

CDEX-50暗物质实验计划与研究进展

杨丽桃 清华大学



On behalf of CDEX Collaboration

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会 2023年5月7日-5月12日,浙江杭州



Main Contents



http://cdex.ep.tsinghua.edu.cn/

- ▶ 暗物质直接探测
- ≻ CDEX-1和CDEX-10
- ≻ CDEX-50: 液氮直冷阵列高纯锗暗物质实验
 - ✓ 总体介绍
 - ✓ 物理目标
 - ✓ 本底研究与控制
 - ✓ 未来展望
- ≻ 总结

暗物质



➢暗物质约占宇宙组分的26.8%,在物质起源和宇宙演化过程中具有非常重要地位; ➢暗物质性质、构成的研究是粒子物理、天文学和宇宙学的重大基础前沿课题。





≻暗物质直接探测实验技术

✓低质量区:高纯锗、硅、晶体量热器等

✓高质量区:液态稀有气体(氙、氩等)



三类暗物质探测方式



暗物质直接探测







低本底、低能量阈值 长时间稳定性







口 角分辨率(<20°)



CDEX "盘古" 实验

- ▶2009年清华大学牵头成立,目前共11家参与单位约80人
- ≻关键技术:点电极高纯锗探测器
- ▶物理目标:轻暗物质直接探测+无中微子双贝塔衰变实验测量















CDEX "盘古" 实验

- ➤ CDEX-1(2009-2018):发展点电极高纯锗探测器技术,开展本底研究
- ➤ CDEX-10(2016-2022): 液氮直冷的高纯锗阵列性能研究
- ➤ CDEX-50(2021-202X): 50公斤级液氮直冷高纯锗阵列实验系统(裸锗)
- ➤ CDEX-300v(2021-202X): 300公斤级富集锗阵列实验系统(裸锗、富集Ge-76)



CDEX-1



- ➢ 两套单体1kg的点电极高纯锗探测器: CDEX-1A(prototype, 2011)→1B(upgraded, 2013);
- > 传统的冷指制冷;
- ≻ 低本底铅&铜屏蔽体+碘化钠反符合;
- ≻ 位于1米厚的聚乙烯室中@CJPL-I;

国际同类单体最大(1 kg,美国0.3 kg) 阈值最低(160 eV,美国475 eV)

CPC 42, 023002 (2018)



Layout of PE room, CJPL-I

CDEX-1 inside PE room

CDEX-1A&B: 1kg PPC Ge × 2

CDEX-10



- ▶ 建立了国际上第一个液氮直冷高纯锗阵列系统,质量达到10kg,国际同类最大;
- ≻ 发展了阵列化探测器系统的数据合成方法,以及多探测器联合的物理分析框架;



阵列化探测器系统数据合成方法框图

Science China-PMA 62, 031012 (2019)

CDEX-10暗物质实验系统

CDEX-10阵列高纯锗探测器测试

物理成果



✓ 开展暗物质直接探测,扫描理论参数空间,给出国际先进水平的物理成果;
 ✓ 开展无中微子双贝塔衰变实验预研,给出我国首个⁷⁶Ge 0vbb实验结果;



WIMP暗物质探测



- ▶2013年,发表我国首个自主暗物质直接探测实验结果,自旋无关探测灵敏度 达到国际水平;
- ▶2014年,暗物质自旋无关探测灵敏度提升10倍;给出了点电极高纯锗国际最灵敏的实验结果,还确定地排除了美国CoGeNT实验组的"疑似"暗物质信号;
- ▶2016年,在自旋相关探测方面,给出7GeV以下国际最灵敏的限制;







WIMP暗物质探测



▶2018年,基于CDEX-1B,国际上首次将点电极高纯锗暗物质探测质量限下推 至2 GeV,给出4 GeV以下自旋相关暗物质国际最灵敏实验结果;

▶2018年,基于CDEX-10,给出4-5 GeV区间自旋无关国际最灵敏实验结果;





暗物质年度调制



➢暗物质年度调制效应研究,确定地排除了美国CoGeNT实验宣称探测到的"疑似" 暗物质信号;对质量小于6 GeV的暗物质年度调制灵敏度限制达到世界最好水平;

>该成果获中国物理学会高能物理分会"晨光杯"青年优秀论文一等奖;

PRL 123, 221301 (2019)

高能物理分会第十一届"晨光杯" 青年优秀论文一等奖





基于Migdal效应的轻质量暗物质探测

- ➢开展亚GeV轻暗物质探测,将CDEX暗物质质量灵敏范围从2 GeV下推至50 MeV; 在50-180 MeV质量区间截面限制灵敏度达到世界最好水平;
- ≻国际暗物质探测向更轻质量区域拓展,被《欧洲粒子天体物理战略规划》引用;

PRL 123, 161301 (2019)

Several results using this effect were already published with the **strongest ones being from** XENON1T and **CDEX** above and below 110 MeV/ c^2 , respectively.





