

低周回軌道衛星によるサブミリ波スペースVLBIの成立性検討

朝木 義晴（宇宙科学研究所），三好真（国立天文台），高橋 芳太（苫小牧高専），坪井昌人（宇宙研）

背景

銀河系中心ブラックホールSgr A*のブラックホールシャドウ（BHS）の観測は天文学にとどまらず相対論物理学にとっても大きな意義を持つものである。Sgr A*の周囲にはプラズマが取り囲み、その電子による散乱のためミリ波まではVLBIで観測しても鮮明な画像は得られない。したがってこのBHSに迫るためには高空間分解能の得られるサブミリ波VLBI観測が望まれる。しかし、Sgr A*は近距離8 kpcにある小さなブラックホール（ 4×10^6 太陽質量）のため最内安定軌道での回転周期は30分と変化の時間スケールが短い。この間に地上望遠鏡によるVLBIでは十分な(u, v)サンプリングを実現することが困難である。しかし、低軌道周回軌道にあるスペースサブミリ波アンテナが加わることで、事態は一変する。例えば地上望遠鏡が3局でも(u, v)上で非常によいサンプリングができ高画質な画像が得られることが示されている。本発表では、観測対象としてSgr A*のBHSのイメージを仮定し、スペースアンテナおよび地上アンテナに想定される現実的な振幅誤差および位相誤差を混入させた場合の撮像シミュレーション結果とそれを基にした観測の実現性について報告する。

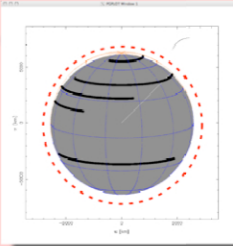
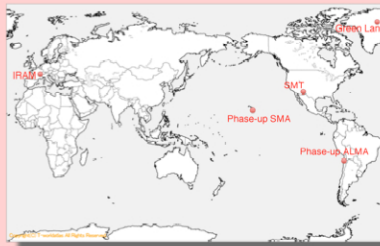
電波干渉計の特徴と装置としての課題：

なぜ、低周回軌道（LEO:Low-Earth-Orbit）衛星によるスペースVLBIを思い至ったか？

- ・空間分解能（解像度）は 観測波長/最長基線長に依存する。よって、空間分解能をあげるためには、観測波長を短くするか、最大基線長を長くすることが求められる。
- ・電波干渉計での画質を決める要因の一つに、いかに多くの空間周波数成分を得るかということがある。多数の望遠鏡で同時に観測し、2次元フーリエ成分（空間周波数成分）をなるべく多く取得することが高画質画像の作成において重要である。
- ・VSOP-2（スペースVLBI）は、高い高度を巡る衛星望遠鏡との組み合わせで基線長を大きく延ばし、センチ波～ミリ波において空間分解能を極限まで高めようとした観測装置である。しかし、同時期に利用可能な宇宙電波望遠鏡が1基であるために、空間周波数成分が埋まりにくいという欠点があった。
- ・地上VLBIにおいて、観測波長を短くし、短ミリ波～サブミリ波観測を行うことで空間分解能を高めることが可能である。一般的には、地上計画は衛星計画ほどにコストはかからないが、利用可能なミリ波/サブミリ波望遠鏡は決して多くなく、また建設に達したサイトも限られている。VSOP-2のようなスペースVLBIと同様に、空間周波数成分が埋まりにくいという欠点がある。

LEO衛星を利用したスペースVLBIでは、地上VLBI並の基線長しか得られないが、観測波長を短くすることで空間分解能を向上させれば空間周波数成分をまんべんなく埋めた高画質/高分解能撮像が可能になると気が付いた。

LEO衛星と地上望遠鏡が描く(U, V)カバレッジと干渉計開口合成ビーム

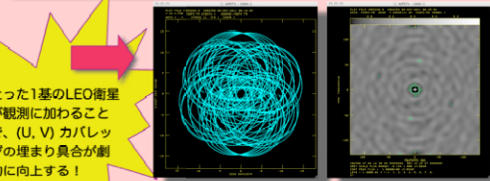
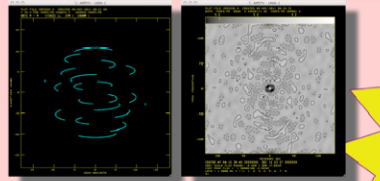


地上望遠鏡の配置と仮定したLEO衛星の軌道

ここでは、観測対象としてM87を仮定し、LEO衛星と4基の地上望遠鏡により得られることのできる3500MHzでの(U, V)カバレッジと干渉計開口合成ビームを調べた。

左：(U, V)作成において仮定した地上ミリ波/サブミリ波望遠鏡の配置。

右：仮定したLEO衛星の軌道。高度800km、軌道傾斜角90°で、太陽同期軌道を仮定。観測天体は銀河系中心方向にある。銀河系中心の位置の部分は夜をあらわす。地球上に描かれた軌道は連続した13時間での地上望遠鏡の軌跡。ここで仮定したLEO衛星の軌道周回時間はおよそ100分であり、13時間の観測時間中により8回周回する。



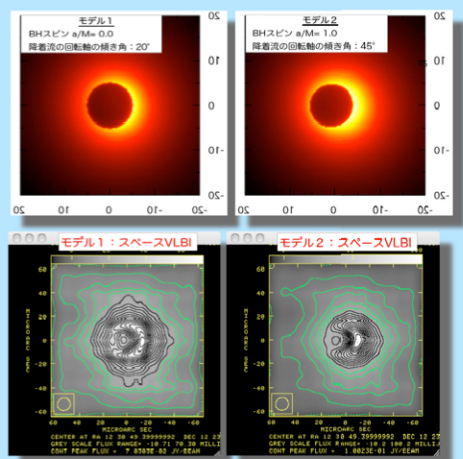
左：地上望遠鏡のみで得た350GHzでの(U, V)カバレッジ。観測時間は13時間。

