ダイヤモンドにおけるスピン縮退キュービットのマイクロ波偏光を用いた量子もつれ状態の研究

横浜国立大学　理工学部　数物・電子情報系学科　物理工学EP
○中村孝秋, 佐藤恒司, 倉見谷航洋, 須田雄太, 関口雄平, 幸村雄介, 小坂英男

研究背景

小型量子デバイスの開発に向けて、室温NV中心量子ビットの研究を行っている。

●量子ビット（キュービット）

$|1\rangle$

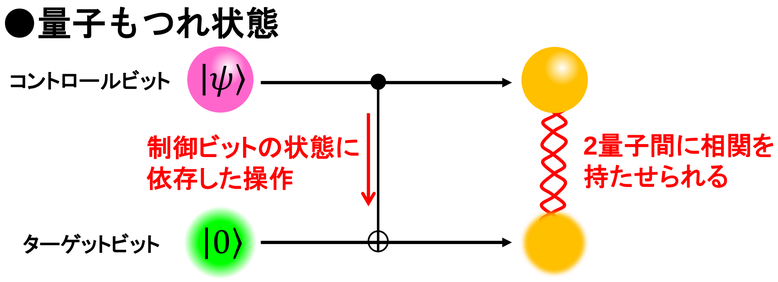
$|0\rangle$

・通常のビットと異なり、量子的な重ね合わせ状態を取ることができる。

・単一量子状態の一般式

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\phi}\sin\theta\,|1\rangle$$

●量子もつれ状態

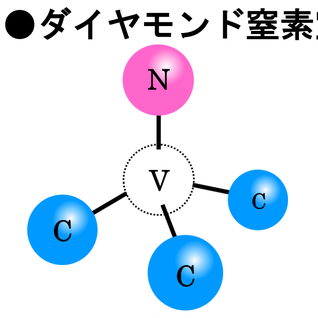


・2量子もつれ状態の例（ベルの4状態）

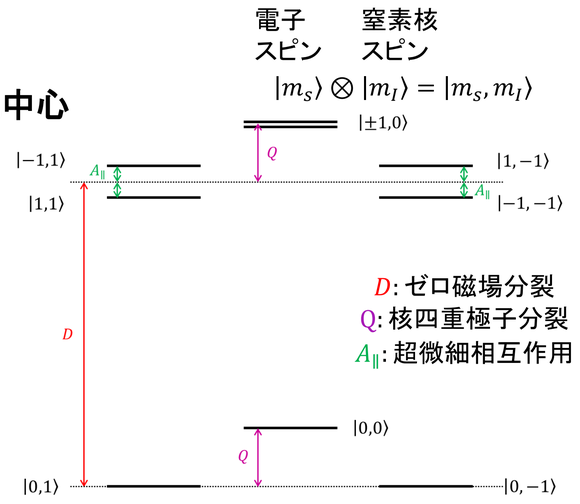
$$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|0,1\rangle + |1,0\rangle\},\quad |\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|0,1\rangle - |1,0\rangle\}$$

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|0,0\rangle + |1,1\rangle\},\quad |\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|0,0\rangle - |1,1\rangle\}$$

●ダイヤモンド窒素空孔中心



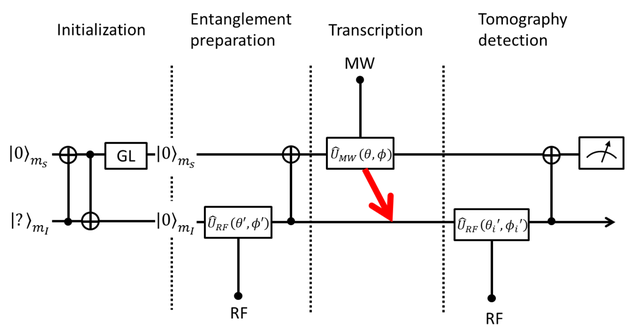
・^{14}Nはスピン1量子
・隣接空孔内電子もスピン1
・周囲の^{12}Cはスピン0
（相互作用なし）



