

# 突発天体とコンパクト天体形成の最前線へ

檜 山 和 己

〈東京大学ビックバン宇宙国際研究センター 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: kashiyama@phys.u-tokyo.ac.jp



中性子星やブラックホール、白色矮星などのコンパクト天体は主に星コアの重力崩壊と連星の合体の最中に生まれ、大きな重力エネルギーを瞬時に解放します。どのような親星からどのようなコンパクト天体がいつどこでどのような爆発現象を伴って生まれるのか？ 時間領域天文学、マルチメッセンジャー天文学が急速に発展する中、コンパクト天体形成史のミッシングリンクが次々と埋まり、一方で新たな謎が次々と発掘されています。主にGamma-Ray Burst (GRB)、超新星、Fast Radio Burst (FRB) に関して、過去およそ10年の進展、今後の展望を私なりに述べたいと思います。

## イントロダクション

スーパースターはよく、世紀の～、とか100年に一人の～、などと形容をされます。能力や業績が抜群であることを発生頻度の低さで表現しています。人生およそ100年、その間にお目にかかるか否か。直感的な閾値です。天の川銀河で起こる超新星爆発もだいたい100年に1度。例えばSN1987Aはまさに世紀の天体現象でした。私自身は当時4歳でなにも覚えてはいませんが、超新星やそれと同時に形成される中性子星やブラックホールなどのコンパクト天体は宇宙物理学者や天文学者にとってスーパーなスターの代表格です。

とはいえ、いわゆる普通の超新星は今やありふれた存在です。SN1987A以来、遠くの銀河で起こる突発現象も逃さず検出できる態勢が整備され、Gamma-Ray Burst (GRB) や超新星が1日に数回報告されることも当たり前。その結果、天の川銀河では1万年、10万年に1度の、突発天体、コンパクト天体界のスーパースター誕生の瞬間も日常的に目撃できるようになりました。特に過去10年の時間領域天文学、マルチメッセンジャー天文学の進展は凄まじく、重力波と多波長電磁波

を同時にとらえた連星中性子星合体GW170817/GRB170817Aはその一里塚です。

私が高エネルギー天文学の研究を始めたのもおよそ10年前。分野の進展のスピードに翻弄されながら取り組んだ研究を無理やり括ると、どのような親星からどのようなコンパクト天体がいつどこでどのような爆発現象を伴って生まれるのか？高エネルギー天体のZoologyと換言できるかもしれません。

天文学会研究奨励賞を頂戴するにあたり、本稿では、私が拙い足取りで辿った順番に、GRB、超新星、Fast Radio Burst (FRB)、三つの突発天体に焦点を当てて界隈の研究を紹介し、個人的な展望も合わせて述べたいと思います。

## 1. GRBとX線、 $\gamma$ 線突発天体

### 1.1 GRBのイロハ

GRBは宇宙でもっとも明るい非熱的な電磁波突発天体です。継続時間が数10秒から100秒程度のlong GRBとおよそ1秒未満のshort GRBに大別されます。いずれの場合も光速の99.99%を超えるような相対論的なジェットが $\gamma$ 線の放射源であることはわかっていますが、

- 1) ジェットの発射機構,
- 2)  $\gamma$ 線の発生機構,

が不明で、それらを解明することがGRB研究者の悲願です。標準理論の枠組みは力学的な限界ギリギリの速度で回転するコンパクト天体（ブラックホール or 中性子星）の回転エネルギーを $\sim 10^{15}$  Gaussもの強力な磁場を介して引き抜く、というのですが、1)に関しては光速の99.99%という速度を実現するための必要条件、質量 ( $mc^2$ ) に対してエネルギー ( $E$ ) が100倍以上の‘火の玉’をどのようにして作るのか、また2)に関してはジェットの自由エネルギーを効率ほぼ100%でいつどこでどのようにして $\gamma$ 線に転換するのか、が争点です。

GRBの親星については、long GRBは高速回転するWolf-Rayet likeな星の重力崩壊、short GRBについてはブラックホールや中性子星からなる連星コンパクト天体の合体という予想がありました。主に「GRBの継続時間 $\approx$ 高速回転するコンパクト天体周りにできる降着円盤の寿命」という仮説に基づくものでしたが、前者についてはいくつかのGRBと超新星の同時検出、後者についてはGW170817/GRB170817Aのマルチメッセンジャー観測によって正しさが強く示唆されています。

