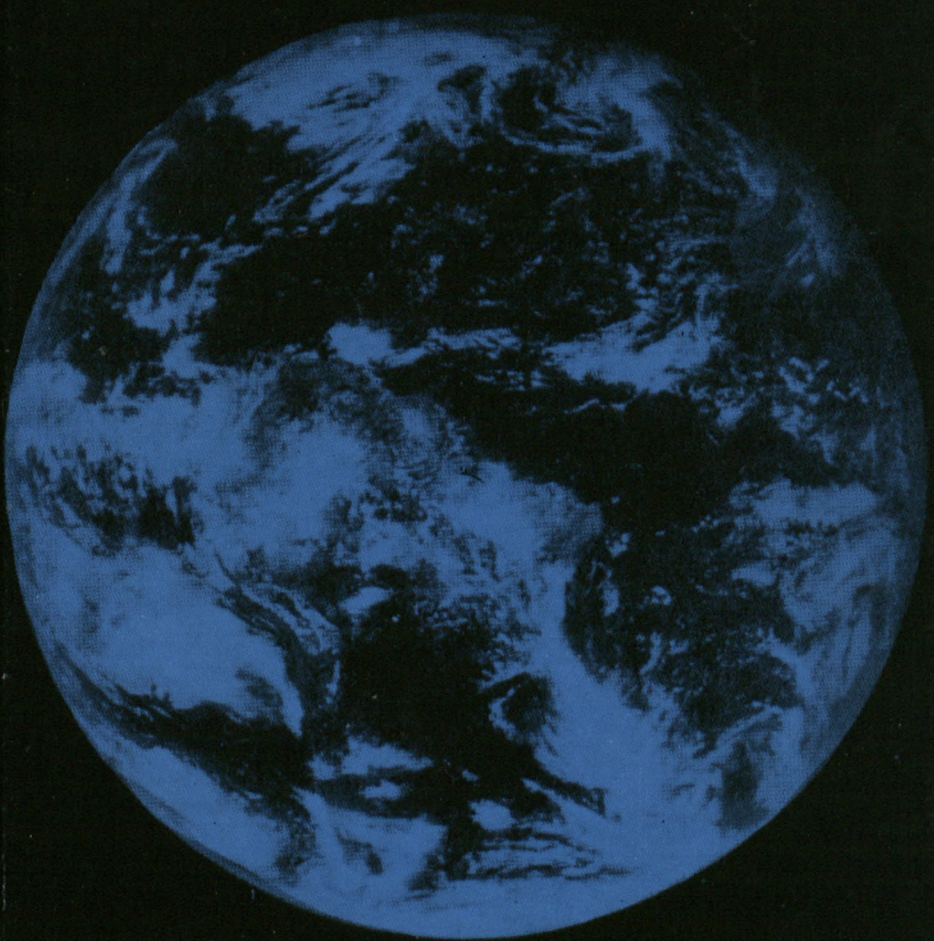


1530/802



ASTRONOMIA
WSPÓŁCZESNA



Książeczka przedstawia w sposób jasny i zwięzły obecny stan wiedzy o Wszechświecie oraz problemy stojące przed dzisiejszą astronomią. To małe kompendium wiedzy astronomicznej ukazuje drogi, którymi współczesna astronomia dochodzi do wspaniałych rezultatów i podkreśla, że drogi te wywodzą się z metody naukowej, którą Mikołaj Kopernik wskazał astronomii i innym naukom matematyczno-przyrodniczym.

*

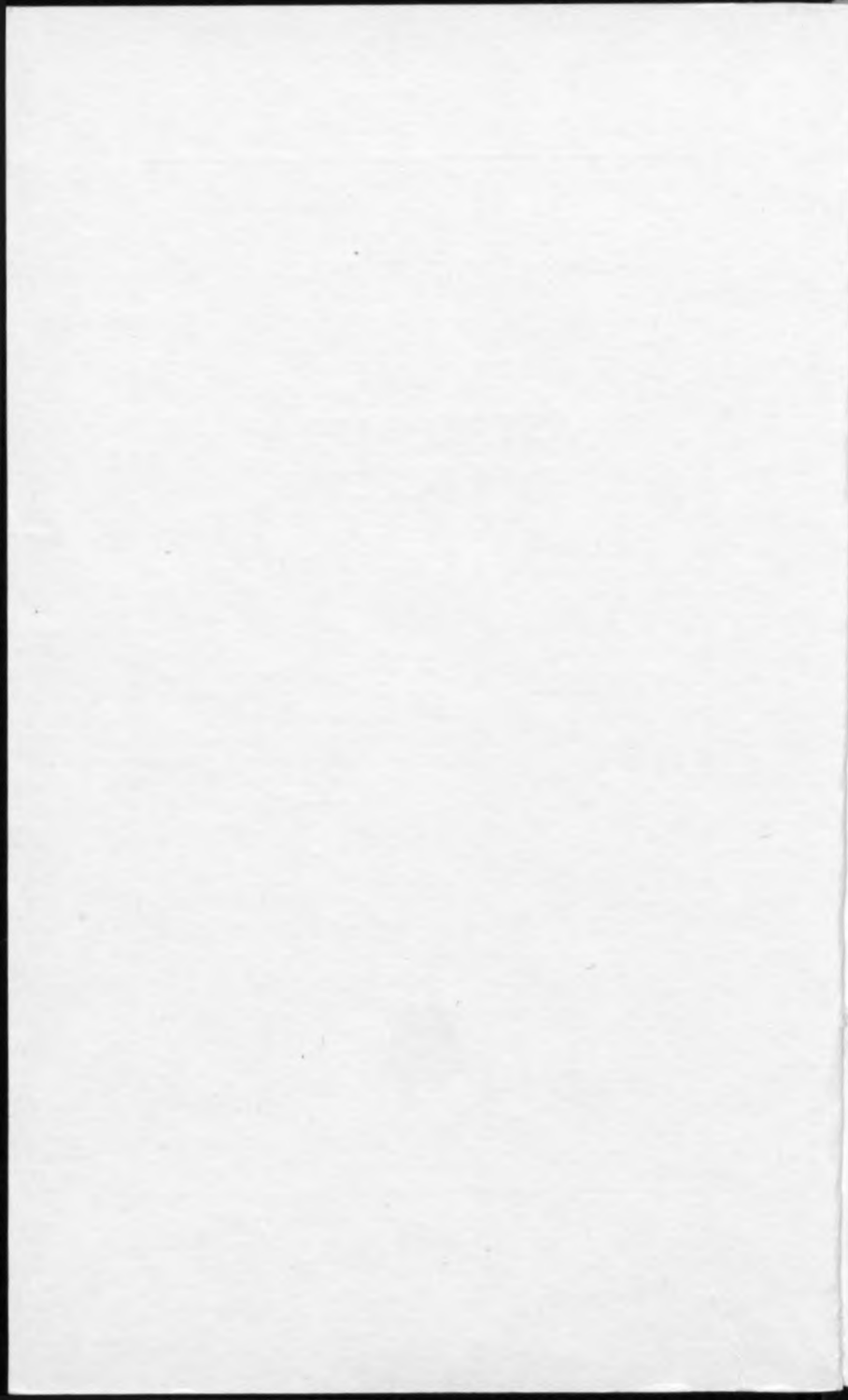
Książeczka niniejsza zamyka cykl „Biblioteczki Kopernikańskiej”, zainicjowanej przez Komisję Kopernikańską Towarzystwa Naukowego w Toruniu, a realizowanej przez Komisję Wydawnictw Popularnonaukowych Towarzystwa z zasiłku Wojewódzkiej Rady Narodowej w Bydgoszczy i Polskiej Akademii Nauk. Biblioteczka stanowi małą encyklopedię najnowszej wiedzy o Koperniku, pisaną popularnie przez specjalistów.

„Eme, lege, fruere”

WILHELMINA IWANOWSKA

ASTRONOMIA
WSPÓŁCZESNA





ASTRONOMIA
WSPÓŁCZESNA

ASTRONOMIA
WSPÓŁCZESNA



BIBLIOTEKA
KOPERNIKAŃSKA

№ 11

WARSZAWA

TOWARZYSTWO NAUKOWE W TORUNIU

PRACE POPULARNONAUKOWE NR 27



BIBLIOTECZKA
KOPERNIKAŃSKA

Nr 14

TORUŃ 1973

2746A6

11/82.

WILHELMINA IWANOWSKA

ASTRONOMIA WSPÓŁCZESNA



TORUŃ 1973

ARCHIWUM
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Redaktor naczelny wydawnictw TNT
ARTUR HUTNIKIEWICZ

*

Komisja Wydawnictw Popularnonaukowych

Przewodniczący
ANDRZEJ TOMCZAK

Członkowie
ANDRZEJ BULSIEWICZ, FRANCISZEK PEPŁOWSKI, WANDA ZABŁOCKA

*

Projekt obwoluty oraz opracowanie graficzne
ZYGFRYD GARDZIELEWSKI

*

Na obwolutę:
Ziemia widziana z odległości Księżyca

WYDANO Z POMOCĄ FINANSOWĄ
POLSKIEJ AKADEMII NAUK



Printed in Poland

918938

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE
ODDZIAŁ W POZNANIU, 1973

Wydanie I. Nakład 9 850 + 150 egz. Ark. wyd. 4. Ark. druk. 5,5. Papier
ilustracyjny III kl. 80 g. Podpisano do druku 29 VI 1973 r. Druk ukończono
w lipcu 1973 r. Zam. 1730 - O-16. Cena zł 12,-

ZAKŁADY GRAFICZNE W TORUNIU

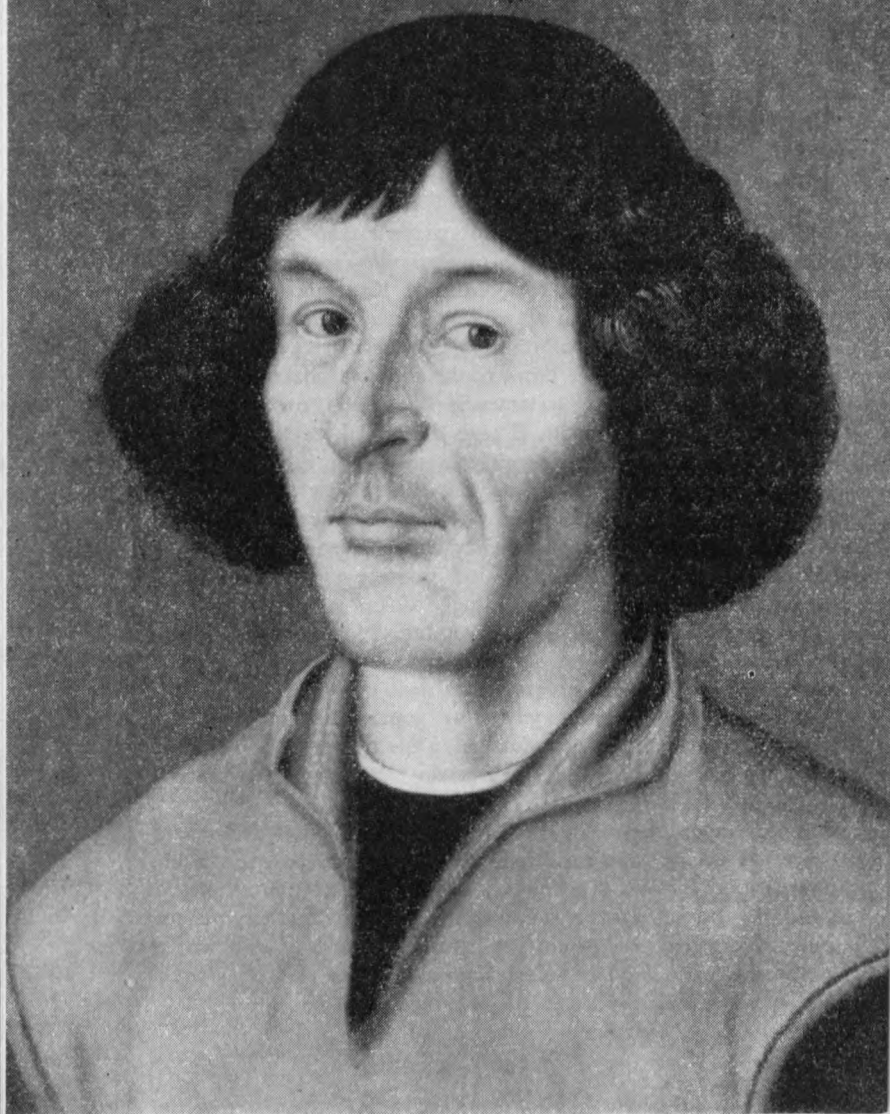
D, 500/2006

WSTĘP

Kiedy z norymberskiej drukarni przywieziono do Fromborka pierwszy egzemplarz dzieła *De revolutionibus orbium coelestium* (O obrotach sfer niebieskich), Mikołaj Kopernik kończył swój ziemski żywot. Nie mogli wówczas przeczuć nieliczni, czuwający przy nim przyjaciele, ani on sam, nieobecny już umysłem, że w owej chwili rodziła się nowa epoka dziejów ludzkości. Umierał człowiek, zostawiając w testamencie swe dzieło, owoc kilkudziesięciu lat samotnego trudu. Z tego dzieła, jak ze źródła, wzięły początek nauki ścisłe, które przeobraziły nasz sposób myślenia i zmieniły gruntownie warunki życia, ponieważ w ślad za rozwojem nauk ścisłych wkraczała nowoczesna technika.

Od tamtej chwili po dzień dzisiejszy tempo rozwoju nauk ścisłych wciąż wzrasta, tak że trudno jest ocenić, czy znajdujemy się u szczytu, czy na początku tej drogi i dokąd nas ona zawiedzie. W tym aspekcie Kopernik nie jest postacią historyczną, nie mieści się w jakimś zamkniętym rozdziale historii, ponieważ to, co on zapoczątkował, rośnie i potężnieje na naszych oczach. Ocena jego roli byłaby niekompletna, gdybyśmy poprzestali na rozważeniu tego, czego on sam za życia dokonał, a nie wciągnęli do rachunku konsekwencji jego dzieła, tych przeszło czterystu lat lawinowego rozwoju nowoczesnej nauki.

Rozważeniu następstw dzieła Kopernika w odniesieniu do astronomii ma służyć niniejsza książeczka, przy czym nie tyle ma ona przedstawić historię rozwoju tej nauki, co próbę przekroju jej obecnego stanu. Bardzo krótki rys historyczny posłuży jedynie do przypomnienia rodowodu współczesnej astronomii, wywodzącej się w prostej linii od Mikołaja Kopernika.



1. Mikołaj Kopernik, toruńczyk. Portret z początku XVI w. (Muzcum Okręgowe w Toruniu)

D. 200/2006

OD KOPERNIKA DO NASZYCH CZASÓW

Można by powiedzieć, że przed Kopernikiem astronomia miała charakter wiedzy usługowej. Obserwowane położenia i ruchy ciał niebieskich służyły do orientacji w przestrzeni i do odmierzenia czasu na Ziemi: niebo było kompasem, zegarem i kalendarzem, szczególnie cennym w żegludze morskiej. Jest rzeczą znamioną, że najpoważniejszy traktat astronomiczny napisany przed Kopernikiem, *Almagest* Ptolemeusza (II w. n.e.), reprezentujący wysoki, jak na owe czasy, poziom matematyczny, nie wychodzi z ram naiwnego geocentryzmu pomimo sprzeczności z wieloma obserwowanymi faktami. Nie było bowiem ważne, jak w rzeczywistości poruszają się ciała niebieskie i czym są w istocie, potrzebny był algorytm*, pozwalający przewidywać ich położenia dla celów praktycznych. Antropocentryzm**, ciążący na filozofii, nauce, religii i powszechnym mniemaniu i wynikający zeń ciasny praktycyzm powstrzymały rozwój nauk matematyczno-przyrodniczych i technicznych na wiele stuleci.

Kultura starożytna, wybitnie antropocentryczna, upadła pod naporem napływających z Azji barbarzyńskich ludów, które załaziły Europę w wiekach V—VII. Ze skrzyżowania różnorodnych kultur i ras wyrastała stopniowo w wiekach średnich nowa kultura europejska, formowana na bazach chrześcijaństwa i kultury starożytnej. Szczególnie silny nawrót ku starożytności w epoce odrodzenia wzbogacił znakomicie literaturę, sztukę, filozofię. W naukach ścisłych natomiast niewiele dało się ze starożytności zaczerpnąć. Na przełomie XV i XVI w. zastał Kopernik w astronomii stan głębokiego kryzysu: system Ptolemeusza, wielokrotnie poprawiany, głównie przez astronomów arabskich, nie dawał zadowalającej zgodności, choćby tylko formalnej, z obserwacjami, skutkiem czego astronomia nie mogła należycie spełniać nawet

* Zestaw formuł potrzebnych do rachunkowego rozwiązania określonego zadania.

** Kierunek myślenia, stawiający człowieka jako główny cel istnienia Wszechświata.



2. Izaak Newton

swej roli służebnej. Wyczuwało się potrzebę gruntownej reformy, rewizji samych założeń systemu. Kopernik nie poszedł drogą innych astronomów tamtych czasów — drogą poszukiwania doraźnych recept i poprawiania tablic opartych na starym systemie Ptolemeusza, nie widział też możliwości przeprowadzenia skutecznej reformy kalendarza, ponieważ uświadamiał sobie, że naprzód trzeba poznać zasady działania i mechanizm zegara niebieskiego, aby móc się nim posługiwać. Logika i intuicja podpowiadały mu, że w tej maszynie Słońce jest ciałem centralnym: oświetlając i ogrzewając planety, posiada ono również siłę utrzymywania ich w stałej od siebie odległości. Ziemia natomiast, pomimo że jest mieszkaniem człowieka, ma w tym mechanizmie rolę podrzędną: podobnie jak inne planety krąży wokół Słońca, ponadto obraca się dokoła własnej osi, która jednakże nie zachowuje stałego kierunku w przestrzeni, tylko powoli (w okresie 26 000 lat) zatacza stożek.

8 Kopernik spostrzegł, że przyjmując potrójny ruch Ziemi, otrzymuje się niezwykle prosty i przejrzysty układ, że znikają wówczas

zawilości ruchów planet, które są wynikiem ruchu samej Ziemi. Owładnięty tą ideą, nie spoczął w poszukiwaniu testów swej teorii: analizował obserwacje swych poprzedników, uzupełniał je własnymi, przeprowadzał setki rozumowań i wywodów geometrycznych, wykonywał mnóstwo wyliczeń trygonometrycznych dla sprawdzenia słuszności swojej tezy. Dodajmy nawiasem, że wykonywał tę olbrzymią i trudną pracę w chwilach wolnych od zawodowych zajęć administracyjnych, w miejscu i w czasach niespokojnych, w oddaleniu od środowisk naukowych. Autentyczna pasja badawcza dawała mu siły do pokonywania licznych przeszkód i oporów zewnętrznych i wewnętrznych. Nie ulega bowiem wątpliwości, że sprawdzanie teorii heliocentrycznej we wszystkich jej konsekwencjach, w ruchach wszystkich widocznych ciał na niebie nastęrczało niemało trudności. Mała dokładność obserwacji, wykonywanych jakże prymitywnymi narzędziami — lunet wówczas nie znano — utrudniała zdobycie przekonujących i niezbitych dowodów słuszności nowej teorii.

Jedną z trudności, chyba najpoważniejszą, nastęrczały gwiazdy: owe sześć tysięcy punktów świetlnych, widocznych gołym okiem, nie chciało podporządkować się teorii Kopernika. Uczestniczyły one wprawdzie w dziennym obrocie sklepienia niebieskiego, który tak prosto tłumaczył Kopernik jako odbicie obrotu dziennego Ziemi dokoła swej osi, wykazywały również tzw. ruch precesyjny, nad którym daremnie głowili się astronomowie przez siedemnaście wieków, a który trafnie wyjaśnił Kopernik jako wynik powolnej zmiany kierunku osi ziemskiej, ale — na przekór Kopernikowi — gwiazdy nie chciały odzwierciedlać rocznego ruchu Ziemi dokoła Słońca. Planety zakreślały pętle tym większe, im bliżej były Ziemi — Ptolemeusz wprowadził epicykle, aby te ruchy opisać; Kopernik dojrzał w nich odbicie rocznego ruchu Ziemi po swej orbicie. Dlaczego nie zakreślały takich rocznych pętli gwiazdy? To był najpoważniejszy zarzut, jaki stawiali Kopernikowi współcześni i późniejsi oponenti. Z pewnością i jemu samemu to pytanie spędzało sen z powiek. Dał on na nie odpowiedź w swoim dziele, mianowicie, że gwiazdy znajdują się tak daleko od nas, że ich roczne wahania paralaktyczne są niedostrzegalnie drobne. Była to odpowiedź trafna i odkrywca, dotychczas bowiem sądzono, że tzw. sfera gwiazd stałych znajduje się tuż za sferą Saturna. Słuszność odpowiedzi Kopernika dała się jednak sprawdzić ilościowo dopiero w trzysta lat później, gdy udało się zmierzyć roczne przesunięcia paralaktyczne najbliższych gwiazd: były one

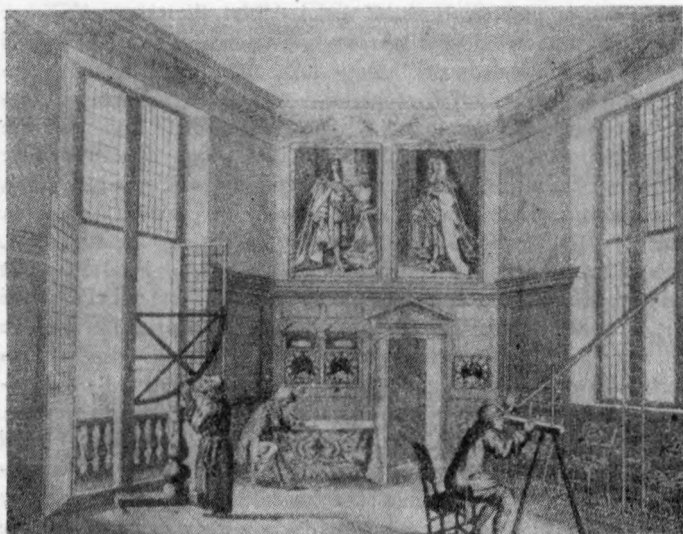
rzędu jednej sekundy łuku, co odpowiada odległości gwiazd równej kilku latom światła *. Natura niechętnie ujawnia swoje tajemnice; wydzierać je z trudem i móżolem, na przekór powszechnemu mniemaniu i świadectwu własnych zmysłów nie było rzeczą łatwą. Pierwszy krok na tej drodze był niewątpliwie najtrudniejszy, ale jakże owocny w skutkach. Okazało się bowiem, że obowiązuje w przyrodzie logika, że istnieją w niej prawidłowości, czyli prawa, które można matematycznie formułować i sprawdzać, a następnie z ich pomocą przewidywać dalsze wypadki. Pasja odkrywania i matematyzowania zjawisk przyrody oraz przepowiadania dalszego ich biegu ogarniała umysły; osiągnięte sukcesy zachęcały do dalszych badań. Tak powstawał gmach nowoczesnej wiedzy matematyczno-przyrodniczej; astronomia odegrała w tej budowie rolę wiodącą. Odgrywa ją i dzisiaj, chociaż nie zawsze zdajemy sobie z tego sprawę.

Pierwszym i najbardziej podstawowym prawem przyrody, które wywodzi się z kopernikowskiego układu heliocentrycznego, jest prawo ciążenia powszechnego. Sam Kopernik mówi parokrotnie w swym dziele o tym, że ciała niebieskie utrzymują się w kulistej objętości dzięki wzajemnemu przyciąganiu się ich części i że Słońce przyciąga planety. Matematyczne sformułowanie prawa grawitacji — że siła przyciągania jest proporcjonalna do masy ciał przyciągających się i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu ich odległości — podał dopiero Izaak Newton w roku 1687 w swym dziele *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Podstawy matematyczne filozofii przyrody). Pomógł mu w odkryciu tego prawa Jan Kepler, który z licznych obserwacji położzeń planet, wykonanych przez Tychona Brahe, dostrzegł związki między odległościami ich od Słońca i okresami obiegów oraz zastąpił kopernikowskie orbity kołowe planet orbitami eliptycznymi (1609 r.). Prawo grawitacji, obok podstawowych praw dynamiki, sformułowanych również przez Newtona, stało się kluczem do zrozumienia ruchów planet, księżyców, planetoid i komet, do obliczania ich orbit i wyznaczania położzeń tych ciał w przeszłości i w przyszłości. Przez dwa następne stulecia mechanika nieba absorbowała całkowicie i pasjonowała astronomów, przynosząc takie sukcesy, jak odkrycie rachunkiem w XIX i XX w. dwóch nie znanych przed tym planet: Neptuna i Plutona, znalezionych

10 * Jeden rok światła jest to odległość, którą światło przebywa w ciągu 1 roku; licząc, że światło rozchodzi się z prędkością 300 000 km/sek., czytelnik łatwo sprawdzi, że 1 rok światła = $9,46 \cdot 10^{12}$ km.

następnie za pomocą lunet. Z kolei Albert Einstein w XX w. poprawił, a raczej uogólnił prawo grawitacji Newtona w swojej ogólnej teorii względności, której słuszność również tylko w zjawiskach astronomicznych mogła być stwierdzona. Na teorii Einsteina oparła się kosmologia współczesna, nauka o budowie i ewolucji Wszechświata jako całości. Na tym nie kończy się historia prawa ciężenia powszechnego. Z badań nad budową i ewolucją gwiazd i galaktyk okazało się, że grawitacja jest siłą warunkującą równowagę tych tworów i kierującą ich rozwojem, zasadniczym bowiem kierunkiem ewolucji gwiazd i galaktyk jest kontrakcja mas pod działaniem ich własnej grawitacji. Prowadzi to do powstawania gęstych i supergęstych form materii, jakie spotykamy w końcowych fazach ewolucji gwiazd w postaci białych karłów i gwiazd neutronowych — pulsarów. Nad możliwością istnienia jeszcze gęstszych stanów materii w postaci tzw. czarnych dołów zastanawia się współczesna astrofizyka. Jeżeli dodamy jeszcze problem fal grawitacyjnych, nad których wykryciem pracuje obecnie kilka potężnych laboratoriów, będziemy musieli przyznać, że prawo ciężenia powszechnego, wywodzące się od Kopernika, znajduje się w centrum uwagi współczesnej fizyki i astrofizyki.

