

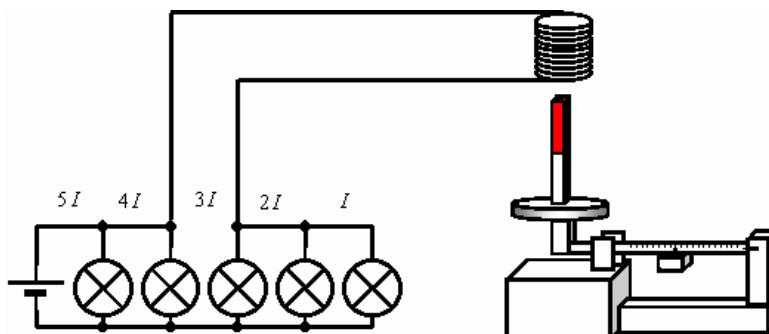
Sähkömagnetismi II: sähkövirta, jännite, varaus, magneettimomentti

Sähkövirran kvantifiointi

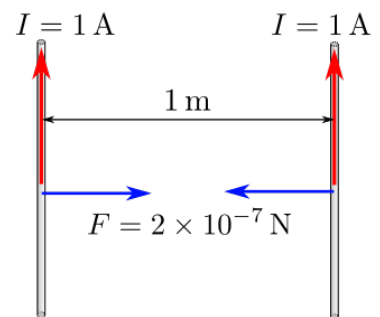
Sähkövirtaa ei voi kvantifioida kahden jo olemassa olevan suureen invarianssina. Näin ollen se täytyy määritellä olemaan verrannollinen jonkin sähkövirran voimakkuudesta riippuvan ilmiön voimakkuuteen, jota pystytään mittaamaan. Mahdollisia ilmiöitä olisivat elektrolyysi (mitataan liuoksesta erottuvan aineen määrä aikayksikössä) ja magneettinen vuorovaikutus (mitataan sähkövirran aikaansaama magneettinen voima tai momentti). Valitaan jälkimmäinen.

Koejärjestely on kuvassa 1a. Samanlaisia lampuja on kytketty rinnan. Ne palavat yhtä kirkkaasti, joten jokaisen läpi kulkee yhtä suuri sähkövirta. Virtapiirissä on myös käämi, jonka läpi ohjataan kytkentää muuttamalla kulkemaan 1...5 lampun sähkövirta. Magneettinen voima käämin ja pariston välillä mitataan esim. vaakaa käyttäen. Havaitaan että voima on verrannollinen sähkövirtaan,

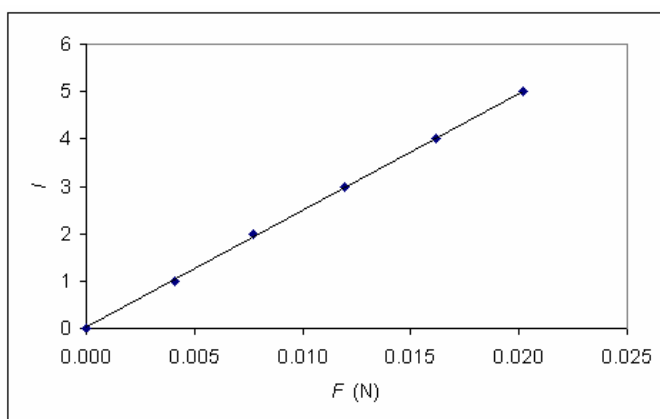
$F \propto I$. Verrannollisuus voidaan kääntää, $I \propto F$ (kuva 2). Näin ollen suure sähkövirta voidaan määritellä verrannolliseksi sähkövirran aikaansaaman magneettisen vuorovaikutuksen voimaan; verrannollisuuskertoimen määrääytyy standardisoidun koejärjestelyn (kuva 1b) avulla.



