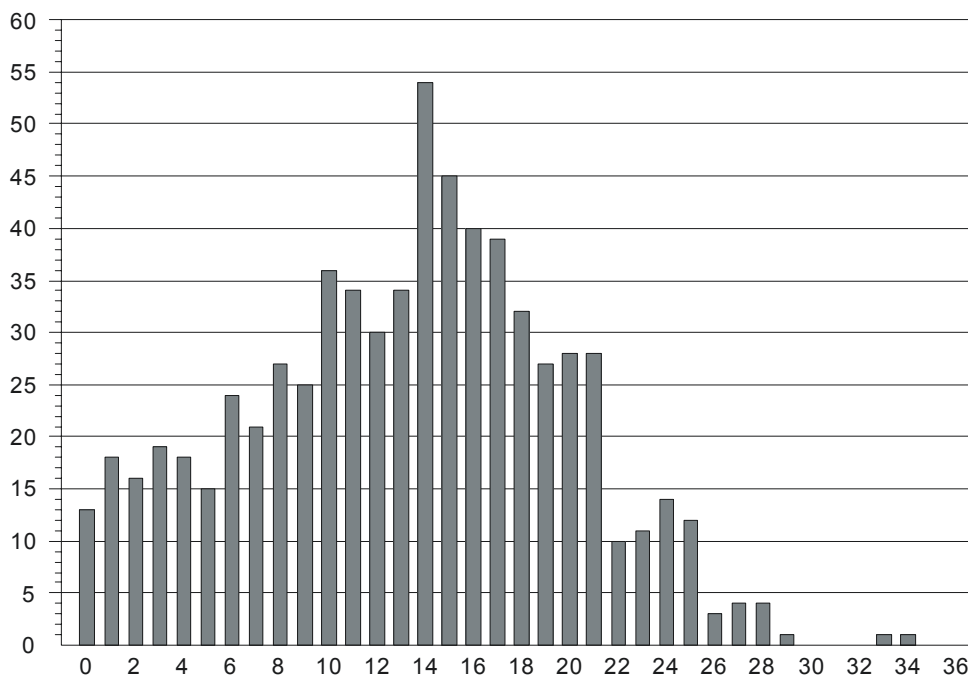


## Fysiikan valintakoe Helsingin yliopistossa v. 1994

*Mikael Björnberg, Sisko Eskola, Kaarle Kurki-Suonio ja Folke Stenman  
Helsingin yliopisto, Fysiikan laitos*

### Kokeen yleiskuva

Matemaattisten aineiden koulutusohjelmiin pyrki vuonna 1994(1993) kaikkiaan 2792(3162) opiskelijaa, heistä 556(578) ensisijaisesti fysiikaalisiin tieteisiin. Fysiikan valintakoe pidettiin 14.06. Siihen osallistui 684(845) pyrkijää. Valintojen pisterajoiksi /280 muodostuivat fysiikassa 184(202), kemiassa 205(228), matematiikassa 188(200) ja tietojenkäsittelytieteessä 189(220). Hakijoista hyväksyttiin kaikkiaan 1944(1862), joista 469(488) sai opiskeluoikeuden fysiikaalisten tieteiden koulutusohjelmaan.



Suoran arvostelun pistejakauma.

Kokeen keskiarvo oli 13,15/36. Oheinen kuva esittää kokeen pistejakaumaa nk. suorassa arvostelussa. Valintalautakunnan päätöksen mukaan valintakokeiden keskiarvojen keinotekoisesta korottamisesta luovuttiin, jotta kokeen tulos rinnastuisi paremmin ylioppilastutkinnon perusteella laskettuihin ainepisteisiin. Arvostelupisteet muunnettiin valintapisteiksi 0...10 kohtuulliseksi arvioidun asteikon mukaisesti, jossa tyydyttävään (7/10) suoritukseen tarvittiin 21/36 ja kiitettävään (9/10) suoritukseen 27/36 pistettä suorassa arvostelussa.

Tehtäväkohtaiset pistejakaumat ja keskiarvot on esitetty oheisessa taulukossa.

Pisteiden prosenttiset jakaumat

Tehtävä	1	2	3	4	5	6
Pisteet						
0	20,8	40,2	22,5	20,3	32,2	28,1
1	15,5	23,0	11,7	4,2	13,3	25,0
2	20,2	15,6	12,1	2,3	17,8	27,9
3	20,9	10,1	11,3	1,5	24,9	10,2
4	13,5	6,3	35,7	2,5	8,0	1,9
5	6,1	4,1	5,7	60,2	2,9	1,8
6	3,1	0,7	1,0	8,9	0,9	5,1
Keskiarvo	2,21	1,35	2,47	3,78	1,76	1,59

## Tehtävä 1.

Esittele lyhyesti a) NaCl-kiteen, b) vetymolekyylin, c) heliumatomin, d) heliumytimen  ${}^4\text{He}$  ja e) protonin rakenneosat ja rakenne sekä sitä koossa pitävät vuorovaikutukset.

