

## Skąd wiadomo, że to, co widzimy, jest czarną dziurą?

*Bogusz Kinasiewicz  
Instytut Fizyki UJ*

A black hole is perhaps the most fantastic of all  
conceptions of the human mind.

*Igor Novikov*

### 1. Wprowadzenie

Obecnie, na początku XXI wieku, potrafimy zobaczyć znacznie więcej aniżeli nasi przodkowie kilkadziesiąt lat temu. Zawdzięczamy to głównie dynamicznemu rozwojowi techniki. Przed wynalezieniem teleskopu gwiazdy i inne ciała niebieskie obserwowano gołym okiem. Kiedy stwierdzamy, że coś widzimy, chcemy przez to powiedzieć, że do naszych oczu docierają fale świetlne, wysłane lub odbijane przez obiekty znajdujące się wokół nas. Tak naprawdę dostrzegamy jedynie nikły ułamek tego, co dociera do nas pod postacią fal elektromagnetycznych. Wokół nas są inne fale, z których obecności w ogóle nie zdajemy sobie sprawy. Oko ludzkie jest czułe tylko na wąski zakres widma elektromagnetycznego – zakres optyczny ( $\lambda_{opt} \in (4 \cdot 10^{-7}, 8 \cdot 10^{-7})$  [m]).

Jednak nawet teraz, wyposażeni w najnowsze teleskopy, badające Wszechświat w każdym zakresie widma elektromagnetycznego, z powierzchni Ziemi czy z orbity, ciągle nie widzimy wszystkiego, o czym skądinąd wiemy, że istnieje.

Nikt nie widział czarnej dziury i zapewne nikt jej nie zobaczy. Do niedawna nikt nie posiadał przekonujących obserwacyjnych dowodów na istnienie takich obiektów w przyrodzie, badanych od dawna przy użyciu fizyki teoretycznej.

Pomysł, że mogą istnieć obiekty o tak silnej grawitacji, iż nic nie jest w stanie ich opuścić (nawet światło), nie zrodził się w XX wieku. Pochodzi on od filozofa Johna Michella (1783), jednak o idei tej dość szybko zapomniano. Zainteresowano się nią ponownie, kiedy Albert Einstein (1915) lepiej zrozumiał grawitację, aniżeli uczynił to Izaak Newton (1687).

Dzisiaj dysponujemy już przekonującymi dowodami obserwacyjnymi na istnienie kilkudziesięciu czarnych dziur i mamy dobre podstawy, aby przypuszczać, że jest ich bardzo dużo [1]. Czarne dziury mogą być obserwowane tylko pośrednio. Oddziałują one z otoczeniem za pomocą pola grawitacyjnego. I właśnie obserwując, jak zachowuje się ich otoczenie, staramy się stwierdzić co jest przyczyną tego zachowania. Nim jednak zastanowimy się nad tym, jak „zobaczyć” czarną dziurę, powiedzmy sobie coś więcej o tych obiektach. We Wszechświecie można spotkać dwa rodzaje czarnych dziur:

1. Gwiazdowe czarne dziury, będące końcowym etapem ewolucji masywnej gwiazdy.
2. Gigantyczne czarne dziury<sup>1</sup>, występujące w jądrach galaktyk. Ich masy są miliony razy większe od mas gwiazdowych czarnych dziur. Przypuszcza się, że powstały one na skutek kolapsu grawitacyjnego materii w jądrze galaktyki, gdy ta się formowała.

Warto dodać, że mogą istnieć tzw. mikro czarne dziury (o rozmiarach znacznie mniejszych od rozmiarów jąder atomowych i masach mniejszych niż masa gwiazdy), o ile doprowadzi się do ściśnięcia materii w bardzo małej objętości. Niektórzy sądzą, że gdy akcelerator LHC<sup>2</sup> zostanie uruchomiony, wśród produktów zderzeń cząstek elementarnych pojawią się również mikro czarne dziury.

Powtórzmy, że czarna dziura jest obszarem czasoprzestrzeni, z którego nie można wysłać żadnej informacji (zaniedbujemy tutaj efekty kwantowo-mechaniczne, takie jak promieniowanie Hawkinga) ani cząstki na zewnątrz, do pozostałych obszarów przestrzeni, gdzie wzajemna komunikacja jest na ogół możliwa. Granicę czarnej dziury stanowi tzw. **horyzont zdarzeń**. Możliwość istnienia czarnych dziur w przyrodzie została przewidziana przez Ogólną Teorię Względności.

