AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: **Paweł Bielewicz**

2. Tytuły zawodowe i stopnie naukowe:
   - magister fizyki, specjalność fizyka teoretyczna, Uniwersytet Warszawski, 2000
     Praca pt. " Wpływ niejednorodności we Wszechświecie na wyznaczanie parametrów kosmologicznych"
   - doktor nauk fizycznych w zakresie astronomii, Uniwersytet Warszawski, 2006
     Praca pt. "Badanie wielkoskalowej struktury Wszechświata poprzez statystyczną analizę pomiarów anizotropii temperatury i polaryzacji reliktowego promieniowania tła"

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:
   - Institut d'Astrophysique de Paris (Francja), staż podoktorski, 2006-2008
   - Institut d'Astrophysique de Paris (Francja), programista, 2009
   - Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (Francja), staż podoktorski, 2009-2012
   - Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati (Włochy), staż podoktorski, 2012-2015
   - Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika PAN, adiunkt, od 2016

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311):
   - Tytuł osiągnięcia naukowego:
     "Obserwacyjne ograniczenia na topologię Wszechświata"
   - Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

     [P1] Bielewicz, P., Riazuelo, A., 2009, "The study of topology of the universe using multipole vectors", MNRAS, **396**, 609

     [P2] Bielewicz, P., Banday, A.J., 2011, "Constraints on the topology of the Universe derived from the 7-year *WMAP* data", MNRAS, **412**, 2104

     [P3] Bielewicz, P., Banday, A.J., Górski, K.M., 2012, "Constraining the topology of the Universe using the polarised CMB maps", MNRAS, **421**, 1064

     [P4] Planck collaboration et al. (including Bielewicz P.), 2014, "Planck 2013 results. XXVI. Background geometry and topology of the Universe", A&A, **571**, A26

     [P5] Planck collaboration et al. (including Bielewicz P.), 2016, "Planck 2015 results. XVIII. Background geometry and topology of the Universe", A&A, **594**, A18

A&A = Astronomy and Astrophysics
MNRAS = Monthly Notices of the Royal Astronomical Society

PB

Opis osiągnięcia naukowego

1 Wprowadzenie

Promieniowanie reliktowe jest jednym z najważniejszych źródeł informacji o budowie i ewolucji Wszechświata. Pochodzi ono z bardzo wczesnych epok ewolucji Wszechświata, kiedy to promieniowanie silnie oddziaływało ze zjonizowaną materią barionową. Ponieważ Wszechświat rozszerzał się i ochładzał, materia barionowa zrekombinowała i stała się obojętna elektrycznie. Po rekombinacji Wszechświat stał się przezroczysty dla fotonów promieniowania reliktowego, które od tego momentu przemierzają Wszechświat niezmienione. Z tego powodu obserwacje promieniowania reliktowego, zwanego też mikrofalowym promieniowaniem tła, dają unikalną możliwość zobaczenia powierzchni ostatniego rozpraszania fotonów i dowiedzenia się jak wyglądał Wszechświat tuż po rekombinacji, około 380 000 lat po Wielkim Wybuchu. Wraz z innymi kosmologicznymi obserwacjami, takimi jak obserwacje supernowych czy przeglądy galaktyk, wykonane dotychczas pomiary promieniowania mikrofalowego tła umożliwiły sformułowanie standardowego modelu kosmologicznego. Model ten opiera się na teorii Wielkiego Wybuchu rozszerzonej o koncepcję inflacji kosmologicznej.

Odległość do powierzchni ostatniego rozpraszania fotonów promieniowania reliktowego jest prawie tak duża jak odległość do horyzontu obserwowalnego Wszechświata. Zatem obserwacje promieniowania tła umożliwiają również testowanie globalnych własności Wszechświata. W szczególności, umożliwiają one testowanie globalnej geometrii Wszechświata, tzn. jego topologii. Najprostsze modele czasoprzestrzeni Wszechświata zakładają globalną izotropię i jednospójną topologię. Chociaż oba te założenia są zgodne z obserwacjami kosmologicznymi, bez fundamentalnej teorii początków Wszechświata potrzebne są obserwacyjne ograniczenia na możliwe odstępstwa od globalnej izotropii będące konsekwencją wielospójnej topologii.

Równania Einsteina wiążą lokalne własności krzywizny z zawartością materii w czasoprzestrzeni. Nie ograniczają one jednak globalnych własności przestrzeni, pozwalając na to że wszechświat z określoną lokalnie geometrią ma różne globalne topologie (de Sitter, 1917). Zatem model Friedmanna–Robertsona–Walkera (FRW) (Friedmann, 1922; Robertson, 1935), w którym uśrednione lokalne własności są wszędzie takie same, może opisywać przestrzenie, które są różne w dużych skalach. Prawdopodobnie najbardziej niezwykłą możliwością jest to, że można żyć we wszechświecie o skończonej objętości ze względu na topologiczną wielospójność przestrzeni nawet, jeśli czasoprzestrzeń opisywana jest przez metrykę FRW z zerową lub ujemną krzywizną. Możliwość ta jest o tyle interesująca, że istnieją modele inflacyjne, gdzie kwantowe fluktuacje mogą wyprodukować wielospójne przestrzenie o stałej krzywiźnie, zarówno płaskie (Zeldovich & Starobinskii, 1984) jak i zakrzywione (Coule & Martin, 2000; Linde, 2004).

Głównym obserwacyjnym efektem związanym z topologią są warunki brzegowe narzucone na mody zaburzeń, które mogą być wzbudzone i rozwijać się w struktury, które obserwujemy. Pierwsze poszukiwania śladów wielospójnej topologii w skalach kosmicznych koncentrowały się na szukaniu powtarzających się wzorców lub indywidualnych obiektów w rozkładach galaktyk (Sokolov & Shvartsman, 1974; Fang & Sato, 1983; Fagundes & Wichoski, 1987; Lehoucq et al., 1996; Weatherley et al., 2003; Fujii & Yoshii, 2011). Powierzchnia ostatniego rozpraszania promieniowania reliktowego jest najdalszym źródłem fotonów we Wszechświecie, zatem badanie fluktuacji na tej powierzchni jest najlepszym znanym sposobem testowania globalnej struktury Wszechświata a reliktowe promieniowanie tła dostarcza najbardziej szczegółowych i dobrze zrozumianych danych, które mogą temu służyć. Pierwsze badania topologii z wykorzystaniem obserwacji promieniowania mikrofalowego tła były możliwe dzięki pomiarom wykonanym przez instrument Differential Microwave Radiometer (DMR) umieszczony na satelicie Cosmic Background Explorer (*COBE*) (Bennett et al., 1996). Chociaż badania te nie dostarczyły dowodów na wielospójną topologię (np. Starobinskij 1993; Sokolov 1993; Stevens et al. 1993; de Oliveira-Costa & Smoot 1995; Levin et al. 1998; Bond et al. 1998, 2000; Rocha et al. 2004; ale również Roukema 2000a,b), to przyczyniły się do stworzenia użytecznych narzędzi statystycznych i sporządzenia spisu możliwych topologii dla danej geometrii (Lachieze-Rey & Luminet, 1995; Levin, 2002). Wraz z udostępnieniem danych z satelity Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (*WMAP*) (Bennett et al., 2003), te teoretyczne i obserwacyjne narzędzia zostały zastosowane po raz pierwszy do zbioru danych wysokiej jakości. Na podstawie tych badań Luminet et al. (2003) i Caillerie et al. (2007) stwierdzili, że mała, w porównaniu do standardowego modelu kosmologicznego ΛCDM (ang. Cold Dark Matter), wartość amplitudy najniższych multipoli jest zgodna z przewidywaniami dla zamkniętego wszechświata o wielospójnej topologii i małej domenie fundamentalnej (zobacz również Aurich 1999; Aurich et al. 2004, 2005, 2006, 2008; Aurich & Lustig 2013; Lew & Roukema 2008; Roukema et al. 2008). Jednakże testy z wykorzystaniem ana-

PB

lizy w przestrzeni pikseli (Cornish et al., 2004; Key et al., 2007; Niarchou et al., 2004; Dineen et al., 2005) oraz w przestrzeni harmonik sferycznych (Kunz et al., 2006) wskazały, że jest to raczej mało prawdopodobne wyjaśnienie niskiej wartości amplitudy multipoli.

