

# Černé díry I

## Teorie a vlastnosti

Petr Kulhánek

Černé díry byly po mnoho desetiletí tajemnými objekty. Staly se vděčným námětem sci-fi literatury. Pocit tajemna a podivných jevů, které jsou nad naše chápání je doprovázel na každém kroku. A dnes? Černé díry si za poslední desetiletí razantně vybudovaly své postavení mezi běžnými astronomickými objekty. Poznali jsme černé díry hvězdných rozměrů stejně tak jako černé díry o hmotnosti celé galaxie.

Často se zdá, že myšlenka existence černých děr je velmi nová. Opak je ale pravdou. Historicky první úvahy o možné existenci objektů, ze kterých nemůže uniknout ani světlo, pravděpodobně pochází od Johna Michella již z roku 1783. Pierre Simon Laplace v roce 1798 odvodil na základě představení Newtonovy mechaniky rozměry tohoto hypotetického tělesa ze vztahu pro únikovou rychlost, do kterého dosadil místo únikové rychlosti rychlost šíření světla. V roce 1916 odvodil stejný vztah, ale na základě Einsteinovy obecné relativity, Karl Schwarzschild. Od té doby hovoříme o tzv. *Schwarzschildově poloměru*. Pojmenování „černá díra“ pochází od Johna A. Wheelera a je až z roku 1967. Zaujme-li těleso menší rozměry než je Schwarzschildův poloměr, nemůže ho již opustit žádné jiné těleso, dokonce ani fotony - částice světla. V přírodě se tak stane vždy, když gravitační síly převládají nad ostatními silami a přivodí nekontrolovatelné hroucení objektu. Jedna z „ukázkových“ černých děr se nachází například v jádru galaxie NGC 4261 v souhvězdí Panny. Velmi dobře odpovídá našim teoretickým představám a byla objevena Hubbleovým dalekohledem v roce 1992.

V tomto dvoudílném miniseriálu se v první části budeme zabývat vlastnostmi těchto zhroutených objektů a v druhé části si povíme o skutečných černých děrách v našem Vesmíru.

### Schwarzschildův poloměr

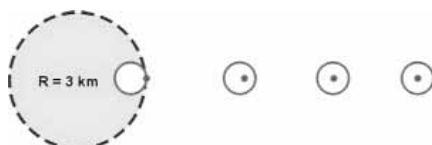
Provedme takovýto myšlenkový experiment. Blikněme baterkou v okolí nějaké

hvězdy (například Slunce) a sledujme, kam se za jednu vteřinu rozšíří světelná vlnoplocha. Výsledkem bude kulová vlnoplocha. Představme si nyní, že máme tu moc stlačit veškerou hmotu Slunce do koule o poloměru pouhé 3 km. Experiment s baterkou dopadne úplně jinak. Světlo je strháváno křivým časoprostorem směrem ke „Slunci“. Čím blíže blikneme, tím více. Přibližně ve vzdálenosti 3 km nastane zajímavý jev. Světlo je hvězdou natolik strháváno, že žádný foton již neletí směrem ven. Jedině do centra letí fotony jako dřívě. Kdyby se naše Slunce stalo černou dírou, mělo by Schwarzschildův poloměr právě 3 km, teplotu  $10^7$  K a vypařilo by se Hawkingovým mechanismem za  $10^{62}$  let.

*Schwarzschildův poloměr* neboli *horizont* je možné určit z jednoduchého vztahu

$$R_g = 2GM/c^2.$$

Pro Slunce vychází právě 3 km, pro naši Zemi 9 mm. Kdyby bylo možné nějakými procesy vtěsnat Zeměkouli do kuličky o poloměru 9 mm, stala by se také černou dírou. V tabulce 1 jsou Schwarzschildovy poloměry pro různé objekty. Vidíme, že pro velmi hmotné objekty jde pořád o relativně malé oblasti. Zkuste si představit velkou galaxii vtěsnanou do rozměrů pouhých několika desítek světelných let. Normálně by zaujímala prostor o rozměrech statisíců světelných let. V tabulce také naleznete hustoty objektů počítané jako podíl hmoty a objemu. Jde o hodnoty, které nikdy nenaměří žádný pozorovatel, protože žádný pozorovatel nám nikdy nepodá zprávu o nitru černé díry. Pro velmi hmotné černé díry tato hustota vychází velmi malá. Jen hvězdné černé díry, a případně ještě menší díry, mají extrémní hustoty. Poznamenejme ještě, že na poloměru  $1,5 R_g$  se nachází kruhová orbita fotonů a na poloměru  $3 R_g$  poslední stabilní orbita částic.