Pierwsze ściśle rozwiązanie równań tej teorii (równań Einsteina) podał Karl Schwarzschild. Poszukiwał on pola grawitacyjnego statycznego i izotropowego obiektu o dużej masie. Dla nierotującej czarnej dziury o masie  $M$ , promień horyzontu zdarzeń dany jest wzorem otrzymanym właśnie przez Schwarzschilda:

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} = 2,95 (M/M_\odot) \text{ [km]}$$

gdzie  $M_\odot$  – masa Słońca.

## 2. Układy podwójne gwiazd – wyznaczenie masy składników

Wiele gwiazd występuje w układach złożonych z co najmniej dwóch gwiazd<sup>3</sup>. Oddziałują one ze sobą grawitacyjnie i w wyniku tego oddziaływania okrążają się lub, mówiąc bardziej precyzyjnie, poruszają się wokół wspólnego środka masy. Jeżeli znamy ich okresy obrotu i prędkości radialne oraz dodatkowo wiemy, pod jakim kątem są nachylone orbity względem obserwatora, to korzystając z praw Keplera, potrafimy wyznaczyć ich masy. Jednak kiedy w widmie układu spektroskopowo podwójnego występują tylko linie jednego składnika, wówczas możemy wyliczyć tzw. funkcję masy:

<sup>1</sup> Niedawno dwa kosmiczne obserwatoria rentgenowskie (XMM Newton oraz Chandra) zaobserwowały rozerwanie gwiazdy przez czarną dziurę, znajdującą się w centrum galaktyki RXJ1242-11.

<sup>2</sup> LHC (ang. *Large Hadron Collider*) – Wielki Zderzacz Hadronów, znajdujący się w CERN w Genewie.

<sup>3</sup> Szacuje się, że około 60% gwiazd wchodzi w skład układów wielokrotnych [2].

$$f(M) \equiv \frac{\sin^3 i}{(1 + M_2/M_1)^2} M_1 = \frac{P_{orb} K_2^3}{2\pi G} \quad (1)$$

gdzie:  $M_1$  i  $M_2$  – masy składników układu podwójnego,

$P_{orb}$  – okres obrotu drugiego składnika,

$K_2$  – połowa amplitudy zmian prędkości radialnej drugiego składnika,

$i$  – inklinacja, tzn. nachylenie orbity względem obserwatora.

Zauważmy, że jeżeli dodatkowo znamy masę drugiego składnika, wówczas za pomocą funkcji masy potrafimy wyliczyć masę pierwszego składnika. Rozpatrzmy dwa typy układów podwójnych, w których nie występują linie widmowe pierwszego składnika:

1. lekki widzialny towarzysz – ciężki niewidzialny
2. ciężki widzialny towarzysz – lekki niewidzialny

W pierwszym typie układów możemy założyć, że  $M_2 \ll M_1$ . Wtedy z (1):

$$M_1 \sin^3 i = \frac{P_{orb} K_2^3}{2\pi G} = const \quad (2)$$

Dodatkowo przyjmując, że  $i = \frac{\pi}{2}$ , otrzymujemy minimalną wartość masy pierwszego składnika. W drugim typie układów jest trudniej. Widzialny towarzysz jest ciężki, a zatem wyznaczenie jego masy jest obarczone większym błędem, co powoduje większą niedokładność wyznaczenia masy niewidocznego składnika.

### 2.1. Układy przejściowe miękkiego promieniowania X<sup>4</sup>

Wiele doskonałych kandydatów na czarne dziury zostało odkrytych w rentgenowskich układach podwójnych (ang. *X-ray binaries*). Jest to układ złożony z dwóch gwiazd: zwartej obiektu (gwiazda neutronowa, czarna dziura) i normalnej gwiazdy, której materia spada w procesie akrecji (patrz 3.) na zwarty obiekt, powodując świecenie dysku akrecyjnego (uformowanego wokół zwartej obiektu) w zakresie promieniowania X, ultrafiolecie i optycznym.

Bardzo pomocne w „polowaniu” na czarne dziury okazały się klasy obiektów zwane SXT (układy przejściowe miękkiego promieniowania X). W tych układach tempo akrecji zmienia się w czasie. Większość czasu SXT spędzają w stanie charakteryzującym się słabą jasnością  $L_{acc} \approx (10^{-6} \div 10^{-8})L_{Edd}$ .

<sup>4</sup> Angielska nazwa to *Soft X-ray Transient*. W dalszej części artykułu będę używał skrótu SXT.

