

宇宙での精密計測

~レーザや干渉計を使ったミッションとその技術~

Univ. of Maryland / NASA-GSFC
沼田健司

2009年11月24日
DPFサイエンス検討会

内容

世界での、レーザや干渉計を用いた宇宙での(精密)計測の計画やこれまでの実績について、分野横断的に概観する。

- 1.重力波/重力場測定
- 2.天体干渉計/光学望遠鏡
- 3. 光通信
- 4.リモートセンシング
- 5.分光やセンサー類
- 6.基礎物理実験
- 7.最近のトレンド
- 8.まとめ

1. 重力波/重力場測定

- ステータス
 - 重力波: 技術開発段階. パスファインダーが現実的になりつつある.
 - 地球重力場: 精度を上げるべく、レーザ測距を使ったものが検討中.
- 重力波検出[テストミッション]
 - LISA[LPF], BBO, DECIGO[DPF], etc.
- 重力場測定
 - GRACE-2/follow-on, DPF, etc.
- レーザを使っていないもの
 - GRACE(2002年打ち上げ. マイクロ波リンク.)
 - GOCE (2009年打ち上げ. ドラッグフリー. $\sim 10^{-12} \text{m/s}^2/\text{rtHz}$)
 - GRAIL(GRACEタイプの測定を月で行う計画.)

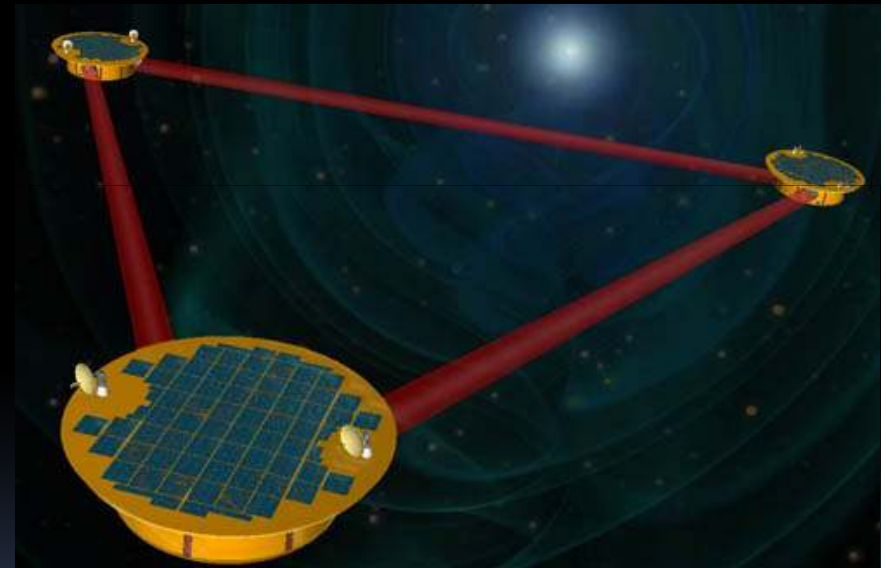
LISA

■ 概要

- NASA/ESA 共同ミッション. 現在Phase A.
- 1~100mHzの重力波をヘテロダイン干渉計により検出.
- 2021年打ち上げ予定(?)

■ 特徴

- 500万kmの基線長
- 3台の衛星
- 試験質量(計6個)
- ドラッグフリー制御
- マイクロスラスタ
- 干渉計変位雑音: $\sim 30\text{pm}/\text{rtHz}$ @ $\sim 10\text{mHz}$
- 加速度計雑音: $\sim 3 \times 10^{-15}\text{m}/\text{s}^2/\text{rtHz}$ @ 1mHz



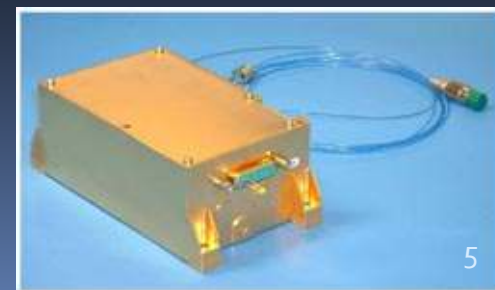
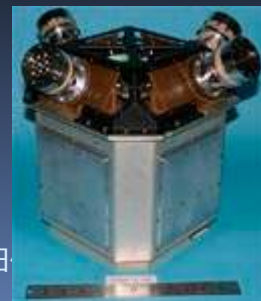
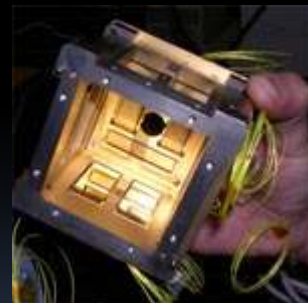
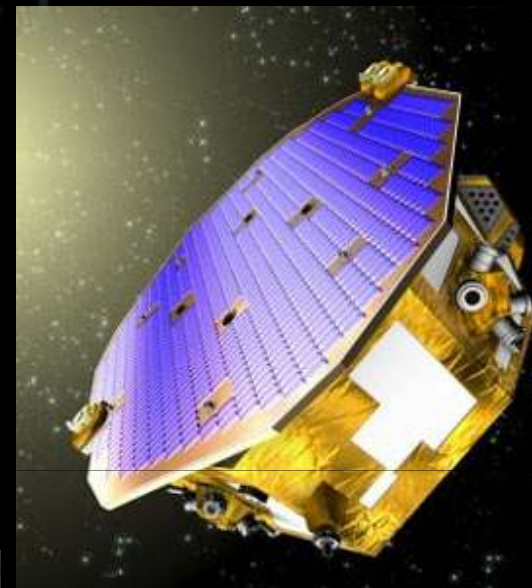
LPF (LISA pathfinder)

