



Ihmisen aistit eivät valitettavasti havaitse radioaaltoja. Havaitseva radioastronomia on hiukan teknispainotteinen, koska se vaatii laitteita. Radiosta tulee helposti mieleen kuunteleminen. Vastoin maallikkojen keskuudessa vallitsevaa yleistä käsitystä, radioastronomit eivät kuitenkaan suoranaisesti kuuntele mitään, sillä kohinaa on turha kuunnella - radioastronomisten kohteiden "lähetyksissä" ei ole tietoa siirtävää koodausta, tai modulaatiota (tai sellaista ei ole ainakaan vielä havaittu).

Maassamme on kaksi radiotutkimusasemaa: Metsähovi ja Sodankylä, jossa joukko tiedemiehiä tutkii mm. Aurinkoa, galaksien ytimiä, geofysiikkaa ja aeronomiaa, mutta havaintoja tekeviä radioastronomian harrastajia Suomessa vähänlaisesti. Artjärven Viestikalliolla on mm. 4-metrinen paraboliantenni, Jyväskylän Siriuksen Hankasalmen observatoriossa 3 m paraboliantenni ja näiden lisäksi joitakin vastaavia projekteja on vireillä muutamalla muullakin Ursan jäsenyhdistyksellä.

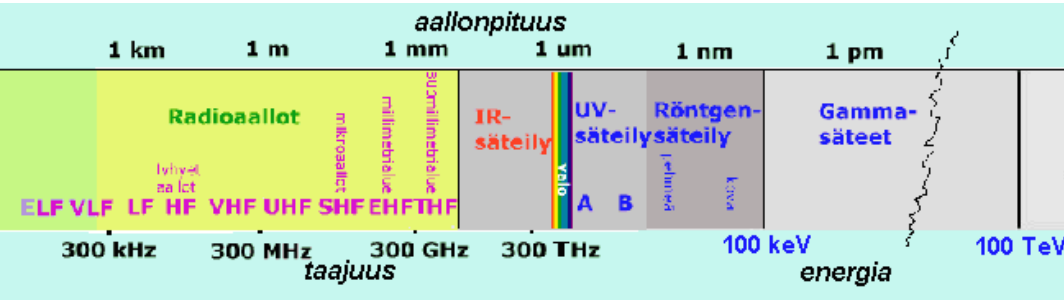
Suomenkielistä materiaalia radioastronomiasta on Internetissä vain lähinnä radioastronomian opiskelijoille. Siksi lähes kaikki linkit johtavat englanninkielisille sivuille.

Miten radioastronomia sai alkunsa?

Vastaus on: tavallaan vahingossa, mutta ennen kuin tieteen ala nimeltä radioastronomia voi syntyä, piti tutkia magnetismia ja saada selville sähköilmiöiden salat ja yhdistää ne sähkömagnetismiksi. Meripihkaan kehittyvä hankaussähkö tunnettiin jo 500 eKr. ja magnetismi kompassin muodossa 1200-luvulta asti. Luigi Galvani havaitsi sähkövirran vaikutuksia sammakon reisiin vuonna 1780 ja seuraavat sata vuotta tiedemiehet tekivät kokeita sähköllä ja magneeteilla ja kehittivät kokeiden tuloksien perusteella yhtälöitä, joilla ilmiöitä voitiin mallintaa.

Vuonna 1864 J. C. Maxwell koosti kertyneet tiedot sähköön, sekä magnetismin yhdistävään muutaman yhtälön kokoelmaan (Maxwellin yhtälöt), jotka mm. ennustivat valonnopeudella kiitävien elektromagneettisten aaltojen olemassaolon. Ne Heinrich Hertz demonstroi kokeellisesti v.1887. Alkeellisia radio-demonstraatioita ehdivät järjestää mm. fyysikot Tesla, Sir Lodge ja monet muutkin vuoteen 1884 mennessä. Pian sen jälkeen nokkelan keksijän, Guglielmo Marconin patentoimat keksinnöt (mm. kipinälennätin, 1896) mahdollistivat radioaaltojen hyöty- ja huvikäytön. Radiolla siis ei ole yksittäistä keksijää vaan taustateoria, sen oikeaksi todistaneet kokeet, laite/komponenttikehitystyö, kokeilut ja niihin pohjautuen käytännöllisen radiovastaanottimen valmistaminen. Jo kauan tunnetun valon spektrin lisäksi liitettiin sähkömagneettisen säteilyn kirjon pidempiaaltoiseen päähän radiospektri.

Ensimmäinen radioastronominen havainto julkaistiin vasta 37 vuotta kipinälennättimen patentinhaun jälkeen. Paljon myöhemmin, 1900-luvun jälkipuoliskolla optisen ja radioastronomian välisen kuilun täytti infrapuna-astronomia ja valoaaltoja lyhyemmälle puolelle spektriä kehittyi ultravioletti-, röntgen- ja gammasädeastronomia. Näillä sähkömagneettisen säteilyn alueilla ilmakehän vaimennus estää, tai ainakin merkittävästi häiritsee havaintoja maanpinnalta. Radioastronomiassa ei havaita yksittäisiä säteilykvantteja, joka on mahdollista lyhtyaaltoista infrapunasäteilyä lyhyemmillä aallonpituuksilla, vaan tarkastellaan sähkömagneettisen säteilyn aaltoliikkeen ominaisuuksia. Tehdyillä havainnoilla vahvistetaan tutkijoiden teorioita, tai joskus teoria syntyy uuden havaitun ilmiön pohjalta.



Radioastronomiakin on tavallaan yksi radioamatööri toiminnan jälkeläisistä, alussa lähinnä radiotekniikan kehitys- ja tutkimustyön sivuhaara. Ehkä juuri sen vuoksi radiokommunikaation ja radioastronomian kehitys ovat kulkeneet käsi kädessä, joskaan ei viimeaikoina aina täysin

Ursa

Etusivu

Haku

Ursan wikit

Wiki-etusivu

Tähtikallio

Tietotekniikka

Ursan hallinto

Tähdet ja avaruus

Aikuisten kerho

Tähtiyhdistysasioita

Harrastusryhmät

Ryhmiä wikit

Ryhmäaktiivit

Jaostotoimikunta

WWW-sivuhanke

Tapahtumia

Avaruusviikko

Apua

Harjoittelusivu

Ohjeita suomeksi

Help in English

muokkaa valikkoo

Haku

Hae

sopeasti - on olemassa vain yksi luonteeltaan uusiutuva, mutta rajallinen luonnonvara, radiospektri, eli "taajuuskakku", josta voidaan jakaa viipaleita ja nälkäisiä syöjiä onkin riittänyt.

Radioastronomian esihistoria

Jo vuonna 1890 Thomas Alva Edison järkeili Auringon säteilevän myös radioaaltoja valon lisäksi ja ajatteli kokeilla radioaaltojen sieppaamiseen magnetiittimalmikäntää, jonka ympäri kiertävä puhelinlinja muodostaisi kelan. Kokeilua ei luultavasti tehty ja se olisi ilmaissut lähinnä maan magneettikentän matalataajuisia vaihteluita.

Muutaman muun radiotekniikan pioneerin lisäksi Sir Oliver Lodge teki vuoden 1898 tienoilla epäonnistuneen yrityksen vastaanottaa Auringon säteilemiä radioaaltoja antennin, resonanssipiiri-kohereeri-ilmaisimen ja galvanometrin avulla. Ilman signaalia vahvistavaa laitetta kokeilut jäivät tuloksettomiksi. Kohereeri-ilmaisinta (metallijauhoa ja elohopeaa kahden elektrodin välissä alipaineisessa lasiputkessa) käyttävät vastaanottimet, jotka perustuvat sähkönjohtokyvyn äkilliseen kasvuilmiöön napojen välisen jännitteen kasvaessa, kuten muidenkin käyttämät alkeelliset koelaitteet olivat aivan liian epäherkkiä. DeForest keksi USA:ssa kolmielektrodisen (katodi-hila-anodi) radioputken v. 1906 ja sen parannetun version, vahvistavan triodin vasta v. 1912, josta radiotekniikan kehitys sai lisävauhtia.



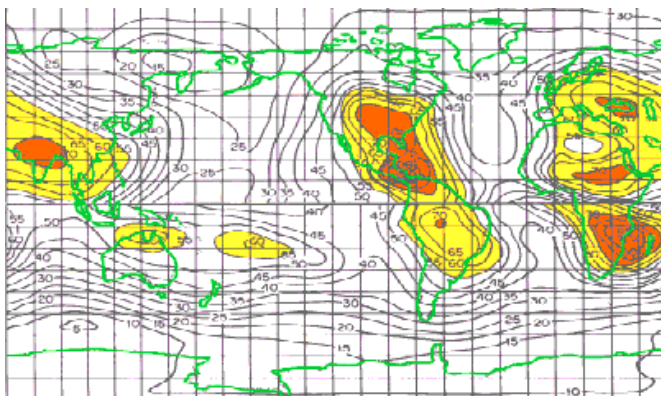
O. Heavisiden ja A. Kennellyn 1902 esittämä teoria ionosfääristä radioaaltoja heijastavana kehänä maapallon ympärillä selitti, miksi Marconin 1901 lähettämät radioaallot ylittivät Atlantin, mutta mahdollista Auringon radiosäteilyä vaimentavan ionosfääri-kerroksen löytyminen, yhdessä Auringon radiosäteilyn heikkoutta ennustaneen Max Planckin mustan kappaleen säteilyn intensiteettijakaumaa kuvaavan teorian kanssa ilmeisesti veivät mielenkiinnon Auringon radiosäteilyn etsinnästä.

- Wilsing, J., Scheiner, J., "On an attempt to detect electrodynamic solar radiation and on the change in contact resistance when illuminating two conductors by electric radiation " (1896) Ann. Physik und Chemie 59: 782-792
- Lodge, O.J., " Signalling through space without wires " (1900) The Electrician, 3d ed: 33
- Deslandres, H., Decombe, L., " On the search for Hertzian radiation emanating from the sun " (1902) Comp. Rendus Acad. Sci. (Paris) 134: 527-530
- Nordmann, C., " A search for Hertzian waves emanating from the sun " (1902) Comp. Rendus Acad. Sci. (Paris) 134: 273-275
- Coats, D., " Stellagraphs: Star Pictures by Radio" Journal of R.A.S.C. Vol. 24, 59, Feb. 1930

Marconin ja monien muiden puuhastellessa pitkien radioaaltojen kanssa Intialaissyntyinen J. C. Bose keksi ja rakenteli kylpyhuoneensa sivukomerossa mikroaalto-laitteistojaan, joihin kuuluivat mm. aaltoputket, pyramidi-torviantennit, dielektriset linssit, kaksoisprismavaimentimet, juuttiköydestä, tai tinafolionipuista tehdyt polarisaattorit, diffraktiohilat, joilla määriteltiin aallonpituus ja jopa alkeelliset puolijohde-ilmaisimet (Fe-kätkidiodit). Bose demonstroi aallonpituuksilla 2,5 cm...5 mm (12...60 GHz) toimivia koelaitteitaan v. 1897 Kuninkaallisessa Instituutissa Englannissa, mutta valitettavasti lopetti tämän alan tutkimukset jo paria vuotta myöhemmin. Bosen kätkidiodi toimi esikuvana mikroaaltotutkien vastaanottimien ilmaisindiodeille 1940-luvulla. Bose oli puoli vuosisataa vuotta edellä aikaansa ja P-N puolijohdeliitosten varsinaista keksimistä.

Karl Jansky

1900-luvun alussa radioliikenne käytti suuria sadan kilowatin luokkaa olevia lähetystehoja ja hyvin pitkiä radioaaltoja, eli matalia, ns. LF-taajuuksia (n. 50 kHz), koska niitä pidettiin parhaina kaukoyhteyksiin ja tuollaisia suuritehoisia matalataajuisia aaltoja oli silloisella tekniikalla helpompi aikaansaada, mutta kapeahkolle taajuuskaistalle ei montakaan lähetystä mahtunut. Kun 1920-luvun puolivälissä mm. radioamatööri-kokeiluissa huomattiin n. 15...20 m aalloilla (HF-alueella) saatavan häiriöttömämpiä mannertenvälisiä yhteyksiä pienillä, jopa wattiluokan tehoilla, alkoi myös kaupallinen liikennekin hyödyntää "kelvotonta" lyhytaaltoaluetta mm. mannertenvälisen puhelinyhteyksien aikaansaamiseksi. Muuta keinoa ei ollut, sillä ensimmäinen Atlantin alittava puhelinkaapeli laskettiin vasta 1956, joten radiopuhelinyhteydet olivat ainoa vaihtoehto. Teleoperaattori Bell avasi kaupallisen radiopuheluliikenteen lyhytaalloilla New York - Lontoo- välillä v. 1928, mutta puhelujen laatua heikensivät ajoittain mm. päiväntasaajaseudun ukkosmyrskyalueiden salamoinnista syntyneet staattiset radiohäiriöt (kartta). Kuitenkin niitäkin suurempia ongelmia olivat mm. avaruussään vaikutus radiokeleihin, radioaaltojen etenemisen oikut, tehokkaiden suunta-antennien ja lähiniputkien puute.



