

# 二百年目を迎えるブラックホール天文学

## 福江 凜 #3

〈宇宙潜艦ヤマト V てんびん座方向 3 光年〉

e-mail: rin\_fukue\_3@yamato05.space.jp



アインシュタインが一般相対論を発表してから約 2 世紀が経ち、同時に、ブラックホール天文学も二百年目を迎えようとしています。量子重力理論も完成してから久しいですが、古典的な一般相対論が有効な天体現象や領域もまだまだあります。本稿では、周辺の研究も含め、2008 年から 2108 年までのブラックホール天文学研究この百年を紹介したいと思います。

### 1. 創刊 200 号へ寄せて

日本天文学会創設 200 周年および天文月報創刊 200 号、おめでとうございます。3 光年先の宇宙からお祝い申し上げます。私こと福江凜ペルソナ #3 は、2056 年に発見された 51 番目の有酸素惑星グリーゼ S81c へ向かう探査船に乗っています。念のために、ペルソナは本人（オリジナル #0）の記憶と模擬人格をもった最新型の自律有機アンドロイドです。私の場合、#1 は記録やマネージメントなど行動支援に、#2 は研究支援に、そして #3 は娯楽支援に特化されています。ちなみに #0 は現在就寝中です。

今回の報告にあたり過去の記録を検索してみたところ、凜 #0 の 4 代前の曾々祖父は、日本天文学会の百周年記念誌の編纂に携わったようで<sup>1)</sup>、オリジナルも感無量だと思っでしょう。

この百年の間、日本はまだ国家として存続していて、日本も世界も相変わらずです。人びとのサピエンス（智慧）は百年前とあまり変わらないですが、サイエンス（知識）は飛躍的に増えました（ペルソナや脳アバター<sup>2)</sup>の支援なしには情報処理が不可能になっています）。ちなみに、ご先祖様は身体が三つ欲しいと思っていたようですが、実際にペルソナができて、一人ひとりの忙しさ

はあまり減っていないようです。

日本は、宇宙開発関連では、月面都市の新京都や火星基地および木星周回軌道にヘリウム 3 採掘基地を擁し、宇宙観測関連では、地球月系ラグランジュ点 L5 のマホロバ天文台、太陽系の極軌道を周回する VSOP-X (VSOP-deluxe) ドコカ、月の向こう側の L2 点に常設された高エネルギー天文コンプレックス・シジン (X $\gamma$  用のスザク II, ニュートリノ用のセイリュウ, 重力波用のビャッコ, SUSY 用のゲンブ) などがあります (図 1)。

以下、次節で超る理論について簡単に説明した後、3 節で特超新星爆発など星の終末の話を、そして 4 節でブラックホール研究の進展を紹介し、さらに 5 節で関連の話題に触れる予定です。



図 1 高エネルギー天文コンプレックス・シジンのセンターハブ近影と各部門のエンブレム。

## 2. 量子重力理論の展開

アインシュタインが重力理論を完成したのは約 200 年前の 1916 年のことでしたが、重力の量子化はなかなか成功しませんでした。約 100 年前の 1995 年になってようやく、ウィッテン (E. Witten) が 10 次元超ひも理論と 11 次元超重力理論を包含する 11 次元 M 理論を提案し<sup>2)</sup>、さらにランドール (L. Randall) たちが余剰次元の研究を進めて<sup>3)</sup>、量子重力への道が開かれました (なお、最近になって掘り起こされた資料からは、M 理論の M は magic でも mystery でも matrix でも mother でもなく、Miho という日本人女性の名前だったという説が浮上しています)。彼らの理論では重力以外の力の介在粒子は開いたひもで表現され、その一端はブレーンに接続しているために重力以外の力はブレーン内でのみ作用しますが、重力は閉じたひもで表現されて、ブレーン外へも作用します。

そして奇しくも一般相対性理論から 100 年目にあたる 2016 年に、日系ハワイ人の俊才 JJ カトウ (J. J. Kato) が、ひも (超対称性をもつ超ひも) を時空まる (時空超まる) へ拡張することで、ついに量子重力理論「超まる理論 (super sphere theory)」が完成したのです (“まる”は湯川秀樹の呼び方にならったそうです)<sup>4)</sup>。通常の超ひも理論では、ひも粒子は  $10^{-33}$  cm という微小なプランク長さの実体として空間内に存在します (図 2)。