Jasność Eddingtona – graniczna wartość, przy której ciśnienie promieniowania byłoby w stanie nie dopuścić do akrecji.

$$L_{Edd} = 1,3 \times 10^{38} M/M_{\odot} \left[ \frac{\text{erg}}{\text{s}} \right] \quad \text{gdzie: } M \text{ jest masą zwartego obiektu.}$$

Co jakiś czas układ przechodzi fazę wybuchów, stając się bardzo jasny, osiągając niemalże jasność Eddingtona, po czym wraca do stanu spokojnego po czasie około 7 miesięcy. Obserwacje wskazują, że typowe masy czarnych dziur w SXT wynoszą od  $5 M_{\odot}$  do  $15 M_{\odot}$ .

## 2.2. Czy wyznaczenie masy jest wystarczającym dowodem?

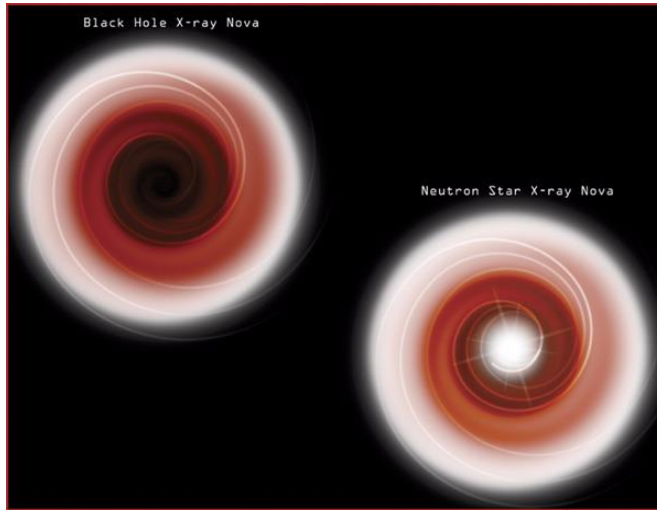
Astronomowie odkryli dużo zwartych obiektów, które są zbyt masywne na to, aby mogły być gwiazdami neutronowymi. *Czy zatem możemy ogłosić zwycięstwo w poszukiwaniu czarnych dziur?* Zdaniem wielu astrofizyków to byłoby przedwczesne!

To prawda, że zwarte objekty o masach  $M > 3 M_{\odot}$  nie mogą być gwiazdami neutronowymi, a zatem powinny być czarnymi dziurami. Niemniej powinniśmy wykonać niezależną obserwację, która by to potwierdziła. Zastanówmy się więc, co jest charakterystyczną cechą czarnych dziur. Jest nią oczywiście horyzont zdarzeń. To właśnie on czyni czarną dziurę takim wyjątkowym obiektem we Wszechświecie. Dlatego powinniśmy wcześniej sprawdzić, czy kandydaci na czarne dziury go mają.

*Jak należy dokonać takiej obserwacji?* W szczególności potrzebujemy zjawiska (lub jego braku), które pozwoliłoby jednoznacznie stwierdzić, że badany obiekt posiada horyzont zdarzeń. Właściwe wydaje się być porównanie dwóch układów podwójnych: jednego z kandydatem na czarną dziurę i drugiego z gwiazdą neutronową (o której wiemy, że ma powierzchnię). Powinniśmy pokazać, że pewne widoczne własności są wyraźnie różne w tych dwóch klasach obiektów i że te różnice są zgodne z poglądem, iż jedna klasa (kandydat na czarną dziurę) ma horyzont zdarzeń, a druga (gwiazda neutronowa) ma powierzchnię. Co więcej, owa różnica własności tych układów podwójnych nie powinna mieć żadnego innego prawdopodobnego wytłumaczenia.

Rentgenowskie układy podwójne są szczególnie dobre do takich badań, w końcu jedne zawierają czarne dziury, a inne – gwiazdy neutronowe. Ramesh Narayan wraz ze swoimi współpracownikami [3], porównując w stanie spokojnym rentgenowskie układy podwójne, jeden z gwiazdą neutronową i drugi z czarną dziurą, pokazał, że „światło” pochodzące z układów zawierających czarne dziury jest słabsze aniżeli z układów zawierających gwiazdy neutronowe (patrz poniższy rysunek, pobrany ze strony internetowej NASA<sup>5</sup>).

<sup>5</sup> <http://imagine.gsfc.nasa.gov>



Ta ogromna różnica jasności części centralnej jest naturalną konsekwencją tego, że kandydaci na czarna dziurę mają horyzont zdarzeń.

