PEDAGOGICKÁ
FAKULTA
Masarykova univerzita

Mechanika a molekulová fyzika

Doc. RNDr. Petr Sládek, CSc.

Pedagogická fakulta
Masarykova Univerzita
Poříčí 7, 603 00 Brno

UNIVERSITAS MASARYKIANA BRUNENSIS • FACULTAS PAEDAGOGICA •

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 d´ Unités).

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

Soustava fyzikálních veličin a jednotek

- V roce 1960 byla jako mezinárodně platná vyhlášena soustava SI. Povinnost používat soustavu jednotek SI v České republice stanovuje zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii v platném znění a prováděcí vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu č. 264/2000 Sb. o základních měřicích jednotkách a ostatních jednotkách a o jejich označování v platném znění. Těmito předpisy je také stanoven Český metrologický institut jako garant jednotek a etalonů pro Českou republiku.

- Od roku 2011 probíhala příprava nových definic stávajících jednotek na základě vazby k pevně stanoveným hodnotám přírodních konstant, která byla definitivně schválena v listopadu 2018 a která následně v květnu 2019 vstoupila v platnost.

- Motivací pro úvahy nad změnou definice některých jednotek SI byl zejména fakt, že mezinárodní prototyp kilogramu během času nepatrně mění svoji hmotnost, přičemž není zcela jasné, zda svoji hmotnost mění mezinárodní prototyp, nebo jeho sesterské kopie, se kterými je jednou za několik let provedeno porovnání.

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

Soustava fyzikálních veličin a jednotek

V tabulce je uveden přehled sedmi přírodních konstant, pomocí kterých jsou definovány základní jednotky SI.

Přírodní konstanty SI		
značka	***konstanta***	***přesná hodnota***
$\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$	frekvence záření velmi jemného přechodu Cs	9 192 631 770 Hz
c	rychlost světla	299 792 458 $\mathrm{m\,s^{-1}}$
h	Planckova konstanta	$6{,}626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ J s
e	elementární náboj	$1{,}602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ C
k	Boltzmannova konstanta	$1{,}380\,649 \cdot 10^{-23}$ $\mathrm{J\,K^{-1}}$
N_{A}	Avogadrova konstanta	$6{,}022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ $\mathrm{mol^{-1}}$
K_{cd}	světelná účinnost záření o frekvenci 540 THz	683 $\mathrm{lm\,W^{-1}}$

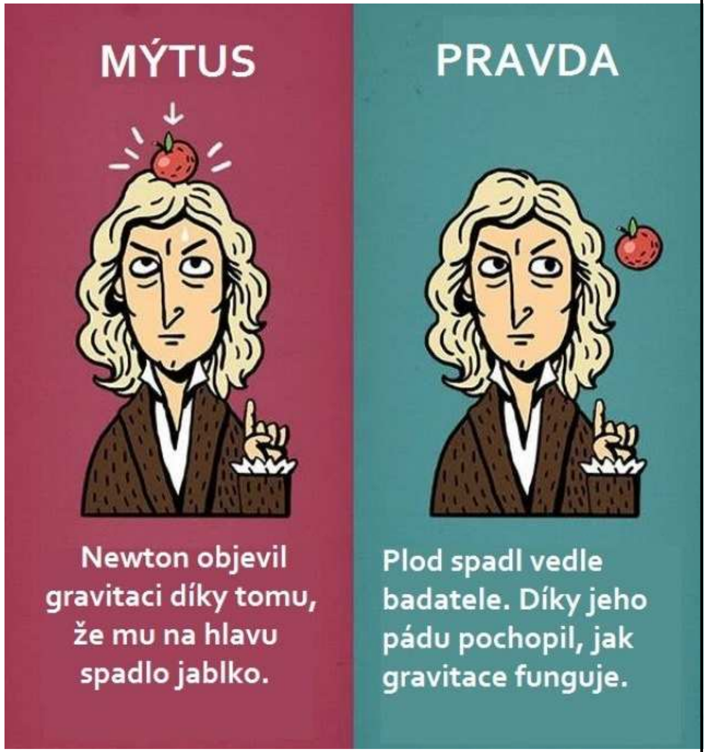
Soustava fyzikálních veličin a jednotek

- 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 ***m/s²*** jednotkou síly je ***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

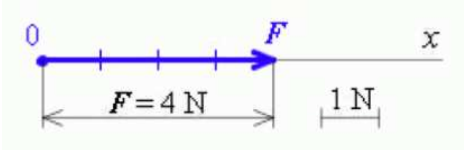
Předpona	Značka	Znamená výchozích jednotek	Předpona	Značka	Znamená výchozích jednotek
kilo	k	10^{3}	mili	m	10^{-3}
mega	M	10^{6}	mikro		10^{-6}
giga	G	10^{9}	nano	m	10^{-9}
tera	T	10^{12}	piko	p	10^{-12}
peta	P	10^{15}	femto	f	10^{-15}
exa	E	10^{18}	atto	a	10^{-18}
hekto	h	10^{2}	deci	d	10^{-1}
deka	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* = │A│. Směr vektoru je dán přímkou ve které vektor leží. A konečně orientaci vektoru nám určuje počáteční (O) a koncový bod vektoru.



PEDAGOGICKÁ FAKULTA
Masarykova univerzita

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)

⟹ **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.

