

近代物理进展 2023年9月

自旋量子技术 及其前沿交叉应用

彭新华

中国科学技术大学近代物理系



内容摘要

第一部分：自旋和自旋磁共振

第二部分：自旋量子计算与模拟

第三部分：自旋量子精密测量

第一部分：自旋和自旋磁共振

- 自旋基本概念
 - 核磁共振基础
 - 零场-超低场核磁共振
 - 单分子微观磁共振 (NV金刚石)
-

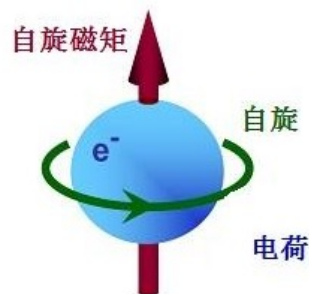
第一部分：自旋和自旋磁共振

- 自旋基本概念
 - 核磁共振基础
 - 零场-超低场核磁共振
 - 单分子微观磁共振 (NV金刚石)
-

自旋

电子的两大内禀属性

电荷
(电流起源)



自旋
(磁性起源)

古希腊时期：摩擦起电现象

1858年：发现阴极射线

1897年：汤姆逊实验

1909年：密立根油滴实验

1922年：斯特恩-盖拉赫实验

1924年：泡利不相容原理

1925年：乌伦贝克-古兹密特理论

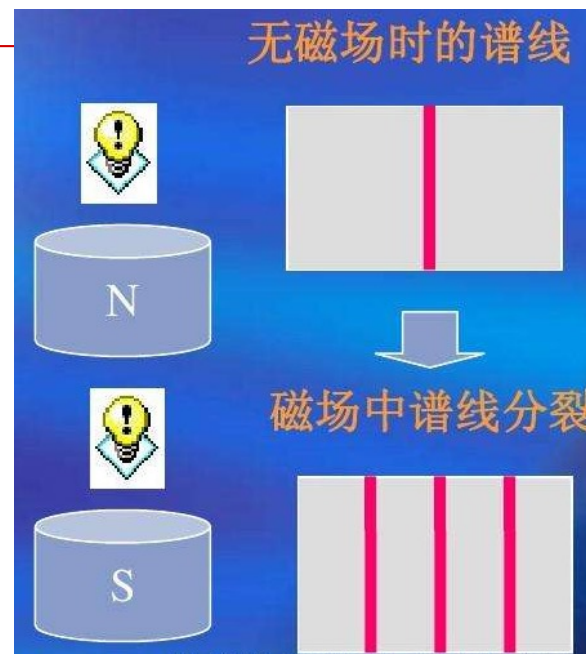
1928年：狄拉克电子相对论波动方程

这两大属性构成了现代科技特别是信息技术的物理基础
自旋是量子信息的重要物理载体

人类是怎样认识自旋的？

塞曼效应

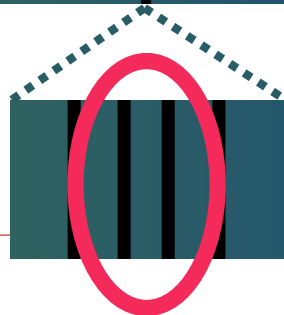
光谱线在磁场中分裂的现象



1897年普雷斯顿 1896年塞曼



“双线之谜” 反常



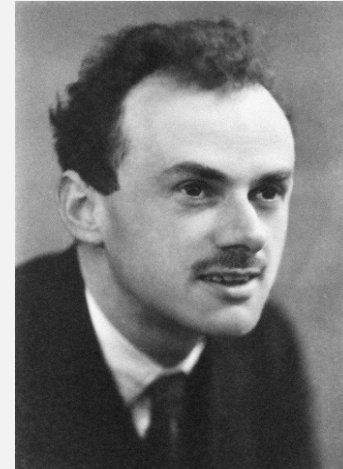
正常 “塞曼效应”



电子自旋假设



1925 乌伦贝克和古兹米特

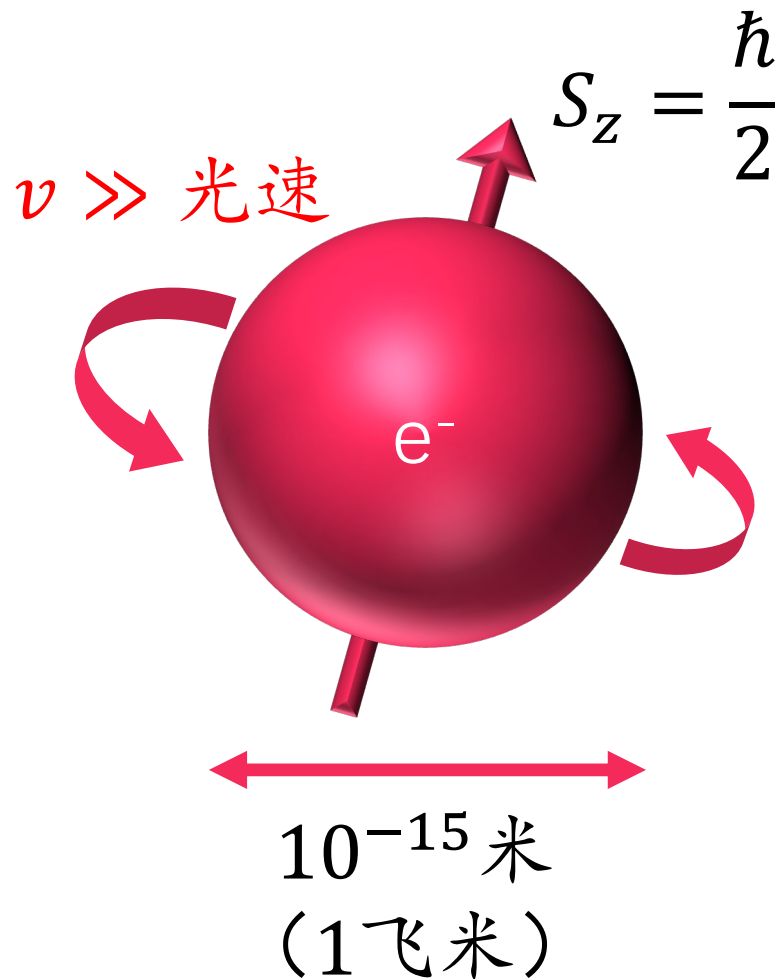


1928 狄拉克

“电子也许是个自转的带电小球，就把它叫做电子自旋吧”

他们的导师埃伦菲斯特 (P.Ehrenfest) : “You are both young enough to allow yourself some foolishness”

自旋 (Spin)



电子自旋 \neq 自转的电子

自旋：微观粒子的内禀属性

自旋不是一个经典概念

| | 光子 | 电子 | 中子 | 希格斯玻色子 |
|----|----|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 自旋 | 1 | 1/2 | 1/2 | 0 |
| 质量 | 0 | 9.1×10^{-31} 千克 | 1.7×10^{-27} 千克 | 2.2×10^{-25} 千克 |
| 电荷 | 0 | -1.6×10^{-19} 库仑 | 0 | 0 |

怎么来的？ 科学上无法解释！

自旋的广泛应用

磁共振



磁场中的自旋效应
获6次诺贝尔奖
广泛应用于医学健康和
工业领域

磁存储



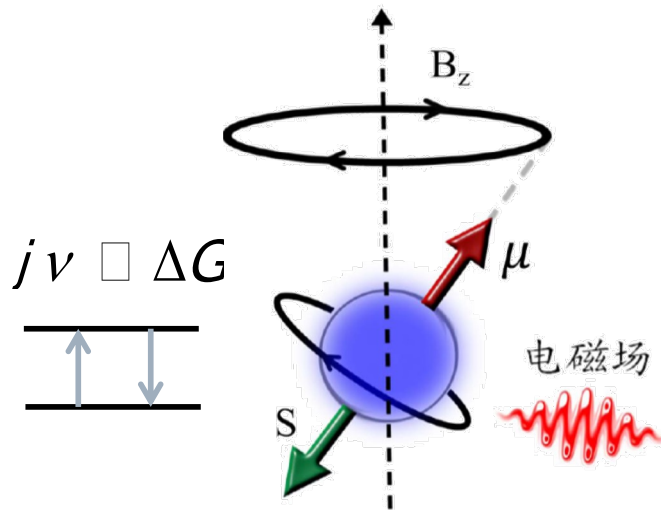
基于自旋的铁磁效应
获得2007诺贝尔物理奖
信息时代的奠基石

主要基于宏观尺度自旋效应的被动观测和直接利用

第一部分：自旋和自旋磁共振

- 自旋基本概念
 - 核磁共振基础
 - 零场-超低场核磁共振
 - 单分子微观磁共振 (NV金刚石)
-

自旋磁共振



原理：原子核自旋处于外磁场中，能够吸收和放出对应频率的电磁辐射，发生磁共振现象

Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy:

- **Nucleus with spin** (核自旋)
- **Magnetic field** (磁场)
- **Resonance perturbation** (共振扰动)

特点：能够用来**准确、快速和无破坏性**地获取物质的组成和结构上的信息

核磁共振 – 应用

- 化学结构鉴定
 - 天然产物化学
 - 有机合成化学
- 动态过程的研究
 - 反应动力学
 - 研究平衡过程(化学平衡或构象平衡)
- 三维结构的研究
 - 蛋白质
 - DNA, 蛋白/DNA复合物
 - 多糖
- 代谢组学的研究(生物代谢指纹谱图与外界应激的关系)

- 药物设计(NMR研究构效关系SAR)
- 医学(磁共振成像)
- 量子信息
- ...



传统磁共振在20世纪取得了巨大成功



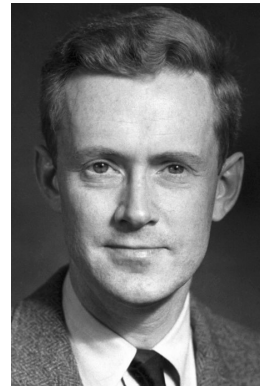
Otto Stern
1943, **Physics**
发现质子磁矩



Isidor Isaac Rabi
1944, **Physics**
用共振方法记录
原子核的磁特性



E. M. Purcell
1952, **Physics**



Felix Bloch
1952, **Physics**



医学磁共振成像

■ 基础科学突破

3次诺贝尔物理学奖

■ 交叉领域技术突破

3次诺贝尔化学
1次生理医学奖



Richard R. Ernst
1991,
Chemistry



Kurt Wüthrich
2002,
Chemistry

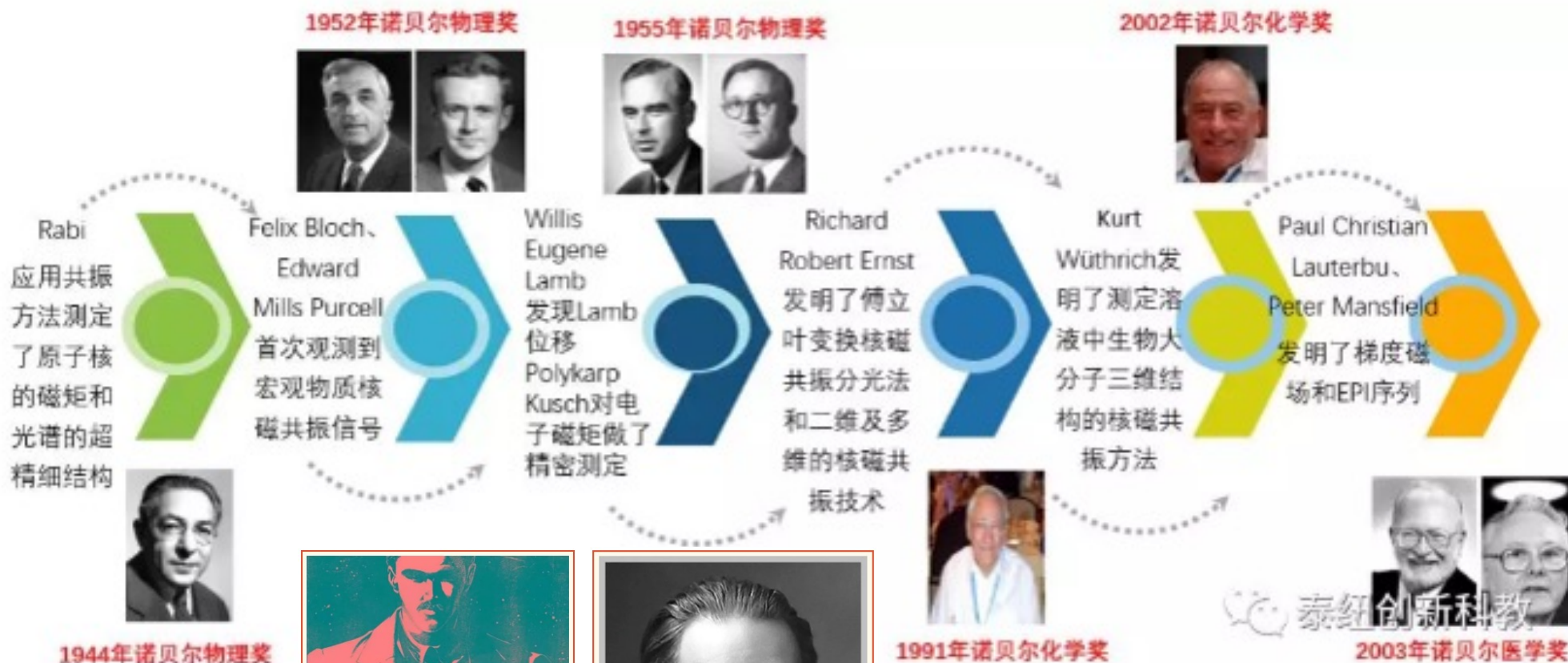


Paul C. Lauterbur
2003, **Medicine**

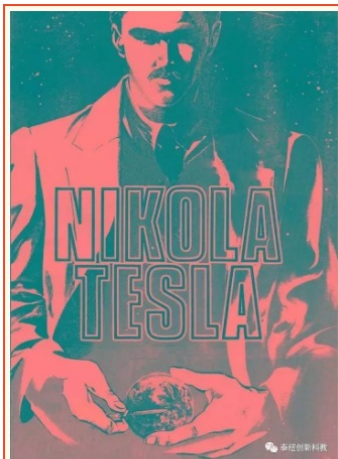


Sir Peter Mansfield
2003, **Medicine**

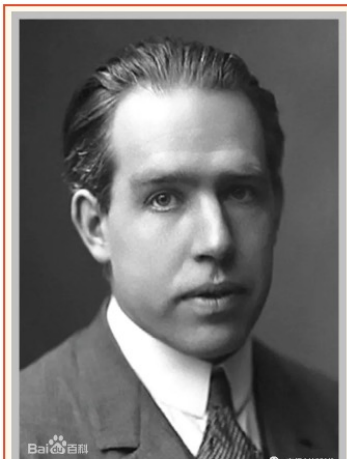
磁共振的“诺贝尔”之路



“暗黑科技掌门人”



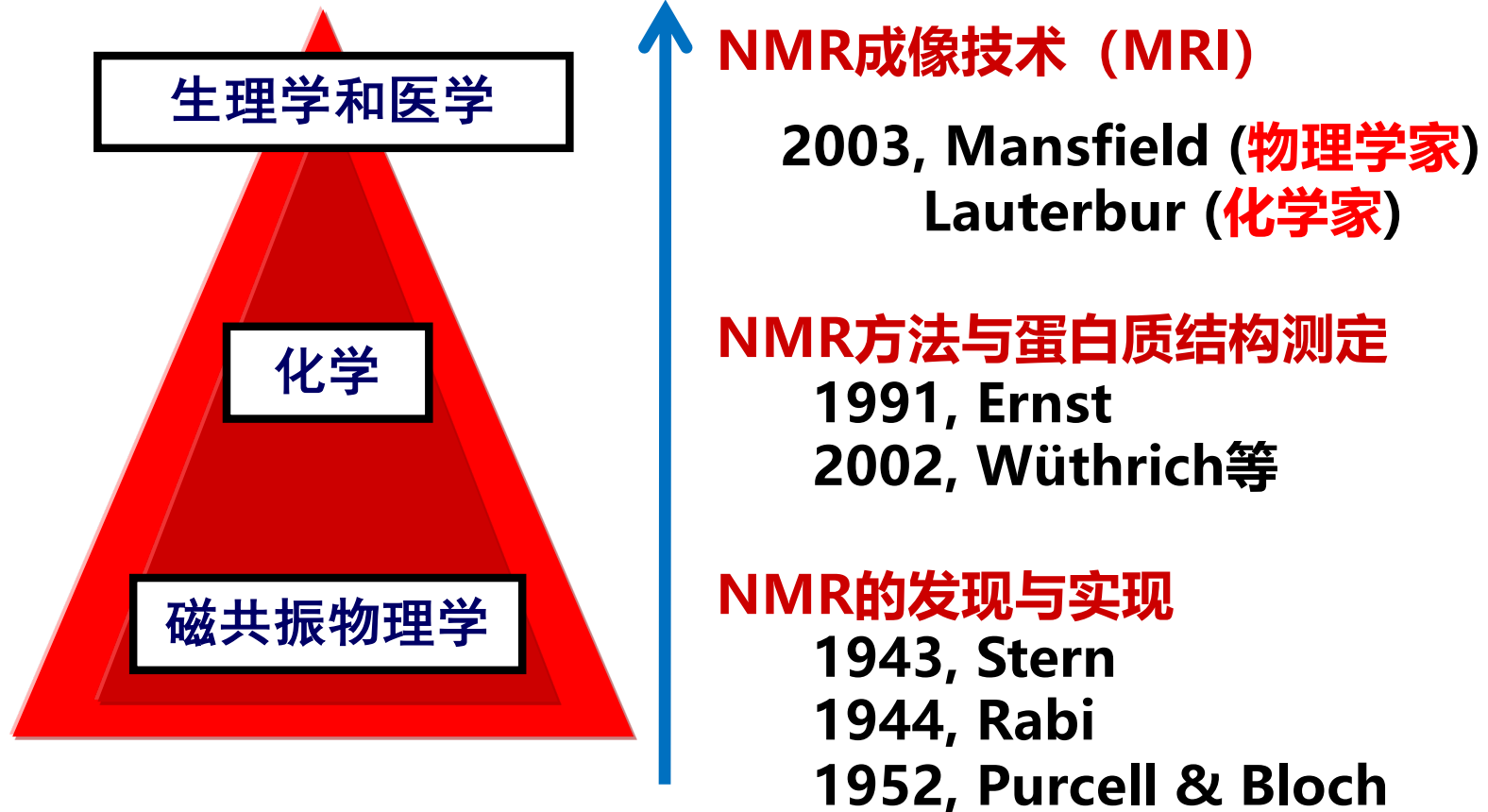
特斯拉的漫画形象，手中用水果刀切开地球的形象源自于他在1898年，利用震荡波切开铁块实验后所说的：“我可以把地球像苹果一样一切两半”的豪言。



尼尔斯·亨利克·戴维·玻尔 (丹麦文: Niels-Henrik David Bohr) 肖像

Rabi之前
原子核的光谱和原子核能量跃迁的基本理论
1922年的诺贝尔物理学奖

磁共振科学技术的创新：催生革命性变化

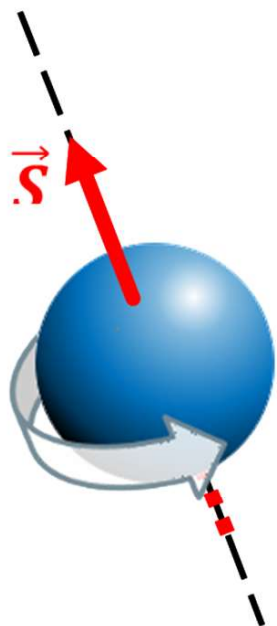


核磁共振的六次诺贝尔奖: 科学技术的创新

什么是自旋?

