

Nobel za badania nad czarnymi dziurami

Nagrodę Nobla z Fizyki otrzymali Roger Penrose „za odkrycie, że tworzenie się czarnych dziur jest z pewnością przewidywane przez ogólną teorię względności”, oraz Andrea Ghez i Reinhard Genzel za „odkrycie supermasywnego obiektu zwartego w centrum naszej Galaktyki”. Dlaczego uhonorowano te właśnie odkrycia?

MAREK ABRAMOWICZ

Wyobraźcie sobie w pustej przestrzeni, daleko od innych ciał, bardzo duży, kulisty obłok złożony z ogromnej ilości cząstek. Cząstki się wzajemnie przyciągają grawitacyjnie, a więc kula zmniejsza rozmiary i zapada w sobie. Jeśli nie działają żadne inne siły z wyjątkiem grawitacji, zapadania nic nie powstrzyma – wszystkie cząstki skupią się w końcu w jednym miejscu. Taki opis nie jest jednak realistyczny.

W składającym się z cząstek gazie mamy zawsze do czynienia z ciśnieniem, które gaz rozpycha, przeciwstawiając się grawitacji, która gaz skupia. Ciśnienie pochodzi stąd, że wszystkie cząstki gazu wykonują drobne, chaotyczne ruchy termiczne, co powoduje ich zderzenia, a więc odpychanie – im gaz jest gorętszy, tym ruchy termiczne szybsze, a więc ciśnienie (odpychanie) większe. Podobnie, im rozmiar kuli jest mniejszy, tym cząstki są bliżej siebie (gaz ma większą gęstość) i zderzają się częściej, co także powoduje wzrost ciśnienia. Zapadający się kulisty obłok osiągnie więc po pewnym czasie rozmiar, który odpowiada stanowi równowagi: ciśnienie zrównoważy dokładnie grawitację. To powstrzyma dalsze zapadanie. Gwiazdy są właśnie takimi ogromnymi gazowymi kulami w równowadze pomiędzy grawitacją i ciśnieniem.

Gwiazda świeci, co powoduje utratę energii cieplnej zgromadzonej w jej wnętrzu. To mogłoby powodować ochłodzenie gwiazdy i przerwanie świecenia. Ale... nawet małe ochłodzenie oznaczałoby spadek ciśnienia. Równowaga mię-

dzy ciśnieniem a grawitacją zostałaby zaburzona, bowiem grawitacja byłaby taka sama jak przedtem (ona nie zależy od temperatury), ale ciśnienie trochę mniejsze. Zatem gwiazda by się trochę zapadła, co oznaczałoby, że w jej wnętrzu cząstki gazu (atomy) częściej zbliżałyby się do siebie i gwałtowniej zderzały. Zwiększyłoby się zatem tempo reakcji jądrowych, które zależy od częstości i gwałtowności tych zderzeń. Ale wzrost tempa reakcji jądrowych zwiększa produkcję ciepła, czyli podgrzewa wnętrze gwiazdy: bezpośrednim skutkiem ochłodzenia byłoby podgrzanie! Ten opisany wyżej łańcuch zależności ustanawia więc proces *samoregulacji* pomiędzy tempem utraty energii przez świecenie oraz tempem produkcji energii w procesach jądrowych: dzięki niemu gwiazdy ani nie gasną, ani nie wybuchają gwałtownie, lecz świecą spokojnie przez miliardy lat.

A ponieważ świecą, wyczerpują swoje nuklearne zasoby energetyczne. Źródłem energii świecenia gwiazd podobnych do Słońca, jest termonuklearna synteza helu z wodoru: z połączenia czterech atomów wodoru powstaje atom helu. Plus energia – cztery atomy wodoru są bowiem masywniejsze niż jeden atom helu i to właśnie ta nadwyżka masy zmienia się w energię, $E=mc^2$. Ale w końcu nuklearne zapasy wodoru się wyczerpią. Gdy ich zabraknie, gwiazdy takie jak Słońce (w jego dalekiej przyszłości) świecą na koszt zgromadzonej we wnętrzu energii cieplnej – czyli stygną (bardziej masywne gwiazdy, zachowują się inaczej, ale tej historii tu nie opisuję).

