

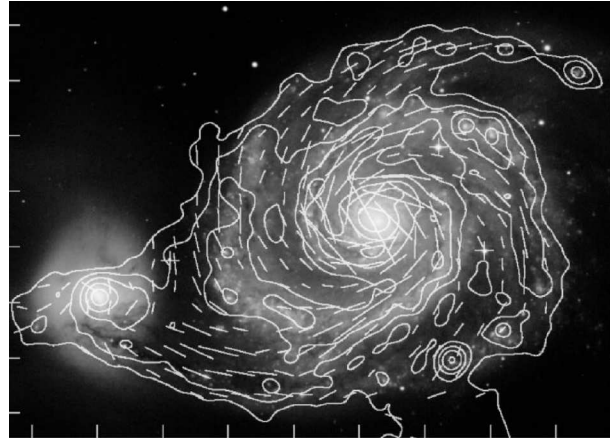
Pole magnetyczne występują powszechnie we Wszechświecie. Badanie ich struktury, ewolucji i roli w różnych kosmicznych obiektach jest jednym z najbardziej fascynujących, lecz trudnych przedsięwzięć współczesnej astrofizyki. Wydaje się, że im lepiej przyglądamy się polu, tym bardziej też doceniamy jego rolę. Otóż w przypadku Ziemi rozumiemy już dzisiaj, że pole magnetyczne było i jest niezbędnym czynnikiem umożliwiającym istnienie życia na Ziemi. A to ze względu na okalającą naszą planetę magnetosferę, która chroni nas przed zabójczym strumieniem cząstek wiatru słonecznego. Pole magnetyczne Ziemi o typowym natężeniu około 0,5 Gs (Gs (gaus) =  $10^{-4}$  T (tesli)) umiemy już numerycznie modelować, odtwarzać jego przebiegunowania i raptowne spadki jego natężenia, z jakimi mamy do czynienia w przeciągu ostatniego stulecia. Analogiczne pola istnieją także na Jowiszu i Saturnie (okładka), obserwowane choćby w widowskich zjawiskach zórz polarnych. Znacznie silniejsze pola, osiągające natężenia kilkuset gausów, występują na Słońcu. Są one źródłem szeregu zjawisk rozgrywających się w chromosferze i koronie słonecznej i są przyczyną cyklicznej aktywności Słońca (rys. 1).



Rys. 1. Zjonizowana materia wyrzucana z powierzchni Słońca porusza się wzdłuż linii pola magnetycznego i powraca ku jego powierzchni tworząc pętle (fot. TRACE, NASA).

Badania pól magnetycznych galaktyk ze względu na odległość i ograniczoną przyrządów obserwacyjnych są nieporównywalnie trudniejsze, a nasza wiedza o nich wciąż jeszcze znacznie uboższa. Najlepszą obecnie metodą wykrywania pól magnetycznych w galaktykach są obserwacje na falach radiowych. Pozwalają one na detekcję promieniowania synchrotronowego – powstałego w wyniku „wyświecania się” szybko poruszających się (relatywistycznych) elektronów w polu magnetycznym. Teoria promieniowania synchrotronowego umożliwia wyznaczenie z obserwacji wartości natężenia pola magnetycznego i jego kierunku. Tą właśnie metodą od przeszło 30 lat odkrywano pola magnetyczne w pobliskich galaktykach. Okazuje się, że ośrodek

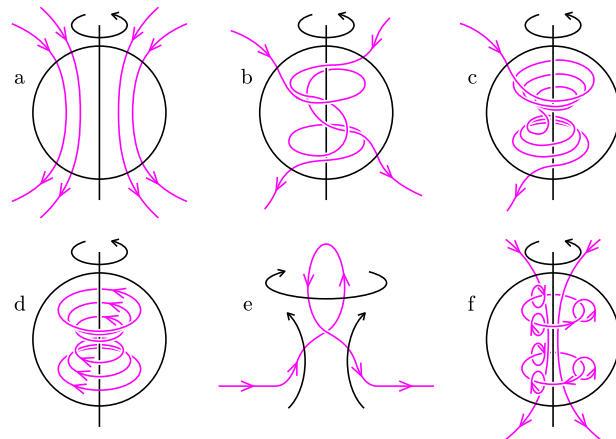
międzygwiazdowy wypełniony jest stosunkowo słabym polem magnetycznym o typowym natężeniu około  $10^{-5}$  Gs. Możemy wyodrębnić dwie składowe tego pola. Jedna to pole chaotyczne (turbulentne), druga to pole regularne, zachowujące kierunek w skali wielu kiloparseków (galaktyka M51, rys. 2).



