

Technologies quantiques émergentes

Pascale Senellart

Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies
CNRS - Université Paris Saclay

6 janvier 2026

Positionnement du cours

Physique Quantique : Première révolution technologique



Avertissement sur le cours

Ambition :

- ▶ Donner une introduction aux technologies quantiques avec des concepts simples
- ▶ Illustrer la science en marche

Cours à plusieurs niveaux de lecture :

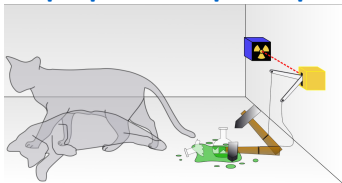
- ▶ Description du domaine avec une formation de élémentaire en mécanique quantique
- ▶ Illustration avec des développements récents
- ▶ Ici et là, des précisions pour les experts

Les technologies quantiques sont pluridisciplinaires : physique, algorithmique, ingénierie, informatique, mathématiques

→ Point de vue d'une physicienne et expérimentatrice

Seconde révolution quantique : Exploiter les concepts avancés

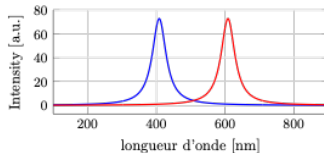
Superposition quantique



$$|\psi\rangle = \frac{|\text{vivant}\rangle + |\text{mort}\rangle}{\sqrt{2}}$$

Superposition en
polarisation

$$|\psi\rangle = \alpha|H\rangle + \beta e^{i\phi}|V\rangle$$



Superposition en fréquence

$$|\psi\rangle = \alpha|\omega_1\rangle + \beta e^{i\phi}|\omega_2\rangle$$

Seconde révolution quantique : Exploiter les concepts avancés

Intrication quantique

$$| \text{particule}^A \rangle \otimes | \text{particule}^B \rangle = | \text{particule}^A, \text{particule}^B \rangle$$

$$| \phi_+ \rangle = \frac{| H^A, H^B \rangle + | V^A, V^B \rangle}{\sqrt{2}}$$

Mesure de A dans l'état ω_1 : projecteur $\Pi = | H^A \rangle \langle H^A | \otimes \mathbb{I}^B$
 $\Pi | \phi_+ \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} | H^B \rangle$

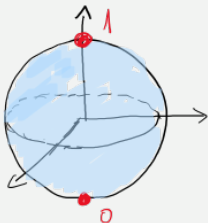


Deux types d'applications : information quantique et capteurs

Traitement quantique de l'information

- ▶ Bit d'information classique : **0** ou **1**
- ▶ Bit d'information quantique :

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \text{ with } \alpha, \beta \in \mathbb{C}$$
$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

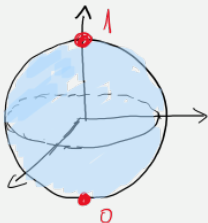


Deux types d'applications : information quantique et capteurs

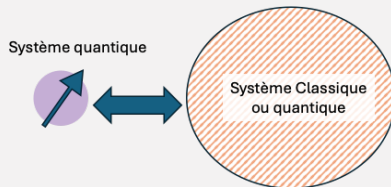
Traitement quantique de l'information

- ▶ Bit d'information classique : **0** ou **1**
- ▶ Bit d'information quantique :

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \text{ with } \alpha, \beta \in \mathbb{C}$$
$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$



Nouveaux instruments de mesure



Interaction avec un système quantique
élémentaire

Exemple : Spin - champ magnétique

$$\hat{H} = -\hat{\vec{\mu}} \cdot \vec{B}$$

cf. Séminaire J.F. Roch

Seconde révolution quantique : 4 catégories d'applications

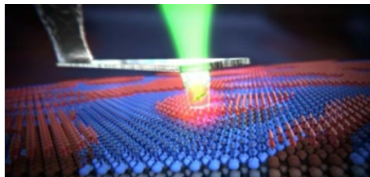
Capteurs quantiques

- ▶ Champs électriques et magnétiques
- ▶ Gravité
- ▶ Temps

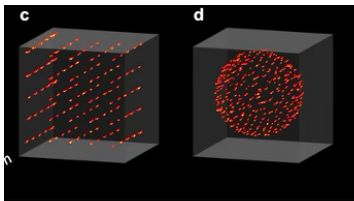
Simulation quantique

- ▶ Calcul quantique analogique
- ▶ Simulation de systèmes physiques complexes

©Thales TRT



©Lab. Charles Fabry



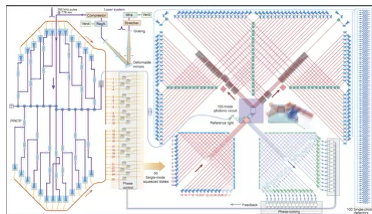
Seconde révolution quantique : 4 catégories d'applications

Calcul quantique

- ▶ Calcul digital
- ▶ Premières machines imparfaites
- ▶ Protocoles de correction d'erreur

Communications quantiques

- ▶ Echange de clés cryptées
- ▶ Réseaux de communications, de calcul
- ▶ Connection capteurs - calculateurs

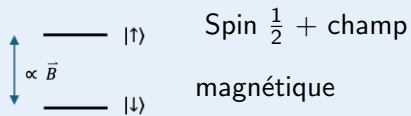


Quantum satellite achieves 'spooky action' at record distance
China's quantum satellite achieves 'spooky action' at record distance

Deux systèmes modèles : spin 1/2 et photons

Atome - spin $\frac{1}{2}$

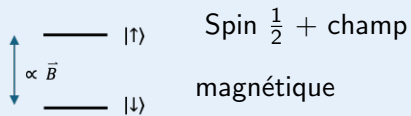
Système modèle - Qubit "stationnaire"



Deux systèmes modèles : spin 1/2 et photons

Atome - spin $\frac{1}{2}$

Système modèle - Qubit "stationnaire"

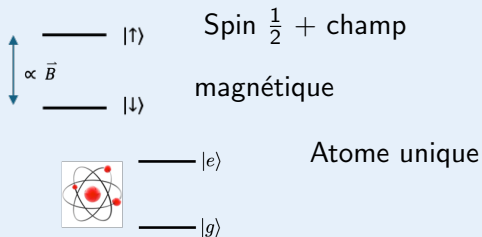


_____ $|e\rangle$
_____ $|g\rangle$ Atome unique

Deux systèmes modèles : spin 1/2 et photons

Atome - spin $\frac{1}{2}$

Système modèle - Qubit "stationnaire"



Photon - oscillateur harmonique

Système modèle - Qubit "volant"

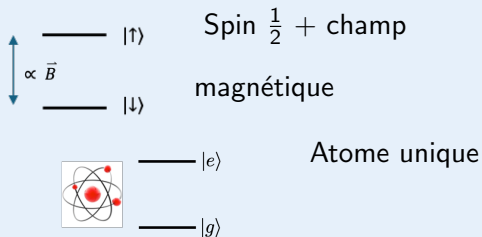
Oscillateur harmonique
Seconde quantification
(boson)

$$\hat{a}^\dagger |0\rangle = |1\rangle$$

Deux systèmes modèles : spin 1/2 et photons

Atome - spin $\frac{1}{2}$

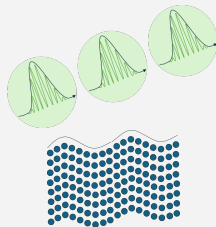
Système modèle - Qubit "stationnaire"



Photon - oscillateur harmonique

Système modèle - Qubit "volant"

Oscillateur harmonique
 $\hat{a}^\dagger|0\rangle = |1\rangle$ Seconde quantification
(boson)



Photons, états quantiques de la lumière
Phonons, ondes acoustiques

Programme des cours et séminaires

6 janvier - Cours 1

Du spin $\frac{1}{2}$ au bit quantique

► Pr. Jean-François Roch

LUMIN - ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay

Centres NV du diamant : du matériau aux capteurs quantiques

20 janvier - Cours 3

Introduction à la décohérence

► Pr. Mete Atature

Cavendish Laboratory, University of Cambridge

Taming a nuclear spin ensemble with quantum optics

13 janvier - Cours 2

Encoder l'information sur la lumière

► Pr. Valentina Parigi

Laboratoire Kastler Brossel

Réseaux quantiques multimodes à variables continues

27 janvier - Cours 4

Photons uniques et intriqués

► Dr. Audrey Bienfait

LPENSL, CNRS, Ecole Normale Supérieure de Lyon

Manipuler des phonons uniques avec des qubits supraconducteurs

Programme des cours et séminaires

3 février - Cours 5

Processeurs quantiques photoniques

► Pr. Gerhard Rempe

Max-Planck Institute of Quantum Optics, Garching, Germany

Entanglement, quo vadis?

