

火星衛星探査計画 MMX MEGANE 開発状況報告

小川 和律 (宇宙航空研究開発機構)

草野 広樹 (量子科学技術研究開発機構)

Morgan T. Burks (Lawrence Livermore National Laboratory)

Nancy L. Chabot (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

Michael J. Cully (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

John O. Goldsten (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

池田 人 (宇宙航空研究開発機構)

今田 高峰 (宇宙航空研究開発機構)

David J. Lawrence (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

Lauren A. Mehr (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

尾崎 正伸 (宇宙航空研究開発機構)

Patrick N. Peplowski (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

Brian C. Schratz (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

白井 寛裕 (宇宙航空研究開発機構)

Development Status of MEGANE for Martian Moons Exploration (MMX)

Kazunori Ogawa (Japan Aerospace Exploration Agency)

Hiroki Kusano (National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology)

Morgan T. Burks (Lawrence Livermore National Laboratory)

Nancy L. Chabot (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

Michael J. Cully (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

John O. Goldsten (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

Hitoshi Ikeda (Japan Aerospace Exploration Agency)

Takane Imada (Japan Aerospace Exploration Agency)

David J. Lawrence (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

Lauren A. Mehr (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

Masanobu Ozaki (Japan Aerospace Exploration Agency)

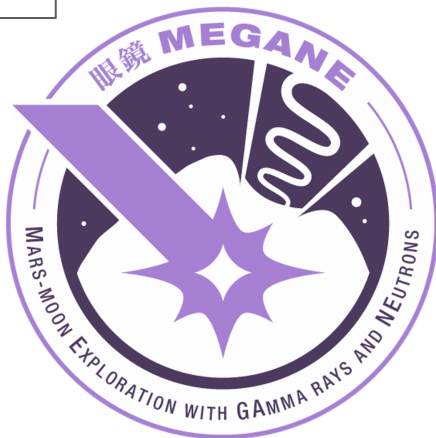
Patrick N. Peplowski (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

Brian C. Schratz (Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

Tomohiro Usui (Japan Aerospace Exploration Agency)

Abstract

This paper introduces the summary and development status of science instrument MEGANE (Mars-moon Exploration with GAMMA rays and NEutrons) for MMX (Martian Moons Exploration), the Japanese Phobos sample-return mission. In Phobos orbit, MEGANE can detect gamma-rays and neutrons generated from Phobos and determine the elemental composition of the ground surface, which is essential information for the science objectives of MMX. The MEGANE instrument is being developed by Applied Physics Laboratory, JHU, U.S., as part of international cooperation between JAXA and NASA.



火星衛星探査計画 MMX MEGANE 開発状況報告

Development Status of MEGANE for Martian Moons Exploration (MMX)

**Kazunori Ogawa¹, Hiroki Kusano², Morgan T. Burks³, Nancy L. Chabot⁴,
Michael J. Cully⁴, John O. Goldsten⁴, Hitoshi Ikeda¹, Takane Imada¹,
David J. Lawrence⁴, Lauren A. Mehr⁴, Masanobu Ozaki¹,
Patrick N. Peplowski⁴ Brian C. Schratz⁴, Tomohiro Usui¹**

1: Japan Aerospace Exploration Agency

2: National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

3: Lawrence Livermore National Laboratory

4: Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University

Mars-moon Exploration with **G**amma rays and **N**eutrons

- ガンマ線・中性子分光計
- Phobos から放射されるガンマ線と中性子を軌道上で観測することにより、地表面の元素組成を決定する。
- JAXA-NASA 間の国際協力の一環として、米国 Johns Hopkins University・Applied Physics Laboratory が中心となり開発を行なっている。
- 機器の多くの部分は NASA 月探査機 Lunar Prospector、水星探査機 MESSENGER 搭載のガンマ線・中性子分光計 GRNS (Gamma-Ray and Neutron Spectrometer) を継承・改良したもの。