暗物质-电子反冲实验研究

▶国际上首次利用液氮温区高纯锗探测器开展暗物质-电子反冲实验研究; ▶在大于100MeV质量区间,给出国际(固体探测器)最灵敏实验结果;



奇异暗物质搜寻



▶ 搜寻费米子暗物质中性流吸收和暗物质核子3-2非弹性散射信号;

▶对反应截面的限制延伸到目前国际最低的暗物质质量区间;



宇宙线加速的轻暗物质探测

≻在宇宙线加速暗物质探测、地球屏蔽效应方面取得了国际先进的物理成果;
>将暗物质探测质量限由GeV下推至keV量级,给出比宇宙学更灵敏的截面限制;

PRD 106, 052008 (2022)





暗光子研究



➢探索除WIMP以外的更多暗物质候选者,如暗光子、轴子等新物理参数空间;➢暗光子研究: 10-300 eV暗光子动量混合参数国际最严格的直接探测实验限制;



PRL 124, 111301 (2020)

*WIMP: 弱相互作用大质量粒子

轴子暗物质研究



▶2017年,给出我国首个轴子暗物质实验结果,1keV以下实验结果国际最灵敏;
 ▶2020年,给出800eV以下高纯锗探测器轴子暗物质参数的世界最灵敏限制;



中微子物理研究



- ▶2017年,发表我国首个⁷⁶Ge无中微子双贝塔衰变实验结果;
- ▶2022年,针对未来⁷⁶Ge 0vββ实验探测器选型,进行了技术预研;
- ▶2022年,开展了中微子超标准模型相互作用(NSI)等新物理实验研究;



未来⁷⁶Ge 0vββ实验的探测器选 型技术预研







CDEX-50实验



>液氮直冷的裸浸高纯锗探测器阵列;
 >有效靶质量(Ge)达到~50kg;
 >本底水平控制到0.01 cpkkd@1keV;

≻暗物质探测灵敏度提升100倍;





CDEX-50物理目标



- ■本底水平控制到小于0.01 cts/(keV·kg·day) @1 keV;
- 实验数据分析阈值100 eV;
- 有效曝光量达到~50 kg·year;
- WIMP自旋无关灵敏度达到10⁻⁴⁴ cm²水平;
- 同时,开展轴子、暗光子暗物质等实验研究;



CDEX-50物理目标





CDEX-50物理目标



- ✓ 继续发挥CDEX实验低能量阈值的优势;
- ✓ 基于太阳暗光子和暗光子暗物质理论,继续开展暗光子理论参数区域的探索;
- ✓ 预期给出600eV以下暗光子暗物质最灵敏限制, 300eV以下太阳暗光子最灵敏限制;



本底来源



■ CDEX-50目标10⁻² cts/(keV·kg·day) @ 1 keV

■ 为了达到目标本底,需要分析探测器各种本底来源、进行优化控制

| | 本底类别 | 主要来源 | 降低途径 | 备注 |
|---------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------|
| 1、环境本底 | 宇宙线缪子、环境伽 马和中子 | 环境 | 深地、实验室材料控制 | |
| 2、屏蔽材料 本底 | 屏蔽材料的宇生、原 生放射核素 | 屏蔽材料 | 屏蔽设计、材料优化 | |
| 3、探测器自 身本底 | 高能γ射线在低能区的 连续Compton平台 | 电子学部件、电缆、结构材 料等 | 选用更纯的电子学部件、电缆, 采用自制超高纯电解铜 | |
| | 宇生非锗核本底贡献 | 宇生非锗同位素特征x射线及 γ射线的级联本底 | 控制地面 | 若掌握晶体生 长技术,可在 |
| | | Tritium的连续本底 (18keV以下) | 晶体生长和探测器研制时间 地下 行晶 | 地下实验室进 行晶体生长 |
| | 宇生锗核本底贡献 | Ge-68及其子核Ga-68的K、L、 M特征X射线及连续区域 | 同位素富集 (主要为减少Ge-70) | |

CDEX-50本底优化控制



➤ CDEX-50预期本底降低到~10⁻² cpkkd@1keV

- ① 至少需要4m的液氮;
- 液氮中²²²Rn需要纯化(µBq/kg);

- 要求具备μBq/kg放射性测量能力
- ③ 探测器内铜构件需要采用地下生产电解铜(µBq/kg);
- ④ 探测器非铜构件材料放射性活度需要优化(~0.1mBq/kg);
- ⑤ 未来在地下生产锗晶体; (~10⁻³ cpkkd@1keV)

