

TECHNOLOGIA W SŁUŻBIE OBSERWACJI NAJSŁABSZYCH METEORÓW

 **Radostaw Poleski**

RÓŻNE RODZAJE KAMER

Obserwacje słabych meteorów są bardzo trudne. Meteory przesuwają się szybko na niebie i na zaobserwowanie każdego ze zjawisk mamy co najwyżej kilka sekund, a z reguły znacznie poniżej sekundy. Typowa metoda stosowana w astronomii, czyli wydłużanie czasu ekspozycji, nie zadziała. Inna możliwość to kierowanie kilku kamer w ten sam obszar nieba i komputerowe dodawanie rejestrowanych przez nie obrazów. To jest oczywiście kosztowne i chyba nie było nigdy stosowane.

Rozwiązaniem problemu obserwacji słabych meteorów jest dobranie odpowiednio czułego detektora. Warto tu dodać, że jeszcze 20 lat temu bezkonkurencyjne było ludzkie oko patrzące dłuższy czas w okular podłączony do refraktora. Jedyną elektroniczną konkurencją były wtedy przemysłowe kamery wideo ze wzmacniaczami obrazu. Wzmacniacze mają jednak stosunkowo małe pole widzenia, ograniczoną żywotność, a do tego są bardzo drogie. Najlepszą możliwością było więc kupowanie urządzeń z demobilu. Cena była niższa, ale za to widoczne były uszkodzenia (np. wyraźne rysy w polu widzenia) i do tego żywotność używanych wzmacniaczy była jeszcze krótsza. Kamery używane ze wzmacniaczami obrazu były kamerami typu CMOS (ang. *complementary metal-oxidesemiconductor*). Tego typu detektory są też używane w aparatach i telefonach komórkowych. Jednak w profesjonalnej astronomii kamery typu CMOS są rzadkością w porównaniu z kamerami typu CCD (ang. *chargecoupled device*). Główne przewagi CCD to możliwość lepszej kalibracji niejednorodności w czułości różnych pikseli, większa rozpiętość tonalna, liniowa zależność sygnału od jasności obserwowanego obiektu oraz większa czułość (ta ostatnia przewaga maleje w ostatnich latach). Dlatego kamery CCD królują w profesjonalnych instrumentach astronomicznych. Z drugiej strony detektory CMOS są tańsze

w produkcji i mają funkcję elektronicznej migawki, co jest ich główną zaletą w zastosowaniu do urządzeń codziennego użytku. Dodatkowo detektory CMOS lepiej radzą sobie z prześwietlonymi obrazami. Ostatnia różnica między CCD i CMOS jest fundamentalna: odczyt detektorów CMOS jest znacznie szybszy. Obecnie odczyt zdjęcia z dużego detektora CCD w rozpiętości tonalnej 16 bitów zajmuje od kilku sekund do około pół minuty w zależności od użytej elektroniki i wielkości detektora. Trzydzieści lat temu odczyt mniejszych detektorów mógł zajmować nawet parę minut. Meteory zwykle są widoczne na tyle krótko, że tradycyjna kamera CCD nie nadaje się do ich obserwacji.

Jedną z możliwych modyfikacji kamer CCD to Frame Transfer CCD. To pojedynczy detektor CCD, którego jedna połowa jest stale zasłonięta, a druga używana jest do robienia zdjęć. Po zrobieniu zdjęcia ładunki elektryczne zebrane w pikselach przesuwane są do zasłoniętej połowki detektora, co trwa bardzo krótko. Po przesunięciu ładunków odsłonięta połowka może zacząć kolejną ekspozycję, a w tym czasie zasłonięta połowka jest używana do odczytu zdjęcia, czyli zamiany zebranych w pikselach ładunków na zdjęcie komputerowe. To rozwiązanie zmniejsza straty czasowe na odczyt zdjęć, ale wymaga bardziej skomplikowanej elektroniki i oferuje o połowę mniejsze rozmiary detektorów za porównywalną cenę. Rozwiązanie to chyba nigdy nie było stosowane na dużą skalę w obserwacjach meteorów.

