

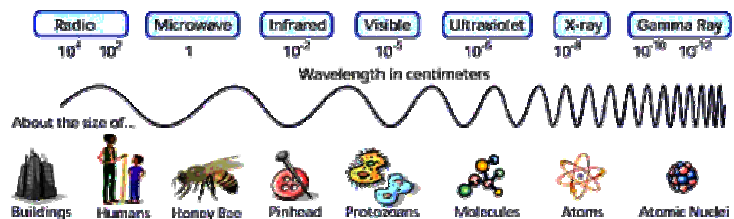
# NOCIONS ELEMENTALS DE RADIOASTRONOMIA

## COM FUNCIONA LA COMUNICACIÓ PER RÀDIO

- Una ona sonora es produeix amb una freqüència entre 5 Hz i 20 kHz.
- L'ona sonora equival a una ona de pressió viatjant a través de l'aire.
- Un micròfon converteix aquesta ona sonora en un senyal elèctric.
- L'ona elèctrica que viatja a través del cable del micròfon és anàloga a l'ona sonora original.
- L'ona elèctrica es fa servir per codificar o modular una ona de ràdio "portadora" d'alta freqüència. L'ona portadora, per ella sola, no inclou cap informació sonora fins que no ha estat modulada.
- El senyal elèctric pot modular l'ona portadora en amplitud (amplitud modulada) o bé en freqüència (freqüència modulada).
- El senyal es transmet a través d'una antena de radiodifusió.
- Un aparell de ràdio té una *antena* que detecta el senyal transmès, un *sintonitzador* per recollir la freqüència desitjada, un *desmodulador* per extreure l'ona del so original del senyal transmès, i un *amplificador* que envia el senyal als altaveus. Els altaveus converteixen el senyal elèctric en vibracions físiques (el so).

## QUÈ ÉS LA RADIOASTRONOMIA?

Els nostres ulls detecten la llum. La llum consisteix en ones electromagnètiques i els diferents colors de la llum són ones electromagnètiques de diferent longitud. La llum visible només cobreix una petita part de les longituds d'ona existents.



Les ones de ràdio són ones electromagnètiques de longitud d'ona més llarga que la de la llum. Durant segles, els astrònoms estudiaven el cel només mirant els objectes i, més tard, fent fotografies. Molts objectes astronòmics emeten ones de ràdio, però això no es va descobrir fins al 1932.

Els cossos celestes emeten ones de ràdio a través de diferents processos, com:

- Radiació tèrmica dels cossos sòlids, com els planetes.
- Radiació tèrmica o *bremstrahlung* (literalment "radiació de frenada") de gas calent en el medi interestel·lar.
- Radiació de línia espectral de transicions atòmiques i moleculars en el medi interestel·lar o en l'embolcall gasós al voltant de les estrelles
- Radiació sincrotó d'electrons relativístics en camps magnètics dèbils.
- Radiació polsant resultant de la ràpida rotació de les estrelles de neutrons voltades per un camp magnètic intens i electrons energètics.
- Radiació procedent de màsers a l'espai.

Les protuberàncies i les taques solars són fonts intenses d'emissions de ràdio. El seu estudi permet preveure les perturbacions que poden causar en les comunicacions de ràdio a la Terra.

Els radiotelescopis permeten mesurar la temperatura superficial dels planetes del SS i d'alguns dels satèl·lits de Júpiter i Saturn i les radioobservacions han revelat l'existència d'intensos cinturons de Van Allen (\*) al voltant de Júpiter.

Els cinturons de Van Allen són dos anells en forma de dònut que volten la Terra i que estan formats per partícules carregades elèctricament. Aquestes partícules són procedents del vent solar i hi estan confinades pel camp magnètic de la Terra. el primer va de 2.000 a 5.000 km i conté principalment protons i el segon és a 16.000 km, fa 6.000 km de gruix i conté principalment electrons (altres informacions donen diferents distàncies, el primer de 800 a 6.000 km i el segon de 25.000 a 36.000). Van ser descoberts respectivament pel primer satèl·lit EUA Explorer 1 (1958) i pels satèl·lits Pioneer 1 a 3 (també 1958).

Hom observa l'emissió contínua en banda ampla, en tot l'espectre de la radiofreqüència d'una gran varietat d'estrelles, especialment binàries, emissores de raigs X i altres estrelles actives, de romanents de supernova i de camps magnètics i electrons relativístics en el medi estel·lar.

