

# MODERN SCIENCE

{ } PŘF UHK

*Výzkum černých  
děr: Je čas přepsat  
učebnice fyziky?*

**Kerrový-Senovy  
černé díry:  
Když teorie  
gravitace dostane  
upgrade.  
str. 16**

2

12/2024



# CO JE MODERN SCIENCE?

Vážené čtenářky, vážení čtenáři,

představujeme Vám druhé vydání magazínu Přírodovědecké fakulty Univerzity Hradec Králové s názvem „MODERN SCIENCE“. **Tento magazín vznikl s jasným cílem** – přiblížit výsledky špičkového výzkumu, který se odehrává na naší fakultě, co nejširší veřejnosti.

*Protože tyto významné publikace často zůstávají nepřístupné pro ty, kteří se těmito obory nezabývají na profesionální úrovni.*

V magazínu jsme se rozhodli tento stav změnit. **Každé číslo bude přinášet výběr nejzajímavějších vědeckých článků z PŘF UHK** přepsaných do srozumitelné, moderní a atraktivní podoby, která osloví nejen odborníky, ale i laickou veřejnost.

*Naším cílem je ukázat, že věda není jen pro hrstku zasvěcených, ale že se týká nás všech. Chceme přiblížit vědu mladým lidem, inspirovat nové generace vědců a ukázat, jak významný dopad mají vědecké objevy na náš každodenní život.*

Děkujeme, že budete věnovat čas čtení tohoto vydání.

Vaše PŘF UHK



# OBSAH

|   |    |
|---|----|
| <b>ÚVOD DO ČERNÝCH DĚR</b> .....  | 4  |
| <i>Co jsou černé díry? Proč by nás měly zajímat? Hlavní otázky výzkumu?</i> |    |
| <b>KOMIKS - DOBRODRUŽSTVÍ (URČITĚ NE) Z FUTURAMY</b> .....                  | 6  |
| <i>Může být černá díra velký odpadkový koš? Řešení odpadkové krize?</i>     |    |
| <b>TEMNÁ ENERGIE: PŘEPISUJEME FYZIKÁLNÍ ZÁKONY?</b> .....                   | 8  |
| <i>Co je temná energie? Ovlivňuje černé díry?</i>                           |    |
| <b>KDYŽ ČERNÁ DÍRA DROPNE POSLEDNÍ STOPU</b> .....                          | 10 |
| <i>Může černá díra opravdu zmizet beze stopy?</i>                           |    |
| <b>REKTOR JAN KŘÍŽ NEJEN O ČERNÝCH DÍRÁCH</b> .....                         | 12 |
| <i>Rektor UHK, aktualita a příběh o tom, jak jej černé díry pohltily.</i>   |    |
| <b>JE TO STÍN, ALE NENÍ TO STÍN</b> .....                                   | 14 |
| <i>Co skrývají stíny černých děr?</i>                                       |    |
| <b>TEORIE, KTEROU ANI SHELDON NEVYŘEŠIL (MY JSME BLÍŽ)</b> .....            | 16 |
| <i>Černé díry a teorie strun = klíč k nové fyzice?</i>                      |    |
| <b>CO JSTE SE V TOMTO VYDÁNÍ DOZVĚDĚLI?</b> .....                           | 18 |
| <i>Když ani dvoustrana není dostatečně stručná.</i>                         |    |



# ÚVOD DO ČERNÝCH DĚR

Začínáme s úvodem do černých děr, abyste mohli lépe pochopit témata tohoto vydání.

## CO JSOU ČERNÉ DÍRY?

Černá díra je místo ve vesmíru, kde je gravitace tak silná, že dokáže přitáhnout vše, co se k ní přiblíží. Vzniká, když se velmi velká hvězda na konci svého života zhroutí sama do sebe. Černé díry jsou neviditelné, ale jejich přítomnost můžeme poznat podle toho, jak ovlivňují své okolí, například pohyb hvězd nebo světlo.

## PROČ JSOU DŮLEŽITÉ?

Umožňují nám studovat extrémní podmínky, kde se střetává obecná teorie relativity s kvantovou mechanikou. Poskytují příležitost testovat fyzikální zákony, zkoumat zakřivení časoprostoru, a odhalovat nové jevy, například interakce s temnou energií. Jsou klíčem k pochopení vesmíru na nejzákladnější úrovni.

## SOUČASNÉ OTÁZKY VÝZKUMU

1

### STRUKTURA PROSTORU A ČASU

Má prostor uvnitř černých děr hladkou, nebo „zrnitou“ strukturu?

2

### INTERAKCE S TEMNOU ENERGIÍ

Ovlivňuje temná energie stabilitu a vlastnosti černých děr?

