

Dynamiikan perusteet

Perushahmotus

Mekaniikan oliot, ilmiöt ja niiden ominaisuudet

Mekaniikan perushahmot ovat kappale, liike ja vuorovaikutus. Kappaleet ovat *olioita*, liike ja vuorovaikutus ovat *ilmiöitä*.

Kappaleet

Kappaleena pidetään yleensä aineellista, ympäristöstään erottuvaa ja ajallisesti pysyvää oliota. Aluksi on selkeintä tarkastella kiinteitä ja muotonsa säilyttäviä (jäykkiä) kappaleita.

Kappaleilla on useita ominaisuuksia. Dynamiikan kannalta tärkein kappaleen ominaisuus on **hitaus**. Sitä voidaan tarkastella vasta liikkeen muutoksen yhteydessä.

On olemassa myös olioita, jotka erottuvat ympäristöstään ja ovat ainakin jossain määrin ajallisesti pysyviä, mutta eivät ole aineellisia; esimerkkinä vaikkapa valkokankaalle projisoitu kuva. Tällaiset oliot eivät ole kappaleita eikä niillä ei ole hitautta, mutta niillä voi olla kappaleiden kanssa samoja ominaisuuksia, kuten fyysiset mitat. Useat ei-kappaleoliot voidaan yhtä hyvin tulkita ilmiöiksi.

Liike, liikkeen muutos

Liike on ilmiö, joka tapahtuu jollekin oliolle. Liikettä on kahta perustyyppiä, etenevää (paikka muuttuu) ja pyörimisliikettä (suuntautuminen muuttuu). Hyvin usein liikkeessä sekä paikka että suuntautuminen muuttuvat yhtä aikaa, jolloin kyseessä on yhdistetty liike.

Tarkastellaan jatkossa vain etenevää liikettä.

Liikkeen ominaisuudet ovat **nopeus** ja **suunta** (terminologiasta riippuen nopeus voi sisältää myös suunnan).

Liikkeen muutos on myös ilmiö, ja sillä on ominaisuudet **liikkeen muutoksen suuruus** ja **liikkeen muutoksen suunta**.

Vuorovaikutus

Vuorovaikutus on ilmiö, joka vaikuttaa kahden kappaleen välillä. Se havaitaan vaikutustensa kautta. Omaan ruumiiseen kohdistuvan vuorovaikutuksen voi usein (mutta ei aina) tuntea. Vuorovaikutus voi muuttaa kappaleen muotoa. Dynamiikan kannalta tärkein vaikutus on vuorovaikutuksen kyky muuttaa kappaleen liikettä.

On perusteltua aloittaa dynamiikan tarkastelu nimenomaan vuorovaikutuksesta, ei voimasta. Vuorovaikutuksessa on ilmeisempää että ilmiöön liittyy kaksi osapuolta. Jos dynamiikan opiskelu aloitetaan lähtökohtana yksi kappale ja siihen vaikuttavat voimat (toisin sanoen, vuorovaikutukset vain tarkasteltavan kappaleen kannalta), myöhemmin voi olla vaikea hahmottaa kokonaistilannetta, eli mitkä ovat vastavoimat ja mihin kappaleisiin ne vaikuttavat.

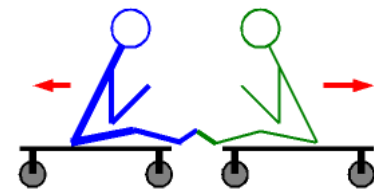
Erilaisia makroskooppisia vuorovaikutuksia:

- tukivuorovaikutus, joka estää kappaleita painumasta toistensa sisään
- kitka, joka jarruttaa pintojen liukumista toisiaan vasten
- väliaineen vastus, joka jarruttaa kappaleen liikettä väliaineen läpi
- sähköinen vuorovaikutus
- magneettinen vuorovaikutus
- gravitaatio

Yllämainituista sähköinen ja magneettinen vuorovaikutus sekä gravitaatio vaikuttavat myös silloin kun kappaleet eivät kosketa toisiaan.

