

Freeman J. Dyson

Institute for Advanced Study
Princeton, New Jersey, USA

Czas bez końca: fizyka i biologia w otwartym Wszechświecie *

Time Without End: Physics and Biology in an Open Universe **

Abstract: Quantitative estimates are derived for three classes of phenomena that may occur in an open cosmological model of Friedmann type. (1) Normal physical processes taking place with very long time-scales. (2) Biological processes that will result if life adapts itself to low ambient temperatures according to a postulated scaling law. (3) Communication by radio between life forms existing in different parts of the universe. The general conclusion of the analysis is that an open universe need not evolve into a state of permanent quiescence. Life and communication can continue for ever, utilizing a finite store of energy, if the assumed scaling laws are valid.

Treść

Wykład I. Filozofia

Wykład II. Fizyka

- A. Ewolucja gwiazd
- B. Odłączanie się planet od gwiazd
- C. Odłączanie się gwiazd od galaktyk
- D. Zanikanie orbit wskutek promieniowania grawitacyjnego
- E. Zanikanie czarnych dziur poprzez proces Hawkinga
- F. Materia jest ciekła w temperaturze zera absolutnego
- G. Wszelka materia przemienia się w żelazo
- H. Zapadanie się gwiazdy z żelaza w gwiazdę neutronową
- J. Zapadanie się zwyczajnej materii w czarną dziurę

Wykład III. Biologia

Wykład IV. Łączność

Literatura

* Artykuł, opublikowany w *Reviews of Modern Physics* **51**, 447 (1979), został przetłumaczony za zgodą Autora i Wydawcy. [Translated with permission, Copyright © 1979 by The American Physical Society] (przyp. Red.).

** Materiał zawarty w tym artykule przedstawiony został po raz pierwszy jako cztery wykłady wygłoszone w ramach „Wykładów Jamesa Arthura o czasie i jego tajemnicach” w Uniwersytecie Nowojorskim jesienią 1978 r. Pierwszy wykład przeznaczony jest dla szerokiego audytorium, pozostałe trzy dla fizyków i astronomów.

Wykład I. Filozofia

Rok temu Steven Weinberg opublikował znakomitą książkę [1] *The First Three Minutes* wyjaśniającą szerokiemu ogółowi czytelników stan naszej wiedzy o początku Wszechświata. W szóstym rozdziale opisuje on szczegółowo w jaki sposób nieśmiałość teoretyków opóźniła rozwój obserwacji i zrozumienia Wszechświata:

„Tak właśnie bywa w fizyce — błędy nasze nie polegają na tym, że zbyt poważnie traktujemy własne teorie, ale na tym, iż nie traktujemy ich wystarczająco poważnie.

Trudno uświadomić sobie, że liczby i równania, którymi bawimy się przy naszych biurkach, mają coś wspólnego z rzeczywistym światem. Co gorsza, często panuje przekonanie, że niektóre zjawiska nie stanowią odpowiednich obiektów do badań teoretycznych i eksperymentalnych. Gamow, Alpher i Herman [2] zasłużyli na wielkie wyróżnienie przede wszystkim za poważne potraktowanie wczesnego Wszechświata — za próbę sprawdzenia tego, co można o nim powiedzieć nie wykraczając poza znane prawa fizyki. Zasłużyli na to, chociaż nie wykonali ostatniego, decydującego kroku. Najważniejszym rezultatem ostatecznego odkrycia promieniowania reliktowego [3] było zmuszenie nas wszystkich do przyjęcia koncepcji, że wczesny Wszechświat jednak istniał¹.”

Dzięki Penziasowi, Wilsonowi, Weinbergowi i innym, badanie początków Wszechświata jest obecnie zajęciem godnym poważania. Zawodowi fizycy, którzy badają pierwsze trzy minuty lub pierwszą mikrosekundę, nie muszą już odczuwać onieśmielenia mówiąc o swojej pracy. Ale koniec Wszechświata jest już inną sprawą. Szukałem w literaturze prac o końcu Wszechświata i znalazłem ich niewiele ([4—8]). Lista ta jest oczywiście niepełna, ale uderzającą cechą wszystkich tych prac jest to, że są one pisane stylem apologetycznym lub żartobliwym, jak gdyby autorzy prosili aby nie traktować ich poważnie. Badanie odległej przyszłości wydaje się dziś równie niegodne jak badanie odległej przeszłości trzydzieści lat temu. Jestem szczególnie zobowiązany Jamalowi Islamowi za wstępny szkic jego pracy z 1977 roku, który skłonił mnie do myślenia poważnie o dalekiej przyszłości. Mam nadzieję, że wykłady te przyspieszą nadejście dnia, kiedy eschatologia, czyli badanie końca Wszechświata stanie się szacowną dziedziną nauki, nie zaś tylko gałęzią teologii.

Sam Weinberg też nie jest wolny od uprzedzeń, które staram się rozwiązać. Na końcu swej książki o przeszłości Wszechświata dodaje krótki rozdział o jego przyszłości. Opis pierwszych trzech minut zajmuje mu 150 stron, natomiast całą przyszłość załatwia na pięciu stronach. Bez wdawania się w szczegóły techniczne, podsumowuje swój pogląd na przyszłość w kilkunastu słowach:

„Im bardziej Wszechświat wydaje się możliwy do ogarnięcia rozumem tym bardziej wydaje się bezcelowy.”

Weinberg sformułował tu, zapewne mimowolnie, istotny problem. Niepodobieństwem jest obliczyć szczegółowo daleką przyszłość Wszechświata, nie uwzględniając obecności życia i rozumu. Niepodobieństwem jest obliczyć możliwości życia i rozumu nie poruszając, przynajmniej peryferycznie, problemów filozoficznych. Jeśli natomiast mamy zbadać, w jaki sposób życie rozumne może sterować fizyczną ewolucją Wszechświata dla swoich

¹ Tłumaczył Aleksander Blum, Iskry, Warszawa 1980 (przyp. Red.).

własnych celów, to z kolei nie możemy uniknąć rozważań, jakie mogą być cele i wartości rozumu. Ale gdy tylko wymieniamy słowa wartość i cel, wpadamy na jeden z najmocniej obwarowanych zakazów dwudziestowiecznej nauki. Posłuchajmy głosu Jacquesa Monoda [9], wielkiego kapłana naukowego racjonalizmu, w jego książce *Chance and Necessity*:

„Wszelkie łączenie wiedzy z wartościami jest bezprawne i zakazane”.

Monod był jednym z tych umysłów, dzięki którym rozkwitła biologia molekularna w naszym stuleciu. Przeciwwstawienie się jego anatemie wymaga pewnej odwagi. Ja jednak przeciwstawię się mu i będę zachęcać innych do tego samego. Zakaz łączenia wiedzy i wartości wyrósł w ciągu dziewiętnastego wieku z wielkiej batalii między biologami ewolucjonistami pod wodzą Thomasa Huxleya a duchowieństwem, któremu przewodził biskup Wilberforce. Huxley wygrał, jednak w sto lat później Monod i Weinberg nadal zwalczali ducha biskupa Wilberforce’a. Dzisiaj fizycy już nie mają powodu obawiać się ducha Wilberforce’a. Jeśli nasza analiza dalekiej przyszłości prowadzić będzie do pojawienia się pytań dotyczących istoty i celu życia, to przebadajmy te pytania śmiało i bez zakłopotania. Jeśli nasze odpowiedzi na te pytania wydadzą się naiwne i powierzchowne, to tym lepiej dla bezustannej witalności naszej nauki.

Proponuję w tych wykładach rozważać przyszłość tak jak Weinberg w swej książce rozważał przeszłość. Moje rozumowanie będzie uproszczone, ale zawsze ilościowe. Celem jest ustalenie liczbowych granic, w obrębie których musi tkwić los Wszechświata. Nie będę też więcej tłumaczyć się z mieszania filozoficznych domysłów z równaniami matematycznymi.

Dwa najprostsze modele kosmologiczne [10] opisują jednorodny Wszechświat bez ciśnienia, który może być zamknięty albo otwarty. Zamknięty Wszechświat ma geometrię opisaną metryką

$$ds^2 = R^2[d\psi^2 - d\chi^2 - \sin^2 \chi d\Omega^2], \quad (1)$$

gdzie χ jest współrzędną przestrzenną poruszającą się z materią, ψ jest współrzędną czasową związaną z fizycznym czasem t przez

$$t = T_0(\psi - \sin \psi), \quad (2)$$

zaś R jest promieniem Wszechświata danym przez

$$R = cT_0(1 - \cos \psi). \quad (3)$$

Cały Wszechświat jest przedstawiony za pomocą współrzędnych (ψ, χ) zawartych w prostokącie

$$0 < \psi < 2\pi, \quad 0 < \chi < \pi. \quad (4)$$

Wszechświat ten jest zamknięty zarówno w czasie, jak i przestrzeni. Czas jego trwania jest równy

$$2\pi T_0, \quad (5)$$

gdzie T_0 jest wielkością w zasadzie mierzalną. Jeżeli nasz Wszechświat jest opisany tym modelem, to T_0 musi wynosić co najmniej 10^{10} lat.

Jednorodny, otwarty Wszechświat bez ciśnienia ma zamiast (1) metrykę postaci

$$ds^2 = R^2[d\psi^2 - d\chi^2 - \sin^2\chi d\Omega^2], \quad (6)$$

gdzie teraz

$$t = T_0(\sinh\psi - \psi), \quad (7)$$

$$R = cT_0(\cosh\psi - 1), \quad (8)$$

współrzędne zaś (ψ, χ) przebiegają nieskończony zakres²

$$0 < \psi < \infty, \quad 0 < \chi < \infty. \quad (9)$$

Otwarty Wszechświat jest nieskończony zarówno w czasie, jak i w przestrzeni.

Modele (1) i (6) są tylko najprostszymi możliwościami, w literaturze można znaleźć modele znacznie bardziej złożone. Dla moich celów wystarczy rozważać (1) i (6) jako przedstawicieli wszechświatów zamkniętych i otwartych. Zasadnicze pytanie czy nasz Wszechświat jest w rzeczywistości zamknięty czy otwarty zostanie już w niedalekiej przyszłości rozstrzygnięte przez obserwacje. Dłużej nie będę zatrzymywać się już nad tym problemem, chociaż nadmienię, iż moje skłonności filozoficzne silnie faworyzują otwarty Wszechświat, a dotychczasowe obserwacje nie wykluczają go ([11, 12]).

Dominujący pogląd [1] głosi, że przyszłość Wszechświata otwartego i zamkniętego jest równie ponura. Zgodnie z nim mamy jedynie wybór pomiędzy usmażeniem się w zamkniętym wszechświecie, a zamrożeniem w otwartym. Koniec zamkniętego Wszechświata był szczegółowo badany przez Reesa [4]. Z przykrością muszę zgodzić się z wyrokiem Reesa, iż w tym wypadku nie unikniemy usmażenia się. Niezależnie od tego jak głęboko zagrzebiemy się w ziemię aby skryć się przed bezustannie rosnącą furią przesuniętego ku fioletowi promieniowania tła, będziemy mogli jedynie opóźnić o parę milionów lat nasz żałosny koniec. Nie będę dalej rozważać zamkniętego Wszechświata, gdy wyobrażam bowiem sobie całą naszą egzystencję zamkniętą w prostokącie (4), to doznaję uczucia klaustrofobii. Postawię tylko jedno pytanie, odpowiedź na które może dać nam nikłą szansę przetrwania. Załóżmy, iż stwierdziliśmy, że Wszechświat jest zamknięty, a więc skazany na zapadnięcie się — czy jest do pomyślenia, aby rozumnym działaniem, przemieniając materię w promieniowanie i porządkując na skalę kosmiczną przepływy energii otworzyć zamknięty Wszechświat i zmienić topologię czasoprzestrzeni tak, by tylko jej część zapadła się, a reszta zaczęła wiecznie rozszerzać się? Nie znam odpowiedzi na to pytanie. Jeżeli okaże się, że Wszechświat jest zamknięty, mamy jeszcze około 10^{10} lat na rozwiązanie technologicznych problemów z otwarciem go.

