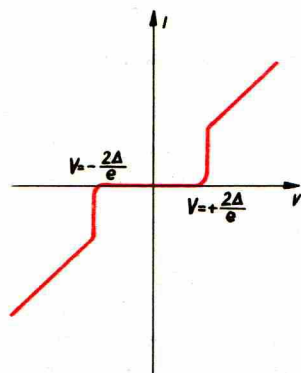


Rys. 4



Rys. 5

Zjawisko Josephsona znalazło szereg zastosowań, od bardzo dokładnego pomiaru e/h , do budowy detektorów mikrofalowego promieniowania elektromagnetycznego, wytwarzanych obecnie na skalę przemysłową. Dokładne omówienie wszystkich zastosowań wymagałoby oddzielnego artykułu.

Jeżeli warstwa izolatora jest trochę grubsza (20–30 Å), tunelowanie par staje się bardzo mało prawdopodobne, ale dosyć prawdopodobne może być jeszcze tunelowanie pojedynczych elektronów. Takich elektronów w nadprzewodniku może jednak nie być; jeżeli bowiem temperatura nadprzewodnika jest dużo niższa od temperatury przejścia w stan nadprzewodnictwa (a więc naprawdę bardzo niska), to można uważać, że wszystkie elektrony tworzą pary. Aby parę elektronową rozbić na dwa pojedyncze elektrony, trzeba dostarczyć im pewną energię, zwaną energią wiązania pary i oznaczaną 2Δ (na każdy elektron trzeba dostarczyć energię Δ). Przykładowo, dla cyny wartość tej energii wynosi $2\Delta \approx 1 \text{ meV} = 10^{-3} \text{ eV}$. Zatem, jeżeli do tunelowego złącza nadprzewodzącego, o barierze zbyt grubej, aby mogły tunelować pary, przyłożymy napięcie $V < 2\Delta/e$, to prąd nie będzie płynął, bo nie ma elektronów, które mogłyby tunelować. Z chwilą, gdy napięcie polaryzacji złącza wyniesie $2\Delta/e$, może następować rozrywanie par dzięki energii dostarczanej przez pole elektryczne tunelującemu składnikowi pary. Pokazuje to rys. 4. Na rysunku tym za zero energii przyjęto energię elektronów związanych w parach po prawej stronie złącza. Pojedynczy elektron może tu mieć najmniejszą energię $E = \Delta$ i na ten poziom przechodzi tunelujący elektron z rozbitej pary po lewej stronie złącza. Zależność prądu tunelowego od przyłożonego napięcia dla takiego złącza pokazuje rys. 5. Z powyższych rozważań jest jasne, że eksperyment tego typu pozwala na bezpośredni pomiar bardzo ważnego mikroskopowego parametru nadprzewodnika — energii wiązania par elektronowych.

Pomysł i wykonanie tego eksperymentu jest dziełem I. Giaevera. Eksperymenty z tunelowaniem jednoelektronowym zostały następnie rozszerzone i bardzo udoskonalone i stały się jednym z najważniejszych narzędzi badania nadprzewodników. Umożliwiły one również weryfikację wielu założeń teorii BCS oraz szczegółowe badanie odstępstw od tej teorii. W chwili obecnej jednoelektronowe złącza tunelowe stosowane są również jako narzędzie badania w innych dziedzinach fizyki ciała stałego, np. w fizyce półprzewodników. Podsumowując możemy powiedzieć, że badania tunelowe pozwoliły lepiej zrozumieć zjawisko nadprzewodnictwa i stanowią obecnie jedno z podstawowych narzędzi jego badania, stosowanych w licznych laboratoriach na świecie, między innymi w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

Czarne jamy

Doc. dr hab. Marek DEMIAŃSKI

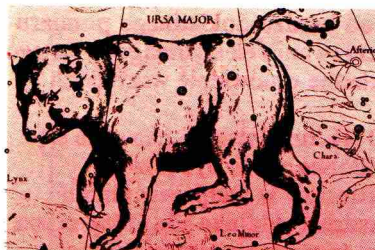
Kiedy w pogodną noc obserwujemy niebo, widzimy setki świecących punkcików — gwiazd. Wszystkie one wydają się podobne jedne do drugich i co najwyżej możemy stwierdzić, że jedne świecą światłem białym, inne zaś są pomarańczowe. Dopiero potężne teleskopy anten radiowych, a ostatnio i detektory promieniowania X pozwalają w tej pozornej monotonii dostrzec ogromną różnorodność.

