

Struktury dyssypacyjne — nowe spojrzenie na rzeczywistość

Prof. dr Bogdan BARANOWSKI

członek korespondent PAN

Uwagi historyczno-filozoficzne

Rozkład w przestrzeni elementów składowych układu fizycznego i związane z nim konsekwencje — czyli struktura układu — stanowią podstawowy czynnik poznawczy i to zarówno z mikroskopowego, jak i makroskopowego punktu widzenia. Jaki jest rozkład elektronów w atomach, jak położone są względem siebie atomy w cząsteczce, jakie jest ułożenie elementów sieci krystalograficznej — oto przykłady pytań dotyczących struktury. Odpowiedzi na te pytania determinują wiele własności układów makroskopowych. Wymienione przykłady dotyczą stanów, w których czas nie odgrywa zasadniczej roli; są to układy statyczne.

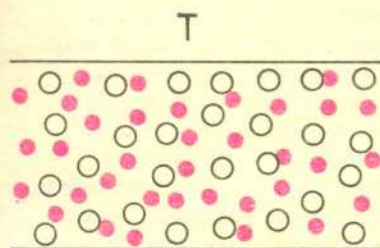
Czym charakteryzują się natomiast stany dynamiczne, w których własności układu ulegają zmianie w czasie? II zasada termodynamiki orzeka, że stany takie zmierzają samorzutnie do stanów statycznych, tj. niezależnych od czasu, zwanych stanami równowagi termodynamicznej. Statystyczna interpretacja II zasady termodynamiki zaproponowana przez Boltzmann'a widzi w dążeniu do równowagi termodynamicznej przejście od stanów mniej do bardziej prawdopodobnych. W makroskopowym ujęciu oznacza to przechodzenie od stanów bardziej uporządkowanych do mniej uporządkowanych. Ta tendencja do maksymalizacji chaosu leży u podstaw koncepcji Boltzmann'a o tzw. śmierci cieplnej Wszechświata. Ta myśl wyraża katastroficzną wizję przyszłości, w której zanikną wszelkie stany dynamiczne.

W ujęciu Boltzmann'a każdy proces nieodwracalny stanowi część realizacji tego ogólnego programu dążenia do wzrostu nieporządku, do destrukuryzacji otaczającej nas rzeczywistości. Ta prosta i logiczna koncepcja kłóci się pozornie z obrazem, jaki obserwujemy w przyrodzie żywej. Tutaj w toku ewolucji z prostych układów powstawały struktury coraz bardziej złożone.

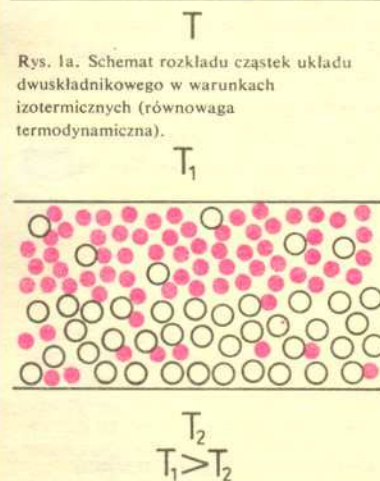
Ten strukturotwórczy charakter układów biologicznych nie jest sprzeczny z II zasadą termodynamiki. Takie układy są z reguły otwarte względem otoczenia, podczas gdy zasada dążenia do maksimum nieporządku dotyczy układów zamkniętych. Prawdą jest natomiast również, że II zasada w interpretacji Boltzmann'a nie jest w stanie nam wytłumaczyć, dlaczego ustroje żywe istnieją i dlaczego ich rozwój stanowi nieprzerwane dążenie do coraz wyższych struktur. Tak więc pomiędzy tradycyjnym podejściem Boltzmann'a do równowagi termodynamicznej układów zamkniętych a strukturami powstającymi w przyrodzie ożywionej wydaje się istnieć wyraźna luka wymagająca nowego podejścia. Jednym z aspektów tego zagadnienia jest pytanie — jak wytłumaczyć z fizyko-chemicznego punktu widzenia powstawanie ustrojów żywych?