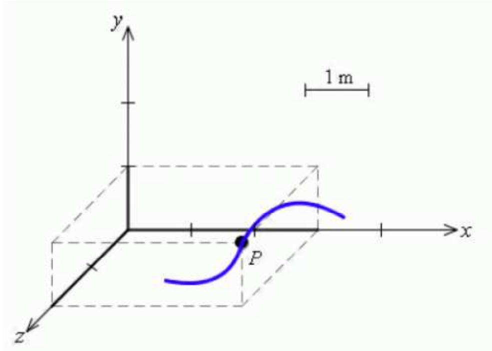
Analogicky: **Pohyb těles je také vždy relativní**.

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.**

PEDAGOGICKÁ FAKULTA
Masarykova univerzita

Polohový vektor, trajektorie, dráha

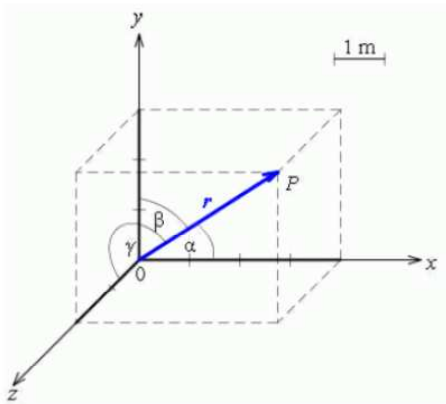
Popisujeme-li mechanický pohyb hmotného bodu vzhledem ke zvolené vztažné soustavě, musíme určit jeho polohu v libovolném čase. Nejjednodušší je určit polohu pomocí pravoúhlé soustavy souřadnic *Oxyz*.



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.

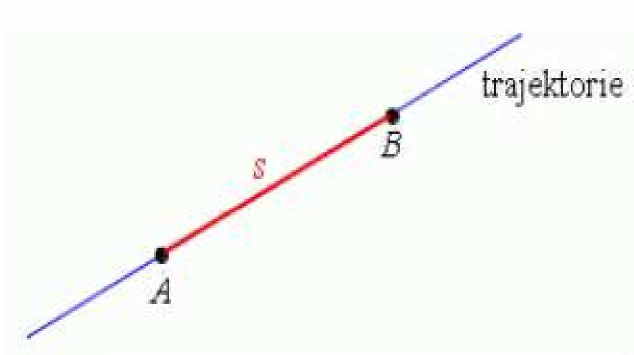


PEDAGOGICKÁ FAKULTA
Masarykova univerzita

Polohový vektor, trajektorie, dráha

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

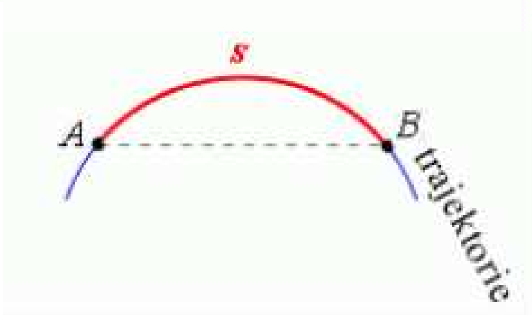
Trajektorie je množina všech poloh, kterými hmotný bod při svém pohybu prochází.



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.

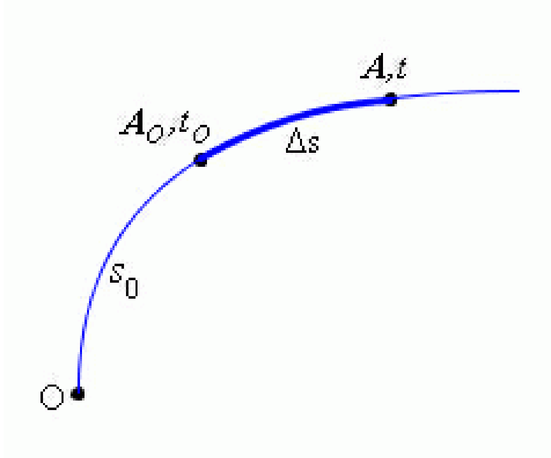
Při pohybu hmotného bodu se zvětšuje dráha, kterou hmotný bod urazil.

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*.

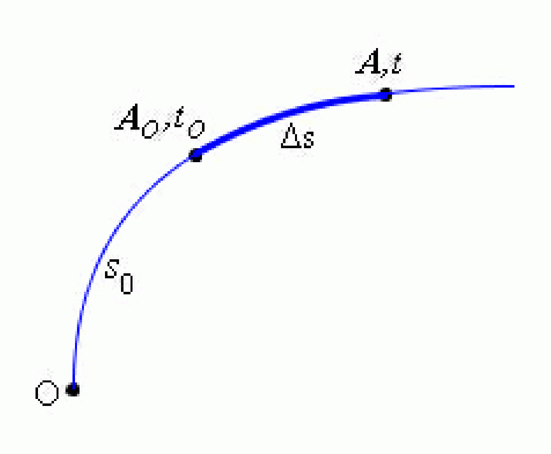
$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s - s_o}{t - t_o}$$

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.

