

锦屏无中微子双贝塔衰变晶体量热器实验

Huan Zhong Huang

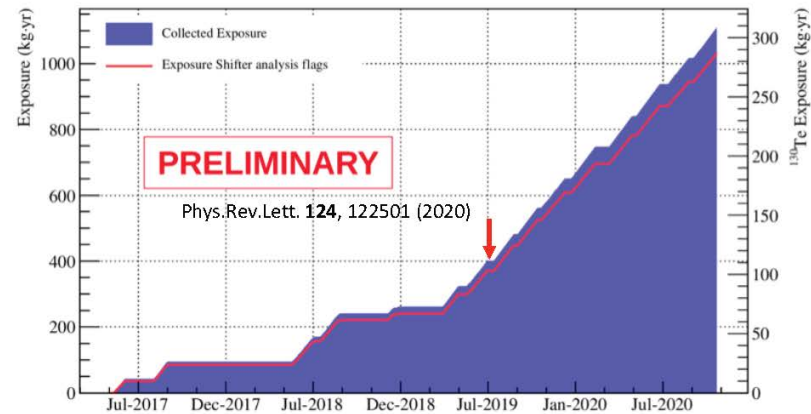
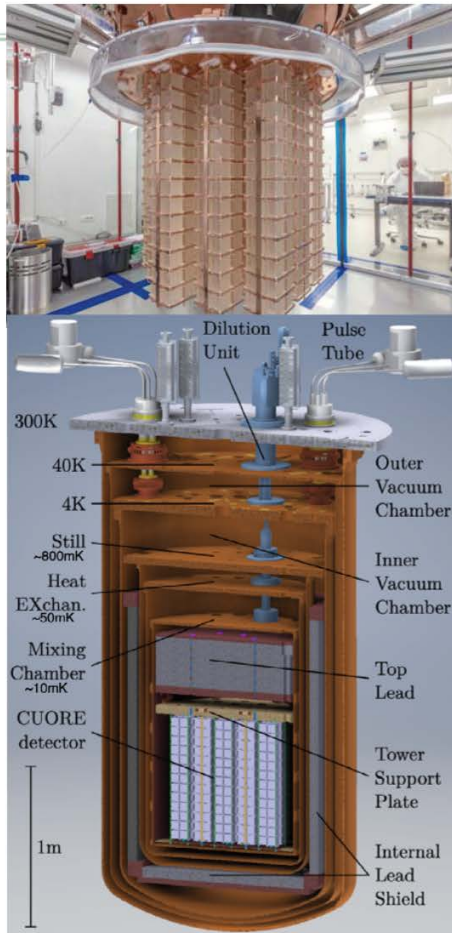
**Institute of modern physics
Fudan University**

Outline

- **CUORE to CUPID**
- **CUPID-China &
CUPID Italian/US and French Plan**
- **CUPID-CJPL Plan**

CUORE Operational Success

CUORE: Towards CUPID Ton-scale NLDBD Search



Collected TeO_2 exposure: 1110 kg*year

Analyzable exposure: 1031 kg*year (*as of Oct 26, 2020)

>1 ton*year analyzable exposure

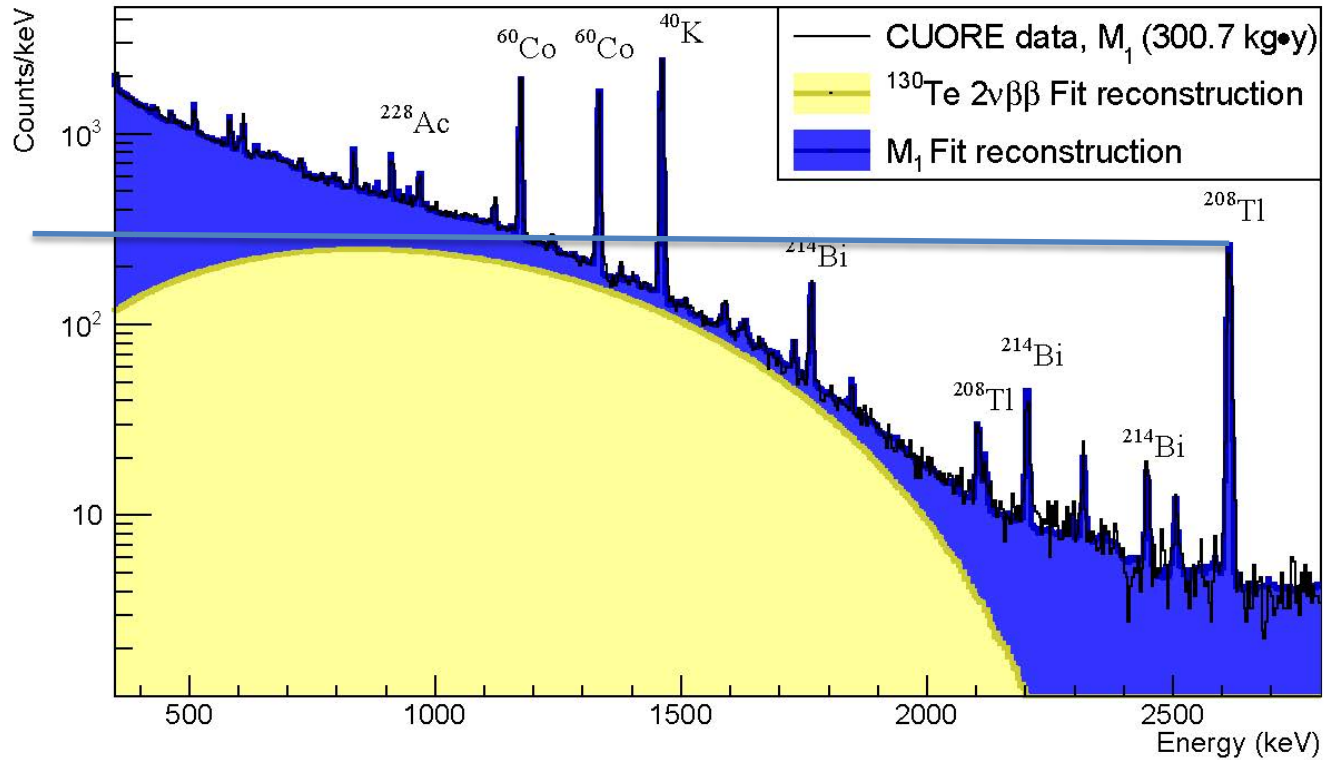
Largest dataset ever collected by a solid-state double-beta decay experiment

