

Rozhledy matematicko-fyzikální

Martin Macháček

Proč se sekunda definuje tak složitě?

Rozhledy matematicko-fyzikální, Vol. 80 (2005), No. 1, 15–25

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/146083>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2005

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

Proč se sekunda definuje tak složitě?

Martin Macháček, Ondřejov

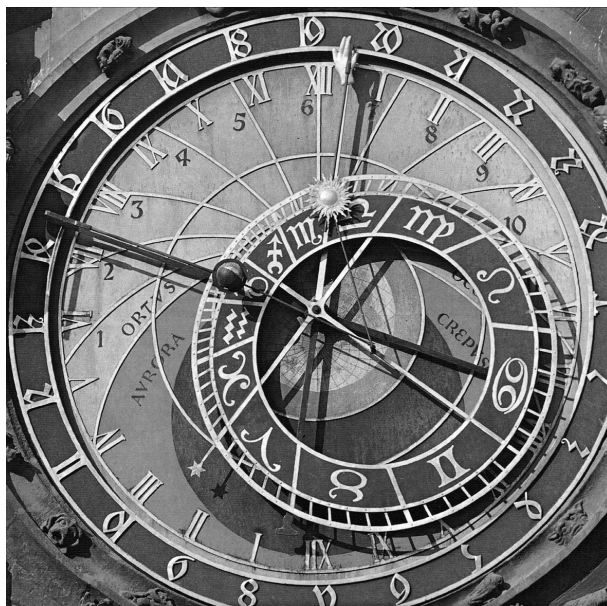
Trocha historie

Jaké časové jednotky se kdy používaly, to samozřejmě vždycky záviselo na stavu techniky; ve středověku se nepoužívala sekunda, protože by ji nikdo neuměl změřit. Dělit den na časové jednotky velké asi jako naše hodina bylo v principu možné už ve starověku, protože k tomu stačí sledovat sluneční stín. První, o kom víme, že to dělal, byli staří Egypťané; okolo roku 3500 př. n. l. stavěli vysoké štíhlé obelisky, jejichž hlavním účelem pravděpodobně bylo ukazovat čas. Okolo roku 1500 př. n. l. už vyráběli i přenosné sluneční hodiny.

Dělení dne na 24 hodin pochází ze staré Mezopotámie. Oblíbeným číslem tam bylo dvanáct, především z důvodů čistě matematických (má víc dělitelů než číslo 10), ale asi hrálo svou roli i to, že Měsíc oběhne Zemi přibližně dvanáctkrát za rok. Proto staří Babyloňané a Egypťané rozdělili den na 12 hodin – jenže den pro ně byla doba od východu po západ slunce. Podobně dělili i noc, kdy sice nemohli použít sluneční hodiny, ale čas mohli měřit podle hvězd. Takové „jednotky času“ byly ovšem různě dlouhé a jejich délka se měnila i v průběhu roku.

To by moc nevadilo v „občanském životě“, lidé ve starověku a středověku opravdu neměli přehnané nároky na přesné udávání času, ale vadilo by to, kdyby někdo chtěl odčítat čas na jiných než slunečních hodinách. Zejména mechanické kolečkové hodiny musely mít ciferník nezávislý na roční době. Délky denní a noční hodiny se proto sjednotily, takže hodina byla teď jedna čtyřiadvacetina dne.

Mechanické kolečkové hodiny byl pravděpodobně první velký technický vynález, který vznikl ve středověké Evropě. Nevíme sice přesně, kdy vznikly, ale určitě to bylo před rokem 1320; v tom roce napsal totiž Dante Alighieri ve své *Božské komedii* verše, které jsou jejich prvním spolehlivým popisem. Tehdejší hodiny měly jen hodinovou ručičku a ta oběhla dokola jednou za den, stejně jako Slunce. Takovou ručičku můžeme vidět i na staroměstském orloji v Praze (obr. 1).



Obr. 1. Hodinová ručička je na pražském orloji označena symbolem Slunce a oběhne dokola jednou za celý den. Na okraji ciferníku jsou dvě stupnice. Vnější je psaná arabskými číslicemi v původní gotické podobě (všimněte si nezvyklých tvarů číslic 4 a 7) a označuje staročeské hodiny od 1 do 24. Den tehdy začínal západem Slunce; to bylo ovšem v různých ročních obdobích v jinou denní dobu, takže ciferník se musel každý den trochu pootočit.

