

Astrolabium

Konkurs astronomiczny

Supernowe Brahe i Keplera



Szkoła Podstawowa Klasy VII-VIII
Gimnazjum Klasa III
Doświadczenie konkursowe 5

Rok 2019

1. Wstęp teoretyczny

Supernowe to jedne z najbardziej energetycznych zjawisk, do jakich dochodzi we Wszechświecie. Są to gwałtowne wybuchy - przez krótki okres niemal tak samo jasne jak całe galaktyki gwiazd. Supernowe odgrywają olbrzymią rolę w astronomii. Przyczyniają się one do powstawania ciężkich pierwiastków, które w wyniku eksplozji rozsiewane są w galaktykach. Eksplozje supernowych mogą ścisnąć pobliskie obłoki gazu, które zaczynają się zapadać, tworząc nowe gwiazdy. Odwrotnie, mogą też „wywiać” gaz z gęstego obłoku lub części galaktyki, wstrzymując powstawanie kolejnych gwiazd. Pewien typ supernowych eksplodujących z określoną jasnością jest wykorzystywany do określania odległości do odległych galaktyk. Są to tak zwane świece standardowe.

Do około 1990 roku astronomowie dzielili supernowe na dwa zasadnicze typy: I i II na podstawie obecności linii wodoru w widmie supernowej¹ bądź jej braku. Po 1990 roku te dwa główne typy zaczęto dzielić na podtypy w zależności od szczegółowych cech danej supernowej.

Typ I: brak widocznych linii wodoru:

- Typ Ia: widoczne linie krzemu
- Typ Ib: brak linii krzemu, widoczne linie helu
- Typ Ic: podobny do Ib, brak linii krzemu oraz helu (występuje bardzo rzadko)

Typ II: widoczne linie wodoru:

- Typ IIb: podobne widmo do Ib po 3 tygodniach od maksimum
- Typ III: jasność spada liniowo z czasem
- Typ IIP: podobne widmo jak III, ale w pewnym momencie się wyfłaszcza
- Typ IIn: obecność wąskich linii emisyjnych wodoru,

Poszczególne typy supernowych oprócz widm różnią się także zmianą jasności w czasie, czyli tzw. **krzywą blasku**. Jej przebiegi dla poszczególnych typów widoczne są na kolejnych ilustracjach. Ukazują one zmiany jasności przed, po i w trakcie maksimum jasności. Jasność zaś jest mierzona w **wielkościach gwiazdowych** (magnitudo). Jest to tradycyjna miara jasności obiektów w astronomii, sięgająca jeszcze starożytności. Wówczas najjaśniejsze gwiazdy określano jako gwiazdy pierwszej wielkości, najślabsze zaś - te ledwo widoczne gołym okiem - jako gwiazdy 6-tej wielkości. Skalę tę precyzyjnie zdefiniowano w XIX wieku. W myśl tejże definicji, gwiazdy o jasności 6 magnitudo (6^m) były 100 razy słabsze od gwiazd o jasności 1^m . Gwiazdy o jasności 11^m były zaś 100 razy słabsze od gwiazd o jasności 6^m i 10 000 razy słabsze od gwiazd o jasności 1^m . Generalnie wzrost wielkości gwiazdowej o 1^m oznaczał spadek jasności o $\sqrt[5]{100} \approx 2,1512$ razy². Za wzór gwiazdy o 0^m przyjęto gwiazdę Wega (α Lyrae) w gwiazdozbiornie Lutni. Jasne obiekty mogą mieć ujemną wielkość gwiazdową. Syriusz, najjaśniejsza gwiazda na niebie (poza Słońcem) ma wielkość gwiazdową $-1,47^m$.

¹ Widmo to światło rozszczerzone na poszczególne długości fali. Obecność pierwiastków modyfikuje widmo, powodując „zagłębienia/wypukłości”, które nazywamy liniami.