PEDAGOGICKÁ FAKULTA
Masarykova univerzita

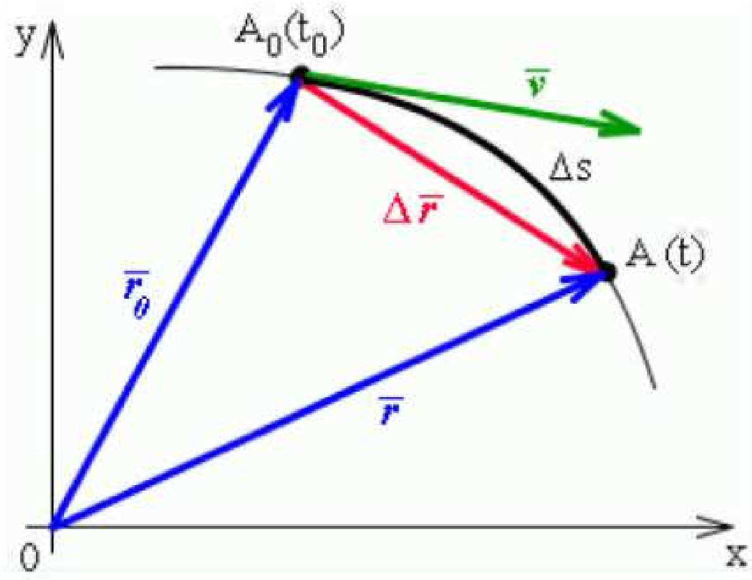
Rychlost hmotného bodu

Změnu polohy hmotného bodu z místa A_o 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 $\Delta t \rightarrow 0$ pak pro *vektor okamžité rychlosti*

Dostaneme následující vztah:

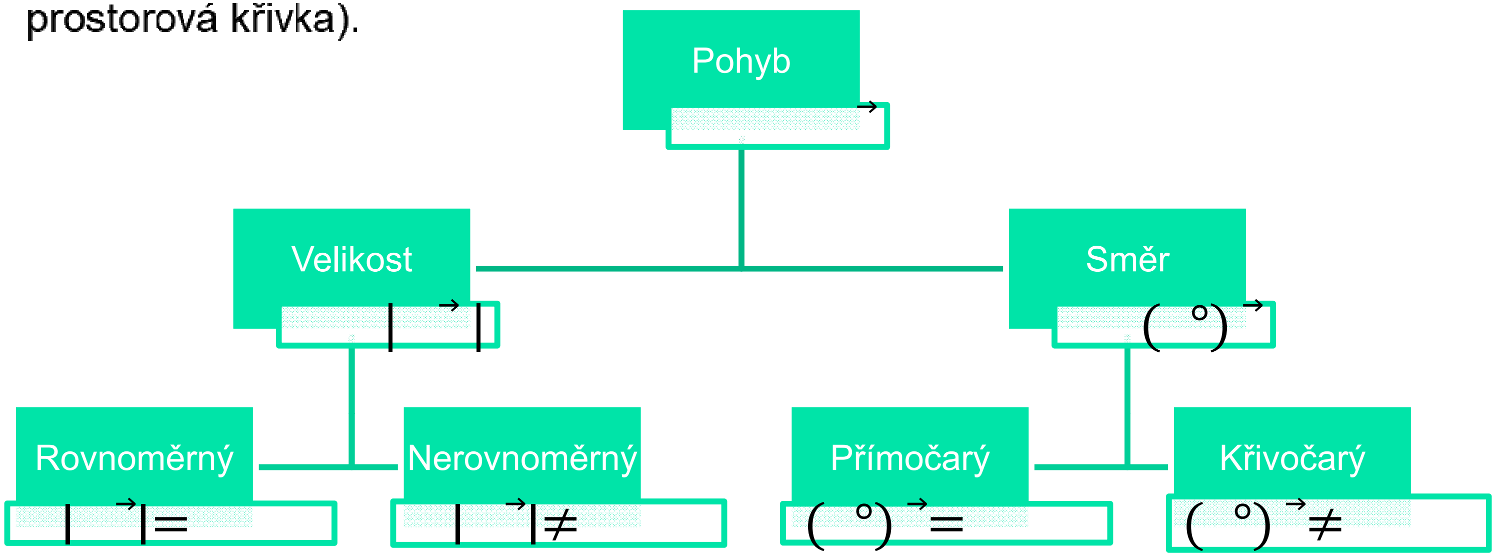
$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}$$

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).



PEDAGOGICKÁ FAKULTA
Masarykova univerzita

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

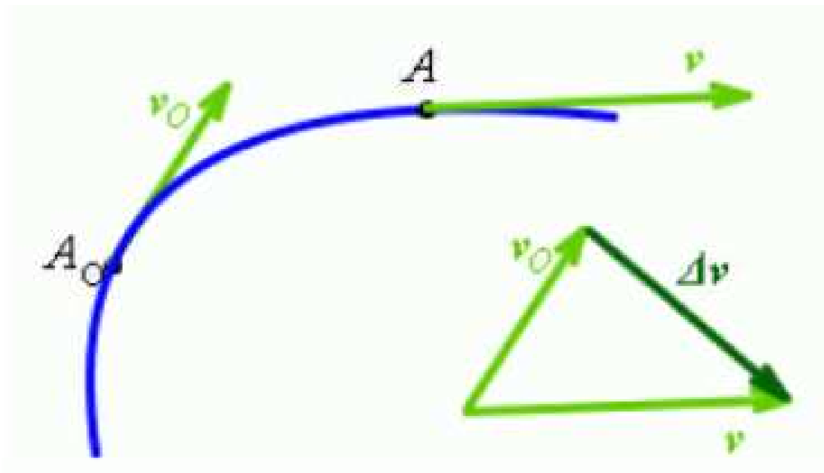
$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_o}{t - t_o}$$

