

dr Anna Barnacka

Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytet Jagielloński, Kraków

Autoreferat

Spis treści

[Informacje podstawowe](#)

[Prace stanowiące osiągnięcie naukowe](#)

[Ograniczenia Fizyczne](#)

[Problem pochodzenia przestrzennego zmiennej emisji](#)

[Metoda wykorzystania silnego soczewkowania grawitacyjnym](#)

[Przykłady](#)

[Przykład: PKS 1830-211](#)

[Przykład: B2 0218+35](#)

[Przyszłe kierunki badań](#)

Informacje podstawowe

Imię i nazwisko

Anna Barnacka

Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

2013 - Doktor Nauk Fizycznych w Zakresie Astronomii

- Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika PAN

oraz - Doktor Nauk Fizycznych w Zakresie Fizyki

- Universite Paris-Sud 11, École doctorale Particules, Noyaux et Cosmos
- Tytuł pracy: *"Detection techniques for the H.E.S.S. II telescope, data modeling of gravitational lensing and emission of blazars in HE-VHE astronomy"*

2008 - Magister Fizyki

- Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie
- Tytuł pracy: *"Analiza danych fotometrycznych z przeglądów Pi of the Sky i ASAS"*

Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- **Od 2016** Adiunkt w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego
- **2015/18** - stypendysta NASA Einstein Fellowship, Uniwersytet Harvarda (Cambridge, USA)
- **2013/16** - Asystent w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego
- **2013/15** - Podoktorski staż naukowy w Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (Cambridge, USA)

Prace stanowiące osiągnięcie naukowe

Tytuł osiągnięcia naukowego:

Wykorzystanie soczewek grawitacyjnych jako teleskopów o wysokiej rozdzielczości

Prace stanowiące osiągnięcie, o którym mowa w Art. 16 (punkty 1 i 2) Ustawy z dnia 18 marca 2011 r. (Dz. U. z 2011 r. Nr 84, poz. 455):

Zaproszony artykuł przeglądowy dla Physics Reports (Impact Factor = 20)

Autor: Anna Barnacka

Tytuł: Gravitational Lenses as High-resolution Telescopes

Zaakceptowany: 1 października 2018, Dostępny "online": 9 października 2018

Edytor: M.P. Kamionkowski

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.10.001>

Podsumowanie Osiągnięcia Naukowego

W artykule przeglądowym stanowiącym prezentowane osiągnięcie naukowe podsumowuję serię moich prac po doktoracie wprowadzających soczewkowanie grawitacyjne jako metodę do całościowych badań w skali, mikro i makro, struktury aktywnych galaktyk z relatywistycznymi dżetami. Aktywne jądra galaktyk kryją takie ekstremalne zjawiska we Wszechświecie jak supermasywne czarne dziury, relatywistyczne dżety, albo nawet systemy podwójnych supermasywnych czarnych dziur. Możliwość badania tych zjawisk jest silnie ograniczona przez rozdzielczość kątową obecnych i przyszłych teleskopów, jak również konieczność astrometrii absolutnej wymaganej do porównania obserwacji z różnych instrumentów. Metody wykorzystywania silnego soczewkowania grawitacyjnego opracowane i przedstawione przeze mnie pozwalają na znaczące polepszenie rozdzielczości kątowej obecnych i przyszłych teleskopów, oraz eliminują potrzebę absolutnej astrometrii. Silne soczewkowanie grawitacyjne powoduje powstawanie wielokrotnych obrazów źródła z opóźnieniami czasowymi pomiędzy tymi soczewkowanymi obrazami. Zarówno opóźnienia czasowe jak i pozycje obrazów zależą od lokalizacji źródła w płaszczyźnie soczewki grawitacyjnej. Zatem obserwowane efekty soczewkowania grawitacyjnego mogą zostać wykorzystane do precyzyjnej lokalizacji źródła w różnych zakresach energetycznych emisji.

Poniżej podsumowuję ograniczenia fizyczne związane z uzyskiwaniem rozdzielczości kątowej w zakresie wysokiej energii ($> \text{MeV}$). Następnie dyskutuję wagę dokładnego określenia lokalizacji zmiennej emisji z aktywnych jąder galaktyk z relatywistycznymi dżetami. Skupiam się na trzech metodach wykorzystujących do tego silne soczewkowanie grawitacyjne:

1. Metoda opóźnień czasowych
2. Metoda wykorzystania stałej Hubble'a
3. Metoda wykorzystania nieliniowych właściwości soczewek grawitacyjnych

Na końcu podsumowuję powyższe metody i prezentuję ich zastosowanie na dwóch blazarach soczewkowanych grawitacyjnie; PKS 1830-211 i B2 0218+35. Przedstawiam także przyszłe zastosowania nieliniowych właściwości soczewek grawitacyjnych oraz prezentuję przyszłe kierunki moich badań w tym zakresie.