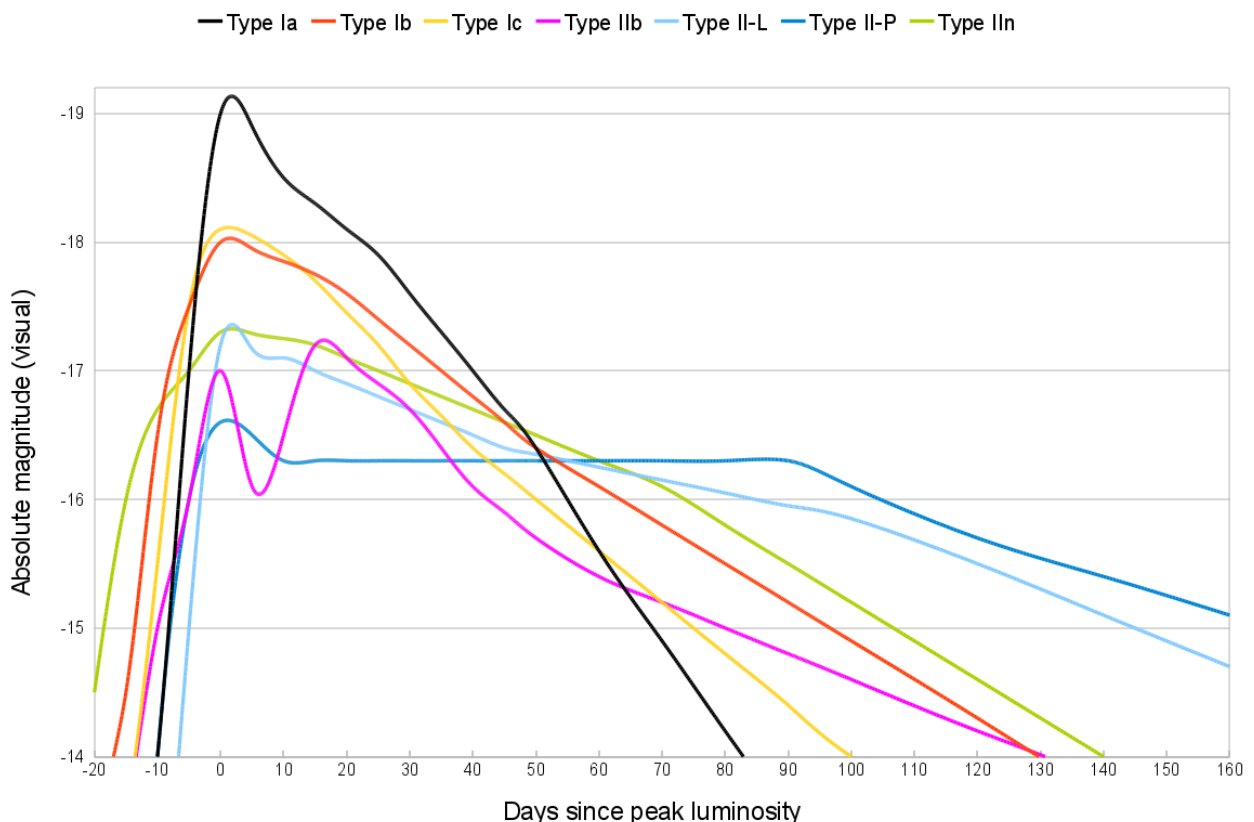
² Ścisły wzór ma postać $m_1 - m_2 = -2,5 \log_{10} \frac{I_1}{I_2}$, gdzie m_1 i m_2 oznaczają wielkości gwiazdowe dwóch obiektów, zaś I_1 i I_2 - jasności obiektów. \log_{10} to logarytm dziesiętny, czyli wykładnik potęgi 10, np. dla $100 = 10^2$, $\log_{10} 100 = 2$.

