

Opis osiągnięcia habilitacyjnego

1 Dane podstawowe

Dr Mariusz Tarnopolski
Instytut Astronomii
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Mikołaja Kopernika
ul. Grudziądzka 5, 87–100 Toruń, Polska

✉ mariusz.tarnopolski@umk.pl

🌐 <https://umk.pl/~mariusz.tarnopolski>

🆔 <https://orcid.org/0000-0003-4666-0154>

📄 <https://www.researchgate.net/profile/Mariusz-Tarnopolski>

2 Zatrudnienie

- 02/2022–teraz — **adiunkt**, Instytut Astronomii, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, Polska (pełen etat na umowie o pracę na czas określony – kierownik grantu)
- 09/2021–12/2021 — **asystent**, Obserwatorium Astronomiczne, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska (umowa zlecenie na czas określony)
- 02/2021–07/2021 — **wykładowca**, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska (umowa o dzieło)
- 02/2021–06/2021 — **asystent**, Obserwatorium Astronomiczne, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska (umowa zlecenie na czas określony)
- 02/2018–02/2021 — **asystent**, Obserwatorium Astronomiczne, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska (pełen etat na umowie o pracę na czas określony – kierownik grantu)

3 Edukacja

- 2012–2017 — **studia doktoranckie, astronomia**, Obserwatorium Astronomiczne, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska. Praca doktorska pt. *Chaotic rotational dynamics of Hyperion* (cum laude), promotor: prof. Zdzisław Goła.
- 2010–2012 — **studia magisterskie, astrofizyka i kosmologia**, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska. Praca magisterska pt. *Chaotyczna dynamika Hyperiona*, promotor: prof. Zdzisław Goła.
- 2007–2010 — **studia licencjackie, fizyka teoretyczna**, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska.

4 Osiągnięcie habilitacyjne: Określenie liczby klas rozbłysków gamma przy pomocy wnioskowania statystycznego

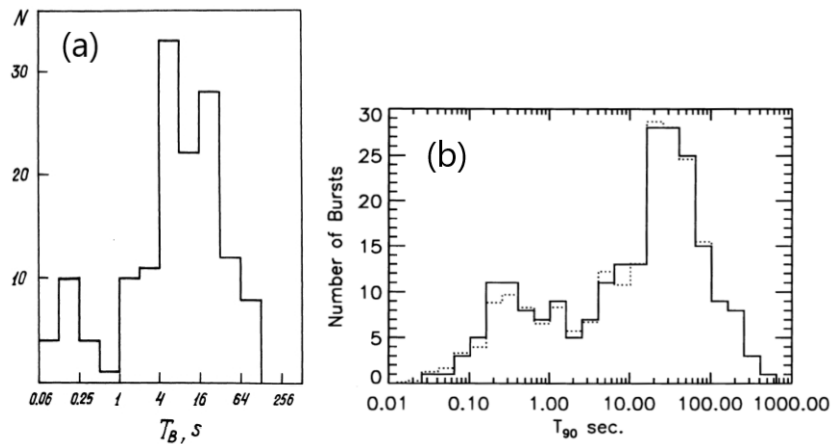
W porządku chronologicznym:

- [Hab1] Tarnopolski, M., *Analysis of the duration–hardness ratio plane of gamma-ray bursts using skewed distributions*, *ApJ*, **870**:105 (2019a)
- [Hab2] Tarnopolski, M., *Multivariate Analysis of BATSE Gamma-Ray Burst Properties Using Skewed Distributions*, *ApJ*, **887**:97 (2019b)
- [Hab3] Tarnopolski, M., *Can the cosmological dilation explain the skewness in the gamma-ray burst duration distribution?*, *ApJ*, **897**:77 (2020)
- [Hab4] Tarnopolski, M., & Marchenko, V., *A Comprehensive Power Spectral Density Analysis of Astronomical Time Series. II. The Swift/BAT Long Gamma-Ray Bursts*, *ApJ*, **911**:20 (2021)
- [Hab5] Tarnopolski, M., *Graph-based clustering of gamma-ray bursts*, *A&A*, **657**, A13 (2022)

4.1 Wprowadzenie

W populacji rozbłysków gamma (gamma-ray bursts; Klebesadel et al. 1973) szybko zauważono bimodalny rozkład ich czasu trwania [Rys. 1(a); Mazets et al. 1981]. Rozbłyski podzielono na krótkie (Eichler et al., 1989; Paczynski, 1991; Narayan et al., 1992)

i długie (Woosley, 1993; Paczyński, 1998; MacFadyen & Woosley, 1999) na podstawie wartości T_{90} (tj. czasu, w trakcie którego 90% całkowitego strumienia danego rozbłysku jest akumulowane, począwszy od chwili akumulacji 5% całkowitego strumienia), przy czym podział jest względem $T_{90} \lesssim 2$ sekundy [Rys. 1(b); Kouveliotou et al. 1993; ale zob. też Fynbo et al. 2006; King et al. 2007; Kann et al. 2011; Bromberg et al. 2013a; Tarnopolski 2015a; Li et al. 2016]. Powszechnie uważa się, że krótkie rozbłyski powstają

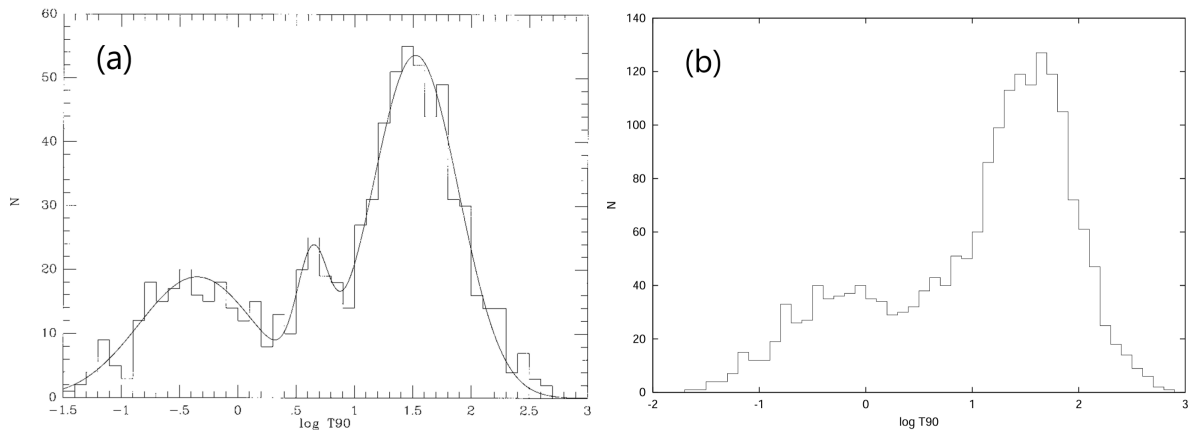


Rysunek 1: (a) Pierwsze wskazanie na bimodalny rozkład czasów trwania rozbłysków. Wykres z (Mazets et al., 1981). (b) 222 rozbłyski z BATSE były podstawą do ustanowienia ich klasyfikacji na krótkie i długie. Wykres z (Kouveliotou et al., 1993).

w procesie zderzenia gwiazd neutronowych w układzie podwójnym lub gwiazdy neutronowej z czarną dziurą (Nakar, 2007). Powiązanie rozbłysku GRB 130603B z kilonową dostarczyło na to silnych dowodów (Tanvir et al., 2013). Wykrycie fal grawitacyjnych wraz z emisją elektromagnetyczną z czasowo i przestrzennie skorelowanym rozbłyskiem, tj. GW/GRB 170817, ostatecznie potwierdziło związek między krótkimi rozbłyskami a zlewaniem się obiektów zwartych (Abbott et al., 2017a,b; Goldstein et al., 2017; Savchenko et al., 2017). Źródłem długich rozbłysków są supernowe Ic (Filippenko, 1997) powstające w wyniku kolapsu grawitacyjnego masywnych gwiazd, takich jak gwiazdy Wolfa-Rayeta lub niebieskich nadolbrzymów (Galama et al., 1998; Hjorth et al., 2003; Stanek et al., 2003; Woosley & Bloom, 2006; Cano et al., 2017; Perna et al., 2018). Nie wykazano póki co żadnego związku między supernowymi a rozbłyskami krótkimi (Zhang et al., 2009; Ruffini et al., 2016). Izotropowy rozkład rozbłysków na niebie od początku sugerował ich pozagalaktyczne pochodzenie. Pierwszy pomiar przesunięcia ku czerwieni rozbłysku, uzyskany dla GRB 970508, dowiódł, że rozbłyski faktycznie znajdują się w kosmologicznych odległościach: $0.835 < z \lesssim 2.3$, co odpowiada minimalnej odległości współporuszającej się 3 Gpc (Metzger et al., 1997). Wraz ze zwiększającą się liczbą zaobserwowanych rozbłysków okazało się, że długie rozbłyski są rzeczywiście rozmieszczone izotropowo na niebie, ale krótkie rozbłyski wykazują statystycznie istotne

odchylenia od izotropii (**Tarnopolski, 2017**). Jest to spowodowane najprawdopodobniej przez systematycznie mniejsze niż dla rozbłysków długich przesunięcia ku czerwieni (**Tarnopolski, 2016a**), tj. rozkład rozbłysków krótkich odzwierciedla nieregularności w rozmieszczeniu galaktyk w wielkoskalowej strukturze lokalnego Wszechświata.

Szybko zauważono (**McBreen et al., 1994; Koshut et al., 1996; Kouveliotou et al., 1996**), że rozkład czasów trwania T_{90} rozbłysków jest w przybliżeniu log-normalny (tj. $\log T_{90}$ tworzą rozkład normalny)¹, a zatem zwyczajowo modelowano go przy użyciu takowych rozkładów analitycznych. **Horváth (1998)** odkrył rzucający się w oczy trzeci pik w rozkładzie czasów trwania, zlokalizowany pomiędzy grupami rozbłysków krótkich i długich [Rys. 2(a)] obserwowanych przez Burst And Transient Source Explorer na pokładzie *Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO/BATSE; Meegan et al., 1992; Paciesas et al., 1999)*, i w związku z tym postawił tezę o istnieniu trzeciej klasy rozbłysków o „pośrednim” czasie trwania. Jednakże, gdy próbka rozbłysków się rozrosła,



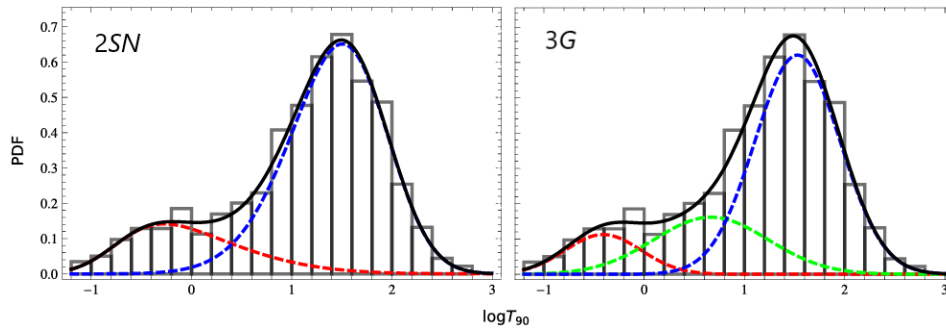
Rysunek 2: (a) 797 rozbłysków z BATSE w istocie wykazało statystycznie istotny trzeci pik w rozkładzie czasów trwania. Wykres z (**Horváth, 1998**). (b) Jednak w przypadku pełnej próbki 1929 rozbłysków z BATSE, ta 'pośrednia' klasa stopiła się ze składową utożsamianą z długimi rozbłyskami. Wykres z (**Horváth, 2002**).

pik ten wtopił się w główną składową związaną z długimi rozbłyskami, ujawniając się jedynie jako małe wybrzuszenie (lub po prostu asymetria) po stronie krótszych długich rozbłysków [Rys. 2(b); **Horváth 2002; Tarnopolski 2015b**]. Taka asymetria przejawia się skośnością rozkładu. Przesłanki za istnieniem trzeciego składnika gaussowskiego w rozkładzie czasów trwania dostrzeżono także w danych teleskopu kosmicznego *Swift* Burst Alert Telescope (BAT) (**Horváth et al., 2008, 2010; Zhang & Choi, 2008; Huja et al.,**

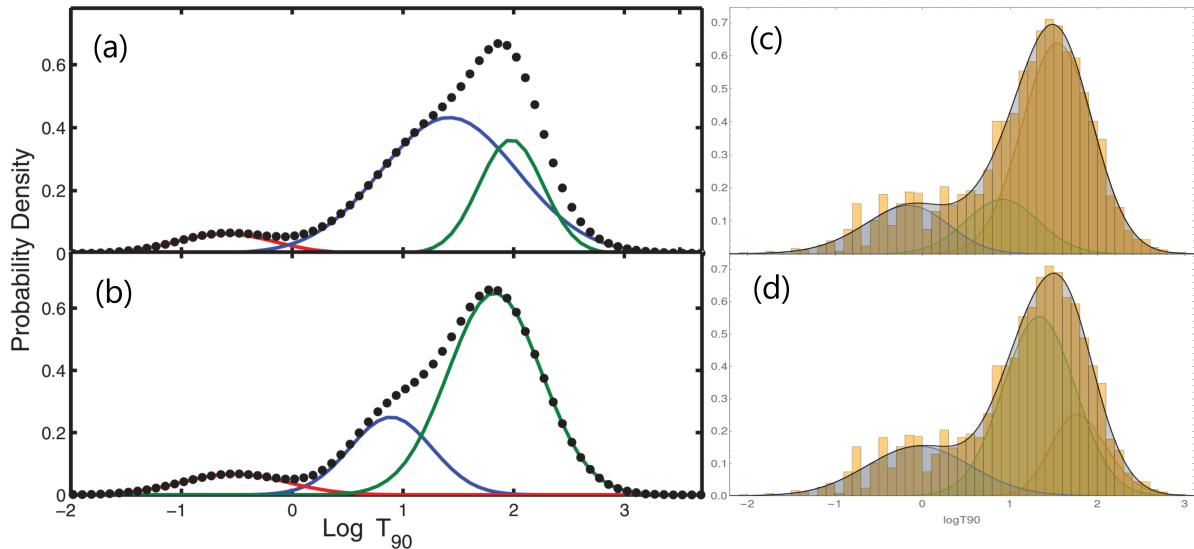
¹W dalszej części tekstu, odnosząc się do „rozkładu czasów trwania”, mam na myśli „rozkład $\log T_{90}$ ”, ponieważ w literaturze zawsze jest on przedstawiany na skali logarytmicznej i to jego kształt jest obiektem badań; natomiast mówiąc o „skośności (bądź asymetrii) rozkładu czasów trwania”, mam na myśli „skośność (lub asymetrię) rozkładu $\log T_{90}$ ”. Taką konwencję stosuję też często w swoich artykułach.

2009a; Zitouni et al., 2015; Zhang et al., 2016). Rozbłyśki obserwowane przez *Swift* stanowią największą jednorodną próbkę (tj. zaobserwowaną przez ten sam instrument) o zmierzonych przesunięciach ku czerwieni, co pozwala na analizy zarówno w układzie obserwatora, jak i w układzie spoczynkowym. Stwierdzono, że w układzie obserwatora statystycznie konieczne są trzy składowe gaussowskie, podczas gdy w układzie spoczynkowym wystarczą dwie (Huja et al., 2009a; Tarnopolski, 2016a; Zhang et al., 2016; Kulkarni & Desai, 2017); jednakowoż Zitouni et al. (2015) donosił o trzech składowych w obu układach. Interesującym jest, że tylko dwie składowe są potrzebne do adekwatnego opisu danych BATSE w układzie obserwatora (Zitouni et al., 2015; Zhang et al., 2016), w przeciwieństwie do wyników uzyskanych przez Horváth (2002). Kulkarni & Desai (2017) również nie znaleźli jednoznacznych dowodów na istnienie trzeciej składowej w przypadku rozbłyśków z BATSE. W przypadku teleskopu kosmicznego *Fermi* Gamma-ray Burst Monitor (GBM; von Kienlin et al. 2014; Gruber et al. 2014; Narayana Bhat et al. 2016; von Kienlin et al. 2020), Bystřický et al. (2012); Narayana Bhat et al. (2016); Zhang et al. (2016); Kulkarni & Desai (2017); von Kienlin et al. (2020) stwierdzili, że dwie składowe wystarczą do opisu rozkładu czasów trwania. Korzystając z pseudoredshiftów wyznaczonych z relacji $L_{\text{peak}} - E_{\text{peak}}$ (Yonetoku et al., 2010; Tsutsui et al., 2013b), Zitouni et al. (2018) doszli do takich samych wniosków. Z drugiej strony, przesłanki za istnieniem trzeciej składowej gaussowskiej stwierdzono dla danych z teleskopu kosmicznego *Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI)* (Řípa et al., 2009). Z kolei dla danych z teleskopu *Beppo Satellite per Astronomia a raggi X (BeppoSAX)* (Frontera et al. 2009), z powodu jego niskiej czułości na krótkie rozbłyśki (spowodowanej jednosekundowym czasem integracji), pojawiły się tylko dwa piki w rozkładzie czasów trwania, ale odpowiadające typom „pośrednim” i długim (Horváth, 2009). W przypadku teleskopu kosmicznego *Suzaku* Wide-band All-sky Monitor (WAM), rozkład z dwoma składowymi gaussowskimi jest preferowany wobec rozkładu z trzema takimi składowymi (Ohmori et al., 2016).

Od pewnego czasu argumentowano (Koen & Bere, 2012; Tarnopolski, 2015b), że składowe rozkładu czasów trwania niekoniecznie muszą być gaussowskie (zob. Rozdz. 4.2); asymetria (skośność) może wynikać np. z asymetrycznego rozkładu masy otoczki masywnej gwiazdy tuż przed kolapsem (Zitouni et al., 2015). Dlatego też dane z BATSE, *Swifta* i *Fermiego* były w ostatnich latach modelowane rozkładami z wbudowaną skośnością (Rys. 3; Tarnopolski 2016b,c; Kwong & Nadarajah 2018; Sharifipanah et al. 2020; Minaev & Pozanenko 2020; Zhang et al. 2022). Rozumowanie to opiera się na tym, że modelowanie inherentnie asymetrycznego rozkładu składowymi symetrycznymi wymaga dodatkowych składowych, co prowadzi do błędnego określenia liczby typów obiektów powiązanych ze składowymi danego rozkładu (Koen & Bere, 2012). Ponadto nadmiarowa liczba składowych może prowadzić do niejednoznacznego przedstawienia rozkładu empirycznego (Rys. 4), co podważa twierdzenia dotyczące ich fizycznej realności. Dlatego też (konceptualnie i technicznie) łatwiej jest wprowadzić dodatkowy parametr przy modelowaniu rozbłyśków krótkich i długich niż sformułować jakiś nowy



Rysunek 3: (Lewy) Rozkład mieszany o tylko dwóch, ale asymetrycznych składowych jest lepszym dopasowaniem do danych z *Fermiego* niż (prawy) rozkład mieszany o trzech składowych gaussowskich. Wykres zaadaptowany z (Tarnopolski 2016b; zob. Rozdz. 4.2).

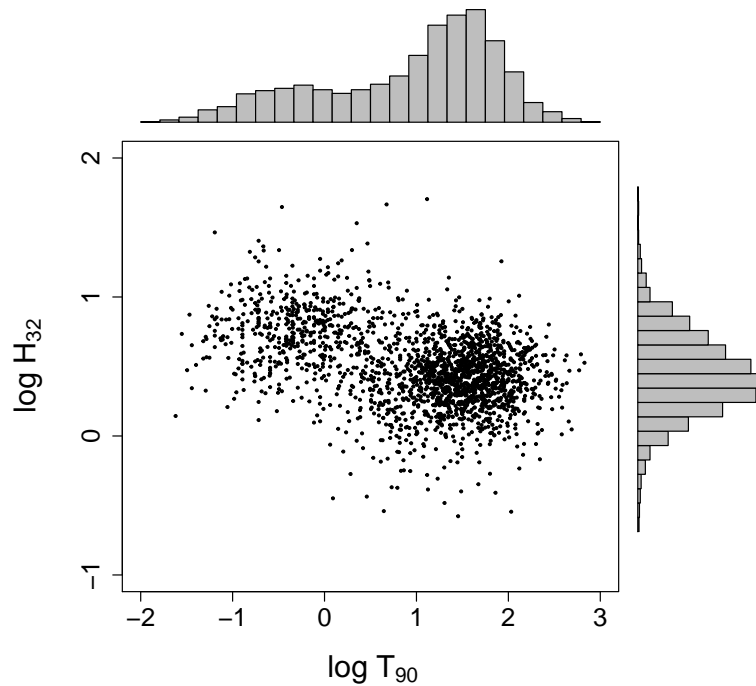


Rysunek 4: (a)–(b) Dwa różne dopasowania (czarne kropki) – oba będące rozkładami mieszanymi trzech składowych gaussowskich (kolorowe linie) - do czasów trwania rozbłysków ze *Swifta*, które są statystycznie równouprawnionymi opisami danych. Interpretowanie liczby składowych jako wyznacznik liczby fizycznie różnych typów rozbłysków jest zatem nieuzasadnione. Wykres z (Koen & Bere, 2012). (c)–(d) Podobna niejednoznaczność ma miejsce w przypadku danych z *Fermiego*. (Autor wykresu: M. Rałowski.)

mechanizm fizyczny odpowiadający za genezę owej (nieprecyzyjnie zdefiniowanej) klasy rozbłysków „pośrednich”. W istocie stwierdzono, że rozkłady mieszane o dwóch skośnych składowych albo znacznie lepiej, albo przynajmniej tak samo dobrze opisują dane obserwacyjne jak modele z trzema symetrycznymi składowymi. Oznacza to, że postulowanie trzeciej klasy rozbłysków jest nieuzasadnione (Tarnopolski 2016b; por. Rozdz. 4.2). Co więcej, dokładna analiza własności grupy tzw. „pośrednich” rozbłysków wykazała,

że różnią się one od rozbłysków długich jedynie niższymi jasnościami (de Ugarte Postigo et al., 2011), co sugeruje, że mogą one po prostu stanowić niskojasnościowy ogon rozkładu długich rozbłysków.