➤ CDEX未来实验中的关键技术

- ① 大型液氮低温屏蔽系统
- ② 超低本底电解铜
- ③ 低本底低噪声前端电子学
- ④ 超低本底高纯锗探测器
- ⑤ 宇生放射性控制方案

大型液氮低温屏蔽系统





屏蔽系统本底构成

| 本底来源 | ROI本底 (cpkkd@1keV) |
|---------------------------------------|------------------------------|
| 液氮外部γ | <10-4 |
| 液氮外部中子 | <10 ⁻⁴ |
| 液氮中 ⁷ Be | <10 ⁻⁴ (地下放置200天) |
| 液氮中 ²²² Rn (~0.1mBq/kg) | ~2×10 ⁻² (未纯化) |
| 液氮中 ²²² Rn (~µBq/kg) | ~2×10⁴(纯化) |
| 液氮中 ⁸⁵ Kr | ~5 × 10 ⁻⁶ |

✓采用至少4m、纯化的液氮(µBq/kg ²²²Rn)屏蔽系统,可将探测器环境本 底、屏蔽体材料自身本底降低到~2×10⁻⁴cpkkd@1keV;

地下超低本底电解铜



- 探测器核心构件分为铜材质和非铜材,铜材质居多;
- 探测器内铜构件需要采用地下生产电解铜(µBq/kg);
- 目标: U/Th含量~ O(0.1µBq/kg); 【ICPMS测量】
- 千级洁净棚@CJPL-I





低本底低噪声前端电子学研究

- 最靠近高纯锗晶体的材料→低本底(高纯度、低质量)
- ✓基于CMOS ASIC的低温低噪声前放研制✓低本底电路基板:熔炉石英和硅基板✓低本底线缆: PTFE(聚四氟乙烯)柔性电缆

ASIC前放

硅基板

PTFE柔性电缆

CDEX HPGe探测技术研发

- 开展BEGe自主研制,取得成功;
- 开展高纯锗探测器裸泡测试,长期 性能稳定;

- 开展了长期的锗晶体生长工艺研究, 取得进展;
- 未来在地下生长锗晶体和探测器制 作,可以大幅压低宇生本底;

锗晶体内宇生放射性研究

宇宙线:

- ✓相同海拔,宇宙线通量增量在几倍的范围内;
- ✓相同纬度,通量增量往往超过两个数量级,随之而 来的是宇生核素产额的急剧增加,避免探测器的高 空运输;
- ✓ 宇宙射线粒子与各同位素反应产生放射性核素的截面不同,同位素丰度也会影响某些核素的产生率。

| | Krasnoyarsk (N $56^\circ)$ | | Strasbourg (N 49°) | | Beijing (N 40°) | |
|---------|----------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------|
| | 0 m | 11300 m | 0 m | 11300 m | 0 m | $11300~\mathrm{m}$ |
| Neutron | 3.400×10^{-3} | 1.969 | 2.982×10^{-3} | 1.415 | 2.200×10^{-3} | 8.793×10^{-1} |
| Proton | 2.169×10^{-4} | 1.453×10^{-1} | 2.043×10^{-4} | 1.044×10^{-1} | 1.657×10^{-4} | 6.457×10^{-2} |
| Muon | 1.191×10^{-2} | 8.960×10^{-2} | 1.191×10^{-2} | 8.420×10^{-2} | 1.182×10^{-2} | 7.122×10^{-2} |
| Gamma | 1.732×10^{-2} | 2.755 | 1.722×10^{-2} | 2.534 | 1.682×10^{-2} | 2.131 |

锗材料宇宙射线照射场景

| 宁仕拉志 | 半衰期 | 衰变模式 | 衰变子体 | 产生率(北京)(day ⁻¹ kg ⁻¹) | | | | |
|------------------|----------|-----------------|------------------|--|------|---------|------|-------|
| 于主核系 | | | | 中子 | 质子 | μ 子 | 伽马 | 总和 |
| ⁶⁸ Ge | 270.9 d | EC | ⁶⁸ Ga | 73.30 | 5.41 | 0.31 | 4.03 | 83.05 |
| ⁶⁸ Ga | 67.7 m | EC or β^+ | ⁶⁸ Zn | 73.30 | 5.41 | 0.31 | 4.03 | 83.05 |
| ⁶⁵ Zn | 243.9 d | EC or β^+ | ⁶⁵ Cu | 35.14 | 3.64 | 1.23 | 0.46 | 40.47 |
| ⁶³ Ni | 101.2 yr | β^- | ⁶³ Cu | 4.05 | 0.54 | 0.12 | 0.08 | 4.79 |
| ⁵⁷ Co | 271.7 d | EC | ⁵⁷ Fe | 3.55 | 1.07 | 0.03 | 0.03 | 4.68 |
| ⁶⁰ Co | 5.3 yr | β^- | ⁶⁰ Ni | 1.21 | 0.22 | 0.01 | 0.01 | 1.45 |
| ⁵⁵ Fe | 2.7 yr | EC | ⁵⁵ Mn | 3.01 | 1.05 | 0.04 | 0.05 | 4.15 |
| ⁵⁴ Mn | 312.2 d | EC | ⁵⁴ Cr | 0.67 | 0.24 | 0.01 | 0.02 | 0.94 |
| ⁴⁹ V | 330.0 d | EC | ⁴⁹ Ti | 0.90 | 0.49 | 0.02 | 0.02 | 1.42 |
| ^{3}H | 12.3 yr | β^- | ³ He | 18.33 | 4.82 | 0.33 | 0.20 | 23.68 |