右：左の(U, V)カバレッジから得られた干渉計開口合成ビーム。

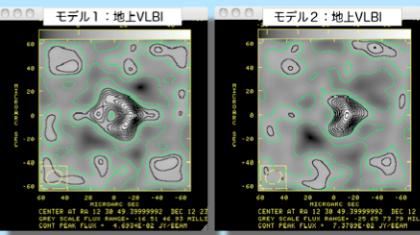
左：地上望遠鏡にLEO衛星望遠鏡を加えた場合の(U, V)カバレッジ。

右：左の(U, V)カバレッジから得られた干渉計開口合成ビーム。

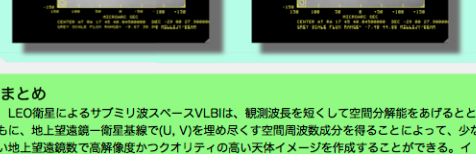
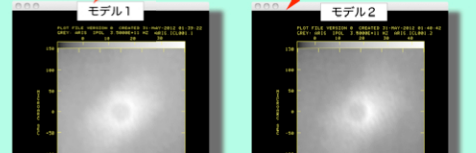
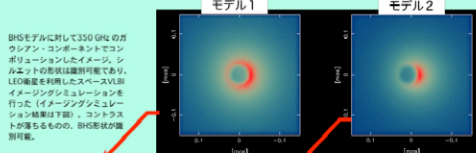
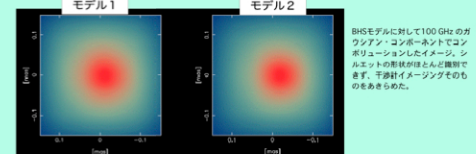
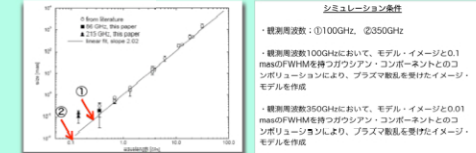
干渉計観測シミュレーション（M87のブラックホール・シャドウ（BHS）のCLEANイメージング）



- VLBI望遠鏡：
 - ・フェーズドALMA、フェーズドSMA、LMT、IRAM、グリーンランド望遠鏡、LEO衛星アンテナ
 - ・熱雑音の動変
 - ・LEO衛星のアンテナ口径：10m
- 観測周波数：
 - ・ALMA（バンド7（350 GHz））
 - ・全てのアンテナがALMAスペック受信機を持つと仮定。
 - ・観測帯幅幅：4 GHz
- 天体イメージ：
 - ・BHS（高橋芳太氏作成/サイズはM87の観測条件に合わせて調整）
 - ・トータル・フラックス：2 Jy (350 GHz)
 - ・時間変動なし



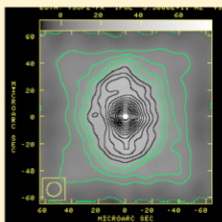
プラズマ散乱を受けた状態でのSgr A* BHSイメージング



広がった複雑な構造をイメージングする際の問題点（点源モデル出発のフリッジ・フィッティングが及ぼす影響）

フリッジ・フィッティング：

アンテナ素子間で相互相関処理をする際にアンテナ間の遅延が十分な精度で得られていない場合、相関処理後にフリッジの最大ピークをとる遅延時間差分値をサーチし、得られた差分値を使って複素相関係数の位相の補正を行う手法（右は概念図）。素子間で独立した時系（時刻基準）や大気遅延など、不確定要素を多く含むVLBIにおいて、データ解析の初期段階で行われ、フリッジ・フィッティングが成功しないとその後イメージング処理に進むことができない。通常、天体の構造が十分に把握できていない場合、天体の構造は「点源」とであると仮定してフリッジ・フィッティングを行う。



左：現実的なVLBI観測エラーを加えたモデル1の疑似観測データに対して、86 GHzの観測データで位相トランスファーで位相補償を行い、フリッジ・フィッティングを施した後でのCLEANイメージング結果。(U, V)カバレッジとしては上の熱雑音のみのシミュレーションと同じだが、天体を点源と仮定したフリッジ・フィッティング処理においてビジュビリティ位相を点源天体に合わせた補正をも施してしまい、イメージング処理結果がモデルと大きく異なってしまう。このような問題を避けるには、フリッジ・フィッティングを使わないでも済むほどにア priori 遅延精度度を十分にあげるか、あるいは観測天体に極力近い構造を導入してフリッジ・フィッティングを行うしかなく、どちらを選択するにしても解決すべき課題である。

まとめ

LEO衛星によるサブミリ波スペースVLBIは、観測波長を短くして空間分解能をあげるとともに、地上望遠鏡一衛星基線(U, V)を埋め尽くす空間周波数成分を得ることによって、少ない地上望遠鏡で高解像度かつクオリティの高い天体イメージを作成することができる。イメージングにおいて、従来からVLBIで用いられてきたフリッジ・フィッティングは複雑な形状を持つ天体のイメージングには問題があり、ポストプロセスでのキャリブレーションも含め、適切なデータ処理法について検討の必要を認めた。

銀河系中心近傍のプラズマ散乱による電波イメージの形状ひずりをガウシアン・コンポーネントとのコンボリューションによってイメージモデルを作り出し、100GHz、350GHzでのサブミリ波スペースVLBIイメージングを試したところ、100GHzでは難しいが、350GHzではBHSを識別できる程度にイメージング処理が可能であることが分かった。