

Seriál: Čas

Tohtoročný seriál sa bude venovať meraniu, štandardizácii a dnes široko používanému systému jednotiek SI. Pozrieme sa na historický vývoj definícií základných jednotiek úzko spätých s postupmi a presnosťou merania príslušných veličín, ako aj na ich súčasnú podobu a postupy merania na rôznych škálach a v rôznych situáciách.

Štandardizujeme

Ludstvo začalo pravdepodobne merať už v praveku. Toto „meranie“ bolo však len veľmi jednoduché, ako napríklad počítanie uplynutých dní, či delenie nájdenej koristi. Pokrok v meraní nastal v Mezopotánii rozvojom obchodu, pivovarníctva a súdnictva zavedením rôznych objemových, dĺžkových a hmotnostných mier. Až do konca stredoveku sa situácia veľmi nezmenila – v každom kráľovstve obvykle platila vlastná mena a dĺžkové, objemové a hmotnostné miery, ktoré boli obvykle odvodené od aktuálneho panovníka (mince s jeho podobizňou, či palce a stopy dané jeho fyzickými rozmermi). Miery sa tak okrem nástroja obchodu a remeselníctva stávali aj nástrojom politickým. Navyše boli v jednotlivých krajinách základné jednotky delené na menšie/väčšie rôznym počtom dielov, ako môžeme doposiaľ vidieť v príklade imperiálnych jednotiek. Táto situácia tak komplikovala medzinárodný obchod a s nástupom priemyselnej revolúcie, kedy konštrukcia strojov začala vyžadovať presné miery, sa stávala neúnosnou.

Štandardizácia jednotiek založených na desiatkovej sústave, ktoré používame dnes, začala v čase francúzskej revolúcie vytvorením platinových prototypov kilogramu a metru uložených v Archíve republiky v Paríži v roku 1799. Neskôr v roku 1832 C. F. Gauss odporučal tieto jednotky spolu s astronomicky definovanou sekundou ako základné jednotky fyzikálnych meraní. V roku 1874 vznikol cgs systém založený na centimetri, grame a sekunde. S objavom elektrických a magnetických vlastností látok bolo potrebné štandardizovať elektromagnetické veličiny, jednotky elektromagnetických veličín odvodené od cgs systému však nemali vhodné veľkosti pre praktické použitie. V 80tých rokoch 19. storočia Medzinárodný elektrický kongres prijal sústavu elektrikomagnetických jednotiek, ktorých názvy používame dodnes – ako ampér, volt, ohm, farad, siemes atď.

20. mája 1875 podpisom Metrickej konvencie vznikol Medzinárodný ústav pre miery a váhy (Bureau international Des poids et mesures)¹, ktorý má dodnes na starosti štandardizáciu meraní a na jej prvom kongrese prijala štandardné jednotky mechanických veličín, ktoré poznáme dnes (kilogram, meter, sekunda). V roku 1901 Giovanni Giorgi ukázal, že prijatím jednej elektrickej jednotky je možné do mechanického systému zahrnúť aj elektromagnetizmus, čo malo za následok prijatie ampéra ako základnej fyzikálnej jednotky v roku 1946. V roku 1954 do systému pribudla jednotka termodynamickej teploty kelvin a svietivosti kandela a v roku 1971 jednotka látkového množstva mol – vznikol takzvaný systém jednotiek SI (Système International). Okrem základných jednotiek tento systém zavádza aj odvodené jednotky veličín, predpony jednotiek charakterizujúce dekadický rád meranej hodnoty, či typografické pravidlá pri zachá-

¹ Webová stránka ústavu v angličtine <https://www.bipm.org/en/home> obsahuje množstvo zaujímavých informácií ako historických, tak technických

dzaní s meranými hodnotami veličín. Ďalej je jeho úlohou aj metodika kalibrácie prístrojov na základe týchto definícií.

Nasledovalo postupné spresňovanie definícií týchto jednotiek a ich previazanie na prírodné konštanty, a teda postupné zbavenie sa fyzických etalónov definujúcich základné veličiny. Tento postup bol zavŕšený novou definíciou kilogramu schválenou na kongrese v roku 2019. Dnes sú tak fyzikálne jednotky definované fixnými hodnotami nasledovných konštánt:

- frekvencia prechodu hyperjemnej štruktúry cézia $\Delta\nu_{Cs}$,
- rýchlosť svetla vo vákuu c ,
- Planckova konštanta h ,
- elementárny náboj e ,
- Boltzmannova konštanta k_B ,
- Avogadrova konštanta N_A ,
- svetelná účinnosť K_{cd} monochromatického žiarenia o danej vlnovej dĺžke.

