

Soczewkowanie grawitacyjne gwiazd bozonowych i fermionowych

Gravitational lensing of boson and fermion stars

Janusz Osarczuk

Abstrakt. Gwiazdy bozonowe oraz gwiazdy fermionowe mogły powstać we wczesnym Wszechświecie podczas grawitacyjnego przejścia fazowego pierwszego rzędu. Być może część z nich zachowała się do dziś. Poszukiwania ich obejmują przede wszystkim centralne części galaktyk. Soczewkowanie grawitacyjne jest jedną z metod obserwacyjnych, która może pomóc je znaleźć.

Słowa kluczowe: cząstki elementarne, grawitacja, soczewkowanie grawitacyjne, gwiazdy

Abstract. Boson stars and fermion stars may have formed in the early universe during a first-order gravitational phase transition. Perhaps some of them have survived till now. The search for them covers mainly the central parts of galaxies. Gravitational lensing is one of the observational methods that can help find them.

Keywords: elementary particles, gravitation, gravitational lensing, stars

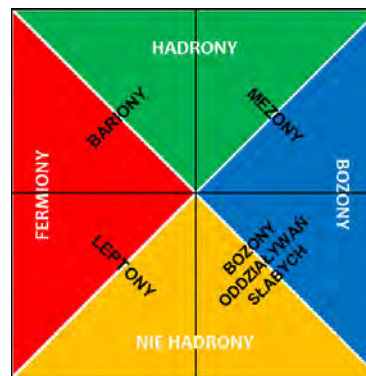
1. Obiekty zwarte

Hipotetyczne, jak do tej pory, gwiazdy bozonowe i gwiazdy fermionowe należą do klasy obiektów zwartych, będących źródłem silnego pola grawitacyjnego. Główni przedstawiciele tej grupy, czyli białe karły, gwiazdy neutronowe i czarne dziury, stanowią końcowy etap ewolucji gwiazd i są skondensowaną formą swoich poprzednich wcieleń. Stąd też zazwyczaj posiadają niewielkie rozmiary w stosunku do swojej masy (np. biały karzeł może mieć masę Słońca i promień 10 000 km, a gwiazda neutronowa może mieć masę Słońca i promień 10 km). Zestawienie tych dwóch parametrów implikuje niezwykle dużą gęstość tych obiektów ($\sim 10^6$ g/cm³ w przypadku białych karłów, $\sim 10^{15}$ g/cm³ w przypadku gwiazd neutronowych).

Obiekty zwarte stanowią konfiguracje stabilne. Nie ulegają kolapsowi (nie rozważam w tym momencie czarnych dziur), ponieważ są zbudowane z materii zdegenerowanej, której cząstki znajdują się tak blisko siebie, iż tworzą nieściśliwy gaz (którego rozkład na stany kwantowe, w zależności od rodzaju cząstek, jest wyznaczony przez zasadę nieoznaczoności Heisenberga lub przez zasadę wykluczania Pauliego). Ciśnienie panujące wewnątrz gazu jest na tyle duże, iż przeciwdziała sile grawitacji. W każdym z typów obiektów inne cząstki formują gaz zdegenerowany. I tak:

- w białych karłach – elektrony,
- w gwiazdach neutronowych – neutrony,
- w gwiazdach bozonowych – bozony skalarne,
- w gwiazdach fermionowych – słabo oddziałujące fermiony.

Podział cząstek i ich wybrane cechy przedstawiono na rys. 1 i w tab. 1.)



Rys. 1. Podział cząstek¹

Tab. 1. Wybrane cechy cząstek

Nazwa	Cechy
hadrony	A
niehadrony	B
fermiony	C
bozony	D
bariony	A, C
leptony	B, C
bozony oddziaływań słabych, fotony	B, D
mezony	A, B

A – uczestniczą we wszystkich czterech oddziaływaniach fundamentalnych
B – nie uczestniczą w oddziaływaniu silnym
C – posiadają spin półowkowy
D – posiadają spin całkowity

1. Bozony oddziaływań słabych to bozony, które przenoszą oddziaływanie słabe, czyli bozony naładowane W^+ i W^- oraz bozon neutralny W^0 .

