

# Nowe–stare problemy ze stałą Hubble’a

Sławomir Stachniewicz, IF PK

## 1. Wstęp

Stała Hubble'a jest jednym z najważniejszych parametrów w kosmologii – gdyż jeśli ją znamy, możemy z grubsza oszacować wiek Wszechświata. Przez długi czas oszacowania jej wartości budziły kontrowersje ale w końcu udało się znaleźć kompromisową wartość (ok.  $70 \text{ km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$ ). Okazuje się, że wskutek zdecydowanego zwiększenia dokładności obserwacji pojawiły się nowe rozbieżności (tzw. **Hubble tension**) i jeden typ pomiarów daje wyniki wyraźnie powyżej tej „kompromisowej” wartości, a drugi poniżej.

## 2. Co to jest stała Hubble'a?

Współczesna kosmologia bazuje na Ogólnej Teorii Względności, a konkretnie na rozwiązaniach opartych na tzw. metryce Friedmanna-Lemaitre'a-Robertsona-Walkera

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\vartheta^2 + \sin^2 \vartheta d\varphi^2) \right]$$

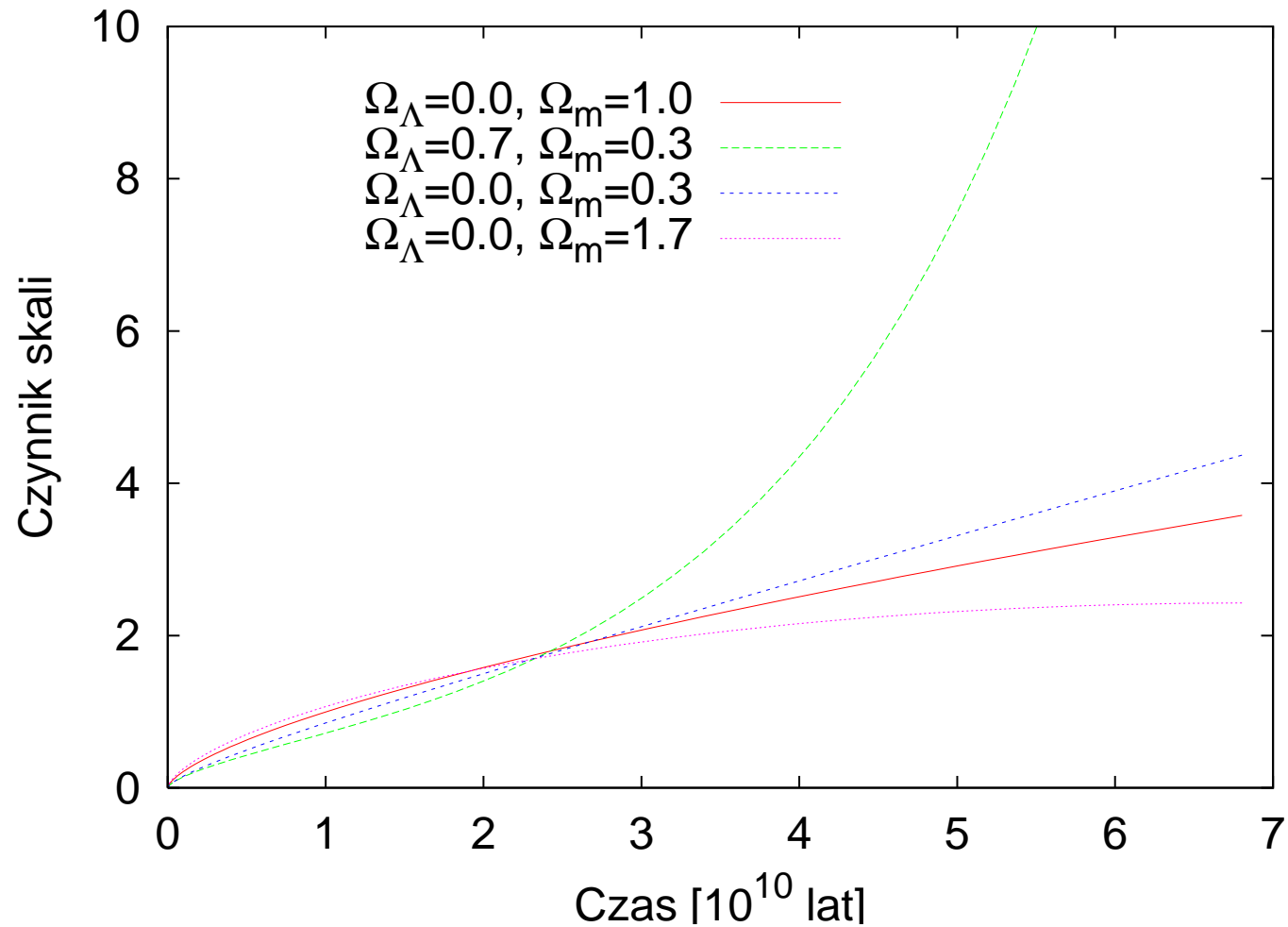
gdzie  $t$  to czas,  $R$  to czynnik skali (zależny wyłącznie od czasu),  $r$  to odległość,  $k$  to krzywizna a ostatni człon to tzw. człon kątowny.

