ROZHOVOR

Pamäť vesmíru

Čierne diery možno nikdy úplne nezaniknú. Nový výskum slovenských fyzikov naznačuje, že rovnaká sedemrozmerná geometria časopriestoru, ktorá by mohla vysvetliť pôvod hmotnosti častíc, ponúka aj riešenie informačného paradoxu čiernych dier. O svojich výsledkoch nám porozprával Richard Pinčák z Ústavu experimentálnej fyziky SAV, v. v. i.

Snímka röntgenového zdroja Cygnus X-1 z observatória Chandra, ktorý bol prvým objaveným kandidátom na čiernu dieru, foto wikipédia/NASA Chandra X-ray Observatory; NASA/CXC

Vo svojom najnovšom výskume ste sa venovali čiernym dieram. Prečo práve im?

Takmer vždy, keď sme skúmali hranice toho, čo dokážeme merať, objavili sme o prírode niečo nové. Tieto hranice bývajú najčastejšie rôzne extrémy, sú to napríklad objekty extrémne malé, extrémne chladné alebo javy s mimoriadne vysokou energiou. Čierna diera je objektom s extrémnymi vlastnosťami, a preto priťahuje pozornosť vedcov už celé desaťročia.

Podľa klasickej všeobecnej relativity vzniká v strede čiernej diery singularita, teda bod, v ktorom matematický opis predpovedá extrémne hodnoty hustoty a zakrivenia časopriestoru. Takéto nekonečná však fyzici nemajú veľmi radi, pretože teórie obsahujúce nekonečné hodnoty, napríklad hustotu, nedokážu poskytnúť zmysluplné predpovede. Ide o prvý významný problém teórie čiernych dier.

Druhým problémom je, že čierna diera sa síce za neuveriteľne dlhý, no predsa len konečný čas úplne vyparí v dôsledku Hawkingovej radiácie. Ostane po nej iba žiarenie a zmizne všetka informácia o tom, čo kedy pohltila. Vo fyzike však platí princíp, podľa ktorého sa informácia nemôže stratiť. Tento rozpor sa nazýva informačný paradox čiernych dier a dodnes trápi mnohých fyzikov.

Ako presne funguje toto vyparovanie?

Stephen Hawking ukázal, že v kvantovej teórii ani *prázdny* priestor nie je úplne prázdny. V dôsledku Heisenbergovho princípu neurčitosti v ňom neustále vznikajú a takmer okamžite zanikajú virtuálne páry častíc a antičastíc – krátkodobé fluktuácie, ktoré za normálnych okolností nemajú merateľný vplyv.

V silnom gravitačnom poli tesne pri horizonte udalostí čiernej diery, teda na hranici, za ktorou sa nič nemôže vrátiť, môže dôjsť k tomu, že jedna z týchto virtuálnych častíc spadne do čiernej diery a druhá unikne preč. Toto je intuitívny obraz. Presnejší výpočet vychádza z kvantových polí v zakrivenom časopriestore.

Keď sa čierna diera zmenší na mikroskopickú veľkosť, torzia časopriestoru vytvára obrovskú odpudivú silu, ktorá náhle zastaví vyparovanie.

Z pohľadu vzdialeného pozorovateľa častica, ktorá spadne dovnútra, prináša do čiernej diery negatívnu energiu. Výsledkom je, že čierna diera postupne stráca hmotnosť a vyžaruje častice smerom von. Tento proces nazývame Hawkingovým vyparovaním.

Prečo má tá častica, ktorá spadne do čiernej diery, z pohľadu vzdialeného pozorovateľa negatívnu energiu?

Na prvý pohľad to znie paradoxne. V bežnom plochom priestore majú virtuálne páry spolu nulovú energiu a rýchlo sa navzájom zničia. Tesne pri horizonte čiernej diery je však gravitácia taká silná, že dramaticky mení tok času. Z pohľadu vzdialeného pozorovateľa sa čas pri horizonte takmer zastavuje, čo voláme gravitačný červený posun.

