



## Výfučení: Tajemství černých děr

Možná jste už někdy přemýšleli nad tím, do jaké míry platí fyzikální zákony, které se učíte ve škole. Platí kalorimetrická rovnice stejně pro všechna skupenství látky? Ve všeobecném vztahu pro gravitační sílu

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

figuruje kromě gravitační konstanty  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$  a hmotností těles  $m_1$ ,  $m_2$  i jejich vzájemná vzdálenost  $r$ . Co by se stalo, kdyby nějaké těleso padalo z opravdu velké výšky? Co kdyby někdo vytvořil stroj, který by měl účinnost vyšší než sto procent?

Podobné myšlenky jsou často hnací silou fyziky a nutí vědce vymýšlet nové teorie, respektive vylepšovat ty stávající. Příkladem testu fyzikálních zákonů v extrémních situacích jsou právě černé díry. V tomto dílu Výfučení se blíže podíváme na to, jak tyto exotické vesmírné objekty fungují a vysvětlíme si, proč je fyzika černých děr opravdu extrémní.

Černé díry se neobjevují jen tak, ale jsou naopak poslední fází života velmi těžkých hvězd. V průběhu života takovéto hvězdy probíhají jaderné reakce, při kterých hvězda spaluje lehké prvky (zejména vodík) na těžší (helium, uhlík, křemík, ...). Při těchto reakcích vzniká velké množství energie, které hvězda vyzařuje do okolí. Tlak tohoto záření působí proti gravitační síle, která přitahuje veškerou hmotu hvězdy do jejího středu. Jedná-li se o velkou hvězdu (s hmotností přesahující trojnásobek hmotnosti Slunce), po spálení veškerého paliva gravitace překoná tlakovou sílu záření a dojde k tzv. gravitačnímu kolapsu. Hvězda se začne postupně zmenšovat, přičemž její hustota bude s klesající velikostí rychle růst.

Gravitační zrychlení na povrchu hvězdy s hmotností  $M$  a poloměrem  $R$  bude rovno

$$a_g = \frac{GM}{R^2}$$

Všimněte si, že i  $g$  bude rychle růst<sup>1</sup> a tedy bude i náročnější takovéto gravitační pole opustit. Tuto náročnost lze popsat tzv. únikovou rychlostí. To je minimální rychlost, kterou se musíme „vystřelit“ z povrchu hvězdy, abychom mohli její gravitační pole opustit.

Pokud bychom měli dostatečně silnou raketu, uměli bychom opustit i opravdu silné gravitační pole. Speciální relativita však omezuje maximální rychlost, kterou lze ve vesmíru dosáhnout, na rychlost  $c = 300\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Naši nedostatečnou technologií takovéto rychlosti sice nelze dosáhnout, ale světlo se ve vakuu touto rychlostí pohybuje zcela běžně<sup>2</sup>.

Aby se tedy z hroutící hvězdy stala černá díra, úniková rychlost na jejím povrchu musí překonat právě rychlost světla ve vakuu, neboť po překonání této hranice neexistuje mechanismus, pomocí kterého by bylo možné její gravitační pole opustit (proto se těmto objektům říká černé díry). Kritický poloměr, kdy se hroutící hvězda promění na černou díru, teoreticky spočetl Karl Schwarzschild. Po něm pojmenovaný Schwarzschildův poloměr lze vyjádřit jako

$$r_s = \frac{2GM}{c^2},$$

kde  $M$  je hmotnost černé díry.

<sup>1</sup>Ve vztahu výše je gravitační zrychlení nepřímou úměrně druhé mocnině poloměru. Tzn. zmenší-li se poloměr hvězdy dvakrát, gravitační zrychlení na její povrchu vzroste čtyřnásobně.

<sup>2</sup>Proto se rychlosti  $c$  říká rychlost světla ve vakuu.

Pomyslná hranice, ze které už z černé díry není úniku, se jmenuje horizont událostí. Jakmile cokoliv (raketa, vesmírná sonda, světlo) překročí tuto hranici, už se to nenávratně stane součástí černé díry. Představovat si, jak černá díra vypadá, tzn. co je uvnitř horizontu událostí, je v principu nemožné. Obtížné vůbec hovořit o tom, zda-li je uvnitř černé díry nějaký prostor a zda-li v ní platí nějaké fyzikální zákony. Můžeme si akorát představit, že gravitační kolaps musel pokračovat i po překonání Schwarzschildova poloměru (jednoduše neexistuje síla, která by ho mohla zastavit) a celá hmota původní hvězdy se smrškla do hrozně malého bodu uprostřed horizontu událostí, tzv. singularity.

Kvůli nepřekonatelné gravitaci je náročné i samotné pozorování černých děr. Jsou vsuktku černé! Ale právě silná gravitace může ovlivňovat objekty v jejich okolí, což již pozorovat lze. Navíc materiál, který na černou díru dopadá, vytváří diskovitý oblak, který se spirálovitě přibližuje k horizontu událostí a při tom se zahřívá a vyzařuje světelné záření. Na základě těchto ukazatelů a dalších měřitelných veličin umí astrofyzici černé díry hledat a určovat jejich základní parametry – hmotnost, poloměr a dokonce to, jak černá díra rotuje. Další způsob detekce je také pozorování, jakým způsobem černá díra ohýbá světlo (fotony), které se šíří v její blízkosti. Čím těžší je černá díra, tím je ohyb silnější. Jeho měření proto může sloužit k určení hmotnosti pozorované černé díry. Tomuto jevu se říká gravitační čočkování.

Nejbližší známá černá díra se nachází ve vzdálenosti asi 2 800 světelných let v souhvězdí Jednorozce. Zajímavá je tím, že je složkou dvouhvězdného systému spolu s malou, poměrně chladnou hvězdou. Podobně je tomu i v případě známějšího blízkého systému v souhvězdí Labutě (objekt Cygnus X-1). Pozorovaná černá díra váží asi 15 hmotností Slunce, ale její poloměr je pouze 44 km. V její blízkosti se nachází tzv. modrý obr, velmi těžká a svítivá hvězda, která je pomalu černou dírou požíraná, viz obrázek.



Obr. 1: Umělecká představa systému Cygnus X-1. Zdroj obrázku: European Homepage for the NASA/ESA Hubble Space Telescope

Na první pohled nudný život černých děr je překvapivě bohatý. Existuje celá řada dalších zajímavých efektů (vypařování černých děr, jejich spojování, vyzařování gravitačních vln apod.), které jsou důsledky obecné teorie relativity a kvantové mechaniky. Jejich intenzivní výzkum není zdaleka u konce, takže v budoucnu se můžeme těšit na další překvapivé efekty, ke kterým

v černých děrách dochází.

---

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími 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/>.