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

INTRODUCTION TO SPECIAL ISSUE SPIN

The next century of spin

ILYA KUPROV AND WARREN S. WARREN Authors Info & Affiliations

SCIENCE ADVANCES 16 Sep 2026 Vol 12, Issue 38 DOI: 10.1126/sciadv.aem0444

SCIENCE ADVANCES | REVIEW

SPIN

One hundred years of spin: Fundamental physics, dark matter, exotic interactions, and all that

Dmitry Budker[1,2,3,4]*†, Tim Chupp[2,5]†, Klaus Kirch[6,7]†, W. Mike Snow[8]†

For a century, spin has been an indispensable probe of the fundamental laws of nature. A reflection on the role of spin in shaping modern physics is presented, from the early days of quantum mechanics to the latest precision tests of the Standard Model. The significance of magnetic and electric dipole moments in testing *CP* and *CPT* symmetries is surveyed, along with the ongoing searches for exotic spin–dependent interactions that may reveal the nature of dark matter and its connection to spacetime geometry. Through these vignettes, it is shown that spin continues to provide a fresh perspective on the most profound questions in physics today.

Copyright © 2026 The Authors, some rights reserved; exclusive licensee American Association for the Advancement of Science. No claim to original U.S. Government Works. Distributed under a Creative Commons Attribution License 4.0 (CC BY).

What is Spin?

电子的两大内禀属性

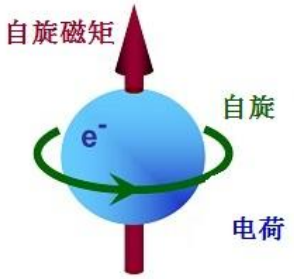
电荷
（电流起源）

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



自旋
（磁性起源）

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

自旋的广泛应用

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

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

内容摘要

第一部分：　自旋和自旋磁共振

第二部分：　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）

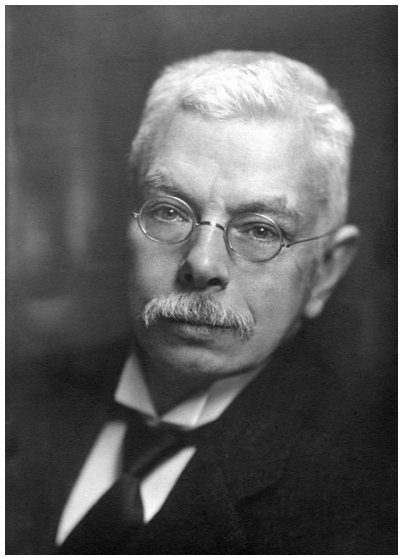
第一部分： 自旋和自旋磁共振

- 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）

人类是怎样认识自旋的？

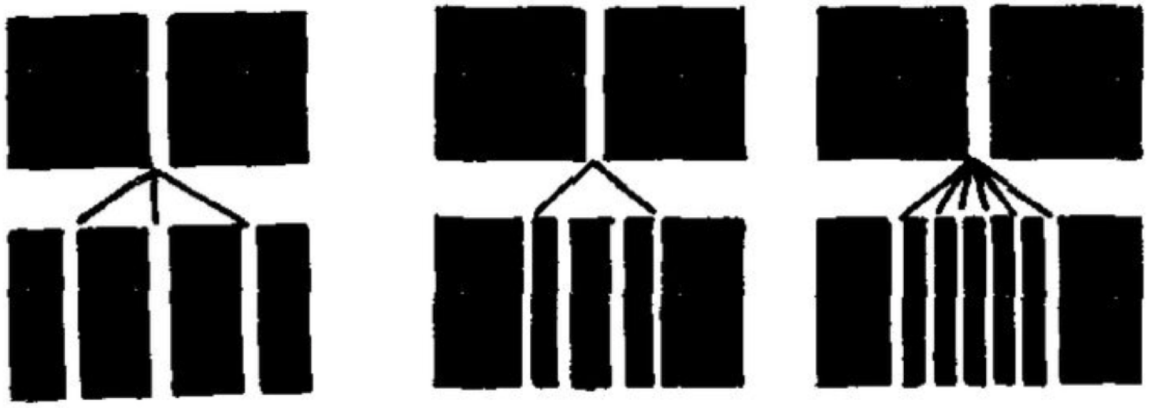
塞曼效应

外磁场中的原子：塞曼效应与反常塞曼效应



塞曼

1896年 “双线之谜” 1897年

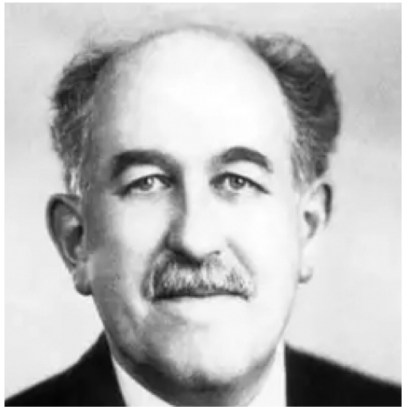


(a) 正常塞曼效应　　(b) 反常塞曼效应

1902年诺贝尔物理学奖

The Stern-Gerlach experiment at 100, Nature 4, 140 (2022)

斯特恩-格拉赫实验

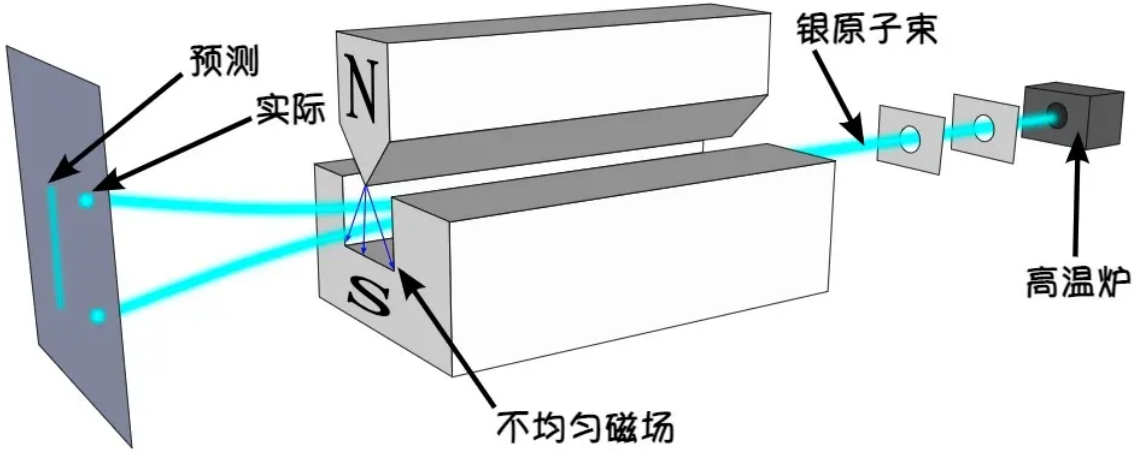


斯特恩



格拉赫

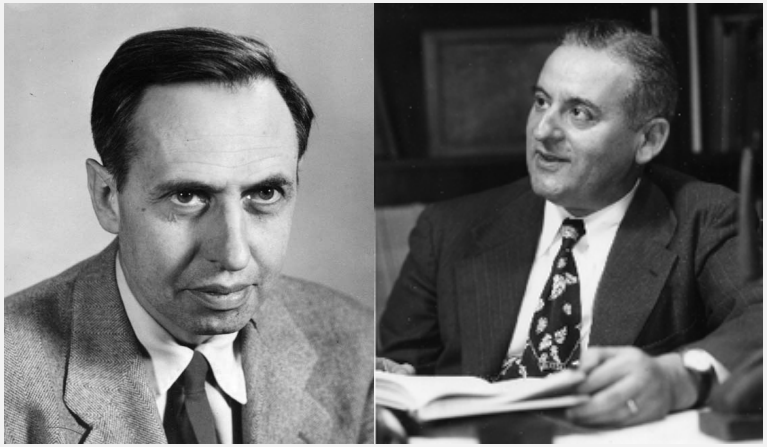
原子射线在非均匀磁场中的偏转



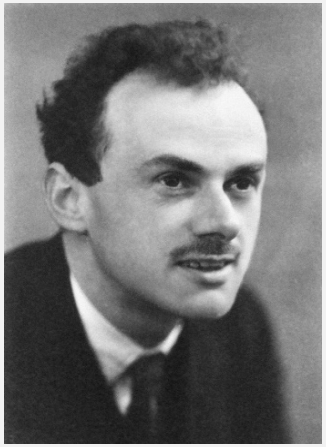
- 1922年首次首次证实原子在磁场中取向量子化的著名实验，**证实了角动量的量子化**（一种新的角动量）
- 发现**质子磁矩**
- 1943年诺贝尔物理学奖

The Stern-Gerlach experiment at 100, Nature 4, 140 (2022)

电子自旋假设



1925 乌伦贝克和古兹米特



1928 狄拉克

乌伦贝克：痴迷理论物理，对前沿实验结果完全不懂
古兹米特：只关注实验光谱学，基础理论水平弱

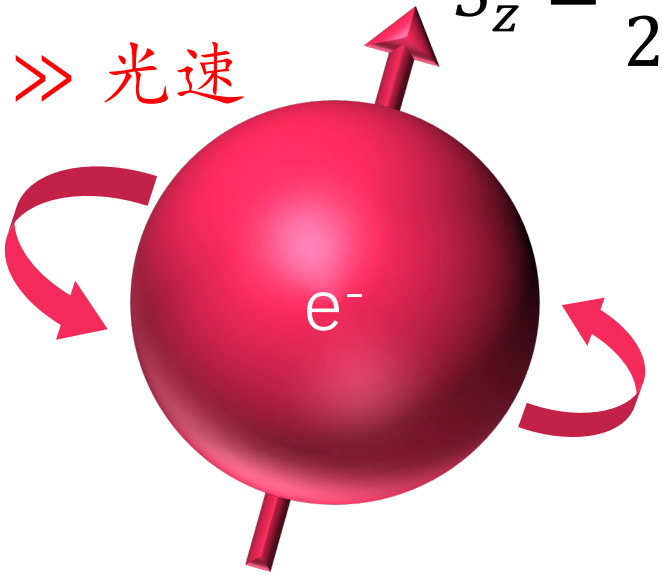
“电子也许是个自转的带电小球，就把它叫做电子自旋吧”

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）

$S_z = \frac{\hbar}{2}$

$v \gg$ 光速



10^{-15} 米
（1飞米）



电子自旋 ≠ 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

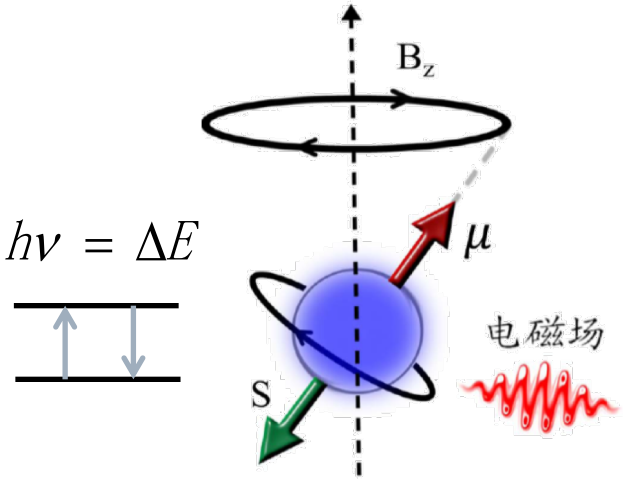
	光子	电子	中子	希格斯玻色子
自旋	1	1/2	1/2	0
质量	0	9.1×10^{-31} 千克	1.7×10^{-27} 千克	2.2×10^{-25} 千克
电荷	0	-1.6×10^{-19} 库仑	0	0

怎么来的？ 科学上无法解释！

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

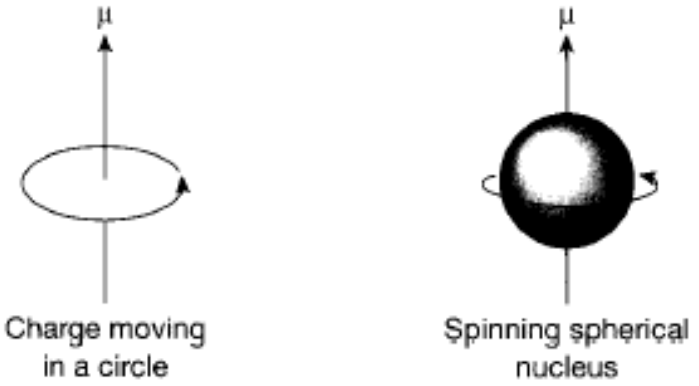
特点：能够用来准确、快速和无破坏性地获取物质的组成和结构上的信息

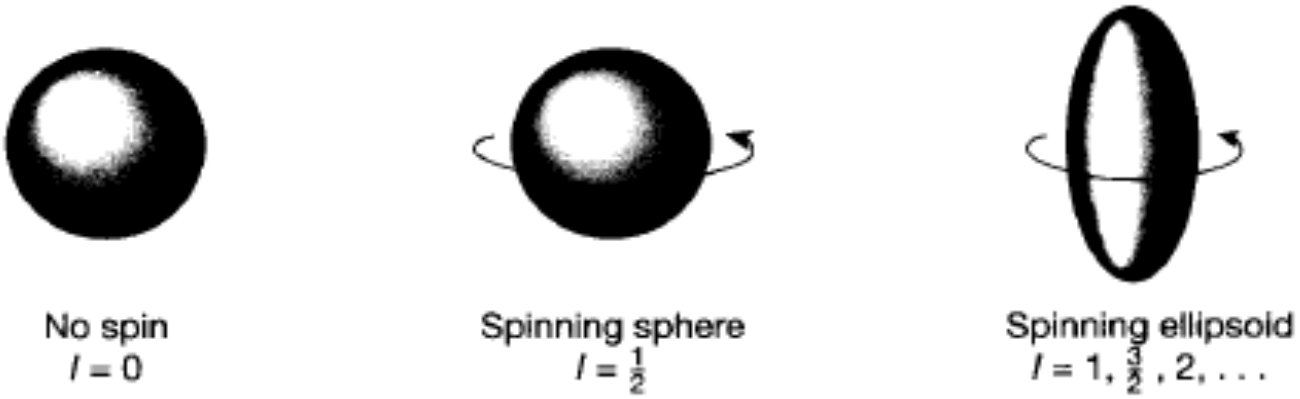
Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy:

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

原子核的磁性

原子核（带电荷的粒子）的自旋会产生一个矢量：磁矩
(nuclear magnetic moment)





所有偶-偶核，如^{12}C、^{16}O等

^{1}H、^{13}C、^{15}N、^{31}P、^{19}F等

^{2}H、^{11}B、^{14}N、^{17}O、^{33}S、^{35}Cl等

原子核的自旋（spin）

通常是指总的角动量，即原子核中粒子（质子和中子）的自旋角动量和轨道角动量的总和。

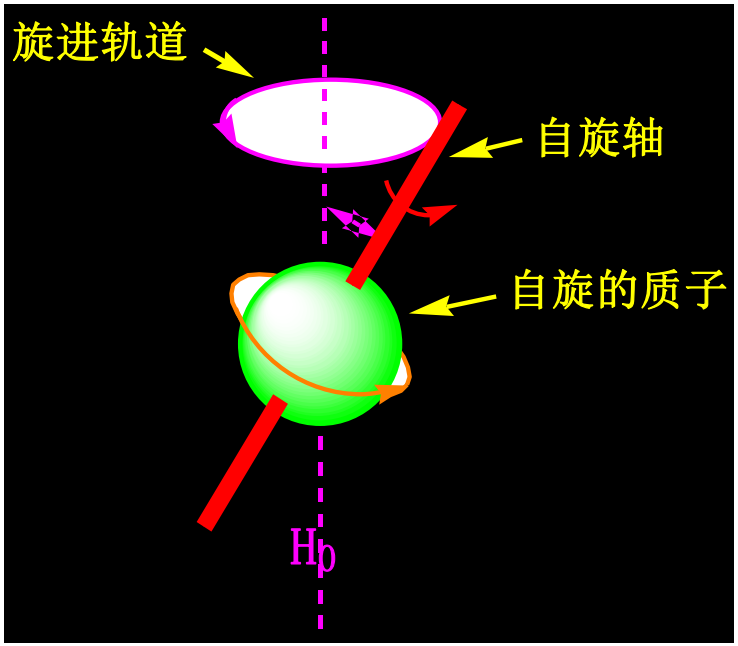
Nuclear Magnetic moment μ

$$\mu = \gamma P$$

γ -- Gyromagntic ratio

P -- Procession angular momentum

核的自旋角动量(***p***)是量子化的，不能任意取值，可用自旋量子数(***I***)来描述。

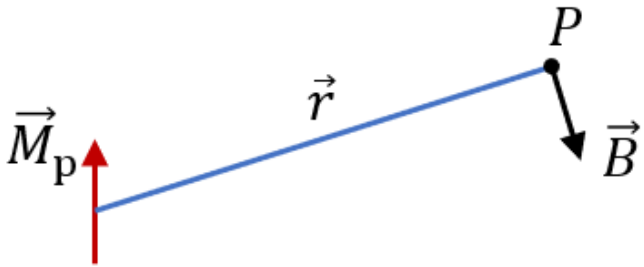


原子核自旋与磁矩

单个质子磁矩 $\vec{M}_{\mathrm{p}} = g_{\mathrm{p}} \dfrac{e\hbar}{2m_{\mathrm{p}}} \vec{I}$

$$\vec{M}_{\mathrm{p}} = 1.41060679736(60) \times 10^{-26} \quad \mathrm{J \cdot T^{-1}(A \cdot m^2)}$$

在1cm处产生的磁场



$$\vec{B} = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{\vec{M}_{\mathrm{p}}}{r^3} = -10^{-7} \times \frac{1.41060679736 \times 10^{-26}}{10^{-6}}$$

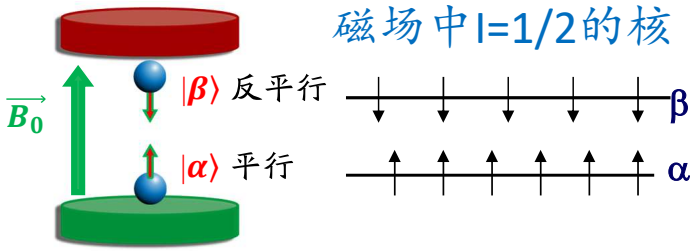
$$= 1.41060679736 \times 10^{-27} \quad \mathrm{T}$$

原子核自旋与磁矩

宏观数量（1mol） 质子产生的磁场

热平衡时，能级粒子布局数服从玻尔兹曼分布

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$



室温和外磁场（～10T）下，

热极化度 $p = \dfrac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \sim 10^{-5}$

