Nové definice základních jednotek soustavy SI

Od konce 18. století se fyzikové snažili vybrat některé jednotky, které by byly jasně a přesně definovány a pomocí kterých by bylo možné definovat následně všechny další jednotky používané (nejen) ve fyzice. Definice základních jednotek dané soustavy (a od konce 18. století se používala řada různých soustav) se zpočátku opíraly o existenci etalonů, které byly udržovány při specifických podmínkách na bezpečném místě.

Etalonem bylo těleso, které modelovalo danou jednotku. Např. pro metr byla vyrobená tyč z materiálu, který nekoroduje, neprohýbá se, ..., prostě má stále konstantní délku. Analogicky to bylo s etalonem hmotnosti: model kilogramu byl též přesně definován a vyroben. Problém je, že vlastnosti „nekoroduje“, „neprohýbá se“, „nemění se“, „neinteraguje s okolím“, ... nelze v reálném světě docílit; neexistují absolutně tuhá tělesa, která by se nedeformovala, neexistuje absolutně netečný materiál, který by nereagoval s okolím, ... Proto se každý z používaných etalonů v průběhu času velmi mírně měnil.

Vzhledem k nevýhodám použitých etalonů a neschopnosti zajistit neměnnost daného tělesa bylo postupně od tohoto přístupu k definici základních jednotek upouštěno. Jakmile se totiž změní hodnota etalonu, nutně se změní i hodnota fyzikálních veličin, které mají tuto jednotku. Tento problém se stával stále aktuálnější s tím, jak se zvyšovala přesnost současné měřící techniky.

Etalon kilogramu za posledních několik desetiletí zmenšil svojí hmotnost o desítky mikrogramů. Na první pohled je to naprosto minimální změna (nákup jídla, nosnost tašek či aut, ...), ale v některých oblastech fyziky (jaderná fyzika, částicová fyzika) to byla změna naprosto zásadní. Navíc každé určování hmotnosti by se mělo na tento etalon odvolávat. Takže jestliže etalon kilogramu zmenšoval svou hmotnost, zvyšovala se hmotnost všech ostatních těles (etalon byl menší, do hmotnosti Slunce, židle, člověka, ... se „jich vešlo tedy více“! A to není příjemná vlastnost, s níž by fyzikové chtěli pracovat.

Poslední jednotkou, která byla do roku 2018 definována pomocí takového etalonu, byl kilogram. Ale i s definicemi ostatních základních jednotek byl problém. Např. jednotka kelvin byla do roku 2018 definována jako teplota trojného bodu vody za určitého tlaku. Problém ale je s přesným měřením teploty tohoto bodu, protože přesná teplota vody závisí na čistotě vody, na zastoupení jednotlivých izotopů ve vodě, ...

Dne 16. listopadu 2018 proto schválila *Generální konference pro míry a váhy* (CGPM) na svém jednání ve Versailles nové definice základních jednotek. Tím změnila i celý koncept nahlížení na základní jednotky soustavy SI. Každá základní jednotka je tak od 20. května 2019 spojena s určitou neměnnou vlastností přírody, tj. s určitou fyzikální konstantou.

Změnu konceptu vysvětlíme na jednotce *sekunda*.

Definice sekundy platná do listopadu 2018 měla toto znění.

SEKUNDA JE DOBA ROVNAJÍCÍ SE 9192631770 PERIODÁM ZÁŘENÍ, KTERÉ ODPOVÍDÁ PŘECHODU MEZI DVĚMA HLADINAMI VELMI JEMNÉ STRUKTURY ZÁKLADNÍHO STAVU ATOMU CESIA 133.

Jinými slovy jednotka sekunda byla definována pomocí jistého pozorovatelného děje, který v přírodě nastává a který lze fyzikálními prostředky měřit. Nová definice téže jednotky je v podstatě stejná, ale vychází z toho, že danou frekvenci (resp. periodu) záření mezi dvěma danými hladinami příslušného izotopu cesia fixuje jako fyzikální konstantu.