17 février - Cours 7

Vibrations et technologies quantiques

► Pr. Markus Aspelmeyer

University of Vienna

How does a quantum object gravitate?

10 février - Cours 6

Processeurs quantiques à atomiques

► Pr. Antoine Browaeys

Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique, Palaiseau

Assembler la matière quantique atome par atome

24 Février - Cours 8

Interfaces et mémoires quantiques

► Pr. Tracy Northrup

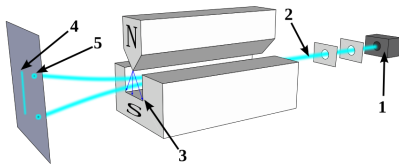
University of Innsbruck, Department of Experimental Physics

Quantum interfaces based on ions and photons

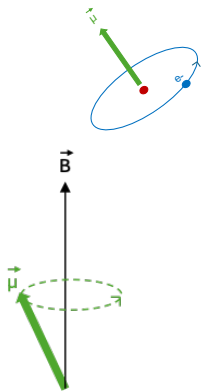
Le spin $\frac{1}{2}$

Spin $\frac{1}{2}$: Bref rappel historique

Mise en évidence de la quantification du spin par Stern et Gerlach (1922)



Spin $\frac{1}{2}$: Bref rappel historique : Vision classique de la précession de Larmor



Moment magnétique $\vec{\mu} = iS \vec{u} = \frac{q\hbar}{2} \vec{u}$. Lien avec le moment cinétique orbital $\vec{L} = rmv \vec{u}$:

$$\vec{\mu} = \frac{q}{2m} \vec{L} = \gamma_0 \vec{L}$$

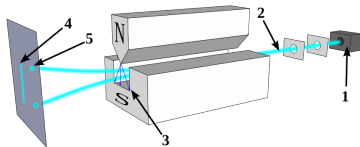
Précession du moment cinétique :

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} = \gamma_0 \vec{L} \times \vec{B}$$

$$\frac{dL_x}{dt} = -\omega_0 L_y, \quad \frac{dL_y}{dt} = \omega_0 L_x, \quad \frac{dL_z}{dt} = 0$$

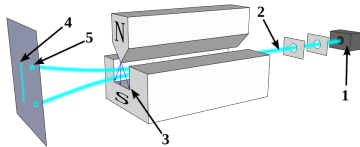
Spin $\frac{1}{2}$: Bref rappel historique

Mise en évidence de la quantification du spin par Stern et Gerlach (1922)



Spin $\frac{1}{2}$: Bref rappel historique

Mise en évidence de la quantification du spin par Stern et Gerlach (1922)

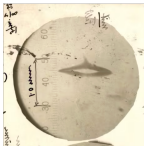


Observation de deux taches séparées

Moment magnétique intrinsèque de l'électron:

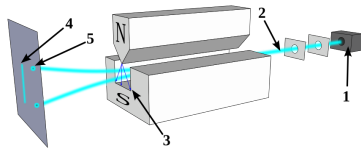
spin $\hat{S}$

$\hat{\mu} = \gamma \hat{S}$, γ facteur gyromagnétique



Spin $\frac{1}{2}$: Bref rappel historique

Mise en évidence de la quantification du spin par Stern et Gerlach (1922)



Observation de deux taches séparées

Moment magnétique intrinsèque de l'électron:

spin $\hat{S}$

$\hat{\mu} = \gamma \hat{S}$, γ facteur gyromagnétique

Interaction avec champ magnétique $\vec{B} = (0, 0, B_z)$:

$$\hat{W} = -\hat{\mu} \cdot \vec{B} = -\gamma \hat{S}_z B_z$$

Valeurs propres de $\hat{S}_z$: $\pm \frac{\hbar}{2}$

Spin $\frac{1}{2}$: Formalisme général

Algèbre des opérateurs de spin Opérateur moment cinétique $\hat{\vec{S}} = (\hat{S}_x, \hat{S}_y, \hat{S}_z)$ qui satisfont aux relations de commutation :

$$[\hat{S}_x, \hat{S}_y] = i\hbar \hat{S}_z, \quad [\hat{S}_y, \hat{S}_z] = i\hbar \hat{S}_x, \quad [\hat{S}_z, \hat{S}_x] = i\hbar \hat{S}_y$$

Cas du spin $\frac{1}{2}$: $\hat{S}_i = \frac{\hbar}{2} \hat{\sigma}_i$.



$|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$

où les trois matrices de Pauli sont :

$$\hat{\sigma}_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{\sigma}_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{\sigma}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad [\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y] = 2i\hat{\sigma}_z$$

Spin $\frac{1}{2}$: Formalisme général

États propres des matrices de Pauli

$$\hat{\sigma}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\hat{\sigma}_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{\sigma}_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

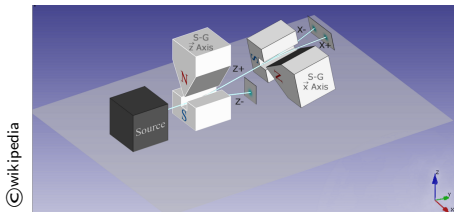
$$\sigma_z |\pm_z\rangle = \pm |\pm_z\rangle \quad |+_z\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |-_z\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

$$\sigma_x |\pm_x\rangle = \pm |\pm_x\rangle, \quad |\pm_x\rangle = \frac{|+_z\rangle \pm |-_z\rangle}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm 1 \end{pmatrix}.$$

$$\sigma_y |\pm_y\rangle = \pm |\pm_y\rangle, \quad |\pm_y\rangle = \frac{|+_z\rangle \pm i |-_z\rangle}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix}.$$

Spin $\frac{1}{2}$: mesures successives

Rappel : effet de la mesure, non-commutation des observables



Hypothèse - état à la source :

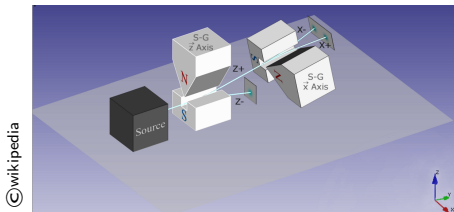
$$|\psi\rangle = \alpha|+_z\rangle + \beta|-_z\rangle$$

Intensité tache haute - appareil 1 $\propto |\alpha|^2$

$$\rightarrow |\psi\rangle = |+_z\rangle$$

Spin $\frac{1}{2}$: mesures successives

Rappel : effet de la mesure, non-commutation des observables



Hypothèse - état à la source :

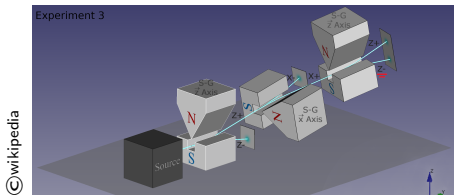
$$|\psi\rangle = \alpha|+_z\rangle + \beta|-_z\rangle$$

Intensité tache haute - appareil 1 $\propto |\alpha|^2$

$$\begin{aligned}\rightarrow |\psi\rangle &= |+_z\rangle \\ &= \frac{1}{2}(|+_x\rangle + |-_x\rangle)\end{aligned}$$

$\Rightarrow$ Deux taches après appareil 2

Et si on mesure de nouveau selon z ?

