

# Niestandardowe pomysły w kosmologii

Sławomir Stachniewicz, IF PK

# 1. Skąd wiemy, jaki jest Wszechświat?

Nasze informacje na temat Wszechświata pochodzą z dwóch źródeł: z **obserwacji** i z **modeli teoretycznych**.

**Dane obserwacyjne** pochodzą z obserwacji naziemnych, eksperymentów balonowych i z obserwatoriów orbitalnych. Badane są fale elektromagnetyczne w zakresie od fal radiowych do najtwardszych promieni gamma oraz cząstki i jony promieniowania kosmicznego.

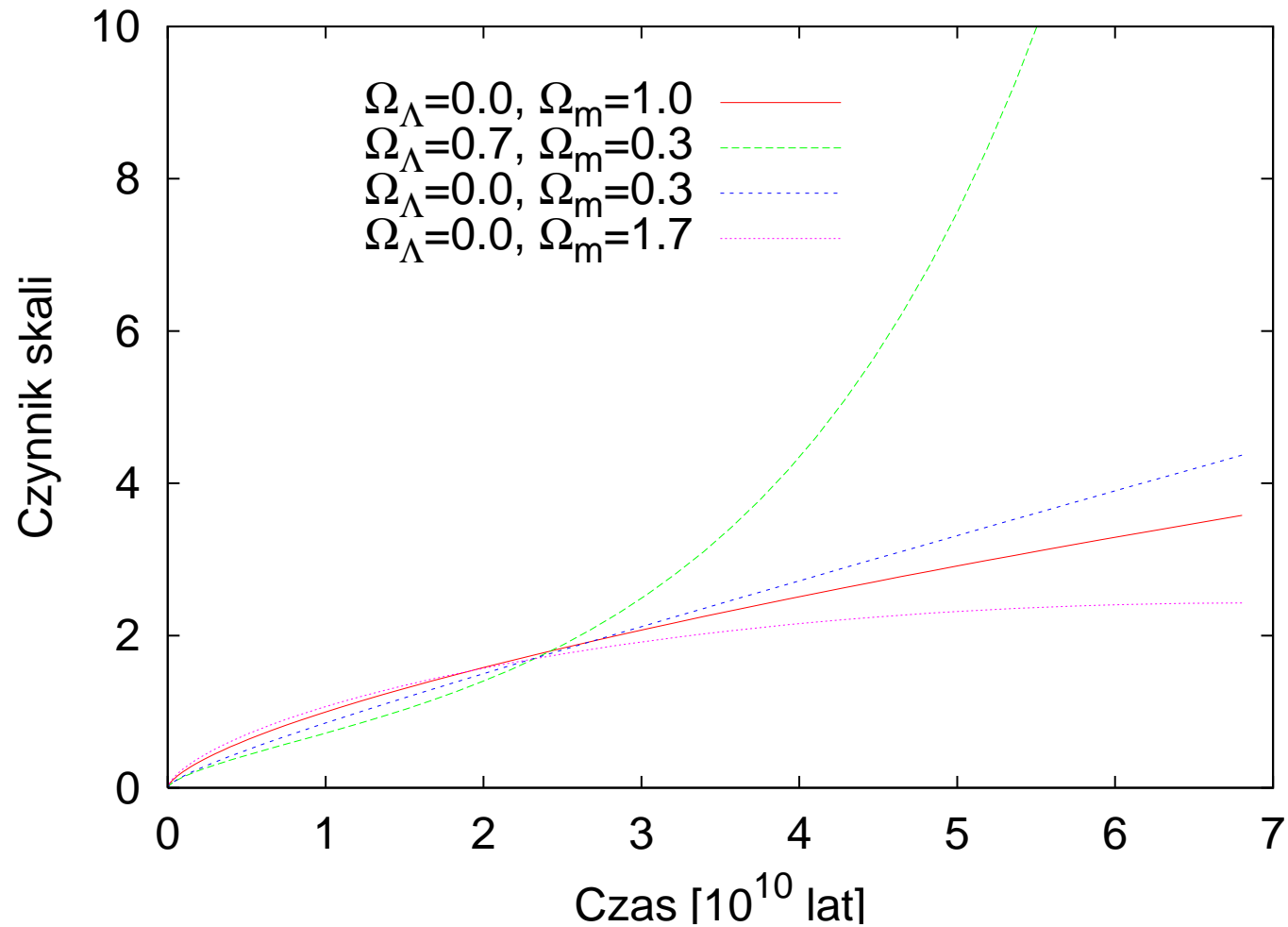


**Modele teoretyczne** zawierają w sobie dane z praktycznie wszystkich działów fizyki, ale podstawą do konstruowania modeli jest **Ogólna Teoria