



Brian Cox
Jeff Forshaw

Černé díry

Klíč k porozumění
vesmíru

VYŠEHRAĐ



Černé díry

Klíč k pochopení vesmíru

Vyšlo také v tištěné verzi

Objednat můžete na
www.ivysehrad.cz
www.albatrosmedia.cz



Brian Cox, Jeffrey Forshaw
Černé díry – e-kniha
Copyright © Albatros Media a. s., 2025

Všechna práva vyhrazena.
Žádná část této publikace nesmí být rozšiřována
bez písemného souhlasu majitelů práv.

ALBATROS  **MEDIA**

Brian Cox
Jeff Forshaw

Černé díry

Klíč k porozumění
vesmíru

Brian Cox
Jeff Forshaw

Černé díry

Klíč k porozumění
vesmíru

Přeložil Vojtěch Witzany

VYŠEHRAĐ

First published by HarperCollins Publishers Ltd
under the title Black Holes.

Text © Brian Cox and Jeff Forshaw 2022

Images © HarperCollinsPublishers 2022

unless otherwise indicated in Picture Credits.

Illustrations by Martin Brown and Jack Jewell

Translation © Vojtěch Witzany, 2024

ISBN tištěné verze 978-80-7601-924-9

ISBN e-knihy 978-80-267-3333-1 (1. zveřejnění, 2025) (ePDF)

ISBN e-knihy 978-80-267-3335-5 (1. zveřejnění, 2025) (epub)

ISBN e-knihy 978-80-267-3334-8 (1. zveřejnění, 2025) (mobi)

Jeffově matce Sylvii

Obsah

1. Stručná historie černých děr	11
2. Sjednocení prostoru a času	31
3. Přenesení nekonečna na konečné místo	54
4. Pokřivení prostoročasu	81
5. Do černé díry	103
6. Bílé díry a červí díry	117
7. Kerrova říše divů	136
8. Skutečné černé díry ze zhroutených hvězd	153
9. Termodynamika černých děr	166
10. Hawkingovo záření	189
11. Špagetizování i vypaření	198
12. Zvuk tleskání jedné ruky	208
13. Svět jako hologram	225
14. Ostrovy v proudu	238
15. Dokonalý kód	252
Poděkování	261
Odkazy na literaturu	262
Zdroje obrázků	265
Rejstřík	266
Obrazová příloha	274
O autorech	291

Kapitola 1

Stručná historie černých děr

„Vědomí o existenci něčeho, do čeho nemůžeme proniknout, o projevech nejhlubšího rozumu a nade vše oslnivé krásy – právě toto vědomí a tento pocit utváří skutečně náboženský postoj; v tomto smyslu, a pouze v něm, jsem hluboce věřící člověk.“

Albert Einstein

V srdci Mléčné dráhy se nachází deformace přediiva vesmíru způsobená něčím, co je čtyřmilionkrát hmotnější než naše Slunce. Prostor a čas jsou v její blízkosti tak pokrivené, že dochází k zachycení paprsků, které se přiblíží na vzdálenost menší než 12 milionů kilometrů. Oblast, odkud není návratu, je ohraničena horizontem událostí, který se tak jmenuje proto, že vesmír vně je navždy izolován od všeho, co se děje uvnitř. Nebo jsme si to alespoň mysleli, když tento název vznikl. Pojmenovali jsme ji Sagittarius A* a je to superhmotná černá díra.*

Černé díry leží tam, kde dříve zářily nejhmotnější hvězdy, v centrech galaxií a na hranici našeho současného chápání. Jsou to přirozeně se vyskytující objekty, nevyhnutelné výtvořy gravitace, pokud se příliš mnoho hmoty zhrouť do dostatečně malého prostoru. A i když je naše přírodní zákony předpovídají, nedokážou je zcela popsat. Fyzici věnují celé své kariéry hledání problémů, provádějí experimenty a pátrají po všem, co nelze vysvětlit známými zákony. Na rostoucím počtu černých děr, které objevujeme

* Sagittarius A* se vyslovuje „Sagittarius A hvězda“.

rozesetě po obloze, je úžasné, že každá z nich je experimentem prováděným Přírodou, který nedokážeme vysvětlit. To znamená, že nám něco hlubokého uniká.

Moderní studium černých děr začíná Einsteinovou obecnou teorií relativity, publikovanou v roce 1915. Tato přes sto let stará teorie gravitace vede ke dvěma překvapivým předpovědím: „Za prvé, že osudem masivních hvězd je zhroucení za horizont událostí a vytvoření ‚černé díry‘, která bude obsahovat singularitu; a za druhé, že v naší minulosti existuje singularita, která v jistém smyslu představuje počátek vesmíru.“ Tato pozoruhodná věta se objevuje na první stránce zásadní učebnice obecné teorie relativity *The Large Scale Structure of Space-Time* (Struktura časoprostoru ve velkém měřítku), kterou v roce 1973 napsali Stephen Hawking a George Ellis.¹ Uvádí sugestivní pojmy – černá díra, singularita, horizont událostí –, které se staly součástí populární kultury. Říká se v ní také, že nejhmotnější hvězdy ve vesmíru jsou na konci svého života nuceny gravitací ke kolapsu. Hvězda zaniká a zanechává otisk v předivu vesmíru. Za horizontem však něco zůstává. Singularita, spíše okamžik nežli místo, ve kterém se naše znalosti přírodních zákonů hroutí. Podle obecné teorie relativity se singularita nachází na konci času. V naší minulosti se také nachází singularita, která označuje počátek času: Velký třesk. Žádá se po nás, abychom přijali hlubokou myšlenku, že náš vědecký popis gravitace, známé síly, která řídí chování dělových koulí a planet, se ve své podstatě zabývá povahou prostoru a času.

