

Na čem pracujeme: Univerzální popis viskozity akrečních disků černých děr

1.9.2026 - Michal Švanda | Astronomický ústav AV ČR

Akreční disky kolem černých děr bývají nejčastěji studovány s využitím modelu, podle něž se turbulentní transport momentu hybnosti řídí zjednodušeným předpokladem konstantní viskozity. Tento empirický zákon má svůj původ v úvahách ze 70. let minulého století a na jeho základě bylo analyzováno mnoho zajímavých systémů. Autoři představované práce, mezi nimi i Jiří Horák z Oddělení galaxií ASU, analýzou několika nezávislých relativistických magnetohydrodynamických simulací odhalují překvapivě univerzální průběh tohoto transportu, avšak opouštějí představu stálé viskozity. Představují a testují jednoduchý vztah, který tento průběh popisuje a který by mohl zpřesnit modely záření akrečních disků a pomoci lépe interpretovat pozorování černých děr.

Akreční disky patří mezi nejzajímavější fyzikální procesy spojené s černými děrami. Samotná černá díra nevyzařuje žádné světlo, protože z oblasti za horizontem událostí nemůže uniknout žádná informace. V okolí díry se však může nacházet látka, například z blízkého souputníka, která přítomnost černé díry může odhalit. Astronomové pak často pozorují intenzivní záření hmoty, která kolem černé díry obíhá ještě před svým pohlcením. Plyn a prach vytvářejí rotující disk, v němž se postupně ztrácí moment hybnosti a hmota spirálovitě padá dovnitř. Gravitační potenciální energie se přitom mění na teplo a elektromagnetické záření, které může být pozorováno i ve vzdálených galaxiích. Akreční disky tak umožňují studovat vlastnosti černých děr nepřímo a představují jeden z hlavních zdrojů informací o jejich hmotnostech, rotaci i okolním prostředí.

Teoretický popis akrečních disků byl zásadně ovlivněn prací Shakury a Sunyaeva z roku 1973. Protože tehdy nebylo známo, jak přesně turbulence v plazmatu přenáší moment hybnosti směrem ven, zavedli jednoduchý parametrický popis známý jako α -viskozita. Namísto detailního modelování turbulence předpokládali, že efektivní viskozita je úměrná tlaku v disku, přičemž koeficient úměrnosti α je v disku všude stejný. Tento přístup se ukázal jako mimořádně užitečný a stal se základem mnoha modelů tenkých i tlustých akrečních disků, i když i samotní autoři původní práce poukazovali, že není žádný důvod pro konstantní α , že je to jen zjednodušující úvaha. Pozdější relativistické magnetohydrodynamické simulace opravdu ukázaly, že realita je komplikovanější: hodnota α se v disku mění a zejména v oblasti velmi blízko černé díry se její chování výrazně odlišuje od původního jednoduchého předpokladu.

Moderní počítačové simulace řeší přímo Einsteinovy rovnice obecné relativity kombinované s rovnicemi magnetohydrodynamiky a umožňují sledovat vývoj plynu v okolí horizontu událostí. Tyto simulace však zatím nejsou náhradou za analytické modely, protože jsou výpočetně velmi náročné. Je proto důležité najít jednoduché fyzikálně motivované vztahy, které zachytí hlavní vlastnosti numerických výsledků a umožní jejich využití v praktických, byť méně přesných modelech akrečních disků. Právě na tento problém se zaměřuje představovaná práce.

Autoři článku se zaměřili na otázku, zda lze v chování α -viskozity nalézt obecný zákon platný pro různé typy akrečních disků kolem černých děr. Výchozím bodem byla skutečnost, že původní model Shakura-Sunyaev předpokládá konstantní hodnotu α v celém disku. Tento předpoklad je však problematický zejména v oblasti mezi poslední stabilní kruhovou drahou a horizontem událostí černé díry, kde hmota již nezadržitelně padá směrem k černé díře. Právě zde mohou vznikat významné příspěvky k celkovému záření disku, a proto je správný popis transportu momentu hybnosti klíčový.

