

Marek Szydłowski, Paweł Tambor

## **Model kosmologiczny (LCDM, CDM) w schemacie pojęciowym efektywnych teorii Wszechświata**

W pracy pokazujemy, że współczesna kosmologia posiada status efektywnej teorii fizycznej podobny do statusu standardowego modelu cząstek elementarnych. Operuje ona obiektem, który można nazwać standardowym modelem kosmologicznym, który jest prostym modelem teoretycznym, w ekonomiczny sposób opisującym obecne obserwacje. W węższym sensie ten model jest modelem Wszechświata przestrzennie jednorodnego i izotropowego wypełnionego materią barionową, ciemną materią oraz tzw. ciemną energią w postaci stałej kosmologicznej interpretowanej jako energia próżni. W szerszym sensie jest to tzw. *vanilla* o minimalnej liczbie parametrów. U źródeł takiego punktu widzenia leży przekonanie, że kompletna teoria Wszechświata powinna być tak dalece skomplikowana, że bezpośrednie wyprowadzenie z niej obserwabli w celu konfrontacji z obserwacją może być niezwykle trudne. Natomiast do opisu konkretnych zjawisk fizycznych zachodzących we Wszechświecie można użyć nie kompletnej teorii Wszechświata, lecz grupy teorii wyłaniających się z fundamentalnej teorii fizycznej w odpowiednich przejściach granicznych, np. w skalach odległości większej od rozmiarów planckowskich. Te emergentne teorie, stosowane w praktyce badawczej przez kosmologów, są odmienne od teorii pośrednich, które są w istocie etapami w procesie konstrukcji teorii unifikującej wszystkie oddziaływania fundamentalne. Pokazujemy, że te emergentne teorie aplikowane w praktyce przez kosmologów są teoriami efektywnymi, którym stawia się pragmatyczny wymóg dawania predykcji zgodnych z obserwacjami astronomicznymi i danymi astrofizycznymi.

Teorie efektywne Wszechświata nie są już ani maksymalnie proste, ani eleganckie. Sądzi się, że na gruncie teorii efektywnych należy się wycofać ze znanych postulatów maksymalnej conceptualnej prostoty (Einstein), piękna i elegancji (Dirac,

Dyson), które winny przysługiwać teorii ostatecznej, a w teorii efektywnej muszą zniknąć.

## 1. WSTĘP

Teorie kosmologiczne Wszechświata jako całości, próbując opisywać jego dynamikę, opierają się na Ogólnej Teorii Względności bądź jej odmianach. Do materii wypełniającej Wszechświat aplikuje się emergentne teorie fizyczne, takie jak teoria oddziaływań elektroslabych Weinberga–Salama, chromodynamika kwantowa oraz inne efektywne teorie fizyczne, które opisują Wszechświat do coraz wyższych energii oddziałujących cząstek.

Ponieważ każda z tych teorii posiada pewne obcięcie energetyczne, przeszłą ewolucję Wszechświata dzielimy na epoki, w których pewne efekty były znaczące, a inne możemy bez szkody dla opisu zaniedbać. Oczywiście całościowy obraz świata fizycznego jest dynamiczną teorią efektywną wyższego rzędu parametryzowaną czasem kosmologicznym, której końcowym ogniwem jest dzisiejszy Wszechświat opisywany przez tzw. standardowy model kosmologiczny. Jego opis nie jest już ani elegancki, ani conceptualnie prosty. Jest to jednak model ekonomiczny, ponieważ opisuje Wszechświat i procesy w nim zachodzące za pomocą minimalnej liczby parametrów (*current vanilla model*).

Model ten posiada pewien „zapach” teorii prostej conceptualnie i estetycznej, dziedziczony po Ogólnej Teorii Względności, będącej teorią grawitacji opisującą Wszechświat i ewolucję jego wielkoskalowych struktur.

Podkreślimy, że fakt, iż ostatnio formułowane są radykalne wnioski dotyczące statusu tej teorii — grawitacja nie jest samodzielnym fundamentalnym oddziaływaniem opisywanym na poziomie klasycznym przez OTW (a na poziomie kwantowym przez kwantową teorię grawitacji, w której są skwantowane geometryczne stopnie swobody), lecz jest tylko zjawiskiem emergentnym — zdaje się przeczyć ogólnemu przekonaniu, że teoria efektywna jest z definicji pozbawiona elementów estetycznych (nie jest elegancka).

Innym argumentem przeciwko specyficzności grawitacji opisywanej równaniami pola Einsteina jest wiele analogonów w dziedzinie fizyki fazy skondensowanej czy akustyce. Odnajdujemy tam odpowiedniki czarnych dziur, co z kolei otwiera zupełnie nieoczekiwaną możliwość laboratoryjnego badania efektów OTW poprzez modelowanie ich zjawiskami zachodzącymi w cieczach i ciałach stałych. Konsekwencją tego faktu może być możliwość testowania kosmologii w laboratorium.

Celem pracy jest skonfrontowanie ogólnej wiedzy na temat teorii efektywnych i ich roli w fizyce z praktyką badawczą współczesnej kosmologii (*case study*), która kładzie nacisk nie tyle na badanie geometrycznej struktury Wszechświata, ile na badanie procesów fizycznych w nim zachodzących. W ten sposób upodabnia się do fizyki, w której decydującą rolę odgrywa eksperyment. Swój projekt badawczy ko-

smologia realizuje przy wsparciu naziemnych i kosmicznych laboratoriów, które otwierają możliwość wyznaczania parametrów kosmologicznych. To przejście od etapu badania jakościowych własności różnych rozwiązań równań Einsteina do wyznaczania parametrów kosmologicznych jest udziałem naszych czasów, o których się mówi jako o złotym wieku kosmologii. Ta nowa metodologia badań naukowych dokonała się z chwilą uświadomienia sobie, że kosmolodzy dysponują pewnym modelem teoretycznym, co do którego jesteśmy pewni, że z grubsza opisuje dzisiejszy Wszechświat oraz daje poprawne predykcje procesów fizycznych zachodzących w jego przeszłości. Oczywiście kosmolodzy są świadomi ograniczeń przyjętego modelu chociażby przez fakt, że Wszechświat nie jest ściśle jednorodny i izotropowy, lecz na gruncie tego modelu realizowana jest funkcja testowania teorii z uwagi na proste formuły na obserwable. Skonstruowany przy takich założeniach idealizacyjnych model posiada moc przewidywania nowych faktów, takich jak np. przyspieszona ekspansja Wszechświata (funkcja heurystyczna modelu). Odkrycie nowych faktów obserwacyjnych w takich dziedzinach jak kosmologia może prowadzić do korekt samej teorii, a w konsekwencji do ściślejszego powiązania jej z obserwacją.

Zaczynamy poważnie rozważać możliwość wyjścia poza model grawitacji opartej na einsteinowskich równaniach pola i poszukiwać rozwiązań problemu ciemnej energii w modyfikacji tych równań. W przypadku współczesnej kosmologii naocznie widać, że składnikami teorii Wszechświata nie są uniwersalne prawa, odnoszące się do całości, lecz modele, które aspektowo traktują procesy fizyczne w nich zachodzące. Od modelu wymaga się głównie mocy wyjaśniania i przewidywania tych zjawisk. We współczesnej kosmologii rolę modelu opisującego Wszechświat pełni tzw. „*vanilla universe*”. O tym modelu myślimy jako o modelu bardzo uproszczonym, co oddaje jego nazwa *vanilla* (albo *pocket model*). Jednocześnie cały czas poszukiwane są nowe zjawiska fizyczne, które nie znajdują wyjaśnienia w ramach tego uproszczonego modelu. Oznaczają one wyjście poza model i są niezwykle ważne w konstrukcji nowego modelu. Zawsze jednak te modele są wybiórcze i do opisywanych zjawisk podchodzą aspektowo [Coles 2005].

## 2. TEORIE NAUKOWE I MODELE W KOSMOLOGII

Kosmologia współczesna, która wraz z rozwojem coraz bardziej wyrafinowanych technik obserwacyjnych stała się nauką empiryczną, stanowi doskonałe pole do refleksji metanaukowych. Uzyskiwana baza empiryczna dostarcza coraz lepszych przesłanek do wnioskowań falsyfikujących w sensie Poppera.

