

Namagnesowane galaktyki

Marek Urbanik

Obserwatorium Astronomiczne UJ w Krakowie

Od Redakcji:

Redakcja dedykuje poniższy artykuł wszystkim uczestnikom spotkania „Problemy dydaktyki fizyki” w Kudowie, w listopadzie 2007, a w szczególności zapalonym astronomom: Lucynie Gut, Grzegorzowi Sękowi i Ludwikowi Lehmanowi.

Od kilkudziesięciu lat wiadomo, że przestrzeń międzygwiazdowa nie jest pusta, lecz wypełniona różnymi formami gazu o temperaturach od -250°C do kilku milionów stopni. Ponadto całe nasze niebo, a najsilniej Droga Mleczna, wysyła charakterystyczny „szum radiowy”. Dziś już wiemy, że jego źródłem są bardzo szybkie elektrony o prędkościach bliskich prędkości światła, poruszające się w polu magnetycznym przenikającym cały gaz międzygwiazdowy. Pole to jest na tyle silne (rzędu $5\text{--}15\ \mu\text{Gs}$), że wywiera własne ciśnienie na ośrodek międzygwiazdowy. Współczesne teorie formowania się gwiazd czy powstawania obłoków międzygwiazdowych, muszą uwzględniać wpływ pola magnetycznego, bez jego znajomości wiele zjawisk nie daje się wytłumaczyć. A tak naprawdę, co – i od jak dawna – wiemy o galaktycznych polach magnetycznych?

Galaktyczny „szum radiowy” był najwcześniej zidentyfikowanym radiowym sygnałem pozaziemskim, dokonał tego w roku 1933 inżynier z Bell Telephone Labs, Karl Jansky. O ile to odkrycie było przypadkowe, to już z początkiem lat 40. dwudziestego wieku inny inżynier i radioamator Grote Reber wykonał w sposób systematyczny mapy emisji radiowej Drogi Mlecznej, zwanej też Naszą Galaktyką. W tym początkowym okresie związek „radiowego szumu galaktycznego” z polem magnetycznym Drogi Mlecznej nie był oczywisty. Pierwsze dowody na istnienie globalnego pola magnetycznego Naszej Galaktyki, które pojawiły się z końcem lat 40. XX stulecia, nie były dziełem radioastronomów, natomiast dostarczyły ich obserwacje w zakresie optycznym. Odkryto mianowicie, że światło widzialne wielu gwiazd Drogi Mlecznej jest spolaryzowane, a płaszczyzna polaryzacji ma podobną orientację w dużych obszarach nieba. Za główną przyczynę uznano globalne galaktyczne pole magnetyczne, porządkujące w wielkich skalach wirowe ruchy drobin kosmicznego pyłu, co powoduje polaryzację rozproszonego na nich światła.

Radioastronomowie włączyli się do badań galaktycznych pól magnetycznych z początkiem lat 50. XX wieku. To właśnie galaktyczny magnetyzm i wirujące wokół linii magnetycznych ultraszybkie elektrony, a właściwie ich promieniowanie zwane synchrotronowym, okazały się być odpowiedzialne za „szum radiowy” Drogi Mlecznej, odkryty przez K. Jansky’ego i zbadany przez

G. Rebera. Fakt, że galaktyki spiralne mogą być gigantycznymi magnesami, nie budził już wątpliwości.

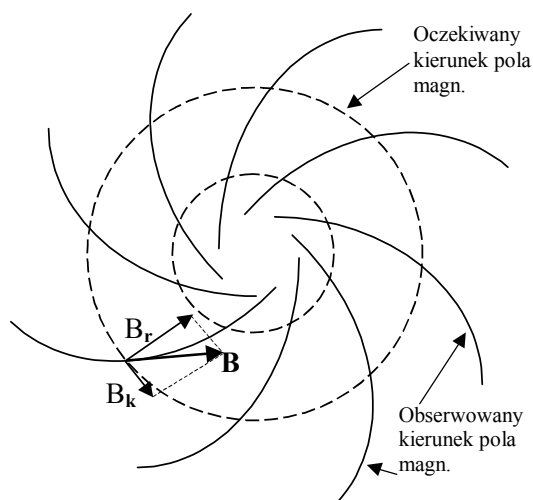
Część najdawniej odkrytych indywidualnych źródeł promieniowania radiowego okazała się być stosunkowo bliskimi pozostałościami po wybuchach gwiazd supernowych w Naszej Galaktyce. Inne to odległe radiogalaktyki (galaktyki o bardzo silnej emisji radiowej, bez spektakularnych efektów optycznych) bądź kwazary, gdy promieniowaniu radiowemu towarzyszy bardzo silne świecenie centrum galaktyki w świetle widzialnym. W obu tych przypadkach sprawcą jest supermasywna czarna dziura w centrum gigantycznej galaktyki, najczęściej eliptycznej. Wobec powszechnej fascynacji tak egzotycznymi obiektami, galaktyki spiralne pozostawały przez szereg lat niedocenianymi kosmicznymi „kopcuszkami”, głównie z powodu dużo słabszej i trudniejszej do zmierzenia emisji radiowej.