Na počest Karla Schwarzschilda (1873-1916) byl pojmenován jeden z kráterů na Měsíci. Jeho souřadnice jsou:  $70^{\circ}6'N$ ,  $121^{\circ}12'E$ .

### Statická mez a ergosféra

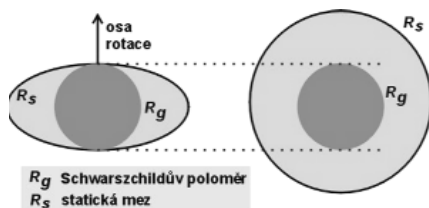
Budeme-li provádět náš experiment s baterkou u rotujícího tělesa, přidá se další efekt. Strhávání časoprostoru s rotujícím tělesem způsobuje i strhávání fotonů ve směru rotace. Mez za kterou se foton již nemůže pohybovat proti směru rotace se nazývá *statická mez*. Statická mez vytváří kolem černé



díry elipsoidovitou plochu podobně jako je ve vajíčku skořápka kolem žloutku.

Prostor mezi Schwarzschildovým poloměrem a statickou mezí se nazývá ergosféra. Částice mohou do ergosféry vletat i z ní vylétnout. Částice, která prolétne ergosférou získá energii z rotace černé díry a ergosféru opouští s vyšší energií než do ní vstoupila. S každou vylétující částicí s vyšší energií tak klesá rotační energie černé díry a ergosféra se zmenšuje.

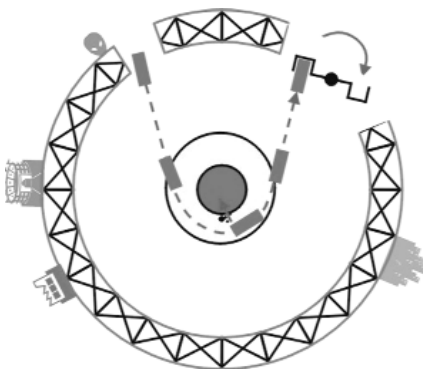
Samozejmě je velmi lákavé vymýšlet různé mechanismy, kterými by šlo z černé díry odčerpávat energii. Za všechny uvedu



alespoň jeden z nich. Objevil se ve slavné knize *Gravitation* od autorů Misnera, Thorneho a Wheelera. Kdyby u černé díry žila civilizace, mohla by si kolem vystavět na jakési konstrukci města, obydlí a továrny. Odpad by, jak jinak, sypala do černé díry. Kontejner by měl cestu zvolenou tak, aby

### Doc. RNDr. Petr Kulhánek, CSc. (\*1959)

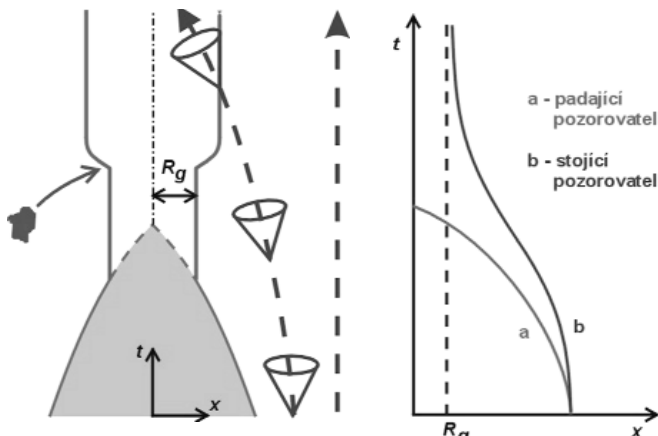
vystudoval MFF UK, obor teoretická fyzika, v současné době se zabývá fyzikou plazmatu na katedře FEL ČVUT. Poslední tři roky kromě standardních přednášek vede výběrovou přednášku „Astrofyzika“ doplněnou astronomickým soustředěním.



prolétal ergosférou. V ní by se otevřela záložka, vysypal odpad a prázdný kontejner přiletěl zpět. Ale přiletěl by s vyšší energií než odlétal, protože prolétl ergosférou! Kontejner by zapadl do jakéhosi záchytného kola, které by svou nadbytečnou energií roztočil. Krásný zdroj energie, že? Jenže nic není na věky. Tímto čerpáním by černá díra postupně ztrácela svou rotační energii a ergosféra by nakonec zanikla.

