

Załącznik 2: Autoreferat w j. polskim

Poniższy opis jest tłumaczeniem opisu z wersji angielskiej przez moją współpracowniczkę, która jednak nie jest specjalistką w astrofizyce błysków gamma. Dlatego w przypadku jakichkolwiek wątpliwości odnośnie tekstu proszę o odnoszenie się do wersji angielskiej.

Curriculum Vitae

Imię i nazwisko: Maria Giovanna Dainotti

Wykształcenie:

grudzień 2008

doktorat z zakresu Astrofizyki,

Uniwersytet Rome La Sapienza, Rzym, Włochy

- ☐ **Rozprawa:** "GRBs associated with SNe Ib/c and their theoretical interpretation within the Fireshell model". Promotor: prof. Remo Ruffini.
- ☐ International Relativistic Astrophysics Ph.D. Program (IRAP). Pierwszy w cyklu doktorskim IRAP, którego celem jest uzyskanie doktoratu w krótkim okresie 3 lat. IRAP to konsorcjum zrzeszonym z siedmiu instytucji: Rome La Sapienza, ETH Zurich, Freie Universitat at Berlin, Observatoire de la Cote d'Azur, Universite' de Nice-Sophia Antipolis, Universite' de Savoie and the University of Ferrara.

lipiec 2005

magisterium z fizyki, Uniwersytet w Salerno, Salerno, Włochy

- ☐ Z wyróżnieniem
- ☐ Praca dyplomowa: "Standard Candles in Astronomy"
- ☐ Promotor: prof. Salvatore Capozziello

Praca o znaczącej wartości naukowej, wg: art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

Tytuł dorobku naukowego:

Badanie korelacji Dainotti, ich interpretacji fizycznej oraz zastosowania jako narzędzi kosmologicznych.

Podczas mojej 14-letniej kariery w dziedzinie astrofizyki, głównym celem moich badań było ustandaryzowanie właściwości rozbłysków promieniowania gamma i wykorzystanie ich jako możliwego narzędzia w kosmologii. W toku prac odkryłam trzy typy korelacji dla rozbłysków gamma i zastosowałam innowacyjne metody do poradzenia sobie z zagadnieniem efektu selekcji, który wpływa na parametry obserwacyjne rozbłysków. Seria najważniejszych publikacji jest prezentowana jako moja rozprawa habilitacyjna. Tutaj podsumowuję moje badania, opisane w tych publikacjach, w odniesieniu do stanu wiedzy w rozpatrywanej dziedzinie badań. Oprócz przedstawionych poniżej publikacji przedstawię również pokrótce inne moje prace, ściśle związane z tym związane, które to nie mogły się tu jednak znaleźć ze względu na niemożność uzyskania odpowiednich oświadczeń o udziale w pracy od niektórych moich współautorów.

Poniższe artykuły, wszystkie opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora, składają się na moją rozprawę habilitacyjną:

1. **Dainotti M. G.**, Ostrowski, M., Willingale, R., “*Towards a standard gamma-ray burst: tight correlations between the prompt and the afterglow plateau phase emission*”, MNRAS, 418, 2202 (2011b). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19433>.
2. **Dainotti M. G.**, Petrosian, V., Singal, J., Ostrowski, M., “*Determination of the intrinsic Luminosity Time Correlation in the X-ray Afterglows of GRBs*”, ApJ, 774, 157, 2013a. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/774/2/157>.
3. **Dainotti, M. G.**, Petrosian, V., Willingale, R., O'Brien, P., Ostrowski, M., Nagataki, S., “*Luminosity--time and luminosity--luminosity correlations for GRB prompt and afterglow plateau emissions*”, MNRAS, 451, 3898, (2015b). <https://doi.org/10.1093/mnras/stv1229>
4. **Dainotti, M. G.**, Postnikov S., Hernandez, X., Ostrowski M., “*A fundamental plane for long gamma-ray bursts with X-ray plateaus*”, ApJL, 825L, 20 (2016). <https://doi.org/10.3847/2041-8205/825/2/L20>
5. **Dainotti, M.G.**, Hernandez, Postnikov, S. Nagataki, R. Willingale, O'Brien, S. Siegel, “*A Study of the Gamma-Ray Burst Fundamental Plane*”. ApJ, 848, 88 (2017). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8a6b>.
6. Rea, N., Gullón, M., Pons, J.A., Perna, R., **Dainotti, M. G.**, Miralles, J.A., Torres, D.F., “*Constraining the GRB–Magnetar Model by Means of the Galactic Pulsar Population*”, ApJ, 813, 92 (2015). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/813/2/92>.
7. Postnikov, S., **Dainotti, M. G.**, Hernandez, X., Capozziello, S., “*Nonparametric Study of the Evolution of the Cosmological Equation of*

State with SNeIa, BAO, and High-redshift GRBs", ApJ, 783, 126 (2014).
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/783/2/126>.

Poniżej wyróżnimy odniesienia do tych publikacji za pomocą pogrubionej czcionki. Wybrałam 7 powyższych publikacji z 30-stu moich prac poświęconych badaniom rozbłysków możliwych do zaprezentowania w ramach habilitacji, aby ograniczyć nieco zakres prezentowanych badań do odkrytych przeze mnie korelacji. W szczególności przedstawiony tutaj temat ma na celu aktualizację dwuwymiarowej *relacji Dainotti* po korekcie na błąd selekcji, jej teoretycznej interpretacji w modelu magnetara, zastosowania jako narzędzia kosmologicznego, odkrycie związku pomiędzy jasnością tzw. *prompt phase* a fazą poświaty oraz relację trójwymiarowej płaszczyzny fundamentalnej, która jest połączeniem wcześniejszych dwuwymiarowych relacji Dainotti. Inne prace skrótowo przedyskutowane poniżej są ściśle związane z tymi zaprezentowanymi.

Dorobek Naukowy - Przegląd motywacji naukowych oraz wyników

Wprowadzenie

Rozbłyski promieniowania gamma są najdalej zaobserwowanymi i niezwykle potężnymi obiektami we Wszechświecie, dzięki czemu mogą być potencjalnie użytecznymi próbnikami do testowania modeli kosmologicznych (Totani 2012). W tym celu kluczowym jest zrozumienie, czy mogą one być brane pod uwagę jako świece standardowe (obiekty astronomiczne, których jasność jest znana lub można ją wyznaczyć z innych - niezależnych od odległości - parametrów obserwacyjnych). Na pierwszy rzut oka rozbłyski, ze swoją szacowaną jasnością rozciągającą się przez ponad 8 rzędów wielkości, wydają się być dalekie od świec standardowych. Jednakże odkrycie uniwersalnych relacji między ich obserwowalnymi właściwościami odgrywa kluczową rolę w określaniu, czy można je przekształcić w standardowe świece, a także może zapewnić wgląd w fizyczne procesy odpowiedzialne za ich powstawanie.

