

PODSUMOWANIE OSIĄGNIĘĆ ZAWODOWYCH

DOROTTYA SZÉCSI

1. Podstawowe dane

Imię i nazwisko **Dorottya Szécsi**
 <http://orcid.org/0000-0001-6473-7085>
Adres Instytut Astronomii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, ul. Gagarina 11, 87-100 Toruń
E-mail dorottya@umk.pl
Strona www <http://astro.umk.pl/~dorottya>
Metryki [ui.adsabs.harvard.edu-search-szecs-dorottya-metrics](http://ui.adsabs.harvard.edu/search-szecs-dorottya-metrics)

2. Dyplomy i stopnie naukowe

- 04.07.2016 **Doktorat z astrofizyki**, *Argelander-Institut für Astronomie of the University Bonn (Niemcy)*, Tytuł rozprawy doktorskiej: „The evolution of low-metallicity massive stars” (w języku angielskim), promotor: Prof. Norbert Langer.
- 22.06.2012 **Magister fizyki**, *Eötvös Loránd University, Budapest (Węgry)*, Praca magisterska: „Direction Dependent Background Fitting Method for analysing the Fermi Gamma-ray Space Telescope’s Data” (w języku węgierskim), promotor pracy dyplomowej: Dr Zsolt Bagoly.
- 10.06.2010 **Licencjat z fizyki ze specjalizacją astronomia**, *Eötvös Loránd University, Budapest (Węgry)*, Praca licencjacka: „Badanie właściwości czasowych rozbłysków gamma za pomocą satelity Fermi” (w języku węgierskim), promotor pracy dyplomowej: Dr Zsolt Bagoly.

3. Historia edukacji i zatrudnienia

- 10.2020 – teraz **Adiunkt, lider grupy - grant NCN OPUS**, *Instytut Astronomii, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej – Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, Polska.*
- 04.2019 – 09.2021 **Alexander von Humboldt Individual Research Fellow**, *University of Cologne, Niemcy.*
- 10.2017 – 03.2019 **Adiunkt**, *Institute of Gravitational Wave Astronomy and School of Physics and Astronomy, University of Birmingham, Wielka Brytania.*
- 08.2016 – 09.2017 **Adiunkt**, *Astronomical Institute of the Czech Academy of Sciences, Czechy.*
- 04.2016 – 07.2016 **Adiunkt**, *Argelander-Institut für Astronomie of the University Bonn, Niemcy.*
- 09.2012 – 07.2016 **Doktorant**, *Argelander-Institut für Astronomie of the University Bonn, Niemcy.*
- 01.2008 – 08.2012 **Asystent naukowy**, *Konkoly Observatory of the Hungarian Academy of Sciences, Węgry.*
- 09.2010 – 06.2012 **Student studiów magisterskich**, *Eötvös Loránd University, Budapest, Węgry.*
- 10.2011 – 02.2012 **Student wymiany Erasmus**, *Stypendium na Bergische Universität Wuppertal, Niemcy.*
- 01.2008 – 06.2012 **Stażysta**, *Nieodpłatny staż badawczy w węgierskiej grupie badawczej OTKA-77795.*
- 09.2007 – 06.2010 **Student studiów licencjackich**, *Eötvös Loránd University, Budapest, Węgry.*

4. Osiągnięcia habilitacyjne

ROLA PROGENITORÓW FAL GRAWITACYJNYCH WE WSZECHŚWIECIE

- (HAB1) [Szécsi](#), D., Agrawal, P., Wunsch, R., Langer, N.: *'Bonn' Optimized Stellar Tracks (BoOST). Simulated Populations of Massive and Very Massive Stars as Input for Astrophysical Applications*, A&A 658, A125 (2022). [[LINK](#)] [[arXiv:2004.08203](#)] [[Media Release](#)] – 22 strony.
- (HAB2) Agrawal, P.; [Szécsi](#), D.; Stevenson, S.; Hurley, J.: *Explaining the differences in massive star models from various simulations*, MNRAS Vol.512, Issue 4, pp.5717-5725 (2022). [[LINK](#)] [[arXiv:2112.02800](#)] – 9 strony.
- (HAB3) [Szécsi](#), D. and Wunsch, R.: *Role of supergiants in the formation of globular clusters*, ApJ 871, 20 (2019). [[ADS](#)] [[arXiv:1809.01395](#)] – 21 strony.
- (HAB4) [Szécsi](#), D., Mackey, J. and Langer, N.: *Supergiants and their shells in young globular clusters*, A&A 612, A55 (2018). [[LINK](#)] [[arXiv:1711.04007](#)] – 13 strony.
- (HAB5) Kubátová, B.; [Szécsi](#), D.; Sander, A. A. C.; Kubát, J.; Tramper, F.; Krtićka, J.; Kehrig, C.; Hamann, W.-R.: *Low-metallicity massive single stars with rotation. II. Predicting spectra and spectral classes of chemically homogeneously evolving stars*, A&A, 623, A8 (2019). [[LINK](#)] [[arXiv:1810.01267](#)] – 33 strony.

I. WPROWADZENIE

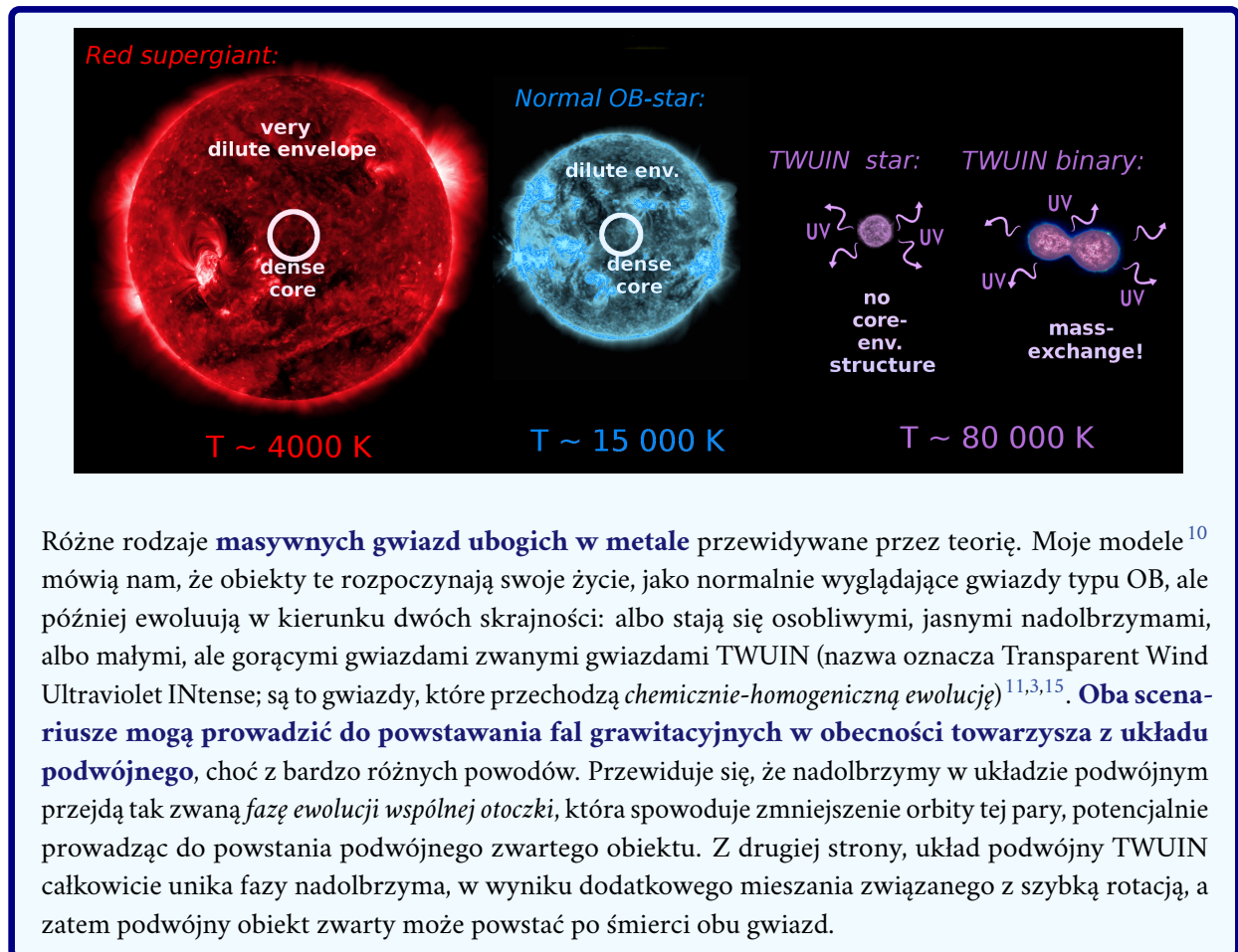
Co fale grawitacyjne mają wspólnego ze starożytnymi gromadami gwiazd? Co łączy je z kosmicznymi eksplozjami, wytwarzającymi promieniowanie gamma, z energetycznym promieniowaniem w galaktykach gwiazdotwórczych, a nawet z początkiem naszego Wszechświata? Wszystkie te zjawiska, i nie tylko, zostały teoretycznie wyprowadzone, w taki czy inny sposób, z zadania dotyczącego **masywnych gwiazd ubogich w metal**¹⁻⁷.

Jednak nasza wiedza na temat tego typu gwiazd, masywniejszych niż 8 mas Słońca i zawierających tylko niewielką ilość ciężkich pierwiastków, jest wciąż dość uboga. Istniejące dowody na ich istnienie są zazwyczaj sporadyczne: w końcu gwiazdy te nie tylko rzadko się rodzą (wszystkie masywne gwiazdy rodzą się rzadko), ale także żyją daleko od nas, w innych galaktykach. Dlatego bardzo trudno jest przeprowadzić ich bezpośrednie obserwacje^{8,9}. Przez większość czasu musimy pracować z wszelkimi *pośrednimi* dowodami, jakie możemy uzyskać.

Używam terminu *ubogi w metale* w znaczeniu zawartości metali (*metaliczności*) niższej niż ta, występująca w Małym Obłoku Magellana, tj. $0,1 Z_{\odot}$, ale jeszcze nie całkowicie wolnej od metali.

Wiemy, że gwiazdy te muszą być wystarczająco **masywne**, aby po śmierci utworzyć czarne dziury lub gwiazdy neutronowe (w skrócie: masywne zwarte objekty). Wiemy również, że większość z nich musi mieć **niską zawartość metali**. Jednakże, pomimo wszystkich wysiłków ostatniej dekady, natura tych *ubogich w metal masywnych gwiazd* wciąż nas zaskanawia^{1,10,11,2}, ponieważ nikt nigdy *bezpośrednio* nie zaobserwował gwiazdy, która jest, powiedzmy, 100 razy bardziej masywna i 100 razy bardziej uboga w metal niż Słońce. Droga Mleczna, dość stara galaktyka o wysokiej zawartości metali, po prostu nie zawiera już takich gwiazd.

Z teorii¹⁰ wynika, że ubogie w metale masywne gwiazdy mogą zachowywać się w szczególny sposób (por. rysunek na stronie 3). Na przykład, mogą one stać się **osobliwymi gwiazdami nadolbrzymami**^{12,13}, które są o wiele rzędów wielkości jaśniejsze, niż jakikolwiek nadolbrzym obserwowany do tej pory. Mogą także, w innych okolicznościach, tworzyć **gorące i szybko rotujące gwiazdy**^{14,15}, które po wybuchu wytwarzają niezwykle energetyczne zjawiska (np. rozbłyski gamma^{3,4}). W obu przypadkach, jeśli takie gwiazdy narodzą się w układzie podwójnym, mogą utworzyć podwójne zwarte obiekty (choć różnymi kanałami), które ostatecznie połączą się i wyemitują fale grawitacyjne^{16–20}.



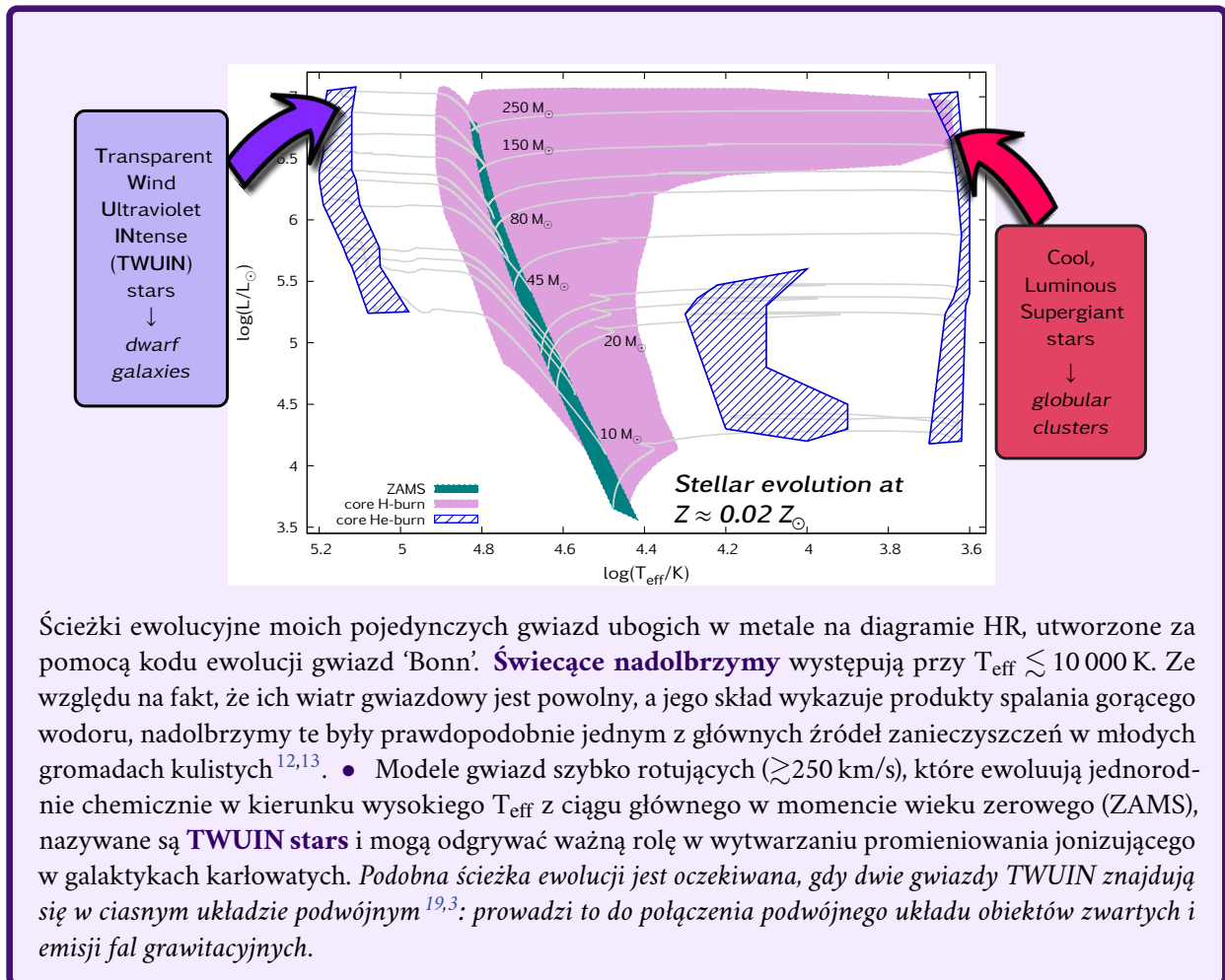
Różne rodzaje **masywnych gwiazd ubogich w metale** przewidywane przez teorię. Moje modele¹⁰ mówią nam, że obiekty te rozpoczynają swoje życie, jako normalnie wyglądające gwiazdy typu OB, ale później ewoluują w kierunku dwóch skrajności: albo stają się osobliwymi, jasnymi nadolbrzymami, albo małymi, ale gorącymi gwiazdami zwanymi gwiazdami TWUIN (nazwa oznacza Transparent Wind Ultraviolet INTense; są to gwiazdy, które przechodzą *chemicznie-homogeniczną ewolucję*)^{11,3,15}. **Oba scenariusze mogą prowadzić do powstawania fal grawitacyjnych w obecności towarzysza z układu podwójnego**, choć z bardzo różnych powodów. Przewiduje się, że nadolbrzymy w układzie podwójnym przejdą tak zwaną *fazę ewolucji wspólnej otoczki*, która spowoduje zmniejszenie orbity tej pary, potencjalnie prowadząc do powstania podwójnego zwanego obiektu. Z drugiej strony, układ podwójny TWUIN całkowicie unika fazy nadolbrzyma, w wyniku dodatkowego mieszania związanego z szybką rotacją, a zatem podwójny obiekt zwarty może powstać po śmierci obu gwiazd.