PRZYHAMOWANE BADANIA

Gdy we wnętrzu stygnącej gwiazdy ciśnienie spada, gwiazda się zapada, a więc rośnie jej gęstość, co powoduje wzrost ciśnienia: znowu działa samoregulacja! Czy stygnąca gwiazda może dzięki tej samoregulacji stygnąć bardzo powoli, spokojnie, stygnąć już na zawsze, będąc przez cały czas stygnięcia w stanie równowagi między grawitacją a ciśnieniem? Tak, może, ale tylko wtedy, gdy jej masa jest mniejsza niż masa Chandrasekhara, $M \approx 1.5$ masy Słońca. Chandra, jak go wszyscy nazywali, udowodnił, iż jeśli się uwzględni efekty kwantowe, które określają dla bardzo gęstego, zimnego gazu, jak ciśnienie zależy od gęstości, to dochodzi się do wniosku, że dla gwiazd o masie większej niż M nie jest możliwa równowaga pomiędzy ciśnieniem a grawitacją: grawitacja zawsze wygrywa. Gwiazda musi się nieograniczenie zapadać w siebie. Chandra odkrył istnienie tej krytycznej wartości M w 1935 r., gdy był młodzieńcem dwudziestoletnim. Sir Arthur Eddington, najwybitniejszy wówczas astrofizyk na świecie i szef Chandry w Cambridge, nie chciał uznać ani poprawności, ani ogromnego znaczenia tego wyniku dla fizyki. Upór Eddingtona przyhamował badania czarnych dziur na lata, a Chandra dostał swojego Nobla dopiero w roku 1983. Był już wtedy bardzo stary, ale ciągle naukowo aktywny.

Eddington przyhamował badania czarnych dziur, ale ich całkiem nie zastopował. W 1939 r. Robert Oppenheimer i Hartland Snyder, używając ogólnej teorii względności Alberta Einsteina,

opisali pewien szczególny przypadek „kolapsu grawitacyjnego”, czyli grawitacyjnego zapadania się materii, w tym wypadku chmury cząstek. Założyli, dla uproszczenia rachunków, że chmura jest kulista i że nie ma w niej ciśnienia. Ich rozwiązanie pokazane jest schematycznie na rysunku.

