PEDAGOGICKÁ
FAKULTA
Masarykova univerzita

Mechanika a molekulová fyzika

Doc. RNDr. Petr Sládek, CSc.

Pedagogická fakulta
Masarykova Univerzita
Poříčí 7, 603 00 Brno

Pro potřeby přednášky zpracováno s využitím www.studopory.vsb.cz materialy html_files

Úvodem

Mechanika

⇩

- je to nejstarší obor fyziky zabývající se zákonitostmi mechanického pohybu těles známý již ve starověku.
- je pro studujícího nejsnáze pochopitelný, protože na mechanické jevy naráží každý den. Ne že by se běžně nesetkával i s jinými fyzikálním jevy a zákonitostmi, ale ty nejsou často na první pohled tak zřejmé.
- bez znalosti zákonitosti mechaniky neobejdete při studiu jiných partií fyziky a uplatníte je i u velmi složitých jevů.

Úvodem

- **Mechanika**
  - **Kinematika** se zabývá pouze popisem pohybu tělesa
  - **Dynamika** vyšetřuje příčiny tohoto pohybu.
  - **Mechanická práce a energie.**
  - **Gravitační pole a Tuhé těleso.**

PEDAGOGICKÁ FAKULTA Masarykova univerzita

Soustava fyzikálních veličin a jednotek

- Postupem času při rozvoji fyzikálních poznatků se používalo k vyjádření velikostí fyzikálních veličin nejrůznějších jednotek. (loket, stadium,míle, versta,..)
- Globalizace světa $\Rightarrow$ nutnost sjednotit všechny jednotky.
- Od roku 1971 byla zavedena Mezinárodní soustava jednotek označovaná zkratkou **SI** (Systéme International des Unités).

- Soustava SI obsahuje sedm základních fyzikálních jednotek a tomu odpovídajících sedm základních veličin..“

Soustava fyzikálních veličin a jednotek

jednotka	*značka*	*název veličiny*	*značka*
metr	m	délka	l
kilogram	kg	hmotnost	m
sekunda	s	čas	t
ampér	A	elektrický proud	I
kelvin	K	termodynamická teplota	T
mol	mol	látkové množství	n
kandela	cd	svítivost	I

PEDAGOGICKÁ FAKULTA
Masarykova univerzita

Soustava fyzikálních veličin a jednotek

- Dále soustava SI obsahuje odvozené jednotky. Tyto jednotky jsou odvozeny na základě definičních vztahů příslušných veličin

- $F = m.a$
- Protože jednotkou hmotnosti *m* je ***kg***, jednotkou zrychlení **a** je $\boldsymbol{m/s^2}$ jednotkou síly je $\boldsymbol{kg.m.s^{-2}}$. Tuto jednotku síly můžeme zapsat také jako ***N*** (Newton).
- Odvozené jednotky se často pojmenovávají po význačných fyzicích. (Newton, Pascal, Sievert, Becquerel, Volt, Tesla, Henry, Farad, atd.)

Soustava fyzikálních veličin a jednotek

- V praxi je často výhodné používat násobky a díly jednotek. Proto vzdálenost ujetou autem vyjadřujeme v kilometrech (km) a ne v metrech, malé hodnoty elektrického proudu měříme v miliampérech (mA) a ne v ampérech.

- Zásady soustavy SI určují násobky a díly pomocí třetích mocnin základu 10. Jednotlivé násobky a díly jsou označeny předponami.
- Někdy se používají ještě další předpony, které nepatří do soustavy SI jako je
- ***centi***- se značkou ***c*** (1 cm = 10^{-2}m), ***deci-***, značka ***d*** (1 dm = 10^{-1}m) a ***hekto***- , značka ***h*** (1 hPa= 100 Pa).

- Stále se ještě setkáváme s jednotkami, které nepatří do soustavy SI. Je to dáno jejich praktickým významem, zde patří jednotky jako minuta, hodina, tuna, litr. A nebo tradicí – míle, stopa či libra. Těmto jednotkám se říká **vedlejší jednotky**.

Soustava fyzikálních veličin a jednotek

Předpona	Značka	Znamená výchozích jednotek	Předpona	Značka	Znamená výchozích jednotek
kilo	k	10^{3}	mili	m	10^{-3}
mega	M	10^{6}	mikro		10^{-6}
giga	G	10^{9}	nano	m	10^{-9}
tera	T	10^{12}	piko	p	10^{-12}
peta	P	10^{15}	femto	f	10^{-15}
exa	E	10^{18}	atto	a	10^{-18}
hekto	h	10^{2}	deci	d	10^{-1}
deka	da	10^{1}	centi	c	10^{-2}

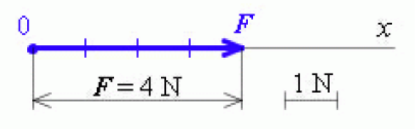
Skalární a vektorové fyzikální veličiny

Fyzikální veličiny můžeme rozdělit do dvou skupin.

- Skalární fyzikální veličina, krátce skalár, je určena svou velikostí a příslušnou jednotkou (čas, hmotnost, teplota, energie, ..).

  Skalární veličinu označujeme v textu kurzivou. Například čas zapíšeme jako *t*, hmotnost *m*

- Vektorová fyzikální veličina, zkráceně vektor, je veličina, která má určitou velikost, směr a orientaci(síla, rychlost, zrychlení, intenzita elektrického pole).
- Vektorovou veličinu označujeme zpravidla kurzívou a to tučnou nebo šipkou nad jejím symbolem. Například sílu zapíšeme jako ***F***, nebo $\vec{F}$.
- Vektorovou veličinu znázorňujeme úsečkou určité délky a určitého orientovaného směru. Délka této úsečky určuje **velikost vektoru** – (je to skalár). Velikost vektoru A zapisujeme jako $A = |\mathbf{A}|$. Směr vektoru je dán přímkou ve které vektor leží. A konečně orientaci vektoru nám určuje počáteční (O) a koncový bod vektoru.



