

基于粒子/量子符合测量的深空磁单极子搜寻

刘栋

第十届BESIII R值与QCD强子结构研讨会

2025年7月，乌鲁木齐



一、研究背景与现状

二、符合测量方案

三、探测方案预期性能

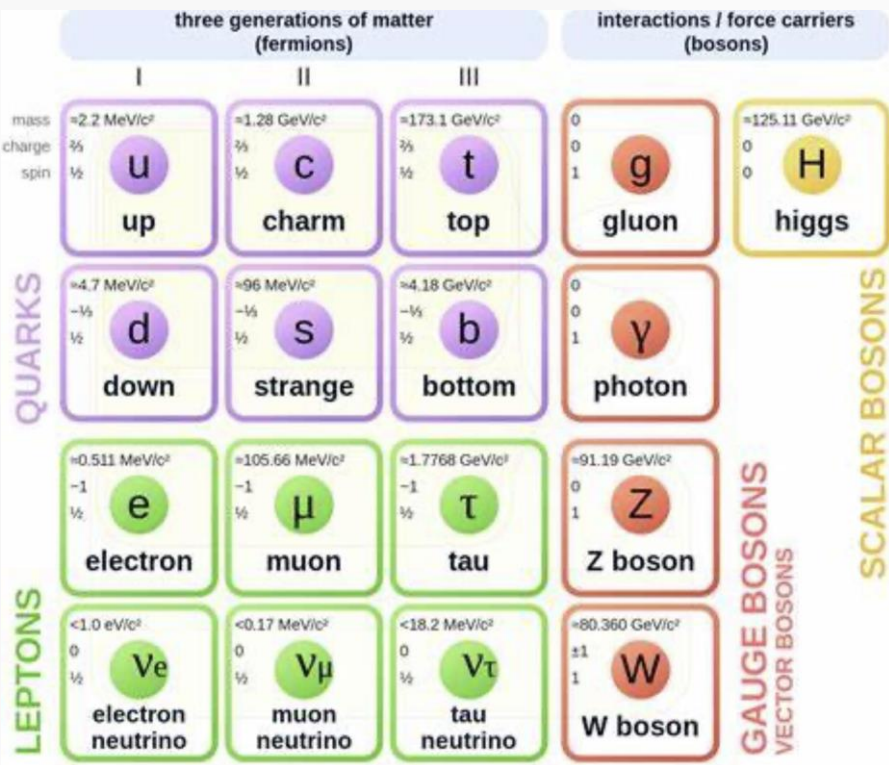
四、总结与展望

一、研究背景



1.1 粒子物理标准模型

标准模型不能解释所有物理现象



Topic	Crucial measurement	Significance
Higgs boson	Existence: $M = 125 \text{ GeV}$	Confirm spontaneous symmetry breaking in gauge theory
Gravitational waves (Graviton)	Existence	Support general relativity
Glueball, exotic hadron	Existence	Test and understand QCD
Dark matter	Existence	Missing mass in the universe
Antimatter	Existence	Baryon number asymmetry
Neutrino: oscillation, mass	Mass, mixing parameters, phase	Structure of GUTs
Proton decay	$\tau > 1.67 \times 10^{34} \text{ years}$	Evidence for validity of GUTs
Magnetic monopole	Existence, mass, electric charge	Electric and magnetic charge symmetry, GUTs
Fractionally charged particle	Existence	Would confuse all current prejudice
Axion	Existence	CP in strong interaction, DM
Super-symmetric particles	Existence, $M > 1 \text{ TeV}$	Hope of understanding gravity
Extra dimension	Existence, Heavy W/Z like particle, graviton, microscopic black hole	Hierarchy problem

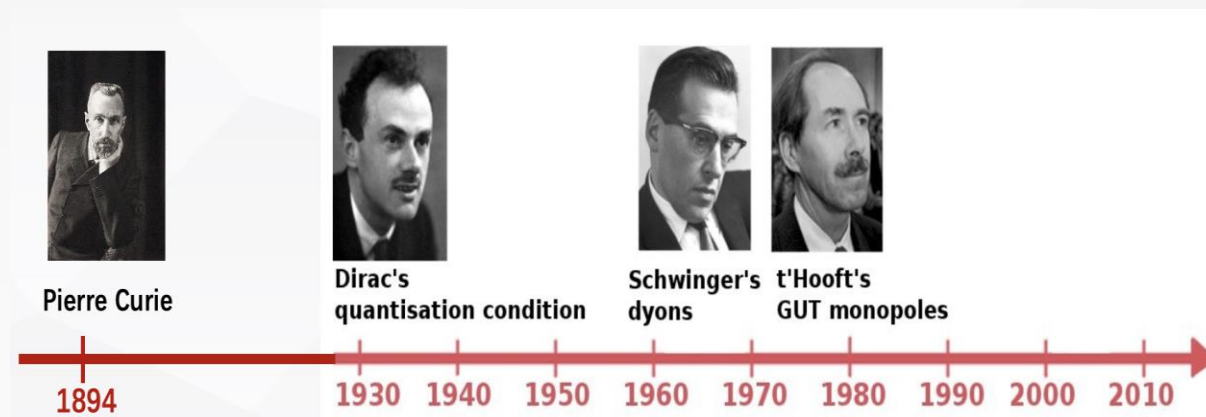
1.2 磁单极子的背景

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 4\pi\rho_e \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \quad + ? \\ -\nabla \times \mathbf{E} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad + ? \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_e\end{aligned}$$



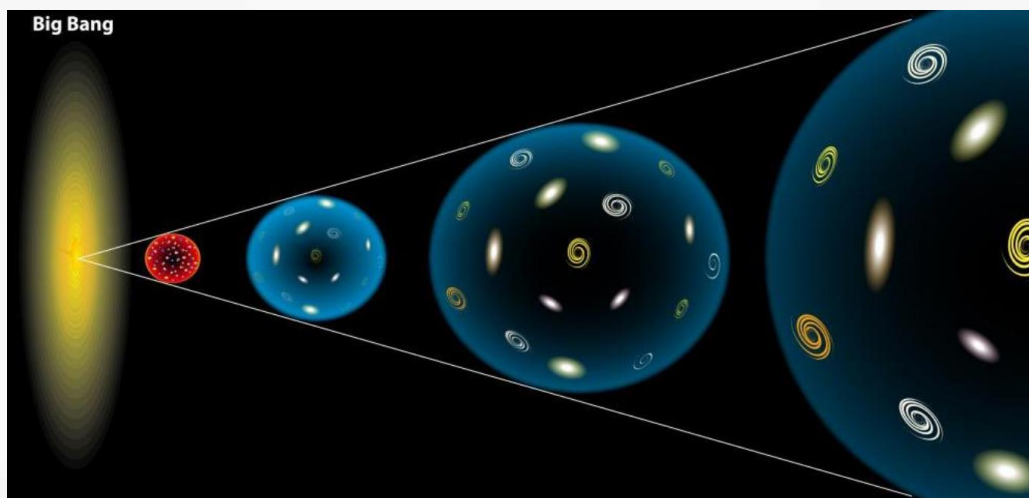
$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 4\pi\rho_e \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 4\pi\rho_m \\ -\nabla \times \mathbf{E} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_m \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_e\end{aligned}$$

- 将电场和磁场理论统一为经典电磁学
- 电磁不对称，没有磁荷/流
- 对称方程组，允许磁单极子存在
- 分立的电荷

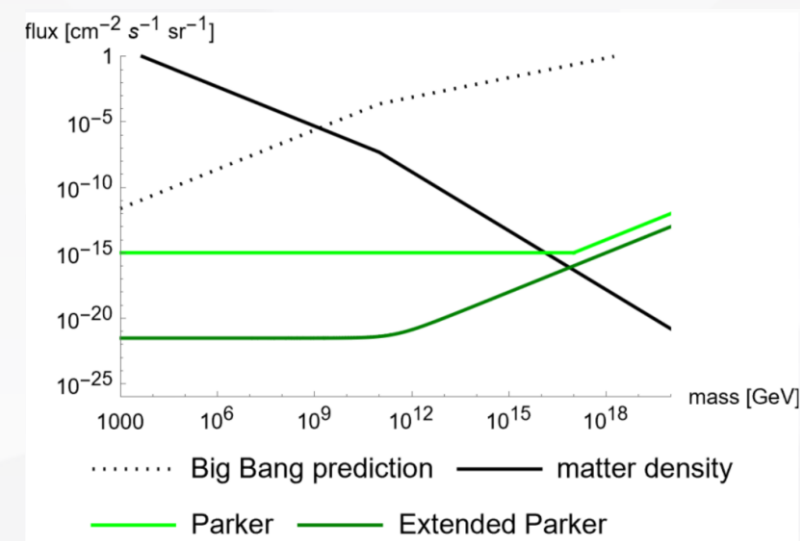


- 1894年，Pierre Curie讨论了独立磁荷存在的可能性
- 1931年，Dirac指出如果存在磁单极子，就可以自然地解释电荷量子化，磁单极子质量 $\sim \text{GeV}$
- 1969年，Schwinger提出了dyon概念，该粒子同时携带电荷和磁荷
- 1974年，Hooft提出GUT磁单极子

1.3 磁单极子与宇宙演化



- 宇宙大爆炸理论表述宇宙原点之后的演化；“暴涨”大爆炸理论，极大稀释了磁单极子产生，解决此问题以及其余多个问题，成为主流；
- GUT磁单极子在宇宙早期有重要地位，质量更小的磁单极子有可能在后续星际形成中产生；



- Parker: 过多磁单极子会抵消星际磁场
- Density: 过多重磁单极子会明显与星际总质量不匹配

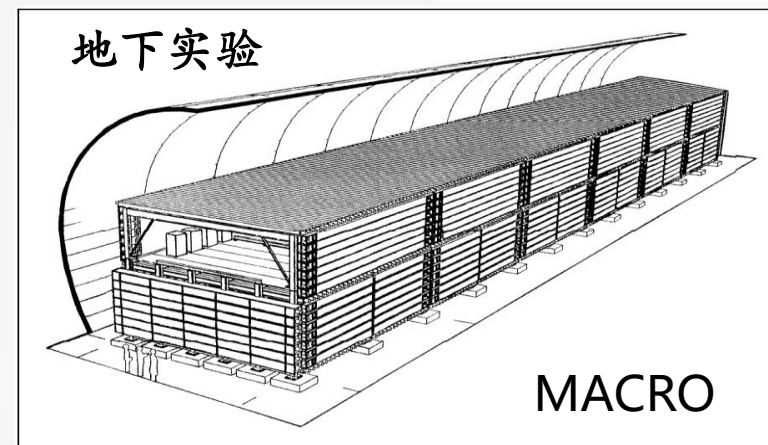
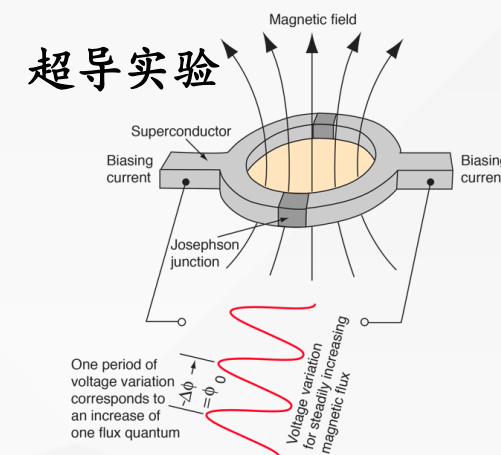
1.4 磁单极子实验现状

- 电磁相互作用

- **感应法**：利用磁单极子与超导环的量子态之间的远距离电磁相互作用，通常需要**低温超导环境**
- **电离能损**：带狄拉克磁荷的磁单极子能损通常比带基本电荷的粒子能损大几百到几千倍，**信号不具备独特性**。
- 非螺旋径迹：磁单极子在均匀磁场中的运动轨迹区别于带电粒子
- 切伦科夫辐射：高速磁单极子在介质中的切伦科夫辐射