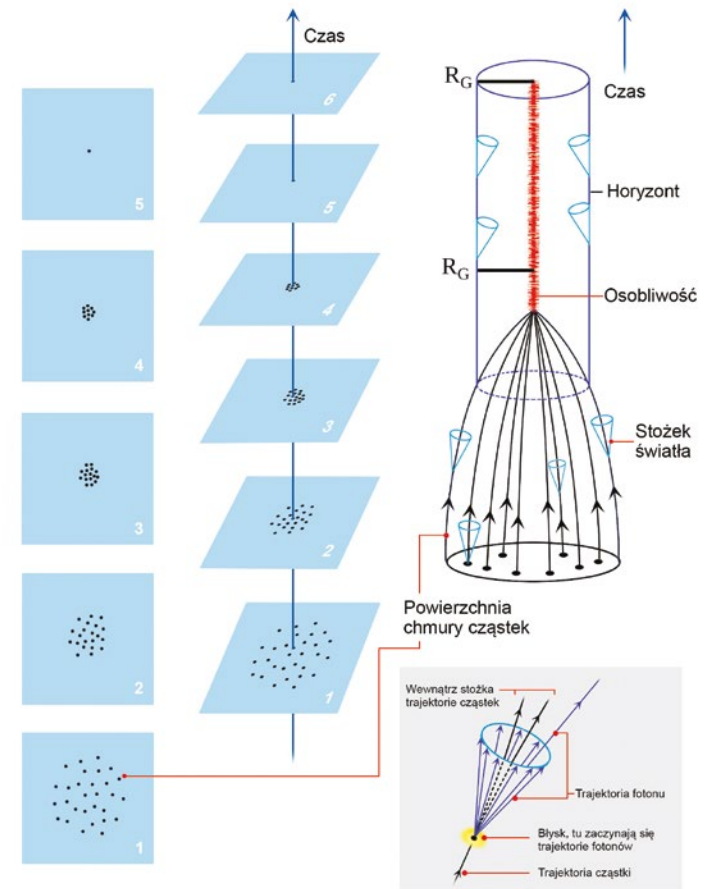
CZYM JEST CZARNA DZIURA

- W pierwszej kolumnie pokazane są „zdjęcia” chmury w kolejnych momentach czasu: 1, 2, 3, ...;
- W drugiej kolumnie te zdjęcia ułożone są jedno nad drugim; tworzą one obraz przebiegu zjawiska w czasie: można by połączyć położenia tej samej cząstki w różnych momentach i uzyskać jej „trajektorię czasoprzestrzenną”;
- To właśnie zrobione jest w trzeciej kolumnie. Kolorem czarnym pokazane są trajektorie cząstek. Kolorem niebieskim pokazane są trajektorie fotonów (promieni świetlnych) oraz przedstawione stożki światła: powierzchnia takiego stożka utkana jest z promieni świetlnych. Trajektorie cząstek muszą znajdować się wewnątrz stożków, ponieważ cząstki poruszają się wolniej niż światło.
- Zwróćcie uwagę na dwa najbardziej istotne aspekty kolapsu, widoczne na tym rysunku:
 - o OSOBLIWOŚĆ (linia zaznaczona na czerwono) oraz
 - o HORYZONT (cylicylniczna powierzchnia zaznaczona na niebiesko).
- Wszystkie cząstki wpadają do osobliwości, gdzie tracą swą identyczność i „przestają być”. Osobliwość znajduje się wewnątrz powierzchni horyzontu. Z położenia stożków świetlnych na horyzoncie wynika, że nic spod horyzontu się nie może wydostać do zewnętrznego świata: to jest właśnie czarna dziura!

Ponieważ opis Oppenheimera-Snydera dotyczy sytuacji wyidealizowanej, trzeba spytać, czy powstawanie czasoprzestrzennej osobliwości w wyniku kolapsu grawitacyjnego jest ogólnym prawem, czy może wynika z przyjętych uproszczeń: kulistej symetrii i braku ciśnienia? To nie jest łatwe pytanie. Policzone, rzecz jasna, bardziej realistyczne przykłady kolapsu, uwzględniające obecność rotacji, pól magnetycznych, silnego promieniowania etc. Ale to nie wystarczy, ponieważ pytamy o zasadę dotyczącą wszystkich możliwych przypadków. Podkreślam: *wszystkich możliwych!*

GDZIE CZĄSTKI TRACĄ PRZYSZŁOŚĆ

Temu wyzwaniu sprostały dopiero zupełnie nowe metody matematyczne, wymyślone w latach 60. XX w. w Cambridge, w legendarnym zespole Dennisa Sciama. Sciamy był niewątpliwie jednym z najbardziej charyzmatycznych uczonych XX w. Kilka lat po jego śmierci w 1999 r., ustanowiono doroczny cykl prestiżowych wykładów „Dennis Sciamy Memorial Lectures”, organizowany wspólnie przez oxfordzkie All Souls College, gdzie Sciamy był jednym z Fellows oraz



triesteńską SISSA, gdzie był profesorem. Prelekcji wygłaszały wykłady dwukrotnie: najpierw w Triście, potem w Oxfordzie. Lista wykładowców przypomina nazwiska fizyków należących w różnych latach do „wewnętrznego kręgu” Sciamey; tu wymieniam po kolei tylko pierwszych ośmiu: Roger Penrose, George Ellis, Stephen Hawking, John Barrow, Julian Barbour, Marek Abramowicz, Kip Thorne, Martin Rees (aż dwóch z nich dostało nagrodę Nobla). O historii olśniewającego sukcesu Sciamey i jego uczniów w Cambridge, dodatkowo dramatycznie naznaczonej chorobą Hawkinga, opowiada słynny film z 2014 r. *Teoria wszystkiego*.