一方、超まる理論では、まる粒子は空間内ではプランク長さの広がりをもつと同時に、 $10^{-44}$  s という微小なプランク時間だけ時間の過去と未来へも広がっていると考えます。時空における素領域を“まる”と考えるのです。

カトウの超まる理論は、電磁力・弱い力・強い力・重力を完全に統一しただけでなく、新しい相互作用を予言しました。それは時間的な相互作用を引き起こし因果律を破る因果粒子「時子 (chronon)」です。かつては、仮想的な超光速粒子タキ

### • 点粒子

～ 開いたひも

○ 閉じたひも

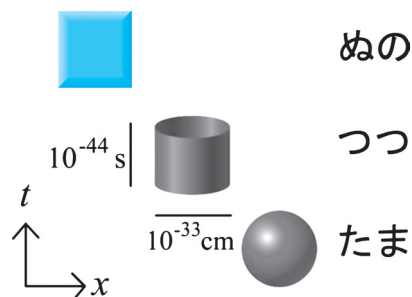


図 2 超ひも理論における閉じたひもと開いたひも (上) と超まる理論における時空まる (下)。時空まるには、実際には開いた“ぬの”や、半分開いた“つつ”や、閉じた“たま”など、いろいろなトポロジーがあります。

オンを使った時間通信や、時空の蟲道ワームホールを利用したタイムトンネルが議論されましたが、現在ではクロノンを用いたタイムトラベルが可能だと考えられています。さらにクロノンの予想によって、「余剰時間 (extratime)」の研究が始まりました。おそらく 22 世紀は時間の研究が大きく進展することでしょう。

## 3. ウルトラノヴァの発見

電子が量子縮体した白色矮星に関して、チャンドラセカール (S. Chandrasekhar) はその質量に限界があることを突き止め、1934 年に、白色矮星の限界質量、いわゆるチャンドラセカール質量が太陽質量の約 1.44 倍であることを求めました。

しかし、中性子が量子縮退した中性子星のチャンドラセカール質量はなかなか正確な値が決まりませんでした。中性子物質 (neutronium) の性質を表す状態方程式が正確に得られなかったためです。量子重力理論が完成した後でも、中性子物質

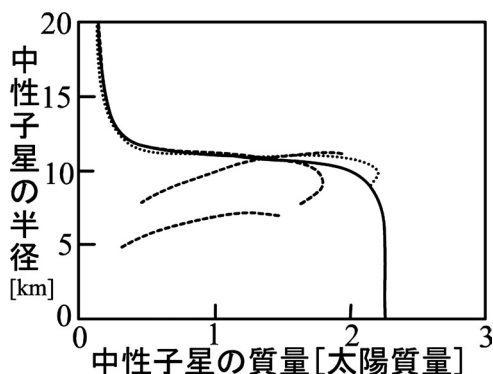


図3 中性子星のチャンドラセカール質量  $M_{\text{ch}}$ . 横軸が中性子星の質量  $M$  で縦軸が半径  $R$ . 質量が大きくなって解がなくなるところがチャンドラセカール質量に相当します. 破線や点線は21世紀初頭に得られていたもので、状態方程式に性質によって、少しずつ違っていました. 実線が2030年代に量子コンピューターで計算されたチャンドラセカール質量で、重元素が太陽組成の場合は約2.25太陽質量で解がなくなります. なお、上の関係は、ノーマン(J.Norman)の式:  $R=10[(M_{\text{ch}}/M)^2 - (M/M_{\text{ch}})^2]^{0.05}$  km でよく近似されます.

があまりにも複雑な状態なので、しばらくの間は相変わらず不明でしたが、2030年ごろに量子コンピューターが実用化されて、やっと超高度にメッシーな方程式が俊速で解けるようになり、中性子星のチャンドラセカール質量が得られました. 最終的に得られた中性子星のチャンドラセカール質量は、元素組成比にもよりますが、だいたい太陽質量の2.25倍となりました(図3).

また星の進化の最終段階がどうなるかは、100年前にはおおむね解明されていました<sup>5)</sup>.

#### (1) 約1太陽質量 $\leq M \leq$ 約8太陽質量

この範囲の星は、漸近巨星枝などで質量放出をしながら外層大気の多くを失い、中心核はCO白色矮星になります.