Na przykładzie oglądu kosmologii współczesnej z dużą wyrazistością możemy także obserwować efekt przesunięcia zainteresowań naukowych od teorii naukowych w kierunku modeli teoretycznych [Zaidler 2007]. We współczesnej kosmologii obserwacyjnej, co warto podkreślić, modele są w dużej mierze autonomicznymi narzędziami praktyki badawczej. Wielu uczonych jest „przypisanych” do konkretnego

modelu teoretycznego. Model umożliwia planowanie i przeprowadzanie przyszłych eksperymentów, misji satelitarnych. Modele „rozliczane” są według tego, jak radzą sobie jako pewne narzędzia z rozwiązaniem sytuacji problemowych. Rozważany w pracy model LCDM, z punktu widzenia obecnych danych, jest właśnie najlepszym modelem, który rozwiązuje sytuację problemową, jaką jest wyjaśnienie akceleracji Wszechświata.

*Teorie efektywne* w rekonstrukcji postępowania badawczego umieszcza się obok teorii naukowych i modeli. Przedmiotem zainteresowania autorów pracy będzie na początku status modelu jako takiego w kosmologii i jego relacja do teorii naukowej.

W kosmologii, zbudowanej na Ogólnej Teorii Względności, za modele Wszechświata można uznać rozwiązania równań Einsteina. Ich konstruowanie dokonuje się przez przyjmowanie określonych założeń idealizacyjnych oraz warunków *ceteris paribus*, a tym samym zawężanie liczby problemów implikowanych przez teorię. Stosowanie idealizacji to pomijanie oddziaływań, których wpływ na zjawisko ma charakter systematyczny, natomiast uwzględnianie warunków *ceteris paribus* to pomijanie wpływu czynników odpowiednio przygodnych. Takie sformułowania praw naukowych są więc pewnymi przybliżeniami badanej rzeczywistości. Uzyskiwana w ten sposób prostota matematyczna pozwala na praktyczne realizowanie zasadniczych funkcji modelu w relacji do teorii:

1. Funkcja badania własności samej teorii. Możliwość zastosowania różnych idealizacji w konstruowaniu modeli pozwala na pokazywanie, jak „zachowuje się” teoria w konkretnych przypadkach. Różnorodność modeli pozwala uwydatnić cechy teorii. Jeśli teorię naukową traktować jako strukturę przez analogię do struktur matematycznych, to wyjaśnienia wymaga miejsce, jakie w tej strukturze zajmują modele. W naukach formalnych możliwość skonstruowania modelu daje gwarancję, że teoria jest spójna logicznie. Obrońcy tzw. semantycznej koncepcji teorii naukowej traktują teorię jako rodzinę modeli [Suppe 1989; Suppes 1967; van Fraassen 1989]. Składnikami teorii nie są zdania uniwersalne, prawa, ale modele. To niezdaniowe ujęcie teorii naukowej charakteryzuje wybiórcze i fragmentaryczne podejście do opisu zjawisk [Grobler 2006, s. 178-187]. W kontekście problematyki tej pracy ważna wydaje się uwaga Adama Groblera:

Koncepcja niezdaniowa podkreśla, że teoria nie jest próbą opisu „całego świata”, lecz raczej stosuje się, w pewien systematyczny sposób, do poszczególnych jego wycinków. Ta myśl, jak się wydaje, otwiera perspektywy na ściślejsze powiązanie pojęć teorii i eksperymentu. Przedmiotem eksperymentu nie jest nigdy cały świat, lecz zawsze jakiś jego wycinek, zwany układem względnie izolowanym [Grobler 2006, s. 183].

2. Funkcja heurystyczna. Zwykle sformułowania teorii są zbyt skomplikowane i nie dają się stosować do opisu zjawisk. Przez zastosowanie zabiegów aproksymacji model staje się pewną interpretacją teorii w granicach wyznaczonych przez przyjęte idealizacje [Nagel 1961]. Heurystyczna rola modelu może przejawiać się zarówno w doprowadzeniu do rozwiązania danego problemu, jak i w odkrywaniu nowych

teorii. Skonstruowany dzięki określonym idealizacjom model może przejawiać cechy na pierwszy rzut oka niewidoczne w teorii, która leży u jego podstawy. W tym sensie można modele postrzegać niekoniecznie jako zubożenie teorii, ale wręcz przeciwnie. Model rozwija teorię, stając się narzędziem konstruowania nowej teorii.

3. Funkcja testowania teorii. Rozbudowane i złożone teorie bazowe często nie nadają się do wysuwania przewidywań empirycznych. Na styku teorii i danych doświadczalnych pojawia się luka nazywana w literaturze przedmiotu *computation gap* [Redhead 1980]. Modele pełnią w takich przypadkach rolę pośredniczącą między teorią a zjawiskami [Smith 2001]. W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że obecna praktyka badawcza może wskazywać na swoistą autonomiczność modeli w stosunku do teorii. Procedura testowania teorii zostaje zastąpiona w rzeczy samej testowaniem sensowności przyjętych przybliżeń, a zatem modeli.

W punktach (1) i (2), jako przykłady interpretowania roli modeli w odniesieniu do teorii i zjawisk empirycznych, podane zostały dwa skrajne stanowiska: strukturalizmu w podejściu semantycznym (van Frassen) i koncepcji autonomicznych modeli. Zestawienie tych opozycyjnych stanowisk może okazać się pouczające w kontekście pewnego bałaganu metodologicznego związanego z modelowaniem w kosmologii [Szydłowski 2006].

Status modeli pośredniczących (*mediating models*) w koncepcji Morrison wyznaczony jest, po pierwsze, przez sposób ich konstruowania: nie są wyprowadzane bezpośrednio z teorii ani nie wyznaczane wyłącznie przez dane doświadczalne; po drugie, przez ich umiejscowienie między teorią a światem zjawisk. Morrison ujmuje to tak:

Although they are designed for a specific purpose these models have an autonomous role to play in supplying information, information that goes beyond what we are able to derive from the data/theory combination alone [Morrison, *Philosophia Naturalis* 54, 67].

Główny punkt sporu z koncepcją semantyczną modeli tkwił w przekonaniu, że modele w ujęciu Morrison, pełniące funkcję mediacyjną między teorią a światem zjawisk, pochodzą spoza teorii i są wymagane przy zastosowaniu teorii w konkretnych przypadkach.

### 3. TEORIE EFEKTYWNE

Wydaje się, że pojmowanie i prezentowanie teorii efektywnej jako takiej tylko intuicyjnie i funkcjonalnie jako teorii fenomenologicznej, która skutecznie opisuje zjawiska nie wyjaśniając istoty rzeczy, jest ujęciem niewystarczającym i domaga się bardziej pogłębionej refleksji metodologicznej.

Bardziej wyczerpującą rekonstrukcję tego, czym w fizyce są teorie efektywne, poprzedzi jeszcze kilka uwag dotyczących rozróżnienia i relacji między rzeczywistością zjawisk a strukturami formalnymi, których używa się do ich modelowania. W określaniu tej relacji między modelem a rzeczywistością szczególnie nacisk jest

położony na moc opisową i wyjaśniającą modelu. W ujęciu realistycznym jedną z fundamentalnych cech teorii fizycznej jest własność aproksymowania rzeczywistości [Morrison 2006]. Często aparat symboliczny używany w procesie konstruowania praw fizyki jest zbyt prosty, by reprezentować wszystkie aspekty badanej rzeczywistości. Nieuniknione stosowanie przybliżeń jest związane także ze stopniem złożoności sformułowań: „*The more complicated the laws become the greater its approximation*” [Morrison 2005, 149].

Wyszczególnimy teraz cechy teorii efektywnej:

— Teoria efektywna działa w jakimś obszarze fizyki. Najczęściej ten reżim stosowalności określany jest w skali odległości lub energii. Funkcjonująca w ramach tego obszaru teoria efektywna opisuje, w jaki sposób zachowują się badane przez nią obiekty, natomiast nie wyjaśnia ich natury. Na przykład Model Standardowy jest teorią efektywną kwarków i gluonów w skali odległości  $10^{-17}$  m.

— Każda teoria efektywna posługuje się pewnymi parametrami, które można nazwać „wkładem informacyjnym” zadany teorii bez wyjaśnień i niepodważalnie. Takimi *input parameters* są na przykład: spin jądra, wartość ładunku elementarnego, własności magnetyczne. „Jeśli teoria posiada dane wejściowe, to jest teorią efektywną” [Kane 2006].<sup>1</sup>

— Do posługiwania się teorią efektywną niepotrzebne jest rozumienie istoty wielkości tych zadanych parametrów. Ich dane wartości mogą być wyznaczone eksperymentalnie lub ich źródłem może być teoria efektywna niższego poziomu (np. mniejszej skali odległości). Podobnie dana teoria wypracowuje i dostarcza parametrów, które stają się danymi wejściowymi dla teorii efektywnej na kolejnym poziomie.

