

Hiukkaskiihdyttimet

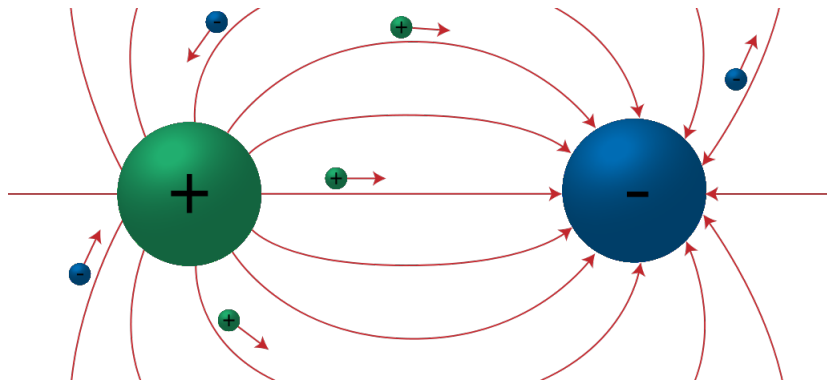
Tapio Hansson

Miksi kiihdyttää hiukkasia?

- ▶ Hiukkaskiihdyttimien kehittäminen on ollut ehkä tärkein yksittäinen kehityssuunta alkeishiukkasfysiikassa.
- ▶ Hyöty, joka saadaan hiukkasten kiihdyttämisestä perustuu Einsteinin massan ja energian relaatioon $E = mc^2$.
- ▶ Koska energia kasvaa hiukkasen nopeuden kasvaessa, voidaan törmäyksissä synnyttää uusia raskaampia hiukkasia.
- ▶ Osa hiukkasista, esimerkiksi Higgsin hiukkanen, on raskaita, ei niitä voida löytää ilman korkea-energisiä törmäyksiä.
- ▶ Hiukkasten havaitseminen on tärkein tapa todentaa standardimallia.

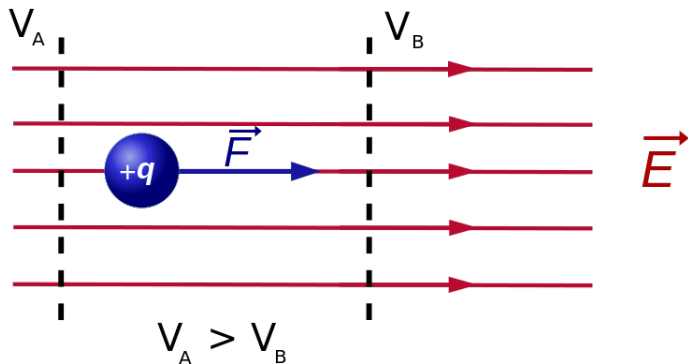
Sähkökentät

- ▶ Sähkövaraus luo ympärilleen sähkökentän. Positiivinen varaus toimii kentän lähteenä ja negatiivinen "nieluna".
- ▶ Saman merkkiset varaukset hylkivät toisiaan ja erimerkkiset vetävät toisiaan puoleensa.