リモートセンシングにおけるガンマ線

観測対象

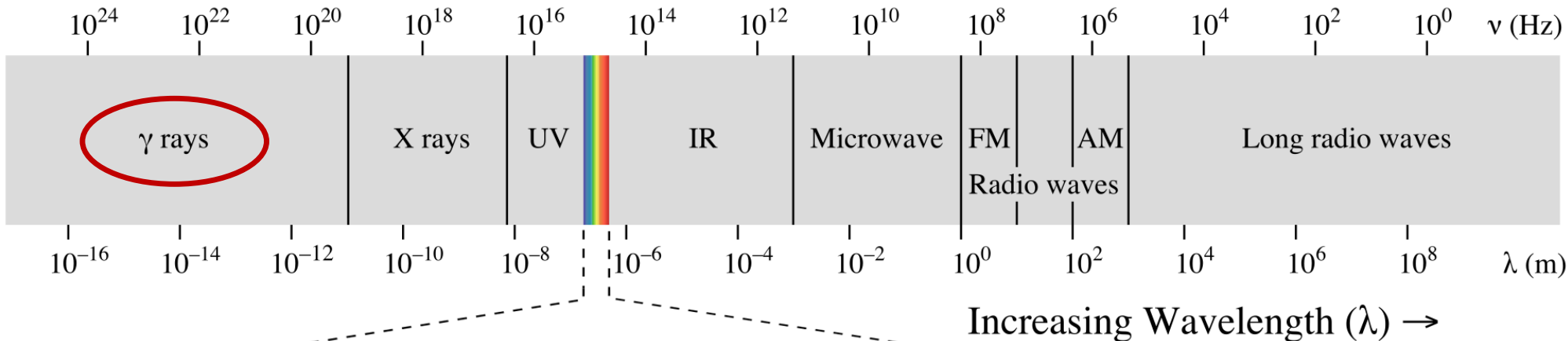
- 核種
- 元素組成
- 鉱物組成
- 温度
- 地下構造

対応スケール

原子核振動

軌道電子
電離
電子振動
原子振動
分子振動
格子振動

地層



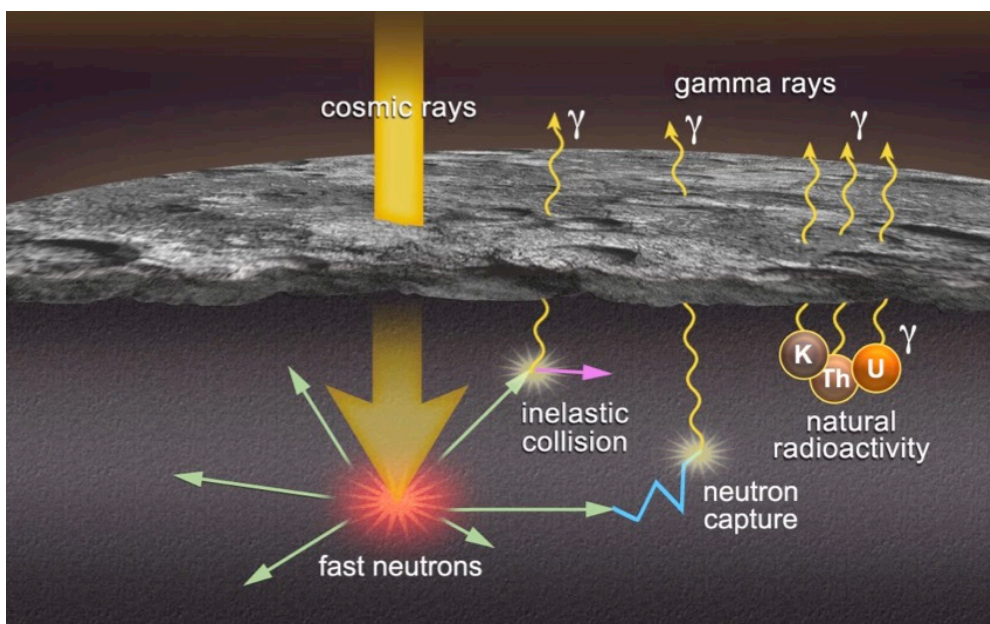
Visible spectrum



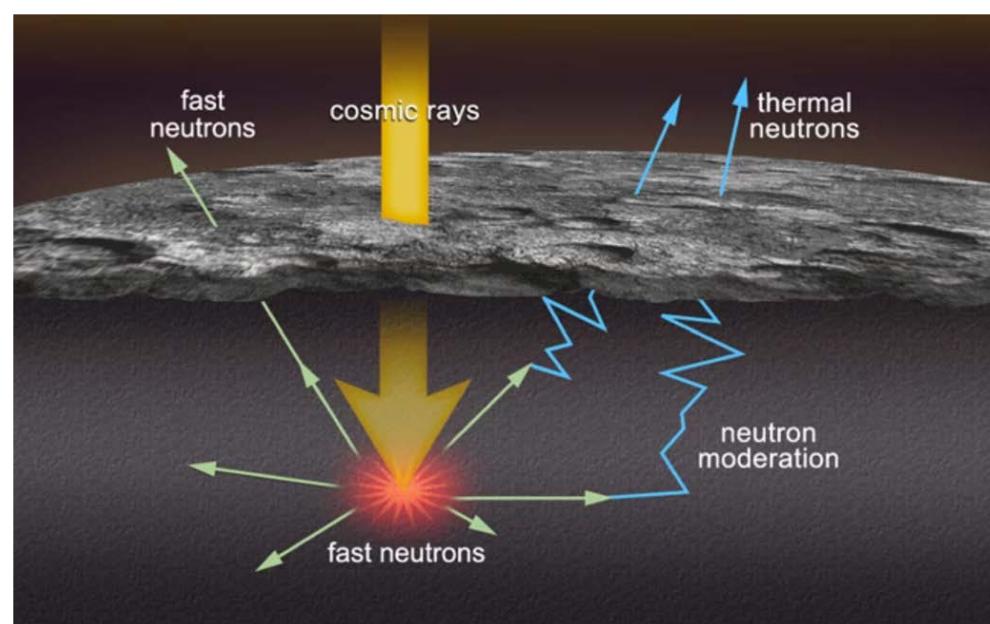
(Wikipedia)

- 主に銀河宇宙線との相互作用によりガンマ線・中性子を宇宙空間に放出する。
- 放射性同位体は崩壊によりガンマ線を放出する。
- これらは核種に固有のエネルギーを持つため、軌道上で観測・エネルギー分解することにより地表面の元素組成を決定できる (深さ ~ 数 10 cm まで)。
- 惑星探査では Apollo の時代から使われる歴史ある手法。

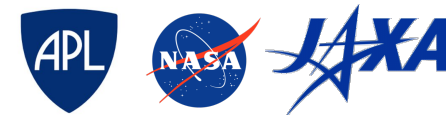
ガンマ線



中性子



MMX 科学目的への MEGANE の貢献



大目的1 火星衛星の起源を明らかにし、内外太陽系接続領域における惑星形成過程と物質輸送に制約を与える。

中目的1.1 Phobosの起源が小惑星捕獲なのか巨大衝突なのかを明らかにする。

MO1.1.1 Phobosを構成する物質の表層分布を採取地点の科学的評価と地質構造把握に必要な空間分解能で分光学的に明らかにし、Phobosの起源に制約を与える。

MO1.1.2 Phobos表面の回収試料から構成物質の主要成分を、形成時の記録を保持する衛星固有物質として同定し、その同位体比等から、その起源を強く制約する。

MO1.1.3 Phobos内部の氷の存在に関わる分子放出率や質量分布等の情報を取得し、またPhobos表層の密度コントラストの有無を調べ、Phobosの起源にMO1.1.1、MO1.1.2とは独立に制約を与える。

中目的1.2a 【Phobosが小惑星捕獲起源の場合】地球型惑星領域へ供給される始原物質の組成とその移動過程を解明し、火星表層進化の初期条件を制約する。

MO1.2a.1 太陽系始原物質の形成およびスノーライン周辺領域での始原天体形成環境に、物質科学的に制約を与えるとともに、Phobos捕獲過程を推定することで、初期太陽系での天体移動過程と火星表層進化の初期条件に制約を与える。

中目的1.2b 【Phobosが巨大衝突起源の場合】地球型惑星領域における巨大衝突と衛星形成過程を理解し、火星の初期進化過程に及ぼす影響を評価する。

MO1.2b.1 Phobosの衛星固有物質中に、巨大衝突で飛び散った原始火星成分（火星起源成分）と衝突天体起源成分を特定し、その特徴を明らかにするとともに、巨大衝突規模と年代を推定し、地球型惑星領域における天体移動と惑星形成過程に制約を与える。

中目的1.3 Deimosの起源に新たな制約を加える。

MO1.3.1 Deimosを構成する物質の表層分布を地質構造の把握に必要な空間分解能で分光学的に明らかにして、Phobosと対比する。

大目的2 火星衛星からの視点で、火星圏変遷の駆動メカニズムを明らかにし、火星圏進化史に新たな知見を加える。

中目的2.1 火星圏における衛星の表層進化の素過程に関する基本的描像を得る。

MO2.1.1 小惑星と比較して火星衛星に特有な表層レゴリス層の風化・進化過程（天体衝突頻度と攪拌の程度、並びに宇宙風化過程）を特定する。

中目的2.2 火星表層変遷史に新たな知見と制限を加える。

MO2.2.1 Phobos表面の回収試料中に、衛星形成後に火星から飛来した物質を探し、適切な試料が存在する場合には、それから火星表層の化学状態やその変遷に制約を与える。