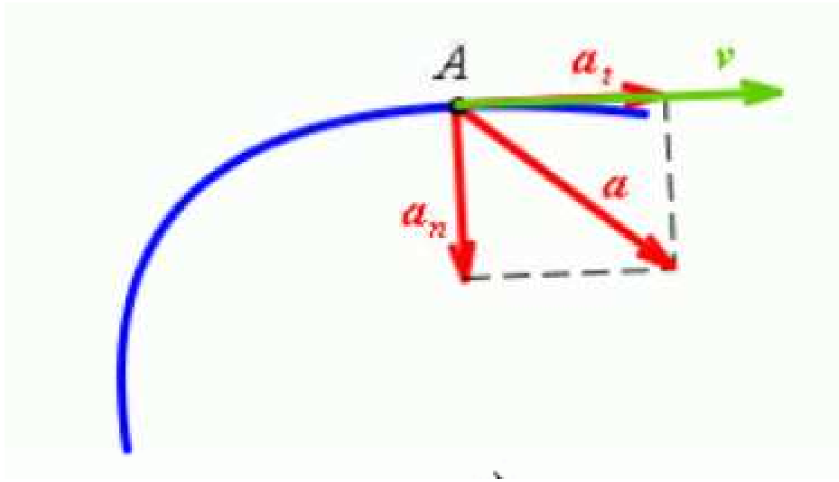
Vektor okamžitého zrychlení hmotného bodu

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

Zrychlení hmotného bodu

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



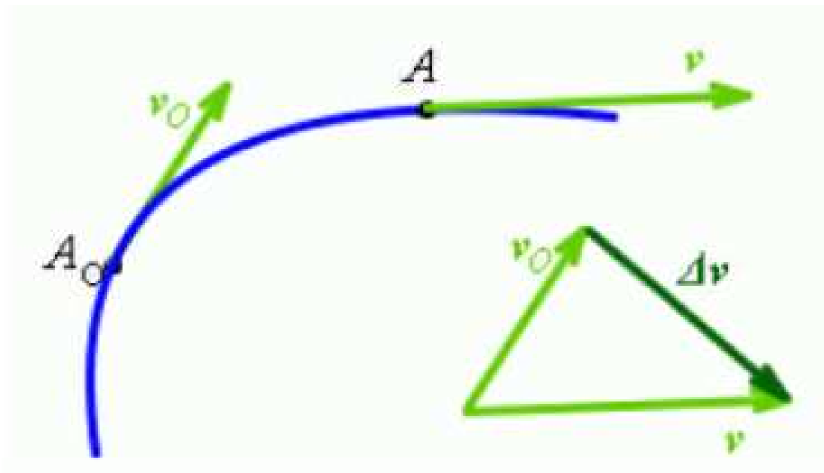


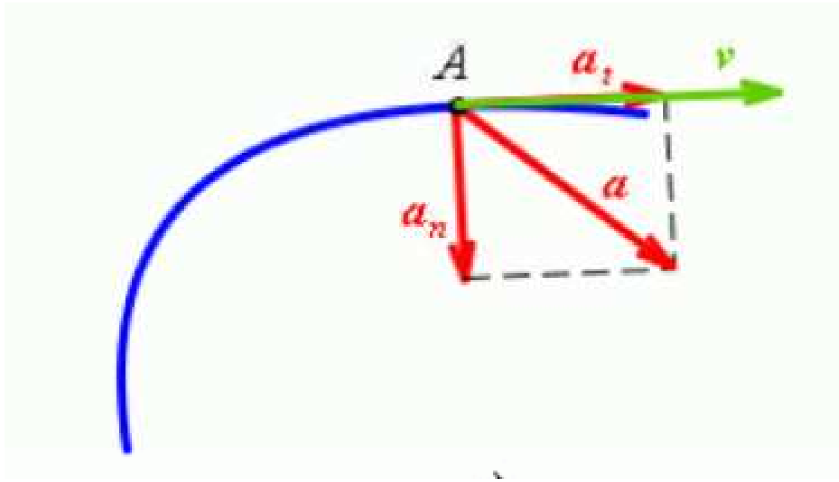
Vektor zrychlení $\vec{a}$ bude mít směr vektoru změny rychlosti $\Delta\vec{v}$.
Protože vektor rychlosti má směr tečny, rozložíme vektor zrychlení