#### (2) 約8太陽質量 $\leq M \leq$ 約30太陽質量

星の初期質量が太陽の約8倍より重くなると、星の進化の最終段階で重力崩壊型超新星爆発を起こします. その結果、星の大部分を吹き飛ばし

まい、後には中性子星が残ります.

#### (3) 約30太陽質量 $\leq M \leq$ 約140太陽質量

星の初期質量が太陽の約30倍より重いと、重力崩壊型超新星爆発の後にブラックホールが残ります. ただし、質量があまり大きくない範囲では超新星爆発で星の一部を吹き飛ばしますが、質量が大きくなると超新星“爆発”にはならず全体が重力崩壊してしまいます.

#### (4) 約140太陽質量 $\leq M \leq$ 約260太陽質量

面白いことに、この範囲内の星はブラックホールになりません. 電子陽電子対不安定と呼ばれるある種の不安定を起こして、星全体が吹き飛ばしてしまいます.

#### (5) 約260太陽質量 $\leq M$

星の初期質量が太陽の約260倍を超えると、中心核の重力崩壊に伴って、超新星爆発は起こさずに星全体が重力崩壊し、全体が直接にブラックホールになってしまいます.

上記のような描像は変わっていませんが、超新星爆発についてはもっと理解が深まりました.

まず、2010年ぐらいから2030年代にかけてガンマ線バーストのエンジンが解明されたことで、当時、太陽の40倍から50倍以上の非常に重い星は、通常の超新星爆発よりも1桁大きなエネルギーを放出する極超新星(hypernova)となり、その爆発に付随して、光速の99.99%ものプラズマジェットを吹き出して、ガンマ線バースト現象として観測されることは知られていました(ファイアボールモデルと呼ばれていました)<sup>6)</sup>. また極超新星の中心核では、物質密度があまりに高密度になって、ニュートリノさえも捕捉されるニュートリノ球ができたり、ニュートリノ降着円盤が形成されるだろうと推定されていました.

その後、2000年代末に、極超新星の中心にできるのは、“球”でも“円盤”でもなく、「超臨界降着中性子トーラス(supercritical neutron torus)」であると提案されました<sup>7)</sup>(図4). 超臨界降着トーラス内ではガスが非常に高密度になり一部は

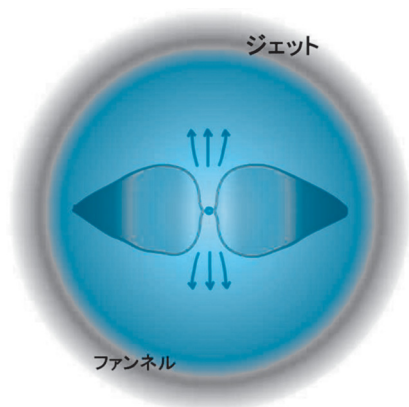


図4 極超新星と中性子トーラスのイメージ。トーラスは10万倍に拡大してあります。

中性子になっていて、ニュートリノを閉じ込めることができます。そしてトーラス軸上にできた空洞領域（ファンネル）内へニュートリノが集中的に放出され対消滅して、（ジェット状の）ファイアボールになると推測されました。この描像は2010年代の数値シミュレーションで定量的にも確かめられました。

さらに特記すべきことは、2087年にL5のマホロバ天文台がウルトラノヴァ「UN2087A」を発見したことでしょう。現在の宇宙では、2%ほど含まれる重元素の冷却作用によって、太陽の約100倍より大質量の星は生まれません。しかし水素とヘリウムしかなかった初期宇宙では、重元素の冷却が働かないために、太陽の100倍から1,000倍の星がたくさん生まれていました。そのような宇宙の最初の星は、約100万年の寿命しかなく、“最初の超新星”になります。しかし、距離が遠いために、（ガンマ線バーストのようなエネルギーの集中がなければ）、観測するのが難しい状況でした。そしてようやく2087年に、マホロバ天文台が初期宇宙の最初の超新星爆発の輝きをとらえたのです。球対称を仮定すると、爆発エネルギーは、通常の超新星の100から1,000倍にもなると見積もられ、「特超新星 (ultranova)」と名づけられま