Stała Hubble'a (stała w przestrzeni a nie w czasie) nam pokazuje, jaka jest względna prędkość zmiany czynnika skali:

$$H = \frac{\dot{R}}{R}$$

W większości modeli (wyjątkiem byłby m.in. model ekspansji wyłącznie wykładniczej) jej odwrotność jest zbliżona do aktualnego wieku Wszechświata (a w przypadku ekspansji ze stałą prędkością byłaby to po prostu równość).

Na następnej stronie pokazano kilka typowych przypadków zależności czynnika skali od czasu.



Ewolucja Wszechświata w modelach płaskim, płaskim ze stałą kosmologiczną, otwartym i zamkniętym.

### 3. Pierwsze pomiary stałej Hubble'a

Pierwsze próby oszacowania tego parametru były oparte na cefeidach jako „świecach standardowych” (znano zależność między okresem pulsacji a mocą promieniowania). Hubble oszacował odległości do galaktyk M31 i M33 na 285 kpc (wcześniej Öpik bazując na twierdzeniu wirialnym otrzymał wartość 450 kpc, obecnie przyjmowane wartości to odpowiednio 740 i 830 kpc). W 1929 roku Hubble zauważył, że obiekty bardziej odległe mają większe przesunięcie ku czerwieni, zaś owa zależność obecnie nosi nazwę prawa Hubble'a:

$$v = Hd$$

gdzie  $d$  jest odległością obiektu a  $v$  prędkością oddalania się obliczoną na podstawie przesunięcia linii widmowych względem wartości laboratoryjnych ( $c$  to prędkość światła w próżni,  $z$  to przesunięcie ku czerwieni,  $\lambda$  to długość fali a  $\Delta\lambda$  to jej zmiana):

$$\frac{v}{c} = z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

Oczywiście, powyższe wzory są jedynie przybliżeniami dla niewielkich prędkości i odległości, zaś samo pojęcie **prędkość oddalania się** jest bardzo mylące; w rzeczywistości jest to tzw. redshift kosmologiczny który pokazuje, jak bardzo zmienił się

czynnik skali od momentu wyemitowania światła ( $R$  i  $R_0$  to początkowa i obecna wartość czynnika skali):

$$z + 1 = \frac{R_0}{R}$$

Zależność ta bierze się z założenia, że długości fal zmieniają się wraz ze zmianami kosmologicznego czynnika skali  $R$ . Obecnie te zależności wydają się oczywiste, ale 100 lat temu bynajmniej nie były. Einstein wierzył we Wszechświat statyczny (właśnie do tego potrzebował stałej kosmologicznej – żeby powstrzymać jego kolaps) i dopiero obserwacje Hubble'a potwierdziły wcześniejsze przewidywania Lemaitre'a, że Wszechświat jest dynamiczny.



