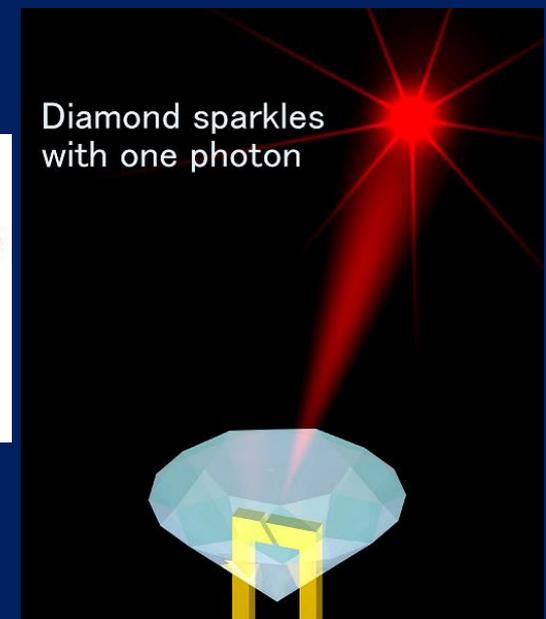
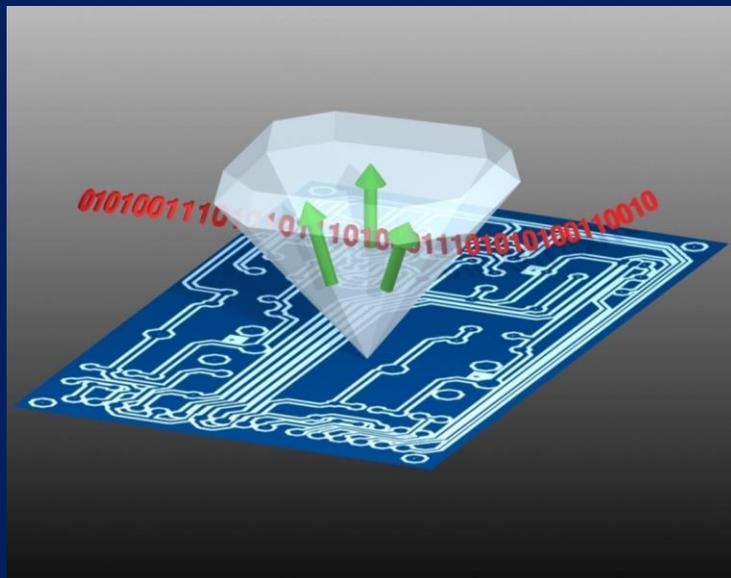


先端科学技術セミナー

ダイヤモンドNV中心と量子情報

鈴木研究室 准教授 水落憲和

一つ一つのスピン、光子、電荷を制御する
究極の科学と技術：普遍的な価値のある技術



2014年の大きな科学ニュースは
何でしたか？

2014年ノーベル物理学賞受賞



Photo: Yasuo Nakamura/Meijo
Isamu Akasaki



Photo: Nagoya University
Hiroshi Amano



Photo: Randall Lamb, UCSB
Shuji Nakamura

"for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources".

社会への波及効果

2014年ノーベル化学賞



Photo: Matt Staley/HHMI
Eric Betzig



© Bernd Schuller, Max-Planck Photo: K. Lowder via Wikimec
Stefan W. Hell



William E. Moerner

*"for the development of super-resolved
fluorescence microscopy"*

究極の世界 社会への波及効果

本日の内容

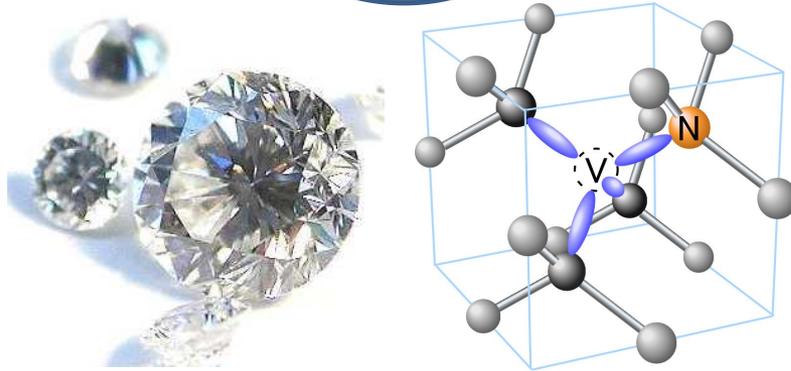
- ダイヤモンドとNV中心
- 単一分子(発光中心)の観測と超高分解能分光法(今年度のノーベル賞!)
- NV中心への期待:トピックス
量子計測、量子暗号通信、量子コンピュータ

究極の世界

社会への波及効果

一つ一つのスピン、光子、電荷を制御する
究極の科学と技術：普遍的な価値のある技術

Spin



Interface

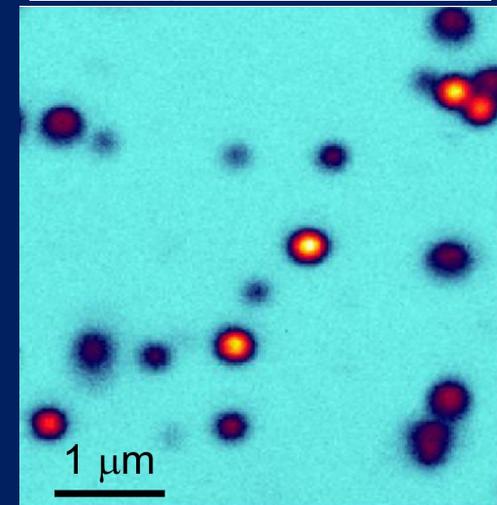
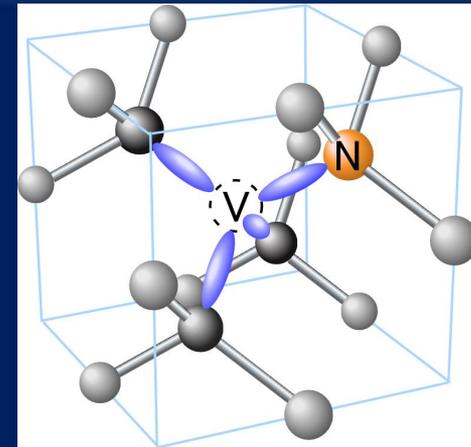
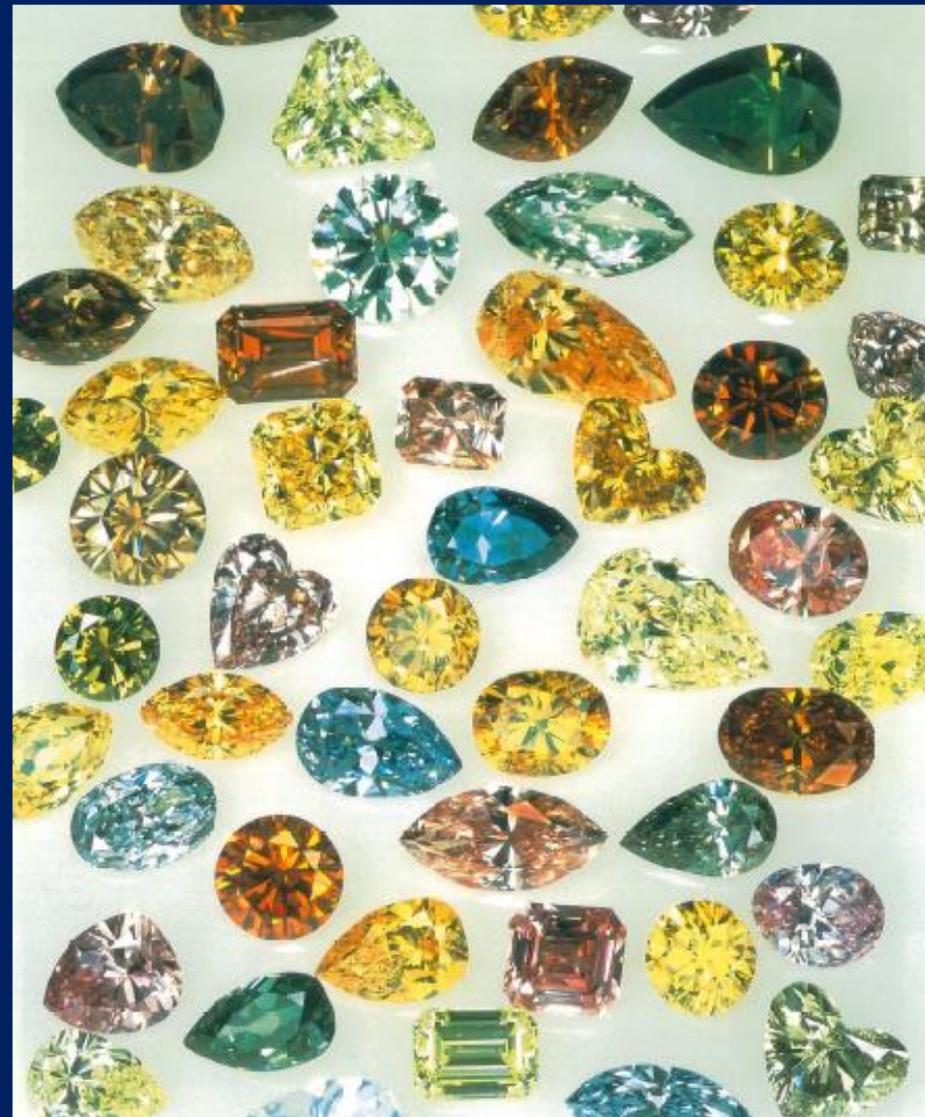
Charge

Photon

ダイヤモンドとNV中心

Diamond

Impurities can incorporate :
Various colors





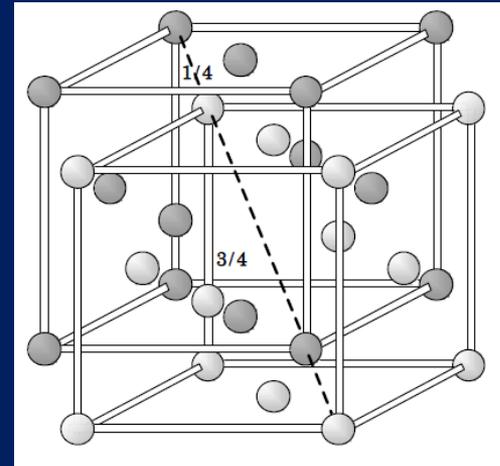
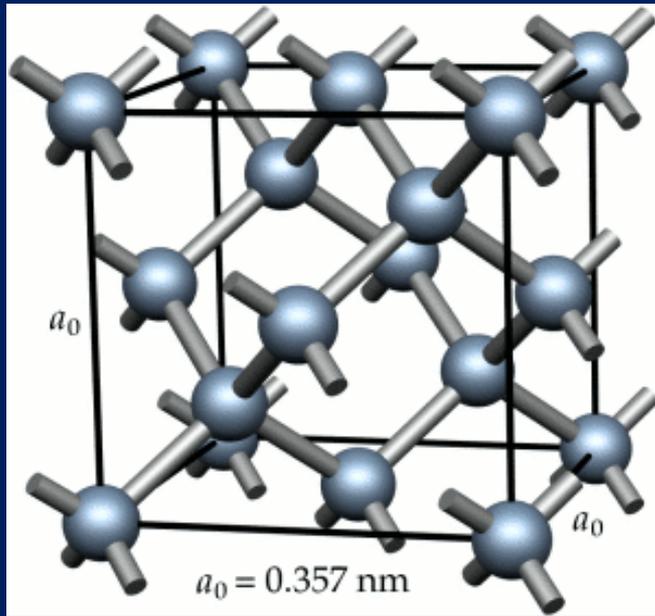
アダム・スミス

ダイヤモンドは単なる装身具であり、水に比べて効用は小さいが非常に希少であるため限界効用が大きく市場では高い価格で取引される。

現代の科学者

宝石としての希少価値はなくなるかもしれないが、科学・技術に新たな価値をもたらすのではないか。

ダイヤモンドの構造



2組の面心立方格子 (fcc) を対角線長の $1/4$ だけずらした構造

- 各原子は4個の最隣接原子と12個の第2隣接原子を持つ
- 炭素原子同士は共有結合
- ダイヤモンド構造は他の構造に比べて隙間が多い。例えば剛体球を置いて満たすことのできる体積の割合は最大で0.34である。Fcc構造あるいはhcp構造の様な最密構造の充填率の46%。

ダイヤモンド



近年、きれいで大きなダイヤモンドが人工的に合成されるように！

既にいくつかの企業から販売！

デビアスの子会社からもCVDで合成されたダイヤモンドを販売

近いうちに1cm角や1インチ角の試料も販売されるという。

Synthetic CVD Diamond

elementsix

[CVD Diamond eShop](#) [Technology & Materials](#) [About eShop](#) [About E6](#)

Electronic Grade Plates

Element Six offers two types of Electronic grade diamond material - Single Crystal and Polycrystalline.

Single crystal Electronic grade is Element Six's highest purity commercially available material in plate sizes up to 4.5 x 4.5 mm. Larger plate sizes are available in Polycrystalline material.

These standard plates give researchers easy access to an exciting and enabling material technology.

CVD Single Crystal Electronic Grade Plates

High purity CVD diamond plate suitable for electronic applications and quantum optics.

Plates are supplied with high quality, low damage polished surfaces.

These plates have the lowest NV centre density of all commercially available Element Six materials.

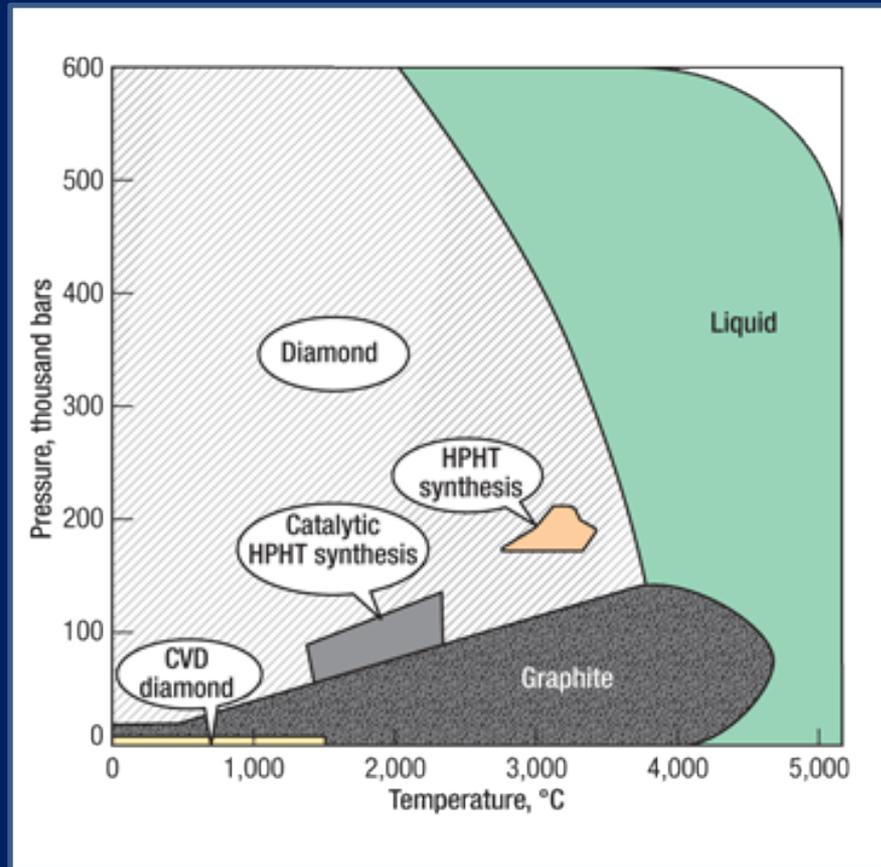


CVD Diamond eShop

- Optical Grade CVD
- Thermal Management Grade CVD
- Mechanical Grade CVD
- Electrochemistry Grade CVD
- Single Crystal Diamond Plate
- Electronic Grade Plates**
 - Electronic Grade Single Crystal Plate
 - Electronic Grade Polycrystalline Plate
- Custom Product Request Form

Contact
FAQ
How To Buy

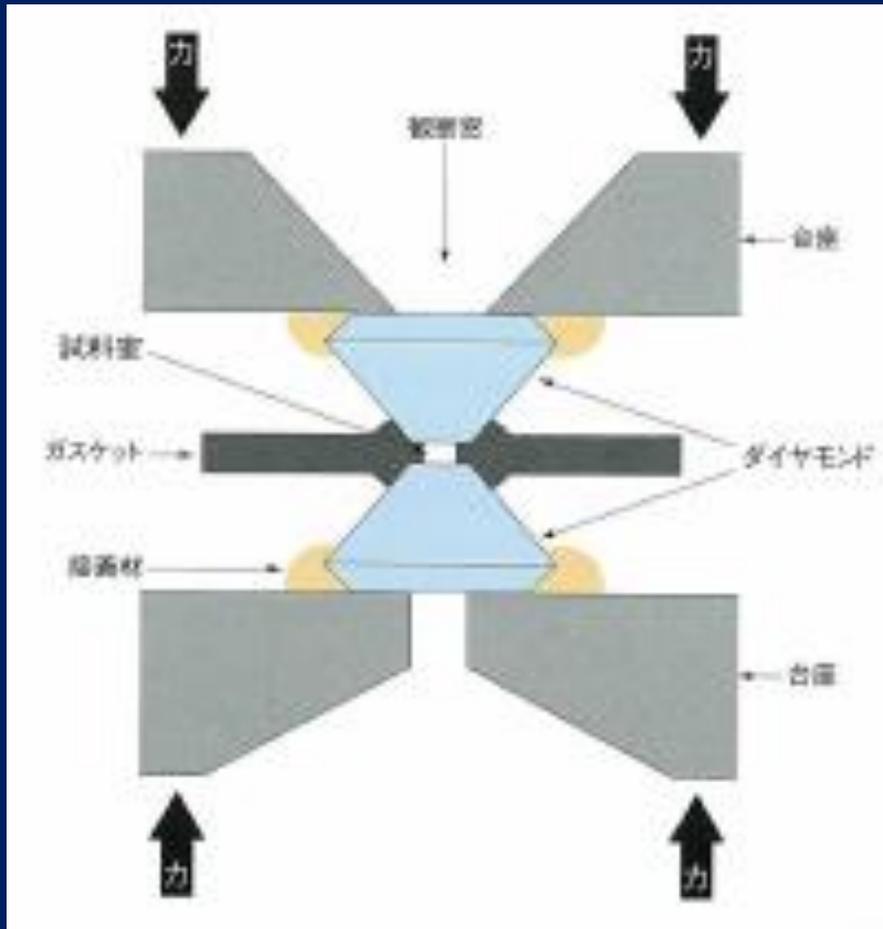
ダイヤモンドは永遠の輝きか？



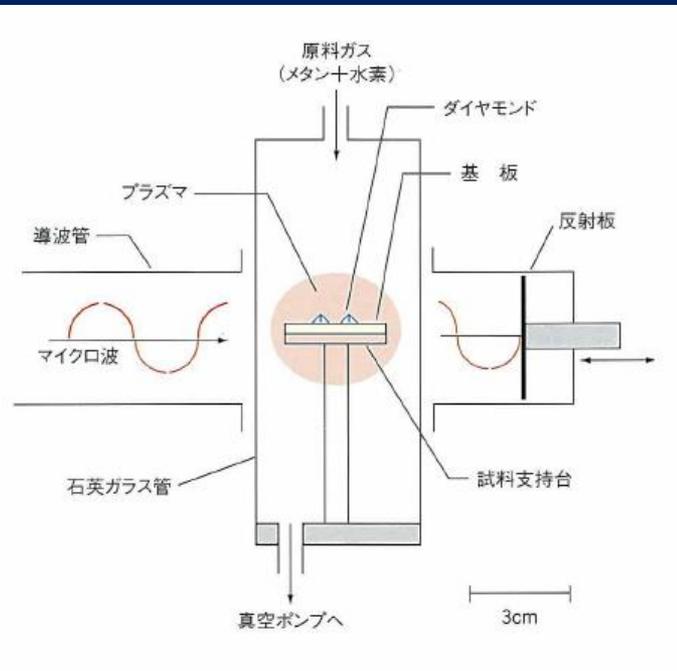
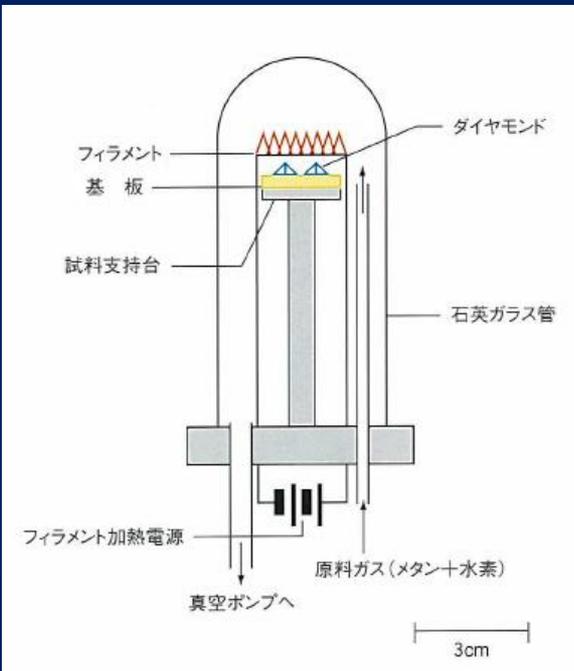
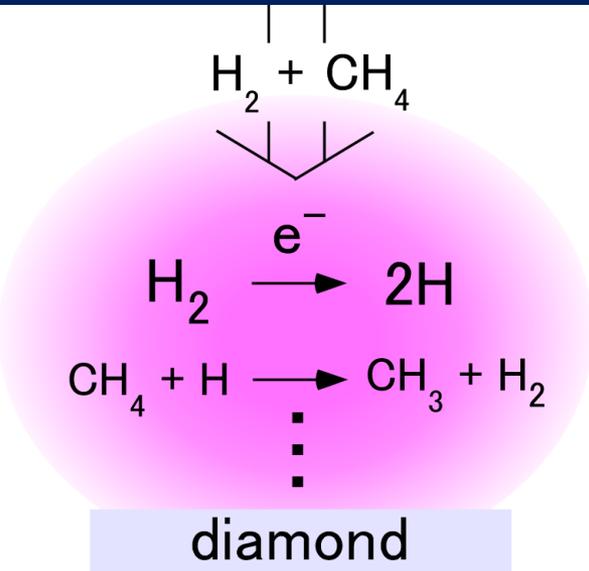
ダイヤモンドは常温常圧では準安定状態！
いつかはグラファイトに相転移！

