

# Krótką notatka o ograniczeniach Planck 2018 na rozpadającą się zimną ciemną materię

Robert Szymański

29 maja 2026

## Streszczenie

Przedstawiamy krótką notatkę podsumowującą naszą najnowszą analizę profile-likelihood dla rozpadającej się zimnej ciemnej materii (DCDM) z niewidzialnym rozpadem do ciemnego promieniowania. Analiza wykorzystuje pakiet CLASS+MontePython wraz z kombinacją funkcji wiarygodności Planck 2018 TT,TE,EE+low $\ell$ +lowE+lensing. Zamiast swobodnie próbując współczynnik rozpadu  $\Gamma_{\text{dcdm}}$  standardową metodą MCMC, profilujemy funkcję wiarygodności względem pozostałych parametrów kosmologicznych i parametrów nuisance przy ustalonych wartościach  $\Gamma_{\text{dcdm}}$ . Po celowanym dopracowaniu siatki stałego  $\Gamma$  metodą warm-start profil nadal nie wykazuje żadnych oznak późnego rozpadu ciemnej materii i preferuje granicę stabilnego CDM. Obecnie wygładzony profil obejmuje przecięcie jednoparametrowego poziomu 95% pomiędzy  $\Gamma_{\text{dcdm}} = 2.25$  i  $2.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , a interpolacja liniowa daje  $\Gamma_{\text{dcdm}} \approx 2.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . Dlatego konserwatywnie przyjmujemy

$$\Gamma_{\text{dcdm}} \lesssim 2.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \quad (95\% \text{ C.L.}).$$

## 1 Wprowadzenie

Rozpadająca się ciemna materia pozostaje atrakcyjnym fenomenologicznym rozszerzeniem standardowego modelu kosmologicznego, ponieważ nawet bardzo słaby rozpad zachodzący w późnych epokach może tłumić wzrost struktur i zmieniać sygnał soczewkowania CMB. W tej notatce wracamy do najprostszego przypadku, w którym zimna ciemna materia rozpada się do niewidzialnego ciemnego promieniowania, opisanego przez współczynnik rozpadu  $\Gamma_{\text{dcdm}}$  wyrażony w jednostkach  $\text{km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . Nasz cel jest skromny: udokumentować obecny stan obliczeń, podsumować ukończoną serię profile-likelihood oraz sformułować aktualny wniosek naukowy w sposób konserwatywny.

Główna lekcja z tego uruchomienia jest prosta. Dane Planck 2018 nie wykazują przekonującej preferencji dla niezerowego  $\Gamma_{\text{dcdm}}$ . Dominująca siła ograniczeń pochodzi z późnoczasowego tłumienia struktur i soczewkowania CMB, a nie z dramatycznej deformacji głównych pików akustycznych TT. W rezultacie oczekiwane ograniczenie leży na poziomie kilku  $\text{km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , a nie przy znacznie mniejszych wartościach.

## 2 Metoda

Obliczenia wykonano przy użyciu CLASS+MontePython z zestawem funkcji wiarygodności Planck 2018 TT,TE,EE+low $\ell$ +lowE+lensing. Wcześniejsze próby oparte

Tabela 1: Aktualne minima profile-likelihood dla ustalonego  $\Gamma_{\text{dcdm}}$  z wygładzonego skanu profilu Planck 2018. Punktem odniesienia jest model stabilnego CDM z  $\Gamma_{\text{dcdm}} = 0$ .