Ak jedna z virtuálnych častíc prekročí horizont, jej energia meraná z diaľky vyjde ako negatívna. Táto negatívna energia odčerpáva hmotnosť z čiernej diery, zatiaľ čo unikajúca častica nesie pozitívnu energiu, ktorú vidíme ako Hawkingovo žiarenie. Je to, akoby čierna diera požičala energiu z vlastnej gravitácie na vytvorenie reálnej častice, ktorá odletí preč.

Neznamená to však, že častica má lokálne zápornú energiu. Ide o efekt definície energie vzhľadom na vzdialeného pozorovateľa.

A čo sa stane s informáciou?

Toto tepelné žiarenie nenesie žiadnu informáciu o tom, čo čierna diera v minulosti pohltila. Podľa Hawkingovho výpočtu nič tento proces nezastaví a čierna diera sa nakoniec úplne vyparí. Vo fyzike však platí, že stav každého objektu nesie informáciu o svojej minulosti. Strata tejto informácie predstavuje vážny rozpor, známy ako informačný paradox čiernych dier.

Ako zareagovala fyzikálna komunita na tento paradox?

Paradox vyvolal veľký rozruch a stal sa jedným z najvýznamnejších problémov teoretickej fyziky druhej polovice 20. storočia. Leonard Susskind a Gerard 't Hooft ho považovali za vážnu hrozbu pre základy fyziky. Začala sa tzv. vojna o čierne diery, intelektuálny súboj medzi S. Hawkingom a L. Susskindom s jeho prívržencami.

Susskind tento spor podrobne opisuje v knihe *The Black Hole War* (Vojna o čierne diery). Hawking dlho tvrdil, že informácia sa stráca. V roku 2004 však pripustil, že Susskind mal pravdepodobne pravdu, a prehral symbolickú stávku.

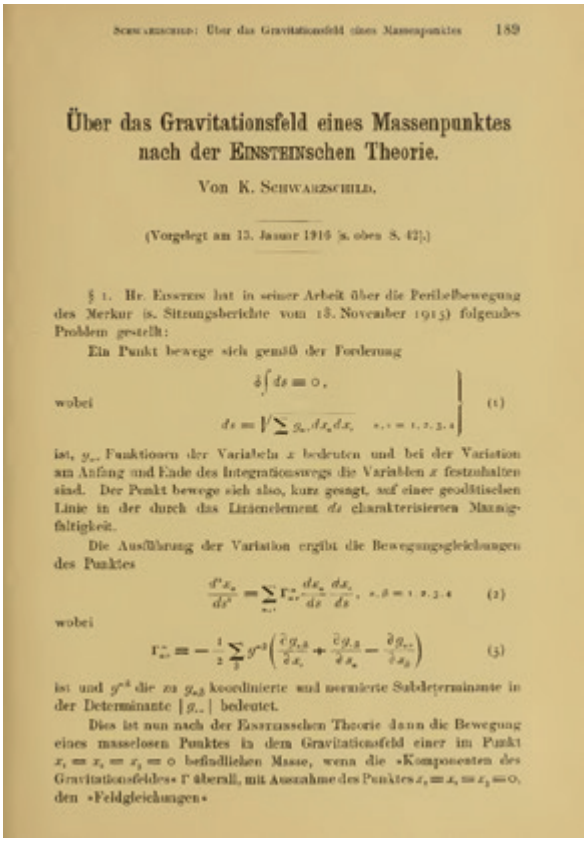
Jedným z najvplyvnejších smerov riešenia sa stal holografický princíp, ktorý hovorí, že informácia o trojrozmernom objeme môže byť úplne zakódovaná na jeho dvojrozmernej hranici, podobne ako v holograme. Tento princíp naplno rozvinul Juan Maldacena v roku 1997 v rámci AdS/CFT korešpondencie. Jeho priekopnícky článok je jedným z najcitovanejších v teoretickej fyzike a má viac ako 20-tisíc citácií.

Dnes sa významná časť teoretických fyzikov domnieva, že vďaka holografii, teórii strún a kvantovej informácii je paradox v podstate vyriešený: informácia sa zachováva, hoci uniká veľmi pomaly a je zakódovaná v Hawkingovom žiarení.

Ako do tejto situácie zapadá váš výskum?

