


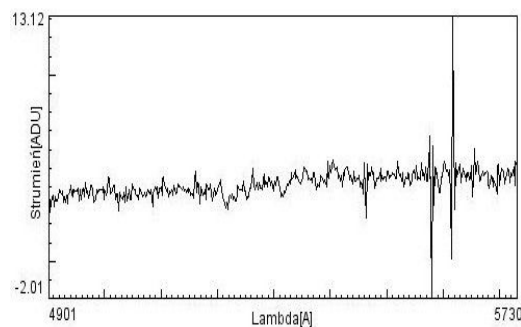
Skąd wiemy, że Wszechświat się rozszerza? Zmierz sam stałą Hubble'a !!!

 **Jean-Christophe Mauduit & Pacôme Delva**
Université Pierre et Marie Curie
Paryż, Francja


 **Agnieszka Pollo**
Instytut Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana
Otwock-Świerk, Polska

Przedstawiamy Państwu ćwiczenie, dzięki któremu można osobiście przekonać się, że Wszechświat się rozszerza. Zmierzymy tu prędkości, z jakimi uciekają od nas inne galaktyki, co pozwoli nam ocenić, z jaką prędkością rozszerza się cały Wszechświat. To pozwoli nam wyznaczyć "własnymi rękami" stałą Hubble'a - jedną z podstawowych stałych, używanych przez kosmologów do opisu własności Wszechświata.

Do pomiaru prędkości oddalania się galaktyk posłużą nam ich widma - jak to przedstawione poniżej (zdjęcie typowej galaktyki spiralnej - ESO).



**Pomiar stałej
Hubble'a**

 [Instrukcja do ćwiczenia \(pdf\)](#)

[SalsaJ, program do analizy danych](#)

 [Zdjęcia galaktyki NGC691](#)

 [Widma galaktyk](#)

Program nauczania/Przedmioty:

Szkoła ponadgimnazjalna
Podstawa programowa: Budowa i ewolucja Wszechświata
temat: Obserwacyjne podstawy kosmologii

Spis treści

[Wstęp](#)

[Rozszerzanie się Wszechświata](#)

[Pomiar prędkości ucieczki galaktyk](#)

[Pomiar odległości galaktyk](#)

[Pomiar stałej Hubble'a](#)

[Nasze galaktyki](#)

[Obliczenie odległości NGC 691](#)

[Pomiar prędkości ucieczki NGC 691](#)

[Pomiar prędkości ucieczki innych galaktyk](#)

[Obliczenie stałej Hubble'a](#)

[Ściąganie zdjęć i widm](#)

Wstęp

Rozszerzanie się Wszechświata

Jeszcze na początku XX wieku większość uczonych była przekonana, że Wszechświat istniał zawsze i zawsze wyglądał podobnie. Dopiero w 1929 roku Edwin Hubble zapoczątkował pomiary prędkości radialnych (czyli prędkości oddalania się albo zbliżania do nas) galaktyk, które doprowadziły do niespodziewanego wniosku - większość galaktyk oddala się od nas. Te pomiary dały początek teorii rozszerzającego się Wszechświata. Według niej nasz Wszechświat narodził się 13,8 mld lat temu podczas zdarzenia, znanego jako Wielki Wybuch. Od tego czasu nieustannie się rozszerza.

Ucieczka, czyli oddalanie się galaktyk, zaobserwowane po raz pierwszy przez Hubble'a, jest właśnie przejawem rozszerzania się Wszechświata. Galaktyki oddalają się od nas (i od siebie nawzajem) z prędkościami proporcjonalnymi do ich odległości od nas. Ekspansję Wszechświata opisujemy równaniem:

$$v \text{ [km/s]} = H_0 \text{ [km/s/Mpc]} * D \text{ [Mpc]}$$

gdzie stała Hubble'a H_0 łączy prędkość ucieczki galaktyk v i ich odległość D wyrażaną w megaparsekach (Mpc, przy czym $1 \text{ pc} = 3 \times 10^{16} \text{ m}$)

