

高エネルギー突発天体の理論的研究

井 岡 邦 仁

〈京都大学基礎物理学研究所 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: kunihiro.ioka@yukawa.kyoto-u.ac.jp



突発天体—夜空に突如現れてはすぐに姿を消す、まさに「諸行無常の宇宙」を象徴する現象です。その多くは高エネルギー天体であり、ここ30年ほどの間に、天文学における主要な研究分野へと急速に成長してきました。この発展は、天文学の必然的な流れとも言えるものです。本稿では、私が関わってきたガンマ線バーストや高速電波バーストの理論的研究を紹介するとともに、その歩みの中で出会った個性的で魅力的な人々についても触れたいと思います。

はじめに

この度は、2024年度林忠四郎賞という栄誉ある賞を賜り、大変光栄に思います。ご推薦くださった先生、選考に携わってくださった委員の皆様、そしてこれまでご指導くださった先生方、共同研究者の皆さん、研究コミュニティの皆様により感謝申し上げます。

今回このように受賞記事を執筆する機会をいただいたので、私が関わってきた研究分野—高エネルギー突発天体の理論的研究—の発展や面白さをお伝えするとともに、研究のきっかけとなった「人との出会い」や「影響を受けたエピソード・教訓」にも触れてみたいと思います。すべての人に当てはまるとは思いませんが、読んでくださった方に少しでも楽しんでいただければ、そしてどこかに参考になる部分があれば、大変嬉しいです。

高エネルギー突発天体といっても、さまざまな種類があります。本稿では、私がこれまで研究してきたガンマ線バースト (Gamma-Ray Bursts; GRBs) と高速電波バースト (Fast Radio Bursts; FRBs) についてご紹介します。一言で申し上げると、GRBは「宇宙で最も明るい天体」、FRBは「宇宙で最も

高温な天体」と言えます。本稿の構成はおおむね時系列に沿っており、私の京都大学での大学院生時代、大阪大学（阪大）でのポスドク時代、そしてThe Pennsylvania State University (Penn State)でのポスドク時代を中心に、それぞれの時期に取り組んだ研究と、これらの突発天体が天文学全体の大きな流れの中でどのような位置付けにあるのかについてもお伝えできればと思います。

1. 林先生の薫陶: General education

まずは、林忠四郎先生との思い出を一つご紹介したいと思います。林先生は、当時毎週土曜日に天体核研究室のお茶部屋に顔を出され、議論や雑談を楽しまれていました。常にタバコを手にしておられたのが印象的で、当時75歳くらいだったと思います。私はその頃、修士1年生 (M1) でした。お茶部屋は院生でも気軽に出入りできる場で、私もとくに気にしませんでした。

ある日、普段はほとんど話しかけられることのなかった林先生から、突然声をかけられました。

「君、今何をしている？」

不意を突かれた私は、思っていたことをそのまま口にしました。

「今、M1 っす。早く研究したいっす」
この返答が、どうやら林先生の逆鱗に触れてしまったようで、そこから約1時間にわたるご指導(説教)が始まりました。

林先生は「General education (一般教養・基礎学力の涵養)」を非常に重視されており、修士1年生の間は、研究よりも幅広い基礎的な勉強—素粒子や原子核なども含めて—を通じて学問の土台を固めるべきだと考えておられました。修士1年生のうちから研究を始めたいという私の考えは、その思想に反するものだったのです。

つまり、林先生から私が最初に授かった教訓は、

General education は大事！

ということです。その後、私は改心し、基礎勉強に真剣に取り組むようになりました。その経験は、現在の自分の研究の土台となっています。たとえば、近年盛んになっているマルチメッセンジャー天文学では、電磁波だけでなく、重力波、ニュートリノ、宇宙線といった多様なメッセンジャーを扱い、それぞれに関わる一般相対論や場の理論の知識が必要とされます。まさに、林先生の言われた「General education」が重要になる場面が増えてきたように思います。

2. 最初の研究・最初の論文・禁数値計算

私は、林先生が創始された天体核研究室に入りました。当時は2代目の佐藤文隆さん^{*1}が研究室を率いておられました。研究室の雰囲気は非常に自由で、皆が思い思いに研究をしており、形式的な指導教官は佐藤さんでしたが、誰と研究しても構わないという方針でした。しかし、コロキウムでは、

10勉強して1話せ！

と言われ、厳しく質問されました。また、当時は

ベビーブーム世代ということもあり、同世代の院生が多く、しばしばお互いバチバチと衝突していました。「とんでもないところに入ってしまったな」というのが、率直な第一印象でした。