Cofnijmy się jednak do okresu owych dwustu lat po ogłoszeniu dzieła Newtona. Zarówno w astronomii, jak w fizyce królowała wówczas mechanika newtonowska. Obok obliczania orbit nowo odkrywanych ciał układu planetarnego w postaci planetoid i komet i doskonalenia metod tych obliczeń astronomowie XVIII i XIX w. rozwiązywali takie zadania, jak teoria zakłóceń (perturbacji) ruchu okołosłonecznego tych ciał przez przyciąganie ich przez planety, teoria figur równowagi wirujących ciał płynnych i gazowych, przyciąganych przez inne ciała, teoria przypliwów i odpływów morskich na Ziemi, będących wynikiem działania grawitacyjnego Księżyca i Słońca. Jako podstawowe dzieła reprezentujące osiągnięcia mechaniki nieba w wiekach XVIII i XIX należy wymienić *Traité de Mécanique céleste* (Traktat o mechanice nieba), napisany przez P. S. Laplace'a, matematyka i astronom francuskiego, na przełomie w. XVIII i XIX, oraz prace H. Poincarégo również Francuza, wydane na przełomie XIX i XX w. Sukcesy mechaniki newtonowskiej nie pozostały bez wpływu na filozofię w. XVIII i XIX; utrwałał się mechanistyczny światopogląd, sprowadzający rzeczywistość do stosunkowo prostego modelu zegarka. Wydawało się, że niedaleka jest chwila,



3. Królewskie Obserwatorium w Greenwich (Anglia), założone w 1675 r.

gdy poznamy wszystkie kółka mechanizmu Wszechświata i będziemy mogli nim kierować według naszej woli.

Równoległe z rozwojem mechaniki nieba postępowała astrometria, dział astronomii, zajmujący się precyzyjnym wyznaczaniem położenia ciał niebieskich, w szczególności planet, komet i planetoid. Astrometria dostarczała danych obserwacyjnych, potrzebnych do sprawdzenia teorii. Proces udoskonalania lunet — od chwili ich wynalezienia na początku XVII w. — szedł w kierunku zwiększania precyzji pomiaru kątów, jak i zwiększania zasięgu lunet przez powiększanie średnicy obiektywu. Dokładność wyznaczania pozycji ciał niebieskich wzrastała od kilku minut łuku do kilkadziesiątu sekund i wreszcie do małych ułamków sekundy łuku w naszych czasach. Tak wysoką dokładność osiągnęto dzięki precyzji mechanicznej konstrukcji lunet, oraz dzięki bardzo przemyślnemu opracowywaniu obserwacji z eliminowaniem wszelkich możliwych błędów systematycznych. Te prace obserwacyjne były



4. Królewskie Obserwatorium w Wilnie, założone w 1753 r.

rium Jana Heweliusza w Gdańsku (XVII w.); bądź państwowych. Jednym z pierwszych takich obserwatoriów na świecie było Obserwatorium Paryskie, założone w 1667 r., innym — Królewskie Obserwatorium w Greenwich koło Londynu, założone w 1675 r. Pierwszym państwowym obserwatorium polskim było Obserwatorium Wileńskie, zbudowane w 1753 r. przy Akademii Wileńskiej z fundacji księżnej Puzyniny, podniesione do rangi Obserwatorium Królewskiego przez Stanisława Augusta. Pierwszym astronomem królewskim i trzecim dyrektorem tego obserwatorium był Marcin Poczobut, następnym — Jan Śniadecki. O tym to obserwatorium opowiada Mickiewicz w ósmej księdze *Pana Tadeusza*.

W połowie XIX w. szerokim frontem badań ruszyła fizyka. Obok mechaniki powstała termodynamika, a spośród metod doświadczalnych rozwinęła się analiza widmowa (spektroskopia), która utorowała drogę fizyce atomowej. Z wyników i metod fizyki skorzystała z jednej strony technika (wynalazek maszyny parowej), z drugiej — astronomia. Stosując metodę spektroskopową do badania obiektów niebieskich (Fraunhofer, 1817) i prawa promieniowania (Kirchhoff, Planck), zapoczątkowano badania stanu fizyko-chemicznego Słońca, gwiazd i planet. Powstała astrofizyka, nowy dział astronomii, rozwijający się coraz intensywniej, równoległe z postępami fizyki. Na początku XX w. zaczęto budować nowoczesne obserwatoria astrofizyczne, wyposażone w teleskopy lustrzane o dużych średnicach, służące głównie do badań spektroskopowych. Poprzednio posługiwano się kamerami pryzmatycznymi, czyli lunetami soczewkowymi z umieszczonym przed obiektywem pryzmatem. Na zdjęciach wykonanych taką kamerą otrzymywało się obrazy gwiazd badanej okolicy nieba, rozłożone przez pryzmat według długości fali we wstęgi widm. Taką pionierską kamerą pryzmatyczną był zbudowany w końcu XIX w. w Harvard College Observatory, USA, astrograf Drapera o średnicy obiektywu 20 cm, znajdujący się obecnie w Polsce w Obserwatorium Toruńskim. Pierwsze wielkie teleskopy lustrzane o średnicach 1,5 i 2,5 m, wyposażone w spektrografy, zainstalowano w latach 1910 i 1916 w Obserwatorium MtWilson w Kaliforni, USA. W pobliżu, na górze Palomar uruchomiono w 1949 r. teleskop o średnicy lustra 5 m. Obecnie uruchamia się na Kaukazie w Związku Radzieckim teleskop 6-metrowy. W budowie znajduje się obecnie kilkanaście teleskopów o średnicach większych od 2 m. W Polsce największy teleskop



5. Maria Skłodowska-Curie

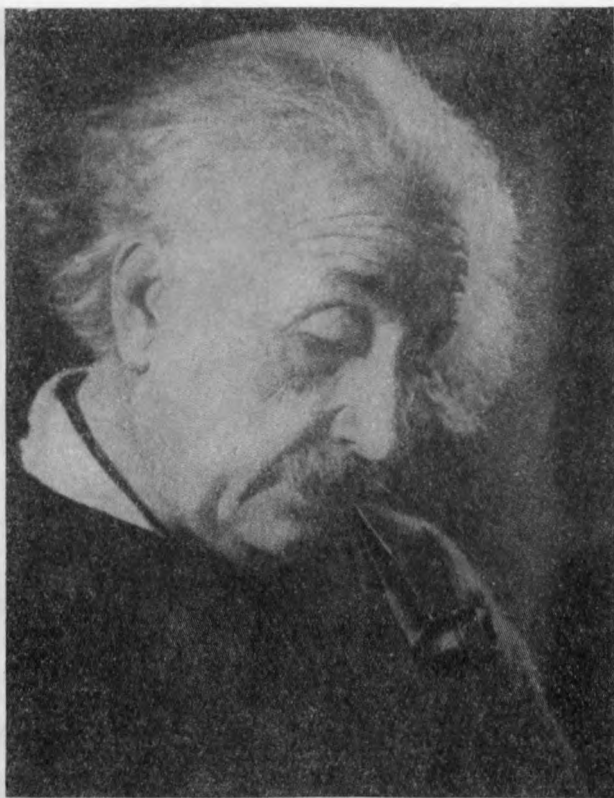


ma średnicę lustra 90 cm; został on zainstalowany w 1962 r. w Obserwatorium Toruńskim.

Rosnące rozmiary teleskopów oraz wzrastająca czułość aparatury odbiorczej — od oka ludzkiego poczynając, poprzez kliszę fotograficzną, fotopowielacz i elektronowy przetwornik obrazu — pozwalały osiągać coraz dalsze obiekty kosmiczne. Kopernik zajmował się układem planetarnym, w którym najdalsza ze znanych mu planet, Saturn, jest odległa od Słońca o niecałe 1,5 godziny światła. Najdalsza gwiazda, jaką mógł gołym okiem dostrzec, jest odległa o około 2 tysiące lat światła. Obecnie największe teleskopy i radioteleskopy „widzą” wszechświat do odległości 10 miliardów lat światła. Obiekty obserwowane na takich odległościach to nie pojedyncze gwiazdy, tylko całe galaktyki, czyli skupiska setek miliardów gwiazd.

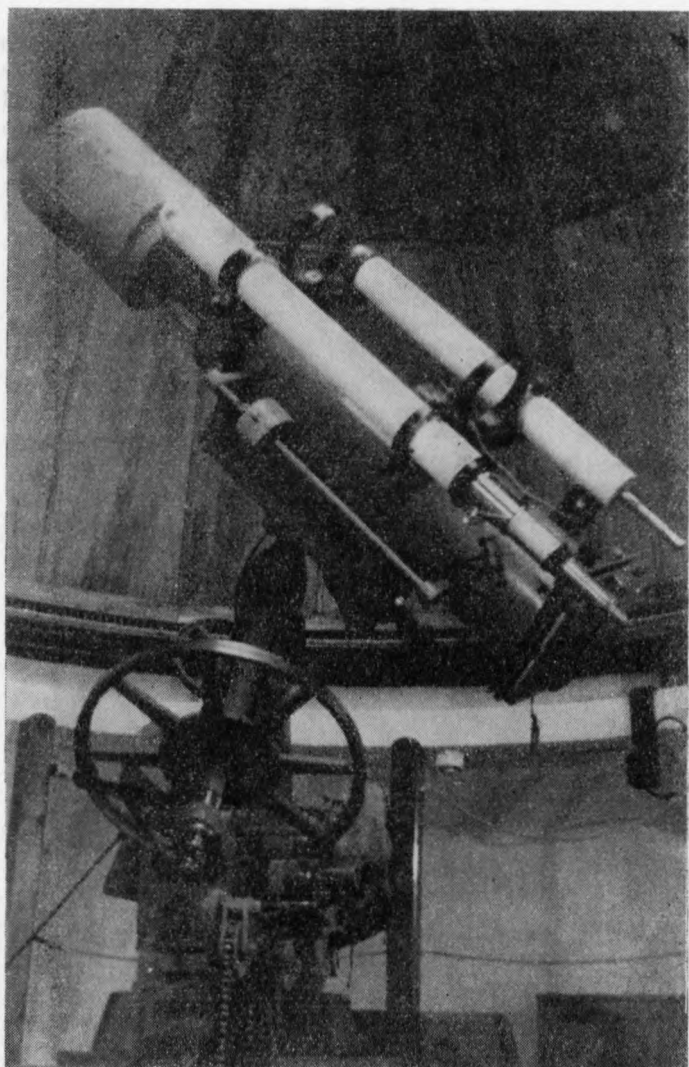
Równoległe z postępem techniki obserwacyjnej rozwinęła się astrofizyka teoretyczna, której zadaniem jest interpretacja obserwowanych zjawisk oparta na fizyce teoretycznej. Powstała teoria budowy i ewolucji gwiazd, zapoczątkowana w pierwszych dziesiątkach lat naszego stulecia głównie dzięki pracom A. S. Eddingtona. Wspomnieć tutaj należy również pionierską pracę polskiego fizyka, prof. C. Białobrzeskiego, który sformułował równania równowagi promienistej kul gazowych, jakimi są gwiazdy. Obecnie astrofizyka teoretyczna dysponuje modelami budowy wnętrza i atmosfer gwiazd różnych mas i rozmiarów oraz śledzi rachunkiem ich drogi ewolucyjne od stanu rozrzedzonej chmury do stanu supergęstej gwiazdy neutronowej albo białego karła. Astrofizyka współczesna stawia przed sobą zagadnienia ewolucji materii we Wszechświecie — powstawania i przemian pierwiastków chemicznych (nukleogeneza) — opierając się na rozwoju fizyki jądrowej, zapoczątkowanym pracami Marii Skłodowskiej-Curie. W rozwiązywaniu tak złożonych problemów pomocne są elektroniczne maszyny cyfrowe.

Okolo połowy XX w. astronomia wzbogaciła się o nowe metody badań. W latach czterdziestych powstała radioastronomia, zajmująca się badaniem promieniowania radiowego, wysyłanego przez obiekty kosmiczne w zakresie długości fal od 1 cm do kilkudziesięciu metrów, przepuszczanych przez atmosferę ziemską. Jesteśmy świadkami bardzo szybkiego rozwoju metod obserwacyjnych radioastronomii i niemniej szybkiego dostarczania nowych wiadomości o Wszechświecie. Buduje się coraz większe radioteleskopy, urządzenia przypominające teleskopy lustrzane, z tym



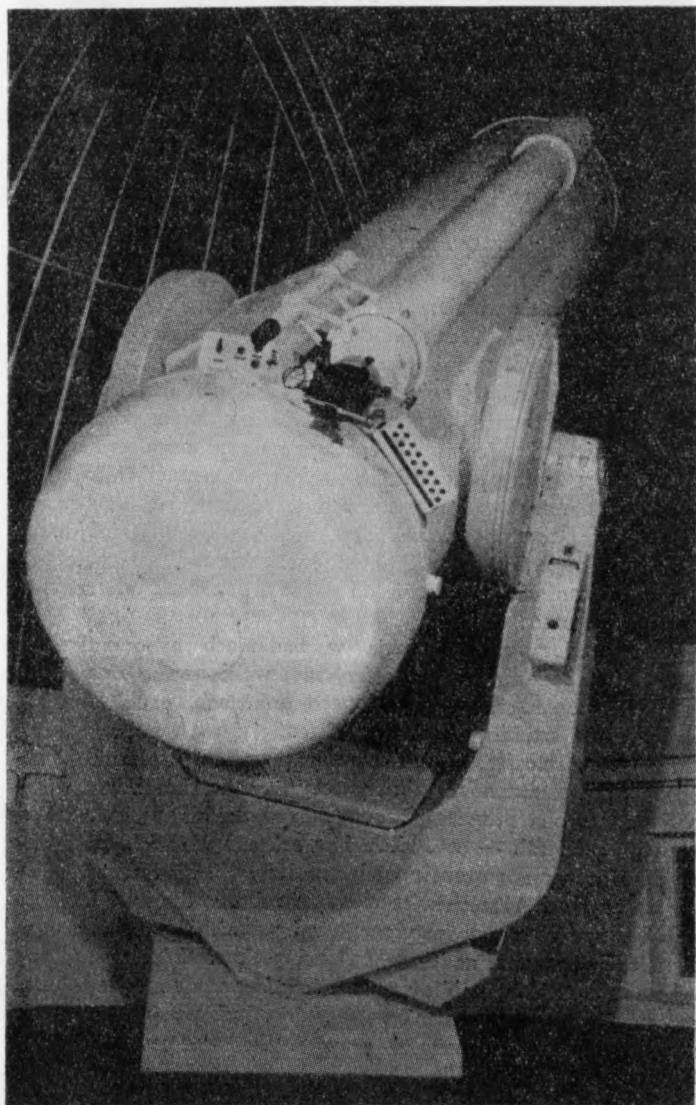
6. Albert Einstein

że obiektywem jest metalowy reflektor paraboliczny o dużej średnicy, ewentualnie pokryty siatką metalową, w którego ognisku znajduje się antena, połączona z bardzo czułym odbiornikiem. Przeciętne średnice radioteleskopów wynoszą kilkanaście lub kilkadziesiąt metrów, największy ruchomy ma średnicę równą 100 m, nieruchomy — 300 m. Dalsze powiększanie średnic radioteleskopów następuje z trudności techniczne, toteż buduje się zespoły radioteleskopów współdziałających ze sobą, rozstawionych w odległościach kilometrowych i większych. Zespoły takie, zwane inter- 17



7. Astrograf Drapera (1890 r.)





8. Teleskop Schmidta-Cassegraina o średnicy lustra 90 cm w Toruniu-Piwnicach

50

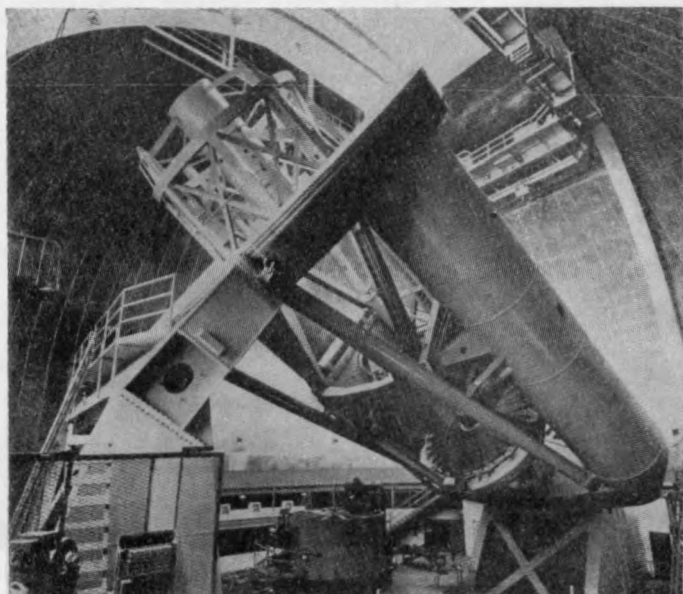
ferometrami, działają w pewnym sensie tak, jak pojedynczy radioteleskop o tak dużej średnicy. Buduje się nawet interferometry transkontynentalne, umieszczając jeden radioteleskop np. w Stanach Zjednoczonych, drugi — w Związku Radzieckim. W Polsce istnieją dwa ośrodki radioastronomii — w Toruniu i w Krakowie. Największy polski pojedynczy radioteleskop posiada średnicę 15 m (w Krakowie), największy interferometr ma bazę 1,5 km (w Toruniu).

Ta nowa technika znakomicie wzbogaca naszą wiedzę o Wszechświecie, ukazuje nam bowiem obiekty i zjawiska, których w świetle przeważnie nie widzimy, jak koronę słoneczną, sięgającą aż do orbit Merkurego i Wenus, wodór międzygwiazdowy i molekuly organiczne w przestrzeni międzygwiazdowej, miejsca wybuchów gwiazd supernowych i całych galaktyk (radiogalaktyki i kwazary). Radioastronomia dostarcza, jak widzimy, wiadomości o zjawiskach niezwykle, ponieważ reaguje na promieniowanie nietermiczne*; można powiedzieć, że większość sensacji, jakie przeżyła astronomia w ciągu ostatnich trzydziestu lat, dostarczyły badania radioastronomiczne. Szybkość uzyskiwania informacji w tej dziedzinie wynika z faktu, że obserwacje radioastronomiczne można wykonywać niezależnie od pogody, ponieważ fale radiowe przechodzą przez chmury.

Drugą przełomową innowacją w badaniach astronomicznych XX w. są badania pozaatmosferyczne, wykonywane za pomocą aparatury umieszczonej na balonach, raketach, pociskach balistycznych**, sztucznych satelitach Ziemi i innych pojazdach kosmicznych. Atmosfera ziemska stanowi poważną przeszkodę w obserwacjach astronomicznych; nawet przy bezchmurnym niebie przepuszcza ona promieniowanie tylko w dwóch wąskich zakresach długości fali — w świetle i w zakresie krótkich fal radiowych. Unosząc aparaturę ponad atmosferę Ziemi, możemy obecnie obserwować Wszechświat w całym zakresie długości fali promieniowania elektromagnetycznego, od promieni gamma poprzez promienie Rentgena, nadfiolet, światło, podczerwień, fale radiowe od najkrótszych do najdłuższych. Ponadto poza atmosferą Ziemi możemy odbierać promieniowanie korpuskularne — strumienie szybkich cząstek wyrzucanych przez Słońce, oraz tzw. promienie

* Promieniowanie termiczne jest uwarunkowane temperaturą ciała promieniującego, nietermiczne zależy od innych czynników.

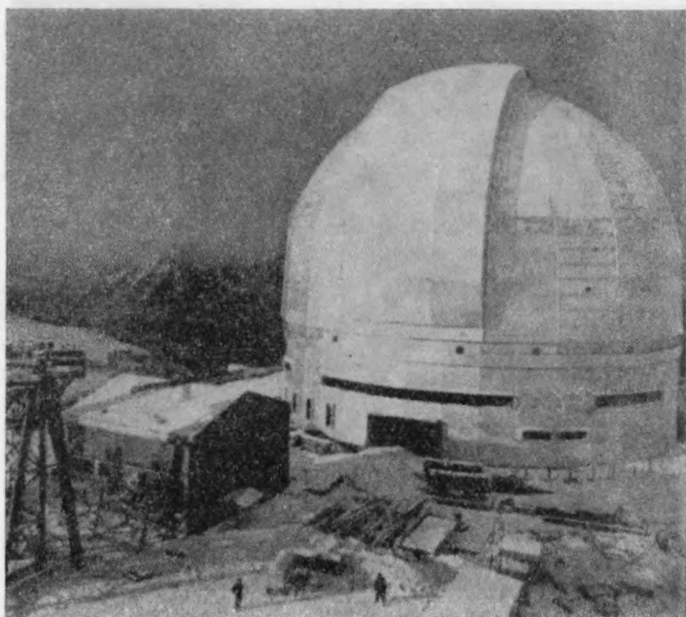
20 ** Pociski balistyczne — pociski raketowe, które osiągają wysokość do kilkuset kilometrów, po czym spadają na Ziemię.



9. Teleskop o średnicy lustra 5 m na górze Palomar (1949 r.)

kosmiczne — cząstki o bardzo dużych energiach, lecące z przestrzeni międzygwiazdowych. Wreszcie, dzięki pojazdom kosmicznym możemy bezpośrednio, dotykalnie badać materię kosmiczną, jak to się dzieje z próbkami materii pobranej z Księżyca i tymi, które będzie można w niedługim czasie otrzymać z innych ciał naszego układu planetarnego.

Próby unoszenia aparatury na balonach były podejmowane jeszcze przed drugą wojną światową. Po wojnie zaczęto wykorzystywać do tych celów w Stanach Zjednoczonych rakiety niemieckie V2, a następnie własne typu Aerobee i Vanguard. Osiągają one wysokości kilkuset kilometrów i pozwalają wykonywać zautomatyzowane pomiary w ciągu kilku lub kilkunastu minut, po czym spadają wraz z aparaturą i zarejestrowanymi wynikami pomiarów. Jeżeli pocisk zostaje wystrzelony z prędkością przynajmniej 8 km/sek. w odpowiednim kierunku, nie wraca na Ziemię i staje się sztucznym satelitą Ziemi. Po raz pierwszy udało się to zreali-

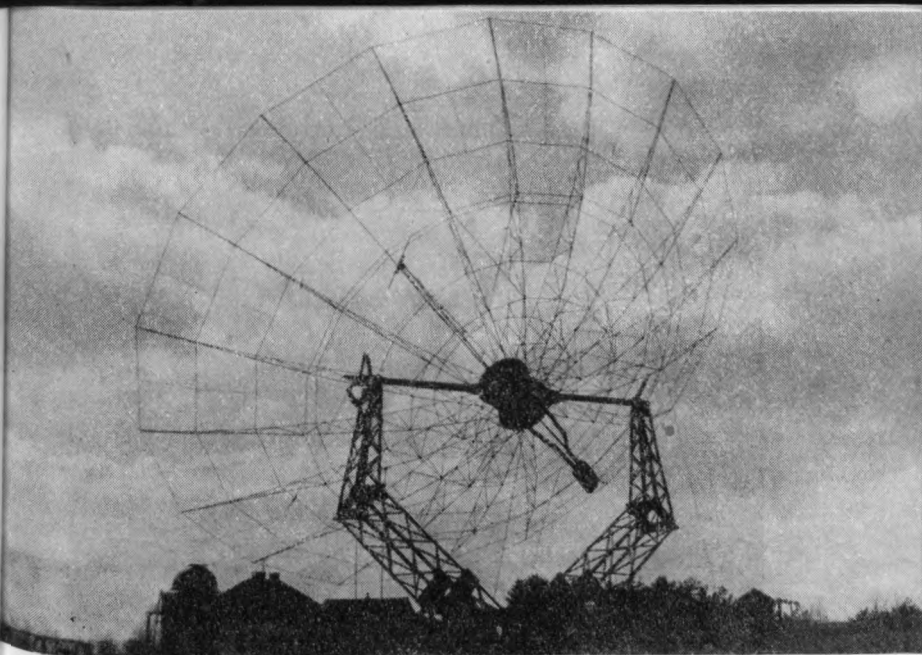


10. Kopała teleskopu o średnicy lustra 6 m na Kaukazie

zować 4 października 1957 r., gdy wystrzelono pierwszy sputnik w Związku Radzieckim. Od tego czasu dokonano bardzo wielu wystrzeżeń sztucznych satelitów Ziemi i raket międzyplanetarnych, w niektórych wypadkach z załogą ludzką, wreszcie byliśmy świadkami lądowań ludzi na Księżycu. Część tych wielu kosztownych eksperymentów służy badaniom astronomicznym. Kraj nasz włącza się w skromnym zakresie również do tych badań*.

W tym krótkim przeglądzie rozwoju nowoczesnej astronomii doszliśmy do czasów obecnych. Następne rozdziały poświęcimy wprowadzeniu czytelnika w niektóre aktualne problemy współczesnej astronomii. Aby dokonać wyboru tych problemów, po-

* 19 kwietnia 1973 r. na radzieckim sztuczny satelicie „Kopernik” został wystrzelony radiospektrograf skonstruowany w Toruniu, służący do obserwacji długofalowego promieniowania Słońca.