Kun aineen rakenne opitaan tuntemaan paremmin, ymmärretään että "kosketus" on itse asiassa kahden kappaleen pinta-atomien välinen sähköistä vuorovaikutusta. Ja toisaalta sähkömagnetismin syvällisempi tunteminen kertoo että sähköinen ja magneettinen vuorovaikutus ovat saman asian kaksi ilmenemismuotoa. Tämä antaa viitteitä siihen, että kaikki makroskooppiset, hyvinkin erilaisilta näyttävät vuorovaikutukset voidaan palauttaa sähkömagneettisen vuorovaikutuksen ja gravitaation aiheuttamiksi.

Vuorovaikutuksella on aina kaksi osapuolta, ja se vaikuttaa aina niihin molempiin. Tämä täytyy tulla ilmi kun vuorovaikutuksia havainnollistetaan. Esimerkkinä kinestetiikkavaunut: on sama työntääkö toinen matkustaja vai työntävätkö molemmat, aina molemmat lähtevät liikkeelle.



Kinestetiikkavaunut.

Vuorovaikutus muuttaa osapuolten liikkeitä niin, että liikkeiden muutokset ovat vastakkaissuuntaiset. Vuorovaikutuksella on siis kummankin osapuolen kannalta **suunta**. Nämä suunnat ovat vastakkaiset.

Kappaleen liike muuttuu vuorovaikutuksen suuntaan. On tärkeä hahmottaa, mikä on liikkeen muutoksen suunta. Yksiulotteisessa tapauksessa, jos vuorovaikutuksen suunta on liikkeen suuntainen, liikkeen muutoksen suuntakin on liikkeen suuntainen ja liike kiihtyy. jos vuorovaikutuksen suunta on liikkeen suuntaa vastaan, liikkeen muutoksen suunta on liikkeen suuntaa vastaan ja liike hidastuu. Kaksiulotteisessa tapauksessa, mikäli vuorovaikutuksen suunta on liikkeen suunnalle kohtisuora, liikkeeseen tulee uusi vuorovaikutuksen suuntainen komponentti, mutta vuorovaikutukselle kohtisuora liikkeen komponentti säilyy.

Kappaleen liikkeen muutoksen syynä on aina vuorovaikutus. Jos vuorovaikutuksia ei ole, liike ei muutu.

Jos kappale on osapuolena useissa vuorovaikutuksissa, niiden yhteisvaikutus määrää miten kappaleen liike muuttuu. Vuorovaikutukset voivat myös tasapainottaa toisensa, jolloin niiden yhteisvaikutus on nolla ja kappaleen liike ei muutu.

Vuorovaikutuksen voimakkuudet: voima ja impulssi

Koska vuorovaikutuksen seuraukset (tuntemus, muodonmuutos, liikkeen muutos) voivat olla eri suuruisia, myös syyllä eli vuorovaikutuksella täytyy olla **voimakkuus**. Mutta tarkemmin tutkittaessa havaitaan että yksi voimakkuusominaisuus ei riitä.

- Arkipäivän havaintojen perusteella vuorovaikutuksella on voimakkuus, jonka voi tuntea. Jouta venyttämällä huomataan että vuorovaikutuksen voimakkuuden tuntemus ja jousen venymä riippuvat toisistaan. Päättellään että tuntuohavainto ja jousen muodonmuutos riippuvat molemmat samasta ominaisuudesta, jota voidaan kutsua vuorovaikutuksen **voimaksi**.