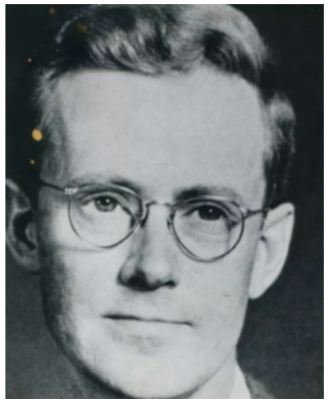
$$N_+ - N_- = 6.02 \times 10^{23} \times 10^{-5} = 6.02 \times 10^{18}$$

在1cm处产生的磁场 $\vec{B} = 8.4919 \times 10^{-9}$ T

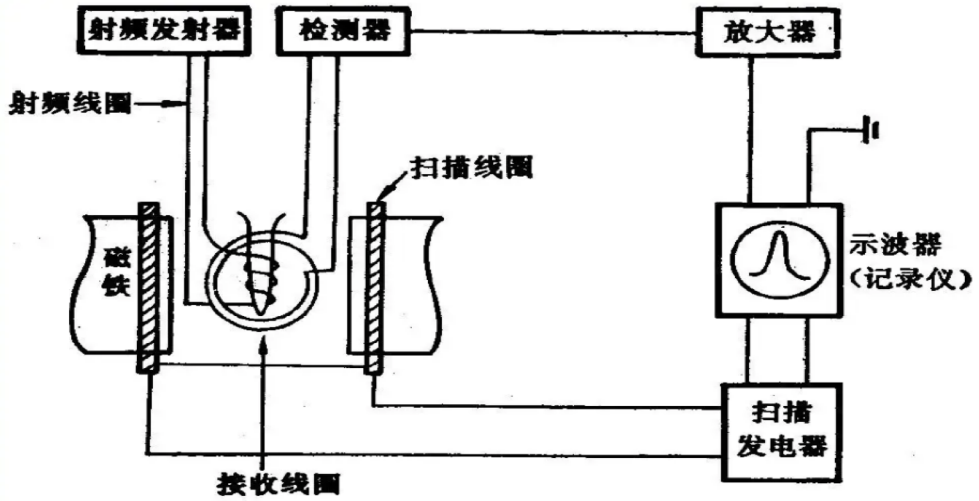
自旋磁共振的发现：凝聚态样品的核磁共振



布洛赫



珀塞尔

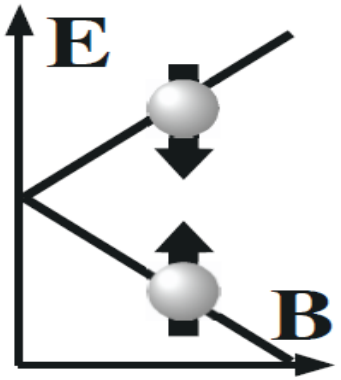


- ✓ 发明核磁共振感应法：首次扩展到凝聚态样品 $V=\frac{\partial \Phi}{\partial t}$ $\frac{N1}{N2}=e^{-\frac{hv}{kT}} \approx 10^{-6}$
- ✓ 发现更加精细的自旋结构信息：**化学位移、自旋标量耦合、驰豫**等
- ✓ 提出半经典演化方程：布洛赫方程
- ✓ 获得1952年诺贝尔奖物理学奖

$$\begin{cases} \frac{dM_X}{dt} = \gamma(M_Y B_0 + M_Z B_1 sin\omega t) - \frac{M_X}{T_2} \\ \frac{dM_Y}{dt} = \gamma(-M_X B_0 + M_Z B_1 cos\omega t) - \frac{M_Y}{T_2} \\ \frac{dM_Z}{dt} = \gamma(-M_X B_1 sin\omega t - M_Y B_1 cos\omega t) - \frac{M_Z - M_0}{T_1} \end{cases}$$

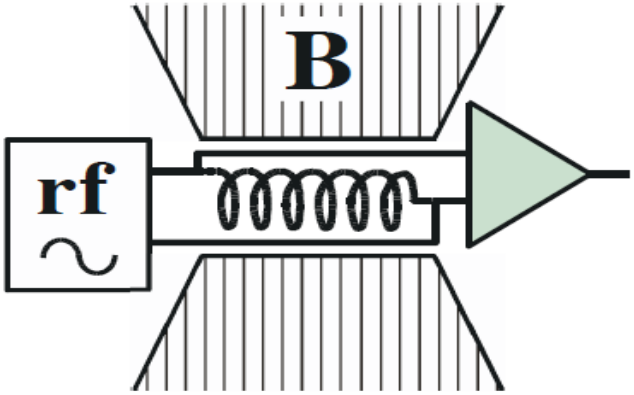
核磁共振实验

Zeeman分裂



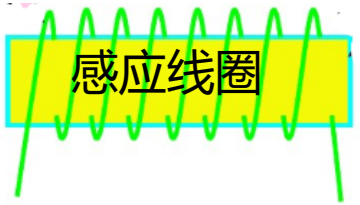
自旋感应磁场

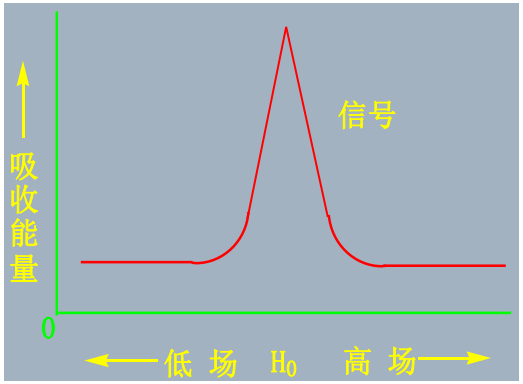
NMR实验基本装置



射频脉冲
激发核自
旋体系吸
收能量

探测
（电磁感应理论）

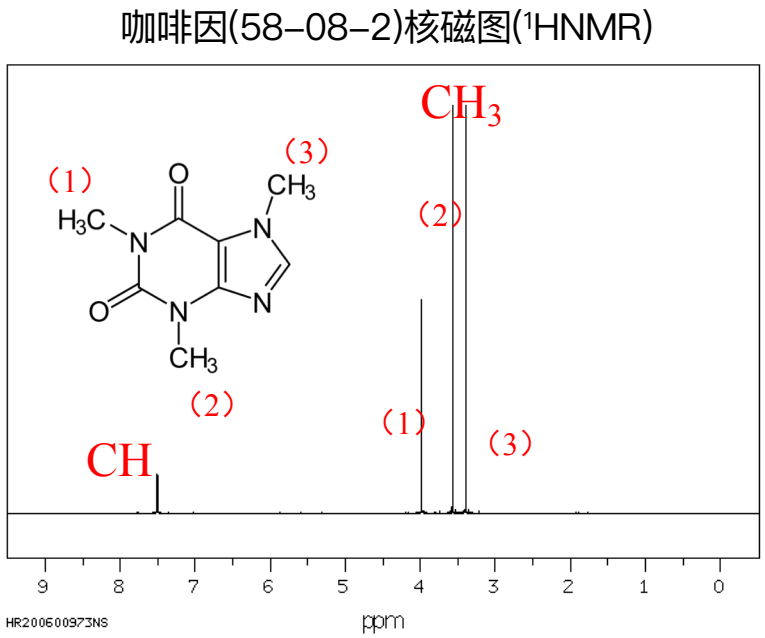




NMR : analyzing samples non-destructively

Direct probes of nuclear spins

Nuclear spins are the engines of NMR.





核磁共振頻譜學——分子的放大鏡

最原始的弱磁探测

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
- …



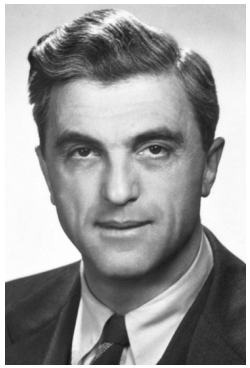
传统磁共振在20世纪取得了巨大成功



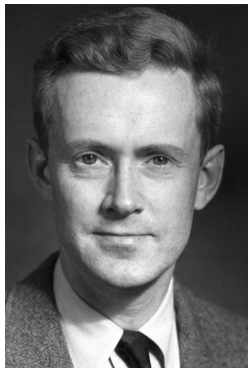
Otto Stern
1943, Physics
发现质子磁矩



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



E. M. Purcell
1952 ,Physics

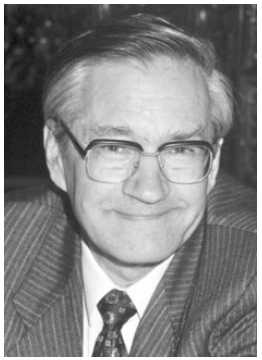


Felix Bloch
1952, Physics

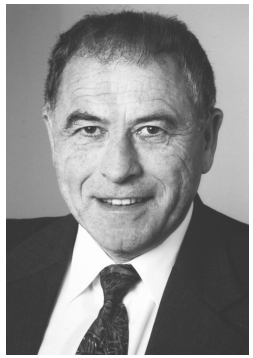


医学磁共振成像

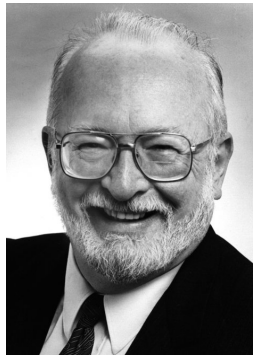
- 基础科学突破
  3次诺贝尔物理学奖
- 交叉领域技术突破
  3次诺贝尔化学
  1次生理医学奖



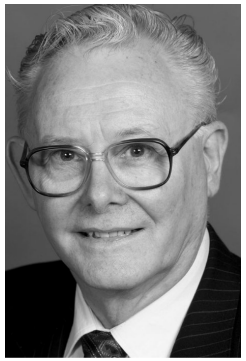
Richard R. Ernst
1991, Chemistry



Kurt Wüthrich
2002, Chemistry

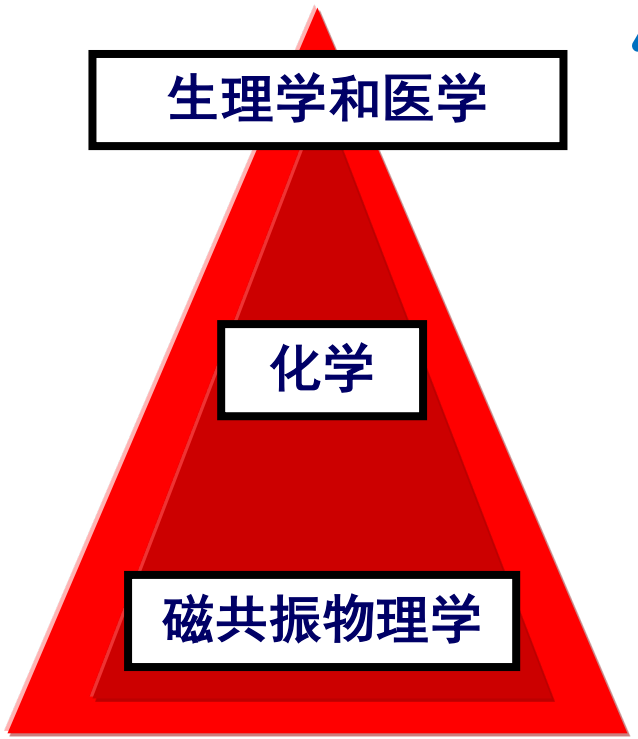


Paul C. Lauterbur
2003, Medicine



Sir Peter Mansfield
2003, Medicine

磁共振科学技术的创新：催生革命性变化



NMR成像技术（MRI）

2003, Mansfield (物理学家)
Lauterbur (化学家)

NMR方法与蛋白质结构测定

1991, Ernst
2002, Wüthrich等

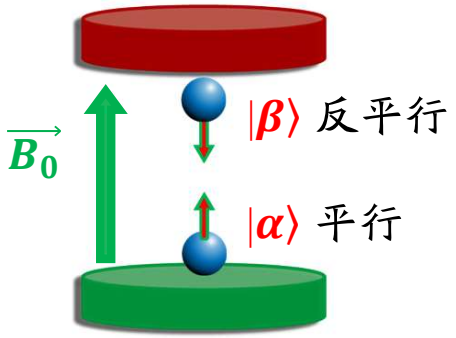
NMR的发现与实现

1943, Stern
1944, Rabi
1952, Purcell & Bloch

核磁共振的六次诺贝尔奖: 科学技术的创新

核磁共振的探测灵敏度

玻尔兹曼分布：$N = N_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$



能级差　$\Delta E = E_+ - E_- = \hbar\gamma B_0$

室温下热极化度　$p = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \approx \frac{\hbar\gamma B_0}{2k_B T}$　取决于B_0和T

线圈感应电压　$V = \frac{1}{4} B\omega\pi D^2 N$　$\omega = \gamma B_0$

信噪比　$S/N \propto n\gamma_e \sqrt{\gamma_d^3 B_o^3 t}$

the spin being excited　the spin being detected

传统核磁共振谱仪

磁共振信号弱，检测灵敏度低

弱信号探测　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

超导磁体：价格昂贵 💰💰💰、笨重、磁场不均匀

核磁共振实验谱仪



Cutting-Edge Technology

Bruker Ascend **1.2 GHz NMR**

28.2 T $17.8 million

Only six 1.2GHz NMR spectrometers in the world

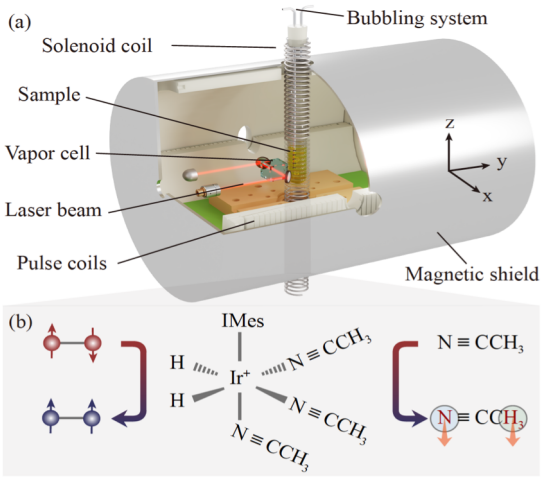
At the *National Gateway Ultrahigh Field NMR Center*

如何提高NMR的灵敏度？

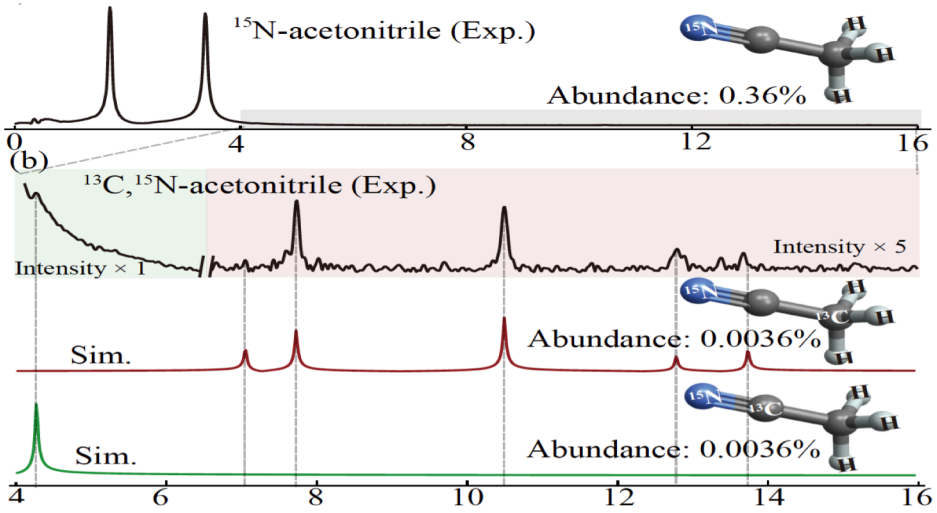
超极化技术——助力提升核磁信号强度

Parahydrogen Induced Polarization, PHIP

基于仲氢分子高有序自旋态的核磁共振（NMR）增强技术
具有成本低、速度快（秒级）和极高的信号放大倍数，
能显著提高灵敏度



^{15}N spin polarization of 0.5%



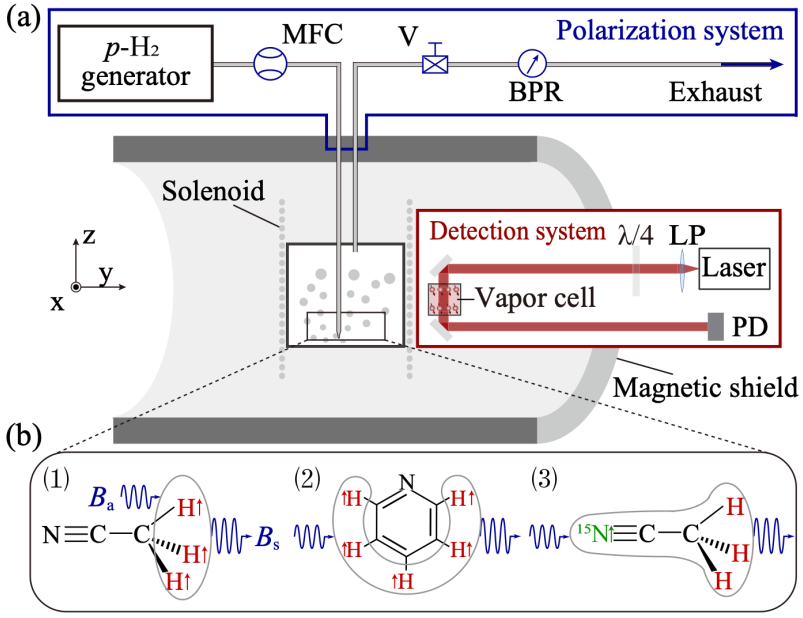
首次实现稀核^{15}N样品中多种同构体的单次测量

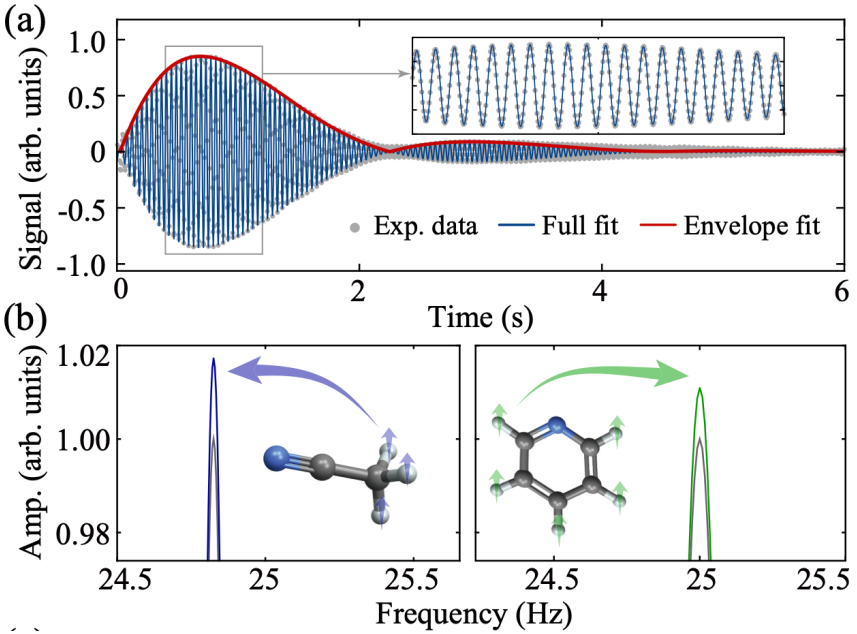
首次利用超极化分子核自旋实现磁场信号放大

PHYSICAL REVIEW LETTERS **136,** 133201 (2026)