2. Parametry gwiazd bozonowych i gwiazd fermionowych

Mimo przynależności do rodziny obiektów zwartych, gwiazdy bozonowe i gwiazdy fermionowe mogą osiągać olbrzymie rozmiary i gigantyczne masy. Poza tym nie mogą przekroczyć granicy wyznaczonej przez ich równanie stanu, tj. masy maksymalnej. Dla gwiazd bozonowych można ją przedstawić formułą $M_{Bmax} = 0,633M_{Pl}^2/m_B$ [4] (gdzie M_{Pl} jest masą Plancka, a m_B jest masą pojedynczego bozonu), dla gwiazd fermionowych $M_{Fmax} = 0,38426 \cdot (2/g)^{1/2} \cdot M_{Pl}^3/m_F^2$ [2] (gdzie m_F jest masą pojedynczego fermionu, a g jest współczynnikiem degeneracji spinu (ang. *spin degeneracy factor*)). Promień takich obiektów jest funkcją masy gwiazdy oraz masy pojedynczej cząstki i można go opisać wzorem $R_{Bmax} \sim h^2/GM_{Bmax}(m_B)^2$ dla gwiazd bozonowych i $R_{Fmax} \sim h^2/G(M_{Fmax})^{1/3}(m_F)^{8/3}$ dla gwiazd fermionowych, gdzie h jest stałą Plancka, a G jest stałą grawitacji [3]. Dla przykładu, gwiazda bozonowa o masie 10^{12} mas Słońca może mieć promień ok. 100 kpc (kiloparseków; 1 pc $\approx 3,2616$ roku świetlnego $\approx 206\,265$ jednostek astronomicznych $\approx 3,086 \times 10^{16}$ m) w przypadku bozonów o masie 10^{-25} eV/ c^2 , gwiazda fermionowa zaś może posiadać takie same parametry, gdy jest zbudowana z fermionów o masie 20 eV/ c^2 (dla porównania promień naszej galaktyki to ok. 16–18 kpc).

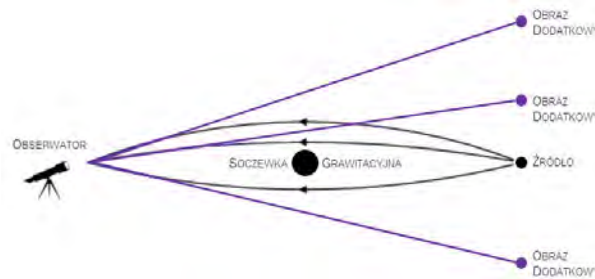
Warto zwrócić uwagę, iż rozpiętość wielkości gwiazd bozonowych i gwiazd fermionowych jest olbrzymia. Mogą mieć one mikroskopowe rozmiary, mogą być wielkości czarnych dziur w centrach galaktyk, ale mogą też być istnymi monstrami o rozmiarach większych niż Droga Mleczna.

Istotną własnością obu rodzajów gwiazd jest to, że cząstki, które je tworzą, oddziałują ze sobą tylko grawitacyjnie i w konsekwencji te gwiazdy są przezroczyste dla promieniowania elektromagnetycznego. Nie istnieje także sfera fotonowa (czyli zestaw kołowych orbit występujących wokół czarnej dziury lub gwiazdy neutronowej, z których każda charakteryzuje się tym, że odległość fotonu od centrum pola grawitacyjnego nie ulega zmianie w trakcie ruchu), a żaden foton nie może "spaść" na gwiazdę ani zostać przez nią schwytyany. To powoduje niesamowite efekty związane z soczewkowaniem grawitacyjnym

