

天体核研究室活動報告(重力, 宇宙論)

発表者：野村皇太 (天体核研究室)

座長：鈴木智也 (天体核研究室)

1. イントロダクション

重力波が初めて直接観測されてからまもなく 10 年になります。重力波観測は今後ますます規模の拡大や精密化が進む計画です (図 1, 2)。これに対応して、精密観測の時代に何ができるのか、次にどのような目標を立てるべきか、理論側の考察もまた重要性を増していると思われます。この発表では、最近の天体核研究室が興味を持っている重力波・宇宙論に関連したテーマを紹介します。

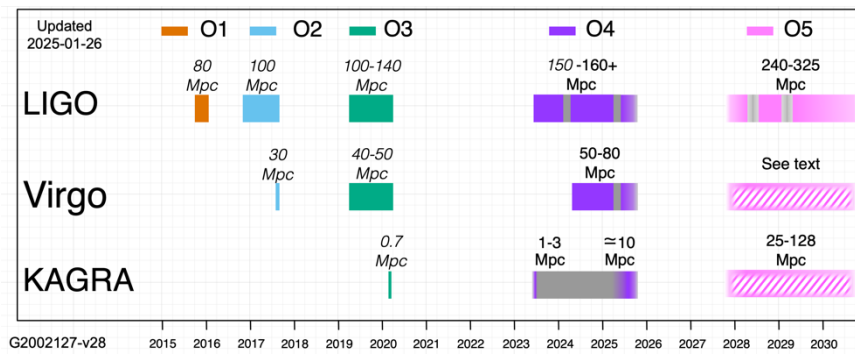


図1. 地上干渉計による重力波観測計画。Mpc が単位の数字はSNR 8 で連星中性子星合体を検出できる距離を表す。[1]

2. Quasi-periodic Eruptions as Multi-Messenger Sources [鈴木智也, 大宮英俊, 武田紘樹]

Quasi-periodic eruption (QPE) は 2019 年に発見された X 線の準周期的なバースト (図 3) でその起源は未解明である。QPE を説明するシナリオの 1 つが「Extreme Mass Ratio Inspiral (EMRI) + 円盤」系 (図 4) である。この研究では、EMRI がコンパクト天体のとき、マルチ・メッセンジャー源 (電磁波と重力波が両方観測されるイベント) になり得るか調べた。現在のところ、TDE 円盤の硬 X 線成分欠如と、継続時間の傾斜角依存性から、特定の傾斜角をもつイベントはターゲットになり得るという結果を得ている。ただし、AGN 円盤を起源とする場合、コロナからの硬 X 線放射により観

測は難しいと思われる。

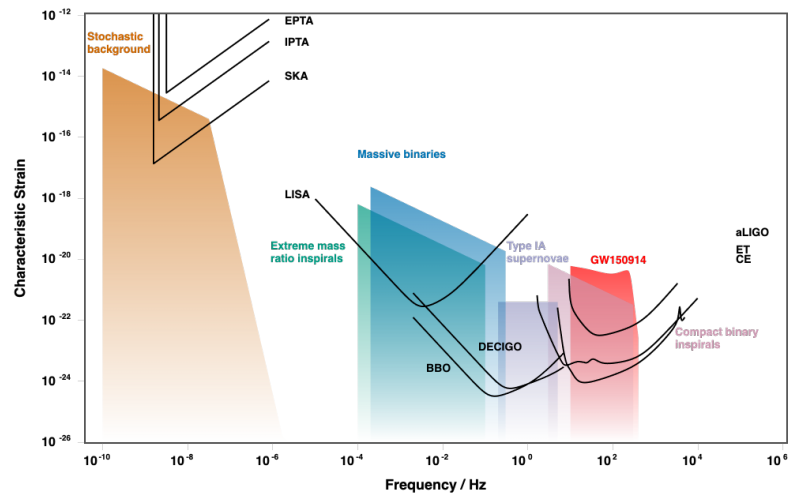


図2. 様々な重力波観測計画の感度曲線 . [2]

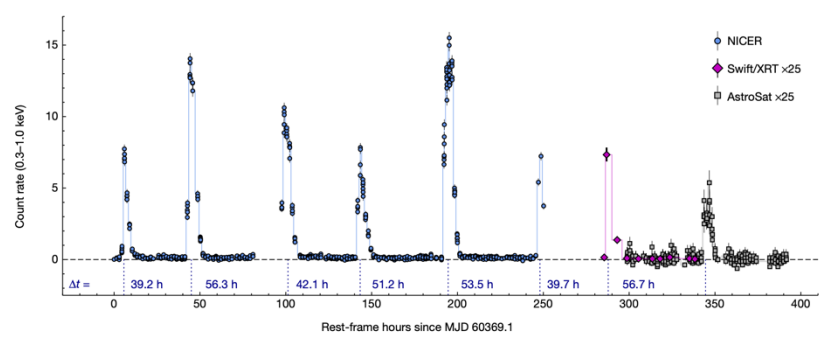


図 3 . QPE の観測例 . [3]