GRBの残光放射の観測から示唆されるジェットの開き角と相対論的なビーミング効果を考慮すると、およそ100発に1発の割合でしか観測することができません。この点を考慮して発生頻度を見積もると、GRBは天の川銀河ではおよそ1万年から10万年に1度。そんな稀な現象を年間およそ100発という高いレートで検出できているのは、高い感度で全天の大部分をモニターするSwift衛星やFermi衛星の性能と高赤方偏移からでも地球上に大量の $\gamma$ 線を届けるGRBの明るさのおかげです。

## 1.2 ultra-long GRB

私がGRBの勉強、研究を始めた頃、高エネルギー帯域の突発天体に関してはSwift衛星による発見を整理する作業がひと段落し、Fermi衛星の

初期成果に色めき立っている、という雰囲気です。研究の最前線に繰り出すのはなかなか大変そうでした。一方、Swift衛星の運用が10年を超えると、そもそも稀なGRBの中でもさらに稀な新種もちらほら検出されるようになります。

一つの例が継続時間が $\sim 10^4$ 秒と非常に長い、ultra-long GRBです [1]. 「GRBの継続時間 $\approx$ 高速回転するコンパクト天体周りにできる降着円盤の寿命」に則ると、ultra-long GRBの親星は連星コンパクト天体の合体でもWolf-Rayet likeな星でもありません。一つの有力な可能性は、このGRBの親星が重力崩壊時でもしっかりとした水素外層を持つ青色巨星である、というものです [2]. 古巣の京都大学天体核研究室の人々と一緒に提案しました。

青色巨星モデルのアイデア自体は誰でも思いつくものですが、「野球解説者になるな、理論家なら予言しろ」という教義のもと、このシナリオ独自のスモーキングガンも合わせて提案したのが味噌です。青色巨星からのGRBの場合、ジェットが親星を貫通するまでに時間がかかり、その間に注入されたエネルギーはジェットを包むコクーンに蓄えられます。ジェットがついに親星を突き破った暁にはコクーンも星周空間に解き放たれ、その後、超新星の要領 (2.1参照) でコクーンから熱的光子が放射されます。このコクーン放射がおおよそ100日後に見え始めるはずだ、という予言を付け加えました。

そしてほぼ予言どおりの放射がGRB111209Aというultra-long GRBから受かります [3]. 反論もないわけではなく、GRB研究の傍流ではありますが、理論予言と観測による検証がリアルタイムに進む時間軸天文学のダイナミズム、ジェットやコクーンという普遍的な構造と親星の多様性を掛け合わせることで生まれる突発天体の多様性、それらの面白さを教えてくれた研究として思い出深いです。

### 1.3 GRBのこれから

現在、GRB研究の本流はshort GRBでしょう。中性子星連星の合体からGRBの中心エンジン形成に至るダイナミクスを直接測ることができる重力波はやはり強力。それを足掛かりに、ジェットの発射機構、 $\gamma$ 線の発生機構という本丸に迫る流れです。GW170817/GRB170817Aはジェットを軸からおよそ30度外れた方向から観測した、いわゆるoff-axisイベントでしたが、それでもジェットの性質について新たな知見をいくつも与えてくれました。On-axis GRBと重力波の同時検出が待望されています。

高エネルギーニュートリノも過去10年、そして今後のGRB研究の進展を語る上で忘れてはならないキーワードです。宇宙一明るい非熱的放射であるGRBの放射領域では宇宙一激しい粒子加速が起こっているに違いない。特に、起源不明の最高エネルギー宇宙線の加速器としてGRBを考えるのは自然です。2010年に完成したIceCubeと $\gamma$ 線衛星との同時観測により、GRBの $\gamma$ 線光子が作られるまさにその現場で最高エネルギー宇宙線が同時に加速される、という魅力的な可能性はほぼ棄却されました。ただし、GRBが最高エネルギー宇宙線の起源として棄却されたわけではありません。今後も高エネルギーニュートリノがGRBのジェットの物理や放射機構を探る上で非常にユニークなメッセンジャーであることは間違いありません。

