



Paperi ritisee ja repeää – sanomalehdestä tilastolliseen fysiikkaan

Mikko Alava



Aamun *Helsingin Sanomia* voi tutkia monella tavalla. Viestintätutkija on ehkä kiinnostunut lehden poliittisista linjauksista. Hörppiessään sunnuntiaamun kahviaan fyysikko lukee tärkeimmät eli urheilun, sarjakuvat ja lopuksi sydän pamppaillen työpaikkailmoitukset. Itse viestintäväline, se paperi jolle lehti on painettu, on kuitenkin joskus arkipäivän suola työpaikallakin. Mutta miksi?



Aamukahvista tippunut pisara kahvia leviää avoimna olevan sanomalehden sivulle. Hitaasti mutta varmasti neste imeytyy alla olevaan paperiin. Mikä lieneekään syynä siihen, kuinka nopeasti pisara häviää? Lopulta paperissa on ruskea läiskä, ja paljaalla silmälläkin voi nähdä, että sen reuna on epätasainen. Syy tähän, sekä imeytymisen nopeuteen, on itse asiassa osaksi tuntematon. Neste tunkeutuu arkkiin sekä leviää sen pintaa pitkin. Edellinen on riippuvainen siitä mikä huokosrakenteen geometria on, ja pinnan karheus hidastaa pisaran leviämistä, koska pisaran reuna juuttuu ajoittain pinnan epätasaisuuksiin.



Fysiikon työkalupakki sisältää nykyään onneksi keinoja tämänkaltaisten systeemien kuvaamiseen, vaikka paperitekniikka on insinööritieteenä vielä hieman voimaton. Arkki voidaan rakentaa tietokoneessa yksinkertaisen mallin mukaan, ja tuloksena on "virtuaalikopio" todellisesta materiaalista. Ne säännöt joita tähän tarvitaan voidaan yrityksen ja erehdyksen sekä älykkäiden arvausten kautta valita niin, että ne pintakemialliset ja mekaaniset ilmiöt jotka paperinvalmistuksessa vaikuttavat arkin rakenteeseen saadaan kuvattua mahdollisimman hyvin.



Oppi virtuaalipaperiin on saatu tilastollisesta fysiikasta, jonka yksi tuoreimpia tuulia on epätasapainotilan systeemien tutkiminen. Yksi tyypillisimpiä systeemejä, jolla on kokeellista mielenkiintoa, on atomitaso pintojen kasvattaminen esimerkiksi molekyyliepitaksialla - suihkulla, joka kastelee atomivuolla kasvavaa pintaa. Paperin rakenteen muodostumista voidaan matkia samantapaisella yksinkertaisella mallilla, vaikka mittakaavat ovatkin täysin erilaiset.



Kuitujen epäjärjestys ja WC-paperi

Joskus aamulla lehteä postilaatikosta hakiessa törmää, etenkin sunnuntaisin, siihen pikku pulmaan, että lehti on niin paksu, ettei sitä saa ehjänä mukaansa. Unisin silmin lehdelle tehty väkivalta on kuin kotiversio laboratoriossa tehtävästä vetokokeesta. Saman analogian voi toteuttaa helposti ottamalla normaalin A4-arkin, ja repimällä se kahtia. Lopulta pienen ahertamisen jälkeen arkista on kädessä kaksi palaa. On mahdollista olla huolellisempi, mutta yleensä tulos on se, että revennyt pinta ja sen kaksoiskappale ovat silmännähtävästi karheita.



Tämä satunnaisuus johtuu siitä, että arkin rakenne ei ole homogeeninen. Sama epätasaisuus joka on tärkeä, jos ajatellaan paperiin imeytyneen nestepisaran jättämän jäljen muotoa, saa paperin rikkoutumaan tavalla joka on joskus yllätyksellinen. Insinööriä tämä ei suuresti miellytä, koska paperin lujuus laskee. Tämä on ekonomille joka laskee asiaanliittyviä euroja lopulta tärkeä asia.