kuva 1a



kuva 1b



Kuva 2

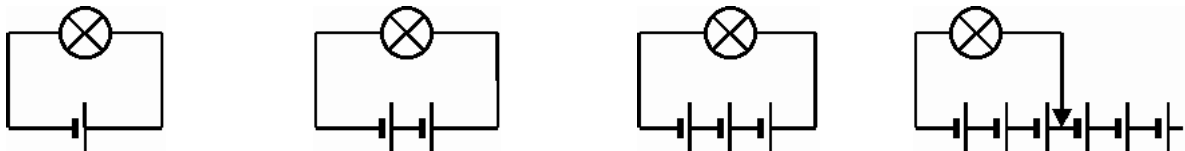
Kuva 2 esittää tyypillisiä koetuloksia. Koska voimat ovat pieniä, vaa'an resoluution pitää olla vähintään 0,1 g. Käämissä pitää olla tarpeeksi kierroksia että voima pystytään mittaamaan, mutta ei liikaa jottei käämi vastusta huomattavasti sähkövirran kulkua. Sopiva määrä on 60 tai 180 kierrosta.

Jännite

Paristojen kytkennät, jännitteen summautuminen

On todettu, että paristoilla on jännitteeksi kutsuttu ominaisuus, joka saa aikaan sähkövirran suljetussa virtapiirissä.

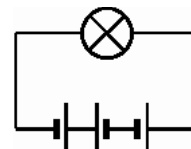
Jo Volta keksi, että kytkemällä peräkkäin useita sähkövirtaa tuottavia elementtejä, saadaan niiden muodostamasta paristosta voimakkaampi. Kuvan 3 esittämillä kokeilla havaitaan, että mitä useampia paristoja kytketään sarjaan napaisuudeltaan samoin päin, sitä kirkkaammin yhdistelmään kytketty lamppu palaa. Eli sarjaankytkennässä jännite näyttäisi summautuvan.



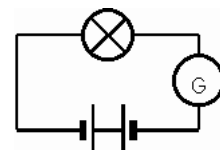
Kuva 3

Aikaisemmin on sähkövirran suunnan kääntymisen perusteella päätelty, että myös jännitteellä on suunta. Viereisten kuvien kokeilla havaitaan, että kaksi samanlaista, napaisuudeltaan vastakkaisiin suuntiin sarjaan kytkettyä paristoa kumoaa toistensa jännitteet. Kuvan 4a tilanteessa lamppu palaa yhtä kirkkaasti kuin yhdellä paristolla; kuvan 4b tilanteessa lamppu ei pala lainkaan, ja galvanometri näyttää että piirissä ei kulje sähkövirtaa. Näyttää siltä että jännitteitä voi laskea yhteen kuten etumerkillä varustettuja lukuja, ja kytkentäsuunta määrää jännitteen merkin.

Paristojen rinnankytkennässä lampun kirkkaus ei muutu, joten paristojen yhteinen jännitekään ei muutu.



4a

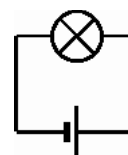


4b

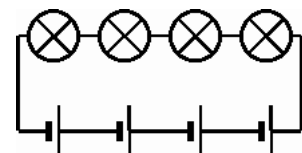
Jänniteominaisuuden yleistys, porrasmalli

Kun paristoon kytketään useita lamppeja sarjaan, ne palavat sitä himmeämmin mitä enemmän lamppeja kytkennässä on. Toisaalta jos kytkentään lisätään aina yksi lamppu ja yksi paristo (kuva 8), lampujen kirkkaus pysyy samana. Tämä osoittaa että lampun kannalta jännite on kaikissa tilanteissa sama.

On siis ilmeistä, että ei ainoastaan paristoilla vaan myös lampuilla on vaikutusta sähkövirtaan. Tehdään yleistys: jännite ei ole ainoastaan pariston ominaisuus, vaan jännite on minkä tahansa virtapiirin kahden pisteen ominaisuus.