### Käsittely.

a) NaCl-kide koostuu  $\text{Na}^+$ - ja  $\text{Cl}^-$ -ioneista. Ne muodostavat hilarakenteen, jota pitää koossa ionien välinen sähkömagneettinen vuorovaikutus. Hilan rakenneyksikkönä on kuutio, jonka vierekkäisissä kärjissä on aina erimerkkiset ionit. Näin jokaista  $\text{Na}^+$ -ionia ympäröi kuusi  $\text{Cl}^-$ -ionia ja päinvastoin.

b) Vetymolekyylin muodostaa kaksi vetyatomia. Niiden kaksi elektronia muodostavat yhdessä kovalenttisen sidoksen, joka sitoo niiden ytimet yhteen. Myös kemiallisen sidoksen muodostumisen aiheuttaa sähkömagneettinen vuorovaikutus (tavalla, jonka selittäminen on mahdollista vain kvanttimekaanisesti.)

c) Heliumatomin rakenneosat ovat ydin ja kahden elektronin muodostama elektroniverho. Atomia pitää koossa sähköinen vuorovaikutus.

d) Heliumydin  ${}^4\text{He}$  muodostuu kahdesta protonista ja kahdesta neutronista. Ytimen pitää koossa vahva vuorovaikutuksesta aiheutuva ydinvuorovaikutus, joka voittaa ydinten välisen sähköisen poistovoiman.

e) Protonin muodostaa kolme kvarkkia, joita sitoo yhteen vahva vuorovaikutus eli nk. väri vuorovaikutus.

### Huomautuksia.

Näillä tiedoilla, vähän epämääräisemminkin esitettynä, sai ensimmäisestä ja viimeisestä kohdasta kaksi, muista yhden pisteen, enintään kuitenkin 6 pistettä.

Tehtävässä testattiin aineen rakenneosasten ja niitä koossa pitävien vuorovaikutusten hierarkian tuntemusta, joka kuuluu nykyaikaisen yleissivistyksen perusteisiin.

Vuorovaikutusten luonteen lähempää tarkastelua ei edellytetty, vaikka hyvässä vastauksessa olisi oikeastaan kuulunut mainita vuorovaikutuksen kantajat (fotonit, mesonit, gluonit) ja pohtia niiden mahdollista pitämistä rakenneosina. Samoin olisi voinut odottaa tietoja kvarkkien lajeista (maut) ja kolmesta eri väristä sekä neutraloitumisesta, jonka vuoksi e- ja c-kohdan perusvuorovaikutuksista jää jäljelle d-, b- ja a-kohtien heikompia jäännösvuorovaikutuksia.

Näiden asioiden sijasta monissa vastauksissa kerrottiin ummet ja lammet elektroniverhon kuorirakenteesta ja eri sidostyypeistä, mm. van der Waalsin voimista ja jalokaasujen ominaisuuksista. Sinänsä on kiitettävää, että oppiaineiden rajoja ylitetään – tehtävähän sitä osittain edellyttikin –, mutta nämä aiheet eivät kuuluneet kysymyksen piiriin.

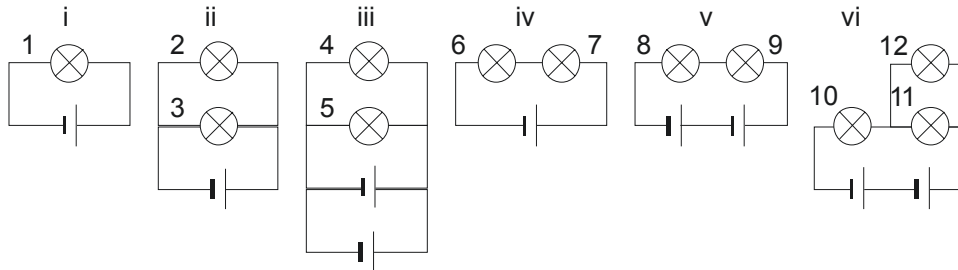
Vastauksista kävi ilmi myös koulussa käytetyn terminologian horjuvuus ja osittainen ristiriitaisuus. Kemian ja fysiikan tunneilla opittuja tietoja samoista asioista ei aina osattu yhdistää kokonaisuudeksi. Pääsääntäisesti tästä ei sakotettu. Esimerkiksi pelkän ionisidoksen mainitseminen sähkömagneettinen vuorovaikutuksen asemesta ja kovalenttisen sidoksen sähköisen alkuperän puuttuminen sivuutettiin olankohautuksella.

Peruskäsitteiden ymmärtämisen kannalta on valitettavaa, että voiman ja vuorovaikutuksen käsitteet sekoitetaan kansantajuistelevien esitysten huonoa esimerkkiä seuraten. Heikko ja vahva vuorovaikutus kahden perusvuorovaikutuksen niminä näyttävät tuottavan ongelmia. Ne tuntuvat ilmeisesti liian yleiskielisiltä, jotta niitä osattaisiin käyttää oikein fysikaalisina standarditermeinä sen rinnalla, että on tarpeen kuvata myös eri vuorovaikutusten voimakkuuksia. Onhan toki esimerkiksi sähkömagneettinen vuorovaikutus gravitaatioon verrattuna vahva ja gravitaatio suurilla etäisyyksillä heikko. Fysikaalisessa kielenkäytössä on opittava erottamaan sanojen terminologinen ja yleiskielinen käyttö.

Valtaosalle atomin ja molekyylin käsitteet olivat tuttuja, mutta noin viidennekselle nekin aiheuttivat ongelmia. Kvarkit mainitaan ilmeisesti vain harvoissa lukioissa, vaikka päivä- ja ajanvietelehdet niistä kirjoittavatkin.

## Tehtävä 2.

Oheisissa kytkennöissä kaikki lamput ja kaikki paristot ovat keskenään samanlaisia. Selvitä fysikaalisesti perustellen lamppujen kirkkausjärjestys.



### Käsittely.

Tehtävässä päästään helpoimmin alkuun vertaamalla lamppujen napojen välisiä jännitteitä. Lamppu palaa sitä kirkkaammin, mitä suurempi jännite sen napojen välillä on.

Jos yhden pariston lähdejännite on  $E$ , piireissä i...iv lähdejännite on  $E$ , koska niissä on vain yksi paristo tai kaksi rinnan, piireissä v ja vi se on  $2E$ .