Les ones de ràdio travessen la major part del gas i pols a l'espai i l'atmosfera terrestre amb poca distorsió. Per això els radioastrònoms poden obtenir imatges més clares de les estrelles i les galàxies que les que es poden obtenir amb una observació òptica.

Amb radiotelescopis hom ha descobert a l'espai més de 140 molècules diferents, algunes de tan conegudes com vapor d'aigua, formaldehid, amoníac, metanol, etanol i diòxid de carboni.

La important línia espectral de l'H atòmic, a 1.421,405 MHz (21 cm) s'utilitza per determinar el moviment dels núvols d'H a la Via Làctea i a d'altres galàxies. Això es fa mesurant el canvi de la longitud d'ona en les línies espectrals per l'efecte Doppler.

A partir d'aquests mesuraments s'ha vist que les velocitats de rotació dels núvols d'H varien amb la distància al centre galàctic. I a partir d'aquestes dades de velocitat es pot estimar la massa de la galàxia espiral, la qual cosa va permetre les primeres conjectures sobre l'existència de la matèria fosca.

Hi ha objectes celestes que emeten radiació més intensa a longituds d'ones de ràdio que a les de la llum visible.

## MECANISMES DE L'EMISSIÓ DE RADIOONES

### Introducció: Ones de llum i l'espectre electromagnètic

La llum consisteix en ones electromagnètiques. Una ona electromagnètica es compon d'un camp elèctric i un camp magnètic que oscil·len conjuntament. Els dos camps són perpendiculars l'un a l'altre i l'ona viatja en la direcció perpendicular als respectius plans d'oscil·lació.

Aquestes ones també es poden considerar com unes partícules anomenades fotons; paquets d'energia sense massa que viatgen a la velocitat de la llum. De fet, la radiació electromagnètica es comporta al mateix temps com una ona i com una partícula.

Les característiques de les ones electromagnètiques són la longitud d'ona ( $\lambda$ ) o distància entre dues ones consecutives, la freqüència ( $f$ ) en Hertz o nombre d'oscil·lacions per segon, i l'energia ( $E$ ) de cada fotó. La relació entre aquestes 3 magnituds és aquesta:

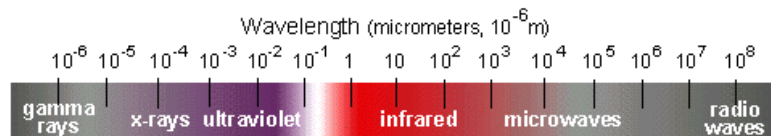
$$\lambda = c/f = hc/E \quad \text{o bé} \quad E = f \cdot \lambda$$

Essent  $c$  la velocitat de la llum =  $3 \cdot 10^8$  m/s, i  $h$  la constant de Planck =  $6,626076 \cdot 10^{-34}$  Joule\*s.

És remarcable que totes les formes de radiació electromagnètica viatgen a la velocitat de la llum, independentment de la seva longitud d'ona, freqüència o energia. Com que l'energia d'una ona electromagnètica qualsevol és directament proporcional a la seva freqüència i

inversament proporcional a la seva longitud d'ona, com més elevada és l'energia d'una ona més elevada és la seva freqüència i més curta és la seva longitud d'ona

Les diferents longituds d'ona de la radiació electromagnètica actuen diferentment sobre diferents materials, com p. ex. els nostres ulls o els detectors dels telescopis. L'anomenada llum visible fa que els nostres ulls vegin els colors. Ones més curtes com les dels raigs X poden passar a través del nostre cos. Ones més llargues com les infraroges no es detecten amb els ulls però es poden notar com a calor. Les ones més llargues de totes són les de ràdio, amb longituds que van d'1 mm a 100 km.



La regió de les ones de ràdio es divideix també en diferents "bandes", detallades en la taula següent:

Banda	Longitud d'ona	Freqüència
P-band	90 cm	327 MHz
L-band	20 cm	1,4 GHz
C-band	6,0 cm	5,0 GHz
X-band	3,6 cm	8,5 GHz
U-band	2,0 cm	15 GHz
K-band	1,3 cm	23 GHz
Q-band	7 mm	45 GHz

Els electrons (i també qualsevol altra partícula carregada elèctricament) emeten radiació electromagnètica quan són accelerats, o sigui quan canvien de velocitat o de direcció. En general, la radiació electromagnètica s'emet de dues maneres: Emissió tèrmica, que depèn de la temperatura de l'objecte, o bé emissió no tèrmica, que no depèn de la temperatura de l'objecte. Així podem classificar en dos apartats els tipus de radiació enunciats al principi.