- Vuorovaikutuksen voima ei kuitenkaan yksin määrää, miten paljon vuorovaikutus muuttaa kappaleen liikettä. Kappale voidaan työntää paikaltaan tiettyyn nopeuteen joko rajusti tönäisten, tai kevyesti ja pitkään painaen. Vastaavasti kappale voidaan vetää jousen välityksellä tiettyyn nopeuteen joko kiivaasti tempaisten jolloin jousi venyy hetkellisesti paljon, tai kevyesti ja pitkään vetäen jolloin jousi venyy paljon vähemmän. Koska liike kuitenkin muuttuu kummassakin tapauksessa yhtä paljon, jollain tavalla määriteltynä vuorovaikutustenkin täytyy olla yhtä suuret, vaikka voimat ovat eri suuret. Toisaalta mitä pitempään kappaletta työnnetään, sitä enemmän sen liike muuttuu. Vuorovaikutuksella on siis myös kestosta riippuva voimakkuus, vuorovaikutuksen määrä, joka riippuu voimasta ja vuorovaikutuksen kestoajasta. Kutsutaan vuorovaikutuksen määrää nimellä **impulssi**. Mikäli vuorovaikutuksella on selkeä alku ja loppu, impulssi on vuorovaikutuksen kokonaisvoimakkuus: koko vuorovaikutustapahtuma vaikuttaa siihen kuinka paljon liike muuttuu. Impulssia voidaan myös tarkastella tietyllä aikavälillä, esimerkiksi silloin kun vuorovaikutuksella ei ole havaittavissa olevaa alkua eikä loppua (gravitaatio). Kyseessä on tällöin aikavälillä kertynyt vuorovaikutuksen määrä.

Vuorovaikutuksen voima määrää kuinka nopeasti kappaleen liike muuttuu; impulssi määrää kuinka paljon liike muuttuu.

Vuorovaikutuksen voima ja impulssi ovat molemmille osapuolille yhtä suuret, myös tilanteissa joissa vuorovaikutuksen osapuolet ovat erilaiset. Tämä intuition vastainen seikka on jossain määrin haastavaa osoittaa kokeellisesti, mutta onnistuu esimerkiksi tutkimalla joustavilla puskureilla varustetujen vaunujen törmäyksiä hidastetusta videokuvasta.

Hitaus

Kappale vastustaa liikkeensä muuttamista: kiihdytystä, hidastamista tai suunnan muuttamista. Tämä kappaleen ominaisuus, **hitaus**, on erilainen eri kappaleilla. Sama vuorovaikutus muuttaa kevyen kappaleen nopeutta enemmän kuin raskaan kappaleen nopeutta.

Hitaus ja kitka sekoitetaan yllättävän usein. Jos esimerkiksi raskasta tuolia yritetään työntää pitkin lattiaa eikä tuoli lähde liikkeelle, tämä johtuu tuolin ja lattian välisestä kitkasta, ei tuolin hitaudesta. Hitaus ei koskaan estä kappaleen liikkeen muutosta, ainoastaan vaikuttaa siihen, kuinka paljon ja kuinka nopeasti liike muuttuu.

Esikvantifiointi ja kvantifiointi, ominaisuuksista suureiksi: Nopeus ja massa

Suureiden ja lakien kvantifiointi: yleistä

Suureen *kvantifioinnilla* tarkoitetaan prosessia, jossa määritellään olion tai ilmiön tiettyä ominaisuutta kuvaava suure kvantifioivan kokeen avulla. Määrittely perustuu *esikvantifioiviin* havaintoihin. Joko:

- a) havaitaan ilmiöön liittyvien jo tunnettujen *kahden* suureen suureen välillä säännöllinen riippuvuus, joka pysyy samanlaisena kun kvantifioitava ominaisuus pysyy vakiona. Mikäli ominaisuus muuttuu, myös riippuvuussuhde muuttuu mutta riippuvuus on edelleen säännöllinen.
- b) Havaitaan että kvantifioitava ominaisuus riippuu jollain säännöllisellä tavalla jostain ilmiöön liittyvästä *yhdestä* tunnetusta suureesta. Esimerkki: suljetussa astiassa olevan kaasun paine kasvaa, kun lämpötila kasvaa.

Nämä kaksi erilaista riippuvuutta johtavat kahteen erilaiseen suureen kvantifointiin.