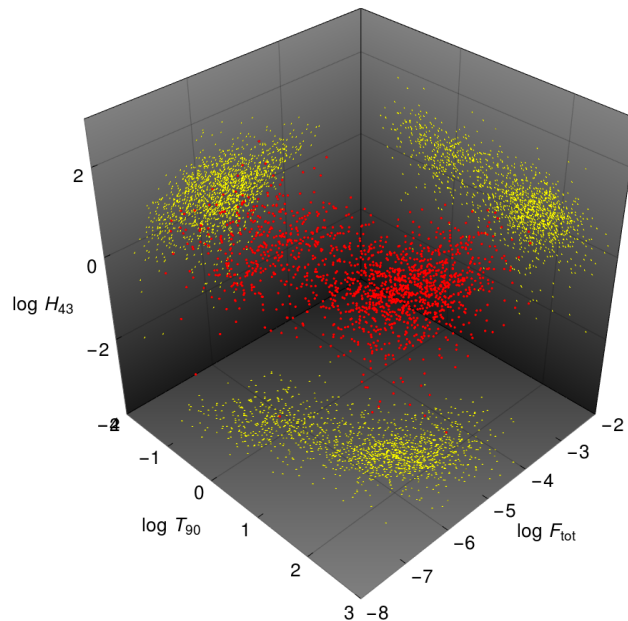
Analiza jednoczynnikowa nie jest jednak w stanie ujawnić wszystkich szczegółów dotyczących podziału rozbłysków na statystycznie istotne klasy. Naturalnym krokiem jest zbadanie dwuwymiarowej przestrzeni rozpiętej na czasach trwania oraz twardości (stosunków strumienia całkowitego w dwóch zakresach energetycznych; [Hab1] i Tarnopolski 2019c). Mukherjee et al. (1998); Horváth et al. (2006); Bhavsar et al. (2022) (używając danych z BATSE; Rys. 5), Rípa et al. (2009) (dane z *RHESSI*), Horváth et al. (2010); Veres et al. (2010); Deng et al. (2022) (dane ze *Swifta*) przeprowadzili analizy wspólnego rozkładu czasów trwania i twardości podobnie jak w przypadku analizy jednoczynnikowej, tj. przyjęli dwuwymiarowy gaussowski rozkład mieszany i badali jaka jest optymalna liczba składowych, tj. taka, która sprawia, że dany model najlepiej opisuje dane. We wszystkich przypadkach stwierdzono, że rozkład mieszany o trzech składowych jest bardziej adekwatny niż rozkład z tylko dwoma składowymi. Rípa et al. (2012) jednakże doszli do wniosku, że w przypadku danych z *RHESSI* wystarczą tylko



Rysunek 5: Rozbłyski z BATSE w płaszyźnie rozpiętej na czasach trwania i twardościach. Rozkłady brzegowe pokazane są w formie histogramów. Wyraźnie widoczne są dwa zgrupowania punktów (krótkie/twarde i długi/miękkie), ale nie widać przesłanek za istnieniem żadnych dodatkowych grup.

dwie składowe, podczas gdy [Salmon et al. \(2022a\)](#), na podstawie kryteriów związanych z entropią, potwierdzili obecność tylko rozbłysków krótkich i długich, zaś trzecią, „pośrednią” grupę, uznali za wynik nadmiernego dopasowania (overfitting). [Horváth et al. \(2012\)](#) przeprowadzili analizę głównych składowych (principal component analysis, PCA; zob. [\[Hab2\]](#)), na bazie której dopasowali dwuwymiarowy gaussowski rozkład mieszany; stwierdzili, że rozkład z trzema składowymi jest optymalnym dopasowaniem. Z drugiej strony, [Yang et al. \(2016\)](#) przeanalizowali rozbłyski ze *Swifta* z wyznaczonymi przesunięciami ku czerwieni i pokazali, że dwie składowe gaussowskie wystarczą zarówno w układzie obserwatora, jak i w układzie spoczynkowym. Dla danych z *Fermiego* uzyskiwano za to sprzeczne wyniki: [Narayana Bhat et al. \(2016\)](#); [von Kienlin et al. \(2020\)](#); [Bhave et al. \(2022\)](#); [Salmon et al. \(2022a\)](#) skłonili, że wystarczą dwie składowe, zaś [Horváth et al. \(2018\)](#) stwierdzili, że konieczne są trzy.

Analizę skupień przeprowadzano również w wielowymiarowych przestrzeniach parametrów (Rys. 6). [Mukherjee et al. \(1998\)](#) wykonali nieparametryczną i multinormalną



Rysunek 6: Przedstawienie wszystkich rozbłysków BATSE w trójwymiarowej przestrzeni rozpiętej na czasach trwania, twardościach i strumieniach całkowitych (czerwone punkty), wraz z dwuwymiarowymi rozkładami brzegowymi (żółte punkty). Modelowanie tej i innych wielowymiarowych przestrzeni parametrów zostało wykonane w pracy [\[Hab2\]](#).

analizę skupień przy użyciu 797 rozbłysków z BATSE w przestrzeni rozpiętej przez 6 parametrów (czasy trwania T_{90} i T_{50} , zdefiniowane w podobny sposób jak T_{90} , szczytowy strumień P_{256} zmierzony w przedziałach 256 ms, całkowity strumień F_{tot} , oraz twardości H_{32} i H_{321} ; zob. definicje w [\[Hab2\]](#)). Podejście nieparametryczne dało niejednoznaczne

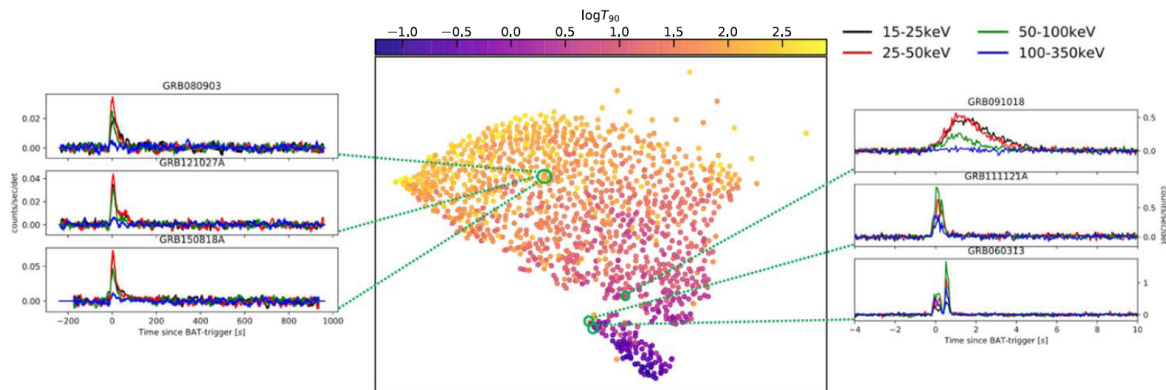
wyniki, wskazując na istnienie dwóch lub trzech grup, podczas gdy modelowanie multinormalne (w trójwymiarowej przestrzeni rozpiętej na T_{90} , F_{tot} i H_{321}) wskazało, że populacja rozbłysków składa się z trzech klas (ale zob. Rozdz. 4.2). Należy podkreślić, że analizowana próbka danych była ta sama co w pracy (Horváth, 1998), w której odkryto niebudzący wątpliwości trzeci pik w rozkładzie czasów trwania, który jednak zniknął gdy zgromadzono więcej danych. Balastegui et al. (2001) postulowali istnienie trzeciej klasy rozbłysków na podstawie klasyfikacji wykonanej przy użyciu sieci neuronowych. Jednak Hakkila et al. (2000, 2003) przypisywali obecność tej klasy efektem instrumentalnym i kwestionowali jej fizyczną realność; wniosek ten został wsparty przez Rajaniemi & Mähönen (2002), którzy zastosowali niezależną metodę analizy (sieć Kohonena; Kohonen 1982). Na wyniki tego rodzaju klasyfikacji nienadzorowanych wpływ ma kilka czynników, między innymi: zastosowana technika obliczeniowa, konkretne próbki danych i używane parametry (Hakkila et al., 2004), a także błędy systematyczne (Roiger et al., 2000). Chattopadhyay et al. (2007) z kolei użyli różnych metod analizy skupień (K -średnich i procesu Dirichleta; ten drugi zasadniczo zakłada rozkład multinormalny). Również podali przesłanki za istnieniem trzech klas rozbłysków. Veres et al. (2010) także stwierdzili, bazując na metodzie K -średnich, że dane wskazują na istnienie trzeciej klasy. To samo podejście nie doprowadziło do rozstrzygnięcia w przypadku danych z *RHESSI* (Řípa et al., 2012); z drugiej strony dopasowanie multinormalne w przestrzeni trójwymiarowej rozpiętej na czasach trwania, twardościach i zliczeniach szczytowych również wskazały na trzy składowe.

Aby ograniczyć liczbę zmiennych do informatywnie małego, a jednocześnie niosącego maksimum informacji podzbioru, Bagoly et al. (1998) przeprowadzili dogłębną analizę PCA na 625 rozbłyskach z BATSE wykorzystując dziewięć zmiennych: czasy trwania T_{90} i T_{50} , strumienie F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , oraz strumienie szczytowe P_{64} , P_{256} , P_{1024} . Autorzy doszli do wniosku, że pierwsze dwie składowe główne (PC) niosą ponad 90% informacji. W związku z tym rozbłyski z BATSE mogą być w satysfakcjonujący sposób opisane zaledwie dwiema zmiennymi, skonstruowanymi z wyjściowych dziewięciu parametrów (największe wagi miały czas trwania, szczytowy strumień i całkowity strumień, z których tylko dwie zmienne są niezależne). Uwzględnienie jeszcze jednej PC (aczkolwiek niekonieczne z punktu widzenia statystyki) zwiększa informację zawartą w trzech PC do niemal 97%. Cztery strumienie można wyrazić za pomocą całkowitego strumienia i twardości; wtedy H_{43} staje się istotnym składnikiem dla PC. Te wyniki pozostają w mocy dla większej próbki 1598 rozbłysków (Balastegui et al. 2001; zob. też [Hab2]). Balázs et al. (2003), bazując na powyższej PCA, opowiedzieli się za astrofizycznie różnym pochodzeniem krótkich i długich rozbłysków rozważając zależność $T_{90} - F_{\text{tot}}$ dla danych z BATSE. Horváth et al. (2012) przeprowadzili PCA na próbce 425 rozbłysków z *Fermiego*, wykonując następnie modelowanie wspólnych rozkładów multinormalnych trzech pierwszych PC; stwierdzili, że potrzebne są trzy składowe dla uzyskania optymalnego dopasowania.

Chattopadhyay & Maitra (2017) przebadali kompletny katalog BATSE w sześciowymiarowej przestrzeni rozpiętej na tych samych parametrach co Mukherjee et al. (1998). Poprzez dopasowanie wielowymiarowego mieszanego rozkładu gaussowskiego stwierdzili obecność pięciu grup rozbłysków. Do tego samego wniosku doszli modelując te same dane za pomocą wielowymiarowego mieszanego rozkładu t Studenta (Chattopadhyay & Maitra 2018; ale zob. [Hab2]). Acuner & Ryde (2018) też użyli mieszanego modelu gaussowskiego do analizy rozbłysków z *Fermiego* w innej przestrzeni – rozpiętej na parametrach spektralnych $\alpha, \beta, E_{\text{peak}}$ (Band et al., 1993), czasie trwania i strumieniu – również dochodząc do wniosku, że istnieją przesłanki za istnieniem pięciu grup. Tóth et al. (2019) przeprowadzili standardowe modelowanie mieszanym rozkładem gaussowskim rozbłysków z katalogu BATSE, jednak wykorzystując sześć innych zmiennych: $T_{90}, T_{50}, F_{\text{tot}}, P_{256}, H_{32}$ i H_{321} . Stwierdzili, że w tej przestrzeni sześciowymiarowej dane najlepiej są opisane pięcioma składowymi multinormalnymi (co jest zgodne z wynikami uzyskanymi przez Chattopadhyay & Maitra 2017). Zauważyli jednak, że wynika to z asymetrycznego rozkładu P_{256} , co prowadzi do podziału dwóch (również asymetrycznych) grup (odpowiadających krótkim i „pośrednim” rozbłyskom) na dwie, skutkując efektywnie czterema grupami utożsamionymi ze składowymi gaussowskimi, oraz pojedynczą grupą odpowiadającą długim rozbłyskom. Dla kompletności należy wspomnieć, że Ruffini et al. (2018) postulują istnienie aż siedmiu klas rozbłysków.

Chen et al. (2024) dokonali redukcji wymiarów za pomocą stochastycznej metody porządkowania sąsiadów w oparciu o rozkład t (t -distributed stochastic embedding, t -SNE), jednolitej aproksymacji rozmieszczenia i projekcji (uniform manifold approximation and projection, UMAP) oraz metody K -średnich na obecnie najbardziej kompletnym zestawie danych pięciowymiarowych z *Fermiego* (tj. kombinacji energii szczytowych widm, strumieni i strumieni całkowitych), uzyskując wyraźne rozróżnienie na tylko dwa rodzaje rozbłysków. Algorytm t -SNE jest elastyczny i może być stosowany również do szeregów czasowych, co wykorzystali Jespersen et al. (2020) stosując go do krzywych zmian blasku rozbłysków ze *Swifta*. Nie znaleźli żadnych wzorców zmienności sugerujących istnienie jakichkolwiek innych typów rozbłysków niż dobrze znane krótkie i długie (Rys. 7). Salmon et al. (2022b) użyli metody transformacji falkowej i PCA w połączeniu z t -SNE do analizy danych z BATSE, *Fermiego* i *Swifta* – również doszli do wniosku, że istnieją jedynie dwa rodzaje rozbłysków. Kilka zupełnie odmiennych podejść nieparametrycznych, opartych na teorii grafów (Wilson, 1998), zostało zastosowanych w [Hab5].

Rodzina rozbłysków, oprócz krótkich i długich, obejmuje również ultra-długie (Gendre et al., 2013; Levan et al., 2014; Zhang & Zhang, 2014; Perna et al., 2018); rozbłyski o niskiej jasności (Bromberg et al., 2011); oraz krótkie rozbłyski z wydłużoną emisją (short GRBs with extended emission, sGRBwEE; Norris & Bonnell 2006), czyli takie, których czasy trwania zaklasyfikowałyby jako długie ($T_{90} > 2$ s), ale bez powiązanej supernowej (choć potwierdzono związki z kilonowymi; Bulla et al. 2023) – najprawdopodobniej mają miejsce gdy biały karzeł zlewa się z gwiazdą neutronową (King et al., 2007) lub czarną dziurą (Dong et al., 2018). Deng et al. (2022) zasugerowali, że sGRBwEE mogą



Rysunek 7: Klasyfikacja nieparametryczna (t -SNE) krzywych zmian blasku uwidocznia dwa typy rozbłysków (utożsamiane z krótkimi i długimi), ale nie wskazuje na żadną subklasyfikację rozbłysków długich. Wykres z (Jespersen et al., 2020). Inna, nowatorska nieparametryczna reprezentacja krzywych zmian blasku *Swifta* w płaszczyźnie $\mathcal{A} - \mathcal{T}$ została przeprowadzona w pracy [Hab4], zaś analiza skupień na bazie teorii grafów – w pracy [Hab5].

być głównym źródłem populacji niekolapsujących obiektów o dłuższym czasie emisji, tj. mogą przyczyniać się do asymetrii składowej rozkładu czasów trwania długich rozbłysków. Brano również pod uwagę kolejne podziały długich rozbłysków na podgrupy (Pendleton et al., 1997), z sGRBwEE jako jedną z nich (Tsutsui et al., 2013a; Tsutsui & Shigeyama, 2014), oraz rozważano możliwe kontaminacje, na poziomie do kilku procent, populacji krótkich rozbłysków w katalogu BATSE przez powtarzalne źródła miękkich promieni gamma (soft gamma repeaters; Lazzati et al. 2005; Ofek 2007; Ofek et al. 2008; Hurley et al. 2010). Nadreprezentacja sGRBwEE w katalogach (Bostanci et al., 2013; Kaneko et al., 2015; Kagawa et al., 2019) stanowi jednak wyzwanie.

Jak przedstawiono w powyższym wyczerpującym przeglądzie literatury przedmiotu, to, co faktycznie stanowi typ rozbłysków gamma, pozostaje przedmiotem debaty, a próby rozstrzygnięcia tej sprawy za pomocą nowatorskiego, rygorystycznego rozumowania statystycznego są konieczne. Taki cel przyświecał cyklowi artykułów naukowych, które przedstawiam jako moje osiągnięcie habilitacyjne [Hab1-5].

4.2 Kontekst

Aby przygotować grunt pod opis cyklu artykułów [Hab1-5], muszę najpierw przedstawić moje dwie wcześniejsze prace:

- Tarnopolski, M., *Analysis of Fermi Gamma-Ray Burst duration distribution*, *A&A*, **581**, A29 (2015b)

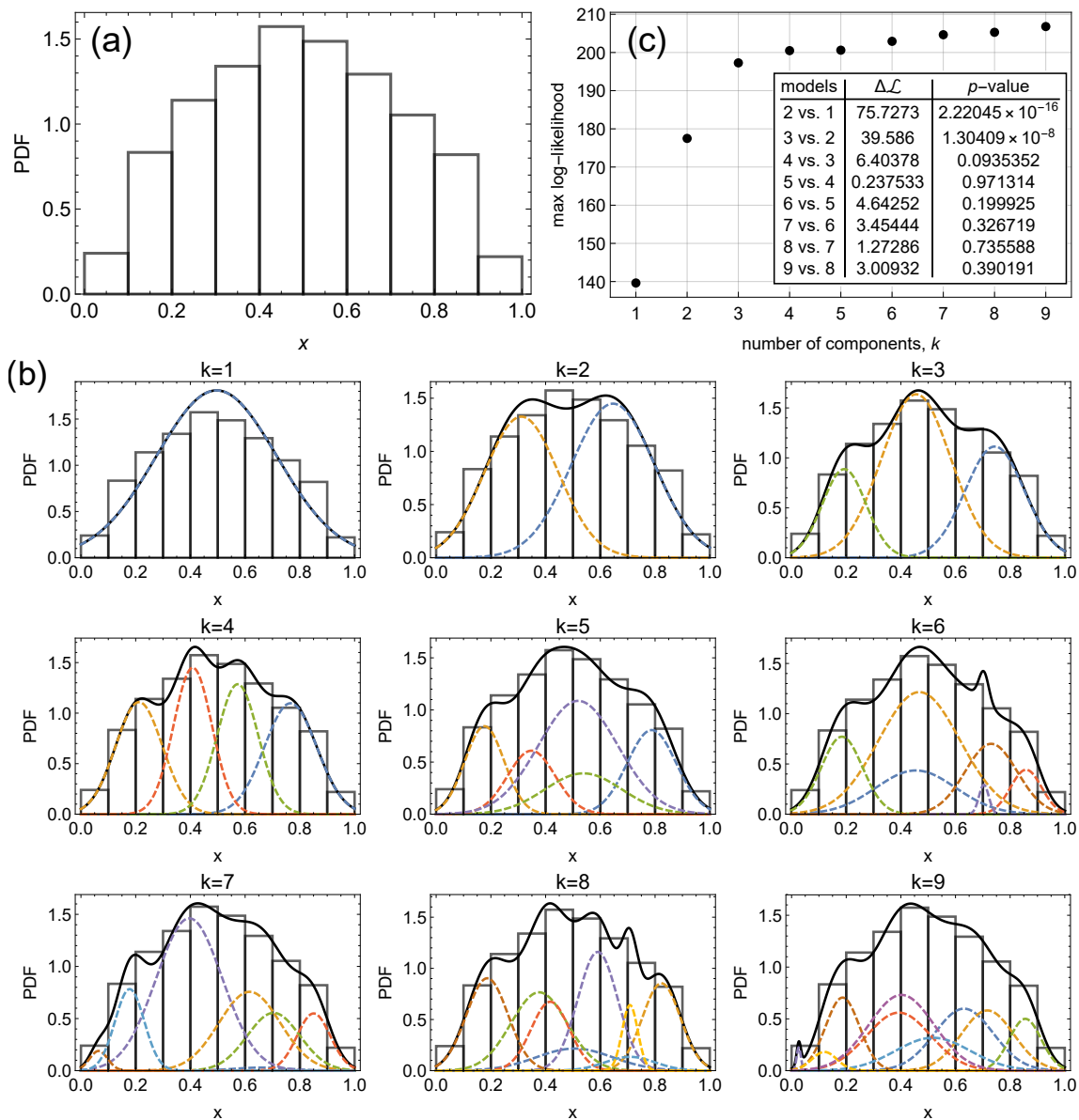
-
- **Tarnopolski, M.**, *Analysis of gamma-ray burst duration distribution using mixtures of skewed distributions*, *MNRAS*, **458**(2), 2024–2031 (2016b)

Pierwszy artykuł (**Tarnopolski, 2015b**) stanowi rozpoznanie problemu: sam fakt, że rozkład czasów trwania jest lepiej opisany jako rozkład mieszany trzech, a nie dwóch składowych gaussowskich, nie implikuje tego, że (i) rozkład czasów trwania rozbłysków jest trójmodalny, ani że (ii) istnieją trzy klasy rozbłysków. Ilustruje to Rys. 8. Przypomnijmy, że klasyfikacja rozbłysków na krótkie i długie została zaproponowana na podstawie bimodalnego (!) kształtu rozkładu czasów trwania (**Kouveliotou et al., 1993**). Istnieje kryterium matematyczne (**Schilling et al., 2002**), które mówi, że rozkład mieszany o dwóch składowych normalnych jest bimodalny jeśli różnica ich średnich jest większa niż suma ich odchyłeń standardowych, przemnożona przez pewien współczynnik (rzędu jedności), zależny od stosunku wag i stosunku wariancji. Pokazałem w (**Tarnopolski, 2015b**), że składowe „pośrednie” i długie rozkładu czasów trwania rozbłysków nie spełniają tego kryterium; dlatego, w połączeniu z krótkimi rozbłyskami, ogólny rozkład czasów trwania jest bimodalny, co czyni twierdzenie o istnieniu trzeciej klasy rozbłysków nieuzasadnionym na podstawie tego rodzaju rozumowania statystycznego.