Proces nieodwracalny to niekonicznie tylko wzrost nieporządku

Dążeniu do równowagi termodynamicznej towarzyszy wyrównywanie różnic parametrów intensywnych układu, np. różnic temperatury w procesie przewodnictwa ciepła, różnic stężeń (dokładniej potencjału chemicznego) w procesie dyfuzji, różnic szybkości makroskopowej w procesie przepływu lepkościowego, różnicy powinowactwa chemicznego w reakcji chemicznej. Każdy z wymienionych procesów ma charakter nieodwracalny, tzn. zachodzi jednokierunkowo z tendencją do niwelowania wymienionych wyżej różnic. Jeżeli dany proces transportu przeprowadzimy w układzie zamkniętym, to niwelacja taka jest równoznaczna ze wzrostem nieporządku. Ten wzrost nieporządku w procesie nieodwracalnym może jednak nie wyczerpywać całości zagadnienia, jeśli układ jest otwarty. Rozpatrzmy tutaj jako prosty przykład stacjonarne przewodzenie ciepła w układzie złożonym z dwóch składników (np. dwa różne związki chemiczne lub dwa izotopy tego samego pierwiastka). Rys. 1a przedstawia schematycznie sytuację przed przyłożeniem różnicy temperatury do równoległych płytek metalowych, między którymi znajduje się wspomniana dwuskładnikowa mieszanina. W tym stanie mieszanina jest jednorodna, tzn. względny rozkład obu składników jest całkowicie losowy. Jeżeli temperatura górnej płytki (T_1) będzie wyższa niż temperatura płytki dolnej (T_2), to po pewnym czasie we wzajemnym rozkładzie składników zajdzie zmiana przedstawiona schematycznie na rys. 1b. Składnik cięższy będzie wzbogacony w okolicy płytki o niższej



Rys. 1a. Schemat rozkładu cząstek układu dwuskładnikowego w warunkach izotermicznych (równowaga termodynamiczna).

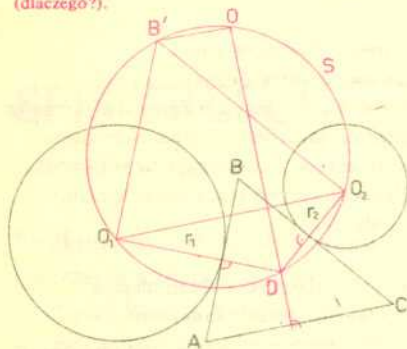


Rys. 1b. Schemat rozkładu cząstek układu dwuskładnikowego w stacjonarnych warunkach politermicznych.



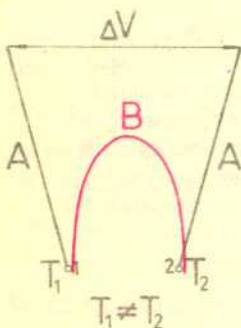
Rozwiązanie zadania M 305.

Niech środkami podanych w zadaniu okręgów będą O_1 i O_2 i niech B' będzie takim punktem, że $O_1B' \parallel AB$, $O_2B' \parallel CB$. Ponieważ $\angle O_1B'O_2 = \angle ABC$, więc B' porusza się po pewnym łuku okręgu s . Równocześnie odległość B' od prostej AB jest stała i równa r_1 , podobnie odległość B' od prostej BC jest stała równa r_2 . Wynika stąd, że i odległość B' od prostej AC jest stała (dlaczego?).



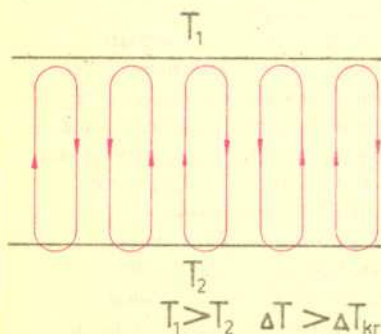
Niech D będzie punktem przecięcia prostych $O_1D \perp AB$ i $O_2D \perp BC$. Ponieważ kąty $B'O_1D$ i $B'O_2D$ są proste, D leży na okręgu s . Niech teraz O będzie punktem okręgu s takim, że $OD \perp AC$. Mamy $\angle O_1DO = \angle BAC = \text{const}$ i wobec tego łuk O_1O okręgu s jest stały, a więc punkt O pozostaje nieruchomy przy ruchu $\triangle ABC$.

Równocześnie $\angle B'OD = \angle B'O_2D = \frac{\pi}{2}$ i $B'O \parallel AC$, a więc odległość O od boku AC pozostaje stała, czyli AC ślizga się po pewnym okręgu o środku O .