3. Soczewkowanie grawitacyjne

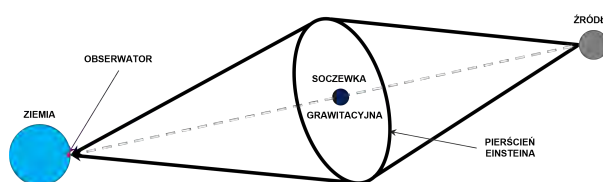
Soczewkowanie grawitacyjne polega na ugięciu wiązki promieniowania elektromagnetycznego (o dowolnej długości fali) w polu grawitacyjnym masywnego, tj. gęstego ciała niebieskiego (zwanego **soczewką grawitacyjną**), co prowadzi do jej skupienia (rys. 2). W wyniku tego zjawiska następuje pojaśnienie źródła promieniowania na

skutek pojawienia się na niebie jego wielokrotnych, znie-



Rys. 2. Idea soczewkowania grawitacyjnego

kształconych obrazów. W szczególnym przypadku, gdy obserwator usytuowany jest dokładnie na linii prostej wyznaczonej przez źródło pola grawitacyjnego i znajdujące się za nim źródło promieniowania, na niebie pojawia się spektakularny pierścień, zwany pierścieniem Einsteina (rys. 3).



Rys. 3. Pierścień Einsteina [na podstawie https://www.researchgate.net/figure/Formation-of-an-Einstein-ring-when-light-from-a-distant-source-star-is-bent-by-the_fig6_283118105]

Soczewkowanie grawitacyjne, ze względu na obserwowane efekty, dzieli się na słabe, silne i mikrosoczewkowanie. Potężne pola grawitacyjne gwiazd bozonowych i gwiazd fermionowych są źródłem soczewkowania silnego (możliwe, że małowasywne gwiazdy bozonowe lub fermionowe będą powodować szczególny rodzaj soczewkowania silnego czyli mikrosoczewkowanie). Można się zatem spodziewać, iż wpływ grawitacji na trajektorie fotonów będzie skutkować konsekwencjami opisanymi powyżej.

4. Przyczyny poszukiwania gwiazd bozonowych i gwiazd fermionowych

Zarówno gwiazdy bozonowe, jak i fermionowe (oraz ich kombinacje, czyli gwiazdy bozonowo-fermionowe, gwiazdy fermionowo-bozonowe czy też gwiazdy zbudowane z dwóch rodzajów cząstek fermionowych) są ciągle obiektami hipotetycznymi. Na razie nie ma żadnych obserwacji wskazujących na ich istnienie. Jednakże to wcale nie oznacza, że ich nie ma. Warto poszukiwać gwiazd bozonowych, fermionowych oraz ich różnych kombinacji choćby z następujących powodów:

- Mogą one stanowić część ciemnej materii. Ich odkrycie pozwoliłoby stwierdzić, które z wielu teoretycznie

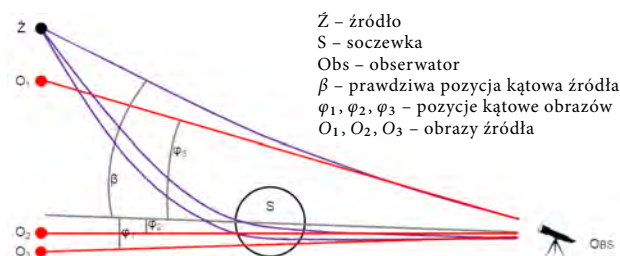
możliwych bozonów i fermionów naprawdę istnieją w przestrzeni kosmicznej. Studiując właściwości tych cząstek moglibyśmy lepiej określić naturę ciemnej materii.

- Najbardziej masywne z nich mogły odegrać istotną rolę podczas formowania się obserwowanych dziś struktur wielkoskalowych takich jak gromady galaktyk czy galaktyki.
- Mogą stanowić alternatywę dla masywnych czarnych dziur.

