

Niektóre problemy pomiaru odległości we Wszechświecie.  
*Supernowa typu Ia jako świeca standardowa po SN 2011fe*

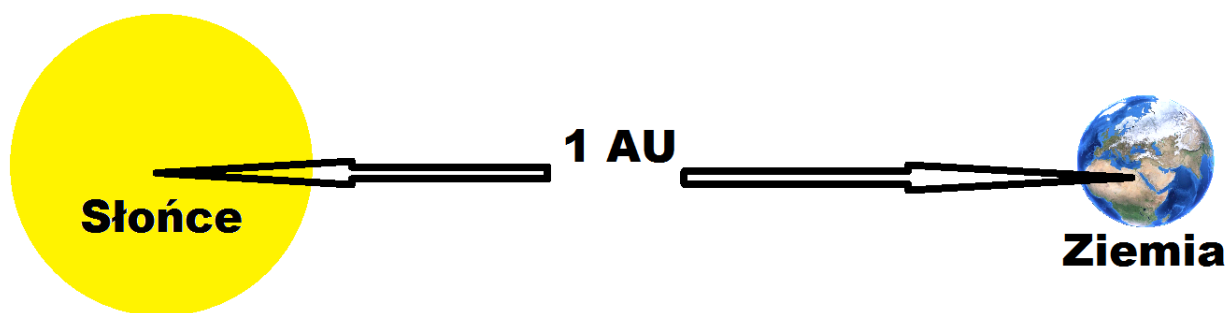
Referat wygłoszony na Posiedzeniu Komisji Astrofizyki PAU  
Piątek, 23 marca 2012, 17:00.

## 1. WSTĘP

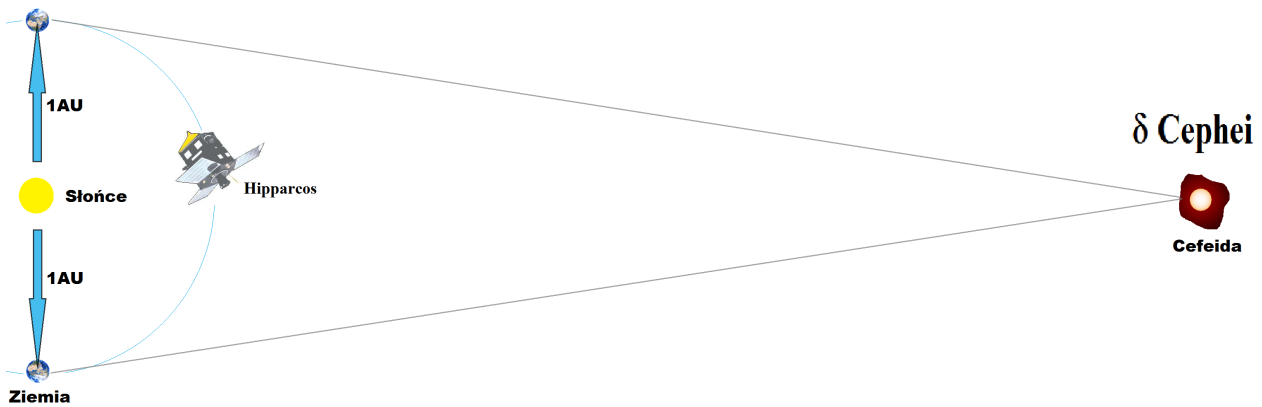
### 1.1 Drabina odległości kosmologicznych

Wyznaczanie odległości astronomicznych, a już z całą pewnością kosmologicznych, jest zadaniem nietrywialnym. Nie można po prostu rozciągnąć taśmy mierniczej pomiędzy galaktykami. Do tego dochodzą problemy natury pojęciowej. Dla przykładu, co właściwie jest odległością pomiędzy galaktykami oddalonymi o miliardy lat świetlnych, w sytuacji gdy Wszechświat powstał kilkanaście miliardów lat temu i stale się rozszerza? Musimy bardzo precyzyjnie zdefiniować co kryje się pod słowem „odległość”. I nikt nie powinien być zdziwiony, że będzie ona zależała od sposobu zdefiniowania, zwykle ściśle powiązanego z pewną metodą pomiaru.