物质的基本属性

- 质量 m
- 电荷 e
- 自旋 \vec{S}



自旋的幅度（自旋角动量） $|\vec{S}| = \hbar \cdot \sqrt{I(I+1)}$

- 只有自旋量子数 (I) 不为零的核才有NMR信号
 - 质量数和原子序数都为偶数 $\Rightarrow I = 0$ (^{12}C , ^{16}O)
 - 质量数为偶数, 原子序数为奇数 $\Rightarrow I = \text{整数}$ (^{14}N , ^2H , ^{10}B)
 - 质量数为奇数 $\Rightarrow I = \text{半整数}$ (^1H , ^{13}C , ^{15}N , ^{31}P)
- 原子核的自旋态是量子化的: $m = I, (I-1), (I-2), \dots, -I$
- m 为磁量子数; 如: ^1H , ^{13}C $m = 1/2, -1/2$

自旋角动量和磁矩

自旋角动量 \vec{S} 产生一个磁矩 $\vec{\mu}$:

$$\vec{\mu} = \gamma \cdot \vec{S}$$

γ : 旋磁比, 不同的原子核具有不同的旋磁比.

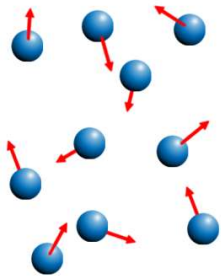
磁矩是一个矢量, 它给出了“原子核磁体”的方向和大小(强度)



| Isotope | $\gamma/2\pi$ |
|-----------------|---------------|
| ^1H | 42.58 |
| ^{13}C | 10.71 |
| ^{15}N | -4.32 |

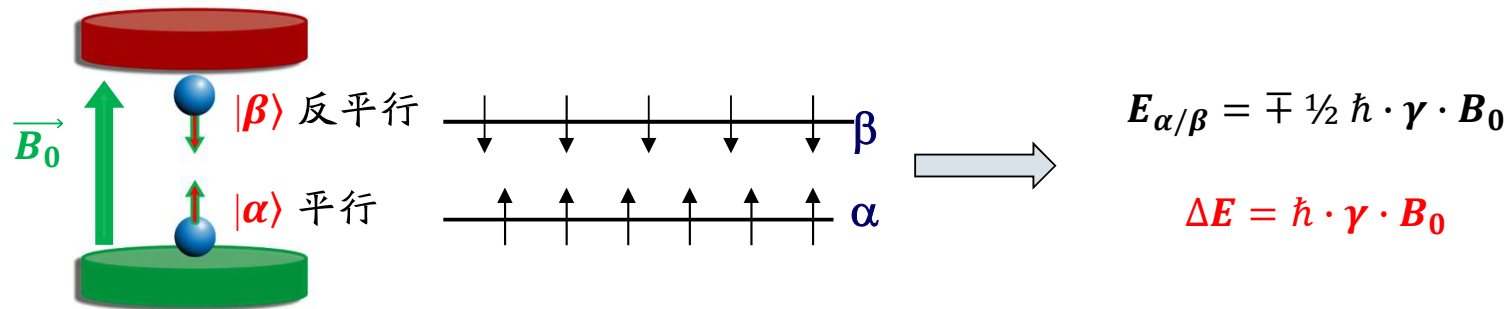
磁场中 $I=1/2$ 的核(能量自旋状态)

- 在基态下核自旋是无序的，彼此之间没有能量差。它们的能态是简并的：



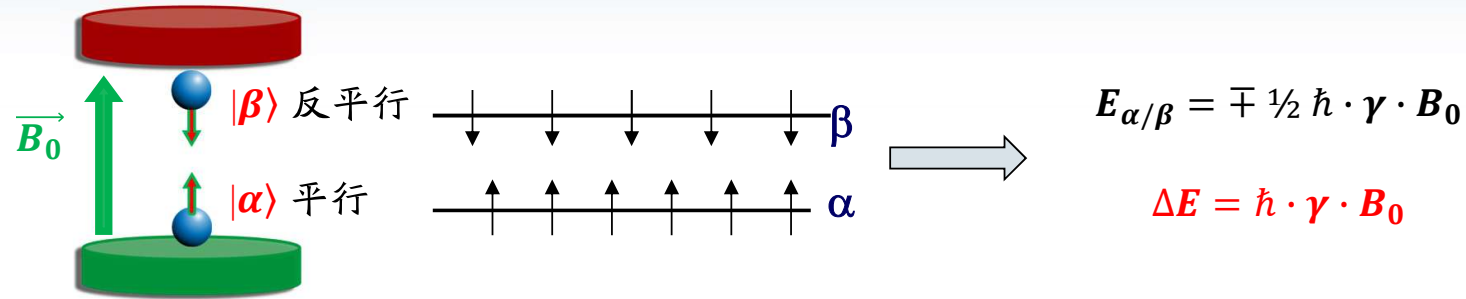
$$\hbar = \gamma h / 4\pi$$

- 由于原子核具有核磁矩，当外加一个强磁场时 (B_0)，核磁矩的取向会与外磁场平行或反平行：



- 取向与外磁场平行核的数目总是比取向反平行的核稍多。

能量与布居数(能量吸收理论)



- 每个能级都有不同的布居数 (N) , 布居数的差别与能量差有关遵守 Boltzmann分布:

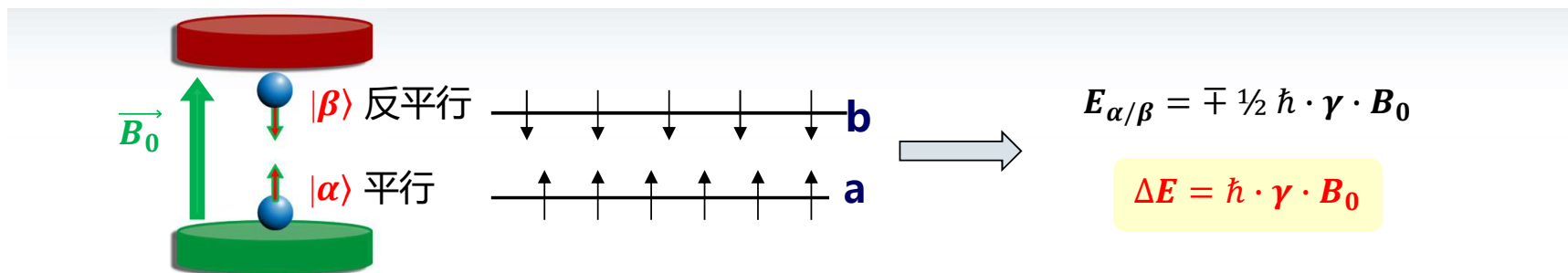
$$N_{\alpha} / N_{\beta} = e^{\Delta E / kT}$$

- 400 MHz ($B_0 = 9.5 \text{ T}$) 下的 ^1H , 能量差为 $3.8 \times 10^{-5} \text{ Kcal / mol}$

$$N_{\alpha} / N_{\beta} = 1.000064$$

- 与UV或IR相比 , NMR两个能级的布居数差别很小。

能量与灵敏度(能量吸收理论)



• 这个能量的差就是每个核可以吸收的能量（与信号的强度和灵敏度直接相关）：

- 磁体的磁场越强（大的 B_0 ），NMR谱仪的灵敏度就越高。
- 具有较大 γ 值的核，吸收或发射的能量就越大，也就越灵敏。灵敏度与 μ 、 $N_\alpha - N_\beta$ 及“线圈的磁通量”都成正比，这三者都与 γ 成正比，所以灵敏度与 γ^3 成正比。

$$\gamma^{13\text{C}} = 6,728 \text{ rad / G}$$

$$\gamma^{1\text{H}} = 26,753 \text{ rad / G}$$

仅仅是 γ 的原因， ^1H 的

灵敏度就大约是 ^{13}C 的64倍

• 如果考虑同位素的天然丰度， ^{13}C (~1%) 的灵敏度要比 ^1H 低6400倍。

能量与频率(能量吸收理论)

- 能量与频率是相关的，我们可以作一些简单的数学变换：

射频: $\Delta E = h \cdot \nu$

能量差: $\Delta E = h \cdot \gamma \cdot B_0 / 2\pi$

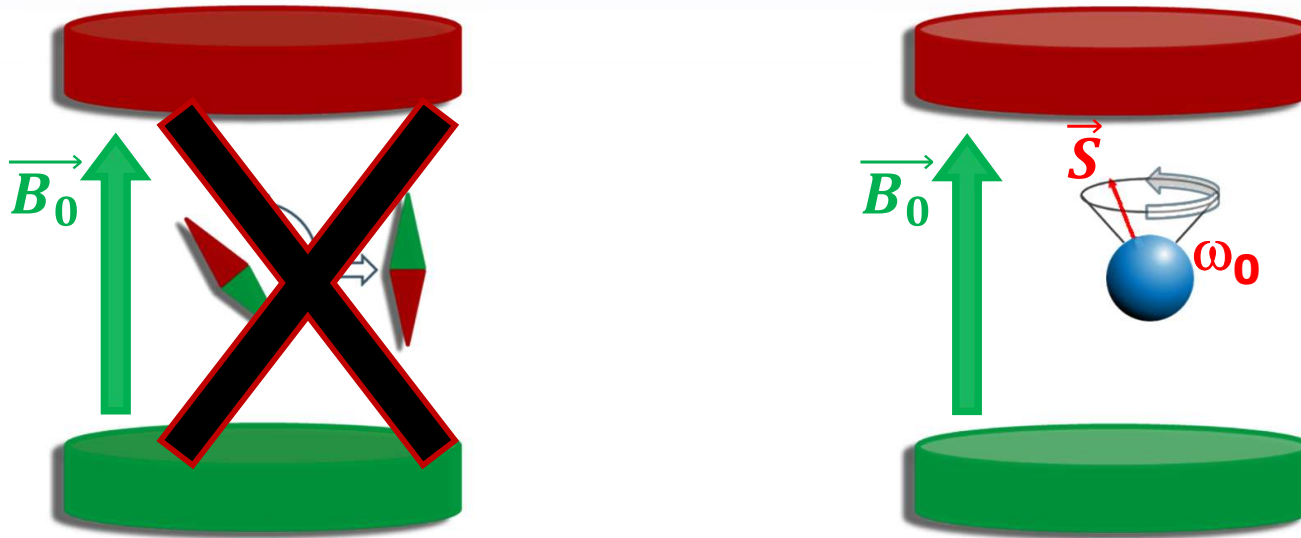


$$\nu = h \cdot \gamma \cdot B_0 / 2\pi$$

- 对于 ^1H 来说，在通常的磁体中 (2.35–18.6 T)，其共振的频率在100–800 MHz之间。对 ^{13}X ，是其频率的1/4。
- 在解释有些 NMR原理时，我们需要用到圆周运动。对于描述圆周运动 ν 并不是一个好的单位。我们把进动（或Lamor）频率定义为 ω ：

$$\omega = 2\pi\nu \Rightarrow \omega_0 = \gamma B_0 \text{ (弧度)}$$

磁场中 $I=1/2$ 的核(电磁感应理论)

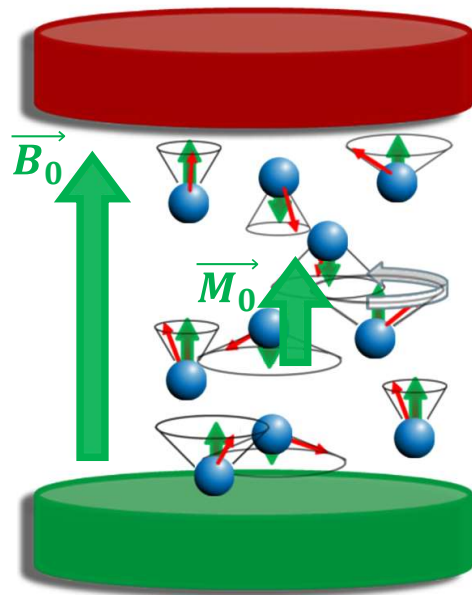


... 但是原子核不是指南针

进动频率称为Larmor Frequency ω_0 :

$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

磁场中 $I=1/2$ 的核(电磁感应理论)- 弛豫



$$\sum_i \vec{\mu} = \vec{M}_0$$

弛豫 \rightarrow 动态平衡

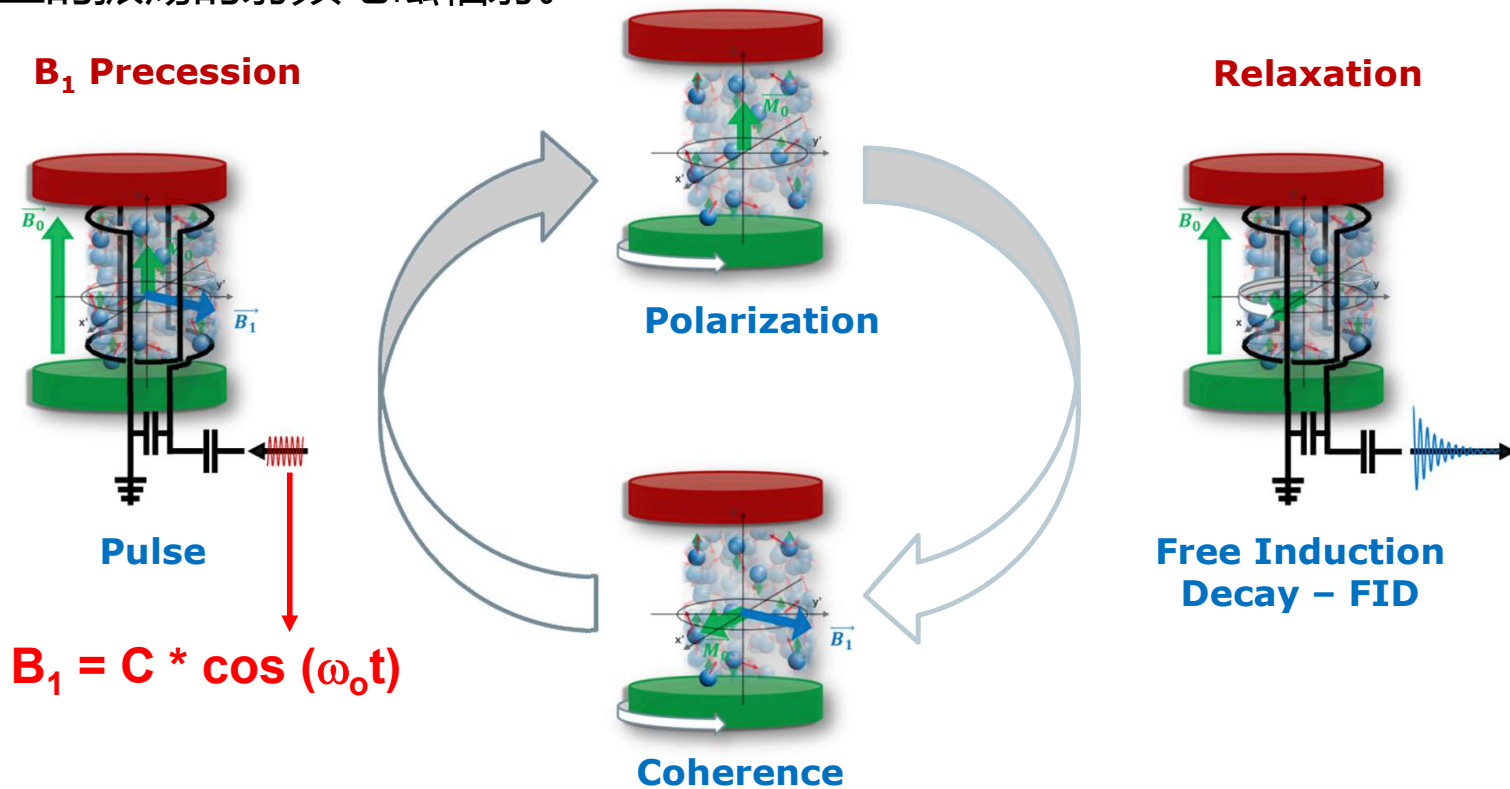
- 与外磁场平行或反平行
- 热各向同性分布

宏观效应-宏观磁化矢量 \vec{M}_0

- $|\alpha\rangle$ 和 $|\beta\rangle$ 态能量差
- 波兹曼分布
- \vec{M}_0 的大小

射频脉冲产生NMR信号

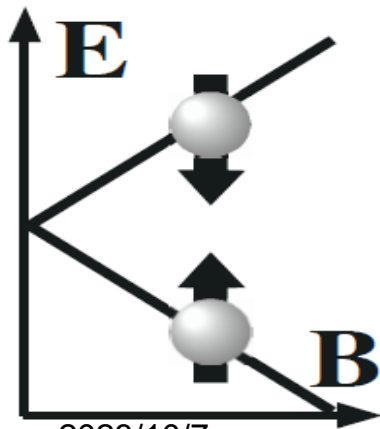
NMR激发需要核自旋体系吸收能量。能量的来源是一个由变化的电场所产生的振荡的射频电磁辐射。