W poniższym omówieniu wyników mojej pracy będę bezpośrednio się odnosić do moich prac, które zestawiałam w artykule przeglądowym, który przedstawiam jako moje osiągnięcie naukowe. Prace omówione w artykule przeglądowym obejmują:

1. **Barnacka, A.**, "Galaxies as High-resolution Telescopes," ApJ, 846 (2017), 157

2. **Barnacka, A.**, Geller, M., Dell'Antonio, I., Zitrin, A., "The Structure of the Strongly Lensed Gamma-Ray Source B2 0218+35", *ApJ*, 821 (2016) 58B, 14 pages, IF =
3. **Barnacka, A.**, Geller, M., Dell'Antonio, I., Benbow, W., "Resolving the High-energy Universe with Strong Gravitational Lensing: The Case of PKS 1830-211", *ApJ*, 809 (2015b) 100B, 18 pages
4. **Barnacka, A.**, Geller, M., Dell'Antonio, I., Benbow, W., "Strong Lensing, Time Delays, and the Value of H_0 ", *ApJ*, 799 (2015a) 48B, 9 pages
5. **Barnacka, A.**, Bottcher, M., Sushch, I., "How Gravitational Lensing Helps γ -Ray Photons Avoid γ – γ Absorption", *ApJ*, 790 (2014b), 147, 7 pages
6. **Barnacka, A.**, Geller, M., Dell'Antonio, I., Benbow, W., "Strong Gravitational Lensing as a Tool to Investigate the Structure of Jets at High Energies", *ApJ*, 788 (2014a), 139, 6 pages
7. **Barnacka, A.** and Loeb, A., "A Size-Duration Trend for Gamma-Ray Burst Progenitors", *ApJL*, 794 (2014), 8B, 5 pages

Ograniczenia Fizyczne

Jednym z głównych obiektów astronomicznych badanych w zakresie wysokich energii są relatywistyczne dżety w aktywnych jądrach galaktyk, stanowiące równocześnie największe akceleratory cząstek we Wszechświecie, które wytwarzają promieniowanie od fal radiowych aż po wysokoenergetyczne fotony gamma. Obserwacje dżetów ujawniają bardzo złożone struktury o rozmiarach w zakresie od sub-parseków do dziesiątków kpc (Biretta i wsp. 1991, Siemiginowska i wsp. 2002, Marshall i wsp. 2005, Harris & Krawczynski 2006, Tavecchio i wsp. 2007, Marscher i wsp. 2008, Doleman, S. 2017). Obserwacje z lepszą rozdzielczością kątową pokazują, że zmienność tych źródeł jest również bardzo złożona; rozbłyski emisji mogą pochodzić z regionów bliskich supermasywnej czarnej dziury lub z "węzłów" wzdłuż dżetów, jak w przypadku M87 (Harris i wsp. 2003, 2006). W zakresie promieniowania gamma, kosmiczne obserwatorium Fermi (Fermi Gamma-ray Space Telescope) nieustannie skanuje całe niebo i rejestruje emisje i rozbłyski pochodzące z setek blazarów. Satelita Fermi obserwuje całe niebo w ciągu zaledwie kilku godzin z doskonałą rozdzielczością czasową. Jednak jego rozdzielczość kątowa wynosi w najlepszym razie ~ 0.1 stopnia, uniemożliwiając precyzyjną lokalizację rozbłysków nawet dla pobliskich źródeł. Aby zlokalizować emisję promieniowania gamma z jednego z najbliższych źródeł, którym jest M87, wymagana jest tysiąckrotna poprawa rozdzielczości kątowej. Rozdzielczość kątowa detektorów promieniowania gamma jest ograniczona przez wykorzystane w nich procesy fizyczne i jest mało prawdopodobne, aby poprawiła się więcej niż kilkukrotnie dla przyszłych instrumentów (Bernard i wsp. 2014, Wu i wsp. 2014).

Promieniowanie gamma z dżetów może być dobrze rozdzielone w zakresie radiowym. Jednak skala czasowa zmienności w zakresie radiowym jest długa, od tygodni do miesięcy, w porównaniu do

skali zmienności czasowej promieniowania gamma; od minut do dni. Monitoring radiowy wykazał, że około 2/3 rozbłysków gamma pokrywa się z pojawieniem nowego węzła wzdłuż dżetu i/lub rozbłysku w zakresie radiowym (Marscher i wsp. 2010, 2012; Agudo i wsp. 2011, Marscher 2012, Fuhrmann i wsp. 2014, Ramakrishnan i wsp. 2014, Casadio i wsp. 2015). Dalsze badania pokazują korelacje i podobieństwa między obserwacjami w zakresie promieniowania gamma i innych długościach fal (Chatterjee i wsp. 2012, León-Tavares i wsp. 2012, Sandrinelli i wsp. 2014). Max-Moerbeck i in. (2014) modelowali krzywe zmiany blasku blazarów jako niezależne procesy stochastyczne i odkryli, że tylko 1 z 41 źródeł o wysokiej jakości danych w zakresie radiowym i gamma wykazuje korelację z istotnością detekcji wyższą niż 3σ . Ten wynik demonstruje trudności w lokalizacji pochodzenia emisji na podstawie korelacji w różnych zakresach energetycznych, nawet jeśli dane obejmują wiele lat.