Vnitřní stupnice je psaná římskými číslicemi a má dvakrát 12 hodin. Tato stupnice na nejstarším orloji nebyla – doplnil ji tam až v polovině 16. století tehdejší správce orloje Jan Táborský. Jak na obrázku vidíme, využil k tomu prostoru uvnitř kruhu; to bylo ovšem trochu nouzové řešení, protože část tohoto prostoru je vždy zakryta.

Jan Táborský o nové stupnici píše: „Přidal sem také na sféře veliké počet hodin poluorlojních, kteréhožto jest prvé nebylo, neb v Čechách německých hodin neužívali a málo o nich věděli neb nic, až teprv za kralování krále Ferdinanda.“ (Hodiny „německé“ neboli „poluorlojní“ znamenaly právě dělení dne na dvakrát dvanáct hodin a začátek dne o půlnoci.)

Později v Německu vznikla další novinka: ručička oběhla hodiny ne jednou, ale dvakrát za den a ciferník měl na sobě jen dvanáct hodin. Výhodou takového ciferníku bylo, že byl přehlednější a bylo možno odhadovat i díly mezi hodinami.

Středověké hodiny byly samozřejmě obrovské stroje, protože byly vyráběny v podstatě kovářskou technikou. Byly také určitě málo přesné; odhaduje se, že jejich chyba byla aspoň 15 minut za den. Jejich *oscilátorem*, tedy tím, co svým periodickým pohybem vlastně odměřuje čas, bylo vodorovné břevno, které mělo na svých koncích závaží a které se otáčelo sem a tam okolo svislé osy. Při každé výchylce umožnilo, aby se *krokové kolo* pootočilo o jeden zub. Frekvence takového oscilátoru podstatně závisela na tom, jakou silou byl celý stroj poháněn (jak velký moment síly působil na krokové kolo). Navíc, technické provedení bylo ještě velmi primitivní, proto bylo ve stroji velké tření a to dále způsobovalo nerovnoměrnost chodu.

První kyvadlové hodiny sestrojil holandský fyzik Christian Huyghens v roce 1656 (myšlenku však uveřejnil už Galileo Galilei roku 1582). Kyvadlo je daleko dokonalejší oscilátor, protože jeho frekvence jen velmi málo závisí na tom, jakou silou je stroj poháněn – při malých výchylkách je doba kyvu dána prakticky jen délkou kyvadla. Chyba těchto hodin proto byla daleko menší, jen asi 10 s za den.

O 19 let později, v roce 1675, vynalezl Christian Huyghens další přesný oscilátor: systém vlásek-setrvačka („nepokoj“), který se v mechanických hodinkách používá dodnes. Angličan John Harrison zdokonalil okolo roku 1760 tento systém natolik, že jeho *chronometr* dokázal i na houpající se lodi udržet dlouhodobou přesnost asi 0,2 s za den. To žádala především mořeplavba – zeměpisná délka se mohla určovat jen tak přesně, jak přesné hodiny měl kapitán na palubě. Harrisonovy hodiny umožnily kapitánům spolehlivě určovat zeměpisnou délku i při dlouhé plavbě.

Jak se hodinářská technika zdokonalovala, mohly se používat menší jednotky času než hodina. První byla samozřejmě minuta. Je typické, že měřit s přesností na minuty si nevynutily potřeby „praktického života“, ale *vědy*. První hodiny s minutovou ručičkou totiž sestrojil roku 1577 švýcarský hodinář Jošt Bürgi na zakázku dánského astronoma Tychona Brahe, který potřeboval ke svým přesným měřením polohy nebeských těles také přesný čas.

Sekundová ručička byla zavedena v roce 1676. Názvy *minuta* a *sekunda* však existovaly ještě předtím, byly to spíš matematické termíny, nevznikly v souvislosti s měřením času, a proto je dodnes používáme i při dělení jednotky úhlu *stupeň*.

Dnes bychom jistě dělili stupeň i hodinu na desetiny a setiny, ale desetinné zlomky jsou poměrně nedávný vynález: zavedl je vlámský matematik Simon Stevin okolo roku 1600. Ve starověku a středověku se

místo dnešní desítkové používala babylonská šedesátková soustava, jednotky se tedy dělily na šedesátiny. Takový dílek se nazýval *malá část*, latinsky *pars minuta*, odtud naše minuta. Ještě menší dílek, šedesátina šedesátiny, byla *druhá malá část*, latinsky *pars minuta secunda*, odtud naše sekunda.