Niemniej jednak, poza małą wartością najniższych multipoli, bardziej ogólne testy statystycznych własności map anizotropii temperatury promieniowania reliktowego otrzymanych z satelity *WMAP* ujawniły również inne odstępstwa od statystycznej izotropowości w dużych skalach kątowych, które mogłyby świadczyć o wielospójnej topologii Wszechświata (Tegmark et al., 2003; Copi et al., 2006; Eriksen et al., 2007; Copi et al., 2009; Hansen et al., 2009; Hoftuft et al., 2009). W czasie moich studiów doktoranckich analizowałem stabilność niektórych z tych anomalii ze względu na efekty systematyczne takie jak emisja promieniowania mikrofalowego przez naszą Galaktykę i błędy związane z kalibracją map (Bielewicz et al., 2004, 2005). Dużą część moich badań po doktoracie poświęciłem jednemu z najbardziej fascynujących możliwych wyjaśnień tych anomalii, tzn. wielospójnej topologii Wszechświata. Poniżej przedstawię mój wkład w badania topologii Wszechświata, a w szczególności badania opisane w cyklu publikacji [P1-P5] wchodzących w skład dzieła habilitacyjnego. W pierwszej z publikacji [P1] rozważałem wielospójny wszechświat jako możliwe wyjaśnienie jednej z obserwowanych anomalii, tzn. współosiowości kwadrupolowego i oktupolowego momentu rozkładu map promieniowania reliktowego w bazie harmonik sferycznych. W pozostałych publikacjach skupiałem się na szukaniu śladów topologii w mapach promieniowania tła używając tzw. metody dopasowanych okręgów. W artykułach [P2] i [P4] metoda ta była stosowana do analizy map anizotropii temperatury otrzymanych, odpowiednio, z danych satelity *WMAP* oraz *Planck*. Rozszerzenie tej metody na mapy polaryzacji promieniowania reliktowego było rozważane w publikacji [P3], zaś w publikacji [P5] zostało przedstawione pierwsze zastosowanie metody dla obserwowanych map polaryzacji i pierwsze wynikające z tego ograniczenia na topologię.

2 Testowanie topologii Wszechświata przy użyciu multipolowych wektorów [P1]

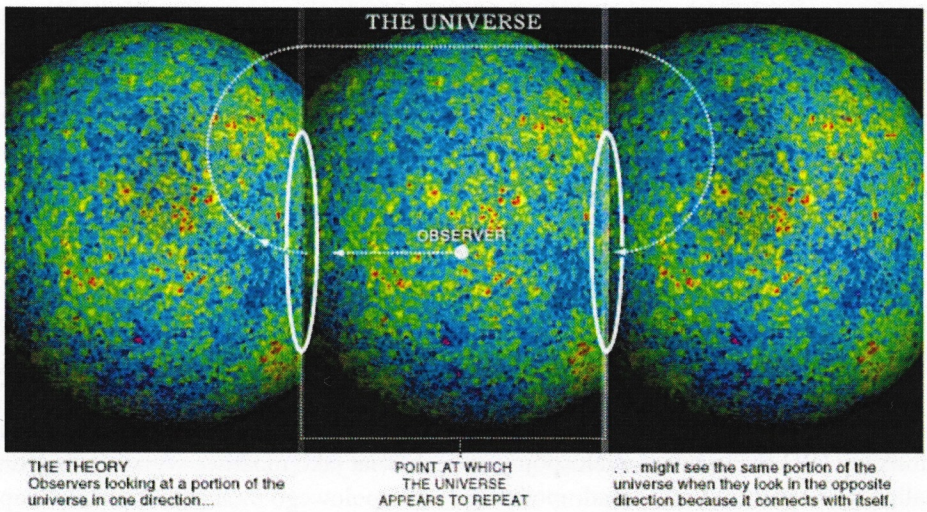
Od czasu udostępnienia pierwszych danych z satelity *WMAP* podjęto liczne badania statystycznych własności map anizotropii promieniowania reliktowego. Badania te zaowocowały kilkunastoma publikacjami, w których wykorzystywano jakościowo różne metody, wskazującymi na detekcję niegaussowskości i odstępstw od statystycznej izotropowości map (Tegmark et al., 2003; Bielewicz et al., 2004, 2005; Copi et al., 2006; Eriksen et al., 2007; Copi et al., 2009). Detekcje te zostały ostatnio potwierdzone dla najnowszych pomiarów promieniowania reliktowego wykonanych przez satelitę *Planck* (Planck Collaboration et al., 2014c, 2016c). Jedną z obserwowanych anomalii jest współosiowość preferowanych kierunków kwadrupolowego i oktupolowego momentu. Może być ona konsekwencją krótszego wymiaru domeny fundamentalnej wielospójnego wszechświata w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wyznaczonej przez rozkład kwadrupola i oktupola. Taką możliwość, dla wszechświata o topologii trójwymiarowego torusa, badałem wraz ze współautorem w publikacji [P1].

W badanich tych używaliśmy rozkładu map promieniowania reliktowego na tzw. multipolowe wektory (Copi et al., 2004). W przeciwieństwie do zależnych od układu współrzędnych współczynników rozkładu w bazie harmonik sferycznych, multipolowe wektory wskazują ten sam kierunek na niebie niezależnie od używanych współrzędnych. Są więc one użytecznym narzędziem do badania statystycznej izotropowości map promieniowania. Obliczenia statystyk dla multipolowych wektorów zostały wykonane w tej pracy przy użyciu napisanego przeze mnie podczas doktoratu programu do testowania anomalii map promieniowania reliktowego (Bielewicz et al., 2005).

W publikacji pokazaliśmy, że dla wszechświat o topologii trójwymiarowego torusa z przynajmniej jednym wymiarem domeny fundamentalej krótszym niż średnica obserwowalnego Wszechświata, rozkład multipolowych wektorów odzwierciedla symetrie komórki fundamentalnej, zaś kwadrupol i oktupol wykazują tendencje do współosiowości. Niemniej, zintegrowany efekt Sachsa-Wolfe'a znacznie osłabia ślady wielospójnej topologii na mapach.

Bardziej ilościowa analiza wskazała na to, że dane rzeczywiście nieznacznie preferują wszechświat o wielospójnej topologii. Niemniej jednak hipoteza jednospójnego wszechświata nie może być jednoznacznie odrzucona (tzn. na poziomie ufności $\sim 97\,\%$). Nasze badania wskazały również, że multipolowe wektory nie są zbyt wrażliwe na obserwacyjne przejawy topologii trójwymiarowego torusa, jeśli długość krótszego wymiaru domeny fundamentalnej jest porównywalna do średnicy obserwowalnego Wszechświata.

PB



Rysunek 1: Korelacja anizotropii promieniowania reliktowego wzdłuż pary okręgów widocznych w dwóch różnych kierunkach w wielospójnym wszechświecie jest wynikiem przecięcia powierzchni ostatniego rozpraszania z brzegami topologicznej domeny fundamentalnej. Rysunek autorstwa Maxa Tegmarka.

3 Ograniczenia na topologię Wszechświata otrzymane za pomocą metody dopasowanych okręgów [P2], [P3]

Głównym obserwacyjnym efektem wywołanym wielospójnością wszechświata jest istnienie kierunków w których światło może obiec przestrzeń w czasie kosmologicznym więcej niż raz co oznacza, że odległość do powierzchni ostatniego rozpraszania przekracza rozmiar wszechświata. W takim przypadku powierzchnia ostatniego rozpraszania może przeciąć teoretyczne brzegi domeny fundamentalnej. Na tych przecięciach możemy obserwować te same zdarzenia w czasoprzestrzeni w wielu różnych kierunkach na niebie.

Zatem anizotropia temperatury w jednym kierunku, $\Delta T(\hat{n})$, będzie skorelowana z anizotropią w innym kierunku, $\Delta T(\hat{m})$. Ponieważ przecięcie topologicznej domeny fundamentalnej z powierzchnią ostatniego rozpraszania jest okręgiem, potencjalnie można zaobserwować dopasowaną anizotropię promieniowania wzdłuż par skorelowanych okręgów (Rys. 1). Dopasowanie to nie jest jednak dokładne z powodu szumu, pozostałości galaktycznej emisji oraz zintegrowanego efektu Sachsa-Wolfe'a i efektu Dopplera odpowiadającym innym kierunkom obserwacji.

Pomysł wykorzystania dopasowanych okręgów do badania topologii Wszechświata został zaproponowany w publikacji Cornish et al. (1998). W pracy tej przedstawiono statystyczne narzędzie użyteczne do detekcji skorelowanych okręgów na mapach anizotropii promieniowania reliktowego tzw. statystykę dopasowanych okręgów. Istnieją dwie wersje tej statystyki: dla par okręgów z punktami uporządkowanymi zgodnie z ruchem wskazówek zegara (o zgodnej fazie, oznaczanej jako S^+) oraz dla par okręgów, gdzie dla jednego z okręgów punkty są uporządkowane przeciwnie do ruchu wskazówek zegara (o przeciwnej fazie, oznaczanej jako S^-). Statystyki te pozwalają na detekcję zarówno orientowalnych jak i nieorientowalnych topologii. Dla topologii orientowalnych dopasowane okręgi mają korelacje o zgodnej fazie, podczas gdy dla topologii nieorientowalnych mają one korelacje zarówno o zgodnej jak i przeciwnej fazie.

Aby wyciągnąć jakiekolwiek wnioski z analizy opartej na tych statystykach, ważne jest prawidłowe oszacowanie poziomu istotności statystycznej dopasowania par okręgów. Prawdopodobieństwo przypadkowego dopasowania jest szczególnie duże dla okręgów o małym promieniu. Z tego względu statystyki powinny zostać skalibrowane przy użyciu symulacji Monte Carlo map anizotropii promieniowania reliktowego dla jednospójnego wszechświata.

W badaniach przedstawionych w publikacjach [P2] i [P3] analizowaliśmy ograniczenia na topologię Wszechświata otrzymane przy użyciu statystyki dopasowanych okręgów w wersji zoptymylizowanej dla anizotropii w małych skalach (Cornish et al., 2004) co pomaga zredukować negatywny wpływ na detekcję wywołany przez zintegrowany efekt Sachsa-Wolfe'a. W pracy [P2] analizowaliśmy mapy anizotropii temperatury, zaś w pracy [P3] rozważaliśmy rozszerzenie metody dopasowanych okręgów dla map anizotropii polaryzacji promieniowa-

PB

nia reliktowego.

