Struktura kosmicznej sieci

Pajęczyna utkana z ciemności

WOJCIECH A. HELLWING
Institute for Computational Cosmology
Uniwersytet w Durham
Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego
Uniwersytet Warszawski
pchela@icm.edu.pl
Dr Wojciech A. Hellwing obronił w 2010 roku w Centrum Astronomicznym PAN im. Mikołaja Kopernika w Warszawie doktorat, napisany pod kierunkiem zmarłego w tym roku wybitnego kosmologa prof. Romana Juszkiewicza. Obecnie jest adiunktem na Uniwersytecie w Durham oraz programistą, zatrudnionym w projekcie POWIEW w ICM UW.

Współczesna kosmologia stawia fundamentalne pytania o skład i strukturę Wszechświata, jego ewolucję i przyszłe losy

Obecnie stan naszej wiedzy o Wszechświecie jest zawarty w standardowym modelu kosmologicznym zwanym LCDM (nazwa pochodzi od angielskich słów: Lambda Cold Dark Matter, co oznacza model wszechświata ze stałą kosmologiczną Einsteina - Λ - i zimną ciemną materią). Zakłada on, że podstawowe dwa składniki kosmosu mają ciemny charakter - są to ciemna materia (CM) i ciemna energia (CE) - decydujący zaś wpływ na jego ewolucję ma tylko grawitacja.

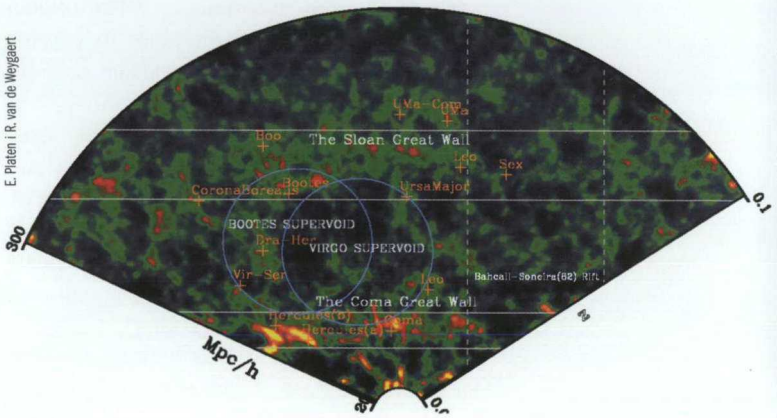
Ciemne składniki

Specyficzny charakter CM i CE polega na tym, że żaden z tych składników nie emituje ani nie pochłania światła. O ich istnieniu możemy wnioskować tylko pośrednio z analizy różnych obserwacji astronomicznych. Ciemna materia, choć niewidoczna, jest podobna do tej zwykłej, z której zbudowane są planety, gwiazdy i istoty żywe. Podobieństwo objawia się tym, że CM oddziałuje grawitacyjnie i dzięki temu łączy się w większe skupiska i struktury. To właśnie struktury zbudowane z CM tworzą „rusztowanie", w którym znajdują się świecące galaktyki - domy miliardów gwiazd. Bez ciemnej materii galaktyki nigdy by nie powstały, gdyż byłoby zbyt mało grawitacji, by zebrać gaz w odpowiednio duże skupiska. To właśnie CM niczym władca marionetek w kosmicznym teatrze rządzi losami galaktyk.

Zostając przy analogii do teatru (czy kosmicznej sceny, jak chciałby Newton), możemy powiedzieć, że jeśli CM jest władcą rządzącym ruchami galaktyk, to ciemna energia pełni funkcję reżysera decydującego o wydarzeniach na całej scenie, czyli we Wszechświecie. Nie układa się ona w żadne skupiska - jednorodnie wypełnia cały Wszechświat, od najgęstszych skupisk materii po największe kosmiczne pustki, domeny pozbawione światła i materii. Oddziałuje grawitacyjnie z całym Wszechświatem, ale robi to w bardzo specyficzny sposób: wytwarza siłę odpychającą, która w największych skalach przeciwdziała przyciąganiu grawitacji CM i powoduje, że Wszechświat jako całość rozszerza się coraz szybciej.

