

IOTA-KIIHDYTTIMEN ELEKTRONILINSSIN PÄÄMAGNEETIN SUUNNITTELU

Suopajarvi Jussi
Opinnäytetyö
Konetekniikka
Insinööri (AMK)

2020

Konetekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Jussi Suopajarvi	Vuosi	2020
Ohjaaja	DI Ari Pikkarainen		
Toimeksiantaja	Lapin AMK ja CERN		
Työn nimi	IOTA-kiihdyttimen elektronilinssin päämagneetin suunnittelu		
Sivumäärä	60		

Työn tarkoituksena oli suunnitella Chicagossa sijaitsevaan, IOTA-hiukkaskiihdyttimeen tulevaan elektronilinsiin päämagneetin tilavaraukset ja sen kiinnitys- ja säätöjärjestelmä. Elektronilinsin avulla voidaan tutkia epälineaarisen optiikan vaikutusta kiihdyttimessä kiertävään säteeseen.

Työ suoritettiin kolmen kuukauden työharjoittelun aikana, kesällä 2019 CERNin hiukkastutkimuskeskuksessa, joka sijaitsee Genevessä. Työpaikka CERNissä oli EN-osastolla, MME-ryhmän tiloissa. Työssä avustivat ja työtä ohjasivat MME-ryhmän työntekijät Antti Kolehmainen ja Diego Perini. Suunnitteluohjelmana oli käytössä 3D CAD-ohjelma Catia V5.

Työssä opeteltiin käyttämään Catia-suunnitteluohjelmaa, jonka käyttö poikkeaa joiltakin osin koulussa opetetuista ohjelmista. Suunnittelun mahdollistamiseksi teorian tietoa etsittiin muun muassa kryotekniikasta, suprajohteista, magneeteista ja magnetismista, hiukkaskiihdyttimistä sekä itse elektronilinsistä ja sen toiminnasta.

Työn tuloksena saatiin tehtyä 3D-mallikuvat laitteesta, minkä avulla hiukkaskiihdyttimen omistava taho pystyy esittelemään tarvitsemaansa koelaitetta suurelle yleisölle sekä rahoittajillensa. Toinen tavoite oli tehdä tilavaraukset laitteille ja varmistaa niiden sopiminen oikeille paikoilleen ja oikeassa asennossa, myös tämä tavoite saatiin työssä täytettyä.

Avainsanat

suunnittelu, magnetismi, 3D-mallinnus, hiukkaskiihdyttimet, suprajohtavuus, kryofysiikka

Mechanical Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Jussi Suopajärvi	Year	2020
Supervisor	Ari Pikkarainen, M.Sc. (Tech.)		
Commissioned by	Lapland University of Applied Sciences and CERN		
Subject of thesis	Design of the main solenoid on the IOTA-e-lens		
Number of pages	60		

The purpose of this work was to design a space charge, mounting and adjusting system for the electron lens main solenoid on the IOTA-particle accelerator in Chicago. With the electron lens, the effect of nonlinear optics on the beam travelling through the acceleration can be studied.

The work was done during a three-month internship in the summer of 2019 at the CERN Particle Research Centre in Geneva. The job at CERN was in the EN Department, on the premises of the MME Group. Antti Kolehmainen and Diego Perini, which are MME employees, assisted and supervised the work. The 3D CAD design software was Catia V5.

At work, the use of Catia design software had to be learnt, and it differs in some parts from what was taught at school. To enable design, theoretical information had to be searched in cryotechnology, superconductors, magnets and magnetism, particle accelerators, and the electronic lens itself and its function.

As a result of this work, 3D images of the device were made which enabled the owner of the particle accelerator to present the test device they needed to the general public and their financiers. Another goal was to make the space reservations for the devices and make sure they fit in the right places and in the right positions, and also this goal was reached.

Key words design, magnetism, 3D modeling, particle acceleration, superconductive, cryophysics

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	CERN	8
2.1	Esittely	8
2.2	LHC.....	12
2.3	EN-MME -osasto	15
3	FERMILAB.....	18
3.1	Esittely	18
3.2	IOTA-ring	19
4	PROJEKTIN LÄHTÖKOHTA	21
4.1	Tilanne Fermilabissa.....	21
4.2	Suunnittelun lähtökohdat	22
5	SUUNNITTELUSSA TARVITTAVAA TIETOA.....	24
5.1	Magnetismi, magneetti ja magneettikenttä.....	24
5.2	Suprajohtavuus.....	25
5.2.1	Ryhmän 1 Suprajohteet.....	26
5.2.2	Ryhmän 2 Suprajohteet.....	27
5.2.3	Suprajohteiden käyttö.....	27
5.3	Kryojäähdytin	29
6	SUUNNITTELU.....	33
6.1	Suunnitteluprosessi	33
6.2	CATIA V5 -suunnitteluohjelma.....	35
6.2.1	Historia	36
6.2.2	Ohjelman esittely.....	37
7	TYÖN SUORITUS	39
7.1	Aloitukset ennen CERNiin menoa	39
7.2	Työskentely CERNissä	40
8	ELEKTRONILINSSIN JA PÄÄMAGNEETIN ESITTELY	44
8.1	Elektronilinssi.....	44
8.2	Päämagneetin toiminnan kuvaus	45

9 PÄÄMAGNEETIN OSAT JA NIIDEN SUUNNITTELU	47
9.1 Päämagneetti.....	47
9.2 Magneettien kiinnitys	51
9.3 Virran siirto ja päämagneetin kannatin.....	53
10 POHDINTA.....	57
LÄHTEET.....	58

ALKUSANAT

Haluan kiittää kaikkia, jotka ovat edesauttaneet työn valmistumista, erityisesti työtä ohjannutta opettajaa Ari Pikkaraista, sekä CERNistä työtä ohjanneita Antti Kolehmaista ja Diego Periniä. Kiitokset myös koko MME-osaston henkilökunnalle.

Kemissä 15.3.2020

Jussi Suopajarvi

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tehdä Chicagossa sijaitsevaan Fermilab-tutkimuskeskuksen, IOTA-hiukkaskiihdyttimeen tulevan elektroninssin päämagneetin suunnittelu ja tilavaraukset. Päämagneetti kuuluu osana elektroninssimitalaitteeseen, jota suunniteltiin kesällä 2019, Euroopan hiukkastutkimuskeskuksessa Cernissä.

Opinnäytetyössä käsitellään CERNissä työharjoittelun aikana tehtävää suunnittelutyötä sekä asioita, joihin täytyi kiinnittää erityistä huomiota työtä tehtäessä. Työ suoritetaan CERNin suunnitteluosastolla, mekaanisen suunnittelun ryhmässä. Suunnitteluohjelmana työssä käytetään ranskalaista alkuperää olevaa Catia-nimistä ohjelmaa.

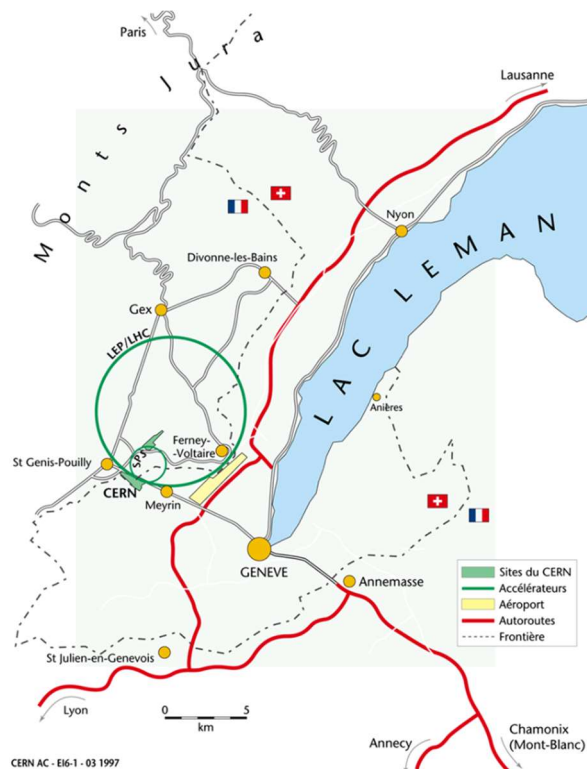
Suunnitelluilla kuvilla ja tilavarauksilla pyritään varmistamaan, että halutut laitteet sopivat niille varatuille paikoille. Tavoitteena on myös varmistaa, että simuloineilla saatavat tulokset magneettien paikoista olisivat käytännössä mahdollisia, etteivät magneettien koot kasvaisi liian suuriksi, eivätkä ne törmäisi keskenään tai muihin rakenteellisiin osiin.

Tässä työssä ei ole tarkoitus tehdä tarkkoja valmistuspiirroksia, vaan keskitytään suunnittelemaan ratkaisuja, joilla halutut ominaisuudet pystytään saamaan laitteeseen käytössä olevassa tilassa. Työn tuloksena syntyvien 3D-kuvien avulla Fermilab-hiukkastutkimuskeskus voi esitellä tarvitsemaansa mittalaitetta rahoittajilleen sekä yhteistyökumppaneilleen.

2 CERN

2.1 Esittely

CERN on Euroopan hiukkasfysiikan tutkimuslaitos, joka sijaitsee Geneven lähettyvillä, molemmin puolin Ranskan ja Sveitsin rajaa (Kuva 1). CERN on lyhennys sanoista Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire. Conseil eli neuvosto muutettiin organisaatioksi 1954, mutta lyhenne nimestä päätettiin pitää ennallaan (CERN 2019a). Tutkimuskeskuksella on useampia eri toimipaikkoja ja alueita ympäri maailman pisintä hiukkaskiihdytintä, joka on 27 kilometriä pitkä. Hiukkaskiihdytintä on ympyrän muotoinen ja sijaitsee noin 100 metriä maan alapuolella ja tunnetaan maailmalla nimellä LHC Large Hadron Collider (Suuri hadronitörmäytin). (CERN 2019c.)



Kuva 1. CERNin sijainti Sveitsin ja Ranskan rajalla (CERN 2016)

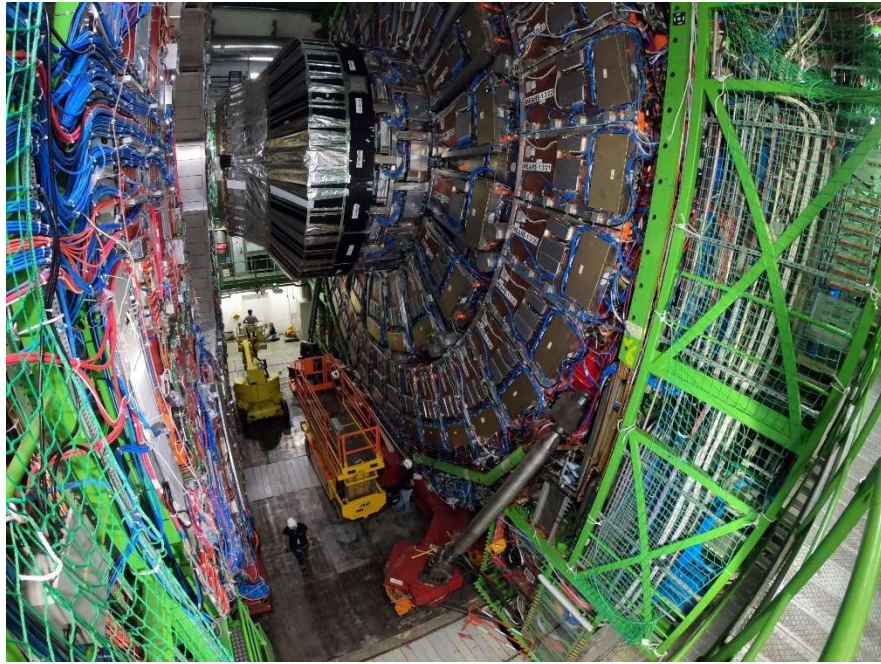
CERNin pääasiallinen tehtävä on selvittää, mistä aineista maailmankaikkeus koostuu, miten se toimii ja miten se on syntynyt. Sen tehtävänä on koko ajan laajentaa tietoutta muun muassa maailmankaikkeuden synnystä, alkeishiukkasista, antimateriasta ja kaikkea koossa pitävästä voimasta. Viimeinen suuri löytö

LHC-kiihdyttimellä oli 4. heinäkuuta 2012, jolloin he saivat todisteet Higgsin Bosonin olemassa olost. Löydöstä on myös myönnetty Nobelin fysiikan palkinto (CERN 2019f).



Kuva 2. CERNin tunnetuin maamerkki ja näyttelypaikka

CERNillä on myös toinen erittäin tärkeä ja yleishyödyllinen tehtävä, joka on tiedonjakaminen. CERNissä on koko ajan erilaisia näyttelyitä ja siellä vierailee suuri määrä opiskelijoita eri oppilaitoksista ympäri maailmaa (Kuva 2). Alueelle järjestetään opastettuja kiertokäyntejä eri kohteisiin, joissa esitellään tutkimuslaitteita, tietämystä maailmankaikkeuden synnystä, historiaa, toimintafilosofiaa ja kiertokäynneillä pääsee myös käymään katsomassa maailman suurimman hiukkas-törmäytin koelaitteistoja maan alla (Kuva 3). Toinen merkittävä tapa tiedon jakamiseen ovat erilaiset yhteistyömenetelmät, esimerkiksi koulujen kanssa työharjoittelut ja yhteistyöprojektit tai yritysten kanssa tehtävä yhteistyö. CERN muun muassa myöntää lisenssejä yrityksille, että ne voivat hyödyntää heidän kehittämänsä teknologiaa ja kehottaa perustamaan spin-off yrityksiä, jotka voivat perustua osittain tai kokonaan sen tietoon ja/tai tekniikkaan. (CERN 2017a.)

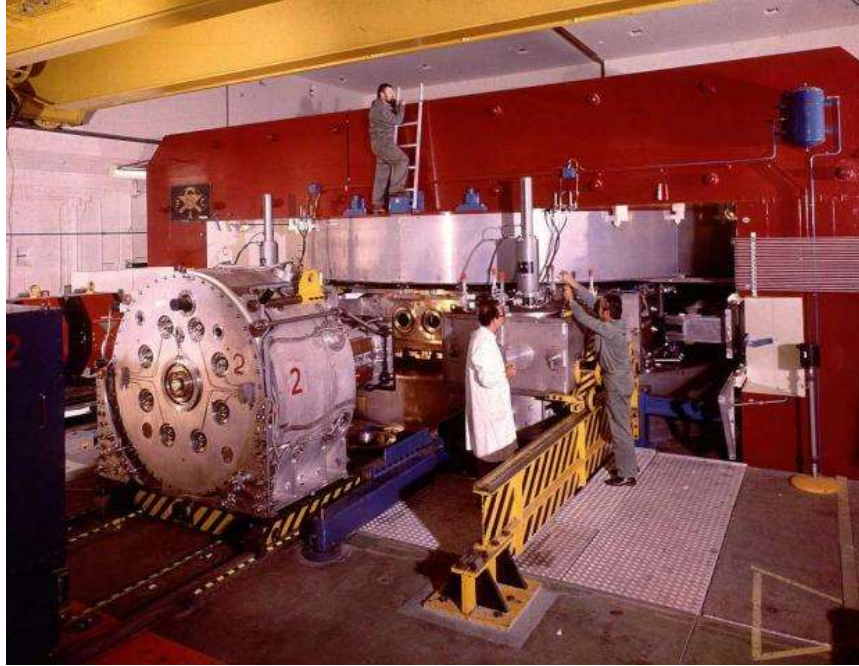


Kuva 3. CMS-koelaitteisto

CERNin synty sijoittuu toisen maailmasodan jälkeiseen aikaan, jolloin pieni joukko eurooppalaisia ja amerikkalaisia johtavia tutkijoita alkoivat haaveilla yhteisestä Euroopan laajuisesta hiukkasfysiikan laboratoriosta. Tällä voitaisiin estää tutkijoiden joukkomuutto Amerikkaan, ja kansainvälinen rajat ylittävä yhteistyö myös mahdollistaisi paremmin kustannusten jakamisen. (CERN 2019a.)

Unescon kokouksessa Pariisissa joulukuussa 1951 hyväksyttiin ensimmäinen päätöslauselma Euroopan neuvoston ydintutkimuskeskuksen perustamisesta. Tutkimuskeskuksen rakentaminen aloitettiin 1955. (CERN 2019a.)

Ensimmäinen kiihdytin rakennettiin 1957, se loi perustan ja mahdollisti ensimmäiset hiukkaskokeet ja ydinfysiikan kokeet (Kuva 4). Vuonna 1964 kiihdytin keskittyi pelkästään ydinfysiikan kokeisiin jättäen hiukkasfysiikan kokeet uudemmille ja tehokkaammille laitteille. Tästä laitteesta tuli myös CERNin pitkäikäisin koelaitte, joka palveli kokeissa 33 vuoden ajan. (CERN 2020a.)



Kuva 4. Ensimmäisen hiukkaskiihdyttimen rakennusta (CERN 2020a)

CERNiä on myös kiittäminen, nykyään jo melkein välttämättömästä asiasta, eli internetistä. World Wide Webin eli WWW:n kehitti englantilainen tiedemies Tim Berners-Lee vuonna 1989, kun hän työskenteli CERNissä. Alun perin verkko suunniteltiin tiedonjakokanavaksi instituutioiden, yliopistojen ja tutkijoiden välille ympäri maailmaa. Tarve tällaiseen tuli, koska CERN ei ole vain yksittäinen laboratorio Geneven lähellä vaan keskipiste laajalle tutkijayhteisölle. Tähän tutkijayhteisöön kuuluu yli 17 000 tutkijaa yli 100 maasta. Tutkijat työskentelevät normaalisti hetken CERNin alueella olevissa yksiköissä ja palaavat tämän jälkeen jatkaamaan työtään kotimaidensa yliopistoihin sekä tutkimuslaitoksiin. Tämän vuoksi luotettavat ja nopeat tiedonsiirtoväylät ovat tarpeellisia. (CERN 2019e.)

