

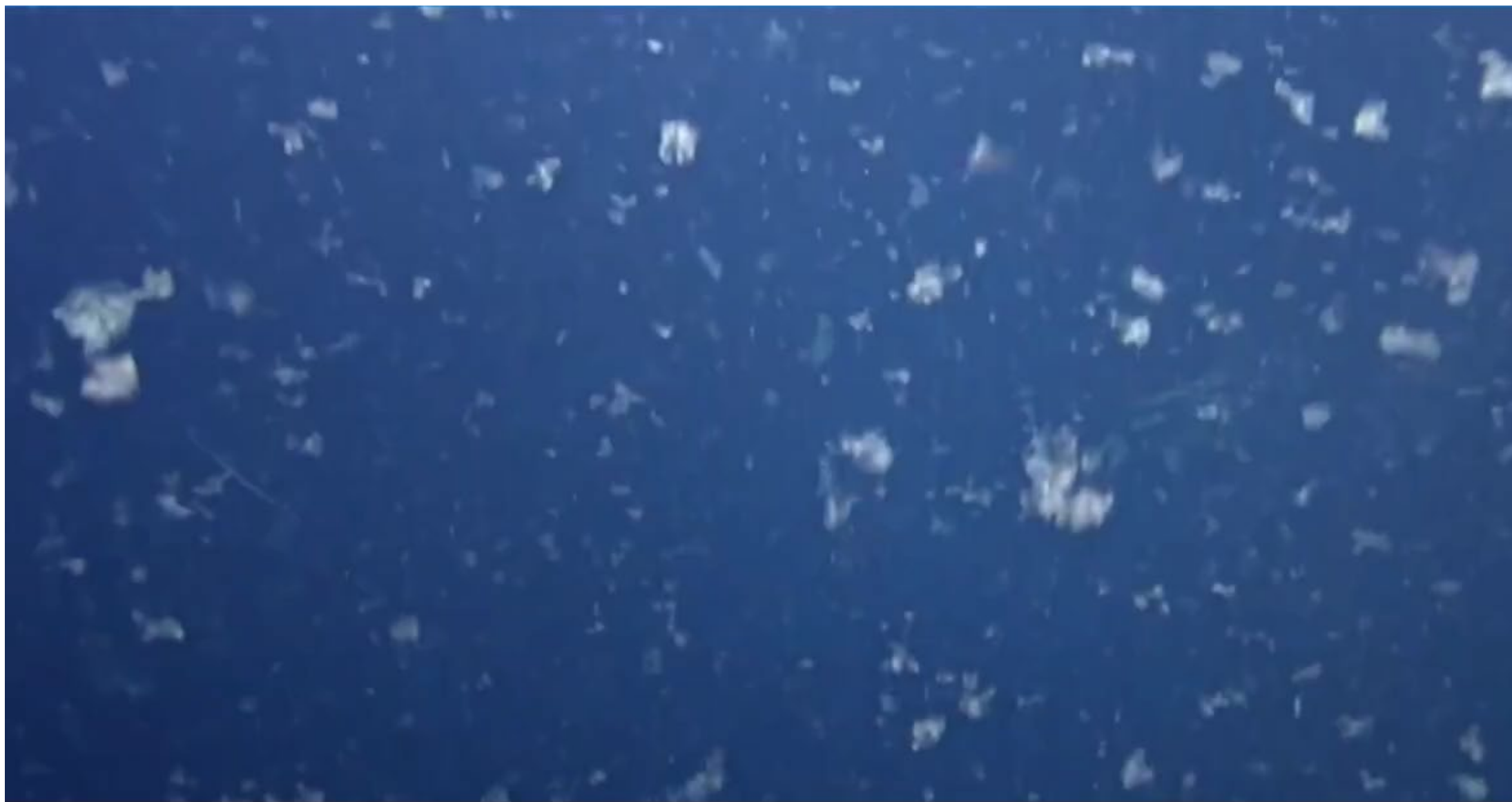
“暗域孪生”——

深海深空极端场景下的世界模型

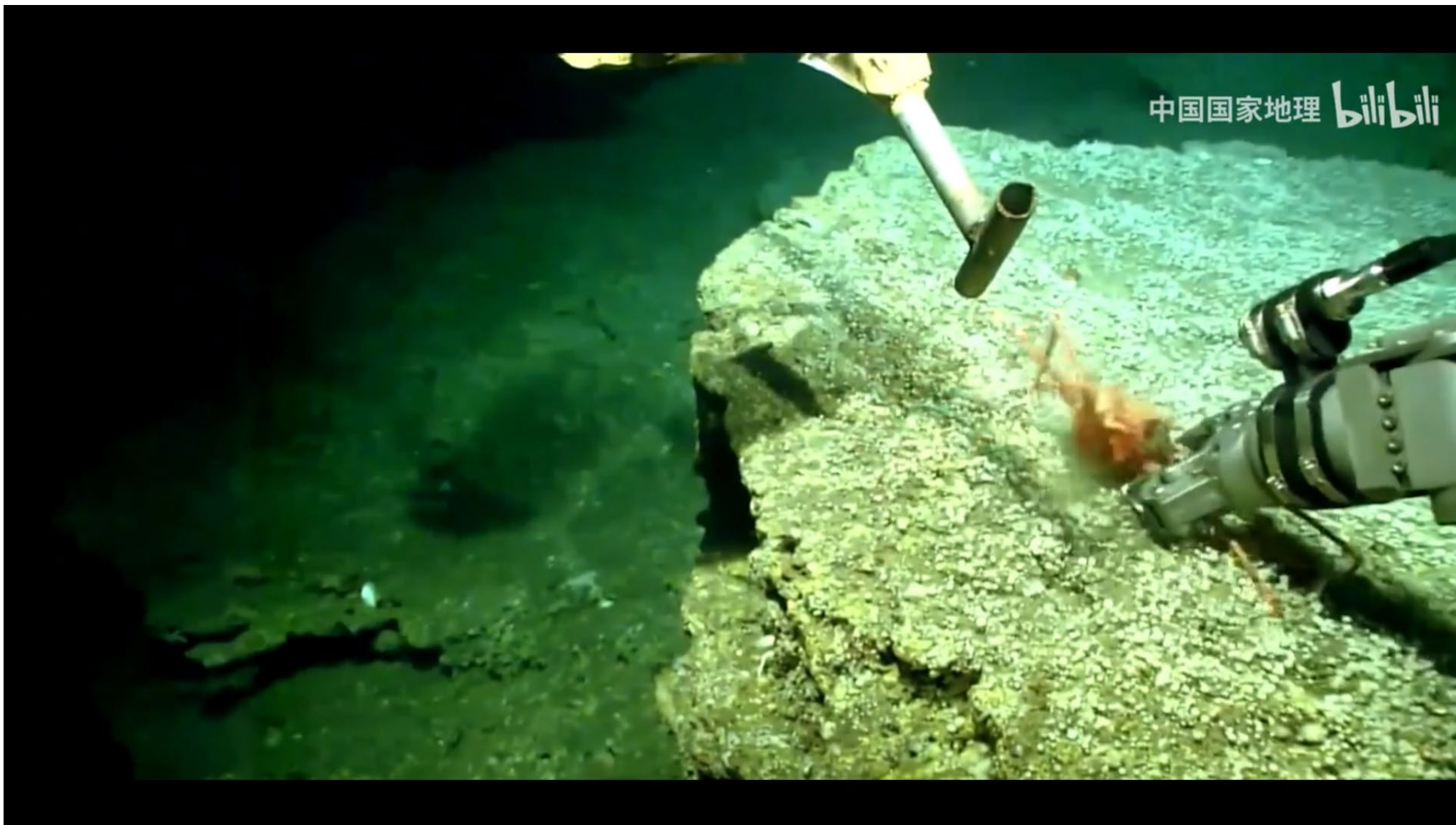
地球空间与极端智能系统组

小组成员（首字母排序）：张岸，张子澄，张涛，吴泰霖，
喻纯，宋晨明，杨定也，邵雷来，方楷楷

极端环境的诅咒1: **感知信号的衰弱与失灵**



