超軽量暗黒物質と宇宙物理

発表者：高橋卓弥 (天体核研究室)
座長：間仁田侑典 (天体核研究室)
執筆：高橋卓弥 (天体核研究室)

1. Axion cloud around black hole

超軽量ボソンは、超弦理論から予言されるストリングアクシオンを具体例とし、暗黒物質の有力な候補としても注目を集めている。このような粒子はブラックホールに関連する観測から探査できる可能性がある。基本となる現象は、回転ブラックホールを記述する Kerr 時空におけるエネルギー増幅機構である。回転ブラックホールに入射するボソンの波を考えると、波の振動数がある条件を満たす時、反射波は元より大きな振幅を獲得する。これは超放射と呼ばれる現象であり、波がブラックホールからエネルギー（と角運動量）を引き抜いたと解釈できる。特に、質量を持ったボソンはブラックホールに束縛されるため、この機構によりエネルギーを獲得し続ける。こうしてボソンがブラックホールの周りに雲のような凝縮体を形成する。このシナリオの長所は、自然な初期条件から自発的に雲が形成される点と、重力以外との結合を必要としない点にある。

超放射によるエネルギー引き抜きは、ボソンの Compton 波長とブラックホールの半径が同程度の時に効率的に起き、天体物理的なブラックホールに対応するボソンの質量は 10^{-20}–10^{-10} eV 程度となる。この時、雲は宇宙年齢より十分早く形成され、様々な観測的兆候を示す。代表的なものは、角運動量引き抜きによるブラックホールのスピンダウンと雲から放射される重力波である。これらの信号を精確に予言し、観測からアクシオンの探査に適用するためには雲の進化を正しく理解する必要がある。

超軽量ボソンとして具体的にアクシオンを考えると、アクシオンは一般に自己相互作用を持つ。作用としては、

$$
\begin{aligned}
S &= \int d^4x\sqrt{-g}\left[-\frac{1}{2}g^{\mu\nu}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi - \mu^2F_a^2\left(1-\cos\frac{\phi}{F_a}\right)\right] \\
&\sim \int d^4x\sqrt{-g}\left[-\frac{1}{2}g^{\mu\nu}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi - \frac{1}{2}\mu^2\phi^2 + \frac{1}{4!}\mu^2F_a^2\left(\frac{\phi}{F_a}\right)^4\right]
\end{aligned}
$$

で与えられるものを考える。ここで μ はアクシオンの質量、F_a は相互作用の強さを特徴づける崩壊定数である。ブラックホールの周りでアクシオンが成長する過

程において、初期の段階ではブラックホールに束縛された固有状態のうち成長率の一番早いモードの振幅が卓越する。しかし、自己相互作用が十分強いとアクシオンが成長するにつれて非線形性が効き始める。この非線形性が及ぼす特に重要な効果としては、固有モード間の結合による別のモードへのエネルギー輸送と無限遠方へのアクシオンの散逸がある。どのようなモードが励起し、ブラックホールのスピンにどう影響するかは非自明であり、この非線形性を含めたアクシオン雲の進化を理解することが大きな課題であった。

我々のグループはアクシオン雲の進化に関して次の 2 点について研究を行った。一つ目はブラックホール-アクシオンの系に集中して、これまで含まれていなかった効果も含めて進化を解析した。二つ目は、アクシオン雲を持つブラックホールが連星系にある場合を考えて、どのような現象が起こるかを調べた。以下でそれぞれについて詳細を述べる。

まずブラックホール-アクシオン系の進化に関しては、[2] によって非線形な自己相互作用によるモード間結合が重要な役割を果たすことが明らかにされた。ただし、これはアクシオンが非相対論的であるという近似のもとで、重力は基本的に Newton 的に扱われていた。雲の成長率が最も速く、観測的に興味深いパラメーター領域ではアクシオンは相対論的であり、そのような領域を調べるためには拡張が必要であった。そこで、我々は進化が断熱的であることに着目し、フラックスバランスによる定式化を与え、前年度に [3] において Kerr 時空背景での相対論的な計算を行った。しかし、この計算ではモードの数を 3 つに制限し、ブラックホールへの反作用も無視していた。今年度の成果として、必要な全てのモードと反作用も含めた計算を行った。その結果、現実的な雲の進化を把握できるようになり、観測的兆候を定量的に評価することが可能になった。例えば、回転するブラックホールが比較的近傍に存在すれば、アクシオンのモード間の遷移に付随する重力波が観測可能な信号として期待できることが明らかになった。