Kinematika hmotného bodu

Zjednodušení: Reálné těleso nahrazujeme modelem - **hmotným bodem**.

Hmotný bod je myšlený bodový objekt, kterým nahrazujeme skutečné těleso.

Hmotný bod má stejnou hmotnost jako těleso a představujeme si ho umístěný do jeho těžiště.

Toto zjednodušení lze použít, jsou-li rozměry tělesa zanedbatelné vůči vzdálenostem po kterých se pohybuje.

Pokud se poloha hmotného bodu nemění vůči danému okolí (objektu)

$\Rightarrow$ **objekt je v klidu**.

Vztažný objekt (okolí) se ale také může pohybovat –

Klid těles je vždy relativní, absolutní klid neexistuje.

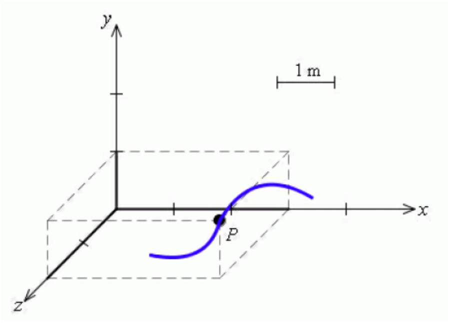
Označím-li těleso za klidné, musím vždy uvést, vzhledem k čemu je v klidu.

Analogicky: **Pohyb těles je také vždy relativní**.

Popis klidu i pohybu vždy závisí na tom, k jakým tělesům jej vztahujeme. Volíme tedy soustavu těles, ke kterým vztahujeme pohyb nebo klid sledovaného tělesa - volíme tzv. **vztažnou soustavu.**

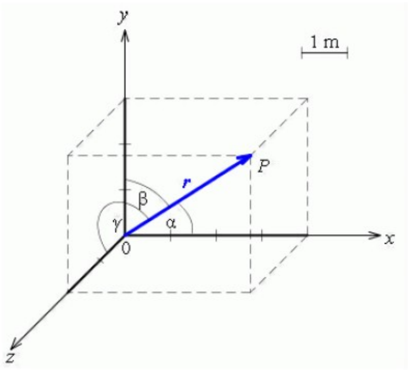
Polohový vektor, trajektorie, dráha

Popisujeme-li mechanický pohyb hmotného bodu vzhledem ke zvolené vztažné soustavě, musíme určit jeho polohu v libovolném čase. Nejjednodušší je určit polohu pomocí pravoúhlé soustavy souřadnic *Oxyz*.



Polohu hmotného bodu určujeme pomocí **polohového vektoru $\vec{r}$.**

Polohový vektor je vektor S počátkem v bodě O souřadnicové soustavy a s koncovým bodem ve vyšetřovaném bodě P. Souřadnice polohového vektoru jsou totožné se souřadnicemi hmotného bodu x, y, z .



Vektor $\vec{r}$ tak můžeme zapsat jako $\vec{r}$ [x,y,z]. Jeho velikost je určena pomocí Pythagorovy věty.

Polohový vektor, trajektorie, dráha

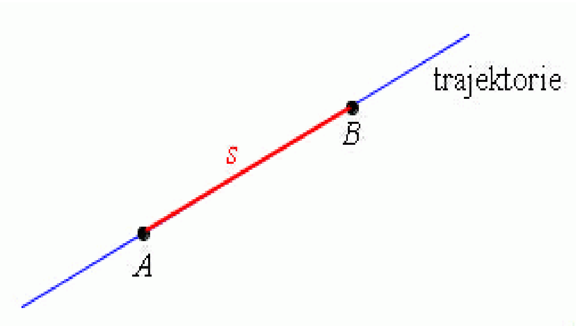
Pohybuje-li se hmotný bod, opisuje v prostoru pomyslnou souvislou čáru, kterou nazýváme **trajektorie hmotného bodu**.

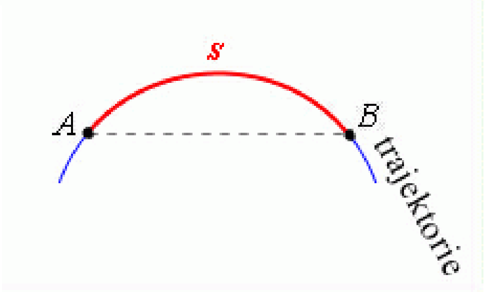
Trajektorie je množina všech poloh, kterými hmotný bod při svém pohybu prochází.

Podle tvaru trajektorie rozlišujeme pohyby:

· **přímočaré** – trajektorií je část přímky,

· **křivočaré** – trajektorií je křivka nebo její část
(kružnice, parabola, elipsa nebo libovolná prostorová křivka).





Délka s trajektorie, kterou hmotný bod opíše za čas *t*,
se nazývá **dráha**.

Dráha je fyzikální veličina, kterou uvádíme v jednotkách délky.

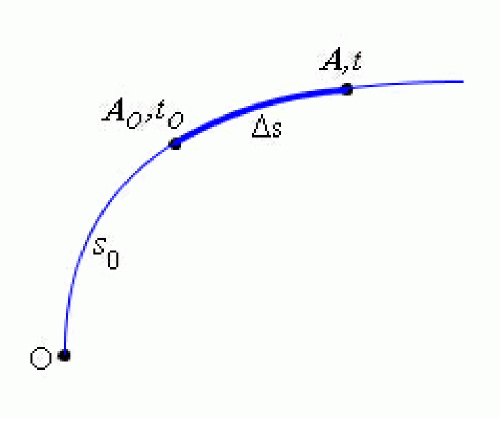
Při pohybu hmotného bodu se zvětšuje dráha, kterou hmotný bod urazil.