Continuous operations at 11mK since March 2019

Demonstrates readiness for a ton-scale bolometric double-beta decay experiment

CUPID proceeding to technical design

CUORE Results



Te-130 $0\nu\beta\beta$ Q value 2527 keV

Significant background in the ROI

Tl-208 gamma peak \sim 300 for 300.7 kg x yr exposure

CUPID-Mo Results

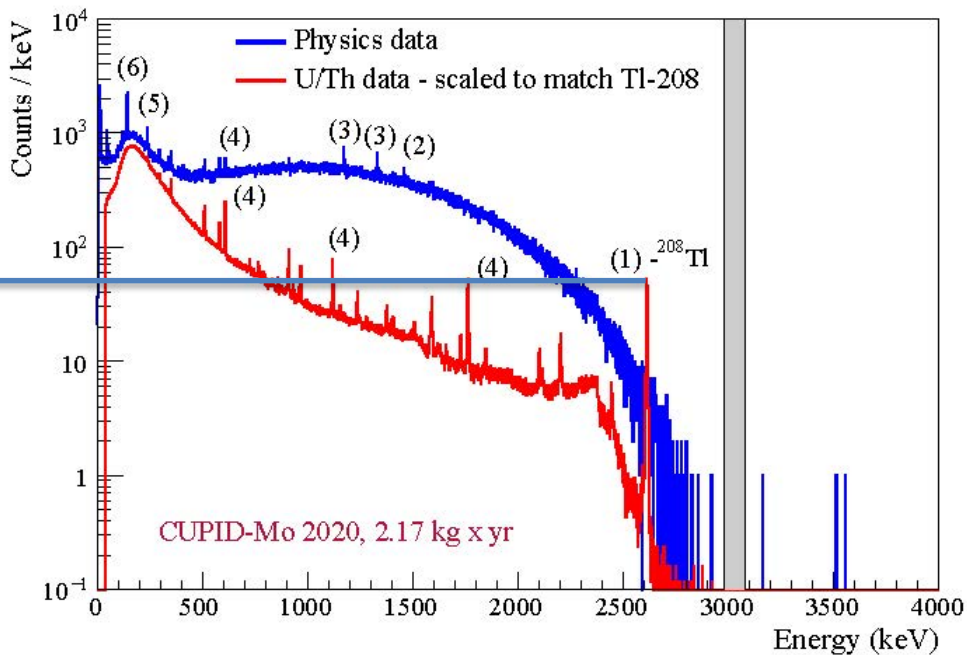


FIG. 1. Physics spectrum (blue) for 2.17 kg×yr of data and Calibration spectrum (red) scaled to match the 2615 keV counts from ^{208}Tl . A ± 50 keV region around $Q_{\beta\beta}$ has been blinded (gray). The most prominent γ -peaks in the physics and calibration data are the following: (1) ^{208}Tl 2615 keV, (2) ^{40}K 1461 keV, (3) ^{60}Co 1173 keV, 1332 keV, (4) ^{214}Bi 1764 keV, 1120 keV, 609 keV, (5) ^{212}Pb 239 keV, (6) ^{99}Mo 142 keV.

**Tl-208 gamma background
peak ~ 50 for 2.17 kg x yr**

Alpha rejection works!