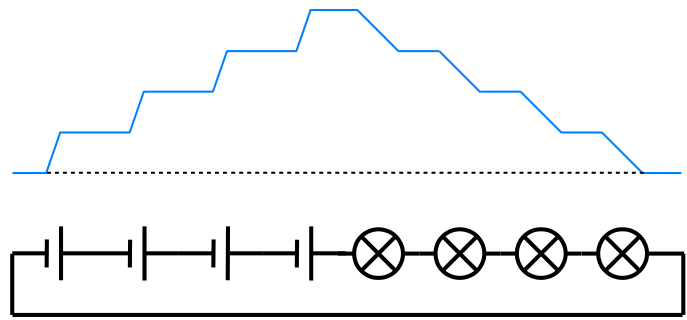
5a



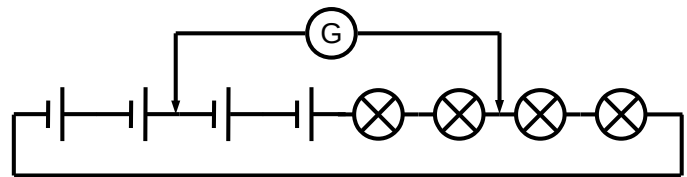
5b

Tältä pohjalta voidaan muodostaa ilmiöt selittävä porrasmalli. Kuvan 5b kytkennässä jännite lamppujen napojen välillä on yhtä suuri kuin jännite paristojen napojen välillä. Otetaan yksi virtapiirin piste vertailupisteeksi, ja piirretään sen ja muun virtapiirin pisteiden välisen jännitteen kuvaaja. Paristojen ja lamppujen napajännitteet näkyvät kuvaajassa portaina, minkä tahansa kahden pisteen välinen jännite ilmenee vastaavien kuvaajan tasojen korkeuserona. Toisaalta pisteen ja sen itsensä välinen jännite on epäilemättä 0, joten kaikkien jänniteportaiden eli komponenttien napajännitteiden summan pitää olla 0.

Porrasmallia voidaan testata kuvan 7 kokeella. Malli ennustaa että kytkennässä on pistepareja joiden välinen jännite on 0. Tämä voidaan todeta kytkemällä galvanometri pisteiden välille kuvan mukaisesti¹.



Kuva 6

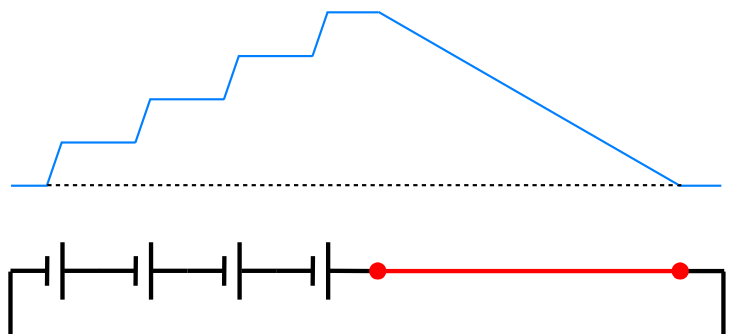


Kuva 7

Jännitteen kvantifiointi

Tässä vaiheessa on ilmeistä, että jännite on verrannollinen sarjaan kytkettyjen paristojen lukumäärään. Olisi mahdollista määrittää tuntematon jännite, käyttäen sarjaa samankaltaisia vertailuparistoja ja galvanometriä nollainstrumenttina, edellyttäen että tuntematon jännite on vertailupariston jännitteen monikerta. Kuitenkin yleisempää jännitteen kvantifiointikoetta varten tarvitaan keino tuottaa jatkuvasti muuttuva jännite.

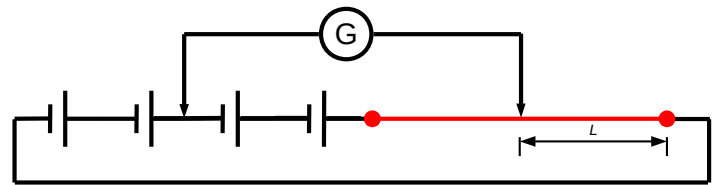
Korvataan lamppusarja tasapaksulla vastuslangalla (kuvassa punainen johdin). Jännitteen vertailupisteen ja langalla olevan pisteen välillä pitäisi nyt muuttua lineaarisesti, eli jännitteen pitäisi olla verrannollinen langan vertailupisteeseen kytketystä päästä mitattuun etäisyyteen.



