

Przełomowe odkrycia i koncepcje po II wojnie światowej

Ogólna Teoria Względności i Czarne Dziury

JEAN-PIERRE LASOTA I ANDRZEJ TRAUTMAN

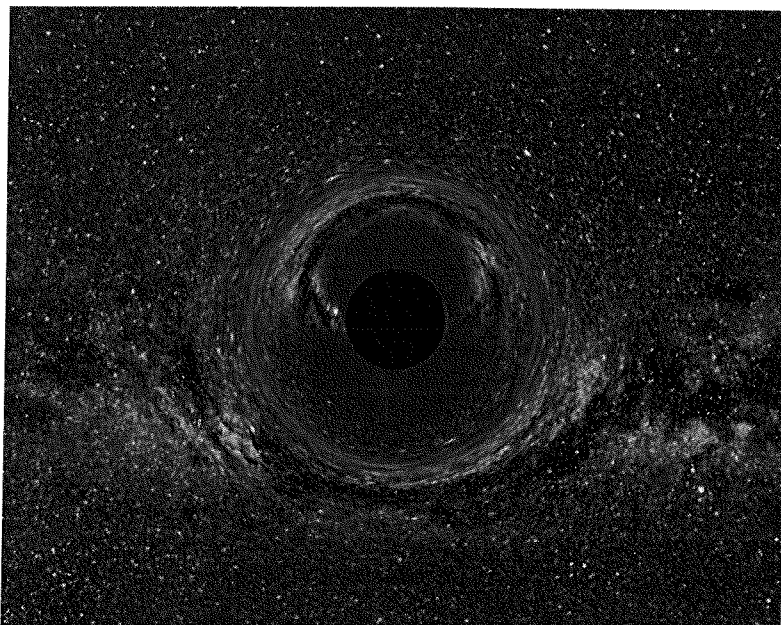
Szczególna Teoria Względności sformułowana przez Alberta Einsteina w 1905 r. połączyła opis zjawisk mechanicznych i elektromagnetycznych. Rozszerzenie tej teorii na grawitację doprowadziło do powstania (Einstein 1915) Ogólnej Teorii Względności (OTW), opartej na „zakrzywionej” czasoprzestrzeni (geometria Riemanna), dostosowanej do opisu zjawisk zachodzących w silnych polach grawitacyjnych i przy dużych prędkościach ciał.

Początkowo OTW została potwierdzona w niewielu i niezbyt precyzyjnych obserwacjach; najważniejszym osiągnięciem było wyjaśnienie anomalnej – tzn. nie dającej się otrzymać z teorii Newtona – składowej ruchu peryhelionowego Merkurego, wynoszącej zaledwie 42 sekundy kątowne na stulecie! OTW budziła zainteresowanie i podziw ze względu na swoje piękno i fundamentalny charakter, ale przez długi czas była na uboczu głównego nurtu fizyki i rozwijała się wyłącznie dzięki pracom teoretycznym. W Polsce, w międzywojennym dwudziestoleciu, takie prace prowadzili Leopold Infeld, Jan Weyssenhoff i Myron Mathisson. Po II wojnie światowej powstało w USA i Europie kilka aktywnych ośrodków badań w dziedzinie OTW i rozpoczęto organizację, odbywających się co trzy lata, międzynarodowych konferencji poświęconych tej teorii. Jedną z pierwszych odbyła się w Polsce (Jabłonna 1962). Największe zainteresowanie budziły wtedy zagadnienia promieniowania grawitacyjnego, kosmologii oraz związków między grawitacją i zjawiskami kwantowymi. Odkrycie w 1965 r. mikrofalowego promieniowania tła potwierdziło *Wielki Wybuch* przewidywany przez relatywistyczną kosmologię Aleksandra A. Friedmanna (1922) i Georges Lemaitre'a (1927)¹. Ale dopiero prace teoretyczne nad czarnymi dziurami, a później ich obserwacje, wprowadziły OTW do głównego nurtu fizyki i przyczyniły się do powstania astrofizyki relatywistycznej.

Nazwa „czarna dziura” pojawiła się dopiero w 1967 r.: John A. Wheeler spopularyzował tę nazwę, zaproponowaną przez anonimowego słuchacza na jego wykładzie. Ale samą ideę czarnych dziur rozważano już w XVIII wieku, opierając się wyłącznie na teorii Newtona. John Mitchell i Pierre Simon de Laplace zwrócili uwagę na to, że według newtonowskiego prawa zachowania energii, aby cząstka mogła dowolnie daleko oddalić się od ciała o masie M i promieniu r , powinna poruszać się z prędkością o kwadracie większym niż $2GM/r$, gdzie G jest stałą grawitacyjną. Wynika stąd, że światło o prędkości c nie może opuścić ciała, którego promień jest mniejszy od jego promienia grawitacyjnego $R=2GM/c^2$. Dla „zwykłych” ciał promień grawitacyjny jest znacznie mniejszy od jego wymiarów; np. dla Słońca R wynosi około 3 kilometrów.