Nykyään CERNiin kuuluu 23 jäsenmaata ja 8 kumppanusmaata, joista 2 on jäsenyyden esivaiheessa. Näiden lisäksi CERNiin kuuluu 6 maata tai järjestöä, jotka ovat tarkkailija-asemassa. Tarkkailijat eivät ole jäseniä, eikä heillä ole ääni-oikeutta neuvoston kokouksissa, mutta heillä on oikeus saada neuvoston dokumentteja sekä osallistua kokouksiin. (CERN 2019b) CERNissä työskentelee tällä hetkellä noin 2500 työntekijää, jotka osallistuvat tutkimusinfrastruktuurin suunnitteluun, rakentamiseen ja käyttöön. He työskentelevät myös kokeiden valmistelussa, niiden toteuttamisessa sekä käsittelevät niistä saatua dataa. Tätä tietoa

hyödyntävät yli 12 200 tutkijaa, jotka edustavat 110 kansallisuutta ja yli 70 maata. (CERN 2019d.)

Vaikka tutkimuskeskus on jo tehnyt valtavia innovaatioita ja suuria löytöjä, se ei aio asettua lepäämään. Vuonna 2019 se julkaisi tiedotteen, jonka mukaan suunnitelmissa on rakentaa vielä huomattavasti suurempi hiukkastörmäytin. Tämän törmäyttimen pituudeksi on suunniteltu 100 kilometriä ja siinä pystyttäisiin saamaan jopa 5 kertaa suurempia törmäyksiä aikaan kuin nykyisessä törmäyttimessä. Suunnitelmien mukaan FCC eli Future Circular Collider (Kuva 5) olisi täysin toimintavalmis vasta 2050 luvun jälkipuoliskolla. (Tekniikan Maailma 2019.)

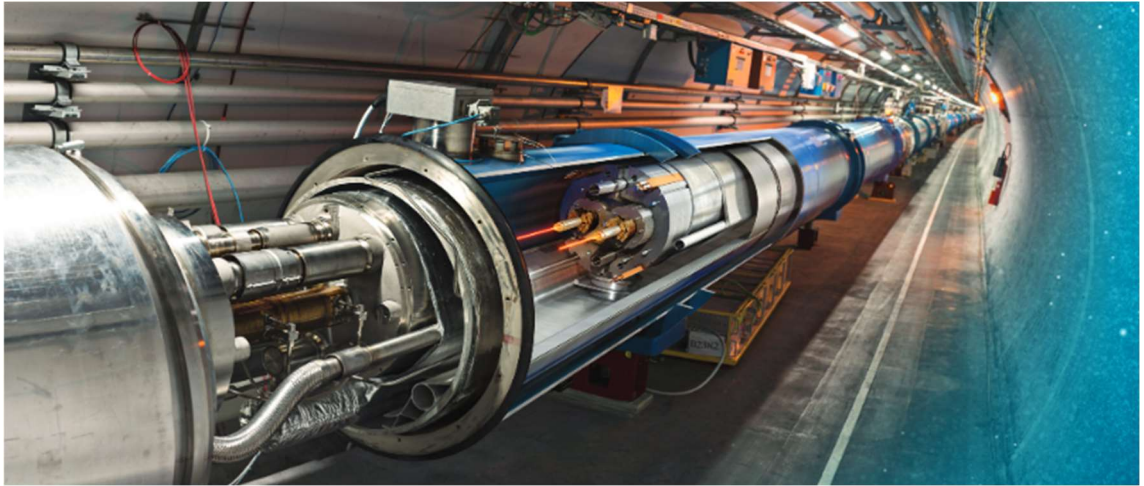


Kuva 5. Havainnekuva suunnitelmissa olevasta kiihdyttimestä (CERN 2018a)

2.2 LHC

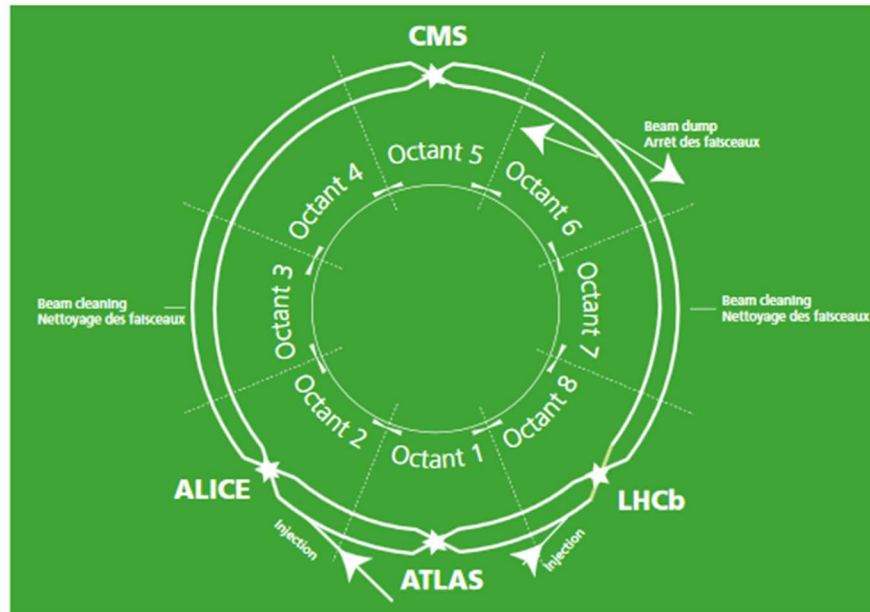
LHC – Large Hadron Collider eli vapaasti suomennettuna Suuri hadronitörmäytin on tällä hetkellä maailman suurin ja tehokkain hiukkastörmäytin. Se on rakennettu samaan tunneliin (Kuva 6), jota käytti edellinen suuri kiihdytin nimeltään LEP – The Large Electron-Positron Collider, joka purettiin vuonna 2000. Ensimmäisen kerran LHC käynnistettiin vuonna 2008 ja siinä saatiin kiertämään ensimmäiset protonisuihkut, mutta magneettien virtoja nostettaessa tuli vika yhteen suprajohtavaan liitokseen, viasta seurasi kylmäaineen nopea lämpeneminen ja

sen purkautuminen kryostaatteihin. Vahinkojen korjaus sekä kiihdyttimen parannustyöt kestivät vuoden 2009 loppupuolelle, jonka jälkeen kiihdytin on toiminut hyvin. (Tuominen 2010.)



Kuva 6. LHC-kiihdytin (CERN 2018b)

Kiihdyttimessä kulkee rinnakkain 2 putkea, joissa hiukkaset kulkevat vastakkaisiin suuntiin toisiinsa nähden. Niiden nopeus voidaan nostaa maksimissaan lähes valonnopeuteen. Koeasemilla putket risteytyvät ja hiukkaset voidaan törmäyttää keskenään. LHC-kiihdyttimessä on 4 koeasemaa ATLAS, CMS, ALICE ja LHCb (Kuvio 1), jotka kaikki tutkivat eri asioita törmäyksistä. Näillä tutkimusasemilla ovat tarkat mittalaitteen ja ”kamerat”, joilla törmäykset saadaan tallennettua niiden tutkimista varten. (Tuominen 2010.)



Kuvio 1. LHC-kiihdytin ja hiukkasten törmäyspaikat (CERN 2017b)

Hiukkaset saavat alkuvauhtinsa pienemmillä kiihdyttimillä, joita alueella on useampia. Kun hiukkaset ovat saaneet riittävän vauhdin, ne ohjataan vasta sen jälkeen LHC-kiihdytimeen. Hiukkasten ohjailu sekä kiihdytys tapahtuu magneettien avulla. Magneettien avulla hiukkaset muun muassa saadaan kääntymään kiihdyttimen suuntaisesti, etteivät ne törmää seinämiin, sekä muokattua hiukkassuihkua, esimerkiksi puristettua kasaan, jos näyttää, että suihku alkaa leviämään. Magneeteilla myös hoidetaan hiukkassäteiden kohdistus koeasemilla törmäystä varten. (Tuominen 2010.)

Jotain mittakaavaa laitteen valtavista voimista sekä muista suureista kertovat seuraavat faktat. Hiukkaset kiertävät 27 kilometriä pitkän kiihdyttimen yli 11 000 kertaa sekunnissa sen toimiessa maksiminopeudella. CMS-koelaitteiston magneettijärjestelmä sisältää noin 10 000 tonnia rautaa, joka on enemmän kuin Eiffel tornissa. Tietomäärä, joka saadaan kerättyä kiihdyttimessä tehtävissä kokeissa, vaatii noin 50 000 TB kovalevytilaa joka vuosi. (CERN 2017b.)

2.3 EN-MME -osasto

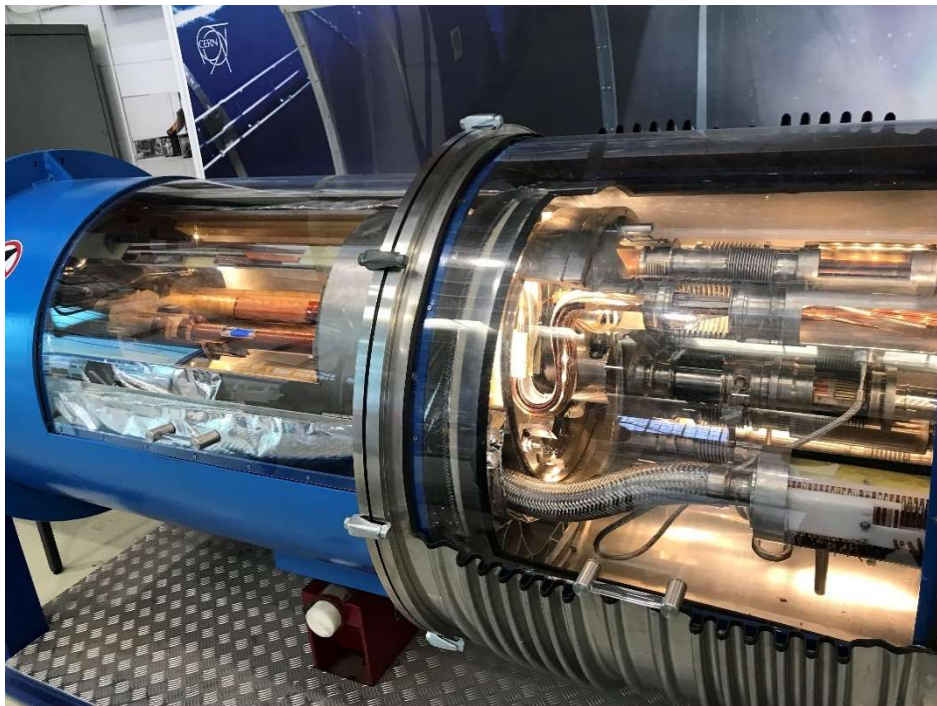
Mechanical and Materials Engineering (MME) -ryhmä kuuluu yhtenä osana CER-Nin EN-osastoon, joka käsittää alueen Insinööritoiminnan. Insinööriosasto koostuu 9 eri alaryhmästä, joilla kaikilla on omat osaamisalueensa. Alaryhmät selviävät alla olevasta kuvioista (Kuvio 2). Insinööriosaston toiminta tarjoaa organisaatiolle teknisen osaamisen, infrastruktuurijärjestelmät sekä hankkeiden teknisen koordinoinnin, joita tarvitaan tutkimuskompleksin ja kokeellisten laitteiden suunnittelu-, asennus-, käyttö-, huolto- ja purkuvaiheisiin. (CERN 2020b.)



Kuvio 2. Insinööriosasto ja sen alaryhmät (CERN 2020d)

MME ryhmällä on 3 ydinaluetta, joista se vastaa: mekaaninen suunnittelu, tuotteiden valmistus sekä materiaalitietämys. Ryhmä ylläpitää ja kehittää mekaanisia

komponentteja sekä laitteistoja, joita tarvitaan hiukkaskiihdyttimissä, erilaisissa antureissa ja korkea energisissä kokeissa (Kuva 7). Ryhmä myös suorittaa simuloitteja, analyyssejä sekä laskelmia esimerkiksi siitä, miten hiukkaset käyttäytyvät kiihdyttimissä ja koelaitteissa, paljonko tarvitaan magneettista voimaa ja miten voiman tulee sijoittua kiihdyttimessä että, kulkurata saadaan halutun malliseksi. Arviointeja sekä simuloitteja tehdään komponenttien käyttäytymisestä ja kestävydestä erittäin rankoissa olosuhteissa, esimerkiksi äärimmäisissä lämpötiloissa, säteilylle altistuneena, tyhjiössä sekä suurissa magneettikentissä. (CERN 2020c.)



Kuva 7. Insinööriosaston suunnittelema laite

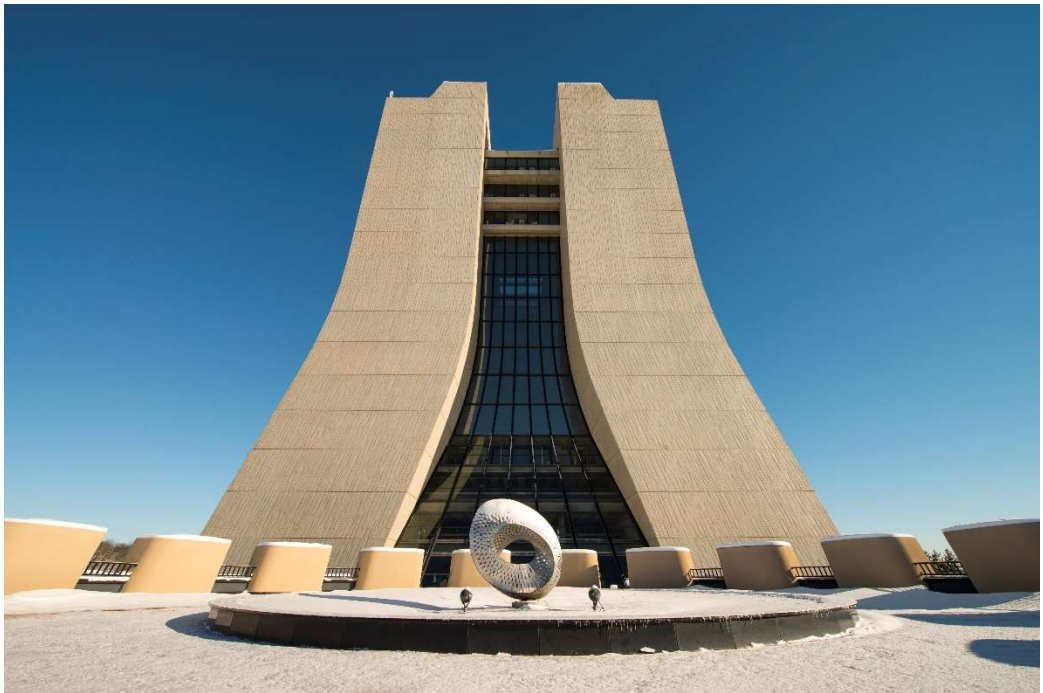
Valmistuksen osasto voi hoitaa omassa konepajassaan, joka on varustettu nykyaikaisilla työvälineillä tai sitten alihankkijoilla, joiden kanssa osasto tekee tiivistä yhteistyötä. Pienemmät laitteet ja testiyksilöt yleensä tehdään omalla pajalla, mutta suuret koneet ja isot sarjat ovat yleensä helpompi hoitaa alihankkijoiden avulla. Näissäkin tilanteissa voi olla, että oma paja on tehnyt ensimmäiset versiot sekä työohjeet, miten laitteet ovat järkevin tehdä. (CERN 2020c.)

Materiaalien tutkimista varten yksiköllä on laboratoriotilat, joissa voidaan tutkia mekaanisia rasituksia, venymistä, paineen aiheuttamia siirtymiä sekä värinän aiheuttamia vikoja laitteissa ja osissa, joita tarvitaan kokeiden onnistumiseen äärimmäisen vaikeissa olosuhteissa. Laboratorioissa voidaan tehdä materiaalitutkimusta myös materiaaleja tuhoamatta ja tutkimuksia voidaan suorittaa sekä huoneenlämmössä, että erittäin kylmissä olosuhteissa, joita hiukkaskiihdyttimissä esiintyy. (CERN 2020c.)

3 FERMILAB

3.1 Esittely

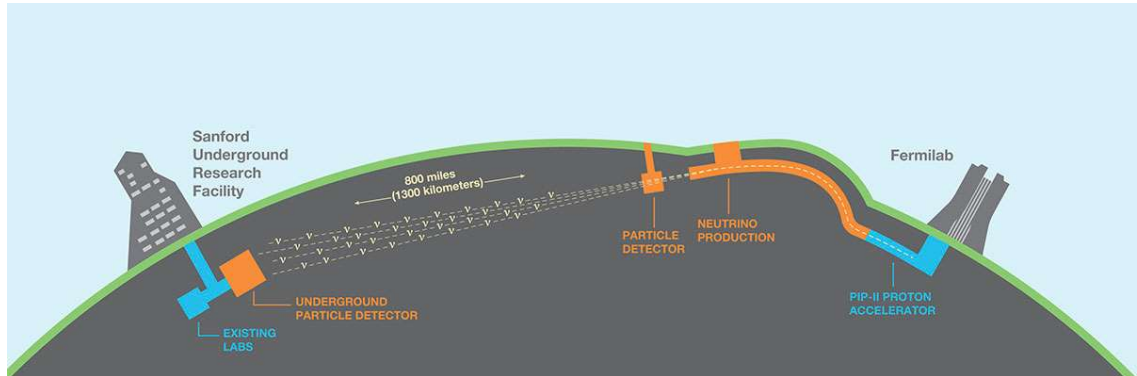
Fermilab on Yhdysvalloissa sijaitseva vastaavanlainen hiukkastutkimus- ja kiihdytinkeskus kuin CERN Euroopassa (Kuva 8). Fermilab on perustettu 1967 ja sijaitsee lähellä Chicagoa. Sen suurin hiukkaskiihdytin on pienempi kuin CERNin LHC, Fermilabin kiihdyttimen ympärysmittana on noin 6 kilometriä. Tutkimuslaitos tutkii maailmankaikkeutta ja sen alkuaikojia, kuten pimeää materiaa ja pimeää voimaa. Fermilab työllistää noin 1750 työntekijää sisältäen tutkijat ja insinöörit, jotka ovat kotoisin ympäri maailmaa. (Fermilab 2019.)



