Pola magnetyczne w galaktykach spiralnych

Dr Rainer BECK, RFN

Kamienie magnetyczne znane były w Chinach już 5000 lat temu. Natura magnetyzmu i jego związek z elektrycznością zostały odkryte w XIX wieku przez Oersteda, Faradaya i Maxwella. Umożliwiło to zastosowanie sił elektromagnetycznych w silnikach i prądnicach. Odkrycie pól magnetycznych na Słońcu przez Hale'a w 1908 roku wprowadziło zjawiska magnetyczne do astrofizyki. Pole magnetyczne Słońca i jego związek z takimi zjawiskami, jak aktywność słoneczna, wiatr gwiazdowy czy ogrzewanie korony słonecznej, są znane dość dobrze. Sporo też wiemy o polu magnetycznym planet (w tym Ziemi). Tematem tego artykułu jest działanie sił magnetycznych w przestrzeni międzygwiazdowej naszej Galaktyki lub w innych galaktykach — problematyka badana w ostatnich latach bardzo intensywnie.

1. Pola magnetyczne w naszej Galaktyce

Obserwacje międzygwiazdowych pól magnetycznych zostały rozpoczęte w 1950 roku, kiedy to Alfven, Herlofson i Kipenhauer wysunęli przypuszczenie, że fale radiowe dochodzące z Drogi Mlecznej są emitowane przez elektrony poruszające się w polu magnetycznym (tzw. promieniowanie synchrotronowe). Elektrony takie są także obserwowane w pobliżu Ziemi jako tzw. promieniowanie kosmiczne. W tym samym roku Hanbury Brown i Hazard zaobserwowali za pomocą 66-metrowego radioteleskopu w Jodrell Bank promieniowanie radiowe pochodzące z galaktyki Andromedy (M31). Dało to podstawy do przypuszczenia, że pola magnetyczne występują także poza Drogą Mleczną — w innych galaktykach.

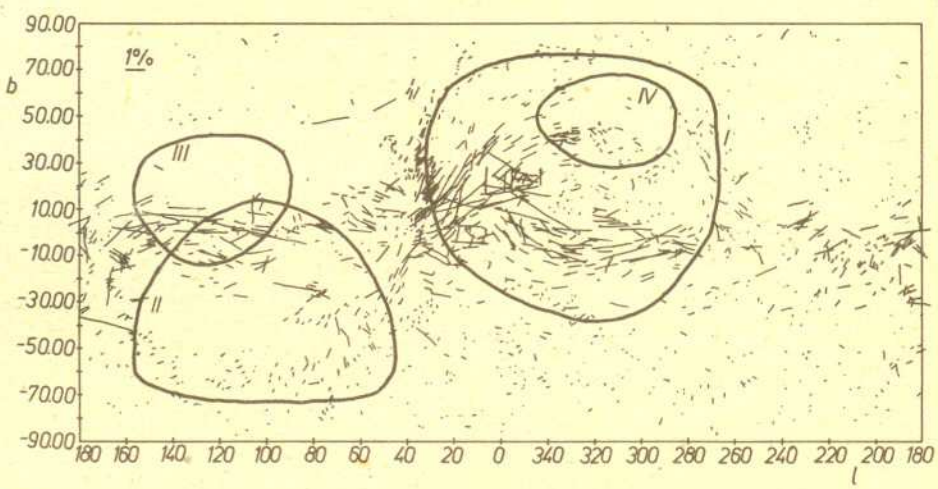
Istnienie międzygwiazdowego pola magnetycznego zostało też potwierdzone przez astronomię optyczną. W roku 1949 Hiltner wykrył, że światło odległych gwiazd jest słabo spolaryzowane. Światło tych gwiazd podczas swej drogi ku nam ulega polaryzacji rozpraszając się częściowo na cząsteczkach pyłu. Cząsteczki te są wydłużone, mają własności paramagnetyczne lub słabo ferromagnetyczne, co powoduje, że układają się one zazwyczaj równolegle do linii pola magnetycznego. Kierunek płaszczyzny polaryzacji światła („wektor polaryzacji") pokrywa się z kierunkiem pola magnetycznego (zrzutowanym na sferę niebieską). Efekt ten został wyjaśniony na drodze teoretycznej przez Davisa i Greensteina w 1951 roku. Obserwacje polaryzacji światła gwiazd obejmujące całe niebo zostały zakończone w 1970 roku (Mathewson i Ford). Dają one wyobrażenie o przebiegu linii pola magnetycznego wzdłuż ramienia spiralnego, w którym się znajdujemy.