■ 概要

- ESA 主導. 現在Phase C/D.
- LISAの技術試験衛星.
- LISAの10倍以内の測定雑音を目指す.
- 打ち上げ:~2012年

■ 特徴

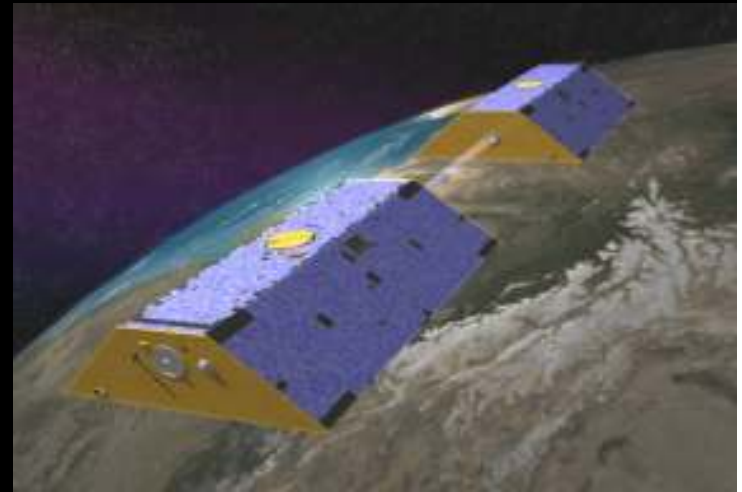
- ~30cm の基線長
- 1台の衛星に試験質量2個
- ドラッグフリー制御
- 低雑音加速度計
- 高安定光学ベンチ, NPRO
- マイクロスラスタ
- ケーシング機構



GRACE-2/follow-on

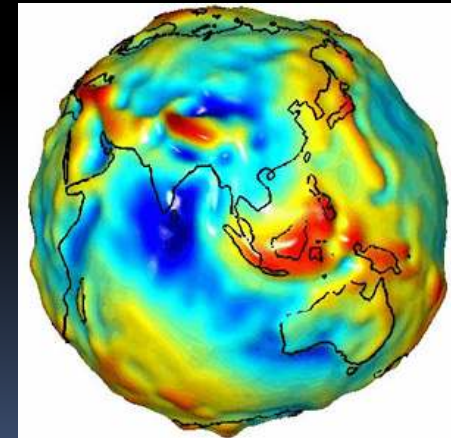
■ 概要

- NASA-DLR 共同ミッション
- 初代GRACE: 2002年打ち上げ
 - マイクロ波リンク使用
- 地球の重力場のマッピング
- 10倍程度の解像度を目指す (100kmスケールで1cmの海面変化)
- コンセプトデザインフェーズ



■ 特徴

- ヘテロダイン干渉計(-2?/follow-on)
- ドラッグフリー制御(Follow-on)
- 周波数安定化レーザ(光共振器)
- 変位雑音: 10nm/rtHz@10m~100mHz.
- 加速度計雑音: $1 \times 10^{-13} \text{m/s}^2/\text{rtHz}$



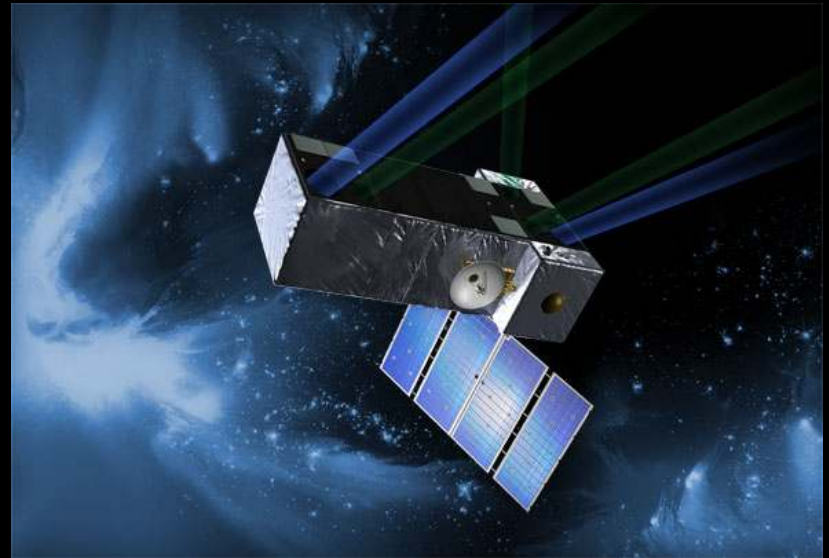
2. 天体干渉計/光学望遠鏡

- ステータス
 - 将来の打ち上げに向けて技術開発が行われている。
- レーザ干渉計で天体干渉計/光学望遠鏡の測定(安定化)
 - SIM Lite (天体干渉計)
 - TPF-C (可視/近赤外コロナグラフ)
- 精密フォーメーションフライト
 - TPF-I (天体Null干渉計)
 - MAXIM (Black hole Imager, X線干渉計)
 - Stellar Imager (UV/可視干渉計)

SIM Lite

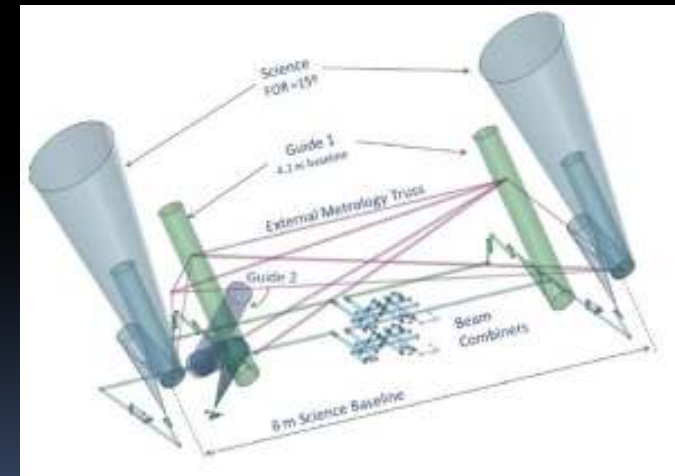
■ 概要

- NASA(JPL)ミッション
- 開発フェーズ
- 規模を縮小してLiteとして復活.
- 銀河系内の星の位置($1\mu\text{arcsec}$)/距離の決定、地球型惑星の発見.

