

Klasyczne i kwantowe czarne dziury: uwagi astrofizyka

Marek ABRAMOWICZ*

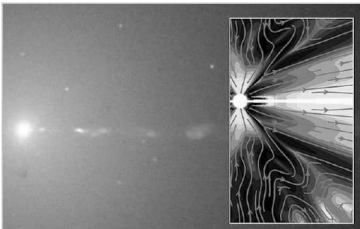
Klasyczne, astrofizyczne czarne dziury

* *Professor Emeritus:*
Physics Department,
Göteborg University, Szwecja
Na niepełnym etacie:
Centrum M. Kopernika PAN, Warszawa
Slezká univerzita, Opava, Czechy

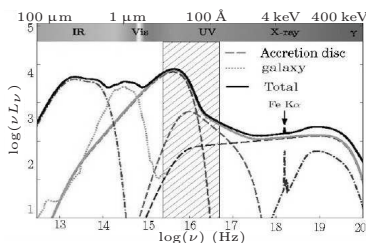
ZWARTOŚĆ OBIEKTÓW ASTROFIZYCZNYCH

Czarne dziury: $\mathcal{X}_{\text{BH}} = 1$
Słońce: $\mathcal{X}_{\odot} = 10^{-6}$
★ neutronowe: $\mathcal{X}_{\text{NS}} = 3 \cdot 10^{-1}$
Galaktyka: $\mathcal{X}_{\text{GAL}} = 10^{-7}$

ASTROFIZYCZNE BADANIA CZARNYCH DZIUR



Zdjęcie z teleskopu Hubble'a galaktyki eliptycznej M87, w której centrum tkwi supermasywna czarna dziura o masie $7 \cdot 10^9 M_{\odot}$. Akrecja materii na tę czarną dziurę jest źródłem jasności (mocy) przewyższającej wielokrotnie jasność samej galaktyki. Akrecja napędza także strzelającą z centrum strugę materii, jej prędkość zbliżona jest do prędkości światła. Magnetohydrodynamiczne symulacje akrecji i strugi pokazane są w okienku po prawej.



Rysunek powyżej pokazuje zasadę dopasowania obserwowanego widma z widmem obliczonym w modelach teoretycznych. Widmo pochodzi od dysku akrecyjnego, samej galaktyki, pyłu i rozrzedzonego gazu („korony”) oraz innych składników.

Teoria akrecji na czarne dziury jest bardzo szczegółowo zgodna z obserwacjami.

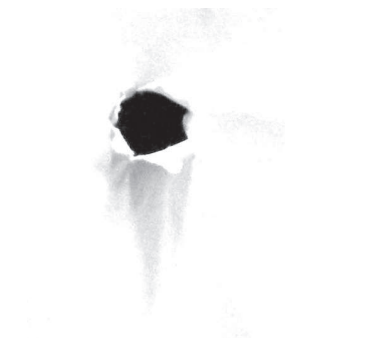
Astrofizyka nie daje przesłanek do kwestionowania einsteinowskiej, klasycznej, teorii czarnych dziur.

Czarne dziury są najbardziej niezwykłą teoretyczną przepowiednią wynikającą z równań ogólnej teorii względności Alberta Einsteina. Dwie ich cechy budzą ogromne wątpliwości teoretyków: istnienie centralnej osobliwości oraz istnienie horyzontu zdarzeń. Żadna z nich nie została zweryfikowana obserwacyjnie. Z drugiej strony teoretycy nie potrafią uzgodnić stanowiska, czy osobliwości i horyzont powodują poważny kryzys w fizyce. Natomiast obserwatorzy są o wiele mniej sceptyczni. W ciągu ostatniego czterdziestolecia astrofizycy zgromadzili ogromną ilość bardzo dokładnych obserwacji dotyczących konkretnych obiektów na niebie, które z racji swej „zwartości” mogą być czarnymi dziurami. Dla obiektu o promieniu R i masie M , którego kształt niewiele różni się od sfery, zwartość \mathcal{X} definiowana jest jako R_G/R , gdzie promień grawitacyjny R_G to $2GM/c^2$.