Era kosmologii precyzyjnej

W ostatniej dekadzie dzięki serii głębokich przeglądów nieba oraz ultraczułym obserwatoriom orbitalnym udało się określić wartości parametrów opisujących standardowy model kosmologiczny, a zatem i sam Wszechświat, z niebywałą wręcz precyzją. Niestety, jak to już nieraz w historii nauki bywało, nowe dokładniejsze pomiary przyniosły kolejne pytania, głównie o naturę fizyczną dwóch głównych składników Wszechświata - CM i CE. Kwestie te pozostają bez jednoznacznej odpowiedzi.



Wzory kosmicznego gobelinu widoczne w wygładzonym polu gęstości galaktyk zaobserwowanych w przeglądzie galaktyk SDSS

Dlatego właśnie kluczowe badania kosmologiczne skupiają się obecnie nad wyjaśnieniem zagadek ciemnej materii i energii. Możemy je z grubsza podzielić na dwie kategorie. W pierwszej dominującą rolę odgrywa rozwój teorii fizycznych, dotyczących CM i CE, wspomagany przez naziemne eksperymenty i laboratoria, takie jak Wielki Zderzacz Hadronów w CERN pod Genewą. Druga dotyczy analizy skomplikowanych symulacji komputerowych, w których bada się wpływ różnych modeli ciemnej energii i materii na powstawanie struktury Wszechświata, porównując wyniki symulacji z obserwacjami astronomicznymi. Badania bazujące na komputerowych symulacjach ostatnio rozwijają się niebywale dzięki nowym algorytmom i metodom badań symulacji kosmologicznych.

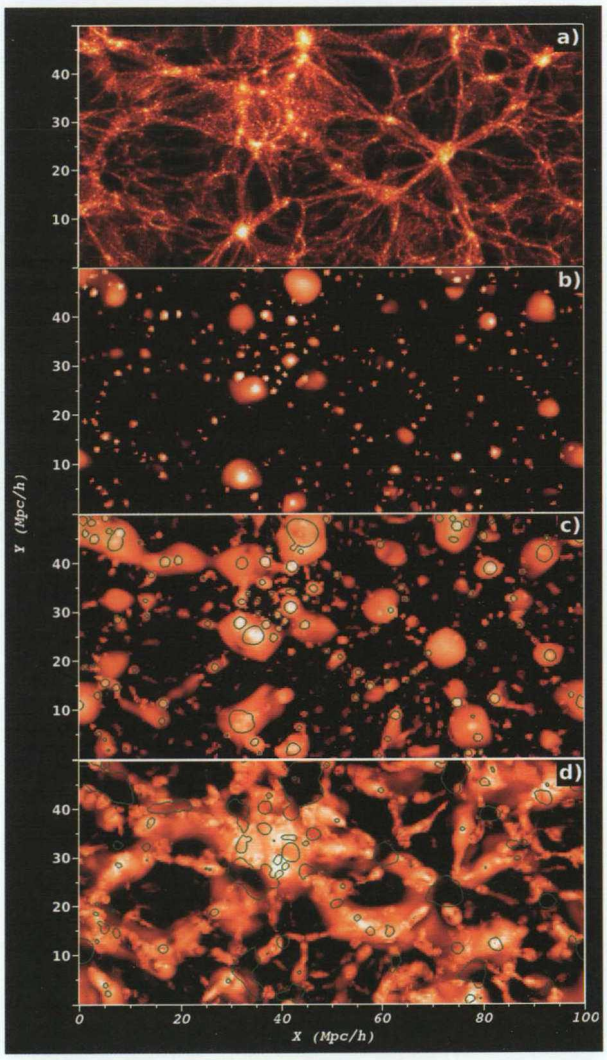
Od kilku lat rozwija się także nowa gałąź kosmologii dotycząca badań tzw. Kosmicznej Sieci i zakodowanych w niej informacji o CM i CE. W badaniach tych używa się metod i technik wywodzących się z dziedzin na pozór odległych od kosmologii i astronomii - topologii i geometrii obliczeniowej oraz obrazowania medycznego.

