

Stanisław Mrówczyński

Jak umierają gwiazdy

21 sierpnia 1995 roku zmarł w Chicago jeden z największych astrofizyków naszych czasów, laureat Nagrody Nobla Subrahmanyan Chandrasekhar. Miał 85 lat.

Swoją najślawniejszy rezultat Chandrasekhar uzyskał mając zaledwie 20 lat. Aktywnym pozostał do końca swoich dni. Ostatniego lata ukazały się jego *Principia dla każdego (Principia for the Common Reader)*, w których na blisko 600 stronach podjął trud przybliżenia współczesnemu czytelnikowi największego naukowego dzieła wszechczasów *Zasad matematycznych filozofii naturalnej* Izaaka Newtona. Recenzje ostatniej pracy Chandrasekhara i wiadomość o jego śmierci ukazały się w tym samym czasie.

Z MADARU DO CAMBRIDGE

Subrahmanyan Chandrasekhar urodził się 19 października 1910 roku w Lahore w Indiach, obecnie jest to terytorium Pakistanu. Studia rozpoczął w Presidency College w Madrasie. Tutaj w roku 1928 odbył rozmowę z wybitnym fizykiem owych czasów – Arnoldem Sommerfeldem. Ten na pożegnanie podarował młodemu Hindusowi manuskrypt właśnie przygotowanej pracy o gazie elektronów, który przy dużej gęstości przejawia zdumiewające własności kwantowe. Podarunek ten, jak się później okazało, określił w znacznej mierze całą dalszą karierę

naukową Chandrasekhara. Lektura pracy Sommerfelda spowodowała, że zainteresował się problemami gęstej materii i w konsekwencji zagadnieniami budowy gwiazd.

W roku 1930, tym samym, który przyniósł nagrodę Nobla z fizyki jego stryjowi Chandrosekharze V. Ramanowi za prace z dziedziny optyki, Chandrasekhar otrzymał tytuł bakałarza. Dalsze studia miał odbyć w Cambridge w Anglii, gdzie pracowali jego mistrzowie – astrofizycy Ralph H. Fowler i Arthur S. Eddington. Podczas osiemnastu dni podróży parowcem z Madrasu do Southampton, Chandrasekhar wykonał obliczenia, których zasadniczy wynik był głównym powodem przyznania mu po 53 latach nagrody Nobla.

Zgodnie z ówczesnie panującym poglądem, gwiazda wypaliwszy swoje paliwo, zamienia się w słabo świecąca kulę zimnego, gęstego gazu. Kulę tę nazwano białym karłem. Siły grawitacyjnego przyciągania zgniatające ją miały być równoważone przez ciśnienie gazu elektronowego. Dzięki kwantowemu zjawisku degeneracji, o którym Chandrasekhar usłyszał po raz pierwszy od Sommerfelda, ciśnienie gazu elektronów nie znika nawet przy zerowej temperaturze. Śmierć gwiazdy miała więc następować łagodnie i bez wstrząsów, czyli w drodze spokojnej ewolucji: biały karzeł stygł i zamieniał się w czarnego karła – ostateczną i niezmienną już formą wypalonej gwiazdy.



Obliczenia wykonane w czasie podróży parowcem pokazały jednak, że tylko gwiazda o masie mniejszej od pewnej wartości krytycznej – znanej dzisiaj jako masa Chandrasekhara i wynoszącej 1.44 masy Słońca – może zamienić się w białego karła. W przypadku gwiazdy masywniejszej ciśnienie zdegenerowanego gazu elektronowego nie może zrównoważyć sił przyciągania, i kurczenie gwiazdy, zwane również zapadaniem grawitacyjnym, musi postępować.

ARGUMENTY I AUTORYTET

Początkowo rezultat ten nie wywołał żadnego zainteresowania. Po upływie zaś kilku lat, w roku 1935 znalazł się w ogniu krytyki samego sir Arthura Eddingtona, największego astrofizyka owych czasów. Ten jako pierwszy zrozumiał najważniejszą konsekwencję wyniku Chandrasekhara. Otóż istnienie krytycznej masy gwiazdy, powyżej której ciśnienie materii nie jest w stanie przeciwdziałać siłom przyciągania, musi prowadzić do powstania obiektu, w którym nawet światło jest uwięzione przez grawitację, czyli – posługując się współczesną terminologią – do powstania czarnej dziury.