Program do obliczania statystyki dopasowanych okręgów używany w tych badaniach został napisany przez mnie. Aby przyspieszyć obliczenia algorytm wykorzystuje szybką transformatę Fouriera wzdłuż okręgów. W celu przetestowania poprawności działania tego programu, napisałem również program generujący symulacje map promieniowania reliktowego dla wszechświata o topologii trójwymiarowego torusa. Program do symulacji oblicza bezpośrednio współczynniki rozkładu w bazie harmonik sferycznych, co umożliwia wygenerowanie map o wyższej rozdzielczości kątowej niż otrzymane przy użyciu alternatywnych metod symulacji wykorzystujących macierz kowariancji (Riazuelo et al., 2004; Phillips & Kogut, 2006). Warto wspomnieć, że wygenerowane przeze mnie mapy są mapami o najwyższej rozdzielczości jakie do tej pory zostały utworzone dla modeli wielospójnego wszechświata. Wysoka rozdzielczość jest szczególnie istotna dla statystyki dopasowanych okręgów, ponieważ jest ona czuła na anizotropię w małych i średnich skalach kątowych.

Współczynniki rozkładu w bazie harmonik sferycznych były obliczone przez zsumowanie wszystkich modów zaburzeń obecnych dla danych warunków brzegowych narzuconych przez wielospójną topologię. Ponieważ topologia nie wpływa lokalnie na zjawiska fizyczne, równania rządzące ewolucją zaburzeń kosmologicznych są niezmienione i mogą być rozwiązane przy użyciu publicznie dostępnego oprogramowania takiego jak CAMB (Lewis et al., 2000). Na koniec, symulowane mapy zostały wygładzone wiązką o profilu odpowiadającym rozdzielczości analizowanej mapy promieniowania reliktowego, a następnie został dodany, charakterystyczny dla mapy, szum. Programy do analizy i symulacji zostały przystosowane do uruchomiania na wielu procesorach równocześnie na superkomputerach.

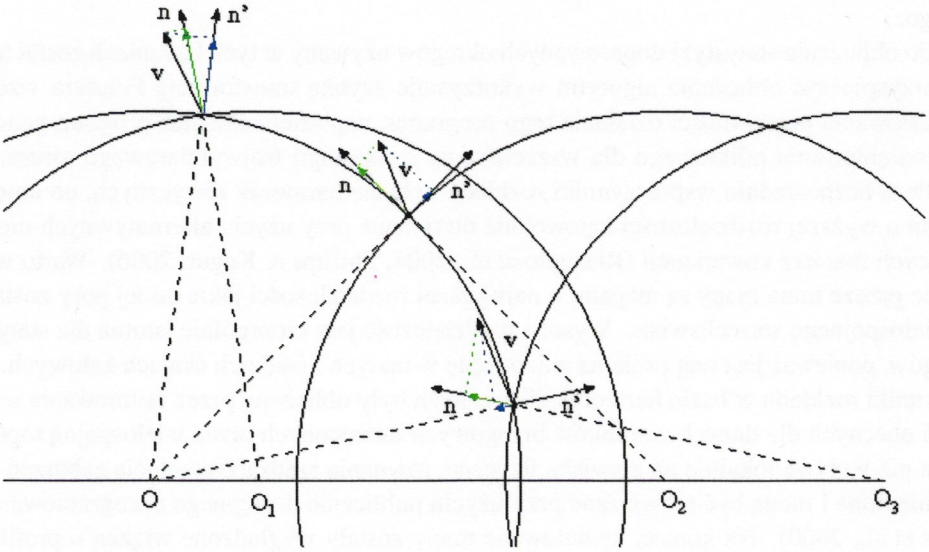
W pracy [P2] szczególną uwagę poświęciliśmy tym aspektom poszukiwania dopasowanych okręgów w mapach, które zostały pominięte w większości wcześniejszych prac na ten temat. Skupiliśmy się na badaniu wpływu pozostałości emisji galaktycznej, użyciu wyższej rozdzielczości map oraz oszacowaniu poziomu fałszywej detekcji na podstawie realistycznych symulacji Monte Carlo map promieniowania. W szczególności analizowaliśmy mapę ILC (ang. Internal Linear Combination) oraz oczyszczoną z emisji galaktycznej mapę dla zakresu W ($\sim$ 94 GHz) otrzymane z siedmioletnich danych satelity *WMAP*. Najbardziej zanieczyszczona przez emisję galaktyczną część nieba została zamaskowana. Dzięki użyciu mapy dla zakresu W o wyższej rozdzielczości uzyskaliśmy niższy poziom fałszywej detekcji co umożliwiło otrzymanie ściślejszych ograniczeń na rozmiar domeny fundamentalnej. Poziom fałszywej detekcji został oszacowany na podstawie 100 symulacji Monte Carlo map ILC i dla zakresu W zakładając jednospójny wszechświat.

Ponieważ szukanie dowolnie zorientowanych par dopasowanych okręgów jest obliczeniowo bardzo wymagające, ograniczyliśmy naszą analizę do szukania par okręgów, których środki położone są antypodalnie. Pomimo tego obostrzenia, analiza obejmuje szeroką klasę topologii przewidujących istnienie takich par okręgów. Najsilniejsze oganiczenia analiza narzuca na topologie przewidujące pary antypodalnych okręgów we wszystkich kierunkach jak np. trójwymiarowe torusy. Słabsze ograniczenia są narzucone na topologie z antypodalnymi okręgami, których środek jest położony na kole wielkim sfery niebieskiej. Analiza może również narzucić pewne ograniczenia na wielospójne przestrzenie przewidujące jedną parę antypodalnych okręgów jak np. przestrzeń Kleina.

Analiza oczyszczonej z emisji galaktycznej mapy *WMAP* dla zakresu W nie ujawniła żadnej istotnej korelacji par okręgów antypodalnych o promieniu większym niż $\alpha_{\rm min} \simeq 10^\circ$. Niższy poziom fałszywej detekcji pozwolił na otrzymanie znacznie mniejszego minimalnego promienia dopasowanych okręgów, które mogą zostać wykryte, niż wcześniejsze ograniczenia, około 20°, otrzymane przez Key et al. (2007). Minimalny promień okręgów $\alpha_{\rm min} \simeq 10^\circ$ oznacza, że w płaskim wszechświecie, opisanym przez parametry kosmologiczne najlepiej pasujące do siedmioletnich danych satelity *WMAP*, dolne ograniczenie na rozmiar domeny fundamentalnej wynosi $L \gtrsim 2\,\chi_{\rm rec}\cos(\alpha_{\rm min}) = 1.97\,\chi_{\rm rec} = 27.9\,{\rm Gpc}$, gdzie $\chi_{\rm rec}$ jest współporuszającą się odległością do powierzchni ostatniego rozpraszania.

W publikacji [P3] rozważaliśmy rozszerzenie metody dopasowanych okręgów dla map anizotropii polaryzacji promieniowania reliktowego. Ponieważ poziom szumu map polaryzacji satelity *WMAP* jest zbyt duży, aby być w stanie wykryć dopasowane okręgi, w badaniach wykorzystaliśmy symulacje map polaryzacji o rozdzielczości i poziomie szumu charakterystycznym dla, jeszcze nie udostępnionych w tamtym czasie, danych z satelity *Planck* oraz przyszłej generacji eksperymentów mierzących promieniowanie reliktowe takich jak misja Cosmic Origin Explorer (COrE) (The COrE Collaboration et al., 2011). Symulacje wykonane zostały dla płaskiego wszechświata o topologii trójwymiarowego torusa.

PB



Rysunek 2: Prędkość barionów v na powierzchni ostatniego rozpraszania widziana z dwóch różnych kierunków n, n' w wielospójnym wszechświecie. Dla promienia dopasowanych okręgów większego niż 45° rzuty prędkości barionów na kierunki obserwacji (przerywane linie) są silnie skorelowane dla obserwatorów O i O_1. Dla promienia równego 45° (obserwatorzy O i O_2) rzuty predkości są nieskorelowane, zaś dla promienia mniejszego niż 45° (obserwatorzy O i O_3) rzuty są antyskorelowane. Rzuty prędkości są oznaczone przez niebiekie i zielone strzałki. Rysunek z publikacji [P3].

W publikacji pokazaliśmy, że wykorzystanie anizotropii temperatury, generowanej przez kilka członów na powierzchni ostatniego rozpraszania (tzn. fluktuacje gęstości fotonów, zwykły efekt Sachsa-Wolfe'a oraz efekt Dopplera), nie jest optymalne dla testowania topologii Wszechświata. Wkłady pochodzące od różnych członów częściowo się kasują w wielospójnym wszechświecie, tak że wykrycie śladów topologii jest trudniejsze a otrzymane ograniczenia na topologię są słabsze. Znoszenie się członów jest szczególnie znaczące dla topologii z domeną fundamentalną o rozmiarach porównywalnych do rozmiaru obserwowalnego Wszechświata, przewidujących dopasowane okręgi o małych promieniach (Rys. 2). Ponieważ polaryzacja promieniowania tła jest generowana tylko przez kwadrupolowy rozkład promieniowania rozpraszanego na wolnych elektronach w momencie rekombinacji (Kosowsky, 1996; Zaldarriaga & Seljak, 1997), w wielospójnym wszechświcie sygnał polaryzacji nie kasuje się jak ma to miejsce w przypadku anizotropii temperatury. Zatem polaryzacja daje większą szansę na wykrycie śladów topologii niż anizotropia temperatury.

