

3. СИЛА И ЕНЕРГИЈА

3.1. РЕКАПИТУЛАЦИЈА И ПРОДУБЉАВАЊЕ ПОЈМОВА ДИНАМИКЕ СТЕЧЕНИХ У ОСНОВНОЈ ШКОЛИ

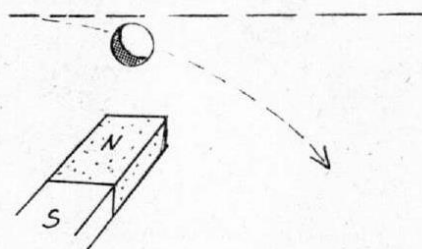
Механика проучава и описује кретања тела. Дели се на *кинематику* и *динамику*. Док кинематика описује кретање не улазећи у то како оно настаје, динамика изучава узроке промене кретања. Динамика разматра узајамно деловање (интеракцију) два или више тела и дефинише силу као меру узајамног деловања тела. Она повезује силу и убрзање, говори о томе како се тело креће када не интерагује са другим телима, тврди да је деловање два тела узајамни процес. Основни појмови динамике су: маса, сила и енергија.

Основни задатак динамике састоји се у следећем: познајући силе које делују на тело, као и положај и брзину тела у једном тренутку времена, предвидети како ће се тело кретати у будућности, или описати како се кретало у прошлости.

3.2. ОСНОВНИ ЗАКОНИ ДИНАМИКЕ

У кинематици смо научили како се приказује кретање тела у односу на различите референтне системе. Започињање или промена било каквог кретања изазвана је утицајем околних тела. Да би фудбалска лопта полетела према голу потребно је да је снажно и кратко трајно удари фудбалер. Да би гвоздени кликер који се котрља по столу скренуо са праволинијске путање довољно је да му приближимо намагнетисану шипку (сл. 3-1). У ова два опита утицај спољашњег тела (нога фудбалера, магнет) мења кретање посматраног тела (лопта, кликер). Спољашње тело изазива промену интензитета и прав-

на брзине кретања — дакле, убрзава тело. Многобројни експерименти указују да је узрок убрзања у другим телима која с њим интерагују. Кажемо да тела интерагују (или међусобно делују), јер ако се неко тело 1 креће убрзано зато што на њега делује тело 2, онда се и тело 2 креће убрзано. Убрзање тела 2 може да буде и мање и веће од убрзања тела 1, али смер његовог убрзања је увек супротан смеру убрзања тела 1. У ком односу стоје апсолутне вредности убрзања тела 1 и 2 зависи од њихових инерцијалних особина, или краће речено од односа њихових маса.



Сл. 3-1

Најзад, из кинематике је познато да једно те исто кретање, посматрано из различитих система референције изгледа сасвим различито. Стога је важно да знамо да ли се једно тело креће убрзано зато што на њега делује друго тело, или зато што га посматрамо из система референције који се креће убрзано.

Проблемима узрока убрзаног кретања бави се динамика. Она се заснива на три основна закона — три Њутнова закона. То су први закон или закон инерције, други закон или закон силе, и трећи закон или закон акције и реакције. Са сваким од њих упознаћемо се детаљније.

МАСА, ИМПУЛС, СИЛА

Свако од нас поседује неку представу о маси. Стављајући два тела у две руке скоро непогрешиво процењујемо које од њих има већу масу. Међутим, овај „осећај за масу“ који стичемо свакодневним искуством, не помаже нам много да дефинишемо масу као физичку величину. Зато посматрајмо једноставан опит — судар два кликера једнаких полупречника, једног начињеног од гвожђа, а другог од стакла (сл. 3-2). Колику ће брзину $\vec{v}_1$ пре судара да саопшти играч кликеру од гвожђа (1) зависи од много чега. Непосредно после судара кликери 1 и 2 имају неке нове брзине $\vec{v}_1'$ и $\vec{v}_2'$: Пошто су се у