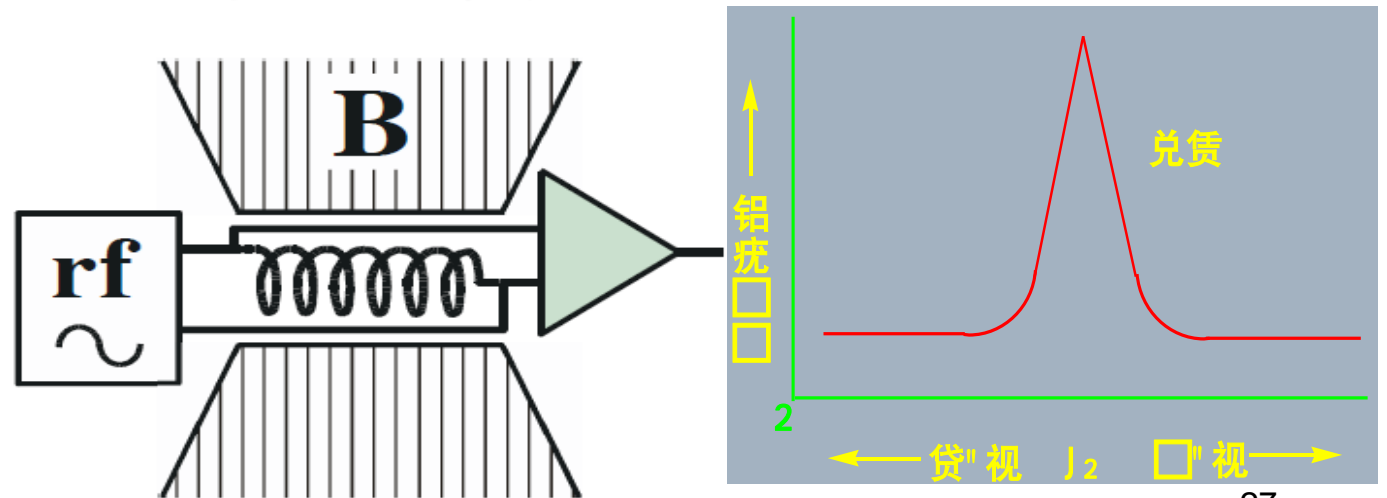
磁共振的产生

- 塞曼效应：原子磁矩的空间取向量子化，磁场作用下的附加能量不同，引起能级分裂。
 - (1) $\Delta E \propto B_0$;
 - (2) ^1H 受到一定频率 (ν) 的电磁辐射，且提供的能量 $=\Delta E$ ，则发生共振吸收，产生共振信号。

Zeeman分裂



NMR实验基本装置



NMR谱仪



1. 操作工作站
2. 机柜
3. 超导磁体
4. 前置放大器
5. 探头
6. 室温匀场系统

第一部分：自旋和自旋磁共振

- 自旋基本概念
 - 核磁共振
 - 零场-超低场核磁共振
 - 单分子微观磁共振 (NV金刚石)
-

传统商用核磁共振谱仪

弱信号探测

$$\text{灵敏度} \propto B_0^{3/2}$$

传统核磁：向高磁场方向发展

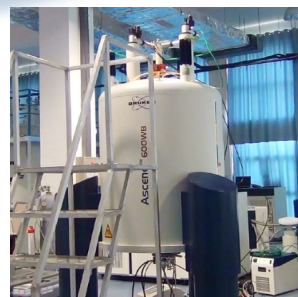


1T



10T

~ 300万



15T

~ 800万



21T

> 1000万

看得越来越清晰

Bruker Ascend 1.2 GHz NMR
\$17.8 million

超导磁体：价格昂贵 💰💰💰、笨重、磁场不均匀

自旋与核磁共振



核磁共振的发展新趋势：从高场到低场



A. Abragam

超低场

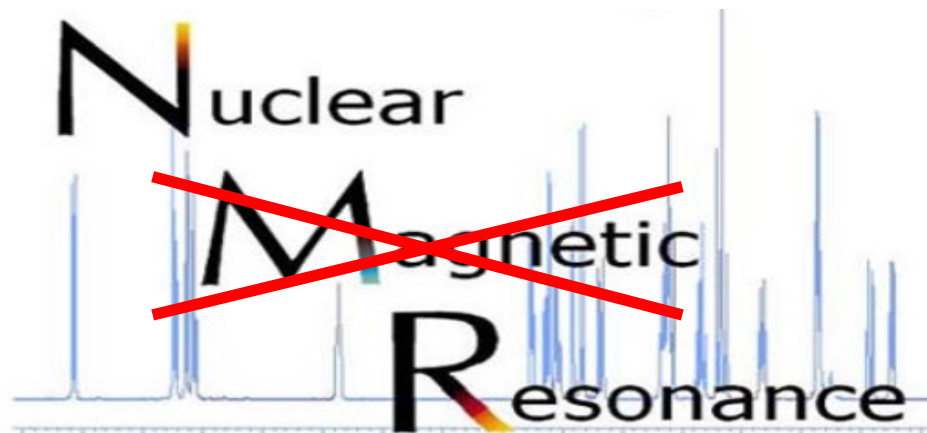
成本低、便携式、小型化

不需要超导磁体，
甚至不需要磁场？



Bloch Purcell

高磁场



零场核磁共振

ZERO-FIELD

nuclear magnetic resonance

— Micah P. Ledbetter and Dmitry Budker

Counter to intuition, one doesn't necessarily need a strong magnet—or any magnet, for that matter—to extract richly informative spectra from nuclear spins.

Physics Today **66**, 4, 44
(2013)

核磁共振发展新趋势：从高场到超低场

超低场核磁共振



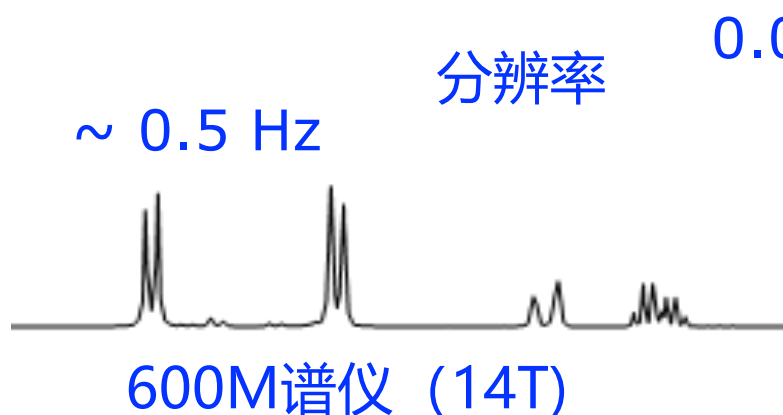
< 1 μ T

无需超导磁体：成本低、便携式、小型化

高分辨率：磁场绝对均匀、弛豫时间长，谱线线宽~10 mHz

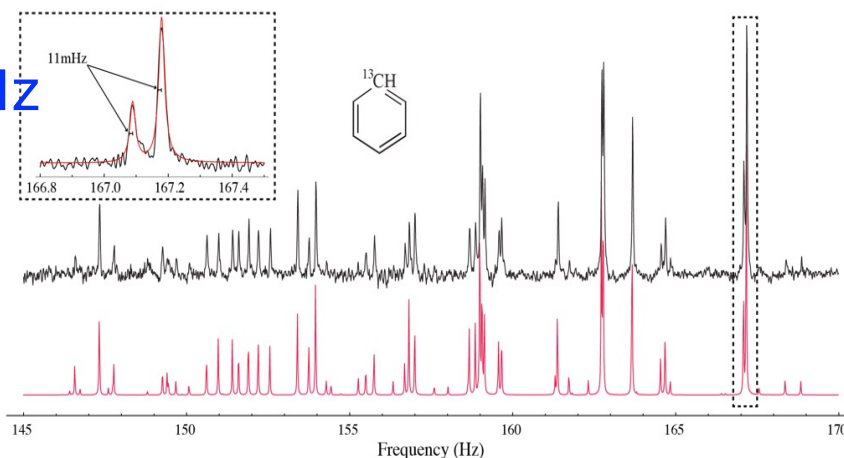
强关联动力学：保留完整的自旋耦合信息

适合特殊研究对象（如顺磁材料）：安全性高



分辨率

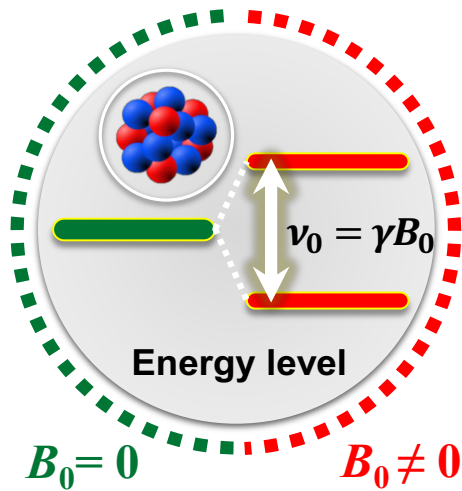
0.01Hz



零场谱仪

NMR: Dominant Interactions

Zeeman Interaction & Chemical Shift



$$H_{\text{Zeeman}} \propto \gamma_I \mathbf{I} \cdot \mathbf{B}_0$$

$$H_{\text{CS}} \propto -\gamma_I \mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B}_0$$

Local Interaction (independent of B_0)

□ Dipole-Dipole coupling

$$H_D \propto \hbar \sum_{N;N' \neq N} \mathbf{I}_N \cdot \mathbf{D}_{NN'} \cdot \mathbf{I}_{N'}$$

□ J-coupling

$$H_J \propto \hbar \sum_{N;N' \neq N} \mathbf{I}_N \cdot \mathbf{J}_{NN'} \cdot \mathbf{I}_{N'}$$

□ Quadrupolar coupling

$$H_Q \propto \frac{eQ}{2I(2I-1)} \mathbf{I} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{I}$$

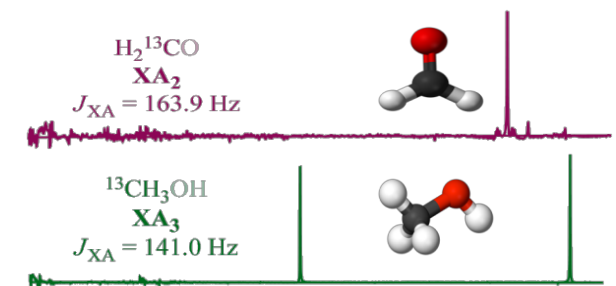
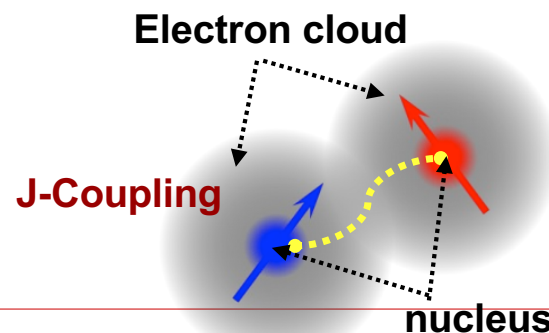
❖ What is **Ultralow Field**

Zeeman Interaction < Local Interaction

❖ Liquid Spin 1/2 System

H_Q is zero; H_D is averaged out

Only H_J exists (<kHz)



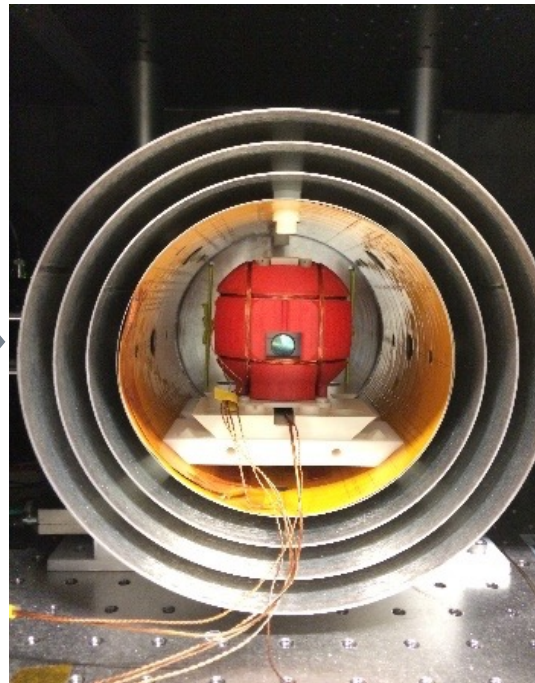
From high field to zero- & ultralow field

40 tesla



Zeeman Interaction >>
Local Interaction
Inductive detection

ZULF **Without superconducting magnet!**



Zeeman Interaction <
Local Interaction
Optical magnetometer

Simplicity
No superconducting magnet and frequent cryogenic maintenance

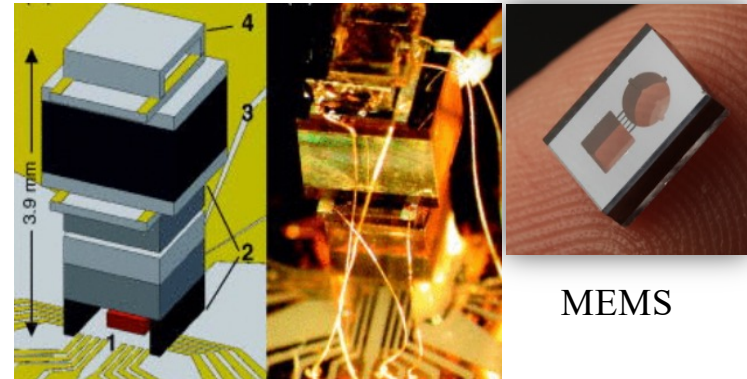
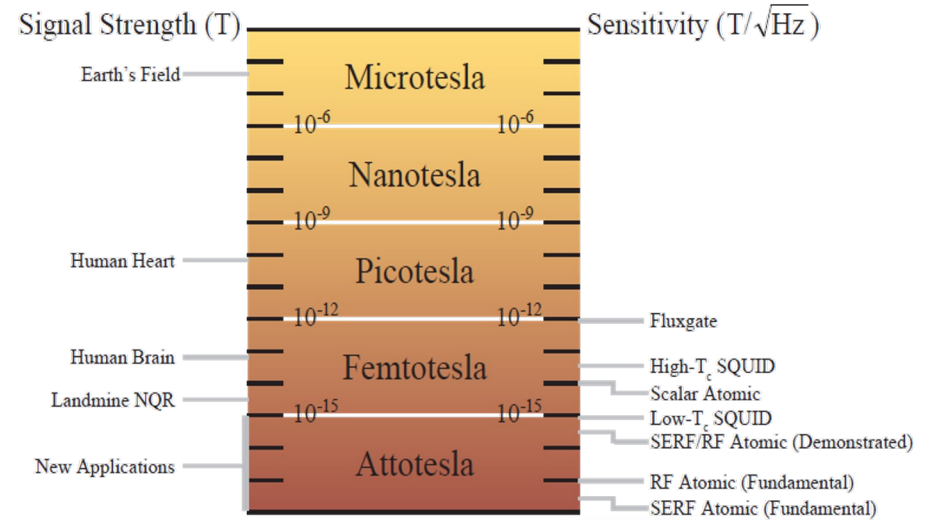
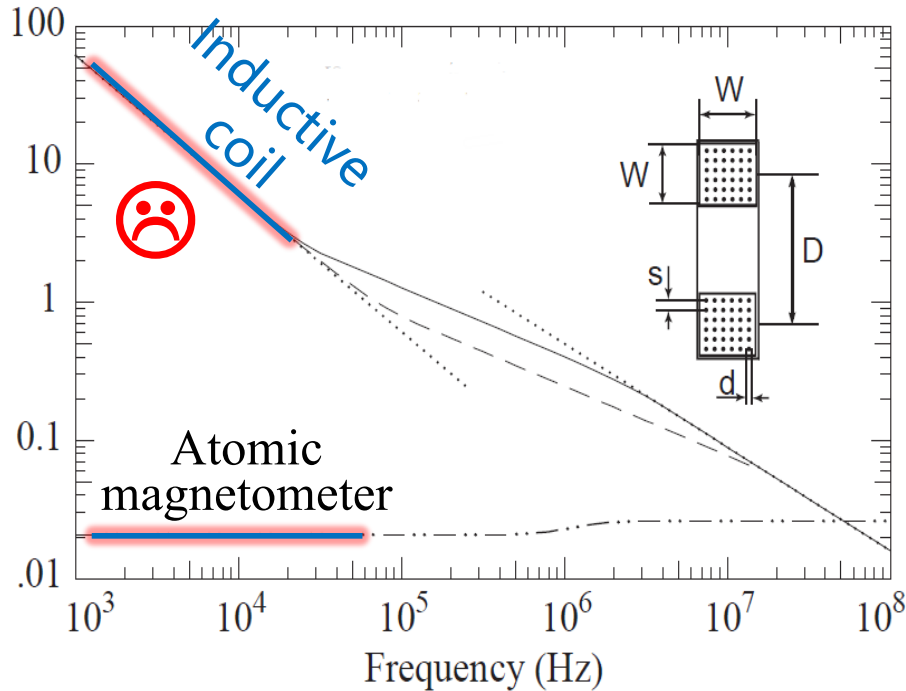
Ultra-narrow linewidth
High absolute magnetic field homogeneity

Untruncated Residual Dipolar Couplings
Rich spin dynamics

.....

Need new sensor: Sensitive Magnetometers

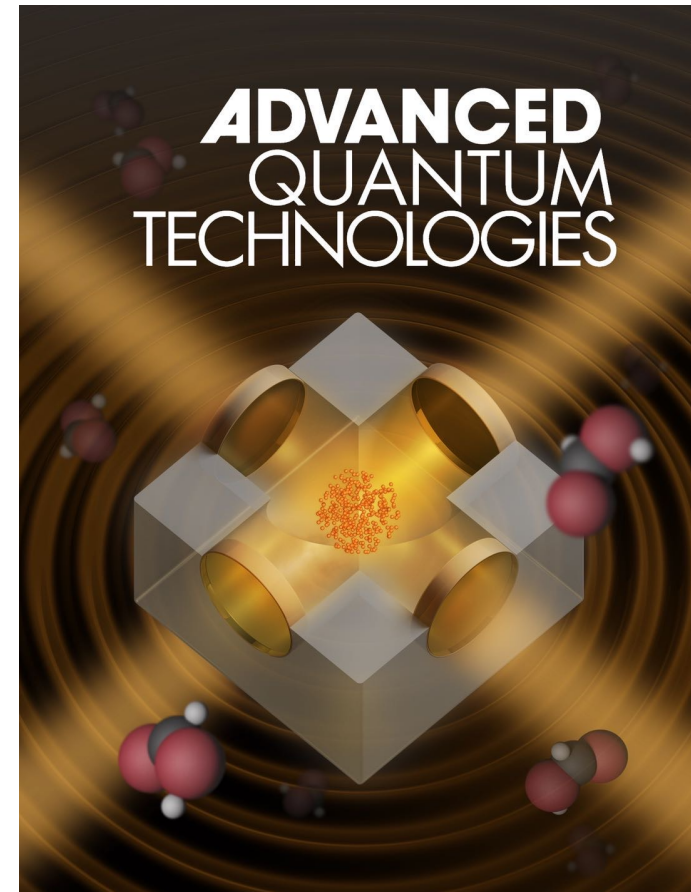
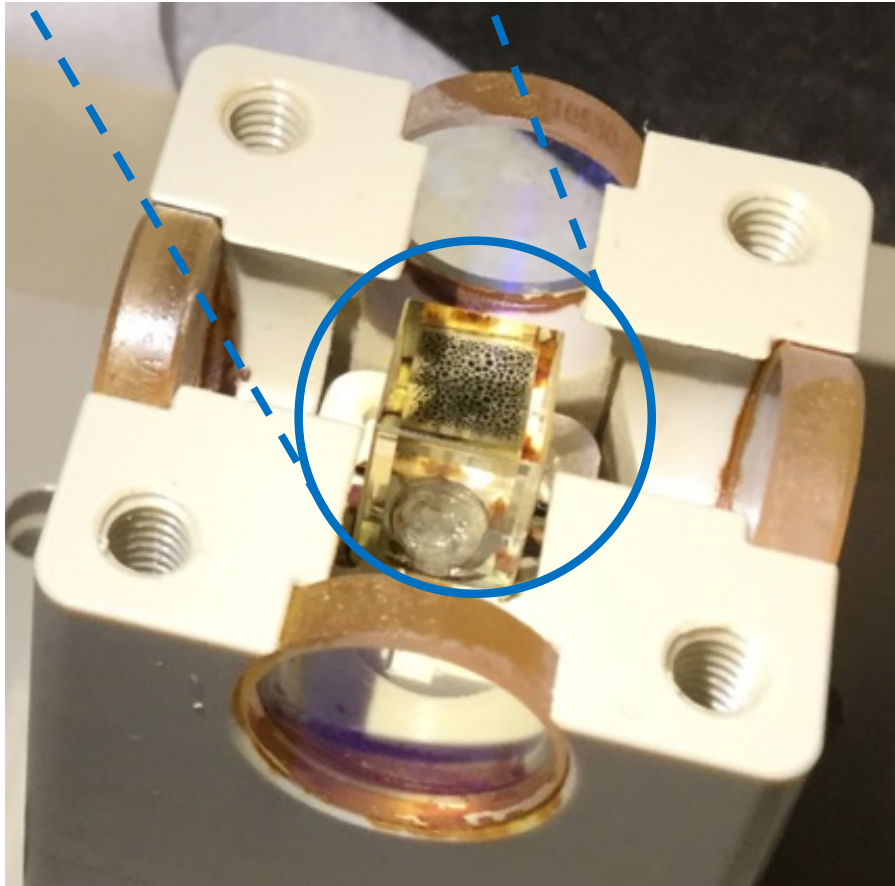
Sensitivity is very poor in low field



Atomic magnetometer could be **small** and **highly sensitive**!