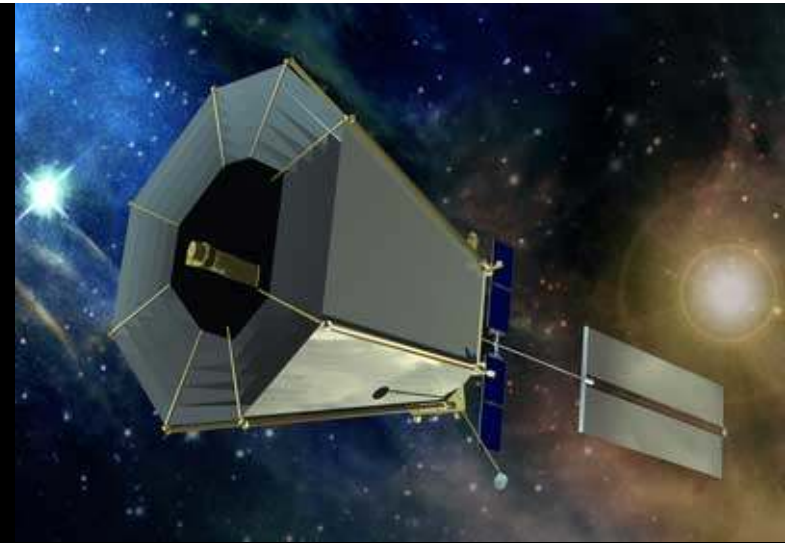


■ 特徴

- 天体干渉計：6-m基線長
 - 50-cm 径望遠鏡x2
- メトロロジー干渉計
 - 光トラス(10ビーム)
 - 絶対長精度 $\sim 3\mu\text{m}$ /安定度 $\sim 20\text{pm}$ (1時間).
 - “2色”ヘテロダイン干渉計
 - $1.319\mu\text{m}$ Nd:YAG NPRO



TPF-C

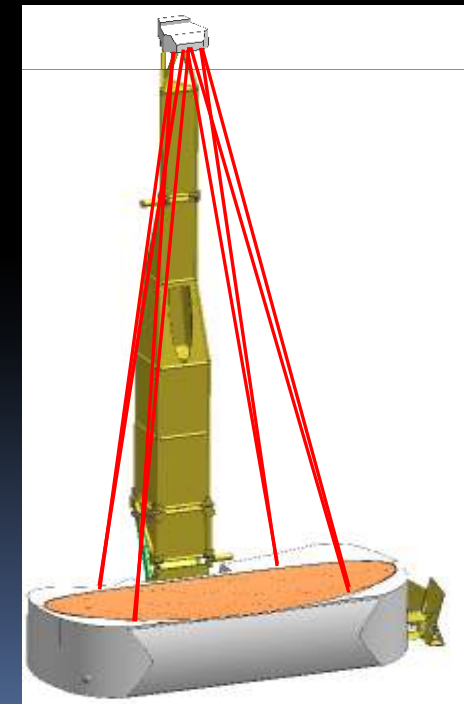


■ 概要

- 反射望遠鏡
- 可視/近赤外 高コントラストコロナグラフ(10^9)
- 地球型惑星の発見.(直接イメージング)

■ 特徴

- 干渉計トラスによる光学系の能動安定化.
- 安定度 $< 25\text{nm}$ (8時間/12m)
- アセチレン安定化レーザ(1542nm)?
- 8.5m \times 3.5mメインミラー
- Hexapodに乗ったセカンダリミラー.



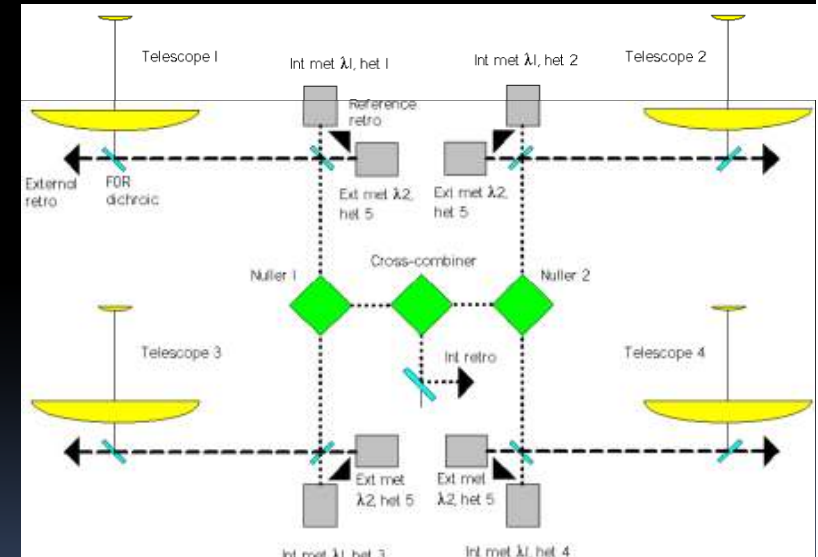
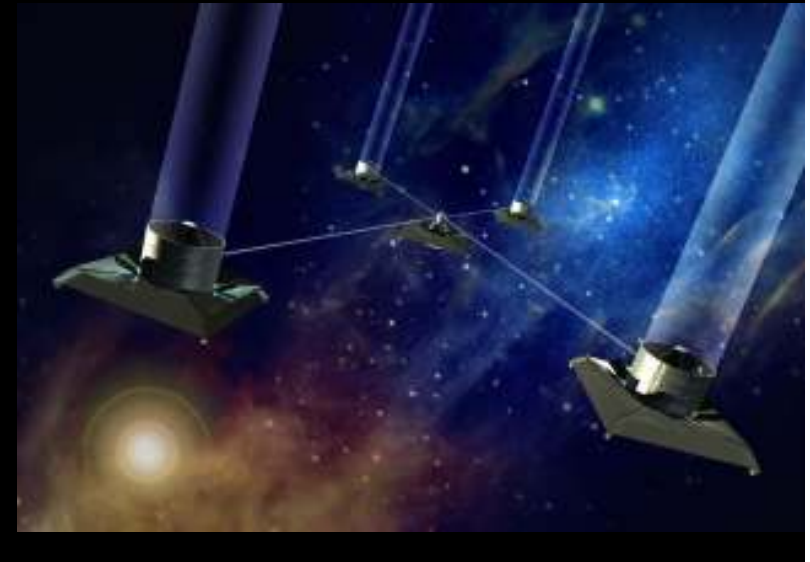
TPF-I