V minulom roku sme ukázali, že v dôsledku torzie extradimenzií nadobúdajú elementárne častice v našom vesmíre, napríklad Higgsov bozón, hmotnosť, ktorú meriame v laboratóriách, ako je CERN (pozri *Quark* 3/2026). Metódy použité v tomto výskume sme aplikovali na svet čiernych dier. Zaujímavé je, že vo svete, v ktorom majú extradimenzie torziu, sa dajú vyriešiť oba paradoxy čiernych dier. Čierna diera nemá singularitu a informačný paradox riešime alternatívnym spôsobom.

V našej novej štúdii sme pracovali s modelom časopriestoru, v ktorom sú pridané neviditeľné *zrolované* dimenzie a geometrická vlastnosť nazývaná *torzia*. Demonštrovali sme, že v takomto modeli čierne diery v skutočnosti nikdy úplne nezaniknú. Zistili sme, že keď sa čierna diera zmenší na mikroskopickú veľkosť, torzia časopriestoru vytvára obrovskú odpudivú silu, akýsi druh *antigravitácie*, ktorá náhle zastaví vyparovanie a zachráni čiernu dieru pred úplným vyparením. Tento konečný relikt je neuveriteľne malý. Jeho hmotnosť je približne 9×10^{-41} kg. To je ohromujúco malé číslo.



Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1916, S. 189

Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie.

Von K. Schwarzschild.

(Vorgelegt am 13. Januar 1916 [s. oben S. 42].)

§ 1. Hr. Einstein hat in seiner Arbeit über die Perihelbewegung des Merkur (s. Sitzungsberichte vom 18. November 1915) folgendes Problem gestellt:

Ein Punkt bewege sich gemäß der Forderung

$$\delta \int ds = 0,$$

wobei

$$ds = \sqrt{\sum g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu} \qquad \mu, \nu = 1, 2, 3, 4 \qquad (1)$$

ist, $g_{\mu\nu}$ Funktionen der Variabeln x bedeuten und bei der Variation am Anfang und Ende des Integrationswegs die Variablen x festzuhalten sind. Der Punkt bewege sich also, kurz gesagt, auf einer geodätischen Linie in der durch das Linienelement ds charakterisierten Mannigfaltigkeit.

Die Ausführung der Variation ergibt die Bewegungsgleichungen des Punktes

$$\frac{d^2 x_\alpha}{ds^2} = \sum_{\mu\nu} \Gamma^\alpha_{\mu\nu} \frac{dx_\mu}{ds} \frac{dx_\nu}{ds}, \qquad \alpha, \beta = 1, 2, 3, 4 \qquad (2)$$

wobei

$$\Gamma^\alpha_{\mu\nu} = -\frac{1}{2} \sum_\beta g^{\alpha\beta} \left(\frac{\partial g_{\nu\beta}}{\partial x_\mu} + \frac{\partial g_{\beta\mu}}{\partial x_\nu} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_\beta} \right) \qquad (3)$$

ist und $g^{\alpha\beta}$ die zu $g_{\alpha\beta}$ koordinierte und normierte Subdeterminante in der Determinante $|g_{\mu\nu}|$ bedeutet.

Dies ist nun nach der Einsteinschen Theorie dann die Bewegung eines masselosen Punktes in dem Gravitationsfeld einer im Punkt $x_1 = x_2 = x_3 = 0$ befindlichen Masse, wenn die »Komponenten des Gravitationsfeldes« Γ überall, mit Ausnahme des Punktes $x_1 = x_2 = x_3 = 0$, den »Feldgleichungen«

Prvá strana článku, ktorým sa začala história čiernych dier. Článok Karla Schwarzschilda o riešení rovníc všeobecnej relativity pre nerotujúcu hviezdu, zdroj wikipédia/ archive.org/details/sitzungsberichte-1916deutsch, *public domain*

Čierne diery priťahujú pozornosť vedcov práve preto, že sú objektmi s extrémnymi vlastnosťami.