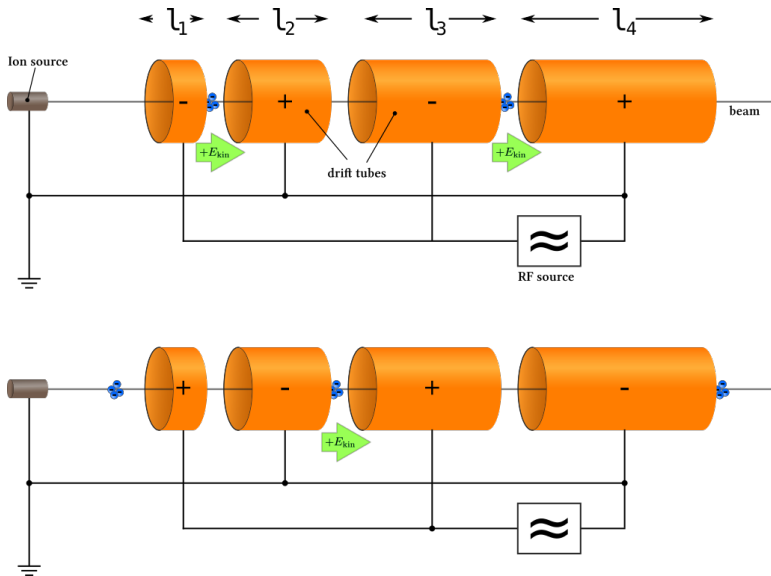


Miten hiukkanen kiihtyy?

- ▶ Esimerkiksi kondensaattorilla voidaan luoda tasainen homogeeninen sähkökenttä.
- ▶ Varattu hiukkanen kokee sähkökentässä voiman. Negatiivisesti varattu hiukkanen kentän suuntaa vastaisen voiman ja positiivisesti varattu kentän suuntaisen voiman.
- ▶ Tämä voima saa varatun hiukkasen kiihtyvään liikkeeseen.



Lineaarikiihdytin (LINAC)



Lineaarikiihdytin

- ▶ Pitkän homogeenisen kentän muodostaminen on hankalaa, mutta kuvan mukaisella rakenteella voidaan hiukkaselle saada useassa eri kiihdytyksessä lisää energiaa.
- ▶ Putkien varaus vaihtelee jaksollisesti.
- ▶ Sähkökentän suunta vaihtelee tasaisella taajuudella, joten putkien täytyy pidentyä sitä mukaa kun hiukkasen nopeus kasvaa.
- ▶ Lineaarikiihdyttimen kokoskaala vaihtelee pienestä kuvaputki-tv:stä Stanfordissa olevaan SLAC-kiihdytimeen, jonka pituus on 3,2 km.

Lineaarikiihdytin

- ▶ Lineaarikiihdyttimen hyviä puolia on mm. mahdollisuus kiihdyttää raskaita ioneja suuriin energioihin verrattuna ympyräliikkeeseen perustuviin kiihdyttimiin.
- ▶ Suorassa liikkeessä olevasta hiukkasesta ei myöskään lähde synkrotronisäteilyä, mikä sopii tiettyihin tutkimuksiin hyvin.
- ▶ Huonoina puolina on teknisen toteutuksen haaste: putken tulee olla erittäin suora, joten sen rakentaminen usean kilometrin pituiseksi vaatii erityisen hyvät olosuhteet.
- ▶ Lisäksi virtalähteitä ja ohjauselektroniikkaa tarvitaan paljon, mikä lisää kustannuksia huomattavasti.

Lineaarikiihdyttimiä

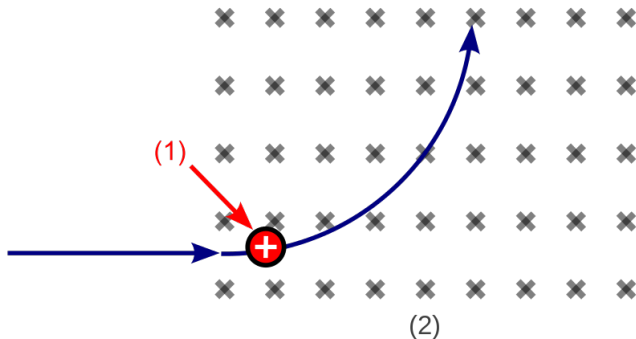
- ▶ Suurin toiminnassa oleva lineaarikiihdytin on SLAC (Stanford Linear Accelerator Center).
- ▶ Tällä hetkellä suunnitteilla on kansainvälinen lineaaritörmäytin (ILC, International linear collider), jonka sijoituspaikaksi tulee joko Japani, Cern tai Fermilab.
- ▶ Suomea pidettiin yhtenä mahdollisena sijoituspaikkana vakaan kallioperän vuoksi.
- ▶ <https://www.youtube.com/watch?v=40Ap98o-4tU>