Entre la primera manera tenim:

- L'emissió del cos negre o radiació tèrmica dels cossos.
- El bremsstrahlung o radiació tèrmica de gas calent en el medi interestel·lar.
- L'emissió de línia espectral de transicions atòmiques i moleculars en el medi interestel·lar o en l'embolcall gasós al voltant de les estrelles.

Entre la segona manera tenim:

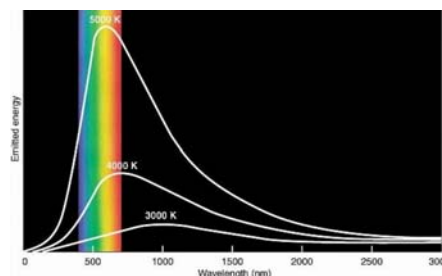
- La radiació sincrotó d'electrons relativístics en camps magnètics dèbils.
- L'emissió geosincrotó resultant de la ràpida rotació de les estrelles de neutrons (púlsars) voltades per un camp magnètic intens i electrons energètics.
- L'emissió amplificada de màsers a l'espai.

### Emissió tèrmica:

#### Emissió del cos negre

L'emissió tèrmica segurament que és la forma més corrent de radiació electromagnètica. Qualsevol objecte o partícula que tingui una temperatura per sobre del zero absolut emet radiació tèrmica. La temperatura de l'objecte fa que els seus àtoms i molècules es moguin girant i topant entre elles. Com que aquests canvis de direcció són equivalents a una acceleració, per això emeten radiació electromagnètica. La intensitat de la radiació depèn de la temperatura de l'objecte i està repartida en tot l'espectre, però no d'una manera uniforme. Això es palesa p. ex. veient que els cossos a una determinada temperatura emeten calor i a una temperatura més alta emeten llum visible. D'això els científics en diuen radiació del cos negre.

Un cos negre és un objecte hipotètic que absorbeix completament la radiació que rep i que no en reflecteix gens. Aquest objecte assoleix una temperatura d'equilibri i radia energia de tal manera que la intensitat màxima d'aquesta energia ocorre a una longitud d'ona que només depèn de la seva temperatura. Notem que a temperatures més baixes, els objectes emeten més proporció de la seva radiació a una longitud d'ona més llarga, i inversament.



La unitat de temperatura és el Kelvin, sense el signe ° del grau, que equival a la temperatura de l'escala centígrada més 273,15, o sigui comptant graus del mateix valor però a partir del zero absolut.

Els objectes a menys de 1.000 K emeten més radiació infraroja que llum visible, com la Terra o les nanes marró (objectes massa massius per ser planetes però no prou massius per ser estrelles). Els objectes més calents, com les estrelles, emeten sobre tot llum visible. Els objectes molt calents emeten sobre tot radiació ultravioleta, com les nanes blanques (estrelles moribundes que ja han cremat tot l'H dels seus nuclis).

El Sol i les altres estrelles es poden considerar com a cossos negres emissors, i mirant la freqüència o "color" de la radiació que emeten, els científics poden esbrinar la seva temperatura. P. ex. les estrelles més fredes es veuen vermelles i les més calentes van del blau al blanc.

Un dels millors exemples d'un cos negre "perfecte" és la Radiació Còsmica de Microones Fons de l'univers. Aquesta radiació omple tot l'univers, es va alliberar durant l'explosió del Big Bang i s'ha anat refredant durant 15.000 M d'anys. Avui dia és tan freda (només 2,725 K), que la major part d'aquesta radiació es detecta en longituds d'ona de ràdio de pocs centímetres (per això és anomenada radiació de microones. Els astrònoms van poder estudiar l'espectre d'aquesta radiació gràcies al satèl·lit COBE (COsmic Background Explorer).

La naturalesa d'aquesta radiació concorda molt acuradament amb les prediccions de la teoria del Big Bang, la qual cosa s'ha considerat com un poderós argument en favor d'aquesta teoria. La sonda WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) llançada el 2001 ha estudiat aquesta radiació encara amb major detall, mirant de detectar la possible irregularitat o manca d'uniformitat en la distribució d'aquesta radiació.