Obserwując gwiazdę z powierzchni Ziemi, mówimy o jej **jasności widomej**. Lecz gwiazdy znajdują się w różnej odległości od Ziemi, a im są bliżej, tym wydają się jaśniejsze. Aby ocenić ich prawdziwą jasność i móc porównać między sobą, potrzebujemy pewnej niezależnej miary. Jasności gwiazd wyliczone w taki sposób, jakby znajdowały się one w tej samej odległości od Ziemi³, nazywamy **absolutną wielkością gwiazdową M** . Dla Słońca wynosi ona $4,83^m$, dla Wegi $0,58^m$, dla Syriusza $1,42^m$. Dla porównania typowe wielkości absolutne supernowych w maksimum blasku wynoszą od -17^m do -19^m , co jest porównywalne z wielkościami absolutnymi niewielkich galaktyk.

Odległość d (wyrażoną w parsekach) do obiektu o widomej (m) oraz absolutnej (M) wielkości gwiazdowej można obliczyć za pomocą następującego wzoru:⁴

$$d = 10^{\frac{m-M+5-A}{5}}$$

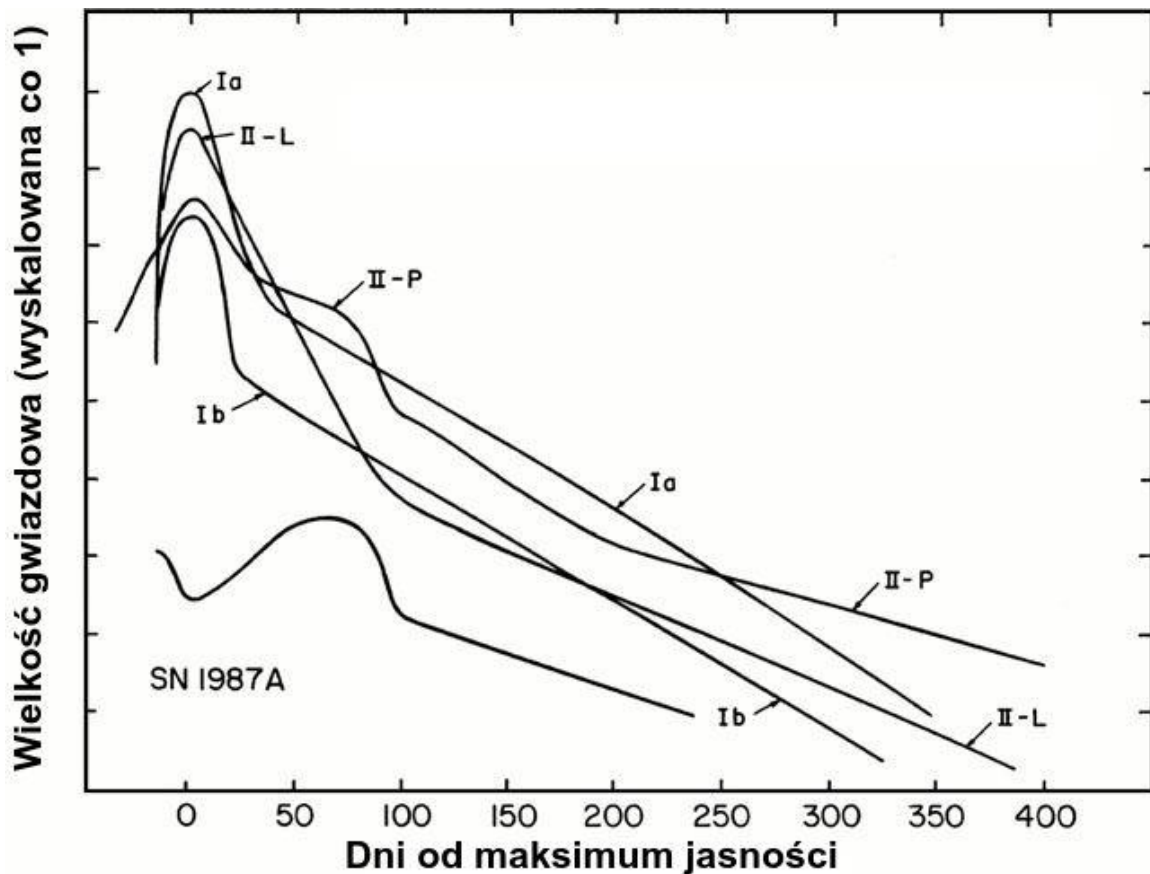
gdzie A to tzw. współczynnik ekstynkcji mówiący o ile magnitudo widoma wielkość gwiazdowa m jest osłabiona poprzez pył międzygwiazdowy znajdujący się na drodze do obiektu.



