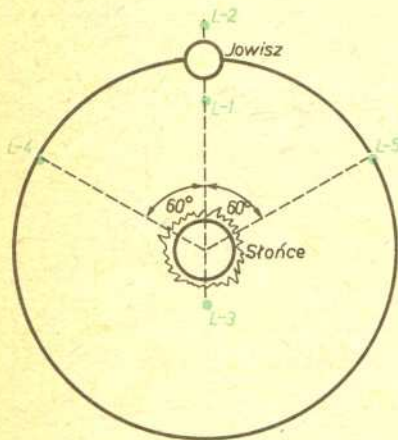


Wyberzemy się na wycieczkę w okolice największych planet naszego Układu: Jowisza i Saturna. Po minięciu orbity Marsa musimy pokonać jeszcze 500 mln kilometrów, aby dotrzeć do Jowisza. Przestrzeń ta nie jest jednak pusta. Krążą tam tysiące ciał nazwanych ze względu na niewielkie rozmiary planetoidami lub asteroidami. Pierwsza planetoida zastała odkryta w 1801 roku przez Piazziego, jest to zarazem największa ze znanych planetoid, ma średnicę około 1080 km. Typowe rozmiary planetoid wynoszą 1 km. Ocenia się, że planetoid o średnicy większej niż 1 km jest około 500 tysięcy. Mimo niewielkich mas dają one o sobie znać na różne sposoby. Odpowiedzialne są za powstanie wielkich struktur uderzeniowych, np. Caloris na Merkurym czy Hellas na Marsie. Zagrożają też i Ziemi. W 1937 roku Hermes — ciało o rozmiarach około 1 kilometra — przeszedł w odległości 800 tys. km od Ziemi. Jego zderzenie z Ziemią spowodowałoby powstanie 20 kilometrowego krateru i zniszczenie 8000 km² obszaru wokół — efekt eksplozowania superbombi o mocy stu tysięcy megaton! Na szczęście zderzenie takie jest bardzo mało prawdopodobne. Orbity planetoid wykazują też inne ciekawe, a mniej niebezpieczne własności.



Położenie pięciu punktów libracyjnych Lagrange'a względem Jowisza i Słońca (rysunek schematyczny).

