

Udział Radioteleskopu "Heweliusz" w badaniach kosmologicznych: teoria i obserwacje

DATA : 2010-04-23

AUTOR: BARTOSZ LEW

1 Wstęp

Na przestrzeni ostatnich dwóch dekad, dzięki systematycznie wzrastającym czułości odbiorników radiowych i mocy obliczeniowych komputerów, nasz obraz Wszechświata został zrewolucjonizowany. Eksperymentalne badanie Wszechświata stało się rzeczywistością. Spośród być może najbardziej spektakularnych odkryć, które zmieniły wizerunek Wszechświata, należy wymienić obserwacje supernowych typu Ia, które pozwoliły ustalić relacje pomiędzy odległością jasnościową a redshiftem w skalach (współporuszającej się) odległości od zera do około 3.3 Gpc ($z \sim 1$) i dostarczyły pierwszych dowodów popierających modele przyspieszającego Wszechświata z nie-zeroowym członem kosmologicznym – czyli formą tzw. Ciemnej Energii. Ponadto systematycznie wzrastająca czułość pomiarów natężenia i polaryzacji fluktuacji promieniowania relikтового (CMB) - które zawierają ślady pierwotnych kwantowych fluktuacji przestrzeni oraz fizyki wczesnych oddziaływań ciemnej materii, plazmy i promieniowania – pozwoliła na niezależne potwierdzenie wyłaniającego się u schyłku poprzedniego wieku nowego modelu kosmologicznego Λ CDM (Lambda Cold Dark Matter) który zastąpił uprzednio faworyzowany płaski model CDM Einsteina-de Sittera lub otwarty model CDM. Pomiar fluktuacji CMB pozwoliły na oszacowanie parametrów kosmologicznych (modelu Λ CDM i różnych jego modyfikacji) otworzyły nową i bardzo obiecującą drogę testowania fizyki, która wykracza poza standardowe jednorodne i izotropowe rozwiązania równań Einsteina. Bogactwo obecnie dostępnych danych kosmologicznych oraz ogromna liczba działających i planowanych eksperymentów naukowych również pozwala testować zmodyfikowane modele grawitacji, oraz wyznaczać parametry modeli inflacyjnych – jak dotąd najbardziej obiecujących modeli wyjaśniających powstawanie pierwotnych fluktuacji gęstości materii o statystycznych własnościach zgodnych z obserwacjami. Stało się również oczywiste, że niezależne pomiary rozkładu przestrzennego galaktyk, skali oraz amplitudy oscylacji akustycznych w przestrzennym widmie mocy fluktuacji materii, pomiary silnego soczewkowania grawitacyjnego odległych kwazarów, słabego soczewkowania CMB na wielkoskalowych strukturach, pomiary tzw „cosmic shear” (kosmicznego scinania – obserwowanej deformacji kształtu galaktyk poprzez słabe soczewkowanie na wielkoskalowych strukturach), pomiary stosunków i ilości pierwiastków chemicznych wzdłuż linii widzenia do odległych kwazarów, pomiary wielkoskalowych pól prędkości łącznie z teoretycznymi przewidywaniami i numerycznymi symulacjami wspólnie kładą bardzo silne i co najważniejsze zgodne ze sobą oszacowania parametrów kosmologicznych modelu Λ CDM i zbiegają się w ramach błędów wyznaczeń wokół wartości kilkunastu parametrów, które definiują nasz obecny Standardowy Model kosmologiczny (SM).