もう一つのフロンティアはGRBを用いた遠方宇宙の開拓です。究極的には始原ガスから生まれた第一世代星が起こすGRBで最遠方の宇宙をプローブすること。始原ガスのような低金属量環境で生まれる大質量星は重力崩壊直前でも青色巨星である、という理論的な示唆があります。未だ見ぬ最遠方のGRBは青色巨星が起こすultra-long GRBだらけかもしれません。

## 2. 超新星と可視光突発天体

### 2.1 超新星のイロハ

Ia, Ib, Ic, IIP, IIInなどといった超新星の型分類は超新星の勉強を始めて最初に、うっ、となるポイントではないでしょうか。観測されるスペクトルと光度関数に基づいているのですが、慣れるのに時間がかかりました。個人的には次のように主なエネルギー源で分けることでスッキリしました。実際、主なエネルギー源とスペクトルの間には大雑把な対応関係があります。

超新星を含む可視光突発天体が一番明るくなるのはエジェクタに蓄えられた光子が、エジェクタよりも速い速度で外向きに拡散し始める瞬間です。その時間は基本的にエジェクタの質量 ( $M_{ej}$ )、速度 ( $v_{ej}$ )、オパシティー ( $\kappa$ ) で決まります。

$$t_{\text{peak}} \approx \left( \frac{3\kappa M_{ej}}{4\pi c v_{ej}^2} \right)^{1/2}. \quad (1)$$

一方、可視光突発天体の明るさ ( $L_{\text{peak}}$ ) は、ピーク時まで蓄えられている、あるいはピーク時に注入されている熱的な光子のエネルギー ( $E_{\text{int}}$ ) で決まります。

$$L_{\text{int}} \approx \frac{E_{\text{int}}}{t_{\text{peak}}}. \quad (2)$$

光子エネルギーの起源は大雑把に三つのカテゴリーに分類することができます。まずは

#### i) 爆発の根元で注入された熱エネルギー。

このエネルギーはエジェクタの断熱膨張に伴って運動エネルギーに転換され、エジェクタが晴れ上がるまでに大部分が失われてしまうので明るいピークを作るためには向きません。例えばIIP型超新星のプラトーがこのカテゴリーに入ります。次に

#### ii) 爆発時に合成された不安定原子核の崩壊。

崩壊した原子核のエネルギーのうち、少なくとも割合が $\gamma$ 線や電子陽電子として放出され、特に後者は即座に熱化します。ピーク時間は半減期で決

まり、例えば $^{56}\text{Ni}$ の場合、半減期がおよそ10日。ピーク時の明るさから合成された不安定原子核の量の情報を得ることができます。通常のI型の超新星などがこのカテゴリーに入ります。最後に、

### iii) i),ii) とは別の熱エネルギー注入。

これのように書くとなんでもありなのですが、基本的には衝撃波によるエネルギー注入を考えます。例えば、エジェクタが星周物質の中を進行する時に発生する衝撃波でエジェクタの運動エネルギーの一部を熱エネルギーに(再)転換することができます。この場合、熱エネルギーと光子が発生してから拡散が始まるまでの時間が短く、i)の場合と比べて断熱膨張による損失が少ないので明るいピークを作ることも可能です。IIn型と呼ばれる超新星はこのカテゴリーに入ります。

通常の超新星については～2000年までに現象論の大枠は完成しました。つまり、Ia型、Ib型、Ic型、IIP型、IIn型など、大雑把にいて銀河系で100年に一度程度起こるような超新星は、それぞれどういう星が起こしたどういう爆発なのか、理解が得られたのです。また、これらに比べておよそ10倍頻度が低く、一方でおよそ10倍爆発エネルギーが大きい極超新星についても、long GRBに付随したイベントが検出され、long GRBは大質量星の重力崩壊と関係していることが確かめられました。1998年の出来事です。ただし、いずれの場合についても爆発メカニズムを第一原理計算によって再現することはできていません。その意味でもっとも重要な問題は未解決のままです。

