Astrofizyka sfery Dysona

*Michał BEJGER**

* Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika PAN; Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione di Ferrara, Włochy

Kosmiczne urządzenie zwane obecnie sferą Dysona zostało zaproponowane przez Freemana Dysona w latach 60., w pionierskich czasach projektu poszukiwania pozaziemskich cywilizacji SETI (ang. *Search for ExtraTerrestrial Intelligence*). Oryginalny pomysł był dość ogólnym stwierdzeniem, że wystarczająco długi rozwój pozaziemskiej cywilizacji może doprowadzić do stworzenia przez nią „sztucznej biosfery, która całkowicie otacza gwiazdę macierzystą”, na przykład w celu czerpania z niej energii. Taka megastruktura byłaby budowlą na skalę planetarną, która jest z oczywistych względów całkowicie poza zasięgiem naszej cywilizacji – tak teraz, jak i w przewidywalnej przyszłości.

Interesujące są oczywiście szczegóły. Wkrótce po przedstawieniu pomysłu, w odpowiedzi na zasłużoną – jak zaraz zobaczymy – krytykę, Dyson doprecyzował, że „sfera” niekoniecznie musi być sztywną (monolityczną) bryłą „wykonaną z jednego kawałka”, ponieważ tak zaprojektowana struktura nie byłaby odporna na różne niestabilności.

Pomysłem bardziej realistycznym niż sztywna sfera jest np. konstelacja dużej liczby gromadzących światło gwiazdy „satelitów” krążących wokół niej; takie urządzenie nazywa się „rojem Dysona”. Napiszemy o nim przy innej okazji.

Jak to zwykle bywa, koncepcja sfery w literaturze popularnej i science-fiction wyprzedza samego Dysona. On sam przypisywał ten oryginalny pomysł powieści „Sprawca gwiazd” Olafa Stapledona z 1937 roku. W fantastyce naukowej pomysł nie pojawia się zazwyczaj jako rój wielu obiektów, ale jako pojedynczy twór wielkości planety lub jeszcze większa megastruktura, jak np. w serialu telewizyjnym „Star Trek: The Next Generation”, w odcinku pt. „Relikty” z 1992 roku, który przedstawia monolityczną sferę umożliwiającą życie po wewnętrznej stronie. Megastruktura o podobnej budowie pojawia się też w powieści fantastycznonaukowej „Pierścień” Larry’ego Nivena (1970), jako otaczający gwiazdę gigantyczny pierścień wykonany z bardzo wytrzymałego materiału, obracający się w celu zapewnienia przyciągania niezbędnego do życia na jego wewnętrznej powierzchni.

Pierwszy raz sformułowanie „sfera Dysona” w literaturze pojawia się dzięki Nikołajowi Kardaszowowi w 1964 roku, który skategoryzował cywilizacje pod względem poziomu ich rozwoju. Podczas gdy nasza cywilizacja jest typu 0, cywilizacje typu II są zdolne do kontrolowania całej energii swojej gwiazdy. Niektóre inne przykłady zaawansowania takich cywilizacji to wspomniany już wcześniej monolityczny pierścień Nivena wokół gwiazdy, satelita Harropa–Dysona, który wykorzystuje strumień cząstek wiatru słonecznego zamiast fotonów do generowania energii, częściowe sfery Dysona wykorzystywane jako międzygwiezdny napęd; jak to działa, zobaczymy poniżej. Jeśli chodzi o sfery Dysona, zaproponowano ich istnienie wokół przeróżnych astronomicznych obiektów: białych karłów, gwiazd neutronowych, rentgenowskich układów podwójnych, a nawet czarnych dziur.

Przedyskutujmy teraz kilka cech, a w zasadzie inżynieryjnych problemów związanych z praktyczną implementacją sfery Dysona.