Problem pochodzenia przestrzennego zmiennej emisji

Pochodzenie rozbłysków gamma jest przedmiotem intensywnej debaty (Tavecchio i wsp. 2010; Nalewajko i wsp. 2014a). W modelowaniu teoretycznym zazwyczaj zakłada się, że rozbłyski gamma pochodzą z regionów bliskich supermasywnej czarnej dziury, poniżej parseka (Tanaka i wsp. 2011, Barnacka i wsp. 2014c, Nalewajko i wsp. 2014a, 2014b; Hovatta i in. 2015). Modele, w których emisja pochodzi od odrębnych przestrzennie węzłów, jak w M87, wymagają nowych mechanizmów fizycznych (Dermer i wsp. 1992, Sikora i wsp. 1994, 2009, 2013, Bloom & Marscher 1996; Mücke i wsp. 2003; Reimer et al. 2004, Stawarz i wsp. 2005, 2006, Giannios i wsp. 2009, Böttcher i wsp. 2013, Meyer i Georganopoulos 2014). Tak więc lokalizacja rozbłysków gamma ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia tych mechanizmów w tym przyspieszania cząstek i struktury pól magnetycznych na małych i dużych odległościach od supermasywnych czarnych dziur.

Możliwość istnienia różnych regionów o zmiennej emisji nakłada ograniczenia na użycie aktywnych galaktyk do pomiaru parametru Hubble'a w oparciu o opóźnienia czasowe. W pracy Barnacka i in. (2015) zademonstrowałam, że nawet niewielkie przesunięcie przestrzenne, odpowiadające kątowi $\sim 0,025''$, pomiędzy obserwowaną pozycją radiowej emisji a miejscem zmiennej emisji może skutkować bimodalnym rozkładem wartości stałej Hubble'a o wartości rms ~ 12 km/s/Mpc. W takim przypadku złożona struktura aktywnej galaktyki może być poważnym źródłem błędów systematycznych pomiaru parametru Hubble'a z opóźnień czasowych indukowanych przez soczewkowanie grawitacyjne.