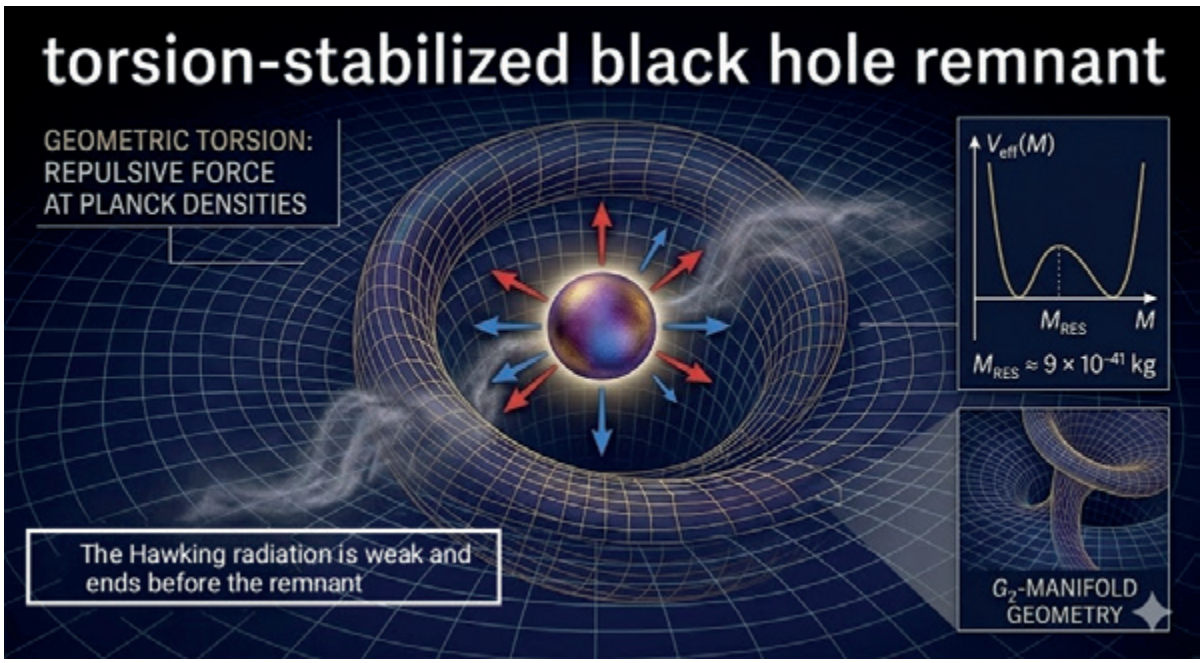
Ako si možno predstaviť torziu časopriestoru a* antigravitáciu, *ktorá zachráni čiernu dieru pred zánikom?

Torzia je geometrická vlastnosť časopriestoru. Ak zakrivenie opisuje, ako sa priestor ohýba, torzia opisuje, ako sa môže lokálne *krútiť*. V našom modeli sa táto vlastnosť objavuje v dodatočných priestorových dimenziách.

Antigravitácia je len ilustračné označenie. Ide o nový geometrický

RNDr. Richard Pinčák, PhD.,

pôsobí na Oddelení teoretickej fyziky Ústavu experimentálnej fyziky SAV, v. v. i., v Košiciach. Absolvoval dlhodobý pracovný pobyt (sedem rokov) na Oddelení teoretickej fyziky v Spojenom ústave jadrových výskumov (JINR) v Dubne v Rusku. Pravidelne navštevuje aj Oddelenie teoretickej fyziky v CERN-e. V posledných rokoch sa prioritne venuje kozmológii, v ktorej rieši úlohy vychádzajúce z nových geometrických modelov. Je autorom viac ako stovky odborných publikácií. Svoje výsledky sa usiluje popularizovať aj atraktívnou formou, ktorá je blízka širšiemu okruhu čitateľov.



Torzne stabilizovaný zvyšok čiernej diery. Schematické znázornenie stabilného zvyšku v sedemrozmernej Einsteinovej-Cartanovej teórii na G_2-variete s torziou. Geometrická torzia vytvára odpudivú silu (farebné šípky) pri Planckových hustotách, ktorá zastavuje poslednú fázu Hawkingovho vyparovania a vytvára zvyšok s hmotnosťou $M_{RES} \approx 9 \times 10^{-41}$ kg. Vpravo hore je efektívny potenciál $V_{eff}(M)$ s minimom pri hmotnosti zvyšku čiernej diery. Vpravo dole je zobrazenie základnej geometrie G_2-variety, ilustrácia R. Pinčák pomocou AI.