Osobliwość końcowa definiowana jest jako obszar, gdzie kończą się czasoprzestrzenne trajektorie cząstek i fotonów: wypadają one z Bytu, nie osiągając czasowej nieskończoności, tracą Przyszłość (z tego powodu, niektórzy spekulują, że tu Fizyka spotyka się z Filozofią, ponieważ fundamentalna utrata przyszłości jest problemem ontologicznym). Penrose i Hawking mistrzowsko dowiedli, używając nowatorskich, topologicznych, metod matematycznych, że z teorii Einsteina wynika, iż podczas kolapsu grawitacyjnego zawsze powstaje taka końcowa osobliwość, jeśli tylko energia kolapsującej materii nie jest ujemna. Ten warunek energetyczny spełniony jest we wszystkich okolicznościach uważanych przez

fizyków za realistyczne. Osobliwość końcowa podobna jest w wielu aspektach do osobliwości początkowej, opisanej przez Hawkinga i Ellisa, a związanej z Wielkim Wybuchem, w którym powstał Wszechświat: w pewnym sensie, jedna jest odwróceniem drugiej w czasie.

Roger Penrose dostał tegoroczną Nagrodę Nobla z fizyki za dowód twierdzenia o końcowej osobliwości: Nobla dostaje się zawsze za konkretne, jednostkowe, odkrycie – taki jest regulamin nagrody. Należy jednak z całą mocą podkreślić zupełnie monumentalne znaczenie także innych prac i trudów Penrose’a dla współczesnej fizyki (np. diagramy i proces Penrose’a), dla matematyki (np. twistory), dla filozofii (neoplatonizm, sztuczna inteligencja) dla kultury (jego bestsellerowe książki), a nawet dla sztuki (obiekty niemożliwe, słynny parkietaz). Roger Penrose jest niewątpliwie najprzenikliwszym uczonym w naszym pokoleniu i jednym z najbardziej niezwykłych myślicieli w dziejach. Ta Nagroda Nobla jest naprawdę Wielką Nagrodą i słusznie napisał w „Gazecie Wyborczej” Piotr Cieśliński, że za nią, za pomysł jej przyznania, Komitet Noblowski też powinien dostać Nobla!

ZMIERZYĆ MASĘ CZARNEJ DZIURY

Teoretycznie, na podstawie matematycznych badań konsekwencji ogólnej teorii względności Alberta Einsteina, wiemy już bardzo dużo o czarnych dziurach. W szczególności, że istnieją końcowe osobliwości oraz horyzonty zdarzeń. Ale nawet dziś nie mamy na istnienie czarnych dziur bezpośrednich dowodów obserwacyjnych, choć mamy kilka bardzo mocnych obserwacyjnych przesłanek. Tych dostarcza astrofizyka – właśnie za takie osiągnięcie zostali uhonorowali tegorocznym Noblem z fizyki Andrea Ghez i Reinhard Genzel.

Astrofizycy mniej niż fizycy spekulują, są zawsze o wiele bardziej konkretni. Praktyczna, astrofizyczna, definicja horyzontu zdarzeń nie jest całkiem ścisła, ale za to jest konkretna i obserwacyjnie sprawdzalna. Popatrzenie na rysunek ilustrujący kolaps grawitacyjny Oppenheimera-Snydera: horyzont zdarzeń wyłania się z chmury wtedy, gdy ostatni kęs materii wpada pod horyzont. Potem cała materia jest już zawsze pod horyzontem, na zewnątrz nic się już nie dzieje, rozmiar horyzontu pozostaje już na zawsze ustalony. Jest on ściśle ustalony przez rozwiązanie równań Einsteina, które znalazł niemiecki matematyk Karl Schwarzschild już w 1915 r. Z rozwiązania Schwarzschilda wynika, iż (rozmiar horyzontu) $= R_G$ zależy od masy czarnej dziury M . Jeśli wyrazi się masę w jednostkach masy Słońca M_\odot , to można napisać, $R_G = 3 \text{ km } (M/M_\odot)$. Zatem dla astrofizyka czarna dziura jest obiektem, którego obserwowany (rzecz jasna tylko pośrednio) rozmiar R^* jest równy rozmiarowi horyzontu R_G . Ponieważ R_G zależy od masy, pierwszym zadaniem astrofizyka jest zmierzenie masy czarnej dziury.