- 新相互作用

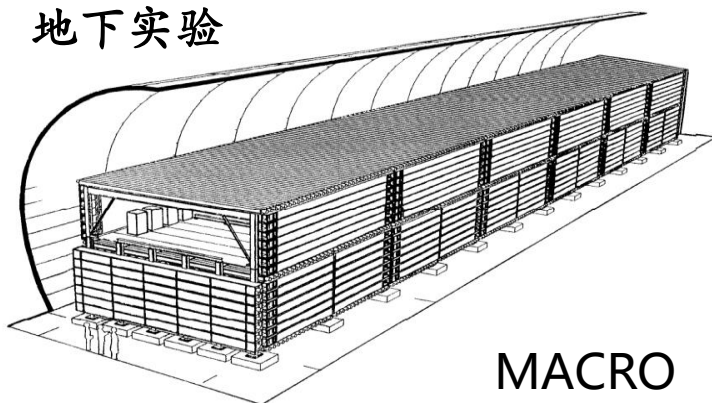
- 诱导核子衰变：磁单极子特殊结构能诱导质子衰变



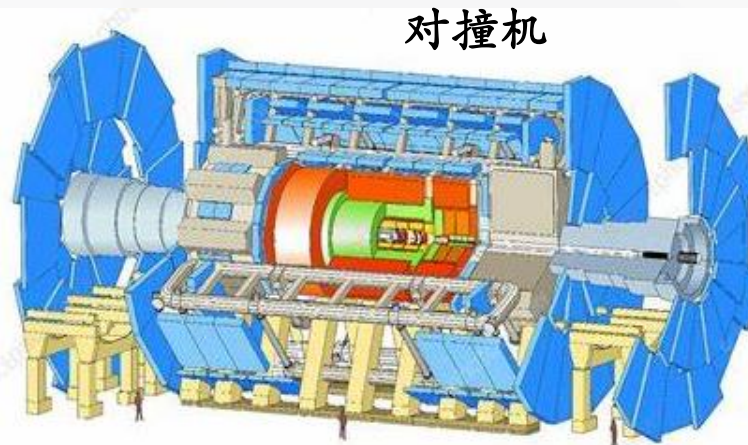
一、研究背景

1.4 磁单极子实验现状

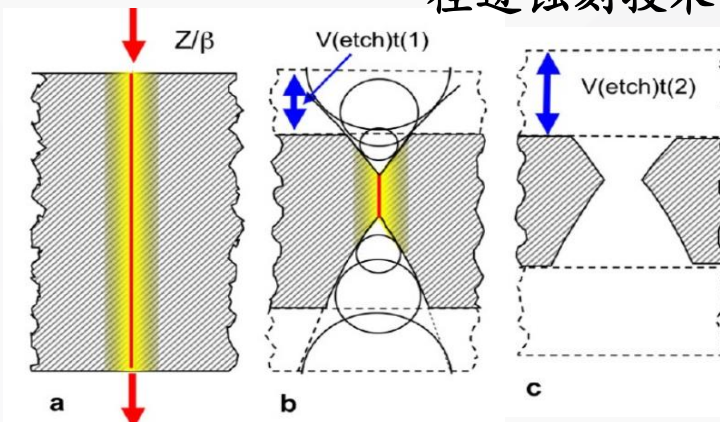
地下实验



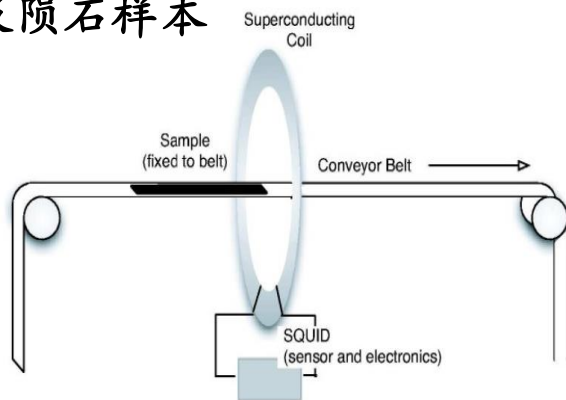
对撞机



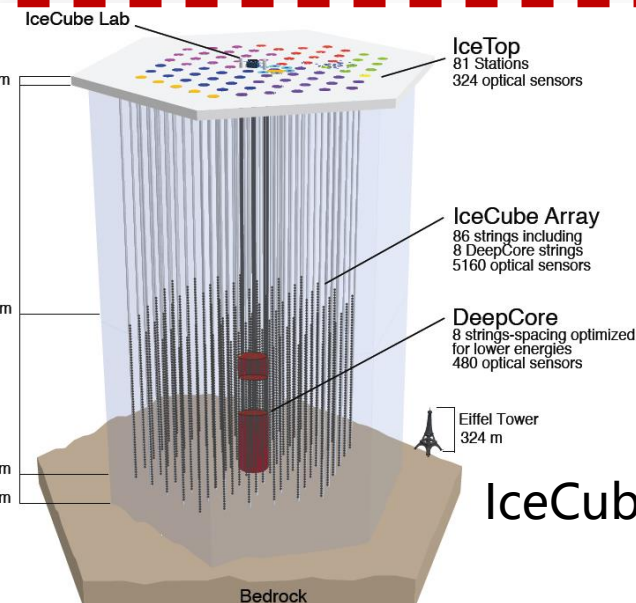
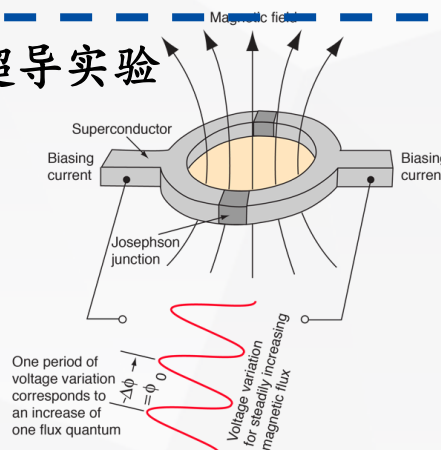
径迹蚀刻技术



月球及陨石样本



超导实验



IceCube₇



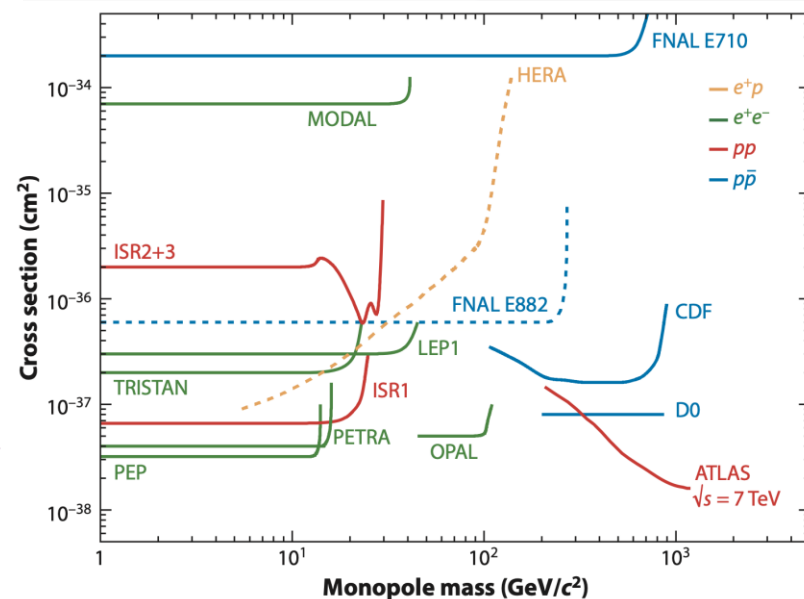
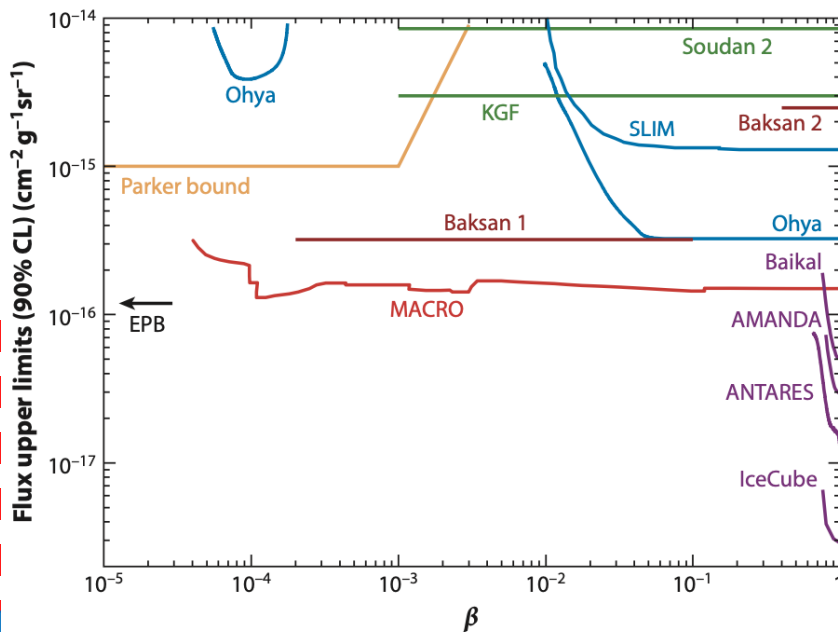
一、研究背景

1.4 磁单极子实验现状

目前实验中没有证据找到磁单极子

Table 1 Flux upper limits for GUT and IMMs from different experiments^a

Experiment (reference)	Mass range (GeV/c ²)	β range	Flux upper limit (cm ⁻² s ⁻¹ sr ⁻¹)	Detection technique
AMANDA II upgoing (69)	10 ¹¹ -10 ¹⁴	0.76-1	(8.8-0.38) × 10 ⁻¹⁶	Ice Cherenkov
AMANDA II downgoing (69)	10 ⁸ -10 ¹⁴	0.8-1	(17-2.9) × 10 ⁻¹⁶	Ice Cherenkov
IceCube (71)	10 ⁸ -10 ¹⁴	0.8-1	(5.6-3.4) × 10 ⁻¹⁸	Ice Cherenkov
Baikal (68)	10 ⁷ -10 ¹⁴	0.8-1	(1.83-0.46) × 10 ⁻¹⁶	Water Cherenkov
ANTARES (70)	10 ⁷ -10 ¹⁴	0.625-1	(9.1-1.3) × 10 ⁻¹⁷	Water Cherenkov
MACRO (63)	(5 × 10 ⁸)-(5 × 10 ¹³)	>5 × 10 ⁻²	3 × 10 ⁻¹⁶	Scintillator, streamer tube, NTDs
MACRO (63)	>5 × 10 ¹³	>4 × 10 ⁻⁵	1.4 × 10 ⁻¹⁶	Scintillator, streamer tube
Soudan 2 (66)	10 ⁸ -10 ¹³	>2 × 10 ⁻³	8.7 × 10 ⁻¹⁵	Gas drift tubes
Ohya (64)	(5 × 10 ⁷)-(5 × 10 ¹³)	>5 × 10 ⁻²	6.4 × 10 ⁻¹⁶	Plastic NTDs
Ohya (64)	>5 × 10 ¹³	>3 × 10 ⁻²	3.2 × 10 ⁻¹⁶	Plastic NTDs
SLIM (62)	10 ³ -(5 × 10 ¹³)	>3 × 10 ⁻²	1.3 × 10 ⁻¹⁵	Plastic NTDs
SLIM (62)	>5 × 10 ¹³	>4 × 10 ⁻⁵	0.65 × 10 ⁻¹⁵	Plastic NTDs
Induction, combined (9)	>10 ⁵	Any	4 × 10 ⁻¹³	Induction