Tapauksessa a) pidetään kvantifioitava ominaisuus vakiona, varioidaan yhden suureen arvoa ja mitataan toista suuretta. Tutkitaan graafisesti, millainen *invarianssi* eli vakioisuus suureiden välillä vallitsee. Jos suureet ovat a ja b , niin invarianssi on jokin näistä:

- $\frac{b}{a}$ on vakio, eli suureiden suhde on vakio ja suureiden välillä vallitsee verrannollisuus. Riippuvuutta kuvaa tällöin (a,b) -koordinaatistossa origon kautta kulkeva suora.

Kvantifioitavan suureen määrittelylaki on tällöin suoran kulmakertoimen yhtälö, $S = \frac{b}{a}$

Esimerkki: resistanssin määrittelevä Ohmin laki $R = \frac{U}{I}$.

- $\frac{\Delta b}{\Delta a}$ on vakio, eli suureiden muutosten suhde on vakio ja suureiden välillä vallitsee lineaarinen riippuvuus. Riippuvuutta kuvaa (a,b) -koordinaatistossa suora, joka ei kulje origon kautta. Kvantifioitavan suureen määrittelylaki on $S = \frac{\Delta b}{\Delta a}$.

Esimerkki: tasaisen liikkeen nopeuden laki $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

- $\frac{g(b)}{f(a)}$ on vakio; $f(a)$ ja $g(b)$ ovat lausekkeita joissa a ja b ovat parametreina. Riippuvuutta kuvaa tällöin $(f(a),g(b))$ -koordinaatistossa origon kautta kulkeva suora. Uuden suureen määrittelylaki on $S = \frac{g(b)}{f(a)}$.

Esimerkki: taitekertoimen määrittelevä Snellin laki $n = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}$.

Katso myös: [kuvaajien tulkinnasta](#).

Invarianssi määritellään niin päin, että kun kvantifioitava ominaisuus voimistuu, suhteen arvo kasvaa. *Invarianssia kuvaavasta lausekkeesta tulee kvantifioivan suureen määrittelylaki.*

Tapauksessa b) invarianssia ei voi muodostaa, koska ei ole käytettävissä kahta sen muodostamiseen tarvittavaa suuretta. Tällainen tilanne vallitsee usein aihealueen käsiterakenteen perussuureilla, kuten massa, lämpötila, sähkövirta, varaus... Tällöin pitää ottaa jokin kvantifioitavasta ominaisuudesta riippuva tunnettu suure T , kehittää menetelmä jolla kvantifioitavaan suuretta S voidaan varioida hallitusti vaikka sitä ei pysty mittaamaan, ja osoittaa että tunnettu suure on verrannollinen kvantifioitava suureeseen, $T \sim S$. Tämä verrannollisuus voidaan kääntää, $S \sim T$, joka kertoo että suuretta S voidaan mitata suureen T avulla.

Kvantifioitavan suureen hallittu variointi vaatii intuitioon luottamista. Esimerkiksi:

- Yhdistetään n kappaletta samanlaisia pyöräradan vaunuja, yhdistelmän massa on intuitiivisesti n -kertainen verrattuna yhden vaunun massa.
- Sekoitetaan yhtä suuret määrät eri lämpöisiä vesiä. Sekoituksen lämpötila on alkulämpötilojen keskiarvo.
- Samanlaiset kappaleet, toisella on sähkövaraus ja toinen on neutraali. Kun kappaleet koskettavat toisiaan, varaus jakautuu puoliksi kappaleiden kesken.
- Samanlaisia lampuja, jotka palavat yhtä kirkaasti. Jokaisen lampun läpi kulkee siis yhtä suuri sähkövirta I . Johdetaan vuorotellen 1, 2 jne lampun sähkövirta käämin läpi, jolloin sähkövirta saa arvot $I, 2I$ jne.

Kun verrannollisuus on osoitettu, kvantifioitavan suureen täydellinen määrittelylaki vaatii vielä vähintään yhden standardipisteen, joka määrittää suureiden verrannollisuuskertoimen.