— Teoria efektywna posiada określony zakres zastosowania. Działa i daje zadowalające rezultaty na swoim poziomie, a załamuje się przy przejściu na poziom niższy: wyższa skala energii, mniejsza odległość. To podejście wyraża zarówno słabość, jak i siłę, a raczej skuteczność teorii efektywnych w fizyce. (Do „efektywnego” opisywania mechaniki obiektów astronomicznych wystarczy traktować je jako ciała posiadające masę i charakteryzujące się jasnością.) Bardzo ważną szczegółową cechą

<sup>1</sup> Rozważania dotyczące *input parameters* na poziomie ogólnym mogą okazać się bardzo kontrowersyjne ze względu na to, że trudno jest podać definicję takiego parametru niezależnie od danej teorii. Prowadzi to w prostej linii do wniosku, że wszelka informacja „dostarczana” teorii z zewnątrz (na przykład zadane pewnym równaniom warunki początkowe) stanowi taki „wkład informacyjny” świadczący o efektywności teorii. Dane parametry uzyskują swój status *input parameters* nie tylko w kontekście teorii efektywnej, która się nimi posługuje, ale zawsze w ramach pewnej uszeregowanej struktury, której elementem jest ta teoria. Choć wartości parametrów mogą być pochodzenia empirycznego, ich rozumienie jest warunkowane przez teorię niższego poziomu (to ta teoria je „zadaje”). W ten sposób pojęcie fundamentalności zostaje zrelatywizowane w kontekście danego parametru do specyficznej relacji między teoriami. Na przykład masa elektronu jest taką wartością zadaną dla efektywnej teorii atomów; wartości spinu (choć zrozumiałe z punktu widzenia algebry operatorów obrotu) na poziomie chemii molekularnej funkcjonują już jako *input parameters*, których wartości ta teoria nie poddaje dyskusji.

tego kryterium ograniczonej stosowalności jest to, że teorie efektywne można w praktyce stosować tylko wtedy, jeżeli dane zakresy energii czy odległości dadzą się faktycznie oddzielić.

— Teorie efektywne współlistnieją ze sobą. Można naturalnie dokonywać pewnego porządkowania teorii efektywnych na przykład według malejącej skali odległości i wyodrębnić pewien szereg teorii efektywnych. Stąd wynika kolejna ważna cecha: każda teoria efektywna bazuje na innej teorii efektywnej. Na przykład elektrodynamika kwantowa jest teorią efektywną bazującą i dającą się wyprowadzić z teorii elektroslabej. Ten związek między dwoma następującymi po sobie teoriami może wynikać z przekazywanych danych wejściowych, które wypracowała i wyjaśnia teoria niższego rzędu, a które przejmuje teoria na niej się opierająca. Taką teorią efektywną, która bazuje na innej teorii, charakteryzuje też pojawianie się własności lub prawidłowości, które często nie są redukowalne do własności „poprzedniczki”. Te nowe własności nazywane są emergentnymi. Oprócz własności, ważnymi elementami, które „wylaniają się” w procesie tworzenia nowej teorii, są struktury. W literaturze przedmiotu rozważania na temat teorii efektywnych cechuje zwykle postrzeganie świata fizycznego w kategoriach struktur. Proponuje się nawet wyodrębnienie nowego rodzaju strukturalno–fenomenologicznych teorii efektywnych [Drăgănescu, Roy, Kafatos 2004].

— Bardzo istotnym kryterium porządkowania lub klasyfikowania teorii efektywnych, oprócz wskazywania na skalę odległości lub energii, w jakiej teoria „działa”, jest rodzaj wyjaśniania, a zatem typ wiedzy, jaki uzyskujemy dzięki danej teorii. W kontekście problematyki badanych przez nas w tej pracy modeli kosmologicznych, tym, co specjalnie wyróżnia budowane modele czy stosowane teorie, jest właśnie określenie zamierzonych celów. Zgodnie z przyjętym celem teoria efektywna daje wyjaśnienie badanego zjawiska, ale w zasięgu lokalnym.

[...] Możemy dowiedzieć się z danych astronomicznych, że istnieje ciemna materia. Jeśli jednak ciemna materia składa się z cząstek, ani astronomia, ani kosmologia nie wyjaśnią, jakie to są cząstki, ponieważ metody badawcze kosmologii nie dotyczą własności odróżniających jedną cząstkę od drugiej, takich, jak ich masy czy też ładunki, którymi są obdarzone [Kane 2006, 56].

— Teoria efektywna nie jest teorią fundamentalną. Badając wspomniany szereg wzajemnie warunkujących się i współlistniejących teorii efektywnych w skali malejącej odległości (lub wzrastającej energii), dochodzimy do problemu istnienia teorii fundamentalnej. Może lepiej w tym kontekście byłoby ją nazywać teorią bazową lub teorią finalną, czyli taką, która „kończy” ten szereg w porządku rekonstrukcji, a faktycznie „rozpoczyna” w porządku emergencji. Pojawiają się także w literaturze przedmiotu stanowiska, że porządkowanie poszczególnych dziedzin fizyki według opisujących je teorii efektywnych prowadzi do uzyskania obrazu, któremu odpowiada niekończąca się wieża teorii efektywnych. Pokazuje ona, że obszary objęte przez fizykę cechują odmienne prawa fundamentalne i różna ontologia. Zatem problem ist-

nienia teorii fundamentalnej zakłada zagadnienie fundamentalności jako takiej w fizyce [Cao, Schweber 1993; Schweber 1993; Cao 1999].

Gdzieś w tym wspomnianym wyżej szeregu teorii można wyróżnić teorie, które mają charakter bardziej generalny:

1. Teorie klasyczne: mechanika Newtona i Ogólna Teoria Względności
2. Model Standardowy
3. Proponowane uogólnienia Modelu Standardowego:
  - istnienie dodatkowego wymiaru przestrzennego;
  - istnienie dodatkowych symetrii w 3 wymiarach przestrzennych;
  - Supersymetryczny Model Standardowy: każda cząstka elementarna posiada odpowiadającą jej supersymetryczną cząstkę o takich samych własnościach oprócz masy i spinu.
4. Teoria strun.

Wyjaśnianie bazujące na teoriach efektywnych dokonuje się zatem w ramach struktur. Możliwe jest wyizolowanie zespołu zjawisk i opisywanie wzajemnych zależności bez potrzeby zrozumienia wszystkich składników teorii. Intuicyjnie tę cechę teorii efektywnych wyraził Howard Georgi:

[...] We can divide up parameter space of the world into different regions, in each of which there is a different appropriate description of the important physics. Such an appropriate description of the important physics is an „effective theory”. The two key words here are appropriate and important.

The word „important” is key because the physical processes that are relevant differ from one place in parameter space to another. The word „appropriate” is key because there is no single description of physics that is useful everywhere in parameter space [Georgi 1995].

Stosowanie teorii efektywnych w fizyce dokonuje się zwykle na dwa sposoby nazywane podejściami *bottom-up* i *top-down*.

1. Rekonstruując procedurę *bottom-up*, często zakłada się w ogóle brak teorii, na której ma się opierać poszukiwana teoria efektywna. Określa się zakres skali, w której teoria ma funkcjonować; przyjmuje się istnienie pewnych symetrii i oddziaływań. W przypadku efektywnej teorii pola konstruuje się gęstość lagranżjanu. W przypadku istnienia już pewnej teorii — zwykle innej teorii efektywnej, która jest skuteczna w niższym reżimie energetycznym, a załamuje się w interesującym nas zakresie, bada się nowe oddziaływania między cząstkami, których istnienie zakładają obie teorie. Sytuacja jest inna, gdy na nowym poziomie pojawiają się nie tylko nowe własności i oddziaływania, ale i nowe cząstki, i wymagane jest określenie rodzaju cząstek, ich masy i ładunku. Cały proces w podejściu *bottom-up* ma charakter teoretyczny i eksperymentalny.

2. Podejście *top-down*, to sytuacja istnienia teorii bardziej fundamentalnej i poszukiwania teorii efektywnej, która będzie funkcjonować dla niższych energii.