ПРЕ СУДАРА

1 2

3.4. ЕНЕРГИЈА И РАД

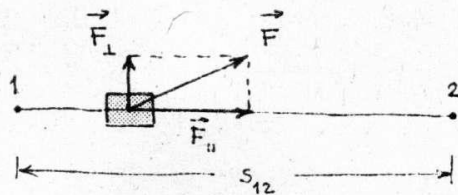
Значај појма енергије проистиче из чињенице да ова величина на веома сажет начин говори о способности физичког система да у околном свету врши одређене промене. Сваком физичком систему својствен је одређени облик енергије. У физичким процесима енергија прелази са једног система на други и из једног облика у други али се при том њена вредност не мења — енергија се одржава. Ово је тачно не само за све физичке процесе већ и за све процесе уопште, те значај овог појма далеко превазилази оквире саме физике. Ми ћемо се на овом месту упознати са оним облицима енергије који су карактеристични за механичке системе. Појам рада је са овим облицима енергије и повезан.

РАД И ЕНЕРГИЈА У МЕХАНИЦИ

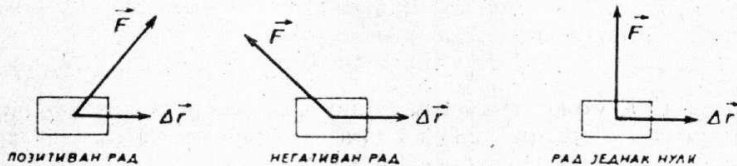
Рад је мера предаје енергије једног тела другоме. Претпоставља се да два тела узајамно делују силама. Сила врши рад када се тело на које она делује креће. Рад A_{12} који стална сила F изврши премештајући тело по праволинијском путу s_{12} једнак је:

$$A_{12} = F_{11} \cdot s_{12} \quad (3.28)$$

У овом изразу смо са F_{11} означили пројекцију вектора силе на правац путање тела (сл. 3-15). Када је угао између вектора силе и помераја оштар, извршени рад је позитиван; када је угао прав, рад је једнак нули; а када је угао туп, рад је негативан (сл. 3-15). Сила која врши позитиван рад често се назива „погонском“ а сила која врши негативан рад зове се „силом отпора“.



Сл. 3-15



Ако се интензитет силе мења у току кретања или мења правац у односу на трајекторију онда се вредност рада од тачке до тачке мења па се укупан рад за коначно померање мора наћи као збир такозваних *елементарних радова*, ΔA :

$$\Delta A = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r} = F_{11} \cdot \Delta r \quad (3.29)$$

који су једнаки скаларном производу из вектора силе и вектора помераја у одговарајућој тачки трајекторије.

Јединица за рад у SI систему јединица је џул (J). Рад од 1 J врши стална сила од 1 N, на путу од 1 m када се правац силе и пута поклапају.

Шта је последица вршења рада? У највећем ороју реалних ситуација бар један део рада извршеног на померању тела привидно је изгубљен заувек. Ако силом од 1 N прегурамо књигу по столу за 1 m тада је рад од 1 J утрошен на „савлађивање трења“ и дефинитивно је изгубљен. Наиме, ако желимо да књигу вратимо назад тада морамо поново уложити нови цул рада.

Ако, међутим, тело тежине $mg=1\text{ N}$ дејством исте толике силе усмерене вертикално навише подигнемо за $h=1\text{ m}$ тада уложени цул рада можемо повратити; пуштајући тело оно ће се под дејством силе сопствене тежине вратити назад и тежина тела ће при том опет извршити рад од $mg \cdot h=1\text{ J}$. Подигнуто тело чини резервоар рада који се може ослободити по жељи. У случају тела подигнутог на висину h у односу на неки (произвољни) референтни ниво у пољу земљине теже кажемо да тело поседује *потенцијалну енергију*, E_p , једнаку:

$$E_p = mgh. \quad (3.30)$$

За рад који сила тежине тела изврши при паду тела са висине h сада кажемо да се врши на рачун потенцијалне енергије коју је тело поседовало. Видимо да је извршени рад једнак промени потенцијалне енергије тела. Строго говорећи поседовање потенцијалне енергије није својство самог тела већ система кога чине тело и Земља који су заједно одговорни за постојање силе коју називамо „тежином“. Кажемо да тела поседују потенцијалну енергију захваљујући одређеном положају у односу на систем коме припадају. При том је такође важно да приметимо да ће тело на истој висини увек имати исту потенцијалну енергију, *без обзира како је на ту висину доспело*.

