

Ciemna energia



Szkoła średnia
Klasy I – IV
Doświadczenie konkursowe 3

Rok 2019

1. Wstęp teoretyczny

O tym, że Wszechświat się rozszerza, wiadomo od blisko 90 lat. W 1915 roku Albert Einstein ogłosił Ogólną Teorię Względności. Podstawą tej teorii były równania Einsteina wyrażające relację między kształtem czasoprzestrzeni a obecnością materii, która jest źródłem grawitacji. W ciągu następnych kilkunastu lat próbowano znaleźć rozwiązania równań Einsteina dla różnych parametrów, które opisywałyby sytuację panującą we Wszechświecie. Jednym z takich przypadków jest przestrzeń jednorodnie wypełniona materią we wszystkich kierunkach. Rozwiązaniem równań Einsteina dla tego przypadku jest tzw. **metryka Friedmanna-Lemaître-Robertsona-Walkera** (w skrócie FLRW, od nazwisk kilku ludzi, którzy niezależnie znaleźli to rozwiązanie). Problem polegał na tym, że to rozwiązanie ma pewne niepokojące konsekwencje: rozmiary przestrzeni zmieniały się z czasem. Wszechświat mógł się albo rozszerzać z jednego punktu¹, albo kurczyć do jednego punktu. Einsteinowi nie bardzo się to podobało. Uważał (jak większość uczonych w tym okresie), że Wszechświat jest niezmienny, zawsze był i będzie taki sam. Dlatego zdecydował się „poprawić” swoje równania, dodając do nich pewien sztuczny człon, który przeciwdziałałby grawitacji i ewentualnemu kurczeniu się Wszechświata - tzw. **stałą kosmologiczną** (oznaczoną literą Λ).

Tymczasem amerykański astronom Edwin Hubble badając rozkład prędkości odległych galaktyk na podstawie ich spektroskopowych widm, stwierdził, że wykazują one przesunięcie ku czerwieni. Charakterystyczne linie w widmach galaktyk znajdowały się w miejscach dłuższych fal w porównaniu z widmami galaktyk pobliskich, co świadczy o tym, że obiekty zdają się od nas „uciekać” i to tym szybciej, im dalej się znajdują. Oryginalny wykres opublikowany przez Hubble’a przedstawiony jest na Rysunku 1. Dziś potrafimy dokładniej zmierzyć odległości do odległych galaktyk, więc zależność pokazana na Rysunku 1 jest bardziej ścisła. Odkrycie Hubble’a określa się często jako „ucieczkę galaktyk”. Kiedy Einstein dowiedział się o odkryciu oddalania się galaktyk, wycofał się z koncepcji stałej kosmologicznej, uznając ją za „największą pomyłkę swego życia”.

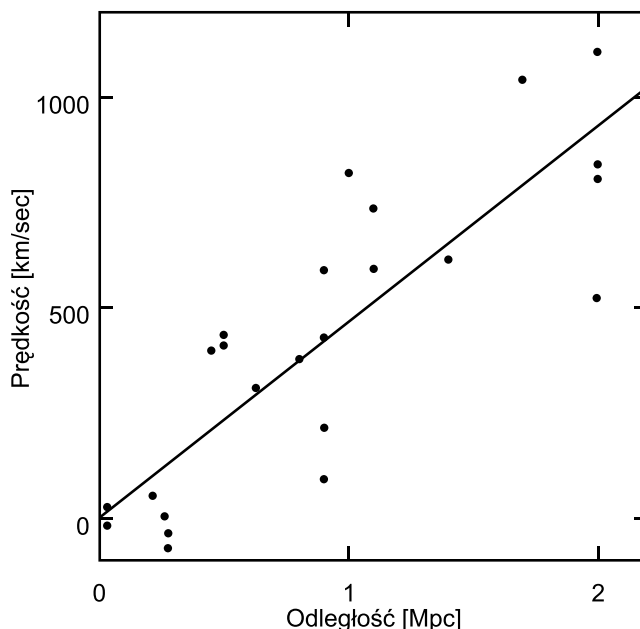
Przesunięcie ku czerwieni (ang. **redshift**) oznaczane zwykle jako z jest zależne od długości fali odbieranej przez obserwatora λ_{obs} do fali wyemitowanej przez źródło λ_{emit} :

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{emit}}{\lambda_{emit}}$$

co można również przeformułować do postaci:

$$1 + z = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{emit}}$$

¹ Moment, w którym cały Wszechświat skupiony był w jednym punkcie został później nazwany przez astronoma Freda Hoyle’a „Wielkim Wybuchem” (ang. Big Bang). Miała to być drwina z tej koncepcji, w którą wielu astronomów nie chciało wówczas wierzyć.



Rysunek 1. Pierwotny wykres Hubble’a. Źródło: Wikipedia².

Przesunięcie ku czerwieni może być spowodowane przez trzy procesy fizyczne:

- przez utratę energii światła (im dłuższa fala, tym niższa energia) wydostającego się z silnego pola grawitacyjnego (np. gwiazdy neutronowej). Jest to tak zwane **poczerwienienie grawitacyjne**, które nie ma istotnego zastosowania w przypadku naszych galaktyk.

- jako rezultat **efektu Dopplera**, który wiąże się z prędkością oddalania się obiektu. Można sobie go wyobrazić jako zmniejszanie częstotliwości sygnału karetki pogotowia, która oddala się od nas.