Fakt, że ze statystycznego punktu widzenia trzy składowe gaussowskie (tworzące jednakże rozkład bimodalny!) są znacznie lepszym dopasowaniem niż rozkład mieszany dwóch składowych, sugeruje, że rozkład czasów trwania nie jest adekwatnie opisany przez składowe gaussowskie. Wzięcie zatem pod uwagę rozkładów o innych kształtach — w szczególności asymetrycznych albo z ciężkimi ogonami — było naturalnym kolejnym krokiem, który podjąłem w kolejnym artykule (**Tarnopolski, 2016b**). Ciekawym jest, że mimo poruszenia tej kwestii w niektórych wcześniejszych pracach taki kierunek badań nie został podjęty: „rozkłady często wydają się bimodalne o asymetrycznych, niestandardowych kształtach²” (**Mukherjee et al., 1998**), „jest całkowicie możliwe, że rozkłady parametrów danej klasy rozbłysków, takiego jak $\log T_{90}$, są niestandardowe: w takim przypadku złudnymi będą klasy zidentyfikowane poprzez modelowanie rozkładu niegaussowskiego za pomocą składowych normalnych³” (**Koen & Bere, 2012**). Dlatego też sam się tego podjąłem (**Tarnopolski, 2016b**), modelując rozkłady czasów trwania rozbłysków z BATSE, *Fermiego* i *Swifta* jako rozkłady mieszane o składowych z wbudowaną asymetrią: rozkład skośny normalny (skew-normal, SN), sinh-arcsinh (SAS) oraz alfa-skośny normalny (alpha-skew-normal, ASN) (Rys. 9), i porównałem przypadki dwu- i trójskładowe ze zwykłymi rozkładami mieszanymi o gaussowskich składowych. Same dopasowania przeprowadziłem poprzez maksymalizację funkcji wiarygodności (max-loglikelihood), zaś kryterium informacyjne Akaikego (Akaike information criterion, AIC) użyłem do określenia dopasowania najlepszego spośród rozważanych (**Akaike, 1974**; **Schwarz, 1978**;

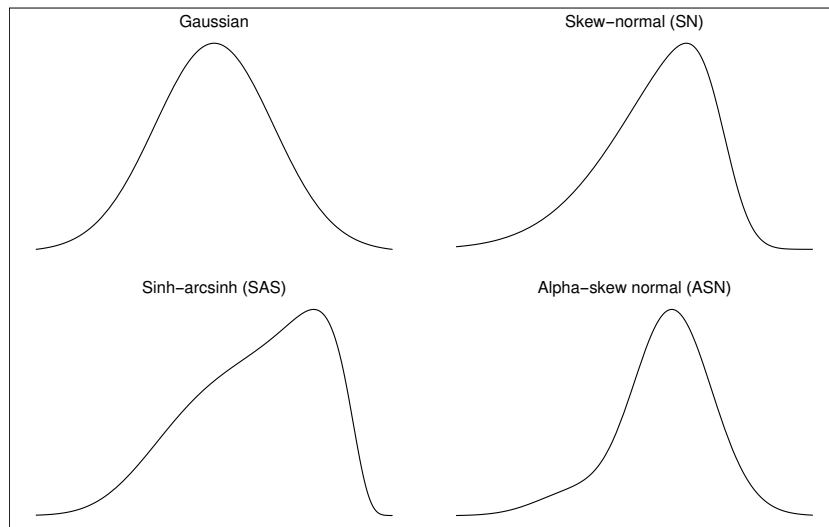
²„The distributions often seem bimodal with asymmetrical non-Gaussian shapes.”

³„It is entirely possible that the distributions of class properties, such as $\log T_{90}$, are non-normal: in such a case, spurious classes would be identified due to the modeling of a non-normal distribution by normal components.”



Rysunek 8: (a) 1500 wartości wylosowanych z rozkładu f . (b) Rozkłady mieszane o od 1 do 9 składowych gaussowskich zostały następnie dopasowane do tej próbki. (c) Względna poprawa dopasowania przy dodawaniu kolejnych składowych (2 vs. 1, 3 vs. 2 itd.) była oceniana przez stosunek funkcji wiarygodności, tak jak w (Tarnopolski, 2015b). Okazuje się, że dodawanie kolejnych składowych prowadzi do kolosalnej poprawy jakości dopasowania do liczby 4 składowych; później p -wartości stają się duże, co implikuje brak dalszej poprawy dopasowania. Można by postulować, że dane są zatem złożone z 4 różnych typów obiektów. Te dane jednak zostały wylosowane z rozkładu postaci $f(x) = \frac{\pi}{2} \sin(\pi x)$, który nie ma nic wspólnego z rozkładem gaussowskim – te rozkłady nie są zagnieżdżone. W takim wypadku, modelowanie tych danych – które ewidentnie nie wyglądają gaussowsko – rozkładem mieszanym o składowych normalnych w ogóle nie było uprawnione.

Hurvich & Tsai, 1989; Kass & Raftery, 1995; Burnham & Anderson, 2004; Biesiada, 2007; Liddle, 2007). W kolejnych pracach [Hab1-2] używałem również kryterium informacyjnego Bayesa (Bayesian information criterion, BIC). Okazało się, że rozkłady mieszane z zaledwie dwoma składowymi skośnymi (asymetrycznymi) były we wszystkich przypadkach ewidentnie lepszymi lub co najmniej równie dobrymi opisami danych co rozkład mieszany o trzech składowych gaussowskich. Jeśli, opierając się na AIC, dwa modele równie dobrze opisują dane, to jedyną preferencją w stosunku do któregoś z nich może być względna prostota któregoś modelu. W rozważanych przypadkach prostota ta manifestuje się poprzez mniejszą liczbę wolnych parametrów lub — co kluczowe — mniejszą liczbę składowych: koncepcyjnie łatwiej uwzględnić jakiś dodatkowy czynnik prowadzący do asymetrii w obserwowanych rozkładach czasów trwania niż postulować nowy mechanizm fizyczny prowadzący do domniemanej nowej klasy rozbłysków „pośrednich”. Zitouni et al. (2015) zaproponowali asymetryczny rozkład mas otoczki masywnej gwiazdy tuż przed jej kolapsem jako jedną z możliwości; z kolei czysto stochastyczny model, badający wpływ dylatacji kosmologicznej na obserwowany rozkład czasów trwania, został przebadany w [Hab3].



Rysunek 9: Schematyczne przedstawienie rozkładów prawdopodobieństwa użytych do modelowania rozkładów czasów trwania rozbłysków. Ich wzory oraz własności statystyczne są opisane w (Tarnopolski, 2016b).

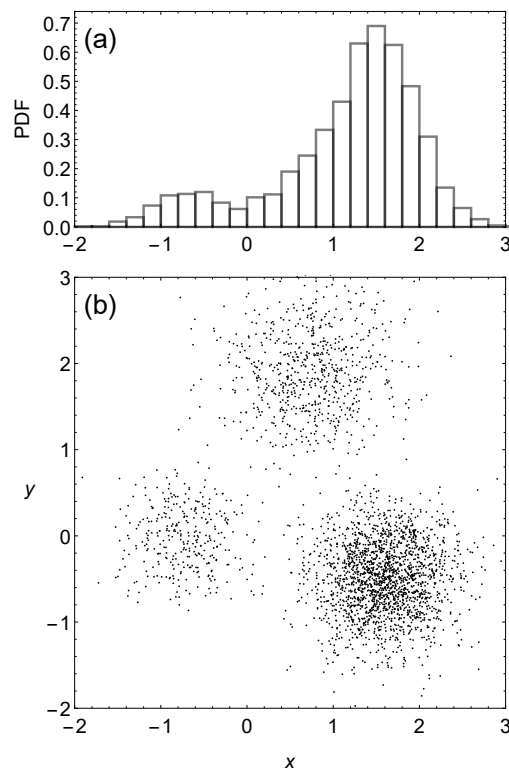
Te moje wczesne dociekania były inspiracją dla i zostały potwierdzone przez niezależne prace badawcze (Kwong & Nadarajah, 2018; Sharifpanah et al., 2020), otwierając drogę do zmiany paradygmatu, której poświęcone są artykuły [Hab1-5] przedstawione w Rozdz. 4.3.

4.3 Opis publikacji złożonych jako osiągnięcie habilitacyjne

[Hab1] Tarnopolski, M., *Analysis of the duration–hardness ratio plane of gamma-ray bursts using skewed distributions*, *ApJ*, **870**:105 (2019a)

4.3.1 Zarys

Dotychczasowe modelowanie rozkładów czasów trwania rozbłysków sugeruje, że są to rozkłady mieszane o asymetrycznych składowych (Tarnopolski, 2016a; Kwong & Nadarajah, 2018; Sharifipanah et al., 2020; Minaev & Pozanenko, 2020). Niemniej jednak, analizy jednoczynnikowe nie są decydujące: wiadomym jest, że do uchwycenia właściwości statystycznych rozbłysków konieczne jest rozważenie przestrzeni rozpiętych na większej liczbie parametrów (Bagoly et al. 1998; Balastegui et al. 2001; Balázs et al. 2003; Horváth et al. 2012; [Hab2]). Skrajny przykład ilustrujący porażkę podejścia jednoczynnikowego przedstawiony jest na Rys. 10.



Rysunek 10: (a) Histogram tylko współrzędnej x jest bimodalny, ale (b) stojące za nim wygenerowane dane dwuwymiarowe ewidentnie składają się z trzech grup.

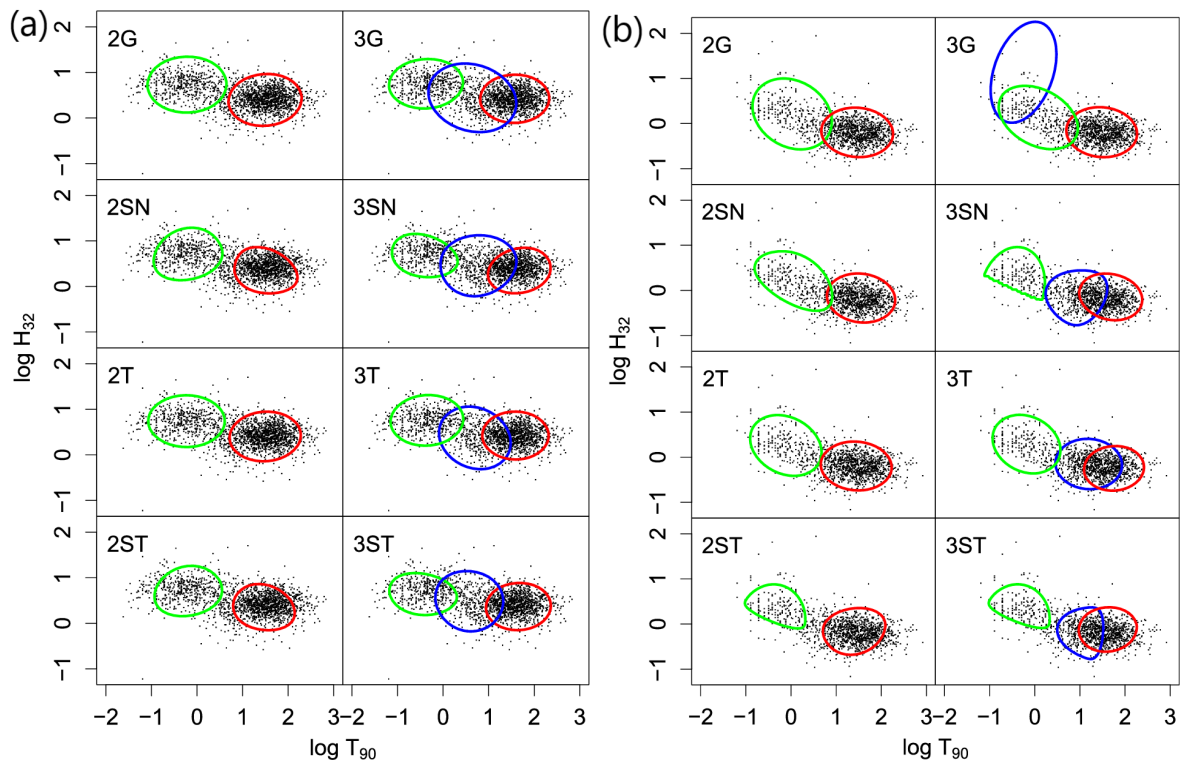
Dlatego też przebadalem rozblyski z BATSE i *Fermiego* na płaszczyźnie rozpiętej przez czasy trwania i twardości w pracy [Hab1]. Czasy trwania T_{90} zostały pobrane z katalogów online, zaś twardości H_{32} przyjęto jako $H_{32} = \frac{F_{100-300, \text{keV}}}{F_{50-100, \text{keV}}}$ dla BATSE i $H_{32} = \frac{F_{50-300, \text{keV}}}{F_{10-50, \text{keV}}}$ dla *Fermiego*. Do danych dopasowano rozkłady mieszane następujących składowych dwuwymiarowych: gaussowski (G), skośny normalny (SN), t Studenta (T) oraz skośny t Studenta (ST), zaimplementowanych w pakiecie MIXSMSN (Prates et al., 2013) w języku R (wzory i detale dotyczące kryteriów wyboru optymalnego modelu są szczegółowo opisane w pracy [Hab1]). Do wyboru modelu najlepiej opisującego dane użyto kryteriów AIC i BIC. Warto podkreślić, że AIC jest bardziej liberalne i ma tendencję do nadmiernego dopasowania (overfitting), podczas gdy BIC jest bardziej rygorystyczne i ma tendencję do niedostatecznego dopasowania (underfitting). Gdy te dwa kryteria wskazują różne modele, prawda leży gdzieś pośrodku; bezpiecznie jest więc wybrać prostszy spośród dwóch wskazanych modeli.

Wyniki dopasowań są przedstawione na Rys. 11. Dla obu próbek danych, BIC wskazał 2ST jako najlepszy opis. AIC wskazuje 3T w przypadku BATSE, ale istnieją silne przesłanki za modelem 2ST (tj., $\Delta\text{AIC} < 4$). Nie ma więc powodu by nie uznać modelu 2ST, jako prostszego, optymalnym. Należy podkreślić, że model 3G jest poza wszelką dyskusją w przypadku obu próbek rozblysków.

Warto dodać, że dokładnie ta sama metodologia została zastosowana do danych ze *Swifta*, *Konus-Wind*, *Suzaku/WAM* i *RHESSI* (Tarnopolski, 2019c), prowadząc do podobnych wyników a co za tym idzie – potwierdzenia wniosków dotyczących liczby klas rozblysków. Zhang et al. (2022) przeanalizowali niezależnie klasyfikację w tych samych przestrzeniach parametrów (rozpiętych na czasach trwania i twardościach) i uzyskali wyniki zgodne z moimi. Wychodzi na to, że nie ma statystycznych przesłanek za istnieniem więcej niż dwóch klas rozblysków.

4.3.2 Jako część cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych

Niniejszy artykuł jest bezpośrednim uogólnieniem koncepcji wprowadzonej w jednej z moich pierwszych prac w tej tematyce (Tarnopolski 2016b; Rozdz. 4.2). Przeanalizowałem tu uprzednio badane w literaturze przedmiotu (Horváth et al., 2006; Řípa et al., 2009; Veres et al., 2010; Narayana Bhat et al., 2016; Horváth et al., 2018; von Kienlin et al., 2020) dwuwymiarowe rozkłady parametrów. Po raz pierwszy explicity wziąłem pod uwagę rozkłady mieszane o inherentnie asymetrycznych składowych. I faktycznie, stwierdziłem, że dwie składowe ST najlepiej opisują dane, co więcej – znacznie lepiej niż zwyczajowo używany rozkład mieszany o trzech składowych gaussowskich. Na kanwie przedstawionego wnioskowania statystycznego tzw. klasa „pośrednich” rozblysków nie ma zatem umocowania w rzeczywistości. Użyta przeze mnie metodologia została następnie rozwinięta w kolejnej pracy [Hab2].



Rysunek 11: Dane zarówno z (a) BATSE jak i (b) *Fermiego* są najlepiej dopasowane rozkładem 2ST. Kolorowe kontury oznaczają szerokość połówkową składowych. Wykresy z [Hab1].

4.3.3 Najważniejsze wyniki

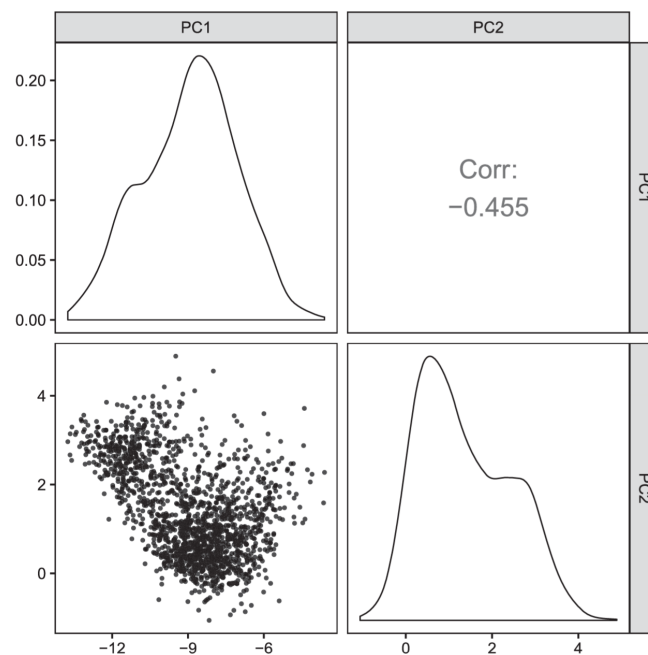
Nie ma podstaw do stwierdzenia istnienia trzeciej klasy rozbłysków o „pośrednich” czasach trwania w dwuwymiarowej przestrzeni parametrów rozpiętej na czasach trwania i twardości dla danych z BATSE i *Fermiego*. Rozkład mieszany wyłącznie dwóch asymetrycznych składowych (2ST) jest wystarczająco dobry opisem danych. W związku z tym nie ma statystycznych przesłanek za istnieniem trzeciej klasy rozbłysków.

[Hab2] Tarnopolski, M., *Multivariate Analysis of BATSE Gamma-Ray Burst Properties Using Skewed Distributions*, *ApJ*, **887**:97 (2019b)

4.3.4 Zarys

PCA ma na celu zbudowanie kombinacji liniowej zmiennych w taki sposób, by wariancja związana z zaledwie kilkoma pierwszymi PC stanowiła większość informacji zawartej w danych (Dunteman, 1989). PCA jest używana do redukcji wymiaru badanego

układu. [Bagoly et al. \(1998\)](#) przeprowadzili PCA dla próbki 625 rozbłysków z BATSE. Co szczególnie istotne, w przypadku analizy powiększonej o około 1000 więcej rozbłysków [\[Hab2\]](#), wyniki PCA są zasadniczo takie same (por. też [Balastegui et al. 2001](#); [Borgonovo & Björnsson 2006](#)). W szczególności elementy macierzy korelacji nie różnią się o więcej niż 0.03, co prowadzi do niemal identycznych PC. Dlatego wszystkie wnioski wysnute przez [Bagoly et al. \(1998\)](#) są nadal aktualne, a zwłaszcza – pierwsze dwie PC stanowią 91.3% informacji zawartej w kompletnym katalogu BATSE. Trzecia PC dodaje do tego 5%, co daje całkowitą informację niesioną przez trzy pierwsze PC na poziomie 96.3%. W związku z tym przestrzenie rozpięte na $PC_1 - PC_2$ i $PC_1 - PC_2 - PC_3$ zawierają wystarczająco wiele informacji (zob. Rys. 12). Okazuje się też, że w przybliżeniu pierwsze dwie PC odpowiadają zasadniczo czasowi trwania i całkowitemu strumieniowi (por. też [Balázs et al. 2003](#)). Inne przestrzenie, o wymiarach 2, 3 i 4, składające się z czasów trwania, twardości, strumieni całkowitych i szczytowych, były również przedmiotem badań w [\[Hab2\]](#) (celem umożliwienia porównań np. z [Tóth et al. 2019](#)).



Rysunek 12: Wykres punktowy oraz rozkłady pierwszych dwóch PC. BIC jednoznacznie wskazuje rozkład 2ST jako najlepsze dopasowanie do danych. Wykres z [\[Hab2\]](#).