Není zřejmé, že by gravitace měla souviset s prostorem a časem, a už vůbec ne to, že snaha o její popis ve vědecké teorii může vést k úvahám o počátku a konci času. Černé díry zaujímají při zkoumání tohoto hlubokého vztahu ústřední místo, protože jsou nejextrémnějším pozorovatelným výtvozem gravitace. Jsou natolik intelektuálně problematické, že ještě v 60. letech 20. století se mnozí fyzici domnívali, že černé díry jsou sice součástí matematiky obecné teorie relativity, ale že Příroda jistě vynalezne způsob, jak se jejich vytváření vyhnout. Sám Einstein napsal v roce 1939 článek, v němž dospěl k závěru, že černé díry „ve fyzikální realitě

neexistují“.² Einsteinův slavný současník Arthur Eddington to vyjádřil poněkud jadrněji: „Měl by existovat přírodní zákon, který by hvězdám zabránil chovat se tímto absurdním způsobem.“ Inu, neexistuje, a ony se tak chovají.

Dnes už víme, že černé díry jsou přirozenou a nevyhnutelnou fází života hvězd několikrát hmotnějších než naše Slunce, a protože takových hvězd je v naší galaxii mnoho milionů, existuje i mnoho milionů černých děr. Hvězdy jsou velké shluky hmoty, které bojují s gravitačním kolapsem. V rané fázi života odolávají stlačující síle vlastní gravitace tím, že ve svých jádrech přeměňují vodík na helium. Tento proces, známý jako jaderná fúze, uvolňuje energii, která vytváří tlak, jenž zastavuje kolaps. Naše Slunce se v současné době nachází v této fázi a každou sekundu přemění 600 milionů tun vodíku na helium. V astronomii je snadné přestat vnímat velmi velká čísla, ale měli bychom se zastavit a žasnout nad děsivým rozdílem v měřítku mezi hvězdami a objekty každodenní lidské zkušenosti. Šest set milionů tun je hmotnost malé hory a naše Slunce každou sekundu neustále spaluje takovou horu vodíku již od dob, než vznikla Země. Nemusíte se bát, má ještě dost vodíku na to, aby mohlo pokračovat v boji s gravitací dalších 5 miliard let. Slunce to dokáže, protože je velké: pohodlně by se do něj vešlo milion Zemí. Má průměr 1,4 milionu kilometrů, dopravní letadlo by muselo letět šest měsíců, aby ho obletělo. A přesto je Slunce malá hvězda. Největší známé hvězdy jsou tisíckrát větší a jejich průměr se pohybuje kolem miliardy kilometrů. Kdyby se takové hvězdy nacházely ve středu naší Sluneční soustavy, pohltily by Jupiter. Taková monstra skončí svůj život katastrofálním gravitačním kolapsem.

Gravitace je slabá, ale neúprosná síla. Sice pouze přitahuje, ale pokud neexistují žádné silnější protichůdné síly, přitahuje bez omezení. Gravitace se vás snaží vtáhnout podlahou do středu Země a stejným směrem přitahuje i podlahu a hlinu pod ní. Důvodem, proč se všechno nehroučí do jednoho středobodu, je to, že hmota je tuhá; je složena z částic, které se řídí zákony kvantové fyziky, to znamená, že se odpuzují, když se k sobě příliš

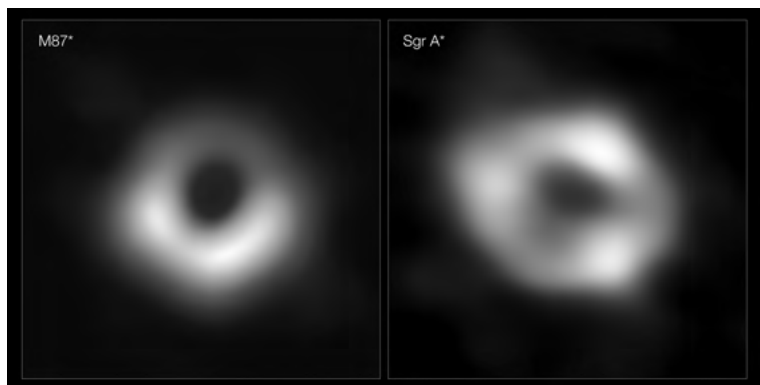
přiblíží. Tuhost hmoty je však tak trochu iluze. Nevnímáme, že země pod námi je v podstatě prázdný prostor. Tančící mračna elektronů obklopující atomová jádra drží atomy od sebe a mylně nás přesvědčují, že pevné objekty jsou vnitřně úplně nahuštěné. Skutečnost je taková, že atomové jádro zabírá jen nepatrný zlomek objemu atomu a že země pod našima nohama je stejně pofidérní jako oblak páry. Odpudivé tendence uvnitř hmoty jsou však velmi silné a jsou schopny zabránit tomu, abyste se propadli podlahou, nebo stabilizovat umírající hvězdy o hmotnosti až dvojnásobku hmotnosti Slunce. Existuje však určitá hranice, podél které brousí neutronové hvězdy.

Typická neutronová hvězda má poloměr jen několik kilometrů a hmotnost asi 1,5krát větší než Slunce. Milion „Zemí“ vtěsnaných do oblasti o velikosti města. Neutronové hvězdy často velmi rychle rotují a vyzařují jasné paprsky rádiových vln, jimiž osvětlují vesmír jako maják. První pozorování takové neutronové hvězdy, známé jako pulsar, provedli Jocelyn Bell Burnellová a Antony Hewish v roce 1967. Puls, který se nad Zemí přechytl každých 1,3373 sekund, je tak pravidelný, že jej Bell Burnellová a Hewish pokřtili Little Green Men-1 (Malí Zelení Mužici-1). Nejrychlejší dosud objevený pulsar, známý jako PSR J1748–2446ad, se každou sekundu otočí 716krát. Neutronové hvězdy jsou extrémně energetické nebeské objekty. Dne 27. prosince 2004 zasáhl Zemi výbuch energie, který oslepil satelity a rozšířil naši ionosféru. Energie se uvolnila v důsledku přeskupení magnetického pole kolem neutronové hvězdy SGR 1806–20, která leží 50 000 světelných let od Země na druhé straně galaxie. Během pětiny sekundy hvězda vyzářila více energie, než naše Slunce vyzáří za čtvrt milionu let.