Muut lait. Kaikki fysiikan lait eivät ole suureiden määrittelylakeja. Esimerkiksi kun nosteen laki

$F_n = \rho V g$ tulee tarkasteltavaksi, kaikki laissa esiintyvät suureet tunnetaan jo. Lain kvantifioinnissa osoitetaan, että noste on verrannollinen upotustilavuuteen V ja nesteen tiheyteen ρ .

Nopeuden esikvantifiointi

Tarkastellaan silmämäärisesti tasaisella eli muuttumattomalla nopeudella kulkevaa kappaletta (vakionopeusvaunu, liukuja vaakasuoralla ilmatyynyradalla; jopa tasainen kävely kelpaa).

Havaitaan että kappaleen aikavälillä kulkema matka riippuu aikavälin pituudesta. Etäisyys muuttuu sitä nopeammin, mitä suurempi nopeus kappaleessa on.

Nopeuden kvantifiointi

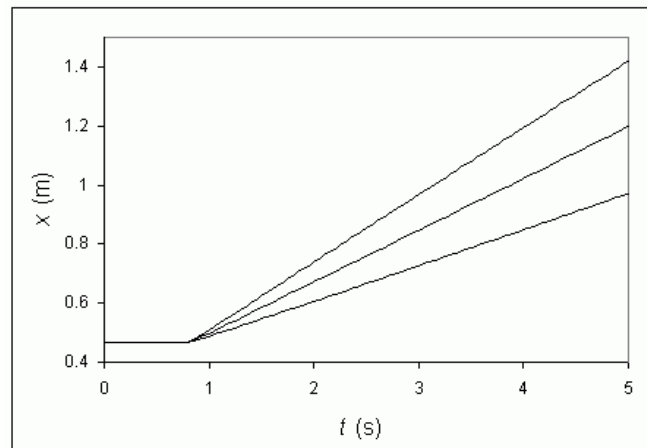
Esikvantifioinnissa on todettu että kuljettu matka riippuu ajasta. Kvantifioivassa kokeessa tutkitaan, millainen riippuvuus on. Mitataan tasaisesti liikkuvan kappaleen paikkaa x ajan t funktiona ja piirretään (t,x) -kuvaaja. Todetaan että pisteet

asettuvat suoralle. Toistetaan varioiden kappaleen nopeutta ja havaitaan suoran olevan sitä jyrkempi, mitä suurempi on silmällä havaittava nopeus. Havaitaan myös että kun liikkeen suunta vaihtuu, suoran kulmakerroin vaihtaa merkkiään. Tältä pohjalta määritellään riippuvuussuoran kulmakerroin uudeksi suureeksi nimeltä tasaisen liikkeen nopeus:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

Mittauksen voi tehdä monella tavalla, esim:

- teippi ja metronomi
- tietokone ja etäisyysanturi
- videokuvauks ja -analyysi



Tietokonemittauksessa on se etu, että kuvaaja piirtyy näkyviin samaan aikaan tapahtuman kasnssa. Tällöin molemmat ovat yhtä aikaa lyhytkestoisessa muistissa ja kytkeytyvät toisiinsa tehokkaammin, kuin jos tapahtumasta kuvaajan hahmottumiseen kuluisi pitempi aika.

Hitaan massan esikvantifiointi

Aikaisemmin on todettu, että vuorovaikutuksen impulssi vaikuttaa siihen kuinka paljon kappaleen nopeus vuorovaikutustapahtumassa muuttuu. Kun kaksi kappaletta vuorovaikuttaa keskenään, impulssi on molemmille yhtä suuri. Koe voidaan tehdä kinestetiikkavaunuilla tai pyörävaunuradalla. Havaitaan että raskaampi vaunu saa pienemmän nopeuden. Kappaleen hitaus vaikuttaa siis liikkeen muutokseen: mitä suurempi hitaus, sitä vähemmän nopeus muuttuu. Kyseessä on siis tyyppiä b) oleva riippuvuus.