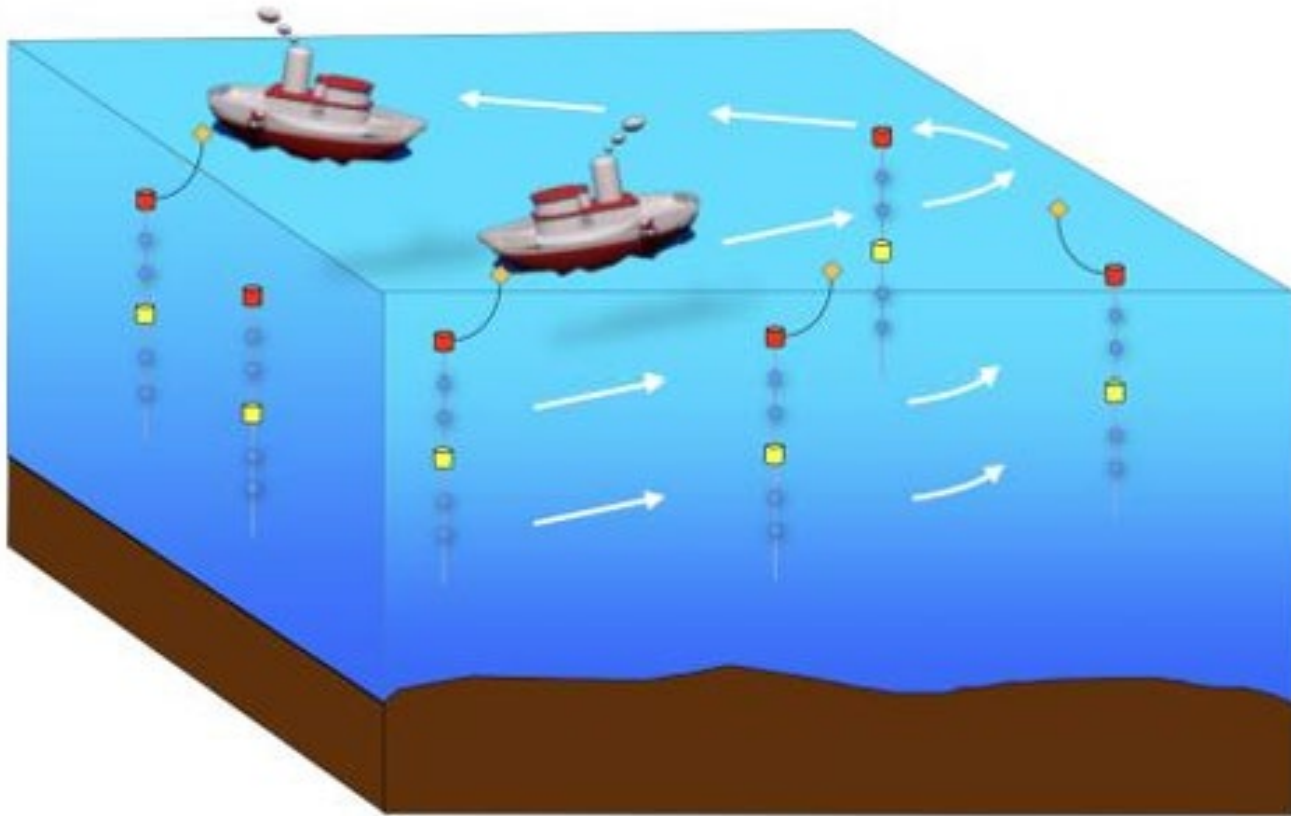
极端环境的诅咒2：异质物理规律耦合下行动的扭曲



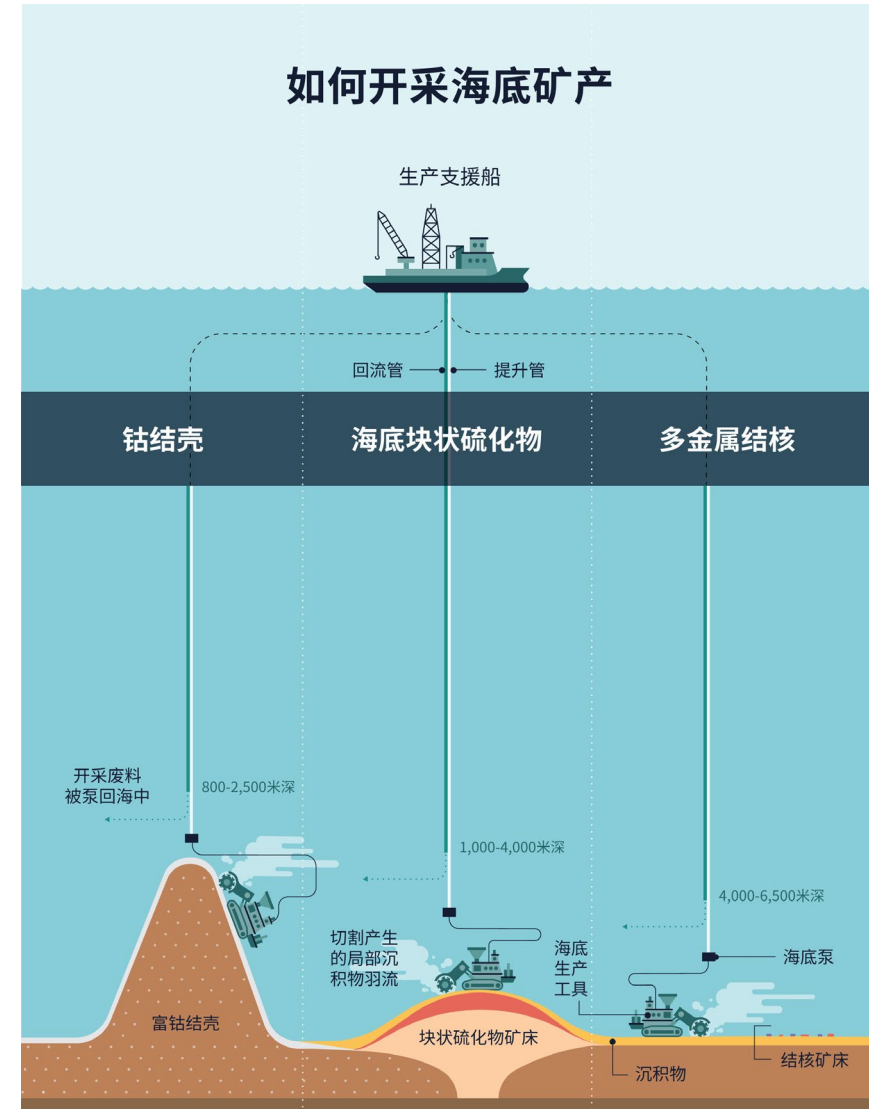
极端环境的诅咒3: 数据稀缺与不可达

探测: 点、线

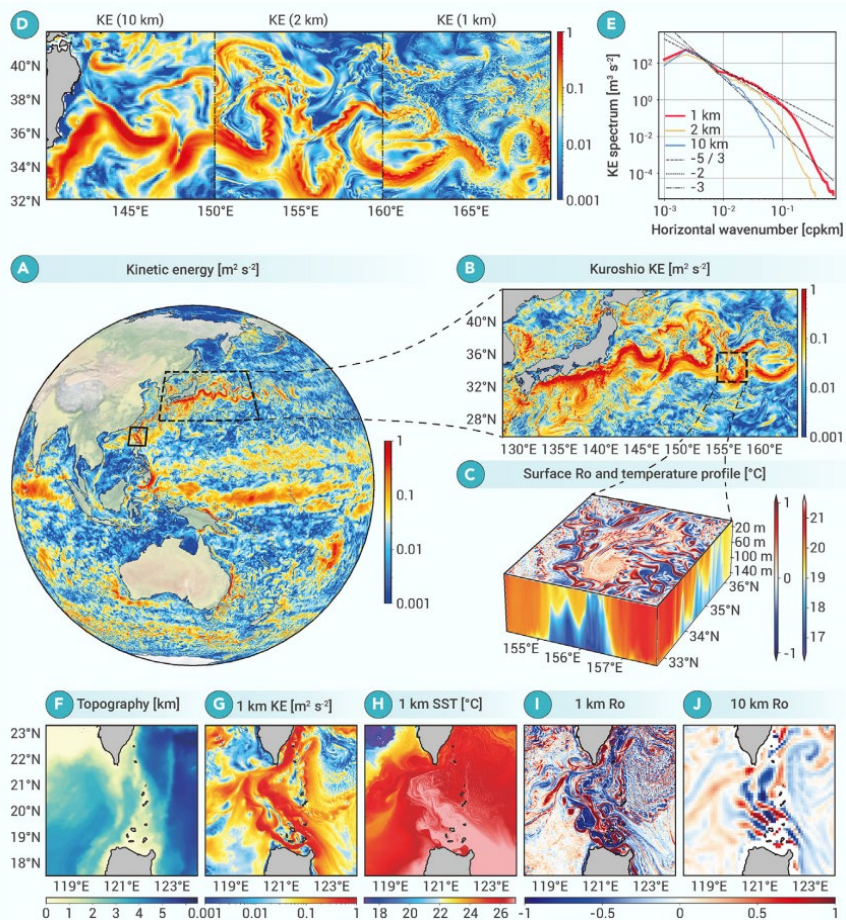
物理场: 面、体!