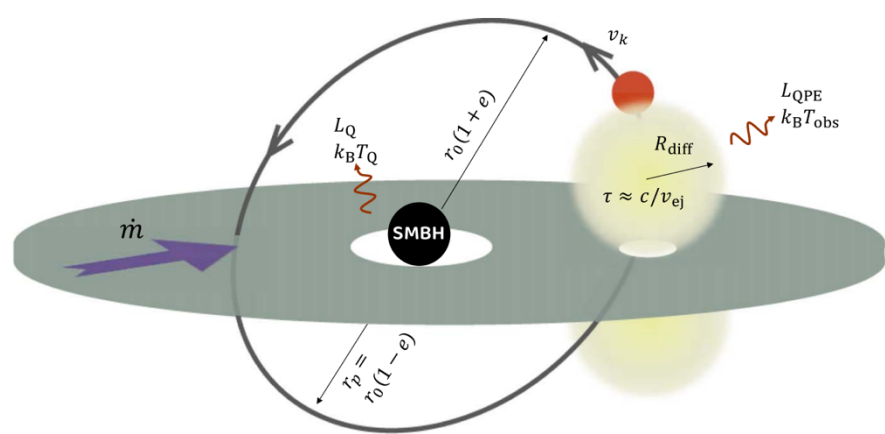


図 3 . EMRI + 円盤系 . [4]

3. コンパクトなボゾンスターの宇宙論的な形成シナリオの可能性 [宮内侑, 田中貴浩]

ボゾンスターとはスカラー場が自己重力によって凝縮して形成される未知のコンパクト天体で、重力波を用いてブラックホールとの識別を試みる研究が多く行われている。しかし、ボゾンスターがコンパクト天体として形成されるシナリオは考えられていない。本研究では、互いに結合する二つのスカラー場を考え、コンパクトなボゾンスターが形成される可能性を調べた。具体的には、ボゾンスターを構成する複素スカラー場とスローロール運動をする空間一様な背景スカラー場を導入し、背景場の時間発展がボゾンスターの進化に与える影響を解析した。その結果、複素スカラー場の有効質量が増大する方向に背景スカラー場が変化すれば、ボゾンスターがよりコンパクトになることが示された。今年度はこの形成シナリオにおいて、スローロール運動によって背景場がどの程度変化すれば、自然な初期条件下で形成される非相対論的なボゾンクラウドがコンパクトなボゾンスターに進化するかを評価した。その結果、背景場はプランクスケール程度の変化をすれば、この形成シナリオが成立することがわかった。

4. Imprints of Dark Photons on Gravitational Wave Polarization [野村皇太, 早田次郎 (神戸大), 上田和茂 (徳山高専), 王子威 (中国科学院)]

背景電磁場上を重力波が伝播するとき、重力波から電磁波への転換（またその逆も同様）が起こることが一般相対論から予言される。我々は宇宙論的スケールでの重力波と光子（ダークフォトン）間の転換過程を調べ、重力波の偏光に対するダークフォトンの影響を明らかにした。具体的には、宇宙論的な磁場の存在を考え、転換を通じた重力波の強度および偏光の発展を解析した。重力波とダークフォトンの最小結合の下では、強度、円偏光、線偏光はそれぞれ独立に発展することを示した。また、ランダムな向きを持つ磁場を通過する際の強度および偏光の統計的平均と分散の解析的公式を導出した。これらの公式は、観測される背景重力波に初期のダークフォトンの偏光がどのように刻まれるかを表している。

5. ベクトルテンソル重力の有効理論における準固有振動 [富塚祥伍, 向山信治 (基研), 高橋一史 (同), 大下翔誉 (同), 小林元 (同)]

現在様々な修正重力理論が提案されているが、重力波を用いることでこれを検証することができる可能性がある。本研究ではブラックホール連星合体後のリングダウン

phaseに着目し、修正重力の一種であるベクトルテンソル重力の有効理論を用いて、摂動のマスター方程式や安定性条件を導出した。また静的球対称時空でのベクトルテンソル重力における準固有振動が一般相対論からどのようにずれるかを明らかにした。

6. 強い重力レンズ効果を用いた重力波の伝播検証 [武田紘樹, 田中貴浩]

重力波が遠方の天体によって重力レンズ効果を受ける際、重力波の伝播補正の影響がどのように現れるかを調べた。レンズ天体近傍での補正では、像の位置や増幅率を変え、場合によっては像の消失や信号の増幅が起こる可能性があることを示した。

7. 重力波の量子デコヒーレンス [武田紘樹, 田中貴浩]

