

重力波観測におけるデータ解析の概要と今後の課題

総合研究大学大学院
物理科学研究科 天文科学専攻
M1 橋詰克也

概要

重力波は重力場の時間変動で生じる時空のさざ波である。この波は光速で時空を伝播し、物質との相互作用が非常に弱いという性質を持つ。よって電磁波とは異なり、波源からの信号は吸収、散乱されにくい。これを観測できれば電磁波では得られないような天体の情報を得ることができる。重力波は連星パルサーの観測から間接的にその存在が確かめられているが、未だに直接的な検出がされておらず、そのための技術開発が進められている。

現在、我々は大型光干渉計による重力波検出を目指している。検出器の高感度化に並んで重要なのは検出器からの信号のデータ解析である。理論的に予測される重力波信号の大きさは、検出器自体の多くの雑音と同程度以下である。したがって、雑音に埋もれている微弱な重力波信号を切り分ける技術が必要になる。

本稿では、現在の重力波データ解析の手法や今後の課題について扱う。

主な重力波源

後述する通り、解析では波源の特徴を知ることが重要である。現在考えられている重波源としては、

- 連星合体による重力波
中性子星連星, BH (Black Hole) 連星, 中性子星とBHの連星
- パースト重力波
重力崩壊型超新星爆発 (type-II SN: Super Nova), GRB (ガンマ線パースト), SGR (ソフトガンマ線リピーター)
- 連続波
パルサー (非球対称な中性子星)
- 背景放射
初期宇宙起源

などが挙げられる。

データ解析について

データ解析の流れ

データ解析の流れについて簡単に述べる．重力波源から放射された重力波が地上の重力波望遠鏡で観測されると，レーザーの干渉状態に応じた電氣的な信号が出力される．それを較正し，データ中の重力波信号を探索することになる．

重力波観測におけるデータ解析

重力波を受信したとしても，重力波望遠鏡から出力される信号には重力波信号に加え様々な雑音が入混している．重力波信号は雑音レベルと同等，またはそれ以下の大きさしかないため，いかにして信号雑音比（SNR）を大きくするかがデータ解析における課題である．ここで波源に応じた解析手法が必要となる．

連星合体

連星合体はアインシュタイン方程式を近似的に計算した理論的な波形予測が進んでおり，またイベント数自体も多いと考えられているので重要な波源である．連星は重力波を放射しながら公転周期を小さくし，最終的には合体してBHが形成されると考えられている．

連星の回転軌道が小さくなっていく段階（inspiral phase）はpost Newtonian近似によって，連星合体後に形成されるBHが固有振動による重力波を放射する段階（quasi-normal mode phase: QNM ringdown）についてはBH摂動理論によって精度よく重力波波形が計算されている．しかし，連星が合体する段階（merger phase）は複雑なコアの状態方程式を解かなければならず，波形予測が困難である．

波形予測ができる場合，望遠鏡からの出力信号と相関をとることで重力波信号を探し出せばよい．相関をとったデータをスペクトルで規格化して信号雑音比（SNR）を得て，重力波信号を同定する方法をMatched Filteringという．

バースト重力波

バースト信号とは，時間的に短い信号¹のことである．これは周波数空間上では広帯域な信号となる．バースト重力波源となる天体は前述した通りだが，これらの天体から放射される重力波の波形予測は方程式が非常に複雑で容易ではない．したがって連星合体と同様に解析することができない．

さらに解析を困難にするものとして，望遠鏡自体がバースト性の雑音（ライン）を持つという問題もある．ラインは懸架系の振動モードによって生じる狭帯域の強い信号である．ラインと同じ周波数帯の中心周波数を持つバースト重力波は隠されてしまい，その情報を失うことになる．ラインはピークに非定常性があるため現在の解析手法では重力波信号との分離が困難である．今後は新たな解析手法の開発が望まれる．

¹典型的な時間スケールは 100msec

連続波

連続的な重力波は非球対称な回転中性子星からは放射されることが理論的にわかっており、マッチドフィルタリングを用いた探索が可能である。しかし、天体のパラメータなどを把握したい場合は長時間の観測が必要であるため非常に大きなデータを扱ったり、安定した望遠鏡の運転が重要となってくる。

背景重力波

背景重力波からは晴れ上がり以前の宇宙の情報が得られると期待されている。電磁波では見ることができない初期宇宙を直接観測できるのは重力波の魅力である。解析手法については今回は触れない。

国際的な観測ネットワーク

すでに、世界各地で重力波望遠鏡は稼働している。アメリカの LIGO やフランス-イタリアの Virgo、ドイツの GEO、日本では TAMA300 などである。現在は改良型の開発が進んでおり、高感度化を目指している。

重力波望遠鏡のネットワークは重力波観測において重要な意味を持つ。重力波望遠鏡 1 台では重力波の到来方向を同定できないため、複数台による同時観測で重力波の到達時間差を利用して波源の位置を特定する。また重力波望遠鏡のアンテナパターンの関係で、複数台による観測でないと全方位に渡る観測領域をカバーできない。

重力波観測は望遠鏡 1 台辺りの性能だけでなく、世界的なネットワークも大事である。

マルチメッセンジャー観測

マルチメッセンジャー観測では電磁波、重力波観測の相互協力によって突発天体を追う。リアルタイムのバーストサーチで重力波イベントの推定天球位置を電磁波望遠鏡に送ってフォローアップ観測を依頼したり、電磁波望遠鏡からのトランジェントアラートを受けて重力波データを解析する。

結論

重力の相互作用が極めて小さいため、重力波望遠鏡自体が持つ雑音に対して重力波信号は微弱である。よって、雑音の中から重力波信号を見つけるためには各波源に応じて解析手法を変えていく必要がある。重力波望遠鏡の高感度化だけでなく、データ解析の手法も重力波初検出に向けて非常に重要な問題である。