Astrofizycy wyznaczają z obserwacji zwartość obiektu, i jeśli okazuje się, iż $\mathcal{X} \approx 1$, to uważają ten obiekt za dobrego kandydata na czarną dziurę. Rzecz jasna, jest to pewnego rodzaju nadużycie, ponieważ nie zwartość, lecz właśnie istnienie horyzontu jest definiującą własnością czarnej dziury. Obserwacje używające fal elektromagnetycznych, to znaczy radiowych, podczerwonych, optycznych, nadfioletowych, rentgenowskich i gamma, nie mogą, z *przyczyn fundamentalnych*, dowieść istnienia horyzontu. Często mamy bardzo mocne przesłanki na istnienie horyzontu, ale nigdy nie mamy na to dowodu. Należy jednak z całą mocą podkreślić, że – jak dotąd – nie ma ani jednej obserwacji, która byłaby sprzeczna z przewidywaniami ogólnej teorii względności dotyczącymi czarnych dziur. Nie ma zatem żadnych obserwacyjnych przesłanek sugerujących konieczność rewizji klasycznej, einsteinowskiej, teorii czarnych dziur.

Astrofizycy odkryli dwa rodzaje czarnych dziur: *gwiazdowe*, o masach od kilku do kilkudziesięciu mas Słońca (masa Słońca: $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ g) oraz *supermasywne*, o masach $10^6 M_{\odot} \leq M \leq 10^{10} M_{\odot}$. Odkryte gwiazdowe czarne dziury tworzą układy podwójne ze „zwykłą” gwiazdą. Supermasywne czarne dziury rezydują w centrach galaktyk. W środku naszej Galaktyki jest to SgrA*, czarna dziura o masie $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$. Gwiazdowe i supermasywne czarne dziury pochłaniają (akreują) rotującą materię ze swego sąsiedztwa. Materia, spadając po ciasnych spiralach nagrzewa się i świeci. Procesy akrecyjne są już stosunkowo dobrze poznane (choć nie do końca). W szczególności potrafimy teoretycznie wyliczać, często bardzo dokładnie, własności promieniowania struktur akrecyjnych. Wiemy, które z nich zależą silnie od grawitacji, natomiast słabo od procesów dysypacyjnych zachodzących w materii. To daje nam wgląd w geometrię czasoprzestrzeni czarnych dziur. W ten sposób zgromadziliśmy solidną, imponującą, obserwacyjną wiedzę o czarnych dziurach.

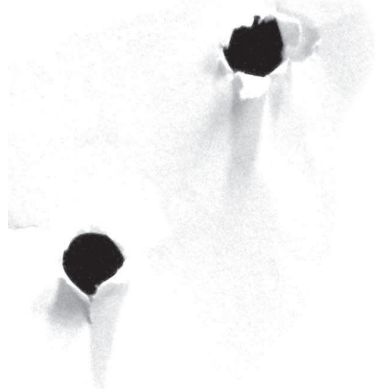
Ale nowe obserwacyjne możliwości badania czarnych dziur są jeszcze bardziej imponujące! Od trzech lat interferometry LIGO i Virgo rejestrują fale grawitacyjne powstałe podczas zderzeń i zlewania się par czarnych dziur. W zeszłym roku działający od kilku lat zespół radioteleskopów tworzących globalną sieć EHT (Event Horizon Telescope), poprawił zasadniczo swe parametry i rozpoczął obserwacje SgrA*, supermasywnej czarnej dziury w centrum Galaktyki, z rozdzielczością kątową porównywalną z rozmiarami tego obiektu. LIGO/Virgo oraz EHT otwierają zupełnie nową epokę w historii fizyki. Po raz pierwszy w dziejach będzie możliwe obserwacyjne testowanie zjawisk kwantowej grawitacji. Praktycznym na to sposobem stanie się obserwacyjne sprawdzanie, czy niektóre z konkretnych obiektów w zasięgu LIGO/Virgo lub