Chociaż nie jest możliwe *bezpośrednie* wykrycie takich obiektów, zebrano pewne dowody obserwacyjne na istnienie i naturę tych specjalnych gwiazd - możemy zobaczyć ich *ślady*. Świecące, ubogie w metale nadolbrzymy mogły odegrać rolę w formowaniu się starożytnych **gromad kulistych**^{12,13}. Jeśli chodzi o szybko rotujące, tak zwane *chemicznie jednorodnie ewoluujące* gwiazdy (lub „gwiazdy TWUIN”, patrz rysunek na stronie 3), zasugerowano, że przyczyniają się one do powstawania gwiazd w galaktykach karłowatych¹⁴ i odpowiadają za **długotrwałe rozbłyski promieni gamma i niektóre supernowe**^{4,21}.

Wśród masywnych gwiazd ubogich w metale, szczególną uwagę należy zwrócić na te, które są **gwiazdnymi rodzicami (progenitorami)** emitujących fale grawitacyjne fuzji zwartych obiektów. Chociaż fale grawitacyjne są obecnie regularnie wykrywane²², pozostają pytania otwarte dotyczące ich pochodzenia, zwłaszcza jeśli chodzi o ich gwiazdnych przodków. To sprawia, że moje badania są szczególnie istotne i aktualne.

Podczas mojej kariery naukowej po doktoracie, **skupiłam się zarówno na udowadnianiu, jak i obalaniu teorii dotyczących masywnych gwiazd ubogich w metale**. Sposób, w jaki to robię, jest całkowicie unikatowy, a jednocześnie logiczny: łączę istniejące dowody oraz analizuję różne role, jakie te gwiazdy odgrywają w wielu dziedzinach astrofizyki w jednolity obraz. Jak wspomniałam, wszelkie dowody, jakie możemy uzyskać, są zazwyczaj pośrednie, a zatem pochodzą z różnych dziedzin takich,

jak np. detekcje fal grawitacyjnych, badania supernowych i rozbłysków gamma, archeologia gwiazdna starożytnych gromad itd. Połączenie tych różnych dziedzin poprzez podstawowy wkład masywnych gwiazd ubogich w metale jest tym, co pokazałam w **HAB1-5**.



Podczas, gdy celem mojego doktoratu było wygenerowanie samych modeli¹¹, od tego czasu rozpocząłem znacznie bardziej wszechstronną analizę: **zastosowałam modele w różnych, niezależnych przypadkach badawczych dla całego Wszechświata**. Zade-monstrowałam kluczowe fakty dotyczące tych gwiazd (takie jak ich typy widmowe¹⁵, **HAB5**), opisałam niektóre z ich ważnych właściwości (takie jak ich materiał wiatrowy, który może tworzyć nowe gwiazdy¹², **HAB4**) i połączyłam zagadnienia i przewidywania z różnych dziedzin astrofizyki (np. badania masywnych gwiazd z dziedziną powstawania gromad¹³, **HAB3**).

Co więcej, zbadałam niepewną fizykę tych gwiazd i ich rolę w badaniach fal grawitacyjnych²³, **HAB2**, a także dostarczyłam bezprecedensowy, i szeroko stosowany, zestaw publicznie dostępnych i dobrze utrzymanych zestawów modeli do zastosowań astrofizycznych²⁴, **HAB1**, więcząc moje osiągnięcia.

TWUIN oznacza: Transparent Wind Ultraviolet Intense. Gwiazdy TWUIN to teoretycznie przewidywane gwiazdy, które przechodzą *chemicznie jednorodną ewolucję*^{11,3,15} i są tak gorące jak gwiazdy Wolfa-Rayeta. Są one jednak *not* typu Wolfa-Rayeta, ponieważ ich wiatr nie jest optycznie gęsty. Szczegółowe informacje można znaleźć na rysunkach na stronach 3 i 4, a także w badaniach przeprowadzonych w **HAB5**¹⁵.

II. OD EWOLUCJI GWIAZD DO BADAŃ FAL GRAWITACYJNYCH: ELEMENTY MODELOWANIA GWIEZDNEGO I POPULACYJNEGO

Modelowanie gwiazdne *ewolucyjne* i modelowanie gwiazdne *populacyjne* są często mylone. Podczas, gdy kody ewolucyjne obliczają modele gwiazdne z pierwszych zasad (symulując hydrodynamiczną strukturę odizolowanej kuli gazu, czyli „gwiazdy” lub „modelu gwiazdnego”), **kody syntezy populacji zazwyczaj opierają się na wstępnie obliczonych modelach ewolucyjnych gwiazd i szacują**, jakie zintegrowane właściwości miałyby ich populacja. Rzeczywiście, jeśli obłok molekularny rodzi daną liczbę gwiazd, niektóre z nich będą miały niską masę, a niektóre z nich będą miały wysoką masę – jest to opisane przez tak zwaną funkcję masy początkowej, która jest zwykle przyjmowana jako prawo potęgowe. Ważąc tę funkcję i wykorzystując wstępnie obliczone modele ewolucji gwiazd, można – w zasadzie – przewidzieć takie rzeczy dotyczące populacji, jak całkowity strumień emitowanych fotonów jonizujących lub całkowita masa wyrzucona z gwiazd (i jej skład) lub liczba/energia supernowych i innych eksplozji (np. wybuchy promieniowania gamma, częstotliwość zdarzeń fal grawitacyjnych). Rzeczywiście, anglojęzyczny termin *stellar feedback* odnosi się do tego w kontekście regionu gwiazdotwórczego, w którym obecne są młode masywne gwiazdy i wnoszą swój wkład w postaci silnego promieniowania i masy, albo jako żywa, wyrzucająca masę masywna gwiazda, albo jako eksplodująca supernowa. Termin *supernova feedback* jest używany w odniesieniu tylko do tego drugiego procesu.

Szczegółowe modele a szybkie modele

Kolejne nieporozumienie często pojawia się, gdy literatura mówi o „śledzeniu ewolucji gwiazdy/populacji gwiazd”. Śledzenie w tym kontekście może oznaczać, że szczegółowe symulacje są przeprowadzane za pomocą kodu ewolucyjnego lub że stosowane są istniejące symulacje (jako tabele / formuły dopasowania) służące jako podstawa dla podejścia szybkiego.

Przykłady szczegółowych kodów ewolucji gwiazd obejmują kod „Bonn”²⁴ i MESA (*Modules for Experiments in Stellar Astrophysics*^{35–37}). Oba te kody są najnowocześniejsze, patrz panel po prawej stronie. Zaletą kodu MESA jest to, że jest kodem o otwartym dostępie, czyli open source, a także jest modułowy i rozszerzalny^{38,39,19,40–42}.

Przykłady szybkich kodów obejmują ten, w który byłam zaangażowana, jako ekspert teoretyczny, zwany COMPAS (*Compact Object Mergers: Population Astrophysics and Statistics*)^{*}. Choć został on wykorzystany w wiodących badaniach nad wskaźnikami fuzji emitujących fale grawitacyjne^{43–46,6,7}, opiera się on na dość uproszczonych formułach dopasowania⁴⁷ i dlatego nie jest bardzo elastycznym narzędziem do syntezy populacji – jego jedynym możliwym zastosowaniem jest przewidywanie wskaźników fuzji. Pomimo jego wielu zalet, w tym wyjątkowo silnych pakietów statystycznych, niedawne otwarte wydanie na githubie:^{**}, a także aktywnego rozwoju i dużego wsparcia użytkowników, jego obecna wersja nie byłaby w stanie uwzględnić powrotu gwiazd np. w formujących się gromadach gwiazd (np. **HAB3/4**).

Bonn Code jest wiodącym kodem ewolucji gwiazd, który, między innymi, jest szczególnie odpowiedni do symulacji masywnych gwiazd ze względu na dużą sieć reakcji jądrowych i wysoką rozdzielczość przestrzenną, którą stosuje^{10,25–28}. Najnowszym dodatkiem do kodu był tak zwany **BoOST project** (*Bonn Optimized Stellar Tracks*, Szécsi+22²⁹), w którym udostępniłam publicznie duże siatki modeli w postaci pełnych, dobrze utrzymanych tabel (por. **HAB1**). Tabele te są obecnie szeroko stosowane w społeczności^{30–34}.

Dlaczego potrzebujemy schematu populacji w badaniach nad falami grawitacyjnymi?

Emitujące fale grawitacyjne zwarte obiekty rozpoczynają swoje życie, jako dwie masywne gwiazdy w układzie podwójnym. Wykrywamy fale grawitacyjne z całego naszego rozległego Wszechświata. Dlatego też przewidywanie ich jest z natury przedsięwzięciem statystycznym. Powszechnym podejściem jest budowanie **syntetycznych populacji gwiazd podwójnych** w oparciu o teoretyczne modele gwiazdne^{48–57,20,58,43,59–61,7}. Wyniki, które mają być interpretowane statystycznie, będą zależeć od leżących u podstaw modeli gwiazdnych *ewolucyjnych* dość delikatnie.

Z drugiej strony, ewolucja masywnych gwiazd, a zwłaszcza masywnych gwiazd ubogich w metale,

* Strona internetowa COMPAS: <http://compas.science/>

** COMPAS github: <http://github.com/TeamCOMPAS/COMPAS>

przeszła w ostatnich latach znaczący rozwój. Nowe składniki fizyczne zostały zaimplementowane i przebadane w symulacjach ewolucji gwiazd, na przykład za pomocą kodu „Bonn”^{62–64,27,28,10,29} i z wykorzystaniem innych kodów^{54,65,66,19,40,42}, dzięki nim nasza wiedza na temat masywnych gwiazd ubogich w metale (pojedynczych i podwójnych) znacznie wzrosła.

Aby przewidzieć zdarzenia związane z falami grawitacyjnymi tak dokładnie, jak to możliwe, musimy upewnić się, że używany przez nas kod populacji syntetycznej opiera swoje statystyki na tych najbardziej aktualnych modelach gwiazdnych - a także przyszłych (por. **HAB2**).

Wyzwania związane z ewolucją układów podwójnych

Interakcja między gwiazdami podwójnymi jest złożonym zagadnieniem^{67–69}, ponieważ te blisko położone gwiazdy mogą wymieniać się masą, łączyć się ze sobą i wpływać na swoje życie na różne inne sposoby (np. poprzez tworzenie pływów grawitacyjnych, poprzez wpływanie na orbitę drugiej gwiazdy, poprzez kolizję wiatrową i akrecję itp.) Wszystkie te procesy są aktywnie badane. Jednym z najbardziej wpływowych z nich jest tak zwana faza *wspólnej otoczki*, podczas której dwie gwiazdy są objęte tą samą, rozszerzoną otoczką gwiazdną. Rzeczywiście, obecność świecących supergigantów (zgodnie z przewidywaniami modeli gwiazd ubogich w metale, **HAB3**, **HAB4**) może znacząco wpłynąć na przewidywania tempa fuzji⁵⁷, ponieważ gwiazdy te mogą przechodzić wspólną ewolucję otoczki ze swoimi towarzyszami.

Nieodłączne wyzwania związane z tworzeniem syntetycznych populacji

Istniejące narzędzia do syntezy populacji zostały zwykle stworzone do określonych celów: niektóre mają na celu przewidywanie częstotliwości zdarzeń fal grawitacyjnych (np. COMPAS^{43,60,7}, StarTrack^{49,53,57}, ComBinE⁵⁹, BPASS^{50,20}), niektóre mają na celu statystyczne przewidywanie właściwości fizycznych obserwowanych gwiazd (Starmaker⁵², Bonnsai⁵⁵, binary_c^{48,51,56}), a niektóre mają na celu dostarczenie danych wejściowych dla innych kodów (np. poprzez przewidywanie sprzężenia zwrotnego na formowanie gwiazd przez populację masywnych gwiazd znajdujących się w pobliżu; BPASS⁵⁴, synStars¹³). Chociaż wszystkie te kody mają tę samą podstawową ideę – to znaczy ważenie modeli ewolucji gwiazd za pomocą funkcji masy początkowej w celu przewidywania pewnych właściwości populacji gwiazd – żaden z nich nie jest w stanie *jednocześnie* spełnić wszystkich wymienionych celów.

W idealnym przypadku potrzebowalibyśmy zintegrowanych wartości *każdej* właściwości gwiazdnej, które uwzględniają najnowocześniejsze modele ewolucyjne, takie jak:

- całkowita energia emitowana w promieniowaniu jako funkcja czasu,
- całkowita utracona masa i jej skład w funkcji czasu,
- całkowita prędkość wiatru w funkcji czasu,
- liczba wybuchów supernowych i ich energia kinetyczna,
- liczba wybuchów gamma o długim czasie trwania (np. oszacowana na podstawie scenariusza kolapsu),
- masy powstałych obiektów zwartych,
- liczba połączeń emitujących fale grawitacyjne,

itd. Posiadanie wszystkich tych przewidywań jednocześnie, z różnych populacji gwiazd (tj. o różnej metaliczności, rozkładach prędkości rotacji i frakcjach binarnych), było jednym z głównych celów podczas mojej niezależnej kariery po doktoracie (**HAB1**).

W praktyce, stworzenie kodu syntezy populacji układów podwójnych opartego na nowoczesnych modelach gwiazdnych w elastyczny sposób tak, aby wynik miał zastosowanie nie tylko do przewidywania częstości zdarzeń fal grawitacyjnych, ale także do kilku innych dziedzin pokrewnych badań, **jest wyzwaniem**^{39,70,71,29}. Z pewnością wymaga wiedzy specjalistycznej w zakresie ewolucji gwiazd i syntezy populacji układów podwójnych, ale także pewnej wiedzy specjalistycznej w innych dziedzinach (formowanie się gwiazd i symulacje kosmologiczne). Choć na pierwszy rzut oka wydaje się to prostym zadaniem, w przypadku syntezy populacji diabeł tkwi w szczegółach. Na przykład,

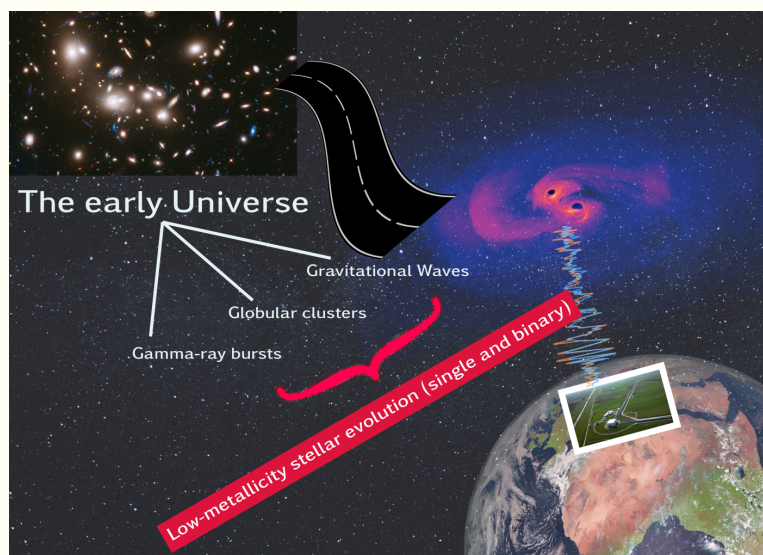
interpolacja między dwoma modelami ewolucji gwiazd jest czymś, co jest zazwyczaj potrzebne^{52,39} (chyba że oblicza się bardzo gęstą siatkę modelu¹⁹; jest to jednak nie tylko kosztowne obliczeniowo, ale wymaga również dużej siły roboczej do utrzymania siatki). Ale interpolacja jest również wyzwaniem, ponieważ modele te są zbiorami danych o bardzo dużych wymiarach. Upewnienie się, że wszystkie ich parametry zmieniają się płynnie po interpolacji, jest poważnym zadaniem. A sytuacja staje się jeszcze bardziej skomplikowana, gdy chce się pracować nie tylko z pojedynczymi, ale także z **gwiazdami podwójnymi**⁴¹: wtedy przestrzeń parametrów staje się znacznie większa, ponieważ dowolne dwie gwiazdy mogą znajdować się na bliskiej orbicie, na szerokiej orbicie lub cokolwiek pomiędzy – a ich odległość orbitalna wpływa na sposób, w jaki żyją swoim połączonym życiem.