Říkáme, že dráha s je funkcí času *t*. Tuto závislost dráhy na čase zapisujme výrazem s = s(t).

Rychlost hmotného bodu

Další veličina charakterizující pohyb je **rychlost.**
Různě rychlá tělesa urazí stejnou dráhu za různý čas.

Než se hmotný bod v čase to dostal do bodu A_o, urazil od počátku *O* dráhu s_o. Označme dráhu od počátku k bodu A jako *s,* kterou urazil hmotný bod za čas *t*.
K uražení úseku dráhy $\Delta s = s - s_o$ potřebuje čas $\Delta t = t - t_o$.



Průměrná rychlost hmotného bodu je podíl jeho dráhy Δs a odpovídající doby pohybu *Δt*.

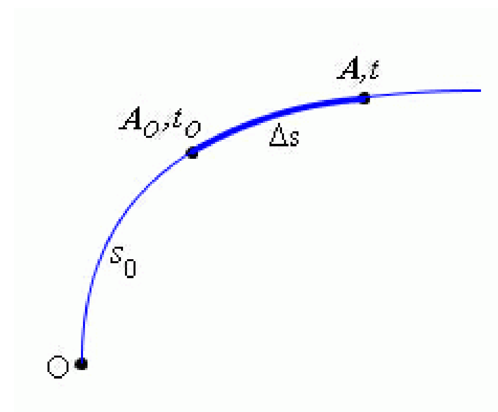
$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s - s_o}{t - t_o}$$

Jednotkou rychlosti v soustavě SI je metr za sekundu tj. m/s = m.s-1. Běžně se používá také vedlejší jednotka km/h.

Rychlost hmotného bodu

Budeme-li zkracovat časový interval Δt až k nekonečně malým hodnotám, potom $\Delta s \rightarrow ds$ (interval přejde na diferenciál) pak dostaneme následující vztah pro *velikost okamžité rychlosti*

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$$



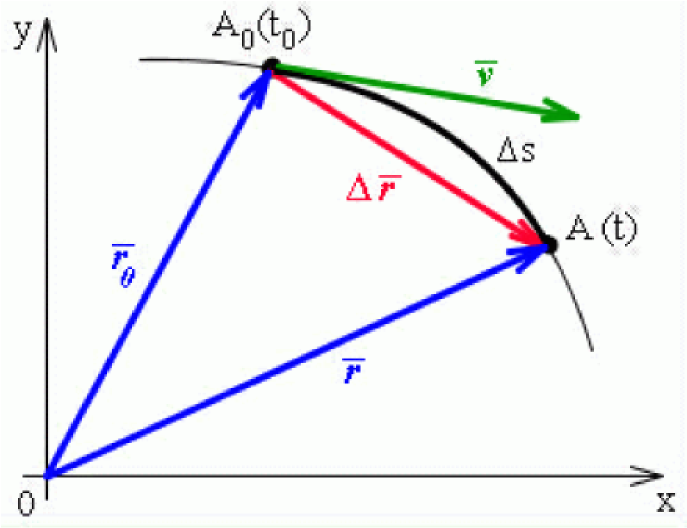
$$\boxed{v = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}}$$

Velikost okamžité rychlosti $|v|$ hmotného bodu se rovná první derivaci jeho dráhy podle času.

Rychlost hmotného bodu

Změnu polohy hmotného bodu z místa A_0 do bodu A můžeme vyjádřit nejen pomocí dráhy Δs, ale také pomocí změny polohového vektoru $\Delta\vec{r}$.

Můžeme tak definovat průměrnou rychlost, tentokráte již jako vektor:



$$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r} - \vec{r_0}}{t - t_0}$$

Pro $\Delta t \to 0$ pak pro *vektor okamžité rychlosti*

Dostaneme následující vztah:

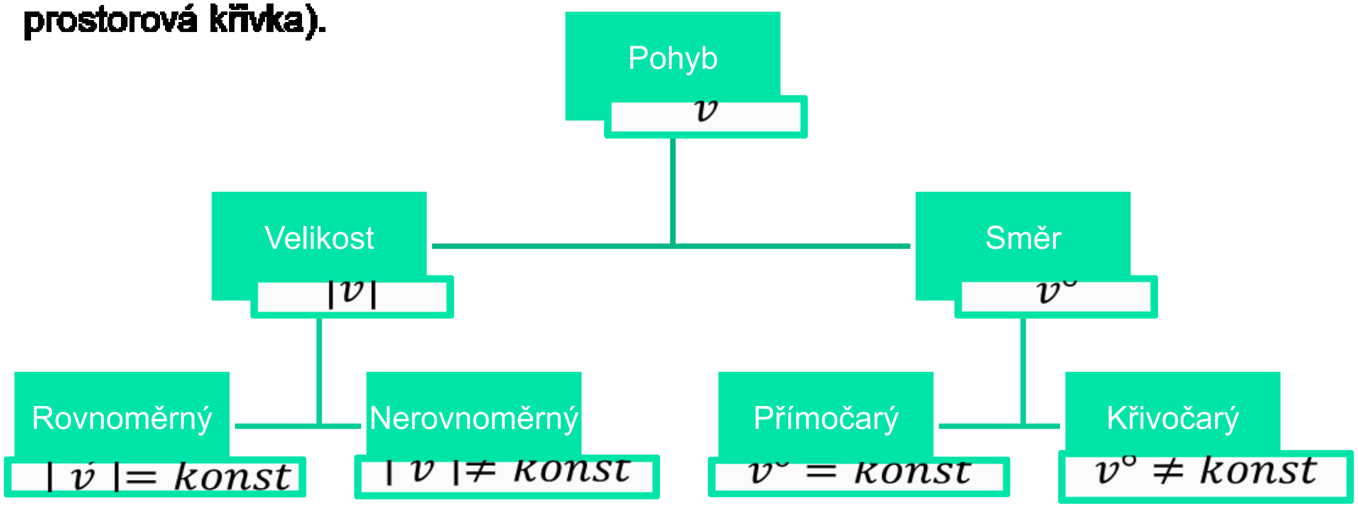
$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}$$

Okamžitá rychlost $\vec{v}$ hmotného bodu se rovná první derivaci jeho polohového vektoru podle času. Vektor rychlosti má směr tečny k trajektorii.

