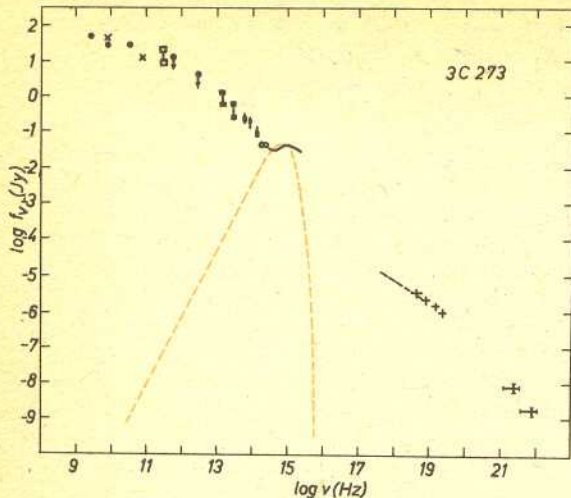


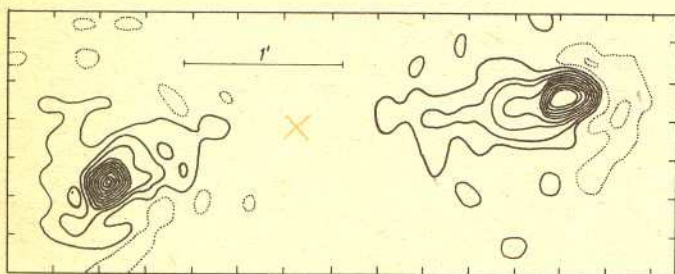
# 20 lat temu odkryto pierwsze kwazary

Dr Marek SIKORA

Kwazary są to najpotężniejsze generatory energii we Wszechświecie, jednocześnie na tyle odległe i na tyle małe, że na kliszach wyglądają jak słabe gwiazdy. Pierwsze odkrywane były na drodze identyfikacji radioźródeł z punktowymi źródłami optycznymi. Kiedy jednak okazało się, że prawie wszystkie są bardzo jasne w bliskim ultrafiolecie oraz mają silne i bardzo szerokie linie emisyjne (własności nie spotykane w gwiazdach), rozpoczęto intensywne poszukiwania takich obiektów w już istniejących katalogach optycznych bądź dokonując odpowiednich optycznych przeglądów nieba. Większość znanych dziś kwazarów odkryta została w ten właśnie sposób i okazało się, że stosunkowo rzadko (~ 10%) towarzyszy im silne promieniowanie radiowe. Natomiast wspólną ich cechą, oprócz wspomnianych wyżej własności optycznych, jest silne promieniowanie rentgenowskie, czego dowiodły obserwacje przeprowadzone w latach 1978—1981 z orbitującego dookoła Ziemi teleskopu rentgenowskiego „Einstein”. Kwazary świecą silnie także w podczerwieni i przynajmniej niektóre — w dziedzinie gamma. Widma kwazarów są więc bardzo rozciągnięte i nie mogą być tłumaczone żadnymi procesami gwiazdnymi (rys. 1).



Rys. 1 Widmo kwazara 3C 273. Na osi pionowej odłożono strumień w janskach ( $1 \text{ Jy} = 10^{-23} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$ ). Dla porównania zaznaczono kolorem widmo ciała czarnego o temperaturze 10 tysięcy K (w dość dobrym przybliżeniu odpowiadające promieniowaniu gwiazdy).



Rys. 2 Mapa radiowa radiogalaktyki Cyg A. Krzyżyk oznacza pozycję jądra galaktyki.

