

月の水資源探査と天文学・素粒子物理学 の研究を連携させる MoMoTarO 計画

資源探査 x 月面天文学 x 素粒子物理学
MoMoTarO プロジェクト



榎戸輝揚 (京都大学・理化学研究所)

榎戸輝揚, 辻直希 (京大), 中澤知洋 (名大), 木坂将大, 高橋弘充 (広大), 仏坂健太 (東大), Ethan van Woerkom (University of Amsterdam), 森本健志 (近大), 吉浦伸太郎, 本間希樹 (NAOJ), 長岡央, 谷口絢太郎, 高梨宇宙, 大竹淑恵, 若林泰生, 岩本ちひろ, 加藤陽, 玉川徹 (理研), 晴山慎 (聖マリアンナ医科大), 小林泰三 (立命館), 池永太一, 中野雄貴, 塚本雄士 (SRE), 草野広樹 (QST), 尾崎直哉, 星野健, 上野宗孝 (JAXA), 他 MoMoTarO チーム

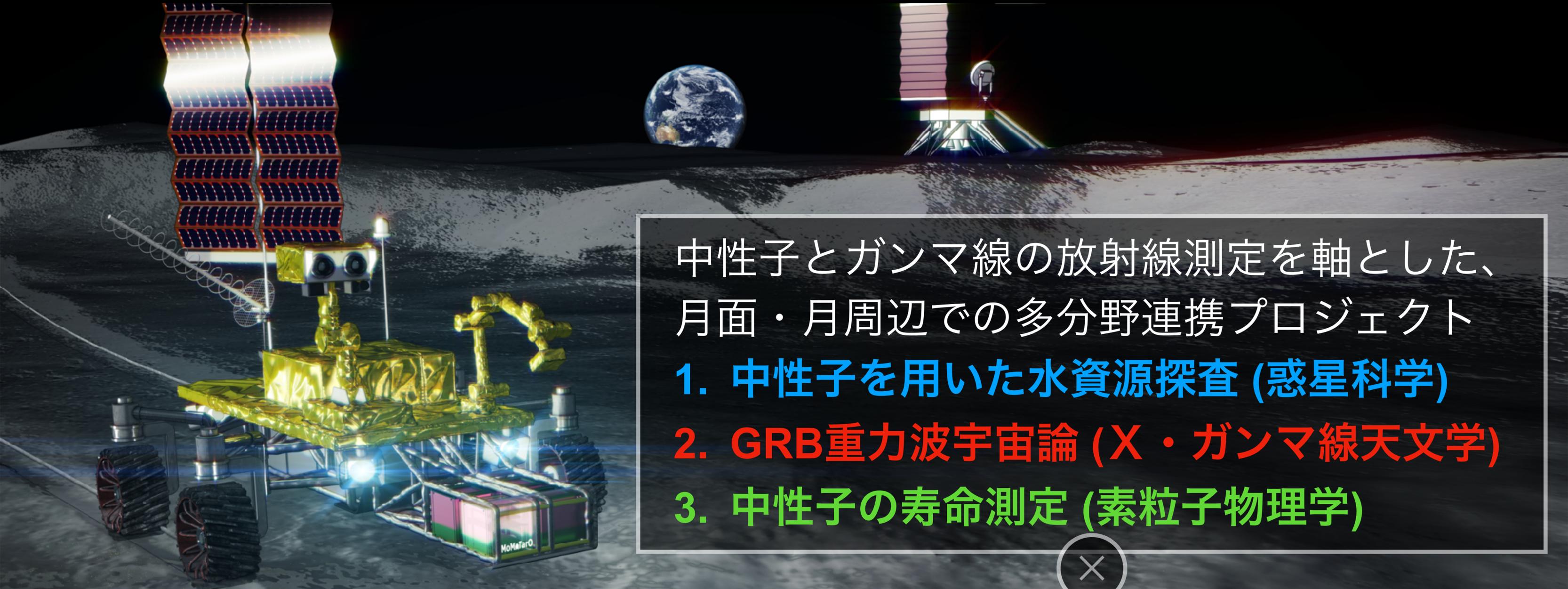
Earthrise (地球の出)

1968年にアポロ8号の宇宙飛行士ウィリアム・アンダーズが撮影。
史上最も影響力を持った写真とも。



- サイエンスから見た月の利点
 - 大気がなく人工電波ノイズが弱い → 理想的な低周波電波の観測
 - 月表面は中性子源 → 月面ローバーで水資源探査に活用できる
 - 月は地球から遠い (1.3光秒) → ガンマ線バーストで宇宙論に貢献
 - 地球より自転が遅い (27日) → 同一天域を長期モニタリング
- **高エネルギー天文学(宇宙論・時間軸天文学) や素粒子物理も可能!**

MoMoTarO (Moon Moisture Targeting Observatory)



中性子とガンマ線の放射線測定を軸とした、
月面・月周辺での多分野連携プロジェクト

1. 中性子を用いた水資源探査 (惑星科学)
2. GRB重力波宇宙論 (X・ガンマ線天文学)
3. 中性子の寿命測定 (素粒子物理学)



低周波電波天文 (~10-100 MHz)+アスカリアン効果で宇宙線測定

宇宙放射線の測定で「月の水資源」を見つけたい！

月面ローバー

銀河宇宙線
(陽子、ヘリウム)