Choć dziś już mało kto nie wierzy w egzystencję czarnych dziur, to jednak można próbować wyjaśniać istnienie ciemnych, zwartych obiektów w centrum galaktyk przy założeniu, iż są one gwiazdami bozonowymi lub gwiazdami fermionowymi. Jednoznacznego rozstrzygnięcia tego dylematu mogą dostarczyć obserwacje soczewkowania grawitacyjnego. Ponieważ, jak już zostało wspomniane, gwiazdy bozonowe i gwiazdy fermionowe są praktycznie przezroczyste dla promieniowania elektromagnetycznego, więc jako soczewki grawitacyjne generowałyby krzywe jasności odmienne od krzywej jasności czarnej dziury. Rejestracja czystego soczewkowanego sygnału mogłaby zatem okazać się jednym z kluczowych testów scenariuszy dla takich obiektów.

5. Soczewkowanie grawitacyjne gwiazd bozonowych i gwiazd fermionowych

Soczewkowanie grawitacyjne gwiazdy bozonowej [4, 5] i soczewkowanie grawitacyjne gwiazdy fermionowej [6] są do siebie jakościowo podobne. Do opisu tego zjawiska można więc zastosować jeden schemat i posłużyć się rys. 4. Jednocześnie przyjmijmy założenie, że gwiazda znajduje się w połowie drogi między źródłem a obserwatorem i jest obiektem o maksymalnej masie (którą oblicza się ze wzorów przedstawionych w rozdz. 2) przy danym promieniu.



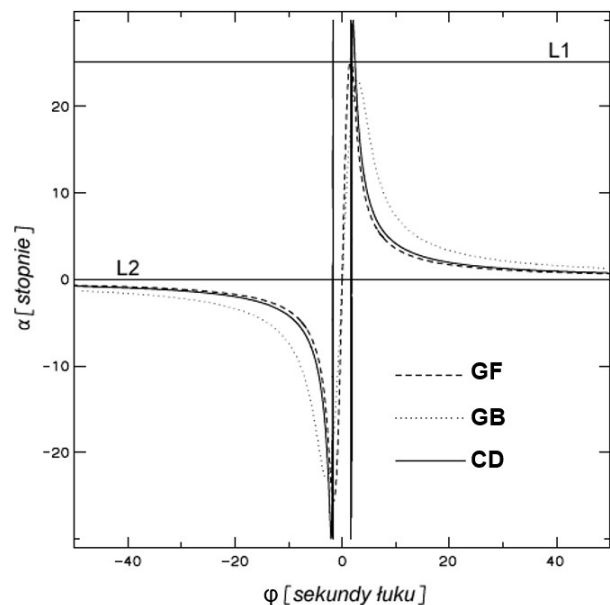
Rys. 4. Soczewkowanie grawitacyjne gwiazdy bozonowej lub gwiazdy fermionowej o maksymalnej masie, znajdującej się w połowie odległości pomiędzy źródłem i obserwatorem

W zależności od położenia elementów układu soczewkującego, obserwuje się jeden, dwa lub trzy obrazy źródła. W tym ostatnim przypadku pierwsze dwa obrazy widać przez gwiazdę (obserwator patrzy przez nią na

wylot). Znajdują się one blisko siebie, dzieli je tylko kilka sekund łuku (arcsec). Trzeci obraz może być oddalony od poprzednich (w zależności od parametrów konkretnej gwiazdy) nawet o ok. 20 stopni (w przypadku gwiazdy bozonowej [4]) lub ok. 30 stopni (w przypadku gwiazdy fermionowej [6]), co stanowi olbrzymą odległość na niebie obserwatora (średnica kątowna tarczy Słońca oglądanego z Ziemi wynosi 31 minut łuku). Obrazy pierwsze i drugi są wzmocnione, natomiast obraz trzeci ma jasność podobną do jasności źródła. Ze względu na dużą odległość kątowną trzeciego obrazu, trudno byłoby się domyśleć, iż ma on coś wspólnego z dwoma pozostałymi obrazami, jeżeli nie znalibyśmy ich pochodzenia. Tylko analiza spektralna wykazałaby związek między nimi.

