

ダイヤモンドNV量子センサー

2024.2.24 K.Kume

基礎科学と応用科学

19世紀後半

マクスウエル方程式 ⇒ 電磁波の予言
ヘルツ ⇒ 電磁波の検出
(ヘルツ「マクスウエル氏の正しさが証明
された**だけだ**」)

20世紀

電波は津々浦々で利用される時代に

20世紀前半 量子力学の完成

20世紀後半 エレクトロニクス、情報通信、AI

20世紀後半 ベル不等式の破れ
(量子世界で局所性が破れる)

21世紀前半 エンタングルメント
量子テレポーテーション
量子計算、量子暗号、..

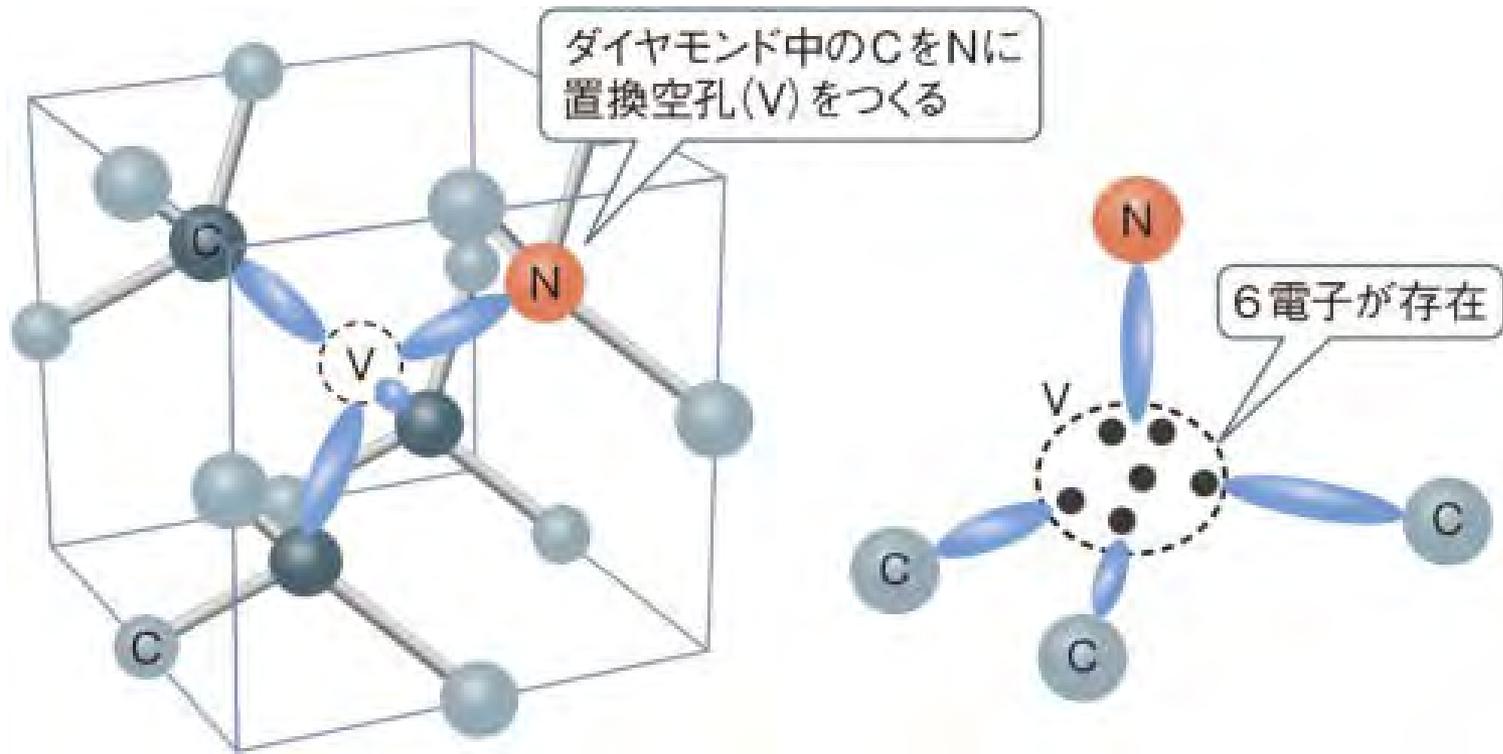
2022年ノーベル物理学賞：
アスペ、クラウザー、ツァイリッガー
遅い！ ベル氏はすでにいない。

21世紀後半は量子力学の精妙な部分が応用される
時代になるかもしれない。

ダイヤモンドNV量子センサーは
ダイヤモンド結晶の中に炭素原子が窒素原子とそれ
に隣接する空孔(Vacancy)で構成される。

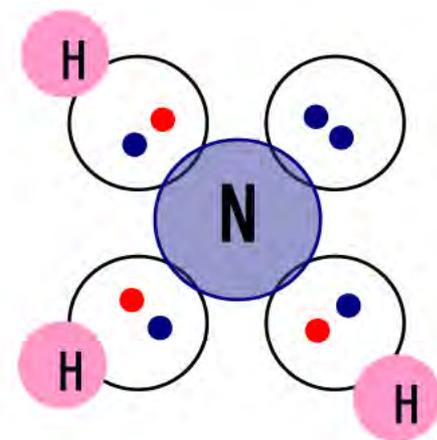
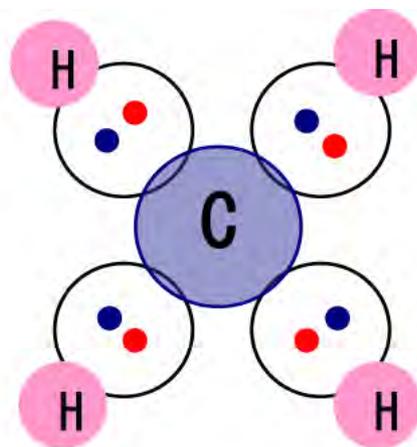
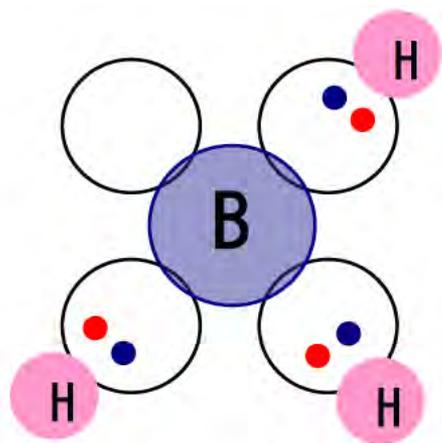
このNVが磁場や温度のセンサーの役割を果たす。