Błąd wyznaczenia stałej Hubble'a do niedawna był bardzo duży - jeszcze kilkanaście lat temu przyjmowano, że mieści się ona w granicach od 50 do 100 km/s/Mpc. Z

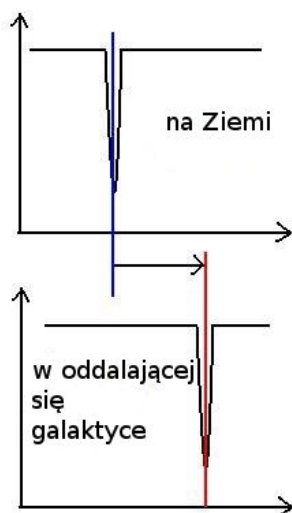
najnowszych pomiarów wynika, że jej wartość wynosi około 70 km/s/Mpc. Dokładne wyznaczenie wartości stałej Hubble'a stanowi istotny problem naukowy, ponieważ ta właśnie stała pozwala powiązać skalę czasową i przestrzenną we Wszechświecie. Na przykład (zakładając liniową ekspansję Wszechświata) zmiana stałej Hubble'a z 50 na 100 km/s/Mpc odpowiada zmianie wieku Wszechświata z 20 na 10 mld lat.

Tematem poniższego zadania jest (bardzo przybliżony) pomiar wartości stałej Hubble'a.

Pomiar prędkości ucieczki galaktyk

Światło białe (widzialne) składa się z wszystkich kolorów tęczy: tzw. widma. W gwiazdach znajdują się pierwiastki, które mają zdolność pochłaniania pewnych kolorów. Na przykład wapń pochłania światło o długości fali, odpowiadającej kolorowi zielonemu. Te brakujące kolory tworzą w widmie źródła tzw. linie absorpcyjne.

Wyobraźmy sobie źródło, emitujące światło o częstotliwości f , i obserwatora, znajdującego się w nieruchomym punkcie O. Jeśli źródło pozostaje nieruchome, do obserwatora wysyłane przez źródło światło dociera z tą samą częstotliwością f . Ale jeśli źródło oddala się od obserwatora, częstotliwość docierającego doń światła jest mniejsza od f . Jeśli źródło się przybliża, częstotliwość obserwowanego światła będzie większa od f .



Tak więc w przypadku źródła, które oddala się i emituje światło widzialne, charakterystyczne linie znanego pierwiastka (na przykład wapnia) będą przesunięte wraz z całym widmem w kierunku mniejszych (bardziej czerwonych) częstotliwości w porównaniu z liniami absorpcyjnymi tego samego pierwiastka, mierzonymi na Ziemi. Ten właśnie efekt obserwuje się w przypadku olbrzymiej większości galaktyk. Dzięki temu można bezpośrednio zmierzyć "przesunięcie ku czerwieni" czyli "redshift", z , korzystając ze wzoru:

$$1) z = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0) / \lambda_0$$

gdzie λ jest długością fali, która jest związana z częstotliwością f wzorem: $\lambda = c / f$, przy czym c jest prędkością światła ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$). λ_{obs} jest długością fali obserwowaną w przypadku danej galaktyki, a λ_0 to "prawdziwa" długość fali, czyli długość fali mierzona na Ziemi dla rozpatrywanego pierwiastka.