Kolejną możliwością obserwacji słabych meteorów to wykorzystanie detektorów EMCCD (ang. *electron-multiplying CCD*). W porównaniu z detektorami CCD detektory EMCCD posiadają dodatkowe wzmacniacze umieszczone przed wzmacniaczem wyjściowym (czyli tym, który „liczy” elektrony zgromadzone wcześniej w pikselach). Liczba tych dodatkowych wzmacniaczy jest duża (powyżej 500),

co pozwala na osiągnięcie kilkusetkrotnego wzmocnienia sygnału. Wzmacniacze te zwiększają liczbę elektronów, wykorzystując zjawisko jonizacji zderzeniowej, podobnie do działania diody lawinowej.

KAMERY EMCCD W OBSERWACJACH METEORÓW

Kamery EMCCD są używane do obserwacji meteorów w ramach kanadyjskiej sieci CAMO (*Canadian Automated Meteor Observatory*). Cztery kamery z takimi detektorami są umieszczone w dwóch stacjach w stanie Ontario. Umieszczenie dwóch stacji obserwacyjnych w odpowiedniej odległości od siebie pozwala mierzyć kluczowe parametry meteorów. Pojedyncza stacja określa płaszczyznę, w której poruszał się meteor. Jeśli mamy obserwacje z dwóch takich stacji, to każda z nich wyznacza niezależnie płaszczyznę, a przecięcie tych dwóch płaszczyzn definiuje linię, po której poruszał się meteor. Dokładność wyznaczenia tej linii zależy od umiejscowienia obu stacji (optymalna odległość to ok. 100 km) oraz od tego, jak dokładnie możemy mierzyć pozycje meteoru na pojedynczych zdjęciach. Określenie trajektorii meteoru pozwala nam wyznaczyć jego orbitę w Układzie Słonecznym.

Głównym celem obserwacji EMCCD w ramach CAMO jest optyczna rejestracja i badanie tych samych meteorów, których echa radiowe obserwowane są przez *Canadian Meteor Orbit Radar* (CMOR). Celem tych działań jest opracowanie metody szacowania mas meteorów na podstawie obserwacji radiowych.

Do obserwacji wykorzystywane są detektory znanej firmy Teledyne e2v. Rozmiar piksela to 13 mikronów, a matryca ma rozmiary 1024×1024 pikseli. W pełnej rozdzielczości można odczytywać 17 klatek na sekundę, a CAMO odczytuje zdjęcia w rozdzielczości gorszej o czynnik 2, co pozwala osiągnąć 32 klatki na sekundę.

Stosowane są obiektywy Nikkor 50 mm $f/1.2$ i dają one zdolność rozdzielczą 1,7 minuty łuku oraz pole widzenia o boku 14,7 stopnia. Kamera ustawiona jest na wzmocnienie 200, co jest optymalne do detekcji meteorów, mimo że ogranicza rozpiętość tonalną z 16 do 15 bitów. Przy takim ustawieniu pojedyncza klatka pozwala zaobserwować gwiazdy o jasności 10,5 mag, a w przypadku meteorów rejestrowane są wszystkie zjawiska jaśniejsze od ok. 4,5 mag. Najślabsze rejestrowane meteory mają jasność 8 mag, ale jest ich bardzo mało i muszą mieć małe prędkości kątowe, by udało się je wykryć. Przykładowy meteor pokazany jest na rys. 1.

Ważnym problemem przy tego typu obserwacjach jest redukcja i analiza danych. W przypadku CAMO zdecydowano się na zapisywanie danych w postaci plików wideo trwających 10 minut. Jeden taki plik zajmuje 10 GB. W każdej stacji jest jeden komputer, który kontroluje dwie kamery oraz zajmuje się analizą danych. Przestrzeń dyskowa typu RAID pozwala przechowywać do 60 godzin nieskompresowanych nagrań wideo. Wyszukiwanie meteorów oraz ich dalsza triangulacja prowadzone są po obserwacjach, by nie przeciążać komputerów obsługujących kamery.