Työskennellessään Bellin Puhelinlaboratoriossa Karl Jansky kartoitti kohinalähteiden ominaisuuksia (Jansky, K.G., "Directional studies of atmospherics at high frequencies", Proc. IRE 20, 1932) ja havaitsi kaukaisten, sekä paikallisten ukkosten aiheuttamien häiriöiden seasta

antennisuuntia, joissa juuri ja juuri erotti heikon, tasaisen suhteen ja jotka siirtyivät taivaalla liki samaa vauhtia Auringon mukana. Kohinatason nousu Janskyn vastaanottimessa oli vain 3 dB, eli kohinateho kaksinkertaistui.

Esityksessään U.R.S.I.:n (Union of Radio Scientists) kokouksessa Washington D.C.:ssä huhtikuussa 1932, Jansky luokitteli häiriösignaalit kolmeen luokkaan: paikalliset ukkoshäiriöt, kaukaiset ukkoshäiriöt ja tasainen kohina, jonka syy oli tuntematon, mutta Jansky arveli jonkin aikaa sen liittyvän jollain tavalla Aurinkoon.

Tarkempia tutkimustuloksia Jansky pääsi esittelemään U.R.S.I.:n kokoukselle 1933 otsikolla: "Oletettavasti tähtienvälisestä avaruudesta lähtöisin olevat sähköiset ilmiöt." Kohinalähteen päivittäisestä esiintymisvälistä (23h 56') Jansky päätteli säteilyn olevan kotoisin maapallon ulkopuolelta ja lisähavaintojen perusteella säteilyn tulevan linnunradan tasosta ja olevan voimakkainta linnunradan keskustan suunnasta. Säteilylähteen koordinaateiksi Jansky ilmoitti 18h / -10°. Radiosäteilyn todellisesta syntymekanismista Jansky ei päässyt perille, koska synkrotronisäteily keksittiin vasta seuraavalla vuosikymmenellä. Senaikaisen käsityksen mukaan avaruudessa oli vain pölyä, kalsiumia ja natriumia ja lämpötila 30 kelvinin tienoilla - mikään näistä ei sopinut Janskyn havaintoon. Janskyn säteilyn voimakkuus oli 100 000 kertaa voimakkaampi kun oletettiin, eivätkä tähtitieteilijät vielä ymmärtäneet seuravaan 15 vuoteen tapaa, jolla Jansky säteilyintensiteetin ilmoitti.

Voi olla hieman yksinkertaistettua väittää, että radioastronomia keksittiin vahingossa, tosin mitään kunnollista teoriaa aurinkokunnan ulkopuolisten radioemissioiden olemassaolosta ei ollut olemassa, ne vain löydettiin valppaan tutkijan alaan (radioaaltojen etenemiseen) liittyvän hyvin suoritettua havaintotyön tuloksena. Onnekkaina sattumana asiassa voidaan pitää sitä, että 1930-luvun alkuvuodet olivat auringonpilkkuminimin aikaa ja sen vuoksi ionosfääri läpäisi kohtuullisen hyvin avaruudesta saapuvat 14,6-metriset radioaallot.

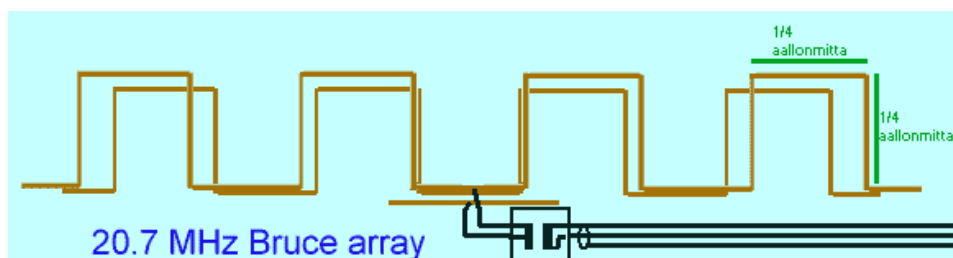
Janskyn karuselli

Karl Jansky oli yliopistossa opetustyötä tekevän sähköinsinöörin poika ja hänen veljensä oli radiotekniikan professori. Karl suoritti fysiikan BSc ja MSc oppiarvot 1927 ja 1936. Tutkimusinsinöörin vakanssi Bellin puhelinlaboratorioon Harald Friisin alaiseksi järjestyi Karlin veljen myötävaikutuksella. Ensityökseen Karl sai selvittää em. lyhytaaltopuhelinliikenteeseen liittyviä ongelmia. Jo 1928, juuri ennen Janskyn palkkaamista Bellin Laboratoriossa tiedettiin, että staattisia häiriöitä (esim. kohinaa) tuli taivaalta eri suunnilta ja mm. Edmund Bruce ja Lowery arvelivat kohina-emissioita tulevan ainakin Auringosta. Auringon radiosäteilyähän oli yritetty vastaanottaa jo yli 30 vuotta aiemmin, mutta antennispecialisti Bruce epäili kohinaa tulevan muiltakin taivaan alueilta. Holmdelissä oli yleisesti huomattu, että antennista tuleva kohinateho oli suurempi kuin päätevastuksesta mitattu. Samantapaista työtä teki myös muuan R.K. Potter, joka mittasi ympärisäteilevällä antennilla ilmastohäiriöiden aiheuttamien kohinapurkausten huippuarvoja, silti niistäkin olisi ollut mahdollista ajoittain huomata galaktinen taustakohina. Tämä galaktinen kohina tavallaan kyllä havaittiin jo 1928, kun RCA:n trans-Pacific- lyhytaaltoradiolinkin Manilan operaattori Gordon H. Stagner, mittasi kohinatehon vaihtelua 5...25 MHz taajuusalueella eri antennilla ja mainitsi kohinatason päivittäisistä muutoksista. Operaattori Stagneria kehoitettiin kuitenkin keskittymään olennaisiin työnkuvaan kuuluviin asioihin.

Bellin laboratorion muutto Cliffordista viivästi lyhytaaltoalueen havaintolaitteiston valmistumista, mutta pitkäaaltoalueen ukkoshäiriöitä Jansky oli ehtinyt tutkia 45 kHz:llä jo ennen muuttoa ja tutkimuksia jatkettiin muuton jälkeen lyhytaaltohavaintojen rinnalla. Reilun vuoden kestäneiden valmistelujen jälkeen 20,5 MHz:n havaintoja aloitettiin Holmdelissä, New Jerseyssä elokuussa 1931 ja kunnollisia tuloksia saatiin seuraavan vuoden aikana.

Laboratorion mittauskalustoon kuului toimiva vastaanotin ja antenninkin olivat Bruce ja Friis suunnitelleet jo 1920-luvulla. Vastaanotin oli lyhytaaltoalueen kentänvoimakkuusmittari, toimintaperiaatteeltaan superheterodyne-radioputkivastaanotin 300 kHz välitaajuudella kaistanleveytenä 26 kHz (Friis H. T., Bruce E., "A radio field strength measuring system for frequencies up to forty megacycles", Proc. IRE, Aug. 1926).

Radioputkien tekninen kehitysaste 1920-luvun lopussa mahdollisti vastaanotinlaitteiden valmistuksen vain noin 40 MHz taajuuksille asti. Syynä tähän oli mm. putkien fyysinen rakenne (mm. pitkät elektrodijohtimet), joka periytyi hehkulamppujen valmistetekniikasta. Jansky ei siis mitenkään voinut tuota korkeammilla taajuuksilla tehdä radiohavaintoja, mutta koska radiotaajuskaistan käytölle oli näköpiirissä uusia sovelluksia (mm. TV), myös korkeammilla taajuuksilla toimivia radioputkia alettiin kehittää 1930-luvulla.



Janskyn lyhytaalloilla käyttämä pystypolaroitu Broadside-(verho)antenni oli eräs Bruce Arrayn versio. Antennirakennelma oli 30 m pitkä lankuista kasattu teline, joka pyöreällä tiilireunuksella Ford T-mallin pyörien kannattelemana kääntyi sähkömoottorin voimalla kierroksen 20 minuutissa. Sähköisesti antennissa oli kahdeksan vierekkäistä vaiheistettua neljännesaaltoelementtiä ja niiden takana toinen pidempielementtinen rivi toimi heijastajana. Vahvistusta antennilla saattoi olla n. 8...10 desibeliä yli dipolin n. 25 asteen korotuskulmaan. Vastaanottimen AGC-jännitteestä mitattu kohinataso tallentui paperipiirturin nauhalle. Ensimmäiset mittaushavainnot Jansky teki taajuudella 20,5 MHz, ja myöhemmin myös 18 MHz:llä. Sarjan viimeiset, Auringon kasvavan aktiivisuuden haittaamat kosmisen radiosäteilyn spektrimittaukset Jansky teki myöhemmin samantyyppisellä antennilla 9,3, 18 ja 20,5 MHz taajuuksilla ("Minimum noise levels obtained on short-wave radio receiving system", Proc. IRE 25, 1937), (Friis, H.T., Feldman, C.B., "A multiple unit steerable antenna for short-wave reception", Proc. IRE 25, 1937).

Janskyn radioastronomia-artikkelit:

- 1932- "Directional studies of atmospherics at high frequencies", Proc. IRE, 20
- 1933- "Electrical disturbances apparently of extraterrestrial origin", Proc. IRE, 21
- 1933- "Radio waves from outside the solar system", Nature, 132

- 1933- "New radio waves traced to centre of the Milky way" N.Y. Times 82: 1, 5 May 1933
- 1933- "Electrical phenomena that apparently are of interstellar origin", Popular Astronomy, 41, Dec. 1933
- 1935- "A note on the source of interstellar interference", Proc. IRE, 23
- 1937- "Minimum noise levels obtained on short-wave radio receiving systems" Proc. IRE 25

Bellin Laboratorio ei myöntänyt rahoitusta uuteen 30-metriseen peiliantenniin, koska alkuperäisen tutkimuksen päämäärä oli jo saavutettu. Janskylle annettiin seuraavaksi tehtäväksi tutkia moottoriveneen polttomoottorin sytytyslaitteiden radiolaitteille aiheuttamia sytytyskipinähäiriöitä.



Janskyn antennin sijaintipaikka selvisi jälkipolville vasta 1998. Paikalle pystytettiin muistomerkki, joka kuvaa antennia suunnattuna syyskuun 10. 1932 klo. 19:10 - ainoastaan tuolta päivältä on säilynyt havaintotietoja.

Havaintojensa tuloksia ja spekulatioita säteilyn alkuperästä Jansky oli julkaissut lähinnä Radioinsinööri-instituutin (IRE, nyk. IEEE) lehdissä vuosina 1933...1937 (Proceedings of the Institute of Radio Engineers), joita luki myös eräs nuori Illinoisissa asuva radioalan insinööri, radioamatööri ja UHF-vastaanotintekniikan virtuoosi.

Grote Reber

Radioaalloilla ja tähtitieteellä ei silloisen käsityksen mukaan ollut mitään tekemistä toistensa kanssa. Tähtitiede oli silloin refraktorikaukoputkia, valokuvausta, tähtien spektrejä, kun oikealle tähtitieteilijälle radio oli laite joka oli kotona olohuoneen nurkassa. Jansky oli ehdottanut, että Harvardissa tehtäisiin vastavat radiohavainnot, mutta ilman vastakaikua. Caltechin Potapenko ja Folland kuitenkin kävivät Mojaven erämaassa 1936 toistamassa Janskyn havainnot, mutta oikeastaan kukaan ei erityisemmin kiinnostunut Janskyn linnunradan kohinoista - lukuun ottamatta Grote Reberiä (W9GFZ, sk.), jota eivät enää puuhastelut tavanomaisten lyhytaaltoyhteyksien kanssa kiehtoneet. Radioamatööriharrasteen Reber oli aloittanut jo 15 vuotiaana v. 1926. Reber oli lukenut Janskyn mielenkiintoisista havainnoista IRE:n julkaisuista 1933. Myös Sir Robert Watson-Watt, britti, jolla oli ilmavalvontatutkaprojekti työn alla v. 1935, oli kiinnostunut haittaisiko tuo galaktinen kohina tutkalaitteiden toimintaa.

Reber yritti ensin etsiä galaktista kohinaa jo vuonna 1937 3,3 GHz ja 910 MHz taajuuksilta siksi, että hän otaksui Janskyn havaitseman säteilyn olevan ns. mustan kappaleen säteilyä, jonka intensiteetti kasvoi taajuuden neliössä. Janskyn havainnoissahan linnunradan kohinalämpötila oli jopa 100 000 kelviniä. Koska säteily olikin synkrotronisäteilyä, joka heikkeni taajuuden kasvaessa, ei Reber epäherkillä mikroalto vastaanottimilaitteillaan saanut mitään tuloksia. Reber hylkäsi mustan kappaleen säteilylain soveltamisen tähän tapaukseen ja yritti uudelleen 1938 syksyllä huomattavasti alemmalla 162 MHz taajuudella, vaikka kipinähäiriöt autoista ja sähkökatkaisijoista haittasivatkin päiväaikaan. Taajuusvalinta perustui vastaanottimen ylipään käyttökelpoiseen toimintataajuuteen ja standardimittaisen alumiinilevyn mittohin, joista Reber valmistutti Alcoa Companyllä alumiinisen syöttötorven. Hän havaitsi kesällä 1939 Linnunradan tasosta tulevan kohinan ja vuonna 1941, sekä 1943 Reber teki radioastronomian historiaa: ensimmäisen radioastronomisen kokotaivaan kartoituksen ja sai sen julkaistua Astrophysical Journalissa lähinnä päätoimittaja Otto Struven myötämielisen suhtautumisen ansioista.