Jos paristoissa tapahtuva jännitehäviö jätetään ottamatta huomioon, lamppujen 1, 2, 3, 4, 5, 8 ja 9 napojen välillä on jännite  $E$ . Kytköksissä i, ii ja iii kukin lamppu on nimittäin kytketty suoraan pariston napojen välille. Piirissä v taas piiriin jännite  $2E$  jakautuu tasan sarjaan kytkettyjen kahden lampun osalle.

Kytkösten i, iii ja v paristoissa myös virrat ovat yhtä suuret. Piirissä iii lamppujen läpi kulkeva summavirta jakautuu myös paristojen kesken yhtä suuriksi osavirroiksi. Piirissä v taas on kaksinkertainen lähdejännite synnyttämässä virtaa "kaksinkertaiseen piiriin". Kaikkien näiden paristojen napajännitteetkin ovat siten yhtä suuret, joten lamput 1, 4, 5, 8 ja 9 palavat siis todella yhtä kirkkaasti.

Piiriin ii paristossa kulkee lamppujen 2 ja 3 summavirta, joka on noin kaksinkertainen verrattuna lampun 1 virtaan. Sen napajännite on siksi vähän alempi, joten myös lamput 2 ja 3 palavat vähän himmeämmin kuin tämä.

Piirissä vi virta, joka kulkee lampun 10 läpi, jakautuu lamppujen 11 ja 12 kesken kahteen yhtä suureen osaan. Piiriin jännite  $U \approx 2E$  jakautuu siten kahteen osaan  $U = U_{10} + U_{11}$ , joista edellinen on lampun 10, jälkimmäinen lamppujen 11 ja 12 jännitehäviö. Ensimmäinen on selvästi suurempi, koska se aiheutuu kaksi kertaa niin suuresta virrasta kuin toinen:  $U_{10} > E$ ,  $U_{11} < E$ . Jos lamput noudattaisivat Ohmin lakia, mitä ne tosin eivät tee, olisi  $U_{10} : U_{11} = 2 : 1$  ja siis  $U_{10} \approx 4E/3$ ,  $U_{11} \approx 2E/3$ .

Kytkökseen v rinnastaen voidaan kuitenkin Ohmin laista riippumattakin todeta, että lamppu 10 palaa selvästi kirkkaammin kuin lamppu 8 ja keskenään yhtä kirkkaat lamput 11 ja 12 ovat selvästi himmeämmät kuin lamppu 9.

Lamppujen 11 ja 12 vertaaminen lamppuihin 6 ja 7 ei onnistu ehdottoman varmasti tuntematta lamppujen ominaiskäyrää  $I = I(U)$ . Jos lamput noudattaisivat Ohmin lakia, 6 ja 7 olisivat selvästi himmeimmät.

Ryhmittelemällä yhtä kirkkaat yhteen saadaan lampuille siis seuraava järjestys himmeimmästä kirkkaimpaan:  $(6, 7) < (11, 12) < (2, 3) < (1, 4, 5, 8, 9) < 10$ . Kahden ensimmäisen ryhmän järjestys on vähän epävarma, kolmannen ja neljännen ero on pieni. Käsittely perustuu siihen luonnolliseen oletukseen, että kaikissa piireissä paristojen jännitehäviöt ovat pienet  $E - U \ll E$

### Huomautuksia.

Koska hehkulamput eivät noudata Ohmin lakia, vaan niiden laskennallinen resistanssi riippuu voimakkaasti virrasta, ei tehtävää pitäisi käsitellä algebrallisesti Ohmin lakiin nojautuen. Se pitäisi ratkaista pelkästään nojautumalla virran ja jännitteen perusominaisuuksiin, joita voi kutsua myös Kirchhoffin säännöiksi. Tässä suhteessa ratkaisuja kuitenkin oli pakko katsoa läpi sormien. Ohmin laki, vaikka se onkin fysikaalisena perusteluna väärä, tuottaa selvästi ja yksikäsitteisesti edellä todetun tuloksen.

Valitettavasti suurin osa kokeeseen osallistuneista ei ymmärtänyt, mitä fysikaalinen perusteleminen merkitsee. Perustelut olivat usein pelkkiä kytköskaavioiden kuvailuja, taulukoista – oikein tai väärin – kopioituja sarjaan ja rinnan kytkentöjen laskusääntöjä. Kirchhoffin lait saatettiin mainita pohtimatta lainkaan, miten ne ilmenevät eri kytköksissä. Tämän jälkeen suoritettiin jonkinlainen lamppujen lottoarvonta toivoen onnettaren apua.

Dimensio, 59, 3/1995, 19...31.

Lähes puolet vastaajista esitti joitakin perinteisten väärinkäsitysten kauhukuvia. "Rinnan kytkennässä vain paristoa lähimmäksi piirretty lamppu palaa, koska elektronit kulkevat aina lyhintä reittiä". Onkohan heillä kotona aina vain yksi lamppu palamassa? "Sarjaan kytkennässäkin vain ensimmäinen lamppu palaa kunnolla, koska seuraaville jää virtaa jäljelle vain vähän, jos ollenkaan."

Hölynpölystä huolimatta vastauksissa esiintyvät oikean tiedon muruset, vaikkei niitä sitten osattukaan käyttää, voitiin palkita 1–2 pisteellä. Parhaatkin vastaajat unohtivat usein paristoissa tapahtuvat jännitehäviöt kokonaan, tai jättivät niiden vaikutuksen esittämättä. Tästä velotettiin yksi piste. Yllättävän yleinen virhe muuten asiallisissakin vastauksissa oli  $\frac{1}{2}E$ :n tarjoaminen rinnan kytkettyjen paristojen yhteiseksi lähdejännitteeksi.