### Bremsstrahlung (radiació de frenada)

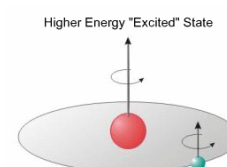
Una altra forma d'emissió tèrmica ve del gas ionitzat. Els àtoms del gas s'ionitzen quan els seus electrons els són arrencats i es converteixen en un conjunt de partícules movent-se dintre d'un gas ionitzat o "plasma", que és el quart estat de la matèria al costat dels estats sòlid, líquid i gasós. Quan això ocorre, les partícules carregades acceleren els electrons i el núvol de gas emet radiació contínuament. Aquest tipus de radiació és l'anomenat *bremsstrahlung*.

En la figura adjunta es veu l'emissió d'un fotó quan un electró (verd) carregat negativament canvia de direcció (o sigui s'accelera) degut a la proximitat d'un ió carregat positivament (vermell). Això ocorre en el gas ionitzat de les regions formadores d'estrelles i en els nuclis galàctics actius.



### Emissió de línia espectral

Aquesta emissió ve de la transició dels electrons en àtoms d'un nivell d'alta energia a un nivell d'energia més baix. En aquest moment s'emeten un fotó d'una energia equivalent a la diferència entre la dels dos nivells. Aquesta emissió es mostra mitjançant una línia discreta a l'espectre electromagnètic.



Una línia espectral important que estudien els radioastrònoms és la línia de 21 cm de l'H neutre. L'àtom d'H consisteix en un electró orbitant al voltant d'un protó en el nucli. El protó i l'electró tenen un *spin* o moviment de rotació. En el nivell d'energia més baix, els spins de les dues partícules són de sentit contrari i quan l'àtom està excitat, p. ex. per haver absorbit energia o bé per topiar amb altres àtoms, l'*spin* de l'electró es capgira i coincideix amb el del protó. Quan l'àtom retorna al seu estat inicial, perd l'escreix d'energia i emet un fotó de 21 cm de longitud d'ona, en la regió de ràdio de l'espectre.

### **Emissió no tèrmica:**

#### **Radiació sincrotó**

La radiació no tèrmica no té una corba característica com la radiació del cos negre, sinó que és ben diferent. La radiació sincrotó procedeix de l'acceleració de partícules carregades en un camp magnètic, especialment en el cas dels electrons.

Quan un electró troba un camp magnètic es mou en una helicoïdal al seu voltant més que no pas a través seu, de manera que té un moviment accelerat (almenys quant al canvi de direcció) i per això emet radiació. La freqüència d'aquesta radiació és proporcional a la velocitat de l'electró, depenent de la seva velocitat inicial o bé de la intensitat del camp magnètic.



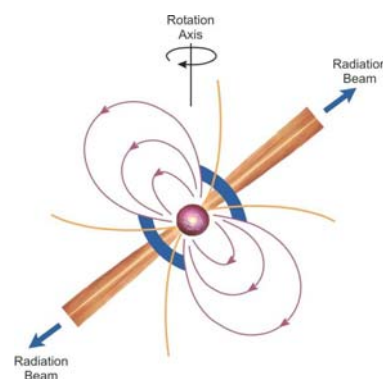
Perquè aquesta radiació sigui rellevant des del punt de vista astronòmic, cal que els electrons viatgin a velocitats pròximes a les de la llum (electrons relativístics). La radiació emesa per electrons més lents s'anomena radiació ciclotró, quasi indetectable astronòmicament.

Mentre l'electró viatja al voltant del camp magnètic emet energia en forma de fotons. Com més extens és el camp magnètic més energia perd i, com a resultat, l'electró fa una helicoïdal més ampla al voltant del camp magnètic i emet radiació de longitud d'ona més llarga. Per això per mantenir una radiació sincrotó cal una aportació contínua de nous electrons relativístics, i això ocorre en les fonts d'energia molt potents, com els romanents de supernova, quàsars i altres formes de nuclis galàctics actius.

A diferència de l'emissió tèrmica, la radiació sincrotó és polaritzada. Quan mirem l'electró de costat sembla que va endavant i endarrera en línies rectes, i la radiació sincrotó té les seves ones alineades més o menys en el mateix pla.