Stąd wylicza się następnie prędkość radialną galaktyki:

$$2) v = c \cdot z$$

Pomiar odległości galaktyk

Odległości galaktyk, D , można mierzyć na różne sposoby. Tutaj przywołujemy metodę, opartą na obserwacjach supernowych (w dalszej części tekstu supernowe oznaczają będziemy skrótami SN). Ponieważ galaktyki nie są obiektami punktowymi, tylko widzimy je jako rozciągnięte "plamy" na niebie - do pomiaru wygodnie jest wybrać jakieś należące do nich jasne źródła punktowe. Supernowe typu Ia mają jeszcze inną bardzo istotną zaletę - ponieważ mechanizm ich wybuchu jest zawsze taki sam, ich maksymalna osiągnięta jasność absolutna jest również identyczna. Jasność absolutna typowej SNIa wynosi $L = (1,4 \pm 0,4) \cdot 10^{36}$ Wattów (Allen's Astrophysical Quantities).

Im dalsza jest supernowa, tym mniejsza jest jej obserwowana jasność: dzięki temu można wyznaczyć odległość do SNIa, porównując jej docierający od niej strumień promieniowania z jej jasnością absolutną. Ścisłej mówiąc, w odległości D od gwiazdy wychodzące z niej promieniowanie rozkłada się na sferze o promieniu D i powierzchni $S = 4 \cdot \pi \cdot D^2$. Z definicji obserwowany strumień promieniowania E (mierzony w W/m^2) w odległości D wynosi: $E = L/S$, gdzie L jest jasnością mierzoną w W . Można stąd wywnioskować, jaka jest odległość D galaktyki:

$$3) D = \sqrt{L / 4\pi E}$$

Pomiar stałej Hubble'a

Nasze galaktyki

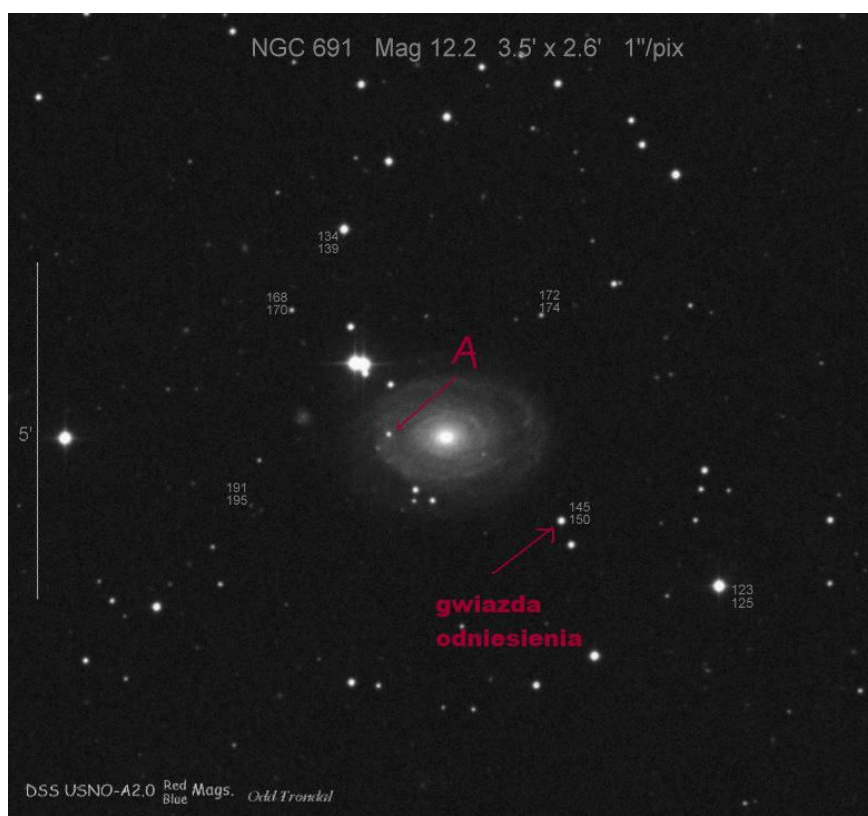
Nazwa galaktyki	odległości (Mpc)
NGC 34	84,0
NGC 1808	14,2
NGC 3511	15,8

NGC 5427	37,4
NGC 691	...