Reberin DIY-radioteleskooppi - vasara ja nauvoja, koko rahalla

Reberin radioamatööriharrastus oli suuntautunut lähinnä VHF/UHF-kokeiluihin ja senaikaisella mittapuulla mitaten hyvin korkeilla taajuuksilla toimivien radiolaitteiden rakenteluun. Hän oli mennyt valmistuttuaan (BSEE) Illinois Institute of Technologystä töihin Chicagolaiselle instrumetti- ja radiolaittevalmistajalle ([Stewart Warner Company](#)) [↗](#), jossa hän suunnitteli ja valmisti vastaanottimia. Reber etsi 1935 rahoittajaa, tai asiasta kiinnostunutta tutkimuslaitosta kumppanikseen radioteleskooppiprojektiinsa, mutta ilman tulosta. American Bridge Companyn \$7000 tarjous antennin rakentamisesta oli Reberille liian kallis, joten Reber päätti tehdä teleskoopinkin itse ja jo 1937 kesällä neljän kuukauden urakan jälkeen halkaisijaltaan 9,5 metrin, vain korkeussuunnassa kääntyvä puukehikon varaan kasattu

peiliantenni oli pystyssä hänen kotinsa takapihalla. Teleskooppi lopulta maksoi Reberille reilusti yli henkilöauton hinnan, \$1300. Antennin koko määräytyi saatavilla olevien standardimittaisten lankkujen pituuden mukaan, joita käytettiin peilin tukirakenteissa. Heijastava pinta oli sentään galvanoitua peltiä, joka napsui ja paukahteli auringonpaisteessa. Epäluuloiset naapurit epäilivät taivaalle suunnatun hirvityksen säätelevän sateen määrää.



Tämä teleskooppi oli silloin maailmassa ainutlaatuinen radioastronomian tutkimuslaite. Peilin polttopisteessä tukivarsien päässä oli syöttötorvi ja vastaanotin. Apupeiliäkin Reber hakitsi, koska aloitti havainnot 3,3 GHz taajuudella, missä kokeilu-signaalin lähteenä toimi RCA 103A magnetroniputki ja vastaanotin oli pelkkä diodi-ilmasin-audiovahvistin. Tämän Reber pian muutti 910 MHz:lle ilman tuloksia, vaikka herkkyys parani reilusti. Reber yritti saada myös Barkhausen-putkea toimimaan 3,3 GHz vastaanottimessa Chicagon Yliopiston avustaessa putken valmistuksessa, mutta se ei toiminut odotetusti.

Muutettuaan mieltä mahdollisimman korkean kokeilutaajuuden suhteen oli aika valmistaa VHF- vastaanotin, viis antennin erottelukyvystä ja Planckin laista. Oikeastaan "vastaanotin" oli pelkkä 5-asteinen RF-putkivahvistin, jonka kaistanleveys 160 MHz:llä oli 1 MHz (myöh. 0,19 MHz) ja vahvistus 90 dB (1 000 000 000-kertainen). Vahvistettu RF-signaali (galaktinen kohina) tasasuunnattiin putkidioidilla. Siitä kohinatehoa indikoiva mittaussignaali siirtyi tasajännitteenä suojattua kaapelia myöten talon kellariin, jossa olivat virtalähdeosa ja mittari, vasta 1940 alkuvuodesta piirturi. 1944 Reber päätti kokeilla uudellen hiukan korkeammalla taajuudella ja päätyi saatavilla olevan 400...550 MHz signaaligenraattorin takia 480 MHz:iin. 6,5 dB kohinaluvun 480 MHz vastaanotin oli 4-asteinen lyhykestoisilla ja kalliilla RCA 5588A putkilla (korvasi ne v. 1946 GE 446B putkilla) ja koaksiaaliresonaattoreilla. Laitteisto oli akkukäyttöinen. Tavattuaan van de Hulstin Reber valmisti vielä 1420 MHz vetyviivan vastaanottimenkin, mutta ei ehtinyt tehdä Wheatonissa sillä havaintoja.

Jansky ja Reberin havaintolaitteet ratsastivat teknisen kehityksen aallonharjalla, niitä ei olisi voitu valmistaa juurikaan sen aiemmin. Vuoteen 1934 mennessä RCA -yhtiö oli kehittänyt radioputkia, jotka toimivat jo n. 80 MHz taajuuksille asti. Seuraava kehitysaskel vastaanotinputkissa oli yksinkertaisesti tehdä niistä fyysisesti pienempiä ja rakenteltaan parempia ja jo v. 1935 alettiin valmistaa ns. Acorn-tyyppisiä radioputkia, joiden toimintataajuus ylti 1000 MHz asti, mikä teki mahdolliseksi Reberille rakentaa herkän VHF-vastaanottimen. Samoja putkia käytettiin myös tutkavastaanottimissa. NBS:n insinööri Dunmore oli 1936 julkaissut [artikkelin koaksiaali-resonaattoreilla toteutetusta 100...300 MHz vastaanottimesta](#) ko. 954-putkityypillä, mutta kyseinen vastaanotin ei kuitenkaan toiminut hyvin yli 200 MHz taajuuksilla, mikä vaikutti taajuusvalintaan lopullisen taajuuden määräytyessä syöttötorven mitoista.



Tähtitieteen kannalta "oikeassa" lehdessä julkaistut havainnot sitten kiinnostivatkin jo monia astronomeja ja astrofysikoita, mainittakoon esimerkiksi Hollantilainen Jan Oort, joka vielä sodan riehussa Euroopassa käynnisti aiemmin havaitsemattoman 21 cm aallonpituuden vetykaasun spektriviivan metsästyksen. Silti "oikeiden" astronomien ja radioastronomisia havaintoja tehneiden "insinöörien" ja heidän käsittämättömien "mustien laatikoidensa" välillä oli jonkinlainen kuilu, joka säilyi pitkälle 1950-luvulle asti.

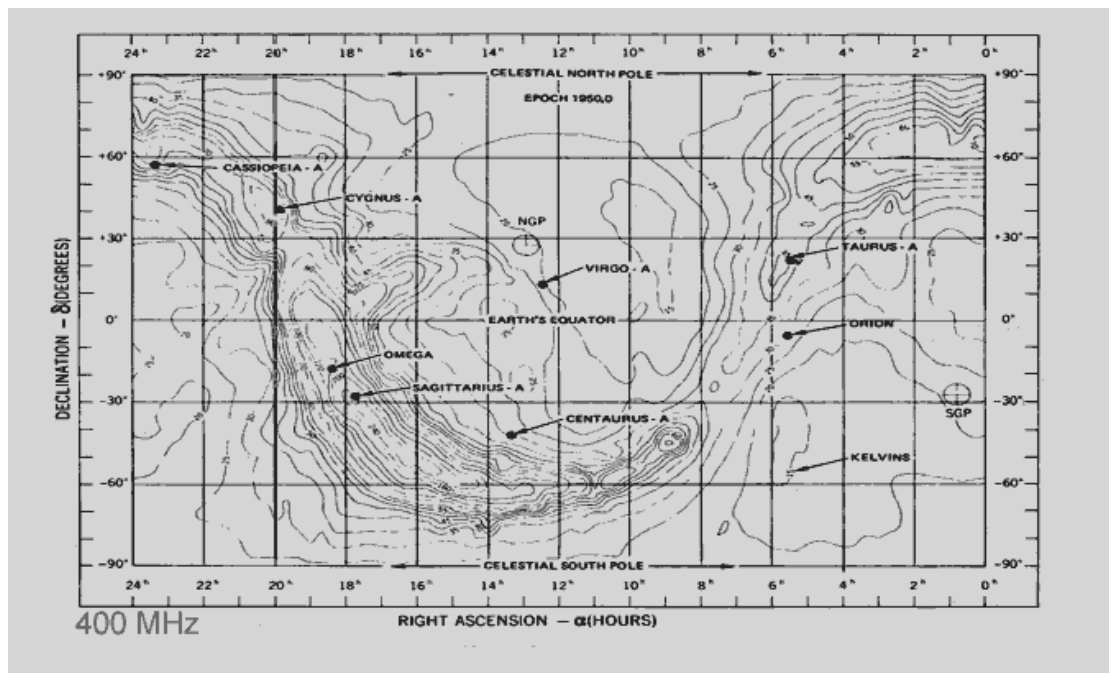
Reberin muita mainittavia havaintoja olivat Auringon radiosäteilyhavainnot 162 MHz:lla syyskuussa 1943 ja kokotaivaan kartoitus 480 MHz:llä v. 1948. Grote Reber teki vuosia laiterakentelu- ja havaintotyötä omalla ajallaan ilman ulkopuolista rahoitusta ja apua ja saavutti hienoja tuloksia. Tätä ei ollut tapahtunut radioastronomiassa aiemmin, eikä sen jälkeen!

Reber jatkoi sodan jälkeen tutkimustyötään ensin NBS:llä Virginiassa 1947...1951, piipahti Havaijilla ja Tasmaniassa, oli hetken NRAO:ssa 1960, kunnes palasi jäädäkseen Tasmaniaan jatkamaan yksityistä tutkimustyötään pitkäaaltosen kosmisen radiosäteilyn parissa.

Reber kuoli vuonna 2002 91 v. ikäisenä. Tuorlan observatorio vastaanotti yhden viidestä Reberin tuhkauurnasta tunnustuksena tuorlalaisten panoksesta radioastronomiselle tutkimustyölle.

Reberin alkuaikojen radioastronomiiaa käsitteleviä artikkeleita:

- 1940- "Cosmic Static", Proc. IRE, 28, 68.
- 1940- "Cosmic Static", Astrophysical Journal, 91.
- 1942- "Cosmic Static", Proc. IRE, 30, 367.
- 1944- "Cosmic Static", Astrophysical Journal, 100, 279.
- 1946- "Solar Radiation at 480 Mc.sec.", Nature, 158, 945.
- 1947- "Radio-frequency investigations of astronomical interest", G. Reber, J.L. Greenstein, The Observatory, vol. 67, no. 836, Feb. 1947.
- 1948- "Solar Intensity at 480 Mc", Proc. IRE, 36, no.1.
- 1948- "Cosmic Radio Noise", Radio-Electronic Engineering, July 1948.
- 1948- "Cosmic Static", Proc. IRE, 36, 1215, 1948.
- 1949- "Galactic Radio Waves", Sky and Telescope, vol. 8.
- 1949- "Radio astronomy", Scientific American, vol. 181, Sept. 1949.
- 1950- "Galactic Radio Waves", ASP Leaflet no. 259, 1950.
- 1955- "Radio Astronomy in Hawaii", Nature, 175, 78.
- 1955- "Fine structure of solar radio transients", Nature, 175, 132.
- 1956- "Cosmic radio-frequency radiation near one megacycle", G. Reber, G.R. Ellis, J. Geophys. Res., 61, 1.



Reberin omissa havainnoissa näkyivät vain Linnunradan voimakkaimmin säteilevät alueet ja kohteet, varsinkin 480 MHz:lla, eikä erotellukyky ollut oikein intensiteettikartan luokkaa.

Radioastronomia Reberin ensihavaintojen jälkeen

Jo 1935...1936 olivat radioamatöörit havainneet ylimmällä HF-alueellaan, eli 10 m:llä (28 MHz) outoa kohinaa, luultavasti Auringosta, jonka myös brittifysiikko E. V. Appleton laittoi merkille. Ensimmäinen dokumentoitu kohinahavainto Auringosta tehtiin Tokiossa Nagamin ja Miyan (Intl. Telecom. Co. Ltd. Japan) toimesta 1. elok. 1938 klo. 09:50-09:55 Japanin kesäaikaa. Tutkimus liittyi HF-alueella ilmenevään äkilliseen radiosignaalin vaimenemiseen, eli Dellingerin-häipymään (nyk. SWF), mutta kerrostetuilla 14,36 MHz dipoleilla voitiin myös päätellä kohinalähteen korkeussuunnan tulokulma, joka oli tapahtumahetkellä 70°, kuten Auringon korkeuskin. Sennikään havaitsijat kirjassivat paperipiirturin puutteen vuoksi vastaanottimen signaalinvoimakkuuslukemat paperille minuutin välein joka päivä puolen vuoden ajan. Nuoremman tukijan, Miyan, päätelmää Auringosta kohinan lähteenä ei kirjattu julkaisuun vanhemman kollegansa epäilyä kohinan syntyneen ionosfäärissä Auringon säteilyn seurauksena. Miya oli kuitenkin oikeassa.

Toista maailmansotaa edeltävinä vuosina ja sen aikana tutka- ja radiotekniikan voimakas kehitys oli suureksi hyödyksi myös radioastronomialle. Etäisyyttä mittaavaa tutkaa ei pystytty rakentamaan ennen 1930-lukua, koska sopivia elektronisia komponentteja ei yksinkertaisesti ollut vielä olemassa. Ensimmäiset tutkat 1930-luvulla olivat lähinnä läjä radiovastaanotin- ja mittalaitteita, joihin oli liitetty pulssilähetettä tuottava lähetyksikkö. Mikroaaltotukan suurin ongelma oli lähettimessä tarvittava tehoaltaan suurehkon ja erittäin korkeataajuisen pulssilähteen synnyttävän radioputken kehittäminen, joka onnistui ensin englantilaisilta. Sitä ennen korkein toimintataajuus oli alle 600 MHz, mutta ontelomagnetrin tultua se kohosi pariinkymmeneen gigahertsiin. Uusilla radiolähetinkomponenteilla oli myös sovelluksia hiukkasfysiikan alalla, koska niillä voitiin rakentaa hiukkaskiihdyttäjiä (syklotroni), joissa radiotaajuisella teholla aikaansaadaan

hiukkasen nopeuden, eli energiatason kasvu. Mikroaaltotutkan vastaanottimen kehitys edisti vastaavasti GHz-alueen antenni- ja vastaanotintekniikkaa, sekä signaalinkäsittelyä.