LATA DWUDZIESTE, LATA TRZYDZIESTE

W latach dwudziestych i na początku lat trzydziestych, kiedy święciła tryumfy nowa fizyka, panował ogromny optymizm co do przyszłości – nauki, sztuki, kultury i cywilizacji. Myślano, że Europejczycy i Amerykanie wywołali się raz na zawsze z barbarzyńskich aspektów swej historii – wojen, nacjonalizmów, populizmu, zabobonów i przesądów. Hitlera uważano z początku za nieszkodliwego pajaca. Ale on i jemu podobni potrafili jednak uwieść nie tylko niewykształconego suwerena, lecz także wybitnych intelektualistów. Uwieść chamskim wrzaskiem z pierwszych stron dzienników i odwiecznymi kłamstwami o wstawaniu z kolan, o piędzi, chwale i rubieży, o ojcach, dziadach i sztandarach, o bohaterach i ofiarach. Brr...

Gdyby ktoś twierdził, że ta uwaga jest niestosowna w felietonie dotyczącym kwantowej grawitacji, niech wie, że się myli. *Wir müssen wissen!* W roku 1986 opublikowałem w giedroyciowej *Kulturze* obszerny esej historyczny o „Hitlerowskiej ustawie o szkołach wyższych”, opisując, jak ustawa rządu kanclerza Adolfa Hitlera, „przywracająca niemieckim uczelniom narodowy charakter”, zdruzgotała w ciągu zaledwie kilku lat niemiecką matematykę i fizykę, obie wówczas najlepsze w świecie, kwitnące.



Występowanie w formule Hawkinga jednocześnie stałych c , G , \hbar świadczy o tym, że łączy ona grawitację i kwanty.

EHT są czarnymi dziurami, czy też ich „kwantowymi alternatywami”. To nie jest sprawa odległej przyszłości, to stanie się niebawem. Technologia i know-how istnieją już dzisiaj.

Teorie współczesnej fizyki

Fundamentem, na którym stoi cała współczesna fizyka, są dwie teorie – mechanika kwantowa oraz ogólna teoria względności Alberta Einsteina, czyli teoria grawitacji. Obie powstały w pierwszych dziesięcioleciach XX wieku i zupełnie odmieniły nasze rozumienie rzeczywistości – nasze koncepcje na temat czasu i przestrzeni, determinizmu, a nawet na temat roli świadomości w świecie materii. Jeszcze większą rewolucją, o niewyobrażalnych dziś konsekwencjach dla fizyki, kultury i technologii, będzie przyszła unifikacja obu teorii – sformułowanie kwantowej teorii grawitacji. „Niewyobrażalnych konsekwencji” nie sposób, rzecz jasna, przewidzieć. To mogą być, na przykład, podróże „na skróty” w czasoprzestrzeni, w tym także wehikuly czasu, wykorzystanie energii próżni, makroskopowa teletransportacja...

Rzeczywistość w najmniejszej skali cząstek elementarnych, atomów i molekuł zdominowana jest przez efekty kwantowe, które są ze swej natury probabilistyczne i wynikają z faktu, iż materia nie jest ciągła, lecz składa się z niepodzielnych porcji – kwantów. Teoria grawitacji Alberta Einsteina, czyli ogólna teoria względności, objaśnia rzeczywistość w dużej skali – tam, gdzie dominuje oddziaływanie grawitacyjne, opisywane jako efekt zakrzywienia ciągłej (nieskwantowanej) czasoprzestrzeni. Dotyczy to struktury i ruchu planet, gwiazd, galaktyk i całego Wszechświata, a także budowy skał, domów i maszyn, gdzie ważne są również wiązania chemiczne, opisywane kwantowo przez oddziaływania elektromagnetyczne. Chemia jest głównym językiem biologii, która opisuje wiele aspektów budowy i życia organizmów – w tym organizmu człowieka. W poznanym fizycznym świecie obie teorie opisują wszystko, o czym wiemy, od najmniejszych do największych istniejących obiektów. Ich poprawność jest imponująca – została potwierdzona w ogromnej ilości pomiarów, eksperymentów i obserwacji, a także w działaniu maszyn i urzędzeń.