### 3. Akrecja gazu na zwarte obiekty

Akrecją nazywa się spadek materii w polu grawitacyjnym. Proces ten nie gwarantuje jednak wypromieniowania części energii. Na przykład akrecja nieoddziałujących cząstek zwiększa tylko masę obiektu centralnego, nie prowadząc w ogóle do promieniowania. W realnych sytuacjach zarówno gwiazda neutronowa, jak i czarna dziura, otoczona jest obłokiem gazu i pyłu. Problem **akrecji gazu** na sferycznie symetryczną gwiazdę w niutonowskiej teorii grawitacji badał Hermann Bondi (1952). Rozpatrywał on proces adiabaticznej akrecji gazu spełniającego równanie stanu:  $p = K\rho^\gamma$ . Następnie rozważania te zostały uogólnione na przypadek relatywistyczny. Jednak sferycznie symetryczny proces akrecji nie zapewnia wystarczającej efektywności zamiany energii spoczynkowej na energię promienistą. Uwzględnienie postępowego ruchu obłoku gazu względem centrum nie wpływa istotnie na zmianę sytuacji. Jeżeli prędkość ruchu gwiazdy neutronowej lub czarnej dziury będzie większa od prędkości dźwięku w gazie, przed gwiazdą może powstać fala uderzeniowa. Będzie to słaba fala uderzeniowa i efektywność zamiany energii kinetycznej cząstek na promieniowanie będzie bardzo niska [2]. Trzeba było opracować inny model akrecji, zapewniający znacznie większą efektywność. Zwrócono wówczas uwagę na układy podwójne. W takim układzie materia przenikająca przez punkt Lagrange'a będzie wychwytywana przez czarną dziurę. Proces akrecji przebiega teraz inaczej niż w przypadku sferycznie syme-

trycznym. Spadająca materia ma różny od zera moment pędu. Utworzy ona dysk, w wyniku procesów dysypacyjnych utraci stopniowo moment pędu i będzie przybliżać się do powierzchni horyzontu, ulegając w końcu wychwytowi przez czarną dziurę.

Punkt Lagrange'a – punkt, w którym siła przyciągania jednego ciała dokładnie równoważy siłę przyciągania drugiego.

W przypadku gwiazdy neutronowej spadająca materia będzie gromadziła się na powierzchni gwiazdy, stając się coraz gorętsza i gęstsza. Umożliwi to zajście reakcji termojądrowych, co obserwujemy w postaci charakterystycznych rozbłysków w zakresie promieniowania rentgenowskiego.

#### 4. Błyski promieniowania X (*X-ray bursts*)

Błyski promieniowania X, pochodzące z podwójnych układów rentgenowskich, zostały po raz pierwszy zaobserwowane przez Jonathana Grindlaya (1976) i natychmiast skojarzone z termojądrowymi wybuchami na powierzchni gwiazdy neutronowej. Te wybuchy znane są jako błyski I typu (dla odróżnienia ich od błysków II typu, które nie mają pochodzenia termojądrowego). W błyskach I typu jasność gwiazd neutronowych wzrasta, osiągając prawie granicę Eddingtona. Różnica czasu pomiędzy dwoma błyskami zwykle wynosi od kilku godzin do 1–2 dni. Są one bardzo powszechne i były obserwowane w wielu układach podwójnych, zawierających gwiazdę neutronową. Niemniej warto zauważyć, że u żadnego z kandydatów na czarną dziurę w rentgenowskich układach podwójnych nie zaobserwowano błysków. W pewnym sensie jest to oczywiste. Błyski I typu wymagają posiadania powierzchni, na której materia byłaby kompresowana i podgrzewana do czasu wywołania syntezy termojądrowej. Czarna dziura nie ma powierzchni w sensie materialnym. Gdy materia spada na nią, przechodzi przez horyzont zdarzeń i znika dla zewnętrznego obserwatora<sup>6</sup>. Dlatego czarna dziura nie może przejawiać błysków I typu. Czy zatem jeżeli obiekt nie przejawia błysków I typu, to jest to dowód na to, że posiada horyzont zdarzeń? Otóż nie!