kuva 8

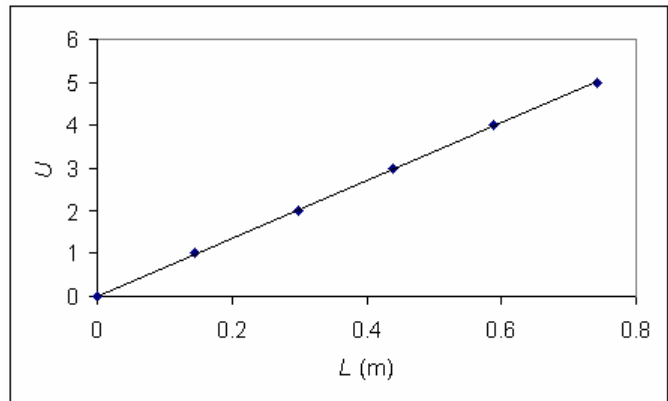
¹ Käytännössä paristojen ja lamppujen välillä on yksilöeroja. Näin ollen kuvan tilanteissa jännitteet eivät kumoudu täysin, ja galvanimetrin läpi kulkee pieni, mutta herkässä mittarissa huomattavalta näyttävä sähkövirta. Kokeita varten on syytä kytkeä galvanimetrin kanssa sarjaan n. 100 ohmin vastus, joka muuttaa galvanimetrin epäherkemmäksi.

Kuva 9 esittää koetta, jolla osoitetaan kuvan 8 mallin ennuste oikeaksi. Galvanometrin avulla löydetään vastuslangalta pisteet, joiden potentiaalit vastaavat 0, 1, 2 jne pariston jännitteitä.



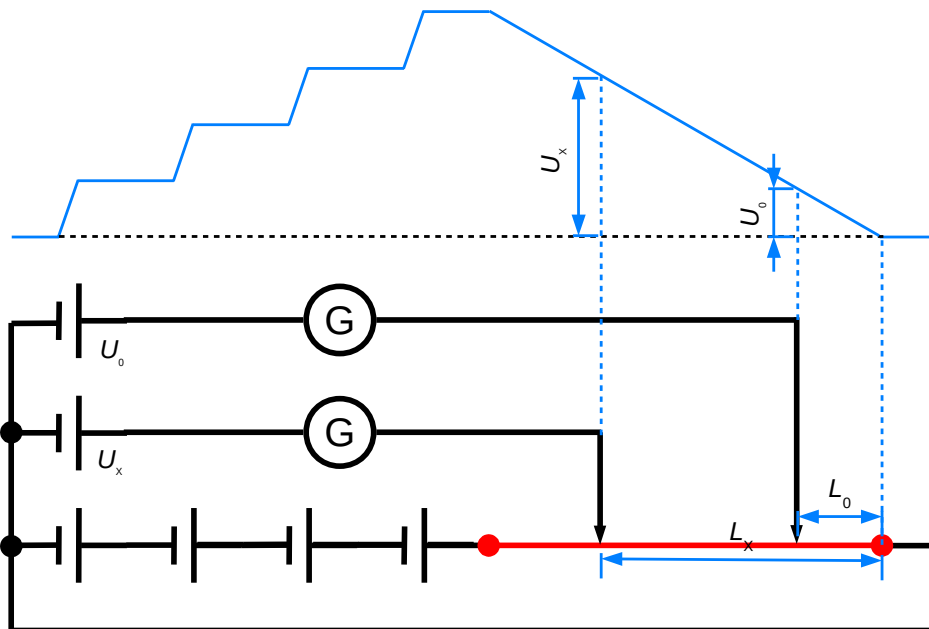
kuva 9

Havaitaan että pisteiden etäisyydet ovat verrannollisia jännitteeseen, $L \propto U$. Jälleen verrannollisuus voidaan kääntää muotoon $U \propto L$ (kuva 14; jännitteen yksikkönä on paristosarjan yhden pariston jännite). Tästä seuraa, että jännitteen mittaaminen voidaan perustaa vastuslangalta mitatun etäisyyden mittaamiseen.



kuva 10

Kuva 11 esittää, miten voidaan mitata mielivaltainen tuntematon jännite U_x vertailupariston määritellyn jännitteen U_0 avulla. Kun molemmat² galvanimetrit näyttävät nollaa, $U_x = \frac{L_x}{L_0} U_0$.



kuva 11

Vastuslankamenetelmää vastaavia keinoja on käytetty tarkkaan jännitteen mittaamiseen vielä joitakin kymmeniä vuosia sitten, ennen halpojen digitaalimittarien yleistymistä. Menetelmän etu on, että mitattavan jännitelähteen ja vertailupariston läpi ei kulje sähkövirtaa, joten niissä ei tapahdu

2 Käytännössä voi käyttää samaa galvanometria vuorotellen jännitteille U_0 ja U_x .

jännitehäviötä.