Ta sama metoda może być stosowana także do innych galaktyk (Obłoki Magellana, galaktyki M31 i M51), w których możemy obserwować gwiazdy przesłonięte przez pył. Wektory polaryzacji pokrywają się tu z grubsza z ramionami spiralnymi. Obserwowany stopień polaryzacji światła jest niewielki, co powoduje, że wyznaczone w opisany wyżej sposób kierunki pola są obarczone dużym błędem.

Jeszcze trudniejszy do zaobserwowania, lecz łatwiejszy do interpretacji jest tzw. efekt Zeemana, polegający na rozszczepieniu linii widmowych wytwarzanych przez atomy znajdujące się w polu magnetycznym. Rozszczepienie to dla linii 21 cm, wytwarzanej przez wodór neutralny, zostało po raz pierwszy zaobserwowane przez Verschuura w 1968 roku. Efekt ten jest jednak tak słaby, że możemy go jedynie wykorzystywać do badania naszych najbliższych okolic (obejmujących nasze ramię spiralne i dwa sąsiednie).

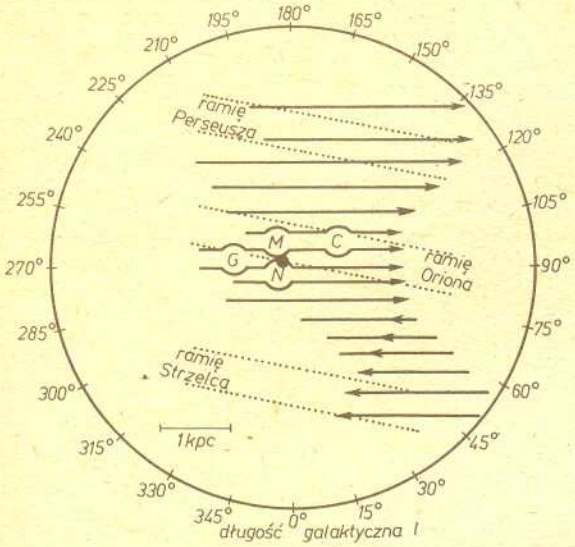
Istnieją, na szczęście, także inne metody badania pól magnetycznych występujących we Wszechświecie. Dostarcza nam ich znowu radioastronomia. Płaszczyzna polaryzacji liniowo spolaryzowanych fal elektromagnetycznych ulega skręceniu, gdy fale te przechodzą przez plazmę znajdującą się w polu magnetycznym — zjawisko to nazywamy rotacją Faradaya. Kąt skręcenia jest proporcjonalny do składowej wektora pola magnetycznego równoległej do linii obserwator-źródło, a także do gęstości i rozmiarów chmur plazmowych oraz do kwadratu długości fali. Kierunek skręcenia zależy od kierunku wektora natężenia pola. Jeśli wektor ten ma kierunek „od obserwatora", to kierunek skręcenia płaszczyzny polaryzacji jest zgodny z ruchem wskazówek zegara. Słabe pola magnetyczne istniejące w przestrzeni międzygalaktycznej wytwarzają wykrywalną rotację Faradaya dla długości fali powyżej kilku centymetrów.

Pomiary rotacji Faradaya wymagają istnienia punktowych źródeł spolaryzowanego liniowo promieniowania radiowego. Promieniowanie takie wysyłane jest przez pulsary i przez źródła leżące poza Galaktyką (kwazary, radiogalaktyki). Pomiary rotacji Faradaya dla fal radiowych wysyłanych przez pulsary (dokonane przez Manchestera w 1974 r.) umożliwiły bardzo dokładne zmierzenie pola magnetycznego w ramieniu spiralnym, do którego należymy. Wynosi ono $2{,}2 \pm 0{,}4$ μGs. Okazuje się, że linie pola magnetycznego w naszej Galaktyce przebiegają wzdłuż jej ramion spiralnych.



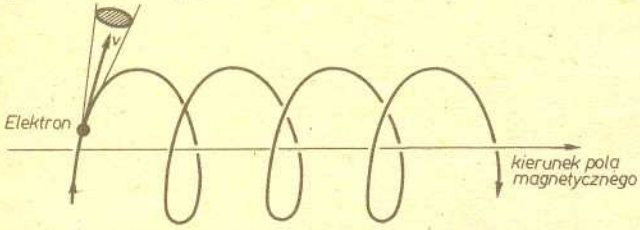
Rys. 1. Kierunki pola magnetycznego widziane z Ziemi (we współrzędnych galaktycznych *l*, *b*) otrzymane na podstawie obserwacji polaryzacji światła gwiazd, powstałej na pyle międzygwiazdowym. Uporządkowane linie pola magnetycznego w płaszczyźnie Drogi Mlecznej ($b = 0$) są związane z ramieniem spiralnym, w którym się znajdujemy. Pętle ponumerowane liczbami rzymskimi oznaczają miejsca podwyższonej emisji radiowej.