Co je to den

Z toho, jak jsme k jednotce času sekunda došli, plyne, že

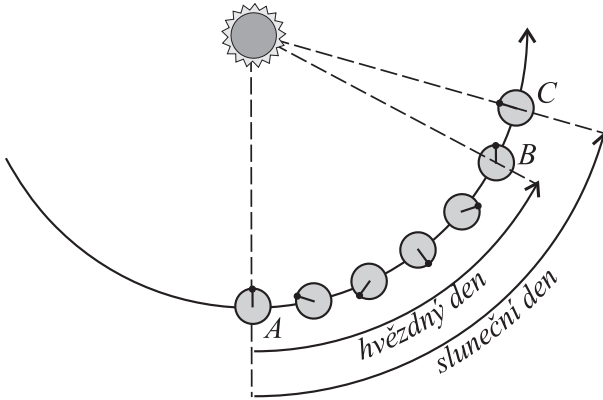
$$1 \text{ s} = \frac{1}{24 \cdot 60 \cdot 60} \text{ dne} = \frac{1}{86\,400} \text{ dne.}$$

Jenomže – co je *den*?

Pravý sluneční den je doba od jednoho poledne k druhému. To ale není moc dobrá jednotka: kdybychom měřili čas přesnými hodinami, zjistili bychom, že pravé sluneční poledne nastává v listopadu okolo 11 hodin 45 minut místního času, zatímco v únoru až ve čtvrt na jednu. Pravé sluneční dny jsou tedy různě dlouhé v různé roční doby.

Je to snad tím, že by se Země při svém otáčení zpomalovala a zase zrychlovala? To sotva, Země je obrovský těžký setrvačnický a nerovnoměrnost jejího otáčení bude asi nepatrná. (Skutečně je; projeví se až při porovnání s velmi přesnými atomovými hodinami, o kterých píšeme níže.)

Vysvětlení toho, proč doba od jednoho poledne k druhému není po každé stejná, je v tom, že to *není skutečná doba otočení Země*. Země se totiž nejen otáčí, ale také obíhá okolo Slunce, a proto rotaci Země nemůžeme měřit vzhledem k Slunci – musíme ji měřit vzhledem k vzdáleným hvězdám. Dobou rotace Země je tedy doba jejího otočení vzhledem k hvězdám, *hvězdný den*; trvá 23 hodin 56 minut a 4,1 sekundy. Naproti tomu doba od jednoho poledne k druhému se nazývá *sluneční den*. Na obr. 2 vidíme, jaký je mezi nimi rozdíl. Když je Země nejbližší Slunci, pohybuje se po své dráze rychleji, než když je od něj dál, a proto sluneční den trvá o něco déle. Hvězdné dny jsou s velkou přesností stejné, pravé sluneční dny stejné nejsou. Proto se pro definici hodiny, minuty a sekundy nepoužíval pravý sluneční den, ale *střední sluneční den*, který v podstatě vznikl vystředováním toho „pravého“ dne přes celý rok.



Obr. 2. Když je Země v místě *A* své dráhy okolo Slunce, má pozorovatel (kterého jsme označili černou tečkou) právě poledne. Hvězdný den je doba, za kterou se Země otočí o 360° ; dostane se při tom do místa *B* své dráhy. Sluneční den je doba, po které se pozorovateli opakuje poledne; za tuto dobu se Země dostane do místa *C*.

Otáčení Země vzhledem k hvězdám se tedy po dlouhou dobu používalo pro ověřování přesnosti hodin. Máme-li kyvadlové hodiny a ty nám ukazují, že Země se otočí pokaždé za stejnou dobu, znamená to, že jdou rovnoměrně. Ukazují-li, že Země se otočí pokaždé za jinou dobu, řekneme si jistě, že špatně jdou hodiny, ne Země. Prostě hodinám spojeným s rotací Země vzhledem k hvězdám věříme víc než hodinám kyvadlovým.

Přibližně od poloviny dvacátého století se však začaly vyvíjet nové metody měření času, které vedly k dnešním *atomovým hodinám*. Měříme-li dobu rotace Země atomovými hodinami, zjistíme, že doby různých otoček se nepatrně liší. To znamená, že obojí, hodiny spojené s otáčením Země a hodiny atomové, nemohou současně jít správně. Buď špatně ukazuje Země, nebo špatně ukazují atomové hodiny. A my se musíme rozhodnout, kterým budeme věřit víc.