Metoda wykorzystania silnego soczewkowania grawitacyjnym

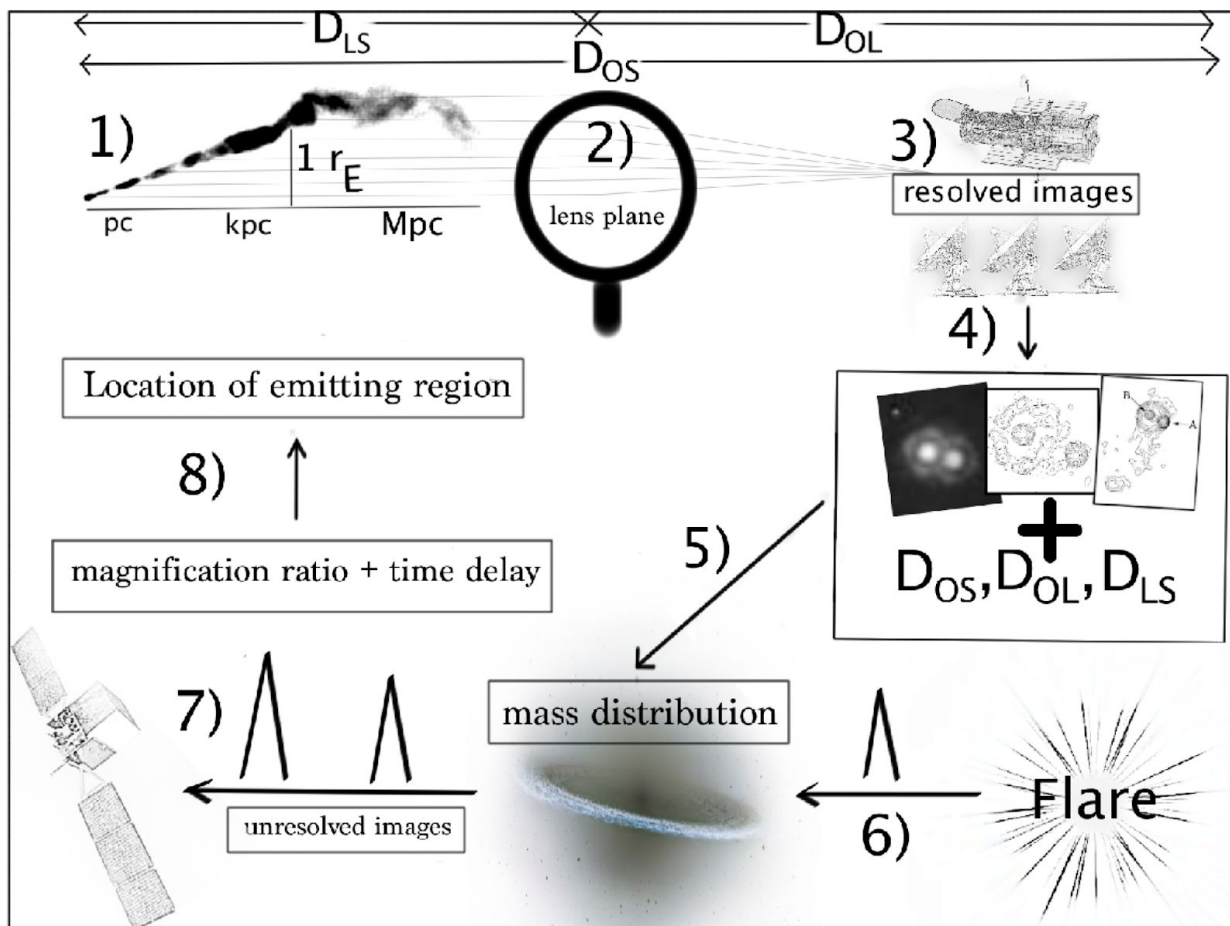
Opóźnienia czasowe i wzmocnienie obrazów uzyskane z krzywych zmian blasku soczewkowanych grawitacyjnie blazarów mogą posłużyć do zlokalizowania emisji. W pracy Barnacka i in. (2014b), przedstawiłam model układu soczewki grawitacyjnej umieszczając analog M87 obserwowanej z przesunięciem ku czerwieni z ~ 1 i galaktykę soczewkującą przy $z \sim 0.6$. W przypadku M87 mierzona odległość między super masywną czarną dziurą, a węzłem oznaczonym jako HST1, wynosi 60 pc (Biretta i wsp. 1991), co odpowiada w moim modelu $\sim 3\%$ promienia Einsteina. Wynikające z modelu różnice w opóźnieniu czasowym (~ 3 dni) i wzmocnienie obrazów ($\sim 0,2$) wynikające ze złożonej budowy źródła mogą zostać zmierzone przy pomocy obecnych teleskopów i satelitów. Zatem soczewki grawitacyjne mogą posłużyć jako narzędzie do lokalizacji pochodzenia promieniowania gamma z odległych aktywnych galaktyk.

Dzięki strategii obserwacji satelity Fermi, krzywe zmian blasku doskonale nadają się do pomiarów opóźnień czasowych. Wykorzystując soczewkowanie grawitacyjne czasowa rozdzielczość satelity Fermi rzędu 3 godzin przekłada się na rozdzielczość kątową rzędu mili-sekundy łuku (mas). Rysunek 1

przedstawia kolejne kroki w zastosowaniu silnych soczewek grawitacyjnych do lokalizacji emisji wzdłuż dżetów.

Zaprezentowana przeze mnie metoda może napotkać ograniczenia wynikające z efektu absorpcji fotonów w procesie gamma-gamma. Fotony gamma emitowane ze źródeł na kosmologicznych odległościach mogą być absorbowane przez różne pola fotonów. W pracy Barnacka i in. (2014), zbadałem, czy światło emitowane przez galaktykę stanowiącą soczewkę grawitacyjną może wpływać na sygnał. Obliczenia pokazały, że fotony z galaktyki soczewkującej nie dają żadnego mierzalnego sygnału związanego z absorpcją gamma-gamma, z wyjątkiem znanego efektu jaki ma pozagalaktyczne światło tła w zakresie optycznym (the Extragalactic Background Light, EBL, Abdo i wsp. 2010, Ackermann i wsp. 2012).

