

O znaczeniu 1/400 średnicy protonu

Cząstki subatomowe, takie jak elektrony, neutrony i protony, są rozmytymi obiektami, których pozorna wielkość zależy do tego, jak próbujemy je zmierzyć. Niemniej jednak w przypadku protonów dość wygodnym oszacowaniem średnicy jest 1,6–1,8 femtometrów, czyli około 1600–1800 attometrów. Wspomniane wcześniej ruchy zwierciadeł w detektorach fal grawitacyjnych wynoszące cztery attometry stanowią więc około 1/400 średnicy protonu. To niezbyt wiele, jak można by pomyśleć, aby mogło być zapamiętane i celebrowane przez następne stulecia.

Jednak detektory fal grawitacyjnych wzmacniają te ruchy, wielokrotnie odbijając promienie świetlne między zwierciadłami. Zwierciadła działają parami, oddzielone w tych pierwszych detektorach o około 4 km, ale wiązki światła, po odbiciu między zwierciadłami około 280 razy, przebywają około 1100 km. Ruchy zwierciadeł są więc wzmacniane 280-krotnie – do około 1100 attometrów, czyli około 70% wielkości protonu. Proste, jeśli ktoś jest fizykiem subatomowym, ale 70% protonu to nadal bardzo niewiele według naszych codziennych standardów. Gdzie więc leży tego znaczenie?

Odpowiedź jest taka, że te minimalne zmiany w obrębie dwóch instrumentów na Ziemi pochodzą ze zdarzenia, które przez ułamek sekundy wytworzyło pięć razy więcej energii niż cała reszta Wszechświata razem wzięta (a ta cała reszta Wszechświata sprowadza się do około 10^{23} gwiazd jak nasze Słońce lub do 3×10^{28} planet takich jak nasza Ziemia), a niektóre szacunki sugerują, że Wszechświat może mieć nawet około 20 razy większą masę.

Powodem, dla którego tak zadziwiająco ogromna przyczyna wytworzyła tak zadziwiająco mały efekt na Ziemi, jest po prostu odległość.

Zdarzenie, które wytworzyło na Ziemi sygnał **{10}** GW150914, miało miejsce około 430 megaparseków od nas. A 430 megaparseków to około $1,4 \times 10^9$ lat świetlnych, czyli inaczej $1,3 \times 10^{25}$ m, więc zdarzenie to w istocie miało miejsce około $1,4 \times 10^9$ lat temu.

A zatem sygnał fali grawitacyjnej, który stał się **{10}** GW150914, podróżował do nas w przestrzeni – i oczywiście w innych kierunkach też – od początku ery mezoproterozoiku, gdy jednokomórkowe organizmy o wielkości 0,1 mm, zwane eukariontami, ewoluowały na Ziemi. Sygnał przebył około 2/3 drogi w naszym kierunku, gdy trylobity pływały w ziemskich morzach, ale nadal miał do przebycia jeszcze 5% trasy, gdy tyranozaurowi zjadały się stekami z ankylozaurów na terenach, które są dziś północnym Meksykiem i zachodnią częścią USA i Kanady.