Rozpoznawalną cechą pomiarów odległości kosmologicznych jest ich kaskadowy charakter. Pomiar w większej skali jest oparty o pomiary w mniejszej. Na potrzeby referatu przyjmijmy, że najniższym „szczeblem” drabiny pomiaru odległości (jak często określamy opisywaną procedurę) jest średnia odległość Ziemia-Słońce ( Ilustracja 1). Nazywamy ją jednostką astronomiczną, i oznaczamy 1 AU (ang. *astronomical unit*). Sposób jej pomiaru jest znany i nie budzi wątpliwości.



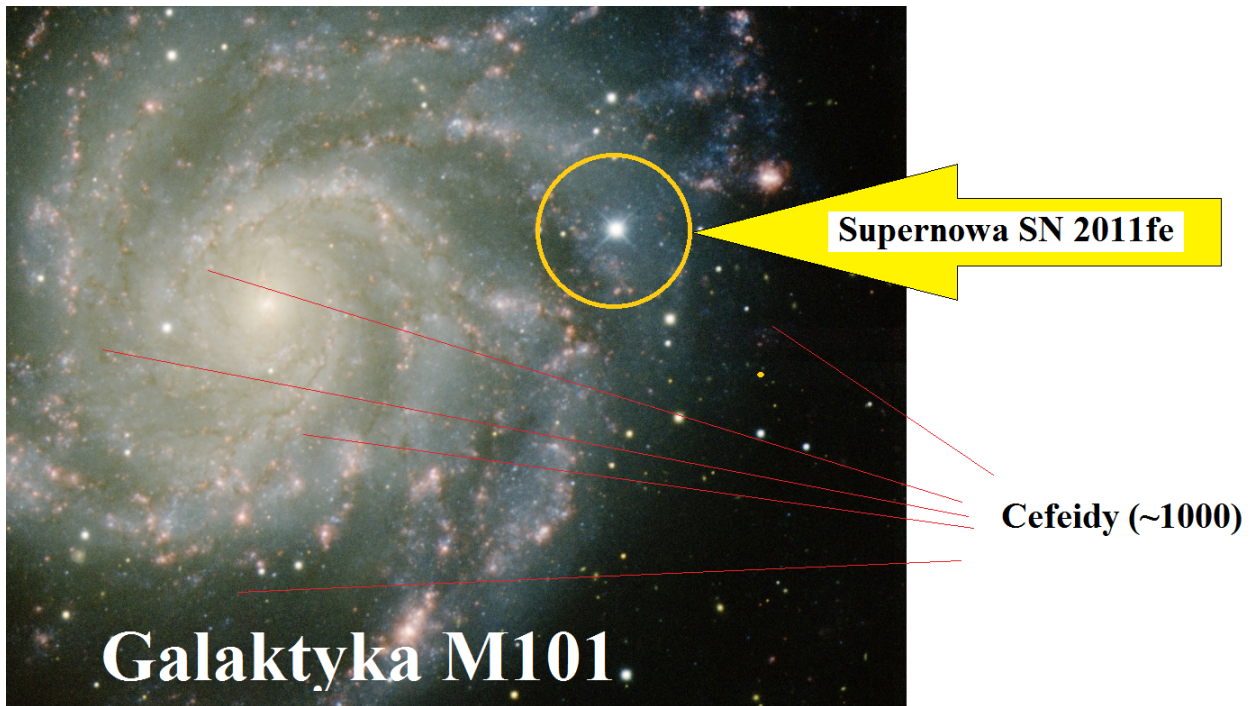
Ilustracja 1: Definicja jednostki astronomicznej



*Ilustracja 2: Metoda paralaksy heliocentrycznej*

Na kolejny szczebel drabiny odległości wspinamy się za pomocą triangulacji, przy czym podstawą trójkąta jest średnica orbity Ziemi, równa 2 AU (Ilustracja 2). Teleskop wykonuje dwa pomiary położenia gwiazdy na niebie w odstępie pół roku. Można w ten sposób wyznaczać odległości w obrębie Galaktyki, w bezpośrednim otoczeniu Układu Słonecznego. Szczególnie ważne są pomiary dla gwiazd pulsujących, w tym cefeid. Nazwa cefeida pochodzi od jednej z pierwszych zbadanych gwiazd tego typu,  $\delta$  Cefeusza. Jej kluczową cechą jest zależność jasności od okresu pulsacji. Jeżeli jasność w funkcji okresu jest znana, to prowadząc obserwacje zmienności gwiazdy w innej galaktyce, możemy obliczyć jej odległość od Słońca. Pozwala to na pokonanie kolejnego szczebla drabiny odległości. W praktyce sytuacja jest bardzo skomplikowana z powodu różnorodności i braku dostatecznie pewnych danych na temat ewolucji gwiazd pulsujących. W przeszłości skutkowało to drastycznymi pomyłkami w wyznaczaniu odległości, o czym piszę dalej. Współcześnie osiągnięto dobrą dokładność pomiarów tą metodą [1].

