

Drabina (metod) i świece (standardowe),
czyli jak astronomowie mierzą
odległości do najdalszych obiektów?

1. Wstęp

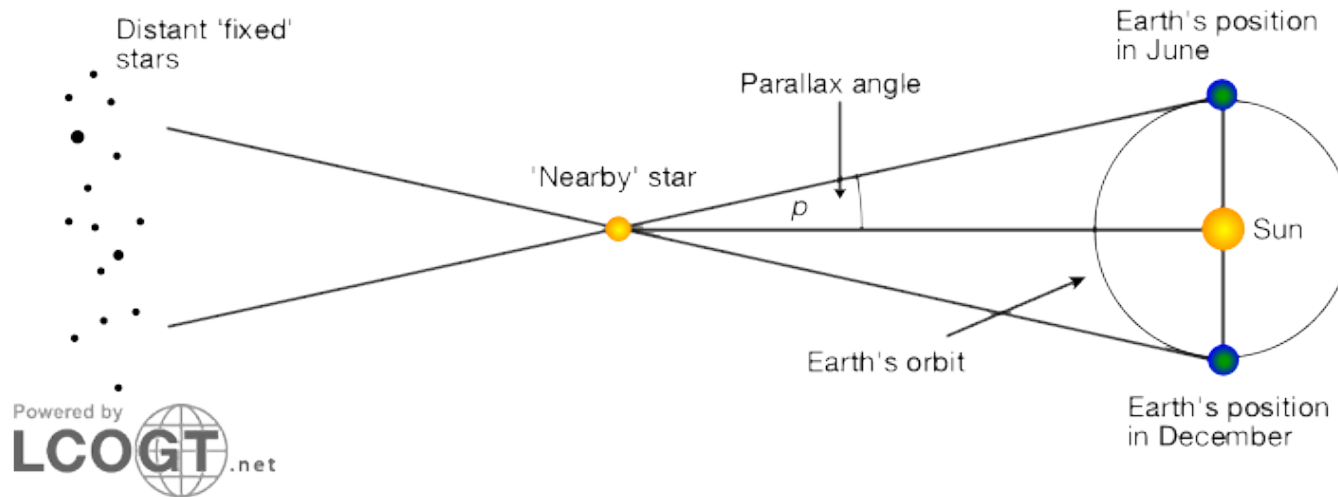
Pomiary odległości do najdalszych obiektów są podstawą naszej wiedzy na temat Wszechświata. One – wraz z pomiarami przesunięcia linii widmowych tych obiektów ku czerwieni – prowadzą do wniosku, że Wszechświat się rozszerza. Przez dłuższy czas sądzono, że Wszechświat rozszerza się coraz wolniej. Od połowy lat 1990. bardziej popularny stał się pogląd, że Wszechświat rozszerza się coraz szybciej – choć można było to twierdzenie kwestionować. Najnowsze obserwacje nie przybliżają nas do rozwiązania tej kwestii.

2. Pomiar odległości w astronomii i kosmologii

Odległości astronomiczne nie da się mierzyć bezpośrednio. Pierwsze wiarygodne pomiary były oparte na obserwacjach transzytu Wenus przed tarczą Słońca – na ich podstawie można było obliczyć odległości do Słońca i planet. Obecnie do pomiarów odległości stosuje się metody **oparte na sondach kosmicznych i radarze** – dzięki nim na przykład wiadomo, że **jednostka astronomiczna** jest równa **149 597 870.66 km**. Odległości obiektów poza Układem Słonecznym trzeba mierzyć w inny sposób:

⇒ najbliższe gwiazdy: **pomiary paralaksy**

⇒ dalsze obiekty: **metoda świec standardowych**.



Pomiar odległości przy pomocy paralaksy

Jak widać, metoda paralaksy jest metodą podobną do stosowanych w geodezji – znamy długość bazy i dzięki pomiarowi kąta paralaksy możemy obliczyć odległość. Dla bardziej oddalonych skupisk gwiazd można wyznaczać średnią z wielu paralaks.

Świece standardowe to obiekty o znanej jasności. Jeśli zmierzmy **pozorną wielkość gwiazdową**, można ją przeliczyć

na strumień promieniowania docierający do Ziemi i oszacować odległość (strumień **maleje z kwadratem odległości**).