- jako efekt rozszerzania się Wszechświata (**kosmologiczne przesunięcie ku czerwieni**). W obliczeniach kosmologicznych³ wprowadzono pewien parametr zależny od czasu mówiący o tym, jak w miarę rozszerzania się Wszechświata zmieniają się odległości między dwoma ustalonymi punktami. Jest to tzw. **czynnik skali** $a(t)$. Przykładowo zapis $\frac{a(t_2)}{a(t_1)} = 2$ oznacza, że odległości we Wszechświecie w chwili t_2 są dwa razy większe niż w chwili t_1 . W momencie Wielkiego Wybuchu cała materia było skupiona w punkcie, czyli $a=0$. Przesunięcie ku czerwieni wiąże się z czynnikiem skali poprzez prosty wzór opisujący wzrost długości fali światła z rozmiarami Wszechświata:

$$1 + z = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{emit}} = \frac{a(t_{obs})}{a(t_{emit})}$$

Choć i do dziś dnia mówi się o „ucieczce galaktyk”, to tkwią one w przestrzeni, która się z czasem rozszerza. Rozszerzanie się Wszechświata powoduje ich wzajemne oddalanie się od siebie, co schematycznie zobrazowane jest na Rysunku 2. Hubble sformułował przybliżoną zależność między odległością bliskich galaktyk a „prędkością ucieczki”, tudzież redshiftem, czyli tzw. **prawo Hubble’a-Lemaître’a**⁴:

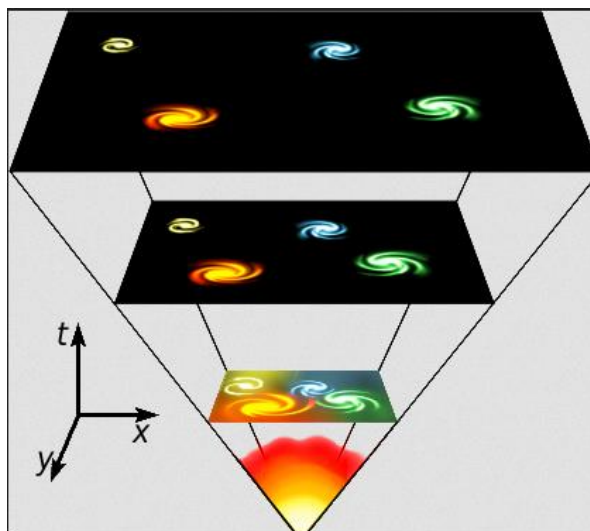
² https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_Hubble%E2%80%99a#/media/File:Prawo_Hubble%27a_1.svg

³ Kosmologia to nauka zajmująca się strukturą i ewolucją Wszechświata.

⁴ w 2018 roku Międzynarodowa Unia Astronomiczna podjęła decyzję, by zmienić nazwę prawa Hubble’a na

$$z c = H_0 d$$

gdzie d jest odległością od galaktyki, c - prędkością światła, a H_0 to tzw. **stała Hubble'a** wyrażona w kilometrach na sekundę na Megaparsek (milion parseków⁵). Stała Hubble'a, interpretowana jako tempo obecnego rozszerzania się Wszechświata, została zaadaptowana jako jeden z parametrów modelu FLRW.



Rysunek 2. Schemat ekspansji Wszechświata. Galaktyki tkwią ciągle w tych samych punktach przestrzeni, która z czasem się rozszerza, natomiast względem siebie galaktyki się „oddalają”. Źródło: Wikipedia⁶.

Problemem na następne kilkadziesiąt lat stało się znalezienie wartości parametrów modelu FLRW, do których oprócz stałej Hubble'a zalicza się **gęstość materii** Ω_0 i powiązany z nim **parametr krzywizny** k . Oba te parametry opisują przestrzeń Wszechświata, która może być płaska ($k=0$ i jednocześnie $\Omega_0=1$), hiperboliczna ($k=-1$, co jest równoważne $\Omega_0<1$) czy sferyczna ($k=+1$ oraz $\Omega_0>1$). Możliwe kształty przestrzeni we Wszechświecie pokazane są na Rysunku 3. W dwóch pierwszych przypadkach Wszechświat rozszerzałby się w nieskończoność, ale stopniowo coraz wolniej, ponieważ siła grawitacji spowalniałaby ekspansję. W przypadku sferycznym Wszechświat kiedyś przestałby się rozszerzać i zaczął na powrót kurczyć.

W innej parametryzacji parametr krzywizny zastępuje unormowana **gęstość krzywizny** Ω_k , która sumuje się z **gęstością materii** Ω_m do jedynki.

$$\Omega_k + \Omega_m = 1$$

Dla wszechświata płaskiego $\Omega_k = 0$.

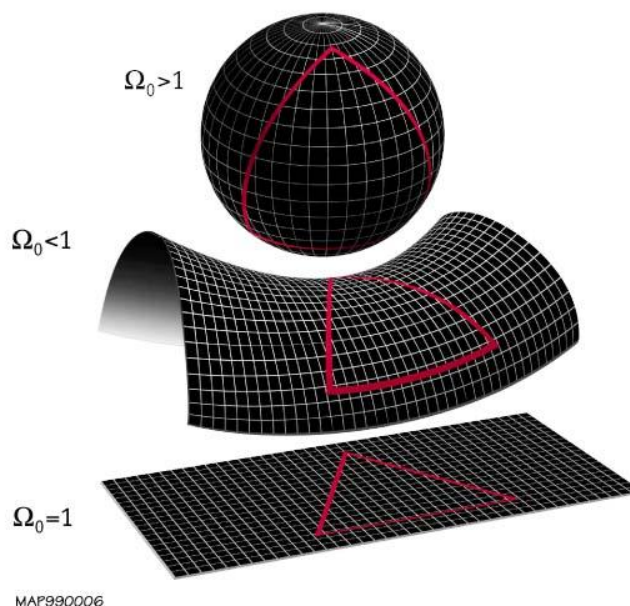
Aby określić wiek oraz ostateczny los Wszechświata, należało znaleźć wartości Ω_k , Ω_m oraz stałej Hubble'a H_0 . Pomiary stałej Hubble'a przez dziesięciolecia oscylowały pomiędzy wartościami od $50 \frac{km}{s Mpc}$ do $100 \frac{km}{s Mpc}$. Natomiast pomiary gęstości materii wykazały, że jest ona bardzo bliska wartości