MO2.2.2 火星史を通じた大気散逸量に、現在の散逸大気の組成比・同位体比から制約を与える。

中目的2.3 火星気候の変遷に関わる火星大気物質循環のメカニズムに制約を与える。

MO2.3.1 火星大気中および大気-地表間のダストと水の輸送過程にダストストームと水蒸気・雲の全球分布の時間変化から制約を与える。

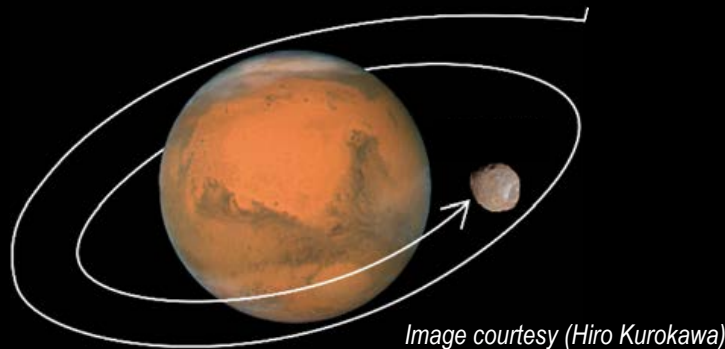
Phobos の起源



Phobos の表層進化

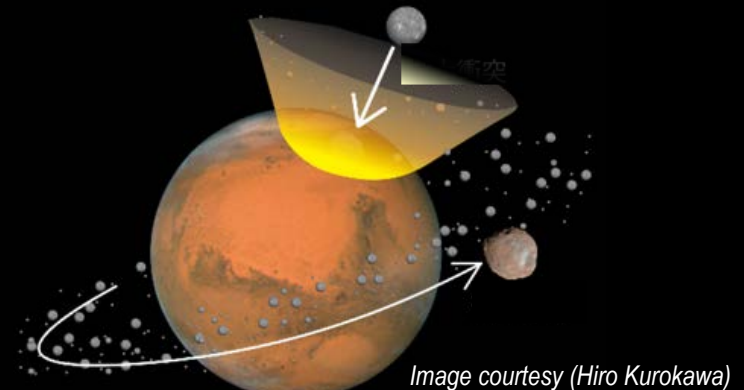
- 捕獲起源の場合は、D型もしくはC型小惑星が捕獲されたと思われる、コンドライト的な (始原的な) 元素組成が予想される。
- 衝突起源の場合は大部分が火星物質になり、エコンドライト的な (分化天体の) 元素組成、かつ揮発性元素の枯渇が予想される。
- 両者は主に Fe/Si · Fe/O · K/Th 比、Mg·Fe·H の存在度、熱外中性子と熱中性子の放射量比などから判定できる。

Capture of asteroid



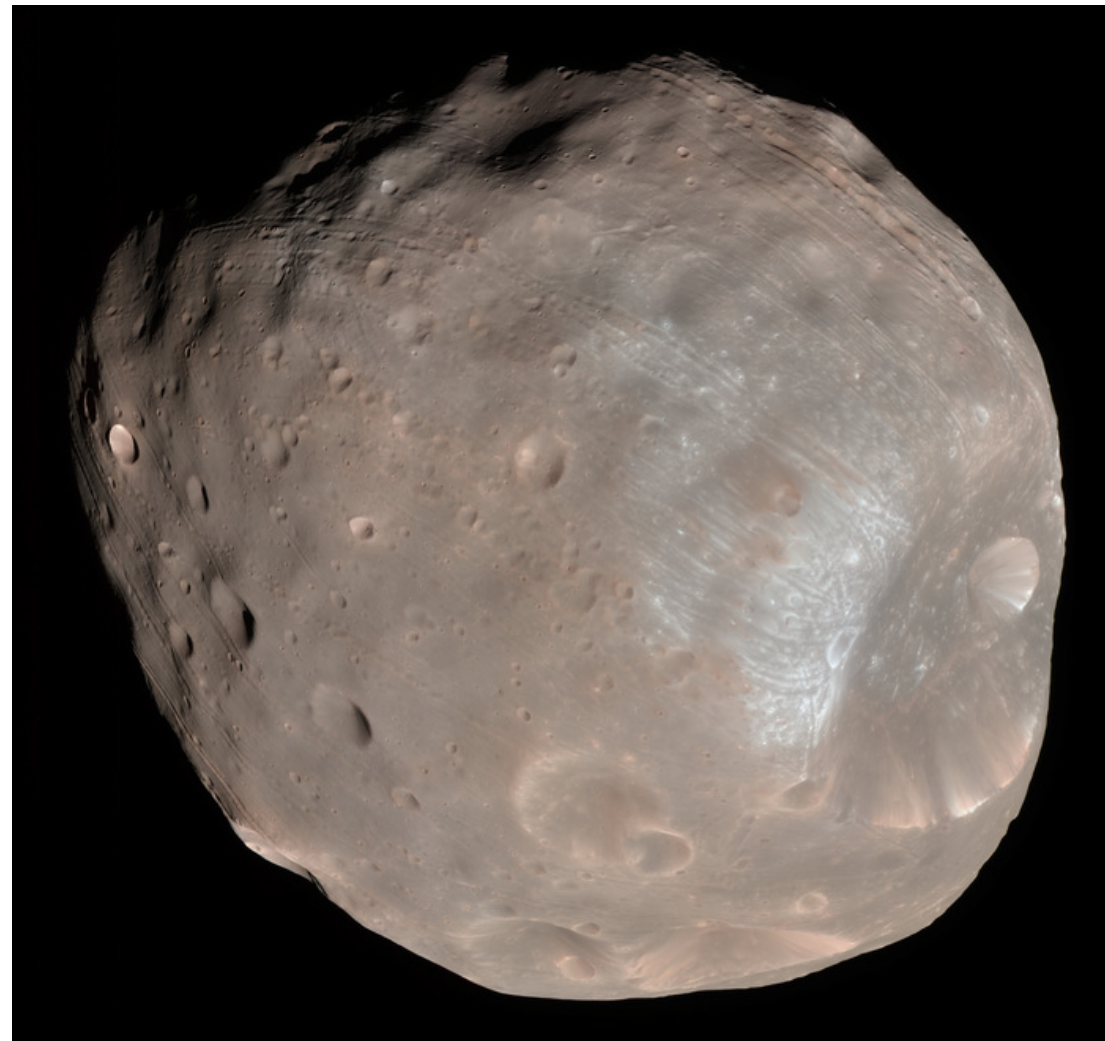
Consistent with D- or T-type IR spectra

in situ formation by an impact



Consistent with low eccentricity & inclination

- Phobos には赤外反射スペクトルが赤い領域と青い領域がある。
- この分布の成因や層序、両者の物質の由来は分かっていない。
- それぞれの領域の元素組成を決定することで、それらを制約することができる。
- Phobos の過去の地表面 (および内部) の進化プロセスを推定することができる。