- 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 $a_n = 0$

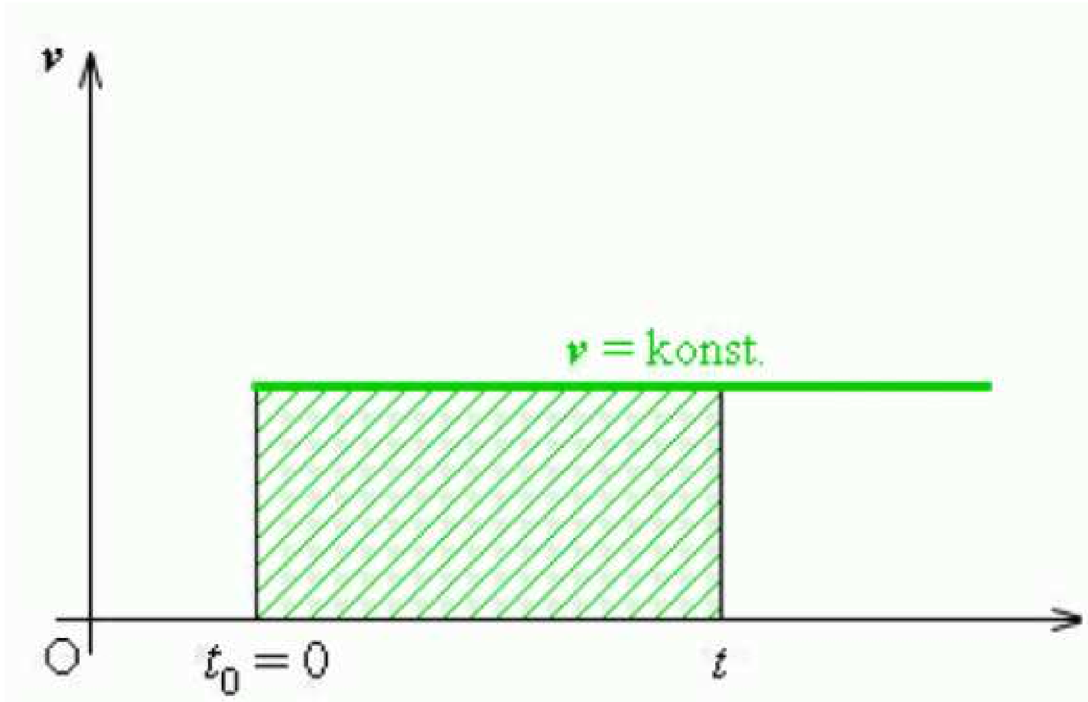
- Rovnoměrný přímočarý pohyb.
  - Tečné zrychlení tohoto pohybu je navíc nulové $a_t = 0$
  - Celkové zrychlení $\vec{a} = 0$, tj. vektor rychlosti je konstantní $\vec{v}$= konst. (velikost i směr)
  - Pro dráhu *s* pak platí

