

Nim zaświeci gwiazda

Dr Michał RÓŻYCZKA

Chcemy dzisiaj opowiedzieć, jak rodzą się gwiazdy, jednak powiedzmy sobie od razu: nim zaświeci gwiazda — dzieją się rzeczy niepojęte. No, może niezupełnie niepojęte, lecz w każdym razie do dziś skutecznie opierające się próbom ich spójnego opisan.

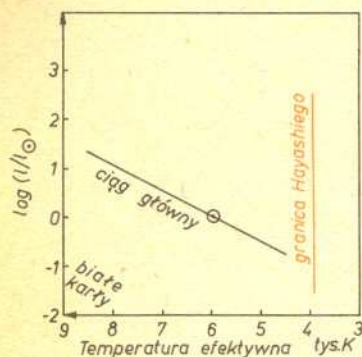


Diagram Hertzsprunga-Russella

Umówmy się, że nazwę „gwiazdy” rozciągniemy tylko na te obiekty, w których tempo produkcji energii w odbywających się we wnętrzu reakcjach jądrowych jest praktycznie równe tempu jej wyświecania z powierzchni. Zgodnie z tą umową gwiazda zaczyna świecić w chwili, gdy po raz pierwszy dochodzi w niej do zbilansowania energii wyświecanej i energii uzyskiwanej z reakcji jądrowych. Nieco już wtajemniczeni wiedzą, że na diagramie H—R miejscem tak zdefiniowanych narodzin gwiazdy jest określony przez jej masę punkt należący do tzw. ciągu głównego wieku zerowego. Jaką drogę przebywa rodząca się gwiazda, nim trafi na ciąg główny? Dobrze ugruntowana teoria ewolucji gwiazd informuje nas, że obiekty na lewo od ciągu głównego są ewolucyjnie zaawansowane, tj. takie, które kiedyś już były na ciągu głównym. Pomieważ żaden z tych obiektów nie ma szans powtórnego tam trafienia, rodzących się gwiazd (będziemy je dalej nazywać protogwiazdami) musimy szukać na prawo od ciągu głównego, w obszarze małych gęstości i niskich temperatur. Głównym źródłem energii (protogwiazdy również świecą — inaczej w ogóle by nie trafiły na diagram H—R), jak się domyślamy, jest kurczenie się pod wpływem własnych sił grawitacyjnych, przy czym energia potencjalna ściskanego gazu zamienia się w energię wewnętrzną, czyli w ciepło. Takiemu kurczeniu (inaczej — kontrakcji) musi towarzyszyć wzrost gęstości i temperatury obiektu, z upływem czasu powinien on zbliżać się do ciągu głównego. Jednak próbując zacząć nasze rozważania jeszcze bardziej na prawo napotykamy nieprzekraczalną na pierwszy rzut oka barierę zwaną *granica Hayashiego*. Na prawo od tej niemal pionowej linii na diagramie H—R nie ma już żadnych obiektów, które przypominałyby gwiazdy. Chcąc ją pokonać musimy się odwołać do teorii wnętrza gwiazdowych (równie dobrze, lub nawet lepiej ugruntowanej niż teoria ewolucji gwiazd). Stwierdza ona, iż na prawo od granicy Hayashiego równania budowy wewnętrznej gwiazdy, oparte na założeniu braku szybkich ruchów systematycznych tracą swą ważność — stają się wewnętrznymi sprzecznymi. Kontrakcja, z którą zetknęliśmy się na lewo od granicy Hayashiego jest oczywiście ruchem systematycznym, jednak na tyle powolnym (jej szybkość mierzy się w ułamkach milimetra na sekundę), że przy opisie budowy wewnętrznej znajdujących się tam obiektów można ją z powodzeniem zaniedbać. Mówimy wtedy, że panuje tam

równowaga hydrostatyczna (przeważnie ruchy systematyczne można zaniedbać wtedy, gdy ich prędkości są bardzo małe w porównaniu z lokalną prędkością dźwięku). Gaz, tworzący obiekty na prawo od granicy Hayashiego nie może utrzymać równowagi hydrostatycznej, musi podlegać w całej swej objętości lub znacznej części szybkim ruchom systematycznym — np. szybkiej fazie kontrakcji (kolaps).