次に、アクシオン雲が連星系にある状況を考える。現在の重力波観測ではブラックホール連星合体イベントが多数検出されており、連星系に属するブラックホール周りでのアクシオン雲の進化も注目されている問題である。この系では、アクシオンには連星のペアとなる伴星からの潮汐相互作用が加わる。これは連星の軌道運動を反映した周期ポテンシャルとして作用する。また、連星系は軌道運動からの重力波放射の反作用で、連星間距離が縮まるインスパイラル軌道をとる。雲を構成する束縛されたアクシオンを非束縛状態まで励起させられるだけ連

星間距離が近づくと、雲は潮汐効果により散逸されることになる。ここで、これまでの研究を見ると、相互作用しない超軽量スカラーの雲の場合のみが考えられてきた。今年度に我々は、連星系の文脈において初めて自己相互作用するアクシオン雲を考えた。その結果として2つの新しい現象を発見した。まず自己相互用がある場合には、ない場合と違って、超放射で成長するモードとは別のモードが励起される点にある。一般に、この別のモードで構成される雲の半径はより大きく、潮汐効果を受けやすい。一つ目として、この雲が散逸される際に角運動量が軌道運動へ輸送され、その影響が重力波の位相に変更として現れ観測的兆候になり得ることを議論した。二つ目として、別のモードの雲がより早い段階で散逸することにより、自己相互作用の効果を阻害し、超放射モードの雲をさらに成長させボースノヴァと呼ばれる爆発現象が起こり得ることを示した。

References

[1] A. Arvanitaki and S. Dubovsky, Phys. Rev. D 83, 044026 (2011)

[2] M. Baryakhtar et. al., Phys. Rev. D 103, 095019 (2021)

[3] H. Omiya et. al., JCAP 06 (2023) 016

[4] D. Baumann et. al., Phys. Rev. D 101, 083109 (2020)

[5] T. Takahashi et. al., Phys. Rev. D 107, 103020 (2023)

ボゾンスターの新たな形成シナリオの提案

発表者：高橋卓弥 (天体核研究室)
座長：間仁田侑典 (天体核研究室)
執筆：宮内侑 (天体核研究室)

本発表において、ボゾンスターの新たな形成シナリオの可能性についての研究報告を紹介した。

1. イントロダクション

現在までに重力波によってブラックホールなどのコンパクト天体が多数観測されており、重力波を用いた強い重力における物理の検証が盛んに行われている。その中の1つに、今までの観測では発見されなかった未知の物質で構成されている天体が重力波によって見えるようになるのではないかというテーマも考えられている。そして、重力波の観測によって、一般相対論におけるブラックホールと未知のコンパクト天体の区別ができるかという研究が多く行われている [1]。このような未知の天体の１つとしてボゾンスターというものが考えられている。

ボゾンスターとは、スカラー場が自己重力によって基底状態に凝縮してできる未知の天体である。例えば、クラインゴルドン方程式とアインシュタイン方程式の連立微分方程式の定常解が最も簡単なコンパクトなボゾンスターの例である [2]。ここで、