Względności** Einsteina. Do niej dodaje się pewne dodatkowe postulaty określające typy możliwych rozwiązań i pewne założenia na temat składników materii wypełniającej Wszechświat.

Obecnie najczęściej są brane pod uwagę trzy składniki materii:

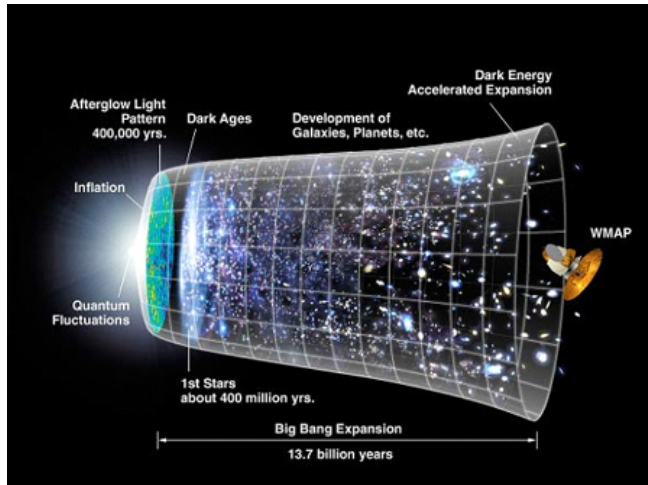
- ⇒ materia (*pył*)
- ⇒ promieniowanie
- ⇒ ciemna energia

W zależności od dominującego składnika otrzymujemy różny typ zależności gęstości od czynnika skali i różne typy ewolucji Wszechświata.



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

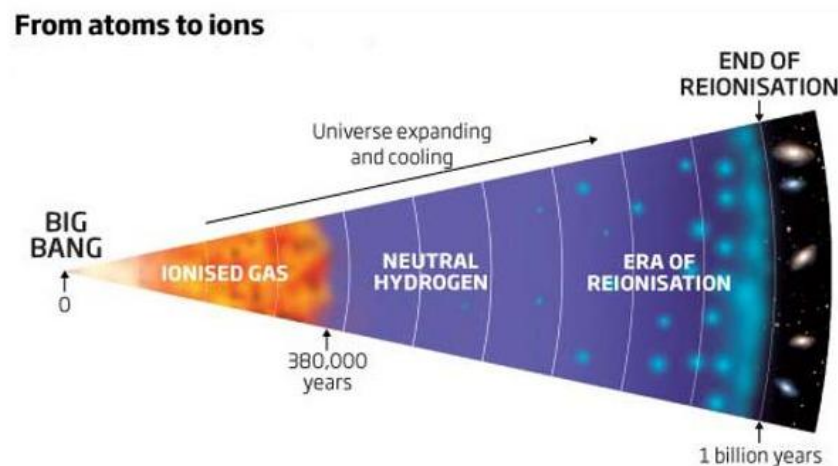
## 2. Standardowy Model Kosmologiczny



"Call that a BIG BANG, eh God..? Why, back home in Texas..."

