

Czas i jego pomiary

Fryderyk Zawielski

Spis treści

Od autora	3
1 Czas i kalendarz	4
Rachuba dni w roku	4
Ery i epoki	7
2 Jak starożytni mierzyli czas	9
Zegar słoneczny	9
Zegary piaskowe, ogniowe i wodne	12
3 Zegary mechaniczne kołowe i wahadłowe	16
Koło zamiast piasku, ognia i wody	16
Wahadło - serce współczesnego zegara	18
4 Do czego potrzebny jest dokładny czas	23
Gdzie rozpoczyna się rok	23
Jak określa się położenie statku na pełnym morzu	25
5 Otrzymywanie, przechowywanie i przekazywanie dokładnego czasu	28
Otrzymywanie momentów dokładnego czasu	29
Przechowywanie dokładnego czasu	32
Przekazywanie dokładnego czasu	34
6 Jednostki miar i wzorce	36
7 Zegar molekularny	38
Wzorce atomowe	38
Zasada działania zegara molekularnego	40
8 Pomiary krótkich odstępów czasu	42
Co dzieje się w ułamku sekundy	42
Chronograf iskrowy	43
Układ z kondensatorem	45
Czujniki	47
Przyrząd z układem przeliczającym	50
9 Badanie procesów szybkozmiennych	54

Jak zapisujemy procesy szybkozmienne.....	54
Pomiar czasu trwania krótkotrwałych zjawisk elektrycznych	56
Pomiar czasu trwania krótkotrwałych zjawisk nieelektrycznych	58
10 Pomiar tysięcznych, milionowych i miliardowych części sekundy za pomocą przyrządów elektronopromieniowych	58
Przyrządy elektronopromieniowe o działaniu nieciągłym	59
Elektronopromieniowe przyrządy liczące o działaniu ciągłym	62
Urządzenia radiolokacyjne	62
Przyrząd z oscylografem wysokonapięciowym	67
Przyrząd z różnicą faz	68
11 Pomiar milionowych, miliardowych i bilionowych części sekundy	70
Metoda koincydencji z opóźnieniem.....	71
Wyznaczenie średniego czasu życia stanu wzbudzonego jądra litu 7	77
12 Pomiar długich okresów czasu za pomocą „zegara promieniotwórczego”	79
Zasada działania „zegara promieniotwórczego”	79
Pomiar czasu za pomocą węgla promieniotwórczego (metoda C ¹⁴).....	83
13 Wiek różnych form życia na Ziemi; wiek skał i Ziemi	86
Kto i dlaczego powinien znać wiek skał i Ziemi	86
Pierwsze próby znalezienia „zegara” do mierzenia setek milionów lat	87
„Zegar promieniotwórczy” do pomiarów milionów i miliardów lat.....	87
Tabela chronologiczna.....	92
Bibliografia.....	93

Od autora

Od wczesnej starożytności aż do czasów nam współczesnych walka o opanowanie przyrody zmusza człowieka do rozwiązywania różnego rodzaju problemów. Jednym z nich jest mierzenie czasu, początkowo realizowane za pomocą metod bardzo prymitywnych, potem coraz bardziej precyzyjnych.

Mijają wieki. Rozszerza się horyzont myślowy człowieka. Badając Ziemię, jej ruch i otaczające ją gwiazdy człowiek wynajduje tak dokładne metody i instrumenty pomiarowe, że potrafi dostrzec ruch kontynentów i zmierzyć nierównomierność obrotu Ziemi, nie przekraczającą tysięcznych części sekundy na stulecie. Przenikając stopniowo tajemnice mikroświata, poznając molekuły, atomy, cząstki elementarne, człowiek styka się z nową skalą czasu tysięcznych, milionowych, miliardowych, a nawet bilionowych części sekundy i uczy się je mierzyć. Podejmując badania nad przeszłością życia

organicznego człowiek znajduje w Ziemi szczątki dawnego życia odtwarza historię zdarzeń sprzed wielu tysięcy lat; ważną rolę odgrywa przy tym umiejętność określania daty tych wydarzeń.

Badając wnętrze Ziemi, opracowując metody poszukiwań geologicznych człowiek nabiera przekonania, że ważna jest znajomość wieku skał. Wymaga to mierzenia odstępów czasu rzędu milionów i setek milionów lat, do czego nie nadaje się żadna z dawnych metod pomiarowych i powstaje konieczność stworzenia nowych.

Badając ciała niebieskie - Słońce, gwiazdy, gromady gwiazd - człowiek jest świadkiem ich zmienności. Zgłębiając historię ich rozwoju staje wobec gigantycznych okresów czasu, milionów i miliardów lat i opracowuje metody ich pomiaru.

Książka opowiada o celach i podstawowych zasadach różnych metod pomiaru czasu.

1

Czas i kalendarz

Rachuba dni w roku. Kalendarzem nazywamy system liczenia długich odstępów czasu z ustaloną kolejnością dni w roku i momentem początkowym, od którego prowadzi się rachubę lat.

Kalendarz używany przez nas obecnie jest tylko jednym z wielu. W różnych krajach istniało około dwustu kalendarzy, w których stosowano odmienną rachubę czasu w ciągu roku i przyjmowano inny moment początkowy.

Ludy pierwotne nie posiadały kalendarza. Fakt ten potwierdzają obserwacje pewnych współczesnych plemion, pozostających jeszcze w stanie dzikości. I tak, w buszu środkowej Australii, w tropikalnych lasach Indonezji i Południowej Ameryki po dziś dzień żyją ludzie, którzy nie znają regularnego liczenia czasu.

Dopiero rozwój uprawy roli, hodowli, żeglugi sprzyjał powstawaniu bardziej lub mniej regularnej rachuby czasu. Początkowo wymagania wobec rachuby czasu i metody jego pomiaru były dość prymitywne. Słowianie i inne narody rolnicze określali rok jako okres czasu między kolejnymi zniwami, Indianie amerykańscy liczyli rok od wystąpienia pierwszego śniegu, Australijczycy - od rozpoczęcia pory deszczowej itd.

Powstanie państw, wzrost miast, wzmocnienie się więzi handlowych i rozwój systemów nawadniających wymagały ulepszenia i zwiększenia precyzji metod liczenia czasu. W związku z tym u niektórych narodów powstają kalendarze księżycowe.

W kalendarzu księżycowym występuje już rachuba dni w miesiącu. Miesiąc określa się jako okres czasu między kolejnymi pełniami księżyca. Rok zawiera 12 miesięcy księżycowych. Ale ponieważ między kolejnymi pełniami księżyca upływa w przybliżeniu 29,5 dnia, to w kalendarzu księżycowym miesiące zawierają po 29 i 30 dni.

Jeżeli uwzględnimy, że długość miesiąca księżycowego wynosi dokładnie 29,5306 dnia, to otrzymamy, że rok ma 354,3671 dnia. Zatem w ciągu jednego roku księżycowego popełniamy błąd o 0,3671 dnia, tzn. ok. 3,5 dnia w ciągu 10 lat. Ponadto system ten nie zapewnia zgodności z rokiem słonecznym, ponieważ 12 miesięcy księżycowych zawiera tylko 354 dni, podczas gdy rok słoneczny - ok. 365,25 dnia. Aby usunąć te rozbieżności, wprowadzono do kalendarzy księżycowych odpowiednie poprawki,

np. w muzułmańskich kalendarzach księżycowych lata mają kolejno po 354 i 355 dni. Ten nader niedogodny system liczenia czasu zatwierdził w Koranie Mahomet,

W 433 r. p. n. e. astronom grecki Meton obliczył, że 19 lat słonecznych albo 6940 dni, prawie dokładnie zawiera 235 miesięcy księżycowych, tak że co każde 19 lat wszystkie fazy księżyca przypadają w te same dni miesiąca. Starożytni Grecy uznali to za wspaniałe odkrycie: cykl Metona zapisano złotymi literami na płytach marmurowych, wystawianych na placach miejskich.

W żydowskim kalendarzu księżycowo-słonecznym rok zwykły składa się z 12 miesięcy i zawiera 353, 354 lub 355 dni, a rok przestępny, posiada dodatkowo trzynasty miesiąc i liczy 383, 384 lub 385 dni. Dodatkowy miesiąc wprowadzony jest zgodnie z cyklem Metona.

Żydowski kalendarz księżycowo-słoneczny, zgodny w przybliżeniu z cyklem słonecznym, cechuje złożony system poprawek.

W starożytnym Egipcie już w V tysiącleciu p. n. e. zrezygnowano z kalendarza księżycowego. Dla całego gospodarczego życia Egiptu olbrzymie znaczenie miały wylewy Nilu. Znajomość momentu rozpoczynania się wylewu Nilu jest bardzo ważna, gdyż pozwala na czas przygotować się do robót rolnych. W ciągu dwóch miesięcy gwiazda Syriusz (Sotis), wschodząc jednocześnie ze Słońcem, pozostaje niewidoczna, ponieważ blask Słońca przyćmiewa jej światło. W początku lipca Syriusz wschodzi nieco wcześniej niż Słońce i przez kilka minut można obserwować go na wschodzie, dopóki nie pojawi się Słońce. Okres ten zbiega się z początkiem wylewu Nilu. Kalendarz egipski był zgodny z pozornym ruchem Syriusza-Sotisa.

W kalendarzu tym rok składał się z 12 miesięcy po 30 dni każdy. W końcu roku dodawano jeszcze 5 dni. Tak więc, rok składał się z 365 dni. Przy tej metodzie liczenia czasu występowała niedokładność ok. 0,25 dnia w ciągu roku, czyli 1 dzień co 4 lata, albo $(4 \cdot 365 = 1460)$ 1 rok co każde 1460 lat. W ten sposób wszystkie święta kalendarzowe ulegały stopniowo przesunięciu i powracały na to samo miejsce co 1460 lat. Starożytni Egipcjanie znali tę rozbieżność, ale kapłani zarządzający kalendarzem zachowywali taki „błądzący” rok ze względów kultowych i sprzeciwiali się reformom kalendarza.

Mimo to, co najmniej dwukrotnie usiłowano w starożytnym Egipcie zreformować kalendarz. W XVII w. p. n. e. Egipt został podbity przez plemię Hyksosów. Hyksosi posługiwali się kalendarzem, w którym rok składał się z 12 miesięcy księżycowych i zawierał 354 albo 355 dni, tak więc na ogół był mniej dokładny od egipskiego. Jednakże pod pewnym ważnym względem kalendarz Hyksosów był lepszy od kalendarza egipskiego; miał system periodycznych poprawek, pozwalający utrzymywać zgodność z cyklem słonecznym.

Myślano o reformie obu kalendarzy, która połączyłaby zalety każdego z nich: 365-dniowy rok egipski z dodaniem jednego dnia co 4 lata. Reformę tę przeprowadził król Hyksosów Salitis. W wyniku odpowiednich poprawek 365-dniowy rok starożytnych Egipcjan był już bardziej zgodny z cyklem słonecznym. Jednakże reforma ta nie utrzymała się długo. Po zwycięstwie narodowego powstania egipskiego, które obaliło władzę Hyksosów, nowy kalendarz został zniesiony.

Drugiej próby reformy kalendarza w starożytnym Egipcie dokonał po wielu wiekach faraon Euergetes. Zachował się napis na płycie, znalezionej w jednej ze świątyń z datą 7 marca 238 r. p. n. e., który głosi:

„Ponieważ gwiazda (Sotis) co każde 4 lata przesuwają się o jeden dzień naprzód, to żeby święta obchodzone latem nie przypadły w przyszłości w zimie, jak to bywa i jak będzie, jeśli rok nadal będzie się składał z 360 dni i pięciu dni dodatkowych, zarządza się odtąd co każde 4 lata obchodzić święto

bogów. Euergetesa po pięciu dniach dodatkowych i przed nowym rokiem, aby każdy wiedział, że poprzednie wady kalendarza zostały naprawione przez faraona Euergetesa”.

Po śmierci faraona Euergetesa również i ta reforma kalendarza nie utrzymała się.

W starożytnym Rzymie używano pierwotnie kalendarza księżycowego. Ale kapłani rzymscy, na których spoczywał obowiązek prowadzenia kalendarza, częściowo na skutek niedbalstwa, a częściowo ze względu na korzyści materialne (ponieważ z różnymi datami kalendarza związane były terminy płacności i rozliczeń), stopniowo zawikłali rachubę dni tak gruntownie, że rok posiadał bądź 12, bądź 13 miesięcy, jeden rok trwał 355 dni, inny 377 dni. Zdarzało się, że data 1 stycznia przypadła 15 października; na dworze - lato, w kalendarzu - zima. W końcu kalendarz stał się tak skomplikowany, że zaczął przeszkadzać normalnemu biegowi życia codziennego i Juliusz Cezar nakazał go uporządkować.

Zgodnie z propozycją astronoma egipskiego Sozygenesa w 46 r. p. n. e. przyjęty został nowy kalendarz słoneczny. Nazwano go juliańskim, znany jest także pod nazwą „starego stylu”.

W kalendarzu słonecznym za podstawę służy rok zwrotnikowy, będący odstępem czasu między dwoma kolejnymi przejściami środka Słońca przez punkt równonocy wiosennej. Rok słoneczny z dokładnością do 0,1 sek. zawiera 365 dob 5 godz. 48 min. 46,1 sek. Ponieważ liczba miesięcy i dob w roku nie wyraża się żadną liczbą całkowitą ani regularnym ułamkiem, to dla ułatwienia przyjmuje się w poszczególnych kalendarzach taką lub inną wartość przybliżoną.

W kalendarzu juliańskim rok zawiera w przybliżeniu 365,25 doby, przy tym zwykły rok składa się z 365 dni, a co czwarty rok - z 366 dni. Rok przedłużony o 1 dzień nazywa się przestępnym. Z tą poprawką rok wg kalendarza juliańskiego był średnio o 11 min. i 14 sek. dłuższy od roku zwrotnikowego, co daje jedną dobę po 128 latach i trzy doby po 384 latach, albo w przybliżeniu trzy doby po 400 latach.

W 325 r. n. e. na soborze kościelnym w Nicei kalendarz juliański został zatwierdzony jako kalendarz chrześcijański. Wiosenne zrównanie dnia z nocą nastąpiło w tym roku 21 marca. Zgodnie z postanowieniami soboru w Nicei święto Wielkanocy powinno być obchodzone w pierwszą niedzielę po pierwszej wiosennej pełni księżyca. Z upływem stuleci rzeczywisty początek wiosny (zrównanie dnia z nocą) był coraz bardziej niezgodny z kalendarzowym: w 2 poł. XVI w. różnica wynosiła już 10 dni. W życiu świeckim było to niezauważalne, ale dla kościoła posiadało istotne znaczenie, ponieważ w wyniku przesunięcia wiosny kalendarzowa Wielkanoc przesunęła się wyraźnie bliżej lata.

Chcąc to skorygować, nie zmieniając przy tym postanowień soboru nicejskiego, papież Grzegorz XIII wprowadził w 1582 r. tzw. kalendarz gregoriański, czyli „nowy styl”.

Przy wprowadzaniu „nowego stylu” usunięto rozbieżności, jakie nagromadziły się w ciągu 1200 lat, i postanowiono na przyszłość co każde 400 lat nie uwzględniać 3 dni, uważając 3 lata przestępne jako zwykłe. Za lata zwykłe, a nie przestępne przyjęto wszystkie lata kończące się dwoma zerami (np. 1700, 1800, 1900), z wyjątkiem tych, w których po odrzuceniu końcowych dwóch zer pozostała liczba dzieli się przez 4 bez reszty (np. 1600, 2000).

W Rosji carskiej wprowadzenie „nowego stylu” uległo opóźnieniu, ponieważ kościół prawosławny obawiał się, że może przy tym nastąpić „naruszenie świąt paschalnych” - czyli zbieżności daty paschy żydowskiej i chrześcijańskiej - i „nowy styl” wprowadzono dopiero po Rewolucji Październikowej, począwszy od 1 lutego 1918 r. Istniejąca dotąd różnica 13 dni została usunięta.

Rok gregoriański jest średnio o pół minuty dłuższy od roku zwrotnikowego. W ciągu 400 lat różnica wynosi 2 godz. 53 min., czyli jedną dobę co 3300 lat. Taka niedokładność nie przynosi zakłóceń w życiu codziennym.

Jeśli chodzi o rachubę dni w ciągu roku, to kalendarz gregoriański, którym posługujemy się obecnie, posiada wiele wad. Miesiące mają w nim różną długość (28, 29, 30 i 31 dni), niejednakowej długości są także kwartały (od 90 do 92 dni); daty w miesiącu nie zgadzają się z dniami tygodnia, tak że znając datę danego dnia, nie można od razu określić, jaki to dzień tygodnia itp.

Podział miesięcy na siedmiodniowe tygodnie jest związany ze starożytnymi poglądami filozoficznymi i religijnymi. Jeszcze w starożytnym Babilonie liczbie 7 nadawano szczególne znaczenie. Według Biblii każdy siódmy dzień jest dniem odpoczynku, ustanowionym przez Boga w czasie stworzenia świata.

Bez wątplenia kalendarz dojrzał już do nowej reformy. W 1923 r. Liga Narodów przyjęła projekt nowego kalendarza, w którym wszystkie kwartały miały jednakową długość 91 dni, czyli 13 tygodni. Pierwszy miesiąc każdego kwartału zawierał 31 dni, a pozostałe po 30 dni. Wszystkie kwartały w tym kalendarzu, a w ich liczbie również pierwszy kwartał roku, rozpoczynały się od niedzieli. Ponieważ cztery kwartały po 91 dni zawierały tylko 364 dni, to po 30 grudnia dochodził dzień świąteczny Nowego Roku, nie wchodzący w skład żadnego miesiąca ani tygodnia, a w roku przestępnym po 30 czerwca należało umieścić jeszcze jeden taki dzień świąteczny.

Kalendarz ten posiada pewne zalety w porównaniu ze stosowanym obecnie. Możliwe jednak, że uda się bardziej racjonalnie podzielić rok kalendarzowy na dni. Oczywiście wprowadzenie nowego kalendarza powinno być aktem międzynarodowym.

Ery i epoki. W jednej ze starych kronik rzymskich powiedziano, że w 622 r. od założenia Rzymu Publiusz Licyniusz Krassus, konsul i naczelny kapłan został wysłany ze świetnie wyszkolonym wojskiem przeciw Arystonikowi. Okazuje się, że niełatwo obliczyć okres czasu, dzielący nas od tego wydarzenia historycznego. Rachuba dni i miesięcy w kalendarzu rzymskim różni się od przyjętej obecnie. Jednakże po zapoznaniu się z nią, odpowiednie przeliczenia nie powinny sprawiać większych trudności. Znacznie trudniej jest znaleźć moment odniesienia. Autor tej kroniki historycznej prowadzi rachubę czasu nie według naszej ery, lecz według innej, w której jako epokę, tj. moment odniesienia przyjęto datę założenia Rzymu. Na podstawie wielu zawiłych porównań różnych wydarzeń historycznych stwierdzono, że moment „założenia miasta Rzymu” Rzymianie określają na rok 753 n. e. Tak więc zbrojne wystąpienie konsula rzymskiego Krassusa przeciwko niewolnikom, którzy powstałi pod wodzą Arystonika, miało miejsca w 131 r. p. n. e.

W starej kronice asyryjskiej czytamy, że w eponimacie Pur-an-sa-gal-a wybuchło powstanie w mieście Assur. W miesiącu siwan nastąpiło zaćmienie Słońca.

Wyznaczenie okresu czasu oddzielającego nas od tego historycznego wydarzenia połączone jest z jeszcze większymi trudnościami ze względu na bardzo szczególną rachubę czasu. W tym przypadku rachubę czasu prowadzi się wg eponimatów, tj. okresów rządów wyższych urzędników państwowych, od imienia których nazywa się rok. Żmudne i zawiłe badania historyczne pozwoliły stwierdzić na drodze porównania różnych wydarzeń, że wspomniany eponimat dotyczy 763 r. p. n. e. Na szczęście ta sama kronika wspomina o zaćmieniu Słońca. Dokładne obliczenia astronomiczne wykazały, że 15 czerwca 763 r. p. n. e. (według kalendarza asyryjskiego - w miesiącu siwan) było rzeczywiście zaćmienie Słońca.

Przy wyborze momentu odniesienia w różnych kalendarzach kierowano się różnymi motywami, jednak zawsze był to wybór umowy i dowolny. Arabowie przed Mahometem prowadzili rachubę

czasu od „roku słonia”. W tej „erze” jako epoka służyło wydarzenie o wyraźnie lokalnym charakterze - napaść na Mekkę wojsk Jemenu, w skład których wchodziły słonie bojowe.

Takie „ery” o charakterze miejscowym były w starożytności bardzo rozpowszechnione. Historyk grecki Tukidydes liczył czas od wybuchu wojny peloponeskiej, upadku Troi, wygnania Pizystratydów. Istniało wiele er związanych z rządami poszczególnych monarchów lub z ich zwycięstwami wojennymi. Jako przykład może tu służyć, stosowana w starożytnej Aleksandrii, era Augusta. W tej erze jako moment odniesienia przyjęto decydujące zwycięstwo Augusta nad Antoniuszem. Taki sam charakter miała era ustanowiona w 1556 r. n. e. w Indii przez Akbara z dynastii Wielkiego Mogoła, który nakazał uzgodnić kalendarz z rokiem swego wstąpienia na tron.

Teologowie wielokrotnie tworzyli pretendujące do uniwersalności „ery światowe”, w których jako moment odniesienia przyjmowano stworzenie świata. Wymyślono ok. 200 takich er. W najdłuższej z nich stworzenie świata odnoszono do 6984 r. p. n. e., w najkrótszej - do 3483 r. p. n. e.

Odmienne jest system hinduski, opisany w *Mahabharacie*, *Puranach* i innych dawnych hinduskich księgach religijnych. U jego podstaw leży rok składający się z 360 dni. Era zbudowana jest z gigantycznych okresów, po upłynięciu których - jak stwierdzają księgi - wszystko co żywe umrze. Każdy taki okres, zw. Kalpa, trwa 4 320 000 000 lat ale zgodnie ze słowami autorów hinduskich ksiąg religijnych jest to tylko jeden dzień w życiu Brahmy. Każdy Kalpa dzieli się na 1000 krótszych okresów, czyli „Wielkich Wieków”, po 4 320 000 lat. Ostatni „Wielki Wiek” składa się z czterech okresów: Krita - Złoty Wiek, Treta - Srebrny Wiek, Dwapara - Brązowy Wiek i Kali - Żelazny Wiek, wiek grzechu, w którym my żyjemy. Taki jest ów zadziwiający system, bardzo poetyczny, ale niczym nieuzasadniony.

Obecnie używamy powszechnie ery chrześcijańskiej, zwanej też naszą erą. W tej erze jako epoka służy narodzenie Chrystusa. Era chrześcijańska została wprowadzona na podstawie obliczeń rzymskiego mnicha Dionizjusza Małego w 241 r. ery Dioklecjana. Obliczone przez niego daty zmartwychwstania Chrystusa, i narodzenia Chrystusa miały oczywiście bardzo dowolny charakter. Podstawa obliczeń była następująca: co 19 lat wszystkie fazy księżyca przypadają w te same dni miesiąca (cykl Metona), co 28 lat (cykl słoneczny) wszystkie dni tygodnia przypadają w te same kolejne dni miesiąca; w wyniku tego co każde 532 lata ($19 \times 28 = 532$) Wielkanoc przypada w te same dni miesiąca.

Jeszcze na długo przed Dionizjuszem w kościele katolickim przypisywano szczególne znaczenie dacie 25 marca. Niektórzy wiązali tę datę ze stworzeniem świata, inni - z narodzeniem Chrystusa, jeszcze inni - z ukrzyżowaniem, wreszcie byli i tacy, którzy łączyli ją ze zmartwychwstaniem. Do nich należał Dionizjusz.

W 241 r. ery Dioklecjana, kiedy Dionizjusz przeprowadzał swoje obliczenia, najbliższa zbieżność niedzieli wielkanocnej z datą 25 marca miała nastąpić za 38 lat. Dodając do aktualnego roku ery Dioklecjana 38 lat i odejmując od wyniku 532 lata, Dionizjusz znalazł datę zmartwychwstania Jezusa: $241 + 38 - 532 = - 253$, tzn. 253 r. przed erą Dioklecjana.

W wyniku obliczenia Dionizjusz otrzymał, że narodzenie Chrystusa miało miejsce w 283 r. przed erą Dioklecjana. Tak więc od momentu narodzenia Chrystusa minęło 524 lata. Dlatego następny rok Dionizjusz nazwał 525 r. od narodzenia Chrystusa.

W ewangelii z opowieściami o Chrystusie przeplatają się rzeczywiste wydarzenia i postacie historyczne, np. spis Augusta, rządy Kwiryniusza w Syrii, Piłat, Herod itd. Dla teologów, usiłujących znaleźć dokładną datę narodzenia Chrystusa, stały się one przyczyną trudności nie do pokonania.

W ślad za religią chrześcijańską zaczęła się powszechnie szerzyć wprowadzona przez Dionizjusza era chrześcijańska. W 532 r. n. e. przyjęto ją w Rzymie, w VIII w. - we Francji, w Rosji - za panowania Piotra I. W XIX w. wszystkie kraje chrześcijańskie prowadziły rachubę czasu od narodzenia Chrystusa.

W krajach islamu istnieje era muzułmańska, w której za epokę służy *hedżra* - rok ucieczki Mahometa z Mekki do Medyny. Erę tę wprowadził kalif Omar w latach 634-644 n. e.; *hedżra* wg Omara miała przypadać w 622 r. n. e.

Najnowszą erą była wprowadzona we Francji „era republiki”, w której za epokę przyjęto dzień proklamowania republiki 22 września 1792 r. Kalendarz ten zniesiony przez Napoleona, ponownie przyjęty został w czasie Komuny Paryskiej i przestał istnieć z chwilą jej klęski.

Kalendarz, którym posługujemy się obecnie, nie jest doskonały: wyboru epoki dokonano w sposób dowolny; podział na miesiące o niejednakowej długości nie zawsze jest dogodny. Zresztą przy obliczaniu odstępu czasu dzielącego nas od poszczególnych wydarzeń historycznych, wybór momentu odniesienia jest sprawą drugorzędną. Dla prawidłowej rachuby lat istotne jest nie to, jakie zdarzenie (choćby nawet mityczne) przyjęto jako epokę, lecz to, że za moment odniesienia uważana jest przez wszystkich ta sama określona data.

2

Jak starożytni mierzyli czas

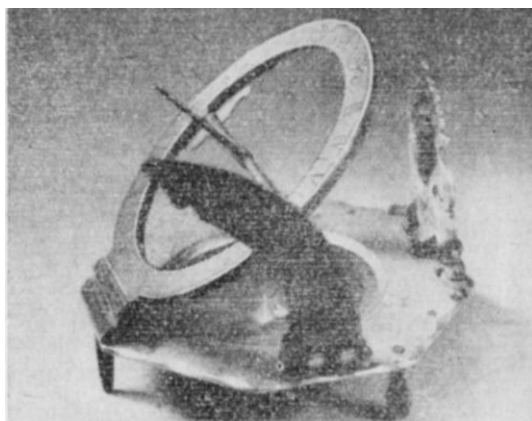
Zegar słoneczny. Pierwszymi instrumentami, za pomocą których ludzie zaczęli mierzyć czas, były zegary słoneczne, piaskowe, ogniowe i wodne.

Zegar słoneczny znano już bardzo dawno, bo ponad 500 lat p. n. e. Jego wynalezienie przypisuje się Chaldecyckowi, Berossosowi.

Zegar słoneczny składa się z dwóch elementów: przedmiotu dającego wyraźny i długi cień oraz tarczy z podziałką, odpowiadającą godzinom i częściom godzin. Działanie zegara słonecznego opiera się na spostrzeżeniu, że cień rzucany przez przedmioty oświetlone światłem słonecznym zmienia się w ciągu dnia: przesuwa się i zmienia swoją długość; wcześniej rano cień jest długi, potem skraca się, a po południu znów wydłuża. Rano cień zwraca się ku zachodowi, w południe na półkuli północnej - ku północy, a wieczorem - ku wschodowi. W związku z tym można odmierzać czas dwoma sposobami: według długości cienia i według jego kierunku. Drugi sposób jest wygodniejszy i dokładniejszy.

Początkowo rolę wskazówki zegara słonecznego pełniła pałka osadzona pionowo w ziemi, a tarczę wyznaczały wbite w ziemię kołki. Jest to prawdopodobnie najprostsza, ale bynajmniej nie najwygodniejsza postać zegara słonecznego, ponieważ przy pionowej pozycji wskazówki i poziomym położeniu tarczy koniec cienia opisuje nie okrąg, lecz inną bardziej złożoną krzywą, przy czym z dnia na dzień i z miesiąca na miesiąc położenie tej krzywej zmienia się.

Wielu uczonych i wynalazców starożytności pracowało nad udoskonaleniem zegara słonecznego.

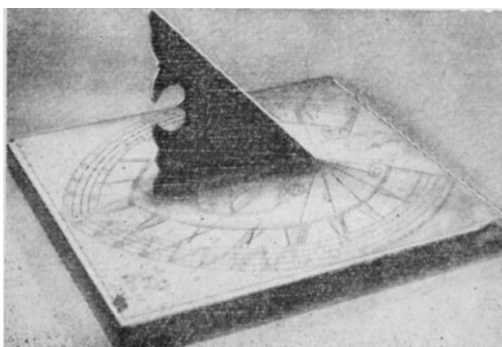


Rysunek 1 Zegar słoneczny równikowy, Augsburg, XVI-XIX w.

Decydujący krok na drodze do jego ulepszenia uczyniono wtedy, kiedy astronomowie zrozumieli, jakie korzyści daje umieszczenie wskazówki zegara słonecznego równoległe do osi ziemskiej. Przy takim położeniu koniec wskazówki zwrócony jest ku biegunowi świata, tj. ku temu punktowi na sklepieniu niebieskim, który przy obrocie Ziemi wydaje się nieruchomy. A jeśli tarcza zegara umieszczona jest prostopadłe do wskazówek, to cień porusza się z jednostajną szybkością, a koniec cienia opisuje łuk okręgu. W wyniku jednostajnego ruchu cienia, podziałki zegara są równomierne. Tarcza takiego równikowego zegara słonecznego (ryc. 1) nachylona jest do płaszczyzny poziomej pod kątem $90^\circ - \phi$ gdzie kąt ϕ oznacza szerokość geograficzną. Na przykład ustawiając równikowy zegar słoneczny w Moskwie, której szerokość geograficzna wynosi $55^\circ 48'$, należy dobrać kąt nachylenia tarczy zegara do poziomu, równy $90^\circ - 55^\circ 48'$, czyli $34^\circ 12'$.

Rolę wskazówki w równikowym zegarze słonecznym spełnia pręt, przesunięty na wylot przez środek pochylonej tarczy, tak że część jego znajduje się pod, a część nad płytą zegara; bowiem w równikowym zegarze słonecznym w ciągu jednej części roku cień od pręta pada na tarczę z góry, w ciągu drugiej - z dołu.

Zaletą równikowego zegara słonecznego jest możliwość stosowania tej samej podziałki tarczy dla wszystkich dni roku. Główna wada natomiast polega na tym, że przez część roku cień wskazówki pada na tarczę od dołu, co utrudnia obserwację.



Rysunek 2 Ogrodowy poziomy zegar słoneczny ze skalą co 5 mm. na jedną szerokość geograficzną

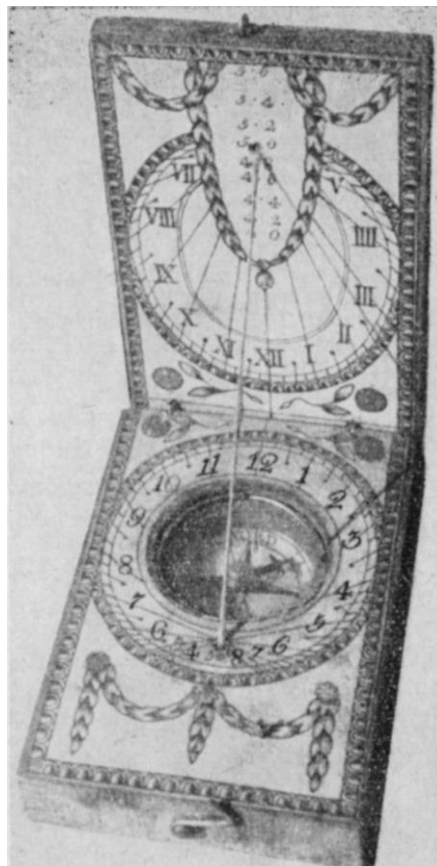
Poziomy zegar słoneczny (ryc. 2) składa się z umieszczonej poziomo płyty wraz z tarczą zegarową i wskazówki w kształcie trójkąta. Kąt ostry tego trójkąta jest równy szerokości geograficznej danej miejscowości, tak że pochylony bok trójkąta jest równoległy do osi ziemskiej. Trójkątną wskazówkę ustawia się w ten sposób, aby płaszczyzna trójkąta była prostopadła do tarczy zegara, a prosta stanowiąca przedłużenie podstawy trójkąta miała kierunek północ - południe. W południe cień

wskazówki zwraca się (na półkuli północnej) ku północy. Tak więc linia podziałki odpowiadająca godzinie 12 leży na prostej, stanowiącej przedłużenie podstawy trójkąta. W poziomym zegarze słonecznym szybkość przemieszczania się cienia nie jest równomierna. Dlatego na tarczy kolejne linie podziałki położone są względem siebie pod różnymi kątami.

W poziomym zegarze słonecznym, podobnie jak w równikowym, tarcza służy do odczytywania czasu wszystkich dni roku, a cień wskazówki zawsze pada na tarczę z góry.

W starożytności zegary słoneczne były nadzwyczaj rozpowszechnione. Wysokie i smukłe obeliski starożytnego Egiptu służyły jako wskazówki zegarów słonecznych. W Indii pielgrzymi nosili laski z wbudowanymi miniaturowymi zegarami słonecznymi. Duży zegar słoneczny znajdował się na tzw. wieży wiatrów w Atenach. W Rzymie cesarz August ustawił na Polu Marsowym, spełniający rolę wskazówki zegara słonecznego, obelisk Sezostriisa wysokości 34 m, przywieziony wśród innych trofeów wojennych z Egiptu.

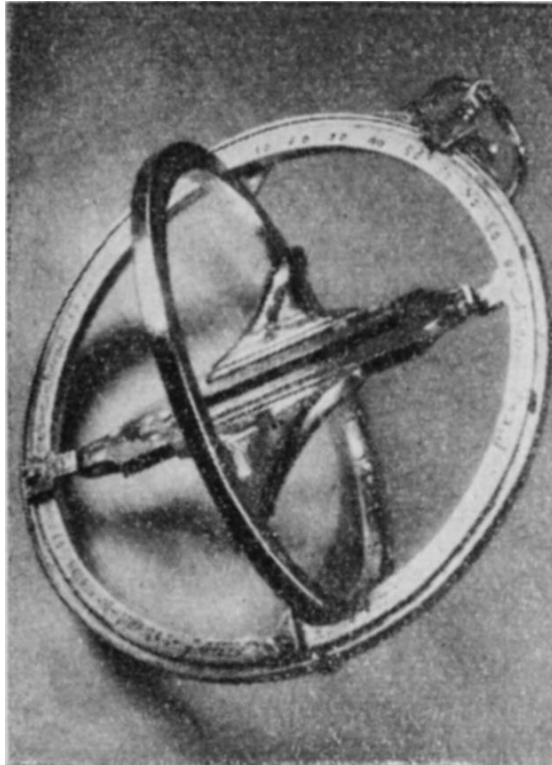
Cesarz chiński Ko Szu-p'ng zbudował w 1278 r. w Pekinie wskazówkę zegara słonecznego wysokości ok. 11 m. Prześcignął go znacznie wnuk Timura, znakomity astronom z Samarkandy, Uług-Bek, który w dążeniu do zwiększenia dokładności wskazań wzniósł w 1430 r. w Samarkandzie zegar słoneczny wysokości ok. 50 m.



Rysunek 3 Ozdobny zegar słoneczny tabliczkowy, wyrabiany masowo w Niemczech w XVIII w.

Zainteresowanie zegarami słonecznymi, jakie przejawiali królowie i możnowładcy, nierzadko zmuszało budowniczych zegarów nie tylko do troski o dokładność, ale skłaniało ich także do nadania zegarom postaci efektownej lub zabawnej (ryc. 3). Mechanik Regnier zbudował zegar słoneczny, który za pomocą szkieł, prochu i dzwonek dzwonił w południe. Mistrz Rousseau wykonał jeszcze

oryginalniejszy wskaźnik czasu; w zegarze jego konstrukcji odpowiednio ustawiona i skierowana soczewka powodowała wystrzał działa w odpowiednim momencie.



Rysunek 4 Zegar słoneczny pierścieniowy, XVII w.

Zegary słoneczne budowano aż do w. XVI a nawet XVII (ryc. 4). Zresztą budowano je niekiedy i w późniejszym okresie, ale tylko dla celów ozdobnych (ryc. 5).

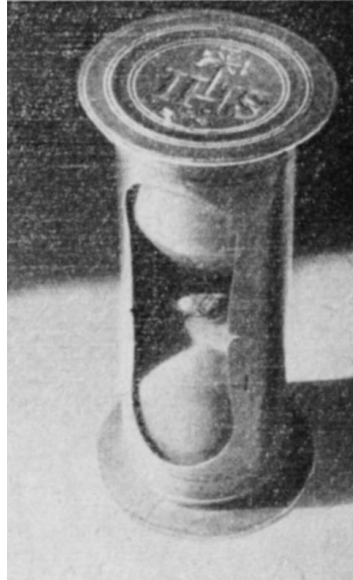


Rysunek 5 Zegar słoneczny analemmatyczny, w którym wskazówkę stanowi człowiek stojąc w odpowiednim miejscu i obserwując własny cień. Obliczony i wykreślony przed Pałacem Kultury i Nauki w Warszawie przez dr T. Przytkowskiego

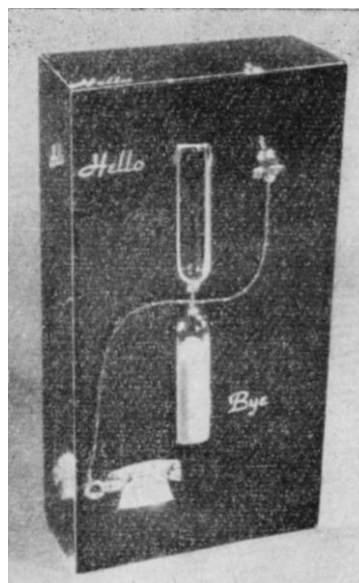
Chociaż uczeni nauczyli się wykonywać bardzo duże i doskonałe zegary słoneczne, korzystanie z nich często było niewygodne; nie działały one nocą lub przy pochmurnej pogodzie, trudno je było brać w podróż czy na wojnę. Pod tym względem znacznie wygodniejsze były zegary piaskowe.

Zegary piaskowe, ogniowe i wodne. Zegar piaskowy wykonywano zazwyczaj w postaci dwu naczyń szklanych w kształcie lejka, ustawionych jedno na drugim. Górne naczynie było wypełnione do określonego poziomu piaskiem, którego przesypywanie się do naczynia dolnego służyło jako miara czasu. Kiedy piasek z górnego naczynia wysypał się całkowicie, zegar należało przewrócić (ryc. 6 i 7).

Dla większej wygody przy odmierzaniu czasu używano czasem całego układu naczyń, z których pierwsze opróżniało się w ciągu $\frac{1}{4}$ godziny, drugie - w ciągu $\frac{1}{2}$ godziny, trzecie - w ciągu $\frac{3}{4}$ godziny, czwarte - w ciągu godziny. Po opróżnieniu się czwartego naczynia specjalnie przeznaczony do tego dozorca odwracał wszystkie naczynia tak, że odmierzanie czasu rozpoczynało się od nowa, i jednocześnie zaznaczał minioną godzinę.



Rysunek 6 Klepsydra piaskowa Jezuitów do wygłaszania 20 minutowych kazań, wzorowana na klepsydrach wprowadzonych przez Marcina Lutra

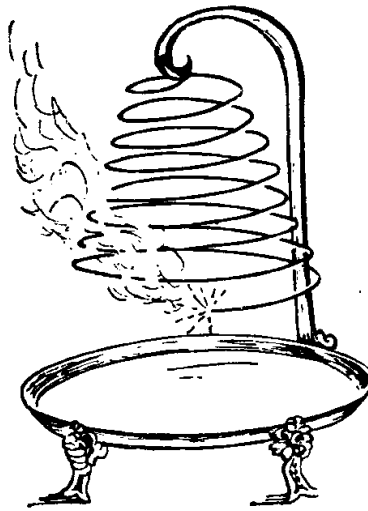


Rysunek 7 Klepsydra piaskowa telefoniczna na 3 min., używana powszechnie w USA

Zegary piaskowe stosowano na okrętach; pomagały one marynarzom w zachowaniu porządku dnia - w zmianie wacht i odpoczynku.

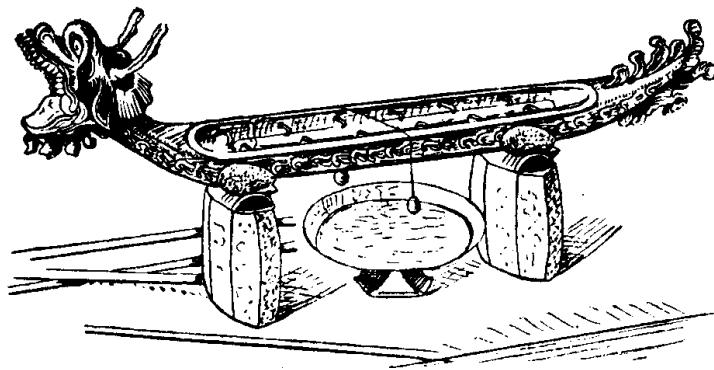
Do odmierzania mniej lub bardziej długich odcinków czasu zegary piaskowe nie nadają się zarówno ze względu na niewielką dokładność, jak i konieczność stałego nadzoru. Pod tym względem znacznie wygodniejsze były zegary ogniowe i wodne, bardzo popularne w starożytności.

Starożytni górnicy, wydobywając w kopalniach srebro i żelazo, stosowali szczególny sposób pomiaru czasu: do glinianej lampy, jaką brali ze sobą, nalewali tyle oliwy, ile potrzeba było na 10 godzin. Kiedy oliwa wyczerpywała się górnik wiedział, że dzień roboczy się kończy i opuszczał kopalnię.



Rysunek 8 Chiński zegar ogniowy

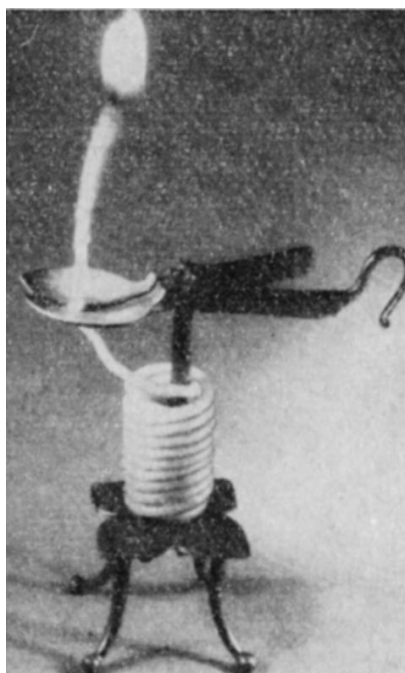
W Chinach budowano zegary ogniowe nieco innej konstrukcji. Ze specjalnych gatunków sproszkowanego drewna zmieszanego z wonnościami przygotowywano ciasto, z którego rozwałkowywano pręty, nadając im różne formy, np. spirali (ryc. 8); niektóre osiągały kilka metrów długości. Z lekka potrzaskując i wydając aromat mogły palić się miesiącami. Czasem w określonych miejscach zawieszano na pręcie kulki metalowe, które przy spalaniu się pręta spadały do porcelanowej wazy, wydając głośny dźwięk - tak powstał budzik ogniowy (ryc. 9).