Jonkin verran esiintyi myös vastauksia, joissa muutta mutkitta ilmoitettiin lampuille jokin järjestys ilman sanaakaan perusteluksi. Pisteitä niistä ei annettu riippumatta siitä, kuinka monta oikein oli veikkattu.

Täysien pisteiden vastaukset sai laskea yhden käden sormilla. Noin 40 % osallistujista joko jätti tehtävän kokonaan käsittelemättä tai sai siitä pyöreän nollan. 1–2 pisteen vastauksia oli toiset noin 40 %. Heistäkin suurin osa olisi oikeastaan ansainnut nollan. Häpeällisen lempeästikin arvostellen tehtävän keskiarvo jäi hämmentävän alhaiseksi. Jos fysiikan opiskelijoiksi pyrkivien ymmärrys sähkövirrasta on tätä tasoa, mitä pitää ajatella niistä, jotka eivät ole lukeneet fysiikkaa lainkaan, vai aiheutuvatko sekaannukset nimenomaan fysiikan opetuksesta.

Miksi yksinkertaiset virtapiirit ovat suurelle osalle koulufysiikkansa läpäisseistä täysi mysteeri? Ovatko ne liian arkisia jaksaakseen kiinnostaa? Kysymys on kuitenkin elinympäristömme jokapäiväisistä ilmiöistä ja peruskäsitteistä, joiden ohi ei ole mitään tietä "hienompaan" fysiikkaan tai teknologiaan.

### Tehtävä 3.

a) Kuinka suuri on putoamiskiihtyvyyden viiden Maan säteen korkeudella Maan pinnasta? b) Kuinka suuri nopeus satelliitille on annettava tällä korkeudella, jotta se alkaisi kiertyä Maata pitkin ympyrärataa? c) Miten satelliitin rata muuttuu, jos sen ratanopeutta muutetaan? Selvitä fysikaalisin perustein mahdolliset eri tapaukset.

#### Käsittely.

a) Putoamiskiihtyvyyden aiheutuu Maan painovoimasta. Newtonin gravitaatiolain mukaan se on kääntäen verrannollinen Maan keskipisteestä mitatun etäisyyden neliään. Putoamiskiihtyvyyden korkeudella  $5R$  (etäisyydellä  $6R$  keskipisteestä) saadaan siten verrannosta

$$g(r) \sim 1/r^2 \Rightarrow g(6R) : g(R) = 1 : 36 \Rightarrow g(6R) = (9,8 \text{ m/s}^2)/36 = 0,27 \text{ m/s}^2$$

b) Ympyräradalla satelliitti on painovoiman ylläpitämässä tasaisessa ympyräliikkeessä, jonka kiihtyvyyden  $a = v^2/r$  on putoamiskiihtyvyyttä. Tässä  $v$  on satelliitin nopeus ja  $r = 6R$  sen ympyräradan säde. Kun kiihtyvyyden  $a$ -kohdan mukaan tunnetaan, voidaan nopeus ratkaista:

$$v^2/(6R) = g/36 \Rightarrow v = \sqrt{gr/6} \approx \sqrt{(9,8 \text{ m/s}^2) \cdot (6,4 \cdot 10^6 \text{ m})/6} \approx 3200 \text{ m/s}.$$

c) Kappaleen ratakäyrä Newtonin gravitaatiolain mukaisessa painovoimakentässä on kartioleikkaus, jonka toisessa polttopisteessä voimakas, tässä tapauksessa Maan keskipiste, sijaitsee. Ratakäyrä on ellipsi, jos satelliitin kokonaisenergia on  $E < 0$ , hyperbeli, jos se on  $E > 0$ . Parabelirata on näiden välinen rajatapaus, jossa on  $E = 0$ .

Kun satelliitin nopeutta pienennetään, se joutuu ellipsiradalle, jonka ylin piste on lähtökorkeudella. Jos nopeus on niin pieni, että rata kulkee ilmakehän kautta, satelliitti putoaa ennen pitkää Maahan. Nopeuden suurentaminen vie satelliitin ensin ellipsiradalle jonka radan alin piste on lähtökorkeudella. Kun nopeuden lisäys ylittää tietyn rajan, satelliitti joutuu hyperbeliradalle, joka vie sen jatkuvasti yhä kauemmas Maasta.

#### Huomautuksia.

Tehtävässä oli tunnettava fysiikan kaksi kulmakiveä, Newtonin gravitaatiolaki ja dynamiikan peruslaki. Oli myös tiedettävä tai (tunnistettava taulukoista) normaalikiihtyvyyden lauseke ja ymmärrettävä, että ainoa satelliitin vaikuttava voima on gravitaatio, joka aiheuttaa putoamiskiihtyvyyden. Lisäksi odotettiin tietoa taivaankappaleiden ratojen muodoista ja radan luonteen yhteydestä kokonaisenergiaan.

Pisteet jaettiin tasan eri kohtien kesken. Suuri osa pyrkijöistä vastasi oikein kahteen ensimmäiseen kohtaan, joten 4 pisteen vastauksia oli paljon.

Dimensio, **59**, 3/1995, 19...31.

Kohdassa (a) ei sakotettu väärästä säteestä  $5R$ . Eräissä vastauksissa putoamiskiihtyvyys laskettiin interpoloimalla lineaarisesti maanpinnalla ja Kuun etäisyydellä vallitsevista putoamiskiihtyvyyksistä. Kekseliäisyydestä, jolla näin korvattiin fysiikan perustietojen pettäminen, annettiin 1 piste.

Kohdan (b) vastauksissa yleensä kyllä tarjottiin tavalla tai toisella sitä oikeaa lähtöajatus, että tasaisen ympyräliikkeen kiihtyvyys on tässä sama kuin putoamiskiihtyvyys, mutta tätä ei aina osattu pukea sellaiseen esitysmuotoon, joka olisi johtanut tulokseen.

