

Seriál: Aktivní galaxie

V minulém díle jsme si představili základní morfologii galaxií, které běžně pozorujeme na obloze, máme-li k dispozici dalekohled. Krom morfologie kterou jsme si představili, můžeme galaxie rozdělit na aktivní a neaktivní. Za aktivitu považujeme výtrysk (dále budeme používat anglický název *jet*) z centrální supermasivní černé díry, která se nachází v jádru každé galaxie.

Je tam černá díra nebo ne?

Postulovat, že uprostřed každé aktivní galaxie je černá díra je poněkud odvážné, neboť jako sám název napovídá, černou díru nemůžeme jednoduše pozorovat, neboť její gravitace je natolik silná, že z ní neuniká ani světlo. Musíme se zamyslet nad tím, co v případě takové aktivní galaxie vidíme¹. Aktivní galaxie se vyznačují tím, že je vidíme na velké vzdálenosti, což naznačuje, že mají vysokou luminositu L . Pro výpočet provedeme několik zjednodušení. Zdroj budeme považovat za stabilní a izotropní, budeme také uvažovat o tom, že centrum naší aktivní galaxie je tvořeno ionizovaným vodíkem. Aby nebylo dezintegrováno, musí gravitační síla vyrovnávat tlak záření. Vyjádříme si tok záření F , což je energie, která za jednotku času proce slupkou o poloměru r .

$$F = \frac{L}{4\pi r^2}.$$

Zamysleme se na chvíli nad hybností. Pro foton hybnost vyjádříme $p = E/c$ a pro tok záření to bude obdobné. Hybnost toku záření je v podstatě to, co nazveme tlakem záření

$$P_{\text{rad}} = \frac{F}{c} = \frac{L}{4\pi r^2 c}.$$

Pokud nás zajímá zářivá síla, tak se musíme zajímat ještě o účinný průřez jednoho elektronu σ_e . Vztáhneme-li sílu na jednotkový vektor v radiálním směru \mathbf{r} , můžeme napsat

$$\mathbf{F}_{\text{rad}} = \sigma_e \frac{L}{4\pi r^2 c} \mathbf{r}.$$

To bychom měli záření, teď přijde na řadu gravitace. Vzhledem k tomu, že máme ionizovaný vodík, můžeme gravitační sílu mezi částicemi napsat jako

$$\mathbf{F}_{\text{grav}} = -\frac{GM(m_p + m_e)}{r^2} \mathbf{r} \approx -\frac{GMm_p}{r^2} \mathbf{r},$$

jelikož hmotnost elektronu je zanedbatelná. Galaktické jádro se pomalu nerozpíná, takže je zřejmé, že gravitační síla, směřující dovnitř musí být větší nebo rovna zářivé síle

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{\text{rad}} &\leq \mathbf{F}_{\text{grav}} \\ \sigma_e \frac{L}{4\pi r^2 c} &\leq \frac{GMm_p}{r^2} \\ L &\leq \frac{4\pi Gcm_p}{\sigma_e} M. \end{aligned}$$

¹Lze dokázat, že černá díra se nachází i uprostřed neaktivních galaxií, ale tím se zde zabývat nebudeme.

Po vyčíslení dostaneme $6,31 \cdot 10^4 \text{ erg}\cdot\text{s}^{-1} \approx 1,26 \cdot 10^{38} (M/M_{\odot}) \text{ erg}\cdot\text{s}^{-1}$. Výše uvedený vztah pro luminositu se nazývá *Eddingtonův limit*. Určuje nám minimální hmotnost, kterou může mít zdroj o luminositě L . Vztah pro hmotnost můžeme přepsat jako

$$M_E = 8 \cdot 10^5 L(10^{44}) M_{\odot},$$

kde $L(10^{44})$ znamená luminositu v jednotkách $10^{44} \text{ erg}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro takovou aktivní galaxii je typická hodnota $L \approx 10^{46} \text{ erg}\cdot\text{s}^{-1}$, což odpovídá hmotnostem okolo 10^8 hmotností slunečních. Vzhledem k tomu, že pozorovaný objekt je bodový, jako hvězda, musí být poměrně malý a velmi hmotný. Takové kritérium nespĺňuje nic jiného než právě černé díry.

