

Seriál: Hmotnosť

Ak k metru a sekunde pridáme aj jednotku hmotnosti – kilogram, vieme pomocou vzniknutej sústavy jednotiek popísať nielen pohyb telies, ale aj jeho príčinu – dynamiku. Vzťah medzi silou pôsobiacou na teleso a zmenou jeho pohybového stav – zrýchlením – je daný pomocou druhého Newtonovho zákona práve prostredníctvom hmotnosti telesa, na ktoré sila pôsobí. Väčšina úloh, s ktorými sa človek vo fyzike ako stredoškôľák stretne, sú práve úlohy z dynamiky. Pozrime sa preto na to, ako sa miera hmotnosť a s ňou spojené veličiny.

Hmotnosť

Prvé merania hmotnosti sa objavujú podobne ako pri meraní dĺžky s rozvojom obchodu v Mezopotámii a Egypte koncom 3. tisícročia pred našim letopočtom, teda pred skoro 5 000 rokmi. Už vtedy sa na váženie používali rovnoramenné závesné váhy so sadou označených závaží, ktorých váhy boli celočíselné násobky závaží ľahších. Jednotky hmotnosti boli často odvodené od bežných produktov, s ktorými sa obchodovalo, ako napríklad váhy zrna obilia, či šošovice. Okrem váhy samotnej sa často rovnaké pomenovanie prenieslo (pomocou drahých kovov) aj na označenie hodnoty tovaru – obchodnej meny – ako v prípade britskej jednotky „pound“. Podobne aj pre drahé kamene doposiaľ používaný karát je odvodený od hmotnosti semien rohovníka obyčajného. V prípade niektorých produktov sa ale často obchodovalo prostredníctvom objemu, nie váhy samotnej, ako v prípade tekutín, ale aj cukru, múky, či iných sypkých komodít. Prírodné preto bolo na objem tej najbežnejšej tekutiny – vody – previesť aj meranie ostatných hmotností.

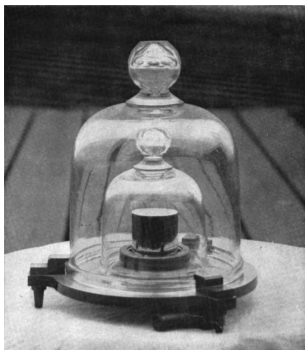
Zrodil sa kilogram

Predchodcom kilogramu, ako ho poznáme dnes, bola francúzska jednotka hmotnosti *grave* definovaná ako hmotnosť jedného litra vody v roku 1793. Neskôr bola spresnená na novú definíciu gramu v roku 1795 zavedením referenčnej teploty topenia ľadu, pri ktorom sa meranie objemu vody malo uskutočniť. Táto teplota sa zmenila zavedením nového kilogramu v roku 1799 – meranie pri teplote maximálnej hustoty vody – a zavedením štandardu *Kilogramme des Archives* vyrobeného z platiny a následne prevedením definície na hmotnosť práve tohto prototypu:

Kilogram je jednotka hmotnosti rovná hmotnosti medzinárodného prototypu kilogramu.

O skoro storočie neskôr bol zhotovený nový prototyp zo zliatiny 90 % platiny a 10 % irídia pre zvýšenie tvrdosti materiálu, ktorý bol vtedajšími metódami nerozlíšiteľnej hmotnosti od pôvodného etalónu a opätovným preneseným definície na tento objekt v roku 1889. Tento etalón je tvaru valca o výške rovnej priemeru pre minimalizáciu povrchu a je uschovaný v trezore Ústavu pre miery a váhy v Paríži s kontrolovanými atmosférickými podmienkami. Okrem samotného prototypu bolo vyrobených aj šesť sesterských kópií uschovaných v tom istom trezore a desať pracovných kópií uschovaných v kalibračnom laboratóriu BIPM v Saint-Cloud vo Francúzsku. Okrem týchto existuje aj skoro stovka národných prototypov – v Česku uschovaný prototyp č. 67 v Brne a na Slovensku prototypy č. 41 a 65. Hmotnosť týchto etalónov bola určená oproti pôvodnému definíčnému etalónu, napr. pre etalón 67 ako $m = 1 \text{ kg} + 0,148 \text{ mg} \pm 0,021 \text{ mg}$.