$\Gamma_{\text{dcdm}}$ [ $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ ]	najlepsze loglkl	$\Delta \text{loglkl}$	$\Delta \chi^2$
0.0	1388.12	0.00	0.00
1.0	1388.90	0.78	1.56
1.5	1389.17	1.05	2.10
2.0	1389.75	1.63	3.26
2.25	1389.70	1.58	3.16
2.5	1390.34	2.22	4.44
3.0	1390.48	2.36	4.72
5.0	1395.04	6.92	13.84

na łańcuchach MCMC z wolnym  $\Gamma_{\text{dcdm}}$  okazały się nieefektywne dla problemu jednostronnego ograniczenia górnego, a strategię skoków kowariantnych prowadziły do niestabilnego zachowania w istotnym obszarze przestrzeni parametrów. Dlatego przyjęliśmy strategię profile-likelihood z osobnymi przebiegami dla ustalonych wartości  $\Gamma_{\text{dcdm}}$ , profilując jednocześnie pozostałe parametry kosmologiczne i nuisance.

Początkowa seria produkcyjna zawiera przebiegi dla ustalonych wartości

$$\Gamma_{\text{dcdm}} = 0, 1, 1.5, 3, 5 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1},$$

z których każdy został rozszerzony do łącznej długości 12000 kroków dzięki kontrolowanym restartom. Następnie dodaliśmy celowane przebiegi warm-start dla

$$\Gamma_{\text{dcdm}} = 1, 1.5, 2, 2.25, 2.5 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1},$$

używając seedów best-fit wyciągniętych z już zbieżnego otoczenia minimum. Strategia ta bezpośrednio celuje w wielkość istotną dla ograniczenia jednostronnego i daje wyraźnie gładzy profil w obszarze przecięcia 95%.

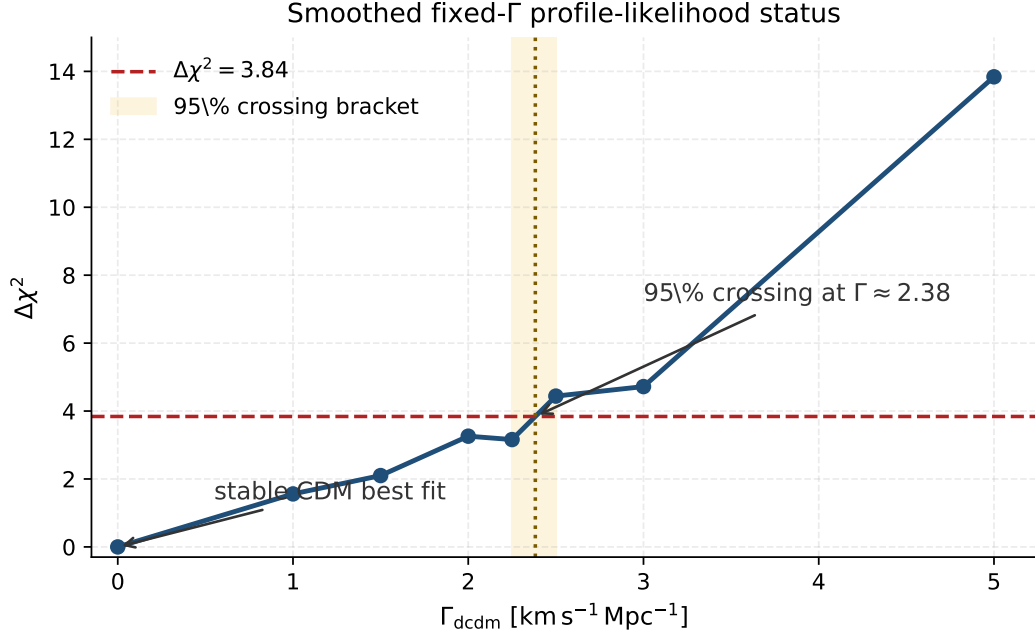
### 3 Wyniki

Najlepsze wartości profilu wyznaczone z pełnego zestawu produkcyjnego oraz dogrywki warm-start zestawiono w Tabeli 1. Podajemy najlepszą wartość funkcji wiarygodności w konwencji MontePython oraz różnice względem przypadku stabilnego CDM.

