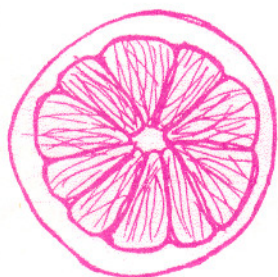


Kazimierz STEPIEŃ

Artykuł ten rozpoczyna cykl podsumowań osiągnięć matematyki, fizyki i astronomii w XX wieku, który będziemy kontynuować przez 2 lata.
Redakcja



Rozwiązanie zadania F 503.

Człowiek krótkowzroczny, aby poprawić swoją wadę wzroku, nosi okulary z soczewek rozpraszających, by promienie padające od punktów odległych o 30 cm ogniskowały się na siatkówce w tym samym miejscu, w którym ogniskują się promienie padające od przedmiotów odległych o 16 cm bez korekcy dodatkowymi soczewkami.

Dla oka nieuzbrojonego mamy

$$\frac{1}{d_0} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

gdzie przez $\frac{1}{F}$ oznaczyliśmy zdolność skupiającą oka, $d_0 = 0,16$ m jest odległością dobrego widzenia dla krótkowidza, a f głębokością oka.

Analogicznie dla oka uzbrojonego mamy

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} + \frac{1}{F_1}$$

gdzie $d_1 = 0,3$ m, a $\frac{1}{F_1}$ jest zdolnością skupiającą okularów. Zrobiliśmy tutaj pewne uproszczenie, zakładając, że zdolność skupiająca jest równa sumie ich zdolności skupiających.

Odejmując powyższe równania stronami znajdujemy, że

$$\frac{1}{F_1} = \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_0} \approx -2,9 \text{ dioptrii}$$

Podobnie jak we wszystkich naukach przyrodniczych, wiek XX przyniósł w astrofizyce więcej odkryć niż wszystkie wcześniejsze razem wzięte. Wybór najważniejszych z nich musi mieć, siłą rzeczy, subiektywny charakter, zwłaszcza że należy je niejako wyrwać z ciągu kolejnych i ściśle ze sobą powiązanych prac i wyników naukowych, które składają się na globalny proces poznawczy. Ja wybrałem dwa takie odkrycia.

Za pierwsze z nich uważam odkrycie reakcji jądrowych prowadzących do syntezy pierwiastków i stanowiących podstawowe źródło energii gwiazd. Odkrycie to pozwoliło zrozumieć, jak ewoluują gwiazdy i jak zmieniają się ich własności obserwacyjne w zależności od wieku, masy i składu chemicznego. Obserwowane na niebie gwiazdy wydawały się wcześniej dziwnym zbiorowiskiem obiektów „bez ładu i składu”, mających wielkie i małe rozmiary, jasnych i słabych, stałych i zmiennych na najróżniejsze sposoby, czasem pojawiających się nagle tam, gdzie ich wcześniej nie było, a potem znikających. Czy wszystkie mają jednakowy wiek? Jak długo żyje gwiazda? Czy jedne są „skazane” na zmienność przez całe życie, a inne, np. Słońce, są stateczne i niezienne? Cały ten galimatias stał się jasny i zrozumiały dzięki rachunkom ewolucyjnym. Każda gwiazda znalazła swoje miejsce w układzie ewolucyjnym, tak jakby ktoś ułożył rozsypaną wcześniej układankę. Wszystko to było wynikiem odkrycia podstawowego mechanizmu napędzającego ewolucję gwiazd: reakcji jądrowych.