**Mo-100 $0\nu\beta\beta$
Q value 3034 keV !**

**There is room to improve
the quality of the crystals
and reduce gamma
background !**

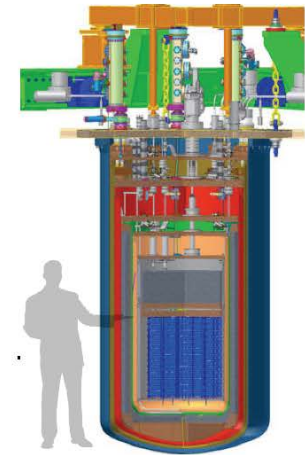
CUPID Concept

R. Artusa et al., Eur.Phys.J. C74, 3096 (2014)
pre-CDR: arXiv:1907.09376

Mature concept based on:

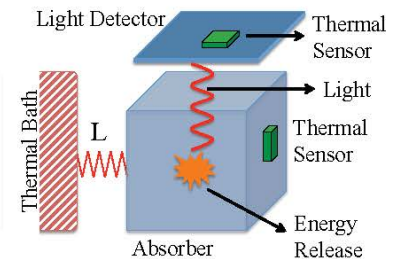
CUORE Achievements:

- Ton-scale bolometric detector is technically feasible
- Operation and analysis of 1000 bolometers demonstrated
- Reliable data-driven background model constructed
- Infrastructure for next-generation experiment exists



Scintillating Bolometer technology based on R&D by Lucifer/CUPID-0, Lumineu, CUPID-Mo

- Baseline: ~1500 enriched Li_2MoO_4 crystals (~250 kg of ^{100}Mo)
- Demonstrated radio-purity, active background rejection
- Energy resolution ~5 keV demonstrated
- Total background of <0.1 counts/(ton*keV*year)
- Phased deployment options up to 1 ton of ^{100}Mo



Experimental Parameters

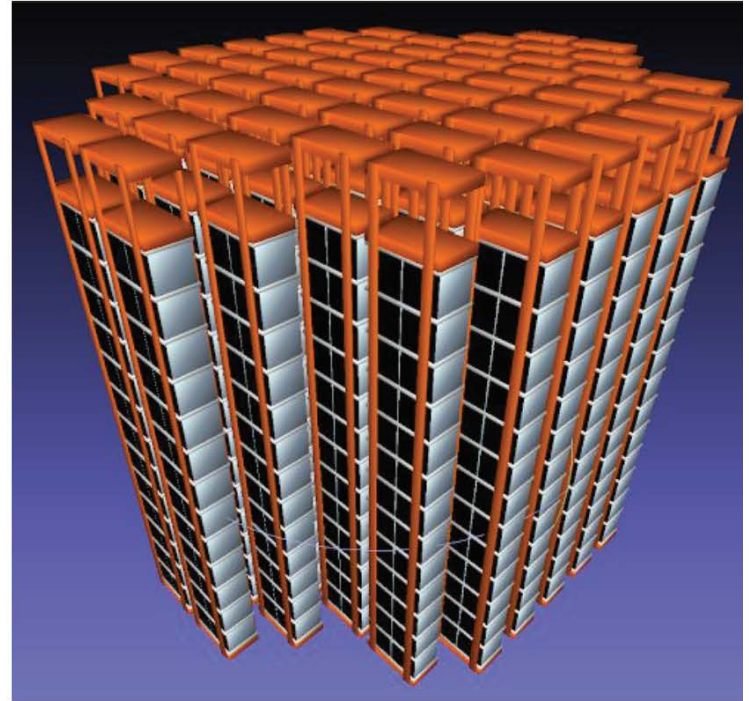
Parameter	Baseline
Crystal	Li_2MoO_4
Crystal size	45x45x45 mm ³
Crystal mass (g)	281
Number of crystals	1482
Number of light detectors	1596
Detector mass (kg)	417
¹⁰⁰ Mo mass (kg)	223
Energy resolution FWHM (keV)	5
Background index (counts/(keV·kg·yr))	10 ⁻⁴
Containment efficiency	79%
Selection efficiency	90%
Livetime	10 years
Half-life limit sensitivity (90%) C.L.	1.5×10^{27} y
Half-life discovery sensitivity (3 σ)	1.1×10^{27} y
$m_{\beta\beta}$ limit sensitivity (90%) C.L.	10 – 17 meV
$m_{\beta\beta}$ discovery sensitivity (3 σ)	12 – 20 meV

Updated since pCDR

To be updated

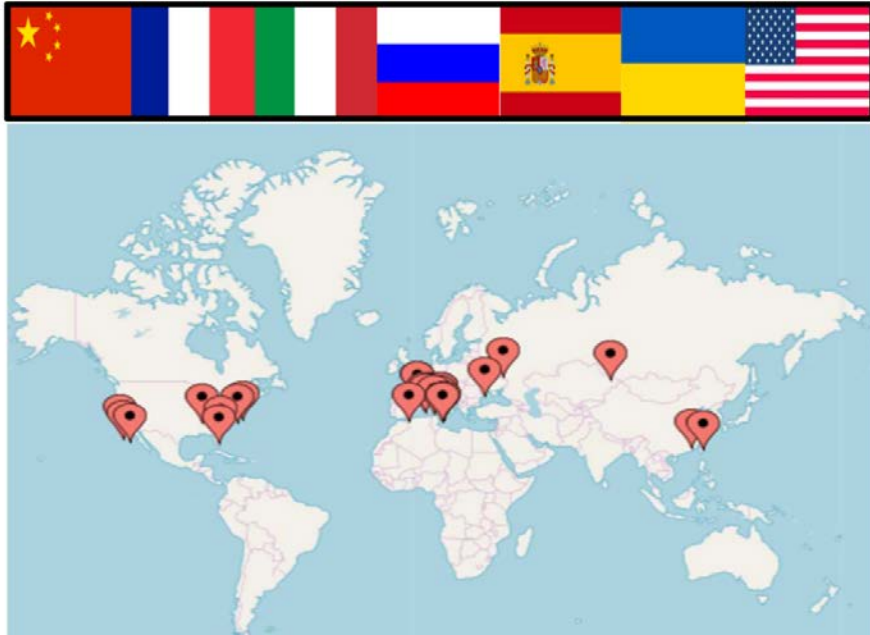
Main Updates Since preCDR

- Settled on crystal geometry (45x45x45 mm³)
- New tower design
- Significant updates on the background model
- New electronics prototypes
- Ongoing detector optimization
- Cost, schedule, responsibilities: preparation for the project phase



CUPID-China Collaboration

International CUPID collaboration



Many thanks to the CSNSM Orsay group and CUPID-Mo Collaboration, Milan-Bicocca, UCB, LNGS Groups for helping us to get started.