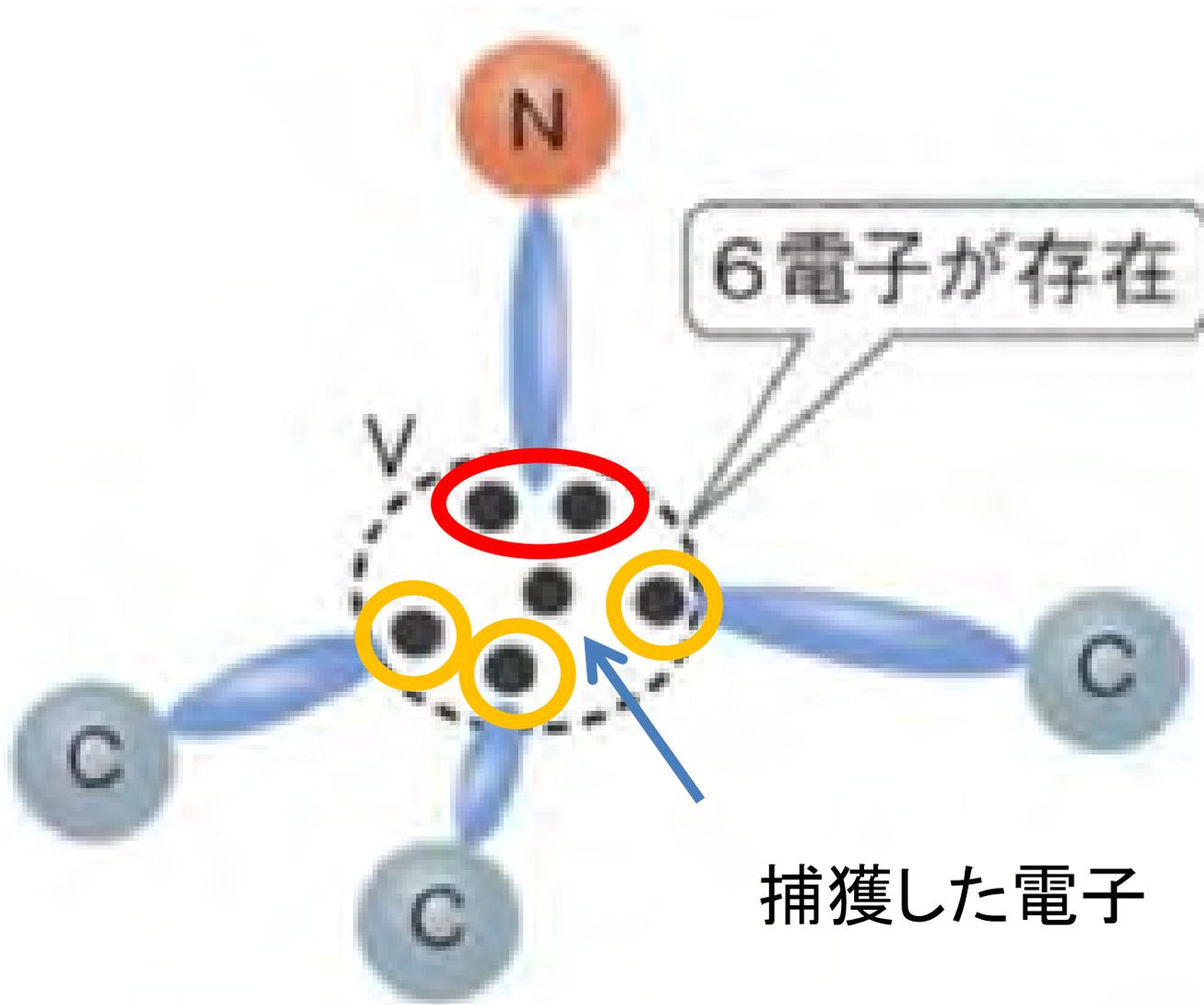
NVセンサーには2電子が $S=1$ となった状態が安定的
に存在し、これがセンサーの役割を果たす。



ダイヤモンド内の炭素原子を窒素に置換することで、腕(原子価)を1本減らし、空孔(V)をつくり複合欠陥を持つ。負に帯電したダイヤモンドNVセンターでは、隣接する3つのCから供給された3電子、Nから供給された電子対、捕獲した電子の6電子が存在する

炭素は腕が4本、窒素は腕が3本





6個の電子 $[\uparrow\downarrow][\uparrow\downarrow][\uparrow][\uparrow]$ **$S=1$**

ダイヤモンド中の窒素(腕3本)は、炭素と結合しない方向に孤立電子対があって、炭素が入れず空孔。

このようにしてNVセンターと呼ばれる点欠陥が生じる。

NVセンターは電子を捕獲して負に帯電しやすい。

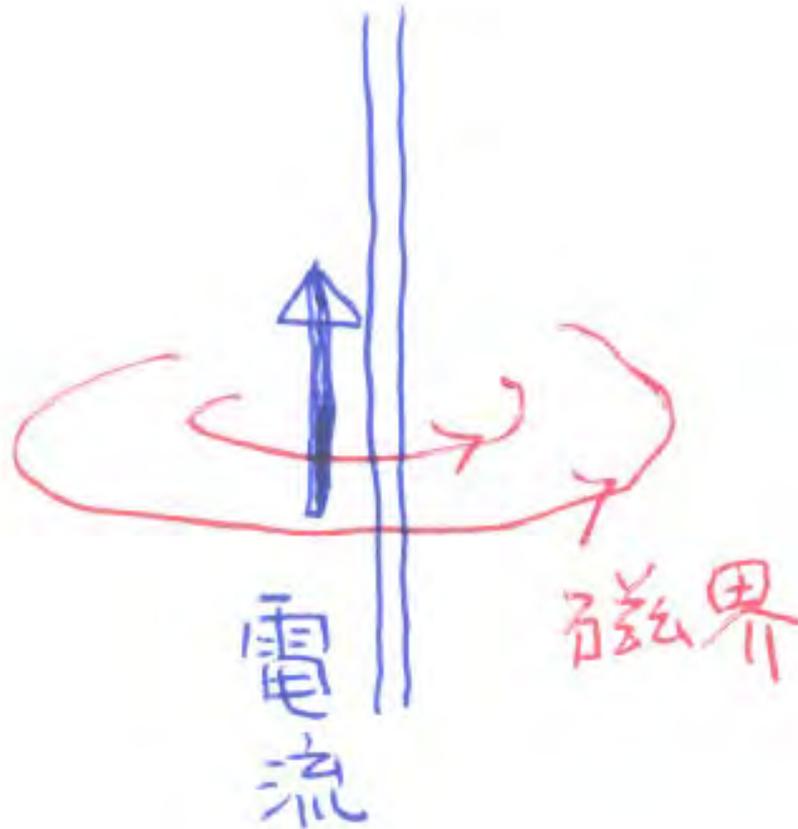
NVセンターの6個の電子は

[↑↓][↑↓][↑][↑]