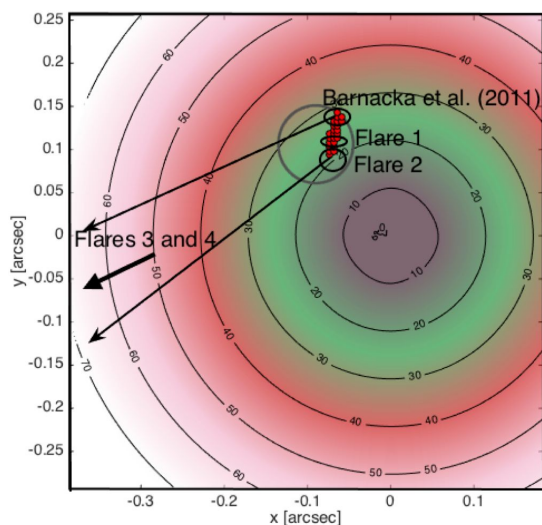
W celu dalszego badania pochodzenia promieniowania gamma w relacji do dobrze rozdzielonej emisji radiowej zaproponowałam nowatorskie podejście użycia parametru Hubble'a. Tradycyjnie grawitacyjne opóźnienia czasowe są używane do pomiaru stałej Hubble'a. Jak przedstawiłam w pracy Barnacka i in. (2015), wyznaczana wartość stałej Hubble'a jest bardzo wrażliwa na przesunięcie przestrzenne pomiędzy pozycją emisji radiowej, a pozycją regionu emitującego zmienne promieniowane, z którego jest mierzone opóźnienie czasowe. Jednak tę metodę można odwrócić. Wartość stałej Hubble'a mierzona za pomocą innych technik może być wykorzystana do wyznaczenia odległości pomiędzy pozycją dobrze rozdzielonych obrazów soczewkowanych, a pozycją regionu, z którego jest mierzone opóźnienie czasowe. W dalszej części autoreferatu przedstawiam zastosowanie tej metody do obserwacji soczewkowanego grawitacyjnie blazara B2 0218+35.



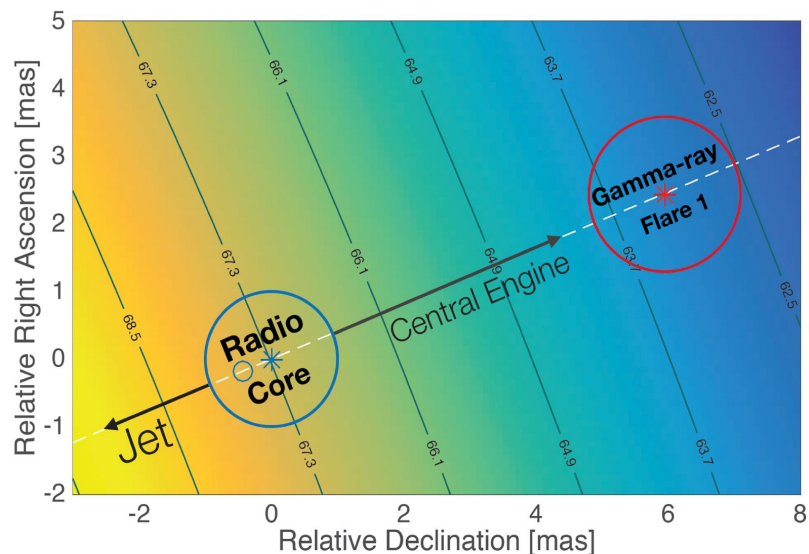
Rysunek 1: Kroki w stosowaniu soczewkowania grawitacyjnego w celu lokalizacji pochodzenia emisji z relatywistycznych dżetów (1) Relatywistyczne dżety rozciągają się od skali sub-parsekowej do mega-parsekowej. (2) Galaktyka umiejscowiona w pobliżu linii widzenia między źródłem a obserwatorem działa jak soczewka o promieniu Einsteina kilku kpc. Promieniowanie emitowane w różnych obszarach dżetu przecina płaszczyznę soczewki w różnych odległościach od środka masy soczewki. Różnice w długości drogi fotonów skutkują różnym wzmocnieniem obrazów pozornych i opóźnieniem czasowym dla każdego obrazu soczewkowanego blazara. (3) Obserwacje w zakresie radiowym i optycznym pozwalają na badanie morfologii obrazów pozornych oraz pozwalają zmierzyć przesunięcie ku czerwieni soczewki i źródła. (4) Obrazy przedstawiają układ soczewkowany grawitacyjnie B2 0218 + 35 obserwowany w zakresie optycznym i radiowym (obrazy z Jackson i wsp. 2000, Patnaik i wsp. 1995, Biggs i wsp. 1999). (5) Morfologia obrazów pozornych i znane odległości pozwalają na zrekonstruowanie rozkładu masy soczewki grawitacyjnej. (6) Pochodzenie emisji gamma z relatywistycznych dżetów nie może zostać bezpośrednio zaobserwowane za pomocą obecnych instrumentów. Jednakże skala zmienności w czasie krótszym niż kilka godzin sugeruje, że region musi być zwarty. (7) Skala czasowa zmienności gamma jest krótka w porównaniu do opóźnienia czasowego. W ten sposób można oszacować opóźnienie czasowe i odpowiadające wzmocnienie obrazów pozornych źródła promieniowania. (8) Pomiar opóźnienia czasowego można wykorzystać do lokalizacji emisji.