■ 概要

- 中赤外Null干渉計
- 精密フォーメーションフライト
- ~3m望遠鏡x5
- 地球型惑星の直接検出.

■ 特徴

- MSTAR(絶対長精度~100nm)
- “2色”ヘテロダイン干渉計
- 安定化レーザ
- ~5cm精度/~100m間隔の編隊飛行.



3. 光通信

- ステータス
 - 宇宙開発初期から歴史がある.近年の通信技術の発展を受けて、宇宙での通信も急速に現実になりつつある.
- 打ち上げ済み
 - ETS-VI[きく6号], Galileo, SPOT-4, SILEX (Artemis), OICETS[きらり], GEOlite, TerraSAR-X, NFIRE, etc.
- 計画中
 - LLCD (LADEE): 月との高速光通信. 2011年打ち上げ予定.
 - Mars Telecommunications Orbiter: 火星との高速光通信.

Gemini/Apollo

■ 歴史

- Gemini 6A/7, 最初の宇宙レーザ(? , 1965)
 - GaAs半導体レーザ, 4Wx4, 900nm
- Apollo 11: 月にコーナーキューブアレーを設置 (1969)
 - レーザレンジングのため現在も使用.
- Apollo 15/16/17 (1971-1972)
 - レーザ高度計 (精度~10m)
 - フラッシュランプ励起ルビーレーザ(694nm, 200mJ, 10nsec)

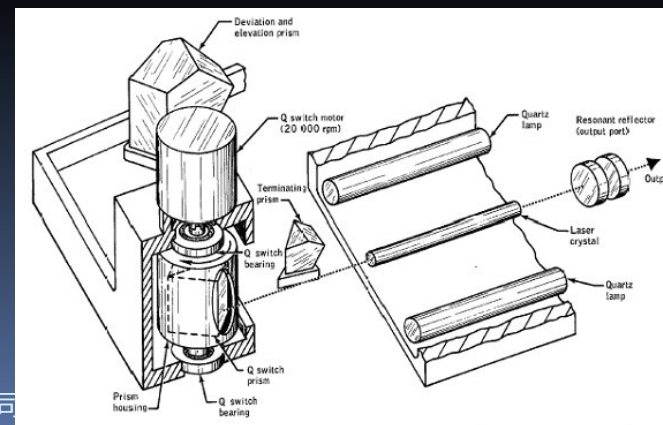


Figure 14-69.- Laser altimeter module light reflection components.

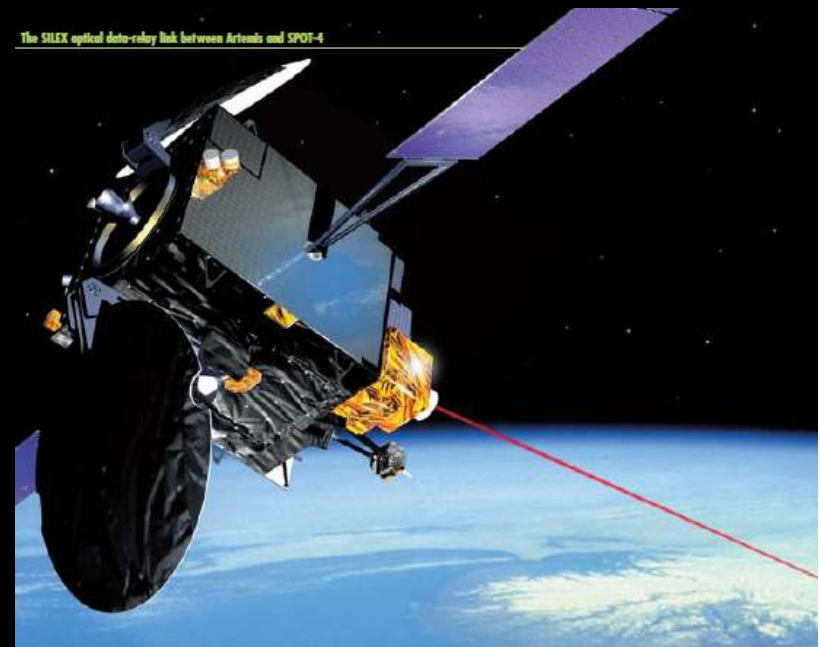
SILEX (ARTEMIS)

■ 概要

- ESA
- 先端型データ中継技術衛星
- 2001年7月打ち上げ
- SPOT-4, OICETS[きらり]との衛星間光通信
- 50Mbps, BER $<10^{-9}$, ~30000km

■ 特徴

- GaAlAsダイオードレーザ(0.85 μ m)
- 160mW ピークパワー
- Zerodurテレスコープ(25cm)
- Si-APD, 1.5nW 受信パワー