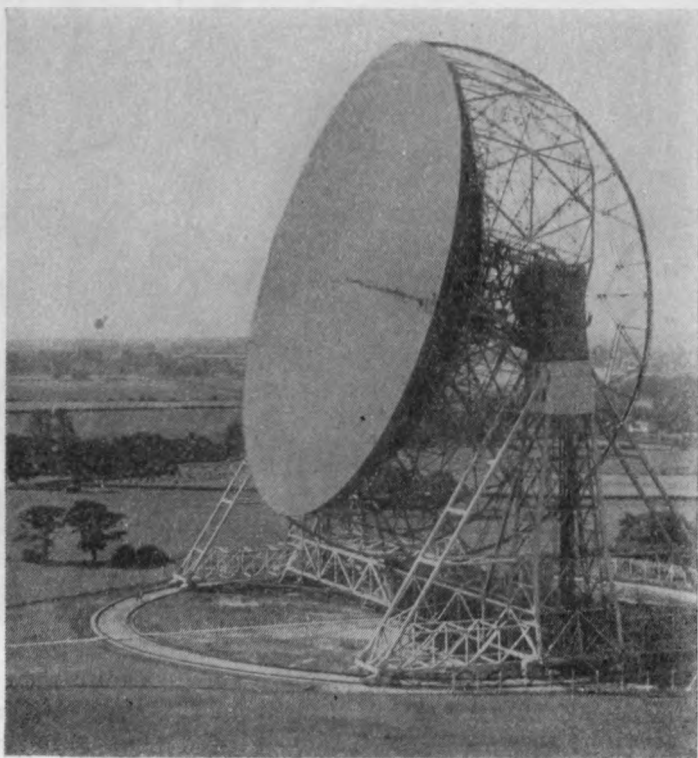


11. Radioteleskop o średnicy 12 m w Toruniu-Piwnicach

służymy się tematyką sympozjów, które zostały zaprojektowane dla Nadzwyczajnego Kongresu Międzynarodowej Unii Astronomicznej, zwołanego z okazji 500 rocznicy urodzin Mikołaja Kopernika w roku 1973 do Polski. Kongresy Unii, odbywające się co trzy lata, stanowią okazję do generalnego przeglądu zagadnień i badań astronomii w okresach trzyletnich. Sympozja zaś poświęcone są w szczególności najbardziej aktualnym i ważnym problemom. Tą też zasadą kierowano się przy wyborze tematyki sympozjów Nadzwyczajnego Kongresu Unii, chodziło bowiem o to, aby uczcić Kopernika nie tylko w aspekcie historycznym, ale też w przedstawieniu jego zasług dla rozwoju nowoczesnej nauki.

A oto tematy sympozjów nadzwyczajnego kongresu Międzynarodowej Unii Astronomicznej w Polsce w 1973 r.: 1. Dynamika układów planetarnych i gwiazdowych. 2. Badania układu planetarnego. 3. Ewolucja gwiazd. 4. Kolaps grawitacyjny* i fale grawitacyjne. 5. Kosmologia. 6. Sympozjum historyczne „Collo-

* Zob. s. 78.



12. Radioteleskop o średnicy 76 m w Jodrell Bank (Anglia)

quia Copernicana": Astronomia przedkopernikowska. Recepcja teorii Kopernika.

Ponieważ tematy 5 i 6 zostały omówione w innych książkach „Biblioteczki Kopernikańskiej”, nie będziemy ich tutaj poruszać.

DYNAMIKA UKŁADÓW PLANETARNYCH I GWIAZDOWYCH

Czytamy w życiorysie Marii Skłodowskiej-Curie, że jako młoda studentka Sorbony z wielkim zainteresowaniem słuchała wykładów mechaniki znakomitego profesora Appella; kiedy profesor mówił „biorę i rzucam Słońce”, fascynowało to wyobraźnię słuchaczy i mobilizowało uwagę do śledzenia matematycznych wywodów. Upłynęło niecałe sto lat od tamtych czasów i słowa profesora Appella stają się rzeczywistością. „Biorę i rzucam planetę”, albo „biorę i rzucam księżyc” może powiedzieć każdego dnia zespół ludzi wysyłających w przestrzeń sztucznego satelitę Ziemi albo raketę międzyplanetarną. I niemal każde dziecko dziś wie, że wystrzelując sztucznego satelitę Ziemi, trzeba mu nadać odpowiednią prędkość — większą niż 8 km/sek. (tzw. pierwsza prędkość kosmiczna), a mniejszą niż 11,2 km/sek. (tzw. druga prędkość kosmiczna). Będzie on wówczas okrążyć Ziemię po orbicie eliptycznej lub kołowej, zależnie od wielkości i kierunku nadanej mu prędkości. Gdybyśmy wyrzucili pocisk z prędkością większą niż 11,2 km/sek., opuściłby on Ziemię i stałby się samodzielną planetą, na podobieństwo Ziemi. Ziemia okrąża Słońce po orbicie bliskiej kołowej z prędkością 30 km/sek. Gdybyśmy z pomocą potężnych silników raketowych zdołali powiększyć prędkość orbitalną Ziemi do 42 km/sek., Ziemia opuściłaby układ słoneczny i okrężałaby samodzielnie Galaktykę na podobieństwo Słońca lub jednej z gwiazd. Słońce w obrotach dokoła środka Galaktyki krąży po orbicie prawie kołowej z prędkością około 250 km/sek. Gdybyśmy zdołali przyspieszyć ten jego ruch do 350 km/sek., opuściłoby ono Galaktykę i szybowałoby samodzielnie jak jedna z galaktyk.

Skąd o tym wszystkim wiemy i skąd znamy te liczby? Skąd znamy ruchy wszystkich ciał naszego układu planetarnego — planet, ich księżyców i planetoid? Skąd wiemy, po jakiej orbicie polecą statek kosmiczny i jakie silniki powinien on włączyć, aby tę orbitę zmienić na inną według naszej woli. W zasadzie sprawa

jest bardzo prosta: jedno powszechne prawo grawitacji, czyli ciężenia, pozwala te wszystkie zadania rozwiązywać. Sprawa jest rzeczywiście bardzo prosta, gdy w grę wchodzi tylko dwa ciała, a jeszcze prościej — dwa punkty materialne. Wówczas wiemy dzięki Newtonowi, że na każdy z nich działa siła (F) wzdłuż łączącej je prostej, proporcjonalna do iloczynu ich mas (M i m) i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu ich wzajemnej odległości (r):

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (1)$$

G jest współczynnikiem proporcjonalności, zwanym stałą grawitacji. Poza tym powinniśmy znać podstawowe prawa dynamiki Newtona, definiujące pojęcie siły jako iloczynu masy ciała przez wywołane przez tę siłę przyspieszenie. Już Kopernik mówi w swym dziele, że Słońce utrzymuje przy sobie planety. Newton znalazł zależność tej siły od odległości. Sprawdził tę zależność na ruchu Księżyca następującym rachunkiem. Jeżeli Księżyc obiega Ziemię po kole, Ziemia musi go przyciągać siłą grawitacji równoważącą reakcję odśrodkową, która dla ruchu kołowego wyraża się znany

wzorem $\frac{mV^2}{r}$, gdzie m jest masą Księżyca, r — jego odległością od Ziemi, V — jego prędkością orbitalną równą $\frac{2\pi r}{T}$.

T oznacza czas obiegu Księżyca równy miesiącowi gwiazdowemu. Przyrównując to wyrażenie do siły grawitacji, otrzymujemy równanie:

$$m \frac{4\pi^2}{T^2} r = G \frac{Mm}{r^2} \quad (2)$$

Wielkość GM była znana z pomiarów przyspieszenia ciężkości na powierzchni Ziemi: $g = \frac{GM}{R^2} = 980 \text{ cm/sek.}^2$, gdzie R jest promieniem Ziemi. O odległości Księżyca od Ziemi (r) było wiadome

(z pomiarów tzw. paralaksy Księżyca), że jest równa 60 promieniom Ziemi: $r = 60R$. Promień Ziemi był wstępnie wyznaczony z pomiarów długości południka ziemskiego, a zatem Newton

26 dysponował wszystkimi wielkościami, potrzebnymi do sprawdzenia

nia równania (2), a więc do sprawdzenia słuszności swego prawa grawitacji. Niestety, po podstawieniu wszystkich wartości równanie to nie sprawdziło się. Jak się później okazało, przyczyną niepowodzenia była niedokładna znajomość promienia Ziemi. Gdy po latach przeprowadzono nowe, dokładniejsze pomiary południka ziemskiego, otrzymana nowa wartość promienia Ziemi R dała dobrą zgodność równania (2). W ten sposób prawo grawitacji zostało po raz pierwszy sprawdzone. Sprawdzano je później wielokrotnie na ruchach innych ciał układu planetarnego przy wykorzystaniu coraz dokładniejszych pomiarów obserwacyjnych. Otrzymywano coraz lepszą zgodność prawa grawitacji z rzeczywistością aż do początków XX w., gdy Albert Einstein wykazał na drodze teoretycznej, że dynamika Newtona i prawo grawitacji są przybliżeniami, wystarczającymi, gdy w grę wchodzi niewielkie prędkości (znacznie mniejsze od prędkości światła), niewielkie masy i odległości. Podał on ogólniejsze prawa dynamiki i uogólnione prawo grawitacji w postaci swojej szczególnej i ogólnej teorii względności. Słuszność tych teorii jest obecnie sprawdzana w całym szeregu zjawisk astronomicznych.

Powróćmy jednak do mechaniki Newtona i zastosowania jej do najprostszego wypadku dwóch punktów materialnych, który daje się bardzo prosto rozwiązać; potrafimy wyznaczyć orbity obu punktów i położenia tych punktów na orbitach w każdym momencie czasu, jeżeli znamy masy ciał i ich początkowe położenia i prędkości. Możliwe są w tym wypadku tylko tzw. keplerskie orbity, to znaczy elipsy (w krańcowych wypadkach koła oraz odcinki prostych), parabole i hiperbole. Te dwa ostatnie rodzaje orbit zdarzają się u komet, sporadycznie przelatujących przez nasz układ. Odwrotnie, obserwując ruchy układu dwóch ciał, możemy znaleźć ich masy. Tymi drogami, na podstawie obserwacji ruchu poszczególnych planet, wyznaczono ich orbity oraz masę Słońca, a z ruchu księżyców — ich orbity i masy planet. Były to jednak rozwiązania przybliżone w tym sensie, że każdorazowo brano pod uwagę tylko dwa ciała: Słońce i planetę lub planetę i jej księżyc, zaniedbując obecność i działanie grawitacyjne pozostałych planet i księżyców. Uwzględnienie wzajemnego oddziaływania wielu ciał komplikuje ogromnie zadanie wyznaczania orbit. Nazywa się to w mechanice zagadnieniem n ciał. Nie istnieją proste matematyczne rozwiązania takiego złożonego zagadnienia. W praktyce rozwiązuje się je w przybliżeniu, traktując działanie dalszych ciał jako zakłócenia (perturbacje) zasadni-

czego ruchu dwóch ciał. Orbity keplerowskie zostają odkształcone działaniem perturbacyjnym innych ciał, na ogół stają się one krzywymi nie zamkniętymi, to znaczy planeta nie powraca po jednym pełnym obiegu do tego samego punktu wyjściowego. Można mówić w przybliżeniu, że są to również orbity keplerowskie (elipsy), tylko o zmiennych elementach: połowa wielkiej osi (a), ekscentryczność (e), nachylenie płaszczyzny orbity do orbity Ziemi (i), okres obiegu (T) są zmienne. Teoria perturbacji ma za zadanie podać, jak zmieniają się z czasem te elementy. Okazało się, że orbity planet i planetoid naszego układu słonecznego mają ciekawą i ważną własność: elementy ich oscylują dokoła pewnych średnich wartości, powracając po dłuższym czasie, po wielu obiegach do tych samych wartości. Oznacza to, że nasz słoneczny układ jest bardzo stateczny i nie grozi mu rozpadnięcie się lub zapadnięcie w ciągu czasu porównywalnego z jego dotychczasowym wiekiem. A że układ nasz już istnieje około 5 miliardów ($5 \cdot 10^9$) lat, można by fakt jego stateczności tłumaczyć tak, że zostały się w nim te ciała, które mają trwałe orbity, te zaś, u których, na przykład, połowa wielkiej osi rosła stale lub malała z czasem, opuściły nasz układ lub spadły na Słońce. Zagadnieniu stateczności i trwałości układów planetarnych i gwiazdowych ma być głównie poświęcone sympozjum kopernikowskie z dynamiki tych układów.

Jeszcze jedno uproszczenie w dotychczasowych naszych rozważaniach wymaga korekty. Prawo grawitacji Newtona mówi o wzajemnym przyciąganiu dwóch punktów materialnych. Tymczasem Słońce i planety nie są punktami, ale ciałami o skończonych rozmiarach. Ponieważ ich rozmiary są małe w porównaniu z ich odległościami, możemy je traktować jak punkty, ale już w wypadku układu: Ziemia i sztuczny satelita uproszczenie takie nie jest dopuszczalne. Gdyby chociaż Ziemia była idealną kulą, złożoną z jednorodnych współśrodkowych warstw, wówczas oddziaływałaby tak, jak gdyby cała jej masa znajdowała się w środku kuli i moglibyśmy ją traktować jak punkt materialny, ale tak nie jest. Ziemia jest spłaszczona: jej promień równikowy jest dłuższy od biegunowego o $\frac{1}{293}$ swej wartości. Ponadto występują inne odstępstwa od kulistości w budowie Ziemi. Te odstępstwa należy uwzględnić przy obliczaniu orbit sztucznych satelitów Ziemi. Komplikują one zadanie i sprawiają, że prawdziwe orbity sztucznych satelitów Ziemi odchylają się od keplerowskich i nie są na ogół zamkniętymi krzywymi. Dodatkowe zakłócenie powo-

duje obecność atmosfery ziemskiej: chociaż bardzo rozrzedzona na wysokościach 100—1000 km, gdzie przeważnie krążą sztuczne satelity, stawia ona opór i hamuje prędkość tych ciał, powodując w końcu ich upadek na Ziemię. Gdy pojazd księżycowy opuści orbitę okołozemską (przez włączenie odpowiednich silników) i przejdzie na orbitę okołoksiężycową, problem atmosfery w pobliżu Księżyca nie istnieje, pojawia się natomiast problem nieregularności bryły Księżyca: jego oś zwrócona ku Ziemi jest dłuższa od osi poprzecznych, poza tym rozkład mas wewnątrz Księżyca wykazuje nieregularności, powodujące zakłócenia w ruchu pojazdów okołoksiężycowych. Do takich niespodzianek, na które natrafiły pierwsze pojazdy okołoksiężycowe, należą tzw. maskony, miejsca na Księżycu o większej sile ciężkości, spowodowanej prawdopodobnie lokalnymi skupieniami materiałów o dużej gęstości.

Takie to zagadnienia nasuwa dynamika ciał naszego układu słonecznego, składającego się ze Słońca jako ciała centralnego, dziewięciu planet, 32 księżyców, około 2000 zarejestrowanych planetoid, czyli małych planet, około setki komet periodycznych i wciąż rosnącej liczby komet nieperiodycznych, niezliczonego mnóstwa drobnych ciał meteorycznych i wciąż rosnącej liczby sztucznych satelitów Ziemi i pocisków międzyplanetarnych. Czy wokół innych gwiazd również istnieją układy planetarne? Przypuszczalnie tak. Nie widzimy powodów, dla których Słońce miałoby być wyjątkiem. Zaobserwowanie planet przy innych gwiazdach jest obecnie niemożliwe wobec dużych odległości gwiazd i małych rozmiarów planet. Najbliższa gwiazda jest odległa od nas o $4\frac{1}{3}$ lat świetła. Z tej odległości nawet taka planeta, jak Jowisz, mająca średnicę około 10 razy większą niż Ziemia i około 10 razy mniejszą niż Słońce nie da się zaobserwować przy dzisiejszej technice obserwacyjnej. Prawdopodobnie w przyszłości będzie to możliwe. Obecnie natomiast znamy kilka takich gwiazd podwójnych, w których mniejszy składnik jest czymś pośrednim między gwiazdą i planetą. Masy tych obiektów wynoszą mniej niż jedna setna masy Słońca. Obecność ich wykrywamy z drobnych ruchów orbitalnych głównych składników.

Gwiazd podwójnych i wielokrotnych jest w naszej Galaktyce bardzo dużo, stanowią one około 40% wszystkich gwiazd. Są to pary gwiazd związane siłami wzajemnego ciężenia, opisujące orbity eliptyczne lub kołowe wokół wspólnego środka mas. Różne kombinacje gwiazd są wśród nich reprezentowane: olbrzym z kar-

łem albo dwie gwiazdy podobnego typu, gwiazdy prawie stykające się ze sobą, tzw. ciasne pary, i gwiazdy bardzo daleko rozsunięte, o okresach obiegu wynoszących dziesiątki i setki lat. Gwiazdy podwójne dostarczają wielu cennych informacji: możemy z ich orbit oszacować ich masy i rozkład gęstości w ich wnętrzach, niekiedy — rozmiary i szybkość obrotu osiowego, jeżeli są to podwójne gwiazdy zasłaniające się na przemian w ruchu orbitalnym (zaćmieniowe). W ciasnych parach obserwuje się wpływ i wymianę materii pod działaniem wzajemnej grawitacji.

Istnieją w naszej Galaktyce zgrupowania gwiazd związane siłami wzajemnego ciężenia, zwane gromadami gwiazd. Niektóre z nich liczą po kilkaset, do tysiąca gwiazd dość luźno związanych; nazywamy je gromadami otwartymi. Takimi są znane powszechnie Plejady, Hiady, Warkocz Bereniki i wiele innych. Mają one niewątpliwie wspólne pochodzenie, nie są jednak trwałymi skupieniami, z biegiem czasu działanie grawitacyjne Galaktyki rozluźnia je i rozprasza. Z ich obecnego stanu skupienia oraz z wieku gwiazd, które wchodzi w ich skład, można oszacować wiek tych gromad. Są to twory na ogół młode, liczące około 10 milionów (10^7) lat, jak Plejady — około stu milionów (10^8) lat, jak Hiady — do około miliarda (10^9) lat, jak Warkocz Bereniki. Inny rodzaj gromad stanowią bardzo zwarte i liczebne gromady, zwane gromadami kulistymi, ponieważ z reguły stanowią konfiguracje kuliste, silnie zagęszczone ku środkowi, w przeciwieństwie do gromad otwartych, stanowiących zgrupowania nieregularne. Gromady kuliste liczą po kilkaset tysięcy (10^5) gwiazd. Są to zgrupowania silnie związane siłami grawitacji i na skutek tego trwałe. Wiek ich ocenia się na 10^9 — 10^{10} lat. Dynamika gromad kulistych dwojako bywa ujmowana: albo jako zagadnienie n indywidualnych ciał — jest to bardzo skomplikowane zagadnienie, ale dające się obecnie śledzić do $n = 10^3$ przy pomocy szybkich komputerów albo też jako ruch poszczególnych gwiazd w polu grawitacyjnym całej gromady, przy czym należy uwzględnić również oddziaływania poszczególnych gwiazd przy bliskich spotkaniach. Dzięki takim spotkaniom następuje wymiana energii pomiędzy gwiazdami i ustala się stan ekwipartycji (równego podziału) energii, podobnie jak to zachodzi pomiędzy cząsteczkami gazu w stałej temperaturze. Gwiazdy o większych masach mają mniejsze prędkości i koncentrują się bliżej środka gromady.

30 Gwiazdy o małych masach, mające większe prędkości i mniej

skoncentrowane ku środkowi gromady, są bardziej narażone na „wyparowanie” z gromady. Taki proces utraty gwiazd postępuje powoli, przy czym w miarę ucieczki gwiazd pozostałe gwiazdy silniej skupiają się ku środkowi.

Mamy wreszcie skupienia gwiazd i gromad gwiazdnych liczące setki miliardów (10^{11}) gwiazd. Są to również układy związane siłami grawitacji. Nazywamy je galaktykami. Te olbrzymie skupiska gwiazd i rozproszonej materii międzygwiazdowej mają różne rozmiary i strukturę. Od kulistych, podobnych do gigantycznych gromad kulistych, poprzez eliptyczne — w kształcie mniej lub więcej spłaszczonych sferoid, aż do silnie spłaszczonych dysków. Te ostatnie mają mniej lub bardziej wyraźną strukturę spiralną. Czytelnik odnajdzie te różnorodne formy galaktyk na załączonych zdjęciach. Stopień spłaszczenia galaktyk wiąże się niewątpliwie z szybkością ich obrotu dokoła swej osi. Nasza Galaktyka ma kształt silnie spłaszczonego dysku o średnicy około 80 tysięcy lat światła, widocznego na niebie jako pas Drogi Mlecznej. Posiada strukturę spiralną w dysku, a w środku ma sferoidalne jądro o grubości około 4 tysięcy lat światła. Nie możemy wykonać zdjęcia naszej Galaktyki w całości, ponieważ znajdujemy się wewnątrz niej, w odległości około 30 tysięcy lat światła od środka, a więc na peryferiach dysku. Badając od wewnątrz rozmieszczenie gwiazd i ruchy materii w naszej Galaktyce, możemy odtworzyć jej obraz i znaleźć analogie z innymi galaktykami. Galaktyka nasza jest przypuszczalnie bardzo zbliżona rozmiarami i strukturą do wielkiej galaktyki w gwiazdozbiornie Andromedy, jednej z większych galaktyk spiralnych, a zarazem stosunkowo bliskiej nas, bo odległej zaledwie o 1,5 miliona lat światła. W pogodną noc można ją dostrzec gołym okiem. Silny stopień spłaszczenia naszej Galaktyki i galaktyki Andromedy świadczy o ich szybkiej rotacji osiowej. Istotnie, nasze Słońce wraz z całym układem planetarnym ma w tym obrocie prędkość około 250 km/sek., części Galaktyki położonej bliżej środka, a także na zewnątrz Słońca mają mniejsze prędkości rotacji.

Z punktu widzenia dynamiki Galaktyka nasza przypomina układ słoneczny: wokół centralnego jądra, gdzie skupiona jest znaczna część masy Galaktyki, krążą po orbitach — zbliżonych do kołowych — gwiazdy, niczym planety dokoła Słońca, tylko że tych krążących gwiazd są w naszej Galaktyce setki miliardów. Podobnie jak w układzie słonecznym orbity gwiazd leżą w przybliżeniu w jednej płaszczyźnie, i gwiazdy z nielicznymi stosunkowo wy-

jątkami krążą w tym samym kierunku. Aby obliczyć orbitę którejkolwiek gwiazdy w Galaktyce, np. orbitę Słońca, w pierwszym przybliżeniu możemy potraktować to zadanie jako zagadnienie dwóch ciał: centralnej masy Galaktyki i krążącego wokół niej Słońca, utrzymywanego siłą ciężenia. W wyniku otrzymamy orbitę keplerowską, dla Słońca — elipsę bardzo bliską koła, podobnie dla większości gwiazd. Są wyjątkowe gwiazdy, poruszające się po orbitach hiperbolicznych, skazane na opuszczenie Galaktyki. Aby otrzymać orbity galaktyczne gwiazd bardziej zbliżone do rzeczywistych, należy uwzględnić działanie grawitacyjne wszystkich gwiazd, czyli rozwiązać zagadnienie n ciał przy n równym 10^{11} . Łatwiej jest przyjąć pewien model Galaktyki z określonym rozkładem mas, możliwie zbliżonym do realnego, wyznaczyć wynikający z tego modelu rozkład sił grawitacyjnych i śledzić ruch gwiazdy w tak określonym polu sił. Obliczenia takie wykonano dla wielu gwiazd o znanych aktualnie prędkościach. Otrzymano orbity mniej lub więcej odchylające się od keplerowskich, przeważnie jako tory nie zamknięte. Jednakże i tu daje się stwierdzić trwałość układu galaktycznego jako całości: większość orbit oscyluje w skończonych granicach. Odwracając zagadnienie, możemy z obserwowanych prędkości gwiazd w ich obrocie galaktycznym otrzymać rozkład mas i całkowitą masę Galaktyki. Tą metodą wyznaczono masy wielu galaktyk. Zawierają się one w granicach od 10^8 do $3 \cdot 10^{14}$ mas Słońca.

Przyjrzyjmy się z kolei galaktykom eliptycznym o małym stopniu spłaszczenia, a zatem o małej prędkości rotacji. Jakie ruchy wykonują w nich poszczególne gwiazdy? W takich galaktykach, podobnie jak w gromadach kulistych, istnieje pole grawitacyjne skierowane do środka. Gdybyśmy wprowadzili gwiazdę do takiego układu z początkową prędkością zerową, spadałaby ona ku środkowi, i gdyby tam nie zderzyła się z inną gwiazdą, minęłaby środek i oscylowałaby wokół niego ruchem wahadłowym tam i z powrotem. Można powiedzieć, że tor jej byłby granicznym przypadkiem silnie wydłużonej elipsy. Jeżeli gwiazda miała niezerową prędkość początkową, skierowaną nie ku środkowi układu, orbita jej będzie zbliżona do mniej lub więcej wydłużonej elipsy, w szczególnym wypadku może być nawet kołem. Galaktyki eliptyczne mają chaotyczny rozkład prędkości i orbit gwiazd, w przeciwieństwie do uporządkowanego, zgodnego obrotu gwiazd w galaktykach spiralnych. Przypuszcza się, że ten uporządkowany obrót galaktyki spiralne nabyły w przeszłości przy bliskim mijaniu

się z inną galaktyką, która swoim działaniem grawitacyjnym „zakręciła” daną galaktykę. Galaktyki eliptyczne, w myśl tej teorii, albo nie miały takich spotkań, albo miały ich wiele, działających w różnych kierunkach.