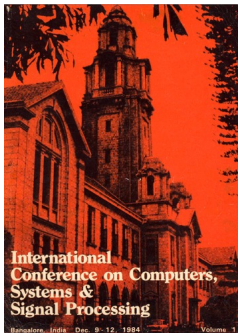


$\Rightarrow$ La mesure en x a effacé toute information sur l'état en z

$\Rightarrow$ Inverser l'ordre des mesures 2 et 3 conduit à des résultats différents

Première application - échange de clés cryptographiques

Spin $\frac{1}{2}$: Application à la cryptographie quantique



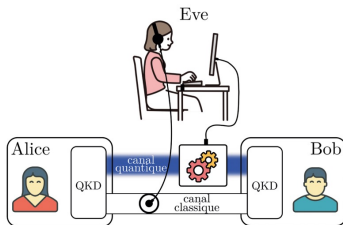
QUANTUM CRYPTOGRAPHY: PUBLIC KEY DISTRIBUTION AND COIN TOSSING

Charles H. Bennett (IBM Research, Yorktown Heights NY 10598 USA)

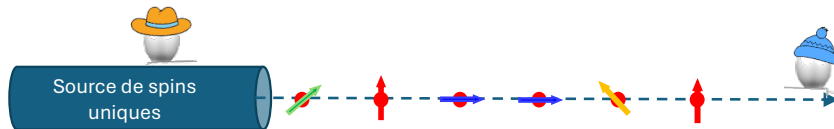
Gilles Brassard (dept. IRO, Univ. de Montreal, H3C 3J7 Canada)

Theoretical Computer Science 560 (2014) 7–11

Spin $\frac{1}{2}$: Application à la cryptographie quantique : principe



Photonique, n° 130 (2025)



Spin $\frac{1}{2}$: Application à la cryptographie quantique : encodage



$$|0\rangle \equiv |+\rangle_z$$



$$|0\rangle \equiv |+\rangle_x = \frac{|+\rangle_z + |-\rangle_z}{\sqrt{2}}$$

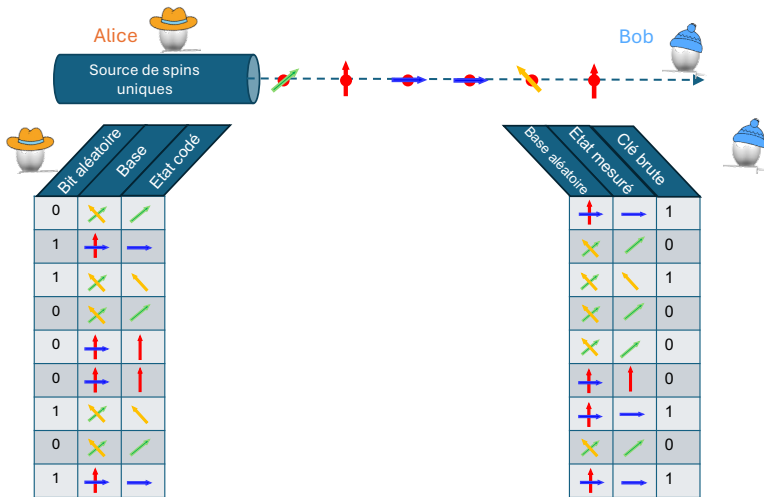


$$|1\rangle \equiv |-\rangle_z$$

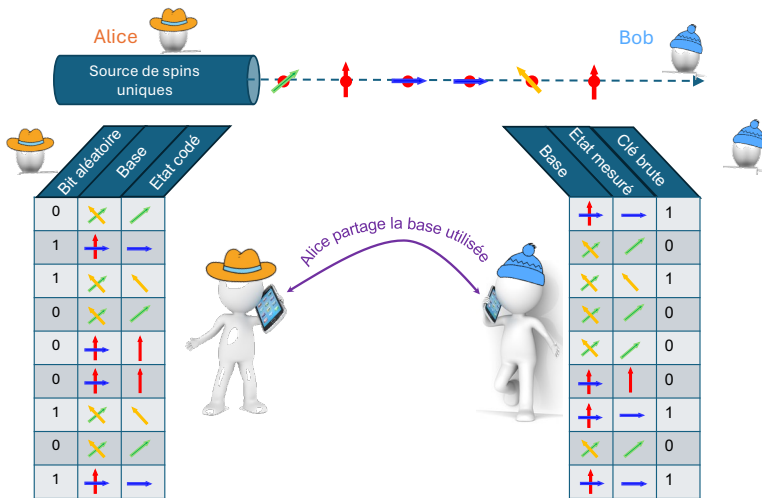


$$|1\rangle \equiv |-\rangle_x = \frac{|+\rangle_z - |-\rangle_z}{\sqrt{2}}$$

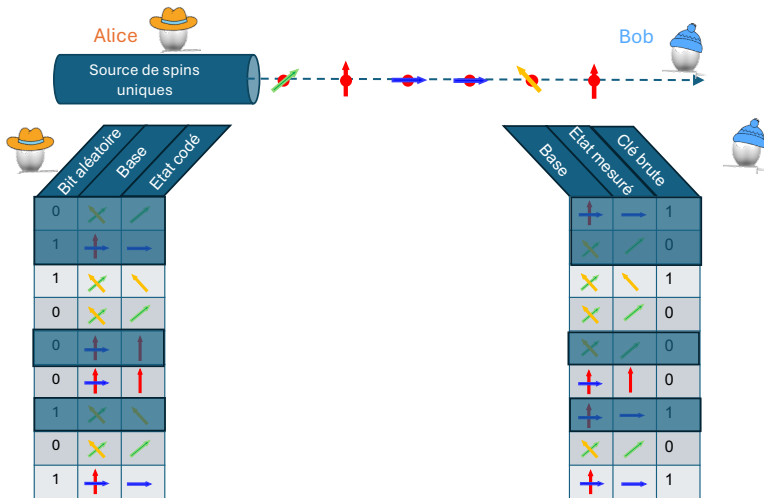
Spin $\frac{1}{2}$: Application à la cryptographie quantique



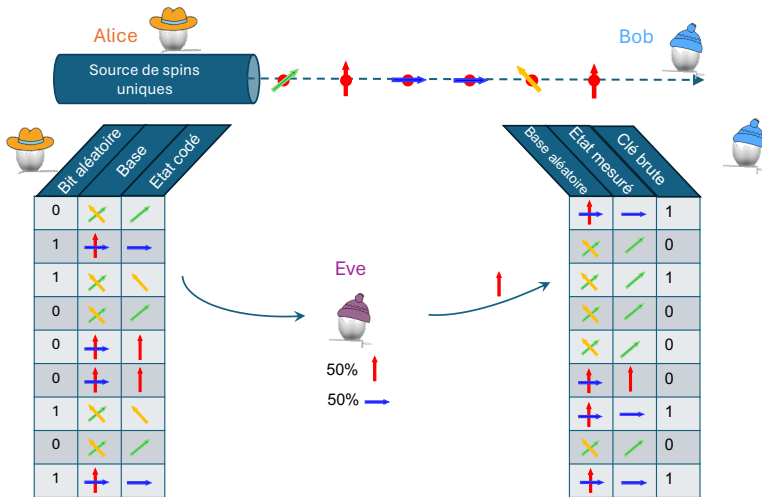
Spin $\frac{1}{2}$: Application à la cryptographie quantique : "sifting" ("tamiser")



Spin $\frac{1}{2}$: Application à la cryptographie quantique : clé filtrée



Spin $\frac{1}{2}$: Application à la cryptographie quantique : clé filtrée



Spin $\frac{1}{2}$: Application à la cryptographie quantique : clé sécurisée

Clé aléatoire	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0
Base aléatoire	+	+	X	X	X	+	X	+	X	X	+	X	+	+	+	+	X	X	X	+	X	+	+	X
Etats codés	↑	→	↘	↗	↘	↑	↗	↑	↗	↘	↑	↘	→	↑	→	→	↗	↗	↘	↑	↘	→	↑	↗
	 Alice																							
Base aléatoire	+	X	+	X	+	X	+	+	X	X	+	X	+	+	X	X	X	X	X	+	X	X	+	X
Etats mesurés	↑	↗	↘	↗	↑	↗	↑	↑	↗	↘	→	↘	→	↑	↗	↘	↗	↗	↗	↑	↘	↗	↑	↗
Clé brute	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
Clé filtrée	0		1	0					0	0	1	1	1	0			0	0	0	0	1		0	0
Test sécurité			1						0		1						0			0	1			0
Clé partagée	0			0					0		1		1	1	0				0	0				0
	 Bob																							

Pour tenir compte des erreurs expérimentales: estimation des erreurs attendues, protocoles d'amplification, ajouts d'états leurres etc.