NMR detector: atomic magnetometer

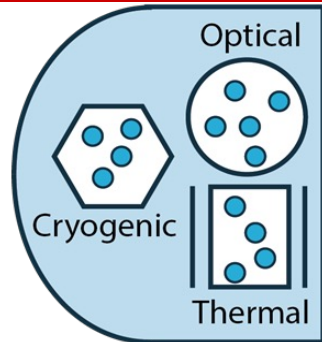
^{87}Rb vapor gas



(选为封面文章)

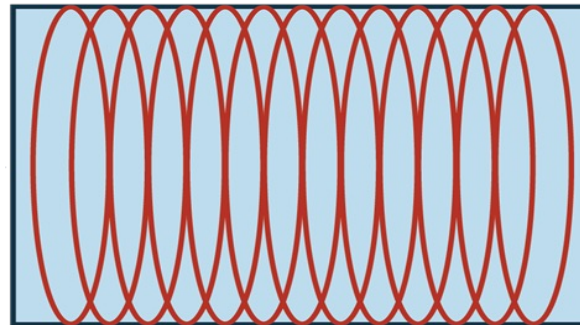
Min Jiang *et al.* Advanced Quantum Technologies, 2000078 (2020) [**Selected as Front Cover**]

Zero- & ultralow field NMR (ZULF)



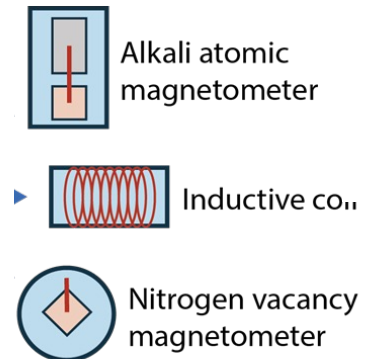
Pre-polarization

- Thermal: Permanent magnet
- Parahydrogen
- Dynamical nuclear polarization



Encoding

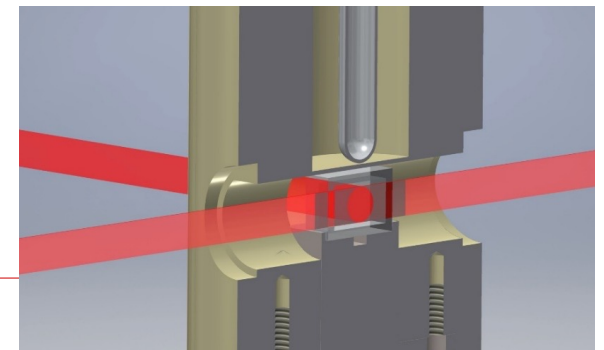
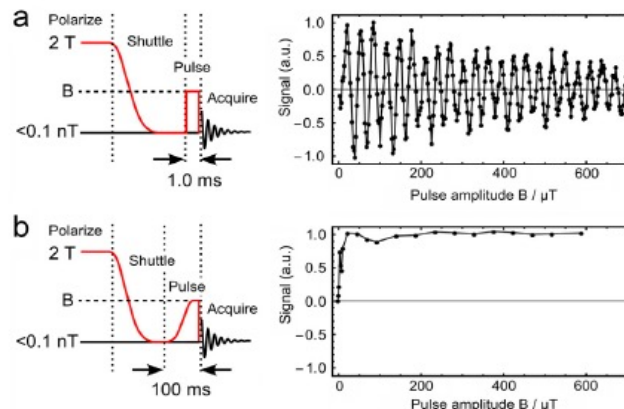
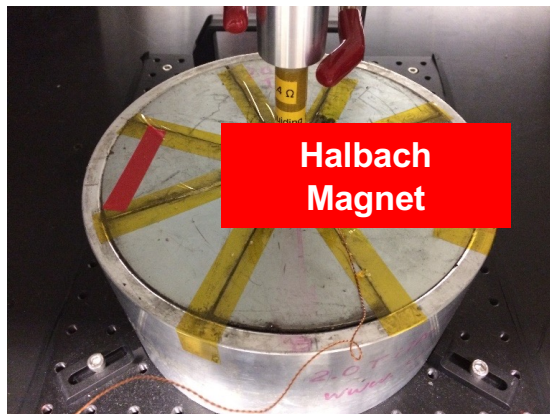
- Magnetic field gradient (Imaging)
- J-coupling (Spectroscopy)



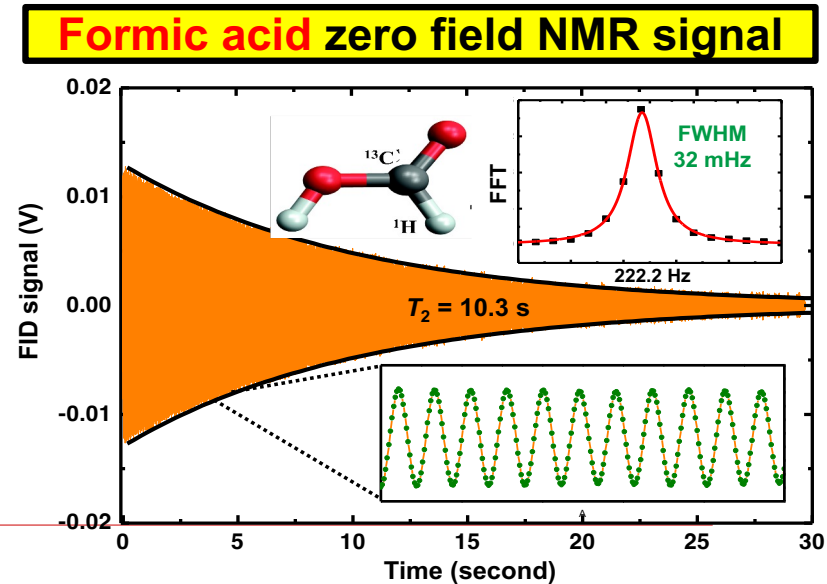
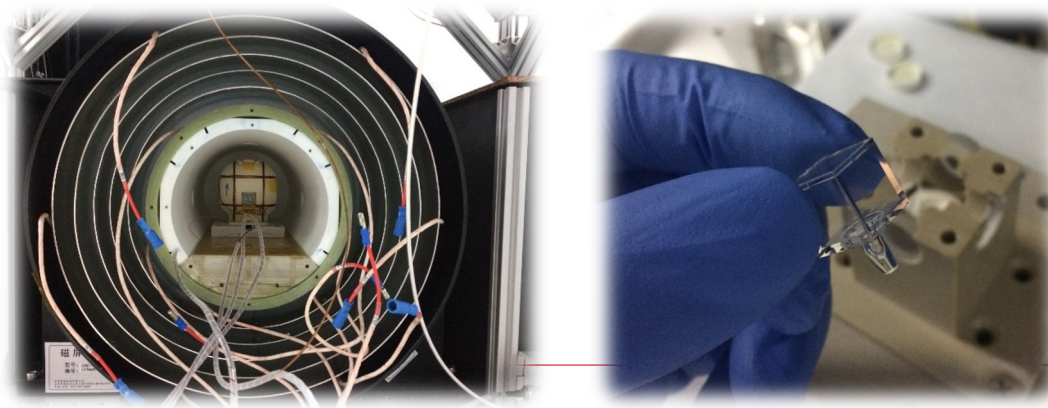
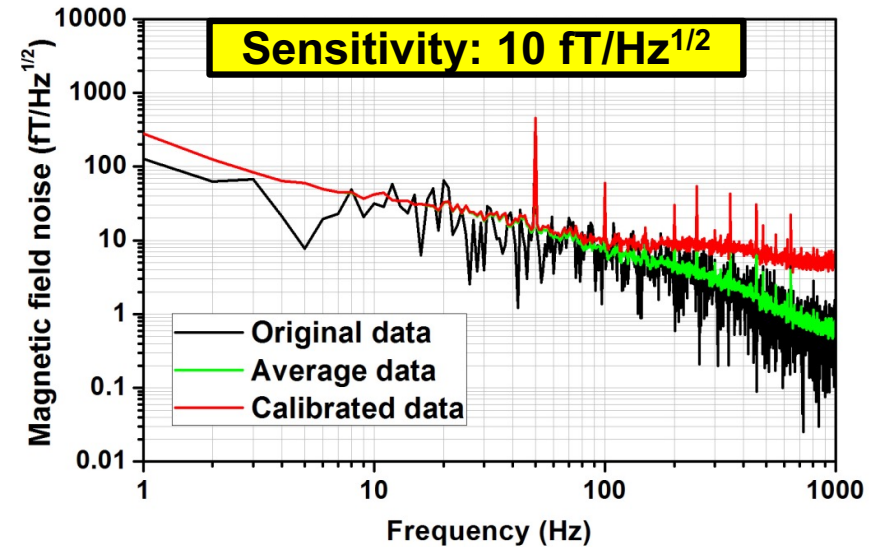
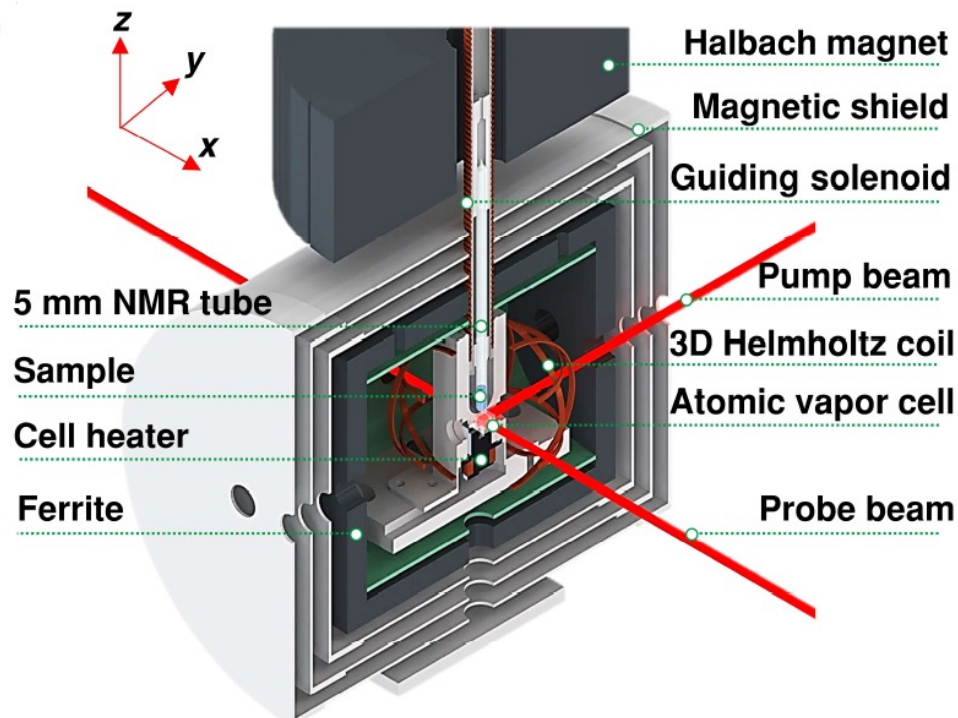
Detection

- Superconducting coil
- Atomic magnetometer

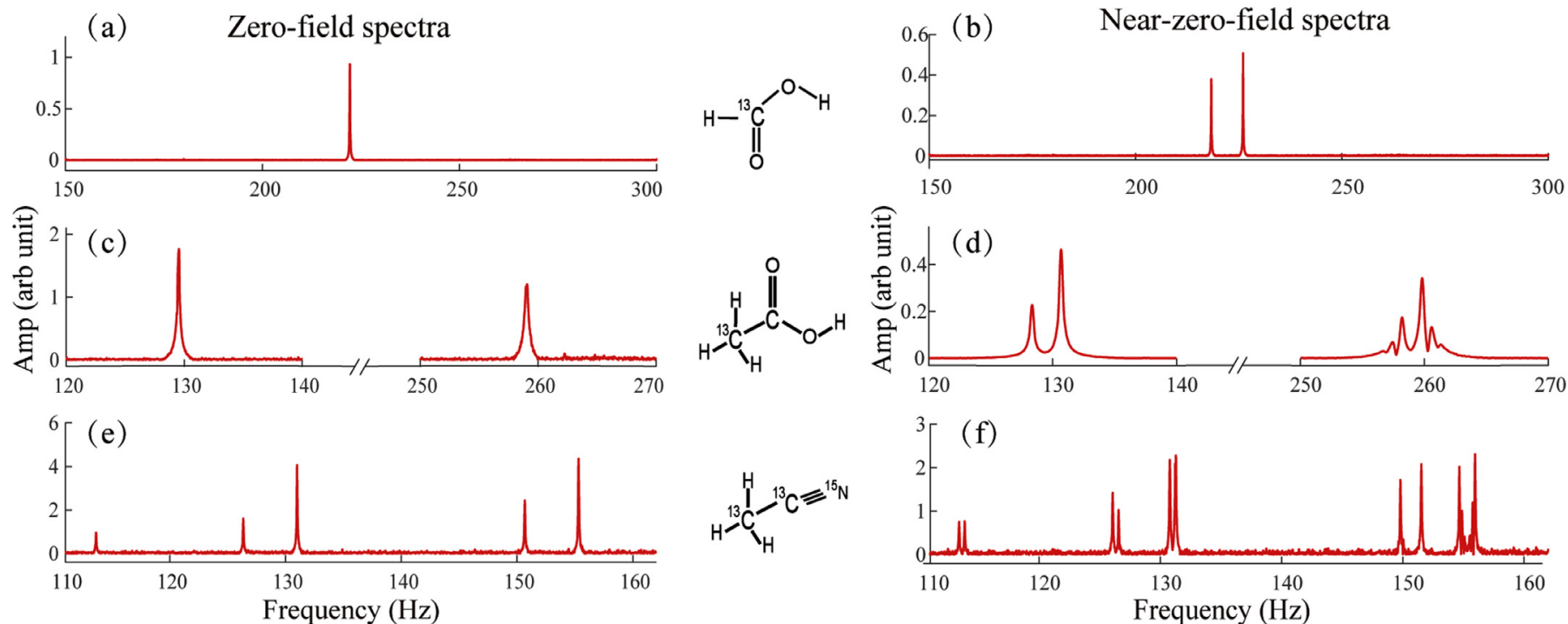
J. Magn. Reson. 270 (2016) 35-49



Zero- & ultralow field NMR (ZULF)