Kohdassa (c) ei odotettu laskennallista käsittelyä. Siitä annettiin 1 piste, jos muistettiin jotakin oikeaa radan muodosta. Sidottujen ja äärettömien ratojen erottelu tuotti jo toisenkin pisteen. Selitykset olivat kuitenkin runsaita ja uskomattomia:

- "Maan vetovoima on suurempi kuin keskipakovoima",
  - "Maan vetovoima on suurempi kuin nopeuden aiheuttama pakovoima",
  - "Gravitaatiovoima kasvaa suuremmaksi kuin normaalivoima",.
  - "Keskipakovoima ei pysty pitämään satelliittia radallaan",
  - "Keskipakovoima  $F = mv^2/r$  suurenee",
  - "Maan vetovoima on suurempi kuin satelliittia poispäin työntävä voima",
- jne.

#### **Tehtävä 4.**

Suosta löytyneessä suksenpalassa oli beeta-aktiivisen hiili-isotoopin  $^{14}\text{C}$  ja pysyvän isotoopin  $^{12}\text{C}$  määrien suhde neljäsosa tuoreen näytteen vastaavasta isotooppisuhteesta. Aktiivisen isotoopin puoliintumisaika on 5730 vuotta. Kuinka vanha suksenpala oli? Mihin olettamuksiin vastauksesi perustuu?

#### **Käsittely.**

Hajoamislain mukaan aktiivisen isotoopin määrä ja siitä aiheutuva näytteen aktiivisuus puolittuvat määrästä riippumatta aina yhtä pitkässä ajassa, jota sanotaan isotoopin tai näytteen puoliintumisajaksi.

Aktiivista hiili-isotooppia  $^{14}\text{C}$  syntyy ilmakehässä jatkuvasti (erityisesti auringosta tulevan protonisäteilyn aiheuttamissa) ydinreaktioissa.

Yhteyttäminen sitoo hiiltä elolliseen materiaan. Niin kauan kuin eliö elää, se on mukana tässä prosessissa, ja isotooppien suhde sen materiassa säilyy samana kuin ilmassa. Kun eliö kuolee (suksipuu kaadetaan) tämä yhteys katkeaa, ja aktiivisen isotoopin suhteellinen osuus alkaa pienetä hajoamislain mukaisesti. Se pienenee neljänteen osaan kahdessa puoliintumisajassa. Suksen palalla oli siis ikää noin  $2 \cdot 5730 \text{ a} \approx 11500 \text{ a}$ .

Tärkein oletus siis on, että isotooppien  $^{14}\text{C}$  ja  $^{12}\text{C}$  määrällinen suhde ilman hiilidioksidissa on pysynyt jatkuvasti samana.

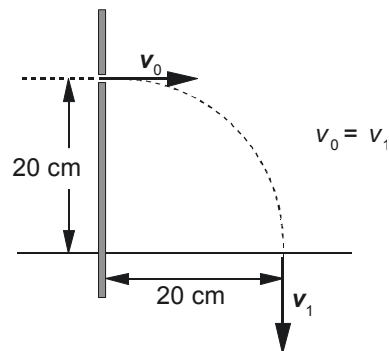
#### **Huomautuksia.**

Laskennallisesti tehtävä oli kokeen helpoin. Kahdella kertomisen osaaminen ei liene kohtuuton vaatimus. Monet eksyivät tarpeettomasti "korkeampaan matematiikkaan" hyödyntämällä hajoamislain eksponentiaalista muotoa ja joutuivat näin alttiiksi monille virhemahdollisuuksille. Odottamattomasti niistä oli kantaluvun e lukeminen taulukon kohdasta alkeisvaraus e.

Oikein perusteltu kahdella kertominen tai eksponenttilaskenta riittivät 5 pisteeseen. Kuudennen pisteen saivat ne 10 %, jotka osasivat kertoa mihin olettamuksiin vastaus perustui. Oletukseksi on hyväksytty myös se, että sukset on vuoltu tuoreesta puusta – vaikka tuntuukin epätodennäköiseltä, että esi-isät olisivat käyttäneet satojen vuosien ikäisiä pötkelöitä.

### Tehtävä 5.

Vaakasuora protonisuihku on kiihdytetty 1,5 kV:n jännitteellä. Se ohjataan sitä vastaan kohtisuoran levyn aukosta tilaan, jossa on homogeeninen a) magneettikenttä b) sähkökenttä. Kenttä taivuttaa suihkua kuvan mukaisesti pystytasossa siten, että se osuu vaakasuoralle varjostimelle kohtisuorasti nopeudella, joka on yhtä suuri kuin sen alkunopeus aukossa. Osumakohdan etäisyys levystä on 20 cm ja yhtä suuri kuin aukon etäisyys varjostimesta. Määritä a-kohdassa magneettivuon tiheys, b-kohdassa sähkökentän voimakkuus ja kummassakin tapauksessa kentän suunta. c) Miten tilanne muuttuu kohdissa (a) ja (b), jos protonien asemesta kiihdytetään elektroneja?



#### Käsittely.

Kiihdytysjännite  $U$  antaa sekä protoneille että elektroneille liike-energian  $eU = 1,5 \text{ keV}$ . Kenttään saapuvien hiukkasten nopeus voidaan tällä perusteella laskea:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = eU \Rightarrow v_0 = \sqrt{2eU/m} .$$

Nopeuden lukuarvoa laskemattakin voidaan päätellä, ettei suhteellisuusteoriasta tarvitse huolehtia vaan klassinen tarkastelu riittää. Elektroninkin lepoenergia, 0,5 MeV, on nimittäin paljon suurempi kuin tehtävässä annettu liike-energia 1,5 keV.