Success of Diamond synthesis by High Pressure High Temperature method

1955 Success by GE



CVD (Chemical Vapor Deposition) synthesis of diamond



Realization of semiconductor

熱伝導率

(単位: $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

- **ダイヤモンド(C)** 1000~2000
- 銀(Ag) 420
- **銅(Cu)** 398
- 金(Au) 320
- アルミニウム(Al) 236
- シリコン(Si) 168
- 真鍮 106
- 鉄(Fe) 84
- 白金(Pt) 70
- ステンレス鋼 16.7 ~ 20.9
- 水晶(SiO_2) 8
- ガラス 1
- 水(H_2O) 0.6

最近では良い熱伝導率を利用するため、ダイヤモンドコーティングされたフライパンや炊飯ジャーも販売されている！

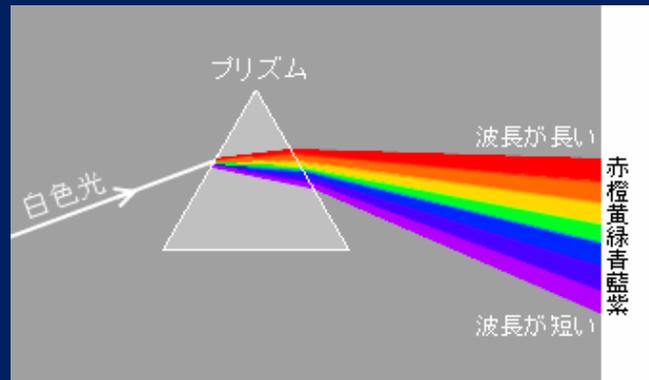


屈折率

- ・光学ガラス BK7 1.51
- ・**ダイヤモンド** 2.417
- ・酸化ジルコニウム ZrO_2 2.4
- ・炭化ケイ素 β -SiC
- 空気(0°C,1気圧) 1.000292
- 二酸化炭素 1.000450
- 水(20°C) 1.3334
- 氷(0°C) 1.309
- エタノール 1.3618
- ポリメタクリル酸メチル(20°C) 1.491
- 水晶(18°C) 1.5443

宝石名	屈折率
ガーネット	1.70~1.89
ルビー、サファイア	1.76~1.77
スピネル	1.717
ペリドット	1.65~1.69
ひすい	平均1.66
トパーズ	1.62~1.63
トルマリン	1.62
エメラルド	1.57~1.58
水晶	1.54~1.55
オパール	1.42~1.47

分散率



- ダイヤモンド 0.044
- ジルコニア 0.066
- ガラス 0.013

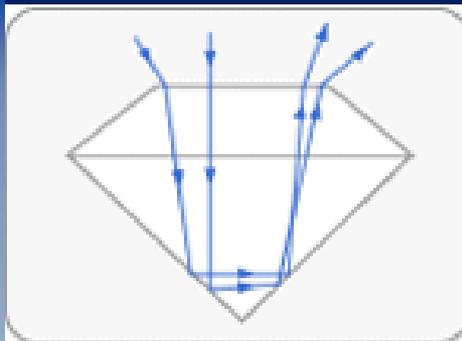


ジルコニア(人工ダイヤモンドといわれることも)

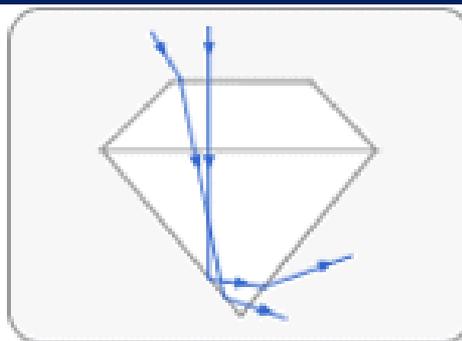
ちなみに...

ブリリアントカット

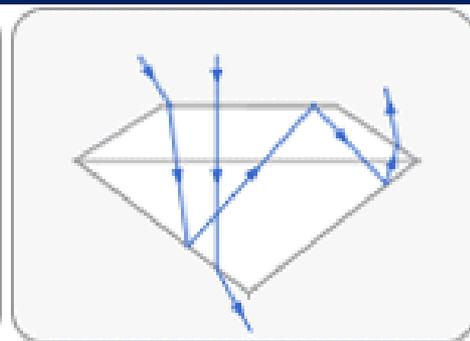
- すべて58面体(下面の面取りをしない場合は57面体)で、上部から進入した光が全て内部で屈折して上部から放たれるように設計されている。



理想的なカット



厚すぎるカット



薄すぎるカット

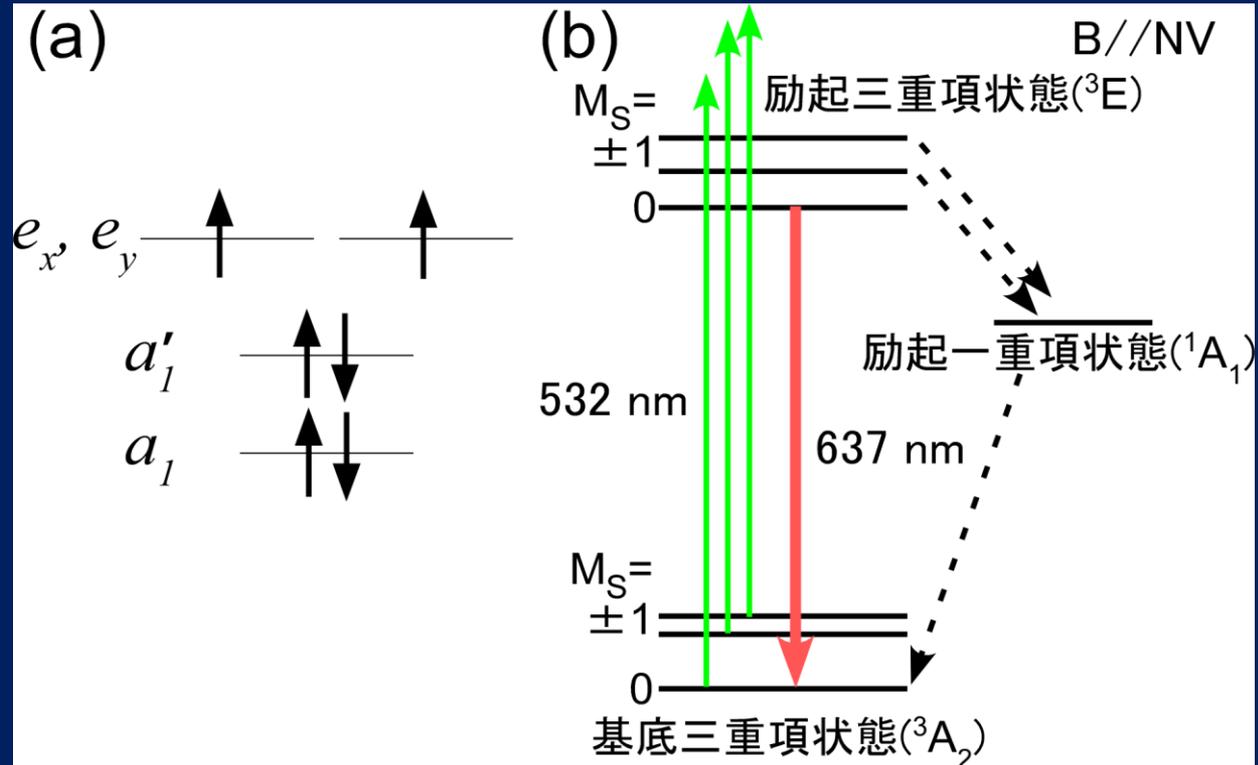
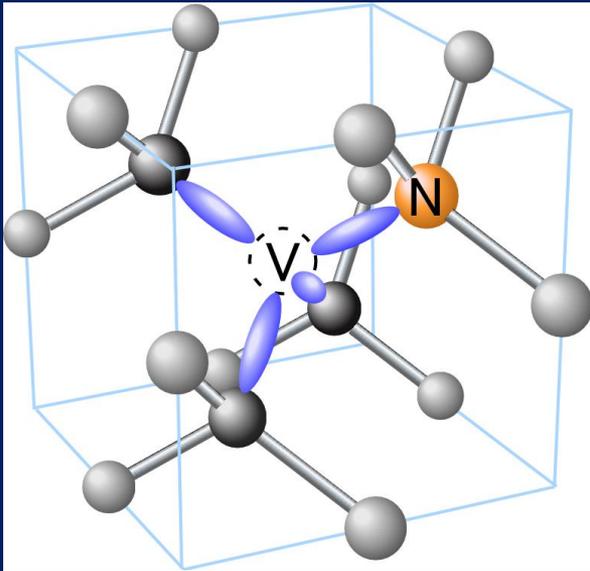
NV中心への期待:トピックス

量子計測、量子暗号通信、量子コンピュータ

NV center: Paramagnetic color center

Electronic states of defect in deep level (molecular like)

- $S=1$ (triplet state, paramagnetic, localized spin)
- Strong emission (Fluorescence) from excited spin



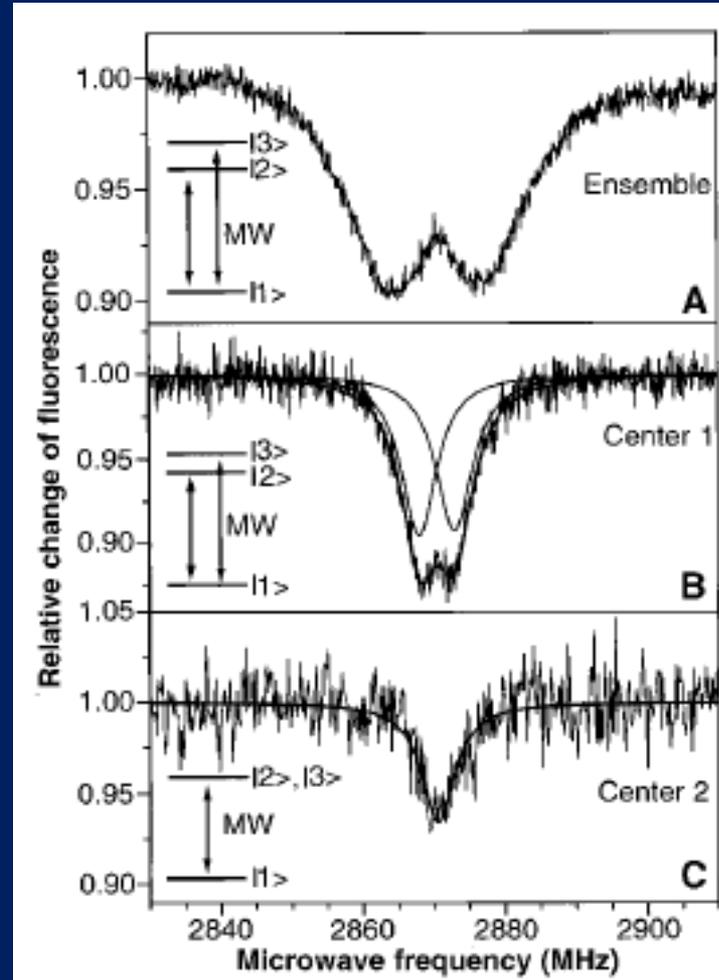
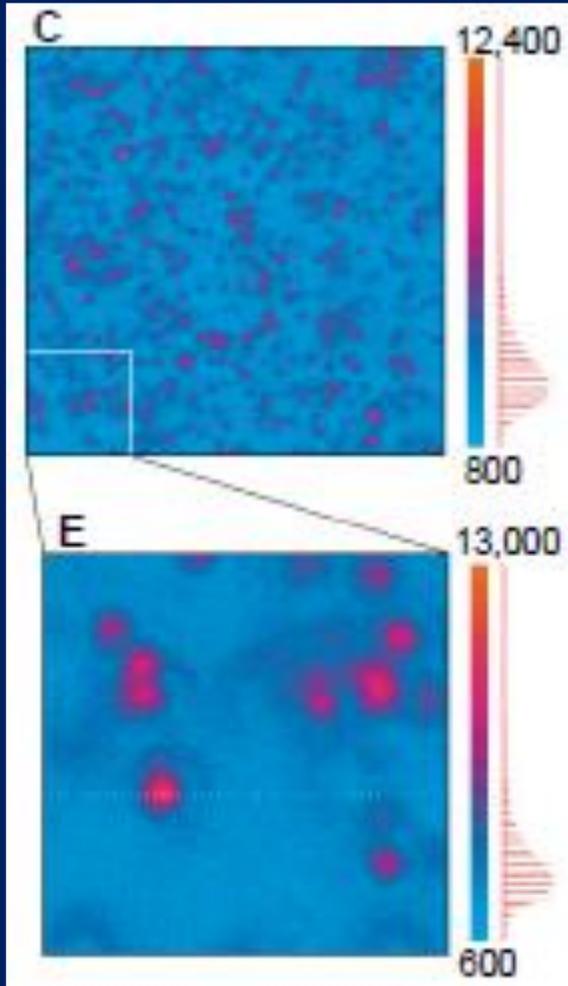
(a) Energy level by molecular orbital model of NV- center (linear combination of 3 carbon and 1 nitrogen dangling bonds)

(b) Schematic electronic states

History: 単一NV中心の観測 (1997)

“Scanning confocal optical microscopy and magnetic resonance on single defect centers: Single NV center”

A. Gruber, A. Dräbenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtrup,* C. Borczyskowski, *Science*, 276, 2012, 1997



Prof. Dr. J. Wrachtrup

History: 単一分子からの発光の観測 (1990)

VOLUME 65, NUMBER 21

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 NOVEMBER 1990

Single Pentacene Molecules Detected by Fluorescence Excitation in a *p*-Terphenyl Crystal

M. Orrit and J. Bernard

Centre de Physique Moléculaire Optique et Hertzienne, Centre National de la Recherche Scientifique et Université de Bordeaux I, 351, Cours de la Libération, F-33405 Talence CEDEX, France

(Received 9 July 1990)



Prof. M. Orrit

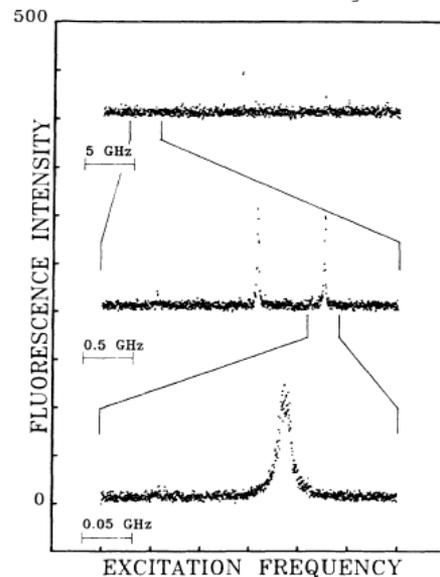
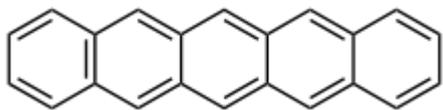


FIG. 2. Shape of a single molecule's excitation peak at different frequency scales. The bottom spectrum is approximately Lorentzian with FWHM about 12 MHz. The vertical scale is in counts/channel.

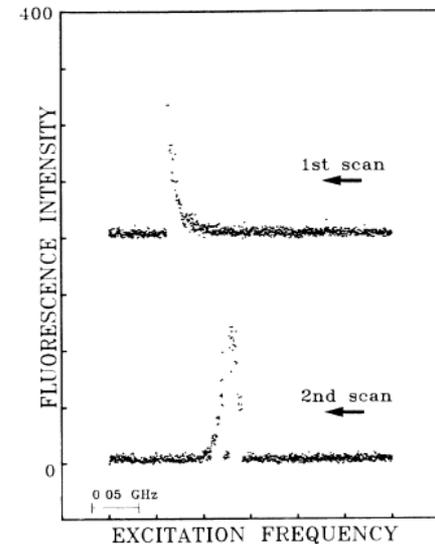


FIG. 4. Two successive scans of the excitation spectrum of a single molecule suggesting a photophysical hole-burning process. The sudden intensity falls and surges might arise from the flip-flops of a two-level system in the neighborhood of the molecule. The time per channel was 0.08 s and a scan lasted about 1 min. The vertical scale is in counts/channel.

今年ノーベル賞を受賞したMoernerは1989年に単一分子の吸収を観測したと発表していた。

History: 単一分子のスピン観測(1993)

Optical detection of magnetic resonance in a single molecule

J. Wrachtrup*, **C. von Borczyskowski***, **J. Bernard†**,
M. Orrit† & **R. Brown†**

* Fachbereich Physik, Freie Universität Berlin, Arnimallee 14,
1000 Berlin 33, Germany

† Centre de Physique Moléculaire Optique et Hertzienne, u.a. 283 du
C.N.R.S., Université Bordeaux I, 33405 Talence cedex, France

NATURE · VOL 363 · 20 MAY 1993

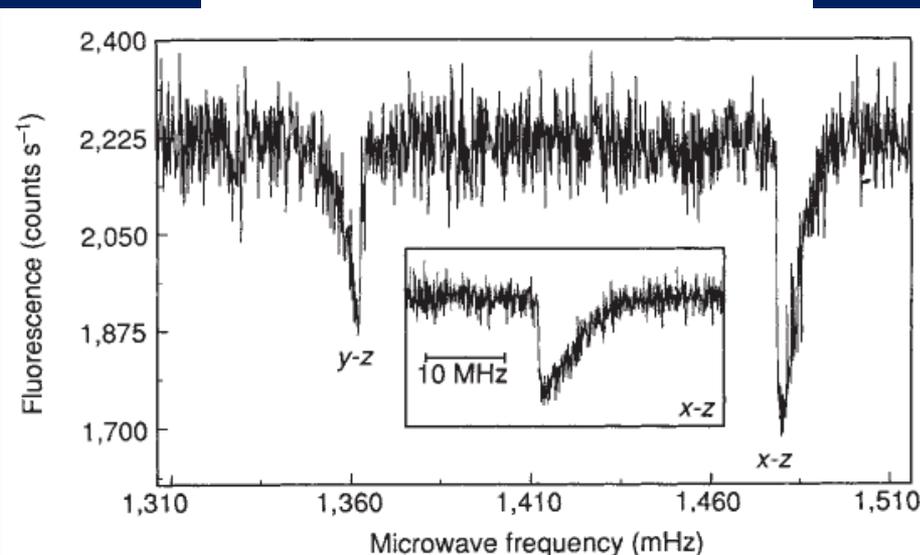


FIG. 1 Decrease of the fluorescence intensity of a single pentacene molecule when the microwave field is resonant with the y - z or the x - z transition. The inset shows the x - z transition on an enlarged frequency scale, on reducing the microwave power by a factor of ~ 30 .