Hyperpolarized Molecular Nuclear Spins Achieve Magnetic Amplification

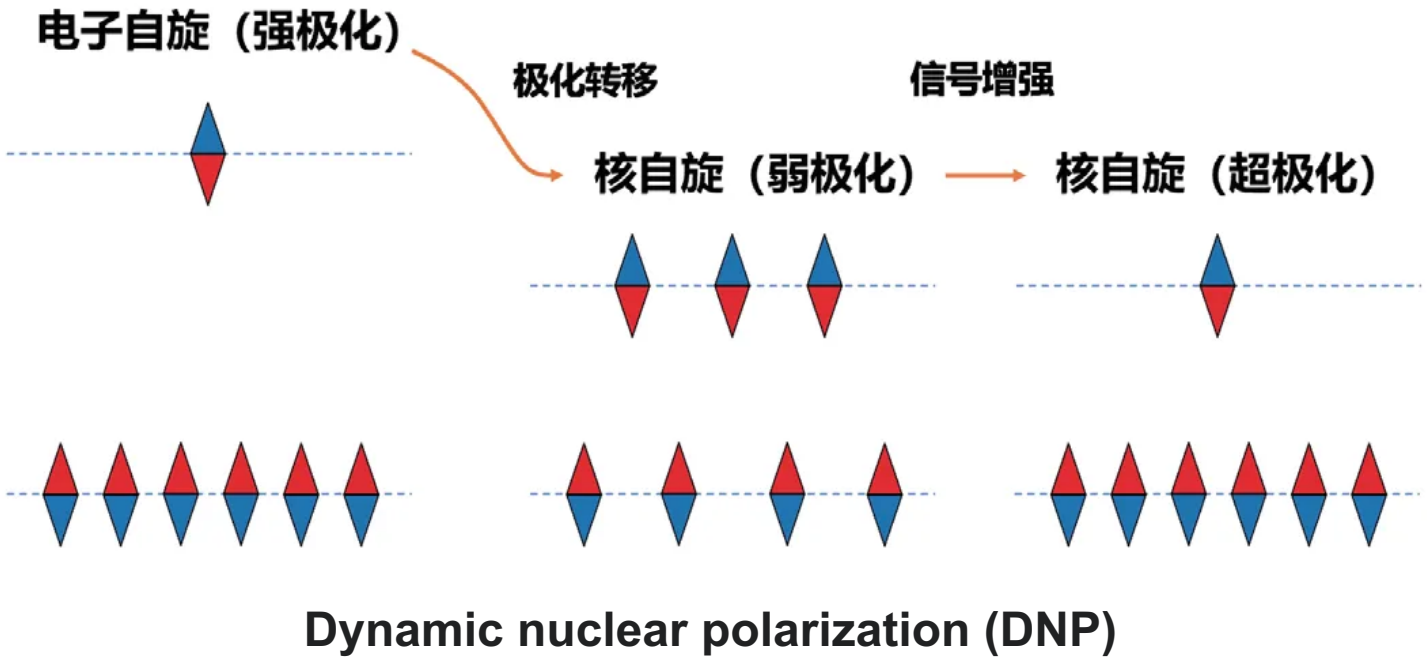
Shengbang Zhou,[1,3] Qing Li,[1,3] Yi Ren,[1] Jingyan Xu,[4,5,6] Raphael Kircher,[4,5,6] Danila A. Barskiy,[4,5,6,7] Dmitry Budker,[4,5,6,8] Min Jiang,[1,*] and Xinhua Peng[1,2,3,†]





超极化技术——助力提升核磁信号强度

电子的磁性比原子核的磁性强约1000倍



Dynamic nuclear polarization (DNP)

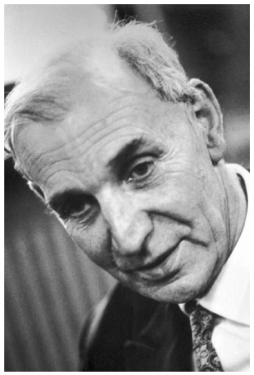
The Overhauser magnetometer is a scalar quantum magnetometer based on the dynamic nuclear polarization (DNP) effect in the Earth's magnetic field.

A special liquid (containing free, unpaired electrons) is combined with hydrogen atoms.

提高一个量级



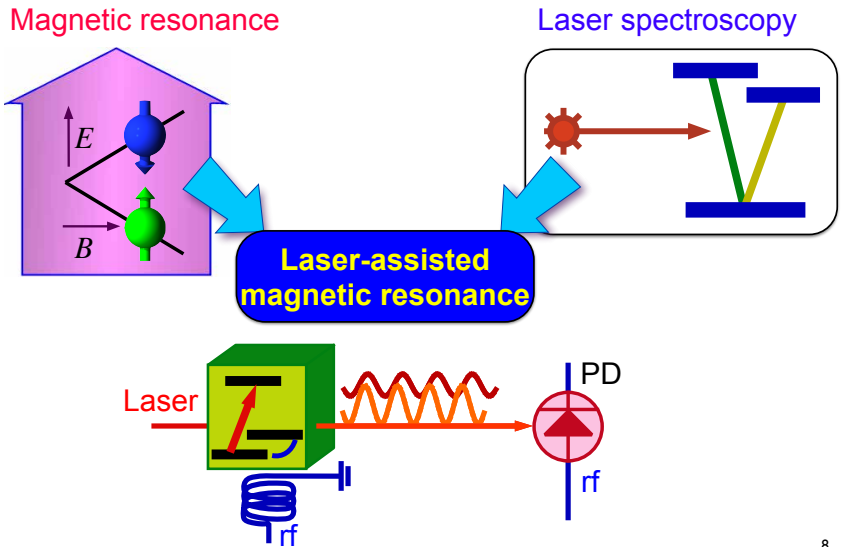
Optical Magnetic Resonance



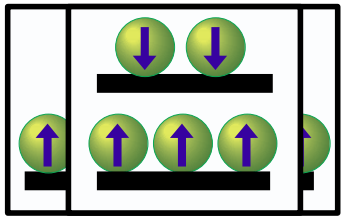
卡斯特勒

1966 年诺贝尔物理学奖

光抽运产生偏极化状态 → 磁共振进行探测



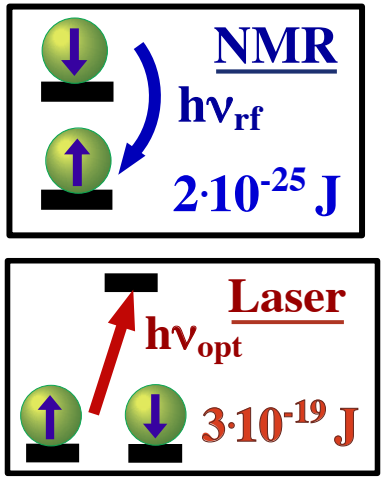
Polarization



NMR: $\frac{n_\uparrow - n_\downarrow}{n_\uparrow + n_\downarrow} \approx 10^{-5}$

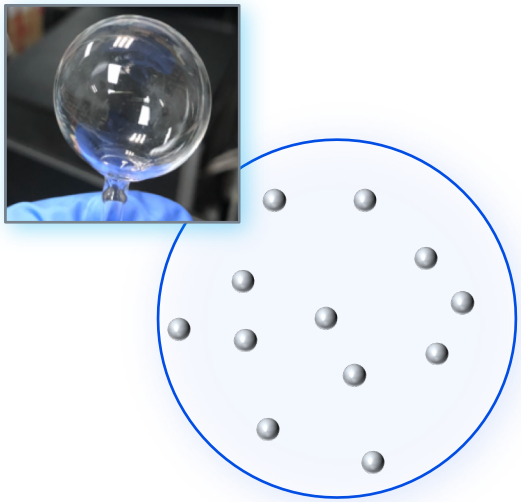
Optically pumped: $\frac{n_\uparrow - n_\downarrow}{n_\uparrow + n_\downarrow} \Rightarrow 1$

Signal Energy per Spin

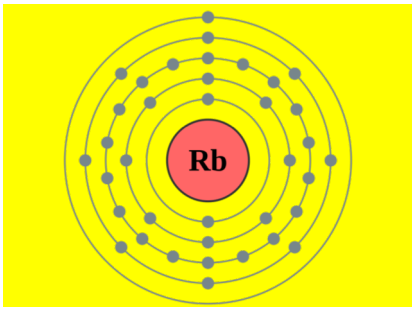


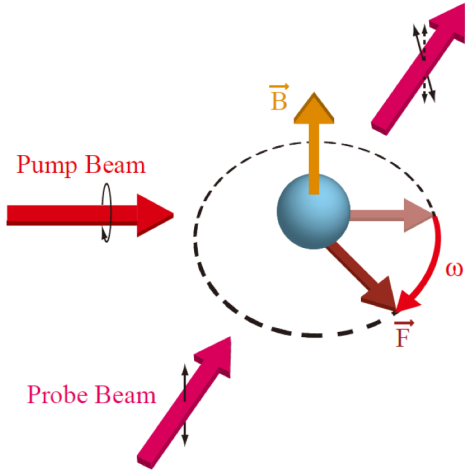
Sensitivity
increase by > 10 orders of magnitude

Atomic Optical magnetometers



Alkali-metal (Rb, K)





分子简单，分子快速运动使得分子内部分、分子间各种相互作用被平均掉
（体系简单，自旋数密度低）

- Single Valence Electron (relatively simple and well-understood)
- Strong Magnetic Dipole Moments (unpaired electron)
- Optical Accessibility (efficient optical pumping)
- High Vapor Pressure at Low Temperatures (practical implementation)
- Long Coherence Times (higher sensitivity and precision)

原子自旋磁力计

Vapor cell: Alkali metal atoms

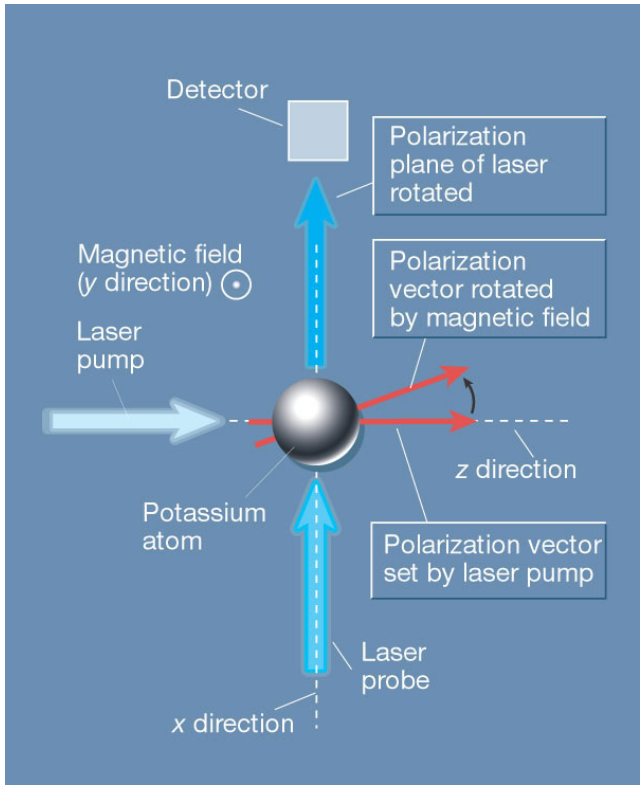
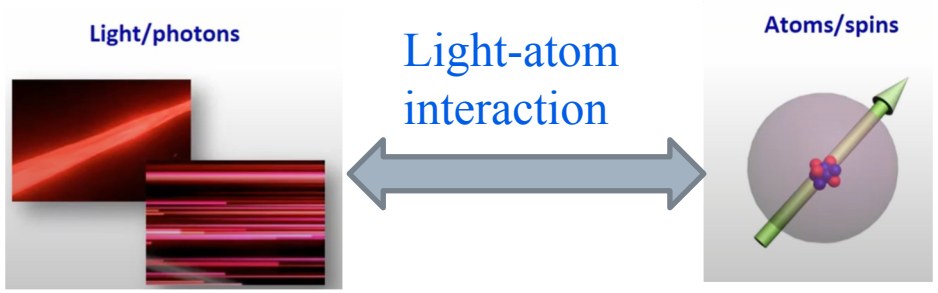


Figure from: D.Budker. : A new spin on magnetometry Nature (News&Views) 422, 574 - 575 (2003)

- Optical pumping
- Spin precession
- Probe (light intensity/light polarization)



用光来测量原子角动量对磁场的响应

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 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

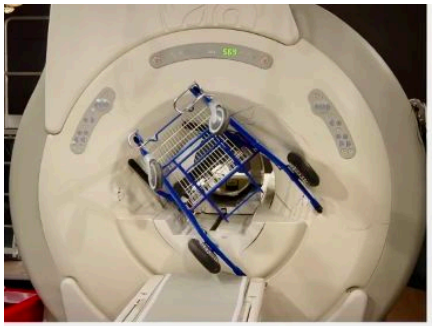




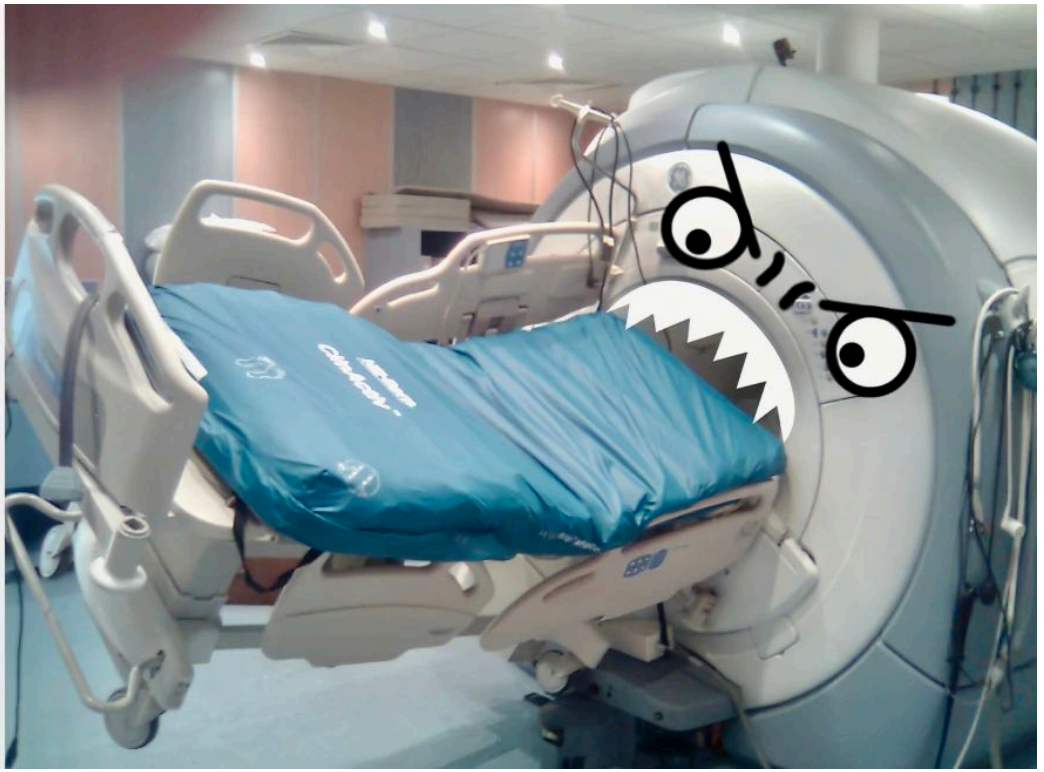
检查前请准备

如何能够消除对超导磁体的依赖？

男子戴金属项链被吸入核磁共振仪后身亡，金属为什么会成为死亡暗器?







磁共振安全一定不能忽视！

核磁共振的发展新趋势：从高场到超低场



A. Abragam

超低场

成本低、便携式、小型化

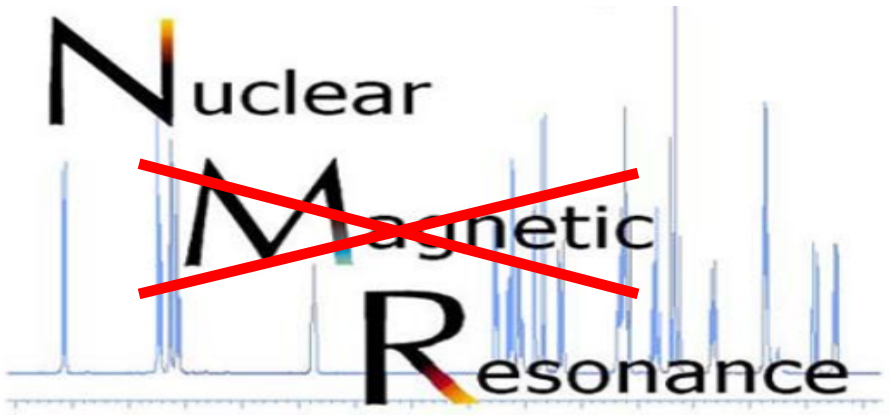
不需要超导磁体，
甚至不需要磁场？





Bloch Purcell

高磁场



零场核磁共振



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)

From high field to zero- & ultralow field

40 tesla



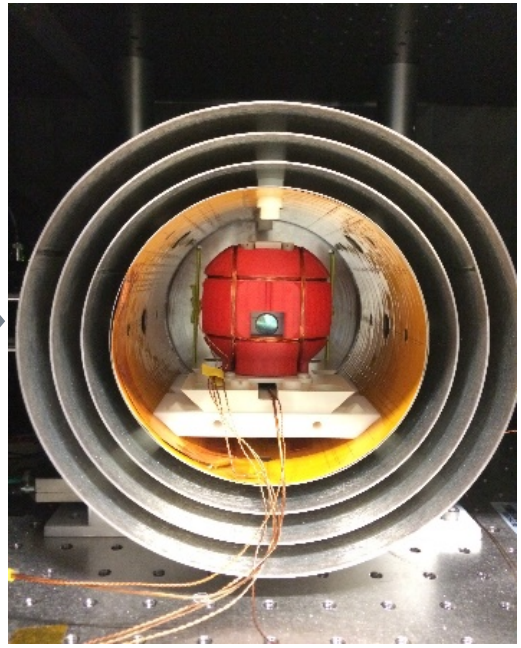
Zeeman Interaction >>

Local Interaction

Inductive detection

ZULF

Without superconducting magnet!