Sukces nie jest jednak zupełny, ma bowiem zasadniczą skazę – te dwie podstawowe teorie fizyki nie są kompatybilne. Opisują rzeczywistość odrębnie, we właściwych sobie zakresach stosowności, ale gdy próbujemy stosować je naprawdę łącznie, napotykamy podstawowe teoretyczne trudności, których dziś nikt nie potrafi przezwyciężyć. Często obrazują to paradoksalne sprzeczności, niemożliwe dziś do rozwikłania. Mamy nadzieję, że wszystkie te trudności i paradoksy usunie kwantowa teoria grawitacji – jeszcze nieodkryta „teoria wszystkiego”, uogólniająca i łącząca kwanty z grawitacją. Kwantowa grawitacja i teoria wszystkiego to palący nierozwiązany problem, największe wyzwanie współczesnej fizyki.

Próby, nigdy jak dotąd udane, stworzenia teorii wszystkiego są także domeną teoretycznych spekulacji, całkowicie oderwanych od doświadczeń. Dopiero w ostatnich latach otworzyły się możliwości obserwacyjnego testowania przynajmniej niektórych z tych spekulacji. Otóż, choć nie ma jeszcze teorii kwantowej grawitacji, fizycy spekulują, jakie mogłyby być tej teorii przewidywania dotyczące konkretnych zjawisk i obiektów – w tym czarnych dziur. Najsłynniejszym przykładem jest tu promieniowanie Hawkinga. Stephen Hawking założył, iż pewne postulaty zarówno teorii Einsteina, jak i mechaniki kwantowej są tak bardzo fundamentalne, iż będą zapewne obowiązywać także w kwantowej teorii grawitacji. Za takie uznał istnienie horyzontu zdarzeń czarnych dziur oraz zasadę nieoznaczoności Heisenberga. Następnie sprawdził, co z nich obu łącznie wynika. Pokazał (wykonując skomplikowany rachunek, w którym przyjął jeszcze dodatkowe założenia), że czarne dziury nie są całkiem czarne, ale emitują promieniowanie termiczne z temperaturą daną wzorem $T = \hbar c^3 / 8\pi G k M$. Tutaj \hbar jest podstawową w mechanice kwantowej stałą

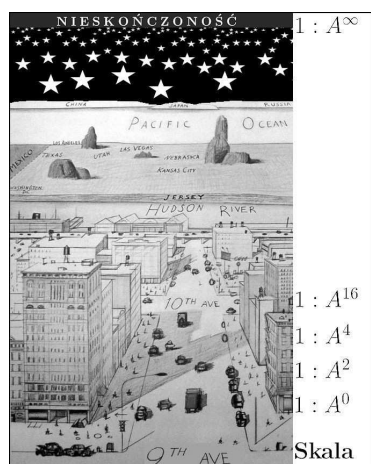
KONFOREMNA KOMPAKTYFIKACJA

To jest ważny temat, ale poboczny w stosunku do głównej myśli tego felietonu. Dlatego objaśniam go tylko na marginesie tej i następnej strony. Konforemna kompaktifikacja jest elegancką metodą, używaną od dawna przez matematyków i artystów. Do teorii Einsteina wprowadził ją Brandon Carter, a upowszechnił Roger Penrose. Pozwala na tworzenie użytecznych i poglądowych map czasoprzestrzeni.

Okladka *New Yorkera* z 29 marca 1976 roku przedstawia słynny rysunek Saula Steinberga „View of the World from 9th Avenue”. Rysunek jest przykładem stosowania konforemnej kompaktifikacji w sztuce. Zasada jest dokładnie taka sama, jak w przypadku diagramów Cartera–Penrose’a, opisanych na stronie następnej.