Rysunek 9 Chiński budzik ogniowy

W średniowieczu liczne odkrycia starożytnych poszły w zapomnienie. W wielu klasztorach mnisi określali czas w nocy według ilości przeczytanych modlitw - metoda daleka od dokładności. Potem weszły w użycie świece zaopatrzone w podziałkę, odpowiadającą określonym odstępom czasu. Był to europejski wariant zegara ogniowego.

Dokładność zegarów ogniowych nie była duża. Nie mówiąc już o trudnościach przygotowania doskonale jednorodnych prętów czy świec, należy zauważyć, że szybkość ich spalania zależała zawsze od konkretnych warunków: dostępu świeżego powietrza, wiatru itd. (ryc. 10).

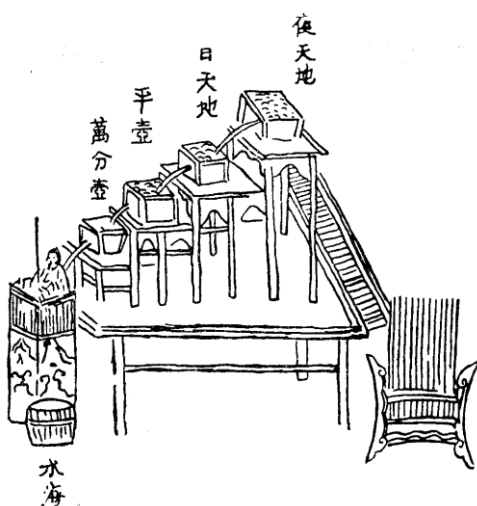


Rysunek 10 Zegar ogniowy. Czas wyznacza odcinek pręta spalający się do miejsca w którym szczypce gaszą płomień

Inną wadą zegarów ogniowych była konieczność ich stałego odtwarzania. Zegary wodne były pod tym względem wygodniejsze, ponieważ odnawianie zapasu wody nie przedstawiało trudności.

Zegary wodne znano w starożytnym Egipcie, Judei, Babilonie, Grecji, Chinach. Grecy nazywali zegar wodny klepsydrą, co można przetłumaczyć jako „złodziejka wody”.

W upalnej Afryce, w wioskach Algierii, gdzie woda jest cenna, specjalny człowiek zarządzający jej rozdziałem - *ukil el-ma* - kierując wodę na pole któregoś z chłopów, jednocześnie nabierał nieco wody do specjalnej kadzi z małym otworem. Kiedy woda kropla po kropli wyciekała z kadzi, *ukil el-ma* przerywał dopływ wody i kierował ją na pole następnego chłopca.



Rysunek 11 Chiński zegar wodny „czteropiętrowy” wg chińskiego rękopisu średniowiecznego

W późniejszych czasach zegary wodne - klepsydry - udoskonalono. Czas określano według ilości wody wyciekającej z jednego naczynia do drugiego, zaopatrzonego w podziałkę; poziom wody w drugim naczyniu wskazywał czas. W celu przedłużenia pomiaru, stosowano często kilka takich naczyń: trzy, cztery (ryc. 11).

Klepsydry znalazły zastosowanie w życiu codziennym, stosowano je także dla ograniczenia czasu mówców na zebraniach publicznych i w sądzie. W wojsku posługiwano się nimi przy zmianie wart. W starożytności klepsydra była bardzo popularna, chociaż dokładność jej była mała, bowiem woda z otworu naczynia wycieka nierównomiernie: szybciej, im większe ciśnienie, tzn. im wyższy poziom wody w naczyniu, wolniej, gdy poziom opada. Podkreślić należy, że budowniczym zegarów wodnych udało się, za pomocą skomplikowanych urządzeń, usunąć wreszcie tę wadę.

Historia zachowała dla nas opowieści o różnych niezwykłych klepsydrach. Platon wynalazł budzik wodny, wzywający uczniów jego akademii na zajęcia. W początku IX w. kalif Harun al Raszyd podarował Karolowi Wielkiemu klepsydrę z damasceńskiego złoczonego brązu z przemyślnym mechanizmem, bijącym godziny i poruszającym figurki. Kalif al Mamun miał klepsydrę, w której mechaniczne ptaki śpiewały na srebrnych gałązkach. W VIII w. w Chinach astronom I Gang zbudował klepsydrę, która nie tylko biła godziny, ale pokazywała również ruch słońca, księżyca, planet, zaćmienia księżyca i położenie gwiazd. Znakomity duński astronom, Tycho de Brahe (1546-1601), posługiwał się klepsydrą przy obserwacjach ciał niebieskich. Isaak Newton interesował się klepsydrą i badał jej prawa.

Nawet w XVII i XVIII w. niektórzy uczeni usiłowali przywrócić klepsydrze jej dawne znaczenie, ale nie było to już potrzebne, bo pojawił się zegar mechaniczny.

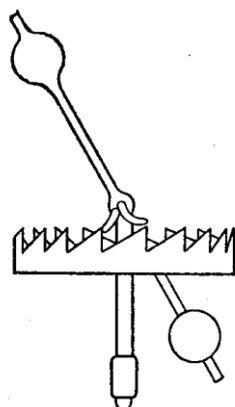
3

Zegary mechaniczne kołowe i wahadłowe

W miarę rozwoju nauki i techniki rosły wymagania dotyczące dokładności pomiarów czasu. Zegary starożytne wskazywały czas z dokładnością do dziesiątek minut na dobę. Najprzeróżniejsze udoskonalenia zegarów słonecznych, piaskowych, ogniowych i wodnych nie były w stanie usunąć ich zasadniczych wad i zwiększyć stopnia dokładności. W wyniku pracy wielu uczonych i mistrzów XIII w. powstał mechaniczny zegar kołowy.

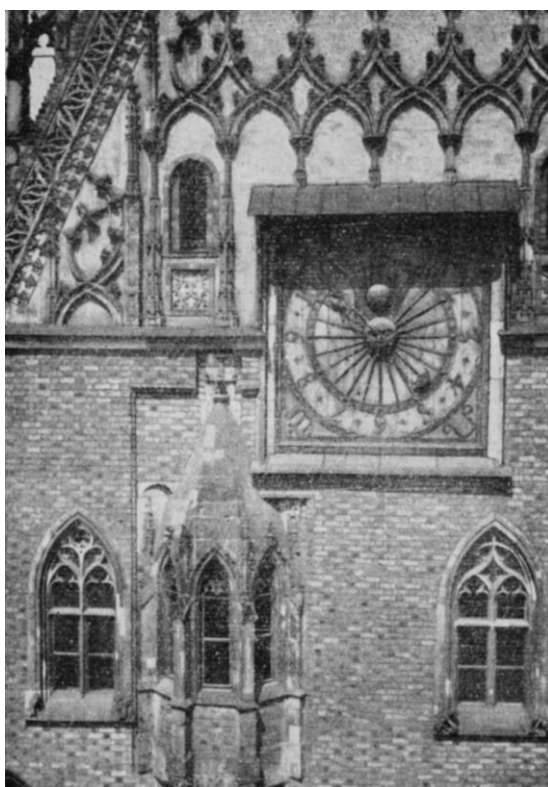
Koło zamiast piasku, ognia i wody. Zasada działania mechanicznego zegara kołowego jest następująca: na poziomy wał nawinięty jest długi sznur zakończony obciążnikiem. Obciążnik ciągnie sznur, odwijając go i obracając wał. Ruch obrotowy wału za pośrednictwem szeregu kół przekazywany jest na podstawowe koło wychwytowe, połączone ze wskazówkami zegara. Jednakże, jeśli ruch obciążnika nie napotka żadnego oporu, to wał będzie obracać się niejednostajnie, lecz z przyspieszeniem. Do uzyskania powolnego i możliwie równomiernego ruchu koła wychwytowego służy specjalny regulator - kolebnik.

Kolebnik (ryc. 12) składa się z pręta metalowego umieszczonego równoległe do powierzchni koła wychwytowego; do pręta przymocowane są dwie wzajemnie prostopadłe łopatki - palety. Przy obrocie koła ząb koła popycha paletę, która ustępuje i umożliwia ruch koła, ale jednocześnie druga paleta wchodzi w zagłębienie pomiędzy zębami i hamuje ruch koła. W efekcie kolebnik zostaje wprawiony w ruch wahadłowy. Przy każdym jego pełnym wahaniciu koło wychwytowe przesuwają się o jeden ząb. Im wolniej waha się kolebnik, tym mniejsza jest szybkość koła wychwytowego. Na pręcie kolebnika zamocowane są ciężarki, zazwyczaj w kształcie kul. Regulując wielkość tych ciężarków i ich odległość od osi, można zmieniać prędkość obrotową koła wychwytowego.



Rysunek 12 Kolebnik

Zegary kołowe to zazwyczaj masywne budowle, umieszczone na wieżach, pałacach czy kościołach (ryc. 13). Ich części miały znaczne rozmiary i wielki ciężar. Na przykład w zegarze kołowym astronoma Tycho de Brahe, koło wychwytowe miało średnicę 91 cm i 1200 zębów. W niektórych zegarach koła ważyły setki kilogramów. Duży ciężar części i powstawanie znacznego tarcia w zegarach kołowych stwarzało konieczność częstego ich smarowania i stałej opieki. Dokładność wskazań zegara kołowego wahała się w granicach kilku minut na dobę.



Rysunek 13 Zegar na ratuszu wrocławskim. Ma on tylko jedną wskazówkę godzinową. W środku tarczy znajduje się krąg wyobrażający Słońce, ponad nim kula Księżycyca poruszana przez mechanizm zegara w taki sposób, że wskazuje fazy Księżycyca

Ciekawym przykładem zegara kołowego jest moskiewski zegar kremłowski na wieży Spasskiej. Jest to wielka budowla; mechanizm zegarowy zajmuje kilka pięter wieży, a rozmiary tarczy są takie, że każda cyfra równa jest prawie wzrostowi człowieka. Zbudował go w r. 1404 mnich Łazarz Serbin. Od tego czasu zegar kilkakrotnie naprawiano i przerabiano, zasadniczej przebudowy dokonano w 1709 r.; zgodnie z wolą Piotra I, który był wielkim miłośnikiem zegarów, zainstalowano zegar z muzyką. Na rozkaz Mikołaja I dokonano ponownej przeróbki, w wyniku której w południe oraz o godzinie trzeciej,

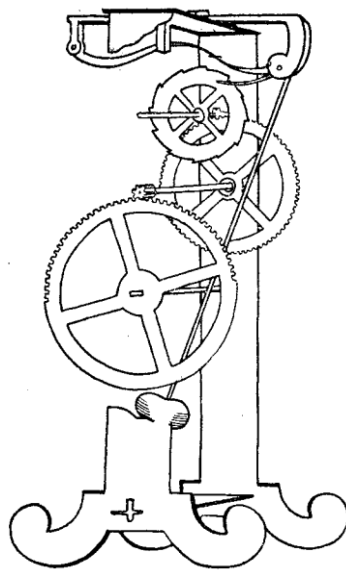
szóstej i dziewiątej zegar wydzwaniał melodię „Kol’ Sławien...” i marsz priebrażenski. Był to olbrzymi zegar z wielkimi wskazówkami i z kilkoma wałami wprawianymi w ruch przez siedmiopudowe ciężary. Po Rewolucji Październikowej zegar kremlowski zgodnie z zarządzeniem Lenina został przebudowany i grał „Międzynarodówkę”.

W XV w. sznur z ciężarkiem napędzający zegar kołowy zastąpiono sprężyną zegarową. Powstały zegary sprężynowe o stosunkowo niewielkich rozmiarach i ciężarze. Pierwsze zegary miały tylko jedną wskazówkę - godzinową. Ok. 1550 r. pojawiają się zegary z dwoma wskazówkami: godzinową i minutową, a od 1760 r. również z wskazówką sekundową.

Wahadło - serce współczesnego zegara. Działanie zegara sprężynowego zależy od wielu przyczyn, w pierwszym rzędzie od siły naciągu sprężyny i tarcia kół.

Dokładność wskazań zegarów kołowych była znacznie większa niż dokładność zegarów piaskowych, ogniowych i wodnych, jednakże bardzo szybko okazała się znów niedostateczna. Rozwój nauk, w pierwszym rzędzie astronomii, wymagał coraz dokładniejszego mierzenia czasu. Zaistniała konieczność stworzenia zegara o bardziej równomiernym chodzie.

Najważniejszą nowością w konstrukcji zegarów było zastosowanie wahadła. Zgodnie z legendą odkrycia równomierności wahań i niezależności okresu wahań od masy, dokonał w 1584 r. dwudziestoletni Galileusz w czasie mszy w katedrze. Porywy wiatru rozkołysały ogromne brązowe kandelabry, zawieszane pod sufitem. Kandelabry były różnej wielkości i różnego ciężaru, ale podtrzymujące je łańcuchy miały jednakową długość. Galileusz zwrócił uwagę na to, że okres wahań tych gigantycznych wahań był jednakowy i to naprowadziło go na myśl wykorzystania wahadła dla uzyskania równomiernego chodu zegarów (ryc. 14).

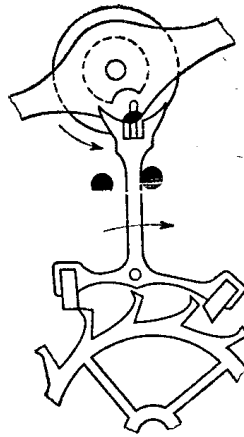


Rysunek 14 Rysunek zegara Galileusza z 1659 r. (Archiwum Medyceuszów we Florencji)

Później, niezależnie od Galileusza, Ch. Huyghens opracował konstrukcję zegara wahadłowego i podał jego teorię. Zasada działania zegara wahadłowego jest następująca: sprężyna dostarcza energii poruszającej układ kół, a wahadło zapewnia równomierny chód zegara.

Oto jak działa zegar wahadłowy. Wałek naciągowy przez pośrednie koła porusza koło minutowe i sekundowe. Koło sekundowe otacza kotwica, składająca się z tuku, z dwoma skośnymi występami (ryc. 15). Kotwica połączona jest z wahadłem. Przy ruchach wahadła i koła sekundowego występy

kotwicy na przemian wchodzi w wycięcia koła sekundowego, regulując szybkość jego ruchu. Z kolei kotwica połączona jest z wahadłem za pomocą wałka popychającego wahadło. Jest to system tzw. wahadła związanego.



Rysunek 15 Mechanizm wychwytowy

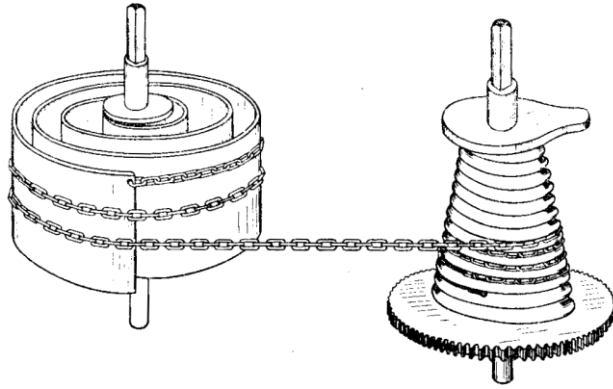
Zastosowanie sprężyny i wahadła otworzyło konstruktorom zegarów szerokie możliwości, a chęć przewyższenia swych współczesnych i poparcie możnowładców lubiących pochwalić się wymyślną zabawką, skłaniały zegarmistrzów do budowy coraz bardziej złożonych i przemyślnych mechanizmów.

Zasłużony podziw współczesnych wzbudził niezmiernie skomplikowany, zbudowany, na kształt jajka zegar Rosjanina I. P. Kulibina. Budzi on zresztą uznanie również i dziś. Mechanizm zegara, składający się z prawie 500 części, zbudowany jest tak, że wybija on godziny i kwadranse, gra różne melodie, wprawia w ruch figurki itd. Kulibin tak opisuje działanie tego wspaniałego zegara, nad którym pracował przez pięć lat i który potem podarował carycy Katarzynie II: „Z nadejściem każdej godziny otwiera się koperta zegarka i ukazuje się wewnątrz w kształcie sali, w której naprzeciw drzwi przedstawiony jest Grób Pański. W grobie widoczne są małe drzwiczki przywalone kamieniem. Z obu stron grobu stoją strażnicy z kopiami. W pół minuty po otwarciu się koperty pojawia się anioł. Wtedy kamień odsuwa się, otwierają się drzwi grobu, a stojący strażnicy padają na twarz. Znowu mija pół minuty, przy dźwiękach dzwonu do anioła zbliżają się dwie niewiasty. Potem nagle zegar zamyka się i tak dzieje się co godzinę. Muzykę można słyszeć o każdej godzinie, począwszy od 8 rano, a od godziny 4 po południu melodia się zmienia. Wielkość zegara przyrównać można do żółtka gęśiego lub kurzego jaja. Biję on także kwadranse i posiada tarczę ze wskazówkami, jak zegarek kieszonkowy”.

Zegary wahadłowe, nawet w nieudoskonalonej postaci znacznie przewyższyły poprzednie typy zegarów. Ich stosunkowo duża dokładność pozwoliła rozwiązać wiele ważnych zadań astronomicznych, jak określanie położenia ciał niebieskich i ich ruchów itd. Na przykład, jeśli znajdziemy czas gwiazdowy kolejnych kulminacji Słońca i momenty kulminacji gwiazd, to możemy na podstawie różnicy tych czasów wyznaczyć położenie wzajemne ciał niebieskich. Systematyczne pomiary tego rodzaju, dokonywane codziennie przez dłuższy okres, pozwalają znaleźć pozorną drogę Słońca w stosunku do gwiazd.

Wkrótce jednak i taka dokładność przestała wystarczać, przede wszystkim w astronomii i nawigacji.

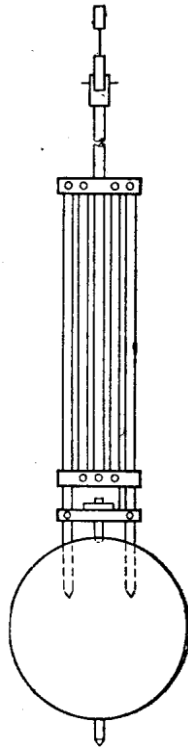
W ciągu ostatnich stuleci i zasada działania, i mechanizm zegara wahadłowego ulegały ciągłym udoskonaleniom. Chód zegara sprężynowego zależy od siły naciągu sprężyny; w miarę jej rozkręcania siła naciągu słabnie i zegar zaczyna chodzić wolniej. Wadę tę usunięto łącząc sprężynę z resztą mechanizmu zegara za pośrednictwem tzw. ślimaka stożkowego.



Rysunek 16 Ślimak stożkowy

Ślimak stożkowy (ryc. 16) ma kształt stożka ściętego z gwintowaną powierzchnią boczną. Przy rozwijaniu się sprężyny połączony z nią łańcuszek nawija się na ślimak, opuszczając się coraz niżej ku większej podstawie. Tak więc, w miarę rozkręcania się sprężyny wraz ze słabnięciem jej siły naciągu zwiększa się ramię dźwigni i moment skręcający pozostaje niezmienny. Ślimak stożkowy bywa stosowany w chronometrach morskich. W zegarkach kieszonkowych zamiast niego używa się sprężyn o znacznej długości, w których pracuje tylko środkowa część, gdzie sprężystość jest w przybliżeniu stała.

Jeszcze większe znaczenie miało udoskonalenie konstrukcji wahadła. Nawet niewielka zmiana długości wahadła wpływa poważnie na pracę zegara. Tymczasem wymiary ciał zależą od temperatury. Pręt stalowy długości 1 m przy ogrzaniu o 1°C wydłuży się o 0,012 mm, miedziany - o 0,016 mm, cynkowy - o 0,028 mm. Jeśli długość wahadła stalowego jest dostosowana do temperatury 0°C , to przy temperaturze 20°C zegar w ciągu doby opóźni się o 10,4 sek.



Rysunek 17 Wahadło z kompensacją wpływu temperatury

Niedokładność chodu zegara można zmniejszyć stosując kompensację wpływu temperatury, tzn. budując wahadło tak, by jego długość nie ulegała zmianie przy różnicach temperatur.

W 1725 r. angielski zegarmistrz, J. Harrison, zastosował w tym celu wahadło złożone z parzystej liczby prętów cynkowych i nieparzystej stalowych połączonych w ten sposób, że przy wzroście temperatury wydłużenie jednych prętów powodowało wzrost długości wahadła, a wydłużenie drugich - skrócenie wahadła (ryc. 17). Odpowiedni dobór materiału i długości prętów parzystych i nieparzystych zapewnia stałą długość wahadła niezależnie od wzrostu czy spadku temperatury. Harrison osiągnął zadziwiająco na owe czasy dokładność pracy zegara rzędu kilku setnych części sekundy na dobę.

Ważnym osiągnięciem w budowie zegarów sprężynowych było zastosowanie balansu na miejsce wahadła. Balans - to maleńkie koło zamachowe, poruszające się ruchem wahadłowym wokół położenia równowagi.

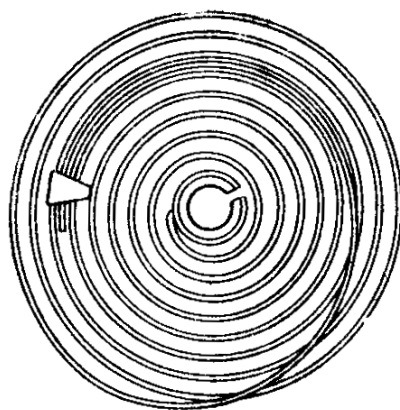
W celu uruchomienia zegara z balansem należy nakręcić sprężynę, pokręcając główkę naciągową zegarka. Przy pomocy szeregu pośrednich kółek ruch zostaje przekazany na wałek bębna, na który nawija się sprężyna. Sprężyna nie może rozkręcić się przy obracaniu wałka. Przeszkadza temu zapadka mechanizmu zapadkowego, która unieruchamia koło napędowe. Dlatego w czasie pracy zegara sprężyna rozkręca się, obracając nie wałek, lecz bęben. Obrót bębna za pośrednictwem kilku kół - minutowego, pośredniego, sekundowego - przenosi się na koło wychwytowe, Koło wychwytowe przez widełki kotwicy przekazuje ruch balansowi, popychając go periodycznie. Przy tym spiralna sprężyna balansu (włos) zwija się i rozwija poruszając balans to w jedną, to w drugą stronę. Tak więc ruch obrotowy koła wychwytowego przekształca się w wahadłowy ruch balansu.

Każde wahnięcie balansu ma (albo w każdym razie powinno mieć) jednakowy czas trwania. Pomiar czasu za pomocą zegara sprężynowego sprowadza się więc do sumowania wszystkich wahnięć balansu w ciągu danego czasu. Pracę tę wykonuje złożony z kilku kół mechanizm licznikowy, a związane z nim wskazówki wskazują na tarczy miniony czas.

W zegarze sprężynowym balans wykonuje szczególnie odpowiedzialną pracę. W ciągu doby główna sprężyna obraca bęben 3,5 raza, podczas gdy balans dokonuje w tym czasie 432 000 wahnięć. Jego spiralna sprężyna w ciągu doby zwija się i rozwija 216 000 razy. Dla prawidłowej pracy zegara sprężynowego olbrzymie znaczenie ma stały okres wahań balansu, niezależny od siły naciągu sprężyny i zmian temperatury.

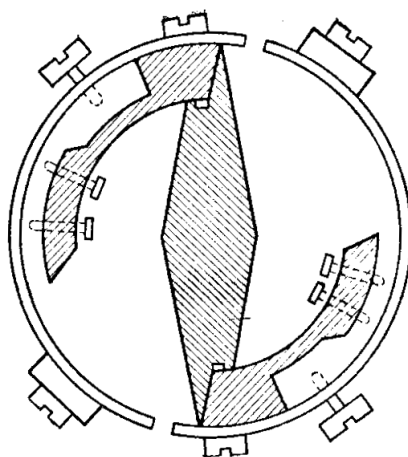
W balansie z płaskim włosiem okres drgań jest zależny od amplitudy, ponieważ przy pracy płaskiego włosa jego zwoje na całej prawie długości rozwijają się we wszystkie strony niejednakowo (ekscentrycznie). Przy tym środek ciężkości balansu periodycznie odsuwa się od osi, tym dalej, im większa jest amplituda drgań. Prócz tego przy pracy balansu z płaskim włosiem zewnętrzna część włosa wygina się z lekka w przeciwnym kierunku, co także narusza regularność drgań. Dlatego zegar z płaskim balansem śpieszy przy całkowicie nakręconej sprężynie, a spóźnia się przy sprężynie słabo napiętej.

Tych wad pozbawiony jest balans z włosiem niepłaskim (balans Bregego - ryc. 18), którego zewnętrzny zwój zagięty jest ku górze i na zewnątrz. W niepłaskiej spirali zewnętrzny zwój jest nieco mniejszy od pozostałych. Włos o takim kształcie rozkręca się koncentrycznie, tzn. równomiernie we wszystkie strony, a środek ciężkości włosa nie przemieszcza się w czasie pracy.



Rysunek 18 Włos Bregego

Okres drgań balansu z włosiem niepiłaskim jest niezależny od amplitudy drgań; takie drgania nazywają się izochronicznymi. Wskazania tego rodzaju zegara nie zależą od siły naciągu głównej sprężyny.



Rysunek 19 Balans z kompensacją wpływu temperatury

W celu uzyskania kompensacji wpływu temperatury skonstruowano koło balansu złożone z dwóch łuków (ryc. 19). Każdy łuk składa się z dwóch różnych zlutowanych ze sobą pasków metalowych. Pasek zewnętrzny jest mosiężny, wewnętrzny - stalowy. Ze wzrostem temperatury zwiększa się długość włosa, a zmniejsza sprężystość: obie te przyczyny powodują zwolnienie drgań balansu. Bimetaliczne łuki balansu przy nagrzewaniu zginają się ku środkowi, ponieważ materiał, z którego składa się zewnętrzny pasek metalu, ma większy współczynnik rozszerzalności. Zmniejsza to długość promienia balansu i odpowiednio zwiększa częstotliwość jego wahań. Cały system wyregulowany jest w taki sposób, aby okres wahań balansu nie zależał od temperatury. W 1904 r. zaproponowano użycie inwaru jako materiału do wyrobu balansu; materiał ten o znikomym współczynniku rozszerzalności cieplnej pozwolił zastąpić skomplikowany układ kompensacyjny.

Najdokładniejszym zegarem sprężynowym jest chronometr morski. W chronometrze przez zastosowanie ślimaka stożkowego uzyskuje się kompensację siły naciągu sprężyny, a balans posiada kompensację wpływu temperatury. Chronometr zamknięty jest w specjalnej obudowie i zamocowany na specjalnym zawieszaniu, tak by niezależnie od pochylenia statku przyjmował zawsze pozycję poziomą. Współczesny chronometr pozwala wyznaczać czas z dokładnością do kilku setnych sekundy.

Do czego potrzebny jest dokładny czas

Gdzie rozpoczyna się rok. Już w końcu I i na początku II w. n. e. geograf rzymski, Marinus z Tyru, używał dla ułatwienia orientacji siatki złożonej z równoległych okręgów - równoleżników i wychodzących z biegunów łuków - południków¹.

Największy z równoległych okręgów nazwano równikiem i oznaczono cyfrą zero. Dziewięćdziesiąt równoległych okręgów przeprowadzonych na północ od równika i dziewięćdziesiąt przeprowadzonych na południe od niego tworzą stopnie szerokości północnej i południowej. Zgodnie z decyzją międzynarodowego kongresu w Waszyngtonie jako południk zerowy przyjmuje się południk przechodzący przez obserwatorium w Greenwich; 180 południków leżących na wschód od Greenwich i 180 leżących na zachód noszą nazwę stopni długości wschodniej i zachodniej. Długość jednostopniowego łuku jest równa $\frac{1}{360}$ części długości okręgu. Każdy stopień dzieli się na 60 części, zwanych minutami, każda minuta - na 60 części, które nazywamy sekundami.

Wskazanie długości (numeru południka) i szerokości (numeru równoleżnika) dowolnego punktu określa dokładnie jego położenie na powierzchni Ziemi. Tak, np. Moskwa ma współrzędne geograficzne: 55°48' szerokości północnej i 37°34' długości wschodniej. Ziemia dokonuje pełnego obrotu wokół swojej osi w ciągu doby, zatem w ciągu godziny obraca się o 15°. W momencie, kiedy w Moskwie jest południe, w miejscu leżącym o 15° dalej na wschód jest już godzina pierwsza po południu, a punkcie znajdującym się o 15° na zachód jest dopiero jedenasta godzina rano. Dlatego, jeśli wyregulować zegar w Moskwie w południe według Słońca, a następnie sprawdzić, którą godzinę będzie wskazywać ten sam zegar w Leningradzie, to okaże się, że w momencie, kiedy w Leningradzie Słońce daje najkrótszy cień, zegar „moskiewski” wskaże 12 godz. 35 min. Wynika stąd, że Leningrad znajduje się o 8°45' na zachód od Moskwy.

Gdybyśmy stosowali w życiu codziennym czas słoneczny, to w miarę przesuwania się na wschód lub zachód musielibyśmy nieustannie przesuwać wskazówki zegara.

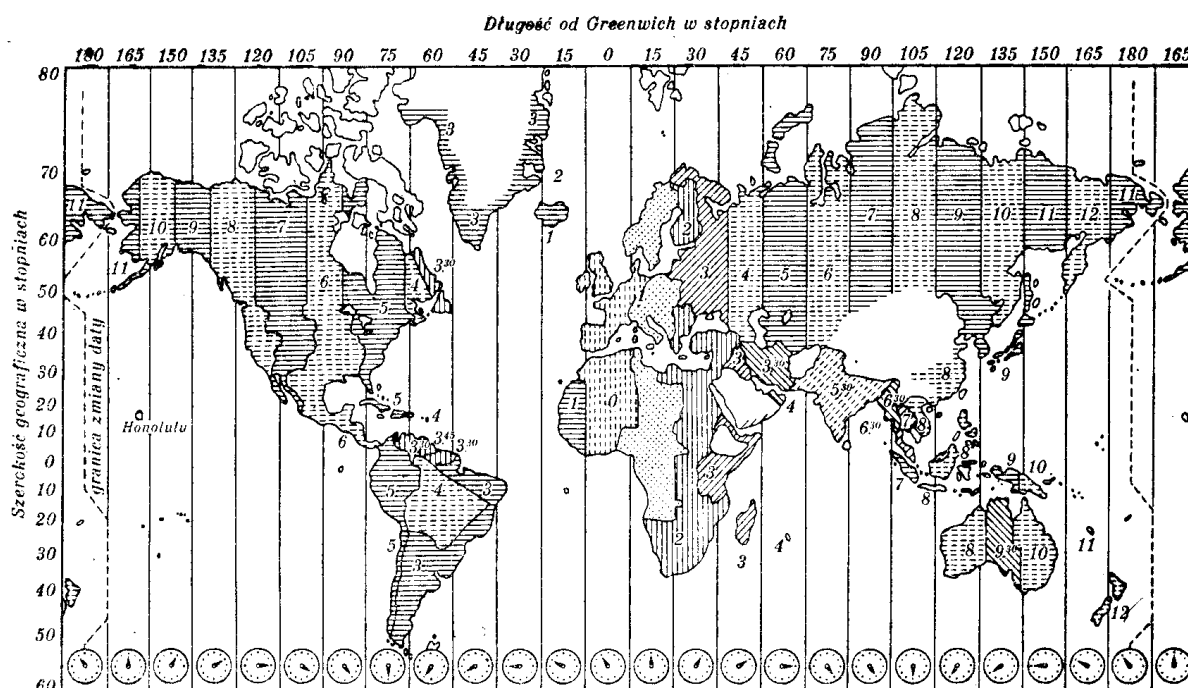
Taka sytuacja byłaby szczególnie niewygodna w życiu codziennym, a zwłaszcza w kolejnictwie. Nie trzeba udowadniać, że dla normalnej pracy kolei ruch pociągów powinien być dokładnie skoordynowany w czasie.

W latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej poszczególne linie kolejowe rozwiązywały ten problem w ten sposób, że każda wprowadzała swój własny „jednolity” czas, obowiązujący na danej linii lub na znacznym jej odcinku. Za podstawę przyjmowano średni czas dla danego terytorium. W wyniku tego powstało ok. 75 różnych systemów rachuby czasu, a na niektórych stacjach węzłowych znajdowały się po trzy zegary, wskazujące czas stacji oraz czas pociągów idących na wschód i na zachód.

Sytuacja stawała się coraz trudniejsza do zniesienia. W 1879 r. inżynier kolei kanadyjskich, S. Fleming, zaproponował wprowadzenie czasu strefowego, ze strefami czasowymi o szerokości 15°, poczynając od południka zerowego.

¹ Prototyp siatki wprowadził Dicearch z Messyny (III-II w. p. n. e.) wyznaczając pierwszy południk i pierwszy równoleżnik, (przyp. red. pol.).

W 1883 r. projekt ten został przyjęty w USA i w Kanadzie, a potem także w innych krajach. W Związku Radzieckim czas strefowy wprowadzono po Rewolucji Październikowej dekretem Rady Komisarzy Ludowych, począwszy od dnia 8 lutego 1919 r.



Rysunek 20 Mapa czasów strefowych

Czas strefowy ustanowiono następująco (ryc. 20): cała kula ziemiska została podzielona na 24 strefy – czasowe o szerokości 15° każda. Wewnątrz każdej strefy przyjmuje się czas jednakowy - średni dla danej strefy. Przy przejeździe przez granicę stref należy przesunąć wskazówki zegara o godzinę.

Ponieważ dla kolei żelaznych nawet taka skokowa zmiana czasu nie jest wygodna, na wszystkich liniach kolejowych w Związku Radzieckim stosuje się jednolity czas moskiewski („czerwona wskazówka”). W przeciwnym razie każdy pociąg, przyjeżdżający na stację węzłową, przywoziłby swój własny czas.

Tak samo jest z telegrafem. Jeśli stosować czas lokalny, to telegram wysłany np. z Władywostoku wczesnym rankiem 1 czerwca dotrze do Moskwy i będzie doręczony adresatowi 31 maja późnym wieczorem, tzn. „o dzień przed nadaniem”! Rzeczywiście, kiedy we Władywostoku według czasu lokalnego jest godz. 4 rano 1 czerwca, to w Moskwie według czasu lokalnego („moskiewskiego”) jest jeszcze godz. 9 wieczorem 31 maja. Na zegarach wszystkich krajów, stosujących czas strefowy, wskazówki minutowe w każdym momencie mają identyczne położenie, a pozycja wskazówek godzinowych różni się o zero lub całkowitą liczbę godzin. Na przykład zegary w Warszawie, gdzie obowiązuje czas środkowoeuropejski, „spóźniają się” o godzinę w porównaniu z zegarami moskiewskimi. Gdy w Moskwie według czasu strefowego jest godz. 12, w Warszawie według czasu strefowego jest dopiero godz. 11. W Tbilisi miejscowy czas strefowy wyprzedza o 1 godz. czas moskiewski, a w obwodach dalekowschodnich Związku Radzieckiego słońce wschodzi o siedem, osiem i dziewięć godzin wcześniej niż w Moskwie. Kiedy w Moskwie, według czasu strefowego jest południe, w Pietropawłowsku Kamczackim zegary wskazują godz. 9 wieczorem.

Granice stref czasowych nie wszędzie przebiegają dokładnie wzdłuż południków, musiałyby wtedy przecinać miasta i mogłoby się zdarzyć, że w różnych krańcach tego samego miasta czas byłby różny. Granice stref czasowych przeprowadzono głównie wzdłuż rzek i innych granic naturalnych,

uwzględniając także podział administracyjny kraju. Na przykład jedna ze stref czasowych na terytorium ZSRR przechodzi wzdłuż rzeki Ob, inna - wzdłuż Kamy itd.

Niedawno, w celu dalszego ulepszenia, granice stref czasowych w Związku Radzieckim zostały częściowo zmienione. Nowe granice stref czasowych lepiej odpowiadają podziałowi administracyjnemu kraju. Tak np. Kraj Krasnojarski był poprzednio rozdzielony na 4 strefy czasowe, a obecnie tylko na trzy. Jakucką Republikę Autonomiczną podzielono obecnie na trzy strefy czasowe zamiast pięciu itd. Nowe, poprawione granice stref czasowych zostały wprowadzone 1 marca 1957 r. o godz. 00 czasu moskiewskiego. Zresztą w Związku Radzieckim nie stosuje się obecnie czasu słonecznego ani czasu strefowego, lecz tzw. czas urzędowy, wprowadzony dekretem Rady Komisarzy Ludowych ZSRR 16 czerwca 1930 r. Zgodnie z tym dekretem wskazówki wszystkich zegarów w ZSRR zostały przesunięte o 1 godz. naprzód. Tak więc czas urzędowy jest równy czasowi strefowemu plus 1 godz. Czas urzędowy wprowadzono dla wygody życia codziennego i oszczędności energii elektrycznej.

Wśród linii granicznych, rozdzielających strefy czasowe, jest taka, przy przejściu której prócz zmiany czasu o jedną godzinę następuje także zmiana daty. Zgodnie z umową linia ta przechodzi w pobliżu 180° południka, między Azją i Ameryką. Tak więc dzień rozpoczyna się najpierw na Kamczatce, potem na Syberii, następnie w Europie, a później w Ameryce i na Alasce. Na statku przecinającym linię zmiany daty w kierunku wschodnim, ten sam dzień miesiąca przypisuje się dwóm kolejnym dniom. Odwrotnie, przy przecięciu linii zmiany daty w kierunku zachodnim wyrzuca się jeden dzień.

[Jak określa się położenie statku na pełnym morzu?](#) Jak przedstawiała się nawigacja morska przed 200-250 laty? W tym czasie epoka wielkich odkryć geograficznych już się skończyła, człowiek wzbogacił swoją wiedzę o świecie, ale dalekie podróże morskie wciąż były przedsięwzięciem trudnym i ryzykownym. Kiedy statek wypływał w daleki rejs, marynarze często tracili ziemię z oczu na przeciąg tygodni i miesięcy. Dokoła fale, nad głową albo Słońce, albo gwiazdy, cienka, drżąca igła magnetyczna wskazuje północ i południe...

Aby wytyczyć właściwie kurs, trzeba dokładnie wiedzieć, w jakim miejscu statek aktualnie się znajduje. Ale skąd zdobyć takie informacje na pełnym morzu?

Wyznaczenie szerokości geograficznej nie sprawia większych trudności. Wystarczy w tym celu w południe, tj. w momencie górowania Słońca określić kąt, pod którym jest ono widoczne nad horyzontem. Znając miesiąc i dzień można, za pomocą odpowiednich tablic, obliczyć bez trudu szerokość geograficzną punktu, w którym dokonano obserwacji (ryc. 21). Analogicznych pomiarów dokonuje się według gwiazd.



Rysunek 21 Zegar słoneczny na morskiej busoli z XVII w.

Znacznie trudniej jest określić długość geograficzną. W XVII i XVIII w. rządy krajów, szczególnie zainteresowanych handlem morskim ustanowiły olbrzymią nagrodę dla uczonych i wynalazców za opracowanie dogodnego i dostatecznie dokładnego sposobu wyznaczenia długości geograficznej danego punktu, np. statku na pełnym morzu.

Król hiszpański Filip III wyznaczył nagrodę tysiąca dukatów za rozwiązanie tego zadania, a Stany Generalne Holandii - 30 tys. guldenów. W Anglii w 1714 r. parlament jednogłośnie zatwierdził ustawę, przyznającą znaczne sumy 20, 15 i 10 tys. funtów dla uczonych, którzy potrafią rozwiązać to zagadnienie. Przy parlamencie angielskim utworzono specjalną komisję dla określenia długości geograficznej: w skład komisji weszli najwybitniejsi uczeni: I. Newton, S. Clark i in. Newton w sprawozdaniu komisji parlamentarnej wyłożył istotę problemu i trudności związane z jego rozwiązaniem.

Na czym one polegają?

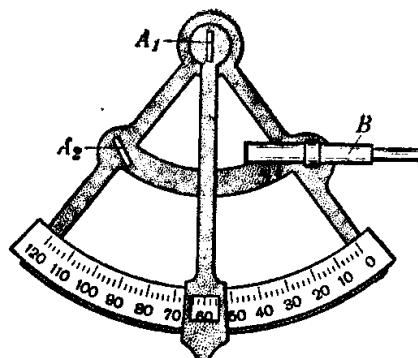
Określić długość geograficzną danego punktu - znaczy stwierdzić, o ile kątowych stopni, minut i sekund różni się południk, przechodzący przez dany punkt od południka zerowego.

Posuwajmy się wraz z zegarem na wschód od południka zerowego. Zatrzymajmy się na 15° długości wschodniej i poczekajmy na południe. Południe w tym punkcie nastąpi o godz. 12 czasu miejscowego. W tym samym punkcie, w tym samym momencie, nasz zegar, wskazujący czas południka zerowego, pokaże godz. 11 rano. Nic w tym dziwnego, ponieważ przesunęliśmy się o $\frac{1}{24}$ część obwodu Ziemi. Gdybyśmy przesunęli się o 30° na wschód, to odpowiednia różnica czasu miejscowego i czasu południka zerowego wyniosłaby tym razem dwie godziny itd. Tak samo jest dla dowolnych dwóch punktów obserwacji: zamiast południka zerowego, możemy wybrać południk Moskwy lub jakiegokolwiek inny.

Tak więc różnica czasów miejscowych dwóch punktów obserwacji określa różnicę ich długości geograficznych. Jeśli znamy długość geograficzną jednego z tych punktów względem południka zerowego, to określenie długości geograficznej drugiego punktu nie przedstawia trudności.

Zatem dla wyznaczenia długości geograficznej danego punktu obserwacji należy znać czas miejscowy tego punktu i czas miejscowy innego punktu, którego długość geograficzna jest dokładnie znana.

Do wyznaczenia czasu miejscowego w danym punkcie służą proste przyrządy astronomiczne. Na statkach używa się w tym celu sekstansu. Jest to instrument, służący do mierzenia kątów, pod którymi Słońce lub gwiazdy są widoczne nad horyzontem. Składa się z wycinka koła z podziałką kątową, poziomej lunety i systemu zwierciadeł.



Rysunek 22 Schemat sekstansu morskiego

W czasie obserwacji (ryc. 22) obserwator jedną ręką, możliwie pionowo, trzyma sekstans i patrząc w lunetę B obraca ramię ze zwierciadłem A_1 . Kiedy promień od obserwowanego ciała niebieskiego, po odbiciu od pary zwierciadeł (A_1, A_2) dojdzie do oka obserwatora, ciało niebieskie widoczne jest pozornie na linii horyzontu. Przy tym skala przyrządu wskazuje wysokość ciała niebieskiego nad horyzontem. Pomiar należy rozpocząć nieco przed południem, i obserwując wskazania przyrządu trzeba uchwycić moment, kiedy Słońce znajdzie się najwyżej nad horyzontem. Kąt, pod którym w tej właśnie chwili widoczne jest Słońce, pozwala na określenie szerokości geograficznej punktu obserwacji. Do wyznaczenia długości geograficznej potrzebna jest jeszcze znajomość czasu południka zerowego albo jakiegokolwiek innego określonego punktu, np. Moskwy, Londynu itd.

Rozwiązanie tego zadania napotyka znaczne trudności. Uчени proponowali różne sposoby określenia w danym punkcie czasu południka zerowego. Jeden ze sposobów polega na obserwacji zaćmienia Księżyca albo Słońca. Zaćmienia księżycowe i słoneczne można obliczyć na wiele lat naprzód. Momenty początkowe i końcowe tych zaćmień są znane z dostateczną dokładnością dla różnych punktów na Ziemi. Tak więc na ich podstawie można określić czas światowy. Niestety, zaćmienia księżycowe i słoneczne zachodzą stosunkowo rzadko, a długość geograficzna trzeba umieć wyznaczać każdego dnia i każdej nocy. Dlatego metoda ta nie znalazła zastosowania w praktyce.