Wydaje się ponadto, że ich zwrot w „naszym" ramieniu (ramię Oriona) i w ramieniu sąsiednim, bliższym centrum Galaktyki (ramię Strzelca) jest przeciwny.



Rys. 2. Przebieg pola magnetycznego w okolicach Słońca (widziany „z góry" — w płaszczyźnie naszej Galaktyki, ze Słońcem w centrum rysunku), otrzymany na podstawie obserwacji rotacji Faradaya dla radioźródeł pozagalaktycznych. Literami *G*, *M*, *N*, *C* oznaczono „bąble" — deformacje pola magnetycznego spowodowane prawdopodobnie wybuchami supernowych („bąble" *N* i *C* odpowiadają pętlom I i II na rys. 1).

Innym źródłem informacji o polu magnetycznym jest promieniowanie synchrotronowe.



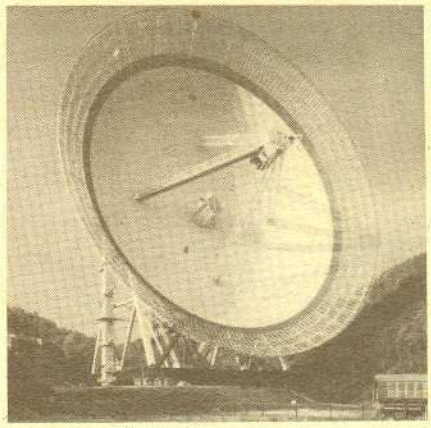
Rys. 3. Promieniowanie synchrotronowe powstaje, gdy naładowane cząstki (elektrony) poruszają się w polu magnetycznym. Staje się ono możliwe do zaobserwowania, gdy cząstki poruszają się z prędkościami bliskimi prędkości światła. Wtedy promieniowanie synchrotronowe jest emitowane (w wąskim stożku) w kierunku ruchu cząstki i jest ono liniowo spolaryzowane w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku pola magnetycznego i prędkości cząstki.

Moc tego promieniowania (z jednostki objętości) jest w przybliżeniu wprost proporcjonalna do kwadratu składowej wektora pola magnetycznego prostopadłej do kierunku obserwacji, a także do gęstości emitujących je elektronów. Gdy promieniowanie jest liniowo spolaryzowane, świadczy to o tym, że pole magnetyczne, w którym powstało, było jednorodne. Brak polaryzacji świadczy o „chaotyczności" pola.

Spolaryzowane promieniowanie radiowe (na fali 75 cm), pochodzące z naszej Galaktyki, odkryto w latach 1960—1961 w Lejdzie (Holandia) za pomocą 25-metrowego radioteleskopu i w Cambridge (Anglia) za pomocą radioteleskopu 7,5-metrowego. Na promieniowanie to składają się silne małe źródła (punktowe lub w kształcie pętli), będące pozostałościami po wybuchach supernowych, oraz rozległe obszary słabego promieniowania pochodzącego od magnetycznego tła naszej Galaktyki.

2. Pola magnetyczne w pobliskich galaktykach

Obserwacje spolaryzowanego promieniowania radiowego pochodzącego z pobliskich galaktyk — konieczne do badania pola magnetycznego w tych galaktykach — wymagają wysokiej zdolności rozdzielczej i wysokiej czułości stosowanych do tego celu radioteleskopów.



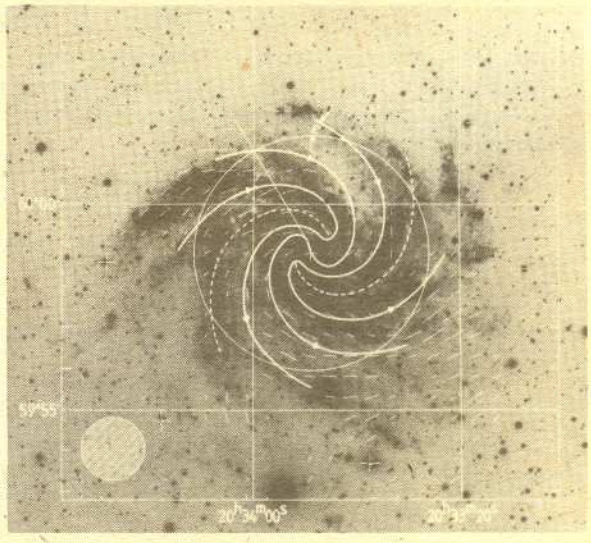
Rys. 4. 100-metrowy radioteleskop w Effelsbergu koło Bonn (RFN).