Eddington uważał istnienie takich nieświejących gwiazd za zupełny absurd; był przekonany, że nie pozwalają na to prawa fizyki. Sądził więc, że obliczenia Chandrasekhara są nieprawidłowe. Zgadzał się, że gaz elektronowy wielkiej gęstości przejawia własności kwantowe i relatywistyczne jednocześnie. Twierdził natomiast, że Chandrasekhar błędnie powiązał dwie, jeszcze bardzo młode w owym czasie, teorie – mechanikę kwantową i teorię względności. Wcześniejsze obliczenia nierelatywistyczne nie prowadziły do granicznej masy, więc dowolnie wielka gwiazda kończyłaby żywot jako biały karzeł.

Zdrzutany krytyką Eddingtona, a przekonany o swej racji, Chandrasekhar zwrócił się o rozstrzygnięcie sporu do tak wielkich fizyków jak Niels Bohr i Wolfgang Pauli. Otrzymał od nich pełne poparcie, jednak sir Arthur pozostał całkowicie głuchy na argumenty. Społeczność astronomów zaś zdała się bezkrytycznie na wielki autorytet Eddingtona.

Chandrasekhar postanowił przygotować obszerną monografię, w której szczegółowo przedstawi swoją teorię białych karłów, a następnie wycofać się z dyskusji i zająć inną tematyką. *Nie miałem jeszcze 30 lat* – wspominał po la-

tach – *i nie chciałem życia trawić na bezproduktywnej batalii*. W takich okolicznościach powstał wielokrotnie wznawiany *Wstęp do badań struktury gwiazd*. Upłynęły jednak ponad dwie dekady nim poprawność i znaczenie wyniku Chandrasekhara zostały powszechnie zrozumiane i uznane.

Zdumiewającą cechą kontrowersji między Chandrasekharem a Eddingtonem było to, że nie zakłóciła ona ich przyjaznych kontaktów zarówno wtedy, gdy razem pracowali w Cambridge – obaj byli członkami Trinity College i często razem jadali kolacje, jak i później, kiedy Chandrasekhar wyjechał do Stanów Zjednoczonych. Uważał on swego mistrza za człowieka absolutnie uczciwego, więc naukowy spór nie mógł wpłynąć na ich stosunki. Sympatia i szacunek, udokumento-

wane korespondencją, przetrwały aż do śmierci sir Arthura w roku 1944. Chandrasekhar nigdy też nie zmienił swej opinii, że Eddington był największym astrofizykiem swoich czasów. Tak właśnie zatytułował wykład wygłoszony w Cambridge w stulecie urodzin mistrza w roku 1982.

ŚMIERĆ GWIAZDY

Co rzeczywiście oznacza wynik Chandrasekhara? Co dzieje się z gwiazdą, gdy jej masa przekracza wartość krytyczną? Kluczem do wyjaśnienia tego problemu było inne zdumiewające zjawisko.

Raz na kilkaset, czasami na kilka lat, słabo świecąca na niebie gwiazda nagle wspaniale rozbłysła na miesiąc, by błędnie zgasnąć zupełnie. Energia wyzwolona przy takim rozbłysku – wybu-

Zdegenerowany gaz elektronów

Przy dostatecznie dużej gęstości materii atomy zostają zjonizowane, to znaczy elektrony są oderwane od jąder atomowych. Mamy zatem gaz elektronów i jonów dodatnich, będących jądrami atomowymi z kilkoma ewentualnie przyłączonymi elektronami z najgłębszych powłok atomowych. Najbliższy jon – jądro wodoru, czyli proton – jest blisko dwa tysiące razy cięższy od elektronu. Elektrony są zatem znacznie ruchliwsze niż jony i to one decydują o własnościach układu. Z tego powodu jony można pominąć całkowicie i rozważać wyłącznie gaz elektronów.

Gdy temperatura jest wystarczająco wysoka lub gęstość dostatecznie mała, gaz elektronów zachowuje się jak dobrze znany (ze szkoły) klasyczny gaz doskonały, którego ciśnienie (p) dane jest równaniem stanu

$$p = R \rho T,$$

gdzie R jest tzw. stałą gazową, ρ gęstością, zaś T temperaturą. Widzimy, że przy zerowej temperaturze (w skali absolutnej oczywiście) ciśnienie jest również zerowe.