Kolejnym problemem poza zapisywaniem i przechowywaniem danych na dysku jest bieżąca analiza zebranych danych. Celem obserwacji EMCCD CAMO jest



Rys 2. Kamera NUVU EMCCD

detekcja możliwie słabych meteorów. Algorytmem o największej czułości jest bezpośrednie dopasowywanie poszukiwanego sygnału do wszystkich możliwych jego realizacji (ang. *matched filter*). Niestety algorytm ten jest niemiłosiernie wolny. Testy wykonane pięć lat temu na procesorach CPU pokazywały, że analiza dwusekundowego nagrania zajmowała 21 godzin! Taka analiza dla wszystkich danych była oczywiście niemożliwa. (Obecnie dostępne procesory graficzne GPU mają wielokrotnie lepsze osiągi i być może byłyby wystarczające do analizy danych w czasie rzeczywistym). Dlatego w CAMO wykorzystywany jest najpierw algorytm MeteorScan (opublikowany w 2005 r. przez Sirko Molaua i Petera Gurala), który ma mniejszą czułość, ale jest wielokrotnie szybszy. Detekcje z MeteorScan są później sprawdzane algorytmem *matched filter* i całość jest wystarczająco wydajna, by na bieżąco analizować dane z EMCCD. W porównaniu z pełnym zastosowaniem algorytmu *matched filter* czas obliczeń skraca się o ok. 10 000 razy kosztem jedynie trzykrotnego spadku liczby detekcji. W zastosowanych algorytmach uwzględniono niejednostajny ruch meteorów na zdjęciach, wynikający z hamowania meteoru w atmosferze i dystorsji obiektywu. Jednym z utrudnień związanych z analizą obrazów z EMCCD jest to, że szumy z tych kamer nie podlegają rozkładowi Gaussa. Ich opis matematyczny jest bardziej skomplikowany, co dodatkowo komplikuje algorytmy do detekcji meteorów.

W pracy Gural, Mills, Mazur i Brown opublikowanej w tym roku autorzy twierdzą, że przez prawie cztery lata system CAMO EMCCD zarejestrował 55 000 meteorów z dwóch stacji. Artykuł ten skupia się jednak na opisie używanego sprzętu oraz oprogramowania i nie przedstawia dokładnej analizy

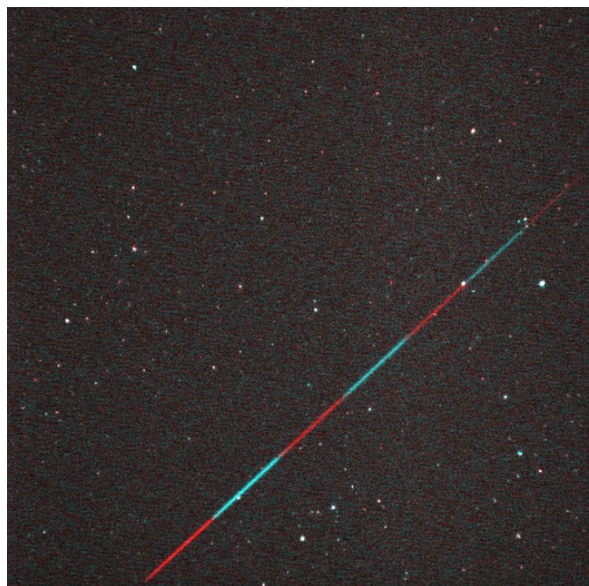
wykrytych meteorów. Pozostaje mieć nadzieję, że kolejna praca będzie zawierała taką analizę oraz porównanie z obserwacjami radiowymi CMOR.

JEDEN TELESKOP, DWA WZMACNIACZE, DWIE KAMERY...

W ramach CAMO działa jeszcze jeden system pozwalający na badanie słabych meteorów. Jego celem także jest porównanie z radiowymi obserwacjami CMOR. Ten drugi system to połączenie szerokokątnego obiektywu, celostatu (dwa ruchome lustra), teleskopu (!), dwóch wzmacniaczy obrazu i dwóch kamer CCD. Cały ten system dzieli się na dwa zestawy. Pierwszy z nich składa się z szerokokątnego obiektywu (25 mm, $f/0.85$, pole widzenia 28°), wzmacniacza obrazu oraz kamery CCD (80 klatek na sekundę). Kamera jest podłączona do komputera, który wykrywa meteory na bieżąco. Przewiduje on także położenie meteoru na kolejne ułamki sekundy.