#### **Radiació giosincrotó: Púlsars**

Una forma especial de la radiació sincrotó és la radiació giosincrotó emesa pels púlsars. Els púlsars provenen de la mort d'estrelles massives (de 8 a 15 masses solars). Quan se'ls acaba el combustible les seves capes exteriors es comencen a col·lapsar contra el seu nucli i es produeix una ona de xoc que provoca la massiva explosió anomenada supernova. Després de la supernova queda una estrella de neutrons enormement densa, d'un diàmetre de només pocs km per a una massa de l'ordre d'1,4 masses solars. En augmentar enormement la densitat, el camp magnètic de l'estrella s'intensifica enormement.



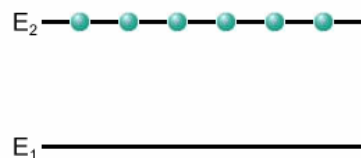
Una estrella de neutrons que gira ràpidament s'anomena púlsar. Un púlsar típic té un camp magnètic un bilió de vegades més intens que el de la Terra. Aquest camp accelera electrons i altres partícules subatòmiques a velocitats pròximes a la de la llum i causa l'emissió de feixos de radiació, incloent-hi ones de ràdio. Quan aquests feixos arriben a la Terra, detectem una pulsació procedent del púlsar, a un ritme que depèn de la seva velocitat de rotació. Alguns

púlsars giren relativament a poc a poc a poc, com el de la nebulosa del Cranc, a 33 rps, però n'hi ha d'altres que giren a centenars de rps.

### **Màsers**

Aquesta paraula és un acrònim de "**M**icrowawe **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation" o sigui amplificació de microones per emissió estimulada de radiació. És similar al làser, que fa el mateix a longituds d'ona pròximes a la llum visible. Els màsers espacials tenen lloc naturalment en núvols moleculars i en els embolcalls d'estrelles antigues. L'acció del màser amplifica unes línies d'emissió a una freqüència específica que serien originalment febles. En alguns casos la lluminositat d'una font en una simple línia de màser pot igualar l'energia de tot l'espectre sencer del Sol.

Els màsers requereixen que un grup de molècules s'elevin a un estat energitzat  $E_2$  com si es tractés d'una molla comprimida, i quan aquestes molècules s'exposen a una petita radiació a la freqüència adequada, salten totes al nivell d'energia inferior  $E_1$  i emeten un fotó de ràdio.



Aquest procés és propaga a les molècules veïnes i això provoca un allau d'emissió consistent en una línia monocromàtica i brillant de màser. Els màsers depenen d'una font d'energia externa, com una estrella veïna, per retornar les molècules a l'estat excitat i així el procés es va repetint.

Els primers màsers descoberts van ser els del radical OH, el SiO i l' $H_2O$ , a més del metanol ( $CH_3OH$ ), l'amoniac ( $NH_3$ ) i el formaldehid ( $H_2CO$ ).

## **HISTÒRIA DE LA RADIOASTRONOMIA**

### **Karl Jansky i el descobriment de les ones de ràdio còsmiques**

Karl Jansky va néixer el 1905 a l'estat d'Oklahoma i va morir el 1950. Es va graduar en física a la universitat de Wisconsin i va entrar a treballar als Laboratoris Bell, que eren una companyia de telefonia, a New Jersey.

Els Laboratoris Bell volien investigar la possibilitat d'utilitzar ones curtes, de 10 a 20 m, per a les comunicacions transatlàntiques, i van encarregar a Jansky que investigués les fonts de soroll que poguessin causar interferències.

Jansky va construir una antena de 100', que semblava un estenedor de roba, muntada sobre una plataforma giratòria equipada amb rodes de Fort-T, preparada per rebre ones de 14,5 m (20,5 MHz). En poder girar l'antena podia trobar la direcció de qualsevol senyal de ràdio rebut. Després de gravar senyals de totes direccions durant mesos, els anys 1931-32 Jansky va identificar 3 tipus de sorolls diferents:

- Temporals elèctrics pròxims.
- Temporals elèctrics llunyans.
- Un xiulet ferm i imperceptible d'origen desconegut.

Jansky va estar més d'un any investigant aquest darrer soroll i va veure que augmentava i disminuïa un cop cada dia, de manera que primerament el va atribuir al Sol.

Més endavant va veure que el punt de més intensitat s'allunyava del Sol i, més important encara, va veure que el senyal es repetia no cada 24h sinó cada 23h 56m. Això va demostrar que no provenia del Sol sinó de les estrelles fixes, o sigui de la Via Làctia, i que era més intens en direcció al seu centre, a Sagitari. Aquest descobriment, que va representar el naixement de la radioastronomia es va publicar el 1933 i va causar sensació.



