蓝宝石网络（Spin Amplifier for Particle PHysIcs Research）

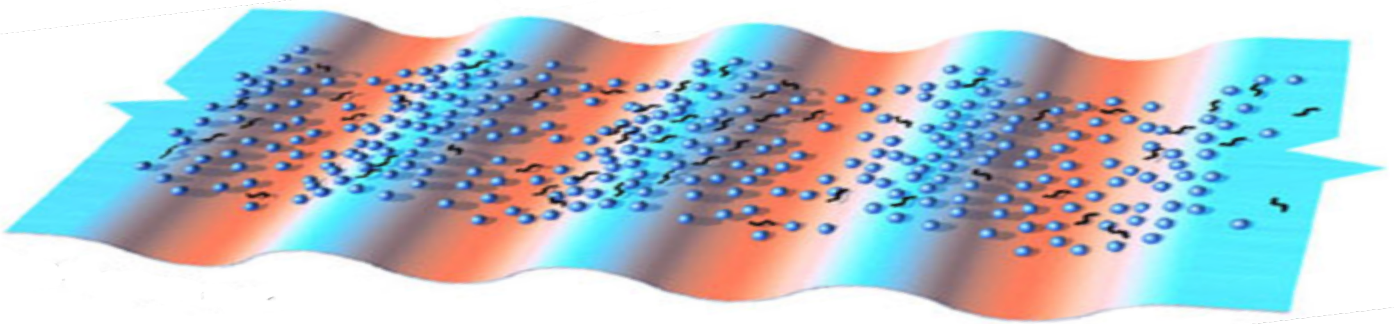
单一探测器

- 难以抑制局域噪声
- 磁场探测存在死区
- 无法给出暗物质的方向信息

发展趋势

探测器网络

- 误报警率 $\propto p^N$
- 磁场探测灵敏度 $\propto 1/\sqrt{N}$
- 全方向灵敏
- 长基线探测



1feV的粒子德布罗意波长 ~地球直径的100倍

对长德布罗意波长的超轻暗物质可实现网络探测

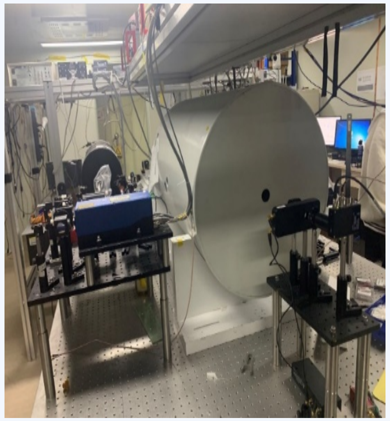
蓝宝石网络（Spin Amplifier for Particle PHysIcs Research）

蓝宝石网络：首个基于混合自旋体系的暗物质探测网络

国内外参与单位：

中国科学技术大学 (平台型，4台)，中国
浙江工业大学（平台型，1台），中国
德国亥姆霍兹研究所（平台型，1台），德国
哈尔滨工业大学（微型化，2台），中国
中科院苏州医工所（微型化，13台），中国
北京大学，中国
犹他州大学，美国
伯克利分校，美国

arXiv:2305.00890v1 (2023)
Nature Communication审稿



Long-baseline dark matter search (AMAILS)

nature communications

New limits on dark photon dark matter

Article

https://doi.org/10.1038/s41467-024-47566-0

Long-baseline quantum sensor network as dark matter haloscope

Received: 13 September 2023

Accepted: 4 April 2024

Min Jiang[1,2,3,12], Taizhou Hong[1,2,3,12], Dongdong Hu[3,4,12], Yifan Chen[5], Fengwei Yang[6], Tao Hu[7], Xiaodong Yang[7], Jing Shu[8,9,10], Yue Zhao[6], Xinhua Peng[1,2,3] & Jiangfeng Du[1,2,3,11]

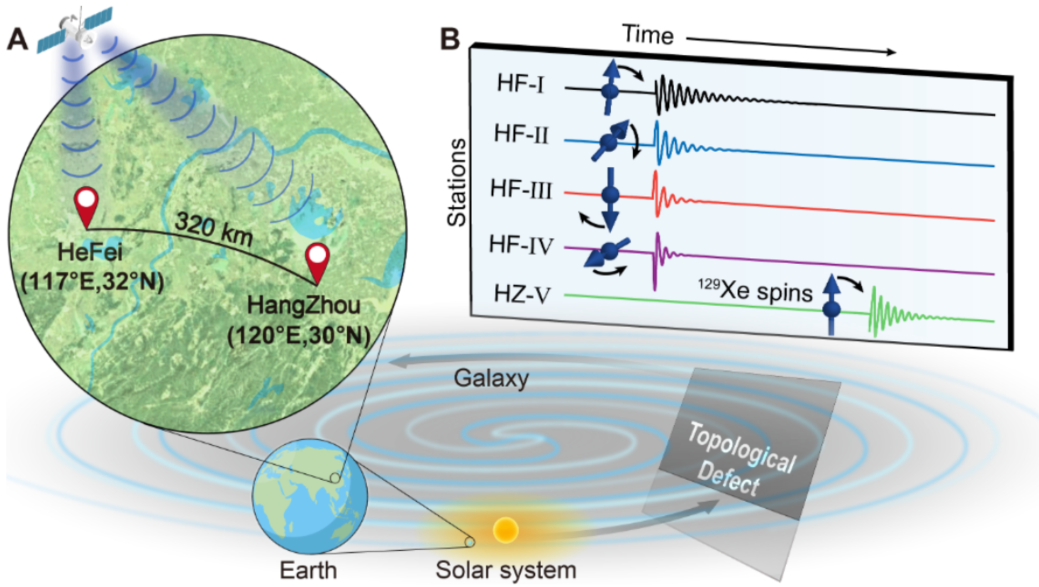
中国科学院苏州生物医学工程技术研究所（13台） 哈尔滨工业大学（2 台)

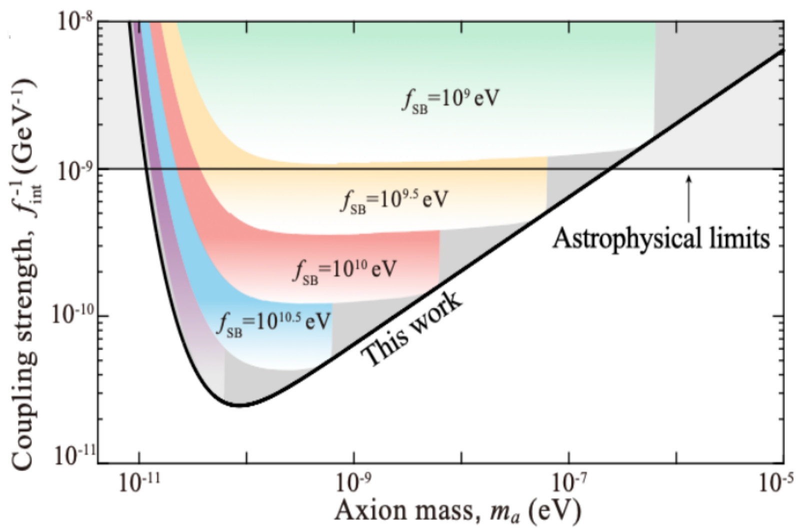
对4.1 feV-2.1 peV质量范围内暗光子暗物质的动力学混合系数提供最严格的地面实验约束

Collaboration with Yue Zhao, Jing Shu, Yifan Chen

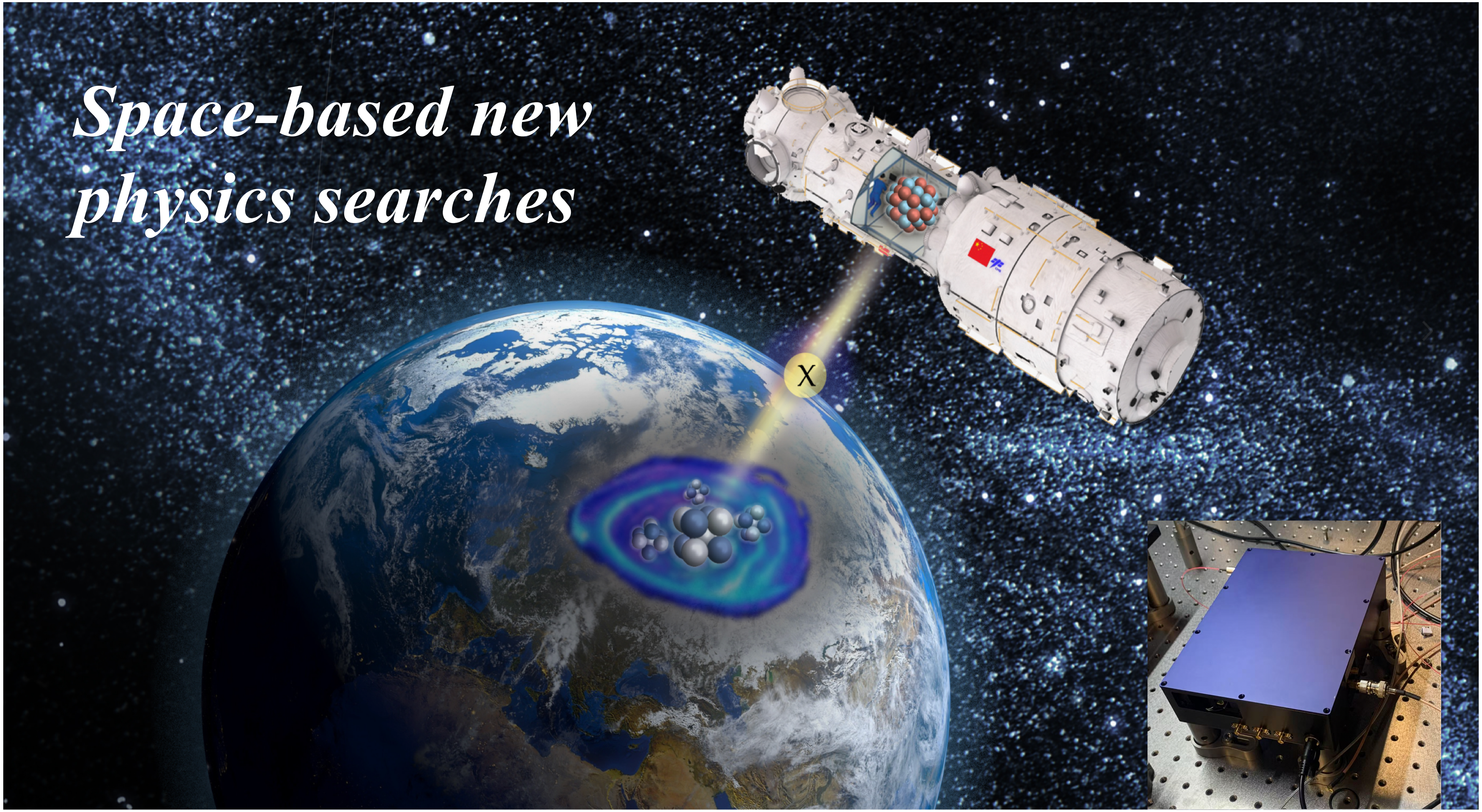
蓝宝石网络（Spin Amplifier for Particle PHysIcs Research）

- 利用相距320km的原子自旋放大器（共5台），开展了暗物质的组网探测，显著降低干扰噪声，突破宇宙天文学界限1个量级





Under reviewing in Nature



PERSPECTIVE

National Science Review
12: nwaf389, 2025
https://doi.org/10.1093/nsr/nwaf389
Advance access publication 22 September 2025

PHYSICS

Quantum sensors in space: unveiling the invisible universe

Yuanhong Wang[1,2,†], Xingming Huang[1,2,†], Min Jiang[1,2,*], Qing Lin[3,4], Wenqiang Zheng[4], Yuan Sun[5], Liang Liu[5], Xinhua Peng[1,2,*], Zhengguo Zhao[3,4] and Jiangfeng Du[2]

PHYSICAL REVIEW D **112,** 095015 (2025)

Hunting for exotic bosons with flying quantum sensors in space

Xingming Huang,[1,*] Yuanhong Wang,[1,*] Xiang Kang,[1] Jiaxi Li,[1,2] Haowen Su,[1] Zehao Wang,[1] Qing Lin,[3,4] Wenqiang Zheng,[5] Yuan Sun,[6] Liang Liu,[6] Min Jiang,[1,7,†] Xinhua Peng,[1,2,7,‡] Zhengguo Zhao,[3,4] and Jiangfeng Du[2,8]

AxionLimits

Our two projects have been included by the AxionLimits

Invitation review

IOPscience Journals Books Publishing Support Login

Reports on Progress in **Physics**

OPEN ACCESS
IOP Publishing Reports on Progress in Physics
Rep. Prog. Phys. **88** (2025) 016401 (31pp) https://doi.org/10.1088/1361-6633/ad99e6

Review

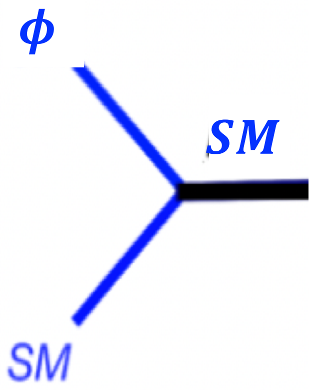
Searches for exotic spin-dependent interactions with spin sensors