Syklotroni - kompaktimpi kiihdytin

- ▶ Monissa tapauksissa korkeisiin energioihin pitäisi päästä paljon lineaarikiihdyttimen vaatimaa tilaa pienemmissä kokoluokissa.
- ▶ Tähän ongelmaan ratkaisua tarjoaa syklotroni, jossa kiihdytettävä hiukkanen lähtee spiraaliradalle.
- ▶ Yleinen periaate hiukkasten kiihdyttämisessä on, että sähkökentällä hiukkaselle annetaan lisää liike-energiaa ja magneettikentällä muutetaan sen rataa.
- ▶ Syklotroneja on käytössä eri kokoluokissa runsaasti ympäri maailmaa. Pienimmät mahtuvat kämmenelle ja suurimmat mahtuvat suuriin halleihin.

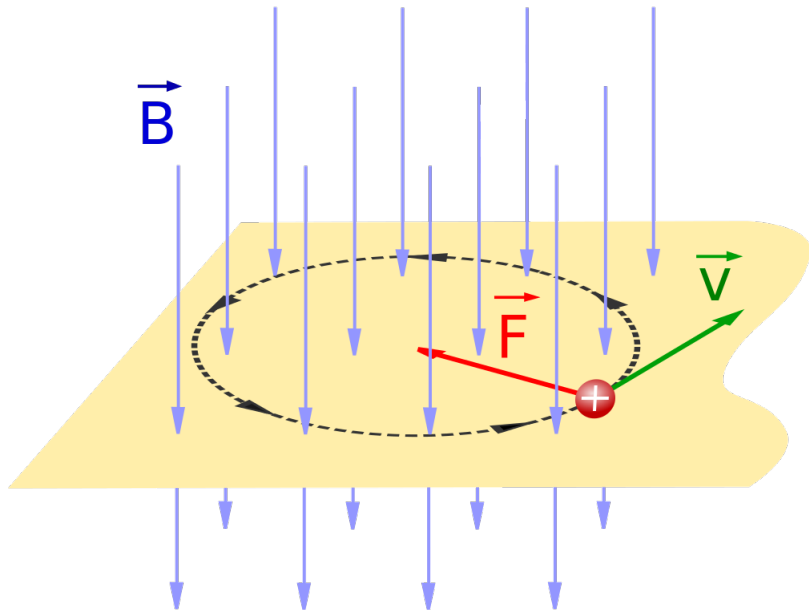
Hiukkanen sähkö- ja magneettikentässä

Magneettikentässä hiukkaseen kohdistuu voima, joka on kohtisuorassa hiukkasen nopeusvektoria ja magneettikenttää vastaan.

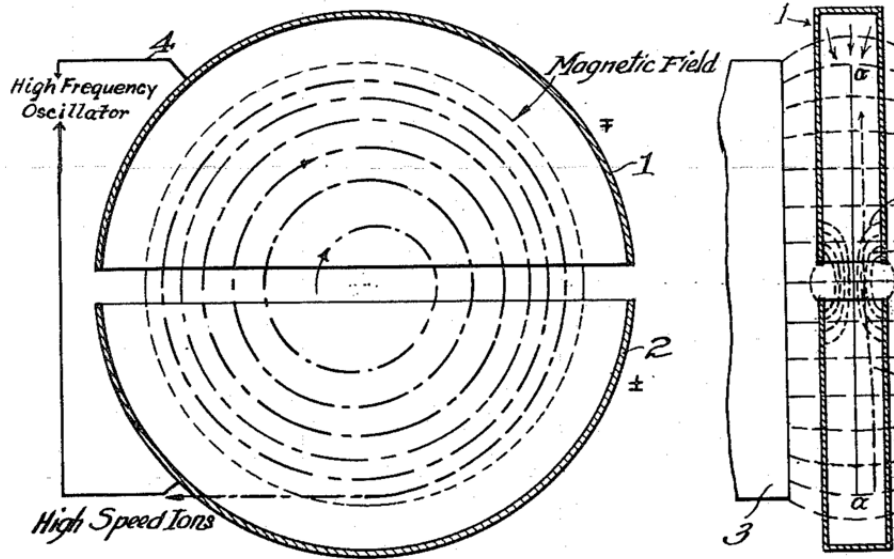


Varatun hiukkasen ollessa sähkö- ja magneettikentässä siihen vaikuttaa nk. Lorentz-voima: $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