Następnie wszystkie utworzone przestrzenie parametrów były wymodelowane za pomocą rozkładów mieszanych G, SN, T i ST, podobnie jak w [\[Hab1\]](#). Przeprowadzono testy porównawcze na symulowanych komputerowo zestawach danych aby ustalić, które z kryteriów informacyjnych (AIC lub BIC) jest bardziej wiarygodne gdy rozważa się przestrzenie o wymiarach wyższych niż dwa, oraz to jak wymiar przestrzeni wpływa

na liczbę składowych wskazywanych przez te kryteria. Okazało się, że BIC jest znacznie bardziej wiarygodne, a przestrzenie o wyższych wymiarach są poniekąd „bardziej pojemne”, tzn. że prawdopodobieństwo identyfikacji nadmiarowej liczby grup wzrasta z wymiarem przestrzeni. [Tóth et al. \(2019\)](#) rozważali przestrzeń sześciowymiarową (ale tylko z 4 niezależnymi zmiennymi) i stwierdzili, że występuje w niej 5 grup. Skoro jednak PCA wskazuje, że wystarczą tylko dwie zmienne, twierdzenie o dodatkowych grupach, tj. klasach rozbłyków, jest nieuzasadnione.

4.3.5 Jako część cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych

[\[Hab2\]](#) to bezpośrednia kontynuacja pracy [\[Hab1\]](#) – wykorzystuje tę samą metodologię celem dopasowania rozkładów statystycznych do danych, ale rozszerza swój zakres na przestrzenie parametrów o wyższej liczbie wymiarów ([Mukherjee et al., 1998](#); [Balastegui et al., 2001](#); [Balázs et al., 2003](#); [Chattopadhyay & Maitra, 2018](#); [Tóth et al., 2019](#)). Co szczególnie istotne, bazuje na PCA aby dokonać redukcji liczby branych pod uwagę zmiennych do minimum maksymalizującego zawartą w nich informację.

4.3.6 Najważniejsze wyniki

Z PCA wynika, że wystarczą tylko dwie zmienne do adekwatnego przedstawienia przestrzeni parametrów rozbłyków oraz wskazuje czasy trwania i całkowite strumienie jako najważniejsze z nich. Spośród dopasowanych rozkładów dwuwymiarowych, rozkład mieszany o zaledwie dwóch skośnych składowych (2ST) jest najlepszym z punktu widzenia statystyki opisem danych. Dlatego też stwierdzono brak przesłanek za istnieniem trzeciej klasy rozbłyków.

[\[Hab3\]](#) [Tarnopolski, M., *Can the cosmological dilation explain the skewness in the gamma-ray burst duration distribution?*, *ApJ*, **897**:77 \(2020\)](#)

4.3.7 Zarys

Centralnym punktem idei wykorzystanej w [\[Hab3\]](#) jest to, że skoro czasy trwania w układzie obserwatora (tj. związanym z Ziemią) T_{90}^{obs} i w układzie spoczynkowym (tj. związanym z emiterym) T_{90}^{int} są ze sobą związane relacją $T_{90}^{\text{obs}} = (1 + z)T_{90}^{\text{int}}$, czyli

$$\log T_{90}^{\text{obs}} = \log(1 + z) + \log T_{90}^{\text{int}}, \quad (1)$$

to rozkład T_{90}^{obs} można wyznaczyć zakładając postaci rozkładów z oraz T_{90}^{int} . Celem przedstawionej pracy było zatem zbadanie hipotezy, poprzez skonstruowanie stosownego

modelu stochastycznego, że asymetria rozkładów $\log T_{90}^{\text{obs}}$ jest konsekwencją dylatacji kosmologicznej.

Czasy trwania w układzie spoczynkowym (możliwe do wyznaczenia dla rozbłysków ze zmierzonym przesunięciem ku czerwieni z) wydają się wystarczająco dobrze opisane przez rozkład mieszany o dwóch składowych gaussowskich (Huja et al., 2009b; Tarnopolski, 2016a,c; Zhang et al., 2016; Zitouni et al., 2018), dlatego też założyłem, że są właśnie takie. Fakt ten, w połączeniu z asymetrią w układzie obserwatora i kosmologicznymi odległościami (aż do $z \gtrsim 9$), sugeruje, że jego splot z rozkładem przesunięcia ku czerwieni może przetransformować inherentnie gaussowskie rozkłady czasów trwania w rozkłady asymetryczne.

Rozkład przesunięcia ku czerwieni odgrywa tu kluczową rolę. Jego rozkład to

$$P_0(z) = N_{P_0} \frac{e(z)F(z)}{1+z}, \quad (2)$$

gdzie $F(z) = \frac{dV(z)}{dz} = \frac{4\pi c d_p^2(z)}{H_0 h(z)}$ to element objętości we współrzędnych współporuszających się w płaskim modelu Λ CDM, w którym $h(z) = \sqrt{\Omega(1+z)^3 + 1 - \Omega}$, zaś $d_p(z) = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dx}{h(x)}$ to odległość właściwa. Różne bezwymiarowe tempo powstawania gwiazd (star formation rate, SFR), $e(z)$, znormalizowane tak, by $e(0) = 1$, zostały zebrane z literatury. Można przyjąć (przynajmniej dla umiarkowanych wartości z ; Jakobsson et al. 2005; Schulze et al. 2015), że tempo powstawania rozbłysków będzie proporcjonalne SFR. Czynniki normalizacyjny N_{P_0} zapewnia, że $\int_0^{z_{\text{max}}} P_0(z) dz = 1$. Zawiera w sobie ów współczynnik proporcjonalności i czynnik skalujący $e(z)$ z postaci bezwymiarowej do wymiarowej.

Uwzględnić trzeba funkcję jasności Schechtera (Paul, 2018)

$$\phi(L) = \frac{1}{L_b \Gamma(1-\nu)} \left(\frac{L}{L_b}\right)^{-\nu} \exp\left(-\frac{L}{L_b}\right), \quad (3)$$

gdzie $\Gamma(\cdot)$ jest funkcją gamma Eulera; $\phi(L)$ jest znormalizowana tak, że $\int_0^\infty \phi(L) dL = 1$. Wzięcie pod uwagę czułości S_{lim} detektorów *Swift*/BAT i *Fermi*/GBM (Paul, 2018) prowadzi do minimalnej jasności, którą można zmierzyć danym instrumentem, zależnej od przesunięcia ku czerwieni: $L_{\text{lim}}(z) = 4\pi d_L^2(z) S_{\text{lim}} k(z)$, gdzie $d_L(z) = (1+z)d_p(z)$ to odległość jasnościowa, a $k(z)$ to k -korekcja. Wprowadza to człon postaci

$$\int_{L_{\text{lim}}(z)}^\infty \phi(L) dL = \frac{\Gamma\left(1-\nu, \frac{L_{\text{lim}}(z)}{L_b}\right)}{\Gamma(1-\nu)}, \quad (4)$$

gdzie $\Gamma(\cdot, \cdot)$ to niekompletna funkcja gamma, jako mnożnik dla $P_0(z)$.

Znana jest też zależna od przesunięcia ku czerwieni efektywność $\eta(z)$ detektora *Swift*/BAT (Howell et al., 2014). W przypadku *Fermiego* jednakże nie wyznaczono żadnej prostej postaci na $\eta(z)$, dlatego efektywność tego detektora nie została uwzględniona w dalszych rozważaniach. Ostatecznie, uwzględniając właściwości danego detektora, obserwowane rozkłady przesunięcia ku czerwieni są wyrażone jako

$$P(z) = N_P \frac{e(z)F(z)}{1+z} \frac{\Gamma\left(1-\nu, \frac{L_{\text{lim}}(z)}{L_b}\right)}{\Gamma(1-\nu)} \eta(z), \quad (5)$$

gdzie N_P jest wyznaczane numerycznie w celu normalizacji, tj. by $\int_0^{z_{\text{max}}} P(z) dz = 1$. Efektywnie, dla *Fermiego* przyjmuję po prostu $\eta(z) = 1$.

$P_0(z)$ można rozumieć jako prawdziwy rozkład przesunięcia ku czerwieni, tzn. gdyby nie było żadnych ograniczeń wynikających ze zdolności obserwacyjnych detektora (tj. uwzględniając wyłącznie kosmologię i SFR), które są uwzględnione przy $P(z)$. Innymi słowy, $P_0(z)$ reprezentuje teleskop idealny, czyli taki, który może zaobserwować każdy rozbłysk, niezależnie od jego jasności czy odległości.

Rozkłady $\log T_{90}^{\text{obs}}$, zdefiniowane zgodnie z równaniem (1), zostały wyprowadzone zgodnie z powyższym opisem; ich skośność została obliczona numerycznie i porównana ze skośnością składowej rozkładu mieszanego odpowiadającej długim rozbłyskom z danych *Fermiego* i *Swifta*. Okazało się, że tak sformułowany model stochastyczny prowadzi do skośności na poziomie co najwyżej kilku procent wywiedzionej z danych obserwacyjnych. Wynika z tego, że skośność rozkładu obserwowana na Ziemi musi być wynikiem procesów zachodzących w miejscu emisji, tj. musi być związana z własnościami kolapsujących gwiazd.

4.3.8 Jako część cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych

Niniejsza praca jest próbą wyjaśnienia skąd bierze się skośność opisana w (Tarnopolski 2016b, [Hab1-2]). Sformułowano w tym celu model stochastyczny. Próba ta okazała się nieudana w tym sensie, że założenia będące jego podwaliną (tzn., że to rozkład przesunięcia ku czerwieni prowadzi do obserwowanej asymetrii; uwzględniono również efekty instrumentalne). Pozwala to więc przekierować uwagę na procesy zachodzące w miejscu emisji, tj. rozważyć pochodzenie skośności bezpośrednio wśród populacji kolapsujących grawitacyjnie masywnych gwiazd (por. Rozdz. 4.5).

4.3.9 Najważniejsze wyniki

Splot rozkładu czasów trwania w układzie spoczynkowym z rozkładem przesunięcia ku czerwieni nie prowadzi do skośności rozkładów czasów trwania jakie widoczne są w danych obserwacyjnych – daje jedynie kilka procent obserwowanego efektu. Dlatego też

jego źródła należy się doszukiwać w procesach fizycznych rządzących kolapsem gwiazd, z których powstają długie rozbłyski (por. Rozdz. 4.5).

[Hab4] Tarnopolski, M., & Marchenko, V., *A Comprehensive Power Spectral Density Analysis of Astronomical Time Series. II. The Swift/BAT Long Gamma-Ray Bursts*, *ApJ*, **911**:20 (2021)

4.3.10 Zarys

Praca [Hab4], stanowiąca „część II”, wykorzystuje metodologię opracowaną i starannie przetestowaną w „części I” (Tarnopolski et al., 2020), w szczególności: określenie kształtu widma mocy (PSD) krzywych zmian blasku rozbłysków, poszukiwanie quasio-kresowych oscylacji (quasiperiodic oscillations, QPO), ostrożnie zachowawcze wyznaczenie wykładnika Hursta oraz klasyfikację w płaszczyźnie $\mathcal{A} - \mathcal{T}$ (Tarnopolski, 2016d, 2019c). W kontekście określenia liczby klas rozbłysków przy pomocy wnioskowania statystycznego kluczowym pojęciem jest tu płaszczyzna $\mathcal{A} - \mathcal{T}$, którą tworzy współczynnik Abbego (von Neumann, 1941a,b; Kendall, 1971; Mowlavi, 2014):

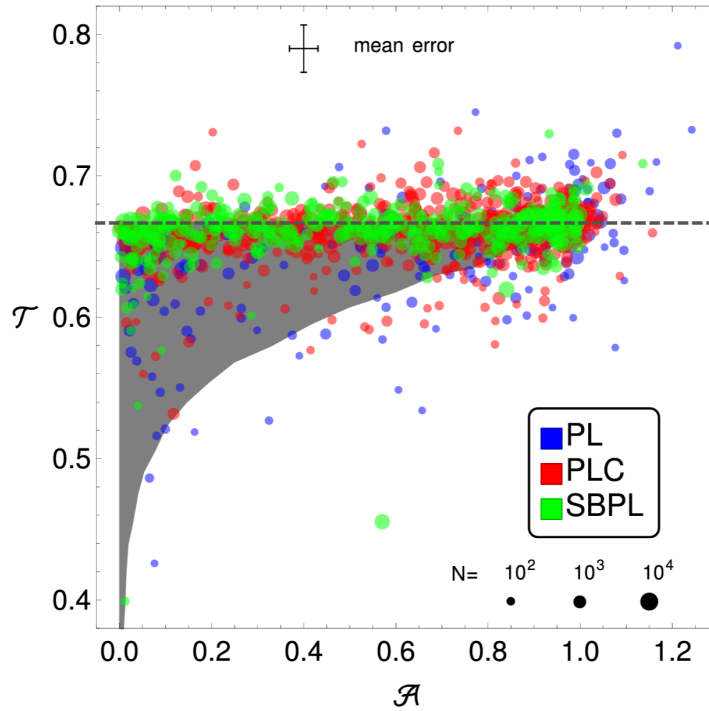
$$\mathcal{A} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2}{\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6)$$

czyli połowa stosunku średniej kwadratowej różnicy kolejnych punktów do wariancji, znormalizowany tak by dla białego szumu $\mathcal{A} = 1$, oraz stosunek tzw. punktów zwrotnych (turning points), \mathcal{T} (Bandt & Shiha, 2007; Zunino et al., 2017). Z punktem zwrotnym w szeregu czasowym mamy do czynienia jeśli trójka kolejnych punktów tworzy maksimum lokalne: \wedge lub minimum lokalne: \vee . Dla białego szumu $\mathcal{T} = 2/3$.

Pomysł sklasyfikowania rozbłysków na płaszczyźnie $\mathcal{A} - \mathcal{T}$ jest wprost konsekwencją wyników uzyskanych dla blazarów (Żywucka et al., 2020; Tarnopolski et al., 2020), których podklasy (kwazary o płaskim spektrum radiowym i obiekty typu BL Lacertae) okazały się leżeć w różnych rejonach płaszczyzny $\mathcal{A} - \mathcal{T}$. Zamiast zatem polegać na zbiorczych charakterystykach widmowych i/lub czasowych [Hab1-2], zadałem pytanie, czy wzorce zmienności zakodowane w całych krzywych zmian blasku długich rozbłysków ze *Swifta* wskażą na istnienie ich podtypów. Wyniki są pokazane na Rys. 13, a jego analiza prowadzi do wniosku, że nie ma podstaw do twierdzenia, że długie rozbłyski w ogóle dzielą się na podtypy, w szczególności – nie ma śladów „pośrednich” rozbłysków.

Pozostałe badania dokonane w [Hab4] to:

1. dopasowanie do widm mocy funkcji postaci potęgowej (power law) i gładko złamanych funkcji potęgowych (smoothly broken power law) – rozkłady indeksów



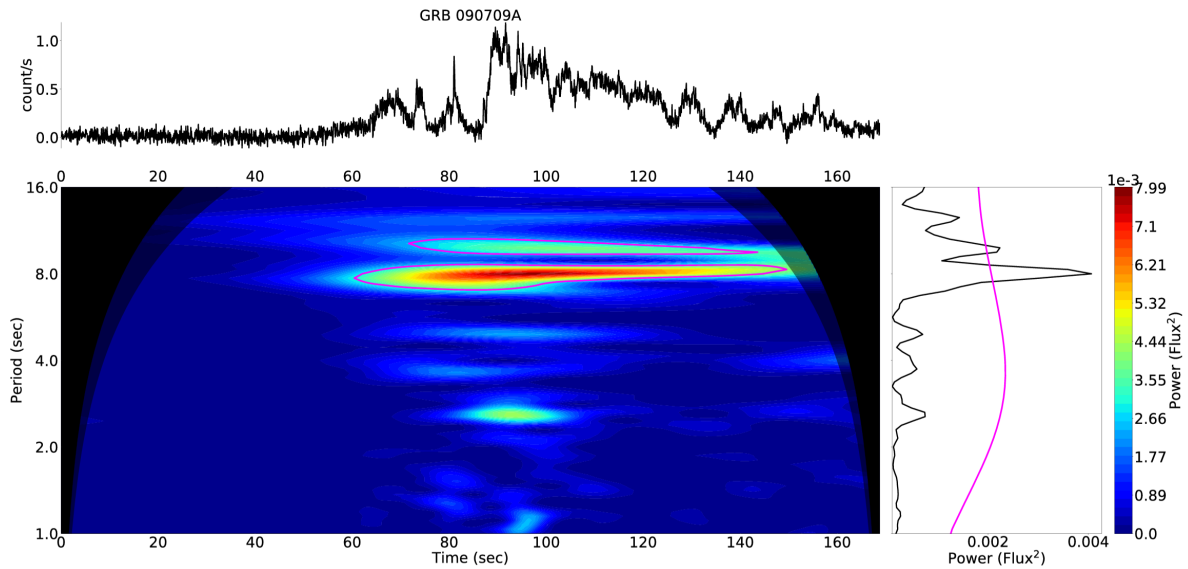
Rysunek 13: Płaszczyzna $\mathcal{A}-\mathcal{T}$ nie wskazuje na żadne wyraźne grupowanie się rozbłysków w dwie lub więcej klas. Rozmiar punktów jest proporcjonalny do długości krzywej zmian blasku, zaś kolory wskazują na kształt widma mocy (PL – funkcja potęgowa, PLC – funkcja potęgowa z poissonowskim poziomem szumu, SBPL – gładko złamana funkcja potęgowa). Widoczne nagromadzenie punktów w pobliżu współrzędnych $(\mathcal{A}, \mathcal{T}) = (1, 2/3)$ należy przypisać krzywom zmian blasku zdominowanym przez szum, tj. niski poziom sygnału do szumu w przypadku wielu rozbłysków. Szary region jest obszarem dostępności dla widm mocy o postaci funkcji potęgowej. Wykres z [Hab4].

potęgowych β były w szerokim zakresie zgodne z prawem Kolmogorowa przewidującym dla w pełni rozwiniętej turbulencji wartość $\beta = 5/3$, co dla rozbłysków było postulowane przez [Dichiara et al. \(2016\)](#).

2. Staranne wyznaczenie wykładników Hursta, które znalazły już swoje miejsce w klasyfikacji rozbłysków ([MacLachlan et al., 2013](#); [Tarnopolski, 2015c](#)), ale praca [Hab4] poświęcona była wyłącznie długim rozbłyskom. Stwierdzono, że aż w 93% rozbłysków występowała długoterminowa pamięć, czyli trend stochastyczny.
3. Poszukiwanie QPO – wykryto 34 nowe przypadki na poziomie istotności 3σ , w tym sygnały o zmiennym okresie (ćwierki w nomenklaturze falowograwitacyjnej) oraz 2 lub 3 współlistniejące harmoniki. Potwierdzono QPO w rozbłysku GRB 090709A, o której donoszono we wcześniejszej literaturze ([de Luca et al., 2010](#); [Cenko et al.,](#)

2010; Iwakiri et al., 2010; Ziaeeepour & Gardner, 2011), z okresem głównym wynoszącym 8 sekund (Rys. 14). Przeprowadzono porównanie ze skalami czasu w ramach kilku modeli fizycznych generujących QPO – potencjalnie uniwersalne mechanizmy ich generacji organiczają się do nieplanarnych orbit relatywistycznych wokół czarnych dziur Kerra, efektu Lense’a-Thirringa oraz oscylacji fal uderzeniowych.

4. Weryfikacja związków postulowanych wcześniej w literaturze: zależność $E_{\text{peak}}^{\text{rest}} - \beta$ (Dichiara et al., 2016) została potwierdzona jako istotna statystycznie, z kolei zależność $L_{\text{iso}} - f_0$ (Ukwatta et al., 2011) została uznana za efekt obserwacyjny zależny od jasności rozbłysków.



Rysunek 14: Skalogram falkowy rozbłysku GRB 090709A. Wyraźna jest statystycznie istotna QPO ($>3\sigma$), z okresem wiodącym wynoszącym ~ 8 sekund, obecna przez większość krzywej zmian blasku. Kolejna, trochę krócej trwająca składowa (harmonika) ma okres wiodący wynoszący ~ 9.8 sekundy. Wykres z [Hab4].

4.3.11 Jako część cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych

Niniejsza praca stanowi bezpośrednie zastosowanie metodologii opracowanej w pracy (Tarnopolski et al., 2020) do krzywych zmian blasku rozbłysków. Płaszczyzna $\mathcal{A} - \mathcal{T}$ została uznana za przejawiającą duży potencjał do klasyfikacji rozbłysków w oparciu o różnice we wzorcach zmienności, czyli do zbadania istnienia podtypów rozbłysków długich. Nie ma ku temu jednak żadnych przesłanek.

4.3.12 Moja rola

Jestem pomysłodawcą tego badania. Zebrałem dane z katalogu *Swifta*, przetworzyłem je do formy wymaganej przez każdą z zastosowanych metod obliczeniowych, dopasowałem postaci funkcyjne do widm mocy, obliczyłem wykładniki Hursta i skonstruowałem płaszczyznę $\mathcal{A}-\mathcal{T}$. Nadzorowałem poszukiwania QPO. Dokonałem przeglądu literatury, sformułowałem interpretacje fizyczne i napisałem cały tekst artykułu.

4.3.13 Najważniejsze wyniki

W kontekście określenia liczby klas rozbłysków poprzez wnioskowanie statystyczne, najważniejszy wynik niniejszej pracy uzyskano za pomocą płaszczyzny $\mathcal{A}-\mathcal{T}$: przeanalizowano długie rozbłyski ze *Swifta* (tj. $T_{100} > 3.2$, s) i nie dostrzeżono żadnego grupowania w dwa lub więcej skupisk. Użyte podejście jest nieparametryczne, nowatorskie i całkiem odmienne od tego z prac [Hab1-2] oraz wcześniejszej literatury.