Rysunek 1. Krzywe blasku dla poszczególnych typów supernowych. Na osi Y odłożono absolutną wielkość gwiazdową w zakresie światła widzialnego, a na osi X czas w dniach liczonych od maksimum jasności.

³ przyjmuje się, że ta odległość wynosi 10 parseków, czyli około 32,6 lat świetlnych

⁴ wynika on z przekształcenia wzoru $m - M - A = 5 \log_{10} d - 5$, który to wzór można wyprowadzić, znając podaną wyżej definicję wielkości gwiazdowych, definicję absolutnej wielkości gwiazdowej, podstawowe własności matematyczne logarytmów oraz fakt, że natężenie światła danego obiektu maleje wraz z kwadratem odległości od niego.



Rysunek 2. Krzywe blasku dla poszczególnych typów supernowych w dłuższej perspektywie czasowej.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono przebieg standardowych krzywych blasku dla poszczególnych typów supernowych. W rzeczywistości jednak, z wyjątkiem typu Ia, krzywe blasku wykazują znaczne różnicowanie. Typ Ia ma zaś dość charakterystyczny przebieg krzywej blasku, choć i tu mogą się zdarzyć pewne odchylenia od „wzorcowego” przebiegu. Ta różnica między poszczególnymi typami bierze się z tego, że różne są przyczyny wybuchów supernowych. Uważa się, że supernowe typu II oraz Ib i Ic powstają w wyniku eksplozji olbrzymich gwiazd (o masie większej niż 8-9 mas Słońca) w końcowych stadiach ich życia. Gdy gwiazda wyczerpuje w swych centralnych częściach (jądrze) paliwo niezbędne do syntezy termojądrowej zapewniającej jej energię do świecenia (oraz powstrzymującej jądro od zapadania się pod własnym ciężarem), jądro takiej masywnej gwiazdy zapada się do gwiazdy neutronowej lub czarnej dziury w czasie ok. 1 sekundy. Na zapadające się jądro opadają gwałtownie zewnętrzne warstwy, które następnie się od niego odbijają, tworząc gigantyczną falę uderzeniową. Zewnętrzne warstwy gwiazdy zostają odrzucone w przestrzeń kosmiczną z ogromną siłą. W zależności jednak od masy gwiazdy oraz innych jej parametrów każdy wybuch może przebiegać w nieco odmienny sposób. Stąd wynika różnicowanie krzywych blasku.

Supernowe typu Ia są generowane w inny sposób. Klasyczny scenariusz zakłada, że mamy do

czynienia z układem podwójnym, złożonym z normalnej gwiazdy i białego karła. Biały karzeł to jądro starej, umarłej⁵ gwiazdy o masie mniejszej niż 8-9 mas Słońca, która odrzuciła zewnętrzną otoczkę. Małe białe karty składają się z helu, duże z mieszaniny węgla i tlenu. Przed zapadaniem się powstrzymuje je ciśnienie tzw. zdegenerowanego kwantowo gazu elektronów. Jest ono wystarczające, jeśli biały karzeł nie jest cięższy niż 1,4 masy Słońca. Jeśli masa białego karła wzrośnie do tej wielkości zacznie się gwałtowna, dostarczająca olbrzymiej ilości energii synteza węgla. Synteza ta przebiega po prostu w formie eksplozji rozrywającej białego karła kompletnie na kawałki bez żadnej pozostałości w środku. Ponieważ zaś granica syntezy węgla jest dobrze określona (1,4 masy Słońca) supernowe typu Ia mają zawsze bardzo podobny przebieg.