1920- ja 1930-luvuilla uusin alan teknologia ja keksinnöt levisivät Euroopasta USA:han AT&T ja GE:n osittain omistaman RCA:n lisensoimalla saksalaisen Telefunkenin ja hollantilaisen Philipsin patentteja. Sodan hävinneet Saksa ja Japani olivat radiotieteellisen tutkimuksen suhteen toimintakiellossa vuosia, Saksa vuoteen 1950 asti.

Galaktista- ja Auringon kohinaa havaitsivat mm. saksalaiset (v. 1939...1940 125 MHz) tutkavastaanottimillaan. Effelsbergin 100 m paraboliantennin pystyttäjänä myöhemmin tunnetuksi tullut Otto Hachenberg työskenteli sodan aikana Telefunkenin tutkalaboratoriossa, missä todensivat omilla laitteillaan Janskyn ja Reberin julkaisemia havaintoja raportoimatta niistä missään. Tutka-insinööreille oli ns. Janskyn kohina tuolloin tutkavastaanottimen herkkyyden mittapuuna.

Muissakaan maissa (mm. Uudessa Seelannissa) ilmailuväyläalueilla tehtyjä havaintoja ei saanut sodan aikana julkaista. Radioastronomian historioitit tunnustavat ensihavainnaksi J. S. Heyn vasta 1945 julkistaman 26-28. helmikuuta 1942 havaitun poikkeuksellisen voimakkaan Auringon radiosäteilyn aiheuttamat häiriöt brittien 50...200 MHz tutkissa. Bellin Laboratorion tutkijat G. C. Southworthin johdolla havaitsivat v. 1942 mikroaaltotutkailualueen termistä kohinaa Auringosta mm. 9,4 GHz:lla.

Täysin immuuni ei nykyinenkään radiokommunikaatioteknologia ole Auringon radioemissioille. Maaliskuussa 2002 Bellin Laboratorio julkaisi tutkimusraportin, jossa todetaan vuosittain parinkymmenen voimakkaimman radiokohinaryöpy voivan aiheuttaa katkoksia matkapuhelinliikenteeseen lievealueilla tukiaseman antennin suuntauksen sattuessa Aurinkoon.

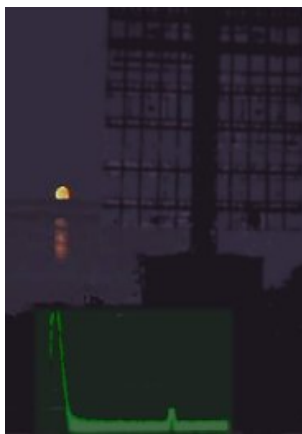
Vuonna 1944 brittien 60 MHz GL2- ja CD-tutkat havaitsivat heijastuksia meteorivanoista, joita erehdyksellisesti luultiin V-2-ohjusten laukaisuiksi. Tästä sai alkunsa tutkameteoriasstronomia. Ensihavainnot tehtiin 1946 perseideistä, sekä giacobinideistä USA:ssa ja Englannissa.

Kanadalaisetkin valmistsivat tuhansia tukalaitteistoja sodan aikana ja pohjoisen sijaintinsa ansiosta NRC:n tutkijoille tuli sodan loputtua ajatus yrittää saada revontulista kaikuja tutkalla. Peter Forsyth ylipuhuttiin v. 1948 matkustamaan Saskachewaniin ja kokeilemaan 3 GHz merivalvonta-mikroaaltotutkalla kaikuja, mutta ilman tulosta, kunnes 1949 USAF toimitti kanadalaisille kaksi [SCR-270- laitteistoa](#) [🔗](#), toisen McKinleylle meteorivanahavaintoihin ja toisen Forsyth'n käyttöön Saskatooniin. VHF-tutkalla (106 MHz) revontulikaiut saatiinkin helposti ja niistä P. Forsyth väitteli tohtoriksi. Havainnot julkaistiin Nature- lehden huhtikuun numerossa 1950. 40 vuotta myöhemmin selvisi, että Saskatooniin annettu tutka oli juuri sama, jolla tehtiin Hawajilla Oahun saaren pohjoisimmalla niemellä havainto yllätyshyökkäystä tekevien japanilaiskoneiden lähestymisestä kohti Pearl Harboria 7.12.1941. Tutka siirrettiin ja pystytettiin [Elektroniikkahistorian Museoon](#), [Marylandiin](#). [🔗](#)

Tammikuussa 1946 USA:n armeijan Signal Corps -ryhmä onnistui kokeiluissaan saamaan tutkakaikuja Kuusta modifioidulla SCR-271 tutkalaitteistolla, mikä oli tutka-astronomian ensimmäinen saavutus - vai olikohan kuitenkin?

Kaukainen tutkamaali Itämerellä?

Jo vuoden 1943 syys-, lokakuussa (Kuu nousi idästä 29.9.1943 klo. 07:45) vastaanotti Willi Thiel, W. Steppin apulainen Telefunkenin pitkän kantaman Würzmann-kokeilututkalla Itämerellä sijaitsevalta Rügenin saaren itäkärjen majakkamäeltä ajoittaisesti parin viikon aikana outoja tutkakaikuja. Kaiku katosi n. 2,5 sekunnin kuluttua lähettimen poiskytkemisestä, tai kun antenni suunnattiin pois idästä etelään.



Kyseessä ei ollut ns. kuulovastaanotto, vaan A-tyypin tutkakuvaputkinäyttö, joka mahdollisti viiveen, eli radioaallon kulkuajan tarkan mittauksen. Tutkalähettimen RF-pulssiteho oli 120 kW (1,5 us), mistä kertyi säteilytehoa maaheijastuksen avustamana n. 250 MW 564 MHz taajuudella. Kuukaiku tuolla säteilyteholla ja 750 kHz kaistanlevydellä olisi kuitenkin ollut melko lähellä kohinatasoa. Antenni oli vaakapolarisoitu ilman elevaatiokulman säätöä ja koostui 32 kpl:sta (yht. 320 kokoaaltodipolia tasoheijastimella) DMG 4K "Michael" UHF-suuntaradion (nyk. radiolinkin) antennimoduleista ja tehostetusta Würzburg-UHF-tutkan lähetin-vastaanottimesta. Tätä tutkaa ei rakennettu kuukaikujen saamiseen, vaan se oli osana natsisaksan sotilaskoneiston rahoittamaa merivalvontatutkan kehitystyötä. Stepp ei uskaltanut, tai katsonut tarpeelliseksi raportoida havaintoaan kuin vasta sodan loputtua teesissään 1946 maininnalla: "Als erstes von uns jemals erfasste extraterrestrische Ziel wurde von uns Anfang 1944 mit dem Würzmann auf Rügen der Mond beim Aufgang errast". "Die deutschen Funkmeß verfahren bis 1945", Fritz Trenkle ja "Physikalische Grundlagen der Funkortung", Stepp, W., 1953.

Kaikuja Kuusta - John DeWitt ja "Project Diana"

Tennesseeeläinen radioharrastuksen 16-vuotiaana aloittanut ja laivaradistina hetken aikaa palvellut John H. DeWitt jr., ex. W4FU, hakeutui töihin nashvilliläiselle yleisradioasemalle v. 1925. Opiskeltuaan ensin vuoden Vanderbiltn yliopistossa, John siirtyi Bellin puhelinlaboratorioon töihin 1929..1932, jossa K. Jansky juuri silloin teki ensimmäisiä radiokohinahavaintojaan. DeWitt palasi takaisin

Nashvilleen WSM:n pääinsinööriksi 1933. DeWitt harrasti myös astronomiaa ja rakensi 1934 veljensä kanssa 12" optisen peiliteleskoopin, jonka sitemmin lahjoitti Dyerin observatorioon.

Työskennellessään myöhemmin WGN- radiolle Chicagossa DeWitt yritti saada signaalinsa heijastumaan kuusta takaisin omaan vastaanottimeensa toukokuussa 1940 silloisella 138 MHz, eli 2,5-metrin radioamatöörialueella, epäonnistuen lähinnä epäherkän vastaanottimen ja alhaisen (80 W) lähetintehon vuoksi. DeWitt oli myös ilmaissut galaktisen kohinan samalla antennilaitteistolla ja oli hyvin perillä mm. Janskyn kuutisen vuotta aiemmin tekemistä kohinamittauksista, eli DeWitt oli tavallaan Reberin kannoilla VHF-alueen galaktisen radiokohinan havainnoimisessa.

John DeWitt liittyi armeijaan 1942 ja kehitti mm. ammuksen radiosytyttimen ja yleni sodan aikana Evansin Laboratorion tutkimuspäälliköksi. Heti sodan loputtua Signal Corps'n päällikkö kannusti DeWittii kehittämään tutkalaitteistoa, jolla voisi ilmaista mahdollisia Neuvostoliiton laukaisemia ohjuksia. Maaliohjusten puuttuessa Kuu sai kelvata tutkan maaliksi. Samalla DeWitt sai mahdollisuuden yrittää uudelleen kuuheijastuskoetta laboratorion resursseja käyttäen 111, 5 MHz taajuudella. Mukana projektissa olivat mm. tri. Harol, D. Webb, E. King Stodola, W3IYF ja Herbert P. Kauffman, W2OQU.

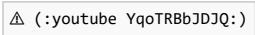
Kuututkalaitteiston kasaus alkoi syyskuussa 1945 ja syystalven aikana tehtiin tuloksettomia yrityksiä, sekä paranneltiin laitteistoa. Tutkan lähetin ja vastaanotin olivat FM-modulaation keksijän, majuri Edwin Armstrongin suunnittelemia. Lähettimeen oli liitetty SCR-271- tutkan modifioitu 4 kW:n pääteaste (myöhemmin 50 kW). Vaikka tutkan tekniikka oli lähinnä sarjavalmistesta sotaylijäämälaitteistoa, kokonaisuus oli kuitenkin epävarma kyhäelmä.

Suorituskyvyn parantamiseksi vastaanottimen eteen lisättiin SCR-271:n modifiointisarjaan kuulunut 3,5 dB:n kohinaluvun RF-esivahvistin ja tutka-tyyppinen kipinävälillä toiminut T/R-vaihto korvattiin mekaanisella antennireleellä. Lähettimen käsi-avainnus sähkötysavaimella korvattiin säädettävällä elektronisella avainnuksella. Pulssin pituus oli 0,25 sekuntia. Antenni tuplattiin lisäämällä rinnalle toinen SCR-271:n 32-dipolinen heijastin, jolla saatiin antennin vahvistukseksi 24 dBd ja lähes megawatin säteilyteho, plus n. 6 dB maaheijastusvahvistusta (n. 3 MW ERP). Antenni oli vain atsimuuttisuunnassa kääntyvä, eli kokeilut oli tehtävä Kuun noustessa ja laskiessa. Teoriaan perustuneet laskelmat antoivat 50 Hz vastaanottokaistanleveydellä kuukaiuille 18 dB signaali-kohinaetäisyyden, mutta se oli teoriaa, ja kuukaikua ei vaan kuulunut.

Kokeita ja laitteiston hienovirtystä jatkettiin päivittäin, kunnes yhtäkkiä Kuun noustessa Camp Evansissa (N.J.) 10. tammikuuta 1946 klo. 11:58 kuunpinnasta heijastunut radiosignaali helähti 180- hertsin taajuisena kovaäänisestä Webbin ja Kauffmanin korviin ja piirtyi selvästi myös oskilloskoopin kuvaputkelle!

Kuuntele äänitallenne kuuheijastuskokeilusta🔊

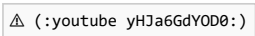
DeWitt oli juuri silloin ostamassa savukkeita eikä ollut paikalla. Kokeita jatkettiin ja tulos julkistettiin vasta kaksi viikkoa myöhemmin. Tuohon aikaan kajasteli mielessä myös Kuun käyttö radiolinkkinä, eli passiivisena heijastajana (vrt. Echo-satelliitit) ja ionosfääritutkimus. Tutkittaviin asioihin kuului myös selvittää miksi Kuusta heijastunut radiosignaali tuli kuuluville ja häipyi pois täysin epäsäännöllisesti.



Katso videotallenne kuuheijastuskokeilusta ja DeWittin kommentit

USA:n laivaston tutkimuskeskus, NRL demonstroi sähkötys-, (v. 1950), puhelähetys- (v. 1954) ja lopulta 4-kanavaista radiokaukokirjoitinyhteyttä (v. 1956) Washingtonista Kuun kautta Havaijille valtavalla 400 MW säteilyteholla, mutta tietoliikennesatelliittien tulo 1960-luvulla kuitenkin vei kiinnostuksen (sotilas)tietoliikenteen reitittämiseltä kuuheijastusta käyttäen. Kun USA:n suuret BMEWS- tutkat aloittivat toimintansa 1959, oli radiosignaalin heijastuminen kuunpinnasta jo päässyt unohtumaan tutkan suunnitteluvaiheessa MIT:n asiantuntijoilta, mikä aiheutti lokakuussa 1960 pikaista pohdittavaa NORAD:ssa Thulen ohjusvaroitustutkan yhtäkkiä sylkiessä näytöille satoja harhamaaleja.