Kosmiczna pajęczyna

Istnienie Kosmicznej Sieci jest konsekwencją anizotropowej (niesferycznej) natury grawitacyjnego kolapsu - głównego mechanizmu odpowiedzialnego za powstawanie struktur we Wszechświecie. Wielkoskalowe struktury, w które układają się miliony obserwowanych galaktyk, wyrosły z pierwotnych, wręcz mikroskopijnych, zaburzeń gęstości i prędkości na skutek procesu nazywanego niestabilnością grawitacyjną. Niestabilność ta jest konsekwencją natury sił grawitacyjnych, które mają tylko przyciągający charakter. Pierwotne zaburzenie gęstości - miejsce, w którym jest odrobinkę więcej materii - w miarę upływu czasu będzie przyciągać do siebie materię z mniej gęstych okolic. Im więcej jej przyciągnie, tym bardziej będzie oddziaływać na swoje otoczenie, stając się coraz gęstsze. Po odpowiednio długim czasie proces ten staje się nieliniowy i może doprowadzić do powstawania olbrzymich i bardzo masywnych skupisk materii. A grawitacja to bardzo cierpliwa siła.

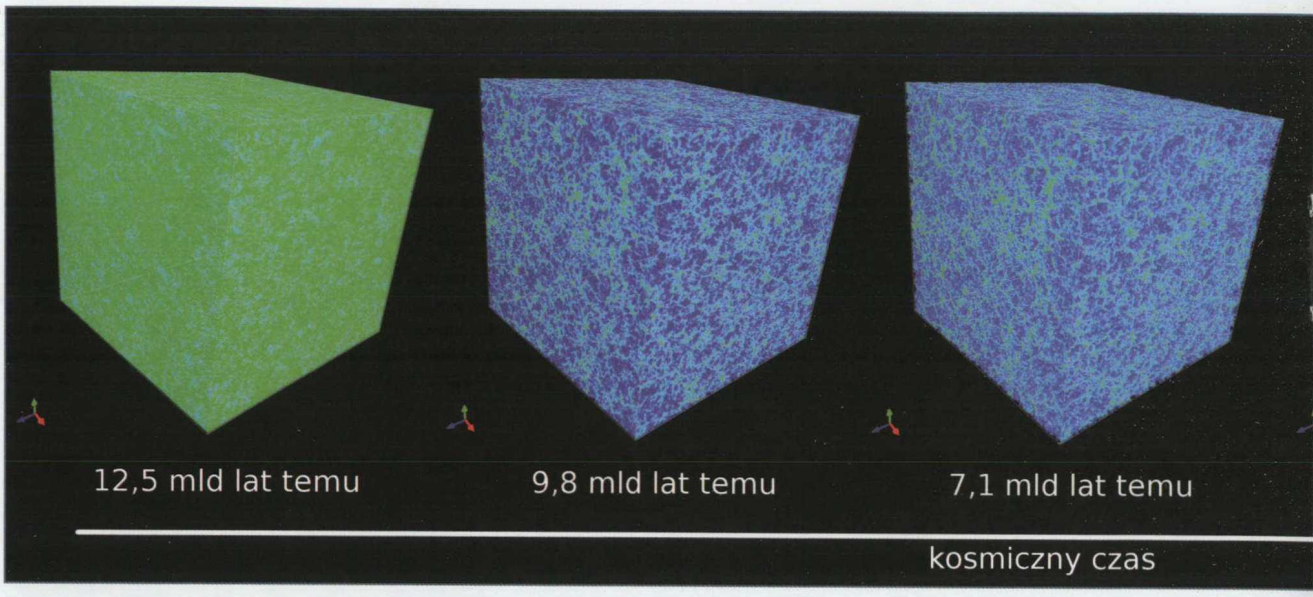
Przez niespełna 14 miliardów lat kosmicznej ewolucji niestabilność grawitacyjna doprowadziła do powstania obiektów takich jak gromady galaktyk, gdzie tysiące galaktyk, wirując w szalonym pędzie, zderza się ze sobą w potężnym polu grawitacyjnym. Komputerowe symulacje wspaniale zilustrowały, w jaki sposób pierwotne pole materii Wszechświata ewoluuje w wyraźny i zawiły kosmiczny gobelin złożony z włókien, splatających się w gęste i zwarte bryły znajdujące się w węzłach sieci. Włókna rozpostarte pomiędzy węzłami kosmicznej sieci działają jak kanały transportowe, poprzez które rzeki materii płyną w kierunku masywnych gromad galaktyk.