Hiukkanen magneettikentässä



Syklotroni



Kuva Ernst Lawrencen patentista vuodelta 1934

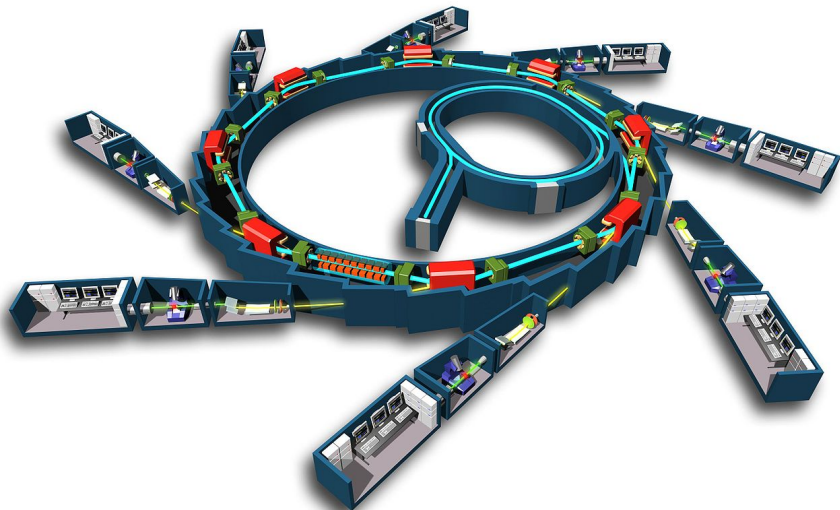
Syklotroni

- ▶ Syklotronissa on neljä D:n muotoista suurta magneettia. Magneettien väliin muodostuu homogeeninen magneettikenttä.
- ▶ Tällöin keskeltä liikkeelle päästetyt hiukkaset kulkevat ympyräradalla.
- ▶ Hiukkaset saavat lisää liike-energiaa magneettien välisessä raossa, jossa on sopivassa tahdissa suuntaa vaihtava sähkökenttä.
- ▶ Tällöin hiukkasen nopeus kasvaa jokaisella puolikkaalla kierroksella ja siten sen ratakin kasvaa.
- ▶ Lopulta hiukkaset ohjataan ulos magneettien ulkoreunalla.

Suurten energioiden synkrotroni

- ▶ Pitkän suoran linjan rakentaminen on hankalaa ja hiukkanen sinkoaa ulos synkrotronista kun magneettikentän voimakkuus ei riitä enää kääntämään rataa tarpeeksi.
- ▶ Ratkaisu on synkrotroni, jossa hiukkanen pakotetaan ympyräradalle.
- ▶ Tällöin hiukkasia voidaan kierrättää pitkä aika samalla radalla ja törmäyksiä voidaan tuottaa tasaisella tahdilla.
- ▶ Synkrotronin toiminta on jo selvästi monimutkaisempaa ja vaatii varsin tasokasta ohjaustekniikkaa.

Synkrotroni



SOLEIL-kiihdytin Ranskasta

Synkrotroni

- ▶ Myös synkrotronin kiihdytykset tapahtuvat sähkökentillä ja suunnan muutokset magneettikentillä.
- ▶ Kuvan suorilla osuuksilla tapahtuu energian lisääminen ja punaiset taivutusmagneetit kääntävät rataa.
- ▶ Rata ei siis itseasiassa ole ympyrä vaan tasainen monikulmio.
- ▶ Taivutusmagneettien kentän voimakkuutta tulee muuttaa, sillä muuten hiukkaset sinkoavat ulos radalta.
- ▶ Tämä hoidetaan ohjaustietotekniikalla.