Po wykryciu meteoru przez pierwszy zestaw zaczyna działać drugi zestaw. Jego pierwszym elementem jest celostat, który osiąga prędkość $2000^\circ/s$ (!) i obejmuje obszar $40^\circ \times 40^\circ$. Lustra wykonują ponad 2000 kroków na sekundę. Dla małych kątów przesunięcie zajmuje zaledwie 6 milisekund. Światło z celostatu jest przekierowywane do nieruchomego refraktora William Optics Zenithstar II ED APO o średnicy 80 mm i światłosile $f/6.8$. Ta apertura nie jest w pełni wykorzystywana, gdyż ograniczają ją rozmiary luster celostatu (50 mm), co skutkuje efektywną światłosiłą $f/11$. Światło z teleskopu jest kierowane do wzmacniacza obrazu, a następnie do kamery CCD (100 klatek na sekundę, rozpiętość tonalna 14 bitów). Te ostatnie są uruchamiane tylko na czas obserwacji meteoru, co pozwala oszczędnie gospodarować żywotnością wzmacniacza obrazu. Pole widzenia drugiego zestawu to $1,5^\circ$. Małe pole widzenia oznacza lepszą skalę obrazu: rozdzielczość pierwszego zestawu dla meteoru na wysokości 100 km to 76 m, a dla drugiego obrazu to zaledwie 4 m. Taka rozdzielczość w połączeniu z bardzo szybkim wykrywaniem meteorów i użyciem celostatu pozwala na obserwacje

Dokończenie na s. 93.



Rys 1. Przelot meteoru zarejestrowany przez CAMO

Amatorska supernowa SN 2022jli

Żyjemy w czasach, kiedy niemal każdego dnia odkrywane są nowe obiekty oraz zjawiska astronomiczne. Następnie prowadzi się obserwacje, które mają na celu poznanie ich natury oraz prawidłowe sklasyfikowanie. Coraz częściej uczestniczą w tym astronomowie amatorzy. Zdarza się nawet, że zarówno odkrycia, jak i klasyfikacji dokonują wyłącznie miłośnicy astronomii, dysponujący odpowiednim sprzętem oraz umiejętnościami. Z takim przypadkiem mieliśmy do czynienia na początku maja tego roku, a niepoślednią rolę odegrali w nim Polacy.

Przed świtem 5 maja 2022 r., mieszkający w RPA znany belgijski astronom amator i odkrywca supernowych Libert Monard, odkrył nowy, gwiazdopodobny obiekt ($14,4^m$) w galaktyce spiralnej NGC 157 w gwiazdozbiore Wieroryba. Odkrycie zostało zarejestrowane w bazie TNS (*Transient Name Server*) jako AT 2022jli (AT — *astronomical transient*)^[1]. Wszystko wskazywało na to, że mamy do czynienia z supernową, jednak jak zwykle w takich sytuacjach konieczne było zarejestrowanie widma i wykonanie klasyfikacji spektroskopowej. Najczęściej robią to profesjonalne obserwatoria wyposażone w nowoczesne spektrografy, bowiem pozagalaktyczne supernowe nie są zbyt jasne. Niestety, galaktyka NGC 157 na początku maja pojawia się na niebie południowym tuż przed wschodem Słońca. Obserwować można ją krótko i znajduje się nisko nad horyzontem. Duże teleskopy mają często ograniczenia niepozwalające na obserwację obiektów, które są w małej odległości kątowej od Słońca oraz których wysokość jest zbyt niska. Mijał już prawie tydzień od odkrycia AT 2022jli i żadne z obserwatoriów na świecie nie wykonało spektroskopii i go nie sklasyfikowało.

Gdy nie można użyć dużego, profesjonalnego teleskopu, lepiej poradzi sobie mniejszy, amatorski sprzęt, który sprawdzi