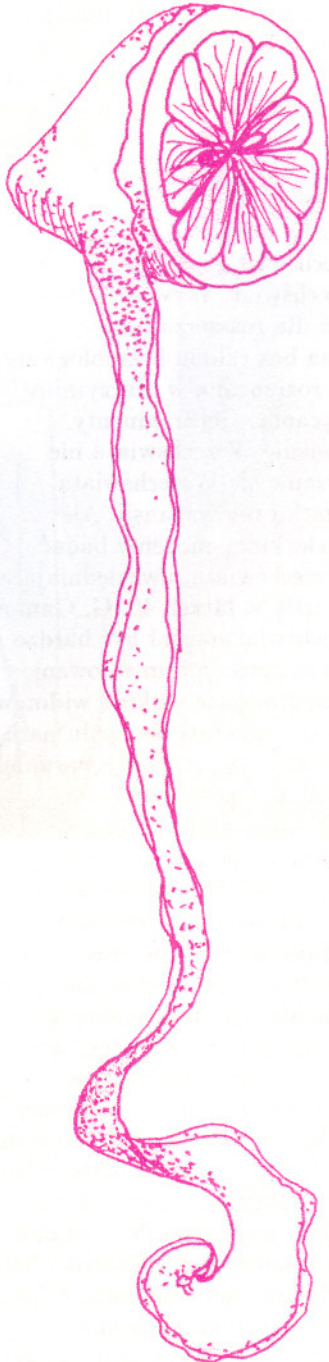
Co na temat źródeł świecenia gwiazd wiadomo było na przełomie wieków? Dla zwięzłej prezentacji ówczesnych poglądów posłużę się cytatem z monumentalnego, 3-tomowego dzieła zbiorowego pt. „Wszczęświat i człowiek”, o objętości ponad 1500 stron formatu A4, które ukazało się na samym początku XX w. pod redakcją Hansa Kramera (wyd. polskie: Warszawa 1906). Zawiera ono podsumowanie wiedzy przyrodniczej z przełomu XIX i XX wieku. Czytamy tam: „... przy ciągłej utracie ciepła przez promieniowanie w przestrzeń świata, następować może powolne ściąganie się bryły słonecznej, co w dalszym ciągu spowoduje silniejsze ciśnienie w jej wnętrzu i stan bardzo naprężony. Wiadomo powszechnie, że według poglądu Helmholtza, przez ciągłe takie ściąganie się warstw wierzchnich słońca i wynikające ztąd wzmaganie się temperatury jego, wyrównywane być mogą straty ciepła, jakie nieuniknienie zachodzić muszą skutkiem promieniowania ciepła słonecznego w przestrzeń wszechświata” (pisownia oryginalna). A zatem wierzono, że źródłem energii Słońca (i innych gwiazd) jest energia potencjalna zamieniana na ciepło podczas powolnego kurczenia się tych ciał. Autorzy podkreślają, że wynikające stąd zmniejszenie średnicy Słońca byłoby zauważalne dopiero po wielu tysiącletniach starannych obserwacji. Energia potencjalna (zwana czasem grawitacyjną) jest istotnie jednym z ważnych źródeł energii we Wszczęświecie. Powstająca z rozproszonej materii gwiazda zaczyna świecić, jeszcze zanim rozpoczną się w jej wnętrzu jakiegokolwiek reakcje jądrowe. Kurczenie się porcji gazu prowadzi do wzrostu temperatury, a rosnąca szybko nieprzezroczystość uniemożliwia szybkie wychłodzenie przez wypromieniowanie nadmiaru energii wewnętrznej. Proces wzrostu temperatury trwa do chwili, gdy osiągnie ona wartość wystarczającą do zapoczątkowania reakcji przemiany wodoru w hel (pomijam tu inne, mało znaczące reakcje, które zachodzą nieco wcześniej). Oceny z początku stulecia były poprawne: proces kurczenia się gwiazdy o masie Słońca trwa bardzo długo w porównaniu ze skalą życia ludzkiego, bo około 100 mln lat, ale jest to nadal o wiele krócej niż wiek Ziemi. Wtedy jednak nie dostrzegano tej sprzeczności. Wprawdzie istniał akceptowany do dzisiaj podział na okresy i ery geologiczno-paleontologiczne, ale było to datowanie względne. Dopiero na początku XX w. wprowadzono izotopowe metody datowania dające wiek badanych próbek w latach. I wtedy okazało się, że wiek Ziemi sięga kilku miliardów lat, a Słońce musiało przez cały ten czas świecić podobnie, jak obecnie. Powstała zasadnicza sprzeczność wymagająca znalezienia innego, trwalszego źródła energii. Początek XX w. to również początek badań nad



Rozwiązanie zadania M 888.