Proponowano także określać czas w dowolnym punkcie na Ziemi za pomocą obserwacji zaćmień księżyców Jowisza. Jowisz posiada kilka księżyców, których zaćmienia zachodzą dostatecznie często i są widoczne nawet przez prostą lunetę. Momenty zaćmień księżyców Jowisza można obliczyć na wiele lat naprzód. Ponieważ odległość Ziemi od Jowisza jest bardzo duża, momenty początkowe i końcowe tych zaćmień dla wszystkich punktów na powierzchni ziemskiej są praktycznie jednakowe. Jednakże, ze względu na szczególne warunki obserwacji nie łatwo jest ustalić momenty początkowe i końcowe. Dlatego również i ten sposób nie znalazł zastosowań praktycznych.

Do określenia w danym punkcie czasu miejscowego innego punktu, którego długość geograficzna jest znana, można zastosować metodę przenoszenia zegara. Istotnie, jeśli przed rozpoczęciem rejsu wyregulować zegar wg czasu miejscowego Moskwy, Londynu lub innego punktu na Ziemi, to w dalszym ciągu może on służyć do rozwiązania drugiej części zadania: wskazywać czas miejscowy punktu o znanej długości geograficznej. Trudność polega na tym, że zwykły zegar nie nadaje się do tego celu, ze względu na niedostateczną dokładność chodu. Tymczasem błąd w czasie 1 min. powoduje w naszych szerokościach geograficznych błąd w odległości ok. 15 km, a w pobliżu równika – 27,6 km. Błąd zwykłego zegara po wielu dniach i tygodniach pływania może stać się tak duży, że określenie długości geograficznej na podstawie jego wskazań będzie bezużyteczne.

Metoda przenoszenia zegara nie wywołuje sprzeciwu ani ze względów zasadniczych, ani praktycznych, wymaga tylko dostatecznie dokładnego zegara.

Zegar taki, jak już stwierdzono, zbudował angielski zegarmistrz Harrison, stosując wynalezione przez siebie wahadło z kompensacją wpływu temperatury. W 1736 r. nowy zegar ustawiono na okręcie wojennym, płynącym do Lizbony. Po powrocie do Anglii kapitan okrętu, który w czasie rejsu śledził bacznie pracę zegara, potwierdził na piśmie jego pełną sprawność. Drugi egzemplarz zegara, wykonany przez wynalazcę, także przeszedł z powodzeniem przez próby. Za trzeci, jeszcze doskonalszy egzemplarz Harrison otrzymał w 1741 r. złoty medal londyńskiego Towarzystwa Królewskiego.

Wreszcie w 1761 r. angielska komisja parlamentarna do spraw długości geograficznej postanowiła przeprowadzić próby zegara Harrisona w warunkach praktycznych - na statku w dalekim rejsie. Niech - rozumowała komisja - zegar wytrzyma burze i sztormy na oceanie, zmianę temperatury i wilgotności od chłodnej i mglistej Anglii do gorących tropików, a jeśli po tym wszystkim będzie wskazywał

dokładny czas i tym samym pozwoli prawidłowo wyznaczać długość geograficzną, to metodę i instrument można będzie uznać za cenne...

Dla tych prób Harrison wykonał czwarty egzemplarz zegara. 18 listopada 1761 r. statek „Deptford” odpłynął z Portsmouth (Anglia) i wziął kurs na Port Royal (Jamajka).

W czasie próby, w ciągu 81 dni żeglugi z Portsmouth do Port Royal, zegar wykazał błąd tylko 5 sek. W ciągu 161 dni statek wrócił do Europy i przybył do Portsmouth. Błąd zegara nie przewyższał kilku sekund. Zadanie określania długości geograficznej na pełnym morzu zostało rozwiązane.

W 1844 r. na wspomnianym kongresie w Waszyngtonie przyjęto jako południk odniesienia przy rachubie czasu, południk przechodzący przez miasto Greenwich w Anglii w pobliżu Londynu. W Greenwich i we wszystkich punktach położonych na tym samym zerowym południku czas miejscowy jest równy czasowi strefowemu.

Czas ten nazywamy czasem światowym.

Obecnie nie stosuje się już metody oddzielnego wyznaczenia szerokości i długości geograficznej miejsca. Położenie statku nawigator znajduje wykreślając dwie lub trzy linie położenia. Każda z tych linii jest wynikiem opracowania obserwacji astronomicznych. Znajomość czasu światowego jest przy tym konieczna. Do jego określania służą chronometry, zapewniające dokładność kilku setnych sekundy. Zresztą, w dzisiejszych czasach dzięki rozwojowi łączności radiowej przechowywanie dokładnego czasu jest sprawą znacznie prostszą. Co godzinę radio nadaje sygnały dokładnego czasu, za pomocą których każdy może wyregulować swój zegar.

Chronometr wchodzi w skład obowiązkowego wyposażenia każdego okrętu. Jeden z okrętowych chronometrów znajduje się zawsze w kajucie kapitana. W przypadku rozbicia statku chroni się przede wszystkim chronometr i sekstans; nie ma w tym nic dziwnego, ponieważ te właśnie instrumenty pozwolą marynarzom określać położenie geograficzne.

Wszystkie badania, w których należy wyznaczyć współrzędne punktu obserwacji, wymagają znajomości dokładnego czasu.

Niezwykle doniosłym osiągnięciem naszych czasów był dryf czterech radzieckich badaczy na krze od Bieguna Północnego do Morza Grenlandzkiego. Ta nie mająca precedensu, pod względem odwagi i zasięgu, ekspedycja zakończyła się pełnym sukcesem. Działalność naukowa na krze, wyznaczenie trasy dryfowania kry, wreszcie znalezienie kry, kiedy trzeba było zabrać odważnych podróżników na pokład lodolamacza, wymagały stałej znajomości nieustannie zmieniających się współrzędnych geograficznych kry, do wyznaczenia których była potrzebna znajomość dokładnego czasu.

Obecnie w rejonie Bieguna Północnego stale pracuje kilka dryfujących stacji. W tych pływających laboratoriach lodowych prowadzone są intensywne badania naukowe. Bada się klimat Arktyki, morza polarne, ich życie, ukształtowanie dna, kierunek prądów, zjawiska magnetyczne itd. Przy tym wszystkie badania i pomiary muszą być bezwzględnie związane z określonymi punktami, których współrzędne geograficzne określa się na podstawie dokładnego czasu.

5

Otrzymywanie, przechowywanie i przekazywanie dokładnego czasu

Do rozwiązania wielu zadań naukowych i technicznych konieczna jest znajomość dokładnego czasu. Wymagana dokładność jest różna dla różnych zadań, ale zazwyczaj dość duża.

Dla przykładu rozważmy zagadnienie ruchu kontynentów. Według teorii Wegenera zarówno w przeszłości, jak i obecnie zachodzi nieustanne przemieszczanie się kontynentów. Ruch ten jest tak powolny, że w porównaniu z nim żółw porusza się błyskawicznie.

Wieloletnie dokładne pomiary położenia określonych punktów wykazały, że odległość między Europą i Ameryką zmniejsza się. Na szerokości geograficznej 45° szybkość zbliżania się Europy i Ameryki wynosi ok. 1 m w ciągu roku. Temu przesunięciu odpowiada zmiana czasu miejscowego o 0,002 sek. Przykład wykazuje, jak dokładne muszą być pomiary czasu przy określaniu długości geograficznej.

Dokładny pomiar długości geograficznej stwarza niemałe trudności i wymaga rozwiązania trzech zadań pomocniczych. Po pierwsze - konieczne jest otrzymanie momentów dokładnego czasu. Zajmują się tym pracownicy służby czasu w obserwatoriach. Otrzymują oni momenty dokładnego czasu raz na kilka dób za pomocą specjalnych obserwacji astronomicznych. Ale znajomość dokładnego czasu potrzebna jest także w odstępach między tymi momentami. Dlatego drugim zadaniem pomocniczym jest określenie czasu w tych właśnie odstępach. Zadanie to, które można nazwać zadaniem przechowywania czasu, wypełnia zegar astronomiczny wysokiej dokładności.

Otrzymywaniem momentów dokładnego czasu i przechowywaniem dokładnego czasu zajmuje się wiele obserwatoriów i zakładów naukowych. Jednakże ilość takich służb czasu jest stosunkowo niewielka, podczas gdy dokładny czas potrzebny jest nie tylko w tych obserwatoriach, ale i w instytutach naukowych, na statkach, w samolotach, w miejscach pracy ekspedycji itd. Dlatego trzecim zadaniem jest przekazywanie czasu z miejsc jego otrzymywania i przechowywania do miejsc, gdzie jest potrzebny. Ważne jest przy tym, aby duża dokładność, osiągnięta przy otrzymywaniu czasu i zachowana przy przechowywaniu, nie została utracona przy jego przekazywaniu. Do tego celu służą odpowiednie metody i specjalne przyrządy.

Przyjrzyjmy się rozwiązaniu każdego z tych zadań.

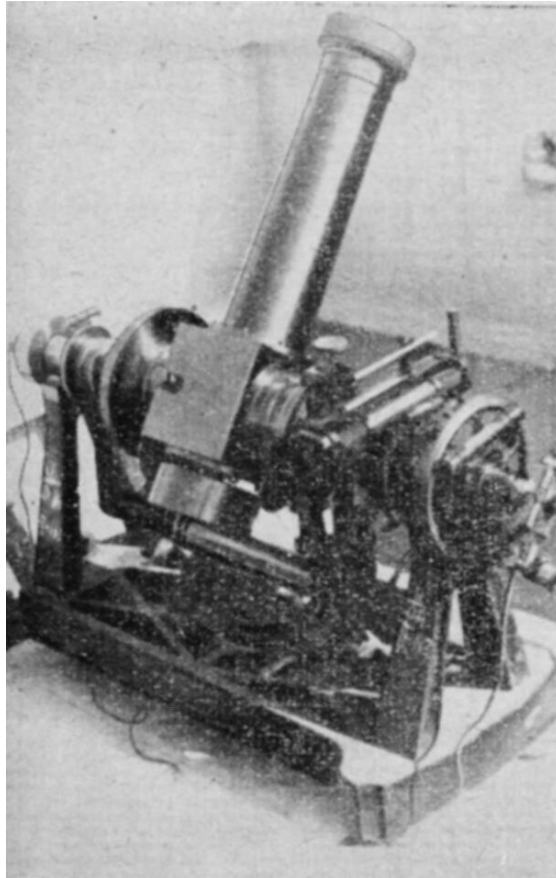
Otrzymywanie momentów dokładnego czasu. Dokładny czas określa się na podstawie obserwacji astronomicznych Słońca i gwiazd. Obserwacje gwiazd dają znacznie dokładniejsze wyniki i z tego powodu są zwykle stosowane.

Dokonując obserwacji gwiazd w celu uzyskania dokładnego czasu należy pamiętać, że doba gwiazdowa jest krótsza od słonecznej. Przyczyną tego jest roczny ruch Ziemi dookoła Słońca. Ruch ten wpływa na pozorny ruch Słońca w ten sposób, że odstęp czasu między kolejnymi kulminacjami zwiększa się o 3 min. 56 sek., co tworzy 2 godz. na miesiąc i dobę na rok. Dlatego doba gwiazdowa okazuje się o 3 min. 56 sek. krótsza od słonecznej.

Rzeczywiście, prowadząc obserwacje gwiazd w ciągu kilku kolejnych nocy, można łatwo zauważyć, że gwiazdy, nie zmieniając swego rozmieszczenia na firmamencie, wschodzą co noc nieco wcześniej. Wynika to stąd, że doba gwiazdowa jest krótsza od słonecznej. Ponieważ znamy zależność między czasem gwiazdowym i słonecznym, to przejście od jednego do drugiego nie przedstawia żadnych trudności.

Stosując odpowiednie metody i przyrządy możemy otrzymać wysoką dokładność czasu, wymaganą przy obserwacjach gwiazd. Do przeprowadzania takich obserwacji służy instrument przejściowy (ryc. 23), w postaci teleskopu, w polu widzenia którego znajdują się skrzyżowane nici. Instrument składa się z obracającej się lunety i koła z podziałką w stopniach. Luneta instrumentu przejściowego często

bywa załamana i jej część wraz z okularum zajmuje stale pozycję poziomą, co znacznie ułatwia obserwację.



Rysunek 23 Instrument przejściowy obserwatorium wrocławskiego z lunetą załamaną

Instrument przejściowy ustawia się dokładnie wzdłuż południka. Określanie momentu czasu polega na obserwacji przejścia gwiazdy przez nić znajdującą się w polu widzenia lunety. W okularze lunety przeciągnięte są dwie nici poziome, ograniczające środkową część pola widzenia i nić pionowa, przechodząca przez środek okularu. Zadanie obserwatora polega na zauważeniu momentu przejścia gwiazdy przez nić pionową. W tym celu powinien on tak nakierować lunetę, by obserwowana gwiazda znalazła się między poziomymi nićmi, a następnie śledząc znajdujący się w pobliżu zegar zaczep liczyć sekundy i obserwować jednocześnie ruch gwiazdy. Zauważywszy, w której sekundzie gwiazda była po prawej i lewej stronie nici, obserwator może ocenić moment przejścia gwiazdy przez nić z dokładnością do dziesiątych części sekundy. Metoda ta nosi nazwę „oko - ucho”. Dokładność jej w znacznym stopniu zależy od doświadczenia obserwatora i jest rzędu dziesiątych części sekundy.

Nieco wygodniejsza jest metoda rejestracji momentów czasu za pomocą klawiszy. Stosując tę metodę, obserwator w momencie przejścia gwiazdy przez nić pionową okularu naciska klawisz, zamykając obwód przekaźnika elektrycznego. W rezultacie na ruchomej taśmie powstaje odpowiedni znak. Jednocześnie na tej samej taśmie drukowane są periodyczne sygnały zegara astronomicznego. Porównując oba rodzaje sygnałów, można znaleźć odpowiedni moment dokładnego czasu.

Żadna z tych metod nie jest zbyt dokładna. Poszczególni obserwatorzy w zależności od temperamentu otrzymują różne wyniki: jeden stale nieco się spóźnia, inny zawsze trochę się śpieszy. Ta niedokładność, rzędu 0,1 sek., tworzy tzw. równanie osobowe obserwatora, które należy

uwzględniać przy dokładnych pomiarach. Sprawa jednak komplikuje się, ponieważ nawet ten sam obserwator przy obserwacji gwiazd o różnej jasności czyni różne błędy.

Trudności te w dużym stopniu usuwa mikrometr kontaktowy, w którym pionowa nić zamocowana jest na specjalnych sankach, wprawianych w ruch za pomocą pokrętła. Na pokrętle zamocowane są kontakty. Całe urządzenie jest połączone z okularzem.

W czasie pomiaru obserwator ustawia obraz gwiazdy między poziomymi nićmi, a potem, obracając pokrętłem, stara się utrzymać obraz gwiazdy na nici pionowej. Przy ruchu pokrętła następuje w określonych pozycjach zwarcie styków. Wtedy na ruchomej taśmie chronograficznej pojawiają się odpowiednie sygnały czasu obok periodycznych sygnałów zegara astronomicznego.

W późniejszych konstrukcjach mikrometru kontaktowego zamiast ręcznej regulacji ruchu pokrętła, wprawiającego w ruch sanki, stosuje się napęd elektryczny. Rola obserwatora sprowadza się wtedy do ustawienia obrazu gwiazdy na przeciwko pionowej nici, a następnie regulowania prędkości obrotów silniczka. Sygnały czasu drukowane są automatycznie przy odpowiednich pozycjach pokrętła. Takie urządzenie zapewnia bardziej jednostajny ruch nici i zmniejsza błąd osobowy obserwatora.

Wariant metody „oko - ucho” z zastosowaniem klawiszy zapewnia przy odczycie błąd wyrażający się w dziesiątych częściach sekundy. Przy pracy z ręcznym mikrometrem kontaktowym błąd zmniejsza się do 0,03-0,04 sek. Mikrometr kontaktowy napędzany silniczkiem pozwala zmniejszyć błąd jeszcze bardziej do 0,02 - 0,03 sek.

W ostatnich latach opracowano metody otrzymywania sygnałów dokładnego czasu przy użyciu fotografii i fotokomórki. Proces pomiaru w odpowiednich instrumentach jest całkowicie zautomatyzowany.

Zazwyczaj dla otrzymania sygnałów dokładnego czasu dokonujemy nie jednego, lecz kilku pomiarów. W tym celu należy wybrać serię tzw. gwiazd fundamentalnych. Wyniki tych pomiarów tworzą, w pewnym sensie, surowiec podlegający dalszemu, dość długiemu opracowaniu. Po pierwsze, wprowadza się poprawki uwzględniające różne błędy przyrządów. Należy uwzględnić także pochylenie poziomej osi przyrządu, odchylenie przyrządu od południka (azymut przyrządu) i wprowadzić odpowiednie poprawki do otrzymanych wyników.

Nie bez znaczenia jest także poprawka uwzględniająca zjawisko aberracji światła. Aberracja światła powstaje w wyniku ruchu Ziemi. Prędkość światła wynosi 300 000 km/sek, a prędkość rocznego ruchu Ziemi wokół Słońca - 30 km/sek. Promień świetlny gwiazdy, który padł na obiektyw naszego teleskopu potrzebuje pewnego, choć niewielkiego odstępu czasu na to, aby przejść odległość od obiektywu do okularu teleskopu. W tym czasie teleskop razem z Ziemią przesunie się o pewną odległość. Aby mimo to promień gwiazdy padł na okular, należy pochylić z lekka teleskop w kierunku ruchu Ziemi. Po upływie pół roku prędkość Ziemi względem gwiazd ma przeciwny kierunek i poprawka na aberrację zmienia znak. Tak więc poprawka na aberrację światła uwzględnia dodatkowe pochylenie teleskopu, będące rezultatem ruchu Ziemi.

W końcu, z wielu obserwacji serii gwiazd wyprowadza się średnią wartość i ocenia wielkość błędu; całkowity średni błąd wynosi zwykle 0,010 - 0,015 sek.

Taki sposób otrzymywania wartości momentów czasu stosuje się we wszystkich obserwatoriach prowadzących służbę czasu. Jednakże dane poszczególnych obserwatoriów wykazują mimo wszystko pewne różnice. Dlatego dane dotyczące dokładnego czasu, otrzymane przez służbę czasu poszczególnych obserwatoriów, kierowane są do Międzynarodowego Biura Czasu, które na ich

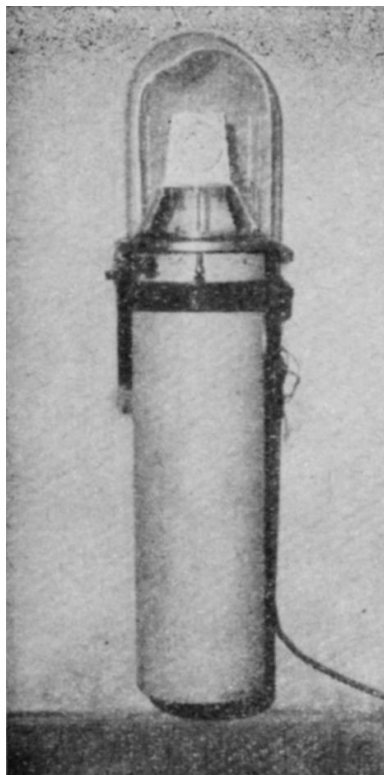
podstawie otrzymuje tzw. momenty koincydencji oraz średnie wartości rezultatów poszczególnych służb czasu. Te momenty koincydencji przyjmuje się właśnie jako prawdziwe wartości momentów czasu.

Przechowywanie dokładnego czasu. Otrzymywanie momentów czasu na podstawie obserwacji astronomicznych - to tylko pierwsze zadanie służby czasu. Następnym zadaniem jest przechowywanie dokładnego czasu.

Pomiarów czasu metodami astronomicznymi dokonuje się raz na kilka dób. W odstępach czasu między pomiarami astronomicznymi do przechowywania dokładnego czasu służą zegary astronomiczne.

W celu otrzymania możliwie dużej dokładności zegarów astronomicznych uwzględnia się i usuwa w miarę możliwości wszystkie źródła błędów i stwarza dla pracy zegarów możliwie korzystne warunki.

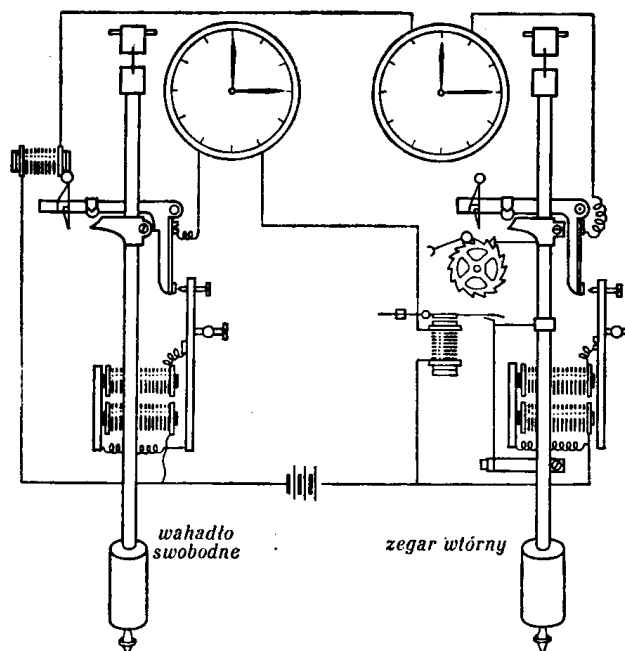
Najważniejszą częścią zegara jest wahadło. Sprężyny i kółka spełniają tylko rolę mechanizmu przekazującego, wskazówki - mechanizmu wskazującego, a czas odmierza wahadło. Dlatego też staramy się stworzyć dla niego w zegarach astronomicznych możliwie najlepsze warunki pracy: zachować stałą temperaturę pomieszczenia, zlikwidować wstrząsy, osłabić opór powietrza i, w końcu zmniejszyć jak najbardziej opory samego mechanizmu zegara.



Rysunek 24 Zegar astronomiczny

Aby zapewnić wysoką dokładność zegarów astronomicznych, umieszczamy je w głębokich, zabezpieczonych od wstrząsów piwnicach. W pomieszczeniu przez cały rok utrzymuje się stałą temperaturę. Dla zmniejszenia oporu powietrza i usunięcia wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego wahadło zegara umieszcza się w osłonie, wewnątrz której ciśnienie powietrza jest nieco obniżone (ryc. 24).

Bardzo wysoką dokładność posiada zegar astronomiczny z dwoma wahadłami (zegar Shortta), z których jedno jest swobodne, a drugie związane z mechanizmem przekazującym i wskazującym i sterowane przez wahadło swobodne (ryc. 25). Wahadło swobodne znajduje się w głębokiej piwnicy w metalowej osłonie, wewnątrz której ciśnienie jest obniżone. Łączność wahadła swobodnego ze związanym odbywa się za pośrednictwem dwu niewielkich elektromagnesów, umieszczonych w pobliżu wahadeł. Wahadło swobodne kieruje wahadłem związanym, zmuszając je do zsynchronizowanych ruchów. W ZSRR zegar astronomiczny wysokiej dokładności z dwoma wahadłami zbudował zasłużony metrolog I. I. Kwarenberg w laboratorium Wszechzwiązkowego Naukowo-Badawczego Instytutu Metrologii im. D. I. Mendelejewa.



Rysunek 25 Zegar astronomiczny z dwoma wahadłami

Można ograniczyć do minimum wielkość błędów we wskazaniach zegara, ale nie można usunąć ich całkowicie. Zresztą, jeżeli zegar chodzi prawidłowo, ale z góry wiadomo, że śpieszy się lub spóźnia określoną ilość sekund na dobę, to wyznaczenie czasu za pomocą takiego zegara nie przedstawia większych trudności. W tym celu wystarczy znać chód zegara, tzn. wiedzieć o ile sekund na dobę zegar śpieszy się lub spóźnia. Niestety, chód zegara nie jest stały.

Przy zmianach warunków zewnętrznych - temperatury pomieszczenia i ciśnienia powietrza - wskutek istniejących zawsze niedokładności w wykonaniu części i pracy poszczególnych elementów mechanizmu ten sam zegar z biegiem czasu może zmieniać swój chód. Zmiana albo uchybienie chodu zegara jest głównym wskaźnikiem jakości jego pracy. Im mniejsze jest uchybienie chodu zegara, tym lepszy jest zegar.

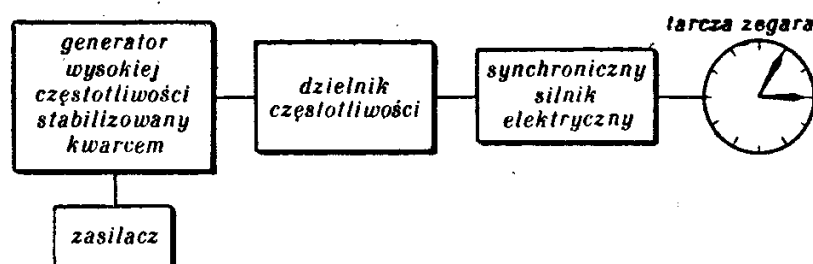
Tak więc dobry zegar astronomiczny może śpieszyć się lub spóźnić nawet dziesiąte części sekundy na dobę, i mimo to może służyć do niezawodnego przechowywania czasu i otrzymywania dostatecznie dokładnych wskazań, jeśli tylko uchybienie jego chodu dziennego jest niewielkie. W zegarach astronomicznych wahadłowych chód może osiągać kilka dziesiątych sekundy na dobę, ale uchybienie chodu dziennego zazwyczaj nie przekracza tysięcznych części sekundy.

W ostatnich latach konstruowaniem zegarów astronomicznych zajęli się nie mechanicy, lecz elektrycy i radiotechnicy. Zbudowali oni zegar, w którym dla odmierzania czasu zamiast ruchu wahadła zastosowano drgania sprężyste kryształu kwarcu.

Odpowiednio wycięta płytką kryształu kwarcu posiada interesujące własności. Jeśli taką płytkę, zwaną kwarcem piezoelektrycznym, ścisnąć lub zgąć, to na przeciwległych jej powierzchniach pojawiają się ładunki elektryczne o różnych znakach. Jeśli do przeciwległych powierzchni takiej płytki kwarcowej doprowadzić prąd zmienny, to płytkę zaczyna drgać. Im mniejsze jest tłumienie układu drgającego, tym bardziej stała jest częstotliwość drgań. Kryształ kwarcu ma pod tym względem wyjątkowo korzystne własności, ponieważ jego tłumienie jest bardzo małe.

Własności te są szeroko wykorzystywane w radiotechnice dla utrzymania stałej częstotliwości nadajników. Ta właśnie cecha kryształu kwarcu - wysoka stabilność częstotliwości drgań - umożliwiła budowę astronomicznego zegara kwarcowego.

Zegar kwarcowy (ryc. 26) składa się z generatora radiotechnicznego, stabilizowanego kwarcem, stopni dzielenia częstotliwości synchronicznego silnika elektrycznego i tarczy zegarowej ze wskazówkami.



Rysunek 26 Schemat zegara kwarcowego

Generator radiotechniczny wytwarza prąd zmienny wysokiej częstotliwości, a kryształ kwarcu z dużą dokładnością podtrzymuje stałość częstotliwości jego drgań. W stopniach dzielenia częstotliwości obniża się częstotliwość prądu zmiennego od kilkuset tysięcy do kilkuset drgań na sekundę. Synchroniczny silnik elektryczny, zasilany prądem zmiennym o obniżonej częstotliwości, obraca wskazówki, uruchamia przekaźnik podający sygnały czasu itd.

Szybkość obrotów synchronicznego silnika elektrycznego zależy od częstotliwości zasilającego prądu zmiennego. Tak więc w zegarze kwarcowym szybkość obrotu wskazówek w ostatecznym wyniku jest określona przez, częstotliwość drgań kwarcu. Duża stabilność częstotliwości drgań płytki kwarcowej zapewnia równomierność chodu i wysoką dokładność wskazań kwarcowego zegara astronomicznego.

Kwarcowe zegary astronomiczne, zbudowane w laboratoriach naukowych w ZSRR, znalazły już zastosowanie w praktycznej działalności astronomów. Zapewniają one jeszcze wyższą dokładność niż wahadłowe zegary astronomiczne. Uchybienie chodu dziennego wynosi dla nich zaledwie 0,0002 - 0,0003 sek. na dobę.

W ciągu miesięcy i lat zestawia się dla danego zegara astronomicznego tabele poprawek. Zegary astronomiczne prawie nigdy nie wskazują dokładnego czasu, ale za pomocą tabeli poprawek można odczytać czas z dokładnością do tysięcznych części sekundy.

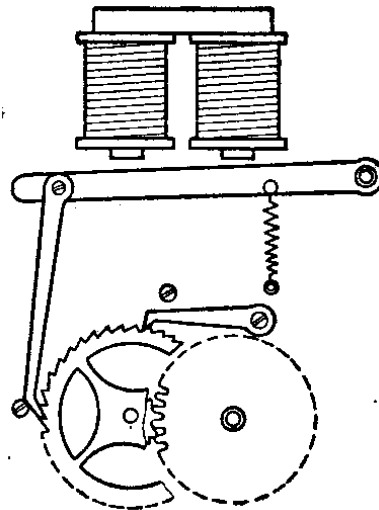
Przekazywanie dokładnego czasu. Zadanie służby czasu nie ogranicza się do otrzymywania i przechowywania dokładnego czasu. Niemniej ważną częścią tego zadania jest taka organizacja przekazywania dokładnego czasu, przy której nie zachodziłaby utrata tej dokładności.

W przeszłości sygnały czasu przekazywano za pomocą urządzeń mechanicznych, dźwiękowych lub świetlnych. W Petersburgu dokładnie w południe strzelało działo; można było także porównać swój

zegar z zegarem wieżowym Instytutu Metrologii. W portach morskich jako sygnał czasu stosowano spadającą kulę.

Obecnie do przekazywania dokładnego czasu stosuje się sygnały elektryczne, przekazywane za pomocą telefonu, telegrafu i radia.

Radiostacje regularnie co godzinę nadają sygnały czasu z dokładnością do 0,1 sek. W przypadku, gdy wymagana jest wyższa dokładność, korzysta się z usług stacji radiotelegraficznej, która przekazuje wtedy serie tzw. sygnałów rytmicznych. Metoda ta zapewnia przekazywanie sygnałów czasu z dokładnością do setnych i tysięcznych części sekundy.



Rysunek 27 Mechanizm wtórnego zegara elektrycznego

Ważnym zadaniem jest dostarczenie dokładnego czasu dla kolei, poczty, telegrafu i wielkich miast. Nie potrzeba tu tak wysokiej dokładności, jak przy badaniach astronomicznych i geograficznych, ale konieczne jest, aby z dokładnością do minuty we wszystkich częściach miasta, we wszystkich częściach kraju, np. Związku Radzieckiego, wszystkie zegary wskazywały jednakowy czas. Zadanie to rozwiązuje się zwykle przy użyciu zegarów elektrycznych. Budowa zegarów elektrycznych jest bardzo prosta, niemniej jednak, wskazują one jednakowy czas we wszystkich punktach miasta z dokładnością do 1 min. Stosuje się zegary elektryczne pierwotne i wtórne. Pierwotny zegar elektryczny posiada wahadło, koła, mechanizm wychwytowy i jest normalnym czasomierzem. Wtórny zegar elektryczny jest tylko wskaźnikiem: nie posiada mechanizmu zegarowego, lecz zawiera tylko proste urządzenie, przesuujące wskazówki raz na minutę (ryc. 27). Przy każdym rozwarciu obwodu elektrycznego elektromagnes wyzwala kotwicę i połączona z kotwicą zapadka naciskając na koło wychwytowe obraca je o jeden ząb. Sygnały prądu elektrycznego przekazywane do zegarów wtórnych mogą pochodzić od urządzenia centralnego lub od pierwotnego zegara elektrycznego.

Niedawno pojawiły się zegary mówiące - zegarynki, skonstruowane na zasadzie kina dźwiękowego.

Tak więc opracowane w ostatnich czasach metody i instrumenty pozwalają otrzymywać, przechowywać i przekazywać czas z bardzo dużą dokładnością. Ma to ważne znaczenie naukowe i praktyczne przy badaniach astronomicznych, tworzeniu stałych punktów geodezyjnych, pracach geograficznych i kartograficznych, dla celów nawigacji morskiej i powietrznej, i przy rozwiązywaniu wielu innych zadań.

6

Jednostki miar i wzorce

Zmierzyć jakąś wielkość - znaczy porównać ją z inną jednorodną wielkością, przyjętą za jednostkę. Na przykład długość kuponu materiału porównuje się z długością metra, długość życia człowieka - z długością roku.

Starożytni znali jednostki długości: „łokiec”, „lot strzały”, „dzień drogi”; w czasach późniejszych weszły w użycie: arszyn, stopa...

W starożytności miarą czasu były odstępy między kolejnymi żniwami, między kolejnymi okresami deszczowymi itd. W niektórych krajach mierzono czas od momentu wystąpienia pierwszego śniegu, w innych - od pojawienia się nad horyzontem określonych gwiazdozbiorów lub gwiazd.

Jednostki te były bardzo dowolne i w przypadku zniszczenia nie nadawały się do odtworzenia. Na przykład wzorzec angielskiej stopy wbudowany w ścianę londyńskiej mennicy uległ zniszczeniu w czasie pożaru i potem nie można go już było dokładnie odtworzyć. Taka sytuacja w życiu codziennym była niewygodna, a w nauce, technice i przemyśle jest zupełnie niedopuszczalna.

Istotnie, czy można mówić o możliwości odtwarzania jednostek miar, które, jak powiada dawna notatka, określano w następujący sposób: niech szesnastu ludzi wysokich lub niskich, z tłumu idącego do kościoła, ustawi kolejno jeden za drugim, każdy po jednym trzewiku - ogólna długość... będzie równa sążniowi.

Chęć ustanowienia jednostek miar możliwych do odtworzenia, skłoniła uczonych do związania ich z wielkością i ruchem Ziemi. Za jednostkę długości - metr - przyjęto długość $\frac{1}{40000}$ części południka przechodzącego przez Paryż; za jednostkę ciężaru - kilogram - ciężar jednego decymetra sześciennego destylowanej wody na poziomie morza, w średniej szerokości geograficznej, przy normalnej temperaturze; za jednostkę czasu - sekundą - $\frac{1}{86400}$ średniej doby słonecznej. Tak więc jednostkę czasu związane z ruchem Ziemi. Uczyniono to w następujący sposób.

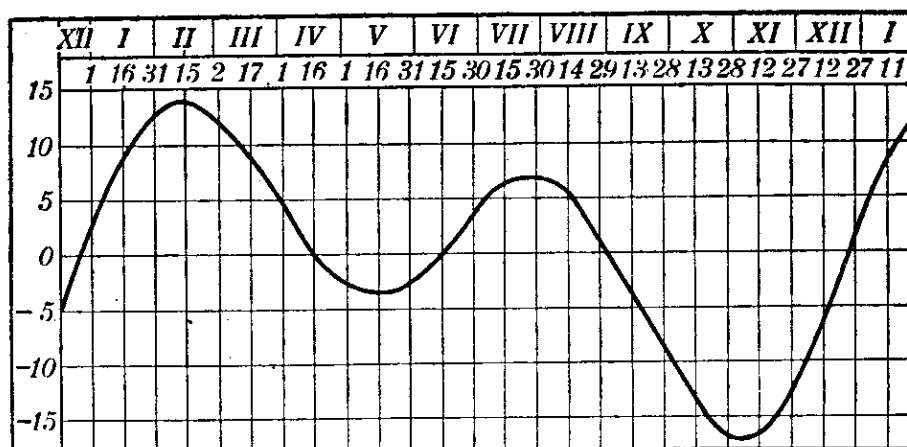
Jako zegar wzorcowy, z którym porównuje się wszystkie inne, przyjęto gigantyczny „zegar” zbudowany przez samą przyrodę: system Ziemia - Słońce. Czas trwania jednego obrotu Ziemi wokół Słońca nazywamy rokiem słonecznym. Prawdziwą dobą słoneczną nazywa się okres czasu między dwoma kolejnymi górowaniami (kulminacjami) środka widzialnej tarczy Słońca. Tak więc możemy otrzymać momenty czasu na podstawie obserwacji ruchu Słońca.

Niestety, system ten w zastosowaniu do rachuby czasu ma wiele wad. Orbita rocznego obrotu Ziemi wokół Słońca ma kształt elipsy. Płaszczyzna równika ziemskiego jest pochylona względem tej orbity. Ruch Ziemi wokół Słońca przebiega nierównomiernie: szybciej kiedy Ziemia znajduje się bliżej Słońca i wolniej, kiedy znajduje się dalej od niego.

Zatem długość doby w ciągu roku wciąż się zmienia. Tylko zegary słoneczne wskazują dokładny czas słoneczny. Żaden zegar mechaniczny nie może dokładnie naśladować tych nierównomiernych zmian.

W związku z tym wprowadzono na miejsce prawdziwej, średnią dobę słoneczną. Długość prawdziwych dób słonecznych zmienia się z dnia na dzień, długość średniej doby słonecznej jest stała w ciągu roku. Za długość średniej doby słonecznej uważamy średnią długość prawdziwych dób słonecznych w ciągu roku.

Przejście od średniego czasu słonecznego do prawdziwego czasu słonecznego umożliwia równanie czasu, dające wielkość poprawki w minutach, którą należy dodać algebraicznie do średniego czasu słonecznego, aby otrzymać czas prawdziwy.



Rysunek 28 Wykres równania czasu

Równanie czasu ma zwykle postać tablic lub wykresu (ryc. 28), dzięki którym bez trudu można dokonać odpowiednich przeliczeń. W równaniu czasu poprawka dodatnia osiąga największą wartość (+ 14,5 min.) około połowy lutego, ujemna (- 16,3 min.) - około połowy listopada. Cztery razy w roku - 15 kwietnia, 14 czerwca, 1 sierpnia i 24 grudnia - poprawka przyjmuje wartość zerową, tzn. średni czas słoneczny jest wtedy identyczny z czasem prawdziwym.

A zatem jako jednostki podstawowe przyjęliśmy metr, kilogram ciężaru, sekundę (techniczny system jednostek) albo centymetr, gram masy, sekundę (system cgs). Jednostki te początkowo nie budziły poważniejszych zastrzeżeń i stopniowo znalazły zastosowanie we wszystkich prawie krajach świata.

Jednakże, kiedy po pierwszych pomiarach długości południka przeprowadzono następne, dokładniejsze, w wyniku których trzeba było wprowadzić pewne poprawki do wzorców metra i kilograma, to okazało się, że każdy następny pomiar wymaga wprowadzania coraz to nowych poprawek. Zdecydowano się wtedy wykonać możliwie jak najdokładniej, zgodnie z ostatnimi pomiarami, wzorzec metra i wzorzec kilograma i już ich więcej nie zmieniać.

Oba wzorce wykonano ze stopu platyny i irydu. Dla ich przechowywania przeznaczono specjalne pomieszczenie, w którym przez cały rok panuje stała temperatura. Ogólnie biorąc dla zachowania stałości wzorców i możliwie troskliwego ich przechowywania podjęto wszystkie niezbędne środki ostrożności. Wszystko to nie daje jeszcze całkowitej gwarancji ich niezmienności, ale w każdym razie pozwala przypuszczać, że w ciągu dziesięcioleci ewentualne zmiany tych wzorców będą minimalne.

Znacznie trudniej jest z jednostkami czasu, ponieważ w przeciwieństwie do wzorców długości i masy nie mamy wpływu na nasz pierwotny wzorzec czasu, system Ziemia-Słońce i nie możemy zapewnić jego niezmienności umieszczając go w piwnicach Instytutu Miar i Wag. Zegary piaskowe, wodne i ogniowe stosowane w starożytności dają błąd rzędu kilkudziesięciu minut na dobę i są zbyt niedokładne, jak na wzorce czasu. Prócz tego, w przypadku zniszczenia danego egzemplarza zegara, jego odtworzenie jest niemożliwe. Wystarczy minimalna zmiana szerokości szyjki zegara piaskowego lub rodzaju piasku, aby zmienić całkowicie wskazania zegara. Podobnie jest z zegarami ogniowymi i wodnymi: niewielka zmiana ich wymiarów wpływa istotnie na dokładność wskazań.

Zegary kołowe zapewniają dokładność kilku minut na dobę. Chód tych zegarów zależy od rozmiarów i ciężaru części, tarcia, smarowania itd. Ani pod względem dokładności, ani pod względem możliwości odtwarzania nie spełniają one wymagań stawianych wzorcom czasu.

Dokładność wskazań współczesnych wahadłowych i kwarcowych zegarów astronomicznych wynosi tysięczne i dziesięciotysięczne części sekundy na dobę. Ale wymagania dokładności pomiarów czasu wzrosły tak dalece, że przy rozwiązywaniu niektórych problemów naukowych i technicznych niedokładność współczesnych zegarów astronomicznych, wynosząca tysięczne części sekundy na dobę, jest prawdopodobnie bardziej uciążliwa, niż błędy kilku minut dla starożytnych. Prócz tego, w razie zniszczenia danego egzemplarza zegara astronomicznego wahadłowego lub kwarcowego niemożliwe jest odtworzenie identycznej kopii, nawet jeśli dysponujemy najdokładniejszymi rysunkami technicznymi. Wystarczy niewielka różnica długości wahadła lub rozmiarów płytki kwarcowej albo nawet nieznaczna niejednorodność materiału, z którego zostały one wykonane, aby spowodować różnicę w chodzie zegara. Dodatkowa trudność polega na tym, że z biegiem czasu części zegarów zużywają się i starzeją.

Tak więc ani prymitywne zegary piaskowe, ani najlepsze wahadłowe i kwarcowe zegary astronomiczne ze względu na niedostateczną dokładność i niemożliwość ich dokładnego odtworzenia nie nadają się na wzorce czasu.

Oto dlaczego w odróżnieniu od jednostek długości, ciężaru i masy, dla których już dawno ludzie stworzyli wzorce, przy pomiarach czasu od starożytności po dzień dzisiejszy jako wzorec pierwotny wykorzystujemy „zegar” zbudowany przez samą przyrodę: system Ziemia - Słońce. Wzorec ten ma wiele wad. Wspomnieliśmy już o nierównomierności ruchu Ziemi po orbicie i niejednakowej długości dób; nie są to jeszcze wszystkie wady.

Astronomowie obserwowali okresowe zmiany ruchu Księżyca i planet wewnętrznych. Zgodność występująca między tymi odchyleniami wskazuje, że przyczyną ich są nie Księżyc i planety, lecz Ziemia, tzn. obserwowane zmiany ruchu Księżyca i planet wewnętrznych są tylko pozorne. W istocie zmienia się tylko prędkość obrotu Ziemi, ale ponieważ sami znajdujemy się na tej planecie, to w wyniku zmian prędkości obrotowej Ziemi obserwujemy tylko zmiany ruchu ciał niebieskich. Tak więc założenie stałej prędkości kątowej ruchu Ziemi zostało faktycznie obalone.

Osiągnięta dokładność pomiaru czasu jest zupełnie wystarczająca dla wielu zadań naukowych i technicznych. Istnieje jednak wiele innych ważnych problemów naukowych, dla rozwiązania których potrzebne są zegary, których chód byłby dostatecznie równomierny w ciągu dziesiątek i setek lat. Do takich zadań należą m. in. obserwacje nadzwyczaj wolnych ruchów kontynentów, badanie nierównomierności ruchu Ziemi itd. Niestety, dotychczas nie dysponowaliśmy niczym lepszym od skali czasu opartej na tym właśnie ruchu Ziemi. A ponieważ ruch Ziemi nie jest dokładnym wzorcem czasu, należy szukać innego wzorca: lepszego i jednocześnie nadającego się do odtwarzania.

7

Zegar molekularny

Wzorce atomowe. Dawno już rozumiano, jak wielkie perspektywy, jeśli chodzi o dokładność i możliwość odtwarzania, kryje w sobie zastosowanie procesów atomowych do techniki pomiarowej.

Kiedy ogromne fabryki produkują seryjnie samochody, zegarki itd., to na pierwszy rzut oka wydaje się, że wszystkie samochody tej samej serii, wszystkie zegarki tego samego typu są identyczne, ale jest to tylko złudzenie. Wśród dziesiątków tysięcy samochodów tego samego typu, każdy wyróżnia się czymś innym, wśród setek tysięcy na pozór takich samych zegarków, wyprodukowanych z tych samych materiałów, nie ma dwu identycznych i dlatego każdy z nich trzeba regulować oddzielnie. W makroświecie nie ma dwu zupełnie identycznych rzeczy.