Gravitace na povrchu neutronové hvězdy je stomiliardkrát větší než gravitace Země. Vše, co dopadne na povrch, je v okamžiku zploštěno a přeměněno na nukleonovou polévku. Kdybyste spadli na povrch neutronové hvězdy, částice, které byly kdysi součástí vašich objemných atomů, by se přeměnily na neutrony a namačkaly by se na sebe tak těsně, že by se ve snaze vyhnout se jedna

druhé třepetaly rychlostí přibližující se rychlosti světla. Takovéto třepetání může udržet neutronovou hvězdu o hmotnosti asi dvou Sluncí, ale ne více. Za touto hranicí vítězí gravitace. Kdyby se na povrch neutronové hvězdy vysypalo trochu více hmoty, hvězda velikosti města by se zhroutila a vytvořila by prostoročasovou singularitu. Georges Lemaître, katolický kněz a jeden ze zakladatelů moderní kosmologie, popsal singularitu Velkého třesku při vzniku našeho vesmíru jako den bez věrejška. Singularita vzniká gravitačním kolapsem je okamžikem bez zítřka. To, co zůstává venku, je temný otisk toho, co kdysi zářilo: černá díra.

Dnes máme konkrétní pozorování, která dokládají, že náš vesmír obývají černé díry. Snímky zobrazené na obrázku 1.1 získala organizace Event Horizon Telescope Collaboration, což je síť radioteleskopů rozmístěných v Americe, Evropě, Tichomoří, Grónsku a Antarktidě. Na levém snímku je centrální superhmotná černá díra v galaxii M87, která leží 50 milionů světelných let od Země. Jak už to tak ve vědě bývá, tento rozmazaný obrázek z velké dálky začne budit tím větší úžas, čím více se dozvíte o tom, na co se vlastně díváte.



OBR. 1.1. Vlevo: Superhmotná černá díra v centru galaxie M87. Vpravo: Sagittarius A*, černá díra v centru naší galaxie. Oba snímky pořízené kolaborací Event Horizon Telescope. (Viz také barevná příloha na konci knihy)

Tato černá díra má hmotnost 6,5miliardkrát větší než naše Slunce a leží v tmavé centrální oblasti snímku, známé jako stín. Tato oblast je tmavá, protože gravitace je tak silná, že nemůže uniknout světlo, a protože nic nemůže cestovat rychleji než světlo, nemůže uniknout nic. Uvnitř stínu leží horizont událostí černé díry M87, koule v prostoru o průměru 240krát větším, než je vzdálenost Země od Slunce. Ta chrání vnější vesmír před singularitou. Jasný disk obklopující stín je tvořen především světelnými paprsky vyzařovanými plynem a prachem, které spirálovitě obíhají kolem černé díry a směřují do ní, přičemž jejich dráhy jsou gravitací díry pokrouceny a zdeformovány do tvaru tlustého prstence.

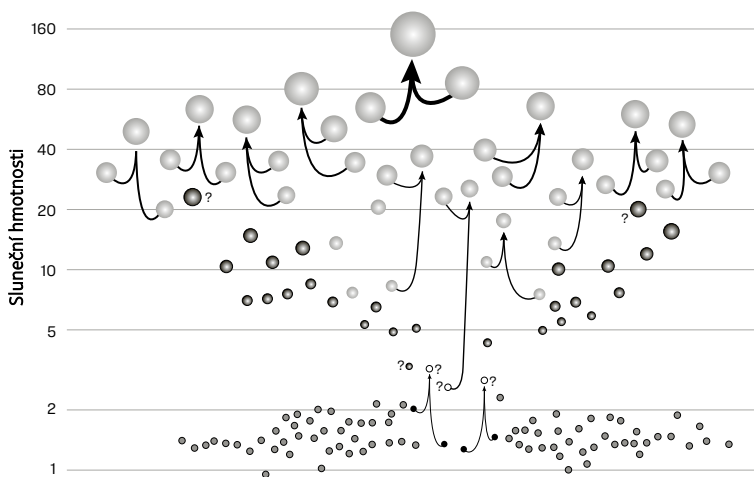
Na pravém obrázku je superhmotná černá díra v centru naší galaxie Sagittarius A*. S hmotností pouhých 4,31 milionu hmotností Slunce je v porovnání s ní malá. Zářící disk by se pohodlně vešel na oběžnou dráhu Merkuru. Její přítomnost byla nejprve odvozena nepřímou, na základě pozorování oběžných drah hvězd v jejím okolí. Tyto hvězdy jsou známy jako „hvězdy S“. Hvězda S2 obíhá obzvláště blízko černé díry, a to s periodou pouhých 16,0518 let. Přesnost tohoto čísla je důležitá, protože vědci podrobná pozorování dráhy hvězdy S2 porovnávali s předpověďmi obecné teorie relativity a použili k závěru o přítomnosti černé díry mnohem dříve, než byla vyfotografována. Největší přiblížení hvězdy S2 k souhvězdí Sagittarius A* bylo pozorováno v roce 2018, kdy prošla na vzdálenost pouhých 120 astronomických jednotek od horizontu událostí.* V době největšího přiblížení se pohybovala rychlostí rovnou třem procentům rychlosti světla. Reinhard Genzel a Andrea Ghezová obdrželi v roce 2020 za tato vysoce přesná pozorování prováděná po řadu let Nobelovu cenu. Pozorování byla důkazem, že v centru naší galaxie se nachází „superhmotný kompaktní objekt“, jak říká výbor pro udělování Nobelovy ceny. O cenu se podělili se sirem Rogerem Penrosem

* Jedna astronomická jednotka se (přibližně) rovná vzdálenosti Země od Slunce.

za jeho matematický důkaz, „že vznik černých děr je spolehlivou předpovědí obecné teorie relativity“.