Претпоставимо сада да на тело које се праволинијски креће делује стална сила $\vec{F}$ која се поклапа са правцем пута. Нека је ова сила почела да делује на тело у тачки 1 када је брзина тела била v_1 (сл. 3.14). Под дејством сталне силе F тело масе m добија стално убрзање $a=F/m$ па је његова брзина на крају пута s_{12} (у тачки 2) једнака:

$$v_2 \sqrt{v_1^2 + 2as_{12}}$$

Истовремено је рад силе F на путу s_{12} једнак:

$$A_{12} = Fs_{12} = mas_{12} = m \left(\frac{1}{2} v_2^2 - \frac{1}{2} v_1^2 \right) = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

Видимо да рад силе F може да се представи као разлика две величине које зависе само од брзина тела на крају и почетку пута. Ова величина назива се *кинетичком енергијом* тела, E_k , и једнака је:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2. \quad (3.31)$$

Кинетичка енергија (енергија кретања) тела је, дакле, облик енергије коју тело поседује само зато што поседује одређену брзину. Сада можемо да кажемо да се у овом случају рад сталне силе на путу s_{12} утрошио на повећање кинетичке енергије тела:

$$A_{12} = F \cdot s_{12} = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k.$$

Из тога следи да када на тело не делују никакве спољашње силе његова кинетичка енергија, па тако и брзина, остаје стална током кретања ($E_k = \text{const}$).

Кинетичку енергију је лако изразити и преко импулса тела:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{m^2v^2}{2m} = \frac{p^2}{2m} \quad (3.32)$$

Кинетичка енергија је увек позитивна величина. Јединица за кинетичку енергију, као и за потенцијалну, идентична је јединици за рад (J).

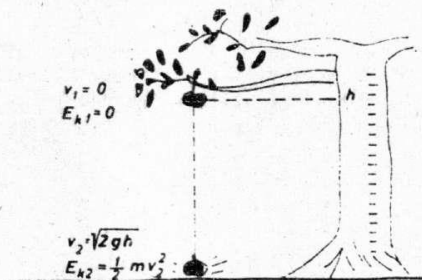
Кинетичку енергију за тело које ротира око фиксне осе можемо одмах да напишемо користећи аналогије које смо усвојили:

$$E_k (\text{ротације}) = \frac{1}{2} I\omega. \quad (3.33)$$

УКУПНА ЕНЕРГИЈА У МЕХАНИЦИ

Посматрајмо случај слободног пада мало детаљније. Нека тело масе m почиње да пада са висине h почетном брзином $v_1=0$, тј. нека у том положају има кинетичку енергију $E_{k1}=0$ и потенцијалну енергију $E_{p1}=mgh$ (сл. 3.16). Преваливши пут $s_{12}=h$, при чему сила теже изврши рад $A_{12}=mgs_{12}=mgh$, тело ће у положају 2 имати потенцијалну енергију $E_{p2}=0$ и кинетичку:

$$E_{k2} = \frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2}m(\sqrt{2gh})^2 = mgh$$



Сл. 3-16

Одавде можемо извести неколико закључака. Као прво, видимо да је у овом процесу извршена промена потенцијалне енергије за износ:

$$\Delta E_p = E_{p2} - E_{p1} = -mgh$$

и промена кинетичке енергије за:

$$\Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} = mgh,$$

те да је рад који је извршила сила гравитације, $A_{12}=mgh$, једнак позитивној промени кинетичке енергије тела (њеном порасту) у негативној промени потенцијалне енергије тела (њеном смањењу). Извршени рад увек је једнак промени неког од видова енергије тела.