Kde se bere jet aneb kouzlo akrece

Už jsme zmínili, že za aktivitou galaxie je jakýsi jet a černá díra. Tyto dva fenomény můžeme spojit. Materiál na černou díru nepadá přímo, ale po spirále², což formuje tzv. *akreční disk*. Ten černou díru v podstatě krmí. Materiál který na ní dopadne pak „exploduje“ a vytvoří jet³. Můžeme si zkusit odvodit, kolik hmoty černá díra musí sežrat, aby si udržela aktivitu. Předpokládejme, že černá díra není dokonalá a existuje nějaký koeficient efektivity μ . Celkovou vyčerpateľnou energii můžeme vyjádřit jako $E = \mu M c^2$. Vyzářená energie se dá napsat jako $L = dE/dt$. Ve vztahu pro energii je jediný v čase měnitelný faktor hmotnost černé díry samotné, můžeme tedy napsat (tečka značí časovou derivaci)

$$L = \mu \dot{M} c^2,$$

kde časová derivace hmotnosti je tempo akrece na centrální objekt. Z empirických závěrů víme, že

$$\dot{M} = \frac{L}{\mu c^2} \approx 1,8 \cdot 10^{-3} \left(\frac{L(10^{44})}{\mu} \right) M_{\odot} \text{ rok}^{-1}.$$

To jak moc bude akrece účinná závisí na faktoru μ , který nám vlastně popisuje úspěšnost přeměny gravitační energie na záření. Potenciální energie černé díry samotné je $U = GMm/r$, kde m je hmotný element ve vzdálenosti r od černé díry, provedeme-li jeho časovou derivaci, výsledkem bude pozorovaná luminosita

$$L \approx \frac{dU}{dt} = \frac{GM}{r} \frac{dm}{dt} = \frac{GM\dot{m}}{r}.$$

Z uvedených rovnic můžeme uhadnout, že $\mu \propto M/r$. To nám definuje jakousi kompaktnost objektu samotného. Můžeme si zadefinovat i poloměr objektu, jelikož jde o černou díru, použijeme poloměr⁴,

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \approx 3 \cdot 10^{13} M(10^8) \text{ cm} \approx 10^{-2} \text{ světelných dní}.$$

Odhlédneme-li od relativistických efektů a určíme, že náš testovací hmotnostní bod je ve vzdálenosti $5R_S$ od centra černé díry, můžeme zjednodušeně napsat

$$U = \frac{GMm}{5R_S} = \frac{GMm c^2}{10GM},$$

²Lze pěkně demonstrovat na gumové bláně na kterou položíme těžkou kuličku. Pustíme-li k ní kuličku lehčí, nespustí se přímo doprostřed, ale bude kroužit po spirále.

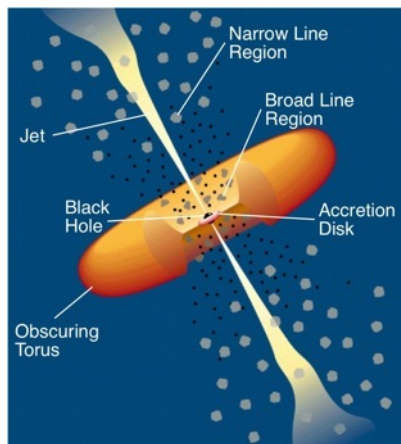
³Samotný mechanismus vzniku jetu je neznámý, proto uvozovky.