Käytännössä jännitteen mittaaminen vastuslankamenetelmällä on sangen työlästä. Onkin syytä jo tässä vaiheessa ottaa käyttöön jännitemittari, vaikka ei vielä voida selittää sen toimintaperiaatetta (kiertokäämimittari perustuu sähkövirran mittaamiseen ja Ohmin lakiin, digitaalimittari taas kanavatransistoriin eli puolijohteen johtavuuden riippuvuuteen sähkökentän voimakkuudesta). On kuitenkin osoitettava että jännitemittari mittaa samaa jännitesuuretta joka on juuri kvantifioitu, yksikkö vain on eri. Tämän voi tehdä esimerkiksi mittaamalla sekä vertailupariston että muutamien muiden paristojen jännitteet sekä vastuslankamenetelmällä että mittarilla. Havaitaan että tulokset ovat verrannollisia, ja verrannollisuuskertoimen mittarilla mitattu vertailupariston jännite (esim. 1,5 V) Se miksi voltti on sen kokoinen kuin on, selviää myöhemmin sähkötehon kvantifioinnin yhteydessä.

Sähkövarauksen kvantifiointi: Coulombin laki

Osoitetaan varaus verrannolliseksi jonkin varauksesta riippuvan ilmiön voimakkuuteen, ja sitten määriteltävä varaus tämän avulla.

On havaittu että sähköstaattinen voima on sitä suurempi, mitä lähempänä toisiaan varatut kappaleet ovat, ja mitä suurempi on kummankin varaus.

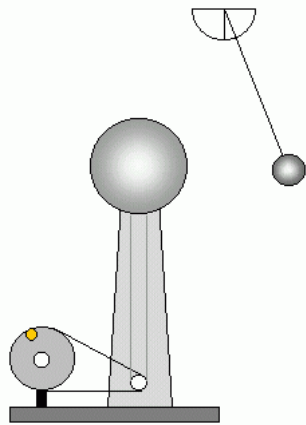
Koe toteutetaan niin, että vakioidaan testikappaleen B varaus ja kappaleiden etäisyys. Varoidaan toisen kappaleen A varausta. Mahdollisuudet:

- Otetaan varausta suuresta varauslähteestä C pienellä annostelukappaleella, siirretään kappaleeseen A. Ilmeisesti A:n varaus kasvaa yhtä suurin annoksin. Ongelmana on C:n ja A:n potentiaalien muuttuminen, joten varausta siirtyy kerta kerralta hieman vähemmän.
- Varauksen tuotto annoksittain, esim. nauhageneraattorin kammen kierrokset.
- Varauksen jakaminen yhtä suuriin osiin koskettamalla samanlaisilla kappaleilla => varaus jakautuu kappaleiden lukumäärän suhteessa.

Nauhageneraattorilla koe voidaan tehdä kuvan 12 esittämällä tavalla. Ripustetaan metallipäällysteinen pallo lankaan niin, että langan kulma voidaan mitata. varataan nauhageneraattoria sopivasti, kosketetaan kupua riippuvalla pallolla. Näin saadaan palloon vakiona pysyvä varaus. Puretaan generaattori, ja ladataan sitä kiertäen kampea esim. 1, 2, 3 jne kierrosta. Kullakin varauksella mitataan pallon langan ripustuskulma, pitäen pallon ja kuvun etäisyys vakiona. Kuvun ja pallon välinen voima on verrannollinen ripustuskulman tangenttiin. Tuloksista piirretään (Q, F) -kuvaaja, havaitaan verrannollisuus. Siispä varaus suurena voidaan määritellä verrannolliseksi voimaan, $Q \propto F$.