Metrický systém na našom území bol prijatý v dobe Rakúsko-Uhorskej monarchie v roku 1871, používať sa začal v roku 1876. Odvtedy sú jednotky a štandardy na území Českej republiky dané medzinárodným vývojom. Dnes je v Českej republike za štandardizáciu jednotiek a kalibráciu prístrojov zodpovedný Český metrologický inštitút sídliaci v Brne.

Kalibrujeme

Pred tým, ako sa pustíme do jadra seriálu, uveďme si niekoľko definícií pojmov. Fyzikálna veličina je vlastnosť materiálu, objektu, systému, či procesu, ktorá sa dá kvantifikovať – vyjadriť ako hodnota pozostávajúca z číselnej hodnoty a fyzikálnej jednotky. Túto hodnotu určujeme meraním danou meracou metódou pomocou meradla – meracieho prístroja, obvykle odčítaním hodnoty z displeja elektronického meracieho prístroja, alebo polohy ručičky oproti ciferníku v prípade prístroja mechanického.

Súčasťou každého merania je určenie presnosti výsledku odhadu odchýlky nameranej hodnoty od tej skutočnej. Táto odchýlka má obvykle náhodnú zložku, ktorá sa mení meranie od merania – jej veľkosť sa dá určiť opakovaním meraní a potlačiť priemerovaním nameraných hodnôt. Problematickejšia je však systematická chyba, ktorá je rovnaká v každom meraní – obvykle je spôsobená nepresnou kalibráciou prístroja, či použitou metódou. Presnosť prístroja je obvykle označená priamo na prístroji (v prípade mechanických prístrojov ako trieda presnosti, presnosť meranej hodnoty zistíme ako súčin triedy presnosti v percentách a rozsahu stupnice), alebo v dokumentácii (v prípade elektronických prístrojov, obvykle obsahuje konštantný a lineárny člen daný veľkosťou meranej veličiny). V prípade, ak toto nie je dostupné, sa za presnosť prístroja obvykle volí polovica najmenšieho dielika stupnice. Hodnoty merané prístrojom sa môžu s časom, či vonkajšími podmienkami (napr. teplotou) meniť. V tomto prípade hovoríme o stabilite prístroja.

Kalibrácia meracích prístrojov a určenie ich presnosti sa prevádza obvykle opakovaným meraním toho istého objektu na kalibrovanom prístroji a prístroji porovnávacom pri rôznych podmienkach a porovnaním nameraných hodnôt. Tento porovnávací prístroj má vyššiu presnosť

(nazýva sa aj sekundárny etalón) a sám je kalibrovaný pomocou primárnych etalónov o najvyššej presnosti. Primárne etalóny sú obvykle realizovaním definície jednotky danej fyzikálnej veličiny pomocou štandardizovaného medzinárodného postupu (*mis én practice*). Vzniká tak reťaz kalibračných vzťahov medzi definíciou jednotiek veličín a nami používaných prístrojov s postupne klesajúcou presnosťou.

Čas

Čas je jednou z najzákladnejších veličín popisujúcich prírodné procesy od tých jadrových (jadrový rozpad), cez biologické (starnutie) až po geologické a astronomické (vek vesmíru). Vo fyzike preto obvykle študujeme časové zmeny fyzikálnych veličín, popis presného času je preto nevyhnutný.

Kalendár

Historicky prvou oblasťou, kde sa popis času, ako vôbec prvej fyzikálnej veličiny, ukázal nevyhnutný bolo poľnohospodárstvo. Už prvé ľudské spoločnosti potrebovali určiť, kedy je treba zasiať a kedy je treba zozáť úrodu pred blížiacou sa zimou. Naši predkovia sa preto obrátili k oblohe a postupne vznikali kalendáre založené na pohybu Mesiaca a Slnka – lunisolárny kalendár. Nie je známe, kedy vznikol v histórii prvý kalendár, ale bolo tak ešte pred vynálezom písma. Nový mesiac obvykle začínal pozorovaním kosáčika Mesiaca niekoľko dní po nove. Keďže dĺžka roku nie je presne deliteľná dobou lunácie, zvyčajne po dvoch 12 mesačných rokoch nasledoval rok s 13 mesiacmi. Pozostatky tohto kalendáru môžeme vidieť v časoch niektorých náboženských sviatkov ako Veľkej Noci, Chanuky a Ramadánu.

Významná zmena nastala reformou Rímskeho kalendáru Júliom Cézarom v roku 44 pred našim letopočtom. Juliánsky kalendár je založený len na pohyboch Zeme a Slnka – rok tvorí 365 dní, pričom každé štyri roky sa vkladá jeden deň navyše². Okrem zmeny doby trvania jednotlivých mesiacov sa presunul začiatok roka na začiatok januára a zmena ako taká si vyžiadala predchádzajúci rok o dĺžke až 445 dní.