Rys. 2. Schemat termopary dla ilustracji efektu Seebecka (powstawanie różnicy potencjału elektrycznego w warunkach politermicznych).

O niestabilności Benarda pisaliśmy w Delcie 4/1981.



Rys. 3. Schemat komórek konwekcyjnych w niestabilności Benarda.

temperaturze, a składnik lżejszy będzie gromadził się przy płytce o temperaturze wyższej. Procesowi przewodnictwa cieplnego między płytkami o różnej temperaturze towarzyszy więc proces częściowego rozdziału składników wypełniających przestrzeń między płytkami. Proces ten zwany jest termodyfuzją. Oznacza on, że całkowicie nieuporządkowany w warunkach stałej temperatury układ przechodzi w warunkach istnienia różnicy temperatury w układ częściowo uporządkowany. A zatem nieodwracalny proces przewodnictwa ciepła jest nie tylko związany z dyssypacją (rozpraszaniem) energii — która musi być ciągle dostarczana z zewnątrz w celu utrzymania stałej różnicy temperatur między płytkami — ale równocześnie prowadzi do zmniejszenia istniejącego pierwotnie nieporządku. Jest to przykład zjawiska, w którym część energii swobodnej traconej w procesie nieodwracalnym jest zużywana na porządkowanie układu — to zaś jest równoznaczne z częściowym magazynowaniem energii.

W obrębie tzw. liniowej termodynamiki procesów nieodwracalnych znamy wiele przykładów podobnych efektów, zwanych efektami krzyżowymi. Wspomnijmy tu jeszcze o jednym, który może być bardziej przekonujący, jeżeli chodzi o użyteczną zamianę energii towarzyszącą procesowi nieodwracalnemu. Chodzi tutaj o tzw. efekt Seebecka, przedstawiony schematycznie na rys. 2. Metale A i B są ze sobą połączone w punktach 1 i 2, które utrzymujemy w różnych temperaturach. Nieodwracalnemu procesowi przepływu ciepła między spoinami towarzyszy powstanie różnicy potencjału elektrostatycznego na końcach obu drutów metalu A . Ta różnica potencjałów może być źródłem energii elektrycznej. Tak więc i tutaj mamy do czynienia z częściową użyteczną zamianą energii w procesie nieodwracalnym. Ponownie zatem w wyniku procesu transportu powstaje nie tylko nieporządek, ale równocześnie obserwujemy powstanie elementów struktury.

Struktury, które powstają w wyniku dyssypacji energii swobodnej, nazywamy strukturami dyssypacyjnymi. W odróżnieniu od omawianych na wstępie struktur statycznych jest to strukturyzacja dynamiczna, opłacana przez zachodzący równocześnie proces nieodwracalny — i najczęściej utrzymywana tak długo, jak długo zachodzi ten proces. Struktury takie są drogie. Efektywność procesu rozdzielnego w termodyfuzji lub procesu zamiany energii wewnętrznej w elektryczną w efekcie Seebecka jest bardzo mała. Istotne jest tutaj przede wszystkim to, że struktury takie powstają spontanicznie w równie spontanicznych procesach dyssypacji energii swobodnej. Jest to pozornie sprzeczne z klasyczną interpretacją II zasady, podaną przez Boltzmann'a. Należy jednak z całym naciskiem stwierdzić, że omawiane wyżej stacjonarne struktury dyssypacyjne wymagają układów otwartych, w których przebiegają stacjonarne procesy nieodwracalne podtrzymujące istnienie tych struktur.