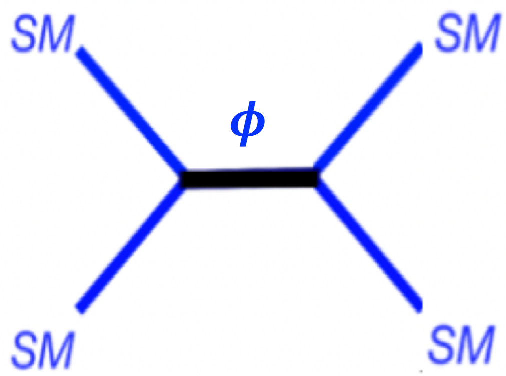
Min Jiang[1,2,6], Haowen Su[1,2,6], Yifan Chen[3,6], Man Jiao[4,5], Ying Huang[1,2], Yuanhong Wang[1,2], Xing Rong[1,2], Xinhua Peng[1,2,*] and Jiangfeng Du[1,2,4]

Introduction to the Progress of Spin Sensors in exotic spin-dependent interactions detection

Sapphire project（“蓝宝石”计划）

Spin Amplifier for Particle PHysIcs Research



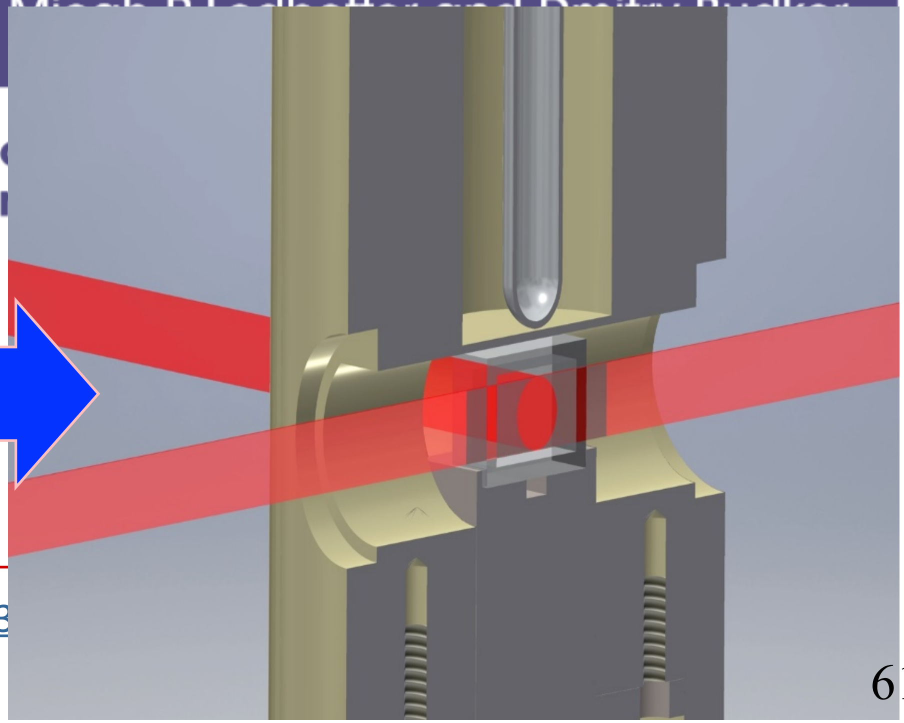


直接探测：
暗物质候选粒子
轴子、暗光子

“蓝宝石”计划：
自旋放大、fT灵敏度、
阵列探测、桌面式

间接探测：
新奇相互作用
新粒子作为传播子


ZERO-FIELD
nuclear magnetic
resonance

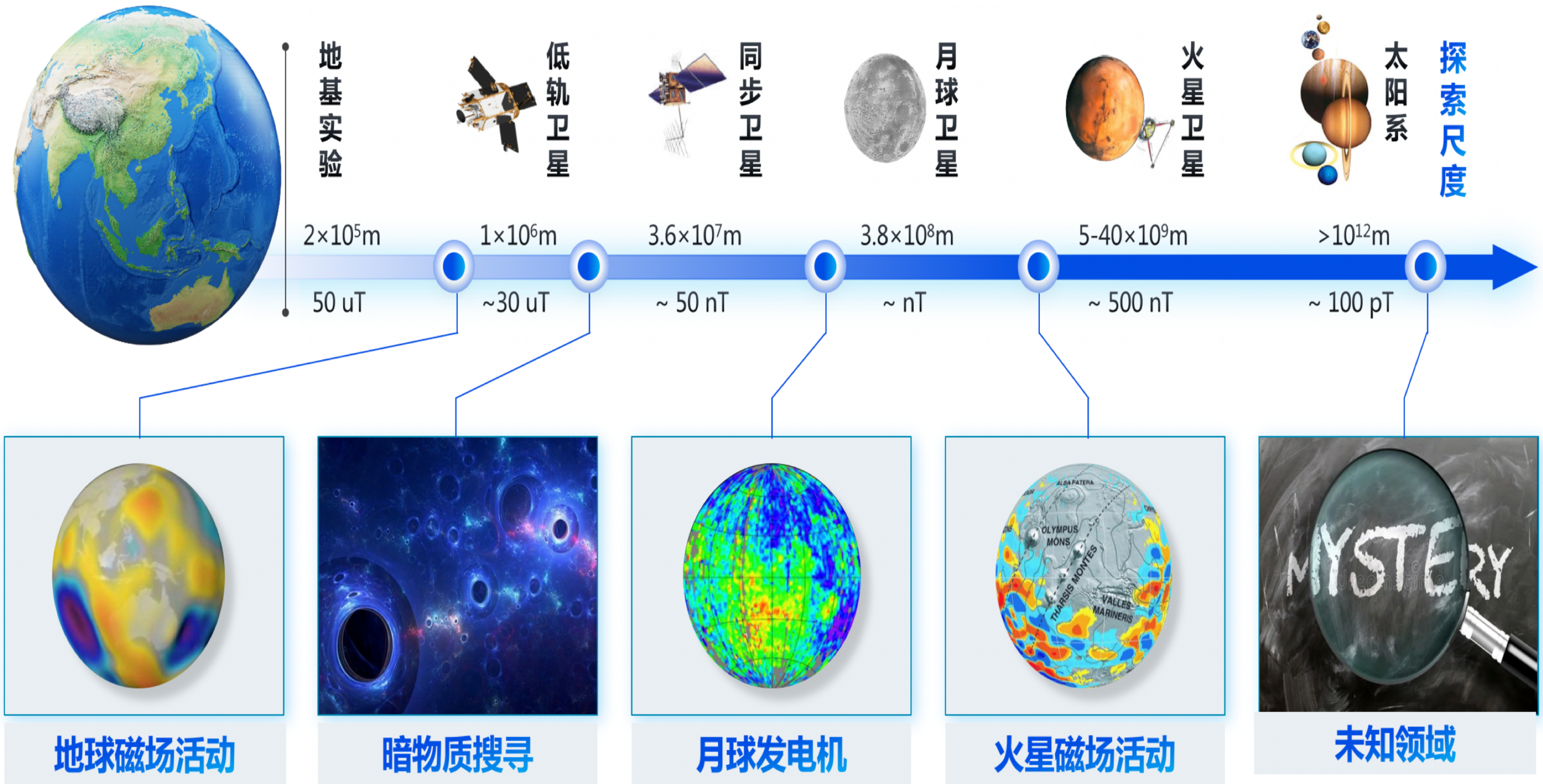


人体磁场：从庞大体积到**便携式诊断仪**

超导量子干涉仪SQUID

便携式原子磁力计

地球与空间磁场：探索浩瀚宇宙



(1) 为什么需要测量极弱磁场？

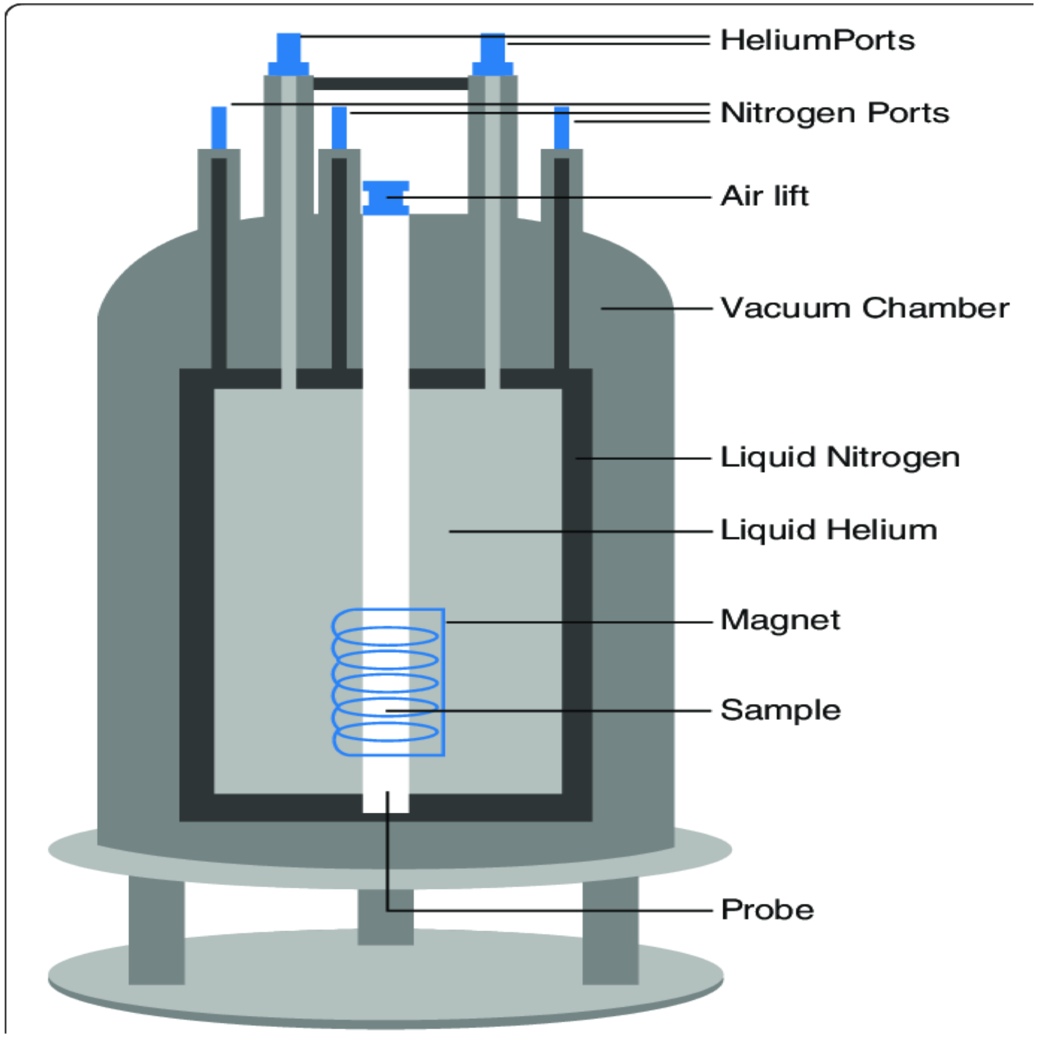
(2) 如何测量极弱磁场？

(3) 有什么前沿科学应用？