Detekovali jsme také řadu menších černých děr s hvězdnou hmotností pomocí vlnění v prostoru a čase, které vzniká při jejich vzájemných srážkách. V září 2015 zaregistroval detektor gravitačních vln LIGO vlnění v prostoročase způsobené srážkou dvou černých děr, ke které došlo 1,3 miliardy světelných let od Země. Černé díry měly 29 a 36krát větší hmotnost než Slunce a srazily se a splynuly za méně než dvě desetiny sekundy. Během srážky přesáhl maximální výkon záření padesátinásobně výkon všech hvězd v pozorovatelném vesmíru. V době, kdy k nám vlnění dorazilo o více než miliardu let později, posunulo vzdálenost měřenou podél čtyřkilometrových ramen laserového pravitka LIGO o jednu tisícinu průměru protonu v prchavém, vlnícím se vzoru, který přesně odpovídal předpovědím obecné teorie relativity. LIGO a jeho sesterský detektor Virgo od té doby odhalily řadu fúzí černých děr. Nobelova cena za fyziku za rok 2017 byla udělena Rainerovi Weissovi, Barry Barishovi a Kipovi Thornovi za jejich vedoucí úlohu při návrhu, stavbě a provozu LIGO. „Hvězdný hřbitov“ známých černých děr a neutronových hvězd s hvězdnou hmotností v době psaní této knihy je znázorněn na obrázku 1.2.

Souhrnně tato pozorování s využitím různých dalekohledů a měřících technik nade vši pochybnost dokazují, že neutronové hvězdy a černé díry existují. Vědecká fikce se stává vědou, když experimentální pozorování potvrdí teorie, a protože nás naše teoretická cesta vede po stále podivnějších cestách do stále spleťtějšího intelektuálního terénu, měli bychom si neustále připomínat, že tyto absurdní věci jsou skutečné. Jsou součástí přirozeného světa, a proto bychom se je měli snažit pochopit pomocí známých přírodních zákonů. Pokud se nám to nepodaří, máme šanci odhalit nové přírodní zákony, jako se tomu se vši pravděpodobností stalo v tomto případě, a to způsobem, který předčil i ty nejdivočejší sny prvních průkopníků.



OBR. 1.2. Známé černé díry a neutronové hvězdy s hvězdnou hmotností seřazené tak, že objekty s nejmenší hmotností jsou dole. Nejmenší kroužky jsou neutronové hvězdy a šipky označují pozorované srážky a splnutí dvojic černých děr nebo neutronových hvězd. Čísla vlevo jsou násobky hmotnosti Slunce (1 sluneční hmotnost = 1 hmotnost Slunce).

Snaha vyhnout se absurditě

Myšlenku černé díry poprvé představil v roce 1783 anglický rektor a vědec John Michell a nezávisle na něm v roce 1798 francouzský matematik Pierre-Simon Laplace. Michell a Laplace se domnívali, že stejně jako je míč vyhozený vzhůru zpomalen a přitážen zpět k zemi zemskou gravitací, je možné, že existují objekty, které působí tak silnou gravitační silou, že by mohly zachytit světlo.

Objekt vymrštěný vzhůru z povrchu Země musí mít rychlost přes 11 kilometrů za sekundu, aby unikl do hlubin vesmíru. Tato rychlost se nazývá únikovou rychlostí Země. Gravitační přitažlivost na povrchu Slunce je mnohem silnější, a proto je úniková rychlost odpovídajícím způsobem vyšší a dosahuje 620 kilometrů za sekundu. Na povrchu neutronové hvězdy se úniková rychlost

může blížít značnému podílu rychlosti světla.* Laplace vypočítal, že těleso s hustotou srovnatelnou se Zemí, ale s průměrem 250krát větším než Slunce, by mělo tak velkou gravitační přitažlivost, že by úniková rychlost přesáhla rychlost světla, a proto „největší tělesa ve vesmíru mohou být díky své velikosti neviditelná“.³ To byla fascinující myšlenka, která předběhla svou dobu. Představte si kulovou schránku ve vesmíru, která se dotýká povrchu jedné z Laplaceových obřích temných hvězd. Úniková rychlost ze slupky by byla rovna rychlosti světla. Nyní udělejte hvězdu o něco hustší. Povrch hvězdy by se smrškl dovnitř, ale pomyslná skořápka by zůstala na místě a vyznačila by hranici v prostoru. Kdybyste se vznášeli na slupce, nyní nad povrchem hvězdy, a svítili baterkou ven, světlo by nikam nedošlo. Zůstalo by navždy zamrzlé a nemohlo by uniknout. Tato hranice je horizontem událostí. Uvnitř skořápky by se světlo baterky otočilo a bylo by vtaženo zpět na hvězdu. Pouze vně skořápky by světlo mohlo uniknout.

Michell a Laplace si tyto temné hvězdy představovali jako obrovské objekty, možná proto, že nedokázali přijít na jinou možnost. Objekt však nemusí být velký, aby na jeho povrchu působila silná gravitace. Může být také velmi malý a velmi hustý; například neutronová hvězda. Pro objekt s libovolnou hmotností lze pomocí zákonů Isaaca Newtona vypočítat poloměr oblasti bez možnosti úniku, která by se kolem něj vytvořila, kdyby byl dostatečně stlačen:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

kde G je Newtonova gravitační konstanta, která vyjadřuje sílu gravitace, a c je rychlost světla. Pokud rozdrtíme cokoli s hmotností M do koule menší než tento poloměr, vytvoříme temnou hvězdu. Dosadíme-li do této rovnice hmotnost Slunce, zjistíme,

* Rychlost světla je 299 792 458 metrů za sekundu.