W powyższych przykładach prostych struktur dyssypacyjnych odległość od stanu równowagi (w przypadku termodyfuzji i efektu Seebecka — wartość różnicy temperatur) nie odgrywała zasadniczej roli. Te efekty pojawiają się nawet przy bardzo małych odchyleniach od równowagi termodynamicznej. Daleko bardziej interesujące są struktury dyssypacyjne, które powstają w stanach dalekich od równowagi termodynamicznej. Pojawiają się one przy przekroczeniu pewnej krytycznej odległości od stanu równowagi — mają więc charakter nieciągłych przejść fazowych znanych z klasycznej termodynamiki. Rozpatrzmy tutaj bardzo prosty przykład z hydrodynamiki, znany pod nazwą niestabilności Benarda. Rys. 3 przedstawia schematycznie to zagadnienie. Między dwiema równoległymi płytkami, położonymi poziomo znajduje się ciecz. Płytkę dolną utrzymywana jest w temperaturze wyższej niż płytka górna. Jeżeli różnica $T_1 - T_2$ leży poniżej pewnej krytycznej wartości ΔT_{kr} , to w cieczy następuje proces przewodnictwa ciepła bez ruchu cieczy. Natomiast przy różnicy temperatury większej od wartości krytycznej pojawia się prąd konwekcyjny, który jest schematycznie zaznaczony na rys. 3. Powstają bardzo symetryczne komórki konwekcyjne, które w porównaniu z cieczą będącą w bezruchu są niewątpliwie nowym elementem struktury. To częściowe uporządkowanie cieczy następuje dopiero po przekroczeniu pewnej odległości od stanu równowagi termodynamicznej. Tak więc przewodzenie ciepła między płytkami może się odbywać w dwojaki sposób:

w sposób bezkonwekcyjny — jeżeli jesteśmy blisko stanu równowagi, z udziałem konwekcji — jeżeli przekroczyliśmy pewną krytyczną wartość różnicy temperatury. Ta krytyczna wartość zależy od geometrii układu i własności cieczy.

Reakcje chemiczne mogą mieć charakter periodyczny

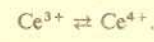
Pojedyncza reakcja chemiczna przebiega w czasie w sposób monotoniczny, tj. gdy startujemy z pewnego odchylenia od położenia równowagi w wyniku reakcji zbliżamy się do niej jednokierunkowo. Inna może być sytuacja, jeżeli ma miejsce sprzężenie między kilkoma reakcjami chemicznymi i jeżeli odchylenie od stanu równowagi jest dostatecznie duże. Może się



Rys. 4. Schemat przestrzennej struktury dyssypacyjnej w reakcji Bielousowa-Zabotyńskiego.

wtedy okazać, że stężenie niektórych składników reagujących zmienia się w czasie nie monotonicznie, a periodycznie. Periodyczność może dotyczyć nie tylko zależności od czasu, ale może następować również w przestrzeni. Takie czasowo-przestrzenne „fale chemiczne” można uważać za wyraz struktury powstającej w toku dyssypacji energii swobodnej, jaka ma miejsce w każdej spontanicznej reakcji chemicznej. Obserwowany wzrost uporządkowania jest tym razem „opłacany” przez degradację energii chemicznej.

Bardzo efektywnym przykładem chemicznej struktury dyssypacyjnej jest reakcja wykryta w r. 1959 w Związku Radzieckim przez Bielousowa, a później obszerniej badana przez Żabotyńskiego i odtąd wiązana z nazwiskami obu badaczy. Czasowo-przestrzenną periodyczność obserwuje się tutaj w procesie redukcji i utleniania jonów cerowych:



Reakcję prowadzi się w roztworze wodnym siarczanu ceru, bromku potasu, kwasu malonowego i kwasu siarkowego. Dodając do tego roztworu feroinę jako wskaźnik, obserwujemy nadmiar jonów czterowartościowego ceru jako zabarwienie niebieskie, natomiast nadmiar jonów trójwartościowego ceru daje zabarwienie czerwone roztworu. Sporządzając roztwór o odpowiednich stężeniach wspomnianych składników możemy zmianę barwy z czerwonej na niebieską obserwować w danym obszarze roztworu jako funkcję czasu (periodyczność w czasie) lub w danym momencie jako uporządkowaną strukturę przestrzenną (periodyczność w przestrzeni). W tym ostatnim przypadku pewne obszary roztworu będą zabarwione na czerwono, inne natomiast na niebiesko. Prowadząc omawianą reakcję w probówce możemy obserwować zachowanie przedstawione schematycznie na rys. 4. W równoległe położonych warstwach następują kolejne zmiany barw niebieskiej i czerwonej.

Reakcja Bielousowa-Żabotyńskiego jest tylko jednym z wielu przykładów periodycznego zachowania się procesów chemicznych. Wiele takich przykładów zna elektrochemia jak również kinetyka procesów katalitycznych. Podobny przebieg mogą mieć reakcje związane z wytwarzaniem nowych faz.

A co z biologią?

