

## Měřítko v mikrosvětě

Na svět se díváme z lidského hlediska, proto i základní měřítko souvisejí s **lidskými dimenzemi**:

- Lidé se rodí velcí okolo 0.5 **metru** a postupně vyrostou na 1.5 - 2 metry
- Začínáme s hmotností několika **kilogramů** a postupně získáme desítky, maximálně stovky kg.
- Typický časový interval, který jsme schopni postřehnout, je v rozsahu od zlomků **sekund** (někdy rozhodnutí mezi životem a smrtí na silnicích) do desítek **let** našeho života (přibližně od  $10^{-1}$  s do  $10^2$  let  $\approx 10^9$  s).
- Jsme schopni nést sebe a zavazadlo až  $10^2$  kg do kopce rychlostí 0,5 km/h, což znamená náš výkon:  
 $mg\Delta h/\Delta t = 10^2 \cdot 10 \cdot 500 / 3600$  **wattů** = 140 W.  
To je zhruba jedna pětina výkonu koně („koňské síly“ 745 W) a dvojnásobek výkonu, který se nazýval lidská síla (1/10 koňské síly).
- 5 hodin stoupání odpovídá práci 2 500 000 **joulů** = 2.5 MJ.  
Denně získáme z jídla přibližně 10 MJ v jídle, dokonce i když neděláme „téměř nic“...

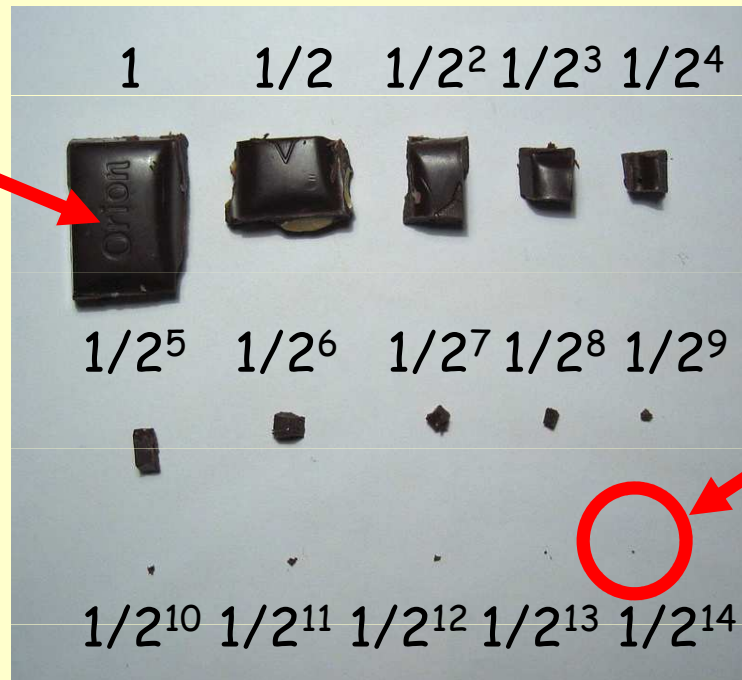
# A co rozměry atomů? Zkusme se k nim dostat!

Můžeme zkusit rozkrájet nějaký makroskopický předmět na mikroskopické kousky - rozdělíme třeba kousek čokolády. Postupujme půlením ...