传统核磁共振：利用超导磁体+电磁感应

Bloch

Purcell



核磁共振成像（MRI）

挑战：安全性、便携性、低成本

传统高场核磁共振

核磁共振技术的难点：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

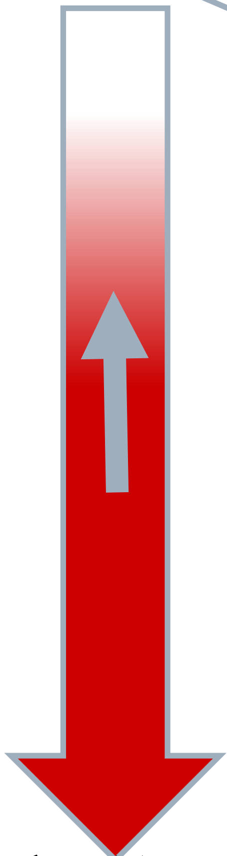
21T
>1000万

超导磁体：价格昂贵💰💰💰、笨重、磁场不均匀

核磁共振的发展新趋势：从高场到超低场

A. Abragam

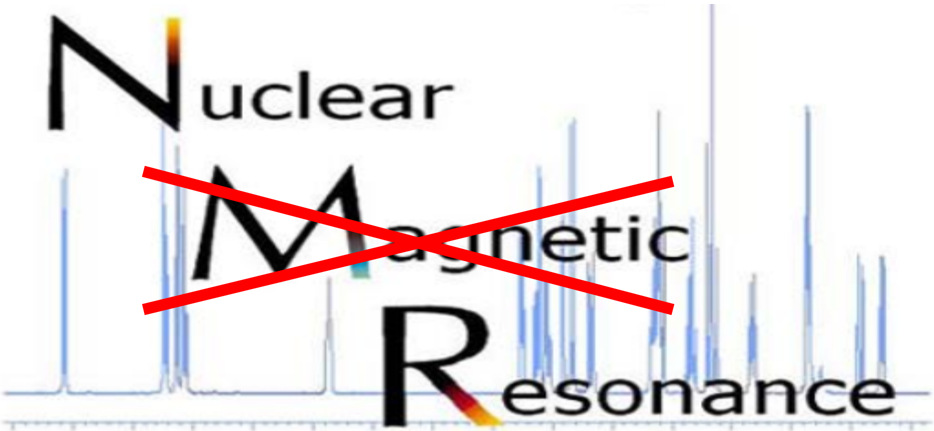
超低场



高磁场

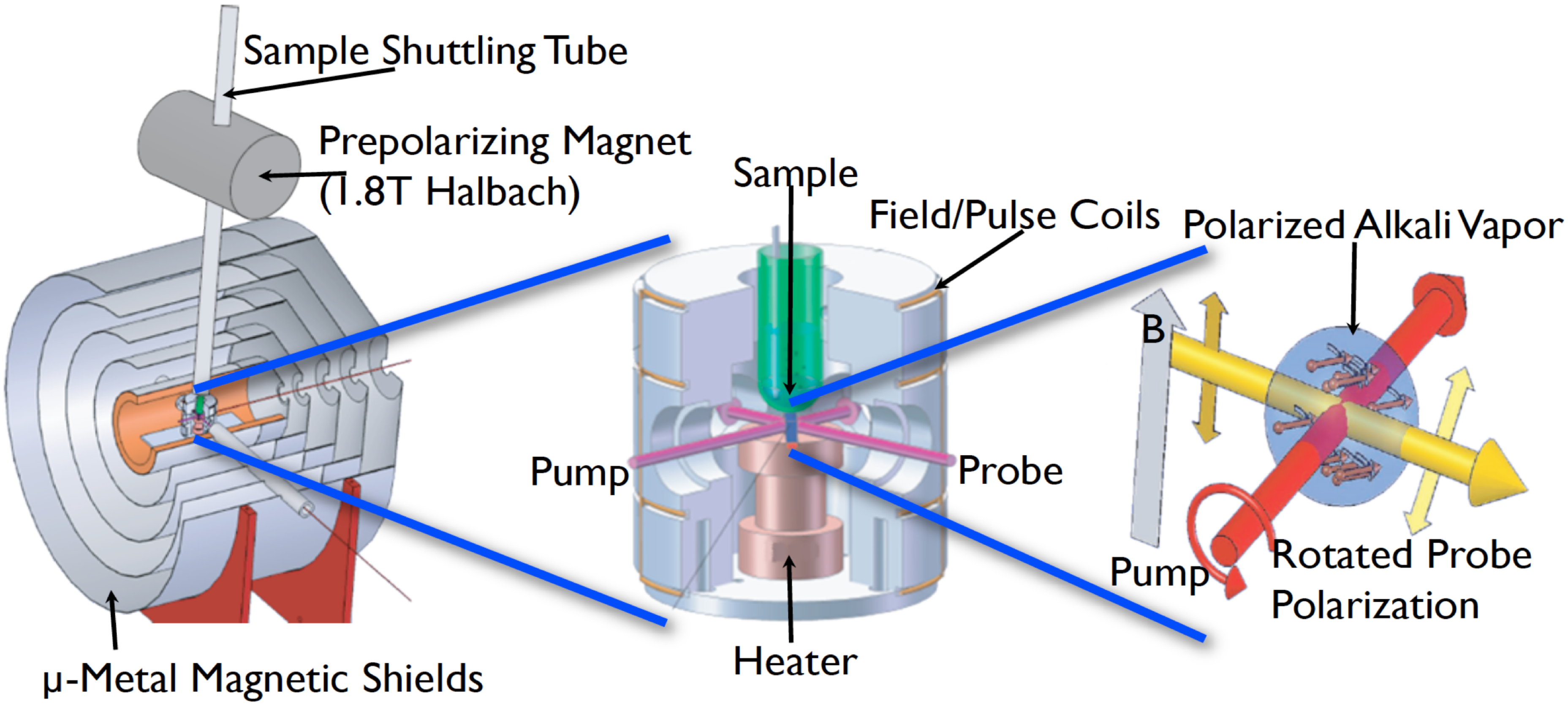
成本低、便携式、小型化

不需要超导磁体，
甚至不需要磁场？

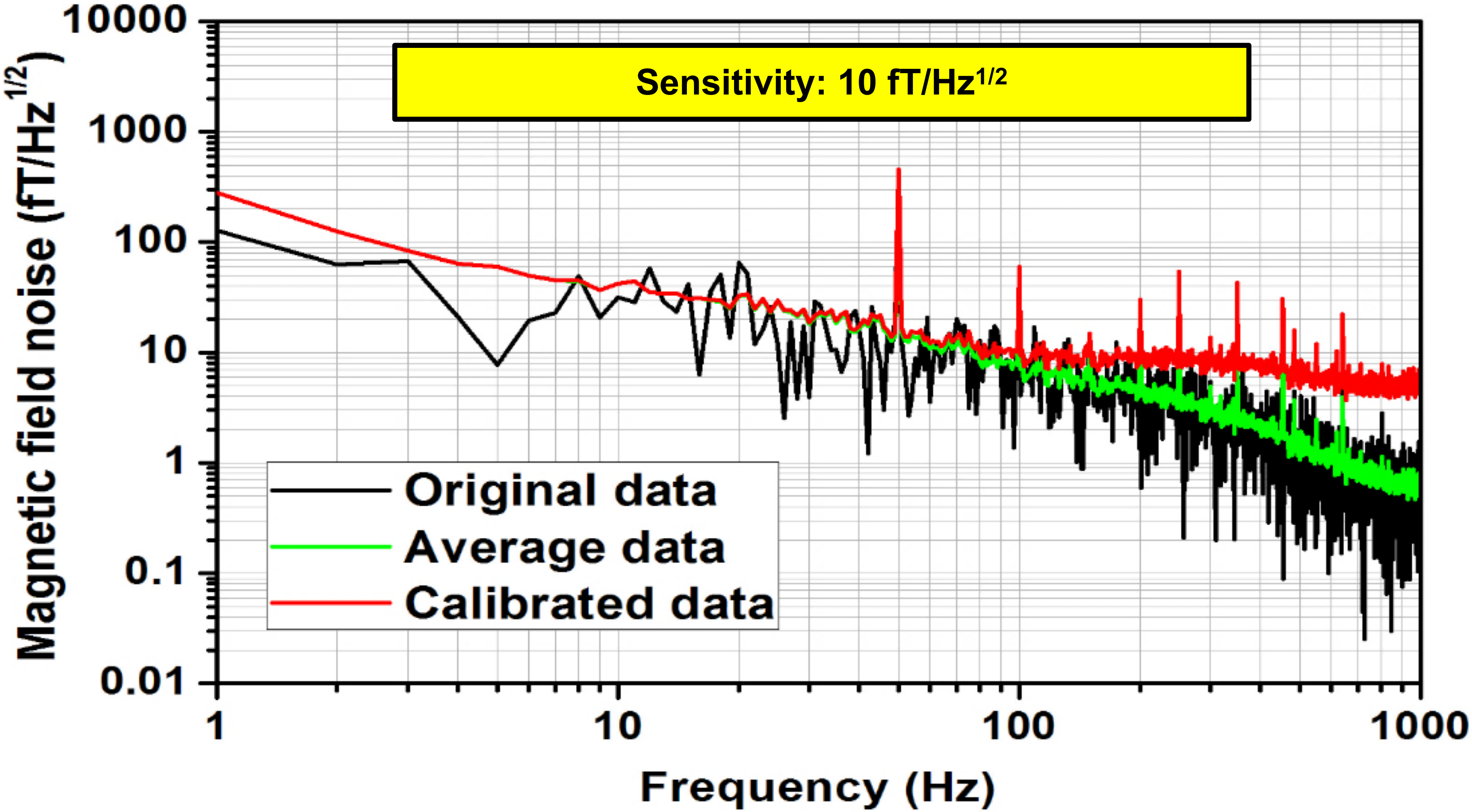


Bloch Purcell

ZERO-FIELD nuclear magnetic resonance

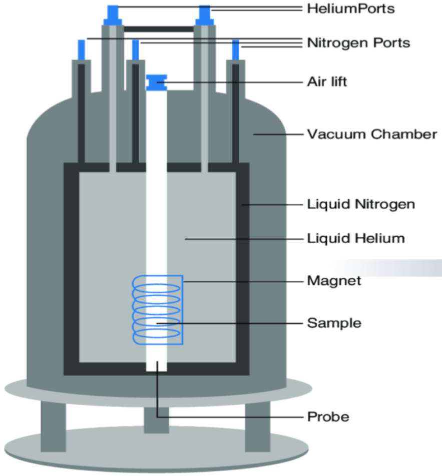


基于SERF原子磁力计的零磁场核磁共振

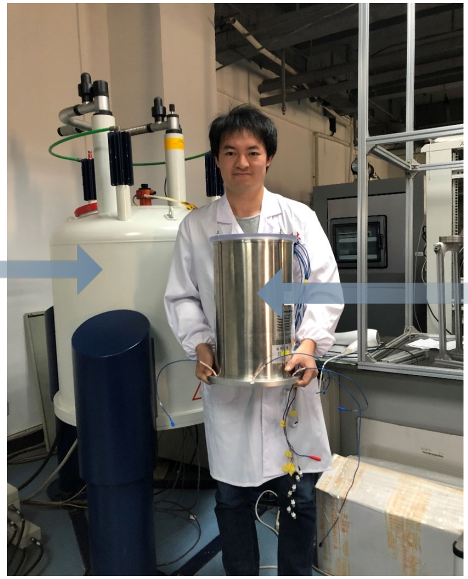


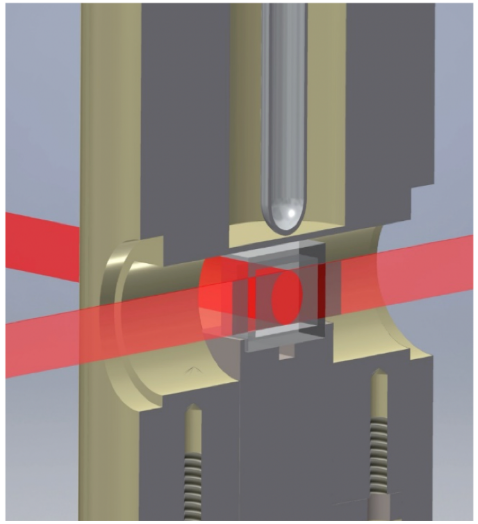
超灵敏化学分子结构测量: 零磁场NMR

核磁共振



电磁感应线圈





本工作

量子精密测量

~ 0.5 Hz

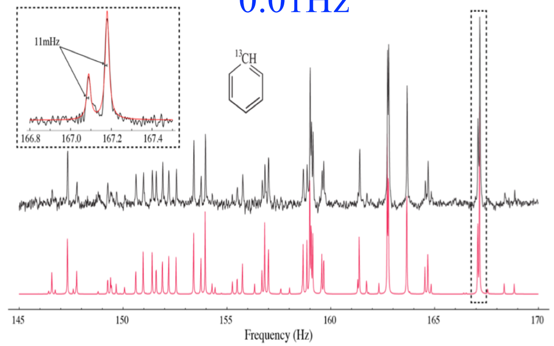
600M谱仪（14T)