Periodyczne przebiegi czasowo-przestrzenne są potocznym zjawiskiem w biologii. Rytmiczne zmiany różnych form aktywności organizmów żywych począwszy od bicia serca u ssaków do powtarzających się procesów podziału komórkowego w prymitywnych formach życia, dają wiele przykładów strukturyzacji czasowo-przestrzennej w ustrojach żywych. Ponieważ chemizm jest motorem tych przebiegów, dlatego w prostych modelach chemicznych struktur dyssypacyjnych szukać należy pierwowzorów tego bogactwa struktur, które prezentuje nam przyroda żywa. Każdy żywy ustrój istnieć może jedynie jako układ otwarty, wymieniający składniki chemiczne i energię z otoczeniem. Mamy tutaj zatem spełniony ten sam warunek, który był tak istotny przy omawianiu prostych struktur dyssypacyjnych. Reakcje chemiczne przez możliwe sprzężenia (powiązanie ze sobą różnych etapów elementarnych), przez szeroki wachlarz bardzo szybkich czy powolnych przebiegów, przez dużą czułość poszczególnych reakcji na obecność katalizatorów, stwarzają prawdziwą dżunglę możliwości dla powstawania struktur dyssypacyjnych w stanach dalekich od równowagi termodynamicznej. Jeżeli dodamy do tego bogactwo struktur, zwłaszcza przestrzennych, charakteryzujące związki organiczne, a w szczególności układy makromolekularne — zrozumiemy, że życie powstać mogło tylko na bazie chemii organicznej, zwłaszcza wielkocząsteczkowej. Lapidarnie rzecz ujmując można wszystkie układy biologiczne uważać za struktury dyssypacyjne, powstałe w układzie otwartym, jaki stanowi nasza Ziemia w odniesieniu do Słońca. Promieniowanie elektromagnetyczne zasila energetycznie w sposób ciągły naszą Ziemię. W strumieniu tego promieniowania, którego temperatura daleka jest od temperatury atmosfery ziemskiej, możliwe są reakcje chemiczne, zwłaszcza fotochemiczne, które prowadzą do nowych układów o wysokim stopniu strukturyzacji. Każdy etap rozwojowy życia stanowi w pewnym stopniu nową, wyższą strukturę dyssypacyjną. Zauważmy przy tym, że tylko niewielka część padającego na Ziemię promieniowania słonecznego przekształcana jest w biologiczne struktury dyssypacyjne. Spotykamy tutaj zatem tę samą cechę, którą zauważyliśmy już w prostych strukturach dyssypacyjnych — mianowicie wysoki koszt uporządkowania następującego w toku procesów nieodwracalnych. Z drugiej jednak strony należy zauważyć, że powstające w procesach nieodwracalnych struktury „magazynują” w pewnym stopniu przynajmniej część tej energii, która przekształciłaby się w mniej efektywne formy, gdyby struktury dyssypacyjne nie powstawały. Przypomnijmy tutaj proces termodyfuzji, gdzie małą wprawdzie, ale wymierną część energii degradującej się w procesie przewodnictwa cieplnego „ratujemy” przez częściowy rozdział składników, co stanowi pewien zasób energii swobodnej, możliwej do użytecznego przekształcenia. Taką samą rolę odgrywają ustroje żywe w stosunku do promieniowania



Rozwiązanie zadania M 306.
 Mamy $x \cdot 11 \dots 1 - y \cdot 11 \dots 1 =$
 $= z^2(11 \dots 1)^2$ i ponieważ $11 \dots 1 =$
 $= \frac{10^k - 1}{9}$, więc
 $9x(10^{2n} - 1) - 9y(10^n - 1) = z^2(10^n - 1)^2$,
 czyli $9x(10^n + 1) - 9y = z^2(10^n - 1)$, skąd
 $(9x - z^2)10^n = 9y - 9x - z^2$ dla dwóch
 różnych wartości n :
 $(9x - z^2)10^{n+1} = 9y - 9x - z^2 = (9x - z^2)10^{n+2}$.
 Wynika stąd, że $9x = z^2$ i $9y - 9x - z^2 = 0$,
 skąd $x = \frac{y}{2} = \left(\frac{z}{3}\right)^2$. Ponieważ równocześnie
 $0 \leq x, y, z \leq 9$ mamy dwa rozwiązania 1, 2, 3
 i 4, 8, 6 spełniające podane równanie dla
 wszystkich naturalnych n .