Zgodnie z prawem Gaussa, podobnie jak w przypadku siły elektrostatycznej, potencjał siły grawitacyjnej wewnątrz jednorodnej, pustej w środku sfery jest równy zero, a na zewnątrz jest taki jak od masy punktowej. Oznacza to, że siła, z jaką sfera działa na masę umieszczoną w jej wnętrzu, jest równa zero. W konsekwencji siła, z jaką masa (np. gwiazda) znajdująca się wewnątrz działa na sferę, jest również równa zero. Inaczej mówiąc, sfera nie oddziałuje z masami znajdującymi się wewnątrz niej, a masy wewnątrz nie oddziałują na nią. Środki masy sfery i gwiazdy nie są grawitacyjnie sprzężone: pozostają w stanie marginalnej (neutralnej) stabilności względem siebie, tzn. w konfiguracji równowagi, która nie jest ani stabilna, ani niestabilna. W praktyce brak stabilności oznacza, że układ sfera-gwiazda wymagałby aktywnej korekcji zmian pozycji wywołanej przez siły perturbacyjne, aby zapobiec zderzeniu.

Uwzględnijmy kluczowy aspekt urządzenia, czyli fakt, że gwiazda świeci, a sfera pochłania jej światło. W konsekwencji sfera odczuwa ciśnienie promieniowania.

Jednak ze względu na to, że pęd wszystkich fotonów wyemitowanych przez gwiazdę jest w sumie równy 0, nawet asymetryczna powłoka otaczająca gwiazdę nie zyska w ten sposób dodatkowego pędu. Ponieważ fotony znajdują się wewnątrz sfery, raz wyemitowane nieuchronnie uderzą w inną jej część i przekażą swój pęd. Oznacza to, że wypadkowa siła związana z ciśnieniem promieniowania ma wartość 0. Umożliwienie fotonom ucieczki na zewnątrz przez otwór w wybranym punkcie sfery może natomiast zapewnić mechanizm sterowania pozycją sfery względem gwiazdy, a nawet stanowić pewnego rodzaju napęd całej struktury.

Oczywiście niesymetryczność promieniowania, np. z powodu aktywności gwiazdy, będzie działać destabilizująco na neutralną równowagę układu sfera-gwiazda.

Jak wytrzymała musi być monolityczna sfera Dysona? Każdy element powierzchni dA powinien znajdować się w stabilnym położeniu względem gwiazdy. Można spróbować ustabilizować siłę przyciągającą grawitacji gwiazdy siłą odśrodkową, wynikającą z obrotu sfery wokół wybranej osi, ale nie jest to możliwe w przypadku monolitycznej sfery, ponieważ bieguny będą doświadczały innej siły odśrodkowej niż okolice równika, co wywoła siłę dążącą do spłaszczenia sfery. W praktyce materia nie jest nieskończenie sztywna, i będzie się deformować, gdy siły ściskające przekroczą krytyczną wytrzymałość elastyczną. Dla sfery o promieniu R i grubości ΔR można rozważyć przypadek, gdy przekroczona jest wytrzymałość plastyczna materiału σ_p, co wiąże się z krytycznym ciśnieniem $p_{\mathrm{kryt},p} = 2\sigma_p \Delta R/R$, albo gdy odkształcenie od sferyczności przekroczy krytyczny rozmiar, co wiąże się z ciśnieniem $p_{\mathrm{kryt},o} \approx E\,(\Delta R/R)^2$, gdzie E jest modułem Younga (stosunkiem naprężenia do względnego odkształcenia liniowego). Siła grawitacji gwiazdy o masie M działająca na jednostkę powierzchni sfery o gęstości ρ to $p_{\mathrm{graw}} = GM\Delta R\rho/R^2$, zatem krytyczny moduł Younga wynosi $E_{\mathrm{kryt}} = GM\rho/\Delta R$. Dla typowych danych, $M = 1\,M_\odot$ (masa Słońca), $\rho = 1\,\mathrm{g/cm^3}$ (gęstość wody) oraz $\Delta R = 10\,\mathrm{m}$, dostaniemy $E_{\mathrm{kryt}} \approx 10^{13}$ GPa, czyli wartość przekraczającą E dla najwytrzymalszych materiałów o czynnik rzędu miliard.

Moduł Younga przyjmuje wartości rzędu 10 GPa (gigapaskali) dla materiału typu drewno, 100 GPa dla metali, 10^3 GPa dla diamentu. Hipotetycznie możliwa alotropowa odmiana węgla, karbin, ma szacowany moduł Younga ~ 30 razy większy od diamentu.