$$100 \text{ g} = 10^{-1} \text{ kg}$$



$$100/15 \text{ g}$$

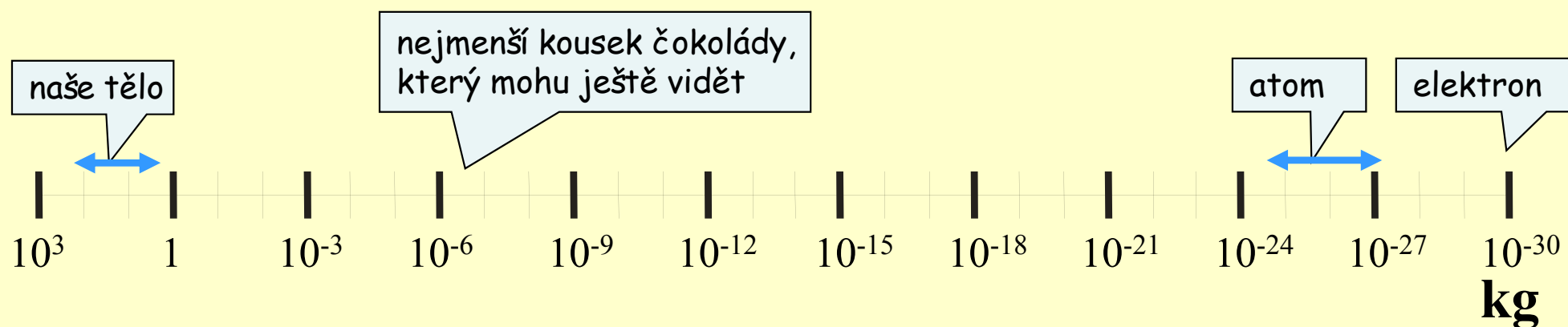


$$\begin{aligned} 100/15 \cdot 1/2^{14} \text{ g} &= \\ &= 4 \cdot 10^{-4} \text{ g} = \\ &= 0.4 \text{ mg} \\ &\text{Jak blízko jsme} \\ &\text{atomům?} \end{aligned}$$

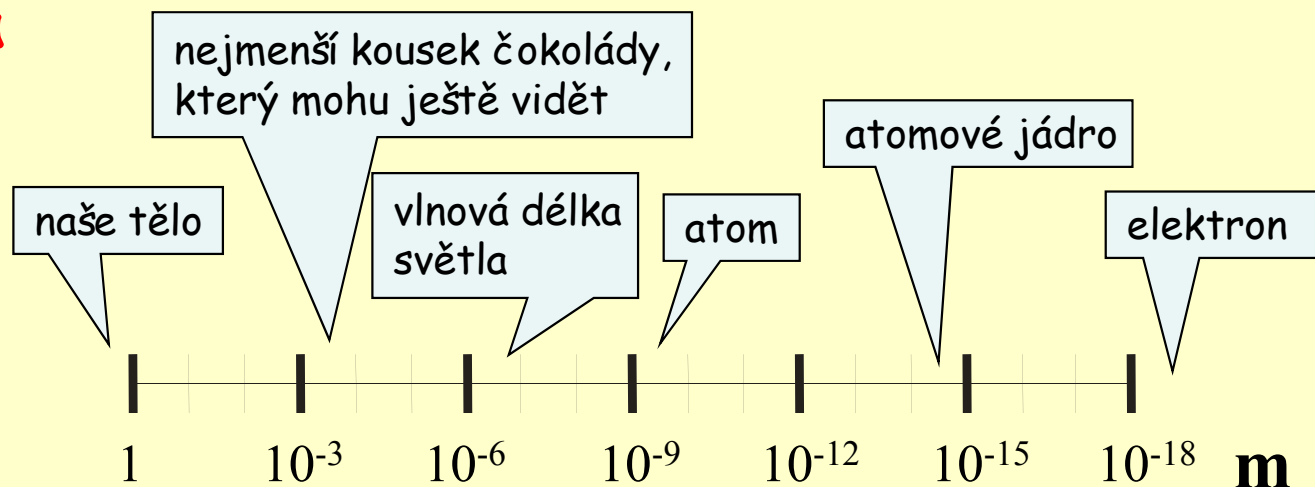


Trvalo to dlouho než byly určeny rozměry atomů. Dnes víme, že typické rozměry atomů jsou  $10^{-10}$  m a jejich hmotnost je řádově  $10^{-27}$  -  $10^{-25}$  kg. Nejlehčí částicí je elektron o hmotnosti  $10^{-30}$  kg.