Rys. 2. W galaktyce spiralnej M51 odkryte pola magnetyczne biegną wzdłuż ramion spiralnych i w przestrzeni pomiędzy nimi. Pola generowane są w procesie turbulentnego dynamo, napędzanego szybką rotacją galaktyki i wybuchami supernowych. Na zdjęcie optyczne nałożone są kontury emisji radiowej, kreski reprezentują kierunek regularnego pola magnetycznego, a ich długość – jego wartość (fot. R. Beck).

Istnienie wielkoskalowych pól regularnych musi wynikać z działania jakiegoś globalnego mechanizmu, porządkującego to pole w całej galaktyce. Ponadto, gdyby w jakimś momencie „włożyć” takie pole do galaktyki, to ono samoistnie zaniknie, w przeciągu niespełna milionów lat. Zatem w galaktykach musi działać, w sposób ciągły, jakiś mechanizm podsycają, wzmacniania pola.

Obecnie uważa się, że tym mechanizmem jest tzw. turbulentne dynamo, podobne do tego, jakie pracuje w planetach i w Słońcu (patrz rys. 3).

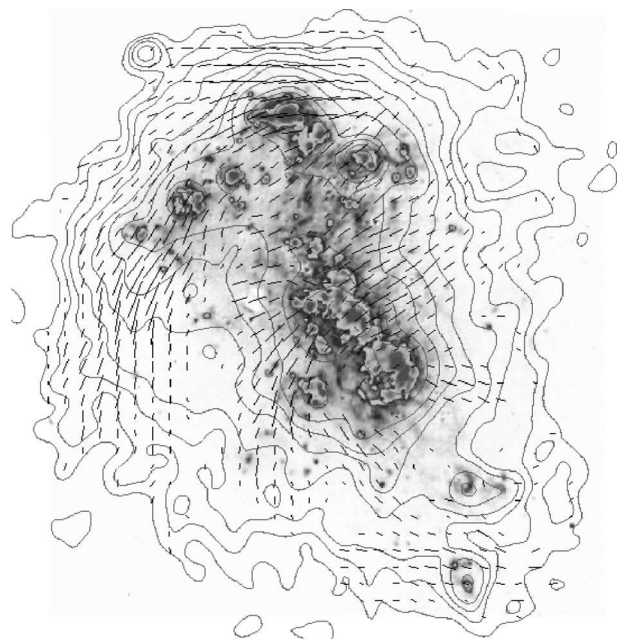


Rys. 3. Mechanizm dynamo. Niech początkowe pole magnetyczne ma kierunek południkowy (a). Na skutek rotacji różnicowej obiektu (szybszej na równiku) pole jest rozciągane i wzmacniane w kierunku równoleżnikowym (b-d). Wznoszenie lub opadanie elementów gazu pociąga za sobą pole magnetyczne. Wskutek siły Coriolisa (wynikającej z rotacji obiektu) materia wraz z polem skręca się, tworząc pętle pola (e). Zgodnie ułożone pętle (f) prowadzą do powstania wielkoskalowego, wzmocnionego pola, o początkowej, południkowej geometrii (a).

\*Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Jagiellońskiego

Do jego działania potrzebna jest rotująca różnicowo przewodząca materia (zjonizowany gaz ośrodka międzygwiazdowego, czyli plazma). W ośrodku musi występować turbulencja, czyli drobnoskalowe ruchy gazu. Ponadto konieczna jest konwekcja, czyli ciągle wznoszenie i opadanie elementów gazu. Przypuszcza się, że w galaktykach za turbulencje i konwekcję odpowiedzialne są głównie wybuchy gwiazd supernowych. W tych warunkach energia kinetyczna rotacji i turbulencji jest zamieniana na energię pola magnetycznego. Jak taki proces zachodzi w galaktykach różniących się tempem wybuchów supernowych, prędkością rotacji czy wielkością? Czy jest on wystarczający do wyjaśnienia obserwowanych w galaktykach struktur pola? Czy struktura spiralna galaktyki wpływa na proces dynamy? Odpowiedzi na te i inne pytania można poszukiwać, badając zjawisko magnetyzmu w galaktykach nietypowych. Powinny one wskazać na ograniczenia naszych teoretycznych koncepcji generacji pola.

W tym sensie małe galaktyki nieregularne stanowią doskonały poligon doświadczalny dla współczesnych teorii dynamy. Po pierwsze, pozbawione są spiralnych fal gęstości. Po drugie – wolno rotują. Można się spodziewać, że efekt wzmacniania pola przez wspomniane klasyczne dynamo jest słaby i działa powoli. Tymczasem odkryte pola magnetyczne w galaktyce nieregularnej NGC4449 (rys. 4) są zadziwiająco silne, tak silne jak w typowych galaktykach spiralnych.