się w trudnych bądź nietypowych warunkach. Uznałem, że jest to dobra okazja, aby wyprzedzić innych i wykonać klasyfikację AT 2022jli. Od 2018 r. zajmuję się spektroskopią supernowych (opisałem swoją działalność w „Uranii” nr 2-3/2020 s. 54), ale pod południowym niebem nie posiadam własnego obserwatorium wyposażonego w spektrograf. Od wielu lat mam jednak przyjemność znać i czasem współpracować z Grzegorzem Duszanowiczem, niezwykle doświadczonym polskim miłośnikiem astronomii mieszkającym w Szwecji. Grzegorz ma na swoim koncie wiele odkryć (głównie supernowych) oraz znakomicie wyposażone obserwatorium w Namibii (Moonbase South Observatory MPC L87 — fot. 1). Prowadzi w nim zdalnie przeglądy nieba południowego. Jednym z jego teleskopów jest 35-cm Schmidt-Cassegrain $f/7,7$ z kamerą CMOS ZWO ASI294MM Pro. W zestawie tym jest również automatyczne koło filtrów, a w nim Star Analyser 200 (SA200)^[2]. Jest to specjalnie profilowana siatka dyfrakcyjna 200 linii/mm, w oprawie filtrów 1,25", umieszczana w osi optycznej teleskopu tuż przed kamerą. Za jej pomocą można rozszczepiać światło docierające do teleskopu i rejestrować widma gwiazd metodą tzw. spektroskopii bezszczelinowej, którą astronomowie znali już ponad 100 lat temu. Otrzymanie prawidłowego widma za pomocą spektroskopii bezszczelinowej jest trudniejsze niż w przypadku użycia spektroskopu szczelinowego, szczególnie dla słabszych obiektów, takich jak pozagalaktyczne supernowe. Bardzo często badane widmo jest na wstępie „zanieczyszczone” przez światła innych, jaśniejszych gwiazd, ich widma, galaktykę macierzystą supernowej oraz tło nieba. Uzyskany materiał fotograficzny wymaga zatem starannej i przemyślanej obróbki. Mimo to, zaproponowałem Grzegorzowi, abyśmy spróbowali wykonać spektroskopię AT 2022jli jego sprzętem.

Tuż przed świtem 11 maja 2022 r. w obserwatorium w Namibii Grzegorz sfotografował obszar nieba w okolicach galaktyki NGC 157, wykorzystując SA200. Wkrótce otrzymałem 49 plików w formacie FIT, na których odnalazłem widmo AT 2022jli (fot. 2). Czas każdej z tych ekspozycji wynosił 45 sekund. Dodatkowo niezbędne było wykonanie zdjęć widma znanej gwiazdy porównania, abym mógł przeprowadzić kalibrację długości fali oraz czułości instrumentalnej. Wybór padł na gwiazdę HIP1900 typu widmowego A1V. Podczas obróbki materiałów korzystałem z oprogramowania: MaxIm DL^[3], BASS^[4] oraz RSpec^[5]. Kiedy udało się już wyodrębnić i oczyścić widmo AT 2022jli, sięgnąłem po narzędzia kla-



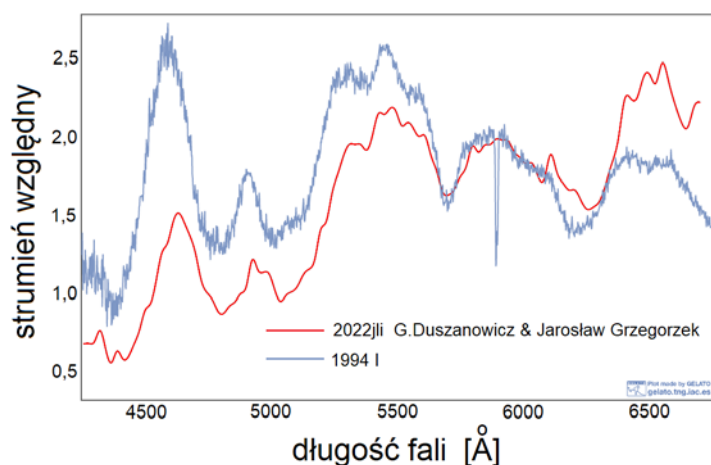
Fot.: Grzegorz Duszanowicz

Fot. 1. Obserwatorium Grzegorza Duszanowicza w Namibii. Oba teleskopy zbudowane w systemie Schmidta-Cassegraina. Po lewej teleskop o średnicy 28 cm i światłosile $f/1,9$ z układem HyperStar. Teleskop po prawej (35 cm, $f/7,7$) jest wyposażony w koło filtrów z siatką dyfrakcyjną Star Analyser 200, za pomocą której zarejestrowano widmo SN 2022jli

syfikacyjne: GELATO^[6] oraz SNID^[7]. Okazało się, że otrzymany wynik jest zgodny z widmami innych, wcześniejszych supernowych typu Ic. Rysunek 3 pokazuje najbardziej zbliżone widmo — supernowej SN 1994I. Jeszcze tego samego dnia zgłosiłem raport klasyfikacyjny do TNS i obiekt AT 2022jli został oficjalnie uznany za supernową SN 2022jli typu Ic^[8].