无需超导磁体：成本低、便携式、小型化

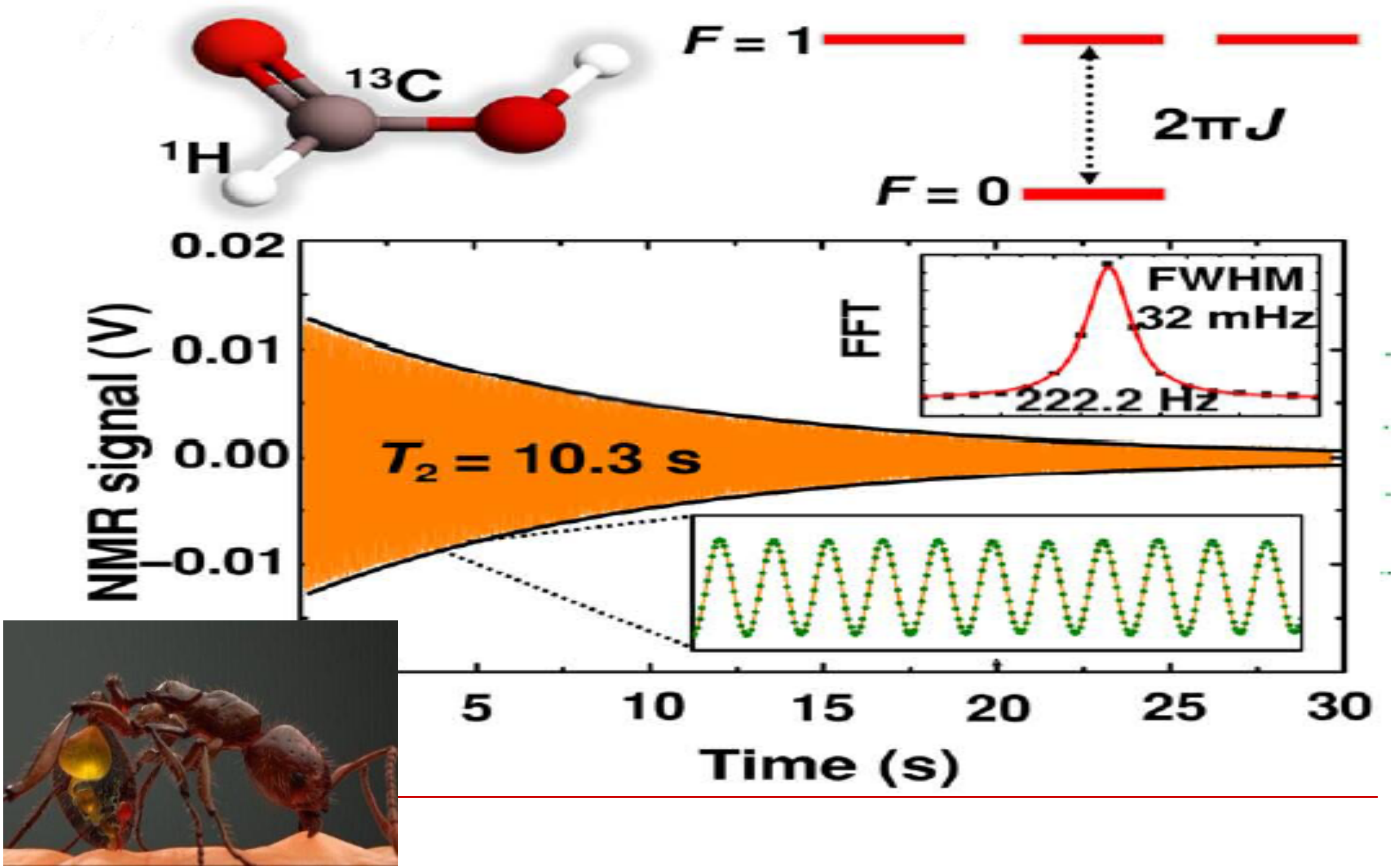
高分辨率：磁场绝对均匀、弛豫时间长，谱线线宽~10 mHz

适合特殊对象（如顺磁材料）：安全性高

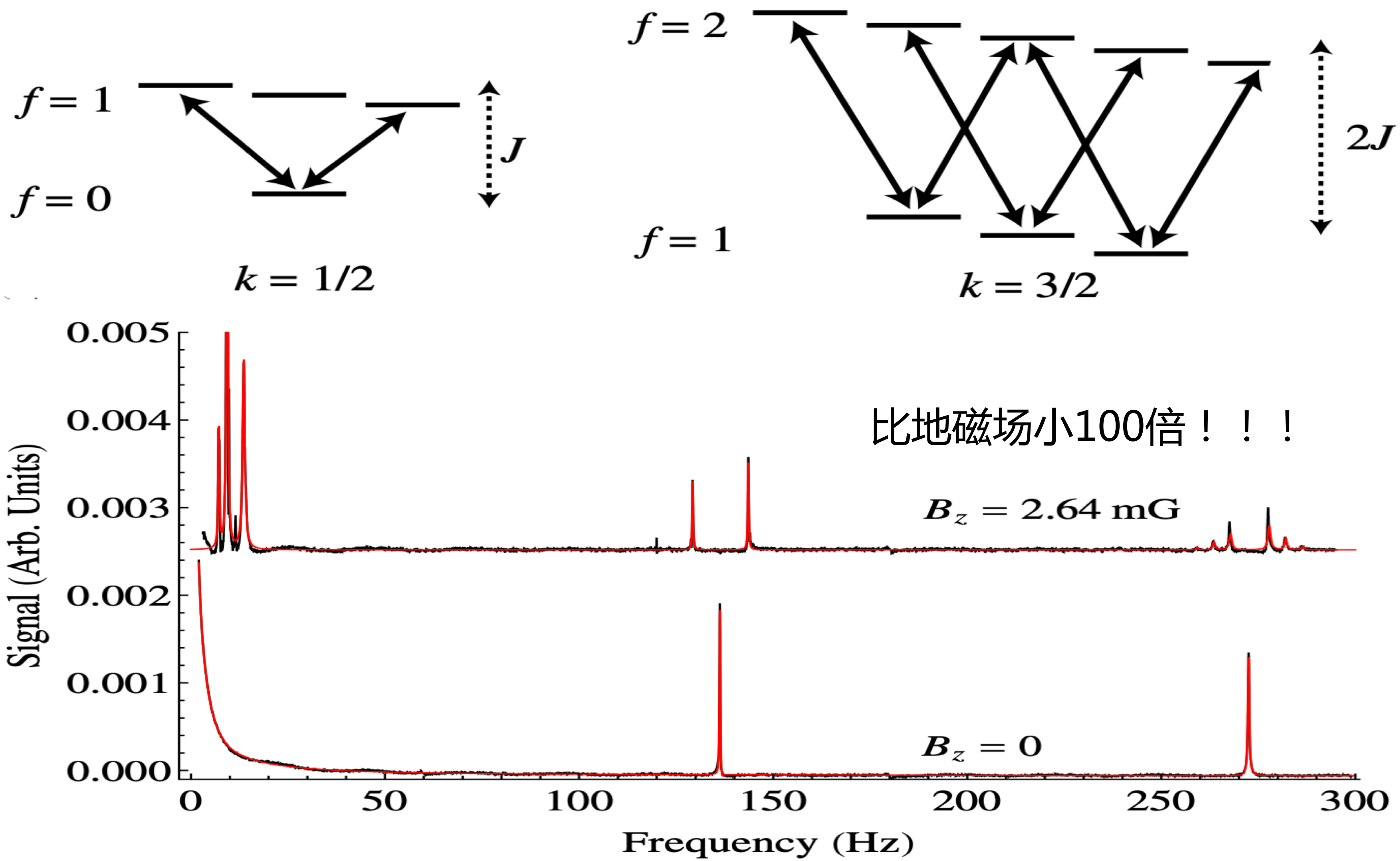
0.01Hz



甲酸的零磁场NMR谱（CH）

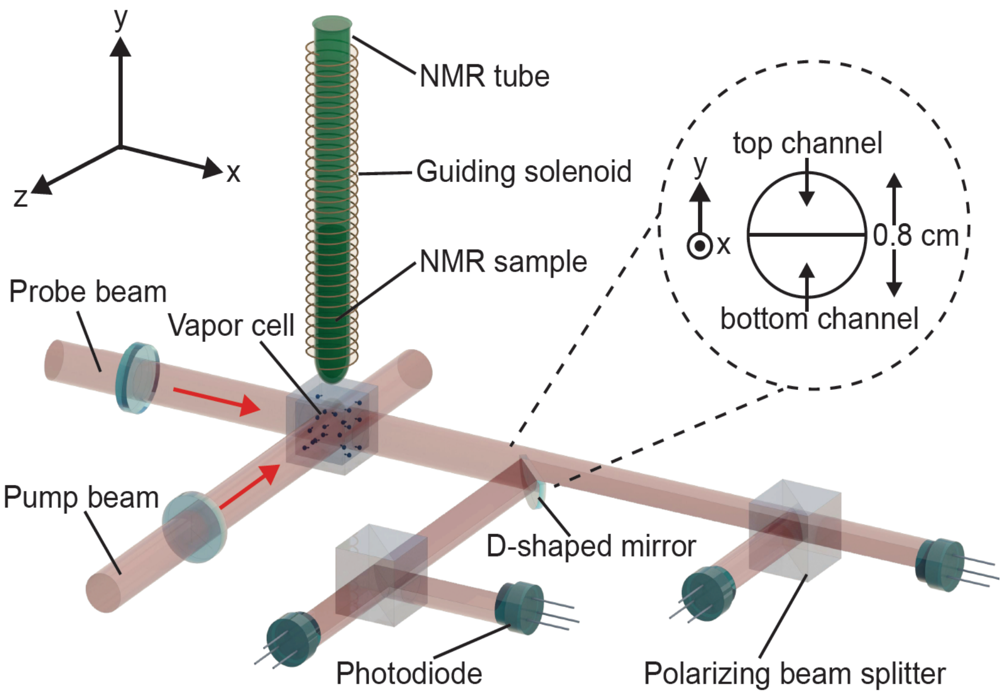


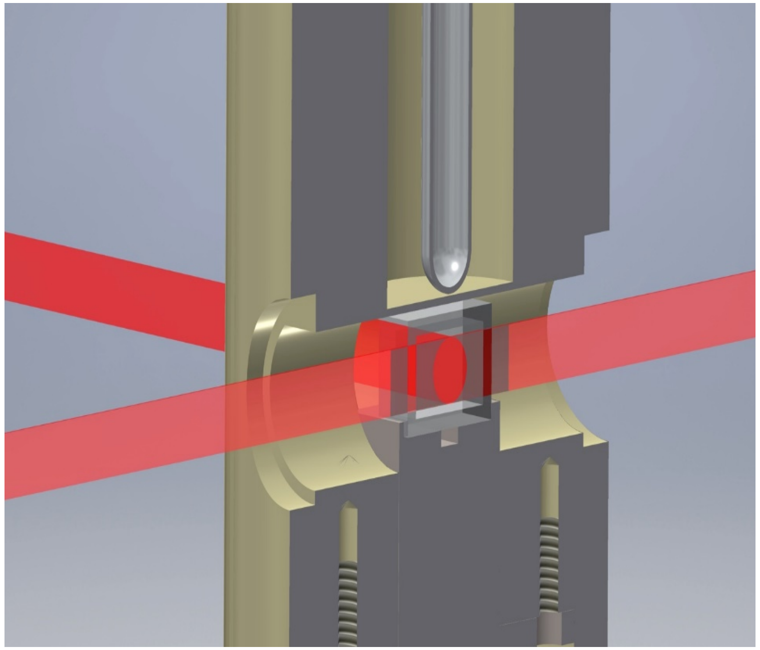
施加极弱磁场？



f = 1
f = 0
J
k = 1/2
f = 2
f = 1
2J
k = 3/2
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0.000
Signal (Arb. Units)
比地磁场小100倍！！！
B_z = 2.64 mG
B_z = 0
0
50
100
150
200
250
300
Frequency (Hz)

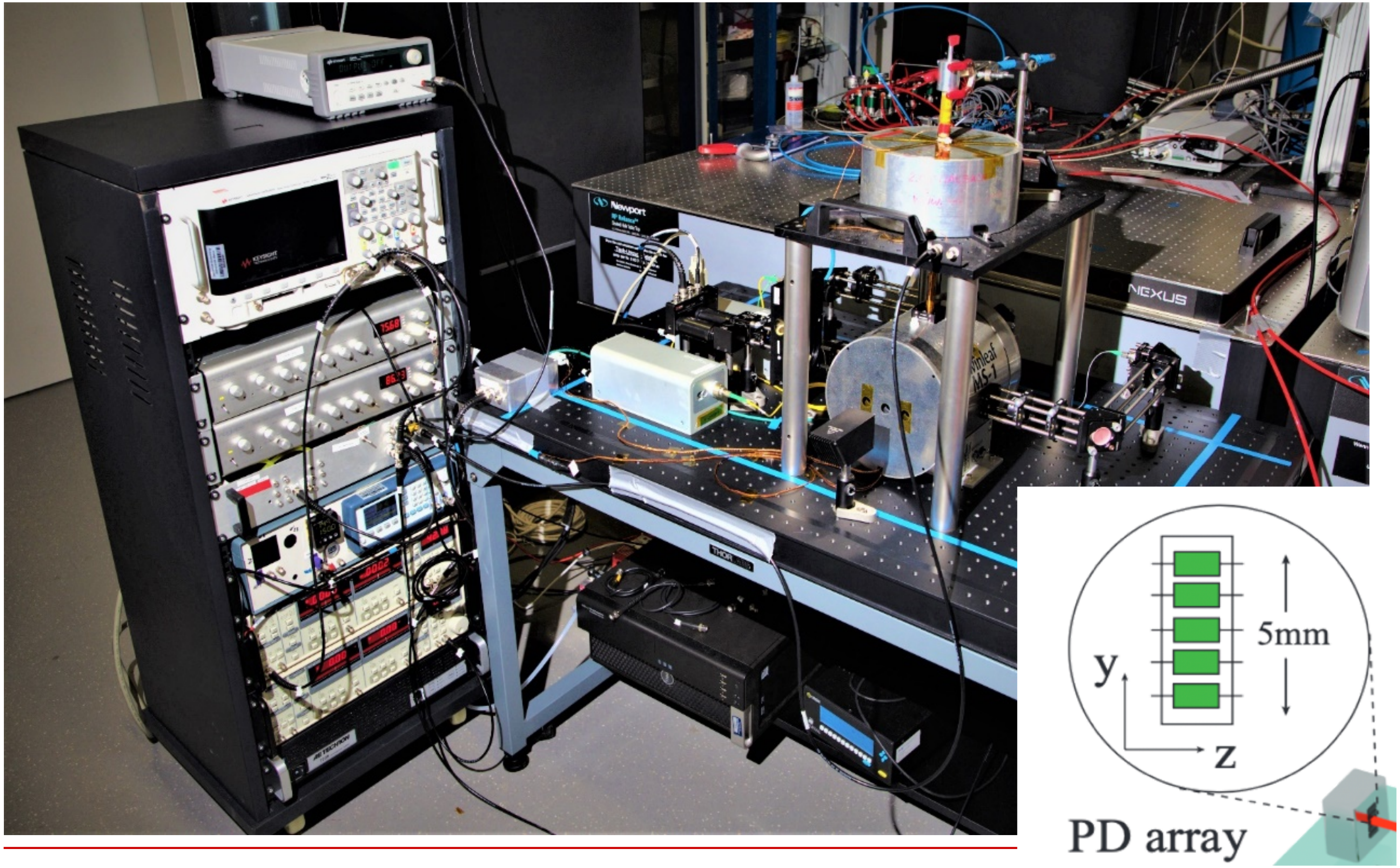
梯度计测量NMR的“局域磁场”