člen, ktorý sa v riešení objaví a ktorý pri extrémnych hustotách pôsobí efektívne odpudivo, čím zastaví ďalšie zmenšovanie čiernej diery.

Takže čierna diera podľa výsledkov vášho výskumu úplne nezmizne?

Áno. Predstavte si čiernu dieru nie ako bublinu, ktorá praskne a zmizne v ničote, ale skôr ako horiace poleno: na konci horenia nie je prázdnota, ale mikroskopická *večná iskra*, nezničiteľný zostatok.

Kam sa podeje informácia o všetkom, čo spadlo do čiernej diery?

Odpoveďou je, že relikt funguje ako dokonalý kozmický trezor, ktorý v sebe uchováva informácie neporušené vo forme geometrických vibrácií.

Relikt zrodený z čiernej diery s hmotnosťou porovnateľnou s hmotnosťou nášho Slnka môže uchovávať nepredstaviteľné množstvo informácií, 10^{77} qubitov, teda jednotku nasledovanú 77 nulami. Celá história čiernej diery je tak bezpečne uložená v jeho vnútri.

Máme si predstaviť čierne diery ako harddisky pamätajúce si históriu vesmíru?

Áno, to je výstižná predstava. Čierne diery a ich konečné relikty uchovávajú informáciu o tej časti vesmíru, s ktorou prišli do kontaktu, teda o objektoch, ktoré pohltili.

Ako sa líši váš výsledok od ostatných teórií?

Mnohé predchádzajúce teórie zachovania informácie predpokladali existenciu deštruktívneho *firewallu* okolo čiernych dier – hypotetickej energetickej bariéry pri horizonte udalostí, ktorá by zničila všetko,

Budúce experimenty ukážu, či si príroda skutočne zvolila sedemrozmernú cestu.

Anomálny magnetický moment miónu

Výskum anomálneho magnetického momentu miónu (označovaného ako g-2) patrí k najpresnejším testom štandardného modelu časticovej fyziky.

Mión je nestabilná, ťažšia verzia elektrónu, ktorá sa v magnetickom poli správa takmer presne podľa predpovedí teórie, len s malou odchýlkou.

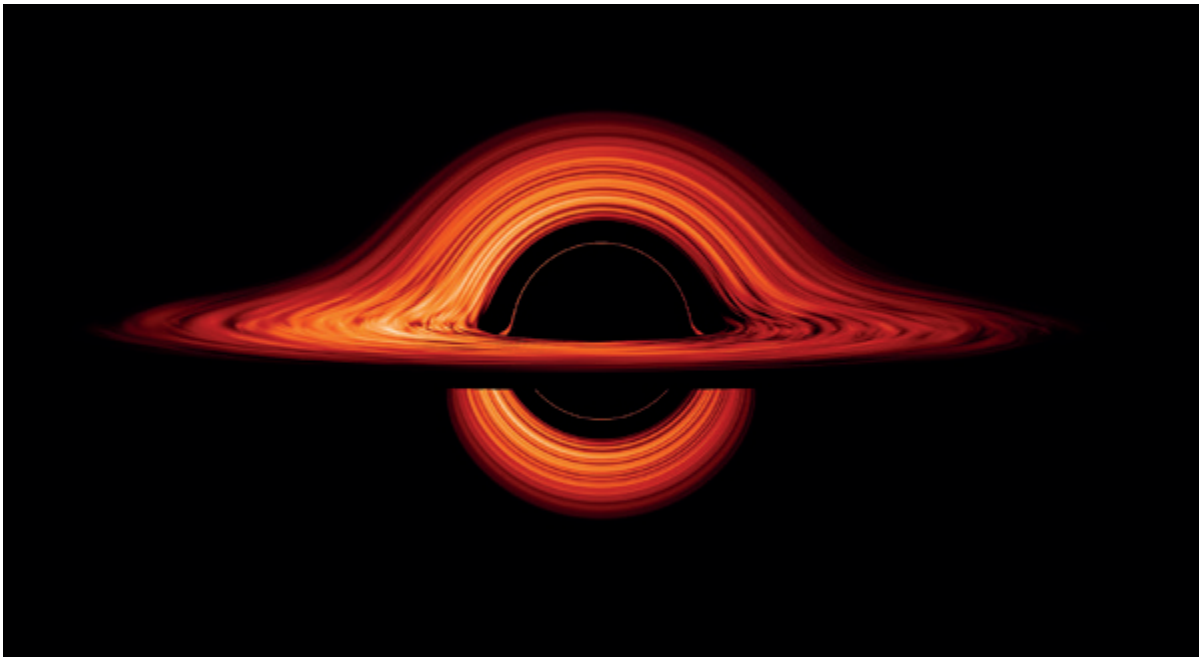
Táto odchýlka nazývaná anomália vzniká v dôsledku kvantových efektov virtuálnych častíc, ktoré sa nakrátko objavujú a miznú v okolí miónu.