Wiatry gwiazdne i ich niepewne wskaźniki utraty masy

Jednym z najbardziej niepewnych fizycznych składników teorii masywnych gwiazd jest natura ich utraty masy, czyli wiatrów gwiazdowych. Faktem jest, że masywne gwiazdy wyrzucają materię podczas swojego życia, a dokładna jej ilość silnie wpływa na ich zachowanie ewolucyjne. Nie jest jednak łatwo przewidzieć dokładną ilość wyrzucanej materii. Szczególnie w przypadku gwiazd o niskiej zawartości metalu (tj. tych, co do których spodziewamy się, że są progenitorami fuzji emitujących fale grawitacyjne), trudno jest uzyskać obserwacyjne wskazówki dotyczące tego, w jaki sposób tracą one swoją masę. Niemniej jednak, w tej dziedzinie badań poczyniono znaczne postępy⁷²⁻⁷⁴ i są one kontynuowane⁷⁵⁻⁷⁷ – część z nich to mój własny wkład, por. **HAB5**¹⁵.

Typy supernowych i kwestia przypisania ich do modeli gwiazdotwórczych

Sekwencje modeli ewolucyjnych masywnych gwiazd nie zawsze obejmują **fazę ostatecznej eksplozji**. Jednakże, przekładając je na populacje, ludzie muszą przypisać im pewien typ supernowej (i uwolnioną energię wybuchu oraz masę resztkową). Ponieważ problem ten jest dość złożony ze względu na fizykę eksplozji zależną od struktury eksplodującej gwiazdy^{78,79}, w praktyce stosuje się kilka prostych rozwiązań.



Koncepcja moich badań. Źródła fal grawitacyjnych takie, jak łączące się czarne dziury i gwiazdy neutronowe, są wykrywane od wielu lat⁸⁰⁻⁸³. Uważa się, że te kosmiczne fuzje pochodzą od ubogich w metale masywnych gwiazd^{3,4} po tym, jak gwiazdy te zakończą swoje życie i utworzą obiekty zwarte. Jednak masywne gwiazdy o metaliczności poniżej 0,1 Z_{\odot} są bardzo trudne do zaobserwowania, jako pojedyncze obiekty. Powodem jest to, że są one (i) rzadkie, (ii) krótkotrwałe i (iii) odległe. Dlatego szukam *bezpośrednich* dowodów, zazwyczaj z młodego Wszechświata. W epokach kosmologicznych gwiazdy miały niższą zawartość metalu niż obecnie, więc zjawiska powstałe w tych wczesnych czasach (takie jak gromady kuliste, ale nawet rozbłyski promieniowania gamma) mogą pomóc nam poznać zachowanie masywnych gwiazd ubogich w metal, w tym ich złożone ścieżki do emisji fal grawitacyjnych.

Na przykład, w obecnej wersji kodu syntezy populacji binarnych COMPAS, każda gwiazda powyżej pewnej masy ma eksplodować jako supernowa, a końcowa masa pozostałości jest po prostu określana na podstawie masy rdzenia eksplodującej gwiazdy. Jest to proste i skuteczne, ale także bardzo uproszczone i przybliżone podejście do problemu. Podobnie, powszechnym podejściem jest założenie, że każda masywna gwiazda w populacji wybucha jako supernowa z jednolitą energią kinetyczną 10^{51} erg, co jest kolejnym prostym podejściem do tego złożonego zagadnienia (**HAB1**).

Rozbłyski promieniowania gamma: czym są i jak wpływają na obraz?

Długotrwałe rozbłyski gamma są zjawiskami energetycznymi towarzyszącymi supernowej z szybko rotującą gwiazdą progenitorową^{62,63,4}. Opierając się na rozkładzie specyficznego momentu pędu modelu gwiazdowego w późnych fazach ewolucji, można wywnioskować, czy taki wybuch nastąpi, czy nie²⁵ dla danego modelu. Otwiera to drzwi do włączenia badań nad rozbłyskami gamma do moich wysiłków na rzecz zrozumienia masywnych gwiazd ubogich w metale: eksplozje te były zarówno teoretycznie, jak i obserwacyjnie związane ze środowiskami o niskiej metaliczności^{14,4}.

Krótkotrwałe rozbłyski gamma powstają, gdy zderzają się dwie gwiazdy neutronowe (lub czarna dziura i gwiazda neutronowa). Naturalnie, **powinna temu towarzyszyć emisja fal grawitacyjnych**. Nominalne rozróżnienie między długimi i krótkimi wynosi 2 sek.

Wybuchy promieniowania gamma są codziennie obserwowane przez specjalne satelity takie, jak *Fermi*^{84,85} i *SWIFT*⁸⁶, a także okazjonalnie przez duże teleskopy naziemne⁸⁷⁻⁹⁰. Na dzień dzisiejszy istnieje próbka około ~ 500 długotrwałych rozbłysków gamma z pomiarem przesunięcia ku czerwieni ich galaktyk macierzystych⁹¹. Po przełożeniu między przesunięciem ku czerwieni, a metalicznością, te dane obserwacyjne mogłyby zostać wykorzystane do ograniczenia fizyki masywnych gwiazd ubogich w metale, tj. informując nas o **stosunku TWUIN stars (HAB5) do normalnych gwiazd w funkcji metaliczności** – pod warunkiem, że ostateczne losy gwiazd są prawidłowo przypisane w naszych syntetycznych populacjach.

Gromady kuliste: jak wpływają na obraz?

W naszej Galaktyce nie ma już masywnych gwiazd ubogich w metal, w tym tych, które rzekomo są progenitorami fuzji emitujących fale grawitacyjne. Mogły jednak istnieć tutaj w przeszłości - i rzeczywiście możemy dostrzec ich ślady w starożytnych, ubogich w metale galaktycznych gromadach kulistych. W prawie wszystkich gromadach kulistych zaobserwowano **anomalne proporcje lekkich pierwiastków**⁵, które mogą być syntetyzowane tylko głęboko wewnątrz masywnych lub średnio masywnych gwiazd, gdzie temperatura jest wystarczająco wysoka.

Masywne gwiazdy ubogie w metale mogą odgrywać kluczową rolę w tym procesie. W szczególności, ubogie w metal *świecące nadolbrzymy* mogą przyczyniać się do tego na różne sposoby (por. **HAB3** i **HAB4**). Podczas symulacji formującej się gromady kulistej, powszechnie zakłada się, że zaczyna ona jako młoda masywna gromada (YMC)^{92,93}. Aby uwzględnić wpływ pierwszej generacji masywnych gwiazd, można zastosować najnowocześniejsze modele ewolucyjne (z założoną funkcją masy początkowej). Druga generacja nowych gwiazd powstaje z materii wiatrowej (lub, w zależności od przyjętego scenariusza, z jej mieszaniny z gazem pierwotnym).

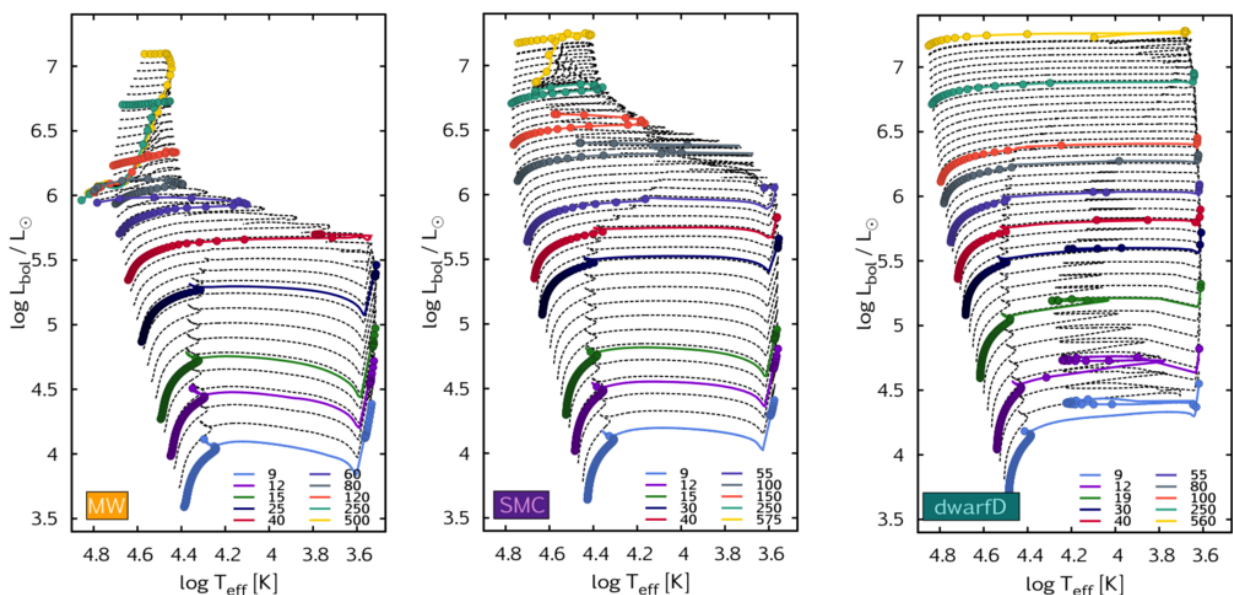
Porównania obserwacyjne można przeprowadzić przy użyciu danych archiwalnych, np. z przeglądu ESO/UVES⁹⁴ satelity *Gaia* i innych przeglądów spektroskopowych. Przyczyniając się w ten sposób do rozwoju dziedziny gromad kulistych **wzbogaca się nasze zrozumienie masywnych gwiazd ubogich w metale**, ponieważ nie ma wielu sposobów na obserwacyjne ograniczenie teorii tych gwiazd, a porównanie przewidywań modeli z pomiarami obfitości w gromadach kulistych, nawet jeśli pośrednie, jest jednym z nich. Rzeczywiście, liczba przewidywanych fuzji czarnych dziur zależy zarówno od liczby nadolbrzymów, jak i od natury transferu masy. Dlatego testowanie syntetycznych populacji w badaniach gromad kulistych, jednocześnie z ich przewidywaniami dotyczącymi detekcji aLIGO/Virgo, jest unikalnym pomysłem badawczym, który jest możliwy dzięki moim osiągnięciom habilitacyjnym (por. **HAB1-3**).

III. OPIS PUBLIKACJI

(**HAB1**) **Szécsi**, D., Agrawal, P., Wunsch, R., Langer, N.: 'Bonn' Optimized Stellar Tracks (BoOST). *Simulated Populations of Massive and Very Massive Stars as Input for Astrophysical Applications*, A&A 658, A125 (2022). [LINK] [arXiv:2004.08203] [Media Release] – 22 strony.

Streszczenie. Publicznie dostępne modele ewolucyjne masywnych gwiazd, obliczone za pomocą kodu Bonn, opublikowane i zoptymalizowane pod kątem zastosowań astrofizycznych. Taki kompletny zestaw modeli – obejmujący masywne i bardzo masywne gwiazdy ($9\text{--}500 M_{\odot}$) oraz szeroki zakres metaliczności ($Z_{\odot}\text{--}1/250 Z_{\odot}$) w przyjazny dla użytkownika sposób – jest **dość unikatowy w literaturze**. Oprócz dostarczania modeli gwiazdnych w zoptymalizowanym formacie, zapewniam również gęstą siatkę interpolowanych ścieżek na ich podstawie. Służą one obecnie, jako dane wejściowe do wielu badań^{30–34}, od symulacji 3D galaktyk karłowatych po formowanie się pyłu.

Jak to pasuje do mojej habilitacji? Publikowanie modeli, które stworzyłam i przetestowałam (**HAB2-4**) tak, aby inni mogli je również zastosować w swoich badaniach, jest kamieniem węgielnym mojej działalności. Mam nadzieję, że im pod szerszym kątem będziemy badać masywne gwiazdy ubogie w metale, tym lepiej będziemy mogli je zrozumieć. Podczas, gdy ja używam tych modeli do badania moich szczególnych zainteresowań badawczych (astrofizyka fal grawitacyjnych, gromady kuliste, rozbłyski gamma), istnieje więcej miejsc, w których takie gwiazdy mają swój udział. Zapewnienie **szerokiego zestawu danych dla społeczności** jest zatem kluczowe, jeśli moim celem jest właściwe zbadanie ich roli we Wszechświecie.



Przykład modeli opublikowanych w ramach projektu BoOST (**HAB1**)²⁴ na diagramie Hertzsprunga–Russella. Masa początkowa jest oznaczona kolorem (między 9 a $\sim 500 M_{\odot}$), początkowa metaliczność odpowiada metaliczności Drogi Mlecznej (MW), Małego Obłoku Magellana (SMC, $Z_{\text{SMC}} = 0,002$) i galaktyki karłowatej ubogiej w metal ($Z_{\text{dwarfD}} = 0,0001$). Kółka oznaczają co 10^5 lat ewolucji wzdłuż modeli gwiazdnych. Przerywane czarne linie reprezentują interpolowane ścieżki, na podstawie których tworzone są syntetyczne populacje gwiazd. • W ramach projektu BoOST, 9 pełnych siatek o podobnej strukturze zostało opublikowanych w przyjaznym dla użytkownika formacie danych (**HAB1**)²⁴ ułatwiającym łatwe zastosowanie modeli gwiazdnych ubogich w metale w badaniach fal grawitacyjnych i nie tylko.