CUPID-China

- Fudan University*
- Beijing Normal University*
- Shanghai Institute of Applied Physics
- Shanghai Institute of Ceramics
- Shanghai JiaoTong University*
- Tsinghua University
- University of Science and Technology of China*
- Ningbo University



*officially joined international CUPID

Near Term Goals

Establish a Crystal Testing Facility at CJPL (2021)

Participate in the CUPID Experiment at LNGS

**Possible contribution in readout electronics and
crystal production (if Chinese crystals meet
CUPID requirement)**

Construct a CUPID-CJPL demonstrator (~10kg)

CUPID-CJPL Plan

How can we maintain international collaboration with CUPID ?

CUPID experiment has to compete with other detectors (LEGEND, nEXO....) !

Chinese groups must focus on $0\nu\beta\beta$ experiment at CJPL!

We contribute to the CUPID detector at LNGS

International CUPID collaboration contribute to the technical development at CJPL and to the large scale bolometer detector at CJPL

Build a large-size CUPID-CJPL detector as a part of CUPID network detectors to achieve ultimate ton-scale sensitivity for Mo-100

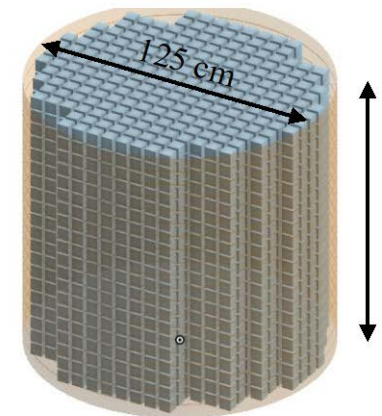
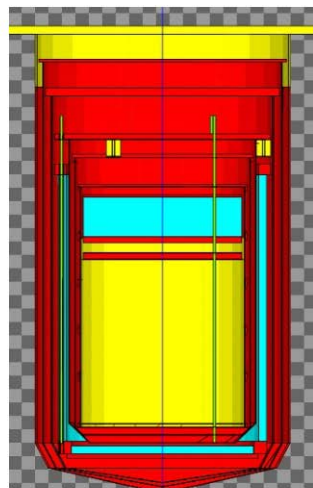
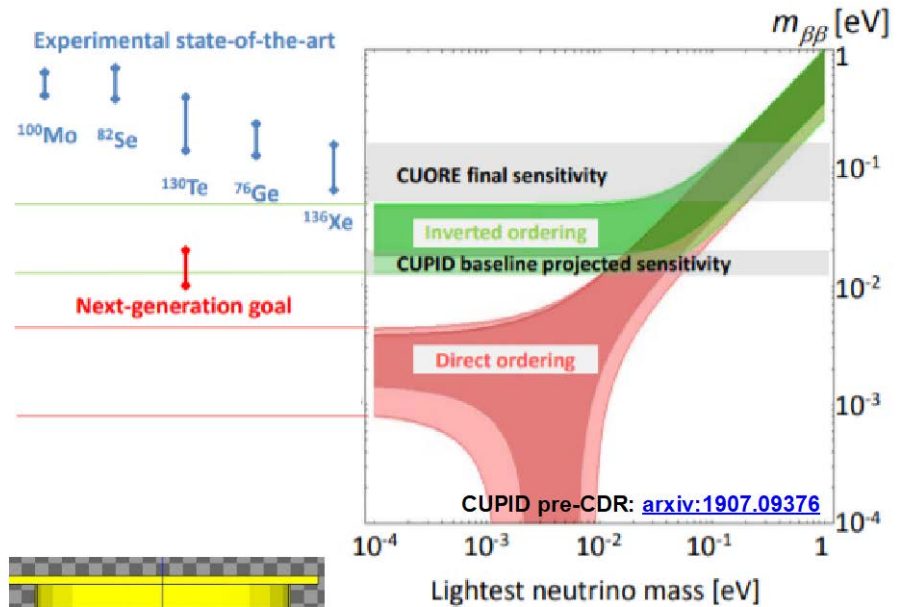
CUPID-1T: the future bolometric experiment

CUPID-1T: HALLMARKS

- 1000 kg of ^{100}Mo in a new cryostat or multiple facilities world wide
- Sensitivity: $m_{\beta\beta} < 10$ meV (NH)