A więc możemy rozpocząć nasze śledzenie ewoluującej protogwiazdy od miejsca, gdzie niesłychanie rzadki, rozległy obłok gazu dopiero „poczuł swoją tożsamość” i zaczął się kurczyć. Jak już wspomnieliśmy na wstępie, nie istnieje żadna kompletna teoria ewolucji protogwiazd, mimo obfitego materiału obserwacyjnego. Wciąż jeszcze nie umiemy odpowiedzieć na pytania najbardziej podstawowe: co powstanie z danego obłoku, kiedy, i przede wszystkim — dlaczego, wszędzie powstaje taka sama mieszanina gwiazd, w której skład, oprócz obiektów podobnych do Słońca wchodzi w ustalonych proporcjach gwiazdy dużo jaśniejsze i słabsze, jak powstają układy podwójne i planetarne itd.

Materia międzygwiazdowa to niezwykle eteryczny, nieco zapyłony gaz, którego średnią gęstość mierzy się w ułamkach atomu/cm³. Początkowo więc obserwowano jedynie jej zagęszczenia zwane w zależności od wyglądu i cech widmowych *mglavicami emisyjnymi, refleksyjnymi* bądź też *ciemnymi (absorpcyjnymi)*. Rychło jednak przekonano się dzięki zliczeniom gwiazd, iż pochłaniająca ich światło ciemna materia międzygwiazdowa wypełnia całą objętość dysku galaktycznego. Obserwacje radiowe *wodoru neutralnego (oznaczonego H I)* pokazały, że tworzy on szereg obłoków o gęstościach dochodzących do 100 atomów/cm³, układających się we wzór, który od biedy przypomina zarys ramion spiralnych. Grubość dysku wodoru neutralnego wynosi 400—600 pc. Początkowo obserwowano zaskakującą zależność zmian gęstości wodoru wzdłuż promienia: gęstość powierzchniowa, czyli masa zawarta w prostokątnym do płaszczyzny Galaktyki słupie o jednostkowym przekroju osiągała maksimum poza orbitą Słońca (odległego od centrum Galaktyki o ok. 9 kpc). Podobnie dziwny przebieg (spodziewalibyśmy się maksimum w pobliżu centrum Drogi Mlecznej) zaobserwowano w wielu innych galaktykach spiralnych. Dopiero jednak w ostatnim dziesięcioleciu okazało się, że zgodnie z naszą intuicją wodoru przybywa w miarę zbliżania się do centrum tyle, że występuje on tu w postaci cząsteczkowej (H₂), bardzo trudnej do obserwacji. Maksimum gęstości powierzchniowej H₂ przypada w odległości 4—8 kpc od centrum, tworzy on również obłoki, zwane *molekularnymi*, w których oprócz H₂ odkryto kilkadziesiąt innych cząsteczek, w tym najłatwiejszy do zaobserwowania tlenek węgla (CO), dzięki któremu pośrednio zbadano rozkład i parametry obłoków molekularnych. Okazało się, że pierścień H₂ jest trzykrotnie cieńszy niż dysk H I. Obłoki H₂ mają niskie temperatury (rzędu 10—20 K) i olbrzymie, jak na materię międzygwiazdową gęstości (do 10⁶/cm³). Największe z nich osiągają rozmiary rzędu 100 pc (aktualny „rekordzista” — 170 pc). Ich masy przekraczają 10⁵ M_⊙. Szacuje się, że takich olbrzymów jest w Galaktyce kilka tysięcy. Oceny mas są obarczone dużymi błędami spowodowanymi głównie słabym znanym stosunkiem obfitości obserwowanego CO do H₂, który decyduje o masie.

W tym miejscu dotykamy zasadniczego problemu, jakim jest status dynamiczny obłoków molekularnych. Jeśli są one rzeczywiście aż tak masywne, to panujących w nich temperaturach powinny się niemal bez oporu (niska temperatura znaczy niskie ciśnienie) poddawać siłom samograwitacji; kurczyć, zapadać, kolapsować, słowem natychmiast zamieniać się w gwiazdy. Szerokie linie emisyjne w widmie CO świadczą o szybkich ruchach