Prawdziwa eksplozja zainteresowania polami magnetycznymi w galaktykach spiralnych nastąpiła, gdy powstała możliwość badania struktury pól magnetycznych w tych dotychczas niedocenianych obiektach. Jak wiadomo ze szkolnych eksperymentów z rozsypywaniem żelaznych opiłków na położonej na magnesie szklanej płycie, pole magnetyczne można opisać poprzez linie sił, wzdłuż których to linii układają się rozsypane opiłki. Potężnym narzędziem badania takich struktur w galaktykach okazała się być polaryzacja promieniowania radiowego, emitowanego przez superszybkie elektrony poruszające się wokół linii sił uporządkowanego pola magnetycznego. Obserwowany rozkład kierunków polaryzacji pełni rolę „kosmicznych opiłków” i wyznacza rzutowaną na sferę nieba geometrię pola magnetycznego. Najlepiej pomiary takie wykonywać na jak najkrótszych falach (długość fali < 6 cm), na których zniekształcający polaryzację wpływ gazu leżącego między obiektem i nami jest bardzo mały.

Epokę dokładnych badań struktury pól magnetycznych w innych galaktykach spiralnych (M51 – znana galaktyka w Psach Gończych, M31 – Mgławica Andromedy) otworzyły dwie pionierskie prace: zespołu holenderskiego w roku 1976 oraz niemieckich naukowców z Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) w Bonn w roku 1980. Już pierwsze wyniki pokazały, że galaktyczne pola magnetyczne są w dużym stopniu uporządkowane w skali całych galaktyk. Z początkiem lat 80. XX wieku również radioastronomowie krakowscy włączyli się w światowy nurt badań pól magnetycznych w galaktykach spiralnych. Prawdziwą rewolucję w pomiarach struktury pól magnetycznych pobliskich galaktyk spowodowało zainstalowanie w latach 90. XX wieku na 100-metrowym radioteleskopie Max-Planck-Institut für Radioastronomie bardzo czułej aparatury polarymetrycznej na wysokie częstotliwości. Głównym inicjatorem i pionierem tych badań był urodzony w Polsce prof. Richard Wielebinski.

Galaktyki (poza centralnymi regionami i małymi karłowatymi obiektami) nie rotują tak jak ciała sztywne – ich, prędkość kątowna szybko maleje z odległością od centrum. Taka rotacja, zwana różnicową, powoduje układanie wszel-