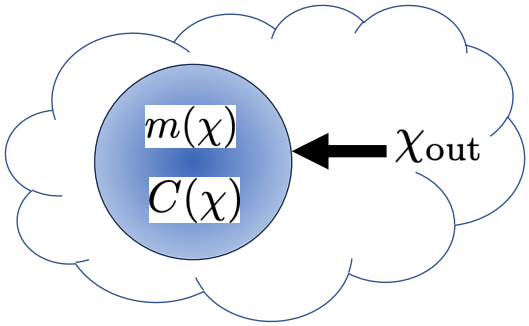
$$C = \frac{2GM}{R} \tag{1.1}$$

で定義されるコンパクトネスという量が1のオーダーのとき、この質量 M, 半径 R の天体はコンパクトであるとする。

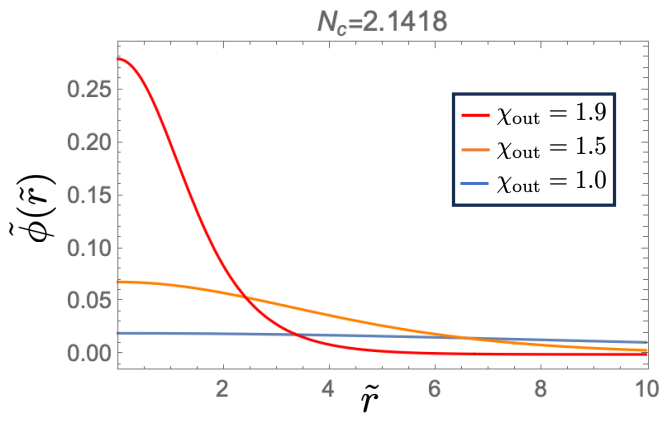
このようにボゾンスターの定常解は存在することはわかっているが、この形成シナリオはわかっていない。特に、非相対論的なボゾンスターはスカラー場の密度揺らぎの重力散乱によって生成されると考えられているが、生成後もこの方法による成長が続くとすると、宇宙年齢内にコンパクト天体として成長するのは不可能であることが示唆される [3]。

2. 断熱進化によるコンパクトなボゾンスターの形成の可能性

そこで本研究では、ボゾンスターの新たな形成シナリオの可能性を調べる。上述したようにボゾンスターは周りのボゾンガスとの相互作用が無視できて粒子数



(a) ボゾンスターとその周りの背景場 χ



(b) $\chi_{\rm out}$ の変化によるボゾンスターのプロファイルの変化

は一定であるとみなせる。そこで、粒子数が一定のボゾンスターがコンパクトになる１つの方法として、ボゾンスターのモデルに含まれるパラメータを時間変化させればよいということが考えられる。例えば、モデルパラメータとして、ボゾンスターを構成するスカラー場 Φ の質量 m の時間変化を考えると、粒子数が一定でも m が大きくなれば、ボゾンスターの C は大きくなることが期待できる。

そこで Φ の質量 m を変化させるモデルとして、

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}|\partial_\mu \Phi|^2 - \frac{1}{2}(\partial_\mu \chi)^2 - \frac{1}{2}m^2(\chi)|\Phi|^2 - \hat{V}(\chi) \tag{2.1}$$

のように、背景スカラー場 χ の存在を仮定して、質量 m が 背景場 χ に依存するものを考える。すると、図 a のような空間全体に広がる背景場を考えると、これはポテンシャル $\hat{V}(\chi)$ に応じて時間変化する。そこで、外側における背景場 χ の値を $\chi_{\rm out}$ とすると、この値の変化がボゾンスター内部のスカラー場の質量 $m(\chi)$ とコンパクトネス $C(\chi)$ に及ぼす影響を調べる必要がある。このとき、ボゾンスターの定常解の無限遠での境界条件は、

$$\chi(\infty) = \chi_{\rm out} \tag{2.2}$$

と与えられる。

そこで、本研究はまず、ポテンシャル $\hat{V}(\chi)$ の形を定めずに、$\chi_{\rm out}$ をパラメータとして、粒子数が一定のもとでの $\chi_{\rm out}$ の変化によるボゾンスターの定常解の系列を数値的に求めることによって、コンパクトネス C の変化を調べた。ここで、ボゾンスター内部ではポテンシャル $\hat{V}(\chi)$ を無視できるとした。

粒子数 N_c が一定の下で $\chi_{\rm out}$ を変化させたときのボゾンスターのプロファイルの変化の結果が図 b である。これから分かるように、$\chi_{\rm out}$ が大きくなるほど、プ

ロファイルはよりシャープに、つまり、ボゾンスターはコンパクトになることがわかる。

以上をまとめると、外側の背景場 χ はポテンシャル $\hat{V}(\chi)$ に応じて時間発展でき、また、このモデルの場合、$\chi_{\rm out}$ が大きくなるほどボゾンスターはコンパクトになることがわかった。したがって、これらのことから、このモデルによってコンパクトなボゾンスターが形成される可能性が示唆された。現段階ではポテンシャル $\hat{V}(\chi)$ の形を定めずに $\chi_{\rm out}$ をパラメータとしてボゾンスターの解の変化を調べた。したがって、宇宙年齢内にコンパクトなボゾンスターが形成されるためのポテンシャル $\hat{V}(\chi)$ の形を制限していくことが今後の展望である。

References

[1] V. Cardoso, S. Hopper, C. F. B. Macedo, C. Palenzuela and P. Pani, Gravitational-wave signatures of exotic compact objects and of quantum corrections at the horizon scale, Phys. Rev. D 94 (2016) 084031 [1608.08637].