电离信号

优点：体量大，灵敏度高；

缺点：信号特征性弱，模型相关性。

感应信号

优点：信号特征独特；

缺点：极低温环境，体量小。

基于对撞机实验得到的
磁单极子产生截面上限
质量范围受限



一、研究背景与现状

二、符合测量方案

三、探测方案预期性能

四、总结与展望

2.1 量子+粒子符合测量方案设想

新途径：量子精密测量技术与传统粒子探测技术结合

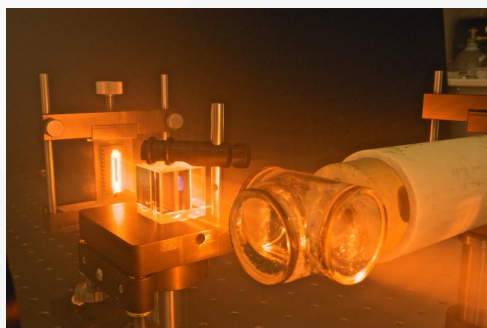
■ **高灵敏：**更低测量噪声

■ **符合式：**压低本底

■ **阵列化：**更高精度和置信度

量子精密测量

电磁感应信号



能量区：低能区，波动性
新手段：搜寻新型相互作用
超灵敏：突破当前测量极限

粒子探测技术

能量沉积信号



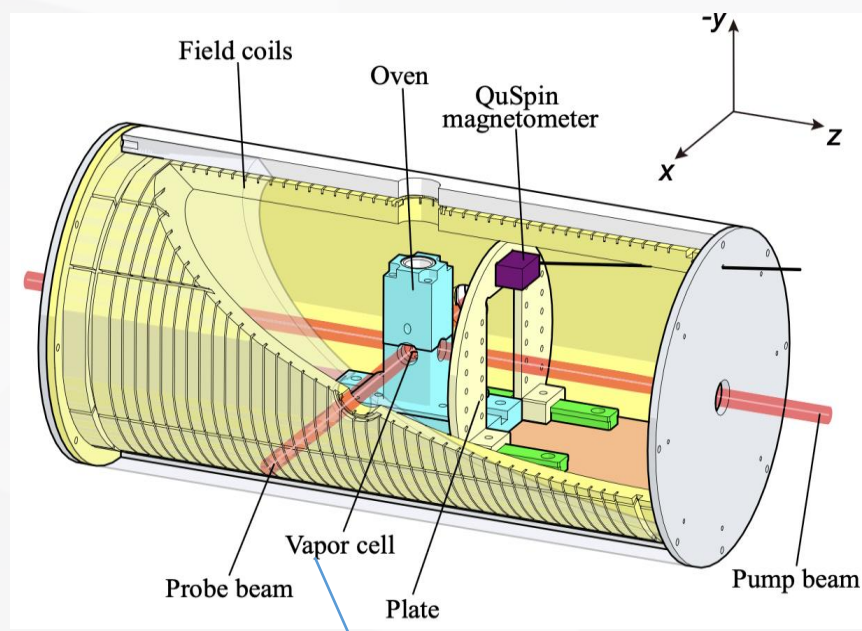
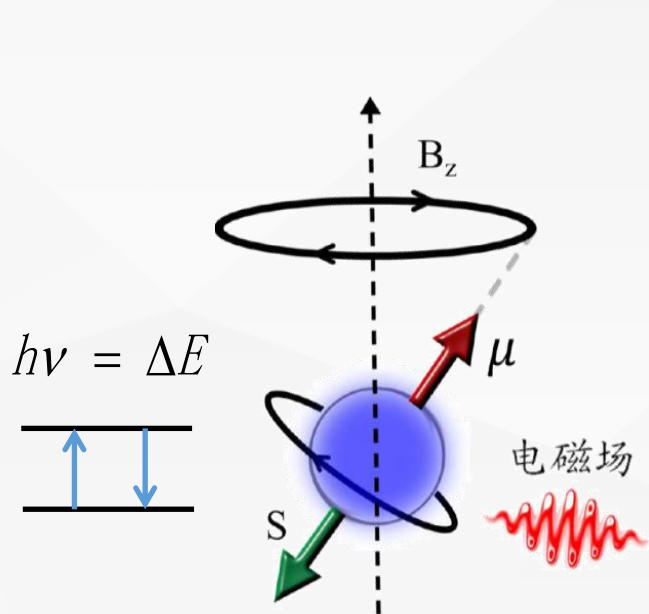
能量区：高能区，粒子性
符合测量：降低本底噪声

- 使用室温磁力仪，规避极低温环境；
- 通过符合测量，排除粒子本底，提高信号置信度，规避深地低本底环境；
- 可分辨磁单极子南北极性；

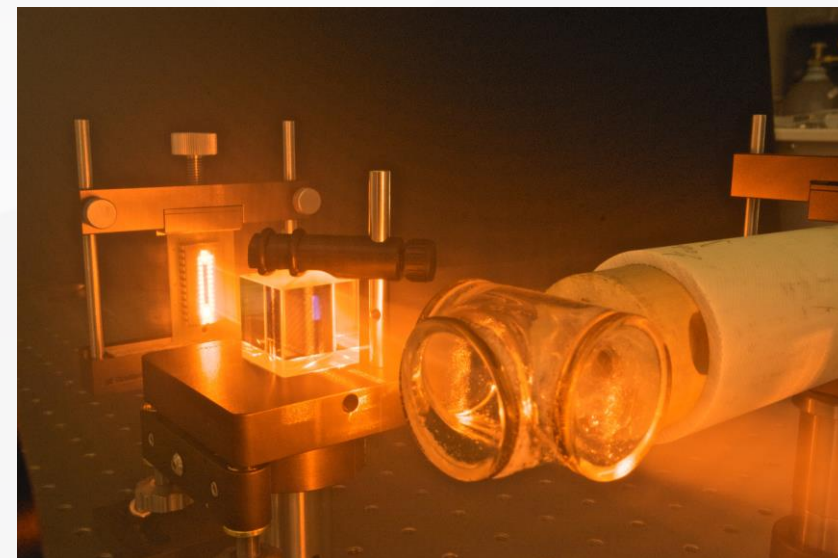
磁单极子探测新方法

2.2 原子磁力仪

- 工作原理：在外加磁场中带自旋的原子核或电子可以吸收和发射特定频率的电磁辐射，导致磁共振的发生。



碱金属原子: K, Rb, Cs
惰性气体: He^3 , Ne^{21} , Xe^{129}



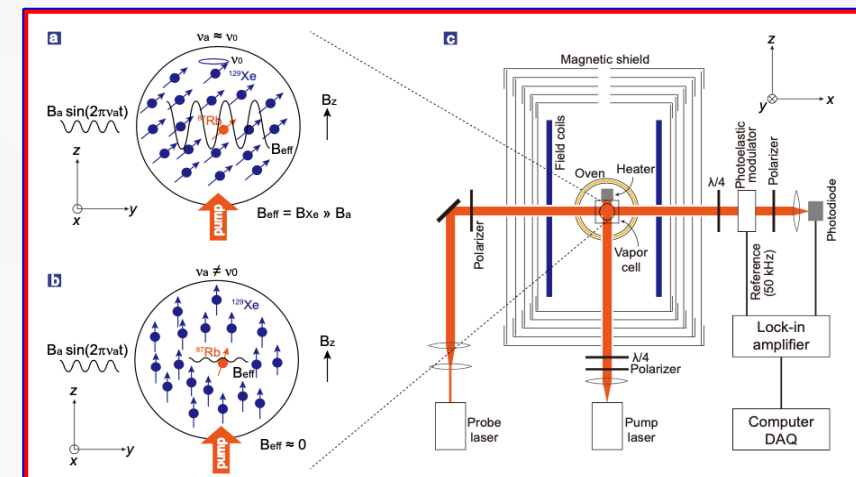
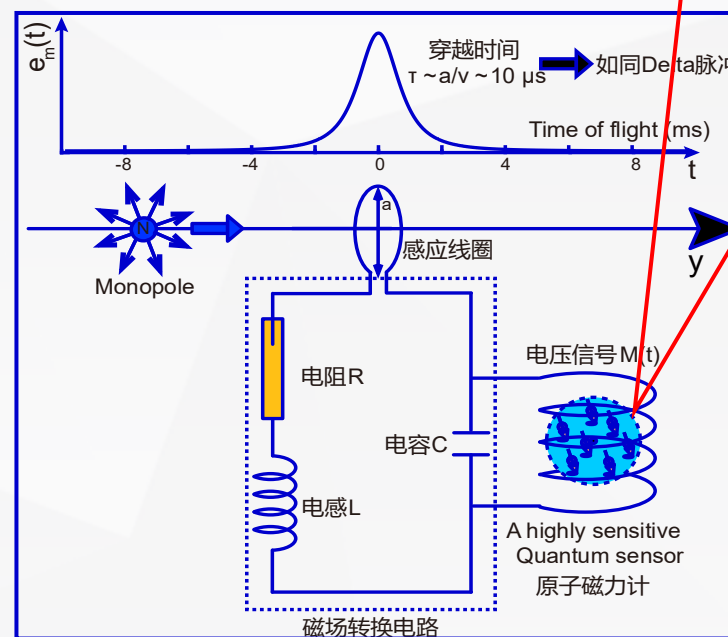
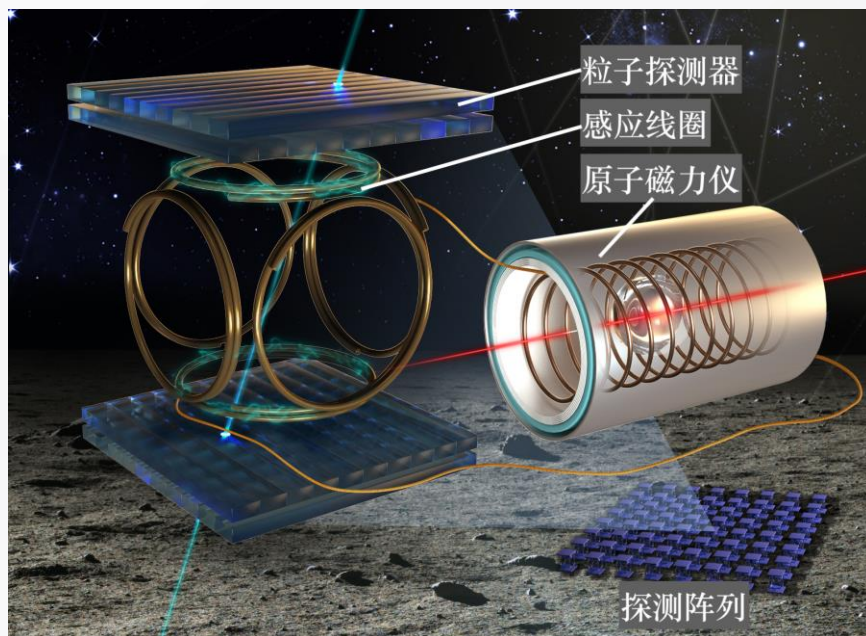
对原子磁力仪的要求:

- 工作频率 $\sim 40 \text{ kHz}$
- 灵敏度: $\sim 10 \text{ fT/Hz}^{1/2}$

二、符合测量方案

2.3 探测装置设计

- 磁单极子穿过粒子探测产生**电离信号**；
- 磁单极子穿过线圈产生感应电流，通过亥姆霍兹线圈转化为**微磁场**被磁力计探测；





一、研究背景与现状

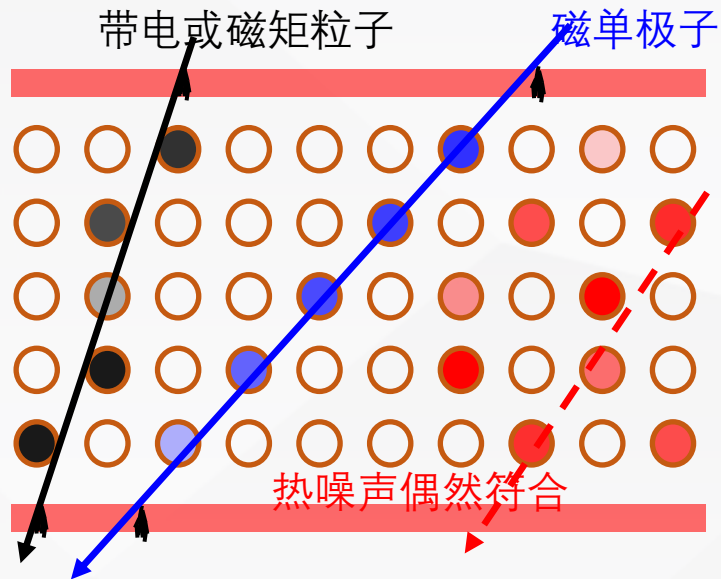
二、符合测量方案

三、探测方案预期性能

四、总结与展望

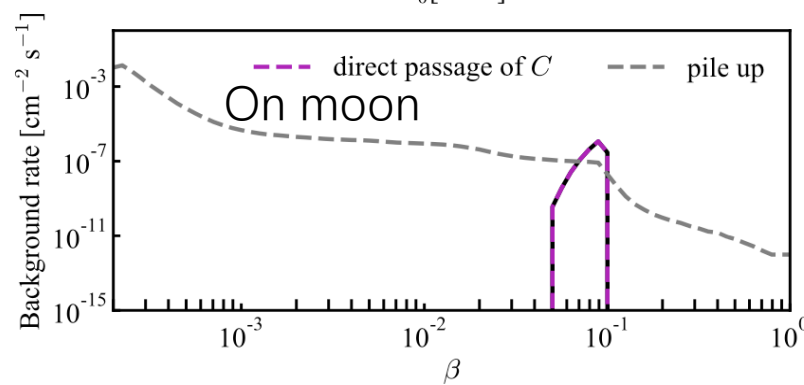
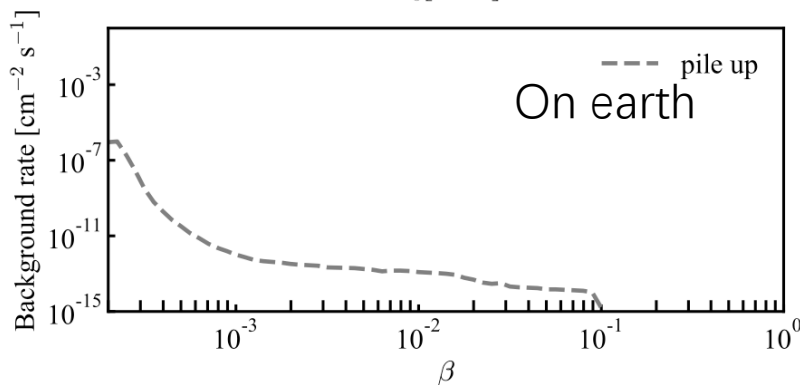
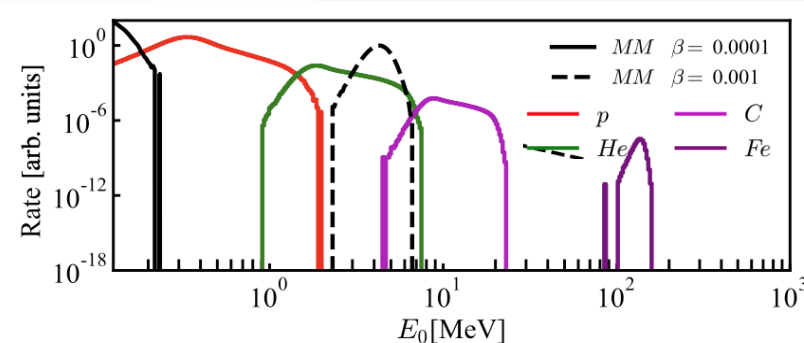
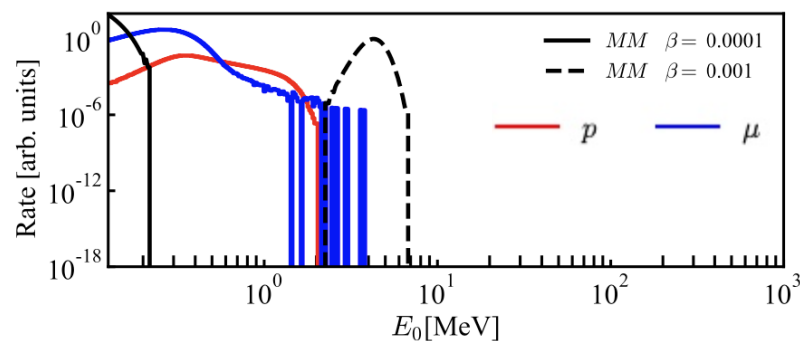
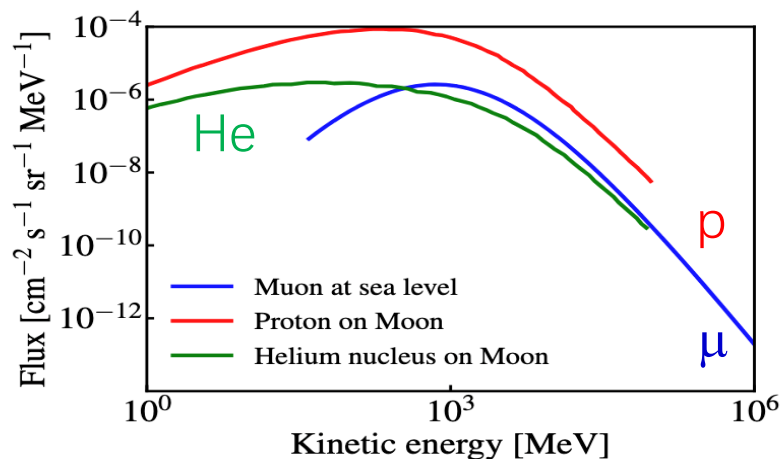
三、探测方案预期性能

3.1 阵列型探测



目标：提高灵敏度，控制本底

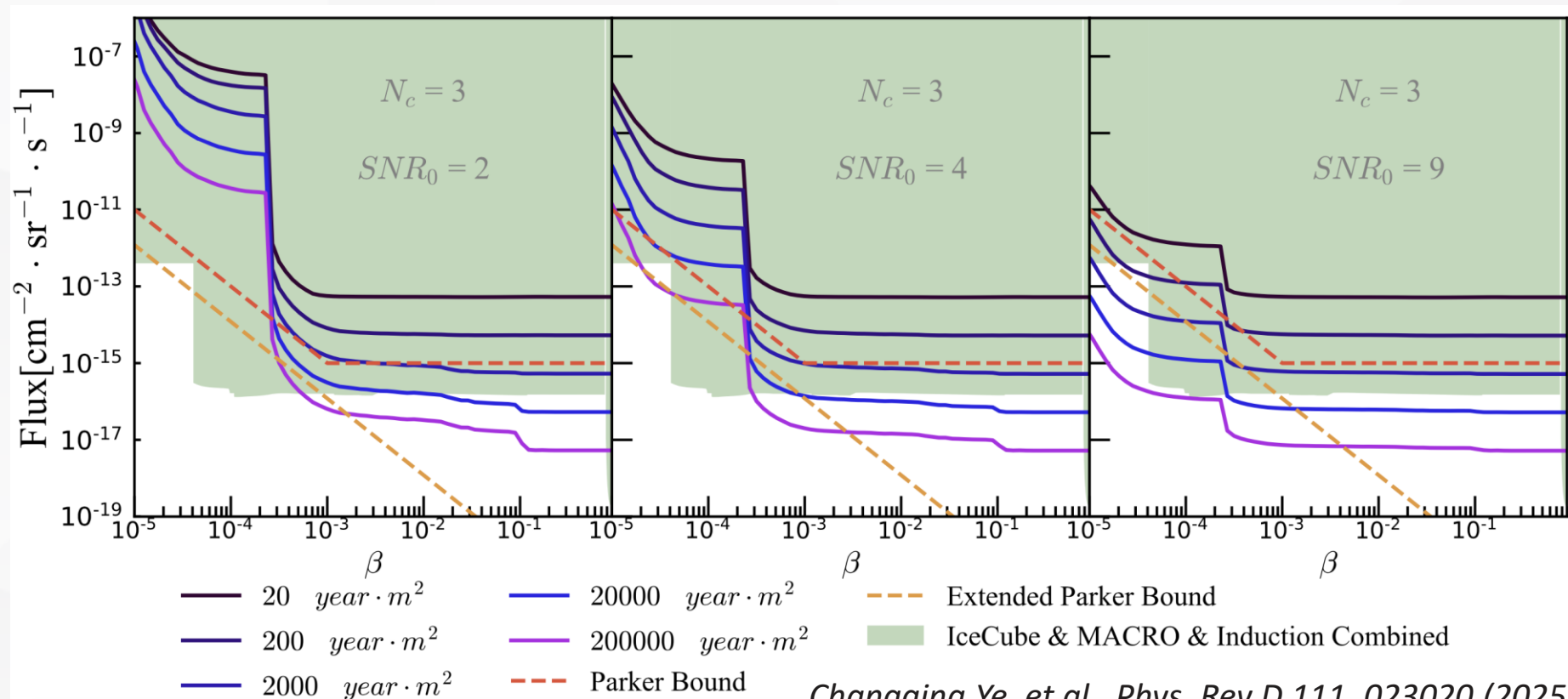
- 主要本底：宇宙线粒子、粒子偶然符合、热噪声偶然符合
- 粒子探测器要求能区分磁单极子与常见粒子： μ 、 e 、 p 、 He 等
- 对感应信号的触发阈值、信噪比等进行优化，提升灵敏度



3.1 探测方案灵敏度

- SCEP有望在磁单极子速度超过约 $2.5 \times 10^{-4}c$ 时实现出色的背景抑制；
- 对速度低于 $2.5 \times 10^{-4}c$ 的磁单极子，塑闪中没有足够信号，仅有感应模式信号，灵敏度降低；
- 在 $20000 \text{ year} \cdot \text{m}^2$ 曝光量下，信噪比 $\text{SNR} > 4.5$ 能达到目前最好的探测线；

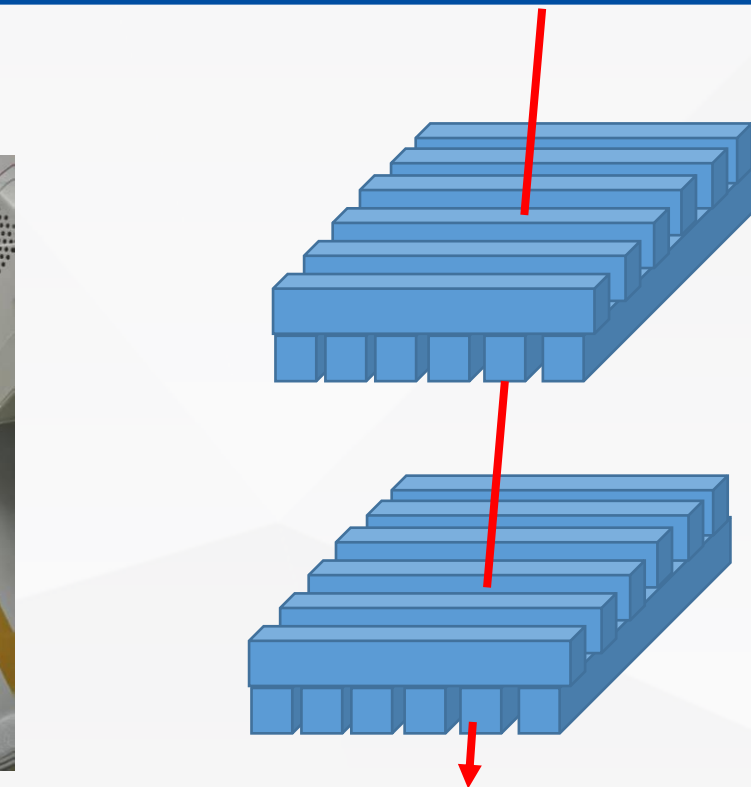
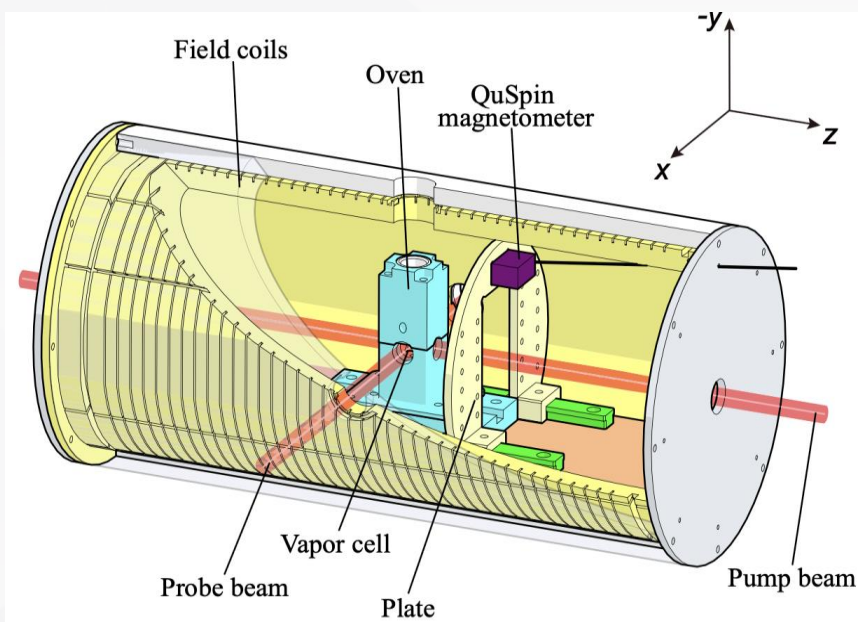
地面实验