そんな中、助手だった西亮一さんに Paczyński [1] を紹介していただきました。これは私が初めてじっくり読んだ論文で、今振り返ると、非常によい論文を最初に紹介してもらったと思います。この論文の著者である Paczyński は、今でも私の憧れの研究者の1人です。1500件を超える引用を誇るこの論文では、宇宙のダークマターが Massive Compact Halo Object (MACHO) だと仮定した場合、背景の星が重力レンズ効果によって一時的に明るくなるのが観測的に検証できるという内容が議論されていました。当時、実際に MACHO によると考えられる重力レンズ現象の観測が報告され、話題になっていたところでした。

さらに、MACHO が連星を成していると考えられるような観測例も現れたことから、連星運動を考慮した観測データのモデルフィッティングを行うというテーマに取り組むことになりました(図1参照)。これは、多次元のポテンシャルの極

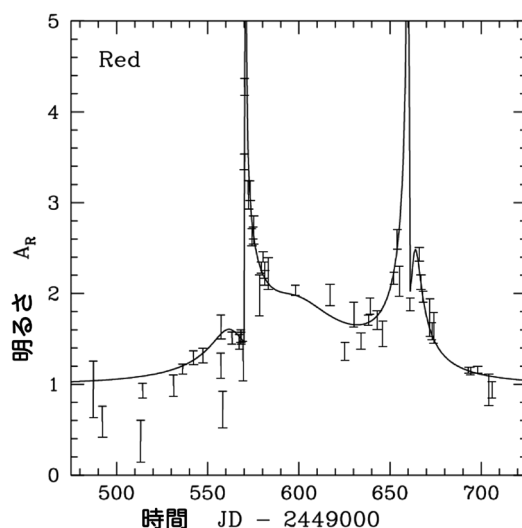


図1 連星による重力レンズ現象 [2]

^{*1} 天体核では林先生を除き「さん」づけが基本。同じ研究者という考えからであり、「先生」と呼ぶと逆に蔑称になる。

小値を数値的に求めるという問題に帰着します。私はコードを書いて数値的に計算を進めようとしたのですが、なぜか最小値付近でポテンシャルが凸凹になるという奇妙な問題が発生し、完全に行き詰まってしまいました。

「バグ取りをしに天体核に来たんじゃない、量子重力を解明しに来たんだ！」

と私はついに切れてしまい、『Quantum Fields in Curved Space』を読み始めるという、よくわからない方向に進み始めます。今思えば、このまま突き進んでいたら、私は研究者になれていなかったと思います。

そんな迷走気味の私を救ってくれたのは、先輩方でした。天体核は、良くも悪くも人間関係が非常に濃い環境で、特に1年先輩の大向一行さんと瀬戸直樹さんは、よく私に絡んできました。私がやばそうだと察した彼らは、

「やばいで、やばいで」

と騒ぎ出し、やばさが皆にバレることになります。

「千葉さん、入道^{*2}がやばいです！」

そう言って、基礎物理学研究所（基研）でポストドクをしていた千葉剛さんのもとに報告に行きました。すると千葉さんは私に、

「原始ブラックホール連星からの重力波の研究をするか？」

と声をかけてくれました。原始ブラックホールはMACHOの候補の一つでした。「なんか凄そうだな」と思った私は、「ぜひお願いします」と即答しました。

千葉さんは「じゃあ中村さんに紹介する」と言って、私を基研の教授だった中村卓史さんのところへ連れて行ってくれました（図2参照）。これが、私にとって実質的な指導教官との出会いでした。当時の私は中村さんのことをあまり知らず、授業で見かけて「髪が多い人だな」くらいの印象しかありませんでした。しかし、研究の相談に部屋を訪ねると、ギロツとにらまれ、「君は誰



図2 中村卓史さん（日本学士院賞受賞パーティにて）

や？」と言わんばかりの視線を向けられたのを覚えています。

その後は、中村さんや千葉さんの指導のもと、なんとか最初の論文を仕上げることができました [3]。最後の方に、千葉さんから

「遅い！早くしろ！」

と怒鳴られて徹夜したのも、今では懐かしい思い出です。

実は、現在天体核研究室を率いている4代目の田中貴浩さんもその論文の著者に加わっています（中村さんは3代目）。田中さんは、当時から尋常ではないほど複雑な計算を軽々とこなしており、今でも驚かされます。この論文は、その後100件以上の引用を得ることになり、よいテーマを与えてもらえたのだと感謝しています。さらに続編の論文もいくつか出すことができました [4, 5]。