Juliánsky kalendár však nebol dostatočne presný. Okamih jarnej rovnodennosti, ktorý bol dôležitý pre určenie času Veľkej noci, sa v ňom postupne posúval, v roku 1582 bol o 10 dní neskôr ako v čase Nicejského koncilu. Nový kalendár navrhnutý Neapolským fyzikom Aloysiom Liliom bol prijatý pápežom Gregorom XIII v roku 1582. Tento gregoriánsky kalendár zavádzal prestupný február v roky deliteľné štyrmi, ako bolo do vtedy zvykom, ale s výnimkou prvých rokov storočí, ktoré štyrmi deliteľné neboli. Týmto je teda Gregoriánsky kalendár oproti Juliánskemu za tisíc rokov kratší o tri dni. Okrem tohto sa aj napravil nazbieraný čas – v roku 1582 po 4. 10. nasledoval 15. 10. Prijatie tohto kalendáru bolo vo svete postupné. V Kráľovstve Českom bol prijatý v roku 1584. Afganistan, Irán Etiópia, Eritrea a Nepál dodnes používajú iný kalendárny systém.

Slnčné hodiny

Aj pri delení dňa na menšie časti je najužitočnejším pohyb oblohy. Určiť čas počas noci bolo možné z polohy hviezd, počas dňa z polohy Slnka. Hlavným nástrojom sa tak stali slnečné hodiny pozostávajúce z gnomónu – tyče rovnobežnej so zemskou osou vrhajúcej tieň – a tienidla so stupnicou. Takéto hodiny ukazujú miestny pravý slnečný čas daný polohou Slnka na oblohe.

²Pôvodný rímsky rok začínal marcom, preto sa dnes tento deň vkladá na koniec februára

Zem však obieha Slnko po eliptickej orbite nerovnomernou rýchlosťou, dĺžka slnečného dňa sa teda počas roka mení. Voči strednému slnečnému času plynúcemu rovnomerne môže byť pravý slnečný čas pozadu/popredu aj o štvrt hodinu – tento rozdiel sa počas roka mení a je daný tzv. časovou rovnícou. Na základe rotácie Zeme okolo vlastnej osi tak prichádzame ku klasickej definícii sekundy ako jednotky merania času:

Sekunda je $1/86\,400$ stredného slnečného dňa.

Tu je však vhodné pripomenúť, že minúty a sekundy neboli realizovateľné, a teda ani používané pred príchodom mechanických hodín koncom 17. storočia. Najmenšie časové diely, ktoré sa používali boli $1/12$ hodiny.



Obr. 1: Slnečné hodiny³

Z polohy hviezd sa dá určiť hviezdny čas daný hviezdami, ktoré sa nachádzajú na meridiáne – spojnici juhu, nadhlavníku a severu na nebeskej sfére. Keďže Zem obieha okolo Slnka je hviezdny (siderický) deň oproti tomu slnečnému kratší o faktor jeden deň/rok, teda má dĺžku 23 hodín 56 minút a 4 sekundy.

Na meranie kratších časových úsekov a v časoch, keď bolo zamračené sa používali rôzne iné metódy, ako napríklad presýpacie hodiny, doba horenia sviečky, či výtoku vody z nádoby. Tieto metódy mali obvykle výrazne menšiu presnosť na dlhšej časovej škále. Napríklad, pre vodné hodiny s dlhou výtokovou trubicou pri zmene teploty vody už o jeden stupeň Celzia dôjde vplyvom zmeny viskozity, a teda prietoku, k chybe merania času o pol hodiny za deň.

³<https://pixabay.com/photos/sun-dial-sun-dial-clock-sundial-1759241/>

Mechanické hodiny

Výrazný pokrok v presnosti merania času nastal vynálezom kyvadlových hodín. Po objave Galilea Galileiho začiatkom sedemnásteho storočia, že perióda kyvadla je nezávislá na jeho výchylke, v roku 1656 Christian Huygens zostavil prvé kyvadlové hodiny. Presnosť merania času sa tak razom zlepšila z 15 minút za deň na 15 sekúnd za deň. Perióda malých kmitov (matematického) kyvadla je daná vzťahom

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

kde g je tiažové zrýchlenie a l je dĺžka závesu. V prípade reálneho – fyzikálneho kyvadla s momentom zotrvačnosti I vzhľadom na os otáčania, hmotnosťou m a vzdialenosťou ťažiska od bodu závesu a – je vzťah trochu komplikovanejší

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mga}}.$$

Pre kyvadlo s dobou kyvu 1 s tak potrebujeme dĺžku závesu $l = 0,994$ m. Regulovať dobu kmitu je možné zmenou efektívnej dĺžky závesu.