Paperikoneen ja sanomalehtipainokoneen ajonopeus - montako lehteä tunnissa voidaan painaa - riippuu siitä mikä paperin murtositkeys on, ja paljonko sen lujuus vaihtelee sekä mikä sen keskiarvo on. Paperi-insinöörin näkökulmasta massaon sekoitettava puuaines joudutaan optimoimaan, ja jos huonosti käy pitkäkuituisen kemiallisesti jalostetun selluloosan osuus kasvaa mikä tulee kalliiksi.





Perustutkimus ja käytännön näkökulma törmäävät tarvittavaa ymmärrystä tavoiteltaessa havainnollisesti. Paperifyysikko haluaa löytää kokeellisesti mitattavia, havainnollisia suureita







jotka lopulta kertovat miten testata tehtaan laboratoriossa paperin lujuuutta ja sitkeyttä. Tilastollinen fyysikko pyörittelee päätään, ja toteaa hiljaa itsekseen, että paperiarkin revetessä syntynyt karhea särö on "universaali". On näet niin, että murtopinnan tarkempi tarkastelu osoittautuu usein yllätykselliseksi. Sen heilahtelu keskimääräisen paikkansa ympärillä kasvaa sitä enemmän, mitä suuremmalla skaalalla keskijajonta mitataan. Ja kas kummaa, kaksiuotteisen - arkin paksuus on mitäön - paperin murtopinta on "skaalainvariantti", eli sen karheus riippuu vain tarkastelumittakaavasta korotettuna tiettyyn potenssiin. Potenssilain eksponenttia kutsutaan karheuseksponentiksi, ja tällä määritelmällä aukeaa Pandoran lipas, koska skaalainvarianttien, karheiden rajapintojen kuten särön paperissa ilmiöt ovat kaikkein modemeinta tilastollista fysiikkaa.




Paperista kiinnostuneen tilastollisen fyysikon vastaus insinöörin kysymykseen on huuto norsunluutomista. Karheuseksponentti, joka näyttää kuvaavan murtopintoja paperissa, on kuin numerologiaan taipuvaisen ihmisen unelma. Sen arvo, jos arvaus sen alkuperästä on oikea, on kaksi kolmasosaa. Ja sen sanoma tai huudon viesti on, että murtopinnan energia on maagisesti tullut minimoiduksi yli kaikkien mahdollisten murtopolkujen. Ikävä kyllä viesti ei sisällä reseptiä, joka kertoo miten tästä lähtien voitaisiin rakentaa halvemmin vahvaa paperia, koska mallien abstraktista maailmasta ei ole suoraa yhteyttä kokeelliseen laboratorioon. Niinpä paperifyysikko onkin omalla tahollaan ollut käytännönläheisempi, ja keksinyt itse vastauksen joka tyydyttää hänen omia tarpeitaan. Insinöörin vastaus murtomekaniikan saloihin on löydettävissä kenen tahansa kotoa: perforointi kotitalouspapereissa varmistaa sen, että paperinpala irtoaa rullasta halutusta kohtaa, ainakin yleensä.




Ritinää kuuluu




Jokainen joka on joskus repäissyt palan paperia tarkoitukseen tai toiseen on tullut huomaamattaan tehneeksi tilastollisen fyysikan kokeen. Ritinä, ratina, eli repeämän ääni kertoo tutkijalle enemmänkin. Mistä äänen synnyttämisessä on kysymys voidaan yksinkertaistaa yläasteen fyysikan tunnin kokeen tasolle.





Kuvitellaan jousi, joka on venytetty kauas tasapainopituudestaan. Tähän tarkoitukseen tehdään työtä, eli jouseen varastoidaan energiaa. Jos josta kiskotaan lisää ja lisää (ja unohdetaan se, että metallien venymäkäytös on monimutkaisempaa), se lopulta katkeaa napsahtaen. Jousen potentiaalienergia on vapautunut, ja tarkemmin sanoen se siirtyy kahden syntyneen jousenpuoliskon heiluntaan tai värähtelyyn, ja osa päätyy suoraan ääneksi.