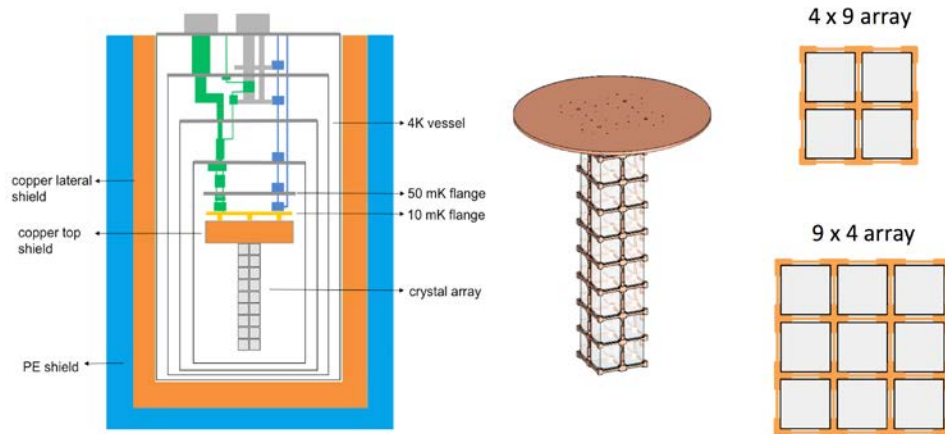
POTENTIAL EXPANSIONS

- Large volume cryogenic facilities in multiple Underground Labs worldwide
- ~1900 kg of LMO



From Danielle Speller's Presentation at Towards CUPID-1T. Snowmass 2021 Planning workshop

CUPID-CJPL Demonstrator

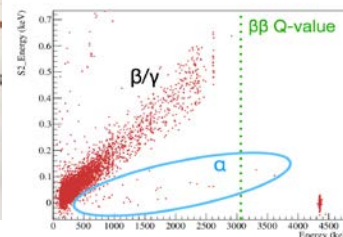
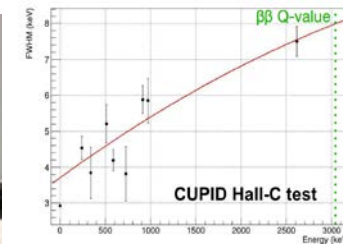
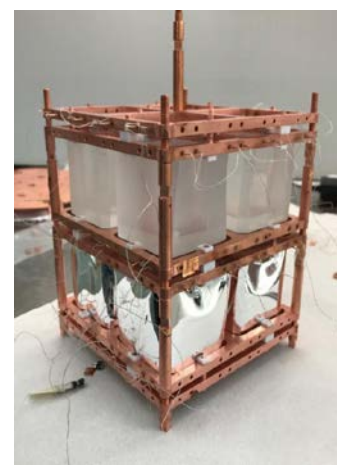
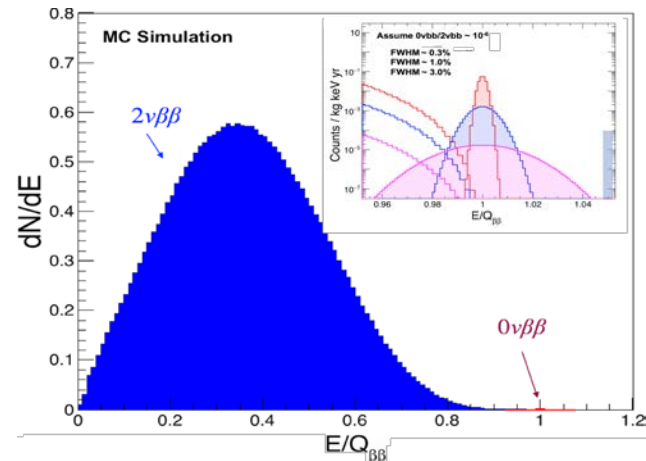


CUPID-CJPL demonstrator conceptual design

Single crystal	Array structure	Total mass [kg]
45×45×45 mm ³ 280 g (LMO)	4x9 (9x4)	10

Goal: Using Chinese LMO crystals to achieve similar energy resolution, alpha rejection and background index as achieved by CUPID-Mo and Hall-C Test

$(BI(ROI) < 10^{-3} \text{cts/keV/kg/yr})$



CUPID Hall-C test (LNGS)

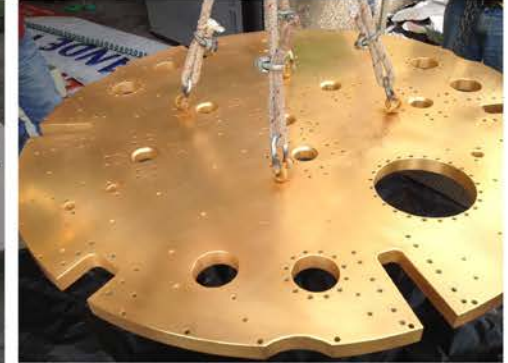
From Demonstrator to Large-Scale



CUORE cryostat (IV)

Building a cryostat

The production, cleaning and assembling of the CUORE cryostat has been a challenge for engineers and companies, given the selection of materials (e.g. copper is not engineers favorite material to design 6 m³ wide vessels-vacuum tight).