Tento etalón bol následne použitý na kalibráciu dvoch závaží z austenitickej ocele, pomocou ktorých sa kalibrujú bežnejšie používané presné váhy a závažia.



Obrázek 1: Prototyp kilogramu¹

Váhy

Základným prístrojom na určenie hmotnosti telesa sú váhy. Ako sme spomenuli už v úvode, prvými z váh už pred 5 tisícročiami boli jednoduché rovnoramenné váhy. Tieto váhy mali dve misy zavesené na koncoch tyče, ktorá bola vyvážená v strede. Hmotnosť objektu sa určila porovnaním s kalibrovanými závažiami, čo bola metóda zásadná pre rozvoj obchodu. V starovekom Ríme sa rozšírili nerovnoramenné váhy, ktoré umožňovali merať hmotnosti veľmi malé (korenie, drahé kovy a kamene), či naopak veľmi veľké (stavebný materiál), ak boli použité v opačnej konfigurácii. V niektorých prípadoch sa vyvažovanie váh realizuje posúvaním závažia,² či kombináciou viacerých prístupov. V 17. storočí boli vynájdené Robervalove váhy, ktoré tvorili misky umiestnené na nosnej konštrukcii tvaru rovnobežníka. Vďaka svojej konštrukcii vážená hmotnosť prekvapivo nezávisí na polohe objektu v miske a umožňuje tak praktické váženie bez nutnosti dlhých závesov – v prípade predošlých váh totiž práve zavesením váženého telesa zabezpečíme polohu jeho ťažiska presne pod bodom závesu.

Všetky dosiaľ spomenuté typy váh sú založené na rovnosti momentu tiažových síl, ktoré pôsobia na predmet a na protizávažie. Označme hmotnosť predmetu m , hmotnosť závažia M , vodorovnú vzdialenosť ťažiska predmetu od osy váh l_m a analogicky l_M vodorovnú vzdialenosť ťažiska závažia od osi váh. V rovnováhe potom platí

$$ml_m g = Ml_M g \quad \Rightarrow \quad ml_m = Ml_M.$$

V prípade rovnoramenných váh je $l_m = l_M$, preto musí byť hmotnosť závažia rovnaká ako hmotnosť predmetu. Pre nerovnomerné váhy môžeme voľbou rôznej dĺžky ramien vytvoriť prevodný faktor medzi hmotnosťou závažia a predmetu vhodný pre rôzne hmotné telesá a sady závaží.

V histórii sa objavili aj ďalšie mechanické princípy merania hmotnosti, založené napríklad na pružnosti a deformácii pevných látok vplyvom tiažovej sily váženého predmetu. Analógové

¹https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_kilogram,_2.jpg

²V mojich základnoškolských rokoch sa takto vážil papier pri školskom zbere.

osobné váhy sú často pružinové – pružina sa v nich vplyvom závažia skrakuje, či predlžuje pričom v oblasti pružnej deformácie pre dostatočne malé závažia platí Hookov zákon

$$\Delta l = l \frac{\sigma}{E} = \frac{lmg}{ES} = \frac{mg}{k}$$

je predĺženie pružiny úmerné jej zataženiu. Narozdiel od predchádzajúcich váh nejde o priame porovnanie hmotností dvoch telies. Nepotrebujeme preto sadu závaží, naopak je ale nutné kalibrovať stupnicu takýchto váh.



