Na čem pracujeme: Pohyby částic v okolí singularit obklopených magnetickými poli

23.7.2025 - | Astronomický ústav AV ČR

Rychlá proměnnost je jednou ze základních pozorovaných vlastností akretujících kompaktních objektů. Kromě chaotických fluktuací pozorovaného záření se zejména v případě rentgenových dvojhvězd objevují pravidelně se opakující jasové změny, které jsou označovány jako kvazi-periodické oscilace. Frekvence těchto oscilací jsou v řádech stovek Hertzů, tedy opakují se řádově stokrát za sekundu. Obecně se vědci domnívají, že tyto pozorované periody souvisejí s oběžným pohybem částic v akrečními disku, který obklopuje těžší objekt, nejčastěji černou díru. Kvaziperiodické oscilace se nejčastěji objevují v párech. Tento druh proměnnosti se nejčastěji pozoruje u dvojhvězd, v nichž jsou těžším objektem neutronové hvězdy. V diskách černých děr je jejich detekce méně výrazná.

Vysoké frekvence kvazi-periodických oscilací naznačují, že variabilní složka signálu pochází z bezprostředního okolí kompaktního objektu. Toto záření tedy pravděpodobně obsahuje cenné informace o jeho vlastnostech. Pokud by se tyto informace podařilo správně dekódovat z pozorovaného záření, získali bychom neocenitelnou sondu do podmínek panujících v jeho okolí a tím pádem pravděpodobně i klíč k samotné podstatě kompaktního objektu. Prvním krokem na této cestě je zkoumání pohybu látky akrečního disku a šíření rentgenového signálu v podmínkách silného gravitačního pole, které v okolí kompaktních objektů panuje.

Zde je třeba udělat odbočku. Látka se v akrečním disku pohybuje po přibližně kruhových drahách. Drobné odchylky od kruhového pohybu se mohou objevit například v důsledku vln, které se akrečním diskem mohou šířit. Obecně se v takovém případě objevují v orbitálním pohybu tři různé frekvence. Jedna frekvence odpovídá pohybu podle Keplerových zákonů, další jsou dvě tzv. epicyklické frekvence, které popisují odchylky v radiálním a vertikálním směru od pohybu podle Keplerových zákonů. V klasické mechanice platí, že tyto tři frekvence jsou shodné. Výsledný pohyb pak probíhá v principu po skloněné elipse, která je však v nerušeném případě stabilní. Situace je však jiné v okolí silně gravitujících objektů, kdy se frekvence mohou začít lišit. Výsledkem může být například relativistické stáčení dráhy v prostoru, tak jako to ve Sluneční soustavě nejvíce pozorujeme u Merkuru. Někteří astrofyzikové se domnívají, že kvaziperiodické oscilace mohou souviset právě s rozličností epicyklických frekvencí.

Popis pohybů hmotných částic v okolí silně gravitujících objektů se v současnosti spolehlivě popisuje obecnou teorií relativity. Tvar rovnic poprvé napsaných Albertem Einsteinem před více než 100 lety však není univerzální a v principu závisí na dodatečných silách, které se mohou v problému uvážit. V představované práci se uvažují dva dodatečné zdroje silového působení. Autoři jednak uvážili působení elektromagnetickou interakcí, tedy studovali objekt typu černá díra vložený do magnetického pole. Druhým silovým zdrojem bylo tzv. hmotné skalární pole, což je matematický objekt zahrnující exotické silové působení, které nelze popsat jinak. Zástupci skalárních polí byli odhaleni například při částicových srážkách na Velkém hadronovém urychlovači (LHC) nebo lze s pomocí skalární polí zahrnout temnou hmotu nebo temnou energii, dvě nezbytné entity současných kosmologických modelů, o jejichž podstatě víme pramálo. Silové působení ovlivňuje geometrii prostoročasu a tedy tvar řešených pohybových rovnic.

Výsledky výpočetních simulací jsou porovnávány se standardními situacemi v okolí nerotující černé díry a nabité černé díry, která generuje magnetické pole. Zvláštní pozornost je věnována stabilitě kruhových drah a epicyklickým frekvencím, které mohou poskytnout informace o struktuře

gravitačního pole. V okolí běžné černé díry totiž existuje několik význačných hranic. Tou první je Schwarzschildův poloměr, který ohraničuje plochu, tzv. horizont událostí, z níž nemůže uniknout ani světlo. Ve vzdálenosti jeden a půl Schwarzschildových poloměrů nalezneme tzv. fotonovou sféru, na níž mohou mít fotony stabilní kruhové dráhy a proto mohou přinášet informace o dění „za“ černou dírou při pohledu pozorovatele. A konečně na třech Schwarzschildových poloměrech nalezneme tzv. poslední stabilní orbitu, tedy sféru, na které mohou mít hmotné částice stabilní kruhové dráhy. Tato pravidla platí jen pro osamocenou nerotující černou díru bez elektrického náboje. Pokud vneseme do popisu tělesa další důležité prvky, situace se poměrně značně mění.

Výsledky práce tak například demonstrují, že při dostatečné intenzitě skalárního pole může centrální objekt přejít do stavu nahé singularity, což má důsledky pro existenci stabilních oběžných drah i chování drah fotonů. Jako „nahou singularitu“ označují vědci v tuto chvíli hypotetický gravitačně zkolabovaný objekt, který není obalen horizontem událostí. Teoreticky by tak mohla být sledována vnějšími pozorovateli a přinést tak o těchto exotických objektech důležité informace. Simulace provedené J. Horákem a jeho kolegy nás přesvědčují, že slabá skalární pole mají podobný účinek jako elektromagnetická pole, ale při vyšších intenzitách dominuje vliv skalárního pole, což může umožnit přítomnost stabilních oběžných drah hmotných částic i v těsné blízkosti singularity. Také se ukazuje, že v některých případech mohou existovat dvě fotonové oběžné dráhy, což ovlivňuje chování hmoty i světla v okolí těchto objektů.

Článek J. Horáka a jeho spolupracovníků obsahuje kromě detailní analýzy stability orbitálního pohybu, výpočtu orbitálních a epicyklických frekvencí a odhadu účinnosti akrečního procesu i popis pravděpodobného scénáře akrece, s přihlédnutím k překvapivým vlastnostem nahých singularit. Ukazuje se, že v důsledku slábnutí gravitační síly se látka padající z vnitřní okraje akrečního disku začne hromadit v blízkosti singularity. Nahromaděná hmota časem vytvoří malý akreční disk, zakončený stacionární rázovou vlnou, která vzniká v důsledku srážky dopadající hmoty s látkou, která obíhá v disku. V rázové vlně se pak uvolňuje většina kinetické energie dopadající látky, což by se mělo výrazně projevit v elektromagnetickém spektru a variabilitě pozorovatelného záření. Na detailních výpočtech těchto spekter, modifikacích stávajících modelů kvaziperiodických oscilací a numerických simulací vlastností akrečního proudění na kompaktní objekty tohoto typu autoři článku v současnosti intenzivně pracují.

J. Horák a kol., *Orbital Motion in Spacetimes Influenced by the Presence of Scalar and Electromagnetic Fields*, Physical Reviews D v tisku, preprint arXiv:2501.13538

K dispozici je též výrazně rozšíření popularizační text od J.Horáka

https://www.asu.cas.cz/articles/2439/19/na-cem-pracujeme-pohyby-castic-v-okoli-singularit-obklopenych-magnetickymi-poli