

宇宙地球フロンティア実地研修 報告書

Report for Onsite Training in Earth-Space Frontier Science

氏名/Name	西野耀平/Nishino Yohei		
所属部局/Affiliation	理学系 Department of	研究科 Astronomy	天文学 専攻 , Graduate School of Science
研究機関・企業名 /Hosting Institution	マーストリヒト大学/Maastricht University		
期間/Period	2023年 5月 28日 28/05/2023	～ 2023年 10月 2日 02/10/2023	*西暦で記入 mm/dd/yyyy

次世代重力波望遠鏡である Einstein Telescope (ET) のプロトタイプを建設中のマーストリヒト大学にて、ETにおける量子雑音を低減する新たな手法の理論的な開発を行った(図1)。ETでは量子雑音を低減するため、基線長 1km のフィルター共振器を 2 本用いて周波数依存スクイーミングを行うことが計画されている。しかしこの手法にはいくつか欠点がある。

一つ目は巨大なインフラストラクチャーが付加的に必要となる点である。フィルター共振器の建設には真空チューブと鏡を安定化するための懸架システムが必要となる。干渉計を 3 台運転する ET の設計では合計 6km の真空チューブと 6 台の懸架システムを要する。

二つ目はフィルター共振器の不完全性による感度の悪化である。従来の周波数依存スクイーミングでは直列につないだ光共振器を経由させる必要があり、共振器間のモードマッチングや位相揺らぎにより雑音が混入する。また 1km のフィルター共振器はロスの影響が比較的大きく、また共振器の安定度由来の雑音も感度に大きく影響する。この影響を回避するためには共振器の長さを長くする必要がある。

この二つの問題を解決するため、今回我々が開発した手法がテレポーテーションを利用した周波数依存スクイーミングである(図2)。スクイーズド真空場と EPR エンタングルメントの 3 本のビームをそれぞれ主干渉計に打ち込み、それぞれに位相回転を行わせる(図3参照)。最後に量子テレポーテーションを利用し、スクイーズド真空場を EPR エンタングルメントの片方へレポートさせることで 3 種類の位相回転操作が集約された状態でテレポーテーションが行われる。この 3 種類の位相回転は従来の手法においての主干渉計と 2 本分のフィルター共振器と等価にすることができ、周波数依存スクイーミングが実現できる。

この手法の優れているところは、一つ目の課題であるインフラストラクチャーが不要になるという点である。これは主干渉計の腕共振器をフィルター共振器として用いるためである。また二つ目の課題に関しても、主干渉計の基線長は 10km あるため、共振器由来のロスが低減できる。

今回の実地研修ではこの理論モデルの構築と、シミュレーションを行い、ETにおける本理論の有用性を示した(図4)。



図 1 : 研修の様子。ET pathfinder prototype.

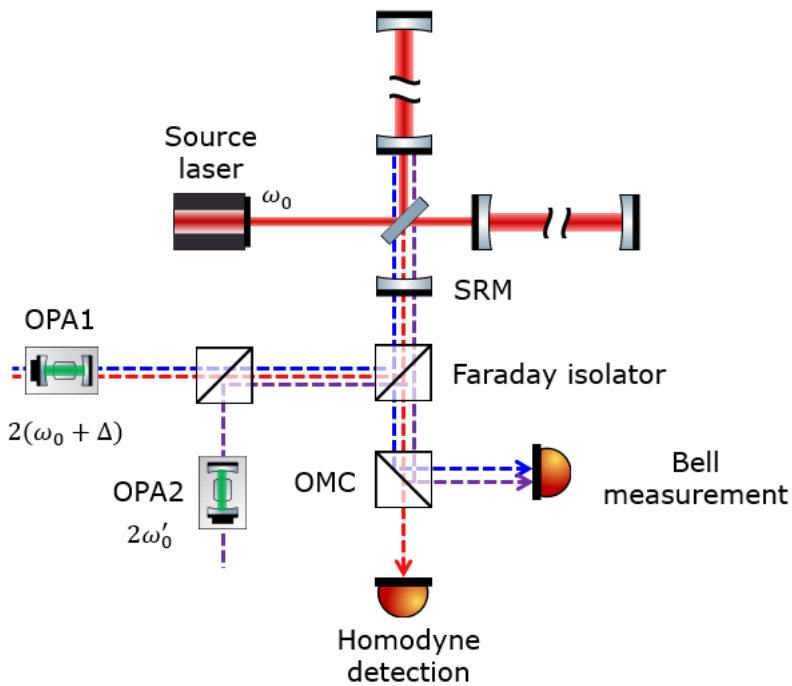


図 2 : テレポーテーションスキューミングの概略図。光パラメトリック増幅器 (OPA) を用いてスクイーズド真空場と EPR エンタングルメントを発生させ、干渉計に打ち込む。周波数的にこれらのビームは分離でき、それぞれ量子的な測定を行い、適切なフィルタリングを通して処理するとテレポーテーションが完了する。