目的

●電子スピンと窒素核スピンの量子もつれ状態生成

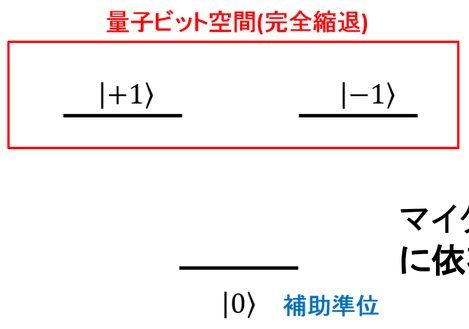
●もつれ状態を介したマイクロ波偏光の窒素核スピン転写
（窒素核スピン量子状態トモグラフィー[1]によるもつれ検証）



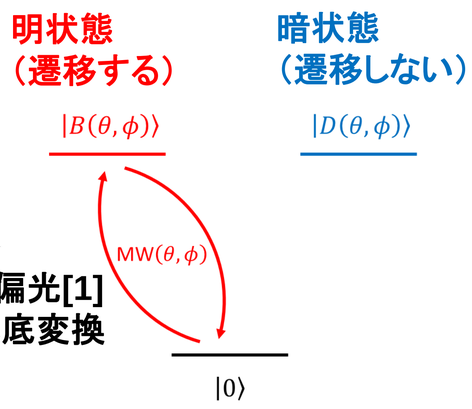
理論

●スピン1量子系

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|+1\rangle + e^{i\phi}\sin\theta\,|-1\rangle$$



マイクロ波の偏光[1]に依存した基底変換



●偏光を導入したラビ振動のハミルトニアン[2]

$$\hat{H}_I(\theta,\phi) = \frac{1}{2}\{\Omega_x(\theta)\hat{S}_x + \Omega_y(\theta,\phi)\hat{S}_y\}$$

（Ω_i: ラビ周波数, θ: 強度変数, ϕ: 位相差）

略記	偏光名称	ラビ振動する明状態
+X	水平偏光	$\|+x\rangle = \|+1\rangle + \|-1\rangle$
-X	垂直偏光	$\|-x\rangle = \|+1\rangle - \|-1\rangle$
+Y	右斜め偏光	$\|+y\rangle = \|+1\rangle + i\|-1\rangle$
-Y	左斜め偏光	$\|-y\rangle = \|+1\rangle - i\|-1\rangle$
+Z	右回り偏光	$\|+1\rangle$
-Z	左回り偏光	$\|-1\rangle$