Paperiarkin hajotessa syntyvä "akustinen emissio" on samaa alkuperää perimmiltään. Arkki joutuessaan venytetyksi murtuu asteittaisesti. Prosessi on huomattavasti monimutkaisempi kuin ajatusesimerkkimme johtuen ainakin kolmesta syystä. Paperissa mekaaninen jännitys siirtyy kuidusta toiseen, ja rajapinta eli 'sidokset' on heikko lenkki ketjussa. Mutta myös kuidut itse saattavat katketa. Niinpä paperin rakenne itsessään tekee murtumisesta vähemmän itsestään selvän: kumpi on tärkeää näistä kahdesta vaihtoehdosta?



Muut kaksi maustetta sopassa ovat rakenteen epäjärjestys - taas - sekä se, että kuidut (ja sidokset) eivät ole "ideaalisen elastisia". Eli: selluloosapohjainen kuitumateriaali muistuttaa hieman kuminauhaa tai purukumia. Se myötäilee hieman ennen murtumistaan.



Sama koe voidaan tehdä myös kontrolloidusti. Nyt otetaan arkki paperia, ja vedetään se vakionopeudella (niin että venymä kasvaa tasaisesti) rikki. Tämä on materiaalitieteessä normaali testausmenetelmä, ja myös paperitekniikassa paljon käytetty. Tuloksena on 'voima-venymäkäyrä', eli arkin venymän funktiona venyttämiseen tarvittu voima. Voiman maksimi antaa murtojännityksen, ja mikäli koe tehdään venymäkontrolloituna paperi venyy vielä tämänkin jälkeen hieman, mutta vaadittava voima laskee. Paperin murtumisen monimutkaisia mekanismeja on yleensä vaikea seurata, mutta onneksi nyt akustinen emissio tulee avuksi. Vetokokeen aikana paperiin kiinnitetään yksi tai useampia pietsosähköisiä kiteitä antureiksi. Nämä muuttavat paperin värähtelyt, jotka syntyvät mikroskooppisista murtumista, sähköiseksi signaaliksi, joka voidaan tallioida ja analysoida tietokoneella.



Piirtämällä samaan kuvaan sekä voima-venymäkäyrä että jokainen akustinen äänenpurskahdus vastaavalla venymällä havaitaan, että ääntä kuuluu - ehkei kovin yllättävästi - eniten lähinnä maksimi voimaa. Tällöin siis arkin elastinen energia muuntuu ritinäksi.



On hyvin luonnollista, että näin käy, koska johonkin käytetyn energian täytyy kulua kun se arkin revetessä tuhlataan. Näivien päätelmien lisäksi akustinen emissio kelpaa myös tutkijan työkaluksi. Päätelmiä voidaan tehdä parhaassa tapauksessa sekä paperi-insinööriin että tilastollisen fysiikan näkökulmista. Se, miten kukin paperilaatu murtuu mikroskooppisesti, on paperin lujuuden ja sitkeyden kannalta mielenkiintoista tietoa. Risahdusten energioiden tyypillinen suuruus kertoo epäsuorasti, miten suurissa paloissa elastinen energia relaksoituu. Näin voidaan tutkia, onko kuitujen, vai kuitujen välisten sidosten murtuminen tietyllä paperin valmistukseen käytetyllä massalla pääsääntöinen mekanismi.