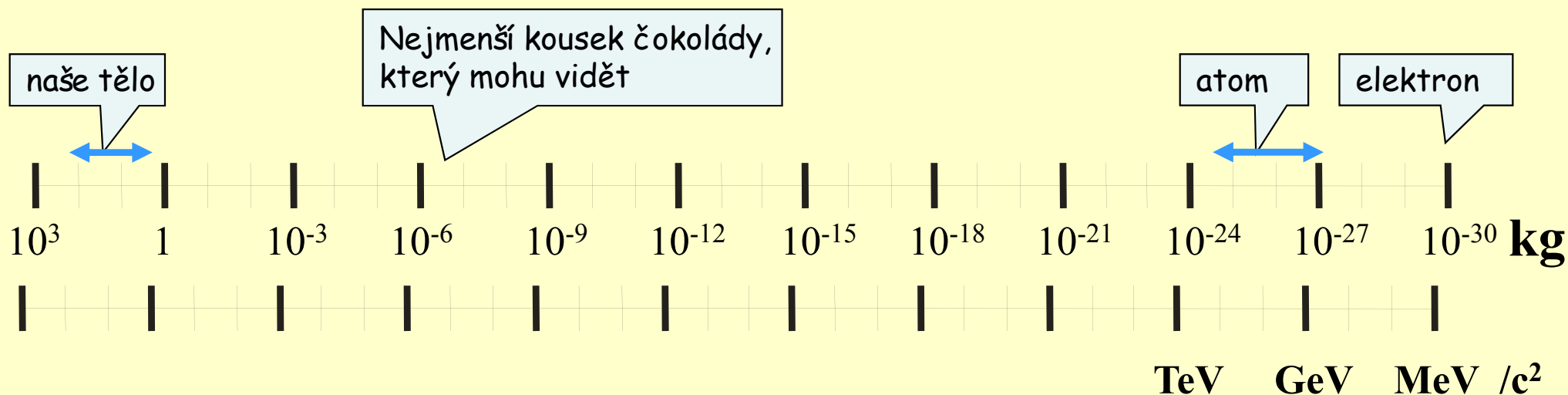
## Hmotnostní škála



## Délková škála

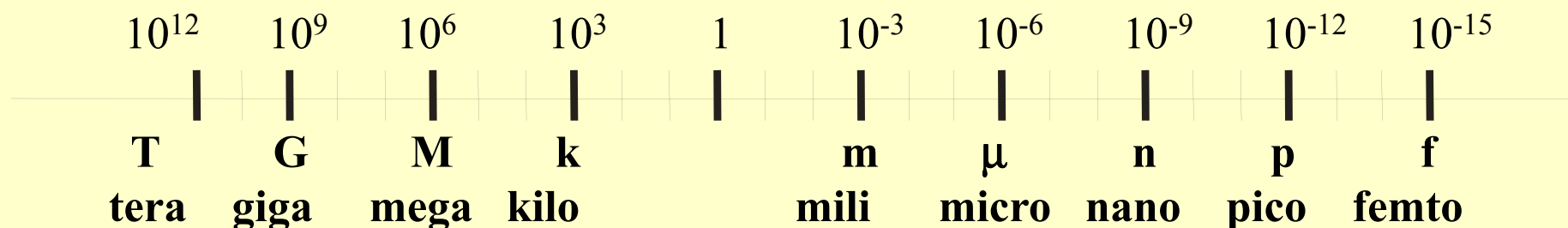


## Hmotnostní měřítko ještě jednou



## Délková měřítko ještě jednou

Je snazší přizpůsobit **délkovou škálu** mikrosvětlu a používat odpovídající předpony - zlomky **nanometrů** pro atomy a **femtometry** pro jádra. Ve starších knihách lze najít angström ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ) a fermi ( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ).



Atomy jsou tak malé, že v jakémkoli kousku hmoty jich je velké množství. V každém molu je jich  $6.022\ 142 \times 10^{23}$  (Avogadrovo číslo). Spočítejme, kolik atomů je ve sklenici vody  $H_2O$  (řekněme o objemu 0.2 litru =  $200\text{cm}^3$ ).