今年ノーベル賞を受賞したS. Hellの業績

高分解能顕微鏡

通常の共焦点レーザー顕微鏡の分解能(光の回折による分解能の限界)

$$\lambda/2NA$$

λ : 励起波長

NA: N値 (Numerical Aperture)

上記の分解能を上回る技術

Stimulated Emission Depletion (STED) microscopy

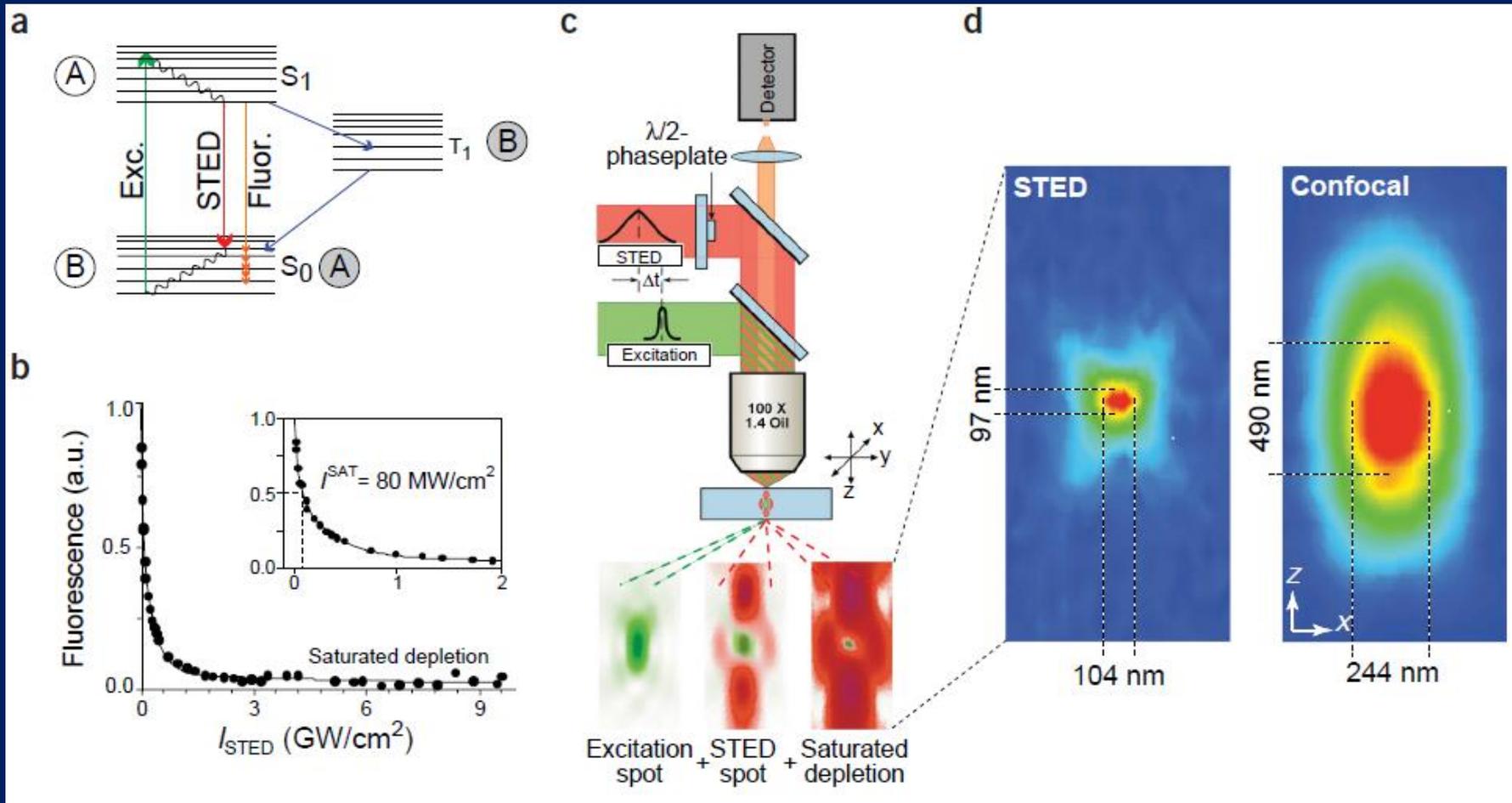
nature
photonics

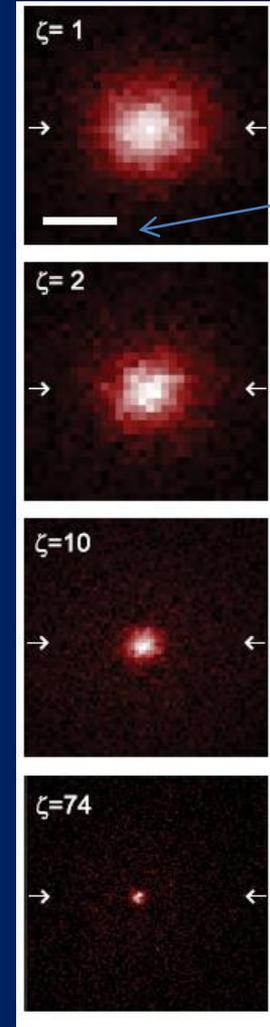
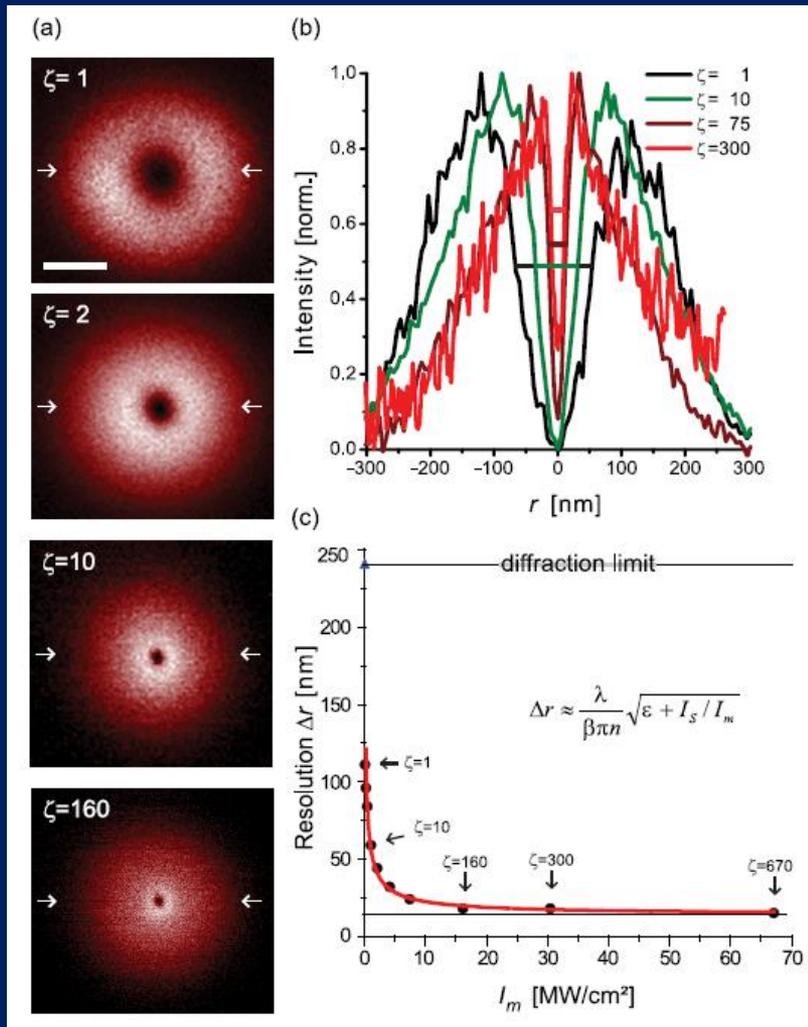
LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 22 FEBRUARY 2009 | DOI: 10.1038/NPHOTON.2009.2

STED microscopy reveals crystal colour centres with nanometric resolution

Eva Rittweger[†], Kyu Young Han[†], Scott E. Irvine[†], Christian Eggeling and Stefan W. Hell^{*}



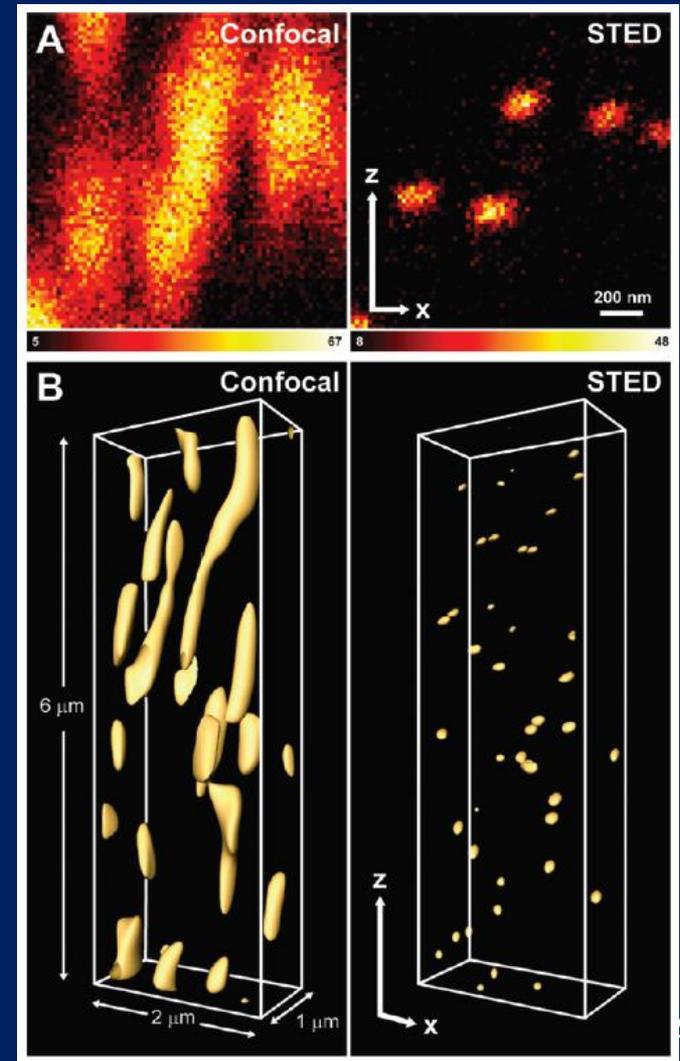
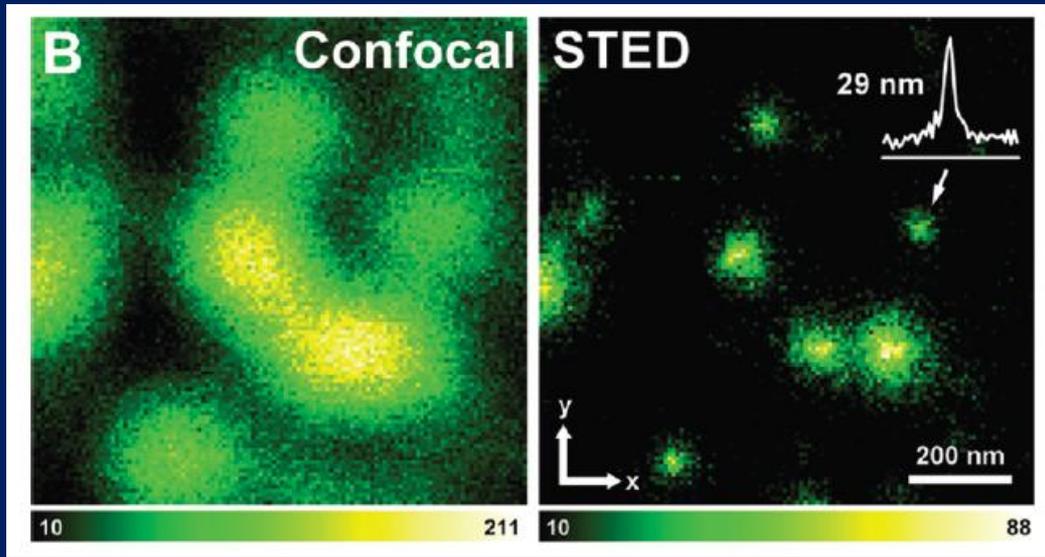


Bar: 150 nm

誘導放しさせる光の形状をドーナツ型に加工！
 励起光による発光はドーナツ中心の暗い部分のみから！これにより超高分解能に！

NV中心の3次元マップ

: 汎用の共焦点顕微鏡像とSTEDの比較



情報化社会の将来

既存の素子、材料、システムの限界を超える必要
全く新しい原理・量子効果を用いた展開

量子暗号通信 (BB84: 単一光子を用いて安全に！)

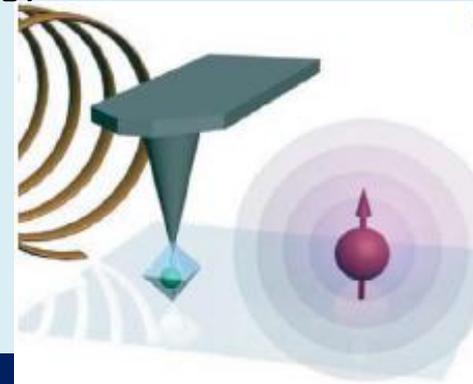
絶対に解読不可能な量子暗号通信、絶対に安全な量子認証
(クレジットカード)

量子コンピューティング

超高速データベース検索、因数分解(暗号解読)

計測

標準限界を超えた計測技術：
超高分解能磁気センサー等

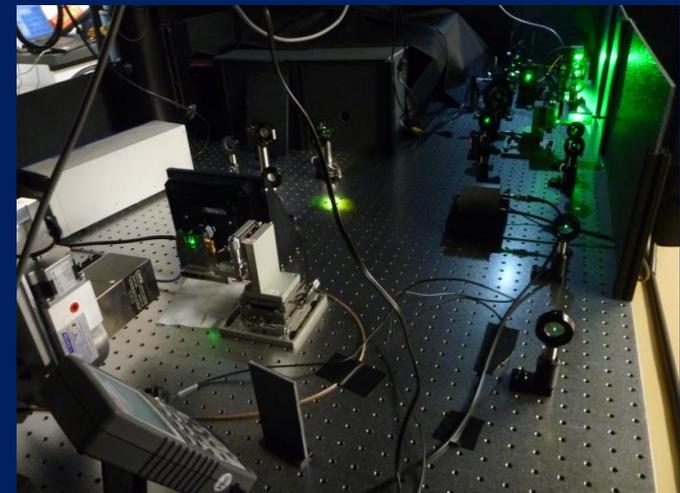
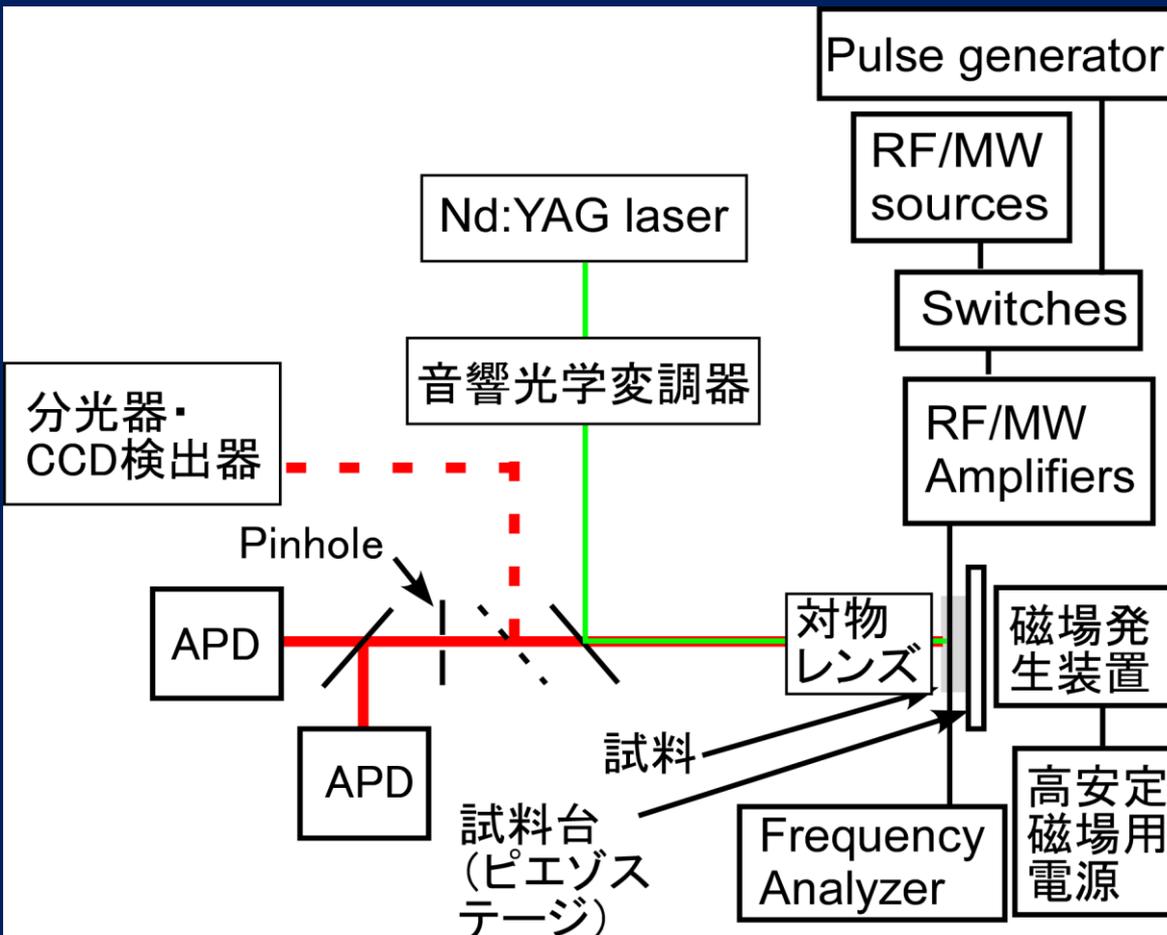


実現には新たな量子デバイスが必要

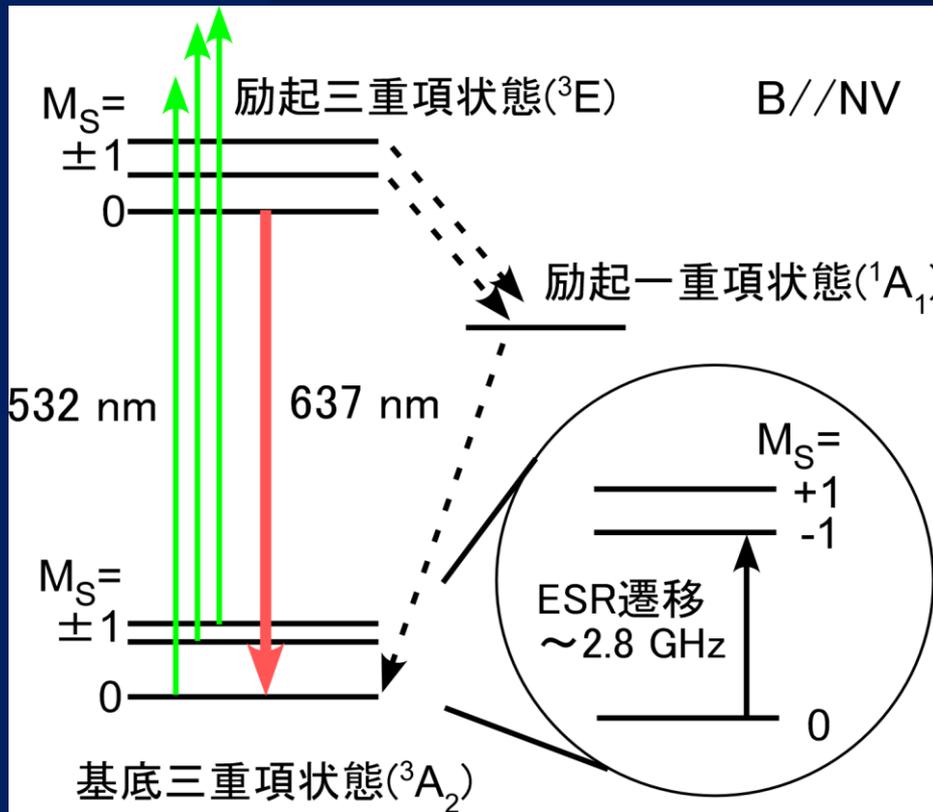
単一光子発生素子、量子中継器、量子レジスタ

測定装置

- ・単一NV中心の観測と単一スピンの操作を可能に！

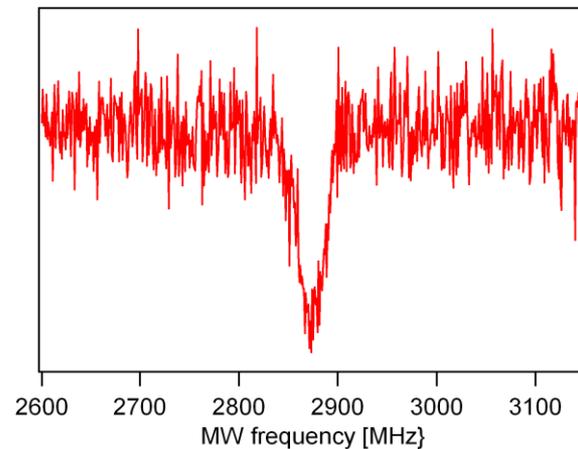


Optically detected magnetic resonance (ODMR)



Laser excitation (532 nm) plays very important roles as initialization and read out the spin states.

