宇宙物理・数理科学研究室　　Astrophysics & Mathematical Sciences

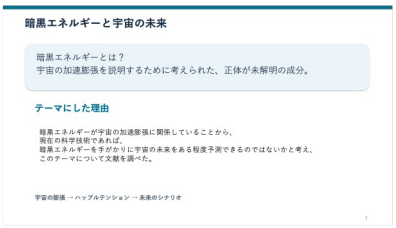
暗黒エネルギー /暗黒物質/超新星爆発

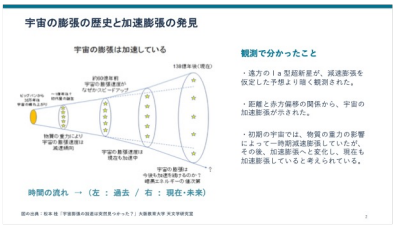
情報ゼミ（3年）文献報告レポート

暗黒エネルギーと宇宙の未来
IC科　林宇軒

大質量星の最期とブラックホール形成
IC科　山口巧翔

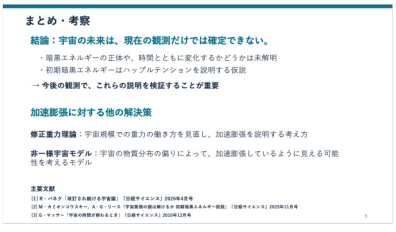
暗黒物質と原始ブラックホール
IS科　山田好古

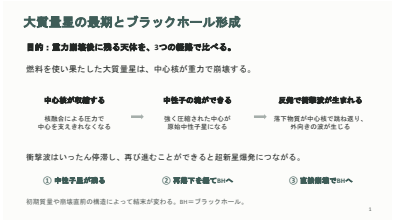


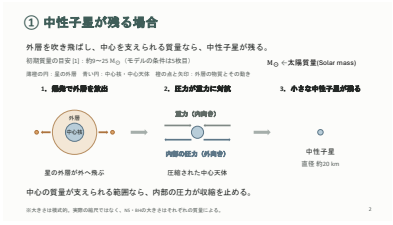


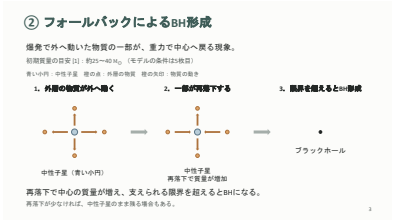


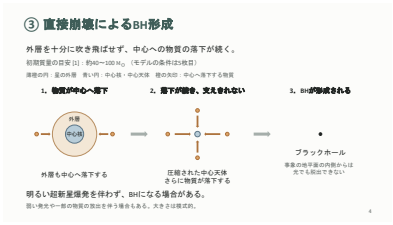














ダークマターとは何か、なぜ必要か

- 光や電波を出さず見えないが、重力の効果から存在がわかる物質。宇宙全体の約27%を占める[2]
- 必要な理由：銀河の外側の星は、見える物質の重力だけでは説明できない速さで回っている。遠方の光が銀河の重力で曲がる量（重力レンズ）からも、見えない質量があると推定される [2]
- 正体は未解明だが、長年の有力候補は次の2つで、どちらも未発見となっている
  - WIMP：重力と弱い力でしか反応しない、重い仮説上の粒子
  - アクシオン：素粒子理論の未解決問題を解くために提案された、非常に軽い仮説上の粒子
- そこへ、新しい粒子を仮定しない候補として原始ブラックホール（PBH）が再注目されている
- ナタラジャン：「PBH仮説の意義は、PBHが正体だと確かめることよりも、WIMPやアクシオンという固定観念から研究を解き放ち、探索の視野を広げた点にある」[1]

原始ブラックホール（PBH）とは

- PBHのP＝Primordial（原初の、原始の）。ビッグバン直後に生まれたブラックホールを指す
- 通常のブラックホールは重い恒星の重力崩壊で形成されるが、PBHは星を経由せず、初期宇宙の密度の濃い場所（密度揺らぎ）が直接潰れて形成されたと考えられる [1]
- 1966年に提唱（ゼルドヴィッチ、ノヴィコフ）され、1971・74年にホーキング、カーが精緻化 [1]
- 十分な数が存在すれば、それ自体がダークマターの正体になりうる
- ホーキング放射（量子効果でブラックホールが粒子を放出する現象）で質量を失い、寿命の終盤で急激に高温化。最終的に標準模型の全17種類の素粒子（ニュートリノを含む）を放出して消滅する＝「最後の爆発」[1]
- 残された質量帯は、小惑星程度（約10^{17} g）から月程度（約10^{25} g）[1]

ニュートリノが指す「最後の爆発」

- ニュートリノ：電荷を持たず、物質をほぼ素通りする素粒子。検出が難しく、巨大な検出器でまれな反応を捉える
- 2023年、地中海に設置された検出器 KM3NeTが、これまで観測された最高エネルギーの35倍以上のニュートリノを検出した [1]
- カイザー（MIT）は、これは爆発したPBHに由来するのではと提案。PBHは爆発時にニュートリノも放出するため [1]
- カイザーらの計算：小惑星サイズのPBHが約2000天文単位（地球〜太陽間の約2000倍）先で爆発すれば、このニュートリノを生成しうる。その確率は**約8%** [1]

「PBH爆発説」への評価と難点

- 仮説：KM3NeTの超高エネルギーニュートリノは、爆発するPBHに由来する（カイザーら）
- 懐疑（フーバー）：「実在すればもっと簡単に観測されるはず」
- 期待（カー）：「50年間研究して直接的証拠は一つもなかった。これは爆発の証拠になりうる」
- 慎重（マクドナー）：「個人的な直感では、少なくとも1つはPBHが実在するはず」
- 難点（チン）：標準的な宇宙論の予測より1万倍大きな密度揺らぎが必要で、精密な微調整を要する [1]

これまでの観測・現状と今後の検証

これまでの観測・現状
- PBHの直接的な証拠は、これまで一つもない。観測による制約が積み上がるばかりだった（カー）[1]
- 小さすぎるPBHは蒸発済みのはずで、大きすぎるPBHは重力レンズ効果として観測されているはずで、このため、残りうる質量は小惑星程度〜月程度に限られる [1]

今後の検証
- 火星探査機で地球〜火星間の距離を精密に測り、PBHの通過による重力の揺らぎを検出する。PBHがダークマターの大半なら、3〜10年に一度、火星軌道にcm単位の変化が出ろる（カイザー）[1]
- HAWC観測所などで、PBH爆発時のガンマ線を捉える。ダークマター由来の粒子が蒸発を遅らせているなら、10年以内に観測できる確率は**90%超**（タム）[1]

結論：PBHは小惑星〜月程度の質量帯でダークマターの候補として残るが、直接的な証拠はなく、決定打になるかは不透明

参考文献　[1] Jonathan O'Callaghan, "Monster Neutrino Could Be a Messenger of Ancient Black Holes," Quanta Magazine, January 15, 2026, https://www.quantamagazine.org/monster-neutrino-could-be-a-messenger-of-ancient-black-holes-20260115/　[2] NASA Space Place, "What Is Dark Matter?" https://spaceplace.nasa.gov/dark-matter/en/