Kuva 8. Fermilabin päärakennus (Fermilab 2015)

Tällä hetkellä Fermilabin kansainvälisesti suurin tutkimusprojekti on LBNF/DUNE, (Long-Baseline Neutrino Facility / Deep Underground Neutrino Experiment (Kuvio 3). Tässä projektissa on mukana yli 1000 tutkijaa, yli 175 organisaatiosta ja yli 30 maasta. Tässä kokeessa Neutriino-säde ensin kiihdytetään Fermilabin kiihdyttimillä lähes valonnopeuteen, sen jälkeen se ammutaan maahan, jossa on 2 havainnointiasemaa. Ensimmäinen asema on kooltaan pienempi ja sijaitsee maan alla lähellä Fermilabia. Toinen havainnointiasema sijaitsee 1300

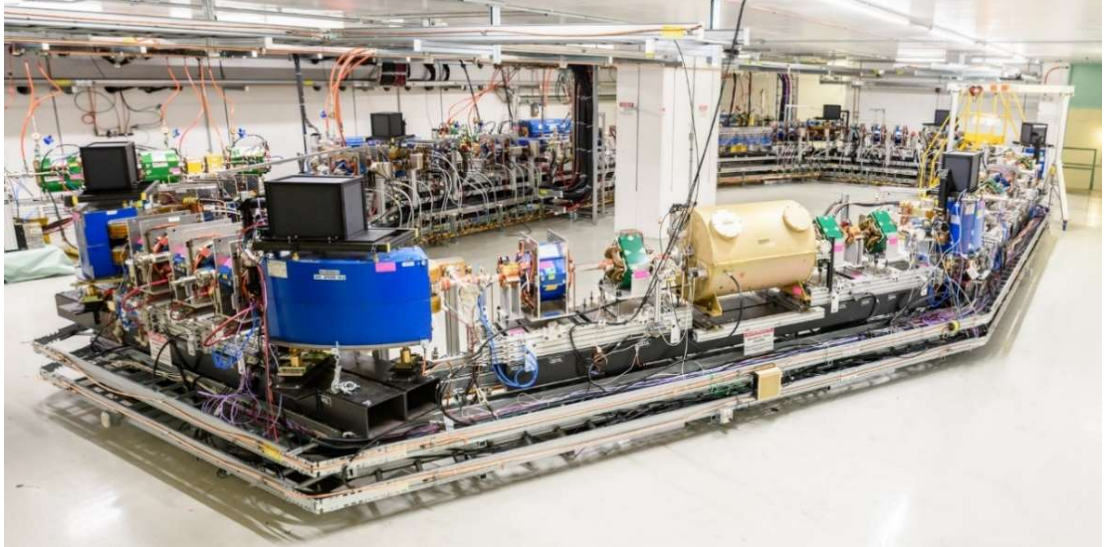
kilometrin päässä Etelä-Dakotassa Sanfordin tutkimuskeskuksessa, 1600 metrin syvyydessä maan alla. Tässä kokeessa tutkitaan miten neutriinit käyttäytyvät, kun ovat vuorovaikutuksessa muiden aineiden kanssa. (Fermilab 2020b.)



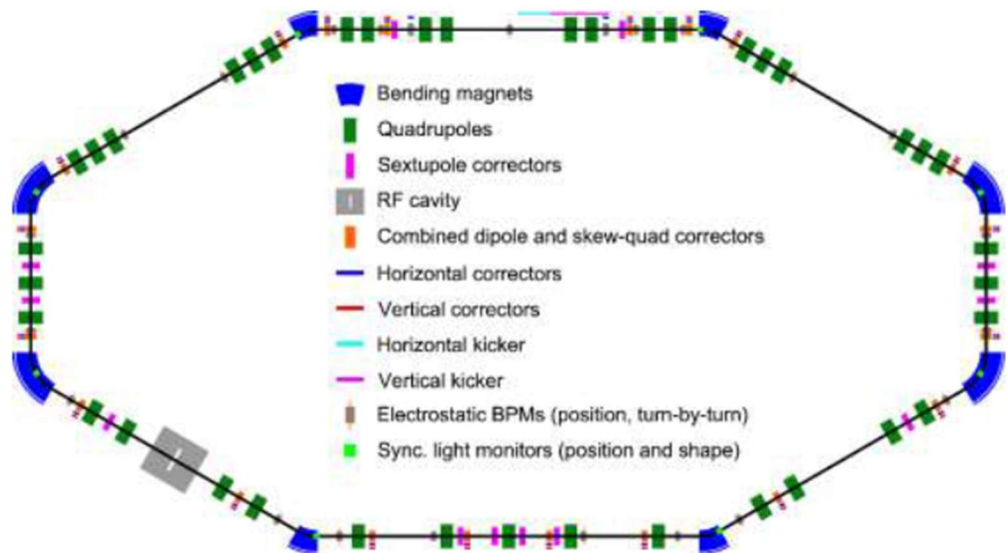
Kuvio 3. Havainnekuva LBNF/DUNE kokeesta (Fermilab 2020b)

3.2 IOTA-ring

Fermilabissa sijaitsee myös pienempi hiukkaskiihdytin, joka tunnetaan maailmalla nimellä IOTA-ring, Integrable Optics Test Accelerator. IOTA-ringillä tehtävien kokeiden tavoitteena on testata matemaattisia laskelmia kokeellisesti. Kehän ympärysmitta on noin 40 metriä ja siinä on 4 pitempää suoraa osuutta koe-laitteistoja varten. Kiihdyttimen muoto on saavutettu neljällä 30 asteen käännöksellä sekä neljällä 60 asteen käännöksellä. Kiihdyttimessä hiukkaset kulkevat 2 tuuman halkaisijalla olevassa putkessa, jonka sisälle on imetty tyhjiö. Kuvasta ja kuviosta (Kuva 9 ja Kuvio 4) saa käsityksen kiihdyttimen mallista ja magneettien sijainneista, joilla hallitaan säteen kääntymistä sekä kasassa pysymistä. (Antipov ym 2016.)



Kuva 9. IOTA-kiihdytin (Fermilab 2020a)



Kuvio 4. Pohjakuva IOTA-kiihdyttimestä (Antipov ym 2016)

4 PROJEKTIN LÄHTÖKOHTA

4.1 Tilanne Fermilabissa

Elektronilinssin suunnittelun alkaessa itse kiihdytin oli jo valmiina rakennettuna Fermilab-tutkimuskeskuksessa. Elektronilinsille oli varattu paikka yhdelle kiihdyttimen suorista osuuksista. Tällä hetkellä suunnitellulla paikalla on kiihdyttimen runkorakenne, jonka päälle elektronilinssi asennetaan sekä suora tyhjiöputki, jota pitkin hiukkaset tällä hetkellä kulkevat (Kuva 10). Tästä syystä suunnittelun reunaehdot olivat varsin selkeät, tulevan laitteen tulisi sopia sille suunniteltuun paikkaan ilman suurempia muutoksia muuhun rakenteeseen. Elektronilinsissä käytettävä elektroniase ja elektronikeräin olivat jo valmiina, nämä osat tulivat uusiokäyttöön jo puretusta kiihdyttimestä.

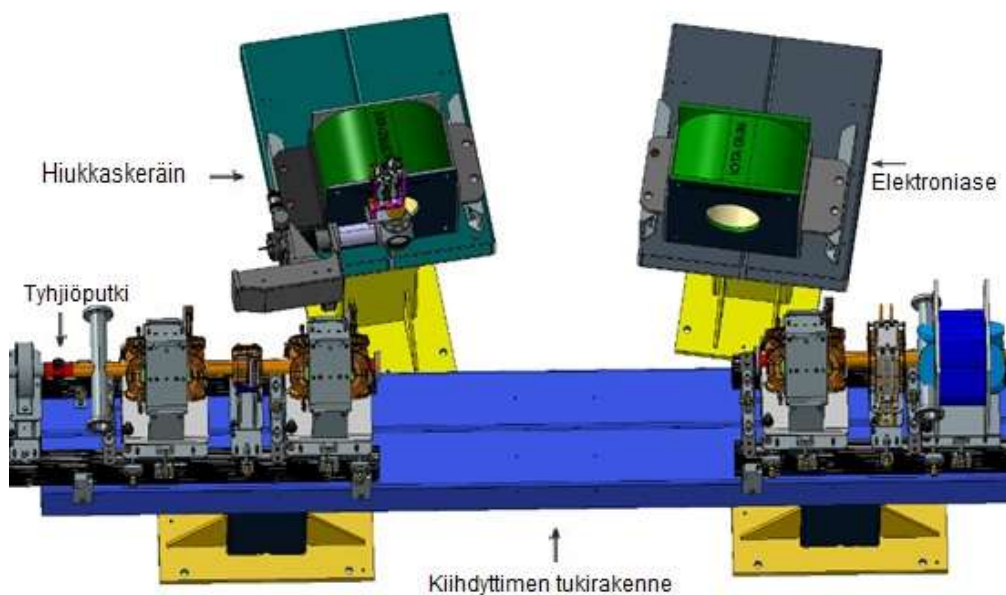


Kuva 10. Tikkaiden kohdalla kiihdyttimessä paikka, johon elektronilinssiä suunnitellaan (Fermilab 2020a)

Itse kiihdytin sijaitsee sisätilassa, joka kooltaan ei ollut kovin paljoa suurempi eikä varsinkaan korkeampi kuin kiihdytin (Kuva 9). Tämän vuoksi linssiä ei voitaisi tuoda valmiina pakettina paikoilleen vaan se piti tuoda osissa ja lopullinen kokoaminen tapahtuisi vasta paikan päällä, tokihan laite olisi kasattu ja varmistettu osien istuvuus jo ennen tätä.

4.2 Suunnittelun lähtökohdat

Suunnittelun alkutilanne selviää hyvin kuvasta (Kuva 11), 3D CAD-kuvassa linsin paikalla on pelkkää tyhjää ja ase sekä keräin ovat sivulla, mutta niiden paikka ja kulma kiihdyttimeen nähden ei ole vielä mitenkään määritelty. Tämän kuvan perusteella aloitettiin laitteiden ja magneettien sijoittelun suunnittelu ja saatiin käsitys millaiseen tilaan laitteiden tuli mahtua.

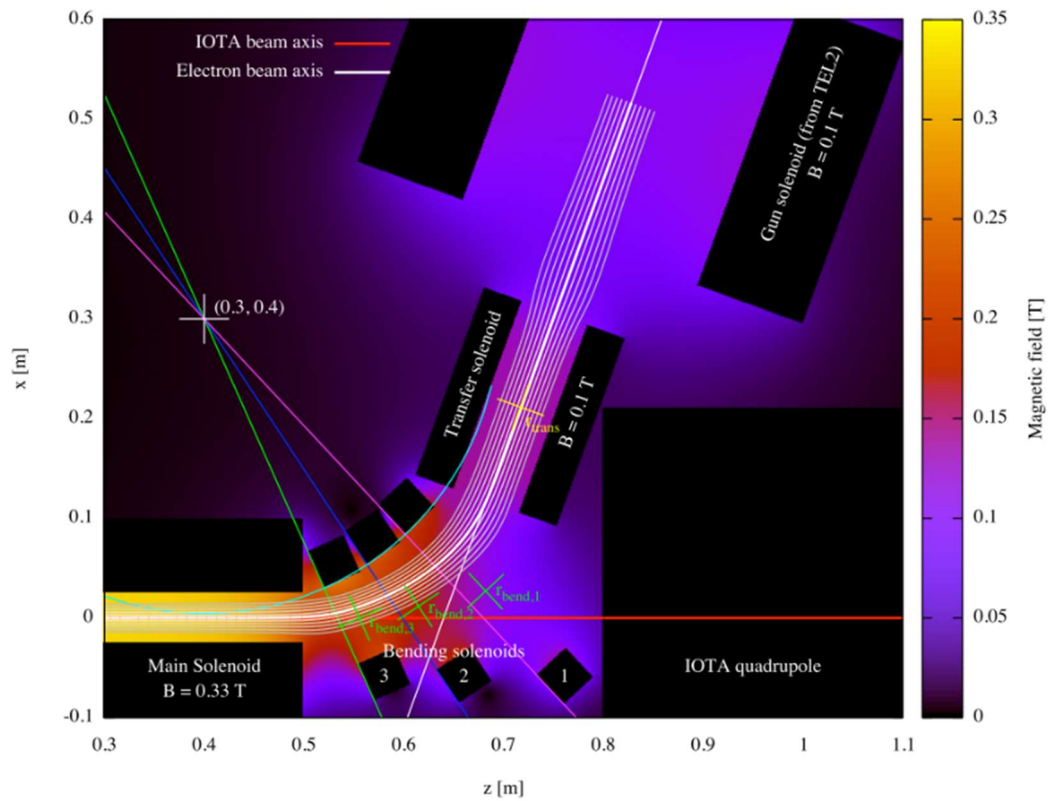


Kuva 11. Tilanne suunnittelun alussa

Teoria tietoa saatiin sähköpostin välityksellä sekä videoneuvotteluissa, joissa kerrottiin ja avattiin tulevaa suunnitteluprojektia. Yksi mainitsemisen arvoinen tietolähde oli projektin Wiki-sivusto, johon oli kerätty perustiedot projektista ja sitä päivitettiin kohtuullisen tiiviiseen tahtiin. Sieltä löytyi kuvia ja piirustuksia, mitä laitteeseen halutaan ja mitä siihen on jo tehty. Lisäksi sivustolle on kerätty julkaisuja ja muistioita, jotka käsittelevät aihetta.

Magneettien sijoittaminen aloitettiin kuvan (Kuva 12) perusteella, mistä saatiin alustava käsitys siitä, millaista asettelua Fermilabissa oli ajateltu. Kuvasta selviää ajateltu magneettikentän voimakkuus, magneettien määrä, alustava kulma sijoittamiselle sekä alustavat paikat. Tämän kuvan ymmärtämiseksi ja suunnittelun alkamisen helpottamiseksi oli Antti Kolehmainen tehnyt suunnitteluohjelmaan

luurankomallin, johon oli merkattu magneettien keskipisteet ja kulmat piirustustasoina.



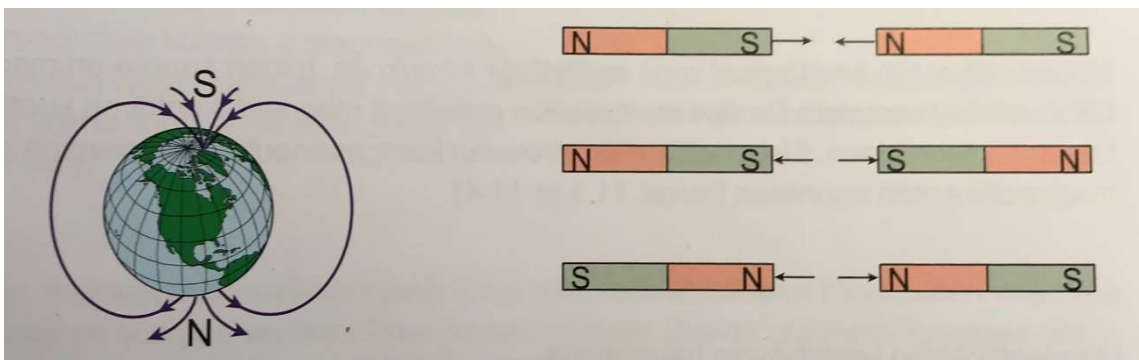
Kuva 12. Magneettien tiedot suunnittelun alkaessa (Fermilab 2020a)

5 SUUNNITTELUSSA TARVITTAVAA TIETOA

5.1 Magnetismi, magneetti ja magneettikenttä

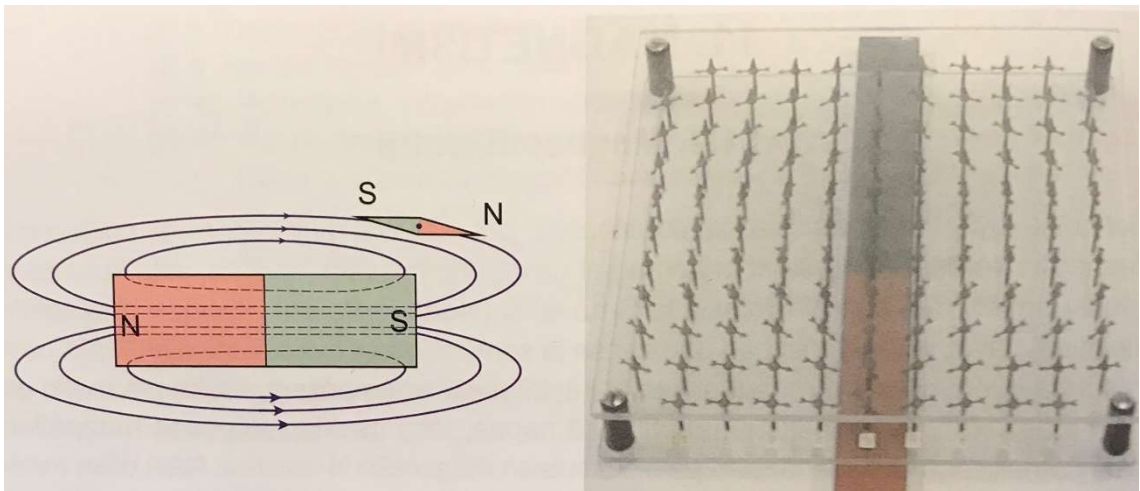
Magnetismia ja magneettikenttiä on ympärillämme koko ajan, joissain paikoissa ne ovat suurempia ja taas toisaalla pienempiä. Magneetit vetävät puoleensa muun muassa toisia magneetteja sekä rautaisia kappaleita ja osaa metalleista. Magneetteja on kahdenlaisia: kestromagneetteja sekä sähkömagneetteja. Kestomagneetit, kuten jotkut kivilajit, ovat magneettisia tai niitä voidaan valmistaa, mutta ne eivät tarvitse magneettisuuteensa ylläpitämiseksi ulkoista voimaa koko aikaa. Sähkömagneetit taas tarvitsevat sähköä toimiakseen ja pysyäkseen magneettisena, kun sähkö katkaistaan, magneettisuus häviää lukuun ottamatta mahdollista pientä jäännösmagnetismia. (Peltonen, Perkkiö, & Vierinen 2018, 9-10.)