Spin $\frac{1}{2}$: non commutation des observables

La cryptographie quantique exploite la non-commutation des observables de spin

$$[\hat{S}_z, \hat{S}_x] = i\hbar \hat{S}_y$$

Rappel :

- ▶ Si au contraire, les deux observables ne commutent pas
 - ▶ l'ordre des mesures donne lieu à des résultats différents.
 - ▶ L'incertitude sur les mesures sont bornées :

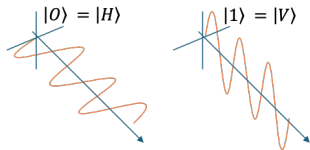
Principe fondamental - Relation d'incertitude d'Eisenberg, observables $\hat{A}$ et $\hat{B}$

$$\Delta A \Delta B \geq \frac{1}{2} |\langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle|$$

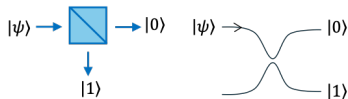
- ▶ si deux observables $\hat{A}$ et $\hat{B}$ commutent $[\hat{A}, \hat{B}] = 0$, il est possible de trouver une base propre commune aux deux et de préparer le système dans un état quantique bien déterminé.

Cryptographie quantique : encodages sur des photons uniques

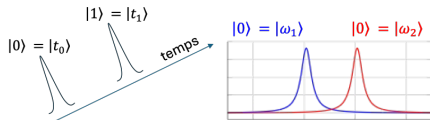
Etats de polarisation



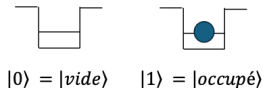
Etats en chemin



Etats temporels. - Etats de fréquence



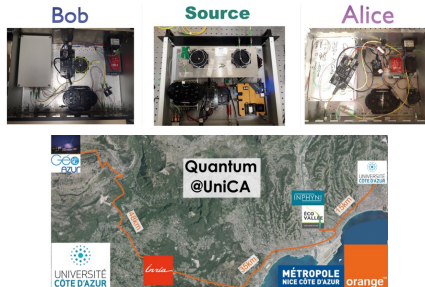
Etats d'occupation



Cryptographie quantique: références



Photoniques
Numéro 130 (2025)



Cryptographie quantique: Etat de l'art



npj Quantum Information 11, 137 (2025)

Implementation of carrier-grade quantum communication networks over 10000 km

Check for updates

Hao-Ze Chen^{1,2,3}, Ming-Han Li^{1,2,3}, Yu Zhou Wang¹, Zhen-Geng Zhao², Cheng Ye^{1,2}, Fei Long Li^{1,2}, Zhu Chen², Sheng-Long Han², Bao Tang², Ya Jun Miao^{1,2} & Wei Qi^{1,2}

Quantum computing poses a serious threat to classical cryptographic algorithms based on computational complexity. Quantum key distribution (QKD), utilizing the principles of quantum mechanics, enables secure key exchange and has been proven to be an essential technology to resist the threat of quantum computing. China attaches great importance to the construction of QKD network to deal with this threat. In 2020, China established an integrated space-to-ground quantum communication network, which includes 32 backbone nodes and 4 metropolitan networks. Here we introduce China's latest progress in the deployment of QKD networks, called the China Quantum Communication Network (CN-QCN). CN-QCN is an operational, long-range, and trusted-relay-based QKD network spanning over 10,000 kilometers, incorporating 145 fiber backbone nodes, and 20 metropolitan networks, which cover 17 provinces and 80 cities. Moreover, the network has deployed 6 ground stations linked with Jinan-1 quantum microsatellite. CN-QCN has not only surpassed its predecessor in scale, but also made significant advancements in multi-type QKD hybrid networking and long-range quantum network operation and maintenance. We present the network architecture, QKD implementation, and long-term performance of CN-QCN in this paper. This work lays the foundation for widespread applications of QKD in China.

Du spin $\frac{1}{2}$ au qubit

Lien spin $\frac{1}{2}$ - bit quantique

Système physique	Information quantique
spin $\frac{1}{2}$ $ \psi\rangle = \alpha -z\rangle + \beta +z\rangle$ $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ et $ \alpha ^2 + \beta ^2 = 1$	Bit d'information quantique $ \psi\rangle = \alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$ $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ et $ \alpha ^2 + \beta ^2 = 1$

Lien spin $\frac{1}{2}$ - bit quantique

Système physique	Information quantique
spin $\frac{1}{2}$ $ \psi\rangle = \alpha -_z\rangle + \beta +_z\rangle$ $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ et $ \alpha ^2 + \beta ^2 = 1$	Bit d'information quantique $ \psi\rangle = \alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$ $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ et $ \alpha ^2 + \beta ^2 = 1$
Mesure $ -_z\rangle$, probabilité $ \alpha ^2 \longrightarrow \psi\rangle = -_z\rangle$ $ +_z\rangle$, probabilité $ \beta ^2 \longrightarrow \psi\rangle = +_z\rangle$	Initialisation initialisation du qubit dans l'état 0 initialisation du qubit dans l'état 1

Lien spin $\frac{1}{2}$ - bit quantique

Système physique	Information quantique
spin $\frac{1}{2}$ $ \psi\rangle = \alpha -z\rangle + \beta +z\rangle$ $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ et $ \alpha ^2 + \beta ^2 = 1$	Bit d'information quantique $ \psi\rangle = \alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$ $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ et $ \alpha ^2 + \beta ^2 = 1$
Mesure $ -z\rangle$, probabilité $ \alpha ^2 \longrightarrow \psi\rangle = -z\rangle$ $ +z\rangle$, probabilité $ \beta ^2 \longrightarrow \psi\rangle = +z\rangle$	Initialisation initialisation du qubit dans l'état 0 initialisation du qubit dans l'état 1
Effet d'un champ magnétique Hamiltonien $\hat{W} = -\gamma \hat{S} \vec{B}$	Manipulation Contrôle $ 0\rangle \rightarrow \alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$

Représentation de l'état d'un spin 1/2 : Vecteur de Bloch

Un état pur (à phase globale près) s'écrit

$$|\psi\rangle = \alpha|-\rangle_z + \beta|+\rangle_z = \cos\frac{\theta}{2}|-\rangle_z + e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}|+\rangle_z, \quad \theta \in [0, \pi], \quad \phi \in [0, 2\pi].$$

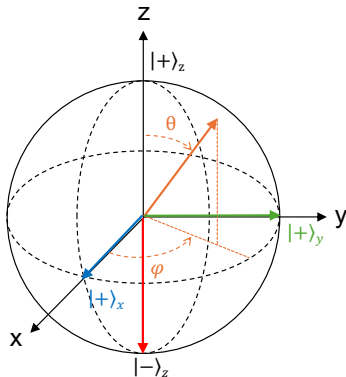
Vecteur de Bloch

Vecteur de Bloch :

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} \sin\theta \cos\phi \\ \sin\theta \sin\phi \\ \cos\theta \end{pmatrix}$$

On montre que:

$$\langle \vec{S} \rangle = \langle \psi | \vec{S} | \psi \rangle = \frac{\hbar}{2} \vec{r}$$



Représentation de l'état d'un spin 1/2 : Vecteur de Bloch

Un état pur (à phase globale près) s'écrit

$$|\psi\rangle = \alpha|-\rangle_z + \beta|+\rangle_z = \cos\frac{\theta}{2}|+\rangle_z + e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}|-\rangle_z, \quad \theta \in [0, \pi], \quad \phi \in [0, 2\pi].$$

Vecteur de Bloch

Vecteur de Bloch :

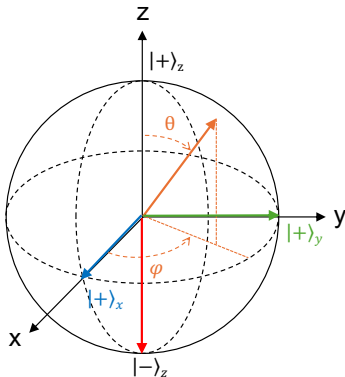
$$\vec{r} = \begin{pmatrix} \sin\theta \cos\phi \\ \sin\theta \sin\phi \\ \cos\theta \end{pmatrix}$$

Exemples:

$$|\psi\rangle = |-\rangle_z$$

$$|\psi\rangle = \frac{|-\rangle_z + |+\rangle_z}{\sqrt{2}}$$

$$|\psi\rangle = \frac{|-\rangle_z + i|+\rangle_z}{\sqrt{2}}$$



Manipulation et mesure d'un spin $1/2$

Manipulation d'un spin 1/2 : Manipulation d'un spin 1/2

A $t=0$, $|\psi(t=0)\rangle = |-\rangle$, soit $\vec{r} = (0, 0, -1)$,
appliquons un champ magnétique $\vec{B} = B_1 \vec{e}_x$.
Hamiltonien d'interaction : $\hat{W} = -\gamma \hat{S}_x B_1$