Klasifikace pohybů podle rychlosti hmotného bodu

Rychlost jako vektor může doznat změny jak

- své velikosti | $\vec{v}$ |
  - rovnoměrný pohyb. U tohoto pohybu urazí hmotný bod ve stejných časových intervalech stejné dráhy. Velikost jeho rychlosti se během pohybu nemění, je konstantní.
  - nerovnoměrný pohyb. U nerovnoměrného pohybu se velikost rychlosti mění během pohybu, není konstantní.
- svého směru $\vec{v}^{\circ}$
  - přímočaré – trajektorií je část přímky,
  - křivočaré – trajektorií je křivka nebo její část (kružnice, parabola, elipsa nebo libovolná prostorová křivka).



Zrychlení hmotného bodu

- U nerovnoměrných pohybů se rychlost během pohybu mění.

Změnu rychlosti za jednotku času označujeme jako **zrychlení**.

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \overrightarrow{v_0}}{t - t_0}$$

Zrychlení $\vec{a}$ je vektor vyjadřující časovou změnu vektoru rychlosti, tj. změnu velikosti i směru vektoru rychlosti.

Velikost průměrného zrychlení

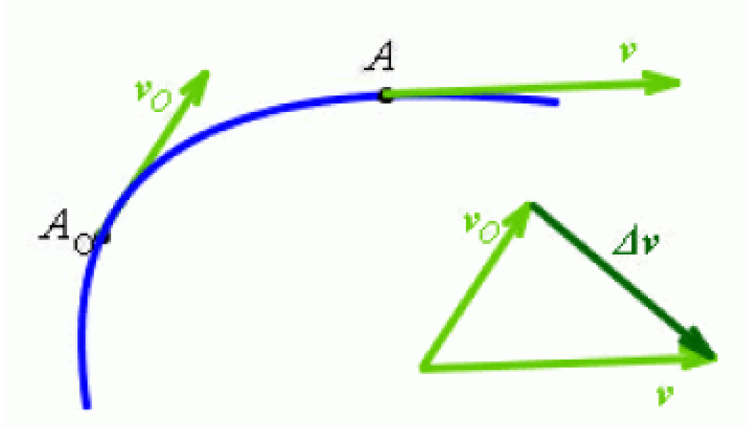
$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_o}{t - t_o}$$

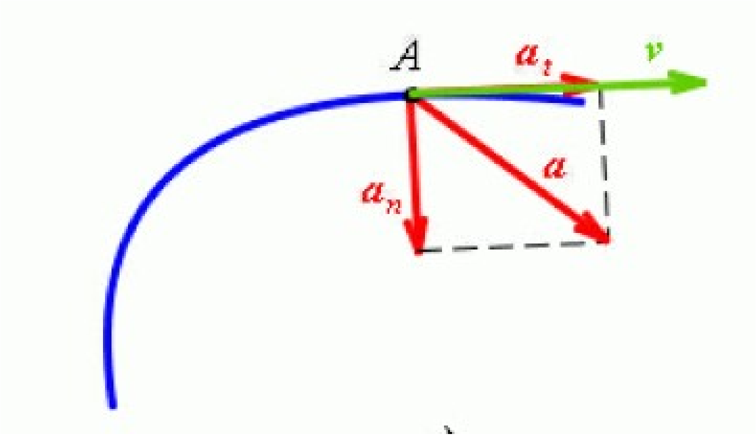
Vektor okamžitého zrychlení hmotného bodu

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{r}^2}{dt^2}$$

Zrychlení hmotného bodu

Zrychlení $\vec{a}$ je vektor vyjadřující časovou **změnu vektoru rychlosti,** tj. změnu velikosti i směru vektoru rychlosti.