[2] D. J. Kaup, Klein-gordon geon, Phys. Rev. 172 (1968) 1331.

[3] J. H.-H. Chan, S. Sibiryakov and W. Xue, Condensation and Evaporation of Boson Stars, 2207.04057.

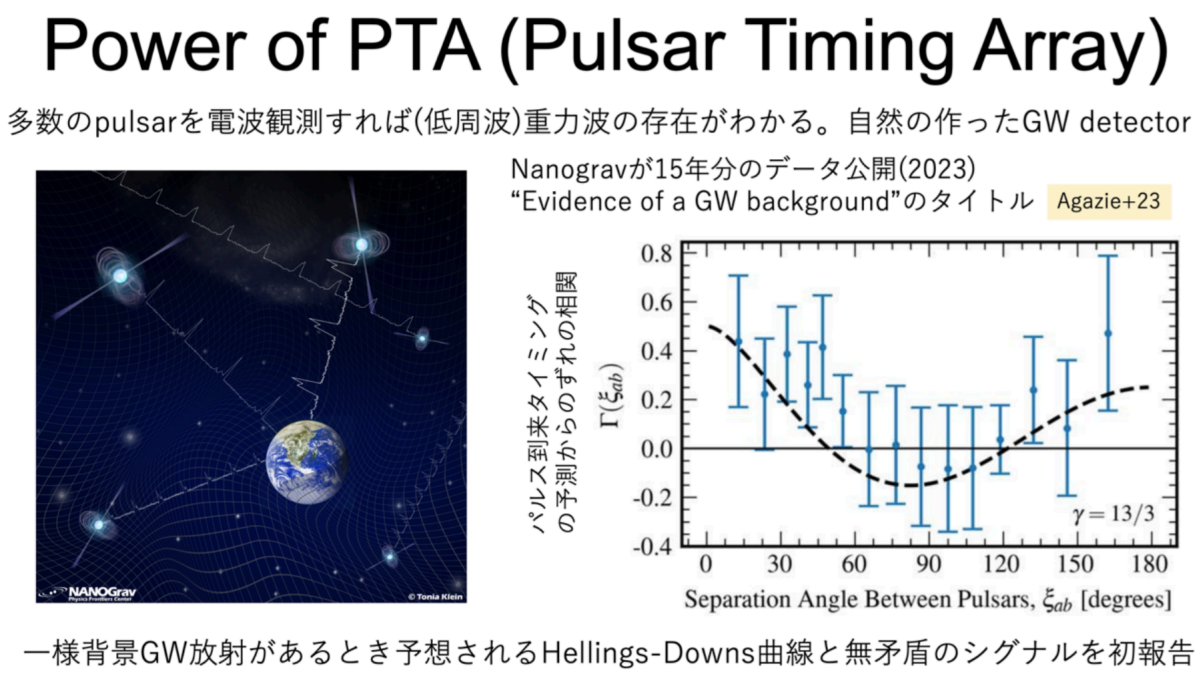
天体核の最近のはなし

発表者： 細川隆史 (天体核研究室)
座長： 間仁田侑典 (天体核研究室)
執筆： 細川隆史 (天体核研究室)