Hubble'a-Lemaître'a w celu uczczenia wkładu Georges'a Lemaître'a w omawiane zagadnienia

⁵ jeden parsek to ok. $3,086 \cdot 10^{16}$ m

⁶ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Universe_expansion2.png

krytycznej, czyli Wszechświat jest z bardzo dobrym przybliżeniem płaski. Ale wkrótce wyszło na jaw coś jeszcze...



Rysunek 3. Kształt Wszechświata dla różnych parametrów krzywizny i gęstości materii. Pokazano kształt trójkąta dla różnych geometrii: sferycznej, hiperbolicznej i płaskiej. Źródło: Wikipedia⁷.

Jedną z metod pomiaru parametrów kosmologicznych jest pomiar odległości jasnościowej d_L w funkcji przesunięcia ku czerwieni z . Aby zmierzyć odległości jasnościowe do galaktyk, potrzebujemy tak zwanych **świec standardowych**, czyli obiektów o stałej jasności. Do pomiarów kosmologicznych wykorzystuje się supernowe typu Ia, które są bardzo jasne, dlatego możemy je obserwować nawet na dużych odległościach. Supernowe typu Ia są pewną szczególną klasą supernowych. Wyróżniają się tym, że w maksimum blasku osiągają bardzo podobną jasność. Klasyczny scenariusz zakłada, że mamy do czynienia z układem podwójnym złożonym z normalnej gwiazdy i białego karła. Biały karzeł to jądro starej, umarłej⁸ gwiazdy o masie mniejszej niż 8-9 mas Słońca, która odrzuciła zewnętrzną otoczkę. Przed zapadaniem się powstrzymuje go 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 w formie eksplozji rozrywającej białego karła na kawałki. Ponieważ zaś granica syntezy węgla jest dobrze określona (1,4 masy Słońca) supernowe typu Ia mają zawsze bardzo podobny przebieg.

Jasność jest mierzona w wielkościach gwiazdowych (magnitudo). Jest to tradycyjna miara jasności obiektów w astronomii, sięgająca jeszcze starożytności. Wówczas najjaśniejsze gwiazdy określano jako gwiazdy 1 wielkości, najśłabsze zaś - te ledwo widoczne gołym okiem - jako gwiazdy

⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Shape_of_the_universe#/media/File:End_of_universe.jpg

⁸ tzn. takiej, we wnętrzu której nie zachodzi synteza termojądrowa

6 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 . Wzrost wielkości gwiazdowej o 1 magnitudo (1^m) oznaczał spadek jasności o $\sqrt[5]{100} \approx 2,1512$ razy. Ocena jasności obiektu obserwowanego z Ziemi to **obserwowana wielkość gwiazdowa** m . W astronomii używa się także **absolutnej wielkości gwiazdowej** M , która mówi o tym, jak jasny byłby obiekt, gdyby był obserwowany z odległości 10 parseków. Różnica między nimi jest tym większa, im dalej znajduje się obiekt i nosi nazwę **modułu odległości** μ :

$$\mu = M - m$$

Powyższy wzór można wyrazić z uwzględnieniem odległości jasnościowej:

$$\mu = 5 \log_{10}(d_L) - 5$$

gdzie d_L jest wyrażone w parsekach, a więc:

$$\mu = 5 \log_{10}(d_L) - 25$$

gdy d_L jest wyrażone w megaparsekach (10^6 parseków).

Jak już wspomniano, odległość jasnościowa zależy od parametrów kosmologicznych $d_L(z, H_0, \Omega_m, \Omega_k)$, a ponieważ wiadomo że $\Omega_k = 0$, to zostaje nam tylko zależność $d_L(z, H_0, \Omega_m)$. Gdy jednak w latach 90-tych XX wieku próbowano wyznaczyć parametry kosmologiczne na podstawie obserwacji supernowych typu Ia, okazało się dla żadnych ich wartości dopasowanie danych nie jest dobrze spełnione. Wbrew przewidywaniom, ekspansja Wszechświata zamiast spowalniać, przyspiesza. Wtedy zdecydowano się na pewien nietypowy krok: a co gdyby do równań Einsteina przywrócić odrzuconą przez niego stałą kosmologiczną? Matematycznie poprawka była bardzo niewielka – zamiast sumować do jedynki dwa składniki, sumujemy trzy:

$$\Omega_k + \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$$

a uwzględniając płaską geometrię Wszechświata:

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$$

wobec czego odległość jasnościowa zależy również od Ω_Λ : $d_L(z, H_0, \Omega_m, \Omega_\Lambda)$.

Matematycznie poprawka niewielka, ale fizycznie to była rewolucja! Oznacza ona, że we Wszechświecie istnieje pewna siła, która wbrew grawitacji przyspiesza ekspansję wszechświata. Nie wiemy nic o naturze tej siły, stąd została nazwana **ciemną energią**. Ponowne poszukiwania parametrów kosmologicznych w oparciu o obserwacje supernowych typu Ia dały dobrą zgodność. Liderzy projektów wykorzystania supernowych Ia do określenia parametrów kosmologicznych (Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt i Adam G. Riess) otrzymali w 2001 r. Nagrodę Nobla z fizyki.

