

スペース干涉計の現状と展望

大阪大学 松尾太郎

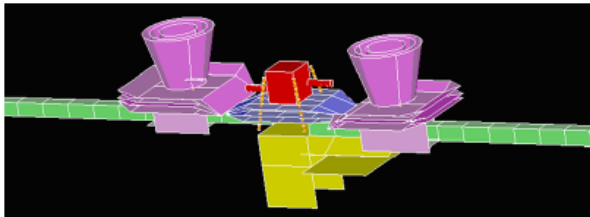
干渉計の背景: 高解像度化の歴史

- 「高感度化」を犠牲にして、高解像度化に注力.
- ✓ 1868: 一枚開口に複数開口の小マスクの干渉像を計測 (Fizeau 干渉計).
開口直径をフリード長に制限し、シーイング以上の解像度の改善
- ✓ 1920: マイクエルソン干渉計による星の直径計測に成功.
- ✓ 1950年代: Closure phase技術の提案 -> VLBIの基礎.
地上電波望遠鏡の観測開始
- ✓ 1960年代: 強度干渉計の恒星の視直径計測
- ✓ 1980年代: スペースVLBIの成功 (基線長は地球直径の2倍程度)
- ✓ 1990年代: 地上光赤外干渉計の幕開け

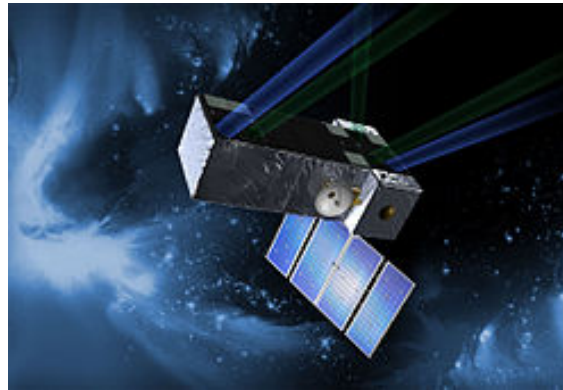
スペース光赤外干渉計の歴史

- 1990年代から開始された地上干渉計の成功に基づいて、2000年代にスペース干渉計の計画が次々と提案.
 1. 中間赤外線ナル干渉計 (TPF-I)
 2. 遠赤外線撮像分光干渉計 (SPIRIT)
 3. 高精度のアストロメトリ干渉計 (SIM)

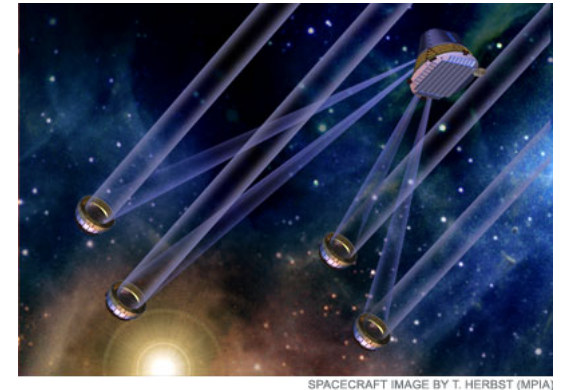
2000年代に提案された方式



SPIRIT
(Leisawitz et al. 2007)



SIM
(Marr et al. 2003)



TPF-I/Darwin
(Lawson et al. 2005)

	SPIRIT	SIM	TPF-I
観測帯域	25- 400 μ m	可視光	5 – 20 μ m
基線長	6-36m (可変)	4-8 m (固定)	Imaging 100 – 300m, Null 10 – 50 m (可変)
空間分解能	0".3 @ 100 μ m		0".01 @ 10 μ m
目的	撮像分光	アストロメトリ	ナル + 分光

スペース光赤外干渉計の歴史

- 1990年代から開始された地上干渉計の成功に基づいて、2000年代にスペース干渉計の計画が次々と提案。
 1. 中間赤外線ナル干渉計 (TPF-I)
 2. 遠赤外線撮像分光干渉計 (SPIRIT)
 3. 高精度のアストロメトリ干渉計 (SIM)
- 2010年に3つの提案とともに落選、無期限延期. その後、スペース光赤外では、望遠鏡の大型化にシフトし、スペース干渉計計画の提案はされていない.

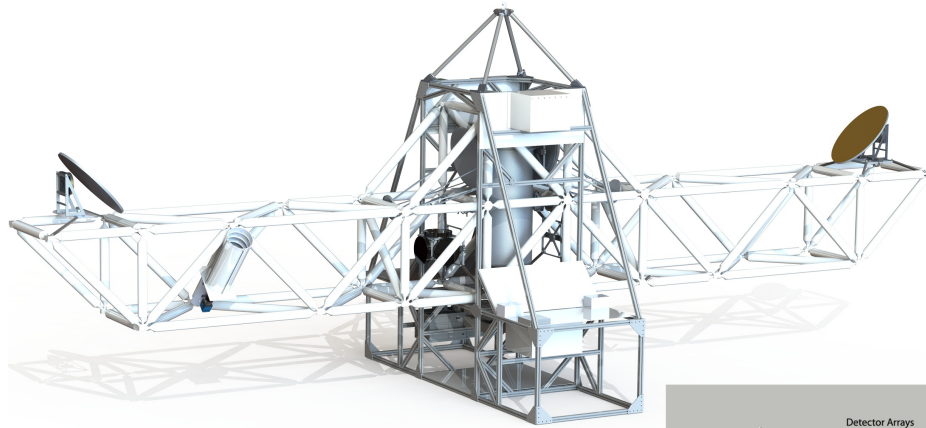
スペース干渉計における技術的課題

- 技術的課題:

1. 光赤外は波長が電波に比べて短いため、各望遠鏡で位相を取得できず、光を干渉させて位相を計測.
->2光路の光路差を波長程度で一致させる.
2. 焦点面で干渉縞を計測するため、2光束をPSFよりも精度よく同時に合わせる必要.
-> 望遠鏡の相対的な指向精度の要求.
3. 撮像が困難. 複素鮮鋭度(cos成分とsin成分の両者)の取得が必要.