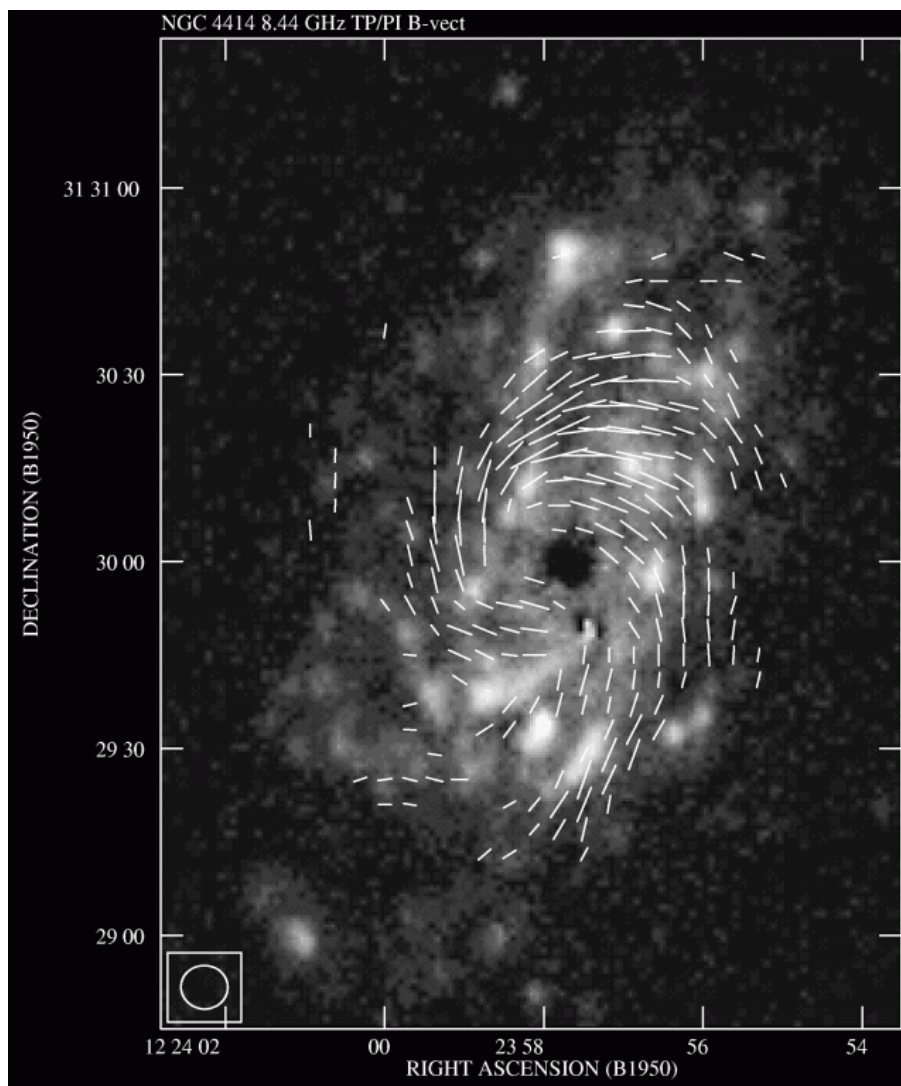
kich struktur materii wzdłuż koncentrycznych okręgów. Pole magnetyczne jest niejako „przyklejone” do gazu, dlatego też uważano początkowo, że rotacja różnicowa powinna nawinąć linie magnetyczne do postaci współśrodkowych okręgów zawierających wyłącznie kołową składową pola \mathbf{B}_k (zwaną też składową azymutalną). Zaskakującym wynikiem było to, że pomimo rotacji różnicowej linie magnetyczne w galaktykach spiralnych, takich jak M51 czy M83, tworzą strukturę spiralną o znacznym nachyleniu ku środkowi dysku. Oprócz kołowej składowej pola magnetycznego, obserwuje się też silną składową wzdłuż promienia dysku (pole radialne \mathbf{B}_r), które rotacja różnicowa powinna była już dawno przetransformować na \mathbf{B}_k (rys. 1).



Rys. 1. Kierunki pola magnetycznego w galaktykach spiralnych: oczekiwany w wyniku rotacji różnicowej (linie przerywane) i obserwowany (linie ciągłe). Rysunek pokazuje również rozkład obserwowanego pola magnetycznego \mathbf{B} na składową kołową (czyli azymutalną) \mathbf{B}_k i radialną \mathbf{B}_r (zerowa dla kołowego pola magnetycznego). Rotacja różnicowa systematycznie przekształca \mathbf{B}_r w \mathbf{B}_k

Efekt rozciągania struktur do postaci kołowej nie dotyczy ramion spiralnych, będących zaburzeniem potencjału o charakterze falowym. Powoduje ono kompresję gazu i jego sływ wzdłuż ramion ku centrum galaktyki. Uważano początkowo, że udział pola magnetycznego w tych przepływach i jego ściąganie przez gaz ku środkowi całkowicie wyjaśnia fenomen magnetycznej spirali. Tymczasem w końcu lat 90. XX wieku, połączony zespół radioastronomów z Krakowa i Bonn, używając 100-metrowego radioteleskopu MPIfR i systemu połączonych 29 anten w USA (interferometru zwanego Very Large Array – VLA, rys. 3), odkrył spiralne, silnie nachylone ku środkowi pola magnetyczne w galaktykach tzw. kłaczkowatych (rys. 2), nieposiadających ani wyraźnych