Ponad dwa tygodnie później SN 2022jli zajęli się astronomowie korzystający z obserwatorium La Silla (ESO) w Chile. Za pomocą teleskopu NTT o aperturze 3,58 m, wyposażonego w spektroskop do słabych obiektów EFOSC2 wykonali drugą spektroskopię i całkowicie potwierdzili nasz wynik. Kilka dni po tym (1 czerwca 2022 r.) satelitą Gaia otrzymano dokładnie ten sam rezultat^[9].

Supernowe typu Ic nie są odkrywane zbyt często. Podobnie jak typ II powstają w wyniku kolapsu jądra bardzo masywnej gwiazdy, ale pozbawionej otoczki wodorowej. W ich widmach nie obserwujemy linii charakterystycznych dla tego pierwiastka. Nie zawierają również linii krzemu (charakterystycznych dla typu Ia) ani helu (obecnych w typie Ib). Przypuszcza się, że utrata zewnętrznych warstw wodoru progenitora supernowej typu Ic może być spowodowana silnym wiatrem gwiazdowym lub interakcją z gwiazdą towarzyszącą.



Rys. 3. Uzyskane widmo SN 2022jli (linia czerwona) w porównaniu z widmem SN 1994I (linia niebieska). Obie to supernowe typu Ic

Dokończenie ze s. 91.

pojedynczych fragmentów po rozpadzie meteoru. Zastosowane algorytmy pozwalają na śledzenie meteoru nawet po tym, gdy wyjdzie on z pola widzenia kamery szerokokątnej.

Celem obserwacji tym systemem nie jest detekcja wszystkich meteorów od wybranej jasności, ale możliwie dokładne badanie wybranych zjawisk. Dzięki danym z kamery szerokokątnej na bieżąco wykrywa-

ne są meteory o jasności do 5 mag. W ciągu typowej nocy, gdy żaden z głównych rojów nie jest aktywny, wykrywanych jest około 100 meteorów.

Opis tego skomplikowanego systemu oraz pierwsze wyniki naukowe zostały opublikowane przez Weryka i in. w 2013 r. Okazało się, że 17% spośród meteorów dobrze obserwowanych przez teleskop pokazuje klarownie odłączanie się fragmentów od głównego ciała. Aż 3/4 wszystkich

meteorów pokazuje ślady lub odłączanie się fragmentów. Niektóre meteory są obserwowane przez CAMO i CMOR. Ich parametry, które można porównać (radiant i prędkość kątowna) są zasadniczo zgodne.

Słabe meteory udaje się obserwować. Z powyższych opisów zastosowanego sprzętu i algorytmów widać, że nie jest to jednak ani tanie, ani proste. ■



Fot. 2. Galaktyka NGC 157 i jej najbliższe otoczenie wraz z supernową SN 2022jli. Ekspozycja 49×45 sekund, wykonana z zainstalowaną siatką dyfrakcyjną SA200

SN 2022jli to drugi w historii przypadek klasyfikacji supernowej, wykonanej za pomocą Star Analysera. Pierwszym była SN 2020ohg — supernowa typu Ia odkryta przez Grzegorza Duszaniowicza, którą również miałem przyjemność sklasyfikować. Szczegóły opisane zostały w „Uranii” nr 4/2020 s. 66.

SN 2022jli — odległy, gwiazdny kataklizm z czasów, kiedy po Ziemi chodziły dinozaury. Odkryty, spektroskopowo zbadany i sklasyfikowany przez astroamatorów. Kiedyś wydawało się to niemożliwe. Dziś staje się niemal normalną praktyką, choć uprawianą wciąż przez bardzo niewielką grupę zapaleńców. Ta niezwykle budująca konkluzja pozwala śmiało przewidywania, jakie kolejne, ciekawe obszary aktywności otworzą się przed miłośnikami astronomii w przyszłości.

 Jarosław Grzegorzek

Przypisy:

- [1] <https://www.wis-tns.org/object/2022jli>
- [2] <https://www.rspec-astro.com/star-analyser/>
- [3] <https://diffractionlimited.com/product/maxim-dl>
- [4] <https://groups.io/g/BassSpectro>
- [5] <https://www.rspec-astro.com/>
- [6] <https://gelato.tng.iac.es/>
- [7] <https://people.lam.fr/blondin.stephane/software/snid/>
- [8] <https://www.wis-tns.org/object/2022jli/classification-cert>
- [9] <http://gsaweb.ast.cam.ac.uk/alerts/alert/Gaia22cbu/>