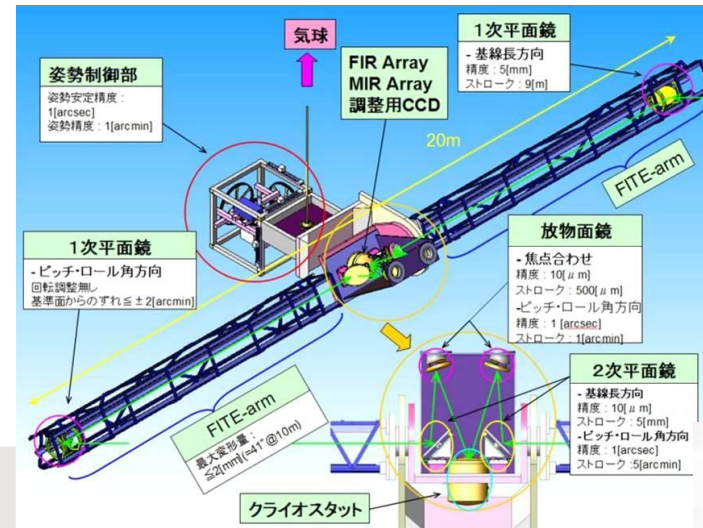
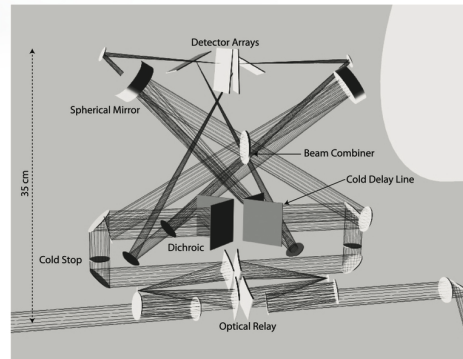
現在：気球搭載赤外線干渉計

- 日米独立に2台の気球干渉計を製作。将来の宇宙干渉計へのステップ。



BETTII (GSFC)

2017年打ち上げ



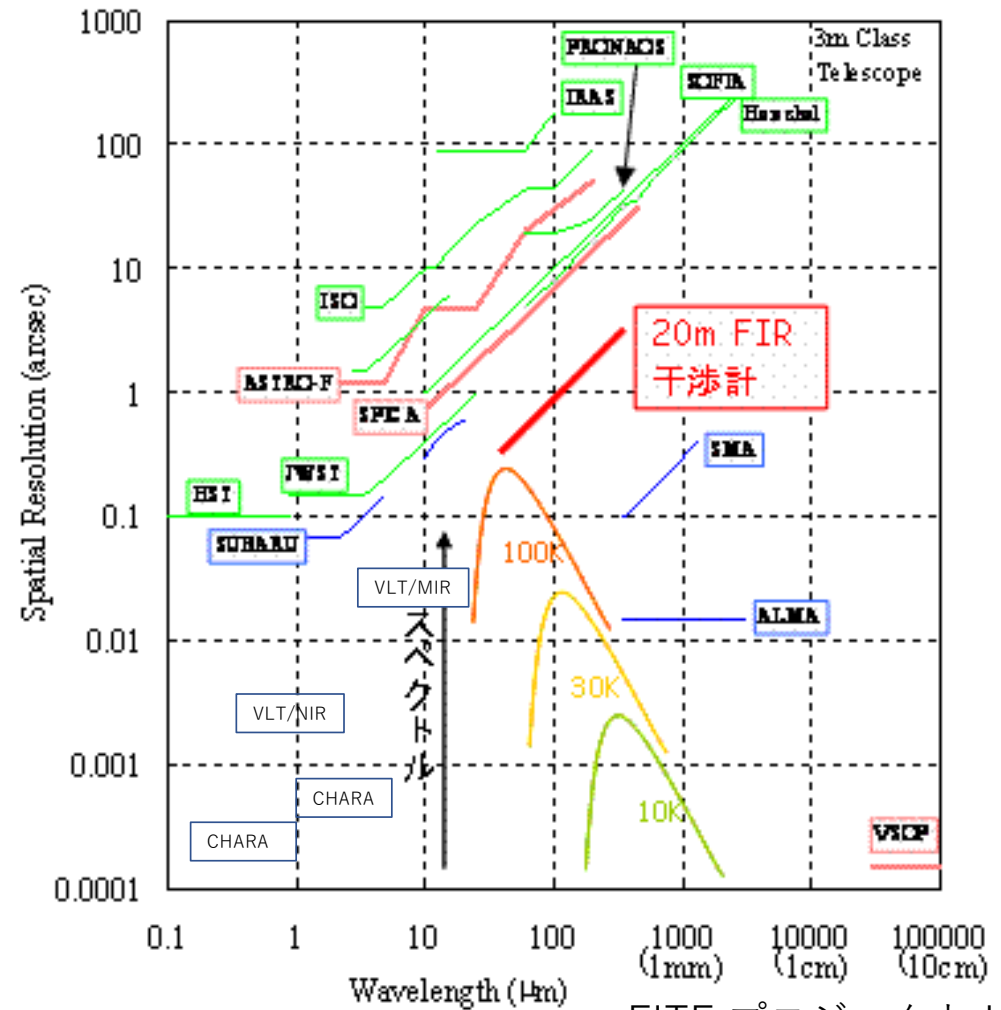
FITE (Osaka)