Wyznaczanie dystansu do odległych galaktyk obserwacjami cefeid nie jest możliwe, gdyż ich jasność jest zbyt mała. Jeżeli jednak w jednej z już zmierzonych cefeidami galaktyk wybuchnie supernowa typu Ia (Ilustracja 3), będziemy w stanie wejść na kolejny szczebel, tym razem sięgając prawdziwie kosmologicznych dystansów, ze wszystkimi konsekwencjami tego faktu, jak kosmologiczna dylatacja czasu czy ewolucja procesów astrofizycznych (np: metaliczności materii).

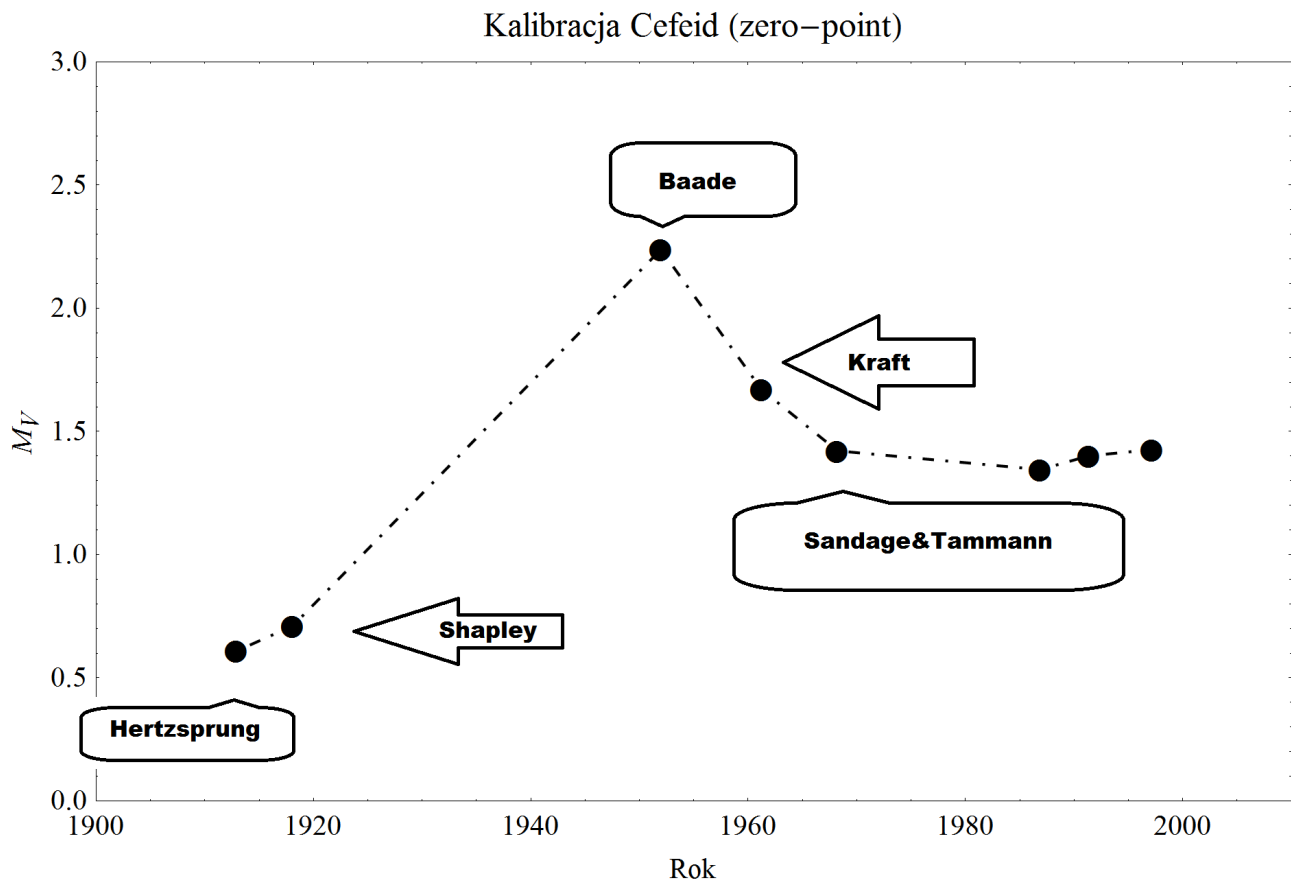


*Ilustracja 3: Supernowa SN 2011fe w galaktyce M101*

Powyżej opisałem wyidealizowany *przykład* sposobu wyznaczania odległości. Bardziej adekwatnym obrazem byłaby powyginana drabina, w której suma odległości pomiędzy szczeblami 4-5 i 5-6 byłaby inna niż odległość 4-6.

### *1.2 Błąd kalibracji cefeid - przestroga na przyszłość*

W latach 50-tych XX wieku dokonano bardzo dużej korekty jasności cefeid. Warto przypomnieć tą historię [2] w kontekście współczesnych wątpliwości co do natury supernowych Ia. Otóż przez prawie 50 lat (Ilustracja 4) traktowano dwie zupełnie różne klasy gwiazd zmiennych jako jedną, przypisując im identyczną zależność okres-jasność. Jak pisał Baade w 1956 roku [3], klasyczne galaktyczne cefeidy to gwiazdy populacji I, natomiast cefeidy w gromadach kulistych to stare gwiazdy populacji II, i nie ma *żadnego* powodu, aby zakładać, że zachowują się tak samo.