Przeciwnie, w mikroświecie panuje jednolitość. Nie możemy odróżnić od siebie dwu elektronów czy dwu protonów nie dlatego, że dane instrumenty pomiarowe są niedokładne, ale ze względów zasadniczych. Atomy zbudowane z jednakowej ilości cząstek elementarnych: elektronów, protonów, neutronów są także identyczne. Molekuły, będące połączeniami kilku atomów, również niczym się nie różnią, jeśli tylko ilość, kombinacja i budowa atomów, wchodzących w ich skład, są jednakowe.

Tak oczywiste zalety układów atomowych pod względem stałości ich parametrów już dawno naprowadziły uczonych na myśl stworzenia wzorców, opartych na procesach atomowych.

Jako atomowy wzorec długości wybrano długość fali czerwonego prążka, emitowanego przez atomy kadmu. W wyniku bardzo dokładnych doświadczeń stwierdzono, że wielkość ta jest równa 6 438,4696 angstroma albo 0,00064384696 mm. Tak więc zmierzono długość fali z dokładnością do stumiliardowej części milimetra. Prawdopodobnie dalszy rozwój techniki pomiarowej pozwoli nieco uściślić również i tę wartość. Tymczasem w wielu badaniach służy ona jako wielkość odniesienia, tzn. porównujemy z nią wyniki innych pomiarów.

Chcąc uchronić się na przyszłość od konieczności wprowadzania poprawek do poprzednich pomiarów za każdym razem, kiedy ta wielkość odniesienia choć trochę się zmieni, postanowiono zgodnie z porozumieniem międzynarodowym nie zmieniać jej więcej niezależnie od przyszłych pomiarów. Tak więc w istocie wprowadzono nową atomową jednostkę długości, związaną już nie z długością południka ziemskiego, lecz z procesami atomowymi.

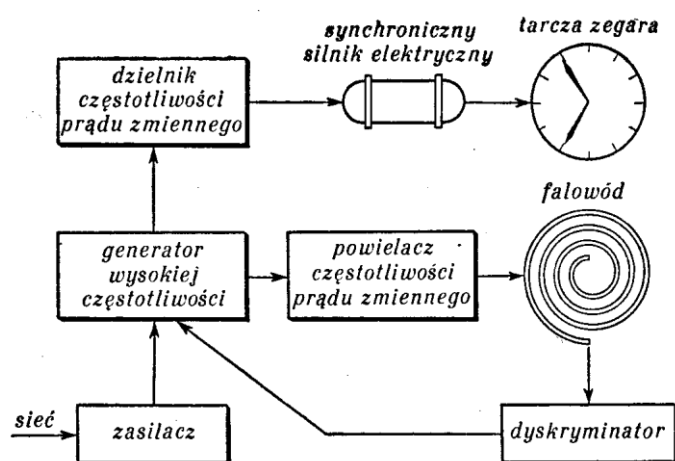
Oczywiście, nie mniej aktualne jest stworzenie wzorca czasu (albo częstotliwości) o dostatecznej stałości i możliwości odtwarzania. Również i tutaj uczeni zwrócili się do zjawisk mikroświata; sytuacja jednak okazała się nieco bardziej złożona.

Układy atomowe i molekularne zapewniają wielką stałość drgań i mniejszą zależność częstotliwości od warunków zewnętrznych w porównaniu z makroukładami. Jeśli przenieść zegar wahadłowy, nic w nim nie zmieniając, z jednego miasta do drugiego, np. z Moskwy do Taszkontu, to w wyniku samych tylko różnic siły ciężkości zostanie naruszony jego chód i błąd wyniesie kilka minut na dobę. Przeciwnie, jeśli układ, w którym drgają atomy lub molekuły, przenieść do innego miasta lub nawet na inną planetę naszego systemu słonecznego, to zmiana częstotliwości drgań będzie minimalna. Tylko w niektórych rejonach naszej Galaktyki, np. na białym karle, gwiazdzie towarzyszącej Syriuszowi, której gęstość jest 30 000 razy większa od gęstości wody, a siła ciężkości 1000 razy większa niż na Słońcu i 30 000 razy większa niż na Ziemi, zmiana częstotliwości drgań molekularnych stałaby się dostrzegalna. Wahadło, które na Ziemi w ciągu sekundy robi jeden ruch, na wspomnianym białym karle w tym samym czasie dokonałoby 140 wahanć, a częstotliwość drgań molekuł amoniaku zmieniałaby się w analogicznych warunkach o nieco mniej niż setną część procenta. Tak więc zalety układów atomowych, jeśli chodzi o ich stałość są ogromne.

Jednakże wykorzystanie drgań atomowych dla stworzenia nowego wzorca czasu przedstawiałoby bardzo wiele trudności, ponieważ częstotliwość tych drgań jest bardzo wielka i trudno związać ją z jakimkolwiek układem mechanicznym lub elektrycznym wskazującym czas. Częstotliwość drgań atomów w molekułach jest nieco mniejsza. Dlatego w układach do wskazywania czasu zamiast

układów atomowych (elektrony i jądro) wygodniej jest wykorzystywać układy molekularne (kilka wzajemnie związanych atomów). Zegar taki nosi nazwę molekularnego.

Zasada działania zegara molekularnego. Zegar molekularny jest dalszym etapem rozwoju opisanego wyżej zegara kwarcowego. Podobnie jak zegar kwarcowy zawiera on generator radiotechniczny wysokiej częstotliwości, stabilizowany kwarcem, który wytwarza drgania elektryczne, sterujące wskaźnikiem czasu. Jednakże w odróżnieniu od zegara kwarcowego w zegarze molekularnym znajduje się jeszcze blok, w którym pobudzone są do drgań molekuly amoniaku, a także urządzenie korygujące częstotliwość drgań generatora radiotechnicznego wysokiej częstotliwości i uzgadniające ją z częstotliwością drgań molekuł amoniaku, tak że ostatecznie ruch wskazówek zegara określony jest przez częstotliwość drgań molekularnych.



Rysunek 29 Schemat zegara molekularnego

Budowa zegara molekularnego jest następująca: cały przyrząd zasilany jest z sieci prądu zmiennego przez zasilacz (ryc. 29). W zasilaczu prąd zmienny z sieci przekształca się w prąd stały o odpowiednim napięciu, potrzebny do pracy przyrządu. Generator wytwarza drgania elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości. Stałość częstotliwości tych drgań jest bardzo ważna dla uzyskania wysokiej dokładności pomiaru czasu; zapewnia ją generator stabilizowany za pomocą kwarcu. W przyrządach tego typu wytwarzane są drgania o częstotliwości kilkuset tysięcy herców, co odpowiada częstotliwości własnej drgań płytki kwarcowej. Generator wysokiej częstotliwości steruje torem wskaźnika czasu, składającego się z dzielnika częstotliwości, synchronicznego silnika elektrycznego i tarczy zegarowej ze wskazówkami. Częstotliwość drgań elektromagnetycznych, wytwarzanych w generatorze wysokiej częstotliwości, jest zbyt duża dla bezpośredniego sterowania jakimkolwiek urządzeniem mechanicznym; zmusiło to konstruktorów do zastosowania dzielnika częstotliwości. Drgania generatora po przejściu szeregu stopni obniżających częstotliwość aż do kilkuset drgań na sekundę, uruchamiają wskaźnik czasu. Prąd niskiej częstotliwości zwiera styki przekaźnika i za pomocą silnika synchronicznego obraca znajdujące się na tarczy wskazówki.

Z kolei generator wysokiej częstotliwości steruje torem zawierającym blok, w którym drgają molekuly amoniaku i który posiada urządzenie korygujące częstotliwość drgań generatora wysokiej częstotliwości. Ponieważ częstotliwość własna drgań molekuł amoniaku wynosi 23870 MHz, a częstotliwość drgań elektromagnetycznych generatora wysokiej częstotliwości jest równa zaledwie kilkuset kilohercom, to między generatorem wysokiej częstotliwości, a blokiem zawierającym amoniak znajduje się wielostopniowy powielacz częstotliwości, który zwiększa częstotliwość prądu zmiennego określoną ilość razy.

Jedną z najważniejszych części zegara molekularnego jest blok, w którym znajdują się molekuly amoniaku w stanie wzbudzonym, wysyłające drgania elektromagnetyczne ultrawysokiej częstotliwości. W istocie blok ten stanowi linię przekazującą energię elektryczną, linia ta ma specjalny charakter wskutek tego, że przy różnych częstotliwościach prądu zmiennego warunki rozchodzenia się energii elektromagnetycznej nie są jednakowe.

Prąd elektryczny niskiej częstotliwości płynie po całej objętości przewodu. Im większy jest przekrój przewodu, tym mniejszy jest jego opór elektryczny i tym mniejsze są straty energii elektromagnetycznej wzdłuż przewodów. Dlatego przy przesyłaniu na odległość prądu zmiennego o częstotliwości technicznej (50 Hz) stosuje się pełne przewody metalowe o odpowiednio dobranej średnicy.

Inaczej jest z prądem zmiennym wysokiej (radiowej) częstotliwości. Prąd ten nie płynie równomiernie przez cały przekrój przewodu, lecz skupia się głównie przy jego powierzchni (zjawisko naskórkowości), wewnętrzna część przewodu okazuje się nieużyteczna. Dlatego też w nadajnikach radiowych cewki wysokiej częstotliwości wykonuje się z pustych rurek.

Dla przekazywania prądów ultrawysokiej częstotliwości (fale metrowe i decymetrowe) ze względu na duże straty energii nie nadaje się ani linia złożona z pary przewodów, ani z rurek. Stosuje się wtedy kabel koncentryczny. Składa się on z przewodu umieszczonego wewnątrz przewodzącej rurki: przekazywana energia elektromagnetyczna zawarta jest między tymi przewodnikami.

W kablu koncentrycznym przy przesyłaniu fal centymetrowych i krótszych powstają jednak zbyt duże straty energii. Aby temu zapobiec, do przesyłania energii elektromagnetycznej używa się pustych rurek o prostokątnym lub kołowym przekroju, zwanych falowodami. Przy określonym stosunku długości fali drgań elektromagnetycznych i przekroju falowodu energia elektromagnetyczna rozchodzi się wzdłuż falowodu z niewielkimi stratami.

W zegarze molekularnym blok w którym zostają wzbudzone molekuly amoniaku, emitujące drgania elektromagnetyczne ultrawysokiej częstotliwości, ma postać rurki miedzianej - falowodu - długości około 10 m, zwiniętej na kształt spirali i napełnionej amoniakiem. Największe wzbudzenie można osiągnąć, kiedy częstotliwość drgań elektromagnetycznych generatora wysokiej częstotliwości jest równa częstotliwości własnej molekul amoniaku. Przy tym znacznie wzrastają straty energii w falowodzie. Zjawiska te wykorzystuje się przy dostrajaniu, korekcji częstotliwości generatora radiotechnicznego wysokiej częstotliwości.

Urządzenie korygujące częstotliwość drgań generatora, zwane dyskryminatorem, porównuje częstotliwość drgań generatora wysokiej częstotliwości z częstotliwością drgań molekul amoniaku i w przypadku istnienia różnicy ich częstotliwości daje „sygnał poprawkowy”. Dyskryminator z kolei połączony jest z generatorem wysokiej częstotliwości i doprowadza do niego „sygnał poprawkowy”, podwyższając lub obniżając częstotliwość jego drgań. Tak więc częstotliwość drgań generatora wysokiej częstotliwości jest uzgadniana z częstotliwością własną drgań molekul amoniaku.

W ostatecznym wyniku w zegarze molekularnym w roli wahadła, tj. przyrządu odmierzającego czas, występują molekuly amoniaku.

W stabilizatorze kwarcowym po długim okresie pracy zmieniają się nieco elektryczne własności styków i w ten sposób z biegiem czasu taki stabilizator kwarcowy trochę się „starzeje”. Molekuly amoniaku nie zmieniają swoich własności i dlatego ich drgania gwarantują niezawodną kontrolę stałości pracy całego układu.

W wypadku uszkodzenia lub zniszczenia danego egzemplarza zegara molekularnego w każdej chwili można wykonać inny, dający zupełnie identyczne wskazania, ponieważ molekuly amoniaku o jednakowym składzie izotopowym są identyczne. A zatem zegar molekularny posiada ważną właściwość: w razie zniszczenia można go dokładnie odtworzyć.

Dalszy rozwój idei wykorzystania drgań molekularnych dla stworzenia wzorców wysokiej częstotliwości (albo czasu) poszedł w kierunku budowy układów „otwartych”, tj. rurek - generatorów drgań elektromagnetycznych ultrawysokiej częstotliwości.

Częstotliwość drgań generatora molekularnego zmienia się z czasem bardzo niewiele. W ciągu sekundy zmiana ta wynosi ok. $10^{-11} - 4 \cdot 10^{-12}$. Stosując generator molekularny jako bezwzględny wzorzec częstotliwości (albo czasu) można osiągnąć dokładność jednej miliardowej (10^{-9}) części mierzonej wielkości, a jako względny wzorzec częstotliwości (czasu) pozwala on osiągnąć dokładność stumiliardowych albo bilionowych ($10^{-11} - 10^{-12}$) części mierzonych wielkości. Stwierdzono, że zegar molekularny zapewnia dokładność milionowych części sekundy na dobę. Zegar molekularny nadaje się szczególnie do przechowywania dokładnego czasu w odstępach między pomiarami astronomicznymi. Jednakże znajduje on znacznie szersze zastosowanie, przede wszystkim jako nowy wzorzec częstotliwości i czasu.

Wspomnieliśmy wyżej o pewnej nierównomierności obrotu Ziemi wokół osi i nierównomierności jej ruchu dokoła Słońca. Wysoka dokładność zegara molekularnego umożliwia dokładniejsze zbadanie tego zagadnienia. Zgodnie z ostatnimi badaniami promieniowania molekuł różnych substancji, pary rubidu pod ciśnieniem 10^{-6} mm słupa rtęci promieniują w podczerwonej części widma w postaci bardzo wąskiej wiązki monochromatycznej o częstotliwości 6834,68 MHz. Istnieją podstawy do przypuszczeń, że z parami rubidu będzie można osiągnąć jeszcze większą dokładność pomiarów czasu i częstotliwości niż z amoniakiem.

8

Pomiary krótkich odstępów czasu

Co dzieje się w ułamku sekundy? Ktoś może mieć wątpliwości, czy warto zajmować się sekundami, a tym bardziej tysięcznymi; milionowymi, miliardowymi czy nawet bilionowymi częściami sekundy? Cóż może się zdarzyć w tak krótkim odstępie czasu?

Kiedy na zawodach sportowych biegacze startują i przecinając powietrze zmiatają do mety - ułamki sekundy decydują o sukcesie. Dlatego dla sprintera sekunda - to bynajmniej nie taki mały odcinek czasu. W ciągu sekundy przebiega on 5-10 m i wykonuje wiele złożonych ruchów, z których każdy zajmuje mu tylko dziesiąte lub setne części sekundy. Od prawidłowości tych ruchów zależy jego sukces i zwycięstwo. Nierzadko sportowcy tracą miesiące, a nawet lata na trening, aby w końcu móc przebiec pewien dystans o kilka sekund lub nawet tylko o kilka dziesiątych części sekundy szybciej.

W silnikach spalinowych w samochodach, traktorach i samolotach wał korbowy dokonuje kilka tysięcy obrotów na minutę. Znajomość procesów zachodzących w czasie każdego obrotu wału jest bardzo istotna dla udoskonalenia pracy silnika i zwiększenia jego sprawności. I tak, w ciągu każdego obrotu silnika czterotaktowego odbywa się: zasysanie, sprężanie, zapłon mieszanki, suw pracy i w końcu wydech. Przy tym w ciągu setnych części sekundy następują gwałtowne zmiany ciśnienia i naprężeń mechanicznych w poszczególnych częściach silnika.

Swego rodzaju „silnikiem spalinowym” z otwartym cyklem jest działo artyleryjskie. W czasie każdego wystrzału zachodzi tylko jeden skok roboczy. Dla zwiększenia zasięgu dział dużo znaczenie ma badanie ruchu pocisku wewnątrz lufy i poza nią. Procesy podlegające badaniu trwają wtedy tysięczne części sekundy, co wymaga użycia przyrządów działających dostatecznie szybko.

Prócz wspomnianych, istnieje jeszcze wiele innych procesów o dużym znaczeniu dla nauki i techniki, trwających tysięczne lub nawet jeszcze krótsze części sekundy. Do takich zjawisk należą np. obciążenia przemienne i udarowe różnych konstrukcji mechanicznych, drgania skrzydła samolotu lub łopatek turbiny itd.

Obecnie opracowano już specjalne metody i przyrządy do rejestrowania szybko przebiegających procesów i pomiarów różnych odstępów czasu, w tym również bardzo krótkich.

Chronograf iskrowy. Zwykły stoper sprężynowy pozwala mierzyć odstępy czasu między dwoma momentami z dokładnością do 0,1 sek.

Przy badaniu jeszcze szybciej przebiegających procesów poważną przeszkodę stanowi bezwładność poszczególnych części przyrządów. Wprowadzenie w ruch ciężkich części lub zmiana kierunku ich ruchu wymaga użycia dużych sił. Należy bowiem pamiętać, że przy badaniu procesów, trwających tysięczne i milionowe części sekundy, nawet części, których masa nie przewyższa ułamków grama, są zbyt „ciężkie”, tj. posiadają zbyt dużą bezwładność. Dlatego mechaniczne urządzenia pomiarowe z ruchomymi częściami - kółkami, strzałkami, nawet najbardziej cienkimi i lekkimi, można stosować tylko przy pomiarach odstępów czasu do dziesiątych i setnych części sekundy. Pomiar jeszcze krótszych odstępów czasu umożliwi kombinowany przyrząd elektromechaniczny - chronograf iskrowy. Przyrząd ten opracowano dla potrzeb artylerii. Do typowych zadań artyleryjskich należy pomiar prędkości pocisków lub ich odłamków. W tym celu należy znać odległość między dwoma punktami na drodze pocisku i umieć zmierzyć czas jego ruchu między tymi punktami. Tak więc, zadanie określenia szybkości ruchu pocisku rozpada się na dwie części: 1) otrzymanie sygnałów o przejściu przez pocisk początku i końca odcinka pomiarowego, 2) pomiar odstępu czasu między tymi dwoma sygnałami.

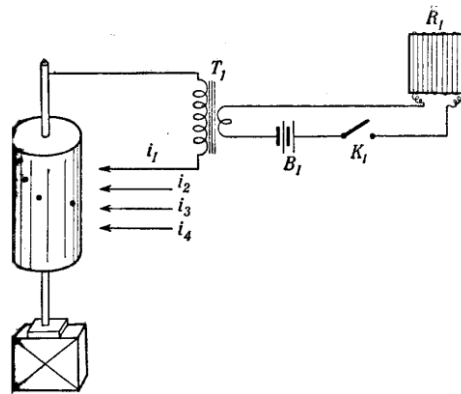
Pierwszą część tego zadania rozwiązują ustawione na określonym odcinku pomiarowym, o długości kilku metrów, odpowiednie urządzenia, sygnalizujące momenty przelotu pocisku. Do tego celu stosuje się różnego rodzaju czujniki: elektryczne, mechaniczne, dźwiękowe i świetlne. Elektryczny czujnik solenoidalny ma postać cewki o dużej średnicy, połączonej z odpowiednim układem elektrycznym. Kiedy pocisk przelatuje wewnątrz takiej cewki, to przez bardzo krótki okres czasu cewka zachowuje się tak, jak gdyby wstawiono w nią rdzeń żelazny i zmienia swoją oporność magnetyczną. Jeśli cewka połączona jest ze źródłem prądu, to nastąpi przy tym gwałtowna zmiana natężenia prądu w obwodzie i spadek napięcia na zaciskach cewki, co wykorzystuje się jako sygnały.

Można też w obu końcach odcinka pomiarowego ustawić ramy z zygzakowato nawiniętym drutem lub taśmą z cynfolii. Ramy te, zw. tarczami Bambergą, włączone są także do obwodu elektrycznego przyrządu pomiarowego. Kiedy pocisk, przelatując przez ramy rozrywa ich uzwojenie, do przyrządu pomiarowego dochodzą odpowiednie sygnały elektryczne.

Do sygnalizowania przelotu pocisku służą także przyrządy elektroakustyczne, specjalne filmy itd.

Po otrzymaniu sygnałów o przejściu przez pocisk określonych punktów na odcinku pomiarowym, należy określić odstęp czasu między tymi sygnałami. Ponieważ szybkość pocisku jest rzędu 500-2000 m/sek, a długość odcinka pomiarowego wynosi 1-2 m, to dla rozwiązania tego zadania należy umieć mierzyć odstępy czasu rzędu tysięcznych części sekundy. Jeśli przy tym żądamy dokładności

pomiarów od 1 do 2 procent, to odpowiedni przyrząd powinien zapewnić dokładność stutysięcznych części sekundy.



Rysunek 30 Cronograf iskrowy

Chronograf iskrowy (ryc. 30) jest przyrządem, w którym obracający się z dużą szybkością posrebrzony, wypolerowany i pokryty cienką równomierną warstwą sadzy bęben metalowy służy za jedną z elektrod, a cienkie ostrze metalowe i_1 umieszczone w pobliżu bębna, spełnia rolę drugiej elektrody w obwodzie elektrycznym. Bęben i ostrze wchodzi w skład obwodu uzwojenia wtórnego podwyższającego transformatora T_1 , w skład którego wchodzi również przerwa wyładowcza. Obwód pierwotnego uzwojenia transformatora składa się ze źródła prądu B_1 i ramy R_1 z nawiniętym drutem lub cynfolią (tarcza Bamberg). Pocisk, przelatujący przez ramę, rozrywa ją i przerywa prąd w uzwojeniu pierwotnym transformatora. W wyniku tego w uzwojeniu wtórnym transformatora indukuje się wysokonapięciowy impuls elektryczny i przez przerwę wyładowczą przeskakuje iskra. Iskra wypala warstwę sadzy i na bębnie pojawia się jasny punkt. Chronograf iskrowy jest połączony z dwoma tarczami. Z kolei każda tarcza ma połączenie z oddzielnym układem elektrycznym i oddzielnym ostrzem, ale oba ostrza umieszczone są naprzeciw tego samego bębna. Kiedy pocisk przebija kolejno obie tarcze, na obracającym się bębnie otrzymujemy dwa jasne punkty. Odległość między tymi punktami wyznacza w pewnej skali mierzony odstęp czasu.

Późniejsze chronografy iskrowe były połączone z kilkoma ramami - tarczami, ustawionymi w odpowiednich punktach trajektorii pocisku i z odpowiednią ilością oddzielnych obwodów elektrycznych i iskierników, umieszczonych naprzeciw wspólnego bębna (i_1, i_2, i_3, i_4 na ryc. 30). Dzięki temu można było mierzyć nie tylko początkową prędkość pocisku, ale także zmiany prędkości w czasie lotu.

W jednej z ostatnich konstrukcji chronografu iskrowego bęben jest umieszczony na wale silnika, który wykonuje 16 000 obrotów na minutę. Przyrząd ma cztery oddzielne obwody elektryczne i cztery iskierniki. Odległość 1 mm między znakami na bębnie odpowiada $1/100\,000$ sek., co jest granicą czułości przyrządu. Chronograf iskrowy pozwala więc mierzyć krótkie odstępy czasu mimo że jego istotnym elementem jest szybko obracający się ciężki bęben. Czym to się tłumaczy? Dlaczego bezwładność ciężkich, poruszających się z wielką szybkością części uniemożliwia pomiar krótkich odcinków czasu w stoperach, a nie przeszkadza w chronografie iskrowym?

Przyczyną tego jest fakt, że w stoperach prędkości poszczególnych części są zmienne, tzn. że w procesie samego pomiaru części te trzeba uruchamiać i zatrzymywać. Natomiast w chronografie iskrowym bęben uruchamia się przed rozpoczęciem pomiaru, a w procesie pomiaru jego szybkość nie ulega zmianie.

Dalszy wzrost dokładności chronografu iskrowego wymaga zwiększenia szybkości lub rozmiarów bębna. Oba te sposoby stwarzają jednak poważne trudności. Wskutek tego o wiele większe zastosowanie znalazły przyrządy elektryczne i elektronowe.

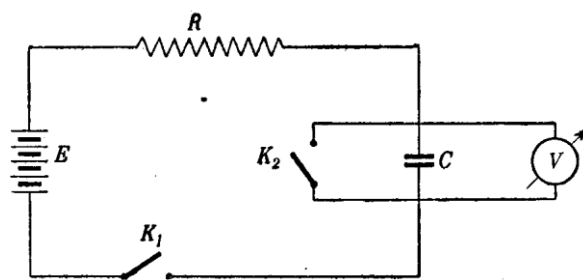
Układ z kondensatorem. Im szybciej przebiega badane zjawisko, tym krótsze odcinki czasu trzeba mierzyć przy jego badaniu. Im krótsze są mierzone odstępy czasu, tym większe szybkości muszą występować w przyrządzie pomiarowym.

Przyrządy elektromechaniczne do pomiarów czasu z wolniej lub szybciej poruszającymi się częściami mechanicznymi stosujemy przy pomiarach odstępów czasu rzędu tysięcznych, a w każdym razie nie krótszych niż stutysięczna część sekundy. Przy pomiarach krótszych odstępów czasu znajdują zastosowanie przyrządy elektryczne; szybkość rozchodzenia się sygnałów elektrycznych jest znacznie większa od prędkości ruchu części w dowolnych przyrządach mechanicznych.

W przyrządzie do pomiarów krótkich odstępów czasu, o którym będzie mowa, zamiast szybkiego ruchu części mechanicznych wykorzystuje się znacznie szybsze przemieszczenia ładunków elektrycznych. Przyrząd ten działa podobnie jak zegar wodny.

W zegarze wodnym woda z określoną szybkością wycieka przez w wąski otwór ze zbiornika do naczynia pomiarowego z podziałką. Ilość wody nagromadzona w naczyniu pomiarowym służy jako miara czasu. Zamiast znaków na oznaczenie poziomu wody w naczyniu pomiarowym umieszcza się proporcjonalną skalę czasu.

W opisywanym przyrządzie elektrycznym do pomiarów czasu rolę wody spełnia ładunek elektryczny, rolę zbiornika - bateria elektryczna E , a odpowiednikiem naczynia pomiarowego jest kondensator elektryczny C (ryc. 31). Kondensator C ładuje się przez oporność R . Zamiast mierzyć ilość wody w naczyniu pomiarowym określamy w tym przyrządzie potencjał, do którego naładował się kondensator. Do tego celu służy woltomierz V , włączony równolegle z kondensatorem. Zamykając wyłącznik K_2 możemy rozładować kondensator przed rozpoczęciem doświadczenia.



Rysunek 31 Schemat układu z kondensatorem

Do włączania i wyłączania całego układu służą różnego rodzaju szybko działające urządzenia elektryczne, oznaczone umownie na schemacie (por. ryc. 31) jako wyłączniki K_1 .

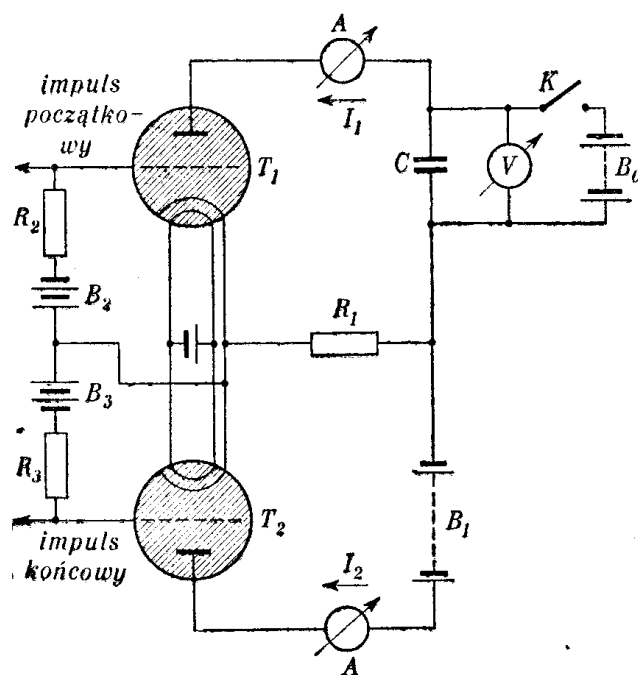
W zegarze wodnym szybkość wyciekania wody z naczynia górnego do dolnego nie jest stała, ponieważ w miarę opróżniania się górnego naczynia zmniejsza się w nim ciśnienie hydrostatyczne wody. W wyniku tego skala czasu na dolnym naczyniu pomiarowym nie jest równomierna.

W rozważanym przez nas przyrządzie nietrudno jest uzyskać stałe napięcie źródła. Wystarczy w tym celu zastosować baterię o dostatecznie dużej pojemności, wtedy w przeciągu krótszego lub dłuższego czasu napięcie na jej zaciskach nie będzie się zmieniać. Ale nawet przy stałym napięciu źródła prądu kondensator ładuje się nierównomiernie: początkowo szybko, potem coraz wolniej, wskutek czego otrzymamy nierównomierną skalę czasu. Trudność tę można usunąć kosztem pewnego

skomplikowanego układu. Wprowadzając do układu jeszcze jeden element - specjalną lampę, ograniczającą natężenie prądu ładowania, możemy otrzymać liniową skalę czasu.

Oczywiście, do pomiaru czasu możemy wykorzystać zarówno proces ładowania, jak i rozładowania kondensatora. Nie odgrywa to jednak istotnej roli. Ważne jest co innego: przy pomiarze krótkich odstępów czasu podczas ładowania lub rozładowania kondensatora przez cały czas pracy przyrządu winien płynąć stały prąd ładowania (lub rozładowania), a wszystkie przełączenia powinny zachodzić dostatecznie szybko. Można to osiągnąć wprowadzając do układu lampy jonowe (gazowane). Lampa gazowana (tyratron) posiada bardzo cenną własność: pracuje na podobieństwo zaworu: albo nie przepuszcza prądu w ogóle albo przepuszcza prąd o określonym natężeniu.

W jednym z układów tego typu (ryc. 32) po naładowaniu kondensatora pomiarowego C przez baterię B_0 otwiera się wyłącznik K. Wtedy przy zablokowanych (zatkanych) lampach T_1 , T_2 kondensator C praktycznie nie rozładowuje się, ponieważ oporność lamp jest bardzo wielka. Pierwszy przychodzący z zewnątrz sygnał, odpowiadający początkowi mierzonego procesu, gwałtownie włącza, jak się często mówi, „zapala” pierwszą lampę (tyratron) T_1 . Przy tym opór tyratronu silnie się zmniejsza i kondensator pomiarowy C rozładowuje się przez tyratron i oporność R_1 . Drugi sygnał zewnętrzny, odpowiadający końcowi mierzonego procesu, zapalając tyratron T_2 , gasi tyratron T_1 i tym samym kondensator C przestaje się rozładowywać.



Rysunek 32 Schemat układu do pomiaru krótkich odstępów czasu za pomocą kondensatora i lamp jonowych

W tym układzie dzięki stałemu natężeniu prądu rozładowania, ładunek kondensatora zmniejsza się równomiernie i wartość potencjału kondensatora okazuje się proporcjonalna do czasu rozładowania. Woltomierz V, służący do pomiaru potencjału kondensatora, można wyskalować bezpośrednio w jednostkach czasu.

Opisany przyrząd posiada skalę liniową i pozwala mierzyć odstępy czasu od $5 \cdot 10^{-5}$ do 10^{-2} sek. z dokładnością do 10%.

Tego typu przyrządy stosuje się przy pomiarach prędkości ruchu ciał, do określania czasu potrzebnego na stopienie bezpieczników itd.

Przyrządy elektryczne, wykorzystujące do pomiarów czasu proces ładowania lub rozładowania kondensatora, nadają się do niezbyt dokładnych pomiarów krótkich odstępów czasu, rzędu tysięcznych i stutysięcznych części sekundy.

Obecnie istnieją znacznie bardziej doskonałe metody do pomiaru jeszcze krótszych odstępów czasu, które opierają się na wykorzystaniu różnego rodzaju przyrządów jonowych, elektronowych i elektronopromieniowych. Za pomocą takich przyrządów udało się zmierzyć odstępy czasu milionowych (10^{-6} sek.), miliardowych (10^{-9} sek.), a nawet bilionowych części sekundy (10^{-12} sek.).

Jednakże przed przystąpieniem do ich opisu, rozważymy jeszcze jedno zadanie, proste przy pomiarze niezbyt krótkich odcinków czasu, ale dość złożone, kiedy mamy do czynienia z niezwykle szybkimi procesami. Jest to zadanie uruchomienia i zatrzymania przyrządu pomiarowego.

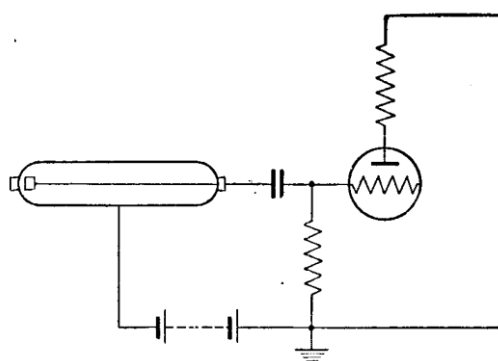
Czujniki. Zadaniem czujników jest reagowanie na odpowiednie zjawisko i przesyłanie sygnału uruchomienia lub zatrzymania do przyrządu pomiarowego.

Sędziowie sportowi przy określaniu czasu, w ciągu którego sportowiec przebiegł pewien dystans, posługują się stoperem. Czujnikiem są wtedy oczy i palce sędziów, a dokładność, jaką można osiągnąć przy takich pomiarach, wynosi dziesiąte części sekundy. W ostatnich latach nawet sportowców przestały zadowalać tego rodzaju czujniki. Sędziowie z racji swoich obowiązków powinni być obiektywni i bezstronni, ale jeden z nich może być flegmatykiem i zawsze naciskać przycisk stopera o moment później niż trzeba, inny będąc cholerykiem, będzie robił to nieco wcześniej. Tak więc błąd może powstać jeszcze przed uruchomieniem przyrządu pomiarowego. Sytuacja jest podobna jak przy wyznaczaniu dokładnego czasu za pomocą instrumentu przejściowego. Dokładność pomiaru można zwiększyć, uwzględniając równanie osobowe obserwatora. Lepsze jednak wyniki uzyska się stosując zapis obiektywny. Dlatego również i w tej dziedzinie pomiarów jako czujników używa się coraz częściej urządzeń automatycznych: optycznych, elektrycznych, fotoelektrycznych.

W zależności od typu obserwowanego zjawiska i charakteru rozwiązywanego zadania stosuje się różne czujniki, np. tarcze Bamberga, rozrywane przez przelatujący pocisk, wielkie cewki indukcyjne, przez które przepływa prąd elektryczny, urządzenia fotoelektryczne, sygnalizujące przerwanie wiązki światła przez przelatujący pocisk itd. Na przykład rozwiązując jedno z zadań biologicznych, polegające na określeniu odstępu czasu, po upływie którego zwierzę reaguje na bodziec elektryczny, postępuje się w następujący sposób: sygnał elektryczny, oznaczający początek pomiaru, podaje się równocześnie do badanego zwierzęcia i przyrządu pomiarowego, sygnał wyłączenia przyrządu podaje czujnik reagujący na odpowiedni ruch zwierzęcia (drgnięcie, odsunięcie łapy, przy których otwiera się obwód elektryczny itd.), a następnie przekształca go w sygnał elektryczny.

Przy badaniu procesów jądrowych i zjawiska promieniotwórczości stosuje się różnego rodzaju liczniki promieniowania jonizującego. Rozpatrzmy dwa tego rodzaju najczęściej stosowane liczniki.

Licznik Geigera-Müllera ma zazwyczaj kształt wypełnionej gazem rurki z dwoma elektrodami. Jedną z elektrod jest cienki, metalowy drucik, naciągnięty wzdłuż osi rurki, drugą - wewnętrzną metalizowaną powierzchnią szklanej rurki albo walec metalowy. Licznik wypełniony jest gazem pod obniżonym ciśnieniem (argonem lub argonem z domieszką par alkoholu albo niektórych związków bromu i chloru). Do elektrod licznika doprowadzone jest ze specjalnej baterii wysokie napięcie rzędu 400-1000 V (ryc. 33).



Rysunek 33 schemat włączania licznika Geigera-Müllera

Naładowane cząstki α lub β , emitowane przez substancje promieniotwórcze, padając do wnętrza licznika jonizują neutralne atomy gazu, wypełniającego licznik. Każda naładowana cząstka zderzając się z atomami neutralnymi tworzy na swojej drodze pewną ilość par jonów, tj. dodatnio i ujemnie naładowanych cząstek. Elektrony, posiadające ładunek ujemny, zdążają do dodatnio naładowanego drucika wewnątrz licznika, a dodatnie jony - do ujemnie naładowanego walca.

Pole elektryczne, wytworzone między elektrodami licznika, spełnia tę samą rolę dla cząstek naładowanych, co pochyłona płaszczyzna dla ważkich kul - przyspiesza ich ruch. Zmierzając ku umieszczonego w środku rurki drucikowi, elektrony zwiększają swoją prędkość i nabierają energii wystarczającej do tego, by jonizować napotkane atomy neutralne. W ten sposób powstają jony wtórne. Wtórne elektrony na drodze do drucika licznika również ulegają przyspieszeniu i same z kolei jonizują atomy neutralne, stwarzając znów nowe jony itd. Tak więc wewnątrz licznika zachodzi „rozmnożenie gazowe” cząstek.

Prąd elektryczny - to ruch naładowanych cząstek. Natężenie prądu elektrycznego na wyjściu licznika jest tym większe, im więcej naładowanych cząstek bierze udział w tym ruchu i im krótszy jest czas dojścia tych cząstek do elektrody. Dzięki „rozmnożeniu gazowemu” ogólna ilość cząstek naładowanych okazuje się znacznie większa od ilości cząstek pierwotnych, a cały opisany proces ruchu elektronów i gromadzenia się ich na druciku licznika trwa mniej niż milionową część sekundy (10 sek.). W rezultacie wielkość sygnału na wyjściu licznika jest rzędu kilku lub kilkudziesięciu woltów.

Jony dodatnie są kilka tysięcy razy cięższe od elektronów i dlatego ich ruch ku ujemnie naładowanemu cylindrowi licznika zachodzi znacznie wolniej i trwa około trzech dziesięciotysięcznych sekundy ($3 \cdot 10^{-4}$ sek.). Dlatego też impuls prądu elektrycznego w liczniku Geigera-Müllera ma kształt charakterystyczny dla przyrządów wypełnionych gazem - stroma krawędź narastania sygnału i nieznacznie pochyły jego spadek. W czasie potrzebnym na przejście jednego sygnału licznik nie reaguje na sygnały następne (martwy czas licznika).

Należy zauważyć, że przy zastosowaniu licznika Geigera-Müllera do liczenia padających na niego cząstek naładowanych czas powrotu licznika do stanu normalnego po zarejestrowaniu kolejnej cząstki ogranicza szybkość działania licznika. W naszym przypadku, kiedy liczniki Geigera-Müllera dają tylko sygnały uruchomienia i zatrzymania przyrządu pomiarowego, o szybkości pracy przyrządu decyduje nie czas trwania całego sygnału, lecz tylko czas jego narastania. Narastanie sygnału trwa nie dziesięciotysięczne, lecz milionowe części sekundy.

Przy rejestrowaniu promieniowania γ licznik Geigera-Müllera działa nieco inaczej. Promienie γ są postacią drgań elektromagnetycznych i nie mają ładunku elektrycznego. Trafiając w licznik kwanty promieniowania γ przekazują swoją energię elektronom atomów materiału ścianki licznika i wybijają je z atomów. Część tych elektronów dostając się do objętości czynnej licznika jonizuje na swojej

drodze neutralne atomy gazu i zapoczątkowuje lawinę jonową. W rezultacie na wyjściu licznika otrzymujemy sygnał prądu elektrycznego.

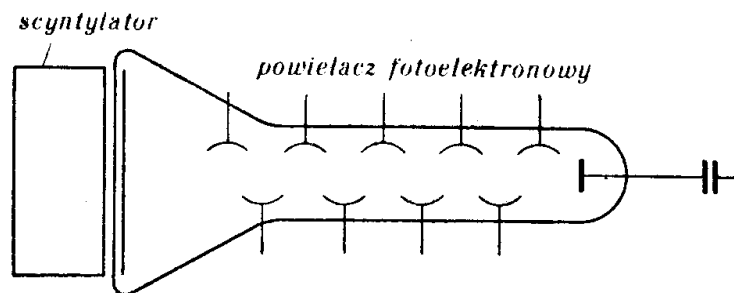
Dla powstania lawiny elektronowej w liczniku Geigera-Müllera wystarczy pojawienie się choćby jednej pary jonów. Tym tłumaczy się wysoka czułość licznika, jego zdolność odróżniania poszczególnych naładowanych cząstek i poszczególnych kwantów promieniowania tym także tłumaczy się fakt, że licznik Geigera-Müllera nie rozróżnia rodzajów promieniowania, każde z nich wytwarza na wyjściu sygnały o jednakowym natężeniu.

Aby wyjaśnić granicę dokładności, jaką można osiągnąć stosując liczniki Geigera-Müllera jako urządzenia uruchamiające, rozważmy jeszcze inny aspekt ich pracy. Liczniki sterujące uruchomieniem i zatrzymaniem przyrządu pomiarowego dają impulsy elektryczne z określoną stromością krawędzi. Przyrząd pomiarowy można uruchomić, podając na jego wejście sygnały, których amplituda przewyższa pewną wartość. Nim sygnał w liczniku osiągnie tę wartość upłynie pewien czas. Tak więc od chwili dostania się cząstki elementarnej do licznika do momentu uruchomienia przyrządu pomiarowego mija pewien odstęp czasu. Taki sam czas upływa od momentu dostania się cząstki naładowanej do drugiego licznika do momentu zatrzymania się przyrządu pomiarowego.

Czy wspomniane opóźnienie przy uruchomieniu i zatrzymaniu przyrządu pomiarowego ma wpływ na dokładność pomiaru czasu?

Łatwo zauważyć, że jeśli oba opóźnienia są sobie równe, to ich występowanie nie wpływa na dokładność pomiaru. Strata dokładności wynika tylko z niekontrolowanej różnicy opóźnień pierwszego i drugiego czujnika. W określonych warunkach różnica ta nie przekracza dziesiątej części czasu narastania sygnału w liczniku, tj. dziesięciomilionowej części sekundy.

W wielu przypadkach to wystarcza, ale istnieją procesy trwające miliardowe (10^{-9} sek.) i nawet bilionowe części sekundy (10^{-12} sek.). Do mierzenia takich procesów potrzebne są jeszcze szybsze urządzenia uruchamiające. Jednym z nich jest licznik scyntylacyjny.



Rysunek 34 Schemat licznika scyntylacyjnego

Licznik scyntylacyjny składa się z luminoforu - kryształu, w którym pod wpływem promieniowania radioaktywnego powstaje błysk światła, i powielacza fotoelektronowego, przekształcającego to światło w impuls prądu (ryc. 34). Różne typy luminoforów mają niejednakowy czas poświaty. Istnieją takie luminofory, których czas poświaty jest równy milionowym częściom sekundy (luminofory nieorganiczne) i takie, których czas poświaty wynosi tylko stumilionowe, a nawet miliardowe części sekundy. Do tych ostatnich należą: naftalen z czasem poświaty $8,1 \cdot 10^{-8}$ sek., antracen $3 \cdot 10^{-8}$ sek., terfenyl $8,5 \cdot 10^{-9}$ sek., stilben $7 \cdot 10^{-9}$ sek.