Pure state can be prepared.



We detect Single NV and repeat detection cycles.

Previous and Recent topics in NV center

Demonstration of single photon source at RT

Stable Solid-State Source of Single Photons

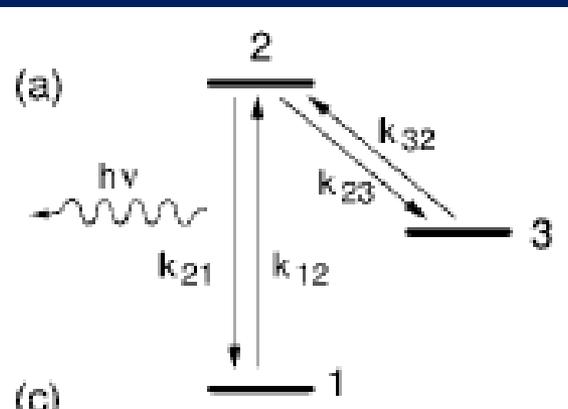
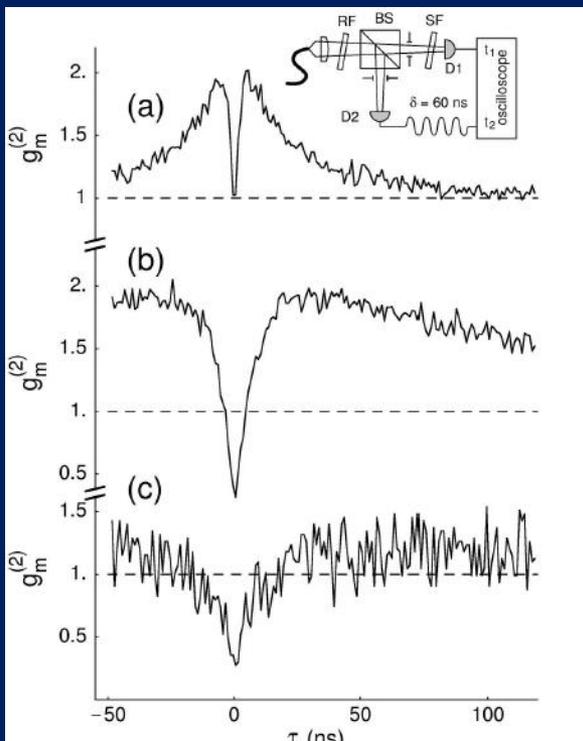
Christian Kurtsiefer,¹ Sonja Mayer,¹ Patrick Zarda,² and Harald Weinfurter^{1,2}

¹Sektion Physik, Ludwig-Maximilians-Universität, D-80799 München, Germany

²Max-Planck-Institut für Quantenoptik, D-85748 Garching, Germany

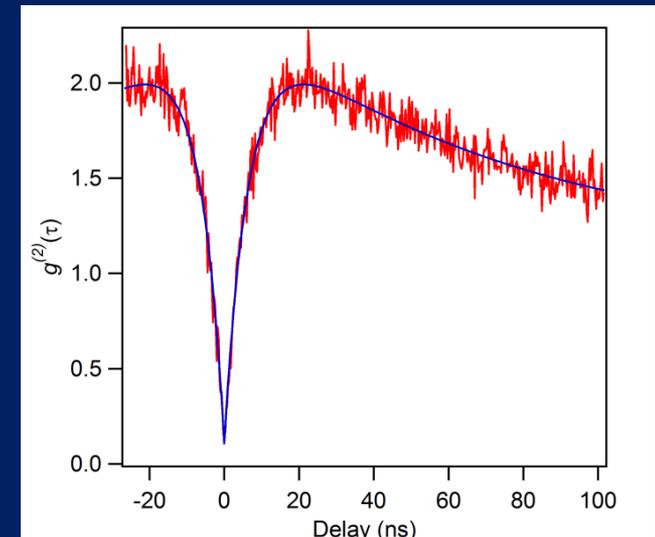
PHYSICAL REVIEW LETTERS

10 JULY 2000



(c)

Our measurement

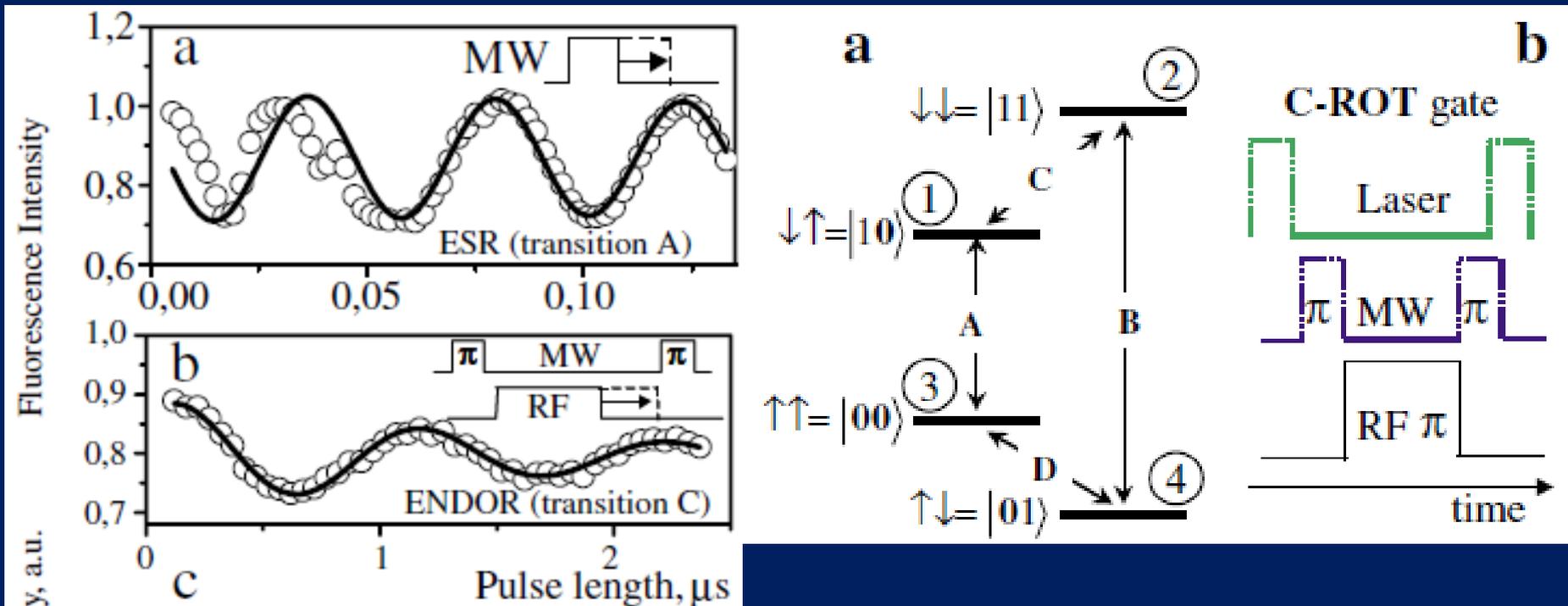


645 nm ~ 800 nm

Previous and Recent topics in NV center (2)

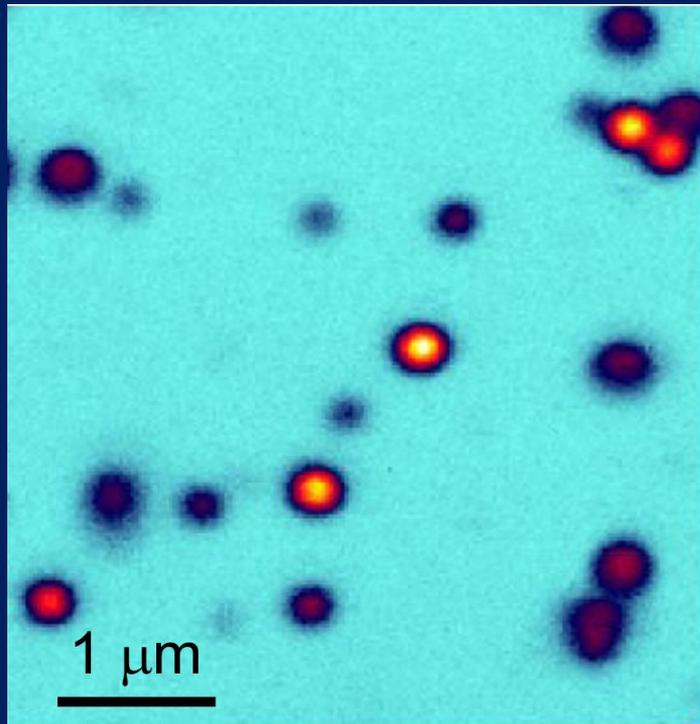
CNOT gate of two qubit (NV-¹³C, electron spin and ¹³C nuclear spin)

F. Jelezko et al., *Phys. Rev. Lett*, 93, 130501, 2004

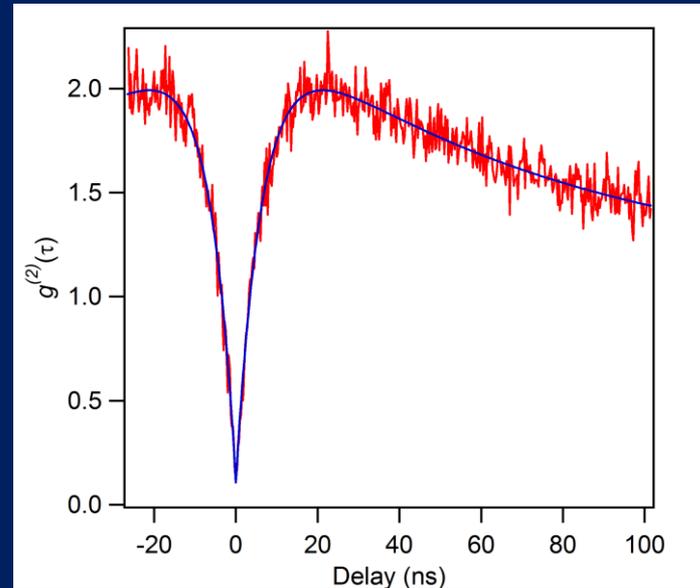


(CROT is equivalent to CNOT gate except for a $\pi/2$ rotation of the nuclear spin around z-axis.)

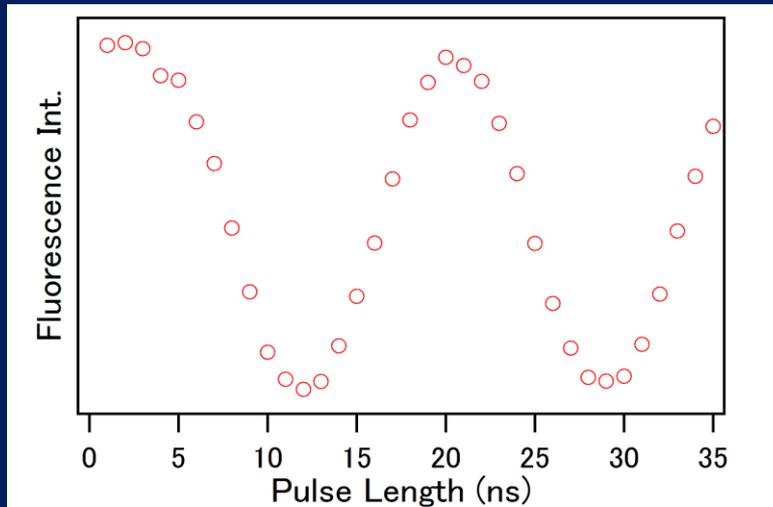
Confocal microscopy image



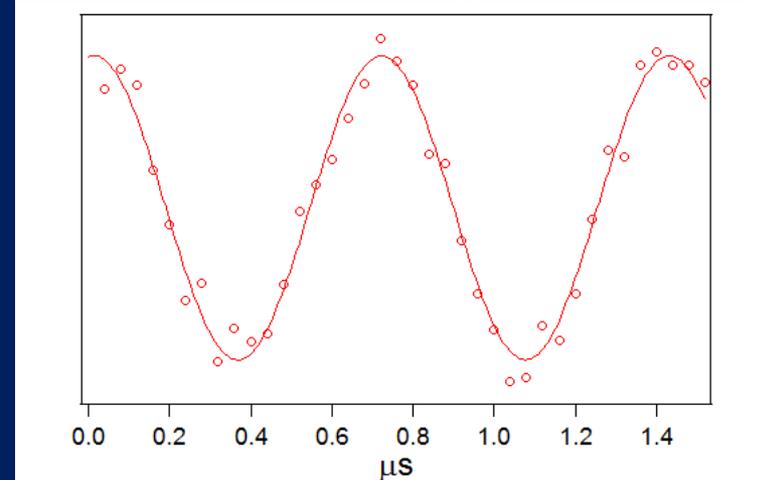
Anti-bunching



Rabi oscillation of single Electron spin



Rabi oscillation of single Nuclear spin



Scanning probe magnetometry (magnetic sensor)

Minimum detectable magnetic field

$$\delta B \approx \frac{1}{g_s \mu_B R \sqrt{\eta}} \frac{1}{\sqrt{NtT_2^*}},$$

R : Measurement contrast

η : detection efficiency

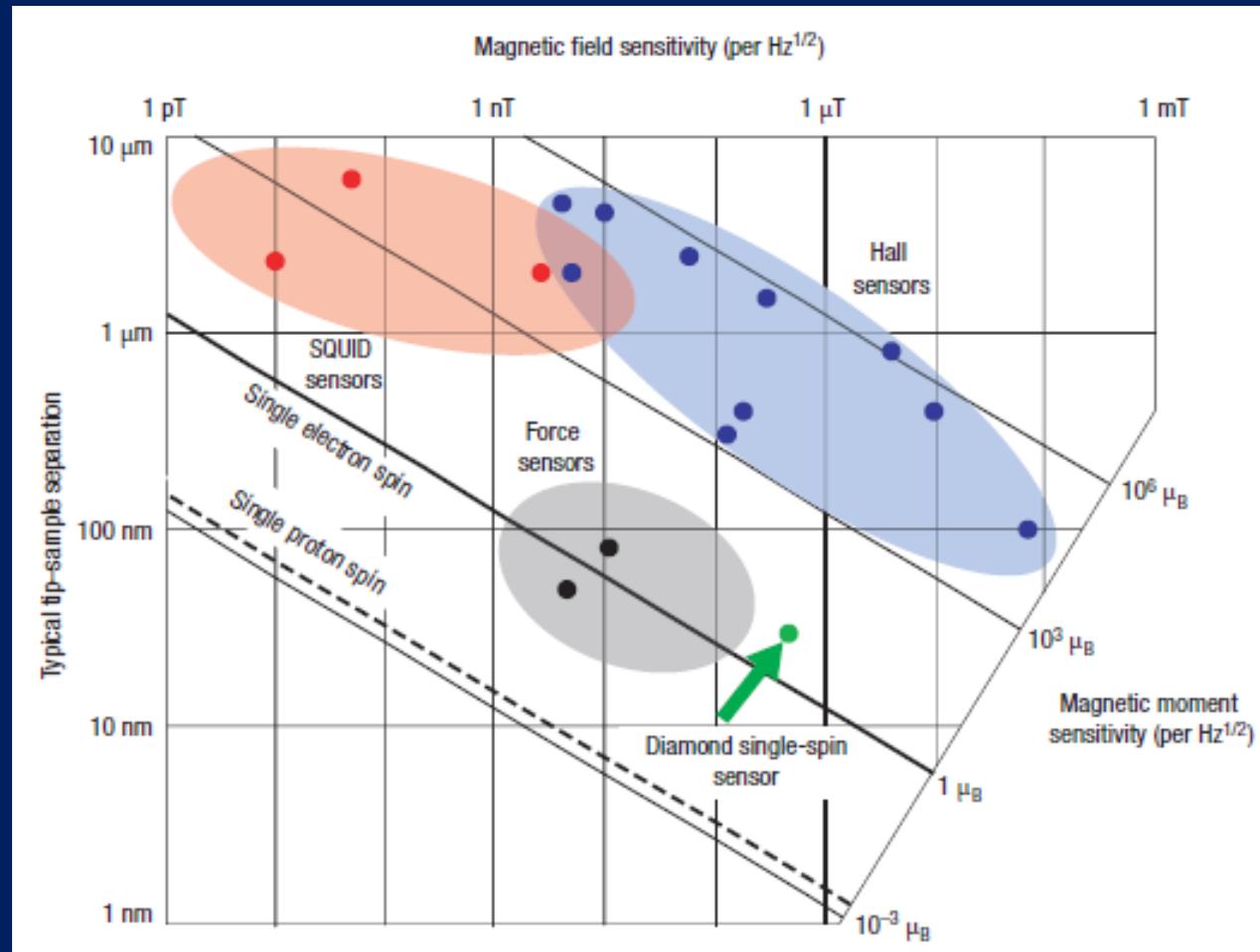
N : number of spin centers

t : integration time

Sensitivity

3 nT / 100 s

30 nT Hz^{-1/2}

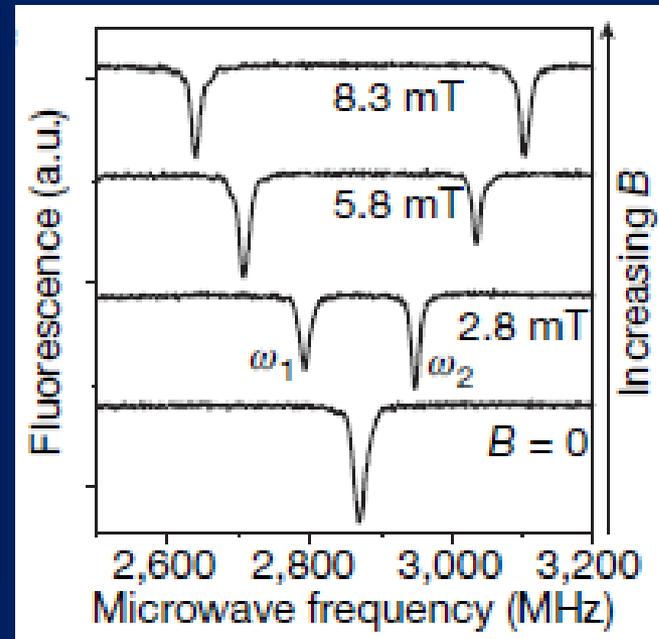
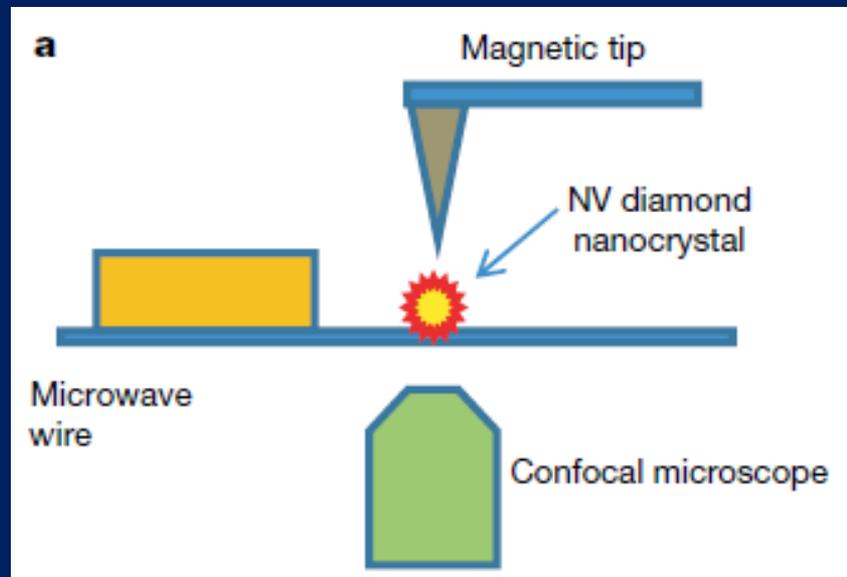