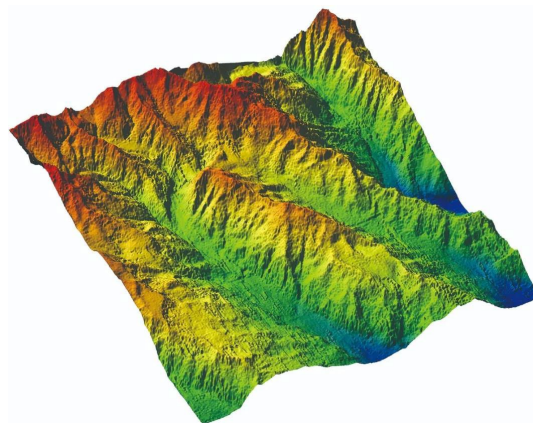
如何开采海底矿产



现有工作：集中在数值预报，单尺度、单介质物理场预报



1. 传统海洋模型主要集中在浅海区，而深海的物理过程更为复杂。比如深海的水体交换、海底地形对水流的影响、海底沉积物的运动等因素，传统的模型无法充分涵盖。
2. 更高水平分辨率（10m-100m）的全球海洋模式，需要极高的计算成本
3. 传统手段的全球海底地形精细化探测至少需要 **300**年。



崂山实验室 LICOMK++ 1公里 全球海洋模式

38366250 sunway cores, 1自然天模拟1模拟年

极端场景的挑战：感知建模已经困难重重！



- 由美国能源部发起，旨在通过人工智能与高性能计算提升地球系统模型的可预测性。
- 该计划整合观测数据、现场实验与数值模拟，利用 AI/ML 技术对多尺度过程进行加速模拟与参数化改进。



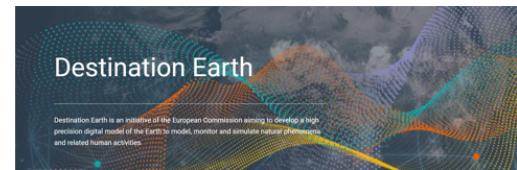
- E3SM模式计划预计在2027年，在发布传统数值模式 E3SMv4 的基础上，同时推出基于 E3SMv4 的代理模式，以及各分量（大气、海洋、陆地等）的独立代理模式。
- 重点关注季节至年代尺度（seasonal to decadal）的预测与预报能力。