## 2.2 超高輝度超新星

2000年代に入ってCCDセンサーを用いた可視光探査がよいよ本格化し、新種の可視光突発天体が次々と発見されます。広い視野と高い感度の両立によって、

- 1) 遠くの宇宙の稀な明るい突発天体、
- 2) 近くの宇宙の暗い突発天体

を逃さずとらえられるようになりました。また(高感度)×(広視野)のさらなるご利益として、

### 3) 変動が速い突発天体

に特化した高ケイデンス探査も可能になりました。

私自身はultra-long GRBの研究(1.3参照)を契機に、突発天体の多様性の起源をより一般的に自分なりに整理しようと思っていました。そこで後発組ではありましたが、まずは1)の代表格、超高輝度超新星(superluminous supernova)に注目しました[4]。発生頻度は極超新星よりもさらに10倍が低く、それぞれの銀河で1万年から10万年に1度。ちょうどGRBと同じくらい稀ではありますが、ピーク時には通常の超新星よりの～10-100倍、～ $10^{50}$  ergものエネルギーをUV/可視光帯に放出する、宇宙でもっとも明るい準熱的突発天体現象です。

このような莫大な熱的エネルギーを2.1で紹介した分類i)の方法で放射することは不可能です。また、分類ii)の方法の場合、太陽質量を超える $^{56}\text{Ni}$ を合成する必要があります。いわゆる対不安定性(pair instability)を起こすような重たい親星を考えることで原理的に不可能ではないのですが、その場合に期待されるスペクトルの特徴がみとめられません。残された可能性は分類iii)の方法です。つまり(1)式のタイミングでエジェクタになにかをぶつけて～ $10^{50}$  ergのエネルギーを解放する必要があります。可能性は二つあります。外側にエジェクタよりも遅いものを置いておいてぶつけるか、内側からエジェクタよりも速いもの打ち込んでぶつけるか、です。ここでは内側からぶつける場合に注目しましょう。

内側からぶつけるなにか、の最有力は生まれたてのコンパクト天体からのアウトフロー、特に高速回転強磁場中性子星からの相対論的な磁気遠心力風です。一般に、回転する中性子星からは単極誘導によって回転エネルギーが引き抜かれます。このアウトフローの光度は中性子星の回転周期( $P$ )と双極磁場強度( $B_d$ )で決まり、爆発後～1ヶ月のタイミングで～ $10^{50}$  ergのエネルギーをエジェクタに注入せよ、という条件から、超高輝度超新星

を説明するためには $P \sim 1$ ミリ秒かつ $B_d \sim 10^{13-14}$  Gaussが要求されます [5]. 比較的強い磁場が必要となることからマグネターモデルと呼ばれることが多いです。

個人的にはこのマグネターモデルという呼び方に違和感があります。マグネターの自然な定義は、放射現象の主なエネルギー源が磁気エネルギーである中性子星だと思っからです。超高輝度超新星を説明する中性子星のパラメータの中で特徴的であるのはむしろ $P \sim 1$ ミリ秒という限界ギリギリの回転周期であり、その主なエネルギー源も回転エネルギーです。中性子星の分類上はむしろパルサー駆動モデルなどの呼び方が適切だと思います。また、マグネターモデルは良くも悪くも融通が効きすぎるため、GRBや超新星の文脈では「困った時のマグネターモデル」などと皮肉を言われることもしばしばです。マグネターには罪はない。なんとかこの状況を打開したい。

そこで主に村瀬孔大さんと共同で取り組んでいるのがマグネターモデル、もといパルサー駆動モデルの非熱的なカウンターパートの研究です。パルサー駆動モデルでは相対論的なパルサー風がエジェクタに打ち込まれ、終端衝撃波では電波から $\gamma$ 線までの多波長のパルサー星雲放射が発生します。爆発直後はその大部分は熱化し、超新星放射に転換されますが、エジェクタが膨張するにつれ、次第に熱化の効率が下がり、非熱的成分が漏れ出すようになります。この生まれたての中性子星からの非熱的星雲放射をスモーキングガンとしてパルサー駆動モデルを検証可能なモデルに格上げし、ひいては宇宙でもっとも明るい可視光突発天体の中心エンジンに決定打を打つことが狙いです。

ということで、爆発直後から超新星エジェクタとパルサー星雲の動力学とそこからの放射を矛盾なく解く枠組みをこしらえ、それを使って電波からX線、 $\gamma$ 線に至るまでの非熱的星雲放射の時間発展を計算、波長ごとにどのタイミングでどうい