Z fenomenologicznego punktu widzenia pierwsza faza emisji rozbłysku na wysokich energiach fotonów (promieniowanie gamma i twarde promieniowanie rentgenowskie) nazywa się *prompt phase*, podczas gdy długotrwała emisja na wielu długościach fal (promieniowanie rentgenowskie, optyczne i czasami radiowe), która następuje po emisji *prompt phase*, nazywana jest poświatą. Rozbłyski tradycyjnie klasyfikowane są jako krótkie i długie, w zależności od czasu ich trwania. Aczkolwiek Norris i Bonnell (2006) odkryli istnienie pośredniej klasy (IC), która wykazuje mieszane właściwości obu klas. Owa kategoria była

ostatnio omawiana w literaturze (np. Danotti i in. 2010, Yasuaki i in. 2015, Tarnopolski 2016).

Mimo różnorodności cech poszczególnych rozbłysków, niektóre wspólne cechy mogą zostać zidentyfikowane poprzez analizę ich krzywych zmian blasku. Istotnym przełomem w obserwacjach na wielu zakresach długości fali było wykrycie rozbłysków gamma przez satelitę Swift, wystrzelonego w 2004 roku. Swift zapewnia szybkie śledzenie poświaty na kilku długościach fal, ujawniając w ten sposób złożone zachowanie krzywych zmian blasku poświaty (O'Brien i in. 2006, Sakamoto i in. 2007), które można podzielić na dwa, trzy, a nawet więcej segmentów. Drugi segment, jeśli jest płaski, nazywa się emisją plateau. Willingale i in. (2007) wykazali, że krzywe zmian jasności *prompt phase* oraz poświaty dla danych z teleskopu Swift mogą być dopasowane tym samym wyrażeniem analitycznym. Daje to okazję na poszukiwanie uniwersalnych cech rozbłysków, które pozwoliłyby nam rozpoznać ich standardowe właściwości, tak jak we wcześniejszych badaniach korelacji między różnymi obserwablami *prompt phase* (Lloyd & Petrosian 1999, Reichart i in. 2001, Schaefer 2003; Amati i in. (2002, 2006, 2009), Yonetoku i in. (2004, 2014), Ghisellini i in. 2004, Ghirlanda i in. 2006). Aby zapoznać się z przeglądem tego tematu, zobacz Dainotti i in. (2018a).

Korelacje między jasnością a czasem

Mimo iż ten temat badań zapoczątkowany został pod koniec moich studiów doktoranckich (lecz nie został załączony do tezy doktoratu), był kontynuowany po moim zatrudnieniu na Uniwersytecie Jagiellońskim w styczniu 2009. W ramach powyższych badań Dainotti i in. (2008) odkryli kilka korelacji dla rozbłysków długich pomiędzy jasnością w paśmie rentgenowskim na końcu fazy plateau (L_X) a długością jej trwania (T_a^*), i zwanej dalej korelacją $L_X-T_a^*$. Za pomocą symbolu * oznaczone są własności rozbłysków w ich układzie spoczynkowym. Korelacja ma postać: $L_X = \log a + b \log T_a^*$, gdzie „a” jest parametrem normalizacji, a „b” jej nachyleniem (w przybliżeniu wynoszącym -1), otrzymanych z dopasowania do danych obserwacyjnych. W analizowanej relacji im bardziej jasna jest faza plateau, tym krócej ona trwa, czyli im potężniejsze jest zjawisko, tym szybciej zużywa swoją energię. Korelacja $L_X-T_a^*$ została zaktualizowana dla 77 rozbłysków w Dainotti i in. (2010), prowadząc do odkrycia nowej podklasy długich rozbłysków z emisją plateau - zwaną „kanoniczną” - z gładką krzywą zmian jasności w zakresie rentgenowskim. Dodatkowo, odkryliśmy podobną relację dla niewielkiego zbioru poświat, które należą do klasy pośredniej rozbłysków gamma. Poświaty z regularną („kanoniczną”) krzywą zmian blasku podlegają nie tylko temu

wspomnianemu ściśle fizycznemu skalowaniu, lecz również, dla danego T_a^* , bardziej regularne wybuchy progenitorów prowadzą do preferencyjnie jaśniejszych poświat (Dainotti i in. 2010).

W następnej pracy Dainotti i in. (2011a) próbowali użyć tego podzbioru jako estymatora przesunięcia ku czerwieni i dowiedli, iż byłoby to prawdopodobne tylko wtedy, gdy rzeczywiste rozproszenie $L_x-T_a^*$ zostanie zredukowane do $\sigma_{int} = 0.20$. Dlatego też potrzebna jest większa liczba rozbłysków o dobrze zdefiniowanych właściwościach wraz ze skuteczną strategią zmniejszania rzeczywistego rozproszenia korelacji w celu wyciągnięcia ostatecznego wniosku.

Korelacja $L_x-T_a^*$, związana z fazą plateau, której mechanizm jest nadal nieznany, stała się przedmiotem badań w literaturze. Jak dotąd była wartościowym i przydatnym testem dla teoretycznych modeli (Ghisellini i in. 2008, Cannizzo & Gerhels 2009, Cannizzo i in. 2010, Dall'Osso i in. 2011, Yamazaki i in. 2009, Bernardini i in. 2011, Sultana i in. 2012, Hascoet i in. 2014, Van Eerten (2014a, 2014b), Rowlinson i in. 2014 and Rea i in. 2015). Co więcej, analizy przeprowadzone podczas badań innych fizycznych parametrów rozbłysków dla obu faz, *prompt phase* oraz poświaty, doprowadziły do określenia nowych znaczących korelacji między jasnością poświaty, L_x , a średnią jasnością emisji *prompt phase*, $L_\gamma(T)=E_{iso}/T$ (E_{iso} jest izotropowo wypromieniowywaną energią w *prompt phase*), obliczoną dla różnych skal czasowych, wykorzystanych w literaturze (Dainotti i in. 2011b). Zauważyliśmy również, że najbardziej skorelowany dla poświaty podzbiór prowadzi również do największych korelacji między *prompt phase* a poświatą.