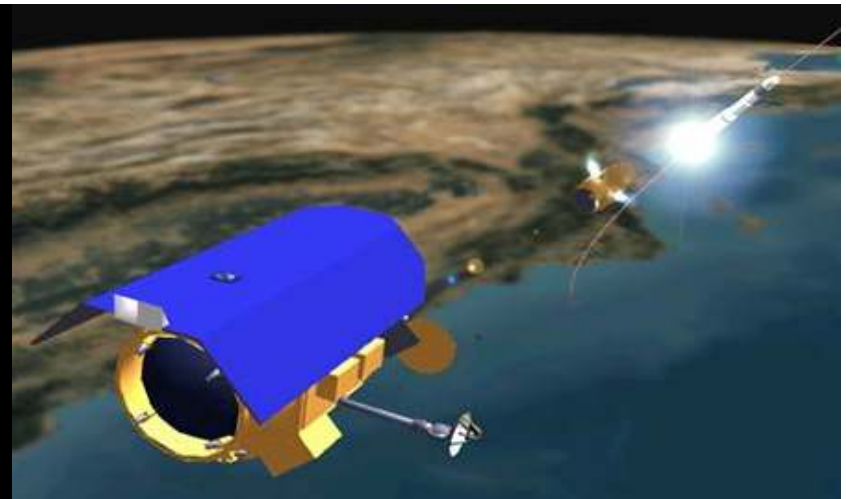
NFIRE

■ 概要

- Missile Defense Agency (USA)
- TESAT レーザコミュニケーションターミナル
- 2007年4月打ち上げ.
- TerraSAR-X(独)との衛星間光通信. (5.6Gbps, BER10^{-9})

■ 特徴

- Nd:YAG NPRO (1064nm)
- Homodyne BPSK
- 10GHzチューニング
- 3800~4800km 基線長



4. リモートセンシング

- ステータス
 - 特に高度計で宇宙レーザ技術の蓄積がある. ガス検出用ライダーが現在盛んに開発されている.
- 高度計
 - Time-of-flight測定
 - MOLA(MGS), Clementine, NEAR, GLAS(ICESAT), MLA(Messenger), LOLA(LRO), etc.
- 雲/エアロゾル/ガス検出
 - 後方散乱、直接反射光測定
 - CALIPSO, LITE (Space Shuttle), ASCENDS(計画中), etc

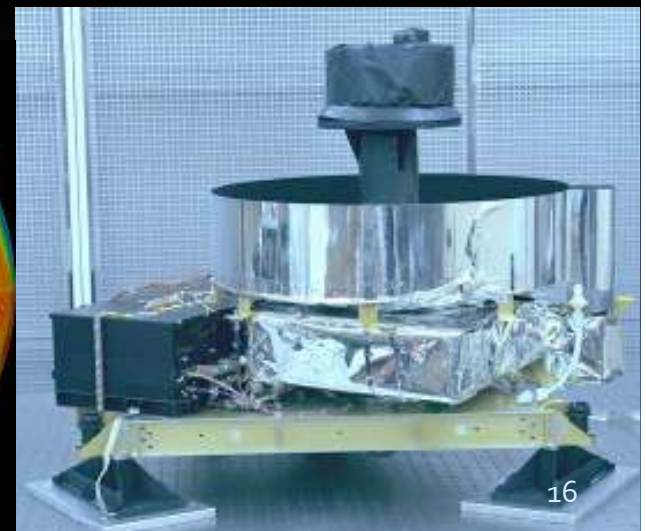
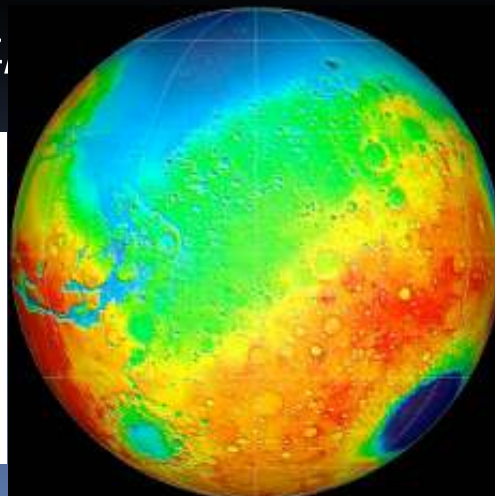
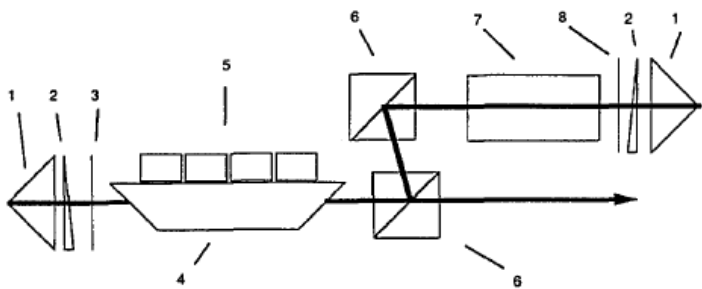
MOLA (MGS)