した。その後のスペクトル観測から、これらの特超新星は電子陽電子対不安定型超新星爆発だと考えられています。

#### 4. ブラックホール現象

いよいよブラックホール天体現象について、この100年間の研究の進展を紹介しましょう。

ブラックホールは、その物理的特性、すなわち属性として質量・角運動量・電荷の3本の毛をもつ「おぼQ定理 (three hairs theorem)」によって、

- シュバルツシルト・ブラックホール：質量のみ
- カー・ブラックホール：質量＋自転
- ライスナー＝ノルドシュトルム・ホール：質量＋電荷
- カー＝ニューマン・ホール：質量＋自転＋電荷

に分かれます。一方、形成過程によって、

- 恒星質量ブラックホール：通常の星が極超新星爆発を起こしてできる数太陽質量から100太陽質量のブラックホール
- 中間質量ブラックホール：初期宇宙の最初の星の重力崩壊で生じた300から1,000太陽質量のブラックホール（歴史的に混乱する名前が付けられましたが2000年代の超光度X線源の正体だと想像されたものとは別です）
- 超大質量ブラックホール：銀河の中心で成長した100万から1兆太陽質量のブラックホール

に大きく類別されます。

まず紹介すべきは、2041年のライスナー＝ノルドシュトルム・ブラックホール「RNBH2041」の発見でしょう。以前は、宇宙に存在するブラックホールは、基本的にはカー・ホールだと考えられていました。というのは、プラスに帯電したブラックホールはマイナスに帯電したプラズマ粒子を引き寄せやすいので、仮に帯電してもすぐに中性化してしまう傾向があるからです。そのため、

宇宙に存在する通常のブラックホールでは電荷はほとんど無視できると考えられていたのです。

しかし、2041年に、VSOP-Xドコカが荷電ブラックホールによる重力レンズ現象を観測して、従来の“常識”は覆りました。0.3マイクロ秒角の分解能を有するドコカは、当時、いくつもの活動銀河中心核で超大質量ブラックホールと降着円盤の撮像観測を行っていたのですが（後述）、たまたまその一つでマイクロレンズ現象が起きました。光度曲線の解析から恒星質量ブラックホールによるレンズ現象だとわかったのですが、光度曲線の波長依存性（色収差）が発見されました。通常のカー・ブラックホールでは色収差は起こらず、帯電パラメーター0.7のライスナー＝ノルドシュトルム・ブラックホールを仮定して初めて、色収差まで含めた観測曲線を説明できたのです。

グリュックブヒト (J. Glückbucht) の研究<sup>8)</sup>で、帯電ブラックホールは以下のように形成されるのではないかと考えられています（図5）。ブラックホールに周囲からガスが降ってくるとブラックホール周辺にプラズマ円盤が形成され、降ってくるガスの量が非常に多いとプラズマ円盤は高温の厚い超臨界円盤となり、ガスは光り輝く円盤の放射圧で吹き飛ばされます。このとき放射圧を直接受ける電子と、電磁気力で電子に引きずられる陽

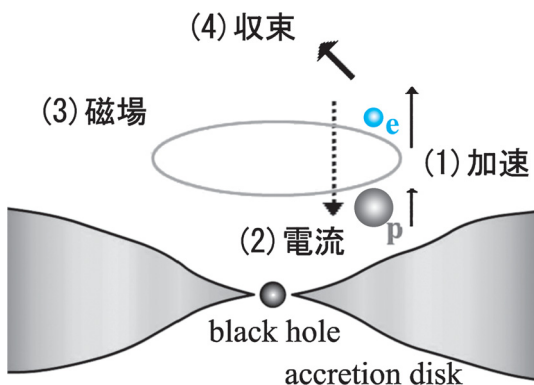


図5 超臨界円盤の放射圧によるプラズマ分離 CSI によりブラックホールが帯電するしくみ。

子の間でわずかに速度差が生じます。荷電粒子の間で速度差が生じると、図のように鉛直方向に電流が流れるのと同じですから、環状のトロイダル磁場が発生し、電子や陽子を締め付けます。このときにも、慣性の大きな陽子よりも電子のほうがより締め付けられ、さらに速度差が生じます。通常は無視できるレベルなのですが、ある条件下ではこの機構が不安定なフィードバックを起こします—「放射圧起動電荷分離不安定 CSI (charge separation instability triggered by radiation pressure)」と呼ばれています。そして、電子だけが極方向へ吹き飛ばされ、陽子はブラックホールへ吸い込まれて、プラスに帯電したライスナー＝ノルドシュトルム・ブラックホールが形成されるようです。