高纯锗探测器运输专用屏蔽

- ✓ 避免探测器的高空运输: 每一步运输都使用17吨的钢屏蔽体;
- ✓ 屏蔽体顶面厚度700mm,侧面厚度400mm,屏蔽体+集装箱总重量19.5吨;
- ✓ 加屏蔽进行地面运输,可将宇生放射性含量降低至少20倍;

锗晶体内宇生放射性研究

| | (冷却三年后) | 十一十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十十 | | |
|-------------------------------------|----------|---|------------|--|
| <u> </u> | 天然锗 | 富集锗 | 土安贝骶肥区 | |
| ⁶⁸ Ge(⁶⁸ Ga) | 36.81688 | 1.046452 | Ονββ能区 | |
| ⁶³ Ni | 0.020231 | 0.020683 | 暗物质能区 | |
| ⁶⁰ Co | 0.101432 | 0.100344 | 暗物质/0νββ能区 | |
| ³ Н | 1.124363 | 1.120034 | 暗物质能区 | |

锗晶体内宇生放射性研究

■ 宇生核素特征峰,以⁶⁸Ge为主,特征峰可通过拟合扣掉;

✓ 降低方法: 1) 增加冷却时间 2) 减少产生率(运输屏蔽+⁷⁶Ge富集)

■ 连续能谱, 以³H为主;

✓ ³H的产生截面于Ge的各同位素差异不明显

CDEX-50本底模型

锗晶体内宇生放射性研究

富集⁷⁶Ge情形:

- ✓ ⁶⁸Ge显著压低约2个量级,特征峰可通过拟合扣掉;
- ✓ ³H连续本底改善不明显,连续能谱无法扣除;
- ✓ 10⁻² cpkkd依然无法满足未来吨级暗物质实验的本底要求。

未来展望

■ 在地下实验室进行晶体生长及探测器制作

除68Ge、68Ga外,包括3H在内的其他长半衰期宇生放射性核素均降低到了可以忽略的水平。

未来展望-太阳中微子探测

- 对于低阈值的高纯锗探测器来说,随着本底的降低,可能探测到⁸B太阳中微子;
- 当本底水平达到2×10⁻³ cpkkd, 阈值达到200 eV的时候,将不可避免的触碰到中微子台阶;
- 理想情况下,每吨靶物质每年可以探测到约350个太阳中微子事例<mark>(其中⁸B约200个)</mark>;
- 考虑探测器阈值100 eV , 每吨靶物质每年可以探测到约280个太阳中微子事例;

CDEX-50实验进度

- CDEX-50目前正在CJPL-I进行探测器单元和小型阵列测试;
- 测试完成后将转移至锦屏二期C1厅大型液氮低温屏蔽系统中;
- 希望能在2024年完成阵列系统试运行;

液氮恒温器@CJPL-II C1

液氮恒温器

CDEX-50高纯锗暗物质实验

总结

- CDEX-1和CDEX-10实验取得了多项国际领先的物理结果,为锦屏 二期开展大型液氮直冷的阵列高纯锗实验奠定了基础;
- ■建立了CDEX-50探测器本底模型,并给出本底优化控制方案;
- ■详细模拟高纯锗探测器从原料处理、制备、运输和探测器研制等 各个环节的本底控制,建立探测器生产标准流程;
- ■面向CDEX未来实验的多项关键技术正在研究,进一步降本底、 增质量、降阈值!

总结

- CDEX-1和CDEX-10实验取得了多项国际领先的物理结果,为锦屏 二期开展大型液氮直冷的阵列高纯锗实验奠定了基础;
- ■建立了CDEX-50探测器本底模型,并给出本底优化控制方案;
- ■详细模拟高纯锗探测器从原料处理、制备、运输和探测器研制等 各个环节的本底控制,建立探测器生产标准流程;
- ■面向CDEX未来实验的多项关键技术正在研究,进一步降本底、 增质量、降阈值!

Thanks for your attention!

http://cdex.ep.tsinghua.edu.cn/

http://cjpl.tsinghua.edu.cn