Astronomowie robią na odwrót: jasność obiektu przeliczają na **absolutną wielkość gwiazdową**, odległość można wyliczyć ze wzoru

$$5 \log D = m - M + 5$$

gdzie m jest wielkością pozorną, M wielkością absolutną a D odległością w parsekach. Wielkość absolutna to wielkość pozorna, jaką miałyby gwiazda w odległości 10 parseków.

Jakie obiekty można stosować w charakterze świec standardowych? Ogólna zasada: **im dalszy obiekt, tym większa niepewność metody**. Jasność musi być dobrze skalibrowana.

Przykład złej kalibracji: jasność cefeid zależy od ich metaliczności. Efekt: odległości 2x większe niż sądzono. Może być podobny problem z supernowymi Ia.

Niektóre używane świece standardowe:

- ⇒ gwiazdy na ciągu głównym (diagram H-R)
- ⇒ gwiazdy zmienne RR Lyrae
- ⇒ funkcje jasności mgławic planetarnych i gromad kulistych
- ⇒ cefeidy i nowe klasyczne
- ⇒ najjaśniejsze gwiazdy w galaktykach
- ⇒ klasy jasności galaktyk spiralnych
- ⇒ najjaśniejsze galaktyki w gromadach
- ⇒ supernowe typu Ia.

3. Problemy z definicją odległości

W kosmologii jest wiele problemów dziwnych z punktu widzenia standardowej fizyki. Jednym z nich jest **definicja odległości**. Wszechświat zmienia swoje rozmiary i dlatego **odległość w momencie wysyłania sygnału różni się od odległości w momencie jego odebrania**. Co więcej, **żadnej z tych odległości** nie da się zmierzyć – jedyną odległością, którą można zmierzyć, jest **odległość jasnościowa**. Właśnie ta, która jest mierzona przy pomocy świec standardowych.

W kosmologii używa się również innych definicji odległości: współporuszającej się, transwersalnej współporuszającej się, drogi przebytej przez światło itd. Zależności między tymi odległościami zależą od modelu kosmologicznego i jego parametrów

(np. Ω_m , Ω_k , Ω_Λ). Jest to kłopotliwe, ale **umożliwia nałożenie ograniczeń na modele kosmologiczne** jeśli równocześnie zmierzyć **przesunięcie ku czerwieni** i **odległość jasnościową**. Problem w tym, że najważniejsze są pomiary przy wysokich redshiftach, a tam jednocześnie pomiary odległości są obarczone największymi błędami, zwłaszcza w przypadku starszych metod oceny odległości.

4. Supernowe w kosmologii

Uważa się, że obecnie najbardziej wiarygodną metodą pomiaru odległości w bardzo dużym ich zakresie (mówi się nawet o odległościach powyżej 1 Gpc) jest użycie supernowych SN Ia jako świec standardowych.

- ⇒ Zalety: używa się wyłącznie standardowej fizyki, brak zaczepienia o niższe *szczeble drabiny*.
- ⇒ Wada: niepewności związane z modelami, zwłaszcza dla supernowych przy pierwotnym składzie materii we Wszechświecie.

Jeszcze w połowie lat 1990. w kosmologii obowiązywał model płaski, w którym na materię barionową przypadało 5% a na ciemną materię 95% (parametr $\Omega=1$). W 1997 roku słyszałem pierwsze „przecieki” na temat publikacji, które ukazały się w następnych latach: Supernova Cosmology Project i High-z Supernova Team ogłosiły, że ekspansja Wszechświata przyspiesza, stała kosmologiczna jest większa od 0 a odpowiedni przyczynek do gęstości energii $\Omega_\Lambda \simeq 0.7$ (ale nadal $\Omega=1$). Modele CDM zostały zastąpione przez Λ CDM.