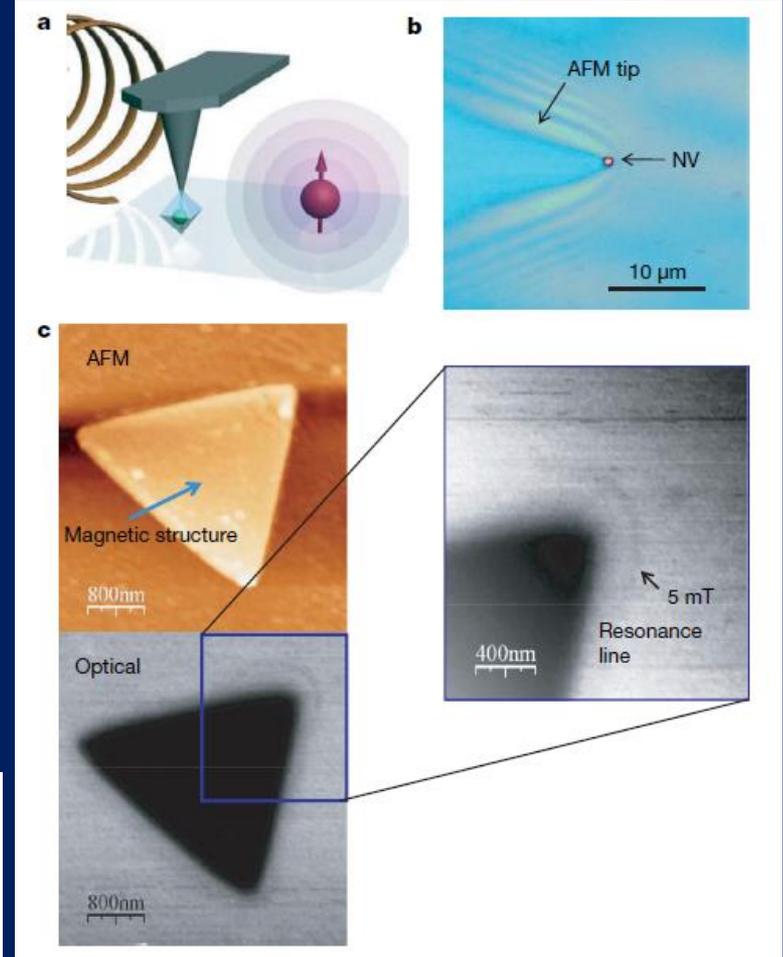
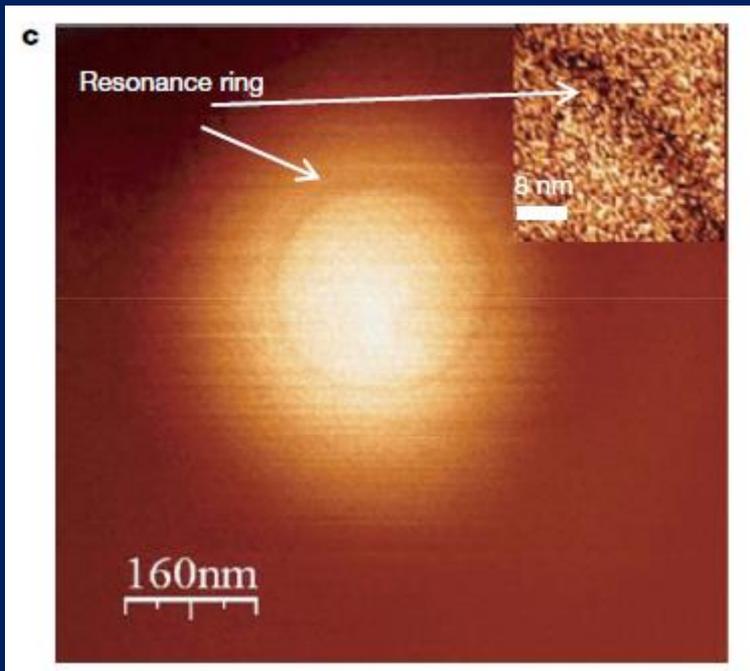
C. Degan, Nature nanotechnology, 3, 643 (2008).

Nanoscale imaging magnetometry with diamond spins under ambient conditions

Gopalakrishnan Balasubramanian¹, I. Y. Chan²†, Roman Kolesov¹, Mohannad Al-Hmoud¹, Julia Tisler¹, Chang Shin³, Changdong Kim³, Aleksander Wojcik³, Philip R. Hemmer³, Anke Krueger⁴, Tobias Hanke⁵, Alfred Leitenstorfer⁵, Rudolf Bratschitsch⁵, Fedor Jelezko¹ & Jörg Wrachtrup¹

(Nature, 455, 648, 2008)

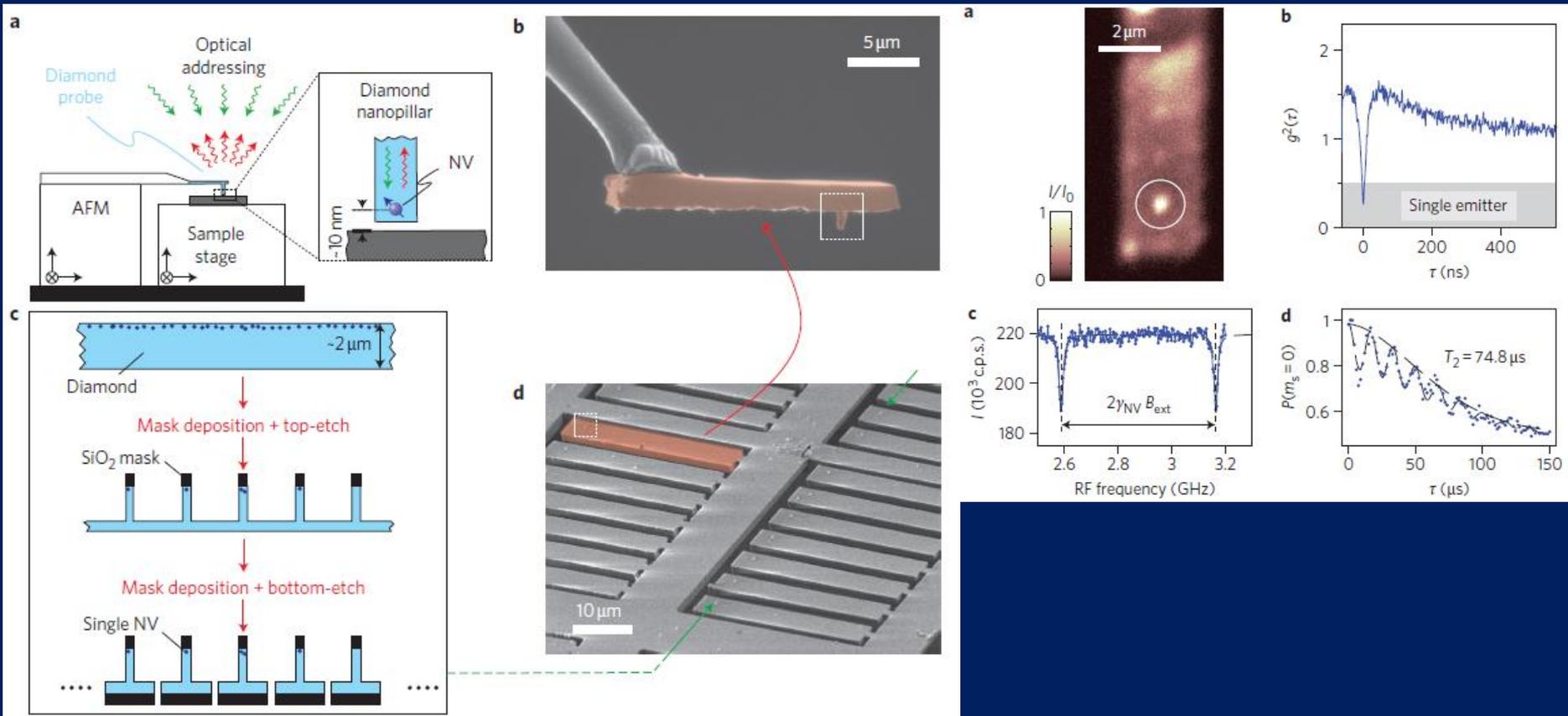


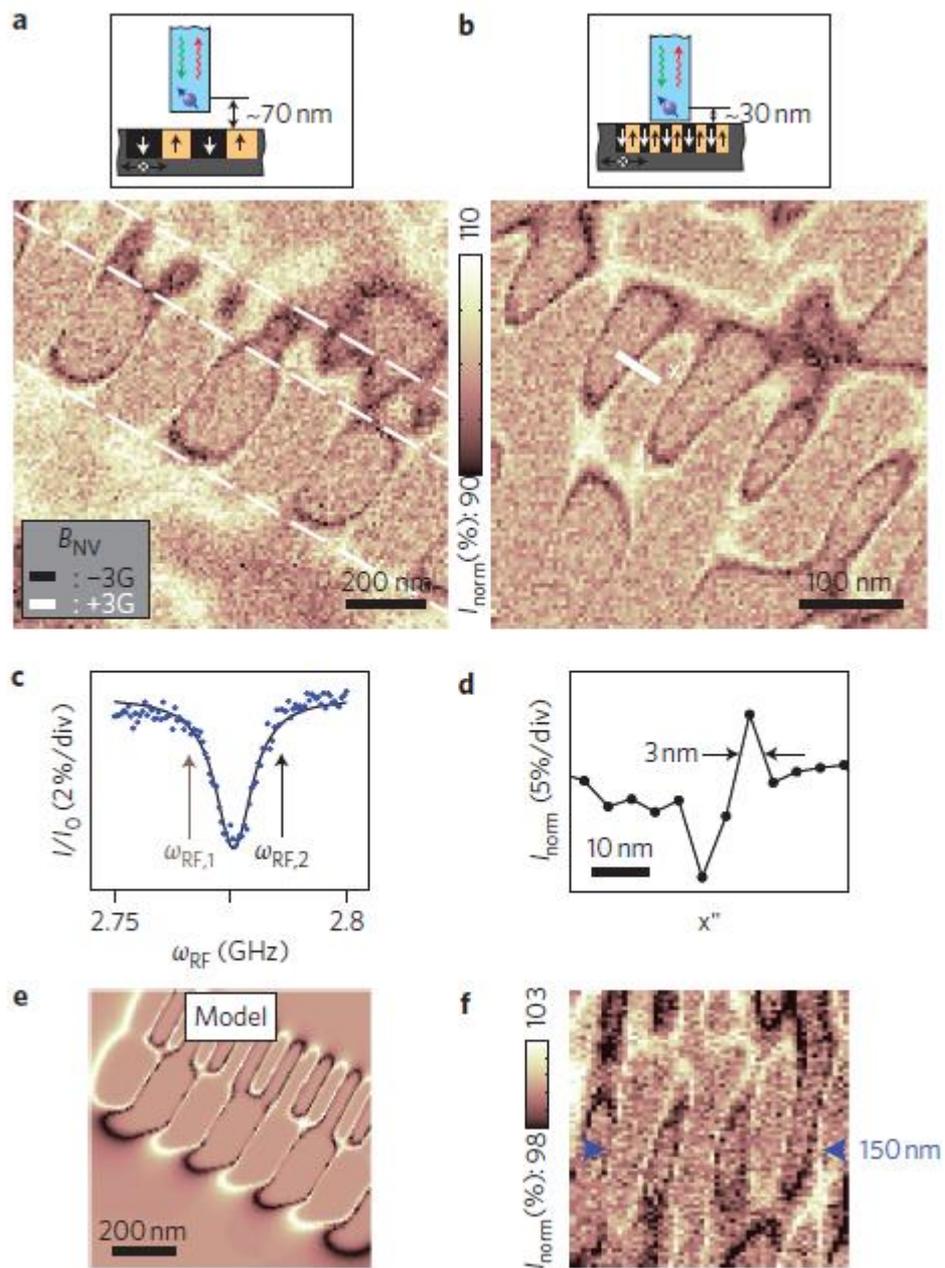


centre (shown in the AFM topography). **c**, Two-dimensional magnetic resonance image of a single nitrogen-vacancy centre, showing resonance rings corresponding to a magnetic field of 3 mT (resonance frequency of 2,780 MHz). Inset, an enlarged section of a ring with a width of approximately 5 nm.

A robust scanning diamond sensor for nanoscale imaging with single nitrogen-vacancy centres

P. Maletinsky^{1†}, S. Hong^{2†}, M. S. Grinolds^{1†}, B. Hausmann², M. D. Lukin¹, R. L. Walsworth^{1,3}, M. Loncar² and A. Yacoby^{1*}

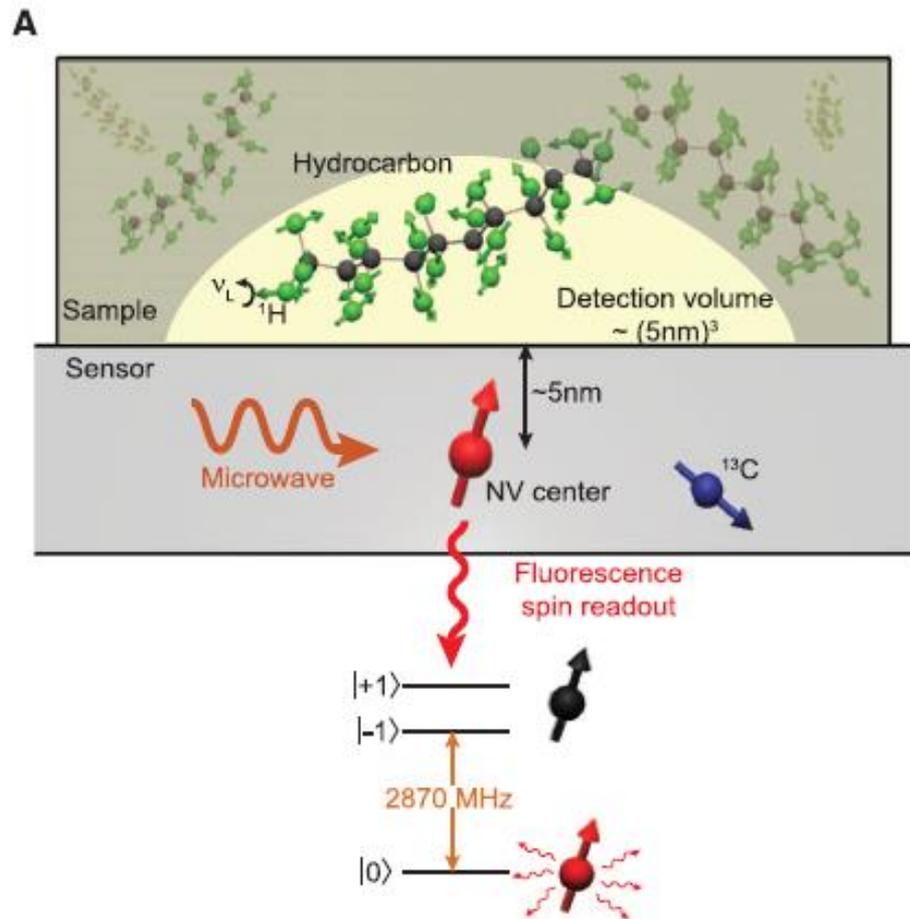




Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy on a (5-Nanometer)³ Sample Volume

T. Staudacher,^{1,2} F. Shi,³ S. Pezzagna,⁴ J. Meijer,⁴ J. Du,³ C. A. Meriles,⁵
F. Reinhard,^{1*} J. Wrachtrup¹

SCIENCE VOL 339 1 FEBRUARY 2013



Structural information
of single protein on the
surface

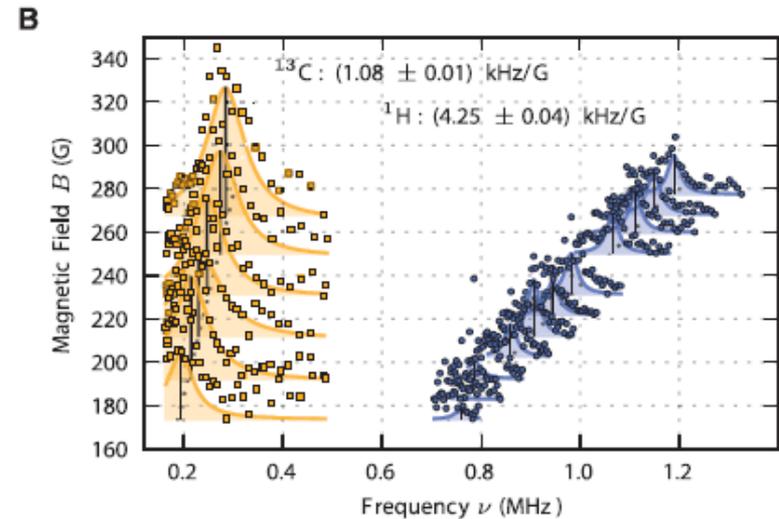
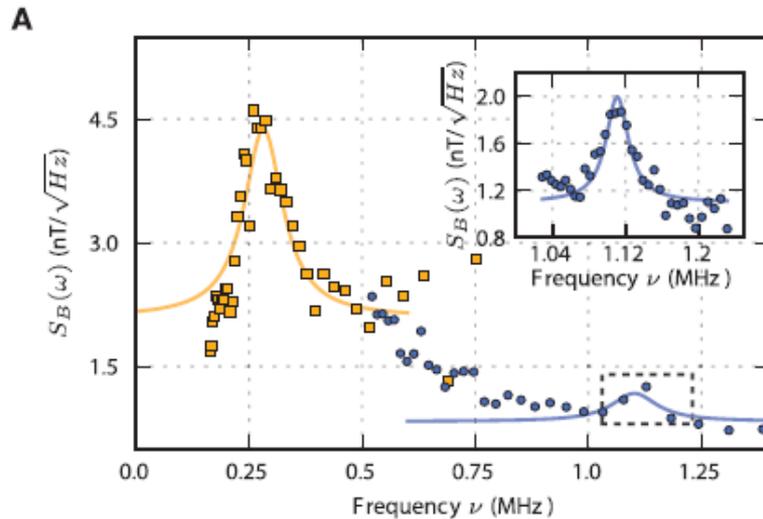
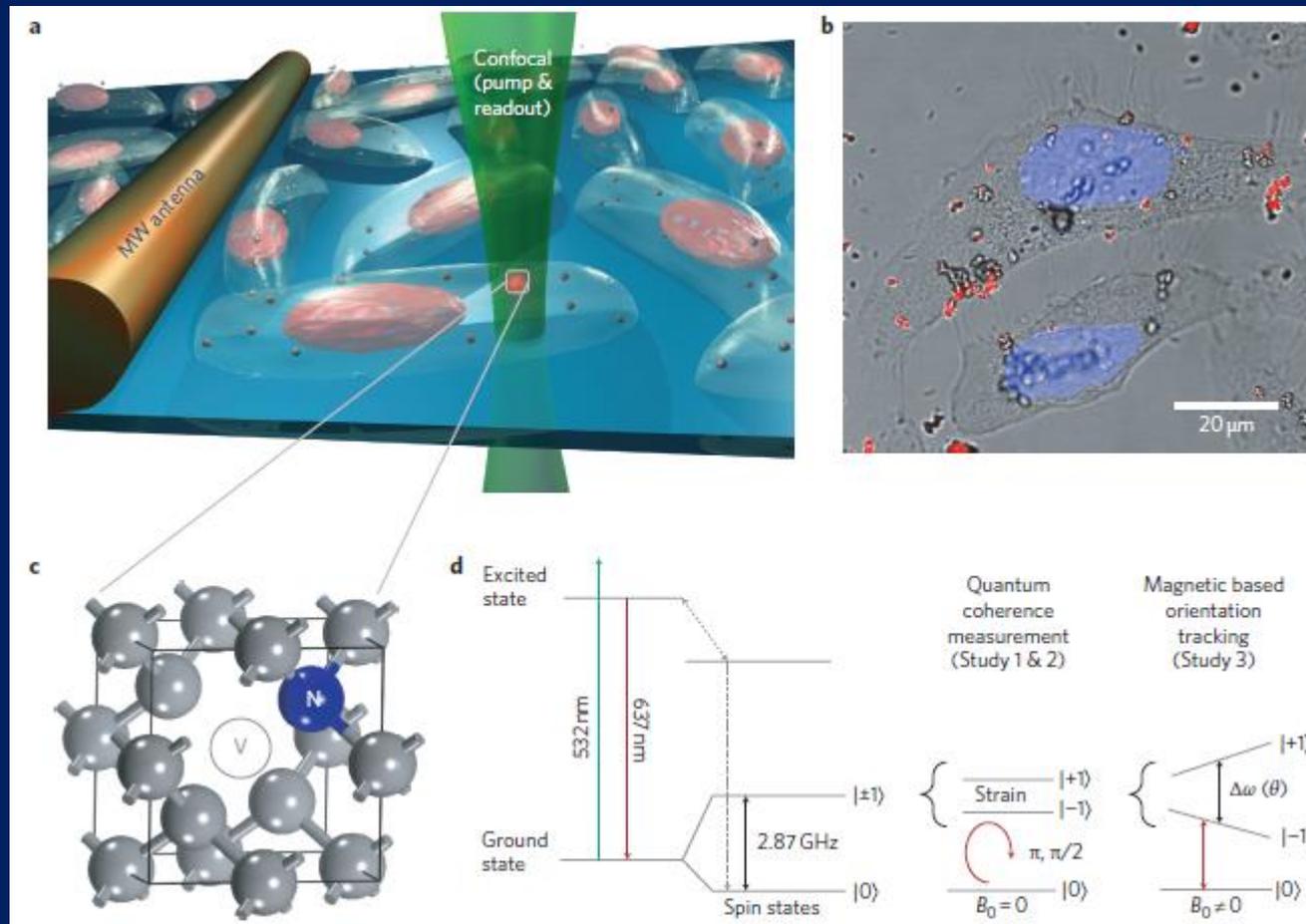


Fig. 2. (A) NMR spectrum of statistically polarized nuclei in the vicinity of a shallow implanted NV center. A strong contribution of ^{13}C nuclei inside the diamond [yellow, acquired by a CPMG6 sequence (20)] was accompanied by a

weaker component of ^1H nuclei of the sample (blue, acquired using a XY8-160 sequence and a sample of microscopy immersion oil). **(B)** Both components shifted with the magnetic field at the gyromagnetic ratios of the respective species.

