

RÖNTGENLASER

avaa ikkunan kemialliseen reaktioon



■ Kalifornialaisen Slac-laboratorion ylpeys on maailman tehokkain röntgenlaser, joka toimii myös jättiläismäisenä mikroskooppina. Sen avulla voidaan seurata reaaliajassa kemiallista reaktiota molekyylien ja atomien tasolla.

Jarmo Wallenius

San Franciscosta etelään kohti San Josea johtava valtatie 280 ylittää reitin puolivälissä yllättäen maailman pisimmän rakennuksen.

Piilaakson sydämessä sijaitseva yli kolmen kilometrin mittainen viiva-suora maamerkki on Yhdysvaltain kansallinen kiihdytinlaboratorio Slac, tarkemmin sanottuna sen lineaari-kiihdytin Linac.

Lyhenteet viittaavat rakennuksen alkuperäiseen nimeen ja tarkoitukseen, Stanfordin yliopiston lineaari-

kiihdytinkeskukseen. Siellä tehtiin 1960-luvun puolivälistä lähtien neljän vuosikymmenen ajan alkeishiukkaskokeita ja materiaalitutkimuksia, jotka poikivat muun muassa fysiikan Nobeleita.

Graalin malja

Tätä nykyä Slac-laboratorion huippuosaamisen Graalin malja on maailman ensimmäinen kovaa röntgensäteilyä tuottava vapaaelektronilaser LCLS (Linac Coherent Light Source).

LCLS:n synnyttämät ultralyhyet

SLAC

◀ Röntgenlaserin avulla on tuoreessa läpimurtokeksessä päästy tarkastelemaan reaaliajassa, mitä tapahtuu katalyyttisessä reaktiossa, kun CO-molekyylejä irrotetaan optisella laserilla rutenium-metallin pinnalta. Tällöin muodostuu hiilidioksidimolekyyleja, mutta hitaammin ja vähemmän kuin on otaksuttu.

röntgensädepulssit eli femtosekuntipulssit ovat miljardi kertaa kirkkaampia kuin aiempien sukupolvien laserpulssit. Samalla ne ovat miljoona kertaa lääketieteessä käytettyjä röntgensäteitä kirkkaampia.

Laserin femtosekunnin – eli tuhannesbiljoonasosasekunnin – mittaisissa sädepulssissa on yhtä paljon tehoa kuin ison valtion kantaverkossa eli noin 10 gigawattia.

Pulsseja tuotetaan sekunnissa noin sata, ja jokaisessa pulssissa on 5–10 miljardia fotonia. Säteilyn aallonpituus voidaan kutistaa jopa 0,15 nanometrin suuruisiksi ja koko säteilyn teho kohdistaa alle 10 nanometrin kokoiseen kohteeseen.

”Lisäksi maailman tehokkain röntgenlaser on myös jättiläismäinen mikroskooppi”, kertoo Slacin asiantuntija **Uwe Bergmann**.

”Lyhyet ultranopeat pulssit ja LCLS:n erotuskyky mahdollistavat muun muassa sen, että kemialliset reaktiot voidaan kuvata reaaliaikaisesti atomien ja molekyylien tasolla.”

Röntgendiffraktiokuvien avulla voidaan tarkastella myös eläviä viruksia, bakteereita, proteiineja, uusien lääkevalmisteiden proteiinisia reseptoreita, soluja ja vaikkapa fotosynteesin tapahtumia. Kansainvälinen tutkijaryhmä on hyödyntänyt laitteistoa kuvattaessaan elävän syanobakteerin yksittäisiä soluja.