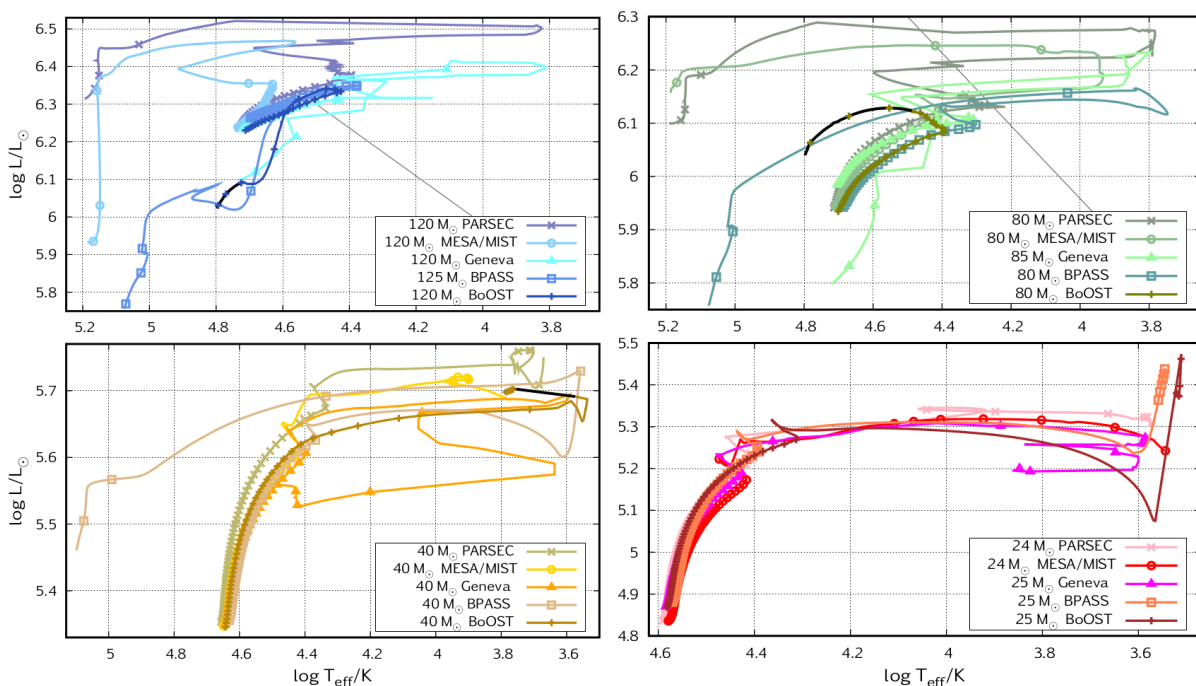
Moja rola. Jestem główną autorką tego badania; osobą, która wykonała zdecydowaną większość pracy. Moi współautorzy pomagali w programowaniu i podwójnym sprawdzaniu modeli pod kątem niespójności, ale wszystko inne zostało zrobione przeze mnie. Obejmuje to symulację i wstępne przetwarzanie modeli gwiazdnych, projektowanie siatek, wynalezienie nowatorskiego sposobu na przewyżczenie trudności numerycznych, post-processing wszystkich modeli do formatu przyjaznego dla użytkownika oraz napisanie artykułu.

Najważniejsze wyniki. Poniższe panele (strona 9) pokazują kilka przykładów modeli opublikowanych w **HAB1**. Wyróżniają się dwie cechy. Po pierwsze, obecność/nieobecność bardzo jasnych nadolbrzymów, przy niskiej/wysokiej metaliczności. Wynika to z faktu, że modele bogate w metal mają większe tempo utraty masy, a tym samym tracą swoje otoczki w wietrze gwiazdowym, stając się zamiast tego gorącymi gwiazdami Wolfa-Rayeta. Po drugie, obecność/nieobecność tak zwanej niebieskiej pętli przy niższej metaliczności: zjawisko to jest ściśle związane z wewnętrznym mieszaniem Schootemeijer:2019. Modele obejmują wydajność wiatru gwiazdowego dla 34 izotopów: ^1H , ^2H , ^3He , ^4He , ^6Li , ^7Li , ^7Be , ^9Be , ^8B , ^{10}B , ^{11}B , ^{11}C , ^{12}C , ^{13}C , ^{12}N , ^{14}N , ^{15}N , ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O , ^{19}F , ^{20}Ne , ^{21}Ne , ^{22}Ne , ^{23}Na , ^{24}Mg , ^{25}Mg , ^{26}Mg , ^{26}Al , ^{27}Al , ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si i ^{56}Fe , a także pełne pokrycie faz spalania jądra wodoru i jądra helu.

Praca ta służy obecnie, jako podstawa do wielu badań astrofizycznych^{30–34}, i będzie służyć więcej w przyszłości, wykorzystując prawdziwy potencjał modelowania ewolucji gwiazd i wieńcząc moje osiągnięcia habilitacyjne.

(**HAB2**) Agrawal, P.; Szécsi, D.; Stevenson, S.; Hurley, J.: *Explaining the differences in massive star models from various simulations*, MNRAS Vol.512, Issue 4, pp.5717–5725 (2022). [[LINK](#)] [[arXiv:2112.02800](#)] – 9 strony.

Streszczenie. Porównując modele BoOST (**HAB1**²⁴) z innymi symulacjami 1D masywnych gwiazd w literaturze, zdałem sobie sprawę, że powyżej $40 M_{\odot}$ pojawiają się poważne rozbieżności we *wszystkich* zestawach danych. Fizyczne przyczyny tych rozbieżności zostały tutaj wyjaśnione, a społeczność otrzymała wyraźne przesłanie, aby traktować *wszelkie* symulacje gwiazd powyżej $40 M_{\odot}$ z ostrożnością, ponieważ fizyka tych modeli nie osiągnęła jeszcze konsensusu naukowego.



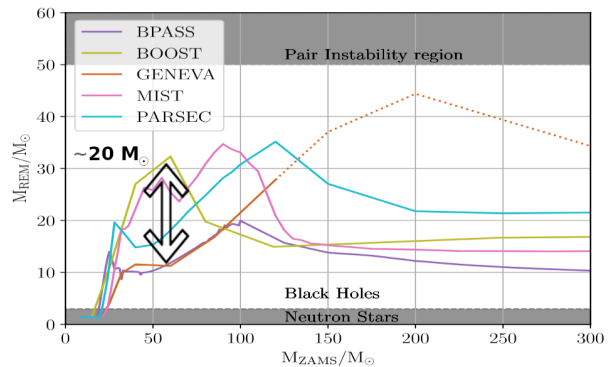
Diagramy HR masywnych modeli pojedynczych gwiazd o składzie zbliżonym do słonecznego. Rysunek pochodzi z **HAB2**²³. Symbole oznaczają co 10^5 lat ewolucji. Wykreślono tylko fazy spalania jądra wodoru i jądra helu. Cienka szara linia oznacza obserwacyjną granicę Humphreysa-Davidsona⁹⁶ tam, gdzie jest to istotne. Ślady stają się bardziej zróżnicowane wraz ze wzrostem masy początkowej. Wynika to z faktu, że kody stosują różne metody leczenia niestabilności numerycznych związanych z bliskością limitu Eddingtona, co prowadzi do różnic około $20 M_{\odot}$ w masach resztkowych między modelami gwiazdowymi z różnych symulacji. • *W oparciu o to wszystko ostrzegamy, że w badaniach fal grawitacyjnych trzeba ostrożnie stosować modele gwiazdne.*

Jak to pasuje do mojej habilitacji? Biblioteki modeli gwiazdowych są często traktowane, jako czarne

skrzynki przez osoby, które je stosują. Ponieważ sam opublikowałem taką bibliotekę w **HAB1**²⁴, dodanie niezbędnego ostrzeżenia, jest naukowo uzasadnionym kolejnym krokiem. Jako przypadek użycia badamy również, w jaki sposób **niepewności wpływają na przewidywania fal grawitacyjnych**. Znajdujemy rozbieżność sięgającą $20 M_{\odot}$: poważne zastrzeżenie dla każdego, kto chce połączyć łączące się czarne dziury z ich teoretycznymi przodkami⁹⁵.

Moja rola. Pierwsze autorstwo dzieł z moją ówczesną doktorantką, P. Agrawal. Oryginalny pomysł był mój, podobnie jak prezentacja wyników i spora część obliczeń. Jednak zaproponowałem mojej studentce, aby była głównym autorem, ponieważ podobnie, jak każdy młody badacz chcący budować karierę naukową, jej lista publikacji musiała zostać wzmocniona, aby uzyskać stanowisko podoktorskie. Niemniej jednak uważam ten artykuł za **jeden z najważniejszych moich wkładów** w teorię masywnych gwiazd: wyjaśnia on długotrwały problem związany z modelowaniem w szeroko dostępny sposób i zwraca uwagę ludzi na fakt, że *każdy* zestaw opublikowanych danych podlega pewnym niepewnościom modelowania.

Najważniejsze wyniki. Przedstawiam porównanie pięciu opublikowanych zestawów modeli gwiazdnych pochodzących z symulacji PARSEC, MIST/MESA, Geneva, BPASS i BoOST/Bonn przy składzie zbliżonym do słonecznego, patrz panele (strona 10). Okazuje się, że różne pragmatyczne metody przyjęte przez kody ewolucji gwiazd, w przypadku przekroczenia limitu Edingtona wewnątrz masywnych gwiazd, mogą skutkować nawet 18% różnicą w zakresie promieniowania jonizującego pochodzącego z populacji gwiazd. Co jeszcze bardziej niepokojące, masa pozostałej czarnej dziury może różnić się nawet o $20 M_{\odot}$ pomiędzy różnymi zestawami modeli (jak pokazano na rysunku po prawej stronie, strona 10). Różnice te są ważne, ponieważ mogą prowadzić do uderzająco różnych wyników, gdy zostaną przełożone na populacje gwiazdne, na przykład przy uwzględnianiu częstotliwości zdarzeń fal grawitacyjnych.



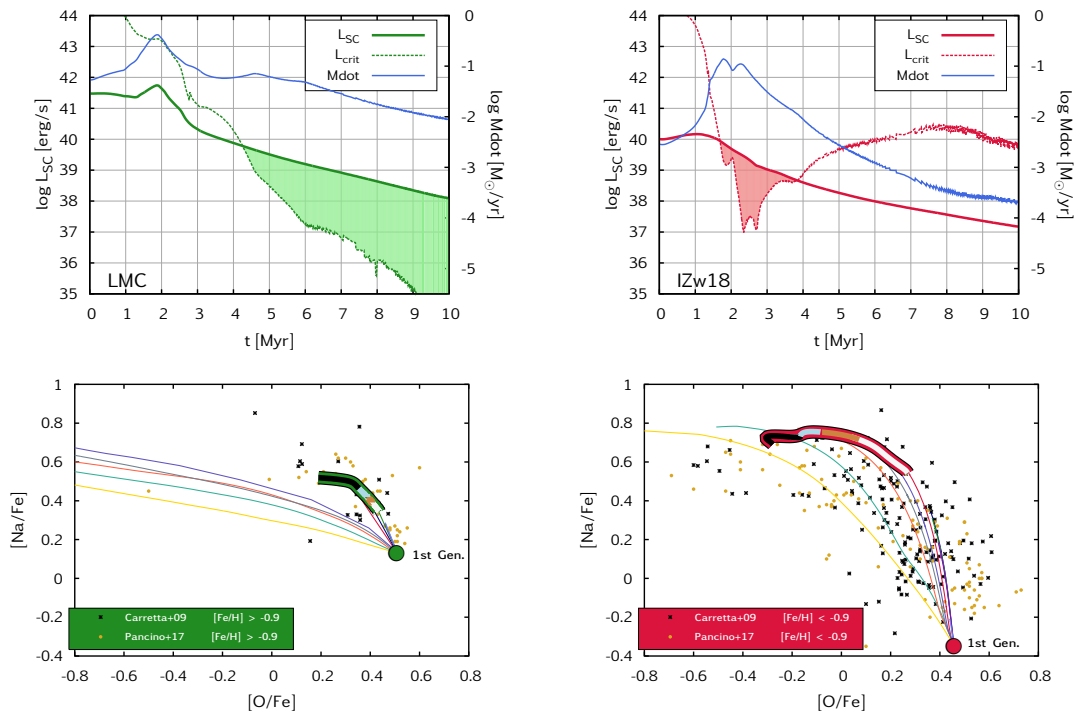
Przewidywana masa pozostałości. Modele mają zastosowanie tylko do metaliczności Słońca; przy niższych metalicznościach masy osiągnęłyby strefę niestabilności par (por. rys. 3 w **HAB2**²³). • *Rozbieżność między zestawami modeli może wynosić nawet $20 M_{\odot}$.*

(**HAB3**) **Szécsi**, D. and Wunsch, R.: *Role of supergiants in the formation of globular clusters*, *ApJ* 871, 20 (2019). [[ADS](#)] [[arXiv:1809.01395](#)] – 21 strony.

Streszczenie. Jest to interdyscyplinarne osiągnięcie, które po raz pierwszy łączy najnowocześniejszą ewolucję masywnych gwiazd z symulacjami hydrodynamiki gromad. Rezultatem jest w pełni rozwinięty model formowania się gromad kulistych. Nakreśliśmy bezprecedensowo złożony obraz tych gromad. W szczególności odkryliśmy, jak i dlaczego **nadolbrzymy mogą być odpowiedzialne** za obserwowane anomalie obfitości. Artykuł został bardzo dobrze przyjęty przez obie społeczności i obecnie pracuję nad kolejnymi badaniami, które opierają się na przedstawionych tutaj metodach.

Jak to pasuje do mojej habilitacji? W artykule wykorzystano moje modele (i populacje) masywnych gwiazd ubogich w metale, opublikowane w publikacji **HAB1**. Niektóre z tych gwiazd stają się czarnymi dziurami i gwiazdami neutronowymi (por. **HAB2**), np. progenitorami fal grawitacyjnych w tych gromadach. Dlatego też należy zrozumieć rolę tych gwiazd w procesie formowania się gromady.

Moja rola. Byłam główną autorką tego badania, odpowiedzialną za obliczanie i utrzymywanie modeli gwiazdnych, za porównania obserwacyjne, a także za wyciąganie wniosków naukowych i prezentację pracy. Mój współautor, R. Wunsch, zapewnił półanalityczne symulacje klastrów i pomógł w interpretacji wyników.



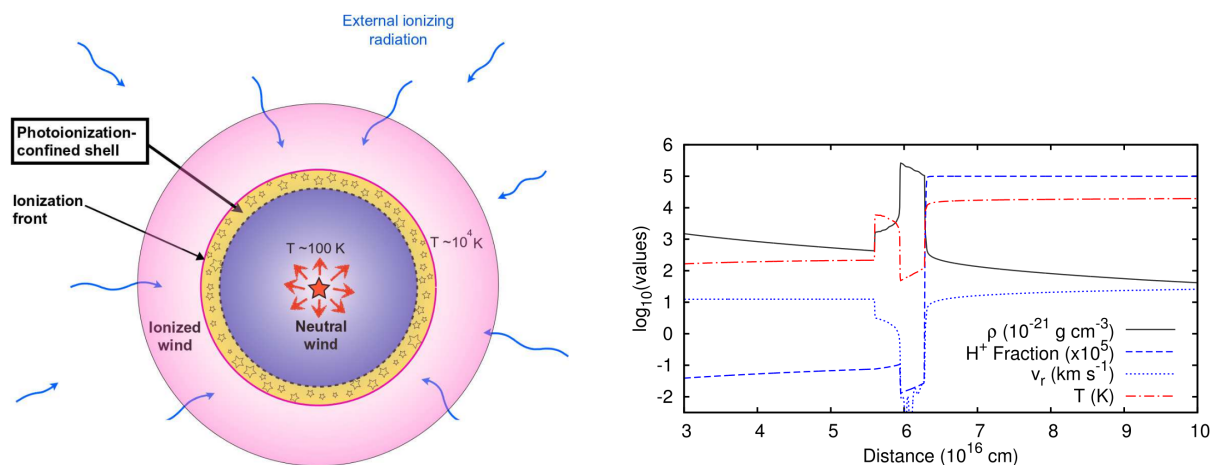
Moja teoria wyjaśniająca powstawanie gromad kulistych przy użyciu najnowocześniejszych modeli masywnych gwiazd ubogich w metale. Rysunek jest zaktualizowaną wersją z [HAB3](#)¹³. • **Góra:** Ewolucja czasowa wiatru gromady dla dwóch początkowych składów: wyższej metaliczności z Wielkiego Obłoku Magellana (LMC) i niskiej metaliczności z galaktyki karłowatej I Zwicky 18. Za każdym razem, gdy jasność wiatru gromady L_{SC} przekracza krytyczną jasność L_{crit} , masa wiatru gromadzi się w centrum gromady (fazy te zaznaczono cieniowaniem). W gromadzie o niskim Z akumulacja masy następuje wcześniej: zanim pierwsze supernowe eksplodują po 4 Myr, zapewniając „okno” dla niezakłóconej formacji drugiej generacji. • **Dół:** Skład powierzchniowy gwiazd GC, pokazujący antykorelację pomiędzy tlenem i sodem. Dane obserwacyjne pochodzą z badania FLAMES-UVES⁹⁷ i *Gaia*/ESO-UVES⁹⁴. Błąd obserwacyjny wynosi zazwyczaj od 0,05–0,12 dex. Nad wykresem znajdują się teoretyczne przewidywania mojego scenariusza. Masa zgromadzona w centrum gromady ma skład pokazany grubą linią. Cztery kolorowe paski (czarny, niebieski, brązowy i biały) oznaczają cztery kwadranty całkowitej masy (tj. co 25%, zaczynając od czarnego, a kończąc na białym). Cienkie linie pokazują skład powierzchni oryginalnych modeli gwiazdnych podczas całej ich ewolucji; nagromadzona masa może mieszać się z oryginalnym gazem w centrum. Mój scenariusz jest w stanie wyjaśnić cały rozrzut, a nawet trend pomiarów. Więcej szczegółów technicznych podano w mojej publikacji [HAB3](#)¹³.