ちなみに、最初に取り組んでいた重力レンズの研究も、周囲の助けを得て、最終的には投稿にこぎつけることができました [2]。

数値計算で痛い目を見た私は、自分には数値計算は向いていないと感じてしまい、以後、数値計

^{*2} 髪の毛を丸坊主にしたときに「入道」というあだ名がついてしまった。

算を封印する縛りを課すことになります（もちろん、簡単な数値計算は今でも必要ですが）。「もうアイデア勝負しかない！」と、背水の陣で臨む覚悟を決めました。幸いなことに、近い先輩に、紙と鉛筆の研究スタイルを貫く戸谷友則さんという先駆者がいたため、私はそれほど心配せずにいられたように思います。

数年後、大向さんから、

「林先生は数値計算から法則を見つけて理論モデル化するんや〜」

という話を聞かされ、私は、林先生のようなスタイルでは自分は研究できないということに愕然としました。「もっと早く言ってほしかった」と、そのときは本気で思いました。

こうして、研究1年目で私は多くのことを学ぶことになりました。

天才でもない限り1人では研究できない。

とにかく人と話せ！

自分に合ったスタイルを発見せよ！

よい問題を見つける！

多くの人に助けられながら、なんとか第一歩を踏み出すことができました。

3. Off-axisガンマ線バーストと重力波イベントGW170817

2000年当時、宇宙物理の世界では以下の3つの発見がマイルストーンとなっていました：

- 1) 1997年：GRB残光の発見（GRBの後に残る光の発見。これによりGRBまでの距離が初めて測定可能となり、GRBが遠方にある宇宙一明るい天体であることがわかった）
- 2) 1998年：Ia型超新星による宇宙項（ダークエネルギー）の発見（ノーベル賞受賞）
- 3) 1998年：マグネター（超強磁場中性子星）の発見

当時、私は博士課程2年目でした。MACHOがダークマター全体を占めるには不十分であること

がわかり始め、この分野への関心が急速に冷めていくのを感じていました。「このままでは死ぬ！」と強い危機感を抱き、新たなテーマを探し始めました。マグネターで何か書けないかと考え、磁場星の平衡形状に関する研究に取り組み、初めて単著の論文を執筆しました [6]。

しかし、中村さんには

「マグネターはマニアックやな」

と言われてしまいます。当中村さんはGRB sub-jet modelに着手し始めていて、正直、私にはGRBとマグネターのどちらがマニアックなのかわかりませんでした。とりあえず中村さんを信じてGRBを勉強し始めました。当時、GRBを含む高エネルギー宇宙物理の分野の理論家は日本にほとんどいませんでした。一方で宇宙論の研究者は周りに多く、競争率も高い状況でした。GRBが本当に「天体」なのかどうかも未確定な時代でしたが、高エネルギー宇宙物理が今後発展することは明らかでした。私は「よし、今後は高エネルギー宇宙物理だ！」と心を決めました。

そのような時期に、Norris, et al. [7] という論文が登場します。GRBの最大光度とラグ（X線とガンマ線の間の時間差）の間に相関があるという主張（光度-ラグ関係）で、一見マニアックな内容に見えますが、今では500件以上の引用があります。この関係は、GRBが「標準光源」になれる可能性を示唆していました。ラグから最大光度が推定できれば、見かけの明るさから距離を測定でき、赤方偏移との関係から宇宙膨張も議論できるようになる一つ。Ia型超新星で宇宙項が発見された方法と同様のことがGRBでも可能になる、かもしれないのです。

西宮湯川シンポジウムに参加していた時に、中村さんがかなりハイテンション気味にやってきて「井岡君！ Viewing angleで光度-ラグ関係が出ないか？」

と聞いてきました。どうやら会議中にPeter Mészáros（GRB理論の先駆者かつ大御所）と話

をして、GRBの見込み角（viewing angle）の違いでこの関係が出るのではという話になったらしいのです。しかし、その場ではなぜか「無理だろう」という結論になり、しばらく忘れ去られました。ちなみにPeterとは縁があり、後に私は彼のポスドクとしてアメリカに渡ることになります。

当時、GRBへ分野転換を試みる中で失業状態だった私は、時間だけはありました。GRBのジェットを横から見たときの光度を、極めて簡単な相対論的モデルで書き下してみました。ジェットがある半径で一瞬だけ光するというシンプルなモデルで、たった1つの式に導出できます。遊び半分で200行ほどのコードを書いてプロットしてみると、なんとラグが現れるではありませんか。なぜ現れるのか最初はわかりませんでした。まさに偶然の発見でした。光度-ラグ関係の理論式を観測と比較してみると、バッチリ合います（図3参照）。中村さんに見せたら、すぐに論文にしようということになりました [8]。この論文はoff-axis GRBを議論した初期の論文の1つになりました。