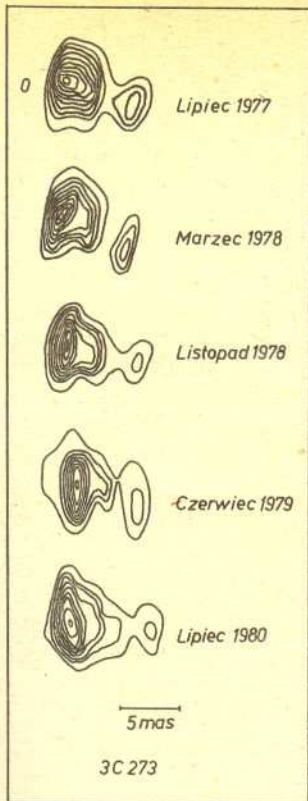
Jeszcze przed odkryciem kwazarów dysponowano danymi obserwacyjnymi wskazującymi na dużą aktywność niektórych galaktyk. Znane były galaktyki Seyferta, charakteryzujące się silnymi i szerokimi liniami emisyjnymi produkowanymi w „punktowych” jądrach, których jasności nierzadko dorównują jasnościom całych galaktyk. Znane były też radiogalaktyki, czyli galaktyki, którym towarzyszą rozległe struktury radiowe o jasnościach  $10^{41} - 10^{45} \text{ erg/s}$  (dla porównania: jasność radiowa naszej Galaktyki wynosi około  $10^{38} \text{ erg/s}$ ). Często struktury te są podwójne, tzn. składają się z dwóch radioobłoków leżących po przeciwnych stronach galaktyki (rys. 2).

Dość szybko zwrócono uwagę na liczne podobieństwa między formami aktywności w galaktykach i kwazarach; „punktowe” źródła centralne i widma liniowe to jest to, co łączy kwazary z galaktykami Seyferta, rozległe podwójne struktury radiowe wskazują z kolei na związek niektórych radiowych kwazarów z radiogalaktykami. Nic więc dziwnego, że już od chwili odkrycia pierwszych kwazarów (3C 273 i 3C 48) sporo ludzi podejrzewało, że znajdują się one w jądrach galaktyk. Potwierdzeniem tego stały się obserwacje słabych poświat optycznych widocznych w otoczeniu najbliższych kwazarów. Rozmiarami i jasnościami poświaty te odpowiadają typowym galaktykom, a ostatecznego dowodu na ich gwiazdną naturę dostarczyło zeszłoroczne odkrycie gwiazdnych linii absorpcyjnych w poświacie kwazara 3C 48. Trudności związane z identyfikacją populacji gwiazdnych wokół kwazarów biorą się stąd, że kwazary przeważnie są bardzo odległymi obiektami oraz że ich jasności dominują zdecydowanie nad otaczającą je strukturą galaktyczną: od najbliższych kwazarów dzielą nas dziesiątki milionów lat świetlnych, od najdalszych — ponad miliard lat świetlnych, a jasności zawierają się pomiędzy  $10^{45} \text{ erg/s}$  a  $10^{48} \text{ erg/s}$ , świecą więc od 10 do 10000 razy silniej niż nasza Galaktyka.

Niemalym zaskoczeniem było odkrycie zmienności niektórych kwazarów. Z prostych bowiem rozważań bazujących na zasadzie przyczynowości otrzymuje się, że rozmiary obiektów zmiennych, wyrażone w jednostkach świetlnych ( $R/c$ ), nie mogą być większe niż czas zauważalnej fluktuacji jasności. Obserwowane często zmiany jasności kwazarów w skali czasowej rzędu jednego roku „ograniczają” więc ich rozmiary do co najwyżej jednego roku świetlnego.

Znane są również kwazary wykazujące dynamiczne zmiany jasności w ciągu tygodni, a niekiedy nawet w ciągu dni i godzin. Obiekty te oznaczane są często skrótem OVV (optically violent variables). Wyróżniają się one dodatkowo spośród „spokojnych” kwazarów tym, że towarzyszą im silne, zwarte i zmienne radioźródła pokrywające się pozycyjnie z obrazem optycznym kwazarów, a strumień promieniowania optycznego, radiowego i w podczerwieni jest w dużym stopniu spolaryzowany. Podobne własności mają tzw. lacertydy, obiekty, z których