- ESDT由美国国家航空航天局（NASA）地球科学技术进步计划支持，
- 计划通过融合高分辨率地球观测数据、先进的数值模式与人工智能算法，发展可交互、可预测、可更新的数字地球系统模型，实现对大气、海洋、陆地和冰冻圈等关键圈层过程的实时模拟与智能分析。



- 由美国NSF支持的哥伦比亚大学 LEAP 项目致力于将人工智能与物理建模深度融合，以提升气候系统预测能力。
- LEAP 利用多源观测数据和物理约束的机器学习代理模型，不仅改进了海洋过程参数化，也为高分辨率云微物理、海-气耦合及智能预报 Agent 构建提供了可借鉴的框架与技术路径。



- 由欧盟委员会牵头，计划致力于构建高精度“数字孪生地球”
- 涵盖“数字孪生海洋”子系统，深度融合公里级地球系统模式与人工智能技术，实现对海洋-大气耦合过程的近实时模拟。



- 由加州理工牵头旨在“从零”构建下一代地球系统模型。
- 该模型从设计之初便融合机器学习、数据同化、高分辨率模拟与传统物理模式，实现从小尺度物理过程到整个耦合系统的无缝集成。
- 在海洋模块中，不仅考虑大尺度环流，还特别强调小尺度湍流与海面边界层混合，这对海-气热通量、水汽通量等关键交换过程至关重要

We Target to Higher !

高精度、多物理仿真 -> 可交互的世界模型

Beyond 视觉!

包含不可见的物理世界!!

对一个以“**物理世界观测信号**”为对象的AI模型，都需要解决的两个核心问题：

数据特质

稀疏

高维

连续

带噪

表征学习

场景要求

物理约束

高鲁棒性

表征能力

可泛化性

建模范式

“环境-具身”：极端环境可迁移智能的关键技术
→ 需要物理先验及生成式环境建模

基于高斯泼溅、隐式神经场的世界模型技术

世界模型提供结构化的动态预测能力
关键能力：

- 短期预测误差 $< 1.5\%$ / step (模型内部奖励的误差项)
- 长期预测累计漂移降低 40–60% (相比非生成式模型)
- 支持 数秒 ~ 数分钟 的动态模拟 (任务尺度可控)