Zeeman Interaction <

Local Interaction

Optical magnetometer

Simplicity & safety

No superconducting magnet and frequent cryogenic maintenance

Ultra-narrow linewidth

High absolute magnetic field homogeneity

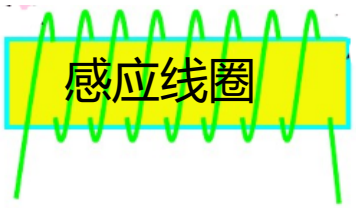
Untruncated Residual Dipolar Couplings

Rich spin dynamics

……..

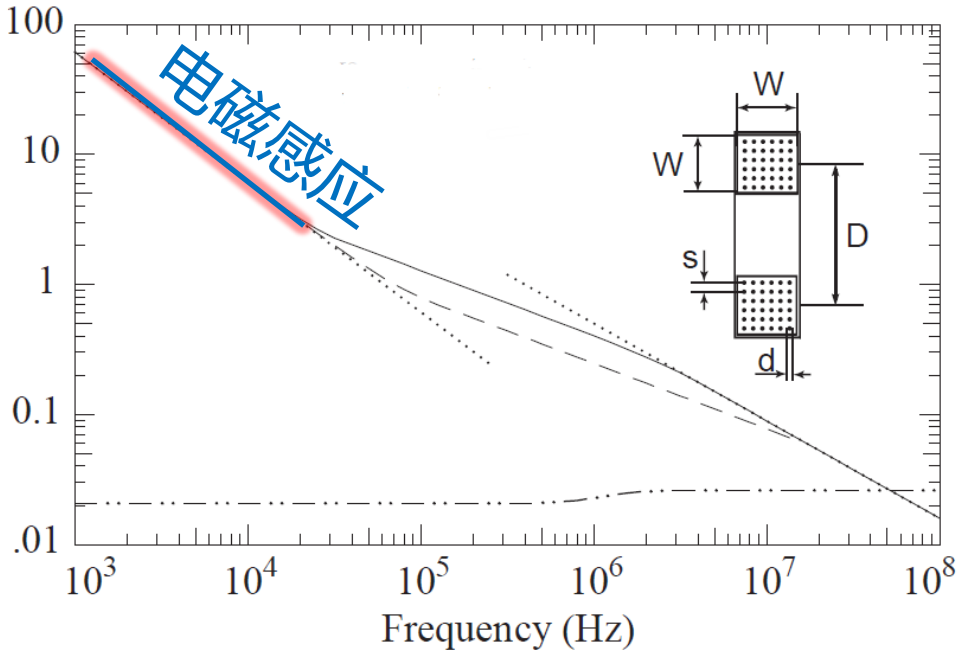
传统核磁共振谱仪

关键挑战：随着磁场的减小，检测灵敏度显著下降



☹

降低5-6个量级



需要新型的传感器

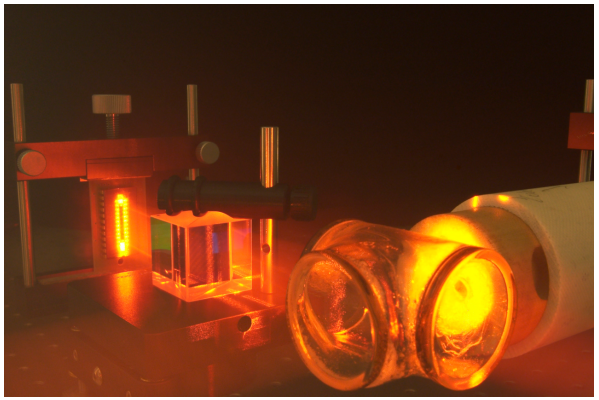
弱信号探测：从经典传感器到量子传感器

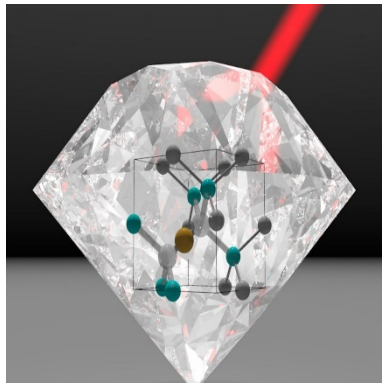
量子传感器：非感应式探测器

对低频信号灵敏，有更高的理论灵敏度

SQUID磁力计　　原子磁力计　　NV色心磁力计





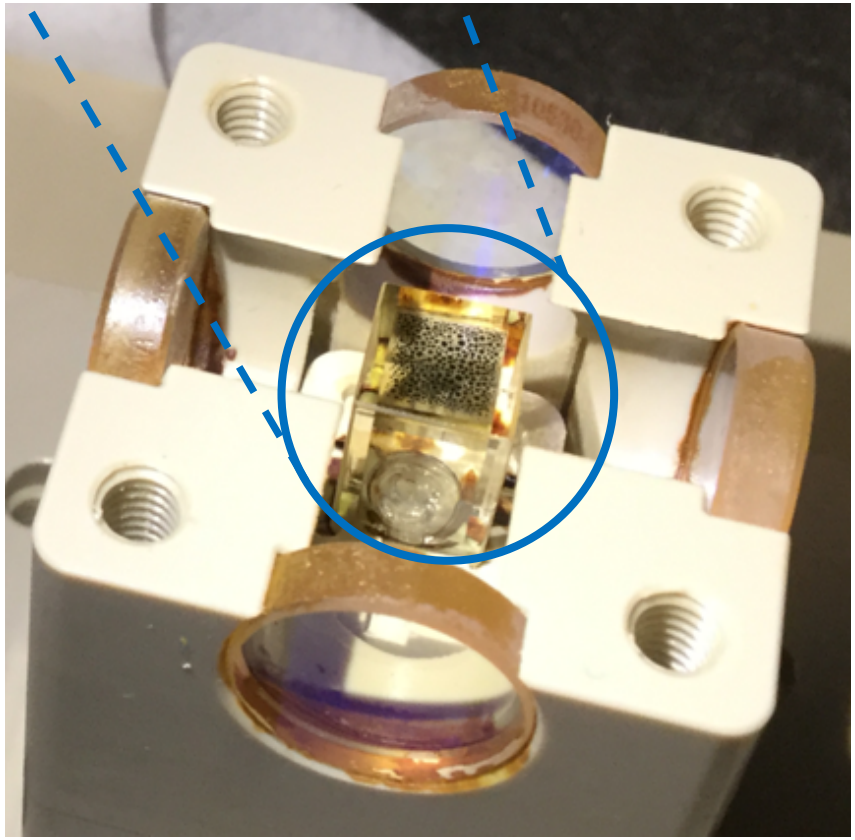


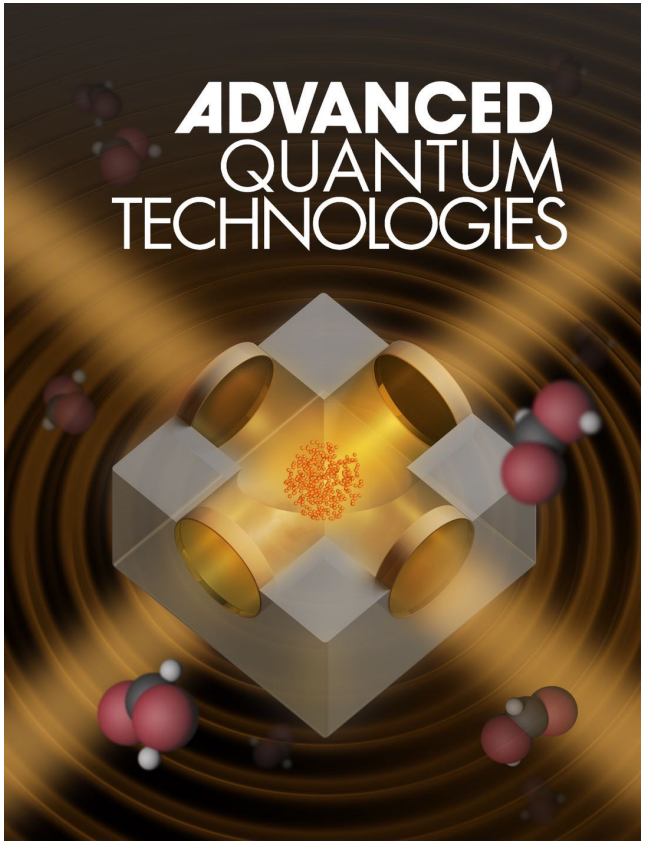
目前世界上最灵敏探测器（理论极限：$1aT/Hz^{1/2}$）；不需要低温；小型化

量子传感器使超低场磁共振的直接探测成为可能！

NMR detector: atomic magnetometer

^{87}Rb vapor gas

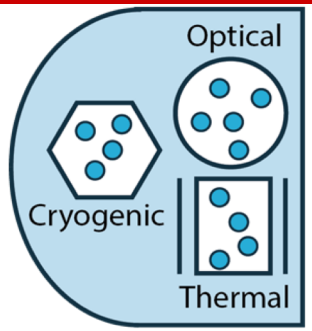


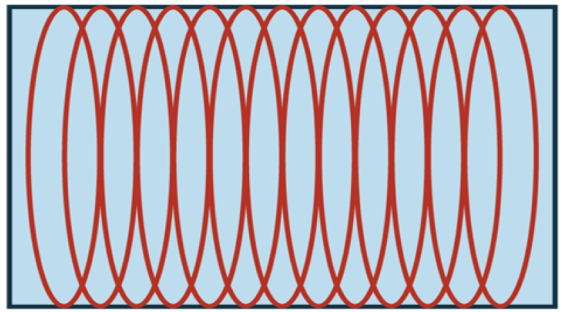


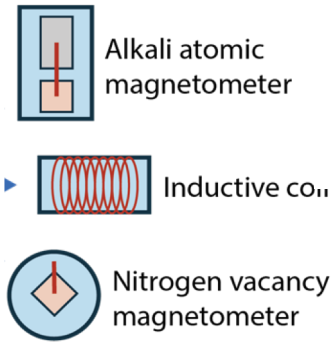
（选为封面文章）

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

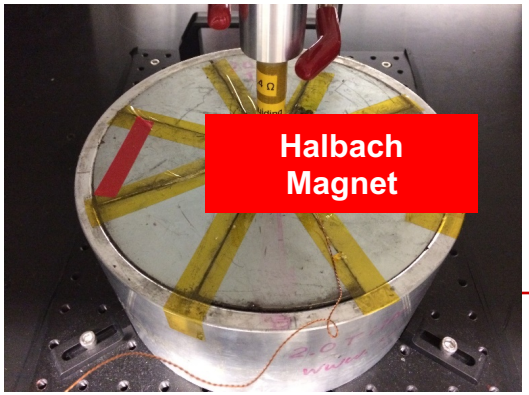
Encoding

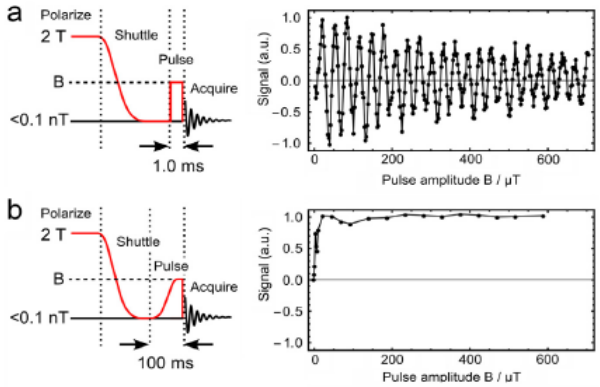
- ❑ Magnetic field gradient (Imaging)
- ❑ J-coupling (Spectroscopy)

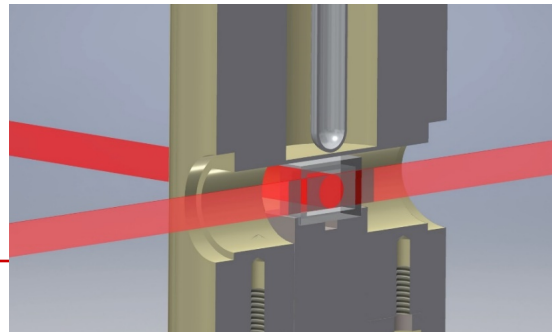
Detection

- ❑ Superconducting coil
- ❑ Atomic magnetometer

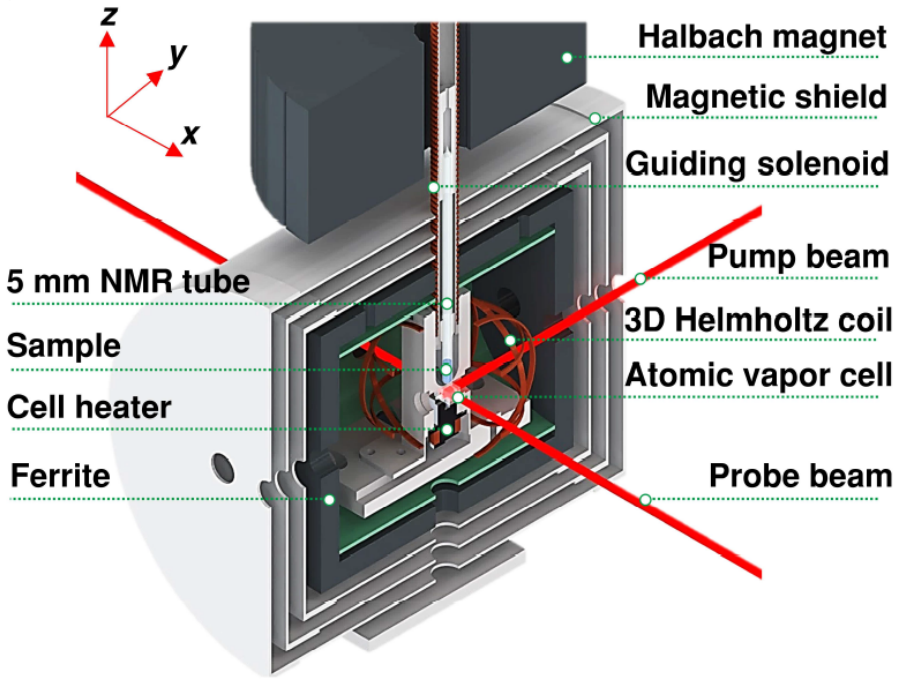
J. Magn. Reson. 270 (2016) 35-49

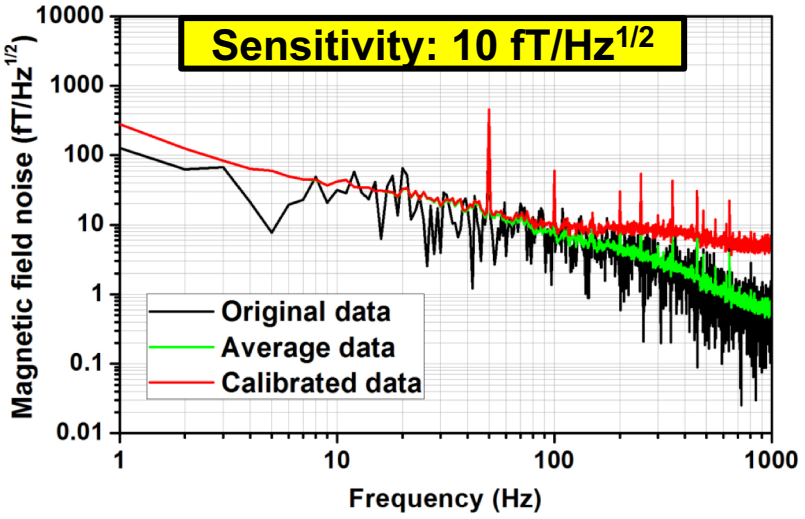


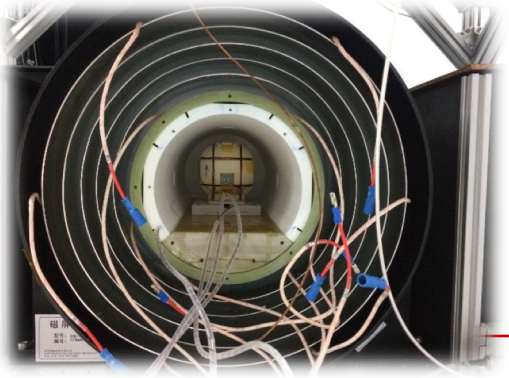


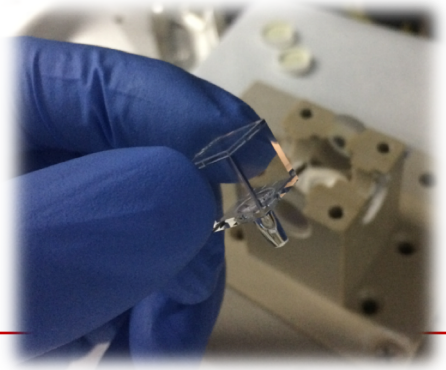


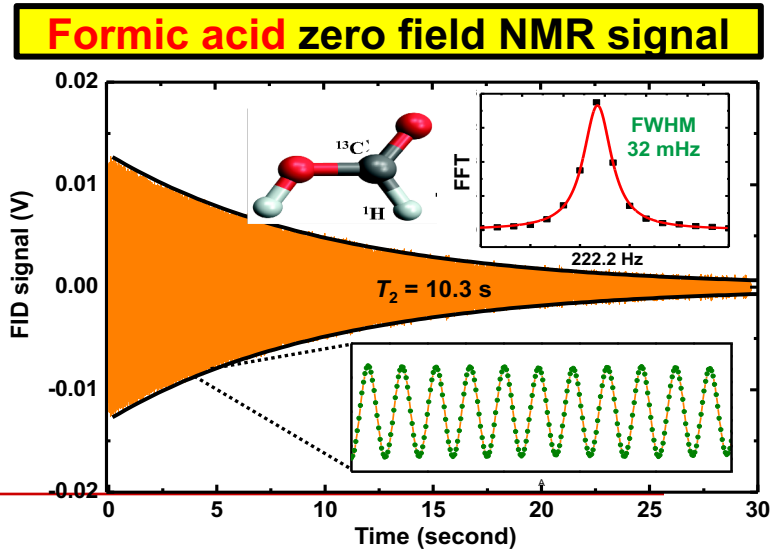
Zero- & ultralow field NMR (ZULF)