Od prawie czterech stuleci astrofizycy mierzą masę obiektów astronomicznych, używając prawa odkrytego w 1619 r. przez Johanna Keplera, które stwierdza, że kwadraty okresów obiegu wokół grawitacyjnego centrum T^2 są proporcjonalne do sześciątów rozmiarów orbit D^3 . W 1687 r. Isaac Newton uzupełnił to prawo, stwierdzając, że współczynnik proporcjonalności w prawie Keplera równy jest odwrotności masy ciała centralnego M , pomnożonej przez pewną uniwersalną stałą. Oznacza to, że w jakimś odległym układzie wystarczy zmierzyć z obserwacji

(rozmiar orbity) $= D$ w jednostkach promienia orbity Ziemi wokół Słońca, tzn. 150.000.000 km (okres orbitalny) $= T$ w jednostkach okresu obiegu Ziemi wokół Słońca, tzn. 1 roku, aby wyznaczyć z obserwacji masę ciała centralnego M w jednostkach masy Słońca: $M = D^3/T^2$.

CZARNA DZIURA W CENTRUM GALAKTYKI

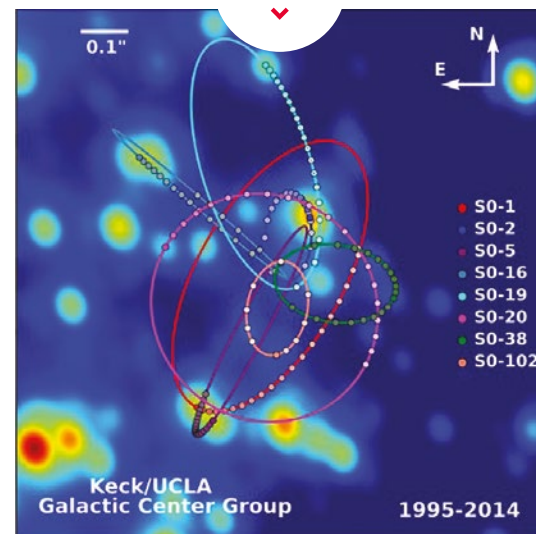
• Na rysunku obok pokazane są położenia, w różnych momentach czasu, ośmiu gwiazd okrążających czarną dziurę SgrA*, znajdującą się w samym centrum naszej Galaktyki, oddalonym o 28.000 l.s. od Ziemi.

• Fotografie gwiazd wykonywał w ciągu 20 lat zespół pod kierunkiem Andrei Ghez, tegorocznej Noblistki, używając słynnego teleskopu Kecka, który jest zestawem dwóch bliźniaczych 10-metrowych teleskopów, najprecyzyjniejszych i najbardziej technologicznie zaawansowanych na świecie. Teleskop Kecka ustawiony jest na wysokości 4.100 metrów, na szczycie góry Mauna Kea na Hawajach.

• Zwróćcie uwagę na zdolność rozdzielczą teleskopu: odcinek w lewym górnym rogu odpowiada 1/10 sekundy łuku!

• Wielkości D oraz T są bezpośrednio mierzone z punktów na tej fotografii, dlatego możemy wyznaczyć dokładnie masę czarnej dziury w centrum Galaktyki,

$M = D^3/T^2 = 4.31 \pm 0.06$ milionów mas Słońca.