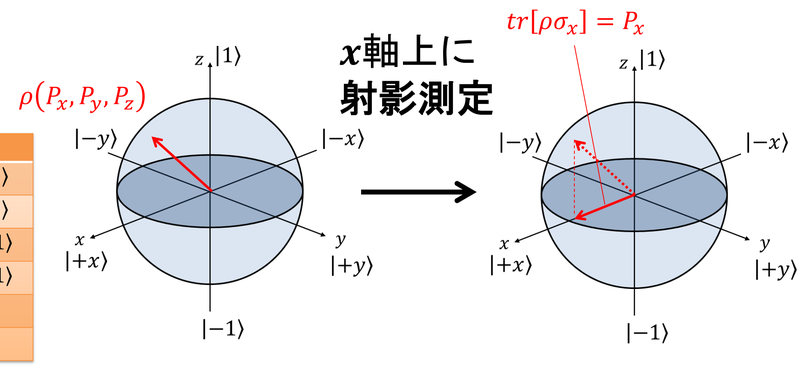
●量子状態トモグラフィー

・単一量子状態を表す密度行列

$$\rho = \frac{1}{2}(\sigma_I + P_x\sigma_x + P_y\sigma_y + P_z\sigma_z)$$

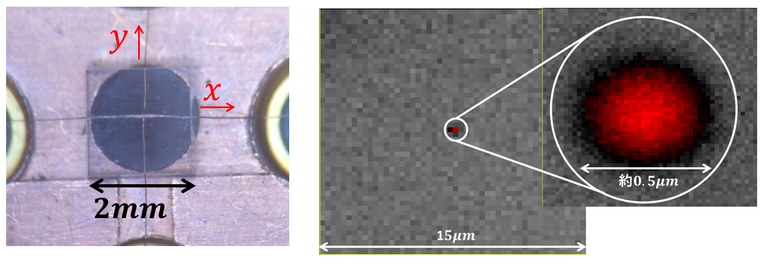
（σ_j: パウリ行列, P_j: j軸上に射影された存在確率）

・一度の射影測定で得られる結果は1軸成分のみ
→同じ量子状態を複数回生成し全軸射影測定



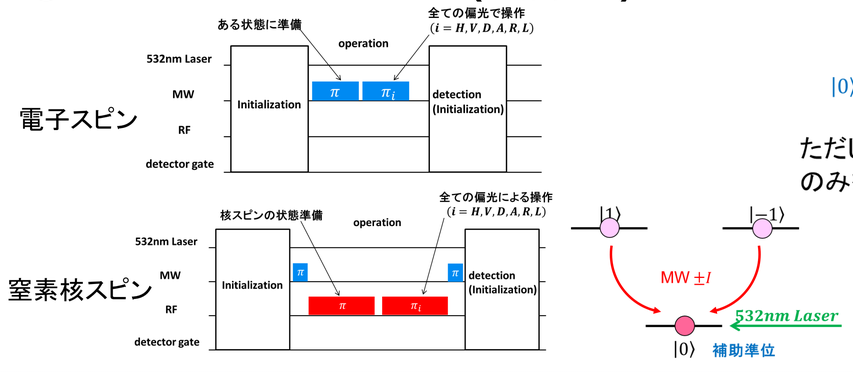
実験

●ダイヤモンドサンプルと　●NV中心
マイクロ波アンテナ

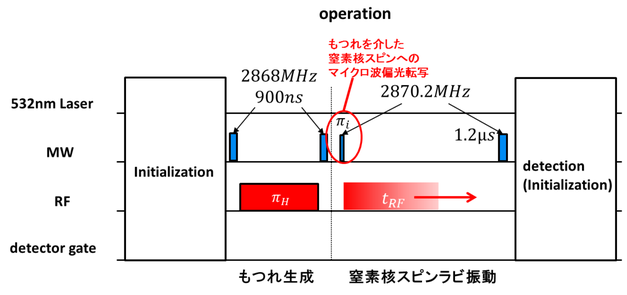


●パルスシーケンス

①単一量子状態トモグラフィー(予備実験)



②もつれ状態を介した偏光状態の転写

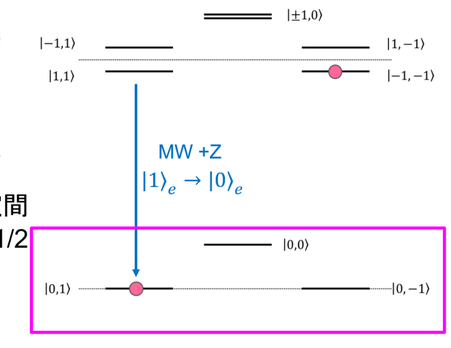


$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|1,1\rangle + |-1,-1\rangle\}$$

MW +Z　$|1\rangle_e \to |0\rangle_e$

$$|0\rangle_e\langle 1|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle_e \otimes |+1\rangle_n$$