Magneeteissa on aina 2 napaa, joista käytetään yleisesti nimitystä etelä- ja pohjoisnapa. Eri merkkiset navat vetävät toisiaan puoleensa ja samannimiset vastaavasti hylkivät toisiaan (Kuva 13). Jos kestromagneetti katkaistaan keskeltä kahtia, niin muodostuu 2 erillistä kestromagneettia, joilla molemmilla on omat pohjois- ja etelänapansa. Tähän perustuu esimerkiksi kompassin toiminta, koska maapallo on itsessään suuri magneetti ja sen magneettiset navat sattuvat sijaitsemaan lähellä maantieteellisiä napoja tosin toisinpäin. Maantieteellisen pohjoisnavan vieressä on magneettinen etelänapa ja vastaavasti maantieteellisen etelänavan lähetyvillä on magneettinen pohjoisnapa (Kuva 13). (Peltonen, Perkkiö, & Vierinen 2018, 9-10.)



Kuva 13. Maapallon magneettiset navat sekä magneetin napojen voimat toisiaan kohtaan (Peltonen, Perkkiö, & Vierinen 2018, 9)

Magneettikentällä tarkoitetaan magneetin vaikutusaluetta ja magneettikentän voimakkuudella tarkoitetaan magneetin aiheuttamaa voimaa ympärilleen. Magneettikenttää kuvataan kenttäviivoilla, jotka ovat suljettuja silmukoita ja niiden suunta on aina pohjoisnavasta etelänapaa kohti. Kun kompassi eli pieni magneetti on voimakkaamman magneetin vaikutusalueella, sen pohjoisnavan osoittaman suunnan avulla, voidaan havaita voimakkaamman magneetin magneettikentän suunta (Kuva 14). (Peltonen, Perkkiö, & Vierinen 2018, 9-10.)



Kuva 14. Magneettikentän havainnollistaminen (Peltonen, Perkkiö, & Vierinen 2018, 10)

Magneettikentällä on myös vaikutus varaukselliseen hiukkaseen, magneettikentällä voidaan ohjata hiukkasta kulkemaan haluttua rataa ja esimerkiksi kiihdyttimissä tällä voidaan estää hiukkasten törmäminen kiihdyttimen seiniin. Magneettikenttää käytetään hiukkaskiihdyttimissä myös hiukkasten nopeuden kiihdyttämiseen sekä hiukkasten pitämiseen halutussa muodossa. (Peltonen, Perkkiö, & Vierinen 2018, 28.)

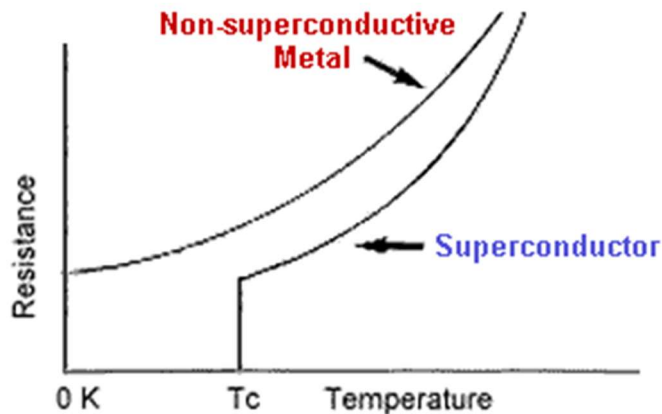
5.2 Suprajohtavuus

Suprajohtavuudella tarkoitetaan fysikaalista ilmiötä, jossa esimerkiksi sähkövarauksella ei ole vastusta johtimessa, eli varaus ei synnytä lämpöenergiaa kulkessaan suprajohteessa. Esimerkiksi renkaan mallisessa suprajohteessa elektronit

tarvitsevat vain liikkeelle panevan voiman ja pysyvät tämän jälkeen liikkeessä ilman erillistä energialähdettä. Suprajohtavassa tilassa myös aineen magneettisuus katoaa. Ensimmäisen havainnon suprajohtavuudesta teki hollantilainen fyysikko Kamerling Onnes, joka havaitsi vuonna 1911, että elohopean vastus katoaa kokonaan lämpötilan pudotessa alle 4 Kelvin-asteen, joka Celsius-asteissa vastaa noin -269 astetta. (Walker 2008, 697.)

5.2.1 Ryhmän 1 Suprajohteet

Suprajohteet voidaan jakaa kahteen eri ryhmään: ensimmäiseen ryhmään kuuluu metalleja sekä puolimetalleja, jotka esiintyvät yksinään ja ovat alkuaineita. Näissä metalleissa on myös huoneenlämmössä jonkinlaista johtavuutta. Toimiakseen suprajohteina nämä aineet tarvitsevat äärimmäisen kylmiä lämpötiloja, alle 10 Kelvin astetta. Yhteistä näille aineille on, että niiden resistiivisyyden menetys tapahtuu yhtäkkiä oikean lämpötilan kohdalla, kuten kuviosta (Kuvio 5) voi havaita. Yllättäen parhaina metallisina johteina tunnetut kupari, hopea ja kulta eivät muutu suprajohteiksi lämpötilan pudotessa, mikä johtuu niiden molekyyli­rakenteesta. (Superconductors 2009.)



Kuvio 5. Vastuksen yhtäkkinen tippuminen vaaditun lämpötilan kohdalla (Superconductors 2009)

Yhden teorian mukaan suprajohtavuus muodostuu, kun elektronit muodostavat parin, jota kutsutaan Cooperin pariiksi. Suprajohtavassa tilassa parin toisen elektronin sähköinen rakenne muuttuu hetkeksi positiiviseksi, mikä aiheuttaa imuefektin parin negatiiviseen osapuoleen. Teorian mukaan tällainen elektronien välinen

toiminta estää niitä törmäämästä suprajohtavan rakenteen molekyylien kanssa ja tämä eliminoisi sähköisen vastuksen. Tämä teoria toimii hyvin ryhmään 1 kuuluvien johteiden kanssa, mutta ei toiseen ryhmään kuuluvien kanssa. (Walker 2008, 698.)

5.2.2 Ryhmän 2 Suprajohteet

Ryhmään 2 kuuluvat suprajohteet koostuvat muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta metallisista yhdisteistä ja seoksista. Ensimmäisen ryhmään 2 kuuluvan suprajohtavan yhdisteen, joka sisälsi lyijyä ja vismuttia, valmistsivat W. de Haas ja J. Voogd vuonna 1930, mutta tuolloin kyseistä yhdistettä ei tunnustettu suprajohtavaksi. Tähän ryhmään kuuluvat johteet saavuttavat suprajohtavuuden huomattavasti korkeammissa lämpötiloissa kuin ryhmään 1 kuuluvat. Ilmiön mekanismista ei ole vielä täyttä varmuutta, mutta siitä on olemassa useampi eri teoria. (Superconductors 2018.)

Korkein muutoslämpötila, joka on saatu materiaalille normaali ilmanpaineessa ja stoikiometrisesti (suoraan sekoittaen), on 147 Kelviniä. Korkein muutoslämpötila, joka on yleisesti saavutettu, on 216 Celsius astetta, mutta se ei muodostu stoikiometrisesti. Ryhmään 2 kuuluvat suprajohteet poikkeavat ensimmäisen ryhmän jäsenistä myös siinä, että niiden muutos normaalista suprajohtavaan tilaan tapahtuu asteittain, mikä riippuu aineiden seossuhteista. (Superconductors 2018.)

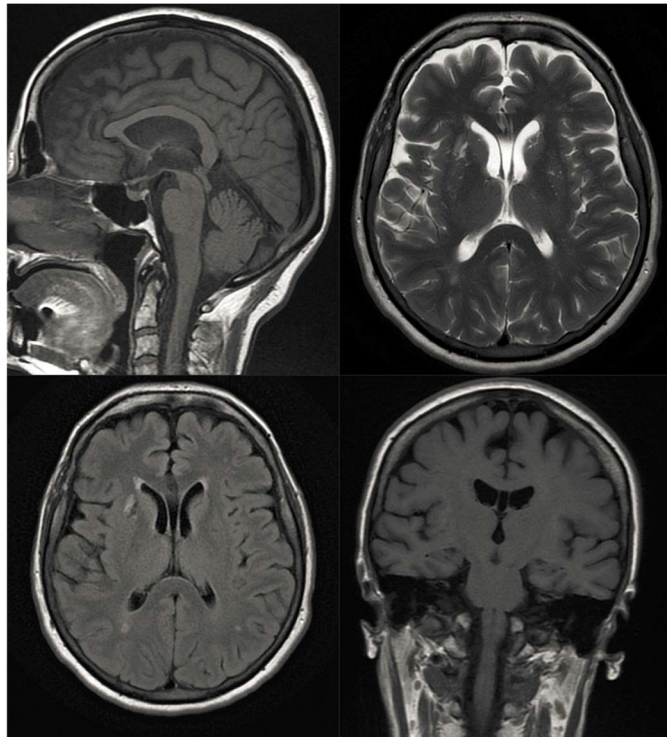
5.2.3 Suprajohteiden käyttö

Yhtenä käyttökohteena suprajohteille on magneettinen levitaatio, esimerkiksi Japanissa on testijuna (Kuva 15), joka käyttää hyväkseen magneettista levitaatiota. Juna ikään kuin ”kelluu” radan päällä voimakkaiden suprajohtavien magneettien voimalla ja näin välttyään junan ja radan väliseltä kitkalta. Huhtikuussa 2015 tämä testijuna saavutti huikean 603 km/h:n nopeuden. (Superconductors 2019.)



Kuva 15. Magneettisen levitaation testijuna Yamanashi MLX01 (Kimura Eiichi, 2014)

Suprajohteilla on käyttöä myös terveydenhuollossa, siellä niitä käytetään esimerkiksi magneettitutkimus koneissa. Tällaisella laitteella lääkärit voivat nähdä potilaan sisään ilman, että heidän tarvitsee suorittaa leikkausta (Kuva 16). (Superconductors 2019.)



Kuva 16. Magneettikuvauslaitteella kuvatut aivot (Pohjois-Pohjanmaan Sairaanhoidopiiri 2020)

Suprajohtavuudella on suuri potentiaali myös sähkö- ja energiateollisuudessa. Tällä hetkellä on tehty ja tehdään testejä ympäri maailmaa aiheeseen liittyen, esimerkiksi Tanskassa on 30 metriä pitkä suprajohtava testilinja käytössä, linjan kautta sähköä siirretään 150 000 talouteen. Moottoreita ja generaattoreita on valmistettu suprajohtavasta materiaalista kuparin sijaan ja tämän ansiosta niiden koko ja paino ovat pienentyneet huomattavasti. Tällaista tekniikkaa on käytössä muun muassa sukellusveneissä. Yksi esimerkki suprajohtavan johdon suuresta energian siirtokyvystä verrattuna kuparijohtimeen on, kun 250 kilolla suprajohtavaa johdinta korvattiin 18 000 kiloa vanhaa kuparijohtoa. Kuvassa (Kuva 17) näkee hyvin kaapeleiden siirtokapasiteetin erot, nippusiteillä kiinnitetyt kaapelit pystyvät siirtämään saman verran virtaa kuin suprajohtava kaapeli niiden päällä. (Superconductors 2019.)



Kuva 17. Suprajohtava johdin kaapelinipun päällä

5.3 Kryojäähdytin

Kryojäähdyttimeksi kutsutaan laitetta, joka pystyy suorittamaan jäähdytyksen 100 Kelvin asteeseen ja sen alapuolelle (Kuva 18). Yleisimpiä käyttökohteita tällaiselle laitteelle ovat kryopumppaus (saadaan aikaan tyhjiö), erilaisten ilmaisimien jäähdytys (esimerkiksi infrapunasensorit), elektronikan ja suprajohteiden jäähdy-

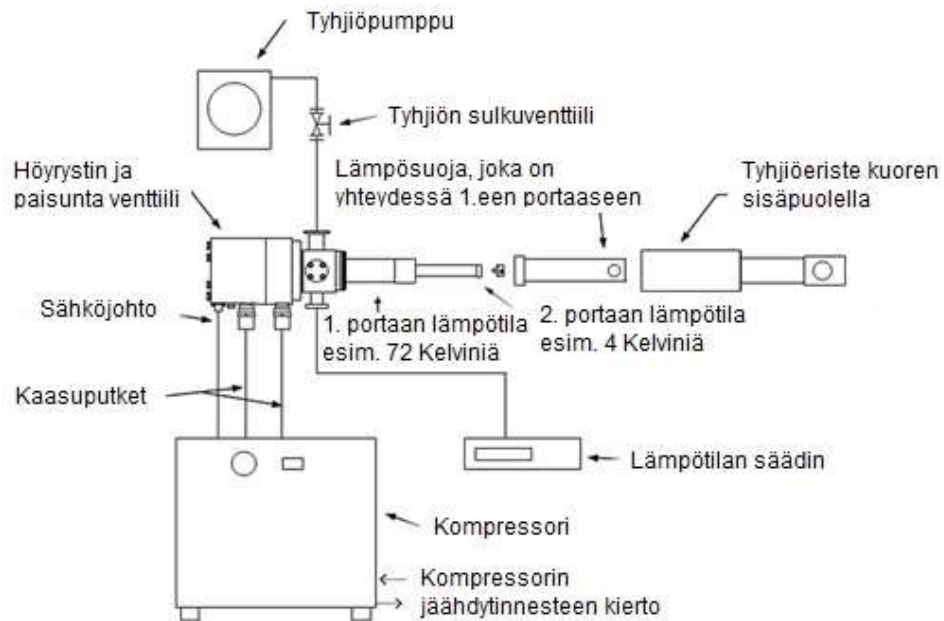
tys, näytteiden jäähditys sekä kaasujen nesteytys. Kryojäähdytin perustuu samoihin termodynamiikan sääntöihin ja lainalaisuuksiin kuin jääkaappi sekä lämpöpumppu. Eli jäähditys perustuu tekniikkaan, jossa työnesteenä käytettävän aineen annetaan puristua kasaan, laajentua ja vaihtaa lämpöä ympäristön kanssa. (Ropponen 2003.)



Kuva 18. Kryojäähdytin kylmäpää (Cryomech 2020)

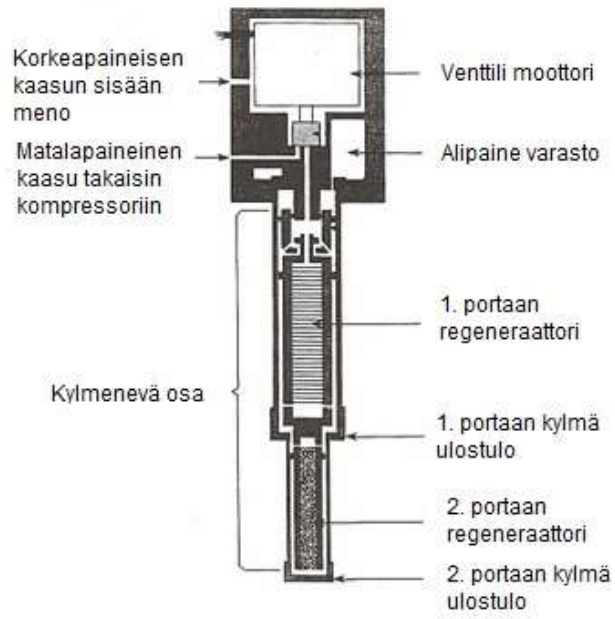
Kryojäähdytin tärkeimmät osat ovat höyrystin ja paisuntaventtiili, kompressori, tyhjiöverho sekä lämpösuoja (Kuvio 6). Kylmäaineena tässä kryojäähdytinmessä käytetään Heliumia. Höyrystimessä ja paisuntaventtiilissä, jota voidaan kutsua myös kylmäpääksi, tapahtuu kaasun laajeneminen ja ympäröivän lämmön siirtyminen kylmäaineeseen. Kylmäpää on kytketty kompressoriin 2 kaasulinjalla sekä sähköjohdolla. Ensimmäistä kaasulinjaa pitkin paineistettu helium, jota käytetään kylmäaineena, siirtyy kompressorilta kylmäänpähän ja toista linjaa matalapaineinen lämmennyt helium palaa takaisin kompressorille. Tyhjiöverho toimii laitteessa eristeenä, jolla saadaan merkittävästi pienennettyä johtumalla tapahtuvaa lämpökuormaa. Lämpösuoja kiinnitetään ensimmäiseen lämpötilaportaa-

seen ja se ympäröi toisen lämpötilaportaan. Lämpösuojaa jäähdytetään kryojäähdyttimen ensimmäisellä portaalla, näin ollen toisen portaan ei tarvitse saada aikaan niin suurta lämpötilan muutosta ympäristöön nähden. (Advanced Research Systems 2020.)



Kuvio 6. Suljetun kierron kryojäähdyttimen periaatekuva (Advanced Research Systems 2020)

Edellä esitellyssä mallissa on kaksi portainen jäähdytysjärjestelmä, ensimmäinen porras suorittaa jäähdytyksen lämpimämpään arvoon eli esimerkkitapauksessa 72 Kelvin-asteeseen ja vasta toinen porras jäähdyttää lämpötilan haluttuun arvoon 4 Kelviniä (Kuvio 7). Tällaisella menetelmällä saavutetaan pienemmät lämpöhäviöt ja parempi tehokkuus. Muita olennaisia osia, joita jäähdyttimissä voi olla riippuen käyttötarkoituksesta ovat tyhjiöpumppu, tyhjiöventtiili, lämpötilan säätö- ja valvontajärjestelmä, kompressorin jäähdytys. (Advanced Research Systems 2020.)