USA:n avaruuspuolustus käyttää nykyisin bistaattista 216.980 MHz:n NAVSPASUR VHF-tutkajärjestelmää satelliittien ja avaruusromun kiertoratojen seuraamiseen ja rataelementtien päivitykseen. Myös Ranskalla on vastaava tutka, jonka signaali on hyvin vastaanotettavissa kuuheijastuksena taajuudella 143.050 MHz.



GRAVES-tutka pyyhkiä taivasta idästä etelän kautta länteen ja samalla pystysuuntaisesti. Kaiku kuuluu voimakkaimmin muutamia sekunteja pääkeilan osuessa Kuuhun, kuten videoleikkeessä on demonstroitu.

Projekti Dianaa pidetään yleisesti myös ensimmäisenä tutka-astronomisena kokeiluna ja DeWittii voidaan pitää tutka-astronomian isänä - joskin saksalaisten Würzmann- tutkakokeilu kuitenkin toi kuukaiut oskilloskoopin kuvapinnalle jo paria vuotta aiemmin?

DeWitt oli myöhemmin fotometristen muuttujatähtihavaintojen yhdyshenkilönä USA:ssa tähtitieteen harrastajien ja ammattilaisten välillä, sen minkä TV- ja radioaseman hallintotoiltaan, velvoitteiltaan ja muilta harrastuksiltaan ehti.

Unkarilaisen Zoltan Bayn kuututka, 1946

Tungsram-hehkulamppu- ja elektroniikkayhtiön tutkimusosaston päällikkönä toiminut unkarilainen fyysikko Zoltan Bay ehdotti maaliskuussa 1944 tutkan käyttöä tieteellisiin kokeisiin, joihin kuuluisi tutkakaiun ilmaiseminen Kuusta. Bayn omien laskelmien mukaan kaiku olisi niin paljon kohinatason alapuolella, että sitä olisi lähes mahdotonta ilmaista. Unkarin puolustusministeriö rahoitti sodan loputtua Standard Electricin valmistaman 120 MHz ylijäämätutkan, mutta Neuvostoliitto takavarikoi laitteet. Uusien tutkalaitteiden rakentaminen pääsi alkuun elokuussa 1945 ja tutka valmistui sodanjälkeisten ankeiden olosuhteiden takia vasta tammikuussa 1946. Kuukaiut ZoltanBay sai ilmaista helmikuussa 1946, vain muutamia viikkoja John DeWittin Diana-projektia myöhemmin.

Zoltan Bayn kuutuksessa ei käytetty kideohjattuja oskillaattoreita, kuten Dianassa ja siksi se taajuusvakavuus oli heikko ja tämä entisestään heikensi vastaanotettua kuukaikua. Bay kehitti ongelman ratkaisuun integraattorin, jolla kuukaiku nostettaisiin esiin kohinan alta. Tämä oli merkittävä teoreettinen innovaatio tutka-astronomian tulevaisuuden kannalta, joskin integraattorin toteutus oli melkoisen erikoinen.

Integraattori koostui KOH-kulometrikennoista (10 kpl), joita kommutoitiin kolmen sekunnin kiertoaajalla. Tämä aika kului radiosignaaleilta kulkea Kuuhun ja takasin. Kulometrit vapauttivat vetykaasua ilmaistun kuututkan vastaanottimen signaalitehon mukaisesti. Kun lyhyehkön lähetyspulssin (60 ms) kaiku palasi Kuusta vastaanottimeen ja ohjattiin synkronoidulla kierrolla toistuvasti aikaviiveen mukaisesti peräkkäisiin kennoihin, kohinan seassa vastaanotettua heikkoa tutkasignaaliimpulsseja keräytyi lopulta juuri tiettyyn kennoon. Kennosta numero 6 alkoi vapautua 4,4 % enemmän vetykaasua kuin muista kennoista, joihin kytketyt vain kohinatehoja. Kaasun määrän ero oli kuitenkin viisinkertainen satunnaiseen hajontaan nähden, joten kuukaiku tuli ilmaistuksi! Nykyisin integraattori toteutetaan tietokoneella digitaalisella signaalinkäsittelyohjelmistolla.

Varsinaisesti tieteellisesti hyödyllisiä kuuheijastuskokeita suoritettiin 20 MHz taajuudella 1948-alkaen, missä selvitettiin signaalinvoimakkuuden huojuntailmiötä, joita syntyi Kuun libraatiosta, sekä Maan magnetosfääristä (Faraday-polarisaatiokiertymä) ja ionosfääristä. Myös Jodrell Bankin kuututkan kaikuja avulla pääteltiin mm. Kuun pintamateriaalin ominaisuuksia jo 1950-luvulla.

Radioastronomian tutkimustyötä tehtiin sodan jälkeen lähinnä Australiassa (Parkes) ja Englannissa (Cambridge/Mullard, Jodrell Bank/Nuffield), jossa sodanaikaisesta tutkalaitteiden kehitys- ja havaintotyöstä haarautui radioastronomian tutkimus. USA ja Neuvostoliitto ehtivät radioastronomiaan kunnolla mukaan vasta 1950-luvun puolivälissä.

Janskyn ja Reberin havaitseman kosmisen radiosäteilyn pääteltiin olevan Linnunradan heikossa magneettikentässä kieppuvien elektronien aikaansaamaa synkrotronisäteilyä (Kiepenheuer, Phys. Review, 1950) Alfven & Herlofsonin ehdotuksen pohjalta. Synkrotronisäteilyn teoriaa kehittivät mm. Ginzburg, Shklovsky, Sokolov ja Ternov.

Erillisiä galaktisia säteilylähteitä havaittiin VHF-taajuuksilla: Cyg A vuonna 1946, Tau A, Vir A ja Cen A, v. 1947. Cas A 1948, Pup A 1949, M31, Cyg X ja Sgr A, v. 1950, jne. Cygnus A:n säteilyn voimakkuuden vaihtelua ihmeteltiin ja etsittiin optisia vastineita havaituille kohteille.

Hollantilaisen Van de Hulstin 15.4.1944 ennustama vetykaasun 1,4 GHz spektriviiva havaittiin ensin Ewenin ja Purcellin toimesta Harvardissa maaliskuussa 1951. Purcellille ajatus emissioviivan havaitsemisesta oli noussut esiin jo Los Alamosin ajoiltaan paremmin tunnetun I. Rabin (NMR:n keksijä) johtaman RLL:n (Radiation Research Laboratories) sota-ajan tutkalaitteiden kehitystyön yhteydessä, jossa Dicke keksi tunnetun radiometrin. Vetykaasun spektriviivan havaintojärjestely ei ollut mitenkään hohdokas. Havaintoa varten oli reilun metrin kokoinen lankuilla tuettu torviantenni nostettu erään Harvardin laboratorion käytävän ikkunasta ulos osoittamaan vinosti ylös taivaalle. Vastaanottimeen kytketyn piirturin lattialle suoltamalta piirturiliuskalta etsittiin päivittäin toistuvia säteilyvuon kohoumia linnunradan sivuuttaessa antennin keilan, kuten Jansky ja Reber olivat tehneet.

Vastaanotin käytti taajuudenvaihtojärjestelyä, jolla saatiin taustakohinan seasta ilmaistua heikot kapeakaistaiset spektriviivaemissiot. Vastaanottimen taajuutta heilutettiin 75 kHz verran 30 Hz tahdissa ja sen lisäksi keskitaajuuden annettiin hitaasti liukua ohi spektriviivojen taajuuden. Näin oskilloskoopin näytölle ilmaantui kaksi kohoumaa, joiden taajuus hitaasti muuttui. Projektin maksoi senaikaista rahaa \$500 ja työaikaa kului reilut kolmisen kuukautta.

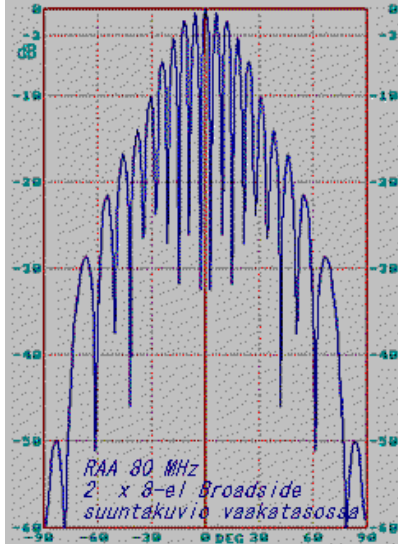
Sodan ollessa loppumaisillaan Jan Oort pohdiskeli mahdollisuudesta havaita vedyn radiosäteilyn 21-cm spektriviivaa. Keskusteltuaan ensin Philipsin laboratorion asiantuntijoiden kanssa, Oort joutui hylkäämään 20-metrin 600 MHz taajuudella toimivan peiliantenniprojektin kesäkuussa 1944. Philipsin laboratorio lupaili toimittaa 1,4 GHz:n vastaanottimen joskus sodan loputtua.

Hollannin vapauduttua miehityksestä Oort hahmotti projektiin riittävää rahoitusta ja kysyi mm. Grote Reberiltä mitä hänen peiliantenninsa valmistus oli maksanut. Kun tulipalokin vielä tuhosi ongelmallisen vastaanotinprojektin, kaikki oli aloitettava uudelleen alusta. Rahaa peiliantenniin ei ollut, mutta onneksi Hollannin PTT:n päällikkönä toimi radioamatööri ja astronomiasta kiinnostunut insinööri A. H. de Voogt. De Voogt oli saanut haallittua 8 kpl entisiä saksalaisten tutka-antenneja Kootwijk-radion alueelle, ajatuksena tehdä niillä havaintoja Auringon radiosäteilystä ja sen vaikutuksista lyhytaaltoradioyhteyksiin. Yksi näistä Telefunkenin valmistamista Würzburg-Riese UHF- IT-tulenjohtotutka-antenneista jouti NFRA:lle (Netherlands Foundation for Radio Astronomy, nyk. ASTRON) havaintokäyttöön. Lopulta toukokuun alkupuolella v.1951 C. A. Muller (PAOCAM) sai modifioitua valmiiksi Philipsin valmistaman 21-cm:n (1,4 GHz) vastaanottimen, joka liitettiin 7,5-metriseen paraboliantenniin. Vastaanotin käytti taajuudenvaihtotekniikkaa, jonka toimintaperiaate selvisi sapattivuottaan Harvardissa luennoimalla viettäneelle van de Hulstille "Doc" Ewenin vierailtua hänen luonaan huhtikuun puolivälissä 1951 ja heidän keskusteltuaan menetelmästä tunnin verran puhelimitse Oortin kanssa. Van de Hulst vahvisti Ewenin ja Purcellin vetykaasun emissioviivan havainnon 11.5.1951. Seuraavina vuosina Jan Oort kartoitti Van de Hulstin kanssa linnunradan vetykaasun jakaumaa, sekä suunnitteli uuden, suuremman 25-metrin peiliantennin rakennuttamista.

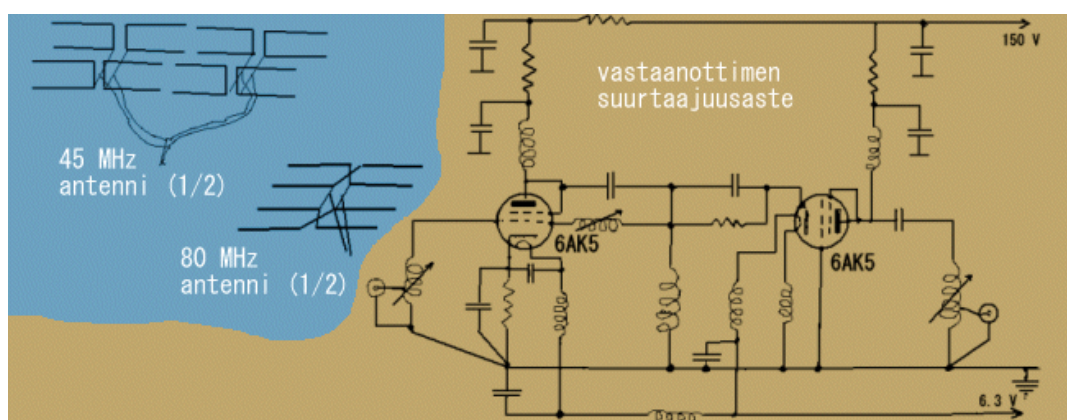
Australialaiset Christiansen ja Hindman saivat Harvardissa tutkijana toimineelta CISRO:n kollegaltaan selvityksen Ewenin käyttämästä havaintotekniikasta ja kasasivat pikaisesti Purcellin kehotuksesta oman vastaanottimensa ja tekivät vedyn spektriviivahavaintoja 12. kesäkuuta 1951, sekä täydensivät Oortin ryhmän työtä eteläisen taivaanpuoliskon vetyemissiokartoituksella.

Radioastronomia Suomessa 1949 ja 1952...