Otrzymaną przez siebie wartość ok. 500 Hubble później podwyższył do 530 km/(s·Mpc), choć Oort optował za niższą wartością, zaś Eddington za wyższą. Co ciekawe, ten drugi (rzekomo na podstawie teorii kwantów i teorii względności) bardzo mocno upierał się przy swojej wartości. *Teraz mogłem dojść do rozwiązania, które uważam za ostateczne. Wynik to 865 km na sek. na megaparsek.*

## 4. Problem wieku Wszechświata

Jeśli Wszechświat rozszerza się w stałym tempie, stała Hubble'a byłaby odwrotnością jego wieku. Dla  $H_0=500$  byłoby to ok. **2 miliardy lat**. Trochę mało biorąc pod uwagę, że geologiczne (oparte na rozpadach promieniotwórczych) pomiary wieku niektórych ziemskich skał dają wartość ok. 2-3 mld lat. **Ziemia byłaby starsza od Wszechświata?** Niekoniecznie – rozwiązaniem mógł być model stanu stacjonarnego Bondiego, Golda i Hoyle'a. Według tego modelu ekspansja Wszechświata miałaby charakter wykładniczy, zaś materia miałaby być **stwarzana z niczego** w miarę ekspansji przestrzeni.

Pomocne w rozwiązaniu problemu okazały się obserwacje Waltera Baade... oraz wyłączenia prądu w okolicach Los Angeles podczas II Wojny Światowej, dzięki czemu w obserwatorium na Mt Wilson były znacznie lepsze warunki obserwacyjne niż zazwyczaj. Obserwacje czerwonych olbrzymów w galaktykach M31, M33 i NGC 205 pozwoliły na lepsze skalibrowanie zależności okres–jasność dla cefeid. W szczególności okazało się, że jest duża różnica między cefeidami z Populacji II (starymi) oraz I (młodymi), co oznaczało konieczność pomnożenia odległości kosmologicznych przez czynnik około 2.

## 5. 50 czy 100?

Zasadniczy postęp w obserwacjach został dokonany w latach 1950. Najpierw okazało się, że gwiazdy wcześniej uznawane za samotne były w rzeczywistości w regionach bogatych w obłoki HI – co oznaczało, że ich blask był nieco osłabiony. Humason, Mayall i Sandage (1956) ogłosili, że  $H_0 \sim 180$ .

2 lata później Sandage (który później okazał się jednym z najwytrwalszych badaczy stałej Hubble'a) zauważył kolejny czynnik wpływający na zależność okres-jasność u cefeid, który powodował niedoszacowanie odległości, i ustalił wartość  $H_0$  na coś pomiędzy 50 i 100. Później te dwie wartości stały się (mówiąc kolokwialnie) *kultowe*.

W następnych latach pojawiły się kolejne metody oceny odległości kosmicznych (m.in. pierwsze próby użycia supernowych), ale ich niepewności były zbyt wysokie, żeby dokonały znaczącego postępu. Za to odkrycie Mikrofalowego Promieniowania Tła stanowiło znaczące potwierdzenie idei gorącego Wszechświata – oraz silny argument przeciwko modelowi stanu stacjonarnego. A to oznacza skończony wiek Wszechświata i możliwość jego niezależnej weryfikacji.

Proste, często przywoływane modele (pusty oraz płaski, wypełniony materią) przy stałej Hubble'a 50 dają wiek Wszechświata odpowiednio 19,3 i 13 mld lat (przy wartości 100 dwukrotnie mniej). W latach 1980. oszacowania wieku najstarszych gromad kulistych dawały wartość ok. 16 mld lat, co (przy założeniu, że Wszechświat mógł być o ok. miliard lat starszy)

dało się pogodzić głównie z modelem pustym oraz o dość niskiej wartości  $H_0$  (przy  $H_0=50$  i  $\Omega_M=0,25$  otrzymywano 16 mld lat, zaś w modelu płaskim 13 mld lat, czyli niebezpiecznie blisko przyjmowanych wówczas granic niepewności). Stałej kosmologicznej wówczas nie brano pod uwagę.