Dodatkowo pokazano, że typowe widmo mocy jest zasadniczo zgodne z prawem Kolmogorowa ($\beta = 5/3$) dla w pełni rozwiniętej turbulencji, a także potwierdzono, że zależność $E_{\text{peak}}^{\text{rest}} - \beta$ (Dichiara et al., 2016) jest statystycznie istotna. Z kolei zależność $L_{\text{iso}} - f_0$ (Ukwatta et al., 2011) uznana została za efekt obserwacyjny związany z jasnością. Wykładniki Hursta w przytłaczającej większości przypadków (93%) wskazują na długoterminową pamięć, tzn. wzorce zmienności obecne w krzywych zmian blasku są trwałe. Ponadto, odkryto 34 nowe QPO, w tym współlistniejące harmoniki oraz sygnały o okresie zmiennym w czasie (ćwierki). Liczba potwierdzonych QPO powiększyła się zatem o rząd wielkości.

W sumie przebadano 1160 krzywych zmian plasku rozbłysków ze *Swifta*. Długoterminowym rezultatem tej pracy jest katalog własności, zawierający indeksy widm mocy β , wykładniki Hursta H , położenia na płaszczyźnie $\mathcal{A}-\mathcal{T}$, okresy QPO oraz parametry spektralne pobrane z katalogów i literatury (E_{peak} , L_{iso}). Wszystkie wartości są podane wraz z błędami statystycznymi.

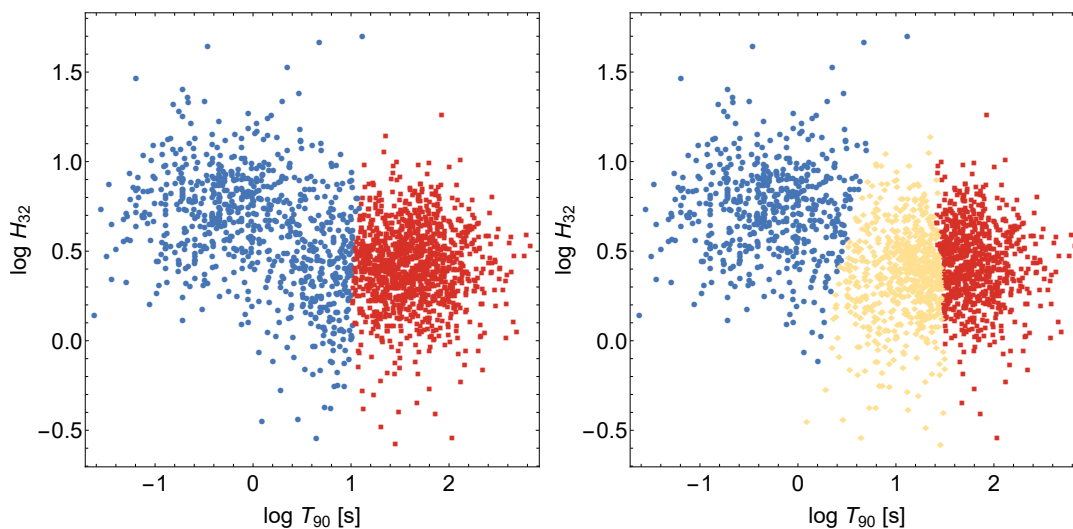
[Hab5] Tarnopolski, M., *Graph-based clustering of gamma-ray bursts*, *A&A*, **657**, A13 (2022)

4.3.14 Zarys

Próby nieparametrycznej analizy skupień zostały podjęte natychmiast po pojawieniu się możliwości istnienia więcej niż dwóch klas rozbłysków (Mukherjee et al., 1998; Balastegui et al., 2001; Rajaniemi & Mähönen, 2002; Jespersen et al., 2020; Chen et al., 2024), prowadząc często do niejednoznacznych lub sprzecznych wyników. Metody analizy skupień oparte na teorii grafów rzadko były używane w stosunku do wielowymia-

rowych własności obiektów astronomicznych (np. [Farrah et al., 2009](#); [Maritz et al., 2017](#)), z wyjątkiem grupowania na sferze niebieskiej ([Campana et al., 2008](#); [Tramacere & Vecchio, 2013](#)) lub detekcji filamentów ([Bonnaire et al., 2020](#)). Graf $G = (V, E)$ to zbiór wierzchołków V połączonych krawędziami E ([Wilson, 1998](#)). W metodach analizy skupień opartych na teorii grafów ([Fortunato, 2010](#)) celem jest skonstruowanie pewnego grafu w oparciu o dane wielowymiarowe, a następnie podzielenie tego grafu na rozłączne komponenty (podgrafy) wg pewnych zdefiniowanych zasad i wytycznych. Podgrafy te są następnie wiązane z różnymi podtypami obiektów zawartych w wyjściowej próbce danych. Liczba algorytmów opartych o teorię grafów jest ogromna. Celem niektórych z nich jest klasyfikacja obiektów podług z góry określonej liczby ich podtypów, inne z kolei mają na celu zastosowanie stosownych kryteriów do określenia również liczby grup. Kilka niedawno sformułowanych algorytmów zostało zastosowanych w [\[Hab5\]](#) do zestawów rozbłysków z ([Tarnopolski, 2019c](#)) oraz [\[Hab1\]](#) (BATSE, *Fermi*, *Swift*, *Konus*, *RHESSI*, *Suzaku*):

1. algorytm *continuous k-nearest neighbor* (CkNN; [Liu & Barahona 2020](#)). Podstawową ideą wielu algorytmów jest graf oparty na k najbliższych sąsiadach (kNN) kolejnych punktów w zestawie danych. Dla każdego punktu w próbce szuka się jego k najbliższych sąsiadów (zazwyczaj stosując metrykę euklidesową) i łączy go z nimi krawędziami tak konstruowanego grafu. To podejście pozwala uchwycić różnice w gęstości punktów w różnych obszarach analizowanej przestrzeni parametrów, ale często jest wrażliwe na wybraną wartość k , która musi być ustalona na samym początku procedury. Jednym ze sposobów na poradzenie sobie z tym problemem jest użycie grafu CkNN ([Berry & Sauer, 2019](#)): wprowadza się metrykę między punktami, a dwa węzły w grafie są połączone krawędzią jeśli odległość między nimi jest mniejsza niż pewien próg zależny od kNN. Następnie tworzona jest macierz autokowariancji procesu Markowa na grafie, a następnie na jej podstawie jest definiowana tzw. stabilność Markowa partycji grafu na podgrafy. Dobra partycja to taka, która osiąga wysoką stabilność Markowa w funkcji czasu Markowa t , który z kolei jest parametrem kontrolującym rozdzielczość partycji. Stabilna partycja utrzymuje się przez długi czas Markowa, a niepodobieństwo partycji dla różnych wartości t i t' jest niskie. Do pomiaru niepodobieństwa używa się wskaźnika zróżnicowania informacji (variation of information, VI; [Meilă 2007](#)). VI opiera się na pojęciach entropii i informacji. Implementacja tego algorytmu w języku MATLAB, wykonana przez jego autorów ([Liu & Barahona, 2020](#)), jest dostępna online. Rys. 15 przedstawia przykładowe partycje uzyskane w pracy [\[Hab5\]](#).
2. Algorytm CutPC ([Li et al., 2020](#)). Na początku konstruuje się wariant grafu kNN, tj. graf naturalnych sąsiadów (natural neighbor, NaN; natural neighbor graph, NNG; [Huang et al. 2016](#)). Dwa wierzchołki u i v uznawane są za NaN, jeśli u jest sąsiadem v i vice versa. Na przykład jeśli rozważymy trzy punkty 1, 3 i 4 na osi liczbowej, najbliższym sąsiadem 1 jest 3, ale najbliższym sąsiadem 3 jest 4,

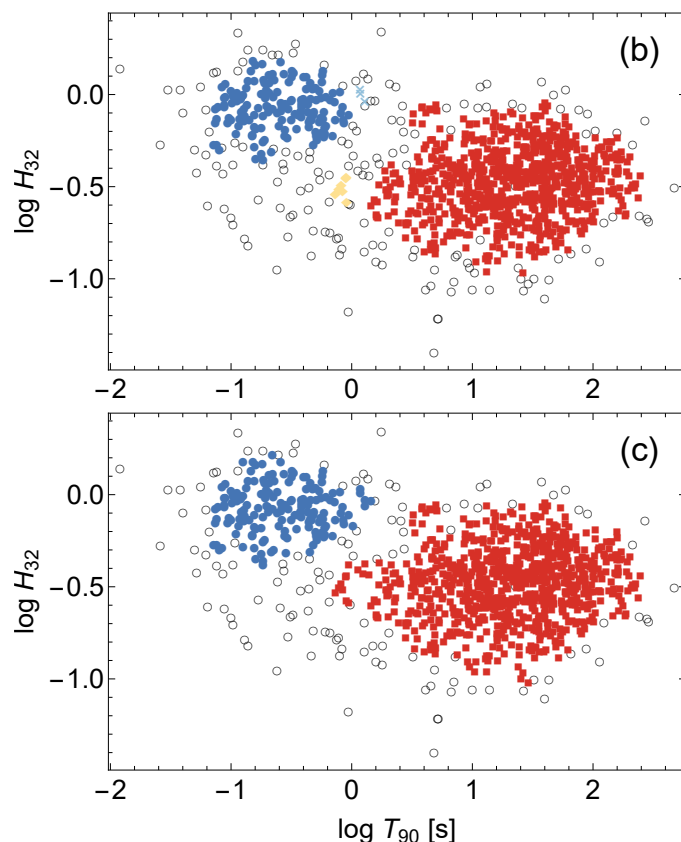


Rysunek 15: Partycja danych z BATSE w (a) dwie i (b) trzy klasy przy użyciu algorytmu CkNN. Wykres z [Hab5].

więc 1 i 3 nie są NaN; jednak 3 i 4 stanowią NaN. Konstrukcja NNG nie wymaga ustalenia wartości żadnych wolnych parametrów, w przeciwieństwie do grafu kNN, w którym trzeba wybrać liczbę k najbliższych sąsiadów. Punkty w obszarach o mniejszej gęstości mają mniej NaN niż punkty w gęstszych obszarach, co pozwala na uznanie punktów w bardzo rzadkich obszarach za wartości odstające (outliers) lub przejawy fluktuacji w danych.

Średnia odległość τ jest obliczana dla wszystkich punktów NaN; używa się jej do zdefiniowania tzw. odwrotnej gęstości, czyli średniej τ zwiększonej o α razy odchylenie standardowe od τ . Parametr α to jedyny wolny parametr w tym algorytmie. Dany punkt uznawany jest za odstający jeśli jego średnia odległość do innych punktów NaN przekracza α razy odchylenie standardowe od średniej. Po odrzuceniu wartości odstających pozostałe punkty są dzielone na grupy (podgrafy). Poszczególne grupy koncentrują się wokół punktów o lokalnie dużej gęstości. Implementacja tego algorytmu w języku MATLAB, wykonana przez jego autorów (Li et al., 2020), jest dostępna online. Rys. 16 przedstawia przykładowe partycje uzyskane w pracy [Hab5].

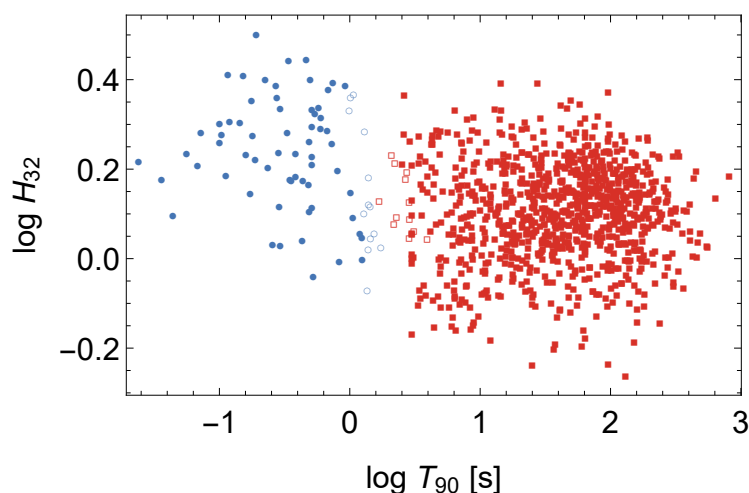
3. Algorytm oparty na k -spójności grafu (Li et al., 2019). Rozpoczyna się od konstrukcji grafu kNN. Kluczowym punktem tej metody jest identyfikacja tzw. punktów osobliwych, których usunięcie rozspójnia graf, tj. dzieli go na rozłączne podgrafy. Na podstawie spójności krawędziowej grafu kNN konstruowane są podgrafy (spójne lub rozłączne, tj. składające się z jednej lub większej liczby składowych).



Rysunek 16: Grupy w rozbłyśkach z *Konusa*, zidentyfikowane algorytmem CutPC. (b) Ta metoda w zasadzie wskazuje na 4 grupy, ale dwie z nich są tak niewielkie (turkusowe krzyżyki i żółte romby), że naturalnym wyborem jest (c) partycja na dwie grupy. Wykres z [Hab5].

Indeks osobliwości (singular index, SI) danego wierzchołka grafu można wtedy przybliżyć liczbą składowych. Wierzchołek jest uważany za punkt osobliwy, jeśli istnieje więcej niż jeden podgraf w zadanej odległości od tego wierzchołka. Składowe rozłączne grafu uzyskane przez usunięcie z niego wszystkich punktów osobliwych tworzą ostateczną partycję. Minimalizacja wartości VI jest ponownie użyta jako kryterium wyboru optymalnej partycji. Implementacja tego algorytmu w języku MATHEMATICA została wykonana przez mnie i jest dostępna online. Rys. 17 przedstawia przykładowe partycje uzyskane w pracy [Hab5].

4. Algorytm „fast density peaks” (**fastdp**) (Sieranoja & Fränti, 2019). Również bazuje na grafie kNN. Kluczowym konceptem jest tu identyfikacja centrów grup jako obszarów o dużej lokalnej gęstości ρ . Gęstość w punkcie i jest definiowana jako odwrotność średniej odległości od i do innych wierzchołków grafu kNN. Centra grup powinny być od siebie dostatecznie oddalone. Odległość od punktu i do naj-



Rysunek 17: Grupy wśród rozbłysków ze *Swifta*, zidentyfikowane algorytmem opartym na k -spójności grafu, oznaczone różnymi kolorami (symbolami – kółka i kwadraty). Puste symbol oznaczają punkty osobliwe, przypisane do grup na podstawie sąsiedztwa. Wykres z [Hab5].

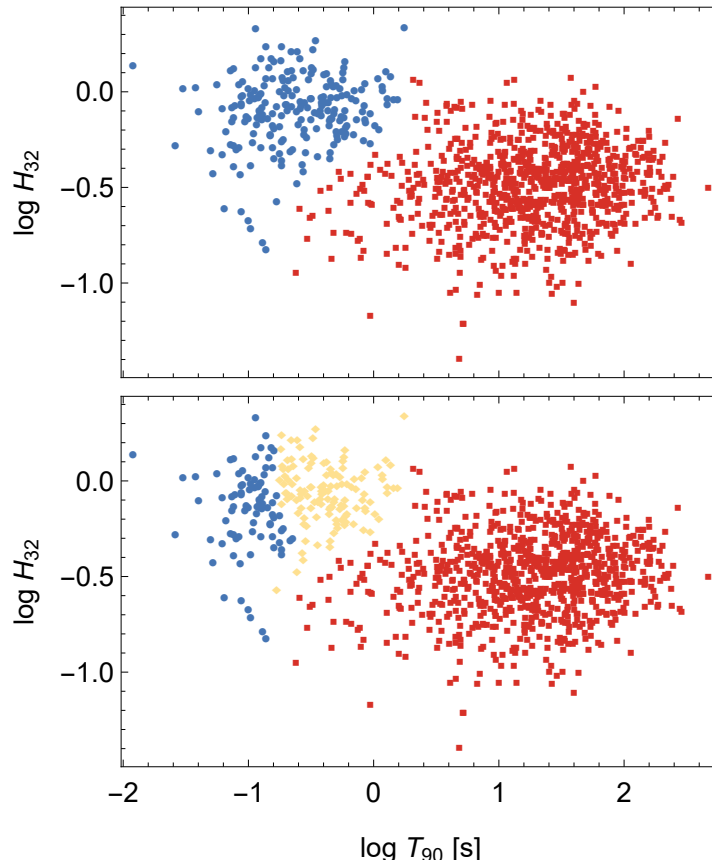
bliższego punktu o wyższej gęstości oznacza się jako δ ; ten drugi punkt nazywany jest „starszym bratem” punktu i . Liczbę grup K określa się jako parametr wejściowy. Wyboru optymalnego K można dokonać na podstawie wykresu par (ρ, δ) : wysokie wartości $\gamma \equiv \rho\delta$ z dużym prawdopodobieństwem oznaczają partycje (Rodriguez & Laio, 2014). Implementacja tego algorytmu w języku C, wykonana przez jego autorów (Sieranoja & Fränti, 2019), jest dostępna online. Rys. 18 przedstawia przykładowe partycje uzyskane w pracy [Hab5].

(Bardziej szczegółowe opisy powyższych algorytmów przedstawione są w pracy [Hab5].)

W pracy [Hab5] skupiłem się na przestrzeni dwuwymiarowej rozpiętej przez czasy trwania i twardości rozbłysków. Powody były takie, że (i) ułatwiło to graficzną prezentację wyników, co z kolei pozwala ocenić uzyskane partycje na pierwszy rzut oka, oraz (ii) taka przestrzeń była powszechnie badana w literaturze przedmiotu, co pozwoliło na natychmiastowe porównanie wyników. Dodanie innych wielkości, na przykład strumieni (por. [Hab2]), aby utworzyć przestrzeń o wyższych wymiarach daje możliwość dalszej eksploracji tego typu analizy skupień w przyszłości (zob. też pobieżne omówienie potencjalnych uogólnień powyższych metod w Rozdz. 4.3.16).

4.3.15 Jako część cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych

Niniejsza praca korzysta z nieparametrycznych algorytmów analizy skupień opartych na teorii grafów, które jeszcze nigdy nie były używane do określenia liczby klas rozbłysków. Jej bezpośrednim celem było odpowiedzieć właśnie na pytanie ile jest statystycznie istotnych podgrup rozbłysków.



Rysunek 18: (Góra) Dwie oraz (dół) trzy grupy rozbłysków z *Konusa* zidentyfikowane algorytmem *fastdp*. Wykres z [Hab5].

4.3.16 Najważniejsze wyniki

Otrzymane w niniejszej pracy podziały rozbłysków na podgrupy w zasadzie zgadzają się z powszechnie przyjętym faktem, że rozbłyski z pewnością dzielą się na dwa typy – krótkie i długie. W wielu przypadkach jednak, z jednej strony, nie można kategorycznie wykluczyć możliwości istnienia trzeciej klasy rozbłysków; z drugiej jednak strony nie można też niepodważalnie stwierdzić jej istnienia. Jednakowoż, w przeciwieństwie do niektórych doniesień o istnieniu pięciu (lub nawet więcej!) klas (Chattopadhyay & Maitra, 2017, 2018; Acuner & Ryde, 2018; Ruffini et al., 2018; Tóth et al., 2019), nie ma podstaw by taka możliwość w istocie zachodziła. Zasugerowałem też, że bardziej wiarygodna klasyfikacja rozbłysków mogłaby być uzyskana poprzez połączenie metodyki z różnych podejść, np. użycie grafów z wagami prawdopodobnie dałoby lepsze (bardziej jednoznaczne) wyniki. Wagi owe z kolei mogłyby być wyprowadzone z innych własno-

ści rozbłysków, nie wynikających z relacji metrycznych w rozważanych przestrzeniach parametrów, a wynikających np. z ich jasności itd.

4.4 Podsumowanie

Znanych jest wiele przypadków rozbłysków, które się wyróżniają na tle całości populacji, ale nie stanowią fizycznie nowego ich podtypu. Na przykład ultra-długie rozbłyski, czyli takie, które trwają od 10^3 sekund do 10^4 sekund, wydają się mieć miejsce przy kolapsie niebieskich nadolbrzymów (Perna et al., 2018). Niemniej jednak ich pochodzenie jest nadal wynikiem kolapsu masywnej gwiazdy, a ze względu na ciągłość rozkładu mas gwiazd znajdują się one po prostu w ogonie rozkładu czasów trwania długich rozbłysków.

Innym przypadkiem są błyski rentgenowskie, które niegdyś proponowano jako trzecią klasę rozbłysków (Veres et al., 2010; Grupe et al., 2013), ale jednak nie mogą one stanowić uniwersalnej atrybucji (Řípa & Mészáros, 2014, 2016) z powodu nieprzystających twardości klasy „pośredniej” w danych z BATSE i *RHESSI* (Řípa et al., 2012).

Oczywiście zachodzi w pewnym zakresie przekrywanie się rozkładów czasów trwania krótkich i długich rozbłysków, tzn. niektóre kolapsary mogą prowadzić do rozbłysków o $T_{90} < 2$ sekundy, podczas gdy niektóre zderzenia obiektów zwartych mogą prowadzić do $T_{90} > 2$ sekundy, co sprawia, że rozróżnienie wprowadzone przez Kouveliotou et al. (1993) nie jest ostre (i w dodatku jest zależne od detektora; Bromberg et al. 2013b; Tarnopolski 2015a). W szczególności, sGRBwEE są prawdopodobnym ogniwem łączącym krótkie i długie rozbłyski (Kaneko et al., 2015); z typowymi czasami trwania rzędu $\sim 5 - 100$ sekund klasyfikują się jako długie, ale pochodzą ze zlewania się obiektów zwartych. Są to w istocie atrakcyjni kandydaci na grupę pośrednią rozbłysków (zob. też Kann et al. 2011).