Hitaan massan kvantifiointi

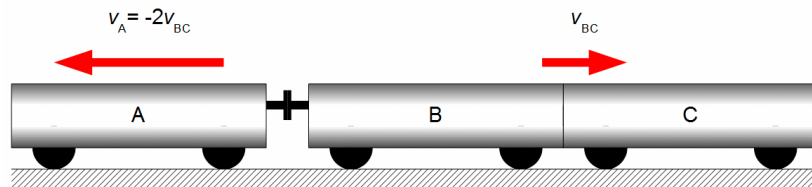
Tavoitteena on kvantifioida kappaleen hitautta kuvaava suure, **hidas massa**.

Kvantifiointikokeessa tutkitaan, miten kappaleen nopeuden muutos riippuu kappaleen hitaudesta. Hitautta voidaan varioida hallitusti kytkemällä yhteen pyörävaunuradan vaunuja. On intuitiivisesti uskottavaa, että jos yhden vaunun hidas massa on m_0 , niin N :n vaunun yhdistelmän hidas massa on $N \cdot m_0$.

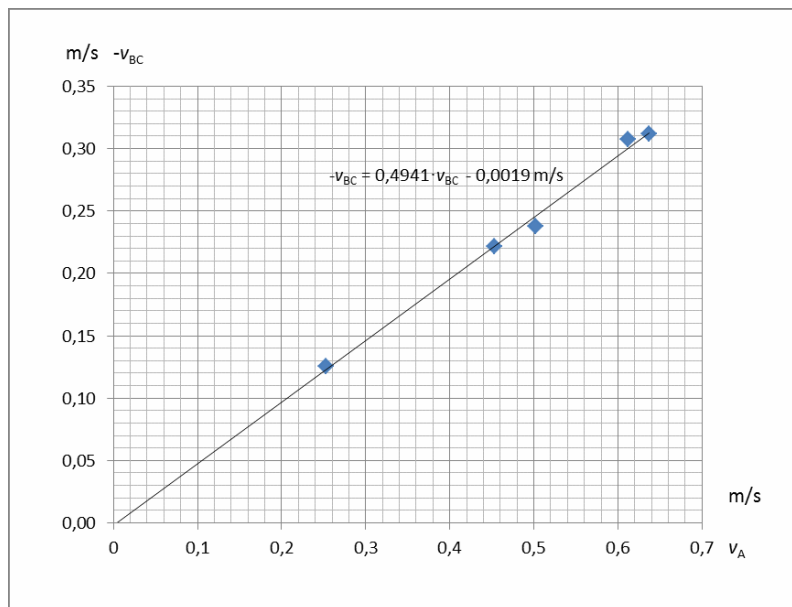
Ideaalitapauksessa voitaisiin lähettää vaunut levosta liikkeelle impulssiltaan vakiona

pysyvällä vuorovaikutuksella, ja todeta verrannollisuus $\frac{1}{v} \sim m$, eli massa on verrannollinen vakioimpulssilla saavutetun nopeuden käänteisarvoon. Ongelmana on, miten tuottaa havainnollisesti ja toistettavasti vakioimpulssi erimassaisille vaunuille. Erityisesti samanlaisen jousen laukaisu ei tuota vakioimpulssia, vaan vakiotyön.