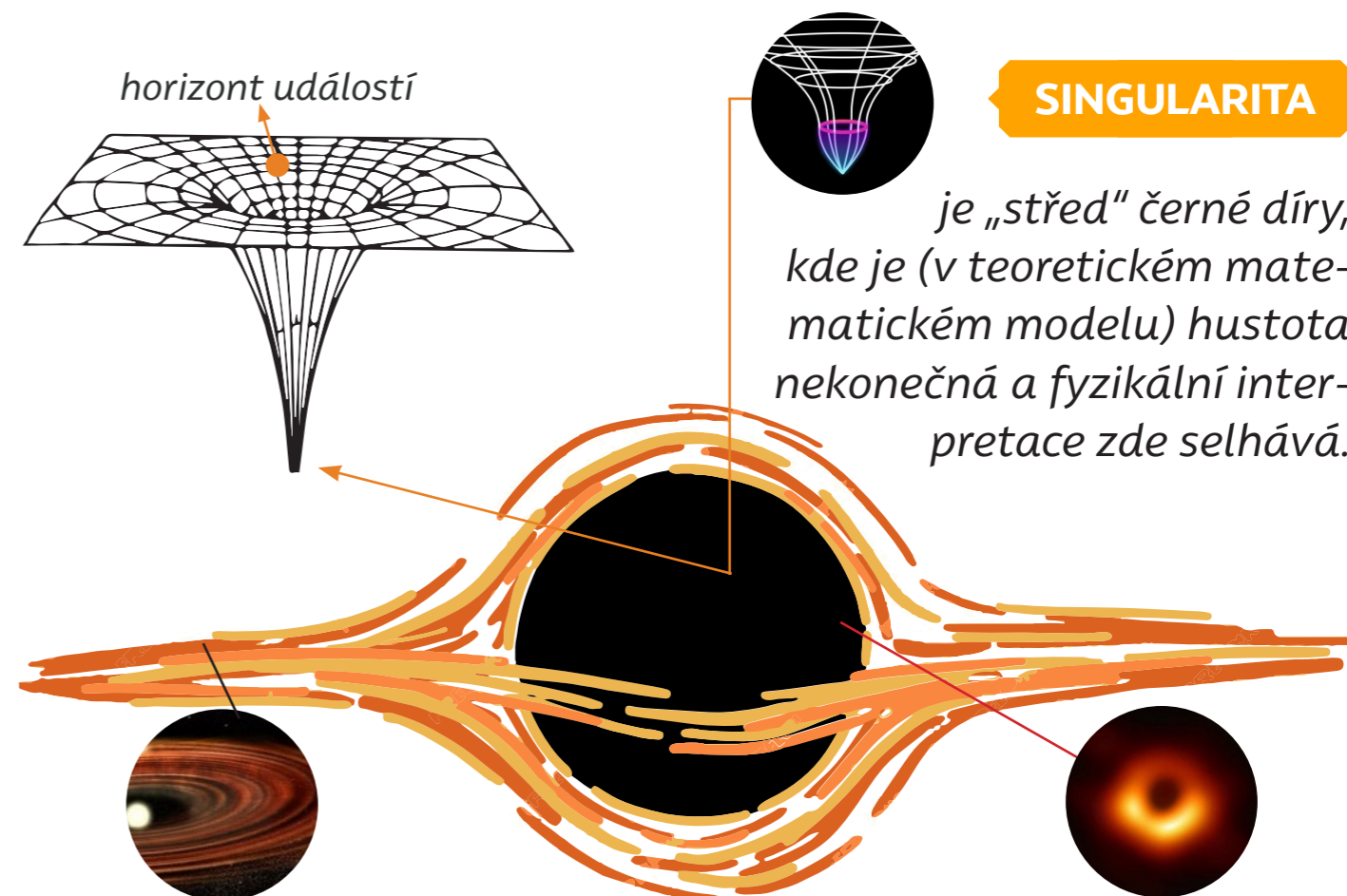
3

### ZÁKONY GRAVITACE

Platí fyzikální zákony v černých dírách stejně jako jinde ve vesmíru?

# ČERNÉ DÍRY

Černé díry jsou „vesmírné pasti“, kde gravitace pohlcuje vše (i světlo). Jsou neviditelné, ale jejich vliv na okolí je nezpochybnitelný: zakřivují časoprostor a odhalují hranice známé fyziky. Co se skrývá uvnitř? **To zůstává jednou z největších záhad vesmíru.**



## SINGULARITA

je „střed“ černé díry, kde je (v teoretickém matematickém modelu) hustota nekonečná a fyzikální interpretace zde selhává.

## AKREČNÍ DISK

je rotující materiál, jako plyn a prach, kolem černé díry. Tření v disku uvolňuje obrovské množství energie ve formě záření.