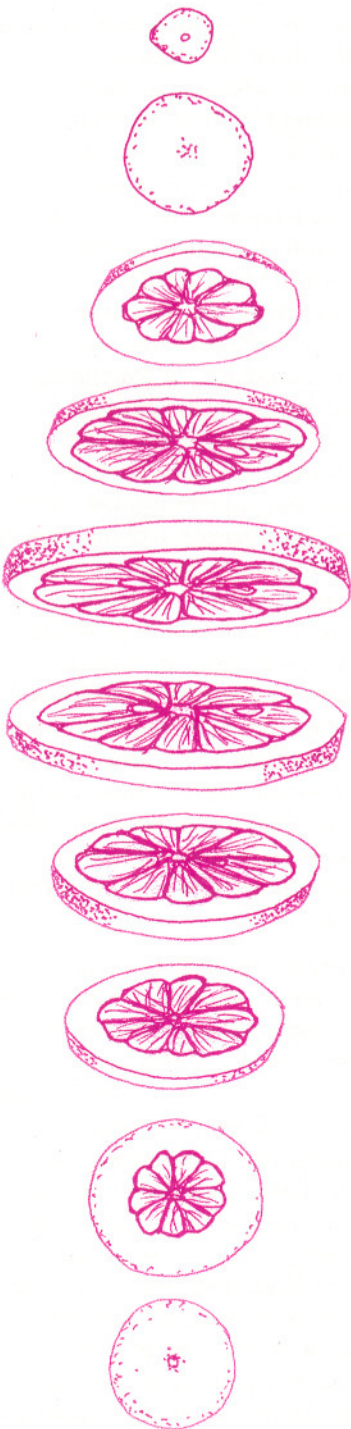
Rozpatrzmy ciąg $1, 11, 111, 1111, \dots$

Pewne dwa jego wyrazy dają tę samą resztę z dzielenia przez m . Ich różnica jest szukaną liczbą.



reakcjami jądrowymi przemieniającymi jedne pierwiastki w inne. W 1905 roku A. Einstein opublikował słynny związek między masą i energią: $E = mc^2$. Stało się jasne, że wyzyskanie energii zawartej nawet w bardzo niewielkiej porcji materii może jej dostarczyć w wymaganej ilości. W 1927 roku A. Eddington zauważył, że suma mas czterech jąder wodoru jest nieco większa niż masa jądra helu. Gdyby więc, spekulował, cztery jądra najobficiej w przyrodzie występującego pierwiastka, czyli wodoru, połączyć w jedno jądro helu, a nadwyżkę masy zamienić na dostępniejszą formę energii, dostalibyśmy niezmiernie obfite źródło energii, wystarczające do podtrzymania świecenia gwiazd przez dostatecznie długi czas. Nie potrafił jednak zaproponować sposobu tej przemiany. Dopiero w 1939 roku H. Bethe odkrył i opisał cykl reakcji, zwany cyklem węglowo-azotowym (lub cyklem CNO), w wyniku którego powstaje hel z wodoru. Zasugerował też, że ten właśnie cykl może zachodzić we wnętrzu Słońca. Następne lata przyniosły odkrycie wielu innych reakcji, w tym reakcji proton-proton, która zachodzi wydajniej niż cykl Bethego w gwiazdach mniej masywnych niż około 1,5 masy Słońca, mających też niższe temperatury w swych wnętrzach. Odkryto cały łańcuch egzotermicznych reakcji prowadzących do syntezy kolejno coraz to masywniejszych pierwiastków aż do żelaza. Wymagają one coraz to wyższych temperatur i ciśnień, osiąganym w zaawansowanych stadiach ewolucyjnych coraz to masywniejszych gwiazd. Reakcje tworzące jeszcze masywniejsze pierwiastki są endotermiczne i zachodzą w warunkach silnie niestacjonarnych, na koszt energii grawitacyjnej zapadającego się gwałtownie jądra gwiazdy supernowej. Wyznaczenie niezbędnych danych jądrowych, przekrojów czynnych, tempa poszczególnych kroków cykli, ich bilansu energetycznego itp. umożliwiło włączenie reakcji jądrowych do ewolucyjnych modeli gwiazd. Burzliwy rozwój technik komputerowych pozwolił na prowadzenie szczegółowych i dokładnych obliczeń modeli w kolejnych stadiach ewolucyjnych, co w efekcie doprowadziło do wyznaczenia całych ewolucyjnych sekwencji gwiazd o różnych masach i początkowych zawartościach ciężkich pierwiastków – od narodzin do śmierci. Modele były stale konfrontowane z obserwacjami, w których szczególnie ważną rolę pełniły obserwacje gromad gwiazdowych – gęstych skupisk gwiazd o tym samym wieku, ale różnych masach. Badania nad ewolucją gwiazd prowadzone były głównie w latach 50. do 70. Obecnie koncentrują się na najbardziej zaawansowanych stadiach ewolucji gwiazd (w tym modelowanie wybuchów supernowych) i różnych nietypowych konfiguracjach, powstałych np. w wyniku wzajemnego oddziaływania dwu lub więcej gwiazd.