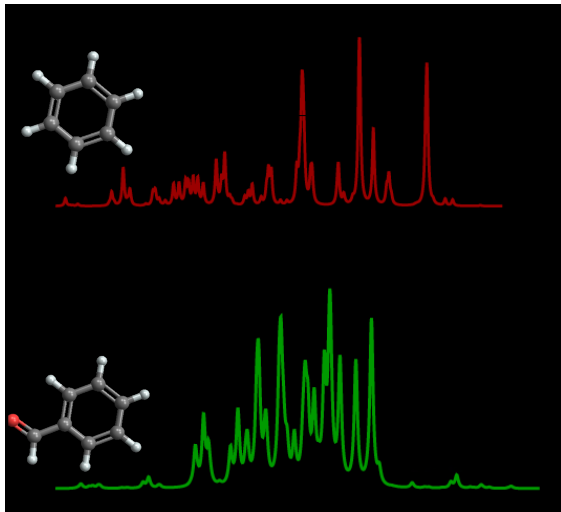


ZULF NMR spectrum

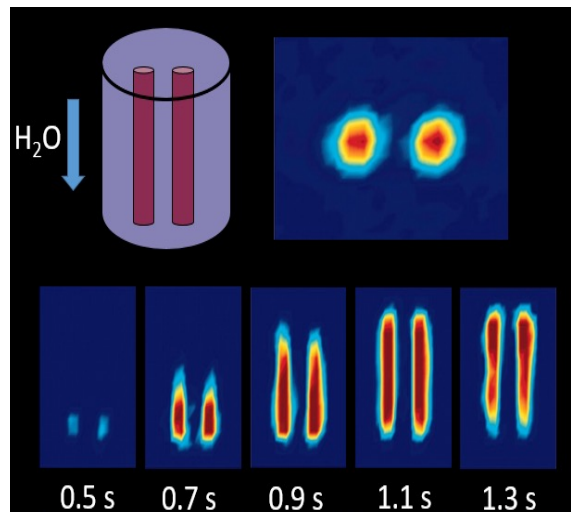


- 对几十种化学物质进行测量，可清晰分辨出不同物质
- 建立零磁场和超低场NMR数据库

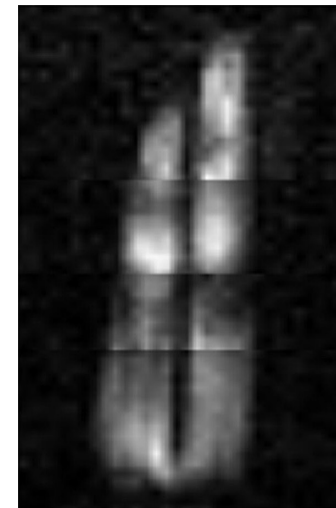
“零磁场”核磁共振谱学



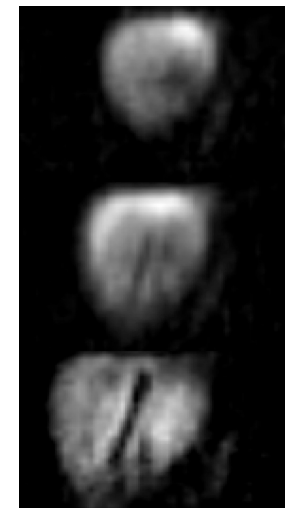
分子结构检测



金属内水成像

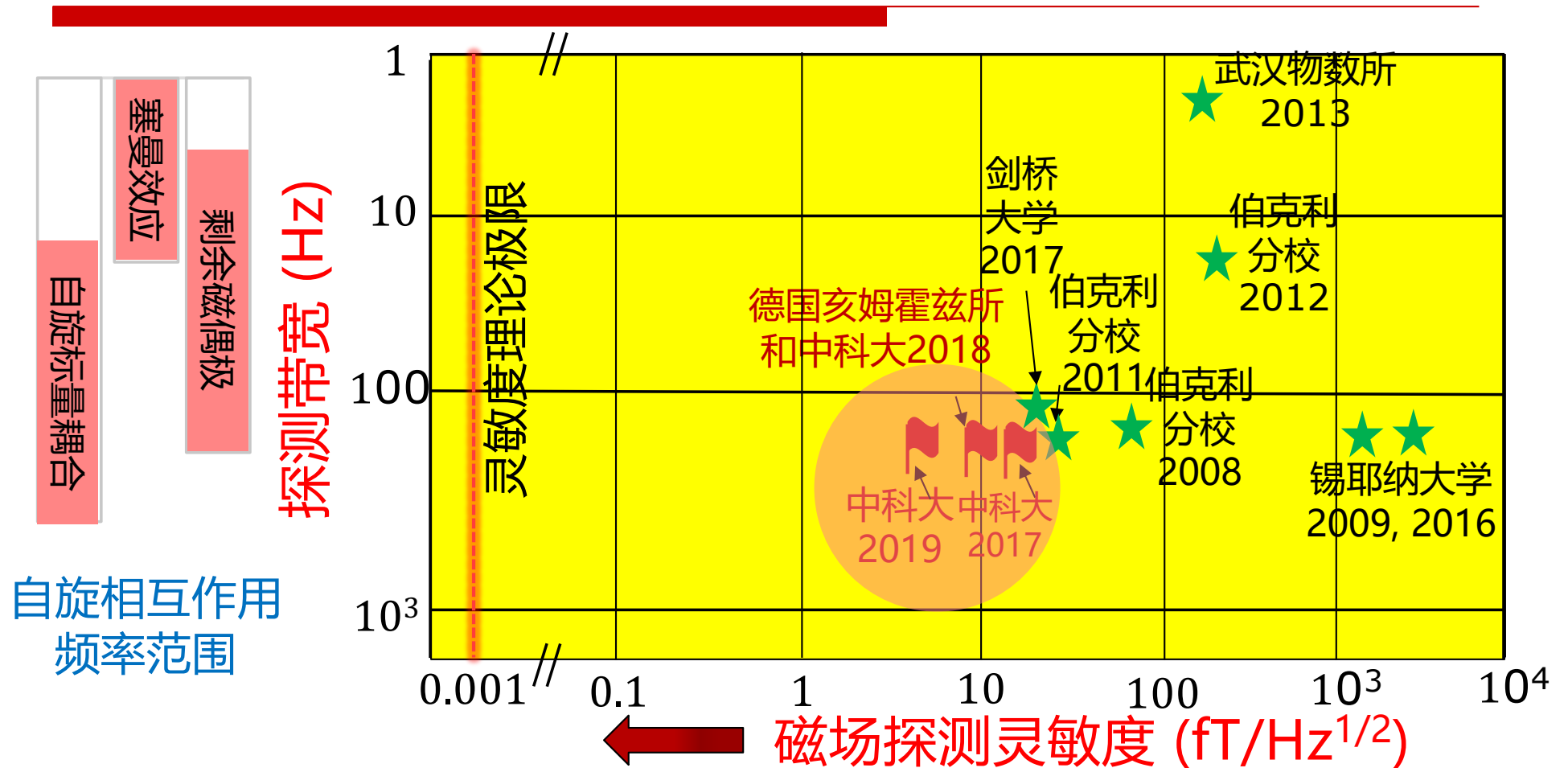


手指成像



脑成像

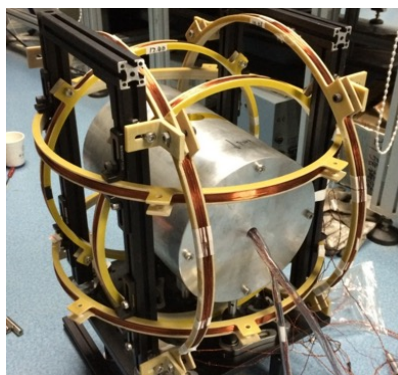
研究目标：高灵敏度、高带宽



但是目前灵敏度水平还远低于商用高场谱仪!

Min Jiang et al., *Science Advances* 4, eaar6327 (2018); *Phys. Rev. Appl.* 11, 024005 (2019)

高灵敏度原子磁力计的研究进展



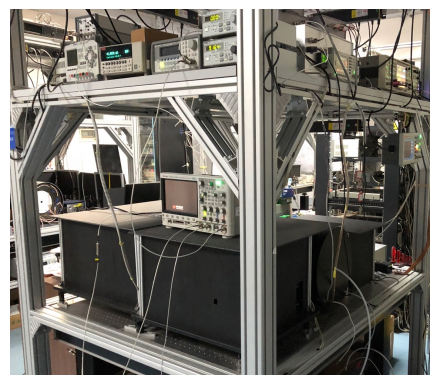
2013-2016年

18fT/Hz^{1/2}



2017-2018年

10fT/Hz^{1/2}



2019-2020年

7fT/Hz^{1/2}

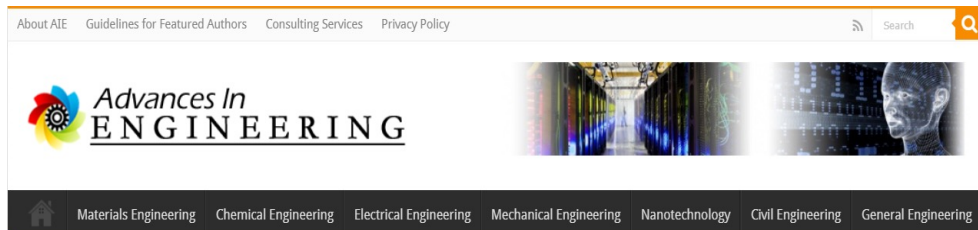


2024年

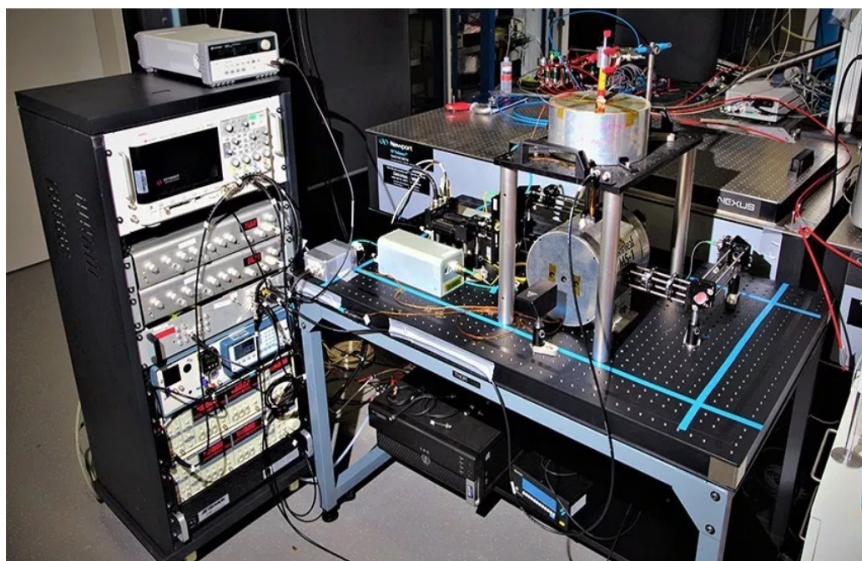
1 fT/Hz^{1/2}

梯度探测零场核磁共振谱仪

首次采用原子梯度磁力计，提升信噪比1个量级



GRADIOMETER IMPROVES “MAGNETIC RESONANCE WITHOUT MAGNETS”

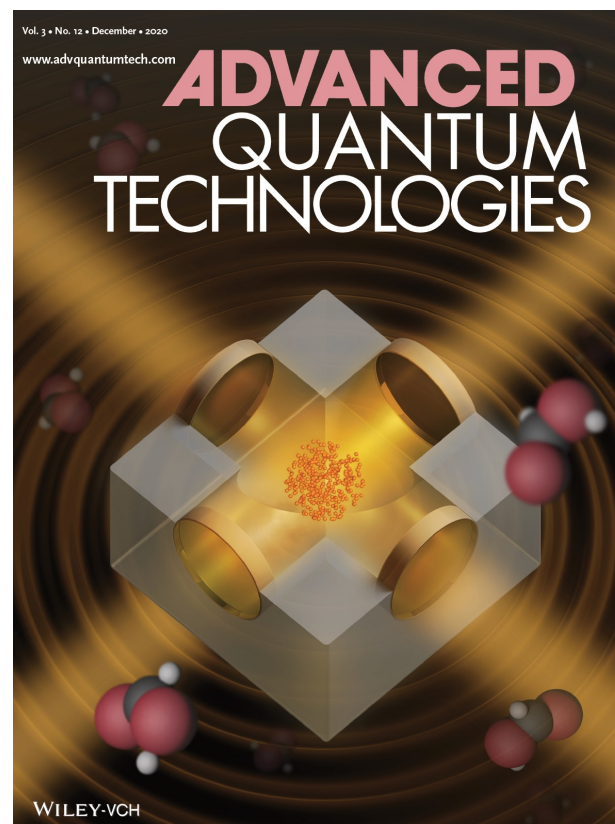
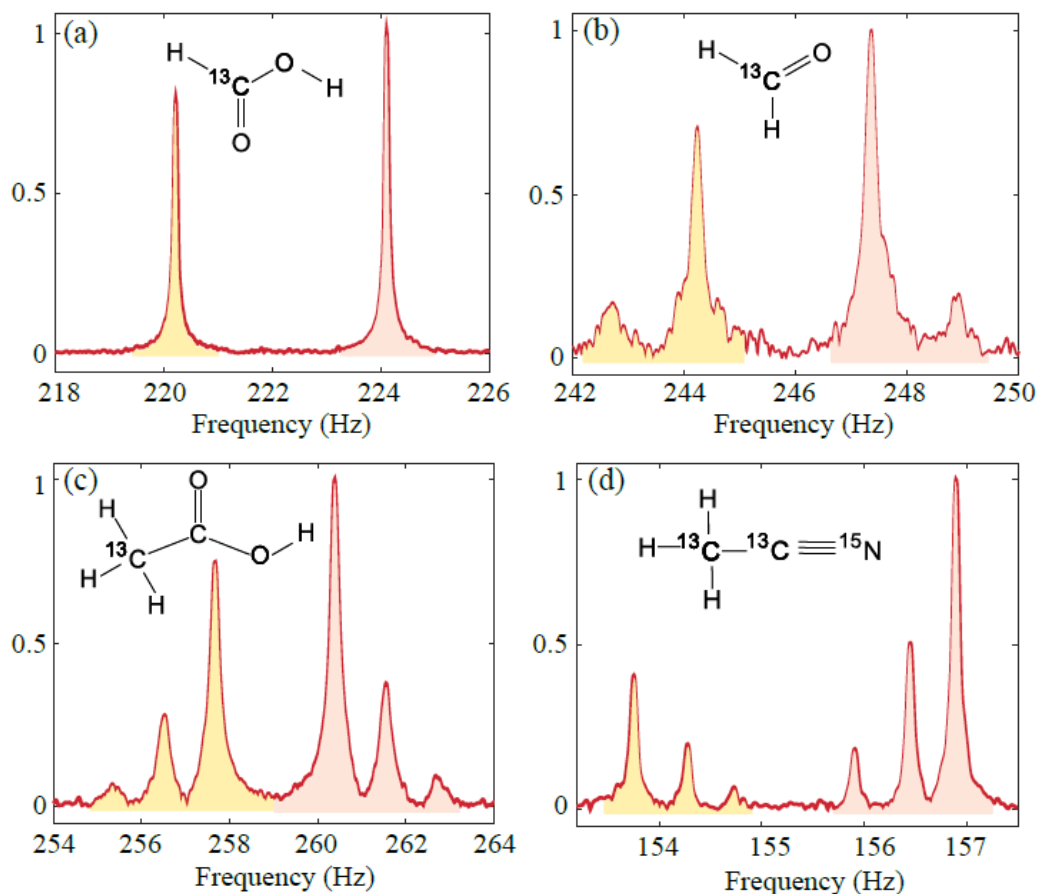


“梯度计提升无需磁体的磁共振”

“...设计一种全新的基于两通道SERF磁力计的装置，能够有效降低该装置对外界磁场噪声的干扰...”

M. Jiang et al., *Phys. Rev. Appl.* 11 (2019) (编辑推荐)

“非对称性”：近零场NMR谱的新特征



[封面文章]

◆ 非对称性的起源问题

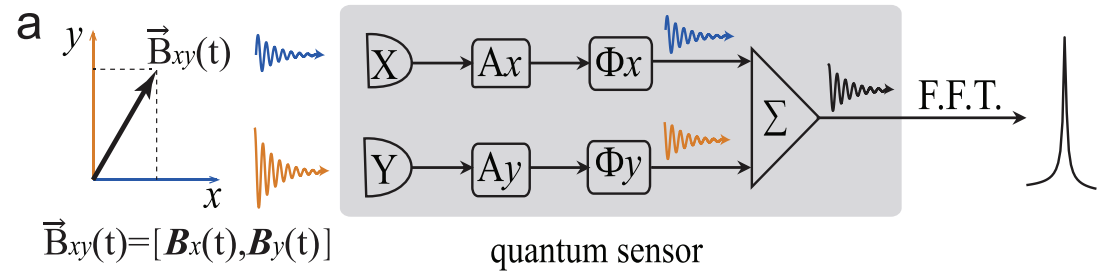
◆ g因子符号测量

◆ 揭示量子干涉效应

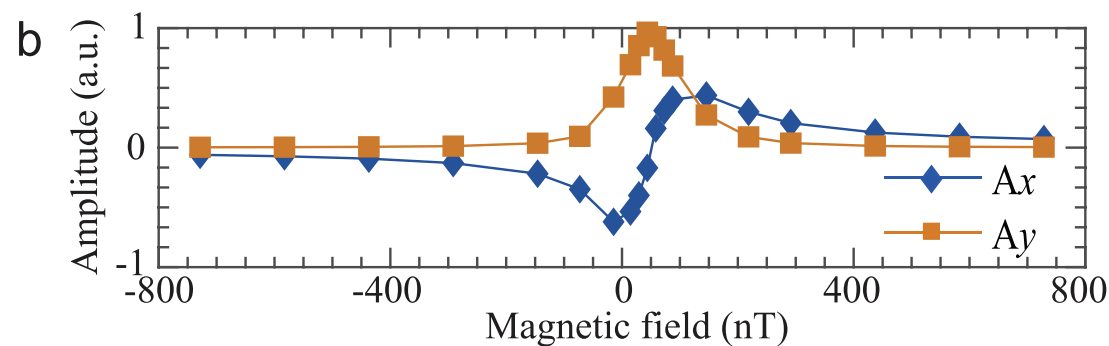
◆ 新型干涉谱学

Min Jiang *et al.* Advanced Quantum Technologies, 2000078 (2020)

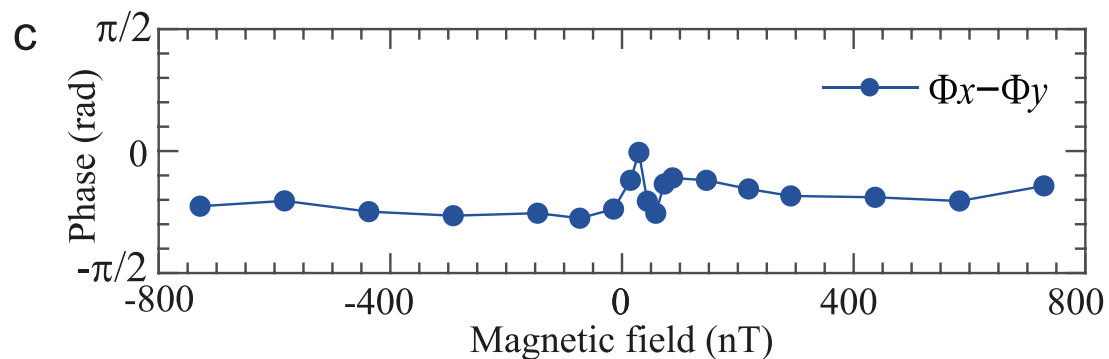
Interference effect in atomic magnetometry



Different responses for the x and y channels



Experimental amplitude responses



Experimental phase responses

Interference effect in atomic magnetometry

$$\mathbf{B}(t) = [B_{x0} \cos(2\pi\nu t + \theta_{x0}), B_{y0} \cos(2\pi\nu t + \theta_{y0}), B_z]$$

The total amplitude response:

$$S_{tot}^2 = (S_x^2 + S_y^2)(1 + \chi \cos \Delta\phi)$$

the interference effect

$$S_x = S_x(\nu, B_z) = \alpha A_x(\nu, B_z) B_{x0}$$

$$S_x = 0 \quad \text{or} \quad S_y = 0 \quad \text{or}$$

$$S_y = S_y(\nu, B_z) = \alpha A_y(\nu, B_z) B_{y0}$$

$$\Delta\phi = \pm\pi/2.$$

$$\chi \equiv 2S_x S_y / (S_x^2 + S_y^2)$$

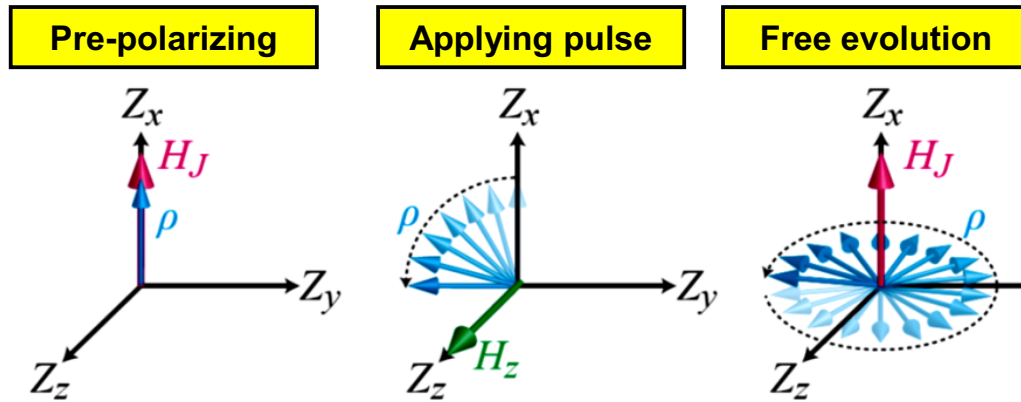
the interference effect vanishes

$$\Delta\phi = \Delta\Phi + (\theta_{x0} - \theta_{y0})$$

$B_z \approx 600$ nT The same initial phases

$$\Delta\Phi \approx \frac{\pi}{5} \quad \text{and} \quad |\chi \cos \Delta\Phi| \approx 0.81 \quad 5\%$$