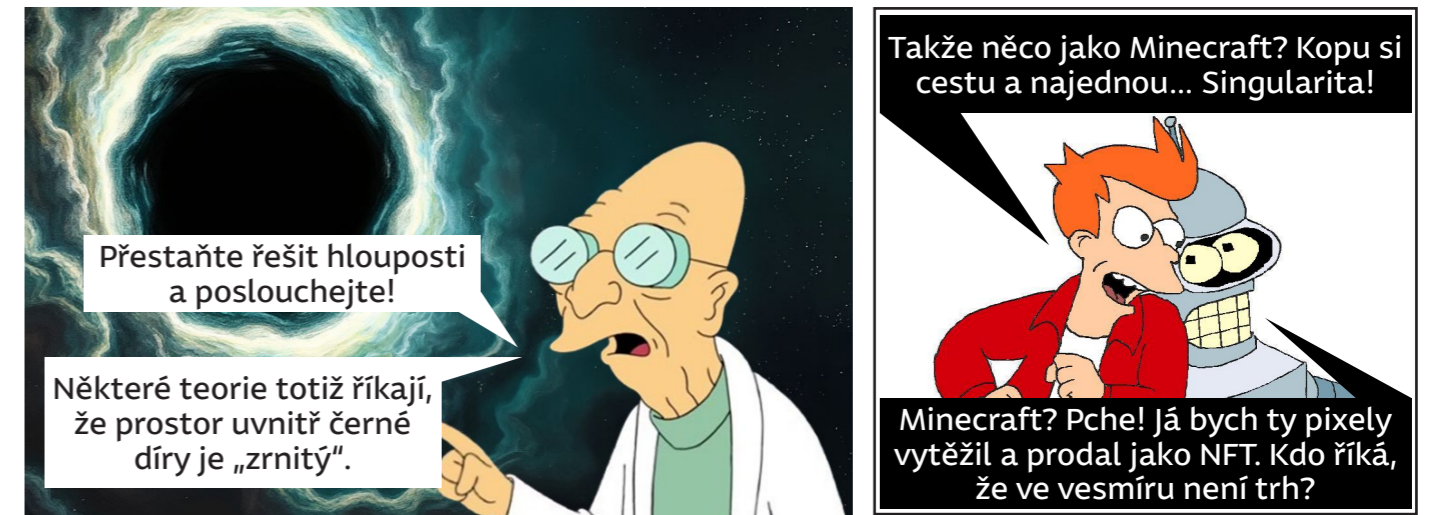
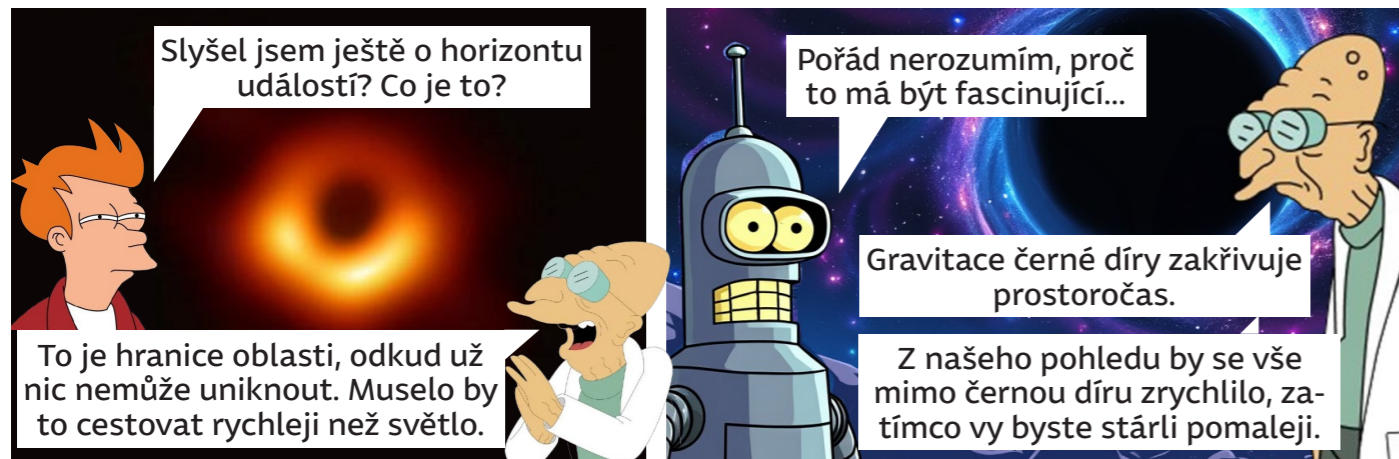
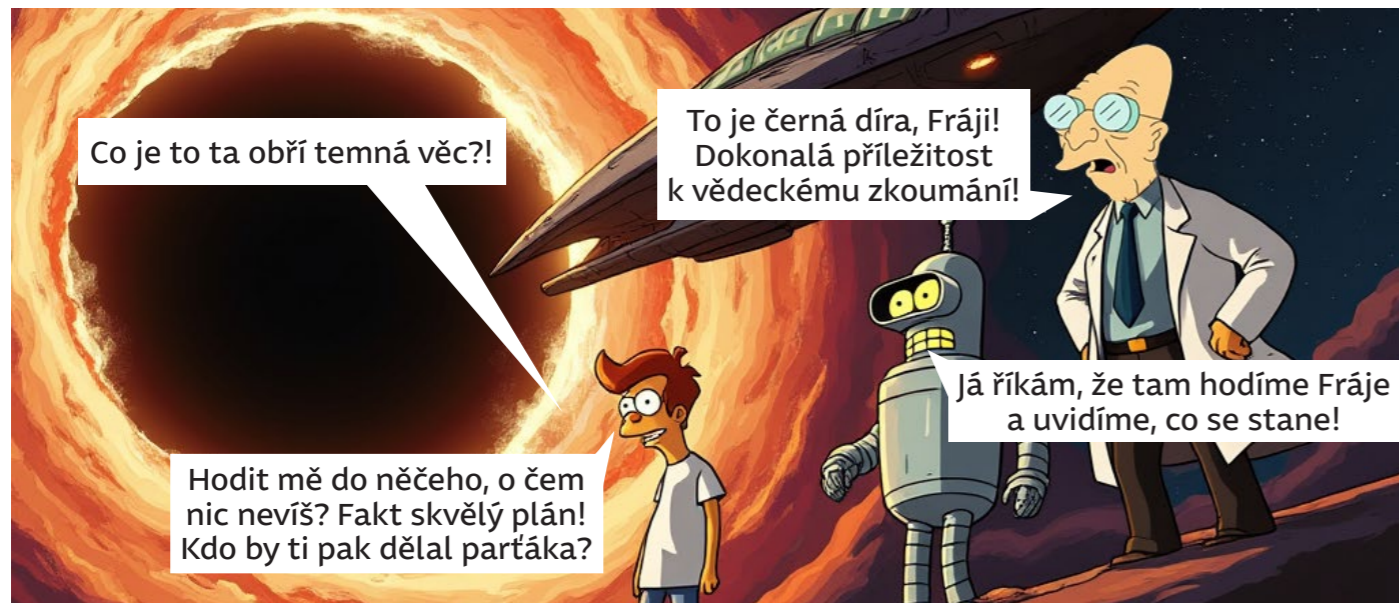
## HORIZONT UDÁLOSTÍ

je hranice černé díry, odkud už nic nemůže uniknout. Jde o „bod, za kterým vše mizí, i světlo“.

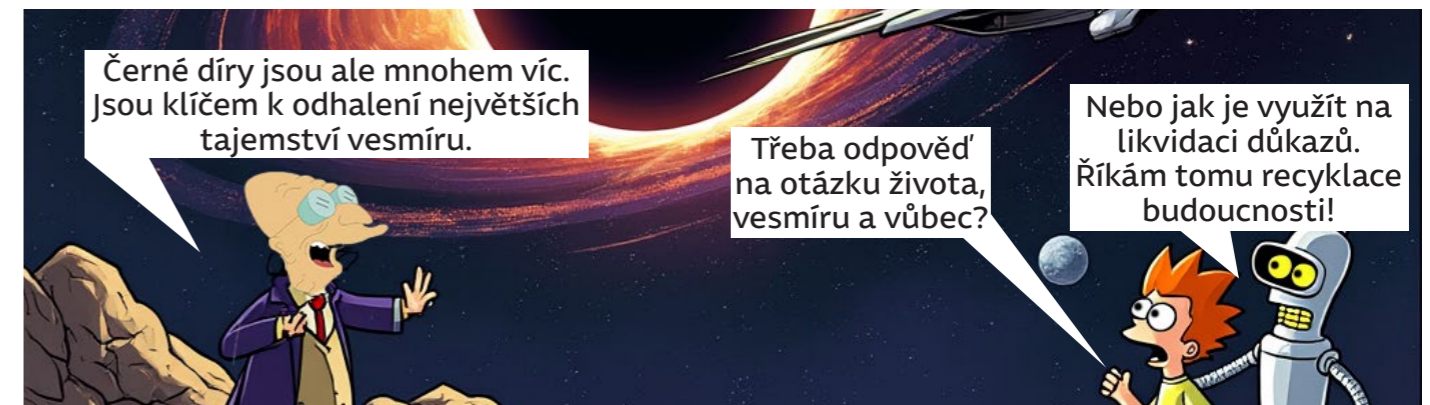
Nikdo přesně neví, jak černé díry vypadají – detailní snímky jsou pouze vizualizace založené na simulacích a datech. Jejich části, jako např. akreční disk, dokážeme popsat, protože jejich vliv na okolí odpovídá předpovědím fyzikálních teorií.