Obiekt emitujący błyski I typu posiada powierzchnię, a zatem nie może być czarną dziurą. To stwierdzenie nie podlega dyskusji. Jednak obiekt nieemitujący

---

<sup>6</sup> Tak naprawdę ściśle rozwiązania pokazują, że zewnętrzny obserwator, znajdujący się w nieskończoności (tzn. tam, gdzie pole grawitacyjne czarnej dziury znika), nigdy nie zaobserwuje, że materia przeszła przez horyzont zdarzeń. Dlatego, że niosąca tę informację fala elektromagnetyczna dotrze do obserwatora po nieskończone długim czasie, a to w praktyce oznacza, że nigdy. Jednak w rzeczywistości obserwator znajduje się w skończonej odległości od czarnej dziury i materia przenikająca horyzont zdarzeń zniknie z jego pola widzenia.

błysków I typu niekoniecznie nie posiada powierzchni, więc niekoniecznie jest czarną dziurą. Nie obserwujemy na przykład pulsarów, mimo iż te obiekty mają powierzchnię.

### 5. Dlaczego kandydaci na czarną dziurę nie emitują błysków I typu?

Zastanówmy się [3] nad tym, co innego oprócz istnienia horyzontu zdarzeń, mogłoby powodować brak błysków.

1. *Czy szybka rotacja może w jakiś sposób wyeliminować powstawanie błysków?* Rotacja wpływa na zróżnicowanie przyspieszenia grawitacyjnego  $g$  w zależności od szerokości geograficznej. Nawet najszybciej obracający się zwarty obiekt może powodować wzrost  $g$  o czynnik 2 pomiędzy równikiem a biegunami. Taka skromna różnica nie wpływa poważnie na proces wybuchów.
2. *Czy kandydaci na czarną dziurę generują silne pole magnetyczne i tym samym unikają błysków?* Wówczas powinniśmy obserwować strumień promieniowania X modulowanego przez okres obrotu gwiazdy, za które odpowiedzialne jest pole magnetyczne (to zjawisko jest obserwowane w przypadku pulsarów rentgenowskich (ang. *X-ray pulsars*)). Zatem gdyby kandydaci na czarne dziury wytwarzali silne pole magnetyczne, powinni wykazywać pulsacje promieniowania rentgenowskiego. Nic takiego nie zostało dotychczas zaobserwowane u badanych kandydatów na czarne dziury.

#### 5.1. Science fiction: „egzotyczne gwiazdy”

Konwencjonalna fizyka mówi nam, że czarne dziury nie mogą być normalnymi zwartymi obiektami, takimi jak białe karły czy gwiazdy neutronowe. Dlatego rozsądne wydaje się przypuszczenie, że jeżeli obiekty, które uważamy za kandydatów na czarne dziury, nimi nie są, muszą być jakimiś egzotycznymi gwiazdami. Czy mogą być egzotyczne w taki sposób, aby tłumić błyski I typu, kiedy spada na nie gaz w procesie akrecji? Wnętrze gwiazdy neutronowej nie jest dobrze poznane.

*Czy kandydaci na czarne dziury mają jądra zbudowane z jakiejś egzotycznej materii, która powoduje tłumienie błysków?* Nie, ponieważ błyski I typu są zjawiskiem związanym z powierzchnią gwiazdy (o gęstości  $10^6 \text{ g cm}^{-3}$ ). Niezwykła materia, która jest tu przywoływana jako wypełnienie wnętrza gwiazdy neutronowej, pojawia się przy wysokim ciśnieniu, kiedy to gęstości są większe od gęstości materii jądrowej ( $> 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$ ). Takie zmiany wnętrza nie mają wpływu na błyski zachodzące na powierzchni.

*Czy istnieje jakaś forma egzotycznej materii, która natychmiastowo zmienia spadającą materię barionową w egzotyczną materię, nawet w gęstościach  $< 10^6 \text{ g cm}^{-3}$ ?* Jeżeli gwiazda byłaby zbudowana z takiego materiału, wtedy mogłoby nie docho-

dzić do emisji błysków, nie byłoby na powierzchni gwiazdy jąder, a to uniemożliwiałyby zajście reakcji termojądrowych. Tymczasem jednak żadna taka substancja nie jest znana!

Na koniec możemy pokusić się o przypuszczenie, że niektórzy kandydaci na czarną dziurę mogą się składać z pewnego rodzaju ciemnej materii, która nie oddziałuje ze zwykłą (znaną nam) materią inaczej niż grawitacyjnie (tak jak ciemna materia we Wszechświecie). Wtedy taki zwarty obiekt byłby całkowicie przepuszczalny dla zwykłej materii. Gaz spadałby swobodnie przez ciemną materię, gromadząc się w centrum. Czy takie obiekty miałyby zdolność do produkowania błysków I typu? To należałoby sprawdzić!