Ilustracja 4: Punkt kalibracji (jasność) cefeid z perspektywy historycznej

Użycie dwóch różnych typów gwiazd pulsujących jako jednej świecy standardowej miało dramatyczne skutki, w postaci rewizji stałej Hubble'a o czynnik dwa.

### 1.3 Supernowe typu Ia jako świece standardowe

Należy zwrócić uwagę, że analiza modelu kosmologicznego niekoniecznie wymaga użycia drabiny odległości. Można zastosować empiryczno-teoretyczne podejście, polegające na szukaniu najlepszego dopasowania modelu kosmologicznego do obserwacji. Stała Hubble'a, a więc faktyczna odległość do supernowych może być potraktowana jako nieznaną parametr. Jedyne czego musimy być pewni, to tego, że supernowe Ia rzeczywiście są identyczne. W praktyce wystarczy umiejętność skorygowania rozrzutu jasności supernowych [4].

Po szczegółowej analizie obserwacji supernowej Ia otrzymujemy parę liczb: **odległość jasnościową** oraz **przesunięcie ku czerwieni**. Pierwsza z tych wielkości to taka odległość w przestrzeni Euklidesowej (statycznej!), z której obiekt o znanej jasności absolutnej (mocy promieniowania) miałby jasność taką samą jak obserwowany w danym rozszerzającym się modelu kosmologicznym. Model kosmologiczny definiujemy trzema standardowymi parametrami:

$\Omega_m$  – zawartość materii (w tym ciemnej) (1a)

$\Omega_\Lambda$  – stała kosmologiczna *vel* ciemna energia (1b)