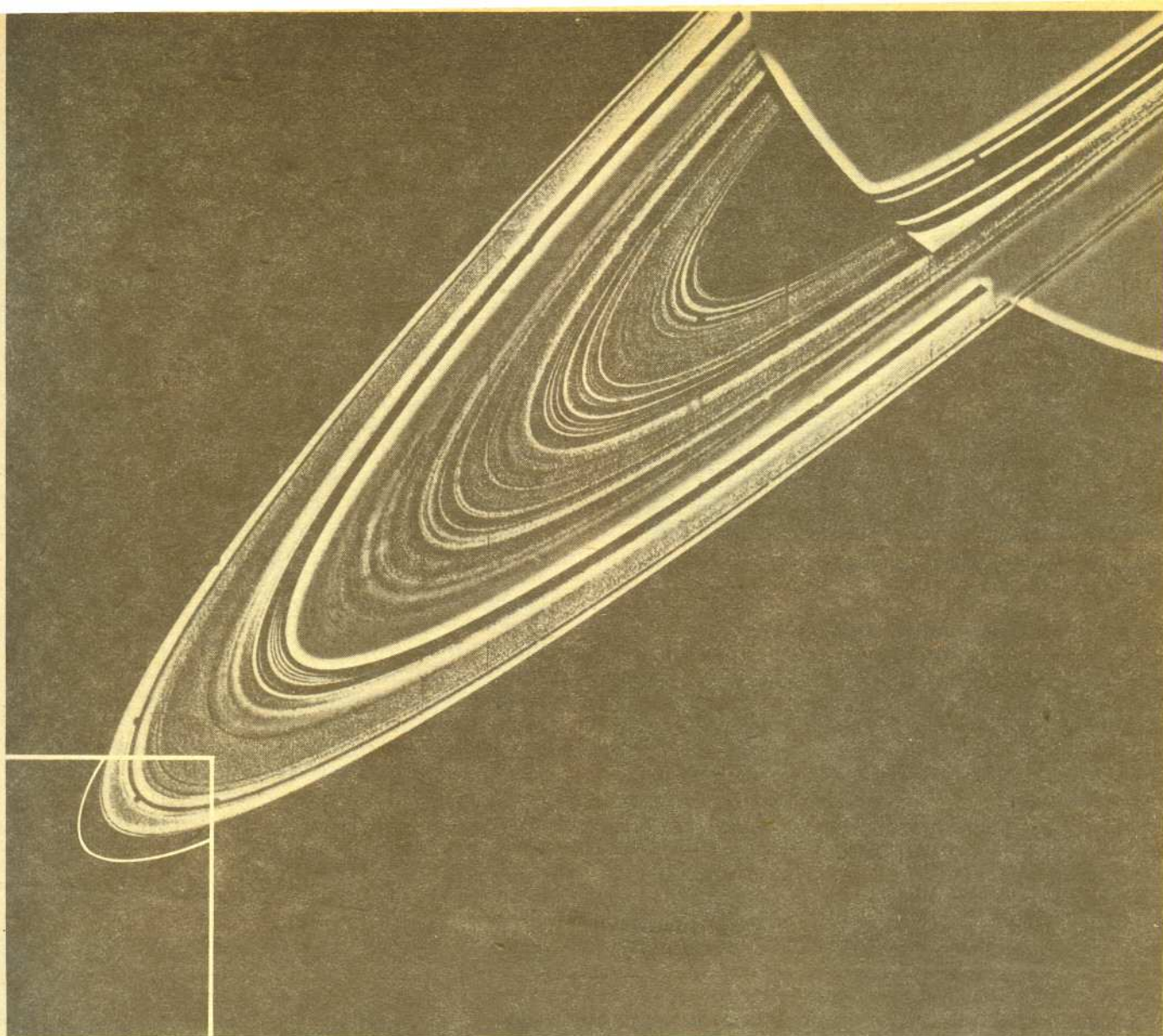
Francuski uczyony J. L. Lagrange udowodnił istnienie tzw. punktów libracyjnych. Lagrange rozważał ruch trzech ciał przyciągających się grawitacyjnie. W ogólnym przypadku wyznaczenie orbit takiego układu wymaga użycia komputera, jednakże istnieją dwa szczególne rozwiązania analityczne znalezione przez Lagrange'a. W jednym z nich trzy ciała obiegające środek masy układu pozostają przez cały czas na prostej, natomiast w drugim umieszczone są w wierzchołkach trójkąta równobocznego, przy czym rozmiary tego trójkąta mogą zmieniać się w czasie. Punkty, w których znajdują się ciała spełniające te rozwiązania, nazywane są punktami libracyjnymi. W polu grawitacyjnym dwóch dominujących wielkości ciał, jak Słońce i Jowisz, istnieje pięć punktów libracyjnych poruszających się w miarę obiegu Jowisza wokół Słońca. Ciało, które raz zacznie się poruszać wraz z punktami L_4 i L_5 , już łatwo ich okolic nie opuści. Punkty te więc działają jako swojego rodzaju pułapki na planetoidy. Planetoidy poruszające się wraz z punktami libracyjnymi L_4 i L_5 nazwano imionami bohaterów wojny trojańskiej. Zauważmy, że orbity ciał poruszających się w punktach libracyjnych L_1 , L_2 , L_3 nie spełniają zasad Keplera, choć oczywiście spełniają prawa dynamiki Newtona.

Planetoidy odczuwają bliskość Jowisza jeszcze w jeden sposób. Zaobserwowano, że ich orbity grupują się w kilkanaście pierścieni oddzielonych od siebie tzw. przerwami Kirkwooda. W przerwach

tych planetoid prawie wcale nie spotykamy. Aby wyjaśnić istnienie przerw, zauważmy, że okres obiegu dookoła Słońca ciała znajdującego się w takiej przerwie i okres obiegu Jowisza mają się do siebie jak niewielkie liczby całkowite: 1: 2, 4: 9, 3: 7, 2: 5, 3: 8, 1: 3, 2: 7. Mamy tu do czynienia z rezonansem. Przykładowo rozważmy planetoidę będącą z Jowiszem w rezonansie 1: 2. Co Jowisz zrobi jeden obieg, to planetoida dwa i zawsze w tym samym miejscu jej orbity nastąpi niewielka deformacja. Po milionach lat orbita wreszcie zmieni się na tyle, że planetoida opuści przerwę Kirkwooda. Tak więc to Jowisz oczyszcza cały czas „rezonansowe” orbity.