Quantum measurement and orientation tracking of fluorescent nanodiamonds inside living cells

L. P. McGuinness^{1,2}, Y. Yan³, A. Stacey¹, D. A. Simpson^{1,2}, L. T. Hall^{1,2}, D. Maclaurin^{1,2}, S. Prawer¹, P. Mulvaney⁴, J. Wrachtrup⁵, F. Caruso³, R. E. Scholten^{1,6} and L. C. L. Hollenberg^{1,2*}



なぜ速くなるのか？

量子コンピュータ

通常のコンピュータ: 0と1のビットにより演算

量子コンピュータ: (古典)ビットから量子ビットへ

量子ビット

0と1だけではなく、重ね合わせ状態 $\Psi = a|0\rangle + b|1\rangle$ を利用
(a, b は0と1の状態の割合を表すある定数)

重ねあわせ、量子もつれ状態を利用して、
超高速並列計算

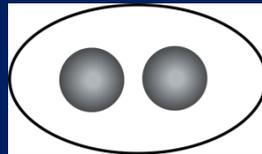
量子もつれ

複数の粒子間に量子力学的な相関がある状態.
空間的に離れていても1つの物体のように振舞う.

$$|\Psi\rangle = |\phi_A\rangle \otimes |\phi_B\rangle \quad \text{Separable: 分離可能}$$

このように表せないとき $|\Psi\rangle$ 状態は量子もつれ状態

量子もつれ状態



If one of the state is measured as $|0\rangle$,
the other state is determined as $|0\rangle$.

$$(1/2)^{1/2} (|00\rangle + |11\rangle)$$



量子暗号通信: 絶対に安全な通信の高速化と長距離化

量子コンピューティング: 量子もつれを含めた超並列計算

$|00\dots00\rangle \sim |11\dots11\rangle$ までのN個のビットの場合： 2^N 個の状態

通常のコンピュータ

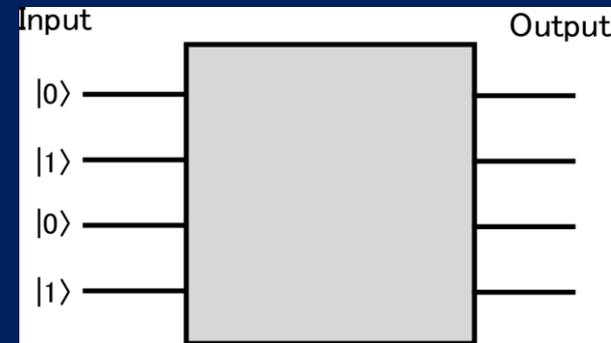
1度に1個の情報(状態)しか取り扱えない。

量子もつれ

2^N 個の情報を同時に扱える。

1度に多くの計算が可能に！

(例えば、 $N=10$ のとき、 $2^N=1024$ 、 $N=40$ のとき、 $2^N > 一兆$)



量子もつれ状態を生成できる、
一つでも大きな量子ビット数の素子が必要

単一光子、単一スピンを利用する理由

単一光子: 通信、処理

- 絶対に解読不可能な量子暗号通信
- 光量子コンピュータ

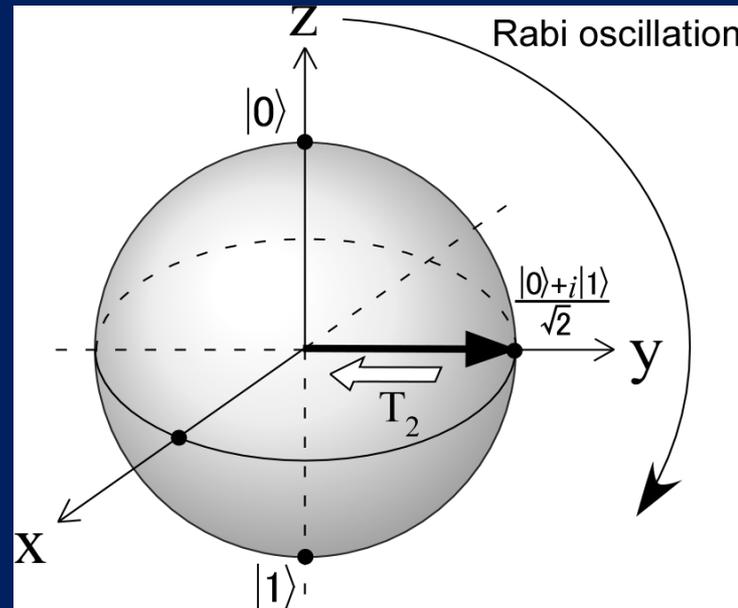
単一スピンの: 処理、記録

- 量子もつれの生成、処理、記録に有利（純粹初期状態の生成可能）
- 単一光子からの情報の転写と操作・処理

In classical information, a bit of 0 and 1.

In quantum information, superposition of 0 and 1.

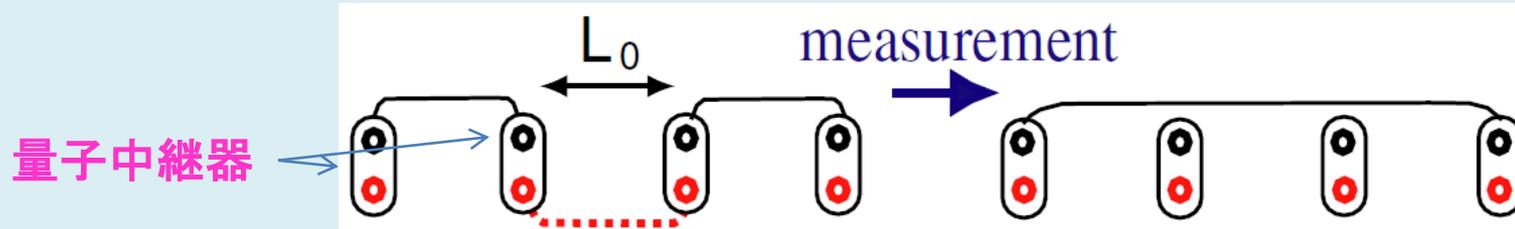
Bloch sphere (vector space of wavefunction of $|0\rangle$ and $|1\rangle$)



- Superposition of $|0\rangle$ and $|1\rangle$ is called **coherence**.
- Relaxation of coherence is characterized by T_2 (**Reduction time to $1/e$**).
- Oscillation during MW irradiation is called **Rabi oscillation**.

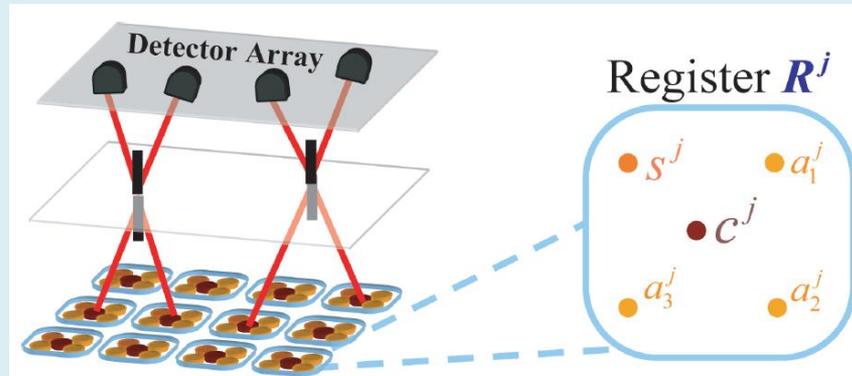
理論提案: 量子ネットワーク

量子暗号通信 (単一光子、量子中継器)



黒丸、赤丸が量子中継器中のスピン(量子ビット). 量子中継器を用いると長距離化と高速化が可能. (中継器無しでの最大距離は現状で200km)

分散処理型量子コンピュータ (多量子ビット量子コンピュータ)

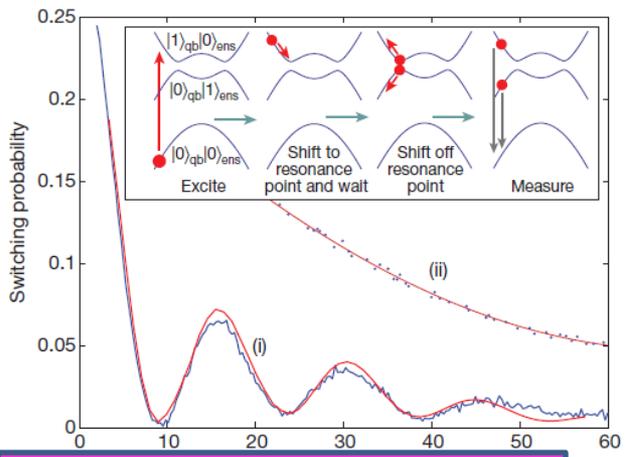


5量子ビットから成る量子レジスタのスピン(量子ビット)が光子による量子もつれ状態で繋がれた多量子ビット量子コンピュータ. Jiang et al., PRA 76, 062323 (2007)

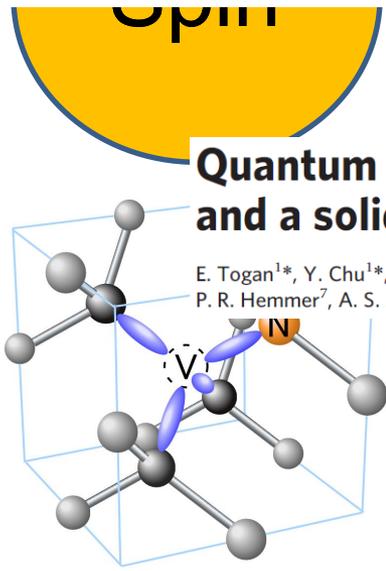
光アクセスビリティ、優れた操作性と長いコヒーレンス時間を持つ数量子ビット量子情報素子(レジスタ)が必要

Coherent coupling of a superconducting flux qubit to an electron spin ensemble in diamond

Xiaobo Zhu¹, Shiro Saito¹, Alexander Kemp¹, Kosuke Kakuyanagi¹, Shin-ichi Karimoto¹, Hayato Nakano¹, William J. Munro¹, Yasuhiro Tokura¹, Mark S. Everitt², Kae Nemoto², Makoto Kasu¹, Norikazu Mizuochi^{3,4} & Kouichi Semba¹



Nature 2011
(Collaboration with NTT and NII)



Quantum

Nature Materials 2009,
PRB 2009

Quantum entanglement between an optical photon and a solid-state spin qubit

E. Togan^{1*}, Y. Chu^{1*}, A. S. Trifonov¹, L. Jiang^{1,2,3}, J. Maze¹, L. Childress^{1,4}, M. V. G. Dutt^{1,5}, A. S. Sørensen⁶, P. R. Hemmer⁷, A. S. Zibrov¹ & M. D. Lukin¹

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\sigma_-\rangle|+1\rangle + |\sigma_+\rangle|-1\rangle)$$

Nature 2011, Harvard

Electrically driven single-photon source at room temperature in diamond

Nature Photonics 6, 299-303, 2012

N. Mizuochi^{1,2*}, T. Makino^{3,4}, H. Kato^{3,4}, D. Takeuchi^{3,4}, M. Ogura^{3,4}, H. Okushi^{3,4}, M. Nothafft⁵, P. Neumann⁵, A. Gali^{6,7}, F. Jelezko⁸, J. Wrachtrup⁵ and S. Yamasaki^{3,4}

Quantum interface among single spin, photon, and charges
In NV center, field of electrical control is frontier.

2. これまで

^{12}C , ^{13}C を制御した高品質ダイヤモンドによる研究

核スピンは外界との相互作用が小さくよい量子ビットとなり得る.

1990年代後半にNMRにおいて隆盛を極める.

○ Long coherence time at RT.

× It is not easy to access.

In our research



Optical detection and manipulation of single nuclear spins
through Single NV center in diamond

^{13}C ($I=1/2$) conc. Natural abundance = 1.1 %

Multi-qubits system by ^{13}C enriched high quality diamond
Effects on coherence time by nuclear spin

コヒーレンス時間 (T_2) in natural abundance diamond at RT

- $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の重ね合わせをコヒーレンス.
- コヒーレンスを保つ時間をコヒーレンス時間: T_2 ($1/e$ になる時間).

T_2 (electron spin)

2003	50 μs	T. A. Kennedy, et al., <i>APL</i> , 2003
2006	200 μs	L. Childress, et al., <i>Science</i> , 2006
	350 μs	T. Gaebel, et al., <i>Nature physics</i> , 2006
2009	700 μs	N. Mizuochi, et al., <i>PRB</i> , 2009

T_2 は不純物や欠陥の持つ電子スピンにより長さが決まり、合成技術の進歩により長くなっていた。

Observation of unreported NV center

NN $^{13}\text{C} \Rightarrow 0$

NN $^{13}\text{C} \Rightarrow 1$

Obs. 16%

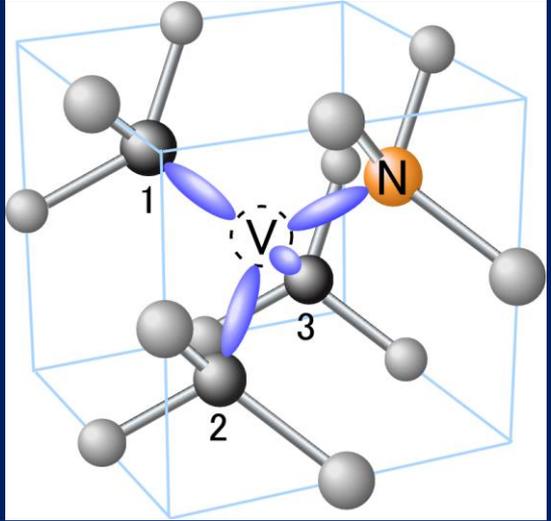
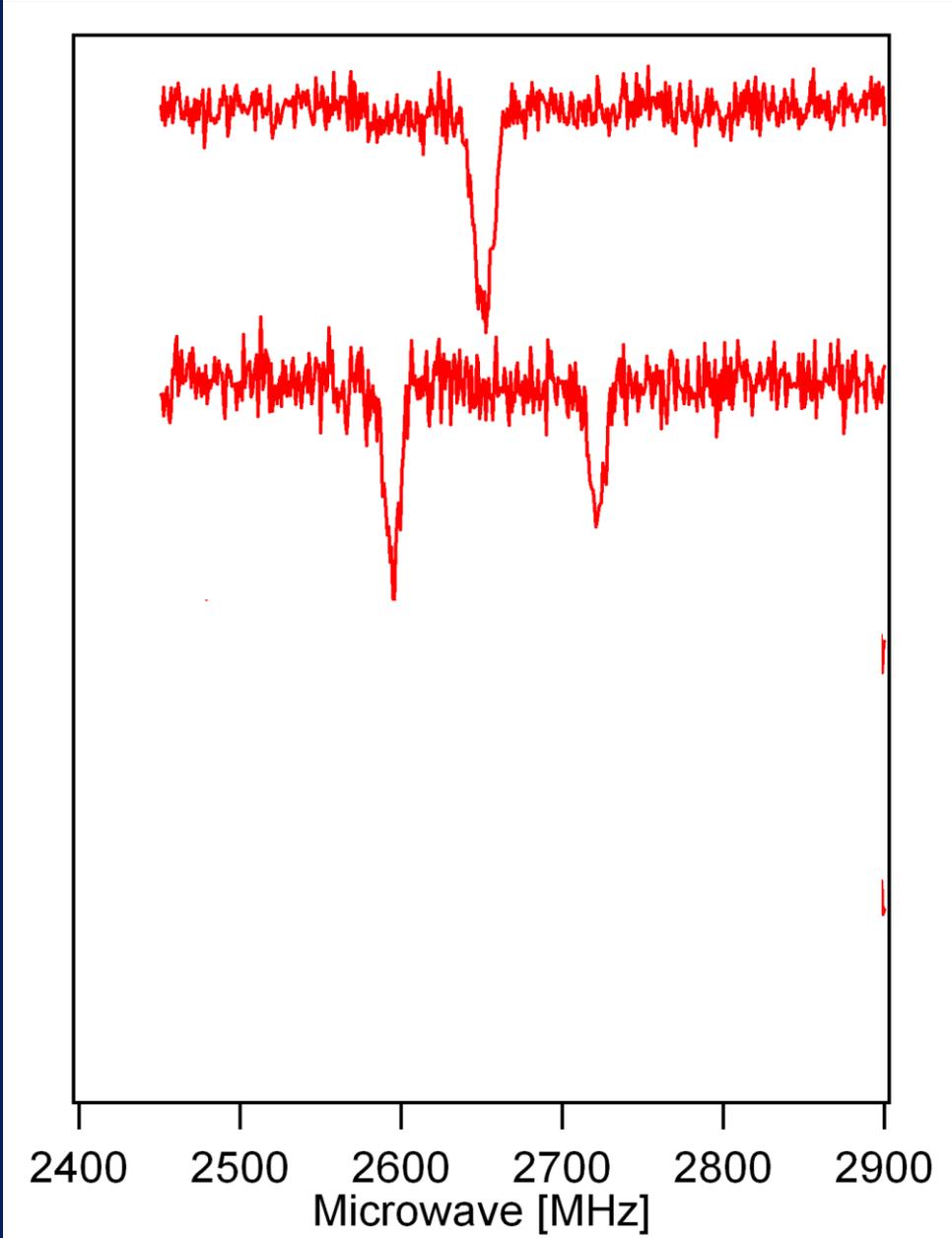
Calc. 17%

Obs. 1.3%

Calc. 1.0%

Obs. < 0.4%

Calc. 0.07%



Labeled 1, 2, 3 carbon are nearest neighbor (NN) C .