目前实现的探测器性能未达到要求，需要持续优化原子磁力仪、感应线圈、粒子探测器性能。

■ 三、探测方案预期性能

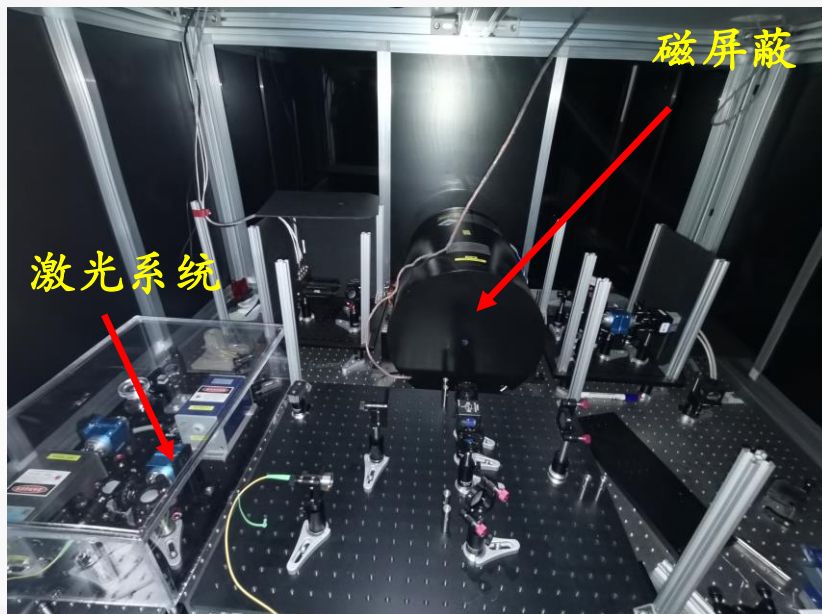
3.2 符合方案主要研究内容



- 磁力计系统优化
 - 提高灵敏度
 - 提高稳定性
- 线圈+谐振电路设计优化
 - 建立电路模型
 - 提高信号增益，降低噪声
 - 提高信噪比
- 粒子符合探测器设计制作
 - 提高能量、位置、时间分辨率
 - 开发径迹重建和粒子鉴别算法

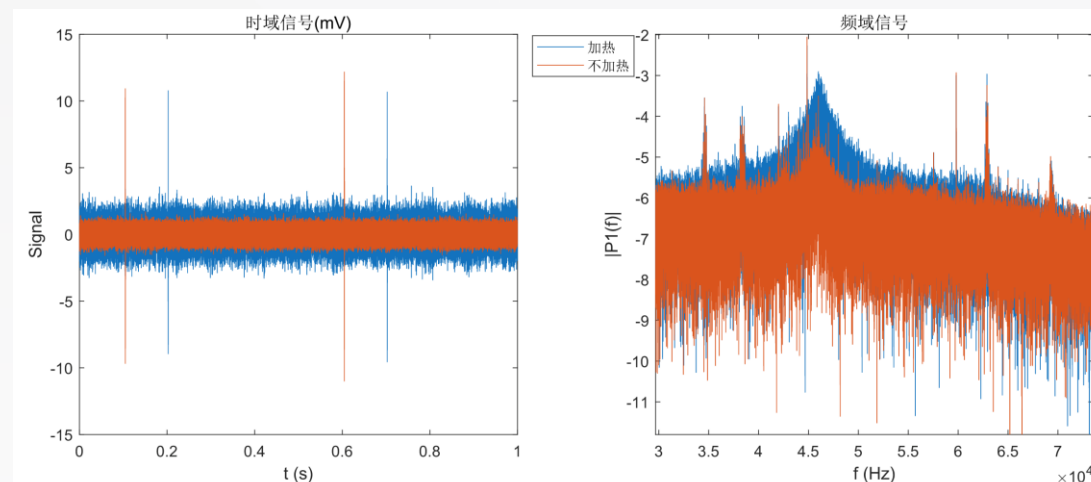
三、探测方案预期性能

3.3 磁力计系统优化



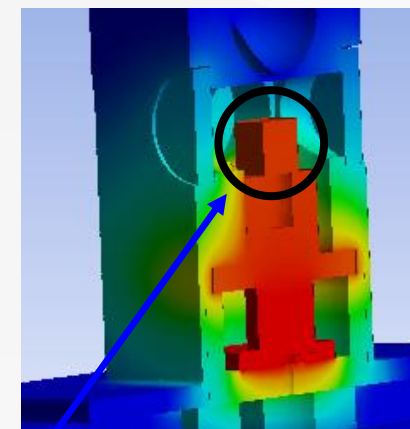
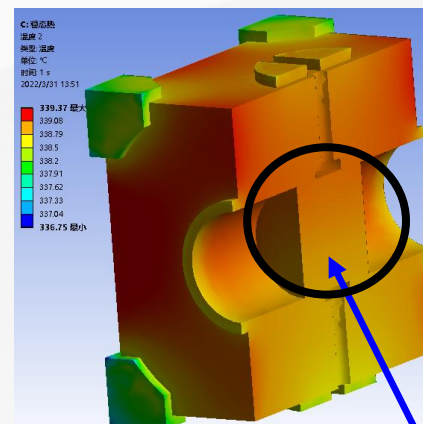
磁力仪系统:

- 已搭建一套专用磁力仪;
- 对磁力仪进行了优化, 提高气泡室最高温度等;
- 磁力仪目前灵敏度 $\sim 100 \frac{\text{fT}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
- 磁力仪持续优化中



新设计: 最高340度

旧设计: 最高140度

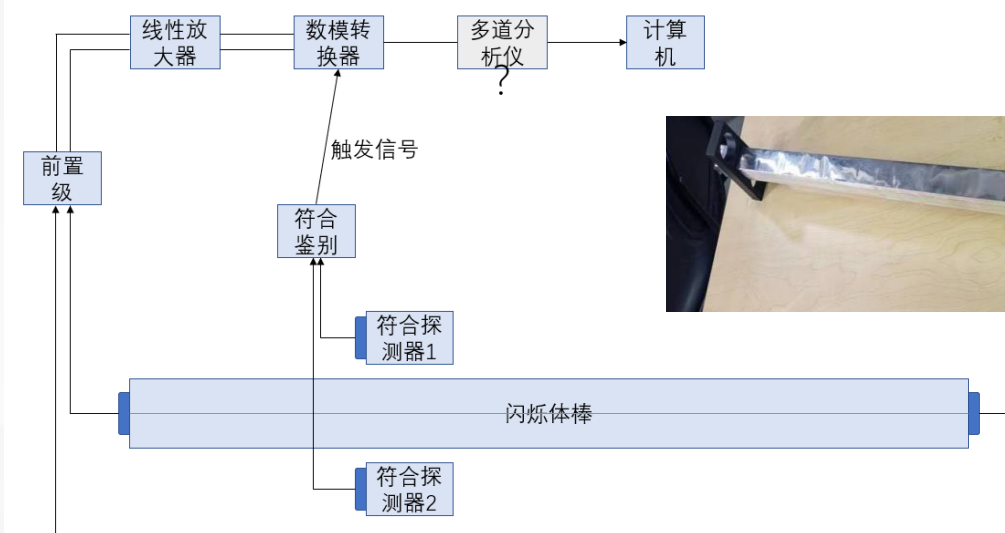
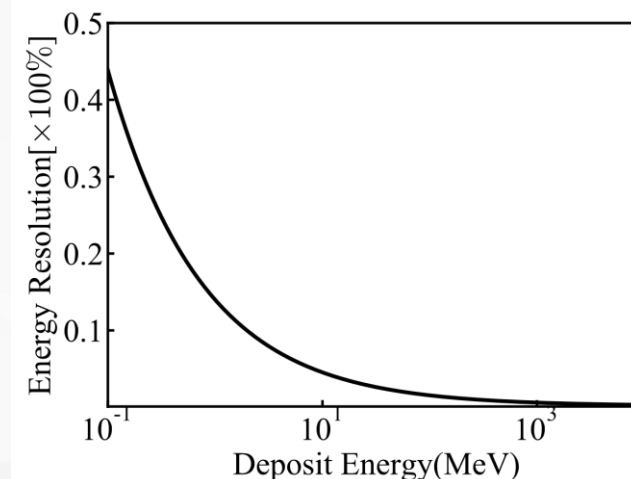
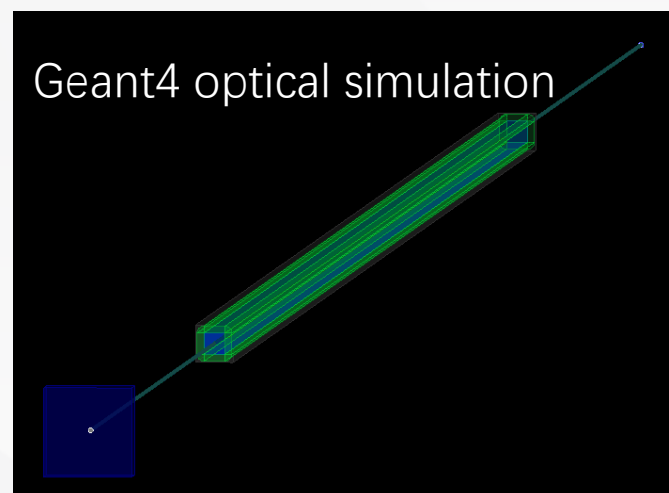


磁力计气泡室

3.4 粒子探测器设计

性能研究:

- 利用geant4, 实现粒子在塑闪里的光学过程模拟;
- 塑闪的能量分辨率可以满足磁单极子探测需求, $8.6\% @ E_{\text{dep}} = 8 \text{ MeV}$ for μ VS $2.5\% @ E_{\text{dep}} = 100 \text{ MeV}$ for MM ;
- 长条塑闪测试和不同光读出方案测试正在开展;