Nová definice sekundy tedy má znění:

SEKUNDA (ZNAČKA s) JE JEDNOTKA ČASU V SOUSTAVĚ SI. JE DEFINOVÁNA FIXACÍ ČÍSELNÉ HODNOTY CESIOVÉ FREKVENCE Δf, TEDY FREKVENCE PŘECHODU MEZI HLADINAMI VELMI JEMNÉHO ROZŠTĚPENÍ NEPORUŠENÉHO ZÁKLADNÍHO STAVU ATOMU CESIA 133 ($^{133}_{55}\mathrm{Cs}$) TAK, ABY BYLA ROVNA 9192631770, JE-LI VYJÁDŘENA JEDNOTKOU Hz, ROVNOU s^{-1}.

Na základě zafixované frekvence záření je tedy možné dopočítat dobu trvání jedné sekundy.

Takto byly zafixovány další fyzikální konstanty pro definice základních jednotek. Byly vybrány ty fyzikální konstanty, které jsou dobře měřitelné a jejichž hodnota je známa pro tento účel s dostatečnou přesností. Proto např. pro kilogram byla vybrána Planckova konstanta a ne gravitační konstanta, která by se přirozeně nabízela.

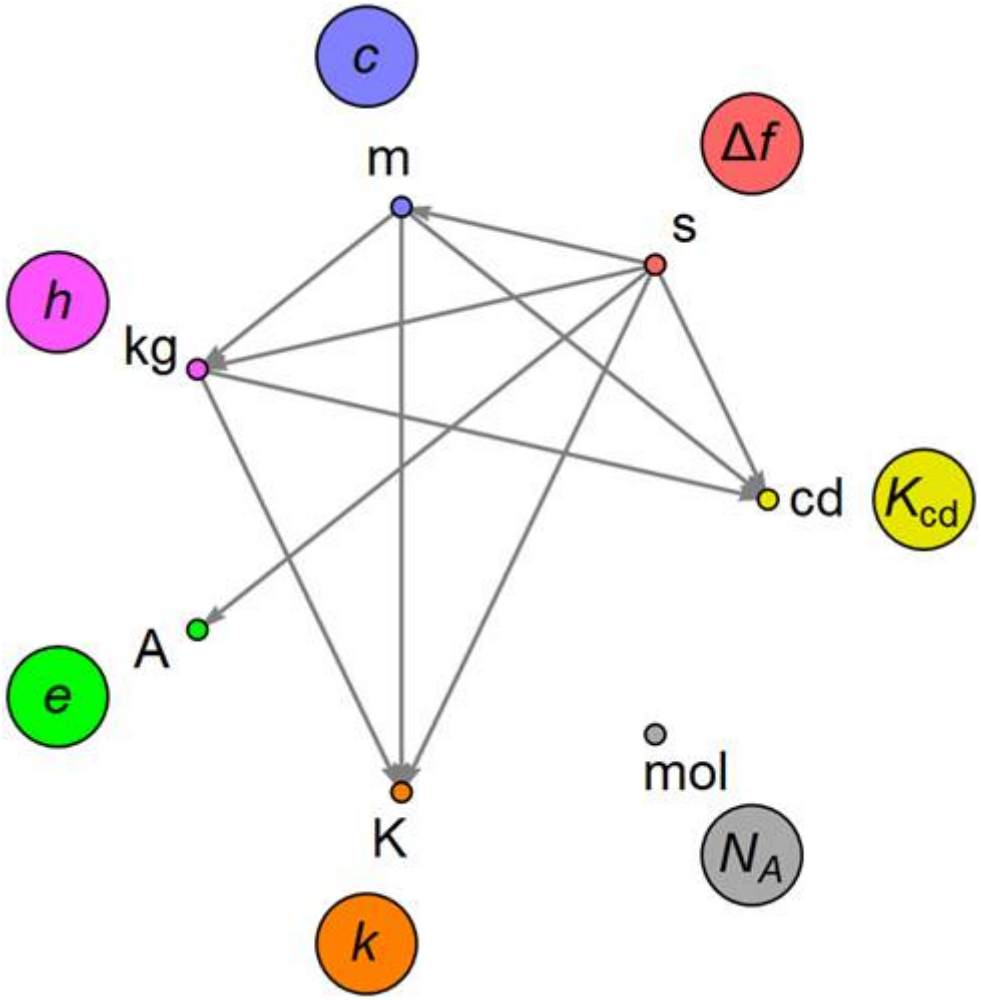
Přehled konstant, pomocí nichž jsou definovány základní jednotky, spolu s hodnotou této konstanty je uveden v tab. 2.

