

Stan RT, jak mówiliśmy, jest tylko fizycznym modelem, zatem ostatnia równość na ogół nie jest spełniona. Zawsze natomiast jest prawdą, że przyrost natężenia promieniowa ΔI po przebyciu jednostkowej drogi jest równy nadwyżce energii wyswieconej nad pochłoniętą, czyli

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I}{\Delta s} &= N_2 A_{21} h\nu + N_2 B_{21} I h\nu - N_1 B_{12} I h\nu = \\ &= N_2 A_{21} h\nu - N_1 B_{12} \left(1 - \frac{N_2 B_{21}}{N_1 B_{12}} \right) I h\nu. \end{aligned}$$

I teraz widać ciekawą rzecz. W stanie RT obsadzeniem poziomów rządzi rozkład Boltzmanna, według którego

$$N_2 B_{21} / N_1 B_{12} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) < 1. \text{ Jeżeli natomiast}$$

dałoby się w ośrodku zrealizować taką sytuację, że $N_2 B_{21} / N_1 B_{12}$ stałoby się większe od jedności (czyli jak gdyby temperatura wzbudzeniowa T stała się „ujemna”), to całe wyrażenie po prawej stronie równości stałoby się dodatnie, a w konsekwencji ΔI stałoby się dodatnie, czyli ośrodek wzmacniałby promieniowanie. Powstałby w ten sposób tzw. laser lub maser — słowa te składają się z początkowych liter angielskiej nazwy tego zjawiska: *Light* (albo *Microwave*) *Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, w zależności od tego, czy zjawisko dotyczy światła widzialnego czy mikrofal.

W jaki sposób wywołuje się zjawisko maserowe? Najczęściej robi się w ten sposób, że atomy ośrodka wzbudza się (przez oświetlenie silnym promieniowaniem lub przez przepuszczenie iskry elektrycznej) na jakiś trzeci poziom wyższy od obu poziomów maserowych. Proces ten nazywa się „pompowaniem”. Następnie atomy „spadają” z niego na wyższy poziom maserowy powodując jego obsadzenie obfitsze, niż wynika z rozkładu Boltzmanna. Tym samym powstają warunki sprzyjające wystąpieniu zjawiska maserowego i ośrodek jest gotów wzmacniać promieniowanie.

Okazało się, że zjawisko maserowe, którego opanowaniem tak się chlubi, przyroda wykorzystuje już od dawna. Mianowicie w 1963 r. radioastronomowie amerykańscy zidentyfikowali w pasmie 18 cm cztery linie radiowe (o częstościach 1612, 1665, 1667 i 1720 MHz) pochodzące od międzygwiazdowych cząsteczek OH. Po bliższym badaniu stwierdzono, że każda z tych czterech linii składa się z licznych blisko siebie leżących i bardzo ostrych maksimów. Zinterpretowano to w ten sposób, że każde maksimum jest promieniowane przez inny obłok cząstek OH, zaś same obłoki widocznie poruszają się względem siebie. Ostrość maksimów świadczyłaby o niskiej temperaturze obłoków, gdyż wtedy ruch cząsteczek jest stosunkowo powolny i dopplerowskie rozmycie linii jest niewielkie. Z drugiej strony, duże natężenie tych linii świadczyłoby, przeciwnie,

o temperaturze niezwykle wysokiej. Dowodzi to natychmiast braku RT w tych obłokach, a obserwowana sytuacja daje się wytłumaczyć hipotezą, że wspomniane cztery linie radiowe powstają w wyniku zjawiska maserowego. Powstaje pytanie, w jaki sposób pompowane są owe kosmiczne masery. Nie mamy możliwości przesłania tu dość żmudnej analizy danych obserwacyjnych, która dałaby jasną odpowiedź na to pytanie. W skrócie, okazało się, że w dobrej zgodzie z obserwacjami jest hipoteza wysunięta przez radzieckiego astronoma J. Szklowskiego. Według niej pompowanie maserów kosmicznych odbywa się przy pomocy podczerwonego promieniowania przenikającego obłoki OH. Znalazienie tego rozwiązania nie było proste, gdyż radioźródła maserowe nie stanowią jednorodnej grupy obiektów. Wyróżniono wśród nich trzy typy różniące się względnymi natężeniami poszczególnych linii i dwa z nich, poza wspólnym mechanizmem pompowania, mają jeszcze jedną cechę wspólną, o której powiemy na końcu.