Doniesienia o trzeciej, „pośredniej” klasie były pierwotnie oparte na bardzo silnych podstawach, ale jednak opierały się na konkretnym zestawie danych obejmującym 797 rozbłysków z BATSE (Horváth, 1998; Mukherjee et al., 1998). Były one potem wielokrotnie ponawiane, ale te późniejsze stwierdzenia stanowiły raczej nadużycia rozumowania statystycznego (Rozdz. 4.1). Bardziej elastyczne podejścia statystyczne doprowadziły do bardziej stanowczego odrzucenia istnienia „pośredniej” klasy rozbłysków (Tarnopolski 2016b, [Hab1-2], Jespersen et al. 2020, [Hab4]). Z drugiej strony, wciąż istnieje pewna niejasność dotycząca wyników niektórych zaawansowanych algorytmów analizy skupień [Hab5], co sugeruje potrzebę udoskonalenia tych metod i implikuje konieczność starannej interpretacji ich wyników.

Po zaakceptowaniu obecności asymetrii w rozkładzie czasów trwania długich rozbłysków powstaje pytanie dotyczące źródła jej pochodzenia. Ponieważ nie może być ona wynikiem dylatacji kosmologicznej [Hab3], musi być zatem związana z samymi fizycznymi mechanizmami powstawania rozbłysków. Taka konkluzja, w pewnym sensie, zamyka kwestie badania istnienia trzeciej klasy rozbłysków za pomocą rozumowania statystycznego, ponieważ teraz uwaga powinna się skierować ku bardziej dogłębnym,

opartym na fizyce, eksploracjom populacji masywnych gwiazd (prowadzących do powstawania długich rozbłysków) poprzez symulacje ich ewolucji (Rozdz. 4.5).

4.5 Aktualnie prowadzone i planowane badania w tej tematyce

Asymetria rozkładu czasów trwania rozbłysków jest potwierdzonym zjawiskiem (**Tarnopolski 2016b**; **Kwong & Nadarajah 2018**; **Tarnopolski 2019c**; **Sharifpanah et al. 2020**; **Minaev & Pozanenko 2020**; **Zhang et al. 2022**; **[Hab1-2]**). Jej pochodzenie, jednakże, pozostaje niejasne – dylatacja kosmologiczna została jednoznacznie odrzucona jako jej źródło **[Hab3]** musi zatem wynikać z procesów zachodzących w miejscu emisji. **Zitouni et al. (2015)** zasugerowali, że asymetryczny rozkład mas otoczki masywnej gwiazdy tuż przed kolapsem grawitacyjnym może stanowić wyjaśnienie. **Perna et al. (2018)** rozważali czasy swobodnego spadku odrzuconej materii gwiazdowej na nowo powstałą czarną dziurę jako wyznacznik czasów trwania rozbłysków.

Obecnie, wraz ze współpracownikami z mojego instytutu, badamy rozkłady czasów swobodnego spadku poprzez syntezę populacji masywnych, chemicznie jednorodnie ewoluujących gwiazd. Bierzymy pod uwagę rozkłady metaliczności, Z (**van Son et al., 2023**), masy początkowej, M (**Salpeter, 1955**), i prędkości, v (**Yoon et al., 2006**), a następnie symulujemy ewolucję gwiazd na siatce wartości (Z, M, v) przy użyciu kodu Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA; **Paxton et al. 2011, 2013, 2015, 2018, 2019**; **Jermyn et al. 2023**), ekstrahując czasy swobodnego spadku materii pod koniec życia gwiazd.

Na tym etapie skupiamy się wyłącznie na gwiazdach pojedynczych aby uzyskać pewne rozeznanie w zagadnieniu. Pamiętać jednak należy, że większość gwiazd znajduje się w układach podwójnych (lub nawet wielokrotnych), w których wzajemne oddziaływania mogą znacząco wpływać na ewolucję gwiazd. Takie układy są znacznie bardziej skomplikowane do sformułowania zarówno pod względem fizycznym, jak i numerycznym. Niemniej jednak zamierzamy wyeksplorować i tę opcję jako następny krok naszych badań.

5 Prezentacja znaczącej działalności naukowej prowadzonej w więcej niż jednej uczelni

Po ukończeniu studiów licencjackich (w 2010 r.), magisterskich (w 2012 r.) i doktorskich (w 2017 r.; Rozdz. 3), podczas których opublikowałem szereg prac badawczych (por. Rozdz. 2.2 Wykazu osiągnięć naukowych), byłem kierownikiem grantu Opus NCN (por. Rozdz. 5 Wykazu osiągnięć naukowych) pracując na pełen etat na Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie (Rozdz. 2). W tym czasie opublikowałem szereg prac badaw-

czych (por. Rozdz. 2.1 Wykazu osiągnięć naukowych), w tym przedstawione jako moje osiągnięcie habilitacyjne (Rozdz. 4).

Od dwóch lat pracuję na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu (Rozdz. 2); w tym czasie opublikowałem artykuł naukowy (Tugay & Tarnopolski, 2023). Obecnie jestem kierownikiem grantu Sonata NCN (Rozdz. 7) i kieruję małą grupą badawczą składającą się z postdoca i doktorantki (Rozdz. 8). Wykazałem się zatem znaczącą aktywnością naukową w więcej niż jednej uczelni.

6 Nauczanie

6.1 Kursy akademickie

- 2023/2024: **prowadzący** kurs *Matematyczne Metody Astronomii 2* (30 godz., semestr letni) dla studentów 3. roku studiów astronomii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Polska
- 2022–2024: **prowadzący** kurs *Wprowadzenie do teorii chaosu* (45 godz., semestr zimowy), Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Polska
- 2020/2021: **prowadzący** kurs *Introduction to theory of chaos: the most ubiquitous phenomenon in nature* (15 godz., jęz. ang.) dla doktorantów programu [Kartezjusz](#), Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska
- 2012–2016: **ćwiczenia** do kursu *Algebra z geometrią* (45 godz.) dla studentów 1. roku studiów astronomii, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska
- 2013/2014: **ćwiczenia** do kursu *Zajęcia wyrównacze z fizyki* (15 godz.) dla studentów 1. roku studiów astronomii, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska
- 2012–2015: **ćwiczenia** do kursu *Matematyczne Metody Fizyki i Astrofizyki* (30 godz.) dla studentów 2. roku studiów astronomii, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska

6.2 Mentoring

- 2023–teraz — **promotor pomocniczy** pracy doktorskiej mgr Klaudii Kowalczyk pt. *Constraining blazar variability via spectral energy distribution modeling*, Instytut Astronomii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Polska
- 2022/2023: **promotor** pracy magisterskiej lic. Klaudii Kowalczyk pt. *Differencing between quiescent and flaring states of blazars using threshold autoregressive models*, obronionej 14.09.2023 r., Instytut Astronomii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Polska

-
- lipiec 2019 oraz lipiec 2020: **opiekun** stażów *International Summer Student Internship for exceptional foreign students*, organizowanych przez Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, Polska.

Wynikiem stażu roku 2019 było opublikowanie artykułu naukowego ([Ostapenko et al., 2021](#)).

7 Osiągnięcia organizacyjne

- *Określenie mechanizmów fizycznych rządzących zmiennością blazarów*, Narodowe Centrum Nauki, Polska, SONATA, grant nr [2021/43/D/ST9/01153](#), okres: 10/2022–10/2025, rola: **kierownik projektu**, osoby zatrudnione z grantu: 2 (jeden postdoc i jeden student), fundusze: 1 117 770 PLN

Jako kierownik grantu zatrudniam postdoca (na pełen etat), Kazumę Ishio, oraz jestem promotorem pomocniczym doktorantki Klaudii Kowalczyk. Współpracujemy z badaczami z Uniwersytetu Łódzkiego w Polsce, North-West University w Potchefstroom w RPA oraz University of Toronto w Kanadzie. W naszej pracy skupiamy się na badaniu zmienności blazarów przy pomocy modelowania w domenach czasowej i energetycznej (Rozdz. 8).

- **Członek komitetu programowego** konferencji: [8. \(27–30 czerwca 2022 r.\)](#) oraz [9. \(12–14 lipca 2023 r.\)](#) *International conference on Time Series and Forecasting*, Gran Canaria, Hiszpania
- **Edytor gościnny** wydania specjalnego *Gamma-Ray Bursts: Observational and Theoretical Prospects in the Era of Multi-Messenger Astronomy* w czasopiśmie *Universe* (EISSN: 2218-1997)
- Konferencja *Astrophysics and Cosmology. Cracow 2013*, 17–18 maja 2013 r., Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska, **lokalny komitet organizacyjny**

8 Bieżąca działalność naukowa i plany na przyszłość

Obecnie moje zainteresowania naukowe skupiają się na aktywnych jądrach galaktyk (active galactic nuclei, AGN), zwłaszcza na blazarach. Ich wielozakresowa zmienność stanowi okno dla badań ekstremalnej fizyki zachodzącej w miejscu emisji elektromagnetycznej – w dyskach akrecyjnych i/lub w relatywistycznych dżetach. Ponieważ występują na odległościach kosmologicznych, pozwalają ujrzeć obraz wczesnego Wszechświata. Wykazują różnorakie rodzaje wzorców emisji – opóźnienia czasowe między krzywymi

zmian blasku w różnych zakresach fal, widma mocy postaci funkcji potęgowych, QPO, gwałtowne pojaśnienia (flary) itd. W epoce teleskopów kosmicznych (*Fermi-LAT*, *Swift-UVOT/XRT/BAT*, itp.) zachodzi potrzeba wieloczynnikowego, kompleksowego, rygorystycznego podejścia do scharakteryzowania zmienności w celu określenia mechanizmów fizycznych ową zmienność napędzających.

Zasadniczym celem prowadzonych wraz z moją grupą (Rozdz. 7) badań jest określenie własności zmienności blazarów przy użyciu nowoczesnych metod statystycznych. Wybór stosownego modelu fizycznego do opisanie cech długoterminowej zmienności pozostaje przedmiotem debaty, pomimo pewnych przekonujących i ciekawych mechanizmów obecnych w literaturze przedmiotu [np. niestabilność magnetorotacyjna w ramach modelu dysku akrecyjnego z lepkością daje widmo mocy w postaci funkcji potęgowej, [Lyubarskii 1997](#), czy też układy podwójne supermasywnych czarnych dziur przywoływane często w przypadku QPO, [Dey et al. 2018](#)]. Atrakcyjną propozycją jest powiązanie zmienności z sygnaturami orbitalnymi plazmy w dyskach akrecyjnych, co może wpływać na emisję poprzez sprzężenie dysk-dżet. Właściwości trajektorii zgrupowań plazmy wokół czarnych dziur Kerra mogą być związane z QPO, a także indeksami widm mocy w przypadku złamanych funkcji potęgowych ([Rana & Mangalam, 2020](#)). Charakterystyczne skale czasu na których owe przełamania były zaobserwowane u kandydatów na blazary za Wielkim Obłokiem Magellana zostały wykorzystane do oszacowania mas supermasywnych czarnych dziur ([Żywucka et al., 2020](#)) i okazały się być zgodne z wartościami uzyskanymi przy użyciu fundamentalnej płaszczyzny zmienności aktywnych jąder galaktyk ([McHardy et al., 2006](#)).

Celem moich wysiłków naukowych jest gruntowne przetestowanie, zastosowanie i interpretacja różnych modeli stochastycznych i technik obliczeniowych: procesów autoregresyjnych z ruchomą średnią ([Tarnopolski et al., 2020](#)), procesów autoregresyjnych z progiem (Rozdz. 6.2), wielowymiarowych procesów stochastycznych ([Hu & Tak, 2020](#)), wykładników Hursta ([Żywucka et al., 2020](#)), opracowanej przeze mnie płaszczyzny $\mathcal{A} - \mathcal{T}$ ([Tarnopolski, 2016d, 2019d](#)) itd., w szczególności w zastosowaniu do modelowania krzywych zmian blasku blazarów w zakresie gamma, celem uzyskania wglądu we wzorce zmienności i znalezienia informatywnych związków między obserwabłami a parametrami fizycznymi. Analizy w domenach czasowej i częstotliwościowej są uzupełniane modelowaniem widm energetycznych w ramach jedno- lub wielostrefowych modeli leptonowych ([Ghisellini et al., 2010](#)) oraz hadronowych ([Böttcher et al., 2013](#)). Nowatorskie podejścia, takie jak wykładniki Hursta czy płaszczyzna $\mathcal{A} - \mathcal{T}$, już okazały się być użyteczne. Zwłaszcza płaszczyzna $\mathcal{A} - \mathcal{T}$ ma wielki potencjał różnicowania typów blazarów ([Tarnopolski et al., 2020](#); [Żywucka et al., 2020](#)). Użyto jej również w stosunku do rozbłysków gamma [[Hab4](#)], ale jej zastosowanie wykracza poza astronomię: ma potencjał wsparcia diagnostyki padaczki na podstawie zapisów EEG ([Zunino et al., 2017](#)) czy też do odróżniania dynamiki chaotycznej od stochastycznej układów fizycznych ([Zhao & Morales, 2018](#)).

Dla dalszego poszerzenia moich horyzontów naukowych planuję wizytę na University of Southampton w Wielkiej Brytanii, gdzie zamierzam pracować nad poszukiwaniem QPO w ultraintensywnych źródłach rentgenowskich (ultraluminous X-ray sources, ULXs; [King et al. 2023](#); zob. Rozdz. 9).

9 Inne osiągnięcia: nagrody, wyróżnienia i stypendia

- 2023–teraz — **stypendium Ministra Edukacji i Nauki dla wybitnych młodych naukowców**, edycja 18., decyzja nr SMN/18/0357/2022, Polska
- 2023 — **Program mobilności dla pracowników UMK: konkurs dla doświadczonych pracowników naukowych i naukowo-dydaktycznych wyjeżdżających do ośrodków zagranicznych w ramach programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza”**, VII edycja, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, Polska (Rozdz. 8)
- 2019 & 2020 — **nagroda dziekana za wybitne osiągnięcia naukowe**, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska
- 2015/2016 — **stypendium Ministra Edukacji i Nauki dla wybitnych młodych naukowców**, decyzja nr D-0013/2015, Polska
- 2015/2016 — **stypendium przyznane przez Krakowskie Konsorcjum Naukowe „Materia – Energia – Przyszłość”** za wybitne osiągnięcia naukowe, grant nr KNOW/48/SS/PC/2015, Kraków, Polska
- 2013–2015 — **interdyscyplinarne studia doktoranckie „Społeczeństwo – Środowisko – Technologia”**, **stypendium**, projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska
- 2013 — **stypendium przyznane przez Krakowskie Konsorcjum Naukowe „Materia – Energia – Przyszłość”** za wybitne osiągnięcia naukowe, grant nr KNOW/02/SS/TM/2013, Kraków, Polska

10 Bibliografia

- Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. *Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*. 2017a, ApJL, 848, L12, doi: [10.3847/2041-8213/aa91c9](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9)
- Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. *Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A*. 2017b, ApJL, 848, L13, doi: [10.3847/2041-8213/aa920c](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa920c)
- Acuner, Z., & Ryde, F. *Clustering of gamma-ray burst types in the Fermi GBM catalogue: indications of photosphere and synchrotron emissions during the prompt phase*. 2018, MNRAS, 475, 1708, doi: [10.1093/mnras/stx3106](https://doi.org/10.1093/mnras/stx3106)
- Akaike, H. *A New Look at the Statistical Model Identification*. 1974, IEEE Transactions on Automatic Control, 19, 716
- Bagoly, Z., Mészáros, A., Horváth, I., Balázs, L. G., & Mészáros, P. *A Principal Component Analysis of the 3B Gamma-Ray Burst Data*. 1998, ApJ, 498, 342, doi: [10.1086/305530](https://doi.org/10.1086/305530)
- Balastegui, A., Ruiz-Lapuente, P., & Canal, R. *Reclassification of gamma-ray bursts*. 2001, MNRAS, 328, 283, doi: [10.1046/j.1365-8711.2001.04888.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04888.x)
- Balázs, L. G., Bagoly, Z., Horváth, I., Mészáros, A., & Mészáros, P. *On the difference between the short and long gamma-ray bursts*. 2003, A&A, 401, 129, doi: [10.1051/0004-6361:20021863](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021863)
- Band, D., Matteson, J., Ford, L., et al. *BATSE observations of gamma-ray burst spectra. I - Spectral diversity*. 1993, ApJ, 413, 281, doi: [10.1086/172995](https://doi.org/10.1086/172995)
- Bandt, C., & Shiha, F. *Order Patterns in Time Series*. 2007, Journal of Time Series Analysis, 28, 646, doi: [10.1111/j.1467-9892.2007.00528.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9892.2007.00528.x)
- Berry, T., & Sauer, T. *Consistent manifold representation for topological data analysis*. 2019, Foundations of Data Science, 1, 1, doi: [10.3934/fods.2019001](https://doi.org/10.3934/fods.2019001)
- Bhave, A., Kulkarni, S., Desai, S., & Srijith, P. K. *Two dimensional clustering of Gamma-Ray Bursts using durations and hardness*. 2022, Ap&SS, 367, 39, doi: [10.1007/s10509-022-04068-z](https://doi.org/10.1007/s10509-022-04068-z)
- Biesiada, M. *Information theoretic model selection applied to supernovae data*. 2007, JCAP, 2, 003, doi: [10.1088/1475-7516/2007/02/003](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2007/02/003)
- Bonnaire, T., Aghanim, N., Decelle, A., & Douspis, M. *T-ReX: a graph-based filament detection method*. 2020, A&A, 637, A18, doi: [10.1051/0004-6361/201936859](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936859)
- Borgonovo, L., & Björnsson, C.-I. *Statistical Analysis of BATSE Gamma-Ray Bursts: Self-Similarity and the Amati Relation*. 2006, ApJ, 652, 1423, doi: [10.1086/508488](https://doi.org/10.1086/508488)
- Bostancı, Z. F., Kaneko, Y., & Göğüş, E. *Gamma-ray bursts with extended emission observed with BATSE*. 2013, MNRAS, 428, 1623, doi: [10.1093/mnras/sts157](https://doi.org/10.1093/mnras/sts157)
- Böttcher, M., Reimer, A., Sweeney, K., & Prakash, A. *Leptonic and Hadronic Modeling of Fermi-detected Blazars*. 2013, ApJ, 768, 54, doi: [10.1088/0004-637X/768/1/54](https://doi.org/10.1088/0004-637X/768/1/54)
- Bromberg, O., Nakar, E., & Piran, T. *Are Low-luminosity Gamma-Ray Bursts Generated by Relativistic Jets?* 2011, ApJL, 739, L55, doi: [10.1088/2041-8205/739/2/L55](https://doi.org/10.1088/2041-8205/739/2/L55)
- Bromberg, O., Nakar, E., Piran, T., & Sari, R. *Short versus Long and Collapsars versus Non-collapsars: A Quantitative Classification of Gamma-Ray Bursts*. 2013a, ApJ, 764, 179, doi: [10.1088/0004-637X/764/2/179](https://doi.org/10.1088/0004-637X/764/2/179)

-
- Bromberg, O., Nakar, E., Piran, T., & Sari, R. *Short versus Long and Collapsars versus Non-collapsars: A Quantitative Classification of Gamma-Ray Bursts*. 2013b, ApJ, 764, 179, doi: [10.1088/0004-637X/764/2/179](https://doi.org/10.1088/0004-637X/764/2/179)
- Bulla, M., Camisasca, A. E., Guidorzi, C., et al. *GRB 230307A: good match with kilonova models*. 2023, GRB Coordinates Network, 33578, 1
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. *Multimodel inference: Understanding aic and bic in model selection*. 2004, Sociological Methods & Research, 33, 261, doi: [10.1177/0049124104268644](https://doi.org/10.1177/0049124104268644)
- Bystřický, P., Mészáros, A., & Řípa, J. 2012, in Proceedings of the 21st Annual Conference of Doctoral Students - WDS 2012, Prague, 29th May - 1st June, 2012, Edited by Jana Šafránková and Jiří Pavlů, MATFYZPRESS, Prague, Part III - Physics, f-1
- Campana, R., Massaro, E., Gasparrini, D., Cutini, S., & Tramacere, A. *A Minimal Spanning Tree algorithm for source detection in γ -ray images*. 2008, MNRAS, 383, 1166, doi: [10.1111/j.1365-2966.2007.12616.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12616.x)
- Cano, Z., Wang, S.-W., Dai, Z.-G., & Wu, X.-F. *The Observer's Guide to the Gamma-Ray Burst Supernova Connection*. 2017, Advances in Astronomy, 2017, 8929054
- Cenko, S. B., Butler, N. R., Ofek, E. O., et al. *Unveiling the Origin of Grb 090709A: Lack of Periodicity in a Reddened Cosmological Long-Duration Gamma-Ray Burst*. 2010, AJ, 140, 224, doi: [10.1088/0004-6256/140/1/224](https://doi.org/10.1088/0004-6256/140/1/224)
- Chattopadhyay, S., & Maitra, R. *Gaussian-mixture-model-based cluster analysis finds five kinds of gamma-ray bursts in the BATSE catalogue*. 2017, MNRAS, 469, 3374, doi: [10.1093/mnras/stx1024](https://doi.org/10.1093/mnras/stx1024)
- Chattopadhyay, S., & Maitra, R. *Multivariate t-mixture-model-based cluster analysis of BATSE catalogue establishes importance of all observed parameters, confirms five distinct ellipsoidal sub-populations of gamma-ray bursts*. 2018, MNRAS, 481, 3196, doi: [10.1093/mnras/sty1940](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1940)
- Chattopadhyay, T., Misra, R., Chattopadhyay, A. K., & Naskar, M. *Statistical Evidence for Three Classes of Gamma-Ray Bursts*. 2007, ApJ, 667, 1017, doi: [10.1086/520317](https://doi.org/10.1086/520317)
- Chen, J.-M., Zhu, K.-R., Peng, Z.-Y., & Zhang, L. *Unsupervised machine learning classification of Fermi gamma-ray bursts using spectral parameters*. 2024, MNRAS, 527, 4272, doi: [10.1093/mnras/stad3407](https://doi.org/10.1093/mnras/stad3407)
- de Luca, A., Esposito, P., Israel, G. L., et al. *XMM-Newton and Swift observations prove GRB090709A to be a distant, standard, long GRB*. 2010, MNRAS, 402, 1870, doi: [10.1111/j.1365-2966.2009.16012.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16012.x)
- de Ugarte Postigo, A., Horváth, I., Veres, P., et al. *Searching for differences in Swift's intermediate GRBs*. 2011, A&A, 525, A109, doi: [10.1051/0004-6361/201015261](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015261)
- Deng, Q., Zhang, Z. B., Li, X. J., et al. *Reclassifying Swift Gamma-Ray Bursts with Diverse Duration Distributions*. 2022, ApJ, 940, 5, doi: [10.3847/1538-4357/ac9590](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac9590)
- Dey, L., Valtonen, M. J., Gopakumar, A., et al. *Authenticating the Presence of a Relativistic Massive Black Hole Binary in OJ 287 Using Its General Relativity Centenary Flare: Improved Orbital Parameters*. 2018, ApJ, 866, 11, doi: [10.3847/1538-4357/aadd95](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aadd95)
- Dichiara, S., Guidorzi, C., Amati, L., Frontera, F., & Margutti, R. *Correlation between peak energy and Fourier power density spectrum slope in gamma-ray bursts*. 2016, A&A, 589, A97, doi: [10.1051/0004-6361/201527635](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527635)