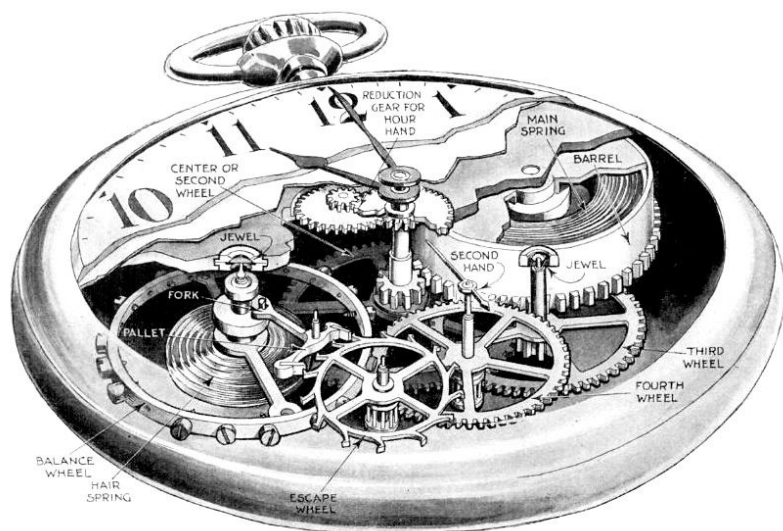
Každé mechanické hodiny sa skladajú z niekoľkých častí. Periodické kmity vlastného *oscilátora* (v našom prvom prípade kmity kyvadla) sa pomocou *kroku* prevedú na impulzy hodinového *súkolia* posúvajúce ich v jednom smere. Zároveň sa pomocou kroku nahrádza trením stratená energia oscilátora z vonkajšieho *zdroja energie*, obvykle závažia, alebo pružiny, ktoré treba z času na čas zdvihnúť/natiahnuť⁴. Súkolie zložené z približne piatich ozubených kolies prevádza pohyb *krokového kolesa*, ktoré poháňa krok, na pohyb ručičiek hodínok. Čas sa následne odčítava z *ciferníka*.

Postupným vylepšovaním kroku bolo možné znížiť amplitúdu kmitov na niekoľko málo stupňov z pôvodných asi 90°, čo viedlo k zavedeniu minútovej ručičky okolo roku 1700. Neskôr sa však ukázalo, že v lete bežia kyvadlové hodiny pomalšie vplyvom teplotnej rozťažnosti materiálu závesu kyvadla – dodnes sa využíva konštrukcia navrhnutá Johnom Harrisonom okolo roku 1726 využívajúca záves kombinujúci dvojicu kovov s rôznymi teplotnými rozťažnosťami, ktoré sa navzájom kompenzujú. Okrem teploty na pohybujúce sa kyvadlo pôsobí aj v čase premenlivý odpor vzduchu so zmenou atmosférického tlaku, vlhkosti a teploty. Na dobu trvania kmitu, a teda presnosť presúvajúcich sa hodín má samozrejme vplyv zmena hodnoty gravitačného zrýchlenia z miesta na miesto. Navyše je nutné bežiacie hodiny uchovávať stále vo zvislej polohe.

Druhou možnosťou je vytvárať periodický signál kmitmi pružiny ako v prípade vreckových hodínok. pružinou budené hodiny zostavili okolo roku 1660 s využitím nápadu Roberta Hookea Christian Huygens, čím zlepšil presnosť vreckových hodínok z niekoľko hodín za deň na asi desať minút. V tejto konštrukcii špirálovitá torzná pružina, tzv. vlásoč, spôsobuje rotačné kmity zotrvačné kolesa, niekedy nazývaného nepokoj. Dobře zostavená pružina vreckových hodínok presne dodržiava Hookeov zákon – sila ktorou pôsobí je priamo úmerná výchylke z rovnovážnej polohy, čo bolo obvykle dosiahnuté navinutím pružiny tak, aby jej ťažisko ležalo v osi zotrvačného kolesa. Postupné spresňovanie bolo dosiahnuté zmenami materiálu pružiny (pôvodné

⁴vreckové hodinky tak obsahujú dve pružiny – jednu slúžacu ako časť oscilátora, druhú ako zdroj energie

⁵https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pocketwatch_cutaway_drawing.jpg

Obr. 2: Diagram mechanických hodinek⁵

netemperované ocelové pružiny strácali pracovnou únavou pevnosť) a zmenami tvaru samotnej pružiny ku dnes používanej tvrdenej temperovanej oceli a tzv. Breguetovmu navinutiu. Doba kmitu sa obvykle reguluje zmenou dĺžky pracujúcej časti pružiny (a teda tuhosti celej pružiny) – kratšia pružina je tuhšia a kmitá rýchlejšie.