また VSOP-X ドコカは、2039年、光る衣をまとったブラックホール、いわゆるブラックホールシルエットの撮像にも初めて成功しました（図6）。そもそもプラズマガスの降着円盤—光る衣—をまとったブラックホールがどう見えるかについては、20世紀から推定されていて<sup>9), 10)</sup>、2010年代に活躍した VSOP2 カナタノによって撮像されると期待されていました。実際、いて座 A\* のシル

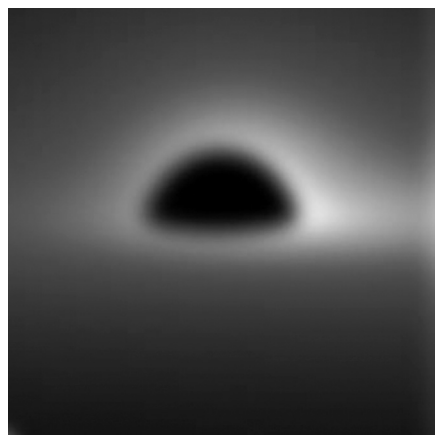


図6 光る衣をまとったブラックホール、いて座 A\* おぼろのシルエット (Courtesy of O. Pi. Takahashi).

エットは約 30 マイクロ秒なのでカナタノでぎりぎり解像できるはずでしたが、ブラックホールと円盤を取り巻く周辺ガスが予想以上に多く、波長 6 mm の電波でもやがかった状態になっていました。ドコカは、分解能も向上しましたが帯域もサブミリ波に選び、なんとか撮像に成功したものです。事前の予想どおり、はっきりしたシルエットというよりは、おぼろなゴースト的イメージが得られ、「いて座 A\* おぼろ (Sgr A\* Oboro)」と名づけられました。もっとも、予想どおりとはいえ、ブラックホールの直接撮像は非常にインパクトも大きく、“2039 年の顔”としてタイム誌の表紙を飾りました。

さらに 2063 年にはソーン=チトカウ天体「TZ2063」の発見もありました。「ソーン=チトカウ天体 (Thorne-Żytkow object)」というのは、もともとはブラックホール研究の大家だったキップ・ソーン (K. S. Thorne) らが 1975 年に提案したもので<sup>11)</sup>、中性子星を飲み込んだ星の有様です。オリジナルなソーン=チトカウ天体は、2 太陽質量程度の中性子星を飲み込んだ 10 太陽質量の星で、半径 1,000 太陽半径、表面温度 2,700 K、光度 65,000 太陽光度という、あたかも M 型超巨星のように見える天体です。放射エネルギーの 97% は星中心核に沈降した中性子星への重力降着エネルギーで、3% が核反応エネルギーと見積もられていました。

高エネルギー天文コンプレックス・シジンが 2063 年に発見した TZ2063 は、それ以前はまさに M 型超巨星として知られていた星で、ジャッコの重力波観測とセリウウのニュートリノ観測により、3.5 太陽質量のブラックホールを飲み込んだ 30 太陽質量程度の星であることがわかりました (図 7)。ブラックホールはほぼエディントン降着率で星のガスを吸い込んでおり (星自身の光度もエディントン光度の 3 割に達しています)、約 1 億 4000 万年で星のガスをすべて吸い込むと予想されています。

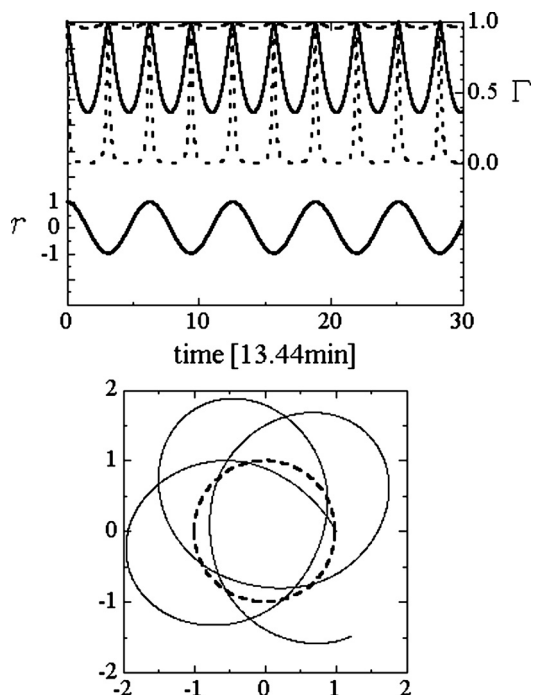


図 7 観測から解析された TZ2063 中心核におけるブラックホールの振舞い。ブラックホールは中心核周辺で軌道運動しています (上の図の下側のグラフが軌道半径の変化で、下の図が実際の軌道)。またブラックホールはガスを吸い込みながら降着エネルギーで光っていて、軌道速度の変化に伴いブラックホールの“明るさ”も周期的に変動しています (上の図の上側のグラフ)。