Objem  $\times$  hustota =  
= hmotnost vody

Hmotnost vydělená molární hmotností  
( $2 \times 1 + 16 = 18\text{ g}$  pro  $H_2O$ )

$$\text{počet atomů H} = \frac{V \cdot \rho}{m_{\text{mol } H_2O}} \cdot N_{\text{Avogadro}} \cdot 2 = \frac{200\text{ cm}^3 \cdot 1\text{ g/cm}^3}{18\text{ g/mol}} \cdot 6.0 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1} \cdot 2 = 1.3 \times 10^{25}$$

Dva atomy H na molekulu  $H_2O$

Jaký je průměrný objem, který zabírá jedna molekula vody? Ve zmíněné sklenici je  $0.67 \times 10^{25}$  molekul vody, proto

$$V_{H_2O\text{ molekuly}} = \frac{200\text{ cm}^3}{0.67 \times 10^{25}} = 3.0 \times 10^{-23}\text{ cm}^3 = 3.0 \times 10^{-29}\text{ m}^3 = 0.03\text{ nm}^3$$

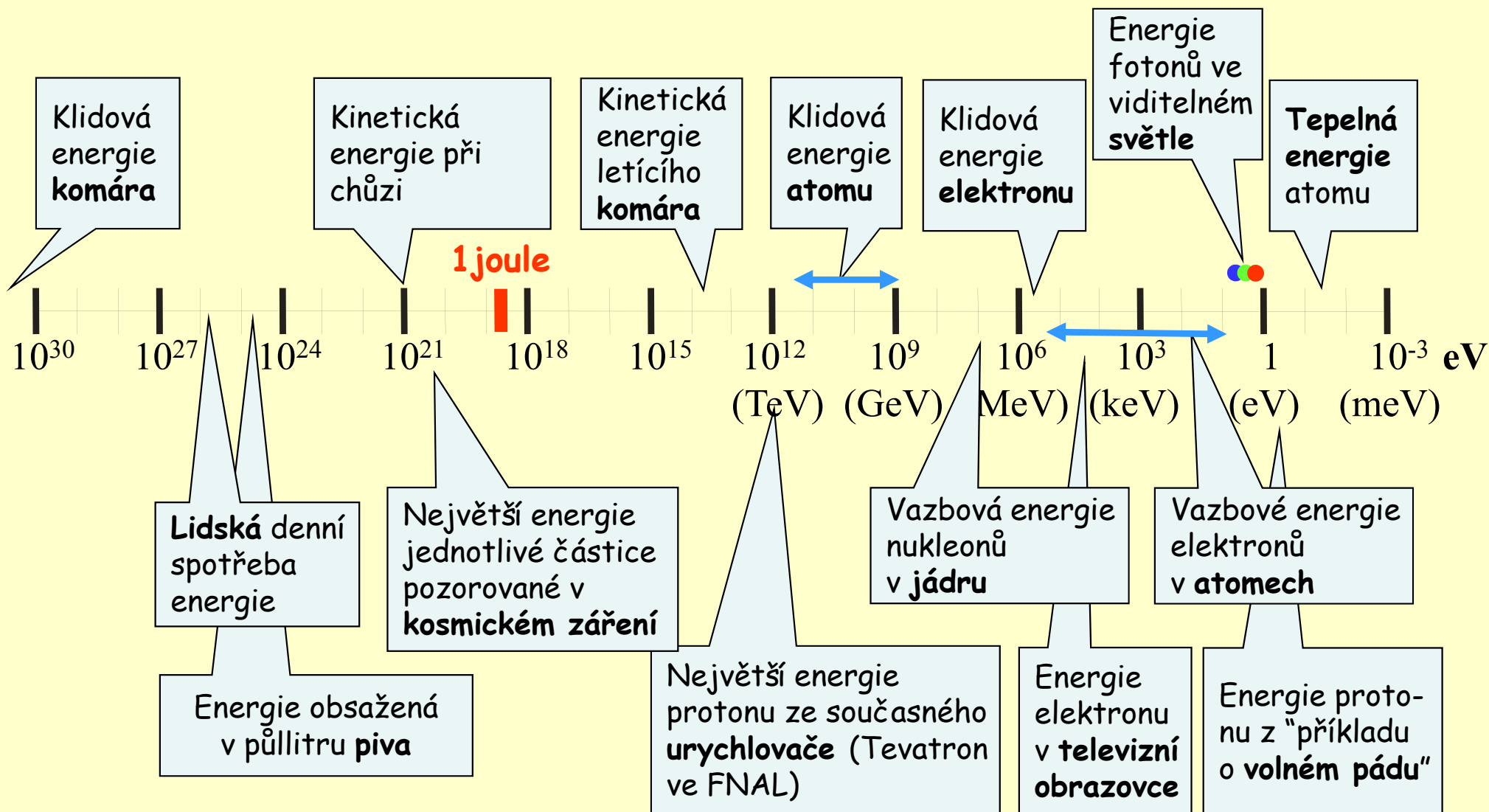
Kdyby byl tento objem ve tvaru krychle, tak její hrana bude mít délku 0.3 nm.