生成式环境建模示意图

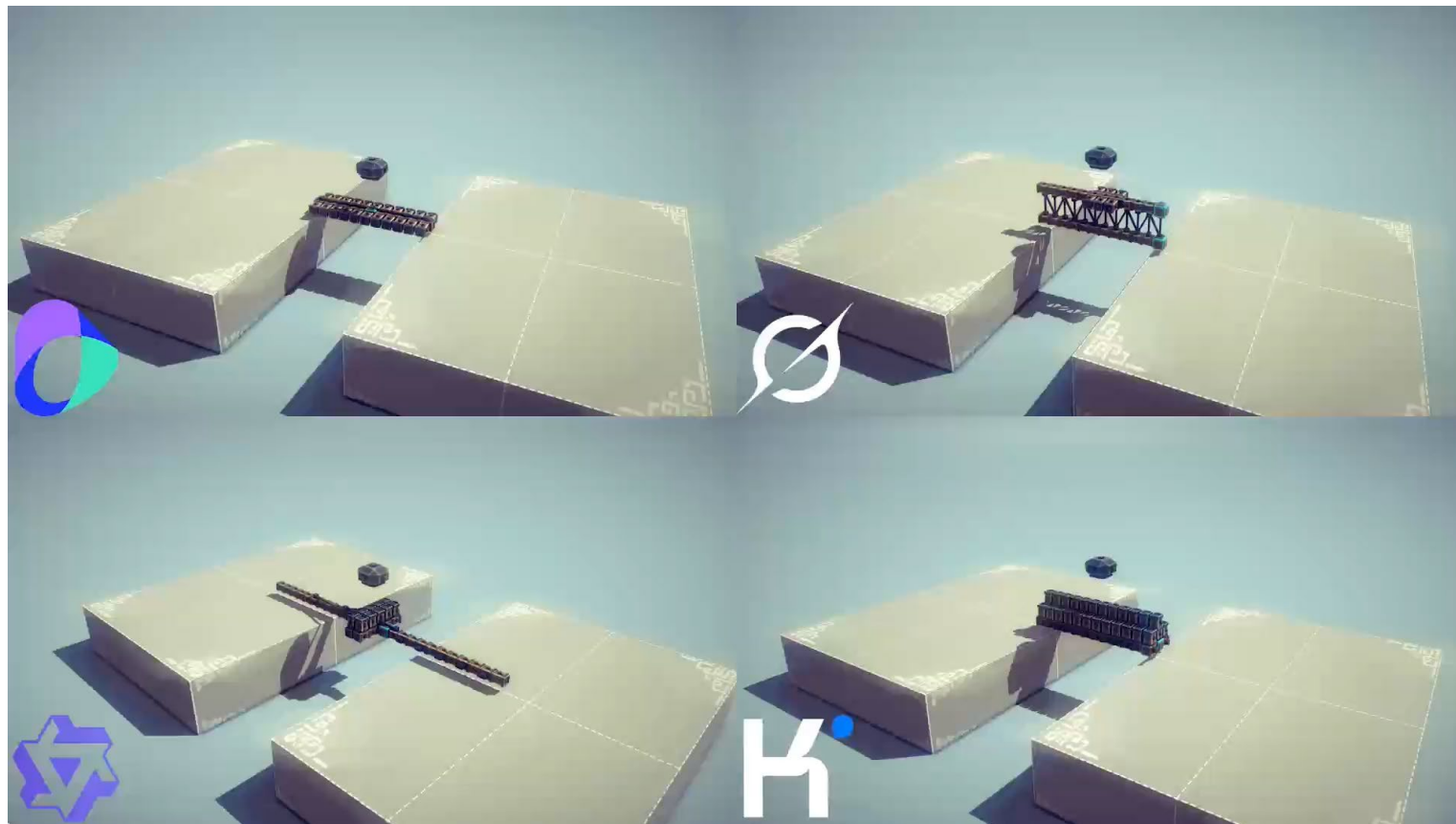
“具身-环境”：从“观察世界”到“与世界耦合”交互
→具身对极端环境的物理反馈建模 洋流、高温、高压

单物理场/多物理场耦合具身Agent

物理场具身Agent

关键能力：

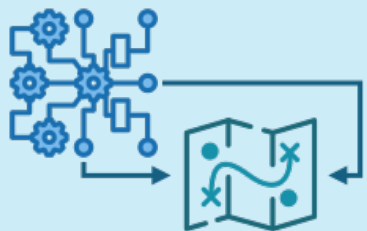
- **动力学一致性误差 $< 3\%$ / step**
保持在单一物理规律下的稳定运动预测
- **多场耦合预测误差降低 35-50%**
包括力-摩擦、力-材料形变、热-材料性能变化等典型耦合场景。
- **稳定支持 0.5-5 秒的高耦合动态推演**
足以覆盖极端环境下诸如开采矿石、抓取物体等复杂任务。



智能体的物理反馈示意图

稀疏数据
低信噪比数据
低分辨率数据

极端环境建模



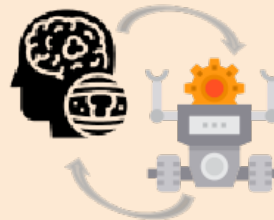
🎯 环境侧突破

特定场景的
深海深空世界模型

全覆盖全尺度的
深海深空世界模型

多模态数据模拟
物理感知扭曲

具身感知模拟



🎯 具身侧突破

单物理场
具身智能

多物理场耦合
具身智能

环境对具身影响

高保真耦合交互

物理环境反馈

50年愿景- 极端世界模型-让暗域变透明!



Thanks!