Kuvantamisen seurauksena tutkit-

Slac-laboratorio

- Aloitti vuonna 1962 kiihdytinlaboratoriona. Röntgentutkimusta synkrotronisäteilyn avulla vuodesta 1974. Maailman tehokkain vapaaelektroneja käyttävä röntgenlaser käynnistyi vuonna 2009.
- Toiminta laajentunut alkeishiukkastutkimuksesta kemian, biologian, lääketieteen, materiaalitieteen ja ympäristötieteen tutkimukseen.
- Vuosibudjetti 350 miljoonaa dollaria. Vakituksia työntekijöitä 1 700, lisäksi 200 postdoc-tutkijaa ja opiskelijaa. Myös 3 400 kansainvälistä tutkijaa hyödyntää vuosittain Slacin tarjoamia tiloja ja välineitä.
- Vuonna 1972 valmistunutta elektronien varastointirengasta Spearia ja synkrotronisäteilyn valolähdettä SSRL:ää on hyödynnetty kokeissa, jotka ovat johtaneet fysiikan Nobelin palkintoihin vuosina 1976, 1990 ja 1995 ja kemian Nobeleihin vuosina 2006, 2009 ja 2012.

tava näyte tavallisesti tuhoutuu, mutta ultralyhyiden ja nopeiden energieettisten pulssien ansiosta reaktioista voidaan tehdä ”röntgensäde-elokuvia”.

LCLS:n röntgensäteillä tehdään muun muassa tutkimusta, jossa selvitetään hiilimonoksidimolekyylien ja happiatomien käyttäytymistä autojen katalysaattoreistakin tutun ruteniumalkuaineisen pinnon päällä.

Tutkijat etsivät Bergmannin mukaan vastauksia moniin kiinnostaviin kysymyksiin.

Miten kemiallisia sidoksia syntyy ja katkeaa? Miten paljon syntyy stabiileja hiilidioksidimolekyyleja ja miten elektroniverhon rakenne muuttuu, kun hiilimonoksidimolekyylit pähkäilevät kiinnittymistään takaisin rutenium-metallin pinnalle?

Reaktiotutkimusta jatketaan seuraavaksi muiden katalyyttisten aineiden ja teollisuudelle tärkeiden kemikaalien parissa.

Kohti kovia säteitä

Slacin johtaja **Chi-Chang Kao** kertoo olevansa tyytyväinen LCLS:n viiteen ensimmäiseen käyttövuoteen.

Kun laite syksyllä 2009 käynnistyi, koeasemia oli vain yksi. Valtaosa tutkimuksista käsitteli atomeja, molekyyliä ja optiikan ongelmia.

”Silloin haluttiin kartoittaa muun muassa jalokaasu neonin elektroniverhoa ja tunkeutua sen ytimeen”, Kao muistelee.

Nykyään tutkimussuunnitelmien kärkeä ovat biologiaan, kemiaan, erilaisiin pehmeisiin ja koviin materiaaleihin sekä aineen ja avaruuden ääriolosuhteiden sietokykyyn keskittyvät projektit. Myös fysiikan rooli näkyy yhä vahvasti.

Koeasemia on kahdessa erillisessä tutkimushallissa jo kuusi. Röntgenlaserin sädettä voidaan ohjailla ja jakaa peilien ja timanttikiteiden avulla usealle asemalle samanaikaisesti.

”Slacin voi rinnastaa paitsi perinteisiin kiihdytinlaboratorioihin myös tähtitieteellisiin hankkeisiin”, sanoo laitoksen optisen lasertiimin vetäjä **Bill White**.

Myös LCLS:ltä on anottava tutkimusaikaa tarkasti perustellen. Tutkimussuunnitelmista hyväksytään ja toteutetaan Whiten mukaan noin 20 prosenttia.

Tutkimusten tasosta kertoo, että kolmannes niistä on julkaistu *Nature*n, *Science*n, *PNAS*n ja *PRL*:n kaltaisissa luonnontieteen eturivin julkaisuissa.

Jatkossa LCLS aiotaan laajentaa nykyisestä kilometrin mitastaan

» » »

Stanfordin lineaarikiihdytin Linac on maailman pisin rakennus. Laboratorion ylläpidon lisäksi, kovia röntgensäteitä tuottava vapaaelektronilaser koeasemineen sijaitsee kiihdyttimen itäpäässä. Sen pituus on reilu kilometri eli kolmannes koko Linacista.