Obrázek 2: Rovnoramenné váhy³



Obrázek 3: Robervalove váhy⁴

S príchodom elektroniky došlo k veľkému skoku v presnosti a možnostiach váženia. V elektronických váhach sa meranie hmotnosti mechanickými princípmi prevádza na elektrický signál. Pri vážení predmetu dôjde k pružnej deformácii tenkej vodivej vrstvy, čo zmení jej elektrický odpor. Túto zmenu odporu je vnútorná elektronika schopná prepočítať na hodnotu pôsobiacej sily, a teda na hmotnosť telesa. Alternatívou je využitie piezoelektrického materiálu, v ktorom vplyvom vonkajšej deformácie dôjde k vytvoreniu vnútorného napätia, ktoré prístroj meria. Opäť je dôležité prístroj pred meraním skalibrovať, často je navyše možné váhy vynulovať aj pri určitom zatažení, čo zjednodušuje odčítanie. Digitálna forma umožňuje komunikáciu s počítačom a má obvykle rýchlu odozvu.

Dôležité je uvedomiť si, akých chýb sa dopúšťame pri meraní samotnom ako aj pri interpretácii nameraných veličín a ako tieto chyby môžeme eliminovať alebo zohľadniť. Váhy totiž porovnávajú silu, ktorou na ne pôsobíme, s istou referenciou. Jednou z príčin nesprávneho určenia hmotnosti váženého telesa môže byť teda nesprávna referencia – či už nepresná kalibrácia váhy (ktorá je obvykle do istej miery závislá na teplote a atmosférickom tlaku a s plynúcim časom sa spravidla zhoršuje), alebo nepresné určenie hmotnosti referenčných závaží (napríklad vplyvom prachu, špiny, či korózie). Na manipuláciu so závažiami preto slúžia špeciálne kliešte. Podobne sa zmena hmotnosti týka aj váženého objektu – či už vplyvom reaktivity so vzduchom, či napríklad vyparovaním, alebo sublimáciou prchavých látok, alebo naopak kondenzáciou vodnej pary na studených objektoch. Ďalším zdrojom chýb môže byť posun mechanických

³https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Balance_à_tabac_1850.JPG

⁴https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Balance_Roberval_white.jpg

komponentov váh, nerovná podložka, či nadbytočné trenie v bodoch závesu, či citlivosť váhy na otrasy. V neposlednom rade je nutné si uvedomiť, že nameranou silou nie je nutné mg . Na meraný objekt a závažia totiž pri meraní vo vzduchu pôsobí vztlaková sila závislá na hustote telies. Ďalej na telesá môžu pôsobiť magnetické polia, elektrostatická interakcia, či prúdenie vzduchu v okolí váh. Posledné spomenuté môže byť totiž spôsobené dokonca konvekciou vzduchu budenou samotným meraným telesom, ak je jeho teplota výrazne odlišná od teploty okolitého vzduchu.

V neposlednom rade je nutné upozorniť, že váhy, ktoré priamo neporovnávajú hmotnosť dvoch objektov merajú silu, ktorá je následne na hmotnosť prepočítaná užitím hodnoty tiažového zrýchlenia. Toto sa ale miesto od miesta líši najmä v závislosti na geografickej šírke a nadmorskej výške. Ako extrémny príklad pri použití na mesiaci by rovnoramenné váhy so sadou závaží ukazovali správne hodnoty hmotnosti, zatiaľ čo pružinové, či digitálne, by ukazovali len asi jednu šestinú tejto hodnoty.

Elektromagnetizmus na scéne

Vráťme sa opäť k etalónu hmotnosti, ktorý je, ako sme práve videli, dôležitý pre kalibráciu všetkých ostatných váh a závaží. Počas prevažovania prototypov v rokoch 1948 a 1989 bola pozorovaná postupná odchýlka hmotností jednotlivých etalónov (od ich kalibrovaných hmotností) medzi sebou v ráde niekoľkých desiatok mikrogramov. Príčína týchto zmien však nebola zrejmä, navyše bolo možné, že celá sada etalónov mohla získať/stratiť aj výrazne vyššiu hmotnosť, keďže porovnanie hmotností závaží s nejakou stálou prírodnou konštantou hmotnosti nebolo na začiatku 20. storočia možné s takouto presnosťou. Bez naviazania kilogramu na prírodnú konštantu tak nie je možné merať hmotnosť (v kilogramoch) s relatívnou presnosťou oveľa vyššou ako asi $1 : 10^{-7}$ – oveľa horšou ako v prípade dĺžky a času. Problémom navyše bolo, že pri definičných vzťahoch iných jednotiek bola táto nepresnosť prenášaná aj na ampér, kandelu a mol a od nich odvodené jednotky.