-
- Dong, Y.-Z., Gu, W.-M., Liu, T., & Wang, J. *A black hole-white dwarf compact binary model for long gamma-ray bursts without supernova association*. 2018, MNRAS, 475, L101, doi: [10.1093/mnrasl/sly014](https://doi.org/10.1093/mnrasl/sly014)
- Dunteman, G. H. 1989, *Quantitative Applications in the Social Sciences: Principal components analysis*. (Newbury Park, CA: SAGE Publications, Inc.), doi: [10.4135/9781412985475](https://doi.org/10.4135/9781412985475)
- Eichler, D., Livio, M., Piran, T., & Schramm, D. N. *Nucleosynthesis, neutrino bursts and gamma-rays from coalescing neutron stars*. 1989, Nature, 340, 126, doi: [10.1038/340126a0](https://doi.org/10.1038/340126a0)
- Farrah, D., Connolly, B., Connolly, N., et al. *An Evolutionary Paradigm for Dusty Active Galaxies at Low Redshift*. 2009, ApJ, 700, 395, doi: [10.1088/0004-637X/700/1/395](https://doi.org/10.1088/0004-637X/700/1/395)
- Filippenko, A. V. *Optical Spectra of Supernovae*. 1997, ARA&A, 35, 309, doi: [10.1146/annurev.astro.35.1.309](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.35.1.309)
- Fortunato, S. *Community detection in graphs*. 2010, PhR, 486, 75, doi: [10.1016/j.physrep.2009.11.002](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2009.11.002)
- Frontera, F., Guidorzi, C., Montanari, E., et al. *The Gamma-Ray Burst Catalog Obtained with the Gamma-Ray Burst Monitor Aboard BeppoSAX*. 2009, ApJS, 180, 192, doi: [10.1088/0067-0049/180/1/192](https://doi.org/10.1088/0067-0049/180/1/192)
- Fynbo, J. P. U., Watson, D., Thöne, C. C., et al. *No supernovae associated with two long-duration γ -ray bursts*. 2006, Nature, 444, 1047, doi: [10.1038/nature05375](https://doi.org/10.1038/nature05375)
- Galama, T. J., Vreeswijk, P. M., van Paradijs, J., et al. *An unusual supernova in the error box of the γ -ray burst of 25 April 1998*. 1998, Nature, 395, 670, doi: [10.1038/27150](https://doi.org/10.1038/27150)
- Gendre, B., Stratta, G., Atteia, J. L., et al. *The Ultra-long Gamma-Ray Burst 111209A: The Collapse of a Blue Supergiant?* 2013, ApJ, 766, 30, doi: [10.1088/0004-637X/766/1/30](https://doi.org/10.1088/0004-637X/766/1/30)
- Ghisellini, G., Tavecchio, F., Foschini, L., et al. *General physical properties of bright Fermi blazars*. 2010, MNRAS, 402, 497, doi: [10.1111/j.1365-2966.2009.15898.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15898.x)
- Goldstein, A., Veres, P., Burns, E., et al. *An Ordinary Short Gamma-Ray Burst with Extraordinary Implications: Fermi-GBM Detection of GRB 170817A*. 2017, ApJL, 848, L14, doi: [10.3847/2041-8213/aa8f41](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa8f41)
- Gruber, D., Goldstein, A., Weller von Ahlefeld, V., et al. *The Fermi GBM Gamma-Ray Burst Spectral Catalog: Four Years of Data*. 2014, ApJS, 211, 12, doi: [10.1088/0067-0049/211/1/12](https://doi.org/10.1088/0067-0049/211/1/12)
- Grupe, D., Nousek, J. A., Veres, P., Zhang, B.-B., & Gehrels, N. *Evidence for New Relations between Gamma-Ray Burst Prompt and X-Ray Afterglow Emission from 9 Years of Swift*. 2013, ApJS, 209, 20, doi: [10.1088/0067-0049/209/2/20](https://doi.org/10.1088/0067-0049/209/2/20)
- Hakkila, J., Giblin, T. W., Roiger, R. J., et al. *How Sample Completeness Affects Gamma-Ray Burst Classification*. 2003, ApJ, 582, 320, doi: [10.1086/344568](https://doi.org/10.1086/344568)
- Hakkila, J., Giblin, T. W., Roiger, R. J., et al. *Subgroups of Gamma-Ray Bursts*. 2004, Baltic Astronomy, 13, 211
- Hakkila, J., Haglin, D. J., Pendleton, G. N., et al. *Gamma-Ray Burst Class Properties*. 2000, ApJ, 538, 165, doi: [10.1086/309107](https://doi.org/10.1086/309107)
- Hjorth, J., Sollerman, J., Møller, P., et al. *A very energetic supernova associated with the γ -ray burst of 29 March 2003*. 2003, Nature, 423, 847, doi: [10.1038/nature01750](https://doi.org/10.1038/nature01750)
- Horváth, I. *A Third Class of Gamma-Ray Bursts?* 1998, ApJ, 508, 757, doi: [10.1086/306416](https://doi.org/10.1086/306416)

-
- Horváth, I. *A further study of the BATSE Gamma-Ray Burst duration distribution*. 2002, A&A, 392, 791, doi: [10.1051/0004-6361:20020808](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020808)
- Horváth, I. *Classification of BeppoSAX's gamma-ray bursts*. 2009, Ap&SS, 323, 83, doi: [10.1007/s10509-009-0039-1](https://doi.org/10.1007/s10509-009-0039-1)
- Horváth, I., Bagoly, Z., Balázs, L. G., et al. *Detailed Classification of Swift's Gamma-ray Bursts*. 2010, ApJ, 713, 552, doi: [10.1088/0004-637X/713/1/552](https://doi.org/10.1088/0004-637X/713/1/552)
- Horváth, I., Balázs, L. G., Bagoly, Z., Ryde, F., & Mészáros, A. *A new definition of the intermediate group of gamma-ray bursts*. 2006, A&A, 447, 23, doi: [10.1051/0004-6361:20041129](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041129)
- Horváth, I., Balázs, L. G., Bagoly, Z., & Veres, P. *Classification of Swift's gamma-ray bursts*. 2008, A&A, 489, L1, doi: [10.1051/0004-6361:200810269](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810269)
- Horváth, I., Balázs, L. G., Hakkila, J., Bagoly, Z., & Preece, R. D. 2012, in *Gamma-Ray Bursts 2012 Conference (GRB 2012)*, 46
- Horváth, I., Tóth, B. G., Hakkila, J., et al. *Classifying GRB 170817A/GW170817 in a Fermi duration-hardness plane*. 2018, Ap&SS, 363, 53, doi: [10.1007/s10509-018-3274-5](https://doi.org/10.1007/s10509-018-3274-5)
- Howell, E. J., Coward, D. M., Stratta, G., Gendre, B., & Zhou, H. *Constraining the rate and luminosity function of Swift gamma-ray bursts*. 2014, MNRAS, 444, 15, doi: [10.1093/mnras/stu1403](https://doi.org/10.1093/mnras/stu1403)
- Hu, Z., & Tak, H. *Modeling Stochastic Variability in Multiband Time-series Data*. 2020, AJ, 160, 265, doi: [10.3847/1538-3881/abc1e2](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abc1e2)
- Huang, J., Zhu, Q., Yang, L., & Feng, J. *A non-parameter outlier detection algorithm based on natural neighbor*. 2016, Knowledge-Based Systems, 92, 71, doi: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.10.014>
- Huja, D., Mészáros, A., & Rípa, J. *A comparison of the gamma-ray bursts detected by BATSE and Swift*. 2009a, A&A, 504, 67, doi: [10.1051/0004-6361/200809802](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200809802)
- Huja, D., Mészáros, A., & Rípa, J. *A comparison of the gamma-ray bursts detected by BATSE and Swift*. 2009b, A&A, 504, 67, doi: [10.1051/0004-6361/200809802](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200809802)
- Hurley, K., Rowlinson, A., Bellm, E., et al. *A new analysis of the short-duration, hard-spectrum GRB 051103, a possible extragalactic soft gamma repeater giant flare*. 2010, MNRAS, 403, 342, doi: [10.1111/j.1365-2966.2009.16118.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16118.x)
- Hurvich, C. M., & Tsai, C.-L. *Regression and time series model selection in small samples*. 1989, Biometrika, 76, 297
- Iwakiri, W., Ohno, M., Kamae, T., et al. 2010, in *American Institute of Physics Conference Series*, Vol. 1279, American Institute of Physics Conference Series, ed. N. Kawai & S. Nagataki, 89–92, doi: [10.1063/1.3509358](https://doi.org/10.1063/1.3509358)
- Jakobsson, P., Björnsson, G., Fynbo, J. P. U., et al. *Ly- α and ultraviolet emission from high-redshift gamma-ray burst hosts: to what extent do gamma-ray bursts trace star formation?* 2005, MNRAS, 362, 245, doi: [10.1111/j.1365-2966.2005.09289.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09289.x)
- Jermyn, A. S., Bauer, E. B., Schwab, J., et al. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Time-dependent Convection, Energy Conservation, Automatic Differentiation, and Infrastructure*. 2023, ApJS, 265, 15, doi: [10.3847/1538-4365/acae8d](https://doi.org/10.3847/1538-4365/acae8d)

-
- Jespersen, C. K., Severin, J. B., Steinhardt, C. L., et al. *An Unambiguous Separation of Gamma-Ray Bursts into Two Classes from Prompt Emission Alone*. 2020, ApJL, 896, L20, doi: [10.3847/2041-8213/ab964d](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab964d)
- Kagawa, Y., Yonetoku, D., Sawano, T., et al. *Exponentially Decaying Extended Emissions Following Short Gamma-Ray Bursts with a Possible LuminosityE-folding Time Correlation*. 2019, ApJ, 877, 147, doi: [10.3847/1538-4357/ab1bd6](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1bd6)
- Kaneko, Y., Bostancı, Z. F., Göğüş, E., & Lin, L. *Short gamma-ray bursts with extended emission observed with Swift/BAT and Fermi/GBM*. 2015, MNRAS, 452, 824, doi: [10.1093/mnras/stv1286](https://doi.org/10.1093/mnras/stv1286)
- Kann, D. A., Klose, S., Zhang, B., et al. *The Afterglows of Swift-era Gamma-Ray Bursts. II. Type I GRB versus Type II GRB Optical Afterglows*. 2011, ApJ, 734, 96, doi: [10.1088/0004-637X/734/2/96](https://doi.org/10.1088/0004-637X/734/2/96)
- Kass, R. E., & Raftery, A. E. *Bayes Factors*. 1995, J. Am. Stat. Assoc., 90, 773
- Kendall, M. G. *Studies in the History of Probability and Statistics. XXVI: The Work of Ernst Abbe*. 1971, Biometrika, 58, 369, doi: [10.2307/2334525](https://doi.org/10.2307/2334525)
- King, A., Lasota, J.-P., & Middleton, M. *Ultraluminous X-ray sources*. 2023, NewAR, 96, 101672, doi: [10.1016/j.newar.2022.101672](https://doi.org/10.1016/j.newar.2022.101672)
- King, A., Olsson, E., & Davies, M. B. *A new type of long gamma-ray burst*. 2007, MNRAS, 374, L34, doi: [10.1111/j.1745-3933.2006.00259.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2006.00259.x)
- Klebesadel, R. W., Strong, I. B., & Olson, R. A. *Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin*. 1973, ApJL, 182, L85, doi: [10.1086/181225](https://doi.org/10.1086/181225)
- Koen, C., & Bere, A. *On multiple classes of gamma-ray bursts, as deduced from autocorrelation functions or bivariate duration/hardness ratio distributions*. 2012, MNRAS, 420, 405, doi: [10.1111/j.1365-2966.2011.20045.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.20045.x)
- Kohonen, T. *Self-organized formation of topologically correct feature maps*. 1982, Biological Cybernetics, 43, 59, doi: [10.1007/BF00337288](https://doi.org/10.1007/BF00337288)
- Koshut, T. M., Paciesas, W. S., Kouveliotou, C., et al. *Systematic Effects on Duration Measurements of Gamma-Ray Bursts*. 1996, ApJ, 463, 570, doi: [10.1086/177272](https://doi.org/10.1086/177272)
- Kouveliotou, C., Koshut, T., Briggs, M. S., et al. 1996, in American Institute of Physics Conference Series, Vol. 384, American Institute of Physics Conference Series, ed. C. Kouveliotou, M. F. Briggs, & G. J. Fishman, 42–46, doi: [10.1063/1.51695](https://doi.org/10.1063/1.51695)
- Kouveliotou, C., Meegan, C. A., Fishman, G. J., et al. *Identification of two classes of gamma-ray bursts*. 1993, ApJL, 413, L101, doi: [10.1086/186969](https://doi.org/10.1086/186969)
- Kulkarni, S., & Desai, S. *Classification of gamma-ray burst durations using robust model-comparison techniques*. 2017, Ap&SS, 362, 70, doi: [10.1007/s10509-017-3047-6](https://doi.org/10.1007/s10509-017-3047-6)
- Kwong, H. S., & Nadarajah, S. *A note on ‘Analysis of gamma-ray burst duration distribution using mixtures of skewed distributions’*. 2018, MNRAS, 473, 625, doi: [10.1093/mnras/stx2373](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2373)
- Lazzati, D., Ghirlanda, G., & Ghisellini, G. *Soft gamma-ray repeater giant flares in the BATSE short gamma-ray burst catalogue: constraints from spectroscopy*. 2005, MNRAS, 362, L8, doi: [10.1111/j.1745-3933.2005.00062.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2005.00062.x)
- Levan, A. J., Tanvir, N. R., Starling, R. L. C., et al. *A New Population of Ultra-long Duration Gamma-Ray Bursts*. 2014, ApJ, 781, 13, doi: [10.1088/0004-637X/781/1/13](https://doi.org/10.1088/0004-637X/781/1/13)

-
- Li, L.-T., Xiong, Z.-Y., Dai, Q.-Z., et al. *A novel graph-based clustering method using noise cutting*. 2020, Information Systems, 91, 101504, doi: <https://doi.org/10.1016/j.is.2020.101504>
- Li, Y., Zhang, B., & Lü, H.-J. *A Comparative Study of Long and Short GRBs. I. Overlapping Properties*. 2016, ApJS, 227, 7, doi: [10.3847/0067-0049/227/1/7](https://doi.org/10.3847/0067-0049/227/1/7)
- Li, Y.-F., Lu, L.-H., & Hung, Y.-C. 2019, in Intelligent Computing, ed. K. Arai, S. Kapoor, & R. Bhatia (Cham: Springer International Publishing), 442–454
- Liddle, A. R. *Information criteria for astrophysical model selection*. 2007, MNRAS, 377, L74, doi: [10.1111/j.1745-3933.2007.00306.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2007.00306.x)
- Liu, Z., & Barahona, M. *Graph-based data clustering via multiscale community detection*. 2020, Appl Netw Sci, 5, 1, doi: [10.1007/s41109-019-0248-7](https://doi.org/10.1007/s41109-019-0248-7)
- Lyubarskii, Y. E. *Flicker noise in accretion discs*. 1997, MNRAS, 292, 679, doi: [10.1093/mnras/292.3.679](https://doi.org/10.1093/mnras/292.3.679)
- MacFadyen, A. I., & Woosley, S. E. *Collapsars: Gamma-Ray Bursts and Explosions in “Failed Supernovae”*. 1999, ApJ, 524, 262, doi: [10.1086/307790](https://doi.org/10.1086/307790)
- MacLachlan, G. A., Shenoy, A., Sonbas, E., et al. *The Hurst exponent of Fermi gamma-ray bursts*. 2013, MNRAS, 436, 2907, doi: [10.1093/mnras/stt1701](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1701)
- Maritz, J., Maritz, E., & Meintjes, P. 2017, in The Proceedings of SAIP2016, the 61st Annual Conference of the South African Institute of Physics, edited by Dr. Steve Peterson and Dr. Sahal Yacoob (UCT/2016), 243–248. <http://events.saip.org.za/internalPage.py?pageId=10&confId=86>
- Mazets, E. P., Golenetskii, S. V., Ilinskii, V. N., et al. *Catalog of cosmic gamma-ray bursts from the KONUS experiment data. I*. 1981, Ap&SS, 80, 3, doi: [10.1007/BF00649140](https://doi.org/10.1007/BF00649140)
- McBreen, B., Hurley, K. J., Long, R., & Metcalfe, L. *Lognormal Distributions in Gamma-Ray Bursts and Cosmic Lightning*. 1994, MNRAS, 271, 662, doi: [10.1093/mnras/271.3.662](https://doi.org/10.1093/mnras/271.3.662)
- McHardy, I. M., Koerding, E., Knigge, C., Uttley, P., & Fender, R. P. *Active galactic nuclei as scaled-up Galactic black holes*. 2006, Nature, 444, 730, doi: [10.1038/nature05389](https://doi.org/10.1038/nature05389)
- Meegan, C. A., Fishman, G. J., Wilson, R. B., et al. *Spatial distribution of gamma-ray bursts observed by BATSE*. 1992, Nature, 355, 143, doi: [10.1038/355143a0](https://doi.org/10.1038/355143a0)
- Meilä, M. *Comparing clusterings—an information based distance*. 2007, Journal of Multivariate Analysis, 98, 873, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmva.2006.11.013>
- Metzger, M. R., Djorgovski, S. G., Kulkarni, S. R., et al. *Spectral constraints on the redshift of the optical counterpart to the γ -ray burst of 8 May 1997*. 1997, Nature, 387, 878, doi: [10.1038/43132](https://doi.org/10.1038/43132)
- Minaev, P. Y., & Pozanenko, A. S. *The $E_{p,I}$ - E_{iso} correlation: type I gamma-ray bursts and the new classification method*. 2020, MNRAS, 492, 1919, doi: [10.1093/mnras/stz3611](https://doi.org/10.1093/mnras/stz3611)
- Mowlavi, N. *Searching transients in large-scale surveys. A method based on the Abbe value*. 2014, Astronomy & Astrophysics, 568, A78, doi: [10.1051/0004-6361/201322648](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322648)
- Mukherjee, S., Feigelson, E. D., Jogesh Babu, G., et al. *Three Types of Gamma-Ray Bursts*. 1998, ApJ, 508, 314, doi: [10.1086/306386](https://doi.org/10.1086/306386)
- Nakar, E. *Short-hard gamma-ray bursts*. 2007, PhR, 442, 166, doi: [10.1016/j.physrep.2007.02.005](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2007.02.005)