Dzięki niezależnym kontrybucjom od tak różnych od siebie metod obserwacji obecnie wiadomo, że na przykład krzywizna obserwowanej części Wszechświata jest bliska zera. Wiadomo, że zgodnie z SM Wszechświat zawiera dominujący (choć relatywnie od niedawna – od około 3.7 miliarda lat) składnik o ujemnym ciśnieniu i dodatniej gęstości energii zwany Ciemną Energią (około 72%), duże ilości słabo oddziałujących nie-relatywistycznych ciężkich cząstek zwanych ciemną materią (DM, około 23%) oraz nieduże ilości materii barionowej (około 5%) z której znaczna część (około połowa) istnieje w postaci gorącej plazmy wypełniającej przestrzeń międzygalaktyczną i promieniującą termicznie w zakresie miękkiego promieniowania X. Mimo, że model ten dobrze pasuje do większości danych obserwacyjnych (zważywszy na niewielką liczbę wolnych parametrów) wciąż pozostaje margines niepewności w zakresie wyznaczenia parametrów wskazujących na konkretny model inflacyjny – lub nawet rodzinę modeli. SM otwiera również nowe pytania dotyczące pochodzenia i fizycznych własności poszczególnych składników Wszechświata. Dane obserwacyjne natomiast zawierają cały zestaw intrygujących zbieżności i własności, których wytłumaczenie może wskazywać na problemy w teorii na poziomie bardziej fundamentalnym niż ten z którego wywodzi się SM.

Obecnie, niektóre z największych przedsięwzięć obserwacyjnej kosmologii następnej dekady to:

- Wyznaczenie parametrów kosmologicznych i inflacyjnych z bezprecedensową dokładnością. Poznanie równania stanu DE, oraz eksperymentalne potwierdzenie lub odrzucenie, na kosmologicznych skalach odległości zmodyfikowanych modeli grawitacji (Planck, SDSS, DES, wiele szerokich i głębokich przeglądów supernowych np. SNLS, przeglądy słabego soczewkowania i cosmic shear, przeglądy efektu Sunyaeva-Zeldovich'a: APEX-SZ, SPT oraz AMI – zob. dalej)
- Poznawanie fizyki bardzo wczesnego Wszechświata i testowanie modeli inflacyjnych poprzez bezpośrednią detekcję fal grawitacyjnych tła lub pośrednią detekcję tzw. modów B w polaryzacji fluktuacji promieniowania relikтового o określonych własnościach kąтового widma mocy. Kosmologiczne tło fal grawitacyjnych jest typowym przewidywaniem modeli inflacyjnych – jak dotąd jedynych modeli generujących tego typu sygnał - tak więc ich detekcja byłaby bardzo silnym dowodem świadczącym o poprawności tej teorii. Co więcej pomiar amplitudy modów tensorowych (fal grawitacyjnych) w CMB pozwoli na wyznaczenie typowej skali energii na której zachodzi inflacja. (misja Planck, CMBPol, LISA i rozważana BBO)
- Detekcja niegaussowości pierwotnych fluktuacji odbitych w CMB. Podczas gdy standardowe modele inflacji (z jednym polem skalarnym i potęgowym potencjale) przewidują niezauważalne odstępstwa od gaussowości, inne modele (np. ze zmodyfikowanymi lub dodatkowymi członami kinetycznymi w lagranżjanie pola lub modele z wieloma dynamicznymi polami) dają odstępstwa od gaussowskich fluktuacji na poziomie zauważalnym przez np. satelitę PLANCK. Wyznaczenie amplitudy niegaussowości, przy uwzględnieniu niegaussowskich sygnałów pochodzenia wtórnego (nie kosmologicznego) pozwoli rozróżnić pomiędzy różnymi rodzinami modeli inflacyjnych.
- Detekcja epoki rejonizacji oraz poznawanie historii formowania się pierwszych struktur we Wszechświecie jest nie-rozwiązanym od dziesięcioleci ważnym problemem w kosmologii. Podczas gdy dane CMB jednoznacznie i z bardzo wysokim

Udział Radioteleskopu "Heweliusz" w badaniach kosmologicznych: teoria i obserwacje

prawdopodobieństwem wskazują na istnienie epoki całkowitej jonizacji Wszechświata (oraz podają oszacowanie momentu jonizacji), przyszłe planowane, tomograficzne przeglądy poczerwienionej linii wodoru (21 cm) (LOFAR, SKA) oraz przeglądy na falach milimetrowych i sub-milimetrowych (ALMA) będą w stanie zaobserwować przebieg jonizacji oraz formowania się pierwszych struktur we Wszechświecie (gwiazd i protogalaktyk).