Najważniejsze wyniki. Stwierdzamy, że silne wiatry pierwszej generacji masywnych gwiazd zderzają się, ulegają szokowi, ochładzają się i wpadają do centrum gromady^{98–101}. W tym przypadku gwiazdy drugiej generacji powstają z mieszaniny materii wiatrowej i nieskazitelnego gazu, również z regularną funkcją masy. Wyniki przedstawiono w poniższych panelach (strona 12). Najważniejszy wkład pochodzi od świecących nadolbrzymów o niskiej metaliczności, co oznacza, że cały proces formowania się gwiazd odbywa się *przed* wybuchem pierwszej supernowej. Zauważyliśmy, że wiele z tych ubogich w metal masywnych gwiazd wpada bezpośrednio do czarnych dziur bez eksplozji.

(**HAB4**) [Szécsi, D., Mackey, J. and Langer, N.: Supergiants and their shells in young globular clusters, A&A 612, A55 \(2018\). \[LINK\] \[arXiv:1711.04007\]](#) – 13 strony.

Streszczenie. Nowy scenariusz wyjaśniający, w jaki sposób gwiazdy o anomalnym składzie mogły powstać w dawnych gromadach kulistych. Scenariusz ten przewiduje, że niskomasowe gwiazdy o anomalnych obfitościach powierzchniowych powstały w *powłokach ograniczonych fotojonizacją* wokół masywnych nadolbrzymów. Po raz pierwszy modele nadolbrzymów ubogich w metale zostały zasugerowane, jako źródło anomalii obfitości w gromadach kulistych.

Jak to pasuje do mojej habilitacji? Podobnie jak w przypadku **HAB3**, tutaj próbuję zbudować teorię tego, jak mogły powstać gromady kuliste pod wpływem ubogich w metale masywnych gwiazd z moich symulacji. Jednak w tym przypadku sugeruję inny możliwy scenariusz (który w rzeczywistości nie jest sprzeczny z **HAB3**, ale może być z nim połączony): tak zwaną teorię powłoki PICO. PICO to skrót od *photoionization-confined*: taka powłoka jest znaleziona wokół słynnego nadolbrzyna Betelgezy¹⁰². Przeprowadzamy symulację takiej otoczki wokół ubogiego w metale nadolbrzyna (patrz rysunek na stronie 13) i stwierdzamy, że staje się ona niestabilna wobec kolapsu grawitacyjnego, w wystarczająco krótkim czasie, aby uformować nowe gwiazdy. Skład powłoki **pasuje do składu gwiazd drugiej generacji obserwowanych w gromadach kulistych**. Jest to bardzo wyjątkowa i ekscytująca teoria, choć nieco trudna do udowodnienia lub obalenia ze względu na brak możliwości zaobserwowania tych wczesnych nadolbrzymów (są one oczywiście teraz martwe, widzimy tylko stare, niskomasowe gwiazdy w gromadach kulistych). Chociaż rozwinąłem moje teorie gromad kulistych później w **HAB3**, uważam, że jest to również ważny wkład, zwłaszcza, że centralne nadolbrzyny tworzyłyby czarne dziury, a tym samym potencjalnie przyczyniałyby się do emisji fal grawitacyjnych pochodzących z gromad kulistych.



Photoionization-confined (PICO) powłoka wokół ubogiego w metale nadolbrzyna. Prawy: schemat teoretyczny. Lewy: wyniki symulacji.

Moja rola. Byłam głównym autorem tego badania. Obliczyłam gwiazdne modele ewolucyjne nadolbrzymów, na których opiera się symulacja powłoki ograniczonej fotojonizacją. Przeprowadziłam wszystkie porównania obserwacyjne i wyciągnęłam wnioski naukowe.

Najważniejsze wyniki. Rysunek na stronie 13 przedstawia zarówno układ teoretyczny, jak i wyniki symulacji powłoki PICO wokół jednego z moich modeli masywnych gwiazd ubogich w metale. Jonizację zapewniają gorące, jednorodnie chemicznie ewoluujące gwiazdy (tzw. gwiazdy TWUIN, temat **HAB5**). Nasza symulacja pokazuje, że na froncie jonizacji powstaje gęsta i długotrwała powłoka złożona z materiału wiatru gwiazdowego centralnego nadolbrzyna. Odległość powłoki od gwiazdy centralnej wynosi $0,02 \text{ pc}$ ($6 \cdot 10^{16} \text{ cm}$). Sam nadolbrzym centralny ma promień $5000 R_{\odot}$, 170 razy mniejszy niż sfera otoczki. W artykule pokazujemy, że powłoka staje się niestabilna i prawdopodobnie tworzy nowe gwiazdy o masie słonecznej i podslonecznej, których wzorce obfitości chemicznej pasują do tych obserwowanych w gromadach kulistych.

(**HAB5**) Kubátová, B.; **Szécsi**, D.; Sander, A. A. C.; Kubát, J.; Tramper, F.; Krtićka, J.; Kehrig, C.; Hamann, W.-R.: *Low-metallicity massive single stars with rotation. II. Predicting spectra and spectral classes of chemically homogeneously evolving stars*, *A&A*, 623, A8 (2019). [[LINK](#)] [[arXiv:1810.01267](#)] – 33 strony.

Streszczenie. Przedstawiono syntetyczne widma szerokiego zbioru chemicznie jednorodnie ewoluujących gorących gwiazd (tzw. gwiazd TWUIN) o niskiej metaliczności, obliczone za pomocą kodu atmosfery gwiazdnej PoWR. Przeprowadzono klasyfikację widmową tych przewidywanych gwiazd. Doszliśmy do wniosku, że ekstremalnie gorące gwiazdy wczesnego typu O w galaktykach o niskiej metaliczności mogą być wynikiem chemicznie jednorodnej ewolucji, a zatem mogą być progenitorami fuzji obiektów zwartych emitujących fale grawitacyjne.

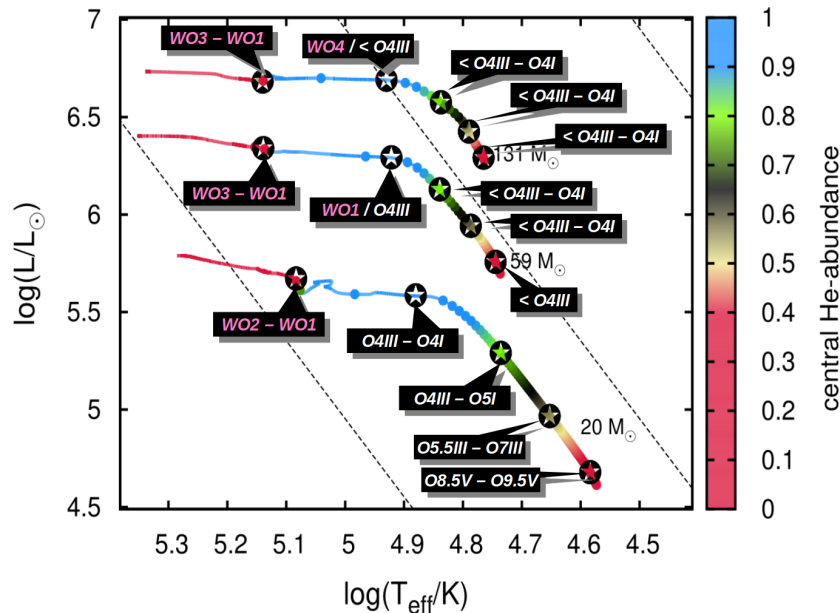


Diagram HR modeli gwiazd, dla których obliczono widma syntetyczne za pomocą kodu PoWR w **HAB5**. Rysunek jest oparty na tym z **HAB5**¹⁰³, ale zaktualizowany, aby pokazać ostateczny wynik klasyfikacji widmowej (por. Tabela 4 artykułu). Gwiazdy o jednorodnej ewolucji chemicznej są rzeczywiście "gwiazdami typu TWUIN" przez większość swojego życia: co oznacza, jak wiemy, gorące gwiazdy typu O wczesnej klasy. Dopiero w fazie po ciągu głównym stają się one gwiazdami Wolfa-Rayeta z liniami emisyjnymi: i to typu WO, a nie WC, jak wcześniej sądzono. • *Innymi słowy, przewiduje się, że progenitory fal grawitacyjnych pojawią się jako wczesne gwiazdy typu O przez większość swojego życia i rozwiną cechy Wolfa-Rayeta (w tym wysoką emisję jonizującą He II) dopiero w ostatnich 10% swojego życia.*

Jak to pasuje do mojej habilitacji? Gwiazdy TWUIN (Transparent Wind Ultraviolet INTense stars) są specjalnymi obiektami przewidywanymi przez moje modele gwiazd ubogich w metal. Gwiazdy te są kandydatami na progenitorów fal grawitacyjnych. Choć w moim doktoracie wykazałam, na podstawie uproszczonych szacunków, że **gwiazdy te w rzeczywistości nie są gwiazdami Wolfa-Rayeta**, pomimo tego, że są gorące i znajdują się dokładnie w tym samym miejscu na diagramie HR, konieczne było bardziej rozstrzygające badanie z użyciem bardziej precyzyjnej techniki, aby potwierdzić to stwierdzenie. **Dlatego, jako post-doc nawiązałam współpracę z ekspertami w dziedzinie modelowania atmosfer gwiazdnych.** Rezultatem jest niniejszy artykuł. Symulujemy pełne widmo gwiazd TWUIN przewidywane przez moje modele ewolucyjne. Analizujemy ich cechy liniowe, dostarczamy informacji na temat ich promieniowania jonizującego i klasyfikujemy je zgodnie ze standardowym podejściem.

Moja rola. Pierwsze autorstwo dzieła z B. Kubátovą. Podczas gdy ja wymyśliłam projekt i dostarczyłam modele, które stanowią podstawę całego badania, B. Kubátova stworzyła widma syntetyczne za pomocą kodu PoWR, które następnie wspólnie przeanalizowaliśmy. Wspólnie wyciągnęliśmy wnioski i napisaliśmy artykuł. Jestem dumna ze **zbudowania tak bliskiej i owocnej współpracy z ekspertami spoza mojej dziedziny**: chociaż na pierwszy rzut oka podobne, modelowanie ewolucji gwiazdnej i modelowanie atmosfery gwiazdnej to bardzo różne techniki z innym żargonem i różnymi sposobami myślenia. Uważam ten artykuł za kluczowy element badań w moim ogólnym osiągnięciu habilitacyjnym, jakim jest zrozumienie masywnych gwiazd ubogich w metale – a zwłaszcza ich progenitorów fal grawitacyjnych.

Najważniejsze wyniki. Okazuje się, że proste szacunki dotyczące jednorodnych chemicznie ewoluujących gwiazd posiadających przezroczyste wiatry są dość poprawne: podczas fazy ciągu głównego (tj. spalania wodoru w rdzeniu) **gwiazdy TWUIN wyglądają jak bardzo gorące gwiazdy typu O** pewnej wczesnej klasy (biorąc pod uwagę niepewności dotyczące utraty masy). Z drugiej strony, podczas fazy post-main-sequence (spalanie hel-rdzeń), ale tylko wtedy, rzeczywiście wyglądałyby jak gwiazdy Wolfa-Rayeta – chociaż **typu WO, a nie WC**, jak powszechnie zakładano wcześniej.

Ponieważ jednorodne chemicznie ewoluujące gwiazdy są teoretycznymi protoplastami **emisja fal grawitacyjnych**^{18,3}, Przewidywanie ich wyglądu w trakcie ich życia jest kluczowym wkładem w tę dziedzinę. Przyszłe kampanie obserwacyjne mogą teraz poszukiwać tych gwiazd np. w lokalnych galaktykach karłowatych.

IV. WNIOSKI: PIONIERSKIE PODEJŚCIE W MOJEJ DZIEDZINIE

Dzięki badaniom, które przeprowadziłam w **HAB1-5**, możliwe jest teraz łączenie informacji z detekcji fal grawitacyjnych z formowaniem się gromad gwiazd, archeologią gwiazdową, a nawet badaniami nad rozbłyskami gamma. Jest to możliwe dzięki opracowanemu przeze mnie pomysłowemu narzędziu obliczeniowemu, przedstawionemu poniżej. Ponieważ uzyskanie jakichkolwiek *bezpośrednich* dowodów obserwacyjnych masywnych gwiazd ubogich w metale jest niezwykle trudne, moje podejście polegające na łączeniu fragmentów *bezpośrednich* dowodów jest czymś więcej niż tylko podejściem praktycznym: stanowi ono wybitny wkład w dziedzinę astrofizyki.

Wprowadzenie mojej własnej kolejki syntezy populacji: **POP**Sy

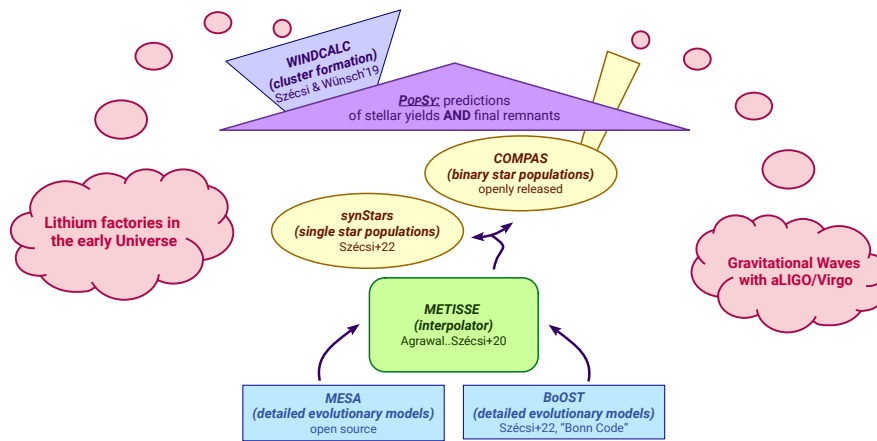
Po zdobyciu grantu NCN OPUS na zbudowanie własnej grupy badawczej, włączyłam cały swój dorobek habilitacyjny (**HAB1-5**) do ujednocnionej struktury, tzw. kolejki **POP**Sy, aby moja grupa mogła ją stosować w różnych przypadkach badawczych (por. Sect. 7/c). Kolejka **POP**Sy jest wielofunkcyjnym narzędziem do syntezy populacji. Rysunek na stronie 16 pokazuje jej konfigurację. Kolejka spełnia następujące trzy wymagania:

- Po pierwsze, **modele gwiazdne** muszą mieć wystarczająco wysoką rozdzielczość i być elastyczne, aby można było zbadać odpowiednie składniki fizyczne.
- Po drugie, populacje gwiazdne muszą być **zsyntetyzowane w specjalny sposób**, aby uwzględnić *zarówno* ich życie, jak i śmierć, przy jednoczesnym zachowaniu elastyczności – bardzo nietrywialne zadanie, co potwierdzi każdy, kto próbował stworzyć takie populacje^{39,70,71,24}.
- Po trzecie, potrzebne są konkretne kody, za pomocą których populacje te mogą być wykorzystywane w różnych **badaniach obserwacyjnych** – tak, aby można było wyciągnąć rzeczywiste wnioski naukowe.