Zainteresowany jestem głównie otwartą kosmologią, bowiem wydaje się ona dawać bez porównania szersze pole działania dla życia i rozumu. Horyzonty w otwartej kosmologii rozszerzają się nieograniczenie. Ściślej mówiąc, odległość od horyzontu w metryce (6) wynosi

$$d = R\psi, \quad (10)$$

² Dla Wszechświata otwartego nazywanie funkcji R promieniem jest mylące, bowiem w modelu tym istnieją punkty dowolnie od siebie odległe. Funkcja R określa nam, jak zmienia się w czasie odległość dwu ciał, których współrzędne przestrzenne są stałe. Dlatego też lepiej nazywać (za Weinbergiem) R kosmicznym czynnikiem skali (przyp. tłum.).

z R danym przez (8), a liczba galaktyk widocznych w obrębie horyzontu jest

$$N = N_0(\sinh 2\psi - 2\psi), \quad (11)$$

gdzie N_0 jest liczbą rzędu 10^{10} .

Porównując (11) z (7) stwierdzamy, że liczba widocznych galaktyk zmienia się dla dużych czasów jak t^2 . Osobliwy przypadek numeryczny powoduje, że rozmiar kątowy typowej galaktyki w chwili t jest

$$\delta \sim 10^5 t^{-1} \text{ rad}, \quad (12)$$

z t mierzonym w latach. Ponieważ (11) i (7) dają

$$N \sim 10^{-10} t^2, \quad N\delta^2 \sim 1, \quad (13)$$

okazuje się więc, że *niebo jest zawsze mniej więcej wypełnione galaktykami*, niezależnie jak daleko pójdziemy w przyszłość. W miarę, jak kątowy rozmiar każdej galaktyki maleje, nowe galaktyki stale pojawiają się na horyzoncie, aby wypełnić luki. Światło z dalekich galaktyk będzie silnie przesunięte ku czerwieni, jednakże niebo nigdy nie stanie się puste i ciemne, jeżeli tylko będziemy w stanie dostroić nasze oczy do coraz to dłuższych w miarę upływu czasu fal.

Omówię trzy zasadnicze problemy odnoszące się do otwartego Wszechświata z metryką (6).

1) Czy Wszechświat ulegnie zamrożeniu do stanu trwałego fizycznego bezruchu w miarę rozszerzania się i ochładzania?

2) Czy życie i rozum będą w stanie przetrwać nieskończenie długo?

3) Czy będzie możliwe utrzymanie łączności i przekazywanie informacji poprzez stale rosnące odległości między galaktykami?

Te trzy pytania zostaną omówione szczegółowo w wykładach 2, 3 i 4. Wstępnie moje odpowiedzi będą brzmią: nie, tak i być może. Odpowiedzi te są zapewne tylko odbiciem moich optymistycznych skłonności filozoficznych. Nie spodziewam się, że każdy zgodzi się z tymi odpowiedziami. Moim celem jest skłonienie ludzi do poważnego zastanowienia się nad tymi pytaniami.

Jeżeli, jak mam nadzieję, moje odpowiedzi okażą się prawdziwe, to co by to właściwie znaczyło? Będzie to oznaczać, że odkryliśmy w fizyce i astronomii analogon twierdzenia Gödla [13] w czystej matematyce. Gödel udowodnił (patrz [14]), że świat czystej matematyki jest niewyczerpywalny; żaden skończony zbiór aksjomatów i reguł wnioskowania nie będzie nigdy w stanie objąć całości matematyki; dla dowolnego skończonego zbioru aksjomatów możemy znaleźć sensowne pytania matematyczne, na które aksjomaty te nie będą mogły odpowiedzieć. Mam nadzieję, że analogiczna sytuacja istnieje w świecie fizycznym. Jeżeli mój pogląd na przyszłość jest poprawny, oznacza to, że świat fizyki i astronomii jest również niewyczerpywalny; niezależnie jak daleko zajdziemy w przyszłość, zawsze będzie się działo coś nowego, zawsze będą się pojawiać nowe informacje i nowe światy, które będziemy mogli badać; stale poszerzająca się sfera życia, świadomości i pamięci. Mówiąc w tym stylu mieszam wiedzę i wartości wbrew zakazowi Monoda. Jestem za to w dobrym towarzystwie. W osiemnastym stuleciu, zanim nadeszły czasy Darwina, Huxleya i biskupa Wilberforce'a, uczeni nie podlegali żadnym zakazom łączenia nauki z wartościami. Thomas Wright [15] ogłaszając odkrycie galaktyk nie obawiał się użycia argumentów teologicznych dla podparcia swojej teorii astronomicznej:

„Ponieważ Świat Stworzony jest równie wspaniały jak i Stwórca, wnioskujemy z nieukończonej wszechżywej mocy, że tak jak świat widoczny zdaje się być pełen układów gwiazdnych i światów planetarnych, tak też w podobny sposób bezmierny ogrom stworzonego jest nieograniczoną mnogością światów przypominających ten znany... O tym, że według wszelkiego prawdopodobieństwa może to być prawdą, przekonują liczne zamglone plamy, przez nas ledwo postrzegane, nie przypominające naszego rozgwieżdżonego Nieba, w których, mimo że są świecącymi przestrzeniami, żadna gwiazda ani też żadne inne ciało nie może być rozróżnione; mogą być one, wedle wszelkiego prawdopodobieństwa, zewnętrznymi światami graniczącymi ze światem znanym, zbyt odległymi abyśmy mogli dosięgnąć je nawet teleskopami”.

Trzydzieści pięć lat później domysły Wrighta zostały potwierdzone dokładnymi obserwacjami Williama Herschela. Wright obliczył również liczbę nadających się do zamieszkania światów w naszej Galaktyce:

„W całości zatem możemy bezpiecznie doliczyć się 170 000 000, nie licząc komet, o których sędzę, że stanowią daleko liczniejszy składnik świata”.

Stwierdzenie o kometach jest zapewne również prawdziwe, chociaż nie mówi on nam, w jaki sposób ocenił ich liczbę. Istnienie tak wielu możliwych do zamieszkania światów było dla Wrighta nie tylko hipotezą naukową, lecz również źródłem moralnej refleksji:

„W tym wielkim niebiańskim świecie katastrofa jednego świata, takiego jak nasz lub nawet całkowita zagłada układu światów, może być dla wielkiego Stwórcy Natury niczym więcej niż dla nas najpospolitszy wypadek życiowy i wedle wszelkiego prawdopodobieństwa takie powszechne dni Sądu Ostatecznego mogą być tam równie częste, jak narodziny lub śmierć dla nas na Ziemi. Myśl ta ma w sobie coś tak radosnego, że czuję, iż nie mogę przyglądać się gwiazdom nie zastanawiając się, dlaczego cały świat nie zamieni się w astronomów, że ludzie obdarzeni uczuciem i rozumem winni zlekceważyć umiejętności, którymi są normalnie tak zainteresowani, a wówczas mogąc powiększać swoje zrozumienie świata byliby w stanie przekonać się o swojej nieśmiertelności i pogodzić się ze wszystkimi drobnymi przypadłościami ludzkiej natury bez najmniejszej obawy.

Cały ten wspaniały ogrom gwiazdnych siedlisk wydaje się zapowiadać: Czego zatem powinniśmy unikać, aby zachować nasze naturalne prawa do niego, aby zasłużyć na takie dziedzictwo, o którym, niestety, myślimy, że stworzone zostało tylko po to, by zaspokoić wymagania chępliwych istot, gdy tymczasem są one przywiązane do tego świata niczym atomy do ziarenka piasku”.

Był to głos osiemnastego stulecia. Natomiast Steven Weinberg powiada „im bardziej Wszechświat wydaje się możliwy do ogarnięcia rozumem, tym bardziej wydaje się bezcelowy”. Jeżeli Weinberg mówi w imieniu wieku dwudziestego, to ja wolę wiek osiemnasty.

Wykład II. Fizyka

W tym wykładzie naśladowuję Islama [6] i badam fizyczne procesy, które będą zachodzić w otwartym Wszechświecie w ciągu bardzo długich okresów. Rozważam tu naturalny Wszechświat nie zakłócony działaniami życia i rozumu. Życie i rozum będą omówione w wykładach III i IV.

Dwa założenia tkwią u podstaw tych rozważań: 1) prawa fizyki nie zmieniają się w czasie i 2) stosowane prawa fizyki są już nam znane. Te same założenia poczynił w swoim opisie przeszłości również Weinberg [1]. Przyjęcie ich uzasadniam tak samo jak i on. Niezależnie od tego czy wierzymy, że obecnie znane prawa fizyki stanowią ostateczną i niepodlegającą zmianie prawdę, czy też nie, jest wielce pouczające przebadanie konsekwencji tych praw tak daleko, jak tylko możemy sięgnąć w przeszłość lub przyszłość. Lepiej jest być nadmiernie śmiałym niż nadmiernie bojaźliwym w ekstrapolowaniu naszej wiedzy od znanego do nieznanego. Może się zdarzyć ponownie, jak już się zdarzyło z kosmologicznymi domysłami Alpera, Hermana i Gamowa [2], że naiwna ekstrapolacja znanych praw na nowe obszary, doprowadzi nas do postawienia nowych ważnych pytań.

W innym miejscu streściłem ([16, 17]) argumenty popierające hipotezę, że prawa fizyki nie zmieniają się. Argumentem najmocniej przemawiającym do wyobraźni są dokonane niedawno przez Shlyakhtera [18] pomiary stosunku ilości izotopów w próbkach rudy pobranych z naturalnego reaktora, który działał przed 2 mld lat w kopalni uranu w Oklo w Gabonie. Kluczową wielkością jest stosunek $^{149}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$, tzn. ilości dwu lekkich izotopów samaru, które nie są produktami rozszczepienia. W naturalnym samarze stosunek ten wynosi około 0,9; w reaktorze w Oklo jest równy około 0,02. Niewątpliwie izotop ^{149}Sm ubyło pod wpływem dawki neutronów termicznych, które absorbował on w czasie pracy reaktora. Jeżeli we współczesnym reaktorze zmierzmy przekrój czynny na wychwyt neutronów termicznych przez ^{149}Sm , to znajdziemy wartość 55 kb; dominujący wkład pochodzi tu od ostrego rezonansu na wychwyt neutronów o energii 0,1 eV. Dokładna analiza stosunku ilości izotopów w Oklo prowadzi do wniosku, że przekrój czynny dla ^{149}Sm był przed 2 mld lat w przedziale $55 \pm 8\text{ kb}$. Oznacza to, że położenie rezonansu na wychwyt nie mogło przesunąć się o więcej niż 0,02 eV w ciągu $2 \cdot 10^9$ lat. Z drugiej strony położenie tego rezonansu wyznacza różnicę pomiędzy energiami wiązania stanu podstawowego ^{149}Sm i stanu jądra złożonego ^{150}Sm , w którym neutron jest pochłonięty. Obie energie wiązania są rzędu 10^9 eV i zależą w skomplikowany sposób od natężeń oddziaływania jądrowego i kulombowskiego. Fakt, że te dwie energie wiązania pozostawały w równowadze z dokładnością do dwóch na 10^{11} w ciągu $2 \cdot 10^9$ lat wskazuje, że natężenia sił jądrowych i kulombowskich nie mogły zmienić się o więcej niż o kilka na 10^{18} w ciągu roku. Jest to najbardziej czuły test stałości praw fizyki, jaki dotąd znaleźliśmy. Fakt, że nie znaleziono żadnych śladów zmian nie dowodzi oczywiście, że prawa są ściśle stałe. W szczególności nie wyklucza to możliwości zmian natężenia sił grawitacyjnych w skali czasowej znacznie krótszej niż 10^{18} lat. Dla prostoty przyjmuję, że prawa fizyki są ściśle niezmiennie. Każde inne założenie byłoby bardziej skomplikowane i wprowadzałoby dodatkowe, arbitralne hipotezy.

W zasadzie nie jestem w stanie przedstawić eksperymentalnych dowodów na rzecz hipotezy, że prawa fizyki stosowane do opisu dalekiej przyszłości są nam już znane. Najpoważniejszą niepewnością mającą wpływ na ostateczny los wszechświata jest kwestia czy proton jest absolutnie stabilny względem rozpadu na cząstki lżejsze. Jeżeli proton jest nietrwały, to cała materia jest przemijająca i musi rozpaść się na promieniowanie. Wywnięto szereg poważnych argumentów teoretycznych ([20, 8, 21]) na rzecz poglądu, że proton powinien ulegać rozpadowi z długim okresem połowicznego zaniku, być może w procesach wirtualnych z udziałem czarnych dziur. Eksperymentalne ograniczenia na szybkość roz-

padu protonu [22] nie wykluczają istnienia takich procesów. Ponownie, dla zachowania prostoty pomijam te możliwości i zakładam absolutną trwałość protonu. Później przedyskutuję szczegółowo wpływ rzeczywistych procesów z udziałem czarnych dziur na stabilność materii.