W latach 1974-82 Sandage i Tammann opublikowali serię artykułów, w których szacowali wartość  $H_0$  na 50-57 z typową niepewnością ok. 7. Opierali się na rozmiarach regionów HII, najjaśniejszych gwiazdach, klasyfikacji jasności oraz właściwościach gromady Virgo. Z kolei de Vaucoleurs ze współpracownikami w latach 1978-86 i opierając się na nowych, cefeidach, najjaśniejszych nadolbrzymach oraz niektórych właściwościach obłoków HII szacowali wartość  $H_0$  na 90-110. W ten sposób zaczęła się ciągnąca się przez lata kontrowersja 50 czy 100?

Od późnych lat 70. zaczął się dokonywać powolny postęp w metodach obserwacyjnych. W 1977 roku Tully i Fisher zauważyli korelację między jasnościami galaktyk spiralnych a ich prędkościami rotacji (TF – zależność **czysto fenomenologiczna**, ale będąca jedną z konsekwencji **modelu MOND**). Ich wartość  $H_0$  była w okolicach 75-80, co (w wyniku nowych obserwacji) w latach 80. zostało przez innych badaczy poprawione na 90-95. Wyniki innych grup, oparte na kolejnych spostrzeżeniach, dawały wartości z przedziału 70-90.

## 6. Wyniki oparte na modelowaniu zjawisk

Wszystkie wymienione wcześniej wyniki były oparte na tzw. **drabinie metod**, czyli kalibrowaniu odległości do dalszych obiektów przy pomocy oszacowań odległości obiektów bliższych. Każdy kolejny **szczebel** tej metody (najpierw właściwości pojedynczych gwiazd, później pojedynczych galaktyk, w końcu całych gromad galaktyk) był obarczony coraz większą niepewnością.

Aby tego uniknąć, trzeba było zastosować metody **oparte na modelach** – gdyby taka metoda okazała się dokładna, pozwoliłoby to na likwidację lub przynajmniej znaczącą redukcję koniecznej liczby szczebli w drabinie metod. W tym celu opracowano metody wykorzystujące:



- ⇒ opóźnienia sygnałów czasowych wskutek mikrosoczewkowania grawitacyjnego (Refsdal, 1964) – wyniki oparte na tej metodzie zwykle dawały wartości 50-75, ale niektóre dochodziły do 100
- ⇒ efekt **Sunjajewa–Zeldowicza** (SZ): bogate gromady galaktyk wskutek tzw. odwrotnego efektu Comptona lokalnie obniżają temperaturę promieniowania relikтового; wczesne wyniki oparte na tej metodzie leżały w granicach 45-70
- ⇒ supernowe (zwłaszcza typu Ia, które zwykle są najjaśniejsze): wartości otrzymane do połowy lat 90. należały do grupy „50” (średnio 58).

## 7. Lata 90. – skok jakościowy

Dużym przełomem było opracowanie pomiarów satelity Hipparcos (1989-93). Jego głównym zadaniem był **pomiar paralaks gwiazdowych**, co pozwoliło **lepiej skalibrować drabinę odległości** oraz zlikwidowało ówczesny problem z cyklu *we Wszechświecie są obiekty starsze niż Wszechświat* (np. „obniżono” wiek najstarszych gwiazd w Galaktyce do 12-13 mld lat).