Większość tych widzialnych gołym okiem punkcików to faktycznie takie gwiazdy, jak najbliższe nam Słońce. Niektóre jednak, oglądane przez silne teleskopy, okazują się złożonymi układami dziesiątków milionów gwiazd — galaktykami. Jeszcze inne, które na kliszach fotograficznych wyglądają jak gwiazdy, są złożonymi, zagadkowymi obiektami promieniującymi bardzo duże ilości energii. To kwazary. Niektóre gwiazdy „mrugają” do nas — niestety tak szybko, że nie jesteśmy w stanie zauważyć tego gołym okiem; stosując jednak specjalne urządzenia do pomiaru szybko po sobie następujących sygnałów, możemy to „mruganie” zaobserwować. I tu rzecz bardzo dziwna; taki duży układ jak gwiazda mruga z niespotykaną dotąd regularnością, niemal jak zegar atomowy. Te mrugające gwiazdy są w istocie bardzo gęste, tak gęste, jak na przykład jądra uranu lub żelaza; i jak na gwiazdy — są bardzo małe, bo ich promienie mają zaledwie kilkanaście kilometrów. Zarówno kwazary, jak i pulsary zostały najpierw zaobserwowane, a później dopiero próbowano opisać teoretycznie ich własności.



Rozwiązanie zadania M21

Zauważmy, że sześcián liczby całkowitej m daje przy dzieleniu przez 9 resztę 0, 1 lub 8. Jeżeli bowiem m jest podzielne przez 3, to m^3 daje resztę 0; jeżeli $m = 3r + 1$, to $m^3 = 27r^3 + 27r^2 + 9r + 1$; jeżeli zaś $m = 3r + 2$, to $m^3 = 27r^3 + 54r^2 + 36r + 8$. Gdyby więc dla pewnych liczb całkowitych x, y, z było $13 = x^3 + y^3 + z^3$, to reszta z dzielenia liczby $x^3 + y^3 + z^3$ przez 9 byłaby równa 4, co, jak łatwo sprawdzić, jest niemożliwe.



Od niedawna poważnie traktuje się możliwość dodania do listy tych „egzotycznych” obiektów jeszcze jednego, którego istnienie zostało przewidziane drogą teorii, a jak się obecnie wydaje, jego istnienie potwierdzają również obserwacje. Tym nowym obiektem jest czarna jama.

Zanim przejdziemy do omówienia własności czarnych jam, rozważmy następujący prosty eksperyment myślowy. Jak wiadomo, po to, aby ciało wyrzucone z powierzchni Ziemi oddaliło się dowolnie daleko, musi być wyrzucone z prędkością $v = \sqrt{2gR}$ (tak zwana druga prędkość kosmiczna), gdzie g jest przyspieszeniem ziemskim, a R promieniem Ziemi. Przyspieszenie ziemskie jest

związane z masą Ziemi i jej promieniem przez prostą zależność $g = \frac{GM}{R^2}$; tutaj G oznacza stałą grawitacyjną. Podstawiając tę wartość do wyrażenia na drugą

prędkość kosmiczną, otrzymujemy $v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$. Jeżeli teraz, nie zmieniając całkowitej masy Ziemi M , będziemy ją ściskali coraz bardziej, czyli zmniejszali jej promień, to wartość drugiej prędkości kosmicznej będzie rosła. Obliczymy, dla jakiej wartości promienia druga prędkość kosmiczna będzie równa prędkości

światła. Prosty rachunek prowadzi do zależności (proszę sprawdzić) $R = \frac{2GM}{c^2}$,

a podstawiając tu dane liczbowe $G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$, gdzie $M = 6 \cdot 10^{27} \text{ g}$, $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm}$, otrzymujemy $R = 0,89 \text{ cm}$.

W tym miejscu każdy wykrzyknie: Ależ to jakiś nonsens! Trudno sobie przecież wyobrazić Ziemię w postaci kulki o promieniu mniejszym od jednego centymetra, a więc mniejszej od piłeczki ping-pongowej! Taka zapewne była reakcja każdego, kto po raz pierwszy przeprowadzał takie obliczenia.

Gdybyśmy obliczyli tę krytyczną wartość promienia dla Słońca, to okazałoby się, że wynosi ona trzy kilometry. To już nie jest takie przerażające, tym bardziej że, jak wspominaliśmy, promienie pulsarów są tylko kilka razy większe od tej krytycznej wartości.