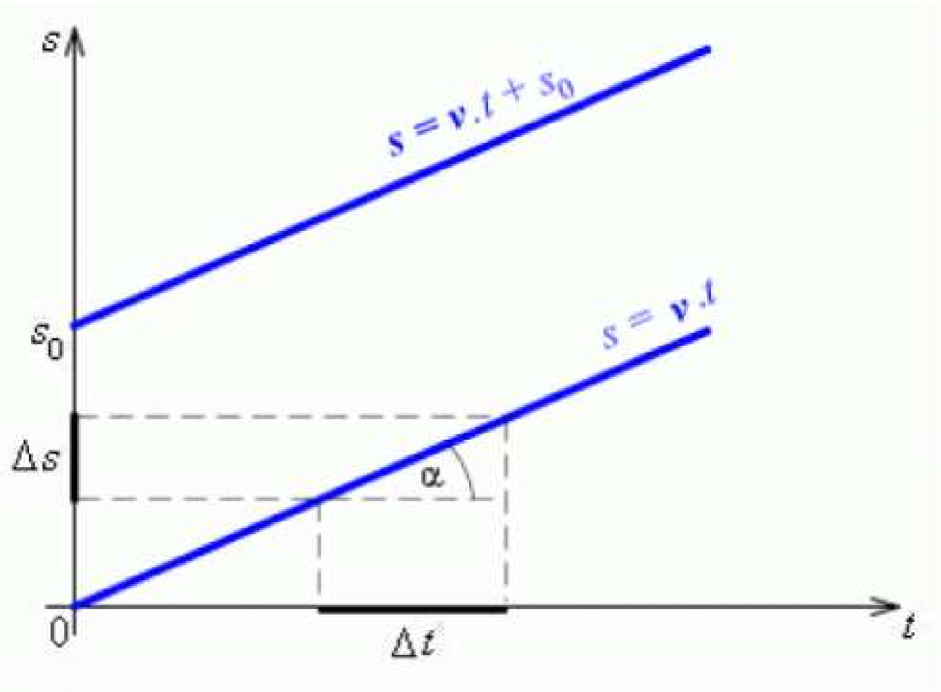
$$s = \int v\,dt = vt + C = vt + s_0$$

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



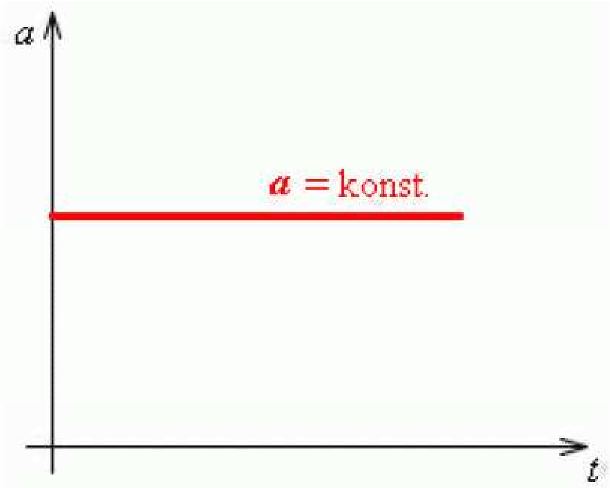


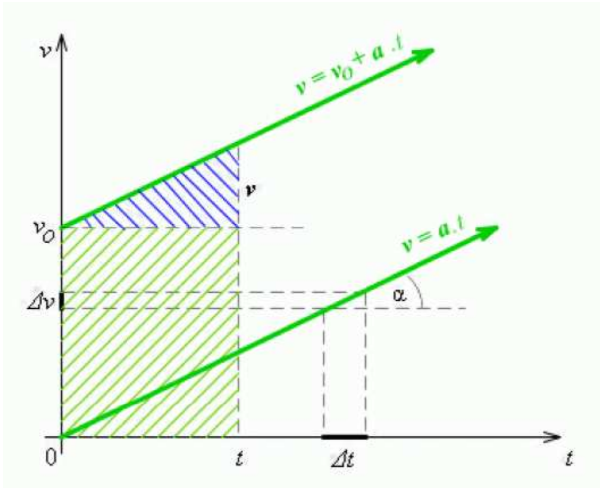
PEDAGOGICKÁ FAKULTA
Masarykova univerzita

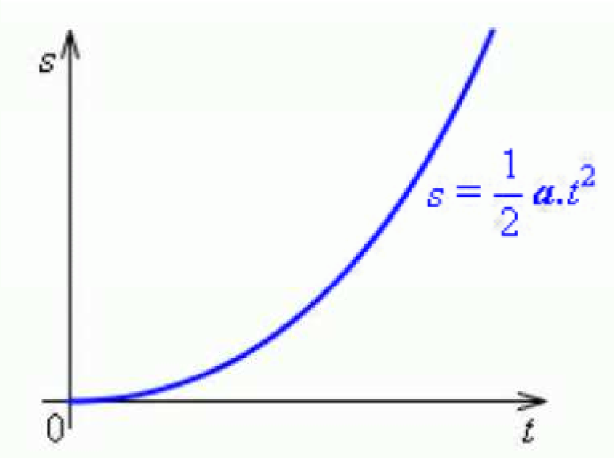
Přímočarý pohyb hmotného bodu

Grafické znázornění – Rovnoměrně zrychlený (zpomalený) přímočarý pohyb

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







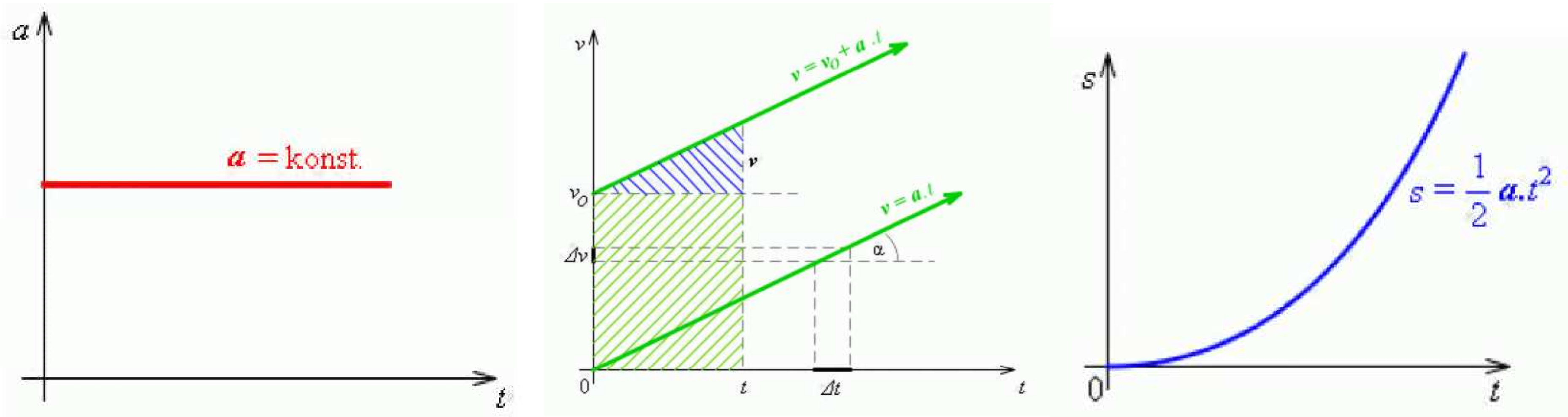
$$v = \int a\, dt + C_1 = at + v_o.$$

$$s = \int v dt + C_1 = ½\, at^2 + v_o\, t + s_o$$

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.