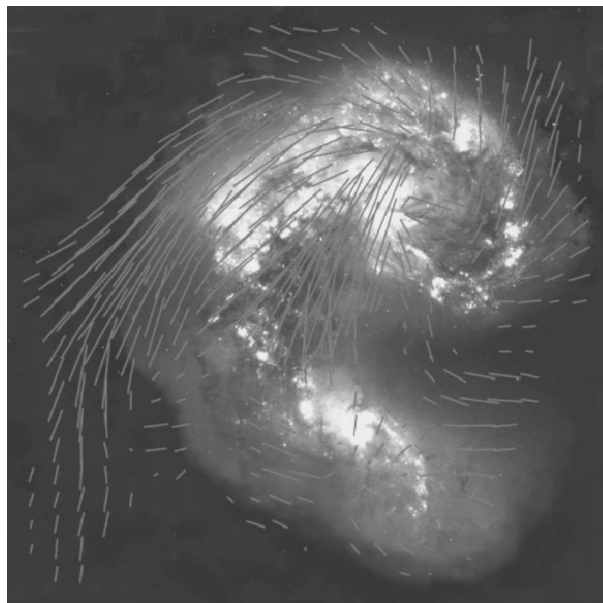


Rys. 4. Galaktyka nieregularna NGC4449 nie ma ramion spiralnych, jest stosunkowo mała i bardzo wolno rotuje. Niespodziewanie ma jednak silne pola magnetyczne wychodzące radialnie z jej centrum i okrążające ją niemal dookoła (fot. K.T. Chyży).

Musi tu zachodzić znacznie efektywniejszy proces generacji pól. Być może pasuje tutaj zmodyfikowana koncepcja tzw. szybkiego dynamy. Dodatkowo uwzględnia ona ciśnienie promieni kosmicznych (głównie relatywistycznych protonów) powstających w falach uderzeniowych po wybuchach supernowych. Prowadzi

to do szybszego unoszenia komórek gazu wypełnionych polem magnetycznym i znacznego przyspieszenia pracy dynamy.

Inną kategorią ekstremalnych galaktyk są kosmiczni piraci drogowi – galaktyki, które się zderzają. W znanym systemie „Anten” doszło do bliskiego spotkania dwóch galaktyk spiralnych i na skutek oddziaływania grawitacyjnego (pływowego) do znacznego odkształcenia ich struktur. Czy tak zdeformowany, chaotyczny ośrodek może mieć pole magnetyczne? Okazuje się, że tak (rys. 5).



Rys. 5. „Anteny” – zderzająca się para galaktyk. Na zdjęcie optyczne nałożone są kreski reprezentujące pole magnetyczne – wskazują one kierunek i regularną składową pola proporcjonalną do ich długości. Pole widoczne w środku zdjęcia zostało uporządkowane w wyniku przepływu gazu pomiędzy galaktykami, a widoczne z lewej strony zostało wyrzucone na zewnątrz układu wzdłuż „ogona pływowego”.

Jest ono nawet kilkakrotnie silniejsze niż w zwykłych galaktykach spiralnych. Z pewnością wiąże się to z dużym tempem formowania się gwiazd i częstymi wybuchami supernowych. O dziwo, silne pola magnetyczne występują również pomiędzy galaktykami. Tutaj dynamo działać nie może. Prawdopodobnie w tym przypadku pola przemieszczają się wraz z materią przepływającą pomiędzy galaktykami i porządkowane są w kierunku tego ruchu. W podobny sposób pola wyciągane są na zewnątrz układu, daleko w przestrzeń międzygalaktyczną.

Ostatnio badane galaktyki w gromadzie Panny również przejawiają niespotykane dotąd własności. Otóż pola magnetyczne prawie wszystkich tych galaktyk są asymetrycznie rozmieszczone, znacznie silniejsze po jednej stronie galaktyki. Świadczy to o działaniu jakiegoś dodatkowego procesu, poza galaktycznym dynamem. Możliwe, że związane to jest z ruchem galaktyki poprzez gęsty ośrodek gromady. Wtedy po nacierającej na ten ośrodek stronie galaktyki pole będzie ściskane, a przez to wyraźnie wzmacniane. Pole magnetyczne może też być deformowane jak w „Antenach”, podczas grawitacyjnego oddziaływania z okolicznymi galaktykami. Sprzyja temu duża

koncentracja obiektów, szczególnie w centrum gromady. Symulacje komputerowe pozwalają w takich przypadkach rozsądzić, który z tych mechanizmów zachodzi.