Otóż radioźródła typu I o silnych liniach 1665 i 1667 MHz obserwuje się w zwartych strefach zjonizowanego wodoru międzygwiazdowego, zaś typu II z silną linią 1612 MHz utożsamiane są z punktowymi źródłami podczerwieni. Strefa wodoru zjonizowanego może istnieć wtedy, gdy w jej wnętrzu znajduje się dostatecznie gorąca gwiazda, zdolna swoim krótkofalowym promieniowaniem jonizować otaczający ją wodór międzygwiazdowy. Tych gwiazd jednak się w źródłach maserowych nie obserwuje, czego przyczyną może być ogromna warstwa pyłu pochłaniającego światło, a emitującego następnie podczerwone promieniowanie pompujące. Lecz wewnątrz takiego obłoku będzie wtedy panować ciśnienie powodujące szybkie jego rozproszenie. Zatem każde tego rodzaju źródło maserowe stowarzyszone ze strefą zjonizowanego wodoru jest obiektem młodym, jak również młoda musi być centralna gorąca gwiazda. Z kolei obiektami pompującymi źródła maserowe II typu okazały się obłoki materii międzygwiazdowej o temperaturze zaledwie rzędu setek kelwinów. Sądząc po obserwowanej mocy, obłok taki powinien mieć rozmiary rzędu nawet setek jednostek astronomicznych i dostatecznie dużą masę, aby w ogóle mógł istnieć przez rozsądny czas. Wtedy okazuje się jednak, że nie może on być tworem stabilnym, lecz musi znajdować się w stadium zapadania się pod wpływem własnej grawitacji. Jest to zatem tzw. protogwiazda, czyli obiekt, który dopiero

w przyszłości stanie się gwiazdą. I tu dochodzimy do niezwykle ważnego wniosku. Tą drugą cechą wspólną maserowych źródeł typu I i II jest ich młodość. Ich promieniowanie maserowe jest sygnałem dla astronomów, że gdzieś niemal na naszych oczach lub bardzo niedawno powstała gwiazda. I chyba godne uwagi jest, że o swoich narodzinach gwiazdy sygnalizują nam przy pomocy tego, co w technice nazwalibyśmy „najnowszym osiągnięciem optyki kwantowej”, czyli przy pomocy naturalnego masera.