銀河宇宙線が月に衝突した際の核反応で生じる中性子を用いて非接触で水資源を探し出す。

熱・熱外中性子

高速中性子

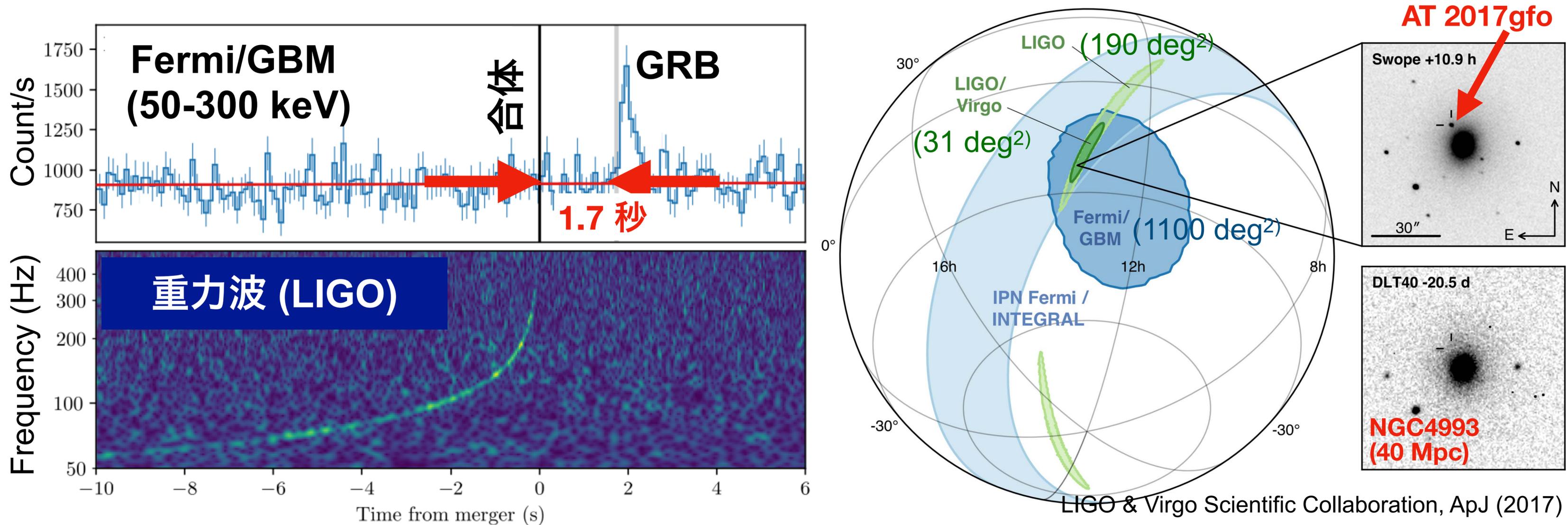
ガンマ線

水資源

核反応

中性子捕獲