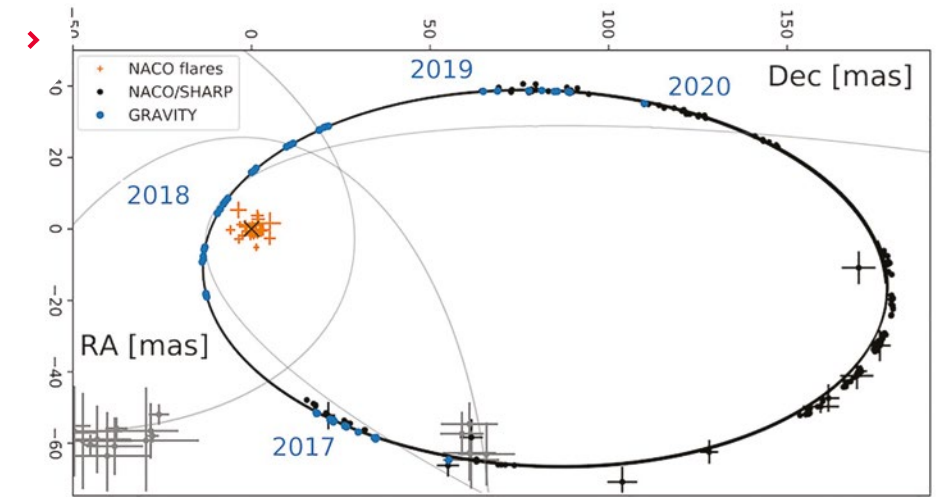
DOKŁADNA MASA SGRA*

Rysunek obok wykonano na podstawie bazy danych zespołu tegorocznego Noblisty, Reinharda Genzela – takich danych używa się w „prawdziwych” badaniach. Reinhard Genzel był pionierem tych badań. Jego monachijski zespół był pierwszym w świecie, który wyznaczył dokładną wartość masy SgrA*. Dr Odele Straub, autorka rysunku i moja była doktorantka, pracuje w tym zespole od roku 2017.

W 2017 r. Rainer Weiss, Barry Barish i Kip Thorne uzyskali Nagrodę Nobla „za decydujący wkład w zbudowanie detektora LIGO i zaobserwowanie fal grawitacyjnych”. Była to nagroda ściśle związana z czarnymi dziurami, prawie dokładnie tak jak nagroda tegoroczna – fale grawitacyjne odbierane przez interferometrię LIGO i Virgo powstają zwykle gdy zderzają się ze sobą czarne dziury. Czarne dziury dostały więc aż dwie nagrody Nobla w ciągu trzech lat, a przecież prawie na pewno wkrótce dostanie Nobla ktoś z zespołu EHT (Event Horizon Telescope), za zdjęcie czarnej dziury w centrum odległej galaktyki M87.

SKĄD TO ZAINTERESOWANIE

Zainteresowanie wykształconej publiczności czarnymi dziurami wynika, rzecz jasna, przede wszystkim z ich niezwyklej natury. Astrofizycy studiują czarne dziury z powodu ich wiodącej roli w procesach kształtujących formowanie się różnych struktur we Wszechświecie. Fizycy wiążą z czarnymi dziurami wielkie nadzieje. Spodziewają się pomocy w wyjaśnianiu najważniejszego dziś problemu fizyki: zgodnego połączenia mechaniki kwantowej i ogólnej teorii względności, które dziś nie są kompatybilne. Zarówno osobliwość we wnętrzu czarnej dziury, jak i jej horyzont wiążą się z tą niekompatybilnością bezpośrednio. Po pierwsze dlatego, że choć Penrose i Hawking dowiedli, iż tworzenie się osobliwości jest wnioskiem z teorii Einsteina, to wcale nie musi oznaczać rzeczywistego osobliwości istnienia. Natomiast oznacza to, prawie na pewno, że teorii Einsteina nie można stosować do opisu wszystkich aspektów grawitacyjnego kolapsu: do tego potrzebna jest kwantowa grawitacja. Podobnych wskazówek dostarczają rozważania dotyczące kwantowych aspektów horyzontu, a zwłaszcza odkrytej, teoretycznie, przez Stephena Hawkinga możliwości, iż czarne dziury nie są całkiem czarne, lecz promieniu-