Ďalší pokrok v presnosti prišiel až s príchodom elektromagnetizmu. Váhy sa najprv používali pre určenie elektromagnetických vlastností látok pomocou silového pôsobenia polí. Napríklad Ampérove váhy merali silu medzi dvomi vodičmi, z ktorej sa určovala hodnota protiekajúceho elektrického prúdu. Takzvané Kibbleho (Wattové) váhy fungujú opačne, z elektrických veličín určujú extrémne presne hmotnosť. Kruhovou cievkou s efektívnou dĺžkou L^5 preteká elektrický prúd I . Kolmo na ňu vedú siločiarly magnetického poľa B , takže je vystavená sile $F = BLI$, ktorá je vyvážená tiažou meraného objektu $F = mg$. Nutnosť merať BL – takzvaný geometrický faktor – sa dá predísť druhým dynamickým meraním. Cievku rozpochybujeme v poli rýchlosťou v , pričom sa na cievke naindukuje napätie $U = BLv$. Vylúčením faktoru BL z oboch rovníc tak dostaneme vzťah pre meranú hmotnosť

$$m = \frac{UI}{gv} .$$

Pri pohybe cievky magnetickým polom meriame pomocou laserového interferometra a atómových hodín závislosť jej polohy na čase, a teda jej okamžitú rýchlosť. Elektrický prúd meriame pomocou ampérmetra založeného na Josephsonovom efekte⁶, napätie pomocou kvantového

⁵ Reálna dĺžka cievky môže byť iná. Efektívna hodnota závisí na konkrétnom tvare cievky a jej natočení v magnetickom poli.

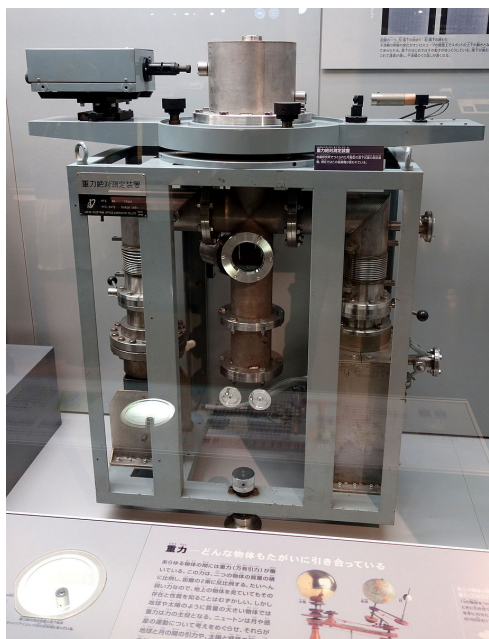
⁶ kvantový efekt nastávajúci na rozhraní medzi dvomi supravodičmi

Hallovhovo javu. Práve v metódach merania elektrických veličín do hry vstupuje Planckova konštanta h prostredníctvom von Klitzingovej konštanty – jednotky „kvanta“ elektrického odporu $R = h/e^2$ – a Josephsonovej konštanty $J = 2e/h$ – prevrátenej hodnoty kvanta magnetického toku. Využívame teda fakt, že nemeríme spojité veličiny, ale celočíselné násobky (hoci vysoké) istých základných hodnôt.