Одавде такође видимо да је током целог кретања укупна промена енергије, кинетичке и потенцијалне, једнака нули; тј.:

$$\Delta E_p + \Delta E_k = 0$$

што истовремено значи да се збир кинетичке и потенцијалне енер-

ије, који се назива укупном механичком енергијом, E , током целог кретања не мења, тј.

$$E = E_k + E_p = \text{const}$$

Ово нам говори да сваком порасту кинетичке енергије тела одговара смањење потенцијалне енергије тела за исти износ, и обротно, тј.:

$$\Delta E_p = -\Delta E_k \quad (3.35)$$

Састав 3.34 је израз закона о одржању укупне механичке енергије, једног од најважнијих закона механике (детаљније у одељку 5.4). Укупна механичка енергија може се дефинисати само у случајевима када је могуће дефинисати потенцијалну енергију. Ова се, пак, може егзактно дефинисати само за системе који узајамно делују гравитационим или електричним силама. Како је број оваквих система у природи огроман то горње ограничење и није нарочито јако.

Силе чији рад при померању тела не зависи од облика путање, већ само од почетног и крајњег положаја тела, зовемо *конзервативним силама* (силе потенцијалних, безвртложних поља, видети одељак 4.3.). За овакве силе може се дефинисати потенцијална енергија. Конзервативне силе зависе само од растојања између тела која узајамно делују, а не од импулса или сопствених момената импулса тела, нити од времена.

УНУТРАШЊА ЕНЕРГИЈА

Кад на тело које се креће под дејством конзервативних сила почну да делују и, такозване, *неконзервативне силе* (рецимо силе трења) укупна механичка енергија дефинисана изразом (3.34) није више константна; један њен део, ΔE , као да нестаје. Експериментално је, међутим, утврђено да се овај део енергије не губи. Он само прелази у нови вид енергије који није садржан у горњим дефиницијама — у разне облике унутрашње енергије тела $E_{\text{и}}$. Дакле,

$$-\Delta E = \Delta E_{\text{и}}$$

Овако трансформисана количина енергије једнака је раду неконзервативних сила.

Микроскопски посматрано, унутрашња енергија тела представља укупну енергију, кинетичку и потенцијалну, коју поседују атоми, молекули, електрони, атомска језгра, унутар тела.

На овај начин збир укупне механичке и унутрашње енергије (пошто је и унутрашња енергија микроскопски посматрано механичка, односно кинетичка и потенцијална) се одржава.

У узајамном трансформисању једног облика енергије у други, механичка енергија може цела да се трансформише у унутрашњу; обрнуто, међутим, не важи. У механичким системима се, штавише, мањи или већи део механичке енергије, неизбежно, трансформише у унутрашњу. (Сила трења је, на пример, увек присутна, и то се сматра непожељним губитком енергије. Овакви системи називају се *дисипативним*).

СНАГА

Снагом, N , назива се величина којом се изражава брзина вршења рада, односно брзина трансформације једног облика енергије у други:

$$N = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\Delta A}{\Delta t} = F_{\parallel} \frac{\Delta s}{\Delta t} = F_{\parallel} v \quad (3.36)$$

У SI систему јединица за снагу је ват (W). Снагу од $1 W$ има уређај који у времену од $1 s$ изврши рад од $1 J$ или из једног облика енергије у други претвори енергију од $1 J$ ($1 W = 1 J/s$).

Могућности уређаја могу се међусобно поредити само преко њихових снага.

РЕЛАТИВИСТИЧКА ВЕЗА ЕНЕРГИЈЕ И МАСЕ

У релативистичкој механици укупна енергија тела једнака је збиру кинетичке енергије E_k и енергије мировања тела, E_o :

$$E = E_k + E_o$$

Енергија мировања једнака је:

$$E_o = m_o c^2 \quad (3.37a)$$

где је са m_o означена маса мировања тела, док је укупна енергија једнака:

$$E = mc^2 \quad (3.37b)$$

Са m је овде означена маса тела које се креће брзином v и која је са масом мировања тела m_o повезана изразом (3.19). Два горња израза представљају најопштију везу измеђи масе и енергије тела. У релативистичкој механици је, дакле, кинетичка енергија тела једнака:

$$E_k = E - E_o = mc^2 - m_o c^2 = \left[\frac{m_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_o \right] c^2 \quad (3.38)$$