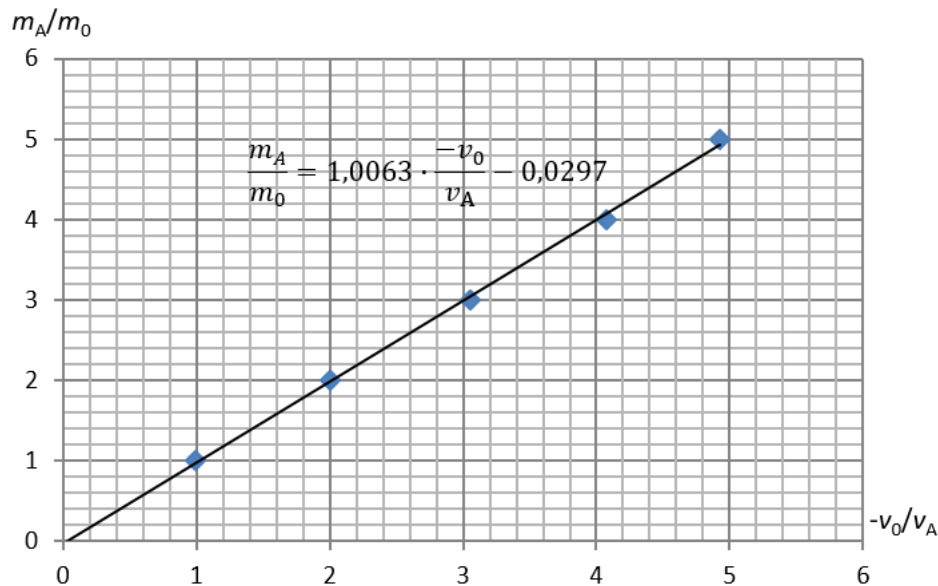
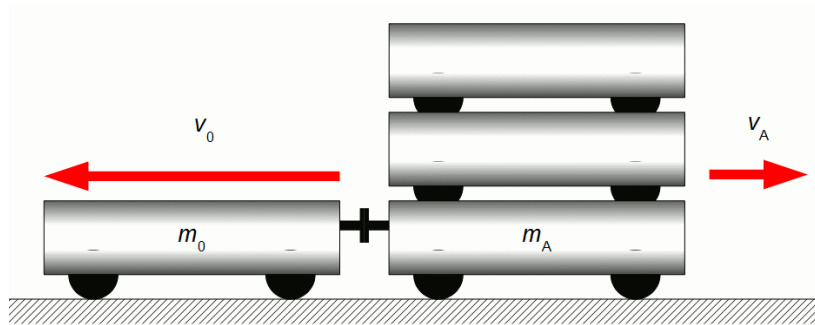
Kun kaksi vaunua laukaistaan jousella erilleen, impulssi on molemmille vaunuille yhtä suuri. Tutkitaan ensin, miten tietyllä vaunuparilla (eli tietyllä massojen suhteella) vaunujen saamat nopeudet riippuvat toisistaan. Käytetään selkeää massojen suhdetta, esim. 1:2. Se saadaan aikaan kolmella samanlaisella vaunulla A,B ja C. Kytetään B ja C yhteen kuvan mukaisesti.



Havaitaan, että vaunuyhdistelmän BC saaman nopeuden itseisarvo on aina puolet vaunun A saamasta nopeudesta. Varmistetaan tämä piirtämällä tulokset $(v_A, -v_{BC})$ -koordinaatistoon. Pisteet asettuvat origon kautta kulkevalle suoralle, jonka kulmakerroin on noin $\frac{1}{2}$. Nopeuksien suhde $-\frac{v_{BC}}{v_A}$ on siis vakio, ja kääntäen sama kuin vaunujen massojen suhde.



Testataan tätä ideaa. Annetaan massalle tunnus m . Pidetään yhtä vaunua standardikappaleena, jonka massa on m_0 . Tällöin kahden vaunun massa on $2m_0$, jne. Tehdään kuvan mukainen laukaisukoe varioiden vaunuyhdistelmän massaa: $m_A = m_0$, $m_A = 2m_0$ jne, mitataan vaunujen saamat nopeudet v_0 ja v_A . Nyt tarvitaan vain yksi laukaisu ja yhdet nopeudet vaunuparia kohden, koska jo tiedetään että samalle massojen suhteelle $-\frac{v_0}{v_A}$ on vakio. Piirretään tuloksista $\left(-\frac{v_0}{v_A}, \frac{m_A}{m_0}\right)$ -kuvaaja.