Suomen ensimmäiset radioastronomiset havaintoyritykset olivat, kuinkas muuten, tähtitieteestä kiinnostuneen ja TKK:lla opiskelunsa aloittaneen radioamatöörin, Jorma Riihimaan, OH8PX:n kokeiluja. Ilmajoella kotinsa takapihalle v. 1949 pystyttämällä 200 MHz Broadside-antennilla ja epäherkällä konvertterilla ei kuitenkaan havaintotuloksia syntynyt. Ilmeinen syy saattoi olla liian pieni antenni, vastaanottimen epäherkkyys ja korkean taajuuden valinta (200 MHz), jolla silloisella radioputkitekniikalla oli vaikeaa valmistaa herkkää vastaanotinta kotipajalla. Tuo taajuusvalinta johtui Riihimaan käsiin joutuneista amerikkalaisen radioastronomin, C. L. Seegerin tutkimuksista, joista oli kirjoitettu iltapäivälehdissä ja yritykseen kannustaneesta Seegerin vastauskirjeestä. Seegerin projekti käytti USA:ssa kahta isokokoista 200 MHz:n SCR-268 ylijäämäilmaoikeuslaitoksen dipolimatto-antennia. Onneksi Riihimaa pääsi kuitenkin heti alusta mukaan Jaakko Tuomisen v. 1952 aloitteesta perustettuun Helsingin yliopiston Radioastronomisen aseman rakenteluun ja mittaustoimintaan. (SRHS 3/1999)



Yliopiston Radioastronomisen Aseman antennit ja vastaanottimet rakennettiin Helsingin Viikkiin. Aseman rakentamisessa konsulttoitiin Martin Ryleä Cambridgen observatoriosta ja aseman valmistuttua tehtiin yhteistyötä skintillaatiomittauksissa. Vastaanottimet olivat pääasiassa omatekoiset ja aluksi verkkojännitteen vaihtelu ja sen regulointi-ongelmat aiheuttivat epävakautta mittaustuloksiin. Kahden 51 m etäisyydelle sijoitetun 80 MHz:n 8-elementtisen Broadside-antennin järjestelmä oli kytketty Rylen vaihe-interferometriksi kulmaerottelukyvyn aikaansaamiseksi (kuva ohessa).



Vastaanottimet olivat superheterodyne-tyyppisiä, joiden LC-välitaajuus-suotimilla saatiin 1 (80 MHz) ja 3 MHz (45 MHz) kaistanleveydet. Suurtajuusvahvistimissa oli jyrkät 6AK5 (EF95) pentodiputket. Sekoittimena EF50, jota LC-kytketty paikallisoskillaattoritriodi 6C4 injektioi. Välitaajuusvahvistimina 4 kpl EF50 pentodeja, joiden jälkeen EA50 ilmaisindiodi. Ilmaistu signaali ajettiin vielä ns. video/AGC-vahvistimen kautta (4 kpl EF50 pentodeja ja kaksoisdiodi tasasuuntaajana S-mittarille). Vaihekytkentävahvistimessa käytettiin samoja pentodeja. Teholähteessä +350 V tasajännitteestä tehtiin putkilla toteutetulla lineaarisella sarjaregulaattori-kytkennällä +250 V anodijännite. Antenneiden vaiheistuskaapeleina käytettiin 300-ohmin "lapamattoa" ja syöttöjohtoina 70-ohmin koaksiaalikaapeleita. Interferometrin ydin – vaihekytkinlaite, oli sähkömoottorilla pyöritetty ilmaeristeinen 230 pF säätökondensaattorikaksikko. Laitevajassa oli myös oskilloskooppi korjauksia ja säätöjä varten.

Ensihavainnot Cas A ja Cyg A kohteista tehtiin saman vuoden elokuussa. Piirturipaperille syntyi oikeanlaista jälkeä radiolähteen ohikulusta ensimmäisen kerran 2/3, 8, 1953. Interferometri-vastaanottimia oli kaksi, toinen 80 ja toinen 45 MHz:lle niihin kahdet antennit. 45 MHz antennirakenne oli myös dipolimatto. Vastaanotinlaitteistolla tutkittiin 80,5 MHz (myöh. 79 MHz) taajuudella em. kohteiden ionosfäärin aiheuttamaa skintillaatiota ja tehtiin havaintoja Auringon koronan radiosäteilystä v. 1954 auringonpimennyksessä, radiotähtien peittymistä Kuun taakse ja vuoden 1957 IGY- havaintoja. 45 MHz vastaanotto kärsi lentokoneiden ja autojen kipinähäiriöistä ja lyhytaaltolähteiden harmonisista lähteistä ja diatermialaitteiden vuotosäteilystä, kun 80 MHz:llä pahimmat ongelmat tulivat Eestistä lähetetyistä radiosondeista ja pääkaupunkiseudun kasvavasta 80 MHz ULA-radiopuhelinliikenteestä.

Asema siirrettiin 1960-luvun taitteessa mainittuja häiriöitä pakoon Keimolan kautta Metsähoviin, Kirkkonummelle, jonne rakennettiin 1960-luvun alkupuolella 16...20 ja v. 1966 20...40 MHz:n Helix-antenneja, joilla Riihimäen tutki Jupiterin dekametrisiä radioemissioita. Martti Tiuri ja TKK tuli noihin aikoihin mukaan Metsähovin radioastronomisiin mittauksiin. Tiurilla oli yhteyksiä mm. Ohio State University:n John Krausin kanssa - Kraushan oli Helix-antennin keksijä. Jupiter-havainnot loppuivat 1967 Riihimäen siirtyessä tutkimaan Jupiterin radiosäteilyä Boulderista, USA:sta käsin. Oulun yliopisto oli ollut mukana Jupiterin radiomittauksissa jo aiemmin ja Riihimäen palatessa Ouluun ennen 1970-luvun puoliväliä Kiiminkiin rakennettiin radio-observatorio, jonne pystytettiin kaksi ristipolaroitua logperiodista dipoliantennia 20...43 MHz taajuusvälille Jupiter-mittauksia varten.



Metsähovin Helix-antenni. Kuva: Pauli Töyrylä, OH2DV

Radioastronominen toiminta Metsähovissa tehostui vasta 1973, kun sinne rakennettiin yhdessä TKK:n kanssa moderni 13-metrinen millimetrialueen radioteleskooppi, jolla on tutkittu mm. Aurinkoa, kvasaareja ja molekyylien viivasäteilyä tähtienvälisistä pilvistä. Peili kupuineen on jo ehditty vaihtaa parempaan v. 1994 ja kattaa taajuusvälin 5...120 GHz.

Big Ear Observatory - surveystä SETlin

John D. Kraus (W8JK, sk.) tunnettiin radioharrastajapiireissä Helix-antennin, kulmaheijastajan ja ns. JK- antennin keksijänä. Ohio State Universityn (O.S.U.) elektroniikkaosaston johtaja tohtori Kraus oli kiinnostunut radioastronomiastakin ja rakensi yliopiston hallinnon tietämättä sen maille VHF-radioteleskoopin. Taivaankartoitus käynnistyi 250 MHz:n taajuudella elokuussa 1952 antenniryhmällä, jossa oli ensin 12 kpl Helix-antenneja, jota havaintotyön ohessa laajennettiin lopulta 96:een Helixiin kahden vuoden aikana. Kraus sai heti aluksi 207 eri kohdetta havaittua taivaalta, mukana useita ekstragalaktisia kohteita ja mittaussarjoista kertyi melko yksityiskohtainen kartta täydentäen Rylen 81 MHz ja Millsin 101 MHz kartoituksia.

Koko 1950-luku oli radioteleskooppien antenniratkaisujen suhteen ripeän kehityksen aikaa, jossa joko haettiin raaka-ainaa antennin pinta-alalla, tai lukumäärällä lisää herkkyyttä ja samalla kulmaerottelukykä, mutta vaihekytkentäisen interferometrian käyttö (mm. Ryle ja Mills) oli norkela tapa saada erittäin kapeita antennikeiloja vähällä antenniraudalla alemmillakin taajuusalueilla ja sitä monet observatoriot hyödynsivät.

Helix-antennijonon suunnattavuusominaisuudet, lisäpinta-alan hinta ja Helixien käytettävyys vain suppealla taajuusalueella sai Krausin kehittämään uudenlaisen radioteleskoopin. Siinä olisi kallistettava 110 m pitkä ja 21 m korkea suora heijastinpinta, josta nurmikentän päälle tehty metallilevy mattoa hipoen ja heijastellen, radioaallot heijastuisivat parabolisen kiinteän pystyverkkoseinämän kautta kentän yli - takaisin polttopisteessä olevaan vastaanottimen syöttötorveen. Rakenteella sai deklinaatiosuunnassa 65° säätövaran, rektaskension säätöä ei ollut, vaan käytettiin ohikulkumenetelmää ja antennin taajuuskaistaksi Kraus kaavaili 21...2100 MHz ja erottelukyvyyksi 9*40 kaariminuuttia (1,4 GHz) hyötysuhteena 45%. Käytännössä syöttörakennelma ei voisi olla noin laajakaistainen. Rakennustyö käynnistyi kesällä 1956, mutta Big Ear -radioteleskooppi valmistui vasta 1963 opiskelijoiden itse osittain rakentamana niukalla NSF:n (National Science Foundation) rahoituksella. Vastaanottimen parametrinen 1,4 GHz:n etuasteen teki O.S.U.:n entinen opiskelija Bellin Laboratoriossa. Vastaanottimessa oli nestetyyppijäähdytteen parametrinen vahvistin, millä saatiin systeemin kohinalämpötilaksi 120 Kelviniä. Kaistanleveydellä 8 MHz integrointiaika oli 12 s.

Havainto-ohjelma aloitettiin Andromedasta ja laajennettiin laitteiden valmistuessa koko antennin havaitsemalle taivaanalle ja kolmelle eri taajuudelle. Teleskoopin laajakaistaisuudesta huolimatta sitä kuitenkin käytettiin pääasiassa 1415 MHz spektriviivan taajuudella, joskin mukana olivat myös 620 ja 2650 MHz. Taivaankartoitustoimintaa tehtiin vuodesta 1965 vuoteen 1971 asti. 1971 julkaistussa Big Earin 1415 MHz -36°...+63° deklinaatio-alueen kartoituksessa oli 19620 kohdetta, joista 60 % ennen havaitsemattomia.

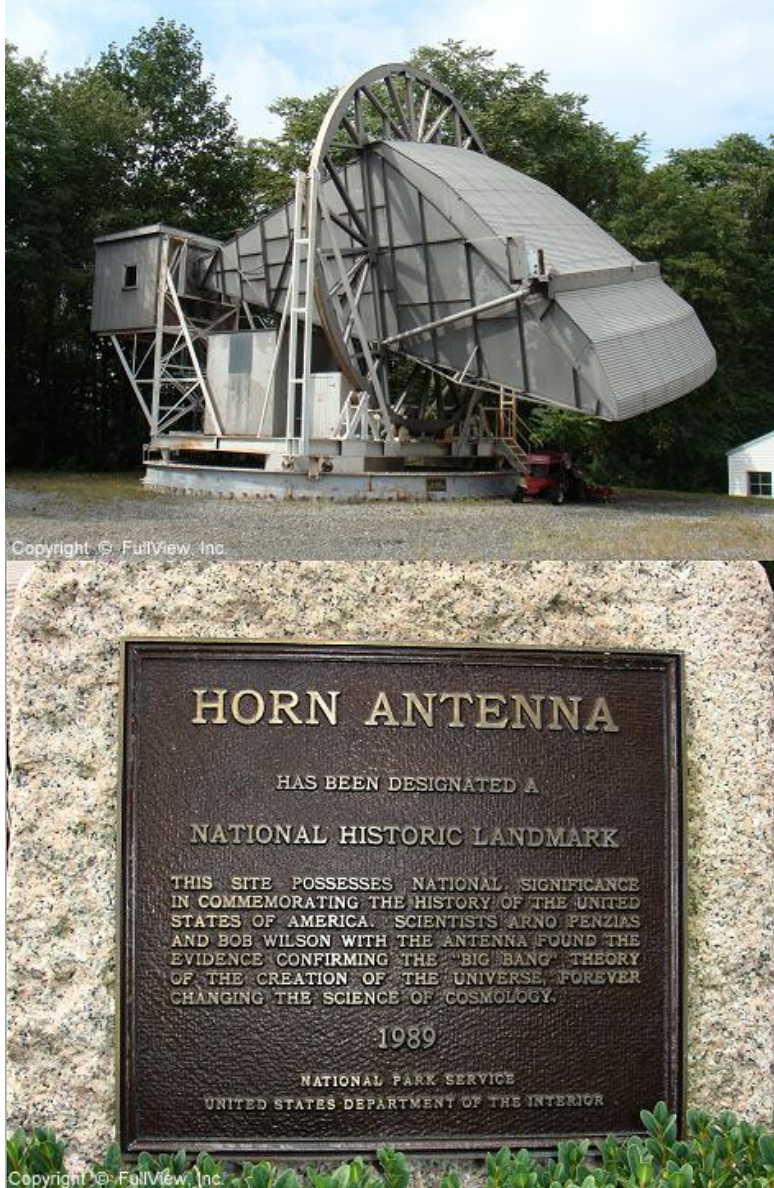
Big Ear jouti eläkkeelle - ruostumaan, tai muuhun käyttöön. Dixonin johdolla Big Earille asennettiin ensimmäinen 8-kanavainen 1420 MHz SETI-vastaanotin. Teleskooppeja hoitivat vapaaehtoiset tutkijat NASA:n ja yksityisten avustuksilla. SETI-havainnot jatkuivat Big Earilla teleskoopin purkamiseen (1998) asti. Tiede sai tehdä tilaa virkistystoiminnalle ja asuinrakennuksille ja SETI siirtyä toisille teleskoopeille. Erikoisin saavutus oli kuuluisan ja mysteerisen "Wow"-signaalin vastaanotto 1977. Kokonaan ei Krausin radioteleskooppimalli ole kadonnut, sillä Ranskassa Nançayn desimetrialueen radioteleskooppi on rakenteeltaan samanlainen Big Earin kanssa, mutta kooltaan nelinkertainen.