$$\text{Gdy } n = 1, \text{ mamy po prostu } \sin\left(\pm \frac{\pi}{4}\right) = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Załóżmy teraz, że wzór (*) zachodzi dla dowolnego ciągu (e_1, \dots, e_n) o długości n . Rozpatrzmy ciąg (e_1, \dots, e_{n+1}) . Mamy

$$\begin{aligned} 2 \cdot \left(e_1 + \frac{e_2}{2} + \dots + \frac{e_{n+1}}{2^n} \right) \frac{\pi}{4} &= \\ &= e_1 \frac{\pi}{2} + e_1 \left(e_1' + \dots + \frac{e_n'}{2^{n-1}} \right) \frac{\pi}{4}, \end{aligned}$$

gdzie $e_i' = \frac{e_{i+1}}{e_i}$. Oznaczając $x = \left(e_1' + \dots + \frac{e_n'}{2^{n-1}} \right) \frac{\pi}{4}$ mamy

$$\cos\left(e_1 \frac{\pi}{2} + e_1 x\right) = -\sin x = -\frac{1}{2} e_1' \sqrt{2 + f_1' \sqrt{2 + \dots + f_n' \sqrt{2}}}.$$

Ale $f_1' = f_{i+1}$, $e_1' = f_2$ i ze wzoru $2 \sin \frac{t}{2} = \pm \sqrt{2 - 2 \cos t}$ mamy

$$\begin{aligned} 2 \sin \left(\left(e_1 + \frac{e_2}{2} + \dots + \frac{e_{n+1}}{2^n} \right) \frac{\pi}{4} \right) &= \\ &= e_1 \sqrt{2 + e_1' \sqrt{2 + \dots + f_n' \sqrt{2}}} = \\ &= f_1 \sqrt{2 + f_2 \sqrt{2 + \dots + f_{n+1} \sqrt{2}}}. \end{aligned}$$

Wśród dotychczas odkrytych planetoid, tych które otrzymały nazwy własne, oprócz numeru, 12 ma polskie imiona. Są to:

nazwa	numer	średnica w km
Dembowska	349	290
Valeska	610	24
Wanda	1057	34
Połonia	1112	57
Sniadecka	1262	57
Varsavia	1263	88
Banachiewiczza	1286	50
Bronisława	1315	66
Copernicus	1322	15
Wawel	1352	38
Zamenhof	1462	21
Posnania	1572	55

Faeton — syn Heliosa, który pozwolił mu przez jeden dzień powozić rydwanem słonecznym. Niewprawy Faeton spowodował katastrofę — uderzył w Ziemię, co pociągnęło za sobą m.in. wyparowanie oceanów i zamianę bujnie kwitnącej północnej Afryki w puszynię.

słonecznego. Bez ich udziału degradacja energii promieniowania byłaby większa. Struktury dyssypacyjne „ratują” więc w pewnym sensie to, co daje się uratować w warunkach nieprzerwanej degradacji energii.

Koncepcja integrująca różne dyscypliny

Pojęcie struktury dyssypacyjnej nie ogranicza się swoim zasięgiem do nauk przyrodniczych. Fakt powstawania nowych form strukturalnych — zwłaszcza w stanach dalekich od równowagi — może być ewidentny np. w różnych przejawach działalności ludzkiej. Nowe struktury organizacyjne w życiu społecznym, gospodarczym czy kulturalnym nie są pozbawione podobieństw z przedstawionymi wyżej prostymi modelami struktur dyssypacyjnych w fizyce i chemii. Wspólne jest działanie w warunkach otwartych układów, wymieniających informację i dobra materialne, wspólny jest przebieg w warunkach degradacji energii swobodnej, której tylko część przekształcamy w postać trwałych „struktur dyssypacyjnych” w postaci dzieł sztuki, różnych obiektów materialnych itp. Czy rozwój kulturalno-cywilizacyjny ludzkości nie zmierza również do coraz to wyższych struktur? Oczywiście zahaczamy tutaj wyraźnie o aspekt filozoficzny koncepcji struktur dyssypacyjnych.