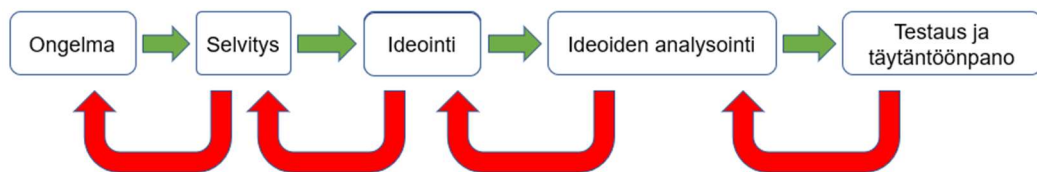
Kuvio 7. Kryojäähdyttimen kylmäpää (Advanced Research Systems 2020)

6 SUUNNITTELU

6.1 Suunnitteluprosessi

Yksinkertaisimmillaan suunnittelu voidaan nimetä ongelman ratkaisuksi, tämä siitä syystä, että suunnittelun avulla on tarkoitus löytää ratkaisu johonkin käsillä olevaan tilanteeseen, toisin sanoen ongelmaan. Se voi tarkoittaa uuden laitteen rakentamista, uutta työtapaa johonkin tehtävään tai jonkin entisen osan parantamista. Suunnitteluprosessin pituus ja laajuus riippuu tietenkin ongelmasta ja sen laajuudesta. Mitä suurempi ongelma on, miten suurta ihmisjoukkoa se koskee ja mikä sen rahallinen arvo on, kaikki edellä mainitut asiat vaikuttavat prosessin pituuteen ja monimutkaisuuteen. Pienimmillään suunnitteluprosessi voidaan suorittaa viidessä eri vaiheessa (Kuvio 8), toki tosielämässä nämä vaiheet voivat liittyä yhteen ja niitä on ehkä vaikea erottaa. (Hyysalo 2009, 55-60.)

Yksinkertaistettu suunnittelun prosessikaavio



Vihreät nuolet osoittavat toivotun suunnan suunnitteluprosessissa ja punaiset nuolet kuvaavat tilannetta, jossa joudutaan palaamaan edelliseen vaiheeseen. Punaiset nuolet aiheuttavat kustannusten lisääntymistä, mitä pidemmällä ollaan ja mitä kauemmas alkuun joudutaan palaamaan sen enemmän se maksaa.

Kuvio 8. Suunnittelun prosessikaavio (Gemba Innovation 2020)

Suunnitteluprosessi alkaa ongelmalla, johon halutaan ratkaisu, esimerkiksi jokin uusi laite, jonkin vanhan laitteen parantaminen tai uusi töidenjärjestely. Nämä ongelmat taas syntyvät ihmisten tarpeista: halutaan puhdasta vettä, halutaan kestävämpi osa koneeseen tai helpommat työolot. Tässä vaiheessa selviää myös muuta pohjatietoa, mitä suunnitellaan, kenelle, millaisia ominaisuuksia tuotteeseen halutaan, mitä se saa maksaa ja muut reunaehdot. On myös tärkeää määrittää ratkaistava ongelma tarpeeksi hyvin, jotta vältetään eksymästä väärään suuntaan. (Khandani 2005.)

Suunnitteluprosessin toinen vaihe on tiedon kerääminen. Tämä on ehkä tärkeimpiä vaiheita koko prosessissa, tässä vaiheessa yleensä ratkaistaan tuotteen hyvyys ja myöhemmässä vaiheessa saatavat tulot. Kysymyksiä, jotka ainakin kannattaa huomioida ja löytää niihin vastaukset ovat: Onko ongelma todellinen ja onko se selvitetty tarpeeksi tarkoin? Onko tähän ongelmaan jo valmis ratkaisu olemassa? Ovatko ne ratkaisut riittävät ongelman selvittämiseen? Mikä edellä mainituissa ratkaisuissa on hyvää ja mikä huonoa? Mistä tällaisen valmiin ratkaisun voi saada? Mitkä ovat ratkaisun taloudelliset tekijät? Mitä siitä ollaan valmiita maksamaan? Mitkä muut asiat ratkaisussa pitää huomioida (turvallisuus, ympäristö, standardit, estetiikka)? (Khandani 2005.)

Kolmantena vaiheena on ideointi, tässä vaiheessa luodaan ideoita, miten ongelma voidaan ratkaista. Ideointi voidaan aloittaa tutustumalla valmiisiin ratkaisuihin mitä muut ovat jo kehittäneet. Selvittää toimivatko ne tai jos eivät niin miten niitä voitaisiin parantaa? Jos on useampi ratkaisu ja ne eivät toimi yksinään, niin voiko näistä jo valmiista ratkaisuista saada yhdistelemällä hyvän ja toimivan ratkaisun? Toki jos tilanne sitä vaatii, niin ideointi aloitetaan puhtaalta pöydältä kehittämällä jotain täysin uutta. Tämän vaiheen päättyessä voi olla useita erilaisia ratkaisuehdotuksia. (Khandani 2005.)

Prosessin neljäs vaihe on ideoiden ja ratkaisuehdotusten tutkimista ja analysointia. Tässä vaiheessa selvitetään, ratkaiseeko tämä ongelman kaikki ne kysymykset ja vaatimukset, mitkä suunnittelulle asetettiin ensimmäisessä ja toisessa vaiheessa. Ratkaisun on kyettävä vastaamaan kaikkiin esitettyihin vaatimuksiin, jos näin ei ole voidaan todeta suunnittelun epäonnistuneen. Otetaan esimerkiksi kuulakärkikynä: jos se näyttää hyvältä, se tuntuu kädessä hyvältä, sen hinta on oikea, se jättää kauniin jäljen paperiin, mutta se ei pidä mustetta tiiviisti sisällään, joten kuulakärkikynän suunnittelu on tältä osin epäonnistunut. Kun ideat on tutkittu ja analysoitu ja on löydetty ratkaisu, joka vastaa kaikkiin kysymyksiin, joita aiemmin on esitetty, valitaan se ratkaisuksi. (Khandani 2005.)

Viimeisenä vaiheena on valitun ratkaisun testaaminen ja täytäntöönpano. Ratkaisua voidaan testata esimerkiksi tekemällä siitä prototyyppi ja kokeilemalla sitä, nykyään myös CAD-ohjelmat sisältävät simulointi- ja testausominaisuuksia. Prototyypin tarkoitus on testata suunniteltu ratkaisu todellisessa ympäristössä. Jos

ratkaisu ei toimi, sitä voidaan tässä vaiheessa parannella ennen kuin laitteen varsinainen valmistus alkaa. Tässä vaiheessa myös selvitetään tuotteen valmistukseen liittyvät kysymykset, kuka valmistaa, millaisia määriä, mistä raaka-aineista tuote tehdään? (Khandani 2005.)

Toki suunnitteluprosessi ei yleensä ole näin suora ja se voi sisältää monia muitakin vaiheita, esimerkiksi asiakastestauksia ja tuotteen parantamista niiden perusteella. Suunnittelussa voidaan myös joutua ottamaan askeleita taaksepäin, jos todetaan, että valittu ratkaisu ei toimi. Voi olla, että ratkaisua esitellään käyttäjälle tai tilaajalle ja he eivät hyväksy ratkaisua tai vaativat siihen muutoksia, tällaisia esittelykohtia ja takaisinpaluita voi olla useita suunnittelun aikana. Voi myös käydä niin, että suunnitteluprosessi keskeytetään ja ratkaisua ei ikinä saada valmiiksi, mikä voi johtua esimerkiksi rahojen loppumisesta tai joku muu on ehtinyt tehdä toimivan ratkaisun suunnitteluprosessin aikana. (Hyysalo 2009, 55-60.)

6.2 CATIA V5 -suunnitteluohjelma

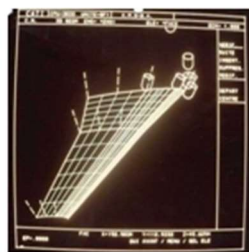
Suunnittelussa oli käytössä CATIA V5 -niminen 3D-suunnitteluohjelma (Kuva 19). Ohjelma on ranskalaista alkuperää ja se suunniteltiin lentokoneiden valmistuksen helpottamiseksi ja nopeuttamiseksi. CATIA nimi tulee ranskan kielen sanoista *Conceptio Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée*. Tällä hetkellä ohjelma tunnetaan maailman laajuisesti ja on käytössä monen erilaisen tuotteen valmistuksessa. Ohjelmaa käyttävät suunnittelussa muun muassa seuraavat maailmanlaajuiset suuryritykset, lentokonevalmistaja Boeing, autonvalmistajat BMW, Mercedes Benz, Honda ja lukuisa joukko muita yrityksiä ja organisaatioita, jotka tarvitsevat 3D-mallinnusta ja simulointia. (Bernard 2010.)



Kuva 19. Mallikuva Cad-ohjelmalla suunnitellusta tuotteesta (Designtech CAD Academy 2020)

6.2.1 Historia

Alun perin ohjelman kehitti ranskalainen lentokonevalmistaja Dassault Aviation Company omaan käyttöönsä helpottamaan lentokoneidensa suunnittelua (Kuva 20). Vuosien 1967-1976 välillä oli kehitytty tarpeelliset 3D-CAD/CAM-ohjelmat lentokoneen suunnittelua ja mallintamista varten, mutta ne toimivat kaikki eri alustoilla ja vaativat käyttäjäkseen todellisen erikoisosaajan. 1977 aloitettiin kokonaisohjelman suunnittelu, jossa pyrittiin saamaan nämä kaikki yksittäiset ohjelmat samalle alustalle ja helppokäyttöiseksi. Tietokonetekniikka oli myös parantunut suunnittelun alkuun verrattuna ja niissä oli enemmän tehoa käyttää graafista käyttöliittymää, joka ohjelmaan haluttiin. (Bernard 2010.)



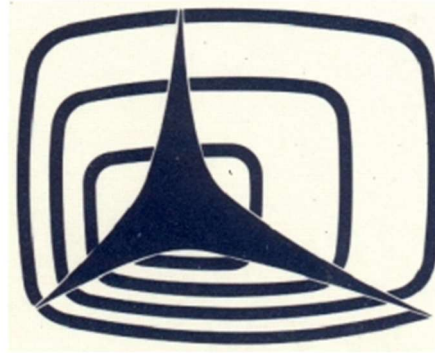
NC machining in CATIA



NC machining in the plant

Kuva 20. CATIA-ohjelmalla suunnitellun osan työstöä (Bernard 2010)

Vuoteen 1981 asti CATIA-ohjelman suunnitteluryhmä oli osa Dassault Aviation Companya, mutta tällöin ohjelmaa varten perustettiin oma yritys, jonka nimeksi tuli Dassault Systèmes (Kuva 21). Näihin aikoihin sovittiin myös yhteistyösopimus amerikkalaisen tietokonevalmistaja IBM:n kanssa, joka markkinoisi ohjelmaa IBM-tuotteena. Tästä seurasi, että ohjelma sai maailmanlaajuisen markkinointi- ja myyntiverkoston valmiina eikä sen tarvinnut aloittaa maailman valloitusta sen rakentamisella. Tämä sopimus tuli päätökseen vasta vuonna 2009, kun Dassault Systèmes osti IBM:ltä ohjelman myyntiosaston takaisin itselleen. (Bernard 2010.)



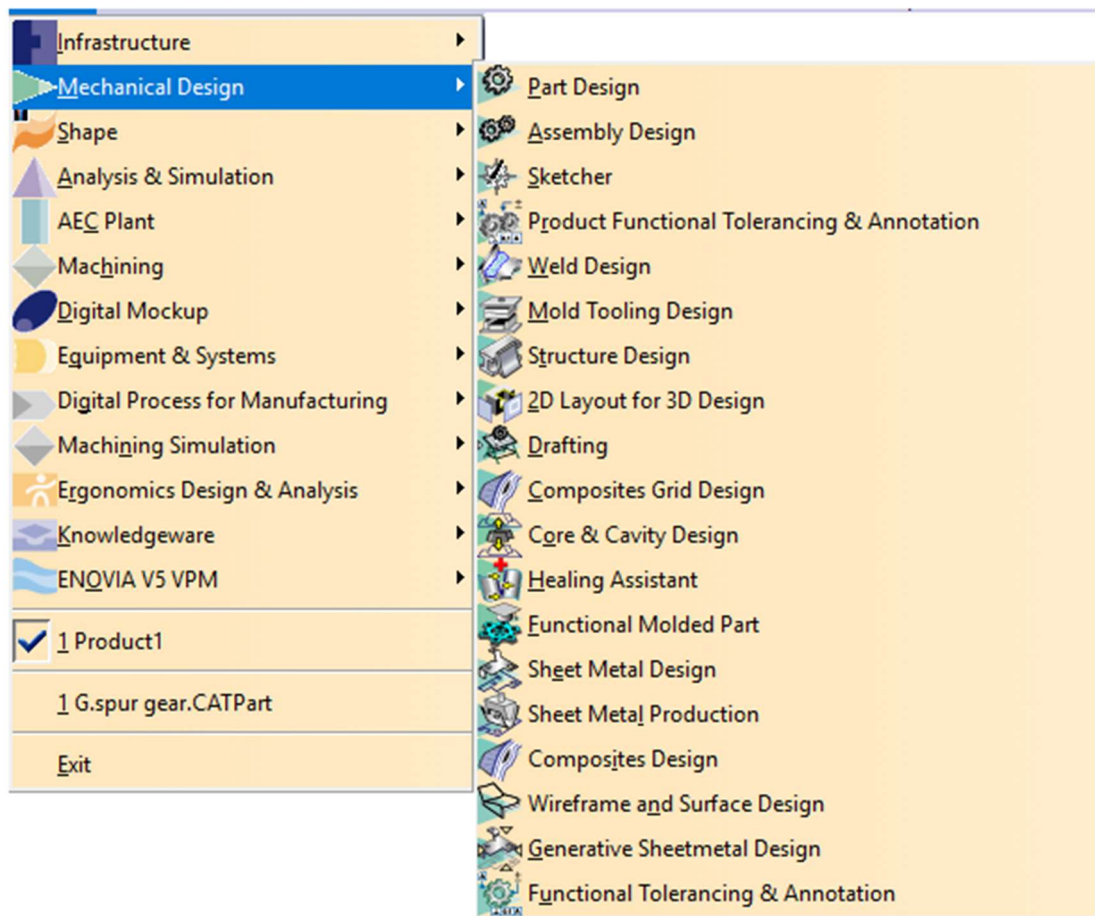
Kuva 21. Dassault Systèmesin ensimmäinen logo (Bernard 2010)

6.2.2 Ohjelman esittely

CATIA V5 on monipuolinen suunnitteluohjelma ja sitä voidaan käyttää koko suunnitteluprosessin ajan, aina ideasta valmiiseen tuotteeseen saakka. Ohjelmalla voidaan piirtää osan karkea malli, muotoilla siihen halutunlainen ja mallinen pinta, testata osan kestoa simuloinneilla ja erilaisilla kuomanlaskenta ominaisuuksilla, liittää osa suurempaan osakokoonpanoon, testata osakokonaisuuden liikkuvuuksia, osien yhteentörmäyksiä ja kokonaisuudelle syntyviä yhteiskuormituksia sekä lähettää valmiin osan tiedot CNC-koneelle, joka valmistaa kyseisen osan. (Designstech CAD Academy 2020.)

Ohjelma koostuu erilaisista ”työpöydistä”, jossa jokaisessa tehdään erilaisia asioita (Kuva 22). Mekaniikkasuunnittelijalle ehkä tärkein työpöytä on osien suunnittelu, tällä työpöydällä tehdään osien mallinnus, saadaan osalle 3D-muoto ja annetaan sille oikeat mitat. Muotoilu-työpöydällä saadaan tehtyä erilaista muotoja

ja pintoja, esimerkiksi laitteiden ulkokuoria. Kokoonpano-työpöydällä yksittäisistä osista tehdään kokoonpanoja, joiden nivelille tai liitoksille voidaan antaa ehtoja, miten ne liikkuvat. Kinemaattisessa simulointi -työpöydässä voidaan tarkastella esimerkiksi useita niveliä sisältävän mekanismin liikkuvuuksia. Edellä mainitut työpöydät ovat vain muutamia esimerkkejä ohjelman ominaisuuksista, ja ohjelmaan voidaan ostaa lisää työpöytiä ja ominaisuuksia tarpeen mukaan. (Designtech CAD Academy 2020.)



Kuva 22. Esimerkkilista työpöydistä (Dannana 2017)

7 TYÖN SUORITUS

7.1 Aloitus ennen CERNiin menoa

Työ aloitettiin tammikuun 2019 lopussa videoneuvotteluiden välityksellä, koska projekti ja projektista tietävät henkilöt ovat töissä CERNissä. Työhön osallistuivat alkuvaiheessa CERNistä Diego Perini ja Antti Kolehmainen, Lapin Amkista ohjaajana toimi Ari Pikkarainen sekä kaksi kesätyöntekijää Jussi Suopajarvi ja Henrik Schmuul, joka oli kevään ajan vielä oppilasvaihdossa Wienissä. Näistä välimatkoista johtuen ainoat realistiset yhteydenpitovälineet olivat videoneuvottelut sekä sähköpostiviestit.

Kevään ohjelmana oli tutustua suunniteltavaan laitteeseen sekä harjoitella Catia-suunnitteluohjelmiston käyttöä. Suunniteltavaan laitteeseen tutustuminen oli varsin haastavaa, koska aihepiiri oli täysin uutta. Videoneuvotteluissa läpikäytyt asiat etenivät niin nopealla tahdilla, ettei niistä jäänyt käytännössä oikeastaan mitään mieleen, joitakin kuvia jäi muistiin, mutta hetken kuluttua ei kyllä enää tiennyt, että mitä ne kuvat oikein tarkoittivat ja mihin ne nyt sitten liittyivät. Myös sähköpostissa saadut materiaalit ja nettisivut, joissa ohjattiin käymään ja tutustumaan aiheeseen eivät juurikaan selventäneet asiaa.