že tento poloměr je přibližně 3 kilometry. Pro Zemi je to necelý 1 centimetr. Je těžké si představit, že by Země byla rozdrčena na velikost oblázku, což je pravděpodobně důvod, proč Michell a Laplace tuto možnost nezvažovali. Jakkoli jsou však temné hvězdy fantaskní, nezdá se, že by na nich, pokud by existovaly, bylo něco obzvlášť problematického nebo absurdního. Zachytávaly by světlo, ale to by, jak podotkl Laplace, znamenalo jen to, že bychom je nemohli vidět.

Tento jednoduchý newtonovský argument nám dává představu o černé díře – gravitace může být tak silná, že světlo nemůže uniknout – ale když je gravitace silná, není použitelný Newtonův gravitační zákon a je nutné použít Einsteinovu teorii. Obecná teorie relativity také připouští objekty, jejichž gravitace je tak silná, že světlo nemůže uniknout, ale důsledky jsou velmi odlišné a zcela bezpochyby znepokojivé a absurdní. Stejně jako v Newtonově případě, pokud je nějaký objekt stlačen pod určitý kritický poloměr, uvězní světlo. V obecné teorii relativity je tento poloměr známý jako Schwarzschildův poloměr, protože jej v roce 1915, velmi krátce po zveřejnění obecné teorie relativity, poprvé vypočítal německý fyzik Karl Schwarzschild. Shodou okolností je výraz pro Schwarzschildův poloměr v obecné teorii relativity úplně stejný jako výše uvedený Newtonův výsledek. Schwarzschildův poloměr je poloměr horizontu událostí černé díry.

Více se o Schwarzschildově poloměru dozvíme ve 4. kapitole, až budeme mít k dispozici aparát obecné relativity, ale můžeme se již nyní zmínit o některých absurditách, které nás čekají. Dozvíme se, že černé díry ovlivňují tok času ve svém okolí. Když astronaut padá směrem k černé díře, jeho čas měřený na hodinách daleko ve vesmíru bude tikat pomaleji. To je zajímavé, ale ne absurdní. Absurdně znějící výsledek je tento: podle vzdálených hodin se čas na horizontu událostí zastaví. Při pohledu zvenčí není nikdy vidět, že by do černé díry něco padalo, což znamená, že astronaut padající k černé díře zůstane na horizontu zamrzlý na věky. To platí i pro povrch hvězdy, která se skrze horizont hroutí dovnitř a vytváří černou díru. Na první pohled se zdá, že obecná teorie

relativity předpovídá nesmysly. Jak se může hvězda zhroutit přes horizont událostí a vytvořit černou díru, když její povrch nikdy nepřešel horizont? Taková pozorování trápila Einsteina a první průkopníky a toto je jen jeden ze spleti zdánlivých paradoxů.

Einsteina a většinu fyziků až do 60. let 20. století vedly tyto obavy k závěru, že příroda si najde cestu ven, a výzkum černých děr se zabýval především dokazováním, že nemohou existovat. Možná není možné neomezeně stlačit hvězdu a vytvořit tak horizont událostí. To se nezdá být nerozumné, uvážíme-li, že kostka materiálu neutronové hvězdy o velikosti kostky cukru by vážila nejméně 100 milionů tun. Možná ještě plně nerozumíme tomu, jak se hmota chová při tak extrémních hustotách a tlacích.

Hvězdy jsou velké shluky hmoty, které bojují s gravitačním kolapsem, a když jim dojde jaderné palivo, jejich osud závisí na jejich hmotnosti. V roce 1926 Eddingtonův kolega z Cambridge R. H. Fowler publikoval článek „On dense Matter“ (O husté hmotě), v němž ukázal, že nově objevená kvantová teorie poskytuje způsob, jak se stará hroutící se hvězda může vyhnout vytvoření horizontu událostí díky efektu známému jako „tlak degenerovaných elektronů“.⁴ To byl první záblesk „kvantového třepetání“, o němž jsme se zmínili dříve v souvislosti s neutronovými hvězdami. Jeho závěr se zdál být nevyhnutelným důsledkem dvou základních kamenů kvantové teorie: vylučovacího principu Wolfganga Pauliho a principu neurčitosti Wernera Heisenberga.

Vylučovací princip říká, že částice jako elektrony nemohou obývat stejnou oblast prostoru. Pokud se v důsledku gravitačního kolapsu stlačí mnoho elektronů, oddělí se uvnitř hvězdy do svých vlastních malých objemů, aby se od sebe navzájem držely dál. Nyní vstupuje do hry Heisenbergův princip neurčitosti. Ten říká, že když je částice uzavřena do menšího objemu, její hybnost se zvětšuje. Jinými slovy, pokud elektron uzavřete v prostoru, bude se třepetat, a čím více se ho budete snažit omezit, tím více se bude třepetat. To vytváří tlak zcela obdobně, jako když teplo z reakcí jaderné fúze na počátku života hvězdy způsobí, že se její atomy rozkmitají a zastaví kolaps. Na rozdíl od tlaku z fúzních reakcí

však tlak degenerovaných elektronů nevyžaduje uvolnění energie, která by ho poháněla. To by znamenalo, že hvězda může odolávat vnitřní gravitační přitažlivosti donekonečna.

