

## 宇宙物理学教室

## 1 連星中性子星合体で形成される大質量中性子星の合体後振動における重力波シミュレーション

浅川 直道

中性子星(NS)は中心密度が $10^{15}$  g/cm<sup>3</sup>以上にも達する高密度天体である。NSの構造を調べ状態方程式(EOS)を決定することは、実験で到達困難な超高密度下での物質の振る舞いを知るために重要だと考えられる。NSの構造、翻ってEOSを調べる手段に連星中性子星合体からの重力波があり、特に連星合体後振動の重力波の特徴的周波数は高密度域のEOSに依存することが分かっている。そこで本研究では近似的だが計算効率に優れた1次元一般相対論的流体計算コードを用いて特徴的周波数のEOS依存性を明らかにし、中性子星の質量と半径の間の相関を調べた。

## 2 拡張重力理論とその検証について

窪田 圭一郎

一般相対性理論は発表以来100年以上の間、重力場を記述する最適な理論だと考えられている。しかし、重力の量子効果や宇宙の加速度膨張の解明には一般相対性理論の拡張が必要かもしれない。本論文では一般相対性理論を超えた拡張重力理論とその検証方法について調べた。その検証方法として計量を重力ポテンシャルで展開したときの係数をパラメータで表すPPN形式、重力波の偏波、重力波波形の係数をパラメータで表すPPE形式について調べた。その結果、今後の発展が期待できる重力波が有望な手段であることがわかった。

## 3 General Relativistic Ray-Tracing Code for Black Hole Shadow

小林 雪乃

2019年イベントホライズンテレスコープによるブラックホール(BH)の直接撮像によって、いわゆるBH Shadowの観測がなされBH研究の新分野が拓かれた。そこで本研究では、Schwarzschild BH周りの光子の振る舞いを調べ、BH Shadowをシミュレーションするためのコードを作った。具体的には光子の測地線方程式をルンゲクッタ法で解き、極座標における座標特異点の数値的取り扱い、一般相対論に特有のTetradの適用といった点を解決してコードを作成した。その結果BH時空の任意の点から任意の方向に飛ぶ光子の軌道の追跡に成功し、本研究によってBH Shadowをシミュレーションするための準備が整った。

## 4 J-GEMによるキロノバのフォローアップ観測

田中 亮哉

2015年に初めて重力波の直接観測は重力波天文学の幕開けとなった。更に、2017年に連星中性子星からの重力波とそれに伴う電磁波対応天体が観測されこれらのマルチメッセンジャー観測によって中性子星の状態方程式への制限や、重元素の起源の謎に迫る結果が得られた。2019年4月より開始された重力波観測のO3フェイズではさらなる成果が期待されている。そこで、本研究では日本の重力波観測チームであるJ-GEMに参加し、重力波アラートのチェックおよび観測画像の解析を行った。本論文では、O3で観測されたGW190425zの質量の同定やGW200114fの解析に貢献した内容についてまとめた。

## 5 バリオンとダークマターの相対速度を考慮した密度ゆらぎの進化の解析

安田 萌乃

宇宙の晴れ上がり直後にバリオンとダークマターの間に相対速度が存在することが示唆されている。本研究では、この相対速度を考慮した密度ゆらぎの方程式を導出し、バリオンとダークマターの線形密度ゆらぎの進化を数値的に解いた。その結果、相対速度が存在しない場合には、解析的に見積もられたジーンズ質量付近を境に確かにバリオン密度ゆらぎの成長が抑制された。一方で、30 km/s 程度の相対速度が存在する場合には、バリオン密度ゆらぎの成長が抑制される臨界質量が2桁以上大きくなることがわかった。

## 6 密度ゆらぎの確率分布の時間発展

土田 阜生

宇宙論的重力多体計算の結果に基づき、密度ゆらぎの確率分布の時間発展を調べた。その結果、密度ゆらぎの確率分布は正規分布から対数正規分布へと変化した。この分布の変化を定量的に見ると、標準偏差が0.2~0.3になると尖度と歪度の値は1を超えることがわかった。つまり、非線形性が弱い段階から密度ゆらぎが正規分布から有意に外れることを示唆している。また、初期に同一の値を持つ密度ゆらぎの時間発展を調べると、デルタ関数から正規分布、対数正規分布へと確率分布が遷移し、単純な線形理論では説明できないことがわかった。