Następnym obiektem naszego zainteresowania będzie Io. Jest to jeden z czterech satelitów Jowisza odkrytych jeszcze przez Galileusza. Przez kilkadziesiąt lat badań naziemnych i kilkanaście lat lotów kosmicznych nie odkryto poza Ziemią aktywnego wulkanizmu. Niewielu uczonych w 1979 roku, gdy Voyager 1 zbliżał się do Jowisza i jego księżyców, spodziewało się tam te zjawiska znaleźć. Gdy pani Linda A. Morabito, członkini zespołu obsługującego misję Voyagera 1, zajmująca się opracowaniem obrazów przekazywanych przez Voyagera, zauważyła jasny łuk wystający ponad brzeg tarczy Io, próbowano najpierw wyjaśnić to jako defekt techniczny zdjęcia. Ale technika nie zawiodła, wkrótce następne zdjęcia ukazały jeszcze piękniejsze przykłady wybuchów wulkanicznych. Na Io okazują się one być codziennością. Voyager 1 zaobserwował osiem erupcji, z czego siedem jeszcze trwało, gdy cztery miesiące później do Io zbliżyła się druga sonda Voyager 2. Io okazała się być zupełnie inna, niż mogliśmy się spodziewać. Rozmiarami i masą ten satelita prawie nie różni się od wygasłego od miliardów lat i gęsto pokrytego kraterami meteorowymi Księżyca. Na Io nie odkryto natomiast choćby jednego takiego krateru. Przy takiej aktywności wulkanicznej to zresztą nic dziwnego. Jak się oblicza, materiał wyrzucony przez wulkany przykrywa co roku jednodmilimetrową warstwą całą jej powierzchnię. Niby to mało, ale na powstanie krateru meteorowego o średnicy 5 — 10 km można liczyć raz na milion lat. W ciągu tego okresu istniejące poprzednio kratery zostaną pokryte kilometrową warstwą wulkanicznego materiału. Wyjaśnienie różnicy między Io a Księżycem sprowadza się więc do odpowiedzi na pytanie, skąd się bierze energia konieczna do podtrzymania procesów wulkanicznych przez miliardy lat. Na Ziemi jest to przede wszystkim energia cieplna wydzielana przy rozpadzie radioaktywnych pierwiastków: uranu, toru i izotopu potasu ⁴⁰K. Mniejsze znaczenie ma ciepło zachowane we wnętrzu planety od czasu jej powstania. Ale we wnętrzu Io trudno spodziewać się większej zawartości pierwiastków radioaktywnych niż na Księżyca, a tym bardziej niż na Ziemi. Także początkowe ciepło Io musiałaby szybko stracić wskutek swoich małych rozmiarów. Trzeba więc znaleźć jakieś inne źródło energii! Znalaziono je. Energia jest dostarczana przez najbliższe towarzystwo, satelity: Europę i Ganimedesa, oczywiście w jedyny możliwy sposób — przez rezonans grawitacyjny. Praca Stanton Peala, Patricka Cassena i Raya Reynoldsa na ten temat ukazała się trzy dni przed zbliżeniem się Voyagera 1 do Io. W pracy tej wykazano, że Europa i Ganimedes powodują systematyczne perturbacje orbity Io. Odchylenia orbity powodują zmianę wielkości sił przyptywowych działających na Io ze strony Jowisza. Zmiany te pociągają z kolei znaczne deformacje satelity, przez co rozgrzewa się on podobnie jak zgniatana bryła metalu. Na podstawie tych rozważań uczeni wysunęli hipotezę o istnieniu czynnego wulkanizmu na Io. Niedługo czekali na jej potwierdzenie.

Ciepło powstałe w tym procesie, około $7 \cdot 10^{13}$ W, jest wydzielane z niezliczonych kraterów pokrywających około 5% powierzchni Io.

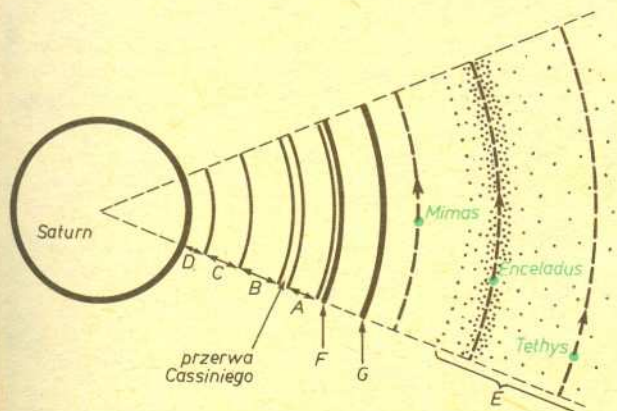


Komputerowo opracowane zdjęcie pierścieni Saturna. W ramce słabo widoczny w tej skali pierśień F.