Jednak w obszarze niskich temperatur bądź wysokich gęstości, gaz elektronów przejawia własności kwantowe, które sprawiają, że nawet przy temperaturze równej zeru ciśnienie pozostaje niezerowe. Powodem takiego zachowania gazu jest fundamentalne prawo przyrody zwane *zakazem Pauliego*. Zabrania ono dwóm elektronom pozostać w tym samym stanie. W hipotetycznym gazie klasycznym o zerowej temperaturze wszystkie cząstki spoczywałyby, co dawałoby właśnie zerowe ciśnienie. Elektrony zaś nie mogą wszystkie spoczywać (byłyby wtedy w tym samym stanie) poruszając się i powodując ciśnienie. Gaz o niskiej temperaturze, w którym ruch cząstek odbywa się zgodnie z prawem zakazu Pauliego, nazywany jest *zdegenero-*

wanym. Jego ciśnienie jest proporcjonalne do gęstości w potęgę 5/3, to znaczy

$$p \sim \rho^{5/3} \quad (1)$$

Średnia prędkość elektronów w gazie zdegenerowanym wzrasta wraz z gęstością gazu. Chandrasekhar uświadomił sobie, że przy bardzo dużych gęstościach, gdy prędkość ta staje się bliska prędkości światła, należy uwzględnić efekty wynikające ze specjalnej teorii względności, pominięte przy wyprowadzeniu równania (1). Dokładniej, zamiast nierelatywistycznego wzoru na energię kinetyczną

$$E = \frac{mv^2}{2}$$

gdzie m jest masą cząstki a v jej prędkością, trzeba użyć relatywistycznego wyrażenia

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

w którym c jest prędkością światła. Okazało się, że wykładnik potęgi gęstości w równaniu na ciśnienie jest wówczas mniejszy niż 5/3. W przypadku, gdy gęstość gazu jest tak wielka, że elektrony poruszają się z prędkością bardzo bliską prędkości światła, zamiast równania stanu (1) otrzymujemy

$$p \sim \rho^{4/3}. \quad (2)$$

Ciśnienie gazu relatywistycznego wzrasta zatem wolniej ze wzrostem gęstości niż gaz nierelatywistyczny. Gaz taki zatem słabiej przeciwstawia się ścisnieniu. Różnica 1/3 między wykładnikami, zdawałoby się niewielka, ma w rzeczywistości ogromne znaczenie.

Ciśnienie otrzymane z równania (1) jest dostatecznie duże, aby przeciwdziałać grawitacyjnemu zgniataniu białego karła o dowolnie dużej masie. Natomiast, jak pokazał Chandrasekhar, ciśnienie (2) może powstrzymać zapadanie się karła tylko o masie mniejszej niż 1.44 masy Słońca. Widzimy, że owa 1/3 była źródłem całej kontrowersji.

chu *supernowej* – jest tak wielka, że długo nie umiano wskazać jej źródła. Ekstrawagancki Szwajcar Fritz Zwicky zaproponował jeszcze w latach trzydziestych następujące rozwiązanie. Gwiazda dużej masy zużywszy swoje paliwo nie zamienia się w białego karła, lecz kurczy się dalej. Gdy jej gęstość osiągnie dostatecznie dużą wartość, centralna część gwiazdy zamienia się w jakby ogromnych rozmiarów jądro atomowe zwane *gwiazdą neutronową*, a wydzielona w tym procesie energia powoduje gigantyczną eksplozję i wyrzucenie w przestrzeń zewnętrznych powłok pierwotnej gwiazdy. W owym czasie odkryto, że poza naładowanymi elektrycznie *protonami*, jądro atomowe tworzą neutralne *neutrony*, które są właśnie składnikami gwiazdy neutronowej.

Obliczenia wykonane w roku 1939 przez George'a Volkoffa i J. Roberta Oppenheimera, (ojca amerykańskiej bomby atomowej) pokazały, że gwiazda neutronowa, podobnie jak biały karzeł,

nie może istnieć, jeśli jej masa przekracza pewną wartość krytyczną, leżącą według współczesnych ocen między 1.5 a 3 masami Słońca. Obiekt cięższy musi się więc zapadać dalej, aż utworzy czarną dziurę.

Rezultat Chandrasekhara był pierwszym wskazaniem, że tylko lekkie gwiazdy umierają spokojnie. Śmierci gwiazd ciężkich towarzyszą kosmiczne kataklizmy – wybuchy supernowych, a ostatecznym stadium gwiazd początkowo wielkich są gwiazdy neutronowe bądź czarne dziury.