Quantum control in ZULF NMR

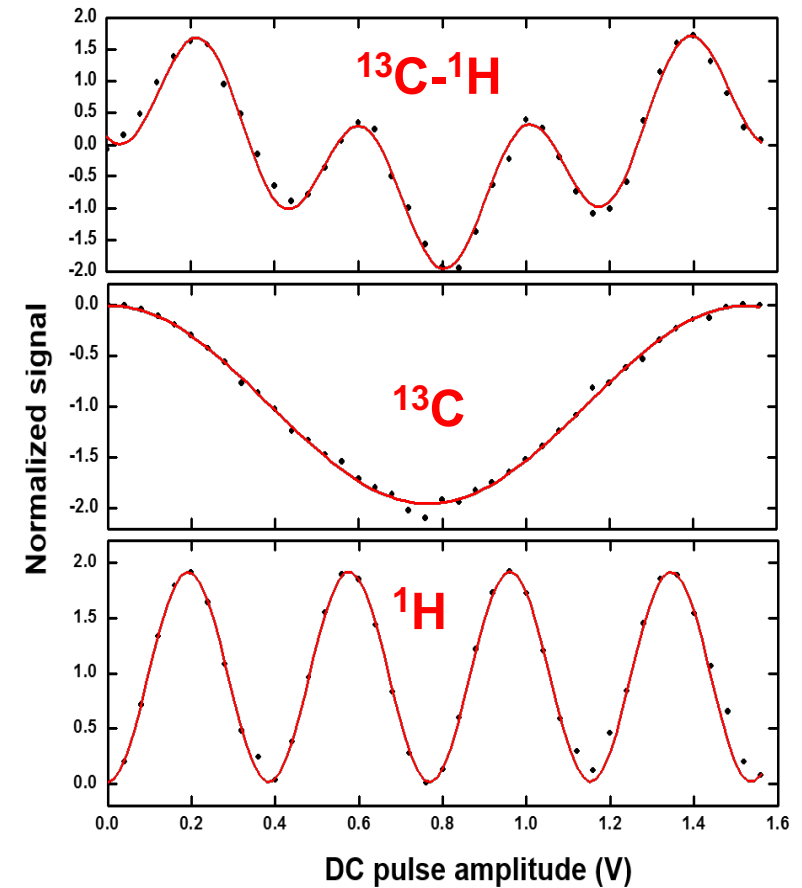


Signal amplitude vs DC pulse amplitude

Single DC pulse : Signal $\propto \cos(\theta_{13C}) - \cos(\theta_{1H})$

Arbitrary rotation on ^{13}C : Signal $\propto \cos(\theta_{13C}) - 1$

Arbitrary rotation on 1H : Signal $\propto 1 - \cos(\theta_{1H})$

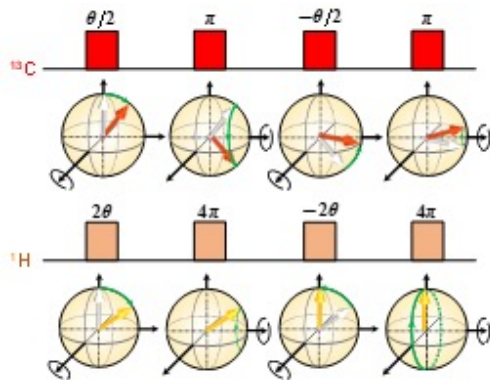


零场量子控制研究

Problems for zero field quantum control

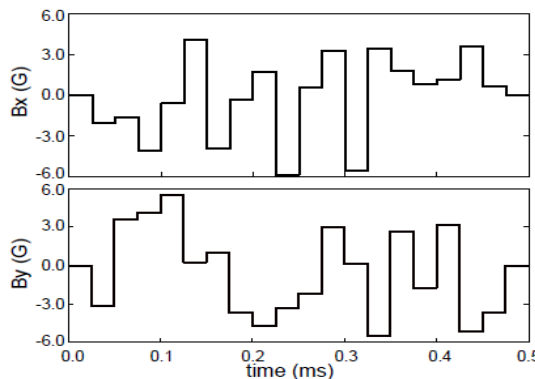
- ❑ Larmor frequency becomes zero at zero field
- ❑ DC magnetic field pulse has no selectivity

Control



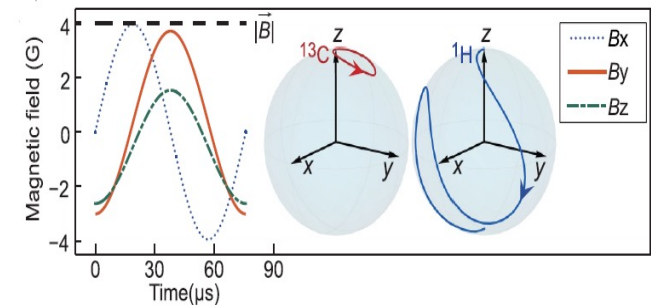
Jiang et al., Science Advances (2018)

Optimal Control

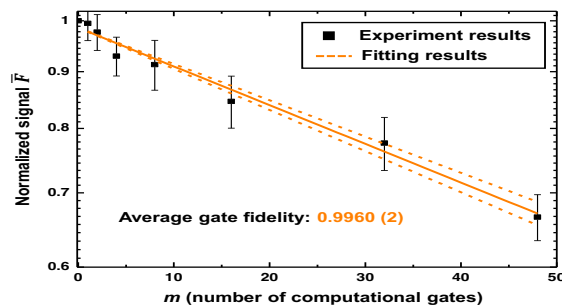


Jiang et al, PRA 97, 062118 (2018)

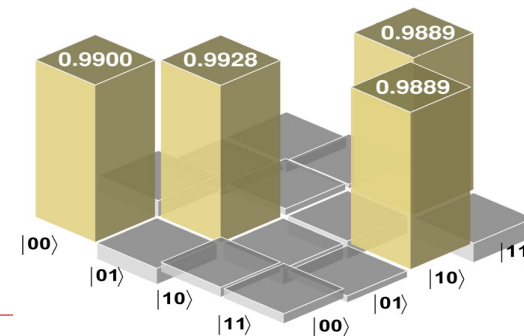
Time-optimal control



Ji et al, PRA 98, 062108 (2018)

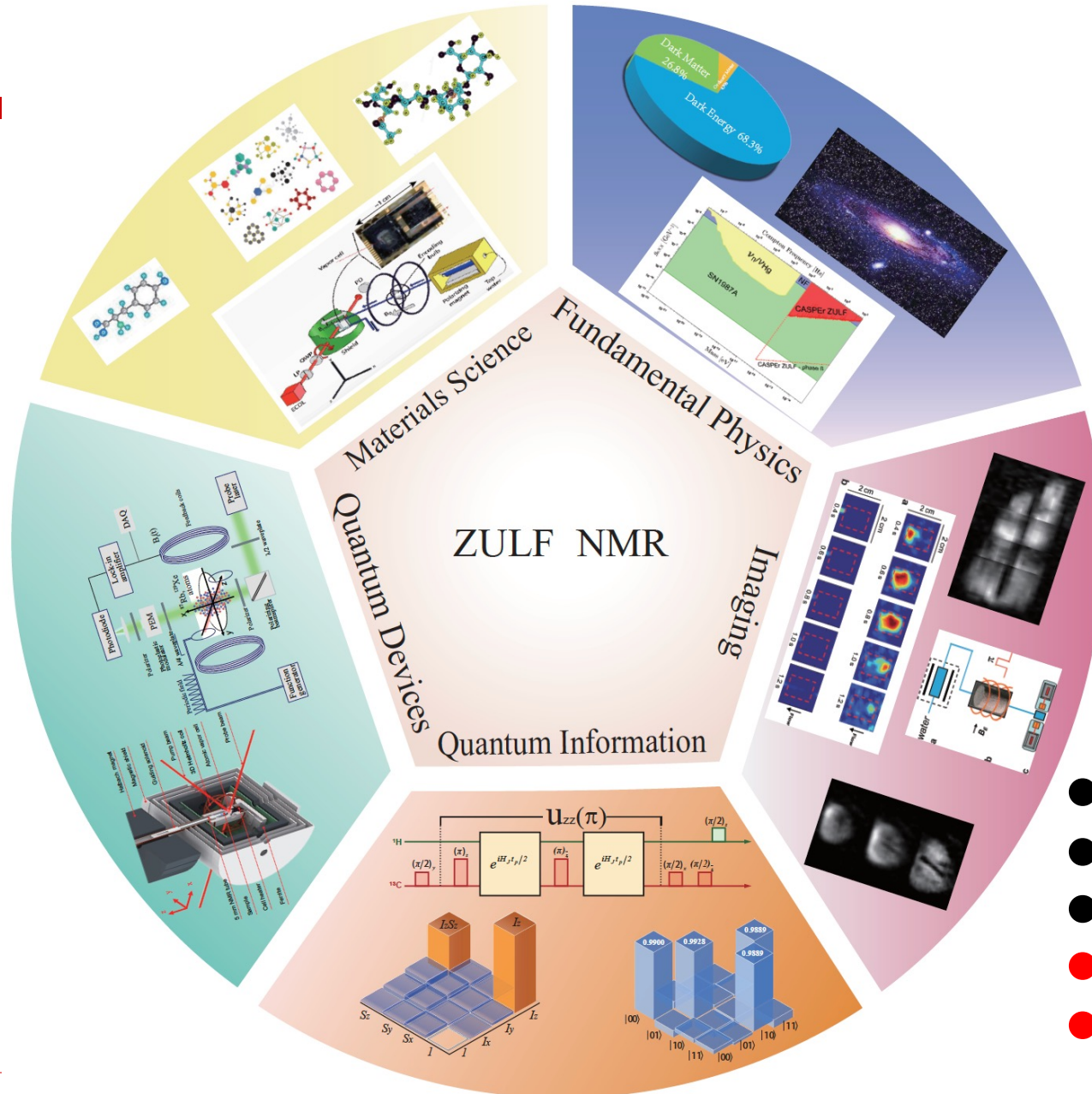


Single-spin fidelity: 99.6%



Two-spin fidelity: 98.0%

综述：零场-超低场核磁共振的**五大应用方向**



- Materials science
- Imaging
- Quantum information
- **Quantum devices**
- **Fundamental physics**

Zero- to ultralow-field nuclear magnetic resonance and its applications,
 Fundamental Research, 1(1):68–84, 2021 (综述邀稿)

第一部分：自旋和自旋磁共振

- 自旋基本概念
 - 核磁共振
 - 零场-超低场核磁共振
 - 单分子微观磁共振 (NV金刚石)
-

基于系综探测的商用自旋磁共振谱仪



核磁共振谱仪

自旋数
 10^{17} - 10^{10}

电子顺磁共振谱仪

10^{12} - 10^{10}

商用磁共振谱仪面向**自旋系综样品**，通过探测自旋系综(大于百亿个自旋)的**空间及时间平均信号**，获取**统计平均**下的物质组成和结构的信息。这一技术已被广泛应用于前沿科学和经济生活的诸多领域，对人类社会产生了意义深远的影响



医学



化学

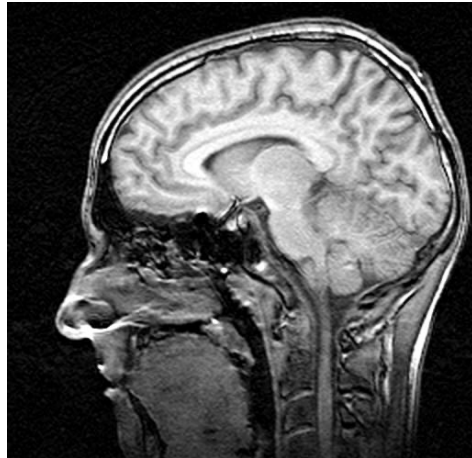


生物



能源

微观尺度磁共振探测



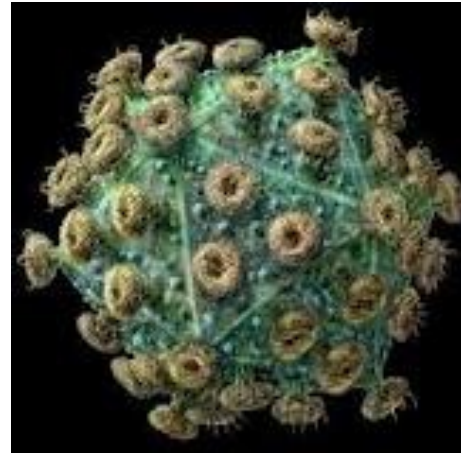
大脑组织轮廓

10毫米



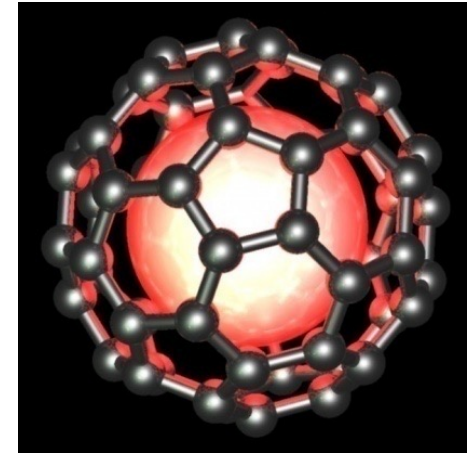
单个红细胞

10微米



单个艾滋病毒

10纳米



单个富勒烯分子

1纳米

看得清

看不清

看不见

手段

传统磁共振 ✓

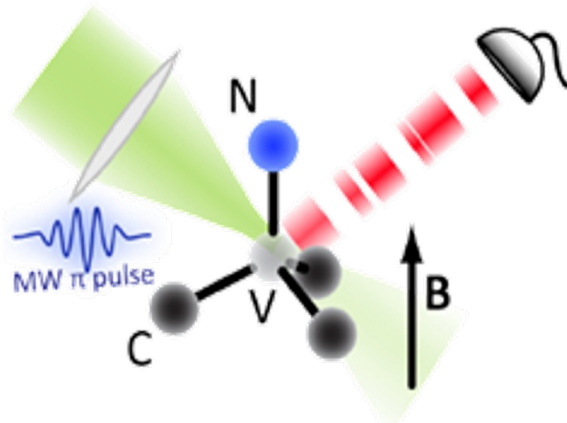
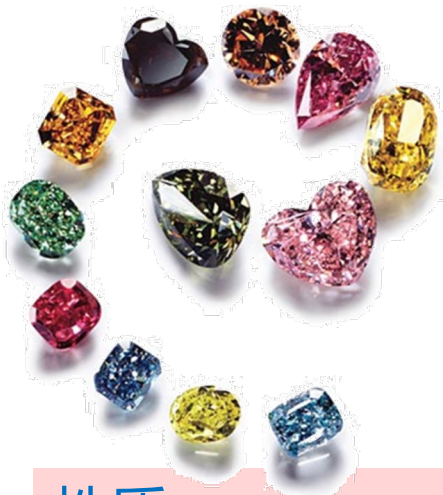
力探测磁共振 ✓

单核自旋探测

- 现有磁共振**尚不具备**对物质进行微观尺度的**灵敏探测**和**空间分辨**能力
- 在**不破坏研究对象**的前提下提供微观物质**内部三维结构信息**，对于前沿科学领域具有极其重要的意义

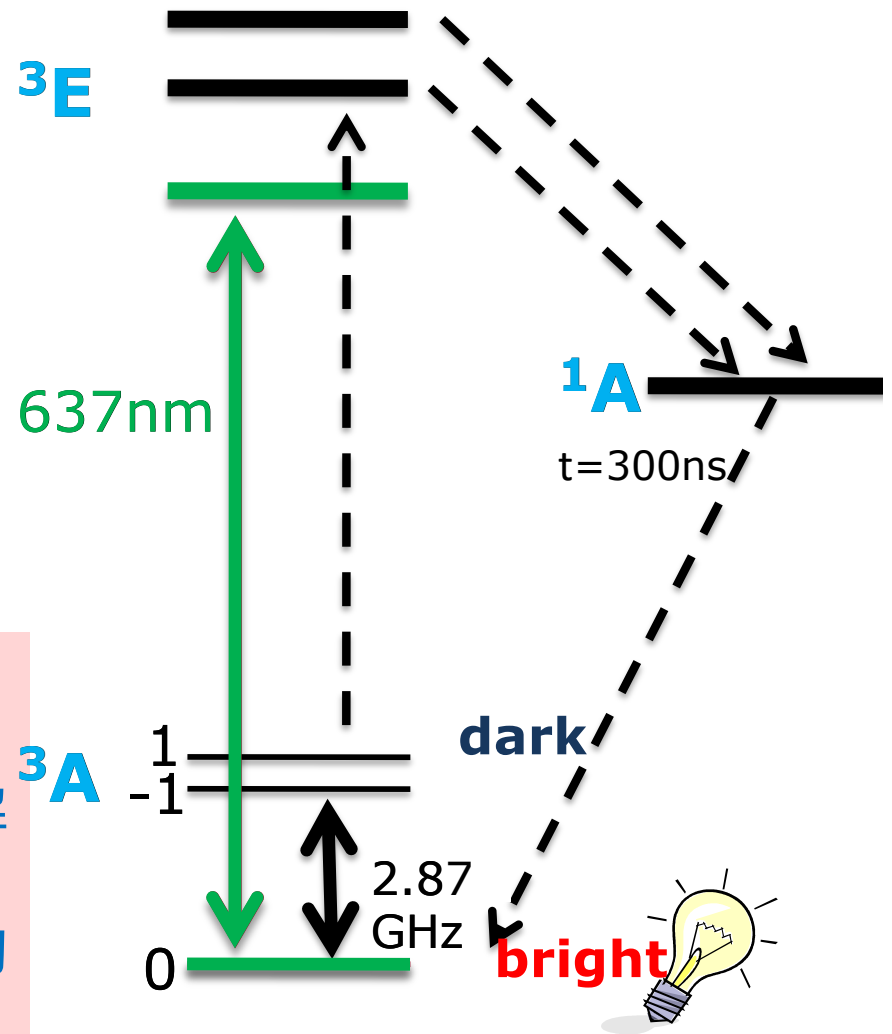
单自旋磁共振：量子钻石探针

由一个替位的氮(Nitrogen)和一个邻位空位(Vacancy)组成(简称NV色心)