う観測を行えば良いか、系統的に戦略を立てました [6-8]. それに基づき、実際に超高輝度超新星のフォローアップ観測が進行中です [9]. 現状、どの波長でもちょうど見えそうで見えない、いや、見えたかもしれない、というやきもきする感じですが、乞うご期待。そしてこの研究は3章で紹介するFRBの研究へ繋がっていきます。

### 2.3 超新星のこれから

超新星の本丸はやはり爆発メカニズムでしょう。自然界の全ての相互作用が複雑に絡まり合う現象を解くのは大変ですが、世界中で人々がしのぎを削っています。次の天の川銀河で超新星が起った暁には、蓄えられた理論的知見に加え、スーパーカミオカンデや地上重力波干渉計が生まれたてのコンパクト天体を丸裸にしてくれるでしょう。それは明日なのか、10年後なのか、はたまた100年後か。On-axis GRBと重力波の同時検出と同様、もう少しは辛抱が必要かもしれません。

一方、LSST時代に突入すると、可視光突発天体Zooがさらに $\sim 10$ 倍賑やかになります。突発天体の多様性、親星の多様性、中性子星、ブラックホールの多様性、それらの間の関係を紐解くことは中心的な課題になるでしょう。

中性子星に関しては、例えばパルサーとマグネター、質的に異なる中性子星の系列、それぞれの運命がどのように決めたのか。個人的には2.2節で紹介したアプローチをより一般の超新星に拡張し、生まれてから日が浅い中性子星からの非熱的放射を探索する方向に伸び代を感じます。蟹パルサーに代表される天の川銀河の中性子星は若いといっておよそ1000歳。誕生からおよそ100年以内の中性子星がどのような姿をしているか、まだ誰も知りません。

ブラックホールに関しては、重力波観測によって質量関数やスピン分布が徐々に明らかになりつつあります。ブラックホールがいつどこでどのようにして生まれたのか？ 今や具体性を伴う問いになりました。ブラックホールにただただものを

吸い込ませる，ということが実は簡単でないことを我々は経験的に知っています．それは形成時と同じでしょう．産声を上げたブラックホールが可視光突発天体探査のフロンティア，1), 2), 3) のどこかに潜んでいるだろう，と当たりをつけているのは私だけではありません [10, 11]．

重力波観測によって検出されるコンパクト天体は，しかし，宇宙時間以内に合体するコンパクト連星系，という非常にバイアスのかかったサンプルであることには注意が必要です．このような連星系の形成は銀河あたりおおよそ1万年に1度，可視光突発天体探査の網にやっとかかり始めたところですが．近接大質量連星系という特異な環境で育った大質量星が起す爆発はどのようなものなのか？ 特に形成されるブラックホールや中性子星のスピンの紐づけて明らかにし，多方面から重力波天体の形成，進化に迫る，という方向にも研究が進むと思われます．

### 3. FRBと電波突発天体

#### 3.1 FRBのこれまで

FRBは継続時間ミリ秒程度の宇宙でもっとも明るいコヒーレント電波放射です．発見の報告は2007年 [12]．上記の性質に加えて非常に大きな分散度 (dispersion measure: DM) から宇宙論的な距離にある天体起源であることが提案されました．が，当初，人々は半信半疑でした．複数台のレシーバーで受信したこともあり，大気圏内のノイズである可能性が排除できなかったこと，到来方向が小マゼラン雲の近傍だったことなど，いくつか理由がありました．

最初のブレイクスルーはThorntonらによる銀河面から外れた方向からの点源として4発のFRBの検出でしょう [13]．これによりFRBの宇宙物理的な起源の信ぴょう性が増し，研究が勢いづきます．その後Arecibo望遠鏡を用いた繰り返すFRBが報告され，VLAなどの長基線電波干渉計を用いた観測によって，このFRB121102の母銀

河が同定され，少なくとも一部のFRBが宇宙論的な距離にある天体起源であることが確定しました [14]．

最初の発見からFRB121102の母銀河同定までは多少時間を要しましたが，そこから先は一気に完成．現在，FRB観測を牽引しているのはCHIMEやASKAP, STARR2など，FRBの発見以後に建設された望遠鏡です．広視野に特化した探査と角度分解能に強みを持つ探査，それらが相補的に観測のフロンティアを押し広げ，あっという間に年間～100発検出，～10個の母銀河同定というフェイズに突入しました．このような目覚ましい進展の中で，FRBに関する大きな問い，

