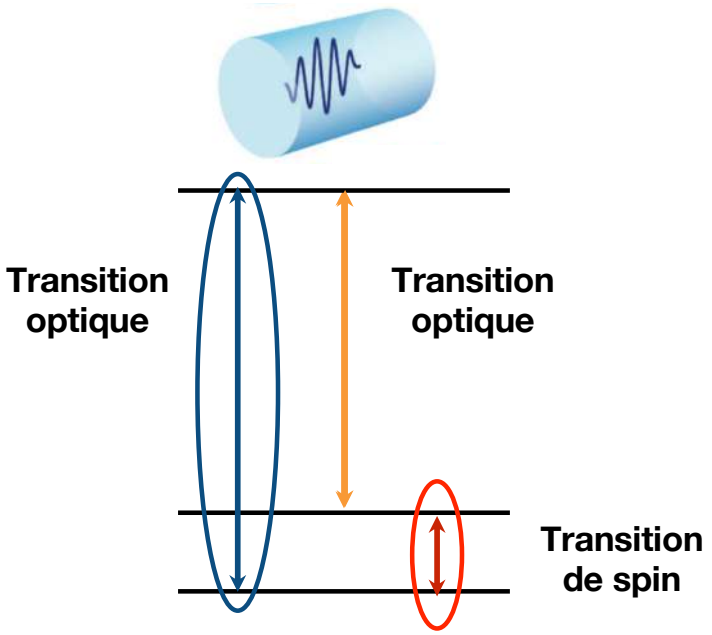
Durée de stockage = T_2 des états quantiques dans le cristal

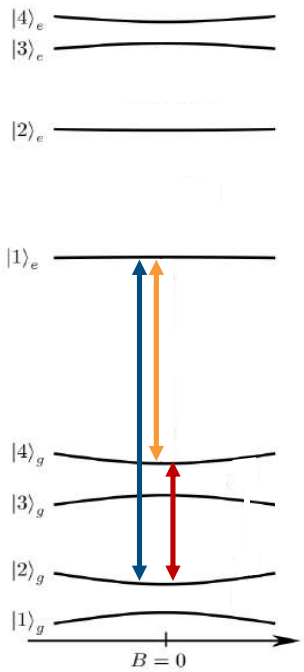
Mémoire : synchronisation du réseau, 1 ms ↔ 200 km : distance entre les éléments

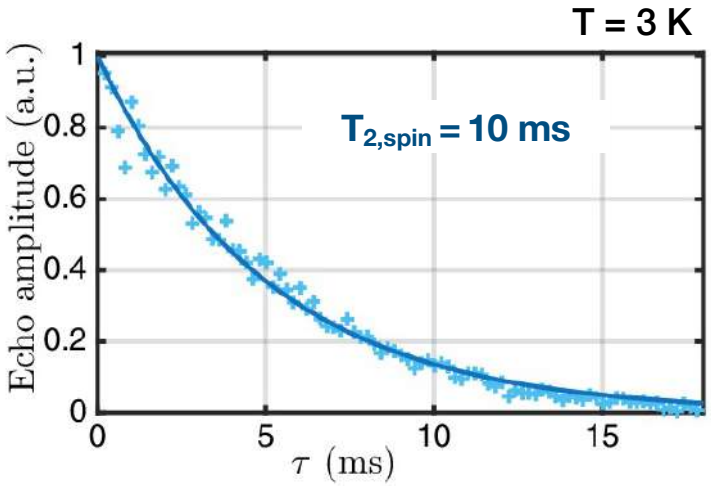
W. Tittel et al., Nature Photon. 2009.

Ondes de spin

Les spins : interactions plus faibles avec l'environnement et **T_2 plus long**







Transitions de spins : stockage 10 x plus long

npj Quantum Inf. 2023.

Remerciements

Groupe “Cristaux et Dynamique des Etats Quantiques”

Permanents
D. Serrano
A. Tallaire
A. Tiranov
M. De Feudis

Thésards
F. Montjovet
A. Blin
J. Morla Al Yahya
A. Hebbrecht
D. Kim
L. Silva
P. Jiao
T. Li

Post-docs:
A. Bach
C. Newsom
K. Waszkowska
L. Wu

@CQSDParis

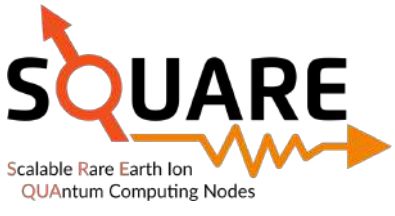
Crystals and Quantum State Dynamics Group