Przykłady

W tym rozdziale przedstawiam wykorzystanie metod opisanych w powyższych rozdziałach do polepszenia rozdzielczości kątowej teleskopów na przykładzie dwóch blazarów soczewkowatych grawitacyjnie; PKS 1830-211 oraz B2 0218+25. W pracy Barnacka i in (2015) przedstawiłam przypadek blazara PKS 1830-211, w którym wyznaczone opóźnienia czasowe pozwoliły na polepszenie rozdzielczości kątowej satelity *Fermi* o cztery rzędy wielkości, co pozwoliło odkryć, że zmienna emisja jest również produkowana wzdłuż relatywistycznego dżetu w odległościach powyżej kpc od supermasywnej czarnej dziury. Obserwacje rozbłysków gamma na tak dużych odległościach stanowią wyzwanie dla obecnych modeli przyspieszania cząstek w relatywistycznych dżetach, oraz mogą wprowadzać błędy systematyczne podczas mierzenia tempa rozszerzania się Wszechświata (stałej Hubble'a) wyznaczonego na podstawie tych opóźnień czasowych. Z drugiej strony obecnie wartość stałej Hubble'a jest mierzona używając wielu niezależnych metod. W pracy Barnacka i inni (2015) zaproponowałam odwrócenie problemu i wykorzystanie znanej wartości stałej Hubble'a, opóźnień czasowych oraz pozycji obrazów pozornych do badania pochodzenia przestrzennego emisji źródła w różnych zakresach energetycznych. Ta metoda pozwoliła na polepszenie rozdzielczości kątowej w zakresie gamma nawet sześć rzędów wielkości i ukazała, że radiowe jądro jest oddalone co najmniej kilkadziesiąt parseków od centralnej czarnej dziury, wbrew ogólnie uznanej opinii, że jądro radiowe znajduje się w odległości najwyżej kilku parseków (Pushkarev, A.B. i inni 2010). Tak duża odległość jądra radiowego stanowi wyzwanie dla naszego zrozumienia pochodzenia emisji radiowej w relatywistycznych dżetach i jej powiązania z supermasywną czarną dziurą.



Rysunek 2: Lokalizacja rozbłysków gamma dla blazara PKS 1830-211. Paleta kolorów i kontury wskazują opóźnienia czasowe w dniach w płaszczyźnie soczewki



Rysunek 3: Odległości zmiennej emisji od jądra radiowego (niebieskie kółko) obliczone na podstawie opóźnień czasowych oraz znanej wartości stałej Hubble'a dla blazara B2 0218+35. Szara strzałka wskazuje kierunek

grawitacyjnej. Długie strzałki ograniczają położenie dżetu. Elipsy przedstawiają lokalizację rozbłysków gamma wyznaczoną z pomiarów opóźnień czasowych dla dwóch rozbłysków (Flare 1 i Flare 2). Górna elipsa pokazuje przestrzenne pochodzenie opóźnienia czasowego wyznaczone przez Barnacka i in. (2011) za pomocą krzywej zmiany blasku w zakresie gamma. Krótka strzałka wskazuje ograniczenia dla lokalizacji rozbłysków 3 i 4 (Flares 3 i 4). Opóźnienie czasowe 50 dni oznacza, że region emitujący musi znajdować się w odległości co najmniej 1,5 kpc od jądra radiowego (Barnacka i in. 2015).

od jądra radiowego w kierunku super masywnej czarnej dziury. Czerwone kółko lokalizuje pochodzenie przestrzenne rozbłysku gamma (Flare 1) (Barnacka i in. 2016).

Przykład: PKS 1830-211

PKS 1830-211 jest blazarem soczewkowanym grawitacyjnie przez galaktykę spiralną z przesunięciem ku czerwieni $z = 0,886$ (Wiklind i Combes 1996, 2001; Winn i wsp. 2002). Soczewkowany blazar ma przesunięcie ku czerwieni $z = 2.507$ (Lidman i wsp. 1999). Soczewka zniekształca rozciągłą emisję radiową z dżetu do morfologii przypominającej pierścień, wraz z dwoma jasnymi obrazami pozornymi radiowego jądra (Jauncey i wsp. 1991).

Z drugiej strony PKS 1830-211 jest jednym z najjaśniejszych obserwowanych blazarów od zakresu radiowego aż po emisję gamma. Satelita Fermi dostarcza precyzyjnych obserwacji tego obiektu od 2008 roku. W tym czasie PKS 1830-211 miał cztery serie rozbłysków gamma. Aby wyznaczyć opóźnienia czasowe w krzywych zmian blasku w zakresie gamma opracowałam metodę wykrywania tych opóźnień czasowych. Wykorzystałam symulacje Monte Carlo do oceny wydajności trzech technik analizy: autokorelacji, spektrum podwójnej mocy i metody maksymalnego piku (szczegóły w dodatku do Barnacka i wsp. 2015). Te metody stosuję do wyznaczania opóźnień czasowych z krzywej zmiany blasku blazara PKS 1830-211.