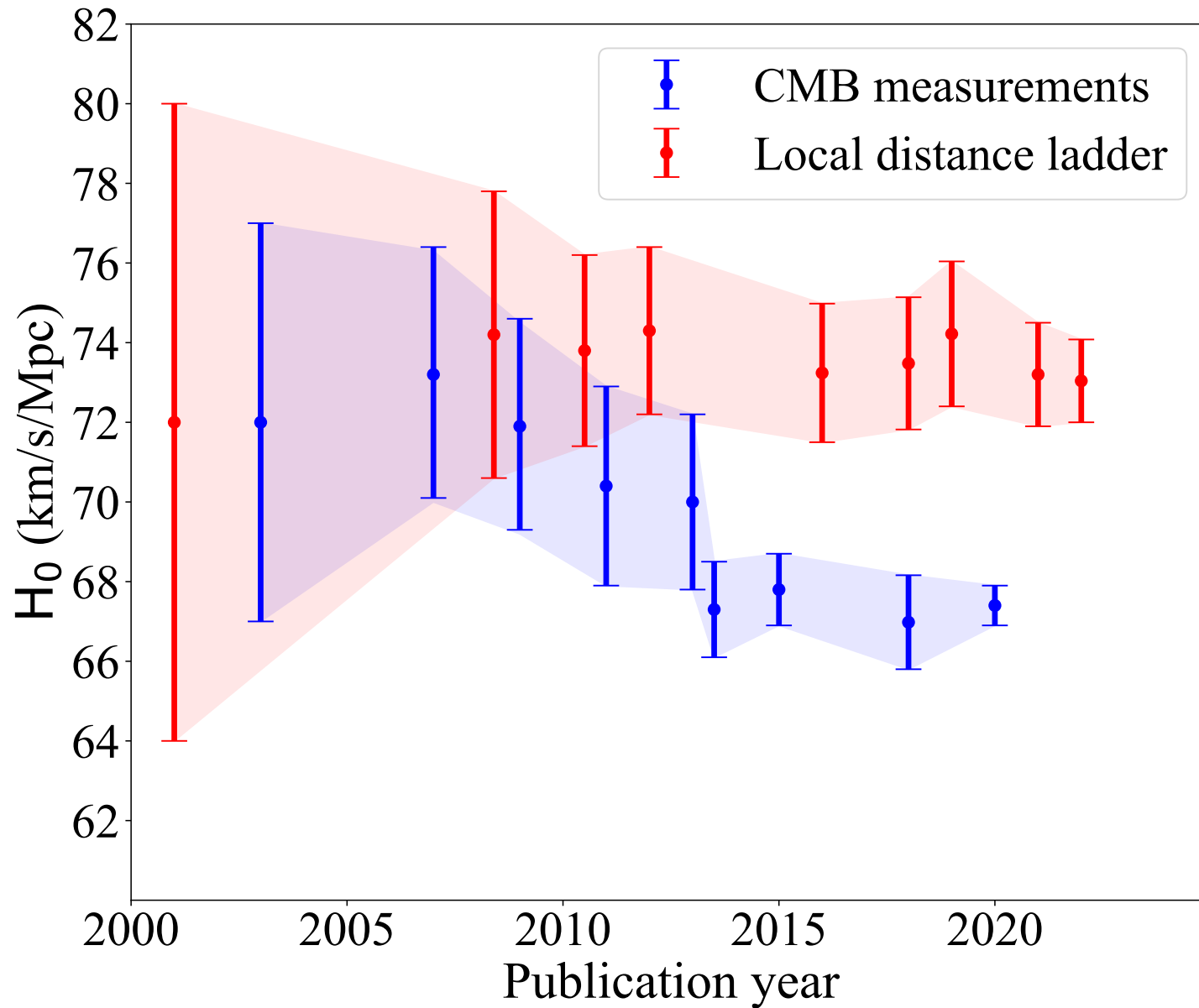
W 1990 roku swoje pomiary rozpoczął Kosmiczny Teleskop Hubble’a (Hubble Space Telescope – ze względu na początkową wadę optyki zamiast „Hubble” mówiono „hobbled”, zaś u nas pojawiła się wersja „komiczny” zamiast „kosmiczny”). Przy jego pomocy obserwowano m.in. najbliższe cefeidy i próbowano poprawić oceny odległości według SNIa. Saha, Sandage

i współpracownicy otrzymali wartość 58 (2000), zaś Freeman ze współpracownikami otrzymali wartość 72 (2001). Późniejsze oceny  $H_0$  oparte na supernowych dawały wyniki w granicach 63-70, zaś oparte na relacji TF dały wartość 57.

W międzyczasie obserwacje oparte na SNIa spowodowały prawdziwe **trzęsienie Ziemi** w kosmologii gdyż z tych pomiarów wyciągnięto wniosek, że (jeśli założyć, że – zgodnie z innymi obserwacjami – geometria Wszechświata jest płaska) musimy być na początku **epoki przyspieszonej ekspansji Wszechświata** – krótko mówiąc, **stała kosmologiczna wróciła do łask** (później jej rolę przejęła **ciemna energia** – energia próżni, quintessence lub super-quintessence). Dotychczas uznawane modele płaskie, zdominowane przez materię ( $\Omega_M=1$ ) dałyby się utrzymać tylko

przy założeniu  $H_0 \sim 35$ , co oznaczałoby zdecydowaną sprzeczność z obserwacjami.