2018年打ち上げ予定



スペース干渉計で目指す領域

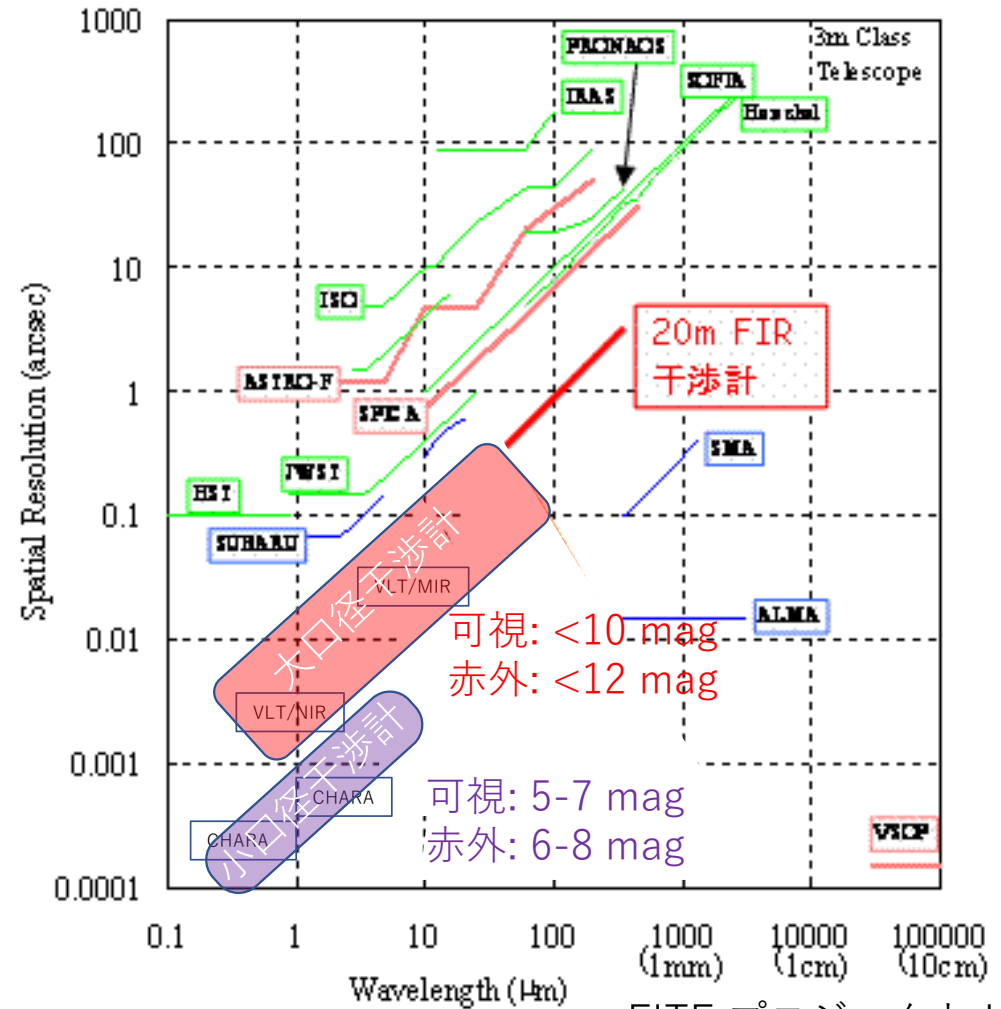
- 基線長100m超えの光赤外干渉計が地上で実現して、一枚開口の大型望遠鏡と相補的な新しいサイエンスも開拓されてきた。
- スペース干渉計の意義、どのようなパラメータスペースを埋められるのか？ブレークスルーとなるサイエンスはあるのか？



FITE プロジェクト HP改変

スペース干渉計で目指す領域

- 基線長100m超えの光赤外干渉計が地上で実現して、一枚開口の大型望遠鏡と相補的な新しいサイエンスも開拓されてきた。
- スペース干渉計の意義、どのようなパラメータスペースを埋められるのか？ブレークスルーとなるサイエンスはあるのか？