Czy zwiększenie ΔR oraz zmniejszenie ρ byłoby rozwiązaniem? Wartości $\Delta R = 100\,\mathrm{km}$ oraz $\rho = 0{,}1\,\mathrm{g/cm^3}$ zmniejszają E_{kryt} do wielkości „jedynie" 10^4 większej od karbinu. Dla sfery o promieniu R równym jednej jednostce astronomicznej (odległości Ziemia-Słońce) oznaczałoby to masę sfery $\sim 1{,}4\,M_\odot$, czyli niezaniedbywalną z punktu widzenia samograwitacji sfery. Rozwiązaniem może być zmniejszenie gęstości powierzchniowej sfery tak bardzo, jak to możliwe. Dla przykładu jasność Słońca jest równa $L_\odot = 3{,}8 \cdot 10^{26}$ W, a zatem całkowity strumień promieniowania przez powierzchnię o promieniu r wynosi $f = L_\odot/(4\pi r^2)$, co daje ciśnienie $p_f = f/c$, gdzie c oznacza prędkość światła. Jeśli promieniowanie ma być równoważone przez siłę grawitacji $F = GM_\odot \rho_s dA/r^2$, gdzie ρ_s jest gęstością powierzchniową, a dA powierzchnią elementu o masie $m = \rho_s dA$, to z porównania ciśnień $p_f = p_g = F_g/dA$ dostajemy $\rho_s \approx L_\odot/(4\pi G M_\odot c) \approx 1\,\mathrm{g/m^2}$, czyli gęstość porównywalną do bardzo cienkich folii. Trudno powiedzieć, czy taka sfera byłaby w stanie przetrwać w warunkach kosmicznych.

Jak wygląda sytuacja, gdy sferę coś zaburzy? Ponieważ monolityczna sfera nie jest dynamicznie stabilna, trzeba jakoś przeciwdziałać siłom perturbacyjnym, by utrzymać ją w stanie równowagi. Siła powodowana przez masę m_p (np. planetę znajdującą się w układzie) w odległości r od sfery Dysona o masie m i promieniu R to z grubsza $F_{\mathrm{pert}} = Gmm_p/r^2$ (oczywiście zakładamy tu, że $R \ll r$). W celu zniwelowania tego przyspieszenia sfera może być wyposażona w silniki odrzutowe wyrzucające część jej masy z prędkością v, wywierając w ten sposób siłę $F_{odrz} = \dot{m}v$, której odpowiada moc $P_{\mathrm{odrz}} = \dot{m}v^2/2$. Utrata masy przez sferę jest więc równa $\dot{m} = F^2_{\mathrm{odrz}}/P_{\mathrm{odrz}}$, co oznacza czas życia sfery $\tau = m/\dot{m} = 2P_{\mathrm{odrz}}m/F^2_{\mathrm{odrz}}$. Dla $F_{\mathrm{pert}} = F_{\mathrm{odrz}}$ dostaniemy:

$$\tau = \frac{2P_{\mathrm{odrz}} r^4}{G^2 m m_p^2} = \left(\frac{P_{\mathrm{odrz}}}{L_\odot}\right)\left(\frac{r}{1\,\mathrm{j.a.}}\right)^4\left(\frac{m}{m_{\jupiter}}\right)^{-1}\left(\frac{m_p}{m_{\jupiter}}\right)^{-2}\cdot 200\ \mathrm{lat}.$$

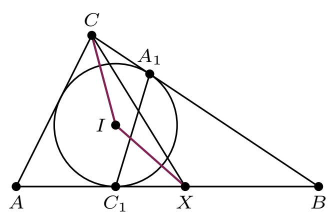
Wynik zapisaliśmy w postaci iloczynu bezwymiarowych stosunków występujących tu wielkości do typowych wartości, uzyskując w konsekwencji skalę czasu równą około 200 lat. Za typową wartość masy przyjęliśmy masę Jowisza $m_{♃}$. Ponieważ sfera jest zasilana energią gwiazdy, to oczywiście $\frac{P_{\mathrm{odrz}}}{L_{\odot}} \leqslant 1$, a w praktyce stosunek ten byłby zapewne znacznie mniejszy od 1. Aby sfera o masie $m_{♃}$ była stabilna przez wystarczająco długi czas (np. $\tau > 10$ milionów lat), w okolicy 1 j.a. nie może znajdować się żadne ciało o masie większej niż $10^{-2} m_{♃}$. Jeśli w układzie nie ma planet, ponieważ np. zostały wykorzystane do budowy sfery, to wydaje się, że stabilność dzięki napędowi zasilanemu światłem gwiazdy może wystarczyć w kosmicznych skalach czasowych. Alternatywnie, sfera może wykorzystywać masę gwiazdy jako paliwo do stabilizacji swojej pozycji.