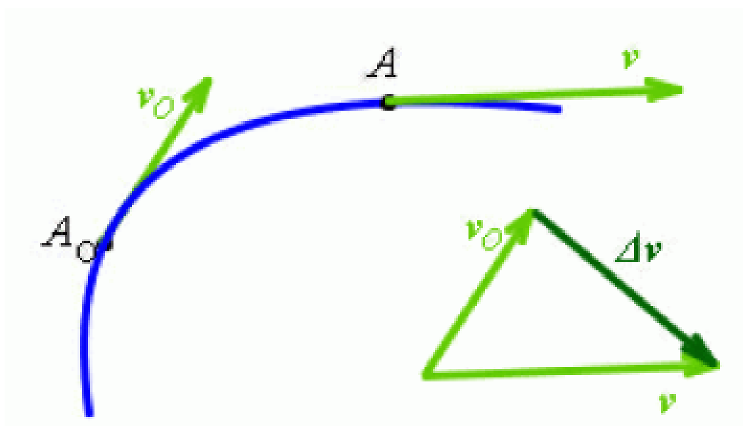


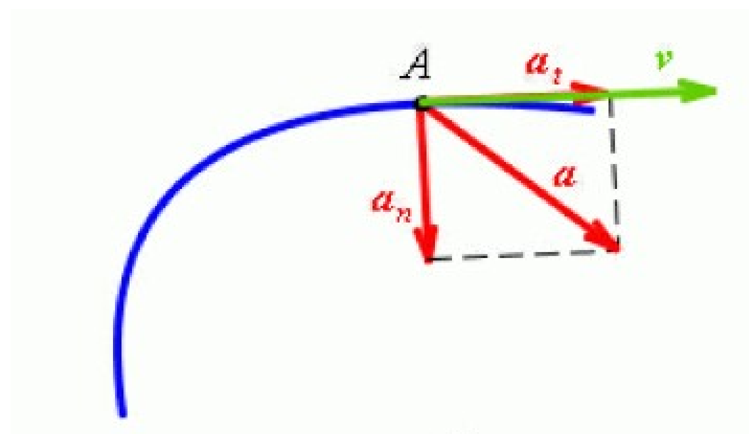
Vektor zrychlení $\vec{a}$ bude mít směr vektoru změny rychlosti $\Delta\vec{v}$.
Protože vektor rychlosti má směr tečny, rozložíme vektor zrychlení

- do směru tečného k trajektorii
- do směru normály k trajektorii

Zrychlení hmotného bodu

- **Tečné zrychlení $\vec{a}_t$** vyjadřuje změnu **velikosti** rychlosti hmotného bodu. **Normálové zrychlení $\vec{a}_n$** vyjadřuje změnu **směru** rychlosti hmotného bodu.





Celkové zrychlení je dáno vektorovým součtem

$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n$$

Velikost celkového zrychlení

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$$

Klasifikace pohybů podle zrychlení hmotného bodu

- Rovnoměrný pohyb. Tečné zrychlení tohoto pohybu je nulové $a_t = 0$

- Rovnoměrně zrychlený pohyb. Tečné zrychlení tohoto pohybu je konstantní a_t = konst., a je kladné ($a_t > 0$).
- (Rovnoměrně zpomalený pohyb). Tečné zrychlení tohoto pohybu je konstantní a_t = konst., ale je záporné ($a_t < 0$).

- Nerovnoměrný pohyb. Tečné zrychlení se během pohybu mění $a_t \neq$ konst.

- Přímočarý pohyb. Normálové zrychlení je nulové $a_n = 0$, tečné zrychlení je rovno celkovému zrychlení $a_t = a$.
- Křivočarý pohyb. Normálové zrychlení je různé od nuly $a_n \neq 0$.

Přímočarý pohyb hmotného bodu

- Zrychlení - rychlost - dráha

Přímočarý pohyb. Normálové zrychlení je nulové $a_n = 0$

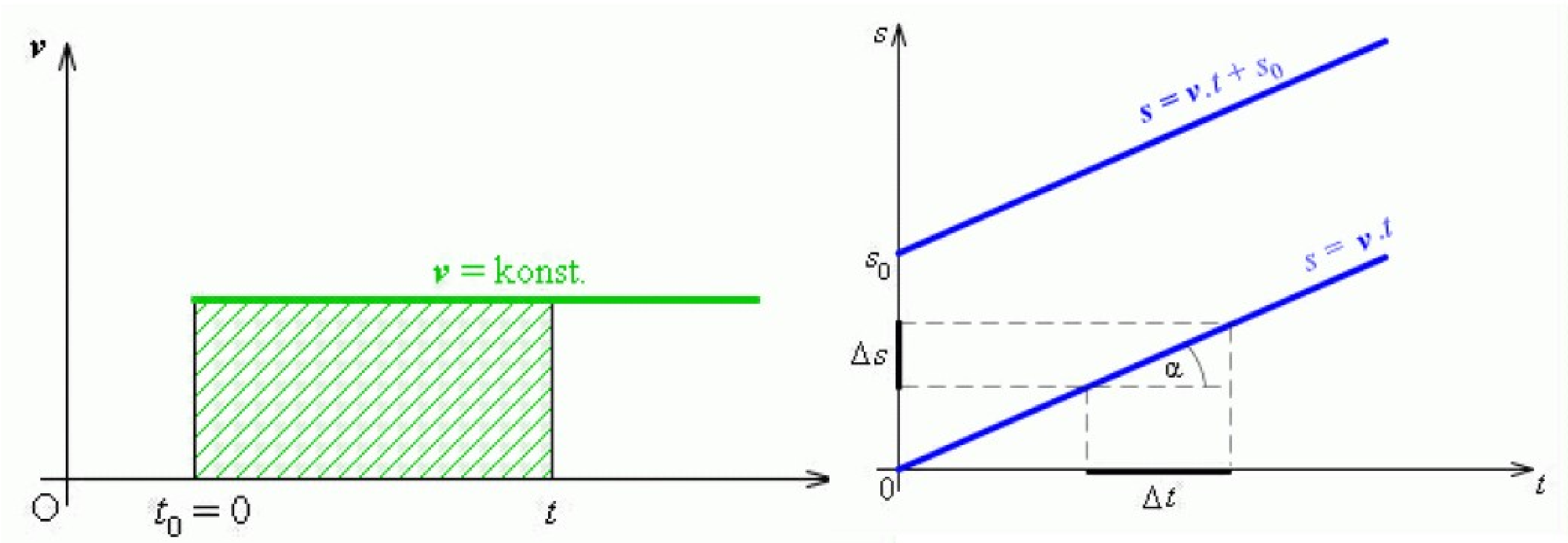
- Rovnoměrný přímočarý pohyb.
  - Tečné zrychlení tohoto pohybu je navíc nulové $a_t = 0$
  - Celkové zrychlení $\vec{a} = 0$, tj. vektor rychlosti je konstantní $\vec{v}$= konst. (velikost i směr)
  - Pro dráhu *s* pak platí

$$s = \int v\,dt = vt + C = vt + s_0$$

Když jsme položili integrační konstantu *C* v čase *t*=0 rovnu „počáteční dráze“ s_0 (poloze hmotného bodu).