Teraz jestem już gotów rozpocząć omawianie zjawisk fizycznych, które zajdą w otwartej kosmologii (6) przechodząc kolejno do coraz to dłuższych i dłuższych skal czasu. Najpierw przedstawię klasyczne zjawiska astronomiczne, a następnie zjawiska kwantowe.

Uwaga dodana w korekcie. Od momentu, kiedy wygłosiłem te wykłady pojawiła się lawina prac omawiających modele cząstek w ramach wielkich teorii unifikacyjnych, w których proton jest nietrwały ([23—25]).

A. Ewolucja gwiazd.

Gwiazdy o małej masie, a więc te najdłużej żyjące, wyczerpią swoje paliwo wodorowe, skurczą się w białe karły i ochłodzą do bardzo niskich temperatur w czasie rzędu 10^{14} lat. Gwiazdy o większej masie będą potrzebować krótszego czasu na osiągnięcie chłodnego stanu końcowego, którym może być biały karzeł, gwiazda neutronowa lub czarna dziura, zależnie od przebiegu ich ewolucji.

B. Odłączanie się planet od gwiazd.

Średni czas potrzebny do odłączenia planety od gwiazdy wskutek bliskiego spotkania z inną gwiazdą wynosi

$$T = (\varrho V \sigma)^{-1}, \quad (14)$$

gdzie ϱ jest gęstością gwiazd w przestrzeni, V — średnią prędkością względną dwu gwiazd, a σ przekrojem czynnym na zbliżenie powodujące odłączenie. Dla układu Ziemia-Słońce poruszającego się w zewnętrznym obszarze dysku galaktyki spiralnej przybliżone wartości liczbowe wynoszą

$$\varrho = 3 \cdot 10^{-41} \text{ km}^{-3}. \quad (15)$$

$$V = 50 \text{ km/s}, \quad (16)$$

$$\sigma = 2 \cdot 10^{16} \text{ km}^2, \quad (17)$$

$$T = 10^{15} \text{ lat}, \quad (18)$$

Skala czasowa dla zbliżenia powodującego poważne naruszenie orbit planetarnych będzie znacznie krótsza niż 10^{15} lat.

C. Odłączanie się gwiazd od galaktyk.

Dynamiczna ewolucja galaktyk jest skomplikowanym procesem, który nie w pełni jeszcze rozumiemy. Daję tutaj jedynie bardzo grube oceny skali czasowej. Jeżeli galaktyka składa się z N gwiazd o masie M w objętości o promieniu R , wówczas pierwiastek ze średniego kwadratu prędkości będzie rzędu

$$V = [GNM/R]^{1/2}. \quad (19)$$

Przekrój czynny na bliskie spotkanie dwóch gwiazd, zmieniające o duży kąt ich kierunki ruchu, wynosi

$$\sigma = (GM/V^2)^2 = (R/N)^2. \quad (20)$$

Średni czas, jaki upływa pomiędzy kolejnymi bliskimi spotkaniami, jest

$$T = (QV\sigma)^{-1} = (NR^3/GM)^{1/2}. \quad (21)$$

Jeżeli rozważamy typową dużą galaktykę z $N = 10^{11}$, $R = 3 \cdot 10^{17}$ km wówczas

$$T = 10^{19} \text{ lat}. \quad (22)$$

Relaksacja dynamiczna galaktyki zachodzi głównie poprzez oddziaływania gwiazd na większych odległościach i w skali czasowej

$$T_R = T(\log N)^{-1} = 10^{18} \text{ lat}. \quad (23)$$

Relaksacja dynamiczna i bliskie spotkania dają łącznie zapadanie się centralnych obszarów galaktyki w czarną dziurę oraz parowanie gwiazd z obszarów zewnętrznych. Parujące gwiazdy uzyskują prędkość ucieczki i odłączają się od galaktyki po czasie rzędu 10^{19} lat. Nie wiemy jaki ułamek masy galaktyki zapada się, a jaki ułamek ucieka. Część uciekająca stanowi przypuszczalnie 90 do 99% masy.

Gwałtowne zjawiska obserwowane obecnie w centralnych obszarach wielu galaktyk są zapewne wywołane podobnym procesem ewolucji dynamicznej działającym w znacznie krótszej skali czasu. Zgodnie z (21), skala czasu dla ewolucji i zapadania się będzie krótka, jeżeli obiekty dynamiczne są nieliczne i o dużej masie; np. zwarte gromady gwiazd i chmury gazu zamiast pojedynczych gwiazd. Długa skala czasowa (22) stosuje się do galaktyki nie zawierającej obiektów dynamicznych większych niż pojedyncze gwiazdy.

D. Zanikanie orbit wskutek promieniowania grawitacyjnego

Jeżeli jakieś ciało krąży wokół ustalonego punktu z prędkością V , okresem P i energią kinetyczną E , to będzie tracić energię na emisję promieniowania grawitacyjnego z prędkością rzędu

$$E_g = (V/c)^5 (E/P). \quad (24)$$

Każdy grawitacyjnie związany układ ciał krążących nawzajem wokół siebie rozpadnie się wskutek hamowania wywołanego tym promieniowaniem w czasie rzędu

$$T_g = (c/V)^5 P. \quad (25)$$

Dla Ziemi obiegającej Słońce skala czasu na wypromieniowanie grawitacyjne jest

$$T_g = 10^{20} \text{ lat}. \quad (26)$$

Ponieważ jest znacznie więcej niż (18), Ziemia niemal na pewno ucieknie od Słońca, zanim w wyniku promieniowania przybliży się do niego. Lecz gdyby zdarzyło się tak, że Słońce ucieknie z Galaktyki unosząc Ziemię, to po czasie rzędu (26) Ziemia spadnie na Słońce. Orbity gwiazd w galaktyce również będą ulegać zanikowi wskutek emisji promieniowania grawitacyjnego w czasie rzędu (25), gdzie P jest teraz okresem obiegu po orbitach gala-

ktycznych. Dla galaktyki takiej jak nasza, której $V = 200$ km/s i $P = 2 \cdot 10^8$ lat, ten czas jest rzędu

$$T_g = 10^{24} \text{ lat} . \quad (27)$$

Ponownie jest to znacznie więcej niż (22), co pokazuje, że w ewolucji galaktyk relaksacja dynamiczna przeważa nad promieniowaniem grawitacyjnym.

E. Zanikanie czarnych dziur poprzez proces Hawkinga

Według Hawkinga [26] każda czarna dziura o masie M zanika w wyniku emisji promieniowania termicznego i w końcu znika całkowicie po czasie

$$T = G^2 M^3 / \hbar c^4 . \quad (28)$$

Dla czarnej dziury o masie Słońca czas życia wynosi

$$T = 10^{64} \text{ lat} . \quad (29)$$

Czarne dziury o masach galaktycznych będą mieć czasy życia sięgające 10^{100} lat. Pod koniec swego życia każda czarna dziura stanie się przez krótki czas bardzo jasna. W ostatniej sekundzie istnienia wyemituje około 10^{31} ergów promieniowania o wysokiej temperaturze. Zimny, rozszerzający się Wszechświat będzie przez bardzo długi czas rozświetlany sporadycznymi fajerwerkami.

F. Materia jest ciekła w temperaturze zera absolutnego.

Przechodzę następnie do omówienia grupy zjawisk fizycznych zachodzących w zwykłej materii w temperaturze zera bezwzględnego w wyniku kwantowego przenikania przez barierę potencjału. Czasy życia dla takich zjawisk dane są wzorem Gamowa

$$T = \exp(S) T_0 , \quad (30)$$

gdzie T_0 jest okresem drgań własnych układu, a S jest całką działania

$$S = (2/\hbar) \int (2MU(x))^{1/2} dx \quad (31)$$

Zmienna x jest tutaj współrzędną mierzącą stan układu przechodzącego przez barierę, a $U(x)$ jest wysokością bariery daną jako funkcja x . Aby w przybliżeniu ocenić S , zastępuję (31) przez

$$S = (8MUd^2/\hbar^2)^{1/2} , \quad (32)$$

gdzie d jest szerokością, a U średnią wysokością bariery, natomiast M jest masą obiektu przenikającego ją. Rozważać będę zjawiska, dla których S jest duże, tak że czas życia (30) jest skrajnie długi.

Jako przykład rozważmy zachowanie się bryły materii, skały lub planety, oziębionej do zera absolutnego. Jej atomy, pod wpływem sił kohezji i wiązań chemicznych, są zamrożone w pozornie niezmiennych położeniach. Od czasu do czasu jednak atomy będą przesuwac się względem siebie i przenikać bariery energetyczne kwantowym efektem tunelowym. Wysokość bariery będzie zazwyczaj rzędu jednej dziesiątej stałej Rydberga,

$$U = (1/20)(e^4 m / \hbar^2) , \quad (33)$$

a szerokość będzie rzędu promienia Bohra

$$d = (\hbar^2/me^2), \quad (34)$$

gdzie m jest masą elektronu. Całka działania (32) wynosi wówczas

$$S = (2Am_p/5m)^{1/2} = 27A^{1/2}, \quad (35)$$

gdzie m_p jest masą protonu, zaś A jest masą atomową poruszającego się atomu. Dla atomu żelaza z $A = 56$ otrzymujemy $S = 200$ i wzór (30) daje

$$T = 10^{65} \text{ lat}. \quad (36)$$

Nawet najbardziej sztywne materiały nie mogą zachować swoich kształtów czy też struktur chemicznych przez czas dłuższy niż (36). Po czasie rzędu 10^{65} lat każdy kawałek skały zachowuje się jak ciecz przyjmując kształt kulisty pod działaniem własnej grawitacji. Atomy i molekuly w jego wnętrzu będą nieustannie dyfundować niczym molekuly w kropli wody.

G. Wszelka materia przemienia się w żelazo.

W materii o temperaturze zera bezwzględnego będą zachodzić zarówno reakcje jądrowe jak i chemiczne. Pierwiastki cięższe od żelaza będą się rozpadać w różnych procesach, takich jak rozszczepienie czy rozpad α . Pierwiastki lżejsze od żelaza będą łączyć się na drodze syntezy jądrowej stopniowo w coraz cięższe pierwiastki, aż do żelaza. Rozważmy np. reakcję syntezy, w której dwa jądra o masie atomowej $\frac{1}{2}A$ i ładunku $\frac{1}{2}Z$ łączą się w jądro (A, Z) . Odpychanie kulombowskie obu jąder jest efektywnie ekranowane przez elektrony dopóki nie zbliżą się one na odległość

$$d = Z^{-1/3}(\hbar^2/me^2) \quad (37)$$

od siebie. Bariera kulombowska ma szerokość d i wysokość

$$U = (Z^2e^2/4d) = \frac{1}{4} Z^{7/3}e^4m/\hbar^2. \quad (38)$$

Masa zredukowana w ruchu względnym obu jąder wynosi

$$M = \frac{1}{4}Am_p. \quad (39)$$

Całka działania (32) staje się wówczas równa

$$S = (\frac{1}{2}AZ^{5/3}(m_p/m))^{1/2} = 30A^{1/2}Z^{5/6}. \quad (40)$$

Dla dwóch jąder łączących się w żelazo $Z = 26$, $A = 56$, dostajemy $S = 3500$, zatem

$$T = 10^{1500} \text{ lat}. \quad (41)$$

W skali czasu (41) zwyczajna materia jest radioaktywna i stale generuje energię jądrową.