Wszystkie trzy cele zostały zrealizowane w kolejce **POP**Sy. Podczas gdy kilka innych grup na świecie ma podobne narzędzia, **nikt nie ma tego dokładnie takiego, jak ja**: moja kolejka została unikalnie zaprojektowana do pracy w tworzeniu klastrów (zarówno kulistych, jak i YMC) oraz badań fal grawitacyjnych / rozbłysków gamma w tym samym czasie – i, co ważne, jest elastyczna, jak wyjaśniono poniżej.

Centralnym blokiem konstrukcyjnym jest narzędzie interpolatora **METISSE**, stworzone przez mojego byłego studenta (obecnie post-doc'a) P. Agrawala⁷¹. Możliwości **METISSE** pozwalają użytkownikowi na wprowadzanie dowolnych modeli MESA a także modeli z innych kodów, takich jak kod Bonn. Wynikiem działania **METISSE** jest starannie interpolowany zestaw śladów gwiazd, który **zachowuje szczegółowe właściwości zarówno dla gwiazd, jak i pozostałości**.

Mając taki zestaw ścieżek, następnym krokiem kolejki **POP**Sy jest przeprowadzenie syntezy populacji. W przypadku pojedynczych gwiazd odbywa się to za pomocą prostego narzędzia do syntezy populacji



Zaprojektowanie kolejki POPSY, metody syntezy populacji (i aplikacji), która łączy moje osiągnięcia habilitacyjne (HAB1–5) w jedną zuniifikowaną strukturę obliczeniową.

Będzie ona wykorzystywana przez moją nowo utworzoną grupę badawczą OPUS w Toruniu (zob. rozdział 7/c na temat moich planów na przyszłość).

synStars (opublikowanego w Szécsi+22²⁹). W przypadku układów podwójnych zostanie użyty kod COMPAS^{43–46,6,7}. W rzeczywistości potok METISSE został specjalnie zoptymalizowany do pracy z COMPAS.

W ten sposób kolejka POPSY zapewnia mi syntetyczne populacje – zarówno pojedynczych, jak i podwójnych gwiazd – które mogę **bezpośrednio zastosować** w badaniach gromad kulistych za pomocą metody opracowanej przez Szécsi & Wunsch'19¹³ (zwaną WINDCALC, obecnie integralną częścią kolejki), a także w badaniach ewolucji chemicznej – a ponieważ używam COMPAS, także w badaniach fal grawitacyjnych.

Dużą zaletą mojej metody jest jej **elastyczność**: dowolną nową siatkę modeli można obliczyć za pomocą MESA (lub innych kodów) i przekształcić w syntetyczne populacje. Kolejną dużą zaletą jest jej wielozadaniowość: wynik kolejki POPSY dostarcza **jednocześnie** szczegółowych wyników obfitości izotopowych (np. litu i innych pierwiastków) oraz statystyk masy pozostałości (do przetestowania pod kątem aLIGO/Virgo i nadchodzących detekcji GW).

Ale największą zaletą jest to, że dzięki POPSY mogę testować te same teoretyczne populacje gwiazd w odniesieniu do kilku **całkowicie niezależnych** zjawisk obserwacyjnych. Wszystko, czego nauczę się z jednego porównania obserwacyjnego, może być natychmiast przetestowane w innych: więc wszystko, czego dowiem się o fizyce masywnych gwiazd, może być bezpośrednio przekształcone z powrotem w modele za pośrednictwem kolejki POPSY i ponownie zaimplementowane w reszcie podprojektów.

Oznacza to, że dzięki POPSY pojawia się szansa na zaprojektowanie różnych przyszłych testów (np. z kosmologii lub badań galaktyk karłowatych) w celu zbadania natury masywnych gwiazd ubogich w metale. W sekcji 7/c przedstawiam przegląd badań, które planuję przeprowadzić z moją grupą OPUS w nadchodzących latach.

Podsumowując, moje osiągnięcia habilitacyjne pozwoliły mi odkryć rolę, jaką progenitory fal grawitacyjnych – czyli ubogie w metale masywne gwiazdy – odegrały/odgrywają w różnych miejscach Wszechświata. Realizując ten cel, znacznie poszerzyłam nasze zrozumienie fizyki tych obiektów, wytyczyłam nowe i unikalne ścieżki badania takich egzotycznych gwiazd oraz zbudowałam mosty między różnymi poddziedzinami astrofizyki.

5. Prezentacja znaczącej działalności naukowej prowadzonej w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub kulturalnej, w szczególności w instytucjach zagranicznych

- 2,5 lata **Alexander von Humboldt Individual Research Fellow**, *University of Cologne, Niemcy*, 04.2019 – 09.2021.
- 1,5 lata **Adiunkt**, *Institute of Gravitational Wave Astronomy and School of Physics and Astronomy, University of Birmingham, Wielka Brytania*, 10.2017 – 03.2019.
- 1 rok **Adiunkt**, *Astronomical Institute of the Czech Academy of Sciences, Czechy*, 08.2016 – 09.2017.
- 3 miesiące **Adiunkt**, *Argelander-Institut für Astronomie of the University Bonn, Niemcy*, 04.2016 – 07.2016.
- 3 miesiące **Asystent naukowy**, *Konkoly Observatory of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Węgry*, 01.2008 – 08.2012.
- 4 lata **Stażysta**, *Nieodpłatny staż badawczy w węgierskiej grupie badawczej OTKA-77795*, 01.2008 – 06.2012.

6/a. Prezentacja osiągnięć w nauczaniu

- semestr letni 2022 **Progenitory fal grawitacyjnych**, *Wykład monograficzny w ramach programu Master in Astronomy (3 ECTS), Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Programu nauczania tutaj.*
- 2021 – **Obecnie nadzoruje dwóch doktorantów w Toruniu**, *R. Sarwar, H. Stinshoff*, Pełnienie funkcji głównego doradcy. *Astronomica Copernicana Grad-School, UMK.*
- 2018 – 2021 **Zewnętrzny promotor pracy doktorskiej**, *Dr. Poojan Agrawal*, Swinburne University of Technology, Australia, Data skutecznej obrony: 24.11.2021. *Obecnie zajmuje stanowisko badacza podoktoranckiego na University of North Carolina w Chapel Hill, USA.*
- 2020 – 2021 **Opracowania naukowe w astrofizyce**, *Samodzielnie opracowany specjalny wykład dla doktorantów i magistrantów*, University of Cologne, Niemcy & Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, [Programu nauczania tutaj](#).
- 2017 – 2018 **Dwóch studentów studiów magisterskich na University of Birmingham**, *N. Bennett, S. Ratcliff*, Data obrony: Maj 2018 r.
- semestr zimowy 13/14 **Asystent nauczyciela**, *Kurs magisterski „Struktura i ewolucja gwiazd”*, University of Bonn, Niemcy.
- IFS-Mentoring **Program mentorski dla International Female Scholars (IFS)**, *regularne uczestnictwo jako Mentor*, obecny podopieczny: A. Baby (Uni Cologne), poprzedni podopieczny: A.M. Babaei (Uni Cologne), [Link](#).

6/b. Prezentacja osiągnięć organizacyjnych

- Zarządzanie dotacjami **Główny wykonawca grantu NCN OPUS 2021/41/B/ST9/00757**, *Data rozpoczęcia: 01.02.2022*, Osoby zatrudnione z dotacji: 2 (jeden pracownik naukowy ze stopniem doktora i jeden doktorant).
- Lider grupy **Nowo utworzona grupa „Progenitorów fal grawitacyjnych” w Toruniu**, *Obecny stan grupy: dwoje doktorantów (H. Stinshoff, R. Sarwar), jeden post-doc (K. Sen), jeden stażysta (Sz. Żywica)*, *Były członek grupy: postdoc (Á. Szabó).*
- Warsztaty na EAS 2021 **Early Career Astronomers & their supporters**, *Starszy członek naukowego komitetu organizacyjnego*,
Data warsztatów: 28.06.2021, [Strona internetowa i program](#).

- Konferencja 'Actual Problems in Mathematics and Physics 2021', członek naukowego komitetu „MathFiz” organizacyjnego, Data konferencji: 26.08.2021, [Strona internetowa i program](#).
- Konferencja MOBSTER-1 2020 Conference on Magnetism in Massive Stars, członek Wirtualnego Komitetu Organizacyjnego, Data: 13-17 lipca 2020 r., [Strona internetowa i program](#).
- Journal Club **Główny organizator, 2016-2017**, Międzywydziałowe comiesięczne spotkanie, *Astronomical Institute of the Czech Academy of Sciences*.
- przewodniczący S11S11 na EWASS 2017 **Symposium 11 na European Week of Astronomy and Space Sciences (EWASS)**, Przewodniczący i główny organizator, Data: 26-27 czerwca 2017 r., [Strona internetowa i program](#).

6/c. Osiągnięcia w popularyzacji nauki

- Noc teleskopów **Prezentacja Księżyca i planet za pomocą refraktora 102/500 mm o dużym polu widzenia (80x)**, Wydarzenie publiczne, 12 sierpnia 2021 r., Budapest, Węgry.
- Astronomy on Tap Cologne **Jak duże są gwiazdy?**, Rozmowa na temat „Youtube Live”, 5 listopada 2020, organizowany przez społeczność „Astronomy on Tap Köln”, [Link do wideo](#).
- Astro in the City Birmingham **Jak duże są gwiazdy?**, Wykład zorganizowany przez University of Birmingham, 17 października 2018 r., Birmingham, Wielka Brytania, [Link do prezentacji](#).
- Girls in STEM Talk Birmingham **Opowieść o nadobrzymach i muszlach**, Rozmowa podczas „Girls in STEM” Open Day, 12 Sep 2018, Birmingham, Wielka Brytania, [Link do prezentacji](#).
- Artykuł informacyjny **Kto żyje w gromadach kulistych?**, Artykuł informacyjny w języku węgierskim. Opublikowano w „Élet és Tudomány” (w druku, październik 2018 r.).
- Rozmowa publiczna **Tworzące gwiazdy powłoki supergigantów**, Wystąpienie informacyjne wygłoszony na: Polaris Public Observatory, 6 lutego 2018 r., Budapest, Węgry, [Link do prezentacji](#).

7/a. Bieżąca działalność grupy i plany na przyszłość

Jako stypendysta NCN OPUS kontynuuję obecnie działalność badawczą jako kierownik grupy. Poniżej omawiam aktualne cele naukowe mojej młodej grupy w Toruniu.

Testowanie fizyki masywnych gwiazd pod kątem detekcji fal grawitacyjnych

Obecnie, gdy systemy detektorów fal grawitacyjnych aLIGO/Virgo działają z coraz większą wydajnością^{80,22,104}, a nowe detektory są dodawane do sieci^{105,106}, niezwykle ważne jest, aby obserwowane częstości zdarzeń fal grawitacyjnych były dopasowane do najbardziej aktualnej fizyki gwiazdnej, takiej jak np. modele Bonn (**HAB1**) lub MESA.

Rzeczywiście, wykazano, że jednorodnie chemicznie ewoluujące gwiazdy TWUIN (por. **HAB5**) mogą prowadzić do emisji fal grawitacyjnych w układzie podwójnym^{16-19,107}. Dodatkowo, obecność świecących nadobrzymów (zgodnie z przewidywaniami ewolucji gwiazd ubogich w metale¹⁰, por. **HAB3/4**) może również znacząco wpływać na przewidywania tempa fuzji⁵⁷ ze względu na to, że gwiazdy te mogą przechodzić wspólną ewolucję otoczki ze swoimi towarzyszami. Za pomocą PopSy można przetestować oba te scenariusze.

Opierając się na elastyczności kolejki PopSy, nowo utworzone modele Bonn/BoOST i MESA mogą być do niej dodawane w kółko. Jedną z największych niewiadomych w ewolucji masywnych gwiazd, utratę masy, można zbadać w ten sposób, tworząc zestawy modeli z różnymi zaleceniami dotyczącymi tempa utraty masy i porównując je ze sobą, a także z detekcjami aLIGO/Virgo. Możemy również przetestować

wpływ innych istotnych źródeł niepewności (np. procesów mieszania, takich jak konwekcja i półkonwekcja^{108,109}, oraz ich roli w fizycznej stabilności gwiazd w pobliżu granicy Eddingtona^{110–112}; lub półmagnetycznych⁴²). Ta elastyczność sprawia, że nasza praca jest niezwykle korzystna dla społeczności naukowej. Dodatkowo, dodanie nowych modeli MESA z szybką rotacją przyda się przy uwzględnianiu rozbłysków gamma, jak poniżej.

Wybuchy promieniowania gamma i supernowe: prognozy ostatecznego losu

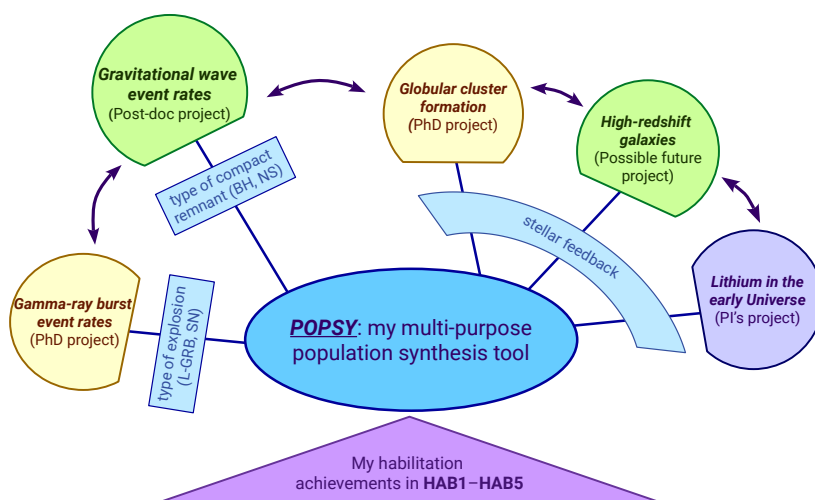
Aby osiągnąć ten cel, **opracujemy nowe narzędzie FINFAT** do automatycznego decydowania o tym, jakiego rodzaju *ostateczny los* oczekuje się od danej gwiazdy w populacji. Obejmuje to różne typy supernowych (np. regularne zapadanie się rdzenia, wychwyty elektronów, niestabilność par, niestabilność par pulsacyjnych itp.) wraz z szacunkami dotyczącymi ich energii wybuchu i przybliżonej masy wyrzutu – zgodnie z pracami przygotowawczymi, które wykonałam^{113,11} i pozostawiając miejsce na przyszłe aktualizacje^{78,114,115,113,116–118,11,21}. Chociaż będzie to niezwykle korzystne dla wszystkich tych, którzy potrzebują przewidywać **sprężenia zwrotnego supernowych** z moich modeli, chcę zwrócić szczególną uwagę na ważne, ale nie powszechnie uwzględniane zjawisko: wybuchy promieniowania gamma o długim czasie trwania, których progenitorami są szybko rotujące masywne gwiazdy (gwiazdy TWUIN, **HAB5**).