今では、この経験が、「林スタイル」なのかもしれないと、私は勝手に都合よく解釈しています。（超簡単だけど）数値計算から法則を見出し、モデル化できたのです。

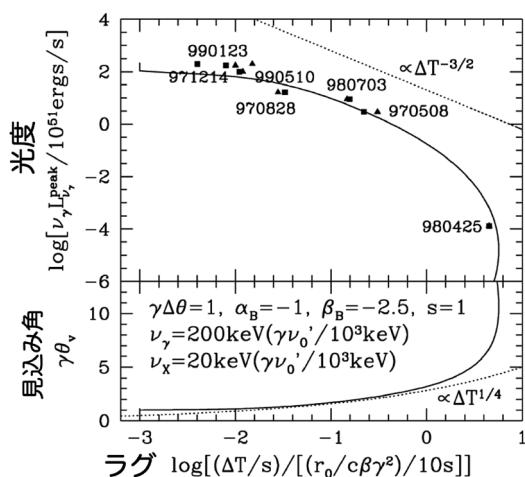


図3 GRBの光度-ラグ関係 [8]

ただ、1つ気になっていたことがありました。使用したのは特殊相対論のみで、学部生でもできる内容です。私は中村さんに尋ねました。

私「こんなに簡単でいいんですか？」

中村さん「簡単な方がいいじゃない？」

私「?!」

かなり衝撃を受けました。それまで私は「難しい＝価値がある」と思い込んでいたからです。しかし、簡単でかつ重要であることこそ、最も価値のある研究だと気づかされました。

研究は簡単な方がいい！

中村さんはほかにも有益な教訓を何度も皆に繰り返していました：

3行で説明せよ！

論理は簡潔に、明快に。それができないときは、しばしば間違っている。

解ける問題にせよ！

中村さんが大学の数学の講義で感銘を受けた話。問題が解けないときは「1. 実力不足 2. 問題設定が悪い」のどちらか。ならば、まずは「解ける問題」にすればよい。

文献が少ない分野を研究せよ！

林先生の教え。微惑星が衝突した時に合体するか壊れるかという問題に対して「文献が少ないからできない」と言った中村さんに、林先生は「むしろ文献が少ないからいいんだ」と答えた。

とりあえず海に飛び込め！泳ぐしかない

分野を変える中村さんの姿勢。瀬戸さんが中村さんにどうやったらそんなに分野を変えられるのかと聞いたときの答え。また、MACHOの研究を始めた頃、中村さんは私に論文を100本ぐらいどさっと渡してきて、新しい分野に行くときは最低これぐらいは読まないといけないと言われた。

Off-axis GRBの研究は、その後いくつかの方向に発展しました。1つは、off-axis GRBがX線で輝く暗いバースト—いわゆる X-ray flash と呼ばれる新種族として観測される可能性です。この方向性は、山崎了さんが中心となって研究が進められました [9–12]。もう1つは、光度関係を用いた宇宙論の展開です。こちらは米徳大輔さんが中心となり、有名な「米徳関係」の発見につながりました (500件超の引用) [13]。

そして、off-axis GRBの研究は2017年に再び脚光を浴びます。重力波イベントGW170817の約2秒後にGRBが観測され、このイベントがマルチメッセンジャー天文学の幕開けとなりました。GRBの継続時間は短く、いわゆる short GRB であり、その起源は40年来の謎でしたが、この観測により連星中性子星の合体が起源であることが実証されました。

ただし、このときのGRBは非常に暗く、全エネルギーが桁違いに小さかったのです。なぜか？ 1つの可能性は、通常のGRBとは異なる現象—ジェットが周囲の物質を突き抜けることに失敗した「失敗ジェット」。もう1つは、off-axis GRBであった可能性です(図4参照)。相対論的ジェットの放射は、ビーミング効果によって前方に集中するため、横から観測すると暗く見えます。

私は中村さんとともに, off-axis GRBの可能性

を徹底的に調べました [14]。中村さん曰く、「2001年の論文 [8] があるから書く資格がある!」。GW170817に関する論文はすべて箝口令下にあり、2017年10月16日に一斉に投稿されました。大量の論文がarXivに登場しましたが、多くの研究では、ジェットを点源として扱っていたため、見込み角の効果を過大評価していました。ジェットの開き角を正しく考慮した計算を行っていたのは、我々のほかにほんの数本だけでした。

現在では、このGRBは「失敗ジェット」ではなく「off-axisジェット」であったという見方でほぼ決着しています。今の焦点は、ジェットの角度構造です [15-17]。エネルギーが外側ほど小さいという構造を持つことが示唆されており、これは中性子星の合体の後できるブラックホールがどうやってジェットを形成するのか、そしてそれが周囲の物質をどう突き抜けてくるのか [18-21] という問題と密接に関わっています。