ゴール

Phobos 表面の元素組成の観測を通じて、Phobos の起源 (外来小惑星の捕獲、あるいは火星上の巨大衝突) および地表面進化プロセスを明らかにするとともに、サンプル採取のための着陸値点の選定に必要な情報を提供する。

科学目標

Phobos表面の元素組成の観測を通じて

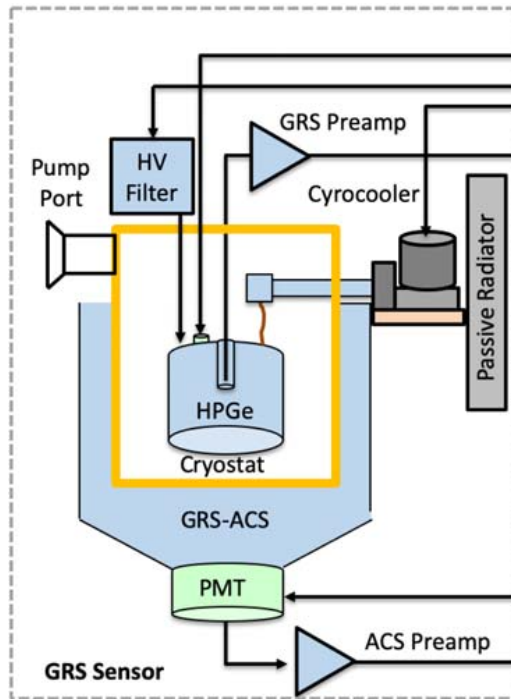
- Phobos全球の元素組成がコンドライト的かエコンドライト的か判定する。
- 揮発性元素の枯渇状況を判定する。
- 地表面の元素組成分布を明らかにする。
- 水平・深さ (< 30 cm) のH存在度分布を決定する。

観測目標

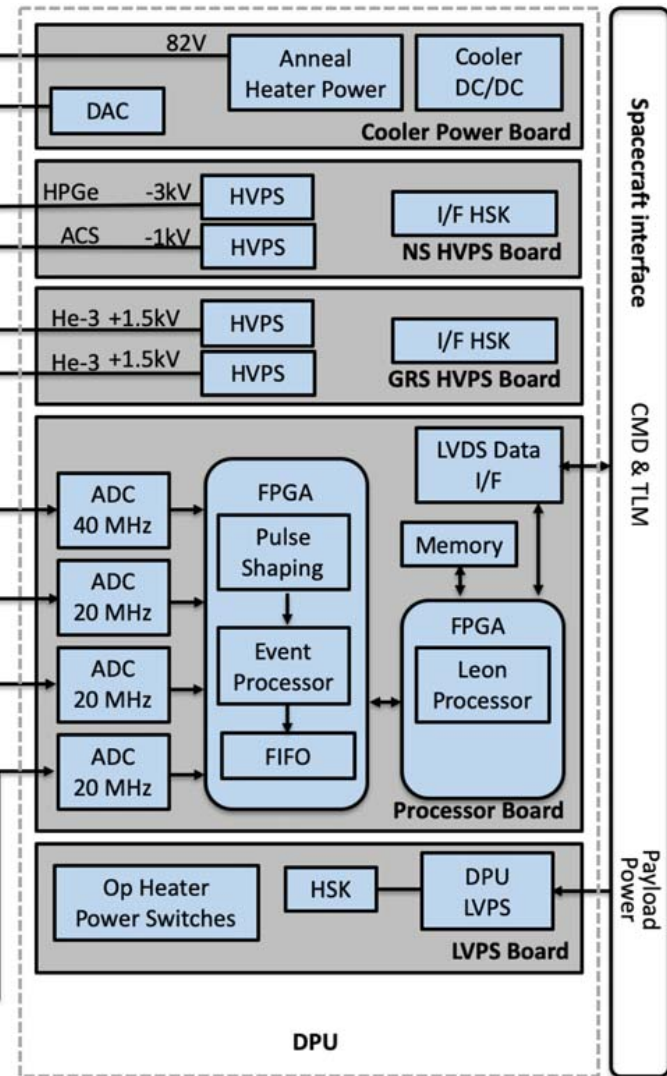
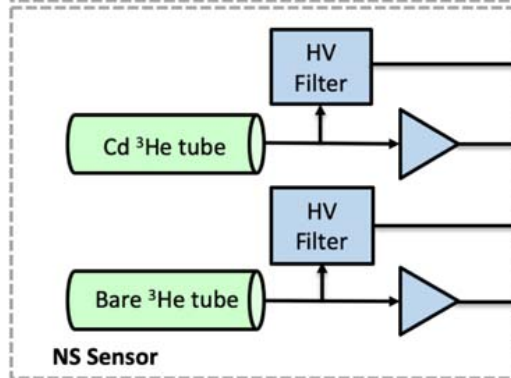
- Phobos 全球表面の主要・微量元素 のバルク存在度を観測する。
(Mg, Fe, O, Si, Na, K, Ca, Th, U, H, C, Cl など、特に K/Th 比)
- Si・K・Fe・Th・H・熱中性子捕獲断面積・地域平均原子量は地域分布を決定する。