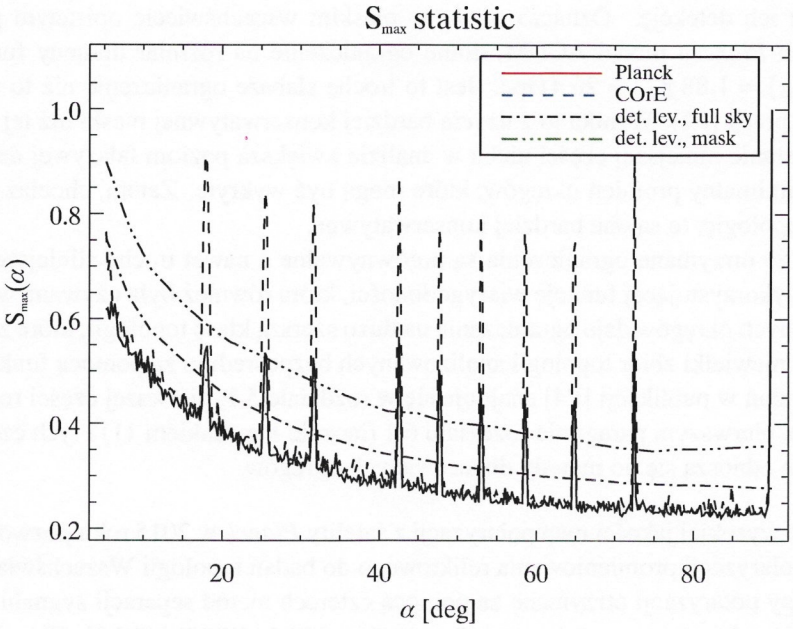
Niemniej powinniśmy pamiętać, że polaryzacja promieniowania jest tensorem, który zachowuje się inaczej niż skalar przy obrotach. Ponieważ polaryzacja zależy od kąta pod którym jest obserwowana, bardziej wygodne jest używanie wielkości niezależnych od układu współrzędnych, tzn. map E i B, które są, odpowiednio, skalarem i pseudo-skalarem i nie zależą od kierunku obserwacji. Mapy E odpowiadają bezrotacyjnej, zaś mapy B bezźródłowej składowej pola polaryzacji. Rozkład zaszumionej i zanieczyszczonej przez emisje galaktyczną mapy polaryzacji, gdzie część nieba jest również zamaskowana, na mapy E i B jest zadaniem skomplikowanym i nielokalnym na niebie. Zakładając zaniedbywalnie mały wkład od modów B, używaliśmy w badaniach tylko map E otrzymanych z map polaryzacji promieniownia w taki sam sposób jak opisany w publikacji Kim (2011).

W pracy przeanalizowaliśmy wszystkie wspomniane wyżej kwestie związane z wykorzystaniem map polaryzacji i przetestowaliśmy metodę dopasowanych okręgów używając symulacji map dla wielospójnego wszechświata. Pokazaliśmy, że polaryzacja umożliwia otrzymanie silniejszych ograniczeń na topologię niż anizotropia temperatury. Ponadto pokazaliśmy, że detekcja śladów topologii jest niewrażliwa na wtórną anizotropię polaryzacji wytworzoną po epoce wtórnej jonizacji. Jednakże wykorzystanie map polaryzacji do badania topologii zależy w dużym stopniu od poziomu szumu i pozostałości mikrofalowego promieniowania galaktycznego w oczyszczonych mapach.

Używając symulacji map polaryzacji z satelity *Planck* wykazaliśmy, że poziom szumu map powinien być wystarczająco niski, aby umożliwić wykrycie śladów wielospójnej topologii. Jednakże szum nie będzie na tyle niski, aby znacząco poprawić dotychczasowe ograniczenia na topologię otrzymane dla map anizotropii

PB

temperatury. Znacząca poprawa tych ograniczeń byłaby jednak możliwa w przypadku danych pochodzących z satelity COrE (Rys. 3). Krótka dyskusja perspektyw wykorzystania danych COrE do testowania topologii Wszechświata została zawarta również w publikacji The COrE Collaboration et al. (2011) (rozdział 2.3).



Rysunek 3: Przykład statystyki $S^{-}_{\max}$ (tzn. maksymalnej wartości statystyki dopasowanych okręgów S^{-}) jako funkcji promienia okręgów α dla symulowanej mapy polaryzacji dla wszechświata o topologii trójwymiarowego sześciennego torusa o rozmiarze $L = 2\ c/H_0$. Linie ciągła i przerywana oznaczają statystykę dla symulowanej mapy o rozdzielczości i z dodanym szumem odpowiadającym danym z satelitów, odpowiednio, *Planck* oraz COrE. Linie przerywana z kropka i trzema kropkami przedstawiają poziomy fałszywej detekcji dopasowanych okręgów, oszacowane na podstawie 100 symulacji map polaryzacji złożonych ze współdodanych map *Planck*a odpowiadających częstotliwościom 100, 143 i 217 GHz dla, odpowiednio, analizy na całym i części nieba. Rysunek z publikacji [P3].

4 Ograniczenia na topologię Wszechświata otrzymane dla danych z satelity *Planck* [P4], [P5]

Jako członek *Planck* Core Team miałem okazję do zastosowania rozwijanych przeze mnie programów do szukania par dopasowanych okręgów do map otrzymanych z satelity *Planck*. Testy map anizotropii udostępionych w 2013 i 2015 roku przedstawione zostały, odpowiednio, w publikacjach [P4] i [P5]. W pierwszej z nich koncentrowałem się głównie na analizie map anizotropii temperatury, zaś w drugiej – na analizie map polaryzacji.

Dane zebrane przez satelitę *Planck* w ciągu pierwszych 15,5 miesięcy obserwacji i udostępnione w 2013 roku pozwoliły oszacować mapy promieniowania reliktowego za pomocą kilku różnych metod separacji komponentów opisanych w pracy Planck Collaboration et al. (2014a). Otrzymane w ten sposób mapy promieniowania są ze sobą w dużej mierze zgodne z niewielkimi różnicami w natężeniu pikseli, własnościami szumu oraz maską usuwającą najbardziej zanieczyszczone przez emisję galaktyczną części nieba. W pracy [P4] analizowaliśmy mapy anizotropii temperatury otrzymane za pomocą metod `Commander-Ruler`, `NILC`, `SEVEM` i `SMICA`. To umożliwiło na sprawdzenie wrażliwości analizy na zastosowaną metodę oddzielania sygnału kosmologicznego od emisji pochodzenia galaktycznego.

Podobnie jak w publikacjach [P2] i [P3] oszacowaliśmy poziom statystycznie istotnego dopasowania par okręgów używając symulacji Monte Carlo map dla jednospójnego wszechświata. Poziom został ustalony, tak że mniej niż 1 % spośród 300 symulacji może mieć przypadkowo skorelowane okręgi. Algorytm użyty do analizy został również przetestowany na opisanej w poprzednim rozdziale symulacji mapy dla wszechświata o topologii trójwymiarowego torusa.

PB

Nie znaleźliśmy żadnej istotnej statystycznie korelacji par okręgów o promieniu większym niż 20° w żadnej z analizowanych map. Zatem możemy wykluczyć, na poziomie ufności 99 %, jakąkolwiek topologię przewidującą istnienie dopasowanych antypodalnych okręgów o promieniu większym niż 20° zakładając, że względna orientacja domeny fundamentalnej i maski usuwającej najbardziej zanieczyszczoną cześć mapy pozwala na ich detekcję. Oznacza to, że w płaskim wszechświecie opisanym przez najlepiej dopasowany do danych *Plancka* model ΛCDM, dolne ograniczenie na rozmiar domeny fundamentalnej wynosi $L \gtrsim 2\chi_{\rm rec}\cos(\alpha_{\rm min}) = 1.88\,\chi_{\rm rec} = 26.4\,{\rm Gpc}$. Jest to trochę słabsze ograniczenie niż to otrzymane dla map z satelity *WMAP* w pracy [P2]. Wynika to z użycia bardziej konserwatywnej maski niż tej używanej dla danych *WMAP*. Wykorzystanie mniejszej części nieba w analizie zwiększa poziom fałszywej detekcji par skorelowanych okręgów i minimalny promień okręgów, które mogą być wykryte. Zatem, chociaż otrzymujemy słabsze ograniczenia na topologię, to są one bardziej konserwatywne.

Warto dodać, że otrzymane ograniczenia są porównywalne a nawet trochę silniejsze niż te otrzymane za pomocą metody wykorzystującej funkcję wiarygodoności, która również była używana w publikacji. Jednakże metoda dopasowanych okręgów daje ograniczenia na dużo szerszą klasę topologii, które zostały wymienionych w rozdziale 3, niż niewielki zbiór topologii analizowanych bezpośrednio za pomocą funkcji wiarygodności.