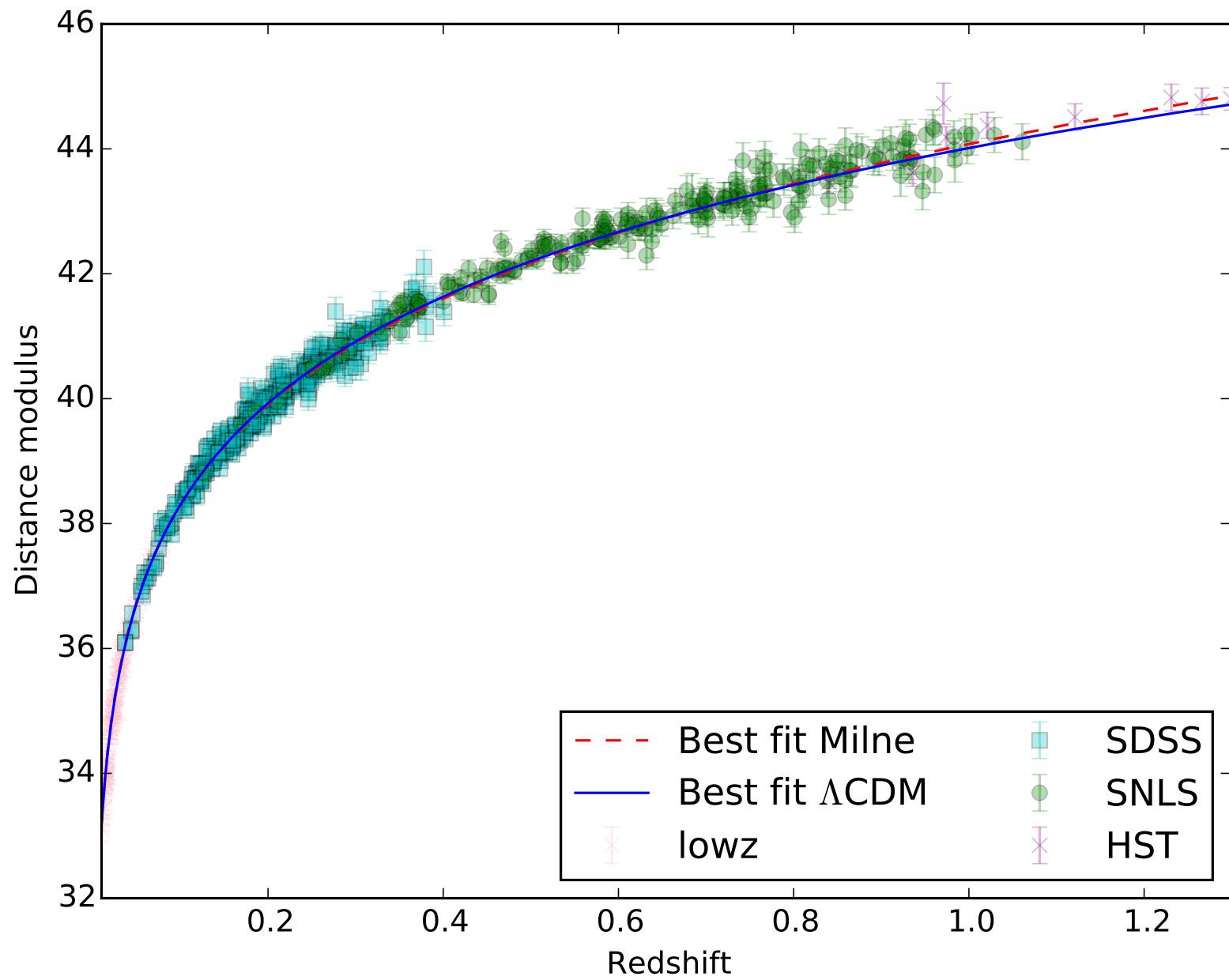
Później okazało się, że jednak jest pewna wątpliwość. Co prawda modele typu „best fit” przy założeniu $\Omega=1$ dają przyspieszoną ekspansję, ale **niewiele gorsze dopasowanie** można uzyskać dla **pustego Wszechświata**, w którym stała Hubble’a nie zmienia się w czasie.