Dla takiej właśnie gwiazdy przedstawimy teraz wykres tzw. zredukowanego kąta ugięcia α , definiowanego jako $\alpha = \varphi - \beta$, gdzie φ jest kątem pomiędzy soczewką i obrazem, a β – kątem pomiędzy soczewką i źródłem. Zarówno założenia dotyczące obliczeń (w tym to, iż odległość od obserwatora do soczewki jest równa $D_{OL} = 2,41732 \cdot 10^5 \cdot a$, gdzie $a = (2/g)^{1/2} \cdot (\hbar \cdot M_{Pl}/cm_{\tilde{F}}^2)$, przy czym \hbar jest zredukowaną stałą Plancka, a c – prędkością światła), jak i wyniki, które będą przedstawione poniżej, pochodzą z prac [4] i [6].

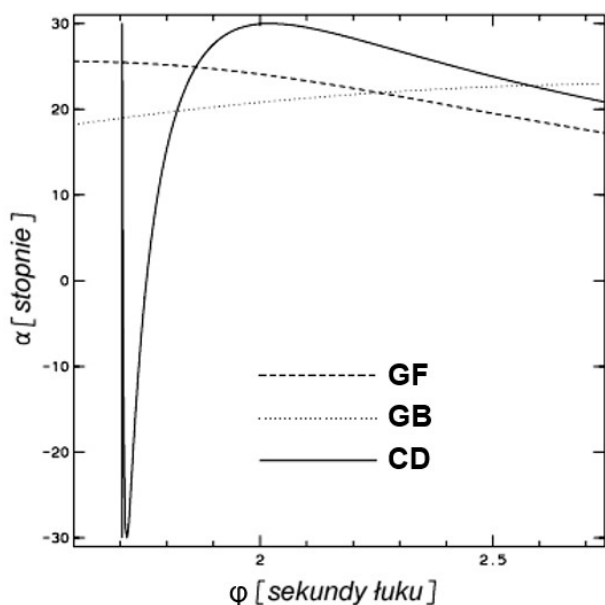
Na rysunku 5 został zaprezentowany wspomniany wyżej zredukowany kąt ugięcia, faktycznie obserwowany z Ziemi dla gwiazdy bozonowej (GB), gwiazdy fermionowej (GF) i czarnej dziury (CD) (wszystkie trzy obiekty o takiej samej masie; wartości wszystkich parametrów użytych w obliczeniach numerycznych, na bazie których został stworzony rys. 5 są opisane w [4] i [6]). Poziome linie pokazują wybrane pozycje źródła, np. linia L1 oznacza, że źródło jest widoczne pod kątem 25 stopni



Rys. 5. Zredukowany kąt ugięcia dla gwiazdy fermionowej o maksymalnej masie

łuku. Punkty przecięcia linii z krzywą kąta α wyznaczają kąty φ , pod jakimi widoczne są obrazy przedstawione na rys. 4. W przypadku istnienia trzech obrazów, trzeci z nich nie jest widoczny na rysunku. Linia L2 oznacza sytuację, gdy wszystkie elementy układu soczewkującego leżą na jednej prostej, co skutkuje powstaniem pierścienia Einsteina (obraz na niebie obserwatora jest widoczny w postaci świecącego pierścienia o środku w punkcie, w którym znajduje się źródło).