(zjawisko Dopplera) gazu we wnętrzach obłoków. Trudno na razie stwierdzić, czy jest to uporządkowane kurczenie czy chaotyczne kłębieństwo (turbulencja). Proste rozważania teoretyczne wskazują, że nie pobudzona ciągle z zewnątrz turbulencja niemal natychmiast zaniknęłaby. Z drugiej strony raz rozpoczętego kolapsu nie można zatrzymać, każdy zapadający się obłok powinien nieuchronnie zamienić się w gwiazdę lub gromadę gwiazd. Jeśli wszystkie obłoki kolapsują, tempo powstawania gwiazd byłoby ponad 1000-krotnie większe od obserwowanego. Krótko mówiąc — dynamiki obłoków molekularnych po prostu nie rozumiemy. Kolaps trwa co najwyżej parę milionów lat i jeśli chcemy utrzymać stałą liczbę obłoków (wprawdzie nie wiemy, czy rzeczywiście powinna ona być stała, ale nie widzimy powodów, dla których akurat teraz miałyby być w Galaktyce wyjątkowo dużo obłoków), musimy podać jakiś niezwykle wydajny sposób ich wytwarzania. Takiego sposobu nie znamy. Pewne nadzieje wiążemy z jeszcze dyskusyjnymi spiralnymi falami gęstościowymi, a raczej — z wywołanymi przez nie frontami uderzeniowymi omiatającymi ośrodek międzygwiazdowy. Obłok H I znalazłszy się w obrębie takiego frontu może zostać tak silnie zgnieciony, że jego gęstość wzrośnie tysiąckrotnie — zbliżając się do gęstości obłoków H_2 . Niestety obliczenia prowadzą do wniosku, że jedynie skromna jego reszka pozostanie w fazie molekularnej po wyjściu z frontu i związanym z tym rozprężeniu. Co prawda, takich resztek pochodzących z wielu obłoków może być dużo. Jeśli jest ich dostatecznie wiele i jeśli mają na to dostatecznie dużo czasu, mogą między sobą oddziaływać (zlepiając się lub rozpraszając) na tyle efektywnie, że pod wpływem tych oddziaływań wytworzy się pewien stan równowagi, przy którym w każdym zakresie mas tyle samo obłoków będzie się tworzyło, co rozpraszało. Nie wiadomo niestety, czy można w ten sposób otrzymać obserwowany rozkład mas obłoków, w którym znaczna większość ogólnej masy galaktycznego wodoru molekularnego zdaje się przypadać na obłoki największe. Nie jest również jasne, czy niestanne oddziaływania między obłokami wspomagałyby netto ich naturalną tendencję do kolapsowania, czy też ją netto niwelowały. O ile bowiem spokojne zlanie się dwóch obłoków jest niewątpliwą zachętą do kolapsu (towarzyszy mu wzrost masy, a więc i samograwitacji), o tyle gwałtowne zderzenie powinno prowadzić do ich rozproszenia lub przynajmniej do pobudzenia wewnętrznej turbulencji. W każdym razie przeprowadzone na kilka niezależnych sposobów oceny średniego wieku obłoków dają wartości co najmniej dziesięciokrotnie większe od czasu potrzebnego do ukończenia kolapsu. Jeśli im ufamy — musimy przyznać, że nie wiemy, co właściwie kolapsowi przeciwdziała. W każdym razie nie może to być czynnik stuprocentowo efektywny; przynajmniej część dużych obłoków i przynajmniej niektóre małe obłoki kolapsować muszą. Jak się bowiem za chwilę przekonamy, kolaps w obłokach molekularnych jest jedyną drogą prowadzącą do powstawania gwiazd.

Obserwacje ze wszystkich dziedzin widma składają się mianowicie na nasze, bez żadnej przesady niezachwiane, przekonanie o ścisłym związku genetycznym łączącym obłoki molekularne i gwiazdy. Po pierwsze — w pierścieniu molekularnym 4—8 kpc od centrum Galaktyki znajduje się wyjątkowo dużo gwiazd młodych. Po drugie — wśród zaobserwowanych dotychczas wielkich obłoków molekularnych nie ma ani jednego, w którego bezpośrednim sąsiedztwie nie znalazłby się gwiazdy bardzo młode. Wniosek, że tam, gdzie dziś znajdują się młode gwiazdy, jeszcze milion lat temu były tylko obłoki molekularne, narzuca się sam. Są i dalsze argumenty. Można teoretycznie przewidzieć, jak będzie wyglądało widmo zwykłej gwiazdy ciągu głównego otoczonej obłokiem. W szczególności nie warto się wdawać; istotne jest to, iż dotrze do nas od niej wyłącznie promieniowanie podczerwone niosące informację nie tylko o gwieździe, lecz i o jej otoczeniu. We wszystkich zbadanych dotychczas wielkich