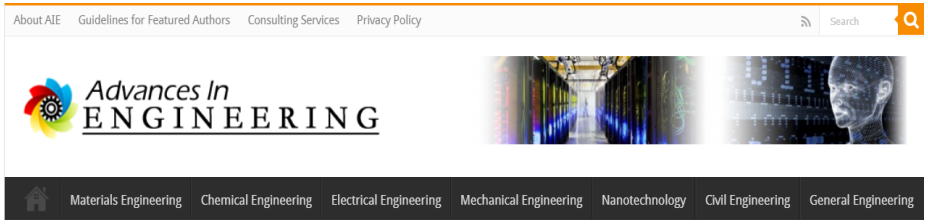






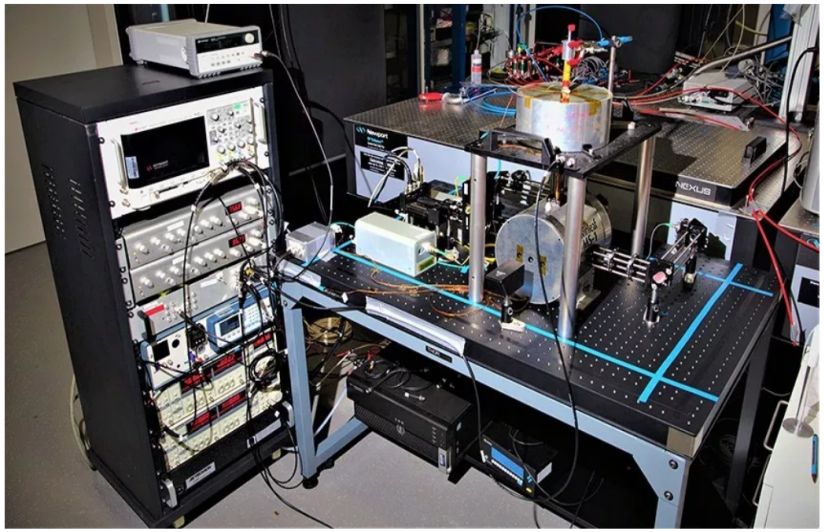
梯度探测零场核磁共振谱仪

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"

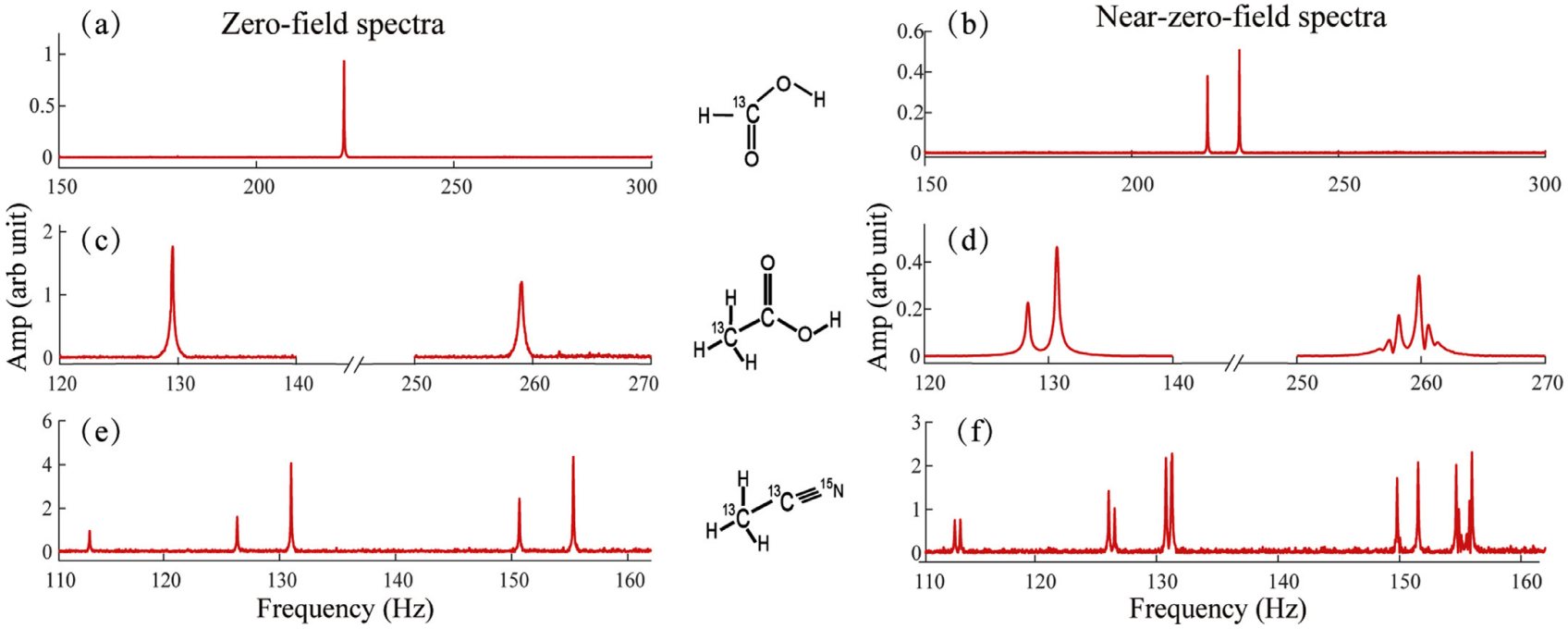
"梯度计提升无需磁体的磁共振"



"…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)

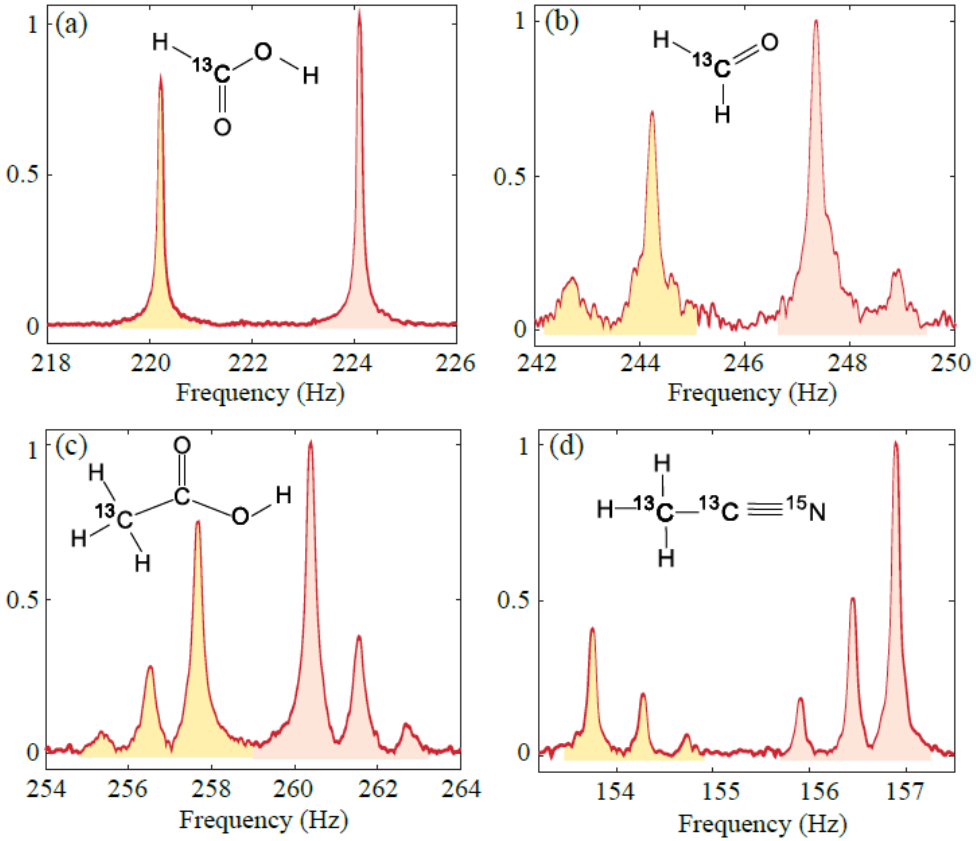
ZULF NMR spectrum

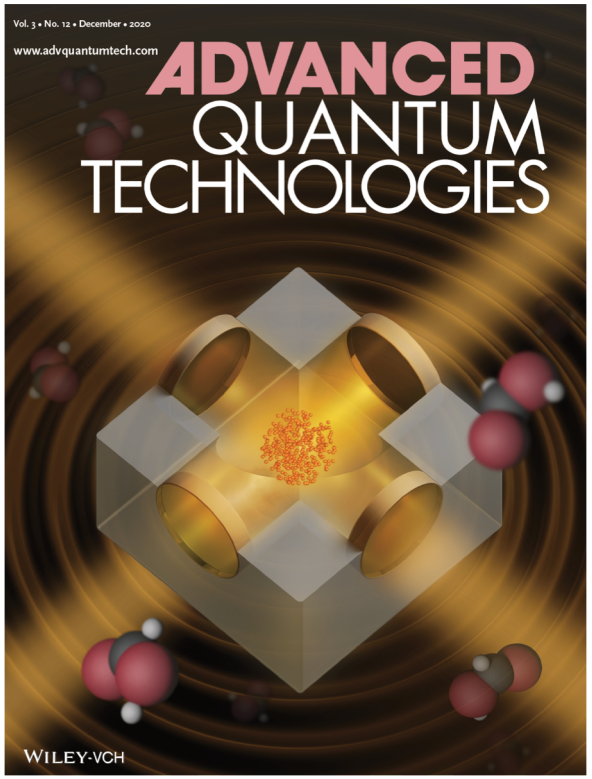


- 对几十种化学物质进行测量，可清晰分辨出不同物质
- 建立零磁场和超低场NMR数据库

Min Jiang et al., Fundamental Research, 1(1):68–84, 2021.

“非对称性”：近零场NMR谱的新特征



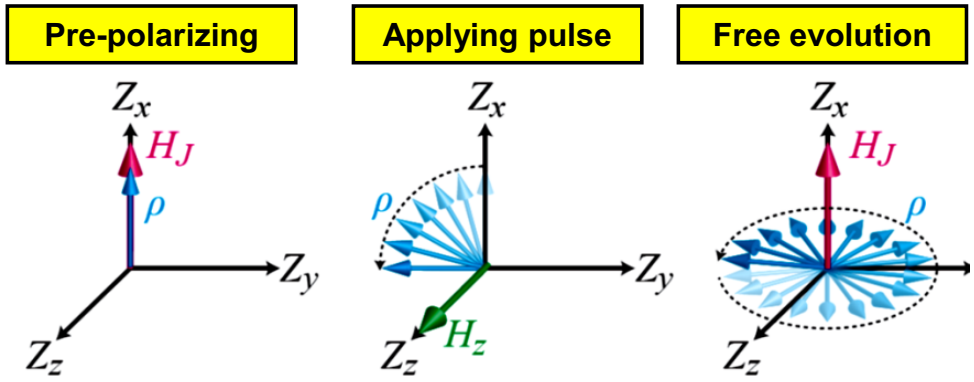


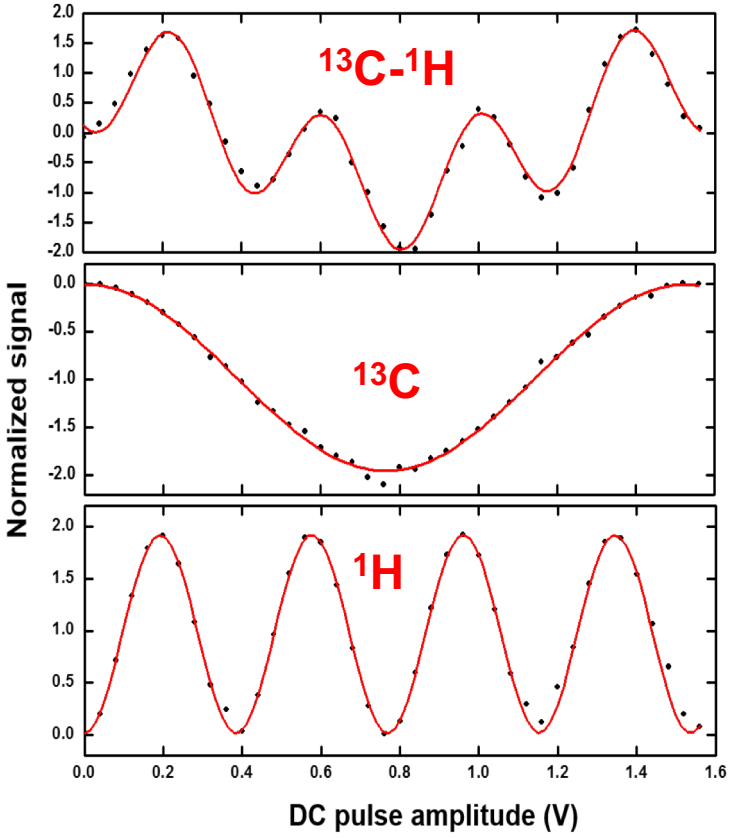
[封面文章]

- 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)

Quantum control in ZULF NMR





Signal amplitude vs DC pulse amplitude

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

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

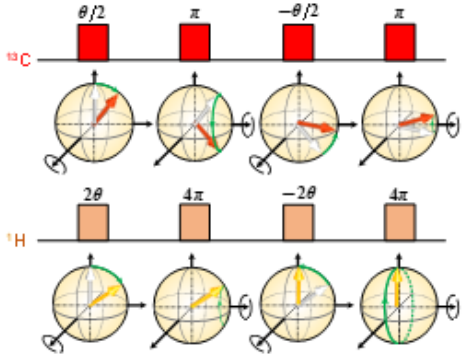
Arbitrary rotation on ^{1}H : $\text{Signal} \propto 1 - \cos(\theta_{^{1}\text{H}})$

零场量子控制研究

Problems for zero field quantum control

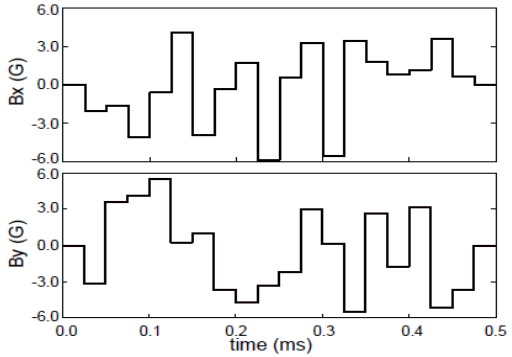
- ❑ Larmor frequency becomes zero at zero field
- ❑ DC magnetic field pulse has no selectivity

Control



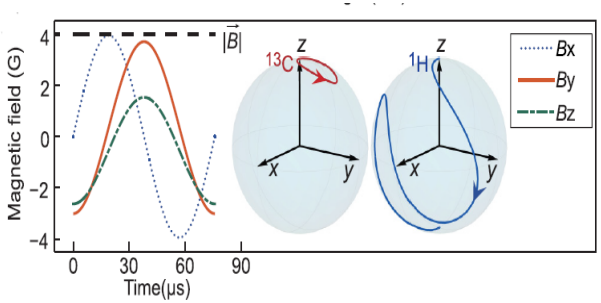
Jiang et al., Science Advances (2018)

Optimal Control

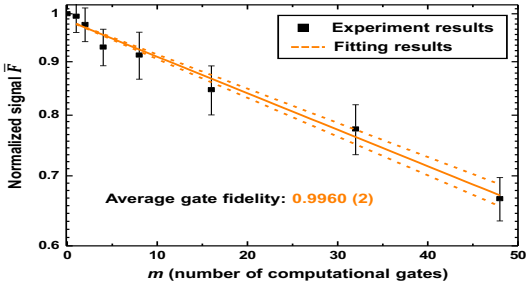


Jiang et al, PRA 97, 062118 (2018)

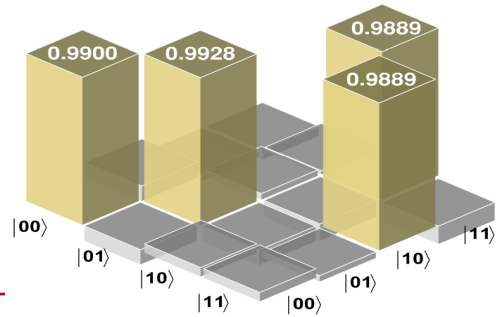
Time-optimal control



Ji et al,PRA 98, 062108 (2018)