H. Zapadnięcie się gwiazdy z żelaza w gwiazdę neutronową.

Po upływie czasu (41) większość materii we Wszechświecie będzie miała postać zwyczajnych gwiazd o małej masie, które osiągnęły stan białego karła i stały się chłodnymi kulami czystego żelaza. Jednakże gwiazda żelazna nadal jeszcze nie jest w stanie o naj-

niższej energii. Mogłaby bowiem uwolnić olbrzymią ilość energii, gdyby zapadła się w gwiazdę neutronową. Aby zapasć się, musi ona jedynie przetrwać barierę o skończonej wysokości i szerokości. Interesujące jest pytanie czy istnieje jakiś niesymetryczny sposób zapadania się, przechodzący przez punkt siodłowy niższy niż dla symetrycznego zapadnięcia się. Nie byłem w stanie znaleźć możliwego do przyjęcia modelu niesymetrycznego, dlatego też zakładam, że zapadnięcie się jest sferycznie symetryczne. W całości działania (31) współrzędną x będzie promień gwiazdy, a całość rozciągać się będzie od promienia gwiazdy neutronowej r do promienia gwiazdy żelaznej R , od której to zaczyna się zapadanie. Wysokość bariery $U(x)$ będzie zależała od równania stanu materii, które jest bardzo niepewne, gdy x zbliża się do r . Na szczęście równanie stanu jest dobrze znane w większej części obszaru całkowania, gdzie x jest duże w porównaniu z r i głównym wkładem do $U(x)$ jest energia nierelatywistycznych zdegenerowanych elektronów

$$U(x) = (N^{5/3} \hbar^2 / 2mx^2), \quad (42)$$

gdzie N jest liczbą elektronów w gwieździe.

Całkowanie po x w (31) daje logarytm

$$\log(R/R_0), \quad (43)$$

gdzie R_0 jest promieniem, przy którym elektrony stają się relatywistyczne i wzór (42) przestaje być słuszny. Dla gwiazd o małej masie logarytm ten będzie rzędu jedynki, przez co część całki pochodząca od obszaru relatywistycznego $x < R_0$ będzie również rzędu jedynki. Masa gwiazdy wynosi

$$M = 2Nm_p. \quad (44)$$

Zastępuję logarytm (43) jednością i otrzymuję dla całki działania (31) oszacowanie

$$S = N^{4/3} (8m_p/m)^{1/2} = 120N^{4/3}. \quad (45)$$

Na podstawie (30) czas życia wynosi

$$T = \exp(120N^{4/3}) T_0. \quad (46)$$

Dla typowej gwiazdy o małej masie mamy

$$N = 10^{56}, \quad S = 10^{77}, \quad T = 10^{1076} \text{ lat}. \quad (47)$$

Jest całkowicie obojętne czy w (46) T_0 jest małym ułamkiem sekundy, czy też wielką liczbą lat.

Nie wiemy czy każde zapadnięcie się gwiazdy żelaznej aż do gwiazdy neutronowej będzie przyczyną wybuchu supernowej. W każdym razie spowoduje ono olbrzymi wybuch energii w postaci neutrin i skromniejszy wybuch w postaci promieni rentgenowskich i światła widzialnego. Po czasie tak długim jak (47) Wszechświat będzie nadal wytwarzać sporadyczne fajerwerki.

I. Zapadanie się zwyczajnej materii w czarną dziurę.

Długi czas życia (47) gwiazd żelaznych ma znaczenie tylko wtedy, jeżeli wcześniej nie zapadają się one w czarne dziury. Zapadanie się materii w czarną dziurę opisane jest tymi samymi wzorami co zapadanie się w gwiazdę neutronową. Jediną różnicą jest to, że całkowanie w całość działania (31) rozciąga się obecnie nie do promienia gwiazdy neutronowej, ale aż do promienia czarnej dziury. Główna część tej całki pochodzi od większych wartości x i jest taka sama w obu przypadkach. Dlatego też czas potrzebny na zapadnięcie się jest nadal dany przez (46). Jednakże zachodzi tu istotna zmiana sensu N . Jeżeli możliwe są małe czarne dziury, to niewielka część gwiazdy może ulec niezależnemu zapadnięciu się w czarną dziurę. Raz utworzona mała czarna dziura w krótkim czasie pochłonie resztę gwiazdy. Czas potrzebny na zapadnięcie się dowolnej gwiazdy jest zatem dany przez

$$T = \exp(120N_B^{4/3})T_0, \quad (48)$$

gdzie N_B jest liczbą elektronów w kawale żelaza o masie równej minimalnej masie M_B czarnej dziury. Czas (48) jest taki sam dla każdej bryły materii o masie większej niż M_B . Materia w porcjach o masie mniejszej niż M_B jest całkowicie trwała. Pełniejsze omówienie problemu zapadania się w czarne dziury znajduje się w książce Harrisona i in. [27].

Numeryczna wartość czasu (48) zależy od wartości M_B . Jedyne co wiemy na pewno, to to, że

$$0 \leq M_B \leq M_c, \quad (49)$$

gdzie

$$M_c = (\hbar c/G)^{3/2} m_p^{-2} = 4 \cdot 10^{33} \text{ g} \quad (50)$$

jest masą Chandrasekhara. Dla każdej masy większej niż M_c muszą istnieć czarne dziury, bowiem gwiazdy cięższe niż M_c nie mają stabilnego stanu końcowego ewolucji i zmuszone są zapaść się.

Wysunięto cztery hipotezy dotyczące M_B .

1) $M_B = 0$. Istnieją wówczas czarne dziury o dowolnie małej masie i wzór (48) traci sens. W tym przypadku wszelka materia jest nietrwała i ma względnie krótki czas życia (20).

2) Masa M_B jest równa masie Plancka

$$M_B = M_{PL} = (\hbar c/G)^{1/2} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ g}. \quad (51)$$

Ta wartość M_B jest sugerowana przez teorię Hawkinga promieniowania czarnych dziur [26], zgodnie z którą każda czarna dziura traci masę aż do osiągnięcia masy rzędu M_{PL} , kiedy to znika gwałtownie w wybuchu promieniowania. W tym przypadku [48] daje

$$N_B = 10^{19}, \quad T = 10^{1026} \text{ lat}. \quad (52)$$

3) Masa M_B jest równa masie kwantowej

$$\tilde{M}_B = M_Q = (\hbar c/Gm_p) = 3 \cdot 10^{14} \text{ g}, \quad (53)$$

zgodnie z poglądami Harrisona i in. [27]. M_0 jest masą najmniejszej czarnej dziury, dla której ma sens opis klasyczny. Jedynie dla mas większych niż M_0 może on uważać, że wzór (31) na przenikanie bariery potencjału jest fizycznie uzasadniony. Jeżeli zachodzi (53), to

$$N_B = 10^{38}, \quad T = 10^{10^{52}} \text{ lat}. \quad (54)$$

4) Masa M_B jest równa masie Chandrasekhara (50). W tym przypadku czas potrzebny na zapadnięcie się w czarną dziurę jest tego samego rzędu co czas (47) dla zapadnięcia się w gwiazdę neutronową.

Odległa przyszłość Wszechświata zależy w sposób decydujący od tego, która z tych czterech możliwości zachodzi w rzeczywistości. Jeżeli słuszna jest hipoteza 4) to gwiazdy mogą zapadać się w czarne dziury, a następnie rozpyływać się w czyste promieniowanie, natomiast masy rzędu mas planetarnych istnieć będą na zawsze. Jeżeli słuszne jest założenie 3) to planety zanikną w czasie (54), natomiast obiekty o masach do miliona ton będą trwałe. Jeżeli założenie 2) jest słuszne, to obiekty o rozmiarach ciała ludzkiego zanikną w czasie (52), natomiast ziarna pyłu o średnicy mniejszej niż około 100 μ będą wiecznie trwałe. Jeżeli słuszna jest hipoteza 1), to wszystkie ciała materialne zanikną i pozostanie już tylko promieniowanie.

Gdybym był zmuszony wskazać, która z tych czterech możliwości wydaje się bardziej prawdopodobna niż inne, wybrałbym 2). Uważam, że 3) i 4) są nieprawdopodobne, bowiem są one niezgodne z teorią Hawkinga emisji promieniowania z czarnych dziur. Uważam również 1) za nieuzasadnione, bowiem trudno zrozumieć dlaczego proton nie miałby się rozpadać szybko, jeżeli w ogóle może się rozpaść. Jednakowoż w naszym obecnym stanie niewiedzy żadna z tych czterech możliwości nie może być wykluczona.

Wyniki tego wykładu są streszczone w tabeli 1. Podana tam lista skal czasu różnych zjawisk fizycznych nie pretenduje do tego, żeby być kompletna. Wiele innych zjawisk fizycznych niewątpliwie zachodzić będzie w skali czasu równie długiej lub dłuższej niż te, które tam podałem. Główny wniosek jaki chciałbym wyciągnąć z dotychczasowej analizy jest następujący: Tak daleko, jak tylko możemy sięgnąć wyobraźnią w przyszłość zawsze coś się będzie działo. W otwartej kosmologii historia nie ma końca.

Tabela 1. Zestawienie skal czasowych

Wszechświat zamknięty	
Całkowity czas trwania	10^{11} lat
Wszechświat otwarty	
Gwiazdy o małej masie oziębiają się	10^{14} lat
Planety odłączają się od gwiazd	10^{15} lat
Gwiazdy odłączają się od galaktyk	10^{19} lat
Znik orbit wskutek promieniowania grawitacyjnego	10^{20} lat
Parowanie czarnych dziur w procesie Hawkinga	10^{64} lat
Materia staje się ciekła w zerze absolutnym	10^{65} lat
Cała materia przemienia się w żelazo	10^{1500} lat
Zapadanie zwyczajnej materii w czarną dziurę [możliwość 2)]	$10^{10^{26}}$ lat
Zapadanie gwiazd w gwiazdy neutronowe lub czarne dziury [możliwość 4)]	$10^{10^{76}}$ lat

Wykład III. Biologia

Patrząc na minioną historię życia widzimy, że potrzeba około 10^6 lat aby w drodze ewolucji powstał nowy gatunek, 10^7 lat aby powstał rodzaj, 10^8 lat aby powstała klasa, 10^9 lat dla powstania nowej gromady i mniej niż 10^{10} lat dla przebycia całej ewolucji poczynając od pradawnego szlamu aż do Homo Sapiens. Jeżeli życie będzie się rozwijać w przyszłości w tym samym tempie, to niemożliwe będzie określenie jakichkolwiek granic różnorodności form fizycznych jakie organizmy żywe mogłyby przyjąć. Jakie zmiany musiałyby zajść w ciągu następnych 10^{10} lat, aby konkurować ze zmianami, które miały miejsce w przeszłości? Można sobie wyobrazić, że w ciągu następnych 10^{10} lat życie przekształci się z form zbudowanych z mięsa i kości i wcieli się w międzygwiazdną czarną chmurę [28] lub w odczuwający komputer [29].

Przedstawiam tu listę głębokich pytań dotyczących natury życia i świadomości.

- 1) Czy bazą świadomości jest materia czy struktura?
- 2) Czy możliwe są odczuwające czarne chmury lub komputery?
- 3) Czy możemy stosować prawa skalowania w biologii?

Są to pytania, na które nie znamy odpowiedzi. Jednakże nie są to pytania z zasady nierozstrzygalne. Możliwe jest, że wkrótce dzięki postępowi biologii eksperymentalnej znajdziemy na nie odpowiedzi.

Sformułuję teraz wyraźniej sens pytania 1). Moja świadomość jest w jakiś sposób związana ze zbiorem molekuł organicznych we wnętrzu mojej głowy. Czy istnienie mojej świadomości zależy od faktycznej natury konkretnego zbioru molekuł, czy też zależy ono od struktury molekuł? Innymi słowy, gdybym był w stanie skonstruować kopię mojego mózgu z tą samą strukturą, lecz używając innych materiałów, czy kopia ta pomyślałaby, że jest mną?

Jeżeli odpowiedź na pytanie 1) brzmi „materia”, wówczas życie i świadomość nigdy nie będą mogły w swej ewolucji opuścić ciał z mięsa i krwi. W tym przypadku odpowiedzi na pytania 2) i 3) są negatywne. Życie mogłoby istnieć wówczas tak długo, jak długo istniałyby ciepłe środowiska mające ciekłą wodę i nieprzerwany dopływ swobodnej energii dla utrzymania stałej szybkości procesów metabolicznych. W tym też przypadku, skoro galaktyka ma tylko ograniczony zasób swobodnej energii, czas trwania życia organicznego będzie skończony. W miarę rozszerzania się i oziębiania Wszechświata źródła energii swobodnej, potrzebnej dla metabolizmu organizmów żywych, wyczerpią się ostatecznie.