Přímočarý pohyb hmotného bodu

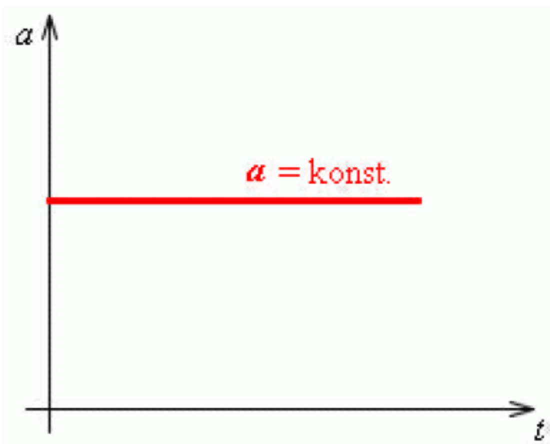
Grafické znázornění – přímočarý rovnoměrný pohyb

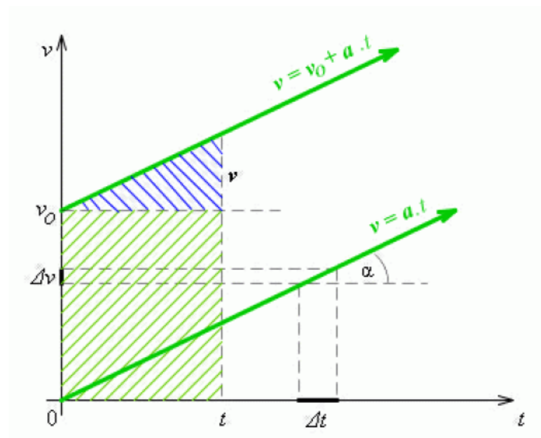


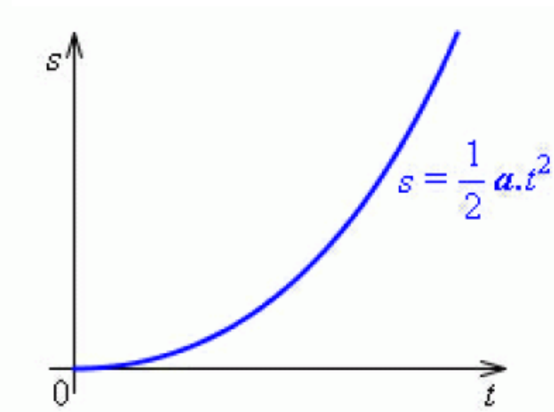
Přímočarý pohyb hmotného bodu

Grafické znázornění – Rovnoměrně zrychlený (zpomalený) přímočarý pohyb

Zrychlení je konstantní, $\vec{a} = \overrightarrow{konst}$, nemění se ani jeho velikost ani jeho směr.







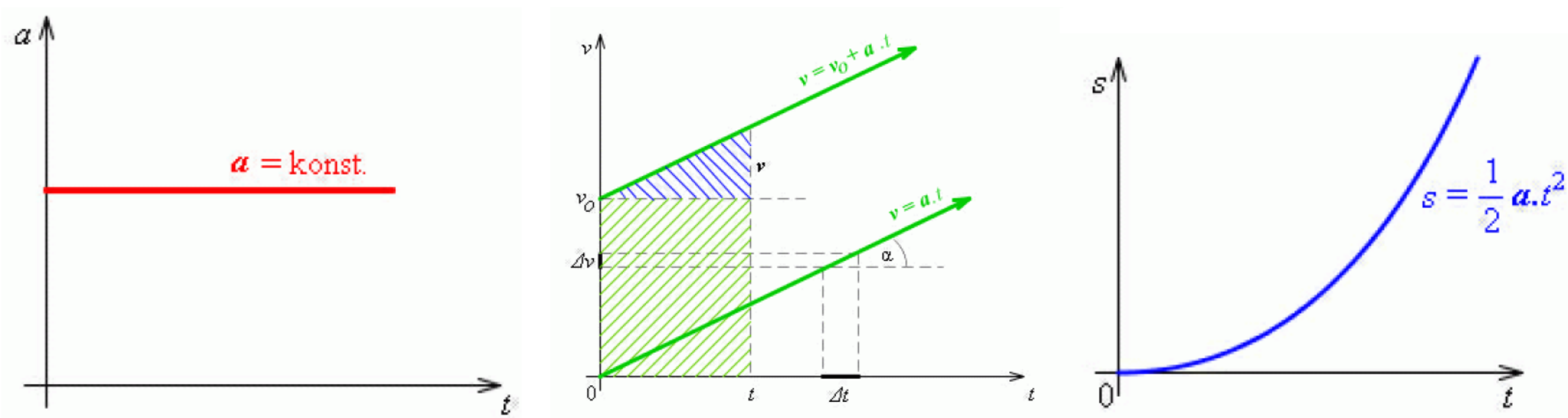
$$v = \int a\,dt + C_1 = at + v_o.$$

$$s = \int v\,dt + C_1 = \tfrac{1}{2}\,at^2 + v_o\,t + s_o$$

Přímočarý pohyb hmotného bodu

Grafické znázornění – Rovnoměrně zrychlený (zpomalený) přímočarý pohyb

Zrychlení je konstantní, $\vec{a} = \overrightarrow{konst}$, nemění se ani jeho velikost ani jeho směr.