Opis moich badań w publikacji [P4] znajduje się w rozdziale 5.1, pierwszej części rozdziału 5.3.1 (łącznie z rysunkami 4 i 5), pierwszym paragrafie rozdziału 6.1 (łącznie z rysunkiem 11) i tych częściach rozdziałów 1, 2, 3.1 oraz 7, które odnoszą się do metody dopasowanych okręgów.

Udostępnienie wysokiej jakości map polaryzacji z satelity *Planck* w 2015 roku pozwoliło na wykorzystanie po raz pierwszy polaryzacji promieniowania reliktowego do badań topologii Wszechświata. W publikacji [P5] analizowałem mapy polaryzacji otrzymane za pomocą czterech metod separacji sygnału kosmologicznego od emisji pochodzenia galaktycznego, tzn. mapy `Commander`, `NILC`, `SEVEM` i `SMICA` (Planck Collaboration et al., 2016a). Podobnie jak w pracy [P3] oryginalne mapy polaryzacji przetransformowałem na mapy modu E polaryzacji. Dodatkowo przetestowałem również zaktualizowaną mapę anizotropii temperatury otrzymaną z pełnych danych zebranych przez satelitę *Planck*.

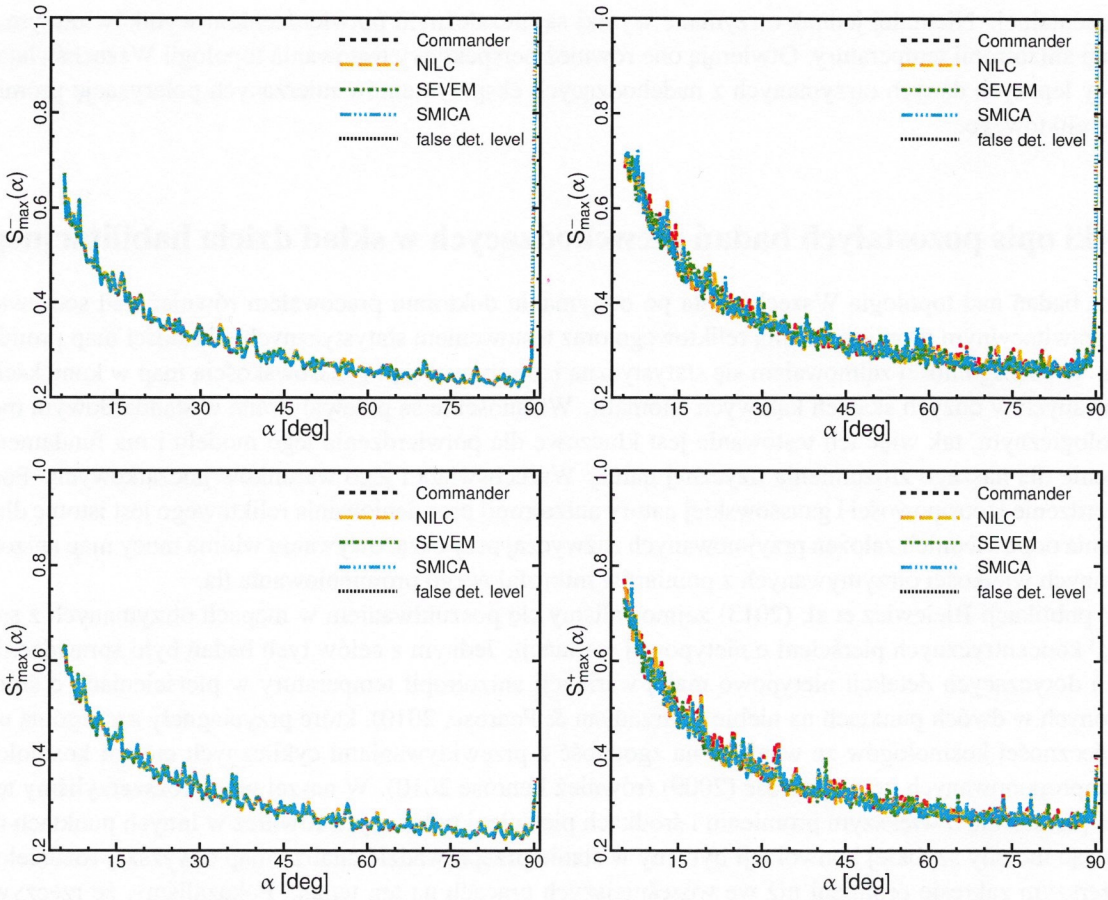
Nie znalazłem żadnego istotnego statystycznie dopasowania okręgów w żadnej z map (Rys. 4). Wyniki dla map temperatury są zgodne z wynikami przedstawionymi w pracy [P4]. Minimalny promień okręgów dla którego sygnał pochodzący od dopasowanych okręgów jest większy niż poziom odpowiadający przypadkowym korelacjom wynosi około $\alpha_{\rm min} \simeq 15°$. To nieco mniejszy promień niż dla map anizotropii temperatury analizowanych w pracy [P4], tzn. 20°. Dzięki temu otrzymujemy nieco silniejsze dolne ograniczenie na rozmiar domeny fundamentalnej w płaskim wszechświecie, tzn. $L \gtrsim 1.94\,\chi_{\rm rec}$. Wynik ten jest niezależnym potwierdzeniem ograniczeń otrzymanych wcześniej na podstawie analizy map anizotropii temperatury z satelitów *WMAP* i *Planck*. Niemniej, ze względu na znacznie silniejszą emisję galaktyczną w porównaniu do sygnału kosmologicznego, w analizie map polaryzacji używaliśmy mniejszej części powierzchni nieba niż w przypadku analizy map temperatury (tzn. 40 % dla polaryzacji w porównaniu do 74 % dla temperatury).

Opis moich badań w publikacji [P5] znajduje się w drugim paragrafie rozdziału 4.1, rozdziale 4.2, pierwszej części rozdziału 4.4.1 (łącznie z rysunkiem 6), rozdziale 5.1.1 (łącznie z rysunkami 11 i 12) i tych częściach rozdziałów 1, 2 i 6, które odnoszą się do metody dopasowanych okręgów.

5 Podsumowanie

W serii pięciu publikacji [P1], [P2], [P3], [P4] i [P5] zostały przedstawione wyczerpujące badania nad ograniczeniami na topologię Wszechświata otrzymanymi z obserwacji reliktowego promieniowania tła. W pierwszej z publikacji, jako możliwe wyjaśnienie obserwowanej współosiowości kwadrupolowego i oktupolowego momentu anizotropii temperatury, był rozważany wszechświat o wielospójny topologii. Analiza została przeprowadzona przy wykorzystaniu rozkładu map anizotropii promieniowania na multipolowe wektory, które są użytecznym narzędziem do badania statystycznej izotropowości. W pracy pokazaliśmy, że dane rzeczywiście preferują wszechświat o topologii trójwymiarowego torusa, jednakże wszechświat jednospójny nie może być jednoznacznie odrzucony. W pozostałych publikacjach skupiałem się na testowaniu topologii Wszechświata za pomocą metody dopasowanych okręgów. Wykorzystuje ona fakt, że przecięcie topologicznej domeny fundamentalnej z powierzchnią ostatniego rozpraszania jest okręgiem, który w wielospójnym wszechświecie potencjalnie może być obserwowany w różnych kierunkach. W pracach [P2] i [P4] szukałem dopasowanych okręgów w najnowszych dostępnych w tamtym czasie mapach anizotropii temperatury z satelitów *WMAP* i *Planck*. W

PB



Rysunek 4: Statystyki $S^-_{\max}$ i $S^+_{\max}$ (tzn. maksymalna wartość statystyki dopasowanych okręgów, odpowiednio, S^- i S^+) jako funkcje promienia okręgów α dla mapy `Commander` (krótka przerywana czerwona linia), `NILC` (długa przerywana pomarańczowa linia), `SEVEM` (zielona linia przerywana z kropką) oraz `SMICA` (niebieska linia przerywana z trzema kropkami). Rysunki z lewej strony przedstawiają statystyki dla map temperatury, rysunki z prawej strona dla map modów E polaryzacji. Linie kropkowane przedstawiają poziomy fałszywej detekcji dopasowanych okręgów, oszacowane na podstawie 300 symulacji map `SMICA`. Maksimum statystki dla promienia 90° odpowiada dopasowaniu dwóch kopii tego samego okręgu o promieniu 90° i środkach położonych antypodalnie. Rysunek z publikacji [P5].

analizie zwracałem szczególną uwagę na wpływ pozostałości emisji galaktycznej i kalibrację statystyk dopasowanych okręgów za pomocą realistycznych symulacji Monte Carlo map promieniowania reliktowego. Poza tym, używałem map o wyższej rozdzielczości niż we wcześniejszych badaniach. Warto dodać, że przy okazji tego projektu stworzyłem symulacje map dla wielospójnego wszechświata o najwyższej rozdzielczości jaka do tej pory była używana. Chociaż nie znaleźliśmy śladów wielospójnej topologii, to znacznie poprawiliśmy dolne ograniczenie na rozmiar domeny fundamentalnej dla szerokiej klasy topologii.