# DOBRODRUŽSTVÍ FRÁJE, BENDRA A PROF. FARNSNĚCO ZA ČERNOU DÍROU



*Zkoumání velkých vesmírných celků popisuje teorie relativity, která je „hladká“, zatímco „zrnitá“ kvantová fyzika se primárně týká velmi malých objektů. Obě experimentální teorie se nedaří sloučit. To, co se děje uvnitř černých děr, by mohlo pomoci k pochopení teorie všeho.*



## ČERNÉ DÍRY = BUDOUCNOST PRO LIKVIDACI ODPADU?





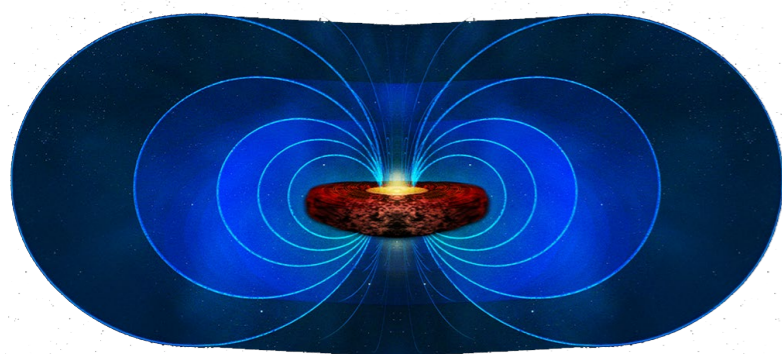
# TEMNÁ ENERGIE: PŘEPISUJEME FYZIKÁLNÍ ZÁKONY? <sup>[1]</sup>

Ačkoliv jsou černé díry s (+ nebo -) elektrickým nábojem předmětem teoretického studia již více než 100 let, náboj černých děr nebyl dosud pozorován.

**Mohou tedy být černé díry skutečně elektricky neutrální, nebo je jejich náboj skrytý, například vlivem temné energie?**

Temná energie je záhadná forma energie, které vysvětluje zrychlování rozpínání vesmíru. Tvoří téměř 70 % celkové energie vesmíru. Neumíme ji vysvětlit, ale její efekt je znám již skoro 30 let a snažíme se s ní počítat.

**Tento článek přináší fascinující hypotézu:** temná energie, která ovládá většinu vesmíru, by mohla „maskovat“ náboj černých děr. Ovlivňuje totiž šíření gravitačních vln, jemných vibrací časoprostoru, jejichž zdrojem jsou např. rotující masivní dvojhvězdy nebo splynutí dvou masivních objektů. Studie ukazuje, že temná energie může zvyšovat frekvenci těchto vibrací a rychleji je tlumit, což může zakrýt elektromagnetické stopy náboje.



elektromagnetické pole černé díry

**Jak na to vědci přišli?** Využili počítačové simulace, aby modelovali, co se děje, když temná energie působí na gravitační vlny. Použili k tomu **upravenou teorii gravitace**, která pracuje s myšlenkou, že energie a hybnost se nemusí chovat úplně tak, jak jsme zvyklí podle Einsteinovy teorie relativity. Tím dokázali lépe napodobit podmínky v extrémních situacích kolem černých děr.

Zaměřili se na tzv. **kvazinormální módy** – představte si je jako „dozvuky“ černé díry po velké kosmické události, například po srážce s jinou černou dírou. Tyto vibrace mají specifickou frekvenci (jakým „tónem“ černá díra časoprostorem „zvoní“) a tlumení (jak rychle se vibrace utiší s rostoucí vzdáleností od zdroje). Vědci zkoumali, jak tyto vibrace vypadají v prostředí ovlivněném temnou energií, a porovnávali je s tím, jak by vypadaly bez ní.



**KVAZINORMÁLNÍ MÓDY:** Specifické gravitační vlny vznikající například při srážkách černých děr.

**Výsledky ukázaly jasný rozdíl** – temná energie způsobila, že černé díry vibrovaly s vyšší frekvencí a i jejich „zvuk“ se tlumil rychleji. To by mohlo vysvětlit, proč jsme dosud nepozorovali el. náboj černých děr: temná energie tyto stopy jednoduše zakrývá.

## CO BY KDYBY?

Kdyby se závěry studie potvrdily, mohlo by to znamenat, že černé díry často nesou náboj a mohou produkovat silná elektromagnetická pole, což by **změnilo naše modely** jejich interakcí s okolím. Gravitační vlny by odhalily nejen jejich hmotnost a rotaci, ale také skryté vlastnosti ovlivněné temnou energií, což by umožnilo **získávat více informací** o známých černých děrách a prohloubilo jejich pochopení.

Tento objev by mohl vést k **nové fyzice černých děr**, upřesnění kosmologických modelů a možná i k lepšímu pochopení, **jak temná energie určuje dynamiku vesmíru.**



# KDYŽ ČERNÁ DÍRA DROPNE POSLEDNÍ STOPU<sup>[2]</sup>

I černá díra má svou „životnost“. Postupně se vypařuje díky Hawkingovu záření, což u velké černé díry může trvat mnohonásobně déle, než je současné stáří vesmíru. Nakonec ztratí všechnu svou energii a zmizí (to se týká hlavně malých černých děr).

*Mohou ale černé díry skutečně zmizet beze stopy?*

Naši vědci přicházejí s novou teorií, která říká:



Podle nové teorie vycházející z tzv. kvantově zrnité struktury prostoru černé díry nezmizí beze stopy. I po jejich vypaření by měly **zůstat drobné „relikty“** – nepatrné zbytky hmoty, které mohou uchovávat **informace o tom, jak černá díra vypadala, z čeho vznikla, či co do ní spadlo**. Mohly by tedy nést důležité informace o historii černé díry.

Vědci vypočetli základní termodynamické parametry černé díry v tomto modelu a zjistili, že se **vypařování pro určitou zbytkovou hmotnost zastaví**. Relikty by mohly být hypoteticky detekovatelné díky vlivu na chování světla, trajektorie částic a gravitačních vln v okolí černé díry.