Sähköisen voiman etäisyysriippuvuus saadaan samalla koejärjestelyllä. Nyt kuvun ja pallon varaukset pidetään vakioina, ja muutetaan etäisyyttä. Saadaan riippuvuus $F \propto \frac{1}{r^2}$. Huom!

Etäisyys on mitattava kuvun ja pallon keskipisteestä keskipisteeseen.



kuva 12



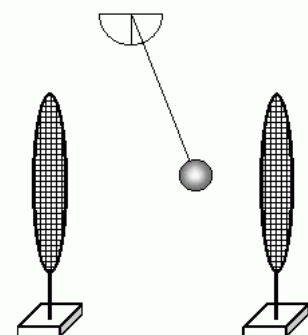
kuva 13

Vastaavat kokeet voidaan tehdä myös Coulombin lain tutkimuslaitteella ES-9070. Siinä mitataan kahden varatun pallon välistä voimaa hopealangan kiertokimmoisuuden avulla. Toisen pallon varausta varioidaan koskettamalla sitä kolmannella samankokoisella pallolla, jolloin varaus aina puolittuu. Kokeessa täytyy varoa, että ilmavirta, oman kehon varaus yms. eivät vaikuta liikkuvaan palloon.

Sähkökentän voimakkuus

Perusmielikuva: sähkökentän voimakkuus määrää kentässä olevaan varaukseen kohdistuvan voiman suuruuden.

Aikaisemmin on havaittu sähköisen voiman olevan suurempi, mitä lähempänä pallomaista varattua kappaletta ollaan. Mannarynikokeissa on nähty, että tällaisen kappaleen lähellä kenttäviivat näyttävät tulevan lähemmäksi toisiaan. Toisaalta yhdensuuntaisten levyjen välillä kenttäviivat näyttävät kulkevan yhdensuuntaisesti, joten levyjen välissä voisi kentän voimakkuuden olettaa olevan vakio. Tämä voidaan testata kokeella: varattujen levyjen välissä varattuun testikappaleeseen kohdistuu kaikkialla yhtä suuri voima. Havaitaan myös, että testikappaleeseen kohdistuva voima riippuu testikappaleen varauksesta. Kun varaus puolitetaan esimerkiksi koskettamalla testikappaletta toisella samanlaisella varaamattomalla kappaleella, myös voima puolittuu (pienillä kulmilla ripustuskulma puolittuu).



Sähkökentän voimakkuus voitaisiin kvantifioida varioimalla testikappaleen varausta ja mittaamalla siihen kohdistuva voima. Tällöin todetaan, että tietyllä levyjen varauksella voiman ja testikappaleen varauksen q suhde on vakio. Määritellään tämä vakio sähkökentän voimakkuudeksi $E = \frac{F}{q}$.

Käytännössä kvantifiointikoe on hankala toteuttaa. Sähkökentän voimakkuudelle voidaan kuitenkin tehdä suure-ennuste, käyttäen hyväksi varauksen kvantifioinnin ja Coulombin lain kokeiden tuloksia. Niissä on tutkittu kahta lähekkäin olevaa varattua kappaletta. Ensimmäinen on testikappale, joka on toisen kappaleen sähkökentässä. Testikappaleeseen kohdistuva voima F on verrannollinen sekä toisen kappaleen varaukseen Q (verrannollisuus todettu varauksen kvantifiointikokeessa) että testikappaleen omaan varaukseen q (symmetria, N III). Määritellään toisen kappaleen sähkökentän voimakkuudeksi testikappaleen kohdalla $E = \frac{F}{q}$.

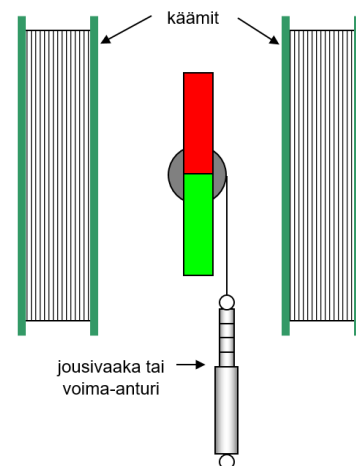
Magneettisen olion voimakkuus, magneettimomentin kvantifiointi