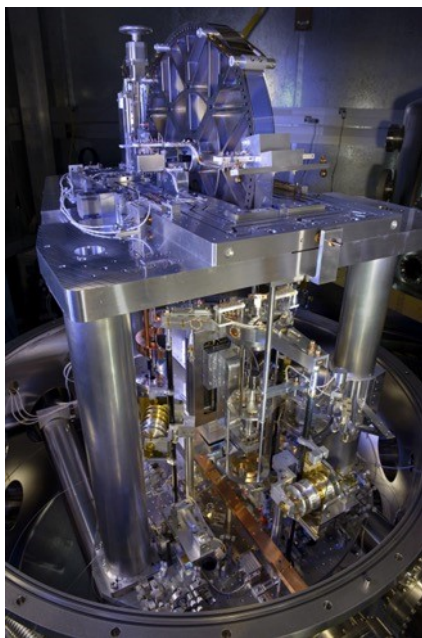
Tiažové zrýchlenie g v laboratóriu je nutné zmerať iným prístrojom. Absolútny gravimeter s vysokou presnosťou meria priebeh pádu telesa vo vyvákuovanej trubici pomocou atómových hodín a interferometra, ktorého jedno rameno končí na retroreflektore umiestnenom na padajúcom telese. Pre určenie hmotnosti telies s najvyššou presnosťou je však nutné toto meranie vykonať na viacerých miestach v laboratóriu a zostaviť model gravitačného poľa v okolí samotného miesta merania.

Kilogram je tak dnes definovaný následovne z hodnoty Planckovy konštanty

Kilogram, značka kg, je SI jednotka hmotnosti definovaná fixovanou hodnotou Planckovej konštanty $\{h\} = 6,62607015 \cdot 10^{34}$ vyjadrenej v jednotkách $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázek 4: Absolútny gravimeter⁷



Obrázek 5: Kibbleho váhy⁸

⁷ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Absolute_gravity_measurement_apparatus,_developed_in_1976_at_the_Earthquake_Research_Institute,_Japan_-_National_Museum_of_Nature_and_Science,_Tokyo_-_DSC07819.JPG https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_kilogram,_2.jpg

⁸ <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nist-4.jpg>

Vesmírne hmotnosti

Hmotnosti telies vo vesmíre meriame pomocou ich gravitačného pôsobenia. Z Newtonovho gravitačného zákona je možné určiť jeden z najpoužívanejších vzťahov – tretí Keplerov zákon v rozšírenom tvare

$$\frac{a^3}{P^2} = M + m$$

pre sústavu, kde teleso hmotnosti m obieha teleso hmotnosti M po eliptickej orbite s poloosou veľkosti a s periódou obehu P . Iste ste si však všimli chýbajúce konštanty $G/(4\pi^2)$ na pravej strane rovnice. V tejto forme je vzťah použiteľný, ak dosadzujeme periódu v rokoch, vzdialenosť v astronomických jednotkách a hmotnosť v hmotnostiach Slnka. Lahko tak vieme určiť hmotnosť napríklad Jupitera v jednotkách hmotnosti Slnka využitím Galileiho mesiacov. Už v predošlom diele sme spomenuli, ako ťažké bolo určiť vzdialenosti v Slnčnej sústave v pozemských jednotkách. V prípade hmotnosti sme poznali hmotnosti telies v slnčnej sústave vo vzájomnom porovnaní pomerne presne. Problémom však bola znalosť hodnoty gravitačnej konštanty. Prvé hodnoty vychádzali z určenia hmotnosti Zeme hádaním jej priemernej hustoty – šlo teda v podstate o rádový odhad. Pokrok nastal koncom 18. storočia pokusom C. Huttona o zmeranie hmotnosti škótskej hory Schiehallion meraním odchýlky zvislého smeru spôsobenej jej gravitačným pôsobením. Stále však bolo potrebné určiť objem hory a jej priemernú hustotu a dostať tak hmotnosť inou metódou. Odchýlka od dnešnej hodnoty bola však až 20 %.