## VÝSLEDKY:

Zavedení kvantových efektů do „tradičního“ popisu černých děr: Kvantová „zrnitost“ časoprostoru, kterou zavádí teorie strun, může být popsána nekomutativní geometrií. V tomto přístupu závisí poloměr horizontu událostí černé díry nejen na její hmotnosti, ale i na parametru míry nekomutativnosti. Naši vědci zavedli tzv. **deformovanou hmotnost černé díry**, závislou právě na tomto parametru.

1 + 2 = 2 + 1 komutativní  
1 - 2 ≠ 2 - 1 nekomutativní

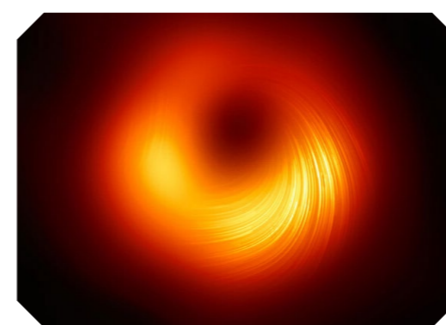
*U nekomutativní geometrie záleží na pořadí operandů!*

## Termodynamika černých děr s deformovanou hmotností:

Dosazení deformované hmotnosti do Hawkingovy teploty přineslo **překvapivý objev**. U klasických černých děr teplota s klesající hmotností roste, a vypařování tak zrychluje. V tomto modelu však při určité zbytkové hmotnosti teplota klesne na nulu a **vypařování se zastaví**.

## CO BY KDYBY?

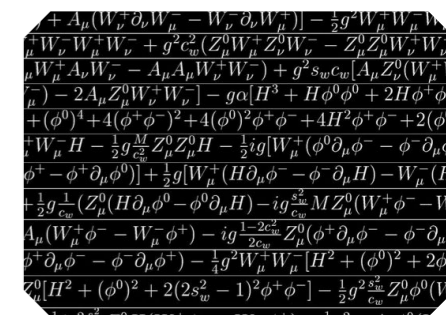
Tento koncept přináší několik potenciálních dopadů, např.:



### Řešení informačního paradoxu

*Pokud relikty skutečně existují, mohly by vyřešit informační paradox černých děr a potvrdit, že informace v kosmu není nikdy zničena.*

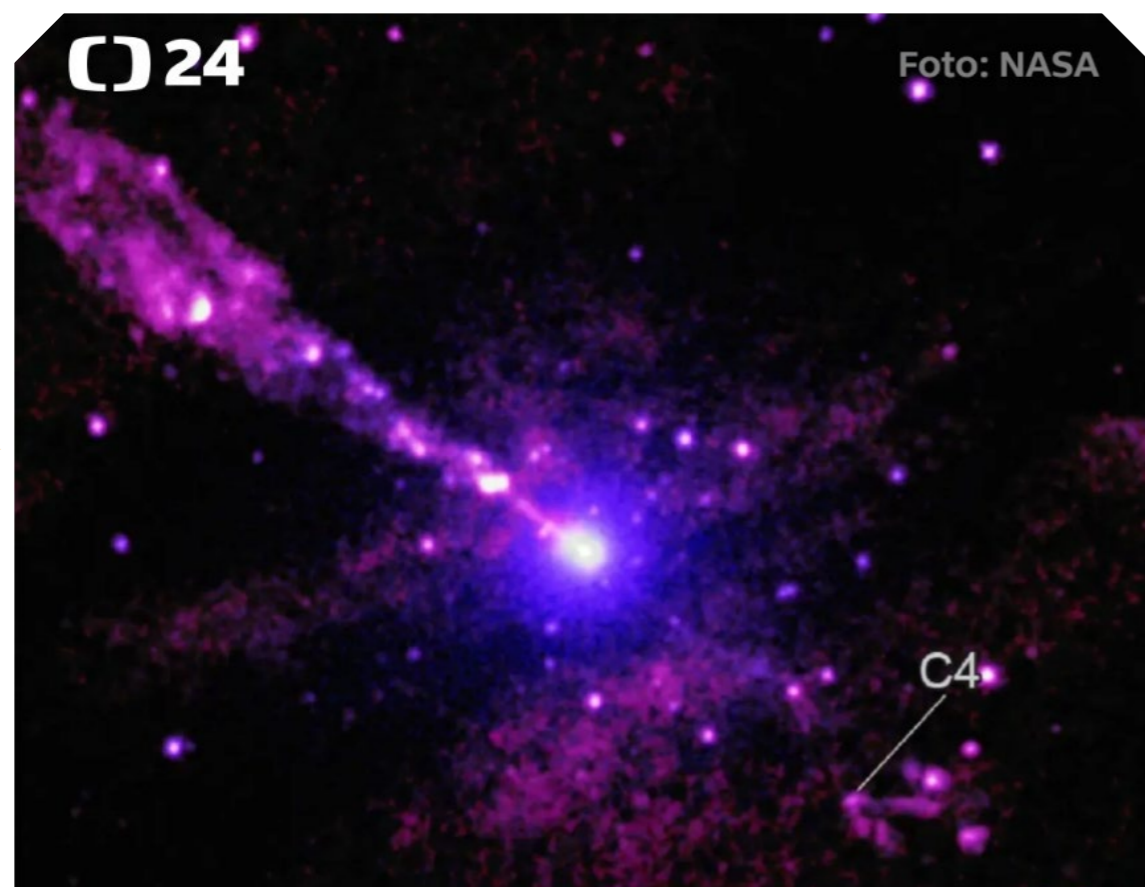
**Propojení kvantové fyziky a gravitace**  
*Teorie by mohla být krokem k dlouho hledané teorii všeho, která by spojila Einsteinovu relativitu s kvantovou mechanikou.*





# AKTUALITA

Ze světa vědy přichází fascinující objev: teleskop Chandra zachytil srážku částicového proudu z černé díry s neznámým objektem. Tento jev otevírá nové otázky o povaze extrémních kosmických interakcí.



## Srážka kosmických rozměrů

Výtrysk z černé díry narušil vesmírný objekt

Článek popisuje objev neobvyklé emise „ve tvaru písmene V“ v galaxii Centaurus A, která vznikla, když proud částic z černé díry narazil do neznámého objektu. Tento objekt, označený jako C4, může být masivní hvězda nebo hvězdný systém. Srážka způsobila turbulence a zvýšení hustoty plynu v proudu částic, což vedlo k emisím zachyceným pomocí teleskopu Chandra.