Big Ear-radioteleskoopin suunnittelija, tohtori John D. Kraus kuoli v. 2004 heinäkuussa 94 vuoden ikäisenä.



Kiinnostavien havaintotulosten innostamana suuria radioteleskooppeja alettiin rakentaa ympäri maailmaa 1950-luvun lopulla ja 1960-luvulla (Dwingeloo (yllä kuvassa), Westerbork, Jodrell Bank, Pulkova, Parkes, Green Bank), sillä kylmä sota ja kilpajuoksu avaruuteen helpottivat rahoituksen saamista. Monet näistä teleskoopeista ovat vieläkin käytössä, joitakin on annettu harrastajille entisöitäviksi ja joitakin on tuhottu ilman lupaa, tai luvalla niiden rakenteiden rapistuttua.

Uusilla tehokkailla radioteleskoopeilla löydettiin kvasaarit 1963 (M. Ryle) ja OH-spektriviiva.



Penzias&Wilsonin käyttämä torviantenni

Kolmen kelvinin taustasäteily löytyi (taas vahingossa Bell Labs:lla) 1965 kun tutkittiin mikroaaltoyhteyksiä tietoliikennesatelliitteihin. Tasainen taustakohina tuli kaikista suunnista taivaalta ja sen lopulta pääteltiin johtuvan itse alkuräjähdyksestä - kosmologisesti hyvin tärkeä löytö. Teoria, joka ennusti tällaisen säteilyn, oli kehitelty jo 1948 (A. Penzias ja R. Wilson, kuva 6-metrisestä torviantennista). Penzias mainitsee koko havaintolaitteiston antenneineen ja vastaanottimineen maksaneen v. 1962 \$25 000. Antennilaitteistosta on sittemmin tehty kansallinen monumentti, vaikka arvostusta kollegoiltaan sen paremmin ensihavainnosta, kun Nobelin palkinnosta ei herunut.

Pulsarit löydettiin Englannissa uudella metristen radioaaltojen (VHF) teleskoopilla 1967 (Jocelyn Bell). Pulsareja tunnetaan nyt jo yli tuhat.

NH_3 ja H_2O -spektriviivaemissiöt löydettiin 1968, sekä monimutkaiset interstellaaariset molekyylit millimetriaaltoalueelta 1970-luvulla. Radioastronomisissa tutkimuksissa on avaruudesta löydetty jo toistasataa erilaista molekyylä. Radioteleskooppeja on nykyisin ainakin 24:ssä eri maassa kattaen aaltopituudet 30 metristä millimetrialtoihin. Suurin osa maailman radioteleskoopeista on USA:ssa ja Australiassa.

Monet radioastronomit ja sitä edeltävän ajan radiotieteen tutkijat ovat saaneet tunnustuksena työstään ja löydöistään Nobelin fysiikan palkinnon: Guglielmo Marconi, Carl Ferdinand Braun, Sir Edvard Victor Appleton, Sir Martin Ryle, Anthony Hewish, Arno A. Penzias, Rober W. Wilson, Russel A. Hulse, Joseph Taylor jr.

Radioteleskooppien evoluutio on kulkemassa ohi mekaanisesti liikuttavista suurikokoisista heijastinpinnosta kohti (tasopinta-)rykelmiä, joiden vastaanottama radiospektri digitoidaan suoraan kussakin antennielementissä ja välitetään tietoverkon kautta supertietokoneklusterille, joka prosessoi massiivisesta bittivirrasta teleskoopin kaikille toimintataajuuksille ja taivaansuunnille radiosäteilyn ominaisuuksista kertovaa tietomassaa. Tällainen teleskooppirykelmä voi olla halkaisijaltaan miten suuri hyvänsä, kattaa hyvin laajan taajuusalueen, sillä on hyvin kapea keilanleveys, mutta se kuitenkin kattaa samanaikaisesti koko taivaanalan, eli on "suunnattu kaikkialle". Tämähän ei onnistu parabolipeiliantennilla.

Eurooppalaisessa LOFAR- projektissa antennien (25 000 kpl) kokonais-pinta-alaksi tulee muutamia kymmeniä neliökilometrejä, verkon maatihteelliseksi laajuudeksi on kaavailtu n. 350 km ja 30...240 MHz:n taajuuskaista peitetään.

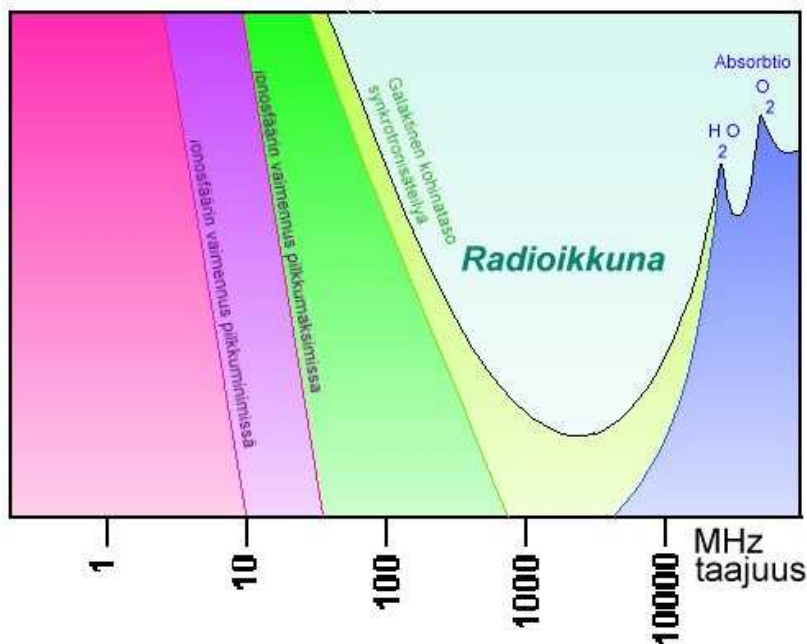
Taivas ja varsinkin Linnunrata näyttävät hyvin erilaisilta eri aallonpituuksilla havaittuna. Silminnähtävä ero on Linnunradan tason pölypilvien aiheuttamat mustat katvealueet valon aallonpituuksilla, jotka eivät kuitenkaan vaimenna radiotaajuuksia. Taivasta on kartoitettu eri radiotaajuuksilla lukuisissa eri projekteissa.

Kirjallisuutta:

- "The Evolution of Radio Astronomy", J.S.Hey. Science History Publications, 1973
- "Big Ear", by John Kraus, Cygnus-Quasar Books, Powell Ohio, 1976
- "Grote Reber and the First Radio Maps of the Sky", John Kraus, Cosmic Search, v.4, 1982
- "Classics in Radio Astronomy", W.T.Sullivan, ed., Cambridge Univ. Press, 1982
- "Serendipitous Discoveries in Radio Astronomy", Kellermann and Sheets, Eds., NRAO, 1983
- "The Early years of Radio Astronomy", W.T.Sullivan, ed., Cambridge Univ. Press, 1984
- "Grote Reber, founder of radio astronomy", John Kraus, J. Roy. Astron. Soc. Can., 1988
- "AA Radar History of World War II", Richard Rhodes, Taylor & Francis, 1999

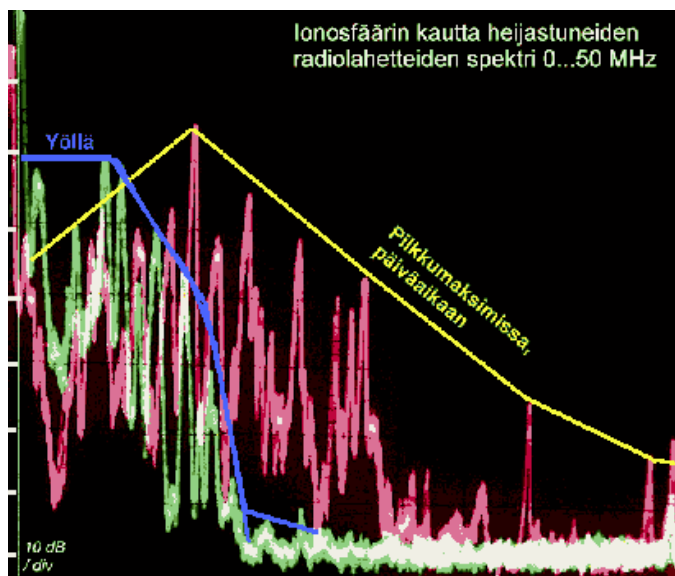
Radioiikkuna

Maapallon ilmakehän ja ionosfäärin ulkopuolella lentävillä satelliiteilla, tai Kuun pinnalta voidaan tutkia niin matalataajuisia kuin varsinkin hyvin korkeataajuisia radioemissioita, mm. kolmen Kelvinin taustasäteilyn jakaumaa. Koska tutkimussatelliittien lähettäminen avaruuteen on kallista ja hankalaa puuhaa ja laitteiden vioittuessa korjaaminen mahdotonta, suuri osa radioastronomisista havainnoista ja kaikki harrastajien tekemät havainnot on ainakin toistaiseksi tehty maan pinnalta.



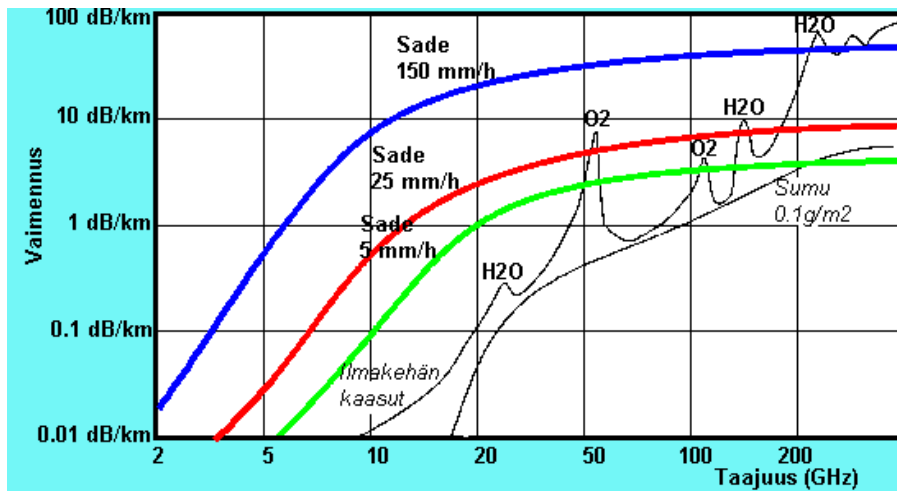
Valitettavasti koko radiospektriä ei maan pinnalta voida käyttää astronomisiin tarkoituksiin, koska ilmakehä ei läpäise kuin osia spektristä. Tämä ns. radioiikkuna alkaa HF-alueelta noin 3 MHz...30 MHz (aallonpituutena 100 m...10 m) tienoilta kohti mikroaaltoja alarajataajuuden riippuessa lähinnä Auringon aktiivisuudesta (Solar Flux), joka vaikuttaa ionosfäärin ($h = 40 \dots 1000$ km) elektronitiheyteen, vuorokaudenajasta, ionosfäärin tilasta (avaruussää), sekä radioaallon tulokulmasta.

Ionosfäärin yö-/päivävaihtelu 0-50 MHz taajuusvälillä.



Piikkuminimin aikaan ja varsinkin yöllä zeniitin suunnasta saapuvat n. 3 MHz taajuiset (80 m) radioaallot läpäisevät ionosfäärin, kun taas piikkumaksimin tienoilla päiväaikaan vastaava raja on n. 10...15 MHz (30...20 m). Läheltä horisonttia loivasta tulokulmasta saapuvat saapuville radioaalloille vastaavat rajat ovat n. 15 MHz ja n. 40 MHz, joiden alapuoliset taajuudet eivät yleensä pääse maan pinnalle asti. Samaan aikaan matalista tulokulmista vielä heijastuu radiolähteyksiä muutamien tuhansien kilometrien etäisyyksiltä haitaten avaruudesta saapuvan emission mittauksia. Radioiikkunan taajuusalaraja on luonteeltaan "veteen piirretty viiva", ja rajataajuuden yläpuolellakin esiintyy

vielä skintillaatiota, mutta jostakin HF-alueen yläreunasta alkaa radioikkuna avaruuteen ja sitä seuraavalla reilun kahden oktaavin levyisellä taajuusalueella voi (ainakin syrjäisellä radiohäiriöttömällä alueella) tehdä havaintoja yöllä ja päivällä säästä riippumatta.



Ilmakehän vaimennus mikroaalloilla. (Eri tekijöiden vaikutus on summattava)

Radioikkunan taajuusalueen yläraja on paljolti riippuvainen ilmakehän troposfäärikerroksen ($h < 10$ km) sisältämän veden määrästä. Sää, eli lähinnä sade, pilvet ja ilmankosteus alkavat vaikuttaa haittaavasti mikroaaltoalueen puolivälin paikkeilla (n. 10 GHz). Vesimolekyylit vaimentavat 22 GHz taajuudella ja sitä korkeammilla taajuuksilla on jo pelkästään ilman kaasumolekyyleistä paikoin haittaa, kunnes n. 500 GHz (0,6 mm) yläpuolella ilmakehä ei juuri enää läpäise radioaaltoja, ennen kuin vasta infrapuna-alueella, mutta sehän ei ole enää radiosäteilyä. Ei ihme, että alimillimetrialueen (yli 300 GHz) radioteleskoopit aina sijaitsevat vuoristoissa.