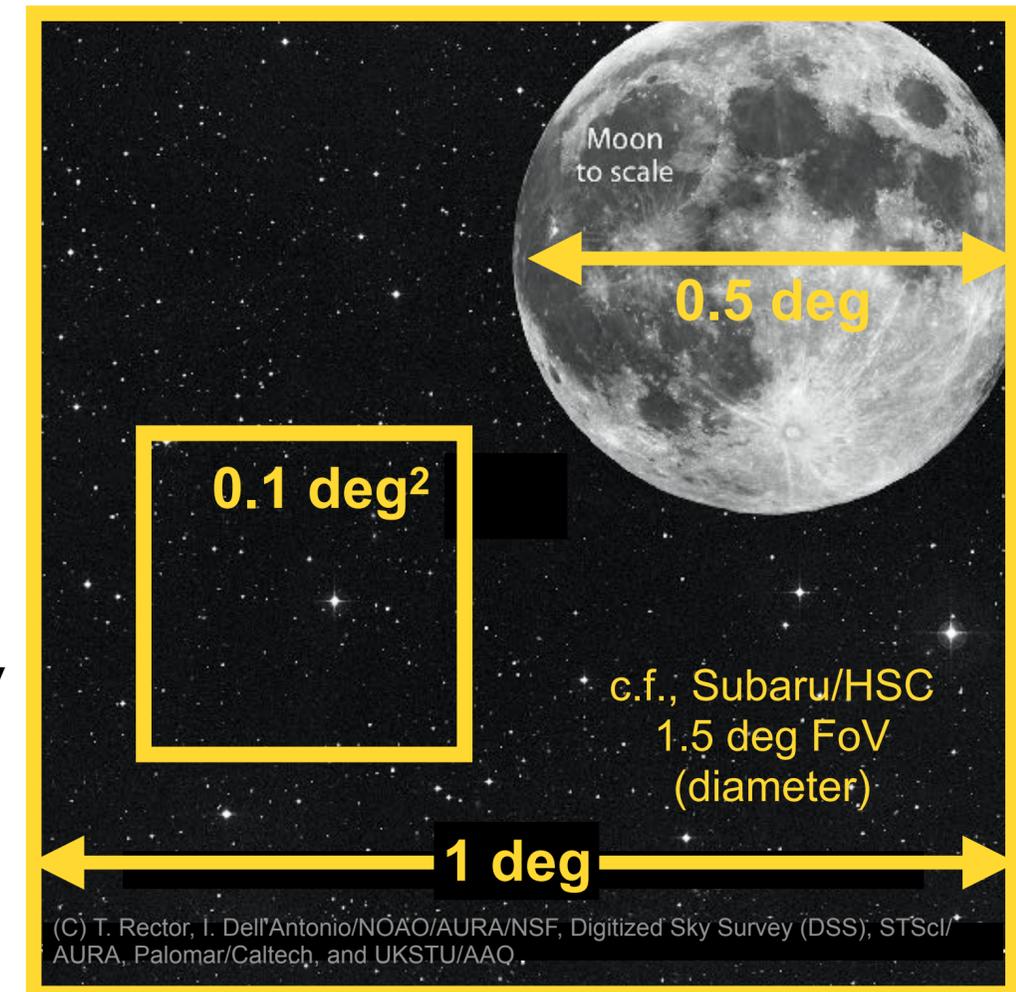
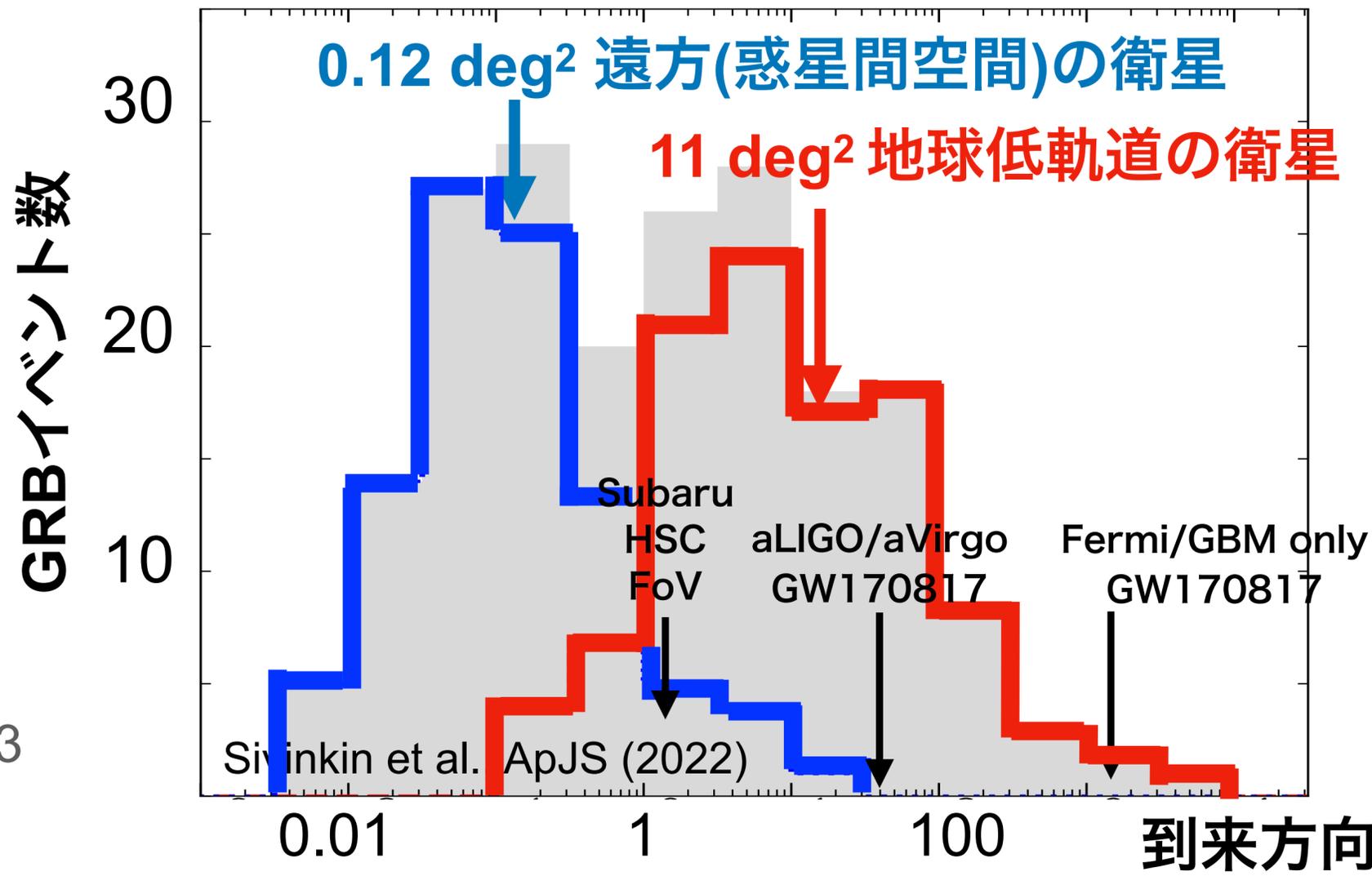
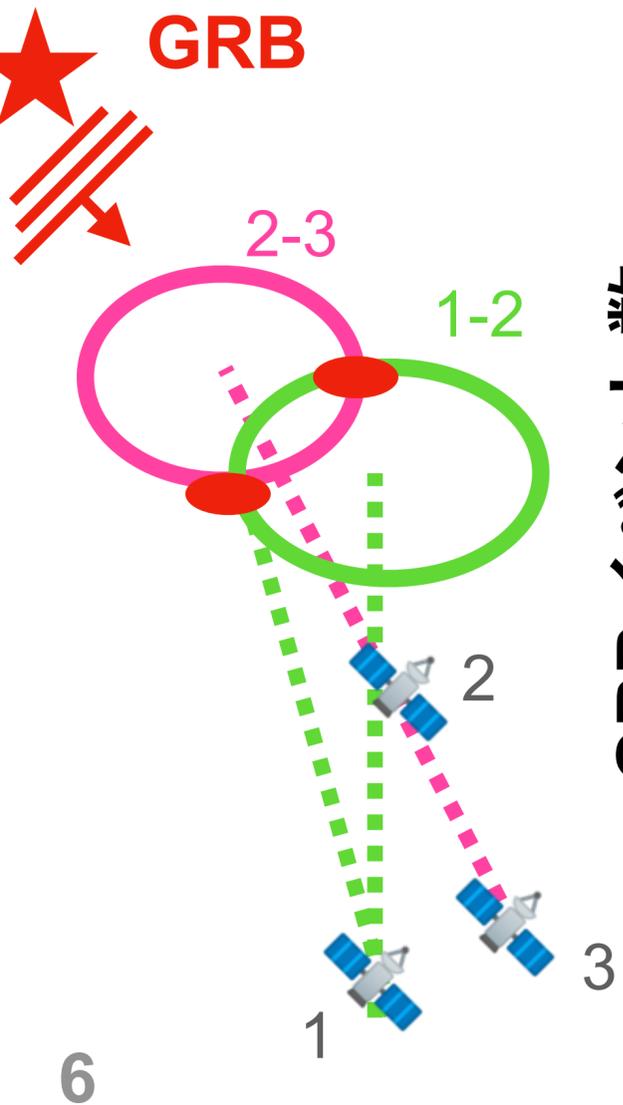
連星中性子星の重力波とガンマ線バースト観測