ją. Istnienie promieniowania Hawkinga prowadzi do paradoksów, w tym słynnego paradoksu informacyjnego czarnych dziur, których jak na razie nikt nie potrafi rozwiązać. Proponowane rozwiązania teoretyczne, zwykle sprzeczne z teorią Einsteina, postulują istnienie kwantowych alternatyw czarnych dziur – dziwacznych obiektów o rozmiarach $R^* \approx R_G$, ale pozbawionych horyzontu i centralnej osobliwości: grawastarów, zapór ogniowych, etc. W pewnym sensie, jest to powrót do intuicji Eddingtona: on się przecież nie mógł pogodzić z implikacją rezultatu Chandrasekhara, iż zbudowana z zimnego gazu gwiazda o masie większej niż M musi się nieograniczenie zapadać aż do osobliwości!

Dobra wiadomość jest taka, iż już planowane udoskonalenia instrumentów używanych przez zespoły tegorocznych noblistów, a także zespoły LIGO-Virgo i EHT, pozwolą, w perspektywie kilku lat, na wykrywanie obserwacyjnych sygnałów takich obiektów. Jeśli, rzecz jasna, one istnieją. Ale jest i zła wiadomość: w 2002 r. Marek Abramowicz, Włodek Kluźniak i Jean-Pierre Lasota wykazali ściśle na podstawie ogólnej teorii względności Einsteina, iż z fundamentalnych powodów żadna obserwacja wykorzystująca fale elektromagnetyczne nie może dowieść istnienia horyzontu zdarzeń czarnej dziury.

A na koniec opowiem Wam, drodzy Czytelnicy, słodką bajkę na dobranoc. W bardzo, bardzo odległej przyszłości cała materia, nie od razu, kęs po kęsie, wpadnie do czarnych dziur, które po bardzo, bardzo długim czasie wszystkie wyparują. We Wszechświecie będą już tylko fotony. Ale fotony nie mierzą

czasu, nie mają wieku, nie starzeją się, „zegar fotonowy nie tyka”. Czasoprzestrzeń Wszechświata, w którym nie ma innej niż fotony materii, jest beczasowa, w tym sensie, że nie ma niczego, co upływ czasu mogłoby fizycznie mierzyć. Według tegorocznego noblisty, Rogera Penrose’a i innych fizyków, podobnie („konforemnie podobnie”) było przed Wielkim Wybuchem. Tak więc, twierdzi Penrose, czasoprzestrzeń odległej przyszłości także będzie przyczyną Wielkiego Wybuchu, nowego Wielkiego Wybuchu. – Taki jest los Wszechświata – powiedział Penrose w wywiadzie dla Komitetu Noblowskiego tuż po ogłoszeniu wiadomości o przyznaniu mu Nagrody Nobla z fizyki – bez początku i bez końca powtarzające się cykle.

Eschatologiczna idea cyklicznego Wszechświata bez początku i bez końca wydaje się bardzo zaprzętać genialny umysł Rogera Penrose’a. Ja sam, jak zresztą wielu innych fizyków, nigdy nie byłem co do słuszności tej wielkiej wizji przekonany, ale z ogromną przyjemnością i wielką satysfakcją usłyszałem, iż w całym noblowskim wywiadzie Roger Penrose wymienił nazwiska tylko trzech swoich współpracowników: Daniela An z uniwersytetu w Nowym Jorku, oraz Pawła Nurowskiego i Krzysztofa Meissnera, fizyków z Warszawy. Paweł zrobił doktorat w Trieście, w SISSA, u słynnego Andrzeja Trautmana, wielkiego przyjaciela Penrose’a, który to (Trautman) był kilka lat wcześniej także i moim promotorem. W Trieście Paweł był doktorantem w zespole kierowanym przez Dennisa Sciamę – wywodzi się więc z tego samego magicznego kręgu. W roku 2018 był kolejnym prelegentem wcześniej tu wspomnianych „Dennis Sciam Memorial Lectures”. ■