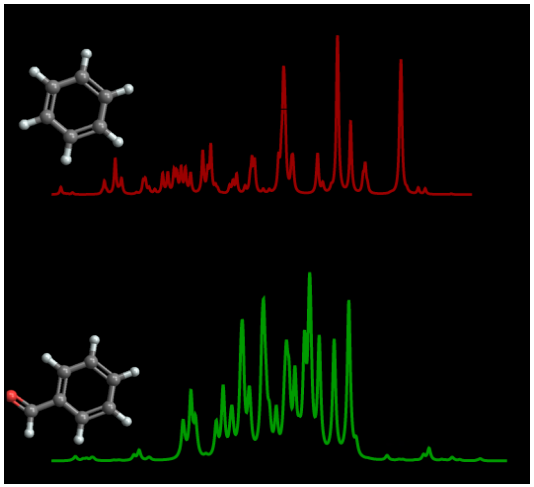


Single-spin fidelity: 99.6%

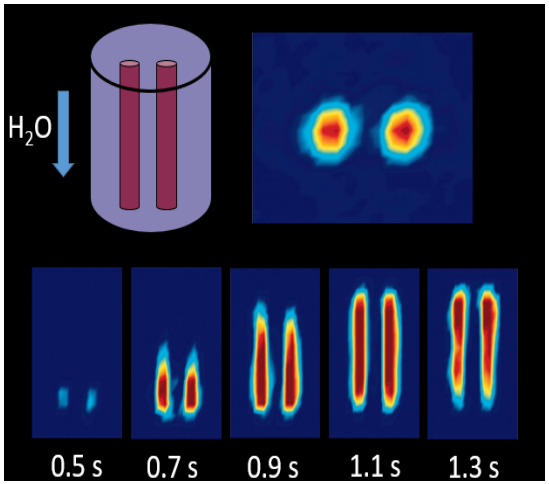


Two-spin fidelity: 98.0%

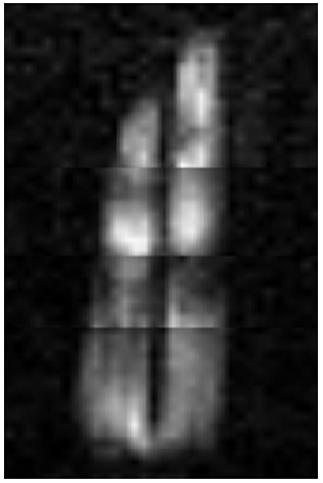
“零磁场”核磁共振谱学



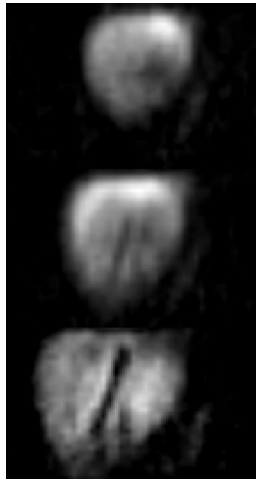
分子结构检测



金属内水成像



手指成像



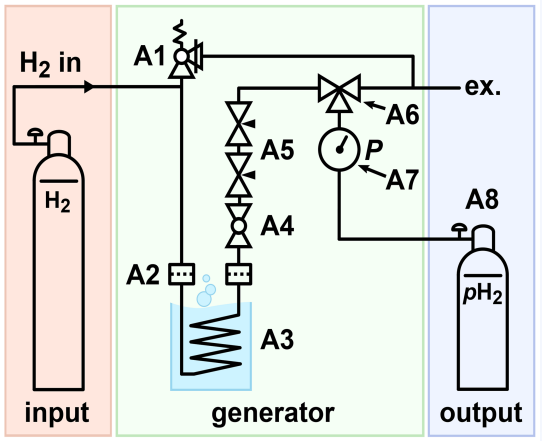
脑成像

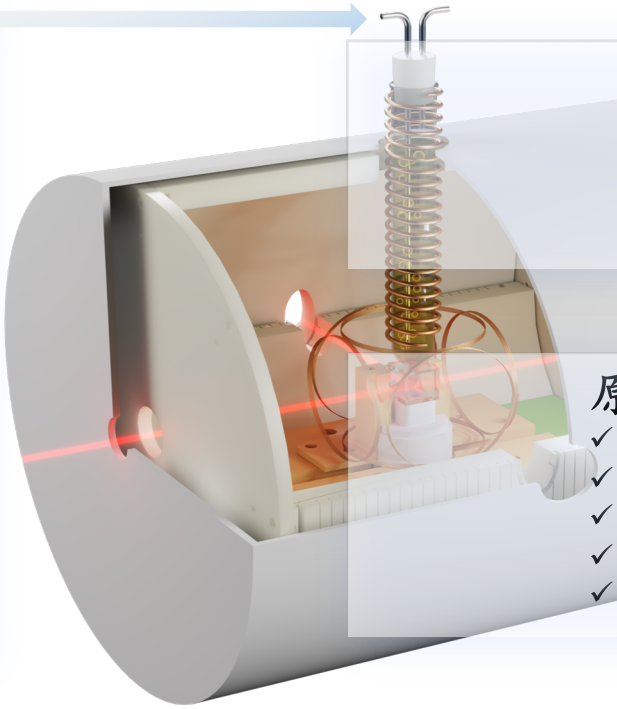
利用超极化技术提升信噪比

包括仲氢超极化系统、脉冲控制系统以及原子磁力计探测系统

仲氢超极化系统

- ✓ 仲氢低温催化产生装置
- ✓ 仲氢极化检测装置





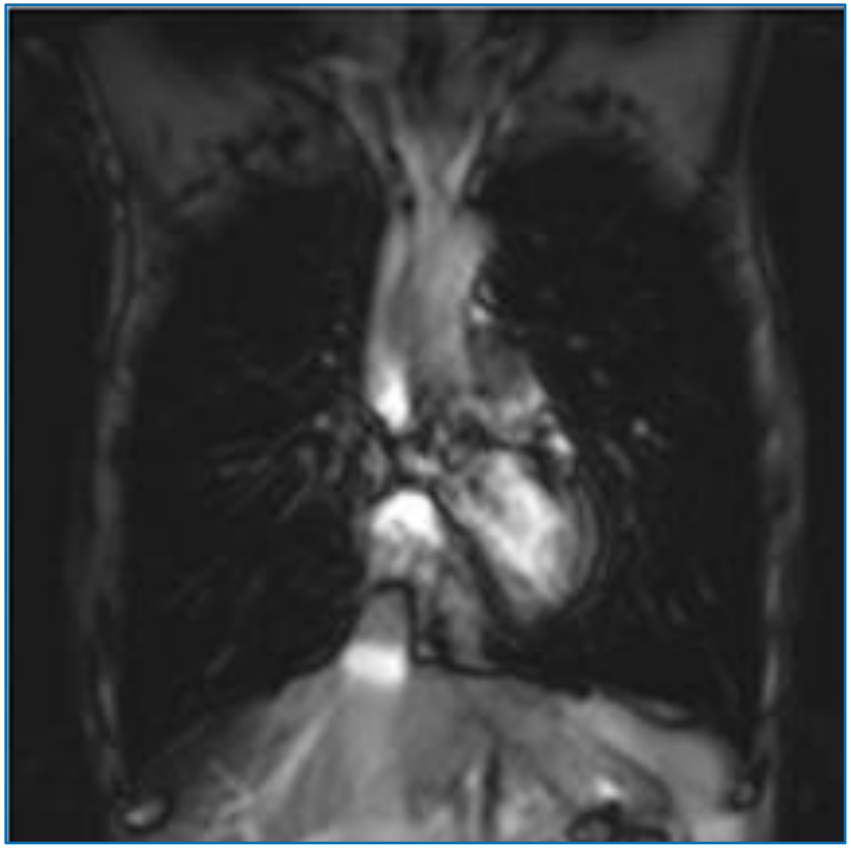
脉冲控制系统

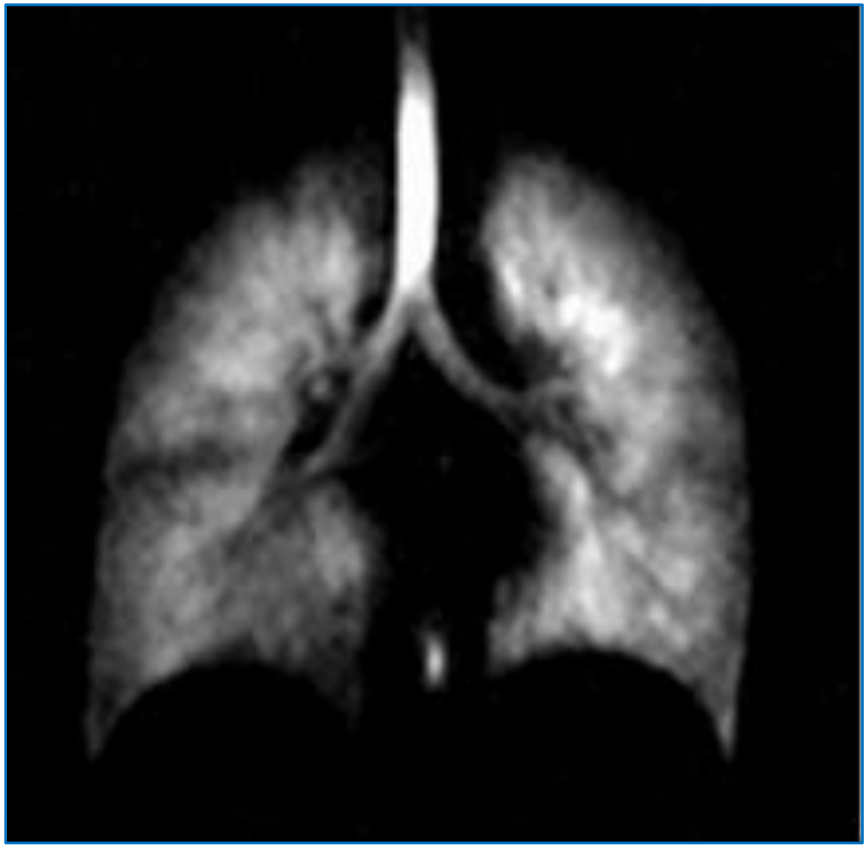
- ✓ 脉冲线圈
- ✓ 脉冲发生电子学
- ✓ 保真度评估算法

原子磁力计探测系统

- ✓ 泵浦和探测激光系统
- ✓ 高压低漏率原子气体室
- ✓ 坡莫合金-铁氧体组合磁屏蔽
- ✓ 无磁真空加热技术
- ✓ 多通道差分探测阵列

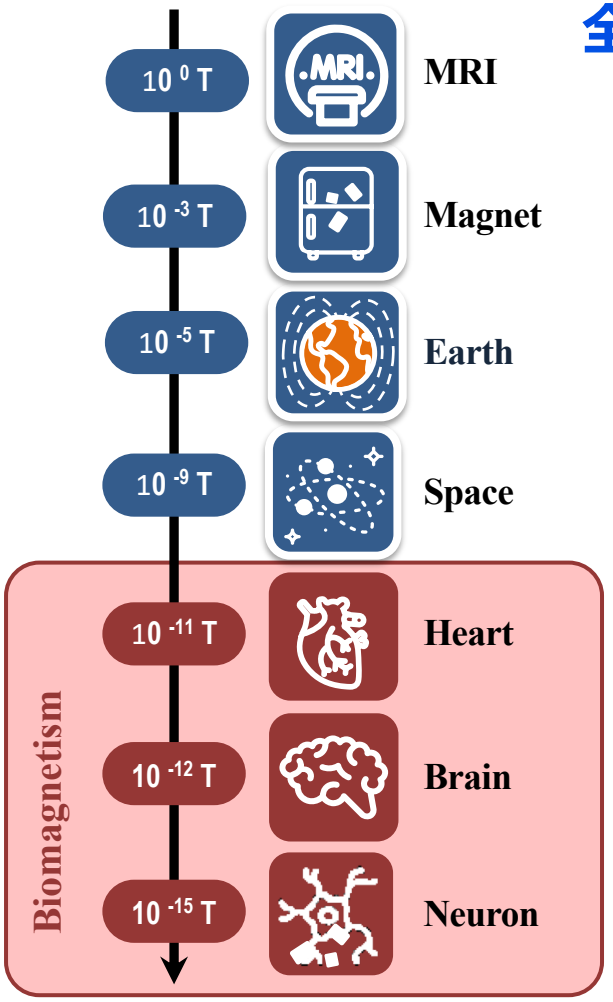
“点亮”肺部（武汉物数所）



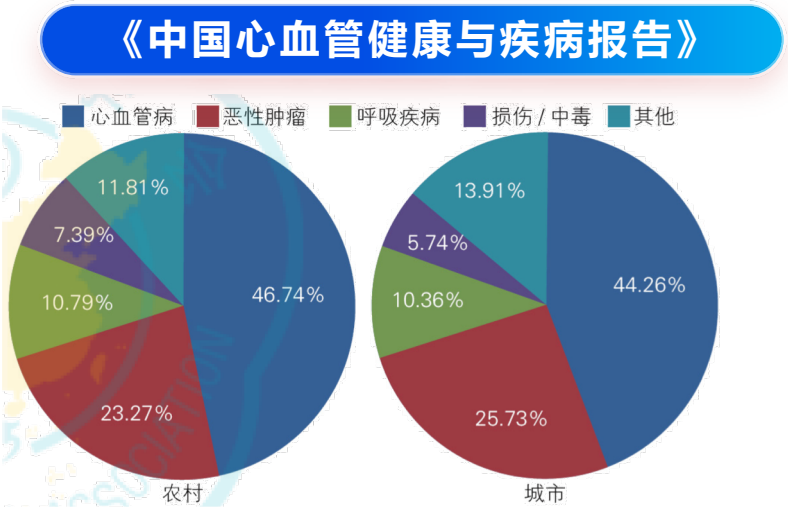


突破传统磁共振技术在肺部的应用局限，实现肺部磁共振检测。

生物磁场探测（未来产业重要布局）



全球心血管疾病患者超过5亿（“人类头号杀手”），将其纳入《健康中国2030规划纲要》

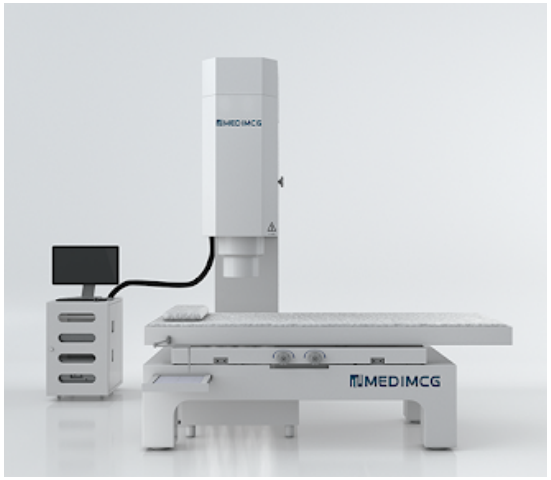


占死亡原因：约45%，预计现患者3.3亿
2019年心血管住院总费用：3133.66亿元

脑电图(EEG)/心电图(ECG)：心肌电活动在体表产生的电位差，受组织强烈影响，干扰大
脑磁图(MEG)/心磁图(MCG)：心肌电流同步产生的磁信号，穿透性好，信息更完整，可实现更精准的源定位