W AMERYCE

W roku 1937 Chandrasekhar przeniósł się z Cambridge do USA. Początkowo pracował w Yerkes Observatory w Williams Bay, w stanie Wisconsin. Wykładał jednocześnie na Uniwersytecie Chicagowskim, gdzie w roku 1944 otrzymał profesurę i pozostał przez następne pół wieku.

W Ameryce Chandrasekhar ujawnił swe talenty nauczyciela. Pod jego kie-

runkiem przygotowano ponad 50 doktoratów. Zdarzyło się raz, że cała jego klasa dostała Nagrodę Nobla. W pewnym okresie co tydzień podróżował z Wisconsin do Chicago dla dwóch zaledwie studentów. Byli nimi Chińczycy Chen N. Yang i Tsung D. Lee nobliści z roku 1957.

Chandrasekhar zajmował się licznymi zagadnieniami astrofizycznymi. Usystematyzowane wyniki opublikował w sześciu obszernych monografiach; nakład tych wybitnie specjalistycznych książek przekroczył 100 tysięcy egzemplarzy. Publikował również kilka, a nawet kilkanaście artykułów rocznie, a jego „produktywność” nie słabła z wiekiem.

Spotkałem raz Chandrę – wspomina jeden z jego kolegów profesorów – *spacerującego po korytarzu. Wyglądał na mocno zafrasowanego. – Co się stało? – spytałem. – Oddałem właśnie sprawozdanie roczne i okazało się, że napisałem tylko 5 czy 6 prac tego roku. – Zwalniasz tempo – powiedziałem. Po chwili jednak dodałem – przecież napisałeś również książkę o czarnych dziurach. – Rzeczywiście – ucieszył się – zupełnie o tym zapomniałem.*

Chodziło o monografię *Matematyczna teoria czarnych dziur* wydaną w roku 1983, tym samym, w którym otrzymał Nagrodę Nobla za wkład w rozwój astrofizyki gwiazdowej, głównie zaś za wykazanie istnienia granicznej masy białego karła. Rezultat ten, jak pamiętamy, był pierwszym wskazaniem, że czarne dziury rzeczywiście mogą powstawać.

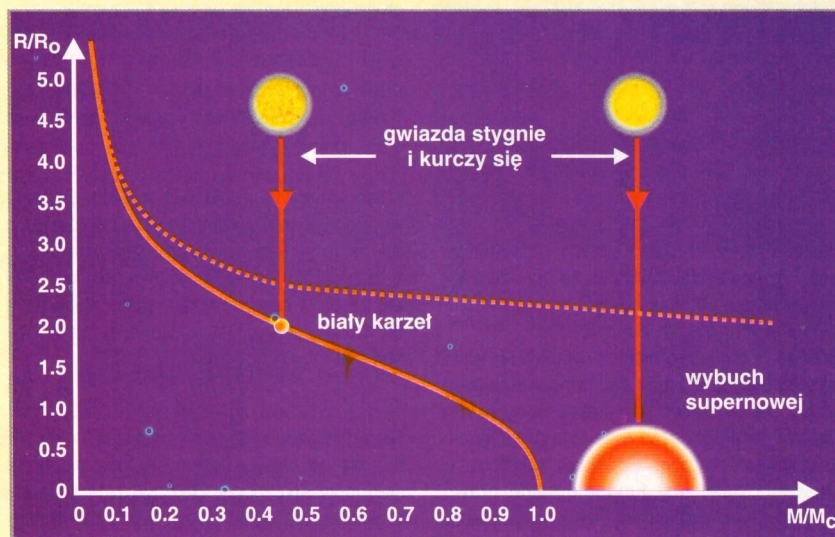
PROPAGATOR DZIEŁA SMOLUCHOWSKIEGO

W latach czterdziestych Chandrasekhar interesował się problemem zjawisk losowych, zwanych też stochastycznymi. Przystudiował wtedy prace wielkiego polskiego fizyka, przedwcześnie zmarłego w roku 1917 Mariana Smoluchowskiego. Pisząc, znany później, artykuł przeglądowy Chandrasekhar wyraził taką opinię: *Teoria fluktuacji gęstości, jaką rozwinął Smoluchowski, stanowi jedno z najznakomitszych osiągnięć fizyki cząsteczkowej (...) i budzi rozczarowanie fakt, że w prowadzonych ostatnio dyskusjach na temat praw termodynamiki nie uwzględnia się we właściwy sposób badań Boltzmann'a i Smoluchowskiego. Szczególnie należy ubolewać nad brakiem odnośników do prac Smoluchowskiego, gdyż nikt nie przyczynił się do*