### Pád tělesa do černé díry

Při pádu tělesa do černé díry dochází vždy k zvětšení Schwarzschildova poloměru. Nabalováním hmoty z okolí se černá díra zvětšuje. Popíšme si přiložený obrázek. Na vodorovné ose je jedna z prostorových souřadnic, na svislé ose čas. Úplně napravo vidíme světočáru stojící částice. Její prostorová souřadnice se nemění, zatímco čas nezadržitelně plyne. V levé části obrázku je schematicky znázorněn vznik černé díry. Rozměry objektu (vodorovně) se s časem (svisle) zmenšují až překročí Schwarzschildův poloměr. Při pádu tělesa do černé díry se zvětší Schwarzschildův poloměr. Kužel budoucnosti částice (události, které sama může ovlivnit) se při pádu postupně naklání. Po průchodu horizontem černé díry



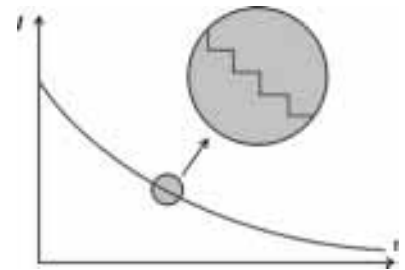
míří kužel budoucnosti jen pod horizont. Částice spadlé do černé díry nemohou ovlivnit události vně černé díry.

Pozorovatel padající do černé díry projde Schwarzschildovým poloměrem z hlediska své souřadnicové soustavy za konečnou dobu. Jiný obraz uvidí pozorovatel vně černé díry. Signály od padajícího pozorovatele bude dostávat stále s větším zpožděním a jejich frekvence bude posunuta k červenému konci spektra. To je způsobeno změnou frekvence vystupujících fotonů v silném gravitačním poli v okolí černé díry. Průchod horizontem by vnější pozorovatel viděl až v nekonečném čase a vlnová délka fotonů nesoucí tuto informaci by také byla nekonečná.

Padající pozorovatel zaznamená ještě jeden zajímavý jev. Bude-li do černé díry padat například po nohou, bude na jeho nohy působit větší gravitační síla než na jeho hlavu. Tomuto jevu říkáme slapové síly. Na Zemi například slapové síly způsobují přílivy a odlivy. Kombinované silové působení Měsíce a Slunce na vodní hladinu je jiné na přivrácené a na odvrácené straně. U černé díry budou slapové síly pozorovatele natahovat a trhat. Pevnost lidských kostí je taková, že pro černou díru vzniklou z našeho Slunce (poloměr 3 km) by slapové síly padajícího pozorovatele vážně ohrozily již 250 km od černé díry. Náš pozorovatel by se proto průletu Schwarzschildovým horizontem vůbec nedožil a zprávy o letu by nám přestal podávat mnohem dříve.

### Intenzita vyzářování při kolapsu hvězdy do černé díry

Z předchozího odstavce je zřejmé, že i samotný vznik černé díry bude pro vnějšího pozorovatele trvat nekonečnou dobu. Intenzita světla z tohoto kolabujícího objektu bude exponenciálně klesat a měli bychom, byť s malou intenzitou, stále pozorovat kolabující hvězdu jako hvězdu vysílající záření. Kvantová teorie však tento obraz zcela pozmění. Světlo je kvantováno, jde o ne-



přetržitý proud malých částic nazývaných fotony. Ubývání intenzity se tedy děje po skocích, tak jak ubývají jednotlivé fotony. V konečném čase nastane poslední „schod“ na světelné křivce kolabujícího objektu. Od této chvíle již žádné záření nevysílá.