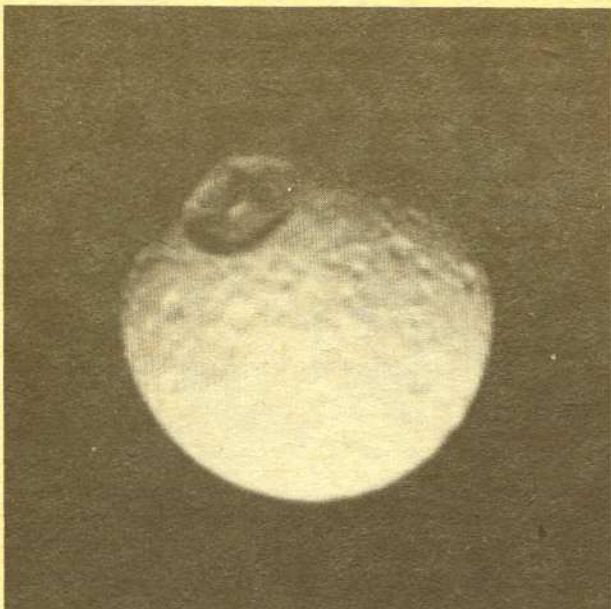
Temperatura gazów wylatujących z wulkanów waha się w granicach od 300 do 600 K. Z obserwacji przeprowadzonych z Ziemi udało się zlokalizować miejsce o największej aktywności. Okazuje się, że pokrywa się ono z wulkanem o nazwie Loki, zaobserwowanym przez Voyagera. Na podstawie analizy zdjęć i obserwacji spektroskopowych przypuszcza się, że w wulkanie tym znajduje się jezioro płynnej siarki lub SO_2 . Ciemna powierzchnia jeziora pokryta jest jasnymi plamami, jak się przypuszcza, są to kry utworzone z zestalonej siarki.

W podobny sposób, choć w mniejszym stopniu, rozgrzewane jest wnętrze Europy, następnego satelity Jowisza.

Na zakończenie naszej wycieczki odwiedzimy okolice Saturna. Celem nie jest sama planeta ani liczne jej satelity, lecz znane wszystkim pierścienie. Strukturę podobną mają także Jowisz i Uran, spodziewamy się, że kiedyś obdarzony nią będzie Mars. Pierścienie wokół Saturna są jednak najpiękniejszymi znanymi „okazami”. Istnienie ich odkrył Galilusz w 1610 roku, lecz wskutek niskiej rozdzielczości swego teleskopu mylnie je zinterpretował. Dopiero w 1665 roku Holender Christian Huygens rozpoznał te twory jako pierścienie. W końcu dziewiętnastego wieku J. E. Keeler udowodnił, że pierścienie nie stanowią jednolitego dysku, lecz składają się z wielu drobnych ciał krążących wokół Saturna. Pierścienie mają bardzo małą grubość.



Pierścienie Saturna



Satelita Mimas (zdjęcie wykonane przez Voyagera 1 z odległości 425 tys. km) — największy krater ma 100 km średnicy.

Gdy są one ustawione krawędzią do Ziemi, nie można ich dostrzec przez największe teleskopy. Obecnie ich grubość ocenia się na około 150 metrów.

Zajmijmy się najpierw trzema najlepiej widocznymi pierścieniami oznaczonymi literami *A*, *B*, *C*. Zewnętrzna krawędź pierścienia *A* znajduje się 78600 km od Saturna (licząc od górnej warstwy chmur) i ma szerokość 17400 km. Wewnątrz tego pierścienia, oddzielony tzw. przerwą Cassiniego o szerokości 4000 km, znajduje się najjaśniejszy z pierścieni — pierścień *B*.

Jego szerokość wynosi 25300 km. Z kolei wewnątrz pierścienia *B* znajduje się pierścień *C* o szerokości 16500 km. Wewnętrzny brzeg pierścienia *C* znajduje się 12900 km ponad powłoką chmur.