Jansky hauria volgut prosseguir aquestes investigacions, i va proposar la construcció d'una antena de plat de 100' de diàmetre, però la seva empresa ja sabia el que volia i li van assignar una altra feina, de manera que ja no va tornar mai més a fer res en el terreny de la radioastronomia, ni tampoc ningú, malgrat l'interès suscitat, va prosseguir la recerca que ell havia començat. Eren els anys de la gran depressió econòmica i no hi havia diners disponibles per a nous projectes. L'antena original va desaparèixer durant els anys 50s.

Quan va morir el 1950 el seu descobriment encara no havia estat reconegut per la comunitat científica, potser perquè quan el va fer ningú no pensava que les ones de ràdio tinguessin res a veure amb l'astronomia. En rigor Jansky no era un astrònom sinó un físic que va tenir l'oportunitat de fer un descobriment astronòmic de primera magnitud. Tanmateix, el paper de Jansky com a pare de la radioastronomia més tard s'ha commemorat de diverses maneres:

- El NRAO (National Radio Astronomy Observatory) concedeix el premi anual Jansky.
- Els laboratoris Bell van construir un monument, inaugurat el 8 juny 1998, consistent en una maqueta a escala de la seva antena, de 13' de llargada. Això es va poder fer gràcies a una recerca detectivesca de Tony Tyson i Robert Wilson per localitzar documentació relativa a l'antena i al seu emplaçament. Sembla que a l'acte d'inauguració hi van assistir familiars seus, amics, col·legues, i el mateix Grote Reber hi va anar des de Tasmània on residia.
- Les oficines i laboratori principal del NRAO a Green Bank duen el nom de Laboratoris Jansky.
- També a Green Bank hi ha una rèplica de la seva antena a escala 1/1, que va ser feta pel mateix fuster que havia fet l'antena original.
- La unitat de brillantor (magnitud) aparent d'una radiofont és el Jansky, equivalent a una densitat de  $10^{-26}$  Watt per  $m^2$  i Hz d'amplada de banda.

Afortunadament el descobriment de Jansky no va caure en l'oblit sinó que va interessar molt a dues persones que van resultar decisives en el desenvolupament de la radioastronomia: Grote Reber, que el 1937 va construir el primer radiotelescopi de plat a casa seva i que va fer el primer mapa de radioones del cel, i John Kraus, que va crear un radioobservatori a la universitat d'Ohio i va escriure un llibre que va ser la Bíblia dels radioastrònoms.

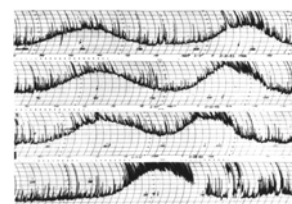
### **Grote Reber i el seu radiotelescopi**

Grote Reber va néixer a Xicago el 1911 i segons la informació consultada va morir el desembre de 2002 a Tasmània (Austràlia) on residia. Era radioaficionat, va estudiar enginyeria de ràdio i va treballar per diversos constructors de ràdios de 1933 a 1947.

Es va assabentar del descobriment de Jansky i de seguida va voler prosseguir aquelles investigacions. Va demanar feina als laboratoris Bell per poder treballar amb Jansky i a altres diferents observatoris, però eren els anys de la gran depressió i no la hi van donar, de manera que es va haver de posar a estudiar radioastronomia pel seu compte.

L'any 1937 es va construir un radiotelescopi al pati de casa seva, a Wheaton, Illinois. Feia 9,57 m de  $\varnothing$  i tenia el focus 6,10 m sobre el plat. En aquell punt hi havia el receptor de ràdio que amplificava els debils senyals còsmics i permetia enregistrar-los en una gràfica.

Va creure que era important observar una banda ampla de longituds d'ona per entendre millor com es produïen les radiacions. Treballava de nits per evitar les interferències produïdes per les xispes de les bugies dels cotxes que circulaven pels voltants. No va detectar radiacions a 3.300 MHz ni a 900, però sí a 160 MHz ( $\lambda$  d'1,9 m) el 1938, i així va confirmar el descobriment de Jansky. Podem veure a la figura unes gràfiques de 1943. Les punxes es deuen a les bugies dels cotxes, i els dos màxims de l'ona corresponen al Sol i a la Via Làctea.



Va fer el primer mapa de radioones del cel, i la part més brillant correspon a la Via Làctea. Va anar publicant els seus descobriments, gràcies als quals, la radioastronomia va esdevenir un gran camp de recerca després de la 2<sup>a</sup> guerra mundial.