Prvé priame meranie gravitačného pôsobenia telies v laboratóriu uskutočnil Henry Cavendish v roku 1798 meraním vzájomnej príťažlivej sily medzi dvojicou $m = 0,7$ kg závaží zavesených na konci 1,8 m dlhého ramena visiaceho na torznej pružine a pevných závaží o hmotnosti $M = 160$ kg. Prítomnosť ťažkých váh vychýlila rameno o približne štyri milimetre. Na prevod výchylky na silu bolo nutné určiť tuhosť závesu meraním torzných kmitov s periódou až štvrt hodiny – pre meranie bolo teda nutné aparáturu čo najlepšie odizolovať od okolitých vplyvov ako napríklad prúdenia vzduchu. Výsledkom experimentu bolo určenie hmotnosti Zeme s chybou asi jedného percenta.

Ešte v 50. rokoch 20. storočia bola presnosť určenia gravitačnej konštanty len asi jedno promile. V astrofyzike sa preto dodnes hmotnosti vyjadrujú tradične v hmotnostiach Slnka, Jupitera, či Zeme. Aj dodnes majú najpresnejšie merania $G = 6,67430(15) \cdot 10^{11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ neurčitosť asi 20 dielov v milióne, zatiaľ čo určenie hodnoty súčinu hmoty Slnka a gravitačnej konštanty poznáme s relatívnou presnosťou $6 \cdot 10^{-11}$ – o šesť rádov vyššou.⁹ Uvedme ešte pre úplnosť hodnotu hmotnosti Zeme $M_E = 5,97 \cdot 10^{24}$ kg – základným zdrojom praktických problémov pri meraní je práve jej neporovnateľná hodnota s „ľudskými“ hmotnosťami. Hmotnosti hviezd sa pohybujú v rádoch 10^{28} až 10^{32} kilogramov, hmotnosti galaxií siahajú k 10^{44} kilogramov.

Atómové hmotnosti

Na opačnom konci hmotnostného spektra sa nachádzajú molekuly, atómy a subatomárne častice. O atomárne hmotnosti sa zaujímali chemici už v dobe Lavoisiera v 18. storočí, ich priamemu určeniu sa však vyhli zavedením novej veličiny látkové množstvo s jednotkou mol, ktorej sa budeme venovať v neskoršom diele. Na prepočet na hmotnosť jedného atómu by sme museli poznať hodnotu Avogardovej konštanty, čo však dlho nebolo možné. Prvý rádový odhad pochádza od

⁹Pre použitie mimo slnečnú sústavu sme však obvykle limitovanými určením veľkosti polosy – či už astrometrickou presnosťou pri meraní vizuálnych dvojhviezd, alebo presnosťou radiálnych rýchlostí pri meraní hmotností spektroskopických dvojhviezd a exoplanét.

českého vedca Josefa Loschmidta, ktorý využil vzťah medzi strednou voľnou dráhou častice plynu a zmenou objemu plynu pri jeho skvapalnení. Neskôr za prvé presné merania dostal v roku 1926 Jean Baptiste Perrin Nobelovu cenu. Mnohé z dobových metód zahŕňali meranie zmeny hmotnosti elektródy pri elektrolýze a od roku 1910 využitie známej hodnoty náboja elektrónu. Inou modernou metódou je určenie atómovej hmotnostnej konštanty určením počtu atómov v čistom makroskopickom monokrýštále určením ich vzájomných vzdialeností pomocou roentgenovej difrakcie. Najpresnejšiu hodnotu atómovej hmotnosti je však možné určiť z iných prírodných konštant a určením hmotnosti elektrónu pomocou hmotnostného spektrografu.

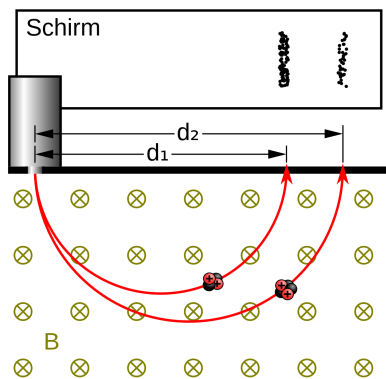
Hmotnostný spektrograf je prístroj merajúci pomer náboja a hmotnosti iónov. Na nabitú časticu pohybujúcu sa rýchlosťou v v elektrickom poli s elektrickou intenzitou \mathbf{E} a magnetickom poli s magnetickou indukciou \mathbf{B} pôsobí zrýchlenie