- ⇒ przed  $10^{-43}\text{s}$  – tzw. era Plancka
- ⇒ ok.  $10^{-36}\text{s}$  – złamanie Wielkiej Unifikacji, ukształtowanie przewagi materii nad antymaterią
- ⇒  $10^{-36}\text{s}$  -  $10^{-10}\text{s}$  – tzw. pustynia energetyczna
- ⇒ ok.  $10^{-10}\text{s}$  – podział oddziaływań elektroslabych na elektromagnetyczne i słabe, plazma kwarkowo-gluonowa

- ⇒ ok.  $10^{-5}$ s – pierwsze hadrony (później stopniowo się rozpadały)
- ⇒ 3 minuty – pierwotna nukleosynteza, materia w stanie plazmy: lekkie jądra, elektrony i fotony
- ⇒ paręset tysięcy lat – rekombinacja (jądra wychwytyją swobodne elektrony), powstaje Mikrofalowe Promieniowanie Tła.
- ⇒ później – era materii, najpierw niemal jednorodnej, stopniowa formacja struktur.



### 3. Szukamy dziury w bardzo dziurawym?

Standardowy Model Kosmologiczny w swej tradycyjnej postaci ma jednak wiele problemów. Próby ich rozwiązania można podzielić na kilka kategorii.

- ⇒ drobne poprawki (dodanie drobnych elementów, w niewielkim stopniu wpływających na ogólny obraz)
- ⇒ duże zmiany (dodanie elementów istotnie zmieniających fundamentalne założenia modelu)
- ⇒ model stanu kwazistacjonarnego
- ⇒ kosmologia plazmowa
- ⇒ Wszechświat jako hiperprzestrzeń
- ⇒ stan stacjonarny z redshiftem niekosmologicznym

## 4. Drobne poprawki

### 4.1. Antymateria i naruszenie symetrii CP.

Jednym z problemów modelu kosmologicznego jest fakt, że mamy w nim dużo zwykłej materii i nie widać śladów większych skupisk **antymaterii**. Nasuwają się dwa pytania.

⇒ Jeśli na początku była symetria między materią i antymaterią, to **co się stało z antymaterią**? Gdyby którykolwiek obszar obserwowanej części Wszechświata składał się z antymaterii, na granicy tego obszaru powinniśmy wykrywać twarde promieniowanie  $\gamma$  pochodzące z anihilacji.



⇒ Jeśli od początku była asymetria, oznaczałoby to silne złamanie symetrii CP, co z kolei pociągałoby za sobą inne konsekwencje. Prawie cała antymateria uległaby anihilacji, ale w efekcie pozostałoby trochę materii resztkowej.

Według wczesnych modeli asymetria powodowałaby niestabilność protonu – protony musiałyby ulegać rozpadowi na  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\mu^-$  i  $\mu^+$  (a priori byłaby możliwa dowolna kombinacja trzech produktów z sumą ładunków równą 1 – od dwóch pozytonów i elektronu do dwóch antymionów i jednego mionu). Teorie Wielkiej Unifikacji (GUT) przewidywały czas rozpadu rzędu  $10^{30}$  lat. Problem w tym, że istnieją bardzo silne ograniczenia doświadczalne na tego typu rozpady – czas połowicznego zaniku musiałby być rzędu  $10^{31}$  lat lub dłuższy (wg danych z eksperymentu HPW), według danych z eksperymentu IMB-3

ograniczenia są o 2 rzędy wielkości wyższe. Krótko mówiąc, **nie ma jakiegokolwiek dowodu na rozpad protonu**. A to oznacza mającą **11 rzędów wielkości** rozbieżność między przewidywaną przez Model Standardowy gęstością materii barionowej a obserwacjami.

## 4.2. Inflacja kosmologiczna.

**Postulat:** we wczesnym Wszechświecie istniało dość szczególne pole, które w momencie złamania Wielkiej Unifikacji ( $10^{-36}$  s) podlegałoby przejściu fazowemu i w niższych temperaturach energia jego stanu podstawowego z jakiejś dużej wartości malałaby do zera, proces miałby się zakończyć ok.  $10^{-33}$ - $10^{-32}$  s po Wielkim Wybuchu.

**Efekt:** niesłuchanie szybka ekspansja przed przejściem fazowym i normalna po przejściu.

Miałoby to rozwiązać problem horyzontu (skąd się bierze bardzo wysoka izotropia Wszechświata?), płaskości (dlaczego efekty ewentualnej krzywizny geometrii Wszechświata są niższe od niepewności obserwacyjnych?), początkowych fluktu-

acji gęstości materii (niezbędnych do późniejszego uformowania struktur) itd.