Rzecz polega na odpowiednim skalowaniu: skala zmniejsza się wraz z odległością od środka mapy, gdzie ma wartość 1 : 1, dążąc w nieskończoności do wartości 1 : ∞ . W ten sposób na skończonej mapie można pokazać nieskończony obszar – to jest właśnie „kompaktifikacja”. Natomiast „konforemność” oznacza, iż deformując odległości, skalowanie nie deformuje kątów (kształtów). Widok z 9-tej Alei aż do nieskończoności pokazany jest na rysunku poniżej.



Plancka, c i G najważniejszymi stałymi teorii Einsteina – to znaczy prędkością światła i stałą grawitacji, k stałą Boltzmanna – podstawową w termodynamice statystycznej, wreszcie M jest masą czarnej dziury.

Promieniowanie Hawkinga

$T = \hbar c^3 / 8\pi G k M$ jest temperaturą nierotującej i elektrycznie nienaładowanej czarnej dziury. Najbardziej ogólne rozwiązanie równań pola Einsteina dopuszcza czarne dziury z momentem pędu J i ładunkiem elektrycznym Q – czarna dziura może mieć tylko te trzy własności (M, J, Q) , jest nimi całkowicie i kompletnie określona. Muszą one spełniać nierówność,

$$(1) \quad M^2 - \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 G} - \left(\frac{Jc}{MG}\right)^2 \geq 0.$$

Przez ϵ_0 oznaczyliśmy przenikalność elektryczną próżni. Często we wzorach zastępuje się moment pędu czarnej dziury J przez jej „spin” zdefiniowany jako $a = J/(Mc)$.

Położenie „zewnątrznego” r_+ i „wewnętrznego” r_- horyzontu zdarzeń dane jest wzorem,

$$(2) \quad r_{\pm} = \frac{G}{c^2} \left[M \pm \sqrt{M^2 - \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 G} - \left(\frac{Jc}{MG}\right)^2} \right].$$

Z tego wzoru wynika, że jeśli nierówność (1) nie jest spełniona, to nie ma rzeczywistych rozwiązań równania (2) – a zatem, nie ma horyzontu, choć jest osobliwość. W tym przypadku mamy do czynienia z „nagą osobliwością”. Graniczny przypadek, to znaczy równość we wzorze (1) definiuje przypadek „maksymalnej czarnej dziury”. Dla takich mamy $r_+ = r_- = GM/c^2$.

Dla rotujących ale nienaładowanych czarnych dziur definiuje się geometryczne wielkości na horyzoncie:

$$\text{grawitacja: } \kappa = \frac{c^2(r_+ - r_-)}{2(r_+^2 + a^2)},$$

$$\text{rotacja: } \Omega = \frac{a}{r_+^2 + a^2},$$

$$\text{powierzchnia horyzontu: } A = 4\pi(r_+^2 + a^2).$$

Zauważmy, że dla maksymalnej czarnej dziury (z $a = M$) mamy $r_+ = r_-$, to znaczy $\kappa = 0$. James Bardeen udowodnił, że żadne oddziaływanie nie może rozkręcić czarnej dziury do maksymalnego stanu $a = M$ w skończonym czasie – zatem κ nie może być zredukowane w skończonym czasie do zera. Do stwierdzenia, że pole horyzontu czarnej dziury nie może maleć, doprowadziły prace Demetrios Christodoulou i kilku innych fizyków. Jacob Bekenstein, jeszcze jako doktorant Johna Archibalda Wheelera w Princeton, zauważył, iż wzór na zmianę energii czarnej dziury,

$$dE = \frac{\kappa}{8\pi} dA + \Omega dJ,$$

jest bardzo podobny do wzoru opisującego drugie prawo termodynamiki,

$$dE = T dS + \Omega dJ.$$

W pierwszym członie po prawej w obu przypadkach różniczka związana jest z wielkością niemającą (entropia S albo pole horyzontu A), natomiast jej mnożnik Lagrange’a jest wielkością nieredukowalną do zera (temperatura T albo grawitacja na horyzoncie κ). Bekenstein znalazł skalowanie $A \rightarrow S$ oraz $\kappa \rightarrow T$,

$$\text{temperatura: } T = \kappa \left(\frac{1}{2\pi c}\right) \left(\frac{\hbar}{k}\right),$$

$$(3) \quad \text{entropia: } S = S_{\text{BH}} = A \left(\frac{c^3}{4G}\right) \left(\frac{\hbar}{k}\right)^{-1} = A \left(\frac{k}{4\ell_P^2}\right),$$

gdzie $\ell_P = \sqrt{G\hbar/c^3} = 10^{-33}$ cm oznacza długość Plancka. Indeks „BH” nie jest skrótem pochodzącym od „black hole”, lecz od „Bekenstein–Hawking”.