Drugie, najważniejsze, moim zdaniem, odkrycie astrofizyczne XX w., to wykazanie, że Wszechświat powstał w wyniku Wielkiego Wybuchu. Stan wiedzy na temat całego Wszechświata na początku wieku tak opisuje cytowana już książka: „O początek i koniec wszechrzeczy nie troszczy się wiedza przyrodnicza. Wie dobrze, że nieumiarkowane takie dążności, jakby mamidła, uwodziły myśl naszą coraz głębiej w pustynię dogmatów jałowych”. I dalej: „Astronomja odważyła się na zastosowanie praktyczne swych teorii ruchu, jakkolwiek nie wie o pierwszych podniętach ruchów ciał niebieskich i jakkolwiek nie zna zgoła istoty tak zwanych sił, którymi tak pomyślnie operuje, a wprowadzonych dotąd w obrazach matematycznych jedynie”. Cytaty pokazują, jak mierna była podówczas wiedza dotycząca powstania i życia Wszechświata. Wprawdzie akceptowano powstanie Słońca i planet z materii rozproszonej, ale to było wszystko. Podziwiać można dyscyplinę przyrodników, którzy nie mając do dyspozycji żadnych faktów obserwacyjnych dotyczących powstania, ewolucji, obecnego wieku czy rozmiarów Wszechświata, nawoływali do unikania jałowych spekulacji, które albo doprowadziłyby do uznania dogmatów religijnych, albo do stworzenia innych, również nie mających żadnego wsparcia przyrodniczego. Z perspektywy ówczesnego obserwatora Wszechświat wydawał się niezmienny i albo wieczny, albo powstały w wyniku procesów, których nigdy nie poznamy i nie zrozumiemy. Potrzeba było geniuszu Einsteina, by zmierzyć się z zadaniem matematycznego opisu struktury całego Wszechświata. Zaraz po odkryciu w 1916 roku ogólnej teorii względności Einstein zastosował jej równania do opisu