天体現象ではないですが、この 100 年のブラックホール研究の掉尾を飾るのが、2070 年代における人工ブラックホールの製造 (実用化) でしょう。人工ブラックホールの製造自体はすでに 2020 年代に CERN のチームが成功していましたが、その実用化までには紆余曲折がありました。巨大加速器でマイクロブラックホールを作るのはそれほど困難ではなかったのですが、できたブラックホールはホーキング放射ですぐに消し飛んでしまうのです (図 8)。かつては、加速器で作ったブラックホールが地球の内部に落下して地球を飲み込むのではないかと心配されたこともあったよう

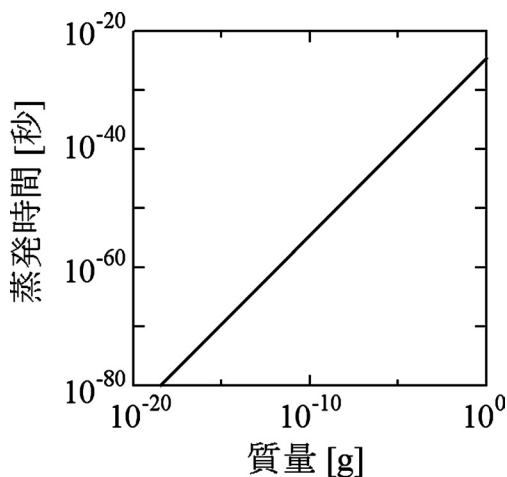


図8 ブラックホールの質量と寿命. ブラックホールの質量を  $M$ , 蒸発時間を  $t$  とすると,  $t = 2.5 \times 10^{-25} (M/1 \text{ g})^3 \text{ s}$  という関係があります.

ですが, そんな間もなく蒸発してしまいます. 蒸発する前にブラックホールを太らせること—「ブラックホール別腹化 (black hole cake viking)」が長年の課題で, ヒグシーノ (ヒッグス粒子の超対称性パートナー) を照射して光子に質量をもたせることで, ようやくマイクロブラックホールを安定化させることが可能になりました. 量子重力理論の最初の応用と言えるでしょう. 本探査船宇宙潜艦ヤマト V もブラックホールエンジンを搭載した5番艦です.

## 5. ラスト降着円盤

ここで, ブラックホール天文学関連の話題として, 降着円盤理論の進展について少し触れます.

約 100 年前に判明したように, 私たちの宇宙は約 137 億年前に始まり, 約 45 億年前に減速膨張から加速膨張へ転じて, このまま永遠に加速膨張していくと考えられています. その結果, 宇宙の未来は以下になると予想されています.

**AD50 億年 (地球の未来):** 約 50 億年後, 太陽は赤色巨星化し, 火星軌道ぐらいまで膨張します. その過程で質量を放出して太陽の質量は減少する

ので, 地球の公転半径は拡大して地球が太陽に飲み込まれることはないですが, 居住は不可能になります.

**AD200 億年 (銀河系の未来):** 約 60 億年後, 銀河系とアンドロメダ銀河は衝突合体し, 200 億年後ぐらいには, 銀河系をはじめ 20 個ほどの銀河を含む局部銀河群全体が合体してしまうでしょう.

**AD10 兆年 (星々の未来):** もっとも長寿命の星 (太陽質量の 8% ぐらいのもっとも軽い星) でさえ, 10 兆年ほどで寿命が尽きます. したがって, 星間物質が使い尽くされ新しい星の誕生もなくなった数十兆年先には, 最後の星の火が消えて, 宇宙には闇の帳が降りると予想されていました.