Pre pružinu o tuhosti κ a zotrvačník o momente zotrvačnosti I máme pohybovú rovnicu pre uhol vychýlenia θ a uhlové zrýchlenie α

$$M = -\kappa\theta = I \alpha = I \frac{d^2\theta}{dt^2}.$$

Ide preto o harmonický oscilátor s periódou kmitov nazávislou na výchylke

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{\kappa}}.$$

Na chod takýchto hodín má vplyv najmä teplota spôsobujúca zmeny rozmerov súčiastok a zmenu modulu pružnosti, a teda aj tuhosti pružiny, a zmena trenia pôsobená starnutím oleja lubrikujúceho mechanizmus.

Problém zemepisnej dĺžky

V námorníctve sa po započatí transoceánskych plavieb v šestnástom storočí ukázalo ako veľmi potrebné presné meranie času v komplikovaných podmienkach – meniaci sa teplota, vlhkosť, rôzne tiažové zrýchlenie, či samotný pohyb lode na otvorenom oceáne. Na lodi vieme jednoducho určiť zemepisnú šírku z výšky nebeského pólu nad obzorom, pre určenie zemepisnej dĺžky však okrem merania hviezd potrebujeme poznať referenčný čas. Zem vykoná jednu otočku za

24 hodín, pre určenie zemepisnej dĺžky s presnosťou jeden stupeň (na rovníku 111 km) teda potrebujeme poznať čas s presnosťou niekoľkých minút. Túto presnosť si pri tom musíme udržať po dobu aspoň jedného mesiaca. Problém bol natoľko naliehavý, že panovníci krajín ako Španielsko, Holandsko, či Veľká Británia vypisovali nemalé finančné odmeny. Cena posledného menovaného v roku 1713 bola vypísaná na 10 000 libier⁶ po dosiahnutí presnosti jedného stupňa po šesťtyždennnej ceste do Indie.

Najúspešnejším riešiteľom sa stal John Harrison konštrukciou svojich námorných chronometrov. Po celoživotnej práci zostrojil chronometer H4, ktorý počas cesty do Karibiku trvajúcej 81 dní stratil len päť sekúnd. Tento výrazný pokrok bol dosiahnutý vďaka konštrukcii s nízkym trením obsahujúcim oscilujúce súkolia budené pružinou – boli teda nezávislé na zemskom gravitačnom poli o odolné voči vonkajším silám, ako napríklad odstredivej sile pri zmene kurzu, ktoré na klasické kyvadlové hodiny pôsobia. Vysoká presnosť bola dosahovaná aj vďaka teplotnej stabilizácii pomocou bimetalického pásiku, či vďaka vynálezu kobyľkového krokového kolesa a špeciálneho valčekového ložiska.⁷ Pokroky v britskom hodinárstve boli jednou z príčin dominancie britského námorníctva a hlavným dôvodom, prečo je dnešný štandard času a zemepisnej dĺžky observatórium v Greenwichi.

Druhou možnosťou určenia času bolo astronomické pozorovanie. Na pevnine sa presný čas určoval pomocou pozorovania predpovedaných zatmení Jupiterových mesiacov pomocou ďalekohľadu – na mori sa ale samotné pozorovanie ukazovalo nerealizovateľné. Pokrok tak učinili tabuľky Tobiasa Mayera popisujúce pohyb Mesiaca na oblohe – v tom čase veľmi náročná úloha nebeskej mechaniky daná vzájomným gravitačným pôsobením Zeme, Slnka a Mesiaca.

Efemeridový čas

Na prelome 19. a 20. storočia sa z astronomických meraní postupne ukázalo, že rotácia Zeme nie je rovnomerná na krátkych časových škálach, a že sa dlhodobo spomaľuje vplyvom slapového pôsobenia. Astronómovia preto navrhli presný čas určovať z polohy telies v Slnčnej sústave ako predstavu rovnomerného Newtonovského času za predpokladu platnosti Newtonovskej gravitácie a mechaniky. Definícia sekundy sa v roku 1956 preto zmenila nasledovne:

Sekunda je zlomok $1/31\,556\,925,974\,7$ tropického roku⁸ v čase 1900 Január 0 o 12 hodine efemeridového času.

Táto definícia bola realizovaná pozorovaním polôh Mesiaca a ich porovnaním s predpovedanými polohami – efemeridami – odkiaľ pochádza názov tejto časovej miery.

Atómový čas

Aktuálna definícia sekundy je realizovaná od roku 1967 nasledovne:

Sekunda (skratka s) je SI jednotka času, ktorá je definovaná fixovaním číselnej hodnoty céziovej frekvencie $\Delta\nu_{Cs}$ neporušenej frekvencie superjemného prechodu základného stavu atómu ^{133}Cs na hodnotu $9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$.