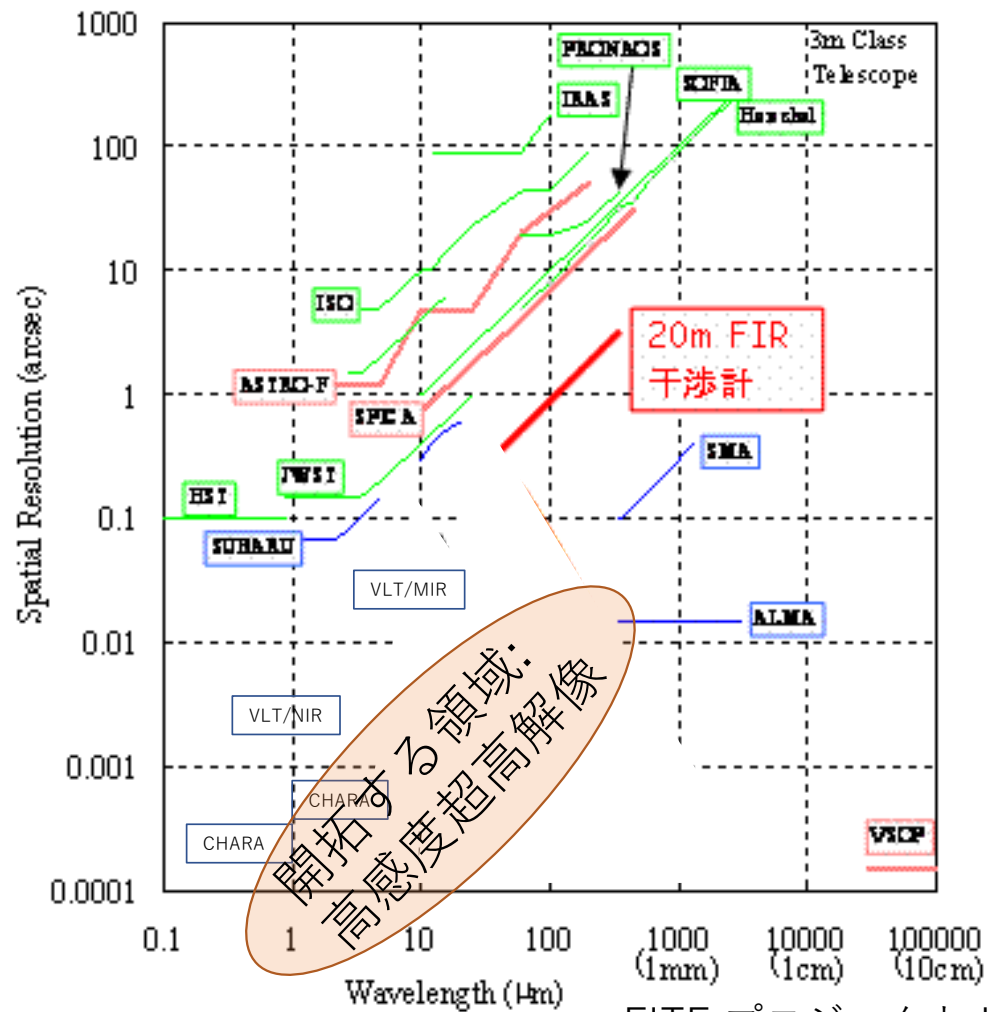
スペースに出る利点

- 大気がない:
 - 開口内の波面収差の最小化-> 干渉効率の向上 (高感度化)
 - > 鮮鋭度測定における系統誤差の最小化.
- 自由空間:
 - 望遠鏡間で光路長、相対位置、姿勢を制御が可能.
 - > 基線長を増加させることが可能

	近赤外線	中間・遠赤外線
サイエンス例	銀河中心のブラックホールシャドウの撮像 活動銀河核のBRLの撮像	スノーラインの撮像 円盤ガスの惑星への降着 ダストトラスの空間分解
空間分解能	40 – 400 μ arcsec	0.4 – 10 mas
基線長	1-10 km	1-10 km

スペース干渉計で目指す領域

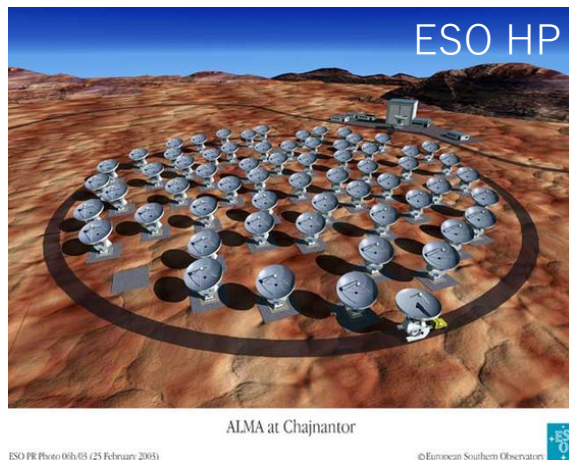
- 基線長100m超えの光赤外干渉計が地上で実現して、一枚開口の大型望遠鏡と相補的な新しいサイエンスも開拓されてきた。
- スペース干渉計の意義、どのようなパラメータスペースを埋められるのか？ブレークスルーとなるサイエンスはあるのか？



FITE プロジェクト HP改変

多開口干渉計 vs 超長基線撮像干渉計

- ALMAのような多開口干渉計は 密に望遠鏡を埋められるので、一枚望遠鏡のような撮像が可能.
- 超長基線干渉計（例えば、VLBI）では、 (u,v) 平面を埋められないので、天体の直径測定やアストロメトリに利用される.

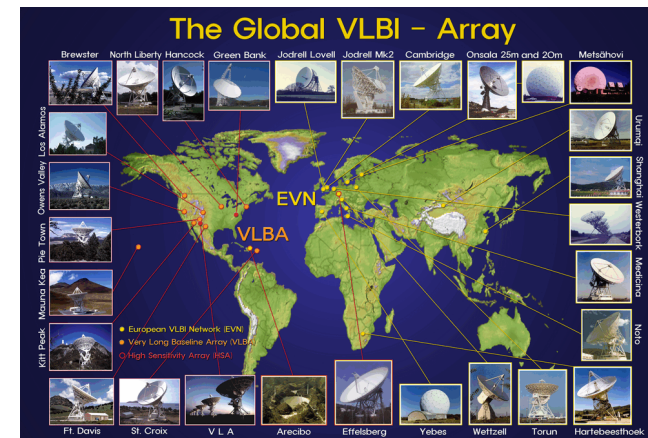


ESO PR Photo 06h/05 (25 February 2005)

© European Southern Observatory

ALMA (最大基線 16-17km)

V.S.