Manipulation d'un spin 1/2 : Manipulation d'un spin 1/2

A $t=0$, $|\psi(t=0)\rangle = |-\rangle$, soit $\vec{r} = (0, 0, -1)$,
appliquons un champ magnétique $\vec{B} = B_1 \vec{e}_x$.
Hamiltonien d'interaction : $\hat{W} = -\gamma \hat{S}_x B_1$

Théorème d'Ehrenfest

$$\frac{d}{dt} \langle \hat{A} \rangle = \frac{1}{i\hbar} \langle [\hat{A}, H(\hat{t})] \rangle + \left\langle \frac{\partial \hat{A}}{\partial t} \right\rangle$$

$$\frac{d}{dt} \langle \hat{S} \rangle = \omega_1 \frac{1}{i\hbar} \langle [\hat{S}, \hat{S}_x] \rangle \text{ avec } \omega_1 = -\gamma B_1$$

$$\frac{\hbar}{2} \frac{dr_x}{dt} = \frac{d}{dt} \langle \hat{S}_x \rangle = 0$$

$$\frac{\hbar}{2} \frac{dr_y}{dt} = \frac{d}{dt} \langle \hat{S}_y \rangle = \gamma B_1 \langle \hat{S}_z \rangle = -\frac{\hbar}{2} \omega_1 r_z$$

$$\frac{\hbar}{2} \frac{dr_z}{dt} = \frac{d}{dt} \langle \hat{S}_z \rangle = -\gamma B_1 \langle \hat{S}_y \rangle = \frac{\hbar}{2} \omega_1 r_y$$

Manipulation d'un spin 1/2 : Manipulation d'un spin 1/2

A $t=0$, $|\psi(t=0)\rangle = |-\rangle$, soit $\vec{r} = (0, 0, -1)$,
 appliquons un champ magnétique $\vec{B} = B_1 \vec{e}_x$.
 Hamiltonien d'interaction : $\hat{W} = -\gamma \hat{S}_x B_1$

Théorème d'Ehrenfest

$$\frac{d}{dt} \langle \hat{A} \rangle = \frac{1}{i\hbar} \langle [\hat{A}, H(\hat{t})] \rangle + \left\langle \frac{\partial \hat{A}}{\partial t} \right\rangle$$

$$\frac{d}{dt} \langle \hat{S} \rangle = \omega_1 \frac{1}{i\hbar} \langle [\hat{S}, \hat{S}_x] \rangle \text{ avec } \omega_1 = -\gamma B_1$$

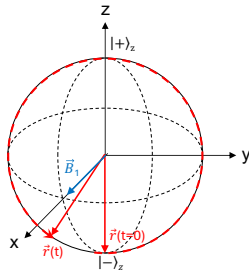
$$\frac{\hbar}{2} \frac{dr_x}{dt} = \frac{d}{dt} \langle \hat{S}_x \rangle = 0$$

$$\frac{\hbar}{2} \frac{dr_y}{dt} = \frac{d}{dt} \langle \hat{S}_y \rangle = \gamma B_1 \langle \hat{S}_z \rangle = -\frac{\hbar}{2} \omega_1 r_z$$

$$\frac{\hbar}{2} \frac{dr_z}{dt} = \frac{d}{dt} \langle \hat{S}_z \rangle = -\gamma B_1 \langle \hat{S}_y \rangle = \frac{\hbar}{2} \omega_1 r_y$$

On trouve :

$$\langle S_x \rangle = 0, \quad \langle S_y \rangle = \frac{\hbar}{2} \sin(\omega_1 t), \quad \langle S_z \rangle = -\frac{\hbar}{2} \cos(\omega_1 t).$$



soit : $\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{\omega}_1 \times \vec{r}$ avec $\vec{\omega}_1 = \omega_1 \vec{e}_x$.

Manipulation d'un spin 1/2 : Initialisation d'un qubit

Cadre général : résonance magnétique nucléaire

Champ magnétique fixe selon z et tournant dans le plan xy.

$$\vec{B} = B_0 \vec{e}_z + B_1 (\cos(\omega t) \vec{e}_x + \sin(\omega t) \vec{e}_y)$$

$$\begin{aligned} \text{On pose } \vec{\omega}_0 &= -\gamma B_0 \vec{e}_z \quad \text{et} \\ \vec{\omega}_1(t) &= -\gamma B_1 (\cos(\omega t) \vec{e}_x + \sin(\omega t) \vec{e}_y) \end{aligned}$$

$$\text{On montre de même : } \frac{d\vec{r}}{dt} = (\vec{\omega}_1(t) + \vec{\omega}_0) \times \vec{r}$$

Manipulation d'un spin 1/2 : Initialisation d'un qubit

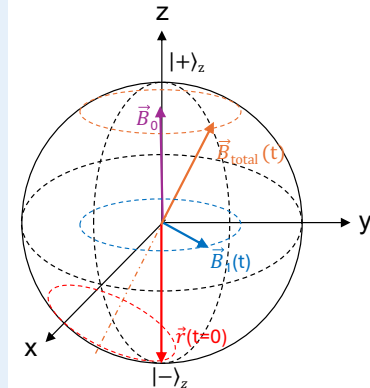
Cadre général : résonance magnétique nucléaire

Champ magnétique fixe selon z et tournant dans le plan xy.

$$\vec{B} = B_0 \vec{e}_z + B_1 (\cos(\omega t) \vec{e}_x + \sin(\omega t) \vec{e}_y)$$

$$\begin{aligned} \text{On pose } \vec{\omega}_0 &= -\gamma B_0 \vec{e}_z \quad \text{et} \\ \vec{\omega}_1(t) &= -\gamma B_1 (\cos(\omega t) \vec{e}_x + \sin(\omega t) \vec{e}_y) \end{aligned}$$

$$\text{On montre de même : } \frac{d\vec{r}}{dt} = (\vec{\omega}_1(t) + \vec{\omega}_0) \times \vec{r}$$



Manipulation d'un spin 1/2 : Initialisation d'un qubit

Dans le référentiel tournant $\vec{r}'(t) = R_z(-\omega t) \vec{r}(t)$,
($R_z(\theta)$ rotation d'angle θ autour de z).

On obtient :

$$\frac{d\vec{r}'}{dt} = \vec{r}' \times \vec{\Omega}_{\text{eff}},$$

avec $\vec{\Omega}_{\text{eff}} = \omega_1 \vec{e}_x + \Delta \vec{e}_z$, $\Delta = \omega_0 - \omega$.
et $\Omega = \sqrt{\omega_1^2 + \Delta^2}$, pulsation de Rabi.

Manipulation d'un spin 1/2 : Initialisation d'un qubit

Dans le référentiel tournant $\vec{r}'(t) = R_z(-\omega t) \vec{r}(t)$,
($R_z(\theta)$ rotation d'angle θ autour de z).

On obtient :

$$\frac{d\vec{r}'}{dt} = \vec{r}' \times \vec{\Omega}_{\text{eff}},$$

avec $\vec{\Omega}_{\text{eff}} = \omega_1 \vec{e}_x + \Delta \vec{e}_z$, $\Delta = \omega_0 - \omega$.
et $\Omega = \sqrt{\omega_1^2 + \Delta^2}$, pulsation de Rabi.

Avec $\vec{r}'(0) = (0, 0, -1)$, on obtient explicitement
 $r'_x(t) = -\frac{\omega_1 \Delta}{\Omega^2} (1 - \cos(\Omega t))$, $r'_y(t) = \frac{\omega_1}{\Omega} \sin(\Omega t)$
 $r'_z(t) = -1 + \frac{\omega_1^2}{\Omega^2} (1 - \cos(\Omega t))$

Manipulation d'un spin 1/2 : Initialisation d'un qubit

Dans le référentiel tournant $\vec{r}'(t) = R_z(-\omega t) \vec{r}(t)$,
($R_z(\theta)$ rotation d'angle θ autour de z).

On obtient :

$$\frac{d\vec{r}'}{dt} = \vec{r}' \times \vec{\Omega}_{\text{eff}},$$

avec $\vec{\Omega}_{\text{eff}} = \omega_1 \vec{e}_x + \Delta \vec{e}_z$, $\Delta = \omega_0 - \omega$.
et $\Omega = \sqrt{\omega_1^2 + \Delta^2}$, pulsation de Rabi.