Krytycy wskazują na fakt, że hipotezy inflacyjne są bardzo *gumowe* – można je dopasować do w zasadzie dowolnych danych obserwacyjnych (zwłaszcza jeśli przyjmujemy hipotezę Wieloświata), dlatego są *niefalsyfikowalne*, a przez to *nienaukowe*. *Teoria, która może przewidzieć wszystko, nie przewiduje niczego*. Nawet jeśli pominiemy Wieloświat, są **TYSIĄCE** wersji modelu inflacyjnego. Tylko niektóre wersje inflacji (zakładające tzw. *slow roll potential*) zostały wykluczone (brak wielkoskalowych korelacji w widmie anizotropii promieniowania tła).

### 4.3. Różne typy ciemnej energii.

Standardową interpretacją wyników obserwacji supernowych typu Ia jest przyjęcie, że o ile wczesny Wszechświat spowalniał swoją ekspansję, to stosunkowo niedawno rozpoczęła się faza ekspansji przyspieszonej. Przyczyną miałyby być obecność **stałej kosmologicznej** (interpretacja tradycyjna) lub tzw. **ciemnej energii**, która miałyby zdominować obecny Wszechświat.

Problem w tym, że w miarę napływu nowych danych staje się coraz bardziej oczywiste, że **dane są konsyistentne ze stałym tempem ekspansji Wszechświata**. Obserwacje ujawniają istnienie łamiących sferyczną symetrię przepływów materii (*bulk flow*) w naszej części Wszechświata, które są sprzeczne z przewidywaniami modeli  $\Lambda$ CDM. To oznacza, że przyspieszona ekspansja Wszechświata może być tzw. artefaktem wynikającym z faktu, że żyjemy w niejednorodnym Wszechświecie. Inne propozycje wyjaśnienia to oddziaływanie pyłu międzygwiazdowego lub efekty ewolucji *metaliczności* supernowych – stare supernowe miałyby być słabsze i efekt byłby taki, że wydawałyby się bardziej odległe.

W odróżnieniu od stałej kosmologicznej, ciemna energia byłaby jakimś dynamicznym polem, ewoluującym według swoich zasad i podlegającym fluktuacjom. Osobną kwestią jest wartość parametru  $w$  (standardowo  $-1$ ) i jego ewentualnej ewolucji.

## 4.4. Inne propozycje.

- ⇒ Niektóre problemy tradycyjnie przypisywane deficytowi masy (np. kwestia stabilności galaktyk) można rozwiązać bez ciemnej materii.
- ⇒ Krzywe rotacji w galaktykach spiralnych można wyjaśnić bez niebarionowej ciemnej materii – np. przy pomocy pól magnetycznych lub modelu cienkiego dysku.
- ⇒ Niektórzy uczeni kwestionują ograniczenie na ilość materii barionowej z teorii pierwotnej nukleosyntezy. Jedną z rozważanych hipotez jest kwarkowo-hadronowe przejście fazowe we wczesnym Wszechświecie.



## 5. Duże zmiany w Modelu Standardowym

### 5.1. Modyfikacja grawitacji.

Najbardziej popularnym modelem modyfikującym grawitację jest zmodyfikowana dynamika newtonowska (MOND). W tym modelu istnieje graniczne przyspieszenie (lub natężenie pola grawitacyjnego)  $a_0$  rzędu  $10^{-10}$  m/s<sup>2</sup>, powyżej którego dynamika/grawitacja działałaby normalnie, a dla niższych wartości jak  $\sqrt{ga_0}$ . Z początku był to model czysto fenomenologiczny, ale pojawiły się próby jego uzasadnienia np. na gruncie mechaniki newtonowskiej i Ogólnej Teorii Względności (TeVeS, RMOND, QMOND). Model znakomicie oddaje zachowanie materii na małych skalach, ale zawodzi na wielkich skalach

(począwszy od gromad galaktyk) i przy mikrosoczewkowaniu grawitacyjnym.