重力子の信号を古典信号と完全に区別するには非自明な量子状態が必要だが、環境との相互作用で破壊される可能性がある。重力波の量子デコヒーレンス汎関数を導き、インフレーション起源の重力波に適用することで、量子的コヒーレンスが保たれる領域を明らかにした。

8. 大規模構造における非等方性の検証 [湊恵太, 樽家篤史 (基研), 奥村哲平 (中央研究院天文及天文物理研究所), 栗田智貴 (マックス・プランク天体物理学研究所), 白石希典 (公立諏訪東京理科大)]

非等方性のモデルを仮定し、Euclid, DESI などの観測を想定したフィッシャー解析を行い、(双極子) 非等方性の大きさの推定誤差を得た。特に、Intrinsic Alignment (IA) と呼ばれる、銀河の形状に相当する観測量を解析に用い、非等方性の推定誤差の改善を試みた。その結果、それによる精度の改善は数% と期待より小さかった(別の解析(宇宙論パラメータの推定) では 40% ほどの改善があった[5])ものの、銀河分布と形状の相互相関(厳密にはパワースペクトル) のみで銀河分布の相関関数の 60% ほどの制限が得られ、IA を用いて銀河分布の相関関数とは独立に非等方性を制限できることがわかった。

一方、[6], [7] で、銀河分布や IA において、密度ゆらぎの等方成分と非等方成分は同じようにバイアスされない(非等方バイアス) ことが示唆され、上で用いたモデルが正しくないかもしれないということになった。また、非等方バイアスがあれば、それ

と非等方性の大きさを独立に決定できないという問題も生じる．そこでまず，双極子非等方性のモデルでこのような非等方バイアスが生じないか，解析的に考えてみた．その結果，双極子非等方性では非等方バイアスは生じず，これまでのフィッシャー解析の結果が使えるのだという結論に至った．

今後の展望として，銀河分布，IA に加えて弱重力レンズのデータも用いることで，非等方バイアスと非等方性の大きさを独立に決定できないか，ということを考えている．

References

- [1] <https://observing.docs.ligo.org/plan/>
- [2] <https://www.sr.bham.ac.uk/~cplb/GWplotter/>
- [3] Nicholl et al., "Quasi-periodic X-ray eruptions years after a nearby tidal disruption event," *Nature* 634, 804-808 (2024)
- [4] I. Linial, B.D. Metzger, "EMRI + TDE = QPE: Periodic X-Ray Flares from Star-Disk Collisions in Galactic Nuclei," *ApJ*, 957, 34. (2023)
- [5] A. Taruya, T. Okumura, "Improving Geometric and Dynamical Constraints on Cosmology with Intrinsic Alignments of Galaxies," *ApJL*, 891, L42 (2020)
- [6] M. Shiraishi, T. Okumura, K. Akitsu, "Statistical anisotropy in galaxy ellipticity correlations," *JCAP*, 2023, 013. (2023)
- [7] S. Masaki, M. Shiraishi, T. Nishimichi, T. Okumura, S. Yokoyama, "First confirmation of anisotropic bias from statistically anisotropic matter distributions," *arXiv*, arXiv:2409.12004. (2024)

天体核研究室活動報告(天体物理学)

発表者：喜友名正樹(天体核研究室)

座長：鈴木智也(天体核研究室)

1. イントロダクション

これまでの宇宙物理学 100 年の歩みにおいて、人類の宇宙に対する理解は驚くほど進歩した。星の形成・進化、星の最期としての超新星爆発やコンパクト天体形成、これらのサイクルの総体としての銀河の形成・進化などについて、ほとんどの現象に対し標準的描像が整理されている。しかし、その中であって 50 年以上その標準的描像が確立していないものがある。それが超巨大ブラックホール(SMBH)である。SMBH は 1930 年代に謎の電波源(準星: quasar)として初めて発見され、1970 年代にそれが超巨大ブラックホールと降着円盤で説明されることが提唱された(e.g. [1])。以降、このような SMBH をどのように形成するのかの説明が試みられてきた([2],[3])。鍵となるのは、観測技術・観測機の発展に平行し、より初期宇宙にも SMBH が観測されているという事実である。

宇宙物理学の立場からはこれら SMBH を星起源の種 BH 形成とそれへのガス降着による質量成長で説明しようとする。しかし、天文分野ではよく知られていることとして、BH にガスが降着させるにはガスを BH の ISCO(最内安定円軌道)半径に送り込むまで力学的エネルギーと角運動量を輻射エネルギーに転換して捨てる必要がある。その輻射が外側の降着ガスに輻射圧を与えて重力を実効的に弱めるため、あまりにも高い降着率は安定して維持できず、力学的に安定な BH 質量成長率は Eddington 降着率で上から制限される。

$$\begin{aligned}\dot{M}_{\text{BH}} &\simeq \frac{4\pi G m_p}{\eta c \sigma_T} M_{\text{BH}} \simeq \frac{M_{\text{BH}}}{50 \text{ Myr}} \\ M_{\text{BH}} &\simeq M_{\text{BH}}(t_0) \exp\left(\frac{t-t_0}{50 \text{ Myr}}\right)\end{aligned}\quad (1)$$