W powyższej tabelce podajemy dane, dotyczące galaktyk, z którymi będziemy pracować. Aby wyznaczyć stałą Hubble'a H_0 musimy znać odległość D i prędkość oddalania się v każdej galaktyki.

Obliczenie odległości do NGC 691

W 2005 roku zaobserwowano wybuch SN typu Ia w galaktyce NGC 691. Otrzymała ona oznaczenie SN2005W. Właśnie ta supernowa posłuży nam do zmierzenia odległości galaktyki NGC 691.



1. Otwórz zdjęcie NGC691_przed_sn.fits, korzystając z programu Salsa.

Na tym zdjęciu, zrobionym przed pojawieniem się supernowej, zaznaczono jasną gwiazdę A na lewo od galaktyki. Chcemy zmierzyć jej obserwowaną jasność.

2. Otwórz narzędzie "Fotometria" z rozwijanego menu "Analiza". Zaznacz na zdjęciu gwiazdę A i gwiazdę odniesienia, pokazane na ilustracji za pomocą czerwonych strzałek. W astronomii wszystkie pomiary są względne - jasność danej gwiazdy mierzona w danej chwili zależy bowiem od wielu czynników:

pogody, stanu teleskopu czy sprawności detektora, który rejestruje obraz. Dlatego korzystamy z gwiazd odniesienia, których jasności są znane i ustalone. Wiedząc, jak różni się spodziewana jasność gwiazdy odniesienia od tej, którą mierzymy naszym instrumentem, jesteśmy też w stanie ocenić "prawdziwą" jasność obserwowaną naszej gwiazdy A.

3. Korzystając z narzędzia "Fotometria" z rozwijanego menu "Analiza" zmierz ilość zliczeń (czyli ilość fotonów) pochodzących od gwiazdy A i gwiazdy odniesienia, I_A oraz I_{ref} . Ilość zliczeń jest proporcjonalna do obserwowanego strumienia promieniowania. Jeśli chcesz wiedzieć więcej o pomiarach natężenia promieniowania i jasności gwiazd, zajrzyj do [instrukcji](#).
4. Natężenie promieniowania docierającego od naszej gwiazdy odniesienia jest znane: $E_{ref} = 5.24 \times 10^{-14} \text{ W/m}^2$. Można dzięki temu policzyć jasność obserwowaną gwiazdy A:

$$E_A = E_{ref} \cdot (I_A / I_{ref}) =$$

SN2005W pojawiła się w pobliżu gwiazdy A i te dwie gwiazdy nakładają się na zdjęciu. Dlatego nie możemy zmierzyć ich jasności osobno.

1. Otwórz zdjęcie NGC691_po_sn.fits. Na tym zdjęciu, zrobionym po pojawieniu się supernowej, zmierz łączną jasność SN2005W i gwiazdy A.
2. Stąd, jak poprzednio, możemy wyznaczyć obserwowaną łączną jasność obu obiektów: $E_{tot} = E_{SN2005W} + E_A$:

$$E_{tot} =$$

$$\text{Skąd: } E_{SN2005W} = E_{tot} - E_A =$$

3. Jasność absolutna L supernowej jest znana (podaliśmy ją w części "Pomiar odległości galaktyk"), dzięki czemu możemy obliczyć jej odległość, korzystając z równania 3):