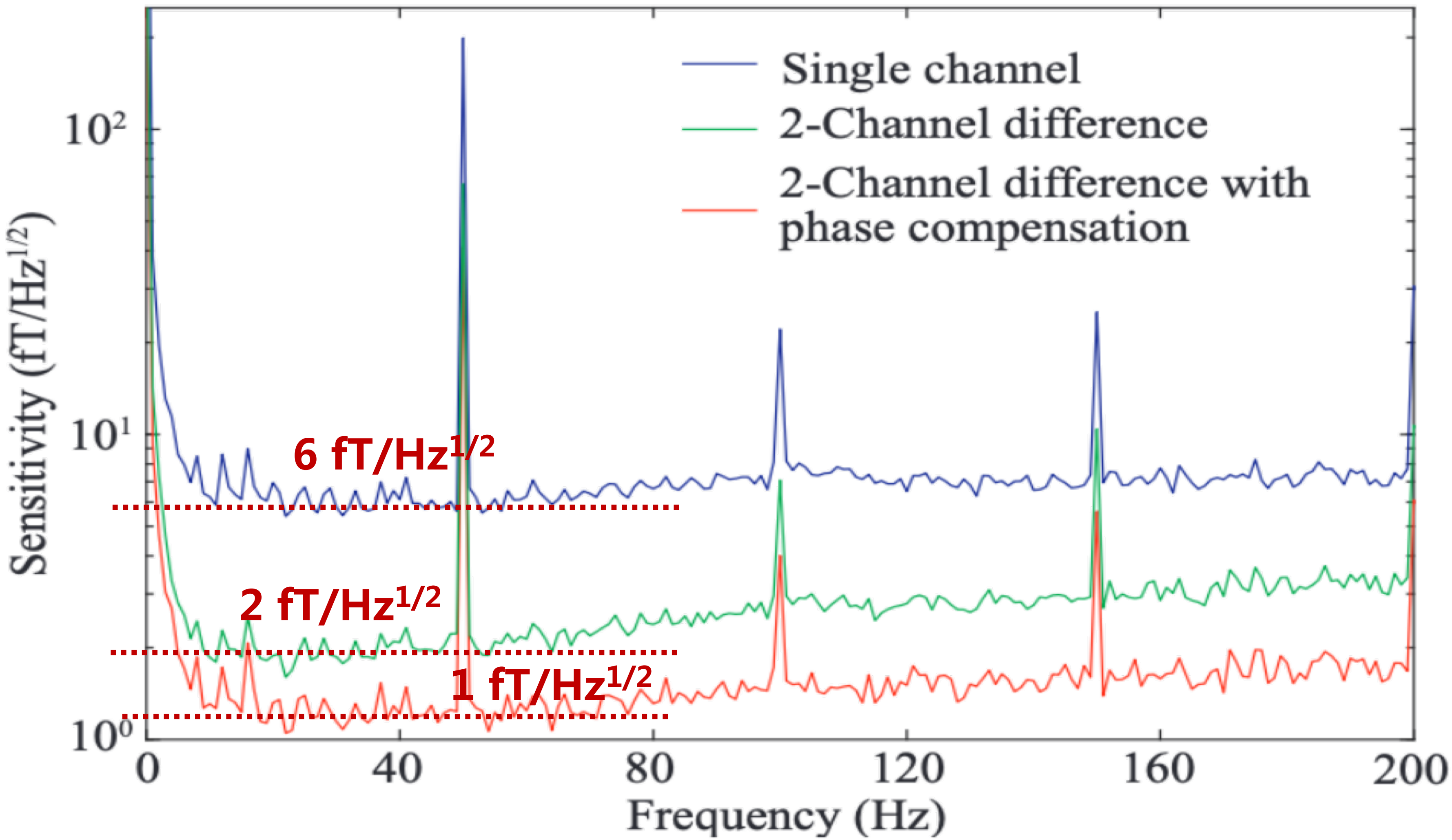


- ✓ 核自旋系综产生局域磁场，约5 mm范围
- ✓ 在相当尺寸的原子气体室内形成磁场梯度
- ✓ 梯度计是NMR探测的理想工具

化学分子的梯度磁场探测：超灵敏

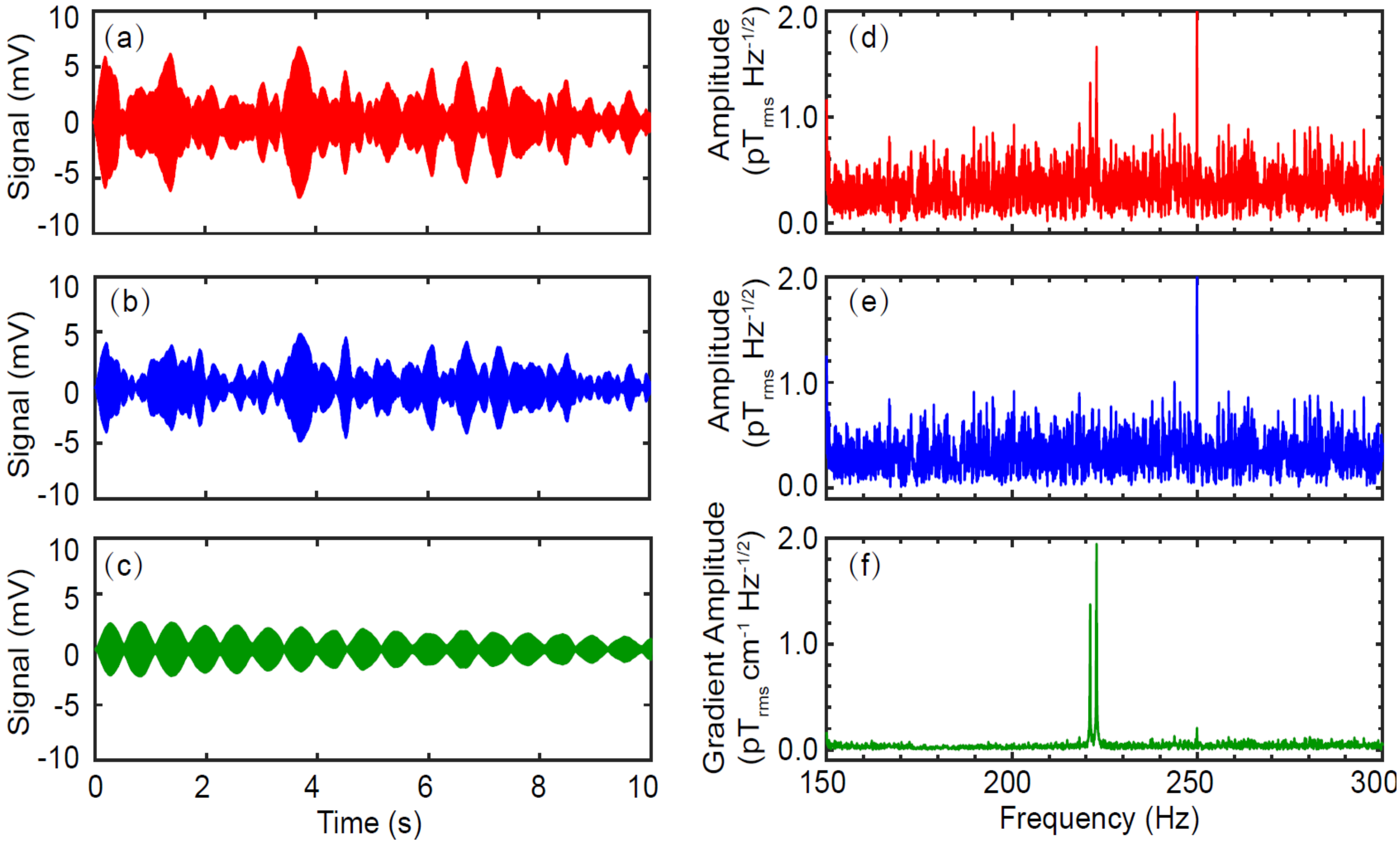


梯度探测灵敏度



Single channel
2-Channel difference
2-Channel difference with phase compensation
6 fT/Hz1/2
2 fT/Hz1/2
1 fT/Hz1/2
Sensitivity (fT/Hz1/2)
Frequency (Hz)