1. 最近の進展：重力波関係

天体核といってもカバーしている分野が広いので、今回のこの話では主に天体物理学 (いわゆるアストロ) 分野を中心に、最近の話題と関係する新しい研究の話をした。天体核でいろいろ行われている研究テーマの中でも、中心的な話題の一つはやはり一般相対論に関わる話、特に最近進展の著しい話として重力波がある。 2015 年の最初の発見以来、地上干渉計を用いた観測は年々アップデートが加えられ、現在 O4 の観測期間中に当たる。すでに数日に一度くらいの頻度で、主に連星ブラックホール (BH) 合体イベントが報告される状況になっており、この頻度はこの先もっと増えるだろう。GW170817 であったような電磁波対応天体が観測される、いわゆるマルチメッセンジャー的なイベントの観測が待たれているが、この次の例はまだ報告されていない。しかし、時間の問題と言ってよいかもしれない。 2023 年の重力波に関係する新しい話題として、パルサータイミングアレイ (PTA)、特に NANOGrav の 15 年分データによる低周波 (∼ nHz) 背景重力波の報告があった [2]。彼らは論文のタイトルで “Evidence” と主張している。というのも、一様な背景重力波が存在する場合に理論的に予想される、いわゆる Hellings-Downs 曲線とデータが無矛盾なことが初めて実データを用いて示されたからである。

こういう低周波の重力波背景放射を何が作っているのか、その起源がもちろん問題になるが、まず挙げられるのは銀河中心に存在する超巨大 BH(Supermassive BH; 以下 SMBH) 同士の合体である。これまでの地上干渉計で観測されているのはせいぜい太陽の 10-100 倍くらいのいわゆる恒星質量 BH 同士の合体だが、これとは別種族で、実に太陽質量の 100 万倍を超えるような BH である。近傍宇宙ではほぼ全ての銀河の中心には SMBH があることが観測により分かっており、銀河同士の合体もありふれている。どれくらい大きな銀河、SMBH がどれくらいの数あるか、は分かるから、これらが最低一度は合体を経験する等の仮定を置けば SMBH 同士の合体多数の重ねあわせが作る背景重力波スペクトルを理論的に予想できる。NANOGrav の報告する背景重力波の強さはこうした理論予想とは

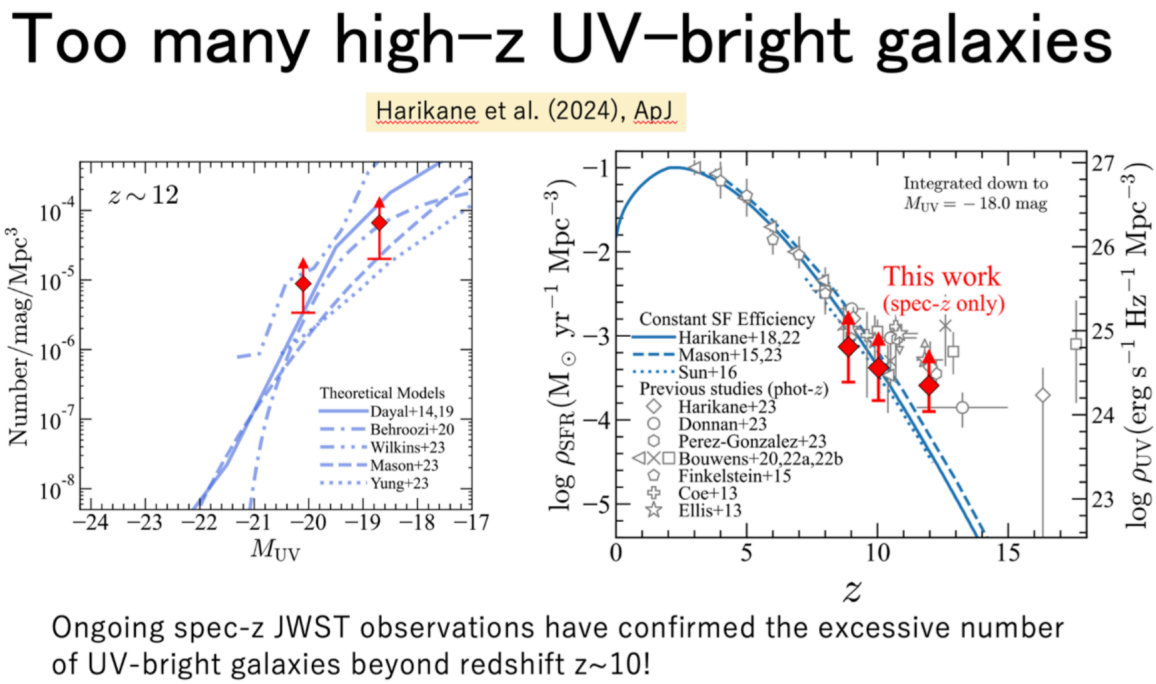


ほぼ同オーダーになっており、SMBH 合体を第一候補とする考えが妥当であることを示している。とはいえ、理論予想は観測強度より数倍足らないという報告もあり [2]、今後も活発な議論が続くだろう。