Błyski światła powstałe w luminoforze w wyniku zderzeń z pojedynczymi naładowanymi cząstkami lub poszczególnymi kwantami promieniowania γ są bardzo słabe i krótkotrwałe. Aby wykorzystać błyski światła do sterowania przyrządem pomiarowym, należy uprzednio przekształcić je w sygnały

elektryczne o dostatecznie dużym natężeniu, starając się jednocześnie w miarę możliwości nie utracić dokładności pomiaru.

Do przekształcania sygnałów świetlnych w impulsy elektryczne służy komórka fotoelektryczna próżniowa. W komórce tej kwanty światła wybijają z warstwy światłoczułej elektrony, które następnie gromadzą się na dodatnio naładowanej anodzie komórki fotoelektrycznej. Ponieważ ruch elektronów zachodzi z dużą szybkością (ok. 10^9 cm/sek.), a długość komórki fotoelektrycznej jest nieznaczna (kilka centymetrów) i wszystkie elektrony muszą pokonać tę samą drogę, to czas ich przelotu jest niewielki (ok. 10^{-9} sek.), a co najważniejsze - stały. Sygnał otrzymany na wyjściu komórki fotoelektrycznej jest zbyt słaby, aby mógł bezpośrednio sterować przyrządem pomiarowym. Należy uprzednio go wzmocnić miliony i setki milionów razy. Do tego celu nie nadają się zwykłe wzmacniacze radiotechniczne, składające się z lamp elektronowych, oporników i kondensatorów, ponieważ w takich wzmacniaczach czas przejścia sygnału jest zbyt długi, a co najważniejsze, niezupełnie stały. Znacznie wygodniejszy jest powielacz elektronowy o katodach wtórnych, połączony bezpośrednio z fotoelektryczną komórką.

W powielaczu fotoelektronowym pole elektryczne kieruje fotoelektrony wybite przez światło z powierzchni katody fotokomórki na szereg elektrod. Każdy elektron przy uderzeniu o elektrodę, pokrytą specjalnie czułą warstwą, wybija kilka elektronów. Po przejściu przez szereg elektrod w danej lampie strumień elektronów wzrasta miliony i setki milionów razy i na wyjściu powielacza fotoelektronowego otrzymujemy sygnał o dostatecznym natężeniu.

Podobnie jak w komórce fotoelektrycznej czas przelotu elektronów jest tu niewielki (ok. $2 \cdot 10^{-8}$ sek) i prawie stały; jego nierównomierność dla poszczególnych elektronów nie przewyższa połowy miliardowej części sekundy ($0,5 \cdot 10^{-9}$ sek.). Ta właśnie wielkość określa dokładność danego czujnika.

Wybór typu czujnika zależy od charakteru rozwiązywanego problemu i żądanej dokładności pomiarów. Jeśli np. pewne zadanie wymaga przeprowadzenia pomiarów odstępów czasu rzędu dziesięciotysięcznych części sekundy z dokładnością do 1% albo stutysięcznych części sekundy z dokładnością do 10%, to przyrząd powinien mieć dokładność milionowych części sekundy. W przeciwnym razie wysoka dokładność przyrządu pomiarowego okaże się bezużyteczna. Zupełnie tak samo mija się z celem stosowanie czujnika o wysokiej dokładności, jeśli przyrząd pomiarowy nie ma dokładności co najmniej tego samego rzędu.

Przyrząd z układem przeliczającym. Jednym z urządzeń, służących do pomiaru krótkich odstępów czasu, jest przyrząd z układem przeliczającym. W ciągu ostatnich 15-20 lat znalazł on szerokie zastosowanie.

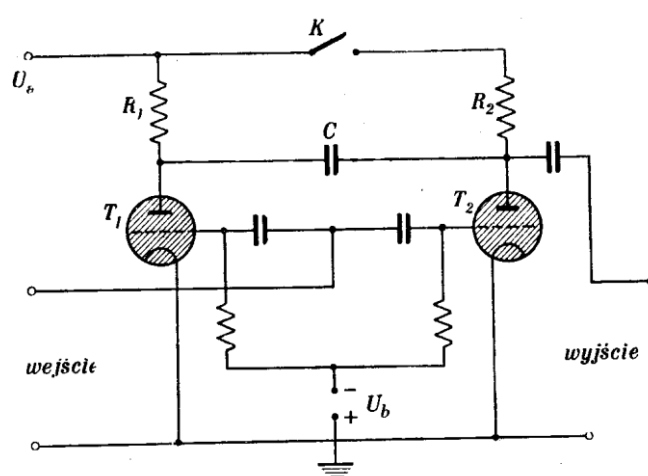
Przyrząd z układem przeliczającym składa się z następujących podstawowych bloków: generatora wzorcowego, wytwarzającego sygnały z określoną częstotliwością, urządzenia przeliczającego, określającego ilość sygnałów wytworzonych w danym odstępie czasu i mechanizmu uruchamiającego. Mechanizm uruchamiający podłącza generator wzorcowy do układu przeliczającego po pojawieniu się pierwszego sygnału i odłącza po przejściu drugiego.

W istocie jest to sekundomierz, w którym zamiast wahadła, poruszającego się z odpowiednią częstotliwością, sygnały o dobranej częstotliwości wytwarza generator wzorcowy, zamiast mechanizmu zegarowego, liczącego ruchy wahadła, ilość sygnałów określa układ przeliczający, zbudowany na lampach elektronowych lub jonowych, a zamiast przycisku włączającego, mechanizm uruchamia wyłącznik elektronowy lub jonowy.

Rozważmy kolejno poszczególne bloki tego przyrządu. Generator wzorcowy musi odpowiadać wymaganiom dotyczącym stabilności częstotliwości i kształtu wytwarzanych sygnałów. Dostatecznie wysoką stałość częstotliwości drgań zapewnia kryształ kwarcu. Drugie zadanie rozwiązuje specjalny generator impulsów. Drgania sinusoidalne o wysokiej częstotliwości, wytwarzane przez ten przyrząd, przekształcane są początkowo na serię równoodległych sygnałów tej samej częstotliwości, a potem na impulsy prostokątne o standardowym kształcie, amplitudzie i częstotliwości.

Jeśli częstotliwość drgań generatora wzorcowego wynosi 100 000 Hz, to długość jednego okresu jest równa stutysięcznej części sekundy. Jest to właśnie najmniejszy odstęp czasu, jaki może zmierzyć dany przyrząd. Ten minimalny odstęp czasu zależy oczywiście od częstotliwości drgań generatora.

Żadne urządzenie mechaniczne nie jest w stanie liczyć sygnałów o częstotliwości tysięcy i setek tysięcy drgań na sekundę. Do tego celu służą układy przeliczające z lampami jonowymi i elektronowymi.



Rysunek 35 Schemat układu spustowego na tyratronach

Najprostszy układ przeliczający, zbudowany na lampach jonowych, składa się z dwu tyratronów, połączonych na zasadzie układu spustowego z dwoma stanami stabilnymi: kiedy jeden tyratron znajduje się w stanie przewodzenia, przez drugi prąd nie płynie; stan taki trwać może nieograniczenie długo (ryc. 35). Przyjmijmy, że w pewnym momencie tyratron T_1 przewodzi, a tyratron T_2 jest zablokowany (zatkany). Stan ten można osiągnąć otwierając początkowo wyłącznik K , a następnie zwiernając go. Przy otwarciu wyłącznika prąd przestaje płynąć, przez tyratron T_2 , a przy zamknięciu tyratron w dalszym ciągu nie przewodzi, ponieważ bateria U_b dostarcza na jego siatkę napięcie ujemne. W wyniku spadku napięcia na oporze obciążenia R_2 , napięcie na anodzie odetkanego tyratronu T_2 wynosi zaledwie 10 - 20 V. Napięcie na anodzie zatkanego tyratronu T_2 jest równe napięciu źródła zasilania U_a . Zatem kondensator C jest naładowany do napięcia bliskiego wartości U_a . Pojawienie się na wejściu układu sygnału ujemnego nie zmienia w niczym sytuacji, ponieważ tyratron T_2 jest zablokowany, a ujemny potencjał na jego siatce nie może zablokować tyratronu T_1 . Przy pojawieniu się na wejściu układu sygnału dodatniego dostatecznej amplitudy przez tyratron T_2 zaczyna płynąć prąd. W wyniku tego potencjał na jego anodzie spada do kilkudziesięciu woltów i kondensator C rozładowuje się przez tyratron T_2 i opór obciążenia R_1 , ale jednocześnie spada potencjał na anodzie tyratronu T_1 i prąd przez lampę przestaje płynąć. Powiadamy wtedy, że następuje „przeskok układu”. Jeśli na wejściu układu pojawi się następny sygnał, to ponownie otwiera się pierwszy tyratron, a zatyka drugi, tj. układ „przeskakuje” jeszcze raz. Ogólnie układ „przeskakuje” tyle razy, ile sygnałów pojawiło się na jego wejściu. Jeśli prześledzimy pracę jednego z tyratronów, np. drugiego, to zauważymy, że w odstępach czasu, w ciągu którego na wejściu układu

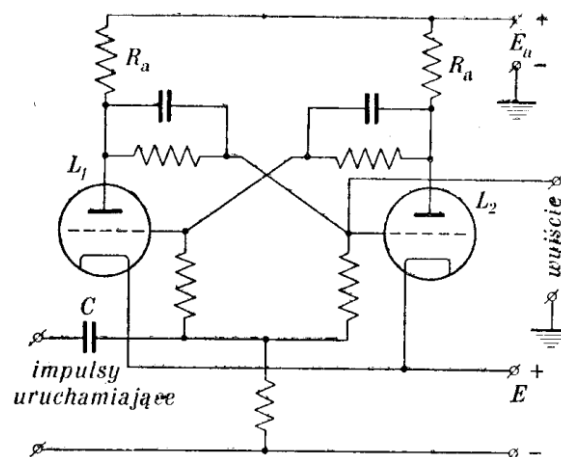
sygnał pojawił się 100 razy, lampa przewodziła 50 razy. Tak więc układ spustowy z dwoma stanami stabilnymi dokonuje przeliczenia w układzie dwójkowym. Łatwo zauważyć, że łącząc wyjście jednego układu spustowego z wejściem następnego, można otrzymać przeliczenie na czwórki. Siedząc drugą lampę drugiego układu spustowego zauważymy, że w czasie pojawienia się na wejściu 100 sygnałów tyratron znajdował się 25 razy w stanie przewodzenia. Zespół trzech układów spustowych, odpowiednio ze sobą połączonych, pozwala otrzymać przeliczenie na ósemki, zespół czterech układów spustowych - przeliczenie na szesnastki itd.

Tak więc układ złożony, składający się z serii układów spustowych, „zapisuje” liczby w systemie binarnym, ponieważ każdy kolejny stopień układu daje wartość dwukrotnie większą niż poprzedni.

W układzie przeliczającym, opracowanym przez L. N. Korablewa, zastosowano miniaturowe tyratrony (typu MTCh-90), nie wymagające żarzenia i pobierające małą moc. Kiedy taki tyratron znajduje się w stanie przewodzenia, pojawia się w nim widoczne gołym okiem świecenie; pozwala to wykorzystać lampę nie tylko jako element układu, ale także jako urządzenie sygnalizujące. Wspomniany aparat Korablewa składa się z sześciu układów spustowych, przelicza więc na 64. Druga lampa ostatniego układu spustowego odlicza każdy 64-ty sygnał i za każdym razem uruchamia licznik elektromechaniczny, a lampy poprzednich układów spustowych odliczają sygnały pośrednie.

Ten przenośny przyrząd pobiera tylko nieznaczny ilość energii elektrycznej.

Istotną wadą układów przeliczeniowych, zbudowanych na lampach gazowanych (tyratronach), jest zbyt mała szybkość ich działania. Przejście lampy ze stanu przewodzenia do stanu nieprzewodzenia, tj. dejonizacja, trwa kilka dziesięciotysięcznych części sekundy. Aby uchronić układ od błędnych wskazań, należy zapewnić mu takie warunki pracy, przy których czas przejścia od jednego stanu pracy układu do drugiego nie byłby mniejszy od czasu dejonizacji. Tak więc szybkość liczenia tych układów nie może przekraczać kilkuset sygnałów na sekundę.



Rysunek 36 Schemat układu spustowego z dwoma stanami stabilnymi zbudowanego na lampach elektronowych

Znacznie większą szybkość liczenia możemy osiągnąć w układzie spustowym zbudowanym na lampach elektronowych (ryc. 36). Układ pracuje w następujący sposób. Jeśli początkowo lampa L_1 przewodzi, a lampa L_2 nie przewodzi, to pojawiający się na wejściu sygnał dodatni prawie nie zmienia dodatniego potencjału siatki lampy odetkanej, ale gwałtownie zwiększa potencjał siatki zatkanej lampy i odblokowuje ją. Przy tym przez lampę L_2 zaczyna płynąć prąd i powstały w wyniku tego spadek napięcia na oporności obciążenia lampy R_a powoduje obniżenie się napięcia na jej anodzie. Ponieważ anoda lampy L_2 jest połączona z siatką lampy L_1 ; to spadek napięcia na anodzie lampy L_2 powoduje odpowiednie zmniejszenie się potencjału siatki lampy L_1 i w rezultacie lampa ta zostaje

zablokowana. Tak więc zachodzi „przeskok” układu, po czym układ pozostaje stabilny aż do nadejścia nowego sygnału.

W układach przeliczeniowych, składających się z wielu układów spustowych, pracujących na lampach elektronowych, można ułatwić odczytywanie przez przyłączenie neonówki do każdego układu spustowego; neonówka zapala się, kiedy odpowiednia lampa układu zaczyna przewodzić. Dzięki dużej szybkości procesów elektronowych budowa szybko działających układów przeliczeniowych z lampami elektronowymi nie sprawia trudności. Stosując małe oporności obciążenia i wybierając lampy z małymi pojemnościami międzyelektrodowymi, można otrzymać dla takich układów czas rozdzielczy rzędu mikrosekundy, a nawet ułamków mikrosekundy.

Zazwyczaj posługujemy się nie systemem binarnym, lecz dziesiętnym. Do przeliczania na system dziesiętny służy dekadowy pierścieniowy układ przeliczający. W takim układzie pierwszy sygnał na wejściu odtyka pierwszą lampę, drugi sygnał z kolei zatyka pierwszą lampę, a odtyka drugą... Dziesiąty sygnał na wejściu znów odtyka pierwszą lampę itd. Układ tego rodzaju przelicza na dziesiątki.

Ilość lamp w takim układzie jest jednak zbyt duża. Bardziej korzystny jest blok, złożony z układów przeliczających na piątki i dwójki, który jako całość również przelicza na dziesiątki. Gdy połączymy ostatnią lampę dekadowego układu przeliczającego z jeszcze jednym dekadowym układem przeliczającym, otrzymamy przeliczenie na setki. Po dodaniu trzeciego dekadowego układu przeliczającego będziemy mogli przeliczać na tysiące itd. Odpowiedni szybko działający przełącznik elektronowy lub jonowy podłącza układ przeliczający do generatora wzorcowego w momencie pojawienia się pierwszego sygnału, a odłącza z nadejściem drugiego sygnału.

Całe urządzenie pomiarowe łącznie z układem przeliczającym pracuje w sposób następujący. Przed rozpoczęciem pomiaru należy włączyć generator wzorcowy i doprowadzić do stanu pracy czujniki. Czujniki reagują na początek i koniec mierzonego zjawiska i przesyłają sygnały sterujące na wejście przyrządu pomiarowego, odpowiednio przyłączając i odłączając generator wzorcowy. Między tymi momentami na wejściu układu przeliczającego pojawi się określona ilość impulsów od generatora wzorcowego. Ilość tych impulsów jest miarą długości odpowiedniego odstępu czasu.

Jeśli do urządzenia przeliczającego dojdzie tylko jeden impuls, to po odłączeniu generatora prąd będzie płynął tylko przez pierwszą lampę pierwszej dekady. Jeżeli na wejście układu przeliczającego podamy siedem impulsów, to po odłączeniu generatora w stanie przewodzenia będzie znajdować się siódma lampa pierwszej dekady. Piętnaście impulsów na wejściu spowoduje przepływ prądu przez pierwszą lampę drugiej dekady i piątą lampę pierwszej dekady, ponieważ dziesiąty impuls po odetkaniu dziesiątej lampy pierwszej dekady odtyka również pierwszą lampę drugiej dekady, a następne pięć impulsów wprowadza w stan przewodzenia piątą lampę pierwszej dekady. A zatem wiedząc, które lampy w poszczególnych dekadach znajdują się w stanie przewodzenia po odłączeniu generatora, możemy określić długość mierzonego odstępu czasu. Jeśli po dokonaniu pomiaru okaże się, że w piątej dekadzie układu przeliczającego prąd płynie przez trzecią lampę, w czwartej dekadzie - przez ósmą, w trzeciej - przez piątą, w drugiej - przez pierwszą, a w pierwszej - przez siódmą, to wnioskujemy stąd, że na wejście układu podano 38 517 impulsów. Ostatni wynik możemy łatwo otrzymać wiedząc, że lampy piątej dekady reagują na każdy dziesięciotysięczny sygnał, lampy czwartej dekady - na każdy tysięczny sygnał itd. Jeśli przy tym częstotliwość generatora wynosi 100 000 Hz, to każdy sygnał przychodzi na wejście układu przeliczającego co stutysięczną część sekundy i zmierzony przez nas odstęp czasu wynosi 0,38517 sek.

Przyrządy do pomiaru krótkich odstępów czasu z układami przeliczającymi, pracującymi na lampach elektronowych okazały się przydatne do mierzenia małych odstępów czasu aż do milionowych i nawet dziesięciomilionowych części sekundy.

W ostatnich latach opracowano inny elektronopromieniowy typ urządzeń przeliczających. W przyrządach tego rodzaju pracę całej dekady zastępuje jedna lampka elektronopromieniowa specjalnej konstrukcji. Takimi urządzeniami zajmujemy się w rozdziale następnym.

9

Badanie procesów szybkozmiennych

Jak zapisujemy procesy szybkozmiennne. Przy rozwiązywaniu wielu zadań naukowych i technicznych trzeba mierzyć odstępy czasu między dowolnie wybranymi momentami danego zjawiska. W innych przypadkach, np. podczas obserwacji błyskawicy, przy badaniu pracy silnika itd. potrzebny jest ciągły zapis zmian poszczególnych wielkości w czasie.

Dla zapisu niezbyt szybkich procesów można stosować różnego rodzaju przyrządy piszące. Przyrząd taki ma dwie zasadnicze części: urządzenie piszące i mechanizm przesuwu taśmy.

Urządzenie piszące ma kształt lekkiej ramki, umieszczonej, podobnie jak w elektrycznych przyrządach pomiarowych, w polu silnego magnesu. Pod wpływem prądu, przepływającego przez ramkę, powstają siły, które obracają ją o pewien kąt, tym większy im większa jest wartość natężenia prądu.

Zamiast strzałki-wskazówki do ruchomej ramki przymocowane jest zazwyczaj lekkie pióro, piszące atramentem na papierze. W niektórych urządzeniach piszących rolę pióra pełni rozżarzone ostrze, które wytapia w wosku wąski rowek. Specjalny mechanizm zegarowy przesuwa taśmę, zapewniając równomierność jej ruchu. Mechanizm przesuwu taśmy pozwala na otrzymanie prędkości taśmy od kilku centymetrów na dobę do kilku metrów na sekundę.

Przyrządy piszące znajdują zastosowanie przy określaniu czasu pracy i przestojów maszyn, przy kontroli sieci energetycznych, sprawdzaniu pracy różnego rodzaju maszyn itd. Bezpośrednie zastosowanie przyrządów piszących ogranicza się do zapisu niezbyt szybkich procesów, bowiem ruchome części mechaniczne urządzenia piszącego i mechanizmu przesuwu taśmy nie mogą poruszać się zbyt szybko ze względu na dużą masę i bezwładność. Szybkość zapisu można zwiększyć zmniejszając ciężar części ruchomych. Jeśli skrócimy pióro, będzie ono wtedy lżejsze, ale jednocześnie zmniejszy się skala zapisu. W pomysłowy sposób trudność tę rozwiązano w oscylografie pętlicowym. Ruchoma część oscylografu pętlicowego składa się z niewielkiej pętli z cienkiego drutu, umieszczonej między biegunami silnego magnesu. Do pętli przymocowane jest małe lusterko. Podczas przepływu przez drucik prądu elektrycznego pętla obraca się razem z lusterkiem. Światło w postaci wąskiej wiązki, rzucanej przez specjalne źródło światła, po odbiciu się od lusterka pada na poruszający się papier fotograficzny, umieszczony przed nim w odległości kilkudziesięciu centymetrów.

Tak więc w oscylografie pętlicowym rolę ciężkiego pręta z piórem spełnia promień świetlny.

Podczas przepływu przez oscylograf pętlicowy mierzonego prądu elektrycznego pętla z lusterkiem obraca się o odpowiedni kąt, a plamka świetlna przesuwa się po papierze fotograficznym na odpowiednią odległość. Dzięki małej masie poruszającej się części oscylograf pętlicowy pozwala

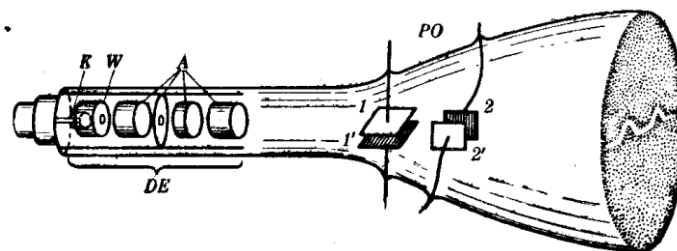
zapisywać zmiany różnych wielkości, które zachodzą w ciągu tysięcznych i dziesięciotysięcznych części sekundy. Do zapisu jeszcze szybszych procesów jego ruchoma część okazuje się jednak za ciężka.

Jeśli ze szklanej rurki przez bardzo wąski otwór wypuścić pod ciśnieniem strumień wody, to na skutek tarcia o ścianki strumień naelektryzuje się. Przepuścimy ten strumień między dwoma okładkami kondensatora elektrycznego. Jeśli jedna okładka jest naładowana dodatnio, a druga ujemnie, to naładowany strumień wody odchyli się w polu elektrostatycznym kondensatora. Kąt odchylenia strumienia jest tym większy, im większa jest różnica potencjałów między okładkami kondensatora. Jeżeli zmienić znak ładunków na okładkach kondensatora, to strumień odchyli się w przeciwną stronę. W ten sposób można zapisywać najrozmaitsze procesy, ale podobnie jak w oscylografie pętlicowym szybkość zapisu jest tu ograniczona, ponieważ nawet najcieńszy strumień, składający się z drobnutkich kropelek wody, ma jeszcze zbyt wielką masę i bezwładność.

Czy można wytworzyć strumień złożony z tak lekkich cząstek, by ich bezwładność nie była przeszkodą przy zapisie nawet najszybszych procesów?

Okazuje się, że można. Wystarczy posłużyć się wiązką elektronów - najdrobniejszych ujemnie naładowanych cząstek, których masa wynosi zaledwie $9 \cdot 10^{-28}$ g. Urządzenie zapisujące za pomocą wiązki elektronów nazywa się oscylografem elektronowym.

Oscylograf elektronowy składa się z dwu zasadniczych części: lampy oscyloskopowej i układu elektrycznego. Lampa oscyloskopowa posiada urządzenie do ogniskowania wąskiej wiązki szybkich elektronów i ekran świecący się w miejscach, gdzie padają elektrony. Układ elektryczny steruje ruchem wiązki elektronów i w zależności od charakteru zapisywanego procesu otrzymujemy na ekranie lampy oscyloskopowej taki lub inny obraz.



Rysunek 37 Lampa oscyloskopowa

Lampa oscyloskopowa (ryc. 37) ma następującą budowę: w jednym końcu lampy, w wąskiej szyjce, znajduje się katoda K, emitująca elektrony. Ma ona postać małego niklowego kubka, którego denko skierowane ku ekranowi pokryte jest warstwą tlenku. Wewnątrz kubka znajduje się grzejnik. Po włączeniu prądu żarzenia grzejnik rozżarza się i rozgrzewa nikłowy kubek. Warstwa tlenku emituje wtedy intensywnie elektrony. Elektrony, wysyłane przez katodę, należy teraz zogniskować w postaci wąskiej wiązki, skierować je na ekran i nadać im prędkość, wystarczającą do otrzymania dostatecznie jasnego obrazu. W tym celu na katodę K nakłada się jeszcze jeden kubek nikłowy W, z niewielkim okrągłym otworem w denku. Jest to elektroda sterująca albo cylinder Wehnelta.

Ujemny potencjał elektrody sterującej odpycha elektrony od ścianek i kieruje je ku otworowi w denku. Strumień elektronów wysyłanych przez katodę przybiera kształt płomienia świecy, którego koniec przechodzi przez otwór w cylindrze Wehnelta. Zwiększając ujemny potencjał cylindra Wehnelta można utworzyć bardzo wąską wiązkę elektronów. Przy dalszym zwiększaniu ujemnego napięcia na cylindrze Wehnelta natężenie wiązki elektronów słabnie, aż do jej pełnego zaniku. Tak więc cylinder Wehnelta spełnia w lampie oscyloskopowej dwie ważne funkcje: ogniskuje wiązkę i zmienia jej natężenie, aż do całkowitego zaniku.

Za cylindrem Wehnelta znajduje się kilka anod A, których potencjał w stosunku do katody jest dodatni i wynosi kilkaset lub kilka tysięcy woltów. Anody mają postać cylindrycznych kubków lub okrągłych przesłon z otworem w środku. Zadaniem ich jest dalsze ogniskowanie i przyśpieszanie ruchu elektronów.

Cały ten układ elektrod: katody K, cylindra Wehnelta W i anod A tworzy tzw. działło elektronowe -- urządzenie wytwarzające bardzo wąską wiązkę elektronów, promień elektronowy. W środkowej części lampy oscyloskopowej mieszczą się dwie pary płytek odchylających 1, 1', 2, 2'. W rozszerzonym końcu lampy znajduje się ekran fluoryzujący, pokryty specjalną substancją, jaskrawo świecąca w miejscach uderzeń elektronów. Dopóki do płytki odchylającej nie zostało przyłożone napięcie, promień elektronowy nie odchyła się i pada na środek ekranu, tworząc jaskrawo świecąca plamkę. Jeśli do którejkolwiek z par płytek odchylających, np. 2, 2', doprowadzić napięcie w ten sposób, aby płytka 2 otrzymała ładunek dodatni, a płytka 2' - ładunek ujemny, to złożony z cząstek naładowanych ujemnie promień elektronowy będzie przyciągany przez płytkę 2, a odpychany przez płytkę 2'. W rezultacie promień odchyli się i plamka świetlna przesunie się w kierunku poziomym w prawo. Przy zmianie znaków ładunku na płytkach odchylających promień przesunie się w lewo. Im większy jest ładunek na płytkach odchylających, tzn. im większa jest różnica potencjałów między nimi, tym bardziej odchyła się promień elektronowy. Jeśli przyłożyć napięcie między płytkami 1, 1', to promień zacznie odchyłać się w kierunku pionowym.

W oscylografie elektronowym ekran jest nieruchomy. Zamiast ekranu lub taśmy porusza się promień elektronowy. Do tego celu służy druga para płytek odchylających 2, 2', do której przykłada się narastające stopniowo napięcie, wytwarzające poziomy ruch promienia elektronowego ze stałą prędkością. Na pierwszej parę płytek odchylających 1, 1', podaje się sygnały od badanego procesu. Przy obserwacji na ekranie oscylografu pojedynczego zjawiska, np. wyładowania elektrycznego, obraz znika tak szybko, że trudno go obejrzeć czy sfotografować. Trudność tę łatwo usunąć, jeśli badane zjawisko jest okresowe lub jeśli możemy powtarzać je wiele razy na sekundę. W takiej sytuacji uzgadnia się odchylenie promienia elektronowego z początkiem zjawiska w taki sposób, aby kolejne obrazy danego zjawiska nakładały się na siebie. Taki obraz, w istocie migający wiele razy na sekundę, nasze oko odbiera jako nieruchomymi ciągły, z pewną średnią jaskrawością. Średnia jaskrawość jest tym większa, im częściej powtarza się zjawisko. Przy dostatecznej częstotliwości powtórzeń obraz można bez trudności oglądać, zmierzyć, a nawet fotografować.

W przypadku, gdy badane zjawisko nie daje się powtarzać wielokrotnie, dostateczną jaskrawość obrazu możemy otrzymać w oscylografie wysokonapięciowym.

W oscylografie wysokonapięciowym różnica potencjałów między katodą i anodą lampy oscyloskopowej sięga kilkudziesięciu tysięcy woltów. Elektrony nabierają tak wielkiej energii kinetycznej, że przy uderzeniu o ekran wywołują oślepiający błysk. Obraz na ekranie jest tak jaskrawy, że mimo krótkiego czasu trwania daje się łatwo sfotografować. Prędkość poziomego ruchu promienia elektronowego w oscylografie może być dana z góry. Określa ona skalę czasu odchylenia.

Oscylograf elektronowy pozwala zapisywać najróżniejsze procesy, a tym samym mierzyć ich czas trwania, szybkość przebiegu, a także odstępy czasu między poszczególnymi fazami danego procesu.

Pomiar czasu trwania krótkotrwałych zjawisk elektrycznych. Wyładowanie atmosferyczne przebiega tak szybko, że aby je zbadać, trzeba umieć mierzyć tysięczne a nawet milionowe części sekundy. Nietrudno jest otrzymać zwykłą fotografię błyskawicy. W tym celu wystarczy w burzliwą noc wystawić na pewien czas aparat fotograficzny z otwartą migawką. Otrzymane w ten sposób zdjęcia mogą być bardzo piękne, ale dają tylko ogólny widok błyskawicy i niestety nie mogą nic powiedzieć o

jej własnościach elektrycznych. Jeśli błonę fotograficzną nawiniemy na bęben, połączony z silnikiem i wprawimy bęben w szybki ruch obrotowy z określoną prędkością, to otrzymamy fotografię błyskawicy, rozwiniętą w czasie. Powstanie rozciągnięty i wygięty obraz błyskawicy. Znając prędkość ruchu błony fotograficznej, można na podstawie wartości kąta pochylenia błyskawicy i pewnych danych dodatkowych obliczyć szybkość przebiegu wyładowania atmosferycznego. Otrzymane informacje mogą być ciekawe, ale nie wystarczają do wyjaśnienia elektrycznych własności błyskawicy.

Bardzo wygodnym przyrządem do badania tak szybkich procesów jest oscylograf elektronowy. Przy badaniu błyskawicy na pierwszą parę płytek odchylających lampy oscyloskopowej podaje się prąd lub napięcie wyładowania atmosferycznego. Na drugą parę płytek specjalny generator doprowadza szybko narastające napięcie odchylenia, które powoduje poziomy ruch promienia elektronowego z dużą szybkością. Napięcie i natężenie prądu wyładowania atmosferycznego są zbyt duże, by można je było bezpośrednio podać na płytki odchylające lampy oscyloskopowej. Dlatego między anteną, pobierającą prąd wyładowania atmosferycznego, a oscylografem elektronowym, zapisującym ten prąd, znajdują się dzielniki prądu i napięcia, które zmniejszają mierzone wielkości określoną ilość razy.

Przy badaniu błyskawicy występuje jeszcze dodatkowa trudność: wyładowanie atmosferyczne jest jednorazowym, przypadkowym zjawiskiem, powstającym nieoczekiwanie w różnych odległościach od obserwatora. Dla rozwiązania tego zadania I. S. Stiekolnikow zbudował wysokonapięciowy oscylograf impulsowy z układem synchronicznej podstawy czasu, włączającym przyrząd w momencie pojawienia się błyskawicy.

Prędkość poziomego ruchu promienia elektronowego w tym przyrządzie jest rzędu setek tysięcy kilometrów na sekundę. Dostateczna jaskrawość obrazu zapewnia wysokie napięcie 20 000 V, które nadaje elektronom tak wielką prędkość, że przy ich uderzeniu o ekran powstaje oślepiający błysk.

Praca wysokonapięciowego oscylografu impulsowego jest całkowicie zautomatyzowana. Kiedy przyrząd znajduje się w położeniu „wyczekującym” promień elektronowy nie pada na ekran. Z chwilą powstania wyładowania atmosferycznego prąd, pojawiający się w antenie odbiorczej, włącza oscylograf i uruchamia układ synchronicznej podstawy czasu, sterujący poziomym ruchem promienia elektronowego.

Mierzony prąd wyładowania atmosferycznego przed dojściem do płytek odchylających oscylografu przechodzi przez zwinięty w kształcie pętli odcinek kabla. W ten sposób uzyskujemy opóźnienie sygnału w stosunku do obserwowanego zjawiska, potrzebne na to, by promień elektronowy zdążył dojść do końca ekranu. Po zapisaniu danego wyładowania atmosferycznego oscylograf impulsowy automatycznie przygotowuje się do następnego zapisu.

W wyniku badań udało się wyjaśnić przebieg czasowy natężenia prądu i napięcia wyładowania atmosferycznego, a także stwierdzić, że szybkość ruchu błyskawicy równa się ok. 0.1 prędkości światła, sam zaś ruch błyskawicy ma charakter impulsowy. Początkowo błyskawica wytwarza przed sobą wąski, przewodzący kanał, elektryzuje okrążające powietrze, następnie przez kanał ten następuje główne wyładowanie, które go znacznie rozszerza; proces ten może się powtarzać wielokrotnie. Pomiar wykazały, że natężenie prądu w kanale błyskawicy sięga 20 000 A a napięcie, przy którym zaczyna się wyładowanie atmosferyczne, jest rzędu 50-100 mln V.

Badania te okazały się bardzo użyteczne przy opracowywaniu metod i urządzeń dla ochrony przed piorunami.

Pomiar czasu trwania krótkotrwałych zjawisk nieelektrycznych. Przy badaniu drgań skrzydła samolotu albo pracy silnika mierzymy wielkości nieelektryczne, lecz mechaniczne: odkształcenie skrzydła, ciśnienie gazów w cylindrze silnika itd.

Przebiegi tych wielkości w czasie możemy także mierzyć za pomocą oscylografu elektronowego. Napotykamy tu jednak na dodatkową trudność. Ponieważ oscylografem elektronowym mogą sterować tylko sygnały elektryczne, to podlegające pomiarowi wielkości mechaniczne - siły, ciśnienia, odkształcenia itp. - należy początkowo przekształcić na proporcjonalne do nich wielkości elektryczne: prądy o różnym natężeniu i napięciu. Dopiero wtedy można przeprowadzać pomiar, stosując szybko działające przyrządy elektryczne.

Do przekształcania wielkości mechanicznych na proporcjonalne do nich sygnały elektryczne służą różnego rodzaju czujniki.

Za pomocą tensometrów - drutowych czujników oporowych - można zamieniać odkształcenia na sygnały elektryczne. Zasadniczą częścią tensometru jest cienki, zygzakowato ułożony drucik, przyklejony do bibułki od papierosa. Zasada działania tensometru polega na tym, że wielkość jego oporu elektrycznego zależy od najmniejszych odkształceń drucika. Wystarczy niewielkie tylko rozciągnięcie, ściśnięcie lub zgięcie drucika, by wartość oporu elektrycznego uległa zmianie.

Przy pomiarze odkształceń badanej części nakleja się drutowy czujnik oporowy bezpośrednio na tę część, a końce zygzakowatego drucika za pośrednictwem odpowiedniego układu elektrycznego przyłącza się do płytek sterujących oscylografu elektronowego. Odkształcenie badanej części wywołuje zmianę oporu tensometru, a wraz z nią zmienia się napięcie sterujące na płytkach odchylających lampy oscyloskopowej i promień elektronowy zapisuje w odpowiedniej skali występujące zmiany.

Do zamiany siły lub ciśnienia na proporcjonalne do nich napięcia elektryczne stosuje się często czujniki piezoelektryczne. Zasada działania tych czujników polega na tym, że na powierzchni niektórych kryształów w wyniku mechanicznych naprężeń pojawiają się ładunki elektryczne. Takie własności posiadają kryształy kwarcu, dielektryków o polaryzacji spontanicznej i niektóre inne. Napięcie elektryczne, powstałe na przeciwległych powierzchniach kryształu kwarcu, po odpowiednim wzmacnieniu podaje się na płytki odchylające oscylografu elektronowego. W ten sposób mierzymy szybko zmieniające się siły i ciśnienia.

Metody te pozwalają mierzyć i zapisywać procesy mechaniczne, trwające tysięczne i stutysięczne części sekundy.

10

Pomiar tysięcznych, milionowych i miliardowych części sekundy za pomocą przyrządów elektronopromieniowych

Przyrządy elektronopromieniowe okazały się pożyteczne nie tylko przy badaniu przebiegu bardzo szybkich procesów, ale i przy rozwiązywaniu bardziej specjalnego zadania: mierzenia krótkich odstępów czasu między dwoma zdarzeniami albo dwoma etapami pewnego procesu. Udoskonalenie metod i przyrządów do pomiaru krótkich odstępów czasu za pomocą przyrządów

elektronopromieniowych miało charakter dwukierunkowy: budowy urządzeń o działaniu ciągłym i nieciągłym.

Przyrządy elektronopromieniowe o działaniu nieciągłym. Zasada działania urządzeń z elektronopromieniowym przelicznikiem dekadowym, służących do pomiarów krótkich odstępów czasu, jest prawie taka sama, jak w opisanych wyżej przyrządach z przelicznikiem pracującym na lampach jonowych lub elektronowych. Urządzenie składa się z generatora wzorcowego, szybkościowego wyłącznika i przelicznika.

Generator wzorcowy wysyła okresowe sygnały prądu z określoną częstotliwością. Przelicznik zlicza sygnały, które do niego dotarły, a szybkościowy wyłącznik przyłącza przelicznik do generatora wzorcowego w ciągu mierzonego odstępu czasu.

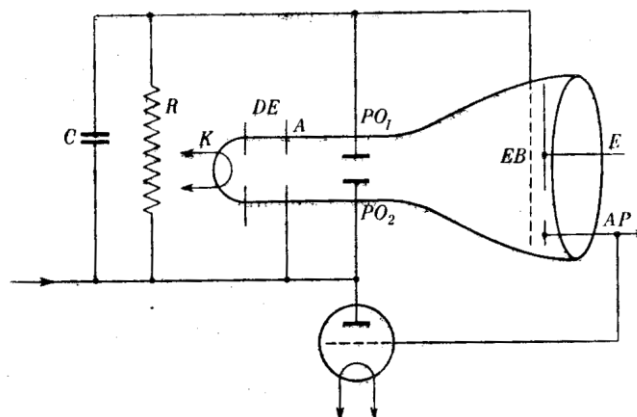
Omawiane tu przeliczniki różnią się od rozważanych poprzednio zastosowaniem dekadowych lamp elektronopromieniowych.

Przy zastosowaniu pierścieniowych przeliczników dekadowych, pracujących na lampach jonowych lub elektronowych, przeliczenie na dziesiątki wymagało użycia co najmniej siedmiu lamp (pięć lamp do przeliczenia na piątki i dwie lampy do przeliczenia na dwójki). Tak więc do przeliczenia na setki trzeba było stosować czternaście lamp, a do przeliczenia na 10 000 - dwadzieścia osiem lamp itd., nie licząc lamp potrzebnych do kształtowania sygnałów i końcowego wzmocnienia.

Na skutek tak dużej ilości lamp cały przyrząd stawał się ciężki i niepewny w działaniu.

Trudność tę można usunąć. Do liczenia impulsów prądu, przychodzących z niewielką szybkością, można by zastosować urządzenie mechaniczne. Wtedy rozwiązanie zadania byłoby bardzo proste. Przeliczać na dziesiątki mogłoby kółko z dziesięcioma zębami, które każdy przychodzący impuls obracałby o jeden ząb. Pełny obrót kółka odpowiadałby dziesięciu impulsom. Aby układ mógł przeliczać na setki, trzeba by do pierwszego kółka dołączyć drugie identyczne, tak połączone, by przy pełnym obrocie pierwszego kółka drugie obracało się tylko o jeden ząb itd.

Czy do liczenia bardzo szybko zmieniających się impulsów można zbudować równie proste układy? Czy można zamiast lampek sygnalizacyjnych umieścić w tej samej lampie nie tylko urządzenie do liczenia impulsów, ale również urządzenie do ich zapisywania?



Rysunek 38 Schemat układu przeliczającego z elektronopromieniową lampą liczącą

Okazuje się, że wszystko to można osiągnąć za pomocą strumienia elektronów. W ostatnich latach zastosowano do tego celu urządzenie ze specjalnymi liczącymi lampami elektronopromieniowymi. Jedną z takich lamp wielkości zwykłej lampy elektronowej, takiej, jakie znajdują się w odbiornikach

radiowych, zastępuje całą pierścieniową dekadę przeliczeniową razem z lampami sygnalizacyjnymi. Praca liczącej lampy elektronopromieniowej przypomina działanie przełącznika, w którym ślizgacz przesuwa się po zestyku. Rolę ślizgacza spełnia tu promień elektronowy, wędrujący z pozycji na pozycję z olbrzymią szybkością, niedostępną żadnemu urządzeniu mechanicznemu. Elektronopromieniowa lampa licząca (ryc. 38) składa się z działa elektronowego DE, wytwarzającego wąską wiązkę elektronów, pary płytek odchylających PO_1 , PO_2 , sterujących promieniem elektronowym, elektrody bombardowanej EB i płytek E, AP, zbierających elektrony. Kiedy promień elektronowy padnie na elektrodę bombardowaną EB, zamyka się obwód kondensatora C włączonego równolegle z płytkami odchylającymi PO i kondensator ładuje się. Dlatego też w miarę wzrostu różnicy potencjałów między jego okładkami zwiększa się także różnica potencjałów między płytkami odchylającymi, w wyniku czego promień elektronowy zaczyna się przesuwać. Ruch promienia elektronowego wzdłuż elektrody bombardowanej trwa tak długo, dopóki promień nie dojdzie do szczeliny. W tym momencie promień pada już nie na elektrodę bombardowaną, lecz na inną elektrodę E. Teraz tylko sygnał zewnętrzny może przerzucić promień elektronowy przez szczelinę na następną część elektrody bombardowanej. Gdy to nastąpi, promień przesuwa się wzdłuż elektrody tak długo, aż znajdzie się naprzeciw kolejnej szczeliny. Każdy nowy impuls zewnętrzny prądu ponownie ładuje kondensator C, umożliwiając tym samym następny przeskok itd.

Ilość impulsów podanych na lampę jest równa ilości odcinków elektrody bombardowanej, przez które przeskoczył promień elektronowy, przy tym dla wygody ekran pokryty jest świecącymi cyframi. Kiedy promień elektronowy zatrzymuje się naprzeciwko określonej szczeliny, na ekranie pojawia się odpowiednia cyfra. Po zatrzymaniu się naprzeciw dziesiątej szczeliny promień elektronowy pada na anodę powrotu AP. W tym momencie zaczyna rozładowywać się kondensator C i promień elektronowy wraca do położenia pierwotnego w górnym końcu elektrody bombardowanej. W układzie przeliczającym na setki impuls prądu z anody powrotu AP przechodzi jako sygnał wejściowy do następnej elektronopromieniowej lampy liczącej itd.

Aby skrócić czas powrotu promienia elektronowego do położenia wyjściowego w niektórych urządzeniach przeliczających stosuje się specjalne układy pracujące na lampach elektronowych lub tyratronach. W innych tę samą funkcję spełnia pierścieniowe rozmieszczenie szczelin w elektrodzie bombardowanej. Przy takim rozmieszczeniu szczelin, promień elektronowy po obejści pełnego okręgu wraca znów na pozycję początkową. W urządzeniu przeliczającym poszczególne lampy liczące znajdują się zazwyczaj obok siebie. Każda następna lampa zlicza dziesiątki impulsów z poprzedniej komórki. Świecące na ekranach lamp cyfry pozwalają odczytać liczbę impulsów zliczonych przez każdą lampę, a zatem ogólną ilość sygnałów, które pojawiły się na wejściu urządzenia przeliczającego. W porównaniu z urządzeniami przeliczającymi na lampach elektronowych opisany przyrząd elektronopromieniowy posiada niewątpliwe zalety: jest prosty i zwarty w konstrukcji.