とNV中心内の軌道に入り、2電子のスピンのS=1となる。

通常、量子状態は壊れやすい。ダイヤモンドは結合が強く硬いためバンドギャップが大きく、数百°C以上でもこの電子を放出しない → 常温作動センサー

基本戻って： 電子は小さな磁石

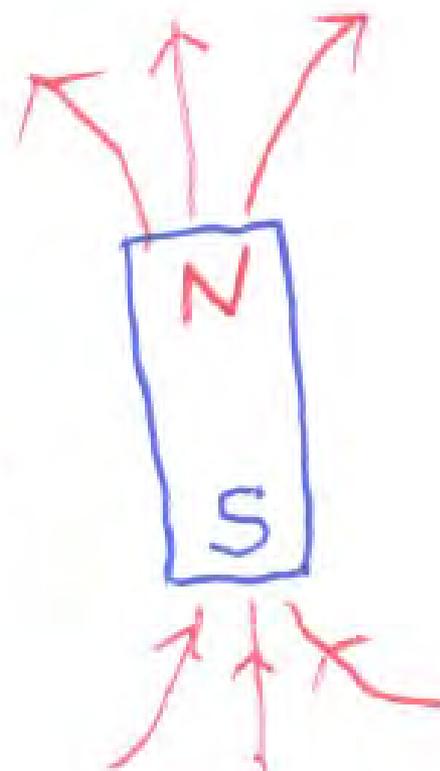


エールステッド

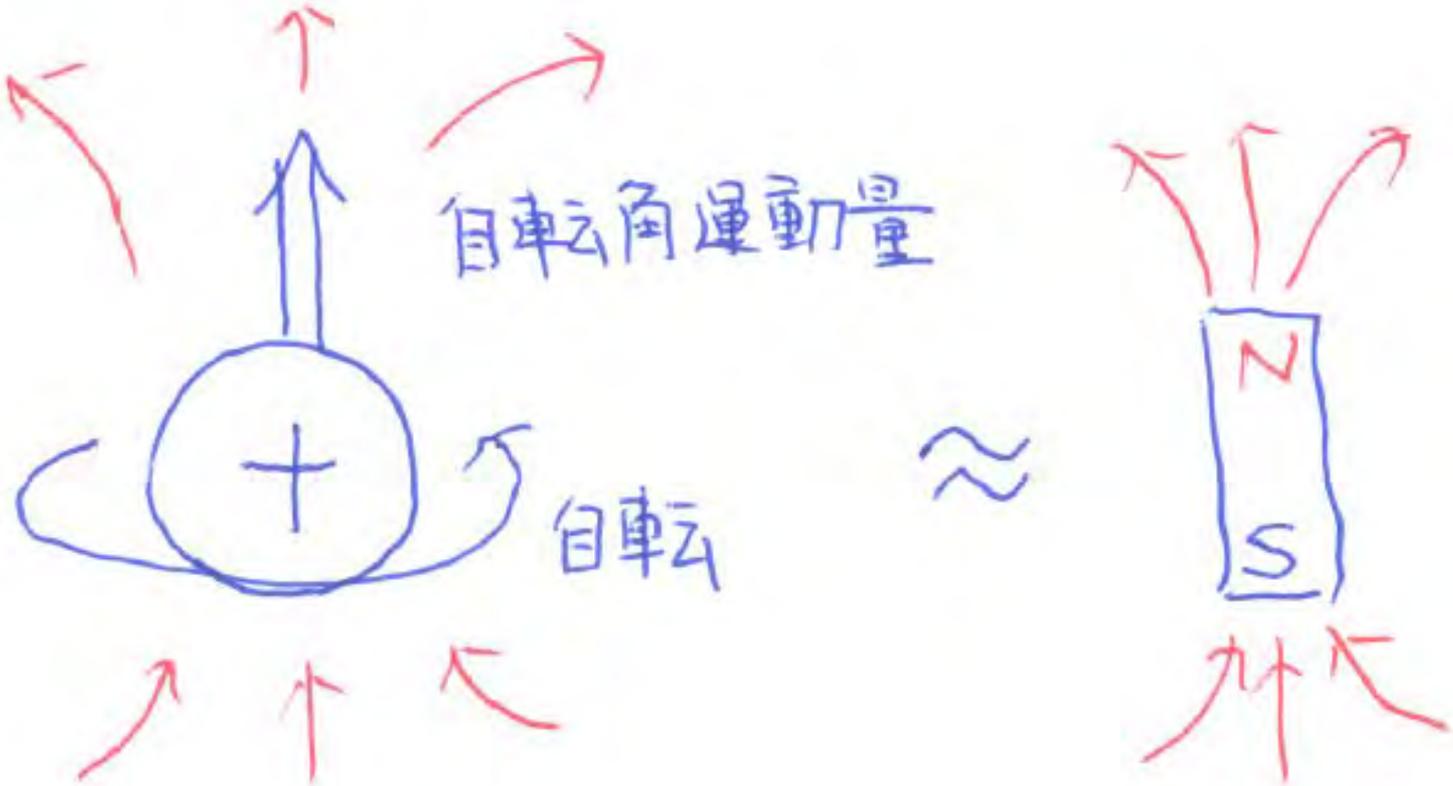
円電流 ~ 磁石



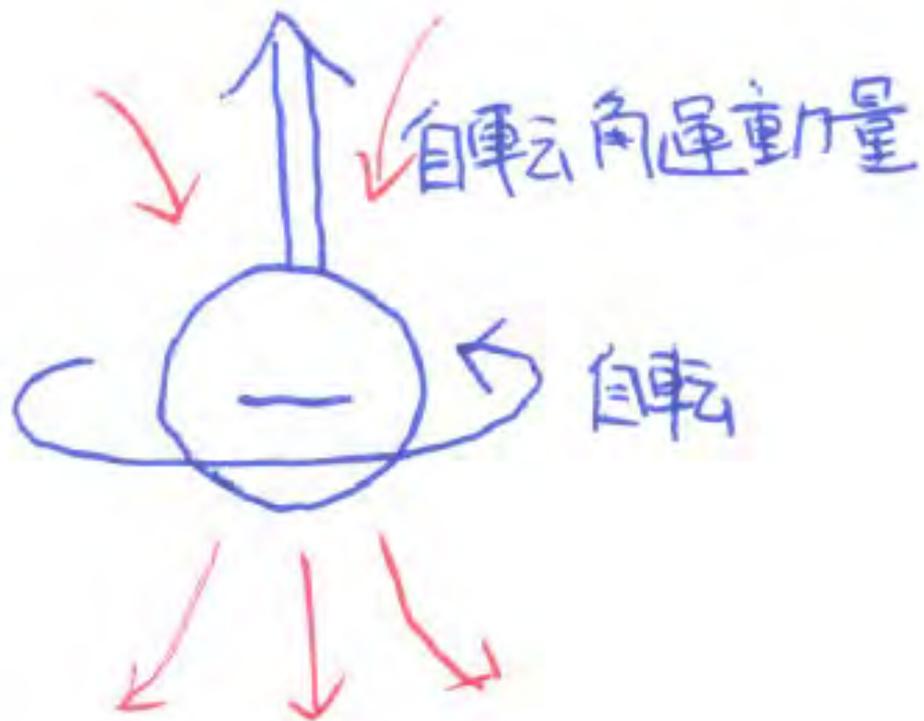
≈

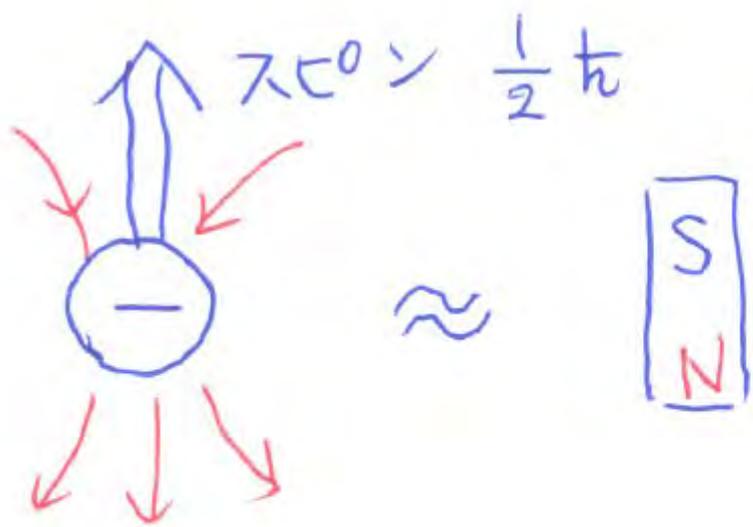


回転する荷電粒子は磁石になる

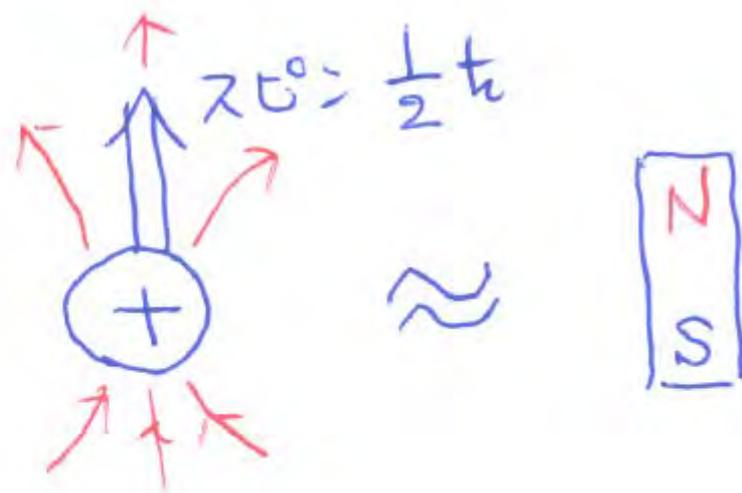


負に帯電すると磁石の方向が逆



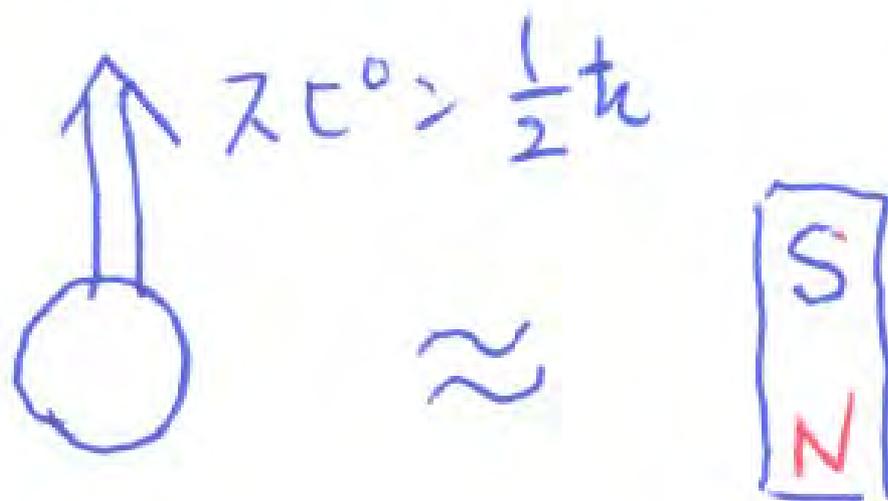


電子



陽子

中性子は中性だが、磁石になっている



$$n \Leftrightarrow 'p + \pi^{-}'$$

中心(胴体)に+
周辺(着物)に-

中性子

$n = udd$ クォークでもある

電子の磁気能率(磁石の強さ)