2. 最近の進展：JWST の革命

最近のアストロ業界の話題といえば、James-Webb 宇宙望遠鏡 (JWST) の登場である。これは昔からある (今も現役の!)Hubble 宇宙望遠鏡の後継機として 2021 年末に打ち上げられ、2022 年夏に最初のデータ公開が行われた。それ以降の〜1 年間で実に 2000 本以上の関連論文が出るほどの活況を呈している。JWST のサイエンスはいろいろあるが、代表的なものは従来の 10-1000 倍の感度向上を活かした遠方宇宙天体、銀河の観測である。JWST 登場前は宇宙の赤方偏移 z¿10 はまだまだ未踏の領域という感が強かったが、2022 年以降はこうした時代の銀河が数十例も初めて、かつ一気に報告されて明らかに隔世の感がある。この時代はビッグバン後、十億年に満たない極初期にあたり、Pop III 星 (初代星) 形成に代表される、いわゆる宇宙の初代天体形論が対象としてきた時代に接近しつつある。

こうした初期宇宙の銀河観測はさまざまな新しい知見をもたらしている。盛んに議論されているトピックのうち一つは、$z > 10$ の明るい銀河が予想されたよりたくさん見つかっていることである [3]。例えば、図 2 の右図にあるように、JWST 以前の観測で $z \sim 3$ から遠方 (つまり昔) に行くほど宇宙全体の星形成率密

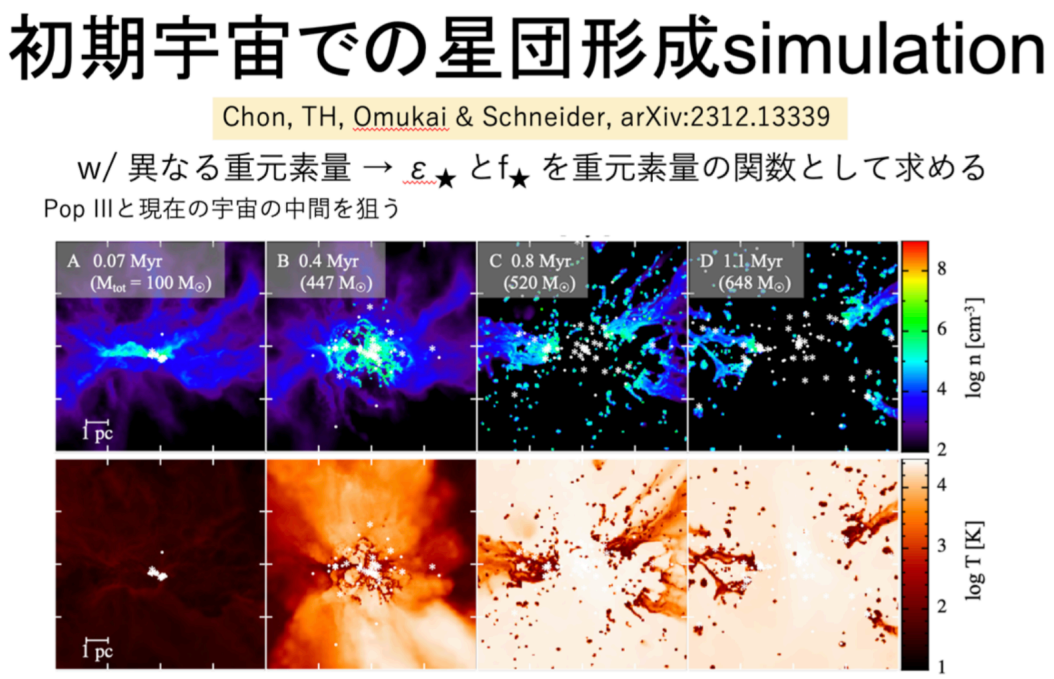


度は低下していくことが分かっていた。このことはダークマターの大規模構造形成下での銀河形成モデルで大まかに理解されると考えられてきたのだが、JWST の分光観測の結果 (同図中の赤データ点。$z \gtrsim 12$ の白点は JWST の測光観測) は $z > 10$ で明らかな excess があることを示している。