Овај израз се битно разликује од класичног израза за кинетичку енергију тела (3.31):

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \approx \frac{1}{2} m_o v^2$$

И по класичном и по релативистичком схватању је, дакле, кинетичку енергију тела могуће бесконачно повећавати (вршењем рада над њим) само што се у ова два разматрања брзина тела не повећава на исти начин. По класичном схватању и брзина тела тада бесконачно расте, док по релативистичком брзина јесте да постаје све већа, али никада не може у потпуности достићи брзину светлости c . Разлика између два горња израза почиње приметно да се испољава тек када кинетичка енергија постане реда величине $m_o c^2$. За сва макроскопска тела $m_o c^2$ представља огромну енергију коју им је на данашњем ступњу техничких могућности немогуће саопштити (за тело масе $m_o = 1 g$ ово износи $10^{13} J$!). У случају елементарних честица, међутим, величина $m_o c^2$ износи око $10^{-11} J$ што је енергија која им се ре-

лативно лако може саопштити. Управо ту је експериментално утврђено да даљим додавањем енергије честицама преко ове вредности њихова брзина престаје да се повећава по закону (3.31) већ почиње да расте веома споро, у складу са изразом (3.38), те да је достићи брзину светлости немогуће. Да је честици тада подједнако лако додати нову енергију види се по учинку честице на мети у коју ова удара; свака новододатна количина енергије јасно се манифестује по одговарајуће већем деловању честица на мети, упркос томе што им се брзина при том, можда, безначајно повећала.

3.5. КЛАСИЧНА МЕХАНИКА И ОГРАНИЧЕНОСТ ЊЕНЕ ПРИМЕНЕ

Механика као најстарија грана физике проучава најједноставнији облик кретања материје — обично међусобно премештање тела (или њихових делова).

Очигледност овог облика кретања условила је да се механика развије знатно пре свих осталих области физике, па и осталих природних наука уопште. Основне законе механике установили су Галилео Галилеј (1564—1642) и Исак Њутн (1643—1727).

Општи задатак класичне, или њутновске механике састоји се у одређивању кретања тела из познатог узајамног деловања. Другим речима, ако су задате силе (закон њиховог деловања), налази се положај тела (или материјалне тачке), у сваком тренутку времена.

Да би се решио задатак о кретању материјалне тачке, потребно је познавати кинематичке величине за неки временски тренутак t . Обично се овај тренутак узима за почетак рачунања времена и обележава се са $t=0$. Кинематичке величине у том тренутку се називају *почетни услови кретања*. Познавање сила и почетних услова кретања омогућава решавање задатка о кретању материјалне тачке (тела).

Ако су познате силе и почетни услови кретања, кретање је одређено за све тренутке времена који ће наступити, као и за оне који су већ прошли. То значи да познавање сила и почетних услова у потпуности одређује прошлост и будућност кретања тела.

Једнаке силе и једнаки почетни услови увек ће за последицу имати једнаке облике кретања тела. Другачије речено, могуће је увек поновити једно одређено кретање тела, само ако се поново остваре исти почетни услови и исти начин узајамног деловања тела.

Са становишта Њутнове механике у свим системима тело има исту, непроменљиву дужину, а време је апсолутно и једнако протиче у сваком инерцијалном систему референције.

Закони класичне механике подразумевају, исто тако, и *непроменљивост масе тела*, без обзира на систем из којег се тело посматра. Маса тела је у класичној механици стална физичка величина.

Закони класичне механике су резултат уопштавања вековних искустава људи у посматрању и изучавању природних појава. Сва та искуства односила су се на тела *макросвета* непосредно доступна нашим чулима, а брзине кретања тих тела су много мање од брзине светлости. Зато класичну механику, данас, називају и *механиком великих тела и малих брзина*.