

Dr hab. Michał Michałowski  
Instytut Obserwatorium Astronomiczne, Wydział Fizyki  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu  
ul. Słoneczna 36, 60-286 Poznań  
michal.michalowski@amu.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Rybickiego  
pt. „Mikrosoczewkowanie astrometryczne i jego zastosowanie astrofizyczne w  
dobie misji kosmicznych nowej generacji”**

**Podsumowanie pracy doktorskiej**

Badanie gwiazdowych czarnych dziur (o masach kilku mas Słońca) jest istotnym aspektem naszego rozumienia ewolucji gwiazd. Jednak trudno je wykryć i mikrosoczewkowanie jest jedną z metod pozwalających robić to rutynowo. Jednak w większości tego typu zjawisk zmierzenie promienia Einsteina i pomiar masy soczewkującej czarnej dziury jest niemożliwe. W pracy doktorskiej przedstawiono badanie nad rozwiązaniem tego problemu przez zarejestrowanie zjawiska mikrosoczewkowania astrometrycznego, czyli zmian pozycji centrum emisji soczewkowanego źródła.

W rozdziale 2 przedstawiono analizę mikrosoczewkowania astrometrycznego na podstawie syntetycznych danych wygenerowanych zgodnie ze specyfikacjami misji *Gaia* dla mikrosoczewkowania OGLE3-ULENS-PAR-02, które prawdopodobnie było spowodowane przez masywną czarną dziurę. Przedstawiono obliczenia dokładności wyznaczania masy soczewki tą metodą dla różnych mas soczewki i jasności źródła. Dodatkowo, przedstawiono dla jakich mas i jasności dodanie danych astrometrycznych pozwala odrzucić drugie rozwiązanie z dużą istotnością statystyczną. Dodatkowo, w rozdziale 4 te rozważania syntetycznych danych są rozszerzone na dwa kolejne przypadki mikrosoczewkowania. Dla *Gaia18mbt* i *Gaia19bld* przedstawiono syntetyczne dane astrometryczne z satelity *Gaia*, których można się spodziewać dla tego typu zdarzeń.

W rozdziale 3 przedstawiono wyznaczenie masy soczewki w zjawisku mikrosoczewkowania *Gaia19bld* używając danych fotometrycznych i spektroskopowych uzyskanych z powierzchni Ziemi i z satelit *Gaia* i *Spitzer*. Ze względu na dużą jasność źródła, początek obserwacji na długo przez maksimum i kompletność danych, jest to jeden z nielicznych przypadków dokładnego oszacowania masy soczewki. Wynosi ona około jednej masy Słońca, więc była to prawdopodobnie gwiazda ciągu głównego albo biały karzeł.

W rozdziale 4 przedstawiono równoległą analizę fotometrycznych i astrometrycznych (z satelity *Gaia*) danych mikrosoczewkowania *Gaia16aye*. Te dane pozwoliły na dokładny pomiar promienia Einsteina.

Wreszcie w rozdziale 5 przedstawiono analizę syntetycznych fotometrycznych i astrometrycznych danych z teleskopu kosmicznego Nancy Grace Roman. Pokazano, że pozwolą one wyznaczyć masę soczewki z około 10-20% dokładnością dla czarnej dziury o masie kilka razy większej niż masa Słońca lub gwiazdy na ciągu głównym mniej masywnej niż Słońce.

**Wkład pracy w rozwój nauki i konkluzja recenzji**

Obliczenia podobne do tych dokonanych w pracy doktorskiej już niedługo będą mogły być rutynowo używane do mierzenia mas soczewek na podstawie danych astrometrycznych z satelity *Gaia* i przyszłych satelit. Praca przedstawia gotowe implementacje modelowania danych fotometrycznych (co samo w sobie jest mniej innowacyjne) i danych astrometrycznych (co zostało