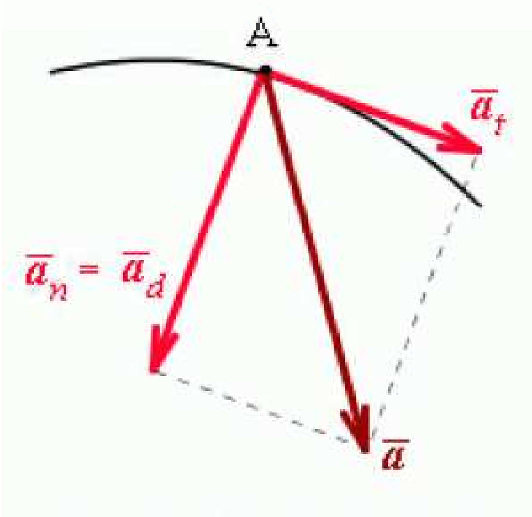


$$v = \int a\, dt + C_1 = at + v_o.\qquad s = \int v dt + C_1 = \tfrac{1}{2} at^2 + v_o\, t + s_o$$

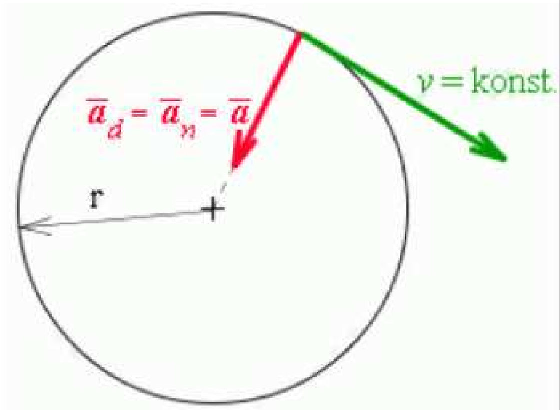
Volný pád je přímočarý rovnoměrně zrychlený pohyb se zrychlením daným tíhovým zrychlením, $a = g$, počáteční rychlost pohybu je nulová, $v_o = 0$.

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

Pohyb hmotného bodu po kružnici



obecný křivočarý pohyb



rovnoměrný kruhový pohyb

Nejjednodušší křivočarý pohyb– trajektorií je kružnice

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

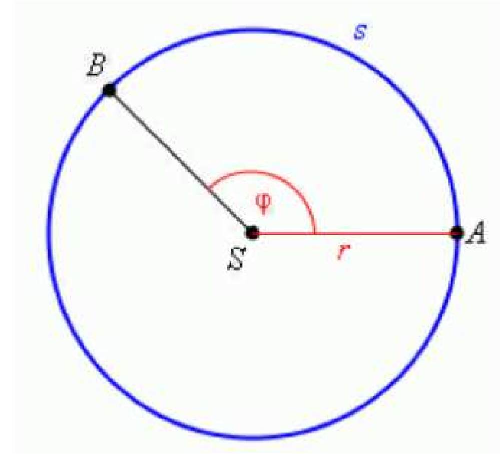
V případě rovnoměrného pohybu po kružnici
je tečné zrychlení nulové $a_t = 0$.
Velikost rychlosti je konstatní $v = konst.$

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.

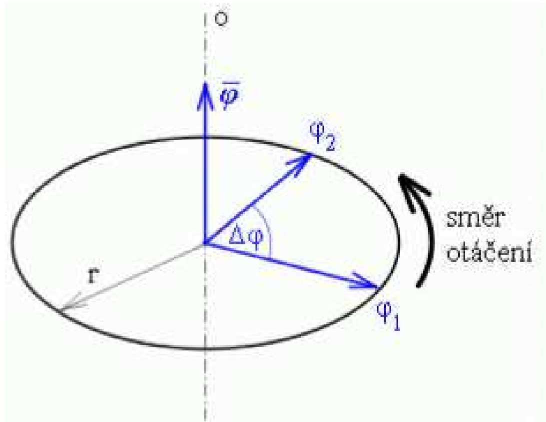
Pohyb hmotného bodu po kružnici



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.

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

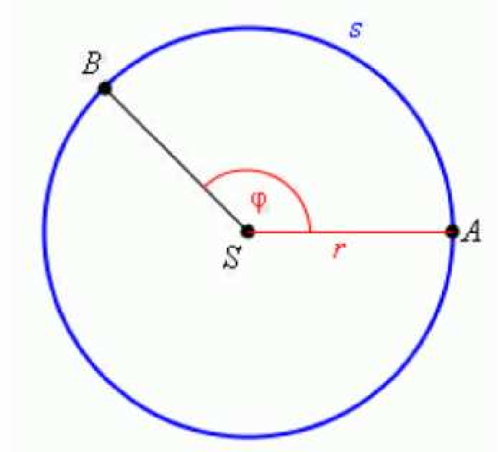


Mezi přírůstkem úhlové dráhy $d\varphi$ a příslušnou změnou dráhy ds platí vztah:

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

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

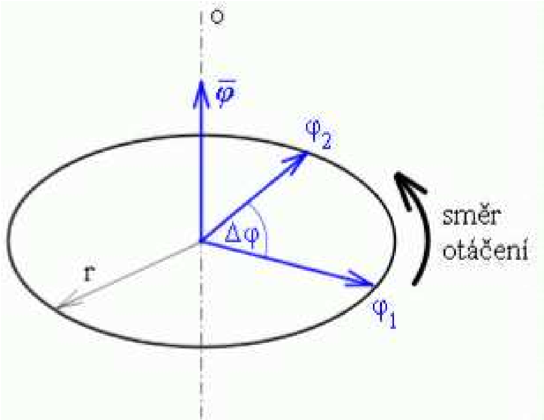
Pohyb hmotného bodu po kružnici



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 .