Experimenty merajú túto veľmi jemnú odchýlku tak, že mióny urýchlia takmer na rýchlosť svetla a nechajú ich obiehať v obrovskom kruhu so silným a mimoriadne rovnomerným magnetickým poľom. Spin miónov v tomto poli precesuje (otáča sa) mierne odlišnou rýchlosťou, než akou obiehajú po svojej dráhe. Túto rozdielovú frekvenciu vedci merajú veľmi presne pomocou rozpadu miónov na elektróny (resp. pozitróny), ktorých vyžarovanie závisí od orientácie spinu. Z nameranej hodnoty a presne známeho magnetického poľa potom vypočítajú hodnotu anomálie.

Celý experiment si vyžaduje extrémnu presnosť merania magnetického poľa, kontroly systémových chýb a sofistikovanú analýzu dát, čo robí z neho technický aj vedecký majstrovský kúsok modernej fyziky.

Teoretické výpočty v rámci štandardného modelu predpovedajú hodnotu anomálie s vysokou presnosťou. Najnovšie experimenty z Fermilabu však ukazujú určitý nesúlad s teóriou. Tento rozdiel vzbudzuje veľký záujem, pretože by mohol naznačovať existenciu nových, doteraz neobjavených častíc alebo interakcií za hranicami súčasnej teórie.

Výskum g-2 je preto považovaný za jeden z najsľubnejších spôsobov hľadania novej fyziky pri energiách, ktoré priame urýchľovače zatiaľ nedokážu dosiahnuť.



Vizualizácia čiernej diery s oranžovým akrečným diskom. Časti disku obiehajúce nad čiernou dierou a pod ňou sú v skutočnosti gravitačne šošovkované obrazy zadnej strany disku, ilustrácia NASA Goddard Space Flight Center/Jeremy Schnittman.

čo do čiernej diery padá. Náš model neruší zákony fyziky, jednoducho využíva prirodzené zakrivenie a krútenie geometrie na vyriešenie tejto hádanky.

Aký je to pocit, keď myšlienka, ktorá alternatívne vysvetľuje jednu z kľúčových otázok fyziky, hmotnosť častíc a Higgsovho bozónu, následne poskytne vysvetlenie aj pre záhadu z úplne iného konca fyziky? A dokonca pomôže vyriešiť niektoré problémy teórie čiernych dier?

Je to veľmi motivujúce, povedané s úsmevom. Vedie nás to k použitiu tejto metodiky na ďalší fyzikálny problém, konkrétne anomálny magnetický dipólový moment miónu. Jeho merania ukazujú výsledky, ktoré sú odlišné od predpovedí štandardného modelu častícovej fyziky. Tomuto sa aktuálne venujeme.