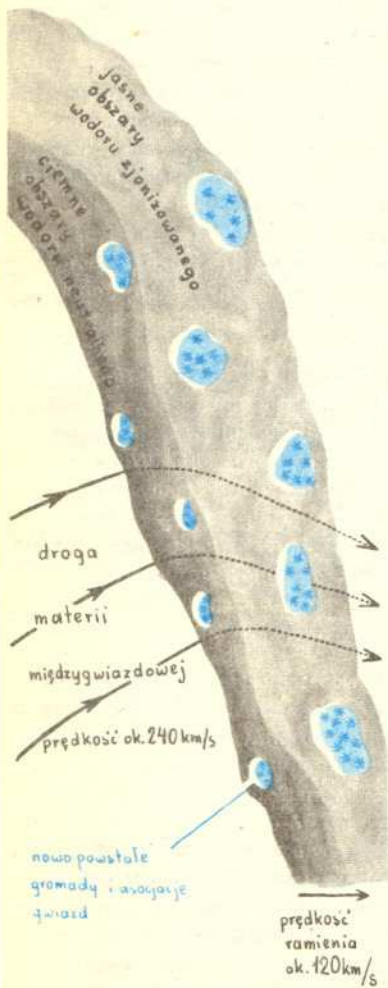
Ramiona spiralne



Doc. dr Jerzy STODÓŁKIEWICZ

Jest paradoksem, że łatwiej poznać wygląd odległych galaktyk niż tej, w której żyjemy. Podobnie, znajdując się w lesie, w gęstwinie drzew i krzewów, nie jesteśmy w stanie ogarnąć wzrokiem jego ogólnych zarysów, rozmieszczenia w nim polan i zagajników, przecinających go dróg i ścieżek. Dopiero gdy wzniesiemy się w górę i okiem ptaka spojrzymy na rozciągający się pod nami teren, możemy dostrzec całe jego bogactwo: kształt lasów i pól, piaszczyste wydmy, rzeki, łąki i jeziora. Uwięzieni w płaszczyźnie Drogi Mlecznej, otoczeni przez nieprzezroczystą materię międzygwiazdową, z trudem zdobywamy wiadomość

Gwiazdy podzielono w kolejności malejących temperatur powierzchniowych na typy widmowe O — B — A — F — G — K — M.



Przekrój przez ramię spiralne Galaktyki

o rozmieszczeniu w dysku galaktycznym różnych typów gwiazd. Bardziej szczegółowe informacje odnoszą się jedynie do położenia wodoru neutralnego. Wiemy, że skupia się on w potężnych ramionach spiralnych o szerokości rzędu kiloparseka, przebiegających przez cały dysk Galaktyki. Znacznie mniej wiemy o położeniach gwiazd, dostrzegamy tylko bliżej leżące, a pomiary ich odległości obarczone są znacznymi błędami. Dlatego nasza wiedza o ich przynależności do ramion spiralnych ograniczona jest jedynie do tych części, które przebiegają w pobliżu Słońca. Na podstawie obserwacji tej ograniczonej próbki gwiazd możemy wnioskować o tym, że ramiona spiralne naszej Galaktyki to nie tylko skupiska materii międzygwiazdowej, ale także siedlisko młodych gwiazd. W nich, prawie wyłącznie, obserwuje się asocjacje, układy na tyle nietrwałe, że muszą się składać z gwiazd narodzonych nie dawniej niż kilkanaście milionów lat temu. W ramionach spiralnych lub w ich otoczeniu skupiają się gorące gwiazdy typów widmowych O i B szybko ewoluujące, a więc także niedawno powstałe. Natomiast nie stwierdzamy grupowania się w ramionach spiralnych gwiazd starszych. Nasze informacje byłyby znacznie kompletniejsze i odnoszą się do struktury ramion w obrębie całego dysku, gdybyśmy mogli wznieść się wysoko ponad płaszczyznę Galaktyki. Widziana z odległości około 10 kiloparseków Galaktyka rozpościerałaby się jak olbrzymia tarcza na niebie, rozjarzająca tysiącami błyszczących punktów i świecących obłoków jonizowanego gazu większą część firmamentu. Jej wygląd możemy sobie wyobrazić zestawiając wiadomości o niej uzyskane z Ziemi ze zdjęciami wielu podobnych do niej galaktyk spiralnych. Na tle jasnego dysku dostrzegliśmy wówczas rozciągający się od odległości około 3-4 kiloparseków od świecącego jako mglista, niewielka plamka gorącego gazu jądra Galaktyki, olbrzymie ramiona sięgające aż po brzeg układu. Na ich wewnętrznym brzegu ciągnąłby się ciemny, wąski pas neutralnego gazu i pyłu, dalej, już w obrębie ramion dominowałyby olbrzymie, świecące obłoki zjonizowanego wodoru i tysiące gorących jasnych gwiazd. Obszary między ramionami śkńczyłyby w świetle ramion, ich blada poświata pochodziłaby od miliardów gwiazd niewidocznych już gołym okiem, gdzieś tam zaledwie błyszczałyby pojedyncze jasne gwiazdy lub obłoki. Ten wyraźny obraz struktury spiralnej naszej Galaktyki nie oddaje jednak właściwie jej rozkładu masy. Gęstość gwiazd (ich liczba w jednostce objętości) jest niewiele większa w obrębie ramion spiralnych niż między nimi. Większa część masy w Galaktyce zawarta jest w słabo świecących, chłodnych gwiazdach rozmieszczonych dość równomiernie w Galaktyce. Natomiast najjaśniejsze obiekty: duże obłoki zjonizowanego wodoru i gorące młode gwiazdy skupiają się w obrębie ramion. To właśnie powoduje ich znacznie większą jasność niż obszarów leżących między ramionami.