⁶ v dnešnej hodnote niekoľko miliónov

⁷ Originálny článok popisujúci funkciu Harrisonovho chronometra je dostupný na https://books.google.cz/books?id=aB80AAAQAAJ&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

⁸ čas medzi dvomi po sebe idúcimi okamihmi jarnej rovnodennosti

V základnom stave má jediný stabilný izotop cézia ^{133}Cs jadro v stave so spinom $7/2$ a jeden nespárený elektrón so spinom $1/2$. Základný stav atómu sa teda rozštiepi na dve hladiny s celkovým spinom $7/2 \pm 1/2$ podľa toho, či sú tieto spiny orientované v rovnakom alebo opačnom smere. Prechodom medzi týmito hladinami sa vyžiari elektromagnetické žiarenie práve o frekvencii $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, čo zodpovedá vlnovej dĺžke asi troch centimetrov – jedná sa teda o mikrovlnné žiarenie. Atóm v definícii je neporušený – nepôsobia naň žiadne vonkajšie elektromagnetické polia, ako napríklad tepelné žiarenie. Realizáciou by teda bol atóm o teplote 0 K . Takto určený čas je vlastným časom v zmysle všeobecnej teórie relativity v lokálnej vzáťažnej sústave sústave spojeney s príslušnými atómovými hodinami. Pre zostavenie koordinovanej časovej škály pre sústavu pozorovateľov je preto nutné previesť príslušné relativistické korekcie.

Sekunda je realizovaná v laboratóriách vznikom elektrického signálu na frekvencii, ktorej vzťah s $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ je presne známy, pričom je korigovaný na vplyvy prostredia, či vzájomný pohyb častíc. Primárne časové štandardy dnes dosahujú presnosť až $1 : 10^{16}$. Okrem $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ existuje aj množstvo sekundárnych štandardných frekvencií, ktoré sú známe s presnosťou $1 : 10^{14}$ až $1 : 10^{16}$.⁹

Medzinárodný atómový čas (TAI) sa následne získava priemerovaním času na niekoľkých stovkách atómových hodín po celom svete. Takto získaný čas má stabilitu $3 : 10^{16}$ na mesačnej škále a je obvykle dostupný spätne s odstupom niekoľkých týždňov zverejnením korekcií medzi (TAI) a jednotlivými atómovými hodinami. Pre praktické použitie je preto dôležitý prenos časového signálu medzi dvomi laboratóriami – tento sa uskutočňuje kalibráciou pomocou GPS satelitov na obežnej dráhe Zeme pomocou atómových hodín na satelitoch samotných s obvyklou presnosťou prenosu niekoľko nanosekúnd.

Z atómového času sa následne určuje koordinovaný svetový čas (UTC), ktorý sa od TAI líši o celý počet sekúnd tak, aby sa zhodoval so stredným slnečným časom na Greenwichskom poludníku (UT1) s chybou menšou ako $0,9\text{ s}$. Tento rozdiel je vplyvom nerovnomernej rotácie Zeme premenlivý, občas preto Medzinárodná služba pre rotáciu Zeme zavádza prestupnú sekundu. Z času UTC sa konečne určí korekciou obvykle o celé hodiny príslušný pásmový čas, ktorý používame v bežnom živote a je bežne šírený pomocou internetu, rádia a televízie. Používa čas odvodený od greenwichského UT od 1893

V Česku je etalónom času *Státní etalon času a frekvence* uložený na Ústavu fotoniky a elektroniky Akademie věd, ktorý vytvára časovú stupnicu UTC(TP) pomocou priemyselných céziových hodín s frekvenčnou nestabilitou $6 \cdot 10^{-14}$ na škále jedného dňa.

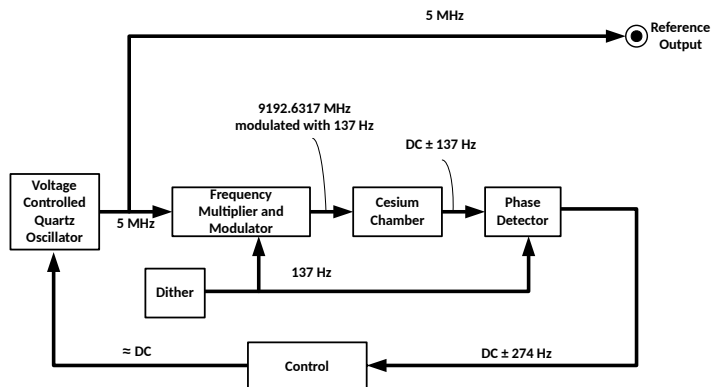
Atómové hodiny

Ako však fungujú samotné céziové atómové hodiny? Pozrime sa najprv na „kvantovú“ časť prístroja.