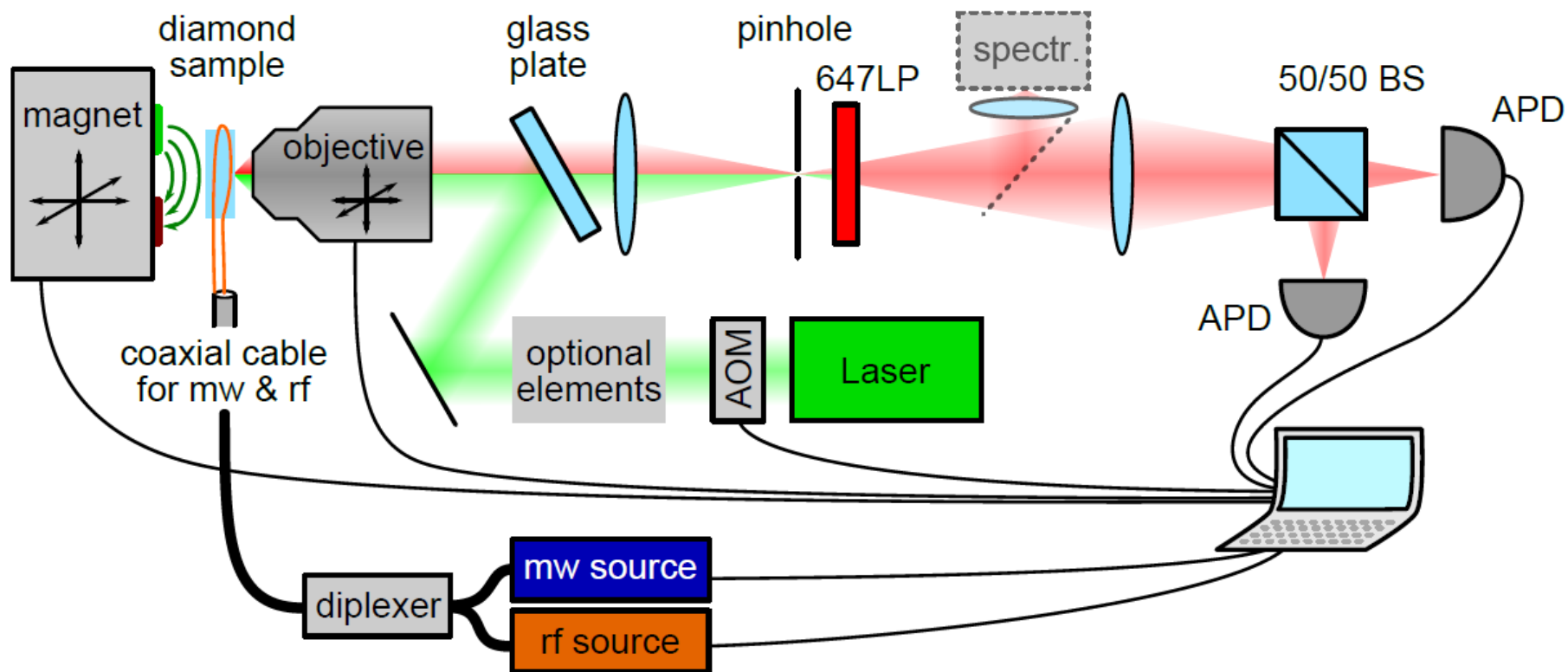


性质

- 原子尺度：高空间分辨率
- 室温下的长量子相干时间结合动力学解耦技术：高灵敏度
- 被测磁信号可转化为自旋量子干涉仪的相位信息，光学手段读出

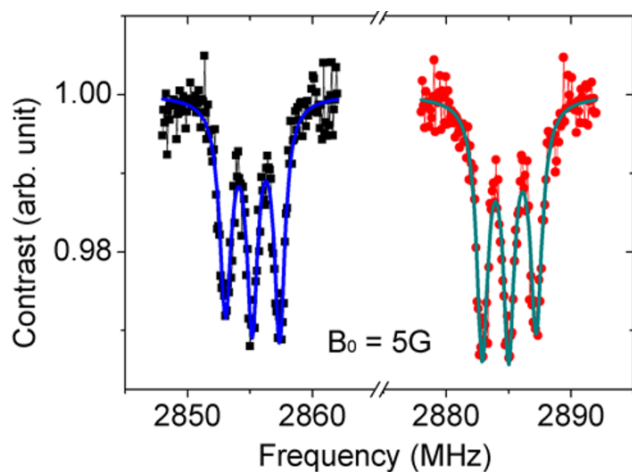
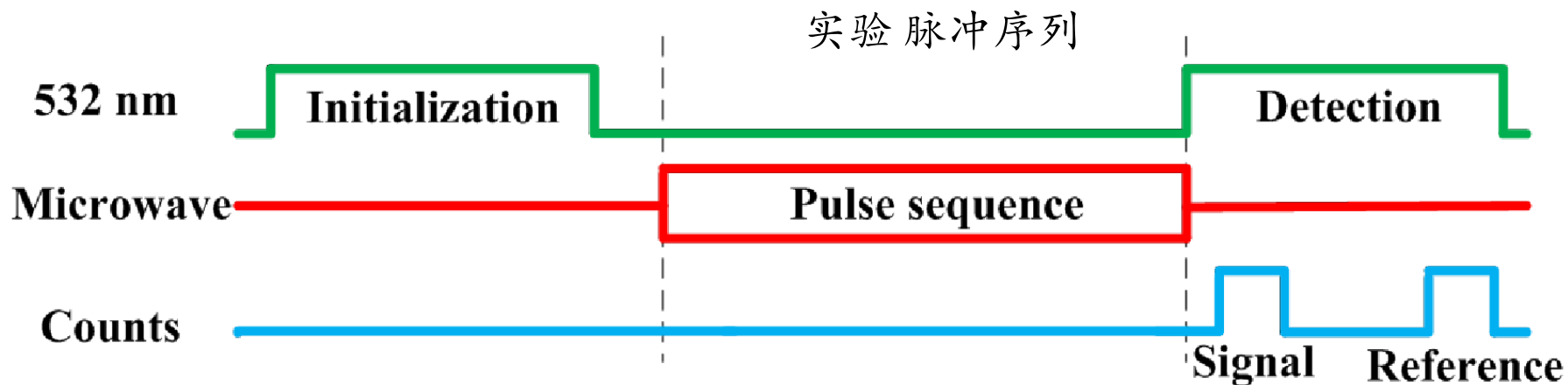


典型的 S 波段共聚集系统

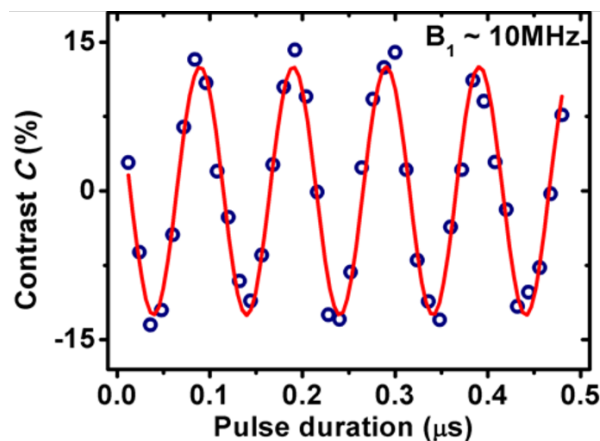


- 1) 光学共聚焦系统，用于初始化 NV 自旋态及读出；
- 2) 微波和射频部分，操控自旋量子态；
- 3) 电子学部分，同步整个系统，如激光、操控脉冲与采样等。

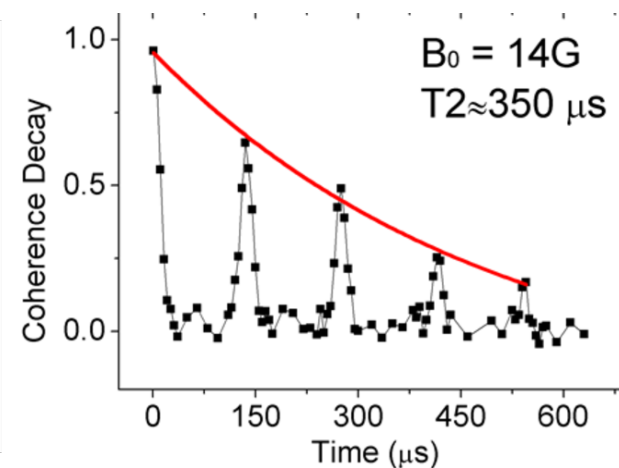
单自旋磁共振谱



ODMR 连续波谱

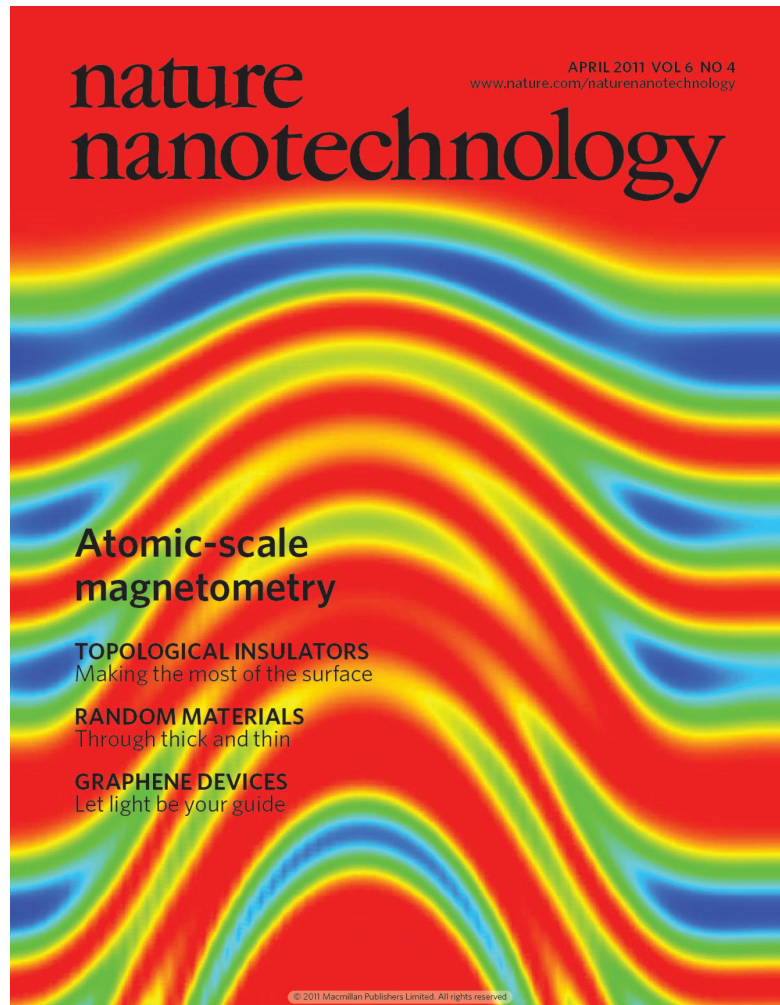


NV 自旋的 Rabi 振荡



NV 的相干时间

Sensing using NV center



Atomic-scale magnetometry

1 nucleus is featureless;
2 (or more) have characteristic

N. Zhao, J. L. Hu, S. W. Ho, J. T. K. Wan, &
RBL, Nature Nanotech. 6, 242 (2011).

~~Toward single-nucleus detection & single-molecule NMR (@ zero field)~~

Sensing using NV center

PRL 109, 137602 (2012)

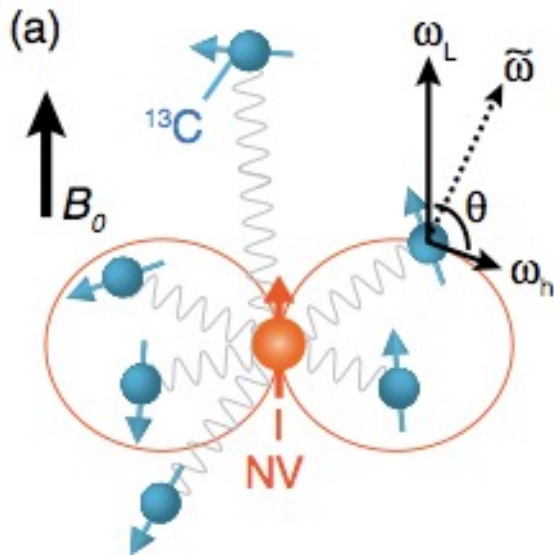
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
28 SEPTEMBER 2012

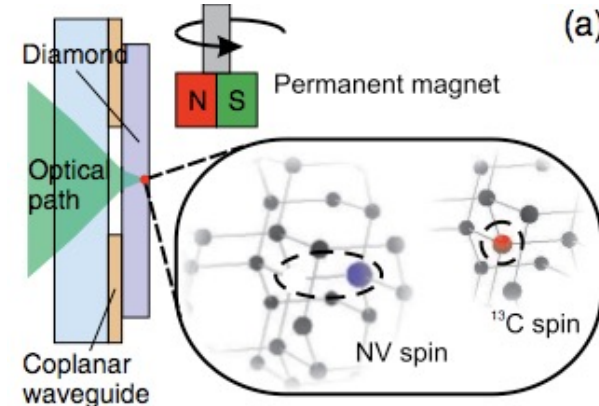
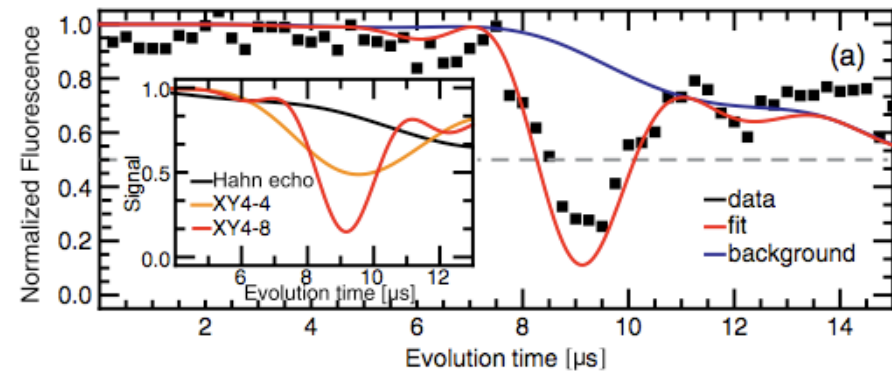


Detection and Control of Individual Nuclear Spins Using a Weakly Coupled Electron Spin

T. H. Taminiou,¹ J. J. T. Wagenaar,¹ T. van der Sar,¹ F. Jelezko,² V. V. Dobrovitski,³ and R. Hanson¹



up to six individual nuclear spins



PRL 109, 137601 (2012)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
28 SEPTEMBER 2012

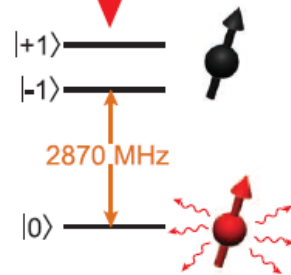
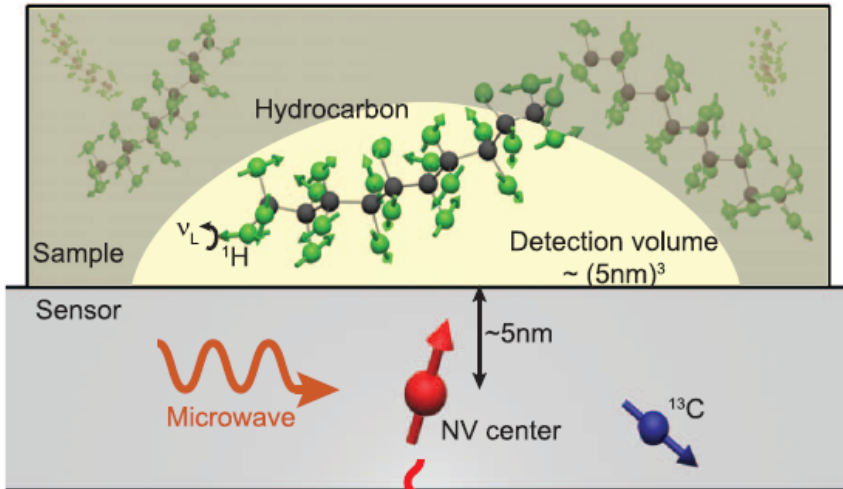


Sensing Distant Nuclear Spins with a Single Electron Spin

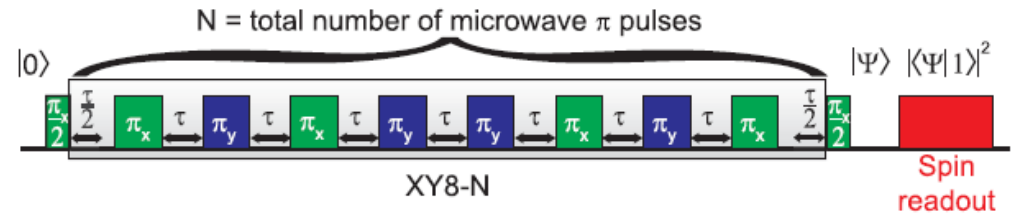
Shimon Kolkowitz, Quirin P. Unterreithmeier,^{*} Steven D. Bennett, and Mikhail D. Lukin