Ponieważ jestem optymistą w dziedzinie filozofii, zakładam jako hipotezę roboczą, że odpowiedź na pytanie 1) brzmi „struktura”. W tym przypadku życie ma możliwość wcielenia się w toku ewolucji w dowolną substancję najlepiej pasującą do jego celów. Odpowiedzi na pytania 2) i 3) są wtedy twierdzące i jakościowe rozważania przyszłości życia we Wszechświecie stają się możliwe. Gdyby np. okazało się, że materia jest w pełni odporna na zapadanie się w czarne dziury tylko wtedy, kiedy podzielona jest na ziarenka pyłu o średnicy kilku mikronów, wówczas korzystnym ukształtowaniem żywego organizmu w dalekiej przyszłości musiałoby być coś w rodzaju czarnej chmury Hoyle’a, czyli zbiorowisko ziarenek pyłu niosących ładunki dodatnie i ujemne, w którym stan organizacji i łączność utrzymywane byłyby za pomocą sił elektromagnetycznych. Nie potrafimy wyobrazić sobie w szczegółach, jak taka chmura mogłaby trwać w stanie równowagi

dynamicznej, który my zwiemy życiem. Ale przecież nie potrafilibyśmy wyobrazić sobie architektury żywej komórki protoplazmy, gdybyśmy jej nigdy nie widzieli.

W celu podania ilościowego opisu sposobu, w jaki życie może adaptować się do chłodnego środowiska, muszę założyć prawo skalowania niezależne od każdej konkretnej postaci materialnej, w jaką życie może się wcielić. Moje prawo skalowania formułuję następująco:

Hipoteza skalowania biologicznego: jeżeli kopiujemy żywą istotę, kolejno jeden stan kwantowy po drugim, tak że hamiltonian kopii jest

$$H_c = \lambda U H U^{-1}, \quad (55)$$

gdzie H jest hamiltonianem tej istoty, U jest operatorem unitarnym, a λ jest dodatnim czynnikiem skalującym, oraz jeśli środowisko jest podobnie kopiowane, tak że temperatury środowisk, istoty i jej kopii są odpowiednio T i λT , to wówczas kopia jest żywa, subiektywnie identyczna z oryginałem, a prędkości wszystkich jej procesów życiowych są zredukowane przez ten sam czynnik λ .

Struktura równania Schrödingera, w którym energia i czas pojawiają się jako zmienne sprzężone czyni tę właśnie hipotezę skalowania wiarygodną. Jest to hipoteza czysto teoretyczna, w chwili obecnej niemożliwa do zweryfikowania eksperymentalnego. Aby uniknąć nieporozumień powinienem podkreślić, że prawo skalowania nie stosuje się do zmian tempa metabolizmu danego organizmu w funkcji temperatury. Na przykład, kiedy wąż lub jaszczurka zmienia temperaturę, tempo metabolizmu zależy od ich temperatury wykładniczo, nie zaś liniowo. Liniowe prawo skalowania stosuje się do zbioru węży, w którym każdy osobnik przystosowany jest do innej temperatury. Nie stosuje się ono do jednego węża o zmiennej temperaturze.

Od tego momentu zakładać będę prawdziwość hipotezy skalowania i przebadam jej konsekwencje dla świata istot żywych. Pierwszą konsekwencją jest to, że właściwą miarą subiektywnego czasu odczuwanego przez istotę żywą nie jest fizyczny czas t , ale wielkość

$$u(t) = f \int_0^t \theta(t') dt', \quad (56)$$

gdzie $\theta(t)$ jest temperaturą organizmu, a $f = (300 \text{ K} \cdot \text{s})^{-1}$ jest czynnikiem skalowania, który wprowadzamy dla wygody, aby otrzymać u bezwymiarowe. Wielkość u nazywam „czasem subiektywnym”. Następną konsekwencją prawa skalowania jest to, że każdy organizm charakteryzowany jest przez wielkość Q mierzącą tempo produkcji entropii w jednostce jego czasu subiektywnego. Jeżeli entropia mierzona jest w jednostkach informacji, czyli bitach i jeżeli u jest mierzone „chwilami świadomości”, wówczas Q jest liczbą bezwymiarową wyrażającą ilość informacji, która musi być przetworzona, aby utrzymać organizm przy życiu tak długo, aby zdołał powiedzieć „cogito ergo sum”. Wielkość Q nazywam „złożonością” organizmu. Np. istota ludzka zużywa około 200 W w temperaturze 300 K, w każdej chwili świadomości trwającej około sekundy. Istota ludzka ma zatem

$$Q = 10^{23} \text{ bitów}. \quad (57)$$

Wielkość Q jest miarą złożoności struktur molekularnych uczestniczących w pojedynczym akcie ludzkiej świadomości. Dla gatunku ludzkiego jako całości

$$Q = 10^{33} \text{ bitów}, \quad (58)$$

Jest to liczba podająca nam rząd wielkości zasobów materialnych potrzebnych dla podtrzymania społeczeństwa istot żywych.

Jednostka lub społeczeństwo o danych Q i temperaturze będzie zużywać energię z szybkością

$$m = kfQ\theta^2, \quad (59)$$

m jest tutaj szybkością metabolizmu mierzona w ergach na sekundę, k jest stałą Boltzmanna, a f — współczynnikiem, który pojawił się w (56). Ważne jest to, że m zmienia się jak θ^2 , bowiem jeden mnożnik pochodzi ze związku energii i entropii, a drugi mnożnik wynika z przyjętej zależności szybkości procesów życiowych od temperatury.

Zakładam, że życie ma możliwość wyboru temperatury $\theta(t)$ tak, aby uzyskać największe szanse przetrwania. Istnieją dwa ograniczenia fizyczne na $\theta(t)$. Pierwszym ograniczeniem jest, że $\theta(t)$ musi być zawsze wyższe od temperatury kosmicznego promieniowania reliktowego, która jest najniższą możliwą temperaturą chłodnicy cieplnej. Oznacza to, że

$$\theta(t) > aR^{-1}, \quad a = 3 \cdot 10^{28} \text{ K} \cdot \text{cm}, \quad (60)$$

gdzie R jest promieniem Wszechświata, zmieniającym się z t według (7) i (8). W obecnym czasie warunek (60) jest spełniony z nadwyżką o czynniku 100. Drugim ograniczeniem na $\theta(t)$ jest konieczność istnienia pewnego mechanizmu fizycznego powodującego wypromieniowanie w przestrzeń zbędnego ciepła generowanego przez metabolizm. Aby sformułować to ograniczenie ilościowo zakładam, że zasadniczym sposobem pozbycia się zbędnego ciepła jest wypromieniowanie go, oraz że jedyną stosowną postacią promieniowania są fale elektromagnetyczne.

Istnieje absolutna górna granica

$$I(\theta) < 2\gamma(Ne^2/m\hbar^2c^3)(k\theta)^3 \quad (61)$$

na moc emitowaną przez źródło promieniowania zawierające N elektronów w temperaturze θ . Wielkość

$$\gamma = \max_x [x^3(e^x - 1)^{-1}] = 1,42 \quad (62)$$

jest wysokością maksimum planckowskiego widma promieniowania. Ponieważ nie mogłem znaleźć warunku (61) w podręcznikach, podaję krótki dowód według artykułu [30]. Moc emitowana przez dipol elektryczny dana jest wzorem

$$I(\theta) = \sum_p \int d\Omega \sum_i \sum_j q_i(\omega_{ij}^4/2\pi c^3) |D_{ij}|^2. \quad (63)$$

Wielkość p jest wektorem polaryzacji fotonu emitowanego w kąt bryłowy $d\Omega$, i jest stanem początkowym, a j jest stanem końcowym emitera,

$$q_i = Z^{-1} \exp(-E_i/k\theta) \quad (64)$$

jest prawdopodobieństwem znalezienia emitera w stanie początkowym i ,

$$\omega_{ij} = \hbar^{-1}(E_i - E_j) \quad (65)$$

jest częstotliwością fotonu, a D_{ij} jest elementem macierzowym momentu dipolowego emitera pomiędzy stanami i oraz j . Suma (63) jest brana tylko dla par stanów (i, j) z

$$E_i > E_j. \quad (66)$$

Istnieje ścisła reguła sum dla momentów dipolowych,

$$\sum_i \omega_{ij} |D_{ij}|^2 = (1/2i) \langle D \dot{D} - \dot{D} D \rangle_{jj} = (Ne^2 \hbar / 2m). \quad (67)$$

Musimy być jednak ostrożni w stosowaniu (67) do znajdowania granicy dla (63), bowiem niektóre z wyrazów (67) są ujemne. Skuteczna jest tu następująca sztuczka. W każdym członie (63), ω_{ij} jest dodatni dzięki (66), tak więc (62) daje

$$\varrho_i \omega_{ij}^3 < \gamma \varrho_i (k\theta/\hbar)^3 (\exp(\hbar\omega_{ij}/k\theta) - 1) = \gamma (\varrho_j - \varrho_i) (k\theta/\hbar)^3. \quad (68)$$

Dlatego też (63) implikuje

$$I(\theta) < \gamma (k\theta/\hbar)^3 \sum_p \int d\Omega \sum_i \sum_j (\varrho_j - \varrho_i) (\omega_{ij}/2\pi c^3) |D_{ij}|^2. \quad (69)$$

Teraz możemy przestawić wskaźniki sumowania (i, j) w części sumy (69) zawierającej ϱ_i . W wyniku dostajemy

$$I(\theta) < \gamma (k\theta/\hbar)^3 \sum_p \int d\Omega \sum_i \sum_j \varrho_j (\omega_{ij}/2\pi c^3) |D_{ij}|^2, \quad (70)$$

z sumowaniem rozciągającym się na wszystkie pary (i, j) , niezależnie od warunku (66). Reguła sumowania (67) może być wówczas zastosowana do (70) dając w wyniku (61).

Dowód wzoru (61) zakłada, że wszystkie cząstki różne od elektronu mają tak duże masy, iż można zaniedbać generowane przez nie promieniowanie. Dowód ten zakłada również, że zaniedbywane są dipolowy moment magnetyczny i wyższe multipole. Interesującym problemem jest czy warunek (61) może być udowodniony bez użycia przybliżenia dipolowego (63).

Na pierwszy rzut oka może wydać się dziwne, że prawa strona (61) jest proporcjonalna do θ^3 nie zaś do θ^4 , skoro standardowy wzór Stefana-Boltzmannna na moc emitowaną przez ciało doskonale czarne zawiera proporcjonalność do θ^4 . Wzór Stefana-Boltzmannna nie stosuje się w tym przypadku, bowiem wymaga on, aby emiter miał znaczną grubość optyczną. Natomiast określona wzorem (61) maksymalna moc emitowana może być osiągnięta tylko wtedy, gdy emiter jest optycznie cienki.

Po krótkiej dygresji fizycznej, powracam do biologii. Drugie ograniczenie na temperaturę θ trwałego organizmu żywego głosi, że szybkość rozpraszania energii (59) nie może być wyższa niż maksymalna moc (61) emitowanych fal elektromagnetycznych. Ograniczenie to określa dolną granicę temperatury,

$$k\theta > (Q/N)\varepsilon = (Q/N)10^{-28} \text{ erg}, \quad (71)$$

$$\varepsilon = (137/2\gamma)(\hbar f/k)mc^2, \quad (72)$$

$$\theta > (Q/N)(\varepsilon/k) = Q/N 10^{-12} \text{ K}. \quad (73)$$

Stosunek $\bar{Q}/N$ złożoności społeczeństwa do liczby elektronów będących do jego dyspozycji nie może przyjmować dowolnie małych wartości. Dla obecnego gatunku ludzkiego, z $\bar{Q}$ danym przez (58) i $N = 10^{42}$ będącym liczbą elektronów w biosferze Ziemi, stosunek ten jest 10^{-9} . W miarę jak społeczeństwo rozwija swoje możliwości intelektualne, stosunek ten najprawdopodobniej rośnie zamiast maleć. Dlatego też (73) i (59) narzucają dolną granicę szybkości dysypacji energii przez społeczeństwo o danej złożoności. Ponieważ całkowity zasób energii dostępnej społeczeństwu jest skończony, skończony jest również czas jego życia. Doszliśmy do smutnego wniosku, że spowolnienie metabolizmu opisanego moją hipotezą skalowania biologicznego jest niewystarczające na to, by społeczeństwo mogło przetrwać dowolnie długo.