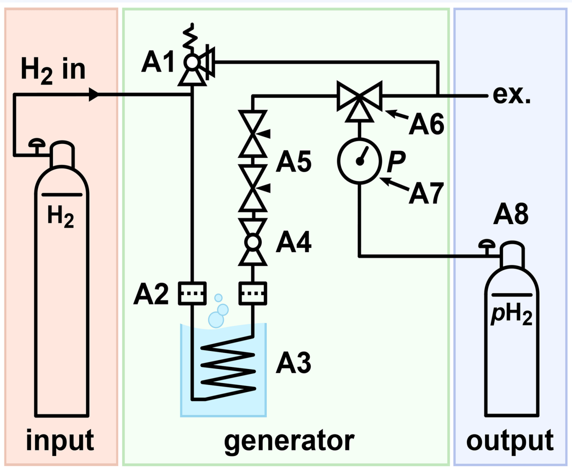
更高化学分子探测信噪比

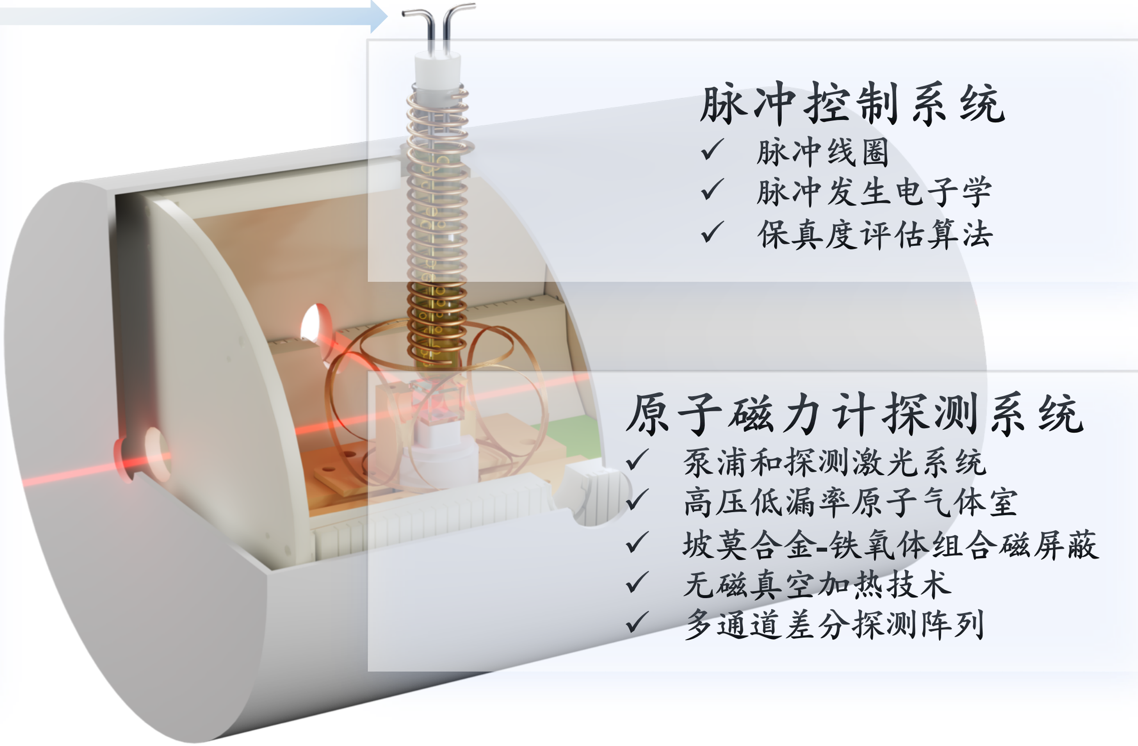


利用超极化技术提升信噪比

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

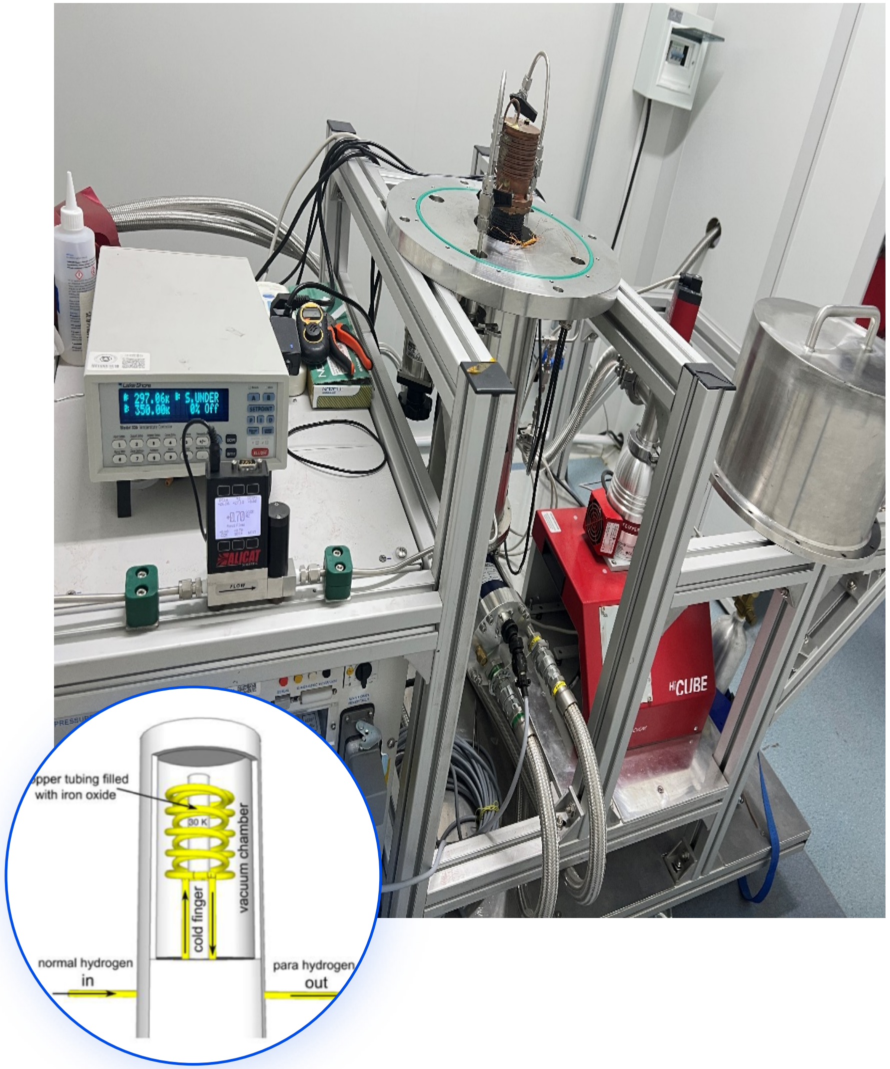




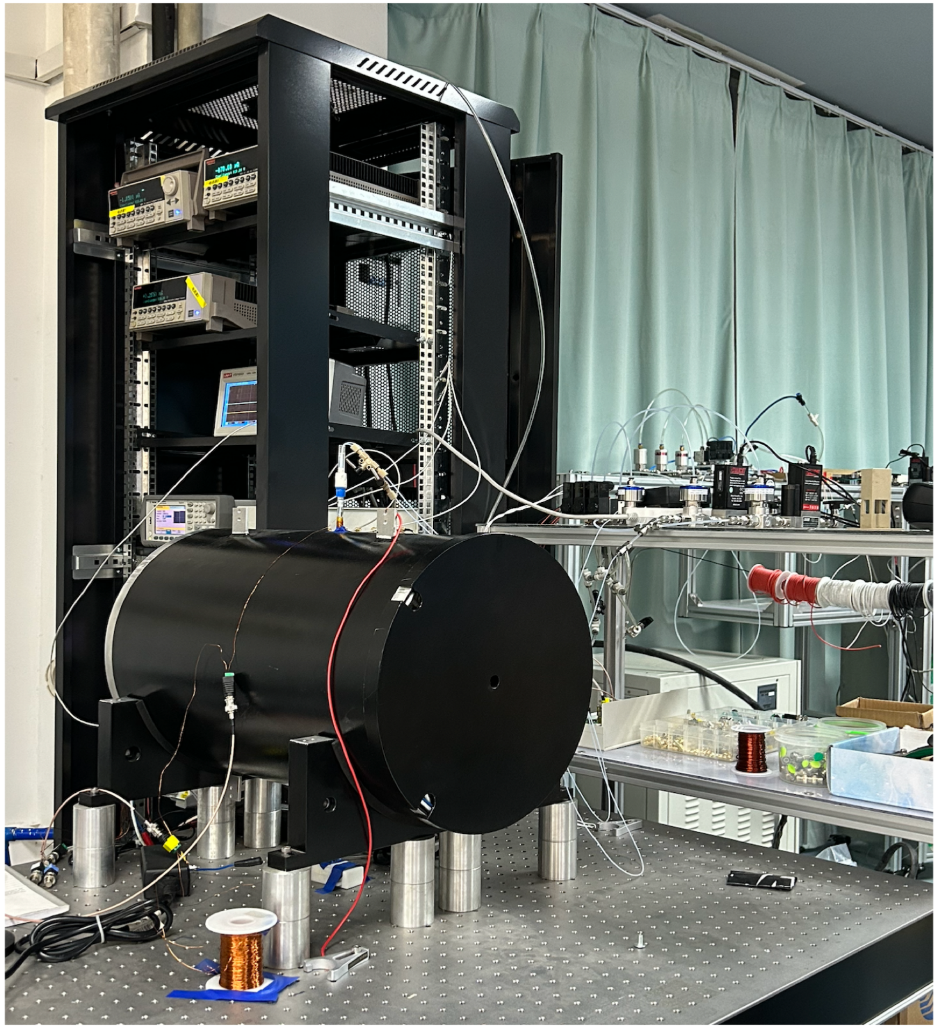
脉冲控制系统
- ✓ 脉冲线圈
- ✓ 脉冲发生电子学
- ✓ 保真度评估算法

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

超极化零磁场核磁共振

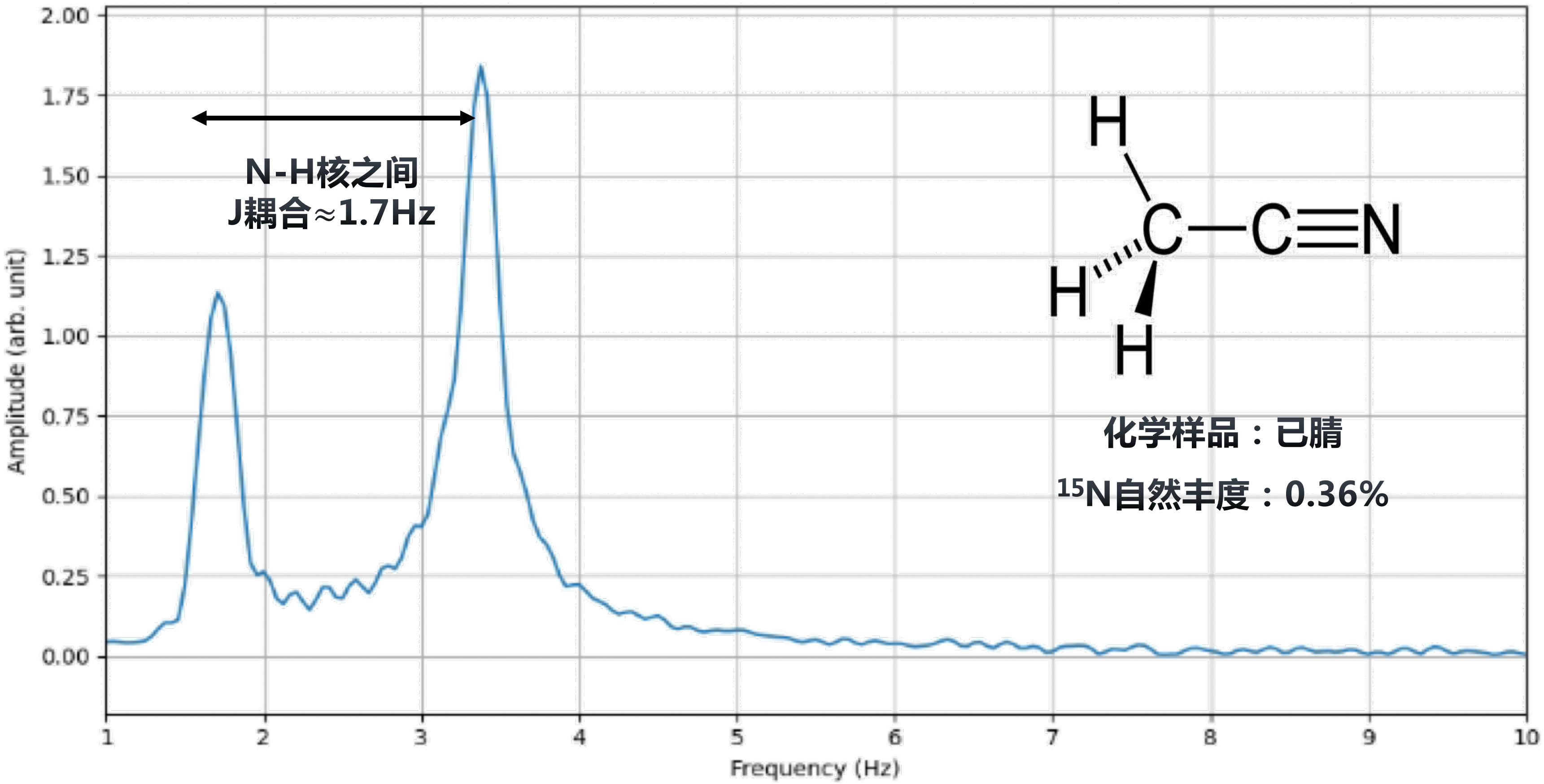


pper tubing filled
with iron oxide
30 K
vacuum chamber
cold finger
normal hydrogen
in
para hydrogen
out
HiCUBE



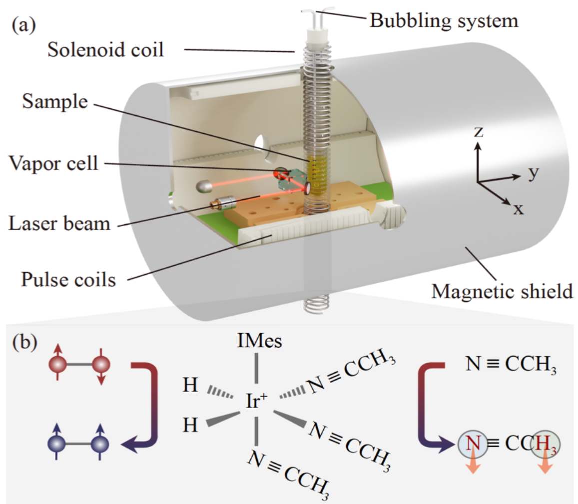
超极化零磁场核磁共振

首次观测到稀核^{15}N自然丰度零磁场核磁共振信号(信噪比>150)，测量出氮-氢核之间耦合强度(约1.7Hz)，增强传统热极化信号至少3个量级

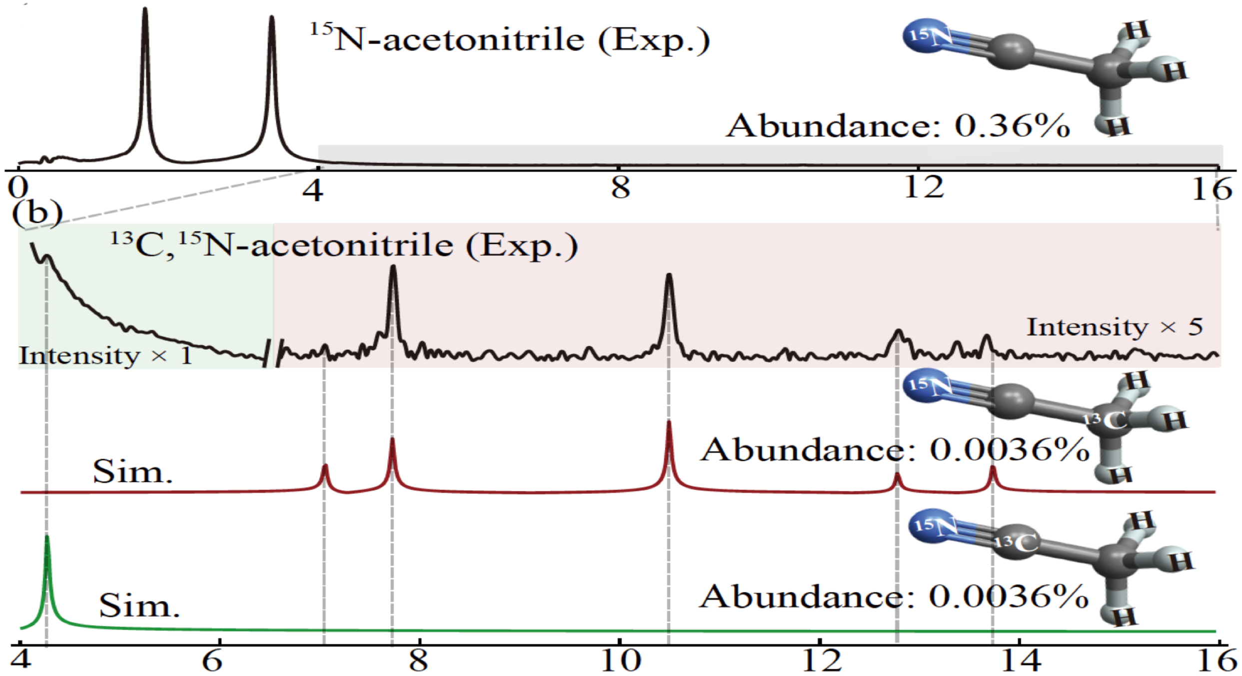


高灵敏、高分辨超低场核磁共振谱学研究

- 利用仲氢超极化与超低场核磁共振结合，**首次实现稀核^{15}N样品中多种同构体的单次测量**，获得不同同构体的高分辨率谱及核-核自旋J耦合常数



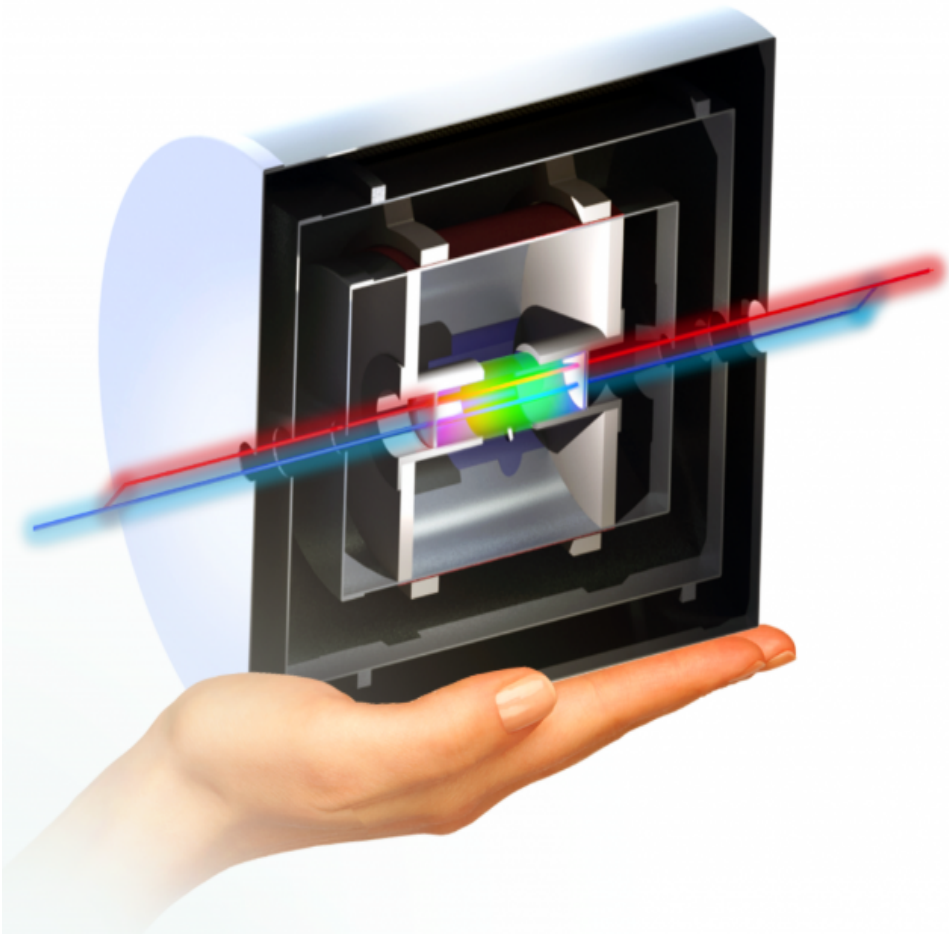
^{15}N spin polarization of 0.5%



Li…**Peng*** et al., to be submitted (2025)