Każdy z wymienionych celów wymaga dużej liczby niezależnych obserwacji w zakresie od fal radiowych aż po fale X, gdyż w każdej obserwacji oprócz interesujących sygnałów, szum bądź to sygnały tła, bądź nakładające się na tło emisje (tzn pochodzące z mniejszych odległości – np: galaktyczne emisje termiczne, free-free, synchrotronowe, źródeł punktowych, wirujących polarnych ziaren, termicznie oscylujących magnetycznie polarnych ziaren, oraz rozciągniętych nie-termicznych emisji wiadomego i niewiadomego pochodzenia) zakłócają interesujący sygnał. Redukcja i analiza kosmologicznych danych obserwacyjnych wymaga więc bardzo zaawansowanych metod statystycznych oraz sporych ilości niezależnych obserwacji.

Planowany, nowoczesny, 90cioro metrowy radioteleskop (RT90) będzie w stanie zaadresować niektóre z ważnych problemów dzięki dużej zdolności rozdzielczej (duża średnica teleskopu) oraz dużej ilości nowoczesnych i czułych odbiorników. Nowo powstające kompleksowe przeglądy emisji gromad galaktyk (np poprzez pomiar efektu Sunyaev-Zeldovicha (SZE)) wymagają wielopasmowych obserwacji, które często trudno wykonać na pojedynczym teleskopie ze względu na ograniczoną liczbę systemów odbiorczych. Radioteleskopy ogólnego stosowania następnej generacji (takie jak RT90) będą wielo-wiązkowymi i wielozadaniowymi systemami pracującymi w zakresie częstotliwości od kilkunastu do kilkudziesięciu GHz.

2 Kosmologia z RT90: teoria

2.1 Emisja słabych źródeł punktowych

Kosmologiczna interpretacja zrekonstruowanego kąowego widma mocy fluktuacji CMB jest obciążona błędem, jeśli moc od słabych źródeł punktowych nie jest uwzględniona. Ponieważ chodzi o słabe radioźródła, które są mniejsze niż wiązka teleskopu, jedyną metodą uwzględnienia ich jest statystyczna ocena mocy sygnału. Ponieważ źródła punktowe dodają moc na małych skalach kąowych bardziej niż na dużych skalach, w pierwszym rzędzie parametrem kosmologicznym, który będzie źle oszacowany jest nachylenie pierwotnego widma mocy (n_s). Wartość tego parametru jest niezmiernie ważna dla selekcji klasy modeli inflacyjnych (modele o małych polach, dużych polach, hybrydowe modele inflacji) przy danej amplitudzie modów tensorowych (fal grawitacyjnych). Przykładowo, obecne wyznaczenia tego parametru jeszcze nawet nie pozwalają na jednoznaczne wykluczenie widma Harrizona-Zeldowicha – widma mocy niezależnego od skali – na wysokim poziomie ufności, aczkolwiek dane wskazują na tzw. „widmo czerwone” - tj. o mniejszej mocy na mniejszych skalach odległości niż na większych skalach odległości (zgodnie z przewidywaniami standardowych modeli inflacyjnych).

Jedną ze standardowych metod wyznaczenia mocy źródeł punktowych w CMB jest założenie pewnej zależności spektralnej dla jasnych źródeł oraz eksperymentalne oszacowanie wolnych parametrów (typowo strome widmo potęgowe temperatury antenowej o indeksie widmowym ~ -2) a następnie założenie takiego samego widma dla źródeł słabych i dokonanie marginalizacji po składniku, który jest niezależny od częstotliwości – czyli po widmie mocy fluktuacji CMB. Ponieważ widmo mocy źródeł punktowych jest płaskie w zależności od rozmiarów kąowych (biały szum o znikomej kowariancji) jest ono zdefiniowane w ramach założonego modelu pojedynczą liczbą – amplitudą widma mocy dla danej referencyjnej częstotliwości. Tak oszacowane widmo źródeł punktowych można po prostu odjąć od zrekonstruowanego (różnymi dostępnymi metodami) widma mocy CMB, które następnie można użyć do oszacowania wartości parametrów kosmologicznych.

