



Czy istnieją dyski akrecyjne?

Rozwiązanie zadania F 226. Ponieważ płytę utrzymuje na dachu siła tarcia, więc przy jej nagrzewaniu w ciągu dnia muszą istnieć punkty płyty nieruchome względem konstrukcji dachu. Oznaczmy x_0 ich odległość od dolnej krawędzi płyty.

W czasie kurczenia się (przy ochładzaniu w nocy) nieruchome będą inne punkty płyty — ich odległość od dolnej krawędzi oznaczmy x'_0 . W czasie nagrzewania część płyty poniżej punktu nieruchomego spęła w dół, a część powyżej przesuwa się w górę. W efekcie tych ruchów na górną część płyty działa siła tarcia

$$f_1 = mg\mu \frac{l-x_0}{l} \cos \varphi \text{ skierowana w dół,}$$

wzdłuż dachu. Podobnie na dolną część

$$\text{działa siła tarcia } f_2 = mg\mu \frac{x_0}{l} \cos \varphi$$

skierowana w górę. Działa również siła ciężkości, $mg \sin \varphi$. Jeśli płyta pozostaje cały czas w stanie równowagi, to suma sił skierowanych wzdłuż dachu musi być równa zeru:

$$-mg\mu \left(1 - \frac{x_0}{l}\right) \cos \varphi + mg\mu \frac{x_0}{l} \cos \varphi - mg \sin \varphi = 0,$$

$$\text{skąd } x_0 = l \frac{\sin \varphi + \mu \cos \varphi}{2\mu \cos \varphi}.$$

W ten sposób w czasie nagrzewania dolna krawędź przesunie się względem dachu na odległość

$$\Delta x_0 = \frac{\alpha l}{2\mu} (T_2 - T_1) \cdot \frac{\sin \varphi + \mu \cos \varphi}{\cos \varphi}.$$

W czasie ochładzania się dolna część przesuwa się w górę, w kierunku nieruchomego punktu x'_0 , natomiast górna przesuwa się w dół. Podobnie jak w przypadku rozszerzania

$$\text{otrzymujemy } x'_0 = \frac{l}{2\mu} \cdot \frac{\mu \cos \varphi - \sin \varphi}{\cos \varphi},$$

skąd otrzymujemy, że w czasie ochładzania dolna krawędź przesuwa się do góry o

$$\Delta x'_0 = \frac{\alpha l}{2\mu} (T_2 - T_1) \cdot \frac{\mu \cos \varphi - \sin \varphi}{\cos \varphi}.$$

Tak więc w ciągu jednej doby zmiana położenia dolnej krawędzi wynosi $\Delta l = \Delta x_0 -$

$$- \Delta x'_0 = \frac{\alpha l}{\mu} (T_2 - T_1) \operatorname{tg} \varphi. \text{ W ciągu miesiąca}$$

przesunięcie to będzie wynosić $\Delta L = n \Delta l \approx$
 $\approx 8 \text{ cm.}$

Promieniowanie synchrotronowe jest to promieniowanie, jakie emitują naładowane cząstki szybko poruszające się w silnym polu magnetycznym.

Powierzchnia Roche'a ogranicza obszar, wewnątrz którego siły grawitacyjne jednej gwiazdy dominują nad wpływami drugiej. Przy obliczaniu kształtów powierzchni Roche'a bierze się pod uwagę siły odśrodkowe (układ gwiazd przeciw rotuje). Każda z gwiazd w układzie ma swą powierzchnię Roche'a, która jest tym większa, im masywniejsza jest gwiazda. Powierzchnie te stykają się w jednym punkcie na linii łączącej środki mas gwiazd, zwanym wewnętrznym punktem Lagrange'a.

W gwiazdach nowych wybuchy zachodzą co kilka, kilkadziesiąt lub kilkaset lat, w zmiennych kataklizmicznych (zwanym też nowymi karłowatymi) wybuchy powtarzają się co kilka — kilkadziesiąt dni.