⁴Poloměr okolo hmotného objektu, jehož úniková rychlost je rovna rychlosti světla, jinak řečeno.

což po vyčíslení vychází cca $0,1mc^2$, kde 0,1 je faktor μ . Pro srovnání, fúze vodíku na hélium má $\mu = 0,007$. Co to znamená? Že pro vyzaření obrovské energie, kterou pozorujeme ve skutečnosti stačí neuvěřitelně málo hmoty, konkrétně $\dot{M} \approx 2M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$. Zakomponujeme-li do výpočtu Eddingtonův limit, dostaneme maximální tempo akrece, což je $2,2M(10^8)M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$. Náš model je samozřejmě výrazně zjednodušený, neboť jsme celou dobu počítali se sférickým systémem (už při odvození Eddingtonova limitu). Ve vesmíru často narazíme na tzv. super Eddingtonovské luminosity. Ty vznikají, je-li systém nikoliv sférický, ale diskový. Akrece pak probíhá zejména v ekvatoriálním disku, kde ji nejčastěji také pozorujeme. Kolem černé díry pak vzniká charakteristický torus akrečního disku, který je obklopen prachovým materiálem, který se neúčastní akrece.

Všechny aktivní galaxie rovny jsou

Aktivitu galaxií pozorujeme různou. Někdy velmi silnou, někdy slabší a hlavně u takových zdrojů pozorujeme různá spektra, která má na svědomí toroidální disk tvořený různými lehkými prvky v různém stavu. V první polovině devadesátých let byla vyslovena teorie, že všechny aktivní galaxie jsou vlastně jeden druh objektu, pozorovaný z různého úhlu. Vzniklo tzv. *unifikované schéma aktivních galaxií* (pro jednoduchost budeme dále pro ono aktivní jádro galaxie používat zkratku AGN – z anglického active galactic nucleus).



Obr. 1: Náčrtek AGN

Pozorované objekty dostaly z historického důvodu různá označení (teorie bohužel přišla až po pozorování), neboť se vyznačují různými vlastnostmi.

Seyfertovy galaxie (Sy)

První objevené aktivní galaxie, rozdělují se na několik podtříd podle vzhledu spektra. Základním dělením je Sy 1 a Sy 2. V případě Sy 2 se díváme do roviny prachového a akrečního disku a vidíme pouze úzké spektrální čáry, kdežto na Sy 1 se koukáme z většího úhlu (dle

obrázku cca úhel kde se objeví broad line region, BLR) a pozorujeme i oblast se širokými spektrálními čarami. Mezi těmito dvěma třídami ještě existuje jemnější dělení jako Sy 1,5, Sy 1,8 podle inklináčního úhlu. Ačkoliv mluvíme o úzkých a širokých spektrálních čarách, ve srovnání s obyčejnými galaxiemi jsou obojí velmi široké, což je způsobeno Dopplerovým efektem. To naznačuje, že pozorovaný materiál velmi rychle rotuje.

Kvasary (QSO)

Kvasar je zkratkové slovo, které vzniklo z anglického *quasi stellar object*. S hvězdou takový objekt samozřejmě nemá nic společného, ale při objevu bylo konstatováno, že se jedná o hvězde podobný objekt s neobvyklým spektrem s velmi širokými spektrálními čarami. Jedná se o jedny z nejvzdálenějších objektů, které umíme pozorovat, neboť jsou extrémně jasné (nejvzdálenější kvasary mají červený posun cca 7). Jsou pozorovatelné z podobného úhlu jako Sy 1, ale liší se tím, že jsou o něco jasnější (můžeme to srovnat tak, že jasnost jádra v případě Sy je srovnatelná s jasností všech hvězd v galaxii, která objekt obklopuje, kdežto kvasary jsou asi stokrát jasnější). Hranice mezi Seyfertovými galaxiemi a kvasary je poměrně nejasná a velmi často záleží jen na autorech článků/učebnic. Kvasary navíc narozdíl od Seyfertových galaxií můžeme pozorovat i v rádiové oblasti, ale ne všechny. To implikuje dělení na tzv. rádiové – *radio loud* (QSR) a obyčejné (QSO).