Zarówno odległości, jak i jasności obliczane są na podstawie znajomości przesunięć linii emisyjnych ku czerwieni,  $z = \Delta\lambda/\lambda$ , które interpretuje się jako efekt dopplerowski związany z ucieczką kwazarów spowodowaną ekspansją Wszechświata. Większość znanych kwazarów ma  $z \gtrsim 1$  i nie można do obliczania ich odległości stosować liniowego prawa Hubble’a  $d = cz/H_0$ , gdzie  $H_0$  — stała Hubble’a, lecz trzeba używać bardziej skomplikowanych formuł uwzględniających nie tylko tempo, ale i dynamikę ekspansji charakteryzowaną przez tzw. parametr deceleracji  $q$ .



Rys. 3 Ekspansja „ponadświetlna” wyrzutu z 3C 273 (mas: mili-arc-second = 0,001'')

Prędkość relatywistyczna oznacza tu prędkość porównywalną z prędkością światła. Kolimację wiązki można tu określić jako odwrotność największego z kątów między torami cząstek, jakie się na nią składają.

$M_{\odot}$  — masa Słońca ( $1 M_{\odot} = 1.99 \times 10^{33}$  g)

### Inwersje — lemat

Ponieważ  $OX \cdot OI_x(X) = r^2 = OY \cdot OI_y(Y)$ , więc

$$\frac{OY}{OX} = \frac{OI_x(X)}{OI_y(Y)}$$

i, wobec wspólnego kąta, trójkąty  $OXY$  i  $OI_x(Y) I_y(X)$  są podobne.

część udało się zlokalizować w jądrach gigantycznych galaktyk eliptycznych, a różniące się od OVV jedynie brakiem silnych i szerokich linii emisyjnych. Czy jednak ograniczenia rozmiarów kwazarów, wynikające ze skali czasowej zmienności, stosują się w każdej sytuacji fizycznej, a w szczególności do OVV i lacertyd?

Odpowiedź na to pytanie została niejako podsunięta „z zewnątrz”. Astronomowie zajmujący się problemem rozległych radioźródeł zapostulowali konieczność ciągłego ich zasilania, aby uniknąć zbyt szybkiego ich wygaśnięcia. Brytyjski astronom — teoretyk prof. Martin Rees zasugerował, że zasilanie to może iść ze źródła centralnego w postaci strugi cząstek. I rzeczywiście radioastronomowie zaobserwowali wąskie, długie struktury radiowe (dżety) rozciągające się pomiędzy kwazarami i jądrami radiogalaktyk a zewnętrznymi radioobłokami znajdującymi się w odległościach dochodzących do kilku milionów lat świetlnych.

Następnie interferometryczne obserwacje radiowe centralnych zwartych radioźródeł pokazały, że ich struktury są często wydłużone tworząc swego rodzaju mini-dżety o rozmiarach rzędu kilku lat świetlnych. Gdy stwierdzono, że dość dokładnie leżą one na osi symetrii zewnętrznych struktur radiowych, utwierdzono się w przekonaniu, że rzeczywiście mamy do czynienia z transportem materii z centralnego źródła. W międzyczasie świat dowiedział się, że astronomowie zaobserwowali prędkości ponadświetlne. O prędkościach takich doniosły obserwacje kilku stosunkowo bliskich, silnych i zmiennych źródeł centralnych. W ciągu kilku lat stwierdzono u niektórych z nich zmiany strukturalne przejawiające się wzrostem separacji dwóch „pików” radiowych (rys. 3). Mnożąc prędkość kątową rozszerzającej się struktury przez jej odległość od nas otrzymano tangencjalną (poprzeczną) składową prędkości kilka, a w jednym przypadku nawet kilkanaście razy przekraczającą prędkość światła. Zjawisko to znajduje proste wyjaśnienie w modelu, w którym mini-dżet jest relatywistyczny (materia przemieszcza się w nim z prędkością  $v > 0,7c$ ) i tworzy mały kąt z naszą linią widzenia (patrz *Delta* 9/1982). Rzeczywista prędkość jest (oczywiście) mniejsza niż  $c$ . W modelu tym jeden pik radiowy związany jest z początkiem dżetu lub źródłem centralnym, a drugi — z niejednorodnością (zagęszczeniem, falą uderzeniową) poruszającą się wzdłuż dżetu z prędkością nieco większą niż materia. Przy powyższych założeniach świecenie niejednorodności i jego fluktuacje zostają silnie wzmocnione efektem dopplerowskim. Pokazano, że takie niejednorodności mogą świecić także w podczerwieni, w dziedzinie optycznej i dalszych nawet zakresach. Tak czy inaczej interferometryczne obserwacje radiowe pokazują, że w obszarze centralnym o promieniu mniejszym od jednego roku świetlnego strugi cząstek mają relatywistyczne prędkości i są skolimowane. Ich kolimacja i przyspieszenie powinny więc zachodzić znacznie „głębiej”, dokąd, ze względu na ograniczoną zdolność rozdzielczą, nawet przy udziale radiowych systemów interferometrycznych o bazach międzykontynentalnych nie możemy bezpośrednio zajrzeć.