W jednej z galaktyk spiralnych gromady w Pannie, NGC4569, odkryto jeszcze inną strukturę pól magnetycznych. Otóż, symetrycznie po obu stronach galaktyki, daleko poza jej optycznym dyskiem, widnieją rozległe obszary emisji radiowej, przepełnione regularnym polem magnetycznym. Na pierwszy rzut oka ta podwójna struktura przypomina budowę odległych kwazarów. Jednak w przeciwieństwie do nich galaktyka ta nie zawiera aktywnego jądra ani masywnej czarnej dziury. Jej centrum zajmuje natomiast liczna populacja młodych, masywnych gwiazd. To one są prawdopodobnie przyczyną tego fenomenu. Są źródłem bardzo silnych wiatrów (znacznie silniejszych niż wiatr słoneczny) i wybuchów supernowych. Zdolne są wypychać materię międzygwiazdową wraz z polem magnetycznym poza granice galaktyki. „Wyrzucaniu” pól magnetycznych na tak wielkie, niespotykane dotąd odległości, pomogło prawdopodobnie przejście galaktyki blisko centrum gromady. Spowodowało ono odarcie galaktyki z pyłu i gazu w zewnętrznych jej częściach. Przez to w rzadszym ośrodku wypchnięcie materii wraz z polem magnetycznym stało się znacznie łatwiejsze. Szacunki pokazują, że oba obłoki z polem formowały się w czasie około 30 mln lat, a zmagazynowana w nich energia odpowiada wybuchom około 100 tysięcy supernowych.



Prezentowane tutaj badania ujawniły istnienie całego bogactwa struktur pola magnetycznego w galaktykach. Do ich wyjaśnienia klasyczny proces dynamy jest dalece niewystarczający. Tam, gdzie istnienia pola w ogóle się nie spodziewano, a więc w galaktykach nieregularnych, pola okazały się bardzo silne. W zderzających się galaktykach dynamo również pracuje efektywniej niż w typowych galaktykach spiralnych. Ponadto pola generowane w procesie dynamy są w tym przypadku silnie modyfikowane przez wielkoskalowe przepływy gazu oraz wyrzucane są daleko w przestrzeń międzygalaktyczną. Inną jeszcze ewolucję pól magnetycznych mamy w galaktykach w gromadzie Panny. Anomalie w polu magnetycznym wskazują na silną modyfikację ośrodka międzygwiazdowego spowodowanego ruchem galaktyk przez ośrodek gromady. Można podejrzewać, że obserwowane efekty będą się nasilać w odleglejszych galaktykach, pochodzących z wcześniejszych epok kosmologicznych. Ośrodek był wtedy znacznie gęstszy, a zderzenia galaktyk bardziej powszechne. Nowym wyzwaniem staje się zatem pytanie o strukturę pola magnetycznego w galaktykach wczesnego Wszechświata i możliwy wpływ pola na formowanie się pierwszych kosmologicznych struktur. Pozostaje mieć nadzieję, że już niedługo nowe instrumenty radioastronomiczne pozwolą rzucić pierwsze światło na te problemy.



## Wielomian Ehrharta

Każdy, kto słyszał o twierdzeniu Picka, wie, że istnieje prosty związek między polem wielokąta o wierzchołkach w punktach kratowych, czyli takich, które mają wszystkie współrzędne całkowite, a liczbą tychże punktów w nim zawartych. Dla wielościanów podobna relacja także istnieje, choć jest bardziej zawiła. Zysk jest taki, że da się ją uogólnić do wyższych wymiarów, co pokazał E. Ehrhart w 1962 roku. Ustalmy zatem  $n$ -wymiarowy wielościan  $W$  w  $\mathbb{R}^n$  o wierzchołkach w punktach kratowych. Z takim wielościanem możemy związać w naturalny sposób ciąg liczbowy. Mianowicie, dla dowolnej liczby całkowitej dodatniej  $t$  liczymy, ile jest punktów kratowych w wielościanie  $W$  rozdętym  $t$ -krotnie, czyli w obrazie  $W$  przy jednokładności o skali  $t$ . Wynik oznaczamy przez  $k_t$  i ciąg gotowy. Ehrhart zaobserwował, że ciąg ten może być opisany przez pewien wielomian stopnia  $n$  o współczynnikach wymiernych:

$$k_t = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_0.$$

Co więcej, wartości tych współczynników można zinterpretować geometrycznie. Objętość wielościanu to  $a_n$ , a jego charakterystyka Eulera–Poincarégo równa się  $a_0$ . Z kolei  $a_{n-1}$  to połowa sumy odpowiednio unormowanych objętości ścian wielościanu. W przestrzeni  $(n-1)$ -wymiarowej, zawierającej pewną ścianę wielościanu, objętość obliczamy przy założeniu, że najmniejszy zawarty w niej  $(n-1)$ -wymiarowy prostopadłościan o wierzchołkach w punktach kratowych ma objętość 1. Znaczenie pozostałych współczynników wielomianu Ehrharta objawia się jednak dopiero przy badaniu pewnej stowarzyszonej z rozważanym wielościanem rozmaitości algebraicznej.