Chociaż amplituda źródeł punktowych, nie jest duża (typowo na poziomie kilku do kilkunastu μK^2) jego wpływ na wielkość błędów i wartości parametrów kosmologicznych nie jest zaniedbywany. Założenia dotyczące użytego modelu źródeł punktowych są więc bardzo ważne i mają swe kosmologiczne konsekwencje.

Rozległa dystorsja widma promieniowania CMB na gromadach galaktyk (efekt Sunyaeva Zeldowicha (SZ)) również ma wpływ na kształt widma mocy źródeł punktowych (Użyto typowej nomenklatury “widmo mocy źródeł punktowych” które włącza wpływ również od obiektów rozciągniętych – klastrów galaktyk). Kątowe widmo tego typu emisji nie jest już widmem płaskim – ma rozległe maksimum na skalach kąowych kilku minut łuku. Amplituda fluktuacji generowanych przez SZ przewyższa amplitudę fluktuacji CMB właśnie na tych skalach kąowych. Systematyczne katalogowanie gromad SZ oraz źródeł tła w tych samych gromadach galaktyk, jest również bardzo istotne dla niezależnego i niezawodnego wyznaczania parametrów kosmologicznych oraz poznania własności fizycznych gromad, oraz kalibracji modeli formowania się struktur we Wszechświecie.

2.2 Parametry kosmologiczne, powstawanie struktur i fizyka gromad galaktyk

W nie-relatywistycznym przybliżeniu, termiczny efekt SZ (SZE) obserwowany w CMB jest proporcjonalny do iloczynu tzw. parametru komptonizacji (y) oraz funkcji definiującej zależność widmową $f_e(x)$:

$$\frac{\Delta T_{SZE}}{T_{CMB}} = f_e(x) y = f_e(x) \int n_e \frac{k_B T_e}{m_e c^2} \sigma_T dl$$

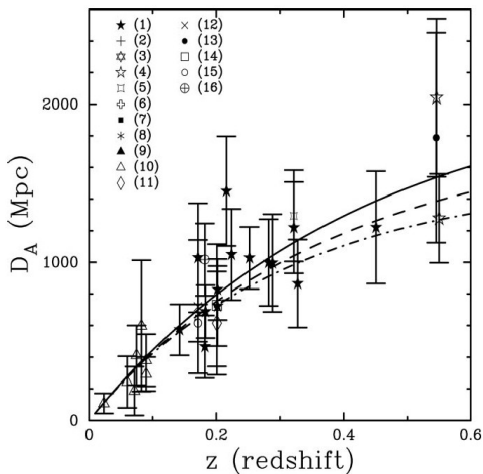
Udział Radioteleskopu "Heweliusz" w badaniach kosmologicznych: teoria i obserwacje

gdzie $f_\nu(x) = x (\coth(x/2) - 4)$, $x = h\nu / (k_B T_{\text{CMB}})$. Ponieważ parametr y jest całką wzdłuż linii widzenia z gęstości elektronów w gromadzie galaktyk oraz temperatury gazu, mapowanie SZE stwarza możliwość pomiaru masy barionowej w gromadach galaktyk, oraz zrzutowanego profilu gęstości. Obecnie obie wielkości są słabo oszacowane eksperymentalnie.

Wiadomo również, że C_l^{SZ} (widmo mocy SZE) przy pewnych założeniach dotyczących modelu gromady, jest bardzo czułą funkcją amplitudy fluktuacji materii σ_8 (w skalach $8\text{Mpc } h^{-1}$) oraz gęstości materii barionowej $C_l^{\text{SZ}} \sim \sigma_8^7 \Omega_b h^2$.

Ponieważ z teoretycznego punktu widzenia C_l^{SZ} zależy od funkcji masy gromad galaktyk $dn(M,z)/dM$, pomiary widma SZ oraz katalogi gromad galaktyk wykrytych metodą SZE, pozwolą na oszacowanie kształtu funkcji masy i jej zależności od redshiftu. Funkcja masy jest nie tylko kluczem do normalizacji widma mocy fluktuacji materii (na odpowiadających skalach długości) i gęstości materii barionowej, lecz także pozwala na zmierzenie dynamicznej historii wszechświata (w tym dynamiki DE i ewolucji parametrów równania stanu (w i w') (Rys.2)). Oszacowano, że dokładność wyznaczenia wspomnianych parametrów kosmologicznych z przeglądów SZE będzie porównywalna z dokładnością uzyskiwaną z innych obecnie dostępnych danych obserwacyjnych (CMB, SNIa, BAO, LSS, i inne).