■ 概要

- 1992年打ち上げ
- 火星の地形測定 (絶対精度: $< \sim 1\text{m}$)
- 雲の分布の測定

■ 特徴

- 宇宙で最初のLD励起Nd:YAGレーザー (Crドープ)
- LiNbO_3 アクティブQスイッチ
- 40mJ , 10nsec , 10Hz ,



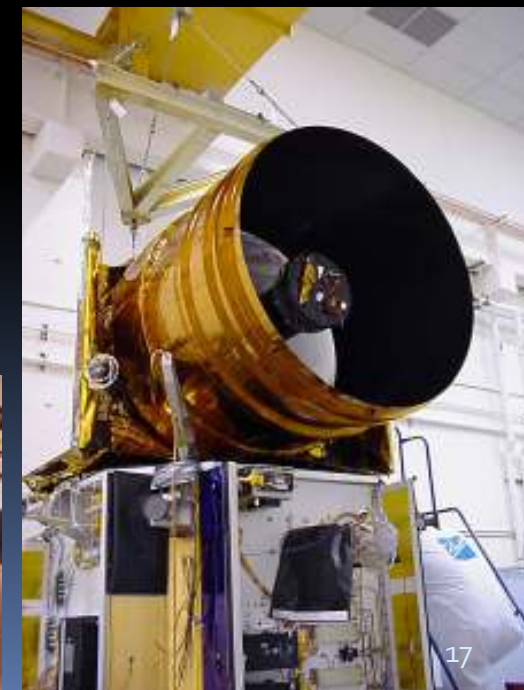
GLAS (ICESAT)

■ 概要

- 2003年打ち上げ
- 地球の極地の氷のマッピング, 大気後方散乱の測定.
- ICESAT 2 開発中

■ 特徴

- 3つの同じレーザ
- 75mJ(1064nm), 35mJ(532nm), 40Hz, 6nsec
- Nd:YAG MOPA (2段)
- Cr⁴⁺:YAG パッシブQスイッチ
- LBO ダブラー
- 1m望遠鏡



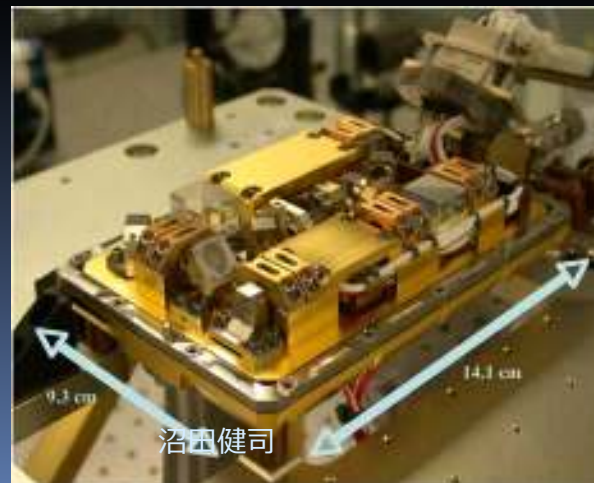
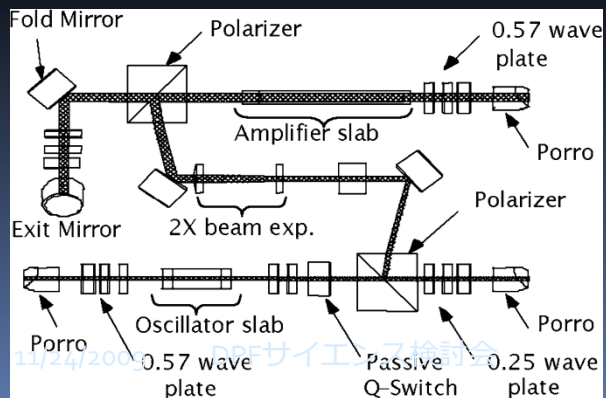
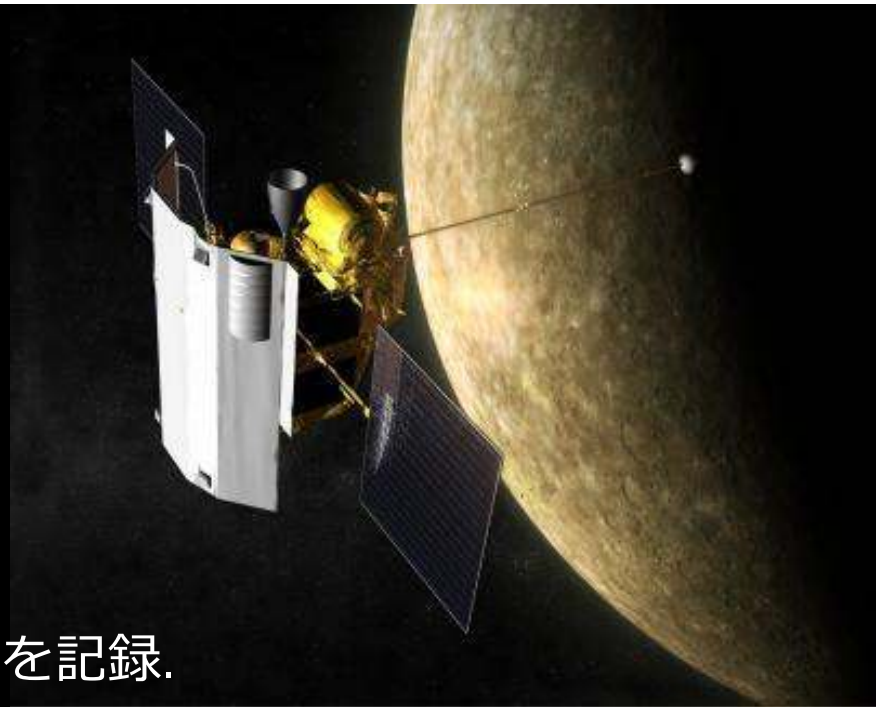
MLA (Messenger)

■ 概要

- 2004年打ち上げ
- 水星の地形, 衛星の位置測定
- 2-way レーザ通信の最長距離を記録.