Kosmiczna Sieć to zatem wielkoskalowa struktura utkana z galaktyk i ciemnej materii przez cierpliwą tkaczkę - grawitację. W budowie tej gwiezdnej pajęczyny możemy wyróżnić cztery istotnie różne składniki, które - połączone i powtórzone wielokrotnie - tworzą wzór wszędzie podobny, nigdzie jednak taki sam.



Elementy sieci zidentyfikowane przez algorytm NEXUS+ w wybranym małym wycinku Wszechświata. Panele ukazują kolejno: a) wynikowe pole gęstości materii z symulacji komputerowej, b) węzły sieci, c) włókna i d) kosmiczne ściany

Struktura kosmicznej sieci



Te cztery składniki sieci to gromady galaktyk, włókna, ściany lub inaczej osnowy oraz pustki.

Gromady galaktyk to najgęstsze i najmasywniejsze obiekty, które pełnią funkcję węzłów kosmicznej sieci. Węzły te przypominają olbrzymie grawitacyjne pająki wciąż głodne i „pożerające" materię ze swoich okolic. Kosmiczna materia przepływa do gromad galaktyk głównie wzdłuż wielkich i gęstych włókien. Przypominają one wielkie nici rozpostarte pomiędzy węzłami. Większość galaktyk we Wszechświecie znajduje się właśnie we włóknach.

Pomiędzy włóknami i gromadami rozpościerają się cienkie i mniej gęste osnowy, nazywane również ścianami. Materia w nich charakteryzuje się powolniejszymi ruchami, spływając łagodnie w kierunku najbliższego włókna lub gromady. W osnowach znajduje się wciąż sporo galaktyk, chociaż znacznie mniej niż we włóknach. Nasza galaktyka - Droga Mleczna - zamieszkuje najprawdopodobniej takie właśnie kosmiczne peryferia.

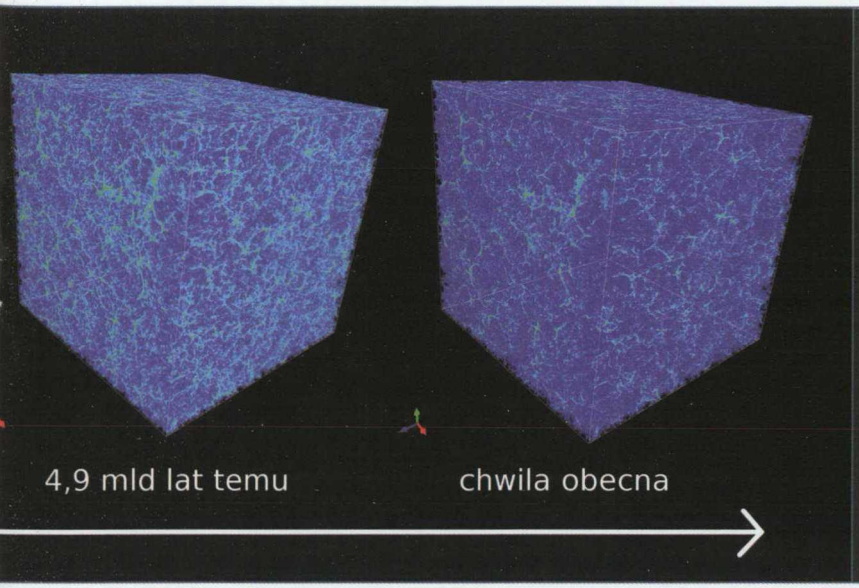
Ostatnim składnikiem kosmicznej sieci są ogromne kosmiczne pustki. Są to olbrzymie mroczne domeny, niemal pozbawione światła i materii, wypełniające przestrzeń pomiędzy ścianami i włóknami. Znajdujące się w nich bardzo nieliczne galaktyki są zazwyczaj małe i słabo rozwinięte.