4. 宇宙再電離と高速電波バースト

2001年、私は日本学術振興会特別研究員(PD；学振PD)として阪大の宇宙進化グループに所属することになりました。当時、学振PDに応募するには受入教官のサインが必要で、「高エネルギー宇宙物理でやっていくぞ!」と決めていた私は、迷うことなく高原文郎さんを訪ねました。高原さんは、当時この分野を代表する存在で、今では素晴らしい教科書を執筆されていることでも有名です。

高原さんを訪ね、サインをお願いしたところ、
開口一番、

「君、論文は何本や？」

と聞かれました。私が

「5本です！」

と答えると、

「ちょうどやな」

とのこと。「……はい」と返したものの、先行きが不安になったのを覚えています。

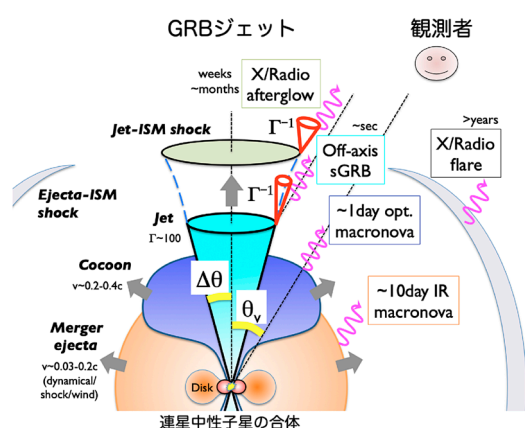


図4 GW170817での off-axis GRB [14]

無事、学振PDには採用され、血気盛んな私は高原さんに次々とアイデアをぶつけに行きました。

「こんなアイデアはどうでしょう？」

「うーん」

「じゃあ、こんなの？」

何度かやり取りをしたある日、高原さんから衝撃の一言が飛び出します。

君は解けない問題を解きなさい！

「???」と頭にハテナが浮かぶ私は、禅問答のようなこの言葉にかなり悩まされました。この言葉の意味には、いまだに明確な答えを見出せていません。

そんな折、Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) 衛星が宇宙マイクロ波背景放射の観測精度を飛躍的に向上させ、「宇宙の再電離」の兆候が見え始めました。ビッグバン直後の宇宙は非常に高温で、陽子と電子がばらばらの電離状態でした。やがて宇宙が膨張して温度が下がると、自由電子は陽子に捕まり、一度中性化します（このとき、光は電子に散乱されにくくなり、宇宙は「晴れ上がる」）。再電離とは、その中性化したガス（主に水素）が、天体からの紫外線によって再び電離される現象です。これを調べることで、宇宙の初代星・初代銀河の形成過程を知る手がかりになります。

この結果に刺激を受けた私は、

「GRBを使って宇宙の再電離を調べられないか？」

と考えました。思いついたアイデアは、電波による分散量度 (Dispersion Measure; DM) を測定するというものでした [22]。プラズマは中性か電離状態かで性質が異なり、その中を通る電波にも影響が出ます。特に、電離プラズマ中では電波の伝播速度が周波数に依存して遅くなり、低周波ほど到達が遅れます。この遅れを測れば、DMを測定できます。DMは、光源から観測者までの自由電子の柱密度に対応します。これをさまざまな

赤方偏移 z で測定できれば、宇宙の電離状態を時間軸に沿って追跡できるのです (図5参照)。重要なのは、電波の遅れを観測するには突発的な光源が必要であるという点です。

私は、宇宙のDMをハッブル定数 H_0 などの宇宙論パラメータの関数として以下のように1式で書き下しました [22] (図5参照)：

$$DM = \frac{3cH_0\Omega_b}{8\pi Gm_p} \int_0^z \frac{(1+z)dz}{[\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda]^{1/2}} \quad (1)$$

それまで、銀河系内のDMはパルサーで測定されていましたが、宇宙全体のDMについての議論はほぼ皆無でした。

この宇宙DMのアイデアを、初めて高原さんが主催するゼミで紹介しました。高原さんはセミナー中、感嘆したときに顔を手のひらでペシッと叩く、いわゆる「一本取られたポーズ」をされる癖がありました。そのポーズが出ると、学生やポスドクの間では「出た！」と密かにざわめくのが恒例でした。宇宙DMの話をしたときに、そのポーズが出たのを見て、「やった！」と思ったのを今でも覚えています。高原さんは厳しくも温かく見守ってくださいました。まだ若くしてご逝去されたのは大変残念です。