- 連星中性子星の合体 GW170817—重力波から1.7秒後にガンマ線バースト到来
11時間後、rプロセス元素の放射性崩壊で輝くキロノバが同定。
- 可視光対応天体の同定では、ガンマ線バーストで到来方向の測定が重要
LIGO/Virgo では 31 deg²、Fermi/GBM では 1100 deg² の制限。

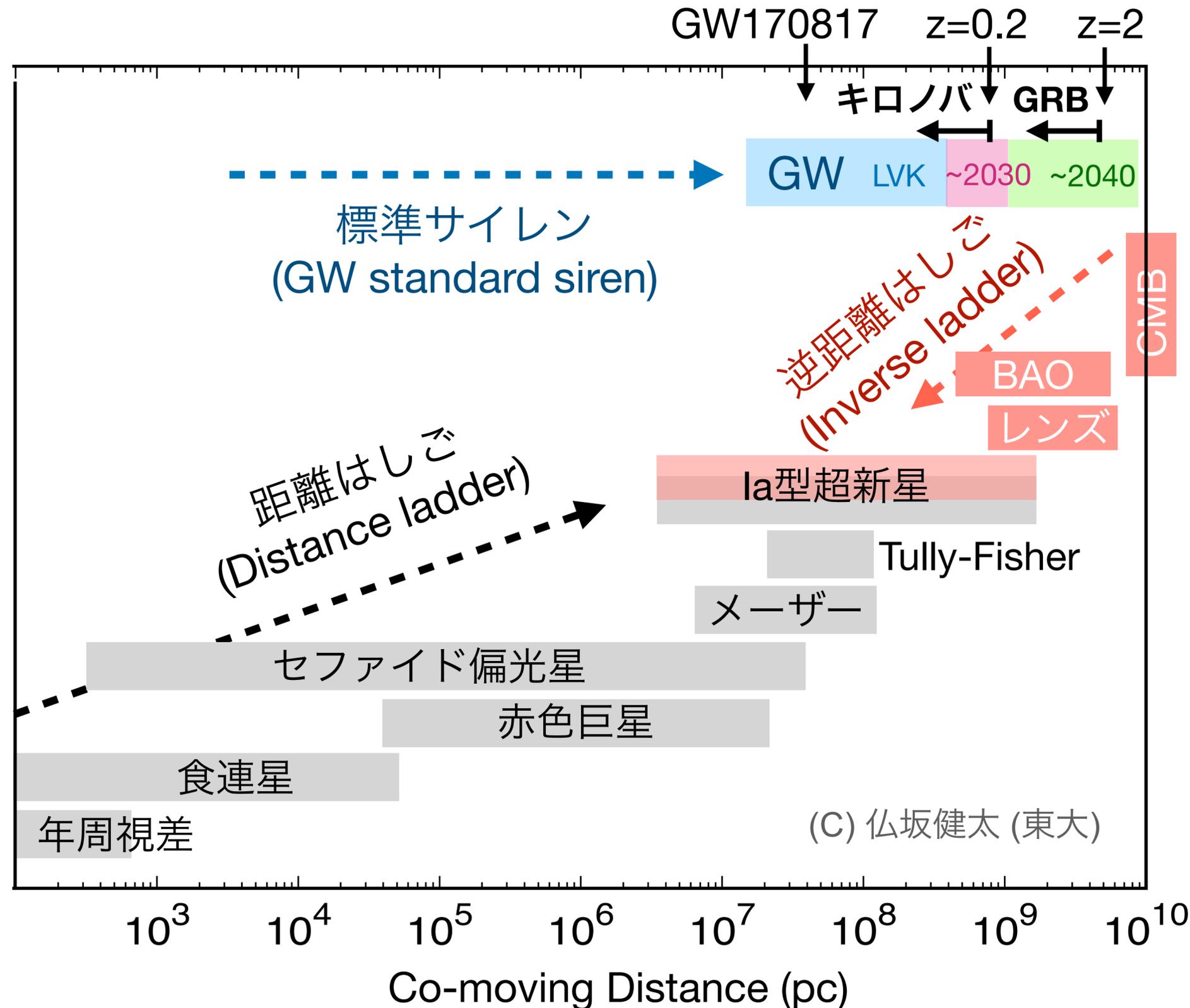
惑星間空間での GRB 検出は到来方向の決定に有効！

- 3 個以上の衛星間の到来時間差による「三角測量」で方向決定
- Inter Planetary Network (IPN, 1994年以降)で数百個の GRB で方向決定
- 遠方の衛星で全天カバーし 0.1 deg^2 を達成 → 地上の可視光望遠鏡 FoV