81

未来核磁共振：“示波器”



物理	- 磁化率的测量 - 谱学研究 - 弛豫率分析
化学	- 化学样品定性分析 - 自旋捕获 - 分子结构
材料科学	- 固体材料结构分析 - 探测材料缺陷 - 复合材料
生物和医学	- 自旋标记和自旋探针技术 - 病变诊断 - 小动物成像测试
工业应用	- 石油勘探 - 岩样检测 - 加工缺陷检测 - 纺织工业

核磁共振将渗透到各行各业：不再受到价格和体积限制

零场-超低场核磁共振

Our review paper on 《Fundamental Research》

Contents lists available at ScienceDirect

Fundamental Research

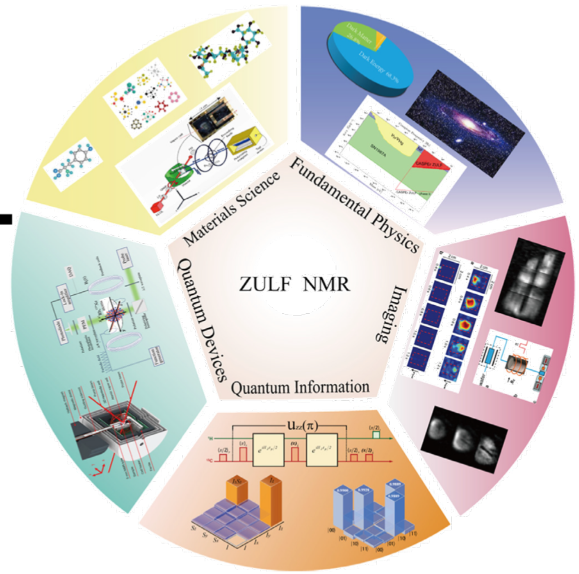
journal homepage: http://www.keaipublishing.com/en/journals/fundamental-research/

Review

Zero- to ultralow-field nuclear magnetic resonance and its applications

Min Jiang[a,b,c], Ji Bian[a,b,c], Qing Li[a,b,c], Ze Wu[a,b,c], Haowen Su[a,b,c], Minxiang Xu[a,b,c], Yuanhong Wang[a,b,c], Xin Wang[a,b,c], Xinhua Peng[a,b,c,*]

[a] *Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale and Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*
[b] *CAS Key Laboratory of Microscale Magnetic Resonance, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*
[c] *Synergetic Innovation Center of Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*

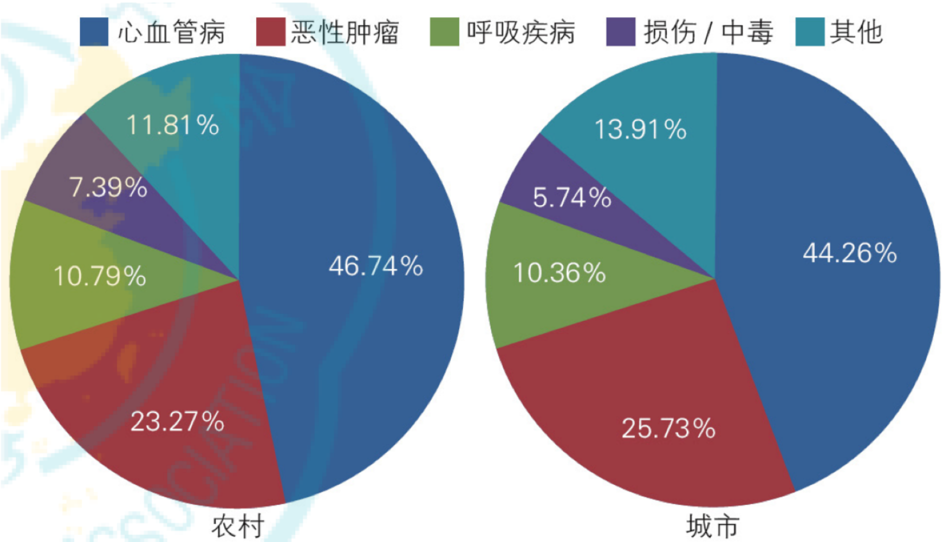


Jiang, et al., Fundamental Research 1, 68 (2021)