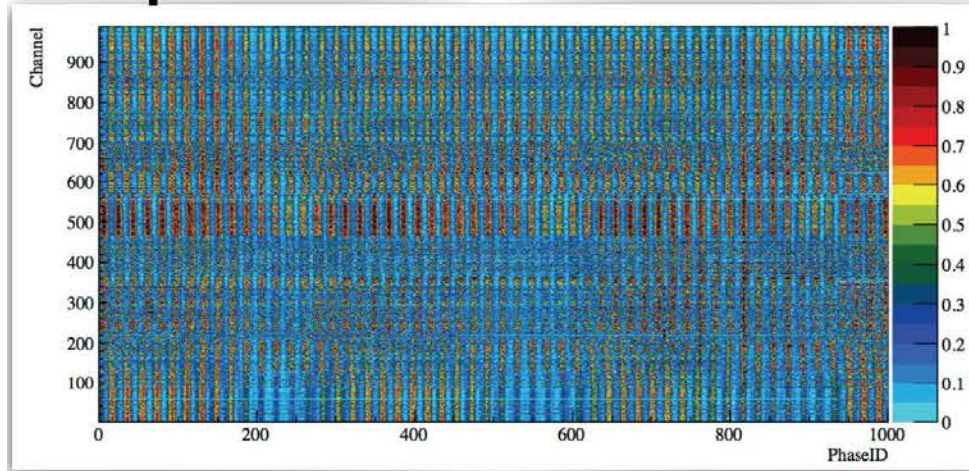
Infrastructure

Assembling an experiment



Noise Suppression

PT phase cancellation

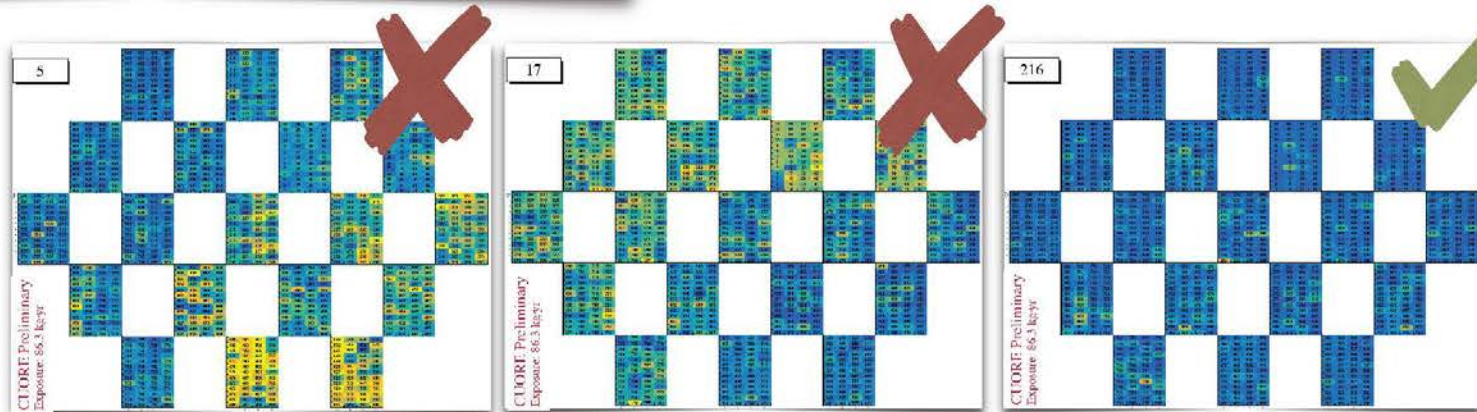


Attenuation of Pulse tube induced vibrations:

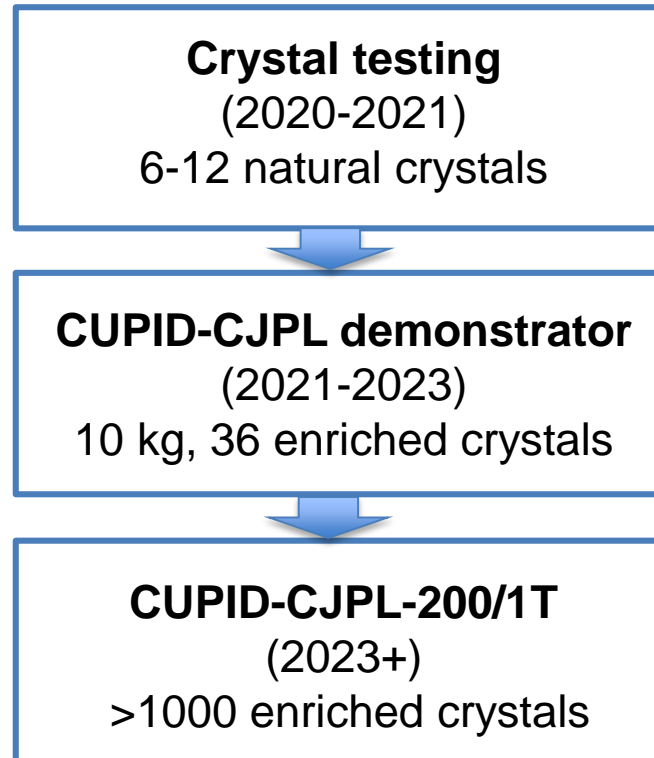
- (1) Switch to Linear Drives to control PT motor heads -> reduce temperature variations on the Mixing Chamber
- (2) PT phase scan to find the phase configuration that actively minimize the PT induced vibrations

Cryogenics 93 (2018) 56–65
arXiv:1712.02753

Example of the PT induced noise for three different PT phase configurations



Future Plan



- 10 kg prototype experiment
 - demonstrating CUPID techniques using Chinese crystals at CJPL
- 200/1000 kg experiment
 - fully cover neutrino IH mass region
- Extensive physics to be explored:
Axion / Light DM/ CPT test

2021年CJPL晶体测试系统

1, CJPL实验室空间建设规划

清华、北师大、复旦

2, 晶体生长

SINAP原材料本底测试

宁波、硅酸盐所生长晶体

寄两块晶体到LNGS测试? (质量保证?)