V peci zahriatím cézia nad 100 °C získame postupným vyparovaním (na teplote medzi bodom topenia a varu) prúd atómov, ktoré sa nachádzajú rovnomerne rozložené v hornom a dolnom stave nášho prechodu. Tieto vieme oddeliť prechodom cez sústavu magnetov tvorených nehomogénne magnetické pole ako v Stern-Gerlachovom experimente (SG). Filterovaný spodný stav prechodu následne necháme preletieť jednou časťou mikrovlnnej kavity budenej na frekvencii f . Následne po prelete oblasťou s malým magnetickým polom B preletí druhou časťou

⁹<https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies>

¹⁰https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Caesium_clock_block.svg



Obr. 3: Bloková schéma fungovania céziových hodín¹⁰

mikrovlnnej kavity.¹¹ Týmto sa v niektorých atónoch zväzku vybudí vyšší stav. To je spôsobené tým, že elektromagnetické pole je kvantované ako fotóny s energiou $E_f = hf$, kde h je Planckova konštanta. A ak sa atóm Cézia zrazí s fotónom, čo má správnu energiu, môže ho pohltiť a preskočiť tým do vyššieho energetického stavu. Následne vybudené atómy vyfiltrujeme pomocou SG magnetov a ionizujeme na horúcom vlákne. Tieto ionizované častice analyzujeme hmotnostným spektrometrom, čím vylúčime potenciálne kontaminujúce atómy, a detekujeme elektrónovým násobičom. Na násobiči bude najvyššie napätie pre najvyšší tok častíc na hornej hladine, teda vtedy, ak budeme mikrovlnnú kavitu budiť rezonančnou frekvenciou $f = \Delta\nu_{CS}$.

Dôležitá je aj elektronická časť prístroja. Srdce prístroja je napätím kontrolovaný kryštálový oscilátor o frekvencii $f_0 = 5\,000$ kHz. Z tejto frekvencie sa postupne pripraví striedavý elektrický signál na frekvencii 18krát vyššej. Táto sa následne po prechode vysoko nelineárnou súčiastkou generujúcou veľké množstvo celočíselných násobkov prefiltruje mikrovlnnou kavitou tak, že ostane len jej 102 násobok na 9 180 MHz, k čomu sa interferenčne pridá z pôvodných f_0 lokálne generovaných 12,63 MHz. Táto výsledná frekvencia sa privedie na mikrovlnnú kavitu, ktorou prelietavajú atómy cézia. Frekvencia f_0 , a teda aj všetky z nej odvodené, sa pri tom upravuje tak, aby bolo napätie na násobiči maximálne využitím napäťovej spätnej väzby. Celý prístroj je navyše teda céziom stabilizovaný kryštálový oscilátor.¹²

Pre úplnosť popíšme ešte ako funguje kremenný kryštálový oscilátor, aký môžeme nájsť napríklad vo väčšine náramkových hodín.¹³ Malý špeciálne vyrezaný kúsok kryštálu kremeňa je umiestnený medzi elektródy. Privedením vonkajšieho elektrického poľa sa kryštálová mriež-

¹¹Toto zostavenie sa nazýva Ramseyho metóda a zvyšuje presnosť merania v porovnaní s jedným preletom. Je tým presnejšie, čím sú oblasti preletu elektromagnetickým poľom od seba ďalej.

¹²Pre hard-core záujemcov odkaz na operačný a servisný manuál atómových hodín HP 5061:http://www.cs.cmu.edu/~dga/time/5061/5061_ops_and_schematics.pdf

¹³Prvý kryštálový riadený oscilátor zostavil v roku 1917 Alexander M. Nicholson, prvý kremenný oscilátor Walter G. Cady v roku 1921 a prvé kremenné hodiny v roku 1927 Warren Marrison a J.W. Horton v Belových laboratóriách.

ka zdeformuje pôsobením prízvo-elektrického javu.¹⁴ Ak má privádzané elektrické pole rovnakú frekvenciu ako vlastné mechanické kmity kryštálu, dôjde k rezonancii. Táto nastáva aj na nepárnych násobkoch základnej frekvencie a pre kremenný kryštál len málo závisí na teplote. Táto frekvencia môže byť upravená použitím vonkajšieho napätia na úrovni do niekoľko 100 častí v milióne. Prvé kremenné náramkové hodinky, teda také s akými sa dnes stretávame najčastejšie, vyrobili v roku 1969 v Japonsku v dnes svetoznámej firme Seiko.