2. Cel doświadczenia

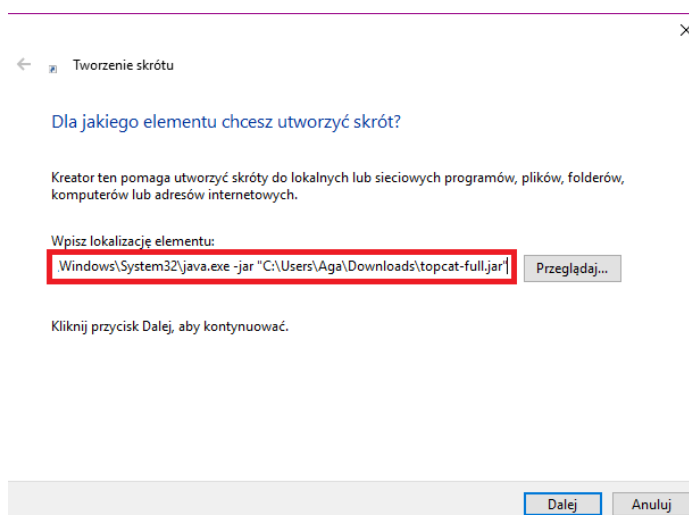
Celem doświadczenia jest określenie parametrów kosmologicznych na podstawie zależności między przesunięciem ku czerwieni a modulem odległości dla supernowych typu Ia.

3. Opis wykonania doświadczenia

Do wykonania zadania niezbędny jest program **TOPCAT** (oraz łącze z Internetem). Można go pobrać ze strony <http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>. Działa on w środowisku Java, więc należy się upewnić, że jest ono zainstalowane.

Posiadacze systemu Windows powinni pobrać plik **topcat-lite.jar** lub **topcat-full.jar** z sekcji *Downloads*, a następnie utworzyć skrót w wybranej lokalizacji (np. na pulpicie). Pojawi się okno *Tworzenia skrótu*, gdzie system poprosi nas o wpisanie lokalizacji elementu. Wpisujemy tutaj poniższe wyrażenie, zapisujemy skrót, a następnie uruchamiamy program podwójnym kliknięciem:

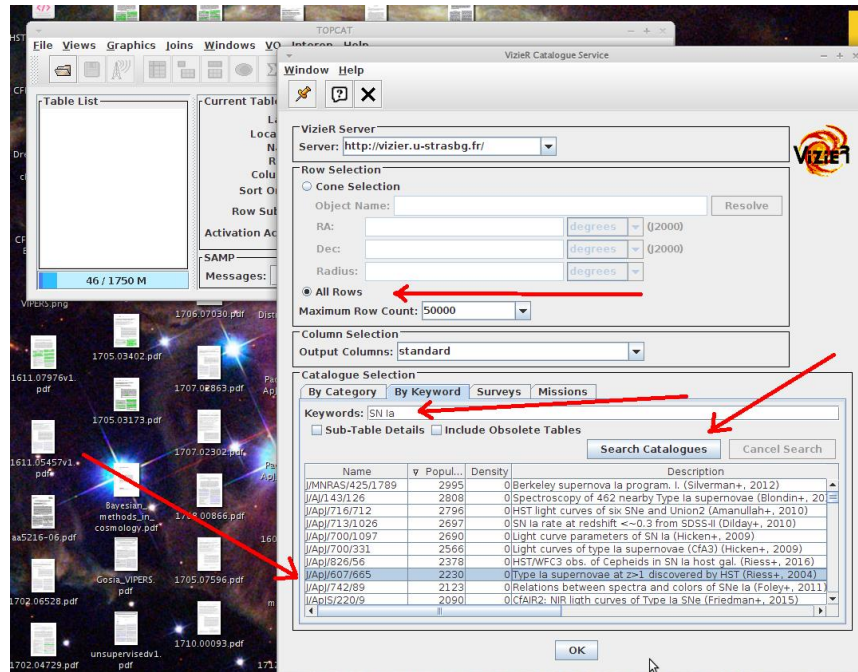
C:\WINDOWS\System32\java.exe -jar "[ścieżka do pobranego pliku .jar]"



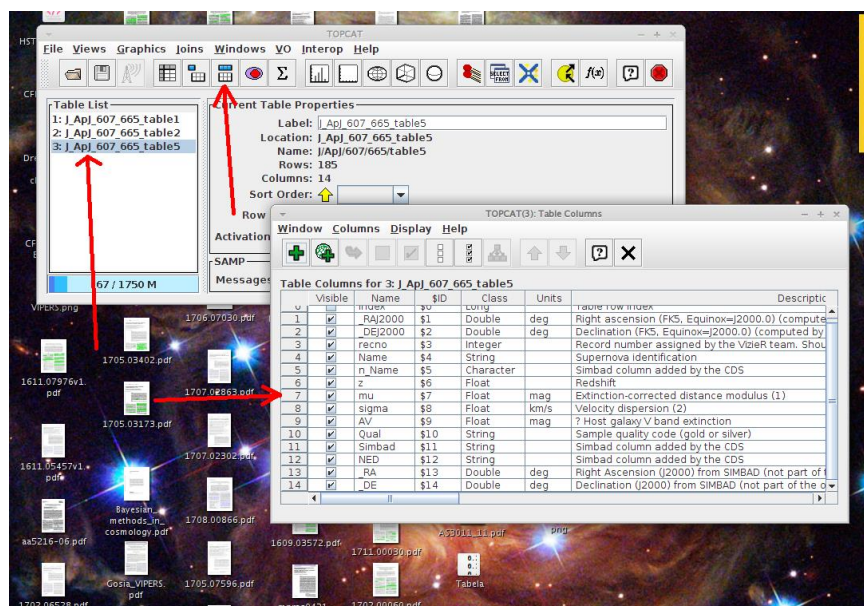
W systemach opartych na Unixie (Linux) należy wpisać w terminalu następujące polecenie, upewniwszy się poprzednio, że znajdujemy się w katalogu, w którym umieściliśmy plik instalacyjny: **java -jar topcat-full.jar** (lub **java -jar topcat-lite.jar**, jeśli wybraliśmy tę wersję).