ただし、電子スピンの$|0\rangle_e$空間のみを考えるため、確率は1/2



窒素の縮退量子ビット空間へ
マイクロ波偏光に依存した状態が遷移する

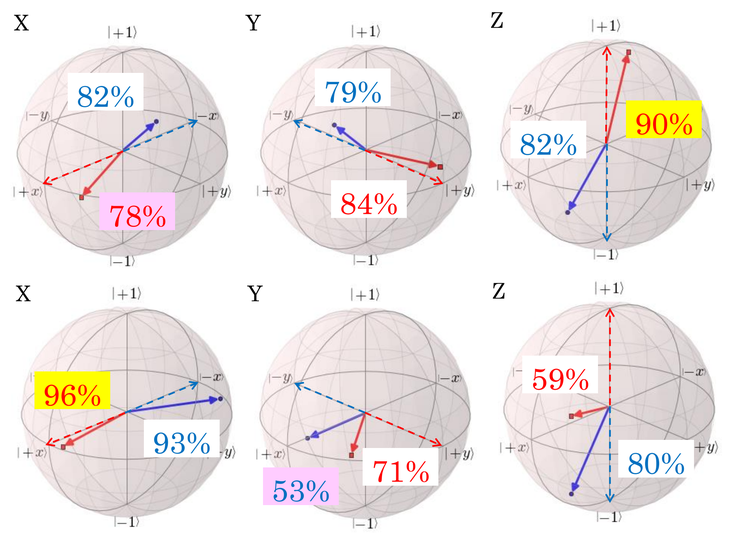
結果

●単一量子状態トモグラフィー（予備実験）

	正方向	負方向
実験	←	←
理論	←	←

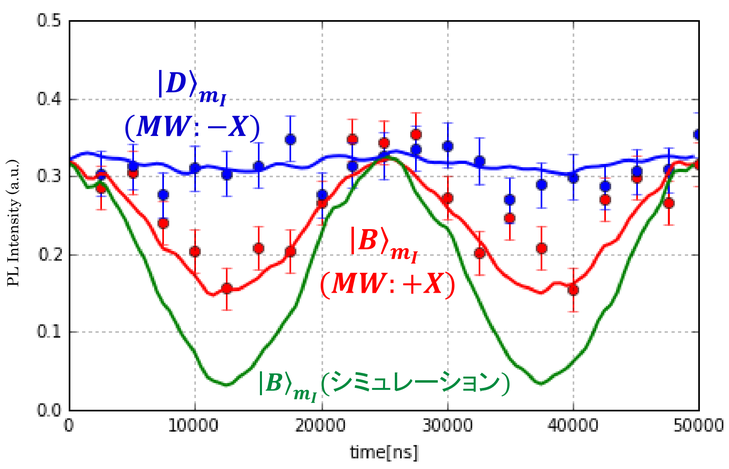
電子スピン
忠実度平均83%

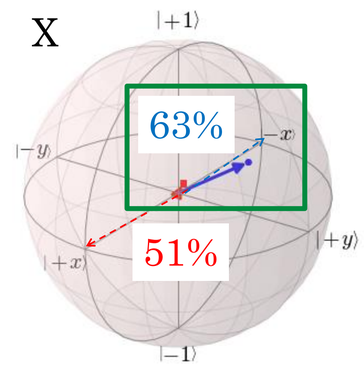
窒素核スピン
忠実度平均75%



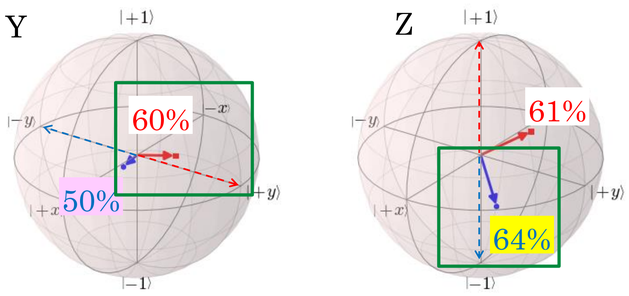
・マイクロ波、ラジオ波の偏光によって状態を判別できた
・偏光が完全な直交基底ではないため、忠実度が低下している
→偏光軸の補正が必要

●もつれ状態を介した偏光状態の転写





	正	負
窒素核スピン状態	←	←
マイクロ波偏光	←	←



・暗状態を転写した場合、ラビ振動が抑制された
・明状態の振動がシミュレーション結果よりも小さい
・マイクロ波偏光と窒素核スピンの相関を確認することはできた。
・忠実度が低い→偏光基底の対応関係

考察

●もつれ生成、転写共に手法を確立したが、忠実度の向上が必要。

●原因と改善方法
①量子化軸に対する偏光の直交性
→マイクロ波アンテナの性能向上

②マイクロ波偏光軸とラジオ波偏光軸の定義の違い
→二本のアンテナから印加される強度が等しくなるように調整

まとめ

●成果
・電子スピンと窒素核スピンの量子もつれ状態の生成
・偏光転写によるもつれ状態の間接的評価

●展望
・マイクロ波アンテナとして回路状の導波路を構成する
・量子もつれトモグラフィー

謝辞

日ごろからご議論、ご協力頂く水落憲和氏、松崎雄一郎氏、根本香絵氏、Bill John Munro氏に感謝致します。

参考文献

[1] Thiago P. Mayer Alegre, C. Santori et al,PHYSICAL REVIEW B 76, 165205 (2007)
[2] P. London et al, PHYSICAL REVIEW A 90, 012302 (2014)
[3] C. Zu et al, NATURE Letters,VOL 514,(2 Oct. 2014)