Avec $\vec{r}'(0) = (0, 0, -1)$, on obtient explicitement
 $r'_x(t) = -\frac{\omega_1 \Delta}{\Omega^2} (1 - \cos(\Omega t))$, $r'_y(t) = \frac{\omega_1}{\Omega} \sin(\Omega t)$
 $r'_z(t) = -1 + \frac{\omega_1^2}{\Omega^2} (1 - \cos(\Omega t))$

Populations

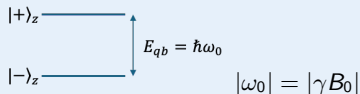
En notant que $r_z(t) = r'_z(t)$ et
 $\frac{\hbar}{2} r_z(t) = \langle \hat{S}_z \rangle = P_{|+\rangle_z} - P_{|-\rangle_z} = 2P_{|+\rangle_z} - 1$

On trouve :

$$\begin{aligned} P_{|+\rangle_z} &= \frac{r'_z(t) + 1}{2} \\ &= \frac{\omega_1^2}{\Omega^2} \sin^2\left(\frac{\Omega t}{2}\right) \end{aligned}$$

Manipulation d'un spin 1/2 : Initialisation d'un qubit

Oscillations de Rabi - influence de Δ



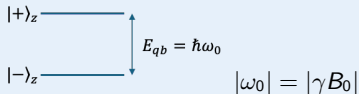
$$\vec{B} = B_0 \vec{e}_z + B_1 (\cos(\omega t) \vec{e}_x + \sin(\omega t) \vec{e}_y)$$

$$\text{Désaccord } \Delta = \omega_0 - \omega$$

$$P_+(\delta t, \omega_1) = \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 + \Delta^2} \sin^2 \left(\frac{\sqrt{\omega_1^2 + \Delta^2}}{2} \delta t \right).$$

Manipulation d'un spin 1/2 : Initialisation d'un qubit

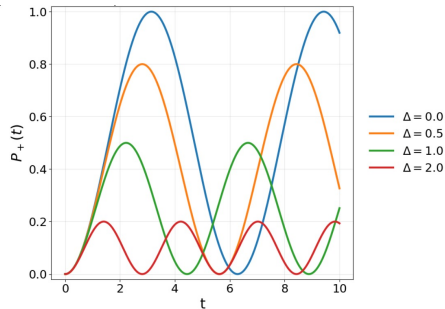
Oscillations de Rabi - influence de Δ



$$\vec{B} = B_0 \vec{e}_z + B_1 (\cos(\omega t) \vec{e}_x + \sin(\omega t) \vec{e}_y)$$

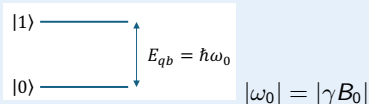
$$\text{Désaccord } \Delta = \omega_0 - \omega$$

$$P_+(\delta t, \omega_1) = \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 + \Delta^2} \sin^2 \left(\frac{\sqrt{\omega_1^2 + \Delta^2}}{2} \delta t \right).$$



Manipulation d'un spin 1/2 : Initialisation d'un qubit

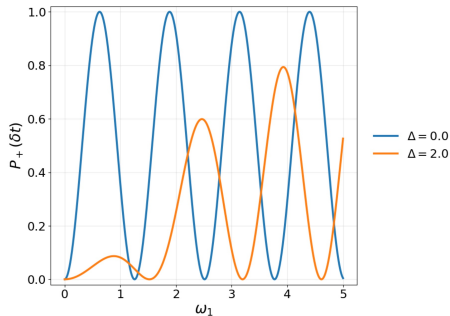
Oscillations de Rabi



$$\vec{B} = B_0 \vec{e}_z + B_1 (\cos(\omega t) \vec{e}_x + \sin(\omega t) \vec{e}_y)$$

$$\text{Désaccord } \Delta = \omega_0 - \omega$$

$$P_+(\delta t, \omega_1) = \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 + \Delta^2} \sin^2 \left(\frac{\sqrt{\omega_1^2 + \Delta^2}}{2} \delta t \right).$$



Des exemples de qubits de spin

Qubits dans le silicium : structure du silicium

carbone 6 C 12,0107	azote 7 N 14,00674
silicium 14 Si 28,0855	phosphore 15 P 30,973762
germanium 32 Ge 72,61	arsenic 33 As 74,92160

Silicium

$1s : 2e^-$

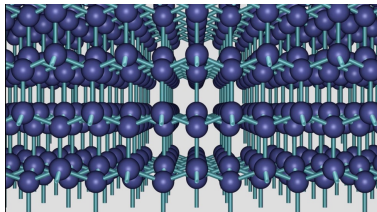
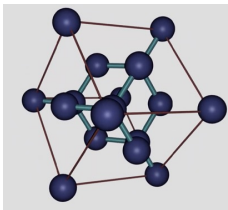
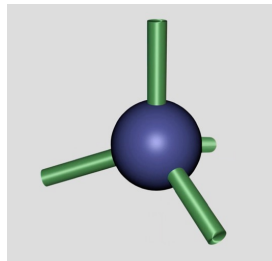
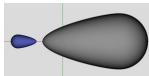
$2s : 2e^-$

$2p : 6e^-$

$3s : 2e^-$

$3p : 2e^-$

4 orbitales hybrides



<https://www.youtube.com/watch?v=ApqFLVd0Xal>

Qubits dans le silicium : **donneurs**

carbone 6 C 12,0107	azote 7 N 14,00674
silicium 14 Si 28,0855	phosphore 15 P 30,973762
germanium 32 Ge 72,61	arsenic 33 As 74,92160

Silicium

1s : 2e⁻

2s : 2e⁻

2p : 6e⁻

3s : 2e⁻

3p : 2e⁻

Phosphore

1s : 2e⁻

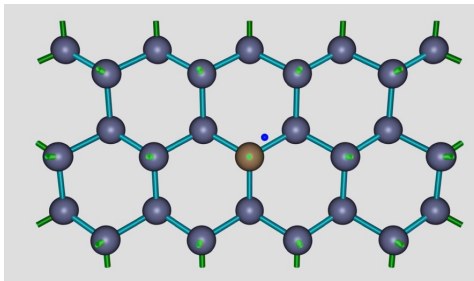
2s : 2e⁻

2p : 6e⁻

3s : 2e⁻

3p : 3e⁻

https://www.youtube.com/watch?v=k0L_y0Av_r8



Qubits dans le silicium : donneurs

carbone 6 C 12,0107	azote 7 N 14,00674
silicium 14 Si 28,0855	phosphore 15 P 30,973762
germanium 32 Ge 72,61	arsenic 33 As 74,92160

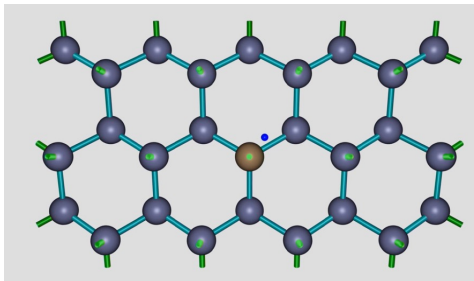
Silicium

1s : 2e⁻
2s : 2e⁻
2p : 6e⁻
3s : 2e⁻
3p : 2e⁻

Phosphore

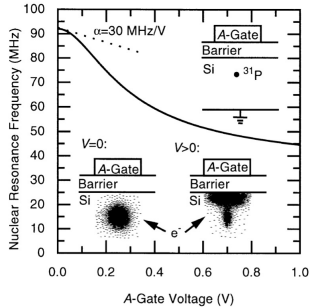
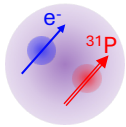
1s : 2e⁻
2s : 2e⁻
2p : 6e⁻
3s : 2e⁻
3p : 3e⁻

https://www.youtube.com/watch?v=k0L_y0Av_r8



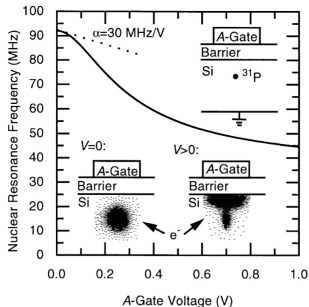
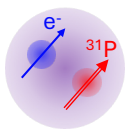
Energie de liaison de l'électron : $E_R^* = \frac{m^* e^4}{2(4\pi\epsilon_0\epsilon_r)^2 \hbar^2} = 13.6 \text{ eV} \frac{m^*}{m_e} \frac{1}{\epsilon_r^2} \approx 32 \text{ meV}$.
→ Fonctionnement à 10 mK.