$$D_{NGC691} = \dots\dots\dots \text{ m} = \dots\dots\dots \text{ Mpc.}$$

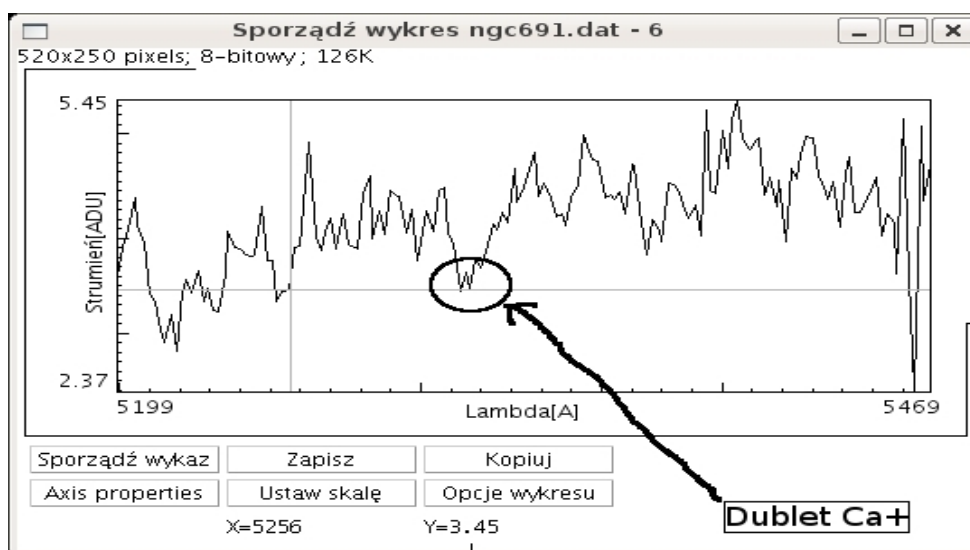
Znamy więc dzięki temu odległość galaktyki, w której ta supernowa wybuchła.

4. Znając błąd pomiaru L (podany wraz z wartością L w części "Pomiar odległości galaktyk"), można policzyć błąd pomiaru odległości NGC 691.

Pomiar prędkości ucieczki NGC 691

Do pomiaru prędkości oddalania się NGC 691 wykorzystamy przesunięcie widmowe linii jednokrotnie zjonizowanego wapnia (Ca^+). Ta linia jest tak naprawdę dubletem (czyli składa się z dwóch bardzo wąskich linii). Te dwie linie, mierzone na Ziemi, mają maksima w długościach fali 5265.557Å i 5270.27Å ($1\text{Å} = 1 \times 10^{-10}\text{m}$).

1. Wejść do menu "Analiza" programu Salsa ii kliknij na "Widmo optyczne". Otwórz plik "ngc691.dat", znajdujący się w katalogu "obrazy". Powinno pojawić się widmo galaktyki.
2. Kliknij na narzędzie "linia prosta" w głównym pasku narzędzi.
3. Zaznacz na widmie linię poziomą, zaczynając od długości fali 5200Å (długości fali to pierwsza liczba wśród wartości, podanych w nawiasie i pojawiających się na głównym pasku narzędzi). Długość zaznaczonej linii powinna wynosić około 150Å.
4. Wybierz opcję "sporządź wykres" w menu "Analiza". Powinniśmy otrzymać wycinek widma w następującej postaci:



5. Kliknij na pierwszą z linii dubletu (pierwszy "dołek") i odczytaj odpowiadającą mu długość fali, która pojawi się w pierwszej kolumnie okienka "Wyniki".

$$\lambda_{\text{obs}} = \dots \text{Å}$$

6. Korzystając z równania 1) możemy teraz obliczyć przesunięcie ku czerwieni galaktyki NGC 691:

$$z_{\text{ngc691}} = \dots$$

7. Korzystając z równania 2) możemy teraz obliczyć prędkość oddalania się galaktyki (uwaga na jednostki!):

$$v_{\text{ngc691}} = \dots\dots \text{ km/s}$$

Pomiar prędkości ucieczki innych galaktyk



NGC 34



NGC 1808



NGC 3511

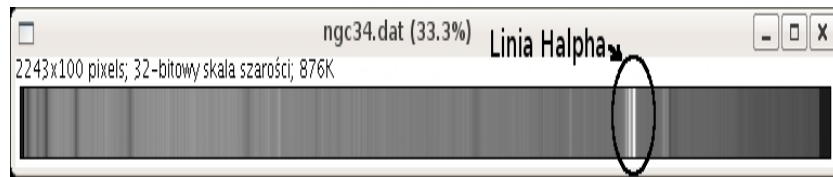


NGC 5427

Do pomiaru prędkości ucieczki galaktyk NGC 34, NGC 1808, NGC 3511 i NGC 5427 wykorzystamy najłatwiejszą do zidentyfikowania linię, którą jest linia wodoru H α . Ta linia, mierzona na Ziemi, ma maksimum w długości fali 6562,8Å.