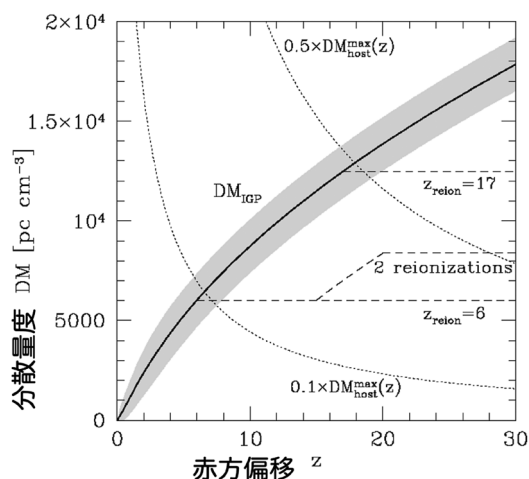


図5 宇宙の分散量度DM-赤方偏移 z 関係 [22]

このアイデアは、GRBではまだ実現していませんが、2007年のFRBの発見によって日の目を見ることになります。現在ではFRBが宇宙論的な距離にあることがわかっていますが、初期には式(1)を使ってDMから距離を推定していました。母銀河が同定されて赤方偏移 z が決まると、DM- z 関係(図5)が直接測定できるようになり、観測結果は式(1)とよく一致しています。宇宙の物質(バリオン)の約半分が観測されておらず、「ミッシング・バリオン」と呼ばれていますが、この宇宙DMの観測により存在が確認されました。観測例が増えることで、バリオンの分布や宇宙論パラメータへの制限が期待されます。特に、超大質量ブラックホールや星形成のフィードバックによって銀河からバリオンが放出される様子を観測できることから、宇宙DMは今後ますます重要な観測手法になるでしょう [23, 24]。一方、FRB自体の起源や放射メカニズムも宇宙物理学最大の謎の1つになっています [25, 26]。

なお、宇宙DMのアイデアは、ほぼ同時期に井上進さんも思いつかれていました。私が外部のセミナーでこの話をしたところ、杉山直さんが「井上君も似たようなことを考えているよ」と教えてくれました。すぐに、井上さんの方から「同じ日に論文を出さないか」と提案され、そうすることになりました。私はその日まで書き上げたのですが、井上さんがまだということで、しばらく待つことにしました。ところが、飲み会で佐々木節さんにこの話をすると、烈火のごとく叱られました。「何をやっているんだ。すぐに投稿しろ」と。私や井上さん以外の人がその間に投稿してしまう可能性がある、というのが理由でした。納得した私は、井上さんに断りを入れて先に投稿することにしました。少し後ろめたさもありましたが、後日井上さんも論文を投稿され [27]、今では両論文とも認知されているようで安心しています。

阪大では佐々木節さんからも大きな影響を受けました。特に、飲み会で語られる研究者としての

心構えが印象に残っています。

二足のワラジを履け！

挑戦的な研究と堅実な研究を並行して行え、ということ。高原さんに「解けない問題を解け」と言われていた私には、大きな支えとなりました。

アホはアホなりに研究するしかない！

これは佐々木さんが池内了さんに言われたという言葉。自分のスタイルや問題を見つけるしかない、という意味と同時に、賢い人はロジックを飛ばしがちなので、愚直な方が研究においてはよい場合もある、という含意もあります。

子供の健全な成長にはおとぎ話は必要！

これは佐々木さんが佐藤文隆さんから言われた言葉だそうです。空想的な研究や夢想も、ときには必要なのです。私にとっては、最初の論文の原始ブラックホールでした。

5. ブラックホールの長時間活動

2004年に、Peter MészárosのポスドクとしてPenn Stateに行くことになりました。海外学振に応募するために受入許可のメールを書いたところ、「じゃあポスドクとして来ないか？」とあっさり採用していただきました。少し驚きましたが、大変うれしかったことを覚えています。もしかすると、阪大で同僚だった小林史歩さんがPenn Stateに先に行っておられたので、何か言ってくださったのかもしれませんが。

Peterはとてもまともで紳士的な方でした。それまで周囲にはアクの強い、個性的な研究者ばかりだったので、「普通でもすごい研究者になれるんだ」と驚いたのを覚えています。基本的にポスドクでも自由にさせてくれて、こちらが何を言ってもそのまま受け入れてくれる感じでした。にもかかわらず、気づいたらPeterっぽい論文になっていたりする [28-30]、とても不思議な感覚でした。

「普通」とは言ったものの、Peterのレスポンスは異常に早かったのも印象的です。

Penn Stateでは、Swift衛星の打ち上げで盛り上がっていました。その環境を活かすべきだと考え、「Swift衛星が確実に観測できるものは何か？」と考えました。その結論が、「天体の明るさの時間変化（光度関数）は確実に観測できる」でした。つまり、明るさの変動から何が言えるかを探ったわけです。