obłokach znaleziono takie właśnie gwiazdowe źródła podczerwieni, czyli — zobaczono gwiazdy, które się z obłoków jeszcze nie wydostały. Przewidziano też teoretycznie i zaobserwowano poszczególnie fazy wynurzania się nowo powstałych gwiazd z macierzystych obłoków. W przypadku gwiazd masywnych główną rolę odgrywają tu szybko rozrastające się obszary wodoru zjonizowanego (H II), w przypadku gwiazd mało masywnych — wiatry gwiazdowe. I wreszcie — wśród znalezionych we wnętrzach obłoków źródeł podczerwieni znaleziono obiekty nietypowe, które najprawdopodobniej (margines niepewności jest rzeczywiście znikomy) są protogwiazdami w fazie akrecji.

Ubočnym niejako i przez nasze wstępne rozważania zupełnie nieprzewidzianym efektem działalności procesów gwiazdotwórczych są masywne międzygwiazdowe, często występujące w sąsiedztwie źródeł podczerwieni oraz obszarów H II i promieniujące olbrzymie ilości energii we wzbronionych liniach takich cząsteczek, jak tlenek krzemu, woda czy grupa hydroksylowa OH.

Jak jednak widzieliśmy, obłoki molekularne zdają się albo w ogóle nie kolapsować, albo kolapsować w tempie niewytłumaczalnie wolnym — zupełnie, jakby nie miały pojęcia o czymś takim, jak samograwitacja. Otóż z teoretycznego punktu widzenia do kolapsu pewnego obszaru (niekoniecznie całego obłoku) dochodzi wtedy, gdy zostanie w nim spełnione tzw. kryterium Jeansa, sprowadzające się z grubsza do żądania, by całkowita energia znajdującej się w tym obszarze materii była ujemna. W bilansie energetycznym ujemną jest energia grawitacyjna; dodatnimi natomiast — termiczna, ruchu obrotowego, ruchów turbulentnych i ewentualnych pól magnetycznych. Te ostatnie prawdopodobnie nie odgrywają w obłokach molekularnych większej roli; z całą pewnością nie można ich jednak pomijać przy badaniu przemian, którym podlegają obłoki H I. Mimo tak znacznego uproszczenia ciągle jeszcze nie potrafimy w ogólności przewidzieć losu turbulentnego, obracającego się obłoku. Badanie ewolucji protogwiazd bez uwzględnienia rotacji i turbulencji jest stosunkowo proste, lecz zbyt głębokiego wglądu w rzeczywistość dać nie może: w Galaktyce kłębi i obraca się dosłownie wszystko.

Astronom angielski James Jeans pokazał w 1926 r., że obłok o danej temperaturze i gęstości może kolapsować, jeśli jego masa przekracza pewną wartość krytyczną:

$$M = 30 \cdot \sqrt{\frac{T^3}{n}} M_{\odot}$$

gdzie T jest temperaturą obłoku, a n jego gęstością (w jednostkach ilości atomów na cm^3). Kryterium to ma jeszcze inną interpretację fizyczną, niż ta podana w tekście: otóż obłok zapadnie się sam, jeśli czas swobodnego spadku na jego środek jest krótszy od czasu, w jakim dźwięk przebiegnie cały obłok. W tabelce podajemy przykładowe masy Jeansa

	gęstość n [cm^{-3}]	temperatura T [K]	masa Jeansa M [M_{\odot}]
ośrodek między obłokami	0,2	8000	$5 \cdot 10^7$
obłoki H I	100	100	3000
obłoki H_2	1000	10	30

O dziwo, jednak tak dalece uproszczona teoria dość dobrze tłumaczy obserwacje wspomnianych już nietypowych źródeł podczerwonych, a jako taka zasługuje na pobicze choćby omówienie. Nie wiadomo niestety, w jakich okolicznościach może dojść do spełnienia kryterium Jeansa, czyli — do „zorientowania” się protogwiazdy we własnej tożsamości. Załóżmy więc po prostu, iż w interesującym nas obszarze zostało ono w pewnej chwili spełnione i że utworzyła się tym samym protogwiazda. Gęstość jej, a zwłaszcza gęstość centralna, zaczyna nieustannie wzrastać. Energia wewnętrzna sprężanego gazu utrzymuje się jednak na