Obserwowane obecnie właściwości, cechy i struktura kosmicznej sieci są wynikiem skomplikowanych zależności łączących warunki początkowe (pierwotne miniaturowe zaburzenia gęstości) oraz fizyczną naturę ciemnej materii i ciemnej energii. W zasadzie jest zatem możliwe uzyskanie wglądu w naturę CE i CM poprzez dokładne badania cech i struktur kosmicznej sieci, poprzez porównanie wyników komputerowych symulacji z obserwacjami.

Jednak badania nad strukturą kosmicznej sieci są niezwykle trudne. Głównym problemem jest sam charakter tej struktury. Pajęczyna cechuje się bowiem wieloskalowością (wzory i elementy pojawiają się w niemal wszystkich skalach odległości) i do tego podlega nieliniowej ewolucji. To sprawia, że poza gromadami galaktyk wszystkie pozostałe składniki sieci nie mają wyraźnie zdefiniowanych granic. Włókna łagodnie przechodzą w ściany, te zaś rozpływają się na granicach pustek. Co więcej, w dużych pustkach wciąż mogą znajdować się mniejsze pustki, rozdzielone cienkimi włóknami i osnowami.

Sieć z superkomputera

Badaniami kosmicznej pajęczyny zajmuje się wspomniana już nowa gałąź kosmologii obliczeniowej. Dzięki implementacji metod szeroko stosowanych do tej pory w badaniach medycznych, stała się możliwa dokładna i - co ważniejsze - oparta na fizycznych kryteriach identyfikacja poszczególnych składników kosmicznej sieci. W ostatnich latach grupa badaczy z Instytutu Kapteyna w Groningen (Holandia) pod kierownictwem prof. Riena van de Weygaerta, z którą mam przyjemność blisko współpra-



Wszechświat w komputerze

Astronomia XXI wieku dzięki zaawansowanym technicznie wielkim naziemnym teleskopom oraz obserwatoriom, umieszczonym na orbicie okołoziemskiej, dostarcza nam wspaniałych zdjęć galaktyk i odległego Wszechświata. Głównym zadaniem współczesnej kosmologii jest zrozumienie, w jaki sposób powstała wielkoskalowa struktura, w jaką układają się galaktyki, oraz jak powstawały same galaktyki. Obecnie postęp teoretyczny w badaniach nad strukturą Wszechświata i galaktyk jest możliwy dzięki wielkim i wyrafinowanym symulacjom komputerowym. W takich symulacjach badamy powstawanie i ewolucje pola gęstości materii modelowanego wycinka Wszechświata. Zazwyczaj takie symulacje wymagają potężnych superkomputerów, co pozwala prześledzić kilkanaście miliardów lat kosmicznej ewolucji w ciągu kilku tygodni obliczeń.

cować, rozwinęła nowoczesną metodę identyfikacji i analizy kosmicznej sieci, nazwaną NEXUS+. Metoda ta bazuje na algorytmach pochodzących z obrazowania medycznego, stosowanych przy obróbce zdjęć rentgenowskich i obrazów z tomografu. Została jednak ulepszona i rozwinięta tak, by dała się zastosować do danych astronomicznych i symulacji komputerowych. Wstępne wyniki dowodzą, że w rzeczy samej właściwości i struktura Kosmicznej Sieci są czułe na specyficzne cechy zarówno CM, jak i CE.