SLAC

Virtahevosta liskolintuun

Vuonna 1962 perustetun Slac-laboratorion ensimmäinen tieteellinen huippuhavainto ei yllättäen liittynyt mitenkään elektronien tai positronien alkeishiukkassuihkuihin, vaan paleontologiaan.

Kun laboratorion alue vuonna 1964

oli vasta rakenteilla, työmaalla tehtiin kiinnostava löytö: *paleoparadoxian* fossiili.

Nykyajan virtahepoa muistuttava, vesikasveja syövä nisäkäs eli Amerikan länsirannikolla Tyynen valtameren tuntumassa 10–20 miljoonaa vuotta sitten. Slacista löydetyn *paleoparadoxian* iäksi mitattiin 14 miljoonaa vuotta.

Paleontologian pyörä ja paradigma on sittemmin pyörähtänyt laboratoriossa uuteen asentoon. Synkrotronisäteilyn avulla on päästy tutkimaan 150 miljoonaa vuotta sitten elänyttä

liskolintua *archaeopteryxia* eli muinaissiipistä.

Legendaarinen liskolintu on puutuva linkki dinosaurusten ja lintujen välissä, eräänlainen paleontologian Tutankhamonin hauta.

Tutkija **Uwe Bergmann** ryhmineen on selvittänyt röntgendiffraktion ja kemiallisten analyysien avulla, että muinaissiipisillä todella oli rikkiä ja fosforia sisältävä höyhenpeite, kuten moderneillakin linnuilla.

Yhtäläisyyksiä löytyi myös muinaisten ja nykyaikaisten eläinten luuston kupari- ja sinkkipitoisuuksissa.



Archaeopteryx on puutuva lenkki dinosaurusten ja lintujen välissä.



Tältä näytti 14 miljoonaa vuotta sitten elänyt virtahepojen esi-isä.

►►►

koko lineaarikiihdyttimen pituiseksi eli 3 200 metriin.

LCLS II:ssa olisi kaksi valolähdettä, toinen ns. pehmeää röntgensädetä varten ja toinen nykyisen kovan röntgensäteilyn tuottamista varten. Samalla kasvatetaan röntgenlasereiden pulssien määrää nykyisestä 100 pulssista sekunnissa miljoonan pulssein sekuntinopeuteen.

Proteiineista pulsareihin

Slac-keskuksessa kiihdytetään yhä elektroneja ja positroneja klystroneissa synnyttävien energettisten mikroaaltojen avulla lähes valon nopeuteen.

Facet-projektissa alkeishiukkassuihkut kiitävät kahden kilometrin matkan lineaarikiihdyttimessä. Uuden sukupolven kiihdytinkoestien ja plasmatuskimusten tavoitteena on löytää ratkaisuja muun muassa entistä herkempiin ilmaisulaitteisiin. Lisäksi tutkijat etsivät keinoja kutis-



Stanfordin yliopiston sovelletun fysiikan laitoksen tohtorikoulutettava Catherine E. Graves asentaa alumiinista valmistettuja optisen laservalon suodattimia röntgensäteiden kuvaamiseen tarkoitettuun pn-CC-kameraan.

Lars Englert



Brad Plummer/SLAC

LCLS:n runsaat 100 metriä pitkässä magneettijärjestelmässä on 33 undulaattoria. Niiden avulla elektronit saadaan pujottelemaan kiihdytinputkessa ja synnyttämään koherenttia röntgensäteilyä.

Pulssit slalomhiittäjinä

Vapaaelektronilaserin toimintaperiaate esitettiin vuonna 1971. Ensimmäisen laitteen rakensi Stanfordin yliopistossa **John Madey** vuonna 1976. Häneltä on peräisin myös laitteen nimi.

Vapaaelektronilaserissa lähes valon nopeuteen lineaarisesti kiihdytetyt elektronipulssit ohjataan vaihtuvaan magneettikenttään eli undulaattoriin.

Siellä elektronikimput etenevät slalomhiittäjän lailla mutkitellen synnyttäen monokromaattista synkro-

nisäteilyä. Ulkoisen valolaserin avulla kimppuja vielä tiivistetään, jolloin itse itseään vahvistavasta säteilystä saadaan koherenttia ja intensiivistä.