Processeur quantique à base de donneurs : principe



A silicon-based nuclear spin quantum computer
B. E. Kane, Nature 393, 133–137 (1998)

Processeur quantique à base de donneurs : principe



A silicon-based nuclear spin quantum computer
B. E. Kane, Nature 393, 133–137 (1998)

Hamiltonien électron-noyau (champ magnétique selon z)

$$H_{\text{en}} = \mu_B B \sigma_z^e - g_n \mu_n B \sigma_z^n + A(V) \sigma^e \sigma^n.$$

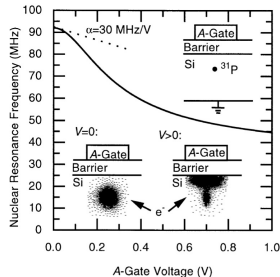
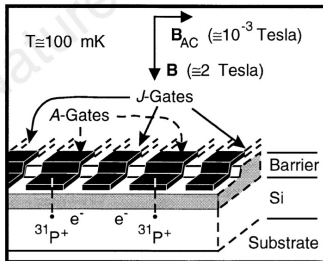
Constante d'interaction hyperfine (contact de Fermi)

$$A(V) = \frac{8}{3} \pi \mu_B g_n \mu_n |\Psi(0, V)|^2.$$

$\Psi(0, V)$ fonction d'onde électronique au niveau du noyau, contrôlée par la tension appliquée.

Processeur quantique à base de donneurs : principe

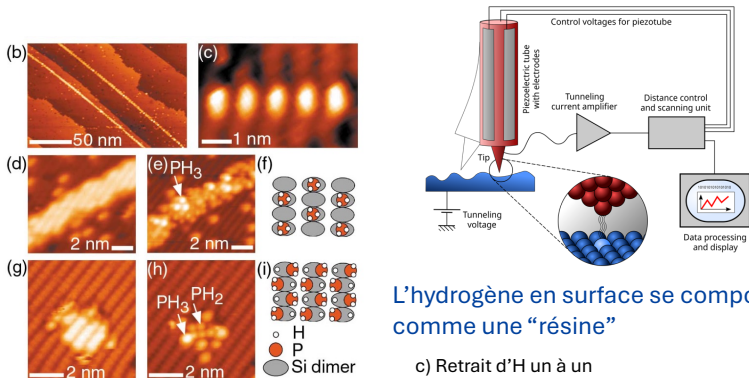
A silicon-based nuclear spin quantum computer B. E. Kane, Nature 393, 133–137 (1998)



- ▶ Champ magnétique transverse pour manipulation des qubits
- ▶ Manipulation d'un qubit : mise en résonance par contact A
- ▶ Manipulation de deux qubits adjacents : mise en résonance par contact J

Qubits de spin : positionnement de donneurs uniques

Lithographie basée sur un microscope à effet tunnel



L'hydrogène en surface se comporte comme une "résine"

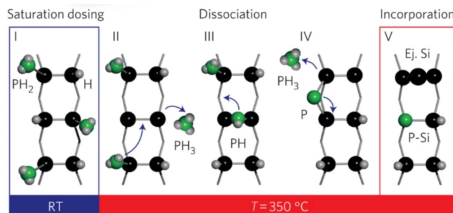
c) Retrait d'H un à un

e,h) Adsorption de molécules PH₃ et PH₂

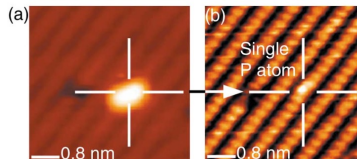
Phys. Rev. Lett. 91, 136104 (2003)

Qubits de spin : positionnement de donneurs uniques

Lithographie basée sur un microscope à effet tunnel



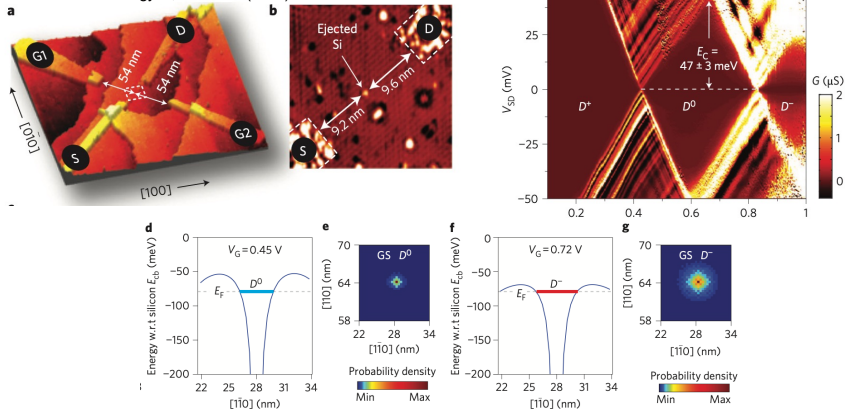
Nature Nanotechnology 7, 242–246 (2012)



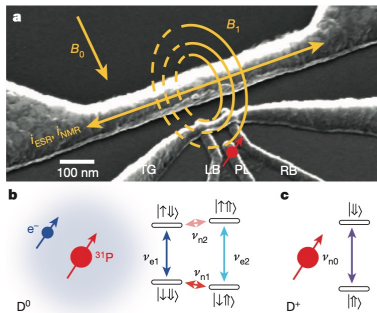
Phys. Rev. Lett. 91, 136104 (2003)

Qubits de spin : positionnement de donneurs uniques

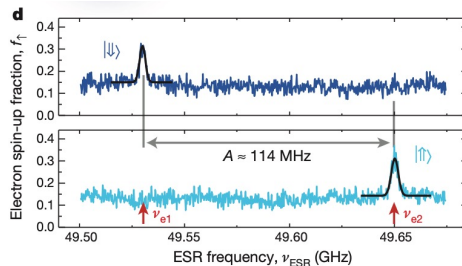
Nature Nanotechnology 7, 242–246 (2012)



Qubits de spin : Contrôle d'un qubit de spin nucléaire



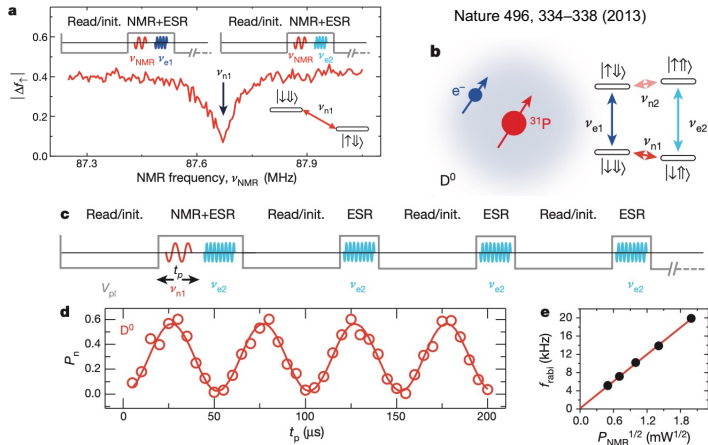
Nature 496, 334–338 (2013)



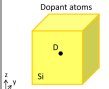
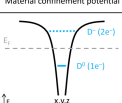
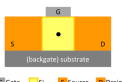
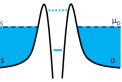
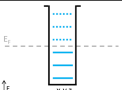
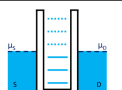
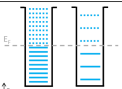
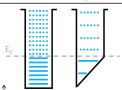
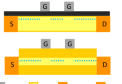
Mesure des résonances électroniques liées à chaque état de spin nucléaires

Système ajusté pour que le spin d'électron "up" sorte par effet tunnel créant un courant entre source et drain

Qubits de spin : Contrôle d'un qubit de spin nucléaire



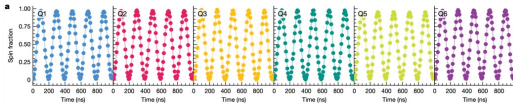
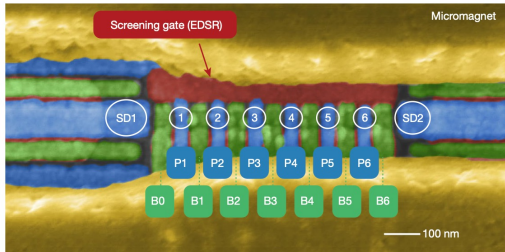
Exemple de système de spins : autres structures