### 5.1.1. Niedośzłe czarne dziury (Gravastary)

W 2001 roku Emil Mottola i Paweł Mazur zaproponowali model obiektów zbudowanych z bardzo gęstej i sztywnej materii. Czasoprzestrzeń na zewnątrz tych obiektów jest rozwiązaniem Schwarzschilda, z kolei jej wnętrze wypełnione jest materią spełniającą równanie stanu  $p = -\rho$  (faza de Sittera). Ich sztywna powierzchnia jest ulokowana trochę powyżej promienia Schwarzschilda:

$$R_* = R_S + 2\lambda_p$$

gdzie  $\lambda_p$  jest długością Plancka.

Długość Plancka – stała o wymiarze długości, będąca kombinacją uniwersalnych stałych fizycznych:  $\lambda_p = 1,6 \times 10^{-33}$  cm

To sprawia, że gravastary nie mają horyzontu ani osobliwości, a więc cech charakteryzujących czarne dziury. Niemniej nie ma obserwacyjnego sposobu rozróżnienia ich od czarnych dziur. Przyszłość pokaże, czy te egzotyczne obiekty istnieją w naszym Wszechświecie.

## 6. Fale grawitacyjne

*Czy istnieją zjawiska pozwalające na jednoznaczną identyfikację czarnych dziur?* Klasycznie czarna dziura nie promieniuje i oddziałuje z otaczającą ją materią tylko przez pole grawitacyjne. Zatem naturalne wydaje się poszukiwanie fal grawitacyjnych w przyrodzie [4]. Okazuje się, że czarne dziury mają zdolność do produkcji uniwersalnych sygnałów. Fala grawitacyjna, padająca na czarną dziurę bądź emitowana z pobliża jej horyzontu, zostanie „przetrawiona” i odległy obserwator może zauważyć pojawienie się charakterystycznych drgań kwazinormalnych. Okres tych drgań i współczynnik tłumienia zależą tylko od globalnych charakterystyk czarnej dziury (masy, ładunku elektrycznego i krętu). Zatem pojawianie się modów kwazinormalnych pozwala na jednoznaczną identyfikację czar-



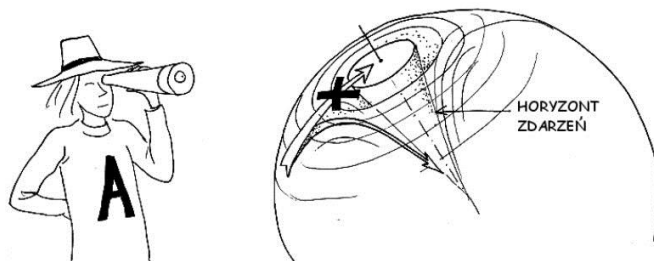
nych dziur, jednak dla niedoszłych czarnych dziur ten efekt będzie równie silny. Dlatego właśnie obserwator nie będzie w stanie rozstrzygnąć, czy „widzi” czarną dziurę, czy jej niedoszłą „siostrę”.

## 7. Podsumowanie

Brak błysków I typu dla kandydatów na czarne dziury w SXT jest istotną wskazówką przy badaniu natury zwartych obiektów. Jeśli obiekt posiada powierzchnię, to powinien przejawiać szeroką aktywność wybuchową. Dlaczego jej nie widzimy u kandydatów na czarne dziury? Najbardziej rozsądnym wytłumaczeniem [3] wydaje się brak powierzchni materialnej (istnienie horyzontu zdarzeń), a to, jak wiemy, jest cechą charakterystyczną czarnych dziur. Detekcja fal grawitacyjnych powinna jednoznacznie rozstrzygnąć problem, czy kandydaci na czarne dziury są nimi rzeczywiście.

## Bibliografia

- [1] K. Ferguson, *Czarne dziury, czyli uwięzione światło*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1999
- [2] M. Demiański, *Astrofizyka relatywistyczna*, PWN, Warszawa 1978
- [3] R. Narayan, *Evidence for the black hole event horizon*, 2003 (astro-ph/0310692) i znajdujące się tam referencje
- [4] J. Stasielak, „Fale grawitacyjne i ich detekcja”, *Foton 77*, lato 2002, str. 58



Rysunek z polecanego, doskonałego, francuskiego komiksu o czarnych dziurach (istnieją wersje anglo- i niemieckojęzyczne) Jean-Pierre’a Petita, *Les aventures d’Anselme Lanturlu: La trou noir*, Editions Belin, 1980-1. (*Przygody ciekawskiego Anzelma: czarna dziura*).