5. Przekłuty balon?

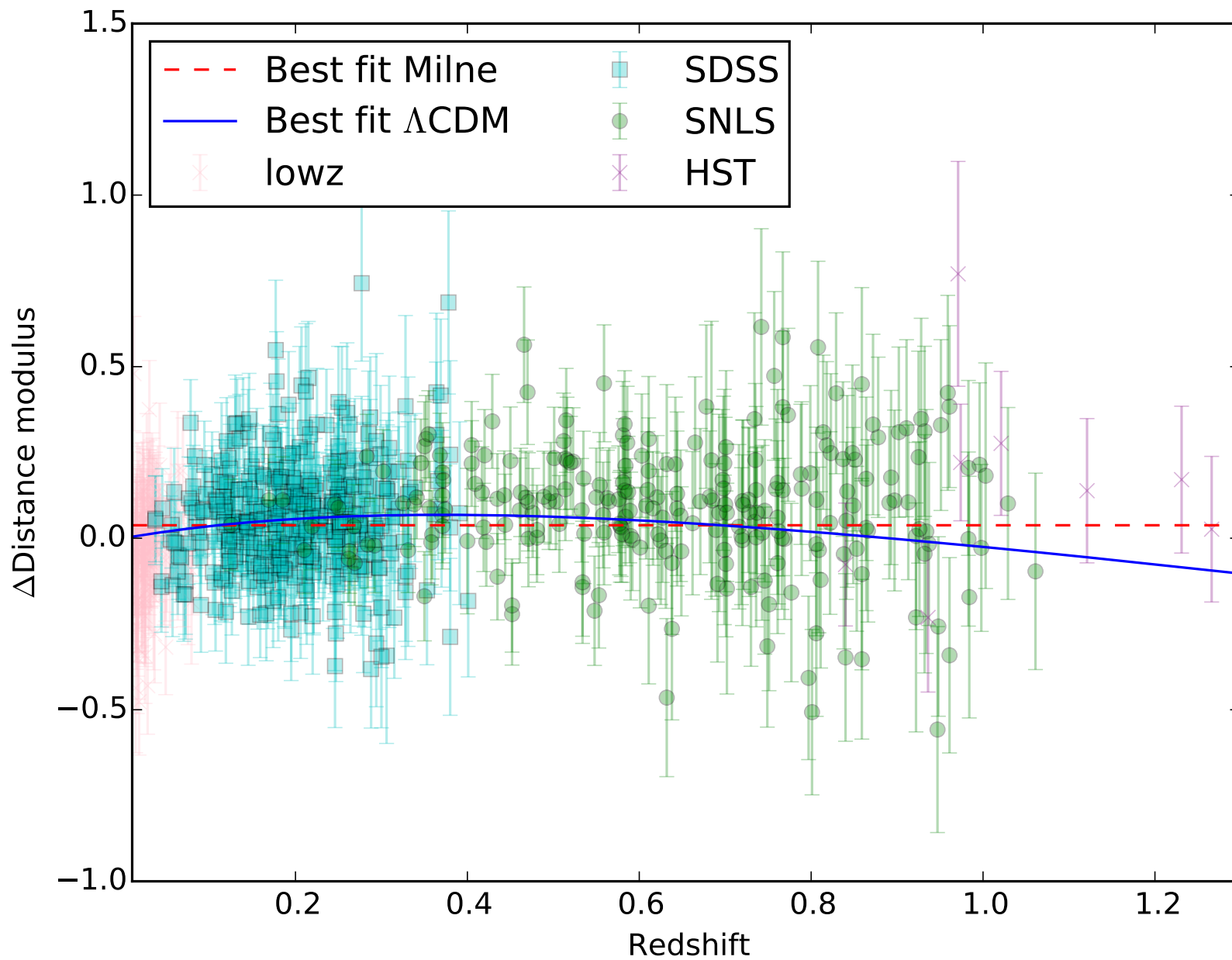
Malkontenci (w tym i piszący te słowa) narzekali, aż w końcu ktoś podszedł do sprawy systematycznie. W czasopiśmie *Scientific Reports* w 2016 roku ukazał się artykuł J.T. Nielsena, A. Guffantiego i S. Sarkara „Marginal evidence for cosmic acceleration from Type Ia supernovae”. Autorzy przeanalizowali dane (katalog Joint Lightcurve Analysis) i doszli do wniosku, że różnice między modelami nie są na tyle duże, żeby definitywnie przesądzać o przyspieszonej ekspansji. Oto wyniki:

TABLE I. Maximum likelihood parameters under specific constraints (in boldface).