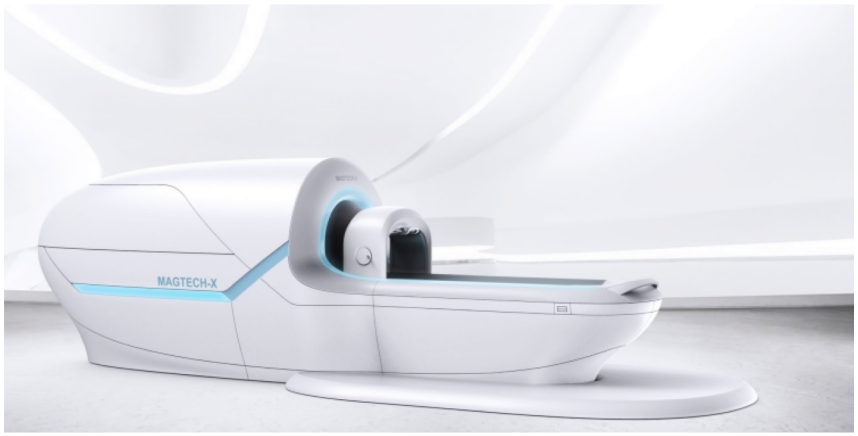
心磁探测

心肌缺血等的早期诊断、胎儿心脏活动检查、心律异常病灶定位，具有非接触、无创伤、快速等特点



超导心磁图仪

设备大、成本高、需低温



量子自旋磁力仪

室温、体积小、可陈列化
（新一代心磁图主流）

脑磁探测：从庞大体积到便携式诊断仪



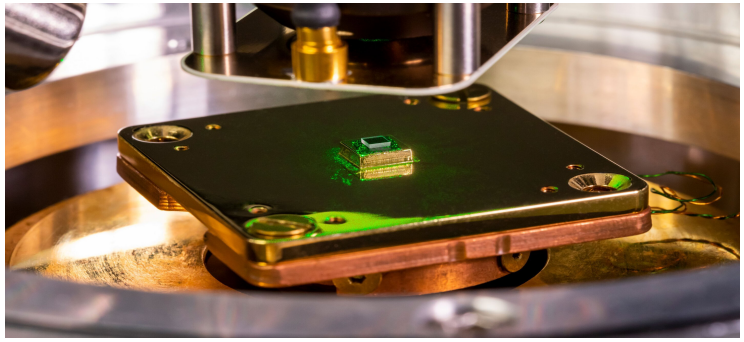
超导量子干涉仪SQUID



便携式原子磁力计

Quantum sensing: Geophysics，Earthquake…

国家量子战略布局
（量子传感：前沿性）



超高灵敏（突破标准量子极限）
稳定性强（基于基本物理常数）
动态范围大（多参数同步探测）
低功耗微型化（场景适应性强）

国家重大战略需求
（矿产勘探：紧迫性）

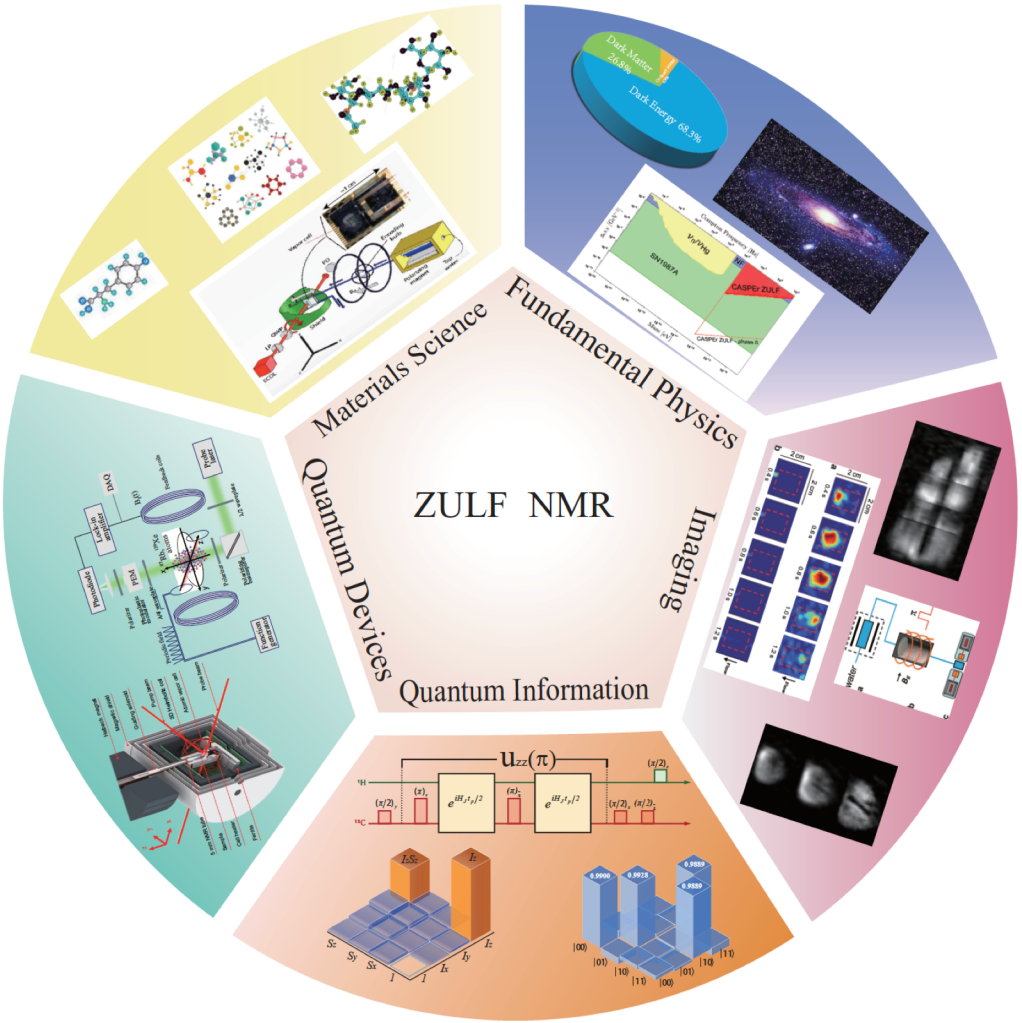


多种重要矿产资源**严重依赖进口**

	铜	镍	钴	锰
■ **年消费量 (万吨)：**	1117	119	8.5	1246
■ **对外依存度 (%)：**	75	91	95	90

量子传感+矿产勘探 → **提升我国地下资源探测精度**

综述：零场-超低场核磁共振的五大应用方向



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

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

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





	自旋数
核磁共振谱仪	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









微观尺度磁共振探测



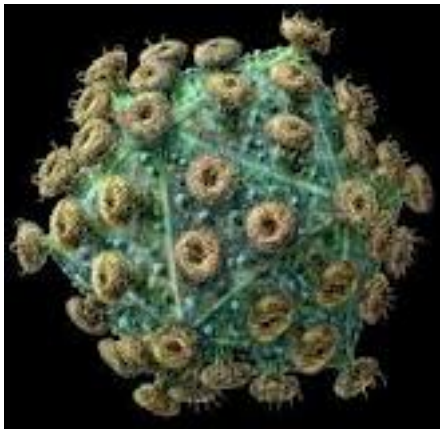
大脑组织轮廓

10毫米



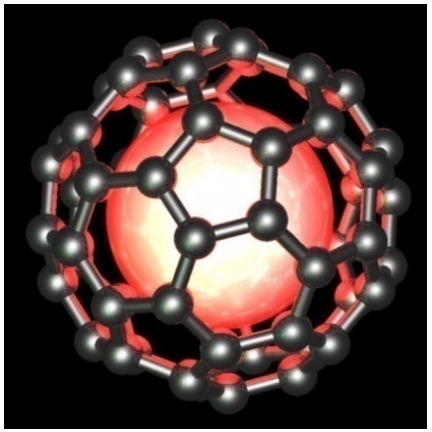
单个红细胞

10微米



单个艾滋病毒

10纳米



单个富勒烯分子

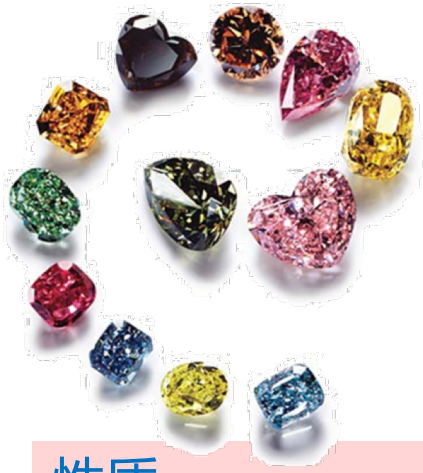
1纳米

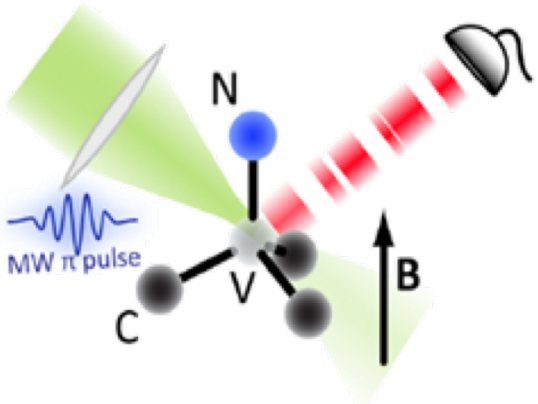
	看得清	看不清	看不见
手段	传统磁共振 √	力探测磁共振 √	单核自旋探测

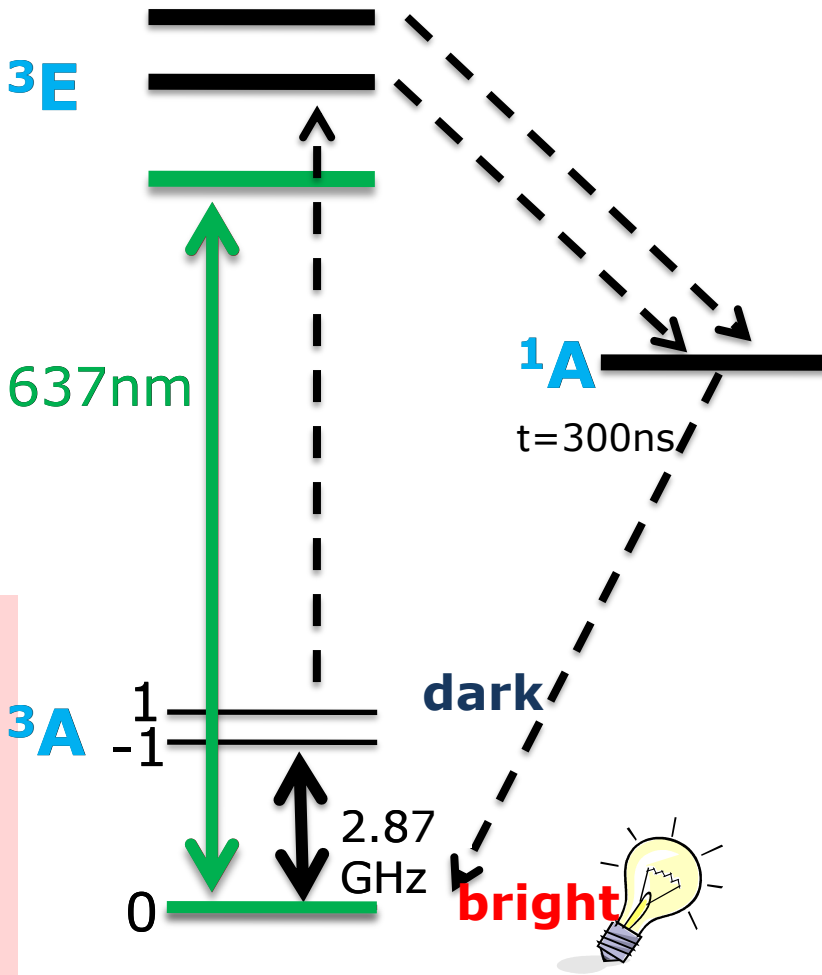
- 现有磁共振**尚不具备**对物质进行微观尺度的**灵敏探测**和**空间分辨**能力
- 在**不破坏研究对象**的前提下提供微观物质**内部三维结构信息**，对于前沿科学领域具有极其重要的意义

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)



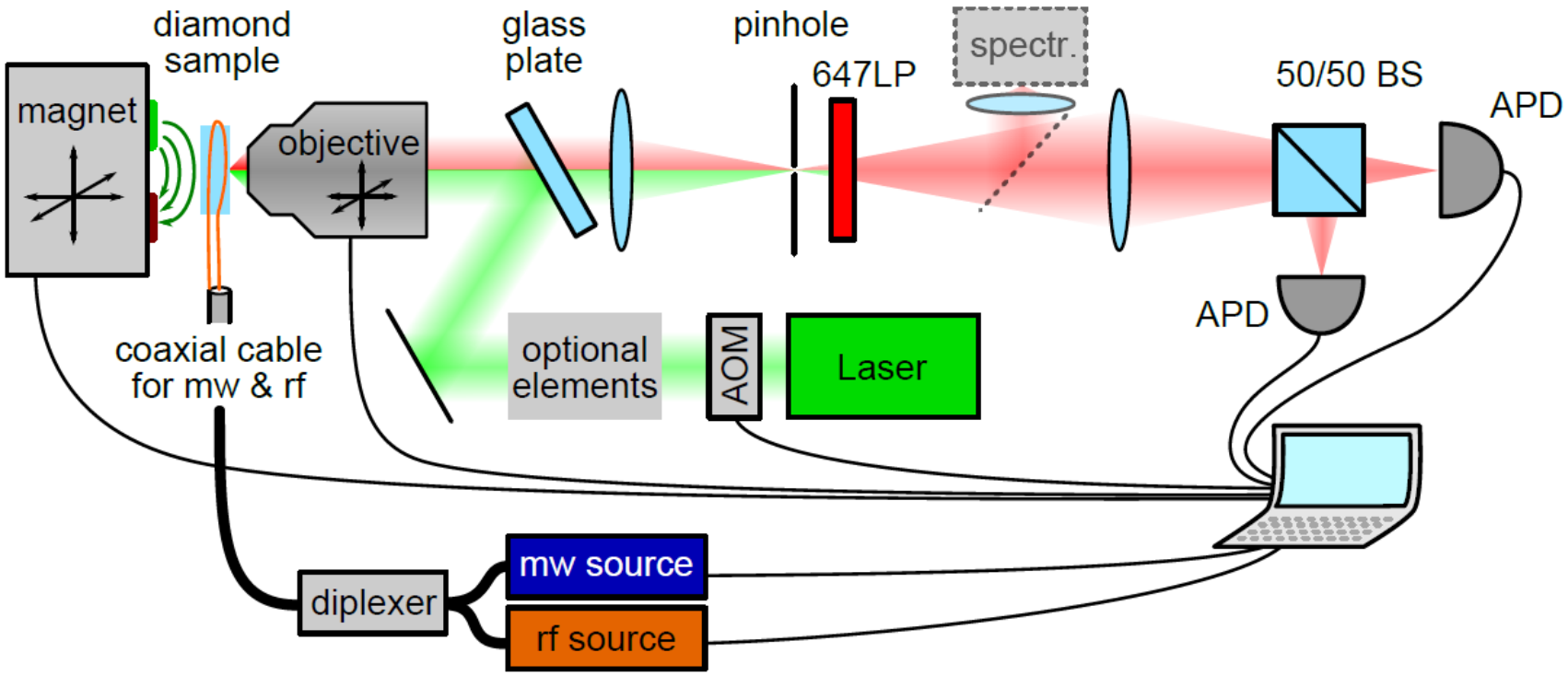




性质

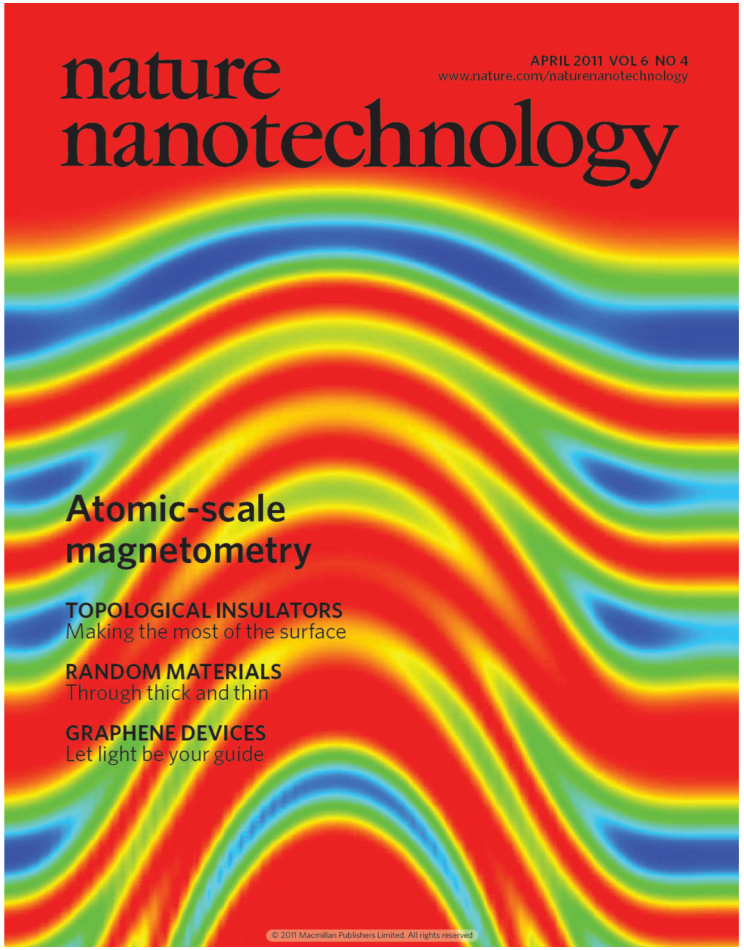
- 原子尺度：高空间分辨率
- 室温下的长量子相干时间结合动力学解耦技术：高灵敏度
- 被测磁信号可转化为自旋量子干涉仪的相位信息，光学手段读出

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。

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).

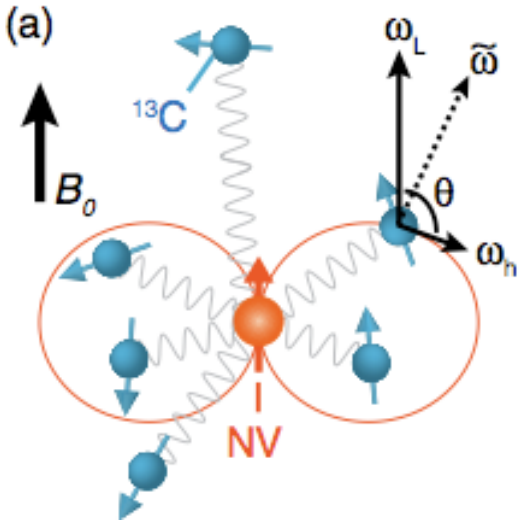
~~Toward single-nucleus detection & single-molecule NMR (@ zero field)~~

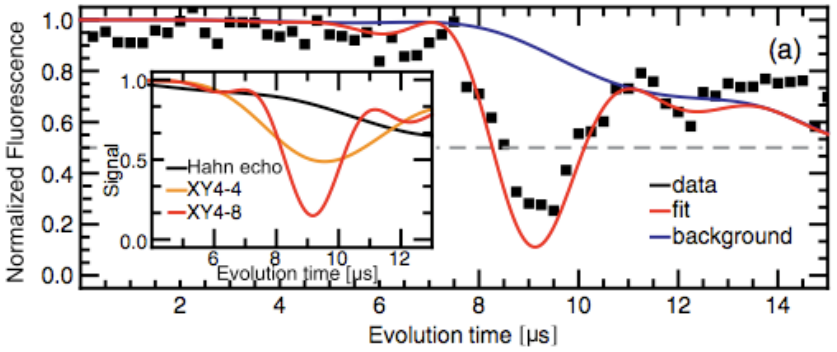
Sensing using NV center

PRL 109, 137602 (2012) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 28 SEPTEMBER 2012

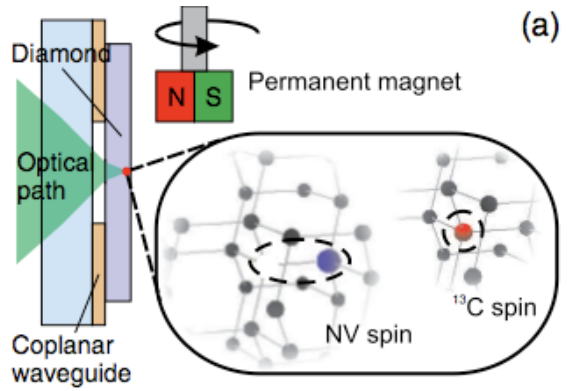
Detection and Control of Individual Nuclear Spins Using a Weakly Coupled Electron Spin

T. H. Taminiau,[1] J. J. T. Wagenaar,[1] T. van der Sar,[1] F. Jelezko,[2] V. V. Dobrovitski,[3] and R. Hanson[1]





up to six individual nuclear spins

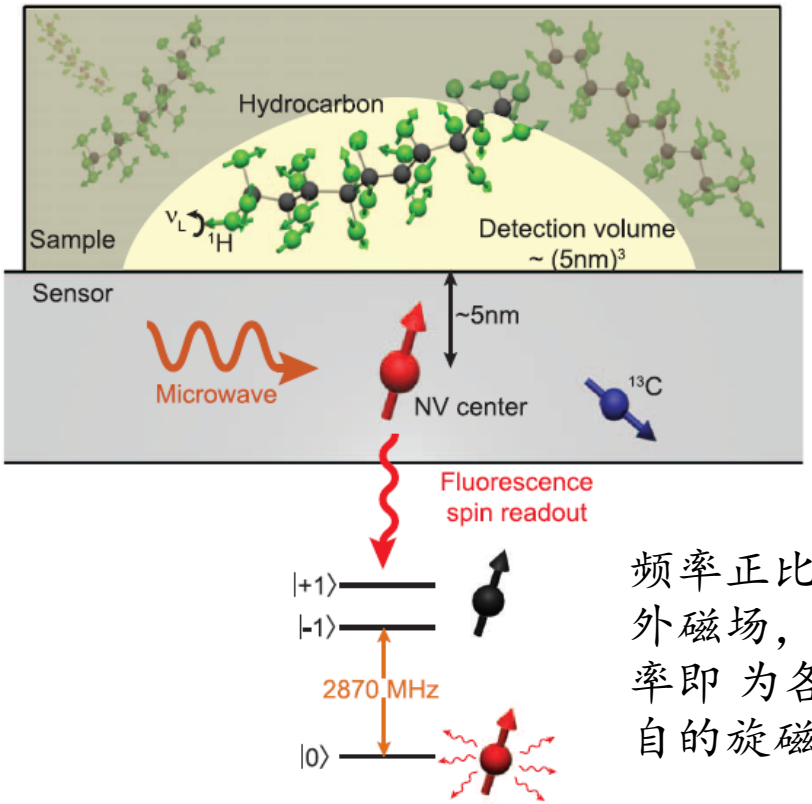


PRL 109, 137601 (2012) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 28 SEPTEMBER 2012

Sensing Distant Nuclear Spins with a Single Electron Spin

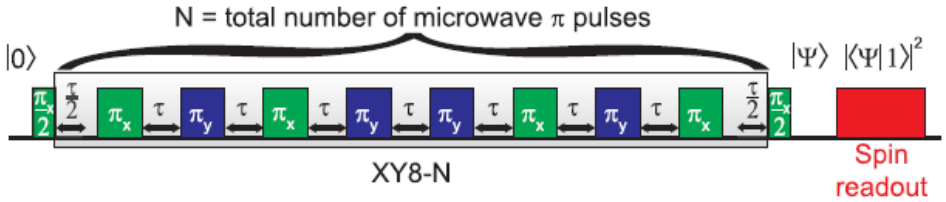
Shimon Kolkowitz, Quirin P. Unterreithmeier,* Steven D. Bennett, and Mikhail D. Lukin