I) 起源天体はなにか？

II) コヒーレント放射機構は？

III) FRBを用いた新たな宇宙論の可能性は？

に少なくとも部分的に答えが与えられました．以下では2章とも関わりが深いI) について紹介したいと思います．

#### 3.2 起源天体はなにか？

FRBの起源天体については，特にThornton et al. [13] の発表直後，数多くの候補が提案されました．ミリ秒という短い継続時間から起源天体はおそらくコンパクト天体．発生頻度は全天で1日におおよそ1000回．全てのFRBが1度きりだと思えば超新星の10%のくらの頻度で起源天体を形成する必要があります．しかしおおよその合意が得られるのはここまで．コンパクト天体が関わるありとあらゆる突発現象が議論されたといっても過言ではありません．その一因はFRB一発に必要なエネルギーがそれほど大きくないことです．明るいものでも一発あたり必要なエネルギーは $\sim 10^{40}$  ergを超える程度．もちろん，地球上の物理現象と比べると桁違いですが，ほとんどのコンパクト天体にとってこの程度のエネルギーの支出は大したものではありません．

Thornton et al. の結果が発表された時，私もご多分に漏れず候補天体モデル祭りに参加しまし

た。当時、IceCubeによるPeVニュートリノ発見という大きなニュースもあり、井岡邦仁さんと、天の川銀河にある連星白色矮星合体残骸から高エネルギーニュートリノ出ないですかねえ、みたいなやり取りをしていたところ、戸谷友則さんの、FRB中性子星合体モデルの論文がarXivにあがりました [15]。それを見て、同じコンパクト天体の合体だし、ニュートリノもいいけどFRBの可能性も面白そうだ、ということになり、FRB白色矮星合体モデルを一週間くらいでババッと書きました [16]。論文をarXivにあげた次の日、Martin Rees 卿から「発生頻度を良く説明する面白い可能性だ」とメールをいただき、嬉しかったことを覚えています。

FRBの起源天体を絞り込むことが難しかったもう一つの理由は、FRBのカウンターパートや母銀河が同定できなかったことです。膠着状態を打開したのは最初の繰り返すFRB、FRB121102の母銀河と定常電波カウンターパートの発見でした [14]。FRB121102の母銀河は赤方偏移 $z=0.19273(8)$ にあるスターバースト矮銀河でした。文字通り爆発的に星を作っていることから、起源天体の形成条件が大質量星の生き死にと密接に関係していることが示唆されます。また、カウンターパートとして検出された定常電波は非常に明るく、放射光度が $a\ few \times 10^{39}\ erg/s$ 。発見からおおよそ10年が経過しましたが、放射強度は衰えていません。この間に定常電波として放射されたエネルギーだけでもおおよそ $10^{48}\ erg$ 。FRB一発一発あたりのエネルギーは大したことはない、という話でしたが、このような大きなエネルギーを放出することができる天体は限られてきます。

FRB121102の起源天体の最有力候補は若い中性子星です。明るい定常電波カウンターパートはまさに2.2節で紹介したような生まれてから日が浅い中性子星からのパルサー星雲放射だとして自然に説明できます [17]。この仮説に則って少し手を動かすと、ただ自然に説明できるだけでなく、

起源天体である中性子星の性質：形成時の回転周期、磁場強度、現在の年齢などを厳しく制限することができることに気づきます。ポイントは定常電波カウンターパートの明るさとFRBの透過条件です。

例えば、中性子星が年をとりすぎると星雲も衰え、定常電波カウンターパートを説明することができなくなります。ここから年齢に上限がつかます。一方で、中性子星が若すぎると周囲を取り囲む超新星残骸にFRBが吸収されてしまうので年齢に下限がつかます。同様に、形成時の回転周期や磁場強度についても値が適切な範囲にないと上の二つの条件を満たすことができません。