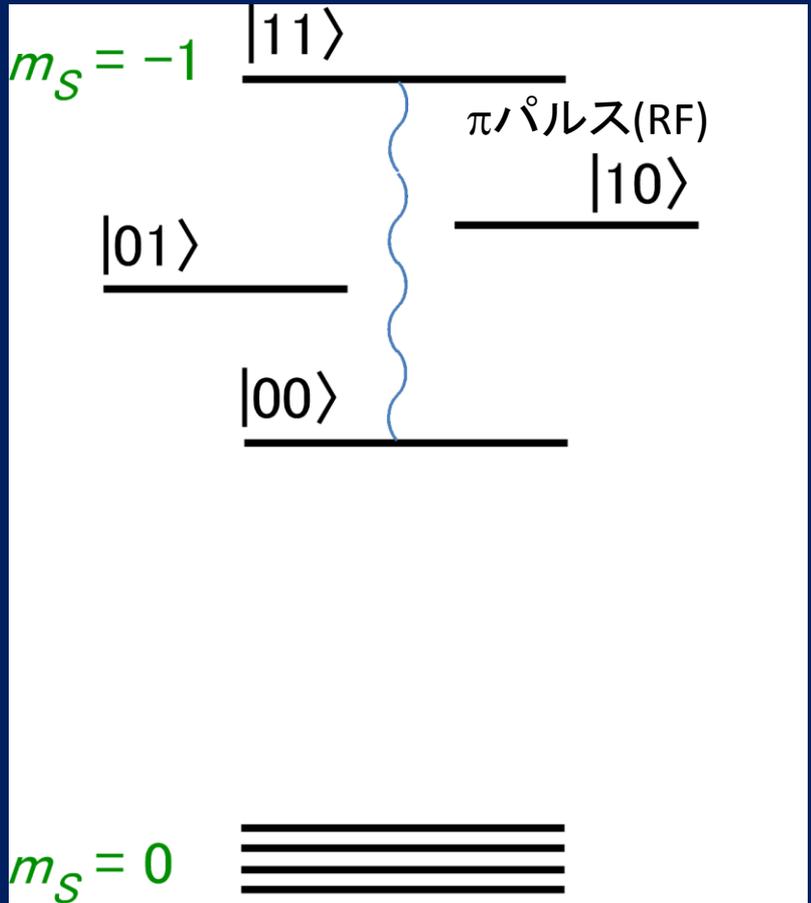
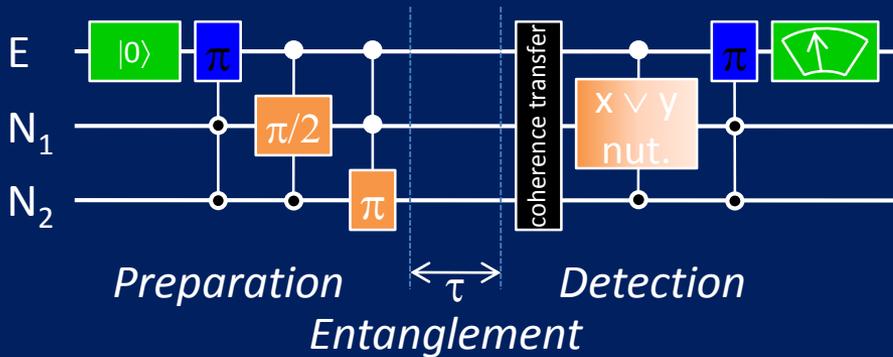
From magnitude of splitting and probability to find, they are suggested to be NN $^{13}\text{C} \Rightarrow 2, 3$.

ベル状態の生成

ベル状態

$$\Phi^\pm = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)(|00\rangle \pm |11\rangle)$$

$$\Psi^\pm = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)(|01\rangle \pm |10\rangle)$$



^{13}C による多量子ビット化により

固体材料で初めてGHZ,W状態の生成、及び室温でのベル状態の生成.

P. Neumann*, N. Mizuochi*, et al., *Science*, 320, 1326 (2008)

^{13}C を用いた多量子ビット化とその制御に成功(3つの単一 ^{13}C 核スピン、これまでは1つだけ)

N. Mizuochi, et al., *Phys. Rev. B*, 80, 041201(R) (2009). *Editors' suggestion*

同位体制御によるコヒーレンス時間の長時間化
: 固体中のスピンの室温での最長時間

G. Balasubramanian, et al., *Nature materials*, 8, 383 (2009)

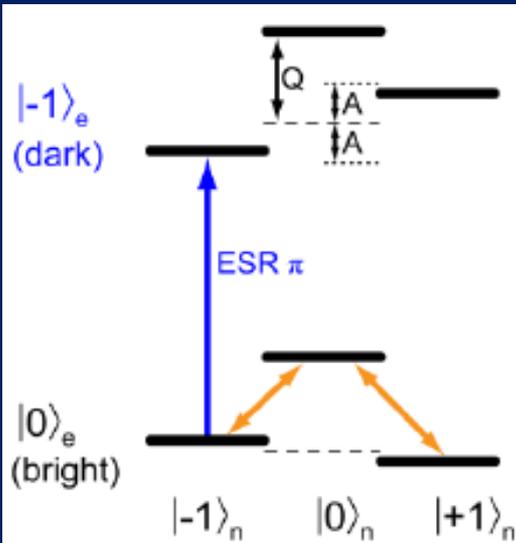
依頼解説記事

- ・水落憲和、日本物理学会誌12月号, p. 910 (2009)
- ・水落憲和、固体物理誌1月号, p. 27 (2010)

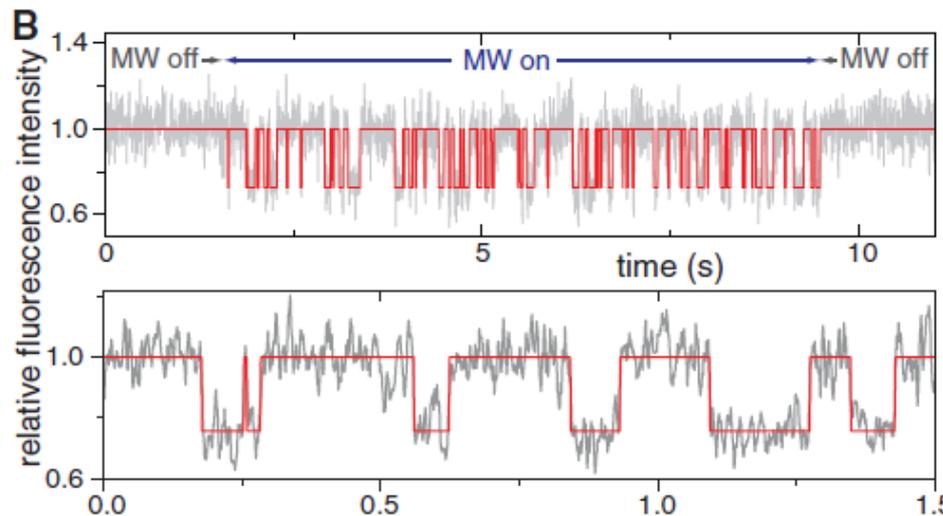
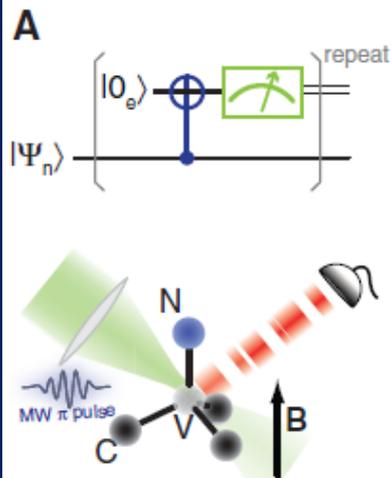
Previous and Recent topics in NV center

Quantum non-demolition measurement, Projective measurement of a single nuclear spin at RT

P. Neumann et al., Science 2010



選択的に一つの核スピン状態 (例えば $|M_I\rangle = |-1_n\rangle$) のみを電子スピンの $|M_S\rangle = |0_e\rangle$ から $|-1_e\rangle$ に遷移させると (=CNOTに対応、FigのA)、基底状態の核スピン状態が $|-1_n\rangle$ かそれ以外かが発光測定によりわかる！測定結果がB. MWがonのとき (=CNOTがかけられているとき) テレグラフ上の信号が得られる！



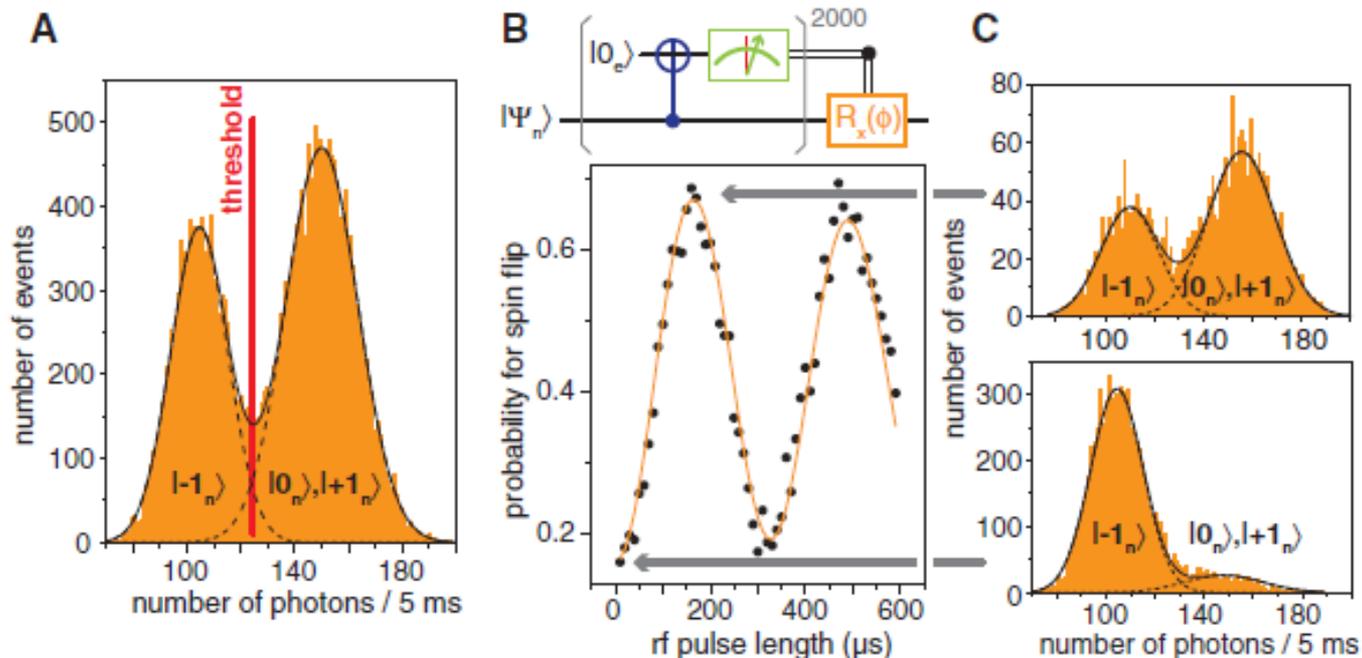


Fig. 2. Readout fidelity and conditional gates using single-shot readout. **(A)** Photon-counting histogram of a fluorescence time trace fitted by two Gaussian distributions (solid lines). Left and right peaks correspond to the dark ($|-1_n\rangle$) and bright ($|0_n\rangle, |1_n\rangle$) states, respectively. By setting a threshold (red line), the nuclear spin state $|-1_n\rangle$ (fluorescence below threshold) can be distinguished from the other nuclear spin states (fluorescence above threshold). For the given lifetimes at 0.65 T and fluorescence levels, the fidelity to detect a given state correctly is $92 \pm 2\%$. **(B)** Conditional nuclear spin Rabi oscillations and histograms. The wire diagram on top illustrates the conditional Rabi sequence. Only if the measurement outcome is $|-1_n\rangle$, a resonant radio-frequency (rf) pulse of certain length is applied on the nuclear spin transition $|-1_n\rangle \leftrightarrow |0_n\rangle$ and a subsequent measurement is performed. Otherwise the sequence is restarted immediately. **(C)** Conditional histograms. Two consecutive QND measurements have a high probability ($\approx 82\%$) of giving the same outcome (lower histogram). If a rf π pulse is applied after detecting $|-1_n\rangle$, this probability drops to $\approx 33\%$ (upper histogram). Possible reasons for the Rabi contrast of < 1 are, for instance, the setup instability and imperfect initialization and readout of the electron spin.

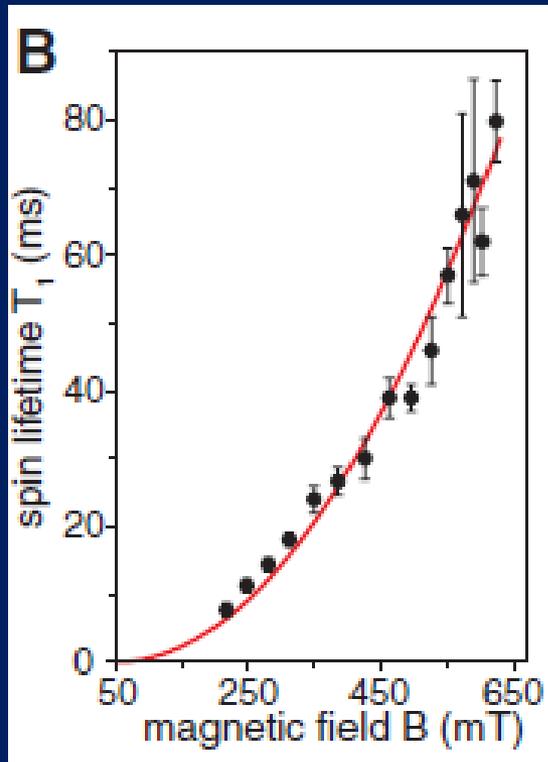
$|-1_n\rangle$ かそれ以外かを見分ける
Fidelity = 92%

$|-1_n\rangle$ を測定した後に
 $|-1_n\rangle$ である
Fidelity = 82.5%

$|-1_n\rangle$ を測定した後に
 $|0_n\rangle$ である
Fidelity = 33%

The jumps occurs nuclear-electron flip-flop process.

$$\text{hyperfine Hamiltonian } H_A = (\hat{S}_+ \hat{I}_- + \hat{S}_- \hat{I}_+) A_{\perp} / 2 + \hat{S}_z \hat{I}_z A_{\parallel}$$



QNDができるかどうかの重要な点は、このジャンプが測定時間よりも長くない点！

電子スピンの T_1 は数ms以上長い！

CNOTは十分短くできることにより可能となった！

磁場をかけることにより長くなる！
左図！

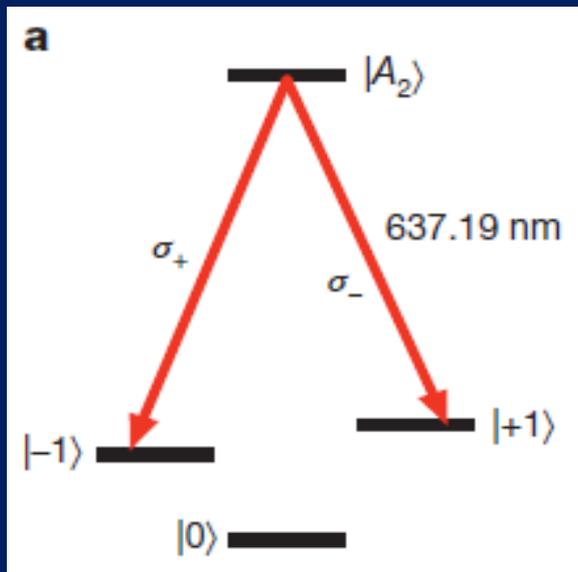
Previous and Recent topics in NV center

Entanglement between spin and photon (Low temp.)

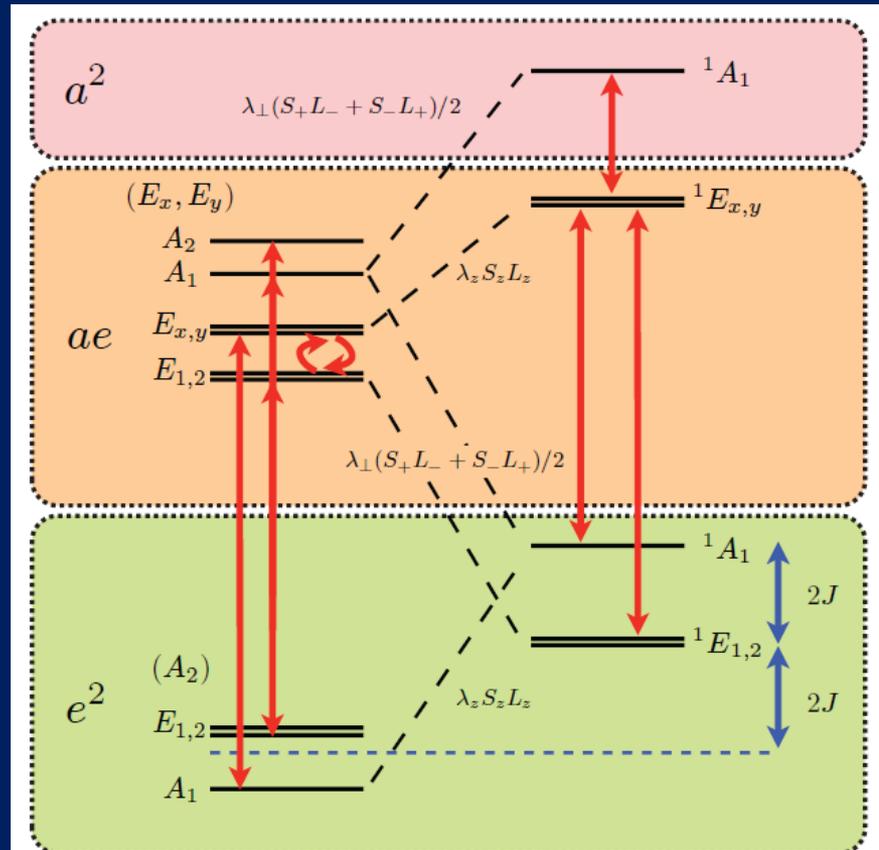
Quantum entanglement between an optical photon and a solid-state spin qubit

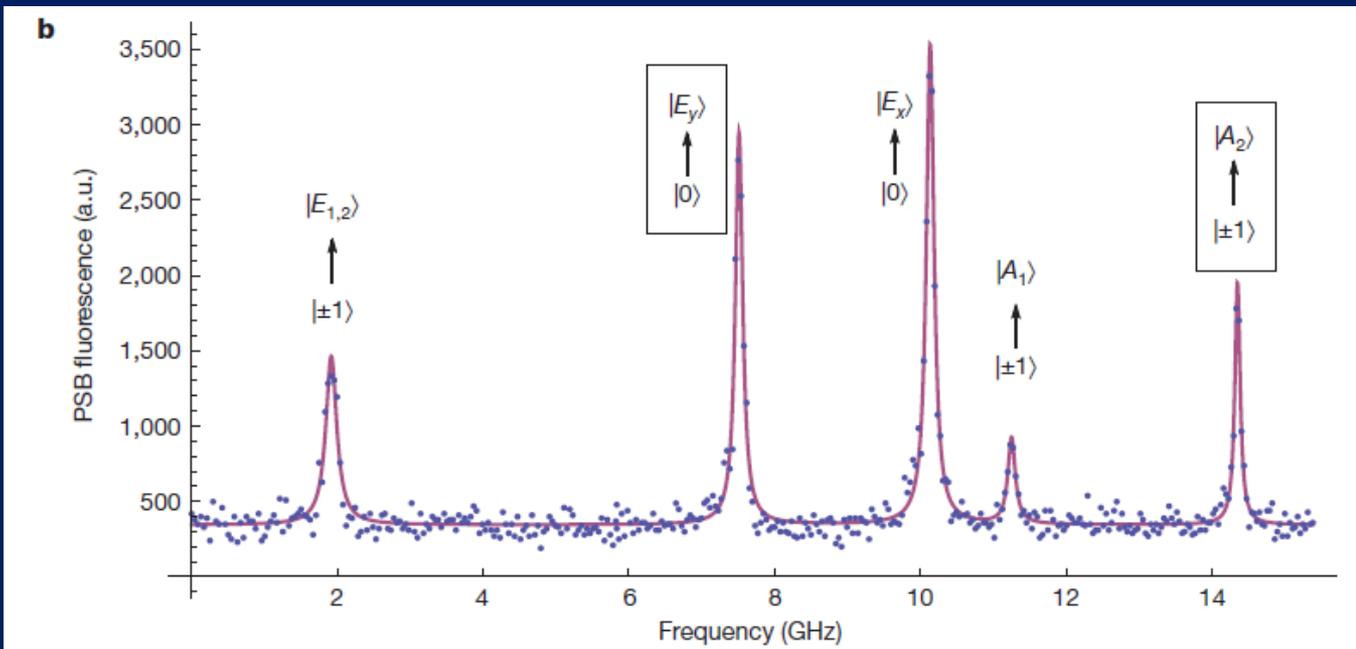
E. Togan^{1*}, Y. Chu^{1*}, A. S. Trifonov¹, L. Jiang^{1,2,3}, J. Maze¹, L. Childress^{1,4}, M. V. G. Dutt^{1,5}, A. S. Sørensen⁶, P. R. Hemmer⁷, A. S. Zibrov¹ & M. D. Lukin¹