$$v = \int a\,dt + C_1 = at + v_o.$$

$$s = \int v\,dt + C_1 = \tfrac{1}{2}\,at^2 + v_o\,t + s_o$$

Volný pád je přímočarý rovnoměrně zrychlený pohyb se zrychlením daným tíhovým zrychlením, $a = g$, počáteční rychlost pohybu je nulová, $v_o = 0$.

$$v = gt \qquad s = \tfrac{1}{2}\,gt^2$$

Pohyb hmotného bodu po kružnici

Nejjednodušší křivočarý pohyb– trajektorií je kružnice

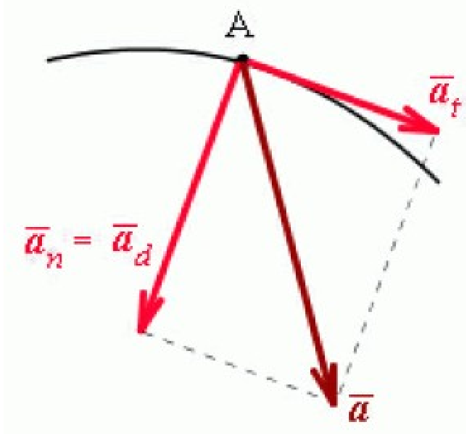
Zrychlení má dvě složky **tečnou** a **normálovou**.

V případě rovnoměrného pohybu po kružnici
je tečné zrychlení nulové $a_t = 0$.
Velikost rychlosti je konstatní $v = konst.$

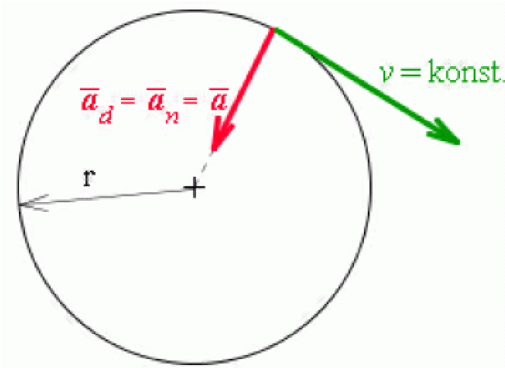
Směr rychlosti se však v každém okamžiku mění.
To způsobuje druhá složka zrychlení ve směru normály a_n .
U kruhového pohybu se toto normálové zrychlení
označuje jako dostředivé zrychlení a_d, protože v každém
bodě kruhové dráhy směřuje do jejího pevného středu.
Velikost dostředivého zrychlení je dána
vztahem:

$$\boxed{a_d = \frac{v^2}{r}}$$

kde *v* je velikost rychlosti (někdy označovaná jako obvodová rychlost) a *r* je poloměr opisované kružnice.

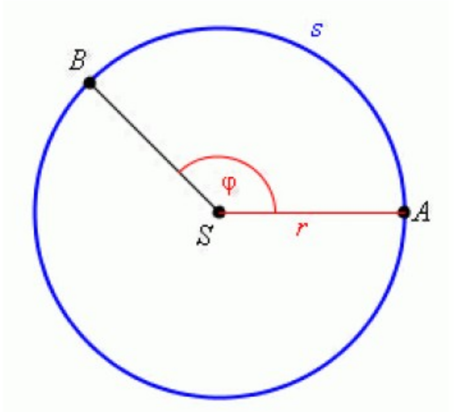


obecný křivočarý pohyb



rovnoměrný kruhový pohyb

Pohyb hmotného bodu po kružnici



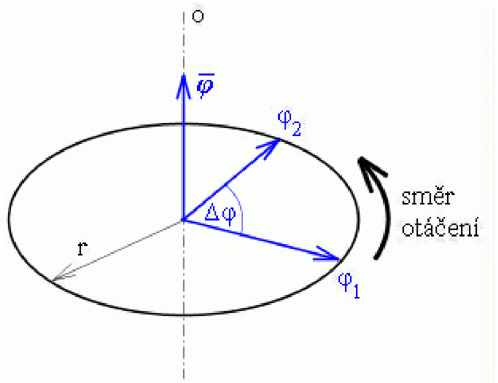
Úhlová dráha, úhlová rychlost a úhlové zrychlení.

Úhlová dráha je definována jako středový úhel *φ*, který opíše průvodič *r* hmotného budu za dobu *t*. Úhlovou dráhu měříme v radiánech se značkou rad.

$$\varphi = \frac{s}{r}$$

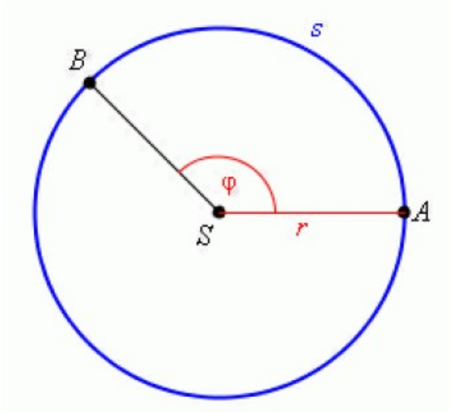
Mezi přírůstkem úhlové dráhy *dφ* a příslušnou změnou dráhy *ds* platí vztah:

$$d\varphi = \frac{ds}{r}$$



Vektor úhlové dráhy $\vec{\varphi}$ má velikost rovnu velikosti opsaného úhlu *Δφ* a směr kolmý na rovinu opisovanou průvodičem r.
Kladný směr vektoru úhlové dráhy $\vec{\varphi}$ je dán směrem pravotočivého šroubu).