Od początku obecnego wieku obserwujemy gwałtowne zawężenie możliwych „widełek” wartości stałej Hubble’a... ale (zapewne po to, żeby kosmolodzy i astronomowie się zbytnio nie nudzili) powstało nowe źródło rozbieżności, co pokazuję na następnej stronie.



Rozbieżności w pomiarach stałej Hubble'a

## 8. 67 czy 74?

Gwałtowny wzrost dokładności oszacowań stałej Hubble'a spowodował, że pomiary, które poprzednio tonęły w dużych niepewnościach, obecnie grupują się wokół dwóch wartości: nieco poniżej i nieco powyżej 70 (różnica rzędu 10% a nie, jak dawniej, o czynnik 2 czy 1,5).

Pomiary oparte na analizie anizotropii Mikrofalowego Promieniowania Tła (najpierw 9 lat obserwacji satelity WMAP, obecnie teleskopu Plancka) dają bardzo zbieżne wyniki z wartością centralną ok. 67,36-67,40 i niepewnością rzędu 0,5.

Pomiary oparte na najnowszej wersji lokalnej drabiny odległości (szczególnie cefeid, czyli odległości do 40 Mpc – ale

dotyczy to również odległości szacowanych przy pomocy SNIa) dają wyniki w okolicach 73-74.

Rozbieżność jest ewidentna – mówi się o około **5 odchyleniach standardowych**. Jej przyczyna jest nieznana, choć oczywiście pojawiają się liczne próby wyjaśnienia. Próbuje się też wypracować inne, niezależne (zwłaszcza od modelu kosmologicznego) metody pomiaru  $H_0$ .

Próby rozwiązania można podzielić na kilka kategorii:

- ⇒ zmiany  $H(z)$  pochodzące z obecnej epoki (np. efekt modelu typu super-quintessence)
- ⇒ deformacje  $H(z)$  z powodu dodatkowych oddziaływań (np. oddziaływania albo rozpady ciemnej materii)

- ⇒ odstępstwa od modelu jednorodnego i izotropowego (*chyba lepiej nie wypuszczać tego dzinna z butelki*)
- ⇒ rekalkibracja metody SNIa
- ⇒ modyfikacje we wczesnym Wszechświecie (pierwotne odstępstwa od rozkładu Gaussa, zasada nieoznaczoności Heisenberga...)
- ⇒ bardziej egzotyczne propozycje (np. ciemne atomy).



## 9. Podsumowanie

Jak widać, historia pomiarów stałej Hubble'a przypomina coraz ciaśniejszą spiralę: widać postęp, ale badacze nie mogą spać spokojnie, gdyż na miejsce rozwiązanych problemów pojawiają się kolejne. Być może w końcu spełni się moja „przepowiednia”, że *ten model kosmologiczny musi się zawalić*, gdyż wielu badaczy widzi w tych problemach znak, że jest jakaś **nowa fizyka**, którą trzeba uwzględnić – a dotychczasowy, trzeszczący w szwach model może tego nie wytrzymać. **Pażywiom–uwidim** – choć przypuszczam, że nawet jeśli tak się stanie, to zręby obecnego modelu (Wielki Wybuch, gorący Wszechświat itd.) pozostaną nienaruszone.

## 10. Bibliografia

B. Tully *The Hubble Constant: A Historical Review*,  
arXiv:2305.11950 (zapewne pierwszy rozdział książki)

Jian-Ping Hu, Fa-Yin Wang *Hubble Tension: The Evidence of  
New Physics*, Universe 2023,1,0 arXiv:2302.05709

E. Di Valentino et al, *In the realm of the Hubble tension—a  
review of solutions*, Class. Quantum Grav. 38 (2021) 153001  
<https://doi.org/10.1088/1361-6382/ac086d>