Do rozszyfrowania tego czegoś w środku trzeba więc dochodzić drogami pośrednimi, przez poszukiwanie takich własności kwazarów, które by w istotny sposób weryfikowały stosowalność proponowanych modeli. Jedną z takich własności jest czas życia kwazarów. Z długości niektórych dżetów wynika, że ich produkcja musi trwać co najmniej 10 mln lat, nawet przy założeniu relatywistycznej prędkości przemieszczania się materii na całej ich długości. Co więcej, w ciągu tak długiego okresu czasu powinno być zachowane tempo i kierunek wyrzutu, na co wskazują długie, prostopadłowe dżety niewiele zmieniające swą jasność na całej swej długości. Inną, nie mniej istotną własnością jest masa kwazara. Minimalną jej wartość można oszacować z równości Eddingtona wyrażającej równowagę pomiędzy siłami związanymi z ciśnieniem promieniowania a siłami grawitacyjnymi, działającymi na cząstki świecącego obiektu. Wynika z niej, że  $M \gtrsim (L/L_0) \cdot M_{\odot}$ , gdzie  $L$  jest jasnością kwazara (w erg/s), a  $L_0 = 10^{38}$  erg/s, a stąd, żeby utrzymać w centrum jądra materię produkującą promieniowanie w tempie  $10^{45} - 10^{48}$  erg/s, potrzebne są tam masy nie mniejsze niż  $10^7 - 10^{10} M_{\odot}$ .

Zakładając, że podstawowa struktura kwazara jest taka sama niezależnie od różnic ilościowych, a nawet jakościowych przejawiających się w dominacji poszczególnych form aktywności, w modelach kwazarów powinno się dać:

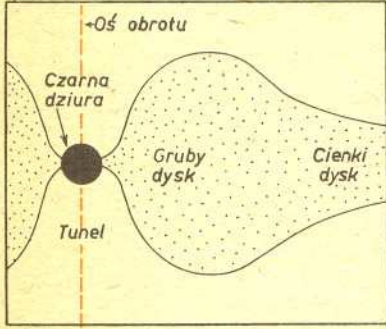
— ulokować masę nie mniejszą niż  $10^7 - 10^{10} M_{\odot}$  w obszarze o promieniu znacznie mniejszym od jednego roku świetlnego,

— produkować w tym obszarze energię w tempie dochodzącym do  $10^{48}$  erg/s, mającą swoje ujście w postaci promieniowania obejmującego bardzo szeroki zakres widma, oraz w postaci skolimowanej relatywistycznej strugi cząstek,

— utrzymać quasi-stacjonarną aktywność i wyróżniony kierunek wyrzutu strugi cząstek w przeciągu co najmniej  $10^7$  lat.