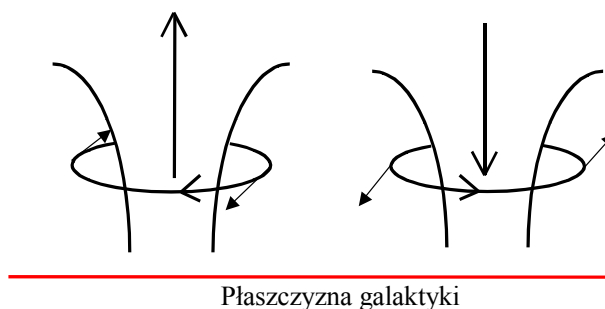
ramion spiralnych, ani efektów splywu gazu ku centrum dysku. Rozwiązania zagadki spiralnych pól magnetycznych należało zatem szukać gdzie indziej.



Rys. 2. Kierunki pola magnetycznego w kłaczkowatej galaktyce NGC 4414, nieposiadającej wyraźnej struktury spiralnej, obserwowane za pomocą VLA dla częstotliwości 8,44 GHz przez zespół radioastronomów z Krakowa i Bonn pod kierunkiem dr Mariana Soidy z Obserwatorium Astronomicznego UJ. W skali szarości pokazano obserwowany, dość chaotyczny rozkład zjonizowanego gazu, zazwyczaj będący bardzo dobrym wskaźnikiem struktury spiralnej



Rys. 3. Jedno z ramion interferometru Very Large Array (VLA) w USA, za pomocą którego krakowscy radioastronomowie wykonali obserwacje galaktyk pokazane w tym artykule. Interferometr składa się z trzech takich ramion, tworzących kształt litery Y

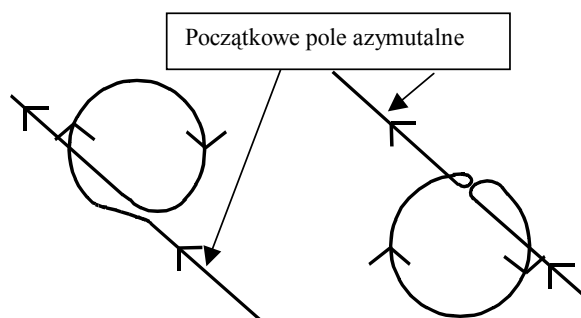


Płaszczyzna galaktyki

Rys. 4. Siła Coriolisa w rotującym dysku nadaje ruch wirowy ruchom turbulentnym. Duże strzałki pokazują kierunek ruchu i rotacji gazu, małymi strzałkami zaznaczono siły Coriolisa

Zgodnie z prawami mechaniki w wirującym układzie odniesienia pojawiają się siły bezwładnościowe, jak np. siła odśrodkowa. Inna siła bezwładnościowa pojawia się, gdy w takim wirującym układzie przesuwamy jakiś przedmiot w kierunku do lub od osi obrotu. Jeżeli posuwamy się ku osi, siła ta, zwana siłą Coriolisa, działa na przedmiot prostopadle do promienia w kierunku ruchu wirowego, jest ona natomiast przeciwnie skierowana w przypadku ruchu oddalającego od osi obrotu. W dysku galaktycznym istnieją turbulentne ruchy gazu o skali od kilku do kilkudziesięciu parseków, przypominające z grubsza konwekcję w cieczy. Element gazu wznoszący się ponad płaszczyznę dysku przechodzi do coraz rzadszego otoczenia i rozszerza się; jedna jego część zbliża się, a druga oddala od osi obrotu galaktyki. Powoduje to powstanie pary sił Coriolisa, zmuszających element gazu do wirowania wokół osi pionowej (rys. 4). Ele-

ment opadający na dysk kurczy się, a siła Coriolisa skręca go w przeciwną stronę niż element wędrujący w górę. Zachowana jest zatem „śrubowość” ruchów turbulentnych: są one na przykład lewoskrętne nad, a prawoskrętne pod płaszczyzną galaktyki.