Paperinpalasta maankuoreen



Mikä sanomalehdessä voi viedä fyysikon mukanaan on se, että ritinää ja ritinaa havaitaan muissakin luonnonilmiöissä. Suurimpia - mittakaavaltaan - äänenlähteitä ovat maanjäristykset. Maankuoren siirtymäalueilla käy samoin kuten paperin murtuessa. Kallioperään varastoitunutta elastista energiaa vapautuu, ja samalla maa tärisee. Vapautuminen voidaan havainnoida seismologisin keinoin, ja lopulta tuloksena on usein se Richterin asteikon luku, joka sitten suuren järjestyksen tapahtuttua mainitaan televisiuutisissa katastrofiraportin osana. Kuten todennäköisesti paperiarkin vaurioituuksakin valitettavasti opitaan, maanjäristysten fysiikka on hyvin monimuotoinen ja suuria yleistyksiä on vaikea tehdä. Helpon esimerkin saa kun kokeilee, miltä tuntuu vetää kättä pöydän pintaa pitkin. Jos pöydän pinta on sileä, tai kostea, tai käsi liikainen kitka pintojen välillä vaihtelee suuresti. Yhteisiä piirteitä löytyy kuitenkin tilastollisista laeista. Tunnetuin on Gutenberg-Richterin skaalauslaki, joka sanoo, että maanjäristysten koko tai vapautuva energia vaihtelee siten että sillä ei ole mitään tyypillistä skaalaa - se noudattaa siis potenssilakia. Suurten järjestyksen edellä esiintyy joskus niinsanottuja prekursoreita, ja niiden jälkeen jälkijärjestyksiä. Näillä on käytännön merkitystä, jos yritetään ennustaa maanjäristyksiä, tai suojautua varsinaisen pääjärjestyksen jälkeen seuraavilta "uusinnoilta". Koko monimutkainen tapahtumaketju taas kiinnostaa tutkijaa.



Samantyyppiseen ilmiömaailmaan törmätään esimerkiksi paperin murtumisessa. Akustisen emission energijakauma noudattaa sekin potenssilakia. Jos vetokoe tehdään erilaisissa olosuhteissa, potenssilaki on joskus enemmän, joskus vähemmän selvästi havaittavissa kokeellisia tuloksia tulkittaessa.



Kuten muistamme paperin murtumisen ymmärtämisen tekee vaikeaksi moni sille materiaalina ominainen piirre. Paperin epäjärjestys on se syy, miksi 'skaalainvariantteja' ominaisuuksia voidaan toivoa löytyvän murtoprosesseista. Materiaalin epäideaalinen - plastinen tai kumimainen - käytös tuo mukaan aikaskaaloja, joita ei ideaalisen elastisessa ja haurassa (kuten lasi nopean rasituksen kohteena) aineessa ole.



Onneksi yksi kokeellinen parametri on lisäksi käytettävissä: vetonopeus kokeessa. Sen ansiosta fyysikko voi systemaattisesti tarkastella, millä aikaskaaloilla paperissa tapahtuu ilmiöitä kun arki murtuu. Ideaalinen, hauras aine tuottaisi akustista emissiota, jonka purskahdukset olisivat jaoteltavissa syy- ja seuraussuhteiden avulla kahteen luokkaan. Mikroskooppiset murtumat saavat aikaan jännityskentän muodonmuutoksia paperissa, eli toisin sanoen kuorma siirtyy sieltä missä paperi murtuu sinne, missä se on vielä ehjää.




Tämä on hyvin nopea ilmiö, ja paikallisen kuorman kasvusta tapahtuvat lisämurtumat tapahtuvat käänteisen äänennopeuden aikaskaalalla. Toisaalta arkin venymä kasvaa hitaasti, paljon hitaammin kuin jännitys uudelleen organisoituu.




Kokeessa havaitaan, että vetonopeudesta riippumatta paperilla on oma sisäinen ilmiömaailmansa. Risahdusten väliset ajat, 'odotusajat', noudattavat nekin potenssilakia, joka ei nähtävästi riipu siitä, millä nopeudella systeemiä rasitetaan.







Niinpä todellinen dynamiikka heijastaa ilmiöitä jotka tapahtuvat ainakin kolmella aikatasolla.