Constraint	$-2 \log \mathcal{L} / \mathcal{L}_{\max}$	$(-2 \log \mathcal{L}_{\max} = -214.97)$									
		Ω_m	Ω_Λ	α	$x_{1,0}$	$\sigma_{x_{1,0}}$	β	c_0	σ_{c_0}	M_0	σ_{M_0}
None (best fit)	0	0.341	0.569	0.134	0.038	0.932	3.059	-0.016	0.071	-19.052	0.108
Flat geometry	0.147	0.376	0.624	0.135	0.039	0.932	3.060	-0.016	0.071	-19.055	0.108
Empty universe	11.9	0.000	0.000	0.133	0.034	0.932	3.051	-0.015	0.071	-19.014	0.109
Non-accelerating	11.0	0.068	0.034	0.132	0.033	0.931	3.045	-0.013	0.071	-19.006	0.109
Matter-less universe	10.4	0.000	0.094	0.134	0.036	0.932	3.059	-0.017	0.071	-19.032	0.109
Einstein-deSitter	221.97	1.000	0.000	0.123	0.014	0.927	3.039	0.009	0.072	-18.839	0.125



Zależność odległości od redshiftu



Porównanie modelu Milne'a z Λ CDM

Widać, że **wiele różnych modeli może prowadzić do bardzo podobnych przewidywań**. Najlepsze dopasowanie jest, oczywiście, przy braku ograniczeń na parametry kosmologiczne, odrobinę gorsze dla standardowego Λ CDM, ciągle nieźle dla trzech innych modeli (pusty Wszechświat, brak przyspieszenia i brak materii), zdecydowanie można wykluczyć tylko Wszechświat Einsteina-de Sittera ($\Omega_\Lambda=0$, $\Omega=1$).

Trzeba zaznaczyć, że np. model „pustego Wszechświata” **wcale nie musi oznaczać Wszechświata bez materii**. Podobne przewidywania mogą dawać inne modele, ale niejednorodne (to również dotyczy pozostałych modeli).

