



Massa ja energia

Martti Pekkanen



Massa ja energia ovat fyysisen todellisuuden kuvauksen avainkäsitteitä. Massa ja energiaan liittyy ilmiötä, jotka ovat niin kaukana arkitodellisuudesta, että on vaikea hahmottaa mitä massa ja energia ovat eli mihin sanat 'massa' ja 'energia' viittaavat. Sanojen 'massa' ja 'energia' merkityksistä on esitetty ristiriitaisia tulkintoja. Nämä ristiriitaiset merkitykset johtavat toisensa poissulkeviin väitelauseisiin, josta siis osa on epätosia.



Fysiikka käsittelee fyysistä todellisuutta. Fyysisen todellisuuden viitattaessaan fysiikka joutuu käyttämään jotain kieltä - joko jotain luonnollista kieltä, kuten suomen kieli, tai jotain formaalia kieltä, kuten matematiikka. Ja kun kieltä käytetään viittamaan todellisuuteen, ei voi kiittää sitä tosiasiaa, että kieli viittaa todellisuuteen vain kielen merkityksen kautta. Kielen - termien ja lauseiden - merkityksen pohtiminen kuuluu siis myös fysiikkaan - eikä vain filosofiaan. Erityisen tärkeää merkitysten pohtiminen on silloin, kun kieltä käytetään viittamaan kaukana arkitodellisuudesta oleviin olioihin ja ilmiöihin. Tyypillisiä tällaisia olioita ovat massa ja energia sekä näihin liittyvät ilmiöt.



Massa ja energia

Jukka Maalampi kirjoittaa [1]:

"Ei voi kuitenkaan kuin ihmetellä, miksi kirjoittajat, niin Tähtinen kuin Al-Khalili, sortuvat toistamaan vanhan, omituisia virhekäsityksiä ruokkivan ja täysin tarpeettoman kielikuvan, jonka mukaan kappaleen massa on liikkeessä suurempi kuin levossa ja lähestyy ääretöntä kun nopeus lähestyy valonnopeutta. Ei massalle mitään tapahdu, liike-energia siinä kasvaa. Eiköhän olisi korkea aika heittää liikemassa historian roskakoriin, sillä kyllä nykytutkijat jo sulattavat sen tosiasian, että painovoima vaikuttaa massan lisäksi myös energiaan." Edellisen kanssa yhteensopimaton näkemystä edustavat Albert Einstein[2]: "Man kann also sagen: Nimmt ein Körper die Energie E_0 auf, so wächst seine träge Masse um E_0/c^2 ; die träge Masse eines Körpers ist keine Konstante, sondern nach Maßgabe seiner Energieänderung veränderlich. Die träge Masse eines Körpersystems kann geradezu als Maß für seine Energie angesehen werden."

Richard Feynman [3]:

"Newton's Second Law [...] was stated with the tacit assumption that m is constant, but we now know that this is not true, and that the mass of a body increases with velocity. In Einstein's corrected formula m has the value (15.1)

Consider the motion of the molecules in a small tank of gas. When the gas is heated, the speed of the molecules is increased, and therefore the mass is also increased and the gas is heavier."

sekä Olenick et al. [4]:

"The final conclusion was that, in relativity, mass and energy are equivalent quantities, related by a constant of conversion, just as miles and kilometers are equivalent quantities, related by a constant of conversion."

Jukka Maalampi siis sanoo, että kun kappaleen nopeus kasvaa, kappaleen liike-energia kasvaa, mutta kappaleen massa ei muutu. Tämä tarkoittaa, että kappaleen massa on sen liike-energiasta riippumaton.

Vastakkaista kantaa edustavat Albert Einstein ja Richard Feynman, jotka siis sanovat, että kappaleen massa ja energia ovat verrannolliset. Tämä tarkoittaa, että kun kappaleen nopeus kasvaa, kappaleen liike-energia kasvaa ja siten myös kappaleen massa kasvaa.

Olenick et al. ovat jopa sitä mieltä, että massa ja energia ovat vain jonkun yhden ja saman suureen ekvivalentteja mittoja siten kuin kilomeri ja maili ovat suureen etäisyys ekvivalentteja mittoja.

Koska kuvaus, jonka Jukka Maalampi antaa, on yhteensopimaton ja ristiriidassa sen kuvauksen kanssa, jonka Einstein, Feynman ja Olenick et al. antavat, on toinen näistä kuvauksista virheellinen.