三、探测方案预期性能

3.5 线圈与谐振电路设计

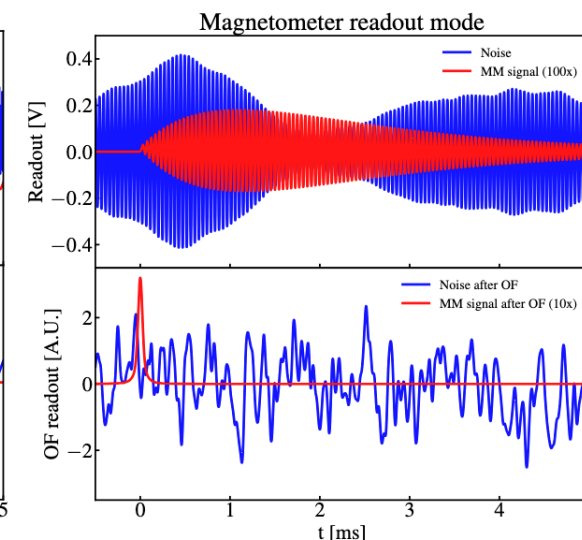
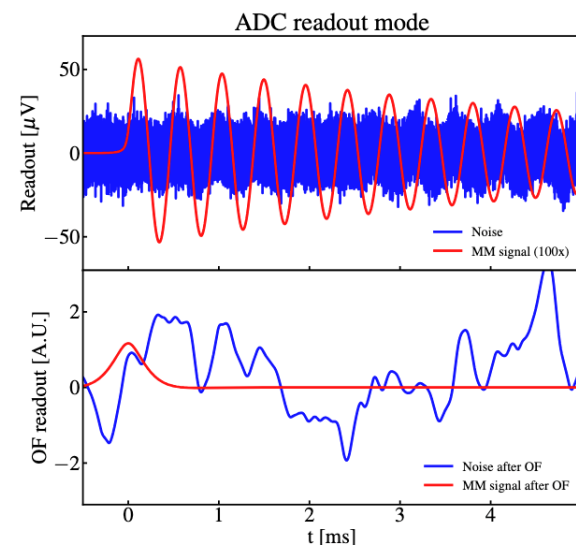
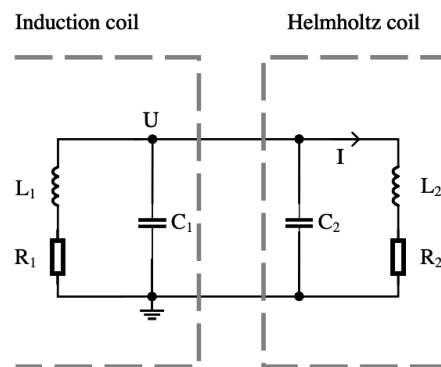
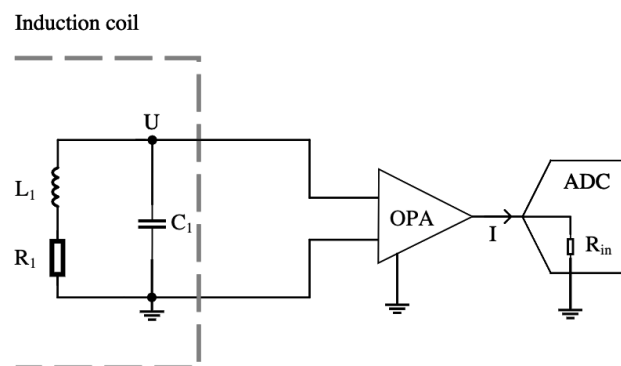
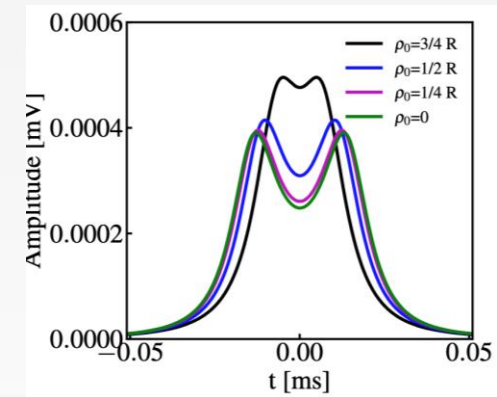
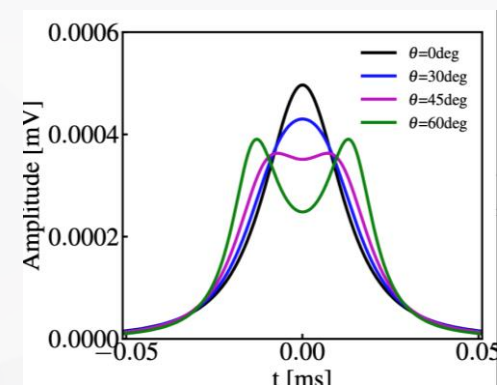
感应电动势

谐振电路shaping

磁力计读出

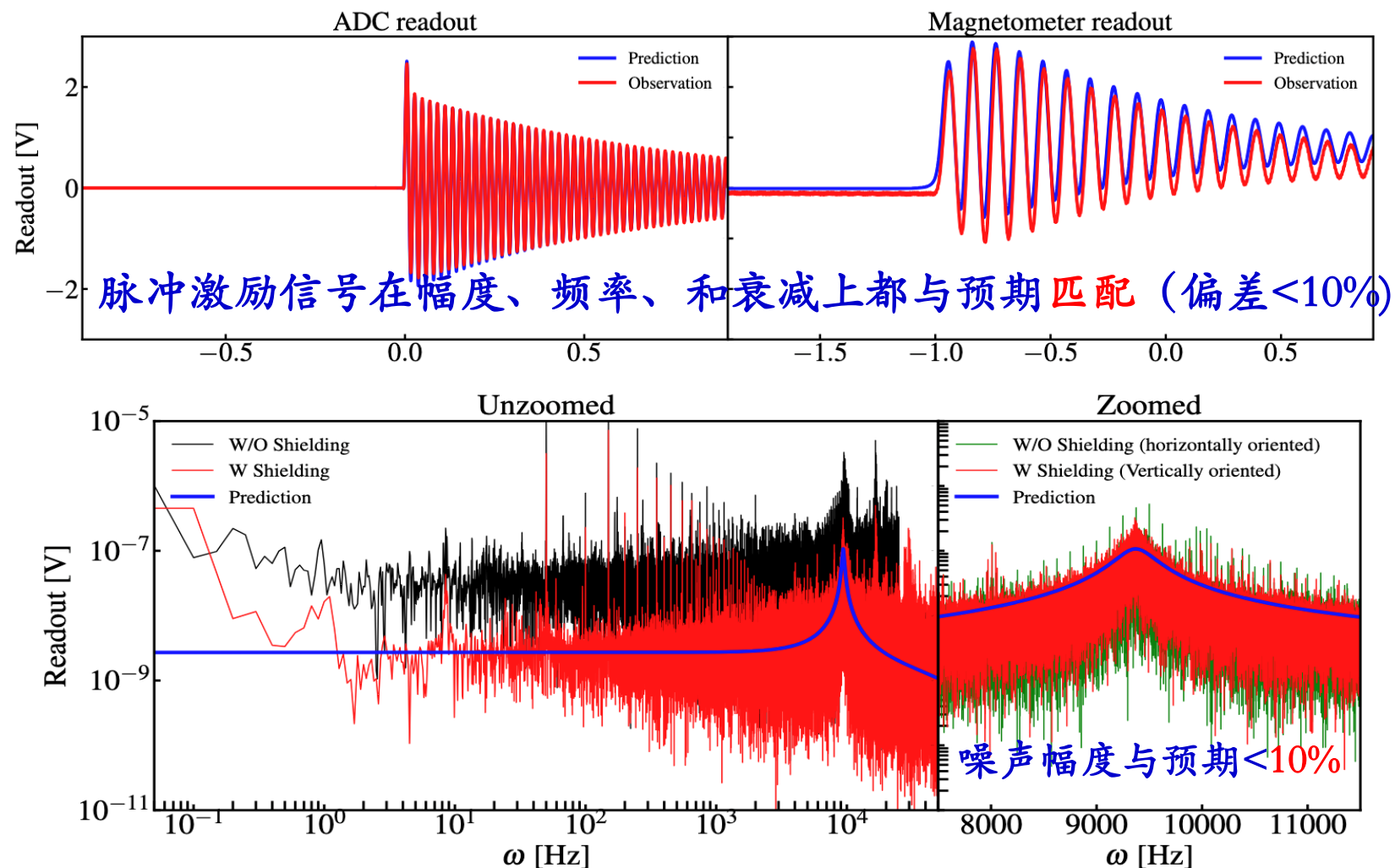
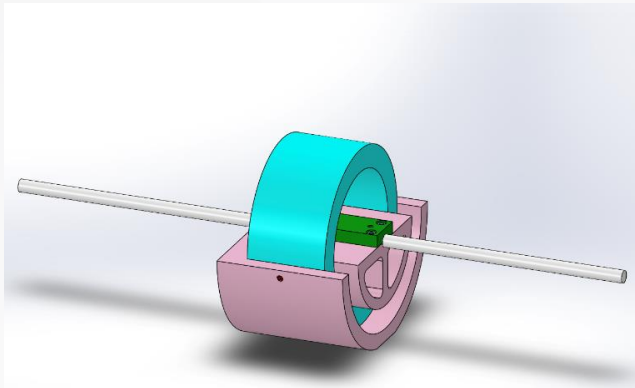
Optimal filter