MEGANE の構成

High-Purity Ge
Gamma-Ray
Spectrometer



Neutron
Spectrometer

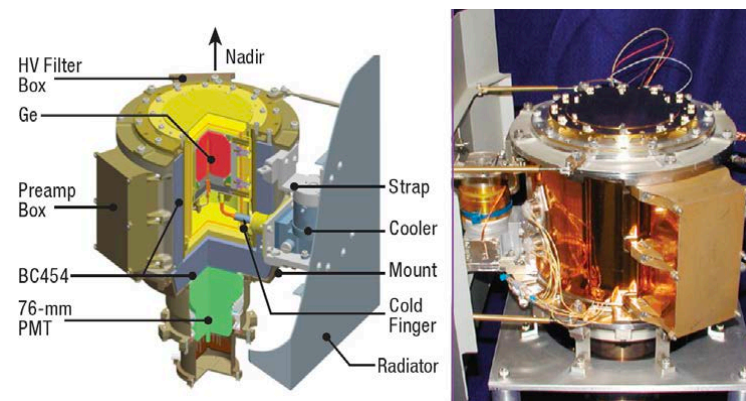
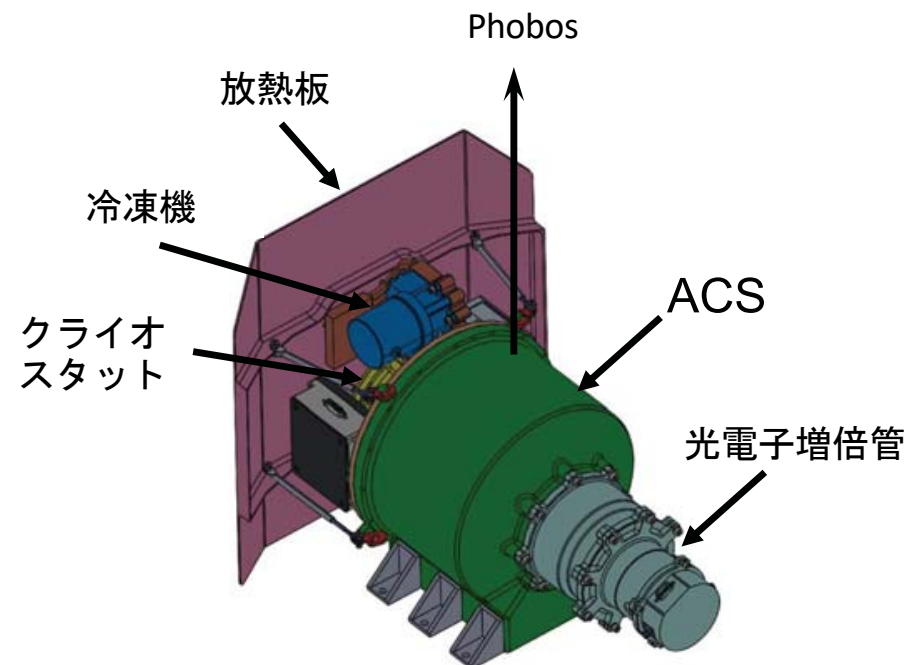


Total ~15 kg

(Lawrence et al., 2019)

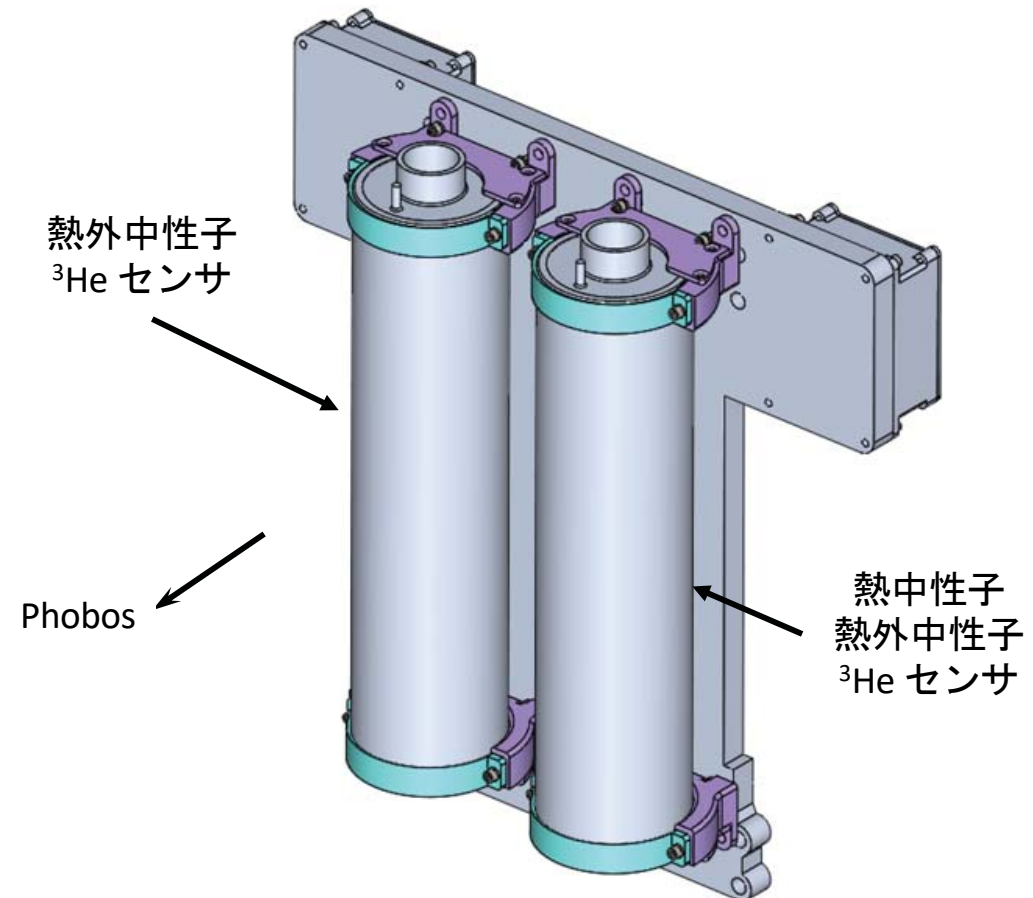
Data Processing Unit

- MESSENGER GRS の改良版。
- メインセンサは高純度ゲルマニウム。
- 測定エネルギー範囲
100 keV ~ 10 MeV
- エネルギー分解能
~5 keV @1333 keV
- 冷凍機により 90 K を維持する。
- アンチコインシデンスシールド (プラスチックシンチレータ + 光電子増倍管) により背景ノイズを除去しつつ、熱外・高速中性子の検出器にもなる。



NS (中性子分光計)

- センサは Lunar Prospector、エレキは MESSENGER NS の改良版。
- 長さ 20 cm の2本の ^3He ガス比例計数管で構成。
- 片方は熱中性子と熱外中性子を検出する (0.4 eV ~ 100 keV)。
- もう片方は厚み 0.5 mm のカドミウムシートで覆っており、0.4 eV 以上の中性子を検出する。