Nb. w 2015 r. pojawił się model łączący zalety MOND na małych skalach i CDM na wielkich skalach – jest to model nadciekłej ciemnej materii (J.Khoury).

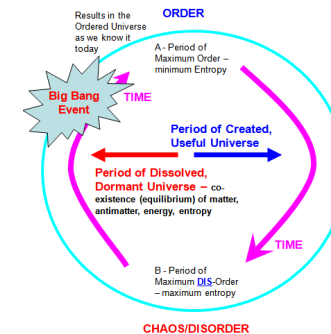
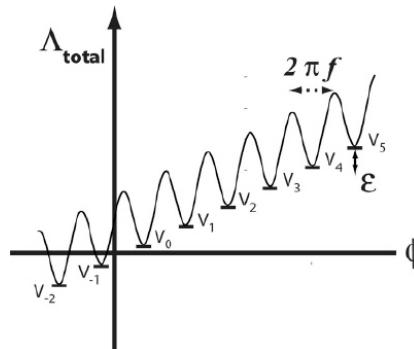
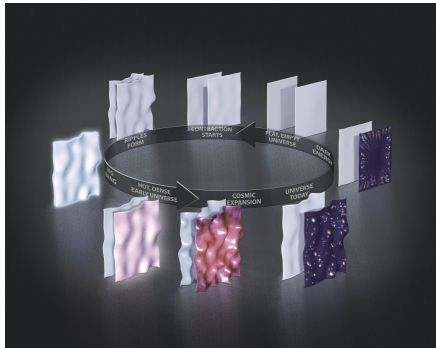
Istnieją inne teorie modyfikacji grawitacji. Najśłynniejszą jest MOG Moffata (2009), ale istnieją też inne, oparte na różnych założeniach (eter Einsteina, bimetryczne, z dodatkowymi wymiarami itd.).

## 5.2. Niestandardowe rozwiązania w ramach metryki FLRW.

Rozwiązaniem standardowym jest model z przyspieszoną ekspansją (materia zwykła i ciemna 0.3, ciemna energia 0.7), ale coraz częściej jest rozważany brak aktywnej masy, czyli liniowa ekspansja Wszechświata. Taki model byłby możliwy w pustym Wszechświecie (model Milne'a) lub przy innym rozwiązaniu, dla którego  $\rho + 3p = 0$  (oczywiście,  $\Lambda = 0$ ). Ta propozycja rozwiązuje niektóre problemy modelu standardowego, np. zbyt *dojrzałe* wyglądające galaktyki we wczesnym Wszechświecie – tu Wielki Wybuch nastąpiłby prawie miliard lat wcześniej ( $1/H_0$ ). Promieniowanie tła mogłoby pochodzić ze znacznie późniejszej epoki ( $z \simeq 16$ , a w Modelu Standardowym powyżej 1000).

## 5.3. Modele cykliczne.

Modele cykliczne zakładają, że **Wszechświat oscyluje**.

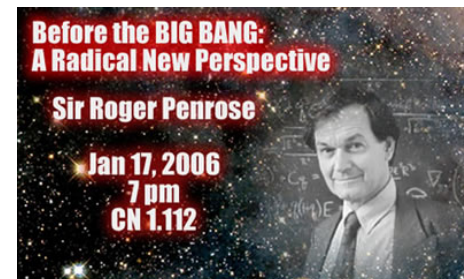
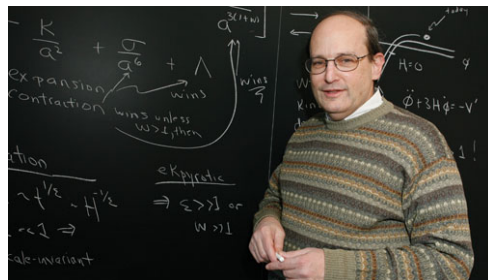


Jak uzyskać cykliczny Wszechświat?