Dr Zbigniew LOSKA

Do niedawna panowało przekonanie, że reakcje termojądrowe są najwydajniejszym źródłem energii w przyrodzie. Zastosowanie w astronomii nowych technik obserwacyjnych pozwoliło odkryć obiekty emitujące olbrzymie ilości energii na falach radiowych i w promieniowaniu rentgenowskim. Reakcje jądrowe zapewniające zwykłym gwiazdom miliardy lat życia okazały się w tych przypadkach zbyt mało wydajne. Dziś sądzimy, że głównym mechanizmem świecenia takich obiektów jest wyzwolenie grawitacyjnej energii potencjalnej w trakcie spadania materii na przyciągającą ją ciało. Proces ten nazywamy akrecją.

Akrecja materii na zwykłą gwiazdę nie ma praktycznie żadnego znaczenia w porównaniu z wydajnością procesów jądrowych w samej gwiazdzie. Może ona stanowić główne źródło energii dla tzw. gwiazd zwartych, czyli białych karłów, gwiazd neutronowych lub czarnych dziur. Białe karły i gwiazdy neutronowe mają masy rzędu masy Słońca, ale daleko mniejsze rozmiary (odpowiednio 10 tys. km i 10 km). Ilość energii grawitacyjnej wyzwolonej podczas akrecji jednostki masy materii na gwiazdę o masie M i promieniu R wyraża się co do rzędu wielkości ogólnym wzorem:

$$\Delta E \approx \frac{GM}{R},$$

gdzie G jest stałą grawitacji. Widzimy zatem, że akrecja na gwiazdę neutronową jest sto tysięcy razy wydajniejsza od akrecji na Słońce. Łatwo też obliczyć, że gram materii spadając na gwiazdę neutronową wyzwala energię około 10^{20} ergów. W najwydajniejszym procesie zamiany wodoru w hel najwyżej 0,7% masy spoczynkowej może zostać zamienione w energię. Z jednego grama uzyskujemy wówczas około $6 \cdot 10^{18}$ ergów, a więc dwudziestokrotnie mniej niż w przypadku akrecji na gwiazdę neutronową.

Większość gwiazd w galaktykach występuje w układach podwójnych. Aby przekonać się, jak ważną rolę odgrywa akrecja, przyjrzyjmy się bliżej ciasnym układom podwójnym. Są to układy gwiazd o okresie obiegu rzędu godzin i tak małych rozmiarach, że zmieściłyby się we wnętrzu Słońca, a niektóre nawet we wnętrzu Jowisza. Co zatem zwróciło naszą uwagę na te — zdawałoby się — tak niepozorne twory? Otóż okazało się, że są to jedne z najjaśniejszych, wysyłających największe ilości energii obiektów w galaktyce. Bywają one setki tysięcy razy jaśniejsze niż Słońce. W świetle widzialnym wiele z nich niczym szczególnym się nie wyróżnia, dopiero w zakresie nadfioletowym i rentgenowskim stają się jednymi z najjaśniejszych obiektów na niebie. Wiele z nich czasami bardzo gwałtownie wybucha zwiększając w ciągu kilku dni swoją jasność, nierazkdo tysiąckrotnie i wyrzucając materię w przestrzeń wokółgwiazdową. Wśród ciasnych układów podwójnych są również i takie, które zachowują się w miarę spokojnie. Nie wybuchają, lecz świecą tak silnie w zakresie rentgenowskim i gamma, że ilość energii przez nie wydzielana nie może być wytłumaczona żadnymi procesami termojądrowymi. Również wysyłane przez wiele z nich promieniowanie synchrotronowe przemawia za tym, że reakcje termojądrowe nie mogą stanowić źródła energii w tych obiektach.