g因子の理論値(理研)

$$g/2 = 1.001\ 159\ 652\ 181\ 78 \pm 0.000\ 000\ 000\ 000\ 77$$

米国ハーバード大学での実験値

$$g/2 = 1.001\ 159\ 652\ 180\ 73 \pm 0.000\ 000\ 000\ 000\ 28$$

人類の持っている理論の最精密値！
量子電磁気学 恐るべし精度
高次補正計算(繰りこみ理論)

重い電子(μ 粒子)の磁気能率

理論値と実験値がずれている兆候アリ
理論／実験とも進行中

電子のスピンは $1/2$ ($\hbar/2$)

スピンは自転角運動量のようなもの

なぜ「ようなもの」と歯切れが悪いか

電子は大きさが無い（点状）

古典物理の自転と考えることはできない。

電子に適当な大きさを考えたとしても、 $1/2$ の角運動量は大きすぎて導けない

（光速以上の回転速度が必要！）

Dirac方程式に組み込まれたという意味ではスピンは相対論的な対象物

半整数のスピン状態 = 360度回転で元に戻らない

余計なこと

電子のスピンは $1/2$ (\hbar を単位として)

アップ $|\uparrow\rangle$ と ダウン $|\downarrow\rangle$

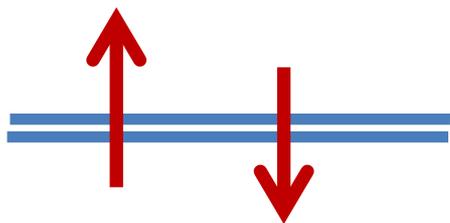
斜めのスピンは存在するか？

$|\nearrow\rangle$

もちろん、ヨコ向き、ナナメ下向きなど
存在する。

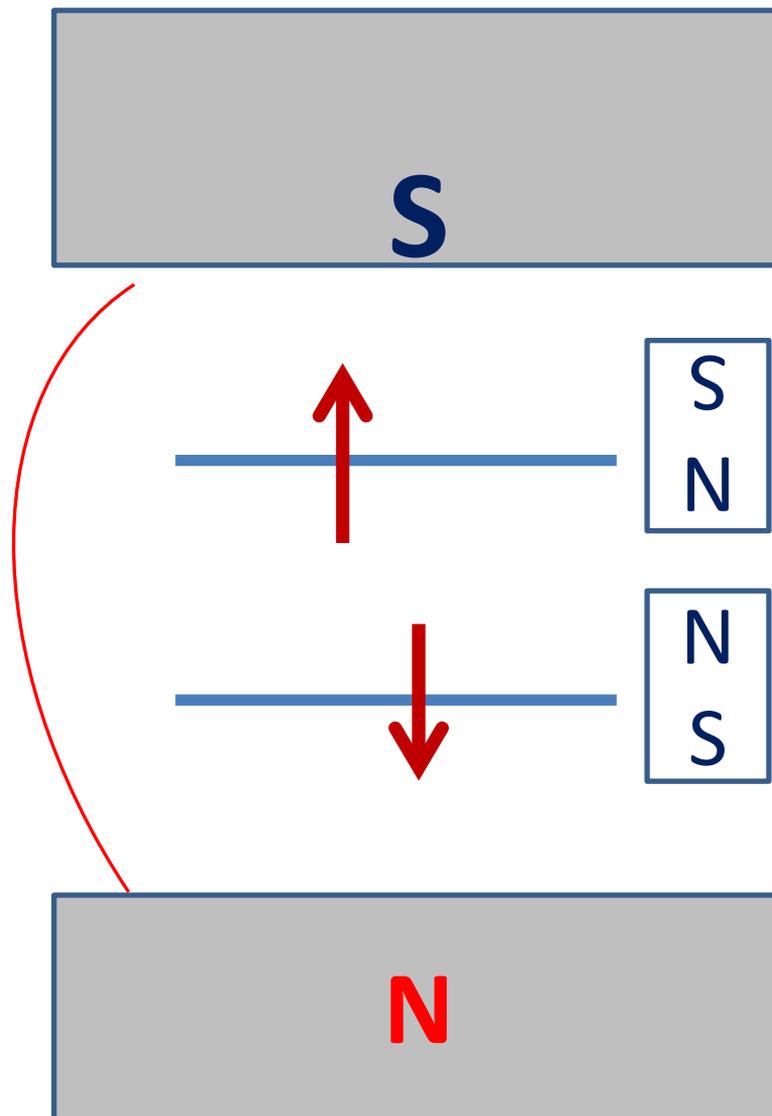
しかし、これらはすべて、アップとダウンで表
せる