Tvar "V" je však záhadný, protože je odlišná od dříve pozorovaných srážek, které měly eliptický tvar.

# CO NA TO FYZIK?

odpovídá rektor Univerzity Hradec Králové Jan Kříž



*Život fyzika v první čtvrtině 21. století je neuvěřitelně fascinující. Aktuální unikátní pozorování teleskopu Chandra je dalším plodem, které sbírají masivní investice do experimentálních fyzikálních zařízení na přelomu milénia.*

*Vždyť v posledních 15 letech jsme svědky experimentálních potvrzení zásadních*

*předpovědí těch nejdůležitějších fyzikálních teorií. Mám na mysli zejména experimentální potvrzení existence tzv. božské částice - Higgsova bosonu - na urychlovači LHC v CERN v roce 2012 a první přímou detekci gravitačních vln interferometrem LIGO v roce 2014.*

*Jako teoretika mě fascinuje neuvěřitelná přesnost těchto zařízení. Uvidíme, co nového nám do fyziky přinese interpretace zcela nového pozorování.*

## ČERNÉ DÍRY A TEMNÁ ENERGIE

*Jako každý student teoretické fyziky jsem byl již při svém studiu fascinován obecnou teorií relativity a jejími předpověďmi - černými děrami a kosmologickými modely. Jelikož od mých studií uběhlo již více než 25 let, hodně se v této oblasti výzkumu*

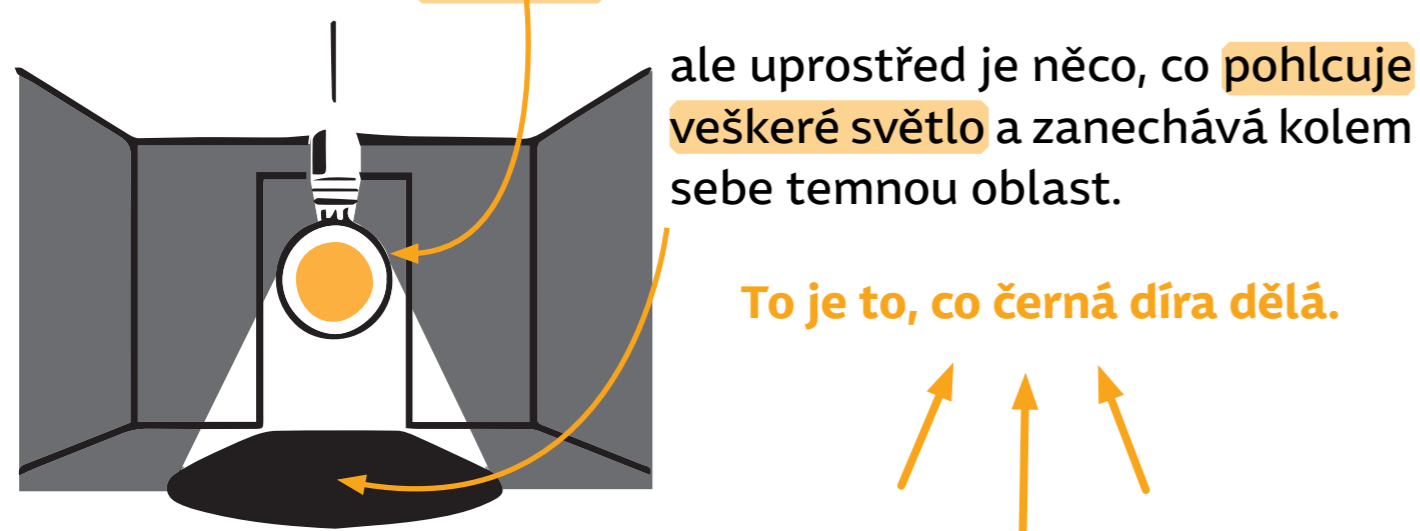


*změnilo. Vždyť třeba nutnost zavedení temné energie (a tedy v jednom modelu nenulové kosmologické konstanty v Einsteinych rovnicích) vznikla v roce 1998, v roce mé promoce. Nám ještě přednášeli, že konstanta Lambda je nulová.*



# JE TO STÍN, ALE NENÍ TO STÍN<sup>[3]</sup>

Co jsou stíny černých děr? Nejsou to stíny v běžném slova smyslu. Představte si: žárovku, která svítí v místnosti,



Naši vědci tvrdí, že stíny černých děr by mohly být **klíčem k pochopení, zda vesmír funguje podle Einsteinových zákonů** gravitace, nebo zda je třeba hledat nové přístupy k jejich rozšíření. Tyto stíny nesou stopy o tom, zda prostor a čas mají hladkou strukturu, nebo zda jsou „zrnitě kvantové“. Kvantová povaha časoprostoru je obecně přijímána, avšak její **přesné propojení s obecnou teorií relativity zatím chybí.**

Stíny černých děr nejsou pouze důsledkem gravitační síly, která pohlcuje světlo, ale fungují jako „**otisky prstů**“, odrážející interakce černé díry s jejím okolím. Současné modely naznačují, že velikost a tvar těchto stínů mohou být ovlivněny temnou energií i kvantovou povahou prostoru.

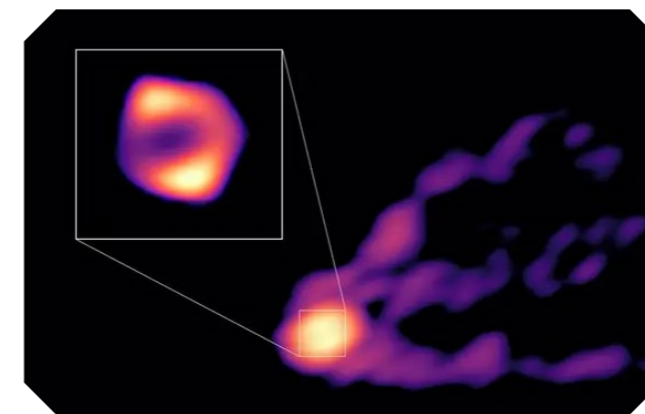


Podobně jako na počátku 20. století, kdy kvantové efekty postupně pronikaly do klasické mechaniky, se i dnes snažíme začlenit kvantové efekty do obecné teorie relativity. To se však zatím nedaří a **sjednocující teorie všeho zůstává v nedohlednu.**

Na stíny černých děr má vliv také prostředí, ve kterém se nachází, například **přítomnost plazmatu**. Toto plazma může měnit chování světelných paprsků v blízkosti černé díry a tím **ovlivňovat pozorované vlastnosti stínů**, což je důležitý faktor při jejich interpretaci.