ADC读出



三、探测方案预期性能

3.5 线圈与谐振电路设计：信号噪声验证测试





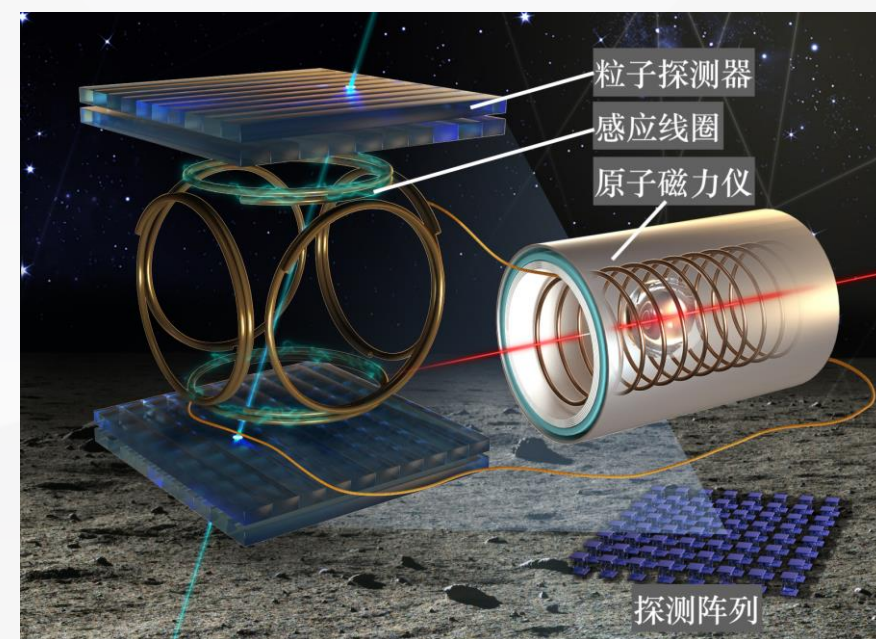
一、研究背景与现状

二、符合测量方案

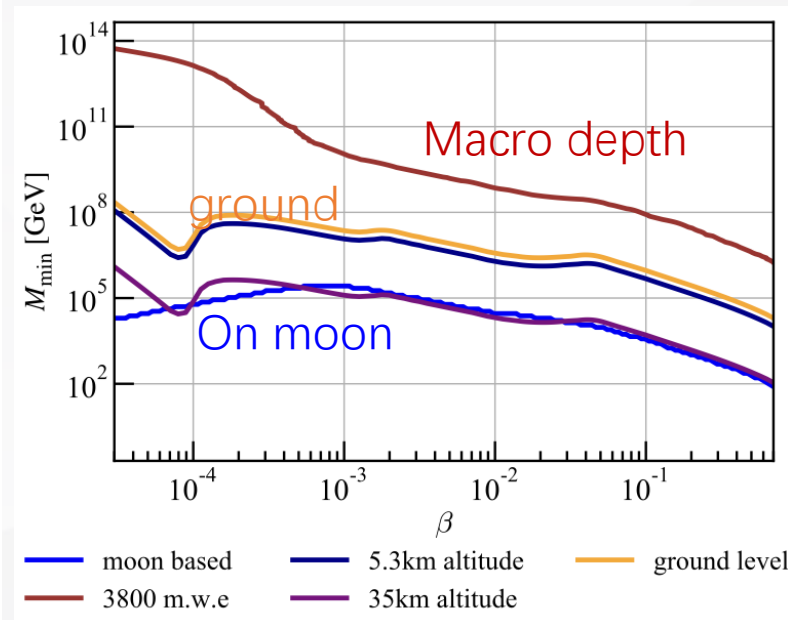
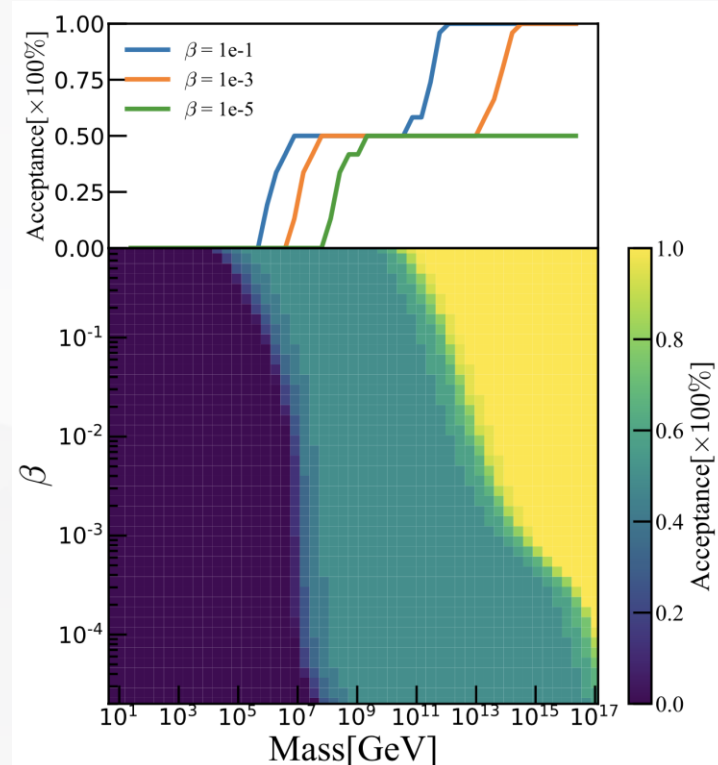
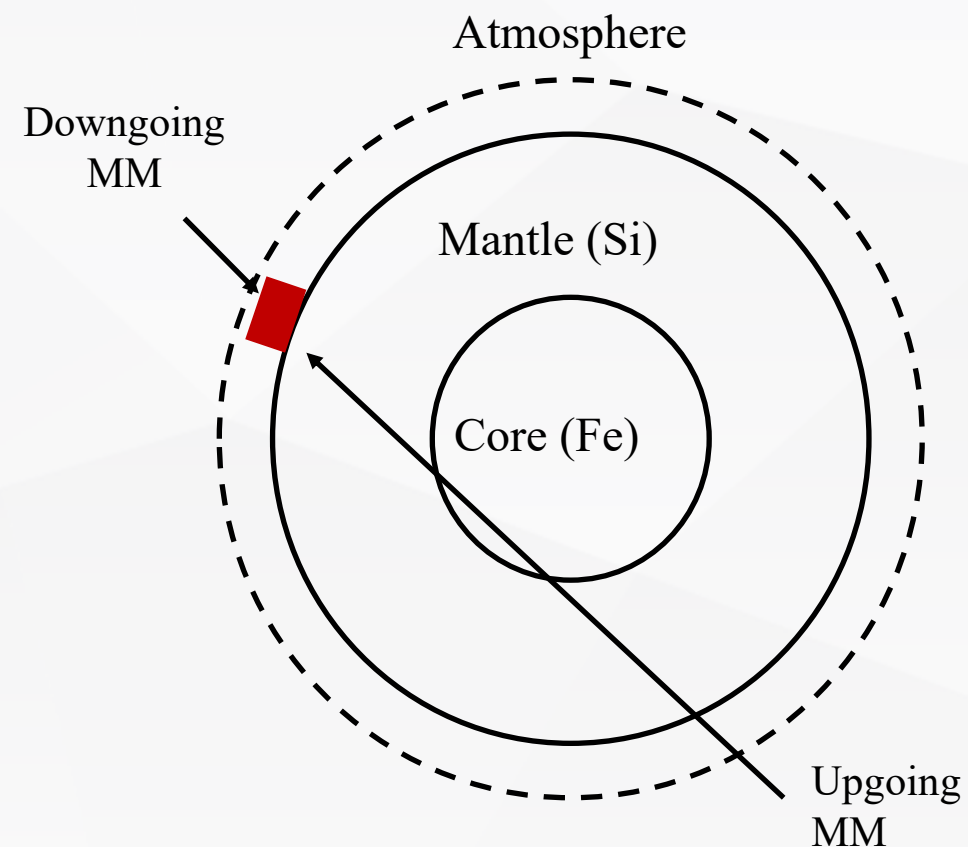
三、探测方案预期性能

四、总结与展望

- 磁单极子存在可以很自然解决麦克斯韦方程电磁不对称问题，以及解释电荷量子化现象；
- 粒子探测和量子传感技术进行符合测量，可以对磁单极子有效探测；
- 已完成了实验可行性研究，并在开展预研，攻克关键技术；
- 具备重大发现的潜力。

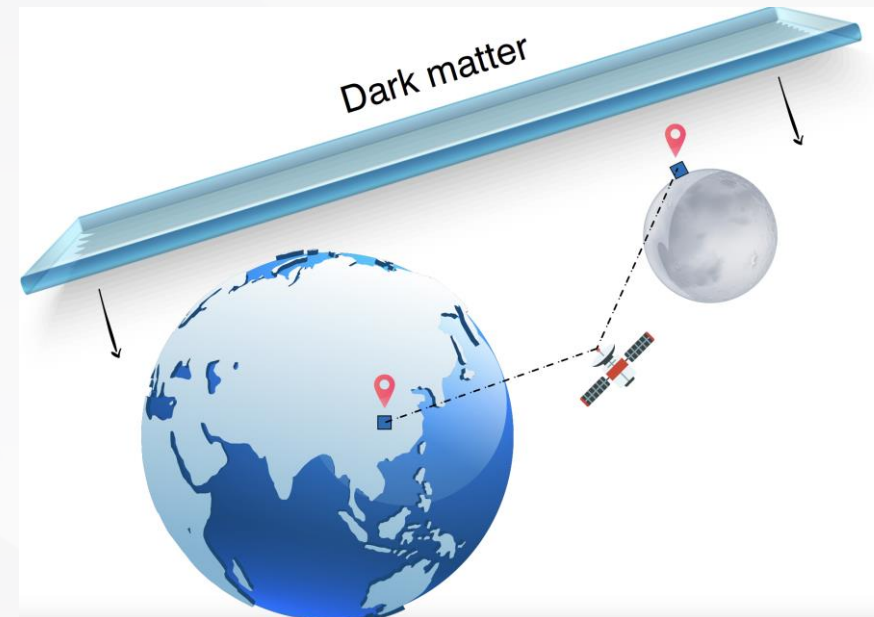
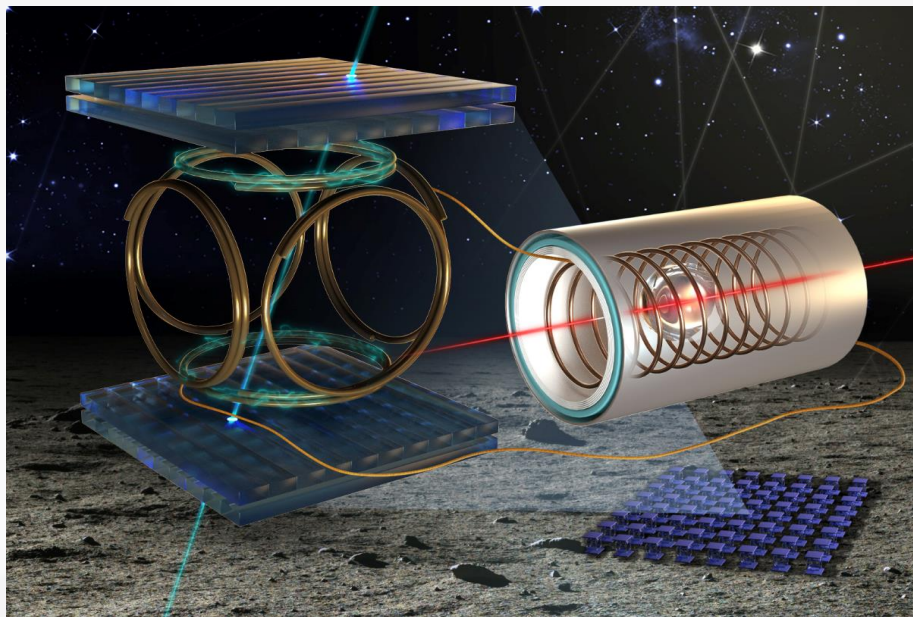


4.2 深空中的寻找与探测



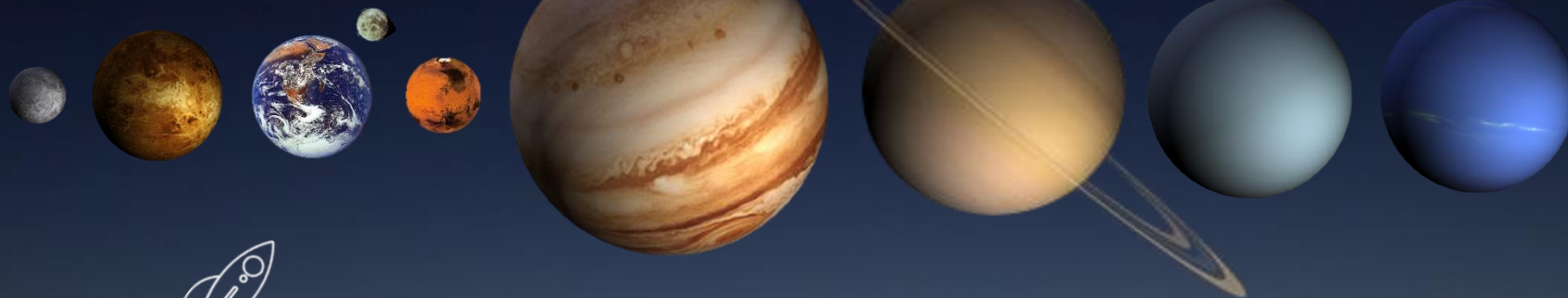
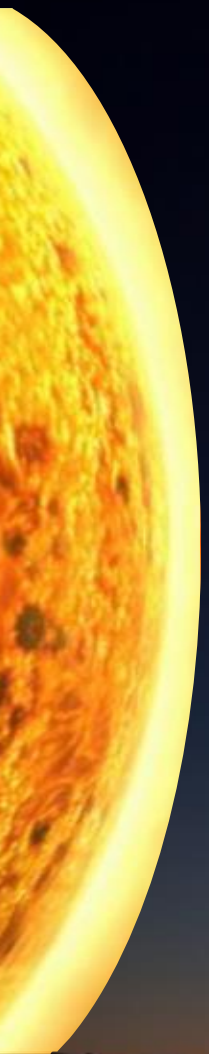
- 由于地球大气遮挡，能到达地面的磁单极子最小质量受限；
- 如果磁单极子无法穿过地球的地幔和地核，探测器接收度会损失50%；
- 月球上布置探测器可以实现更低的可探测质量下限。²³

4.2 深空中的寻找与探测



- 非地球环境的粒子环境, 低磁噪声
- 低速低质量磁单极子
- 地球-月球超长基线探测网络→唯一能够探测极低质量轴子($< \text{feV}$)

谢谢

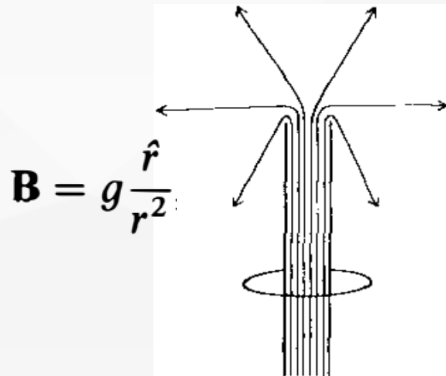


1.3 磁单极子：狄拉克磁单极子与电荷量子化

- 为什么电荷是总是分立值: $Q = ne$?
- 孤立磁极可以导致电荷和磁荷的量子化

$$\frac{eg}{c} = \frac{n\hbar}{2} \rightarrow g = n \cdot g_D = n \cdot \frac{1}{2} \frac{\hbar c}{e} \sim n \cdot \frac{137}{2} e$$

$$\alpha_m = g_D^2 / \hbar c \simeq 34.25 \quad \text{磁荷的耦合强度显著大于电荷}$$



**Semi-infinitely long,
Infinitesimally
thin solenoid**

在狄拉克的电动力学公式中，单极子质量是一个自由参数。

Dirac: “One would be surprised if Nature made no use of it.”

Dirac, P.A.M. 1931. Proc. R. Soc. London A 133:60

Dirac(1948): “The quantization of electricity is one of the most fundamental and striking features of atomic physics, and there seems to be no explanation for it apart from the theory of poles. This provide some ground for believing the existence of these poles.