Końcowe stadium ewolucji gwiazd

Najślawniejszy rezultat Chandrasekhara ilustruje diagram. Linia ciągła określa promień (R) i masę (M) wystudzonego białego karła w stanie równowagi. M_c jest masą Chandrasekhara równą 1.44 masy Słońca, R_0 zaś jest

wybuchu supernowej i powstania gwiazdy neutronowej lub czarnej dziury. Ponieważ zewnętrzne warstwy gwiazdy zostają wyrzucone w przestrzeń podczas wybuchu, masa powstałej gwiazdy neutronowej czy czarnej



długością równą 0.82 promienia Ziemi. Gwiazda stygnąc kurczy się, to znaczy maleje jej promień. Jeśli masa gwiazdy jest mniejsza niż M_c , zakończy ona ewolucję jako biały karzeł. Ponieważ część masy gwiazdy ubywa podczas ewolucji, gwiazdy o masie niewiele większej od M_c również zamieniają się w białe karły. Gdy masa gwiazdy istotnie przekracza M_c zapadanie grawitacyjne doprowadzi do

dziury jest znacznie mniejsza niż pierwotnej gwiazdy.

Linia przerywana – uzyskana przez Ralpha Fowlera – pokazuje krzywą równowagi promień – masa otrzymaną bez uwzględnienia efektów relatywistycznych. W tym przypadku każda gwiazda, niezależnie od jej masy, kończyłaby żywot jako biały karzeł.

wyjaśnienia występujących tu zagadnień bardziej niż on.

Artykuły i wypowiedzi Chandrasekhara przyczyniły się do rozpropagowania osiągnięć innych polskich fizyków. Choćby pracy Czesława Białobrzeskiego, w której po raz pierwszy uwzględniono ciśnienie promieniowania w dynamice gwiazdowej. Taki stosunek do Polaków nie wynikał jednak z jakiejś wyjątkowej sympatii do naszego kraju. Chandrasekhar starał się docenić wszystkich, którzy na to zasługiwali. Był prawdziwym erudytą – interesował się historią idei, starał się dociec ich pochodzenia i prześledzić losy.

W związku z przypadającą w roku 1972 setną rocznicą urodzin Mariana Smoluchowskiego, Polskie Towarzystwo Fizyczne przyznało Subrahmany-anowi Chandrasekharowi swoje najwyższe odznaczenie – Medal Mariana Smoluchowskiego, który wręczono laureatowi rok później, podczas odbywającej się w Warszawie konferencji z okazji pięćsetlecia urodzin Mikołaja Kopernika. Profesor Chandrasekhar był w Polsce także w roku 1962 na zaproszenie Leopolda Infelda oraz w roku 1981, aby wygłosić Odczyt im. Mariana Smoluchowskiego. Odczyt poświęcony

Arthur Stanley Eddington

Jest jedną z najwybitniejszych postaci w całej historii astrofizyki. Urodził się w roku 1882, zmarł zaś 1944. Studiował w Manchesterze i Cambridge; pracował początkowo w sławnym Obserwatorium Greenwich, a w roku 1914 wrócił do Cambridge jako profesor. Był wieloletnim prezydentem Międzynarodowej Unii Astronomicznej.

Zachwycony ogólną teorią względności Eddington wykonał w roku 1919 pomiar położenia gwiazd na niebie podczas zaćmienia Słońca. Pomiar ten wykazał zakrzywienie się promieni świetlnych w pobliżu naszej gwiazdy przewidziane przez teorię. Było to jej pierwsze eksperymentalne potwierdzenie. W późniejszych latach Eddington uchodził za wielkiego zwawcę teorii Einsteina.

Dziennikarz miał go kiedyś spytać. – *Ogólna teoria względności jest podobno tak trudna, że rozumieją ją na świecie zaledwie trzy osoby.* – *Zastanawiam się, kto może być tym trzecim* – odpowiedział po chwili uczony.