Jeżeli chodzi o efekty soczewkowania grawitacyjnego przez gwiazdę bozonową i gwiazdę fermionową, to różnica sprowadza się w zasadzie do nieco innych wyników ilościowych (szczególnie widać to na rys. 6), natomiast kształt krzywej zredukowanego kąta ugięcia jest taki sam. Przypadek czarnej dziury jest jakościowo podobny do przypadków gwiazdy bozonowej i gwiazdy fermionowej, a do tej drugiej jest również podobny ilościowo (krzywe zredukowanego kąta ugięcia dla gwiazdy fermionowej i dla czarnej dziury prawie się pokrywają). Istnieje jednak zasadnicza różnica pomiędzy zachowaniem się wykresów dla obu gwiazd i dla czarnej dziury w obszarze od $-1,7$ do $+1,7$ arcsec. W pobliżu obu tych wartości krzywa dla czarnej dziury zaczyna oscylować (rys. 6), co odpowiada pojawianiu się obrazów wielokrotnych na sferze fotonowej. Wewnątrz obszaru $-1,7 \nabla \cdot 1,7$ arcsec krzywa zredukowanego kąta ugięcia, opisującego przypadek czarnej dziury nie istnieje, ponieważ pod sferą fotonową nie tworzą się żadne obrazy.



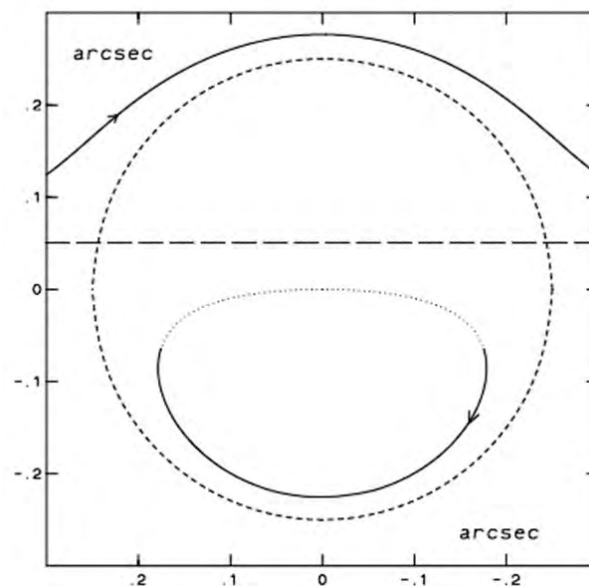
Rys. 6. Zredukowany kąt ugięcia dla gwiazdy fermionowej o maksymalnej masie dla zakresu kąta φ $1,6 \nabla \cdot 2,75$ [5]

Skoro krzywe z rys. 5 są tak bardzo do siebie podobne, to czy soczewkowanie grawitacyjne na pewno może być

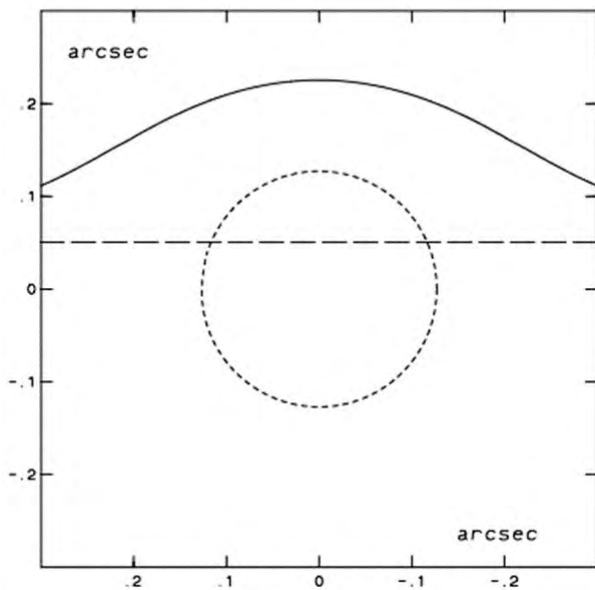
pomocne w rozstrzygnięciu, jakiego typu obiekt znajduje się w centrum galaktyki? Odpowiedź na to pytanie jest pozytywna przy uwzględnieniu faktu, iż przebieg tego zjawiska ma charakter dynamiczny. Ponieważ obiekty układu soczewkującego przemieszczają się względem siebie, więc odzwierciedleniem tego ruchu jest ruch obrazów na niebie obserwatora. Rysunki 7 i 8 przedstawiają trajektorie obrazów odpowiednio dla przypadków gwiazdy fermionowej (dla gwiazdy bozonowej wykres wyglądałby podobnie) i dla czarnej dziury, przy następujących założeniach:

- Soczewką jest obiekt Sgr A*.
- Jeżeli soczewka jest gwiazdą fermionową, to jej promień jest równy 18,52 mpc, czyli 0,4775 arcsec.
- Jeżeli soczewka jest czarną dziurą, to dla obserwatora stanowi obiekt punktowy.
- Masa soczewki wynosi $2,5 \cdot 10^6 M_{\odot}$.
- Odległość obserwator-soczewka jest równa 8 kpc.
- Odległość soczewka-źródło wynosi 200 pc.
- Parametr zderzenia r jest równy 2 mpc.
- Prędkość źródła poruszającego się za obiektem wynosi $v = 50 \text{ km/s} = 1,286$ milisekund łuku na rok.

Jak widać, rysunki 7 i 8 zasadniczo się od siebie różnią. Gdy źródło (jakaś normalna gwiazda) porusza się za czarną dziurą (rys. 7, poprzeczna, przerywana linia jest rzutem trajektorii źródła), to obrazy na niebie obserwatora przesuwają się zgodnie z liniami ciągłymi. Okrąg ukazuje pierścień Einsteina, a przerywana, kropkowana linia reprezentuje kontynuację trajektorii drugiego obrazu, odpowiadającą tej części trajektorii pierwszego obrazu, która wychodzi poza granicę wykresu. Natomiast gdy źródło porusza się z tyłu gwiazdy fermionowej (rys. 8, poprzeczna, przerywana linia jest rzutem trajektorii źródła), wówczas widoczny jest tylko jeden obraz, którego trajektorię opisuje linia ciągła. Tak jak



Rys. 7. Trajektoria obrazów dla przypadku czarnej dziury jako soczewki grawitacyjnej [5 (Fig. 4)]



Rys. 8. Trajektoria obrazów dla przypadku gwiazdy fermionowej jako soczewki grawitacyjnej [5 (Fig. 5)]

w poprzednim przypadku, okrąg symbolizuje pierścień Einsteina.

Obserwacje soczewkowania grawitacyjnego mogą zamienić teoretyczną egzystencję gwiazd bozonowych

lub/i gwiazd fermionowych w realny astrofizyczny byt. Pomiary zredukowanego kąta ugięcia, trajektorii obrazów, prędkości przesuwania się obrazów czy pojaśnień obrazów, pozwolą uzyskać wyniki, które powinny w sposób jednoznaczny określić rodzaj soczewki. Co prawda zdjęcia z Teleskopu Horyzontu Zdarzeń dobitnie pokazały, że za radioźródłem Sgr A* nie kryje się raczej nic innego niż czarna dziura [7, 8], lecz ciągle nie jest wykluczone, że w niektórych galaktykach lub w innych miejscach w przestrzeni kosmicznej gwiazdy bozonowe lub gwiazdy fermionowe mogą istnieć. Kto wie, może kiedyś naprawdę zostaną odkryte?

Literatura

- [1] Friedberg, R., Lee, T.D., Pang, Y., *Phys. Rev. D* 35, 3640 (1987).
- [2] Bilić, N., Viollier, R.D. *Eur. Phys. J. C*, 11, 173 (1999).
- [3] Domcke, V., Urbano, A., *JCAP* 0, 002 (2015).
- [4] Dąbrowski, M. P., Schunck, F. E., *ApJ.*, 535, (1), 316 (2000).
- [5] Osarczuk, J., Schunck, F. E., *Urania*, 4, 148 (1999).
- [6] Bilić, N., Nikolić, H., Viollier, R. D., *ApJ.*, 537, (2), 909 (2000).
- [7] Olivares, H. et al., *MNRAS*, 497, (1), 521 (2020).
- [8] Event Horizon Telescope Collaboration, *ApJL*, 930, 17 (2022).