Podczas wykonania doświadczenia będziemy korzystać z zasobów *Virtual Observatory*, by pobrać poprzez Internet odpowiedni katalog z supernowymi typu Ia. W tym celu z górnego menu Topcata wybieramy opcję *VO -> VisieR Catalogue Service*. Pojawi się kolejne okno, gdzie w sekcji *Row selection* należy wybrać opcję *All Rows*. Zaś w części *Catalogue Selection* wybieramy zakładkę *By Keyword* i w polu *Keywords* wpisujemy słowo-klucz: *SN Ia*. Wciskamy przycisk *Search Catalogues*, by program przeszukał katalogi wedle zadanych ustawień. Sortując je wedle popularności (druga kolumna), zaznaczamy katalog *Type Ia supernovae at z>1 discovered by HST (Riess+, 2004)* i wciskamy przycisk OK.

Konkurs Astronomiczny „Astrolabium”
Ciemna energia
Doświadczenie konkursowe rok 2019

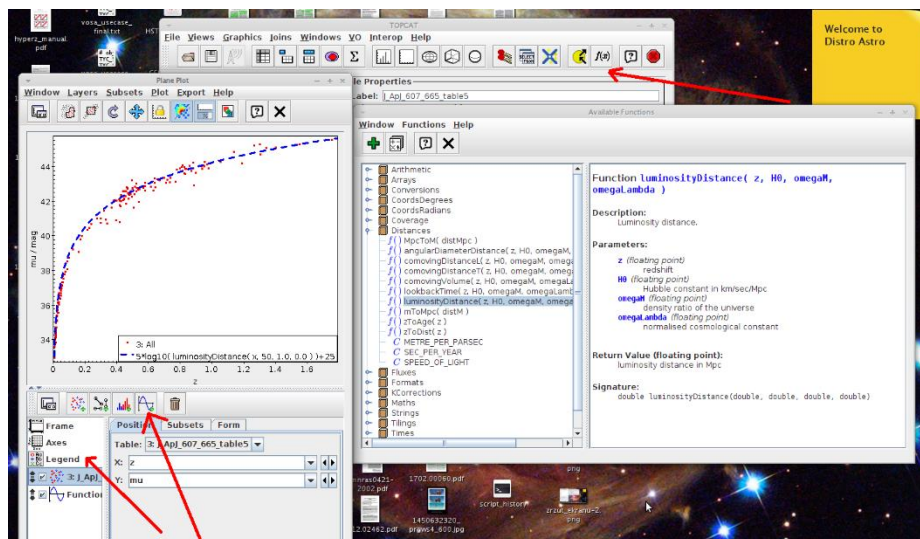


W polu *Table list* załadują się trzy tabele. Wybieramy ostatnią z nich. Sprawdzimy jej zawartość, klikając na przycisk *Display column metadata* na głównym pasku poleceń. Ukaze się wtedy okno *Table Columns*, zawierające nagłówki kolumn w tabeli wraz z opisem. Nas interesują kolumny 6 i 7, czyli przesunięcie ku czerwieni (*redshift*) oraz moduł odległości po poprawieniu na ekstynkcję dla poszczególnych supernowych z katalogu (*extinction corrected distance modulus*). Należy odznaczyć wszystkie pozostałe kolumny.



Następnie otwieramy okno *Plane Plot* za pomocą przycisku *Plane plotting window* na głównym pasku poleceń. Umożliwia ono tworzenie dwuwymiarowych wykresów z dwóch dowolnych kolumn z tabeli. W zakładce *Position* wybieramy kolumny 6 i 7, czyli odpowiednio przesunięcie ku czerwieni z oraz moduł odległości *mu*. Otrzymujemy wykres modułu odległości dla poszczególnych supernowych typu Ia w funkcji przesunięcia ku czerwieni galaktyk, w których wybuchły.

Konkurs Astronomiczny „Astrolabium”
Ciemna energia
Doświadczenie konkursowe rok 2019



W celu wyznaczenia parametrów kosmologicznych będziemy dopasowywać odległość jasnościową do danych supernowych typu Ia. TOPCAT zawiera odpowiednią funkcję obliczającą odległość jasnościową - *luminosityDistance*. Więcej informacji można uzyskać, wybierając przycisk *Display information about available algebraic function* na głównym pasku programu. Informacja o funkcji znajduje się w zakładce *Distances*. Dowiadujemy się stąd, że funkcja ma format ***luminosityDistance(z,H0,omegaM,omegaLambda)***, a więc jako jej argumenty (wymienione w nawiasie) należy podać kolejno po przecinku: przesunięcie ku czerwieni, stałą Hubble'a, gęstość materii oraz gęstość stałej kosmologicznej.