在锦屏的测试晶体

3, 电子学读出系统、NTD

中科大、北师大、复旦

4, DAQ系统

5, 数据分析和模拟系统

Thanks

重大仪器项目申请

Review 1

无中微子双贝塔衰变精确测量是基础粒子物理领域重要的研究方向，本项目计划依托锦屏深地实验室，研制超低本底和光热双通道精确读出的晶体量热探测器的无中微子双贝塔衰变探索实验的示范装置，具有重要的科学意义。项目紧紧围绕高能量分辨和超低本底进行，主要研制的内容符合项目的预期目标，技术路线基本可行。但项目需要研制高性能钼酸锂晶体和NTD器件都涉及复杂的实验过程，需优化的实验参数较多，特别是没有说清楚钼酸锂晶体为什么是现有的尺寸，大了和小了都会发生什么，其与能量分辨率的关系等等。中子嬗变掺杂的NTD-Ge器件研制的技术路线叙述不够明确，采用的大功率无液氦稀释制冷机是国外产品是否有禁运问题，是否有替代方案，年度计划过于简单等。考虑到项目的科学意义，可以考虑给予资助。

Review 2

无中微子双贝塔衰变 ($0\nu\beta\beta$)实验是当前国际上粒子物理与核物理领域的科学前沿，目标是测量和确定中微子和反中微子是否是同一种中微子（是且有质量即为Majorana粒子，反之为Dirac粒子），是可能突破粒子物理标准模型的崭新研究方向和重大实验之一。该项目以探索无中微子双贝塔衰变为主要科学目标，依托锦屏深地实验室，研制超低本底光热双通道读出的低温晶体量热探测器实验示范样机，实现10mk低温环境、本底优于0.001count/keV/kg/year、能量分辨率优于10KeV、测量质量灵敏度达10MeV等关键技术指标，达同类装置国际先进水平，寻找Mo-100 $0\nu\beta\beta$ 的灵敏度达国际领先水平，突破后续吨级大型 $0\nu\beta\beta$ 衰变实验所需的关键技术；同时为在锦屏深地建设国际一流无中微子双贝塔衰变实验中心奠定基础；为鉴别中微子质量是否是反常排序且为Majorana粒子，实现国际上的突破。该项目对发展我国具有自主知识产权的关键技术和实现重大科学目标具有重大意义。该项目的目标和任务清楚，项目组汇聚了国内精英团队，研究方案和措施描述清楚，技术线路合理且具可行性，经费预算基本合理，项目的组织与管理结构具有科学性。申请人是国际上著名的实验科学家，具有很强的物理基础和综合实验能力，有很强的领导大型实验的组织和管理能力。经过项目团队的努力，预期能完成研究计划并实现其目标。建议优先资助。

Review 3

申请团队拟研制超底本底低温晶体量热探测器实验示范样机，作为锦屏地下实验室开展无中微子双贝塔衰变探测实验的前期技术储备。经过调研，项目组选择采用钼酸锂晶体和光热双通道精确读出的技术方案，明确了设计参数，期望在能量分辨率和本底水平等关键指标上达到国际水平。该样机包含4个子系统，其中探测器系统是该实验平台的核心部分。申请书描述了样机各系统实现的具体工艺步骤，列举了计划开展的研究内容，但重点不突出，没有对其中核心步骤和方案进行深入阐述探讨。对于确保和提高样机技术指标的关键部分，评审人认为申请书中并没有提出具有创新性或独特的技术解决方案，例如针对光热信号双读出系统这一核心部分，申请书针对其创新方案仅阐述了拟开展的研究内容，并未说明研究内容对该系统的重要性、如何开展相关研究、预期的研究结果和对该系统性能提升产生的贡献程度等。同时，申请书也缺乏对晶体制备等新方案的风险分析。综上所述，评审人建议对该项目不予资助。

Review 4

无中微子双贝塔衰变 ($0\nu\beta\beta$) 是超出标准模型的重大物理前沿课题，超低本底低温闪烁晶体量热器是下一代超吨级 $0\nu\beta\beta$ 实验极具竞争力的实验方案之一。本项目以探索 100Mo $0\nu\beta\beta$ 物理为主要科学目标，依托锦屏地下实验室，基于 CUORE 探测技术路线和自主超纯晶体生长技术，研制超低本底光-热双通道精确读出的低温晶体量热探测器实验示范样机。通过 10kg 100Mo 富集率 85% 以上的高纯钼酸锂晶体在 10mk 低温环境下光-热双通道精确读出，实现 100Mo $0\nu\beta\beta$ 衰变 Q 值 3034keV 处能量分辨 10keV 和本底甄别，并采用地下制备极低本底高纯铜优化屏蔽，本底水平优于 $0.001\text{count/keV/kg/year}$ ，达到国际同类装置先进水平。高纯钼酸锂晶体研制和光-热双通道读出、探测系统屏蔽等有难度和创新。本装置完成后，其寻找 100Mo $0\nu\beta\beta$ 衰变的实验灵敏度达到国际领先，可以突破吨级大型 $0\nu\beta\beta$ 衰变实验的全部关键技术，为锦屏实验室建设国际一流 $0\nu\beta\beta$ 物理研究中心奠定基础。