$$\mathbf{a} = \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}),$$

kde m je hmotnosť iónu a q jeho náboj. Prechodom cez takéto pole teda vieme roztriediť častice podľa m/q (častejšie sa používa m/z , kde $z = q/e$ je náboj v jednotkách elementárneho náboja) a následne ich detekovať na fosforovej obrazovke, či digitálnom čipe. Najnázornejší je sektorový hmotnostný spektrograf, kde sa využíva závislosť polomeru trajektórie R častice na intenzite magnetického poľa. V homogénnom magnetickom poli o veľkosti B opisuje častica letiaca kolmo na siločiaru s rýchlosťou v trajektóriu v tvare oblúku kružnice o polomere

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

Na opačnom konci možností sa nachádza hmotnostný spektrograf merajúci dobu letu častice urýchľovanej v čisto elektrickom poli. Neoddeliteľnou časťou prístroja je aj samotná ionizácia častíc.



Obrázek 6: Hmotnostný spektrograf¹⁰

¹⁰<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mass-spectrograph.svg>

V prípade subatomárnych častíc detekovaných v urýchľovačoch sa ich hmotnosť m určuje zmeraním celkovej energie E pomocou kalorimetra a hybnosti p pomocou dráhového detektoru merajúceho zakrivenie trajektórie častice v magnetickom poli a použitím známeho vzťahu špeciálnej relativity

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4.$$

Pre subatomárne častice sa z tohto dôvodu hmotnosti obvykle uvádzajú v jednotkách $\text{eV}\cdot\text{c}^{-2}$, kde elektrónvolt eV je energia udelená častici s nábojom jedného elementárneho náboja napätím jeden volt. Pri urýchľovaní elektrickým napätím to preto je prirodzená miera energie pri takýchto experimentoch. Najľahšími hmotnými časticami so zmeranou hmotnosťou sú elektróny s hmotnosťou $m_e \doteq 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$. O neutrínach vieme, že aspoň dva ich typy majú nenulovú hmotnosť. V prípade elektrónového neutrína poznáme horný odhad jeho hmotnosti, ktorý je $1 \text{ eV}\cdot\text{c}^{-2} \doteq 1,8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$.

Odvođené jednotky

Pridanie jednotiek hmotnosti umožňuje definíciu SI jednotiek ďalších mechanických veličín. Sila – ktorú v podstate merajú každé váhy – má jednotku newton $1 \text{ N} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Zvláštne názvy majú aj

- jednotka tlaku a mechanického napätia pascal $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$, tlak meriame pomocou manometra meraním deformácie deformačného člena alebo výšky hladiny kvapaliny zodpovedajúcej danému hydrostatickému tlaku; pre meranie nízkych tlakov plynov musíme používať špeciálne metódy založené na koncentracii častíc v objeme;
- energia, práca a teplo majú jednotku joule $1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}$, ide o komplexnú veličinu, ktorej veľkosť sa obvykle určuje výpočtom z iných meraných veličín; zákon zachovania energie je jedným zo základných fyzikálnych zákonov;
- jednotka výkonu watt $1 \text{ W} = 1 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$, ktorý sa obvykle tiež určuje výpočtom, s výnimkou elektrického výkonu, ktorý je možné priamo merať pomocou wattmetra.

Samozrejme existuje mnoho ďalších veličín, ktorých jednotky sú jednoducho násobky a podiely základných, či odvodených jednotiek. Meranie týchto jednotiek sa odvíja od fyzikálnych javov, v ktorých vystupujú, ako napríklad meranie hustoty kvapalín hĺbkou ponorenia hustomeru, či viskozity kvapaliny určením prietoku z Mariottovej fľaše. Spomeňme aj rozdiel medzi joulom ako jednotkou energie a jednotkou momentu sily $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ newton-meter, ktoré sú si teoreticky rovné, avšak jedna popisuje veličinu skalárnu a druhá vektorovú.

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/>.