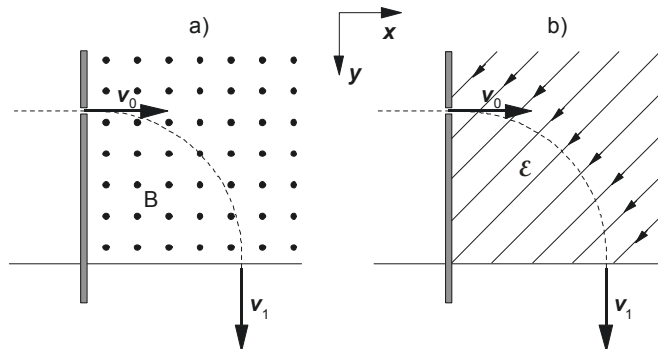
**a)** Magneettikenttä, jonka magneettivuon tiheys on  $B$  vaikuttaa hiukkaseen, jonka varaus on  $q$ , voimalla  $F_B = qvB$ . Voima on kohtisuorassa sekä hiukkaseen nopeutta  $v$  että kenttää vastaan. Koska hiukkassuihku pysyy kuvan tasossa, kentän on oltava kuvan tasoa vastaan kohtisuora. Vektorit  $qv$ ,  $B$  ja  $F_B$  muodostavat tässä järjestyksessä oikeakätisen kolmikion. Koska protonin varaus on positiivinen  $q = e$  ja voima alkutilanteessa suuntautuu alaspäin, kentän on suuntauduttava kohti katsojaa.

Protonit joutuvat kentässä ympyräradalle, jonka säde on  $r = 20 \text{ cm}$ . Kenttä antaa niille ympyrän keskipisteeseen suuntautuvan kiihtyvyyden  $a = v_0^2/r$  liikeyhtälön

$$F_B = ma \Rightarrow ev_0B = mv_0^2/r$$

mukaisesti. Tästä voidaan ratkaista magneettivuon tiheys

$$B = \frac{mv_0}{er} = \frac{1}{r} \cdot \sqrt{\frac{2U}{me}} \approx 28 \text{ mT} .$$



**b)** Sähkökenttä, jonka sähkökentän voimakkuus on  $\mathcal{E}$ , vaikuttaa protoneihin voimalla  $F_{\mathcal{E}} = e\mathcal{E}$ . Homogeenisessa kentässä protonit joutuvat tasaisesti kiihtyvään liikkeeseen. Niiden ratakäyrä on paraabeli, jonka akseli on kentän suuntainen. Tämä paraabeli voi kohdata sekä levyn että varjostimen kohtisuorasti vain, jos kenttä suuntautuu kuvassa  $45^\circ$ :n kulmassa vasemmalle alas.

Tilannetta kannattaa tarkastella komponenttiesityksessä kuvan mukaisessa  $xy$ -koordinaatistossa. Kentän  $x$ -komponentti pysäyttää suihkun liikkeen  $x$ -komponentin välillä  $\Delta x = d = 20 \text{ cm}$ . Sen  $y$ -komponentti antaa suihkulle alkunopeuden suuruisen nopeuden  $v_1 = v_0$  yhtä suurella välillä  $\Delta y = d$ . Kun energiaperiaate kirjoitetaan erikseen kummallekin komponentille, saadaan siis yhtälöt

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = e\mathcal{E}_x d \text{ ja } \frac{1}{2}mv_0^2 = e\mathcal{E}_y d ,$$

joista voidaan ratkaista

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_y = \frac{mv_0^2}{2ed} = U/d \Rightarrow \mathcal{E} = \sqrt{2U} / d = 10,6 \text{ kV/m}$$

**c)** Protonien korvaaminen tehtävässä elektroneilla vaihtaa hiukkasten varauksen etumerkin. Kummankin kentän suunta on sen tähden vaihdettava päinvastaiseksi. Elektronien pienemmän massan vuoksi,  $m_e \approx m_p/2000$

magneettikentän on a-kohdassa oltava heikempi,  $B_e \approx B_p / \sqrt{2000} = 650 \mu\text{T}$ . Tehtävän b-kohdassa tarvittavaan sähkökentän voimakkuuteen hiukkasten massa ei vaikuta.

**Huomautuksia.**

Kukin kohta oli periaatteessa kahden pisteen arvoinen, joskin merkkejä tiedonmurusista kerättiin läpi tehtävän palkittavaksi yhteisellä pisteellä silloin, kun kukin kohta erikseen olisi tuottanut vain nollan. Tehtävän luonteeseen vaikuttamaton pieni virhe saattoi myös kompensoitua muuten ansiokkaan esityksen vuoksi.

Magneettikentän osalta tehtävä osattiin kohtalaisesti. Ilahduttavan monet jopa esittivät fysikaalisia perusteluja. Tavallisin virhe oli väärä tai vajavaisesti ilmaistu kentän suunta – useimmat kuitenkin tiesivät sen olevan kohtisuorassa kuvan tasoa vastaan. Nekin, jotka eivät muuta osanneet, onnistuivat useimmiten selvittämään hiukkasten kiihdytyksessä saaman nopeuden, joka palkittiin yhdellä pisteellä.

Muutamat pitivät kiihdytysjännitettä turhana tietona tai peräti hämäysyrityksenä, koska uskoivat hiukkasten liikkuvan valonnopeudella! Jotkut pitivät gravitaation vaikutusta hiukkasiin merkittävänä. Ja tietysti – mukaan mahtui taas lukuisia keskipakovoimalla hulluttelijoita.