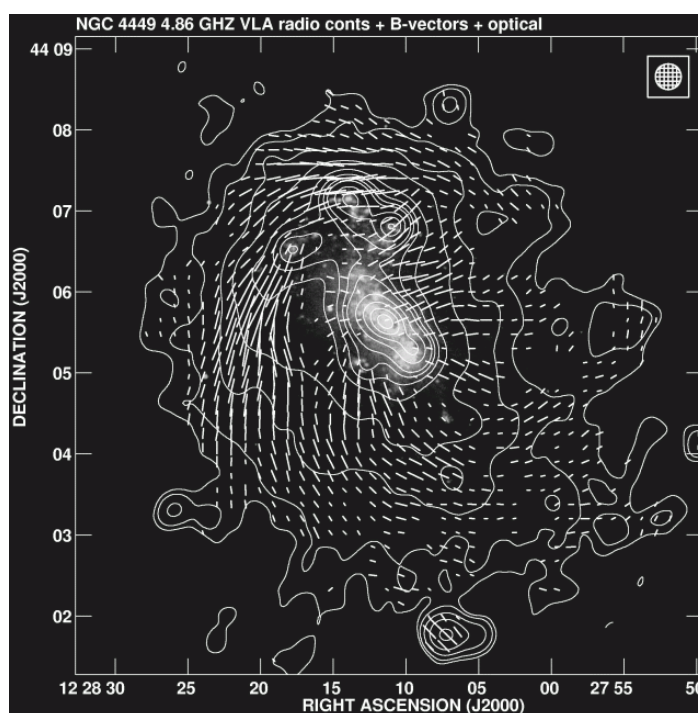


Rys. 5. Pętle magnetyczne powstające w wyniku lokalnej deformacji pola magnetycznego przez ruchy turbulentne. Pętla z lewej strony jest wynikiem wznoszenia się gazu, z prawej – opadania gazu. Proszę zwrócić uwagę na **taki sam kierunek** „obiegu” pola magnetycznego w pętlach, niezależnie od kierunku ruchu gazu w dół lub w górę. Jest to konsekwencja „śrubowości” ruchów turbulentnych.

Wirujące i przemieszczające się elementy gazu wloką za sobą „wklejone” pole magnetyczne oraz powodują jego lokalne splątania **prostopadle** do początkowego pola magnetycznego (rys. 5). Takie magnetyczne pętelki (również o wyróżnionej skrętności) łączą się następnie w wielkie, wielo-kiloparsekowe pętle, również **prostopadle** do początkowego kierunku pola, w szczególności posiadające silną składową B_r wzdłuż promienia dysku galaktycznego. Oczywiście, rotacja różnicowa przerabia pracowicie pole radialne B_r na kołowe (czyli azymutalne) B_k , składowa radialna jest jednak ciągle regenerowana przez omawiany proces skręcania i sklejaną pętli. Rezultatem jest kombinacja składowej kołowej i radialnej, a zatem magnetyczne linie sił nachylone ku środkowi i dające wrażenie spirali (rys. 1 i 2). Mamy zatem do czynienia z cyklem: turbulencja zwija składową azymutalną w małe pętelki, te z kolei łączą się w wielkie pętle radialne, a rotacja różnicowa odtwarza pole azymutalne. Proces ten, znany jako dynamo galaktyczne, powoduje też systematyczne wzmocnienie pola magnetycznego od bardzo słabych, kosmologicznych pól pierwotnych (10^{-3} μ Gs), do obecnie mierzonych natężeń rzędu 5–15 μ Gs.

Zasadniczą rolę w procesie dynamo odgrywa rotacja dysku galaktycznego, porządkująca turbulentne ruchy gazu i kreowane przez nie struktury magnetyczne. W typowych galaktykach spiralnych prędkość rotacji osiąga 100–300 km/s. Tym niemniej, nawet w takich obiektach uzyskanie zmierzonych natężeń pól wymaga stabilnej rotacji dysku przez okres co najmniej miliarda lat. Taki komfort nie jest dany małym galaktykom nieregularnym, które rotują bardzo powo-

li. Ich prędkości rotacji nie przekraczają 10–20 km/s, co jest porównywalne z chaotycznymi ruchami gazu. Są to na ogół obiekty o małych masach, podatne na oddziaływania grawitacyjne z innymi galaktykami, w wyniku czego ich pola prędkości są zaburzane i zmieniają się w skali czasowej ok. 10^8 lat. Przewidywania teoretyczne sugerowały, że galaktyki nieregularne mogą być obiektami całkowicie pozbawionymi globalnych pól magnetycznych. Oznaczałoby to, że fizyka środowiska międzygwiazdowego w tych obiektach jest inna niż w galaktykach spiralnych. Jak wspomniano, w tych ostatnich siły magnetyczne są na tyle duże, że w istotny sposób wpływają na tworzenie się i ewolucję obłoków gazu międzygwiazdowego, tworzenie się gwiazd itp. Czyżby małe galaktyki nieregularne rządziły się innymi prawami?