#### **4. MIEJSCE TEORII EFEKTYWNYCH W HIERARCHICZNEJ STRUKTURZE NAUKI**

Po pierwsze trzeba określić, jaka jest relacja teorii efektywnych do teorii jako takich oraz do modeli. Teoria fizyczna stara się obejmować w zakresie swojej stosowności jak najwięcej zjawisk i przez to, z powodu swojej ogólności, najczęściej bardzo trudno ją wykorzystać w opisie lokalnych zjawisk. Dzięki niej uzyskuje się raczej pewien stopień rozumienia, ale w sensie globalnym, w umiejscowieniu danego faktu fizycznego w szerokim kontekście. Modele natomiast, dzięki stosowanym zabiegom abstrakcji i idealizacji, służą osiągnięciu praktycznych celów: łatwość rachunkowa, wspomniana wcześniej funkcja heurystyczna, lokalne zastosowanie teorii. Niewątpliwą słabość modeli tkwi w sposobie uwzględniania warunków idealizacyjnych. Często dokonuje się to nie tylko teoretycznie, ale i eksperymentalnie — poprzez dopasowanie modelu do wyników pomiarów danego zjawiska. Wydaje się, że teorie efektywne przejawiają zalety zarówno teorii, jak i modeli. S. Hartmann wskazuje na te funkcje, badając efektywne teorie pola:

Like models, they provide a local, intuitive account of a given phenomenon in terms of freedom which are relevant at the energy scale under consideration. They are relatively easy to solve and to apply, and they are heuristically useful. This is demonstrated by the Fermi theory and the V—A theory which eventually led to Standard Model, as well by the EFTs which are used to test the low-energy regime of a future quantum theory of gravity. Like theories, EFTs are part of a bigger picture or framework, from which they can be derived in a controlled way. They help to make predictions and to test the theory they relate to. EFTs avoid the disadvantages of theories of being 'too far away' from the phenomena. [Hartmann 2001].

Hartmann zauważa, że niekiedy trudno jest dokonać rozróżnienia między teorią efektywną a modelem. Teoria efektywna rzeczywiście utożsamia się z modelem, gdy jej związek z teorią naukową, na której się opiera, nie jest ściśle dedukcyjny. Stwierdzana identyczność dotyczy jednak także tylko ostatecznej postaci formalizmu, natomiast załamuje się, gdy rekonstruuje się proces uzyskiwania modelu i teorii efektywnej. Model znacznie częściej tworzony jest przy dużym udziale wyników doświadczeń.

#### **5. LCDM (CDM) MODELEM KOSMOLOGICZNYM W SENSIE ŚCISŁYM — SPOJRZENIE OGÓLNE**

Zobaczymy, w jaki sposób faworyzowany obecnie przez dane obserwacyjne model standardowy współczesnej kosmologii realizuje wyróżnione w pierwszej części pracy podstawowe funkcje modelu teoretycznego.

### Funkcja badania własności teorii

Pierwszą ważną cechą teorii, której modelem jest LCDM (jak i CDM), wyznacza wielość modeli, dających się zbudować w oparciu o teorię grawitacji Einsteina. W opisie relacji między teoriami a ich modelami ważną rolę pełni twierdzenie o izomorfizmie. „Żadna teoria nie może mieć tylko jednego modelu, gdyż każda dziedzina izomorficzna z dziedziną będącą modelem teorii jest również modelem tej teorii” [Hajduk 1972]. Teorie empiryczne zawierają także modele nieizomorficzne (mówimy, że nie są teoriami kategorycznymi) i tym samym właściwie nie jest możliwe, mimo bogactwa modeli, wyznaczenie całej zawartości treściowej danej teorii. Istnieje możliwość zastosowania teorii grawitacji Einsteina w różnych konkretnych przypadkach: gwiazdy neutronowe, czarne dziury itp. Różnorodność aplikacji wewnętrznie cechy teorii.

Można zaryzykować stwierdzenie, że mówiąc o modelach kosmologicznych, nie mamy na myśli tylko modeli teorii grawitacji (proces pierwotnej nukleosyntezy jest modelem fizyki jądrowej). Kosmologia jest z definicji „zlepkiem” bardzo wielu modeli fizyki, ponieważ jest ona ekstrapolacją na cały Wszechświat. Pytanie o relacje strukturalne między modelami w ramach teorii pozostaje otwarte. Istnieje pewna struktura dziedziczona po teorii względności (Heller); warto także wspomnieć o bardzo oryginalnym dopatrywaniu się struktur łączących teorie między sobą i ich modele [Tegmark 2007]. M. Tegmark proponuje, by relacje między różnymi teoriami (OTW, kwantowa teoria pola, STW, nierelatywistyczna mechanika kwantowa, mechanika klasyczna, fizyka cząstek elementarnych), rekonstruować w postaci swobodnego drzewa (*family tree*), gdzie obowiązuje pewna hierarchia. Przejście między dwoma teoriami sąsiadujących poziomów dokonuje się przez aproksymację graniczną jednej ze stałych fizycznych.

Oto kilka przykładów:

- OTW  $\Rightarrow$  STW, przy  $G \rightarrow 0$
- Kwantowa Teoria Pola  $\Rightarrow$  STW, przy  $\hbar \rightarrow 0$ ;
- Kwantowa Teoria Pola  $\Rightarrow$  Nierelatywistyczna Mechanika Kwantowa, przy  $c \rightarrow \infty$ ;
- Nierelatywistyczna Mechanika Kwantowa  $\Rightarrow$  Mechanika Klasyczna, przy  $\hbar \rightarrow 0$ ;
- Poszukiwana teoria bazowa dla OTW i Kwantowej Teorii Pola  $\Rightarrow$  OTW (przy  $\hbar \rightarrow 0$ );  $\Rightarrow$  Kwantowa Teoria Pola (przy  $G \rightarrow 0$ );

Sądzymy, że w takim podejściu (*przejście graniczne*) kryją się pewne intuicje mechanizmów wyłaniania się emergentnych teorii efektywnych z teorii bardziej fundamentalnych.

We współczesnych dyskusjach ograniczeń OTW ważną rolę odgrywają tzw. wartości Plancka, które są kombinacją 3 stałych fundamentalnych:  $c$  — prędkości światła,  $G$  — stałej grawitacji oraz  $\hbar$  — stałej Plancka:  $x_{\text{Pl}} = c^\alpha G^\beta \hbar^\gamma$ , gdzie odpo-

wiedni wybór stałych  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  wyznacza wymiary: długości, czasu i gęstości. Współcześnie wielkości Plancka są powiązane z kwantowymi ograniczeniami OTW. Choć wielkości te zostały wprowadzone przez Plancka, ich powiązanie z kwantowymi ograniczeniami w stosowalności teorii klasycznej grawitacji zostało odkryte w roku 1938 przez rosyjskiego teoretyka Matwieja P. Bronsteina (1906-1938). Bronstein skonstruował sześcian, w którego węzłach umieścił teorie fizyczne. W jednym z wierzchołków sześcianu zlokalizował poszukiwaną kwantową teorię grawitacji.<sup>2</sup>

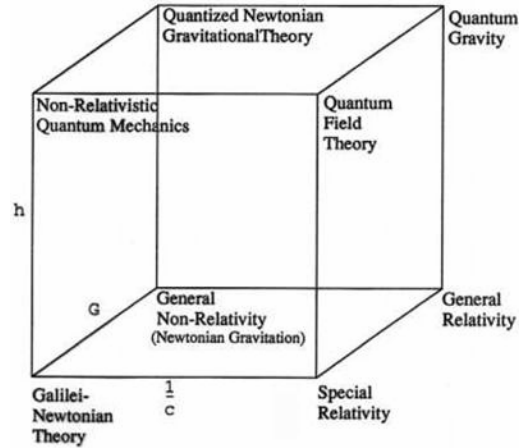
Przejsie pomiędzy teoriami jest przejściem granicznym do zera ze stałymi  $h$ ,  $G$ ,  $\frac{1}{c}$ .