Takové rozhodnutí ovšem uděláme z nějakých důvodů. V konkrétním případě rozhodování mezi hodinami atomovými a hodinami, jejichž ručička se otáčí se Zemí, dali fyzici přednost hodinám atomovým. Proč? Porovnali, co vše může ovlivnit otáčení Země a co oscilace atomů, na nichž jsou založeny atomové hodiny. Země je uvnitř plastická, někde i tekutá, látka v ní proudí a každý ví, jak to může ovlivňovat otáčení tělesa. Jestliže uvnitř Země klesne nějaký těžký kus látky a na jeho místo stoupne jiný, lehčí, pak se změní moment setrvačnosti Země, a tím i její

úhlová rychlost, podobně jako když krasobruslař při piruetě přitáhne ruce k sobě (k ose otáčení). Tyto děje ovšem nemůžeme ovlivnit a dokonce je ani nemůžeme jinými prostředky zjistit, takže nemůžeme údaje Země jako hodin ani opravit. Naproti tomu vlivy, které mohou působit na frekvenci atomů, se dají snadno odstínit (je to především magnetické a elektrické pole).

Kromě toho, Země je jen jedna, zatímco atomových hodin můžeme postavit hodně (a dokonce několik různých druhů). To, jak se liší údaje různých atomových hodin, nám dává představu o jejich chybě. Ukazuje se, že atomové hodiny se mezi sebou liší daleko méně než hodiny založené na otáčení Země. To je další známka, že na atomové hodiny je větší spolehnutí než na Zemi.

Sekunda v soustavě SI

V soustavě SI je jednotka času *sekunda* definována takto:

Sekunda je doba rovnající se 9 192 631 770 periodám záření, které odpovídá přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cezia 133.

Tato definice je ušita na míru jedné speciální metodě měření času, totiž *ceziovým atomovým hodinám*. Na nich si teď ukážeme princip atomových hodin obecně; kromě ceziových jsou i jiné atomové hodiny, ale ty ceziové jsou dnes považovány za dlouhodobě nejstabilnější.

Cezium má jediný stabilní izotop; jeho atom má 55 protonů a 78 neutronů, hmotnostní číslo tohoto izotopu je tedy 133. Jak známo, cezium je alkalický kov, jeho elektronový obal v základním stavu (ve stavu s nejnižší energií) proto obsahuje uzavřené slupky (jako jemu nejbližší vzácný plyn xenon) plus jediný elektron navíc.

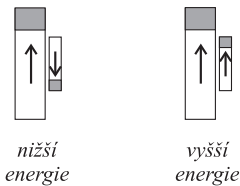
Elektronový obal se obvykle chová, jako by byl malým tyčovým magnetem. Ovšem magnetické účinky všech elektronů *v uzavřené slupce* se navzájem vyruší – výsledné magnetické pole uzavřené slupky je nulové. Elektronový obal vzácných plynů se skládá jen z uzavřených slupek, proto má nulové magnetické pole.

Atom cezia 133 má jediný elektron mimo uzavřené slupky, proto je magnetické pole jeho obalu rovno magnetickému poli právě tohoto jediného elektronu. (To samozřejmě platí pro všechny alkalické kovy.)

Nejen elektronový obal, ale i jádro má své magnetické pole. V atomu cezia jsou tedy jakoby dva malé tyčové magnety: elektronový obal

a jádro. Pole těchto magnetů popisujeme vektorovou veličinou, která se nazývá *magnetický moment*. Jeho směr je definován tak, aby ukazoval *od jižního pólu magnetu k severnímu* uvnitř magnetu (obr. 3).

Každý ví, že dáme-li k sobě dva tyčové magnety, budou se „snažit“, aby k sobě byly přiloženy *opačnými póly* – tedy tak, aby jejich magnetické momenty mířily *proti sobě*. Chceme-li jeden z magnetů otočit tak, aby oba magnety byly k sobě přiloženy *souhlasnými póly* (tak, aby oba magnetické momenty mířily stejným směrem), musíme na to vynaložit práci. To znamená: stav, kdy oba magnetické momenty míří stejným směrem, má *vyšší energii* než stav, kdy oba míří opačnými směry.