W ciągu 20 lat pojawiły się dziesiątki modeli kwazarów. Postulowano m.in. gęste skupiska gwiazd, w których można by się spodziewać produkcji energii w takich procesach, jak wzajemne zderzenia gwiazd, częste wybuchy supernowych, akrecja (spadek) materii na gwiazdy

neutronowe i czarne dziury pochodzenia gwiazdowego. Proponowano też supermasywne „gwiazdy” czepiące energię z grawitacyjnego kurczenia się, spiny i magnetoidy będące supermasywnymi wariantami pulsarów, i wreszcie supermasywne czarne dziury wraz z akreującą na nie materią. W obliczu wymienionych wcześniej warunków największe szanse daje się tym ostatnim. W pobliżu czarnych dziur można osiągać nie spotykaną w „nieanihilacyjnych” procesach efektywność zamiany masy spoczynkowej na energię, bo dochodzącą do 40%. Przy takiej wysokiej efektywności akrecja kilkudziesięciu  $M_{\odot}$ /rok jest w stanie zapewnić produkcję energii w tempie odpowiadającym maksymalnym jasnościom kwazarów.

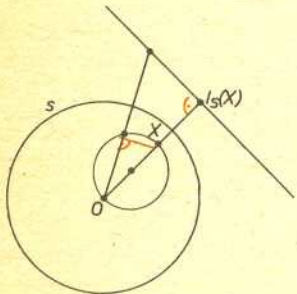


Rys. 4 Model grubego dysku akrecyjnego wokół czarnej dziury (w przekroju).

Czarna dziura z akreującą na nią materią jest układem, który może przejawiać swoją żywotność na wiele różnych sposobów. Jest to uzależnione od takich czynników, jak masa czarnej dziury i jej moment pędu, tempo akrecji, natężenie i struktura pól magnetycznych wzmrożonych w akreującą materię itd. Stąd też wynika cały wachlarz teoretycznych modeli proponujących przeróżne scenariusze akrecji wraz z towarzyszącymi jej wysokoenergetycznymi procesami. Akrecja może być sferyczna bądź dyskowa, dyski mogą być grube i cienkie, mniej lub bardziej stabilne, otoczone termiczną koroną bądź magnetosferą. W przypadku bardzo grubych dysków mamy w pobliżu czarnej dziury konfigurację quasi-sferyczną z wąskim kanałem wzdłuż osi rotacji (rys. 4). W kanałach takich mogą być kolimowane i rozpędzane ciśnieniem promienistym strugi cząstek wyrwanych z powierzchni dysku. Dżety mogą być również produkowane i kolimowane w wyniku złożonych procesów elektromagnetycznych związanych z dyskową akrecją materii wlokącej ze sobą znaczne ilości pola magnetycznego.

W układzie „czarna dziura — akreująca materia” daje się też odtworzyć charakterystyczne dla kwazarów szerokie widma promieniowania. W modelach dyskowych „optyka i ultrafiolet” są produkowane w samych dyskach, natomiast promieniowanie rentgenowskie i gamma — w gorących koronach dyskowych w wyniku rozpraszania „fotonów dyskowych” na wysokoenergetycznych elektronach korony. Korony mogą być grzane poprzez dyssypację energii wynoszonej z powierzchni dysku w postaci silnych fal akustycznych, magnetohydrodynamicznych bądź w wyniku licznych rozbłysków związanych z niestabilnościami natury magnetycznej (tak jak na Słońcu). Źródłem wysokoenergetycznych elektronów, stanowiących swego rodzaju wzmacniacz fotonowy, mogą być również fale uderzeniowe generowane w rozrzedzonym ośrodku nad dyskiem w zderzeniach obłoków materii lub gwiazd osiągających w pobliżu czarnej dziury prędkości bliskie prędkości światła. Wysokoenergetyczne procesy zachodzą również w dżetach, gdzie fotony radiowe i podczerwone produkowane w mechanizmie synchrotronowym zostają wzmacniane na relatywistycznych elektronach, które je wyprodukowały, a wtórne rozpraszanie tych ostatnich może dać promieniowanie gamma. Fotony gamma mogą być też produkowane w procesach rozpadu pionów powstających w rezultacie zderzeń wysokoenergetycznych nukleonów. Warunki sprzyjające takim procesom panują w bliskim otoczeniu czarnej dziury.

