

## Původní princip atomových hodin

Nejpřesnější [frekvenci](#) s velmi nízkým [wanderem](#) má [elektromagnetické záření](#), které vzniká v [elektronovém obalu atomu](#) při přechodu [elektronů](#) z vyšších [energetických hladin](#) na nižší energetické hladiny. Frekvence elektromagnetického záření (resp. frekvence [fotonů](#)), které je emitováno při přechodech elektronů mezi energetickými hladinami, je ve viditelném oboru pro většinu prvků řádově 100 THz. A to je frekvence, která je současnou elektronikou (elektrickými obvody, počítači, ...) nezpracovatelná.

Budeme-li uvažovat střed viditelného oboru elektromagnetického spektra - tj. záření s vlnovou délkou 600 nm - pak jeho frekvence je rovna:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{600 \cdot 10^{-9}} \text{ Hz} = 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 500 \cdot 10^{12} \text{ Hz} = 500 \text{ THz} .$$

Detailním studiem spekter jednotlivých prvků [periodické soustavy prvků](#) bylo ale zjištěno, že čára, která se při prvním studiu jevila jako jediná, je ve skutečnosti složena z několika čar. Tato tzv. **jemná struktura** vyplývá z rozdílných [kvantových čísel](#), kterými je stav elektronu popsán.

Pokud se ale dva elektrony liší pouze [spinem](#), mají i tehdy (při stejných ostatních kvantových číslech) různou [energii](#). Tento rozdíl energií dvou elektronů s opačným spinem je o několik řádů nižší, než jsou rozdíly energií v rámci jemné struktury. Proto v tomto případě mluvíme o tzv. **hyperjemné struktuře**. Rozdíly energií energetických hladin v hyperjemné struktuře atomu odpovídají interakcím magnetického momentu spinů elektronu s [magnetickým momentem jádra](#) atomu - nastává tedy [Zeemanův jev](#). Přitom rozdíly energetických stavů v rámci hyperjemné struktury odpovídají podle [kvantové hypotézy](#) frekvence elektromagnetického záření řádově 1 GHz. A toto je frekvence elektromagnetického záření, kterou lze současnou elektronikou zpracovat. Proto se ke konstrukci atomových hodin využívá právě této hyperjemné struktury.

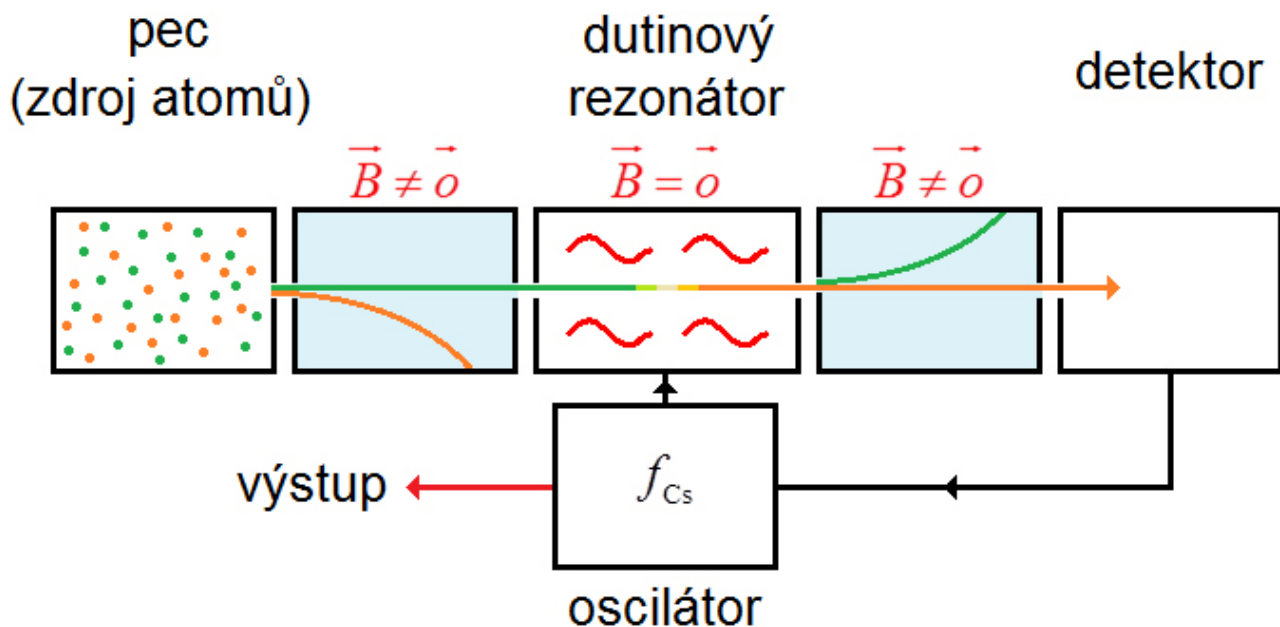
[Izotop](#) cesia  $^{133}_{55}\text{Cs}$  vyzařuje v rámci této hyperjemné struktury elektromagnetické záření o frekvenci  $f_{\text{Cs}} = 9192631770 \text{ Hz}$ , izotop rubidia  $^{85}_{37}\text{Rb}$  vyzařuje elektromagnetické záření s frekvencí 6,835 GHz.