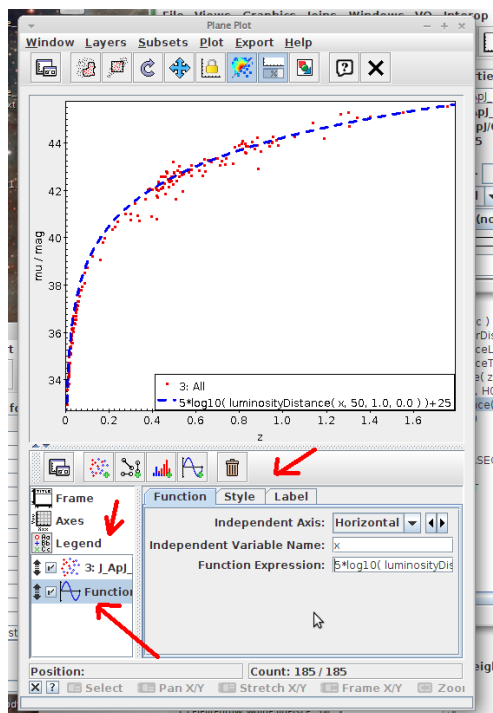
W oknie *Plane Plot* możemy sprawdzić, jak wygląda ta funkcja. Klikając w przycisk *Add a new function layer control to the stack*, otworzy się warstwa *Function* pozwalająca na zdefiniowanie funkcji od jednej konkretnej zmiennej X lub Y (w tym przypadku z lub *mu*). Wybieramy nazwę dla naszej zmiennej w oknie *Independent Variable Name* (domyślnie x), a w oknie *Function expression* definiujemy wyrażenie na funkcję. Odpowiednie wyrażenie ma postać:

$$5 * \log_{10}(\text{luminosityDistance}(x, 50, 1.0, 0.0)) + 25$$

Formuła w powyższym przykładzie oblicza odległość jasnościową, przyjmując $50 \frac{\text{km}}{\text{s Mpc}}$ jako wartość stałej Hubble'a, 1.0 za gęstość materii oraz 0.0 jako gęstość stałej kosmologicznej.

Dodatkowo w zakładce *Style* możemy sformatować wygląd naszej funkcji na wykresie: możemy zmienić kolor, grubość i wygląd linii itp., a w zakładce *Legend* wygodnie jest dobrać położenie legendy: wewnętrzne (*Internal*) lub zewnętrzne (*External*) oraz jej położenie.

Konkurs Astronomiczny „Astrolabium”
Ciemna energia
Doświadczenie konkursowe rok 2019

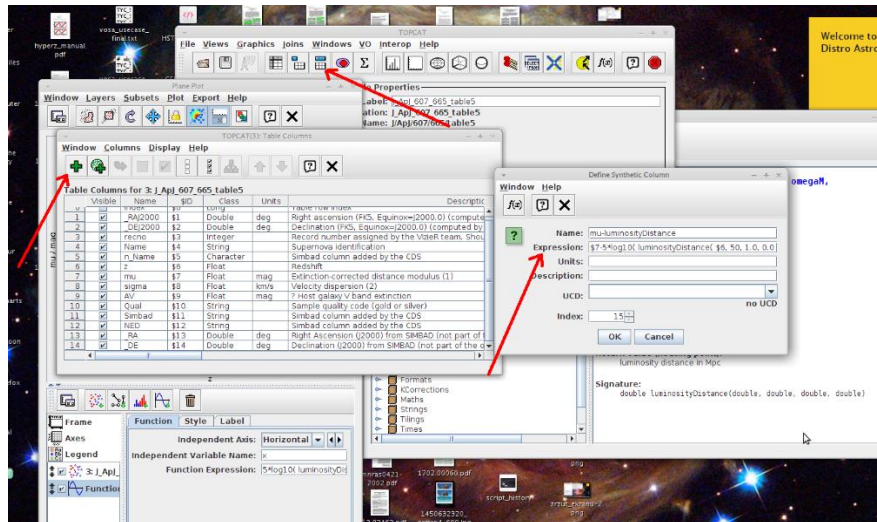


Cała istota doświadczenia sprowadza się do znalezienia takich wartości parametrów kosmologicznych, dzięki którym funkcja odległości jasnościowej najlepiej pasuje do danych obserwacyjnych, czyli rzeczywistej zależności modułu odległości i przesunięcia ku czerwieni dla poszczególnych supernowych typu Ia. W tym celu potrzebujemy jakiejś miary, dzięki której potrafilibyśmy ocenić, jakie wartości parametrów kosmologicznych są najtrafniejsze. Pełna, dokładna analiza tego zagadnienia przekracza poziom tego zadania, ale można to zrobić w pewnym uproszczeniu. Najprościej jest sprawdzić, jak wygląda rozkład różnicy modułu odległości i odległości jasnościowej w zależności od przesunięcia ku czerwieni. W oknie *Table Columns* za pomocą przycisku *Add a new column defined algebraically from existing ones* definiujemy nową kolumnę zawierającą te różnice. Ukaze się okno *Define Synthetic Column*. W polu *Name* wpisujemy nazwę nowej kolumny (np. *mu-luminosityDistance*), zaś w polu *Expression*:

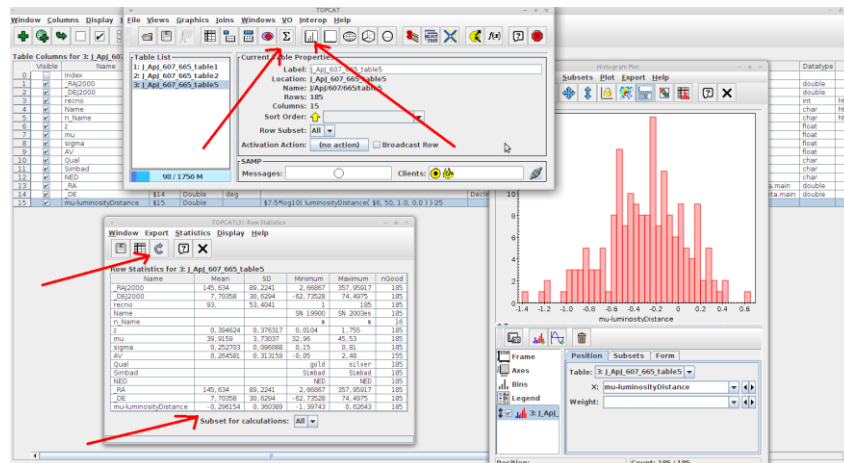
$$\$7 - 5 * \log_{10}(\text{luminosityDistance}(\$6, 50, 1.0, 0.0)) - 25$$

Oznacza ono, że od wartości w kolumnie 7 (*mu* - moduł odległości dla danej supernowej) odejmujemy funkcję obliczającą odległość jasnościową, która jest zależna od przesunięcia ku czerwieni zawartego w kolumnie 6.

Konkurs Astronomiczny „Astrolabium”
Ciemna energia
Doświadczenie konkursowe rok 2019



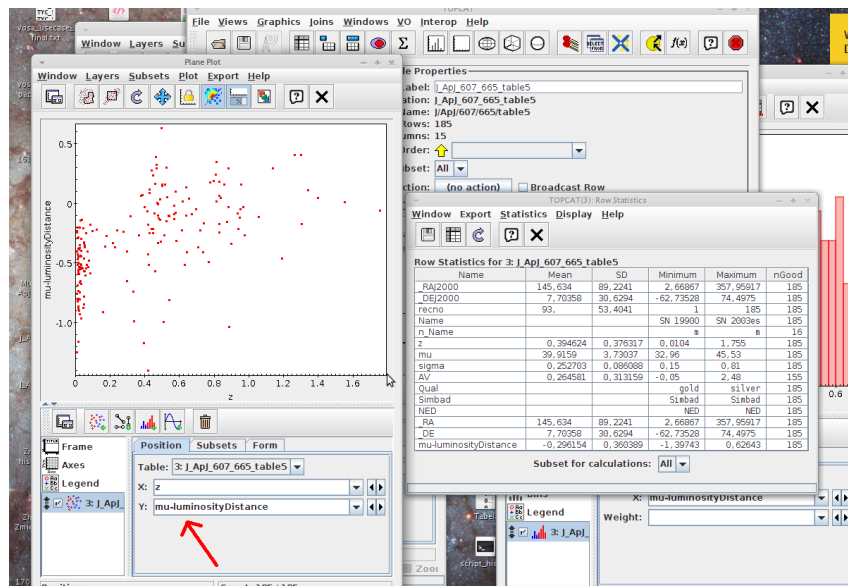
Za pomocą przycisku *Plane plotting window configured for convenience while plotting histogram* możemy wyświetlić rozkład wielkości wyliczanej w nowej kolumnie w formie histogramu. W nowo otwartym oknie *Histogram plot* w zakładce *Position* wybieramy naszą zmienną *mu-luminosityDistance*. Interesuje nas średnia wartość (*Mean*) różnicy *mu-luminosityDistance*, co możemy sprawdzić, klikając w przycisk *Display statistics for each column* w oknie głównym. Wyświetli się wtedy okno *Row statistic* zawierające dane statystyczne dla każdej kolumny. Po wprowadzeniu zmian w naszym histogramie należy odświeżyć statystyki za pomocą symbolu zakręconej strzałki, która jest zaznaczona na rysunku poniżej.



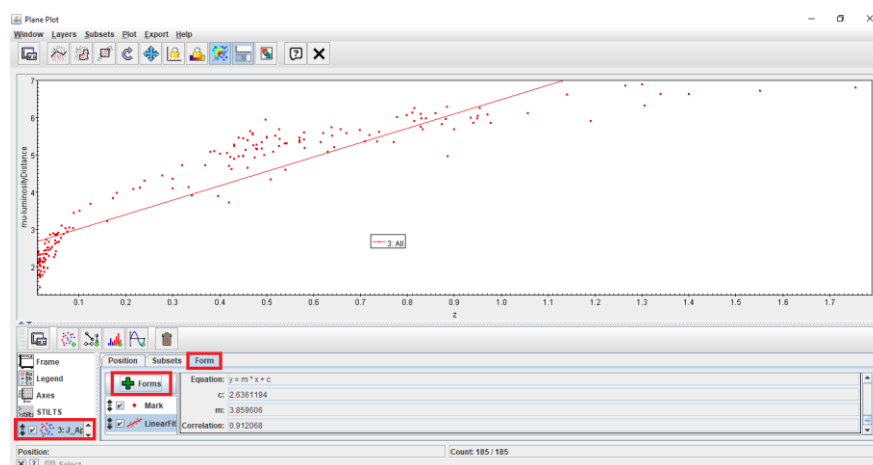
Parametry funkcji $5 \cdot \log_{10}(\text{luminosityDistance}(\$6, \$50, 1.0, 0.0)) + 25$ można zmieniać w kolumnie *Expression* w oknie *Table Columns*. Kolumna ta znajduje się pomiędzy kolumnami *Units* oraz *Description*.