Astronomové o takové hvězdě, známé jako bílý trpaslík, věděli. Sirius B je mdlým společníkem Siria, nejjasnější hvězdy na obloze. Bylo známo, že Sirius B má hmotnost blízkou hmotnosti našeho Slunce, ale poloměr srovnatelný se Zemí. Jeho hustota byla na základě tehdejších měření odhadnuta na zhruba 100 kg/cm^3 , což, jak poznamenává Fowler, „již dalo podnět k navýsost zajímavým teoretickým úvahám“. Eddington ve své knize *The Internal Constitution of Stars* (Vnitřní stavba hvězd) napsal: „Myslím, že se obecně považuje za vhodné dodat závěr, což je absurdní“. „Podle moderních měření je hustota dokonce více než desetinásobná. Ačkoli se tato exotická hvězda velikosti planety zdála absurdní, Fowler objevil mechanismus, který vysvětloval, jak může odolávat gravitaci. Tehdejší fyzikům to podle všeho přineslo velkou úlevu, protože to zabránilo nemyslitelnému. Díky Fowlerovi se ukázalo, že hvězdy končí svůj život jako bílí trpaslíci. Podpořeny kvantovým třepetáním elektronů se nezhroutí uvnitř Schwarzschildova poloměru a nevznikne horizont událostí.“

Pocit úlevy netrval dlouho. V roce 1930 se devatenáctiletý fyzik Subrahmanyan Chandrasekhar během osmnáctidenní cesty z Madrásu do Cambridge za Eddingtonem a Fowlerem rozhodl spočítat, jak silný může být tlak degenerace elektronů. Fowler nestanovil horní hranici hmotnosti takto udržované hvězdy a většina fyziků patrně předpokládala, že by žádná neměla existovat. Chandrasekhar si však uvědomil, že tlak elektronové degenerace své hranice má. Einsteinova teorie relativity říká, že bez ohledu na to, jak moc je elektron sevřený v prostoru, rychlost jeho třepetání nemůže překročit rychlost světla. Chandrasekhar vypočítal, že na toto rychlostní omezení narazíme u bílého trpaslíka s hmotností přibližně 90 % hmotnosti Slunce. Přesnější výpočet odhalil, že Chandrasekharova limita, jak je nyní tato hranice nazývána, je 1,4násobek hmotnosti Slunce.⁵ Pokud kolabující hvězda překročí tuto hmotnost, elektrony již nevytvářejí dostatečný tlak, aby

odolávaly stlačování vlastní gravitací, protože se pohybují tak rychle, jak jen mohou, a gravitační kolaps musí i nadále pokračovat. Na Eddingtona to neudělalo žádný dojem. Domníval se, že Chandrasekhar nesprávně propojil teorii relativity s tehdy novým oborem kvantové mechaniky a že při správně provedeném výpočtu by se ukázalo, že bílí trpaslíci mohou existovat až do libovolně velkých hmotností. Následná hádka mezi mladým Chandrasekhar a ctihodným Eddingtonem se Chandrasekhara hluboce dotkla. Ještě několik desetiletí po Eddingtonově smrti v roce 1944 popisoval Chandrasekhar toto období jako „velmi skličující zkušenost..., když astronomická komunita zcela zdiskreditovala mou práci“. Chandrasekharovi se nakonec dostalo zadostiučinění a za svou práci o struktuře hvězd obdržel v roce 1983 Nobelovu cenu.

Chandrasekharův výsledek, publikovaný v roce 1931, nebyl považován za definitivní důkaz, že černé díry musí vznikat. Einstein byl ještě v roce 1939 znepokojen zdánlivým zamrznutím času na horizontu událostí. Možná existuje nějaký jiný proces, který může poskytnout oporu pro hroutícího se bílého trpaslíka, když tlak elektronové degenerace selže? Koncem 30. let 20. století americký fyzik Fritz Zwicky a ruský fyzik Lev Landau správně navrhli, že mohou existovat ještě hustší hvězdy než bílí trpaslíci, které nepodpírá tlak elektronové degenerace, ale tlak neutronové degenerace. Za extrémních podmínek, které panují při gravitačním kolapsu, mohou být elektrony nuceny slučovat se s protony za vzniku neutronů a lehkých částic zvaných neutrina, které z hvězdy unikají. Neutrony, stejně jako elektrony, se při mačkání těsně vedle sebe třepetají, ale protože jsou hmotnější než elektrony, mohou poskytnout větší oporu. Tyto vesmírné objekty jsou neutronové hvězdy.

Není bezdůvodné se ptát, zda tento osud náhodou není konečnou stanicí pro všechny superhmotné hvězdy, i když zkušenosti s bílými trpaslíky naznačují, že tlak neutronové degenerace by měl mít také své hranice. Možná, že nejhmotnější hvězdy při svém kolapsu vyvrhují materiál do vesmíru, anebo se při dosažení

hustoty neutronové hvězdy odrazí a explodují. Tyto možnosti nebylo v té době snadné zavrhnout – jaderná fyzika byla velmi novým oborem a samotný neutron byl objeven teprve v roce 1932.

V roce 1939 J. Robert Oppenheimer a jeho student George Volkov na základě práce Richarda Tolmana stanovili tzv. Tolmanovu-Oppenheimerovu-Volkovovu mez, která určuje horní hranici hmotnosti neutronové hvězdy na necelý trojnásobek hmotnosti Slunce. Oppenheimer a další z jeho studentů, Hartland Snyder, následně ukázali, že za určitých předpokladů se nejtěžší hvězdy musí zhroutit za horizont událostí a vytvořit černou díru.⁶ Tento přelomový článek začíná slovy: „Když se vyčerpají všechny termonukleární zdroje energie, dostatečně těžká hvězda se zhroutí. Pokud štěpení v důsledku rotace, vyzařování hmoty nebo odfukování hmoty zářením nezmenší hmotnost hvězdy na řádově stejnou hmotnost jako u Slunce, bude tato kontrakce pokračovat donekonečna.“ Závěrečné řádky úvodu podrobně popisují důsledky pro tok času na horizontu, který Einsteina tolik znepokojoval: „Celková doba kolapsu pro pozorovatele, který se pohybuje spolu s hvězdnou hmotou, je konečná a pro tento idealizovaný případ a typické hvězdné hmotnosti se pohybuje v řádu dnů; vnější pozorovatel vidí, jak se hvězda asymptoticky smršťuje na svůj gravitační poloměr.“* Jinými slovy, hvězdě o trochu větší než Slunce trvá zhruba den, než se zhroutí z pohledu někoho, kdo se pohybuje dovnitř s povrchem hroučící se hvězdy, ale věčnost pro někoho, kdo ji pozoruje zvenčí. To je to záhadné chování času, které jsme zaznamenali dříve. Oppenheimer a Snyder tento jednoduchý výsledek obecné relativity přijali a ukázali, že nevede k žádnému rozporu. Tyto zajímavé výsledky budeme podrobněji zkoumat v následujících kapitolách.