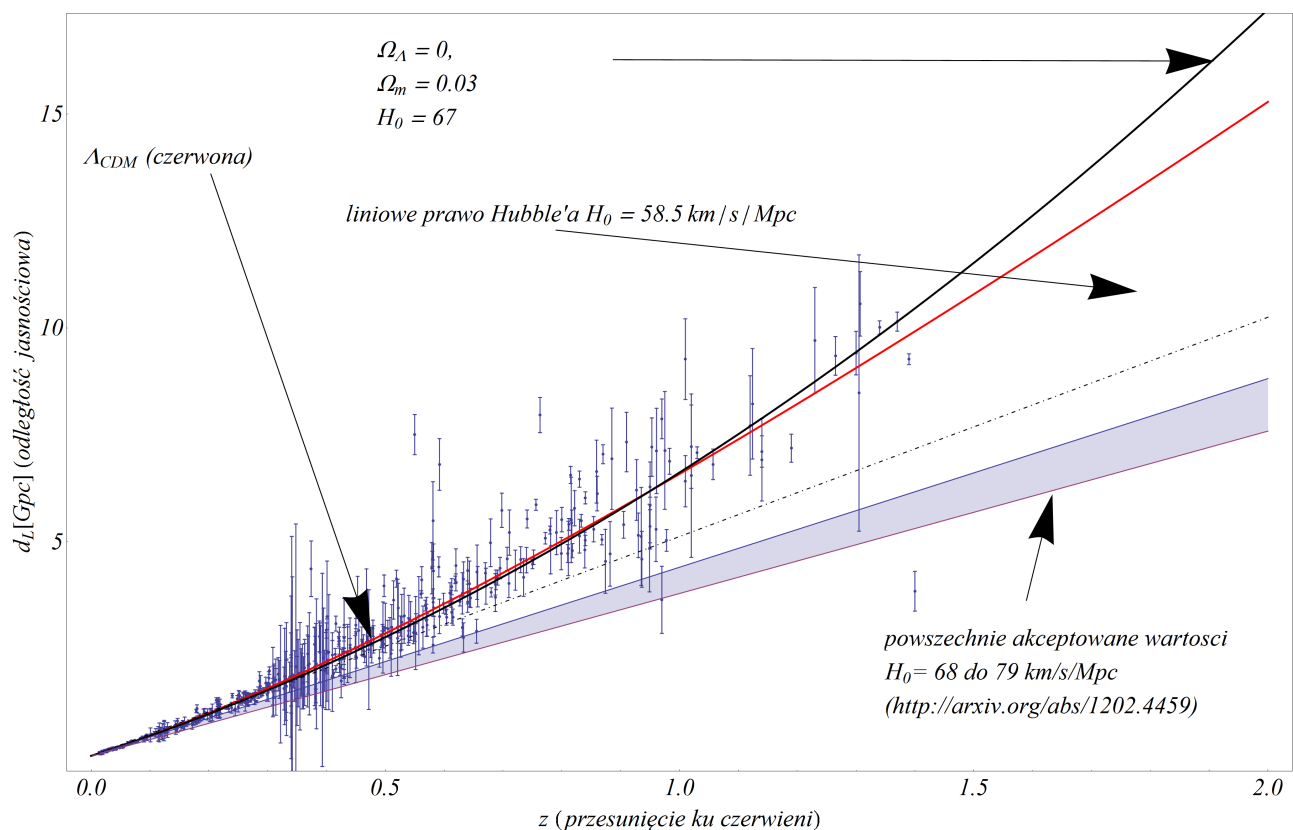
$H_0$  – stała Hubble'a (1c)

Przesunięcie ku czerwieni  $z$  to zmiana częstotliwości promieniowania obserwowanego w odniesieniu do wyemitowanego. Zakładamy oczywiście, że prawa fizyki są niezmiennie w czasie i przestrzeni. Odległość jasnościowa w zależności od  $z$  dana jest wzorem:

$$\frac{c}{H_0} \frac{1+z}{\sqrt{1-\Omega_m-\Omega_\Lambda}} \operatorname{sinn} \left( \int_0^z \frac{\sqrt{1-\Omega_m-\Omega_\Lambda} dz'}{\sqrt{(1+z')^2(1+\Omega_m z') - z(z+2)\Omega_\Lambda}} \right)$$

gdzie:  $c$  - prędkość światła,  $\operatorname{sinn}$  - sinus „kosmologiczny”, t.j.  $\sin$  dla modelu zamkniętego ( $\Omega_m + \Omega_\Lambda > 1$ ),  $\sinh$  dla otwartego ( $\Omega_m + \Omega_\Lambda < 1$ ) i wreszcie funkcja tożsamościowa dla modelu płaskiego ( $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ ). Najbardziej ogólne pytanie, które możemy zadać bazując **tylko** na obserwacjach supernowych brzmi: *dla jakich wartości trzech parametrów  $\Omega_m, \Omega_\Lambda$  i  $H_0$  uzyskamy najlepszą w pewnym ustalonym sensie (zwykle metoda najmniejszych kwadratów) zgodność z obserwacjami?*

Bez dodatkowych źródeł informacji, sam model kosmologiczny w połączeniu z obserwacjami supernowych Ia pozostawia dużą dowolność (Ilustracja 1). Przykładowo, można dopasować liniowe prawo Hubble'a, czyli model w którym *de facto* mamy do czynienia z ruchem galaktyk w statycznej przestrzeni Euklidesowej (Ilustracja 1, linia przerywana). Lub model, w którym nie ma ani ciemnej materii ani ciemnej energii (Ilustracja 1, linia czarna). Wyniki te są jednak w **jawnej sprzeczności** z tym co wiemy na temat wartości stałej Hubble'a, wyznaczonej poprzez szczeble drabiny odległości kosmologicznych (Ilustracja 1, zacieniony obszar).