$$|\nearrow\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$$



磁界中の磁気モーメント
を置くとエネルギー的に
分裂する

ゼーマン分裂

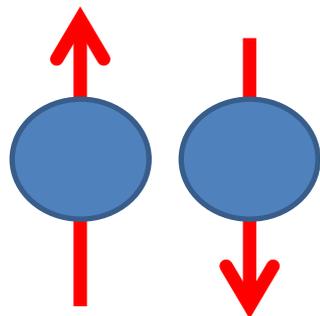


歴史的には
軌道角運動量のみを考えたときの分裂を
正常ゼーマン効果

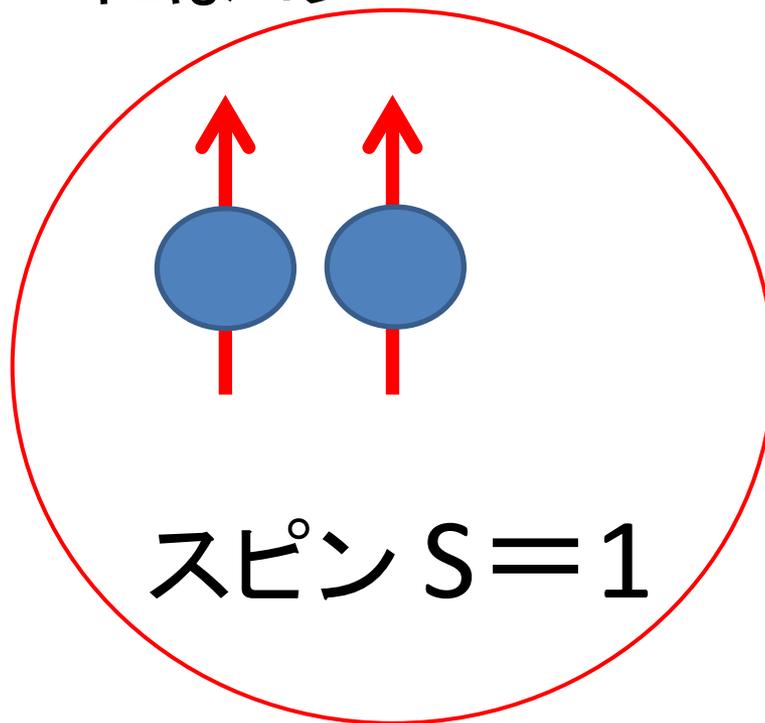
スピン角運動量と軌道角運動量の両方を
考慮した場合の分裂を異常ゼーマン効果

2個の電子

ダイヤモンドのNVセンターにはコレ

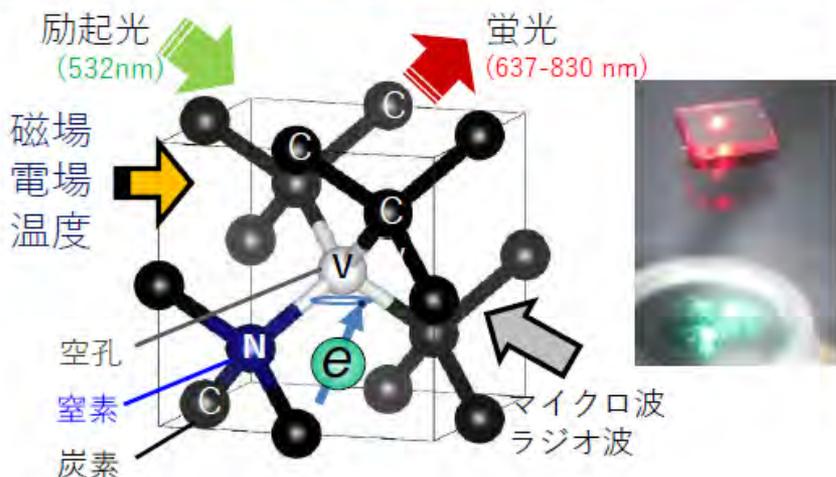


スピン $S=0$



スピン $S=1$

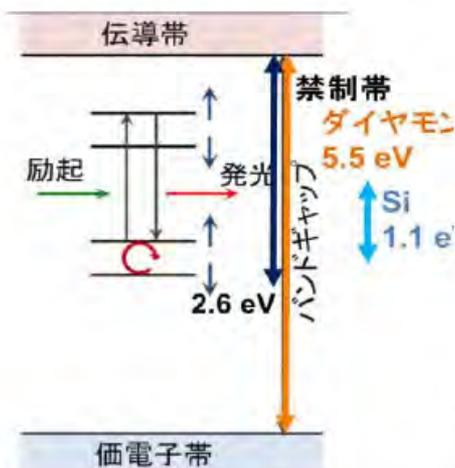
NVセンタ構造



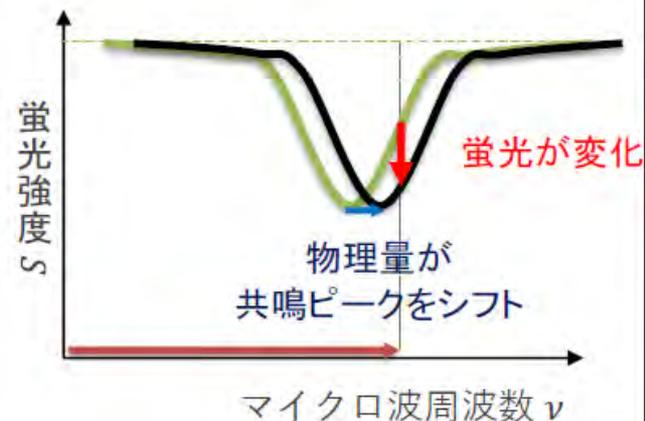
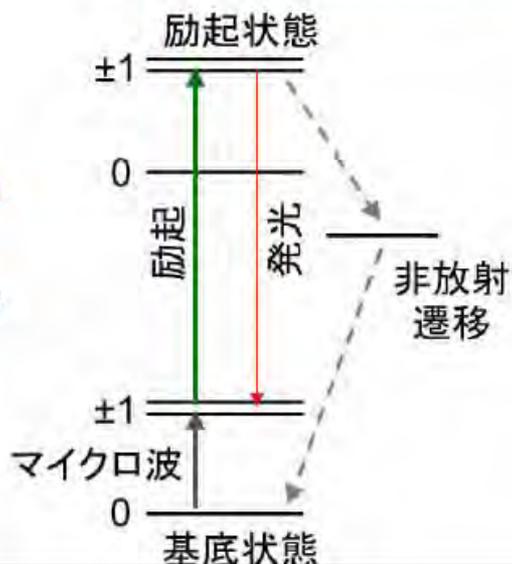
NVセンタの強み

- 室温・大気圧下で動作: 固体中電子スピン系で最長、ミリ秒のスピンコヒーレンス
- スピン状態の初期化、操作、検出により磁場/電場ベクトル、温度、圧力の高感度センサ
- 光検出磁気共鳴(ODMR)によるイメージング
- ナノスケール計測
- アンサンブルによる高感度化

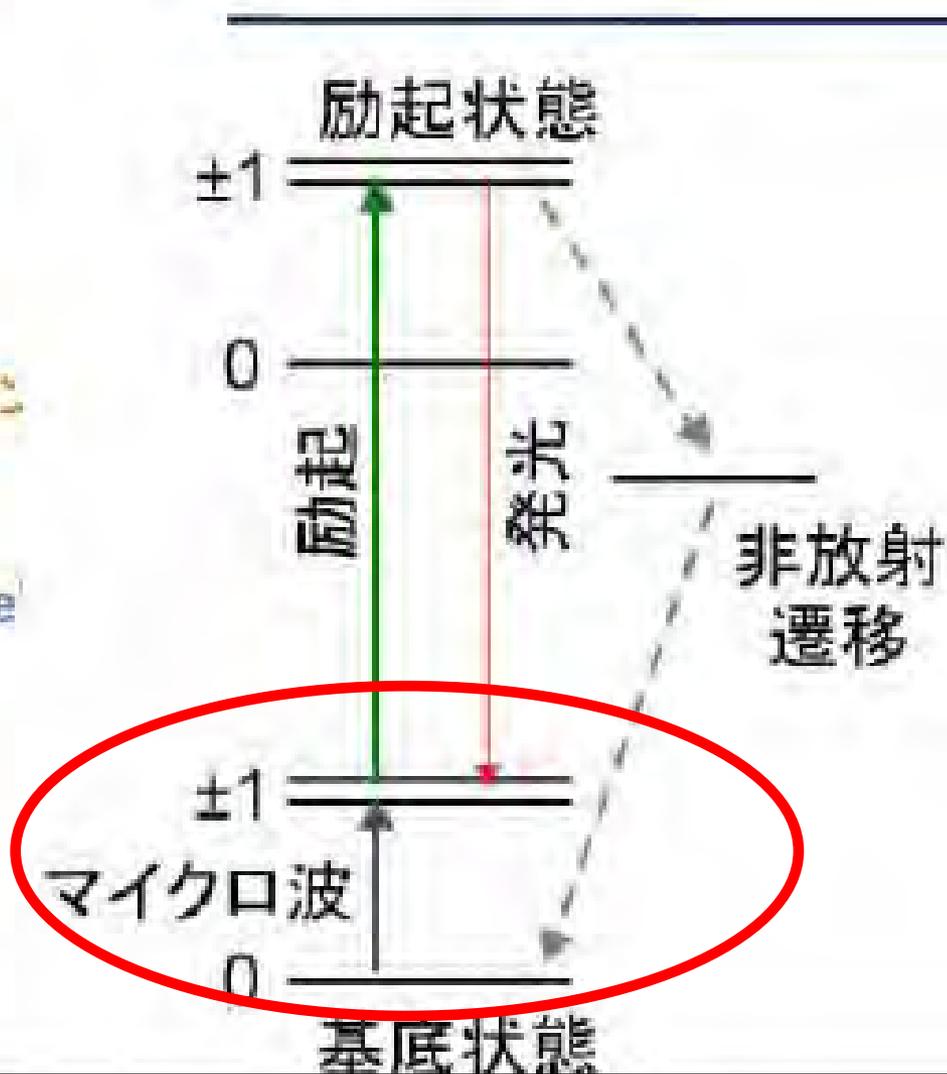
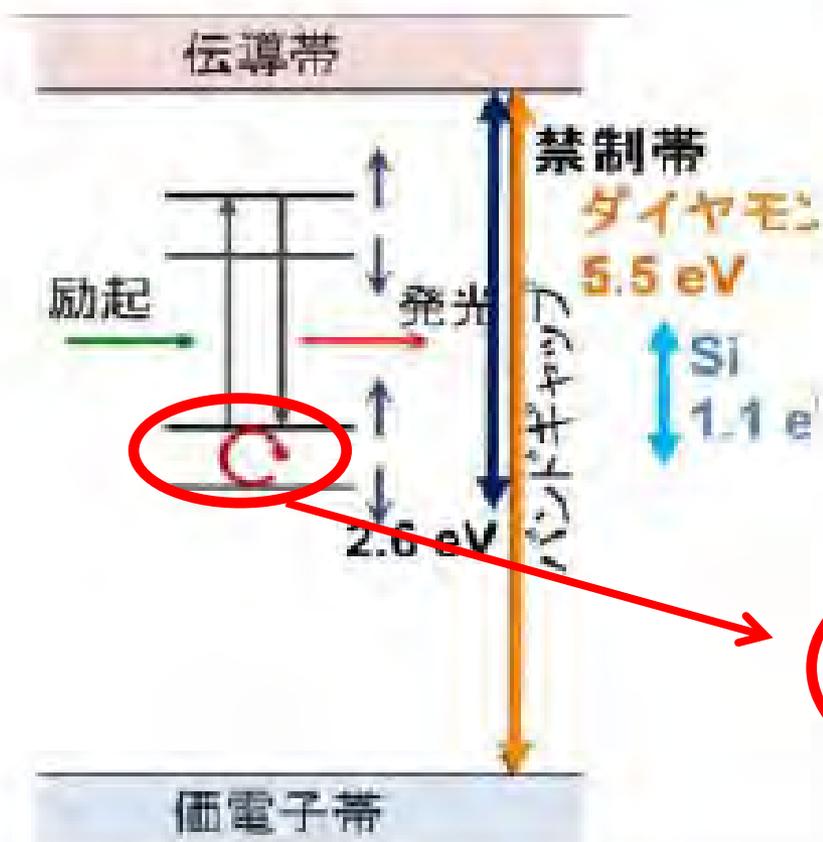
エネルギー準位