Akrecja jest najbardziej efektywna wówczas, gdy następuje na białego karła, gwiazdę neutronową lub czarną dziurę. Wprawdzie te dwa ostatnie obiekty powstają w wyniku wybuchu supernowej, ale wybuch taki nie musi prowadzić do zniszczenia układu podwójnego. Możemy wobec tego wyobrazić sobie następującą sytuację. Mamy ciasny układ podwójny, którego jeden składnik jest gwiazdą normalną i wypełnia swoją powierzchnię Roche'a, drugi zaś jest zwartą gwiazdą. Przez wewnętrzny punkt Lagrange'a materia przepływa w okolicy zwartej gwiazdy tworząc wokół niej dysk akrecyjny, gdyż mając moment pędu nie może opaść na nią bezpośrednio. Tarcie wewnętrzne w dysku (lepkość) powoduje, że silnie się on rozgrzewa i intensywnie świeci. Cząstki gazu tracąc w ten sposób energię i moment pędu opadają po spirali na gwiazdę zwartą. Gdy w układzie mamy białego karła lub gwiazdę neutronową, to w dysku akrecyjnym wydziela się tylko część dostępnej grawitacyjnej energii potencjalnej tworzącego go gazu. Reszta wyzwolana jest w cienkiej warstwie granicznej między nim a powierzchnią akrejującej gwiazdy. Jeśli tempo przepływu materii przez dysk jest małe, może stać się on niestabilny i wybuchać rozpraszając się w przestrzeni. Mamy wówczas do czynienia z tak zwaną zmienną kataklizmiczną. Kolejny wybuch nastąpi dopiero, gdy z materii dostarczonej przez drugą gwiazdę dysk akrecyjny zostanie odtworzony. Gdy tempo przepływu materii przez dysk jest duże, zachowuje się on spokojnie. Opadająca z niego materia osiada na powierzchni białego karła. W pewnym momencie zaczynają w niej zachodzić gwałtownie reakcje termojądrowe powodując wybuch. Tego rodzaju gwiazdy nazywa się gwiazdami nowymi. Przebieg akrecji wygląda inaczej, gdy gwiazda neutronowa lub biały karzeł ma silne pole magnetyczne — a nie jest to rzecz rzadka. Istnieją białe karły z polami magnetycznymi o natężeniu milionów gaussów,

ELEKTRONY I FOTONY SPOTYKAJĄ SILNE POLA

Elektrony i fotony przechodzące przez materię produkują nowe cząstki. Elektrony emitują fotony - jest to tzw. promieniowanie hamowania, a fotony mogą zmieniać się w pary elektron-pozyton. Oba te efekty spowodowane są oddziaływaniem z polem elektrycznym jądra lub sieci krystalicznej i są dobrze zrozumiałe na gruncie teorii oddziaływań elektromagnetycznych - elektrodynamiki kwantowej. Nowe i ciekawe efekty mogą wystąpić w bardzo silnych polach, gdy energia oddziaływania spinu elektronu z polem staje się porównywalna z jego masą. Ma to miejsce, np. gdy cząstka porusza się równoległe do osi kryształu, którego temperaturę obniżono dostatecznie, by ruchy termiczne atomów sieci nie zaburzały pola.

Warunki takie osiągnięto w Europejskim Ośrodku Badań Jądrowych (CERN) w Genewie. Naukowcy z laboratoriów z Albany (USA), Annecy i Lyonu (Francja) naświetlali kryształ germanu o grubości 0,2 cm, ochłodzony do temperatury 100 K wiązką elektronów i fotonów o energiach do 150 GeV (1 GeV to miliard elektronowoltów). Kąt między osią kryształu a kierunkiem wiązki był nie większy niż 5°. Poczynając od energii fotonów równej 30 GeV zaobserwowano szybki wzrost prawdopodobieństwa produkcji par elektronowo-pozytonowych. Przy energii 150 GeV prawdopodobieństwo to jest około 10 razy większe niż w warunkach, gdy osie kryształu i wiązki nie są równoległe lub temperatura jest zbyt duża.