W tym wszystkim, co powiedzieliśmy o obrocie galaktyk, pozostała nie wyjaśniona sprawa, dlaczego galaktyki silnie spłaszczone, a więc szybko i zgodnie rotujące, mają strukturę spiralną, złożoną z dwóch lub większej liczby uzwojeń. Wiele prac poświęcono temu zagadnieniu. Obecnie największą popularność ma teoria Lindblada-Lina, według której niejednorodności gęstości materii obiegają dysk galaktyki jako tzw. fale gęstości, przypominające fale zgęszczeń z akustyki. Czy nasza Galaktyka ma strukturę spiralną? Do niedawna nie byliśmy tego pewni, nie mając możliwości spojrzenia na nią z zewnątrz. Obecnie z rozkładu gęstości gwiazd o znanych odległościach rozpoznajemy zarysy kilku ramion spiralnych, przebiegających w naszym pobliżu. Ponadto z badań radioastronomicznych znamy dość dobrze rozkład gęstości wodoru międzygwiazdowego w całej prawie Galaktyce. Mianowicie, atomy wodoru neutralnego nawet w stosunkowo niskich temperaturach (ok. 100°K *), jakie panują przeważnie w przestrzeniach międzygwiazdowych, mogą emitować promieniowanie o długości fali 21 cm, a więc w zakresie krótkich fal radiowych. Możliwość wykrywania obecności wodoru w przestrzeniach międzygwiazdowych przez obserwacje radiowe w tej długości fali była przewidziana teoretycznie w latach czterdziestych, zanim jeszcze rozwinęła się radioastronomia. Od 1953 r. kilka ośrodków radioastronomicznych bada promieniowanie naszej i innych galaktyk w tej linii wodorowej. Dzięki tym badaniom znamy rozmieszczenie wodoru międzygwiazdowego w Galaktyce. Jak widać z załączonego rysunku, rozkład ten wykazuje dość zawiłą strukturę spiralną. Ponieważ wodór jest najobfitszym pierwiastkiem we Wszechświecie, a więc i w materii międzygwiazdowej, uzyskany obraz przedstawia rozmieszczenie materii międzygwiazdowej. Ramiona spiralne gwiazdowe, odcyfrowane w naszym otoczeniu, zgadzają się w przybliżeniu z przebiegiem ramion wodorowych. Wydawałoby się, że galaktyki są największymi skupieniami materii we Wszechświecie, związanymi siłami grawitacji. Okazuje się, że tak nie jest, że istnieją galaktyki podwójne i wielokrotne,

* $^{\circ}\text{K}$ oznacza stopień temperatury w skali Kelvina. Aby otrzymać wartość temperatury w skali Celsjusza, należy od temperatury podanej w skali Kelvina odjąć 273° .

ponadto istnieją gromady galaktyk, liczące po kilkaset lub po parę tysięcy galaktyk. Na zdjęciach nieba, otrzymanych przy pomocy dużych teleskopów, jak na przykład w atlasie nieba wykonanym teleskopem Schmidta w Obserwatorium na górze Palomar, można zauważyć, że galaktyki nie są równomiernie rozrzucone po niebie, ale w pewnych okolicach występują obficie niż w innych. Takie wyraźne skupienia galaktyk znajdujemy w gwiazdobiorach Panny i Warkocza Bereniki, w gwiazdozbiorze Wielkiej Niedźwiedzicy i innych. Nasza Galaktyka znajduje się w gromadce kilkunastu galaktyk, stanowiących tzw. Układ Lokalny i powiązanych ze sobą siłami grawitacji. Do tego układu należy bliźniacza z naszą wielka galaktyka Andromedy z dwoma swymi satelitami — małymi galaktykami eliptycznymi, widocznymi na zdjęciach galaktyki Andromedy. Nasza Galaktyka ma również dwóch satelitów — dwie małe galaktyki na wpół regularne, zwane Obłokami Magellana, widoczne gołym okiem na południowej półkuli nieba. Poza tym do Układu Lokalnego należy galaktyka spiralna M₃₃ i szereg małych galaktyk eliptycznych i nieregularnych. Na zdjęciach niektórych galaktyk podwójnych i wielokrotnych widoczne są „mosty” — jasne smugi materii łączące galaktyki.

Skoro mamy tak wiele szczebli skupień materii, w postaci gwiazd, gromad gwiazdnych, galaktyk i gromad galaktyk, chcielibyśmy zapytać, czy istnieją dalsze szczeble w postaci gromad gromad galaktyk i tak dalej. Oznaczałoby to, że Wszechświat ma budowę hierarchiczną. Jest to zagadnienie bardzo istotne dla kosmologów, ponieważ hierarchiczny model Wszechświata jest szczególnie „pakowny”. Nie możemy jednak na razie stwierdzić, czy istnieją gromady gromad galaktyk i, jak dotąd, hierarchia obserwowanej części Wszechświata kończy się na gromadach galaktyk.

Wśród galaktyk obserwuje się kapitalne zjawisko przesunięć ich widm ku czerwieni, tym silniejszych, im dalej od nas galaktyki się znajdują. Przesunięcia widm ku falam dłuższym lub krótszym, obserwowane w małej skali u gwiazd, interpretujemy znanym efektem Dopplera jako wynik oddalania się lub zbliżania ku nam źródła światła. Na tym zjawisku oparta jest metoda wyznaczania prędkości oddalania się lub zbliżania gwiazd (tzw. prędkości radialnej). W widmach gwiazd naszej Galaktyki te przesunięcia są bardzo małe i odpowiadają prędkościom od kilku do kilkuset km/sek. Widma galaktyk natomiast mają przesunięcia odpowiadające prędkościom ucieczki od kilkuset do paru tysięcy km/sek.

Wynikałoby stąd, że wszystkie galaktyki uciekają od nas z prędkościami tym większymi, im są dalej, i że najdalsze mają prędkości ucieczki bliskie (ok. 0,9) prędkości światła. Wypływa stąd prosty wniosek, że zasięg naszych dzisiejszych teleskopów jest bliski granic poznawalnego Wszechświata: galaktyk uciekających z prędkością większą od prędkości światła nie będziemy mogli obserwować. Jeżeli więc przesunięcia widm galaktyk ku czerwieni są wynikiem efektu Dopplera, oznacza to, że Wszechświat się rozszerza. Znając stosunek prędkości ucieczki galaktyk do ich odległości (stała Hubble'a), możemy obliczyć wstecz, kiedy galaktyki wyruszyły z jednego „punktu” — kiedy Wszechświat zaczął się rozszerzać. Okazuje się, że to nastąpiło około 10 miliardów (10^{10}) lat temu. Moment ten kosmologowie nazywają wielkim wybuchem (ang. *big bang*) Wszechświata, albo — w języku matematycznym — osobliwością. Do zagadnienia tego powrócimy jeszcze w dalszych rozdziałach tej książeczki.

BADANIA UKŁADU PLANETARNEGO

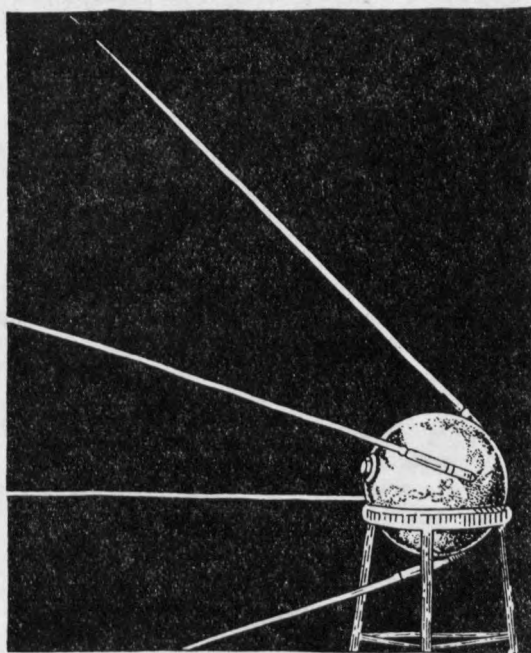
Układ planetarny jest naszym domem rodzinnym w bezmiarach Wszechświata. Tak go widział Kopernik, gdy w nim ustalał ład i hierarchię, umieszczając Słońce w jego środku „jakby na tronie królewskim”, skąd „kieruje rodziną planet, krążącą się dokoła” (*De revolutionibus*, księga pierwsza).

Do czasu zastosowania lunety (1609 r.), a więc i w czasach Kopernika, znano tylko 6 planet i niewiele wiedziano o naturze fizycznej tych ciał poza tym, że w przeciwieństwie do Słońca, są to ciała chłodne, świecące odbitym światłem słonecznym. Ziemia mogła służyć za wzorec rozmiarów i budowy innych planet, Księżyc zaś ukazywał tarczę z niezmiennym zarysem „lądów” i „mórz”. Pozostałe planety przedstawiały się nie uzbrojonemu oku jako punkty. Toteż doniesienia Galileusza o tym, że w lunecie widać tarcze planet, że Wenus ukazuje fazy podobnie jak Księżyc, że Jowisz ma cztery księżycy, a Saturn ma niezwykle kształt, wywołały sensację wśród uczonych i dostarczyły naocznych argumentów na korzyść teorii Kopernika. Pierwsze lunety były niedoskonałe, toteż rozwój wiedzy o planetach był ściśle związany z postępem techniki budowy lunet. Doskonalenie optyki i powiększanie rozmiarów lunet pozwalały z biegiem lat dostrzegać coraz więcej szczegółów na tarczach planet i w strukturze pierścieni Saturna, odkrywać dalsze planety i coraz słabsze ich księżycy. Kres tym możliwościom kładzie jednak atmosfera ziemska, ten niejednorodny i niespokojny ośrodek optyczny, przez który obserwator ziemski jest zmuszony oglądać ciała niebieskie. Stosując coraz silniejsze powiększenia w lunetach, powiększamy również efekty turbulencji atmosferycznej*, nie mówiąc o rosnących błędach optyki.

Wyjście poza atmosferę Ziemi przez unoszenie aparatury czy to przy pomocy balonów czy rakiet balistycznych, sztucznych satelitów Ziemi i rakiet międzyplanetarnych uwalnia obserwacje od

* Turbulencja atmosferyczna – nie uporządkowane i przypadkowe zmiany kierunku i prędkości cząsteczek powietrza.

rozmycia atmosferycznego obrazów i udostępnia zakresy promieniowania niedostępne z Ziemi, jak nadfiolet, promienie X (Roentgena) i gamma z jednej strony, a podczerwień i długie fale radiowe — z drugiej. Zbudowanie obserwatorium astronomicznego na



13. Pierwszy sztuczny satelita Ziemi, wystrzelony w ZSRR 4 X 1957 r.

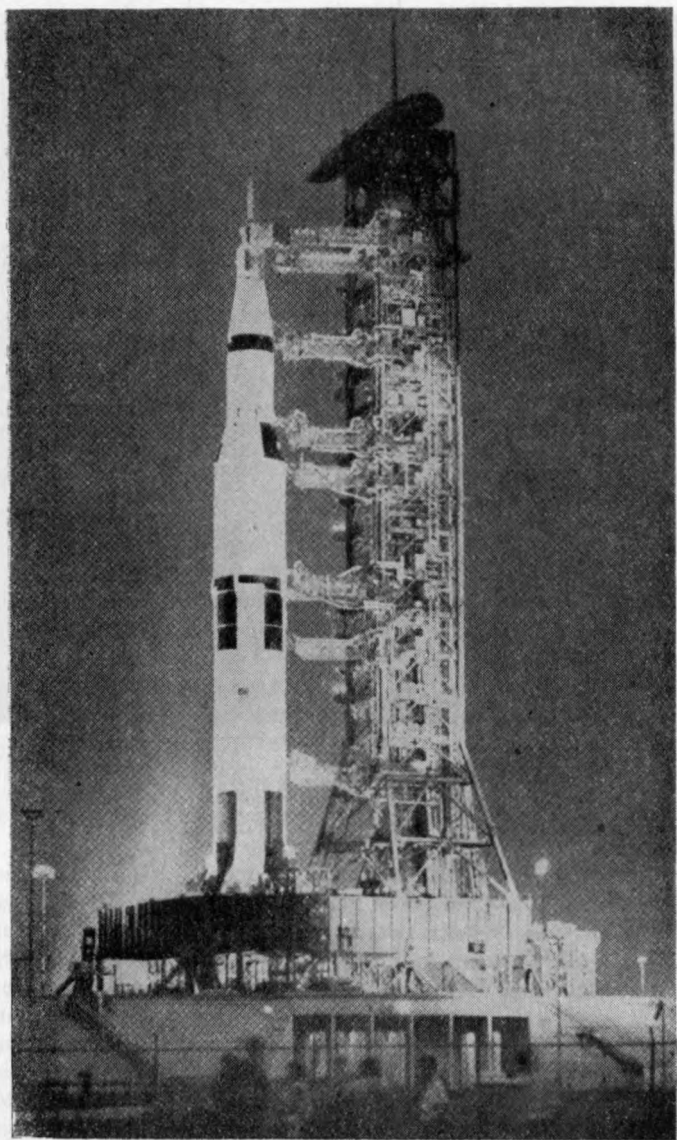
Księżycu będzie przypuszczalnie w niedalekiej przyszłości dalszym krokiem naprzód w badaniach planet i gwiazd. Loty pojazdów kosmicznych wokół planet i lądowanie stacji automatycznych na powierzchni planet z przekazywaniem wyników pomiarów drogą radiową na Ziemię pozwalają już obecnie na bezpośrednie ich badanie. Zdajemy sobie sprawę z tego, że badania pozaatmosferyczne ciał niebieskich są trudne w realizacji i bardzo kosztowne, toteż są i będą kontynuowane naziemne obserwacje, które dostarczyły i dalej mogą dostarczać wiele cennych informacji. Nie chodzi

tu tylko o samo oglądanie ciał niebieskich przez lunety. Fotografia, pomiary jasności powierzchni planet, a nade wszystko analiza widmowa dostarczają danych o temperaturze powierzchni, o gęstości i składzie chemicznym atmosfer planet.

Widma Księżyca i planet są zasadniczo powtórzeniem widma Słońca, ponieważ ciała te świecą odbitym światłem Słońca. Jeżeli jednak planeta posiada atmosferę, światło słoneczne, przechodząc przez nią, jest pochłaniane w pewnych długościach fali, zależnie od rodzaju gazów obecnych w atmosferze planety. Tak na przykład, widma planet Wenus i Marsa wykazują ciemne linie i pasma charakterystyczne dla dwutlenku węgla, widma dalszych czterech planet mają pasma amoniaku (NH_3) i metanu (CH_4). Powiedzenie, że planety same nie świecą, a tylko odbijają światło słoneczne, nie jest ścisłe. Każde ciało wysyła promieniowanie o natężeniu i barwie zależnych przede wszystkim od jego temperatury. Słońce ma wysoką temperaturę, około 6000°K w zewnętrznych warstwach, toteż promieniuje silnie, najsilniej w zakresie światła. Planety i księżycy mają temperatury niskie, poniżej 700°K , dlatego promieniają słabo, a maksimum natężenia ich promieniowania przypada w podczerwieni. Istotnie, obserwujemy w widmach planet w podczerwieni, gdzie widmo Słońca jest już bardzo słabe, własne promieniowanie planet, z którego można określić ich temperatury. Im niższa jest temperatura planety, tym dalej w podczerwieni odnajdujemy jej własne promieniowanie.

Bliższe zapoznanie się z opisem poszczególnych planet poprzedzimy zestawieniem tabelarycznym ich podstawowych cech, takich jak odległość od Słońca, rozmiary, okresy obiegu wokół Słońca i obrotu wokół własnej osi oraz innych danych, uzyskanych przeważnie z obserwacji naziemnych.

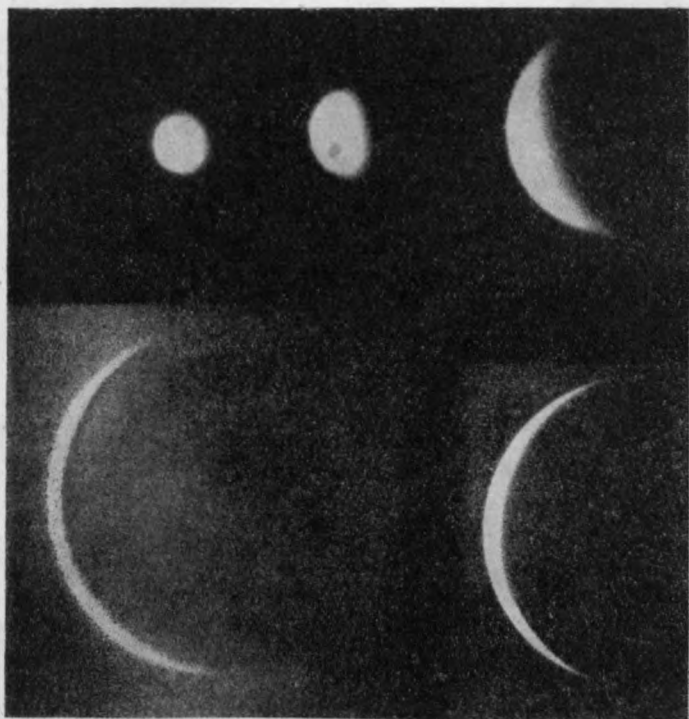
Z tabeli 1 wynika, że w naszym układzie mamy cztery planety olbrzymy: Jowisza, Saturna, Urana i Neptuna, oraz pięć planet karłowatych, zbliżonych rozmiarami do Ziemi lub mniejszych od niej. Planety olbrzymy mają szybki obrót dokoła osi, dużą liczbę księżyców, małą gęstość średnią. Czynnikiem decydującym o temperaturze panującej na powierzchni planet jest ich odległość od Słońca. Z tego powodu Merkury i Wenus, planety leżące bliżej Słońca niż Ziemia, powinny mieć temperatury wyższe, pozostałe zaś — niższe niż Ziemia. Poza odległością od Słońca na temperaturę planety ma wpływ obecność i skład atmosfery, co z kolei zależy od przyspieszenia ciężkości na jej powierzchni, wyrażającego się stosunkiem masy do kwadratu promienia planety. Planety o słabej



14. Rakieta Saturn 5, przygotowana do wystrzelenia pojazdu Apollo 11

Tabela 1
Dane dotyczące planet i Słońca

| Planeta | Średnia odległość od Słońca (mln km) | Okres obiegu (lat) | Średnica równikowa (km) | Masa (10^{27} g) | Średnia gęstość (g/cm^3) | Okres obrotu dookoła osi | Liczba księżyców |
|---------|--------------------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------------|------------------|
| Merkury | 59 | 0,241 | 4 800 | 0,33 | 5,62 | 59 dni | - |
| Wenus | 108 | 0,615 | 12 200 | 4,87 | 5,09 | 243 dni | - |
| Ziemia | 149,5 | 1,000 | 12 756 | 5,98 | 5,52 | 23 godz. 56 min. | 1 |
| Mars | 228 | 1,881 | 6 800 | 0,64 | 3,97 | 24 godz. 37 min. | 2 |
| Jowisz | 778 | 11,862 | 143 600 | 1900 | 1,30 | 9 godz. 50 min. | 12 |
| Saturn | 1 426 | 29,458 | 120 700 | 568 | 0,68 | 10 godz. 14 min. | 10 |
| Uran | 2 868 | 84,015 | 47 100 | 87 | 1,58 | 10 godz. 49 min. | 5 |
| Neptun | 4 494 | 164,788 | 44 600 | 103 | 2,22 | 15 godz. 48 min. | 2 |
| Pluton | 5 900 | 248 | 6 000? | 1,1 | 8? | 6 dni 8 godz. | ? |
| Słońce | 0 | - | $1,392 \cdot 10^6$ | $1,98 : 10^{33}$ g | 1,41 | 25 dni (na równiku) | - |



15. Wenus w różnych fazach

sile ciężenia, jak Merkury i Mars, nie były w stanie utrzymać gęstych atmosfer, to samo dotyczy księżyców planet, aczkolwiek jeden z księżyców Saturna posiada stosunkowo gęstą atmosferę. Bliskość Słońca również przyspiesza utratę atmosfery przez planetę, ponieważ szybszy ruch termiczny cząsteczek gazu ułatwia im ucieczkę z pola grawitacyjnego planety. Sprawdza się to na Merkurym, który jest pozbawiony atmosfery, ale niezupełnie zgadza się z faktem istnienia wyjątkowo gęstej atmosfery na Wenus.

Merkury jest trudny do obserwacji, ponieważ znajduje się zawsze w pobliżu Słońca. Toteż o tej niewielkiej planecie niewiele więcej wiemy nad to, co powiedziano wyżej. Merkury nie



16. Ziemia widziana z odległości Księżyca

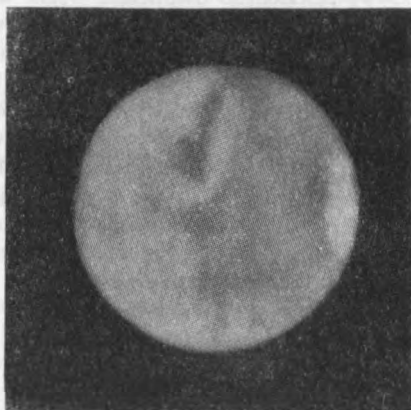
ma atmosfery i wolno obraca się dookoła osi, co sprawia, że temperatura na tej planecie jest silnie zróżnicowana pomiędzy dzienną i nocną stroną — od 30 do 600° K (od -240 do +330° C).

W e n u s, zwana białą planetą, świeci bardzo jasno na wieczornym lub rannym niebie. Ta najbliższa i najbardziej podobna do Ziemi rozmiarami i masą planeta przedstawia dotąd wiele zagadek, głównie z powodu swej nieprzezroczystej atmosfery. Nie

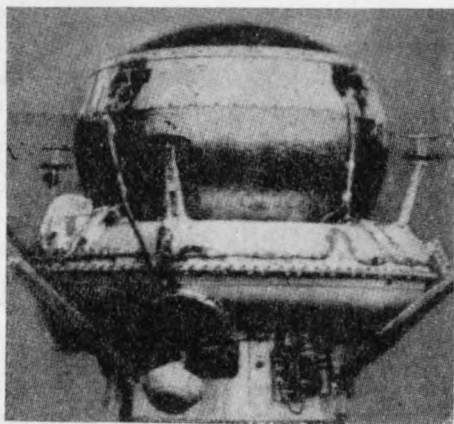
zują na powolny obrót Wenus dokoła jej osi — w kierunku przeciwnym niż wszystkich pozostałych planet. Badania widmowe planety, prowadzone z Ziemi i z raket międzyplanetarnych (radzieckie Wenery i amerykańskie Mariner), dają różne wartości temperatury zależnie od zakresu badanego widma. Pomiary natężeń pasm dwutlenku węgla, obecnego w atmosferze planety, dają wartości temperatury około 400°K , promieniowanie podczerwone Wenus wskazuje na temperatury około 250°K , a pomiary promieniowania radiowego na falach centymetrowych dają wynik około 700°K . Przymuszczalnie te różne wartości temperatury pochodzą z różnych warstw atmosfery białej planety. Radziecka stacja kosmiczna Wenera 7, która osiadła na powierzchni Wenus, przekazała wartość temperatury około 750°K .

O składzie chemicznym atmosfery Wenus wiemy, że głównym jej składnikiem (95%) jest dwutlenek węgla (CO_2). Małą domieszkę stanowi para wodna, a zaledwie wykrywalną — tlen. Jak widzimy, skład atmosfery Wenus różni się zasadniczo od składu atmosfery ziemskiej, co obok bardzo wysokich temperatur czyni istnienie życia na tej planecie wysoce nieprawdopodobnym.

Mars, drugi nasz sąsiad, zwany czerwoną planetą od koloru pomarańczowego niektórych partii powierzchni, jest dwukrotnie mniejszy od Ziemi, ma znacznie rzadszą od niej atmosferę, złożoną głównie z dwutlenku węgla, azotu i nikłej domieszki pary wodnej, oraz tlenu i wodoru, wykrywalnych w górnych war-



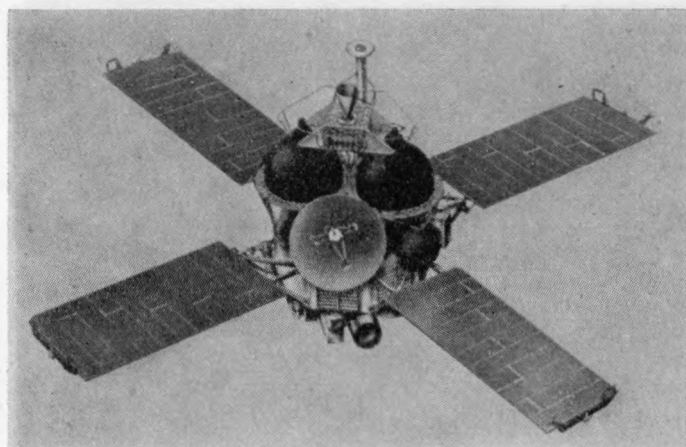
17. Mars



18. Automatyczna stacja radziecka Mars 3

stwach atmosfery. Ta rzadka atmosfera, w której pojawiają się sporadycznie zamglenia, podczas burz pyłowych zmętnienia o zabarwieniu żółtawym, bądź wreszcie w wyższych warstwach zamglenia o kolorze niebieskim, normalnie jest o tyle przezroczysta, że pozwala obserwować powierzchnię planety. Znane są i utrwalone na mapach zarysy jaśniejszych żółtawych obszarów i ciemniejszych szarzielonkawych „mórz”, nie będących zbiornikami wody. Bieguny planety są pokryte białymi czapkami, zmieniającymi kolejno swoje rozmiary z porami roku; są to cienkie pokrywy zestalonego dwutlenku węgla w postaci szronu, topniejącego w porach letnich. Zdjęcia Marsa wykonane z raket międzyplanetarnych, radzieckich Marsów i amerykańskich Marinerów, ukazują obecność na jego powierzchni licznych kraterów, przypominających kraterzy księżycowe, gór dochodzących do wysokości 13 km, i głębokich rozpadlin. Po Księżycu Mars jest drugim z kolei obiektem badań kosmicznych. Po oblotach pojazdów kosmicznych wokół Marsa i miękkich lądowaniach stacji automatycznych na jego powierzchni planowany jest na lata osiemdziesiąte lot statku z załogą ludzką i ewentualnym lądowaniem. Będzie to zadanie znacznie trudniejsze niż w wypadku Księżycy, jeśli się porówna czas trwania wypraw: około tygodnia na Księżyc i około roku na Marsa.