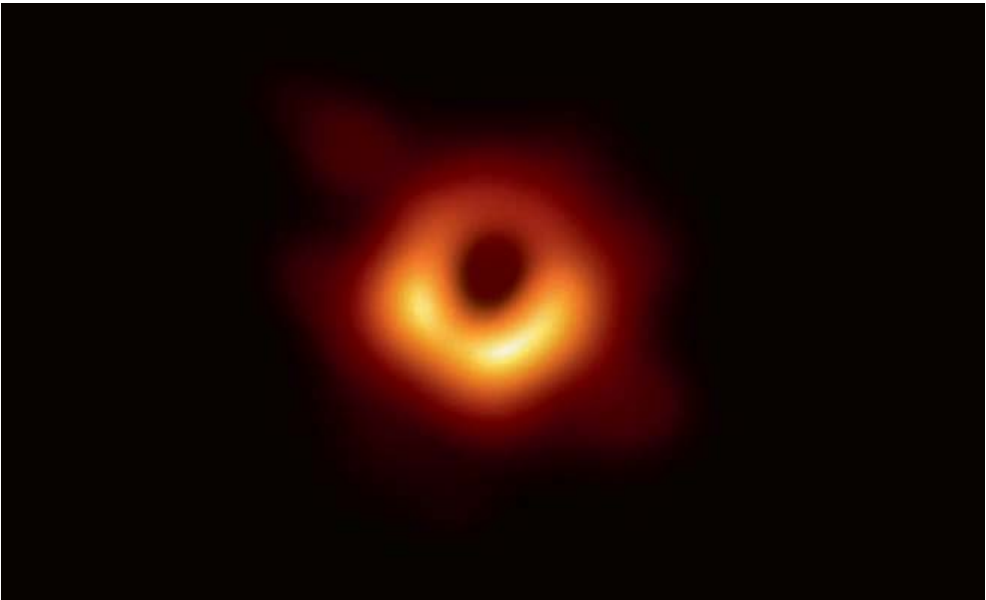
Ta ogromna ilość energii ze zwykłego zdarzenia **{10}** GW150914 jest dziś rozłożona na kuli o równie niewyobrażalnej powierzchni 2×10^{18} parseków kwadratowych czyli 2×10^{51} metrów kwadratowych – a jej natężenie jest więc teraz odpowiednio nieskończenie małe.

Co było przyczyną **{10}** GW150914?

Pierwsza osoba, która mogła odpowiedzieć na pytanie postawione w tytule tego punktu, zaczerpnęła pierwszy oddech w Boże Narodzenie 1724 roku. Wielobny John Michell urodził się

trzy lata przed śmiercią Izaaka Newtona w przybliżeniu 46 km na północ od Woolsthorpe-by-Colsterworth, miejsca urodzenia Newtona. Pięćdziesiąt dziewięć lat później Michell zaczął zastanawiać się nad gwiazdami o średnicy 500 razy większej od Słońca – czyli o masach około $10^8 M_{\odot}^*$ – i doszedł do wniosku, że prędkość ucieczki do nich byłaby równa prędkości światła. Nazwał te obiekty „ciemnymi gwiazdami”, gdyż nie jesteśmy w stanie zobaczyć ich światła. Teraz nazywamy je czarnymi dziurami.

Dwieście trzydzieści siedem lat później nadal nikt nie widział czarnej dziury, gdyż są one w końcu czarne. Nawet tak bardzo nagłośniony w 2019 roku „obraz czarnej dziury M87” (rys. 1.3) był w istocie obrazem cienia czarnej dziury.



Rysunek 1.3. | Cień supermasywnej czarnej dziury w środku dużej galaktyki eliptycznej M87 w gwiazdozbiórze Panny [reprodukcja za zgodą EHT Collaboration], <https://www.science.org/content/article/images-black-hole-reveal-how-cosmic-beasts-change-over-time>

Nasze współczesne rozumienie czarnych dziur nie różni się wiele od tego, co uważał Michell – weźmy Słońce, ściśnijmy je w kulę o promieniu 3 km – i mamy obiekt, którego prędkość ucieczki równa się prędkości światła.

Ten 3-kilometrowy promień nazywany jest promieniem Schwarzschilda dla Słońca – a inne masy stają się czarnymi dziurami, gdy ich rozmiary osiągną promień Schwarzschilda. Związek opiera się na prostej proporcjonalności, więc ciało mające 10 mas Słońca ($10 M_{\odot}$) ma promień Schwarzschilda 30 km, a ciało o masie $0,1 M_{\odot}$ ma promień Schwarzschilda 0,3 km itd. Promień Schwarzschilda Ziemi wynosi 9 mm, a typowy człowiek musiałby zostać ściśnięty do około 0,0000001 attometrów, aby osiągnąć stan czarnej dziury, jednak byłoby