Toinen kevääksi annettu tehtävä oli tutustuminen Catia-mallinnus ja -suunnitteluohjelmaan ei sekään mennyt ihan putkeen. Koulussa oli kolme konetta, joihin kyseinen ohjelma oli asennettu, mutta niitä ei saatu toimimaan koko kevään aikana. Koneet ilmoittivat, että ohjelmaan kuuluva lisenssi ei ollut voimassa tai ei toiminut, asiasta oltiin yhteydessä koulun it-tukeen sekä ohjaavaan opettajaan, mutta asia ei edennyt mitenkään. Ohjelma ei ole koulussamme varsinaisena opiskelukohteena, joten asiaa ei ilmeisesti katsottu kovin kiireelliseksi eikä hoitamisen arvoiseksi. Ainoaksi vaihtoehdoksi ohjelmaan tutustumiseen jäi ladata ohjelmasta opiskelijaversio omalle koneelle ja ostaa siihen lisenssi. Opiskelijaversio ja CERNissä käytettävä versio erosivat kuitenkin toiminnaltaan aika paljon ja koska tutustumisen ja oppimisen ainoa työkalu oli YouTuben tutoriaalivideot, jäi oppiminen varsin pintapuoliseksi.

7.2 Työskentely CERNissä

Varsinainen suunnittelu ja mallinnustyö alkoi toukokuussa, kun kesätyö alkoi CERNin tutkimuskeskuksessa. Osasto, jolla työskentely tapahtui, kuului EN-yksikköön ja siellä MME-osastoon. Työn alussa saatiin tarkempi kuvaus ja selvyys mitä oltaisiin tekemässä, minkä vuoksi ja miten sen kuuluisi toimia. Työt alkoivat perusteellisemmalla tutustumisella käytettävään tietokantaan ja muihin laitoksen järjestelmiin, sekä itse alueeseen.

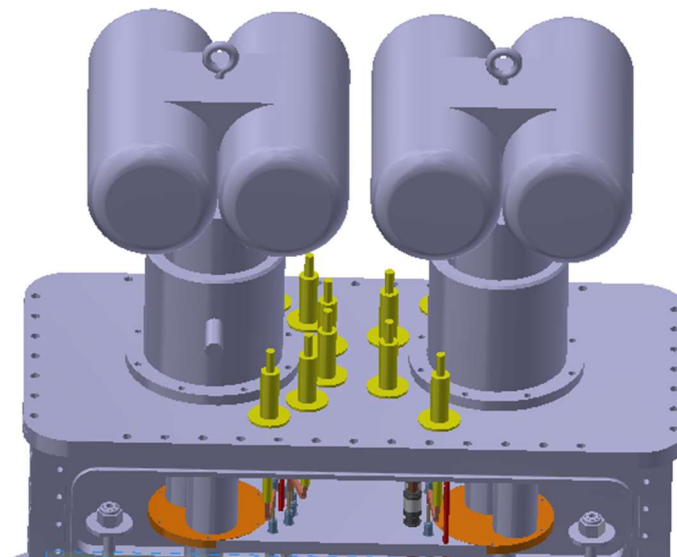
Suunnittelu aloitettiin pohjatiedoilla, jotka oli saatu Fermilabista. Suunnittelua ohjasivat pääasiassa Antti Kolehmainen ja Diego Perini. Antti Kolehmainen toimi lähimpänä esimiehenä ja hänellä oli erittäin suuri tietämys aiheesta ja hän myös kävi kesän aikana tutustumassa Fermilabissa kiihdyttimeen, sen sijaintiin ja paikkaan mihin linssiä oli suunniteltu. Diego Perini avusti myös suunnittelussa paljon, hänellä oli suuri tietämys magneeteista, niiden suunnittelusta ja pitkään toimintaikään ja -varmuuteen vaikuttavista asioista. Giorgia Gobbi oli suunnittelussa mukana, hän simuloi tietokoneen ja MATLAB Code ohjelman avulla hiukkasten kulkureittiä ja reitin muutoksia erilaisilla magneeteilla sekä magneettien sijoittelulla.

Magneettien koon ja sijainnin määrittely oli varsin suuritöinen operaatio, koska hiukkasten kulkurata saattoi muuttua erittäin paljon jo asteen muutoksesta magneettien kulmissa toisiinsa nähden, magneettien sijainnin muutoksilla sekä magneettien koon muutoksella. Simuloinnilla saatujen tulosten perusteella magneetteja alettiin sijoittaa 3D-malliin, tällä pystyttiin havaitsemaan, pystyykö magneetteja asentamaan simuloinnin esittämällä tavalla. Tässä kohtaa huomattiin lukuisia kertoja, että magneetit törmäävät johonkin tai oli jokin muu syy miksi magneetteja ei voinut asentaa simuloinnin esittämällä tavalla. Kun oli selvitetty, mistä kiikastaa ja miten asia voitaisiin korjata, annettiin Giorgialle Gobbille uusia mittoja millä asennus voitaisiin tehdä ja hän aloitti simuloinnin uudestaan. Tätä kohtaa suunnittelussa toistettiin useita eri kertoja erilaajuisena ennen kuin saatiin kaikkia tyydyttävä tulos.

Suunnittelun ja 3D-mallin edistyessä pidettiin videotapaamisia Fermilabin porukan kanssa, suunnilleen joka toinen viikko. Tapaamisissa käytiin läpi mitä oltiin

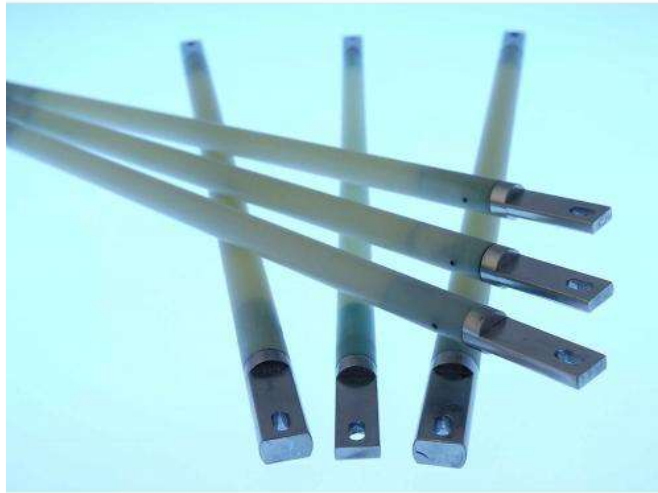
saatu aikaiseksi, millaisiin ratkaisuihin oltiin päädytty ja mistä syystä. Neuvotte-
luissa CERNistä esitettiin ajatuksia ja ideoita jatkon suhteen. Fermilabista puo-
lestaan kerrottiin, oltiinko siellä tyytyväisiä ratkaisuihin ja mitä muutoksia kaivat-
tiin. Yhdessä tällaisessa neuvottelussa tuli myös tieto, että päämagneetin teho
nousee 0.33 Teslasta 0.8-0.9 Teslaan. Tämä muutos muutti koko suunnitelman
suuntaa täydellisesti, muutos oli niin suuri, että koko päämagneetin tyyppi joudut-
tiin muuttamaan erilaiseksi. Tavallisesta sähkömagneetista olisi tullut valtavan
suuri ja pelkän kuparin paino magneetissa arvioitiin kohoavan yli 1200 kiloon.
Lisäksi ongelmia olisi aiheuttanut magneetin tuottama lämpökuorma, jonka jääh-
dytys olisi tullut ongelmalliseksi, muun muassa veden korkean virtaamisnopeu-
den vuoksi. Tästä syystä ratkaisuksi tuli suprajohtava magneetti.

Tämän muutoksen jälkeen alkoi tutustuminen suprajohtavan magneetin toimin-
taan ja siihen sisältyviin osiin. Suurin ongelma tässä oli tilanpuute, tila mihin tämä
kaikki piti saada sopimaan, oli noin 750 mm pitkä ja 380 mm leveä. Korkeutta ei
sinänsä ollut rajoitettu, joten sen kanssa ei tullut isompia ongelmia. Mitat tulivat
itse magneetin koosta sekä kohdasta mihin linssi piti sopia kiihdyttimellä. Tämän
kokoiselle alueelle piti sovittaa kaksi kryojäähdytintä sekä 10 ilmatiivistä läpivienni-
ä (Kuva 23), koska läpiviennin takana oli tyhjiö.



Kuva 23. Kaksi kryojäähdytintä sekä 10 läpivientiä kannessa

Huomiota piti kiinnittää myös virran saamiseen magneetteihin, jäähtymisen riittämiseen ja sen siirtymiseen magneetteihin tyhjiössä. Virran kuljettamiseen sup- rajohtavuuden edellyttämään lämpötilaan käytettiin sitä varten suunniteltuja kau- pallisia tuotteita (Kuva 24).



Kuva 24. Virtajohteita (Scott 2020b)

Yhtenä tärkeimmistä suunnittelukohteista oli kehittää kiinnitysjärjestelmä, jonka tehtävä oli pitää magneettipaketti sekä lämpökuori irti toisistaan ja oikeassa koh- dassa pintaan nähden. Kiinnitysjärjestelmä tuli kehittää erityisesti huomioiden lämmönsiirtyminen ja sen minimointi. Tehtävä oli varsin haastava, mutta hyvien neuvojen sekä usean eri version jälkeen siinä onnistuttiin erittäin hyvin.

Työn lähestyessä loppuaan se esiteltiin CERNissä, muille työtovereille sekä osaston johdolle. Tilaisuus oli vapaa eli sinne pääsi osastolta kuka tahansa kuun- telemaan ja esittämään kysymyksiä suunnitelmasta, siitä miten siihen oli päädytty ja esimerkiksi materiaali valinnoista. Tilaisuus omalta osaltani kesti noin 30 mi- nuuttia, se pidettiin englannin kielellä ja siinä käytettiin apuna PowerPoint-ohjel- malla tehtyä esitystä (Kuvio 9).

IOTA E-LENS Magnet assembly and positioning

Jussi Suopajarvi
EN/MME



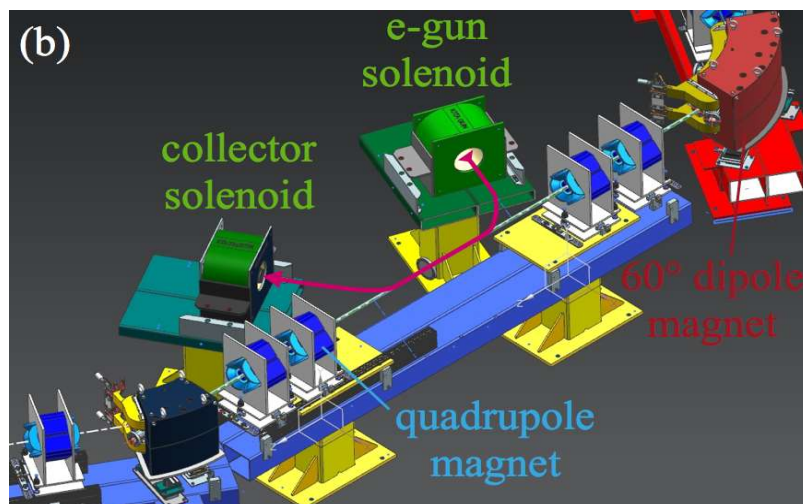
Kuvio 9. Powerpoint-esityksen aloitussivu

Kolmen kuukauden mittainen aika tällaisen laitteen suunnittelemiseen on todella lyhyt. Tarkoituksena ei ollut tehdä tarkkoja valmistuspiirroksia, eikä yksityiskohtaista komponenttivalintaa, vaan tehdä tilavarauksia osille ja näin varmistaa, että halutut ominaisuudet sekä laitteet sopivat niille varatuille paikoille. Tämän lisäksi tärkeä vaihe työssä oli sovittaa eri magneetit oikeille paikoille, oikeissa mitoissa ja oikeissa kulmissa. Lisäksi piti kehittää järjestelmä, jolla magneettien paikkoja pystyy hienosäätämään asennusvaiheessa. Valmistuneella 3D-piirroksella oli tärkeä merkitys Fermilabille, sillä tämän kuvan avulla he pystyvät esittelemään suunnitelmaa ja laitetta rahoittajille ja näin saada rahoitus koelaitteelle.

8 ELEKTRONILINSSIN JA PÄÄMAGNEETIN ESITTELY

8.1 Elektronilinssi

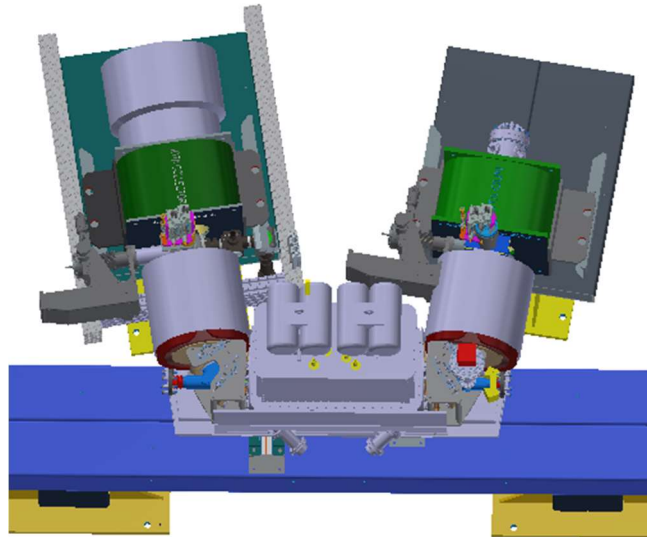
Elektronilinsit ovat laitteita, jotka liitetään hiukkaskiihdytimeen. Niiden perusrakenne sisältää asean, jolla elektronit lähetetään liikkeelle, magneetteja joilla hallitaan säteen paikkaa, muotoa ja liikettä sekä keräimen, jolla kerätään elektronit pois kiihdyttimessä kiertävästä säteestä laitteen päässä, kuvassa 25 näkyy miten ase ja keräin sijoittuvat kiihdyttimelle. Näiden lisäksi laitteessa on yleensä portteja tyhjiöpumppuja varten, sekä venttiilejä, joilla voidaan eristää tyhjiö esimerkiksi asetta vaihdettaessa, näin vältetään hukkaamasta tyhjiö koko kiihdyttimestä. Kiihdyttimeen se liitetään Y-kammioden avulla, kammioden kulma on monen yksittäisen asian summa ja se saadaan simuloinnin avulla selvitettyä. (Kolehmainen 2019)



Kuva 25. Aseen ja keräimen sijoittuminen kiihdyttimelle (Fermilab 2020a)

Elektronilinsit lähettävät sykäyksittäin, magneettisesti ohjattuja elektronisäteitä, joiden tiheys on asetettu sellaiselle tasolle, jolla saadaan haluttu vaikutus kiihdyttimessä kiertävälle säteelle. Elektronilinssejä käytetään muun muassa pitkissä hiukkaskiihdyttimissä pitämässä ja virittämässä sädettä kulkemaan oikeassa kohdassa, ettei se törmää seinämiin, irtohiukkasten poistamiseen, kokeiden säteiden alustavaan vastakkain kohdistamiseen sekä halo kaavinnan demonstroimiseen korkea energisille säteille. (Stancari 2016).

Fermilabin aikomuksena on asentaa elektronilinssi kuvassa (Kuva 26) Integroitavan Optiikan testikiihdytimeen (IOTA). Linssin tehtävänä on olla yhtenä toteutuksena, jossa epälinearisella integroitavalla optiikalla saavutetaan suuri säädettävyys ja vakaampi säde menettämättä dynaamista-aukkoa. (Stancari 2016)



Kuva 26. Malli elektronilinnistä, jota Fermilabiin suunnitellaan

8.2 Päämagneetin toiminnan kuvaus

Elektronilinnin päämagneetin tärkein tehtävä on pitää hiukkaskiihdyttimessä jo kulkevat hiukkaset ja siihen elektronilinnissä ammuttavat hiukkaset mahdollisimman tiiviinä virtana. Tällä saadaan ehkäistyä hiukkasten törmäily kiihdyttimen seinämiin, mikä voi vääristää tietoja, joita kokeilla haetaan. Päämagneettikokonaisuus sisältää viisi itsenäistä magneettia, joista yksi on varsinainen magneetti, jolla muodostetaan magneetin pääteho ja saadaan hiukkaset kulkemaan karkeasti halutulla linjalla. Tämän lisäksi kokonaisuus sisältää neljä korjausmagneettia, joista kahdella voidaan korjata hiukkasvirran sijaintia vertikaalisesti ja kahdella voidaan korjata hiukkasvirran kulkua horisontaalisesti. Nämä korjausmagneetit sijaitsevat päämagneetin ympärillä molemmissa päädyissä.

Päämagneettikokonaisuuden sisälle, tyhjiöön imetyn hiukkasputken ympärille sijoittuu useita erilaisia mittalaitteita ja lähettämiä joilla hiukkasvirran sijaintia pystytään seuraamaan. Ongelmia laitteiden sijoittelussa aiheutti varsin rajallinen tila tyhjiöputken ja magneetin välissä. Lisäksi pohdintaa aiheutti johdinten sijoitus ja läpiviennit magneetin sisälle.