# Energetická měřítko z hlediska mikrosvětla

Často užívanou jednotkou v mikrosvětě je **elektronvolt**

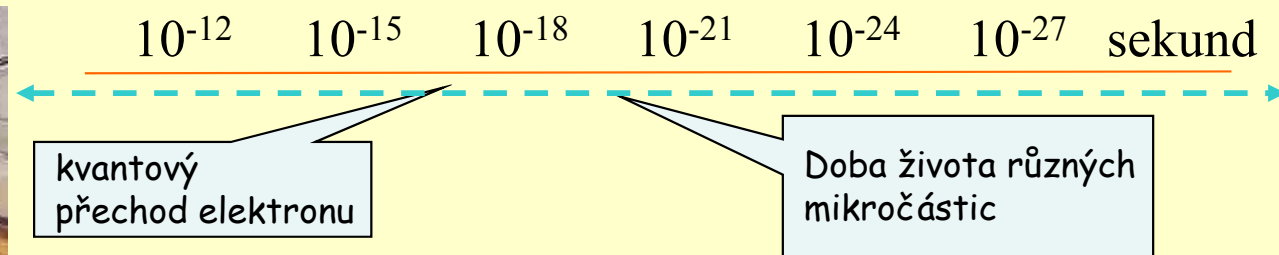
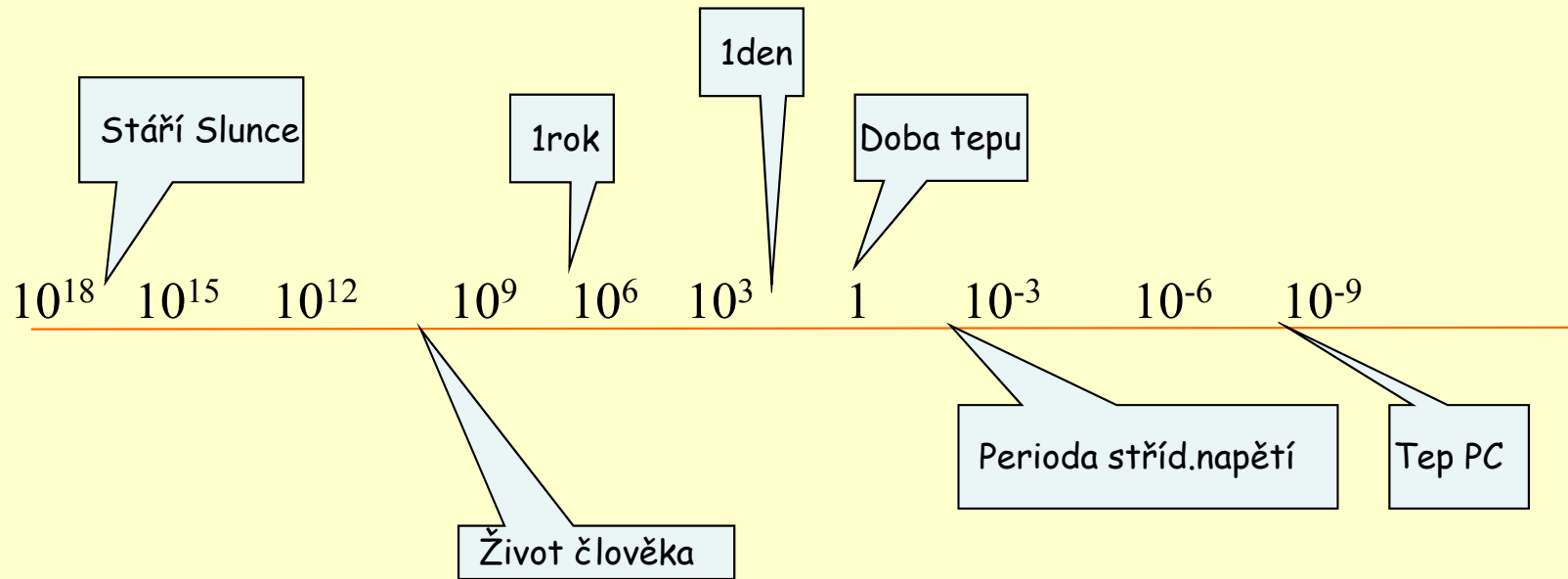
$$1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{J}$$