Ilustracja 5: Wyniki fitowania modelu kosmologicznego do obserwacji supernowych typu Ia

Wstawienie do modelu kosmologicznego zmierzonej wartości stałej Hubble'a powoduje, że bez

ciemnej materii lub/i ciemnej energii dopasowanie stanie się niemożliwe. Duże ilości ciemnej materii<sup>1</sup> sugerują m. in. obserwacje gromad galaktyk oraz soczewkowanie grawitacyjne. Jeżeli dodamy do tego założenie, że Wszechświat jest płaski, model staje się jednoparametrowy, i błędy maleją do niespotykanego wcześniej w kosmologii poziomu ułamków procenta. Mówi się wręcz o erze precyzyjnej kosmologii. Chciałbym tu nieco ostudzić entuzjazm. Małe błędy statystyczne nie oznaczają automatycznie, że założenia modelu są prawdziwe, oraz że nie popełniono *poważnego* błędu systematycznego.

## 2. Supernowa SN 2011fe

24 sierpnia 2011 w galaktyce M101 („Wiatraczek”) wybuchła supernowa, odkryta już 11 godzin po wybuchu, w momencie gdy posiadała 0.001 jasności maksymalnej, (P. Nugent, Palomar Transient Factory, PTF). Pierwsze spektrum sfotografowano już 5 godzin później. Jest to najbliższa (oraz najjaśniejsza) od 40 lat supernowa. Odległość do niej to  $d=6.4$  Mpc (wyznaczone z użyciem Cefeid) lub  $d=7.4$  Mpc (metodą Tip Red Giant Branch, TRGB). Co więcej, jest to typowa, normalna supernowa typu Ia. Dokładnie takich używamy jako świec standardowych. W M101 obserwuje się 1000 cefeid. Otworzyło to możliwości bardzo dokładnej kalibracji a także ustalenia, który z konkurujących modeli astrofizycznych jest poprawny.

Po zaskakująco długim jak na współczesną naukę czasie kilku miesięcy, nastąpił wysyp publikacji opartych o obserwacje SN 2011fe [5]. Analiza obserwacji potwierdziła na wiele sposobów standardowy schemat termojądrowego wybuchu białego karła, ustalając limity na promień, masę, i gęstość progenitora. Także analiza archiwalnych zdjęć galaktyki M101 wykazała, że eksplodujący obiekt musiał mieć bardzo małą jasność, co wyklucza masywne gwiazdy.

Bardziej zaskakujące były wyniki obserwacji radiowych. Dostyc oczywistym wydaje się założenie, że izolowany biały karzeł, nie może eksplodować<sup>2</sup>. Musi istnieć czynnik wyzwalający zapłon reakcji termojądrowych. Wszystkie teorie zakładają, że tym czynnikiem jest obecność drugiej gwiazdy<sup>3</sup>, z której biały karzeł „wysysa” materię. Proces taki musiałby zostawić liczne ślady, np: w postaci mgławicy otaczającej układ. Oddziaływanie eksplodującej supernowej z materią powinno dać wyraźne sygnatury radiowe. Nic takiego nie zaobserwowano: wybuch nastąpił w czystym ośrodku międzygwiazdowym [7].

## 3. Czym jest supernowa typu Ia ?

Obserwacje supernowej SN 2011fe wprowadziły poważne zamieszanie w środowisku astrofizyków, zasiały też pewne wątpliwości wśród obserwatorów i kosmologów. Niewątpliwie, wyniki wskazują silnie, iż był to wybuch termojądrowy w układzie **dwóch białych karłów!** Najbardziej popularny model akrecji został negatywnie zweryfikowany, ale tylko w tym konkretnym przypadku. Obecnie mamy do czynienia z jedną z dwóch poważnych alternatyw:

- a) *wszystkie normalne* supernowe typu Ia to złączenia (ang. *merger*) **pary** białych karłów;
- b) to co dziś nazywamy normalną supernową typu Ia, to w rzeczywistości miks dwóch różnych zjawisk astrofizycznych.

---

<sup>1</sup> Fitowanie modelu kosmologicznego nic nie mówi o tym, w jaki sposób jest rozmieszczona ciemna materia.