W publikacji [P3] rozważaliśmy rozszerzenie metody dopasowanych okręgów dla map polaryzacji promieniowania reliktowego. Przedstawiliśmy zalety użycia map polaryzacji do badania topologii Wszechświata w porównaniu do wykorzystywanych dotychczas map anizotropii temperatury. Na podstawie symulacji pokazaliśmy, że poziom szumu nadchodzących map polaryzacji dla satelity *Planck* będzie wystarczająco niski, aby wykorzystać te mapy do testowania topologii. W przypadku map następnej generacji eksperymentów mierzących promieniowanie mikrofalowe tła, ograniczenia na topologię otrzymane dla map polaryzacji powinny być znacznie silniejsze niż te otrzymane dla map anizotropii temperatury. Teoretyczne rozważania dotyczące danych z satelity *Planck* zostały potwierdzone w publikacji [P5], gdzie analizowałem mapy polaryzacji *Planck*a udostępnione w 2015 roku. Było to pierwsze wykorzystanie map polaryzacji do szukania skorelowanych ze względu na wielospójną topologię okręgów. Podobnie jak w przypadku map anizotropii temperatury, nie znalazłem śladów wielospójnego wszechświata i otrzymałem podobne dolne ograniczenia na rozmiar domeny

PB

fundamentalnej. Niemniej jednak otrzymane wyniki są niezależnym potwierdzeniem wyników otrzymanych dla map anizotropii temperatury. Otwierają one również perspektywy testowania topologii Wszechświata przy pomocy lepszych danych otrzymanych z nadchodzących eksperymentów mierzących polaryzację promieniowania reliktowego.

Krótki opis pozostałych badań niewchodzących w skład dzieła habilitacjnego

Oprócz badań nad topologią Wszechświata po otrzymaniu doktoratu pracowałem również nad soczewkowaniem grawitacyjnym promieniowania reliktowego oraz testowaniem statystycznych własności map promieniowania. W szczególności zajmowałem się statystyczną izotropowością i gaussowskością map w kontekście obserwowanych w dużych skalach kątowych anomalii. Własności te są przewidywane w standardowym modelu kosmologicznym, tak więc ich testowanie jest kluczowe dla potwierdzenia tego modelu i ma fundamentalne znaczenie dla naszego zrozumienia fizycznej natury Wszechświata i jego warunków początkowych. Ponadto potwierdzenie izotropowości i gaussowskiej natury anizotropii promieniowania reliktowego jest istotne dla uzasadnienia odpowiednich założeń przyjmowanych zazwyczaj przy oszacowywaniu widma mocy map anizotropii oraz innych wielkości otrzymywanych z pomiarów mikrofalowego promieniowania tła.

W publikacji Bielewicz et al. (2013) zajmowaliśmy się poszukiwaniem w mapach otrzymanych z satelity *WMAP* koncentrycznych pierścieni o nietypowej wariancji. Jednym z celów tych badań było sprawdzenie doniesień dotyczących detekcji nietypowo małej wariancji anizotropii temperatury w pierścieniach o środkach położonych w dwóch punktach na niebie (Gurzadyan & Penrose, 2010), które przyciągnęły szczególną uwagę w społeczności kosmologów ze względu na zgodność z przewidywaniami cyklicznych modeli kosmologicznych zaproponowanych przez Penrose (2009) (również Penrose 2010). W naszej pracy rozszerzyliśmy tę analizę na pierścienie o większym promieniu i środkach pierścieni położonych również w innych punktach nieba. Używając metody szybkiej konwolucji byliśmy w stanie przeprowadzić analizę map o wyższej rozdzielczości i w szerszym zakresie promieni niż we wcześniejszych pracach na ten temat. Pokazaliśmy, że rzeczywiście dla jednego z wymienionych punktów pierścienie o promieniu większym niż 10° mają systematycznie mniejszą wariancję w porównaniu z przewidywaniami standardowego modelu ΛCDM. Jednakże wykazaliśmy, że to odchylenie jest związane z multipolami rozkładu w bazie harmonik sferycznych rzędu mniejszego niż $\ell = 7$. Zatem obserwowany deficyt wariancji dla koncentrycznych pierścienii o dużym promieniu jest jeszcze jedną oznaką dobrze znanych anomalii map temperatury występujących w dużych skalach kątowych. Można też zauważyć, że na mapach występują również liczne inne pierścienie o niskiej wariancji. W pracy przedstawiliśmy też wyniki analizy dla pierścieni o nietypowo dużej wariancji.

Od momentu dołączenia do projektu *Planck* w 2008 roku brałem aktywny udział w analizie danych. W ramach tej aktywności, oprócz badań nad topologią, byłem odpowiedzialny za rozwój i zastosowanie estymatora N-punktowej funkcji korelacji obliczanej w przestrzeni rzeczywistej do testowania statystycznej izotropowości i gaussowskości (rozdziały 4.3 i 5.3 w pracy Planck Collaboration et al. 2014c, rozdziały 4.3, 5.2 i 7.2 w pracy Planck Collaboration et al. 2016c, rozdziały 7.2, E.3 w pracy Planck Collaboration et al. 2016a i rozdziały 4.7, H w pracy Planck Collaboration et al. 2018a). Był to jeden z kluczowych naukowych projektów w ramach misji *Planck*. Analiza map temperatury potwierdziła asymetrię własności statystycznych anizotropii temperatury na dwóch półkulach, zauważoną wcześniej dla danych z satelity *WMAP* (Eriksen et al., 2004, 2005) pokazując, że ta anomalia nie jest wywołana jakimś efektem systematycznym lub sposobem przetwarzaniem danych, ponieważ eksperymenty *WMAP* i *Planck* używają instrumentów pomiarowych opartych na innych technologiach oraz innych algorytmów do analizy.

W ramach mojego udziału w *Planck* Core Team byłem również zaproszony do specjalnej grupy ekspertów od niegaussowskości testującej mapy promieniowania reliktowego oczyszczone z emisji pochodzenia galaktycznego. Na podstawie tych testów zostały wybrane cztery najbardziej wiarygodne metody separacji sygnału kosmologicznego od emisji galaktycznej, które były wykorzystywane przy tworzeniu oczyszczonych map promieniowania reliktowego udostępnionych w latach 2013, 2015 i 2018 (Planck Collaboration et al., 2014a, 2016a, 2018a). Wykonywałem również regularne testy map i produktów z nimi związanych na potrzeby niepublicznej wymiany danych w ramach projektu *Planck*.

Poza tym, w projekcie *Planck* byłem też odpowiedzialny za testowanie współosiowości momentu kwadrupolowego i oktupolowego anizotropii temperatury (rozdział 5.1 w pracy Planck Collaboration et al. 2014c),

PB

którą analizowałem podczas mojego doktoratu z wykorzystaniem danych z satelity *WMAP* (Bielewicz et al., 2004, 2005). Badania te potwierdziły współosiowość na podobnym poziomie istotności statystycznej jak dla danych *WMAP* co pokazuje, że anomalia ta nie jest spowodowana efektami systematycznymi lub sposobem przetwarzania danych.

Innym obszarem moich zainteresowań badawczych jest soczewkowanie grawitacyjne promieniowania reliktowego. W publikacji Hanson et al. (2011), wraz ze współpracowanikami, analizowałem oszacowywanie widma mocy soczewkującego potencjału grawitacyjnego na podstawie map anizotropii promieniownia. W pracy używaliśmy optymalnego estymatora kwadratowego Okamoto & Hu (2003), który dogłębnie zanalizowaliśmy w kontekście oszacowania widma mocy potencjału soczewkującego. Odkryliśmy, że estymator ten jest odchylony o około 15 % dla multipoli rzędu $\ell < 250$ z powodu wyższych członów w rozwinięciu efektu soczewkowania w szereg Taylora. Aby wyjaśnić ten efekt, przedstawiliśmy pełną 4-punktową funkcję korelacji. Pokazaliśmy, że to odchylenie, podobnie jak znane juz wcześniej odchylenie dla multipoli wyższego rzędu (Kesden et al., 2003), jest istotne dla wyznaczania parametrów kosmologicznych i musi być skorygowane, aby uniknąć znacznych błędów przy oszacowywaniu parametrów. Mój wkład do tej publikacji sprowadzał się do opisu użytecznej metody korygowania widma mocy ze względu na odchylenie dla multipoli niskiego rzędu oraz policzenie 4-punktowej funkcji korelacji w przybliżeniu płaskiego nieba (dodatek B w publikacji Hanson et al. 2011). Metoda ta była ostatnio używana w przypadku oszacowywania widma mocy soczewkującego potencjału otrzymanego z danych z satelity *Planck* (Planck Collaboration et al., 2014b, 2016b, 2018b).