$$1\text{J} = 6,242 \cdot 10^{18}\text{eV}$$



# Časové intervaly v sekundách

1 sekunda je doba trvání 9 192 631 770 period záření, které přísluší přechodu mezi dvěma hladinami základního stavu atomu Cesia 133.



Čas - to je prostě způsob, jakým příroda zajišťuje, aby se všechno neodehrálo najednou.

## Tisícina sekundy 1 ms

Takové krátké časové úseky se začaly objevovat v naší praxi teprve nedávno. Když ještě lidé určovali čas podle výšky Slunce nebo délky stínu, nemohlo být ani řeči o přesnosti třeba jen na minutu; lidé považovali minutu za tak nepatrnou veličinu, že jim nestála za měření. Starověký člověk žil tak beze spěchu, že na jeho hodinách - ať již slunečních, vodních nebo přesýpacích - nebyly minuty zvlášť vyznačeny. Teprve od začátku 18. století se začala na hodinových číselnicích objevovat minutová ručička. A v 19. století se objevila i ručička vteřinová.

Co se může za takovou 1ms přihodit? Vlakovice urazí za tuto dobu jen asi 3 cm, ale zvuk již 33 cm, letadlo asi půl metru; zeměkoule uběhne po své dráze kolem Slunce za tento zlomek vteřiny 30 m, světlo dokonce 300 km.

Pro hmyz je to doba docela běžná. Komár mávne za vteřinu křídélky 500-600krát, to znamená, že za tisícinu vteřiny dokáže křídla zvednout nebo spustit.

Nejrychlejší náš lidský pohyb je mrkání, "okamžik" v původním smyslu slova. Je tak rychlé, že si ani nevšimneme, že se naše zorné pole na chvíli zatmělo. Přesto tento pohyb probíhá vcelku pomalu, měříme-li jej na milisekundy. Přesným měřením se zjistilo, že "okamžik" trvá průměrně 0,4 sekundy, tj. 400 ms. Dělí se na tyto fáze: víčko se zavírá (75-90 ms), je zavřeno a nehýbe se (130-170 ms), víčko se zvedá (asi 170 ms). Jak vidíte, je "okamžik" v doslovném smyslu doba dosti dlouhá a oční víčko si při něm stačí ještě trochu odpočinout.

Kdyby naše nervová soustava měla takovou schopnost, změnil by se pro nás okolní svět k nepoznání. Takové podivuhodné obrazy, které by se pak objevily před naším zrakem, vylíčil anglický spisovatel H. G. Wells v povídce "Stroj času". Hrdinové povídky vypili zázračnou tekutinu, která působí na nervovou soustavu tak, že smyslové orgány jsou pak schopny vnímat odděleně jednotlivé fáze rychlých jevů.

Jaký nejmenší časový úsek dovede dnešní věda změřit? Ještě na začátku tohoto století to byla 1/10 000 sekundy, dnes už však fyzik dovede ve své laboratoři bezpečně změřit i 1/100 000 000 000s.