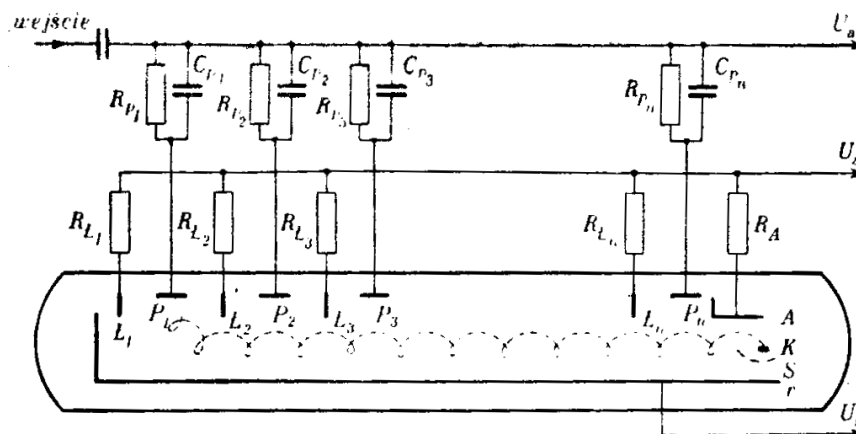
Do ciekawych urządzeń przeliczających należy również dekatron. Jest to lampa gazowana, zastępująca cały przelicznik dekadowy. W dekatronie anoda ogólna jest otoczona przez poszczególne katody. Przyrząd działa w ten sposób, że pod wpływem przychodzących z zewnątrz sygnałów wyładowanie przeskakuje kolejno z jednej katody na drugą. Tak więc znając numer pracującej katody możemy określić, ile sygnałów przeszło przez przyrząd.

Należy pamiętać, że podobnie jak i w innych przyrządach gazowanych, również i w dekatronie częstotliwość impulsów, jakie może on liczyć, jest ograniczona. Tę poważną niedogodność można jednak w znacznym stopniu zmniejszyć. Przy dużym stopniu redukcji impulsów, np. równym 1 000 000, urządzenie przeliczające powinno zawierać sześć dekad. Przy częstotliwości sygnałów generatora wzorcowego 100 000 Hz do ostatniej, szóstej dekady sygnał będzie dochodził tylko raz na sekundę; do przedostatniej, piątej dekady - 10 razy na sekundę itd. Tak więc tylko jedna lub dwie

pierwsze dekady muszą pracować z bardzo dużą szybkością. W związku z tym tylko jedna lub dwie pierwsze dekady w urządzeniach przeliczających budowane są na lampach elektronowych i mogą liczyć sygnały z bardzo dużą szybkością, w następnych dekadach stosuje się dekatrony. Przy tym zdolność rozdzielcza całego urządzenia jest dostatecznie duża.

Bardzo interesującym i cennym elektronopromieniowym urządzeniem przeliczającym jest trochotron. Przyrząd ten działa na zasadzie odmiennej od pozostałych urządzeń elektronowych. W zwykłych przyrządach elektronowych elektrony poruszają się między elektrodami w kierunku wyższego potencjału, w trochotronie ruch elektronów jest prostopadły do tego kierunku i przebiega wzdłuż linii ekwipotencjalnych.

Rozpatrzmy zasadę działania i budowę tego przyrządu, Na elektron, poruszający się we wzdłużnym polu elektrostatycznym, działa siła równoległa w kierunku tego pola. Kiedy elektron znajdzie się w poprzecznym polu magnetycznym, powstaje siła prostopadła zarówno do kierunku jego ruchu, jak i kierunku pola magnetycznego. Tak więc na elektron, poruszający się w polu elektrostatycznym i magnetycznym, działa siła prostopadła do kierunków pola elektrostatycznego i magnetycznego. Pod działaniem tej siły elektron odchyła się od pierwotnego kierunku ruchu i zaczyna poruszać się po krzywej. Postać krzywej zależy od ukształtowania pola elektrostatycznego i magnetycznego i stosunku ich natężeń. W określonych warunkach elektrony poruszają się po złożonej krzywej, zwanej trochoidą, która przypomina silnie rozciągniętą sprężynę. Przy tym wypadkowy ruch elektronów odbywa się nie w kierunku pola elektrostatycznego, lecz prostopadłe do niego, wzdłuż linii ekwipotencjalnych. Takiemu właśnie ruchowi elektronów trochotron zawdzięcza swoją nazwę.



Rysunek 39 Trochotron

Trochotron (ryc. 39) składa się z katody K w kształcie cienkiego walca, wysyłającej elektrony, w pobliżu której znajduje się siatka S, służąca do regulacji natężenia wiązki elektronowej. Pole elektrostatyczne ($U_2 - U_1$) między anodą A i szyną r przyspiesza elektrony ku anodzie. Cały przyrząd znajduje się w jednorodnym poprzecznym polu magnetycznym. Natężenie pola magnetycznego musi być dostatecznie duże, by odchylane przez to pole elektrony nie mogły dojść do anody.

W rezultacie jednoczesnego działania obu pól elektrony ślizgają się wzdłuż szyny w kierunku osi przyrządu. Ponieważ ruch odbywa się wzdłuż linii ekwipotencjalnych, to nie mogą one dostać się ani na elektrodę o ujemnym potencjale względem katody (szyna), ani na elektrody o dodatnim potencjale względem katody (anoda, łopatki $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$), dostępna dla elektronów jest jedynie elektroda o potencjale identycznym z katodą (np. płytka P_1).

Wszystkie płytki P_1, P_2, \dots, P_n połączone są wspólnym przewodem, doprowadzającym sygnały ujemne z wejścia. Inny przewód łączy łopatki L_1, L_2, \dots, L_n z anodą. Kiedy przychodzący z zewnątrz sygnał ładuje

ujemnie płytke P_1 , to promień elektronowy przeskakuje na sąsiednią łopatkę L_2 . Pod wpływem padających elektronów w obwodzie łopatki zaczyna płynąć prąd przez oporność R_L i potencjał łopatki zmniejsza się. Powoduje to przeskok promienia na sąsiednią płytkę P_2 . Na płytce promień pozostaje aż do przyścia kolejnego impulsu, który przetrzuci promień na następną pozycję itd.

Szczególną rolę pełnią opory i pojemności w obwodzie płytek. Ich zadaniem jest wytworzenie opóźnienia czasu, równego lub nieco większego od czasu trwania pojedynczego impulsu. Chroni to przyrząd od błędnych reakcji, tj. przerzutów promienia o kilka pozycji pod wpływem pojedynczego sygnału. Po wielu przerzutach promień elektronowy wraca z powrotem na płytkę anodową A. Na skutek obecności w jej obwodzie oporu R_A potencjał anody spada. W wyniku tego zmniejsza się prąd anodowy, co z kolei powoduje odtworzenie pierwotnego potencjału anody. Proces ten wymaga pewnego czasu, ale o to właśnie chodzi. W czasie, w ciągu którego odtwarza się potencjał na anodzie, zdążą się również odtworzyć potencjały na wszystkich pozostałych elektrodach i promień elektronowy znów przeskoczy na płytkę P_1 . Tak więc trochotron zlicza sygnały zewnętrzne.

Przy zastosowaniu trochotronu do pomiaru krótkich odstępów czasu stosuje się urządzenia analogiczne do opisanych wyżej. Urządzenie to składa się z generatora wzorcowego, wytwarzającego sygnały elektryczne, specjalnego przełącznika, sterującego pracą przyrządu i przelicznika pracującego na trochotronach.

Trochotron jako przyrząd elektronopróżniowy pozwala liczyć sygnały o dużej częstotliwości i tym samym stwarza możliwość pomiaru krótkich odstępów czasu aż do mikrosekund i ułamków mikrosekundy.

Elektronopromieniowe przyrządy liczące o działaniu ciągłym. Niektóre przyrządy elektronopromieniowe do ciągłego pomiaru krótkich odstępów czasu wykazują pewną analogię ze stoperem elektrycznym. W stoperze elektrycznym wskazówka, napędzana przez silniczek elektryczny, porusza się z określoną szybkością; specjalne urządzenie w odpowiednim momencie uruchamia i zatrzymuje wskazówkę, a wynik odczytujemy na skali.

Przyrządy elektronopromieniowe liczące w sposób ciągły działają analogicznie, tylko rolę wskazówki pełni tu promień elektronowy, poruszający się po ekranie, a operator obserwuje nie położenie wskazówki, lecz świecąca figurę na ekranie oscylografu. Analogia ta nie jest jednak zupełna. Pomiar krótkich odstępów czasu wiąże się ze specyficznymi trudnościami, a przyrządy elektronopromieniowe otwierają zupełnie nowe, szczególne możliwości pomiaru.

Urządzenia radiolokacyjne. W gęstej mgłę samolot szykuje się do lądowania. Pilot za pomocą radiowysokościomierza szybko i dokładnie określa wysokość „samolotu nad ziemią.

Jak to się dzieje?

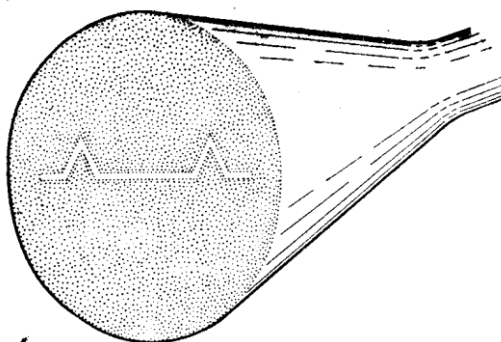
W urządzeniach radiolokacyjnych, tak bardzo dzisiaj rozpowszechnionych, odległość do różnych przedmiotów określa się na podstawie czasu opóźnienia sygnałów radiowych, odbitych od tych przedmiotów. W tym celu specjalny nadajnik radiowy wysyła w ciągu sekundy kilka tysięcy krótkich impulsów, rozdzielonych przerwami. Każdy z takich impulsów jest kierowany z jednej strony bezpośrednio do urządzenia odbiorczego, a z drugiej strony emitowany za pomocą anteny kierunkowej w danym kierunku i po odbiciu od przeszkody odbierany przez antenę odbiornika. Wielkością mierzoną jest czas opóźnienia sygnału odbitego, tzn. odstęp czasu między wystąpieniem przez nadajnik odpowiedniego sygnału, a odbiorem przez odbiornik sygnału odbitego. Czas opóźnienia sygnału odbitego podzielony przez dwa, tzn. czas przebycia przez sygnał odległości do

przeszkody, po pomnożeniu przez prędkość rozchodzenia się sygnałów radiowych, daje odległość do przedmiotu. Taka jest zasada pracy dalmierza radiowego.

Przy zastosowaniu urządzeń radiolokacyjnych można określić nie tylko odległość od danego przedmiotu, ale również wyznaczyć jego zarysy.

Urządzenia radarowe oddają wielkie usługi w nawigacji lotniczej, morskiej i w wielu innych dziedzinach, ponieważ na ich pracę nie mają wpływu ani mgła, ani ciemności. Długość odstępów czasu, z jakimi mamy do czynienia w urządzeniach radarowych, zależy od odległości do przedmiotu i prędkości rozchodzenia się sygnałów radiowych. Fale radiowe rozchodzą się z bardzo wielką prędkością. Piechur przechodzi w ciągu sekundy 1-1,5 m, biegacz przebiega 5-10 m, samochód przejeżdża 20-40 m, samolot przelatuje 100-300 m, pocisk karabinowy i dalekonośny pocisk artyleryjski 500-800 m, a fala elektromagnetyczna (radiowa albo świetlna) - 300 000 km. W ciągu milionowej części sekundy sygnał radiowy przebywa odległość 300 m.

Przy pomiarze odległości 1,5 km sygnał odbity opóźni się o stutysięczną część sekundy, a dla odległości 15 m opóźnienie sygnału odbitego wyniesie tylko dziesięciomilionową część sekundy.



Rysunek 40 Oscylogram liniowej podstawy czasu

Do pomiaru tak krótkich odstępów czasu w dalmierzu radiowym stosuje się lampę elektronopromieniową wraz z odpowiednim układem elektrycznym. W urządzeniu tym druga para płytek odchylających lampy elektronopromieniowej służy jak zwykle do odchylenia obrazu. Specjalny generator podaje na nią narastające napięcie, które wprawia promień elektronowy w jednostajny ruch w kierunku poziomym. W ten sposób otrzymujemy liniową podstawę czasu. Na elektrody pierwszej pary płytek odchylających podaje się dwa impulsy prądu: pierwszy od nadajnika, drugi - sygnał odbity, odebrany przez odbiornik. Odstęp między tymi sygnałami (ryc. 40) jest proporcjonalny do opóźnienia sygnału odbitego i w odpowiedniej skali przedstawia mierzoną odległość. Podziałka naniesiona na ekran lampy elektronopromieniowej dalmierza radiowego jest zazwyczaj wyskalowana bezpośrednio w jednostkach długości.

Zastanówmy się, jakie odstępy czasu i z jaką dokładnością pozwala mierzyć opisane urządzenie.

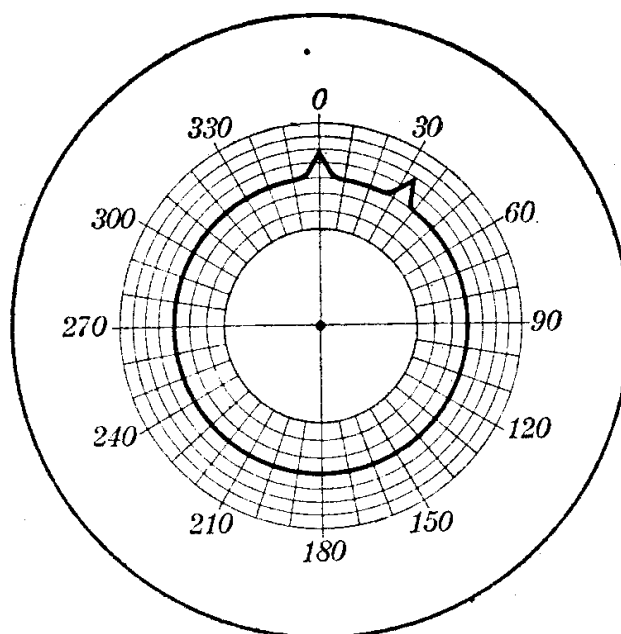
Jeśli promień elektronowy przebywa odległość między brzegami ekranu lampy w ciągu 0,01 sek., a najmniejsza odległość między rozróżnianymi jeszcze sygnałami na ekranie jest równa 0,01 średnicy ekranu lampy, to najmniejszy, dający się jeszcze zmierzyć, odstęp czasu jest równy dziesięciotysięcznej części sekundy, a największy - setnej części sekundy. Jeśli powiększyć dziesięć razy prędkość poziomego ruchu promienia elektronowego, tak by przebywał on tę odległość w ciągu 0,001 sek., to przyrząd będzie mógł mierzyć dziesięciokrotnie krótsze odstępy czasu niż poprzednio. Teraz najmniejszy odstęp czasu, jaki daje się jeszcze odróżnić, jest równy stutysięcznej części sekundy, ale za to nie można mierzyć odstępów czasu dłuższych niż 0,001 sek.

Czy można mierzyć stosunkowo długie odstępy czasu z dużą dokładnością, tzn. zwiększyć dokładność przyrządu, nie zmniejszając jego zakresu?

Można to zrobić dwoma sposobami. Jeden z nich polega na zwiększeniu szybkości odchylenia i wprowadzeniu do układu elektrycznego bloku opóźniającego. Wzrost szybkości odchylenia zwiększa dokładność pomiaru, ponieważ temu samemu odstępowi czasu odpowiada teraz większa odległość między obu sygnałami na ekranie oscylografu. Blok opóźniający pozwala utrzymać lub nawet zwiększyć mierzony odstęp czasu.

Istnieje jednak jeszcze inny sposób zwiększenia zakresu przyrządu i dokładności pomiarów. Przecież, stosując opisaną wyżej liniową podstawę czasu, postępujemy tak samo nieekonomicznie, jak przy druku książki, w której na każdej stronie drukowalibyśmy tylko jeden wiersz, resztę miejsca zostawiając niezapisaną. Możemy znacznie zwiększyć długość zapisu zmuszając promień elektronowy do ruchu po ekranie lampy oscyloskopowej w sposób podobny, jak przy czytaniu książki: od lewego brzegu ekranu do prawego, potem nieco niżej, znów od lewego brzegu ekranu do prawego itd. Przy takim systemie odchylenia powierzchnia ekranu będzie znacznie lepiej wykorzystana. Zastosowanie tego rodzaju podstawy czasu pozwala rozwiązać postawione wyżej zadanie, ponieważ promień elektronowy, poruszając się ze zwiększoną szybkością po dłuższym odcinku drogi, może odmierzać stosunkowo dłuższe odstępy czasu z większą dokładnością.

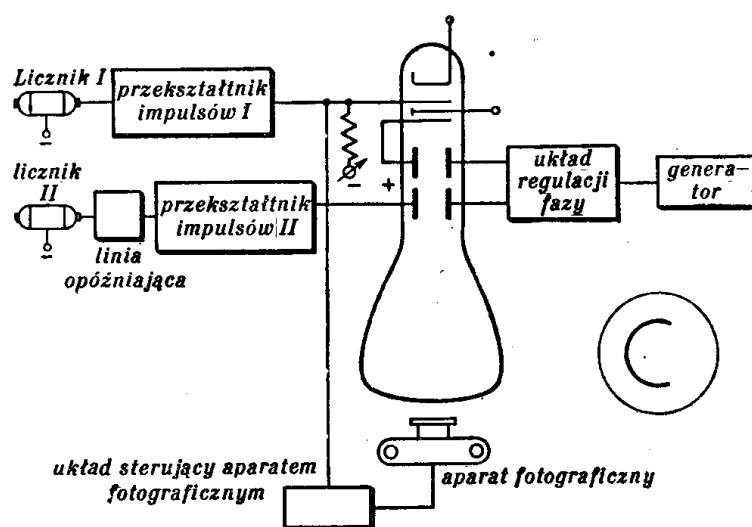
Jeśli zastosujemy odchylenie obrazu wzdłuż okręgu, to droga promienia elektronowego zwiększy się $\pi = 3,14$ raza w porównaniu z odchyleniem wzdłuż linii poziomych. Kołowa podstawa czasu znalazła zastosowanie przy regulacji chodu zegarów. W odpowiednim przyrządzie promień elektronowy dokonuje w ciągu sekundy na ekranie oscylografu 330 pełnych obrotów, tzn. opisuje kąt $118\ 800^\circ$. Przy badaniu zegara na okręgu widocznym na ekranie pojawiają się dwa wybrzuszenia. Odległość między nimi albo odpowiedni kąt są tym większe, im większą rozbieżność wykazuje zegar badany w porównaniu z zegarem wzorcowym. Niedokładność chodu badanego zegara, wynosząca np. 1 sek. na dobę albo $\frac{1}{2880}$ sek. w ciągu 30 sek., powoduje przy danej szybkości odchylenia przesunięcie drugiego impulsu względem pierwszego o kąt 41° (ryc. 41). Przedłużając czas obserwacji można jeszcze bardziej zwiększyć dokładność przyrządu.



Rysunek 41 Oscylogram kołowej podstawy czasu

Kołową podstawę czasu można zastosować również do pomiaru znacznie krótszych odstępów czasu, rzędu dziesiątych i setnych części mikrosekundy. Takie pomiary potrzebne są m. in. przy badaniu promieniowania kosmicznego. Dla dokonania tego rodzaju pomiarów ustawia się w pewnej odległości od siebie dwa liczniki, reagujące na przelot cząstki naładowanej, a czas przelotu cząstki między licznikami mierzy się za pomocą specjalnego oscylografu z kołową podstawą czasu.

Przyrząd ten działa na następującej zasadzie: przed rozpoczęciem pomiarów promień elektronowy jest zgaszony i na ekranie oscylografu nie ma obrazu. Sygnał elektryczny od licznika I przez przekształtnik impulsów i dostaje się na cylinder Wehnelta oscylografu. W przekształtniku impulsów sygnał zostaje wzmacniony i ukształtowany. Przy dojściu sygnału do cylindra Wehnelta promień elektronowy zostaje odblokowany (ryc. 42).



Rysunek 42 Schemat układu do pomiarów odstępów czasu między impulsami

Specjalny blok, składający się z generatora i układu dającego odpowiednie przesunięcie fazowe, wprawia promień elektronowy w ruch po okręgu. Generator wysokiej częstotliwości wytwarza drgania elektryczne o częstotliwości 100 000 Hz. Stałość częstotliwości generatora zapewnia stabilizacja kwarcowa. Układ wytwarzający przesunięcie fazowe, doprowadza napięcie na jedną parę płytek odchylających lampy oscyloskopowej, przesunięte w fazie o $\frac{1}{4}$ okresu w stosunku do napięcia podawanego na drugą parę płytek odchylających. Dzięki temu powstaje ruch promienia elektronowego po okręgu, tj. kołowa podstawa czasu.

Sygnał prądu z licznika II dostaje się przez blok opóźniający i przekształtnik impulsów II na drugą parę płytek oscylografu. Blok opóźniający potrzebny jest do regulacji przyrządu, a przekształtnik impulsów podobnie jak i poprzednio wzmacnia i kształtuje sygnał. Kiedy sygnał z licznika II dostanie się na płytki odchylające oscylografu, promień elektronowy odchyli się za ekran i zapis urywa się.

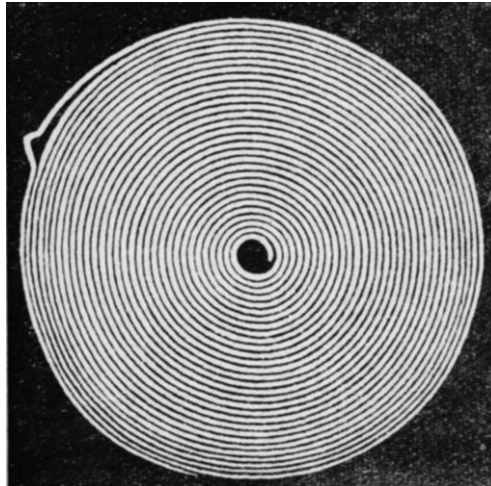
Prócz tego w skład przyrządu wchodzi aparat fotograficzny i układ elektryczny sterujący tym aparatem; w odpowiednim momencie układ sterujący uruchamia aparat fotograficzny, który robi zdjęcia na ekranie oscylografu.

W wyniku pracy całego przyrządu na ekranie oscylografu powstaje obraz łuku o długości proporcjonalnej do mierzonego odstępów czasu.

Przy częstotliwości generatora równej 100 000 Hz promień elektronowy opisuje pełny okrąg w ciągu 10 μ sek. Jeśli przyjąć, że możliwa jest dokładność pomiaru łuku setnej części okręgu, to przy danej

częstotliwości generatora przyrząd pozwala mierzyć odstęp czasu od 0,1 do 10 μ sek. Przy innej częstotliwości generatora odpowiedni przedział mierzonych odcinków czasu będzie oczywiście inny.

Jeszcze lepsze wykorzystanie całej powierzchni ekranu lampy oscyloskopowej zapewnia spiralna podstawa czasu (ryc. 43). Przejście promienia przez wszystkie zwoje spirali odpowiada najdłuższemu odstępowi czasu, który możemy zmierzyć, a każdy zwój spirali - pewnej części tego odstępu czasu. Znacznie większa długość zapisu pozwala w tym przypadku jeszcze bardziej zwiększyć dokładność pomiarów bez zmniejszania zakresu przyrządu.



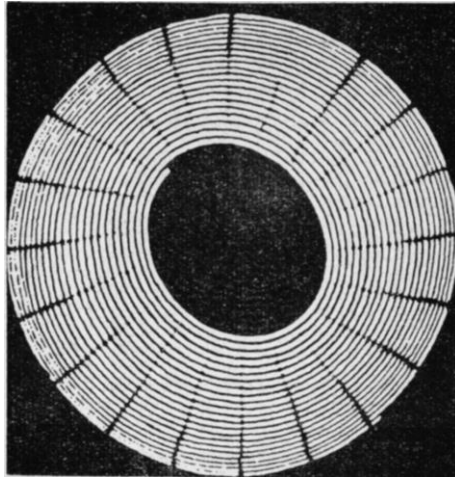
Rysunek 43 Oscylogram spiralnej podstawy czasu

Mimo wielu wysiłków włożonych w opracowanie tych metod i przyrządów nie pokonano jeszcze jednej trudności. Dotychczas we wszystkich opisanych przyrządach zakładaliśmy dokładną równomierność ruchu promienia po ekranie. Tymczasem w rzeczywistości jest inaczej. Przy tak dużej szybkości ruchu promienia nie łatwo jest zapewnić dokładną równomierność odchylenia. Jest to spowodowane wieloma przyczynami: niedoskonałością samej lampy oscyloskopowej (aberracja sferyczna i chromatyczna, wpływ czasu przelotu elektronów, niedokładność wykonania elektrod lampy oscyloskopowej), niedoskonałością generatorów odchylenia (pewien brak stałości ich parametrów, niezupełna liniowość odchylenia) itd. Aby uniknąć kłopotów, związanych z nierównomiernością odchylenia, stosuje się kalibracyjne znaczniki czasu. Można je otrzymać wygaszając okresowo promień elektronowy. Powstają wtedy widoczne przerwy w zapisie.

W przyrządzie, opracowanym na uniwersytecie w Princeton, spiralną podstawę czasu wytworzono przez podanie na obie pary płytek odchylających oscylografu napięcia zmiennego, przesuniętego w fazie o ćwierć okresu. W przyrządzie tym pierwotne napięcie zmienne o częstotliwości 100 000 Hz wytwarzane jest w generatorze stabilizowanym kwarcem. Dzielnik częstotliwości przekształca to napięcie na napięcie zmienne o częstotliwości 10 000 Hz, które z kolei doprowadzane jest do płytek odchylających dla sterowania promieniem. A zatem promień dokonuje pełnego obrotu w ciągu 100 μ sek.

Prócz tego, w układzie znajduje się blok służący do wygaszania promienia, który co każde 5 μ sek. wysyła ujemny impuls, trwający 0,5 μ sek. Sygnał ten gasi promień elektronowy i robi przerwę w zapisie. Tak więc na całej długości okręgu otrzymujemy 20 przerw w zapisie. Kiedy na wejściu przyrządu pojawi się pierwszy zewnętrzny sygnał sterujący, promień elektronowy zaczyna opisywać spiralę; po zakreśleniu odpowiedniego łuku w ciągu mierzonego odstępu czasu promień zatrzymuje się i wygasa przy pojawieniu się drugiego sygnału sterującego. Na ekranie oscylografu powstaje obraz przerywanej spirali (ryc. 44). Wyznaczenie odstępu czasu sprowadza się do pomiaru długości

łuku. W danym przyrządzie każdy pełny zwój spirali odpowiada 10 μ sek., a odległość między znakami czasu 5 μ sek. Przy innej częstotliwości odchylenia otrzymujemy inną skalę.

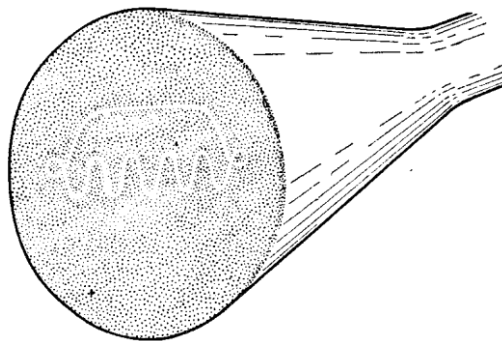


Rysunek 44 Oscylogram spiralnej podstawy czasu ze znacznikami czasowymi

Przyrządy tego typu umożliwiają dokonywanie pomiarów różnych odstępów czasu z dokładnością do milionowych i dziesięciomilionowych części sekundy.

Przyrząd z oscylografem wysokonapięciowym. Przy badaniach zjawisk zachodzących w atomie i jądrze atomowym, przy badaniu promieni kosmicznych i zjawiska promieniotwórczości powstaje konieczność mierzenia krótkich odstępów czasu dla zdarzeń jednorazowych i nieregularnych.

Do takich zadań nadaje się przyrząd pomiarowy z oscylografem wysokonapięciowym. Zasada działania tego przyrządu jest następująca: dwa sygnały elektryczne, pomiędzy którymi należy zmierzyć odstęp czasu, podaje się na wejście układu elektrycznego przyrządu. Układ elektryczny steruje ruchem promienia elektronowego w oscylografie wysokonapięciowym. Przyrząd działa w ten sposób, że pierwszy przychodzący sygnał odchyła promień elektronowy od osi, drugi zaś powoduje ruch powrotny promienia. Ponieważ jednocześnie promień porusza się z dużą szybkością wzdłuż osi, to na ekranie pojawia się impuls prostokątny (rys. 45). Długość płaskiej części tego impulsu pozwala określić czas trwania badanego zjawiska. W celu wy skalowania przyrządu fotografuje się na ekranie zarówno impuls prostokątny, jak i krzywą sinusoidalną o znanej częstotliwości. Z porównania tych krzywych można wyznaczyć mierzony odstęp czasu. Na przykład jeśli generator wzorcowy wytwarza prąd zmienny o kształcie sinusoidalnym z częstotliwością 10 mln Hz, a wzdłuż płaskiej części impulsu prostokątnego układają się cztery okresy sinusoidy, to długość mierzonego odstęp czasu wynosi cztery dziesięciomilionowe części sekundy ($4 \cdot 10^{-7}$ sek.).

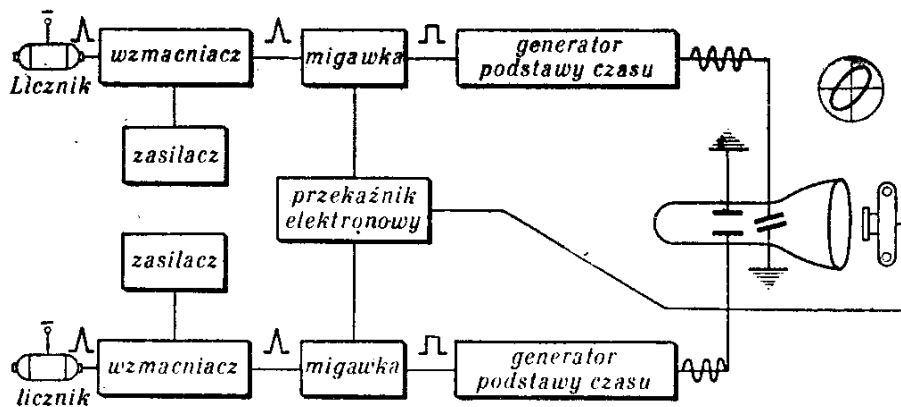


Rysunek 45 Impuls prostokątny

Przyrząd z oscylografem wysokonapięciowym nadaje się do pomiaru odstępów czasu rzędu milionowych i miliardowych części sekundy.

Za pomocą takiego przyrządu zmierzono szybkość rozpadu promieniotwórczego niektórych krótkożyjących izotopów promieniotwórczych, np. izotopu promieniotwórczego rtęci z ciężarem atomowym 197, którego okres połowicznego rozpadu (dla przejścia izomerycznego) jest równy siedmiu miliardowym częściom sekundy.

Przyrząd z różnicą faz. Pomiar krótkich odstępów czasu za pomocą oscylografu wysokonapięciowego jest przykładem bezpośredniego rozwiązania zadania. Ale możliwe są i inne rozwiązania przy użyciu oscylografu niskonapięciowego. Takim przyrządem jest m. in. opracowany przez autora przyrząd z różnicą faz.

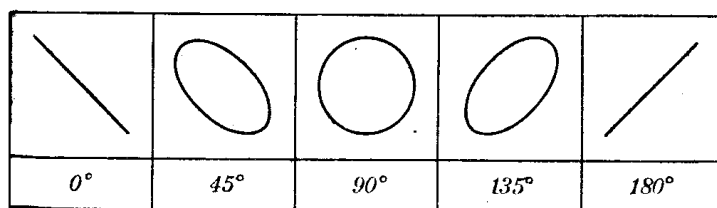


Rysunek 46 Schemat przyrządu z różnicą faz

Przyrząd ten składa się z dwu jednakowych odbiorczych kanałów wzmacniających, niskowoltowego oscylografu elektronopromieniowego i aparatu fotograficznego z automatycznym sterowaniem (ryc. 46). W każdym odbiorczym kanale wzmacniającym znajduje się kilka bloków: zasilacz, licznik, wzmacniacz, migawka i generator podstawy czasu. Zasilacz przekształca prąd zmienny z sieci na prąd stały o odpowiednim napięciu, potrzebny dla pracy układu. Licznik reaguje na przechodzenie cząstek naładowanych i daje sygnały, których amplitudę zwiększa wzmacniacz. Migawka reaguje na sygnał przychodzący ze wzmacniacza i sama daje prostokątny impuls prądu, trwający kilka dziesiątych części sekundy. Generator wytwarza prąd zmienny o częstotliwości 1 mln Hz. Impuls elektryczny, wytworzony w migawce, uruchamia generator na cały czas trwania tego impulsu, tj. na kilka dziesiątych części sekundy. Generator podstawy czasu doprowadza na płytki odchylające lampy oscyloskopowej napięcie sterujące odchyleniem plamki świetlnej na ekranie. Przekaznik elektroniczny steruje aparatem fotograficznym, który dokonuje zdjęć obrazu na ekranie oscylografu. Sygnały sterujące, przechodząc kolejno przez liczniki, wzmacniacze i migawki, włączają generatory podstawy czasu, przy czym drugi generator włącza się po pierwszym z opóźnieniem równym mierzonemu odstępowi czasu.

Rozważmy kilka przypadków włączenia generatora. Jeśli będzie pracował tylko jeden generator, przekaznik elektroniczny nie uruchomi aparatu fotograficznego i pojawiający się na ekranie obraz nie zostanie sfotografowany.

Jeśli opóźnienie drugiego generatora w stosunku do pierwszego jest równe zero, to napięcie na obu parach płytek oscylografu wzrasta jednocześnie, a na ekranie powstaje pochylona linia prosta (ryc. 47).



Rysunek 47 Figury odpowiadające różnym przesunięciom fazowym

Jeśli opóźnienie wynosi $\frac{1}{4}$ okresu drgań, tzn. różnica fazy między drganiami równa się 90° , to promień elektronowy zakreśli na ekranie oscylografu okrąg.

Jeśli różnica faz napięcia na płytkach odchylenia pionowego i poziomego zawarta jest w granicach od 0 do 90° na ekranie oscylografu pojawiają się mniej lub bardziej wydłużone elipsy,

Kiedy opóźnienie przekracza $\frac{1}{4}$ okresu, ale jest mniejsze od $\frac{1}{2}$ okresu, elipsy pochylone są w przeciwną stronę.

Przy opóźnieniu równym $\frac{1}{2}$ okresu i odpowiedniemu przesunięciu fazy o 180° powstaje prosta pochylona w przeciwną stronę. Kiedy przesunięcie fazy jest większe od 180° , cały cykl powtarza się.

Tak więc w zależności od różnicy w czasie zadziałania pierwszego i drugiego kanału na ekranie oscylografu pojawiają się określone figury. Z kolei kształt elips (stosunek ich półosi) określa wartość różnicy faz, a tym samym długość mierzonego odstępu czasu. Aby uniknąć niejednoznacznej interpretacji, zakres mierzonych odstępów czasu ogranicza się do przedziału odpowiadającego różnicom faz od 0 do 180° .

Selekcję odpowiednio krótkich odstępów czasu przeprowadza przełącznik elektronowy, który włącza aparat fotograficzny tylko wtedy, kiedy opóźnienie mieści się między 0 a $\frac{1}{2}$ okresu.

W odróżnieniu od przyrządów omawianych poprzednio, w przyrządzie z różnicą faz mierzony odstęp czasu określamy na podstawie kształtu figur na ekranie oscylografu, zamieniając za pomocą specjalnych migawek i generatorów krótkotrwałych, jednorazowe i nieregularne zjawiska na krócej lub dłużej trwające obrazy.

Zakres pomiarów tego przyrządu jest wyznaczony przez częstotliwość generatorów. Przy częstotliwości drgań 1 MHz, różnicy faz od 0 do 180° odpowiada przedział czasu od 0 do 0,5 μ sek. Ponieważ na podstawie zdjęć fotograficznych można odróżnić $\frac{1}{10}$ - $\frac{1}{20}$ tego przedziału to dokładność pomiaru wynosi $(2,5 - 5) \cdot 10^{-8}$ sek,

Aby otrzymać inny przedział mierzonych odstępów czasu, należy dobrać inną częstotliwość generatorów i inne parametry przełącznika elektronowego.

Opisane w tym rozdziale metody i przyrządy elektronopromieniowe do pomiarów krótkich odstępów czasu między dwoma zdarzeniami umożliwiają osiągnięcie dokładności rzędu milionowych i nawet miliardowych części sekundy, w tym również dla zjawisk jednorazowych i nieregularnych. Dzięki tym metodom zbadano wiele ważnych procesów, zachodzących w atomie, w jądrze atomowych i w promieniach kosmicznych, a także skonstruowano różnego rodzaju urządzenia radiolokacyjne.

Jednakże istnieje wiele procesów atomowych i jądrowych, których czas trwania jest jeszcze krótszy. Ważnym i aktualnym zadaniem jest pomiar odstępów czasu tysiące razy krótszych od miliardowej części sekundy.

Pomiar milionowych, miliardowych i bilionowych części sekundy

W opisanych metodach i przyrządach do pomiaru krótkich odstępów czasu zbliżyliśmy się do granicy osiągniętej przez współczesną technikę pomiarową. Potrzeba stworzenia tych nadzwyczaj szybko działających przyrządów zaistniała przy badaniu cząstek elementarnych, jądra atomowego i reakcji jądrowych.

Sukcesy osiągnięte przy badaniu własności cząstek elementarnych zbliżają nas coraz bardziej do zrozumienia procesów, zachodzących w jądrze atomowym. Pomiarów czasów trwania rozmaitych zjawisk mikroświata są koniecznym warunkiem zrozumienia ich natury i zbadania możliwości zastosowań technicznych. W szczególności badanie szybkości procesów związanych z jądrem atomowym ma duże znaczenie dla zrozumienia budowy materii i jest konieczne przy konstrukcji urządzeń, służących do wykorzystania energii jądrowej.

Wśród izotopów promieniotwórczych różnych substancji obok długożyjących są i takie, których okres połowicznego rozpadu, tj. czas, w ciągu którego rozpada się połowa pierwotnie istniejących atomów, jest bardzo krótki. Nawet dla tych samych pierwiastków okresy połowicznego rozpadu poszczególnych izotopów różnią się bardzo istotnie. Tak np. okres połowicznego rozpadu polonu 210 wynosi 138,3 dnia, polonu 216 - 0,16 sek., polonu 214 - $1,58 \cdot 10^{-4}$ sek., polonu 213 tylko $4,2 \cdot 10^{-6}$ sek., polonu 212 - $3 \cdot 10^{-7}$ sek.

Niektóre cząstki elementarne są trwałe, inne są nietrwałe i rozpadają się spontanicznie. Do tych ostatnich należą występujące w promieniowaniu kosmicznym mezony i hiperony. Średni czas życia dodatnich i ujemnych mezonów μ jest równy milionowym częściom sekundy, dodatnio i ujemnie naładowanych mezonów μ - stumilionowym częściom sekundy, cząstek Σ (hiperonów) - około dziesięciomiliardowej części sekundy (10^{-10} sek.), neutralnych cząstek Σ - około stumiliardowej części sekundy (10^{-11} sek.), a neutralnych mezonów π - ok. 10^{-15} sek.

W wielu przypadkach przy rozpadzie promieniotwórczym i w wyniku reakcji jądrowych powstają jądra w stanie wzbudzonym, tj. z pewnym nadmiarem energii. Jądro wzbudzone wraca do stanu normalnego emitując promienie γ . Proces ten zachodzi szybko, ale nie błyskawicznie i czas jego trwania jest różny dla poszczególnych izotopów promieniotwórczych. Tak np. złoto 198 przy rozpadzie β przechodzi w rtęć 198, której jądro znajduje się w stanie wzbudzonym i przechodząc do stanu normalnego emituje promienie γ . Przy rozpadzie β jądra złota 199, powstałe jądro rtęci 199 również znajduje się w stanie wzbudzonym i po pewnym czasie wysyła kwant promieniowania γ . Czas połowicznego rozpadu rtęci 199 wynosi około miliardowej części sekundy (10^{-11} sek.).

Jeszcze szybciej rozpada się wzbudzone jądro litu 7, powstałe w wyniku reakcji jądrowej oddziaływania boru z neutronem. Okres ten wynosi około dziesięciobilionowej części sekundy (10^{-13} sek.).

Dodatkowa trudność przy badaniu procesów jądrowych polega na tym, że badane zjawiska, np. rozpad promieniotwórczy jąder atomowych, pojawienie się różnych cząstek w strumieniu promieni kosmicznych itd. - nie występują periodycznie, lecz jednorazowo i nieregularnie.

Przy opracowywaniu metod i przyrządów do pomiarów bardzo krótkich odstępów czasu zarysowały się trzy ogólne kierunki.

W pierwszym, dąży się do stworzenia układów, pozwalających bezpośrednio mierzyć wartość odpowiedniego odstępu czasu, np. przez uruchomienie i zatrzymanie szybko działających przeliczników, lub przez otrzymanie na ekranie lampy oscyloskopowej obrazów o długości proporcjonalnej do mierzonego odstępu czasu itp. Takie metody przydatna przy pomiarach krótkich odstępu czasu aż do milionowych i miliardowych części sekundy były już przedmiotem naszych rozważań.

Drugi kierunek zmierza do stworzenia układu ze skalowanym opóźnieniem czasu i elementem układu rejestrującym jednoczesne dotarcie do niego dwóch sygnałów. Takie układy wymagają pracochłonnych i długotrwałych pomiarów dla dobrania potrzebnej, lecz z góry nieznannej wielkości opóźnienia czasu. Umożliwiły one dokonanie pomiaru bardzo krótkich odstępu czasu aż do pięciu stumiliardowych części sekundy ($5 \cdot 10^{-11}$ sek.).

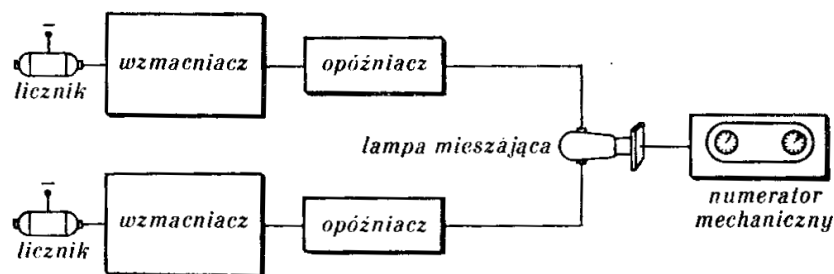
Trzeci kierunek polega na budowie specjalnych układów, uwzględniających specyficzne właściwości każdego badanego zjawiska i wynikające stąd możliwości pomiaru. Dzięki tym układom zmierzono eksperymentalnie odstępy czasu około dziesięciobilionowej części sekundy (10^{-13} sek.). Należy dodać, że wspomniany odstęp czasu 10^{-13} sek. jest granicą, której dotąd nie udało się przekroczyć przy pomiarach bardzo krótkich odstępu czasu.

Wartości jeszcze krótszych odstępu czasu, w ciągu których zachodzą pewne procesy jądrowe, otrzymano pośrednio, dzięki obliczeniom opartym na teoretycznych wnioskach dotyczących budowy jąder i porównaniu różnych ich charakterystyk. Taka metoda jest oczywiście cenna, ale mniej przekonująca od pomiarów bezpośrednich. Dlatego opracowanie eksperymentalnych metod pomiaru jeszcze krótszych odstępu czasu jest zadaniem wciąż aktualnym.

Niżej rozważymy eksperymentalne metody pomiaru krótkich odstępu czasu rzędu miliardowych i bilionowych części sekundy, oparte na zastosowaniu szybko działających urządzeń elektronowych specjalnego typu z uwzględnieniem specyfiki badanych procesów jądrowych.

