### **负质量暗物质的引力子媒介探测：基于排斥作用共振放大与量子压缩增强的新范式**

**作者：** 李志军，赵光耀  
**摘要：** 本文基于李志军ABC（电磁-色荷-希格斯）涡旋场理论，提出了一套直接探测负质量暗物质粒子的革命性方案。核心创新在于：利用负质量暗物质与普通物质之间通过引力子媒介的排斥作用，而非传统寻找的电磁相互作用。我们设计了三重探测方案：1) 通过大规模量子谐振器阵列感知暗物质流的微牛顿级排斥力；2) 利用压缩光腔增强的迈克尔逊干涉仪测量由此产生的皮米级位移；3) 通过超流体氦中的量子声子探测捕捉暗物质粒子与核子的散射信号。本文构建了完整的数学模型：推导了排斥力微分截面与流守恒方程；建立了谐振器阵列的集体响应模型；设计了基于量子压缩的噪声抑制方案；并预言了可观测的信号特征。该方案预期灵敏度比现有实验提高6个数量级，为直接探测暗物质开辟了全新路径。  
**关键词：** 负质量暗物质；引力子媒介；排斥作用；量子谐振器；压缩光干涉；超流体氦；ABC理论  
**1. 引言：暗物质探测的困境与范式转移**  
现有暗物质探测方案（如LUX-ZEPLIN、XENONnT等）均基于暗物质与普通核子的电磁或弱相互作用。然而，根据李志军理论，负质量暗物质（）与正质量物质之间存在电磁隐形（因质量符号不对称导致耦合禁戒），但通过引力子发生排斥性相互作用：

其中 是引力子场。这为探测提供了全新思路。  
**2. 理论框架：引力子媒介的排斥作用**  
**2.1 有效势与运动方程**  
负质量暗物质与核子间的相互作用由有效势描述：

其中排斥势项：

散射振幅 通过引力子传播子计算：

在非相对论极限下 ()：

**2.2 微分截面计算**  
微分截面由散射振幅模方给出：

其中 ， 是相对速度。  
总散射截面需积分至最大动量转移 ：

**2.3 排斥力率方程**  
单位时间内通过单位面积的暗物质粒子流：

其中 是本地暗物质密度。  
相互作用率（单位时间单位质量的能量沉积）：

代入截面表达式：

**3. 探测方案Ⅰ：大规模量子谐振器阵列**  
**3.1 力学响应模型**  
考虑质量为 、共振频率 的谐振器，其运动方程：

排斥力时间相关项：

其中 是x方向动量转移。  
**3.2 噪声分析与信号提取**  
主要噪声源：  
热噪声：  
量子噪声：  
信号功率谱密度：

**3.3 阵列优化设计**  
最佳质量（在量子噪声主导区）：

取典型值：  
  
  
  
  
  
得   
阵列规模：1000个谐振器，排列成球形阵列，覆盖 立体角，总质量10 kg。  
**4. 探测方案Ⅱ：压缩光增强干涉仪**  
**4.1 干涉仪响应函数**  
迈克尔逊干涉仪的输出光场：

长度变化由排斥力引起：

**4.2 量子压缩增强**  
压缩态操作：

压缩后噪声谱：

其中标准量子极限：

**4.3 灵敏度曲线**  
压缩增强后灵敏度：

取 (15 dB压缩)，，，：

可探测位移：

**5. 探测方案Ⅲ：超流体氦量子声子探测**  
**5.1 声子激发方程**  
暗物质与超流体氦原子碰撞产生声子：

相互作用矩阵元：

声子产生率：

**5.2 共振增强机制**  
采用声子腔增强信号，品质因数：

有效质量：

其中 是共振原子数（ 是氦原子质量）。  
**5.3 低温探测技术**  
操作温度：  
热声子数：

在 ， 时，。  
**6. 信号处理与数据分析**  
**6.1 特征信号识别**  
时间特征：脉冲式信号，持续时间   
能谱特征：反冲能   
方向特征：各向异性分布   
**6.2 统计显著性分析**  
采用似然比检验：

检验统计量：

对于90%置信水平排除，需要 。  
**6.3 背景抑制策略**  
主动屏蔽：  
电磁屏蔽：μ-metal，  
辐射屏蔽：Pb + Cu，10 cm  
被动抑制：  
低温环境：  
振动隔离：六级隔振系统  
**7. 预期灵敏度与发现潜力**  
**7.1 排除曲线计算**  
90%置信水平排除限：

取 （1吨材料），：

**7.2 参数空间扫描**

暗物质质量 与截面 的参数空间：

| **质量范围** | **截面灵敏度** |
| --- | --- |
| 1 eV - 1 keV |  |
| 1 keV - 1 MeV |  |
| 1 MeV - 1 GeV |  |
| 1 GeV - 1 TeV |  |

**7.3 与其他实验对比**

与现有实验的互补性：

| **实验** | **质量范围** | **作用类型** | **灵敏度 (cm²)** |
| --- | --- | --- | --- |
| LZ | 10 GeV - 10 TeV | 弱相互作用 |  |
| ADMX | 1 μeV - 100 μeV | 轴子 |  |
| 本方案 | 1 eV - 100 TeV | 引力排斥 |  |

**8. 技术挑战与解决方案**  
**8.1 热噪声抑制**  
低温技术：  
稀释制冷机：  
绝热去磁：  
材料选择：  
低损耗材料：Si，SiO₂  
高Q值谐振器：  
**8.2 量子噪声压制**  
压缩光源：  
压缩水平：15 dB  
带宽：100 MHz  
量子非破坏测量：  
  
**8.3 振动隔离**  
多级隔振系统：  
主动隔振：  
被动隔振：  
惯性传感器：  
分辨率：  
带宽：0.1 - 100 Hz  
**9. 结论与展望**  
本文提出了探测负质量暗物质的三重方案：  
\* **理论创新：** 利用引力子媒介的排斥作用  
\* **技术突破：** 量子增强的高灵敏度探测  
\* **科学价值：** 验证ABC理论的关键实验  
**预期成果：**  
\* **5年内：** 建设原型机，达到   
\* **10年内：** 完整实验，探测到首个信号  
\* **15年内：** 精确测量暗物质性质  
该方案将开启暗物质探测的新时代，并为量子引力研究提供实验平台。  
**参考文献**  
[1] Li, Z. J. (2023). The ABC Mechanism in the Universe.  
[2] Aprile, E., et al. (2018). Dark Matter Search Results from a One Ton-Year Exposure of XENON1T. Physical Review Letters.  
[3] Abbott, B. P., et al. (2016). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. Physical Review Letters.  
[4] Kimble, H. J., et al. (2001). Conversion of conventional gravitational-wave interferometers into quantum nondemolition interferometers. Physical Review D.  
[5] Arvanitaki, A., & Geraci, A. A. (2013). Detecting high-frequency gravitational waves with optically levitated sensors. Physical Review Letters.