Przykładowo, gdy  $\frac{1}{c} \rightarrow 0$  (albo  $c \rightarrow \infty$ ), Szczególna Teoria Względności „redukuje się” do mechaniki klasycznej opartej na symetrii Galileusza.<sup>3</sup>

---

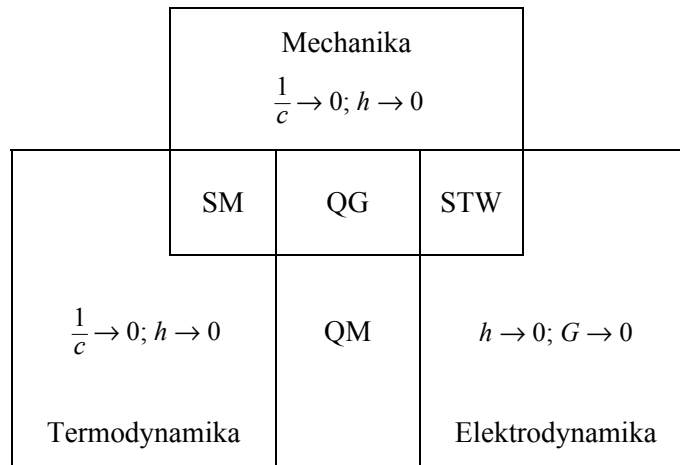
<sup>2</sup> Trzeba zwrócić uwagę, że ten wniosek Bronsteina jest skrajnym uproszczeniem relacji między dwiema następującymi po sobie teoriami. Prace m.in. Kuhna i Ajdukiewicza pokazały, że równania ruchu w STW redukują się w przypadku granicznym do równań Newtona (są formalnie takie same), ale w rzeczy samej nie są to równania Newtona (dotyczy to analogicznie redukcji teorii swobodnego spadku Galileusza do teorii grawitacji Newtona). Pojawia się tu bardzo ważna kwestia nazywana w filozofii nauki niewspółmiernością teorii. Podobieństwo formalne równań jest pozorne z racji tego, że podstawowe terminy („masa” w teoriach Newtona i Einsteina i „przyspieszenie” u Galileusza i Newtona) są w inny sposób zdefiniowane. Pojawia się naturalnie problem statusu jednakowych rezultatów liczbowych uzyskiwanych przez dwie niewspółmierne teorie, co pokażą także prace na temat mocy wyjaśniającej modeli LCDM i CDM, które są nierozróżnialne na podstawie bazy empirycznej dostępnej w latach 90. Ogólny wniosek jest taki: w przypadkach granicznych korzysta się z formalnej analogii między równaniami dwóch teorii, które mogą być jednak niewspółmierne i w sensie ścisłym nieredukowalne do siebie. Pojawiają się różne próby rozwiązania problemu niewspółmierności, do których należy zaliczyć eksplikacyjną koncepcję reguł pomocowych [Paprzycka 2005] lub tłumaczenie relacji między dwiema teoriami w kategoriach emergencji. Biorąc pod uwagę te zastrzeżenia, o tym, co „dzieje się” z równaniami dwóch teorii bliskich sobie (jeśli chodzi o obszar stosowania) w przejściach granicznych, trzeba mówić z dużą ostrożnością.

<sup>3</sup> W metodologii nauk wskazuje się jeszcze na inne rozumienie relacji „redukcji” między teoriami. Wyróżnia się teorię redukującą i redukowaną. Właściwe byłoby powiedzenie, że STW „redukuje” teorię Newtona, a nie „redukuje się do” niej.



Rys. 1. Sześcian Bronsteina

Inną poglądową ilustracją emergencji nowych teorii fizycznych jest pogląd, że nowe teorie powstają na styku znanych teorii fizycznych i motywowane są przez problemy brzegowe. Rozważmy 3 teorie efektywne: mechanikę, termodynamikę oraz elektrodynamikę. Teorie te doskonale opisują obszary zjawisk mechanicznych, cieplnych i elektromagnetycznych.



Rys. 2. Teorie fizyczne a problemy brzegowe

Na styku każdych dwóch z tych teorii powstały: mechanika kwantowa (QM), szczególna teoria względności (STW) oraz mechanika statystyczna (SM). Kwantowa

gravitacja jest obszarem zjawisk leżących na przecięciu mechaniki, elektrodynamiki i termodynamiki. Zachodzi również relacja: termodynamika jest emergentna w stosunku do mechaniki statystycznej, elektrodynamika jest emergentna w stosunku do STW; tak samo jak mechanika klasyczna w stosunku do STW oraz do mechaniki statystycznej. Mechanika, elektrodynamika i termodynamika są emergentne w stosunku do kwantowej gravitacji w zależności od przejścia granicznego.

Gdy fizyk mówi o teorii Wszechświata, to składnikami tej teorii są raczej różne modele niż uniwersalne prawa, które z kolei odnoszą się raczej do rdzenia tej teorii — OTW. Z jednej strony jest to próba opisu globalnego Wszechświata, a z drugiej modele są stosowane do opisu jego fragmentów, np. różnych epok w ewolucji Wszechświata, w których różne procesy fizyczne posiadały znaczenie, podczas gdy inne można było pominąć. Przedmiotem może nie eksperymentu, ale obserwacji może być „cały Wszechświat” — na przykład ekspansja jest efektem globalnym, fala gravitacyjna jest drganiem całej przestrzeni.

### **Funkcja heurystyczna**

Modele są rzeczywiście interpretacją różnych teorii fizycznych w granicach przyjętych przez idealizacje, ale również w konkretnych warunkach, w których te procesy fizyczne się rozgrywają. Stąd ważne są warunki początkowe, dla których rozwiązania równań są interpretowane. Ogromną rolę odgrywają symulacje numeryczne, np.  $n$ -ciałowe symulacje struktur wielkoskalowych. Często zakłada się w tych symulacjach opis newtonowski, co jest uproszczeniem, ale nawet już takie modele odsłaniają nowe cechy teorii Wszechświata opisującej wielkoskalowy rozkład struktur we Wszechświecie (galaktyki, gromady galaktyk, ściany, pustki itd.). Tego typu modele nie są już zubożeniem teorii, lecz wnoszą do niej istotne elementy, których nigdy nie bylibyśmy w stanie poznać, nie opierając się na uproszczeniach. Kosmologowie twierdzą, że różne procesy fizyczne posiadają różne skale czasowe, co uzasadnia, że pewne parametry czy oddziaływania można bez szkody zaniedbać. Przykładowo — oddziaływania elektromagnetyczne można zaniedbać, gdy zajmujemy się badaniem ewolucji Wszechświata. Natomiast gdy interesuje nas pole magnetyczne pulsara, takie oddziaływania są ważne. Trzeba również pamiętać, że procesy astrofizyczne, zachodzące nie w skali kosmologicznej, mają istotne znaczenie dla samej kosmologii.

### **Funkcja testowania teorii**

Skonstruowane modele kosmologiczne powinny sformułować pewien system obserwabli. Wszystkie obserwable można w zasadzie podzielić na dwie kategorie:

- obserwable kinematyczne,
- obserwable dynamiczne.

Obserwable kinematyczne należą do tzw. obszaru kosmologii, gdzie interesujemy się nie dynamiką procesów, lecz czysto kinematycznym opisem w oparciu o sygnały świetlne. Przy wyprowadzaniu tych obserwabli korzystamy tylko ze struktury geometrycznej modelu. Śledzimy drogę fotonu, który rozchodzi się wzdłuż geodezyjnych zerowych ( $ds^2 = 0$ ). Tzw. diagram Hubble'a — zależność odległości jasnościowej od *redshiftu* — należy do metod kosmograficznych, tak samo jak i pomiar rozmiarów kątowych  $\theta$  radiogalaktyk jako funkcji *redshiftu*. Natomiast już widmo mocy promieniowania relikтового z obecnością charakterystycznych pików dopplerowskich należy zaliczyć do obserwabli dynamicznych.

Innym bardzo dobrze przetestowanym obszarem kosmologii jest proces pierwotnej kosmogenez. By zaszedł w przeszłości taki proces, muszą na tym etapie ewolucji Wszechświata panować bardzo określone warunki (temperatura, tempo ekspansji).

Należy podkreślić, że ostatnio w kosmologii mówi się nie tylko o testowaniu modeli kosmologicznych, lecz również o ich selekcji. W sytuacji, gdy mamy wiele konkurencyjnych hipotez (np. hipoteza ciemnej energii) i nie jesteśmy przekonani co do jednej z nich, możemy dokonywać selekcji modeli w oparciu o bayesowskie metody selekcji [Szydłowski, Kurek 2007]. Metody te nie wskazują na *prawdziwy* model, lecz najlepszy model z punktu widzenia danych obserwacyjnych, którymi dysponujemy. Metody te dają argumenty za włączeniem nowego parametru do modelu przy aktualnych danych obserwacyjnych.