Na szczęście życie ma do dyspozycji inną strategię wydobycia się z tego impasu, mianowicie hibernację. Procesy metaboliczne mogą przebiegać w sposób przerywany, sporadycznie, natomiast wyprzemienianie zewnętrznego ciepła może odbywać się w sposób ciągły, również w okresach hibernacji. Kiedy życie znajduje się w swojej fazie aktywnej, będzie w kontakcie cieplnym ze swoim emitentem o temperaturze θ . W czasie hibernacji emitent będzie miał nadal temperaturę θ , natomiast organizmy żywe będą oziębione do znacznie niższej temperatury, tak że metabolizm ulegnie efektywnie zatrzymaniu.

Założmy zatem, że społeczeństwo spędza ulamek $g(t)$ swojego czasu w fazie aktywnej i ulamek $[1 - g(t)]$ w stanie hibernacji. Cykle aktywności i hibernacji powinny być na tyle krótkie, aby $g(t)$ i $\theta(t)$ nie uległy znacznej zmianie w ciągu jednego cyklu. W tych warunkach wzory (56) i (59) przestają być słuszne. Subiektywny czas jest dany natomiast przez

$$u(t) = \int_0^t g(t') \theta(t') dt', \quad (74)$$

a średnia szybkość rozpraszania energii wynosi

$$m = kf\bar{Q}g\theta^2. \quad (75)$$

Ograniczenie (71) można zastąpić przez

$$\theta(t) > (\bar{Q}/N)(\varepsilon/k)g(t). \quad (76)$$

Organizmy żywe dostosowują się do ograniczenia (61) na moc energii wyprzemienowanej, zmniejszając czas trwania fazy aktywnej proporcjonalnie do swojej temperatury. Jako przykład możliwej strategii długo istniejącego społeczeństwa możemy wybrać funkcję $g(t)$ w postaci

$$g(t) = \theta(t)/\theta_0 = (t/t_0)^{-\alpha}, \quad (77)$$

gdzie θ_0 jest obecną temperaturą organizmów żywych, a t_0 — obecnym wiekiem Wszechświata; w tym przypadku warunki (60) i (76) są spełnione z dużą nadwyżką. Wykładnik α powinien leżeć w przedziale

$$\frac{3}{4} < \alpha < \frac{5}{4}. \quad (78)$$

Dla wygody wybieramy

$$\alpha = \frac{3}{8}. \quad (79)$$

Stosunek Q/N złożoności społeczeństwa do liczby elektronów będących do jego dyspozycji nie może przyjmować dowolnie małych wartości. Dla obecnego gatunku ludzkiego, z Q danym przez (58) i $N = 10^{42}$ będącym liczbą elektronów w biosferze Ziemi, stosunek ten jest 10^{-9} . W miarę jak społeczeństwo rozwija swoje możliwości intelektualne, stosunek ten najprawdopodobniej rośnie zamiast maleć. Dlatego też (73) i (59) narzucają dolną granicę szybkości dysypacji energii przez społeczeństwo o danej złożoności. Ponieważ całkowity zasób energii dostępnej społeczeństwu jest skończony, skończony jest również czas jego życia. Doszliśmy do smutnego wniosku, że spowolnienie metabolizmu opisane moją hipotezą skalowania biologicznego jest niewystarczające na to, by społeczeństwo mogło przetrwać dcwolnie długo.

Na szczęście życie ma do dyspozycji inną strategię wydostania się z tego impasu, mianowicie hibernację. Procesy metaboliczne mogą przebiegać w sposób przerywany, sporadycznie, natomiast wypromieniowanie zbędnego ciepła może odbywać się w sposób ciągły, również w okresach hibernacji. Kiedy życie znajdzie się w swojej fazie aktywnej, będzie w kontakcie cieplnym ze swoim emiterem o temperaturze θ . W czasie hibernacji emiter będzie miał nadal temperaturę θ , natomiast organizmy żywe będą oziębione do znacznie niższej temperatury, tak że metabolizm ulegnie efektywnie zatrzymaniu.

Załóżmy zatem, że społeczeństwo spędza ułamek $g(t)$ swojego czasu w fazie aktywnej i ułamek $[1-g(t)]$ w stanie hibernacji. Cykle aktywności i hibernacji powinny być na tyle krótkie, aby $g(t)$ i $\theta(t)$ nie uległy znacznej zmianie w ciągu jednego cyklu. W tych warunkach wzory (56) i (59) przestają być słuszne. Subiektywny czas jest dany natomiast przez

$$u(t) = f \int_0^t g(t') \theta(t') dt', \quad (74)$$

a średnia szybkość rozpraszania energii wynosi

$$m = kfQg\theta^2. \quad (75)$$

Ograniczenie (71) można zastąpić przez

$$\theta(t) > (Q/N)(\varepsilon/k)g(t). \quad (76)$$

Organizmy żywe dostosowują się do ograniczenia (61) na moc energii wypromieniowanej, zmniejszając czas trwania fazy aktywnej proporcjonalnie do swojej temperatury.

Jako przykład możliwej strategii długo istniejącego społeczeństwa możemy wybrać funkcję $g(t)$ w postaci

$$g(t) = \theta(t)/\theta_0 = (t/t_0)^{-\alpha}, \quad (77)$$

gdzie θ_0 jest obecną temperaturą organizmów żywych, a t_0 — obecnym wiekiem Wszechświata; w tym przypadku warunki (60) i (76) są spełnione z dużą nadwyżką. Wykładnik α powinien leżeć w przedziale

$$\frac{1}{3} < \alpha < \frac{1}{2}. \quad (78)$$

Dla wygody wybieramy

$$\alpha = \frac{3}{8}. \quad (79)$$

Subiektywny czas staje się wówczas, dzięki (74), równy

$$u(t) = A(t/t_0)^{1/4}, \quad (80)$$

gdzie

$$A = 4f\theta_0 t_0 = 10^{18} \quad (81)$$

jest obecnym wiekiem Wszechświata mierzonym w jednostkach czasu subiektywnego. Na podstawie (75) średnia szybkość dysypacji energii wynosi

$$m(t) = kfQ\theta_0^2(t/t_0)^{-9/8}. \quad (82)$$

Całkowita energia procesów metabolicznych, które zaszły od t_0 do nieskończoności jest

$$\int_{t_0}^{\infty} m(t)dt = BQ, \quad (83)$$

$$B = 2Ak\theta_0 = 6 \cdot 10^4 \text{ erg}. \quad (84)$$

Przykład ten pokazuje, że strategia hibernacji pozwoliłaby organizmom żywym osiągnąć jednocześnie dwa główne cele. Po pierwsze, zgodnie z (80), subiektywny czas jest nieskończony; wprowadzie zegary biologiczne będą coraz wolniej i z przerwami w miarę rozszerzania się Wszechświata, ale subiektywny czas będzie płynąć zawsze. Po drugie, zgodnie z (83), całkowita energia potrzebna do przetrwania dowolnie długo jest skończona. Warunek (78) wystarczy, by całka (83) była zbieżna, a całka (74) — rozbieżna przy $t \rightarrow \infty$.

Zgodnie z (83) i (84), zasób energii swobodnej potrzebny dla przetrwania społeczeństwa o złożoności (58), a więc równej złożoności obecnego gatunku ludzkiego, zaczynającego swoją egzystencję w chwili obecnej i trwającego nieskończenie długo, jest rzędu

$$BQ = 6 \cdot 10^{37} \text{ erg}, \quad (85)$$

czyli mniej więcej tyle energii, ile emituje Słońce przez 8 godzin. Zasoby energii byłyby wystarczające dla dowolnie długiego zaopatrywania społeczeństwa o złożoności około 10^{24} razy większej niż nasza.

Wnioski te są prawdziwe w kosmologii otwartej. Interesujące jest przebadanie całkowicie odmiennej sytuacji istniejącej w kosmologii zamkniętej. Jeżeli życie będzie się starać przetrwać przez nieskończony czas subiektywny w zamkniętej kosmologii, przyspieszając swój metabolizm w miarę kurczenia się Wszechświata i podnoszenia się temperatury promieniowania reliktowego, to związki (56) i (59) pozostają prawdziwe, mimo że fizyczny czas t ma skończony przebieg (5). Jeżeli

$$\tau = 2\pi T_0 - t, \quad (86)$$

to na podstawie (2) i (3) temperatura promieniowania reliktowego

$$\theta_R(t) = a(R(t))^{-1} \quad (87)$$

jest proporcjonalna do $\tau^{-2/3}$ gdy $\tau \rightarrow 0$. Jeśli temperatura $\theta(t)$ organizmów żywych jest bliska θ_R przy $\tau \rightarrow 0$, to całka (56) jest skończona, podczas gdy całka z wielkości (59) jest nieskończona. Skończony czas trwania cywilizacji mierzony czasem subiektywnym

wymaga nieskończonej ilości energii. Jeżeli $\theta(t)$ zmierza do nieskończoności wolniej niż θ_R , to energia potrzebna dla metabolizmu jest nieskończona. Zegary biologiczne nie będą mogły nigdy biec tak szybko, aby zmieścić nieskończony czas subiektywny w skończonym Wszechświecie.

Powracam z uczuciem ulgi do szeroko otwartych przestrzeni otwartego Wszechświata. Nie muszę podkreślać, jak bardzo cząstkowy i powierzchowny charakter mają wnioski, które przedstawiłem w tym wykładzie. Naszkicowałem tylko z grubsza parę problemów fizycznych, którym życie będzie musiało stawić czoła, aby przetrwać w zimnym Wszechświecie. Nie wymieniłem w ogóle mnóstwa pytań pojawiających się natychmiast, jeżeli próbować wyobrazić sobie w szczegółach architekturę postaci organizmów żywych adaptowanych do skrajnie niskich temperatur. Czy w niskotemperaturowych strukturach istnieją funkcjonalne równoważniki mięśni, nerwów, rąk, głosu, oczu, uszu, mózgu i pamięci? Odpowiedzi są mi nieznane.

Można nieco powiedzieć o pamięci nie wchodząc w szczegółowe problemy strukturalne, bowiem pamięć jest pojęciem abstrakcyjnym. Pojemność pamięci może być opisana ilościowo jako pewna liczba bitów informacji. Pragnąłbym, aby nasi potomkowie obdarzeni byli nie tylko nieskończeniem długim subiektywnym czasem życia, ale również pamięcią o nieskończenie rosnącej pojemności. Być nieśmiertelnym i mieć skończoną pamięć, to bardzo przykre, właściwie nie warto być nieśmiertelnym, jeżeli jest się zmuszonym wymazywać z pamięci wszelkie ślady młodości, aby zrobić miejsce dla nowych przeżyć. Fizyka zna dwa rodzaje pamięci, analogową i cyfrową. Cała współczesna technologia komputerowa oparta jest na pamięci cyfrowej. Jednak pamięć cyfrowa ma pojemność ograniczoną przez liczbę atomów użytych do jej konstrukcji. Społeczeństwo o skończonych zasobach materialnych nie będzie mogło nigdy wybudować pamięci cyfrowej przekraczającej pewną skończoną pojemność. Z tego też powodu pamięć cyfrowa nie nadaje się dla potrzeb cywilizacji planującej nieskończenie długie istnienie.

Na szczęście, nie ma żadnych fundamentalnych powodów ograniczających pojemność pamięci analogowej zbudowanej ze skończonej liczby elementów rozszerzającego się Wszechświata. Na przykład taka wielkość fizyczna, jak kąt pomiędzy dwiema gwiazdami na niebie, może być użyta jako jednostka pamięci analogowej. Pojemność tej jednostki pamięci jest równa liczbie cyfr znaczących w systemie dwójkowym w liczbie będącej miarą tego kąta. W miarę jak Wszechświat rozszerza się, a gwiazdy się oddalają, liczba cyfr znaczących w tym kącie będzie rosła logarytmicznie z czasem. Również pomiary częstości atomowych i poziomów energetycznych mogą być wyrażone liczbami o ilości cyfr znaczących proporcjonalnej do $\log t$. Dlatego też nieśmiertelna cywilizacja winna w końcu znaleźć sposoby zakodowania swoich archiwów pamięci analogowej o pojemności rosnącej jak $\log t$. Pamięć taka nałoży poważne ograniczenia na szybkość gromadzenia nowej wiedzy, ale przynajmniej nie wykluczy go.