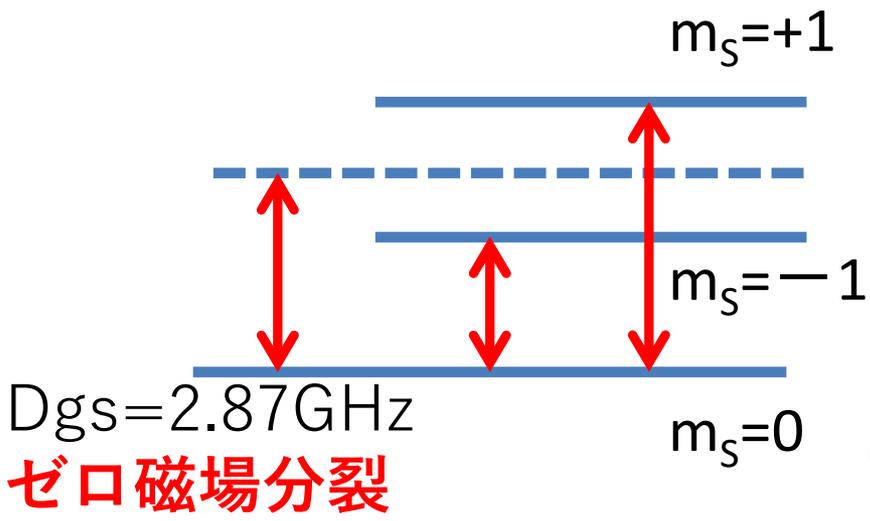
光検出磁気共鳴 (ODMR)