色々考えた末に、GRB残光の変動には「禁止領域」が存在することに気づきました [31]。もしこの領域を破る変動が観測されれば、それは残光ではなく中心エンジンの活動によるものであるとわかる。正直、あまり期待していなかったのですが、Swift衛星が実際にその「禁止領域」を破るX線フレアを観測しました。フレアの開始時間がGRBの継続時間よりもはるかに後であったため、GRBの中心エンジン（おそらくブラックホール）は、想定以上に長時間活動していることが明らかになりました。これは、とても興奮する発見でした。

近年では、short GRBにおいても長時間活動が示唆される事例が報告されています。また、中国のEinstein Probe衛星が、GRBに似ているが極めて長時間継続するX線突発天体を観測し、ブラックホールの長時間活動はますます重要なテーマとなっています。「なぜ長時間活動が可能なのか？」という点については、まだ多くの謎が残されています [32]。

Penn Stateには1年しか滞在できませんでしたが、そのときのポストドク仲間とは今でも交流があります（図6参照）。そこで得た教訓は：

活発な人が集まるところに行け！

です。素晴らしい人とのつながりは一生の財産になります。なお、この1年の間に長男がアメリカで生まれました。妻には大変な思いをさせてしまいましたが、異常に濃密な1年だったと思います。

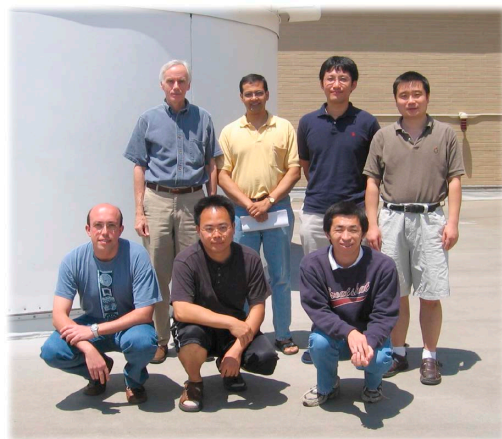


図6 Penn StateでのPeter Mészárosグループ。奥が Peter Mészáros, Soebur Razzaque, 井岡, Bing Zhang, 手前が Jaime Alvarez-Muñoz, 小林史歩さん, Lijun Gou.

6. 突発天体と天文学の流れ

私はGRBから研究を始めたので、突発天体はごく普通に当たり前の存在でした。当時は気づいていなかったのですが、天文学全体では、定常的に光っている天体の研究から、突発天体の研究へとシフトする流れが生じていました。この流れは、おそらく不可避のものであり、その理由の一つは、望遠鏡の巨大化にあると私は考えています（もちろん後付けの見解ではありますが）。

素粒子の加速器を思い浮かべるとわかりやすいでしょう。加速器は年々大型化し、初期には最高到達エネルギーは指数関数的に向上していましたが、ついには飽和に達しました（いわゆるLivingston plot）。エネルギーをこれ以上上げることが、極めて困難になってきたのです。理由は主に二つあると思います。第1に、建設・運用にかかる費用が膨大であるという「経済的リミット」。第2に、建設にかかる時間が人間の寿命に匹敵するという「寿命リミット」です。

同様の状況が、天文学の望遠鏡にも見られます。望遠鏡の感度は基本的にその口径（サイズ）

によって決まります。これまで口径は年々大型化してきましたが、現在ではその成長にも限界が見えてきました。やはり経済的・寿命的制約が壁となって立ちはだかっています。このような中で、感度を単純に上げることが難しくなったとき、次に注目されるのは、時間分解能です。観測の「時間軸」に注目することで、新しい探索空間が広がるようになったのです。これが、突発天体研究が盛んになってきた背景の一つと私は見えています。もちろん理由はこれだけではないと思います。突発天体はブラックホールなどのコンパクト天体に関係することが多く、理論的にも非常に魅力的です。また、突発天体はマルチメッセンジャー天文学とも極めて相性がよく、その結びつきも強いです。

このようにして、突発天体の研究は今まさに状況を呈しており、今後もしばらくは続くでしょう。ただ、今、個人的に気になっていることがあります。

突発天体の次の流れは何か？

気づいていないだけで、すでに流れは始まっているはずです。誰か、教えてください。

7. エピローグ：林トラックと Little Red Dot

林忠四郎賞にまつわる話は、これで一区切りです。ただ、最近、林先生の偉大さを改めて思い知らされる出来事がありました。どうしてもこの話をしておきたいと思います。

それは、Little Red Dot (LRD) と呼ばれる、異常にコンパクトな銀河についてです。そのサイズはわずか100 pc程度で、通常の銀河の $\sim 1/100$ という極端な小ささです。ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (James Webb Space Telescope; JWST) によって発見され、その正体が何であるのか、大きな注目を集めています。