Szkopuł w tym, jak dostarczyć białemu karłowi tej dodatkowej masy potrzebnej do przekroczenia punktu syntezy węgla. Klasyczny scenariusz zakłada, że materia ta pochodzi z towarzyszącej białemu karłowi normalnej gwiazdy, bo gdy jest ona dostatecznie blisko, część jej materii może opadać na białego karła. Niedawno przedstawiono też drugi model zakładający, że do wybuchu supernowej typu Ia może dojść w wyniku połączenia się dwóch białych karłów.

W poznaniu natury supernowych niezwykle istotne są badania pozostałości supernowych w naszej Galaktyce - Drodze Mlecznej. Szacuje się, że w danej galaktyce wybucha nie więcej niż kilka supernowych na stulecie. Odległość utrudnia nam badanie ich pozostałości w innych galaktykach w przeciwieństwie do bliskich pozostałości po supernowych w naszej Galaktyce. Wybuchły one jednak stulecia temu, więc ich rozbłysków nie możemy bezpośrednio obserwować. Musimy zatem polegać na zapiskach historycznych z dawnych wieków, wyciągając z nich wszelkie interesujące nas szczegóły np. kiedy wybuchła dana supernowa, w jakim miejscu na niebie, jaką miała wielkość gwiazdową itp.

W naszej Galaktyce w ciągu ostatnich 2000 lat zaobserwowano około 8-9 wybuchów supernowych. Wybuchów było zapewne więcej. Ocenia się, że do kilku na stulecie. Jednak z powodu pyłu w dysku naszej Galaktyki możliwe do zaobserwowania gołym okiem są jedynie wybuchy stosunkowo bliskie⁶. Przed renesansem większość informacji o obserwacjach supernowych czerpiemy z dość zwięzłych notatek kronikarzy Dalekiego Wschodu: Chin, Korei i Japonii. W Europie i krajach arabskich wzmianek o supernowych pojawia się znacznie mniej. Wynikało to po części z dość niskiego poziomu europejskiej astronomii we wczesnym średniowieczu, a po części z tego, że czerpiąc z dziedzictwa starożytnych Greków astronomia europejska i arabska koncentrowała się bardziej na planetach i ich ruchach niż na obserwacjach nowych gwiazd. Inaczej zmiany na niebie traktowano na Dalekim Wschodzie. W myśl tamtejszej filozofii boskie Niebo zsyła co jakiś czas znaki, objawiając swą wolę w stosunku do poczynań ludzkich na Ziemi. Stąd tak skrupulatne obserwacje i zapiski w kronikach Dalekiego Wschodu.

Kiedy jednak w latach 1572 i 1604 wybuchły dwie jasne supernowe, europejska astronomia stała

⁵ tzn. takiej, we wnętrzu której nie zachodzi synteza termojądrowa

⁶ supernowe w innych galaktykach z pomocą teleskopu dostrzec jest prościej, dlatego że patrzymy nie wzdłuż dysku naszej Galaktyki (gdzie pyłu jest najwięcej), lecz w górę i w dół

już na zdecydowanie wyższym poziomie. Pojawienie się nowych gwiazd⁷ wzbudziło w Europie niezwykle zainteresowanie, stąd pozostało wiele opisów i relacji oraz pomiarów astronomicznych. Dwaj wielcy uczeni wnieśli największe zasługi w badanie nowych gwiazd: w 1572 roku duński szlachcic i astronom Tycho Brahe, a po jego śmierci nową gwiazdę z 1604 roku opisał jego uczeń, niemiecki astronom Johannes Kepler.