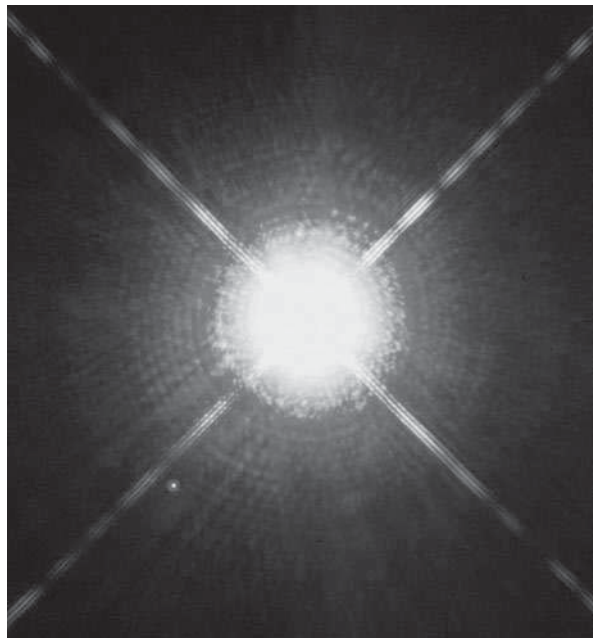
* M_{\odot} – masa Słońca (przyp. red.).

to bardzo ulotne – w ciągu około 10^{-11} sekundy wyparowalibyśmy w postaci promieni γ poprzez promieniowanie Hawkinga (dodatek ☆☆ B3) lub w nawet krótszym czasie ($\sim 10^{-34}$ sekundy) zniknęlibyśmy w naszej własnej osobliwości, osiągając jeszcze większy rozgłos.

Jednak istnienie czarnych dziur we Wszechświecie jest dobrze zbadane, choć czekamy jeszcze na to, aby zobaczyć je bezpośrednio (patrz ramka ☆☆4.3). Dowód na ich istnienie opiera się na stabilności obiektów o masach zbliżonych do masy Słońca lub większych. Podczas gdy takie obiekty nadal wytwarzają energię w wyniku syntezy jądrowej, są bardzo gorące, lecz składają się z mniej więcej zwyczajnych gazów, w których normalne ciśnienie gazu równoważy grawitację.

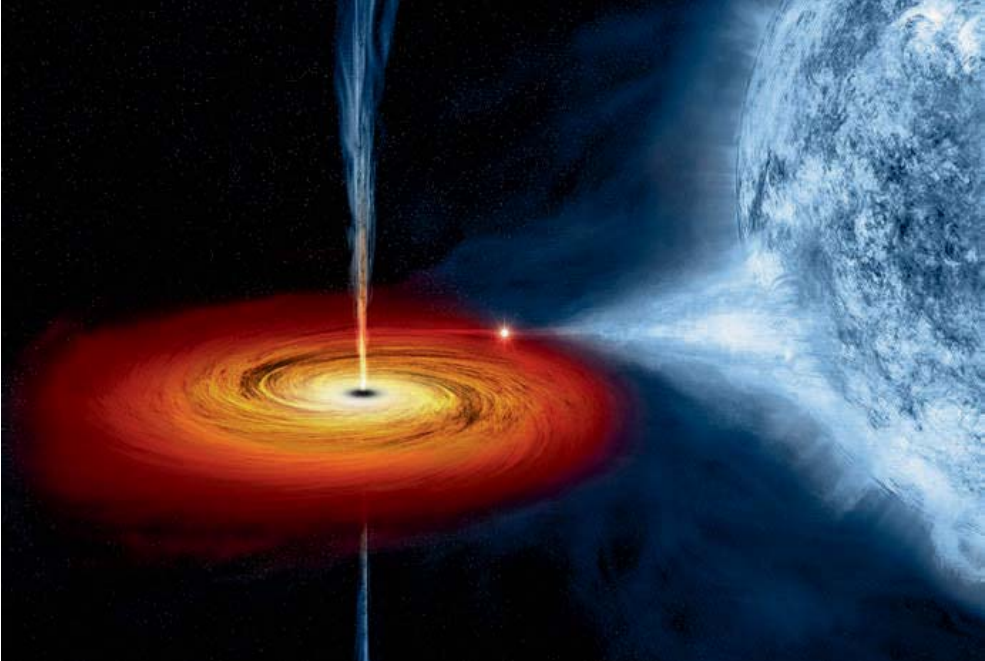
Gdy reakcje termojądrowe dobiegają końca, zwykłe ciśnienie gazu nie wystarcza już do zrównoważenia grawitacji i gwiazdy zaczynają się zapadać. Istnieją jednak jeszcze dwa istotne źródła ciśnienia – to związane z elektronami i to związane z neutronami, a ponadto światło czy bardziej ogólnie promieniowanie elektromagnetyczne także wywiera ciśnienie (dodatek ☆☆☆ C.1).