Elektrony przechodzące przez kryształ emitują do 80% swej energii w postaci fotonów poruszających się wzdłuż jego osi. Choć całkowita wypromieniowywana energia zgadza się z obliczeniami teoretycznymi, to nie jest jasne, dlaczego energie tworzonych fotonów są tak duże. Aby głębiej zbadać te interesujące zjawiska, planuje się doświadczenia przy użyciu cieńszych kryształów, co powinno zmniejszyć prawdopodobieństwo powtórnego oddziaływania produktów pierwotnej reakcji.

Na podstawie "CERN Courier" opracował Maciej Górski

Weźmy pod uwagę dwa odległe od siebie rejony jądra aktywnej galaktyki. Aby oba naraz mogły zmienić jasność, jeden musi „wiedzieć” o zmianie jasności drugiego. Ponieważ sygnały mogą się przemieszczać co najwyżej z prędkością światła, oznacza to, że jeśli znacząca część promieniowania zmienia się na przykład w ciągu dwóch godzin, to emitujący obszar nie może być większy niż dwie godziny świetlne.



Rozwiązanie zadania M 480. Odpowiedź brzmi

$$1 \cdot (w_1 - w_2) + 2 \cdot (w_2 - w_3) + \dots + (k-1)(w_{k-1} - w_k) + k \cdot w_k = w_1 + \dots + w_k.$$

a w gwiazdach neutronowych wartości te sięgają miliardów gausów. Materia opadająca na zwartą gwiazdę musi wtedy spływać wzdłuż linii pola w okolicy jej biegunów magnetycznych wysyłając intensywne promieniowanie synchronotroniczne. Nagromadzenie opadającej materii może prowadzić do wybuchów analogicznych jak wybuchy nowych, z tym tylko, że obszar przez nie ogarnięty ogranicza się do okolic biegunów, a nie jak w nowych — całego pasa równikowego. Wybuchy te obserwujemy głównie w promieniowaniu rentgenowskim. Prawdopodobnie mechanizm taki odpowiedzialny jest za aktywność bersterów.

Okazuje się również, że akrecja w układzie podwójnym może być odpowiedzialna za wybuchy pewnego typu supernowych. Otóż: gdy mamy w nim białego karła o masie nieznacznie mniejszej od masy Chandrasekhara (porównaj *Delta* 3/1987), to zbierając z dysku materię biały karzeł może przekroczyć tę granicę. Wybuch wówczas jako tzw. supernowa I typu stając się gwiazdą neutronową lub zostaje rozerwany.

Zauważmy, że różnorodne zachowania wyjaśniliśmy za pomocą jednego tylko procesu — akrecji w ciasnym układzie podwójnym. Sądzi się, że jest ona odpowiedzialna za aktywność takich obiektów we Wszechświecie, w których nie jesteśmy w stanie zaobserwować jej bezpośrednio. Na przykład — badając nowe karłowate w okresach między wybuchami widzimy białego karła, dysk akrecyjny otaczający go i tak zwaną gorącą płamę powstającą w miejscu zderzenia materii zasilającej dysk z jego zewnętrznym brzegiem.