wcześniej zrobione tylko dla kilku obiektów). Doktorant jest w stanie przenieść informacje z modelowania fotometrycznego do modelowania astrometrycznego, które albo uwzględnia tylko ruchy własne i paralaksę, albo dodatkowo także przesunięcie centrum obrazu na skutek mikrosoczewkowania w celu oszacowania istotności wpływu mikrosoczewkowania. Skutkuje to dużo lepszą dokładnością i możliwością złamania degeneracji niektórych parametrów. Pozwoli to na badanie rozkładu mas ciemnych obiektów takich jak czarne dziury, gwiazdy neutronowe i mało-masywne gwiazdy ciągu głównego. Jest to ważny temat ponieważ są to podstawowe zagadnienia naszego rozumienia ewolucji gwiazd.

Z tych powodów uważam, że oceniana praca wnosi istotny wkład do badań naukowych czarnych dziur. Z tego powodu popieram nadanie mgr. Krzysztofowi Rybickiemu stopnia doktora.

Poniżej omawiam słabe strony pracy.

### **Wkład doktoranta w wykonane badania**

Zakładam, że obliczenia, które nie są opatrzone stosownym komentarzem zostały wykonane przez doktoranta. Jednak w pracy są częste odwołania do innych publikacji, w których doktorant nie był pierwszym autorem (np. Bachelet et al. i Wyrzykowski et al.). Trudno się więc zorientować czy duże części obliczeń zostały wykonane przez innych współautorów czy przez doktoranta.

### **Dokładność wyznaczenia promienia Einsteina i masy soczewki**

W rozdziale 4.4.4 na stronie 137 wyznaczono pomiar promienia Einsteina z analizy danych fotometrycznych i astrometrycznych jako  $3.11 \pm 0.03$  mas. We wcześniejszej pracy (Wyrzykowski et al., 2020) wyznaczono wartość  $3.04 \pm 0.24$  mas. Myślę, że warto by było omówić znaczną różnicę w błędach pomiarowych. Czy dodanie danych astrometrycznych z satelity *Gaia* pozwoliło zwiększyć dokładność pomiaru o czynnik 8? Czy to raczej wpływ większej ilości danych fotometrycznych lub ich jakości w aktualnej pracy?

Podobnie, rozdział 5 przedstawia analizę przyszłych danych z teleskopu kosmicznego Nancy Grace Roman. Jednak z opisu nie jest do końca jasne jak duże polepszenie dokładności wyników umożliwi ten teleskop. Byłoby dobrze przedstawić, albo chociaż omówić, jaką dokładność dla tych samych zjawisk można by osiągnąć współczesnymi teleskopami.

Pod koniec rozdziału 3.5.1 podano, że przewidywana amplituda efektu astrometrycznego wynosi 0.25 mas, a dokładność obserwacji 0.1 mas. Z tego raczej powinno wynikać, że trudno będzie zauważyć ten efekt, skoro błąd jest porównywalny z maksymalną amplitudą.

### **Układ pracy doktorskiej**

Rozumiem, że podział na rozdziały jest podyktowany strategią publikacyjną. Jednak skoro doktorat jest pisany w formie jednolitej pracy, to można by zmienić układ w celu większej przejrzystości. Dla zjawisk Gaia18mbt i Gaia19bld przedstawiono syntetyczne dane astrometryczne z satelity *Gaia*, podobnie jak dla zjawiska OGLE3-ULENS-PAR-02. Z tego powodu ich analiza bardziej by pasowała do rozdziału 2. W ten sposób rozdział 4 przypadłby tylko na zjawisko Gaia16aye, dla którego istnieją prawdziwe dane z satelity *Gaia*, więc logicznie by było żeby ten obiekt oddzielić od innych zjawisk.

W pracy brakuje też wprowadzenia o badanych obiektach. Rozdział 1 opisuje mikrosoczewkowanie i krótko inne metody badania ciemnych obiektów, ale przydałby się opis tego co wiemy o tych obiektach, dlaczego są ważne i co fundamentalnego dowiemy się jeśli będziemy je badać za pomocą mikrosoczewkowania.

Dr hab. Michał Michałowski