Dainotti i in. (2015b), kontynuując badanie korelacji między *prompt phase* a poświatą, wykazali, że $L_x-T_a^*$ ma nachylenie funkcji potęgowej, które jest różne, na poziomie istotności 2 sigma, od nachylenia korelacji $L_{peak}-T_\gamma^*$ dla *prompt phase* (Willingale i in. 2010), pomiędzy izotropową, szczytową jasnością, L_{peak} , a czasem trwania impulsu T_γ^* . Wszystkie te cechy otwierają nową dyskusję na temat tego, czy te przesunięcia wynikają z efektu selekcji, czy też z innego mechanizmu emisji między *prompt phase* a plateau. Ponadto wykazaliśmy, że rozkład $L_{peak}-L_x$ charakteryzuje się wyższym współczynnikiem korelacji Spearmana, $\rho=0.79$, aniżeli $\rho=0.60$, obejmującym uśrednioną jasność *prompt phase*, $L_{prompt}-L_x$, dla tego samego zbioru rozbłysków.

Dainotti i in. (2016) wprowadzili do korelacji trzeci parametr – obserwowaną jasność szczytową rozbłysku, znajdując tym samym wyższą korelację, która to zwiększa użyteczność rozbłysków jako świec standardowych. Spowodowało to zredukowanie rozproszenia (do 54% w porównaniu z korelacjami

dwuwymiarowymi) danych w grupie długich rozbłysków (o czasie trwania większym niż 2 s) i płaskimi plateau, które określają tak zwany "złoty zbiór" złożony z 40 rozbłysków. Wyniki te zostały zweryfikowane za pomocą symulacji Monte Carlo, by wykazać, iż korelacja 3D nie była efektem losowym ze względu na wykorzystane w analizie rozbłyski. Ponieważ w poprzednich pracach **Dainotti i in. (2013a, 2015b)** wykazano inherentną naturę korelacji *prompt phase*-poświata i jasność-czas, dlatego też ta nowa korelacja jest inherentna. Wpływ tego wyniku będzie znaczący zarówno dla kosmologii, jak i teoretycznego modelowania rozbłysków, gdyż korelacja ta jest najściślejszą spośród znanych dotąd w literaturze między *prompt phase* a poświatą, z wewnętrznym rozproszeniem $\sigma = 0,27$. Uważamy to za ważny krok naprzód w kierunku stworzenia kosmologicznej świecy standardowej z wykorzystaniem rozbłysków gamma.

W kontynuacji tych badań, opublikowanych niedawno przez **Dainotti i in. (2017c)**, potwierdziliśmy istnienie owej 3-wymiarowej relacji, poprzez zwiększenie "złotego zbioru" do 45 rozbłysków z inherentnym rozproszeniem powyżej płaszczyzny w obrębie 1σ w odniesieniu do poprzedniego wyniku. Dokonano również porównania między różnymi klasami rozbłysków. Badane klasy to: krótkie rozbłyski z rozciągłą emisją (SEE), błyski promieniowania X, rozbłyski gamma powiązane z supernowymi, zbiór jedynie długich rozbłysków (132) wybranych z całkowitego zbioru poprzez wykluczenie rozbłysków z poprzednich kategorii, bardzo długie rozbłyski i złoty zbiór. Poszczególne płaszczyzny korelacji dla każdej z tych kategorii są statystycznie spójne z podstawową złotą płaszczyzną, z wyjątkiem SSE, które z tego powodu są identyfikowane jako fizycznie odrębna klasa. Złota płaszczyzna podstawowa ma inherentne rozproszenie mniejsze niż dla każdej innej płaszczyzny, wyznaczonej poprzez zbiór należący do innej kategorii. Tak więc rozkład odległości jakiegokolwiek konkretnej klasy od tej płaszczyzny staje się istotnym parametrem dla odpowiedniego fizycznego mechanizmu rozbłysków. Płaszczyzny kilku klas rozbłysków, reprezentowanych przez XRFs, SEE, długie rozbłyski itp., obliczonych z T_a^* jako parametrem zależnym, wykazywały dla każdej kategorii mniejsze rzeczywiste rozproszenie (osiągając 24-procentową redukcję dla długich rozbłysków). Dodatkowo, płaszczyzna podstawowa jest niezależna od kilku parametrów *prompt phase* i poświaty, i zostaje zachowana również w przypadku rozbłysków o wysokiej energii, obserwowanych przez Fermi-Gamma Ray Burst Monitor (GBM).

Szczegółowa oraz krytyczna analiza wszystkich najbardziej istotnych korelacji rozbłysku wraz z ich błędem selekcji zarówno w relacjach dla *prompt phase* jak i między *prompt phase* a poświatą, zostały przedstawione w moich artykułach przeglądowych: Dainotti i in. (2016c, 2017d) i Dainotti i in. (2017b).

Te wszystkie artykuły stanowią spójny wkład w zarys możliwości istnienia standardowej świecy kosmologicznej w oparciu o korelacje pomiędzy *prompt phase* a poświatą rozbłysku gamma.

Wpływ naukowy na dziedzinę oraz wartość badań nad korelacją jasność-czas i płaszczyzną fundamentalną.

Wraz z odkryciem korelacji jasność-czas otworzyłam nowy obszar badawczy, jako że wcześniej nie było badań korelacji dla emisji poświaty. Prace te uutorowały drogę do rozważenia emisji plateau jako ważnej części rozbłysków gamma, która może rzucić światło zarówno na teoretyczne rozumienie rozbłysków w całości, jak i na możliwość przyjęcia rozbłysków jako narzędzi kosmologicznych. Ze względu na artykuły naukowe o odkryciu korelacji między jasnością a czasem oraz moją serię artykułów analizujących rozważaną korelację, moja korelacja jest czasami cytowana w literaturze jako „relacja Dainotti”, np. w Cannizzo i in. 2011, Shu-Kun Si i in. 2018, Zitouni i in. 2018, Hou-Jun Lü i in. 2015, Ruffini i in. 2014, Xu i Huang 2012, Kuwakubo i in. 2015, itd.

Badanie korelacji emisji *prompt*-poświaty stanowi znaczący krok naprzód w zrozumieniu związku między fazą *prompt* a poświatą. Przed tym badaniem istniały korelacje tylko dla *prompt* albo tylko dla poświaty, a zatem praca przedstawiona przeze mnie wypełnia lukę między tymi badaniami. Dodatkowym krokiem naprzód jest odkrycie płaszczyzny podstawowej, która jest najściślejszą trójparametrową korelacją rozbłysków, która obejmuje zarówno właściwości *prompt* jak i poświaty.