-
- Narayan, R., Paczynski, B., & Piran, T. *Gamma-ray bursts as the death throes of massive binary stars*. 1992, ApJL, 395, L83, doi: [10.1086/186493](https://doi.org/10.1086/186493)
- Narayana Bhat, P., Meegan, C. A., von Kienlin, A., et al. *The Third Fermi GBM Gamma-Ray Burst Catalog: The First Six Years*. 2016, ApJS, 223, 28, doi: [10.3847/0067-0049/223/2/28](https://doi.org/10.3847/0067-0049/223/2/28)
- Norris, J. P., & Bonnell, J. T. *Short Gamma-Ray Bursts with Extended Emission*. 2006, ApJ, 643, 266, doi: [10.1086/502796](https://doi.org/10.1086/502796)
- Ofek, E. O. *Soft Gamma-Ray Repeaters in Nearby Galaxies: Rate, Luminosity Function, and Fraction among Short Gamma-Ray Bursts*. 2007, ApJ, 659, 339, doi: [10.1086/511147](https://doi.org/10.1086/511147)
- Ofek, E. O., Munro, M., Quimby, R., et al. *GRB 070201: A Possible Soft Gamma-Ray Repeater in M31*. 2008, ApJ, 681, 1464, doi: [10.1086/587686](https://doi.org/10.1086/587686)
- Ohmori, N., Yamaoka, K., Ohno, M., et al. *Suzaku Wide-band All-sky Monitor measurements of duration distributions of gamma-ray bursts*. 2016, PASJ, 68, S30, doi: [10.1093/pasj/psw009](https://doi.org/10.1093/pasj/psw009)
- Ostapenko, O., **Tarnopolski, M.**, Żywucka, N., & Pascual-Granado, J. *Searching for signatures of chaos in γ -ray light curves of selected Fermi-LAT blazars*. 2021, MNRAS, 502, 2750, doi: [10.1093/mnras/stab146](https://doi.org/10.1093/mnras/stab146)
- Paciesas, W. S., Meegan, C. A., Pendleton, G. N., et al. *The Fourth BATSE Gamma-Ray Burst Catalog (Revised)*. 1999, ApJS, 122, 465, doi: [10.1086/313224](https://doi.org/10.1086/313224)
- Paczynski, B. *Cosmological gamma-ray bursts*. 1991, AcA, 41, 257
- Paczyński, B. *Are Gamma-Ray Bursts in Star-Forming Regions?* 1998, ApJL, 494, L45, doi: [10.1086/311148](https://doi.org/10.1086/311148)
- Paul, D. *Modelling the luminosity function of long gamma-ray bursts using Swift and Fermi*. 2018, MNRAS, 473, 3385, doi: [10.1093/mnras/stx2511](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2511)
- Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., et al. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA)*. 2011, ApJS, 192, 3, doi: [10.1088/0067-0049/192/1/3](https://doi.org/10.1088/0067-0049/192/1/3)
- Paxton, B., Cantiello, M., Arras, P., et al. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Planets, Oscillations, Rotation, and Massive Stars*. 2013, ApJS, 208, 4, doi: [10.1088/0067-0049/208/1/4](https://doi.org/10.1088/0067-0049/208/1/4)
- Paxton, B., Marchant, P., Schwab, J., et al. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Binaries, Pulsations, and Explosions*. 2015, ApJS, 220, 15, doi: [10.1088/0067-0049/220/1/15](https://doi.org/10.1088/0067-0049/220/1/15)
- Paxton, B., Schwab, J., Bauer, E. B., et al. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Convective Boundaries, Element Diffusion, and Massive Star Explosions*. 2018, ApJS, 234, 34, doi: [10.3847/1538-4365/aaa5a8](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aaa5a8)
- Paxton, B., Smolec, R., Schwab, J., et al. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Pulsating Variable Stars, Rotation, Convective Boundaries, and Energy Conservation*. 2019, ApJS, 243, 10, doi: [10.3847/1538-4365/ab2241](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab2241)
- Pendleton, G. N., Paciasas, W. S., Briggs, M. S., et al. *The Identification of Two Different Spectral Types of Pulses in Gamma-Ray Bursts*. 1997, ApJ, 489, 175, doi: [10.1086/304763](https://doi.org/10.1086/304763)
- Perna, R., Lazzati, D., & Cantiello, M. *Ultra-long Gamma-Ray Bursts from the Collapse of Blue Supergiant Stars: An End-to-end Simulation*. 2018, ApJ, 859, 48, doi: [10.3847/1538-4357/aabcc1](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabcc1)

-
- Prates, M., Lachos, V., & Cabral, C. B. *mixsmsn: Fitting finite mixture of scale mixture of skew-normal distributions*. 2013, Journal of Statistical Software, Articles, 54, 1, doi: [10.18637/jss.v054.i12](https://doi.org/10.18637/jss.v054.i12)
- Rajaniemi, H. J., & Mähönen, P. *Classifying Gamma-Ray Bursts using Self-organizing Maps*. 2002, ApJ, 566, 202, doi: [10.1086/337959](https://doi.org/10.1086/337959)
- Rana, P., & Mangalam, A. *A Relativistic Orbit Model for Temporal Properties of AGN*. 2020, Galaxies, 8, 67, doi: [10.3390/galaxies8030067](https://doi.org/10.3390/galaxies8030067)
- Rodriguez, A., & Laio, A. *Clustering by fast search and find of density peaks*. 2014, Science, 344, 1492, doi: [10.1126/science.1242072](https://doi.org/10.1126/science.1242072)
- Roiger, R. J., Hakkila, J., Haglin, D. J., Pendleton, G. N., & Mallozzi, R. S. 2000, in American Institute of Physics Conference Series, Vol. 526, Gamma-ray Bursts, 5th Huntsville Symposium, ed. R. M. Kippen, R. S. Mallozzi, & G. J. Fishman, 38–42, doi: [10.1063/1.1361503](https://doi.org/10.1063/1.1361503)
- Ruffini, R., Rueda, J. A., Muccino, M., et al. *On the Classification of GRBs and Their Occurrence Rates*. 2016, ApJ, 832, 136, doi: [10.3847/0004-637X/832/2/136](https://doi.org/10.3847/0004-637X/832/2/136)
- Ruffini, R., Wang, Y., Aimuratov, Y., et al. *Early X-Ray Flares in GRBs*. 2018, ApJ, 852, 53, doi: [10.3847/1538-4357/aa9e8b](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa9e8b)
- Salmon, L., Hanlon, L., & Martin-Carrillo, A. *Two Dimensional Clustering of Swift/BAT and Fermi/GBM Gamma-ray Bursts*. 2022a, Galaxies, 10, 77, doi: [10.3390/galaxies10040077](https://doi.org/10.3390/galaxies10040077)
- Salmon, L., Hanlon, L., & Martin-Carrillo, A. *Two Classes of Gamma-ray Bursts Distinguished within the First Second of Their Prompt Emission*. 2022b, Galaxies, 10, 78, doi: [10.3390/galaxies10040078](https://doi.org/10.3390/galaxies10040078)
- Salpeter, E. E. *The Luminosity Function and Stellar Evolution*. 1955, ApJ, 121, 161, doi: [10.1086/145971](https://doi.org/10.1086/145971)
- Savchenko, V., Ferrigno, C., Kuulkers, E., et al. *INTEGRAL Detection of the First Prompt Gamma-Ray Signal Coincident with the Gravitational-wave Event GW170817*. 2017, ApJL, 848, L15, doi: [10.3847/2041-8213/aa8f94](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa8f94)
- Schilling, M. F., Watkins, A. E., & Watkins, W. *Is human height bimodal?* 2002, Am. Stat., 56, 223, doi: [10.1198/00031300265](https://doi.org/10.1198/00031300265)
- Schulze, S., Chapman, R., Hjorth, J., et al. *The Optically Unbiased GRB Host (TOUGH) Survey. VII. The Host Galaxy Luminosity Function: Probing the Relationship between GRBs and Star Formation to Redshift ~ 6* . 2015, ApJ, 808, 73, doi: [10.1088/0004-637X/808/1/73](https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/73)
- Schwarz, G. *Estimating the dimension of a model*. 1978, Ann. Statist., 6, 461, doi: [10.1214/aos/1176344136](https://doi.org/10.1214/aos/1176344136)
- Sharifpanah, N., Chinipardaz, R., & Parham, G. A. *A new class of weighted bimodal distribution with application to gamma-ray burst duration data*. 2020, Journal of Applied Statistics, 47, 2785, doi: [10.1080/02664763.2020.1815669](https://doi.org/10.1080/02664763.2020.1815669)
- Sieranoja, S., & Fränti, P. *Fast and general density peaks clustering*. 2019, Pattern Recognition Letters, 128, 551, doi: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2019.10.019>
- Stanek, K. Z., Matheson, T., Garnavich, P. M., et al. *Spectroscopic Discovery of the Supernova 2003dh Associated with GRB 030329*. 2003, ApJL, 591, L17, doi: [10.1086/376976](https://doi.org/10.1086/376976)
- Tanvir, N. R., Levan, A. J., Fruchter, A. S., et al. *A ‘kilonova’ associated with the short-duration γ -ray burst GRB 130603B*. 2013, Nature, 500, 547, doi: [10.1038/nature12505](https://doi.org/10.1038/nature12505)

-
- Tarnopolski, M.** *On the limit between short and long GRBs.* 2015a, *Ap&SS*, 359, 20, doi: [10.1007/s10509-015-2473-6](https://doi.org/10.1007/s10509-015-2473-6)
- Tarnopolski, M.** *Analysis of Fermi gamma-ray burst duration distribution.* 2015b, *A&A*, 581, A29, doi: [10.1051/0004-6361/201526415](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526415)
- Tarnopolski, M.** *Distinguishing short and long Fermi gamma-ray bursts.* 2015c, *MNRAS*, 454, 1132, doi: [10.1093/mnras/stv2061](https://doi.org/10.1093/mnras/stv2061)
- Tarnopolski, M.** *Analysis of the observed and intrinsic durations of Swift/BAT gamma-ray bursts.* 2016a, *NewA*, 46, 54, doi: [10.1016/j.newast.2015.12.006](https://doi.org/10.1016/j.newast.2015.12.006)
- Tarnopolski, M.** *Analysis of gamma-ray burst duration distribution using mixtures of skewed distributions.* 2016b, *MNRAS*, 458, 2024, doi: [10.1093/mnras/stw429](https://doi.org/10.1093/mnras/stw429)
- Tarnopolski, M.** *Analysis of the observed and intrinsic durations of gamma-ray bursts with known redshift.* 2016c, *Ap&SS*, 361, 125, doi: [10.1007/s10509-016-2687-2](https://doi.org/10.1007/s10509-016-2687-2)
- Tarnopolski, M.** *On the relationship between the Hurst exponent, the ratio of the mean square successive difference to the variance, and the number of turning points.* 2016d, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 461, 662, doi: [10.1016/j.physa.2016.06.004](https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.06.004)
- Tarnopolski, M.** *Testing the anisotropy in the angular distribution of Fermi/GBM gamma-ray bursts.* 2017, *MNRAS*, 472, 4819, doi: [10.1093/mnras/stx2356](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2356)
- Tarnopolski, M.** *Analysis of the Duration-Hardness Ratio Plane of Gamma-Ray Bursts Using Skewed Distributions.* 2019a, *ApJ*, 870, 105, doi: [10.3847/1538-4357/aaf1c5](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf1c5) [**Hab1**]
- Tarnopolski, M.** *Multivariate Analysis of BATSE Gamma-Ray Burst Properties Using Skewed Distributions.* 2019b, *ApJ*, 887, 97, doi: [10.3847/1538-4357/ab4fe6](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab4fe6) [**Hab2**]
- Tarnopolski, M.** *Analysis of the duration-hardness ratio plane of gamma-ray bursts with skewed distributions.* 2019c, *MmSAI*, 90, 45. <https://arxiv.org/abs/1907.00355>
- Tarnopolski, M.** *Analytical representation of Gaussian processes in the \mathcal{A} - \mathcal{T} plane.* 2019d, *PhRvE*, 100, 062144, doi: [10.1103/PhysRevE.100.062144](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.100.062144)
- Tarnopolski, M.** *Can the Cosmological Dilation Explain the Skewness in the Gamma-Ray Burst Duration Distribution?* 2020, *ApJ*, 897, 77, doi: [10.3847/1538-4357/ab8eb1](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab8eb1) [**Hab3**]
- Tarnopolski, M.** *Graph-based clustering of gamma-ray bursts.* 2022, *A&A*, 657, A13, doi: [10.1051/0004-6361/202038645](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038645) [**Hab5**]
- Tarnopolski, M., & Marchenko, V.** *A Comprehensive Power Spectral Density Analysis of Astronomical Time Series. II. The Swift/BAT Long Gamma-Ray Bursts.* 2021, *ApJ*, 911, 20, doi: [10.3847/1538-4357/abe5b1](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abe5b1) [**Hab4**]
- Tarnopolski, M., Żywucka, N., Marchenko, V., & Pascual-Granado, J.** *A Comprehensive Power Spectral Density Analysis of Astronomical Time Series. I. The Fermi-LAT Gamma-Ray Light Curves of Selected Blazars.* 2020, *ApJS*, 250, 1, doi: [10.3847/1538-4365/aba2c7](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aba2c7)
- Tóth, B. G., Rácz, I. I., & Horváth, I.** *Gaussian-mixture-model-based cluster analysis of gamma-ray bursts in the BATSE catalog.* 2019, *MNRAS*, 486, 4823, doi: [10.1093/mnras/stz1188](https://doi.org/10.1093/mnras/stz1188)
- Tramacere, A., & Vecchio, C.** *γ -ray DBSCAN: a clustering algorithm applied to Fermi-LAT γ -ray data. I. Detection performances with real and simulated data.* 2013, *A&A*, 549, A138, doi: [10.1051/0004-6361/201220133](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220133)
- Tsutsui, R., Nakamura, T., Yonetoku, D., Takahashi, K., & Morihara, Y.** *Identifying Subclasses of Long Gamma-Ray Bursts with Cumulative Light-Curve Morphology of Prompt Emissions.* 2013a, *PASJ*, 65, 3, doi: [10.1093/pasj/65.1.3](https://doi.org/10.1093/pasj/65.1.3)

-
- Tsutsui, R., & Shigeyama, T. *On the subclasses in Swift long gamma-ray bursts: A clue to different central engines.* 2014, PASJ, 66, 42, doi: [10.1093/pasj/psu008](https://doi.org/10.1093/pasj/psu008)
- Tsutsui, R., Yonetoku, D., Nakamura, T., Takahashi, K., & Morihara, Y. *Possible existence of the E_p - L_p and E_p - E_{iso} correlations for short gamma-ray bursts with a factor 5-100 dimmer than those for long gamma-ray bursts.* 2013b, MNRAS, 431, 1398, doi: [10.1093/mnras/stt262](https://doi.org/10.1093/mnras/stt262)
- Tugay, A., & **Tarnopolski, M.** *Continuous Filament Network of the Local Universe.* 2023, ApJ, 952, 3, doi: [10.3847/1538-4357/acd9a4](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acd9a4)
- Ukwatta, T. N., Dhuga, K. S., Morris, D. C., et al. *A new frequency-luminosity relation for long gamma-ray bursts?* 2011, MNRAS, 412, 875, doi: [10.1111/j.1365-2966.2010.17944.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17944.x)
- Řípa, J., & Mészáros, A. 2014, in Proceedings of Swift: 10 Years of Discovery (SWIFT 10), held 2-5 December 2014 at La Sapienza University, Rome, Italy. id.103, 103
- Řípa, J., & Mészáros, A. *On the connection of gamma-ray bursts and X-ray flashes in the BATSE and RHESSI databases.* 2016, Ap&SS, 361, 370, doi: [10.1007/s10509-016-2960-4](https://doi.org/10.1007/s10509-016-2960-4)
- Řípa, J., Mészáros, A., Veres, P., & Park, I. H. *On the Spectral Lags and Peak Counts of the Gamma-Ray Bursts Detected by the RHESSI Satellite.* 2012, ApJ, 756, 44, doi: [10.1088/0004-637X/756/1/44](https://doi.org/10.1088/0004-637X/756/1/44)
- Řípa, J., Mészáros, A., Wigger, C., et al. *Search for gamma-ray burst classes with the RHESSI satellite.* 2009, A&A, 498, 399, doi: [10.1051/0004-6361/200810913](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810913)
- van Son, L. A. C., de Mink, S. E., Chruślińska, M., et al. *The Locations of Features in the Mass Distribution of Merging Binary Black Holes Are Robust against Uncertainties in the Metallicity-dependent Cosmic Star Formation History.* 2023, ApJ, 948, 105, doi: [10.3847/1538-4357/acbf51](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acbf51)
- Veres, P., Bagoly, Z., Horváth, I., Mészáros, A., & Balázs, L. G. *A Distinct Peak-flux Distribution of the Third Class of Gamma-ray Bursts: A Possible Signature of X-ray Flashes?* 2010, ApJ, 725, 1955, doi: [10.1088/0004-637X/725/2/1955](https://doi.org/10.1088/0004-637X/725/2/1955)
- von Kienlin, A., Meegan, C. A., Paciesas, W. S., et al. *The Second Fermi GBM Gamma-Ray Burst Catalog: The First Four Years.* 2014, ApJS, 211, 13, doi: [10.1088/0067-0049/211/1/13](https://doi.org/10.1088/0067-0049/211/1/13)
- von Kienlin, A., Meegan, C. A., Paciesas, W. S., et al. *The Fourth Fermi-GBM Gamma-Ray Burst Catalog: A Decade of Data.* 2020, ApJ, 893, 46, doi: [10.3847/1538-4357/ab7a18](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab7a18)
- von Neumann, J. *Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance.* 1941a, The Annals of Mathematical Statistics, 12, 367, doi: [10.1214/aoms/1177731677](https://doi.org/10.1214/aoms/1177731677)
- von Neumann, J. *The mean square successive difference.* 1941b, The Annals of Mathematical Statistics, 12, 153, doi: [10.1214/aoms/1177731746](https://doi.org/10.1214/aoms/1177731746)
- Wilson, R. J. 1998, Introduction to graph theory (Addison Wesley Longman Limited, London, 4th ed.)
- Woosley, S. E. *Gamma-ray bursts from stellar mass accretion disks around black holes.* 1993, ApJ, 405, 273, doi: [10.1086/172359](https://doi.org/10.1086/172359)
- Woosley, S. E., & Bloom, J. S. *The Supernova Gamma-Ray Burst Connection.* 2006, ARA&A, 44, 507, doi: [10.1146/annurev.astro.43.072103.150558](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.43.072103.150558)

-
- Yang, E. B., Zhang, Z. B., & Jiang, X. X. *Two dimensional classification of the Swift/BAT GRBs*. 2016, Ap&SS, 361, 257, doi: [10.1007/s10509-016-2838-5](https://doi.org/10.1007/s10509-016-2838-5)
- Yonetoku, D., Murakami, T., Tsutsui, R., et al. *Possible Origins of Dispersion of the Peak Energy-Brightness Correlations of Gamma-Ray Bursts*. 2010, PASJ, 62, 1495, doi: [10.1093/pasj/62.6.1495](https://doi.org/10.1093/pasj/62.6.1495)
- Yoon, S. C., Langer, N., & Norman, C. *Single star progenitors of long gamma-ray bursts. I. Model grids and redshift dependent GRB rate*. 2006, A&A, 460, 199, doi: [10.1051/0004-6361:20065912](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20065912)
- Zhang, B., & Zhang, B. *Gamma-Ray Burst Prompt Emission Light Curves and Power Density Spectra in the ICMART Model*. 2014, ApJ, 782, 92, doi: [10.1088/0004-637X/782/2/92](https://doi.org/10.1088/0004-637X/782/2/92)
- Zhang, B., Zhang, B.-B., Virgili, F. J., et al. *Discerning the Physical Origins of Cosmological Gamma-ray Bursts Based on Multiple Observational Criteria: The Cases of $z = 6.7$ GRB 080913, $z = 8.2$ GRB 090423, and Some Short/Hard GRBs*. 2009, ApJ, 703, 1696, doi: [10.1088/0004-637X/703/2/1696](https://doi.org/10.1088/0004-637X/703/2/1696)
- Zhang, L., Luo, J.-J., Huang, Y.-F., Gong, Y.-J., & Wu, S. *Distribution of gamma-ray bursts on the T_{90} -HR plane and their classification revisited*. 2022, MNRAS, 517, 5770, doi: [10.1093/mnras/stac3131](https://doi.org/10.1093/mnras/stac3131)
- Zhang, Z.-B., & Choi, C.-S. *An analysis of the durations of Swift gamma-ray bursts*. 2008, A&A, 484, 293, doi: [10.1051/0004-6361:20079210](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20079210)
- Zhang, Z.-B., Yang, E.-B., Choi, C.-S., & Chang, H.-Y. *Classifying gamma-ray bursts with Gaussian Mixture Model*. 2016, MNRAS, 462, 3243, doi: [10.1093/mnras/stw1835](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1835)
- Zhao, Y., & Morales, G. J. *Properties of a sinusoidally driven thermostat*. 2018, PhRvE, 98, 022213, doi: [10.1103/PhysRevE.98.022213](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.98.022213)
- Ziaeeepour, H., & Gardner, B. *Broad band simulation of Gamma Ray Bursts (GRB) prompt emission in presence of an external magnetic field*. 2011, JCAP, 2011, 001, doi: [10.1088/1475-7516/2011/12/001](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2011/12/001)
- Zitouni, H., Guessoum, N., AlQassimi, K. M., & Alaryani, O. *Distributions of pseudo-redshifts and durations (observed and intrinsic) of Fermi GRBs*. 2018, Ap&SS, 363, 223, doi: [10.1007/s10509-018-3449-0](https://doi.org/10.1007/s10509-018-3449-0)
- Zitouni, H., Guessoum, N., Azzam, W. J., & Mochkovitch, R. *Statistical study of observed and intrinsic durations among BATSE and Swift/BAT GRBs*. 2015, Ap&SS, 357, 7, doi: [10.1007/s10509-015-2311-x](https://doi.org/10.1007/s10509-015-2311-x)
- Zunino, L., Olivares, F., Bariviera, A. F., & Rosso, O. A. *A simple and fast representation space for classifying complex time series*. 2017, Physics Letters A, 381, 1021, doi: [10.1016/j.physleta.2017.01.047](https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.01.047)
- Żywucka, N., Tarnopolski, M., Böttcher, M., Stawarz, Ł., & Marchenko, V. *Optical Variability Modeling of Newly Identified Blazar Candidates behind Magellanic Clouds*. 2020, ApJ, 888, 107, doi: [10.3847/1538-4357/ab5fe5](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab5fe5)