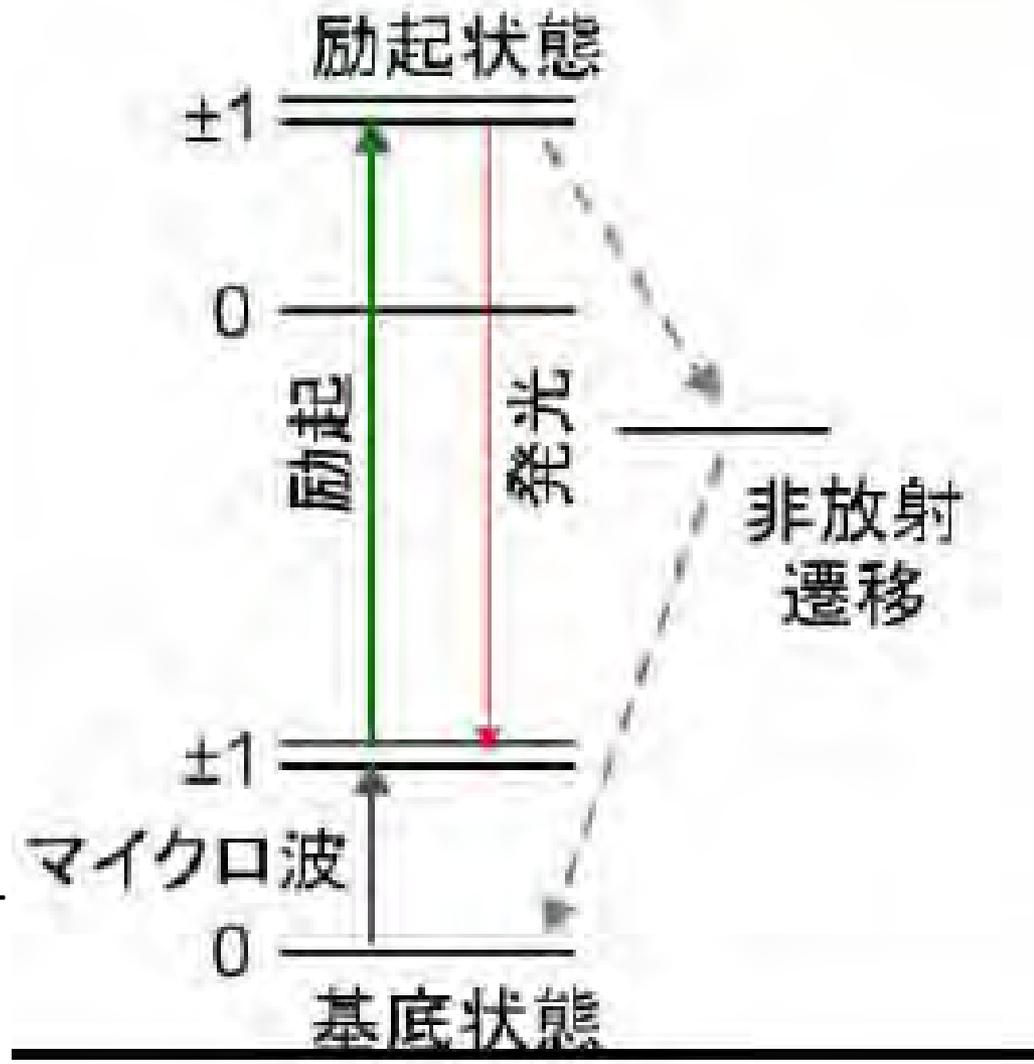
エネルギー準位



ゼロ磁場分裂は電子間の磁気双極子相互作用で生じる
 →温度によって変化する

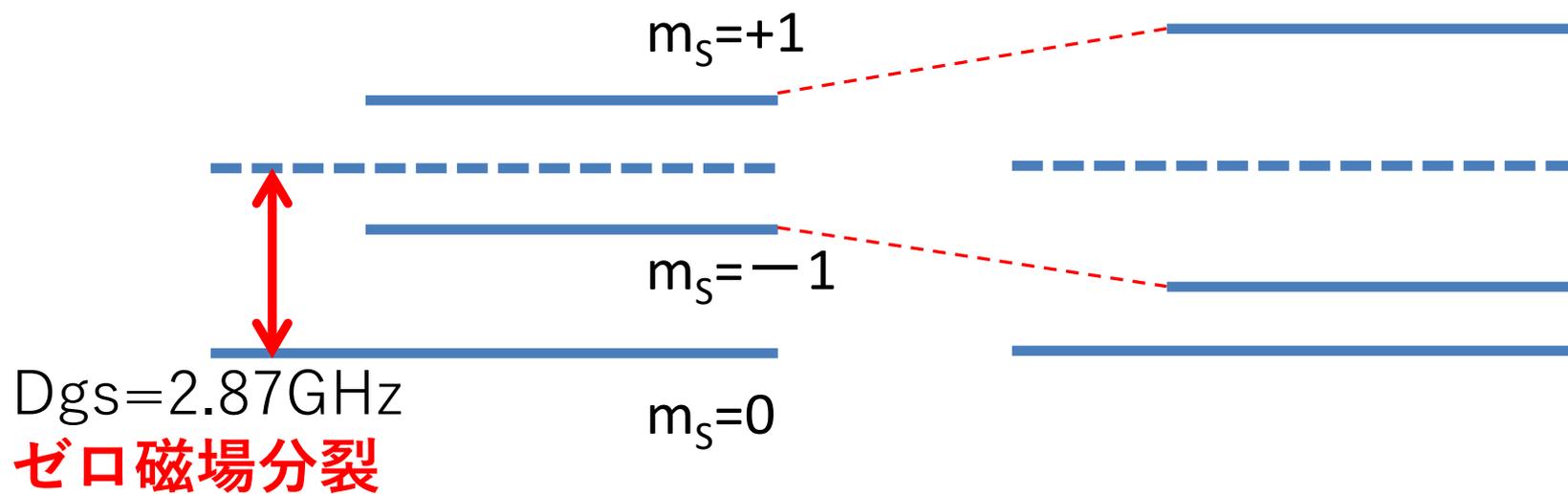


磁界をかける



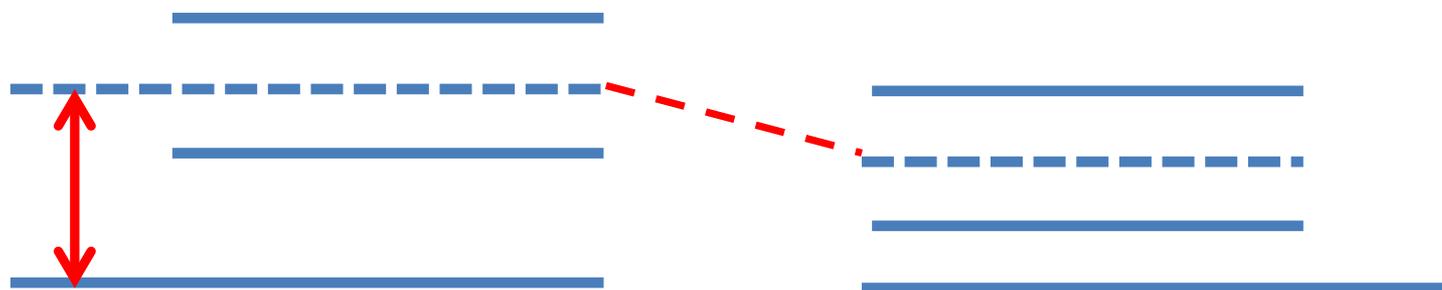
磁界=0

磁場が強くなると



温度が高くなるとゼロ磁場分裂
が小さくなる

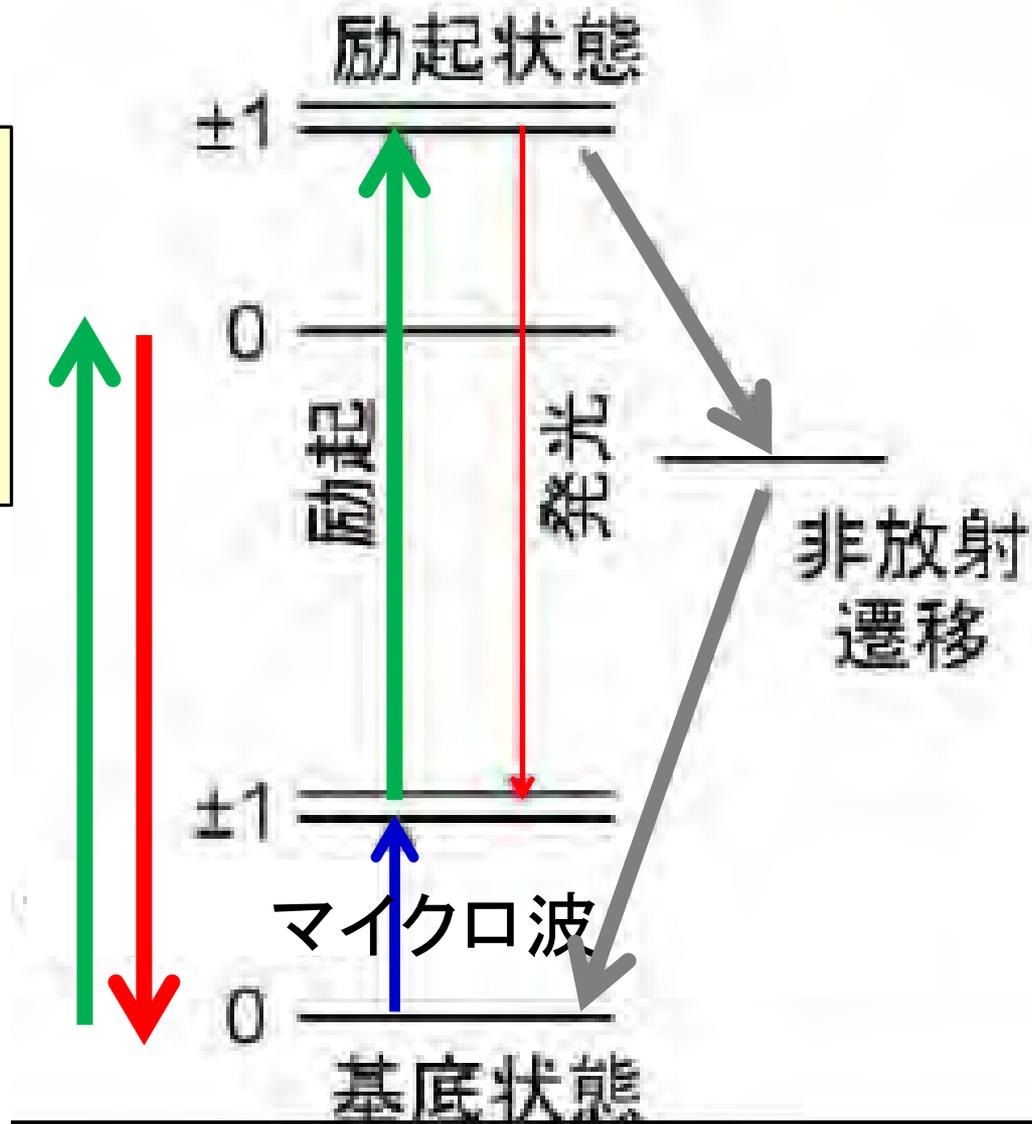
$$\text{約 } dD_{gs}/dT \sim -74\text{kHz}$$