Inną ciekawą możliwość stwarzają obserwacje strumieni SZE w połączeniu z obserwacjami strumieni od gromad galaktyk w zakresie X. Ponieważ strumienie te mają inną zależność od gęstości elektronów gazu gromadowego (liniową i kwadratową odpowiednio) stwarza to możliwość wyznaczenia „odległości rozmiarów kątowych” do gromady w oparciu o temperaturę gazu, oraz rozmiary kątowe gromady (Rys.3). W połączeniu z pomiarami redshiftu gromady, można wyznaczyć stałą Hubble’a w sposób niezależny od innych metod (np. SNIa). Porównanie kształtu teoretycznej zależności odległości kątowej z pomierzonymi wartościami umożliwia natomiast wyznaczenie wartości podstawowych parametrów kosmologicznych od których zależy odległość rozmiarów kątowych.



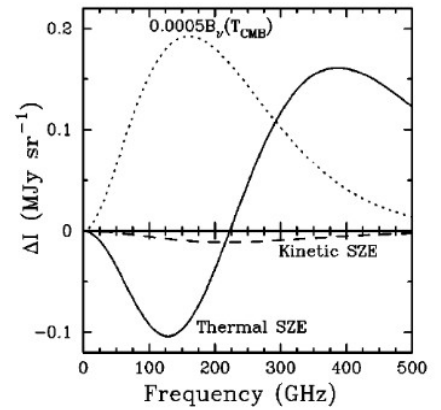
Rys. 3: Zależność odległości rozmiarów kątowych od redshiftu dla różnych modeli kosmologicznych, z naniesionymi danymi obserwacyjnymi.

2.3 Niegaussowskie fluktuacje z gromad galaktyk

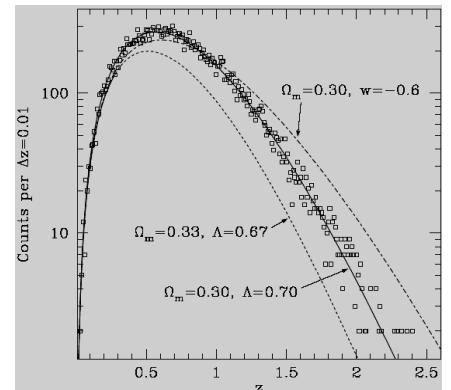
Na przestrzeni ostatnich lat stało się jasne, że pomiary pierwotnej niegaussowości (NG) będą silnym narzędziem do wyróżnienia prawidłowych modeli inflacyjnych i w konsekwencji lepszego określenia teorii wyjaśniającej powstawanie pierwotnych fluktuacji materii. Jak dotąd najlepsze oszacowania NG pochodzą z danych CMB. W przyszłości przewiduje się, że również silne ograniczenia przyjdą ze strony badań tomograficznych przestrzennego rozkładu poczerwienionej linii wodoru, z map satelity PLANCK, jak również zliczeń najmaszywniejszych gromad galaktyk na dużych redshiftach ($z > 2$).

Galaktyczne i poza-galaktyczne emisje (o których była mowa wcześniej) oczywiście nakładają się na mapy CMB i są one niegaussowskie. Szereg wtórnych anizotropii CMB, do których zalicza się również SZE, również generuje NG sygnały. Wszelka analiza mająca na celu wyznaczenie pierwotnej NG musi uwzględniać rodzaj i amplitudę NG sygnałów pochodzenia nie-kosmologicznego. Kompleksowa analiza NG od gromad galaktyk i źródeł punktowych z punktu widzenia przyszłych przeglądów SZ może być istotna dla wyznaczania poprawnej amplitudy pierwotnej NG.