Wszechświata. Poszukiwał jednak statycznych rozwiązań, zgodnych z powszechnym przekonaniem. Okazało się, że rozwiązania takiego nie można znaleźć. Łatwo to zrozumieć nawet na podstawie potocznej intuicji: zawieszono w przestrzeni masy (np. galaktyki) przyciągają się wzajemnie i przy braku siły równoważącej siłę przyciągania grawitacyjnego Wszechświat powinien się zapaść. Chcąc mieć model statyczny, trzeba wprowadzić siłę przeciwną grawitacji. Einstein zrobił to, wprowadzając do swych równań słynny człon kosmologiczny opisujący siłę odpychania działającą między dwiema masami, wprost proporcjonalną do odległości między nimi. Dla odległości występujących w Układzie Słonecznym, a nawet w Galaktyce, wielkość tej siły była bardzo mała, nieporównywalnie mniejsza niż siły grawitacji. Ale odległe galaktyki powinny odpychać się wystarczająco silnie, by zrównoważyć grawitację i zapewnić statyczność Wszechświata. Człon kosmologiczny wprowadzony został ot tak, „z sufitu”, tylko by znaleźć rozwiązanie statyczne. Tymczasem w 1929 r. E. Hubble opublikował przełomową w kosmologii pracę, w której wykazał, że istnieje liniowa zależność między odległością do galaktyki (odległości te nauczono się wyznaczać niewiele wcześniej, też dzięki pracom Hubble’a) i jej prędkością wyznaczoną z dopplerowskiego przesunięcia linii widmowych. Poza najbliższymi galaktykami, które poruszają się względem nas chaotycznie ze stosunkowo niedużymi prędkościami, przesunięcie dopplerowskie występuje zawsze ku większym długościom fal (w części widzialnej widma – ku czerwieni). Prawo Hubble’a mówi, że wszystkie dostatecznie odległe galaktyki oddalają się od nas z prędkościami proporcjonalnymi do odległości. Natychmiast uznano, że to zjawisko, wykryte przecież dla niewielkiej liczby niezbyt odległych galaktyk, jest uniwersalne i oznacza, że cały Wszechświat rozszerza się. Praca Hubble’a zrewolucjonizowała nasz pogląd na Wszechświat. Wywołała lawinę prac teoretycznych, które, oczywiście, pokazały, że dla rozszerzającego się Wszechświata można rozwiązać równania Einsteina bez członu kosmologicznego. Jeżeli np. cała masa Wszechświata została kiedyś rozrzucona w olbrzymim wybuchu, to – ze względu na istnienie siły przyciągania – jej fragmenty powinny poruszać się ruchem opóźnionym, ale istnienie Wszechświata nie wymaga żadnej siły odpychającej. Obecne rozszerzanie się Wszechświata prowadzi do oczywistego pytania, co było na początku tej ekspansji. Ale takie pytanie oznacza, że w ogóle był jakiś początek, który możemy badać metodami przyrodniczymi. Ewolucyjne modele Wszechświata, uwzględniające zachowanie się wypełniającej go materii, doprowadziły w latach 40. G. Gamowa i współpracowników do wniosku, że wczesny Wszechświat musiał być bardzo gorący, a pozostałością po tej fazie powinno być izotropowe promieniowanie elektromagnetyczne wypełniające cały Wszechświat i mające rozkład widmowy taki, jak promieniowanie ciała doskonale czarnego o temperaturze rzędu paru kelwinów. Ponadto, ponieważ we wczesnym Wszechświecie panowały warunki przypominające wnętrze gwiazdy, powinny były tam też zachodzić reakcje jądrowe. Szybka ekspansja ochłodziła Wszechświat, więc warunki do zachodzenia tych reakcji (głównie syntezy helu z wodoru) panowały zaledwie przez parę minut. Dokładniejsze rachunki modelowe wykazały, że 25–30% protonów powinno „zdażyć” połączyć się w jądra helu. A zatem, najpierwotniejszy budulec gwiazd to (masowo) siedemdziesiąt kilka procent wodoru i reszta hel, ze śladowymi ilościami deuteru i litu. W 1965 r. przyszło kolejne ważne odkrycie obserwacyjne. A. Penzias i R. Wilson zarejestrowali istnienie mikrofalowego promieniowania tła, dokładnie tak, jak przewidywały to modele teoretyczne. Jego temperatura wynosi 2,73 kelwina. Zauważmy, że o ile obserwacyjne odkrycie ekspansji Wszechświata wyprzedziło prace teoretyczne, o tyle teraz nastąpiło empiryczne potwierdzenie przewidywań teoretycznych. Tak to często w nauce bywa. Również pierwotną zawartość helu należy uznać za potwierdzoną, choć nie odbyło się to poprzez jedno spektakularne odkrycie, a raczej przez żmudne pomiary zawartości helu w różnych, możliwie najstarszych obiektach. Pomiary wskazują, że istotnie istnieje dolna granica pierwotnej zawartości helu, bliska 25%. Oczywiście, nie znamy wciąż odpowiedzi na wiele fundamentalnych pytań dotyczących Wszechświata. Gwałtowny rozwój kosmologii zachodzi właśnie teraz, na naszych oczach i będzie jeszcze trwał. No, ale o tym napisze ktoś, kto podsumuje odkrycia XXI wieku.