主要な観測元素の検出限界



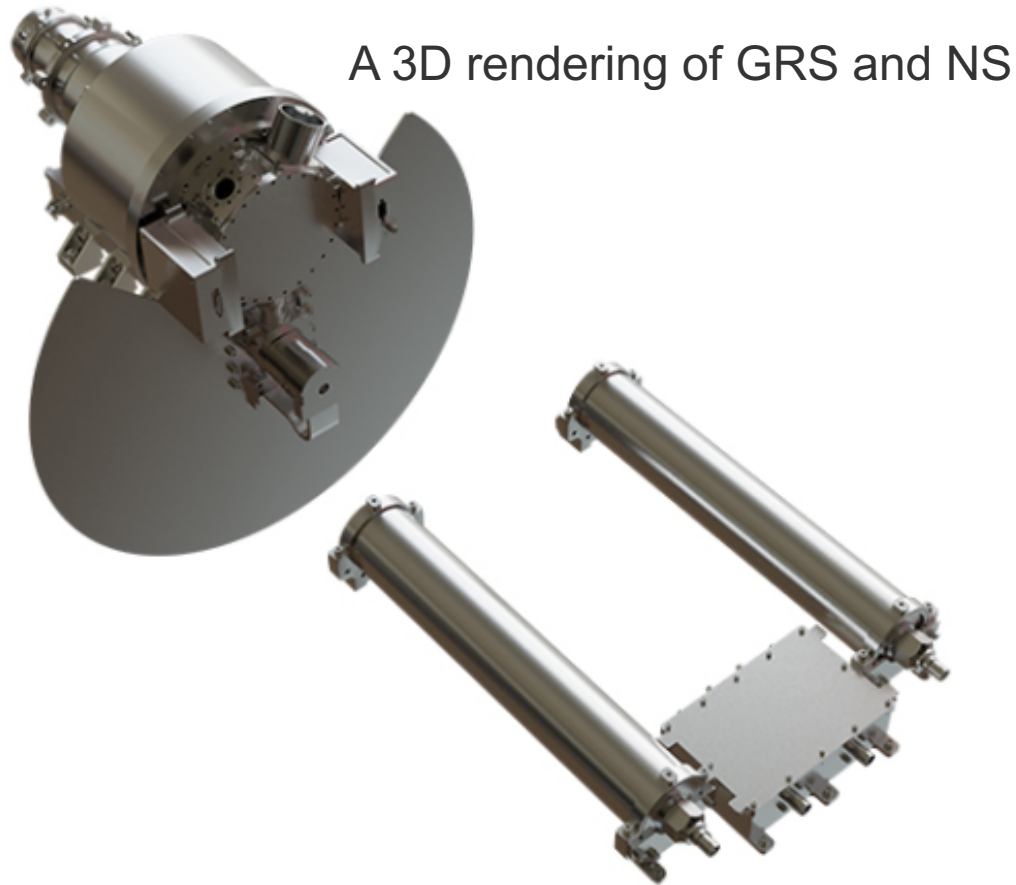
	Peak (keV)	Detection threshold	Relative precision
H ^a	2223.2	100 ppm	20%
O ^a	6128.6	20 wt.%	33%
Na	439.4	2 wt.%	30%
Mg ^a	1368.6	2 wt.%	33%
Si ^a	1779.0	2 wt.%	20%
K ^a	1460.8	300 ppm	20%
Cl	1957.6	0.15 wt.%	25%
Ca ^a	1942.7	5 wt.%	33%
Fe ^a	846.9	1.5 wt.%	20%
	7631.1		
	7645.5		
Th ^a	2614.5	150 ppb	20%
U	351.9	50 ppb	90%
	609.1		

^aRequired to meet MEGANE's Level 1 requirements.

(Lawrence et al., 2019)

- 2020年3-4月にPDRを実施し、現在は詳細設計フェーズ (Phase-C) にて詳細設計を進めている。これまでSTM (熱構造モデル) を製作し、2020年12月にシステムに合流した。
- MEGANE は過去の探査で前身機器のフライト実績があり、すでに高いTRLを有する。
- 主要な課題は、MMX固有の条件に対するものに集中している (特に運用設計、重量、熱設計、探査機インタフェースへの適合) が、MMX振動衝撃レベルへの適合性の確認、MMX熱インタフェース条件への適合など多くの課題はPDRまでに解決した。
- 引き続き以下の点が開発・調整課題となっている。
 - ◆ 観測軌道・運用の設計
 - ◆ コマンド・テレメトリのフォーマットの詳細化 (MMXおよびJAXA地上系への適合)

MEGANE STM (GRS, NS, DPU) が三菱電機鎌倉製作所でシステムに合流した。



Spencer Disque, the engineering lead on the MEGANE STM at APL stands with the two shipping containers.

- ガンマ線・中性子はカウントレートが小さいため、元素組成決定と一部元素のマッピングを十分な S/N で行うには長い観測積分時間が必要。
- MEGANE の科学目標を達成するために必要な運用を数値シミュレーションにより検討した結果、探査機が次の条件を満たす状態が通算 15 日以上必要であることがわかった。
 - ◆ 探査機と Phobos 中心との距離が Phobos 半径 $\times 2$ 以下であること。
 - ◆ GRS と NS の方位が Phobos 中心方向に対して $\pm 10^\circ$ 以下であること。
(Phobos 昼側を飛行中、これを満たす)
 - ◆ 主たる観測期間は 2026 年 4 月 1 日から 2026 年 7 月 15 日の 105 日間。
- MMX がこの条件に適合する運用を行うため、より高度の低い軌道 (QSO-LB、LC) を設計して、軌道安定性の詳細検討を継続すると同時に、これらの軌道をベースとした運用を検討している。