Oszacowana przez zespół eksperymentu *Planck* mapa potencjału grawitacyjnego (Planck Collaboration et al., 2014b, 2016b) umożliwia badanie formowania się wielkoskalowej struktury Wszechświata przy dużym przesunięciu ku czerwnieni ($1 \lesssim z \lesssim 5$). Potencjał grawitacyjny powinien korelować się z obserwowanym polem gęstości galaktyk oraz innych obiektów odzwierciedlających wielkoskalową strukturę. Korelacje te mogą dostarczyć dodatkowych informacji użytecznych dla testowania modeli kosmologicznych. Wiele takich korelacji zostało ostatnio zmierzonych. W pracy Bianchini et al. (2015), gdzie głównym autorem był doktorant Federico Bianchini, którego byłem współpromotorem, przedstawiliśmy pierwszy pomiar korelacji między potencjałem soczewkującym a katalogiem galaktyk o dużym przesunięciu ku czerwnieni *Herschel* Astrophysical Terahertz Large Area Survey (H-ATLAS). Wysoka istotność statystyczna detekcji była możliwa dzięki użyciu katalogu galaktyk o większym przesunięciu ku czerwieni ($z \gtrsim 1.5$) niż katalogi wykorzystywane we wcześniejszych pracach na ten temat.

Rozszerzony i ulepszony pomiar korelacji został zaprezentowany w publikacji Bianchini et al. (2016). Porównaliśmy w niej wyniki oparte na danych z satelity *Planck* udostępnionych w 2013 i 2015 roku oraz zbadaliśmy wpływ różnych kryteriów selekcji galaktyk z katalogu H-ATLAS. Analiza została udoskonalona głównie dzięki wyższemu stosunkowi sygnału do szumu mapy potencjału soczewkującemu udostępnionej przez zespoł eksperymentu *Planck* w 2015 roku. Oprócz pomiaru korelacji dla całego katalogu wykonaliśmy również pomiar korelacji dla podkatalogów galaktyk o przesunięciu ku czerwieni w przedziałach $1.5 \leq z < 2.1$ i $z \geq 2.1$, co umożliwiło przetestowanie modeli ewolucji wielkoskalowej struktury Wszechświata.

Literatura

Aurich, R. 1999, ApJ, 524, 497

Aurich, R., Janzer, H. S., Lustig, S., & Steiner, F. 2008, Classical and Quantum Gravity, 25, 125006

Aurich, R., & Lustig, S. 2013, MNRAS, 433, 2517

Aurich, R., Lustig, S., & Steiner, F. 2005, Classical and Quantum Gravity, 22, 2061

—. 2006, MNRAS, 369, 240

Aurich, R., Lustig, S., Steiner, F., & Then, H. 2004, Classical and Quantum Gravity, 21, 4901

Bennett, C. L., Banday, A. J., Gorski, K. M., et al. 1996, ApJ, 464, L1

Bennett, C. L., Halpern, M., Hinshaw, G., et al. 2003, ApJS, 148, 1

Bianchini, F., Bielewicz, P., Lapi, A., et al. 2015, ApJ, 802, 64

Bianchini, F., Lapi, A., Calabrese, M., et al. 2016, ApJ, 825, 24

Bielewicz, P., Eriksen, H. K., Banday, A. J., Górski, K. M., & Lilje, P. B. 2005, ApJ, 635, 750

Bielewicz, P., Górski, K. M., & Banday, A. J. 2004, MNRAS, 355, 1283

PB

Bielewicz, P., Wandelt, B. D., & Banday, A. J. 2013, MNRAS, 429, 1376
Bond, J. R., Pogosyan, D., & Souradeep, T. 1998, Classical and Quantum Gravity, 15, 2671
—. 2000, Phys. Rev. D, 62, 043006
Caillerie, S., Lachièze-Rey, M., Luminet, J.-P., et al. 2007, A&A, 476, 691
Copi, C. J., Huterer, D., Schwarz, D. J., & Starkman, G. D. 2006, MNRAS, 367, 79
—. 2009, MNRAS, 399, 295
Copi, C. J., Huterer, D., & Starkman, G. D. 2004, Phys. Rev. D, 70, 043515
Cornish, N. J., Spergel, D. N., & Starkman, G. D. 1998, Classical and Quantum Gravity, 15, 2657
Cornish, N. J., Spergel, D. N., Starkman, G. D., & Komatsu, E. 2004, Physical Review Letters, 92, 201302
Coule, D. H., & Martin, J. 2000, Phys. Rev. D, 61, 063501
de Oliveira-Costa, A., & Smoot, G. F. 1995, ApJ, 448, 477
de Sitter, W. 1917, Proc. Roy. Acad. Amsterdam, 20, 229
Dineen, P., Rocha, G., & Coles, P. 2005, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 358, 1285
Eriksen, H. K., Banday, A. J., Górski, K. M., Hansen, F. K., & Lilje, P. B. 2007, ApJ, 660, L81
Eriksen, H. K., Banday, A. J., Górski, K. M., & Lilje, P. B. 2005, ApJ, 622, 58
Eriksen, H. K., Hansen, F. K., Banday, A. J., Górski, K. M., & Lilje, P. B. 2004, ApJ, 605, 14
Fagundes, H. V., & Wichoski, U. F. 1987, Nature, 322, L5
Fang, L.-Z., & Sato, H. 1983, Communications in Theoretical Physics, 2, 1055
Friedmann, A. 1922, Zeitschrift fur Physik, 10, 377
Fujii, H., & Yoshii, Y. 2011, A&A, 529, A121
Gurzadyan, V. G., & Penrose, R. 2010, ArXiv e-prints, arXiv:1011.3706
Hansen, F. K., Banday, A. J., Górski, K. M., Eriksen, H. K., & Lilje, P. B. 2009, ApJ, 704, 1448
Hanson, D., Challinor, A., Efstathiou, G., & Bielewicz, P. 2011, Phys. Rev. D, 83, 043005
Hoftuft, J., Eriksen, H. K., Banday, A. J., et al. 2009, ApJ, 699, 985
Kesden, M., Cooray, A., & Kamionkowski, M. 2003, Phys. Rev. D, 67, 123507
Key, J. S., Cornish, N. J., Spergel, D. N., & Starkman, G. D. 2007, Phys. Rev. D, 75, 084034
Kim, J. 2011, A&A, 531, A32
Kosowsky, A. 1996, Annals of Physics, 246, 49
Kunz, M., Aghanim, N., Cayon, L., et al. 2006, Phys. Rev. D, 73, 023511
Lachieze-Rey, M., & Luminet, J. 1995, Physics Reports, 254, 135
Lehoucq, R., Lachieze-Rey, M., & Luminet, J. P. 1996, A&A, 313, 339
Levin, J. 2002, Physics Reports, 365, 251
Levin, J., Scannapieco, E., & Silk, J. 1998, Nature, 58, 103516
Lew, B., & Roukema, B. 2008, A&A, 482, 747
Lewis, A., Challinor, A., & Lasenby, A. 2000, ApJ, 538, 473
Linde, A. 2004, J. Cosmology Astropart. Phys., 10, 004
Luminet, J.-P., Weeks, J. R., Riazuelo, A., Lehoucq, R., & Uzan, J.-P. 2003, Nature, 425, 593
Niarchou, A., Jaffe, A. H., & Pogosian, L. 2004, Phys. Rev. D, 69, 063515
Okamoto, T., & Hu, W. 2003, Phys. Rev. D, 67, 083002
Penrose, R. 2009, Death and Anti-Death: The Basic Ideas of Conformal Cyclic Cosmology (Ria University Press)
—. 2010, Cycles of Time: An Extraordinary New View of the Universe (Bodley Head)
Phillips, N. G., & Kogut, A. 2006, ApJ, 645, 820
Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N., et al. 2014a, A&A, 571, A12
—. 2014b, A&A, 571, A17
—. 2014c, A&A, 571, A23
Planck Collaboration, Adam, R., Ade, P. A. R., et al. 2016a, A&A, 594, A9

PB

Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N., et al. 2016b, A&A, 594, A15
—. 2016c, A&A, 594, A16
Planck Collaboration, Akrami, Y., Ashdown, M., et al. 2018a, ArXiv e-prints, arXiv:1807.06208
Planck Collaboration, Aghanim, N., Akrami, Y., et al. 2018b, ArXiv e-prints, arXiv:1807.06210
Riazuelo, A., Weeks, J., Uzan, J.-P., Lehoucq, R., & Luminet, J.-P. 2004, Phys. Rev. D, 69, 103518
Robertson, H. P. 1935, ApJ, 82, 284
Rocha, G., Cayón, L., Bowen, R., et al. 2004, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 351, 769
Roukema, B. F. 2000a, Classical and Quantum Gravity, 17, 3951
—. 2000b, MNRAS, 312, 712
Roukema, B. F., Buliński, Z., & Gaudin, N. E. 2008, A&A, 492, 657
Sokolov, D. D., & Shvartsman, V. F. 1974, Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics, 39, 196
Sokolov, I. Y. 1993, Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 57, 617
Starobinskij, A. A. 1993, Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 57, 622
Stevens, D., Scott, D., & Silk, J. 1993, Physical Review Letters, 71, 20
Tegmark, M., de Oliveira-Costa, A., & Hamilton, A. J. 2003, Phys. Rev. D, 68, 123523
The COrE Collaboration, Armitage-Caplan, C., Avillez, M., et al. 2011, ArXiv e-prints, arXiv:1102.2181
Weatherley, S. J., Warren, S. J., Croom, S. M., et al. 2003, Nature, 342, L9
Zaldarriaga, M., & Seljak, U. 1997, Phys. Rev. D, 55, 1830
Zeldovich, Y. B., & Starobinskii, A. A. 1984, Soviet Astronomy Letters, 10, 135