W 1915 r. Karl Schwarzschild, zajęty na froncie wschodnim artyleryjskimi rachunkami balistycznymi, znalazł pierwsze ścisłe rozwiązanie równań Einsteina. Jak się później okazało, opisuje ono sferyczną czarną dziurę. Początkowo, rozwiązanie Schwarzschilda potraktowano nieufnie. Niepokój budziła powierzchnia o promieniu $R=2GM/c^2$: wysyłane z niej światło, obserwowane przez odległego obserwatora, miałyby nieskończone przesunięcie ku czerwieni. Einstein uważał, że taka „osobliwość” nie ma sensu fizycznego i w 1939 r. opublikował pracę poświęconą niemożliwości jej powstania w rzeczywistym świecie. Jednakże w tym samym roku, Robert Oppenheimer i Hartland Snyder wykazali, że kurcząca się kula pyłu zapada się do wnętrza powierzchni o promieniu R , choć nie może to być dostrzeżone przez odległego obserwatora. Był to pierwszy opis powstawania czarnej dziury.

(dokończenie – str. 3)



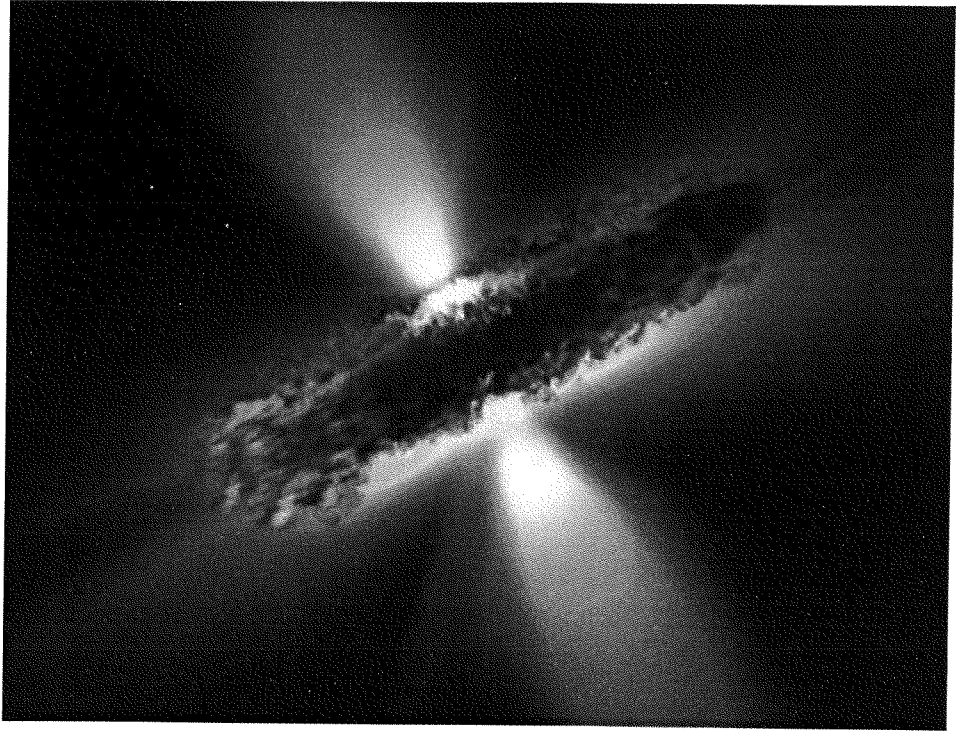
Komputerowa symulacja widoku z odległości 600 km czarnej dziury przed Drogą Mleczną. Masa takiej mikro-czarnej-dziury wynosi 10 mas słonecznych M_{\odot} . Przyspieszenie $4 \times 10^8 g$ jest niezbędne do stałego utrzymywania tej odległości. (NASA)

Ogólna Teoria Względności i Czarne Dziury

(dokończenie ze str. 2)

Komputerowy model grubego torusa z pyłu kosmicznego, jaki otacza super-masywne czarne dziury i ich dyski akrecyjne. Torus, widziany z boku, blokuje większość światła emitowanego przez dysk akrecyjny. Promienie X i gamma mogą przebić się przez torus, stąd obserwatoria satelitarne (np. INTEGRAL) mogą zlokalizować czarne dziury.