### Typy černých děr

Černá díra si při vzniku ponechává jen informaci o hmotnosti, momentu hybnosti a náboji:  $M, b, Q = \text{const.}$  Všechny ostatní atributy hmoty (dipólové, kvadrupólové momenty, různá kvantová čísla) jsou při průchodu horizontem zapomenuty. Tento teorém poprvé zformuloval John Archibald Wheeler a matematicky ho dokázali Brandon Carter, Werner Israel, David C. Robinson a Steven Hawking. Často se nazývá „no hair“ teorém (v českém překladu bychom mohli říci „černá díra nemá žádné vlasy“), tj. neponechává si ze svého původního života téměř žádné vlastnosti. Podle hodnot těchto tří atributů dělíme černé díry na:

1. *Schwarzschildovy černé díry*: Mají nulovou hmotnost, nulový moment hybnosti a elektrický náboj. Každý zkolabovaný nerotující objekt se stane Schwarzschildovou černou dírou.

2. *Kerrové černé díry*: Mají nenulovou hmotnost a moment hybnosti. Jde o výsledek kolapsu rotujících objektů, typickým jevem je existence ergosféry - oblasti mezi statickou mezí a Schwarzschildovým poloměrem.

3. *Reisnerovy-Nordstromovy černé díry*: Nejobecnější možná teoretická forma černé díry s nenulovým nábojem.

Ve Vesmíru se převážně vyskytují Kerrové černé díry, tj. rotující černé díry. Není znám žádný případ černé díry s nenulovým nábojem. Jiné užitečné dělení černých děr je podle jejich velikosti:

1. *Prvotní (primordiální) černé díry*: Tyto černé díry by měly mít nepatrné rozměry elementárních částic a mohly vzniknout v raných fázích vývoje Vesmíru. Jestliže existují, měly by díky Hawkingovu vyzářování

intenzivně zářit. Z pozorovaného množství  $\gamma$  záření ve Vesmíru lze zjistit, že primordiálních děr nemůže být více než 300 v krychlovém světelném roku. Pozorovat takový objekt by bylo možné jen v naší bezprostřední blízkosti (Sluneční soustavě).

2. *Hvězdné černé díry:* Tyto černé díry vznikly jako závěrečné fáze hvězdného vývoje a jejich hmotnosti jsou několikanásobkem hmotnosti Slunce. Objekty tohoto typu se v naší Galaxii pozorují.

3. *Galaktické černé díry:* Černé díry s hmotností srovnatelnou s hmotností galaxií nebo jejich jader. Tvoří jádra některých aktivních galaxií, pravděpodobně i naší vlastní Galaxie a jádra kvasarů. Pozorována je řada objektů tohoto typu.

### tlustý akreční disk

V okolí rotující černé díry se vyskytuje značné množství hmoty, která vytváří tzv. tlustý akreční disk. Jde o analogii prstenců v okolí velkých planet (Jupiter, Saturn, Uran, Neptun) - tyto prstence jsou ale naopak tenké. Ve směru rotační osy může unikat záření a velké množství urychlených nabitých částic. Vytvoří se dva výtrysky, které jsou ve větších vzdálenostech od černé díry bržděny mezihvězdným



prostředím. V místech interakce výtrysků s okolním prostředím je generováno radiové záření. Výtrysky proto často končí intenzivními radiovými laloky. Mechanismus vzniku výtrysků popisuje tzv. Blandford-Znajekův proces na základě interakce černé díry s okolním magnetickým polem.

### Termodynamika černých děr

*Beckenstein-Hawkingova teplota:* Černé díře lze v jistém smyslu přiřadit teplotu. Poprvé to udělal Beckenstein pomocí myšlenkového experimentu s kabinou výtahu plnou záření, která se spouští na černou díru. Záření z kabiny „vysypeme“ do černé díry a výtah vrátíme zpět. Systém tak koná práci, neboť kabinka výtahu jede nahoru bez záření a je tedy lehčí. Becken-

stein celý experiment chápal jako tepelný stroj. Naplnění výtahu zářením odpovídá zahřátí pracovního média ohříváčem a vysypání záření do černé díry odpovídá ochlazení média chladičem. Celá černá díra tak představuje chladič tohoto zvláštního tepelného stroje. Beckenstein použil Carnotův vztah pro účinnost tepelného stroje a odvodil teplotu chladiče (černé díry). Celou úvahu později rozpracoval Hawking v rámci kvantové teorie. V obou případech vyjde teplota černé díry

$$T \sim hc/4\pi R_g k.$$

*Entropie:* Se zavedením teploty černé díry je možné zavést i pojem entropie. Ta je úměrná povrchu černé díry

$$S \sim 10^{75} k (R/R_g)^2.$$

Lze ukázat, že ať probíhají jakékoli procesy, včetně spojování černých děr, celkový povrch všech děr se nezmenší. Povrch černé díry v jistém smyslu nahrazuje pojem entropie klasického souboru částic. Díky entropii přiřazené tímto způsobem černé díře se entropie těles spadlých do černé díry ve Vesmíru neztrácí.