On sängen ilmeistä että magneettisen olion, kuten kestopagneetin, voimakkuus pitää kytkeä jollain tavalla olion aikaansaaman magneettisen vuorovaikutuksen voimakkuuteen. Saattaisi ajatella että magneettinapa on samantapainen olio kuin varattu kappale, ja voitaisiin määritellä magneetin napavoimakkuus suureeksi samalla periaatteella kuin sähkövaraus. Analogia ei kuitenkaan toimi, johtuen pohjimmiltaan sähkö- ja magneettikenttien erilaisesta luonteesta. Magneettikentän kenttäviivat ovat suljettuja silmukoita, jotka eivät kohtaa yhdessä pisteessä jota voitaisiin pitää magneettinavan tarkkana sijaintina. Ja jos tarkastellaan kokonaista magneettia, niin siihen homogeenisessa magneettikentässä kohdistuva voima on nolla riippumatta magneetin asennosta.

Sen sijaan magneettiin kohdistuu sen ja kentän keskinäisestä asennosta riippuva momentti. Tutkitaan, voisiko tämän momentin avulla mitata magneetin voimakkuutta ja määritellä sitä kuvaavan suureen (jota aletaan kutsua magneettimomentiksi, tunnus m).

Tarkoitus on siis osoittaa, että magneettiin kohdistuva momentti on verrannollinen magneetin voimakkuuteen, kun ulkoinen magneettikenttä pysyy samanlaisena. Periaatteessa millainen tahansa kenttä kelpaisi, mutta käytännössä koe kannattaa tehdä niin että ulkoinen magneettikenttä on homogeeninen. Tämä ilmenee niin, että samassa asennossa olevaan magneettiin kohdistuva momentti pysyy vakiona vaikka magneettia liikutetaan kentässä. Homogeeninen magneettikenttä saadaan aikaan kahdella suurella käämillä jotka ovat säteensä etäisyydellä toisistaan; konfiguraatiota kutsutaan Helmholtzin käämeiksi.

Havaitaan että momentti on suurimmillaan kun magneetti on poikittain kenttään nähden. Mitataan näitä maksimimomentteja M_0 . Turvaudutaan mielikuvaan, että n kappaleen nippu samanlaisia magneetteja on ilmeisesti voimakkuudeltaan ja siis magneettimomentiltaan n -kertainen yhteen magneettiin verrattuna. Todetaan mittauksella $m \propto M_0$. Laki määrittelee magneettimomentin, yksikkönä aluksi mielivaltaisesti valitun testiolion voimakkuus. Myöhemmin magneettimomentin yksikkö voidaan kiinnittää muuhun yksikköjärjestelmään määrittelemällä testiolioksi johdinsilmukka, jonka pinta-ala on 1 m^2 ja jossa kulkee 1 A virta.



Kuva 14

Kokeessa tarvittava momentin mittausta tehdään tasapainottamalla magneettikentän aiheuttama momentti toisella, tunnetulla momentilla. Magneettinen olio voidaan kiinnittää pyörityslaitteen akseliin, ja mitata tasapainottava momentti jousivaa'alla tai voima-anturilla (kuva XX).

Magneettikentän voimakkuus; magneettivuon tiheys

Magneettikentän voimakkuutta kuvaava suure on nimeltään magneettivuon tiheys. Se voitaisiin kvantifioida kokeellisesti magneettikentän olioon kohdistaman maksimimomentin M_0 ja olion magneettimomentin suhteena: $B = \frac{M_0}{m}$.

Kuitenkin edellä on jo magneettimomentin kvantifioinnin yhteydessä todettu, että $m \propto M_0$. Toisaalta on selvää, että mitä voimakkaampi magneettikenttä on, sitä suurempi on tietyn

magneettimomentin omaavaan olioon kohdistuva vääntö. Määritellään verrannollisuuskerroin kentän voimakkuutta kuvaavaksi suureeksi nimeltä magneettivuon tiheys³, $B = \frac{M_0}{m}$. Määrittely on siis analoginen sähkökentän voimakkuuden määrittelyn kanssa.

3 Ikävä kyllä suureiden standardinmukainen nimeäminen ei tässä noudata empirian kautta rakentuvaa käsittehierarkiaa. Magneettivuo suureena määritellään vasta induktioilmiön yhteydessä.