Trzy wnioski są teraz odporne na szczegóły numeryczne. Po pierwsze, najlepsze dopasowanie pozostaje przy  $\Gamma_{\text{dcdm}} = 0$ , więc dane nadal preferują stabilną zimną ciemną materię. Po drugie, duże współczynniki rozpadu, takie jak  $\Gamma_{\text{dcdm}} = 5 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ , są wyraźnie niekorzystne statystycznie. Po trzecie, w całym obecnie próbkowanym zakresie nadal nie ma statystycznie przekonującego sygnału rozpadu.

Celowane dopracowanie warm-start usuwa duże numeryczne załamanie widoczne we wcześniejszym, rzadszym skanie i pozostawia jedynie niewielki rozrzut resztkowy pomiędzy węzłami  $\Gamma_{\text{dcdm}} = 2$  i  $2.25$ . Kluczowe jest jednak to, że przecięcie 95% jest teraz wyraźnie ograniczone przez dwa sąsiednie punkty

$$\Gamma_{\text{dcdm}} = 2.25 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1} \quad (\Delta \chi^2 = 3.16) \quad \text{i} \quad \Gamma_{\text{dcdm}} = 2.5 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1} \quad (\Delta \chi^2 = 4.44),$$



Rysunek 1: Wygładzony stan profile-likelihood dla ustalonego  $\Gamma_{\text{dcdm}}$  z pełnego skanu produkcyjnego oraz dogrywki warm-start. Pozioma linia przerywana oznacza nominalny próg  $\Delta\chi^2 = 3.84$  dla jednoparametrowego ograniczenia 95%, zacięniowany pas obejmuje przecięcie pomiędzy punktami próbkowanymi  $\Gamma_{\text{dcdm}} = 2.25$  i  $2.5$ , a linia kropkowana pokazuje wartość interpolowaną  $\Gamma_{\text{dcdm}} \approx 2.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

co daje po interpolacji liniowej

$$\Gamma_{\text{dcdm}} \approx 2.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \quad (95\% \text{ C.L.}).$$

Dla potrzeb krótkiej publikacji przyjmujemy więc konserwatywnie

$$\Gamma_{\text{dcdm}} \lesssim 2.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \quad (95\% \text{ C.L.}).$$

Ten stan ilustruje Rys. 1, gdzie punkt stabilnego CDM pozostaje preferowany, a przecięcie 95% jest już zlokalizowane w wąskim przedziale.

## 4 Interpretacja fizyczna

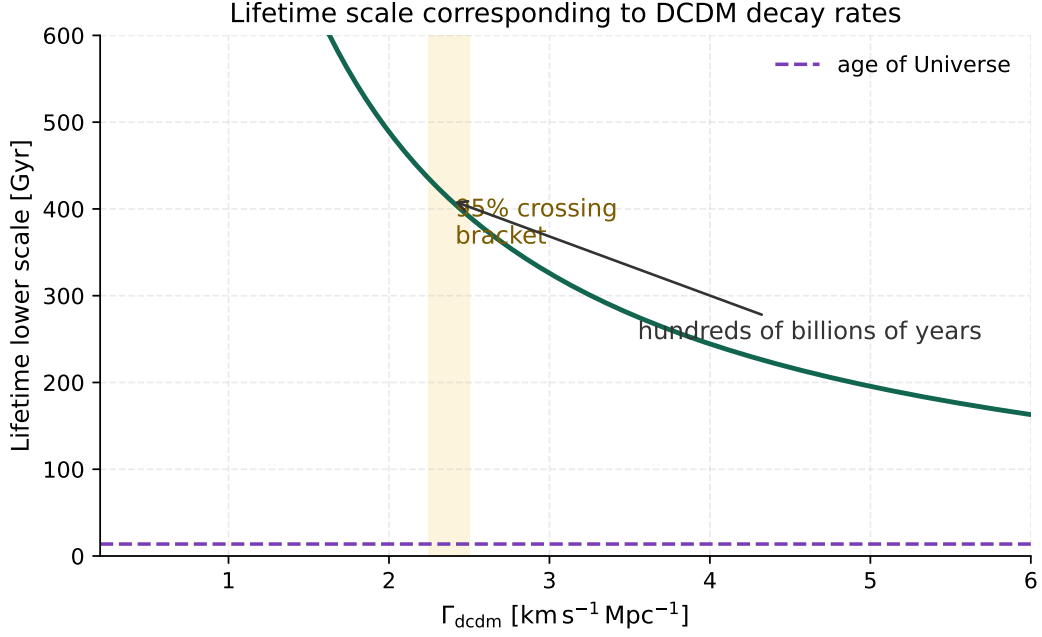
Wyrażone jako czas życia, to ograniczenie oznacza, że każdy niewidzialny rozpad składnika ciemnej materii musi być niezwykle powolny. Ponieważ