Warto zauważyć, że zostałam zaproszona przez Amerykańskie Towarzystwo Astronomiczne do przedstawienia tego artykułu podczas konferencji prasowej i napisania komunikatu prasowego (dostępnego na stronie internetowej NASA Swift: https://swift.gsfc.nasa.gov/news/2016/grbs_std_candles.html), i zostało to wspomniane w wielu artykułach i gazetach, takich jak Scientific American. Jest również jednym z najpopularniejszych wpisów na blogu Stanford KIPAC w roku 2016. Komunikat prasowy został również zamieszczony przez UNAM (Meksyk) oraz INAF (Włochy).

Rozszerzenie pracy na temat płaszczyzny podstawowej doprowadziło do odkrycia, iż dwie klasy rozbłysków są naturalnie wyróżnione poprzez istnienie dwóch podstawowych płaszczyzn. To z kolei stanowi ważny krok naprzód, pokazujący, jak podstawowa płaszczyzna może być wyróżnikiem wśród różnych klas rozbłysków i może pomóc rozeznaczyć się między różnymi mechanizmami emisji, poczynając od statystycznego punktu widzenia.

Chciałabym również wspomnieć, że w kwestii tych wyników zostałam zaproszona przez ApJ do przedstawienia informacji prasowej również odnośnie tego artykułu.

Sam ⁷ meD

INAF przedstawił ten komunikat prasowy, a wiadomość została zgłoszona przez "Le Scienze" - włoską wersję Scientific American. Artykuł ten był przedmiotem komunikatu prasowego kilku instytucji. Uniwersytet Stanforda opublikował blog KIPAC, który znalazł się wśród najważniejszych podsumowań badań KIPAC w 2017r., a UNAM wydał kolejny komunikat prasowy przedstawiony przez dr. Xaviera Hernandeza, drugiego autora tej pracy. Ponadto, Nature Index przedstawił również ten artykuł, który został wybrany przez Riken w Japonii. Ze względu na te udane wyniki, kandydat został wybrany na Fellow of the Week, 2 maja 2019 r. przez program stypendialny Marii Curie. Te dwie prace przyciągnęły uwagę włoskich mediów. Przeprowadzono ze mną wywiad 2 marca 2018 roku dla RAI TG2, krajowego włoskiego telewizyjnego kanału informacyjnego. Dzięki tym wynikom otrzymałam nagrodę Principessa Sichelgaita, ufundowaną przez Urząd Prezydenta Republiki, przyznawaną *dla kobiet utalentowanych w swojej dziedzinie* z prowincji Salerno, na południu Włoch, oraz nagroda dla wybitnych ludzi z mojego miasta rodzinnego, zwana „Cavesi nel mondo” i sponsorowana przez Rotari Club z tego samego miasta.

Efekt selekcji oraz ewolucja redshiftu/przesunięcia ku czerwieni

Niezależnie od siły wspomnianych powyżej korelacji i ich zastosowania jako sondy kosmologicznej, należy odpowiedzieć na fundamentalne pytanie. Czy to, co obserwujemy, jest prawdziwą reprezentacją wydarzeń, czy też mają na nie wpływ czynniki obserwacyjne lub efekty selekcji? Terminy *efekt selekcji* lub *czynniki obserwacyjne* odnoszą się do zniekształceń statystycznych korelacji, wynikających z metody opracowywania zbioru danych obserwacyjnych.

Zbieranie danych z konkretnego satelity z danym limitem strumienia uniemożliwia nam zobaczenie prawdziwie reprezentatywnego zbioru zdarzeń. Dlatego istotne jest, aby najpierw określić prawdziwe korelacje między zmiennymi, a nie te wprowadzone przez obserwacyjne efekty selekcji. Próby korygowania tego rodzaju wpływów były dokonywane od dziesięcioleci (np. Malmquist 1920, Eddington 1940). Jednakże mają one poważne niedociągnięcia, gdyż są one słuszne tylko wtedy, gdy zmienne są niezależne (lub nieskorelowane). Takowe założenie nie powinno być zakładane z góry. Co więcej, parametry obserwacyjne rozbłysku mogą również podlegać zmianom ze względu na redshift i potrzebne jest ilościowe wyznaczenie tego efektu. Dlatego też, aby przezwyciężyć zarówno problemy efektów selekcji jak i ewolucji wraz z redshiftem, Efron oraz Petrosian (1992) zaproponowali metodę, dalej zwaną EP, z powodzeniem zastosowaną do analizy zbiorów rozbłysków (Petrosian i in. 1998, 1999, 2002, 2009, Lloyd & Petrosian 2000, Kocevski 2006, Singal i in. 2011, Singal i in. 2012).

Metoda ta została wprowadzona w przestrzeni dwuwymiarowej (jasność, redshift) oraz trójwymiarowej (jasność, czas i redshift) przez **Dainotti i in. (2013a)** i zastosowana do zaktualizowanej korelacji $L_X-T_a^*$ dla zbioru 101 rozbłysków. Określiliśmy, czy jasność i rozkłady czasowe są niezależne od przesunięcia ku czerwieni. Taka niezależność implikuje brak ewolucji, która, jeśli istnieje, może zostać usunięta, tym samym tworząc w ten sposób nowe obserwable skorygowane za pomocą ich funkcji ewolucyjnych. Tak więc te nowe zmienne nie zależą od redshiftu. Zastosowanie tej metody wykazało, że korelacja $L_X-T_a^*$ jest inherentna na poziomie 12 sigma. Opisano również, w jaki sposób odtworzyć korelację po usunięciu błędów selekcyjnych i jak można tego użyć do ograniczenia fizycznych modeli emisji plateau, których pochodzenie jest wciąż nieznane.

Jako alternatywną metodę do EP, Dainotti i in. (2015a) opracowali ogólną metodę budowania fałszywych zestawów danych, które uwzględniają wpływ selekcji zarówno ze względu na czas, jak i na jasność. Metoda ta pokazuje, że brak wiedzy na temat funkcji efektywności przyrządu wykrywającego rozbłyski, może wpływać na ocenę wewnętrznego nachylenia każdej korelacji między obserwowanymi parametrami. Wykazaliśmy, że te wyniki potwierdzają te przedstawione w **Dainotti i in. (2013a)**, a mianowicie, że inherentne nachylenie korelacji LT wynosi -1. Metoda ta jest dość ogólna, dlatego też jest przydatna do badania, czy jakakolwiek inna korelacja rozbłysku mogłaby zostać wygenerowana przez same błędy obserwacyjne. Ponadto oceniliśmy zależny od redshiftu stosunek $\Psi(z)=(1+z)^\alpha$ częstości występowania rozbłysku do szybkości powstawania gwiazd. Znaleźliśmy niewielką ewolucję z $-0.2 < \alpha < 0.5$, dla redshiftu w zakresie $0.99 < z < 9.4$.