心磁和脑磁诊断

心血管疾病诊断方法重大需求

《中国心血管健康与疾病报告》



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**

相关心血管疾病

冠心病、心肌缺血、心肌病、胸痛、心律失常、胎儿心脏功能评估等

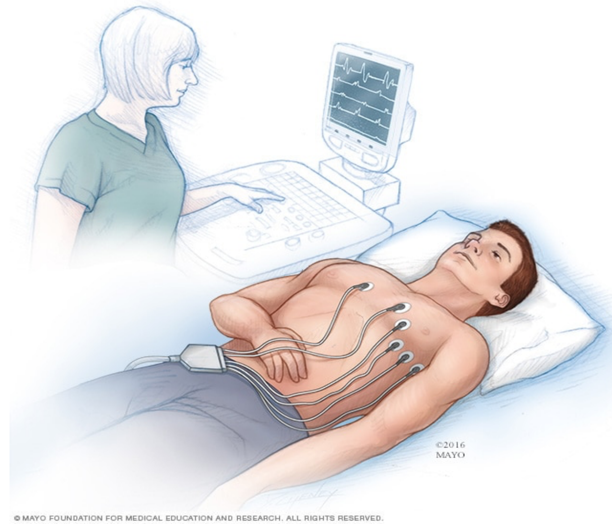
核心挑战：如何快速、准确无误、廉价诊断、早期筛查

心脏疾病的现有医学影像诊断方法

CT成像仪

B超

心电图

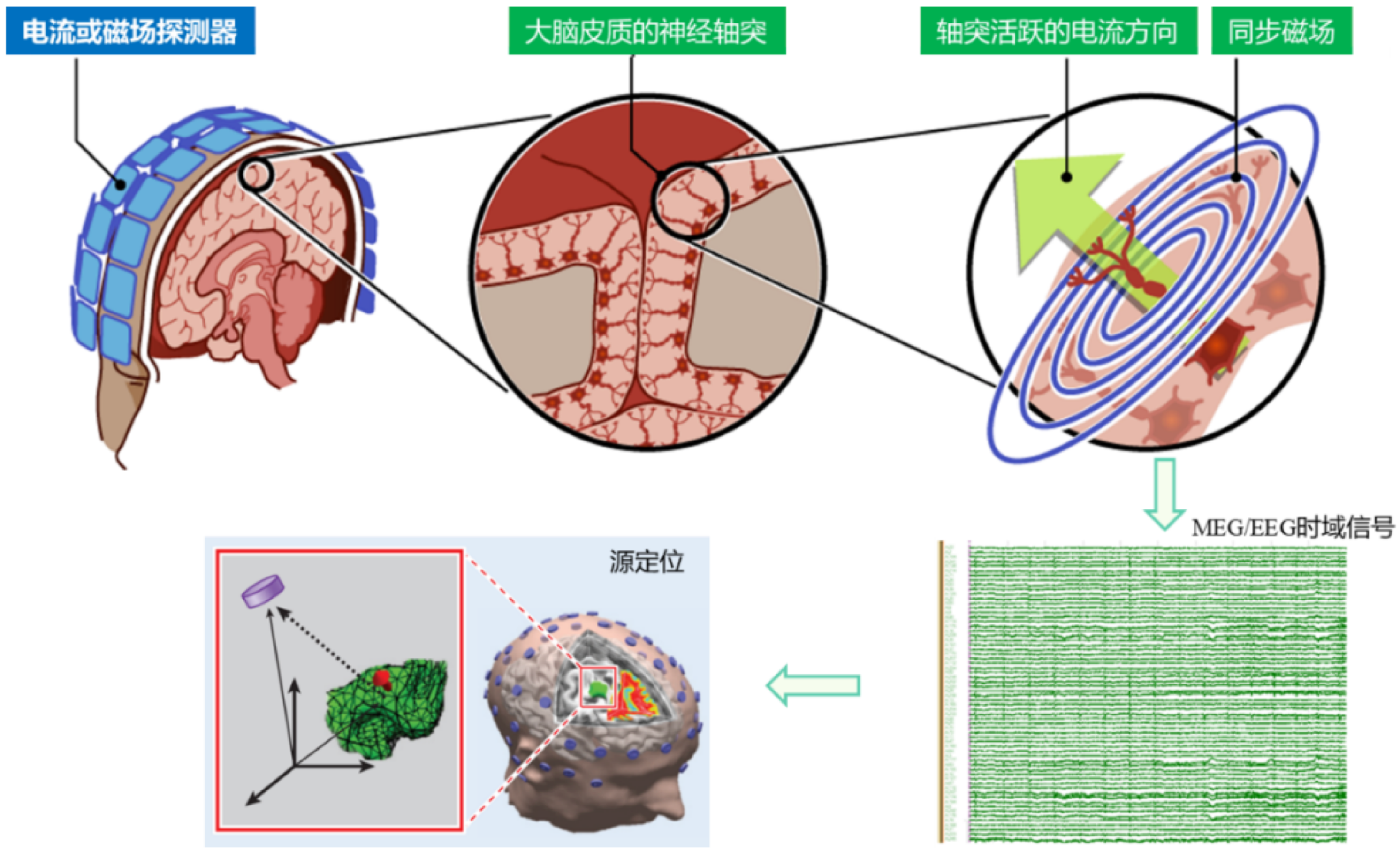


辐射、服用造影剂、特殊人群不能使用：孕妇等

穿透力弱、反射法易误诊等

脂肪组织或脑骨骼严重阻碍信号判断和准确性、无法检测胎儿等

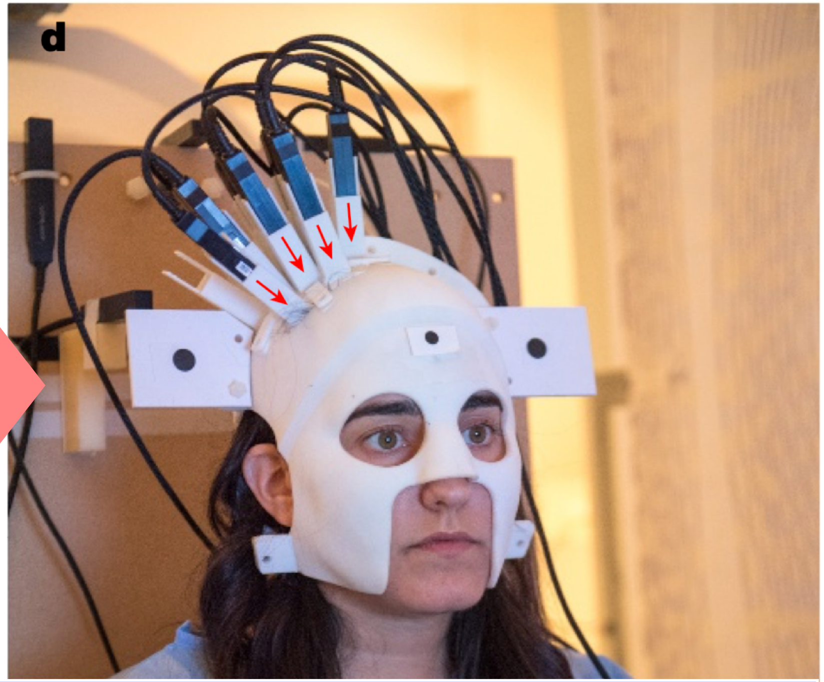
心血管疾病诊断方法：从电到磁



超灵敏、无创、无辐射、无造影剂、不服用任何药物

超导量子干涉仪SQUID

从庞大体积到心磁图诊断仪

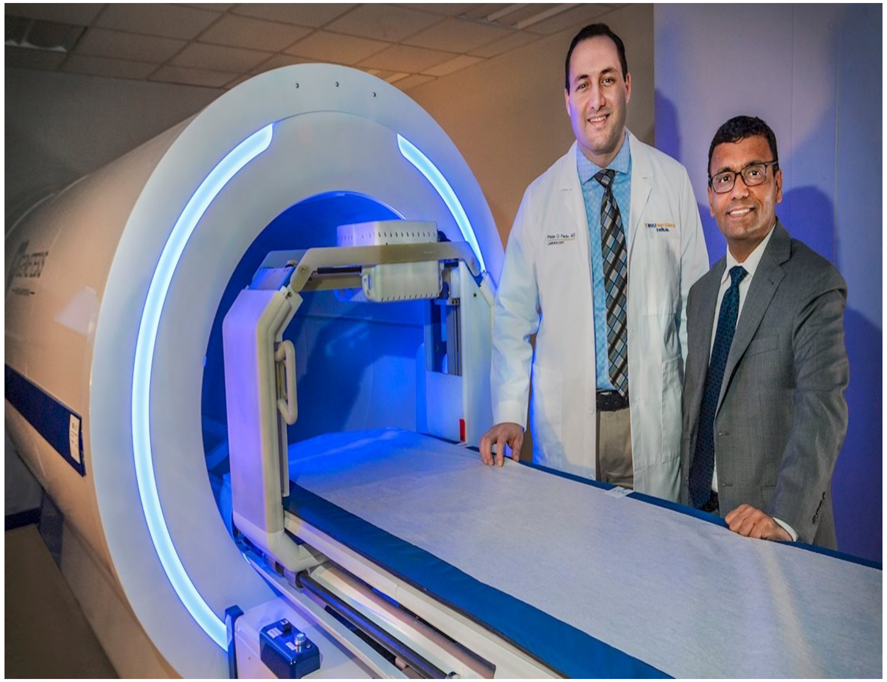


超导量子干涉仪心磁图仪	原子磁力计心磁图仪
需要液氦冷却	可在常温下工作
体积庞大，笨重	可穿戴，轻便
成本高昂（约2000万元）	成本相对低廉（约500万元）
已经有商业化产品	初期

国内外产业化

Genetesis
SCIENCE MADE PERSONAL

未磁科技
X-MAGTECH
知乎 @光子盒



2019年美国FDA510k认证

心磁图仪医疗器械注册证

小型化原子磁力计

技术难点：核心器件的微型化加工和质量保证

激光器

原子气室

光学元件

电子学系统

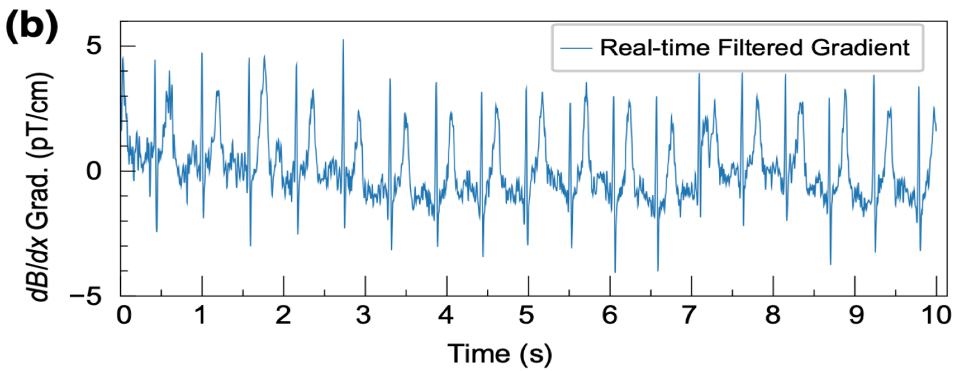
微纳加工技术

小型化原子磁力计

中科大&国仪（量子）合作研制

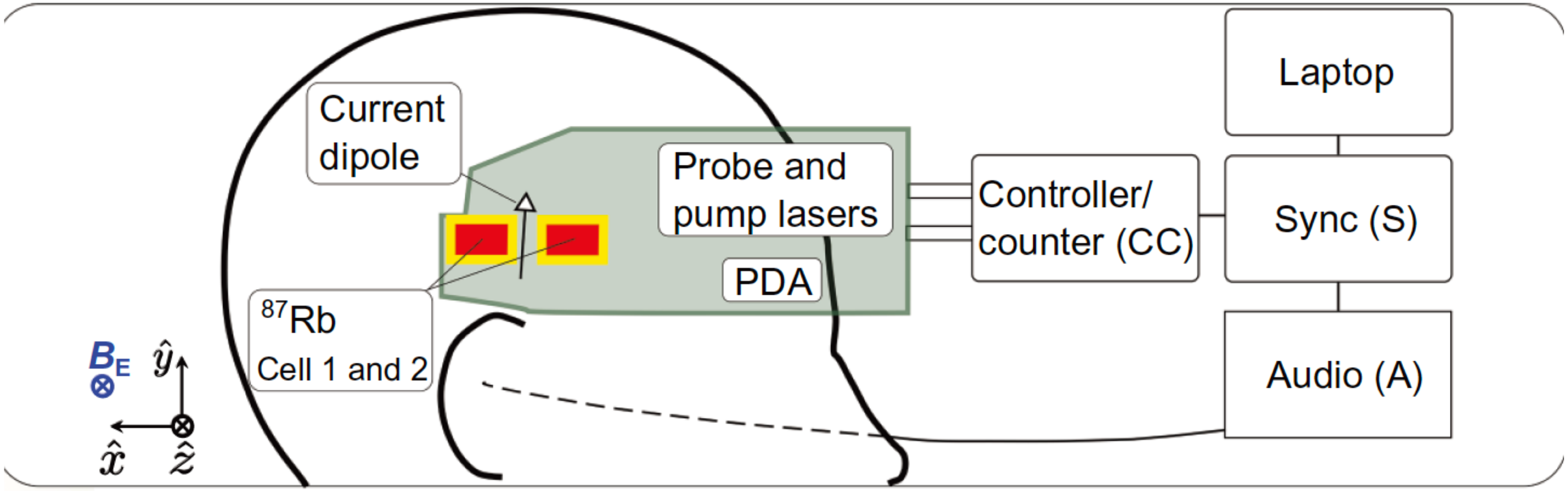
基于原子磁力计的医学影像设备

要求磁屏蔽房（成本大于100万）
限制应用环境、“方仓医院”



开发便携式地磁环境生物磁学探测技术：未来趋势！

基于原子磁力计的医学影像设备

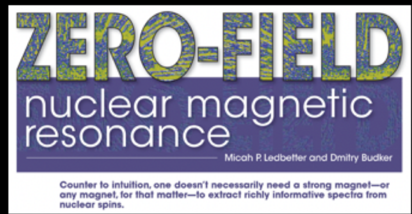


成像技术**变革性**发展

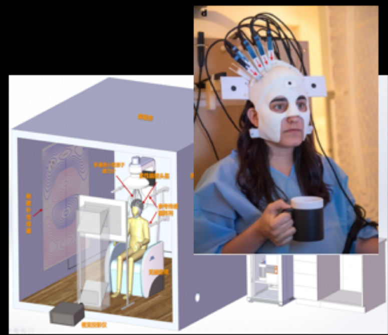
传统核磁共振成像
（pT量级，mm分辨率)

灵敏度低
需要超导磁体

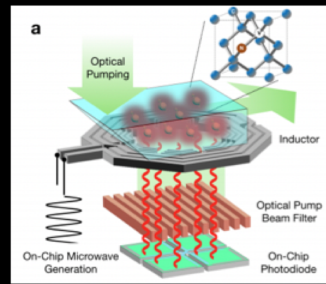
零场-超低场核磁共振（无需超导磁体)



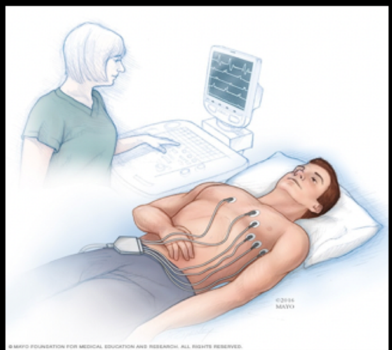
脑磁成像
（fT量级)



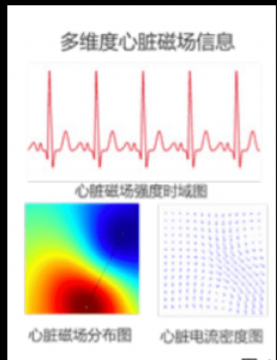
金刚石色心成像
（nm分辨率)



心电检测

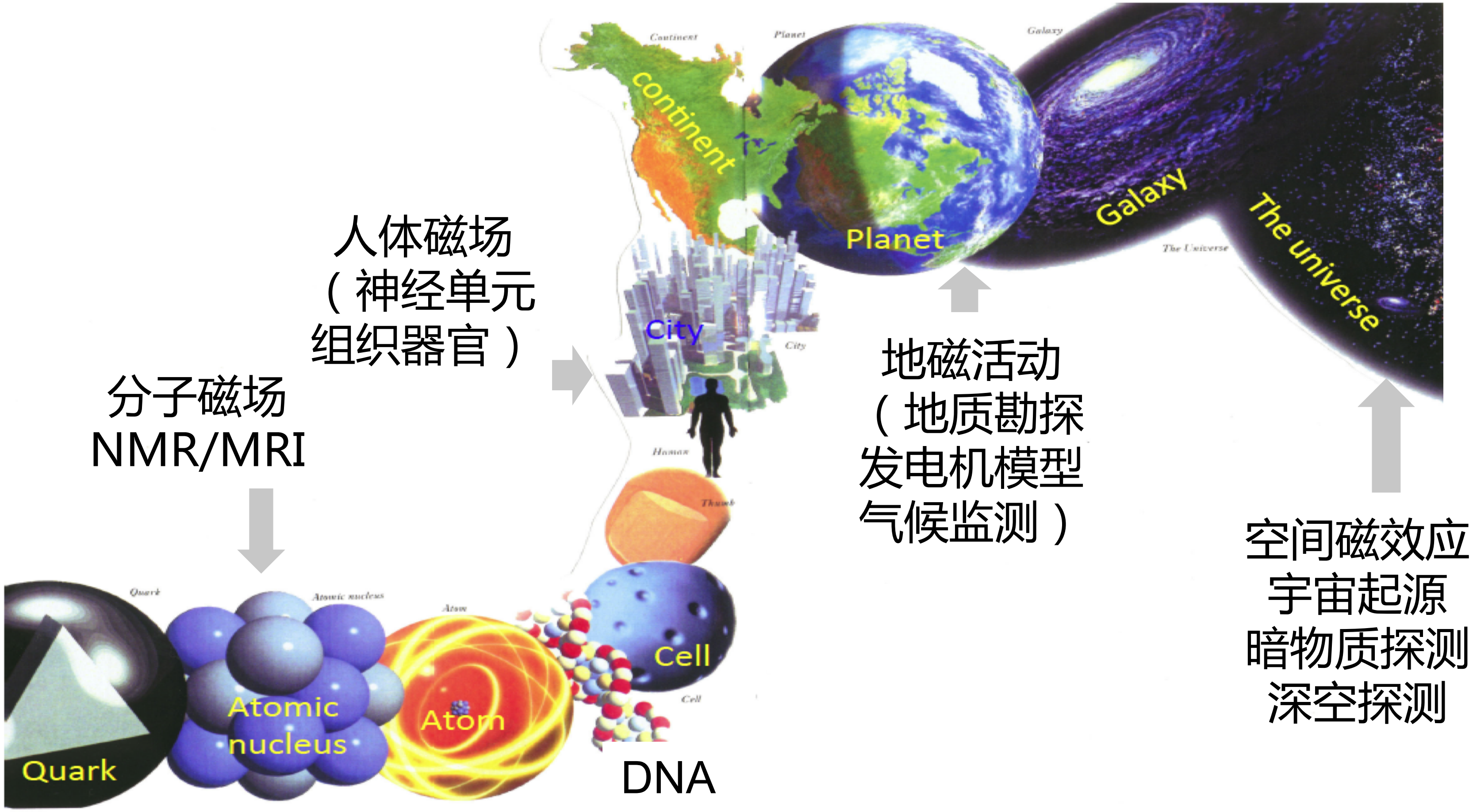


灵敏度低
空间分辨率低



心磁成像

总结


continent
Planet
Galaxy
The universe
City
人体磁场
（神经单元
组织器官）
分子磁场
NMR/MRI
地磁活动
（地质勘探
发电机模型
气候监测）
空间磁效应
宇宙起源
暗物质探测
深空探测
Quark
Atomic
nucleus
Atom
Cell
DNA

Thanks to ……

Prof. Jiangfeng Du
Prof. Zhengguo Zhao

Collaborators:
Prof. Dmitry Budker
Prof. Jing Shu
Dr. Yifan Chen
Dr. Yue Zhao
Dr. Xiao Xue
……

Dmitry Budker

Funding:
USTC, CAS, NNSFC……

NMR group (especially low-field NMR group):

Dr. Min Jiang
Haowen Su
Yuanhong Wang
Qing Li
Shiming Song
Ze Wu
Minxiang Xu
Yushu Qing
…….

Min Jiang

Thank you for your attention!