Chcąc obejrzeć pierścienie najlepiej wznieść się ponad ich płaszczyznę. Widać je będzie oświetlone Słońcem jak na dłoni. Uderza nas charakterystyczna struktura. Pierścień *B* przypomina przecięty pień drzewa z setkami słojów lub płytę gramofonową — składa się on bowiem z setek wąskich kręgów. Podobnie zbudowane są pierścienie *A* i *C*, choć kręgi są tu szersze i jest ich mniej. Zauważymy także szersze przerwy, m.in. przerwę Enckego w pierścieniu *A*.

Jak wytłumaczyć istnienie kręgów? Co spowodowało ułożenie się miliardów bryłek materii w prawie idealnie równy krąg długości ponad miliona kilometrów? Geneza ich jest analogiczna jak przerw Kirkwooda w pasie asteroidów. Wąskie ścieżki w pierścieniach oczyszczane są przez liczne satelity Saturna. Przykładowo Mimas obiegający planetę co 0,94 doby jest w rezonansie 1:2 z bryłkami w przerwie Cassiniego przy zewnętrznym skraju pierścienia *B*. Za istnienie pozostałych kręgów odpowiedzialny jest inny rezonans z Mimasem lub z innym satelitą. Nawet jeśli zderzenia spowodują wypchnięcie którejs z bryłek tworzących krąg w puste miejsce, to jednak wskutek oddziaływania odległego satelity grudka znowu zostanie usunięta do najbliższego kręgu.

Czy opisany powyżej mechanizm tłumaczy strukturę pierścieni? Częściowo tak. Zwłaszcza jeśli chodzi o pierścienie *A* i *C*.

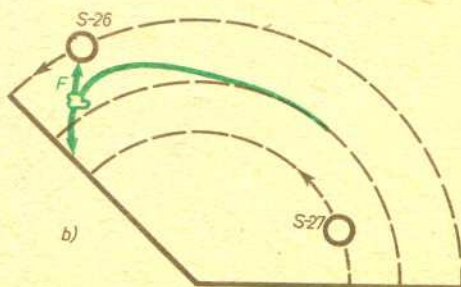
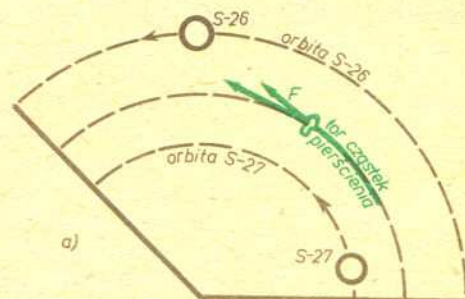
Trudniejszy problem sprawia pierścień *B*. Ucnieni podejrzewają, że działa tam jeszcze jeden mechanizm. Ale o tym później.

Omówimy teraz pierścienie *E*, *G*, *F* znajdujące się na zewnątrz pierścienia *A*. Pierścień *E* położony jest najdalej od Saturna.

Jest on rzadki, ale bardzo szeroki, rozciąga się od odległości 120 tys. km od planety aż za orbitę Tethys. O satelicie tym warto powiedzieć, że ma dwóch towarzyszy o rozmiarach kilkudziesięciu kilometrów poruszających się w punktach Lagrange'a L_4 i L_5 .

Materia w pierścieniu *E* pochodzi prawdopodobnie z powierzchni satelitów planety. Być może część materii wyrzucona została przez hipotetyczne wulkany wodne Enceladusa. Jest to niewielki glob o średnicy 510 km, poruszający się po orbicie o promieniu 238 tys. km. Z daleka przypomina on kryształowy żyrandol, odbija bowiem prawie całkowicie padające nań promienie. Możliwe, że Enceladus jest saturnijskim odpowiednikiem Io. Rezonans 2:1 z Dionem może być źródłem ciepła wulkanów wodnych — gejerów, które wyrzucając z wnętrza globu masy wody tworzą nową skorupę satelity, a także przyczyniają materiału pierścieniowi *E*.