3. 我々の研究：初期宇宙での星団形成

こうした最新の観測に刺激される形で、理論的研究も数多く行われている。特に $z > 10$ での銀河形成は全く新しい話題であり、様々な不定性があるものの人々の関心は高い。以下では、一例として我々が最近進めた関連研究 [4] を紹介しよう。$z > 10$ での銀河数超過の話だが、この原因として、銀河中で起こる星形成が近傍宇宙の描像から逸脱している可能性が考えられる。銀河といっても観測しているのはあくまでも銀河を構成する星の出す光である。構造形成のどの時代であっても小質量の銀河の方が数は多いので、そうした比較的小さい銀河中の星を通常以上に明るく光らせられれば、明るい銀河の数を増やすことができる。

どうしたら小さい銀河が明るく輝くか? 例えば以下の 2 つの可能性がある [5]。まず、ある質量の多数の星の集団を考えよう。このとき、単位質量あたりで観測している UV 光が効率よく出ればよい。質量-光度比と言ってもよいが、この効率を $\varepsilon_\star$ としよう。この量は集団中にどういう質量の星がどういう確率で存在するか、星の質量分布関数 (Initial mass function; IMF) に依存する。この IMF は



近傍宇宙では環境によらず universal であることが観測から分かっているが、初期宇宙まで同じとは限らない。実際、星をつくるガスの中に含まれる重元素量が極端に少ないと、質量の大きな星の割合が高くなることが理論的に予想されている [6]。初期宇宙になればなるほど宇宙全体の重元素量は低下していくはずなので、それに伴う IMF 進化の兆候が見えているのかもしれない。

もう一つの小さい銀河を明るく光らせる可能性、それは銀河中の星の総量を増やすことである。ある質量の銀河を考えた場合、その中に含まれるバリオンの総量は決まっているから、問題となるのはバリオン総量中の星の質量割合である。星ができる場合を考えると、その材料となるのはガスなので、ある質量のガスから星が誕生する場合のその質量比、(生まれた星質量)/(もとあったガス質量) が高ければよい。

明るい銀河の数を増やすには、これら $(\varepsilon_\star, f_\star)$ が通常より大きめならばよい。初期宇宙でこれらが大きくなることがあるだろうか? これを明らかにするために、図 3 にあるような、ガス雲から星団が誕生するのを追跡する数値シミュレーションを行った。このとき、ガス中に含まれる重元素量をパラメータ化し、特に現在の値から低下した場合の $(\varepsilon_\star, f_\star)$ の値をシミュレーションから引き出す。図 3 にあるように、最初に用意したガス雲から星団が誕生し、同時に母体となったガス雲が星からの放射によって徐々に破壊されていく様子が示されている。こうした計算を重元素量を動かして複数実行し、各重元素量の関数として $(\varepsilon_\star, f_\star)$ の