V tomto okamžiku vstoupila do hry druhá světová válka a myšlenky světových fyziků se zaměřily na podporu válečného úsilí. Ve Spojených státech byly odborné znalosti v oblasti jaderné

* Pod pojmem „gravitační poloměr“ myslí Schwarzschildův poloměr.

fyziky získané studiem hvězd zvláště důležité pro vývoj atomové bomby a Oppenheimer se stal dnes proslulým vědeckým vedoucím projektu Manhattan. Když válka skončila a fyzici se vrátili, byla připravena převzít štafetu nová generace. Ve Spojených státech tuto generaci vychoval John Archibald Wheeler. Byl to právě Wheeler, kdo na přednášce v západním tanečním sále newyorského hotelu Hilton 29. prosince 1967 poprvé použil termín černá díra. Ve své autobiografii Wheeler popisuje svůj intelektuální boj s černými dírami v průběhu 50. let 20. století.⁷ „Několik let mi tato myšlenka kolapsu do toho, čemu dnes říkáme černá díra, byla proti srsti. Prostě se mi nelíbila. Ze všech sil jsem se snažil najít východisko, abych se vyhnul nutné implozi těžkých těles.“ Vypráví, jak se nakonec přesvědčil, že „nic nemůže zabránit tomu, aby se dostatečně velký kus vychladlé hmoty zhroutil do rozměru menšího, než je Schwarzschildův poloměr“. Wheelerův myšlenkový vývoj vyvrcholil v roce 1962 prací, kterou napsal se svým studentem Robertem Fullerem a v níž dospěli k závěru, že „v prostoročase existují body, z nichž nelze nikdy přijímat světelné signály bez ohledu na to, jak dlouho budete čekat“.⁸ Jedná se o body uvnitř horizontu událostí, od nichž je vesmír za horizontem událostí navždy izolován. Zdá se, že černé díry jsou nevyhnutelné. Veškeré zbývající teoretické obavy byly rozptýleny v roce 1965 článkem sira Rogera Penrose, za který později získal Nobelovu cenu, „Gravitational Collapse and Space-Time Singularities“ (Gravitační kolaps a prostoročasové singularity), což je třístránková práce, v níž Penrose dokazuje, že, Wheelerovými slovy, „pro prakticky jakýkoli popis hmoty, který si kdo kdy představil, se musí v centru černé díry nacházet singularita“.⁹

Hluboká záře

Naše stručná historie černých děr nás přivádí do roku 1974 a k článku Stephena Hawkinga, který vedl ke zdánlivě jednoduché otázce, jež je hnacím motorem výzkumu černých děr již půl století od jeho zveřejnění.

V 70. letech 20. století už byla existence černých děr mezi teoretiky všeobecně uznávána, ačkoli je astronomové dosud nepozorovali, a pozornost malé skupiny lidí, kteří se o ně stále zajímali, se obrátila ke konceptuálním výzvám, které představují. Hawkingův článek, publikovaný v časopise *Nature*, nese barvitý název „Black hole explosions?“ (Výbuchy černých děr?).¹⁰ Hawking ukázal, že přítomnost horizontu událostí má dramatický vliv na vesmírné vakuum v jeho okolí. Kvantová teorie nám říká, že prázdný prostor není prázdný. Je vyplněn poli, která neustále fluktuují, a tyto fluktuace se projevují jako potenciál pro vznik částic: fotonů, elektronů, kvarků, vlastně jakýchkoli částic. Vakuum má strukturu. V obyčejném prázdném prostoru tyto fluktuace přicházejí a odcházejí; můžeme si představit takzvané virtuální částice, které neustále vznikají a zanikají, ale konečný výsledek je ten, že se žádné skutečné částice nikdy zázračně neobjeví z ničeho. Přítomnost horizontu tuto rovnováhu narušuje, což má za následek, že se prchavé virtuální částice mohou stát skutečnými. Tyto částice, známé jako Hawkingovo záření, proudí do vesmíru a nesou s sebou nepatrný zlomek energie černé díry. Během nepředstavitelných časových škál, které jsou mnohem delší než současné stáří vesmíru, se typická černá díra vypaří a nakonec exploduje. Černé díry, abychom použili Hawkingovu slavnou větu, nejsou zas tak černé. Jemně září jako mdlé uhlíky na chladné obloze. Velmi mdlé uhlíky. Teplota černé díry o hmotnosti Slunce je 0,00000006 stupně Celsia nad absolutní nulou, tedy mnohem chladnější než současný vesmír.* Sagittarius A*

* Teplota kosmického mikrovlnného pozadí je dnes 2,725 stupně Celsia nad absolutní nulou.

je ještě chladnější: Přesněji řečeno 4,31 milionkrát chladnější. Teplota černé díry však není nulová, a to má obrovský význam. Znamená to, jak zjistíme, že černé díry se řídí zákony termodynamiky – stejnými zákony, kterými se řídí žhavé uhlíky, parní stroje a hvězdy – a znamená to, že nejsou nesmrtelné. Jednoho dne v daleké budoucnosti všechny zaniknou.

V důsledku této slabé záře vyvstává hluboká otázka. Když černá díra zmizí, co se stane se vším, co do ní spadlo? Vzhledem k jedinečnému mechanismu vzniku Hawkingova záření, které je vytrháváno z vakua v blízkosti horizontu událostí, se zdá, že záření nemá nic společného s tím, co do černé díry během jejího života spadlo. Je proto velmi obtížné si představit, jak by se v záření mohly uchovat, nějakým způsobem otisknout, informace o čemkoli, co do ní spadlo, nebo dokonce o hvězdě, která se zhroutila a vytvořila černou díru. Původní Hawkingův výpočet byl v tomto bodě skutečně velmi jasný. Záření, pozůstatek černé díry, neobsahuje vůbec žádné informace.