Synkrotronisäteily

- ▶ Synkrotroneilla on paljon käyttöä, vaikka ne ovat tilaavieviä ja kalliita operoida.
- ▶ Eräs pääasiallinen sovelluskohde on synkrotronisäteily.
- ▶ Kiihtyvässä liikkeessä oleva varattu hiukkanen luovuttaa energiaa sähkömagneettisena säteilynä.
- ▶ Koska synkrotronissa nopeudet ovat suuria, tapahtuu taivutuksessa huomattava kiihdytys jonka johdosta hiukkanen lähettää erittäin korkeaenergistä ja ennenkaikkea erittäin kirkasta valoa.
- ▶ Aallonpituus vaihtelee mikroaalloista koviin röntgensäteisiin.
- ▶ Sovelluksia on erityisen paljon materiaalitekniikassa, mutta myös lääketieteessä ja monella muulla alalla.

Suuri Hadronitörmäytin

- ▶ xkcd tietää jälleen missä mennään:
<https://xkcd.com/401/>
- ▶ Tällä hetkellä suurin toiminnassa oleva hiukkaskiihdytin on 27 kilometriä pitkä CERN:n Large Hadron Collider LHC.
- ▶ LHC:n tärkeimpänä tavoitteena oli löytää Higgsin hiukkanen, ja sen koko on suunniteltu enenkaikkea tätä tehtävää varten.
- ▶ Toiseksi suurin, Fermilabissa sijaitseva Tevatron-törmäytin, suljettiin jokin aika sitten.
- ▶ LHC:ssa törmäytetään yhteen protoneja ja lyijy-ytimiä.

LHC



LHC



LHC

- ▶ Kiihdyttimeen kuuluu pieni varastorengas, josta hiukkassuihku ohjataan kiihtymään kunnolla suureen kiihdyttimeen.
- ▶ Ringin varrella on useita tutkimusasemia, joista suurimmat ovat CMS, ATLAS, ALICE ja LHCb.
- ▶ LHC on samaan aikaan maailmankaikkeuden kuumin, kylmin ja tyhjin paikka.
- ▶ Higgsin bosonin löytymisen jälkeen seuraava tavoite on tutkia, onko Higgsin bosoneja useampia.

CMS ja ATLAS

- ▶ CMS (Compact Muon Solenoid) ja ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) ovat kaksi lähes samanlaista tutkimusasemaa.
- ▶ Niiden tarkoitus on täydentää toisiaan ja varmentaa toistensa tuloksia.
- ▶ Ilmaisinten tarkoitus on erityisesti tutkia TeV-energialuokan fysiikkaa, etsiä Standardimallista ongelmia ja tutkia Higgsin hiukkasen ominaisuuksia.

"Kompakti" myonikäämi



ALICE ja LHCb

- ▶ ALICE (A Large Ion Collider Experiment) pyrkii luomaan varhaisen maailmankaikkeuden olosuhteet.
- ▶ Kokeessa törmäytetään raskaita lyijy-ytimiä, jolloin voidaan päästä äärimmäisen korkeisiin energioihin ja lämpötiloihin. Tarkoituksena on muodostaa kvarkki-gluoniplasmaa.
- ▶ LHCb (LHC beauty) keskittyy raskaiden kvarkkien, kauneus ja lumo, tutkimiseen. Näiden avulla selvitetään sähköheikkoa teoriaa ja kvanttikromodynamiikkaa.
- ▶ Tärkeimmät havainnot ovat toistaiseksi liittyneet B-mesonien reaktioihin.

Videoita

Olennaisimmat asiat ja vähän päälle kertoo Alpine Kat:

<https://www.youtube.com/watch?v=j50ZssEojtM>

Jos ei muuten, uskokaa nörttiä:

<https://www.youtube.com/watch?v=AwNwCs2CH7w>

Tai: <https://www.youtube.com/watch?v=328pw5Taeg0>