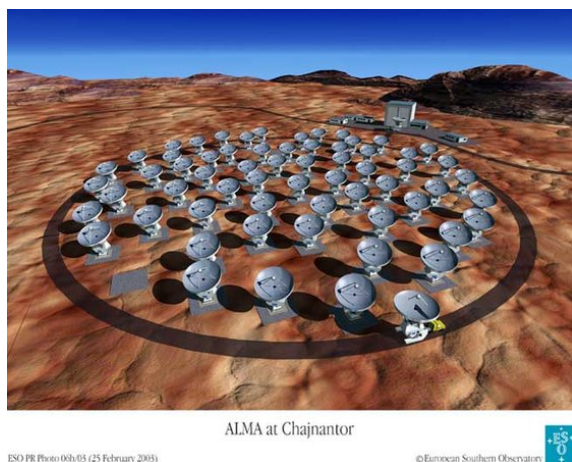


VLBI (> 1000km)

<http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/staff/tkrichbaum/Global-VLBI.html>

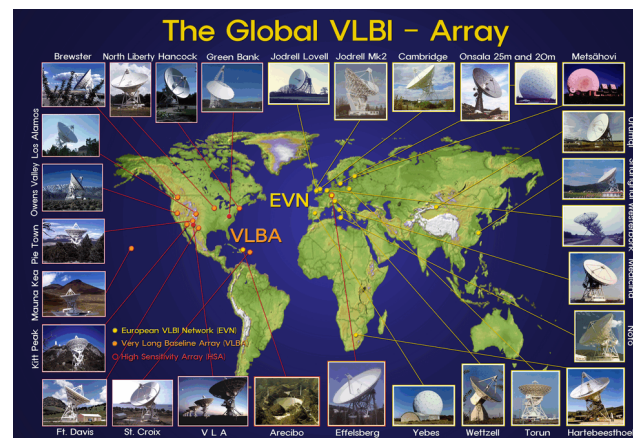
新しい方式

VLBIのような超高解像度を維持しつつ、ALMAのような撮像ができないか？



ALMA (最大基線 16-17km)

+



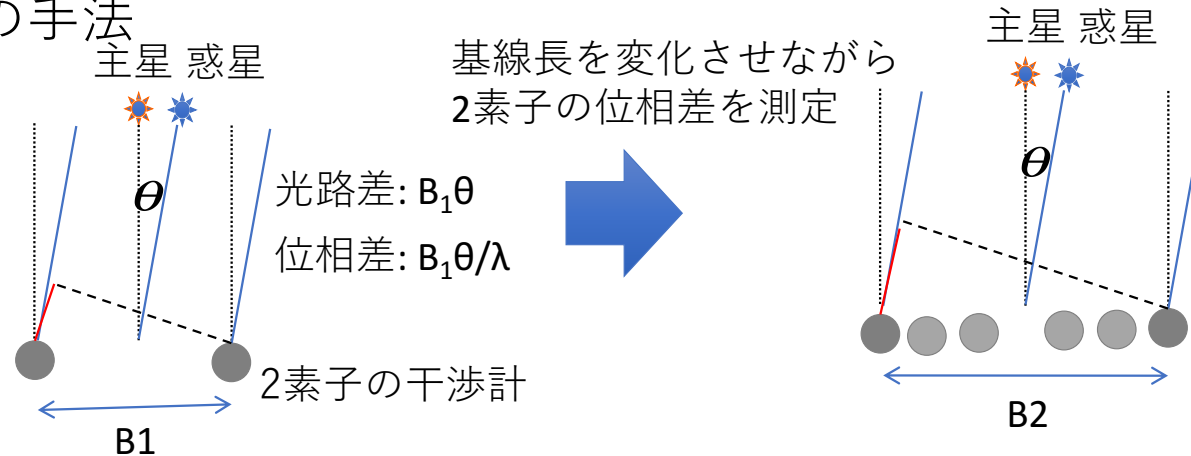
VLBI (> 1000km)

干渉計の（擬似）撮像方式

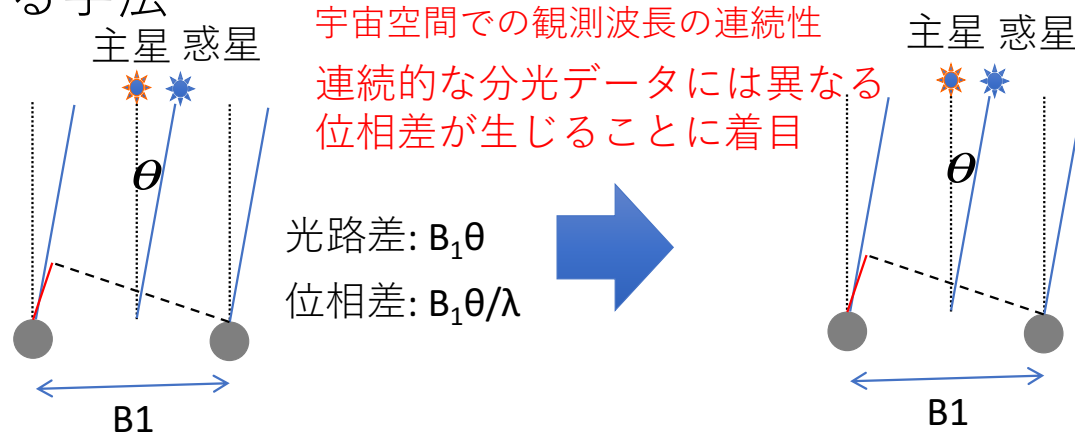
Matsuo et al. ApJ 2011

地球型系外惑星の検出と分光のための方式として提案.