Zamiast tego, w zakresie ewolucji wewnętrznej relacji $L_{\text{peak}}-L_X$, **Dainotti i in. (2015b)** zastosowali test EP dla L_{peak} w celu uzyskania funkcji ewolucji kosmologicznej dla jasności emisji *prompt phase*. Kiedy już ustaliliśmy taką kosmologiczną ewolucję, zastosowaliśmy współczynnik korelacji cząstkowej do nowych, niewyewoluowanych jasności, pokazując, że korelacja $L_{\text{peak}}-L_X$ jest również inherentna. Badania, które doprowadziły do tych wyników, były wartościowe do określenia wiarygodnego zrozumienia wewnętrznej natury badanych korelacji.

Naukowy wpływ badania błędu selekcji na korelacje w rozbłyskach.

Opisane powyżej artykuły stanowią również ważny krok naprzód w odkrywaniu solidnej metodologii, którą można zastosować do każdej korelacji. To pierwszy raz w literaturze, kiedy zastosowano metodę statystyczną Efron & Petrosian w 3D.

Otworzyło to nową perspektywę w stosowaniu korelacji zarówno jako dyskryminatorów modelowych, jak i narzędzi kosmologicznych. Co więcej, jeśli zarówno modele kosmologiczne i modele teoretyczne są testowane bez uwzględnienia błędów selekcji, może to prowadzić do nieprawidłowych parametrów kosmologicznych i teoretycznych.

Zastosowanie relacji $L_X-T^*_a$ oraz płaszczyzny podstawowej jako dyskryminatora modelu

Pierwsza próba w literaturze interpretacji $L_X-T^*_a$ wewnętrznej korelacji, skorygowanej o błąd selekcji, w kontekście teoretycznym została przedstawiona przez Rowlinson i in. (2014). Zaproponowaliśmy, że model magnetara przewiduje obserwowaną fazę plateau, której czas trwania i jasność wyznaczone są przez pola magnetyczne i okresy obrotu nowo utworzonego magnetara. Ta praca w analityczny sposób pokazuje, że pochodzenie magnetara może wyjaśnić, w granicach niepewności jednej sigma, wewnętrzną korelację $L_X-T^*_a$. Ponadto **Rea i in. (2015)** również wykazali, że wewnętrzna korelacja $L_X-T^*_a$ jest w stanie zweryfikować model magnetara w zakresie badań rozbłysku poprzez analizę Galaktycznej populacji gwiazd neutronowych. Stwierdziliśmy, że jeśli rentgenowskie plateau rozbłysku gamma są zasilane energią obrotową nowo utworzonych magnetarów, obserwowana populacja Galaktycznych magnetarów jest niezgodna z tworzeniem w ramach scenariusza rozbłysku. Wynik ten ma ważne astrofizyczne konsekwencje: 1) progenitory (obiekty źródłowe) populacji magnetarów powinny różnić się od tych związanych z krótkimi lub długimi rozbłyskami; 2) typ supernowych Ib/c związany z długimi rozbłyskami powinien tworzyć "supermagnetary", z systematycznie wyższymi początkowymi polami magnetycznymi niż te przewidywane dla naszej Galaktycznej populacji magnetarów.

Aby odróżnić różne fizyczne mechanizmy progenitora odpowiedzialne za emisję plateau, Dainotti i in. (2017a), analizując 176 poświat plateau z satelity Swift dla źródeł rozbłysku ze znanymi przesunięciami ku czerwieni - wykazała, że podzbiór długich rozbłysków związanych z supernowymi (GRB-SNe) ma bardzo wysoki współczynnik korelacji dla zależności $L_X-T^*_a$. Co więcej, kategoria rozbłysków ze spektroskopowo powiązanymi supernowymi wykazuje znacznie wyższą korelację LT niż jakakolwiek inna analizowana próbka, ale z bardziej stromym nachyleniem niż dla długich rozbłysków, dla których żadnego związku z supernową nie zaobserwowano (dalej jako GRB-NO-SNe). Przesłanki te sugerują, że GRB-SNe nie wymagają standardowego zasobnika energii w fazie plateau, w przeciwieństwie do GRB-NO-SNe. Ponadto, supernowe Ib/c związane z rozbłyskami stosują się również do zależności pomiędzy maksimum jasności a

szerokością krzywej blasku maksimum, podobnej do tej stosowanej do standaryzacji supernowych typu Ia. Z uwagi na to, że zbiór GRB-SNe może być oddzielną klasą fizycznych źródeł, wskazane jest jego oddzielne rozpatrywanie od LONG-GRB-NO-SNe, w badaniach ukierunkowanych na przyszłą świecę standardową do pomiaru kosmologicznych odległości oraz ograniczenia parametrów kosmologicznych.

W Stratta i in. 2018 dopasowaliśmy próbkę rentgenowskich emisji plateau rozbłysków, dającą, co ciekawie, rozkład na diagramie pola magnetycznego w funkcji okresu rotacji (B-P) zgodny z $B \propto P^{7/6}$, a tym samym zgodny z, oczekiwaną na podstawie dobrze ugruntowanej fizyki, granicą minimalnego okresu rozkręcania milisekundowych pulsarów w Galaktyce. Normalizacja uzyskanej przez nas relacji idealnie pasuje do przewidywań położenia granicy rozkręcania się nowo narodzonych magnetarów - przy oczekiwanych masach (około 1 masy Słońca) i promieniach (10 km), oraz tempach akrecji materii zgodnych z oczekiwaniami dla rozbłysków, bazując na dobrze ugruntowanej fizyce granicy rotacji akretujących pulsarów rentgenowskich.