Sähkökentän määrittäminen onnistui ani harvalta. Melkein kaikki vastaajat pitivät jonkinlaisena aksioomana kentän suuntautumista "ylhäältä alas" Toiseksi hiukkasan kuviteltiin nytkin kulkevan ympyrärataa. Valopiilkuina erottuivat ne, jotka ymmärsivät hiukkasten liikkuvan paraabelirataa ja vertasivat tilannetta vinoon heittoliikkeeseen. Heiltä jäi kuitenkin yleensä huomaamatta, ettei alas suuntautuva kenttä saa hiukkasia osumaan varjostimelle kohtisuorasti. Näistä ratkaisuista annettiin yksi piste. Jonkin verran esiintyi myös ratkaisuja, joissa sähkökentän suunnaksi ilmoitettiin "oikealta vasemmalle" Sähkökenttä tarvittiin siis vain vaakasuoran liikkeen pysäyttämiseen. Painovoima kai sitten oli lähin ehdokas aiheuttamaan radan kaartumisen kohti varjostinta, vaikka sitä ei aina suoraan sanottukaan!

Tarvittavien kenttien suuntien vaihtumisen kohdassa (c) tiesi suurin osa vastaajista, mutta huomattavassa määrin väitettiin myös joko toisen tai molempien kenttien suunnan pysyvän samana! Monet keksivät, että elektronit saavat suuremman alkunopeuden, mutta kaikki heistä eivät huomanneet sen vaikutusta tarvittavaan magneettivuon tiheyteen.

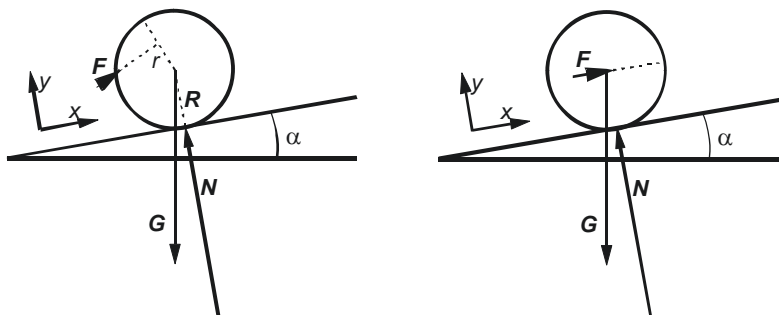
Kohdista (a) ja (c) saatiin tyypillisesti kokoon 2–3 pistettä. Koska b-kohdan tilanteen oivaltaneita oli vain kourallinen, hyvät pisteet olivat todella harvinaisia. Tyhjä sivu tai nollavastaus oli lähes kolmanneksella.

**Tehtävä 6.**

Tynnyri, jonka massa on 80 kg, lepää kyljellään poikittain kaltevilla tasolla, jonka kaltevuuskulma on 10°. Kuinka suuri ja minkä suuntainen on pienin voima, jolla tynnyri saadaan pysymään paikallaan, ja mihin kohtaan tynnyriä se pitää kohdistaa? a) Taso on hyvin liukas. b) Lepokitka riittää estämään tynnyrin liukumisen. c) Kuinka suuri on tynnyrin ja tason välinen lepokitkakerroin b-kohdassa?

**Käsittely.**

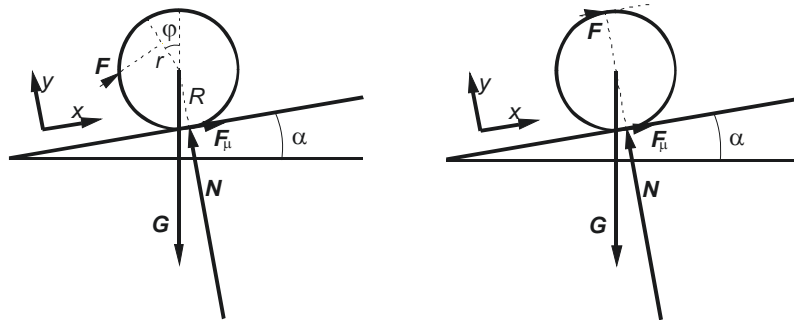
a) Tynnyriin vaikuttavat sen oma paino  $G$  alaspäin ja pinnan tukivoima  $N$  kohtisuoraan tasoa vastaan. Koska taso on liukas, kitka voidaan jättää huomioon ottamatta.



Tynnyrin tasapainoehdot pyörimisen ja etenemisen suhteen kuvan merkinnöin ovat:

Momentit akselin suhteen	$rF = 0 \Rightarrow r = 0$
Voimien x-komponentit	$F_x - G \sin \alpha = 0 \Rightarrow F_x = G \sin \alpha$
Voimien y-komponentit	$N + F_y - G \cos \alpha = 0$

Tasapainottava voima  $F$  on siis suunnattava kohti tynnyrin keskipistettä,  $r = 0$ . Muuten se pyörittäisi tynnyriä. Toinen ehto kiinnittää tasapainottavan voiman  $x$ -komponentin. Voima on pienin, kun sen  $y$ -komponentti on  $F_y = 0$ . Voima on siis tason suuntainen  $F = F_x = G \sin \alpha = 136 \text{ N}$ .



b) Nyt taso ei ole liukas. Koska lepokitka riittää estämään tynnyrin liukumisen sen suuruuden määräävät tasapainoehdot kuten tukivoimankin:

Momentit akselin suhteen	$rF = RF_\mu \Rightarrow F_\mu = r/RF$
Voimien $x$ -komponentit	$F \cos \phi + F_\mu - G \sin \alpha = 0$
Voimien $y$ -komponentit	$N + F \sin \phi - G \cos \alpha = 0$ .