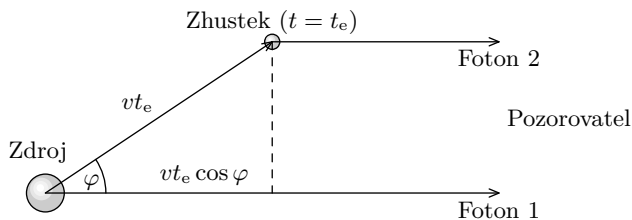
Rádiové galaxie

Narozdíl od kvasarů jsou rádiové galaxie pozorovány hlavně v dlouhovlnné části spektra a naopak třeba v rentgenu jsou poměrně slabé. Na takové galaxie nahlížíme z ještě většího úhlu. V rádiové oblasti začínáme pozorovat hlavně materiál jetu. Stále však pozorujeme i okolní plyn, který se projevuje ve spektrech objektů. Rádiové galaxie opět můžeme rozdělit podle přítomnosti širokých čar na tzv. BLRG – *broad line radio galaxy*, která ve spektru obsahuje rozšířené čáry, stejně jako úzké, a NLRG – *narrow line radio galaxy*, kde jsou pozorovatelné jen úzké spektrální čáry.

Blazary

Název blazar vzniknul z pojmenování *blazing quasi stellar object*. Jakýmsi hlavním zástupcem (po kterém se zároveň jmenuje podtřída těchto objektů) je objekt BL Lac. Kapitálky jsou tradiční označení proměnných hvězd, takže je konkrétně v souhvězdí Lacerta (Ještěrka). Než se zjistil galaktický původ, mělo se za to, že jde o poměrně záhadnou hvězdu, která svoji jasnost zvládne změnit až o 30 % za 24 hodin a za delší čas až o faktor 100. Vedle třídy BL Lac sem patří i tzv. OVV – *optically violently variable quasars*, které jsou jasnější než třída BL Lac. OVV mají ve spektru detekovatelné široké a úzké čáry a jsou silně polarizovány. Spektru BL Lac dominuje kontinuum, spektrální čáry tu nejsou časté. Je to dáno tím, že pozorujeme-li blazar, koukáme se téměř přímo do jetu vycházejícího z centrálního objektu. Při pozorování blazarů se přišlo na to, že podle rádiového pozorování vykazují nadvětelný pohyb. Podle základního principu teorie relativity něco takového nemohlo být možné. Ukazuje se, že nadvětelné rychlosti jsou u blazarů běžné, neboť za ně může geometrie pozorování.

Představme si objekt, který se pohybuje rychlostí v (skutečná rychlost, ne zdánlivá) a od linie pozorování je jeho jet odkloněn o úhel φ (obrázek 2). Objekt emituje foton podél linie pozorování v čase $t = 0$, zdroj je v tu chvíli od pozorovatele vzdálen na vzdálenost d . Představme si druhý



Obr. 2: K výkladu zdánlivé nadsvětelné rychlosti

foton, emitovaný v čase t_e , vzdálenost objektu od Země je v tu chvíli $d - vt_e \cos \varphi$. Vyjádříme si časy, ve kterých oba fotony dorazí k pozorovateli

$$t_1 = \frac{d}{c},$$

$$t_2 = t_e + \frac{d - vt_e \cos \varphi}{c}.$$

Z toho můžeme spočítat časový rozdíl mezi dvěma detekcemi na Zemi

$$\Delta = t_2 - t_1 = t_e \left(1 - \frac{v}{c} \cos \varphi \right),$$

což je čas *kratší* než t_e . Zdánlivá rychlost naměřená pozorovatelem je

$$v_{zd} = \frac{vt_e \sin \varphi}{\Delta t} = \frac{v \sin \varphi}{1 - (v/c) \cos \varphi}.$$

Z výše uvedené rovnice můžeme vyjádřit poměr v/c

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{v_{zd}/c}{\sin \varphi + (v_{zd}/c) \cos \varphi}.$$

Nadsvětelné rychlosti lze pozorovat zejména v dlouhovlnné části elektromagnetického spektra, ve které vidíme samotný jet⁵.

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported. Pro zobrazení kopie této licence, navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

⁵Pěkně je to znázorněno pro příklad galaxie M87 z kupy galaxií v Panně kupříkladu zde <http://www.stsci.edu/ftp/science/m87/color3.gif>.