結果、示唆されるパラメータは形成時の磁場強度が $10^{13}$  Gauss程度、回転周期がミリ秒程度、現在の年齢がおおよそ10-100歳 [18]。興味深いことに、このパラメータは前章で紹介した超高輝度超新星のパルサー駆動モデルで要求されるパラメータと一致します。また、スターバースト矮銀河という母銀河の性質も整合し、年齢が10-100歳だとした時に見積もられる起源天体の形成頻度も超高輝度超新星の発生頻度と一致します。宇宙で一番明るい可視光突発天体と宇宙で一番明るいコヒーレント電波の起源が同じ、というのは面白い可能性だと思います。

ただし、どうやらFRB121102は珍種で、その他の大部分のFRBは異なる起源天体を持っているのではないかと、という雰囲気が漂いつつあります。CHIMEによって検出された二例目の繰り返すFRB、FRB180916.J0158+65に関しても母銀河の同定に成功しましたが、FRB121102のような定常電波カウンターパートの検出されていません [19]。また、ASKAPらによって単発のFRBについても母銀河が同定されましたが、これらはいずれも‘普通の’銀河でFRB121102のような特異なスターバースト矮銀河ではありません [20]。

そして2020年4月末、天の川銀河にある中性子星、SGR J1935+215から2発のFRB、FRB200428

が検出されます [21]. この中性子星は回転周期は3秒、磁場強度は $2.2 \times 10^{14}$  Gauss、折に触れてフレアを起こす、典型的なマグネターです。FRBが観測されたのも活動期の最中で、複数のX、 $\gamma$ 線観測衛星によってFRBの発生と同期したフレアも検出されました [22]. マグネターのフレアはFRBの発見当初から起源天体の最有力候補の一つであり、「やっぱり」と見る向きもあります。ただし、FRB200428は宇宙論的な距離にあるFRBと比べると2桁以上放射光度が小さく、一方でFRBに同期したフレアはSGR J1935+215の通常フレアと比べる有意に‘温度’が高い、など意味深な特徴があります。明らかになりつつあるFRBの輪郭の中でFRB200428とSGR J1935+215は果たしてどこに位置し、それがどういう意味を持つのか。FRB起源天体の研究は新たなステージに入った感じがします。

### 3.3 FRBのこれから

FRBの起源天体の研究は、しばらく中性子星モデルを中心に展開するでしょう。起源天体の素性が割れているFRB121102やFRB200428は、しかし、大部分のFRBとはいろんな意味で異なります。その大部分のFRBの中にも繰り返すものと（観測している限りは）繰り返さないもの、という大きな分岐があり、さらに繰り返すものの中にはFRB180916.J0158+65のように活動に周期性があるものも見つかっています [19]. これらの性質が中性子星やその親星のどのような性質と結びつくのか？ また、FRB母銀河の多様性にも注意が必要です。同定された母銀河の中には星形成が活発でないものも含まれており、中性子星連星合体や白色矮星連星合体など、大質量星の重力崩壊以外の形成過程を示唆しているのかもしれませんが。

極論、中性子星であればなんでも良いのか？ FRBの起源天体になるための必要条件はなんなのか？ この問いに答えるためには比較的後回しになっていたコヒーレント放射機構問題と向き合う必要があるでしょう。FRB200428は放射機

構を考える上でも大きな転機となりました。マグネターフレアと同時に検出されたことから、少なくともこのイベントに関しては、マグネターの磁気圏でなんらかのエネルギー散逸が起こり、それが引き金となってFRBが発生しました。一つの有力な説は磁気圏内の開いた磁場にそって加速された電子・陽電子流からのコヒーレント曲率放射、もう一つの有力な説はフレアと同時に放出されたアウトフローが磁気圏の外でつくる相対論的な衝撃波で発生するシンクロトロンメーザー放射です ([23]とその文献参照)。FRBの検出数が爆発的に増加する中で、追観測におあつらえ向きのイベントも必ず受かります。それに備え、それぞれのシナリオで期待されるカウンターパートを理論的に予言しシナリオをテストするための観測戦略を練っておくことが重要そうです。

発見以来、FRBの大きな魅力の一つは宇宙論の道具として可能性です。FRB起源天体から地球までの電子柱密度に対応するDMは、銀河間空間のバリオンとその電離史を探ることができるユニークな観測量です。FRBの母銀河と赤方偏移を決定する目処が立っていなかった当初は、片手落ちの感もありましたが、今や母銀河と赤方偏移の決定は年間～10個ほどのペースで可能で、その成果により、いわゆるミッシングバリオン問題に終止符が打たれようとしています [20]. 年間～100個の母銀河決定も現実的であり、FRB宇宙論の視界は良好です。FRBが宇宙論の道具としてIa型超新星や連星中性子星合体と肩を並べる日もそう遠くない気がします。