- ⇒ dodać materię, która spowoduje odbicie i wytworzyć warunki, w których Wszechświat będzie oscylował
- ⇒ nieliniowa elektrodynamika
- ⇒ pętlowa kwantowa grawitacja

- ⇒ ekpirotyczny Wszechświat
- ⇒ niektóre wersje kwazistatycznego stanu stacjonarnego
- ⇒ modele strunowe z minimalną odległością  $l_{Pl}$
- ⇒ niektóre typy pola spinorowego
- ⇒ skończony czas życia protonu
- ⇒ skończona masa grawitonu

Główny problem modeli cyklicznych: w fazie kurczenia Wszechświat produkowałby olbrzymią ilość entropii, wiele rzędów wielkości większą od szacowanej.



## 5.4. Inne propozycje zmian.

- ⇒ Wszechświat niejednorodny. Coś w stylu *opcji atomowej* w kosmologii – modele niejednorodne można dopasować do w zasadzie dowolnych danych obserwacyjnych.
- ⇒ Zimny Wielki Wybuch – Wielki Wybuch następuje nie przy ogromnych temperaturach, ale przy temperaturze zerowej. W porównaniu do wersji z lat 1960., model uzupełniono o wyjaśnienie pierwotnej nukleosyntezy, promieniowania tła itd.

⇒ Ewolucja lub oscylacje stałych fizycznych ( $G$ ,  $h$ ,  $\alpha$  itd.). Pierwszą tego typu hipotezą była Hipoteza Wielkich Liczb Diraca (stała grawitacji zależałaby od czasu). Inne propozycje: stała grawitacji zależąca od odległości, zależność prędkości światła w próżni  $c$  od czasu lub innych zmiennych, albo zmienność kilku stałych fizycznych naraz. Tego typu propozycje zasadniczo zachowują kształt MS.

## 6. Stan Kwazistacjonarny

Model będący rozwinięciem modelu Stanu Stacjonarnego – głównego konkurenta Wielkiego Wybuchu do lat 1960. Wszechświat nie ma początku, nie było osobliwości, materia jest wytwarzana w sposób ciągły (Stan Stacjonarny) lub oscylujący (Stan Kwazistacjonarny).



Hipoteza pochodzi od Hoyle'a oraz (niezależnie) od Bondiego i Golda (1948). Wszechświat nie miałby początku, rozszerzałby się w sposób ciągły i każdy element objętości miałby stałe tempo wytwarzania barionów (w odróżnieniu od pojedynczego aktu kreacji podczas Wielkiego Wybuchu). Model ma swoją własną wersję pierwotnej nukleosyntezy (Burbidge i inni). Pierwotna wersja nie wyjaśniała, dlaczego odległe galaktyki są młodsze, rozkładu liczby kwazarów a zwłaszcza mikrofalowego promieniowania tła.

W 1993 r. Hoyle, Burbidge i Narlikar opublikowali zmodyfikowaną wersję – Stan Kwazistacjonarny. Do istniejącego wcześniej wyrazu wykładniczego na czynnik skali dodali czynnik oscylujący (sinusoidalny), a ostatnie minimum miałoby mieć miejsce 14 mld lat temu. Dla wersji początkowej najwyższy obserwowalny redshift  $z \sim 5$ , ale po zmianie parametrów można go dopasować do aktualnego limitu. Kreacja materii miałaby miejsce w czasie minimum czynnika skali. Promieniowanie tła byłoby promieniowaniem gwiazd zaabsorbowanym i reemitowanym przez igłopodobne cząsteczki w przestrzeni międzygwiazdnej (wyjasnienie obejmuje również termalizację promieniowania). Model miałby wyjaśniać również pewne efekty nie objaśniane przez model standardowy, np. sugerowaną przez niektórych badaczy periodyzację redshiftów.

## 7. Kosmologia Plazmowa

Do twórców modelu należą H.Alfvén, O.Klein, A.L.Peratt i E.J.Lerner. Według niego dynamiką Wszechświata nie rządzi grawitacja, tylko oddziaływania elektromagnetyczne. Większą część masy Wszechświata miałyby stanowić plazma. Wszechświat byłby wieczny i podlegałby ciągłej ewolucji.