研究技术路线可行，研究团队、实验环境和技术基础好。研究计划和经费预算基本合理。

建议予以资助。

Review 5

无中微子双贝塔衰变，是研究超出标准模型的重大物理问题的独特手段。在国际众多的探测方案中，超低本底低温闪烁晶体量热器是具有独特竞争力的实验方案。本项目以突破Mo-100材料高纯度规模化科学目标，依托锦屏深地实验室的地理优势，发展超纯晶体生长技术，制备超低本底光热精确读出技术，研制低温晶体量热器实验样机，达到10kg规模100Mo富集率和85%的高纯钼酸锂晶体，实现10mk低温光热双通道精确读出，达到能量分辨10 keV和本底甄别国际先进水平，为全尺寸的双贝塔探测器打下基础；同时在地下制备极低本底高纯铜优化屏蔽材料，使得本底水平优于0.001 count/keV/kg/year的国际同类水平。项目力争在Mo-100材料衰变的实验方面灵敏度达到国际领先，建立大型双贝塔衰变实验的全部关键技术，为未来建设0vbb大型探测器奠定基础。项目团队具备很好的研发和国际合作基础，联合了国内的优势团队，聚焦了重大物理问题的关键技术研发，项目的可行性良好且均备创新性，建议给予优先资助。

Review 6

本申请项目的目标是进行无中微子双贝塔衰变的物理研究，尝试检验中微子是否为马约拉纳中微子，进而测量中微子质量，具有重要的科学意义。申请人提出研制为吨级低温晶体量热器的示范样机，在锦屏山深地实验室开展研究工作，挑战关键的同位素富集提纯和富集晶体生长，尝试建立自主的超纯晶体及提纯富集和降低本底的技术方法。利用极低本底材料和屏蔽的优化设计可获得先进的能量分辨率和低水平本底，既有创新又有挑战。本申请项目成员曾在锦屏深地实验室开展了多年的暗物质探测实验（CDEX实验），在低本底测量方面取得了一些物理、技术方面的成果。申请人拥有非常突出的学术背景，在国际合作研究中研发新晶体和探测器技术的经验，为本项目提供了很好的基础。申请项目包括探测器、电子学、数据获取和数据分析系统，也涉及低本底、低温、晶体生长材料科学等相关各项技术。参加单位有复旦大学、清华大学、中国科技大学、上海高等研究院、上海硅酸盐所等单位。具有较强的交叉融合度，分工合理，特别是该团队在晶体生长技术方面具有显著优势。申请团队成员都在相关分工的领域内具有丰富的工作经验，取得过一些有影响力的研究成果。团队中年、青年骨干成员搭配合理。建议给予优先资助。

Review 7

无中微子双贝塔衰变（**NLDBD**）是粒子物理、核物理和宇宙学交叉领域共同关心的重大科学问题，一旦发现它不仅可以作为马约拉纳中微子的判据，为中微子绝对质量提供信息，也同宇宙中正反物理不对称性紧密联系。采用低温量能器方法（声子）测量双贝塔衰变，由于能量分辨率高，对于本底有很强的抑制效果，是国际上一个主流的方向。在此基础上利用晶体的闪烁光和声子信号同时读出，可以进一步降低，探测器的本底水平，该技术具有很强的前瞻性。

本项目拟建设一个**10公斤级**的**Mo100**的双贝塔衰变的示范样机，作为下一代吨级探测器的这个研究基础。尽管技术上有很高的挑战性，但是在中国开展这样的项目非常必要。由于锦屏实验室在过去**10多年**的发展，时机也已经成熟。项目负责人，长期在国际上从事核物理方面的研究，也参与**CUORE**实验多年，一直在推进光子-声子联合读出的**CUPID-China**合作组的工作。申请团队集中了国内在这个方面优秀的人才队伍，有几位长期参加了国际上规模最大低温量能器的**Te130 NLDBD**实验**CUORE**，也都是**CUPID-China**的核心成员。上海硅酸盐所，也是国际上著名的晶体生长的专业单位，为多个国际上的这个同类实验提供了靶晶体。本团队应该有能力组织起这支队伍，完成该仪器的研制工作。

建议优先资助。

Enrichment in China ?

At a recent meeting with Institute of Physical and Chemistry Engineering Regarding Se-82 and Mo-100 enrichment:

**To build up a facility with production capability of 100 kg/year
~ \$10M investment !**

This is an issue that we have to work out .

重大仪器项目申请2021

复旦、清华、中科大、硅酸盐所、上海高研院

马龙、符士洪
曾志、马豪
薛明萱、杨俊峰
袁辉、朱勇
曹喜光
等

帮助修改申请书

谢谢！