この降着率では BH 質量が 10 倍になるのに最速で ~ 100 Myr かかる。観測されている SMBH が通常の星(質量 ~ $10^{0-2} M_{\odot}$) 起源だと考えると、 $10^{9-10} M_{\odot}$ の SMBH に成長するまで最速で ~ 0.8–1 Gyr かかる計算となる。このため、遠方の quasar を観測すると宇宙年齢 ~ 1 Gyr に向けて SMBH の数が減り、それより過去では超巨大 BH が見つからなくなるだろうと予想されていた。

しかし、2000 年代の SDSS 等および近年の JWST の観測により、赤方偏移 $z \sim 6$, 宇宙年齢 ~ 1 Gyr 以前にも SMBH が多数存在することが明らかになっている([4], [5])。このことは、宇宙初期に SMBH が既に存在し、ごく短期間のうちに SMBH を形成する必要があることを意味する。この問題は近年の観測技術の進展により、更に初期宇宙に更に重い SMBH が観測される結果、解決よりもむしろ悪化の傾向を示しており、現在の宇宙物理学で注目を集める中心的な課題の一つである。

本発表では SMBH の起源に関する理論・観測研究の最近の進展と今後の動向を概観する。

2. JWST による最遠方 quasar 観測

JWST はハッブル宇宙望遠鏡の後継機として NASA が中心となって開発した赤外線宇宙望遠鏡である。2021 年 12 月 25 日に打ち上げが成功し、2022 年 2 月 4 日に観測写真が初公開されて以降、宇宙物理学を観測面から強力に推進する観測データを多数生み出してい

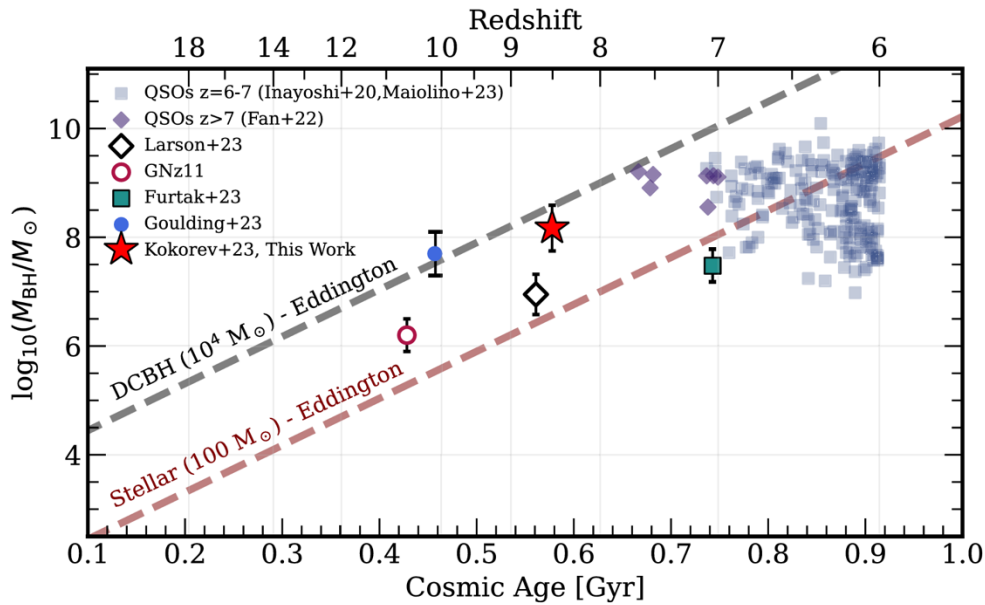


図1. 観測されている遠方SMBHの時刻と質量のまとめ([6]より引用)。

る。JWSTの重要な観測ミッションは、宇宙最初の星(いわゆる初代星)や銀河(初代銀河)の探索、および系外の惑星系の探索である。他方、これまでのハッブル宇宙望遠鏡での観測データから、初期宇宙には quasar(超巨大BH)は数が少ないことが予想され、遠方の quasar 探索は当初期待されていなかった。

しかし、予想に反して JWST の観測する $z \approx 6-10$ の最遠方宇宙にも quasar が多く見つかった([7], [8])。特に、 $z \approx 8.5$ (宇宙年齢0.6Gyr)に質量 $10^8 M_\odot$ を超える SMBH が観測されている。この結果は、宇宙最初の星が Eddington 降着率で成長しても SMBH 形成を説明できないことを意味している。