Przeanalizowałam cztery okresy w których blazar PKS 1830-211 wykazał znaczącą aktywność w zakresie gamma. Wyznaczone opóźnienia czasowe pozwoliły na konkluzję, że podczas dwóch tych okresów lokalizacja emisji jest zgodna z położeniem jądra radiowego, a dla dwóch pozostałych rozbłysków obszar emisji znajdowała się więcej niż $\sim 1,5$ kpc od jądra radiowego (patrz rysunek 2). Dla dwóch pierwszych rozbłysków gamma dla których lokalizacja zgadzała się z pozycją jądra radiowego opóźnienia czasowe w zakresie gamma wynosiły $23 \pm 0,5$ dnia i $19,7 \pm 1,2$ dnia. Te opóźnienia czasowe są zgodne z opóźnieniem czasowym 26 ± 5 dni zmierzonym w zakresie radiowym. Pochodzenie tych dwóch rozbłysków jest więc zgodne z położeniem jądra radiowego w granicach 100 parseków. Zatem wynik analizy opóźnień czasowych w połączeniu z właściwościami soczewki grawitacyjnej pozwolił na poprawę rozdzielczości kątowej w zakresie gamma o cztery rzędy wielkości (Barnacka i wsp. 2015).

Przykład: B2 0218+35

B2 0218+35 to blazar soczewkowany grawitacyjnie z najmniejszym znanym promieniem Einsteina który wynosi 165 mas (O'Dea i wsp. 1992, Patnaik i wsp. 1995). System składa się z jasnego blazara o przesunięciu ku czerwieni $z = 0,944 \pm 0,002$ (Cohen i wsp. 2003), soczewkowanego przez odizolowaną galaktykę o przesunięciu ku czerwieni $z = 0,6847$ (Browne i wsp. 1993). Soczewka grawitacyjna powoduje powstanie dwóch obrazów pozornych jądra radiowego oraz struktury dżetu widocznego jako pierścień Einsteina (Patnaik i wsp. 1992). Biggs i in. (1999) wykorzystali wyniki

trzymiesięcznej kampanii monitorującej VLA na dwóch częstotliwościach radiowych i uzyskali opóźnienie czasowe $10,5 \pm 0,4$ dnia.

Aby zlokalizować pochodzenie promieniowania gamma z dokładnością do 1 mas używając metody bazującej na stałej Hubble'a potrzebujemy pozycji obrazów pozornych jądra radiowego zmierzonych z dokładnością do 1 mas. Następnie potrzebujemy modelu rozkładu masy soczewki, który jest w stanie zrekonstruować pozycje obserwowanych obrazów pozornych z taką dokładnością. Wymagane jest również pomiar opóźnienia czasowego w zakresie gamma z dokładnością do 3 godzin.

W analizie użyłam pozycji obrazów pozornych jądra radiowego obserwowanego w zakresie 15 GHz z dokładnością 0,5 mas (Patnaika i wsp. 1995). Za pomocą opracowanych algorytmów zrekonstruowałam rozkład masy soczewki i zweryfikowałam możliwe źródła błędów systematycznych. Użyłam symulacji Monte Carlo do znalezienia unikalnego zestawu parametrów rekonstruujących obserwacje w zakresie radiowym i optycznym. Symulacje pozwoliły mi zrekonstruować obserwowane pozycje obrazów pozornych jądra radiowego z dokładnością do 1 mas. Ostatni składnik, opóźnienia czasowe w zakresie gamma, otrzymałam za pomocą standardowej funkcji autokorelacji i dwóch metod, które opracowałam na potrzeby tej pracy: spektrum podwójnej mocy (Barnacka i wsp. 2011,2015) oraz "metody maksymalnego piku" (Barnacka i wsp. 2015,2016). Użyłam przy tym symulacji Monte Carlo do zoptymalizowania metod i do oceny istotności wykrycia opóźnień czasowych indukowanych grawitacyjnie. Zmierzyłam opóźnienie czasowe $11,38 \pm 0,13$ dnia w zakresie gamma podczas rozbłysku. To opóźnienie czasowe różni się od czasu opóźnienia w zakresie radiowym o ~ 1 dzień.

Położenie obrazów pozornych w zakresie radiowym, opóźnienie czasowe w zakresie gamma oraz stała Hubble'a umożliwiły pomiar odległości między obszarem emisji promieniowania gamma i jądrem radiowym. Dane sugerują, że emisja gamma jest położona daleko od jądra radiowego: jasny rozbłysk gamma (MJD: 56160-56280) znajdował się 51 ± 8 pc od jądra radiowego, w kierunku super masywnej czarnej dziury. Ta odległość jest wyznaczona na poziomie ~ 3 sigma i jest ograniczona przede wszystkim precyzją stałej Hubble'a. B2 0218+35 jest pierwszym źródłem, w którym pozycja regionu emitującego promieniowanie gamma w stosunku do jądra radiowego została precyzyjnie zlokalizowana.