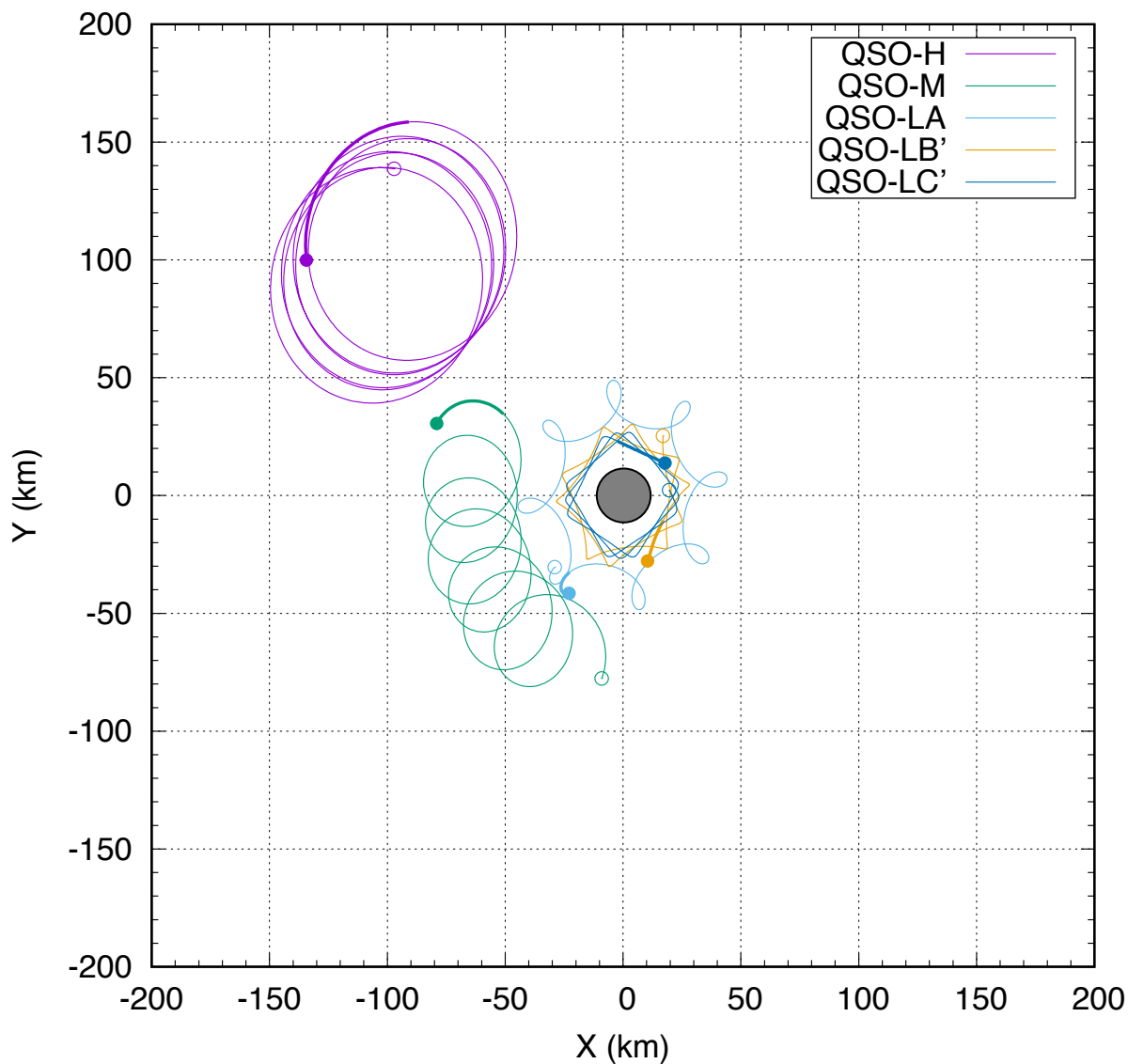
MMX QSO 軌道例

- Origin: PHOBOS
- Frame: ECLIP-J2000
(黄道座標)

duration: 24 hours

- : beginning
- : end

narrow line: beginning 23 hours
wide line: last 1 hour



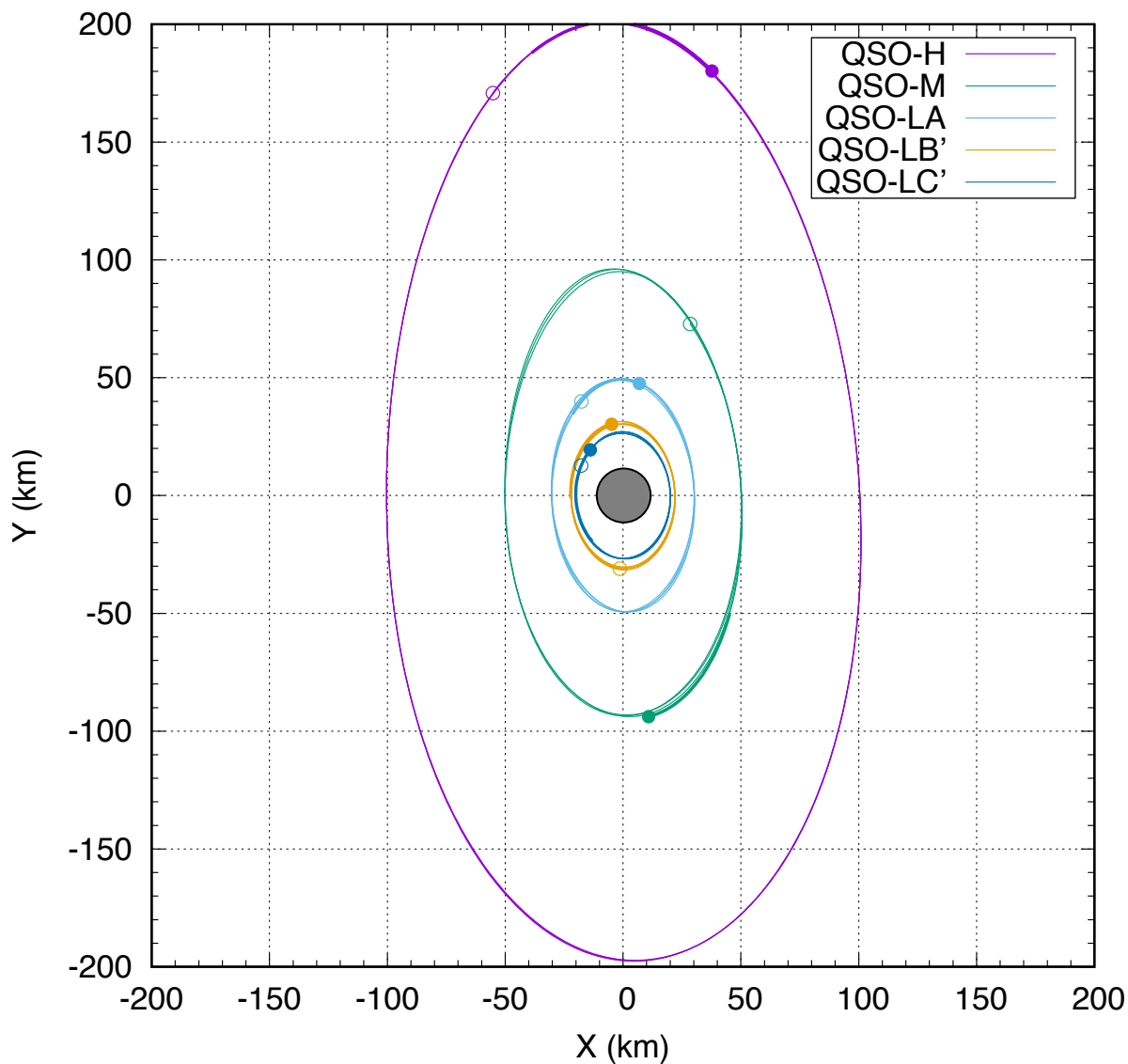
MMX QSO 軌道例

- Origin: PHOBOS
- Frame: IAU_PHOBOS
(Phobos 固定座標)