Pierścienie *F* i *G* nie są podobne do dotychczas omawianych. Są znacznie węższe. Szerokością przypominają raczej kręgi któregoś z większych pierścieni. Tego nie da się wytłumaczyć za pomocą rezonansów. Muszą tu działać inne czynniki utrzymujące materię w wąskim pasie. W pobliżu pierścienia *F* odkryto dwa małe satelity oznaczone w myśl przyjętych zasad: 1980S26 i 1980S27 (pierwsze cztery cyfry podają rok odkrycia, S — oznacza Saturna, a liczba za nim jest numerem satelity). Satelita 1980S26 o średnicy około 200 km porusza się po orbicie nieco większej niż pierścień *F*. Z kolei satelita 1980S27 (o średnicy 220 km) krąży nieco bliżej planety niż pierścień. Peter Goldreich i Scott Tremaine wysunęli następującą hipotezę: pierścień *F* utrzymywany jest w całości dzięki *gravitacyjnemu odpychaniu* jego materii przez satelity S26 i S27. Cóż to za zjawisko? Każdy przecież wie, że siły grawitacyjne powodują zawsze przyciąganie się ciał. Rzeczywiście siły są przyciągające, ale w efekcie powodują oddalanie się ciał! Rozważmy dokładnie ten efekt. Satelita S26 porusza się nieco dalej niż pierścień *F*, a więc jego prędkość jest mniejsza niż bryłek tworzących pierścień. Rysunek *a* obrazuje sytuację, gdy satelita doganiający jest przez chmurę cząstek pierścienia *F*. Dopóki satelita jest z przodu, siła jego przyciągania przyspiesza cząstki pierścienia, zyskują one większą energię i przechodzą na nieco wyższą orbitę. Gdy wreszcie cząstki przegonią satelitę (rys. *b*), sytuacja



Mechanizm grawitacyjnego odpychania (rysunek schematyczny).

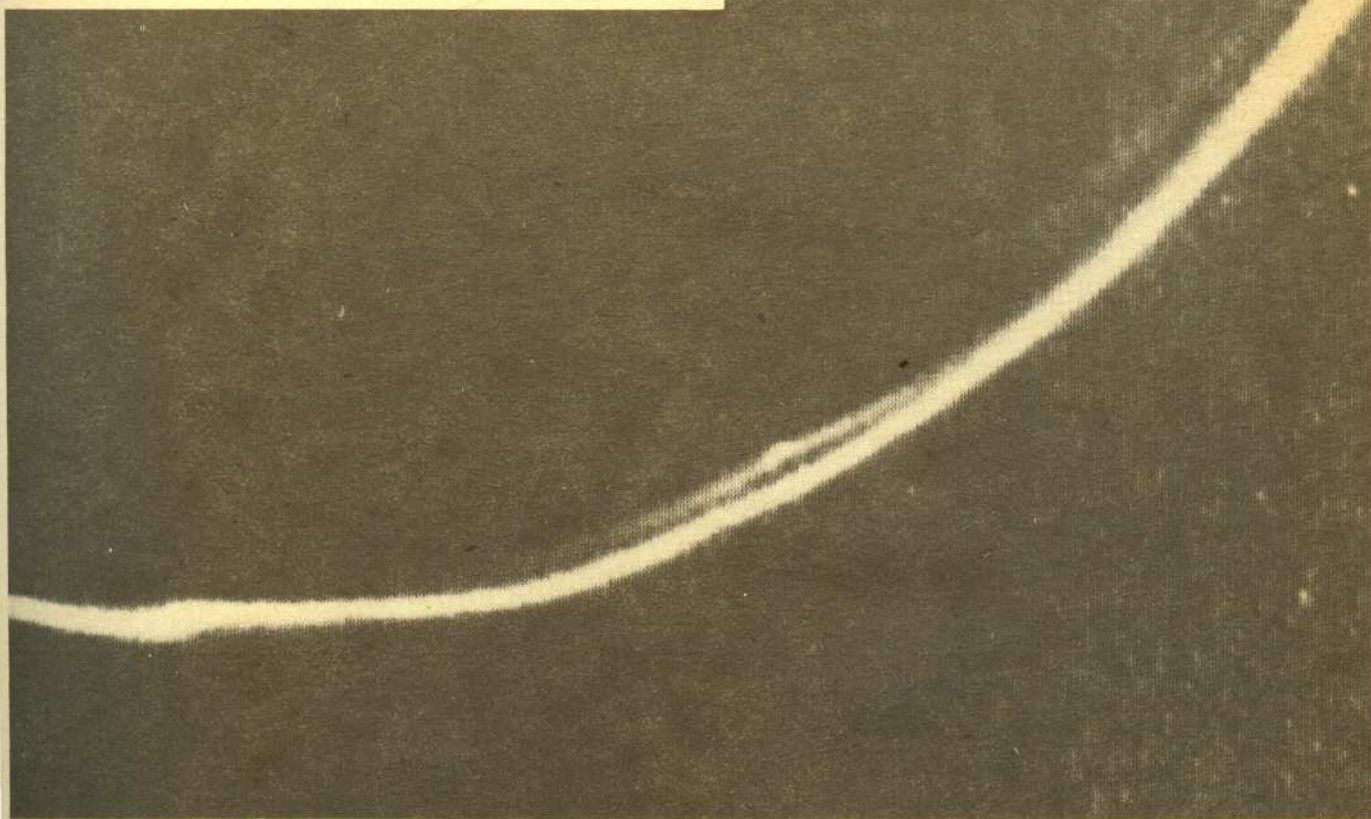
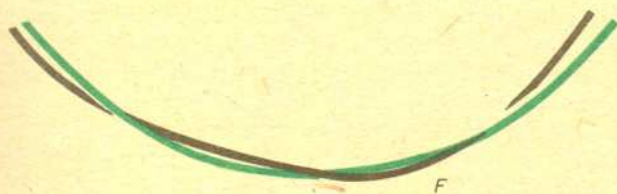
się odwraca — przyciąganie satelity hamuje je i cząstki zaczynają spadać na niższą orbitę. Ponieważ w czasie hamowania cząstki są bliżej satelity, więc hamowanie jest większe niż poprzedzające je przyspieszenie, ostatecznie cząstki znajdują się na niższej orbicie niż poprzednio. Ale oto zbliża się satelita S27. Jego orbita przebiega poniżej pierścienia, więc porusza się on szybciej niż cząstki. Z początku siła jego przyciągania hamuje cząstki, które spadają na jeszcze niższą orbitę, ale po minięciu ich z nadmiarem je przyspiesza przerzucając na nieco wyższą orbitę. Później znowu S26 zepchnie je niżej i tak od milionów lat satelity „zaganiają” obłoki pyłu tworząc wąski pierścień *F*. Stąd uczeni nazwali te satelity pasterkami pierścieni.