Nieliniowe właściwości soczewek grawitacyjnych

Aby móc pogłębić naszą wiedzę na temat relacji pomiędzy emisją radiową i pozycją supermasywnej czarnej dziury w centralnych częściach aktywnych galaktyk, zaproponowałam w pracy Barnacka (2017) użycie obszarów soczewki grawitacyjnej wzmacniającej jasność i zmieniającej pozycję obrazów pozornych dla poszczególnych pozycji źródła w sposób nieliniowy (caustics of lensing galaxies). Takie nieliniowe zmiany w pozycjach obrazów pozornych powodują, że jeśli dwa źródła są od siebie oddalone o kilka lat świetlnych, ich obrazy pozorne są oddalone o nawet setki lat świetlnych. Rozdzielenie źródeł emisji oddalonej o zaledwie kilka lat świetlnych stanowi duże wyzwanie dla obecnych i przyszłych obserwatoriów, podczas gdy oddzielenie pozornych obrazów jest możliwe nawet wykorzystując obecne obserwacje. Wzmocnienie odległości kątowych pomiędzy źródłami przy pomocy soczewki grawitacyjnej pozwoli na rozdzielenie emisji z takich źródeł jak relatywistyczne dżety i pozwoli odkryć i zbadać spodziewaną populację podwójnych systemów supermasywnych czarnych dziur. Budowane wielkoskalowe przeglądy nieba takie jak Square Kilometre Array (SKA), Large Synoptic Survey Telescope (LSST), czy Euclid będą monitorować dużą część nieba co pozwoli na zwiększenie znanych systemów soczewkowanych grawitacyjnie ze ~100 systemów znanych obecnie do ~100,000 systemów w nadchodzącej dekadzie. Takie zwiększenie liczby systemów grawitacyjnych o trzy rzędy wielkości rozpocznie erę badań opartych na soczewkowaniu grawitacyjnym.

Przyszłe kierunki badań

Zaproponowana przeze mnie metoda używania nieliniowych zmian w pozycjach obrazów pozornych bardzo dobrze nadaje się do użycia na dużej ilości obecnie dostępnych danych archiwalnych w zakresach radiowym, optycznym i rentgenowskim. Moje obecne badania koncentrują się na analizie danych w zakresie optycznym i porównaniu z zakresem radiowym, oraz rekonstrukcji modelu soczewki. W obecnej fazie, dane są selekcjonowane dla radiowo głośnych aktywnych jąder galaktyk z przeglądów JVAS / CLASS. Konfiguracja kaustyczna powoduje złożoną morfologię emisji wielkoskalowych dżetów. Obecnie połączyliśmy obserwacje optyczne i radiowe z modelowaniem soczewki dla dwóch źródeł: B0712+472 i B01608+656. Planujemy rozszerzyć tę analizę na wszystkie znane relatywistyczne dżety w konfiguracji kaustycznej, a także planujemy włączyć obserwacje w zakresie rentgenowskim. Zastosowanie metod stanowiących opisane powyżej osiągnięcie naukowe pozwoli nam lepiej zrozumieć pochodzenie emisji relatywistycznych dżetów oraz ich kosmologicznej ewolucji.

Nieliniowe właściwości soczewek grawitacyjnych pozwolą nam odkryć systemy wielokrotnych supermasywnych czarnych dziur pośród danych z nadchodzących wielkoskalowych przeglądów nieba takich jak SKA. Soczewki grawitacyjne wzmacniają promieniowanie elektromagnetyczne z tych systemów nawet o dwa rzędy wielkości. Co więcej, soczewki grawitacyjne będą również wzmacniać promieniowanie fal grawitacyjnych nawet o rząd wielkości. Obecnie skupiam się na badaniu efektów interferencji i dyfrakcji jaki soczewkowanie grawitacyjne ma na fale grawitacyjne. Opóźnienia czasowe pomiędzy wielokrotnymi obrazami dla ciasnych układów supermasywnych czarnych dziur może skutkować efektami interferencji i dyfrakcji. Jednocześnie opracowuję metody użycia silnie soczewkowanych kwazarów z nadchodzących przeglądów nieba, w celu odkrycia podwójnych supermasywnych czarnych dziur, które mogą być kandydatami do detekcji emisji fal grawitacyjnych wykrywalnych przez Pulsar Timing Array (PTA). W przyszłości identyfikacja wielokrotnych supermasywnych czarnych dziur oraz ich emisji fal grawitacyjnych będzie możliwe tylko przy użyciu efektów silnego soczewkowania grawitacyjnego jak zaproponowałam w Barnacka A. (2017).