図1は、 $z > 6$ で観測された SMBH の宇宙年齢と質量をまとめている。2つの破線は、初期に質量 $10^2, 10^4 M_\odot$ の BH があつたとして Eddington 降着成長で実現できる BH 質量の上限を表している。図に示す通り、初期に $100 M_\odot$ の BH の Eddington 降着成長では観測される SMBH の多数を説明できない。このため、別のシナリオが提案されている。

シナリオは大きく分けて、(1) 重い種 BH 形成シナリオ、(2) 超 Eddington 降着シナリオのふたつである(図2参照)。その名の通り、(1)では特殊な状況下で重い種 BH を作るというシナリオである。特に、超大質量星と呼ばれる質量 $10^4-6 M_\odot$ の星が形成され、直接崩壊して $10^5-6 M_\odot$ の直接崩壊 BH(DCBH)を供給するシナリオと、星団形成と星団内の星の暴走的衝突合体により $10^4 M_\odot$ の BH を供給するシナリオがある。(2)では、最初の BH は通常の星形成で作るものの、その後に BH が短期間だけ Eddington 降着率を超えて成長することで成長を間に合わせるシナリオである。(1), (2)ともに、数値流体シミュレーションを用いた多くの理論研究が取り組まれている[4]。

天体核研究室の喜友名の研究([9], [10])では、宇宙初期の環境で超大質量星が形成されるかについて、宇宙論的流体シミュレーションを用いて調べた。これまで十分に調べられていなかった、同一ハロー内の星からの輻射フィードバック効果を取り入れて、なるべく平凡なハローで自動的に超大質量星が形成されることを示した(図3参照)。このことは、より広く一般のハローにおいて重い種 BH が形成できて SMBH 形成を説明できることを示唆する。

他方、これらのシナリオのどちらが(あるいは別のシナリオが)正しいかを理論のみから決着させるのは難しく、観測的証拠が必要となる。宇宙初期の星や超大質量星そのものは寿命が短く、個別に直接観測することはほとんど不可能であると考えられている。このため SMBH 形成シナリオを判別するには、最遠方以外にも、なるべく広い時代の様々な質量

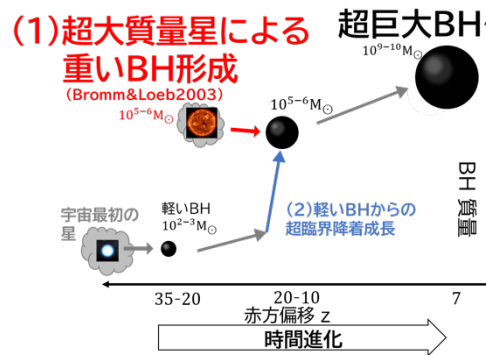


図2. 最遠方SMBHの形成シナリオの概念図。

のBH をくまなく発見し、BH 質量分布を得ることが重要と考えられている。すなわち、質量 $10^2\text{--}5M_{\odot}$ のBH が多数存在する場合には通常の恒星質量BH とSMBHの間には質量に連続的なつながりがあり、軽いBHの一部が超Eddington降着でそれぞれの質量へ成長していることが示唆される。他方、そのようなBHが極端に少ない場合には、通常の恒星質量BHとSMBHは別の起源であることが示唆され、重い種BH形成シナリオが支持されるだろう。以降のsectionでは、最遠方以外にも多くの時期・質量帯のBHを探索する観測研究について紹介する。

3. 謎の種族 Little Red Dots

JWSTでは、Little Red Dotsと呼ばれる特殊な天体が新たに発見されている([12], 図4)。この天体種族はJWST以前には見つかっておらず、以下のような特徴が共通している。

- 同時代の銀河と比べても非常にコンパクトであり、空間的広がりを持たない点光源として観測されている。
- 一部は、広輝線が付随している。輝線の広がりや高速でのドップラーシフトを意味し、一般にはBH降着円盤の内縁の円盤回転としてSMBH観測的特徴と考えられている。このため、Little Red Dotsは何らかのSMBH + 降着円盤と考えるのが自然である。
- SMBH + 降着円盤の特徴である光度の時間変動が見えない[13]。ただし光度変動があると主張する別のグループもあり[14]、決着はついていない。
- SMBH + 降着円盤の特徴である円盤内縁付近でのX線が観測されない[8]。
- SMBHとしては、これまでの予想よりも数が10–100倍多い。
- 宇宙年齢1.5Gyrを超えると、なぜか急速に数が減少し発見されなくなる。