Wykład IV. Łączność.

W tym ostatnim wykładzie przebadam problem porozumiewania się dwu społeczeństw rozdzielonych olbrzymią odległością w otwartym Wszechświecie z metryką (6). Zakładam, że łączność odbywa się za pomocą sygnałów elektromagnetycznych. Bez utraty ogólności

przyjmuje, że społeczeństwo A poruszające się wzdłuż linii świata $\chi = 0$ nadaje, podczas gdy społeczeństwo B poruszające się wzdłuż linii świata $\chi = \eta$ odbiera sygnały. Sygnał wysłany przez A w momencie $\psi = \xi$ zostanie odebrany przez B w chwili $\psi = \xi + \eta$. Jeżeli częstość sygnału w momencie wysłania jest ω , to częstość sygnału odbieranego ulegnie zmniejszeniu do

$$\omega' = \frac{\omega}{1+z} = \frac{R_A}{R_B}, \quad (88)$$

$$R_A = cT_0(\cosh \xi - 1), \quad (89)$$

$$R_B = cT_0(\cosh(\xi + \eta) - 1). \quad (90)$$

Szerokość pasm B i B' , emitowanego i odbieranego, są związane tym samym czynnikiem $(1+z)$. Odległość właściwa A i B w momencie odebrania sygnału wynosi $d_L = R_B \eta$. Z drugiej strony, pole powierzchni sfery $\chi = \eta$ w tym samym momencie równe jest $4\pi d_T^2$, gdzie

$$d_T = R_B \sinh \eta. \quad (91)$$

Jeżeli A emituje F fotonów na steradian w kierunku B , to liczba fotonów obserwowanych przez B wyniesie

$$F' = F \Sigma' / d_T^2, \quad (92)$$

gdzie Σ' jest efektywnym przekrojem czynnym odbiornika.

Przekrój czynny odbiornika na absorpcję fotonu o częstości ω' dany jest wzorem podobnym do (63) z poprzedniego wykładu

$$\Sigma' = \sum_i \sum_j \varrho_i (4\pi^2 \omega_{ji} / \hbar c) |D_{ij}|^2 \delta(\omega_{ji} - \omega'), \quad (93)$$

gdzie D_{ij} jest ponownie dipolowym elementem macierzowym pomiędzy stanami i oraz j . Jeżeli wielkość tę scałkować po wszystkich ω' otrzymamy dokładnie lewą stronę wzoru (67). Wkład pochodzący od ujemnych ω' przedstawia wymuszoną emisję fotonu przez odbiornik. Zakładam, że nie zachodzi korelacja odbiornika z padającym fotonem, dzięki czemu emisja wymuszona jest zaniedbywalna. Wówczas reguła sum (67) daje

$$\int_0^\infty \Sigma' d\omega' = N' (2\pi^2 e^2 / mc), \quad (94)$$

gdzie N' jest liczbą elektronów w odbiorniku. Jeżeli odbiornik jest dostrojony do częstości ω' z szerokością pasma B' , to (94) daje

$$\Sigma' B' \leq N' S_0, \quad (95)$$

$$S_0 = (2\pi^2 e^2 / mc) = 0,167 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}. \quad (96)$$

Aby uniknąć pomylenia jednostek, mierzę zarówno ω' jak i B' w radianach na sekundę, nie zaś w hercach. Zakładam, że rozwinięta cywilizacja będzie w stanie zaprojektować odbiornik, dla którego zachodzi równość we wzorze (95). W tym przypadku (92) przybiera postać

$$F' = (FN' S_0 / d_T^2 B'). \quad (97)$$

Zakładam, że nadajnik zawiera N elektronów, których drgania mogą być zgodne w fazie, tak że wytworzona przez nie wiązka promieniowania ma kąt rozwarcia rzędu $N^{-1/2}$. Jeżeli nadajnik można traktować jako układ N dipoli zgodnych w fazie, to liczba fotonów na steradian w wiązce jest

$$F = (3N/8\pi)(E/\hbar\omega), \quad (98)$$

gdzie E jest całkowitą energią emitowaną. Liczba zarejestrowanych fotonów wynosi wówczas

$$F' = (3NN'ES_0/8\pi\hbar\omega d_T^2 B'). \quad (99)$$

Widzimy od razu z (99), że dla zwiększenia liczby obserwowanych fotonów pożądane są niskie częstotliwości i wąskie pasma nadawania. Jesteśmy jednak bardziej zainteresowani przesyłaniem informacji niż fotonów. Aby efektywnie wydobyć informacje z danej liczby fotonów powinniśmy użyć pasma o szerokości równej szybkości detekcji

$$B' = (F'/\tau_B), \quad B = (F'/\tau_A), \quad (100)$$

gdzie τ_B jest czasem trwania odbioru sygnału, a τ_A czasem trwania emisji. Przy takiej szerokości pasma, F' przedstawia jednocześnie liczbę fotonów oraz liczbę bitów otrzymanej informacji. Wygodnie jest wyrażać τ_A i τ_B jako ułamki promienia Wszechświata w momentach emisji i odbioru

$$\tau_A = (\delta R_A/c), \quad \tau_B = (\delta R_B/c). \quad (101)$$

Warunek

$$\delta \leq 1 \quad (102)$$

nakłada wówczas dolną granicę na szerokość pasma B . Założę również dla prostoty, że częstość ω przyjmuje najmniejszą możliwą wartość zgodną z szerokością pasma B , mianowicie

$$\omega = B, \quad \omega' = B'. \quad (103)$$

Wówczas (99), (100) i (101) dają

$$F' = \left[\frac{NN'\delta^2 E}{(1+z)(\sinh^2 \eta)E_c} \right]^{1/3}, \quad (104)$$

gdzie na podstawie (96)

$$E_c = (8\pi\hbar c^2/3S_0) = (4/3\pi)137mc^2 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ erg}. \quad (105)$$

Ze wzoru (104) widzimy, że ilość informacji, która może być przekazana od A do B za cenę wydatkowania określonej ilości energii nie maleje z czasem w miarę jak Wszechświat się rozszerza, a A i B oddalają się od siebie. Wzrost odległości kompensowany jest zmniejszeniem kosztów energetycznych każdego fotonu oraz wzrostem przekroju czynnego odbiornika wskutek malejącej szerokości pasma.

Sygnał odbierany dany jest wzorem (104). Musimy go teraz porównać z rejestrowanym jednocześnie szumem. Szum kosmicznego tła o częstości ω może być opisany równo-

ważną temperaturą szumową T_N tak, że liczba fotonów na jednostkę częstości na steradian, centymetr kwadratowy i sekundę dana jest wzorem Rayleigha-Jeansa

$$I(\omega) = (kT_N\omega/4\pi^3\hbar c^2). \quad (106)$$

Wzór ten jest jedynie definicją T_N , która w ogólności jest funkcją ω i t . Nie zakładam, że szum opisany jest widmem planckowskim w całym zakresie częstości. Tylko część tego szumu pochodzi od pierwotnego promieniowania relikтового, mającego widmo Plancka o temperaturze θ_R . Pierwotna temperatura szumu θ_R zmienia się jak odwrotność promienia Wszechświata

$$(k\theta_R R/\hbar c) = A = 10^{29}, \quad (107)$$

gdzie R dane jest przez (8). Zakładam, że całkowite widmo szumu ulega podobnym zmianom w miarę wzrostu promieniowania Wszechświata, tzn.

$$(T_N/\theta_R) = f(x), \quad x = (\hbar\omega/k\theta_R), \quad (108)$$

gdzie f jest uniwersalną funkcją x . Gdy x jest rzędu jednośc, szum jest zdominowany przez promieniowanie pierwotne i $f(x)$ przyjmuje postać planckowską

$$f(x) = f_p(x) = x(e^x - 1)^{-1}, \quad x \sim 1. \quad (109)$$

Duże odstępstwa od (109) pojawią się dla wielkich x (wskutek przesuniętego ku podczerwieni światła gwiazd) oraz dla małych x (wskutek promieniowania nietermicznych radioźródeł). Nie wchodząc w szczegóły można powiedzieć, że w ogólności $f(x)$ jest funkcją malejącą i zdąża szybko do zera, gdy $x \rightarrow \infty$.

Całkowita gęstość energii promieniowania we Wszechświecie wynosi

$$\frac{4\pi}{c} \int I(\omega) \hbar\omega d\omega = \frac{(k\theta_R)^4 I}{\pi^2 \hbar^3 c^3}, \quad (110)$$

gdzie

$$I = \int_0^\infty f(x) x^2 dx. \quad (111)$$

Całka I musi być zbieżna zarówno dla dużych, jak i dla małych częstości. Dlatego też możemy znaleźć liczbowe ograniczenie b takie, że

$$x^3 f(x) < b \quad (112)$$

dla wszystkich x . Należy przypuszczać, że (112) jest spełnione dla $b = 10$, jeżeli pominąć pewne dyskretne częstości, takie jak linia wodoru 1420 MHz.

Liczba fotonów szumu rejestrowanych w czasie τ_B przez odbiornik o szerokości pasma B' i przekroju czynnym Σ jest

$$F_N = 4\pi\Sigma' B'\tau_B I(\omega'). \quad (113)$$

Wstawiając (95), (96), (100), (103), (106), i (108) do (113) otrzymujemy

$$F_N = (2r_0/\lambda_B) f N' F', \quad (114)$$

gdzie

$$r_0 = (e^2/mc^2) = 3 \cdot 10^{-13} \text{ cm} , \quad (115)$$

a

$$\lambda_B = \hbar c / k \theta'_R = \Lambda^{-1} R_B \quad (116)$$

jest długością fali pierwotnego promieniowania tła w momencie odebrania sygnału. Ponieważ F' jest sygnałem, stosunek sygnału do szumu wynosi

$$R_{SN} = (\lambda_B / 2fN'r_0) . \quad (117)$$

We wzorze tym f jest stosunkiem szumu do temperatury danym przez (108), N' jest liczbą elektronów odbiornika, a r_0 i τ_B dane są przez (115) i (116). Zauważmy, że wybierając (117) nie uwzględniliśmy kątowej zdolności rozdzielczej odbiornika, bowiem przekrój czynny Σ' dany wzorem (95), nie zależy od kierunku.

Podsumuję obecnie wnioski wypływające z dotychczasowych rozważań. Mamy nadajnik i odbiornik na liniach świata A i B , emitujące i odbierające sygnały w momentach

$$t_A = T_0(\sinh \xi - \xi) , \quad t_B = T_0(\sinh(\xi + \eta) - (\xi + \eta)) . \quad (118)$$

Zgodnie z (89) i (101)

$$\tau_A = \delta(dt_A/d\xi) , \quad \tau_B = \delta(dt_B/d\xi) . \quad (119)$$

Wygodnie jest przyjąć, że nadajnik jest stale skierowany na odbiornik i nadaje z przerwami z pewnym cyklem δ , który może zmieniać się z ξ . Kiedy $\delta = 1$, nadajnik jest włączony przez cały czas. Liczba F' fotonów zarejestrowanych w czasie τ_B może być wówczas traktowana jako szybkość napływania informacji wyrażona za pomocą zmiennej ξ . Rzeczywiście, $F'd\xi$ jest liczbą bitów otrzymanych w przedziale $d\xi$. Wygodnie jest posłużyć się zmienną ξ , bowiem zachowuje ona stałą różnicę η pomiędzy A i B .