A jsou mnohem menší a lehčí, než si dokážeme představit. **V světě atomů se těžko můžeme orientovat pomocí našich smyslů, měli bychom se raději naučit různé vztahy odhadovat.**

Můžeme si pomoci chytře vybranými jednotkami. Pro hmotnost můžeme používat jednotku blízkou hmotnosti nejlehčího atomu (H) ... "**atomovou hmotnostní jednotku**"  $u$ , která je definována jako 1/12 hmotnosti atomu uhlíku ( $^{12}\text{C}$ ).

$$1 u = 1.660\,538\,7 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Další užitečná hmotnostní jednotka je zavedena pomocí Einsteinova vztahu pro energii a hmotnost  $E = mc^2$ . Hmotnost lze tedy vyjádřit v jednotkách energie dělené  $c^2$ .

Oblíbenou jednotkou pro energii v mikrosvětě jsou **elektronvolty**:

$$1 \text{ eV} = 1.602\,176\,46 \times 10^{-19} \text{ J}, \quad 1 \text{ eV}/c^2 = 1.782\,661\,73 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

$$1 u = 931.494\,01 \text{ MeV}/c^2$$

Neočekáváme, že si někdo bude pamatovat tato ošklivá čísla. Ale je užitečné si pamatovat hmotnost protonu a elektronu,  $c$  a převod eV na J:

$$m_{\text{proton}} \approx u \approx 1 \text{ GeV}/c^2, \quad m_{\text{elektron}} \approx 0,5 \text{ MeV}/c^2$$

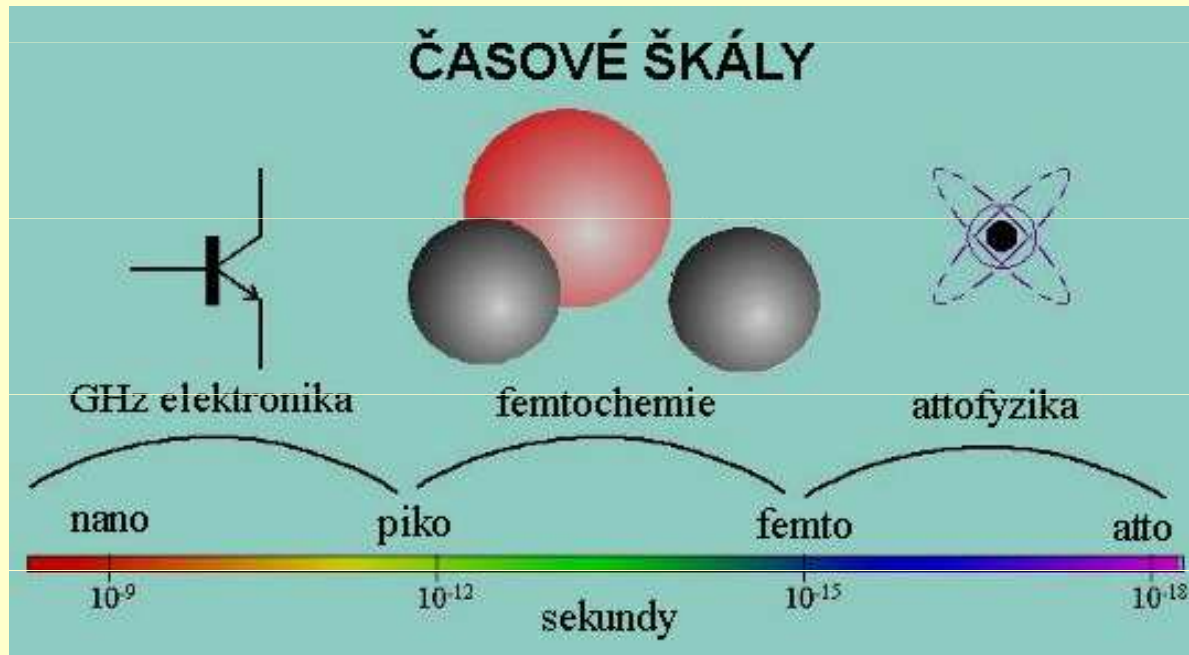
$$c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Impulsní laser dosahující délky impulsu řádově ve femtosekundách ( $10^{-15}$  s) byl poprvé spuštěn v Rakousku. Ferenc Krausz s kolegy z Vídeňské univerzity použili velmi krátký záblesk RTG záření ke zkoumání ionizace kryptonu.