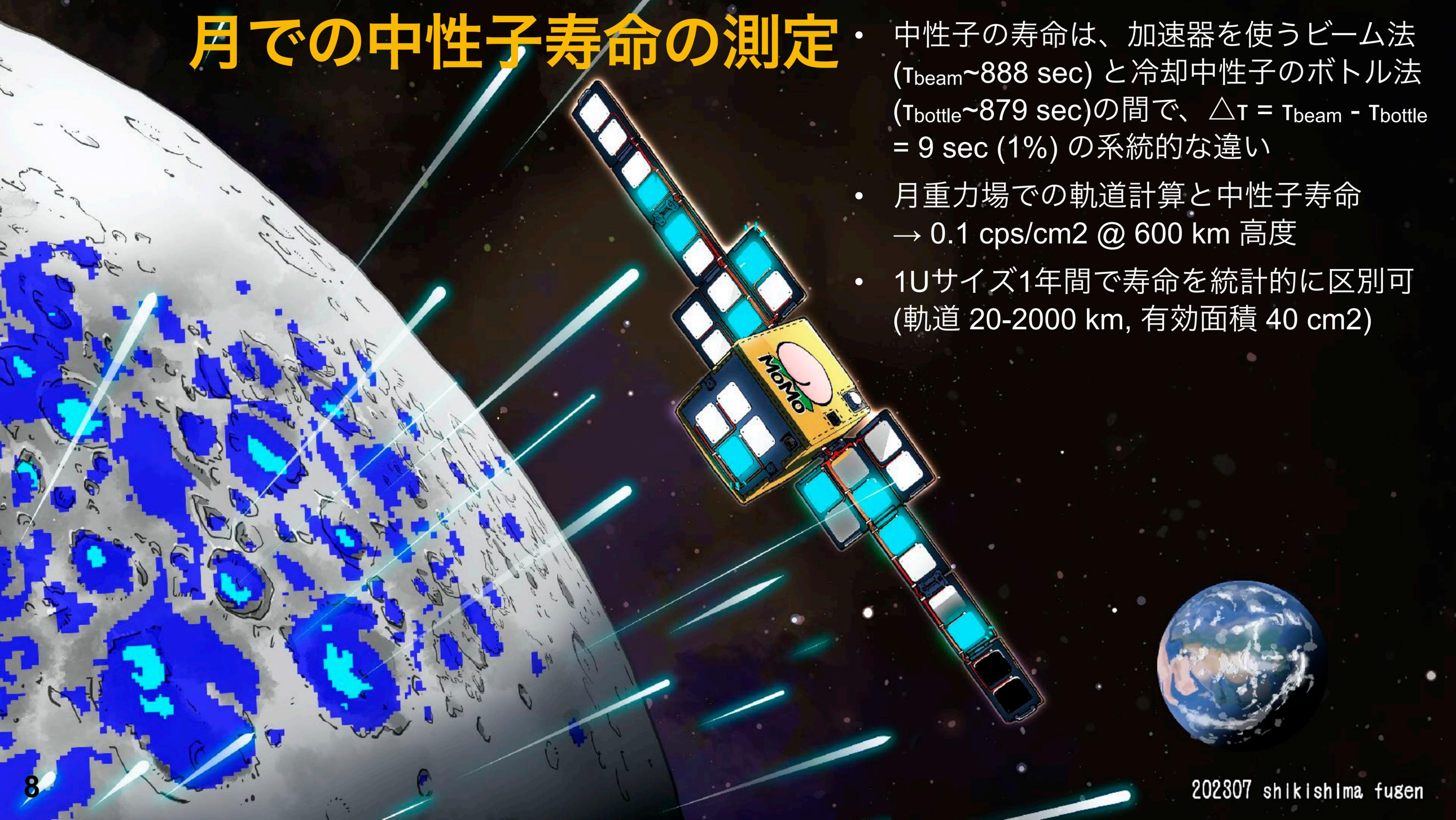
ガンマ線バースト観測は重力波宇宙論へ貢献できる

- 重力波宇宙論 (宇宙膨張史)
- 重力波 → 光度距離
- 可視光対応天体 → 赤方偏移
- ガンマ線バーストによる即時の位置測定が両者を繋ぐ鍵!**
- 従来の「距離はしご」と独立な測定法で、不定性を軽減
- ハッブル定数 (Hubble tension 問題) やダークエネルギーに関する宇宙論パラメータ測定
- Hiz-GUNDAM の赤外線望遠鏡の視野(20'平方)での観測計画をサポートできる可能性も。