DIAGRAMY CARTERA-PENROSE'Ń

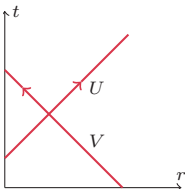
Równanie ruchu sygnałów świetlnych, poruszających się w kierunku od i do centrum na ustalonym promieniu r we współrzędnych sferycznych, można zapisać jako,

$$(4) \quad r = +ct + r_0^+, \quad r = -ct + r_0^-.$$

Stałe r_0^+ oraz r_0^- określają położenie sygnału w chwili $t = 0$, czyli „numerują” poszczególne sygnały. Wprowadzimy oznaczenia $U = r_0^+$ oraz $V = r_0^-$. W jednostkach, w których długość mierzy się w sekundach świetlnych, a czas w sekundach, prędkość światła ma wartość $c = 1$. Równania (4) przyjmują postać,

$$U = r + t, \quad V = r - t.$$

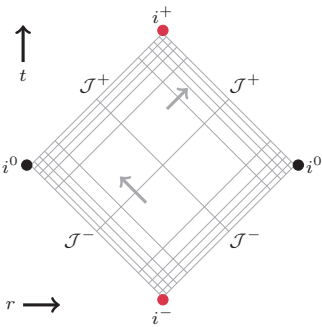
U, V definiują współrzędne „zerowe”, wyznaczone przez trajektorie sygnałów świetlnych w czasoprzestrzeni. Pokazane jest to na rysunku poniżej.



Konformnej kompaktyfikacji dokonuje się za pomocą przekształcenia,

$$u = \text{tg}^{-1} U + \text{tg}^{-1} V, \\ v = \text{tg}^{-1} U - \text{tg}^{-1} V.$$

Teraz całą czasoprzestrzeń bez grawitacji widać na skończonej mapie.



Brzeg tego „diagramu Cartera-Penrose'a” (diagramu CP) stanowią nieskończoności:

i^- czasowa nieskończoność przeszłości. Zaczynają się historie materii i obserwatorów (poruszających się wolniej niż światło).

i^+ czasowa nieskończoność przyszłości. Kończą się historie materii i obserwatorów

J^- zerowa nieskończoność przeszłości. Zaczynają się historie sygnałów świetlnych.

J^+ zerowa nieskończoność przyszłości. Kończą się historie sygnałów świetlnych.

i^0 nieskończoność przestrzenna. Nieosiągalna dla materii, światła i obserwatorów.

To bardzo piękne skalowanie. Zauważmy, że choć każde z osobna – temperatura i entropia czarnej dziury – zależą od stałych \hbar, k , to ich kombinacja TdS_{BH} , równa klasycznej, niekwantowej, czysto geometrycznej wielkości $(\kappa/8\pi)dA$ od tych stałych nie zależy. Wyobraźmy sobie elementarne kwantowe komórki $[2\ell_P \cdot 2\ell_P]$. Na powierzchni horyzontu można je ułożyć na $W = e^{A/4\ell_P^2}$ sposobów. To intuicyjnie wyjaśnia wzór (3) na entropię – można go bowiem zapisać w boltzmannowskiej formie,

$$S_{\text{BH}} = k \log W, \quad \text{gdzie } W = e^{A/4\ell_P^2}.$$

Hawking początkowo był bardzo przeciwny idei Bekensteina. W ważnej pracy „The Four Laws of the Black Hole Mechanics”, napisanej wspólnie z Bardeenem i Carterem w roku 1974, poświęcił cały akapit na argumentację, iż pola powierzchni czarnej dziury NIE można uważać za entropię. Ale przekonał się w końcu do entropii Bekensteina – i wtedy zrozumiał, że czarne dziury rzeczywiście powinny promieniować!