Fyzikální konstanta	**Hodnota konstanty**	**Základní jednotka**
frekvence záření v atomu cesia 133	$\Delta f = 9192631770\ \mathrm{Hz}$	sekunda
velikost rychlosti světla ve vakuu	$c = 299792458\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$	metr
Planckova konstanta	$h = 6{,}62607015 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$	kilogram
elementární náboj	$e = 1{,}602176634 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$	ampér
Boltzmannova konstanta	$k = 1{,}380649 \cdot 10^{-23}\ \mathrm{J \cdot K^{-1}}$	kelvin
Avogadrova konstanta	$N_A = 6{,}02214076 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}}$	mol
světelná účinnost záření	$K_{cd} = 683\,\mathrm{lm \cdot W^{-1}}$	kandela

tab. 2

Tímto přístupem se změnila i vzájemná provázanost jednotek, která je patrná ze schématu zobrazeného na obr. 1. Jednotka, ze které vede šipka, ovlivňuje jednotku, do níž šipka míří.

Jednotka, do které šipka míří, tedy využívá tu jednotku, z níž šipka vychází. Tak např. sekunda je nutná pro definici metru, kilogramu, ampéru a kelvinu. A např. kelvin je definován pomocí kilogramu, metru a sekundy.



Obr. 1

Nyní uvedeme nové definice ostatních základních jednotek soustavy SI.

METR (ZNAČKA m) JE JEDNOTKA DÉLKY V SOUSTAVĚ SI. JE DEFINOVÁNA FIXACÍ ČÍSELNÉ HODNOTY VELIKOSTI RYCHLOSTI SVĚTLA VE VAKUU c TAK, ABY BYLA ROVNA 299792458, JE-LI VYJÁDŘENA JEDNOTKOU $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$, KDE SEKUNDA JE DEFINOVÁNA POMOCÍ CESIOVÉ FREKVENCE Δf.

KILOGRAM (ZNAČKA kg) JE JEDNOTKA HMOTNOSTI V SOUSTAVĚ SI. JE DEFINOVÁNA FIXACÍ ČÍSELNÉ HODNOTY PLANCKOVY KONSTANTY h TAK, ABY BYLA ROVNA $6{,}62607015 \cdot 10^{-34}$, JE-LI VYJÁDŘENA JEDNOTKOU $\mathrm{J \cdot s}$, ROVNOU $\mathrm{kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}}$, KDE SEKUNDA JE DEFINOVÁNA POMOCÍ CESIOVÉ FREKVENCE Δf A METR POMOCÍ VELIKOSTI RYCHLOSTI SVĚTLA VE VAKUU c.

AMPÉR (ZNAČKA A) JE JEDNOTKA ELEKTRICKÉHO PROUDU V SOUSTAVĚ SI. JE DEFINOVÁNA FIXACÍ ČÍSELNÉ HODNOTY ELEMENTÁRNÍHO NÁBOJE e TAK, ABY BYLA ROVNA $1{,}602176634 \cdot 10^{-19}$, JE-LI VYJÁDŘENA JEDNOTKOU C, ROVNOU $\mathrm{A \cdot s}$, KDE SEKUNDA JE DEFINOVÁNA POMOCÍ CESIOVÉ FREKVENCE Δf.