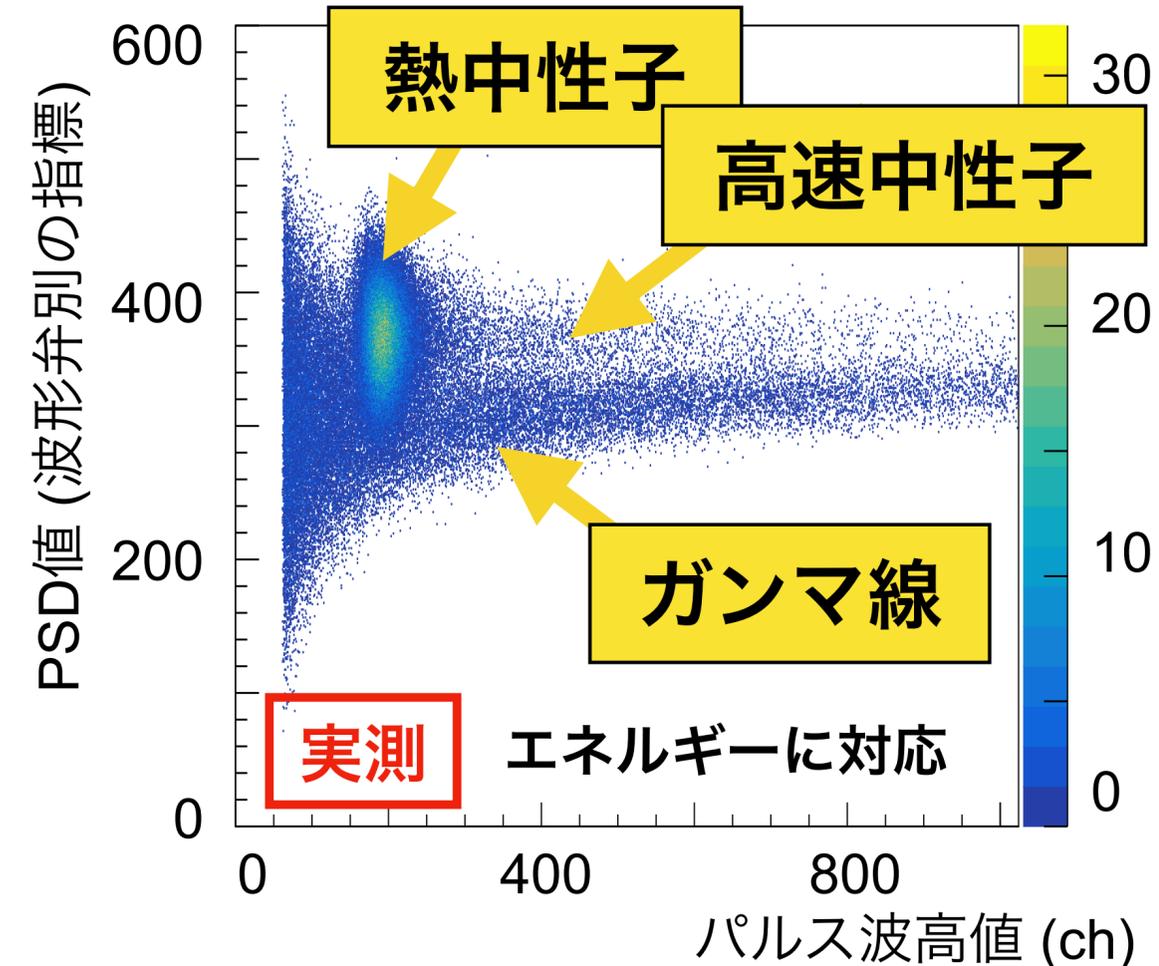
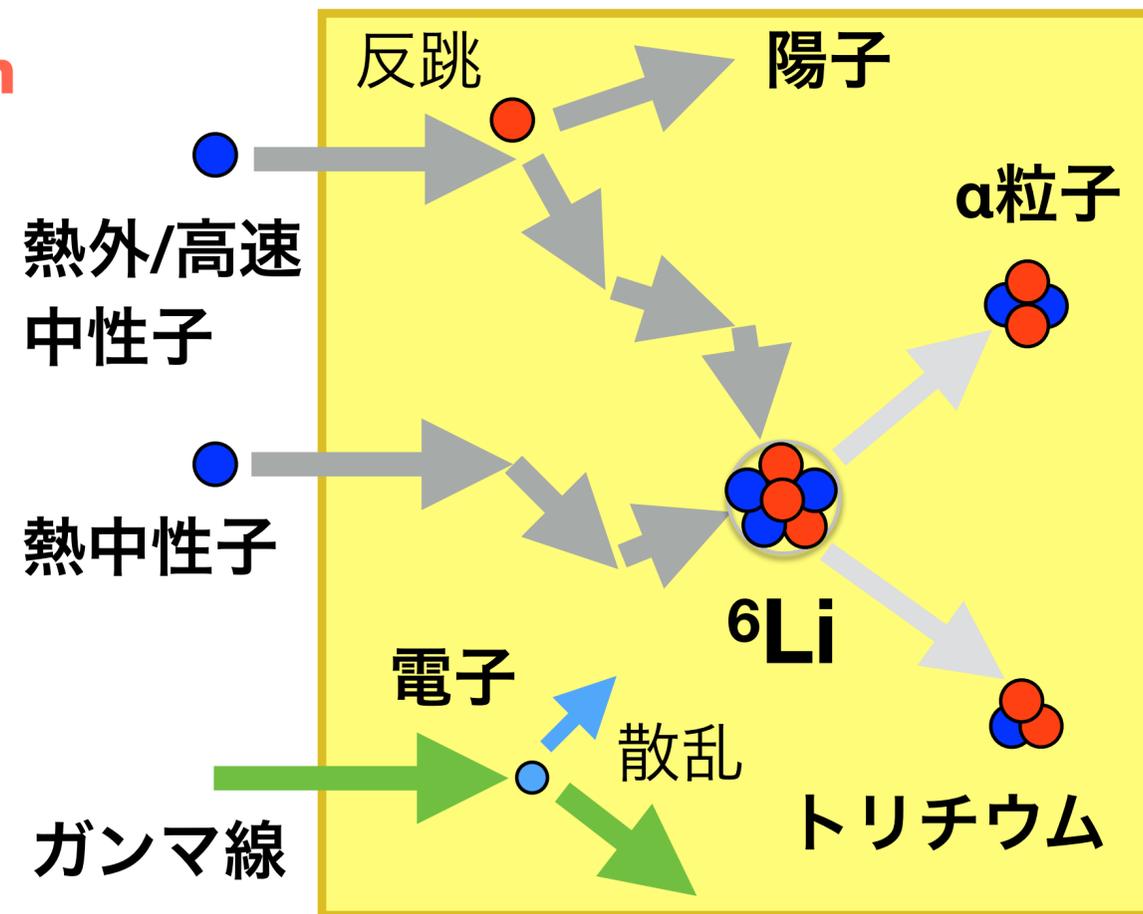
月での中性子寿命の測定

- 中性子の寿命は、加速器を使うビーム法 ($T_{\text{beam}} \sim 888 \text{ sec}$) と冷却中性子のボトル法 ($T_{\text{bottle}} \sim 879 \text{ sec}$) の間で、 $\Delta T = T_{\text{beam}} - T_{\text{bottle}} = 9 \text{ sec}$ (1%) の系統的な違い
- 月重力場での軌道計算と中性子寿命
→ 0.1 cps/cm² @ 600 km 高度
- 1Uサイズ1年間で寿命を統計的に区別可
(軌道 20-2000 km, 有効面積 40 cm²)