Okres obrotu Marsa dookoła osi jest bardzo bliski ziemskiego, 44 doba trwa tam prawie 24 godziny. Nachylenie osi jest również



19. Amerykańska stacja Mars-Mariner 71 (Mariner 9)

podobne do ziemskiego, co daje podobny przebieg pór roku, trwającego na Marsie 1,9 lat ziemskich. Temperatura na równiku Marsa waha się w granicach od 220 do 290° K (od -50 do +20° C) zależnie od pory dnia i roku. Na biegunach spada do 140° K (-130° C). Widzimy zatem, że warunki klimatyczne na Marsie są surowsze niż gdziekolwiek na Ziemi. Ubóstwo tlenu i pary wodnej, której całkowita zawartość po skropleniu pokryłaby planetę warstwą grubości 5 μ *, czynią tę planetę również niegościnną dla życia, jednak możliwość istnienia jakichś bardzo ubogich jego form nie jest wykluczona. Mars ma dwa mini-księżyce, którym nadano groźne nazwy Phobos — Strach i Deimos — Groza, o średnicach wynoszących zaledwie 25 i 12 km. Pierwszy z nich ma okres obiegu zaledwie 7^h39^m (krótszy od okresu obrotu Marsa), skutkiem czego wschodzi na zachodzie i zachodzi na wschodzie dla obserwatora na Marsie. Na zdjęciach wykonywanych przez Mariner 9 Phobos ma nieregularny kształt i jest gęsto pokryty kraterami.

Jo w i s z, największa z planet, o średnicy przeszło dziesięciokrotnie większej od Ziemi i prawie dziesięciokrotnie mniejszej od Słońca, jest otoczona nieprzezroczystą atmosferą, zawierającą

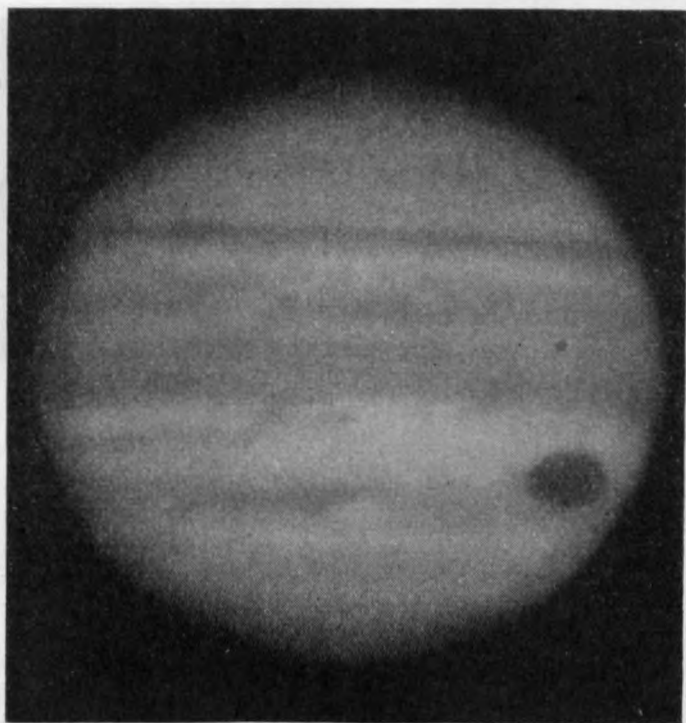
* μ (mikron) — tysięczna część milimetra.



20. Kratery na Marsie - zdjęcie wykonane przez Mariner 9

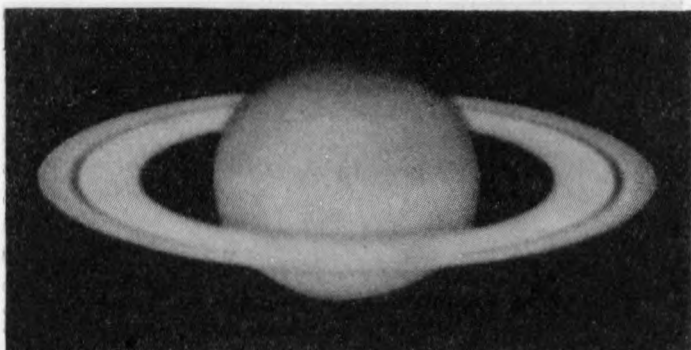
związki bogate w wodór, jak amoniak (NH_3) i metan (CH_4), i przypuszczalnie wolny wodór w postaci molekuł H_2 , co zbliża ją do składu chemicznego Słońca i gwiazd, w których najobfitszym pierwiastkiem jest wodór. Inną cechą zbliżającą Jowisza do gwiazd jest fakt, że wysyła on znacznie więcej energii promienistej niż jej otrzymuje od Słońca, posiada więc jakieś źródła energii. Atmosfera Jowisza wykazuje stosunkowo trwałą strukturę w postaci ciemnych pasów równoleżnikowych o brudnym zabarwieniu i plam, z których szczególnie znana jest duża plama owalna o czerwonym kolorze. Utwory te są wynikiem cyrkulacji atmosfery Jowisza; czerwona plama jest przypuszczalnie miejscem silnych prądów wstępujących. Powierzchni Jowisza nie widzimy.

46 Wobec znacznej odległości Jowisza od Słońca, wynoszącej prawie



21. Jowisz

800 milionów kilometrów, temperatura na tej planecie powinna wynosić około 130°K (ok. -140°C), co wyklucza możliwość istnienia na niej życia organicznego. Bardzo szybka rotacja planety nadaje jej spłaszczony kształt. Jowisz posiada prawdopodobnie dość silne pole magnetyczne. Silne promieniowanie radiowe Jowisza świadczy o obecności jonosfery, czyli warstw zjonizowanych gazów w górnych warstwach atmosfery, oraz pasów radiacyjnych wokół planety, analogicznych do ziemskich pasów Van Allena. Spośród 12 księżyców krążących wokół Jowisza cztery, znane już Galileuszowi, mają rozmiary porównywalne z Księżycem Ziemi, pozostałe są znacznie mniejsze, niektóre z nich są przypuszczalnie planetoidami „złapanymi” przez Jowisza. Jak wiadomo, w 1972 r. wyruszyła pierwsza rakieta międzyplanetarna,

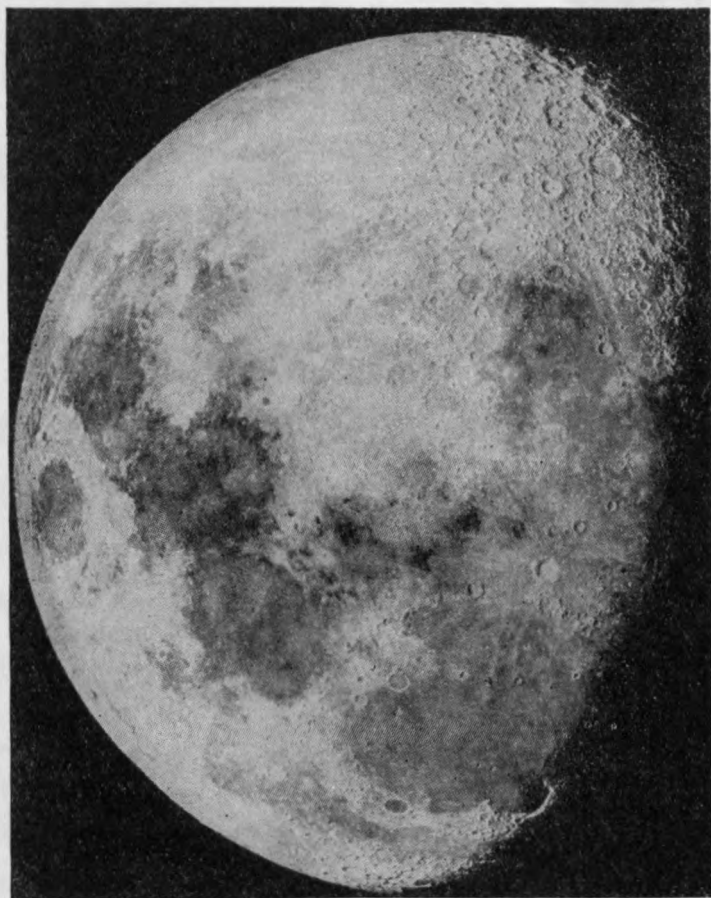


22. Saturn

amerykański Pionier, aby po dwóch latach dotrzeć w okolicie Jowisza. W rok później wyruszył drugi Pionier. W roku 1977 mają być wysłane dwa Marinyery w pobliże Jowisza i Saturna. Te dalekie sondy międzyplanetarne powinny przekazać wiele cennych informacji o planetach olbrzymach i otaczającej je przestrzeni.

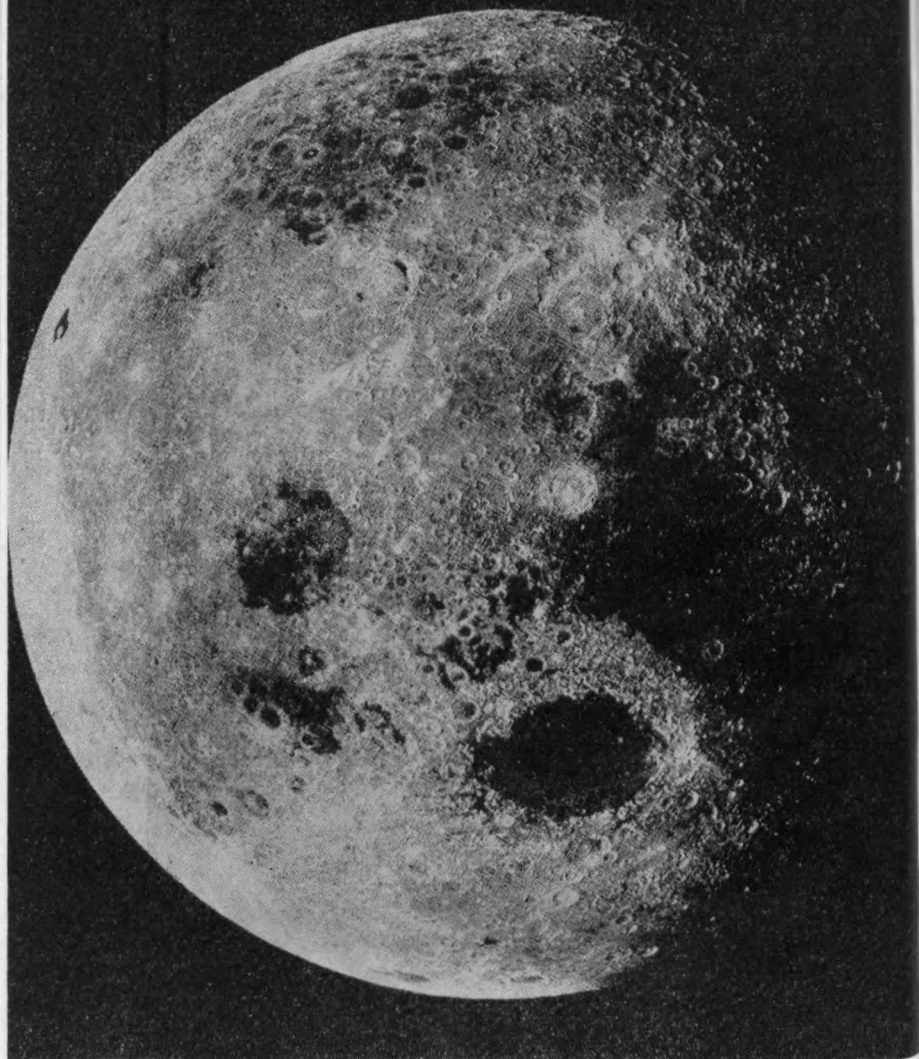
Saturn, zbliżony wielkością do Jowisza, ma też podobną do niego naturę fizyko-chemiczną, z tym że temperatura na nim jest jeszcze niższa (około $120^{\circ}\text{K} = -150^{\circ}\text{C}$). Osobliwością Saturna są jego pierścienie. Są to zbiorowiska drobnych księżyców, krążących w jednej płaszczyźnie wokół macierzystej planety. Rozróżniamy kilka pierścieni poprzedzielanych przerwami. Przypuszcza się, że pierścienie Saturna powstały z rozpadu jednego księżyca, który krążył po orbicie bardzo bliskiej powierzchni planety. Ponadto Saturn posiada jeszcze 10 księżyców.

Uran i Neptun, przeszło trzykrotnie mniejsze od Jowisza i prawie czterokrotnie większe od Ziemi, są również spowite w nieprzezroczyste atmosfery, obfitujące w amoniak i metan. Temperatury na tych planetach wynoszą około 100°K (-170°C). Osobliwością Urana jest to, że oś jego obrotu leży prawie w płaszczyźnie jego orbity, podczas gdy osi obrotu innych planet i Słońca są prawie prostopadłe do płaszczyzny ich orbit. Neptun zapisał się w historii astronomii tym, że został odkryty przez Leveriera rachunkiem według perturbacji, jakie wywołuje w ruchu Urana,



23. Księżyc widziany z Ziemi. Krater „Kopernik” dominuje przy prawym brzegu

Pluton również zawdzięcza swe odkrycie obliczeniom. Jest najdalszą znaną planetą w naszym układzie. Znajduje się on czterdziestokrotnie dalej od Słońca niż Ziemia, odległość tę światło przebywa w ciągu $5\frac{1}{2}$ godzin. Niewiele wiemy o jego naturze fizycznej. Przypuszczalnie nie posiada atmosfery. Z niepewnych pomiarów jego średnicy i równie niepewnego oszacowania masy



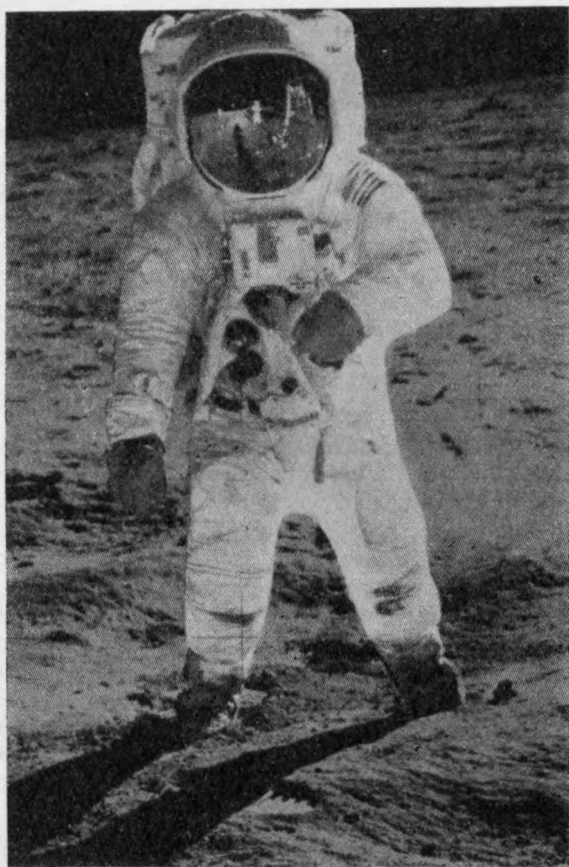
24. Księżyc widziany z pojazdu Apollo 8

(z perturbacji, jakie Pluton wywołuje w ruchu Neptuna) wynika gęstość około 8 g/cm^3 .

Księżyce planet. Najlepiej znany, a obecnie bezpośrednio, dotykalnie badany Księżyc Ziemi jest czterokrotnie mniejszy od Ziemi i tylko dwukrotnie mniejszy od Marsa. Krąży wokół Ziemi po orbicie bliskiej kołowej, w średniej odległości 384 400 km. Jest pozbawiony atmosfery, nie znaleziono na nim dotychczas żadnych śladów życia ani obecnego, ani dawnego. Kratery różnych rozmiarów, łańcuchy górskie o szczytach sięgających podobnych wysokości jak na Ziemi (ok. 9 km) oraz zastygłe rozlewiska lawy („morza”) oto krajobraz Księżyca, tak dobrze znany z wielu zdjęć wykonanych z Ziemi przez duże teleskopy, następnie z raket okołoksiężycowych i wreszcie z powierzchni Księżyca. Grunt księżycowy jest pokryty pyłem. Domyślali się tego radioastronomowie, badając dobowe zmiany promieniowania radiowego Księżyca w różnych długościach fali, zanim stopa ludzka dotknęła powierzchni Księżyca. Próbkę gruntu księżycowego, pobrane przez załogi kolejnych wypraw Apollo, wykazały skład podobny do składu skorupy ziemskiej. Te same pierwiastki chemiczne, choć w nieco innych stosunkach obfitości, występują na Księżycu, co na Ziemi. Podobne, choć nieco różne od ziemskich rodzaje minerałów znajdujemy na Księżycu w postaci bazaltów, anortozytów, brekcji, gabro. Średnia temperatura Księżyca jest zbliżona do ziemskiej, ale wahania dobowe temperatury są bardzo silne, ponieważ doba na Księżycu trwa 29,5 dni: w ciągu dwutygodniowego „dnia” grunt księżycowy oświetlany Słońcem nagrzewa się do około $+100^\circ\text{C}$, aby w ciągu równie długiej „nocy” oziębić się do -100° . W wyniku działania przyptywowego Ziemi Księżyc zwraca ku niej zawsze tę samą stronę.

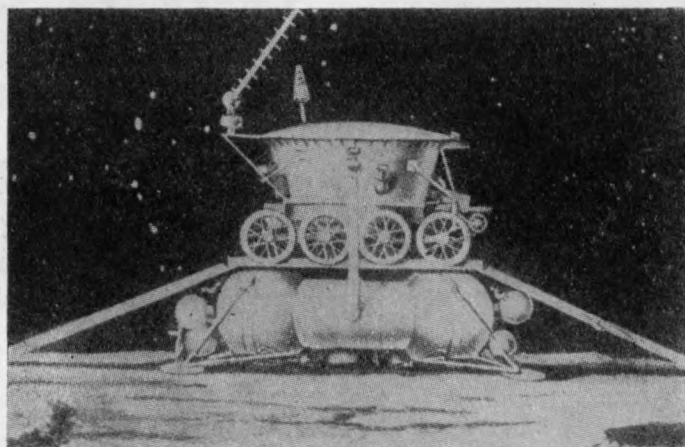
Księżyc Ziemi należy do klasy wielkich księżyców o średnicach od półtora tysiąca do dwóch i pół tysiąca kilometrów. Do tej kategorii należą 4 galileuszowe księżyce Jowisza, jeden księżyc Saturna, Tytan, wyjątkowo posiadający atmosferę gazową, i jeden z księżyców Neptuna, Tryton. Księżyce krążą wokół planet macierzystych w płaszczyznach bliskich płaszczyznom równikowym planet i w kierunku zgodnym z kierunkiem ich rotacji osiowej, z wyjątkiem czterech małych księżyców Jowisza, jednego małego księżyc Saturna i dużego księżyc Neptuna, Trytona, które okrążają planety w kierunku przeciwnym do obrotu planet.

Planetoidy. Między orbitami Marsa i Jowisza krąży mnóstwo drobnych ciał, zwanych małymi planetami, planetoidami:



25. Pierwsi ludzie na Księżycu. Lunonauta Aldrin z wyprawy Apollo 11-20 VII 1969 r.

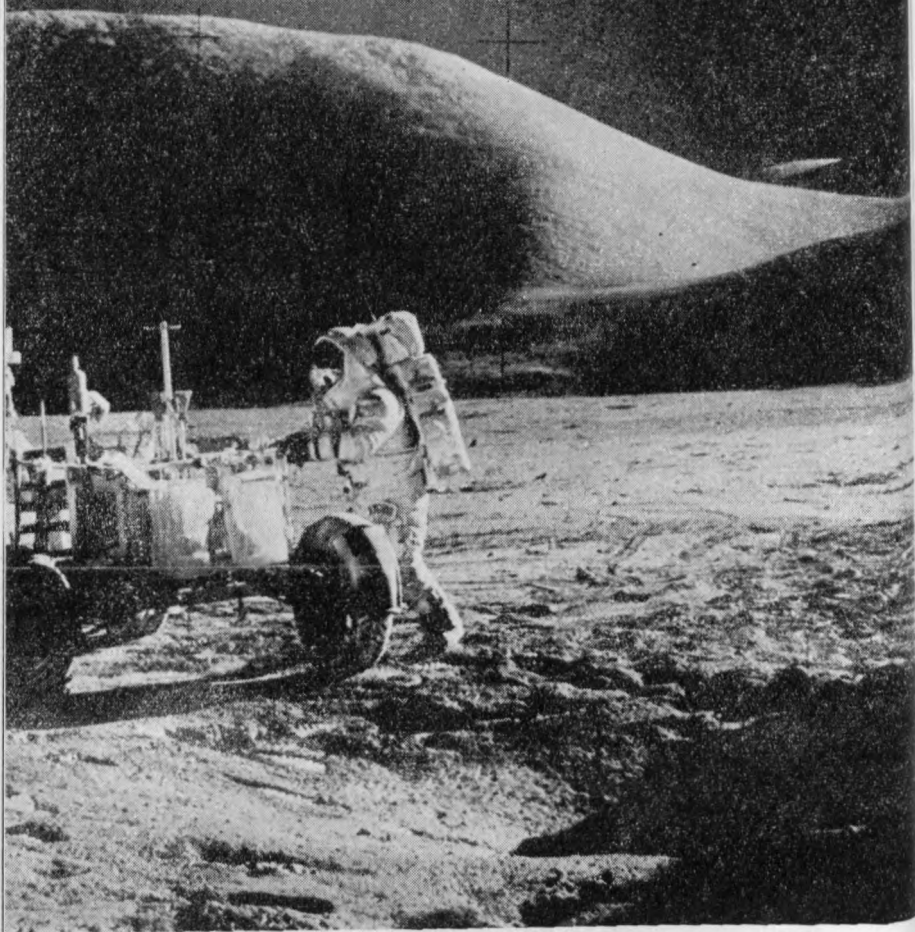
albo wreszcie asteroidami. Przypuszcza się, że pochodzą one z rozpadu jednej większej planety, tym bardziej że w szeregu odległości planet od Słońca istnieje wyraźna luka pomiędzy Marsem i Jowiszem. Pierwszą planetoidę odkryto w 1801 r., obecnie znamy blisko 2000 takich ciał. Największa z planetoid, Ceres, ma średnicę 780 km, średnice najmniejszych znanych sięgają zaledwie



26. Pierwszy automatyczny pojazd księżycowy Lunochod 1 – wylądował na Księżycu 17 XI 1970 r.

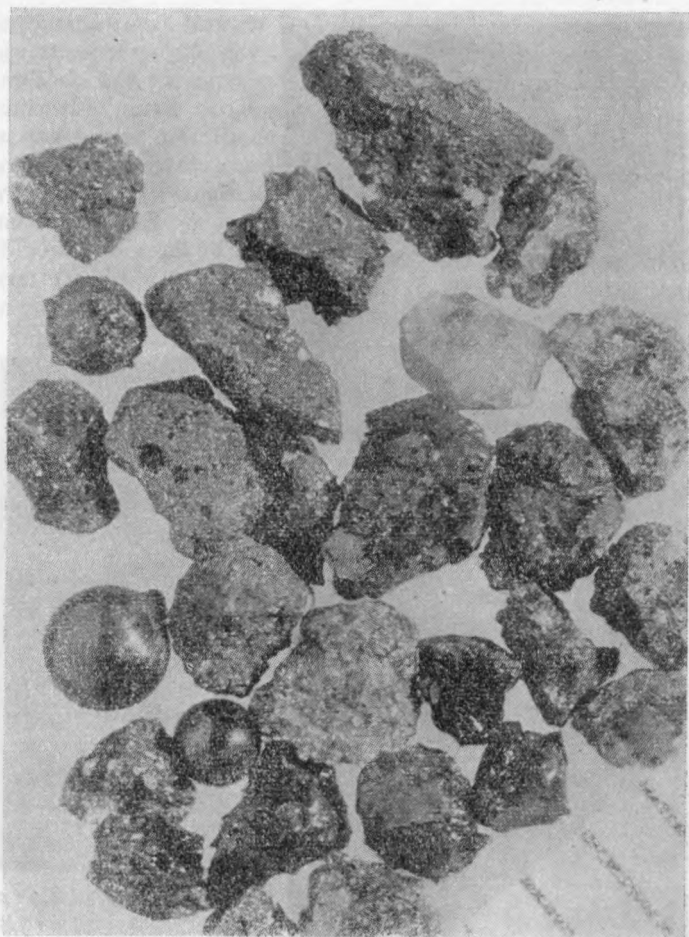
stu metrów. Małe planetoidy mają zazwyczaj nieregularny kształt, co poznajemy po okresowych zmianach blasku jako wyniku rotacji nieregularnych brył.