■ 特徴

- Nd:YAG (1064 nm) MOPA (1段)
- 20mJ, 5nsec, 8Hz, パッシブQスイッチ
- 17cm望遠鏡x4



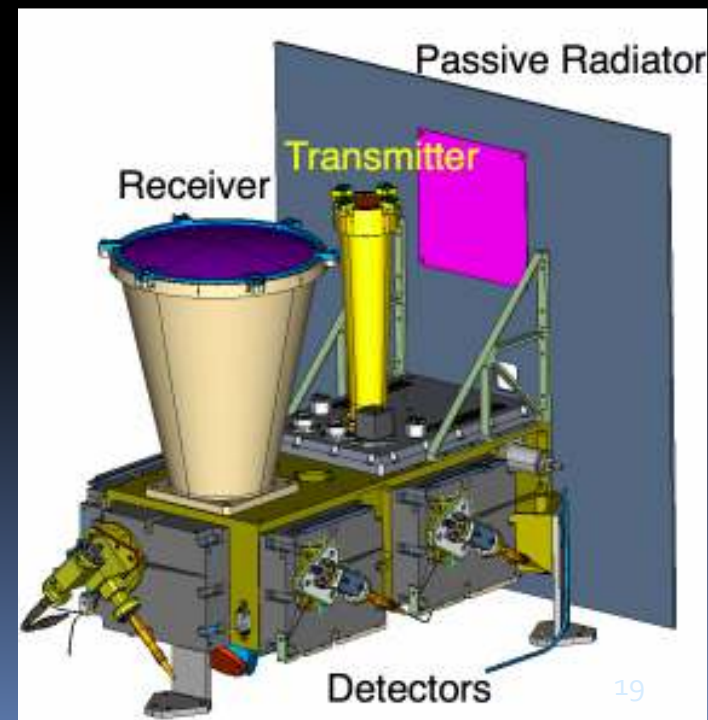
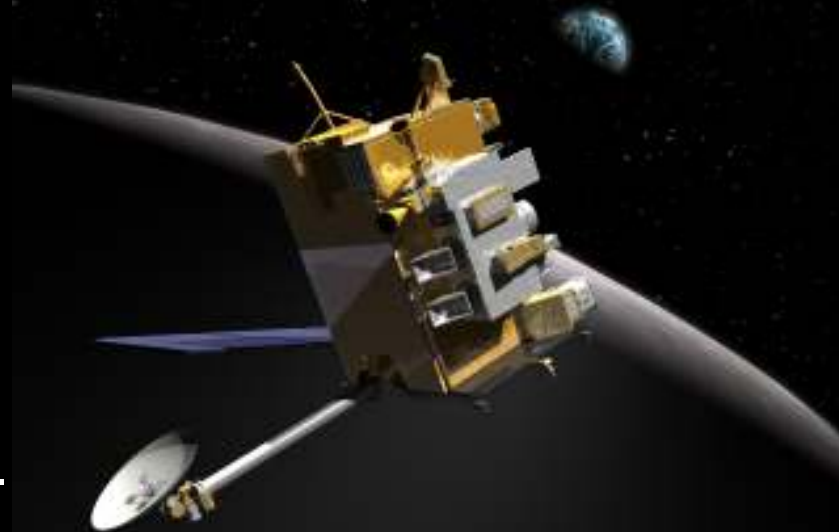
LOLA (LRO)

■ 概要

- 2009年打ち上げ
- 月の地形測定、軌道決定など.

■ 特徴

- MLAに類似したデザイン
- 2つの等価なレーザ.
- Nd:YAG (1064nm), 2.7mJ, 6nsec, 28Hz
- 5チャンネル



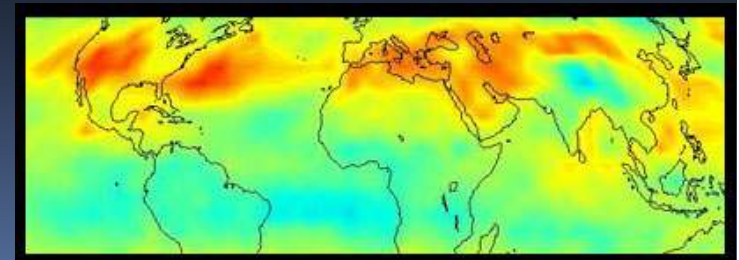
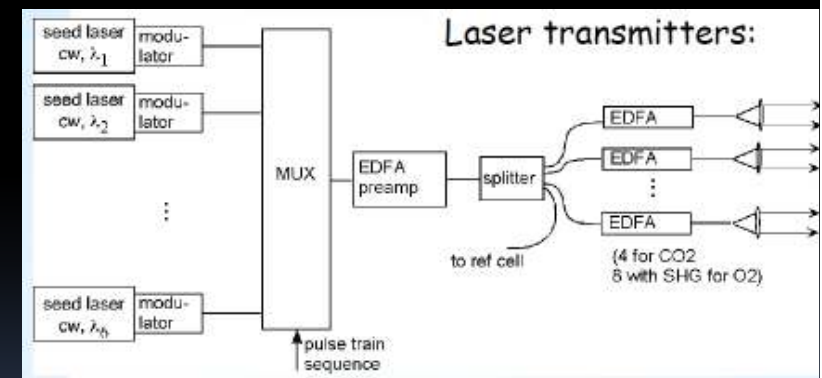
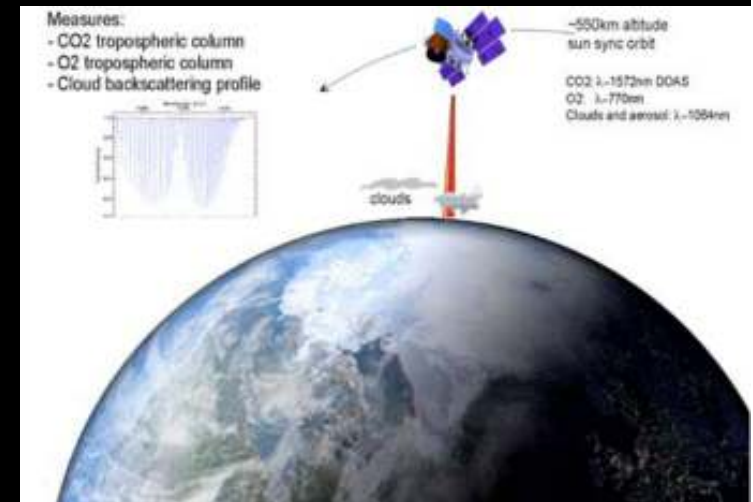
ASCENDS

■ 概要

- DIAL (Differential absorption lidar)
- 地球のCO₂のマッピング(1ppm)
- 201X年打ち上げ予定.