duration: 24 hours

- : beginning
- : end

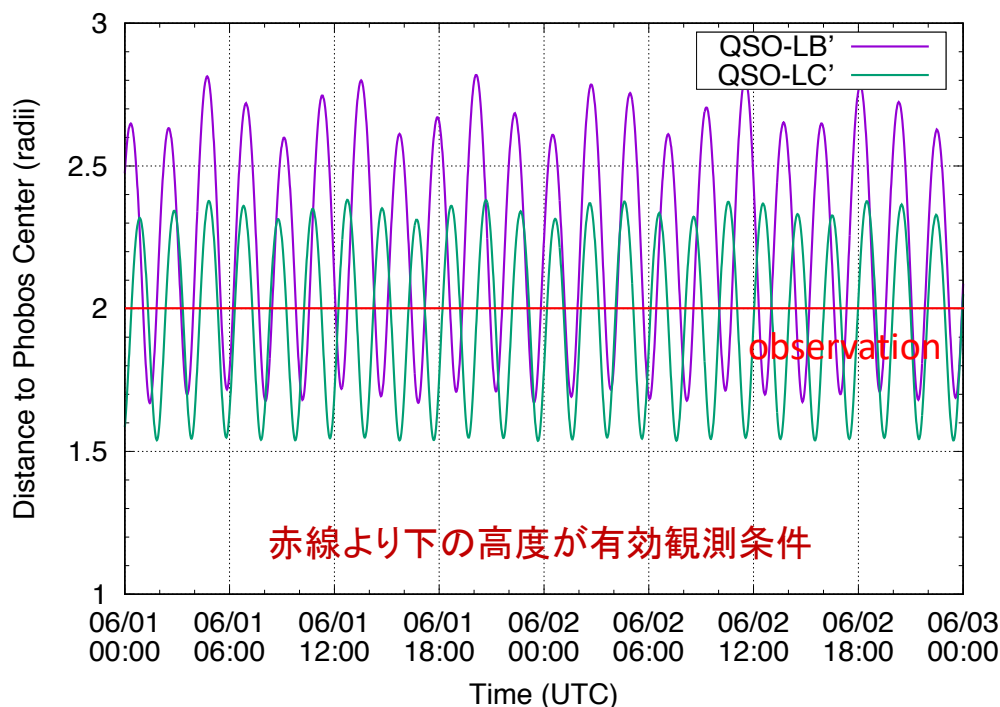
narrow line: beginning 23 hours
wide line: last 1 hour



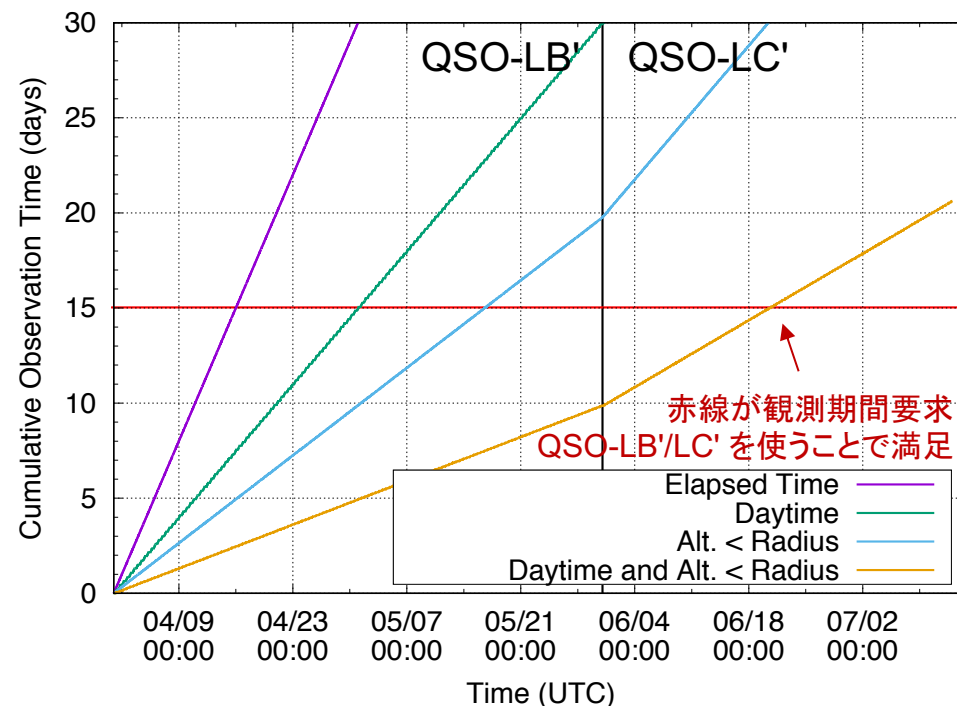
QSO 軌道の高度の例

- QSO-LB を用いることで、所定の観測積分時間が得られることがわかった。
- ただし QSO-LB のみでは余裕が無いため、途中から QSO-LC に遷移させることを中心に検討している。
- 地球通信、火星観測などを考慮した運用の詳細化が課題。

QSO 軌道高度の変化例



有効観測積分時間の推移



- MMX にガンマ線・中性子分光計を搭載することを計画し、JAXA-NASA 間の国際協力の一環として、米国 Johns Hopkins University・Applied Physics Laboratory が中心となり開発を行なっている。
- Phobos から放射されるガンマ線と中性子を軌道上で観測することにより、地表面の元素組成を決定する。
- 機器の多くの部分は NASA 月探査機 Lunar Prospector、水星探査機 MESSENGER 搭載のガンマ線・中性子分光計 GRNS (Gamma-Ray and Neutron Spectrometer) を継承・改良したもの。
- MEGANE は既に高い TRL を有しており、開発は順調に進行している。
- 主要な開発課題は探査機の軌道設計・運用設計の詳細化。CDR までにこれらの課題を解決する予定。