Struktura spiralna jest bardzo powszechna wśród galaktyk. Około 50% większych galaktyk posiada wyraźnie zarysowane ramiona spiralne. Wszystkie one cechują się dobrze ukształtowanym dyskiem skupiającym dużą część ogólnej masy galaktyki. A więc tworzenie się ramion spiralnych nie jest cechą szczególną naszej Galaktyki, lecz musi być bardzo naturalną właściwością dysków. Wydaje się to tym bardziej dziwne, że dyski obracają się nie jak ciało sztywne, lecz z różną prędkością kątową w różnych odległościach od jądra ich macierzystej galaktyki: najszybciej w pobliżu jądra, coraz wolniej w obszarach zewnętrznych. Gdyby więc ramiona potraktować jako twory składające się stale z tej samej materii, to wskutek tego nierównomiernego obrotu dysku powinny się one stale nawijać, jak nić na szpulę w coraz większą liczbę zwojów, a po paru obrotach galaktyki (po kilkuset milionach lat) ich kontury powinny ulec zatarciu. Ramiona powinny więc zaniknąć i już w przyszłości (a przynajmniej do czasu ich ponownego odtworzenia się w wyniku jakiegoś nieznanego procesu) galaktyka nie powinna mieć struktury spiralnej. Przeczyłoby to jednak możliwości obserwowania w przyrodzie tak dużej liczby galaktyk spiralnych. Pozostaje więc przyjąć, że ramiona są tworami dostatecznie trwałymi, samorzutnie tworzącymi się w dyskach galaktycznych.

Najlepiej tłumaczy zjawiska zachodzące w ramionach spiralnych teoria, która traktuje je jako zjawisko falowe: jako obszary w Galaktyce, przez które przepływa materia międzygwiazdowa i gwiazdy. Same ramiona obracają się jak ramiona wiatraka wokół centrum Galaktyki ze stałą prędkością kątową, około dwukrotnie mniejszą niż prędkość Słońca. Dokonują one pełnego obrotu w ciągu 400 milionów lat. Materia międzygwiazdowa i gwiazdy biegną szybciej. Doganiają więc ramię spiralne, przez pewien czas w nim przebywają i uchodzą znów z niego, by po pewnym czasie dotrzeć do następnego.

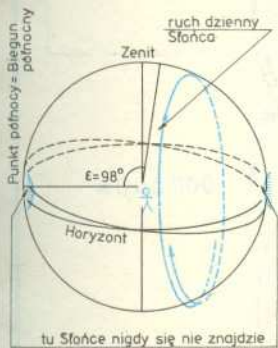
Prześledźmy los obłoku materii międzygwiazdowej. Najpierw biegnie on po prawie kołowej orbicie w płaszczyźnie Drogi Mlecznej wśród rozrzedzonej materii rozproszonej w obszarze pomiędzy ramionami. Ponieważ w tych okolicach mało jest gwiazd gorących, obłok jest chłodny, jego temperatura nie przekracza na ogół 100 K, z wyjątkiem krótkich okresów, w których po zderzeniu się z któryś z sąsiadów ogrzeje się do temperatury rzędu 1000 K. Szybko jednak ostygnie znów wypromieniowując swą energię w przestrzeń. Gdy obłok taki zbliży się do ramienia spiralnego, wówczas przyciąganie grawitacyjne przez materię

Rozwiązanie zadania A2.