Powyższe uwagi mają nam uprzytomnić fakt, że chodzi tutaj o koncepcję integrującą poszczególne dyscypliny naukowe. Koncepcja ta daleka jest od pełnego wykorzystania, dlatego zgodzić się należy ze zdaniem pewnego amerykańskiego uczonego, który kilka lat temu na konferencji poświęconej znaczeniu struktur dyssypacyjnych w medycynie stwierdził: „ludzkość potrzebowała około stu lat, aby właściwie wyeksploatować koncepcję mechaniki Newtona w astronomii, tyleż mniej więcej czasu potrzeba było biologii, aby zastosować w różnych aspektach koncepcję ewolucji gatunków Darwina. Zachodzi pytanie, ile czasu będziemy potrzebowali, aby w pełni wykorzystać koncepcję struktury dyssypacyjnej?”

Patrz w niebo

Odkryta w 1766 roku przez niemieckiego astronoma *J. D. Titiusa* i spopularyzowana przez dyrektora obserwatorium berlińskiego *J. E. Bodego* empiryczna formuła przewidywała, że pomiędzy Marsem a Jowiszem powinna krążyć jeszcze jedna planeta w odległości ok. 2,8 jednostki astronomicznej (j. a.), której dotychczas nie odkryto. W 1800 roku sześciu obserwatorów niemieckich rozpoczęło systematyczne poszukiwania brakującej planety. Lecz los w takich przypadkach często bywa złośliwy. W Sylwestra 1800 roku nocny dyżur w Obserwatorium w Palermo (Sycylia) przypadł *Giuseppe Piazziemu*. Włoch, zły, że mu przepadł bal, nie wiedział jeszcze, że ta noc przyniesie mu światową sławę. Otóż obserwując niebo odkrył właśnie tej nocy nową nieznaną planetę. Nazwał ją Ceres na cześć bogini płodności i dobrych zbiorów — patronki Sycylii. Planeta ta obiega Słońce w czasie 4 lat 7 miesięcy i 6 dni, średnio odległa jest od Słońca o 2,77 j. a., zgodnie z formułą Titiusa — Bodego. Niedługo później, w 1802 roku Olbers odkrył drugie podobne ciało krążące po podobnej orbicie — Pallas. Potem posypały się dalsze odkrycia. Wszystkie nowo odkryte obiekty miały jedną cechę wspólną — bardzo słabo świeciły, co mogło świadczyć o ich małych rozmiarach. Zamiast więc jednej planety w podejrzanym miejscu odkryto wiele małych planetoid. Dotychczas odkryto i zarejestrowano ponad 2 tysiące tych ciał. Wiele z nich odbiega swymi właściwościami od cech „standardowych”. Niektóre zapędzają słońce bliżej Słońca niż Merkury (Ikar) lub dalej niż Saturn (1977UB). Inne są związane w punktach libracyjnych Jowisza i innych planet (patrz artykuł T. Kwasta w poprzednim numerze).

Jak wskazują obserwacje zmian jasności planetoid mają one często nieregularne kształty. Największe mają kształt kulisty, mniejsze jednak często są wydłużone lub płaskie, niektóre nawet mają kształt hantli. W 1979 roku zaobserwowano nawet układ podwójny planetoid obiegających się nawzajem w czasie ok. 15 minut. Średnice planetoid wyznacza się przeważnie z czasu trwania zaćmienia jakiejś gwiazdy przez daną planetoidę. Największe mają ponad 500 km (Ceres — 1080, Vesta — 540), najmniejsze odkryte dotychczas ok. 1 km. Prawdopodobnie istnieje więc ciągle przejście między planetoidami a meteorami. Zakładając, że gęstość materii planetoid nie różni się wiele od gęstości planet, można łatwo wyliczyć ich masy (co pozostawiamy Czytelnikowi). Łączna suma tych mas wynosi mniej więcej 0,008 masy Ziemi, a razem z masą większych i mniejszych meteorów mogących krążyć pomiędzy orbitami Marsa i Jowisza na pewno nie więcej niż 0,1 masy Ziemi. Jest to masa nieco mniejsza niż masa Marsa. Może więc wszystkie te ciała powstały z rozpadu jakiejś domniemanej planety krążącej kiedyś na orbicie za Marsem? Nikt na razie nie potrafi dać odpowiedzi na to pytanie, zaproponowano już jednak nazwę dla tej hipotetycznej praplanety — Faeton.