Tak więc w przypadku gwiazd, których masy są mniejsze niż około 1,4 masy Słońca, ciśnienie elektronów może zatrzymać zapadanie się i gwiazda staje się białym karłem (rys. 1.4). Gwiazdy o masach między 1,4 a 2,2 M_{\odot} będą się zapadać poza stan białego karła i staną się



Rysunek 1.4. | Obraz HST Syriusza (α Cma). Syriusz jest układem podwójnym z gwiazdą ciągu głównego (Syriusz A) o masie $2 M_{\odot}$ i białym karłem (Syriusz B) o masie $1 M_{\odot}$ na wspólnych orbitach. Syriusz A znajduje się w środku obrazu i jest znacznie prześwietlony. Linie ukośne to piki dyfrakcyjne powstające na wspornikach zwierciadeł wtórnych. Syriusz B jest znacznie mniejszą kropką na dole po lewej, ale sama gwiazda ma średnicę około dziesięciotysięcznej części tej kropki w skali tego zdjęcia, w rzeczywistości zaś około 11 000 km. Ma więc masę około 300 tys. mas Ziemi, ściśniętą w objętości nieco mniejszej niż Ziemia [reprodukcja za zgodą NASA, ESA, H. Bond (STScI) i M. Barstow (University of Leicester)]

gwiazdami neutronowymi. Jednak nie ma więcej stanów stabilnych – każdy ściśnięty obiekt o masie powyżej $2,2 M_{\odot}$ albo musi stać się czarną dziurą, albo być na pewnym etapie procesu zapadania się w czarną dziurę. Silne źródło promieni rentgenowskich, Cyg X-1, jest na przykład układem podwójnym złożonym z gorącej gwiazdy supergiganta oraz zwarteo obiektu jako jej towarzysza (rys. 1.5). Masy obu elementów wynoszą $20\text{--}30 M_{\odot}$ dla supergiganta i około $15 M_{\odot}$ dla zwarteo obiektu. Obiekt zwarty Cyg X-1 jest więc z pewnością czarną dziurą.



Rysunek 1.5. | Impresja artystyczna układu podwójnego gwiazdy Cyg X-1 z czarną dziurą. Część widocznej gwiazdy (HD 226868, 9^m , typ O) jest pokazana po prawej stronie obrazu. Spada z niej materia w kierunku czarnej dziury i zaczyna krążyć na orbicie dysku akrecyjnego wokół czarnej dziury. Obiekt podobny do gwiazdy na krawędzi dysku akrecyjnego, gdzie wpadająca materia zderza się z nim, to gorący punkt generowany przez zderzenie. Czarna dziura jest ukryta w środku dysku akrecyjnego i w skali tego obrazu miałaby średnicę około 100 nm. Materia wpadająca w czarną dziurę generuje dwie relatywistyczne strugi, które są wyrzucane wzdłuż linii osi obrotu czarnej dziury. Pokazana jest struga (dżet) zbliżająca się do czarnej dziury, a struga oddalająca się jest przesunięta w kierunku czerwieni i niemal niewidoczna [reprodukcja za zgodą NASA/CXC/M. Weiss], https://imagine.gsfc.nasa.gov/features/yba/CygX1_mass/cygX1_more.html

Wracając do {10} GW150914, wiele gwiazd, zapewne więcej niż połowa, należy do układów gwiazd podwójnych, potrójnych, poczwórnych lub z większą liczbą gwiazd. Około 1 400 000 000 lat temu taki układ podwójny powstał z dwóch czarnych dziur, a były one co najmniej dwa razy bardziej masywne niż ta tworząca Cyg X-1. Nasze szacunki mówią w istocie, że mają one odpowiednio 31 i $36 M_{\odot}$, a więc średnicę około 190 i 220 km.

Nie wiemy, jak ten układ podwójny powstał ani skąd się wzięły te czarne dziury, ale dwa składniki w postaci czarnych dziur zapewne były kiedyś bardziej oddalone od siebie