$$\vec{\omega} = \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{\vec{\varphi} - \vec{\varphi_0}}{t - t_0} \quad \text{resp.} \quad \vec{\omega} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$$



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

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

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

$$\vec{\varepsilon} = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{\vec{\omega} - \vec{\omega_0}}{t - t_0} \quad \text{resp.} \quad \vec{\varepsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

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

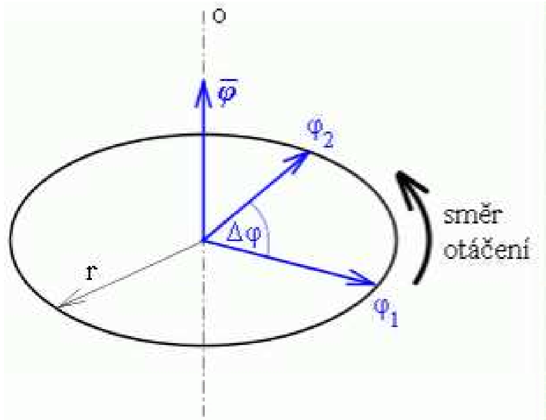
$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{\omega} \times \vec{r}) = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt}$$

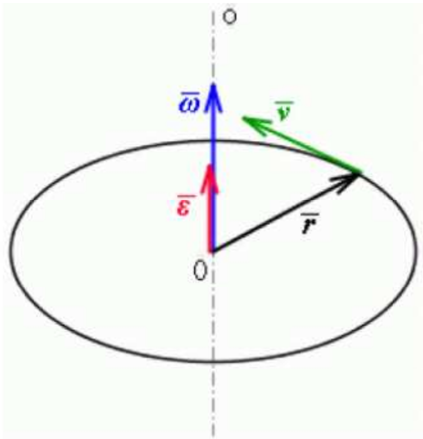
Po dosazení pak

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

Při srovnání směrů pak zřejmě

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



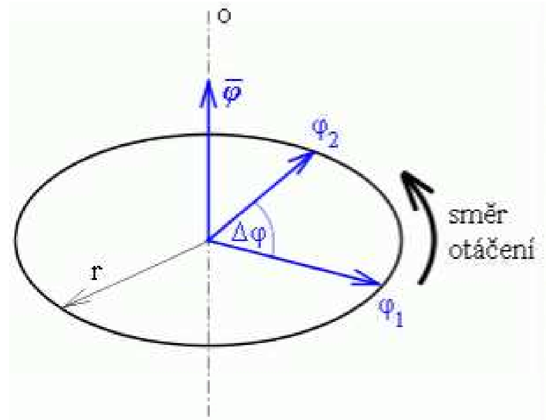


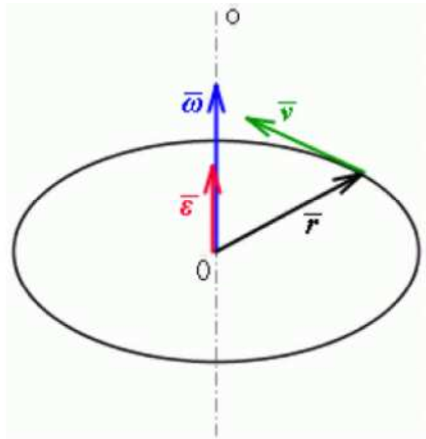
Pohyb hmotného bodu po kružnici

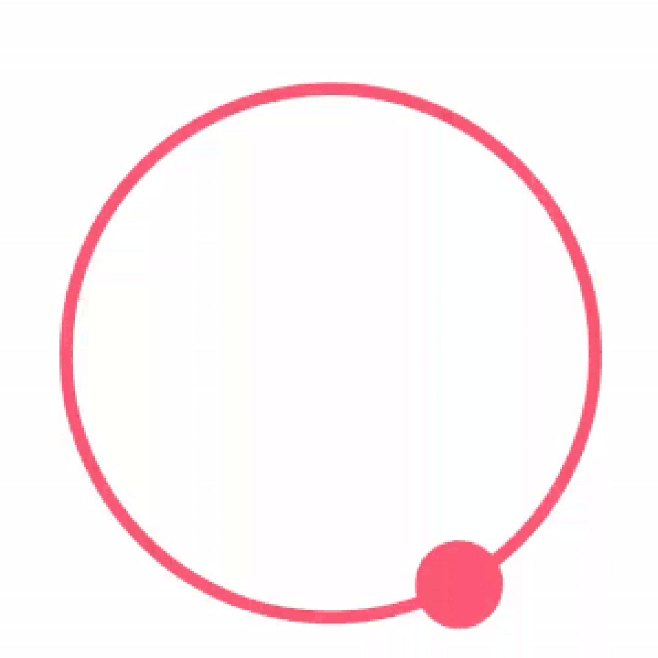
Úhlová dráha, úhlová rychlost a úhlové zrychlení.

Pro jejich velikosti pak

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







PEDAGOGICKÁ FAKULTA
Masarykova univerzita

Pohyb hmotného bodu po kružnici

Rovnoměrný pohyb po kružnici ($\varepsilon=0$)

$$\omega = \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$$ 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

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