探测金刚石表面液体和固体中质子的信号

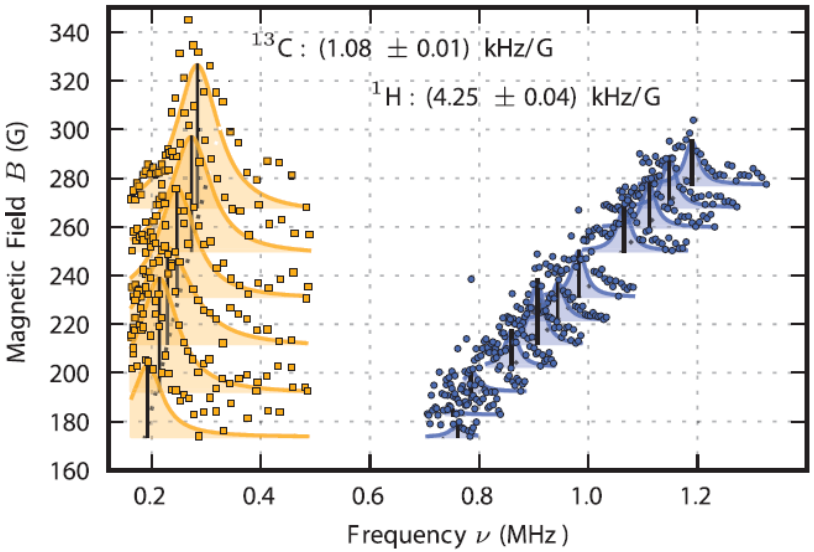


频率正比于外磁场，斜率即 为各自的旋磁比

动力学去耦序列 探测自旋体系噪声



极化核自旋的 NMR 谱

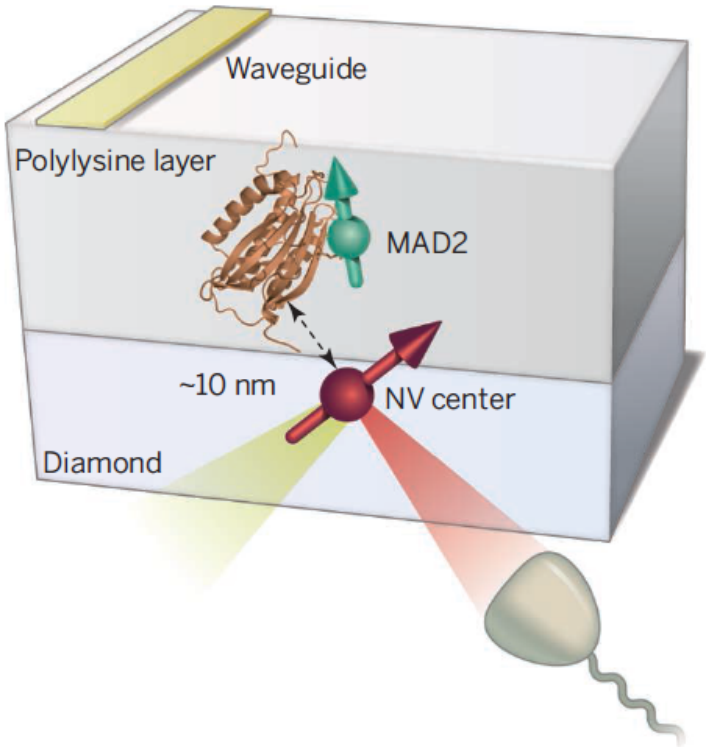


Sensing using NV center

PROTEIN IMAGING

Single-protein spin resonance spectroscopy under ambient conditions

SCIENCE (2015) 347, 1135



PHYSICS

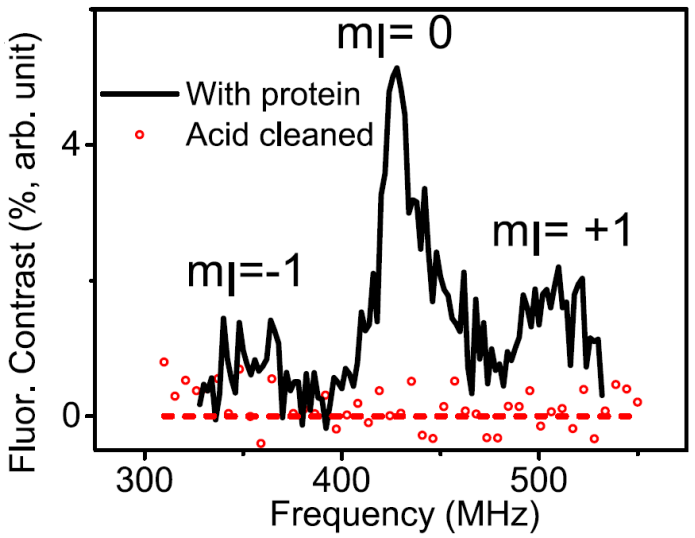
Single proteins under a diamond spotlight

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

By **Philip Hemmer**[1] *and* **Carmen Gomes**[2] | in a virus molecule down to

单蛋白质分子顺磁共振谱

Science 347, 1135 (2015)

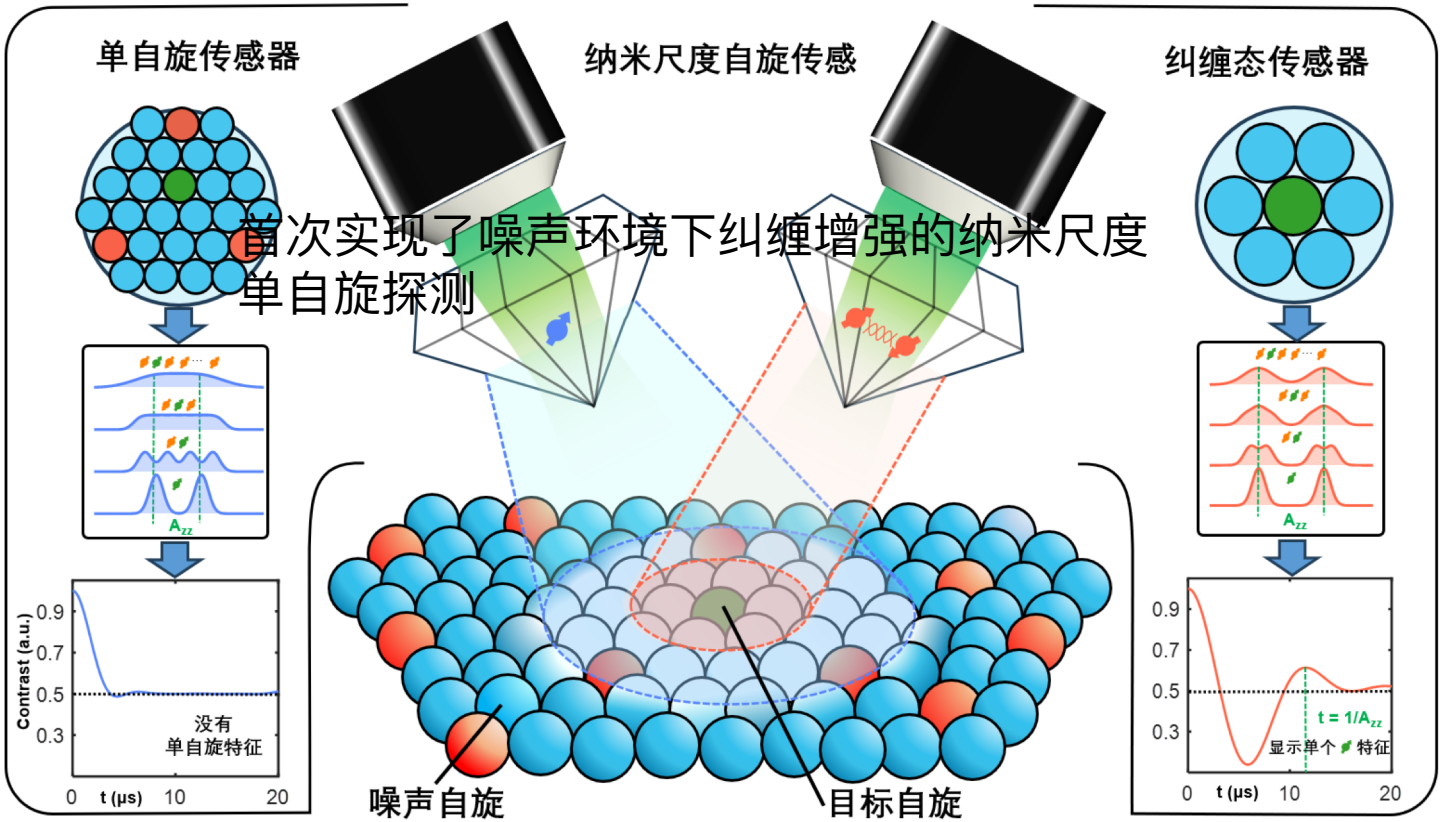


单蛋白质分子顺磁共振谱

- 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 -> 10^{-9}米
  灵敏度：10^{10}分子 -> 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

实现纠缠增强纳米尺度单自旋量子传感

在嘈杂环境中将探测灵敏度提升至单传感器水平的3.4倍；
能够实时监测并主动调控不稳定自旋的信号

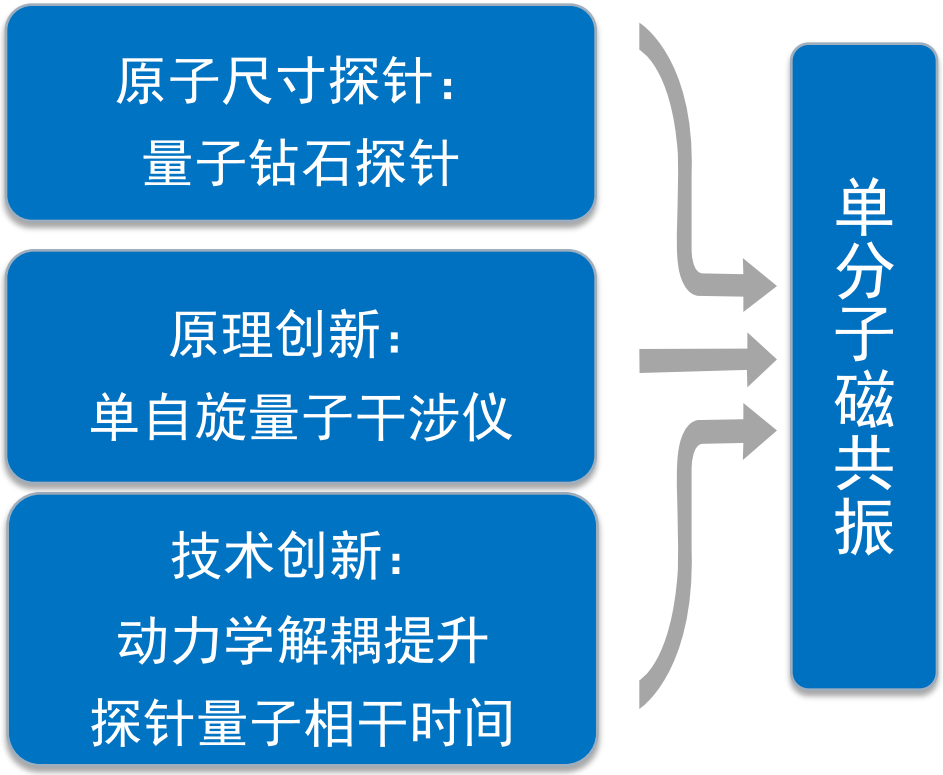


Nature **volume 647**, pages883–888 (2025)

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”



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

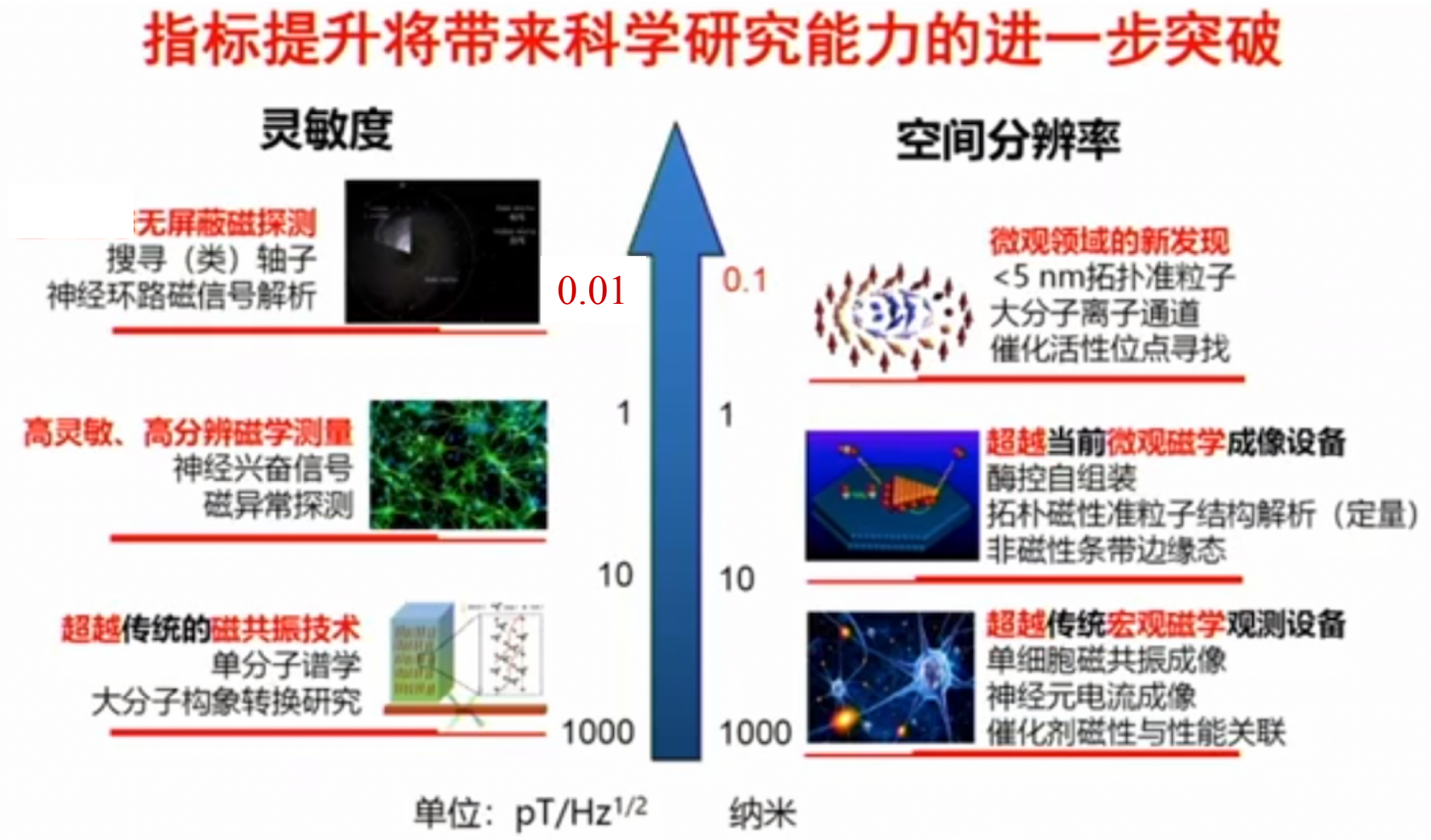
    Nature Physics 10, 21 (2014)
  - 实现单核自旋灵敏度探测

    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

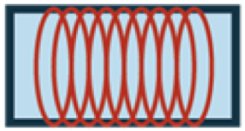
  Science 347, 1135 (2015)

展望

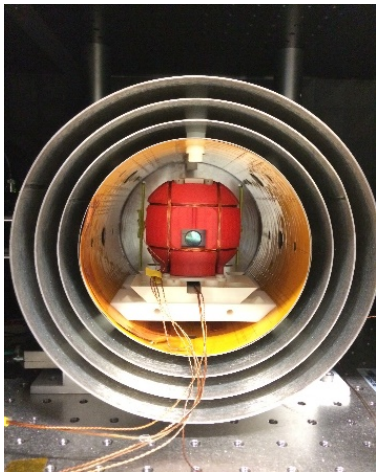

指标提升将带来科学研究能力的进一步突破
灵敏度
空间分辨率
无屏蔽磁探测
搜寻（类）轴子
神经环路磁信号解析
高灵敏、高分辨磁学测量
神经兴奋信号
磁异常探测
超越传统的磁共振技术
单分子谱学
大分子构象转换研究
0.01
1
10
1000
0.1
1
10
1000
微观领域的新发现
<5 nm拓扑准粒子
大分子离子通道
催化活性位点寻找
超越当前微观磁学成像设备
酶控自组装
拓朴磁性准粒子结构解析（定量）
非磁性条带边缘态
超越传统宏观磁学观测设备
单细胞磁共振成像
神经元电流成像
催化剂磁性与性能关联
单位：pT/Hz1/2
纳米

总结



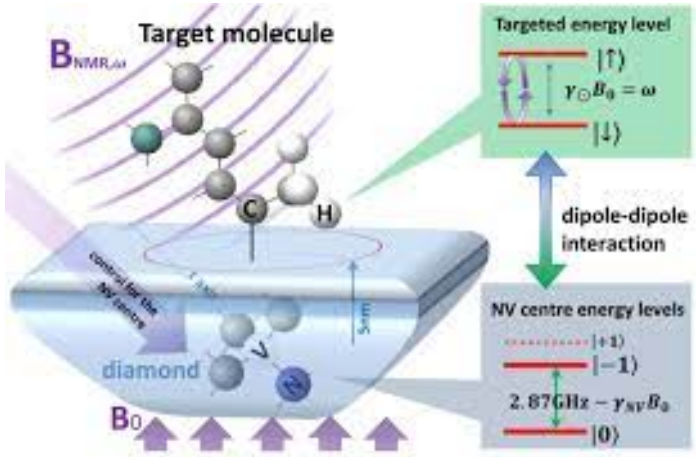


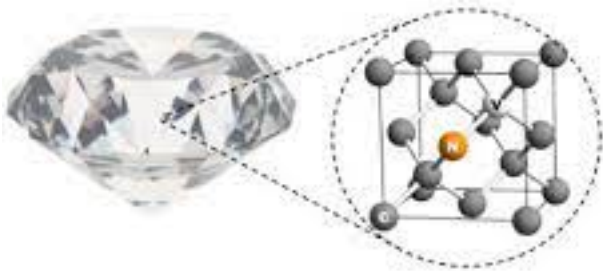
传统高场NMR





零场-超低场NMR





单分子NMR