Taajuusallokaatiot

Lähes kaikki taajuusalueet olisivat radioastronomiaan käyttökelpoisia, mutta koska radiotaajuudet ovat rajallinen luonnonvara, radiotaajuuksia on jaettu tasapuolisesti kaikkien käyttöön ja erilaisiin tarkoituksiin, myös radioastronomialle. Osalla niistä on radioliikennettä rajoitettu, tai erämaa-alueille sijoitettujen teleskooppien ympäristöissä jopa kielletty häiriötason alentamiseksi. Koska radioteleskooppeja on maantieteellisesti melko harvassa, on taajuusallokaatioissa kansallisia poikkeamia. Kontinuumisäteilyn mittausaajuudet eivät ole kovin kriittisiä ja ne onnistuvat kapeammassakin raossa. Molekyyliivivahavainnot kuitenkin vaativat Doppler-siirtymien vuoksi leveitä taajuuskaistoja, mikä vaikeuttaa tilannetta, koska esim. 1 GHz tienoilla ja sen yläpuolella olisi matkaviestin-, Internet- ja satelliittioperaattoreiden ja laitevalmistajien puolelta suuria tarpeita saada allokoiduksi "rahasammoille" lisäkaistoja.

Jos halutaan hakea oikeutusta radioastronomiaan varatuille taajuuskaistoille, kannattaisi muistaa, että radioastronomian keksintöjä on sovellettu menestyksekkäästi muillekin aloille, mm. lääketieteeseen, meteorologiaan ja aeronomiaan. Havaintolaitteiden jatkuva kehitystyö edistää samalla elektroniikkaa ja tietojenkäsittelyä. Radioastronomian perustarkoitus kuitenkin on, kuten astronomian yleensäkin, lisätä tietoa meitä ympäröivästä maailmankaikkeudesta ja etsiä vastauksia sen peruskysymyksiin.

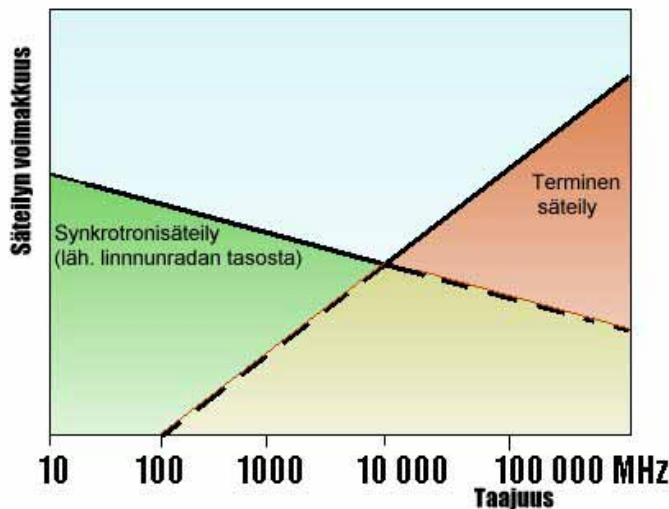
- 13,36-13,41 MHz. * Auringon ja Jupiterin dekametrinen säteilyn havainnot.
- 25,55-25,67 MHz. Auringon ja Jupiterin dekametrinen säteilyn havainnot.
- (37,50-38,25 MHz. * Jupiterin dekametrinen säteilyn havainnot.)
- (73-74 MHz. Aurinkotuulen havainnot.)
- (79,25-80,25 MHz. * Aurinkotuulen vaikutusten havainnot aurinkokunnassa.)
- (150,5-153 MHz. * Aurinko ja pulsarihavainnot.)
- (322-328,6 MHz. * Pulsarit, radiogalakset ja deuteriumin 327.4 MHz spektriviivan havainnot.)
- (406,1-410 MHz. * Kontinuumisäteily ja pulsarihavainnot.)
- (608,5-614 MHz. * Kontinuumisäteily ja pulsarihavainnot.)
- (1330-1400 MHz. * Punasiirtyneen vedyn spektriviivan havainnot.)
- 1400-1427 MHz. Vedyn 21 cm (1420.4057 MHz) spektriviivan havainnot.
- 1660-1670 MHz * OH-radikaalimolekyylin 1665, 1667 ja 1612 MHz spektriviivan havainnot, prototähdet.
- 1718,8-1722,2 MHz. * OH-radikaalimolekyylin 1720 MHz spektriviivan havainnot, prototähdet.
- 2690-2700 MHz. * Kontinuumisäteilyn, ionisoituneiden vetypilvien ja galaksin diffuusin säteilyn ja ytimen rakenteen mittaukset, polarisaatiomittaukset, Auringon aktiivisuutta kuvaavan säteilyfluxin pitkäaikaiset mittaukset 2,8 GHz:llä.
- (3,1-3,4 GHz. CH-molekyylin 3263, 3335 ja 3349 MHz spektriviivojen havainnot.)
- 4,8-5 GHz. * Ionisoituneiden vetypilvien, pulsarijäänteiden ja formaldehydin (H_2CO) 4,82966 GHz spektriviivan havainnot.
- 10,68-10,7 GHz. Kvasaarihavainnot.
- (14,4-14,5 GHz. * Kvasaarihavainnot ja formaldehydin (H_2CO) 14,4885 GHz spektriviivan havainnot.)
- 15,35-15,40 GHz. * Kvasaarihavainnot.
- 22,21-22,5 GHz. * Punasiirtyneen veden (H_2O) spektriviivan havainnot, kontinuumimittaukset, Auringon radiosäteily.
- 23,6-24,0 GHz. Ammoniakkin ja monen muun molekyylin spektriviivojen, sekä kontinuumisäteilyn havainnot.
- 31,3- 31,5 GHz. Kontinuumisäteilyn havainnot.
- 31,5-31,8 GHz. * Kontinuumisäteilyn havainnot.
- 36-37 GHz. HC_3N ja OH-molekyylien spektriviivojen havainnot, kontinuumisäteilyn havainnot, Aurinkotutkimus.
- 42,5-43,5 GHz. * VLBI, kontinuumimittaukset, Aurinkotutkimus.
- kaistoja 49, 76, 78-105 GHz taajuusalueilta. * Molekyylien SiO , CS , H_2CO , CH_3 , OH , OCS spektriviivojen havainnot.

- kaistoja 105, 140, 164, 174, 182, 186,2, 217 ja 265 GHz taajuusalueilta.
- Molekyyliden SO, SO₂, SiO, SiS, HCN, HCO, HCO⁺, HC₃N, HC₂, CH₃, CH₂, OH, CN, CO₃OCH₃ spektriviivojen havainnot.
- VLBI mittauksia suoritetaan kaikilla radioastronomian taajuusalueilla välillä 322 MHz...43 GHz.

* Kaista jaettu muun radioliikenteen kanssa. Sulkuihin merkityt allokatiot eivät ole voimassa Suomessa.

Radiosäteilyissä on eroa!

Säteilylähteet voidaan jakaa eri tyyppeihin niiden pinta-alojen mukaan, pistemäisistä lähteistä taustasäteilyyn.



Kaikista säteilylähteistä tulee yhtä aikaa useampaa eri säteilymekanismien tuottamaa radiosäteilyä ja niiden mukana seassa on lisäksi taustasäteily komponentti. Eri säteilylajien voimakkuudet muuttuvat havaintotaajuuden muuttuessa jokaiselle kohteelle ominaisella tavalla. Kohteen radiosäteilyn ominaisuuksissa, kuten voimakkuudessa, spektrissä ja polarisaatiossa, voi ilmetä merkittäviä ajallisia vaihteluja.

Avaruudesta tuleva radiosäteily voi olla kontinuumisäteilyä

1. Lämpösäteily (thermal emission), joka on lämpöenergian aiheuttamaa ja laajakaistaista (spektri mustan kappaleen lämpösäteilyn mukainen) ja ei ole luonteeltaan polarisoitunutta.
2. Syklotronisäteilyä. Magneetti-, tai joskus sähkökentän kiihdyttämä varattu hiukkanen säteilee radioaaltoja.
3. Synkrotronisäteilyä. Magneettikentän kiihdyttämä relativistinen elektroni säteilee radioaaltoja kulkusuuntaansa. Säteily on polarisoitunutta ja ilmenee yleensä rajoittuneella kaistalla HF/VHF/UHF-taajuusalueilla.
4. Terminen jarrutussäteily. Kuumat ionisoituneen vedyn alueet.

tai spektriviivasäteilyä:

1. Masersäteilyä. Atomien pitkäaikaisen viritystilän purkautuminen, emissiot mm. 1,6, 8 ja 22 GHz:llä.
2. Atomien ja molekyylien emissiospektriviivoja (tai absorptio-), jotka aiheutuvat atomin energiatilan, tai molekyylin rotaation muutoksesta. Ne ovat ilman Doppler-siirtymiä kapeakaistaisia.

Radiolähteitä ovat mm. (suluissa pääasiallinen säteilyn tyyppi):

- Aurinko, Jupiter ja Saturnus (1, 3)
- kuumat ionisoituneen vedyn alueet (4)
- tähtienväliset molekyylipilvet ja pöly (3,5,6)
- supernovajäänteet (3) (esim. Cas A)
- pulsarit (neutronitähdet) (3, 5) (esim. PSR 0329+54)
- oma Linnunrata, radiogalakset (3) (esim. Cyg A)
- kvasaarit (3)
- komeetat (6)
- kosminen 3 K taustasäteily (1)
- kuut ja planeetat (1)

Spektriviivaemissioihin ja varsinkin SETlin käytetään hyvin kapeita vastaanottimen kaistanleveyksiä, jopa millihertsejä, kun taas kontinuumisäteilyä on hyödyllisempää mitata megahertsien kaistanleveyksillä taajuusalueesta ja muista tekijöistä riippuen.

Lämpökohinan havaitsemiseen soveltuu parhaiten yksi yksittäinen antenni. Muihin lähteisiin käytetään usein interferometrejä.

Ammattilaisten harjoittamaan radioastronomiaan vaaditaan yleensä suurikokoisia ja kalliita erikoislaitteita. Tämähän on yleistä tieteellisen tutkimuksen huipulla. Radioastronomisten laitteiden kehittyneisyyttä kuvaa niiden kyky erottaa signaaleja, jotka ovat 60 dB (1/1 000 000) alle vastaanottimen oman kohinatason. Harrastajilla tämä raja on n. 30 dB (1/1000). Vertailun vuoksi mainittakoon, että normaali radiolähetyksen on välttämättä kuunneltavissa, kun signaali on 20 dB (100/1) yli vastaanottimen kohinatason.

Herkkyuden ohella toinen ongelma on kulmaerotuskyky. Suurin UHF-alueella toimiva radioteleskooppi on NRAO:n kiinteä 300 m peiliantenni Arecibossa. Silläkään ei päästä kovin suureen erotuskykyyn, eikä sen pintatarkkuus riitä mikroaalloille.



Kuva: NRAO

Yhdistämällä useampien vierekkäisten radioteleskooppien signaalit (synteesiapertuuri) saatiin erotuskykyä parannettua huomattavasti (VLA). Sen jälkeen kehitettiin interferometriteknikka, joka perustuu atomikellojen käyttöön aikareferenssinä useammalla eri puolilla maailmaa sijaitsevalla teleskoopilla (VLBI) ja näin erotuskyky parani kaarisekunnin tuhannesosaan. Radioaalloilla on monia etuja: radioaallot läpäisevät sumut, joita valo ei läpäise ja näiden takaa on löytynyt mm. uusia galakseja ja havaittu runsaasti muutakin uutta ja mielenkiintoista. ESF:n [Radioastronomian käsikirja](#) on verkossa PDF-dokumenttina.

⚠ (:youtube 68y0EjAz9Sg:)

Erinomainen kokoelma radioastronomiaan liittyvää materiaalia löytyy [NRAO:n](#) kotisivulta. Kuvia [koko taivaasta eri aallonpituuksilla](#) tarjoaa NASA:n Goddardin avaruuslentokeskus. [AstroWeb](#) antaa lisälinkkejä asiaan.

Suunnitteilla, rakenteilla olevia, tai jo osittain toimivia radioteleskooppeja:

- ALMA - Atacama Large Millimeter Array, 30...950 GHz, 64 kpl
- LMT - Large Millimeter Telescope, 75...350 GHz, 50 m
- SRT - Sardinia Radio Telescope, 0,3...100 GHz, 64 m
- FAST - Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope, 70 MHz...3 GHz, 300 m
- ATA - Allen Telescope, 0,5...11,2 GHz, 42 (305) kpl
- SKA - Square Kilometer Array, 150 MHz...25 GHz, 1 km²
- MWA - Mileura Widefield Array, 90...250 MHz, 8 km²
- PaST - Primeval Structure Telescope, 70...200 MHz, 30 km²
- LOFAR - Low Frequency Array, 10...90 MHz ja 110...220 MHz, apertuurisynteesi, 350 km
- LWA - Long Wavelength Array, 10...88 MHz, apertuurisynteesi, 400 km