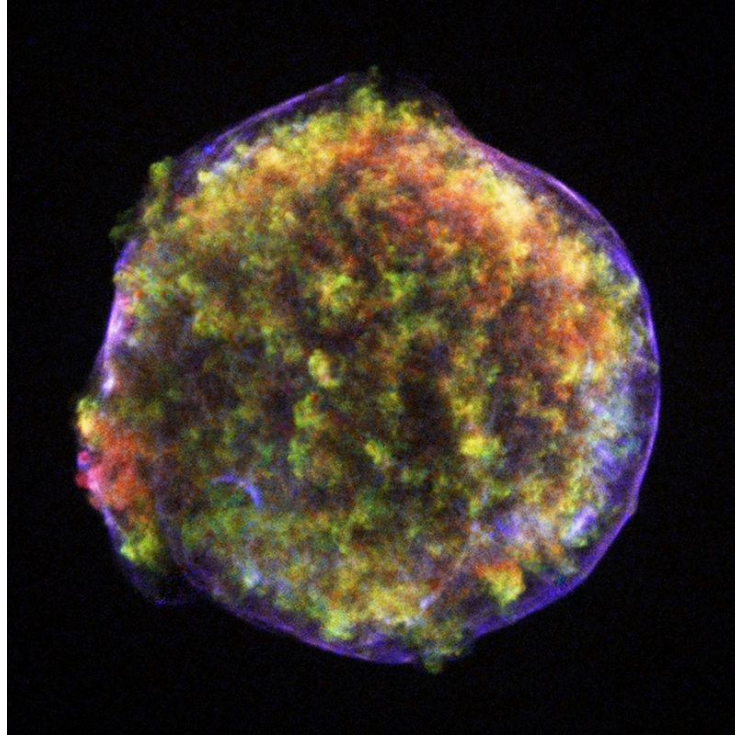


Rysunek 3. Tycho Brahe (1546-1601) i Johannes Kepler (1571-1630).

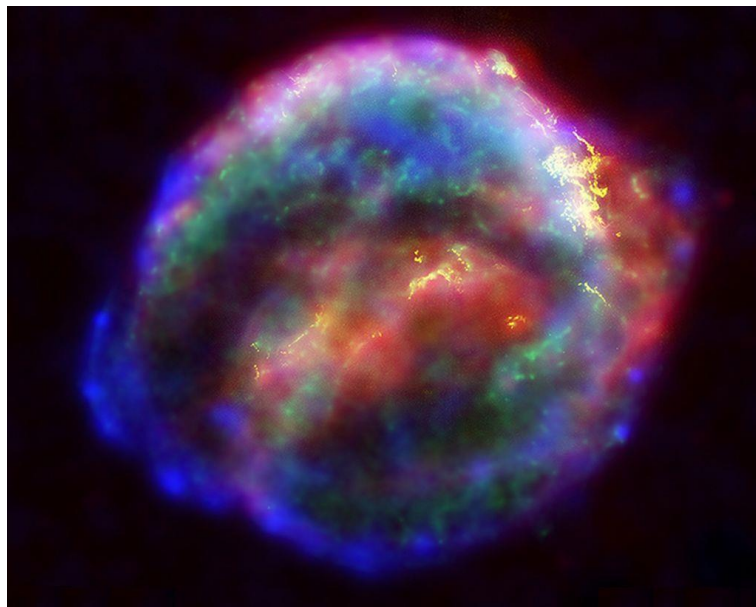
W publikacjach na temat obserwowanych przez siebie nowych gwiazd skrupulatnie opisali ich pozycje, zmiany jasności i koloru. Pomiarzy przez nich zrobione pozwoliły wykazać, że owe nowe gwiazdy z lat 1572 i 1604 znajdowały się ponad atmosferą, dalej niż Księżyc. Był to jeden z przejawów rewolucji naukowej, jaka się wówczas stopniowo dokonywała w Europie.

Skrupulatne pomiary pozycji supernowych pozostawione przez Tychona Brahego, Johannes Keplera i innych, pozwoliły nam dokładnie określić pozycje pozostałości po tych wybuchach. Są to chmury gazu widoczne szczególnie wyraźnie w obserwacjach przeprowadzonych na falach radiowych oraz w promieniowaniu rentgenowskim. Rozszerzają się one w tempie, które pozwala obliczyć czas, jaki upłynął od momentu eksplozji i jest on w pełni zgodny z datą eksplozji znaną z zapisków historycznych. By jednak dokładnie poznać naturę wybuchów, potrzebujemy wiedzy o krzywej blasku. W czasach, kiedy te supernowe wybuchły, nie było teleskopów ani detektorów pozwalających dokładnie określić jasność supernowej. Jednak w przypadku supernowych z 1572 i 1604 roku pozostały bogate zapiski obserwatorów, notujących jasność supernowej w następujących po sobie nocach poprzez porównanie jej blasku z dobrze określoną jasnością planet i gwiazd. Zapiski te pozwalają na stosunkowo dokładne określenie krzywych blasku obydwu omawianych supernowych.