Metodika práce je založena především na porovnání několika nezávislých trojrozměrných relativistických magnetohydrodynamických simulací akrečních disků kolem nerotujících černých děr. Autoři využili tři soubory numerických simulací vytvořené různými výzkumnými týmy. Jednalo se jednak o simulace tenkých disků, v nichž byly radiační ztráty aproximovány pomocí chladicí funkce, a jednak o realističtější simulace takzvaných nadýchaných (puffy) disků s významným podílem radiačního tlaku a s přítomným magnetickým polem.

Z jednotlivých simulací autoři extrahovali radiální průběh viskózního napětí, tedy veličiny popisující přenos momentu hybnosti způsobený turbulentními pohyby a magnetickým polem. Z této veličiny byla pak vypočtena hodnota parametru α jako funkce vzdálenosti od černé díry.

Výsledky ukázaly pozoruhodnou shodu mezi různými simulacemi. Přestože byly vytvořeny různými metodami a za odlišných fyzikálních podmínek, všechny vykazovaly tři stejné základní vlastnosti. Za prvé, α -viskozita klesá k nule v bezprostřední blízkosti horizontu událostí. To znamená, že samotný horizont nepůsobí jako místo, kde by turbulence mohla dále efektivně přenášet moment hybnosti zpět ven. Jakmile plyn překročí horizont, všechny možné fyzikální procesy jsou směřovány dovnitř černé díry. Druhým významným výsledkem je, že α dosahuje maxima v oblasti takzvané kruhové fotonové orbity. Jde o speciální vzdálenost od rotující černé díry, kde může světlo v obecné relativitě obíhat po kruhové dráze. Tato oblast se nachází mezi horizontem událostí a vnější částí disku a představuje místo, kde se výrazně projevují relativistické efekty zakřivení časoprostoru. Na fotonové orbitě se také mění směr odstředivé síly, která na menších vzdálenostech směřuje dovnitř. I to opravňuje očekávání, že právě zde bude hodnota α dosahovat maxima. Tento výsledek naznačuje, že geometrie časoprostoru samotné černé díry hraje důležitou roli v určování vlastností turbulence. Třetím rysem je skutečnost, že ve velkých vzdálenostech od černé díry α opět klesá a její hodnota je výrazně menší než v oblasti těsně nad horizontem. Vnější části disku se tedy chovají odlišně než jeho vnitřní oblasti.

Na základě těchto výsledků autoři navrhuji novou parametrizaci α -viskozity. Namísto konstantního parametru zavádějí vztah, který závisí na takzvaném poloměru gyrace. Tato veličina popisuje vlastnosti rotace v daném gravitačním poli a v případě černých děr je jednoznačně určena geometrií časoprostoru. Nový vztah obsahuje několik konstant, které lze kalibrovat podle výsledků simulací, ale zachovává univerzální vlastnosti pozorované ve všech analyzovaných modelech.

Význam navrženého modelu spočívá především v jeho možném využití v budoucích analytických a poloanalytických modelech akrečních disků. Současné modely tenkých a tzv. slim disků často používají konstantní α i v oblastech, kde tento předpoklad není fyzikálně realistický. Nová formulace by mohla umožnit přesnější výpočty záření vycházejícího z nejvnitřnějších částí disku, což je důležité například při určování rotace černých děr z rentgenových pozorování nebo při interpretaci dat z okolí supermasivních černých děr.

M. Abramowicz, A. Brandenburg, J. Horák a kol., *Universal behaviour of α -viscosity in black hole accretion discs*, Astronomy & Astrophysics v tisku, preprint arXiv:2603.10997

<https://www.asu.cas.cz/articles/2598/19/na-cem-pracujeme-univerzalni-popis-viskozity-akrečních-disků-černých-děr>