Olomuodon muutos: mallien maailmassa




Ilmiöt joihin ei liity mitään aika- tai paikkaskaaloja ovat fyysikon näkökulmasta mielenkiintoisia. Avainsana on "kriittisyys", ja kiehtovaa ajattelussa on se, että nyt yksinkertainen ajattelu on voimissaan. Tilastollinen fysiikka - ja myös alkeishiukkasfysiikka monessa tapauksessa - käsittelee näet olomuodon- tai faasimuutoksia, ja näissä skaalainvarianssi on usein avainsana. Tapana on puhua ensimmäisen ja toisen kertaluvun faasitransitioista, ja oleellisimpana erona näiden termien välillä on se, miten systeemin eri osat näkevät toisensa. Jos palanen systeemistä viis veisaa toisesta, tarpeeksi kaukana olevasta, on helppo nähdä että riippuvuudella on jokin horisontti, jonka etäisyys määrittelee 'korrelaatiopituuden'. Horisontin karkaaminen kaukaisuuteen, kun 'kriittistä' pistettä jossa muutos tapahtuu lähestytään, sanoo ammattilainalla transition olevan luultavimmin toista kertalukua.




Materiaalinpalasen murtuminen on houkuttelevaa esittää samaa kieltä käyttäen ikäänkuin se olisi sukulainen sille muutokselle mikä tapahtuu kun vesi jäätyy, jää sulaa, tai vesi kiehuu. Analogiassa on perustavanlaatuisia ongelmia (vedestä saadaan vesihöyryä helposti ja myös toisin päin, mutta kahta paperinpalaa on melko vaikea palauttaa yhdeksi kappaleeksi), mutta se kutsuu seuraamaan tuntemattomaan päämäärään vievää polkua. Näin siksi, että selitys esimerkiksi akustisessa emissiossa tai maanjäristyksissä havaitulle potenssilaille olisi mukava kuitata kutsumalla sitä olomuodon muutoksen seuraukseksi. Sanomalehti muuttuisi näin faasitransitiossa paperijätteeksi.




Teoreetikko törmää heti ongelmiin yrittäessään kuvata epäjärjestyneiden aineiden käytöstä tällaisissa "epätasapainotilan" olosuhteissa. Mielenkiintoista käytöstä on vaikea löytää kentäteoreettisin menetelmin tutkittavista mallisysteemeistä. Yksi suurimmista syistä on se yksinkertainen totuus, että vetokokeessa oleva kappale on likipitäen samassa jännityksessä koko tilavuudeltaan. Sama ilmiö tulee vastaan analysoitaessa kappaleessa olevan särön etenemistä. Särön jäljiltä jäävä murtopolku karhentuu todellisuudessa paljon enemmän kuin mitä useimmat laskut antavat syytä odottaa.




Yksi usein tarjottu selitys sanoo, että syynä ovat 'akustiset shokit'. Kuten kirkonkello, elastinen kappale jää soimaan kun sitä kopautetaan, olkoon syynä vaikka mikrosärön syntyminen, tai eteneminen ja ohessa vapautuva elastinen energia. Rekylyefekti voisi olla merkityksellinen hyvin hauraissa aineissa, mutta ehkäpä ei maanjäristysten yhteydessä tai paperissakaan.




Paperiarkki on kuitenkin varsin epäjärjestynyt. Tämä on totta yksittäisten kuitujen mittakaavasta alkaen. Lisäksi materiaalina se on hieman plastista. Niinpä on mahdollista, että varsinainen murtoprosessivyyhyke, se osa arkkia jossa paperi varsinaisesti hajoaa, on oleellisesti jännitykseltään homogeeninen. Tällaisissa olosuhteissa murtuma syntyy hitaasti jännityksen kasvaessa siksi, että materiaalin heikoista kohdista tarpeeksi suuri osa alistuu rasitukselle. Syntyvä vaurio kuormittaa tasaisesti vielä ehjää osaa, ja fyysikko puhuu keskimääräisen kentän käytöksestä.