*Vědci simulovali, jak tyto procesy ovlivňují stíny černých děr. Výsledky naznačují, že stíny by mohly být větší, deformované nebo se dynamicky měnit – a právě tyto rozdíly by mohly být prvními důkazy o propojení Einsteinovy teorie relativity s kvantovou mechanikou.*

## JAK TO VŠECHNO OVĚŘIT?



Dobrá zpráva je, že stíny černých děr můžeme pozorovat. Teleskopy, jako je Event Horizon Telescope, už dokázaly zachytit stíny supermasivních černých děr v galaxii M87 a v centru naší Mléčné dráhy. Další pozorování těchto stínů by mohlo odhalit jemné změny v jejich velikosti a tvaru.

## CO BY KDYBY?

Pokud se teorie potvrdí, stíny černých děr se mohou stát klíčem k odpovědím na největší otázky fyziky. Mohly by nám např. ukázat:

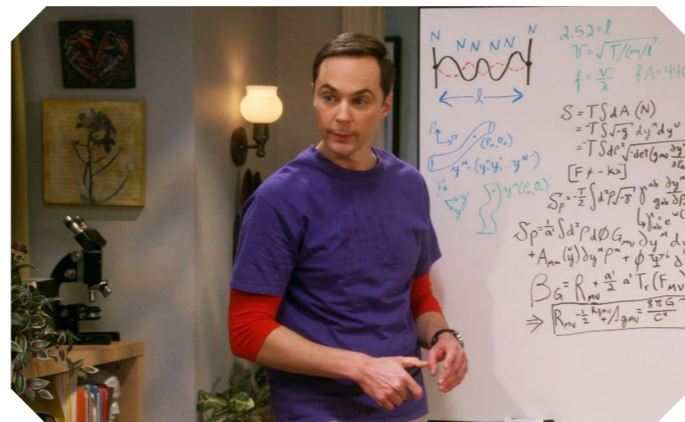
- **Jak temná energie ovlivňuje gravitační objekty.**
- **Zda prostor a čas mají kvantovou povahu.**
- **Jak propojit Einsteinovu teorii gravitace s kvantovou mechanikou – což je sen fyziků již celá desetiletí.**



# TEORIE, KTEROU ANI SHELDON NEVYŘEŠIL (MY JSME BLÍŽ) <sup>[4]</sup>

Einsteinova teorie relativity změnila naše chápání vesmíru – od fungování gravitace až po samotnou povahu času a prostoru. Ale co když existují černé díry, které tato teorie nedokáže popsat? Podle teorie strun by mohly existovat **černé díry s vlastnostmi, které relativita nepředpokládá.**

Právě tyto černé díry, nazývané **Kerrov-Senovy černé díry**, si vzali na mušku naši vědci.



## Kerrov-Senovy černé díry: co jsou zač?

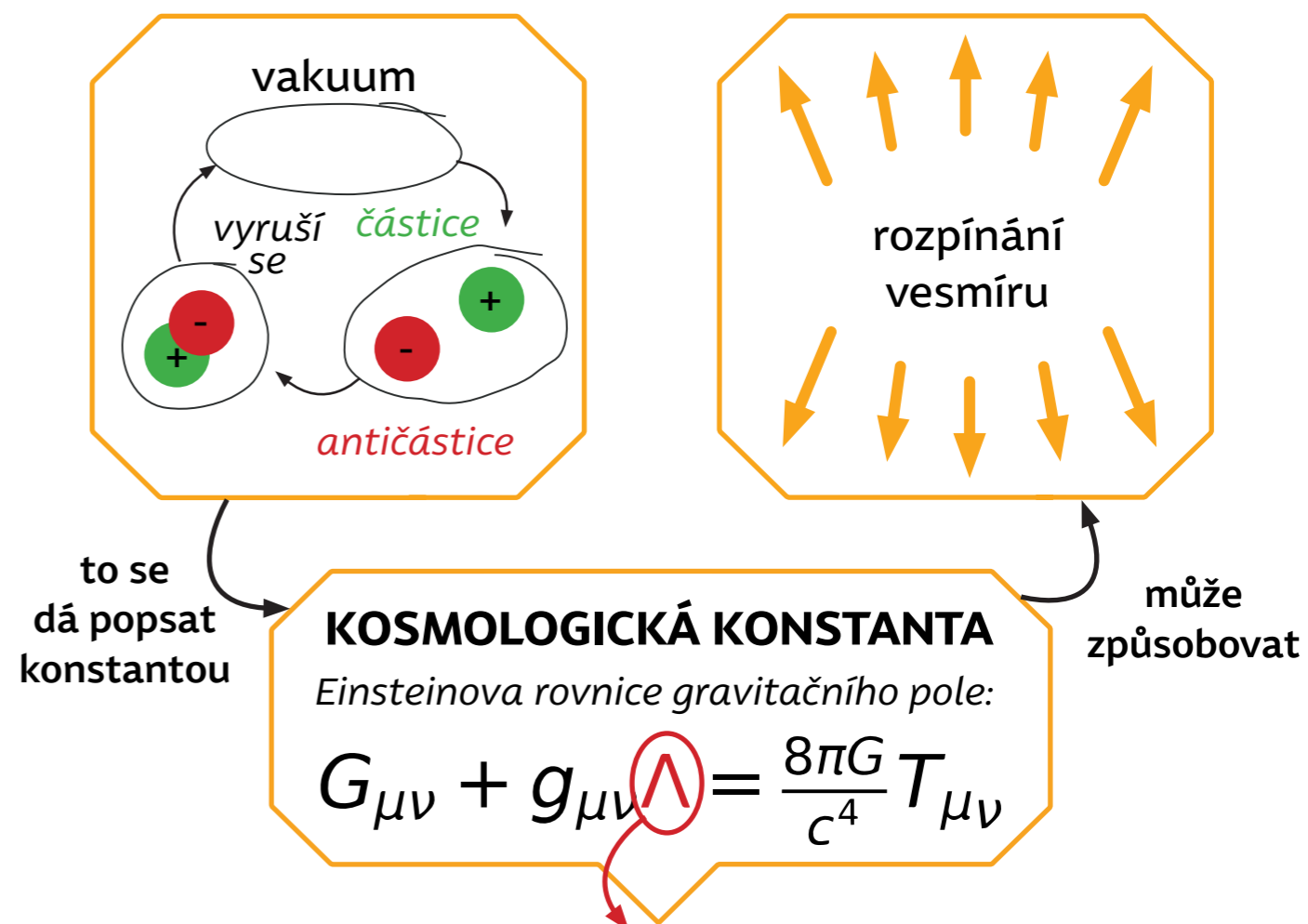
Tyto černé díry pocházejí z teorie strun a liší se od těch „klasických“, které popisuje Einstein. Kromě rotace el. náboje a gravitace zahrnují také interakce s elektromagnetickými poli a dilatonovými poli, což jsou klíčové prvky strunové fyziky. Článek ukazuje, že tyto černé díry mají zvláštní termodynamické vlastnosti, které nelze popsat tradičními modely.