従来の手法



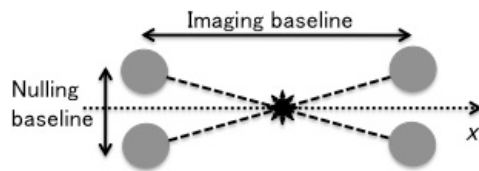
提案する手法



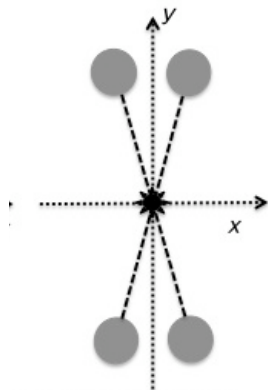
光路差: $B_1\theta$
位相差: $B_1\theta/\lambda_1$
 $B_1\theta/\lambda_2$
 $\dots$
 $B_1\theta/\lambda_n$

例: 惑星系の（擬似）撮像

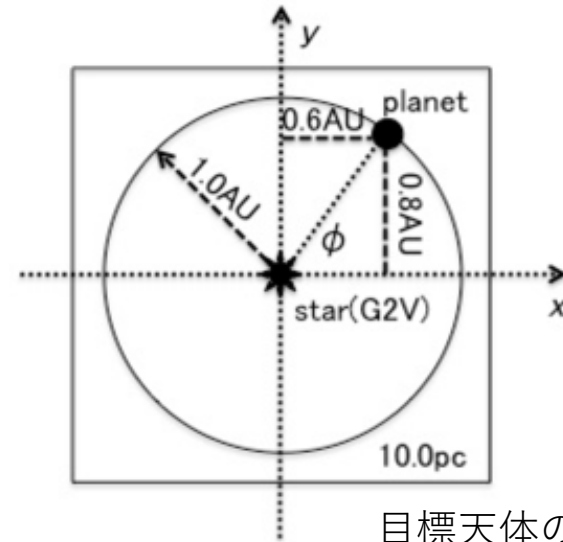
注: 実際には、 $\cos$ 成分あるいは $\sin$ 成分のどちらかを利用.



x軸に沿って測定

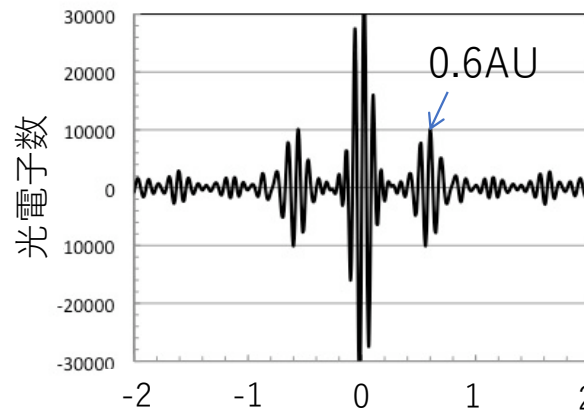


y軸に沿って測定

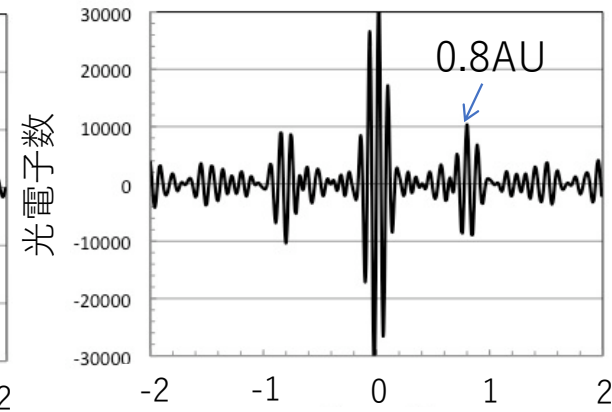


目標天体のモデル

sin成分のみを取得



軌道長半径 (AU)
x軸に沿った測定



軌道長半径 (AU)
y軸に沿った測定

像再生後の惑星系のイメージ

2光束の結合方式

- 技術的課題:

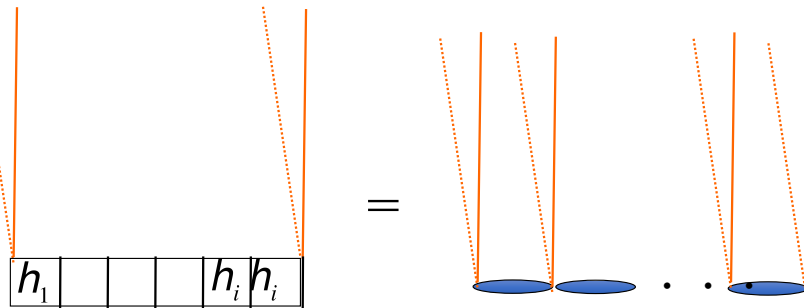
1. 光赤外は波長が電波に比べて短いため、各望遠鏡で位相を取得できず、光を干渉させて位相を計測.
->2光路の光路差を波長程度で一致させる.
2. 焦点面で干渉縞を計測するため、2光束をPSFよりも精度よく同時に合わせる必要.
-> 望遠鏡の相対的な指向精度の要求.
3. 撮像が困難. 複素鮮鋭度($\cos$ 成分と $\sin$ 成分の両者)の取得が必要.