Oprócz katalogowania gromad SZ, istotne dla takich analiz będą symulacje numeryczne N-ciał, oraz symulacje grzania ośrodka międzygalaktycznego celem stworzenia symulowanych map parametru komptonizacji oraz w konsekwencji symulacji termicznego SZE. Statystyczna analiza gaussowości tak uzyskanych map wymagać będzie również implementacji odpowiednich symulacji map CMB z kontrolowaną amplitudą pierwotnych NG (generowanych w ramach danej klasy modeli inflacyjnych). Obecnie w Centrum Astronomii



Rys. 1: Porównanie sygnatur widmowych termicznego i kinetycznego efektu S-Z oraz ich wielkości w porównaniu z widmem promieniowania tła.



Rys. 2: Zależność zintegrowanych teoretycznych funkcji masy od redshiftu dla trzech różnych modeli kosmologicznych. Kwadratami zaznaczono dane obserwacyjne.

Systematyczny ślepy przegląd, lub dedykowane przeglądy wykonane przez RT90, którego czułość będzie porównywalna z czułością SPT (i lepsza od czułości satelity WMAP) w paśmie niskich częstotliwości (L,K, Ka) będą cennym źródłem danych kosmologicznych jeśli będą koincydować z pomiarami redshiftów dokonanych np. w przeglądzie SDSS.

Udział Radioteleskopu "Heweliusz" w badaniach kosmologicznych: teoria i obserwacje

Uniwersytetu Mikołaja Kopernika (CA-UMK) prowadzone są prace nad rozwojem odpowiedniego kodu do generacji takich symulacji.

3 Obserwacje

3.1 Przegląd źródeł punktowych na centymetrowych długościach fal.

Nowe masowe przeglądy nieba umożliwią utworzenie katalogu punktowych radioźródeł przy wysokim limicie czułości (na poziomie kilku mJy) w pasmach L, K i Ka (pokrywających zakres częstotliwości od kilku do kilkudziesięciu GHz), umożliwi skalibrowanie modeli populacji radioźródeł, wyznaczenie indeksów widmowych i w konsekwencji umożliwi oszacowanie ich wpływu na wyznaczanie parametrów kosmologicznych.

Zdecydowana większość źródeł punktowych wykrytych przez satelitę WMAP to źródła o strumieniu niezależnym od częstotliwości: $S \sim \nu^\alpha$, $\alpha \sim 0$. Zdecydowana większość z nich to emisja od kwazarów (70%). Na drugim miejscu to emisja radiogalaktyk i AGNów (20%), pozostałe źródła to obiekty typu BL Lac, i sporadycznie mgławice planetarne. Katalog wykrytych źródeł punktowych zawiera obiekty różnych populacji, w większości o płaskim widmie. Jednakże są również obiekty o stromym, odwróconym widmie, bądź obiekty typu GPS (z maksimum emisji na częstościach kilkunastu GHz), czy też obiekty posiadające kombinację widm stromych (na niskich częstościach) z płaskimi i odwróconymi widmami na wyższych częstościach. W celu wyznaczenia widma mocy źródeł punktowych poniżej progu detekcji można założyć model emisji (jak opisano wcześniej) lub model populacji radioźródeł (opisujący oczekiwaną liczbę radioźródeł w danym przedziale strumienia) i skalibrować go obserwacjami z różnych częstotliwości. Katalog radioźródeł na częstościach kilkunastu GHz pozwoliłby połączyć te obserwacje z istniejącymi przeglądami na niższych częstościach i uzupełnić modele emisji od poszczególnych populacji radioźródeł. Wielowiązkowy system RT90 pozwoli na szybkie i efektywne tworzenie takiego katalogu.