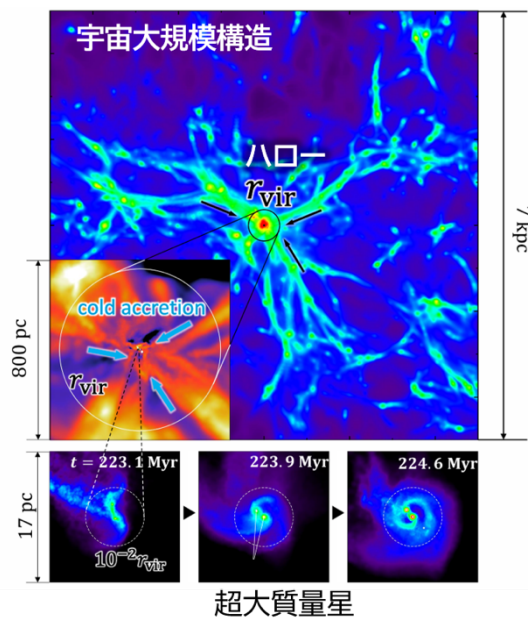


図3. 宇宙論的流体シミュレーションでの超大質量星および重い種BH形成の様子[9]

これらの情報から、Little Red Dots は少なくともごくふつうの SMBH+降着円盤ではないと考えられているが、その正体は何であるかは目下議論されている。Wolf-Rayet 星などの高速アウトフローを付随する星でできたコンパクト星団であるシナリオや、SMBH が超 Eddington 降着率で成長している姿であるシナリオなどが提唱されている。これらの検討は、BH の質量分布や SMBH 形成シナリオの精査の上でも重要であり、今後の進展が待たれる。

4. 重力波での連星 SMBH 観測

SMBH に付随する降着円盤を観測するアプローチでは、SMBH 周りに十分な量のガスが付随していなければ光が観測できないため、観測できる SMBH の種族にはどうしても偏りが生じてしまう。また、円盤の光度は大雑把に SMBH の質量に比例するため、特に遠方において質量が軽めの SMBH を発見しづらいという難点がある。重力波による連星 BH の観測はこの難点を補うと期待されている。

SMBH は銀河の中心に存在するため、銀河同士の合体があれば銀河中心に 2 つ以上の SMBH が集まり、最終的に合体すると期待されている。しかし、連星 SMBH の合体の瞬間はまだ観測されていない。

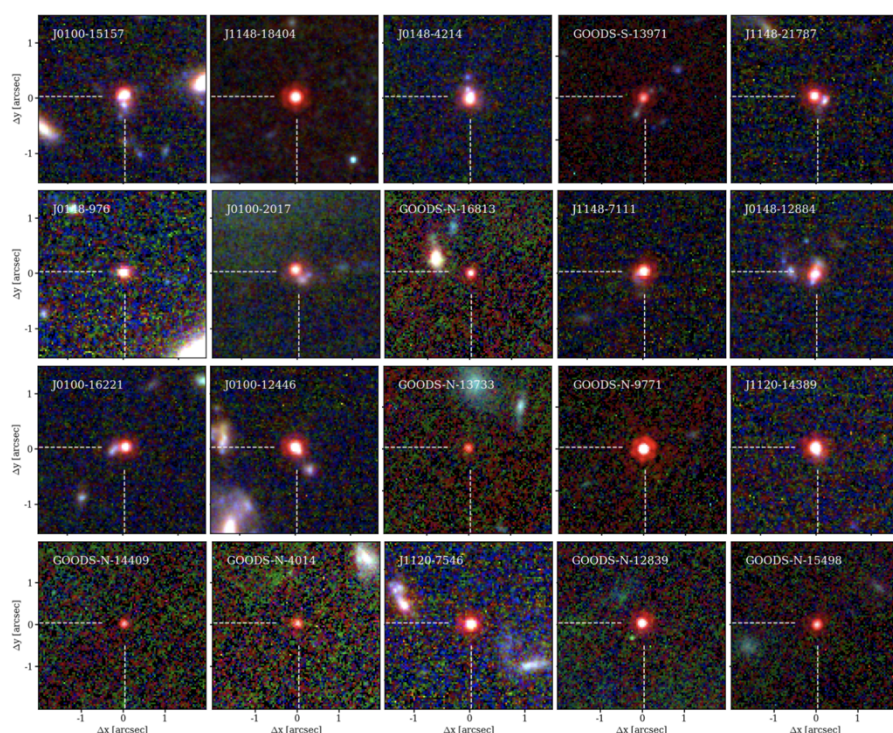


図4. JWSTで新たに見つかった種族であるLittle Red Dotsの撮影画像[12]。それぞれが異なる天体で、このような天体が~200例見つかっている。

パルサータイミングアレイは、パルサーから地球に届くパルス光を長期間観測し、パルスの間隔のわずかな違いから、地球とパルサーまでの背景重力波による宇宙空間のゆがみを測定する観測技術である。2023 年にデータが公開された NANOGrav の観測結果から、得られた背景重力波は主に質量 $\sim 10^{10}M_{\odot}$ の連星 SMBH の重力波合体と consistent であると示唆された[16]。このことは、quasar 以外でも超巨大 BH が宇宙に多数存在し連星を組んで合体することを示す重要な結果である。