Krótkie rozbłyski z rozległą emisją (SEE) w rozkładzie pojawiają się w pobliżu długich okresów, podczas gdy długie rozbłyski (LGRB) zbliżają się do krańca z krótkimi okresami. Wynik ten jest zgodny z oczekiwanymi wartościami granicznymi dla przyrostu okresu rotacji, w których całkowita akretująca masa określa położenie gwiazdy neutronowej na diagramie B-P. Rozkład P-B dla długich rozbłysków oraz rozbłysków z rozległą emisją jest statystycznie różny, co dodatkowo potwierdza ideę, że relacja płaszczyzny podstawowej (Dainotti i in. 2016c, Dainotti2017) jest silnym wyróżnikiem pomiędzy tymi populacjami. Nasze wnioski są odporne na sugestie dotyczące kolimacji kąta rozbłysku i współczynnika załamania magnetara, które zmieniają wynikowe właściwości magnetara równoległe do granicy spinu i dla rozbłysków wykazujących rentgenowskie plateau silnie wspierają pochodzenie magnetara.

Osiągnięcie naukowe oraz wpływ teoretycznej interpretacji płaszczyzny podstawowej

Jednym z problemów, z którym się zwykle borykamy w zrozumieniu mechanizmu emisji rozbłysku, jest wiele jego możliwych interpretacji, biorąc pod uwagę ogromną zmienność w przestrzeni parametrów, która charakteryzuje fenomenologię rozbłysku. Prace związane z przyjętą przeze mnie interpretacją teoretyczną po raz pierwszy szacują duży zbiór rozbłysków. Pozwala to na powiększenie opisu przestrzeni parametrów w porównaniu do poprzedniej pracy. Dodatkowo otwiera to nową debatę na temat tego które są najbardziej prawdopodobnymi parametrami B i

P, biorąc pod uwagę scenariusz emisji izotropowej lub strumieniowej oraz jak bardzo zaobserwowane korelacje mogą ograniczyć teoretyczną przestrzeń parametrów. Innym ważnym wynikiem z tego artykułu jest fakt, iż po raz pierwszy w literaturze parametry modeli teoretycznych są uzyskiwane po korektach na błąd selekcji. Prowadzi to do określenia wolnej od błędów przestrzeni parametrów. Rzeczywiście, może się zdarzyć, że parametry mogą być wynikiem zaszumienia obserwowanych zmiennych. W takim przypadku korelacja P-B byłaby jedynie wynikiem błędu selekcji, a nie rzeczywistej fizyki. W tym artykule dowodzimy solidności wyników dzięki tej poprawce.

Zastosowanie rozbłysków gamma jako testów kosmologicznych

Chociaż rozbłyski gamma nie są jeszcze świecami standardowymi, istnienie korelacji rozbłysków zostało wykorzystane jako próbnik wczesnego Wszechświata do najwyższych obserwowanych przesunięć ku czerwieni. W rzeczywistości rozbłyski przyciągnęły ostatnio wiele uwagi jako możliwy sposób na rozszerzenie diagramu Hubble'a (HD) do bardzo wysokich redshiftów. Pierwsza próba zbudowania HD rozbłysków sięgających $z=6$ (Schaefer 2007), otwiera drogę do wykorzystania rozbłysków jako sond kosmologicznych (Capozziello i in. 2008, Ghirlanda i in. 2007, Amati 2008). W pracy Cardone i in. (2009), dodaliśmy do zbioru 69 rozbłysków wraz ze mierzonymi modułami odległości, $\mu(z)$, korelację $L_X-T^*_{a,}$ i użyliśmy metody dopasowania inspirowaną bayesowską do kalibracji innych korelacji dla rozbłysku. "Uśredniając" ponad sześć korelacji, otrzymaliśmy nowy HD rozbłysków, zawierający 83 obiektów. W celu uniknięcia potrzeby przyjęcia z góry modelu kosmologicznego przedstawiliśmy nową procedurę kalibracji, opartą na niezależnym od modelu oszacowaniu regresji lokalnej $\mu(z)$ przy użyciu zbioru Union Type supernowych typu Ia do skalibrowania korelacji rozbłysku.

W kolejnym artykule Cardone i in. (2010) zbudowali nowy HD rozbłysków przy użyciu samej korelacji $L_X-T^*_{a,}$, lub łącząc ją z innymi danymi, pokazując, iż zastosowanie $L_X-T^*_{a,}$ prowadzi do ograniczeń parametrów kosmologicznych, co jest w zgodzie z wcześniejszymi wynikami w literaturze. Na koniec sformułowaliśmy wniosek, że najlepsza ocena parametrów kosmologicznych pochodzi z HD złożonej tylko z kanonicznych rozbłysków.

Wykazawszy wiarygodność/rzetelność $L_X-T^*_{a,}$ jako możliwego narzędzia kosmologicznego, istotne jest aby wykazać w jaki sposób zmiany obserwowanego nachylenia korelacji mogą wpływać na ustalenie parametrów kosmologicznych. **Dainotti i in. (2013a)** zasymulowała zbiór 101 rozbłysków z główną (pochodzącą z najlepszego dopasowania) wartością nachylenia, która różni się od tej

wewnętrznej o czynnik 5σ . Porównując nasze wyniki z wartościami uzyskanymi przy użyciu supernowych Ia, zarysowaliśmy zawyżone oszacowanie w porównaniu do supernowych przy wartości parametru gęstości materii, Ω_M , 13%, podczas gdy stała Hubble'a, H_0 , jest nadal zgodna w obrębie 1σ z wynikami dla supernowych Ia. Natomiast dla podzbioru wysoko świecących rozbłysków, Ω_M jest niedoszacowane o 13%, a H_0 o 5%. W związku z tym doszliśmy do wniosku, że każde podejście kosmologiczne powinno brać pod rozwagę jedynie wewnętrzne korelacje, mianowicie skorygowane o kosmologiczne ewolucje i błędy selekcyjne.

Inne podejście, obejmujące $L_X-T^*_a$ jako możliwe narzędzie kosmologiczne, zostało zbadane w pracy **Postnikov i in. (2014)**, gdzie ograniczyliśmy kosmologiczne równanie stanu do funkcji redshiftu, $w(z)$, dla z do wartości 9.4 w całkowicie nieparametryczny sposób (tj. bez narzucania z góry postaci funkcyjnej dla $w(z)$). Aby uniezależnić się od wyboru modelu kosmologicznego najbardziej jak to możliwe, skalibrowaliśmy rozbłyski o wysokich redshiftach przy użyciu nachylenia i normalizacji korelacji $L_X-T^*_a$ w zakresie redshiftów supernowych Ia. Przyjmując założenie modelu FLRW płaskiego Wszechświata i łącząc dane dla supernowych Ia z więzami dla barionowych akustycznych oscylacji, powstałe, o największym prawdopodobieństwie, rozwiązania są zbliżone do wartości stałej $w=-1$. Tak więc potwierdziliśmy model przyspieszającego, płaskiego Wszechświata.