Ze (100), (101), (103), (107) i (108) wyprowadzamy prosty wzór na szybkość napływu informacji

$$F' = \Lambda x \delta . \quad (120)$$

Energia E transmitowana w czasie τ_A może być traktowana jako szybkość przekazu energii na jednostkowy przedział $d\xi$. Ze (104) i (120) znajdziemy

$$E = (\Lambda^3 / NN')(1+z)(\sinh^2 \eta) x^3 \delta E_c . \quad (121)$$

Mamy nadal swobodę wyboru parametru x określającego ze wzoru (108) częstość ω oraz δ , które mogą zmieniać się z ξ . Jedynymi ograniczeniami są (102) oraz warunek na stosunek sygnału do szumu

$$R_{SN} \geq 10 , \quad (122)$$

zdefiniowany przez (117). Jeżeli założę, że (112) spełnione jest przy $b = 10$, wówczas (122) zachodzi pod warunkiem, że

$$x > (G/r)^{1/3} , \quad (123)$$

gdzie

$$G = (200r_0/\lambda_p)N'(1+z)^{-1} = 10^{-9}N'(1+z)^{-1}, \quad (124)$$

$$r = (R_A/R_p) = (\cosh \xi - 1)/(\cosh \xi_p - 1). \quad (125)$$

Wielkości λ_p , R_p i ξ_p oznaczają tutaj obecne wartości długości fali promieniowania tła, promienia Wszechświata i współrzędnej czasowej. Warto zauważyć, że warunek (123) na stosunek sygnału do szumu może być trudny do spełnienia we wczesnych epokach, gdy r jest małe, natomiast staje się coraz łatwiejszy do spełnienia w miarę upływu czasu i rozszerzania się Wszechświata. Aby uniknąć zbędnych wydatków energii we wczesnych epokach wybieram okres pracy nadajnika początkowo mały, a następnie stopniowo wzrastający aż do jedności.

Wszystkie te rozważania są spełnione, jeżeli wybierzemy

$$x = \max[(G/r)^{1/3}, \xi^{-1/2}], \quad (126)$$

$$\delta = \min[(r/G)\xi^{-3/2}, 1], \quad (127)$$

tak, że

$$x^3\delta = \xi^{-3/2} \quad (128)$$

dla wszystkich ξ . Przejście pomiędzy dwoma zakresami w (126) i (127) zachodzi dla

$$\xi = \xi_T \sim \log G, \quad (129)$$

bowiem ξ wzrasta logarytmicznie z r zgodnie ze (125). Przy takim wyborze x i δ , (120) i (121) dają

$$F' = \Lambda \min[(r/G)^{2/3}\xi^{-3/2}, \xi^{-1/2}], \quad (130)$$

$$E = (\Lambda^3/NN')(1+z)(\sinh^2 \eta) E_c \xi^{-3/2}. \quad (131)$$

Rozważmy teraz całkowitą liczbę bitów otrzymanych przez B , aż do pewnego momentu ξ w dalekiej przyszłości. Zgodnie ze (130) dana jest ona w przybliżeniu przez

$$F_T = \int^\xi F' d\xi = 2\Lambda \xi^{1/2}, \quad (132)$$

i rośnie nieograniczenie wraz z ξ . Z drugiej strony całkowita energia zużyta przez nadajnik w ciągu całej przyszłości jest skończona,

$$E_T = \int^\infty E d\xi = 2(\Lambda^3/NN')(e'' \sinh^2 \eta) \xi_p^{-1/2} E_c. \quad (133)$$

We wzorze (133) zastąpiłem wyrażenie $(1+z)$ jego wartością asymptotyczną e'' przy $\xi \rightarrow \infty$. Doszedłem tym samym do równie optymistycznego wniosku dotyczącego łączności, do jakiego doszedłem w poprzednim wykładzie odnośnie przetrwania biologicznego. Jest zatem możliwe utrzymanie łączności przez czas dowolnie długi z odległym społeczeństwem w rozszerzającym się Wszechświecie zużywając na ten cel skończoną ilość energii.

Interesujące jest dokonanie przybliżonych ocen liczbowych wielkości F_T i E_T . Dzięki (107) całkowita liczba bitów informacji przekazywanych w każdym kanale łączności jest taka sama i rzędu

$$F_T = 10^{29} \xi^{1/2}, \quad (134)$$

jest to ilość informacji wystarczająca do opisanie historii rozwiniętej cywilizacji. By ocenić E_T zakładam, że zarówno nadajnik, jak i odbiornik zawierają 1 kg elektronów, tak że

$$N = N' = 10^{30}. \quad (135)$$

Wówczas (133) wraz ze (105) dają

$$E_T = 10^{23} (e'' \sinh^2 \eta) \text{ ergów}. \quad (136)$$

Wielkość ta jest rzędu $10^9 \text{ W} \cdot \text{rok}$, a więc według standardów astronomicznych skrajnie mała. Społeczeństwu dysponującemu zasobami energii gwiazdy typu Słońca, około $10^{36} \text{ W} \cdot \text{rok}$, wystarczy tych zasobów na utrzymanie stałych kanałów łączności ze wszystkimi 10^{22} gwiazdami leżącymi wewnątrz sfery $\eta < 1$. Oznacza to, że wszystkie społeczeństwa, których względne przesunięcie ku czerwieni nie przekracza

$$z = e - 1 = 1,718 \quad (137)$$

mogłyby utrzymywać stałą łączność między sobą. Bezpośrednia łączność pomiędzy dwoma bardziej odległymi społeczeństwami byłaby nadmiernie kosztowna. Ze względu na szybki wykładniczy wzrost E_T z η , górna granica sfery bezpośredniej łączności znajduje się w pobliżu $\eta = 10$. Można też łatwo, bez wydatkowania dużej ilości energii, przekazywać informacje na odległości większe niż $\eta = 10$, jeżeli kilka społeczeństw wzdłuż trasy służyć będzie jako stacje przekaźnikowe, kolejno odbierające, wzmacniające i retransmitujące sygnały. W ten sposób informacja mogłaby być przekazywana na dowolnie wielkie odległości. Każde społeczeństwo we Wszechświecie mogłoby dzięki temu nawiązać kontakt z każdym innym.

Jak już wspomniałem w pierwszym wykładzie (równanie (11)), liczba galaktyk leżących w kuli $\eta < \psi$ rośnie dla dużych ψ jak $e^{2\psi}$. Tak więc kiedy spróbujemy nawiązać łączność pomiędzy odległymi społeczeństwami, pojawi się poważny problem selekcji. Jest zbyt wiele galaktyk bardzo odległych. Której z nich powinniśmy nasłuchiwać? Do której z nich powinniśmy kierować sygnały? Im doskonalsze będą nasze środki łączności, tym większe będziemy mieć trudności przy decydowaniu, z których kanałów łączności zrezygnować.

Podsumowując, chciałbym podkreślić, że nie przedstawiłem żadnego rozstrzygającego dowodu stwierdzenia, iż przekaz nieskończonej ilości informacji za cenę zużycia skończonej ilości energii jest możliwy. Rozstrzygający dowód wymagałby przedstawienia szczegółowego projektu nadajnika i odbiornika i zademonstrowania, że mogą one pracować tak jak sobie wyobrażam. Nie próbowałem nawet zaprojektować *hardware* dla mojego systemu łączności. Jedyne co zrobiłem, to pokazałem, że układ nadawczo-odbiorczy, pracujący według moich koncepcji, nie znajduje się w jawnej sprzeczności ze znanymi prawami fizyki i teorii informacji.

Wszechświat, który powierzchownie przebadalem w tych wykładach, różni się bardzo od Wszechświata, jaki miał na myśli Steven Weinberg mówiąc, „im bardziej Wszechświat wydaje się możliwy do ogarnięcia rozumem, tym bardziej wydaje się bezcelowy”. Znalazłem Wszechświat, którego bogactwo i złożoność rosną nieograniczenie, Wszechświat, w którym życie może trwać wiecznie i poprzez niewyobrażalne obszary przestrzeni i czasu informować o swym istnieniu sąsiadów. Czyj Wszechświat jest bliższy prawdy, Weinberga czy mój? Dowiemy się o tym w niedalekiej przyszłości.

Niezależnie od tego, czy szczegóły moich rachunków okażą się poprawne, czy też nie, wydaje mi się, że wykazałem, iż istnieją poważne przyczyny naukowe, by traktować serio możliwość, że życie rozumne będzie w stanie dopasować ten nasz Wszechświat do swoich własnych celów. Jak pisał przed przeszło pięćdziesięciu laty biolog Haldane [31], „umysł ludzki jest słaby i są chwile, kiedy nie wytrzymuje niezmierzonej ilości swoich własnych wymagań. Ale nawet wówczas:

Chociaż w czarnym humorze chyli się i gnie,
Wiem, że grzmi na bogów,
Oczekując ostatniego zaćmienia”.

Tłumaczył Leszek M. Sokołowski

Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Kraków

Literatura

- [1] S. Weinberg, *The First Three Minutes*, Basic, New York 1977; wyd. polskie: *Pierwsze trzy minuty*, Iskry, Warszawa 1980 (tłum. Aleksander Blum).
- [2] R. A. Alpher, R. C. Herman, G. Gamow, *Phys. Rev.* **74**, 1198' (1948).
- [3] A. A. Penzias, R. Wilson, *Astrophys. J.* **142**, 419 (1965).
- [4] M. J. Rees, *Observatory* **89**, 193 (1969).
- [5] P. C. W. Davies, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **161**, 1 (1973).
- [6] J. N. Islam, *Q. J. R. Astron. Soc.* **18**, 3 (1977).
- [7] J. N. Islam, *Sky Telesc.* **57**, 13 (1979).
- [8] J. D. Barrow, F. Tipler, *Nature* (London) **276**, 453 (1978).
- [9] J. Monod, *Chance and Necessity*, Knopf, New York; oryginał *Le Hasard et la Nécessité*, Editions du Seuil, Paris 1970.
- [10] S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, Wiley, New York 1972, rozdz. 15.
- [11] J. R. Gott III, J. E. Gunn, D. N. Schramm, B. Tinsley, *Astrophys. J.* **194**, 543 (1974).
- [12] J. R. Gott III, J. E. Gunn, D. N. Schramm, B. M. Tinsley, *Sci. Am.* **234**, 62, (March 1976).
- [13] K. Gödel, *Monatsh. Math. Phys.* **38**, 173 (1931).
- [14] E. Nagel, J. Newman, *Sci. Am.* **194**, 71 (June 1956).
- [15] T. Wright, *An Original Theory or New Hypothesis of the Universe*, 1750, fascimile reprint with introduction by M. A. Hoskin, Mac Donald, London, American Elsevier, New York, 1971.
- [16] F. J. Dyson, *Aspects of Quantum Theory*, wyd. A. Salam i E. P. Wigner, Cambridge University Press 1972, rozdz. 13.
- [17] F. J. Dyson, *Variation of Constants*, w *Current Trends in the Theory of Fields*, wyd. J. E. Lannutti i P. K. Williams, American Inst. of Physics, New York 1978, p. 163—167.
- [18] A. I. Shlyakhter, *Nature* **264**, 340 (1976).

- [19] M. Maurette, *Annu. Rev. Nucl. Sci.* **26**, 319 (1976).
- [20] Y. B. Zeldovich, *Sov. Phys.-JETP* **45**, 9 (1977).
- [21] G. Feinberg, M. Goldhaber, G. Steigman, *Multiplicative Baryon Number Conservation and the Oscillation of Hydrogen into Antihydrogen*, Columbia University Preprint CU—TP—117, 1978.
- [22] W. P. Kropp, F. Reines, *Phys. Rev.* **137**, 740 (1965).
- [23] D. V. Nanopoulos, *Protons are not Forever*, Harvard Preprint HUTP-78/AO62, 1978.
- [24] J. C. Pati, *Grand Unification and Proton Stability*, University of Maryland Preprint No. 79—171, 1979.
- [25] M. S. Turner, D. Schramm, *The Origin of Baryons in the Universe and the Astrophysical Implications*, E. Fermi Institute Preprint No. 79—10, 1979.
- [26] S. W. Hawking, *Commun. Math. Phys.* **43**, 199 (1975).
- [27] B. K. Harrison, K. S. Thorne, M. Wakano, J. A. Wheeler, *Gravitation Theory and Gravitational Collapse*, Univ. of Chicago Press 1965, rozdz. 11.
- [28] F. Hoyle, *The Black Cloud*, Harper, New York 1957.
- [29] K. Čapek, *R. U. R.*, tłum. P. Selver, Doubleday, Garden City, N. Y. 1923.
- [30] H. A. Bethe, E. E. Salpeter, „Quantum Mechanics of One- and Two-Electron Systems”, *Handb. Phys.* **35**, 334—348 (1957).
- [31] J. B. S. Haldane, *Daedalus, or Science and the Future*, Kegan Paul, London 1924.