Komety i meteory. Komety są to luźne zbiorowiska bryłek i pyłu, zajmujące duże objętości, rzędu objętości Jowisza, o znikomą masę łączną rzędu 10^{21} g. Takie zbiorowisko kamieni i pyłu jest niewidoczne, gdy się znajduje daleko od Słońca. Gdy jednak zbliży się do Słońca na odległość około 250 milionów km, staje się widoczne z Ziemi, nie tylko dzięki odbitemu światłu słonecznemu, ale również dzięki pewnym procesom, które zaczynają w komecie zachodzić. Mianowicie pod wpływem ciepła słonecznego zaczynają się uwalniać cząsteczki gazów, uczipione na powierzchni bryłek. Gazy te, naświetlane przez Słońce, zaczynają świecić; dzięki temu, badając widma komet, możemy określić ich skład chemiczny. Są to różnorodne związki wodoru, tlenu, węgla i azotu, zwane przez chemików rodnikami, jak CH, NH, OH, CN oraz C_2 , CO_2 i inne. Znamy kilkadziesiąt komet periodycznych, krążących po orbitach eliptycznych i dzięki temu powracających co pewien czas w pobliże Słońca. Większość komet jednak pojawia się w jego pobliżu jednorazowo, aby zakreślając orbitę bliską paraboliczną, odlecieć na zawsze w przestrzeń. Os-



27. Wyprawa Apollo 15 na Księżycu. Pojazd Rover 1 - 30 VII 1971 r.

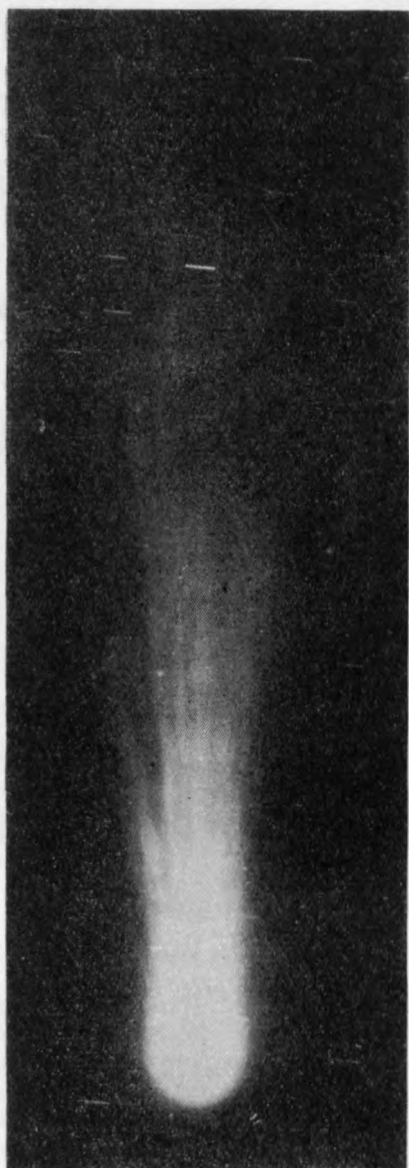
bliwością komet są ich warkocze, rozwijające się, gdy kometa zbliża się do Słońca. Są one z reguły skierowane od Słońca; sądzono, że to ciśnienie promieniowania słonecznego odrzuca pył i gaz z komety. Bardziej jednak prawdopodobne jest, że to szybkie cząstki wylatujące ze Słońca wymiatają cząstki pyłu i cząsteczki gazów komety.



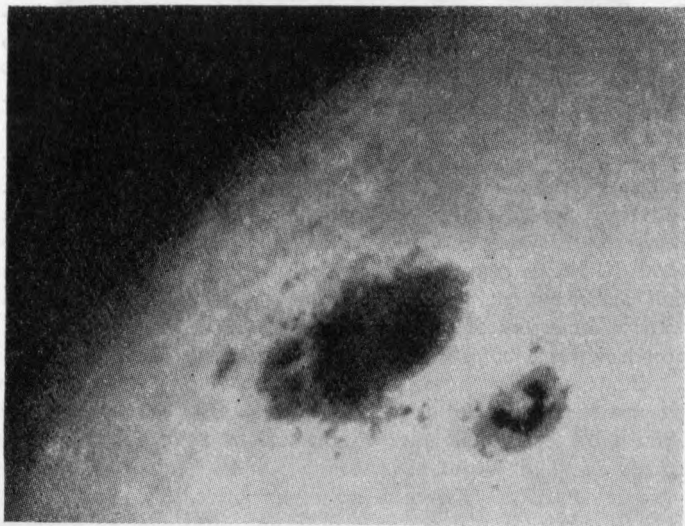
28. Próbkę skał księżycowych przywiezionych przez załogę wyprawy Apollo 11

Nie mamy jeszcze odpowiedzi na pytanie, skąd się biorą komety, natomiast stwierdzono w paru przypadkach rozpad komet na roje meteorów.

Meteory są to bryłki materii, o rozmiarach od ułamków centy- 55



metrów do setek metrów. Stają się one widoczne w postaci tzw. gwiazd spadających, gdy trafią do atmosfery ziemskiej; rozgrzewają się wówczas przez tarcie powietrza i przeważnie spalają się całkowicie przed osiągnięciem powierzchni Ziemi. Największe z nich jednak dolatują do Ziemi i są odnajdywane jako meteoryty. Badanie składu chemicznego wykazuje, że meteoryty bywają różnych typów: kamienne lub żelazo-niklowe. Średnio skład chemiczny meteorytów jest podobny do składu skorupy ziemskiej. Z większych upadków meteorytów należy wymienić słynny meteoryt tunguski z 1908 r., który spadając zniszczył las syberyjski w promieniu kilkudziesięciu kilometrów.

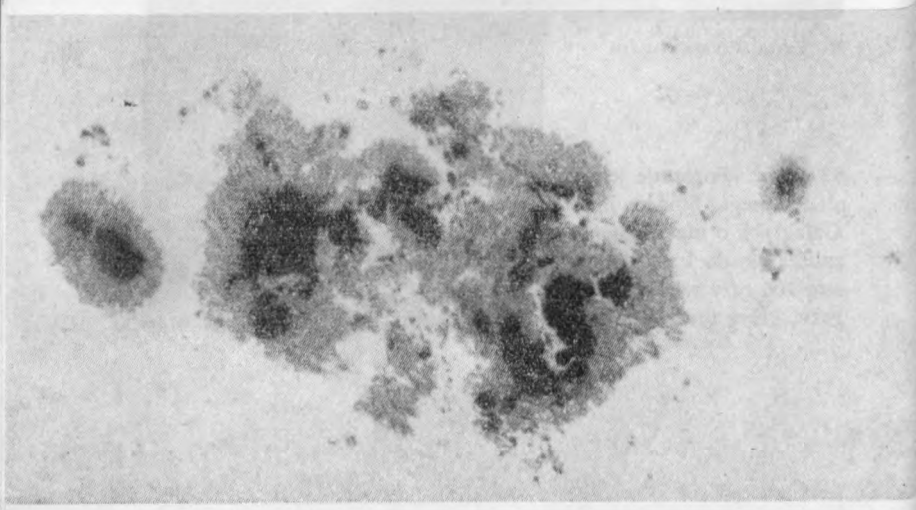


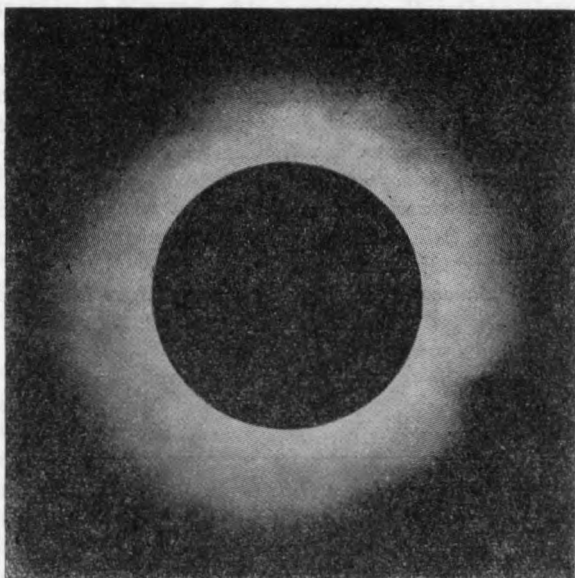
30. Tarcza Słońca z plamami

Sł o Ń c e. Pozostaje jeszcze do omówienia centralne ciało układu planetarnego, Słońce. Jest to jedna z bardzo wielu gwiazd naszej Galaktyki, o masie równej $1,98 \cdot 10^{33}$ g. Co do rozmiarów Słońce zalicza się do kategorii gwiazd-karłów. Średnica Słońca jest przeszło 100 razy większa od średnicy Ziemi. Całe Słońce jest w stanie gazu, który utrzymuje się w stałej objętości dzięki własnej grawi-

tacji. Temperatura w centralnych regionach Słońca wynosi około 10 milionów stopni K, ku powierzchni spada do około 6000° K. W centralnym obszarze Słońca zachodzą samorzutnie reakcje jądrowe syntezy wodoru w hel, przy czym wyzwala się duże ilości energii jądrowej, głównie w postaci kwantów promieniowania gamma, które przeciskając się przez kolejne warstwy materii słonecznej na zewnątrz, przetwarzają się na kwanty promieniowania świetlnego, wypromieniowywanego w przestrzeń. Łącznie Słońce wypromieniowuje w każdej sekundzie około $4 \cdot 10^{33}$ ergów energii, co oznacza stratę 4,4 milionów ton ($4,4 \cdot 10^{12}$ g) masy w sekundzie. Jakkolwiek strata ta wydaje się wielka, to jednak wobec olbrzymiej masy Słońca jest ona znikomo mała.

Promieniowanie słoneczne, które odbieramy i które możemy bezpośrednio badać, pochodzi z zewnętrznych warstw Słońca, jego fotosfery, którą widzimy w postaci świeżącego globu, oraz z leżących nad fotosferą rzadszych warstw atmosfery słonecznej. Rozkładając promieniowanie Słońca według długości fali przy pomocy spektrografu, otrzymujemy widmo fotosfery w postaci kolorowej wstęgi barw, od czerwieni, poprzez kolory: pomarańczowy, żółty, zielony, niebieski, do fioletu (widmo ciągłe), z maksimum jasności w zieleni, co odpowiada temperaturze fotosfery około 6000° K. Na tle tego widma ciągłego widzimy mnóstwo ciemnych linii absorpcyjnych, pochodzących z rzadszych i chłodniejszych warstw atmosfery Słońca. Gazy obecne w atmosferze absorbują promieniowanie fotosfery w określonych długościach fali, cha-





32. Korona słoneczna, widoczna podczas całkowitego zaćmienia Słońca

rakterystycznych dla każdego rodzaju gazu. Analizując te linie, można stwierdzić, jakie pierwiastki i w jakich proporcjach są obecne w atmosferze Słońca, można więc określić jej skład chemiczny. Wyniki tej analizy przedstawia tabela 2, w której są podane liczby atomów dziesięciu najobfitszych pierwiastków, przypadające na milion atomów wodoru.

Tabela 2
Skład chemiczny atmosfery Słońca

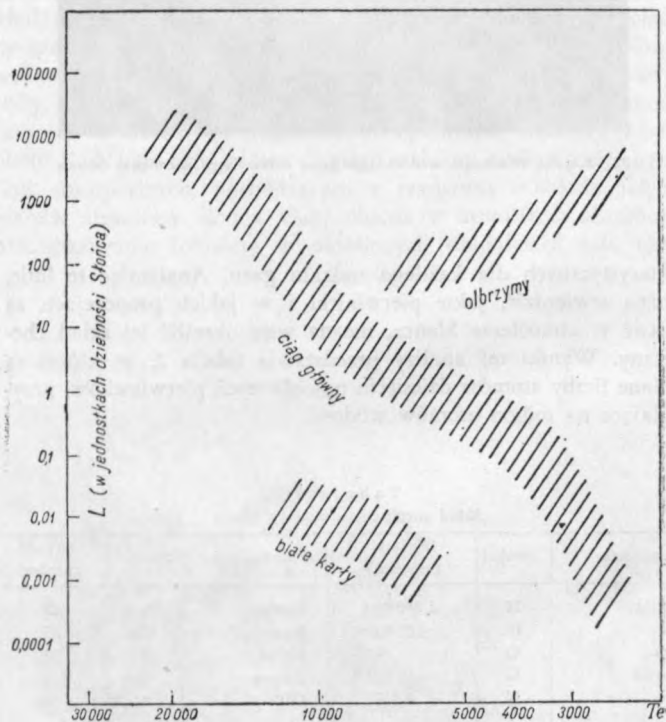
| Pierwiastek | Symbol | Obfitość (atomów) | Pierwiastek | Symbol | Obfitość (atomów) |
|-------------|--------|----------------------|-------------|--------|----------------------|
| Wodór | H | 1 000 000 | Krzem | Si | 32 |
| Hel | He | 162 000 | Magnez | Mg | 25 |
| Tlen | O | 870 | Siarka | S | 20 |
| Węgiel | C | 524 | Zelazo | Fe | 4 |
| Azot | N | 95 | Glin | Al | 3 |

Zawartość poszczególnych pierwiastków w atmosferze Słońca na ogół maleje, gdy przechodzimy od lżejszych do cięższych pierwiastków. Najobfitszym i najlżejszym pierwiastkiem jest wodór, drugim hel, pozostałe pierwiastki stanowią nieznaczną domieszkę do tych dwóch pierwiastków. Przypuszcza się, że całe Słońce ma podobny skład chemiczny z wyjątkiem centralnego jądra, gdzie zachodzi synteza wodoru w hel.

Podobny skład chemiczny spotykamy w widmach większości gwiazd i w materii międzygwiazdowej. Nazywa się czasem ten skład chemiczny uniwersalnym.

Nazwa ta jest niezupełnie słuszna: gwiazdy leżące daleko od pła-

33. Wykres Hertzsprunga-Russella



szczyzny Drogi Mlecznej, w tak zwanym halo Galaktyki, mają z reguły jeszcze mniejszą niż Słońce domieszkę pierwiastków ciężkich. Poza tym istnieją gwiazdy o osobliwym składzie chemicznym, jak gwiazdy helowe, węglowe, krzemowe i inne, w których ten lub inny pierwiastek jest szczególnie obfity. Skład chemiczny planet również odbiega od składu „uniwersalnego”. Ziemia, na przykład, ma niewiele wodoru, występującego głównie w połączeniu z tlenem w postaci wody, ma również niewiele helu. Te lekkie pierwiastki przypuszczalnie ulotniły się z czasem z Ziemi. Pozostałe pierwiastki natomiast występują w skorupie ziemskiej w podobnych proporcjach jak w Słońcu.

Słońce obraca się wokół własnej osi, ustawionej prawie prostopadle do średniej płaszczyzny orbit planet. Kierunek obrotu Słońca jest zgodny z kierunkiem obiegu i obrotu osiowego planet z wyjątkiem Wenus i Urana. Słońce nie obraca się wokół swojej osi jak ciało sztywne: okres obrotu na równiku wynosi 25 dni i rośnie ku biegunom słonecznym, gdzie ma wartość około 32 dni. Z tą nierównomiernością obrotu osiowego Słońca wiąże się prawdopodobnie tzw. aktywność Słońca, polegająca na występowaniu plam, rozbłysków i innych zaburzeń w strefach leżących po obu stronach równika słonecznego w niewielkich od niego odległościach. Plamy mają miejscami temperaturę obniżoną o około 1000° w stosunku do temperatury fotosfery niezakłóconej. Są one siedliskiem silnych pól magnetycznych, dochodzących do kilku tysięcy gausów*. W sąsiedztwie plam pojawiają się sporadycznie rozjaśnienia, zwane rozbłyskami. Są to miejsca wytrysku szybkich cząstek, głównie protonów (jąder wodoru) i elektronów, wyrzucanych w przestrzeń międzyplanetarną z prędkościami rzędu 1000 km/sek. Tym wybuchom i innym zjawiskom aktywności słonecznej towarzyszy wzmożone promieniowanie radiowe Słońca, szczególnie silne na falach metrowych.

Aktywność Słońca jest zjawiskiem cyklicznym, nasila się i słabnie w okresie około 11 lat. W latach minimum aktywności, gdy — jak się mówi — Słońce jest spokojne, wysyła ono również w przestrzeń strumień szybkich cząstek, głównie protonów i elektronów, zwany wiatrem słonecznym albo promieniowaniem korpuskularnym. Wysyła również promieniowanie radiowe, przy czym różne zakresy długości fali tego promieniowania pochodzą z różnych

* Gaus (gs) — jednostka indukcji magnetycznej w elektromagnetycznym układzie jednostek miar.

warstw Słońca: fale milimetrowe pochodzą z fotosfery, centymetrowe — z atmosfery, fale decymetrowe i metrowe — z przestrzeni okołosłonecznej, zwanej koroną Słońca. Jest rzeczą interesującą, że korona słoneczna ma bardzo wysoką temperaturę — rzędu miliona stopni. A zatem rozkład temperatury w Słońcu ma następujący przebieg: kilkanaście milionów stopni w centrum, spadek stopniowy z odległością od środka do około 6000° w fotosferze, dalszy spadek aż do 4000° w atmosferze, gdzie następuje tzw. inwersja temperatury — wzrost aż do wartości dwóch milionów stopni w koronie. Natężenie promieniowania radiowego Słońca reaguje niezwykle silnie na zjawiska aktywności słonecznej i może służyć jako sygnał alarmowy o wybuchach zachodzących na Słońcu, których skutki w postaci wzmożonych strumieni szybkich cząstek docierają do Ziemi po upływie 1—2 dni. Wprawdzie atmosfera ziemska osłania nas przed szkodliwym działaniem tych cząstek, jednak w dobie lotów kosmicznych musimy znać również warunki istniejące w przestrzeni okołozemskiej.

Wśród gwiazd naszej Galaktyki Słońce jest gwiazdą przeciętną pod względem rozmiarów, masy, temperatury i innych cech fizycznych. Ilustruje to następujące zestawienie zakresów wartości tych cech u gwiazd:

| | |
|----------------------|---|
| Masy gwiazd | — od 0,1 do 50 mas Słońca |
| Średnice | — od 0,01 do 5000 średnic Słońca |
| Temperatury fotosfer | — od 1000 do $100\ 000^\circ\text{K}$ |
| Moce promieniowania | — od 0,00001 do 50 000 mocy słonecznej. |

Nie wszystkie kombinacje podanych wartości cech spotykamy wśród gwiazd. Jakie kombinacje są preferowane, uzmysławia najlepiej tzw. wykres Hertzsprunga-Russella, podany na rys. 33. Odkładając na osi x tego wykresu wartość temperatury fotosfery gwiazdy, a na osi y jej moc promieniowania, zaznaczamy poszczególne gwiazdy jako punkty na wykresie. Okazuje się, że te punkty nie rozsypują się bezładnie po całym wykresie, ale układają się w ciągi, zaznaczone na rysunku liniami. Ogromna większość gwiazd skupia się w tzw. ciąg główny, przebiegający po przekątnej wykresu; Słońce leży w połowie tego ciągu, górną jego część zajmują gwiazdy gorące (niebieskie) olbrzymy, dolną — chłodne (czerwone) karły. W prawej górnej części wykresu układa się ciąg olbrzymów chłodnych (żółtych i czerwonych). Nad nimi odnajdujemy rzadkie gwiazdy nadolbrzymy. W lewej dolnej części wykresu układa się ciąg białych karłów, gwiazd o dużych gęstościach, rzędu $1\ \text{tony}/\text{cm}^3$. Zagadnienie, dla-

czego gwiazdy układają się w takie kombinacje temperatur i mocy promieniowania, stanowiło pasjonującą zagadkę dla wielu badaczy. Obecnie sens wykresu Hertzsprunga-Russella można uważać za rozszyfrowany w głównych zarysach. Kluczem do rozwiązania tej zagadki jest teoria ewolucji gwiazd, której poświęcimy następny rozdział. Będzie w nim mowa również o powstaniu i ewolucji Słońca. Tu parę słów powiemy o stanie naszej wiedzy czy też niewiedzy o powstaniu, czyli o kosmogonii układu planetarnego.

Fakt, że planety okrążają Słońce w kierunku zgodnym z kierunkiem obrotu Słońca wokół jego osi, oraz że ich orbity leżą w płaszczyznach bliskich płaszczyzny równika słonecznego, świadczy o wspólnym pochodzeniu Słońca i planet. Podobny związek istnieje pomiędzy planetami i ich księżycami. Nie wiemy jednak, jaki był przebieg powstania układu: czy chmura materii, z której w drodze kondensacji powstało Słońce, podzieliła się we wczesnej fazie kondensacji na fragmenty, które skondensowały się w planety, czy działanie przyływu jakiejś gwiazdy przechodzącej w pobliżu Słońca wyrwało z niego smugę materii, z której powstały planety, czy też powstały one z kondensacji chmury pyłu otaczającego Słońce — takie przypuszczenia były wysuwane. Należy oczekiwać, że intensywne badania ciał układu planetarnego, podjęte od kilkunastu lat dzięki zastosowaniu techniki raketowej, pozwolą rozwiązać ten problem.

Zagadnieniem najbardziej pasjonującym ludzkość w badaniach układu planetarnego jest sprawa istnienia życia poza Ziemią. Z zestawienia znanych własności fizycznych planet wynika, że w naszym układzie planetarnym Ziemia ma niewątpliwie najkorzystniejsze warunki do istnienia i rozwoju życia. Tym bardziej więc musimy te warunki cenić i ochraniać dla zachowania rodzaju ludzkiego. Z innych planet jedynie Mars może posiadać jakieś bardzo ubogie formy życia. Czy posiada je w rzeczywistości, o tym dowiemy się przypuszczalnie już za kilka lub kilkanaście lat. Nasz układ planetarny nie jest jednak z pewnością jedynym układem tego rodzaju. Przypuszczalnie wokół innych gwiazd, przynajmniej niektórych, istnieją również planety. Niektóre z nich mogą mieć warunki sprzyjające powstaniu i rozwojowi życia mniej lub bardziej zorganizowanego. Odkryte ostatnio przez radioastronomów związki organiczne w materii międzygwiazdowej świadczą o tym, że budulec do tkanki organicznej istnieje wszędzie, a zatem życie może powstać tam, gdzie powstaną odpo-

wiednie do tego warunku. Należy jednak pamiętać, że warunki te są bardzo wyspecjalizowane i że tylko wyjątkowe planety w pobliżu niektórych gwiazd mogą posiadać życie. W warunkach wyjątkowo korzystnych mogły powstać organizmy nawet wyżej rozwinięte od człowieka. Nauka nie lekceważy możliwości nawiązania kontaktów z takimi istotami. Przynajmniej jedno z wielkich obserwatoriów radioastronomicznych — w Green Bank w Stanach Zjednoczonych — nadaje regularne sygnały radiowe w tym celu i prowadzi nasłuch ewentualnych sygnałów z Kosmosu. Do tychczas akcja ta nie dała rezultatu.

EWOLUCJA GWIAZD

Gwiazdy, a wśród nich również nasze Słońce, nie mogą trwać wiecznie w niezmiennym stanie. Wynika to z faktu ich świecenia, z tego, że wysyłają one intensywne promieniowanie, a więc tracą duże ilości energii w sposób nieodwracalny. Z biegiem czasu maleją ich własne zasoby energii, a zatem gwiazdy ulegają przemianom czasowym, podlegają ewolucji.

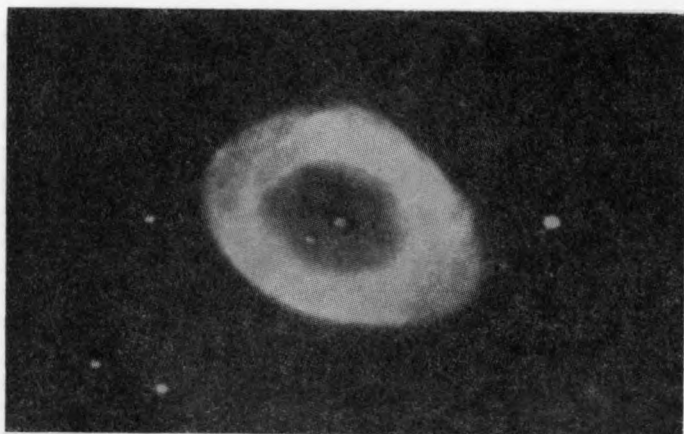
Aby móc ocenić, jak szybko przebiega proces starzenia się na przykład naszego Słońca, musielibyśmy wiedzieć, jakimi zasobami energii Słońce dysponuje i w jakim tempie ją traci. Jeśli chodzi o utratę energii słonecznej, łatwo ją skontrolować w tym, co otrzymujemy od Słońca na Ziemi: zmierzono, że jeden centymetr kwadratowy powierzchni Ziemi (poza atmosferą) odbiera od Słońca dwie kalorie energii w ciągu minuty. Można więc obliczyć, że Słońce traci przez promieniowanie w sumie $5,7 \cdot 10^{27}$ kalorii w ciągu każdej minuty ($3,9 \cdot 10^{33}$ erg/sek.). Trudniej jest ocenić, jakie zasoby energii zdatnej do wypromieniowania Słońce posiada. Ale i ten problem udało się rozwiązać w latach trzydziestych naszego stulecia. Nie wchodzi w grę własne ciepło Słońca — tego starczyłoby na bardzo krótki okres w porównaniu z czasem istnienia Słońca. Wiek Słońca podobnie jak wiek Ziemi ocenia się na $4,5 \cdot 10^9$ lat. Nie starczyłoby również na tak długi czas energii chemicznej, jaka mogłaby być produkowana w Słońcu np. drogą spalania węgla lub innych reakcji chemicznych. Nie byłaby także wystarczająca energia grawitacyjna, jaką można by uzyskać z procesu kurczenia się Słońca w analogii do energii spadku spiętrzonych wód w ziemskich hydroelektrowniach.

Wystarczającym źródłem energii mogłaby być energia jądrowa, gdyby mogły w Słońcu zachodzić odpowiednio wydajne reakcje jądrowe. Takimi reakcjami są bądź syntezy lekkich pierwiastków, bądź rozpady ciężkich. Te dwie różne możliwości zostały wykorzystane przez człowieka w bombie wodorowej (synteza wodoru) i atomowej (rozszczerzenie uranu lub plutonu). Okazało się, że Słońce i wszystkie gwiazdy ciągu głównego posiadają warunki, aby w ich jądrach samorzutnie odbywała się synteza helu z wo-

doru: aby z czterech protonów, czyli jąder wodoru, powstawało w cyklu reakcji jądro helu z wydzielaniem dużych porcji energii promienistej. Aby takie reakcje mogły samorzutnie zachodzić, potrzebny jest odpowiedni zapas wodoru i temperatura rzędu dziesiątków milionów stopni. Oba te warunki są spełnione we wnętrzu Słońca, które jeszcze obecnie składa się w większości z wodoru. Zapasu tego starczy Słońcu na dalsze miliardy lat nie słabnącego promieniowania.

Musimy jednak przewidująco zapytać, co będzie, gdy Słońce wyczerpie swój zapas wodorowego paliwa? Czy nasza gwiazda dnia na zagaśnie i Ziemię ogarnie śmiertelny chłód, czy nastąpią inne zmiany i jakie? Na te pytania mamy obecnie dość wiarygodne odpowiedzi. W ostatnich dwudziestu latach została opracowana teoria budowy i ewolucji gwiazd. Opiera się ona na podstawowych prawach rządzących materią i energią, odkrytych przez astronomów i fizyków, jak prawo grawitacji, prawo gazów doskonałych, zasada zachowania materii i energii, prawa promieniowania, wreszcie związki określające wydajność reakcji jądrowych. Prawa te zastosowane do gwiazd dają szereg równań, z których możemy wyznaczyć wiele niewiadomych, takich jak temperatura, ciśnienie i gęstość we wnętrzu gwiazdy. Znając te wielkości, możemy przewidzieć przebieg i tempo reakcji jądrowych.