1.3 磁单极子: GUT 磁单极子

't Hooft 和 Polyakov 证明了GUT理论里磁单极子的必要性:

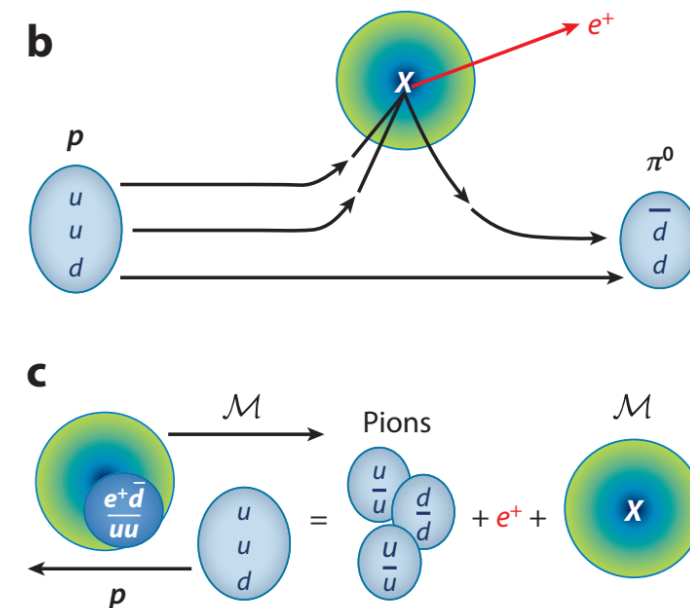
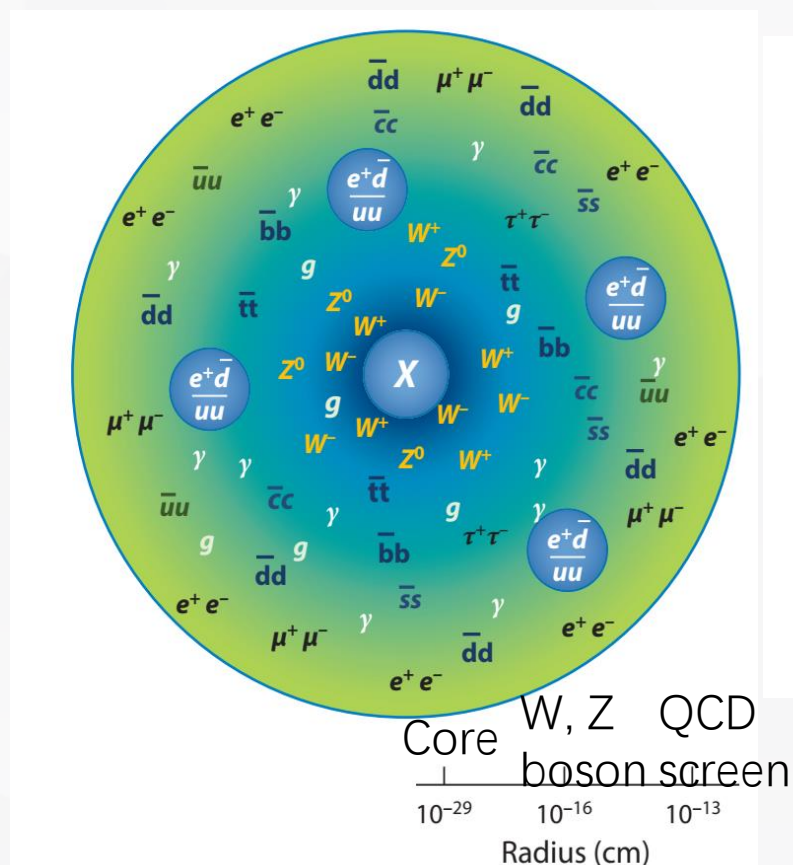
- 磁单极子性质可计算:

$$M \sim 10^{17-18} \text{ GeV}$$

- GUT 磁单极子非常重且具有内部结构

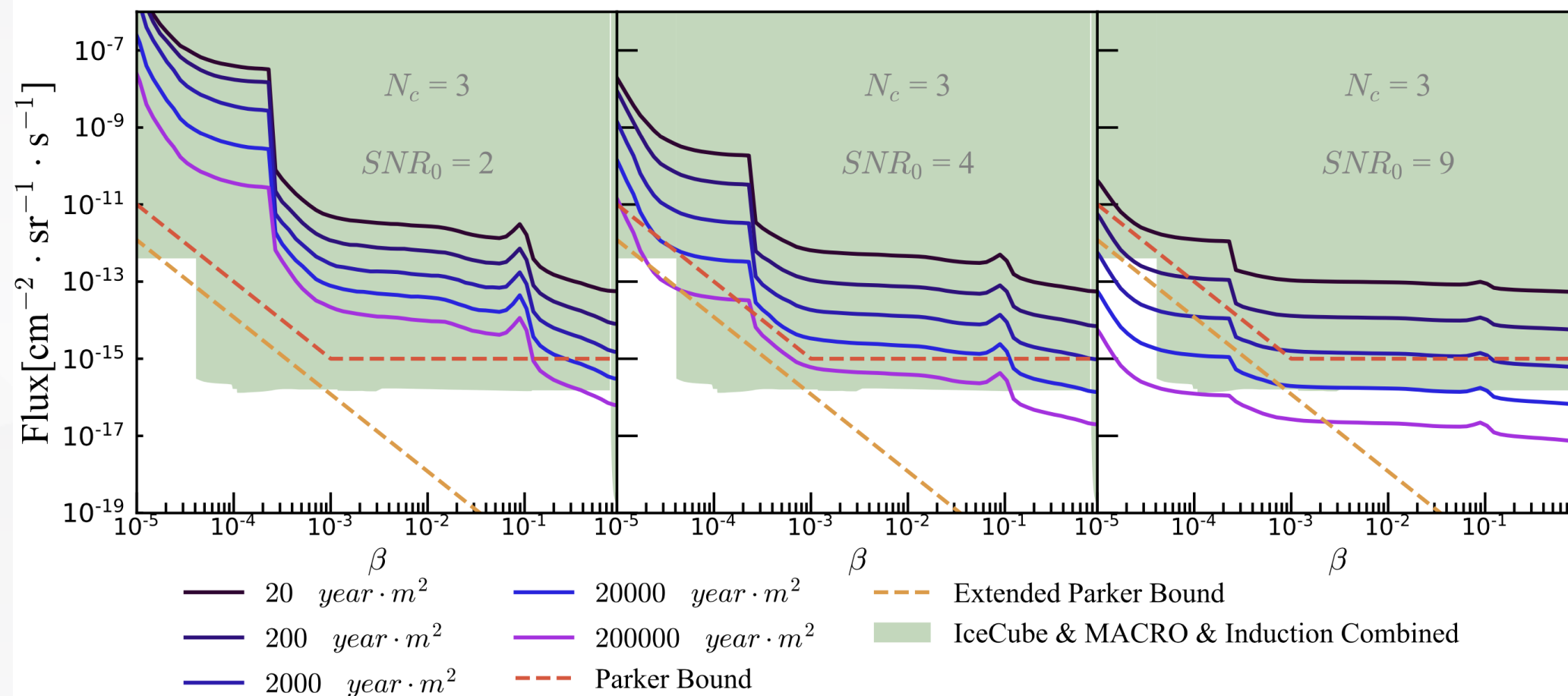
- 可以诱导质子衰变:

$$p + M \rightarrow e^+ + \pi^0 + M$$



3.5 探测方案灵敏度

月面实验



三、探测方案预期性能

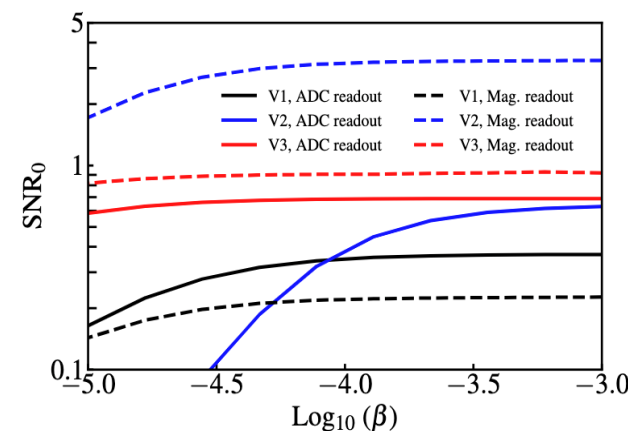
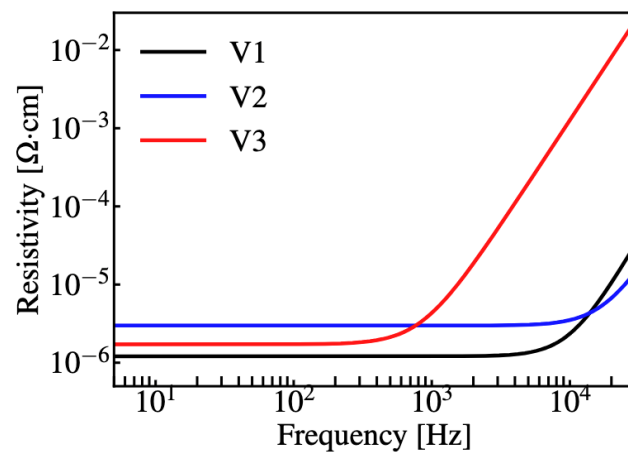
3.5 线圈与谐振电路设计：感应线圈



Coil	Wire type	Wire diameter [mm]	Minimal coil radius [cm]	Maximal coil radius [cm]	Turn number	Optimized SNR ₀	
						ADC readout	Mag. readout
V1	Simple	0.11	5.7	7.2	4320	0.16	0.16
V2	Litz	1.35	5.7	7.2	720	0.02	1.92
V3	Simple	0.55	10.0	14.5	12500	0.57	0.82

降低信噪比的关键参数：

- 电路中元件电阻、电容、电感；
- 感应线圈的交流电阻（与线圈几何与绕制有关，**热噪声来源**）
- 通过实际绕制线圈室温下测试交流电阻。



三、探测方案预期性能

3.4 粒子探测器持续优化

目前粒子探测器存在的问题：

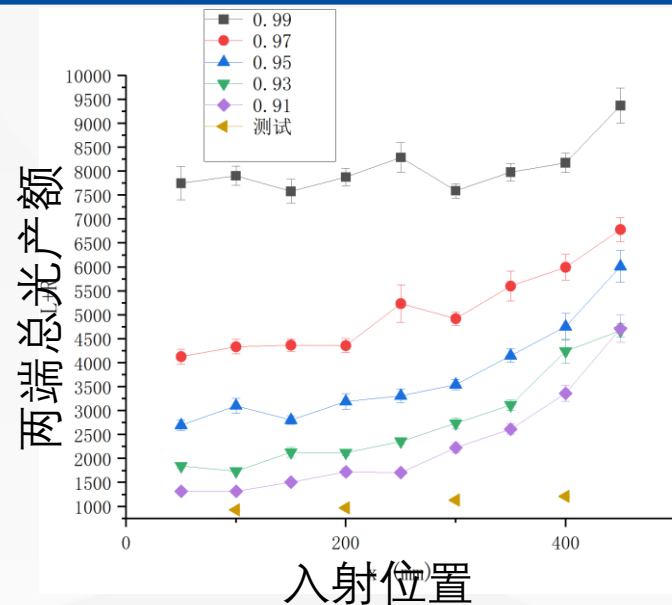
1. 对塑闪性能的理解不足，模拟与测试存在差异，反射率、光衰减长度等超预期；
2. 光产额偏小，测试远小于模拟预期；

问题分析：

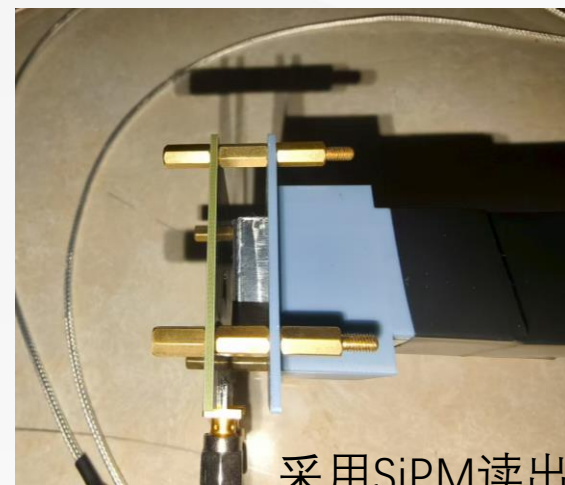
1. 塑闪探测单元存在未知的吸收；
2. 光灵敏探测器PMT量子效率偏低；
3. 塑闪的原初光产额就很低；

解决方案：

1. 与厂商沟通，增强对塑闪性能的理解；
2. 优化塑闪的光传输效率，利用光纤传输等；
3. 采用效率更高的光灵敏器件，如SiPM等；
4. 选择光产额高的塑闪材料。



晶体中心置入光纤



采用SiPM读出