## 7 ダークマターハローの非球対称性と Splashback Radius

岡戸 悠一郎

宇宙論的重力多体計算からは、ダークマターハローの外縁部で物質密度が急激に下がる場所 (Splashback Radius) が、ハローの物理的境界として示唆されている。ただし、先行研究では個々のハローに球対称性を仮定しているため、本研究では非球対称性を考慮した解析を行った。その結果、全てのハローにおいて、長軸方向と短軸方向それぞれで Splashback Radius の存在が確認できた。また従来から指摘されていた Splashback Radius と質量降着率の間の相関関係は、非球対称性を考慮した方が強まることがわかった。

## 8 ALMA 望遠鏡による遠方銀河団 XMMU J2235.3-2557 のスニヤエフ-ゼルドビッチ効果測定

石井 希実

スニヤエフ-ゼルドビッチ(SZ)効果の放射強度は距離によらないため遠方の銀河団の観測に有利であり、高温ガスの圧力分布の直接測定に繋がる。本研究では、ALMA 望遠鏡で観測された赤方偏移  $z = 1.39$  の銀河団 XMMU J2235.3-2557 のデータ解析を行い、圧力分布を調べた。その結果、SZ 効果が  $5\sigma$  以上の統計信頼度で検出された。また、この天体の圧力分布は低赤方偏移 ( $\langle z \rangle = 0.1, 0.2$ ) の銀河団よりも明らかになだらかであり、中間赤方偏移 ( $\langle z \rangle = 0.8$ ) の銀河団とはよく一致することがわかった。このことから、宇宙が誕生して 45 億年から約 20 億年間は銀河団ガスの圧力分布がほぼ変化せず、その後の約 40 億年間で大きく変化したと考えられる。

## 9 弾丸銀河団における衝撃波面周辺の物理的環境

大工原 一貴

ALMA によって取得された Sunyaev-Zel'dovich(SZ)効果の観測データを用いて弾丸銀河団(1E 0656-56)の衝撃波面周辺を調べた。その結果、コンプトン $y$ パラメータ  $\Delta y = (5.83 \pm 1.02) \times 10^{-5}$ に対応する圧力のギャップが $5.7\sigma$ の統計信頼度で検出された。このギャップの位置は、従来 X 線観測で示唆されていた衝撃波面と非常によく一致した。また、SZ 効果と X 線の観測結果の組み合わせから、衝撃波面下流域の電子温度 $5.5 \pm 2.7$  keV、マッハ数 $\mathcal{M} = 1.9 \pm 0.2$ が得られた。このマッハ数は X 線データのみから得られた値よりも低い。その原因としては、衝撃波面下流域において電子温度がイオン温度に追いついていない可能性が考えられる。

## 10 光子計数型強度干渉計の実現に向けた検出器の設計

河原 沙帆

テラヘルツ波帯域で高空間分解能の観測ができる新しい方法として、光子計数型強度干渉計が挙げられる。本研究では光子計数を目指し、3次元電磁界解析ソフトを用いたシミュレーションで、検出器の量子効率を良くし、キャパシタンスを小さくできる設計にすることを目指した。その結果、伝送線路からの放射による損失を減らし、入力電力に対する SIS 素子の量子効率を 70%から 80%に上げることができた。また、検出器のキャパシタンスはシミュレーション結果を用いた計算から、376fFから 22fFまで下げられることが分かった。

## 11 テラヘルツ光子計数型検出器の開発に向けた回路設計および回路の評価

野地 涼平

光子計数型テラヘルツ強度干渉計に搭載する SIS 検出器を運用するために FET(Field-Effect Transistor)を用いた読み出し回路の開発を行った。FET の候補に挙がる GaAs-JFET、J-PHEMT の I-V 特性とゲートリーク電流の温度特性を調べ、雑音について検討した。その結果、共に極低温下におけるゲートリーク電流は 1pA より小さく、J-PHEMT の雑音は GaAs-JFET よりも小さいことが期待される。しかし、J-PHEMT は極低温でキック現象が発生し、ゲートリーク電流が 100pA 以上超えるためドレイン電圧を 1V に制限する必要がある。J-PHEMT を用いた 2 段のソースフォロワー回路(0.8K と 4K)を設計し、消費電力の制限とインピーダンス整合の条件を満たすことができる。