Przy pisaniu tego tekstu obficie korzystałem z artykułu J. T. Wrighta: „Dyson Spheres”, *Serbian Astronomical Journal*, 200, 1 (2020) `arXiv:2006.16734`.

Jak widać, monolityczna sfera Dysona wydaje się interesującym pomysłem teoretycznym, ale może sprawić pozaziemskiej cywilizacji wiele praktycznych kłopotów. Z drugiej strony cywilizacja zdolna do manipulacji obiektami w skali gwiazdowej z pewnością daje sobie radę z większymi problemami.

Zadania

Przygotował Dominik BUREK



M 1789. Okrąg o środku w punkcie I jest wpisany w trójkąt ABC i jest styczny do boków BC i AB odpowiednio w punktach A_1 i C_1. Na odcinku BC_1 obrano punkt X taki, że $IX = IC$. Udowodnić, że środek odcinka XC leży na odcinku A_1C_1.

M 1790. Funkcja $f\colon \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ dla wszystkich $x, y \in \mathbb{R}$ spełnia nierówność

$$f(x^2 + 2y) \geqslant f(x^2 + 3y).$$

Udowodnić, że f jest funkcją stałą na zbiorze dodatnich liczb rzeczywistych.

M 1791. Każdy wierzchołek n-kąta wypukłego $\mathcal{F}$ ($n \geqslant 4$) malujemy na biało lub czarno. Przekątną $\mathcal{F}$ nazwiemy *kolorową*, jeśli jej końce są różnego koloru. Kolorowanie wszystkich wierzchołków $\mathcal{F}$ nazwiemy *dobrym*, jeśli $\mathcal{F}$ można podzielić na trójkąty kolorowymi przekątnymi, które nie mają punktów wspólnych innych niż wierzchołki $\mathcal{F}$. Wyznaczyć liczbę dobrych kolorowań.

Przygotował Andrzej MAJHOFER

F 1101. Pokonywanie zakrętu ze zbyt dużą prędkością kończy się poślizgiem i wypadnięciem z łuku drogi lub przewróceniem pojazdu (tzw. dachowaniem). Znajdź warunki, w jakich następuje pierwszy lub drugi przypadek. Samochód o masie m pokonuje zakręt o promieniu R z prędkością v, współczynnik tarcia opon o powierzchnię drogi wynosi f, a przyspieszenie ziemskie g. Droga jest pozioma. Środek masy pojazdu znajduje się na wysokości h nad drogą, w połowie odległości d między kołami.

F 1102. W wyniku zderzeń neutronów promieniowania kosmicznego z atomami atmosferycznego azotu ^{14}N powstają atomy węgla ^{14}C, które reagują z atmosferycznym tlenem, tworząc cząsteczki dwutlenku węgla CO_2. Izotop ^{14}C jest nietrwały i w przemianie β^- rozpada się do ^{14}N z czasem połowicznego zaniku $\tau_{1/2} = 5730$ lat. Ogromna większość cząsteczek CO_2 w atmosferze zawiera stabilny izotop ^{12}C, przy czym stosunek liczb cząsteczek z atomami ^{14}C i ^{12}C pozostaje stały w czasie (dynamiczna równowaga procesów tworzenia i rozpadu ^{14}C). W wyniku fotosyntezy w takim samym stosunku izotopy węgla są przyswajane przez organizmy żywe (dopóki pozostają żywe). W ruinach starożytnego miasta archeolodzy znaleźli papirusowy zwój, w którym stosunek atomów ^{14}C i ^{12}C wynosił 80% wartości mierzonej we współczesnych roślinach. Kiedy powstał badany zwój?

Rozwiązania na str. 24