	Schematic of material	Material confinement potential	Schematic of device	Device confinement potential
Dopants				
0D structures				
1D structures				
2D structures				

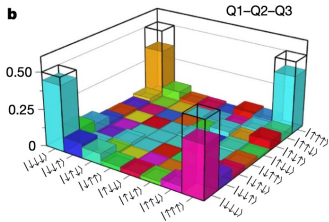
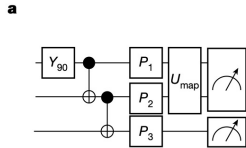
Rev. Mod. Phys. 85, 961 (2013)

Rev. Mod. Phys. 95, 025003 (2023)

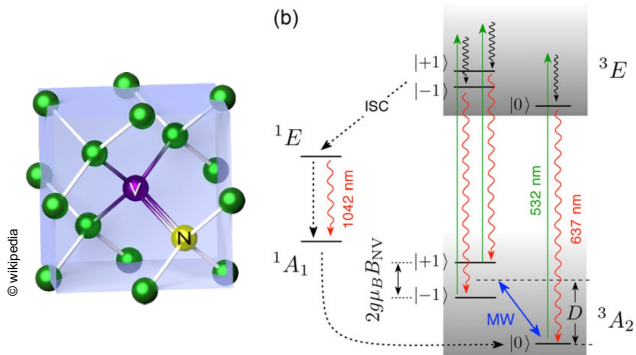
Processeur quantique : 6 qubits de spin dans le silicium



Nature 609, 919–924 (2022)

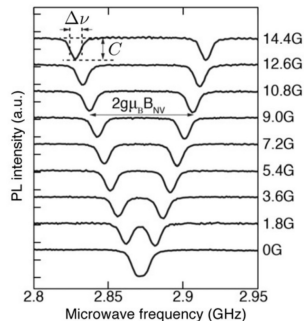
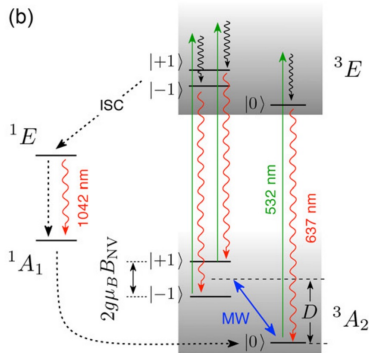
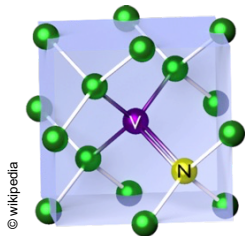


Exemple de système de spins : **Lacune dans le diamant**



Rondin et al., Rep. Prog. Phys. 77 (2014) 056503

Exemple de système de spins : Lacune dans le diamant



Rondin et al., Rep. Prog. Phys. 77 (2014) 056503

Mesure de l'état d'un qubit

Tomographie d'un qubit de spin : Principe

Mesure de la matrice densité

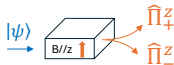
Mesures selon $\pm z$:

$$\begin{aligned} r_z &= \langle \hat{S}_z \rangle \\ &= P_{|+\rangle_z} - P_{|-\rangle_z} \end{aligned}$$

$$c_+^{(z)} \propto P_{|+\rangle_z}$$

$$c_-^{(z)} \propto P_{|-\rangle_z}$$

$$r_z = \frac{c_+^{(z)} - c_-^{(z)}}{c_+^{(z)} + c_-^{(z)}}$$



Tomographie d'un qubit de spin : Principe

Mesure de la matrice densité

Mesures selon $\pm z$:

$$\begin{aligned} r_z &= \langle \hat{S}_z \rangle \\ &= P_{|+\rangle_z} - P_{|-\rangle_z} \end{aligned}$$

$$c_+^{(z)} \propto P_{|+\rangle_z}$$

$$c_-^{(z)} \propto P_{|-\rangle_z}$$

$$r_z = \frac{c_+^{(z)} - c_-^{(z)}}{c_+^{(z)} + c_-^{(z)}}$$

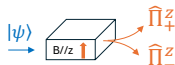
Mesures selon $\pm x$:

$$\begin{aligned} r_x &= \langle \hat{S}_x \rangle \\ &= P_{|+\rangle_x} - P_{|-\rangle_x} \end{aligned}$$

$$c_+^{(x)} \propto P_{|+\rangle_x}$$

$$c_-^{(x)} \propto P_{|-\rangle_x}$$

$$r_x = \frac{c_+^{(x)} - c_-^{(x)}}{c_+^{(x)} + c_-^{(x)}}$$



Tomographie d'un qubit de spin : Principe

Mesure de la matrice densité

Mesures selon $\pm z$:

$$\begin{aligned} r_z &= \langle \hat{S}_z \rangle \\ &= P_{|+\rangle_z} - P_{|-\rangle_z} \end{aligned}$$

$$c_+^{(z)} \propto P_{|+\rangle_z}$$

$$c_-^{(z)} \propto P_{|-\rangle_z}$$

$$r_z = \frac{c_+^{(z)} - c_-^{(z)}}{c_+^{(z)} + c_-^{(z)}}$$

Mesures selon $\pm x$:

$$\begin{aligned} r_x &= \langle \hat{S}_x \rangle \\ &= P_{|+\rangle_x} - P_{|-\rangle_x} \end{aligned}$$

$$c_+^{(x)} \propto P_{|+\rangle_x}$$

$$c_-^{(x)} \propto P_{|-\rangle_x}$$

$$r_x = \frac{c_+^{(x)} - c_-^{(x)}}{c_+^{(x)} + c_-^{(x)}}$$

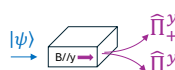
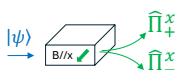
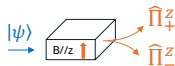
Mesures selon $\pm y$:

$$\begin{aligned} r_y &= \langle \hat{S}_y \rangle \\ &= P_{|+\rangle_y} - P_{|-\rangle_y} \end{aligned}$$

$$c_+^{(y)} \propto P_{|+\rangle_y}$$

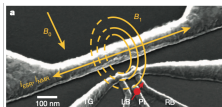
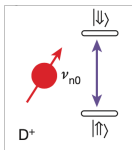
$$c_-^{(y)} \propto P_{|-\rangle_y}$$

$$r_y = \frac{c_+^{(y)} - c_-^{(y)}}{c_+^{(y)} + c_-^{(y)}}$$

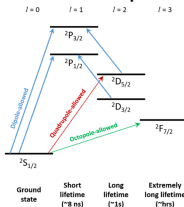


Bits quantiques : Exemples de systèmes décrit par un spin 1/2

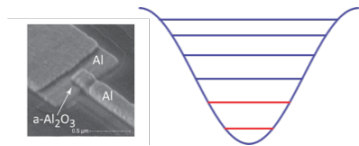
Etats de spin



Etats atomiques



Qubit supraconducteur

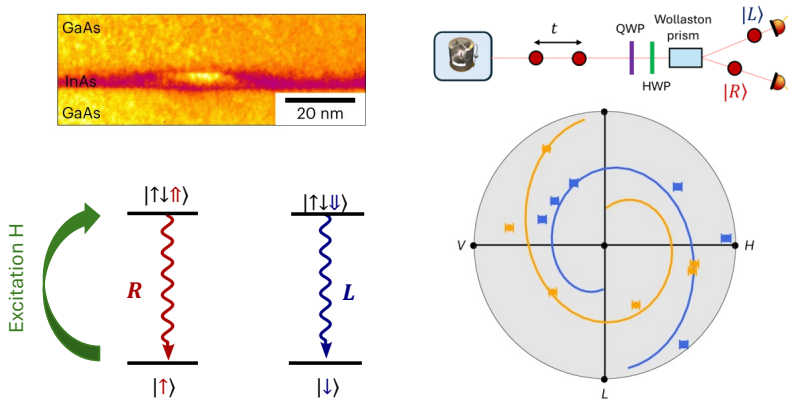


Jonction métal/isolant/métal

$$\hat{H} = \hat{H}_0 - E_J \cos(\hat{\Phi}/\Phi_0)$$

Exemple de tomographie : intrication spin-photon

Spin unique dans une boîte quantique semiconductrice



Nature Photonics 17, 582–587 (2023)