

Na čem pracujeme: Pohyby částic kolem rotujících černých děr: směřujeme ke skloněným akrečním diskům

9.7.2024 - | Astronomický ústav AV ČR

Černé díry jsou fascinujícími objekty, jejichž extrémní gravitace velmi výrazně zakřivuje prostoročas v jejich blízkém okolí. Projevy silné gravitace jsou patrné zejména v bezprostředním okolí tzv. horizontu událostí, tedy myšlené hranice, zpod které již k vzdálenému pozorovateli není schopno uniknout ani světlo.

Z pohledu pozemského pozorovatele se jedná o velmi exotická tělesa a je proto překvapivé, že k jejich popisu stačí dle obecné teorie relativity jen několik málo parametrů, přičemž astrofyzikální relevanci mají hlavně dva. V první řadě jejich hmotnost a v druhé pak rychlost jejich otáčení měřená parametrem, který nazýváme spin. Spin může nabývat hodnot od nuly (nerotující černá díra) až po jedničku (maximálně rotující černá díra). Rotující (v literatuře označované jako Kerrovy) černé díry jsou cílem představovaného článku.

Pokud je rotující černá díra obklopena akrečním diskem (tvořeným hlavně plynnými a prachovými částicemi), stává se tento disk zdrojem elektromagnetického záření. Jedním z údajů, který umožňuje na dálku určit rychlost rotace černé díry, je tzv. poloměr poslední stabilní kruhové orbity (Innermost Stable Circular Orbit, ISCO), který se jednoznačně projeví např. v rentgenovém záření akrečního systému. Poloměr poslední stabilní orbity představuje hraniční vzdálenost obíhajících částic, pod níž se trajektorie stává nestabilní a malá porucha může způsobit např. pád do černé díry. Poloměr poslední stabilní kruhové orbity je však obvykle určován pro předpoklad oběhu částic striktně v rovníkové rovině. Jenže máme k dispozici pozorování, která svědčí o tom, že ne všechny akreční disky jsou ideálně tenké a okupují výhradně rovníkovou rovinu černé díry. V blízkosti černé díry se částice mohou pohybovat i po drahách, které nemají obdobu v klasické newtonovské teorii gravitace. Jedním ze speciálních typů těchto drah jsou tzv. sférické dráhy, které mají konstantní vzdálenost od černé díry, ale částice na nich během oběhu zároveň v různé míře oscilují vůči rovníkové rovině, kterou pravidelně protínají. Autoři článku se zaměřili na sférické dráhy, zkoumali jejich stabilitu a dynamiku částic v různých případech. Pro upřesnění terminologie rovnou uvedme, že stabilní dráhy jsou ty, na kterých může částice setrvat po dlouhou dobu odolávajíc malým poruchám (perturbacím), zatímco u nestabilní dráhy mohou tyto poruchy obecně vést k tomu, že částice buď spadne do černé díry, nebo naopak unikne do vesmíru, či je případně stabilizována na dráze jiného typu. O. Kopáček a V. Karas z ASU se v tomto článku věnovali geodetickým trajektoriím elektricky neutrálních hmotných částic, při jejichž pohybu v okolí rotující černé díry se kromě ostatních integrálů pohybu zachovává hodnota zobecněného momentu hybnosti, tzv. Carterova konstanta, a pohyb proto není ovlivněn deterministickým chaosem.

Studium těchto drah má významný dopad například na pochopení procesů pohlcení menších hmotných objektů černou dírou (v angličtině se tyto jevy označují jako Extreme Mass Ratio Inspiral, EMRI), což jsou scénáře, kde menší objekt, jako méně hmotná černá díra nebo neutronová hvězda, spirálovitě padá do supermasivní černé díry v centru galaxie. Při těchto procesech vznikají mimo jiné gravitační vlny, které by měly být detekovatelné pomocí budoucích gravitačních observatoří. Možnost detekce ovšem bude podmíněna dobrou znalostí trajektorie mnohem lehčího sekundárního tělesa, které v tomto kontextu obvykle můžeme modelovat jako hmotnou částici.

V článku tedy autoři opustili zjednodušení kruhové dráhy v rovníkové rovině a zkoumali řešení pro

skloněné (sférické) dráhy, u nichž poloměr poslední stabilní orbity závisí kromě spinu také na hodnotě Carterovy konstanty, která určuje míru oscilace kolem rovníkové roviny. V závislosti na těchto parametrech lokalizovali nejvnitřnější stabilní sférickou orbitu (Innermost Stable Spherical Orbit, ISSO), což je nejvnitřnější sférická dráha, po níž částice ještě mohou dlouhodobě obíhat kolem černé díry. Dále určovali poloměr tzv. hraničně vázané sférické orbity (Marginally Bound Spherical Orbit, MBSO), což je dráha, na které částice přestává být gravitačně vázaná černou dírou a může proto parabolicky uniknout. Pro určení těchto poloměrů je místo Carterovy konstanty také možné využít parametrizace drah pomocí úhlu sklonu dráhy. Tato parametrizace poskytuje intuitivnější představu o geometrickém tvaru dráhy, kde krajní případy zahrnují polární dráhy (sklon nulový) a rovníkové kruhové dráhy (sklon 90 stupňů). Analýza ukazuje, že pro prográdní dráhy (tedy pro směr oběhu shodný se směrem rotace černé díry) se poloměry ISSO a MBSO postupně posouvají na vyšší hodnoty ve srovnání s poloměry ISCO a MBSO odpovídajících kruhových drah, jak se zvětšuje Carterova konstanta (zmenšuje sklon). Naopak pro retrográdní sférické dráhy (tedy pro oběh proti směru rotace černé díry) jsou poloměry ISSO a MBSO vždy menší než poloměry kruhových drah při shodném spinu a postupně se zmenšují se zvětšující se Carterovou konstantou (klesajícím sklonem).

Neméně zajímavé bylo i studium dynamiky nestabilních sférických drah pod ISSO. V této oblasti velmi blízko horizontu událostí závisí osud částice, tj. zda spadne do černé díry, stabilizuje se na kvaziperiodické dráze nebo unikne, především na směru a velikosti v principu náhodné poruchy. Provedená numerická analýza ale ukazuje, že zkoumané parametry (spin černé díry a Carterova konstanta určující sklon sférické orbity) mohou výrazně ovlivnit pravděpodobnosti jednotlivých možných výsledků. Ukazuje se, že vyšší hodnota spinu snižuje pravděpodobnost stabilizace pro prográdní nestabilní sférické dráhy, zatímco ji zvyšuje pro retrográdní dráhy. Hodnota Carterovy konstanty má opačnou roli: přispívá ke stabilizaci prográdních drah, zatímco retrográdní dráhy činí náchylnějšími k pádu.

Je zajímavé si uvědomit, že značná část efektů popsaných v představované studii se vůbec nevyskytuje v případě klasické newtonovské fyziky a jsou tedy čistě důsledkem relativistických jevů. Vzhledem k nově otevřenému oknu gravitační astronomie je důsledná analýza chování hmotných částic obíhajících gravitačně zhroucené černé díry velmi aktuální a získané výsledky jsou také velmi cenné.

O. Kopáček, V. Karas, *On Innermost Stable Spherical Orbits near a Rotating Black Hole: A Numerical Study of the Particle Motion near the Plunging Region*, Astrophysical Journal 966 (2024) id. 226, preprint arXiv:2404.04501

<https://www.asu.cas.cz/articles/2288/19/na-cem-pracujeme-pohyby-castic-kolem-rotujicich-cernych-d-er-smerujeme-ke-sklonenym-akrecnim-diskum>