KELVIN (ZNAČKA K) JE JEDNOTKA TERMODYNAMICKÉ TEPLOTY V SOUSTAVĚ SI. JE DEFINOVÁNA FIXACÍ ČÍSELNÉ HODNOTY BOLTZMANNOVY KONSTANTY k TAK, ABY BYLA ROVNA $1{,}380649 \cdot 10^{-23}$, JE-LI VYJÁDŘENA JEDNOTKOU $\mathrm{J \cdot K^{-1}}$, ROVNOU $\mathrm{kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}}$, KDE SEKUNDA, METR A KILOGRAM JSOU DEFINOVÁNY POMOCÍ

KONSTANT Δf, c A h.

MOL (ZNAČKA mol) JE JEDNOTKA LÁTKOVÉHO MNOŽSTVÍ V SOUSTAVĚ SI. JE DEFINOVÁNA FIXACÍ ČÍSELNÉ HODNOTY AVOGADROVY KONSTANTY N_A TAK, ABY BYLA ROVNA $6{,}02214076 \cdot 10^{23}$, JE-LI VYJÁDŘENA JEDNOTKOU mol^{-1}.

Jednotka látkového množství je jako jediná ze základních jednotek nezávislá na všech ostatních jednotkách.

KANDELA (ZNAČKA cd) JE JEDNOTKA SVÍTIVOSTI V SOUSTAVĚ SI. JE DEFINOVÁNA FIXACÍ ČÍSELNÉ HODNOTY SVĚTELNÉ ÚČINNOSTI MONOCHROMATICKÉHO ZÁŘENÍ O FREKVENCI $540 \cdot 10^{12}\ \mathrm{Hz}$ K_{cd} TAK, ABY BYLA ROVNA 683, JE-LI VYJÁDŘENA JEDNOTKOU $\mathrm{lm} \cdot \mathrm{W}^{-1}$, ROVNOU $\mathrm{cd} \cdot \mathrm{sr} \cdot \mathrm{W}^{-1} = \mathrm{cd} \cdot \mathrm{sr} \cdot \mathrm{kg}^{-1} \cdot \mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{s}^{3}$, KDE SEKUNDA, METR A KILOGRAM JSOU DEFINOVÁNY POMOCÍ KONSTANT Δf, c A h.

Frekvence záření uvedená v definici kandely odpovídá světlu o vlnové délce 555 nm, na které je lidské oko nejcitlivější. Kandela totiž patří mezi tzv. fotometrické veličiny, které popisují vnímání světla lidským okem.

Tento přístup k definicím základních jednotek ovlivnil i hodnoty dalších fyzikálních konstant. Výše uvedenými sedmi definicemi byly hodnoty sedmi fyzikálních konstant pevně zafixovány. Těchto sedm konstant ale ovlivňuje další konstanty, které popisují fyzikální jevy a děje. V důsledku toho některé fyzikální konstanty díky převodním vztahům mezi výše uvedenými sedmi konstantami budou mít zcela přesnou hodnotu (molární plynová konstanta, Faradayova konstanta, Stefan-Boltzmannova konstanta, Wienova konstanta, ...). U jiných konstant nastal opačný proces: původně byly stanoveny s vysokou přesností, nyní jsou zatíženy jistou nepřesností (permitivita vakua, permeabilita vakua, impedance vakua, ...).

Ani současný stav není konečný, na dalších změnách CGPM dále pracuje. Uvedení do praxe ale bude určitou dobu trvat.

© Encyklopedie Fyziky (http://fyzika.jreichl.com); Jaroslav Reichl, Martin Všetička
Licence http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/ zakazuje úpravy a komerční distribuci.