Z podobną aktywnością jak w ciasnych układach podwójnych, ale w o wiele większej skali, mamy do czynienia w przypadku obiektów pozagalaktycznych. Niektóre z nich emitują w wąskich zakresach widma (fale radiowe lub promieniowanie rentgenowskie czy gamma) tysiące razy więcej energii niż zwykle galaktyki, w których świecą jedynie gwiazdy i gorący gaz. W obiektach tych widać przede wszystkim intensywnie świecące, punktowe jądro na tle galaktyki spiralnej (galaktyki Seyferta) lub eliptycznej (galaktyki typu N). W przypadku kwazarów i lacertyd śladów galaktyki na ogół nie można się dopatrzeć. Wszystkie te obiekty są z reguły również silnymi radioźródłami, a niektóre wyrzucają ze swych jąder wąskie strugi relatywistycznych elektronów emitujących promieniowanie synchronotroniczne. Świadczy to o istnieniu pola magnetycznego związanego z wypływającą materią. Strugi te o długości kilku lat świetlnych przechodzą w rozległe włókna położone prawie symetrycznie po obu stronach jądra. Widziane na falach radiowych włókna te mają rozmiary setek tysięcy lat świetlnych. Kończą się one olbrzymimi chmurami gazu rozciągającymi się nierzadko na wiele milionów lat świetlnych od obiektu centralnego. Chmury te mają olbrzymią energię rzędu 10^{60} ergów i emitują ją w postaci fal radiowych. Centralne źródło tych olbrzymich struktur, położone głęboko we wnętrzu jądra galaktyki, ma rozmiary dużo mniejsze niż zdolność rozdzielcza obecnych instrumentów. Choć aktywne galaktyki różnią się zarówno ilością wydzielanej energii, jak i wyglądem, mają jednak wiele cech wspólnych. Przede wszystkim są znacznie jaśniejsze niż zwyczajne galaktyki, przy czym kwazary wysuwają się pod tym względem na czoło. Większość z nich zmienia swoją jasność w okresie miesięcy lub lat, ale niektóre wykazują silne zmiany jasności w ciągu kilku dni. Taka szybka zmienność jasności świadczy o bardzo małych rozmiarach obszaru produkującego promieniowanie (co najwyżej kilka dni świetlnych). Mimo wielu zagadek związanych ze sposobem działania centralnego obiektu jedno jest pewne — źródłem energii nie mogą być reakcje termojądrowe.

Istnieje wiele teorii próbujących wyjaśnić powody aktywności tych obiektów: wybuchy supernowych w jądrze, supermasywne gwiazdy (o masach setek milionów mas Słońca) utrzymywane w równowadze silnym polem magnetycznym (magnetoidy) bądź bardzo szybką rotacją (spinary). Teorie te są w stanie wyjaśnić tylko część cech aktywnych galaktyk. Najbardziej obiecującą wydaje się jednak teoria zakładająca istnienie masywnej czarnej dziury. Czarna dziura o masie 10^8 mas Słońca ma rozmiary rzędu kilkuset milionów kilometrów, czyli kilkudziesięciu minut świetlnych, jest więc odpowiednio mała. Silne pole grawitacyjne czarnej dziury powoduje rozrywanie gwiazd przebiegających zbyt blisko niej. Obserwowaną aktywność zapewnia akrecja co najwyżej kilku mas Słońca w ciągu roku. Silne pole magnetyczne w okolicy czarnej dziury przyspiesza naładowane cząstki do wysokich energii — powstaje silne promieniowanie synchronotroniczne, a jej oś rotacji wyznacza kierunek wyrzutu strumieni cząstek. Przypuszcza się, że wokół czarnej dziury tworzy się tak zwany gruby dysk akrecyjny — prawie całkowicie ją otaczający i zostawiający wolne jedynie dwa wąskie lejki w pobliżu osi rotacji. W lejkach tych tworzą się strugi relatywistycznych elektronów, skierowane w przeciwne strony. Dysk taki może się utworzyć dzięki temu, że materia dostająca się w pobliże czarnej dziury ma moment pędu — bierze bowiem udział w rotacji całej galaktyki. Proces akrecji na czarną dziurę może trwać dziesiątki milionów lat zapewniając długowieczność jądom aktywnych galaktyk.

Jak widzimy, argumenty na rzecz istnienia dysków akrecyjnych w aktywnych jądrach galaktyk są jedynie pośrednie. Ze względu na olbrzymie ich odległości nie jesteśmy w stanie zajrzeć jeszcze do ich wnętrza. Mamy jednak nadzieję, że najbliższa przyszłość pozwoli i w tym przypadku odpowiedzieć na pytanie, czy aktywność ta ma swoją przyczynę w akrecji, a więc w grawitacji.