Kuvaus

Tapa, jolla Einstein, Feynman ja Olenick et al. käyttävät sanoja =massa= ja =energia=, antaa seuraavan fyysisen todellisuuden kuvauksen:

1. Fyysinen todellisuus koostuu jostakin, jota kutsutaan tyypillisesti nimellä massa-energia tai kokonaisenergia tai energia. Koska tässä pyritään välttämään sanoihin =massa= ja =energia= liittyviä väärinkäsityksiä, sitä jotakin, josta fyysinen todellisuus koostuu, kutsutaan tässä nimellä >substanssi.
2. Jos substanssin nopeus on valon nopeus, sitä kutsutaan nimellä sähkömagneettinen säteily. Jos substanssin nopeus on valon nopeutta pienempi, sitä kutsutaan nimellä aine. [5]
3. Substanssia ei voi tuottaa tai hävittää eli substanssi on säilyvä.
4. Substanssilla on monta ilmenemismuotoa [6]. Substanssin eri ilmenemismuotoja voi tuottaa ja hävittää eli substanssi voi vaihtaa ilmenemismuotoaan.
5. Substanssi on ekstensiivinen suure, joten on mielekäästä puhua substanssin määrästä.
6. Historiallisista syistä substanssin määrän ilmaisemiseksi käytetään kahdenlaisia yksiköitä, joista ensimmäisten perusta on yhteys aineen kappaleiden "painoon" ja toisten perusta on yhteys aineen kappaleiden "lämpötilaan" ja "nopeuteen". SI-yksiköissä ensimmäisiä edustaa kilogramma ja toisia joule. Näihin yksiköihin liittyy kielenkäyttö, jonka mukaan substanssin määrä kilogrammoina on nimeltään massa tai m ja substanssin määrä jouleina on energia tai E eli [7]:
massa = substanssin määrä kilogrammoina (1)
energia = substanssin määrä jouleina (2)
7. Massa ja energia ovat ekvivalentteja eli massalle ja energialle pätee, että ,



jossa c on valon nopeus. Edellisen perusteella tämä voidaan myös ilmaista: (substanssin määrä jouleina) = (substanssin määrä kilogrammoina) c^2 (3) Tässä esitetty kuvaus on yksinkertaistettu ja epätäydellinen. Kuvauksessa esimerkiksi tietoisesti vältetään ottamasta kantaa siihen, mitä on ja miten ilmenee ApotentiaalienergiaA.

Kuvaus on kuitenkin hyödyllinen, sillä sen mukaan aine on yksi fyysisen todellisuuden substanssin muoto ja massa ja energia ovat kaksi historiallisesti kehittyntä tapaa ilmaista substanssin määrä - substanssin esiintymismuodosta riippumatta.

Esimerkkejä

Sovelletaan nyt tätä kuvausta tarkasteluun, jossa yhden moolin rautapallo saatetaan levosta liikkeeseen nopeudella 100 m/s. Edelläolevan perusteella voidaan sanoa, että pallon substanssin määrä lisääntyy 280 J eli $3.1 \cdot 10^{-15}$ kg. Jos ajatellaan, että massa = substanssin määrä kilogrammoina ja energia = substanssin määrä jouleina, tästä saadaan ekvivalentit ilmaukset: pallon energia lisääntyy 280 J ja pallon massa lisääntyy $3.1 \cdot 10^{-15}$ kg. Vastaavasti, kun yhden moolin rautapallo lämmitetään lämpötilasta 0 °C lämpötilaan 20 °C, voidaan sanoa, että pallon substanssin määrä lisääntyy 500 J eli $5.6 \cdot 10^{-15}$ kg. Jos käytetään esitettyjä sanojen =massa= ja =energia= merkityksiä, tämä voidaan ilmaista sekä pallon energia lisääntyy 500 J että pallon massa lisääntyy $5.6 \cdot 10^{-15}$ kg.

Edellä on tarkasteltu ainetta. Massan ja energian ekvivalenssi pätee myös sähkömagneettisen säteilyn tarkastelussa. Jos ajatellaan, että säteily koostuu fotoneista, voidaan sanoa esimerkiksi fotonista, jonka aallonpituus on $300 \cdot 10^{-9}$ m, että fotonin substanssin määrä on $660 \cdot 10^{-21}$ J eli $7.4 \cdot 10^{-36}$ kg tai että fotonin energia on $660 \cdot 10^{-21}$ J tai että fotonin massa on $7.4 \cdot 10^{-36}$ kg. Tarkastelu on laajennettavissa kaikkien substanssin eri ilmenemismuotojen ja niiden välisten muunnosten tarkasteluun.

Merkitys

Koko tässä tarkasteltu ongelma voidaan tietysti sivuuttaa merkityksettömänä. Mutta ongelma - sanojen =massa= ja =energia= merkitykset - ei ole merkityksetön, vaan päinvastoin on tärkeä sekä periaatteessa että käytännössä.