-> これらの技術的課題をクリアできる方式を！

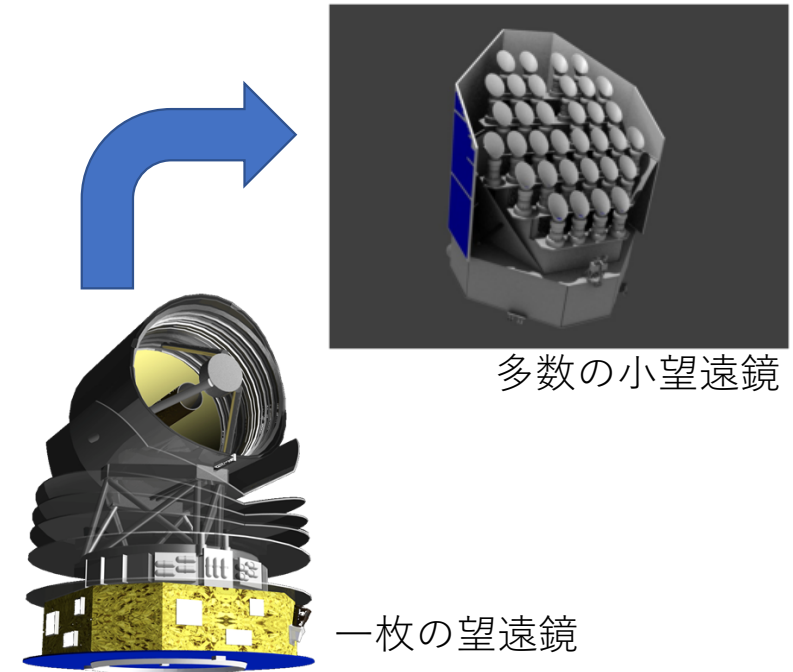
瞳分光

Matsuo et al. ApJ 2016

- 地球型系外惑星の大気分光を目的として提案.
- 望遠鏡開口の像を分光することで非常に高精度に分光測光が可能.
- NASAの2030年代の宇宙望遠鏡計画のキー技術として、NASA/Amesで技術実証を予定.



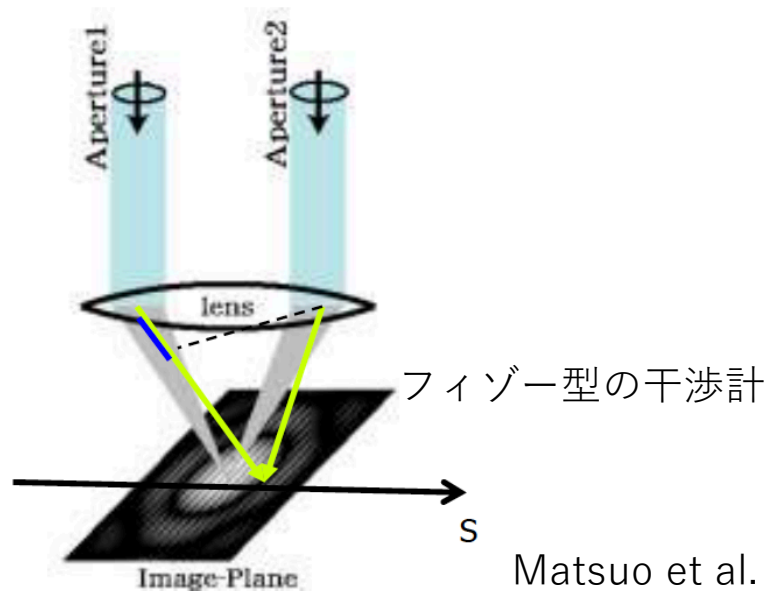
1. 望遠鏡に検出器を配置
→ 姿勢擾乱があっても像が移動しない.
2. たくさんの小望遠鏡(独立なデータセット)
→ 検出器による変動を抑制.