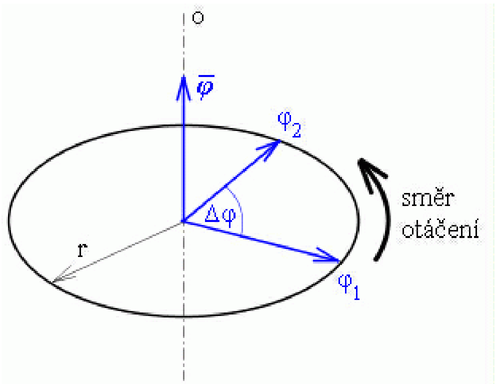
Pohyb hmotného bodu po kružnici



Úhlová dráha, úhlová rychlost a úhlové zrychlení.

Úhlová rychlost $\vec{\omega}$ je definována jako podíl změny úhlové dráhy $\Delta\varphi$ a odpovídající doby pohybu Δt .

$$\vec{\omega} = \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{\vec{\varphi}-\vec{\varphi}_0}{t-t_0} \qquad \text{resp.} \qquad \vec{\omega} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$$



Pro velikost z předchozího pak máme $\omega = \frac{ds}{dt}\frac{1}{r}$

Využijeme-li vztah pro velikost - (obvodovou) rychlost, pak platí $v = r\,\omega$

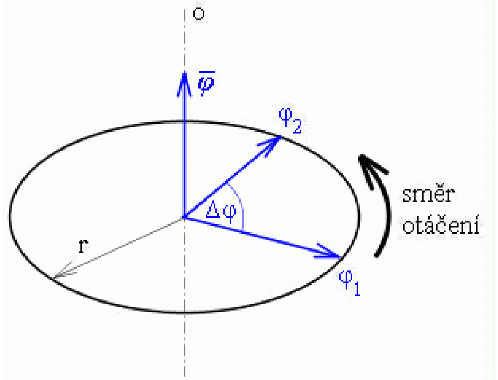
Analogicky pro **úhlové zrychlení $\vec{\varepsilon}$** platí

$$\vec{\varepsilon} = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{\vec{\omega}-\vec{\omega}_0}{t-t_0} \qquad \text{resp.} \qquad \vec{\varepsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

Kladný směr vektorů úhlové rychlosti $\vec{\omega}$ a úhlového zrychlení $\vec{\varepsilon}$ je dán směrem pravotočivého šroubu.

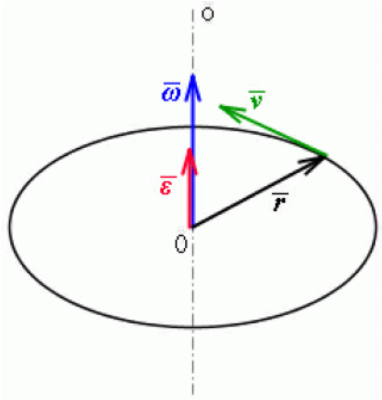
Pohyb hmotného bodu po kružnici

Úhlová dráha, úhlová rychlost a úhlové zrychlení.



Vektor rychlosti $\vec{v}$ je dán vektorový součinem průvodiče $\vec{r}$ a úhlové rychlosti $\vec{\omega}$

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$$



Navíc

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{\omega} \times \vec{r}) = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt}$$

Po dosazení pak

$$\vec{a} = \vec{\varepsilon} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \vec{v}$$

Při srovnání směrů pak zřejmě

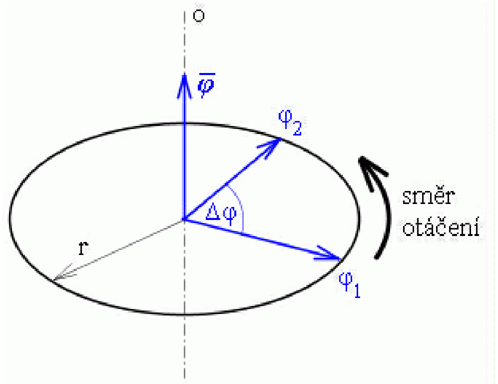
$$\vec{a_t} = \vec{\varepsilon} \times \vec{r} \qquad \vec{a_n} = \vec{\omega} \times \vec{v}$$

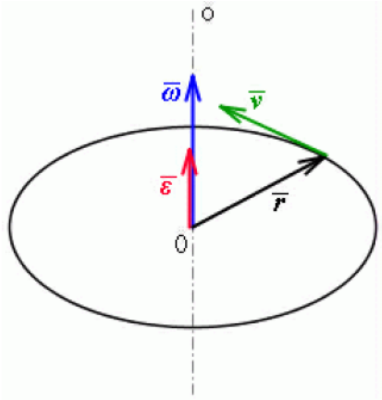
Pohyb hmotného bodu po kružnici

Úhlová dráha, úhlová rychlost a úhlové zrychlení.

Pro jejich velikosti pak

$a_t = r\,\varepsilon$ $\qquad$ $a_n = r\,\omega^2$





Pohyb hmotného bodu po kružnici

Rovnoměrný pohyb po kružnici (*ε=0*)

$$\omega = \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$$ po úpravě $$\varphi = \int \omega\, dt = \omega t + C = \omega t + \varphi_0$$

Rovnoměrně zrychlený (zpomalený) pohyb po kružnici (ε = konst)

$$\omega = \int \varepsilon\, dt + C_1 = \varepsilon t + \omega_o. \qquad \varphi = \int \omega\, dt + C_1 = \tfrac{1}{2}\,\varepsilon t^2 + \omega_o\, t + \varphi_o$$

Frekvence f **- počet oběhů po kružnici za jednotku času (s^{-1}).**
Perioda T **- doba jednoho oběhu vyjadřovanou (s)**

Periodu je možné vyjádřit jako převrácenou hodnotu frekvence $f = \frac{1}{T}$
Obě poslední veličiny souvisejí s úhlovou rychlostí vztahem

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\,\pi\,f$$