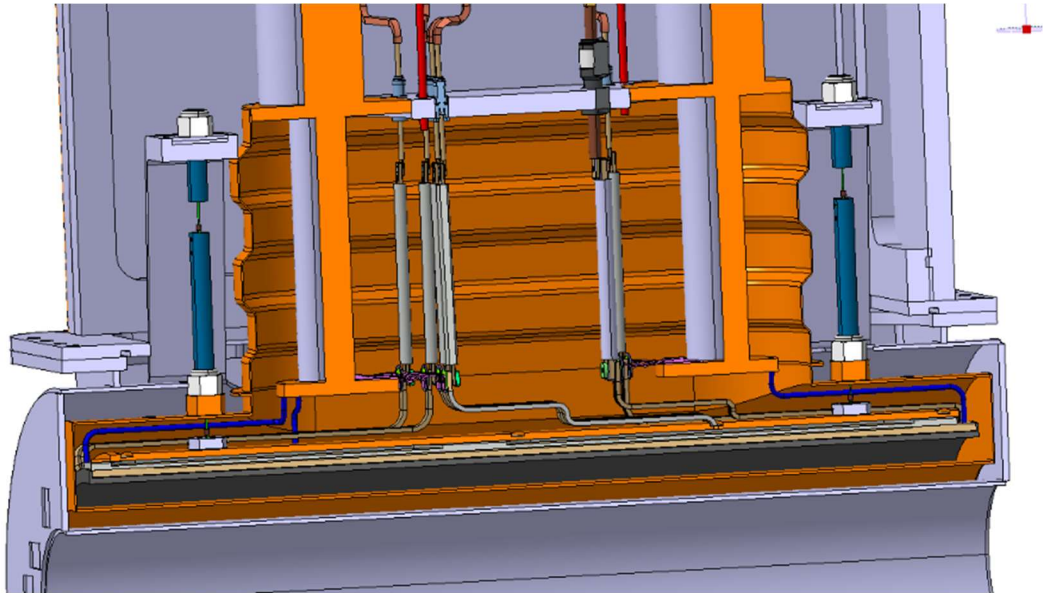
Alkuperäisessä suunnitelmassa oli päämagneetin tehoksi annettu 0.33 Teslaa ja suunnittelu aloitettiin tältä pohjalta. Tällä perusteella oltiin päätymässä kupariseen sähkömagneettiin, jota jäähdytettäisiin kierrättämällä vettä kuparin sisällä olevassa vesikanavassa. Fermilab halusi kuitenkin nostaa magneetin tehon noin 0.8 Teslaan. Simuloinnin ja laskelmien mukaan tavallinen sähkömagneetti olisi tullut tämän tehoisena erittäin suureksi ja magneetin tarvitseman jäähdytyksen toteutus vesikierrolla olisi lyhentänyt magneetin käyttöikää huomattavasti. Veden virtausnopeutta olisi jouduttu kasvattamaan niin suureksi, että se olisi alkanut kuluttamaan kuparia ja tämän vuoksi magneetista olisi tullut varsin lyhytikäinen.

Tehon tarpeen lisäyksestä johtuen, suunnittelussa tultiin siihen tulokseen, että järkevämpi ja hyvin suurella todennäköisyydellä myös edullisempi ratkaisu pitkässä juoksussa olisi tyypiltään suprajohtava magneetti. Käytännössä magneetti asetetaan suprajohtavaan tilaan kylmentämällä se hyvin lähelle absoluuttista nolapistettä, kryojäähdyttimien avulla. Tässä lämpötilassa aine muuttuu suprajohtavaksi eli aine kykenee johtamaan sähkövirtaa häviöttömästi (Vihtakari 2016).

9 PÄÄMAGNEETIN OSAT JA NIIDEN SUUNNITTELU

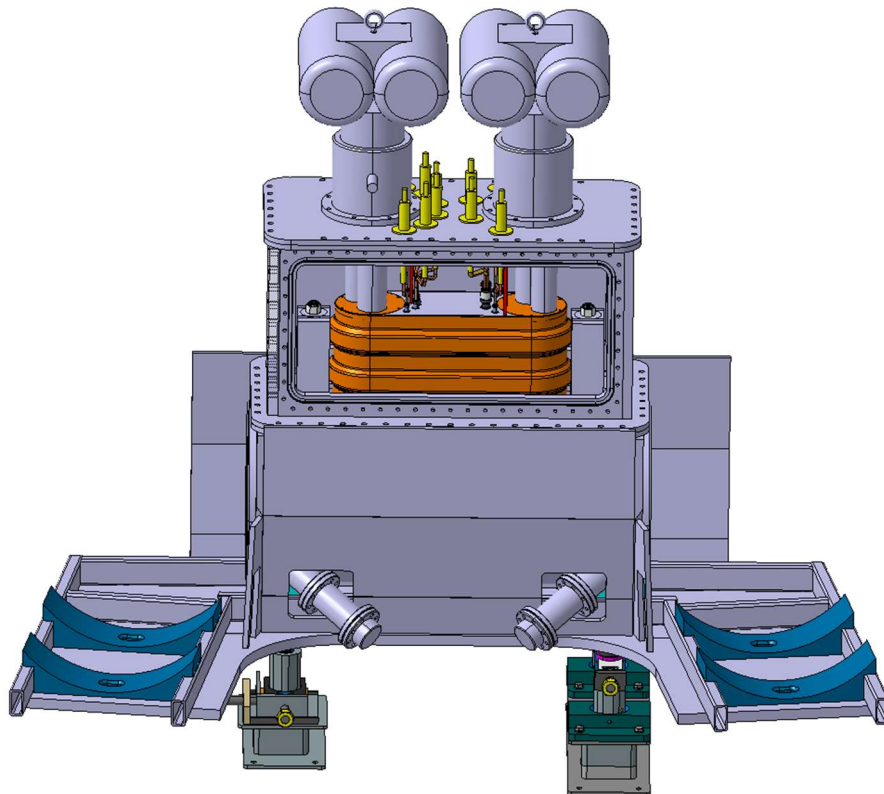
9.1 Päämagneetti

Päämagneetti on nimestään huolimatta usean yksittäisen magneetin kokonaisuus eli varsin suuri ja monimutkainen laite. Siihen kuuluu suuri määrä erilaisia osia ja osakokonaisuuksia, että se voi toimia halutulla tavalla ja saada aikaan halutun suuruisen magneettisen voiman. Koska kyseessä on suprajohtava magneetti se lisää suunnittelun haastavuutta vielä roimasti. Päämagneetti on muoltaan sylinterin mallinen ja siinä on useampia kerroksia eri materiaaleja, eri suuruisilla väleillä keskenään kuten kuvasta (Kuva 27) näkyy.



Kuva 27. Päämagneetti auki leikattuna

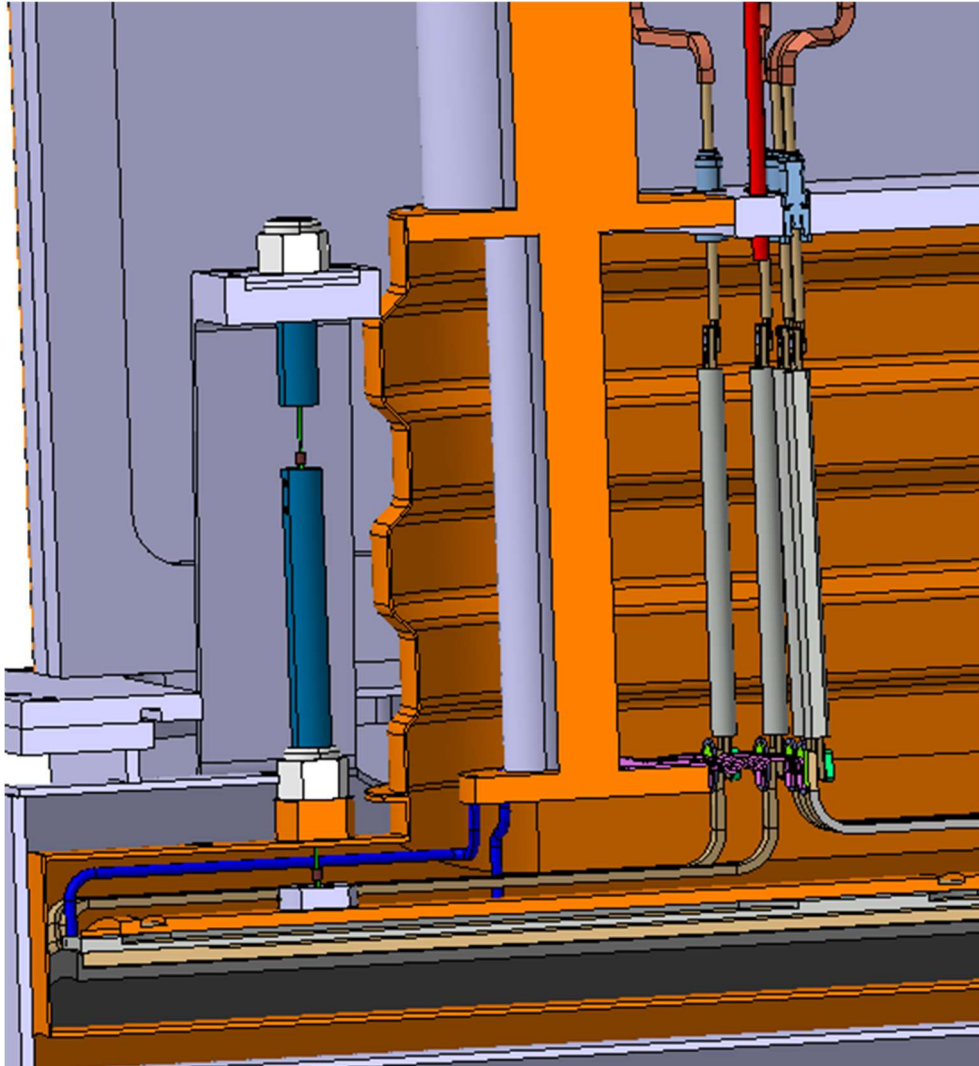
Kerrokset sisältä ulospäin ovat: sisempi tyhjiökuori, sisempi lämpösuoja, päämagneetin tuki, päämagneetti, 1. korjausmagneetti, 2. korjausmagneetti, ulompi lämpösuoja, ulompi tyhjiökuori, näiden lisäksi päämagneetin ympärille tulee magneettisuoja ja päälle tulee paikat kahdelle kryojäähdyttimelle, jotka voidaan havaita kuvasta (Kuva 28).



Kuva 28. Kuva päämagneetista kryojäähdyttimillä sekä magneettisuojiilla

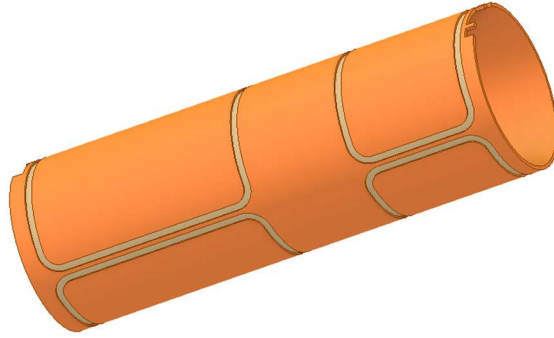
Sisempi ja ulompi tyhjiökuori ovat toisiin yhdistettyinä molemmista päistään päätälaipan välityksellä. Laipat ja tyhjiökuoret ovat hitsisaumoilla kiinni ja näin ollen ne ovat ilmatiiviitä. Kuorien on tarkoitus mahdollistaa tyhjiön luominen lämpökuoren ja tyhjiökuoren väliin. Tyhjiön tarkoitus on toimia eristeenä, koska lämpökuoren sisällä lämpötilan tulee olla hyvin lähellä absoluuttista nolapistettä, joka on 0 Kelviniä (-273.15 °C) (Ilmatieteenlaitos 2020).

Seuraavana vuorossa oleva sisempi lämpösuoja on päistään yhdistetty laipoilla ulompaan lämpökuoreen samalla tavalla kuin tyhjiökuoretkin. Laitteen ollessa toiminnassa tyhjiökuoret ja lämpösuojat eivät saa missään tapauksessa osua toisiinsa. Tämä aiheuttaisi suuren lämpövuodon, jota kryojäähdyttimet eivät kykenisi kattamaan. Lämpösuoja on haitarimallisella kauluksella kiinnitetty kryojäähdyttimeen, siten että ensimmäisen vaiheen jäähdyttävä elementti jäähdyttää lämpösuojaa ja toisen asteen jäähdyttävä elementti jää lämpökuoren sisälle (Kuva 29).



Kuva 29. Päämagneetin lämpösuoja sekä kaulus

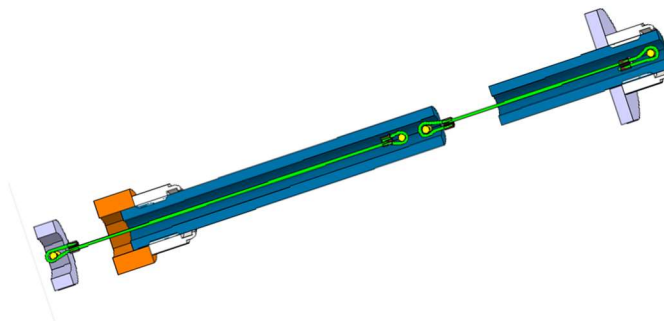
Näiden jälkeen tulee päämagneetin tuki ja itse päämagneetti. Päämagneetti tarvitsee tukielementin, jonka päälle voidaan alkaa valmistamaan magneettia. Magneetti valmistetaan kuparista kiertämällä sitä tarvittava määrä magneettituen ympärille. Kuparin määrä, langan muoto ja koko riippuvat magneetilta vaadittavista arvoista. Alustava tieto langan muodosta, koosta ja määrästä sekä itse magneetin muodosta saatiin syöttämällä magneetin ominaisuuksia kuvaavat tiedot, Excel-taulukkoon, joka oli suunniteltu tätä varten (Taulukko 1). Taulukko antoi tiedot magneetin koosta, jäähdytystarpeesta ja jäähdytykseen tarvittavan veden virtausnopeudesta. Näiden tietojen perusteella pystyttiin alkamaan haarukoida sopivan mallista kuparitankoa.



Kuva 30. Korjausmagneetin tuki ja magneetti

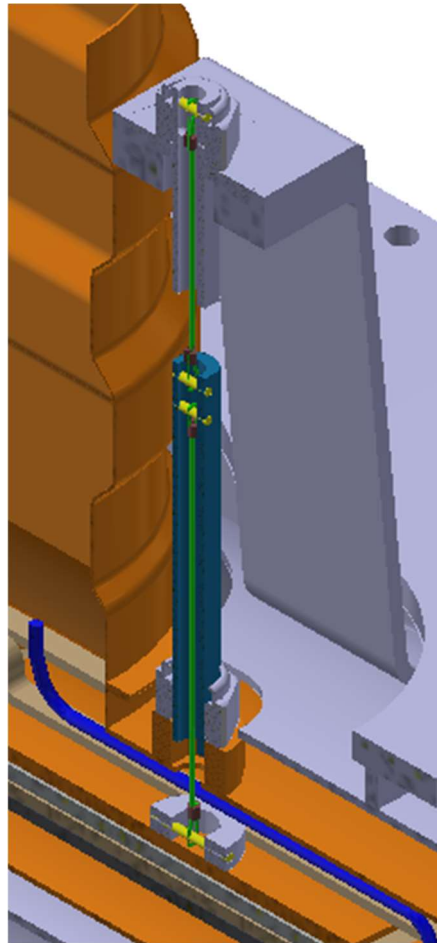
9.2 Magneettien kiinnitys

Päämagneetti päätettiin toteuttaa niin sanotusti kuivana, eli sen jäähdytys on suunniteltu toimimaan ilman heliumia. Tähän päädyttiin, koska suprajohtavan magneetin lämmöntuotto on niin pieni. Tämä ratkaisu myös yksinkertaistaa koko rakennetta, koska heliumille ei tarvitse suunnitella ja rakentaa erillistä suojakuorta päämagneetin sisään. Eristeenä päämagneetissa toimii tyhjiö. Tässä suunnitelmassa päämagneetin jäähdytys hoidetaan kahden kryojäähdyttimen avulla, joiden yhteisjäähdytysteho on 4 wattia. Näin pienestä jäähdytystehosta, johtuen huomiota piti kiinnittää erityisen paljon kaiken lämmöntuoton ja lämmönjohtumisen minimoimiseen. Lämmönjohtumisen minimoimiseksi tehty työ konkretisoituu ehkä parhaiten magneetin kiinnittimessä tyhjiökuoreen (Kuva 31).



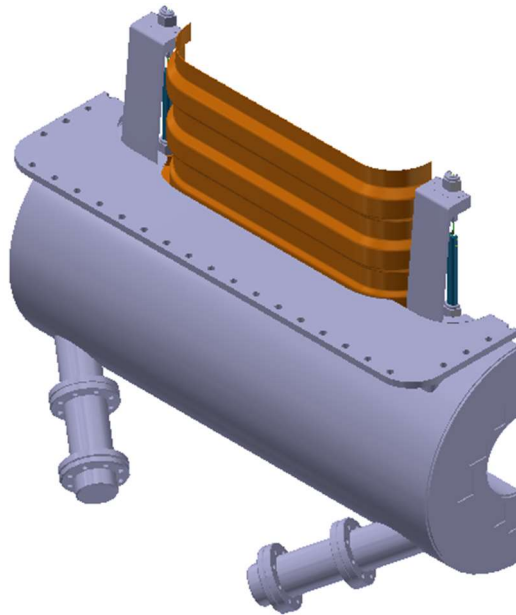
Kuva 31. Magneetin kiinnitin

Päämagneetin kiinnityksen suunnittelussa huomio kiinnitettiin heti alusta alkaen mahdollisimman pieneen lämmönjohtumiseen magneetista suojakuoreen. Kiinnittimen pohjana on Kevlar-lanka, jollaista käytetään myös kalastussiimana tai leijan naruna. Langan hyvänä puolena ovat suuri kestävyys erittäin pienellä pinta-alalla. Langan halkaisijana tässä käytettiin 1,5 mm, jonka kestävyudeksi luvataan 150–300 kg, riippuen valmistajasta. Kiinnitys perustuu kahteen erilliseen Kevlar-lankaan per kiinnitin, tällä saadaan katkaistua lämmön suora johtuminen. Kiinnittimen pituuden syynä on myös lämpöhäviöiden minimoiminen sekä toiminnan kaksiosaisuus, koska samalla kiinnittimellä säädetään kahta erillistä osa-aluetta. Alemmalla osalla säädetään magneettien sijaintia lämpökuoren suhteen, kun tämä on saatu kohdalleen, ylemmällä osalla säädetään edellinen kokonaisuus tyhjiökuoreen nähden (Kuva 32). Kiinnityksen lukitus on hoidettu lukkomuttereiden avulla.