Warszawa, 10.10.2018

P. Bielewicz

Paweł Bielewicz

6. Najważniejsze publikacje:

   a) "Planck 2015 results. XVIII. Background geometry and topology of the Universe"
   Planck Collaboration, et al. (including **Bielewicz P.**), 2016, A&A, 594, A18

   b) "Planck 2015 results. XVI. Isotropy and statistics of the CMB"
   Planck Collaboration, et al. (including **Bielewicz P.**), 2016, A&A, 594, A16

   c) "Planck 2015 results. IX. Diffuse component separation: CMB maps"
   Planck Collaboration, et al. (including **Bielewicz P.**), 2016, A&A, 594, A9

   d) "Toward a Tomographic Analysis of the Cross-Correlation between Planck CMB Lensing and H-ATLAS Galaxies",
   Bianchini F., Lapi A., Calabrese M., **Bielewicz P.**, et al., 2016, ApJ, 825, 24

   e) "Cross-correlation between the CMB lensing potential measured by Planck and high-z sub-mm galaxies detected by the Herschel-ATLAS survey",
   Bianchini F., **Bielewicz P.**, et al., 2015, ApJ, 802, 64

   f) "Planck 2013 results. XXVI. Background geometry and topology of the Universe",
   Planck Collaboration et al. (including **Bielewicz P.**), 2014, A&A, 571, A26

   g) "Planck 2013 results. XXIII. Isotropy and Statistics of the CMB",
   Planck Collaboration et al. (including **Bielewicz P.**), 2014, A&A, 571, A23

   h) "Planck 2013 results. XII. Component separation",
   Planck Collaboration, et al. (including **Bielewicz P.**), 2014, A&A, 571, A12

   i) "A search for concentric rings with unusual variance in the 7-year WMAP temperature maps using a fast convolution approach",
   Bielewicz P., Wandelt B.D., Banday A.J., 2013, MNRAS, 429, 1376

   j) "Constraining the topology of the Universe using the polarised CMB maps",
   Bielewicz P., Banday A.J., Górski K.M., 2012, MNRAS, 421, 1064

   k) "Constraints on the topology of the Universe derived from the 7-year *WMAP* data",
   Bielewicz P., Banday A.J., 2011, MNRAS, 412, 2104

   l) "CMB temperature lensing power reconstruction",
   Hanson D., Challinor A., Efstathiou G., **Bielewicz P.**, 2011, PhRvD, 83, 043005

   m) "The study of topology of the Universe using multipole vectors",
   Bielewicz P., Riazuelo A., 2009, MNRAS, 396, 609

   n) "Multipole vector anomalies in the first-year *WMAP* data: a cut-sky analysis",
   Bielewicz P., Eriksen H. K., Banday A. J., Górski K. M., Lilje P. B., 2005, ApJ, 635, 750

   o) "Low order multipole maps of CMB anisotropy derived from *WMAP*"
   Bielewicz P., Górski K. M., Banday A. J., 2004, MNRAS, 355, 1283

   p) "Influence of the gravitational lensing effect on distance determination"
   Bielewicz P., 2001, Acta Physica Polonica B, vol.32, No.10, 3115

7. Publikacje - statystyka (źródło Web of Science i NASA ADS, 1 października 2018; wartości odnoszą się tylko do publikacji recenzowanych):

   - 112 recenzowanych publikacji w międzynarodowych czasopismach (WoS, NASA ADS)
   - Całkowita liczba cytowań (bez autocytowań): 16890 (WoS), 22104 (NASA ADS)
   - Średnia liczba cytowań (bez autocytowań) na publikacje: 151 (WoS), 197 (NASA ADS)
   - *h*-index: 53 (WoS), 64 (NASA ADS)
   - Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports: 543,960

PB

8. Działalność w sieciach naukowych:
   - 2002-2003: uczestnik sieci CMBNet (training network) finansowanej przez Unię Europejską
   - od 2008: Planck Scientist i członek LFI i HFI Core Team
   - od 2015: współpracownik w projekcie Euclid
9. Nagrody za działalność naukową:
   - 2018: nagroda fundacji Grubera (Gruber cosmology prize for the Planck Team)
10. Recenzje:
   - Recenzent w Monthly Notices of the Royal Astronomical Society
   - Recenzent w Astronomy and Astrophysics
11. Organizacja konferencji:
   - członek lokalnego komitetu organizacyjnego spotkania Planck Joint Core Team meeting, maj 2014, Triest
12. Udział w konferencjach:
   - Sierpień 2017: Understanding cosmological observations, Benasque, Hiszpania
     Talk: "Constraints on the topology of the Universe derived from the Planck CMB maps"
   - Czerwiec 2016: Jubileusz Centrum Astronomicznego im. M. Kopernika, Warszawa, Polska
     Talk: "Latest results from Planck"
   - Marzec 2016: 51st Rencontres de Moriond, La Thuile, Włochy
     Talk: "Testing significance of the large angular scale CMB anomalies using Planck data"
   - 2009-2015: kilkanaście prezentacji na Planck Core Team i Working Group meetings
   - Wrzesień 2015: International Conference on Particle Physics and Cosmology COSMO 2015, Warszawa, Polska
     Talk: "Cross-correlation between the CMB lensing potential measured by Planck and high-redshift Herschel-ATLAS galaxies"
   - Styczeń 2015: Workshop on conformal Universe, Warszawa, Polska
     Talk (invited): "A search for concentric rings with unusual variance in CMB maps"
   - Wrzesień 2014: Experimental search for quantum gravity, Triest, Włochy
     Talk (invited): "Planck 2013 cosmological results"
   - Lipiec 2014: String phenomenology, Triest, Włochy
     Talk: "Planck 2013 cosmological results"
   - Sierpień 2013: Workshop on New Light in Cosmology from the CMB, Triest, Włochy
     Talk: "Testing statistical properties of the Planck CMB maps using the real-space N-point correlation functions"
   - Lipiec 2013: G20th and 10th Amaldi international conferences, Warszawa, Polska
     Talk: "Constraints on the topology of the Universe derived from the Planck CMB maps"
     Poster:"A search for concentric rings with unusual variance in the CMB maps"
   - Marzec 2012: 47th Rencontres de Moriond, La Thuile, Włochy
     Talk: "Constraints on the topology of the Universe derived from the 7-year WMAP CMB data and perspectives of constraining the topology using CMB polarisation maps"
   - Czerwiec 2011: Statistical Challenges in Modern Astronomy V, State College, USA
     Poster: "Estimation of moments on azimuthally symmetric patches on the sphere by means of fast convolution"
   - Czerwiec 2007: Planck consortium meeting, Tuluza, Francja
     Poster: "Study of topology of the universe using multipole vectors"

PB

13. Seminaria:

- Styczeń 2017: Institut Fizyki Doświadczalnej UW, Warszawa, Polska
  Prezentacja: "Planck 2015 cosmological results"
- Listopad 2016: Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Warszawa, Polska
  Prezentacja: "Planck 2015 cosmological results"
- Luty 2016: Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika PAN, Warszawa, Polska
  Prezentacja: "Cosmic microwave background anomalies at large angular scales"
- Październik 2014: Centrum Fizyki Teoretycznej PAN, Warszawa, Polska
  Prezentacja: "Studies of the cosmic microwave background at large angular scales"
- Czerwiec 2014: Imperial College, Londyn, Wielka Brytania
  Prezentacja: "Constraining the topology of the Universe using temperature and polarisation CMB maps"
- Grudzień 2012: SISSA, Triest, Włochy
  Prezentacja: "Studies of the cosmic microwave background at large angular scales"
- Grudzień 2009: CESR, Tuluza, Francja
  Prezentacja: "Gravitational lensing of the CMB"
- Maj 2008: LAL, Orsay, Francja
  Prezentacja: "Estimation of the gravitational lensing potential for CMB maps with mask"
- Wrzesień 2007: IAP, Paryż, Francja
  Prezentacja: "Study of topology of the Universe using multipole vectors"
- Luty 2007: APC, Paryż, Francja
  Prezentacja: "Removing gravitational lensing B-modes"

14. Dydaktyka:

- od 2013 do 2016: promotor pomocniczy doktoranta Federico Bianchini (główny promotor prof. Carlo Baccigalupi) pracującego w SISSA we Włoszech nad pracą doktorską pt. "Cosmic Microwave Background and Large Scale Structure: Cross-Correlation as seen from Herschel and Planck satellites" (obrona 29.09.2016)
- Lipiec 2016: opieka nad studentką Katarzyną Kruszyńską podczas wakacyjnego programu studenckiego w Centrum Astronomicznym im. M. Kopernika.
- Luty 2013, marzec 2014, luty 2015: wykłady dla doktorantów w SISSA na temat obserwacji relikwowego promieniowania tła.
- 2000-2004: prowadzenie ćwiczeń do wykładów z analizy matematycznej i metod numerycznych dla studentów Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (łącznie 360 godzin).

15. Popularyzacja nauki:

- Październik 2017: Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika, Warszawa
  Wykład popularnonaukowy: "Misja satelity Planck",
- Październik 2017: artykuł w miesięczniku "Delta",
- Listopad 2012: wykład popularnonaukowy dla uczniów szkoły średniej w IRAP w Tuluzie we Francji.

P. Bielewicz