Kahdesta ensimmäisestä voidaan ratkaista tasapainottava voima

$$F = G \sin \alpha / \cos \phi + r/R.$$

Tämä on pienin, kun nimittäjä on suurin eli kun voima on tason suuntainen,  $\cos \phi = 1$  ja kun se vaikuttaa tynnyrin kehälle,  $r = R$ . Pienimmäksi tasapainottavaksi voimaksi saadaan näin

$$F = \frac{1}{2} G \sin \alpha \approx 68 \text{ N}.$$

Tukivoima on kolmannen tasapainoehdon mukaan  $N = G \cos \alpha$  ja lepokitka momenttiehdon mukaan  $F_\mu = F$ , joten lepokitkan laista  $F_\mu < \mu_0 N$  seuraa lepokitkakertoimelle  $\mu_0$  ehto

$$\frac{1}{2} G \sin \alpha < \mu_0 G \cos \alpha \Rightarrow \mu_0 > \frac{1}{2} \tan \alpha \approx 0,09.$$

### Huomautuksia.

Arvostelussa hyväksyttiin piirroksen perusteellakin järkeilyjä vastauksia, kunhan niistä kävi ilmi, että oli ymmärretty mistä oli kyse. Ilahduttavan monet osasivatkin ratkaista tehtävän päättämällä, vaikka päättely ei ehkä ollutkaan aivan sitova.

Vaikeuseroista huolimatta tehtävän kolme kohtaa olivat arvostelussa pääsääntäisesti 2 pisteen arvoiset. Useimmat osasivat ratkaista a-kohdan ainakin 1 pisteen arvoisesti ja saivat jotakin irti b-kohdasta, joten 2 ja 3 pisteen vastaukset olivat varsin yleiset. Oikea vastauksen löytäminen b-kohtaan tuotti hankaluuksia, mutta useimmat, jotka onnistuivat siinä, selvittivät saman tien myös c-kohdan.

Oudot kukat kukkivat tässäkin. Yllättävän yleisesti väitettiin, että lepokitka yksin riittää pitämään tynnyrin paikallaan, vaikka vastaajan kuvassa oli selvästi pyöreä tynnyri. Mikä on katkaissut fysiikan yhteyden todellisuuteen? Ei kai kukaan sentään tosissaan kuvittele voivansa jättää pyöreää kappaletta mäkeen tuetta.

### Coda

Kun tarkastellaan valintakokeiden vastausten kehittymistä pitkällä aikavälillä, nähdään koulun fysiikan opetuksessa tapahtuneen myönteistä kehitystä. Hyvät vastaukset ovat sekä lisääntyneet että parantuneet. Fysikaalisia perusteita on opittu tunnistamaan ja esittämään.

Toisaalta vastauksia, jotka osoittavat täydellistä tietämättömyyttä fysiikan ensimmäisistäkin peruskäsitteistä, on jatkuvasti aivan liian suuri osuus. Luonnollinen ympäristön havaitsemisen ja siitä oppimisen prosessi on pahasti poikki. Vastaukset korostavat pelkkää algebraa ymmärtämisen kustannuksella. Konkreettista ja havainnollista esittävää matematiikkaa, graafista esitystä ja vektoreiden piirrettyä geometriaa vieroksutaan. Ratkaisua etsitään



Dimensio, 59, 3/1995, 19...31.

mielummin arvaamalla kaavoja kuin yrittämällä kytkentää tarkasteltavaan ilmiöön. Yhteys havaittavaan todellisuuteen puuttuu. Ei osata vedota ilmiöiden noudattamiin lakeihin, ei kiinnitetä huomiota lakien pätevyysalueisiin eikä tekijöihin, joiden vuoksi poikkeamia laeista voisi esiintyä. Enimmissä kouluissa ei ilmeisesti vielääkään kasvateta perusteltuun esitykseen, jota ei opita ilman järjestelmällistä harjoittelua.

Toinen ongelma on kielellisten valmiuksien puute. Aina ei ole selvää, johtuuko vastauksen avuttomuus enemmän tästä kuin kyvyttömyydestä ymmärtää ilmiöiden fysiikkaa. Vastauksista saa sen vaikutelman, ettei fysiikan yhteydessä harjoitella kielellistä esitystä. On välttämätöntä sekä keskustella että kirjoittaa ilmiöistä, niiden esittämisestä, tulkitsemisesta ja mallintamisesta, käsitteiden merkityksistä, lakien ilmenemisestä luonnossa jne. Käsitteiden hämäryys paljastuu usein itsellekin vasta, kun ajatukset pitäisi purkaa selväkielisiksi lauseiksi. Merkitykset hahmottuvat vasta käsitteitä käytettäessä. Ne eivät selviä kaavoja tuijottamalla ja hautamalla.

Kolmas vaikeus, tarkastajan kannalta varsin kiusallinen, on käsiala – tai paremminkin sen puute. Tietokoneiden aikakaudestako johtunee, että vastaajien kirjoituksesta on vuosi vuodelta yhä vaikeampi saada selvää. Kovin kaukana ei ole aika, jolloin on pakko hylätä vastauksia, koska niitä ei ole mahdollista lukea. Viestintäkasvatusta kyllä korostetaan, mutta onko sen ensimmäinen perustaso, viestin selkeys ja ymmärrettävyys, unohdettu abstraktien humanististen utopioiden innossa.

Vuosien 1992, 1993 ja 1994 tehtävien selitykset on julkaistu Fysiikan laitoksen raporteina HU-P-A75, HU-P-A76 ja HU-P-A77. Niitä voi tilata fysiikan laitoksen toimistosta: puh. 0-1918324, telefax 1918680, sähköposti tuulikki.pitkanen at helsinki.fi.