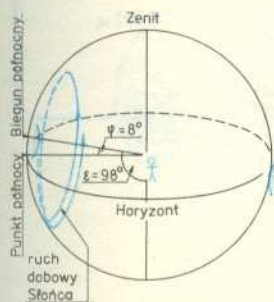
b) Oś obrotu Urana jest, jak u wszystkich planet, zorientowana zawsze w ten sam sposób w przestrzeni. Ponieważ $\epsilon = 98^\circ$, więc oś nigdy nie jest skierowana prosto w Słońce, zawsze kąt między kierunkiem na Słońce a osią obrotu jest nie mniejszy niż 8° . A więc patrząc z powierzchni planety: wokół obu biegunów niebieskich istnieją czapy o promieniu 8° , gdzie Słońce nigdy nie ma. Krają ono w ruchu dziennym po spirali prawie prostopadłe do osi świata, zbliżając się raz w roku do każdej z „czap biegunowych”. A więc dni i noce polarne nie występują na takich szerokościach, na których czapy (będące na danej szerokości zawsze w tym samym miejscu) przycinają się z horyzontem, czyli dla wąskiego pasa równikowego o szerokości 16° ($-8^\circ < \varphi < 8^\circ$). Na innych szerokościach Słońce, zbliżając się w ruchu rocznym do czapy leżącej nad horyzontem, ma szansę okrążyć ją w ruchu dobowym nie zachodząc pod horyzont (czyli występuje dzień polarny). Z rysunków wynika, że w okolicy równika zima (Słońce nisko nad horyzontem) i lato (Słońce wysoko) występują dwa razy w roku!



Rys. 1. Obserwator na biegunie uranowym.



Rys. 2. Obserwator na równiku.



Rys. 3. Obserwator na równoleżniku 8° .

aktualnie znajdującą się w ramieniu (o gęstości o kilkanaście procent większej niż w obszarach między ramionami) zmusi go do zбочenia z kursu ku wewnętrznemu brzegowi ramienia. Niedługo potem obłok wtargnie do obszaru, w którym gęstość gazu jest znacznie większa. Następuje zderzenie materii ze znajdującą się już w ramieniu. Obłok nasz, wraz ze swymi sąsiadami, zostaje gwałtownie sprężony. To właśnie teraz znajduje się on w tym z daleka widocznym ciemnym pasie gęstego wodoru neutralnego u wewnętrznego brzegu ramienia, który obserwowaliśmy po wzniesieniu się wysoko ponad płaszczyznę Galaktyki. W tym pasie gęstej i jednocześnie chłodnej materii międzygwiazdowej istnieją warunki sprzyjające powstawaniu gwiazd. Materia teraz powoli przesuwa się ku wnętrzu, spychana jednocześnie wzdłuż niego. Wkrótce rozbłyskują pierwsze, najmasywniejsze z nowo zrodzonych gwiazd. Tworzą się one na ogół w ugrupowaniach: asocjacji i gromadach. Swymi promieniami ogrzewają otaczającą materię rozproszoną, jonizują ją wokół siebie. Rozprężający się gorący ośrodek pcha przed sobą niezjonizowany i chłodny gaz powodując dalsze jego zagęszczenie. Pojawiają się bardzo gęste krople zimnego gazu, w których formują się następne gwiazdy. Trwa to dopóty, dopóki rozgrzana światłem nowo narodzonych gwiazd materia nie rozproszy się na tyle, że proces powstawania gwiazd wygaśnie. Obserwujemy wówczas dużą liczbę asocjacji i gromad młodych gwiazd otoczonych rozległymi obłokami zjonizowanego wodoru. Biegą one na ukos przez ramię spiralne, w kierunku, w którym ramię jest zakorzenione w pobliżu centrum Galaktyki, z lekkim odchyleniem ku jego brzegowi zewnętrznemu. Osiągnęły już środek ramienia. Teraz one przyciągają ku sobie nowe masy gazu docierające do ramienia. Moment pędu, który wniósł obserwowany przez nas obłok gazu, rozdzielony teraz między powstałe z niego gwiazdy (na które została zużyta jedynie niewielka część masy obłoku) i pozostały po obłoku gorący, zjonizowany gaz, zmusza te gwiazdy i ten gaz do szybszego obrotu wokół środka Galaktyki niż czyni to ramię spiralne. Dlatego poruszają się one ku wewnętrznemu brzegowi ramienia i po pokonaniu sił przyciągania grawitacyjnego przez materię, która w nim jeszcze przebywa, wydostają się do obszarów między ramionami. Uplłynęło już kilkadziesiąt milionów lat od wtargnięcia naszego obłoku gazu do ramienia spiralnego i narodzin w nim gwiazd. Te najgorętsze, odpowiedzialne za jonizację otaczającego gazu, gwiazdy typów O i B zdążyły zakończyć już swą ewolucję. Pozostały jedynie gwiazdy chłodniejsze. Dlatego też gaz szybko stygnie. I znów w przestrzeni między ramionami płyną obłoki neutralnego gazu i pyłu po prawie kołowych orbitach, by po 200 milionach lat dogonić następne ramię i wziąć ponownie udział we wszystkich wyżej opisanych procesach.