値を求める。

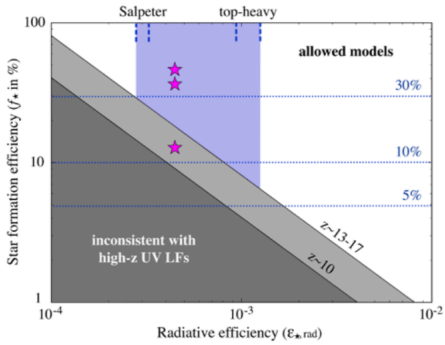
その結果どうなったかというと、いろいろあるが図4の右パネルがまとめである。この図の横軸がIMFを反映する質量-光度比$\varepsilon_\star$、縦軸が星形成効率(SFE)$f_\star$である。図中の右上部分、白抜きの部分がJWSTの銀河数excessを説明するために必要なパラメータ領域に相当する。左下のグレーの領域のパラメータだと銀河数が少なすぎてJWSTの観測が説明できないということである。色付きの+データ点がシミュレーションの結果で、異なる色は異なる重元素量を表す。青が最も重元素量が少なく$[Z/H] = -4$、つまり太陽組成の場合の0.01%しか重元素を含まない場合である。図をみると、データ点は重元素量が下がるほど右下方向へ動くことが分かる。まず右方向に動くのは、重元素量が下がるほどIMFがtop-heavyに変化、つまり質量の大きな星の割合が増えるためである。一方で、下方向へ動くのは、質量の大きな星が増えすぎたために雲を破壊する効果が強くなり、その結果、雲の多くが星に変えられる前に星形成が終了してしまったためである。この2つの効果が組み合わされることによって、重元素量が多すぎても少なすぎても右上側には行けないことになっている。観測を説明する都合の良い場合は程々に重元素量が少ない、$[Z/H] \sim -2$や-3の場合になる。興味深いことに、JWSTで発見された銀河の重元素量も、銀河系よりは少なめなものの、ゼロでない10%やそれ以下であることが示唆されている。パラメータ$(\varepsilon_\star, f_\star)$の重元素量に対する依存性がJWST観測の原因になっているとすると、これは星形成が近傍宇宙の描像から重元素量ゼロの初代星形成へ初期宇宙で遷移する、その兆候を見ていると捉えることができる。JWSTの観測がこれからさらに進めば、さらにこうした未知の兆候の報告が増えていくに違いない。

4. まとめ

天体核に関する最近のはなしとして、特に最近大きな進展があった話題、さらにそれに関係する最近の研究について紹介した。重力波関係ではNANOGravによる背景重力波観測について紹介した。これはSMBH同士の合体兆候を初めて観測的に捉えた事例となる可能性がある。一方、伝統的な電磁波観測では、長い準備期間を経たJWSTが真価を発揮し、未踏の遠方宇宙の開拓が今まさに進行している。$z > 10$の初期宇宙で予想以上に多くの銀河を報告しており、その原因が活発に議論されている。

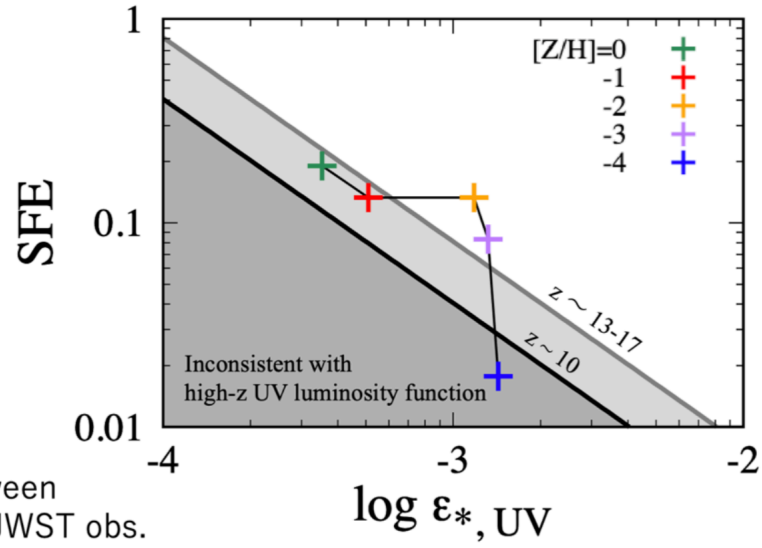
こうした新しい観測に刺激される形でたくさんの理論研究が進んでいる。今回はその一例として、初期宇宙での星団形成シミュレーションを紹介した。

Simulations *v.s.* JWST Obs.



typical metallicities
of the JWST galaxies

The IMFs for [Z/H]~-2 or -3
mitigate the discrepancy between
galaxy formation models and JWST obs.



References

[1] Agazie et al. 2023, ApJL, 951, L8.

[2] Sato-Polito, Zaldarriaga & Quataert, arXiv:2312.06756.

[3] Harikane et al. 2024, ApJ, 960, 56.

[4] Chon, Hosokawa, Omukai, & Schneider, arXiv:2312.13339.

[5] Inayoshi et al. 2022, ApJL, 938, L10.

[6] Hirano et al. 2014, ApJ, 781, 60.