<sup>2</sup> Można jedynie spekulować o zapłonie spowodowanym kosmicznym impaktem, czy też związanym z niestandardową fizyką, o czym dyskutowaliśmy z prof. Rafelskim.

<sup>3</sup> W szczególności może to być *drugi* biały karzeł.

Do tego dochodzi wysyp modeli egzotycznych, np: rekonfiguracja silnie rotujących białych karłów [8], czy też inicjowana powierzchniowo detonacja zbudowanych z helu białych karłów [9]. Wniosek, że wszystkie supernowe typu Ia to złączenia białych karłów budzi opór środowiska, od lat 60-tych przywiązanego do modelu z akrecją. Ilość odpowiednich systemów podwójnych może okazać się zbyt mała aby wyjaśnić obserwacje [10]. Z astrofizycznego punktu widzenia istnienie kilku kanałów prowadzących do eksplozji jest dosyć naturalne, dla kosmologii zaś sprawa staje się wtedy bardziej skomplikowana. Jeden z jej trzech głównych filarów (obserwacje supernowych typu Ia; pozostałe dwa to mikrofalowe promieniowanie tła i formowanie się struktur), opiera się na świecy standardowej będącej mieszaniną co najmniej dwóch różnych zjawisk. Gdyby rzeczywiście produkowały one identycznie wyglądające krzywe blasku i widma, byłoby to zaskakujące. Oprócz tego powinniśmy się spodziewać zmiany proporcji występowania tych dwóch zjawisk w czasie kosmologicznym. Aby doszło do złączenia dwóch białych karłów, muszą one najpierw powstać, a następnie zbliżyć się dzięki emisji fal grawitacyjnych, co wymaga czasu rzędu miliardów lat. Zjawisko to nie mogło więc być dominujące we wczesnym Wszechświecie. Czy powtórzy się sytuacja z lat 50-tych, kiedy to w podobnych okolicznościach rekalkibracja cefeid wywołała radykalną zmianę parametrów kosmologicznych. Czas pokaże.

## Referencje

- [1] Grzegorz Pietrzyński, *Projekt Araucaria - poprawa kalibracji skali odległości we Wszechświecie na podstawie obserwacji świec standardowych w pobliskich galaktykach*. Praca habilitacyjna, 2006.
- [2] <http://institute-of-brilliant-failures.com/index.htm>
- [3] Baade, W., *The Period-Luminosity Relation of the Cepheids*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 68, No. 400, p.5
- [4] Phillips, M. M., The absolute magnitudes of Type IA supernovae, *Astrophysical Journal*, Part 2 - Letters (ISSN 0004-637X), vol. 413, no. 2, p. L105-L108; Kasen&Woosley 2007, *ApJ*, 656 661-665 ; [http://en.wikipedia.org/wiki/Phillips\\_relationship](http://en.wikipedia.org/wiki/Phillips_relationship)
- [5] Mario Hamuy, *Nature* 480, 328–329 (15 December 2011) doi:10.1038/480328a; Peter E. Nugent, et. al., *Supernova SN 2011fe from an exploding carbon–oxygen white dwarf star*, 344–347 doi:10.1038/nature10644
- [6] Bloom et al. 2012 *ApJ* 744 L17
- [7] F. Patat, M. A. Cordiner, N. L. J. Cox, R. I. Anderson, A. Harutyunyan, R. Kotak, L. Palaversa, V. Stanishev, L. Tomasella, S. Benetti, A. Goobar, A. Pastorello, J. Sollerman *Multi-epoch high-resolution spectroscopy of SN 2011fe*, *A&A* 549 A62 (2013) DOI: 10.1051/0004-6361/201118556
- [8] Jifeng Liu et al., *On the Nature of the Progenitor of the Type Ia SN2011fe in M101* 2012 *ApJ* 749 141
- [9] S. A. Sim, M. Fink, M. Kromer, F. K. Röpkke, A. J. Ruiter, and W. Hillebrandt *2D simulations of the double-detonation model for thermonuclear transients from low-mass carbon–oxygen white dwarfs*, *MNRAS* (2012) 420(4): 3003-3016 doi:10.1111/j.1365-2966.2011.20162.x

[10] Marat Gilfanov, Ákos Bogdán, *An upper limit on the contribution of accreting white dwarfs to the type Ia supernova rate*, Nature 463, 924-925 (18 February 2010) | doi:10.1038/nature08685