Widzimy więc, że ramiona spiralne są jak gdyby olbrzymimi falami płynącymi przez Galaktykę, w których następuje sprężenie się gazu międzygwiazdowego, aż do stanu, w którym mogą w nim powstawać gwiazdy. Jednocześnie te nowe gwiazdy, które początkowo mogą współdziałać w dalszym zagęszczeniu materii i tworzeniu się nowych gwiazd, przerywają ten proces: ogrzewają materię i powodują jej rozproszenie w przestrzeni. Ramiona spiralne są więc kliniką położniczą naszej Galaktyki: w nich następuje stałe, choć powolne przetwarzanie materii rozproszonej we wciąż rodzące się młode gwiazdy, rozsiewane następnie w obrębie dysku galaktycznego.

Wzajemnie sprężone procesy decydują o istnieniu ramion spiralnych w dysku galaktycznym. W ramionach gęstość materii jest większa, dlatego że przepływający przez nie gaz zwalnia swój bieg i częściowo płynie wzdłuż nich. Ale tego rodzaju ruch materii w ramionach spiralnych spowodowany jest właśnie tym, że w ramionach gęstość jest nieco większa niż w obszarach między nimi. Teraz łatwo już określić, dlaczego w ramionach spiralnych nie skupiają się gwiazdy starsze. Oczywiście i te z nich, które należą do I populacji, przy każdym obiegu wokół centrum Galaktyki trafiają do ramion. Ale ich prędkości swoiste, z jakimi poruszają się względem siebie, są znacznie większe niż obłoków międzygwiazdowych. Dlatego nie poddają się tak łatwo jak materia międzygwiazdowa potencjałowi grawitacyjnemu ramion i prawie nie odczuwając go przebiegają w poprzek ramion. I Słońce powstało niegdyś w jednym z ramion spiralnych naszej Galaktyki. Oczywiście, nie sposób już dziś odtworzyć, w którym to było miejscu. Od tego czasu regularnie co 200 milionów lat przebiega ono przez ramiona spiralne. Powoduje to, że warunki w przestrzeni międzygwiazdowej wokół Słońca zmieniają się w tym długim okresie. Czasami biegnie ono w prawie kompletnej pustce, kiedy indziej, gdy wchodzi w ramię spiralne, dostaje się w obszary o znacznie większej gęstości gazu i pyłu. A może to mieć istotny wpływ na warunki klimatyczne panujące na Ziemi. Opadający na Słońce pył międzygwiazdowy powodować może jego ogrzanie. Ten sam pył docierający do atmosfery Ziemi może stać się przyczyną zmniejszenia jej przezroczystości, a opadający na powierzchnię Ziemi może zwiększyć jej zdolność odbijania promieni słonecznych. W ten sposób wynikiem przejścia Słońca przez ramiona spiralne Galaktyki mogą być cykliczne zmiany klimatu na naszej planecie. Podejrzewa się nawet, że powodować one mogą powtarzające się co paręset milionów lat epoki lodowcowe na Ziemi. Ponieważ epoki lodowcowe w sposób istotny zmieniające warunki ekologiczne na dużych obszarach naszej planety są ważnym stymulatorem ewolucji życia, pozwala nam to przypuścić, że istnieniu ramion spiralnych zawdzięczamy nie tylko powstanie naszego Układu Słonecznego, ale nawet wpływ na rozwój życia na Ziemi.