## 6. CECHY CHARAKTERYSTYCZNE MODELU LCDM — EFEKTYWNEJ TEORII WSZECHŚWIATA

Model LCDM jest nadbudowany na klasycznej einsteinowskiej teorii grawitacji, która jest teorią operującą powyżej granicy Plancka. Powszechnie uważa się, że dla rozmiarów mniejszych od granicy Plancka teoria ta winna być zastąpiona przez teorię kwantową. Trudno dzisiaj powiedzieć, że dysponujemy taką w pełni zadowalającą teorią, chociaż pewne nadzieje są związane z tzw. pętlową teorią grawitacji (Bojowald, Astekhar, Lewandowski) czy też teorią tzw. dynamicznych triangulacji (Loll, Ambjörn, Jurkiewicz). Teorie kwantowej grawitacji traktują klasyczną grawitację Einsteina jako teorię emergentną, a przez to fenomenologiczną, w stosunku do bardziej fundamentalnej teorii kwantowej z dyskretną czasoprzestrzenną strukturą. Przejście przez granicę planckowską odpowiada emergencji czasoprzestrzeni jako ciągłego kontinuum.

Jest interesujące, że teoria klasycznej grawitacji sama z siebie manifestuje „obciążenia” na małych rozmiarach, kiedy efekty kwantowe stają się już tak istotne, że nasz opis przestaje być poprawny. Szydłowski i Golbiak uważają, że tzw. osobliwości początkowe, pojawiające się w rozwiązaniach równań kosmologicznych, są wewnętrzną manifestacją *obciążenia* teorii na pewnych rozmiarach [Szydłowski, Golbiak 2005].

Ogólna Teoria Względności jest teorią efektywną, która nie wyjaśnia, w jaki sposób powstała struktura czasoprzestrzenna, tylko ją zakłada. Koncepcje tzw. kwantowej kosmogenezy dostarczają mechanizmów powstania C–P. Przykładowo teoria Hawkinga–Hartle’a opisuje, w jaki sposób powstał wszechświat kwantowy z punktu, w którym pojęcie C–P nie miało sensu. Koncepcja Vilenkina opisuje emergencję klasycznej C–P jako kwantowy efekt tunelowania [Golbiak 2007].

W zasadzie z punktu widzenia emergentysty pojawienie się nowej własności systemowej zakłada zawsze istnienie innej własności, która stanowi bazę dla jej emergencji [Poczobut 2006, s. 28]. Wobec tego nie może istnieć coś, co chcemy nazwać emergencją *ex nihilo*. O takiej emergencji mówią S.W. Hawking i J. Hartle czy też Vilenkin, gdy deklarują, że konstruują model kwantowy powstania Wszechświata *ex nihilo*. Okazuje się, że zawsze można znaleźć to coś, z czego wyłania się nowa własność systemowa (wszechświat klasyczny).

W opisie fizycznym zawsze będzie tendencja do uwalniania się od opisu fenomenologicznego i poszukiwania teorii emergentnych, które wyjaśniają te pojęcia (parametry) na podstawie bardziej fundamentalnej teorii, która także posiada elementy fenomenologiczne, i tak w nieskończoność. Jeśli istnieje granica takiego procesu konstruowania nowych teorii coraz bardziej fundamentalnych, to mogłaby to być TOE (*Theory of Everything*), lecz taka teoria byłaby całkowicie nieoperatywna ze względu na jej obliczeniową złożoność [Sokołowski 2006]. Byłaby ona swoistym ornamentem barokowym, który moglibyśmy podziwiać, lecz nie dokonywać predykcji za jej pomocą.

Efektywny charakter modelu LCDM (CDM) może być w pewnym sensie dziedziczny po einsteinowskiej teorii grawitacji, którą niektórzy traktują dzisiaj nie jako samodzielne fundamentalne oddziaływanie, będące na poziomie klasycznym Ogólną Teorią Względności, lecz jako zjawisko emergentne, które się wyłoniło w procesie wygładzania i uśredniania analogicznego do wyłonienia się termodynamicznego opisu z mechaniki statystycznej. Również sama czasoprzestrzeń jest traktowana jako obiekt emergentny posiadający pewną nieznaną strukturę mikroskopową (np. podobną do tej, którą proponuje pętlowa teoria grawitacji).

Do pewnego momentu wyobrażano sobie, że einsteinowskie równania pola grawitacyjnego są czymś zupełnie wyjątkowym i niepowtarzalnym; dopóki nie odkryto, że analogicznymi równaniami są opisywane procesy hydrodynamiczne zachodzące w cieczach (które składają się z atomów) [Sokołowski 2006]. Podobne poglądy były przywoływane od wielu lat w kontekście dyskusji o bezsensowności konstruowania kwantowej teorii grawitacji poprzez kwantowanie OTW. Dopiero jednak ostatnio zyskały one trwałe podstawy, gdy przekonaliśmy się, że istnieją analogony tych równań w odległych często obszarach. Rozwija się dzisiaj żywo nowa dziedzina fizyczna — „Analogiczna Grawitacja” (*Analogue Gravity*), w której pojawiają się niespodziewane odpowiedniki obiektów przewidywanych przez OTW (czarne dziury) [Barcelo 2005; Visser, Weinfurtnner 2007].

W kosmologii bada się problem *how many parameters* (Liddle, Szydlowski, Kurek). Chodzi o wydobycie metodami bayesowskimi istotnych parametrów modelu z punktu widzenia obecnych danych obserwacyjnych. Parametry te można by uznać za parametry efektywne kosmologii, lecz musimy pamiętać, że teoria grawitacji jako taka może być emergentna w stosunku do teorii bardziej fundamentalnej. Ta bardziej fundamentalna teoria może być jakościowo nowym opisem, który nie jest już reprezentowany przez dodatkową liczbę. Przykładowo, jeśli ciągle kontinuum „wyłania się” z pętlowej grawitacji, poprawki mogą być funkcjami, a więc obiektami funkcjonalnymi o nieskończonej liczbie parametrów.

Dzień 12 lutego 2003 r., kiedy *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* [WMAP] ogłosiło wyniki bazujące na jednorocznych obserwacjach [Bennett *et al* 2003; Hinshaw *et al* 2003; Kogut *et al* 2003; Peiris *et al* 2003; Spergel *et al* 2003], jest uważany za początek *golden age* w kosmologii. Obserwacje te umożliwiły wyznaczenie aż 22 parametrów. Rodzi się wówczas koncepcja minimalnego modelu kosmologicznego opartego na 6 parametrach ( $\tau$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.05$ ,  $\omega_d$ ,  $\omega_b$ ,  $A_s$ ,  $n_s$ ) [Tegmark *et al* 2004]. Parametry te określają tzw. *vanilla model* Wszechświata. Model ten można zdefiniować za pomocą kilku parametrów, których pomiar jest możliwy przez WMAP, jeśli przyjmujemy określone założenia teoretyczne. „Waniliowy” model Wszechświata (*Vanilla Cosmology*) można opisać następująco:

- około 25% ciemnej materii, która jest zimna (nierelatywistyczna);
- około 75% ciemnej energii, której gęstość nie zmienia się z ewolucją Wszechświata;
- OTW jest teorią obowiązującą na dużych skalach;
- gaussowskie adiabatyczne widmo pierwotnych fluktuacji z gładkim monotonicznym widmem mocy oddającym formowanie się struktur we Wszechświecie.

Oczywiście „waniliowy” model Wszechświata (nie każdy lubi lody waniliowe) nie jest uważany za ostateczny i toczą się dyskusje nad pogłębieniem tego modelu. W szczególności na jego rozwinięcie wpłynie uzyskanie odpowiedzi na następujące pytania:

- (1) Czy ciemna energia jest stałą kosmologiczną?
- (2) Czy OTW jest słusznym (poprawnym) opisem grawitacji w skalach horyzontu?
- (3) Jak jednorodny i izotropowy jest Wszechświat?
- (4) Czy ciemna materia jest zimna?
- (5) Czy możliwy jest nie-gaussowski charakter fluktuacji?
- (6) Czy ciemna energia jest fluidem czy też ciemną grawitacją?
- (7) Czy LCDM może być zastąpiony przez samooddziałujące pola skalarne (koncepcja kwintesencji)?

Od odpowiedzi na te pytania zależeć będzie „smak” *vanilla cosmology* w przyszłości.