Przy małej rozdzielczości odbiornik „uśrednia" po pewnym obszarze, co może spowodować spadek obserwowanego stopnia polaryzacji, o ile występuje w tym obszarze pewien rozrzut wektorów polaryzacji będący odbiciem lokalnych niejednorodności natężenia i kierunku pola magnetycznego.

Obserwacje rotacji Faradaya w galaktykach spiralnych napotykają szereg trudności. Pole magnetyczne jest w nich skoncentrowane głównie w ramionach spiralnych, leżących w płaszczyźnie galaktyki. Ponieważ do wystąpienia rotacji Faradaya konieczne jest istnienie niezerowej składowej pola równoległej do osi obserwacji, jest ona tym większa, im silniej dana galaktyka jest nachylona do płaszczyzny sfery niebieskiej (dla galaktyk „leżących" dokładnie w płaszczyźnie stycznej do sfery niebieskiej nie występuje wcale). W galaktykach silnie nachylonych obserwujemy więc co prawda dużą rotację Faradaya, ale powstaje ona w wyniku przejścia fal radiowych przez szereg ramion spiralnych. Powoduje to duże trudności w interpretacji uzyskanych obserwacji i sprawia, że badania samej tylko rotacji Faradaya nie pozwalają na całkowite poznanie struktury pola magnetycznego galaktyk.

Do chwili obecnej spolaryzowaną emisję radiową zaobserwowano zaledwie u 12 bliskich galaktyk. Jest to zbyt mała liczba, by wyciągać na jej podstawie definitywne wnioski o międzygwiazdowych polach magnetycznych, jednakże kilka prawidłowości można już zauważyć.

Linie pola magnetycznego ułożone są zazwyczaj wzdłuż ramion spiralnych.



Rys. 5. Kierunki pola magnetycznego w galaktyce NGC 6946 (kreski). Zaznaczono też model pola magnetycznego (linie ciągłe ze strzałkami). Wykonano na podstawie obserwacji promieniowania synchrotronowego na fali 2,8 cm ze zdolnością rozdzielczą 0°,025.

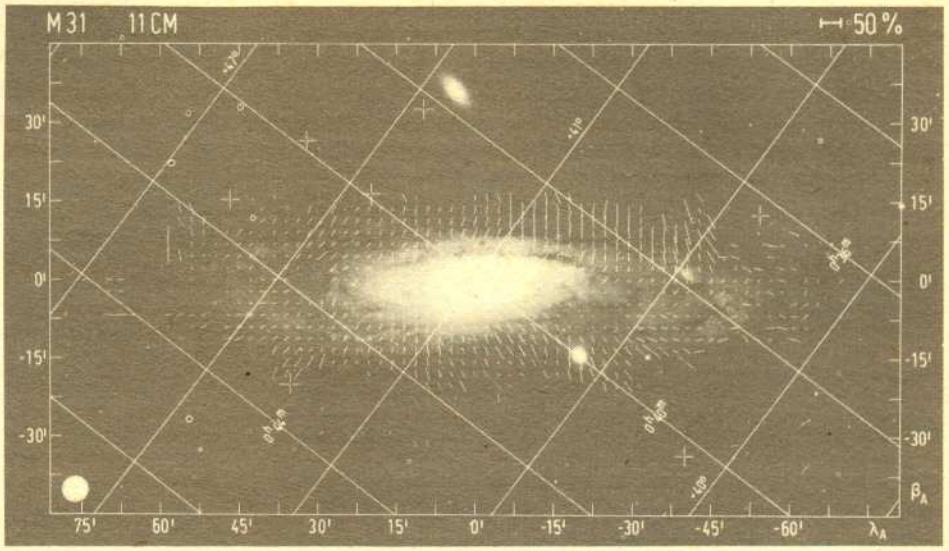
Czasami jednak mają one kształt torusa — jak np. w galaktyce Andromedy (patrz zdjęcie na okładce i rys. 6). Natężenie pola magnetycznego jest najsilniejsze w galaktykach o dużych masywnych ramionach spiralnych (takich jak M51 lub NGC 6946), a słabsze w galaktykach o mniej wyraźnej strukturze spiralnej (takich jak galaktyki tzw. Układu Lokalnego: M31, M33 i nasza Galaktyka).