⁷ sama nazwa „supernowa” pojawiła się dopiero w XX wieku dla odróżnienia znacznie jaśniejszych i jednorazowych wybuchów gwiazd – supernowych - od znacznie słabszych, powtarzalnych rozbłysków gwiazd zwanych „nowymi”



Rysunek 4. Pozostałość po SN1572 (SN – skrót on „supernowa”) obserwowana w fałszywych kolorach w promieniowaniu rentgenowskim.



Rysunek 5. Złożenie obrazów: rentgenowskiego (niebieski i zielony - dwa kanały z satelity Chandra), optycznego (żółty - Teleskop Kosmiczny Hubble'a) oraz podczerwonego (czerwony - Teleskop Kosmiczny Spitzera) ukazujące pozostałość po SN1604.

2. Cel doświadczenia

Celem doświadczenia jest odtworzenie i analiza krzywej blasku dla SN1572 i SN1604 oraz oszacowanie odległości do tych obiektów.

3. Opis wykonania doświadczenia

Odtwórz krzywe blasku supernowych z 1572 i 1604 roku na podstawie historycznych oszacowań blasku w zamieszczonych niżej tabelach, gdzie porównano jasność danej supernowej z odpowiednią gwiazdą lub planetą. Oszacuj dla każdej daty jasność z dokładnością do $0,25^m$. W przypadku kiedy podawana data obejmuje dłuższy okres (kilka dni lub miesięcy), przyjmij połowę omawianego okresu. Pamiętaj, że oceny jasności bazują na historycznej skali wielkości gwiazdowej, więc określenia typu „pierwszej wielkości gwiazdowej” oznaczają przedział 0^m-1^m , „drugiej wielkości gwiazdowej” 1^m-2^m itd. Przyjmij, że określenia „nieco słabsza/jaśniejsza” oznaczają różnicę o $\pm 0,25^m$, „słabsza/jaśniejsza” różnicę o $\pm 0,5^m$, a „znacznie słabsza/jaśniejsza” różnicę o $\pm 0,75^m$.

Określ maksymalną jasność każdej supernowej oraz datę maksimum. Następnie zrób wykres przedstawiający zmiany wielkości gwiazdowej w dniach od maksimum. Porównaj wykonane wykresy z informacjami ze wstępu teoretycznego. Czy można coś powiedzieć o typie tych supernowych?

Określ wielkość absolutną w momencie maksimum i oblicz odległość do obydwu supernowych. Szacowana ekstynkcja A wynosi 2^m-4^m w przypadku supernowej z 1604 roku i ok. 2^m w przypadku supernowej z 1572 roku.

Data	Opis jasności	Obserwatorzy
2 listopada 1572	Niewidoczna	Jeronimo Mugnoz
11 listopada 1572	Nieco słabsza od Wenus	różni
16 listopada 1572	Pomiędzy Wenus a Jowiszem	Joannes Praetorius
grudzień 1572	Jak Jowisz	Tycho
styczeń 1573	Pomiędzy Jowiszem a gwiazdami pierwszej wielkości	Tycho
luty-marzec 1573	Jak najjaśniejsze gwiazdy pierwszej wielkości	Tycho
kwiecień-maj 1573	Jak gwiazdy drugiej wielkości gwiazdowej	Tycho
lipiec-sierpień 1573	Jak gwiazdy trzeciej wielkości w Kasjopei: α , β , γ , δ Cassiopeiae	Tycho
październik-listopad 1573	Jak gwiazdy czwartej wielkości, jak κ Cassiopeiae	Tycho
grudzień 1573 - styczeń 1574	Nieco jaśniejsza od gwiazd piątej wielkości	Tycho
luty 1574	Osiągnęła szóstą wielkość gwiazdową	Tycho
marzec 1574	Niewidoczna	Tycho
pomiędzy 21 kwietnia a 19 maja 1574	Znikła	Chińczycy

Tabela 1. Lista ocen jasności supernowej z 1572 r.