1. Korzystając z narzędzia "Widmo optyczne" z menu "Analiza", otworzymy

plik « ngc34.dat ». Powinniśmy znaleźć tam linię Halpha, jak na poniższym obrazku:



2. Przy pomocy narzędzia "Linia prosta" zaznacz okolice linii Halpha, tak jak poprzednio okolice dubletu wapnia, i sporządź wykres.
3. Widzimy trzy duże linie. Linia Halpha to linia środkowa. Odczytaj jej położenie, jak poprzednio w przypadku galaktyki NGC 691 i oblicz prędkość oddalania się galaktyki NGC 34.

$$v_{\text{ngc34}} = \dots\dots \text{ km/s}$$

4. Powtórzmy tę operację dla trzech pozostałych galaktyk, korzystając z plików « ngc1808.dat », « ngc3511.dat » i « ngc5427.dat ».
5. Wypełnij poniższą tabelkę :

Nazwy galaktyk	λ_{obs}	z	v
NGC 34			
NGC 1808			
NGC 3511			
NGC 5427			

Obliczenie stałej Hubble'a H_0

1. Sporządź plik tekstowy z tabelką, zawierającą dwie kolumny, w których znajdują się: prędkości oddalania się v (km/s) naszych pięciu galaktyk i ich odległości D (Mpc). Możemy narysować wykres zależności v od D.

2. Przy pomocy narzędzia "Dopasuj krzywą" z menu "Analiza", znajdź prostą, która najlepiej pasuje do zmierzonych punktów. Nachylenie tej prostej da nam stałą Hubble'a:

$$H_0 = \dots\dots\dots \text{ km/s/Mpc}$$

Do wyznaczenia stałej Hubble'a z proporcjonalności pomiędzy prędkościami galaktyk a odległościami do nich możesz wykorzystać Twój inny ulubiony program.

3. Jaki byłby wiek Wszechświata, gdyby prędkość jego ekspansji była stała przez cały czas jego istnienia?

$$T = \dots\dots\dots \text{ lat}$$

4. Czy otrzymane wartości stałej Hubble'a i wieku Wszechświata są poprawne?
5. Ci, których zainteresował problem pomiaru stałej Hubble'a i którzy znają trochę język angielski, z przyjemnością [zajrzą pewnie na stronę](#) amerykańskiego kosmologa Johna Huchry, na której opisuje on wciąż rozwijającą się historię pomiarów stałej Hubble'a. Także tych, którzy nie znają angielskiego, mogą zainteresować wykresy: czwarty od końca, trzeci od końca i ostatni. Przedstawione są na nim wartości stałej Hubble'a mierzone w różnych eksperymentach od lat 20. XX wieku do dziś. Jeśli umieścimy otrzymany w naszym ćwiczeniu wynik na którymś z tych wykresów, w którym roku się znajdziemy? Dlaczego znaleźliśmy się właśnie tam i jak świadczy to o dokładności, możliwościach i ograniczeniach naszej metody?

Ściąganie zdjęć i widm

[Zdjęcia NGC 691](#) (format fits, rozmiar 333 kb)

[Widma galaktyk](#) (format dat, rozmiar 45,1 kb)

Jean-Christophe Mauduit & Pacôme Delva.

Według pracy Nathalie Ysard, Nicolasa Bavouzeta & Mathieu Vincendona.

Wersja polska: Agnieszka Pollo