## おわりに

GRB、超新星、FRBについて過去およそ10年の進展を概観しました。随所でかなりのバイアスがかかってはいますが、一人の駆け出しの研究者が最前線へ繰り出そうともがく姿とともに、時間領域天文学、マルチメッセンジャー天文学の躍動が少しでも伝われば幸いです。本稿の主題であっ



た高エネルギー天体Zoologyは遊び心溢れるパズルのように楽しいですが、私自身、本当にやりたいのはその向こう。愛すべき突発天体やコンパクト天体を用いて物理や宇宙論のフロンティアを切り拓くことです。その日を夢見て精進します。

## 謝 辞

本稿で紹介させていただいた私の研究の多くは、村瀬孔大さん、井岡邦仁さん、Peter Mesarosさんとの共同研究によるものです。研究の先生として、仲間として、ライバルとして、これからもよろしく願います。また、仲内大翼さん、諏訪雄大さん、中村卓史さん、木内建太さん、瀬戸直樹さん、稲吉恒平さん、仏坂健太さん、久徳浩太郎さんにも大学院生時代から今日に至るまで共同研究を通して大変お世話になっています。感謝いたします。最後に、東京大学宇宙理論研究室、ビックバン宇宙国際研究センターのみなさん、特に本稿に関わりのあるテーマで共同研究している大学院生のConor Omandさん、川名好史朗さん、津名大地さん、岩田朔さん、Zhong Yiciさん、いつもありがとうございます。

## 参考文献

- [1] Levan, A. J., et al., 2014, ApJ, 781, 13
- [2] Kashiyama, K., et al., 2013, ApJ, 770, 8
- [3] Nakauchi, D., et al., 2013, ApJ, 778, 67
- [4] Gal-Yam, A., 2012, Science, 337, 927
- [5] Kasen, D., & Bildsten, L., 2010, ApJ, 717, 245
- [6] Kashiyama, K., et al., 2016, ApJ, 818, 94
- [7] Murase, K., et al., 2015, ApJ, 805, 82
- [8] Omand, C. M. B., et al., 2018, MNRAS, 474, 573
- [9] Law, C. J., et al., 2019, ApJ, 886, 24
- [10] Kashiyama, K., & Quataert, E., 2015, MNRAS, 451, 2656

- [11] Tsuna, D., et al., 2020, ApJ, 897, L44
- [12] Lorimer, D. R., et al., 2007, Science, 318, 777
- [13] Thornton, D., et al., 2013, Science, 341, 53
- [14] Chatterjee, S., et al., 2017, Nature, 541, 58
- [15] Totani, T., 2013, PASJ, 65, L12
- [16] Kashiyama, K., et al., 2013, ApJ, 776, L39
- [17] Murase, K., et al., 2016, MNRAS, 461, 1498
- [18] Kashiyama, K., & Murase, K., 2017, ApJ, 839, L3
- [19] CHIME/FRB Collaboration, et al., 2019, Nature, 566, 235
- [20] Macquart, J. P., et al., 2020, Nature, 581, 391
- [21] Bochenek, Christopher D., et al., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2005.10828
- [22] Li, C. K., et al., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2005.11071
- [23] Yamasaki, S., et al., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2008.03634

## Explosive Transients and Evolution of Compact Objects

**Kazumi KASHIYAMA**

*Research Center for the Early Universe, Graduate School of Science, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract: When a compact object like neutron stars, black holes, and white dwarfs is formed through a collapse of a star or a merger of a binary, a large gravitational energy is released in a short timescale. What kind of compact objects are formed from what kind of progenitors with what kind of explosions, when and where? Thanks to the rapid growth of time-domain astronomy and multi-messenger astronomy, some of the missing links in the history of formation and evolution of compact objects have been discovered. Focusing on gamma-ray bursts, supernovae, and fast radio bursts, I overview the progress in this research field in the past 10 years or so and discuss the prospects.