Havaitaan että pisteet asettuvat suoralle, jonka kulmakerroin on sangen tarkasti 1. Näin ollen

$\frac{m_A}{m_0} = -\frac{v_0}{v_A}$ eli $m_A = -\frac{v_0}{v_A} m_0$. Tämä hitaan massan määritelmä kertoo, miten kappaleen massa voidaan määrittää: laitetaan kappale ja standardikappale, jonka massa on määritelty, vuorovaikuttamaan keskenään kuten esitetyssä koetilanteessa, ja mitataan kappaleiden nopeudet.

Vaunuilla ja laukaistavalla jousella tehtynä hitaan massan kvantifointikoe on (toivottavasti) helppo ymmärtää, mutta siinä on pari puuttetta:

- Koe antaa turhan kapean kuvan siitä, millaisilla vuorovaikutuksilla massojen ja nopeuksien suhteita koskeva laki on voimassa.
- Saatu hitaan massan määrittelylaki koskee vain tilanteita, joissa kappaleet ovat lähtötilanteessa levossa.

Nämä puutteet voidaan korjata tekemällä koe ilmatyynyradalla niin, että vaunut törmäävät toisiinsa. Tällöin vaunuilla on nollasta poikkeavat alkunopeudet, ja törmäysten luonnetta voidaan varioida. Vaunujen nopeuden mitataan ennen ja jälkeen törmäyksen. Saadaan yleispätevämpi laki

$$m_A = -\frac{\Delta v_0}{\Delta v_A} m_0 \text{ ja havaitaan että törmäyksen luonne ei vaikuta.}$$

Kokeen tekemisessä tällä tavalla on se haitta, että vaaditaan paljon datankäsittelyä joka saattaa hämärtää kokeen tarkoituksen. Ilmatyynyradan vaunujen yhteen yhteen kytkeminen ei myöskään ole yhtä helppoa kuin dynamiikkaradan vaunujen päällekkäin pinoaminen.

Suure-ennusteet: liikemäärä ja impulssi

Tietyissä tapauksissa ennusteita uusiksi suureiksi voidaan rakentaa aikaisempien tulosten pohjalta, ilman tarvetta tehdä näille suureille varsinaisia kvantifiointikokeita. Tarpeen mukaan voidaan kyllä tehdä ennusteen rakentamista tukevia kokeita.

Edellä on havaittu, että sama impulssi saa aikaan pienemmän nopeuden muutoksen sille kappaleelle, jonka massa on suurempi. Toisaalta, koska vuorovaikutus (syy) on molempiin kappaleisiin yhtä suuri, niin myös sen seuraus eli liikkeen muutos pitäisi olla myös jollain tavalla määriteltynä molemmille kappaleille yhtä suuri.

Hitaan massan kvantifiointikokeen tuloksista saadaan törmäyslaki

$$\frac{m_A}{m_B} = -\frac{\Delta v_B}{\Delta v_A} \Rightarrow m_A \Delta v_A = -m_B \Delta v_B . \text{ Yhtälön vasen ja oikea puoli liittyvät eri kappaleisiin.}$$

Ilmeisesti $m\Delta v$ esittää jotain joka muuttuu yhtä paljon kummallakin kappaleella. Määritellään uusi suure nimeltä **liikemäärä**, $p = mv$, jonka muutos $\Delta p = m\Delta v$ kuvaa kappaleen liikkeen määrän muutosta. Tällöin törmäyslaki voidaan kirjoittaa muodossa $\Delta p_A = -\Delta p_B$.

Yleisesti, syyn pitää olla yhtä suuri kuin seuraus. Liikkeen muutos on seuraus, ja aikaisemmin on hahmotettu vuorovaikutuksen ominaisuus impulssi, joka määrää kuinka paljon kappaleen liike muuttuu. Nyt meillä on suure kuvaamaan liikkeen muutosta, joten määritellään vuorovaikutuksen kokonaisvoimakkuutta kuvaava suure impulssi yhtä suureksi kuin liikemäärän muutos: $I = \Delta p$.