| „KLASICKÉ“ ČERNÉ DÍRY   | KERROVY-SENOVY ČERNÉ DÍRY  |
|---|--|
| Jsou popisovány fyzikou obecné relativity                       | Pocházejí ze strunové teorie a jejich popis je složitější          |
| Stabilitu a vlastnosti ovlivňuje pouze hmotnost, rotace a náboj | Stabilitu navíc ovlivňuje tzv. Řenyiho parametr spojený s entropií |
| Mají jednodušší strukturu a vlastnosti                          | Mají složitější strukturu, protože zahrnují více parametrů         |

Je možné, že černé díry, které pozorujeme, se chovají podle Kerrových-Senových předpovědí, ale dosud nemáme ani dostatečně přesné přístroje, ani teoretické modely, abychom to rozpoznali.

Aby vědci lépe pochopili, jak se tyto černé díry chovají, použili **Řenyiho statistiku** – pokročilý matematický nástroj, který umožňuje analyzovat extrémní stavy a nelineární efekty. Výsledky ukazují, že tyto černé díry mohou mít stabilní i nestabilní fáze a že jejich vlastnosti **mohou být přímo ovlivněny kosmologickou konstantou.**

Vysvětleme si nyní kosmologickou konstantu. **Příroda „nemá ráda prázdnotu“**, proto i ve vakuu vznikají částice a antičástice, které si na krátký okamžik „vypůjčí z budoucnosti“. Tyto částice se následně setkají, vzájemně anihilují (vyruší) a vakuum se vrátí do původního stavu.



(lambda) kosmologická konstanta = popisuje odpudivou sílu v prázdném prostoru, která urychluje rozpínání vesmíru.



# CO JSTE SE V TOMTO VYDÁNÍ DOZVĚDĚLI?

**1** Temná energie tvoří 70 % vesmíru a její vliv na černé díry může být zásadní. Vědci zjistili, že kvazinormální módy černých děr – dozvuky po kosmických událostech – vibrují s vyšší frekvencí a jejich zvuk se rychleji tlumí, pokud je přítomna temná energie.

Tato energie by dokonce mohla maskovat elektromagnetický náboj černých děr, což by vysvětlovalo, proč jsme dosud náboj nepozorovali.

*D.J. Gogoi, N. Heidari, J. Kříž, H. Hassanabadi, Quasinormal Modes and Greybody Factors of de Sitter Black Holes Surrounded by Quintessence in Rastall Gravity, Fortschritte Der Physik 72 (2024) 2300245. <https://doi.org/10.1002/prop.202300245>.*

**2** Černé díry se podle Hawkingovy teorie postupně vypařují, ale nové modely naznačují, že jejich vypařování se při určité zbytkové hmotnosti zastaví. Relikty, drobné zbytky hmoty, by mohly uchovávat informace o historii černých děr, například o tom, co do nich spadlo. Tyto hypotetické zbytky jsou výsledkem propojení kvantových efektů a termodynamiky černých děr. Mohly by přispět k řešení informačního paradoxu a propojit kvantovou fyziku s obecnou relativitou.

*N. Heidari, H. Hassanabadi, A.A. Araújo Filho, J. Kříž, S. Zare, P.J. Porfírio, Gravitational signatures of a non-commutative stable black hole, Physics of the Dark Universe 43 (2024) 101382. <https://doi.org/10.1016/j.dark.2023.101382>.*

**3** Stíny černých děr, zachycené teleskopy jako Event Horizon Telescope, nejsou jen temné oblasti, ale „otisky prstů“ interakcí černé díry s okolím. Jejich tvar a velikost mohou být ovlivněny temnou energií i kvantovou povahou prostoru. Tyto stíny nám mo-

hou ukázat, zda časoprostor má hladkou nebo „kvantově zrnitou“ strukturu, a přiblížit nás k propojení Einsteinovy teorie gravitace s kvantovou mechanikou.

*B. Hamil, B.C. Lütfüoğlu, Noncommutative Schwarzschild black hole surrounded by quintessence: Thermodynamics, Shadows and Quasinormal modes, Physics of the Dark Universe 44 (2024) 101484. <https://doi.org/10.1016/j.dark.2024.101484>.*

**4** Černé díry z teorie strun, nazývané Kerrovy-Senovy černé díry, zahrnují interakce s dilatonovými a elektromagnetickými poli, které nejsou popsány obecnou teorií relativity. Rényiho statistika odhalila, že tyto černé díry mají složité termodynamické vlastnosti a jejich stabilitu ovlivňuje nový parametr spojený s entropií. Tento výzkum nás přibližuje k pochopení vztahů mezi gravitací, kvantovou fyzikou a teorií strun.

*M.-Y. Zhang, H. Chen, H. Hassanabadi, Z.-W. Long, H. Yang, Thermodynamic topology of Kerr-Sen black holes via Rényi statistics, Physics Letters B 856 (2024) 138885. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.138885>*





# DĚKUJEME ZA PŘEČTENÍ!

Líbilo se vám toto vydání? Napište nám komentář na Instagram!