Eddington interesował się zastosowaniem ogólnej teorii względności do opisu Wszechświata jako całości, czyli kosmologią relatywistyczną. Był jednym z pierwszych entu-



zjastów modelu rozszerzającego się Wszechświata, powiązał dane obserwacyjne o ucieczce galaktyk z teoretycznymi obliczeniami.

Największe jednak znaczenie miały badania Eddingtona dotyczące budowy i ewolucji gwiazd. Stworzył on, w jakiejś mierze, całą tę dziedzinę. Jego monografia *Wewnętrzna budowa gwiazd* (*The Internal Constitution of the Stars*) wydana w roku 1926 pozostawała klasyczną przez długie lata. Lektura tej książki była punktem wyjścia do samodzielnych badań Chandrasekhara.

był fizyce czarnych dziur. Dwa lata później Chandrasekhar przygotował artykuł *Marian Smoluchowski twórcą fizyki*

zjawisk stochastycznych do tomu poświęconego temu polskiemu fizykowi. Książka ukazała się w angielskojęzycznej serii *Polacy w nauce* (*Polish Men of Science*).

Marian Smoluchowski

Bardzo niewielu polskich uczonych znalazło się w światowej elicie. Do tych nielicznych należał Marian Smoluchowski. Urodził się w Vorderbrühl, niedaleko Wiednia, w roku 1872. Studia ukończył na uniwersytecie wiedeńskim, a od roku 1900 był profesorem uniwersytetu we Lwowie. W roku 1913 przeniósł się do Krakowa, gdzie po czterech latach został rektorem Uniwersytetu Jagiellońskiego. Wkrótce potem, w roku 1917 zmarł podczas epidemii dżentarii.

Smoluchowski był wielkim kontynuatorem dzieła Ludwika Boltzmana. Jeszcze na przełomie wieków XIX i XX istnienie atomów funkcjonowało jedynie jako hipoteza,

a kinetyczna teoria Boltzmana, w której ciepło ma mechaniczną naturę – jest przejawem ruchu atomów lub molekuł, była zaciekle krytykowana.

Kluczową rolę w ugruntowaniu atomistycznej teorii miało wyjaśnienie przyczyny ruchów

Browna – nieustannego ruchu drobin w cieczach – dokonane w latach 1905 – 1906, zupełnie niezależnie i jednocześnie przez Alberta Einsteina i Mariana Smoluchowskiego. Pokazali oni, że ruch drobin odbywa się dzięki chaotycznym uderzeniom atomów bądź cząsteczek cieczy. Ilościowe przewidywania ich teorii zostały wkrótce potwierdzone doświadczalnie. Jean B. Perrin otrzymał za to nagrodę Nobla w 1926 roku.

Innym ogromnym osiągnięciem Smoluchowskiego było wyjaśnienie natury zjawiska opalescencji krytycznej. Polega ona na silnym rozpraszaniu światła w cieczy – jej mętnieniu, gdy jest bliska wrzenia (punktu krytycznego).

Smoluchowski wykazał, że światło rozpraszane wtedy na fluktuacjach gęstości cieczy. W artykule o Smoluchowskim, opublikowanym po jego śmierci Einstein pisał: *odszedł jeden z najbardziej przenikliwych teoretyków współczesności.*



PRAWDA I PIĘKNO

Chandrasekhar łączył uprawianie nauki na najwyższym poziomie z głębokim zainteresowaniem literaturą, muzyką, sztuką. Dociekał cech wspólnych tych całkiem odmiennych przejawów kreatywnych możliwości człowieka. Zastanawiał się, czym jest piękno w nauce i w jakim stopniu jego poszukiwanie jest czynnikiem sprawczym badań. Wyrazem tych zainteresowań jest zbiór wykładów wydanych pod wspólnym tytułem *Prawda i piękno, estetyka i motywacje w nauce.*

Latem tego roku ukazało się dzieło, o którym mówił, że będzie jego ostatnim. Chodzi o wspomniane już na wstępie *Principia dla każdego*. Zaledwie kilka tygodni przed śmiercią autora, recenzent „Nature” pisał: *twierdzenia Newtona lśnią pięknem, prostotą i lapidarnością. Osobiste refleksje Chandrasekhara dodają światła.*

STANISŁAW MRÓWCZYŃSKI

Dr hab. Stanisław Mrówczyński pracuje w Instytucie Problemów Jądrowych im. Andrzeja Soltana w Warszawie