Konkurs Astronomiczny „Astrolabium”
Supernowe Brahe i Keplera
Doświadczenie konkursowe rok 2019

Data	Opis jasności	Obserwatorzy
8 października 1604	Niewidoczna	różni
9 października 1604	Jak Mars	lekarz z Cosenza
10 października 1604	Jak Mars	Capra-Marius
11 października 1604	Jaśniejsza niż Mars	lekarz z Cosenza
12 października 1604	Nieco słabsza od Jowisza	Roeslin
13 października 1604	Nieco słabsza od Jowisza	Koreańczycy
15 października 1604	Jak Jowisz	lekarz z Cosenza Dawid Fabricius
17 października 1604	Znacznie jaśniejsza od Jowisza	Kepler
17-25 października 1604	Znacznie jaśniejsza od Jowisza	Koreańczycy
7-13 listopada 1604	Jak Jowisz	Koreańczycy
14 listopada 1604	Nieco słabsza od Jowisza	Koreańczycy
16-19 listopada 1604	Słabsza od Jowisza	Koreańczycy
26 grudnia 1604 - 20 stycznia 1605	Jaśniejsza niż Antares (α Scorpii)	Koreańczycy
3 stycznia 1605	Jaśniejsza niż Antares (α Scorpii) Znacznie słabsza niż Arktur (α Bootis)	Kepler
13 stycznia 1605	Jaśniejsza niż Saturn	Kepler
14 stycznia 1605	Jak Mars w październiku 1604	Dawid Fabricius
21 stycznia 1605	Jak Antares (α Scorpii)	Mastlin
21 stycznia - 15 lutego 1605	Jak Antares (α Scorpii)	Koreańczycy
koniec stycznia 1605	Jak Kłos (α Virginis)	Heydon
19-21 lutego 1605	Nieco słabsza niż Antares (α Scorpii)	Koreańczycy
23 lutego - 5 kwietnia 1605	Słabsza niż Antares (α Scorpii)	Koreańczycy
20 marca 1605	Nieco jaśniejsza niż ζ i η Ophiuchi	Kepler
27 marca 1605	Nieco jaśniejsza niż ζ i η Ophiuchi	Brengger
28 marca 1605	Nieco jaśniejsza niż η Ophiuchi	Cristini
12 kwietnia 1605	Jak η Ophiuchi	Dawid Fabricius
21 kwietnia 1605	Jak η Ophiuchi	Kepler
23 kwietnia 1605	Jak τ Scorpii	Koreańczycy
29 sierpnia 1605	Jak ξ Ophiuchi	Kepler
13 września 1605	Słabsza niż ξ Ophiuchi	Kepler
8 października 1605	Trudna do dostrzeżenia	Kepler

Tabela 2. Lista ocen jasności supernowej z 1604 r.

Konkurs Astronomiczny „Astrolabium”
Supernowe Brahe i Keplera
Doświadczenie konkursowe rok 2019

Obiekt	Wielkość gwiazdowa
Wenus	-4,3 ^m
Jowisz (listopad - grudzień 1572)	-2,5 ^m
Jowisz (październik - listopad 1604)	-2,0 ^m
Mars (październik 1604)	-1,0 ^m
Saturn (styczeń 1605)	-1,3 ^m
Arktur (α Bootis)	0 ^m
Antares (α Scorpii)	Zmienna: 0,75 ^m -1,3 ^m
Kłos (Spika, α Virginis)	1,0 ^m
γ Cassiopeiae	2,2 ^m
α Cassiopeiae	2,2 ^m
β Cassiopeiae	2,3 ^m
δ Cassiopeiae	2,7 ^m
κ Cassiopeiae	4,2 ^m
ζ Ophiuchi	2,5 ^m
η Ophiuchi	2,4 ^m
ξ Ophiuchi	4,4 ^m
τ Scorpii	2,8 ^m

Tabela 3. Lista jasności obiektów porównania.