Additional selected scientific achievements not related to the main achievements

Osiągnięcia naukowe związane z M87 i emisją na granicy strumienia
Wzdłuż bocznych granic relatywistycznych dżetów, propagujących w otaczającym ośrodku, dochodzi do interakcji poprzez duże gradienty prędkości. W Dainotti i in. 2012 szukamy dowodu tych interakcji w galaktyce M87. Jednym z możliwych efektów takiej interakcji byłaby struktura pola magnetycznego 'ściętego' na granicach dżetu, prowadząca tym do charakterystycznego wzorca polaryzacji radiowej. Kolejne wyjaśnienie zaproponowane przez prof. Ostrowskiego obejmuje generowanie wysokoenergetycznego komponentu promieniowania kosmicznego na granicy dżetu. Efekt tej generacji powoduje dynamiczne oddziaływanie na ośrodek otaczający dżet i tworzenie kokonu zdominowanego przez promieniowanie kosmiczne o zmniejszonej zdolności emisyjnej gazu cieplnego. Szukaliśmy efektów tego typu interakcji. Przeanalizowaliśmy dane rentgenowskie z Chandry dla galaktyki radiowej M87, aby sprawdzić, czy oczekiwane obszary zmniejszonej emisyjności znajdują się w pobliżu rentgenowskiego dżetu. Połączyliśmy 42 oddzielne obserwacje i pokazaliśmy sygnatury niższej emisyjności otaczającej dżet.

W szczególności wykryliśmy spadek natężenia wzdłuż części dżetu, która, jeśli byłby umieszczona wzdłuż dżetu nachylonego w naszą stronę, miałby rozmiar około $1,5 \times 0,15 \text{ kpc}^2$. Ze względu na wysoce niejednolite tło promieniowania rentgenowskiego w rejonie centralnym, jesteśmy w stanie twierdzić, iż wokół strumienia M87 znajduje się kokon promieniowania kosmicznego: wykazaliśmy, że dane ukazują struktury morfologiczne, które można wyjaśnić, jeśli ów kokon promieniowania kosmicznego istnieje.

Osiągnięcia naukowe dotyczące radiowo głośnych i cichych rozbłysków

W Lloyd i in. 2018 badamy energetyczne radiowo głośnie i ciche rozbłyski, sugerując, iż pochodzą one potencjalnie z dwóch oddzielnych systemów progenitora. Odkryliśmy, że radiowo ciche rozbłyski mają znacznie krótszy rzeczywisty czas trwania emisji *prompt* i są średnio mniej energetyczne. Istnieje jednak niewielka korelacja między energią izotropową a czasem trwania w radiowo ciemnej próbce. Co ciekawe, znajdujemy antykorelację między rzeczywistym czasem trwania a przesunięciem ku czerwieni w radiowo jasnej próbce, ale już nie w radiowo ciemnej, co dodatkowo potwierdza, że te dwie próbki mogą pochodzić z oddzielnych progenitorów. Odkryliśmy również, że rozciągnięta emisja o bardzo wysokiej energii (0.1 - 100 GeV) występuje jedynie w radiowo głośnie próbce. Nie ma znaczącej różnicy między obecnością rentgenowskiego/optycznego plateau lub średnimi kątami otwarcia dżetu pomiędzy tymi dwiema próbkami. Sprawdzamy interpretację tych wyników w kontekście różnych modeli progenitorowych. Dane są spójne z radiowo głośnymi rozbłyskami pochodzącymi z tzw. *helium-merger system* i radiowo cichymi rozbłyskami pochodzącymi z systemu kolapsara (hipernowej), ale mogą również odzwierciedlać inne dychotomie w wewnętrznym 'silniku', takie jak gwiazda neutronowa kontra czarna dziura.

Osiągnięcia naukowe związane z mieszaniem materii wyrzuconej z supernowej typu II

Mieszanie materii jest jednym z ważnych tematów w badaniach nad wybuchami supernowych typu II (CCSN). W Mao i in. 2015, wykonujemy dwuwymiarowe symulacje hydrodynamiczne, aby odtworzyć wysokie prędkości skupisk atomów ^{56}Ni obserwowanych w supernowej 1987A. Jest to pierwszy raz, kiedy zaproponowano duże zaburzenie gęstości w progenitorze supernowej typu II, aby wygenerować niestabilność Rayleigha-Taylor (RT) i doprowadzić do efektywnego mieszania materii. W przypadku sferycznego wybuchu niestabilność RT jest skuteczna zarówno dla granicy ośrodków C+O/He jak i He/H progenitora supernowej. Radialne, spójne struktury, pokazane w postaci zaburzeń, są ważne dla uzyskania skupisk ^{56}Ni o dużej prędkości. Możemy także uzyskać cechy mieszania materii oraz wysokie prędkości skupisk ^{56}Ni w niektórych przypadkach

niesferycznych wybuchów. Odkryliśmy, że jeden z najbardziej korzystnych modeli posiada kombinację dwubiegunowych i równikowo asymetrycznych wybuchów, w których co najmniej 25% zaburzeń gęstości jest wnoszonych przy różnym składzie granicy ośrodków progenitora supernowej typu II. Te wyniki symulacji są porównywalne z wynikami obserwacyjnymi supernowej 1987A.

Osiągnięcia naukowe związane z właściwościami widmowymi i polaryzacyjnymi emisji fotosferycznej z warstwowych dżetów

W Ito i in. 2014, badamy właściwości spektralne i polaryzacyjne emisji fotosferycznych z warstwowych dżetów. W tym scenariuszu wiele komponentów, oddzielonych obszarami ostrego ścinania/obcięcia prędkości, jest rozmieszczonych w rejonach bocznych. Obliczana jest tutaj propagacja termicznych fotonów wstrzykiwanych w rejonie o wysokiej grubości optycznej, dopóki nie uciekną one z fotosfery. Stwierdzono, że obecność struktury bocznej w dżecie prowadzi do nietermicznego zachowania widma i znacznego spolaryzowanego sygnału w otrzymanej emisji. Odchylenie od widm termicznych, jak również stopień polaryzacji, mają tendencję do zwiększania się wraz ze wzrostem gradientu prędkości w obszarze ścinania/obcięcia (ang. *shear region*). W szczególności pokazujemy, że emisje z wieloskładnikowego dżetu mogą odtwarzać typowe obserwowane widma rozbłysków gamma niezależnie od położenia obserwatora, podczas gdy obszar ścinania/obcięcia prędkości jest blisko rozmieszczony przy różnych położeniach bocznych (θ). Stopień polaryzacji związany z emisją jest znaczny ($>$ kilka procent) dla szerokiego zakresu kątów obserwatora i może być wyższy niż 30%.