Chemické reakce se běžně odehrávají na časových škálách v měřítku femtosekund.

Femtosekundové laserové impulsy jsou srovnatelné s oscilacemi elektromagnetického pole.

Jestliže se impuls příliš zkrátí, nebude pro zkoumání elektronových efektů použitelný.



Avšak procesy, kterými může procházet elektron v elektronovém obalu - například ionizace - probíhají ještě tisíckrát rychleji. Pro tyto ultrarychlé děje je nutno použít nástroj, který pracuje v časové škále attosekund, tedy  $10^{-18}$  s. V roce 2002 byl experiment, při kterém se podařilo prvním impulsem trvajícím 650 attosekund vyrazit elektron z atomárního obalu. Následně změřili dobu, kterou uvolněnému elektronu zabralo znovuzachycení do atomárního obalu. Určili ji z časové prodlevy mezi laserovým impulsem a následným impulsem RTG záření vyslaným znovuzachyceným elektronem. Touto technologií je možno přímo měřit kvantové přechody v elektronovém obalu. Pro takový experiment je však nutno použít laseru pracujícího v RTG oblasti, kde je možno jít teoreticky na limitně nejkratší délku impulsu až 40 attosekund. Tím se otevřela poprvé brána do nové fyzikální oblasti - tzv. attofyziky.

Pro viditelné záření je nejkratší dosažitelná limitní perioda okolo 2,5 femtosekund.

## Stránky pro experty! Můžete je přeskočit, ale co to zkusit !

**Dokázali by jste spočítat energii protonu padajícího z nekonečna na povrch Země (při zanedbání vzduchu)?** Komentář: Uvědomme si, že gravitace je v podstatě efektivní urychlovač, přinejmenším pro kameny, letadla, sebevrahy atd. a tak můžeme očekávat docela nezanedbatelnou energii ...

Možná si pamatujete, že potenciál pole je užitečná veličina, pomocí které vyřešíme náš problém, určitě jste už viděli potenciál centrálního gravitačního anebo centrálního Coulombovského pole. Tento potenciál je v nekonečnu nulový a v dané vzdálenosti  $r$  od zdroje pole nabývá hodnoty

$$\varphi_{\text{gravitation}} = -\kappa \frac{M}{r}, \quad \varphi_{\text{electric}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

Záporné znaménko v gravitačním potenciálu vyjadřuje, že těleso o hmotnosti  $m$  má zápornou potenciální energii  $E = \phi(r)m$ . Těleso je přitahováno gravitací, aby bylo volné, měli bychom mu dodat energii  $-E$ . Energií  $|E| = -E$  můžeme nazývat vazbová energie tělesa v poli. V našem případě předpokládáme proton v klidu v nekonečnu (s nulovou kinetickou, potenciální a celkovou energií), který bude urychlen přitažlivou silou (získá kladnou kinetickou energii, která vykompenzuje zápornou potenciální energii a celková energie zůstane nulová). Kinetickou energií nám padající proton třeba vrazí do hlavy, toto je veličina, která nás zajímá:

$$E_{p \text{ kin}} = -m_p \varphi_{\text{gravitačra}}(R_{\text{Země}}) = m_p \kappa \frac{M_{\text{Země}}}{R_{\text{Země}}} = m_p \kappa \frac{M_{\text{Země}}}{R_{\text{Země}}^2} R_{\text{Země}} = m_p g R_{\text{Země}}$$

$$E_{p \text{ kin}} = 1.6 \times 10^{-27} \text{ kg } 9.8 \text{ ms}^{-2} 6400 \text{ km} = 1.1 \times 10^{-19} \text{ J} = 0.7 \text{ eV}$$

Toto je gravitační zrychlení  $g$

**To znamená, že elektrické pole vytvořené tužkovou baterií ve vašem walkmanu urychlí proton více než gravitační pole Země!!!**