Wykazał istnienie promieniowania za pomocą dość skomplikowanego rachunku w kwantowej teorii pola (różni obserwatorzy wykrywają różne stany próżni), ale wyjaśnił też rzecz poglądowo – jako wynik kwantowej, spontanicznej kreacji wirtualnych par (cząstka+antycząstka). W swym bardzo znanym popularnym artykule w „Scientific American” tak to opisał. Całkowita energia pary jest równa zero, gdyż energia nie może powstać z niczego. Zatem jedna z wirtualnych cząstek ma energię dodatnią, a druga ujemną. Daleko od horyzontu takie pary powstają na czas bardzo krótki, a potem anihilują bez śladu. Niedaleko horyzontu możliwe jest wchłonięcie cząstki o ujemnej energii przez czarną dziurę. Na zewnątrz horyzontu pozostaje zatem cząstka o dodatniej energii, to znaczy kwant promieniowania Hawkinga. Całkowita energia jest zachowana, ponieważ w wyniku absorpcji cząstki o ujemnej energii masa czarnej dziury ulega zmniejszeniu (masa i energia są równoważne, $E = Mc^2$).

Czy promieniowanie Hawkinga jest rzeczywistym efektem, a jego wzór na temperaturę jest poprawną formułą przyszłej kwantowej teorii grawitacji? Wielu fizyków sądzi (bo przecież nikt tego dziś nie może wiedzieć na pewno), że tak jest istotnie. Ale nie wszyscy się z tym zgadzają. Promieniowanie Hawkinga nigdy nie zostało zaobserwowane – ani bezpośrednio, ani poprzez żadne jego pośrednie efekty. Jego temperatura jest odwrotnie proporcjonalna do masy czarnej dziury. Dla najmniejszej „astrofizycznej” czarnej dziury, o masie $\sim 10M_{\odot}$, wynosi ona $T \sim 10^{-7}$ K, czyli mniej niż temperatura kosmicznego promieniowania tła. Astrofizyczne czarne dziury są zimniejsze niż ośrodek, w którym są zanurzone – na pewno więc do tego ośrodka nie promieniują. Mogłyby promieniować czarne dziury o masach mniejszych niż $\sim 10^{25}$ g. Takie czarne dziury zmniejszałyby swoją masę skutkiem promieniowania, stając się coraz gorętsze i promieniując coraz więcej – w końcu kończyłyby życie wybuchem. Czas życia czarnej dziury jest proporcjonalny do sześcianu jej masy, przy czym czarna dziura o masie około 10^{15} g ma czas życia równy obecnemu wiekowi Wszechświata. Takie pierwotne mini-czarne dziury, jeśli powstały niedługo po Wielkim Wybuchu, powinny teraz właśnie kończyć życie w eksplozji, jako punktowe błyski w promieniach gamma. Obserwujemy różnego typu błyski gamma, ale nie takie, które mogłyby pochodzić od takich eksplozji promieniowania Hawkinga. Ale czy pierwotne czarne dziury rzeczywiście powstały we wczesnym Wszechświecie? Tego nikt nie wie. Moim zdaniem najsilniejszym argumentem za ich powstaniem i istnieniem są FRB – silne, krótkie błyski w falach radiowych, dochodzące do nas z najbardziej odległych rejonów Wszechświata. Jedynym spójnym wytłumaczeniem tego zjawiska są, moim zdaniem, zderzenia pierwotnych czarnych dziur z gwiazdami neutronowymi.

Z promieniowaniem Hawkinga mamy także bardzo poważny problem teoretyczny: **paradoks informacyjny czarnych dziur**, przez wielu postrzegany jako nieusuwalna sprzeczność między mechaniką kwantową a ogólną teorią względności. Jest to materiał na odrębny tekst.