tym samym poziomie — cała jej wytworzona przez pracę sił samograwitacji nadwyżka jest na razie bez przeszkód wypromieniowywana w dalekiej podczerwieni. Po milionkrotnym wzroście gęstości centrum protogwiazdy staje się jednak dla tego promieniowania nieprzezroczyste i zaczyna się nagrzewać. Postępujący za wzrostem temperatury wzrost ciśnienia szybko doprowadza do wstrzymania kolapsu w niewielkim obszarze centralnym, którego masa nie sięga nawet 1% M_{\odot} . Jest to tzw. pierwsze jądro hydrostatyczne, które przestaje istnieć w chwili, gdy jego temperatura osiąga poziom umożliwiający dysocjacje cząsteczek H_2 . Towarzyszący dysocjacji spadek ciśnienia rozpoczyna drugą fazę kolapsu. Wkrótce jednak tworzy się drugie jądro hydrostatyczne i protogwiazda wchodzi w fazę akrecji. Jej opadająca niemal swobodnie na jądro otoczka zmienia gwałtownie wszystkie swe parametry (prędkość opadania, temperaturę i gęstość) w bardzo cienkiej warstwie znajdującej się na powierzchni jądra i zwanej frontem akrecyjnym. Dzięki jego istnieniu masa jądra nieustannie wzrasta. Protogwiazda zaczyna świecić początkowo w podczerwieni, później, w miarę wzrostu jądra, w zakresie widzialnym i w nadfiolecie. Większa część tego promieniowania generowana jest na razie we froncie akrecyjnym dzięki zamianie energii kinetycznej opadającej otoczki w ciepło, udział samego jądra, w którym tymczasem dokonuje się kontrakcja, jest na razie niewielki. Całkowita jasność protogwiazdy w fazie akrecji może przewyższyć jasność Słońca nawet kilkaset tysięcy razy. Niemal w całości pochłaniająca to promieniowanie składowa pyłowa otoczka rozgrzewa się do tego stopnia, że w otoczeniu frontu akrecyjnego wszystkie pyły zostają zniszczone. We wnętrzu otoczki powstaje zatem strefa bezpyłowa, w której wysokoenergetyczne promieniowanie frontu akrecyjnego rozprzestrzenia się niemal bez przeszkód — by tuż ponad nią ulec całkowitemu pochłonięciu i przetworzeniu na bliską podczerwień. Do wtórnego pochłonięcia płynącej z frontu energii i częściowego jej przetworzenia na daleką podczerwień dochodzi następnie w zewnętrznych warstwach otoczki. Formujące się gwiazdy powinny się nam zatem przedstawiać jako bardzo silne źródła podczerwieni, w których widmach, w odróżnieniu od zwykłych gwiazd, widać nie jedno, lecz dwa maksima. Na chwałę naszej prostej teorii należy powiedzieć, iż widma przez nią przewidziane dobrze zgadzają się z widmami obserwowanymi u owej nietypowej klasy źródeł podczerwonych. Niestety, nawet ona nie doprowadza nas do samego ciągu głównego. W swej dotychczasowej formie nie mówi nam mianowicie, przez co zostaje ostatecznie wstrzymany napływ materii z otoczki do jądra. Problem ten praktycznie nie istnieje w przypadku protogwiazd zamieniających się w gwiazdy podobne do Słońca: w końcowych fazach ewolucji wolno kontrahujące jądro takiego obiektu zawiera ponad 99% jego masy całkowitej. Nie popelniając dużego błędu można więc stwierdzić, że proces zamiany mało masywnego obłoku w gwiazdę odbywa się bez żadnych strat. W odniesieniu do obłoków o dużych masach nie będzie to już prawdą; utrata masy może tu być bardzo znaczna. (Szacuje się, iż z obłoku o początkowej masie ok. 100 M_{\odot}