Jak się przypuszcza, pole magnetyczne w galaktykach spiralnych jest na tyle słabe, że nie wpływa na ruch gazu wokół centrum galaktyki, lecz na tyle silne, że stabilizuje ramiona spiralne chroniąc je przed rozpraszaniem lub zapadaniem się.

Po renesansie pól magnetycznych w fizyce Słońca (w latach siedemdziesiątych) obserwujemy obecnie ich renesans w fizyce naszej Galaktyki i innych galaktyk. Jest on spowodowany między innymi możliwością obserwacji spolaryzowanych fal radiowych, które zapewne jeszcze przez długi czas będą stanowić główne narzędzie badawcze w tej dziedzinie.

Tłumaczył dr Jacek CHOŁONIEWSKI

Na okładce: Liniowo spolaryzowane promieniowanie radiowe o długości fali 11 cm dochodzące z galaktyki Andromedy (M31). Rozmiar kątowy przedstawionego obszaru $2^{\circ}6 \times 1^{\circ}5$. Zdolność rozdzielcza — $0^{\circ}07$. Kolor jest funkcją natężenia promieniowania synchrotronowego (niebieski — najniższe, czerwony — najwyższe). Autor: R. Beck (wykorzystano system przetwarzania obrazów „babsy", istniejący przy instytutach astronomicznych w Bonn).



Rys. 6. Kierunki wektorów polaryzacji w galaktyce Andromedy (kreski); są one prostopadłe do kierunku pola magnetycznego. Wykonano na podstawie obserwacji promieniowania synchrotronowego na fali 11 cm.

Zadania

Redaguje dr Rafał SZTENCEL

M 499. Niech a, b, c będą liczbami całkowitymi i niech równanie $ax^2+bx+c=0$ nie ma pierwiastków wymiernych. Udowodnić, że jeśli x jest pierwiastkiem tego równania, to dla każdej liczby wymiernej $\frac{p}{q}$, gdzie p, q są całkowite, mamy

$$\left|x-\frac{p}{q}\right| \geqslant \frac{1}{\left|a\left(x+\frac{p}{q}\right)+b\right|} \cdot \frac{1}{q^2}.$$

Rozwiązanie na str. 17

M 500. Ciąg $(a_n)_{n=0}^{\infty}$ o wyrazach naturalnych jest określony w następujący sposób: $a_0 = 1$, $r_1 = 4$; dalej, a_1 jest największą liczbą, dla której $s_1 = (4a_0+a_1)a_1 \leqslant r_1$; wówczas $r_2 = 4(r_1-s_1)$. Ogólnie, dla danych $a_0, \ldots, a_n$, r_{n+1} i s_n określamy a_{n+1} jako największą liczbę, dla której $s_{n+1} = [4(2^n a_0+2^{n-1}a_1+\ldots+2^0 a_n)+a_{n+1}]a_{n+1} \leqslant r_{n+1}$; wtedy $r_{n+2} = 4(r_{n+1}-s_{n+1})$. Czy wyrazy ciągu (a_n) powtarzają się okresowo, począwszy od pewnego miejsca?

Rozwiązanie na str. 3

M 501. Udowodnić, że wśród $2n$ początkowych cyfr rozwinięcia dziesiętnego liczby $\sqrt{2}$ żadna cyfra nie występuje $n+1$ razy pod rząd.

Rozwiązanie na str. 5

Redaguje dr Rafał STAROŃSKI

F 240. Korzystając z zasady nieoznaczoności Heisenberga dla pędu cząsteczki i odpowiadającej temu pędowi współrzędnej położenia ($\Delta p \cdot \Delta r \geqslant h/2\pi$) ocenić energię stanu podstawowego atomu wodoru.

Rozwiązanie na str. 2

F 241. Załóżmy, że chcemy zmierzyć własny moment magnetyczny elektronu — związany z jego spinem — metodą pomiaru pola magnetycznego H, które indukuje on w odległości r. Aby taki eksperyment miał sens, powinniśmy zlokalizować elektron w małym obszarze $\Delta r \ll r$. Konieczne jest także, aby pole magnetyczne spowodowane ruchem elektronu było zaniedbywalnie małe w porównaniu z polem H. Czy te warunki pomiaru są w sprzeczności z zasadą nieoznaczoności?

Rozwiązanie na str. 5