$D_{gs} = 2.87\text{GHz}$

ゼロ磁場分裂

マイクロ波照射で励起
→ 放射ナシの遷移
が起こり、赤の
発光が弱まる

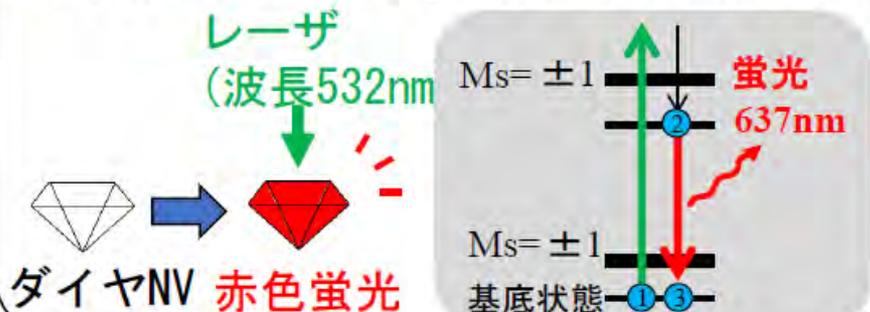


ダイヤモンドNVセンサの基本原理

日新電機 プレゼン資料より

ダイヤモンドNVセンサでの磁場計測

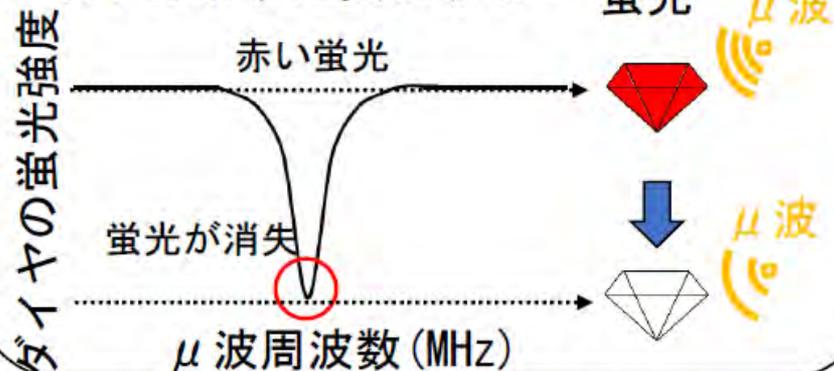
① ダイヤにレーザを当てると赤く光る



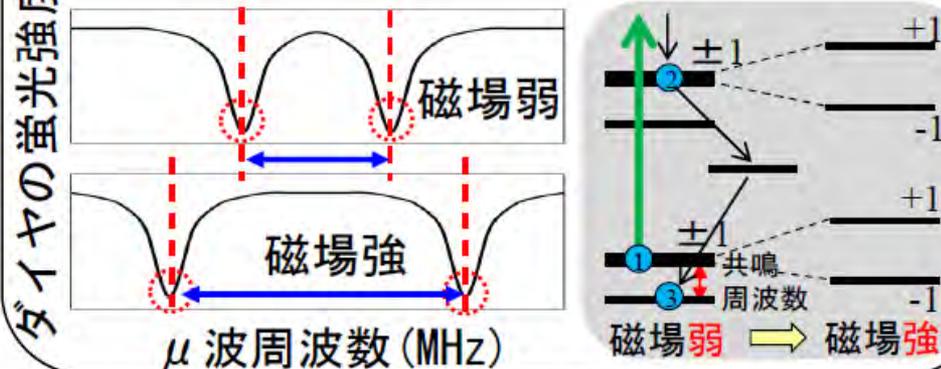
② 共鳴周波数の μ 波印加で光らなくなる



③ μ 波周波数とダイヤモンドの蛍光強度は以下のように変化する



④ 磁場が変化すると、光らなくなる周波数も変化する



磁界の強さ(単位面積当たりの磁束密度)

単位: ガウス、テスラ

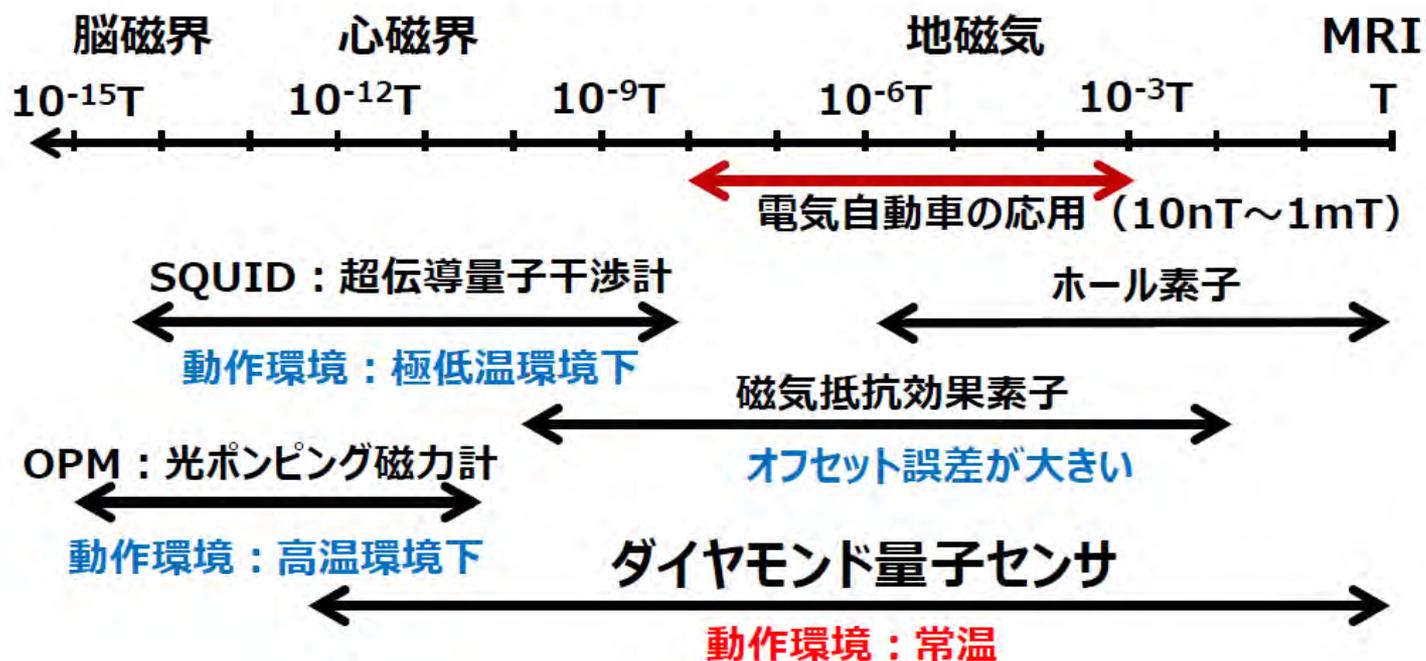
1T=1万ガウス 1mT=10ガウス

1Aの電流から1m離れたところ ~100nT

- 地磁気 0.3G~0.5G=300mG~500mG=30 μ T~50 μ T
- 磁気ネックレス およそ1300G=130mT
- ネオジム磁石 およそ5000G=500mT
- MRI およそ10000G~15000G=1T~1.5T
- 超電導磁場を利用した素粒子研究所の加速器
おおよそ38T~45T

間接的に電流を検出する磁気センサの比較

ダイヤモンド量子センサは計測レンジが広く、
高精度と大電流計測の両立が必要な電気自動車の応用に適している



ダイヤモンドNVセンサの開発状況

日新電機 プレゼン資料より

量子関連への国プロ

国プロ名

日Q-LEAP

日MoonShot

日SIP

米量子国家イニシャチブ

欧Horizon Europe

その他各国個別 P j 多数

様々なダイヤモンドNVの用途

EV電流・温度モニター



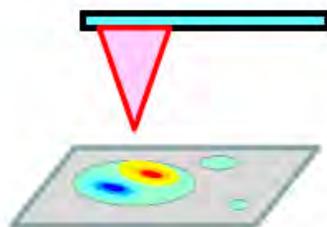
脳磁センサー



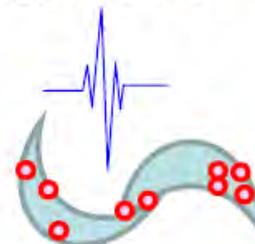
量子暗号通信



磁気センシングAFM



生体センサー



ダイヤモンドNVの量子応用に向け各国が精力的に開発を進めている

まとめ:

- ・ダイヤモンドの堅牢な結晶中に、NVセンターを形成。
- ・NVセンターには2電子状態($S=1$)が常温で安定的に存在することを用いて、精密な磁界／温度センサーとして活用。
- ・2電子の基底状態は $S_z=0$ と $S_z=\pm 1$ の状態はもともとは縮退しているが(NVセンターの対称軸方向)、電子間の磁気双極子相互作用により「ゼロ磁場分裂」する。
- ・緑色レーザーを照射し、マイクロ波を照射することで、赤色蛍光の消失するマイクロ波周波数から $S_z=\pm 1$ 状態のエネルギー精密測定を行う。分裂幅から磁界が、分裂中心のずれから温度計測が出来る。
- ・NVセンターの方向をそろえる、微小なダイヤモンドNV生成、量子状態の安定性保持、計測機器の小型化などさまざまな研究開発が進行中。生体系、医学系での利用が進むのでは。