Visible	Name	ID	Class	Units	Expression	Description	UCD
0	Index	\$0	Long			Table row index	
1	RAJ2000	\$1	Double	deg		Right ascension (FK5, Equinox=2000.0) (computed by VizieR, not part of the original data)	pos.eq.ra
2	DEJ2000	\$2	Double	deg		Declination (FK5, Equinox=2000.0) (computed by VizieR, not part of the original data)	pos.eq.dec
3	recho	\$3	Integer			Record number assigned by the VizieR team. Should not be used for identification.	meta.record
4	n.Name	\$4	String			Supernova identification	
5	n.Name	\$5	Character			Simbad column added by the CDS	
6	z	\$6	Float	mag		Redshift	
7	mu	\$7	Float	mag		Extinction-corrected distance modulus (1)	
8	sigma	\$8	Float	km/s		Velocity dispersion (2)	
9	AV	\$9	Float	mag		7 host galaxy V band extinction	
10	Qual	\$10	String			Sample quality code (gold or silver)	
11	Simbad	\$11	String			Simbad column added by the CDS	
12	NEO	\$12	String			Simbad column added by the CDS	
13	RA	\$13	Double	deg		Right Ascension (2000) from SIMBAD (not part of the original data)	pos.eq.ra.meta
14	DE	\$14	Double	deg		Declination (2000) from SIMBAD (not part of the original data)	pos.eq.dec.meta
15	mu-lumin.	\$15	Double		$5 \cdot \log_{10}(\text{luminosityDistance}(\$6, \$50, 1.0, 0.0)) + 25$		

Zadanie polega na takim dobraniu parametrów kosmologicznych dla powyższej funkcji (oraz analogicznej $5 * \log_{10}(\text{luminosityDistance}(x, H_0, \text{omegaM}, \text{omegaLambda})) + 25$ w oknie *Plane Plot*), by średnia wielkości *mu-luminosityDistance* wypadła jak najbliżej 0. Będzie to oznaczać dobre dopasowanie funkcji do danych obserwacyjnych. Ale to nie wszystko. Interesuje nas również rozkład *mu-luminosityDistance* wraz z przesunięciem ku czerwieni, który można sprawdzić w oknie *Plane Plot*.

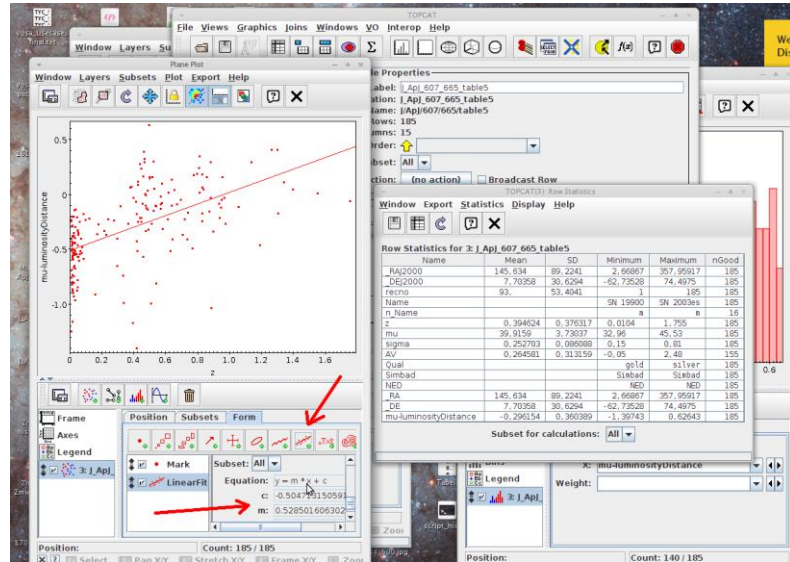


Istotne jest, by *mu-luminosityDistance* był mniej więcej jednokowy, niezależnie od przesunięcia ku czerwieni - tzn. nie rósł ani nie malał wraz z tym parametrem. Można to sprawdzić, dopasowując linię prostą, opisana wzorem $y = m x + c$ do tego rozkładu. Służy do tego przycisk *Add a new linear form fit*, który znajdziemy w zakładce *Form* po kliknięciu na przycisk *Forms*.



Pojawi się warstwa *Linear fit*, którą zaznaczamy i przewijamy pasek jej opisu w dół. Ukazą się wtedy wartości parametrów *m* i *c*. Ważne jest też to, żeby współczynniki *m* oraz *c* (odpowiadający w przybliżeniu średniej (*Mean*) wielkości *mu-luminosityDistance*) były jak najbliższe zeru. Pozbędziemy się wtedy zagrożenia, że znalezione przez nas parametry kosmologiczne będą zależne od przesunięcia ku czerwieni.

Konkurs Astronomiczny „Astrolabium”
Ciemna energia
Doświadczenie konkursowe rok 2019



Najlepiej jest spróbować różnych kombinacji wartości parametrów kosmologicznych:

- stałej Hubble'a od $50 \frac{km}{s Mpc}$ do $100 \frac{km}{s Mpc}$,

- gęstości materii oraz stałej kosmologicznej od 0 do 1, pamiętając, by razem sumowały się do 1.

Dla każdej kombinacji sprawdzimy, jak zmienia się średnia (*Mean*) wielkości *mu-luminosityDistance* oraz współczynnik *m*. Zestaw parametrów kosmologicznych, dla których wynoszą one możliwie blisko 0, jest rozwiązaniem tego zadania.

Za każdym razem należy zresetować okna *Histogram plot*, *Plane Plot* oraz *Row statistic* za pomocą przycisków *Redraw the plot* oraz *Recalculate the statistics for the current subset* odpowiednio (wszystkie te przyciski zaznaczone są poprzez symbol zakreślonej strzałki).