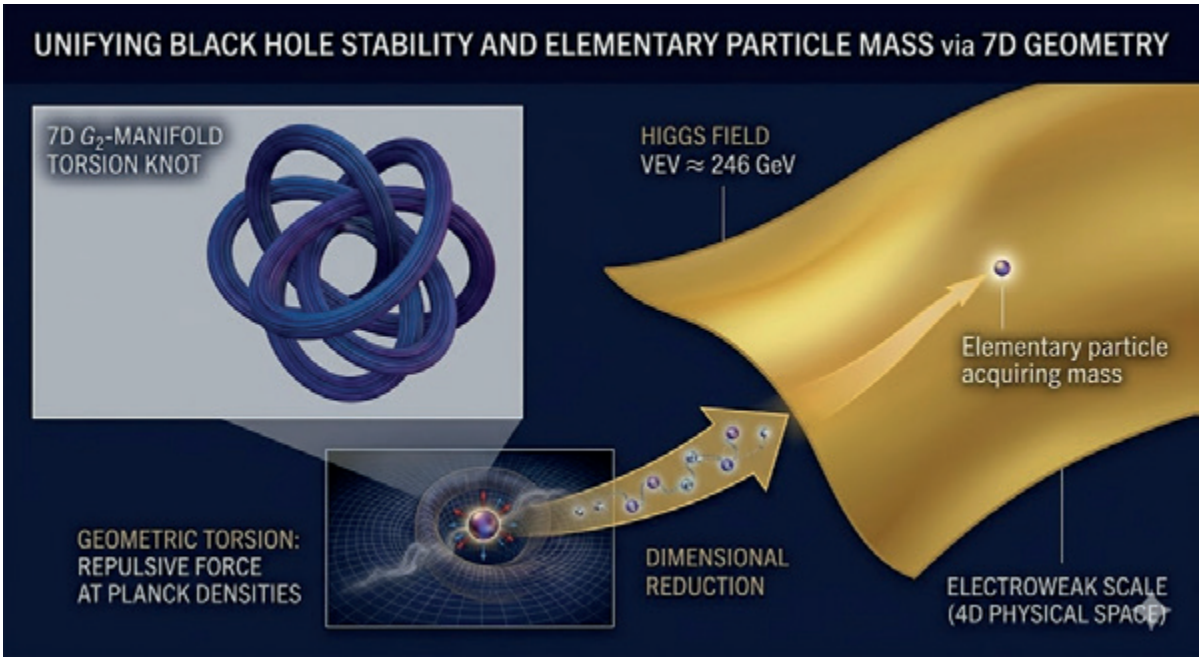
$$t_{\mathrm{ev}} = \frac{5\,120\pi G^2 M^3}{\hbar c^4} = \frac{480 c^2 V}{\hbar G} = 5\,120\pi\, t_{\mathrm{P}} \left(\frac{M}{m_{\mathrm{P}}}\right)^3 \approx 2{,}140\times 10^{67}\,\mathrm{rokov}\,\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^3$$

Vzťah opisujúci čas vyparenia sa čiernej diery. Čierna diera s hmotnosťou nášho Slnka ($M_{\odot}$ = 2,0 × 10^{30} kg) sa vyparí za 10^{67} rokov.

Problémom všetkých týchto teórií, ktoré používajú extradimenzie, vrátane teórie strún, je ich experimentálne potvrdenie. Ako je to v prípade vašej teórie?

Náš model je testovateľný. Ak budúce urýchľovače častíc alebo vesmírne teleskopy odhalia gravitačné anomálie pri špecifických energiách, budeme môcť zistiť, či si príroda skutočne zvolila našu sedemrozmernú cestu.

Náš model prináša konkrétne predpovede, napríklad o energiách, pri ktorých by sa mohli objaviť odchýlky od štandardného modelu, alebo o jemných zmenách v správaní sa gravitačných javov. Ak sa takéto signály raz podarí zmerať, model bude možné potvrdiť alebo vyvrátiť. –



Zjednotenie stability čiernej diery a hmotnosti elementárnych častíc prostredníctvom sedemrozmernej geometrie. Schematické znázornenie rámca prezentovaného v sedemrozmernej Einsteinovej-Cartanovej teórii na G_2-variete s torziou. Vľavo je torzný uzol sedemrozmernej G_2-variety. Geometrická torzia generuje odpudivú silu pri Planckových hustotách (stredný panel), čím stabilizuje zvyšok čiernej diery. Prostredníctvom redukcie rozmerov sa očakávaná hodnota torzného vákua identifikuje s elektroslabou škálou (približne ≈ 246 GeV), čo prirodzene poskytuje očakávanú hodnotu vákua Higgsovho poľa (VEV) a umožňuje elementárnym časticiam získať hmotnosť v štvorrozmernom časopriestore, ilustrácia R. Pinčák pomocou AI.

REDAKČNÝ ČLÁNOK