探测金刚石表面液体和固体中质子的信号

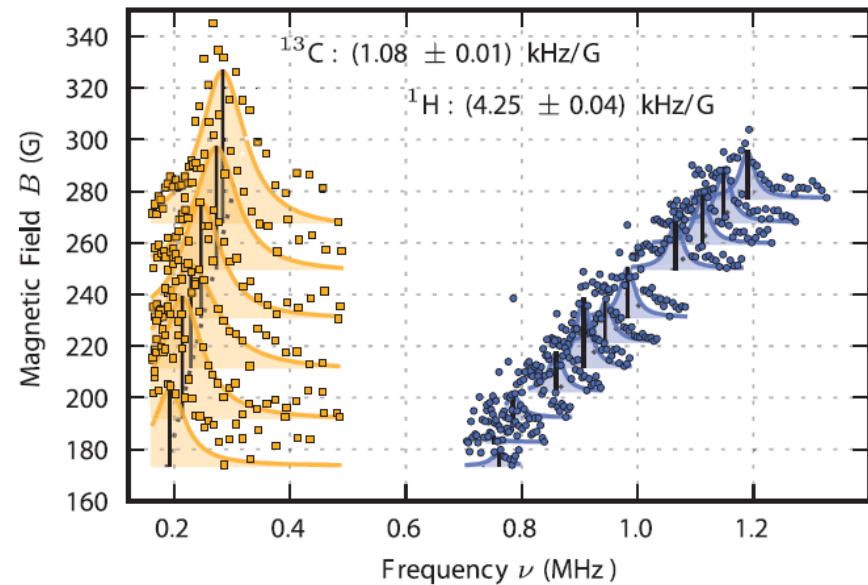
动力学去耦序列探测自旋体系噪声



频率正比于外磁场，斜率即为各自的旋磁比



极化核自旋的 NMR 谱



Sensing using NV center

PROTEIN IMAGING

Single-protein spin resonance spectroscopy under ambient conditions

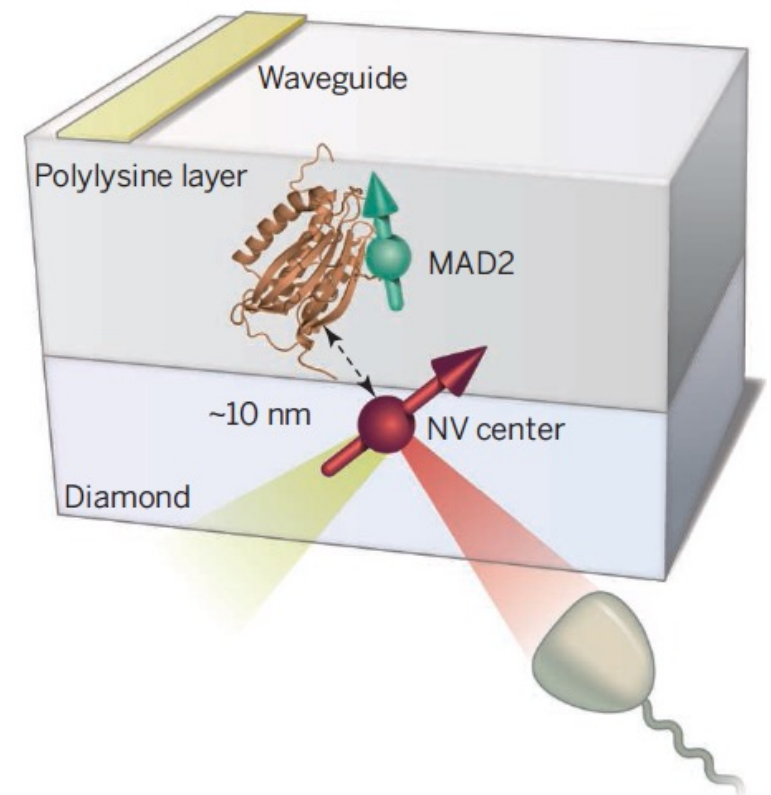
SCIENCE (2015) 347, 1135

PHYSICS

Single proteins under a diamond spotlight

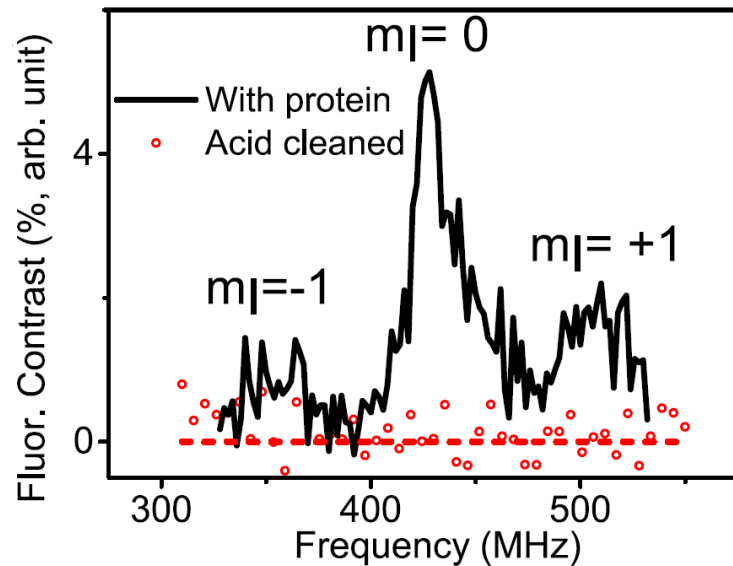
A diamond nanomagnetometer is used to probe conformational changes of a single protein

By Philip Hemmer¹ and Carmen Gomes² | in a virus molecule down to



单蛋白质分子顺磁共振谱

Science 347, 1135 (2015)



单蛋白质分子顺磁共振谱

- 世界上首张单分子顺磁共振谱
- 与传统电子顺磁共振相比
分辨率: 10^{-3} 米 \rightarrow 10^{-9} 米
灵敏度: 10^{10} 分子 \rightarrow 单分子
- 具备室温大气的宽松实验环境, 尤为适合开展活体研究
- 与超高分辨荧光显微技术 (2014年诺贝尔奖) 相比, 不仅同样能够提供纳米分辨率的空间定位信息, 还可进一步解析出单个分子的结构信息和构象变化

实现室温纳米尺度磁共振探测

关键问题突破：
“足够近”，“足够灵敏”

原子尺寸探针：
量子钻石探针

原理创新：
单自旋量子干涉仪

技术创新：
动力学解耦提升
探针量子相干时间

单分子
磁共振

科学成果验证

- 不断提升探测灵敏度
 - 实现核自旋小系综探测
Science 339, 561 (2013) (国际合作)
 - 实现单核自旋对探测和结构解析
Nature Physics 10, 21 (2014)
 - 实现单核自旋灵敏度探测
Nature Communications 5, 4703 (2014)
(国际合作)
- 纳米尺度微波磁场矢量重构
Nature Communications 6, 6631 (2015)
- 单生物大分子结构与动力学
Science 347, 1135 (2015)

早期磁共振成像的发展



早期磁共振设备

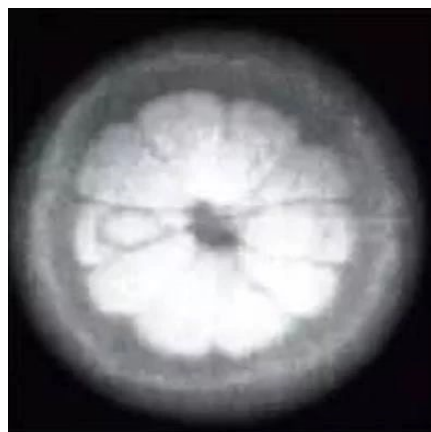
1973

首张磁共振
成像图



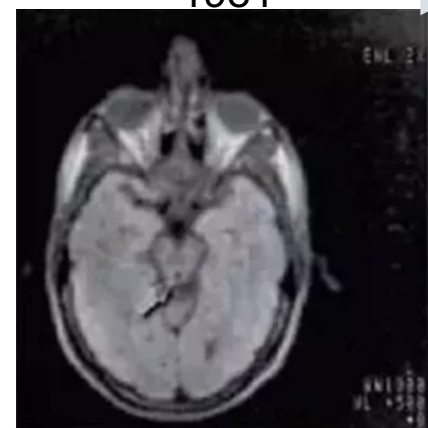
1980

首张大脑磁共振
成像图



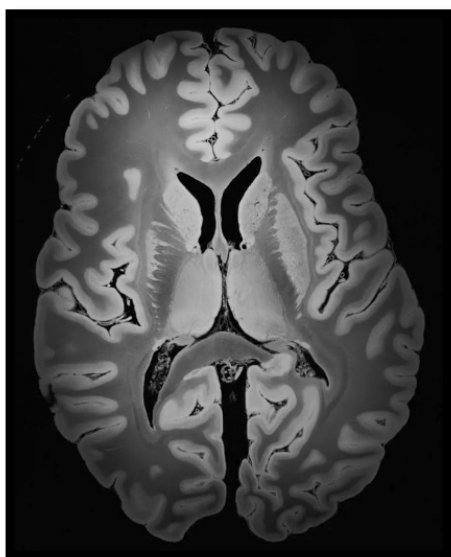
首张傅里叶变换
后的图像

1981

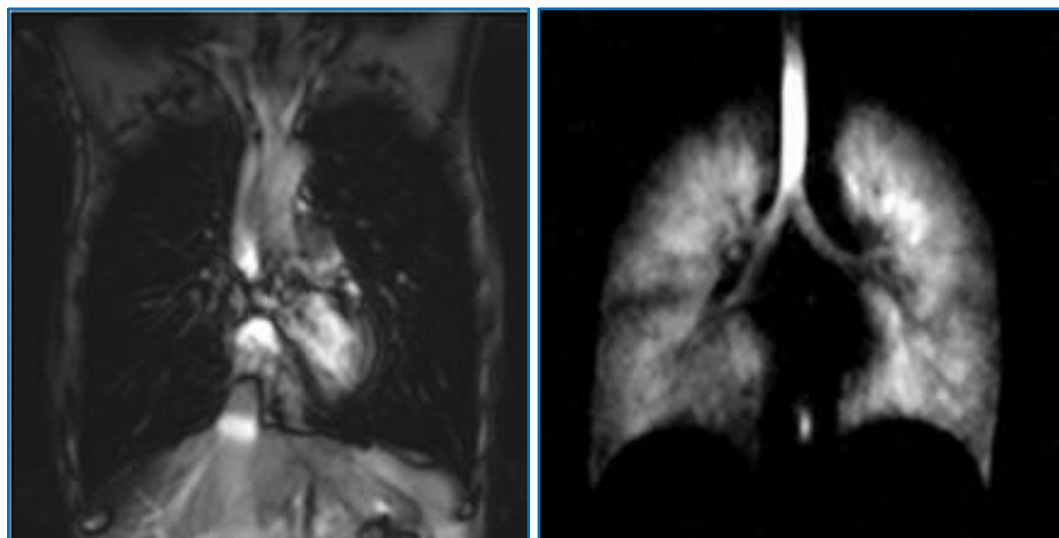


现代核磁共振向更高指标迈进

朝向高空间分辨率、拓展传统磁共振的应用边界

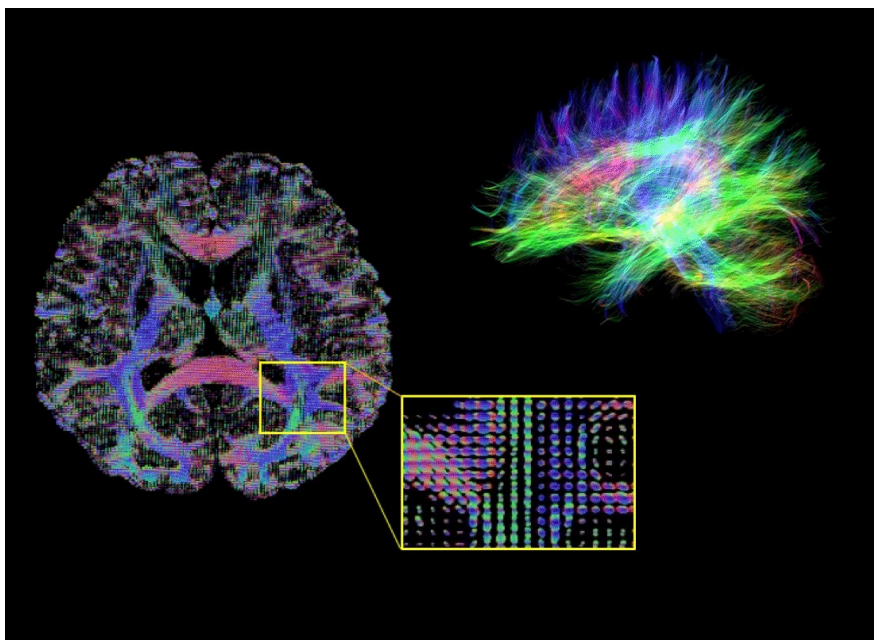


高分辨率磁共振图像
(澳大利亚昆士兰大学)
目前医用7T-MRI仪器的
最优分辨率约为**0.5毫米**



“点亮”肺部 (武汉物数所)
突破传统磁共振技术在肺部的应
用局限，实现**肺部磁共振检测**。

现代核磁共振助力精准医疗



动态成像 (联影医疗)

对于大脑神经实现**动态追踪成像**,
增加对于脑科学的认知。

nature

spotlight

Brain sciences in China

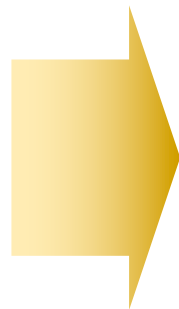


精神影像学 (四川大学华西医学院)

量化大脑特征, 在结构、功能和分子
水平, 建立一套综合的精神病理学体
系。

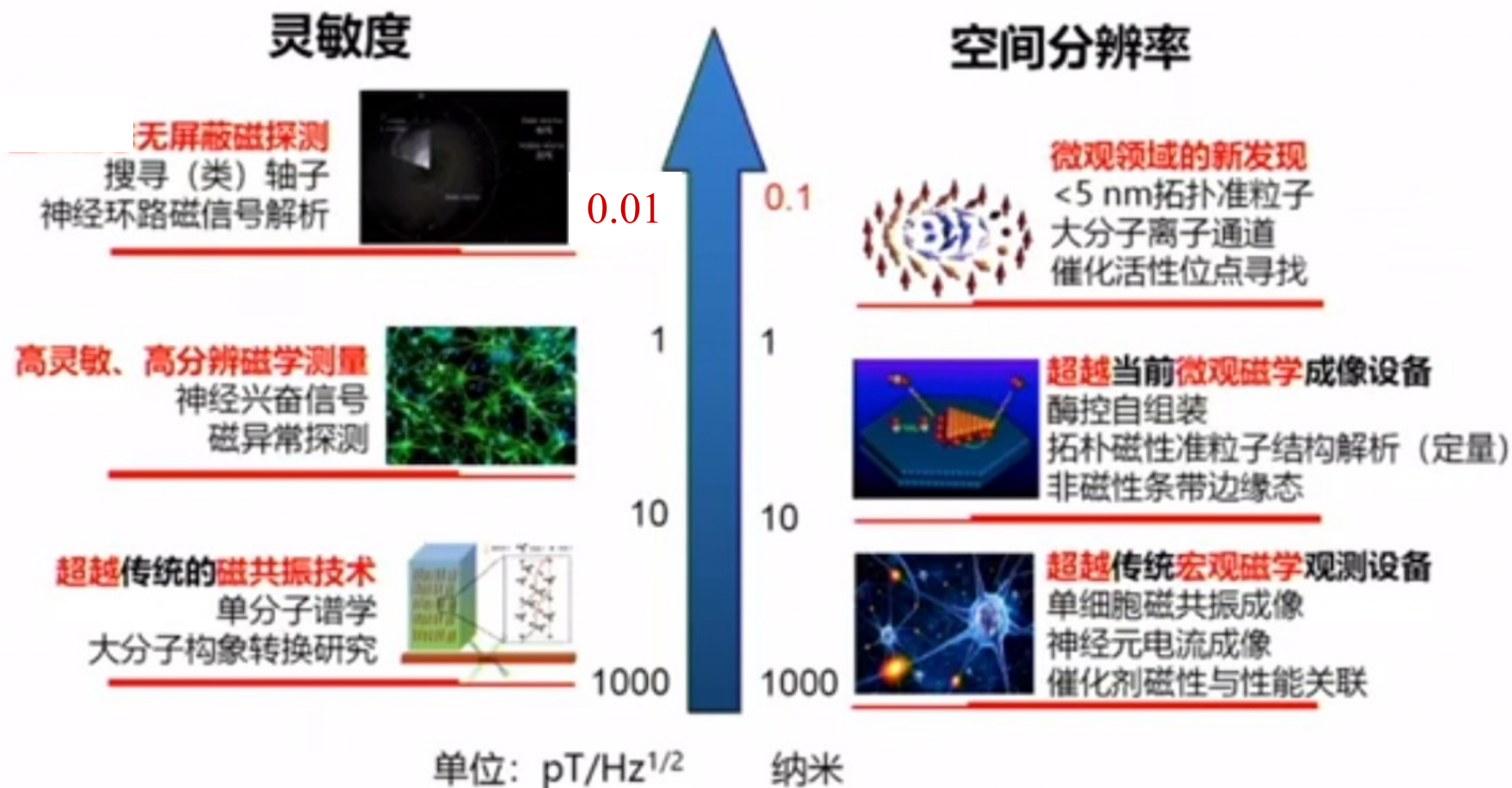
未来应用：量子精准医疗

- 活细胞单分子层面的病理研究
- 各种癌症的早期诊断

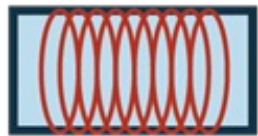
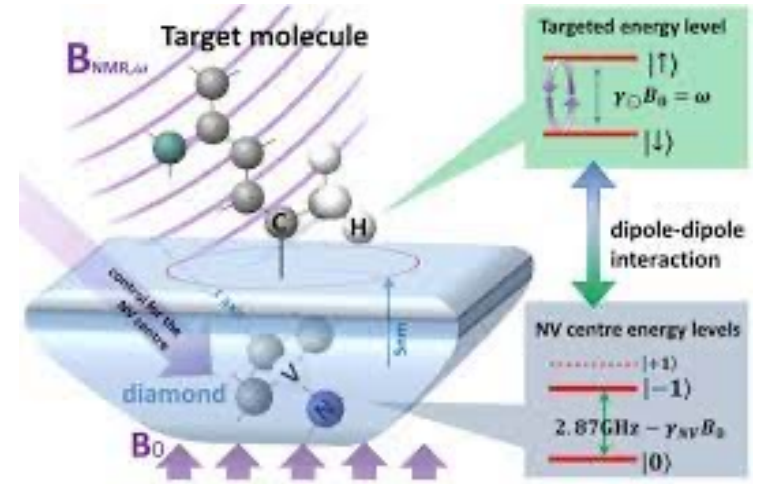
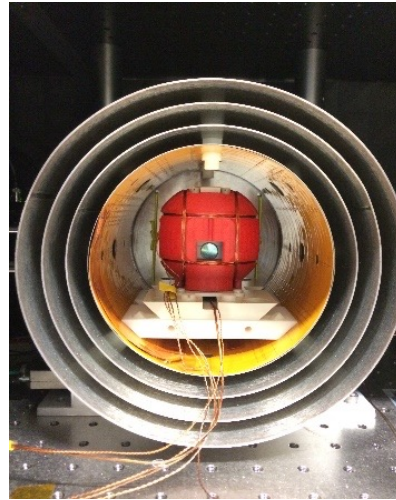


展望

指标提升将带来科学研究能力的进一步突破



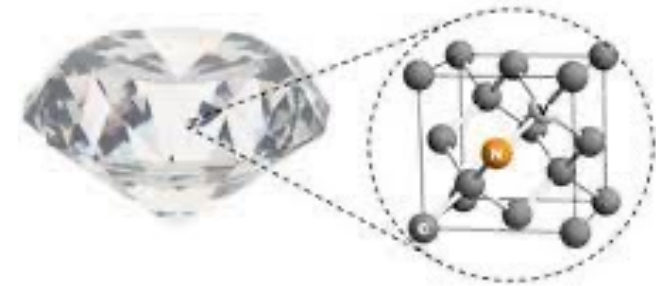
总结



传统高场NMR



零场-超低场NMR



单分子NMR