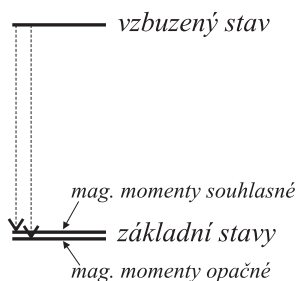


Obr. 3. Velké tyčové magnety na tomto obrázku znázorňují magnetické momenty elektronového obalu, malé znázorňují magnetické momenty jádra. Jsou-li magnetické momenty obalu i jádra naměřeny stejným směrem, je energie atomu vyšší, než když jsou naměřeny proti sobě.

Totéž platí i pro atomy, tedy speciálně také pro atom cezia 133. Podle pravidel kvantové mechaniky však nemůžeme otáčet jádrem o „malé kousky“, jsou tam možné jen dva různé, od sebe oddělené stavy; v našem případě buď jádro a elektrony mají opačný magnetický moment, nebo souhlasný, ale nic mezi tím. Podle toho, co jsme si řekli, má stav s opačnými magnetickými momenty jádra a elektronů *nižší energii*, stav se souhlasnými momenty *vyšší energii*. Základní stav atomu cezia se tedy *rozštěpil* na dva. Protože ale magnetické pole jádra je velmi slabé, řádově tisíckrát slabší než pole elektronů, je rozdíl v energiích obou stavů velmi malý, řádově 10^{-5} eV. Pro srovnání, typické rozdíly energií různých elektronových stavů v atomech jsou desetiny elektronvoltu, někdy i elektronvolty, tedy až stotisíckrát větší. Stejně velké jsou energie fotonů světelného záření. Naproti tomu fotony o energii řádově 10^{-5} eV patří do oboru *radiového záření*.

Teď uvedeme bez bližšího komentáře další (snad známý) fakt z atomové fyziky. Atom může být jen v některých, od sebe oddělených (*diskrétních*) stavech s určitou energií. Jestliže atom vyzářil foton a přešel při tom ze stavu s energií E_1 do stavu E_2 , pak se jeho energie zmenšila o $E_1 - E_2$. Podle zákona zachování energie tuto energii musí mít vyzářený foton; a protože energie fotonu o frekvenci f je hf , kde h je Planckova konstanta, znamená to, že musí platit $E_1 - E_2 = hf$.

Představme si tedy, že atom cezia je na počátku ve vzbuzeném stavu (obr. 4). Může vyzářit světelný foton a přejít při tom do základního stavu. Jak jsme však právě viděli, základní stavy jsou vlastně dva: jeden s úplně nejnižší energií (oba magnetické momenty míří proti sobě) a jeden s energií nepatrně vyšší (oba momenty míří stejným směrem). To znamená, že atom cezia ve vzbuzeném stavu může vyzářit dva různé fotony s velmi blízkou energií (a tedy velmi blízkou frekvencí), podle toho, do kterého základního stavu vlastně přejde. Spektrální čára, která tomuto přechodu odpovídá, se tedy ve skutečnosti skládá ze dvou čar, jejichž frekvence se od sebe nepatrně liší. V případě cezia 133 je rozdíl těchto frekvencí $9\,192\,631\,770\text{ Hz} \doteq 10^{10}\text{ Hz}$, což je opravdu nepatrná hodnota proti běžným frekvencím světelných fotonů, které jsou řádově 10^{14} Hz . V běžném spektru není takové rozštěpení čáry prakticky patrné, proto se mu říká *velmi jemná struktura* (někdy též *hyperjemná struktura*). Dvě hladiny, na které se základní stav atomu cezia rozštěpí díky magnetickým momentům jádra a elektronového obalu, jsou tedy „hladiny velmi jemné struktury základního stavu atomu cezia 133“. A tady už se blížíme definici sekundy v soustavě SI.



Obr. 4. Zjednodušené schéma elektronových stavů atomu cezia 133. Základní stav je rozštěpen na dva stavy podle toho, zda je magnetický moment elektronů a jádra orientovaný souhlasně, nebo opačně. To znamená, že jsou i dva možné přechody ze vzbuzeného stavu do základního – zde jsou naznačeny čárkovaně. Fotony, které se při tom vyzáří nebo pohltí, mají nepatrně odlišné frekvence. Rozdíl energií dvou základních stavů je ve skutečnosti asi 10 000krát větší než rozdíl mezi vzbuzeným a každým ze základních stavů. Kdybychom tedy měli na tomto obrázku dodržet měřítko, musely by dvě spodní čáry být jen asi 0,03 mm od sebe.