他方、SMBH の形成シナリオを制限する上では質量 $\sim 10^{2-5}M_{\odot}$ の中間質量 BH (IMBH) の質量分布が重要となる。これらの質量の BH が連星を組んだ場合には mHz 帯域の重力波を放射すると考えられる。また、こういった IMBH の周りを恒星質量 BH などが軌道運動する際の重力波として Extreme Mass Ratio Inspiral も IMBH の観測的証拠と期待されている。これらを重要な観測ターゲットとしているのが LISA (レーザー干渉計宇宙アンテナ) である。LISA は欧州宇宙機関(ESA) がアメリカ航空宇宙局ジェット推進研究所(NASA-JPL) との共同で進めている計画で、2037 年の打ち上げを計画している。

ただし、連星 IMBH の合体過程については理論的課題がある。IMBH 同士の重力波放射によって十分早く軌道を縮められるようになる($\sim 0.01pc$) まで、連星 IMBH は別の手段で角運動量を抜かなければならない。軌道収縮の初期は連星 IMBH の周りのガスや星を弾き飛

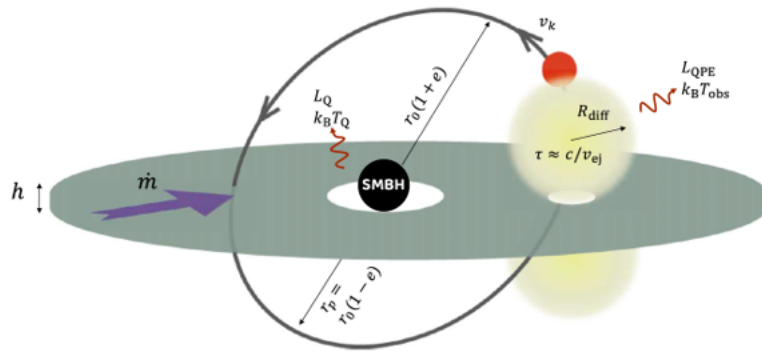


図5. QPEの有力な理論モデル[17]。

ばすことで角運動量を抜けるが、軌道長半径 $\sim 1\text{pc}$ でガスや星が枯渇し、それ以上軌道が縮むのが困難になる。これを final parsec 問題と呼ぶ。

この問題に関連して、天体核研究室の鈴口の研究[18]では、軌道進化を計算するために必要な、BH と周囲のガスとの力学摩擦を高解像度シミュレーションで計算し、従来より詳細なモデル化を実現している。

5. 高エネルギー突発天体現象での IMBH 観測

LISA の重力波観測は期待が高いものの、打ち上げ時期が 10 年以上先であり、別の手段での IMBH 探査が模索されている。その手法の一つが高エネルギー突発天体の観測である。潮汐破壊現象(TDE)はその中で一つで、BH の潮汐半径以内に入った星が、星自身の重力より BH からの潮汐力が強いせいで破壊され、円盤を形成して明るく輝く現象である([19], [20])。TDE は、最も重い SMBH 種族よりも、質量 $10^3\text{-}6M_\odot$ の IMBH で起こりやすいと期待されており、観測から主星(BH)の質量が推定できるため、IMBH を発見できると期待される。

また、近年発見された Quasi-periodic Eruption(QPE)と呼ばれる、現象も BH に関連があると期待されている。QPE は、銀河の中心で X 線の準周期的バーストが起きる天体現象である。この天体現象の起源については解明されていないが、バーストの間隔が $\sim \text{day}$ と短く、長い間隔と短い間隔を交互に繰り返すという特徴から、EMRI のような IMBH の周囲を軌道運動する星または BH が、BH 周りのガス円盤を通過する際にフレアを起こして明るく輝くという描像が提案されている[17]。

さらに、TDE が発見された銀河で、およそ 4 年後に QPE が発見されたという報告もあり[21]、これらの一連の高エネルギー現象が IMBH と星による物理過程として統一的に説明できる可能性が示唆されている。天体核研究室の鈴口の研究[22]では、TDE でできるガス