Metoda koincydencji z opóźnieniem. Metoda ta jest bardzo prosta i opiera się na zastosowaniu w układzie takiego elementu, który reaguje tylko wtedy, kiedy działają na niego jednocześnie dwa sygnały, a nie reaguje na sygnały przychodzące osobno. Zadanie sprowadza się wówczas do tego, by doprowadzając do danego elementu odpowiednie sygnały elektryczne opóźnić pierwszy z nich o tyle, aby przyszedł jednocześnie z drugim i zmierzyć wartość wytworzonego opóźnienia.

Przyrząd, pracujący według metody koincydencji, składa się z dwóch odbiorczych kanałów wzmacniających: lampy mieszającej i przelicznika podłączonego na wyjściu układu (ryc. 48).



Rysunek 48 Schemat układu koincydencyjnego z opóźnieniem

Każdy odbiorczy kanał wzmacniający składa się z licznika promieniowania jonizującego, wzmacniacza i opóźniacza. Licznik rejestruje określony etap badanego procesu. np. rozpad promieniotwórczy, przelot cząstki naładowanej itd. W wyniku tego na wyjściu licznika pojawia się krótki sygnał prądu. Przy przechodzeniu sygnału od licznika przez wzmacniacz amplituda sygnału powiększa się określoną

ilość razy. Następnie sygnał dostaje się do obwodu układu opóźniającego, który ma postać skalowanej linii opóźniającej; jest to odcinek kabla koncentrycznego (tego samego typu, jaki używa się w telewizji), zwiniętego w spiralę. Jeśli żądane opóźnienie czasu ma wynosić około stumilionowej części sekundy, to odcinek kabla powinien mieć długość kilku metrów.

Przyrząd ma dwa odbiorcze kanały wzmacniające, przez które dochodzą do lampy mieszającej sygnały o początku i końcu badanego procesu. Dzięki obecności w tych kanałach skalowanych linii opóźniających, na lampę mieszającą można skierować oba sygnały jednocześnie, po odpowiednim opóźnieniu pierwszego sygnału w stosunku do drugiego. Taka konstrukcja opóźniaczy pozwala z dużą dokładnością zmierzyć wartość wnoszonego przez nie opóźnienia czasu.

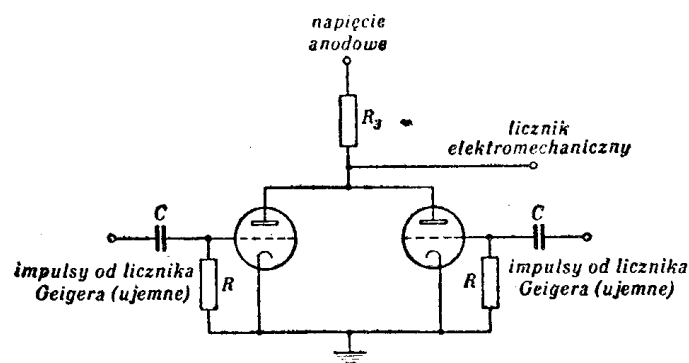
Lampa mieszająca składa się z katody, dwóch siatek sterujących i anody. Rozżarzona katoda wysyła elektrony, a skierowany ruch elektronów ku dodatniej anodzie stanowi prąd elektryczny. Na obie siatki sterujące podane jest wstępne napięcie ujemne. Tak więc w normalnym stanie lampy elektrony nie mogą przejść do anody - lampa jest zablokowana.

Przychodzące sygnały mają znak dodatni i odblokowują lampę. Jednakże prąd anodowy może płynąć przez lampę tylko wtedy, kiedy obie siatki zostaną otwarte jednocześnie.

Układ koincydencyjny z lampą mieszającą można porównać do obwodu elektrycznego z dwoma połączonymi szeregowo wyłącznikami; w takim obwodzie prąd płynie tylko wtedy, kiedy zamknięte są oba wyłączniki.

W układzie koincydencyjnym za lampą mieszającą znajduje się przelicznik, który zlicza ilość wszystkich reakcji układu.

Układy koincydencyjne z lampą mieszającą były stosowane w kilku ośrodkach badawczych. Dzięki temu udało się zbadać pewne procesy w promieniowaniu kosmicznym i jądrach atomowych, których czas trwania wynosił stumilionowe i miliardowe części sekundy. Jednakże większe zastosowanie znalazł układ koincydencyjny Rossiego. Układ ten jest podobny do układu z lampą mieszającą - reaguje tylko na dwa sygnały przychodzące jednocześnie, a nie reaguje na sygnały pojedyncze. Jednakże zasada działania układu Rossiego jest nieco inna: poprzednio, aby układ zadziałał, trzeba było odblokować lampę, w układzie Rossiego przeciwnie, chcąc otrzymać sygnał na wyjściu lampą należy zablokować i przerwać dopływ prądu.



Rysunek 49 „Powolny” układ koincydencyjny Rossiego

Układ koincydencyjny Rossiego składa się z dwóch lamp elektronowych, podłączonych do wspólnej oporności obciążenia (R_3). Obie lampy połączone są w taki sposób, że przy braku sygnałów płynie przez nie prąd, a ich wewnętrzny opór jest mały (ryc. 49). Opór obciążenia jest duży i wynosi od jednego do kilku milionów omów.

Tak więc otrzymujemy obwód elektryczny, w którym opór obciążenia i lampy połączone są szeregowo z baterią. Przy braku sygnałów obie lampy są odblokowane i ich wewnętrzna oporność jest mała; prawie cały spadek napięcia występuje wtedy na oporności obciążenia i potencjał anod obu lamp jest niewielki. Do anod przyłączony jest licznik elektromechaniczny, którego zadaniem jest liczenie powstających na wyjściu sygnałów. Pod nieobecność sygnałów napięcie podawane na liczniki jest zbyt małe, by licznik mógł reagować.

W układzie Rossiego sygnały elektryczne, podawane na siatki obu lamp, mają znak ujemny i każdy z nich blokuje na pewien czas lampę. Zablokowanie jednej lampy nie wpływa istotnie na ogólną oporność obu lamp, ponieważ są one połączone w układzie równoległym. Całkowity opór obu lamp przy pojawieniu się pojedynczego sygnału na siatce jest znacznie mniejszy od oporności obciążenia. W rezultacie pojedynczy sygnał w którejkolwiek z lamp prawie nie zmienia potencjału na ich anodach.

Podobna sytuacja powstanie, gdy jeden koniec cylindrycznej rurki z dwiema szczelinami z boku zatkamy korkiem, a w drugi będziemy wdychać powietrze, aby go usunąć. Szczeliny boczne, przez które uchodzi powietrze, uniemożliwiają nam oczywiście „wystrzelenie” korka. Sytuacja zmienia się niewiele, kiedy zakryjemy palcem tylko jedną ze szczelin, tak by powietrze mogło swobodnie uchodzić przez drugą. Jednakże wystarczy, zatkać choć na chwilę obie szczeliny, dmuchnąć w rurkę, by „korek” wystrzelił.

Mówiąc ściślej, układ koincydencyjny Rossiego jest podobny do obwodu elektrycznego z dwoma równolegle połączonymi wyłącznikami, w którym przerywamy dopływ prądu, wyłączając jednocześnie oba wyłączniki. Obie lampy układu Rossiego można zablokować tylko wtedy, gdy na ich wejście skierujemy jednocześnie dwa sygnały ujemne. Przy tym oporność wewnętrzna obu lamp gwałtownie wzrasta, a ogólny ich opór staje się porównywalny z opornością obciążenia. W rezultacie wzrasta również gwałtownie potencjał na anodach lamp i następuje zadziałanie podłączonego do anod lamp licznika elektromechanicznego.

Poza tym praca układu koincydencyjnego Rossiego z opóźnieniem przypomina działanie układu z lampą mieszającą. Całe urządzenie wyżej opisane, składa się z liczników, spełniających rolę czujników, dwu kanałów wzmacniających z liniami opóźniającymi, układu koincydencyjnego i podłączonego na wyjściu przelicznika.

Za pomocą wymienionych układów rozwiązano zasadnicze problemy fizyczne, wymagające pomiarów krótkich odstępów czasu.

Rozważmy jeden z nich.

W 1937 r. S. H. Neddermeyer i C. D. Anderson ustalili, że w składzie promieniowania kosmicznego istnieją cząstki o masie pośredniej. Cząstki te, nazwane mezonami, mają masę większą niż elektron, ale mniejszą niż proton. Masa mezonu μ równa się w przybliżeniu 209 masom elektronu, podczas gdy masa protonu jest 1836 razy większa od masy elektronu. Istnieją mezony μ z ładunkiem dodatnim i ujemnym. Wkrótce zauważono pewne osobliwości w zachowaniu się tych cząstek. Cząstki naładowane przechodząc przez warstwę materii tracą energię, na jonizację i są częściowo pochłaniane. Zazwyczaj zdolność przenikania cząstek ocenia się na podstawie stopnia ich pochłaniania w warstwie materii o danej gęstości i grubości. Aby uwzględnić jednocześnie oba te czynniki, masę substancji pochłaniającej określa się na podstawie ilości gramów danej substancji, przypadających na 1 cm² powierzchni. Okazało się, że mezony μ są silniej pochłaniane w powietrzu, niż w równoważnych pod względem masy warstwach ołowiu lub mosiądzu.

Tego rodzaju doświadczenia powtarzano wielokrotnie. Dokonano systematycznych badań natężenia mezonów u na poziomie morza i na różnych wysokościach, z zastosowaniem i bez zastosowania warstwy pochłaniającej.

Doświadczenia te potwierdziły występowanie nadmiernego pochłaniania mezonów u przy przechodzeniu przez grube warstwy powietrza. Co więcej, natężenie mezonów μ w powietrzu przy ruchu pod kątem okazało się słabsze niż przy ruchu w kierunku pionowym, chociaż uwzględniano przy tym wzrost masy powietrza, przez które przechodziły cząstki.

Zagadkowe zachowanie się mezonów wyjaśnił H. Kulenkampff, który przyjął, że mezony μ są nietrwałe i że średni czas ich życia jest tego samego rzędu, co czas przejścia przez warstwę atmosfery. W takiej sytuacji osłabienie natężenia strumienia mezonów μ przy przejściu przez warstwę atmosfery tłumaczy się nie tylko bezpośrednim ich pochłanianiem, ale również spontanicznym rozpadem. Tymczasem osłabienie natężenia mezonów μ przy przechodzeniu przez warstwę metalu wynika tylko z bezpośredniego ich pochłaniania, ponieważ długość drogi mezonu μ w równoważnej pod względem masy warstwie metalu wynosi zaledwie kilka centymetrów lub decymetrów i odpowiedni czas jest wielokrotnie mniejszy od średniego czasu życia mezonu u. Jak wykazały obliczenia średni czas życia poruszającego się mezonu μ jest równy $2,7 \cdot 10^{-6}$ do $2,9 \cdot 10^{-6}$ sek.

Z kolei należało określić czas życia spoczywającego mezonu μ .

Zgodnie z teorią względności skala czasu zależy od prędkości ruchu układu. Ścisłej mówiąc, każdy układ, poruszający się z pewną prędkością wobec innego układu, posiada swój własny czas.

W układzie współrzędnych, związanym z Ziemią, nasze laboratorium i znajdujące się w nim przyrządy pomiarowe są nieruchome, a mezony poruszają się względem nas. Czas, który uwzględniamy przy pomiarach jest czasem ziemskim. W tych warunkach szybkość przebiegu procesów obserwowanych przez nas w poruszającym się układzie, np. w mezonie μ , jest zwolniona.

Zgodnie z teorią względności zmiana skali czasu w poruszającym się układzie w porównaniu ze skalą czasu w układzie współrzędnych, związanym z laboratorium, zależy od kwadratu stosunku prędkości ruchu układu do prędkości światła w próżni, przy czym im większy jest ten stosunek, tym większa jest zmiana skali czasu.

Dla zwykłych „wielkich” ciał, np. mknącego samochodu, lecącego pocisku itp. poprawka na uwzględnienie zmiany skali czasu jest znikomo mała. Tak np. stosunek prędkości lecącego pocisku (300 m/sek.) do prędkości światła w próżni (300 000 km/sek.) jest równy jednej milionowej (10^{-6}). Kwadrat tego stosunku jest równy jednej bilionowej (10^{-12}) i odpowiednia zmiana skali czasu jest mniejsza od bilionowej części mierzonego odstępu czasu.

Sytuacja wygląda zupełnie inaczej dla układów, które poruszają się z prędkością bliską prędkości światła. Na przykład przy prędkości ruchu układu równej 150 000 km sek. stosunek prędkości układu do prędkości światła wynosi 0,5, kwadrat tego stosunku jest równy 0,25, a wydłużenie skali czasu dla poruszającego się układu wynosi 15% mierzonego odstępu czasu.

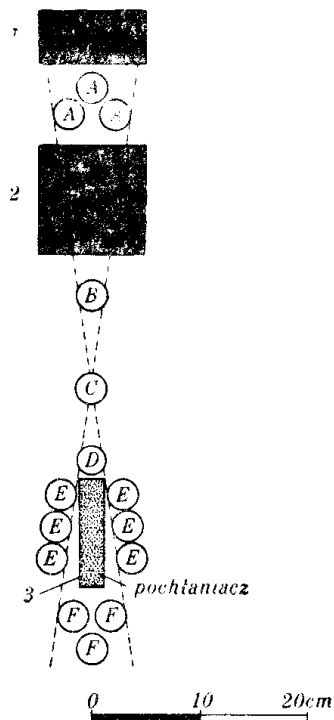
Przy rozpadzie ujemnego mezonu μ powstają elektron i neutrino, przy rozpadzie dodatniego - pozyton i neutrino. Znając energię i masę mezonów można obliczyć ich prędkość. Znając prędkość i średni czas życia poruszających się mezonów, można na podstawie wzorów teorii względności obliczyć średni czas życia spoczywających mezonów μ .

Taka pośrednia metoda wprowadza tym większy błąd do wyniku, im więcej jest ogniw w odpowiednim łańcuchu logicznym. Bezpośredni pomiar średniego czasu życia spoczywającego

mezonu μ ma ważne i zasadnicze znaczenie dla wzbogacenia naszej wiedzy o jego naturze i własnościach fizycznych. Żądany wynik moglibyśmy otrzymać rejestrując początkowo moment zahamowania mezonu, następnie moment pojawienia się powstałego przy jego rozpadzie elektronu lub pozytonu i w końcu mierząc odstęp czasu między tymi zdarzeniami. Ale jak to zrobić?

Zadanie to rozwiązał w 1941 r. F. Rasetti dzięki wykorzystaniu układu koincydencyjnego z opóźnieniem. Podobnie wyznaczyli w latach 1942-1943 średni czas życia spoczywającego mezonu B. Rossi i N. Nereson.

Schemat tego układu jest następujący (ryc. 50). Na drodze mezonów znajduje się kilka filtrów 1, 2, 3 i kilka grup liczników A, B, C, D, F. Wszystkie liczniki, oznaczone tą samą literą, są połączone ze sobą równoległe, tzn. pracują jako jeden licznik o większej powierzchni.



Rysunek 50 Układ doświadczalny do wyznaczania średniego czasu życia spoczywających mezonów

Liczniki grup A, B, C, D połączone są według układu koincydencyjnego, tzn. że przyrząd reaguje tylko wtedy, kiedy obserwowana cząstka przechodzi przez wszystkie te grupy liczników. W ten sposób z całego strumienia promieni kosmicznych wyodrębnia się wąską, skierowaną wiązkę złożoną tylko z takich cząstek, które są w stanie przejść przez dwa grube filtry ołowiowe 1 i 2; możliwe jest to jedynie dla cząstek określonego typu i energii. Tak więc „teleskop jądrowy” - wybiera cząstki żądanego typu.

Do obserwacji mezonów hamowanych służy filtr 3, za którym znajduje się jeszcze jedna grupa liczników (grupa F), połączona ze wszystkimi pozostałymi grupami w układzie antykoincydencyjnym. Przyrząd reaguje więc tylko wtedy, kiedy obserwowana cząstka przechodzi przez grupy liczników A, B, C, D, a nie przechodzi przez grupę liczników F, czyli rejestruje zahamowanie mezonów w pochłaniaczu.

Rozpad mezonów i powstałe przy tym elektrony lub pozytony rejestruje umieszczona po obu stronach filtru trzecia grupa liczników E, połączona z wszystkimi pozostałymi grupami według układu koincydencyjnego z opóźnieniem: układ jako całość reaguje tylko wtedy, kiedy mezon po przejściu

przez dwa pierwsze filtry i zahamowaniu w trzecim wysyła po upływie określonego czasu elektron lub pozyton.

Zmieniając wartość opóźnienia między momentem zadziałania grupy liczników A, B, C, D – F i grupy E i zaznaczając liczbę odpowiednich zdarzeń zarejestrowanych przez przyrząd, można wykreślić krzywą rozpadu mezonu. Pochylenie tej krzywej określa okres połowicznego rozpadu spoczywającego mezonu μ .

Okazało się, że okres ten jest równy $2,15 \pm 0,1$ milionowej części sekundy. Zgodnie z teorią względności jest on mniejszy od średniego czasu życia poruszającego się mezonu.

Układ koincydencyjny z opóźnieniem zastosowali G. B. Żdanow i A. A. Naumow przy badaniu promieni kosmicznych. Dzięki zastosowaniu tego układu potrafili oni na podstawie różnicy w czasie reakcji poszczególnych liczników wydzielić powolne mezony spośród dużej ilości różnych cząstek, wchodzących w skład promieniowania kosmicznego.

W ostatnich latach G. B. Żdanow przeprowadził badania w oparciu o tzw. hodokopy, skonstruowane przez L. N. Korablewa. W przyrządach tych bloki koincydencyjne z opóźnieniem są zbudowane na tyratronach nie wymagających żarzenia i pozwalają mierzyć krótkie odstępy czasu rzędu milionowych części sekundy. Znaczna operatywność tych urządzeń umożliwiła przeprowadzenie za ich pomocą wielu ważnych i interesujących badań własności fizycznych powolnych mezonów.

W skład promieniowania kosmicznego wchodzi cząstki jeszcze bardziej krótkożyjące; średni czas życia dodatnich i ujemnych mezonów- π wynosi stumilionowe części sekundy ($2,6 \cdot 10^{-8}$ sek.) cząstek Ξ i Σ - miliardowe i dziesięciomiliardowe części sekundy (10^{-9} – 10^{-10} sek.) neutralnych mezonów π – 10^{-15} – 10^{-16} sek.

Do wyznaczenia średniego czasu życia tych cząstek, opisany wyżej układ koincydencyjny Rossiego (zw. „powolnym”) nie nadaje się.

Aby wyjaśnić, jak powinien być zbudowany „szybki” układ koincydencyjny, zastanówmy się nad przyczynami, które określają szybkość jego reakcji. Powróćmy do „powolnego” układu Rossiego (ryc. 40) i przypomnijmy, że reakcja licznika elektromechanicznego następuje w wyniku jednoczesnego zablokowania obu lamp, gdy na anodach gwałtownie wzrasta napięcie.

Z jaką szybkością zachodzi to zjawisko i od czego ta szybkość zależy?

Lampy elektronowe, wchodzące w skład układu, mają pewną pojemność elektryczną. Jeśli sięgnąć do często wykorzystywanej analogii prądu elektrycznego z przepływem cieczy, to pojemność elektryczną można porównać ze zbiornikiem cieczy, oporność elektryczną z przekrojem rury, przez którą napełniamy zbiornik, a ładunek elektryczny z objętością cieczy. Im większy jest opór elektryczny, tym cieńsza jest rura; im większa jest pojemność elektryczna, tym większa jest objętość zbiornika.

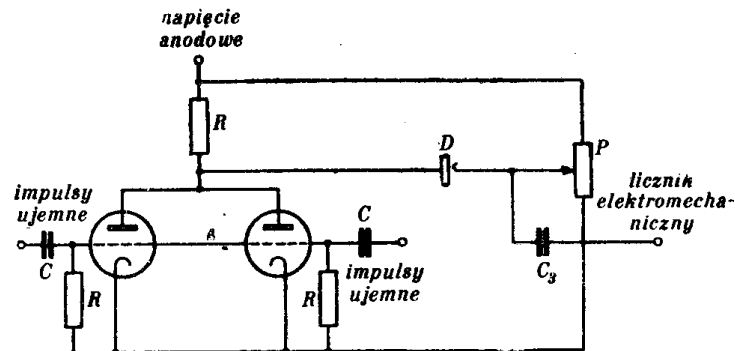
Aby wzrosło napięcie na anodzie lampy, płynący prąd musi uprzednio naładować jej pojemność. Czas potrzebny do tego jest proporcjonalny do pojemności i oporności obciążenia. Odwołując się do przytoczonej analogii można powiedzieć, że czas napełniania zbiornika jest proporcjonalny do objętości naczynia i odwrotnie proporcjonalny do grubości rury.

Jeśli pojemność lamp jest równa $25 \cdot 10^{-12}$ farada, a oporność obciążenia wynosi $4 \cdot 10^6$ omów, to stała czasu układu, równa iloczynowi tych liczb, wynosi 10^{-4} sek., tj. 100 μ sek. Układ zareaguje, jeśli na siatkach sterujących lamp pojawią się jednocześnie dwa sygnały o czasie trwania 100 μ sek. Jeśli czas trwania sygnałów sterujących jest równy 1 μ sek., to wzrost napięcia na anodach wyniesie tylko 1% pełnej wartości i układ nie zareaguje. Szybkość działania układu można zwiększyć zmniejszając

stałą czasu. Jak to zrobić? Oczywiście przez zmniejszenie pojemności lamp elektronowych, wchodzących w skład układu, lub zmniejszenie oporności obciążenia R.

Pierwszy sposób jest właściwy, ale korzyść jaką wtedy osiągamy niewielka, ponieważ nie ma lamp elektronowych o znacznie mniejszej pojemności.

Drugi sposób - zmniejszenie oporności obciążenia - wydaje się prosty i wygodny. Tak jednak nie jest. Przy znacznym zmniejszeniu oporności obciążenia zmiany napięcia na anodach, powstałe w wyniku zablokowania lamp, są niewielkie i przy istniejącym już napięciu anodowym trudno je dostrzec. W rezultacie układ źle rozróżni pojedyncze i podwójne sygnały i dość często błędnie reaguje.



Rysunek 51 „Szybki” układ koincencyjny Rossiego

Aby zmniejszyć stałą czasu i jednocześnie wyeliminować błędne reakcje, do układu przedstawionego na ryc. 51 włączono mały opór obciążenia R i dodano detektor D, potencjometr P i kondensator rozdzielający C. Dzięki obecności kondensatora rozdzielającego stała składowa napięcia anodowego nie ma wpływu na pracę licznika elektromechanicznego. W wyniku odpowiedniego przesunięcia wprowadzanego przez potencjometr P, impuls prądu wywołany działaniem sygnałów pojedynczych, nie dochodzi w ogóle do licznika elektromechanicznego. Jednocześnie impulsy prądu, wywołane sygnałami podwójnymi, dochodzą do licznika elektromechanicznego i powodują jego reakcje.

Taki „szybki” układ Rossiego pozwala mierzyć odstępy czasu aż do miliardowych części sekundy.

W ostatnich latach G. A. Graham i R. E. Bell przy użyciu „szybkiego” układu Rossiego z opóźnieniem, stosując metodę porównawczą, osiągnęli zdolność rozdzielczą metody do stumiliardowych części sekundy. W ten sposób określono średni czas życia wzbudzonego stanu jądra atomu rtęci 198. Przypomnijmy, że jądro atomu rtęci 198 powstaje przy rozpadzie promieniotwórczym jądra atomu złota 198, przy czym jądro rtęci 198 posiada pewien nadmiar energii, tj. znajduje się w stanie wzbudzonym.

Jądro atomu rtęci 198 wraca do stanu normalnego, wysyłając promienie γ . Proces ten zachodzi bezpośrednio po powstaniu wtórnego jądra. Średni czas życia wzbudzonego stanu rtęci 198 okazał się bardzo mały, rzędu jednej albo dwu stumiliardowych części sekundy (10^{-11} sek.).

Wyznaczenie średniego czasu życia stanu wzbudzonego jądra litu 7. Jeszcze krótsze odstępy czasu zmierzili J. O. Elliot i R. E. Bell stosując już nie metodę koincencji z opóźnieniem, lecz metodę uwzględniającą specyficzne właściwości konkretnego zjawiska. Podczas reakcji jądrowej boru 10 z neutronem, jądro boru 10 przechwytyje neutron i wysyła cząstkę α przechodząc w jądro litu 7. Powstałe przy tym jądro litu 7 znajduje się w stanie wzbudzonym i po pewnym, bardzo krótkim odstępie czasu, przechodzi do stanu podstawowego, wysyłając kwant γ . Średni czas życia tego stanu wzbudzonego należało właśnie zmierzyć.

Omawianą reakcję jądrową można przedstawić w taki sposób, że jądro boru 10 po przechwyceniu neutronu tworzy przejściowe jądro nietrwałe, które rozpada się następnie na dwie cząstki: cząstkę α i jądro litu 7, rozpryskujące się z dużą szybkością w różne strony. Pomiar wykazały, że wzbudzone jądro litu 7 wylatuje z energią 0,85 mln elektronowoltów, co odpowiada prędkości $4,8 \cdot 10^6$ m/sek.

Dla dalszych rozważań należy przypomnieć zjawisko Dopplera. Któż nie słyszał, jak zmienia się wysokość tonu gwizdka parowozu, przejeżdżającego obok nas z dużą szybkością? Jest to właśnie spowodowane zjawiskiem Dopplera. Jeśli gwizdek i obserwator nie zmieniają swego położenia, to ilość drgań powietrza, jakie dochodzą w ciągu 1 sek. do obserwatora, jest równa częstotliwości drgań gwizdka. Jeśli źródło dźwięku zbliża się z pewną prędkością do obserwatora, to ilość drgań słyszanych przez obserwatora w ciągu 1 sek. jest większa od częstotliwości drgań źródła i wskutek tego obserwator słyszy dźwięk o podwyższonej wysokości tonu. Zmiana częstotliwości jest proporcjonalna do stosunku prędkości ruchu gwizdka i prędkości dźwięku.

Zjawisko Dopplera obserwujemy także przy rozchodzeniu się fal świetlnych, które są postacią drgań elektromagnetycznych; w astronomii wykorzystuje się to zjawisko do wyznaczania prędkości ruchu gwiazd. Podobnie promienie γ są postacią drgań elektromagnetycznych i tu również zachodzi zjawisko Dopplera, tzn. zmiana częstotliwości drgań, dostrzegana przez obserwatora (przyrząd), przy zmianie prędkości ruchu źródła drgań względem obserwatora.

W naszym zadaniu prędkość ruchu źródła drgań, tj. wzbudzonego jądra litu 7, jest równa $4,8 \cdot 10^6$ m/sek. Ponieważ prędkość rozchodzenia się drgań elektromagnetycznych równa się $3 \cdot 10^8$ m/sek., to stosunek tych prędkości wynosi 0,016 lub 1,6%. Najnowsze przyrządy dostatecznie wyraźnie rejestrują taką zmianę częstotliwości promieni γ .

Wróćmy jednak do naszego zadania. Wiemy, z jaką prędkością porusza się wzbudzone jądro litu 7. Gdybyśmy mogli się dowiedzieć, jaką odległość przebywa ono, zanim wyśle kwant γ , wystarczyłoby to do wyznaczenia odstępu czasu, w ciągu którego jądro znajduje się w stanie wzbudzonym.

Doświadczenie przeprowadzono w następujący sposób: wzbudzone jądra litu 7 o różnej prędkości były hamowane i zatrzymywały się w substancji bombardowanej. Obserwując różnicę częstotliwości kwantów γ , wysyłanych przez zahamowane jądra litu 7 w warstwach o różnej grubości i gęstości, uczeni wyznaczyli długość przebiegu wzbudzonego jądra, a zatem również średni czas życia stanu wzbudzonego, który, jak się okazało, wynosi $0,75 \pm 0,25$ dziesięciobilionowej części sekundy ($0,75 \cdot 10^{-13}$ sek.).

Otrzymana wartość jest granicą, której dotąd nie przekroczono przy bezpośrednich pomiarach krótkich odstępów czasu.

Tymczasem czas trwania niektórych procesów jądrowych jest jeszcze mniejszy. Obecnie aktualnym zadaniem jest pomiar odstępów czasu tysiące razy mniejszych od bilionowej części sekundy, np. średniego czasu życia neutralnego mezonu π ($10^{-15} - 10^{-16}$ sek.).

Badania tego rodzaju są nie tylko interesujące i pożyteczne, ale w wielu przypadkach mają zasadnicze znaczenie i obiecują niemało ważnych odkryć temu, kto potrafi opracować i zastosować odpowiednie metody.

Wymienione przyrządy do pomiaru czasu pozwalają zbadać i zrozumieć wiele ważnych i interesujących problemów, związanych z budową materii i zjawiskami promieniotwórczości. Przy tym korzyść jest obustronna: przyrządy do pomiaru czasu ułatwiają rozwiązywanie zadań fizycznych, a zjawiska fizyczne służą za podstawę przy opracowywaniu nowych metod pomiaru czasu.

W szczególności udało się zastosować zjawisko rozpadu promieniotwórczego do pomiaru długich odstępów czasu. O tym, jak to się stało, opowiemy w następnych rozdziałach.

12

Pomiar długich okresów czasu za pomocą „zegara promieniotwórczego”

Zasada działania „zegara promieniotwórczego”. Zastosowanie substancji promieniotwórczych umożliwiło opracowanie wielu interesujących metod pomiaru długich okresów czasu aż do tysięcy, milionów i miliardów lat.

W zrozumieniu istoty tych metod pomogą nam wiadomości z dziedziny budowy materii i promieniotwórczości. Jak wiadomo, wszystkie ciała w przyrodzie składają się z wielu pierwiastków: żelaza, siarki, węgla, wodoru, tlenu itd. Atomy tych pierwiastków łączą się w mniej lub bardziej złożone układy - molekuly, które tworzą różnorodne związki chemiczne.

Atomy także mają złożoną budowę. Każdy atom składa się z dodatnio naładowanego jądra, wokół którego wirują ujemnie naładowane elektrony.

Najmniejsza wartość ładunku elektrycznego, znana w przyrodzie, odpowiada ładunkowi elektronu i wynosi $4,8 \cdot 10^{-10}$ elektrostatycznej jednostki ładunku. W fizyce jądrowej przyjmuje się, że ładunek elektronu jest równy -1 , a ładunek protonu $+1$. Każdy pierwiastek chemiczny posiada określoną liczbę atomową równą ładunkowi jego jądra i określony ciężar atomowy w stosunku do tlenu, którego ciężar atomowy przyjęto jako 16.

Wszystkie własności chemiczne różnych substancji są zdeterminowane przez budowę powłoki elektronowej ich atomów. Własności fizyczne atomu określa struktura jego jądra.

Jedną z ważnych i jednocześnie zadziwiających właściwości materii jest ogromna trwałość pewnych atomów przy jednoczesnej nietrwałości innych.

Atomy dowolnych substancji mogą przejść złożoną drogę różnorodnych połączeń chemicznych, nie zmieniając przy tym swych własności fizycznych. Pod działaniem olbrzymich ciśnień i wysokiej temperatury atomy węgla tworzą kryształy diamentu. W połączeniu z tlenem atomy węgla dają tlenek węgla. Przy pochłanianiu tlenku węgla przez rośliny, atomy węgla wchodzi w skład złożonych związków organicznych żywej komórki. Po obumarciu rośliny i jej rozkładzie atomy węgla mogą wejść w skład ropy naftowej, utworzyć węgiel kamienny.

Jeśli po tych wszystkich przemianach wydzielić atomy węgla z rośliny, węgla kamiennego lub diamentu, to okaże się, że wszystkie one są identyczne. Analogicznie jest z innymi atomami, niezależnie od tego w skład jakich związków chemicznych wchodziły.

Dzieje się tak dlatego, że w najrozmaitszych reakcjach chemicznych biorą udział tylko najbardziej zewnętrzne, „wartościowe” elektrony powłoki elektronowej atomu, a jądro atomowe nie podlega przy tym żadnym zmianom. W wyniku wielu doświadczeń, przeprowadzonych w specjalnych laboratoriach, wykazano, że ani temperatura kilku tysięcy stopni, ani ciśnienia tysięcy atmosfer nie zmieniają fizycznej natury materii, lecz tylko jej strukturę krystaliczną i wiązania chemiczne.

Jednocześnie istnieją atomy, które rozpadają się spontanicznie, bez oddziaływania z zewnątrz, przekształcając się w inne atomy, np. rad przechodzi w radon, uran w tor, polon w ołów itd. Takie substancje nazywamy promieniotwórczymi.

Trwałość jednych atomów i promieniotwórczość innych jest uzależniona od budowy ich jąder. Przypomnijmy, że jądra wszystkich atomów składają się z protonów i neutronów. Ładunek protonu jest równy +1, neutron ładunku elektrycznego nie posiada. Obie te cząstki nazywamy ciężkimi, ponieważ ich masa jest ok. 2000 razy większa od masy elektronów.

O trwałości jądra decydują siły jądrowe, działające między cząstkami wchodzącymi w jego skład. Oprócz tych sił w jądrze atomowym między jednoimiennie naładowanymi protonami działają siły odpychania elektrycznego. Własności jądra atomowego zależą od ilości protonów i neutronów, które wchodzi w jego skład. Przy pewnym ich stosunku jądro może być trwałe, przy innym - nietrwałe, promieniotwórcze. Na przykład znamy trzy izotopy wodoru, których ciężar atomowy wynosi 1, 2, 3. Przypomnijmy: że izotopami danego pierwiastka nazywamy substancje o takiej samej liczbie atomowej, ale z różnym ciężarem atomowym. Jądro pierwszego z nich składa się z jednego protonu, jądro drugiego - z jednego protonu i jednego neutronu, jądro trzeciego - z jednego protonu i dwóch neutronów - są to: wodór lekki, wodór ciężki albo deuter i tryt. Pierwsze dwa izotopy są trwałe, a trzeci - promieniotwórczy.

Każdy pierwiastek ma pewną ilość izotopów. Atomy pierwiastków o małym i średnim ciężarze atomowym aż do ołowiu posiadają izotopy trwałe i promieniotwórcze, atomy cięższych pierwiastków tylko promieniotwórcze. Tak np. znamy sześć izotopów węgla: ${}^{10}_6\text{C}$ ${}^{11}_6\text{C}$ ${}^{12}_6\text{C}$ ${}^{13}_6\text{C}$ ${}^{14}_6\text{C}$ ${}^{15}_6\text{C}$. Jądra atomów tych izotopów są trwałe w bardzo różnym stopniu.

Izotopy węgla

Izotop	Ilość cząstek w jądrze		Okres połowicznego rozpadu
	protonów	neutronów	
Węgiel 10	6	4	19,1 sek.
Węgiel 11	6	5	20,4 min,
Węgiel 12	6	6	trwały
Węgiel 13	6	7	trwały
Węgiel 14	6	8	5568 lat
Węgiel 15	6	9	2,4 sek.

Jądro atomu węgla, podobnie jak i innych lekkich pierwiastków, jest najtrwalsze, jeśli ilość protonów i neutronów jest w nim jednakowa i tym mniej trwałe, im bardziej różni się ilość protonów od ilości neutronów.

Podczas przemiany promieniotwórczej węgla jeden z neutronów w jądrze przekształca się w proton, przy tym jądro wysyła elektron. Ładunek jądra zwiększa się o jedną i w ten sposób atom węgla przechodzi w atom azotu.

Potas ma osiem izotopów, wśród nich są dwa trwałe: potas 39 (93,08%) i potas 41 (6,91%) oraz sześć promieniotwórczych. W potasie neutralnym znajduje się zawsze pewna niewielka domieszka (0,0119%) promieniotwórczego potasu 40, o okresie połowicznego rozpadu równym 1,32 mld lat. Rozpad promieniotwórczy potasu 40 może nastąpić dwoma sposobami: w jednym przypadku powstaje trwały wapń 40, w drugim - trwały argon 40.

W atomach ciężkich pierwiastków, wskutek stale wzrastającego wzajemnego odpychania protonów jądro jest najtrwalsze wtedy, kiedy zawiera więcej neutronów niż protonów. Im cięższy jest pierwiastek, tym bardziej jest to widoczne. Przy tym każdy pierwiastek posiada optymalną, ze względu na trwałość jądra, wartość stosunku ilości protonów do neutronów; im bardziej dane jądro odchyła się od tego optymalnego modelu, tym bardziej jest ono nietrwale i tym krótszy jest jego okres połowicznego rozpadu.

Jeden z najcięższych atomów - atom uranu - ma 14 izotopów promieniotwórczych. Okresy połowicznego rozpadu poszczególnych izotopów są bardzo różne: od 1,3 min. dla uranu 227 do 7,13 • 10⁸ lat dla uranu 235 i 4,49 • 10⁹ lat dla uranu 238. W wyniku przemiany promieniotwórczej uran przechodzi w tor, który z kolei jest promieniotwórczy i także ulega rozpadowi. W rezultacie długiego łańcucha przemian powstaje trwały izotop ołowiu 206. Poszczególne ogniwa tego łańcucha tworzą promieniotwórczy szereg uranu.

Prócz szeregu uranowego istnieją jeszcze trzy szeregi promieniotwórcze - toru, aktynu i neptunu. Łańcuch przemian promieniotwórczych w szeregu torowym kończy się trwałym izotopem ołowiu 208. Ostatnim elementem w łańcuchu przemian szeregu aktynowego jest ołów 207, a szeregu neptunowego - bizmut 209.

Przeglądając tabelę izotopów łatwo się przekonamy, że izotopy promieniotwórcze poszczególnych pierwiastków są szeroko rozpowszechnione i że szybkość ich rozpadu jest bardzo różna. Chcąc więc oprzeć metodę pomiaru czasu na rozpadzie substancji promieniotwórczych mamy do dyspozycji dostatecznie duży wybór izotopów.

Bardzo ważny jest fakt, że szybkość rozpadu substancji promieniotwórczych nie zależy od warunków zewnętrznych i jest stała dla każdego izotopu. Stwierdzono, że ani najwyższe temperatury i ciśnienia, istniejące w głębi Ziemi, ani najrozmaitsze związki chemiczne (z nielicznymi wyjątkami) nie mają wpływu na szybkość rozpadu substancji promieniotwórczych.

Dzięki stałej szybkości rozpadu substancji promieniotwórczych, a także dzięki istnieniu wielu izotopów, których okres połowicznego rozpadu wynosi tysiące, miliony i miliardy lat, powstała możliwość zastosowania tych izotopów jako „zegara promieniotwórczego” do określania wieku znalezisk archeologicznych sprzed tysięcy i dziesiątków tysięcy lat, wieku skał wynoszącego miliony i setki milionów lat, a także wieku Słońca i gwiazd równego miliardom lat.

„Zegar promieniotwórczy” nie jest przyrządem, lecz umowną nazwą metody lub, ściślej, grupy metod, w których stosuje się zjawisko rozpadu promieniotwórczego do określania wieku bezwzględnego, tj. odstępu czasu, jaki minął od początku badanego procesu do chwili obecnej.

Dla lepszego zrozumienia zasad, na których opierają się te metody, wykorzystamy analogię ze znanym już nam... zegarem ogniowym.

Pomiar czasu w zegarze ogniowym polega na tym, że przygotowane w odpowiedni sposób pręciki spalają się ze stałą, z góry znaną szybkością. Znając początkową długość pręcika i mierząc w razie potrzeby długość niespalonej jego części, można określić, ile czasu minęło od rozpoczęcia spalania. Analogia ta nie jest zupełna z tego względu, że w pręciku zegara ogniowego w ciągu każdej godziny spala się odcinek o jednakowej długości, a ilość substancji promieniotwórczej zmniejsza się z każdą godziną określoną ilość razy. Na przykład można przygotować taki pręcik do zegara ogniowego, który w ciągu godziny będzie się spalał o 1 cm. Jeśli początkowa długość pręcika wynosiła 64 cm, to po 4 godz. spalania długość pręcika wyniesie 60 cm, a po 50 godz. - 14 cm itd., ale zawsze w ciągu jednej godziny będzie spalał się tylko 1 cm.

Jeżeli okres połowicznego rozpadu substancji promieniotwórczej jest równy 1 godz. i jeśli początkowo mieliśmy 64 g tej substancji, to po godzinie zostaną 32 g, a po 2 godz. - 16 g, po 3 godz. - 8 g itd. Zatem w ciągu pierwszej godziny ilość substancji promieniotwórczej zmniejszy się o 32 g, w ciągu drugiej godziny - o 16 itd.

Długość pręcika w zwykłym zegarze ogniowym zmniejsza się zgodnie z postępowaniem arytmetycznym. Jeśli w momencie początkowym była ona równa A, to po 1, 2, 3 godz. wyniesie A - 1, A - 2, A - 3 itd.

Ilość substancji promieniotwórczej zmniejsza się zgodnie z postępowaniem geometrycznym. Jeśli w początkowym momencie ilość substancji promieniotwórczej była równa B, to po 1, 2, 3 godz. wyniesie ona: $B \cdot \frac{1}{2}$, $B \cdot \frac{1}{4}$, $B \cdot \frac{1}{8}$, itd.

Najważniejsze jednak jest to, że szybkości rozpadu są stałe i z góry określone. Aby uprościć dalsze rozważania przyjmijmy, że mamy zegar ogniowy z niezwykle długim pręcikiem, którego długość zmniejsza się zgodnie z postępowaniem geometrycznym. Rozpatrzmy teraz trzy zasadnicze przypadki określania czasu na podstawie spalania się tego niezwykle długiego pręcika, odpowiadające trzem grupom metod promieniotwórczych pomiaru czasu.

Przypadek 1. Znamy początkową i końcową długość pręcika oraz szybkość jego spalania. Należy wyznaczyć odstęp czasu.

Niech początkowa długość pręcika wynosi 64 cm i niech spalanie zachodzi zgodnie z postępowaniem geometrycznym, w taki sposób, że po 1 godz. pozostaje połowa pręcika, po 2 godz. - ćwierć itd. Jeśli w pewnym momencie długość pręcika wynosi już tylko 4 cm, oznacza to, że od momentu rozpoczęcia spalania minęły 4 godz.

Pomiar wielu znalezisk archeologicznych pochodzenia biologicznego za pomocą węgla promieniotwórczego odpowiada właśnie rozważanemu przypadkowi.

Przejdźmy teraz do rozważań innych metod promieniotwórczych wyznaczania bezwzględnego wieku. Oczywiście nie zawsze znamy początkową ilość substancji promieniotwórczej.

Jak postąpić, jeśli początkowa długość „pręcika” nie jest znana?

Kontynuując analogię z zegarem ogniowym przyjmijmy, że spalona część pręcika zamienia się w popiół i ilość popiołu odpowiada dokładnie długości tej części.

Przypadek 2. Znamy długość niespalonej części pręcika i szybkość jego spalania, a także ilość popiołu. Należy wyznaczyć okres czasu. Jeśli pomiary wskazują, że długość niespalonej części pręcika wynosi 16 cm, ciężar popiołu 112 g, a długość pręcika co godzinę zmniejsza się dwukrotnie i przy spalaniu 1 cm pręcika powstaje 1 g popiołu, to łatwo stwierdzić, że od momentu zapalenia pręcika minęły 3 godz.

Taka jest właśnie zasada pomiaru bezwzględnego wieku skał metodą uranowo-ołowiową i metodą helową, a także zasada wyznaczania bezwzględnego wieku minerałów, zawartych w meteorytach metodą potasowo-argonową i zasada określania wieku Słońca i gwiazd metodą wodorowo-helową.

Opisana grupa metod znajduje szerokie zastosowanie w różnego rodzaju badaniach. Jednakże w wielu przypadkach metody te są nie dość dokładne. Nie jest bowiem pewne, czy w ciągu mierzonych ogromnych okresów czasu część produktów rozpadu substancji promieniotwórczych nie została wyłukana ze skały.

W związku z tym opracowano trzecią grupę metod, która opiera się na nieco innej zasadzie pomiaru. Wróćmy znów do porównania z zegarem ogniowym. Wyobraźmy sobie, że mamy pręciki o różnych

kolorach, np. czerwonym i niebieskim, z których każdy spala się z inną, ale znaną nam szybkością. Prócz tego, niech każdy pręcik przy spalaniu daje popiół odpowiedniego koloru: czerwonego i niebieskiego, a ilość popiołu niech dokładnie odpowiada długości spalonej części pręcika.