Chociaż przed nami jeszcze długa droga do spektakularnych wyników, to wydaje się, że dzięki połączeniu technik symulacji komputerowych, zaawansowanych metod ich analizy oraz danych płynących z nowych wielkich i głębokich przeglądów galaktyk już wkrótce uda się wydobyć sekrety skrywane przez kosmiczny gobelin i rzucić nieco światła na zagadki ciemnej materii i energii. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

Bond R.J., Kofman L., Pogosyan D. (1996). How filaments of galaxies are woven into the cosmic web. *Nature, 380*, 603-606.

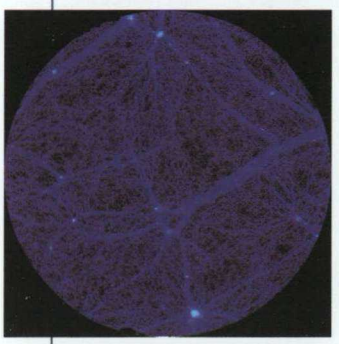
van de Weygaert, R.,Schaap, W., (2009). *The Cosmic Web: Geometric Analysis*, Data Analysis in Cosmology, Lecture Notes in Physics, 665, pp 291-413. Edited by V. J. Martínez, E. Saar, E. Martínez-González, and M.-J. Pons-Bordería. Berlin: Springer.

Cautun M., van de Weygaert R., Jones B.J.T. (2012). *NEXUS: Tracing the Cosmic Web Connection.* MNRAS (submitted). http://arxiv.org/abs/1209.2043.

Hellwing W.A., Cautun M. i in. (2013)., *DM haloes and their environment in the fifth-force cosmology*, w przygotowaniu.

Supersymulacje kosmologiczne w Polsce

Niedawno w Polsce udało się przeprowadzić jedną z największych i najbardziej dokładnych symulacji kosmologicznych na świecie. Symulacja ta, nazwana „Copernicus Complexio" (CoCo), zawiera ponad 13 miliardów cząstek symulujących pole gęstości ciemnej materii. Projekt zrealizowano dzięki współpracy Interdyscyplinarnego Centrum Modelowania matematycznego i komputerowego (ICM) z Uniwersytetu Warszawskiego i Instytutu Kosmologii Obliczeniowej (Institute for Computational Cosmology – ICC) z Uniwersytetu w Durham w Wielkiej Brytanii. Warszawski ICM w ramach programu POWIEW (Program Obliczeń Wielkich Wyzwań Nauki i Techniki – www.wielkie-wyzwania.pl), współfinansowanego przez środki z UE, wzbogacił się w tym roku o potężny superkomputer IBM Power775 – „Boreasz". Ta właśnie maszyna została wykorzystana do policzenia symulacji CoCo. „Boreasz" dysponuje mocą 74 TFlopów (74 bilionów operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę) i pamięcią operacyjną 9,8 terabajtów. Mimo tak dużej mocy superkomputer potrzebował aż 6 tygodni na ukończenie symulacji. Analiza wyników CoCo pozwoli znaleźć odpowiedzi na wiele pytań dotyczących natury ciemnej materii. Na przykład czy nasza własna galaktyka, Droga Mleczna, wraz ze swoim systemem galaktyk satelitarnych jest obiektem wyjątkowym, czy raczej powszechnym we Wszechświecie. Powszechnie przyjmowana we współczesnej kosmologii zasada kopernikańska głosi, że nie zajmujemy uprzywilejowanego miejsca w kosmosie. Stąd też łacińska nazwa symulacji, którą tłumaczymy jako „problem/zagadka Kopernika".



W. A. Hellwing

Superkomputer IBM power 775 – „Boreasz" – w serwerowni ICM, Warszawa