Frekvence elektromagnetického záření vznikající v hyperjemné struktuře cesia byla použita také v definici [sekundy](#), která patří mezi [základní jednotky](#) soustavy SI.

Atomy cesia, ve kterých mají elektrony různé spiny dané hyperjemnou strukturou, mají různé momenty [hybnosti](#) a tedy i různé magnetické momenty. Proto mají tyto dva druhy atomů také nepatrně odlišné energie.

Na tyto dva druhy atomů tak můžeme nahlížet jako na dva typy různě silných magnetů.

Schematický obrázek [atomových hodin](#) dokumentující princip činnosti používaný od vynálezu těchto hodin je zobrazen na obr. 180. Atomové hodiny obsahují elektronický [oscilátor](#), který v [dutinovém rezonátoru](#) budí [elektromagnetické pole](#) s danou frekvencí  $f_{\text{Cs}}$ . Tato frekvence spadá do mikrovlnné oblasti. Oscilátor je tvořen temperovaným krystalem se stříbrnými elektrodami (s [příměsí](#) dalších [chemických prvků](#)). Přesnou frekvenci oscilátoru je možné nastavit právě přidáním vhodných chemikálií. Ty se navážou na stříbro a změní se magnetický moment materiálu, čímž se změní i frekvence oscilátoru. Frekvenci  $f_{\text{Cs}}$  (tj. frekvenci přibližně 9 GHz) lze elektronicky (tj. pomocí např. [děliče napětí](#) a dalších elektrotechnických součástí) ladit s přesností 0,1 Hz.



Obr. 180

Pro nastavení a kontrolu frekvence tohoto oscilátoru se využívá právě [nuklidů](#)  $^{133}_{55}\text{Cs}$  nebo  $^{85}_{37}\text{Rb}$ . U nuklidu  $^{133}_{55}\text{Cs}$  se používá přechod elektronů, který je vyvolán elektromagnetickým zářením o frekvenci  $f_{Cs}$ . Další součástí hodin je proto i zdroj par cesia. Atomy cesia ze zdroje procházejí [magnetickým polem](#), které oddělí atomy podle jejich nepatrně rozdílné energie. Do dutiny [rezonátoru](#), která je vyplněná elektromagnetickým zářením s frekvencí  $f_{Cs}$ , tak projdou jen ty atomy, ve kterých je elektron ve stavu s nižší energií. Pokud má frekvence oscilátoru, který elektromagnetické záření v dutině rezonátoru budí, správnou hodnotu  $f_{Cs}$ , nastane [absorpce](#) fotonů tohoto elektromagnetického záření a elektrony v atomech přejdou do stavu s vyšší energií.

V rezonanční dutině jsou jen ty atomy, jejichž elektrony mají nižší energii. Atomy, jejichž elektrony mají vyšší energii, do dutiny nebyly vůbec vpuštěny. Proto atomy v dutině mohou absorbovat fotony.

Dutina rezonátoru je tvořena kavitou, jejíž délka ovlivňuje přesnost celých atomových hodin. Pro přesnost  $10^{-14}$  s je přitom nutná kavita s délkou 2 m až 3 m. V tak dlouhé kavitě je ale obtížné docílit rezonance v celém objemu kavity. Proto se využívá rezonance jen na začátku a na konci kavity; ve výsledku se kavita chová tak, jako by rezonovala v celém objemu.

Z dutiny rezonátoru pak atomy pokračují dále dalším magnetickým polem. Na základě Zeemanova jevu se opět oddělí atomy s vyšší energií od těch s nižší energií. Do detektoru, který je tvořen žhaveným drátkem, pak dopadají pouze atomy s vyšší energií. Z detektoru je pak vysílán kontrolní signál do oscilátoru. Rezonuje-li tedy rezonanční dutina na frekvenci  $f_{Cs}$ , dopadá na detektor intenzivní tok atomů cesia. V případě, že se frekvence v rezonanční dutině od přesné frekvence  $f_{Cs}$  odchýlí, na detektoru není zaznamenán žádný signál a je nutné upravit frekvenci oscilátoru.

Atomové hodiny jsou tedy založeny na přesném chodu oscilátoru, jehož frekvence je kontrolována pomocí atomů cesia.