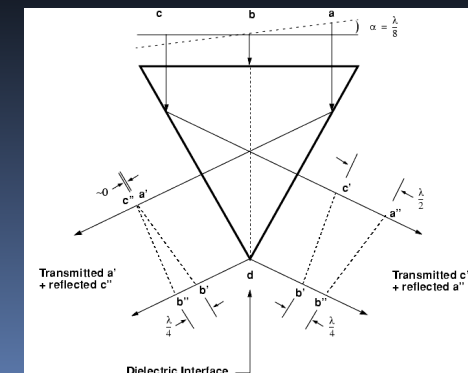
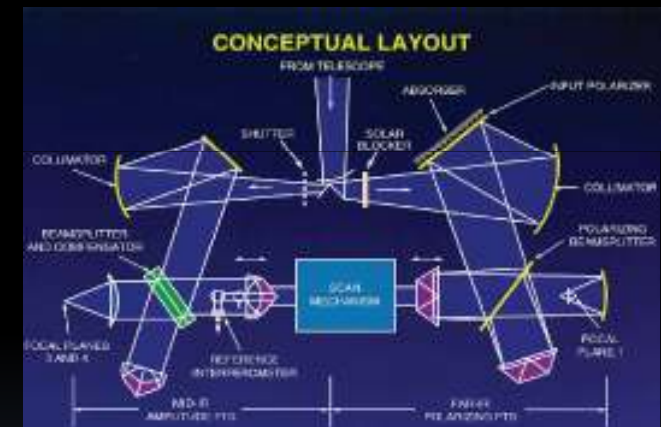
■ 特徴

- 1572nm LD+EDFA
- ファイバーオプティクス
- 周波数ダブリング(O₂測定)
- Waveguide アンプ(?)
- 絶対周波数安定化+位相ロック
- 6~20波長



5. 分光やセンサー類

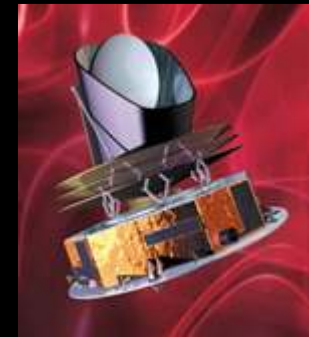
- 幅広い干渉技術の使用
- 分光器
 - FTIR (フーリエ変換型赤外分光)
 - 可動鏡を持ったマイケルソン干渉計
 - 例: CIRS (Cassini)
- センサー
 - 衛星制御やアストロメトリ
 - 例: Fine Guidance Sensor (Hubble)
 - ケスタープリズム



6. 基礎物理実験

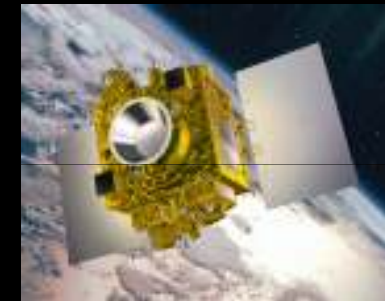
■ 最近のミッション例

- GP-B
 - NASA. 一般相対論に伴う測地効果と空間引きずり効果の測定. 失敗? 2004年打ち上げ.
- Planck
 - ESA. 宇宙背景放射の精密測定, 2009年打ち上げ.



■ 検討中のミッション例

- LARES
 - ASI. 空間引きずり効果の検証, 2010年打ち上げ予定?.
- AMS-02
 - CERN. 国際宇宙ステーションで暗黒物質, 反物質の探査. 2010年打ち上げ予定.
- JDEM
 - NASA/DOE. タイプ Ia 超新星の光度測定により宇宙膨張, ダークエネルギーを測定.
- STEP/Microscope
 - NASA/ESA, CNES. 等価原理の検証. 材質の違う二つのマスにかかる加速度の違いを測定. ドラッグフリー.
- Fundamental Physics Explorer
 - ESA. 等価原理, ボーズアインシュタイン凝縮などの実験のためのプラットフォーム.

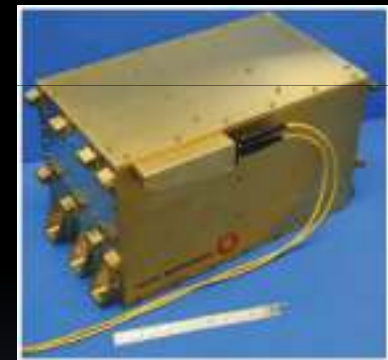


7. 最近のトレンド

- 成熟したテレコム由来のレーザ技術、軍事用途のハイパワー技術、高速処理技術、小型化技術が流入してきている。

- 例)

- ファイバーレーザ(パルス/CW)
- ファイバーアンプ(高ドープ)
- Waveguideアンプ/変調器/グレーティング
- 高安定望遠鏡
- モノリシック光学ベンチ
- 高効率光検出器



8. まとめ

- レーザ干渉計ミッションはいずれも野心的で打ち上げ実績が無い.
- これまでに実績がある分野での経験を組み合わせ、それ以上のことを行う必要がある.
- いずれの分野でも精度を上げていくのは困難ではあるが、得られるサイエンスも大きい.
- DPFにむけて
 - 実現すれば宇宙での精密計測の歴史に食い込める.
 - 模倣でない、先端技術を取り入れて国際競争力のあるものに.