中性子・ガンマ線モニタ 第一世代 MoMoTarO

- キューブサット1Uサイズの放射線モニタをモジュール化し、スケラブルに拡張
- 中性子とガンマ線をパルス波形弁別できるシンチレータ + SiPM 光検出器を採用
- 既存のヘリウムのガス検出器の手法に比べ、振動に強く、小型、低電圧、省電力
- さらに熱・熱外・高速中性子、ガンマ線を区別できる構成 → 高感度測定を実現
- 水資源探査に加え、深宇宙の方向からのガンマ線バーストなどの測定も可能

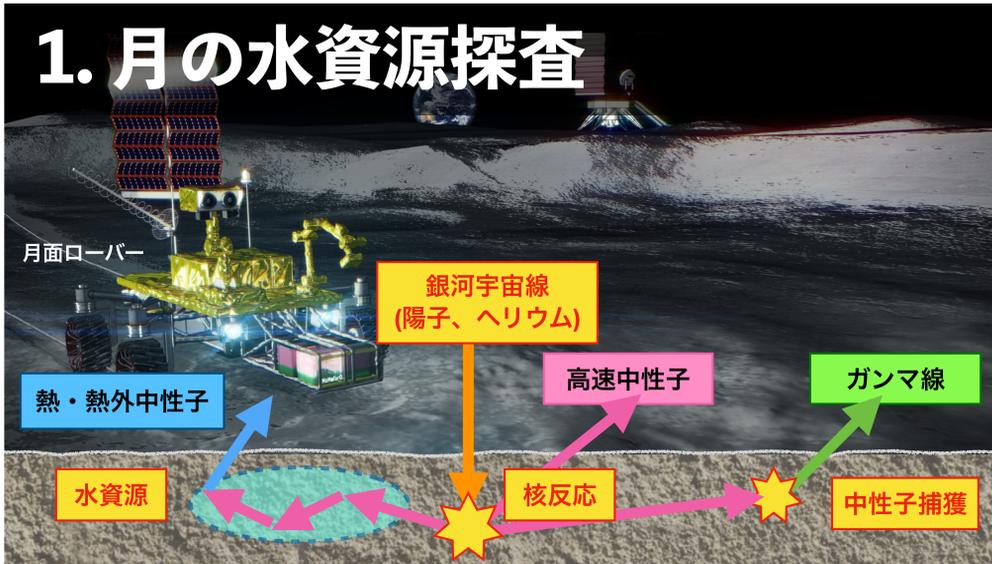


月の水資源探査と天文学・素粒子物理学の研究を連携させる MoMoTarO 計画

榎戸輝揚, 辻直希 (京大), 中澤知洋 (名大), 木坂将大, 高橋弘充 (広大), 仏坂健太 (東大), Ethan van Woerkom (University of Amsterdam), 森本健志 (近大), 吉浦伸太郎, 本間希樹 (NAOJ), 長岡央, 谷口絢太郎, 高梨宇宙, 大竹淑恵, 若林泰生, 岩本ちひろ, 加藤陽, 玉川徹 (理研), 晴山慎 (聖マリアンナ 医科大), 小林泰三 (立命館), 池永太一, 中野雄貴, 塚本雄士 (SRE), 草野広樹 (QST), 尾崎直哉, 星野 健, 上野宗孝 (JAXA), 他 MoMoTarO チーム

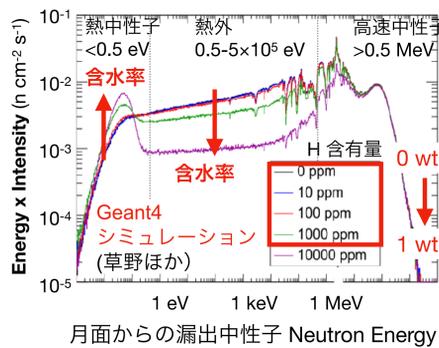
Moon Moisture Targeting Observatory (MoMoTarO) 計画は、アルテミス計画に代表される人類の月面探査の潮流を最大限活用し、月周辺での放射線測定を行う小型モジュールの開発を行い、(1) 銀河宇宙線による月の水資源探査、(2) 地球から離れた月面でのガンマ線バースト測定により到来方向を決定し重力波観測と連携して宇宙論に切り込み、(3) 月周回機での中性子寿命の測定を行う計画である。さらに、月面の低周波電波観測と時間軸天文学やアスカリアン効果での宇宙線測定で連携する。