Wydaje się, że model LCDM wyczerpuje główne założenia charakterystyki teorii efektywnych, podanej w sekcji drugiej tej pracy, również w odniesieniu do posługiwania się tzw. *danymi/parametrami wejściowymi (input parameters)*; na przykład parametr gęstości dla materii barionowej  $\Omega_{b,0} = 0.05$ , einsteinowska stała grawitacji

$$\kappa = \frac{8\pi G}{c^4} \rightarrow 0, \text{ ale przede wszystkim znaczenie wartości stałej kosmologicznej.}$$

W tej teorii dane wejściowe są zafiksowanymi parametrami. Parametry efektywne są w przypadku LCDM dopasowywane z danych obserwacyjnych, a teoria bardziej fundamentalna określi wartość stałej kosmologicznej.

Teoria LCDM ma ograniczoną aplikowalność, np. do epoki ciemnej energii, która opisuje akcelerację Wszechświata. Wcześniejsza epoka, dla  $z > 0.6$ , jest fazą dominacji materii nad ciemną energią. Dla dużych  $z$  efekty  $\Lambda$  są zaniedbywalne, a obowiązuje model CDM. Można powiedzieć, że  $\Lambda$  wyłania się dla  $z_{trans} \approx 0.6$ .

## 7. DODATEK: UWAGI OGÓLNE DOTYCZĄCE ROZWOJU NAUKI

Rozważania powyższe na temat roli modeli/teorii efektywnych w fizyce, przeprowadzone w szczególnym kontekście modeli kosmologicznych, prowokują do wielu interesujących wniosków dotyczących dynamiki rozwoju nauki w ogólności. W tym paragrafie, wykraczając poza główny nurt tematyczny pracy, spróbujemy sformułować najważniejsze naszym zdaniem intuicje z tym związane. Wielu autorów zwraca uwagę na istotną rolę procesów nieliniowych, które odgrywają rolę w procesie rozwoju nauki. Wymieńmy tylko niektórych: Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, *Z chaosu ku porządkowi*, PIW, Warszawa 1990; Ilya Prigogine, *The Die is not cast*, [w:] *Letters to future generation*, Unesco Publ: 1999, s. 133-140; Michał Heller, *Szczęście w przestrzeniach Banacha*, ZNAK, Kraków 1995 — bifurkacyjny model rozwoju wiedzy [także M. Heller, *Filozofia nauki*, Kraków 1994]; M. Szydłowski, A. Krawiec, „Układy dynamiczne w modelowaniu rozwoju nauki”, *Postacie prawdy* 3, red. A. Jonkisz, Katowice 1999.

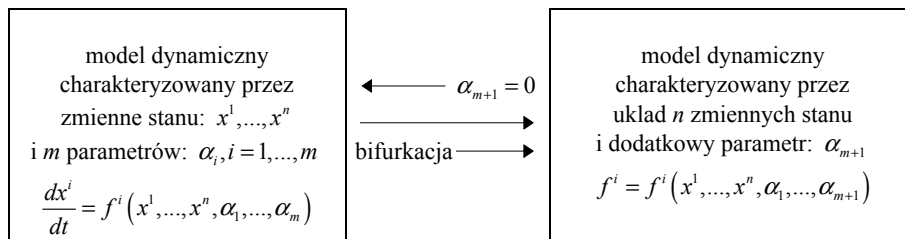
Nauka jest niewątpliwie układem złożonym, ale takie układy dają się badać również metodami samej nauki. Wyobraźmy sobie, że udało nam się uchwycić pewne wskaźniki jej rozwoju, tzw. zdefiniować, być może operacyjnie, układ wielkości, które budują pewien wektor charakteryzujący jednoznacznie stan nauki w danej chwili. Czyli możemy te stany rozważać w pewnej przestrzeni stanów — przestrzeni fazowej. Zmiana stanu układu (zakładamy) odbywa się według pewnych reguł deterministycznych. Powiedzmy, że tempo zmian stanu układu będzie zależęć od samego stanu tego układu. Matematycznym modelem takiej ewolucji jest tzw. układ dynamiczny. Przy pewnych rozsądnych założeniach ciągłości rozwoju nauki oraz gładkości jej ewolucji (w każdej chwili jest dobrze określone jej tempo zmian) możemy wnioskować, że ścieżki ewolucyjne rozwoju nauki istnieją i są wytyczone jednoznacznie poprzez warunki początkowe — początkowy stan nauki. W ten sposób

dynamika jest w ustalonej chwili zadana przez układ równań na tempo zmian składowych stanu układu. W ogólności prawe strony tych równań — a stąd globalna dynamika układu w przestrzeni fazowej — mogą zależeć od pewnych parametrów (oczywiście wcześniej zadaliśmy o precyzyjne określenie równoważności globalnych dynamik mającej postać równoważności topologicznej). Teraz możemy zdefiniować, co znaczą „dramatyczne zmiany” reżimów dynamicznych i pytać, przy jakich wartościach parametrów mają one miejsce. Jest to pytanie o bifurkacje modelu zależnego od parametrów.

W wymienionym liście Prigogine polemizuje ze znanym francuskim historykiem Fernandem Braudem i jego stwierdzeniem: „*events are dust*”. Od razu narzuca mu się analogia do bifurkacji układu jako zaprzeczenie powyższej tezy. Dla Prigogine’a bifurkacje odgrywały bardzo istotną rolę w badaniach termodynamicznych układów otwartych — dalekich od równowagi. W takich układach możliwe jest powstawanie struktur i samoorganizacja.

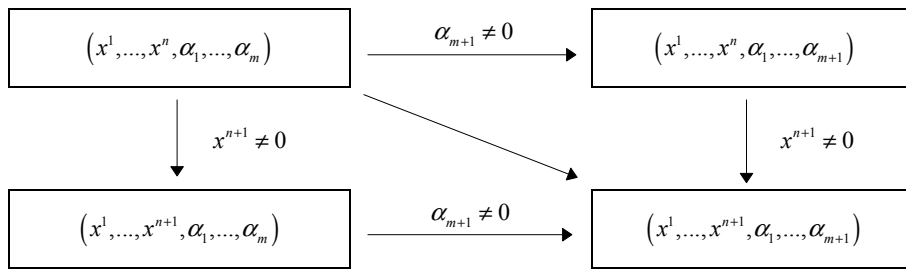
Bifurkacje pojawiają się jako szczególne punkty, w których trajektorie rozszczepiają się na gałęzie. Wszystkie gałęzie są możliwe, ale jedna z nich jest wybierana. Można tutaj dostrzec bezpośrednią analogię do procesu rozwoju nauki, która wybiera jedną ścieżkę ewolucyjną, którą podąża, zrzucając inne. To, co wydaje się najtrudniejsze w uchwyceniu dynamiki tego procesu, to parametr kontrolny, którego zmiana wyznacza bifurkacje. W hydrodynamice cieczy lepkiej rolę takiego parametru pełni liczba Reynoldsa (niezmiennik równania Naviera–Stokesa). Co jest parametrem bifurkacyjnym w rozwoju nauki, jest pytaniem otwartym. Dopóki nie uchwycimy tego parametru, bifurkacyjny model rozwoju nauki jest bardziej marzeniem niż modelem nauki.

Nasze badania w dziedzinie emergencji modelu dają pewne nadzieje, że taki parametr istnieje. Z badań przejścia od modelu CDM do LCDM wynika, że przejście to może być opisane jako przejście bifurkacyjne z wartością stałej kosmologicznej od zera dla modelu CDM do wartości niezerowej w modelu LCDM. W wyniku przejścia (emergencji) uzyskujemy model z dodatkowym niezerowym parametrem — wzbogacającym efektywną teorię Wszechświata o wyjaśnienie w jej ramach obserwowanej akceleracji. Schematycznie możemy ten typ emergencji opisać następująco:



W powyższym schemacie przyjęliśmy ukryte założenie, że cały czas mamy do czynienia z układem, w którym z góry zadana jest przestrzeń stanu. To założenie wy-

daje się dużym uproszczeniem; sam model geometryczny również może być zastąpiony poprzez ogólniejszy, a to oznacza, że może ulec „podbiciu” liczba zmiennych charakteryzujących stan układu. Dlatego, gdy myślimy o emergencji modelu CDM, należałoby rozważać emergencję ortogonalną w kierunku zwiększania ilości zmiennych stanu. Załóżmy, że odbywa się ona jak poprzednio w kolejnych krokach. Oznacza to uzupełnienie powyższego schematu z uwzględnieniem wyjścia poza model.