Istotnym zadaniem obserwacyjnym byłoby poszukiwanie radioźródeł punktowych w polach gromad galaktyk. Badania tego rodzaju będą kluczowe dla redukcji błędów systematycznych wprowadzanych przez zmniejszenie obserwowanego strumienia SZ na gromadzie, co przenosi się na błędy systematyczne wyznaczania np. parametrów kosmologicznych z relacji „odległość rozmiarów kątowych – redshift” (zob. poprzedni rozdział). Analiza kosmologiczna w oparciu o nowy przegląd radiowy najpewniej wymagałaby implementacji zaawansowanych algorytmów, metod Monte-Carlo-Markov-Chain, dla celów całkowania wielowymiarowych powierzchni rozkładów prawdopodobieństwa - standardowych technik wyznaczania parametrów. Metody te są obecnie dobrze ugruntowane i sprawdzone oraz stosowane w codziennej praktyce analizy danych kosmologicznych.

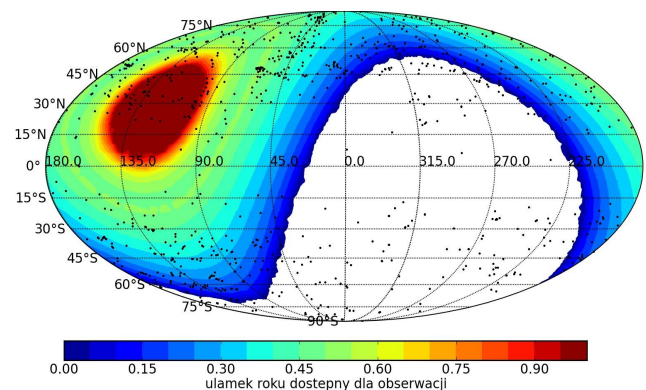
3.2 Katalog gromad galaktyk z SZE

Z planowaną czułością RT90 (około 0.23 mK/sqrt(s)) i wielowiązkowym systemem powinno być możliwe efektywne poszukiwanie nowych gromad galaktyk w polach kilkudziesięciu stopni kwadratowych, metodą pomiaru SZE na częstościach pomiędzy 5-22 GHz. RT90 powiększyłby tym samym katalogi budowane przez dedykowane teleskopy takie jak SPT, ACT, AMI, APEX-SZ i inne. Ślepy przegląd kilkudziesięciu stopni kwadratowych w rozdzielczości poniżej minuty kątowej, powinien dostarczyć detekcji dziesiątek jeśli nie setek nowych gromad galaktyk. Obserwacje wybranej grupy gromad skatalogowanych przez przegląd np SDSS (rys. 4) byłby bezpośrednio użyteczny dla kosmologii. Przy rozdzielczości 0.5' kątowej gromada galaktyk o fizycznych rozmiarach rzędu 180kpc na redshifcie odpowiadającym minimalnym możliwym rozmiarom kątowym (w standardowej kosmologii) $z=1.5$, stanowiłby jeden radiowy piksel, jednakże większe gromady galaktyk i położone bliżej, nadawałyby się do bezpośredniego mapowania metodą SZE. Przykładowo, słynna gromada pocisk „bullet cluster” (nieдоступna dla RT90 z powodu położenia geograficznego) o $z=0.3$ składałaby się z kilku radio-pikseli. Analiza kosmologiczna danych z gromad SZ wymagać będzie szczegółowych symulacji numerycznych SZE, populacji źródeł punktowych, a także sygnałów nakładających się i generowanych w zmiennych warunkach atmosferycznych. Byłoby to znakomite połączenie prac teoretycznych z wynikami nowoczesnych technik obserwacji. Obecnie w CA-UMK trwają prace nad rozbudową dedykowanego oprogramowania służącemu planowaniu takich przeglądów, generowaniu odpowiednich symulacji, oraz kompleksowej redukcji danych obserwacyjnych.

Podziękowania:

Niektóre ilustracje pochodzą z prac:

John E. Carlstrom (Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2002. 40:643–80)



Rys. 4: Sumaryczny, dostępny dla obserwacji RT90 czas w ciągu roku (wyrażony jako ułamek roku) w zależności od kierunku (wyrażonego we współrzędnych galaktycznych). Czarnymi punktami zaznaczono również położenie 900 znanych gromad galaktyk. (Założono ograniczenie obserwowalności danego źródła tylko dla momentów gdy źródło znajduje się powyżej 30 stopni od horyzontu i w odległości zenitalnej powyżej 10 stopni).