Przypadek 3. Zmierzono ilość popiołu każdego koloru i znamy szybkości spalania pręcików. Zakładamy, że pręciki zapalono jednocześnie i że wszystkie były takiej samej długości. Należy wyznaczyć odstęp czasu.

Przypuśćmy, że pomiary wykazały, iż przy spalaniu się pręcika czerwonego jego długość zmniejsza się dwukrotnie w ciągu godziny, a przy spalaniu się pręcika niebieskiego długość zmniejsza się do połowy w ciągu pół godziny i że 1 g popiołu powstaje w wyniku spalania 1 cm któregośkolwiek z pręcików.

Jeśli po zebraniu popiołu okaże się, że mamy 16 g popiołu czerwonego i 4 g popiołu niebieskiego, to można łatwo przekonać się, że od momentu, kiedy pręciki zaczęły się palić, minęły dwie godziny.

Na tej właśnie zasadzie opieramy się przy pomiarach bezwzględnego wieku skał; rolę różnokolorowego popiołu odgrywają wtedy izotopy ołowiu powstałe w wyniku rozpadu promieniotwórczego uranu 238, aktynouranu 235 i toru 232.

Może ktoś odnieść wrażenie, że metoda ta wymaga dodatkowo znajomości stosunku ilości substancji promieniotwórczych w chwili początkowej. Tak jednak nie jest. Znajomość aktualnego stosunku ilości wyjściowych substancji promieniotwórczych i szybkości ich rozpadu wystarcza do przeprowadzenia obliczeń według tej metody. Na przykład aktualny stosunek ilości uranu 238 i aktynouranu 235 w uranie naturalnym wynosi 139, a szybkość ich rozpadu jest znana itd.

Teraz możemy przejść do wyjaśnienia tych konkretnych zadań, dla których opracowano i zastosowano „zegary promieniotwórcze”.

Pomiar czasu za pomocą węgla promieniotwórczego (metoda C^{14}). Węgiel należy do pierwiastków bardzo szeroko rozpowszechnionych w przyrodzie. Spełnia on ważną rolę w wielu złożonych związkach chemicznych. W molekułach białka obok innych atomów znajdują się również atomy węgla. Tak więc węgiel zawsze towarzyszy wszystkim związkom organicznym. Węgiel spotykany w postaci naturalnej w przyrodzie stanowi mieszaninę dwóch trwałych izotopów: węgla 12 (98,9%) i węgla 13 (1,1%) i bardzo małej ilości promieniotwórczego węgla 14.

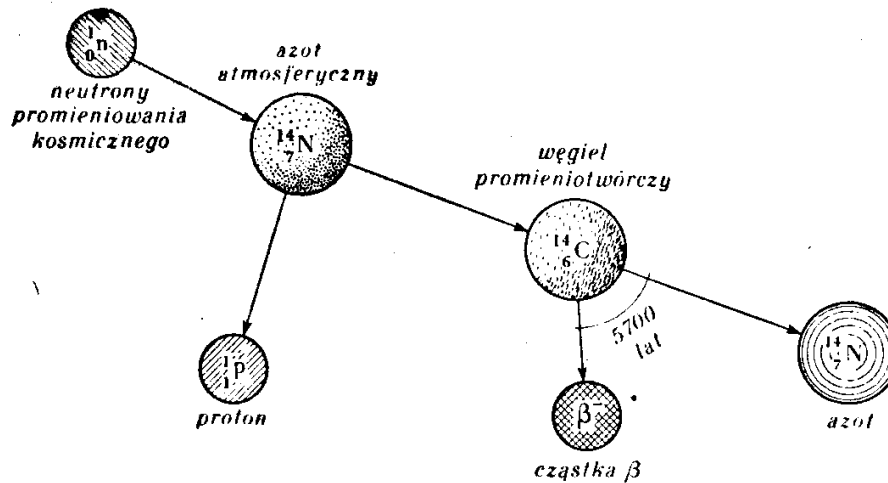
Okres połowicznego rozpadu węgla 14 wynosi 5568 lat albo w przybliżeniu 5600 lat. Jest to wartość niewielka w porównaniu z czasem istnienia życia organicznego na Ziemi lub z wiekiem samej Ziemi i gdyby zapas węgla promieniotwórczego stale się nie zwiększał, to po kilkuset tysiącach lat zniknąłby całkowicie.

Jak powstaje węgiel promieniotwórczy?

Promienie kosmiczne przychodzą na Ziemię z przestrzeni międzygwiazdnych. Posiadają one bardzo wielką energię. Pośród innych cząstek w ich składzie znajdują się również neutrony. Przy przejściu przez atmosferę ziemską neutrony promieniowania kosmicznego oddziałują z jądrami atmosferycznego azotu i zachodzi następująca reakcja jądrowa: neutron zderzając się z jądrem atomu azotu tworzy wraz z nim przejściowy układ nietrwały, który po bardzo krótkim czasie wysyła proton i przekształca się w jądro promieniotwórczego węgla 14 (ryc. 52).

Przemiana jądra dość szybko pociąga za sobą przebudowę powłoki elektronowej i w ten sposób powstaje atom węgla, pod względem chemicznym identyczny z wszystkimi innymi atomami tego pierwiastka. Łącząc się z atomami tlenu tworzy on dwutlenek węgla. Razem ze zwykłym dwutlenkiem węgla, znajdującym się w powietrzu, jest pochłaniany przez rośliny i wchodzi w skład węglanów,

rozpuszczonych w wodach oceanów i mórz itd. Tak więc wytworzony przez neutrony promieniowania kosmicznego węgiel 14 wchodzi w skład ogólnego biochemicznego cyklu życia na Ziemi.



Rysunek 52 Schemat procesu powstania i rozpadu węgla 14

Jądro atomu węgla 14 jako izotopu promieniotwórczego rozpada się po pewnym czasie. Powstaje wtedy cząstka β (elektron), a jądro węgla 14 przechodzi w jądro trwałego izotopu azotu 14 (patrz ryc. 52).

Każdy żywy organizm znajduje się w stanie nieustannej wymiany z otaczającym środowiskiem, pochłaniając pewne substancje i wydzielając inne. Dlatego też względna zawartość węgla promieniotwórczego w żywych roślinach jest dokładnie taka sama, jak w atmosferze. Wartość tego stosunku została zmierzona i jest dobrze znana: zapewnia ona 12 rozpadów promieniotwórczych w ciągu minuty na 1 g naturalnej mieszaniny wszystkich izotopów węgla.

Po obumarciu rośliny ustaje wymiana węgla z otoczeniem. W ściętym drzewie z biegiem czasu ilość trwałego węgla nie ulega zmianie, a ilość promieniotwórczego węgla 14 zmniejsza się z określoną szybkością.

Wracając do rozważanej wyżej analogii ze spalającymi się pręcikami zegara ogniowego można łatwo stwierdzić, że „zegar promieniotwórczy” odpowiada pierwszemu przypadkowi, kiedy znamy początkową długość pręcika i szybkość jego spalania. W danym przypadku będzie to zawartość promieniotwórczego węgla 14 w dopiero co ściętym drzewie, która odpowiada 12 rozpadom promieniotwórczym w ciągu minuty na 1 g naturalnej mieszaniny węgla i okres połowicznego rozpadu węgla 14 równy 5600 lat.

Aby określić bezwzględny wiek przedmiotów pochodzenia organicznego, należy, podobnie jak i w przypadku z zegarem ogniowym, wyznaczyć „długość pręcika” w danej chwili, co w „zegarze promieniotwórczym” odpowiada ilości rozpadów w ciągu minuty, obserwowanych w 1 g węgla, otrzymanego z badanego przedmiotu przez jego spalanie. Jeśli pomiary dają sześć rozpadów w ciągu minuty na 1 g węgla, oznacza to, że bezwzględny wiek przedmiotu wynosi 5600 lat. Jeśli zauważymy tylko trzy rozpadów w ciągu minuty na 1 g węgla, możemy stąd wnosić, że minęło 11200 lat itd.

„Zegar promieniotwórczy” odkrył przed archeologami nowe, niezwykle ważne dla nich możliwości datowania zdarzeń z odległej przeszłości. Jednakże przed praktycznym zastosowaniem tej metody trzeba było uprzednio sprawdzić, w jakim stopniu zapewnia ona prawidłowe wyniki. Trudność polegała przede wszystkim na znalezieniu odpowiednich do tego celu obiektów pochodzenia organicznego sprzed paru tysięcy lat, których wiek jest dobrze znany.

Do pomiarów kontrolnych wybrano siedem różnych kawałków drewna: 1) kawałek jodły, której średni wiek na podstawie pierścieni w pniu oceniano na 1372 ± 50 lat (znaki + i - oraz liczba 50 wskazują na dokładność określenia wieku; w danym przypadku wiek zawiera się w granicach od 1322 do 1422 lat); 2) kawałek drewna ze skamieniałej trumny (Egipt), której wiek na podstawie danych historycznych oceniono na 2149 ± 150 lat; 3) kawałek drewna z podłogi pałacu (Syria), którego wiek na podstawie danych historycznych określono na 2624 ± 50 lat; 4) wewnętrzna część pnia sekwoi, którego pierścienie odpowiadały przedziałowi czasu od 1031 do 928 r. p.n.e., tzn. średniemu wiekowi 2928 ± 52 lata; 5) kawałek deski z łodzi żałobnej faraona Sezostrisa; wiek tego obiektu oceniano na 3792 ± 50 lat; 6) i 7) ostatnie dwa przedmioty miały w przybliżeniu jednakowy wiek 4600 ± 75 lat. Pierwszy z nich to kawałek deski cyprysowej z grobowca Snofru w Medum, drugi - kawałek deski akacjowej z grobowca Dżozera w Sakkarze.

Pomiary potwierdziły przypuszczenia i obliczenia uczonych. Ilość węgla promieniotwórczego zawartego w tych fragmentach była rzeczywiście mniejsza niż w rosnących współcześnie drzewach. Ilość rozpadów promieniotwórczych na 1 g węgla otrzymanego po spaleniu tych kawałków drewna okazała się tym mniejsza, im starszy był obiekt. W wyników pomiarów otrzymano następujące dane: 1) jodła (1372 lata), 11 rozpadów promieniotwórczych w ciągu minuty na 1 g węgla; 2) skamieniała trumna (2149 lat), 9,5 rozpadów na 1 g węgla; 3) deska z pałacu syryjskiego (2624 lata), 9,0 rozpadów w ciągu minuty na 1 g węgla; 4) kawałek drewna sekwoi (2928 lat), 8,5 rozpadów w ciągu minuty na 1 g węgla; 5) deska z łodzi żałobnej faraona Sezostrisa (3792 lata), 8,0 rozpadów w ciągu minuty na 1 g węgla; 6) i 7) deski z drewna cyprysowego i akacjowego z grobowców Snofru i Dżozera (4600 lat), 7,0 rozpadów w ciągu minuty na 1 g węgla.

Te dane doświadczalne są zgodne z wynikami otrzymanymi w drodze obliczeń. Tak więc metoda wyznaczania wieku obiektów pochodzenia organicznego na podstawie względnej zawartości w nich węgla promieniotwórczego w pełni zdała egzamin i została sprawdzona na wielu obiektach, liczących od 1372 do 4600 lat.

Po sprawdzeniu tej metody liczni badacze zaczęli stosować węgiel promieniotwórczy do wyznaczania bezwzględnego wieku najrozmaitszych obiektów. Na przykład określano wiek obiektów, znalezionych w torfowiskach i porównywano go z chronologią opartą na badaniach pyłków i zarodników dawnych roślin. Badania potwierdziły zgodność tych dwóch metod. Na podstawie pomiarów względnej zawartości węgla promieniotwórczego w wypalonych kościach, znalezionych podczas wykopalisk w Iranie, archeologowie określili wiek interesującej ich warstwy (mezolitu) na 8-11 tys. lat. Resztki węgla pozwoliły również datować za pomocą tej metody warstwę kulturową jaskini Lascaux (Francja), której ściany pokryte były prahistorycznymi malowidłami. Wiek tej warstwy określono na 15616 ± 900 lat. W ten sposób archeologowie otrzymali ważne punkty oparcia.

Obecnie metoda pomiaru czasu przy użyciu węgla promieniotwórczego, zwana też metodą C^{14} , znalazła jeszcze większe zastosowanie.

W Palestynie nad brzegiem Morza Martwego znaleziono zwoje Biblii. Przy zastosowaniu metody C^{14} określono ich wiek na 1917 ± 200 lat.

W Stanach Zjednoczonych w jaskini Fort Rock zalanej lawą przy wybuchu wulkanu Newbury w stanie Oregon wykopano plecione ze sznurka „sandały”. Użycie metody C^{14} pozwoliło datować je na 9053 ± 350 lat. Radzieccy uczeni przed kilku laty odkryli na półwyspie Tajmyr dość dobrze zachowanego w lodzie mamuta. Do określenia jego wieku posłużono się ścięgnem zwierzęcia, które zbadano metodą węgla promieniotwórczego. W wyniku pomiaru okazało się, że mamut przeleżał w lodach Tajmyru ok. 12 000 lat.

Oceniając możliwości metody węgla promieniotwórczego, można stwierdzić, że daje ona dostatecznie dokładne wyniki przy wyznaczaniu wieku obiektów pochodzenia organicznego, liczących do 20-25 tysięcy lat.

13

Wiek różnych form życia na Ziemi; wiek skał i Ziemi

Kto i dlaczego powinien znać wiek skał i Ziemi. Czy mamy dostateczne podstawy, by oceniać wiek różnych form dawnego życia na Ziemi lub wiek Ziemi i skał? Przecież, jeśli wyznaczenie odstępów czasu, dzielących nas od zdarzeń oddalonych o tysiąclecia, przedstawia ogromne trudności, to jak stwierdzić, co było przed milionami lat i czy w ogóle jest to potrzebne?

Okazuje się, że informacje te są dla nas bardzo ważne, po pierwsze, z teoretycznego punktu widzenia, dla rozumienia historii naszej planety, historii życia na Ziemi i historii ludzkości; po drugie, dla rozwiązania praktycznych zadań górniczych.

Jak jednak określić wiek zdarzeń oddalonych od nas o setki tysięcy i miliony lat?

Aby zorientować się w kolejności i zmianach tych dawno minionych form życia, należy wyznaczyć ich wiek. Jak to zrobić?

Trzeba zmusić do mówienia przedmioty, a nawet kamienie. Szczegółowe poszukiwania i żmudne badania pozwoliły paleontologom na podstawie szczątków dawnego życia, a czasem tylko niejasnych jego śladów - odcisków na kamieniach - stopniowo zorientować się w drogach jego rozwoju. Opierając się na licznych porównaniach wyjaśnili oni kolejność rozwoju różnych form życia i ustalili ich chronologię.

Sukcesy paleontologów znalazły praktyczne zastosowanie w górnictwie. Określenie wieku skał jest jednym z warunków potrzebnych do poznania budowy gór i rozmieszczenia w nich rud, co ma duże znaczenie zarówno przy poszukiwaniach, jak i przy eksploatacji bogactw naturalnych.

Można przytoczyć wiele przykładów potwierdzających te tezę, rozpatrzmy jeden z nich. W 1929 r. w okolicach Uralu we wsi Wierchnie-Czusowskije Gorodki znaleziono ropę naftową. A. W. Błochin, który prowadził badania geologiczne w miejscowości znajdującej się ok. 500 km bardziej na południe, zauważył w tym rejonie skały identyczne pod względem typu i wieku ze skałami na roponośnych terenach w Wierchnie-Czusowskich Gorodkach. Przeprowadzone wiercenia wykryły bogate złoża ropy na głębokości 800 m. W ten sposób dzięki wyznaczeniu wieku skał odkryto rejon roponośny w okolicach Isymbajewa.

Zasada określania wieku skał znalazła w geologii szerokie zastosowanie i ma często decydujące znaczenie przy pracach poszukiwawczych i opracowywaniu map geologicznych.

Kiedy uczeni badając minione epoki wykorzystują poszczególne warstwy skorupy ziemskiej jako stopnie prowadzące w przeszłość, szczątki żywych organizmów spełniają dla nich rolę znaków, za pomocą których można określić wiek, są jak gdyby skamieniałą chronologią. Ale, niestety, ta podstawowa dla geologii metoda paleontologiczna wyznaczania wieku skał, na skutek zachodzących w dawnych czasach masowych przemieszczeń żywych organizmów, nie zawsze jest dostatecznie pewna i sama musi się oprzeć na innych dokładniejszych metodach.

Obecnie znamy już metody, przy użyciu których możemy mierzyć gigantyczne odstęp czasu. Stosuje się je z powodzeniem zarówno w górnictwie, jak i przy badaniach paleontologicznych.

Pierwsze próby znalezienia „zegara” do mierzenia setek milionów lat. Interesuje nas obecnie, jak określono wiek tych odległych epok, kiedy na Ziemi nie było jeszcze człowieka. Jak zmierzono wiek różnych form życia, wiek skał i samej Ziemi, liczony w setkach milionów i miliardach lat?

Procesy, których można użyć jako „zegara” do wyznaczania wieku odległych epok, muszą mieć dostatecznie jednostajny przebieg i trwać nieprzerwanie od czasów najdawniejszych aż do naszych dni.

Pierwsze próby określenia wieku Ziemi podjęto przeszło 200 lat temu. W 1715 r. E. Halley określił wiek Ziemi za pomocą metody tzw. „zegara solowego”. Zakładał on, że morza i oceany w okresie powstawania miały wody słodkie, które następnie uległy zasoleniu, na skutek wymywania przez rzeki ze skał różnego rodzaju soli. W wyniku krążenia wody i jej parowania z mórz i oceanów w zbiornikach wodnych z tysiąclecia na tysiąclecie gromadziła się coraz większa ilość soli. Wiedząc, ile soli co roku wymywają rzeki i mierząc ilość soli nagromadzonej już w oceanach, można określić wiek oceanów. Wiek Ziemi oczywiście przewyższa wiek oceanów i według obliczeń Halleya wynosi 90-350 mln lat.

Zresztą liczby te są bardzo wątpliwe, trudno jest bowiem określić ilość soli wymywanej przez rzeki do oceanów; nie mamy też pewności, że w odległych epokach szybkość wymywania soli była taka sama jak obecnie.

Druga metoda Halleya wyznaczania wieku Ziemi przypomina w pewnym stopniu zegar piaskowy. Metoda ta polega na określeniu grubości osadów, nanoszonych przez rzeki. Ilość osadów, jakie rzeki niosą do morza jest olbrzymia. Wyraża się w milionach i setkach milionów metrów sześciennych w ciągu roku. Tak np. Huang-ho (Żółta Rzeka) nanosi do oceanu tak wielkie ilości zawiesiny, że woda na znacznym obszarze wokół jej ujścia staje się mętna; ta część Pacyfiku nosi nazwę Morza Żółtego.

Na dnie mórz i jezior narasta stopniowo osad, który pod ciśnieniem wyżej leżących warstw coraz bardziej zagęszcza się, tworząc z biegiem czasu twarde skały: wapienie, piaskowce, gliny łupkowe itd. Średnia grubość skał osadowych na Ziemi wynosi ok. 100 km. Jeśli przyjąć, że warstwa o grubości 1 m powstaje w czasie od 3 do 10 tys. lat, to wiek skorupy ziemskiej można ocenić na 300-1000 mln lat. Czas istnienia Ziemi jest oczywiście dłuższy od tego okresu.

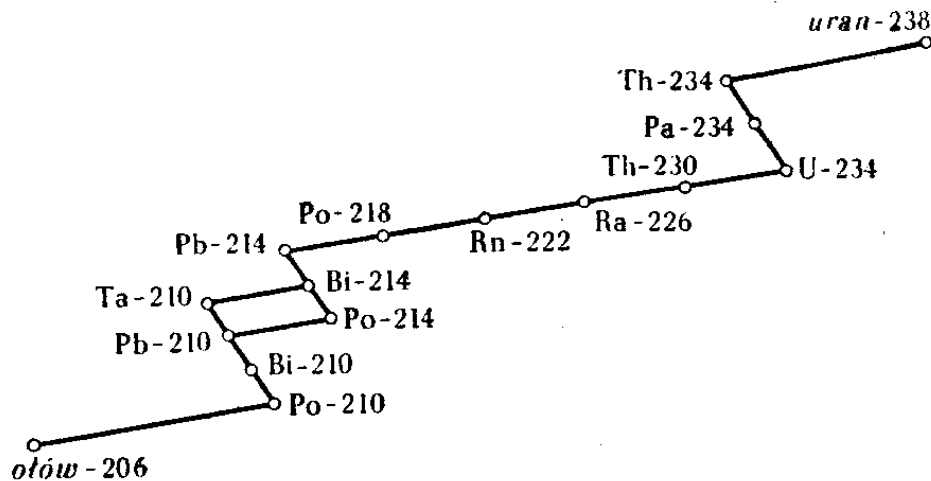
Metoda ta jest pewniejsza od poprzedniej, ale i w tym przypadku nie ma gwarancji, że w dawnych czasach osadzanie się skał zachodziło z taką samą szybkością jak obecnie.

„Zegar promieniotwórczy” do pomiarów milionów i miliardów lat. Do pomiarów okresów czasu, sięgających milionów i miliardów lat, stosujemy również „zegar promieniotwórczy”.

Mówiliśmy już o tym, że ciężkie pierwiastki: uran, tor, aktyn dają początek szeregom promieniotwórczym, tj. długim łańcuchom substancji promieniotwórczych; w których każdy kolejny izotop powstaje w wyniku rozpadu promieniotwórczego izotopu, tworzącego poprzednie ogniwo i które kończą się na różnych izotopach ołowiu.

Prześledźmy łańcuch przemian promieniotwórczych szeregu uranowego (ryc. 53). Uran, którego liczba atomowa jest równa 92, a ciężar atomowy 238 (${}^{238}_{92}U$), wysyłając cząstkę α (jądro atomu helu) przechodzi w tor (${}^{234}_{90}Th$). Okres połowicznego rozpadu uranu 238 wynosi 4,49 mld lat. Tor wysyłając cząstkę β (elektron) z okresem połowicznego rozpadu 24,1 dnia przechodzi w protaktyn (${}^{234}_{91}Pa$).

Protaktyn 234 również się rozpada i wysyłając cząstkę β przechodzi w inny izotop uranu (${}_{92}^{234}\text{U}$) itd. Dalej następuje łańcuch rozpadów α i kolejno powstają: tor 230, rad 226, radon 222, polon 218, ołów 214. Po tym ma miejsce jeszcze kilka rozpadów α i β i w końcu powstaje trwały izotop ołowiu 206 (${}_{82}^{206}\text{Pb}$).



Rysunek 53 Schemat metody ołowiowej wyznaczania wieku skał

Po przechwyceniu dwóch elektronów cząstka α przechodzi w zwykły neutralny atom helu. Ołów pochodzenia promieniotwórczego pod względem chemicznym jest identyczny ze zwykłym ołowiem. Tak więc w wyniku całego łańcucha przemian w minerałach, w którym początkowo występował tylko uran, z biegiem czasu gromadzą się produkty jego rozpadu - hel i ołów.

Przypomnijmy analogię z palącym się pręcikiem zegara ogniowego. W danym przypadku długość niespalonej części pręcika odpowiada ilości uranu, a ciężar popiołu - ilości nagromadzonego helu lub ołowiu. Szybkość przemiany jest również znana. Znamy bowiem okresy połowicznego rozpadu poszczególnych izotopów szeregu uranowego i na ich podstawie możemy wyliczyć szybkość, z jaką powstają w minerałach uranu ołów i hel.

Rozważana metoda odpowiada drugiemu przypadkowi, kiedy znamy długość niespalonej części pręcika - ilość uranu w minerałach, ciężar popiołu - ilość helu lub ołowiu i szybkość spalania się pręcika - szybkość przemian promieniotwórczych.

Wiadomo, że z 1 atomu uranu w ostatecznym wyniku powstaje 1 atom ołowiu, a po drodze, w wyniku przemian pośrednich, pojawia się 8 cząstek α , z których powstaje 8 atomów helu.

Pomiar ilości uranu i końcowego produktu jego rozpadu - ołowiu pozwala wyznaczyć wiek minerałów, zawierających uran. Na tym polega uranowo-olowiowa metoda wyznaczania bezwzględnego wieku skał.

Szeregi promieniotwórcze toru i aktynu po określonej ilości rozpadów dają trwałe izotopy ołowiu 208 i ołowiu 207, a po drodze w wyniku przemian pośrednich powstają cząstki α i cząstki β . W procesie przemian promieniotwórczych toru aż do wytworzenia ołowiu powstaje 6 cząstek α i 4 cząstki β . W wyniku przemian promieniotwórczych aktynouranu otrzymujemy 7 cząstek α i 4 cząstki β .

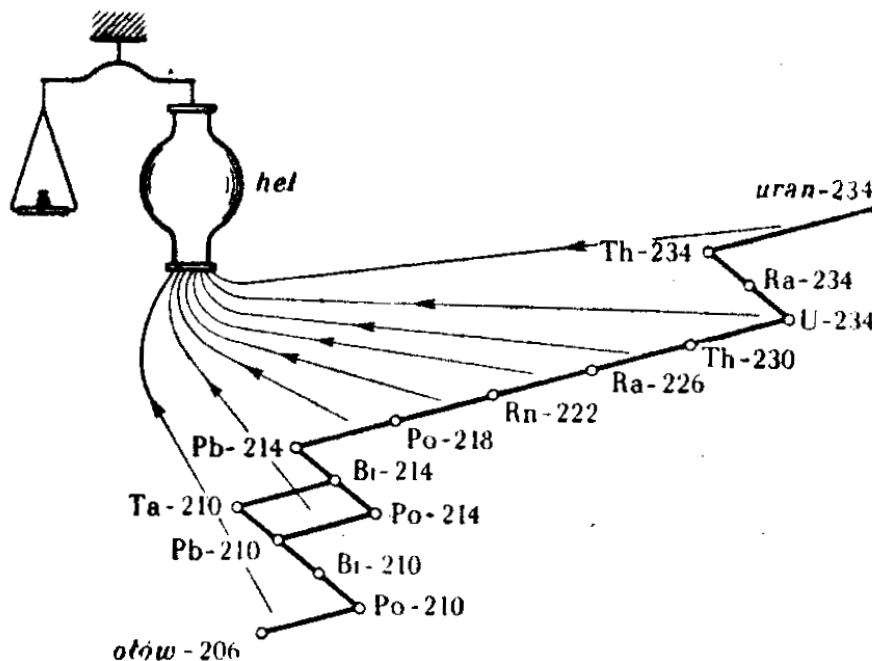
Okresy połowicznego rozpadu poszczególnych izotopów, wchodzących w skład szeregów promieniotwórczych, są znane i na ich podstawie możemy obliczyć szybkość gromadzenia się ołowiu i helu. Dane te pozwalają określić bezwzględny wiek odpowiednich minerałów.

Naturalne minerały uranowe zawierają zazwyczaj mieszaninę kilku izotopów: uranu 238 (99,28%) aktynouranu 235 (0,715%) i uranu 234 (0,005%). Jednakże nie zmienia to zasadniczych założeń metody wyznaczania bezwzględnego wieku, lecz tylko nieco komplikuje pomiary i obliczenia.

Odpowiednie obliczenia wykazały, że z 1 kg uranu po 100 mln lat powstaje 13 g ołowiu i 2 g helu. Przez 2 mld lat w skale zawierającej początkowo 1 kg uranu nagromadzi się 225 g ołowiu i 35 g helu. Po 4 mld lat z 1 kg uranu powstanie 400 g ołowiu i 60 g helu, a uranu zostanie tylko 0,5 kg.

Zrozumiałe, że im więcej w danej skale nagromadziło się ołowiu lub helu w porównaniu z ilością produktu pierwotnego, tym starsza jest dana skała.

Jeśli kawałek skały, zawierającej uran, tor lub aktyn, zmielić na proszek, rozpuścić w kwasie i gotować przez długi okres czasu, to stopniowo wydzieli się zawarty w skale hel. Pomiar ilości uranu, toru, aktynu, zawartych w mineralu i ilość produktu ich rozpadu promieniotwórczego - helu - pozwala na podstawie stosunków tych wielkości obliczyć wiek danego minerału. Na tym polega tzw. helowa metoda wyznaczania wieku skał (ryc. 54).



Rysunek 54 Schemat metody helowej wyznaczania wieku skał

Jeszcze dokładniejsze wyniki zapewnia inny wariant metody ołowiowej, zgodnie z którym wiek skały wyznacza się nie na podstawie stosunku ilości ołowiu i uranu, lecz na podstawie stosunku ilości ołowiu różnego pochodzenia. Należy przy tym uwzględnić, że naturalna mieszanina różnych izotopów ołowiu zawiera zarówno ołów pochodzenia promieniotwórczego, jak i zwykły niepromieniotwórczy ołów 204. W naszej analogii z zegarem ogniowym wspomniana metoda odpowiada trzeciemu przypadkowi, kiedy spalają się pręciki różnych kolorów i powstaje różnokolorowy popiół. Ważny jest fakt, że można zmierzyć ilość popiołu każdego koloru, a szybkość spalania się pręcików jest z góry znana. Na przykład w wyniku analizy składu izotopowego zwykłego ołowiu pochodzenia górniczego, dokonanej przez prof. W. I. Baranowa, otrzymano następujące dane: ołów 204 - 1,2%, ołów 206 - 24,5%, ołów 207 - 21,3%, ołów 208 - 53,0%.

Względną zawartość poszczególnych izotopów w badanej próbce ołowiu możemy wyznaczyć za pomocą specjalnego przyrządu - spektrometru masowego. Dokładność takiego pomiaru sięga setnych części procenta. Na podstawie tego stosunku można obliczyć wiek skały z dokładnością do

dziesiątych części procenta. A zatem, wiek skały liczącej miliardy lat można wyznaczyć z dokładnością do milionów lat.

Do wyznaczania wieku skał zastosowanie znalazła również metoda potasowo-argonowa.

Potas promieniotwórczy, z ciężarem atomowym 40, wysyłając cząstkę β przechodzi w wapń 40; wychwytyjąc elektron ze swojej powłoki elektronowej (wychwyt K) przekształca się w argon 40.

Okres połowicznego rozpadu potasu 40 jest równy 1,31 mld lat. Wartość ta jest bardzo dogodna przy pomiarach długich okresów czasu.

Opracowano specjalną metodę wyznaczania wieku, minerałów, zawierających potas; na podstawie pomiarów ilości potasu 40 i argonu 40, zawartego w badanej próbce, możemy obliczyć bezwzględny wiek minerałów.

Łatwo zauważyć, że w analogii z zegarem ogniowym metoda ta odpowiada drugiemu przypadkowi, kiedy znana była długość niespalonej części pręcika - ilość potasu 40, a także ciężar powstałego popiołu - ilość argonu 40 i wreszcie „szybkość” spalania się pręcika - czas połowicznego rozpadu potasu 40. Przy pomiarach według tej metody należy uwzględnić możliwe straty promieniotwórczego argonu i występowanie w skale argonu pochodzenia niepromieniotwórczego.

Przeprowadzone doświadczenia z próbkami skał, których wiek wyznaczono uprzednio inną metodą (ołowiową), wykazały, że w geologicznych okresach czasu straty argonu są znikomo małe, a domieszka argonu 36 pochodzenia niepromieniotwórczego jest niewielka (10% - 1%), przy czym w procesie oczyszczania i ekstrakcji stosunek $\frac{40 \text{ Ar}}{36 \text{ Ar}}$ nie zmienia się. Dokładność metody potasowo-argonowej jest dość duża. W tych przypadkach, kiedy skała nie zawiera ołowiu lub zawiera go zbyt mało dla przeprowadzenia analizy, nierzadko stosuje się metodę potasowo-argonową. Obecnie zastosowano ją z powodzeniem do określania wieku różnych obiektów zawierających potas.

Wśród wielu przedmiotów, których wiek wyznaczono za pomocą „zegara promieniotwórczego”, szczególne miejsce zajmują meteoryty. Te spadające na Ziemię „kamienie niebieskie” - bywają różnej wielkości, mają różny skład chemiczny i mineralogiczny i mimo że człowiek zetknął się z nimi już bardzo dawno, ich natura i pochodzenie do dziś dnia nie są zupełnie jasne. Przy badaniach nad pochodzeniem meteorytów duże znaczenie posiada określenie ich wieku. Obecnie przeprowadzono już wiele takich pomiarów. Okazało się, że niektóre z meteorytów uległy zestaleniu stosunkowo „niedawno”: 50 - 100 mln lat temu. Wiek innych - a takich jest więcej - równy jest w przybliżeniu wiekowi skorupy ziemskiej. W końcu, bezwzględny wiek niektórych meteorytów na podstawie danych z 1942 r. wynosi 7,6 mld lat. Tak więc są one znacznie starsze od najstarszych skał na Ziemi.

Należy podkreślić, że wspomniane metody dają wartość wieku minerałów poczynając od momentu ich krystalizacji, a nie wiek pierwiastków, z których składa się minerał. Wynika to stąd, że dopiero od momentu krystalizacji minerałów, produkty rozpadu promieniotwórczego gromadzą się w danym mineralu, a nie ulegają rozproszeniu.

„Zegar promieniotwórczy”, czyli helowo-ołowiowa i argonowa metody wyznaczania wieku skał, znalazł zastosowanie[^] w górnictwie przy poszukiwaniach i eksploatacji złóż różnych kopalin. „Zegar promieniotwórczy” jest także niezawodnym źródłem informacji o wieku skorupy ziemskiej.

Liczne pomiary bezwzględnego wieku różnych skał, wydobytych w różnych miejscach kuli ziemskiej, dostarczyły cennych informacji o budowie skorupy ziemskiej i historii jej powstania. Jednymi z najstarszych minerałów są uranity z europejskiej części ZSRR, których wiek wynosi 1,6 mld lat i uranity z Manitoby (Kanada), powstałe przed 1,985 mld lat.

A. Holmes w pracy, poświęconej geochronologii Afryki, przytacza wartości bezwzględnego wieku skał, otrzymane przy zastosowaniu różnych metod. Zbadano wiek skał powstałych nie wcześniej niż pół miliarda lat temu, skał, liczących jeden, dwa i trzy miliardy lat. I tak, wiek galenitu w południowej Rodezji wynosi, jak się okazało 2170 mln lat, galenitu z zachodniego Transwalu - 2300 mln lat, monocyту z południowej Rodezji - 2,6 mld lat, galenitu z Kokoszo (Kongo) - najprawdopodobniej 3,3 mld lat.

Najstarsze ze znanych nam ziemskich minerałów powstały przed ok. 3 mld lat, ale ta liczba nie oznacza jeszcze wieku Ziemi, ściślej, wskazuje na dolną granicę wieku skorupy ziemskiej. Skorupa ziemska nie może być młodsza od wytworzonych minerałów, które krystalizowały się dopiero na określonym etapie jej rozwoju. Wiek Ziemi oceniamy więc w przybliżeniu na 3 - 5 mld lat.

Astronomowie przy pomiarach odległości międzygwiazdnych stosują specjalne jednostki długości. Światło w ciągu 1 sek. przebywa odległość 300 000 km. W ciągu roku promień światła przechodzi w przybliżeniu odległość 10 000 000 000 000 km (10^{13} km). Odległość tę astronomowie przyjmują za jednostkę długości i nazywają rokiem świetlnym. Aby przebyć odległość z Moskwy do Leningradu, światło potrzebuje zaledwie 0,002 sek. Odległość 150 000 000 km, jaka dzieli Słońce od Ziemi, światło przebywa w ciągu 8 i ½ min. Na przejście całego układu słonecznego światło potrzebuje 11 godz. Najbliższa od nas gwiazda *Proxima Centauri* znajduje się w przybliżeniu w odległości czterech lat świetlnych.

Słońce należy do wielkiego skupiska gwiazd, zw. Galaktyką, w skład którego wchodzi wiele milionów gwiazd. Średnica naszej Galaktyki wynosi ok. 100 000 lat świetlnych. Nasz układ słoneczny znajduje się w odległości 30 000 lat świetlnych od środka Galaktyki, tj. w przybliżeniu w ⅓ jej promienia. Przy tym Słońce razem z innymi gwiazdami naszej Galaktyki krąży wokół jej środka. Czas obrotu Słońca wokół środka Galaktyki wynosi 185-200 mln lat słonecznych i nazywa się rokiem galaktycznym.

Nasza Galaktyka nie jest jedynym tworem tego rodzaju; w ogromnej odległości od niej znajdują się inne wyspy wszechświata, w skład których wchodzi także wiele milionów gwiazd. Spiralna mgławica w gwiazdozbiórze Andromedy jest najbliższą od nas spiralną galaktyką. Średnica jej przewyższa 100 000 lat świetlnych; odległość tej mgławicy od naszej Galaktyki wynosi 1 500 000 lat świetlnych. Cały zbadany przez astronomów świat galaktyk nazywa się Metagalaktyką. Nie wiemy dotąd, jak daleko rozciąga się Metagalaktyka i co ją otacza. Od najodleglejszych galaktyk, widzialnych jeszcze przez najpotężniejsze współczesne teleskopy, światło dochodzi do nas ok. 1 mld lat, co odpowiada odległości 10 000 000 000 000 000 000 000 km (10^{22} km).

Tak więc, jak pisał radziecki astronom P. P. Parenago promień światła, wysłany przez najodleglejszą od nas galaktykę, przebył ponad 0,999 swojej drogi w czasie, kiedy na Ziemi nie było jeszcze człowieka. Dopiero, kiedy światłu pozostało do przebycia mniej niż 0,001 drogi, na Ziemi pojawił się człowiek i po ok. 17 000 pokoleń, po przejściu całego swego rozwoju, stworzył astronomię, zbudował potężny teleskop i wyprodukował błonę fotograficzną, za pomocą której ów promień światła został zarejestrowany.

Człowiek żyje już na Ziemi przez wiele tysięcy pokoleń. Jeszcze dłużej trwał rozwój różnych form życia na Ziemi przed pojawieniem się człowieka. Wiek oceanów i skał wyraża się w setkach milionów i miliardach lat. Jeszcze starsza jest sama Ziemia.

Badania gwiazd wykazały, że i one zmieniają się stopniowo: rodzą się, przechodzą określoną drogę rozwoju, starzeją się. Okresy czasu, którymi mierzy się rozwój gwiazd, są ogromne.

W przytoczonej tabeli chronologicznej podane są równolegle trzy skale czasu: w latach słonecznych, w latach galaktycznych i według ilości ludzkich pokoleń, przy założeniu, że średnio na każde pokolenie przypada 30 lat.

Wyniki badań uczonych, przytoczone w tej tabeli, wydadzą się szczególnie imponujące, jeśli uwzględnimy, że tylko kilkaset lat słonecznych albo tylko 1 min. galaktyczną istnieje astronomia w długiej historii Ziemi i wszechświata i że w tym tak krótkim czasie ludzie przeniknęli do najskrytszych tajemnic przyrody. Żyjąc na małej planecie, należącej do średniej gwiazdy, Słońca, ludzie potrafili zbadać nie tylko gwiazdy swojej Galaktyki, ale także i wiele innych wysp wszechświata. Nasza wiedza o świecie w porównaniu ze starożytnością zwiększyła się niepomiaralnie.

Jednakże nierozwiązanych zagadek przyrody pozostało znacznie więcej niż rozwiązanych i, być może, w badaniach rozciągłości przestrzennej i czasu trwania rzeczy uczyniono tylko pierwszy krok.

Tabela chronologiczna

Nr kolejny	Zdarzenie, proces	Wiek		
		w latach słonecznych	w jednostkach galaktycznych	Liczba pokoleń
1	Powstanie Słońca jako gwiazdy	4 - 5 mld	21 - 27 lat	-
2	Krystalizacja minerałów ziemskich	2 - 3 mld	11 - 16 lat	-
3	Wytworzenie się twardej skorupy ziemskiej, powstanie kontynentów i oceanów	1,5 mld	8 lat	-
4	Pojawienie się pierwszych żywych istot w ciepłych wodach oceanów	1 mld	5 lat	-
5	Życie skupia się w oceanach, gdzie żyją archeocyty i trylobity	500 – 800 mln	2,5 - 4 lata	-
6	W oceanach pojawiają się pierwsze ryby. Rośliny, a w ślad za nimi zwierzęta zaczynają przenosić się na ląd. Droga od pierwszej grudki żywej protoplazmy do człowieka została przebyta w połowie	400 mln	2 lata	-
7	Życie podbiło ląd. Na Ziemi trwa długie lato. Burzliwy rozkwit gigantycznych lasów paprociowych, a wśród zwierząt - płazów	300 mln	1,5 roku	-
8	Okres zlodowacenia. Ziemię ogarnęła zima trwająca 25 mln lat. Zniknęły gigantyczne lasy, wiele gatunków zwierząt wymarło. Pozostały przy życiu gatunki najlepiej przystosowane do zmian	200 mln	1 rok	-
9	Na Ziemi panuje znów upalne lato. Następuje okres panowania gadów. Gigantyczne jaszczury zasiedlają lądy, wodę i powietrze	100 mln	½ roku	-
10	Okres aktywności geologicznej. Rozpadają się, zbliżają i oddalają kontynenty, wyłania	50 mln	¼ roku	-

	się współczesne oblicze Ziemi. Jaszczury wymarły. Władcami Ziemi stały się zwierzęta ciepłokrwiste: ssaki na lądzie, ptaki w powietrzu			
11	Epoka lodowcowa. Chłodne okresy występują na przemian z ciepłymi. Pojawia się człowiek	½ mln	20 godz.	17 000
12	Epoka najstarszej kultury człowieka wytwarzającego tylko najprostsze narzędzia drewniane	100 - 125 tys.	5 - 6 godz.	3000-4000
13	Epoka paleolityczna	25 - 50 tys.	1-2,5 godz.	1000-2000
14	Epoka neolityczna	12 - 25 tys.	½ - 1 godz.	500-1000
15	Początek epoki brązu	6000	18 min.	200
16	Powstanie astronomii	5000	15 min.	170
17	Początek epoki żelaza	3000	9 min.	100
18	Początek astronomii teleskopowej (teleskop Galileusza 1610 r.)	350	1 min.	12

Bibliografia²

Keen A. W. *Elektronika*. Warszawa 1959.

Milewski T. *Historia kalendarza*. „Problemy”, nr 9/1952.

Opolski A. *Rachuba czasu*. Warszawa 1959.

Polak J. *Czas i kalendarz*. Warszawa 1952.

Szałabun J. *Czas i jego pomiar*. Katowice 1960.

Winniczuk L. *Kalendarz starożytnych Greków i Rzymian*. Warszawa 1960.

Zajdler L. *Dzieje zegara*. Warszawa 1956.

Żerebcow I. P. *Podstawy elektroniki*. Warszawa 1959.

² sporządzona przez redakcję przekładu polskiego.

Współczesna Biblioteka Naukowa Omega

Komitet Redakcyjny: Jerzy Baumritter, Jerzy W. Borejsza, Marcin Czerwiński, Alicja Dyczek, Ryszard Herczyński, Krzysztof Murawski, Krzysztof Pomian, Ignacy Sachs, Jan W. Stefczyk, Ignacy Wald, Tadeusz Zabłudowski

Warszawa 1964

Państwowe Wydawnictwo Naukowe

Tytuł oryginału rosyjskiego: Завельский Ф. С. - Время и его измерение От биллионных долей секунды до миллиардов лет. Москва 1961

Tłumaczył: Stanisław May

Okładką projektował: Tadeusz Pietrzyk

Państwowe Wydawnictwo Naukowe - Warszawa 1964

Redaktor: Jacek Pestkowski

Redaktor techniczny: Leokadia Lass

Wydanie I. Nakład 15 000 + 300 egz. Ark. wyd. 7,75. Ark. druk. 9,25 Papier ilustrowany kl. V, 70 g Podpisano do druku w lutym 1964. Druk ukończono w lutym 1964. Zam. 1771/63 Cena w subskrypcji zł 10,-

Zakłady Graficzne Im. M. Kasprzaka w Poznaniu O-1