多数の小望遠鏡

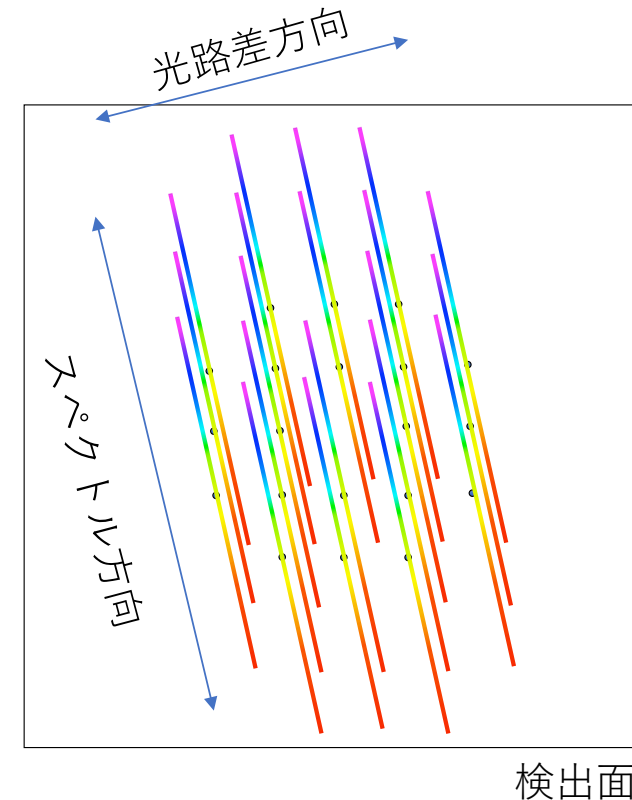
一枚の望遠鏡

撮像方式



Matsuo et al. PASJ 2008

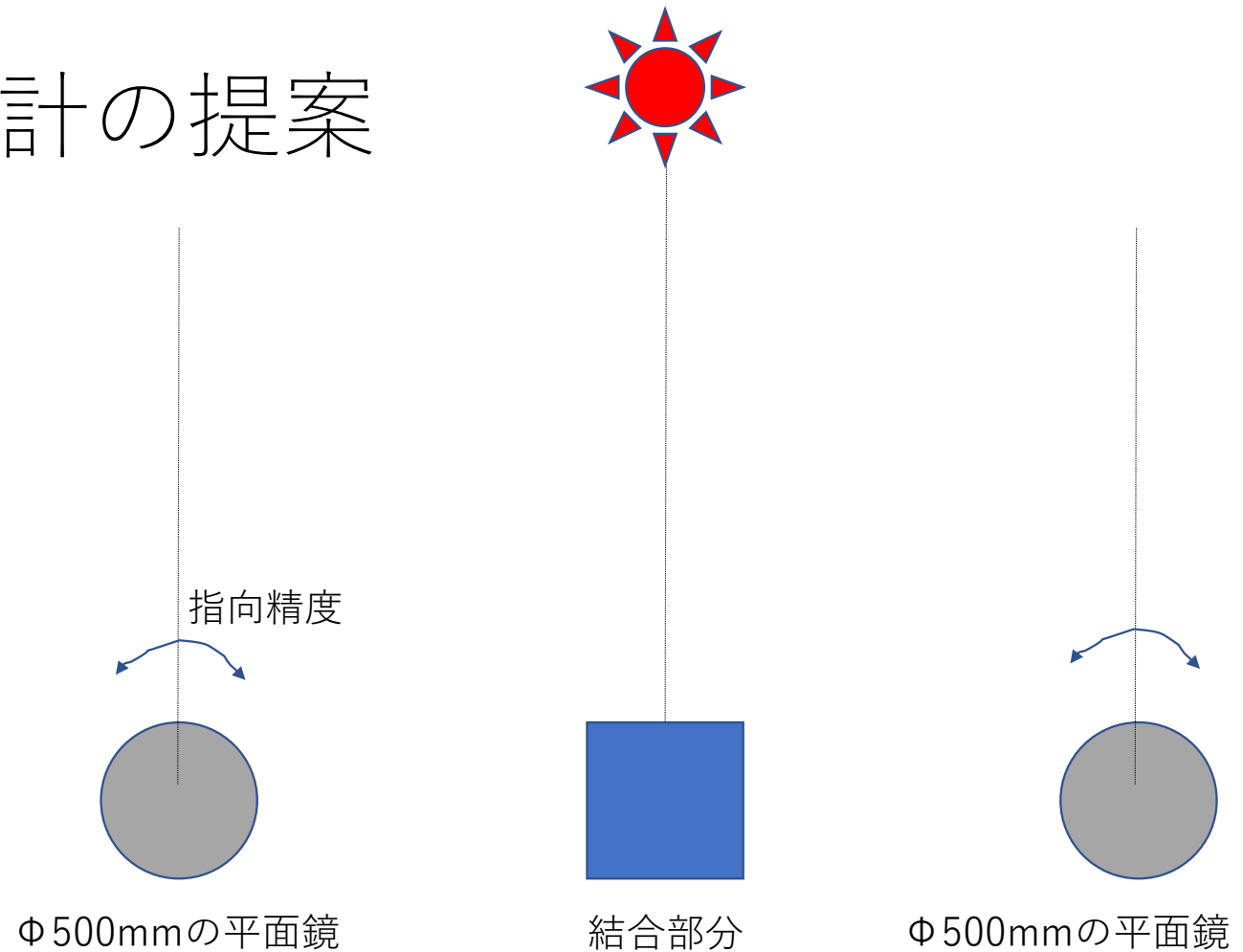
- 2光束の光路差がS軸に形成.
 - > 光路差をフーリエ分光に利用
 - > フーリエ分光により干渉縞の複素鮮鋭度 (cos成分 + sin成分)の取得.



- 瞳分光への撮像方式の応用. 瞳の空間方向に2光束の光路差を形成.
 - > 干渉縞の複素鮮鋭度の取得.

超長期基線干渉計の提案

- ポイント:
 - ✓ 1-10kmの基線長を固定.
回転だけで(u,v)平面を密に埋める.
 - ✓ 位相取得瞳分光により複素鮮鋭度を一度の露光で取得.
 - ✓ flying formationへの要求を大幅に緩和.
(mm -> cm)



Flying formation

- JAXAのFlying formation: 織姫/彦星 (1990年代)、ISS/コウノトリ (2010年代).
- 基線長1-10kmの固定、数cmの光路長制御、数cmの相対位置精度、太陽同期軌道 (高度>1400km以上)をベースラインに検討.
(海外のflying formation計画と同程度の精度)
- Flying formationの制御において太陽輻射の外乱を除去.
- 超長基線長干渉計の基線長リミット: J2 (地球の扁平による緯度方向の重力加速度の違い)による相対位置の変動.

今後

- Flying formationの要素技術（科学衛星内に搭載する計測制御機器）についての要素実証（ISS GEMなどを利用して）が可能か.
- Flying formationを利用する科学計画（FFAST, DECIGO etc）と共通の要素技術があれば、共同で検討を進めていけないか？