V předchozím odstavci jsme mluvili o přechodech z nějakého vzbuzeného stavu elektronového obalu do jednoho ze dvou stavů velmi jemné

struktury; při tom se vyzáří foton viditelného světla. Ale je také možný přechod mezi samými dvěma stavy velmi jemné struktury. Při tomto přechodu se tedy změní vzájemná orientace magnetických momentů obalu a jádra (ze souhlasné na opačnou nebo obráceně) a současně se vyzáří (nebo pohltí) foton. Energie $E = hf$ tohoto fotonu je rovna rozdílu energií obou stavů velmi jemné struktury a ta je, jak jsme si řekli, velmi malá, řádově 10 000krát menší než energie světelných fotonů. Proto je také frekvence f vyslaného nebo pohlceného záření řádově 10 000krát menší než frekvence viditelného světla – toto záření leží tedy v *radiové* oblasti spektra (přesněji v její *mikrovlnné části*).

A teď už rozumíme definici sekundy, která je uvedena na počátku této kapitoly. Záření, které se pohltí, když se v atomu cezia 133 změní orientace magnetických momentů jádra a obalu z opačné na souhlasnou – nebo které se vyzáří, když se tato orientace naopak změní ze souhlasné na opačnou – vykoná přesně 9 192 631 770 kmitů za sekundu, neboli má frekvenci přesně 9 192 631 770 Hz.

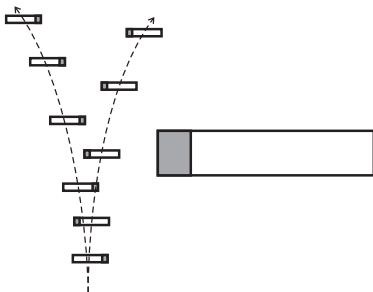
Jak pracují atomové hodiny

Abychom mohli definici sekundy „převést do praxe“, musíme napřed nějakým způsobem připravit atomy cezia 133 v *nižším* ze dvou stavů velmi jemné struktury. Pak je budeme ozařovat radiovými vlnami, které mají frekvenci blízkou k 9 192 631 770 Hz. Mají-li tyto vlny frekvenci *přesně* 9 192 631 770 Hz, atomy cezia je pohltí a přejdou při tom do *vyššího* ze dvou stavů jemné struktury. Je-li frekvence vln jiná, atomy cezia je nepohltí. Mohli bychom vlastně říct, že jako hodiny slouží generátor radiových vln a že atomy cezia 133 tyto hodiny jen kontrolují: jakmile zjistíme, že atomy cezia přestaly pohlcovat naše radiové vlny, je to známka, že frekvence těchto vln je špatná a musíme ji opravit.

Praktické provedení je přibližně takové: Zahříváme kapalně cesium. Jeho páry, tedy proud atomů cezia 133 (jiné izotopy se, jak jsme už řekli, v přírodě nevyskytují), vedeme ve vysokém vakuu okolo jednoho pólu elektromagnetu. Tam působí na atomy různá magnetická síla podle toho, jaký je jejich magnetický moment – je to vlastně obdobná situace, jako kdybychom okolo pólu většího magnetu pouštěli „proud“ malých magnetů o různé orientaci (obr. 5).

Původně jediný proud atomů cezia se tedy u magnetu rozdělí na dva. V jednom proudu jsou atomy, v nichž jsou magnetické momenty jádra a obalu orientovány souhlasně, a ve druhém proudu atomy, v nichž jsou

tyto momenty orientovány opačně. Atomy prvního proudu odvedeme pryč, ty nepotřebujeme. Atomy druhého proudu mají, jak jsme už před chvílí řekli, nižší energii. Tyto atomy ozáříme mikrovlnným zářením. Je-li frekvence záření „správná“, tedy přesně 9 192 631 770 Hz, atomy cezia toto záření pohltní a přejdou při tom do stavu s vyšší energií – magnetické momenty jejich jádra a obalu pak budou orientovány *souhlasně*. Není-li frekvence záření správná, atomy cezia toto záření nepohltní a zůstanou v původním stavu – magnetické momenty jejich jádra a obalu zůstanou orientovány *opačně*.



Obr.5. Proud malých magnetů nalevo znázorňuje proud atomů cezia. Proletá-li tento proud okolo pólu většího magnetu, rozdělí se atomy podle toho, jaký je jejich magnetický moment. Ve skutečnosti se ovšem pro toto třídění atomů nepoužívá permanentní magnet, ale elektromagnet.