1. 月の水資源探査



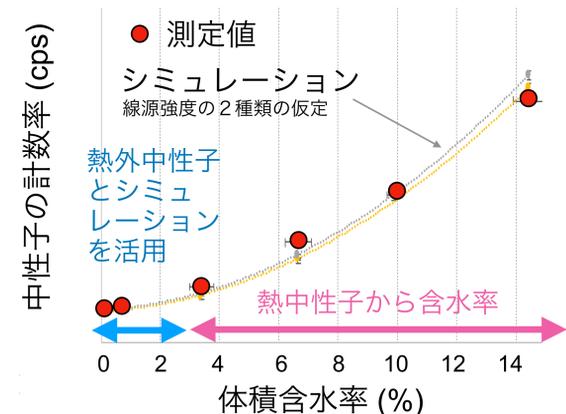
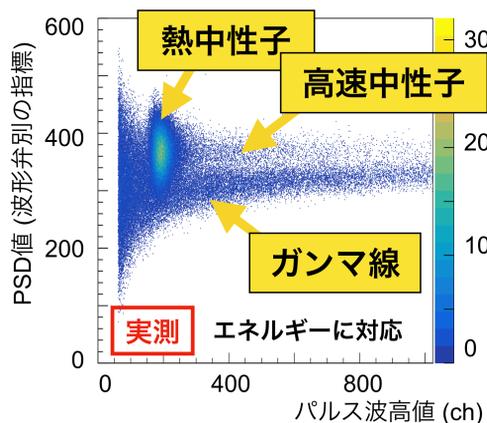
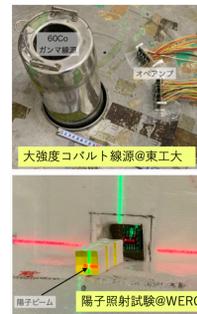
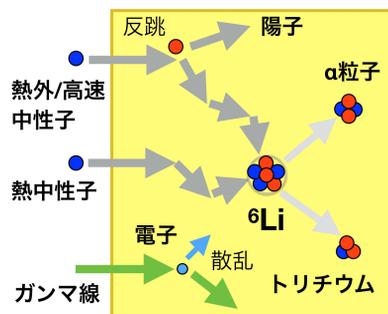
- ・ 月極域には永久影に水が濃集？水資源は月探査の鍵
- ・ サブ重量パーセントの水が表面から数十 cm 以内に存在？
- ・ 銀河宇宙線が月表面での核反応で発生する中性子が水(陽子)に散乱されて漏出する熱・熱外中性子を月面ローバーで測定することで、非接触で水資源を探索できる。

月面からの中性子の漏出スペクトルを Geant4 シミュレーションで再現、定量評価を可能に。熱、熱外、高速中性子を弁別して測定するのが鍵になる。

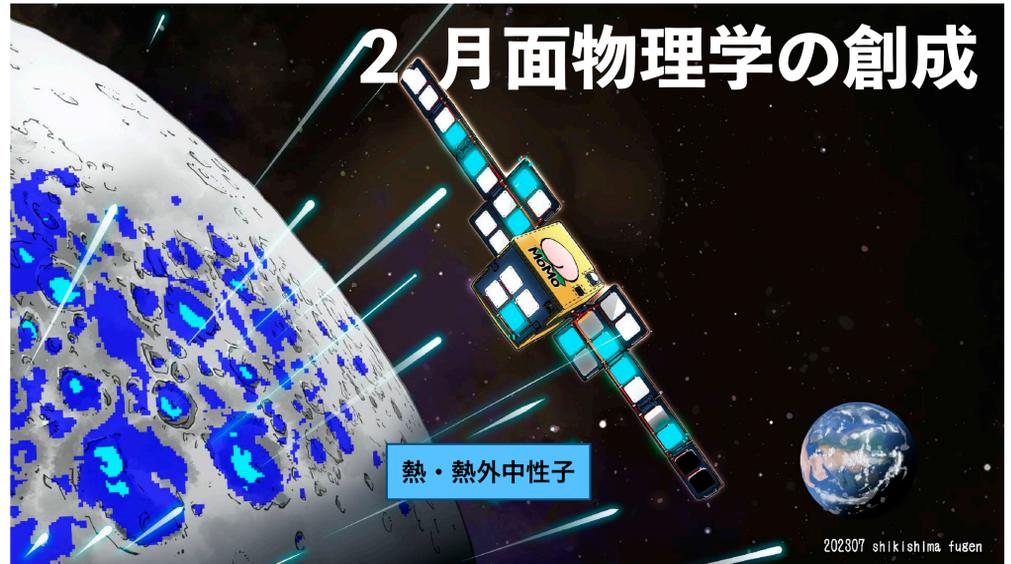


3. 検出器開発

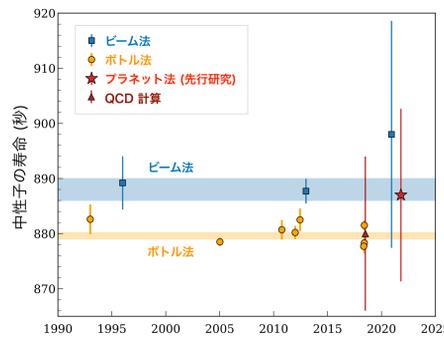
- ・ キューブサット1Uサイズの放射線モニタをモジュール化し、スケラブルに拡張
- ・ 中性子とガンマ線をパルス波形弁別できるシンチレータ + SiPM 光検出器を採用
- ・ 既存のヘリウムのガス検出器の手法に比べ、振動に強く、小型、低電圧、省電力
- ・ さらに熱・熱外・高速中性子、ガンマ線を区別できる構成 → 高感度測定を実現



2. 月面物理学の創成



- ・ 月周回機に搭載した MoMoTarO により、月表面からの熱中性子の高度プロファイル測定し、月表面からの漏出シミュレーションと比較して中性子の寿命を測定できる。
- ・ 地球から遠方でのガンマ線バーストの検出を、地球近傍の衛星での検出と組み合わせ、時刻差から到来方向を決める。重力波での中性子星連星合体のフォローアップに貢献。



中性子寿命は、加速器を使うビーム法 ($\tau_{\text{beam}} \sim 888 \text{ sec}$) と冷却中性子のボトル法 ($\tau_{\text{bottle}} \sim 879 \text{ sec}$) の間で、 $\Delta \tau = \tau_{\text{beam}} - \tau_{\text{bottle}} = 9 \text{ sec}$ (1%) の系統的な違い

4. 実証試験

- ・ 難しい極低含水率の月の模擬土壌(FJS1)の作成法を確立、2回の実証試験を実施
- ・ シミュレーションと熱中性子の実測は精度よく一致 → 理論モデルも活用可能に
- ・ 含水率 ~2 wt% 以上なら、熱中性子のみの計数からでも含水率を測定できる
- ・ 0.5 wt% (発見したい下限)へは、熱外中性子とシミュレーションも活用して実現