ESA / V. Beckmann (NASA-GSFC)



Wynik ten długo nie wzbudzał większego zainteresowania i dopiero odkrycia lat 1960. radykalnie zmieniły to nastawienie. W 1963 r. Roy P. Kerr znalazł uogólnienie metryki Schwarzschilda, uwzględniające rotację, a Maarten Schmidt odkrył kwazary (*quasars*). Już w roku następnym, niezależnie od siebie, Edwin Salpeter i Jakow B. Zeldowicz wysunęli hipotezę, że źródłem energii kwazarów jest akrecja materii na obiekty o bardzo dużej masie i małych rozmiarach. Pierwsze Teksaskie Sympozjum na temat Astrofizyki Relatywistycznej, poświęcone „Quasi-gwiazdowym obiektom i zapadaniu się grawitacyjnemu”, które odbyło się w grudniu 1963, można uznać za wprowadzenie czarnych dziur – wówczas jeszcze tak nie nazywanych – do głównego nurtu badań.

W 1969 r. Donald Lynden-Bell zauważył, że większość jąder galaktyk powinna zawierać super-masywne czarne dziury. Hipoteza ta została potwierdzona przez obserwacje prowadzone w ciągu następnych 40 lat; najlepiej zbadana super-masywna czarna dziura znajduje się w centrum naszej Galaktyki; ma ona masę rzędu miliona mas Słońca M_{\odot} . Odkryta w ostatnich latach uniwersalna zależność między masą centralnej czarnej dziury a dyspersją prędkości gwiazd w galaktyce nie została jeszcze wyjaśniona, ale zapewne jest odbiciem ewolucji struktur we Wszechświecie. Z drugiej strony, dzięki obserwacjom podwójnych układów rentgenowskich, odkryto dziesiątki czarnych dziur o masach gwiazdowych. Powstają one w wyniku zapadania się jąder gwiazd o masach przynajmniej kilkakrotnie większych od masy Słońca – gwiazd, które wypaliły całe dostępne paliwo jądrowe. W wyniku zapadania się gwiazd o mniejszych masach powstają gwiazdy neutronowe i białe karły.

Powierzchnia czarnej dziury – horyzont zdarzeń – ukrywa przed zewnętrznym obserwatorem osobliwość, w której wielkości fizyczne (w tym siły pływowe) stają się nieskończone. Roger Penrose wysunął hipotezę „kosmicznego cenzora”, zgodnie z którą wszystkie tego typu osobliwości we Wszechświecie są okryte horyzontem.

Przewidywanie przez teorię klasyczną powstawania osobliwości interpretuje się zwykle jako znak, że trzeba tu uwzględnić zjawiska kwantowe, co stymuluje próby zbudowania kwantowej teorii grawitacji. W latach 1968–1975 pokazano, że stacjonarna czarna dziura jest całkowicie scharakteryzowana przez swoją masę, moment pędu i ładunek elektryczny. Gdy okazało się, że prawo rządzące zmianą powierzchni czarnej dziury ma postać podobną do pierwszego prawa termodynamiki, Jacob Bekenstein zaproponował w 1973 r., by pole powierzchni czarnej dziury zinterpretować jako jej entropię. Niedługo potem, Stephen Hawking, posługując się kwantową teorią pola, pokazał, że czarna dziura zachowuje się jak ciało doskonale promieniujące o temperaturze

$$hc^3/16\pi^2 kGM$$

czyli około $10^{-7}(M_{\odot}/M)$ stopni Kelvina (h i k – odpowiednio – stałe Plancka i Boltzmana).

Promieniowanie termiczne czarnej dziury nie przeczy własnościom horyzontu: wypromieniowywane cząstki powstają, na skutek zjawisk kwantowych, w silnym (klasycznym) polu grawitacyjnym w pobliżu horyzontu, ale na zewnątrz czarnej dziury. Ale tego promieniowania nie zaobserwowano: jego temperatura dla znanych czarnych dziur jest niesłychanie niska. Źródłem informacji o czarnych dziurach jest promieniowanie wysyłane przez cząstki poruszające się w dysku akrecyjnym i spadające na czarną dziurę.

Istotną rolę w opracowaniu teorii tych zjawisk odegrał Bohdan Paczyński (1940–2007) i jego współpracownicy.

JEAN-PIERRE LASOTA
ANDRZEJ TRAUTMAN

Kraków–Warszawa
czerwiec 2010

¹ zob. artykuł Wojciecha Dziembowskiego (PAUza 71, 4 marca 2010).