$$1 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \simeq 3.24 \times 10^{-20} \text{ s}^{-1},$$

to obecne ograniczenie odpowiada czasowi życia rzędu

$$\tau_{\text{dcdm}} = \Gamma_{\text{dcdm}}^{-1} \gtrsim 4.1 \times 10^{11} \text{ yr},$$

czyli ponad czterystu miliardów lat, a więc znacznie więcej niż wiek Wszechświata. Rysunek 2 pokazuje tę skalę bezpośrednio, porównując czas życia odpowiadający różnym wartościom  $\Gamma_{\text{dcdm}}$  z wiekiem kosmicznym. Obecne ograniczenie należy więc rozumieć przede wszystkim jako ograniczenie wynikające z późnoczasowego tłumienia struktur i soczewkowania, a nie jako sondę bardzo wczesnej fizyki Wszechświata.



Rysunek 2: Skala czasu życia odpowiadająca współczynnikowi rozpadu DCDM. Zacięniowany obszar obejmuje aktualny przedział przecięcia 95% pomiędzy  $\Gamma_{\text{dcdm}} = 2.25$  i  $2.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , odpowiadający czasom życia rzędu  $4 \times 10^{11}$  lat, wyraźnie większym od wieku Wszechświata.

## 5 Dyskusja i kolejne kroki

Z naukowego punktu widzenia główny wynik jest już wystarczająco jasny jak na krótką publikację: Planck 2018 preferuje niemal stabilne CDM i nie wymaga obecności składnika rozpadającego się. Z numerycznego punktu widzenia celowane dopracowanie już wykonało najważniejsze zadanie, czyli wygładziło obszar przejścia i ustabilizowało ograniczenie górne.

Dalsze lokalne próbkowanie pomiędzy  $\Gamma_{\text{dcdm}} \simeq 2.3$  i  $2.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  mogłoby jeszcze doprecyzować ostatnie miejsce po przecinku, ale nie jest już konieczne dla głównego przekazu naukowego. Podstawowy wniosek fizyczny pozostaje stabilny: każdy dopuszczalny niewidzialny rozpad ciemnej materii musi być bardzo powolny, a obecne dane Planck nie dostarczają żadnych dowodów na odejście od granicy stabilnego CDM.

## 6 Wniosek

Nasze najnowsze badanie profile-likelihood dla rozpadającej się zimnej ciemnej materii z użyciem danych Planck 2018 nie znajduje żadnych przekonujących dowodów na niezerowe  $\Gamma_{\text{dcdm}}$ . Granica stabilnego CDM pozostaje globalnym najlepszym dopasowaniem, podczas gdy szybki rozpad jest niekorzystny statystycznie. Po celowanym wygładzeniu warm-start przecięcie profilu z nominalnym progiem 95% wypada przy

$$\Gamma_{\text{dcdm}} \approx 2.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1},$$

dlatego konserwatywnie przyjmujemy

$$\Gamma_{\text{dcdm}} \lesssim 2.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \quad (95\% \text{ C.L.}).$$

Wynik ten już implikuje, że każdy niewidzialny rozpad ciemnej materii musi zachodzić w skalach czasu co najmniej około  $4 \times 10^{11}$  lat, czyli znacznie dłuższych niż obecny wiek Wszechświata.