我々の最近の研究では、このLRDにおいては、中心の超大質量ブラックホールの周囲に非常に厚

いガス層が存在し、まるで星の外層のようにブラックホールを包み込んでいる、というモデルを提案しました [33]。それは、一見すると超巨大な星のように見えますが、その輝きの源は、中心にあるブラックホールの重力エネルギーに由来しているという、驚くべき天体です。

さらに驚くべきことに、このブラックホールの外層の性質を調べたところ、その構造が「林トラック」に乗っていることがわかりました。つまり、通常の巨星の表面温度が約4000度になるように、LRDの「Red」は、林トラックの物理に支配されている可能性があるのです。

林先生、すごい！

ちなみに、このようなブラックホール外層は、年スケールの変動を起こすと予想されており、突発天体として観測される可能性もあります。高エネルギー突発天体の分野は、これからますます面白くなっていきそうです。

謝 辞

本記事では、感謝の気持ちを十分にお伝えできなかった方が多くいらっしゃいます。内容の都合上、Penn State時代までしかご紹介できませんでしたが、その後に異動した天体核、KEK、基研の各研究室の皆さまにも、大変お世話になりました。特に、KEKでは小玉英雄さんに、基研では柴田大さんに多くのご助言をいただきました。また、私は観測・実験の分野の方々とも深く関わっており、数多くの方々にご協力いただきました。さらに、科研費をはじめ、学会、理論懇などの活動を通じて、多くの方に支えていただきました。とてもここですべてのお名前を挙げることはできませんが、この場を借りて心より御礼申し上げます。そして、何より家族に深く感謝しています。

参考文献

- [1] Paczyński, B., 1986, ApJ, 304, 1
- [2] Ioka, K., et al., 1999, Prog. Theor. Phys., 102, 983
- [3] Ioka, K., et al., 1998, Phys. Rev. D, 58, 063003
- [4] Ioka, K., et al., 1999, Phys. Rev. D, 60, 083512
- [5] Ioka, K., et al., 2000, ApJ, 528, 51
- [6] Ioka, K., 2001, MNRAS, 327, 639
- [7] Norris, J. P., et al., 2000, ApJ, 534, 248
- [8] Ioka, K., & Nakamura, T., 2001, ApJ, 554, L163
- [9] Yamazaki, R., et al., 2002, ApJ, 571, L31
- [10] Yamazaki, R., et al., 2003, ApJ, 593, 941
- [11] Yamazaki, R., et al., 2004a, ApJ, 606, L33
- [12] Yamazaki, R., et al., 2004b, ApJ, 607, L103
- [13] Yonetoku, D., et al., 2004, ApJ, 609, 935
- [14] Ioka, K., & Nakamura, T., 2018, Prog. Theor. Exp. Phys., 2018, 043E02
- [15] Ioka, K., & Nakamura, T., 2019, MNRAS, 487, 4884
- [16] Takahashi, K., & Ioka, K., 2020, MNRAS, 497, 1217
- [17] Takahashi, K., & Ioka, K., 2021, MNRAS, 501, 5746
- [18] Mizuta, A., & Ioka, K., 2013, ApJ, 777, 162
- [19] Nagakura, H., et al., 2014, ApJ, 784, L28
- [20] Hamidani, H., et al., 2020, MNRAS, 491, 3192
- [21] Hamidani, H., & Ioka, K., 2021, MNRAS, 500, 627
- [22] Ioka, K., 2003, ApJ, 598, L79
- [23] Takahashi, R., et al., 2021, MNRAS, 502, 2615
- [24] Shirasaki, M., et al., 2022, MNRAS, 512, 1730
- [25] Ioka, K., & Zhang, B., 2020, ApJ, 893, L26
- [26] Ioka, K., 2020, ApJ, 904, L15
- [27] Inoue, S., 2004, MNRAS, 348, 999
- [28] Ioka, K., et al., 2004, ApJ, 613, L17
- [29] Ioka, K., & Mészáros, P., 2005, ApJ, 635, 143
- [30] Ioka, K., et al., 2005a, ApJ, 633, 1013
- [31] Ioka, K., et al., 2005b, ApJ, 631, 429
- [32] Kisaka, S., & Ioka, K., 2015, ApJ, 804, L16
- [33] Kido, D., et al., 2025, arXiv e-prints, arXiv:2505.06965

Theoretical Studies on High-Energy Transients

Kunihito Ioka

Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: Astrophysical transients—sudden appearances in the night sky that quickly fade away—are symbolic of the impermanence of the universe itself. Most of them are high-energy objects, and over the past three decades, they have rapidly grown into a major area of research in astronomy. This development can be seen as a natural progression in the field. In this article, I introduce my theoretical research on gamma-ray bursts (GRBs) and fast radio bursts (FRBs), and also reflect on the many unique and inspiring individuals I have encountered along the way.