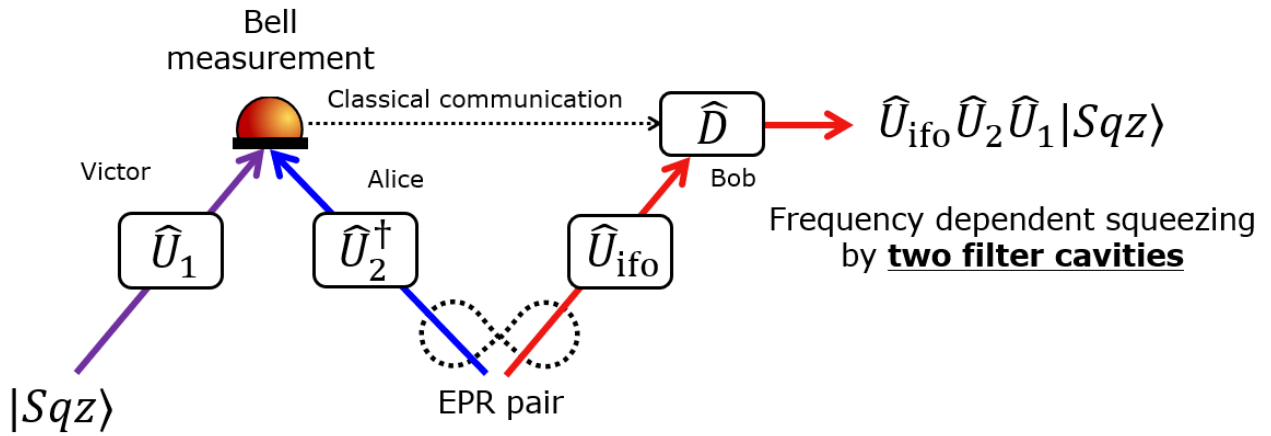


図 3：量子テレポーテーションスクイズングの様子。Victor のもつスクイズド真空場が EPR エンタングルメント（Alice と Bob）を通して位相回転操作を経由しながら Bob 側へと伝わる。

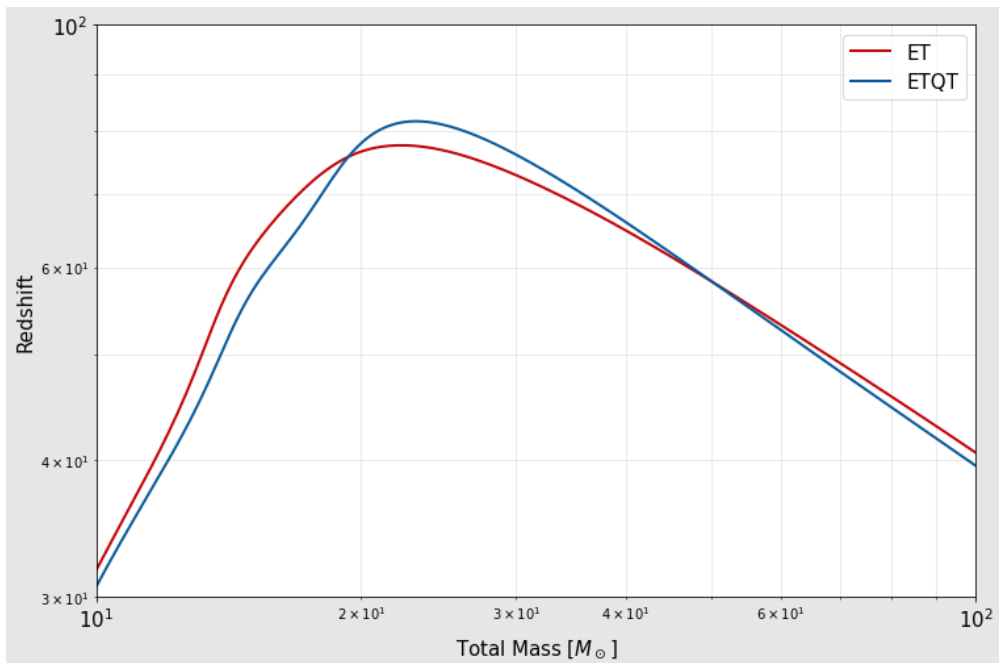


図 2：コンパクト連星合体の観測可能距離を示すプロット。横軸は合体する連星のトータルマス、縦軸は赤方偏移。青線のテレポーテーションスクイズングは 20-50 太陽質量の合体に対して従来の周波数依存スクイズングを上回る。