Obserwowana struktura Wszechświata, formacja galaktyk itd. miałyby być dziełem prądów elektrycznych oraz pól magnetycznych. Mechanizmy plazmowe mogą oddzielić materię od antymaterii, co uniemożliwiłoby pełną anihilację antymaterii (ulegałyby jej wyłącznie obszary zewnętrzne). Podobnie jak w przypadku stanu kwazistacjonarnego, promieniowanie tła pochodziłoby z absorpcji i reemisji promieniowania gwiazd, termalizacja byłaby wynikiem oddziaływania z elektronami.

## 8. Inne niestandardowe propozycje

Istnieją modele, według których przestrzeń Wszechświata jest hiperpowierzchnią zanurzoną w przestrzeni o większej liczbie wymiarów. Początkowa wersja (I.E.Segal, 1976) zakładała jeden dodatkowy wymiar, ale została wykluczona przez dane obserwacyjne (zwłaszcza pomiary mikrofalowego promieniowania tła). Nowsze wersje zakładają większą liczbę wymiarów lub zakładają istnienie 4-wymiarowego Jądra Wszechświata, pozwalającego ominąć istnienie pierwotnej osobliwości w modelu kosmologicznym.

Istnieje też klasa modeli, według których Wszechświat jest statyczny. Zależność między redshiftem a odległością miałyby wynikać np. z tzw. **starzenia się światła** – postulowanego mechanizmu utraty energii przez fotony wskutek oddziaływania z materią międzygalaktyczną. Pierwszą tego typu hipotezę wysunął w 1929 r. Zwicky, który przez długi czas przy niej obstawał (jeszcze w latach 1990. twierdził, że jest wiarygodna).

Do problemów tego typu hipotez należy fakt, że w przypadku tego typu oddziaływań przekazanie pędu materii międzygalaktycznej powodowałoby utratę koherencji, a w efekcie rozmycie obrazów obiektów (ośrodek międzygalaktyczny powinien emitować dodatkowe promieniowanie). Oprócz tego, rozpraszanie to powinno zależeć od częstotliwości, co jest niezgodne z obserwacjami.

Tego typu hipotezy silnie przemawiają do niektórych, gdyż za jednym zamachem pozwalają rozwiązać niektóre problemy standardowej interpretacji redshiftu kosmologicznego (np. *Palce Boga* w strukturze wielkoskalowej). W tle byłby statyczny model Einsteina lub inna metryka z Ogólnej Teorii Względności, alei istnieją też wersje wychodzące poza tę teorię.

Oprócz zmęczenia światła rozważane są też inne źródła niekosmologicznego redshiftu, np. redshift grawitacyjny fraktalnego Wszechświata lub jako efekt niestandardowej teorii grawitacji, ewentualnie zjawisk elektromagnetycznych albo bardziej egzotycznych hipotez (np. efektów kwantowych lub zmienności stałych fizycznych). Żadna z tych hipotez nie ma jakiegokolwiek potwierdzenia doświadczalnego.

## 9. Podsumowanie

Od lat zapowiadam załamanie się modelu kosmologicznego – ciągle z tym samym efektem: model trzeba w kolejnych miejscach łatać, ale jakoś się trzyma. Głównym problemem jest brak sensownej, całościowej alternatywy. Żywotność Standardowego Modelu Kosmologicznego wynika z faktu, że modele alternatywne zwykle opierają się na efektach *wsadzonych ręką*, niepotwierdzonych doświadczalnie. Wprawdzie takiego potwierdzenia nie mają również standardowo stosowane wyjaśnienia (inflacja, niebarionowa ciemna materia, ciemna energia), ale mają one tę przewagę nad pozostałymi, że zdobyły więcej zwolenników. W porównaniu z niektórymi modelami alternatywnymi jest to jedyna przewaga.



## 10. Bibliografia

M. Lopez-Corredoira, L. Marmet *Alternative ideas in cosmology*, arXiv:2202.12897.

J. Khoury *Dark Matter Superfluidity*, arXiv:2109.10928.