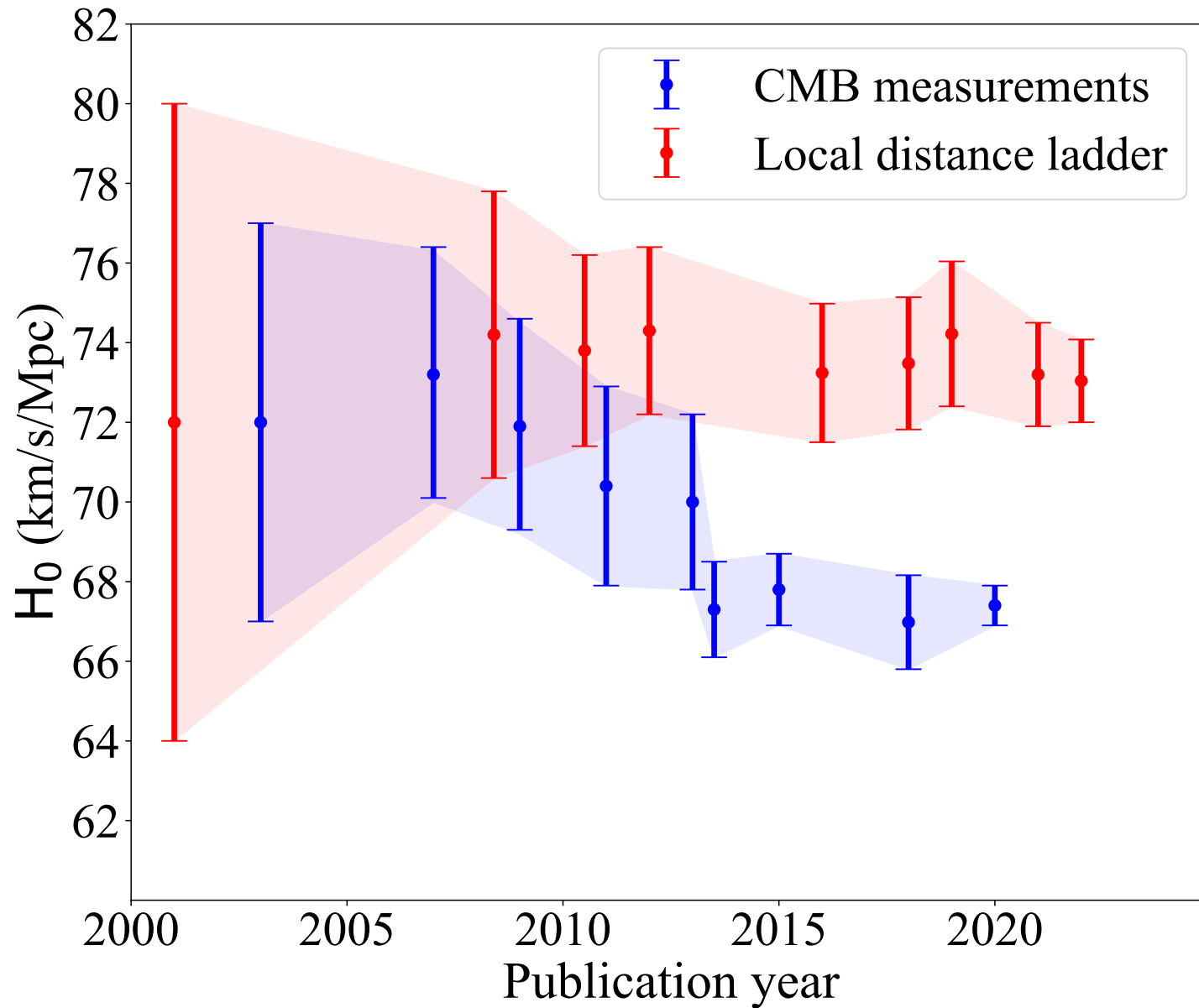
6. Napięcie Hubble'a

Wspomniany w poprzedniej części artykuł był podważany przez zwolenników dominującego obrazu ekspansji Wszechświata, ale problem nie zniknął – wręcz przeciwnie: kolejne obserwacje zdają się potwierdzać, że najdalsze obiekty nie pasują do tego obrazu.

Na dodatek powrócił problem wartości stałej Hubble'a. Jest to parametr, który pokazuje aktualne tempo ekspansji Wszechświata. Pierwsze próby oszacowania tego parametru dały wartość powyżej $500 \text{ km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$ (co odpowiadałoby wiekowi Wszechświata w okolicach 2 miliardów lat), później astronomowie podzielili się na zwolenników 2 wartości: 50 i 100 , co później ewoluowało do 65 i 85 .

Obecnie wiadomo, że ten parametr jest równy ok. 70, ale różne metody pomiaru dają wartości ok. 67 oraz ok. 73-74 – i niepewności tych metod wydają się być znacznie niższe niż różnica między tymi wartościami. Ta kontrowersja jest nazywana *napięciem Hubble'a* (*Hubble Tension*) i jest uważana za jeden z największych problemów w dzisiejszej kosmologii. W skrócie: metody pomiaru oparte na stosunkowo bliższych obiektach dają wyższą wartość parametru Hubble'a, zaś metody oparte na globalnym źródle, jakim są pomiary anizotropii Mikrofalowego Promieniowania Tła - niższą.

Na razie nie udało się wyjaśnić, co jest powodem tej rozbieżności (nb. *niejedynej* w dzisiejszej kosmologii). Wielu badaczy podejrzewa, że za tym stoi jakaś nowa, jeszcze nieznaną fizyka.



Rozbieżności w pomiarach stałej Hubble'a

7. Podsumowanie

Metoda **świec standardowych** stanowi znaczące usprawnienie **drabiny metod** używanych do oceny najdalszych obiektów we Wszechświecie. Tyle, że (jak to już wcześniej nieraz bywało) Wszechświat nie przestaje nas zaskakiwać i ciągle pojawiają się nowe przeszkody na drodze do jego poznania. Obecna kosmologia jest w stanie permanentnego kryzysu, na które składa się mnóstwo małych **kryzysików**, więc może moje wygłaszane od lat *proroctwo*, że „to MUSI się zawalić”, w końcu doczeka się realizacji i wreszcie ktoś stworzy jakiś nowy model, zgodny z danymi obserwacyjnymi, wolny od sztucznych założeń, dopasowywania danych na siłę i usuwający obecne sprzeczności.