**AD10 週間 (物質の未来):** 約 10 の 37 乗年後, 陽子が崩壊してバリオン物質がなくなります.

さて, 約 100 年前には初期宇宙の最初の降着円盤などが議論されたことがあります<sup>12)</sup>, 2010 年代には宇宙のはるかな未来における「最後の降着円盤 (last accretion disk)」についてチャンスバリエ (J. Chancebaie) が検討し<sup>13)</sup>, 「最後のバリオン降着円盤 (last baryonic accretion disk)」と「ポジトロニウム降着流 (positronium accretion flow)」を提案しました.

数十兆年の未来, 最後の星の火が消えた段階で, 宇宙の物質の実質は, 褐色 (黒色) 矮星, 白色矮星, 中性子星, ブラックホール, 少量のガス, ニュートリノその他の素粒子, 大量の低エネルギー光子です. 核融合によるエネルギー発生はなくなりますが, 重力相互作用はあるので, このような未来でも, バリオン物質による降着円盤の形成は起こりえます. 一番多いタイプが, 単独で放浪していた中性子星あるいはブラックホールに, やはり単独で彷徨っていた黒色矮星または白色矮星が潮汐捕獲および潮汐破壊されてできる最後のバリオン降着円盤である「重元素降着円盤 (metal accretion disk)」です (図 9). 降着エネルギー (+核融合エネルギー) によって, 中心付近は約 30 万

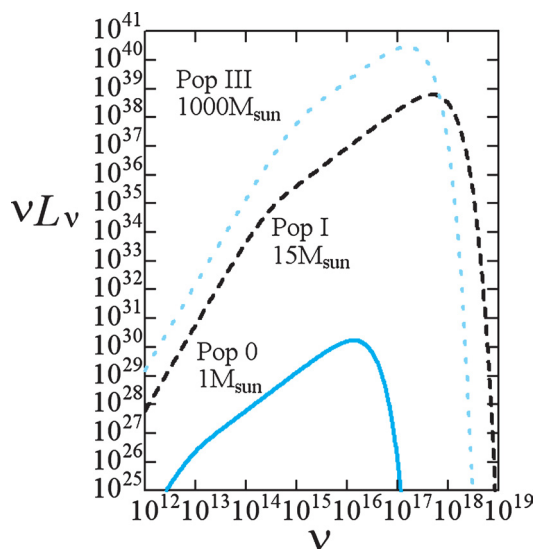


図9 最後のバリオン降着円盤の予想スペクトル. 横軸は光の振動数 (単位は Hz) で, 縦軸は光の強度に振動数をかけたスペクトルエネルギー分布. 実線が最後の Pop0 円盤で, 破線と点線は, それぞれ, 現在の宇宙の PopI 円盤と初期宇宙の PopIII 円盤です. 円盤の種族は, 重元素量を  $Z$  として,  $\text{Pop} = -0.5 \log Z$  で定義されます.

K の温度になり, 約 100 万年から 1000 万年ほど輝くと予想されました. このような縮退物質でできた白色矮星状降着円盤にはパチンスキー (B. Paczyński) らの先駆的な研究もあります<sup>14)</sup>.

また 10 の 37 乗年ほど先, 陽子崩壊後の宇宙に残されているのは, 大小さまざまな大きさの無数のブラックホール, 陽子崩壊前から存在していた少量のガスや光子やニュートリノ, そして陽子崩壊で生じた陽電子・ニュートリノ・パイ中間子・光子などです. この時代になると, バリオン物質はなくなっているので通常の降着円盤は形成されませんが, 電子と陽電子が結合した疑似水素「ポジトロニウム (positronium)」を成分とする「疑似水素降着流 (pseudo-hydrogen accretion flow)」が形成される可能性が指摘されています (図 10).