Jeśli masywna gwiazda tworzy żelazny rdzeń, fuzja jądrowa nie jest już w stanie utrzymać jej stabilności: zapada się i zapada pod wpływem grawitacji. Zwykle zewnętrzne warstwy odbijają się od powierzchni nowo powstałej gwiazdy neutronowej (inicjuje to wybuch supernowej typu kolaps rdzenia). Jednakże, jeśli jądro jest wystarczająco zwarte, aby bezpośrednio utworzyć czarną dziurę, mówi się, że supernowa „zawodzi”, a materiał spada bezpośrednio do czarnej dziury¹¹⁹. Jeśli gwiazda macierzysta obracała się szybko (tak jak w niektórych z moich chemicznie homogenicznie ewoluujących modeli ubogich w metale, tak zwanych gwiazd TWUIN, por. **HAB5**), możemy mieć do czynienia z układem, w którym **czarna dziura jest zasilana przez opadającą materię, podczas gdy obszary biegunowe są opróżniane, tworząc dwa dżety (tak zwany „collapsar”)**. W bliskiej próżni dżetów cząstki przyspieszone do prędkości relatywistycznych emitują promieniowanie synkrotronowe. Dlatego w przypadku, gdy dżet jest skierowany w naszą stronę, możemy zaobserwować (długotrwały) rozbłysk gamma. W praktyce, aby zdecydować, czy dany model gwiazdny jest progenitorem takiego rozbłysku, analizuje się jego wewnętrzny moment pędu²⁵. Z drugiej strony, krótkotrwałe rozbłyski gamma są **związane z łączeniem się zwartych obiektów emitujących fale grawitacyjne**³: w przypadku, gdy w układzie podczas fuzji znajduje się materiał barionowy, może on zostać przyspieszony do prędkości relatywistycznych i możemy go zaobserwować jako krótszy (ale widmowy) rozbłysk gamma.

Kosmiczna częstotliwość wybuchów promieniowania gamma została przewidziana za pomocą tej metody przy użyciu pojedynczych gwiazd²⁵ i podwójnych pod wpływem pływów¹²⁰; ale takie przewidywanie z dokładnymi, rotującymi modelami gwiazd jest koniecznym wynikiem naszych populacji podwójnych z PopSY. W ten sposób projekt pozwoli mojej grupie badawczej wnieść wkład w **rozwijającą się dziedzinę progenitorów rozbłysków gamma** dzięki naszym ważnym nowym wynikom.

Gwiazdy podwójne w gromadach kulistych

Wykazano, że masywne interaktywne gwiazdy w układach podwójnych mogą przyczyniać się do anomalnych stosunków pierwiastków w gromadach kulistych^{121,122} w przypadku, gdy ich transfer masy jest niekonserwatywny. Niemniej jednak nigdy nie przeprowadzono kompleksowego badania



syntezy populacji w celu przetestowania tego scenariusza. Dzięki moim osiągnięciom habilitacyjnym jestem w najlepszym miejscu, aby to zrobić, ponieważ *PopSy* pozwala mi tworzyć binarne populacje ze złożonymi sieciami chemicznymi.

Co więcej, **mam do dyspozycji kod klastrowy *WINDCALC***. *WINDCALC* to półanalityczny kod, który symuluje warunki termodynamiczne w młodych masywnych gromadach i przewiduje skład nowo formujących się gwiazd. Jest to kod używany w **HAB3** do badania roli pojedynczych supergigantów¹³.

Mając do dyspozycji złożone populacje układów podwójnych z *PopSy*, mogę od razu zastosować je w *WINDCALC*. Może to doprowadzić do uświadomienia sobie, że – jak podejrzewam ze względu na brak wykrycia tak jasnych nadolbrzymów^{123,109} w obecnie tworzących się młodych gromadach - zamiast pojedynczych masywnych gwiazd z silnymi wiatrami, to masywne interaktywne układy podwójne z niekonserwatywnym transferem masy są odpowiedzialne za powstawanie gromad kulistych.

Fabryki litu we wczesnym Wszechświecie

Pomiary obfitości litu w starych gwiazdach halo wydają się mieć stałą wartość: tak zwane **Spite-plateau** na poziomie około $A(\text{Li}) \sim 2,2$. Gwiazdy na płaskowyżu są *dość blisko* pierwotne (druga, trzecia lub czwarta – w każdym razie bardzo wczesna^{124–126} – generacja; zwane także gwiazdami „pop-II”), podczas gdy ich zawartość ${}^7\text{Li}$ zawsze uważano za pochodzącą z nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu.

Problem polega jednak na tym, że badacze nieustannie znajdują rozbieżność o czynnik 3 między tym, co zmierzono w starych gwiazdach, a tym, co przewiduje się na podstawie nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu (a mianowicie $A(\text{Li}) \sim 2,7$). Nazywa się to „**kosmicznym problemem litu**” (ang. „cosmic lithium problem”)^{127–131}, który od dawna motywuje badaczy do wykraczania poza Model Standardowy i wymyślania różnych „egzotycznych alternatyw” (ang. „exotic alternatives”)^{132–136}.

Ale te bliskie pierwotnym gwiazdy na płaskowyżu *nie* są pierwszymi gwiazdami. Zawierają one już *niektóre* ciężkie pierwiastki. Oznacza to, że na ich skład miały wpływ poprzednie generacje masywnych gwiazd (ubogich w metale i/lub pozbawionych metali).

Wiadomo, że masywne gwiazdy są jednymi z najbardziej efektywnych chemików we Wszechświecie¹. Jednak wcześniej mało kto uważał je za fabryki litu, ponieważ konsensus błędnie zakładał, że są one *oczywiście* zbyt gorące, aby zachować ten delikatny pierwiastek. Ale co, jeśli konsensus jest błędny? W rzeczywistości **moje symulacje pokazują, że tak właśnie może być**.

Moje symulacje referencyjne zostały utworzone za pomocą kodu Bonn Code i opublikowane w **HAB1**^{137,10,24}. W celu podwójnego sprawdzenia, przeprowadziliśmy kolejny zestaw symulacji za pomocą MESA^{35–37} przy użyciu podobnej fizyki wejściowej. Oba kody wykazały, że ${}^7\text{Li}$ jest *produkowany* w pewnych okolicznościach podczas życia gwiazdy, i to w dużych ilościach.

Jeśli masywne gwiazdy są w stanie produkować lit podczas swojego życia, oznacza to, że mogą być odpowiedzialne – częściowo lub w całości – za Spite-plateau*. Po pierwsze, oczywiście niszczą one pierwotny lit, ponieważ są, no cóż, gorące. **Ale potem odtwarzają jego część** za pomocą nowo odkrytego procesu i – podobnie jak robią to z niezliczonymi innymi pierwiastkami – wyrzucają go do otoczenia, gdzie mogą tworzyć się kolejne generacje gwiazd.

Jeśli tak, gwiazdy pop-II, które tworzą płaskowyż Spite’a, mogą nie być dobrym sposobem na oszacowanie gęstości barionowej Wszechświata. gęstości barionowej Wszechświata¹³⁹ i nie powinny być używane jako bezpośrednie ograniczenie Modelu Standardowego - może zamiast tego masywne gwiazdy ubogie w metale mogą rozwiązać kosmiczny problem litu? Dzięki wszystkim narzędziom, które teraz posiadam dzięki moim osiągnięciom habilitacyjnym (**HAB1-5** i kolejce *PopSy*), mam nadzieję, że wkrótce się tego dowiem.

*Dodatkowo, niektóre gromady kuliste również wykazują intrygujące wartości litu¹³⁸, co motywuje mnie do dalszego badania pochodzenia Li^7

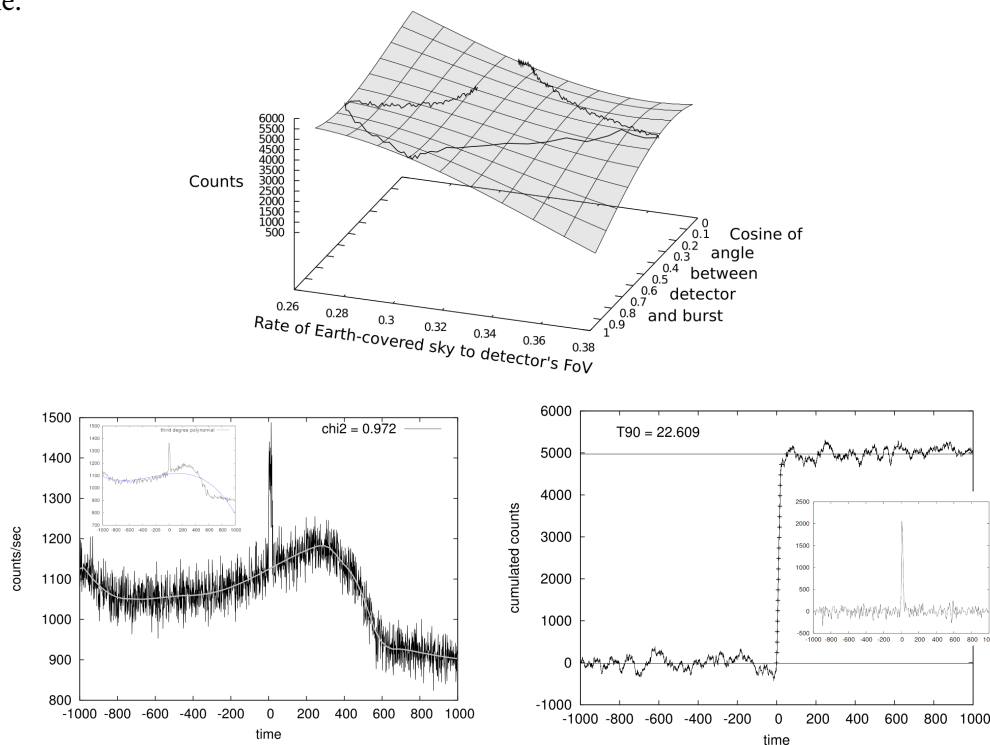
7/b. Opis badań nieuwzględnionych w sekcji 4.

- **Szécsi, D., Bagoly, Z., Kóbori, J., Horváth, I., Balázs, L.G.:** *Direction dependent background fitting for the Fermi GBM data*, A&A v.557, A8 (2013). [LINK] [arXiv:1306.3812] – 16 strony.

Przegląd. Niniejszy artykuł przedstawia **moją własną technikę redukcji danych**, która pozwala na dokładną analizę danych zebranych przez satelity promieniowania gamma.

Byłam głównym autorem tego artykułu A&A jako student studiów magisterskich (na Węgrzech), więc jest to całkowicie niezależne osiągnięcie zarówno złędem mojej rozprawy doktorskiej (w Niemczech), jak i prac habilitacyjnych.

Technika ta jest oryginalna i pomysłowa. Jako studentka chciałam badać krzywą blasku i właściwości fizyczne rozbłysków gamma oraz przeprowadzać na nich analizy statystyczne. Szybko okazało się jednak, że dane zawierają systematyczny szum tła. Zdałam sobie sprawę, że szum ten pochodzi z właściwego ruchu satelity. W tamtym momencie nie było dostępnych narzędzi obliczeniowych, które pozwoliłyby go odfiltrować. **Wymyśliłam więc jedno z nich.** Rysunek na stronie 21 przedstawia wyniki: moją własną technikę redukcji danych, aby obserwacje rozbłysków gamma były bardziej wiarygodne.



Przykład działania mojej techniki redukcji danych. Dane (krzywa świetlna w panelu *na dole po lewej* pokazująca liczbę fotonów w funkcji czasu w sekundach) czasami zawierają systematyczne tło, które jest niemożliwe do modelowania za pomocą prostego dopasowania wielomianowego (tradycyjna metoda przed moim artykułem, pokazana we *wbudowanym* panelu). Po uświadomieniu sobie, że źródło tła jest związane z kierunkiem niebieskim satelity, **zdefiniowałam hiperpowierzchnię opartą na parametrach ruchu właściwego (górnym panelu) i dopasowałam to do danych zamiast wielomianu.** Biała linia nałożona na krzywą świetlną pokazuje to dopasowanie: idealnie podąża za wszystkimi zmianami tła. Po usunięciu, dochodzimy do panelu *na dole po prawej*: osadzony rysunek przedstawia krzywą świetlną usuniętą z tła, podczas gdy liczba fotonów jest mierzona, a wartość czasu trwania ($T_{90} = 22,6$ s) jest wyprowadzana z wykresu skumulowanego. Ten konkretny przykład dotyczy rozbłysku *Fermi* GRB091030.613, ale metoda jest automatyczna i została zastosowana do wielu innych zdarzeń. • **Artykuł i metoda redukcji danych są niezależnym osiągnięciem zarówno mojej rozprawy doktorskiej, jak i osiągnięciem habilitacyjnych.**

Najważniejsze wyniki. Przeanalizowałam złożone efekty ruchu satelity *Fermi* i w rezultacie opracowałam nową metodę filtrowania danych o nazwie „dopasowanie tła zależne od kierunku”. Napisałam kod

dopasowujący dane za pomocą hiperpowierzchni wysokiego rzędu (patrz rysunek), która uwzględnia parametry orbitalne pozycji 3D satelity.

7/c. Inne informacje: granty, nagrody, stypendia i wyróżnienia

Opis i źródło finansowania	Kwota	Data/Okres
Grant badawczy OPUS przyznany przez Narodowe Centrum Nauki (NCN) – finansowanie: Stanowiska kierownika, doktorantów oraz post-doc na okres 4 lat	1.446.310 zł	02. 2022 – 01. 2026
Studia doktoranckie realizowane przez szkołę Academia Copernicana, wspierane przez Centrum Doskonałości Astrofizyki i Astrochemii.	≈ 60k zł/rok ×4 ≈ 240.000 zł	01. 2022 – 12. 2025
Humboldt 'Return' Fellowship oferowane przez Alexander-von-Humboldt-Stiftung, Niemcy	6.500 € ≈ 29.000 zł	04. 2022 – 03. 2023
Humboldt Individual Research Fellowship oferowane przez Alexander-von-Humboldt-Stiftung, Niemcy	104.100 € ≈ 465.000 zł	04. 2019 – 09. 2021
Jan Frič Premium for Young Researchers oferowane przez Astronomical Institute of the Czech Academy of Sciences	80.000 CZK ≈ 14.800 zł	rok 2017
Honours Branch (H2) stypendium Bonn-Cologne Graduate School (BCGS) w dziedzinie fizyki i astronomii	12.400 € ≈ 55.500 zł	10. 2013 – 07. 2016
Stypendium doktoranckie oferowane przez Alexander-von-Humboldt-Professor N. Langer	71.700 € ≈ 321.000 zł	09. 2012 – 03. 2016
Stypendium w ramach programu Erasmus oferowane przez Eötvös University, Węgry i Wuppertal University, Niemcy	1.733 € ≈ 7750 zł	10. 2011 – 02. 2012
Pierwsza nagroda w krajowym konkursie dla młodych naukowców na Węgrzech	–	29. 04. 2011

BIBLIOGRAFIA

- [1] N. Langer. *ARA&A*, 50:107–164, September 2012.
- [2] D. Garcia, ..., [Szécsi](#) et al. *Experimental Astronomy*, 51(3):887–911, June 2021.
- [3] D. [Szécsi](#). *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 47:108–115, July 2017.
- [4] D. [Szécsi](#). *Proceedings of Science, PoS(MULTIF2017)065*, 2017, October 2017.
- [5] N. Bastian and C. Lardo. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56:83–136, sept 2018.
- [6] Neijssel, Vigna-Gómez, ..., et al. *MNRAS*, 490(3):3740–3759, December 2019.
- [7] Stevenson, ..., [Szécsi](#), et al. *ApJ*, 882:121, September 2019.
- [8] F. Tramper, G. Gräfener, O. E. Hartoog, et al. *A&A*, 559:A72, November 2013.
- [9] M. Garcia, A. Herrero, F. Najarro, et al. *MNRAS*, 484:422–430, March 2019.
- [10] D. [Szécsi](#), N. Langer, S.-C. Yoon, et al. *A&A*, 581:A15, September 2015.
- [11] D. [Szécsi](#). *The Evolution of Low-Metallicity Massive Stars*. PhD thesis, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bonn, July 2016.
- [12] D. [Szécsi](#), J. Mackey, and N. Langer. *A&A*, 612:A55, April 2018.
- [13] D. [Szécsi](#) and R. Wünsch. *ApJ*, Vol. 871, nr. 1, 2019.