IR CP

Remerciements

Collaborateurs:

R. Gonçalves, USP, Brazil - S. Kröll, A. Walther, Lund Univ., Sweden - Y. Le Coq, B. Fang, SYRTE, France - S. Seidelin, T. Chanelière, Grenoble Univ., France - H. de Riedmatten and F. Koppens, ICFO, Spain - **M. Afzelius, University of Geneva, Switzerland** - P. Berger, L. Morvan, S. Welinski, Thales - P. Bertet, CEA, France - T. Zhong, Univ. Chicago, USA - J. Thompson, Princeton Univ., USA – J. Achard, LSPM, France – A. Louchet-Chauvet, ESPCI, France – G. Hétet, ENS, France – J. Etesse, UNIPHY, France – S. Bertaina, IM2NP, France – T. Gacoin, LPMC, France. - **A. Faraon, Caltech, USA**



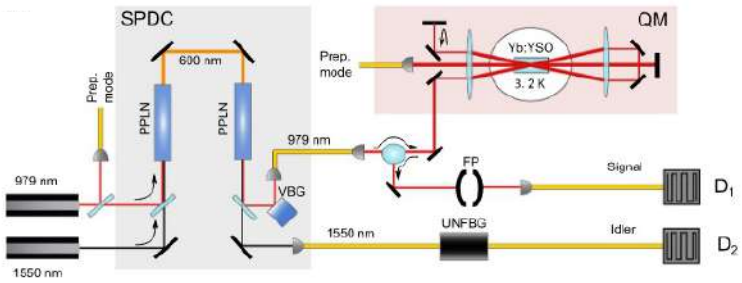
European Research Council
Established by the European Commission

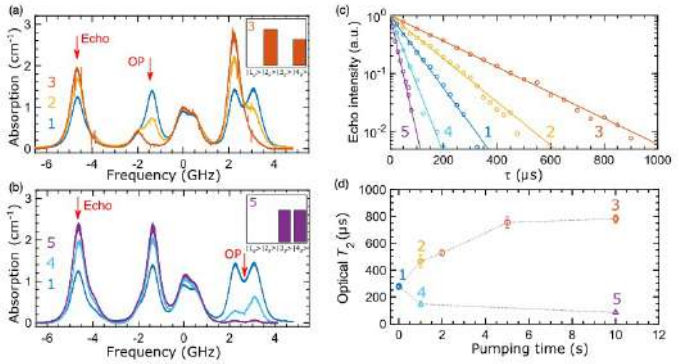
Des mémoires aux matériaux

Mémoires quantiques

Yb^{3+}, Eu^{3+}, Pr^{3+}, Er^{3+}

Capacité, efficacité, et temps de stockage



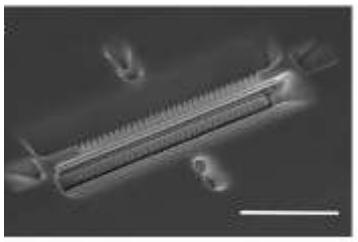
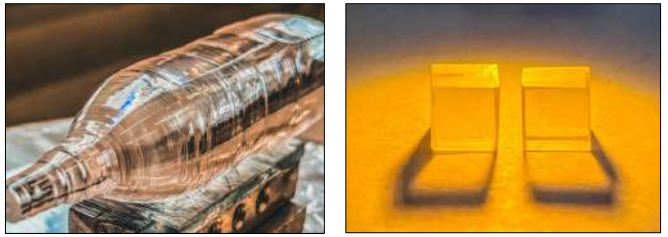
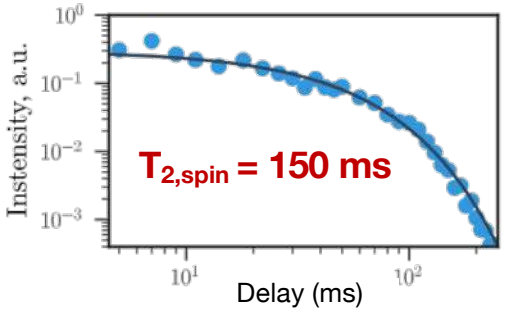


Nature Com. 2022, Phys. Rev. X 2020.

Ions et spin uniques
Conversion micro-onde/optique

Matériaux :

YVO_4 ,$LiNbO_3$, Si, films minces, nanoparticules – **^{171}Yb:$CaWO_4$**



Kindem et al., Nature 2020.