Rys. 3 Rozkład emergencji układu na ortogonalne składowe w jednym kroku

## 8. PODSUMOWANIE

W pracy pokazaliśmy, że współczesna kosmologia posługuje się efektywnymi modelami teoretycznymi, podczas gdy teorie naukowe służą do ich konstrukcji. Modele teoretyczne często nie są ani eleganckie, ani konceptualnie proste, które to cechy są przypisywane raczej teorii ostatecznej, a nie efektywnej teorii emergentnej, w której te własności są zagubione. Analiza praktyki badawczej współczesnej kosmologii pokazuje, że różne autonomiczne modele teoretyczne umożliwiają planowanie przyszłych obserwacji, testów i eksperymentów oraz misji satelitarnych, a także rozwiązania sytuacji problemowych powstałych jako wynik tych badań.

Podaliśmy argumenty za tym, że standardowy model kosmologiczny, z ciemną zimną materią oraz stałą kosmologiczną, jest efektywnym modelem opisu obecnej przyspieszonej fazy ekspansji Wszechświata. Z kolei, jeśli przesuniemy się do bardziej odległej przeszłości Wszechświata (do epoki rekombinacji), to rolę efektywnego modelu pełni tzw. „waniliowy” model, od którego głównie wymaga się, by dawał przewidywania zgodne z obserwacjami, pozostawiając elegancję i prostotę konceptualną samej teorii (nawet teorii ostatecznej).

Zwracamy uwagę, że efektywny charakter kosmologii opartej na einsteinowskiej grawitacji może być podyktowany tym, że sama ta teoria jest postrzegana dzisiaj jako pewna teoria efektywna, która opisuje grawitację jako zjawisko emergentne, wyłaniające się w procesie wygładzania czy uśredniania teorii bardziej fundamentalnej. Jako argument za tym, że grawitacja jest zjawiskiem emergentnym, podawane są przykłady zjawisk opisywanych przez OTW poza nią w fizyce fazy skondensowanej

oraz hydrodynamice, co pokazuje, że zjawiska grawitacyjne opisywane teorią Einsteina nie są aż tak bardzo specyficzne, jakby się mogło wydawać.

### LITERATURA

1. [Barceló 2005] Barceló C., „Analogue Gravity”, *Living Rev. Relativity* 8 (2005) 12, [<http://www.livingreviews.org/lrr-2005-12>].
2. [Bennett et al 2003] Bennett C.L. et al., „First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Preliminary Maps and Basic Results”, *Astrophys. J. Suppl.* 148 (2003) 1, [[astro-ph/0302207](http://arxiv.org/abs/astro-ph/0302207)].
3. [Castellani 2000] Castellani E., „Reductionism, Emergence, and Effective Field Theories” *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.* 33 (2002) 2, 251-267.
4. [Cao, Schweber 1993] Cao T.Y., Schweber S.S., „The Conceptual Foundations and the Philosophical Aspects of Renormalization Theory”, *Synthese* 97 (1993), 33-108.
5. [Cao 1999] Cao T.Y., „Why are we philosophers interested in quantum field theory?”, w: T.Y. Cao (red.), *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory*, Cambridge: Cambridge University Press (1999), s. 28-33.
6. [Coles 2005] Coles P., „The State of the Universe”, *Nature* 433 (2005), 248-256.
7. [Drăgănescu, Roy, Kafatos 2004] Drăgănescu M., Roy S., Kafatos M., „Effective Theories and the Phenomenological Information” [<http://noesis.racai.ro/Noesis2004/>].
8. [van Fraassen 1989] van Fraassen B., *Laws and Symmetry*, Clarendon Press — Oxford 1989.
9. [Georgi 1994] Georgi H., „Effective field theory”, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 43 (1995), 209-252.
10. [Golbiak 2007] Golbiak J., *Początek świata w kosmologii kwantowej*, praca doktorska, KUL Lublin 2007.
11. [Grobler 2006] Grobler A., *Metodologia nauk*, Aureus Znak Kraków 2006.
12. [Hajduk 1972] Hajduk Z., „Pojęcie i funkcja modelu”, *Roczniki Filozoficzne* 20 (1972) 3, 77-124.
13. [Hartmann 2001] Hartmann S., „Effective Field Theories, Reductionism and Scientific Explanation”, *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.* 32 (2001) 2, 267-304.
14. [Hinshaw et al 2003] Hinshaw G. et al., „First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Angular Power Spectrum”, *Astrophys. J. Suppl.* 148 (2003) 135, [[astro-ph/0302217](http://arxiv.org/abs/astro-ph/0302217)].
15. [Kane 2006] Kane G., *Supersymetria, Supersymetryczne cząstki i odkrywanie podstawowych praw przyrody*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2006.
16. [Kogut et al 2003] Kogut A. et al., „Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) First Year Observations: TE Polarization”, *Astrophys. J. Suppl.* 148 (2003) 161, [[astro-ph/0302213](http://arxiv.org/abs/astro-ph/0302213)].
17. [Morrison] Morrison M., „Modeling Nature: Between Physics and the Physical World”, *Philosophia Naturalis* 54, 65-85.
18. [Morrison 2006] Morrison M., „Approximating the Real: The Role of Idealizations in Physical Theory” w: *Idealization XII: Correcting the Model, Idealization and Abstraction in the Sciences*, Poznań Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities 86 (2006).
19. [Nagel 1961] Nagel E., *Struktura nauki*, PWN Warszawa 1961.
20. [Paprzycka 2005] Paprzycka K., *O możliwości antyredukcjonizmu*, Wydawnictwo Naukowe Semper, Warszawa 2005.

21. [Peiris et al 2003] Peiris H. V., et al, „First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Implications for Inflation”, *Astrophys. J. Suppl.* 148 (2003) 213, [astro-ph/0302225].
22. [Poczobut 2006] Poczobut R., „System — Struktura — Emergencja”, w: *Struktura i Emergencja*, wyd. M. Heller, J. Mączka, Biblos 2006.
23. [Redhead ] Redhead M., „Models in Physics”, *The British Journal for the Philosophy of Science* 31 (1980) 2, 145-163.
24. [Schweber 1993] Schweber S. S., „Physics, Community and the Crisis in Physical Theory”, *Physics Today* (1993), Nov., 34-40.
25. [Smith 2001] Smith S. R., „Models and the Unity of Classical Physics: Nancy Cartwright’s Dappled World”, *Philosophy of Science* 68 (2001), 456-475.
26. [Sokołowski 2006] Sokołowski L. M., „Teorie efektywne i Emergencja fizycznego obrazu świata”, w: *Struktura i Emergencja*, wyd. Heller M., J. Mączka, Biblos 2006.
27. [Spergel et al 2003] Spergel D. N. et al, „First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters”, *Astrophys. J. Suppl.* 148 (2003) 175, [astro-ph/0302209].
28. [Suppe 1989] Suppe F., *The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism*, Chicago 1989.
29. [Suppes 1967] Suppes P., *Set-Theoretical Structures in Science*, Stanford 1967.
30. [Szydłowski, Golbiak 2005] Golbiak J., Szydłowski M., „Trudności kosmologii klasycznej motywacją dla kosmologii kwantowej”, *Filozofia Nauki* 51 (2005) 3, 39-55.
31. [Szydłowski, Kurek 2007] Szydłowski M., Kurek A., „The LambdaCDM model on the lead — a Bayesian cosmological models comparison” [astro-ph/0702484].
32. [Szydłowski 2006] Szydłowski M., „Cosmological zoo — accelerating models with dark energy” [astro-ph/0610250v1].
33. [Tegmark et al 2004] Tegmark M. et al, „Cosmological parameters from SDSS and WMAP”, *Phys. Rev. D* 69 (2004) 103501, [astro-ph/0310723].
34. [Tegmark 2007] Tegmark M., „The Mathematical Universe”, *Found. Phys.* April 7 2007 [grqc/0704.0646v2].
35. [Visser, Weinfurtner 2007] Visser M., Weinfurtner S., „Analogue spacetimes: Two models for quantum gravity”, [arxiv:0712.0427].
36. [Zaidler 2007] Zaidler P., „Modele teoretyczne jako narzędzia badawcze nauk empirycznych”, wykład na Ogólnopolskim Interdyscyplinarnym Seminarium Naukowym z Filozofii Przyrody i Nauk Przyrodniczych, 15 lutego 2007 KUL Lublin.