Okazuje się przy tym, że gwiazda w okresie przemiany wodoru w hel jest niezwykle ustabilizowanym zakładem produkcyjnym, w którym energia jądrowa i energia grawitacyjna kontrolują się i regulują nawzajem. Gdy tylko nastąpi najbliższy spadek produkcji energii jądrowej, automatycznie gwiazda się kurczy, w wyniku czego temperatura jej wzrasta, a to powoduje wzrost produkcji energii jądrowej i powrót do normy. Podobnie, gdyby z jakichkolwiek powodów nastąpiła zwyżka w produkcji energii jądrowej, gwiazda się rozszerzy i oziębi, co spowoduje zmniejszenie tempa reakcji jądrowych. Wynika stąd, że gdy gwiazda wyczerpie zapas paliwa wodorowego w centralnych regionach, wewnątrz jej zacznie się kurczyć i rozgrzewać, warstwy zewnętrzne natomiast będą się rozszerzać i oziębiać: gwiazda zacznie pęcznić, przechodząc w stan chłodnego z zewnątrz, a gorącego w środku olbrzyma. Na wykresie Hertzsprunga-Russella gwiazda opuści ciąg główny i powędruje ku gałęzi olbrzymów. Gdy temperatura centralnych części gwiazdy wzrośnie do wartości setki milionów stopni, rozpocznie się samorzutnie następny cykl reakcji termojądrowych, łączenie się jąder helu w jądra węgla, tlenu, neonu



34. Mgławica planetarna

i magnezu. Są to również reakcje egzotermiczne, to znaczy produkujące energię. Podczas ich trwania gwiazda znowu stabilizuje się, aby po wyczerpaniu helu w centralnych okolicach przejść znowu w fazę kurczenia się i rozgrzewania jądra oraz pęcznienia i ochładzania się otoczki. Gdy temperatura centralna gwiazdy osiągnie wartości około 600 milionów stopni, rozpocznie się dalszy cykl syntez jądrowych: łączenie się jąder węgla w cięższe pierwiastki, następnie przy temperaturach rzędu miliarda stopni — synteza jąder tlenu. Ten łańcuch egzotermicznych reakcji termojądrowych posuwa się kolejno do coraz cięższych pierwiastków, w miarę wzrostu temperatury we wnętrzu gwiazdy, aż do wytworzenia jąder żelaza. Dalsze syntezy pierwiastków są już endotermiczne, to znaczy wymagają wkładu energii i nie mogą stabilizować gwiazd, jak to było podczas poprzednich syntez. Jądro gwiazdy zapada się nieuchronnie pod działaniem grawitacji, otoczka gwałtownie ekspanduje — następuje wybuch gwiazdy supernowej. Zewnętrzne warstwy gwiazdy zostają odrzucone z prędkościami rzędu tysięcy kilometrów na sekundę, jądro przechodzi w stan gwiazdy neutronowej o gęstości rzędu 10^{14} g/cm³. Wybuchy gwiazd supernowych obserwujemy przeciętnie raz na 300 lat w poszczególnych galaktykach. W naszej Galaktyce wybuchy ta-



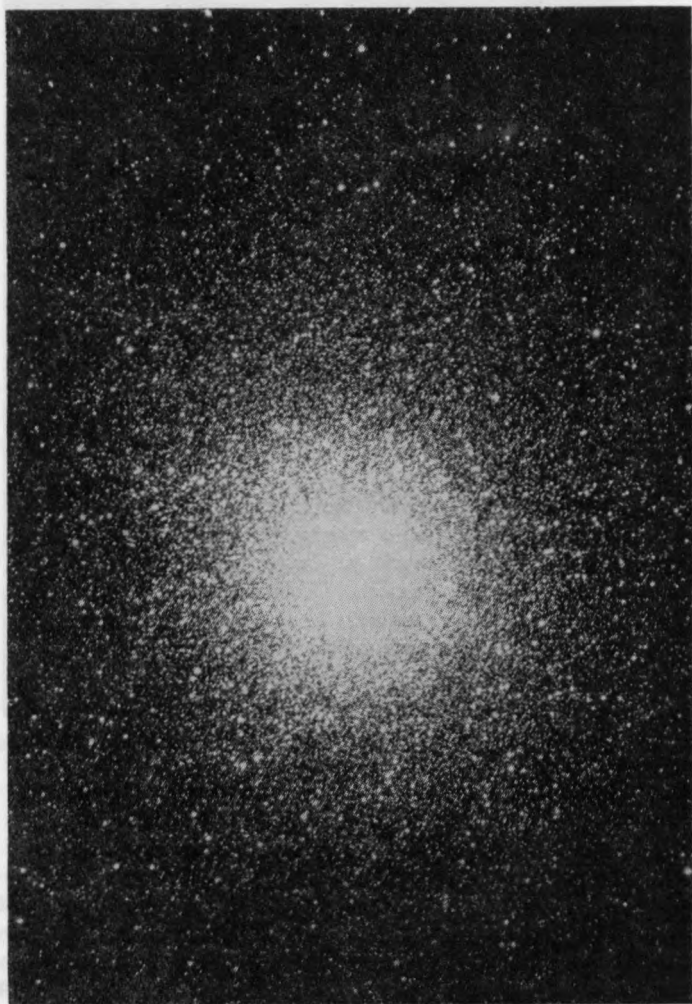
35. Chmury materii międzygwiazdowej

kie obserwowali Tycho Brahe i Kepler w XVII w. W kronikach chińskich w 1054 r. n.e. zarejestrowano bardzo jasny wybuch stosunkowo bliskiej gwiazdy supernowej w gwiazdozbiornie Byka. Pozostałością jej jest znana mgławica „Krab” (rys. 38).

Nie każda gwiazda musi przejść przez tak wielką katastrofę kosmiczną. Opisany wyżej pełny cykl ewolucyjny dotyczy bardzo masywnych gwiazd, o masach około pięciokrotnie większych od masy Słońca. Gwiazdy o masach zbliżonych do masy Słońca mogą przejść w stan białego karła — gwiazdy o gęstości rzędu

tony na cm^3 (10^6 g/cm^3), a więc do stanu dość gęstej, ale nie supergęstej materii, jaką spotykamy w gwiazdach neutronowych. Przejście gwiazdy w stan białego karła może odbywać się bądź ewolucyjnie, poprzez fazę tzw. mgławicy planetarnej, bądź poprzez wybuch gwiazdy nowej. W obu wypadkach zachodzi zapadnięcie się jądra gwiazdy i odrzucenie otoczki, różnica polega na szybkości procesu. Którą z tych dróg wybierze nasze Słońce, nie możemy przewidzieć, aczkolwiek istnieją dane do przypuszczenia, że wybuchy zdarzają się wśród gwiazd podwójnych. W obu wypadkach utrzymanie się życia na Ziemi wydaje się sprawą beznadziejną. Gorąca otoczka ekspandująca ze Słońca ogarnie Ziemię i wszystkie planety. Jeżeli żywe organizmy przetrzymają okres zanurzenia w otoczce Słońca, to po przejściu jej i rozproszeniu się w przestrzeni będą one wystawione na krótkofalowe promieniowanie obnażonego jądra słonecznego. Zjonizowałoby ono całkowicie naszą atmosferę i prawdopodobnie wyjałowiło Ziemię z wszelkiego życia.

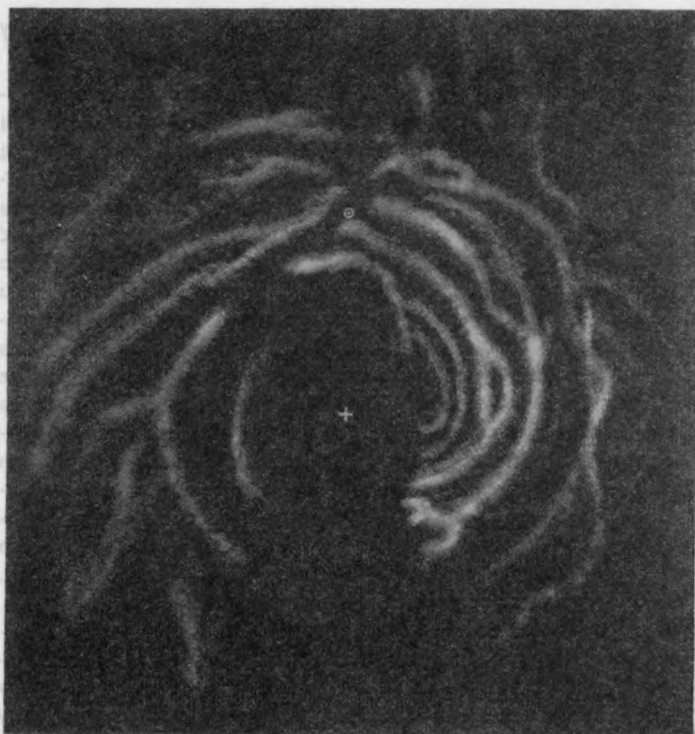
Im mniejsza jest masa gwiazdy, tym powolniej przebiega jej ewolucja i tym mniej obejmuje etapów. Przejście przez wszystkie etapy reakcji termojądrowych, aż do produkcji żelaza włącznie, jest udziałem gwiazd o masach kilkakrotnie większych od masy Słońca. Gwiazdy takie przechodzą te etapy w ciągu zaledwie stu milionów lat. Słońce po spaleniu wodoru w swym wnętrzu zdoła przypuszczalnie zapalić jeszcze hel i już ten moment może być dla niego początkiem końca, którym będzie przejście w stan białego karła, niezdolnego do dalszych reakcji jądrowych, skazanego tylko na wypromieniowanie własnego ciepła, czyli na stopniowe ostygnięcie, aż do stanu czarnego karła. Całkowity czas życia Słońca wyniesie około 10 miliardów (10^{10}) lat. Gwiazdy o masach kilkakrotnie mniejszych od masy Słońca zdołają zaledwie zapalić wodór i paląc go bardzo powoli, a więc świecąc bardzo słabo jako tzw. czerwone karły, mogą żyć dość długo, a po wyczerpaniu wodoru zaczną stygnąć. Masy materii dziesięciokrotnie mniejsze od masy Słońca nie są zdolne do wytworzenia w swym wnętrzu nawet minimalnej temperatury 10 milionów stopni, potrzebnej do zapalenia wodoru, nie mogą stać się gwiazdami we właściwym znaczeniu tego wyrazu; takie ciała świecą słabo w podczerwieni kosztem energii grawitacyjnej i kończą żywot jako czarne karły. Można przypuszczać, że w przestrzeni międzygwiazdowej istnieje wiele takich wygasłych lub niedoszłych gwiazd. Do tej kategorii ciał należą również planety naszego układu słonecz-



36. Gromada kulista w gwiazdozborze Herkulesa

nego; największa z nich Jowisz ma masę równą 0,001 masy Słońca.

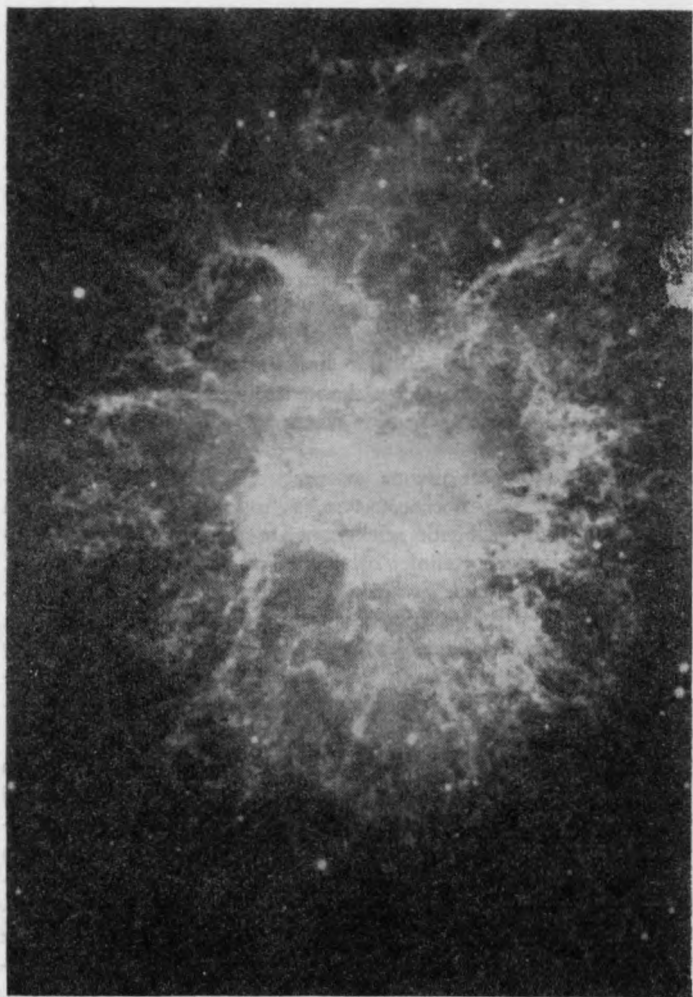
Dotychczas mówiliśmy o przyszłości Słońca i innych gwiazd. A jaka była ich przeszłość? Jak powstało nasze Słońce, jak powstają gwiazdy? Również na to pytanie mamy obecnie dość wiarygodną odpowiedź. Gwiazdy powstają z kondensacji chmur materii międzygwiazdowej. Jeszcze obecnie istnieje materia międzygwiazdowa w postaci gazu, głównie wodoru, oraz pyłu. Średnia jej gęstość w naszych regionach Galaktyki jest bardzo mała, wynosi 1 atom wodoru na cm^3 , czyli 10^{-24} g/cm^3 . Ale występują w ośrodku międzygwiazdowym kondensacje w postaci chmur, w których gęstość bywa 10 i 100 razy większa od przeciętnej. W obrębie takich rozległych chmur obserwuje się lokalne zagęszczenia materii, które są przypuszczalnie centrami kondensacji grawitacyjnej. Chmura materii międzygwiazdowej jest zdolna do kontrakcji pod wpływem własnego ciężenia, przy czym powstają skupienia o masach rzędu setek i tysięcy mas Słońca. Ulegają one następnie podziałowi na mniejsze elementy — protogwiazdy, a te z kolei kondensują się dalej, przekształcając się w gwiazdy. W ten sposób z chmur materii rozproszonej powstawałyby gromady gwiazd. Istotnie, znamy wiele takich gromad gwiazdnych. Jedne z nich, z reguły położone w płaszczyźnie Drogi Mlecznej, gdzie jest skoncentrowana materia międzygwiazdowa i gdzie jeszcze obecnie powstają gwiazdy, liczą po kilkaset gwiazd. Te gromady nazywamy otwartymi. Należą do nich m.in. Plejady i Hiady. Są to gromady niedawno powstałe — 10 do 100 milionów lat temu. Wnosimy to z faktu, że tyle tylko czasu mogą takie luźne gromady o małej stosunkowo liczbie gwiazd przetrwać jako gromady; pod wpływem działania grawitacyjnego Galaktyki gromady takie dość szybko rozluźniają się i tracą wewnętrzną spójność. Drugą wskazówką ich młodego wieku jest obecność w takich gromadach gwiazd o dużych masach, które jak wspomnieliśmy wyżej, mają krótki czas życia. Istnieją grupy gwiazd jeszcze luźniejsze niż gromady otwarte, liczące po kilkadziesiąt lub paręset gwiazd, z reguły bardzo młodych, o wieku rzędu od kilku do kilkudziesięciu milionów lat. Nazywamy je asocjacjami gwiazd. Z drugiej strony istnieją setki silnie skoncentrowanych gromad kulistych, liczących setki tysięcy gwiazd. Występują one zarówno w płaszczyźnie Galaktyki, jak i poza nią, w obrębie tzw. halo Galaktyki w promieniu około 50 tysięcy lat światła. Gromady kuliste dzięki dużym masom i silnej koncentracji są tworami trwałymi, nie poddającymi się



37. Rozkład wodoru międzygwiazdowego według obserwacji linii radiowej 21 cm

rozluźniającemu działaniu pola grawitacyjnego Galaktyki. Toteż wiek ich ocenia się w granicach od 1 do 10 miliardów lat. Również gwiazdy w tych gromadach są gwiazdami tego wieku.

Obecność materii międzygwiazdowej rozpoznajemy po tym, że w pobliżu gorących gwiazd chmury tej materii świecą pod wpływem promieniowania tych gwiazd. Przykładem takiej chmury gazu międzygwiazdowego jest znana mgławica Oriona, pobudzana do świecenia przez zgrupowanie gorących gwiazd olbrzymów, znajdujących się w pobliżu mgławicy. Obecnie możemy obserwować gaz międzygwiazdowy również z dala od gwiazd. Mianowi-



The picture of the starry night sky is a beautiful sight. It shows a vast field of stars, some of which are very bright and some are very faint. The stars are scattered across the sky, and their colors range from white to red. The overall appearance is that of a rich, multi-colored star cluster.

cie, wodór posiada linię emisyjną w zakresie fal radiowych o długości fali 21 cm. Do wzbudzenia tej linii nie potrzeba światła gorących gwiazd, wystarczy niewysoka własna temperatura gazu międzygwiazdowego, wynosząca około 100° Kelvina. Potrzeba było jednak techniki radioastronomicznej, aby tę linię zaobserwować. Odkryto ją w trzech ośrodkach na raz: w Stanach Zjednoczonych, Holandii i Australii w 1951 r., a o dziesięć lat wcześniej przepowiedział istnienie tej linii Van de Hulst na drodze teoretycznych rozważań. W ostatnich latach radioastronomowie odkrywają wciąż nowe linie i pasma gazu międzygwiazdowego, głównie molekuł, jak wody, rodników CH, OH, amoniaku, kwasu mrówkowego, alkoholu metylowego i innych. Interesującą okolicznością tych odkryć jest fakt, że linie i pasma molekuł międzygwiazdowych ujawniają się w skoncentrowanych, prawie punktowych źródłach. Chcemy w nich widzieć protogwiazdy lub protogromady gwiazd.

Materia pyłowa rozproszona w przestrzeniach międzygwiazdowych zdradza swą obecność tym, że osłabia światło dalekich gwiazd. Jest to osłabienie selektywne, to znaczy zależne od długości fali, przy czym silniej osłabione jest światło krótkofalowe, niebieskie. W rezultacie gwiazdy dalekie są osłabione i poczerwienione zarazem przez warstwę pyłu międzygwiazdowego, dzielącą nas od gwiazdy. Podobnie jak gaz, również pył międzygwiazdowy występuje w postaci chmur, w szczególności koncentracje molekuł, o których wyżej wspomnieliśmy, występują w obrębie gęstych chmur pyłowych.

Teoria ewolucji gwiazd, którą przedstawił, jest poważnym osiągnięciem paru ostatnich dziesiątków lat. Nie są to już mniej lub więcej prawdopodobne spekulacje na temat powstawania i historii przemian zachodzących w gwiazdach, tylko oparty na sprawdzonych doświadczalnie prawach fizyki zespół modeli ewolucyjnych gwiazd, odtwarzających ich stan fizyko-chemiczny w kolejnych etapach czasu. Obliczenie tych wielu setek bardzo nieraz złożonych modeli stało się możliwe dzięki postępom techniki obliczeniowej, dzięki konstrukcji coraz szybszych maszyn cyfrowych. Nie ludzimy się, że osiągnęliśmy już pełne rozwiązanie zagadnienia ewolucji gwiazd, które przecież jest tak ważne dla prognoz istnienia życia na Ziemi i losów rodzaju ludzkiego, ściśle uzależnionych od zachowania się Słońca. Na pewno w tej teorii jest wiele uproszczeń i wiele szczegółów nie dopracowanych, niejedno

jej zarysy można uważać za wiarygodne. Sukcesem i sprawdzianem tej teorii jest, że ustala ona związki ewolucyjne pomiędzy różnymi rodzajami znanych od dawna lub nowo odkrywanych form materii kosmicznej, jak gwiazdy różnych mas i temperatur, gwiazdy nowe i supernowe, mgławice planetarne, materia międzygwiazdowa, białe karły i gwiazdy neutronowe, odkryte przed kilkoma laty jako pulsary. Przeżywamy obecnie triumf dziecka, któremu udało się z klocków wysypanych z pudełka ułożyć sensowny obrazek, przy czym wszystkie klocki znalazły zastosowanie i żadnego nie zabrakło. Pudełko ma napis: gwiazdy.

A jeszcze kilka lat temu brakowało nam jednego klocka — gwiazd neutronowych. Już w roku 1939 relatywiści* orzekli, że białe karły nie reprezentują najgęstszej formy materii, że grawitacja może „sprasować” materię do gęstości nuklearnych, rzędu 10^{13} — 10^{15} g/cm³. Konsystencja takiej supergęstej materii — to fluid neutronowy, czyli gęsto upakowane neutrony, powstałe w wyniku wtłoczenia elektronów w protony. Jeżeli biały karzeł jest masą Słońca zamkniętą w objętości Ziemi, to gwiazda neutronowa jest masą Słońca zamkniętą w kuli o średnicy kilkunastu kilometrów. Przypomnijmy, że średnica Ziemi wynosi 13 tysięcy kilometrów, a średnica Słońca — 100 razy więcej. A zatem, ściskając Słońce do jednej setnej obecnych jego rozmiarów, otrzymalibyśmy białego karła, a ugniatając go do jednej tysięcznej jego średnicy, utworzylibyśmy gwiazdę neutronową. O ile jednak istnienie białych karłów zostało stwierdzone już w latach dwudziestych naszego stulecia, gwiazdy neutronowe pozostawały teorią. Odkrycie ich przyszło niespodziewanie w roku 1968 z obserwacji radioastronomicznych. Obserwując radioźródła, radioastronomowie ośrodka w Cambridge (Anglia) zauważyli, że jedno z radioźródeł zmienia regularnie natężenie promieniowania w okresie ułamka sekundy. Takie pulsujące promieniowanie stwierdzono w kilku innych radioźródłach. Nazwano je pulsarami. Znany obecnie około setki pulsarów o okresach od 0,03 do 4 sekund. Między innymi gwiazda znajdująca się w środku mgławicy Krab również jest pulsarem. Szukając przyczyn szybkiej zmienności tych obiektów, przyjęto model szybko obracającej się dokoła swej osi gwiazdy o nierównomiernym rozkładzie jasności na powierzchni. Gwiazdy na ogół mają ruch obrotowy, Słońce wykonuje obrót dokoła swej osi średnio w ciągu 27 dni. Okres obrotu gwiazd

* Fizycy, zajmujący się teorią względności.



39. Wielka galaktyka Andromedy

zależy od ich gęstości — jest odwrotnie proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego ze średniej gęstości. Znając okres obrotu Słońca i jego średnią gęstość ($1,4 \text{ g/cm}^3$), łatwo wyliczymy, że

gwiazda o okresie obrotu równym jednej sekundzie powinna mieć gęstość rzędu 10^{13} g/cm³, a zatem pulsary są gwiazdami neutronowymi.

Czy można bloki tak gęstej materii nazywać gwiazdami, skoro gwiazdy są kulami gazowymi, a chyba fluid neutronowy trudno nazywać gazem? Na pewno nie jest to gaz doskonały, nawet już materia białego karła nie jest takim gazem: nazywamy ją gazem zwyrodniałym i wiemy, jakim równaniem należy w wypadku białych karłów zastąpić równanie gazów doskonałych. Jeśli chodzi o gwiazdy neutronowe, to właśnie poszukuje się dla nich równania wiążącego ciśnienie z gęstością, równania stanu tej supergęstej materii. Pozwoli to następnie zbudować teoretyczny model gwiazdy neutronowej. Jeżeli jeszcze uwzględnimy, że zewnętrzna, bardzo cienka zresztą warstwa takiej gwiazdy jest zwykłym gazem i że gwiazdy neutronowe świecą, przyznamy im prawo nazywania się gwiazdami, chociaż mają rozmiary małych planetoid. Fakt, że w centrum mgławicy Krab znajduje się pulsar, wskazuje, że gwiazdy neutronowe są pozostałościami po wybuchach supernowych; implozja jądra i eksplozja otoczki masywnej gwiazdy — oto historia gwiazdy supernowej, udokumentowana w mgławicy Krab.

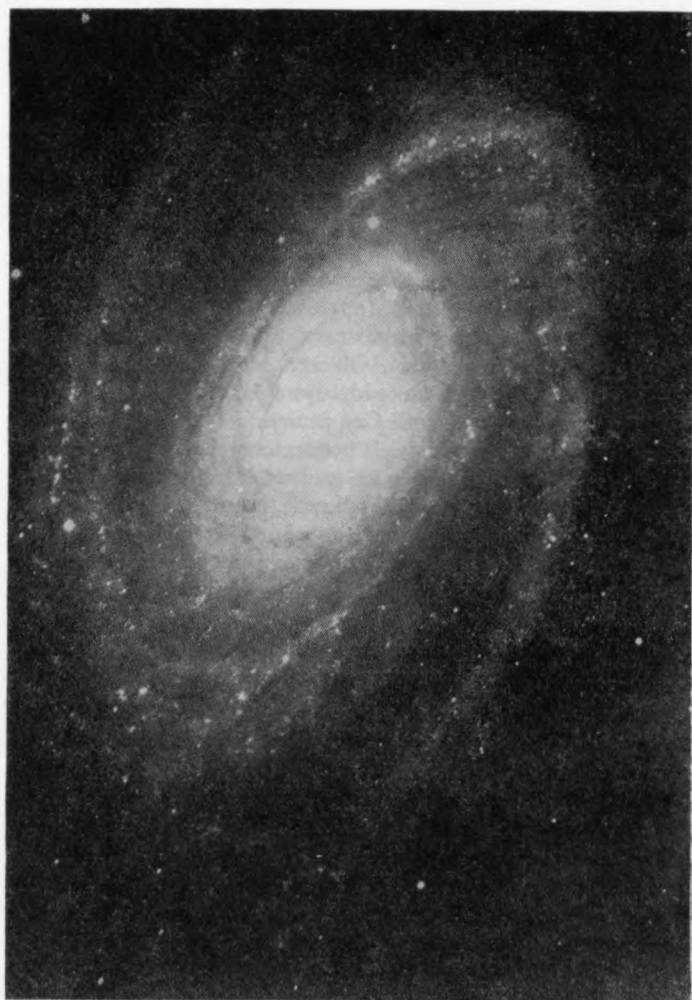
Jako temat obrad kopernikowskiego sympozjum obrano późne stadia ewolucji gwiazd, obejmujące gwiazdy nowe i supernowe, mgławice planetarne, białe karły i gwiazdy neutronowe.