Jeden z průkopníků moderního výzkumu černých děr, Leonard Susskind, vypráví o setkání v malé podkrovní místnosti v San Franciscu v roce 1983, na kterém Hawking poprvé položil tuto otázku a odpověděl na ni, jak se ukázalo, nesprávně. Susskindovo vyprávění z první ruky o obrovském intelektuálním boji, který Hawkingova otázka vyvolala, se jmenuje *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics* (Válka o černou díru: Můj boj se Stephenem Hawkingem za bezpečný svět pro kvantovou mechaniku). Susskind si s názvy umí poradit. Kdysi byl spoluautorem článku nazvaného „Invasion of the Giant Gravitons from Anti-de Sitter Space“ (Invaze obřích gravitonů z Anti-de Sitterova prostoru). Píše: „Stephen tvrdil, že při vypařování černých děr se ztrácí informace, a co hůř, zdálo se, že to i dokázal. Pokud by to byla pravda... základy našeho oboru by byly zničeny.“

Susskind měl na mysli jeden z pilířů moderní fyziky: determinismus. Pokud o nějakém systému, ať už jde o obyčejnou krabici s plynem, nebo o vesmír, víme vše, můžeme předpovědět,

jak se bude vyvíjet v budoucnosti a jak vypadal v minulosti. To je samozřejmě tvrzení pouze v principu. V praxi není možné vědět vše o minulosti a budoucnosti, protože o každém reálném fyzikálním systému máme vždy neúplné informace. Ale ve vědě, na rozdíl od současné politiky, na principech záleží. Pokud by měl Hawking pravdu, černé díry by učinily vesmír fundamentálně nepředvídatelným a základy fyziky by se rozsypaly.

Dnes již víme, že se Stephen Hawking mýlil – informace nejsou zničeny a fyzika je v bezpečí – jak Hawking sám s potěšením, nikoliv s lítostí, uznal, a to i proto, že pokračující výzkumný program podnícený jeho původním tvrzením nás stále pohání k novému chápání prostoru a času a povahy fyzikální reality.

V posledním vydání *Stručné historie času* Hawking píše, že nakonec v roce 2004 změnil názor a uznal prohru v sázce, kterou uzavřel s Johnem Preskillem (s jehož dílem se seznámíme později). Po dalším sporu o podstatu kriketu a baseballu, který rovněž prohrál, Hawking daroval Preskillovi encyklopedii baseballu. Hawking poznamenává, že v době psaní knihy nikdo nevěděl, jak se informace z černé díry dostanou ven – věděl jen, že se tak stane. Jasně však bylo, že informace bude velmi těžké rozluštit. „Je to jako spálit knihu,“ píše. „Informace se technicky neztratí, pokud si člověk ponechá popel a kouř – což mě znovu nutí přemýšlet o baseballové encyklopedii, kterou jsem dal Johnu Preskillovi. Možná jsem mu měl dát raději její spálené zbytky.“

Až za horizont

Představte si, že najdete na zemi hodinky. Při bližším pohledu můžete obdivovat jejich jemnou rafinovanost a vynikající přesnost. Mechanismus byl jistě navržen – musel existovat nějaký tvůrce. Pokud slovo „hodinky“ nahradíte slovem „příroda“, získáte argument pro Boha, který v roce 1802 předložil anglikánský kněz William Paley. Nyní chápeme, že tento argument je vážně narušen

ohromujícími důkazy podporujícími Darwinovu teorii evoluce pomocí přirozeného výběru. Hodinářem je příroda a ta je slepá. „Je velikost v tomto názoru na život,“ napsal Darwin, „jehož četné schopnosti byly původně vdechnuty Tvůrcem v několik málo forem či ve formu jedinou, a v tom, že se za oběhu naší planety podle neměnného zákona tíže vyvíjely a stále ještě a do nekonečna vyvíjejí nejobdivuhodnější a nejkrásnější tvary z tak prostých začátků.“*

Ale jak je to s neměnným gravitačním zákonem, který je předpokladem existence planet, na nichž se vyvinuly nekonečné formy? Nebo se zákony elektřiny a magnetismu, které udržují živočichy pohromadě? Nebo zvěřinec subatomárních částic, z nichž jsme stvořeni? Kdo nebo co stanovilo zákony; rámec, v němž se vše točí?

Příběh moderní fyziky je příběhem redukcionismu. Nepotřebujeme rozsáhlou encyklopedii, abychom pochopili vnitřní pochody přírody. Naopak, pomocí jazyka matematiky můžeme popsat téměř neomezenou škálu přírodních jevů, od nitra protonu až po vznik galaxií, a to se zdánlivě nepochopitelnou efektivitou. Slovy teoretického fyzika Eugena Wignera: „Zázrak vhodnosti jazyka matematiky pro formulaci fyzikálních zákonů je úžasný dar, který nechápeme, a ani si ho nezasloužíme. Měli bychom za něj být vděční.“¹¹ Matematika dvacátého století popsala vesmír obývaný omezeným počtem různých typů základních částic, které spolu interagují v oblasti zvané prostoročas podle souboru pravidel, jež lze zapsat na papír o velikosti obálky. Zdálo se, že pokud někdo navrhl vesmír, musel být matematikem.

Dnes se studium černých děr ubírá opět novým směrem, k jazyku, který častěji používají kvantoví informatici. Směrem k jazyku informace a počítačových věd. Prostor a čas mohou být emergentní entity, které v nejhlubším popisu přírody neexistují. Místo toho jsou syntetizovány z propletených kvantových bitů

* Z českého překladu Emila Hadače a Aleny Hadačové.