Przedstawiony mechanizm grawitacyjnego odpychania znalazł zastosowanie także i do pozostałych pierścieni, np. wyraźny zewnętrzny brzeg pierścienia *A* jest wynikiem działania satelity 1980S28. Wszelkie cząstki wyrzucone z pierścienia wskutek zderzeń „zagania” on z powrotem na swoje miejsce.

Grawitacyjne odpychanie zrobi więc pewnie karierę, ale nawet ono nie wytłumaczy następującego faktu. Popatrzmy z bliska na pierścień *F*. Okazuje się, że jest on zbudowany z kilku wąskich smug spiralnie ze sobą skręconych niby pokrętki sznura lub spirala DNA — najważniejszego dla życia związku. Voyager 1 odkrył życie wokół Saturna — żartowali z tego powodu niektórzy

uczni uczestniczący w opracowywaniu danych. Inni byli mniej skłonni do żartów. „Splatanie” się smug w pierścieniu *F* nie zgadza się z prawami mechaniki z wielu względów. Ale te smugi na pewno stosują się do tych praw. To raczej my ich nie rozumiemy wystarczająco dobrze — powiedział jeden z uczonych.

Na zakończenie zajmijmy się problemem powstania pierścieni. Chociaż nie potrafimy tego problemu rostrzygnąć, to warto zauważyć, że granica Roche’a znajduje się niedaleko od zewnętrznego skraju pierścienia *A*. Pierścienie więc mogły powstać przez rozpad satelity, który zbyt blisko zbliżył się do Saturna. W myśl innej hipotezy pierścienie są materiałem pozostałym po utworzeniu Saturna i jego księżyców. Ich położenie wewnątrz granicy Roche’a wyjaśnia, dlaczego nie utworzyły one jednego ciała. Kończymy naszą wycieczkę po Układzie Słonecznym w poszukiwaniu oddziaływań między różnymi ciałami Układu. W okolicy Saturna znaleźliśmy najwięcej przykładów: rezonanse między satelitami, satelity towarzyszące w punktach Lagrange’a, setki rezonansów między satelitami a cząstkami pierścieni, odpychanie grawitacyjne. Zjawiska te pokazują, jakimi niewidzialnymi niciami jedno ciała wpływają na ruchy innych. Nici te są cienkie, lecz przez miliardy lat doprowadziły do zsynchronizowania ruchów wielu ciał. Układ Słoneczny powoli upodabnia się więc do zegara, w którym każdy trybik zazębiony jest z pozostałymi.



Pierścień *F* złożony ze skręconych smug (zdjęcie i schemat).