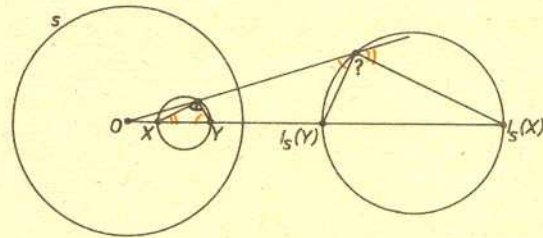
Nie wymieniliśmy tu wszystkich możliwości, istotne jednak jest to, że głęboki dół potencjalny wokół czarnej dziury stwarza doskonałe warunki do realizowania się najprzeróżniejszych wysokoenergetycznych procesów zapewniających nam zarówno emisję fotonów o bardzo dużym zakresie energii, jak i produkcję relatywistycznych dżetów.



Rys. a

### Inwersje — 1

Prosta przez  $O$  przechodzi na siebie. Okrąg przez  $O$  przechodzi (oznaczenia z rys. a), wobec lematu, na prostą przez  $I_s(X)$  prostopadłą do  $OI_s(X)$ . Prosta nie przez  $O$ , wobec inwolutywności  $I_s$ , przechodzi na okrąg przez  $O$ . Okrąg nie przez  $O$  (oznaczenia z rys. b), po dwukrotnym zastosowaniu lematu, przechodzi na okrąg o średnicy  $I_s(X)I_s(Y)$ .



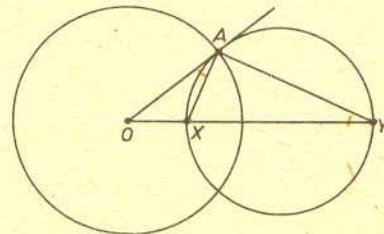
Rys. b

### Inwersje — 2

Przypadek, gdy łańcuch to prosta, jest oczywisty. Gdy okrąg  $o$  jest ortogonalny do okręgu  $s$ , styczna do  $o$  w ich punkcie przecięcia  $A$  przechodzi przez  $O$ . W oznaczeniach z rysunku, wobec równości kąta wpisanego  $OYA$  i dopisanego  $OAX$ , trójkąty  $OYA$  i  $OAX$  są podobne, a więc

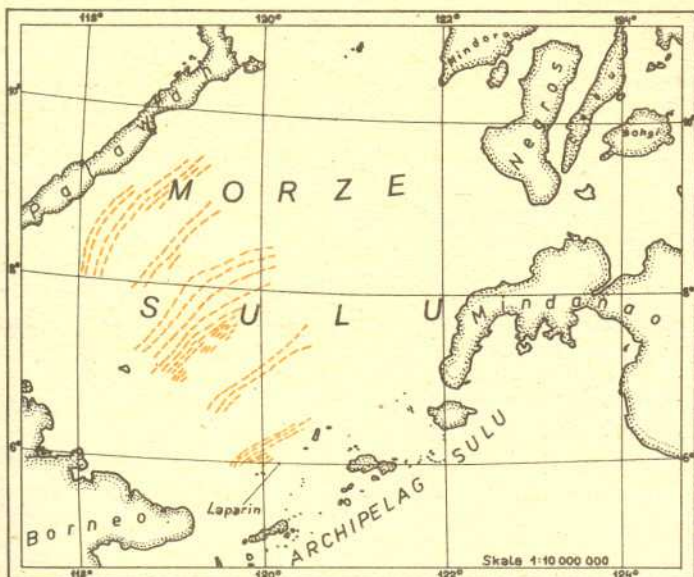
$$\frac{OY}{OA} = \frac{OA}{OX}$$

czyli  $OX \cdot OY = OA^2 = r^2$  i  $Y = I_s(X)$ .