KOLAPS GRAWITACYJNY I PROMIENIOWANIE GRAWITACYJNE

Rozważaliśmy w poprzednich rozdziałach, jak ciężenie powszechne rządzi strukturą i ruchami układów planetarnych i gwiazdowych; następnie — jak ta sama powszechna własność materii rządzi strukturą i ewolucją gwiazd, prowadząc je od stanu chmury rozproszonej materii do stanu białego karła lub gwiazdy neutronowej. Energia jądrowa, wyzwalana we wnętrzach gwiazd, zdolna jest powstrzymać na pewne okresy czasu grawitacyjne sprężanie materii. Można by powiedzieć, że grawitacja i siły jądrowe są głównymi motorami ewolucji Wszechświata. Zauważmy, że do odkrycia tych dwóch potęg przyrody przyczyniło się w sposób decydujący dwoje polskich uczonych: Mikołaj Kopernik i Maria Skłodowska-Curie.

Nie poznaliśmy jeszcze ani nie opanowaliśmy całkowicie tych potęg. Jest to zrozumiałe w odniesieniu do fizyki jądrowej, liczącej niecałe 100 lat. Ale i grawitacja, odkryta przeszło 400 lub 300 lat temu — zależnie od tego, czy nawiązujemy do Kopernika, czy do Newtona — nie stanowi bynajmniej zamkniętego rozdziału. Przeciwnie, istota pól grawitacyjnych i ich nie sprawdzone dotychczas możliwości zajmują umysły wielu wybitnych fizyków i astronomów współczesnych. Takimi możliwościami są: kolaps grawitacyjny i fale grawitacyjne. Tym zagadnieniom poświęcono jedno z sympozjów kopernikowskich.

Ogólnie kolapsem, czyli zapaścią grawitacyjną, nazywamy kurczenie się masy materii pod działaniem własnej grawitacji. Chodzi tu jednak o krańcowy przypadek tzw. kolapsu całkowitego, gdy gęstość materii znacznie przekroczy gęstości nuklearne, wynoszące 10^{13} — 10^{15} g/cm³. Ogólna teoria względności przewiduje możliwość tak daleko posuniętego miażdżenia materii siłami grawitacyjnymi, szczególnie gdy w grę wchodzi masy duże, wielokrotnie przewyższające masy pojedynczych gwiazd. Wprawdzie dotychczas nie zdołano stwierdzić z pewnością istnienia całkowicie skolapsowanych mas, jednak niektóre obiekty istniejące we Wszech-



40. Galaktyka w gwiazdozbiornie Wielkiej Niedźwiedzicy

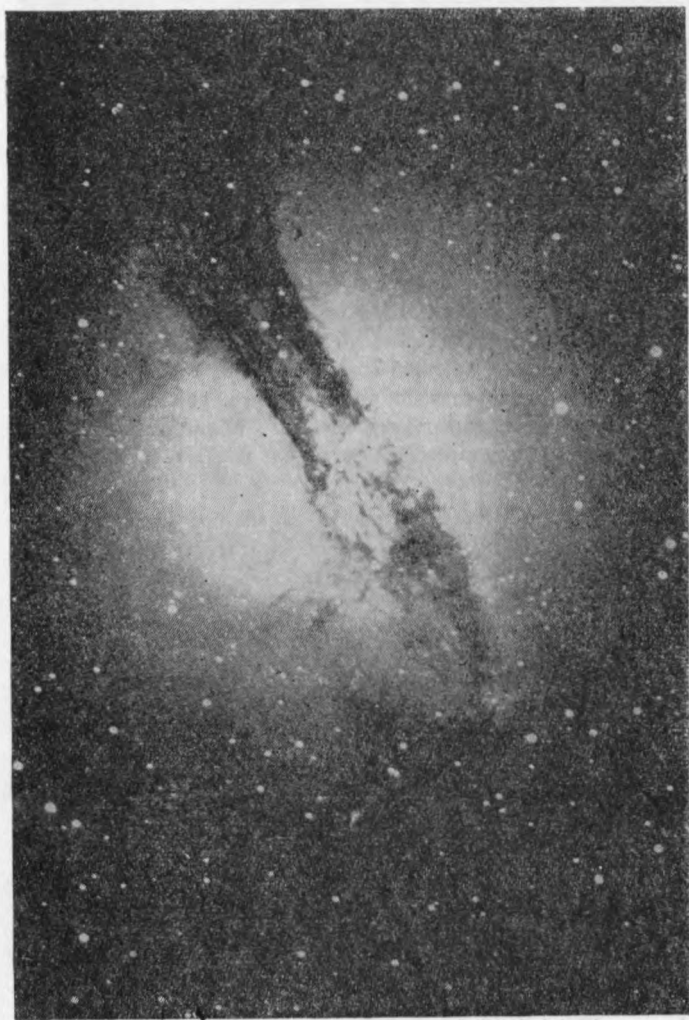
Uogólnione prawo grawitacji, czyli ogólna teoria względności, poucza, że geometria przestrzeni zależy od rozkładu materii w niej zawartej. W szczególności krzywizna przestrzeni zależy od gęstości materii. Przykładem tego jest obserwacyjnie stwierdzone zakrzywianie się toru światła gwiazd, przechodzącego w pobliżu Słońca. Jeżeli miałibyśmy zamiast Słońca całkowicie skolapsowaną masę, zakrzywienie torów promieni świetlnych byłoby tak silne, że nie wydostawałyby się one na zewnątrz, zostałyby złapane jak gdyby w pułapkę. W tak silnym polu grawitacyjnym czasoprzestrzeń zamyka się. Całkowicie skolapsowane obiekty nazywa się „czarnymi dołami“ (ang. *black holes*), ponieważ nie może z nich wydostać się na zewnątrz żadna cząstka materii ani żaden kwant promieniowania. Obiekty takie moglibyśmy rozpoznać po ich grawitacyjnym oddziaływaniu. Czarne doły są na razie tworami teoretycznymi. Czy istnieją we Wszechświecie, jeszcze nie wiemy z pewnością. Wheeler, amerykański fizyk zajmujący się teorią grawitacyjnego kolapsu, obdarzony poza tym zmysłem humoru, przepowiedział odkrycie czarnych dołów na rok 1973 na tej zasadzie, że upływają wtedy 34 lata od teoretycznego odkrycia czarnych dołów, a tyle lat upłynęło od teoretycznego do obserwacyjnego odkrycia gwiazd neutronowych w postaci pulsarów. Byłby to piękny podarunek nauki światowej, złożony Mikołajowi Kopernikowi w pięćsetną rocznicę jego urodzin. Największe szanse na uznanie ich za czarne doły mają w chwili obecnej jądra galaktyk, nie wyłączając naszej Galaktyki. Są to w istocie skupienia wielkich mas, liczących setki milionów (10^8) mas Słońca. Na korzyść przypuszczenia, że jądro naszej Galaktyki jest czarnym dołem, przemawia wspomniany uprzednio fakt, że obserwowana szybkość rotacji Galaktyki wymaga obecności większych mas niż te, których możemy się doliczyć w obserwowanych gwiazdach i materii międzygwiazdowej. Część masy Galaktyki ukrywa się przed naszymi oczyma. Być może, że ukrywa się w jądrze Galaktyki w postaci czarnego dołu lub wielu czarnych dołów.

Istnieją inne jeszcze, niedawno odkryte zjawiska, które zwracają uwagę astrofizyków na jądra galaktyk. Mianowicie, niektóre galaktyki noszą ślady stosunkowo niedawnych potężnych wybuchów w postaci smug i chmur gorącej materii wyrzuconej z jąder. Są one widoczne na zdjęciach niektórych galaktyk, u innych, zwanych radiogalaktykami, ujawniają się w silnym promieniowaniu radiowym. Ślady wybuchu lub kilku kolejnych wybuchów nosi

także nasza Galaktyka: wodór międzygwiazdowy, otaczający jądro Galaktyki, ekspanduje z prędkością około 200 km/sek. Jest to prawdopodobnie wynikiem wybuchu, który się zdarzył w jądrze naszej Galaktyki zaledwie 20 milionów ($2 \cdot 10^7$) lat temu. Obserwuje się ponadto szybkie chmury wodoru międzygwiazdowego w pobliżu naszego Słońca, na peryferiach Galaktyki. Mogą one pochodzić z dawniejszych wybuchów.

Z drugiej strony istnieją galaktyki o bardzo skoncentrowanych, silnie świecących jądrach, zwane galaktykami Seyferta, od nazwiska ich odkrywcy. Obserwuje się w pobliżu jąder tych galaktyk ruchy z prędkościami kilku tysięcy km/sek. Nasuwa się przypuszczenie, że jądra galaktyk Seyferta są w fazie kolapsu grawitacyjnego: mała ich objętość i wysoka temperatura są prawdopodobnie wynikiem pracy sił grawitacyjnych. Obserwuje się ponadto w niektórych galaktykach Seyferta zmiany jasności i zmiany widmowe jąder, mówi się, że są to galaktyki o aktywnych jądrach.

Wreszcie istnieje jeszcze dotychczas zagadkowa klasa obiektów odkrytych w 1964 r. Są to tak zwane kwazary. Nazwa pochodzi od angielskiego „quasi-stellar sources” — „źródła jak gdyby gwiazdowe”, w skrócie QSS. Istotnie, wyglądają one na pozór jak gwiazdy, ale widma ich nie przypominają widm żadnych ze znanych obiektów. Okazało się, że linie widmowe są w nich przesunięte niezwykle silnie ku czerwieni, co by świadczyło o bardzo szybkiej ich ucieczce, a więc o bardzo wielkich, rzędu miliardów lat światła odległościach. Jak dotąd, nie widzimy w tym nic dziwnego — bardzo dalekie galaktyki tak właśnie powinny się zachowywać i powinny z tak dużych odległości wyglądać jak punkty — jak gwiazdy. Dziwność kwazarów polega jednak na tym, że je w ogóle widzimy. Z tak dużych odległości bowiem nawet najpotężniejsze nasze teleskopy nie „widzą” normalnych galaktyk. Jeżeli kwazary są widoczne nawet dla teleskopów średnich rozmiarów, oznacza to, że są one niezwykleymi galaktykami, świecącymi setki razy silniej niż normalne galaktyki. Jeżeli tak jest, to z kolei musimy zapytać, z jakich źródeł mogą one czerpać tyle energii? Najbardziej wydajne reakcje jądrowe mogłyby pokryć zaledwie jedną setną promieniowania kwazarów. Musimy zatem zwrócić się do grawitacji, jako najpotężniejszego źródła energii: jeżeli kwazary są w fazie całkowitego kolapsu grawitacyjnego, wyzwolana gwałtownie energia grawitacyjna może być na czas trwania kolapsu (ok. 10^5 lat) wystarczającym źródłem



41. Zderzające się galaktyki - silne radioźródło

potężnego promieniowania kwazarów. Kwazary byłyby więc wybuchającymi galaktykami, podobnie jak supernowe są wybuchającymi gwiazdami.

Widzimy zatem, że z różnych rodzajów galaktyk: galaktyki Seyferta — kwazary — radiogalaktyki — zwykłe galaktyki, zaczyna się nam układać sensowna składanka ewolucyjna galaktyk, podobnie jak z różnych rodzajów gwiazd ułożyła się w poprzednim rozdziale sensowna historia ewolucji gwiazd. I tu, i tam podstawowym procesem ewolucyjnym jest kontrakcja grawitacyjna. I tu, i tam zdarzają się wybuchy, gdy ta kontrakcja staje się gwałtowna. Różna jest skala mas: jądra galaktyk mają masy setki milionów razy większe niż masy gwiazd. Produktem kolapsu i wybuchu gwiazd są białe karły i gwiazdy neutronowe, produktem kolapsu i wybuchu galaktyk mogą być czarne doły. Tak więc etapem, ku któremu zmierza obecnie Wszechświat, jest zbiorowisko ciemnych supergęstych obiektów, rozlatujących się w przestrzeni. Musimy jednak się zastrzec, że taka droga ewolucyjna galaktyk jest jeszcze hipotezą, wymagającą dalszych badań i mocniejszych argumentów. W szczególności interpretacja kwazarów jako wybuchających galaktyk nie przez wszystkich uczonych jest akceptowana. Nie jest wykluczona inna alternatywa, że kwazary są obiektami bliskimi, leżącymi w pobliżu naszej Galaktyki, a przesunięcia ich widm ku czerwieni nie są spowodowane ich ucieczką, lecz jakąś inną przyczyną, na przykład bardzo silnym polem grawitacyjnym; byłyby to również obiekty kolapsujące, tyle że o masach rzędu mas gwiazd. Rozstrzygnięcie między tymi alternatywami nastąpi przypuszczalnie w najbliższych latach.

Skoro jesteśmy przy ewolucji galaktyk, wypada powiedzieć, czy wiemy, jaki był początek galaktyk. Można by przypuszczać, że podobnie jak gwiazdy, galaktyki powstały z kondensacji chmur materii rozproszonej, z tym że byłyby to olbrzymie chmury o masach rzędu setek miliardów (10^{11}) mas Słońca. Okazuje się jednak, że nie jest rzeczą łatwą „zmusić” do kontrakcji tak rozległe chmury w rozszerzającym się Wszechświecie. Bardziej prawdopodobne jest, że protogalaktyki powstały w chwili wielkiego wybuchu Wszechświata jako niejednorodności w pierwotnym rozkładzie materii.

Mówiliśmy o wybuchach gwiazd i galaktyk, a teraz mówimy o wielkim wybuchu Wszechświata. Istotnie, dzisiejsza kosmologia przyjmuje, że około 10 miliardów (10^{10}) lat temu Wszechświat eksplodował z małej objętości bardzo gęstej materii i dalej się

rozszerza. Mówią o tym przesunięcia widm galaktyk ku czerwieni, tym silniejsze, im dalej od nas znajdują się galaktyki. Takie przesunięcia widm, interpretowane efektem Dopplera, oznaczają, że wszystkie galaktyki uciekają od nas i to tym szybciej, im dalej się znajdują. Oznacza to, że Wszechświat obecnie się rozszerza. Dodatkowym argumentem za przyjęciem tej tezy stało się niedawne wykrycie przez radioastronomów tzw. relikтового promieniowania, wypełniającego Wszechświat. Maksimum natężenia tego promieniowania leży w zakresie fal milimetrowych — na pograniczu fal radiowych i podczerwieni, jest to więc promieniowanie niskotemperaturowe, odpowiadające temperaturze około 3°K. Wielka obfitość tego promieniowania i jego izotropowość* nie znajdują dotąd innego wyjaśnienia jak to, że jest to promieniowanie powstałe podczas wielkiego wybuchu Wszechświata 10¹⁰ lat temu. W wyniku rozszerzania się Wszechświata temperatura tego promieniowania, pierwotnie bardzo wysoka, powinna była spaść do obecnej wartości około 3°K.

Wybuchy gwiazd i galaktyk, o których mówiliśmy wyżej, były następstwem grawitacyjnego sprężania tych obiektów. Nasuwa się pytanie, czy wielki wybuch Wszechświata nie był poprzedzony wielkim kolapsem grawitacyjnym i czy ów „początkowy” Wszechświat sprzed 10¹⁰ lat, zawarty w małej objętości, nie był wielkim czarnym dołem? Na razie nic nie stoi na przeszkodzie do podjęcia badań nad taką możliwością. Nie wyklucza się również możliwości, że obecna faza ekspansji Wszechświata przejdzie kiedyś w fazę kontrakcji. Model Wszechświata oscylującego był już dość dawno zaproponowany**.

Pomimo że prawo ciężenia powszechnego jest jednym z najdawniej odkrytych praw przyrody, istota grawitacji nie jest dotychczas całkowicie jasna. Wokół każdego ciała materialnego istnieje pole grawitacyjne, to znaczy obszar przestrzeni, w którym działają siły grawitacyjne na każdy element materii, jaki tam wprowadzimy. Obszar ten jest teoretycznie nieograniczony, jednak wielkość siły grawitacyjnej szybko maleje z odległością od ciała przyciągającego — siła grawitacji zmienia się, jak wiemy, odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości. Znamy inne pola sił, jak pole magnetyczne, istniejące wokół magnesu, lub pole elektro-

* Izotropowy — jednakowy we wszystkich kierunkach.

** Obszerniejsze omówienie tych zagadnień znajdzie czytelnik w innej książce Biblioteczki Kopernikańskiej: A. Stawikowski, *Wszechświat Kopernika a kosmologia współczesna*.

statyczne, istniejące wokół naelektryzowanego ciała. Siły tych pól również maleją z kwadratem odległości od źródła pola. Te dwa ostatnie rodzaje pól mają ciekawą własność przenoszenia zaburzeń. Jeżeli zmienimy wielkość ładunku ciała naelektryzowanego lub stopień namagnesowania magnesu, pole wokół tych ciał ulegnie zmianie, i ta zmiana będzie się przenosić z prędkością światła od źródeł coraz dalej w przestrzeń. Wystarczy nawet tylko poruszyć ciało naelektryzowane lub magnes, aby spowodować lokalne zaburzenie pola, i zaburzenie to będzie się przenosić na całą przestrzeń, choćby ta przestrzeń była próżnią. Ta własność przenoszenia zaburzeń sprawia wrażenie, jak gdyby pole elektryczne lub magnetyczne było ośrodkiem sprężystym. Jeżelibyśmy ładunkiem lub magnesem poruszyli nie raz, ale wykonywalibyśmy ciągle ruch wahadłowy lub drgający, drgania pola rozchodziłyby się w przestrzeni z prędkością światła, mielibyśmy zjawisko rozchodzenia się fal elektrycznych lub magnetycznych, przypominające rozchodzenie się fal na wodzie za ruchem śruby okrętowej. Wiemy, że światło i fale radiowe przenoszą się (nawet w próżni) jako fale pola elektrycznego i sprzężonego z nim pola magnetycznego, dlatego światło i fale radiowe, a także promieniowanie podczerwone i nadfioletowe, promienie Rentgena (X) i promienie gamma (γ) nazywamy promieniowaniem elektromagnetycznym.

Skoro wokół każdej masy materii istnieje pole grawitacyjne, wydaje się rzeczą naturalną, że każda zmiana wielkości lub rozmieszczenia mas powinna powodować zmiany w polu grawitacyjnym tych mas i te zmiany powinny się rozchodzić od źródła we wszystkich kierunkach na zewnątrz. A zatem jesteśmy skłonni również polu grawitacyjnemu przypisać własność sprężystości i przenoszenie się zaburzeń pola grawitacyjnego uważać za rodzaj fal, którym nadajemy nazwę fal grawitacyjnych. Fale grawitacyjne powinny powstawać wszędzie tam, gdzie następuje przemieszczanie się mas materii. Muszą to być jednak duże masy, masy astronomiczne, aby powstające fale grawitacyjne mogły być wykryte. W szczególności źródłem fal grawitacyjnych mogą być układy gwiazd podwójnych, ale także kolapsujące gwiazdy i jądra galaktyk. Próby wykrycia fal grawitacyjnych idących z kosmosu są podejmowane od kilkunastu lat. Pionierem tych wysiłków jest fizyk amerykański J. Weber. Skonstruował on i udoskonalił urządzenie, przypominające sejsmograf: walec aluminiowy o masie 1,4 tony, umieszczony w próżni. Drgania, jakim powinien

on ulegać, w wypadku nadejścia fali grawitacyjnej mogą być wykrywane z olbrzymią dokładnością do 10^{-14} cm wychylenia. Poza tym walec jest zabezpieczony od wstrząsów sejsmicznych i akustycznych. Aby się zabezpieczyć od jakichkolwiek przypadkowych efektów i aby móc określić kierunek, z którego nadchodzą fale grawitacyjne, Weber umieścił drugi, podobny walec w odległości 1000 km. Jeżeli fala grawitacyjna nadejdzie z kierunku linii łączącej oba walce, muszą one oba zarejestrować drgania w odstępie czasu równym $\frac{1}{300}$ sekundy, bowiem fale grawitacyjne powinny się rozchodzić z prędkością światła, podobnie jak fale elektromagnetyczne. Dotychczasowy „nasłuch” wykazał istnienie takich koincydencji z kierunku centrum Galaktyki, co nie rozstrzyga jednak definitywnie sprawy realności fal grawitacyjnych. Ponieważ jest to sprawa ważna dla sprawdzenia słuszności teorii pola grawitacyjnego, jak i ogólnej teorii względności, a także dla konsekwencji tych teorii, wiele ośrodków naukowych w różnych krajach, głównie w Stanach Zjednoczonych i w Związku Radzieckim, podjęło „nasłuch” fal grawitacyjnych metodami podobnymi lub różnymi od metody Webera. Jedną z konsekwencji wysyłania fal grawitacyjnych byłaby utrata masy przez ciało emitujące te fale, podobnie jak to zachodzi przy emisji fal elektromagnetycznych. Wszelkie fale bowiem przenoszą energię, którą musi pokrywać źródło fal. Słońce pokrywa energię wysyłanego promieniowania elektromagnetycznego z energii odbywających się w jego wnętrzu reakcji jądrowych, a te z kolei czerpią energię z masy wchodzących do reakcji cząstek. Gdy z czterech protonów powstaje jądro helu, następuje ubytek masy o 0,7%: jądro helu „waży” mniej niż cztery protony o taki właśnie ułamek ich łącznej masy. Słońce traci na promieniowanie elektromagnetyczne w każdej sekundzie przeszło 4 miliony ton, co stanowi ułamek $2 \cdot 10^{-21}$ całkowitej masy Słońca. Jeżeli jądro Galaktyki wysyła promieniowanie grawitacyjne zgodnie z szacunkiem Webera, powinno tracić rocznie kilkaset mas słonecznych, co stanowi stratę rzędu 10^{-13} masy jądra Galaktyki na sekundę. Nie oznacza to, że po upływie około miliona lat cała masa jądra Galaktyki zniknie, zamieniając się na grawitony*, bowiem największa możliwa strata masy przy całkowitym kolapsie grawitacyjnym nie może przekroczyć 50%.

86 * Grawitonem nazwano kwant energii fal grawitacyjnych, podobnie jak fotonem nazywa się kwant energii fal elektromagnetycznych.

Jeżeli uda się rejestracja fal grawitacyjnych, uzyskamy nowe źródło informacji o zjawiskach zachodzących we Wszechświecie, a przede wszystkim o kolapsach grawitacyjnych zachodzących w naszej Galaktyce.

*

„Spośród licznych i różnorodnych sztuk i nauk, budzących w nas zamięrowanie i będących dla umysłów ludzkich pokarmem, tym — według mego zdania — przede wszystkim poświęcać się należy i te z największym uprawiać zapalem, które obracają się w kręgu rzeczy najpiękniejszych i najbardziej godnych poznania. Takimi zaś są nauki, które zajmują się cudownymi obrotami we wszechświecie i biegami gwiazd, ich rozmiarami i odległościami [...] a w końcu wyjaśniają cały układ świata” (*De rev.*, księga pierwsza).

Takie zdania położył Kopernik na początku swego dzieła, usprawiedliwiając się jak gdyby ze swej pasji ku astronomii. Jakże słusznie można je odnieść do astronomii dzisiejszej, tak bujnie rozkwitającej, wyrosłej z dzieła Kopernika. A jeżeli piękno nauki nie jest dziś wystarczającym argumentem do jej uprawiania, zauważmy, że astronomia toruje drogi innym naukom ścisłym i postępowi technicznemu.



101-

SPIS TREŚCI

| | str. |
|---|------|
| Wstęp | 5 |
| Od Kopernika do naszych czasów | 7 |
| Dynamika układów planetarnych i gwiazdowych | 25 |
| Badania układu planetarnego | 36 |
| Ewolucja gwiazd | 65 |
| Kolaps grawitacyjny i promieniowanie grawitacyjne | 78 |



Biblioteka Główna UMK



300042872369

W ramach „Biblioteczki Kopernikańskiej”, wydawanej przez Towarzystwo Naukowe w Toruniu dla uczczenia pięćsetnej rocznicy urodzin Mikołaja Kopernika, ukazały się już następujące pozycje:

KAROL GÓRSKI

*Dom i środowisko rodzinne
Mikołaja Kopernika*

BOHDAN RYMASZEWSKI

Toruń w czasach Kopernika

WALDEMAR VOISÉ

*Mikołaj Kopernik –
dzieje jednego odkrycia*

STEFAN CACKOWSKI

Mikołaj Kopernik jako ekonomista

MARIAN BISKUP

*Działalność publiczna
Mikołaja Kopernika*

LEONARD JARZĘBOWSKI

Biblioteka Mikołaja Kopernika

JERZY DOBRZYCKI

Astronomia przedkopernikowska

CECYLIA IWANISZEWSKA

Astronomia Mikołaja Kopernika

ZENON NOWAK

*Kultura unywersytetu Prus Królewskich
w czasach Kopernika*

*Astronomia w Toruniu
mieście Mikołaja Kopernika
pod red. C. Iwaniszewskiej*

ANTONI STAWIKOWSKI

*Wszecświat Kopernika
a kosmologia współczesna*

ALOJZY TUJAKOWSKI

*Mikołaja Kopernika „De revolutionibus”.
Historia wydań*

ANDRZEJ WOSZCZYK

*Instrumenty Mikołaja Kopernika a na-
rządza współczesnej astronomii*

Biblioteka
Główna
UMK Toruń

918938