powstanie gwiazda o masie zaledwie 30 M_{\odot}). Czynnikiem prowadzącym do utraty masy jest prawdopodobnie ciśnienie promieniowania. Ponieważ jądro masywnej protogwiazdy rozpoczyna syntezę helu jeszcze w dynamicznej fazie ewolucji (patrz art. M. Kubiaka w Delcie 10/1982), w chwili, gdy ok. 70% produkowanej ogółem energii pochodzi z frontu akrecyjnego, znaczną rolę mogą też odgrywać dokładnie jeszcze nie zbadane, a pojawiające się w takich okolicznościach niestabilności. Klucz do większości z postawionych na początku pytań ukryty jest w nawet jeszcze nie raczkującej teorii ewolucji obrotujących się protogwiazd. Jest rzeczą pewną, iż los takiej protogwiazdy zależy nie tylko od ilości momentu pędu, ale i od stopnia, w jakim zostaje on podczas ewolucji zachowany. Gdyby miał on być zachowany całkowicie, tzn. gdyby gwiazda miała mieć taki sam moment pędu, co obłok, z którego powstanie — na pewnym etapie kolapsu doszłoby do nieuchronnego zrównoważenia sił odśrodkowych i grawitacyjnych. Dalszy kolaps zostałby tym samym wstrzymany. Coraz dokładniejsze, lecz ciągle jeszcze nie tak dokładne, jak byśmy sobie tego życzyli, rachunki wykazują, iż przynajmniej w pewnych wypadkach po wstrzymaniu kolapsu może dojść do podziału protogwiazdy — najczęściej na dwa fragmenty. Za jednym zamachem otrzymujemy w ten sposób układ podwójny i pozbywamy się nadmiaru momentu pędu, który zostaje zmagazynowany w ruchu obiegowym fragmentów. Moment pędu wcale nie musi jednak być zachowany, a w rzeczywistych obłokach — nawet nie może. Dla uniknięcia niejasności musimy podkreślić, że przez cały czas mówimy o tzw. lokalnym zachowaniu momentu pędu, tzn. o utrzymaniu przez każdy gram protogwiazdy tej wartości momentu pędu, która charakteryzowała go w momencie rozpoczęcia się kolapsu. W rzeczywistym gazie pojawia się tarcie, toteż szybko wirujący środek obłoku trąc o wolniej wirujące części zewnętrzne będzie mógł przekazać im część swego momentu pędu.

Prawdopodobnie w ten właśnie sposób z protogwiazd dostatecznie lepkich (tzn. takich, w których siły tarcia są wystarczająco duże) powstały gwiazdy otoczone układami planetarnymi: układy takie — to nic innego, jak zewnętrzne części protogwiazdy, do których trafiła nadwyżka momentu pędu (przypomnijmy, że w naszych dziesięciu planetach zawarte jest 98% momentu pędu Układu Słonecznego). Jak się łatwo domyśleć, ewoluująca w kierunku układu planetarnego protogwiazda przybiera kształt dysku. Front akrecyjny nadal otacza jądro, lecz nie jest już jedynym źródłem promieniowania; z porównywalną mocą świeci również rozgrzewany przez tarcie dysk. Widać to wszystko oczywiście tylko w podczerwieni, gdzie jakość technik obserwacyjnych mimo ogromnego postępu nie dorównuje jakości obserwacji optycznych, mimo to wydaje się, że zaobserwowano już co najmniej jeden układ protoplanetarny.

Na ostateczny wyrok w tej sprawie, jak zresztą i w większości spraw dziś przez nas poruszonych, trzeba będzie poczekać do wystrzelenia specjalnego satelity przeznaczonego na wyłączne potrzeby astronomii podczerwonej.



Rozwiązanie zadania F 124.

Pod działaniem sił grawitacji, lub co na jedno wychodzi, sił bezwładności, następuje przemieszczanie elektronów w obrębie metalu aż do chwili, gdy siła powstającego pola elektrycznego zrównoważy siłę grawitacji działającą na elektron.

$$eE + mg = 0$$

$$E = - \frac{m}{e} g.$$

Prowadzi to do odpowiedniego rozkładu ładunków oraz potencjału. Efekt powinien być bardzo subtelny ze względu na dużą

wartość $\frac{e}{m}$. Oszacujmy różnicę potencjałów

między osią a obwodem tarczy o promieniu

$R = 10$ cm, wirującej z prędkością kątową

$$\omega = 100 \frac{\text{obr.}}{\text{s}}. \text{ W układzie wirującym wraz}$$

z tarczą siła odśrodkowa bezwładności

równoważona jest przez siłę elektryczną

$$Ee = m\omega^2 r$$

$$E = \frac{m\omega^2 r}{e}$$

$$d\varphi = \frac{1}{2} \dot{E}R = \frac{1}{2} \frac{m\omega^2 R}{e}$$

Po obliczeniach: $U \approx 10^{-9}$ V.