- [14] D. [Szécsi](#), N. Langer, D. Sanyal, et al. In *Proceedings of Wolf-Rayet Stars Workshop, Potsdam, Germany*, p. 189, 2015.
- [15] Kubátová & [Szécsi](#) et al. *A&A*, 623:A8, March 2019.
- [16] S. E. de Mink, M. Cantiello, N. Langer, et al. *A&A*, 497:243–253, April 2009.
- [17] S. E. de Mink and I. Mandel. *MNRAS*, 460:3545–3553, August 2016.
- [18] I. Mandel and S. E. de Mink. *MNRAS*, 458:2634–2647, May 2016.
- [19] P. Marchant, N. Langer, P. Podsiadlowski, et al. *Astronomy & Astrophysics*, 588:A50, April 2016.
- [20] J. J. Eldridge and E. R. Stanway. *MNRAS*, 462:3302–3313, November 2016.
- [21] D. R. Aguilera-Dena, N. Langer, T. J. Moriya, and A. Schootemeijer. *ApJ*, 858:115, May 2018.
- [22] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, B. P. Abbott, et al. *Phys. Rev. D*, 100(2):024017, July 2019.
- [23] Poojan Agrawal, Dorottya Szécsi, Simon Stevenson, et al. *MNRAS*, 512(4):5717–5725, June 2022.
- [24] Dorottya [Szécsi](#), Poojan Agrawal, Richard Wunsch, and Norbert Langer. *A&A*, 658:A125, February 2022.
- [25] S.-C. Yoon, N. Langer, and C. Norman. *A&A*, 460:199–208, December 2006.
- [26] S.-C. Yoon, A. Dierks, and N. Langer. *A&A*, 542:A113, June 2012.
- [27] I. Brott, S. E. de Mink, M. Cantiello, et al. *A&A*, 530:A115, June 2011.
- [28] K. Köhler, N. Langer, A. de Koter, et al. *A&A*, 573:A71, January 2015.
- [29] Dorottya Szécsi, Poojan Agrawal, Richard Wunsch, and Norbert Langer. *A&A*, 658:A125, February 2022.
- [30] M. Kourniotis, R. Wunsch, S. Martínez-González, et al. *MNRAS*, 521(4):5686–5698, June 2023.
- [31] Natalia Lahén, Thorsten Naab, Guinevere Kauffmann, et al. *MNRAS*, 522(2):3092–3116, June 2023.
- [32] A. Romagnolo, K. Belczynski, J. Klencki, et al. *arXiv e-prints*, page arXiv:2211.15800, November 2022.
- [33] Sergio Martínez-González, Richard Wunsch, Guillermo Tenorio-Tagle, et al. *ApJ*, 934(1):51, July 2022.
- [34] Annika Franneck, Richard Wunsch, Sergio Martínez-González, et al. *Accepted by ApJ*, page arXiv:2201.12339, January 2022.
- [35] B. Paxton, L. Bildsten, A. Dotter, et al. *ApJS*, 192:3, January 2011.
- [36] B. Paxton, M. Cantiello, P. Arras, et al. *ApJS*, 208:4, September 2013.
- [37] B. Paxton, P. Marchant, J. Schwab, et al. *ApJS*, 220:15, September 2015.
- [38] J. Choi, A. Dotter, C. Conroy, et al. *ApJ*, 823:102, June 2016.
- [39] A. Dotter. *ApJS*, 222:8, January 2016.
- [40] P. Marchant, N. Langer, P. Podsiadlowski, et al. *A&A*, 604:A55, August 2017.
- [41] Y. Götzberg, S. E. de Mink, J. H. Groh, et al. *A&A*, 629:A134, September 2019.
- [42] Z. Keszthelyi, G. Meynet, M. E. Shultz, et al. *MNRAS*, 493(1):518–535, March 2020.
- [43] S. Stevenson, A. Vigna-Gómez, I. Mandel, et al. *Nature Communications*, 8:14906, April 2017.
- [44] J. W. Barrett, S. M. Gaebel, C. J. Neijssel, et al. *MNRAS*, 477:4685–4695, July 2018.
- [45] A. Vigna-Gómez, C. J. Neijssel, S. Stevenson, et al. *MNRAS*, 481:4009–4029, December 2018.
- [46] F. S. Broekgaarden, S. Justham, S. E. de Mink, et al. *MNRAS*, September 2019.
- [47] J. R. Hurley, O. R. Pols, and C. A. Tout. *MNRAS*, 315:543–569, July 2000.
- [48] R. G. Izzard, L. M. Dray, A. I. Karakas, et al. *A&A*, 460:565–572, December 2006.
- [49] K. Belczynski, V. Kalogera, F. A. Rasio, et al. *ApJS*, 174:223–260, January 2008.
- [50] J. J. Eldridge, R. G. Izzard, and C. A. Tout. *MNRAS*, 384:1109–1118, March 2008.

- [51] R. G. Izzard, E. Glebbeek, R. J. Stancliffe, and O. R. Pols. *A&A*, 508:1359–1374, December 2009.
- [52] I. Brott, C. J. Evans, I. Hunter, et al. *A&A*, 530:A116, June 2011.
- [53] M. Dominik, K. Belczynski, C. Fryer, et al. *ApJ*, 759:52, November 2012.
- [54] J. J. Eldridge and E. R. Stanway. *MNRAS*, 419:479–489, January 2012.
- [55] F. R. N. Schneider, N. Langer, A. de Koter, et al. *A&A*, 570:A66, October 2014.
- [56] C. Abate, O. R. Pols, R. J. Stancliffe, et al. *A&A*, 581:A62, September 2015.
- [57] K. Belczynski, D. E. Holz, T. Bulik, and R. O’Shaughnessy. *Nature*, 534:512–515, June 2016.
- [58] Kruckow, ..., [Szécsi](#) et al. *Astronomy & Astrophysics*, 596:A58, November 2016.
- [59] M. U. Kruckow, T. M. Tauris, N. Langer, et al. *MNRAS*, 481:1908–1949, December 2018.
- [60] Vigna-Gómez, ..., [Szécsi](#) et al. *MNRAS*, 481:4009–4029, December 2018.
- [61] Mario Spera, Michela Mapelli, Nicola Giacobbo, et al. *MNRAS*, 485(1):889–907, May 2019.
- [62] S.-C. Yoon and N. Langer. *A&A*, 443:643–648, 2005.
- [63] S. E. Woosley and A. Heger. *ApJ*, 637:914–921, February 2006.
- [64] M. Cantiello, S.-C. Yoon, N. Langer, and M. Livio. *A&A*, 465:L29–L33, April 2007.
- [65] F. I. Pelupessy, A. van Elteren, N. de Vries, et al. *A&A*, 557:A84, September 2013.
- [66] E. R. Stanway, J. J. Eldridge, and G. D. Becker. *MNRAS*, 456:485–499, February 2016.
- [67] N. Ivanova, S. Justham, X. Chen, et al. *A&A Rev.*, 21:59, February 2013.
- [68] A. Menon and A. Heger. *MNRAS*, 469:4649–4664, August 2017.
- [69] A. Menon, ..., D. [Szécsi](#), et al. *MNRAS*, 507(4):5013–5033, November 2021.
- [70] Simon Portegies Zwart and Steve McMillan. *Astrophysical Recipes; The art of AMUSE*. IOP Publishing, 2018.
- [71] Agrawal, ..., [Szécsi](#) et al. *MNRAS*, 497(4):4549–4564, October 2020.
- [72] J. Puls, J.S. Vink, and F. Najarro. *A&A Rev.*, 16:209–325, December 2008.
- [73] B. Šurlan, W.-R. Hamann, A. Aret, et al. *A&A*, 559:A130, November 2013.
- [74] N. Smith. *Annual Reviews of A&A*, (52), 2014.
- [75] R. Björklund, J. O. Sundqvist, J. Puls, and F. Najarro. *arXiv e-prints*, page arXiv:2008.06066, August 2020.
- [76] Andreas A. C. Sander and Jorick S. Vink. *MNRAS*, 499(1):873–892, November 2020.
- [77] Jorick S. Vink, Erin R. Higgins, Andreas A. C. Sander, and Gautham N. Sabhahit. *MNRAS*, March 2021.
- [78] A. Heger and S. E. Woosley. *ApJ*, 567:532–543, March 2002.
- [79] A. Heger, C. L. Fryer, S. E. Woosley, et al. *ApJ*, 591:288–300, July 2003.
- [80] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, et al. *The Astrophysical Journal Letters*, 818(2):L22, 2016.
- [81] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, et al. *Physical Review Letters*, 116(6):061102, February 2016.
- [82] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, et al. *Physical Review Letters*, 116(24):241103, June 2016.
- [83] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, B. P. Abbott, et al. *Physical Review Letters*, June 2017.
- [84] D. [Szécsi](#), Z. Bagoly, J. Kóbori, et al. *A&A*, 557:A8, September 2013.
- [85] M. Ajello, M. Arimoto, M. Axelsson, et al. *ApJ*, 878:52, June 2019.
- [86] A. Lien, T. Sakamoto, S. D. Barthelmy, et al. *ApJ*, 829:7, September 2016.
- [87] J. Hjorth, D. Watson, J. P. U. Fynbo, et al. *Nature*, 437:859–861, October 2005.
- [88] N. Kawai, G. Kosugi, K. Aoki, et al. *Nature*, 440:184–186, March 2006.
- [89] C. C. Thöne, L. Christensen, J. X. Prochaska, et al. *MNRAS*, 441:2034–2048, July 2014.
- [90] O. E. Hartoog, D. Malesani, J. P. U. Fynbo, et al. *A&A*, 580:A139, August 2015.
- [91] I. Horvath, D. [Szécsi](#), J. Hakkila, et al. *MNRAS*, 498(2):2544–2553, October 2020.

- [92] S. F. Portegies Zwart, S. L. W. McMillan, and M. Gieles. *ARA&A*, 48:431–493, September 2010.
- [93] S. N. Longmore, J. M. D. Kruijssen, N. Bastian, et al. *Protostars and Planets VI*, pages 291–314, 2014.
- [94] E. Pancino, D. Romano, B. Tang, et al. *A&A*, 601:A112, May 2017.
- [95] E. Laplace, Y. Göteborg, S. E. de Mink, et al. *A&A*, 637:A6, May 2020.
- [96] R. M. Humphreys and K. Davidson. *ApJ*, 232:409–420, September 1979.
- [97] E. Carretta, A. Bragaglia, R. Gratton, and S. Lucatello. *A&A*, 505:139–155, October 2009.
- [98] S. Silich, G. Tenorio-Tagle, and A. Rodríguez-González. *ApJ*, 610:226–232, July 2004.
- [99] R. Wunsch, S. Silich, J. Palouš, et al. *ApJ*, 740:75, October 2011.
- [100] S. Silich and G. Tenorio-Tagle. *MNRAS*, 465:1375–1383, February 2017.
- [101] R. Wunsch, J. Palouš, G. Tenorio-Tagle, and S. Ehlerová. *ApJ*, 835:60, January 2017.
- [102] J. Mackey, S. Mohamed, V. V. Gvaramadze, et al. *Nature*, 512:282–285, August 2014.
- [103] B. Kubátová, D. Szécsi, A. A. C. Sander, et al. *A&A*, 623:A8, March 2019.
- [104] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, R. Abbott, et al. *arXiv e-prints 2004.08342*, April 2020.
- [105] J. Aasi, B. P. Abbott, R. Abbott, et al. *Phys. Rev. D*, 89(12):122004, June 2014.
- [106] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, et al. *Living Reviews in Relativity*, 21(1):3, April 2018.
- [107] J. J. Eldridge, E. R. Stanway, and P. N. Tang. *MNRAS*, 482:870–880, January 2019.
- [108] A. Schootemeijer, N. Langer, N. J. Grin, and C. Wang. *A&A*, 625:A132, May 2019.
- [109] Avishai Gilkis, Tomer Shenar, Varsha Ramachandran, et al. *MNRAS*, February 2021.
- [110] N. Langer. *Luminous Blue Variables: Massive Stars in Transition. ASP Conference Series. Ed. A. Nota, H. Lamers.*, 120:83, 1997.
- [111] G. Gräfener, S. P. Owocki, and J. S. Vink. *A&A*, 538:A40, February 2012.
- [112] D. Sanyal, ..., D. Szécsi, et al. *A&A*, 597:A71, January 2017.
- [113] D. Szécsi, N. Langer, S.-C. Yoon, et al. In *Fast Outflows in Massive Stars. EWASS 2014 Simposia 7. Geneva, Switzerland*, June 2014.
- [114] E. O’Connor and C. D. Ott. *ApJ*, 730:70, April 2011.
- [115] M. Ugliano, H.-T. Janka, A. Marek, and A. Arcones. *ApJ*, 757:69, September 2012.
- [116] O. Pejcha and T. A. Thompson. *ApJ*, 801:90, March 2015.
- [117] T. Sukhbold and S. E. Woosley. *ApJ*, 783:10, March 2014.
- [118] T. Sukhbold, T. Ertl, S. E. Woosley, et al. *ApJ*, 821:38, April 2016.
- [119] A. I. MacFadyen and S. E. Woosley. *ApJ*, 524:262, 1999.
- [120] A. A. Chrimes, E. R. Stanway, and J. J. Eldridge. *MNRAS*, 491(3):3479–3495, January 2020.
- [121] S. E. de Mink, O. R. Pols, N. Langer, and R. G. Izzard. *A&A*, 507:L1–L4, November 2009.
- [122] N. Bastian, I. Cabrera-Ziri, and M. Salaris. *MNRAS*, 449:3333–3346, May 2015.
- [123] N. E. Britavskiy, A. Z. Bonanos, A. Herrero, et al. *A&A*, 631:A95, November 2019.
- [124] K. Lind, J. Melendez, M. Asplund, et al. *A&A*, 554:A96, June 2013.
- [125] Tilman Hartwig, Miho N. Ishigaki, Ralf S. Klessen, and Naoki Yoshida. *MNRAS*, 482(1):1204–1210, January 2019.
- [126] A. Mucciarelli, L. Monaco, P. Bonifacio, et al. *A&A*, 661:A153, May 2022.
- [127] E. A. Mauerer, S. Heintz, R. Dressler, et al. *Journal of Instrumentation*, 12(2):P02016, February 2017.
- [128] N. Rijal, I. Wiedenhöver, J. C. Blackmon, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 122(18):182701, May 2019.
- [129] B. Davids. *Mem. d.Soc. Astron.Ital.*, 91:20, January 2020.
- [130] Cyril Pitrou, Alain Coc, Jean-Philippe Uzan, and Elisabeth Vangioni. *Nature Reviews Physics*,

- 3(4):231–232, January 2021.
- [131] E. M. Tursunov, S. A. Turakulov, and A. S. Kadyrov. *Nuclear Physics A*, 1006:122108, February 2021.
- [132] Kanji Mori and Motohiko Kusakabe. *Mem. d.Soc. Astron.Ital.*, 91:26, January 2020.
- [133] G. J. Mathews, A. Kedia, N. Sasankan, et al. *Mem. d.Soc. Astron.Ital.*, 91:29, January 2020.
- [134] G. R. Farrar. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #235*, volume 235 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 133.04, January 2020.
- [135] Kanji Mori, Motohiko Kusakabe, A. Baha Balantekin, et al. *MNRAS*, 503(2):2746–2753, May 2021.
- [136] Yini Lu and Motohiko Kusakabe. *ApJ*, 926(1):L4, February 2022.
- [137] I. Brott, S. E. de Mink, M. Cantiello, et al. *A&A*, 530:A115, June 2011.
- [138] Valentina D’Orazi, Sara Lucatello, Raffaele Gratton, et al. *ApJ*, 713(1):L1–L5, Apr 2010.
- [139] S. Q. Hou, T. Kajino, T. C. L. Trueman, et al. *ApJ*, 920(2):145, October 2021.