*Holografický princip:* Tvzení, že veškeré vlastnosti látky v černé díře jsou dány charakteristikami na povrchu (entropií), se nazývá holografický princip. Mnozí se dnes pokouší aplikovat holografický princip na celý Vesmír. Tam ale není ani u uzavřeného ani u otevřeného Vesmíru zřejmé, co je jeho povrch. Zpravidla se nahrazuje horizontem částic (pozorovatelným Vesmírem). Při inflační fázi a následném ohřevu, kdy se produkuje velké množství entropie nemůže holografický princip v této podobě platit. Zdá se, že neplatí ani v uzavřeném Vesmíru.

Hawkingovo vypařování černých děr: V blízkosti horizontu černé díry probíhají kvantově mechanické procesy, které mají za následek únik energie z černé díry v podobě vznikajících částic. Tepelné spektrum záření odpovídá absolutně černému tělesu s Beckenstein-Hawkingovou teplotou, vlnová délka maxima vyzařování je přibližně rovna Schwarz-

schildovu poloměru. Čím menší je černá díra, tím intenzivnější je vypařování. Poprvé tento proces teoreticky zpracoval S. Hawking. Nejčastěji se popisuje pomocí kreace a anihilace virtuálních párů. Ve vakuu neustále vznikají a zanikají páry částice-antičástice (střední kvadratické fluktuace polí musí být díky relacím neurčitosti pro pole nenulové). V blízkosti horizontu zůstane jeden člen



páru pod horizontem a druhý se pro vnějšího pozorovatele vynoří jakoby z ničeho v blízkosti horizontu. Pár nezanikne, ale jeden člen se dostane pod horizont a druhý se objeví jako nad horizontem jako vyzářená částice. Jiným možným pohledem na jev Hawkingova vypařování je jistá analogie tunelového jevu. Částice z nitra černé díry jakoby tuneluje bariérou o velikosti Schwarzschildova poloměru. Čím menší je díra, tím menší bariéra, tím snadnější tunelování, tím více díra září. A do třetice ještě jeden pohled na stejný jev: Můžeme si představit, že pod horizontem se částice po krátkou dobu (tak, aby se nenarušily Heisenbergovy relace neurčitosti) pohybuje nadsvětelnou rychlostí. Nadsvětelná rychlost nevádí - nepřenáší se informace a není pozorovatelná zvnějšku. U malé černé díry postačí kratší doba pohybu nadsvětelnou rychlostí a proces je tak pravděpodobnější.

Hmota v černé díře tak není navěky ztracena, ale postupně se opět „vypařuje“ do okolního prostoru. Tento proces je velmi pomalý a hvězdné díry se tímto procesem vypaří za dobu, která mnohonásobně překračuje stáří našeho Vesmíru. ■

Těleso	Hmotnost	Horizont $R_g$	Hustota	Teplota	Doba vypaření
proton	$1,7 \times 10^{-27}$ kg	$10^{-54}$ m	$10^{130}$ g cm <sup>-3</sup>	$10^{51}$ K	$10^{-102}$ s
kámen	1 kg	$10^{-27}$ m	$10^{76}$ g cm <sup>-3</sup>	$10^{24}$ K	$10^{-21}$ s
Země	$6 \times 10^{24}$ kg	9 mm	$10^{27}$ g cm <sup>-3</sup>	1 K	$10^{46}$ let
Slunce	$2 \times 10^{30}$ kg	3 km	$10^{16}$ g cm <sup>-3</sup>	$10^{-7}$ K	$10^{62}$ let
jádro galaxie	$10^8 M_S$	20 AU	$1,82$ g cm <sup>-3</sup>	$10^{-14}$ K	$10^{86}$ let
galaxie	$10^{11} M_S$	30 l.y.	$10^{-6}$ g cm <sup>-3</sup>	$10^{-17}$ K	$10^{95}$ let