## Solitony podmorskie?

W 1967 roku Kruskal i jego współpracownicy z Princeton odkryli ogólną metodę rozwiązywania nieliniowych równań falowych, tzw. metodę odwrotnego rozpraszania. Umożliwiła ona dokonanie wielkiego postępu w badaniach nad tymi równaniami i ich szczególnymi rozwiązaniami — solitonami.



Jak dotychczas postęp ten ogranicza się jednak do równań falowych w jednym wymiarze przestrzennym, np. opisujących fale powierzchniowe na wodzie w wąskim kanale. Nie wiadomo, czy stabilne solitony mogą się pojawiać w „prawdziwym”, wielowymiarowym świecie.

Tym większe zainteresowanie wzbudziły więc niezwykle zaburzenia zaobserwowane na powierzchni morza pomiędzy wyspą Borneo a Filipinami. Są one widoczne na fotografiach satelitarnych tego obszaru w postaci serii prążków o długości ponad 100 km, przemieszczających się z dużą prędkością (ok. 2,5 m/s) na odległość ok. 400 km (rysunek). Bliższe badania wykazały, że zaburzenia te są wtórnym przejawem przemieszczania się zniekształceń granicy pomiędzy powierzchniową warstwą cieplej wody a zimną warstwą głębinową. Mają one postać grzbietów cieplej wody o szerokości 2—3 km, sięgających dziesiątki metrów poniżej normalnej granicy pomiędzy warstwami. Charakterystyczne jest to, że zaburzenia te zgrupowane są w serie, w których każda fala ma amplitudę mniejszą niż poprzednia. Podobnie jest dla solitonów: prędkość przemieszczania się solitonu rośnie z jego amplitudą.

Zaburzenia te przenoszą ogromną energię, powodując powstawanie silnych prądów podwodnych zakłócających pracę platform wiertniczych, z których prowadzone są poszukiwania ropy naftowej pod powierzchnią dna morskiego (było to zresztą jednym z powodów podjęcia badań nad tym zjawiskiem). Być może ma ono także związek z tajemniczym zaginięciem kilku łodzi podwodnych.

(na podstawie *Physics Today*, listopad 1980)



## Zadania

Redaguje mgr Krzysztof S. NOWIŃSKI

M 343. Wykazać, że jeżeli  $a + \frac{1}{a}$  jest liczbą całkowitą, to dla każdego naturalnego  $n$  liczba

$a^n + \frac{1}{a^n}$  jest całkowita.

Rozwiązanie na str. 15

M 344. Każda główna przekątna sześciokąta wypukłego  $ABCDEF$  połowi jego pole. Wykazać, że przekątne te mają punkt wspólny.

Rozwiązanie na str. 9

M 345. Czworoscian foremny rzutujemy prostokątnie na płaszczyznę. Przy jakim jego położeniu pole rzutu jest największe?

Rozwiązanie na str. 15

Redaguje mgr Tomasz TRATKIEWICZ

F 140. Mamy igłę magnetyczną zamocowaną w taki sposób, że jej osią obrotu jest prostoliniowy nieskończony przewód, w którym płynie prąd stały o kierunku takim jak na załączonym rysunku. Jak zachowuje się igła? Opory ruchu, oddziaływanie Ziemi oraz efekty włączeniowe należy zaniedbać.

(Zadanie nadesłał p. St. Mrówczyński)

Rozwiązanie na str. 14

F 141. Wzdłuż osi symetrii przewodnika kołowego (prostokątnej do płaszczyzny pętli) biegnie nieskończony przewód prostoliniowy. Przez oba przewody przepływa prąd. Jaki kształt mają linie indukcji pola magnetycznego w pobliżu zwoju?

Ośrodkiem otaczającym jest próżnia.

Rozwiązanie na str. 16