Osiągnięcia naukowe i wpływ związany z przyszłą misją Tezeusz

Aktywnie uczestniczę w Transient High Energy Sky and Early Universe Surveyor (THESEUS) - koncepcji misji zaakceptowanej przez ESA do fazy A badania, które ma kluczowe znaczenie dla obserwacji dużej liczby rozbłysków z redshiftem, co dalej da nam bezprecedensową możliwość dalej badać wczesny Wszechświat i rozbłyski w epoce reionizacji, tempa powstawania gwiazd oraz ewolucję metaliczności międzygwiazdowego i wewnątrzgalaktycznego ośrodka aż do przesunięcia ku czerwieni $z \sim 10$, sygnatury gwiazd III populacji, źródła i fizykę rejonizacji, oraz słaby koniec funkcji jasności galaktyki. W tym celu Theseus (Amati i in. 2018) jest wyposażony w instrumenty, które umożliwiają detekcję rozbłysków i detekcję rentgenowską tranzytu w szerokim polu widzenia (ponad 1sr) z lokalizacją źródła 0.5-1 arcmin, pasmem energetycznym rozciągającym się od 0.3 keV do kilku MeV i wysoką czułością na obiekty tranzytowe w domenie miękkiego promieniowania rentgenowskiego, jak

również pokładowym, o szybkim czasie reakcji (kilka minut) 0.7m teleskopem działającym w zakresie podczerwieni, z możliwością obrazowania jak i spektroskopii. Ponadto zapewni bezprecedensową zdolność do monitorowania zmiennego nieba w zakresie rentgenowskim, w ten sposób wykrywając, lokalizując i identyfikując elektromagnetyczne odpowiedniki źródeł promieniowania grawitacyjnego, które mogą być wykryte pod koniec lat 20./na początku lat 30. przez urządzenia następnej generacji, jak aLIGO/aVirgo, eLISA, KAGRA oraz Einstein Telescope. Projekt THESEUS zapewni również silną synergię z następną generacją obserwatoriów wielofalowych (np. LSST, ELT, SKA, CTA, ATHENA). Rzeczywiście, w odniesieniu do sygnału elektromagnetycznego ostatnie odkrycie elektromagnetycznego odpowiednika źródła fali grawitacyjnej – GW170817 pokazało ogromną moc obserwacji na wielu zakresach. Od 2030 roku i dalej, trzecia generacja naziemnych detektorów fal grawitacyjnych będzie mniej więcej dziesięć razy bardziej czuła niż obecne. W tym samym czasie detektory neutrin, obecnie modernizowane do teleskopów o rozmiarach km^3 , będą wliczać również detektor o powierzchni 10km^3 na półkuli południowej. W Stratta i in. 2018 r. opisujemy kluczową rolę misji THESEUS i zaproponowaliśmy dużą międzynarodową współpracę w odpowiedzi na wezwanie do misji Cosmic Vision Programme M5.

Bibliografia

- Amati et al. 2018, AdSpR, 62, 191
- Bernardini, M.G. et al, 2011 A&A, 526, A27
- Cannizzo, J. K. & Gehrels, N., 2009, ApJ, 700, 1047
- Capozziello, S., et., 2008, A&A, 490, 31C
- Cardone, V.F, i in., 2009, MNRAS, 400, 775
- Cardone, V.F., i in., 2010, MNRAS tmp 1386
- Dainotti, M. G., i in., 2008, MNRAS 391L, 79
- Dainotti, MG., i in., 2010, ApJL, 722, L215
- Dainotti, M. G., i in., 2011a, ApJ, 730, 135
- Dainotti, M.G., i in., 2011b, MNRAS, 418, 2202**

Dainotti, M.G., i in., 2013a, ApJ, 774, 157

Dainotti M.G., i in., 2013b, MNRAS, 436, 82

Dainotti M.G. i in. 2015a, ApJ, 800, 31

Dainotti M.G. i in. 2015b, MNRAS, 451, 3898

Dainotti i in. 2016, ApJ, 825, L20.

Dainotti i in. 2017a, A&A, 600, 98.

Dainotti i in. 2017b, NewAR, 77, 23.

Dainotti i in. 2017c, ApJ, 848, 88.

Dainotti i in. 2018a, Advances in Astronomy, id.4969503

Dainotti & Amati 2018b, PASP, 130e1001D

Dall'Osso, S., i in., 2011, A&A, 526A, 121D

Efron & Petrosian, 1992, ApJ, 399, 345

Ghirlanda, G., i in., 2007, A&A, 466, 127

Ghisellini G., i in., 2008, A&A, 496, 3, 2009

Ghisellini, G., i in., 2004 ApJ, 613, 1, L13.

Ito, H et al. 2014, ApJ, 789,159

Kocevski, D., & Liang, E., 2006, ApJ, 642, 371

Lloyd, N., & Petrosian, V. 1999 ApJ, 511, 550

Lloyd, N., & Petrosian, V. 2000, ApJ, 543, 722L.

Lloyd, N., Gompertz, B., Asaf, P., Dainotti, M., & Fruchter, A. 2019, ApJ, 871, 1.

Mao, J. et al. 2015, ApJ, 808, 164

Malmquist, K. G., 1920, Medd. Lund. Obs., Ser. 2, 22

Norris, J.P., & Bonnell, J.T. 2006, ApJ, 643, 266

O'Brien, P.T., i in. 2006, ApJ, 647, 12130
Postnikov, S. i in. 2014, ApJ, 783, 126
Rea, N. i in. 2015, ApJ, 813, 92
Riechart, D.E., i in., 2001, ApJ, 552, 57
Rowlinson, A. i in. 2014, MNRAS, 443, 1779
Sakamoto, T., i in., 2007, ApJ, 669, 1115
Schaefer, B.E., 2003, ApJ, 583, L67
Schaefer, B.E., 2007, ApJ, 660, 16
Stratta et al. 2018, 2018 AdSpR, 62, 662
Singal, J., i in., 2012, ApJ, 753, 45
Stratta, et al. 2018, ApJ, 869, 155
Tarnopolski, M. 2016, MNRAS, 458, 2024
Willingale, R.W., i in., 2007, ApJ, 662, 1093
Yamazaki, R., 2009, ApJ, 690, L118