Nature 2010



$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\sigma_-\rangle|+1\rangle + |\sigma_+\rangle|-1\rangle)$$





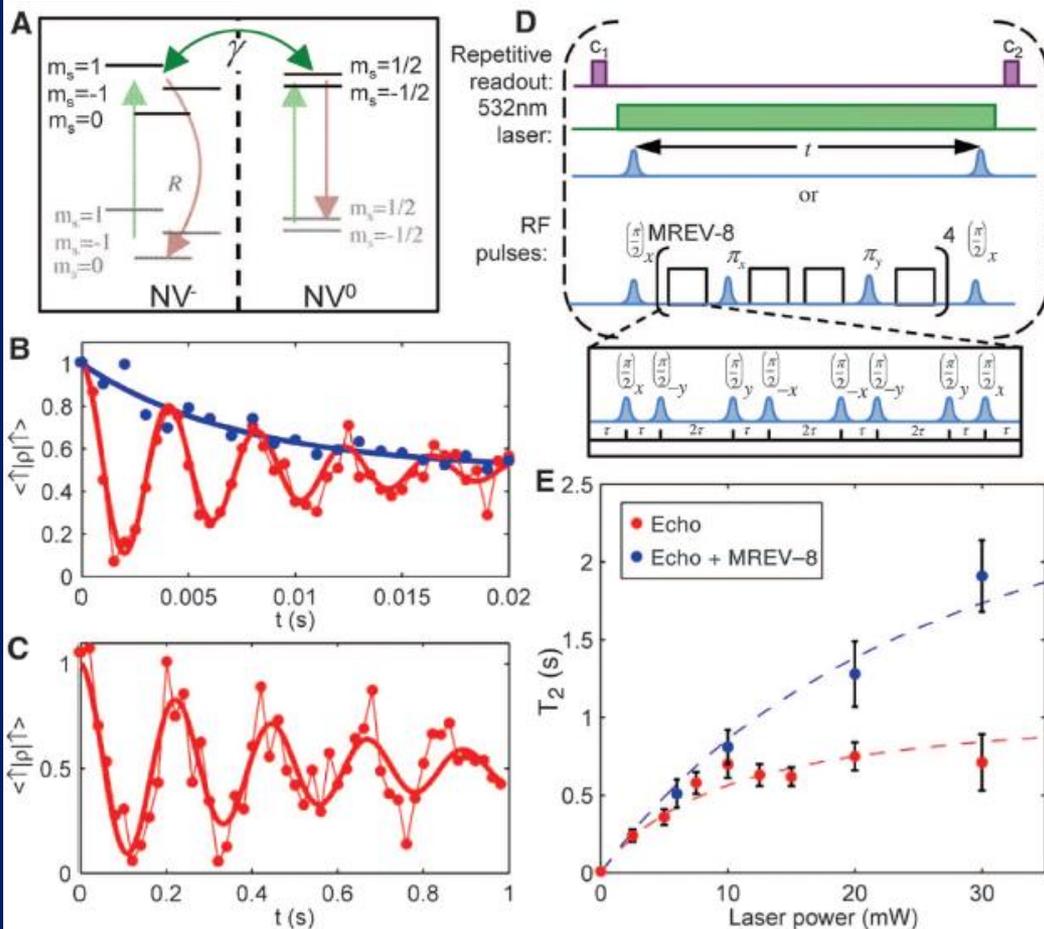
Previous and Recent topics in NV center (7)

Long coherence time (>1 s) of single nuclear spin at RT

Room-Temperature Quantum Bit Memory Exceeding One Second

Nature 2012

P. C. Maurer,^{1*} G. Kucsko,^{1*} C. Latta,¹ L. Jiang,² N. Y. Yao,¹ S. D. Bennett,¹ F. Pastawski,³ D. Hunger,³ N. Chisholm,⁴ M. Markham,⁵ D. J. Twitchen,⁵ J. I. Cirac,³ M. D. Lukin^{1†}



Ionization and deionization



When $\gamma \gg$ Hyperfine int.

Interaction between electron and nuclear spins is strongly suppressed.

電氣的的に光子の粒を発生させる！

“Electrically driven single photon source at room temperature in diamond”

Nature Photonics, 2012

Collaboration with AIST and Stuttgart Univ.

電流注入単一光子発生素子への期待

- 初の電流注入で室温動作する単一光子発生
- 単一キャリアと単一光子のインターフェイス
- 発光とスピン状態の光による操作(初期化)の独立かつ並行操作
- 発光機構の違いにより局所的な操作への期待

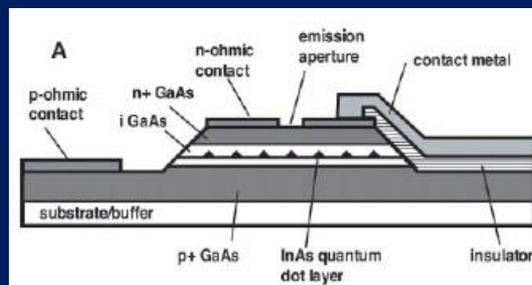
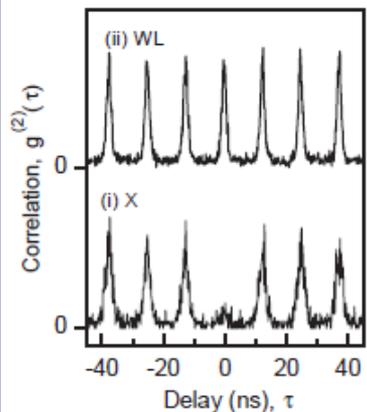
電流注入に関する背景

Electrically Driven Single photon Source
by quantum dot at 5K

4 JANUARY 2002 VOL 295 SCIENCE

Electrically Driven Single-Photon Source

Zhiliang Yuan,¹ Beata E. Kardynal,¹ R. Mark Stevenson,¹
Andrew J. Shields,^{1*} Charlene J. Lobo,² Ken Cooper,²
Neil S. Beattie,^{1,2} David A. Ritchie,² Michael Pepper^{1,2}



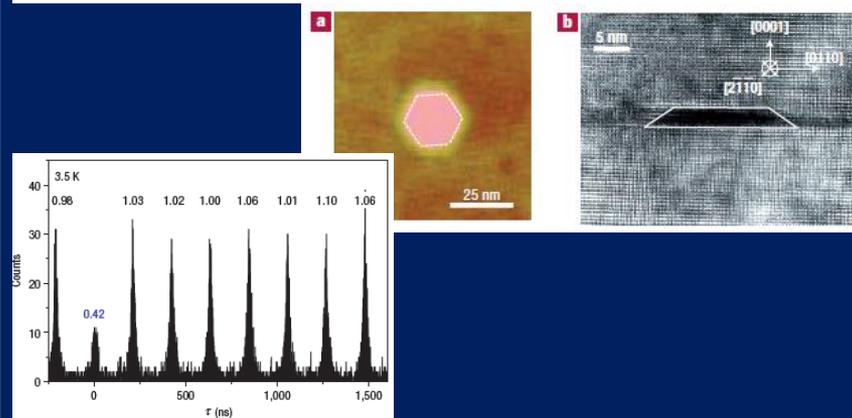
At 5 K

Highest temperature in quantum
dot at 200K, PL (not EL)

Nature Materials, 5, 887 2006

A gallium nitride single-photon source
operating at 200 K

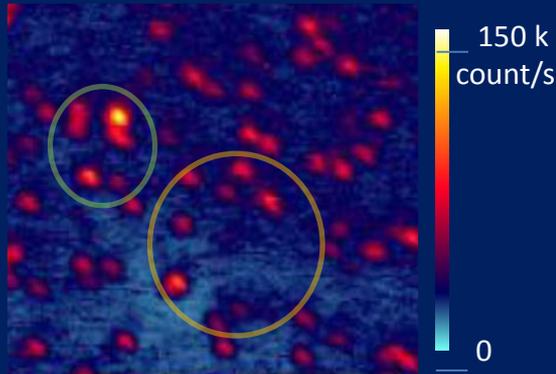
SATOSHI KAKO^{1*}, CHARLES SANTORI^{1,2†}, KATSUYUKI HOSHINO^{1‡}, STEPHAN GÖTZINGER^{2§},
YOSHIHISA YAMAMOTO² AND YASUHIKO ARAKAWA^{1*}



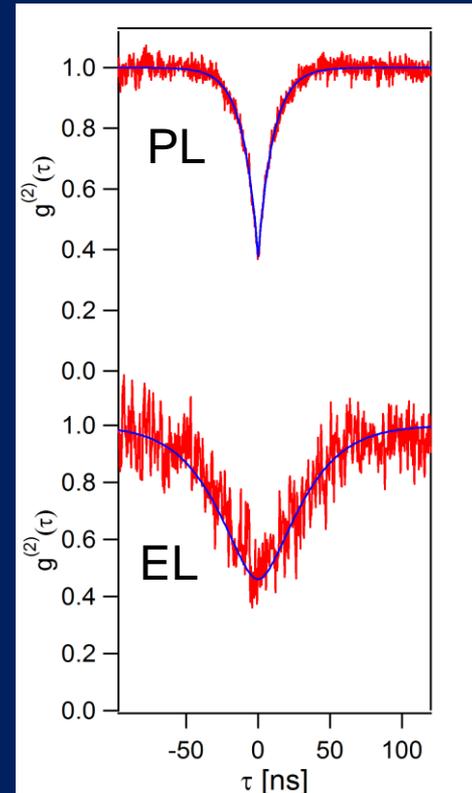
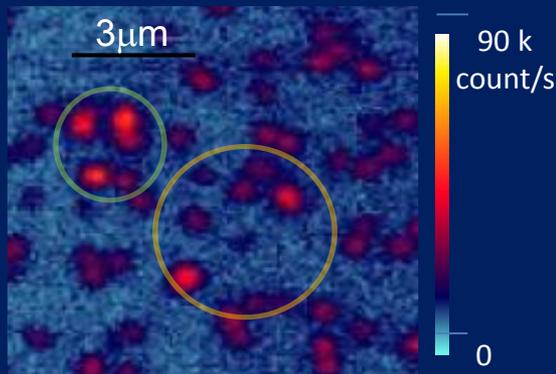
我々の知る限り、これまで室温において電流注入による単一光子発生の実証はなされていない。

測定結果

PL image



EL image



$$g^{(2)}(0) < 0.5$$

PL像と同じ位置に蛍光像！

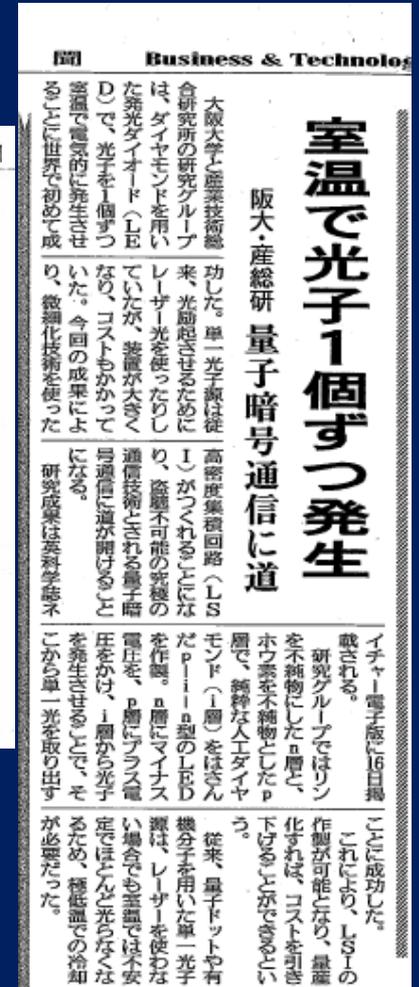
・電流注入による単一NV中心からの発光に成功！
室温において電流注入による単一光子発生の実証は初！

・Nature Photonics誌に論文掲載

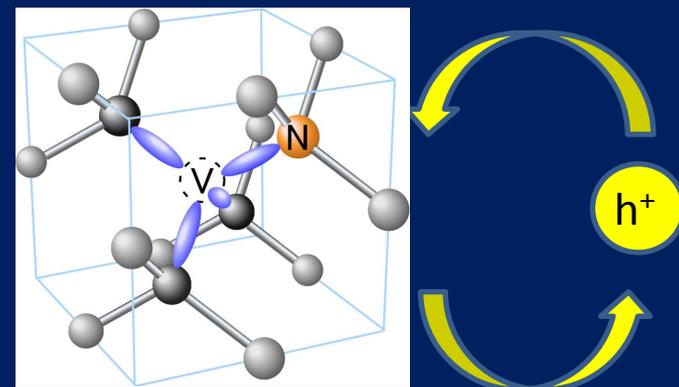
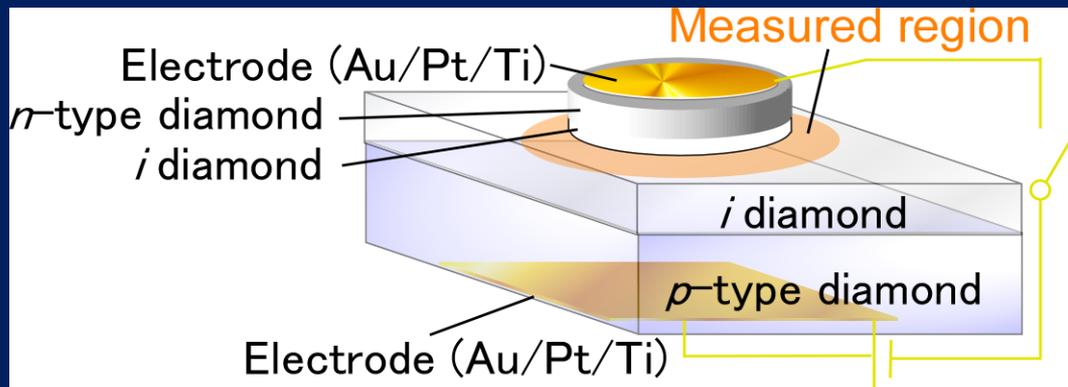
・朝日新聞（その他、日刊工業、日経産業新聞）



- ・Nature誌 (v. 484, p. 291, 2012) の “Research Highlights” に掲載
- ・Physics World (Institute of Physics) に記事が掲載
- ・科学技術振興機構 (JST) の Contents News に記事が掲載
- ・マイナビニュース、Laser focus world、Yahooニュース、に記事が掲載

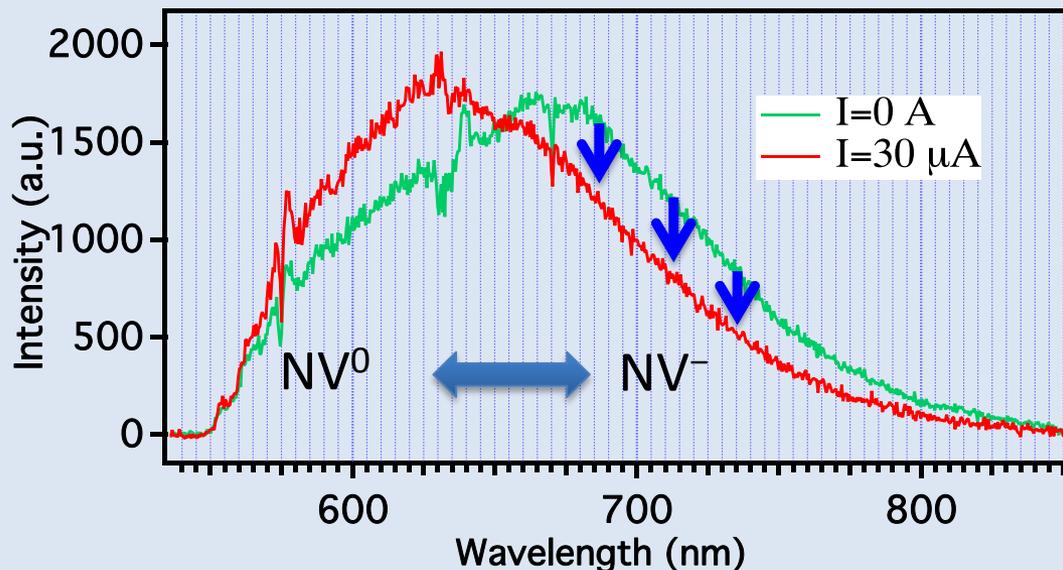


Charge state manipulation of single NV center



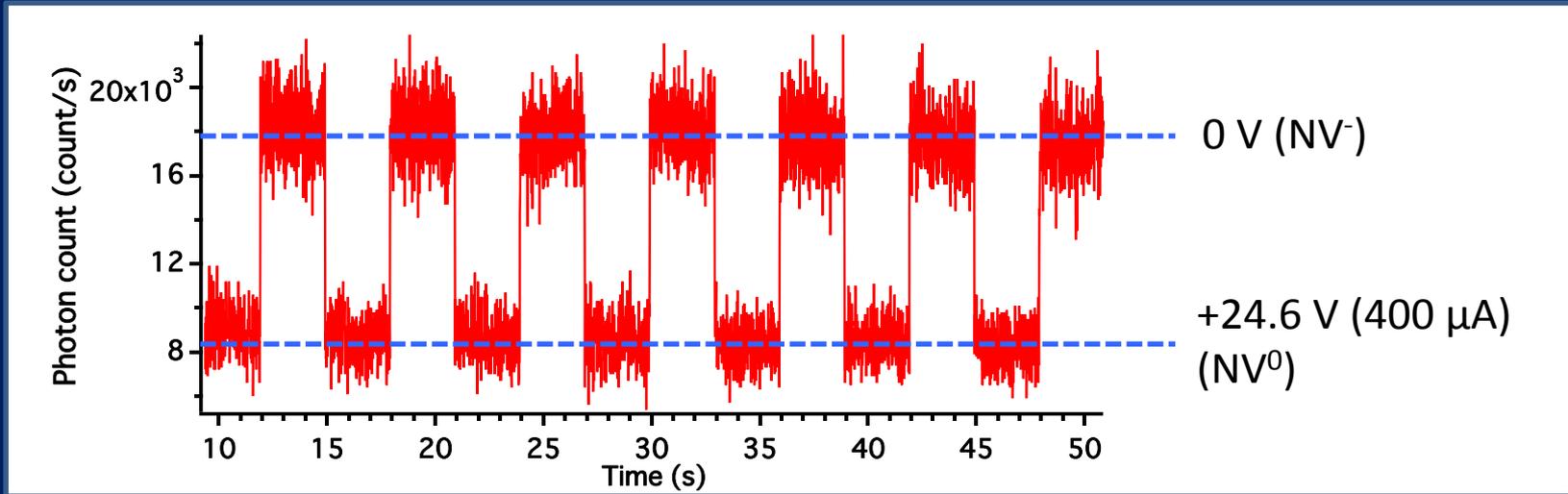
Observation of catch and release of single carrier (hole).

PL from single NV center



Charge state of single NV center can be detected via change of PL intensity

Real time meas. of charge state of single NV at RT



Optical detection of electrical switching of charge state between single NV⁻ and NV⁰

まとめ

- ・ 単一NV中心, 量子情報
学術的観点、基礎的な技術、波及効果

これまでの我々の研究

- ・ ^{12}C , ^{13}C を制御した高品質ダイヤモンドによる研究
Science 2008, Nature Materials 2009, PRB 2009

最近の結果

- ・ 電流注入による単一NV中心からの発光に成功！
(室温において電流注入による単一光子発生は初！)
Nature Photonics 2012