

Na čem pracujeme: První změření rotace černé díry novou metodou rentgenové polarimetrie

24.1.2024 - J. Svoboda, M. Dovčiak | Astronomický ústav AV ČR

Rentgenové dvojhvězdy jsou hvězdné systémy, kde je jednou z komponent gravitačně zkolabovaná černá díra. Ta sama o sobě není zdrojem žádné přímé informace, protože je obklopena horizontem událostí. V případě těsné dvojhvězdy však na ni přetéká hmota z hvězdy sousední. Tato hmota vytváří kolem černé díry akreční disk, ve kterém obíhá vysokými rychlostmi dosahující až poloviční rychlosti světla v těsné blízkosti černé díry. Při tomto procesu se látka silně zahřívá a stává se zdrojem rentgenového záření.

Rentgenové záření v sobě nese důležité informace o samotné černé díře. Ta je charakterizována pouze dvěma parametry, hmotností a rotací neboli spinem. Ten se často vyjadřuje jako bezrozměrný parametr s hodnotami mezi 0 a 1. Nulový spin má statická černá díra, jednotkový pak taková, která rotuje maximální rychlostí, jakou dovoluje teorie relativity. Při interpretaci rentgenových pozorování se obvykle předpokládá, že tenký akreční disk dosahuje až k poloměru tzv. nejvnitřnější stabilní orbity, jehož hodnota je dána právě spinem černé díry. Čím víc černá díra rotuje, tím blíže kolem ní hmota může obíhat. Pro maximálně rotující černou díru sahá akreční disk až k horizontu událostí. Pro nerotující černou díru však končí ve vzdálenosti odpovídající trojnásobku Schwarzschildova poloměru, který vyjadřuje rozměr horizontu událostí nerotující černé díry. V akrečním disku se tak uvnitř nachází „prázdné“ místo, kde neexistují stabilní oběžné dráhy a látka padá přímo do černé díry a její příspěvek k celkovému záření je zanedbatelný.

Všechny metody měření spinu černé díry se v podstatě snaží určit tento spodní okraj akrečního disku. Při spektrálním fitu tepelného záření souvisí s vnitřním okrajem disku naměřená maximální teplota. Je třeba ale započítat i relativistické jevy, zejména gravitační rudý posuv a aberaci, kdy se intenzita mění s frekvencí, která se ale mění dopplerovým jevem podle toho, jestli záření vyzařuje hmota přibližující se nebo vzdalující se. Měření maximálního gravitačního rudého posuvu pak hraje klíčovou roli v určení spinu pomocí čáry železa, která je součástí reflektivního záření. A konečně mohou o spinu napovědět analýzy nejrychlejších časových změn v disku. Každá z těchto metod má své komplikace a ne vždy se jednotlivé metody na hodnotě spinu shodují.

Nezávislou možností, jak určit spin černé díry, je sledování polarizace rentgenového záření. Polarizace je charakterizována dvěma parametry, stupněm polarizace a polarizačním úhlem. Relativistické jevy polarizační vlastnosti mění a opět tak na základě analýzy můžeme určit sílu relativistických efektů a tedy jak blízko se dostává akreční disk k černé díře. Polarizované záření vzniká přímo v akrečním disku při rozptylu na volných elektronech v horních vrstvách akrečního disku. Stupeň polarizace je přímou funkcí sklonu roviny disku vůči pozorovateli, čím větší je sklon, tím větší je polarizace. Efekty ohybu světla, relativistické aberace nebo relativistického beamingu mění zorné úhly různých oblastí disku a ve výsledku vedou k charakteristické rotaci polarizačního úhlu, která závisí na spinu černé díry.

S vypuštěním družice IXPE (Imaging X-ray Polarimetry Explorer) se měření polarizace rentgenového záření stalo skutečností. Přístroj se zaměřil na celou řadu slibných zdrojů. Mezi nimi i na rentgenový zdroj LMC X-3, což je rentgenová dvojhvězda nacházející se v blízké galaxii Velkého Magellanova mračna. Jedná se o systém s černou dírou o hmotnosti přibližně 7 hmotností Slunce, kolem níž obíhá hvězda s hmotností přesahující naše Slunce třiapůlkrát. Objekt je jako zdroj rentgenového záření

znám již od sedmdesátých let minulého století, kdy se poprvé objevil v katalogu družice UHURU. Od té doby se stal jedním z nejvíce pozorovaných rentgenových zdrojů vůbec. Je o něm známo, že se po většinu času nachází v tzv. měkkém stavu, kdy je záření charakterizované pouze tepelným zářením akrečního disku. To je ideální případ pro měření spinu černé díry, kdy tato měření nekomplikují další složky záření, mezi které patří záření tzv. koróny, které je silné v tzv. tvrdém spektrálním stavu. Proto byla černá díra v LMC X-3 vybrána k pozorování pomocí IXPE. Přestože je kvůli větší vzdálenosti slabší než zdroje v naší Galaxii, výhodou LMC X-3 je známý sklon oběžné roviny z optických pozorování a také poměrně přesně určená vzdálenost (50 tisíc parseků). Čistého času týden trvající expozice s IXPE byla doplněna celou řadou dalších rentgenových pozorování k přesnému spektrálnímu fitu. O výsledcích této pozorovací kampaně pojednává článek publikovaný v *Astrophysical Journal*, jehož hlavním autorem je Jiří Svoboda z Oddělení galaxií a planetárních systémů ASU. Z měření družice IXPE autoři ukázali, že stupeň polarizace dosahuje průměrné hodnoty 3,2 % v souladu s předpokládaným sklonem akrečního disku 70° . Zdá se ale, že stupeň polarizace systematicky roste s energií rentgenového záření, jako tomu bylo detekováno i u jiných zdrojů a příčina tohoto růstu je zatím nejasná. Ovšem v případě LMC X-3 není tento trend zcela průkazný, neboť s rostoucí energií narůstají i nejistoty měření. Naměřený polarizační úhel je asi -42° vzhledem k severnímu směru a zdá se být konstantní s energií.

Z analýzy rentgenových spekter vyplývá, že pozorováním nejlépe vyhovuje model se spinem asi 0,2, tedy pomalu rotující černá díra. Odpovídající sklon disku kolem 70° je výborně konzistentní se sklonem oběžné roviny druhé, hvězdné, složky kolem černé díry.

Měření polarizace záření bylo použito jako zcela nezávislé měření a dospělo k podobným závěrům. Pozorováním nejlépe odpovídá model s nízkým spinem. a nízkou odrazivostí akrečního disku, což je též konzistentní s nízkou rotační rychlostí černé díry a tedy existencí prázdné mezery uvnitř akrečního disku.

Významnost této publikace spočívá v tom, že se jedná o historicky první měření spinu černé díry pomocí polarizace rentgenového záření. Díky pečlivě naplánované pozorovací kampani bylo možné tato měření porovnat se spektrálním fitem simultánně pořízených dat. Provedená analýza ukazuje, že výsledky získané nezávislými metodami jsou konzistentní. Polarizované záření se tak prokázalo být užitečným nástrojem pro nezávislé měření spinu černých děr v rentgenových dvojhvězdách a potvrdilo nízký spin v systému LMC X-3.

<https://www.asu.cas.cz/articles/2225/19/na-cem-pracujeme-prvni-zmereni-rotace-cerne-diry-novou-metodou-rentgenove-polarimetrie>