ポジトロニウムは約 140 ナノ秒で崩壊して電子陽電子対消滅を起こしますが, このような超未来

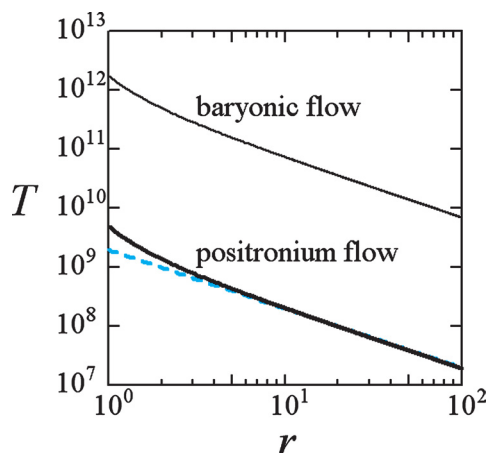


図 10 最後のポジトロニウム降着流の推定温度分布. 横軸はブラックホールからの距離  $r$  (単位はシュバルツシルト半径  $r_g$ ) で, 縦軸はガスの温度  $T$  (単位は K). 通常のバリオン流 (細い実線) は中心近傍で 1 兆 K ぐらいにまで達しますが, ポジトロニウム流 (太い実線) は 10 億 K 強にまでしかありません. なお破線は,  $T = 1.98 \times 10^9 (r_g/r) \text{K}$  を表しています.

においては, あまりにも電子や陽電子の密度が希薄なために, ポジトロニウムとして再結合したときのサイズが典型的に 1 天文単位ほどになり, 崩壊までに時間がかかります. そしてそのようなポジトロニウム疑似水素が, 銀河団程度の質量と 1 光年ほどの半径をもつ超特大ブラックホールの周りに降り積もって超特大降着流を形成するでしょう. また陽子や電子からなる通常のバリオン流は中心近傍で 1 兆 K (ビリアル温度) ぐらいにまで達します. しかし, 電子と陽電子からなるポジトロニウム流では, 粒子の質量がバリオンの 2,000 分の 1 しかないため, ビリアル温度も約 2,000 分の 1 になってしまい, 中心近傍で 10 億 K 強にまでしか到達しません. これは電子陽電子対を生成する閾値温度よりも低いため, 周囲から降ってきた電子と陽電子は, 一時的にポジトロニウムになり, おそらくブラックホールに吸い込まれる前に対消滅してしまうでしょう.



最後になりましたが、基礎理論の進展についても少し触れておきましょう。天体プラズマ現象は古典的な流体力学や放射流体力学で取り扱いますが、量子重力理論などに比べて非線形複雑系は思いの外に難しく、流体カオス・対流・乱流など非線形複雑系の最終的な定式化はなかなか解決しませんでした。拡散型粘性を発展型粘性に修正するなどの作業が進み、エド和田 (Ed. Wada) らの貢献<sup>15)</sup>によって、2090 年代にようやく、ハイゼンベルグの乱流カスケード理論、対流における混合距離理論、そして乱流粘性過程などの諸問題が、任意パラメーターを含まない形で完全に定式化されました。同時に、粘性流体のナビエーストークス方程式や放射流体のモーメント方程式などが書き換えられました。これらの成果は、降着円盤の理論をはじめ、さまざまな天体現象へ適用されて、流体システムとしての天体現象の理解が飛躍的に深まったことは言うまでもありません。現在でも、まだまだそれらの発展は続いています。

どなたの言葉だったか忘れましたが、自然は人間が想像する以上に奇妙で、人間が想像できる以上に驚異に満ちているそうです。ここで紹介したような描像は、きっと近いうちに大きく塗り替えられることでしょう。

## 謝 辞

いくつかの画像については、高箸 II. 凹太さん、西△晋 4 さん、秋陽一鶴さん、福彗♥さん、藤☆一茶さんたちに感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 日本天文学会百年史編纂委員会編『にっぽんてんもんがくのひやくねん』恒星社厚生閣 (2008 年)
- 2) Witten E., 1995, Nu. Ph. B 443, 85
- 3) Randall L., Sundrum R., 1999, Phys. Rev. Lett. 83, 3370
- 4) Kato J. J., 2016, Phys. Rev. Elec. 6, 1
- 5) Heger A., Woosley S. E., 2002, ApJ 567, 532
- 6) Paczyński B., 1986, ApJ 308, L43
- 7) Lucky B. P., 2009, PASJ 61, 23
- 8) Glückbucht J., 2042, EASJ 94, 1281
- 9) Fukue J., Yokoyama T., 1988, PASJ 40, 15
- 10) Takahashi R., 2004, ApJ 611, 996
- 11) Thorne K. S., Żytkow A. N., 1975, ApJ 199, L19
- 12) Fukue J., Takeuchi S., 2007, unpublished
- 13) Chancebaie J., 2018, EASJ 70, 249
- 14) Paczyński B., Jaroszyński M., 1978, ActaAstr. 128, 111
- 15) Wada Ed., et al., 2091, EASJ 143, 1