Kuva 32. Kiinnitin paikoillaan

Kiinnitys on suunniteltu toimivan 6 erillisen kiinnittimen avulla. Kaksi näistä kiinnittimistä on magneetin yläpuolella, magneetti roikkuu näiden varassa ja näillä saadaan säädettyä magneetin pystysuuntainen asema. Loput 4 kiinnitintä sijaitsevat magneetin alapuolella, ne ovat asemoitu vaakatasosta 45 astetta alaspäin sekä 45 astetta sivulle, kuten kuvasta voi havaita (Kuva 33). Näillä 4 kiinnikkeellä voidaan säätää magneetin vaakasuuntaista asemaa suojakuoreen nähden. Kiinnittimien sijoittelulla sekä asemoinnilla on myös tarkoitus lukita magneetti paikoilleen ja näin ollen varmistaa laadukkaat testitulokset (Kuva 33). Kiinnitykset sijaitsevat tyhjiössä, kuten muutkin magneetin osat, tästä johtuu alakiinnikkeiden massiiviset laipat ja kuoret. Magneetin paikoitus ja säätäminen kohdalleen tapahtuu sen kasaamis- ja asennusvaiheessa. Järjestelmä on toteutettu siten, että säätöä voidaan poikkeustapauksessa tehdä myös jälkepäin ilman hitsien aukaisua. Säädön yhteydessä menetetään toki tyhjiö laitteen sisältä.

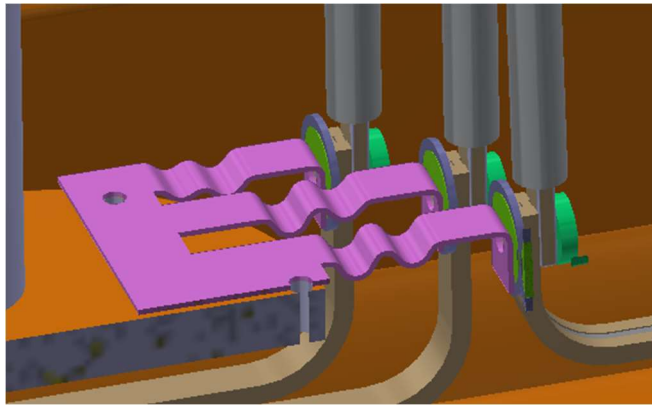


Kuva 33. Kiinnittimien sijoittelu

9.3 Virran siirto ja päämagneetin kannatin

Virtajohtimien tukena ja liitoskohtana on kuvassa näkyvä violetin värinen osa (Kuva 34). Tuella on useita tärkeitä tehtäviä tässä sovelluksessa. Jo nimestä voi päätellä, että se toimii tukena virtajohteille, estäen niiden osumisen yhteen. Tuki

toimii myös liitoskohtana, jossa suprajohde liittyy suprajohtavaan tilaan kylmyyden ansiosta muuttuneeseen johteeseen. Tuki on suunniteltu aaltomaiseksi kahdesta eri syystä, muotoilu mahdollistaa lämpötilan muutoksesta johtuvan laajenemisen ja kutistumisen, koska komponentit ovat eri materiaaleja ja ne reagoivat eritavoin lämpömuutoksiin. Toinen syy muotoiluun on johtimiin ja sitä kautta magneetteihin johtuvan värinän eliminointi, koska kryojäähdyttimet toimiessaan muodostavat pientä värinää.



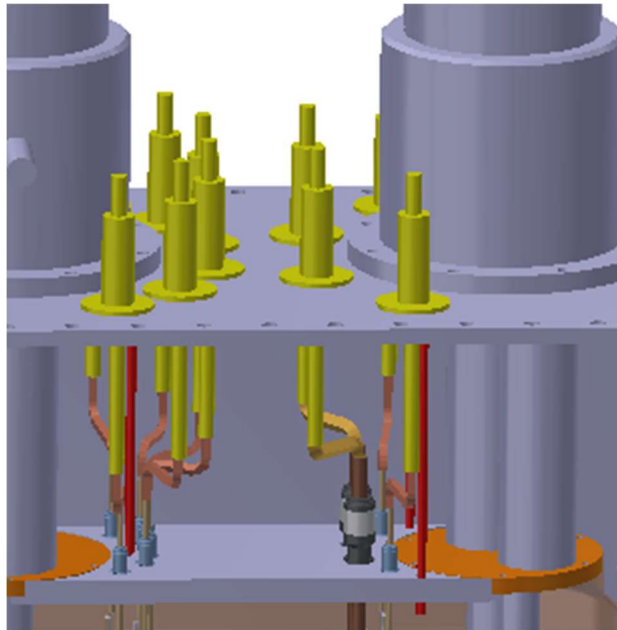
Kuva 34. Virtajohtimien tuki

Magneettien tarvitsema virta kulkee lämpötilan muutosalueen läpi suprajohtavia virtajohteita pitkin, tällä pystytään vähentämään myös syntyvää lämpökuormaa. Näissä virtajohteissa syntyvä lämpövuoto on esimerkiksi 150 A virralla johtimen mallista ja pituudesta riippuen luokkaa 37 – 65 mW (Scott 2020a). Suprajohtavan virtajohteen, jäähdytys-elementin ja magneetille menevän virtajohteen liitoksessa käytetään Safiirista valmistettuja liitoskappaleita minimoimaan lämpöhäviöt (Kuva 35).



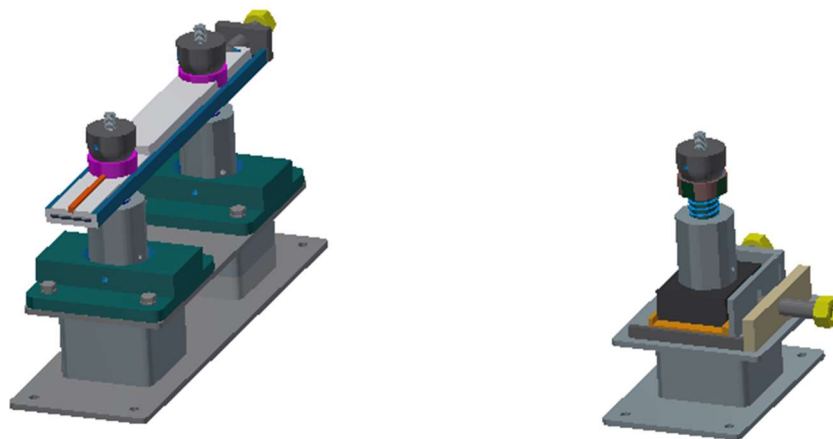
Kuva 35. Safiirista valmistetut liittimet (Scott 2020a)

Virran kulkuun liittyvät myös läpiviennit, joita tässä työssä tarvitaan kahdessa eri paikassa (Kuva 36). Tyhjiökuoressa tarvitaan mallia, joka kestää toisen puolen tyhjiötä ja mahdollistaa ilmatiiviin liitoksen. Sisällä laitteessa tarvitaan läpivientejä lämpökuoren ohitukseen, mutta tähän tarkoitukseen riittävät ihan tavalliset virta läpiviennit, koska läpiviennin molemmilla puolilla on sama tyhjiö. Läpivientien sijoittelussa pohdintaa aiheutti varsin rajallinen tila varsinkin lämpökuoressa, koska läpivientä tarvitsevia kaapeleita oli 10 kappaletta.



Kuva 36. Läpiviennit tyhjiökuoressa sekä lämpökuoressa

Viimeisenä isompana osakokonaisuutena päämagneetissa on koko päämagneettilaitteiston kannatinjärjestelmä (Kuva 37). Järjestelmä koostuu kolmesta kannattimesta, joiden korkeutta voidaan säätää itsenäisesti. Tämän ansiosta päämagneetti saadaan asennettua täsmälleen oikeaan asentoon sekä korkeuteen. Tällainen järjestelmä sallii kallistuskorjauksen kaikkiin suuntiin. Lisäksi tunkeissa on mekanismi, jonka avulla niitä voidaan siirtää ja hienosäätää päämagneetin paikkaa horisontaalisesti.



Kuva 37. Päämagneetin kannatinjärjestelmä

10 POHDINTA

Työn tavoitteena oli saada tehtyä laitteesta 3D-mallikuvat, tilavaraukset sekä testata tilan riittävyys halutuille laitteille ja niiden simuloinneissa saaduille sijainneille. Työn teki haastavaksi varsin pieni tila ja laitteiden tarkka sijoitus, koska pienikin osan siirto voi aiheuttaa suuren muutoksen hiukkasten kulkureiteissä ja pilata koko laitteen toiminnan.

Oppimismielessä työ oli varsin opettavainen, koska suunnittelun kohde sisälsi paljon uusia ja ennestään itselleni tuntemattomia laitteita. Ensin oli perehdyttävä laitteeseen ja sen tehtävään suunnitellussa kokonaisuudessa, että suunnittelua pystyi ylipäättään tekemään. Itselleni tutustumista vaati muun muassa kryotekniikka, tyhjiötekniikka ja magneetteihin liittyvät asiat. Lisäksi huomiota piti kiinnittää erityisen paljon lämpöhäviöiden minimoimiseen.

Työ suoritettiin kansainvälisessä ympäristössä ja työkielenä oli pääasiassa englanti, tästä on mielestäni suuri hyöty tulevaisuuden kannalta, koska maailma koko ajan kehittyy suuntaan, jossa työtä tehdään kansainvälisesti, työkielenä on jokin muu kuin suomi ja kollegat ovat eri kansallisuuksien edustajia. Yksi merkittävä juttu tässä asiassa oli myös, että lähdeaineistot olivat pääasiassa englannin kielellä, joka varmasti paransi myös omalta osaltaan kielellistä osaamista.

Työ onnistui mielestäni hyvin, koska koelaitteesta saatiin mallikuvat tehtyä ja ne ovat julkaistu laitteesta kertovalla nettisivulla. Eli tutkimuslaitos voi esitellä suunnitelmiaan julkisuuteen ja rahoittajille. Tämän ansiosta koelaitteen valmistaminen on ainakin yhden askeleen lähempänä. Toinen asia, mistä voi päätellä työn onnistuneen on, että laitteeseen saatiin mahdutettua tilaajan haluamat ominaisuudet ja osat simuloinneissa oikeiksi katsotuille paikoille.

LÄHTEET

Advanced Research Systems 2020. Closed Cycle Cryocooler Principles of operation. Viitattu 6.2.2020. <https://www.arscryo.com/cryocooler-principles-of-operation>

Antipov, S. Broemmelsiek, D. Bruhwiler, D. Edstrom, D. Harms, E. Lebedev, V. Leibfritz, J. Nagaitsev, S. Park, C. Piekarz, H. Piot, P. Prebys, E. Romanov, A. Ruan, J. Sen, T. Stancari, G. Thangaraj, C. Thurman-Keup, R. Valishev, A & Shiltsev, V 2016. IOTA (Integrable Optics Test Accelerator): Facility and Experimental Beam Physics Program. Article in Journal of Instrumentation 12(03), December 2016. Viitattu 13.12.2019. https://www.researchgate.net/publication/311737339_IOTA_Integrable_Optics_Test_Accelerator_Facility_and_Experimental_Beam_Physics_Program.

Bernard, F. 2010. The DASSAULT SYSTEMES Success Story. Viitattu 8.2.2020. http://isicad.net/articles.php?article_num=14120

CERN 2016. Map of the Geneva region and of the LHC. Viitattu 23.1.2020. <http://cds.cern.ch/record/842399>

CERN 2017a. Knowledge Transfer. Viitattu 12.3.2020. <https://kt.cern/industry>

CERN 2017b. LHC the guide. Viitattu 27.1.2020. https://home.cern/sites/home.web.cern.ch/files/2018-07/CERN-Brochure-2017-002-Eng_0.pdf

CERN 2018a. Future Circular Collider conceptual design report. Viitattu 24.1.2020. <https://fcc-cdr.web.cern.ch/#intro>

CERN 2018b. LHC Season 2 facts and figures. Viitattu 11.3.2020. https://home.cern/sites/home.web.cern.ch/files/2018-07/factsandfigures-en_0.pdf

CERN 2019a. Our History. Viitattu 13.12.2019. <https://home.cern/about/who-we-are/our-history>

CERN 2019b. Our Member States. Viitattu 13.12.2019. <https://home.cern/about/who-we-are/our-governance/member-states>.

CERN 2019c. Our Mission. Viitattu 13.12.2019. <https://home.cern/about/who-we-are/our-mission>.

CERN 2019d. Our People. Viitattu 13.12.2019. <https://home.cern/about/who-we-are/our-people>.

CERN 2019e. The Birth of the Web. Viitattu 13.12.2019. <https://home.cern/science/computing/birth-web>.

CERN 2019f. The Higgs Boson, Viitattu 13.12.2019. <https://home.cern/science/physics/higgs-boson>

CERN 2020a. CERN's first accelerator – The Synchrocyclotron – starts up. Viitattu 24.1.2020. <https://timeline.web.cern.ch/cerns-first-accelerator-synchrocyclotron-starts>

CERN 2020b. Engineering department. Viitattu 27.1.2020. <http://en.web.cern.ch/content/en-department>

CERN 2020c. Mechanical and Materials Engineering Group. Viitattu 27.1.2020. <http://en.web.cern.ch/group/mme>

CERN 2020d. Our Structure. Viitattu 27.1.2020. <http://en.web.cern.ch/content/our-structure>

Cryomech 2020. PT 420 cryocoolers. Viitattu 6.2.2020. <https://www.cryomech.com/products/pt420/>

Dannana S. 2017. Extrudesign.com. CATIA V5 Modules list. Viitattu 8.2.2020. <https://extrudesign.com/catia-v5-modules-list/>

Designtech CAD Academy 2020. Catia Training. Viitattu 8.2.2020. <https://www.designtechcadacademy.com/knowledge-base/catia-training>

Fermilab 2015. Photo albums. Viitattu 28.1.2020. <https://www.flickr.com/photos/fnal/albums/with/72157653243244954>

Fermilab 2019. About Fermilab. Viitattu 13.12.2019. <https://www.fnal.gov/pub/about/index.html>

Fermilab 2020a. IOTA-electron lens, Viitattu 12.1.2020. <https://cdcvs.fnal.gov/redmine/projects/iota-e-lens/wiki>

Fermilab 2020b. LBNF/DUNE: An international flagship neutrino experiment. Viitattu 28.1.2020. <http://www.fnal.gov/pub/science/lbnf-dune/index.html>

Gemba Innovation 2020. Stage-Gate. Viitattu 12.3.2020. <http://gemba.dk/stage-gate/>

Hyysalo S. 2009. Käyttäjä tuotekehityksessä, Tieto, tutkimus, menetelmät. Helsinki: Taideteollisen korkeakoulun julkaisu B97.

Ilmatieteenlaitos 2020. Ilmakehä-ABC Absoluuttinen nolapiste. Viitattu 12.3.2020. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?term=Absoluuttinen%20nolapiste>.

Khandani, S. 2005. Engineering Design Process. Viitattu 9.2.2020. <https://resources.saylor.org/wwwresources/archived/site/wp-content/uploads/2012/09/ME101-4.1-Engineering-Design-Process.pdf>

Kimura, E. 2014. MLX01-2, Superconducting Maglev Test Vehicle. Viitattu 12.3.2020. <https://www.flickr.com/photos/kimuchi583/15553452658>

Kolehmainen, A. 2019. CERN, Vanhempi suunnittelija, Kesäkuu 2019.

Peltonen, H. Perkkiö, J. & Vierinen, K. 2018. Insinöörin (AMK) Fysiikka. 9. Painos. Porvoo: Lahden Teho-opetus Oy.

Pohjois-Pohjanmaan Sairaanhoidopiiri 2020. Magneettitutkimus. Viitattu 12.2.2020. <https://www.ppshe.fi/Toimipaikat/Kuvantaminen/Tietoa-tutkimuksista/Sivut/Magneettitutkimus.aspx>

Ropponen, J, 2003. Kryogeniikan seminaari, Jyväskylän yliopisto, fysiikan laitos. Viitattu 6.2.2020. <http://nikita.tnnet.fi/~weopu/kryo/>

Scott 2020a. Current Leads. Viitattu 12.3.2020. <https://www.scottautomation.com/assets/Uploads/Current-Leads-EN-Web.pdf>

Scott 2020b. HTS-110 CryoSaver Current Leads. Viitattu 12.3.2020. <https://www.scottautomation.com/products/cryosaver-current-leads/>

Stancari, G. 2016. Applications of electron lenses: Scraping of high-power beams, beam-beam compensation and nonlinear optics. Viitattu 4.1.2020. <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4965688>

Superconductors 2008. Type 1 Superconductors. Viitattu 5.2.2020. <http://www.superconductors.org/Type1.htm>

Superconductors 2018. Type 2 Superconductors. Viitattu 5.2.2020. <http://www.superconductors.org/Type2.htm>

Superconductors 2019. Uses for Superconductors. Viitattu 5.2.2020. <http://www.superconductors.org/Uses.htm>

Tekniikan Maailma 2019. CERN paljasti suunnitelmat uuden 100 kilometriä pitkän hiukkastörmäytin rakentamiseksi – Jättihanke valmistuisi vasta 2050-luvulla. Viitattu 24.1.2020. <https://tekniikanmaailma.fi/cern-paljasti-suunnitelmat-uuden-100-kilometria-pitkan-hiukkastormayttimen-rakentamiseksi-jattihanke-valmistuisi-vasta-2050-luvulla/>

Tuominen, J. 2010. CERNin LHC-projekti. Viitattu 27.1.2020. http://www.hip.fi/wp-content/uploads/2013/08/LHC-projekti_r.pdf

Walker, J. 2008. Fundamentals of Physics. United States of America. John Wiley & Sons, inc.