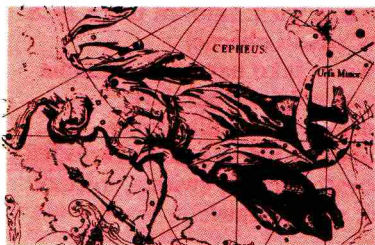
Zostawmy już te rozważania dotyczące krytycznej wartości promienia i zastanówmy się raczej nad wynikiem, do którego doszliśmy. Otóż jeżeliby gwiazdę (ograniczymy dalej nasze rozważania do gwiazd i obiektów o większych masach) dostatecznie skurczyć, to w celu wyrzucenia z jej powierzchni jakiegoś ciała trzeba by mu nadać prędkość światła. Jak wiemy, prędkość światła w próżni jest maksymalną prędkością, z jaką można przekazywać informacje. Powierzchnia kuli o promieniu

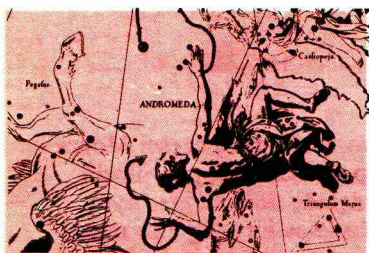
$R = \frac{2GM}{c^2}$, którą dalej nazywać będziemy „horyzontem grawitacyjnym”,

powinna zatem odgrywać szczególną rolę. Dokładniejsza analiza prowadzi do wniosku, że z powierzchni horyzontu nie można wysłać żadnej cząstki ani też żadnego sygnału (na przykład świetlnego lub radiowego) do obserwatora znajdującego się gdzieś na zewnątrz tej powierzchni. Przez powierzchnię horyzontu można tylko przenikać do wnętrza. Gwiazdę, która „schowała się” pod swoim horyzontem grawitacyjnym, nazywać będziemy „czarną jamą”.

Czy czarne jamy mogą istnieć? Aby odpowiedzieć na to pytanie, trzeba się dokładniej przyjrzeć historii gwiazd. Powstają one w wyniku kondensacji obłoków gazu i w początkowym okresie świecą dzięki zamianie energii grawitacyjnej na energię cieplną. W skali czasu życia gwiazdy jest to okres bardzo krótki.

Podczas powolnego kurczenia się temperatura w środkowych częściach rośnie i w końcu osiąga taką wartość, że zaczynają zachodzić reakcje jądrowe. Ten okres ewolucji trwa najdłużej. Po wypaleniu paliwa jądrowego, w centralnych częściach gwiazdy znajdują się będą najtrwalsze jądra z grupy żelaza. W wyniku grawitacyjnego oddziaływania gwiazda zacznie się kurczyć, a temperatura w jej środku zacznie wzrastać. Atomy żelaza rozpadają się w końcu i następuje silny wybuch. Zewnętrzne części gwiazdy zostają wyrzucone, a wewnętrzne jądro kurczy się dalej. Los tego kurczącego się jądra zależy od jego masy. Jeżeli nie jest ono zbyt masywne, proces kurczenia się zostanie zahamowany i może ono ostygając stać się pulsarem. Gdy jego całkowita masa przewyższa masę Słońca, proces kurczenia odbywać się będzie nieograniczenie. W tym wypadku gwiazda stanie się właśnie czarną jamą. Warto zwrócić uwagę na jeszcze jedną szczególną cechę tego





procesu. Przypuśćmy, że możemy śledzić te ostatnie fazy ewolucji znajdując się na powierzchni tego gęstego kurczącego się obłoku. Z naszego punktu widzenia obserwować będziemy stopniowe zmniejszanie się promienia. Siły grawitacyjne, jakie będą na nas działać, będą coraz to większe, ale nic szczególnego nie zauważymy w momencie przenikania przez horyzont grawitacyjny. Naszą jednak ciekawość będziemy musieli przypłacić życiem, po upływie bowiem skończonego czasu zostaniemy zmiążdżeni przez bardzo silne siły grawitacyjne. Cała masa zostanie ściśnięta do punktu. Ewolucja obłoku doprowadzi do stanu o nieskończonej gęstości.