Kielen merkitys nimittäin liittyy totuuteen (tai totuudenkaltaisuuteen): Totena voimme pitää vain lausetta, jonka ilmaisema merkitys vastaa todellisuutta. Kun siis Jukka Maalampi sanoo, että kappaleen massa on sen liike-energiasta riippumaton, ja kun Albert Einstein sanoo, että kappaleen massa ja energia ovat verrannolliset, vain toinen näistä toisensa poissulkevista lauseista voi ilmaista merkityksen, joka vastaa todellisuutta, ja siten jompikumpi lause on epätosi. Lienee ilmeistä, että fyysisen todellisuuden kuvauksen totuudenkaltaisuudella on valtava periaatteellinen ja tieteellinen merkitys. Tehokas uuden tiedon hankinta voi perustua vain ymmärrykseen, johon puolestaan voi johtaa vain totuudenkaltaisen todellisuuden kuvaus.

Totuudenkaltaisuudella on myös käytännön merkitys. Näyttäisi siltä, että teknisten edistysaskeleiden paras selitys ja välttämätön edellytys on luonnontieteellisen ja teknistieteellisen tiedon totuudenkaltaisuuden kasvu. Massa ja energia - sekä aine - ovat tärkeitä useilla tekniikan aloilla, joilla tarkastellaan aineen liikettä, aineen fysikaalisia muutoksia esimerkiksi lämpötilan ja paineen vaihteluista johtuen, aineen molekyylien muutoksia eli kemiallisia reaktioita sekä aineen atomien muutoksia eli ydinreaktioita. Kaikkien näiden tarkastelujen tehokas suorittaminen edellyttää käsitteiden massa ja energia B sekä aine B erottamista.

Näyttäisi siltä, että yleinen ajatus on se, että sanat =massa= ja =aine= tarkoittavat samaa. Tämä onkin luonnollista, sillä useissa tarkasteluissa ainetta edustamaan käytetään aineen massaa. Mutta tästä ei seuraa, että sanojen =aine= ja =massa= merkitys olisi sama.

Fyysistä todellisuutta käsiteltäessä on ymmärryksen kannalta on tärkeää, että lauseet matematiikan kielellä lausutaan jollain luonnollisella kielellä. Tätä korostaa Richard Feynman [8]:

"But the physicist has meaning to all his phrases. That is a very important thing that a lot of people who come to physics by way of mathematics do not appreciate. Physics is not mathematics, and mathematics is not physics. One helps the other. But in physics you have to have an understanding of the connection of words with the real world. It is necessary at the end to translate what you have figured out into English, into the world, [...] Only in this way you can find out whether the consequences are true."

Sanojen =massa= ja =energia= merkitykset ovat oleelliset suhteellisuusteoriassa, mutta merkitysten ymmärtäminen ei ole merkityksetön ja hyödytön muussakaan fyysistä todellisuutta koskevassa keskustelussa B tutkimuksesta ja opetuksesta puhumattakaan.

VIITTEET

- [1] Maalampi, J., Aikamatkoja ajankuluksi, Tieteessä tapahtuu 7/2001, s. 70.
- [2] Einstein, A., Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, Friedr. Vieweg & Sohn, 7. Aufl., 1920, s. 32.
- [3] Feynman, R.P., Leighton, R.B. and Sands, M., The Feynman Lectures on Physics, Vol I, Addison-Wesley, 1965, p. 15-1 ja 15-10
- [4] Olenick, R.P., Apostol, T.M. and Coodstein, D.L., Beyond the Mechanical Universe from Electricity to Modern Physics, Cambridge University Press, 1986, p. 420
- [5] Pauling, L., General Chemistry, W.H.Freeman, 1970, p. 1: "The universe is composed of matter and radiant energy. Matter (from the Latin materia, meaning wood or other material) may be defined as any kind of mass-energy that moves with a velocity less than the velocity of light, and radiant energy as any kind of mass-energy that moves with the velocity of light." (Tässä käytetään sanaa >mass-energy= viittaamaan substanssiin.)
- [6] Feynman et al. (1965, p. 402): "the energy has a large number of different forms, and there is a formula for each one. These are: gravitational energy, kinetic energy, heat energy, elastic energy, electrical energy, chemical energy, radiant energy, nuclear energy, mass energy". (Tässä käytetään sanaa >energy= viittaamaan substanssiin.)
- [7] Massan ja energian käsitteet ovat luonnollisesti SI-yksiköistä riippumattomat. Määritelmät - tai kuvaukset - (1) ja (2) ovat kuitenkin lyhyet ja

ytimekkäät ja siten ymmärrettävämmät kuin esimerkiksi: massa = substanssin määrä yksiköissä, joiden historiallinen perusta on yhteys aineen kappaleiden "painoon".

[8] Feynman, R.P., *The Character of Physical Law*, Penquin Books, 1992, p. 55

Kirjoittaja on assistentti Teknillisen korkeakoulun kemian tekniikan osastolla.