Säädettävän säteilyn aallonpituus voi ulottua mikroalloista röntgensäteilyn alueelle riippuen elektronien nopeudesta, magneettikenttien voimakkuudesta ja undulaattorijärjestelmän pituudesta.

Ensimmäinen röntgensäteilyä tuottava vapaaelektronilaser valmistui saksalaiseen Desy-laboratorioon vuonna 2004.

taa kiihdyttimet sata kertaa nykyistä pienemmiksi.

Laboratorion ylpeys on myös perinteinen synkrotronisäteilylähde SSRL, joka aloitti toimintansa jo 40 vuotta sitten. Synkrotronirengas Spearilla aikaansaaduilla röntgensäteillä tehdään niin biologian, lääketieteen kuin materiaalienkin tutkimusta. Esimerkiksi vuoden 2006 kemian Nobel tuli renkaalla tehdystä rna-polymeraasientsyymitutkimuksesta.

2000-luvulla laboratorio on kuitenkin laajentanut tutkimuskenttäänsä lähes kaikkiin luonnontieteisiin. Tutkimusstrategia on samalla muuttunut. Hiukkasten lineaarinen kiihdyttäminen, varastoiminen renkaisiin ja synkrotronisäteilyn tuottaminen ovat saaneet rinnalleen foto-

niikan eli valotieteen.

Kuten Chi-Chang Kao sanoo, laitoksen tutkimus ulottuu nykyään ”proteiineista pulsareihin”, atomien kokoluokista ja aikaskaaloista avaruuden mittasuhteisiin ja aioneihin.

Luonnontieteiden lomittumista kuvaa sekin, että Stanfordin yliopiston kampusalueelle Slacin naapuriksi on uudella vuosituhanella perustettu myös avaruushiikkafysiikan ja kosmologian Kipac-instituutti, ultranopeita energiakäytäntöjä kartoittava Pulse-instituutti sekä erilaisiin rajapintoihin, faasien reaktioihin ja katalyyttien analysointiin keskittyvä Suncat-instituutti. □

Kirjoittaja on fyysikko ja tiedetoimittaja. jarmowallenius@hotmail.com

Röntgenlaserien kilpajuoksu

Vaikka Kalifornian LCLS vielä onkin maailman tehokkain röntgensäteilyä tuottava vapaaelektronilaser, kilpailu kohti ultralyhyitä pulsseja ja aallonpituuksia on käynnissä.

Japanilaisen huippututkimuslaitoksen Rikenin kovan röntgensäteilyn vapaaelektronilaser Sacla käynnistyi vuonna 2012. Etelä-Koreaan rakennetun vastaavan laitteiston on määrä startata tämän vuoden aikana.

Hampurin lähellä sijaitsevan Desy-kiihdytinlaboratorion ensimmäinen vapaaelektronilaser aloitti toimintansa vuonna 2004. Parin vuoden kuluttua siellä käynnistyy Euroopan ensimmäinen kovan röntgensäteilyn laser, joka peittoaa kalifornialaislaitteen parillasadalla metrillä myös rakennuksen pituudessa.

Myös sveitsiläiseen Paul Scherrer -instituuttiin rakennetaan omaa laitetta.

Piirustuspöydillä ja suunnitelmissa on lisäksi kymmenkunta muuta röntgensäteilyä tuottavaa vapaaelektronilaseria.

Hiukkaskiihdyttimiä maailmassa toimii tätä nykyä noin 30 000. Niistä tosin vain murto-osa on suoraan tekemisissä perustutkimuksen ja -tieteen kanssa. Suurinta osaa hyödynnetään erilaisissa soveluksissa, kuten kuvantamisessa ja sädehoidoissa.

Röntgensäteilyn vapaaelektronilasereiden tulevaisuus näyttää lupaavalta. Alan tutkimuksista on jaettu tähän mennessä 20 fysiikan, kemian ja lääketieteen Nobelin palkintoa. Ensimmäisenä jakovuotena 1901 palkinnon sai itse **Wilhelm Röntgen**.