Abychom poznali, jestli bylo záření pohlčeno, nebo ne, vedeme atomy cezia zase okolo elektromagnetu. Elektromagnet rozdělí proud atomů cezia zase na dva: v jednom budou atomy se *souhlasnými* momenty, ve druhém se *vzájemně opačnými*. Je-li první proud silný a druhý slabý, je frekvence radiového záření správná. Jinak ji musíme opravit – opravujeme ji, dokud není první proud co nejsilnější.

Toto zařízení tedy ještě neukazuje čas, jen produkuje radiové vlny o velmi přesně stanovené frekvenci. Ale zbytek je už práce pro elektroniku. V podstatě se dá říct, že elektronické obvody dokážou „odpočítat“ vždy 9 192 631 770 vln a pak vyslat signál, který oznamuje: „Právě uplynula další sekunda“. A totéž platí i pro menší dílky než sekunda.

Atomové hodiny a otáčení Země

Dřív se naše hodiny řídily podle otáčení Země, dnes se řídí podle atomových hodin, které jdou rovnoměrněji. Znamená to, že už se o otáčení Země nemusíme starat a že bychom mohli náš občanský čas odměřovat jen atomovými hodinami? Mohli, ale riskujeme tím, že někdy v budoucnu, až se oboje tyto hodiny od sebe hodně rozejdou, bude Slunce

vycházet třeba o půl dvanácté. Prostě čas, který používáme, by z praktických důvodů měl být nějak svázán s rotací Země, se zdánlivým pohybem Slunce po obloze, aby poledne bylo asi tak ve dvanáct hodin.

Nechceme-li, aby se sluneční a atomové hodiny od sebe lišily víc než o sekundu, musíme atomové hodiny občas „přestavit“. Nejde o nic jiného než o *přejmenování* určité sekundy. Atomové hodiny prostě budou stále odpočítávat sekundu za sekundou, ale místo abychom určitou sekundu nazvali „7:12:59“, nazveme ji „7:12:58“.

Prakticky se to dělá tak, že když se rozdíl mezi středním slunečním časem a atomovým časem blíží jedné sekundě, vsuneme do hodiny jednu sekundu navíc. Podle dohody se to může stát maximálně dvakrát za rok, o půlnoci ze Silvestra na Nový rok a o půlnoci z posledního června na první červenec; ale v praxi to bývá maximálně jednou ročně. Místo obvyklého „... 58, 59, 0, 1, ...“ se tehdy sekundy počítají „... 58, 59, 60, 0, 1, ...“.

V principu bychom mohli také jednu sekundu z hodiny vypustit, ale v praxi se zatím vždy jen sekundy přidávaly. To ukazuje, že „atomová“ definice sekundy se trochu nepovedla: sekunda měla být nepatrně delší. Dlouhodobá střední hodnota slunečního dne je asi o 2 až 3 milisekundy delší než 86 400 „atomových“ sekund podle definice SI. Kdyby byla sekunda definována ne jako 9 192 631 770 period záření ... (viz definici sekundy), ale řekněme jako 9 192 632 000 period, nemusely by se ty nadbytečné sekundy přidávat tak často. Pak by se samozřejmě jednodušěji počítaly délky časových intervalů mezi dvěma určitými časy – dnes musíme zjišťovat, jestli mezi těmito dvěma časy nebyla náhodou nějaká minuta o 61 sekundách.

Ale ani nejdokonalejší definice sekundy by nás této starosti nezbavila *úplně*. To proto, že rotace Země se nepatrně zpomaluje, den se prodlužuje o 2 až 3 milisekundy za století. Kdyby tedy byla sekunda definována lépe, nemuseli bychom dodatečnou sekundu vkládat přibližně jednou za rok, ale asi dvakrát až třikrát za století. A čím je toto zpomalování způsobeno? Přílivem a odlivem. Při této deformaci oceánu a v malé míře i zemské kůry se totiž mnoho pohybové energie ztrácí třením. Mnoho energie se také spotřebuje na urychlování Měsíce, protože tomu Země prostřednictvím přílivu a odlivu neustále předává malý zlomek své rotační energie, a Měsíc díky tomu obíhá Zemi ve stále větší vzdálenosti. A nakonec: zcela nepatrný zlomek této energie přeměňují přílivové elektrárny na elektrickou energii, kterou pak lidé spotřebují.