Samalla tehtyjen arvausten kera on - ei täysin sattumalta - käynyt niin, että murtumisen dynamiikalle voidaan kirjoittaa numeerisesti tietokoneen avulla sekä suureksi osaksi analyttisestikin ratkeava malli. Tämä paljastaa minkälaisesta faasitransitioista on kysymys: kuten olettaa sopiinkin, systeemillä on "korrelaatiopituus" joka kasvaa ideaalitapauksessa kohti ääretöntä, kun jännitys kasvaa. Lopulta tämä skaala saavuttaa kappaleen koon, ja arkki hajoaa.



Näin siis, jos uskomme yksinkertaista mallia ja sen ennustuksia. Kokeelliset vertailut analyttisiin lakeihin kuitenkin jättävät kysymyksen osittain avoimeksi. Mitatut akustisten purskahdusten energioiden tilastolliset jakaumat kärsivät luonnollisesti saatavilla olevan datan vähyydestä. Kuitenkin näyttää siltä, että havaittu potenssilakikäytös on kvalitatiivisesti - mitä tulee mitatun eksponentin arvoon - lähellä odotettua. Kiveen kompastutaan, kun verrataan yksityiskohtaisemmin odotettua tapahtumainkulkua. Nyt ongelmaksi jää taas se





tosiseikka, että paperi elää omaa varsin rikasta elämäänsä. Yksinkertaiset mallit eivät selitä skaalainvarianttia odotusaikajakaumaa, joka kokeessa vetonopeutta muuttelemalla jo aikaisemmin todettiin merkillisen riippumattomaksi mistään.



Takaisin paperitehtaalle

Aamulehdestä on moneksi. Yksi motivaatio edellä kuvattujen ominaisuuksien tutkimiseen on perustutkimuksen tiedonhalu; tässä artikkelissa on pohdittu teoreettisen fysiikan kysymystä "onko paperipalan repiminen olomuodon muutos myös fysiikon näkökulmasta?" Vastauksen etsiminen on vielä kesken, vaikka näsäviisaampi ammatilainen toteaisi "tottakai, putoaahan arkin kimmomoduli nollaan murtopisteessä". Tämä on diskreetti muutos, joka fysiikon mielessä tuo vastaan analogioita magneettisiin systeemeihin. Pitkäjänteisempi - edellä mainittu vastaus tosin riitti artikkeliin arvostetussa alan ammattilehdessä - tutkimus etsii kokein ja teoreetikon työkaluin kvantitatiivisempia vastauksia.



Yksi perustavanlainen selitystään kaipaava palanen palapelissä on määrän paperin käytös, jos ajatellaan sen tuottamaa akustista emissiota. Vastoin paperiteknikan odotuksia tämä on laadullisesti hyvin lähellä kuivankin paperin vastaavaa. Kuka tahansa toisaalta tietää, että märkä paperi on melko käyttökelvotonta, koska se ei "kestä käytössä". On melko lohdullista todeta, että samaa tutkimusta voi tehdä mielekkäästi monesta näkökulmasta lähtien.



KIRJALLISUUTTA



Niskanen, K, Nilsen, N, Hellén, E., Alava, M. (1997): "KCL-PAKKA: Simulation of the 3D structure of paper", The Fundamentals of Papermaking Materials, The Eleventh Fundamental Research Symposium, Pira International, Sep 21-26, 1997, Cambridge, 1177-1213.



Räisänen, V.I., Seppälä, E. T., Alava, M. J., Duxbury, P. M. (1998): "Quasi-static cracks and minimal energy surfaces", Physical Review Letters 80, 329-332, American Physical Society 1998).



Rosti, J. (1999): Akustinen emissio paperin vetolujuuskokeen aikana. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu.

Kirjoittaja on dosentti Teknillisen korkeakoulun Fysiikan laboratoriossa. Kirjoitus perustuu esitelmään Tieteen päivillä 2001.

mja@fyslab.hut.fi