Postąpiliśmy tu dość nierozważnie, wybierając się na taką eskapadę i nie przygotowawszy sobie możliwości ratunku. Będziemy więc bardziej roztropni i teraz, powtarzając podobny eksperyment, zaopatrzymy się w raketę z silnikiem o bardzo dużej mocy. Zaraz po przekroczeniu horyzontu grawitacyjnego włączymy silnik rakiety. Niestety, niezależnie od tego, jak dużą moc mieć będzie silnik rakiety, zauważymy, że wcale nie oddaliśmy się od centrum. Wręcz przeciwnie, zbliżamy się doń, choć teraz wolniej niż powierzchnia obłoku. Tym razem jednak znowu, niezależnie od mocy silnika, czas naszego życia jest policzony i w końcu potężne siły grawitacyjne nas zmiążdżą. Co gorsza, informacji o tym niebezpieczeństwie nie będziemy mogli przekazać nikomu, kto znajduje się na zewnątrz horyzontu. Obszar wewnątrz horyzontu nie dopuszcza stanu spoczynku. Wszystko, cokolwiek tu się znajdzie, po upływie skończonego czasu musi osiągnąć centrum.

Zupełnie inaczej widzieć będzie obraz kurczenia ktoś znajdujący się na zewnątrz horyzontu. Jemu nie grozi żadne niebezpieczeństwo. Z jego punktu widzenia, w miarę zbliżania się do horyzontu prędkość kurczenia będzie maleć i dopiero po nieskończonym czasie powierzchnia obłoku osiągnie powierzchnię horyzontu. Zapytacie: Jak to jest możliwe? Na to pytanie trudno odpowiedzieć, nie zagłębiwszy się w dokładniejsze rozważania. Z grubsza można powiedzieć, że w pobliżu grawitacyjnego horyzontu geometria przestrzeni jest inna niż ta euklidesowa, do której jesteśmy przyzwyczajeni, zachodzi tu bowiem grawitacyjne zwolnienie biegu zegarów, podobnie jak wówczas, gdy porównujemy wskazania zegara spoczywającego w pewnym układzie, który porusza się względem całego ciągu zegarów w innym układzie, poruszającym się ruchem jednostajnym. Czym zatem jest czarna jama z punktu widzenia dalekich obserwatorów? To prawda, że proces kurczenia się, gdy powierzchnia gwiazdy jest blisko horyzontu, przebiega bardzo powoli, tym niemniej na samym początku kurczenia się jest bardzo szybki. Z dobrym przybliżeniem można powiedzieć, że cząstki znajdujące się na powierzchni spadają swobodnie, przyciągane przez kurczącą się gwiazdę. W tym procesie szybkiego kurczenia zanika też pozorna jasność gwiazdy i i praktycznie już po kilku sekundach gwiazda przestaje „świecić”. Taką „zastygłą” z naszego punktu widzenia gwiazdę, której powierzchnia jest już bardzo bliska powierzchni horyzontu, traktować będziemy jak czarną jamę.

Jak można zaobserwować czarną jamę, skoro ona sama nie świeci? Faktycznie problem jest niezmiernie złożony, jedynym bowiem wskaźnikiem jej istnienia jest pole grawitacyjne, które wokół siebie wytwarza. Izolowanej czarnej jamy, pozostawionej w zupełnej pustce, wykryć nie sposób. Jeżeli jednak czarną jamę otaczać będzie obłok gazu, to sytuacja będzie znacznie lepsza. Przyciągać ona będzie cząstki gazu, a te, rozpędzając się, będą promieniować. Nie jest to metoda najefektywniejsza. Od dawna przypuszczano, że czarną jamę najłatwiej można zaobserwować pośrednio, gdy w jej bliskim sąsiedztwie znajduje się zwykła gwiazda, z którą czarna jama tworzy parę. Ta normalna gwiazda służyć będzie za źródło gazu, który sphywa na czarną jamę. Podobnie jak w poprzednim przypadku, będzie on się rozpędzał i promieniował głównie promienie X. Zwykła gwiazda okresowo będzie przesłaniać czarną jamę i wówczas promieniowanie X będzie zanikać.

Takie pulsujące zmienne źródła promieniowania X udało się ostatnio zaobserwować. Jedno z nich zidentyfikowano z taką dziwną parą, w której optycznie widać tylko jeden składnik. Wiele własności tej pary można wyjaśnić przyjmując, że w jej skład wchodzi czarna jama. Czy tak jest istotnie, odpowiedzą dokładniejsze obserwacje.