円盤をモデル化し、TDE に付随する QPE の詳細な時間変動の観測予言を行っている。

References

- [1] N.I. Shakura, “Black holes in binary systems. Observational appearance.,” *R.A. Sunyaev, A&A*, 24, 337 (1973)
- [2] M.J. Rees, “Emission from the Nuclei of Nearby Galaxies: Evidence for Massive Black Holes?,” *IAUS*, 77, 237 (1978)
- [3] M.J. Rees, “Black Hole Models for Active Galactic Nuclei,” *ARA&A*, 22, 471. (1984)
- [4] K. Inayoshi, E. Visbal, Z. Haiman, “The Assembly of the First Massive Black Holes,” *ARA&A*, 58, 27. (2020)
- [5] M.T. Scoggins, Z. Haiman, “Diagnosing the massive-seed pathway to high-redshift black holes: statistics of the evolving black hole to host galaxy mass ratio,” *MNRAS*, 531, 4584. (2024)
- [6] V. Kokorev, S. Fujimoto, I. Labbe, J.E. Greene, R. Bezanson, P. Dayal, E.J. Nelson, et al., “UNCOVER: A NIRSpec Identification of a Broad-line AGN at $z = 8.50$,” *ApJL*, 957, L7. (2023)
- [7] M. Onoue, K. Inayoshi, X. Ding, W. Li, Z. Li, J. Molina, A.K. Inoue, et al., “A Candidate for the Least-massive Black Hole in the First 1.1 Billion Years of the Universe,” *ApJL*, 942, L17. (2023)
- [8] D.D. Kocevski, M. Onoue, K. Inayoshi, J.R. Trump, P. Arrabal Haro, A. Grazian, M. Dickinson, et al., “Hidden Little Monsters: Spectroscopic Identification of Low-mass, Broad-line AGNs at $z > 5$ with CEERS,” *ApJL*, 954, L4. (2023)
- [9] M. Kiyuna, T. Hosokawa, S. Chon, “First emergence of cold accretion and supermassive star formation in the early universe,” *MNRAS*, 523, 1496. (2023)
- [10] M. Kiyuna, T. Hosokawa, S. Chon, “Sequential formation of supermassive stars and heavy seed BHs through the interplay of cosmological cold accretion and stellar radiative feedback,” *MNRAS*, 534, 3916. (2024)
- [11] V. Bromm, A. Loeb, “Formation of the First Supermassive Black Holes,” *ApJ*, 596, 34. (2003)
- [12] J. Matthee, R. Mackenzie, R.A. Simcoe, D. Kashino, S.J. Lilly, R. Bordoloi, A.C. Eilers, “EIGER. II. First Spectroscopic Characterization of the Young Stars and Ionized Gas Associated with Strong H β and [O III] Line Emission in Galaxies at $z = 5-7$ with JWST,” *ApJ*, 950, 67. (2023)
- [13] M. Kokubo, Y. Harikane, “Challenging the AGN scenario for JWST/NIRSpec broad H α emitters/Little Red Dots in light of non-detection of NIRCам photometric variability and X-ray,” *arXiv*, arXiv:2407.04777. (2024)
- [14] Z. Zhang, L. Jiang, W. Liu, L.C. Ho, “Analysis of Multi-epoch JWST Images of ~ 300 Little Red Dots: Tentative Detection of Variability in a Minority of Sources,” *arXiv*, arXiv:2411.02729. (2024)
- [15] D.D. Kocevski, S.L. Finkelstein, G. Barro, A.J. Taylor, A. Calabrò, B. Laloux, J. Buchner, et al., “The Rise of Faint, Red AGN at $z > 4$: A Sample of Little Red Dots in the JWST Extragalactic Legacy Fields,” *arXiv*, arXiv:2404.03576. (2024)
- [16] G. Agazie, A. Anumalapudi, A.M. Archibald, P.T. Baker, B. Bécsy, L. Blecha, A. Bonilla, et al., “The NANOGrav 15 yr Data Set: Constraints on Supermassive Black Hole Binaries from the Gravitational-wave Background,” *ApJL*, 952, L37. (2023)

- [17] I. Linial, B.D. Metzger, “EMRI + TDE = QPE: Periodic X-Ray Flares from Star-Disk Collisions in Galactic Nuclei,” *ApJ*, 957, 34. (2023)
- [18] T. Suzuguchi, K. Sugimura, T. Hosokawa, T. Matsumoto, “Gas Dynamical Friction on Accreting Objects,” *ApJ*, 966, 7. (2024)
- [19] J. Frank, M.J. Rees, “Effects of massive black holes on dense stellar systems.,” *MNRAS*, 176, 633. (1976)
- [20] J.P. Luminet, B. Carter, “Dynamics of an Affine Star Model in a Black Hole Tidal Field,” *ApJS*, 61, 219. (1986)
- [21] M. Nicholl, S. Srivastav, M.D. Fulton, S. Gomez, M.E. Huber, S.R. Oates, P. Ramsden, et al., “AT 2022aedm and a New Class of Luminous, Fast-cooling Transients in Elliptical Galaxies,” *ApJL*, 954, L28. (2023)
- [22] Suzuguchi & Matsumoto in prep.