Rys. 6. Kontury jasności radiowej i obserwowane kierunki pola magnetycznego w nieregularnej galaktyce NGC 4449. Mapę radiową nałożono na obraz galaktyki w świetle widzialnym. Obserwacje na częstotliwości 4,86 GHz za pomocą interferometru VLA i 100-metrowego radioteleskopu MPIfR wykonał zespół radioastronomów z Krakowa i Bonn pod kierunkiem dr Krzysztofa Chyżego z Obserwatorium Astronomicznego UJ

W roku 2000 krakowscy i bońscy radioastronomowie, pracując tym razem wspólnie pod kierunkiem dr Krzysztofa Chyżego z Obserwatorium Astronomicznego UJ i używając interferometru VLA oraz 100-metrowego radioteleskopu MPIfR, dokonali niezwykłego odkrycia. Galaktyka nieregularna NGC

4449 okazała się posiadać rozległe halo radiowe z silnym, wysoce uporządkowanym polem magnetycznym (rys. 6) o natężeniu zbliżonym do wartości zmierzonych w galaktykach spiralnych. Galaktyki nieregularne nie są zatem „niemagnetyczne”: w ich środowisku międzygwiazdowym pola magnetyczne mają równie wiele do powiedzenia, jak w galaktykach spiralnych. Pozostał problem – NGC 4449 zamiast porządnie wirować, posiada chaotyczne pole prędkości, poszczególne fragmenty galaktyki poruszają się w różnych kierunkach w sposób mało uporządkowany. Zdaniem teoretyków, klasyczny proces dynamo wymagający długotrwałej, stabilnej rotacji nie ma w takich warunkach żadnych szans. Należało zatem zmodyfikować teorię.

Dobrym rozwiązaniem okazała się być modyfikacja koncepcji dynamo. W pracach nad modyfikacją brali udział również naukowcy z Obserwatorium Astronomicznego UJ. W ulepszonej wersji teorii, turbulentne ruchy gazu zastąpiono wybuchami gwiazd supernowych, powodującymi wznoszenie się nad dyskiem galaktycznym dużych pętli magnetycznych. Są one podobne do protuberancji słonecznych, ale posiadają rozmiary ok. pół kiloparseka. Dalej proces wygląda podobnie jak w przypadku „klasycznego” dynamo turbulentnego: sklepanie się poszczególnych pętli w wielkoskalowe struktury z silną składową wzdłuż promienia galaktyki, przeróbka na pole kołowe itd. Pomimo podobieństwa do standardowego dynamo turbulentnego, proponowana nowa wersja tego procesu ma istotną zaletę: mechanizm działa kilkadziesiąt razy szybciej, nawet przy małej prędkości rotacji galaktyki. W galaktykach spiralnych pracuje ono podobnie jak dynamo klasyczne, jednak wymaganie długotrwałej, stabilnej i szybkiej rotacji zostało w koncepcji „szybkiego dynamo” znacznie zredukowane. Jego zalety ujawniają się w galaktykach nieregularnych i ich uporządkowane pola magnetyczne nie są już tak zagadkowe.

Warto wspomnieć, że obserwacje galaktycznych pól magnetycznych są również cennym narzędziem do badania zaburzeń ruchu gazu w galaktykach wchodzących w skład par, grup i gromad tych obiektów. Zaburzenia mogą być wywołane ich wzajemną grawitacją, bądź (szczególnie w gromadach galaktyk) ciśnieniem gazu międzygalaktycznego. Krakowski zespół radioastronomów wykazał, że pola magnetyczne bywają niezwykle „pamiętliwym” i czułym wskaźnikiem zaburzeń ruchu gazu. Bardzo często magnetyczne anomalie obserwuje się w galaktykach niewykazujących perturbacji ani w świetle optycznym ani w rozkładach prędkości i gęstości gazu. Nie można wykluczyć, że zaburzenie było na tyle słabe, lub zaszło tak dawno, że zostało „zapomniane” przez gwiazdy i gaz galaktyki, natomiast pole magnetyczne potrafi je pamiętać przez pół miliarda lat! Zespół badawczy astronomów z Krakowa, Strasburga, Bonn i Paryża właśnie prowadzi szeroko zakrojone poszukiwania i pomiary takich galaktyk. Jest to oddzielny, ogromny temat, już na całkiem inne opowiadanie.