V budúcnosti sa dá očakávať zmena definície sekundy do optických frekvencií. Takzvané optické atómové hodiny využívajúce zakázané optické prechody atómov ako stroncium, či yterbium dosahujú presnosť až $1 : 10^{20}$. Vzhľadom na to, že tieto hodiny bežia na vysokých frekvenciách niekoľko stoviek THz, miesto elektronických obvodov sa musia používať obvody optické využitím pokroku laserovej techniky. Pre dosiahnutie vysokej presnosti musia byť atómy laserovo chladené na mikrokelviny a udržované v optických pasciach, aby sa zabránilo rozšíreniu spektrálnej čiary tepelným pohybom. Prevedenie optického signálu na použiteľný elektronický signál o stabilnej frekvencii sa používa tzv. optický Diracovský frekvenčný hrebeň, za ktorého vývoj bola v roku 2005 udelená Nobelova cena Theodorovi W. Hänschovi a Johnovi L. Hallovi. Pre použitie týchto hodín ako zdroj koordinovaného času je však stále nutné vyriešiť transport signálu, navyš presnosť lepšia ako $1 : 10^{18}$ nie je pre tento čas dosiahnuteľná – takto malé zmeny sú totiž spôsobené už centimetrovými posunmi v gravitačnom poli Zeme pôsobením všeobecnej teórie relativity.

Mimoriadne krátko . . .

Na záver sa pozrime na niekoľko extrémov. Jednými z najkratších časov, s ktorými sa môžeme vo fyzike stretnúť, sú stredné doby života subatomárnych častíc. Napríklad pre Δ baryóny skladajúce sa z trojice up alebo down kvarkov bolo namerané $\tau = (5,63 \pm 0,14) \cdot 10^{-24}$ s, teda asi päť yoktosekúnd. Tieto časy sa merajú z rozdelenia nameraných hmotností danej častice určenej z meraní energií a hybností jej rozpadových produktov. Vplyvom Heisenbergovho princípu neurčitosti nie sú presné, ale popísané Breitovou-Wignerovou distribúciou energií častíc

$$f(E) = \frac{\Gamma}{2\pi \left((E - E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2 \right)}$$

kde $E_0 = mc^2$ je pokojová energia častice o hmotnosti m a Γ je rezonančná šírka (neurčitost energie) spojená so strednou dobou života ako $\tau = \hbar/\Gamma$, kde \hbar je redukovaná Planckova konštanta.

. . . a nesmierne dávno

Na opačnej strane škály sa nachádzajú časy používané v archeológii a geológii. Aj tu však využívame rozpady častíc – dlho žijúcich rádionuklidov. V archeológii sa obvykle datuje pomocou izotopu uhlíka ^{14}C , ktorý vzniká v atmosféra z atómov dusíka vyrazením protónu neutrónom kozmického žiarenia, ktorý v jadre ostane. Následne sa do živých organizmov dostáva v podobe oxidu uhličitého. Tento izotop sa rozpadá na pôvodný izotop dusíka s polčasom asi $T_{1/2} = 5700$ rokov.

Vek organizmu sa určí z pomeru zastúpenia izotopov uhlíka $[^{14}\text{C}] / [^{12}\text{C}]$. Počas života je daný tento pomer zastúpením izotopov v prostredí, ktoré sú na dlhej časovej škále pomerne

¹⁴Piezoelektrické vlastnosti kremeňa objavili Jacques a Pierre Curie v roku 1880.

stabilné.¹⁵ Po smrti organizmu sa rádioaktívny nuklid začne rozpadat'. Čas od úmrtia určíme zo vzťahu

$$\frac{[^{14}\text{C}]}{[^{12}\text{C}]}(t) = \frac{[^{14}\text{C}]}{[^{12}\text{C}]}(t_0) \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t-t_0}{T_{1/2}}}.$$

V geológii používame zastúpenia nuklidov prvkov s ešte dlhšími polčasmi rozpadu. Najjednoduchšia je situácia v niektorých kryštáloch minerálov, v ktorých sa pôvodné rádioizotopy rozpadajú na prvky, ktoré sa v kryštalickej mriežke daného minerálu nemôžu nachádzať. Takýmto je napríklad minerál zirkón, ktorý v čase kryštalizácie vo svojej kryštálovej štruktúre obsahuje prímiesy uránu a tória, avšak neobsahuje olovo, ktoré je koncom príslušných rozpadových rád – U-Pb datovacia metóda. Komplikovanejšia je však situácia, ak pôvodné izotopické zastúpenie nepoznáme, ako napríklad v meteoritoch. V tomto prípade sa odoberie niekoľko analyzovaných vzoriek, pričom sa zaujímate o zastúpenia materského rádionuklidu, dcérskeho stabilného nuklidu a iného stabilného nuklidu rovnakého prvku. Ak mali naše vzorky premenlivé chemické zloženie, vieme z týchto meraní určiť vek materiálu a pôvodný pomer izotopov dcérskeho prvku.

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

¹⁵Dnes meriame tak presne, že sa v skutočnosti tento pomer určuje z kalibrácie voči dendrochronológii – určeniu veku pomocou letokruhov stromov. Navyše jadrové testy v minulom storočí atmosférickú koncentráciu rádioaktívnych nuklidov dominujú.