Reber va trobar que la potència de la radiació era més dèbil a altes freqüències, cosa que no concordava amb la teoria de la radiació tèrmica i això va donar lloc a investigacions per estudiar aquest fenomen, fins que el 1950 es va formular la teoria de la radiació sincrotó, que és l'origen de la majoria de la radiació mesurada per Jansky i Reber.

Reber va donar el seu radiotelescopi al NRAO, que el va instal·lar a Green Bank, on hi és conservat com a un monument històric. El van muntar en una plataforma orientable perquè pogués apuntar a qualsevol direcció del cel. Ha visitat Green Bank diverses vegades i mentre supervisava la instal·lació del seu telescopi també va supervisar la construcció de la rèplica de l'antena de Jansky.

A partir de 1950 es va dedicar a l'estudi de les ones molt llargues (150-300 m) i baixa freqüència (1-2 MHz) perquè li va semblar que d'aquesta part ningú no se'n preocupava. Com que aquestes freqüències no arriben a la Terra si no és en alguns llocs particulars de la Terra i en moments de baixa activitat solar, per això se'n va anar a viure a Tasmània la resta de la seva vida.

### **El progrés de la radioastronomia**

Durant els anys 40 i 50, científics australians i britànics van localitzar un cert nombre de fonts puntuals d'emissió de ràdio, que van poder associar amb antigues supernoves i galaxies actives, més tard anomenades radiogalàxies.

Amb la construcció d'antenes més grans i de radiointerferòmetres, receptors més perfeccionats i mètodes de processament de les dades, els astrònoms van poder estudiar radiofonts més dèbils, amb una resolució i qualitat d'imatge millorades.

Les radiogalàxies estan envoltades de grans núvols d'electrons relativístics que es mouen en camps magnètics dèbils i produeixen radiació sincrotó, que es pot observar en tot l'espectre de ràdio. Hom creu que aquests electrons són accelerats pel material que cau dintre d'un forat negre massiu al centre de la galàxia i després impulsats en forma d'un raig prim per formar els núvols emissors de ràdio que hi ha fins a distàncies de milions d'anys llum de la galàxia originària.

### **L'antena Ewen-Purcell a Green Bank**

Harold Ewen era un físic de la universitat de Harvard i Edward Purcell havia estat investigador en temes de radar durant la 2<sup>a</sup> guerra mundial, que va compartir amb Felix Bloch el premi Nobel de física de 1952 pel desenvolupament d'un mètode de ressonància magnètica per mesurar camps magnètics en el nucli dels àtoms.

El 1950 Ewen treballava en el projecte d'un nou ciclotró per a la universitat i en els caps de setmana preparava en el seu doctorat, construint un aparell receptor per detectar les ones de 21 cm previstes pels treballs de l'astrònom holandès Van de Hulst. El seu treball era supervisat per Purcell, que va demanar i va aconseguir una subvenció de 500 \$ de l'Acadèmia Americana d'Arts i Ciències per pagar el cost dels materials.

Ewen va dissenyar l'antena d'embut i el receptor, i la van instal·lar a fora d'una finestra al 4t pis del laboratori Lyman a la universitat, amb la guia d'ones entrant per la finestra cap al receptor i l'enregistrador. Van tenir alguns problemes, com els de la recollida d'aigua de la pluja que inundava el laboratori, i els estudiants que hi tiraven boles de neu a dintre, com si fos una cistella de bàsquet.



Al cap d'un any, però en realitat de només 3,4 mesos de treball efectiu (els 2 dies dels caps de setmana) l'aparell va estar llest. Casualment en aquell temps Van de Hulst va anar a Harvard a donar un curs i Ewen li va anar a explicar el seu projecte. En van estar parlant amb Van de Hulst i també amb Jan Oort i es va assabentar que els astrònoms holandesos també havien estat treballant en aquesta recerca. Ewen deia que si ho hagués sabut abans, ell no ho hauria pas intentat.

Gràcies a aquest aparell la radioastronomia va dur a terme el descobriment fonamental de la primera detecció de l'emissió de 21 cm de l'H neutre de la Via Làctia el 25 març de 1951. Aquesta antena avui dia també s'exhibeix al NRAO a Green Bank

Finalment els radioastrònoms holandesos, emprant la tècnica de detecció d'Ewen, també van trobar la línia de l'H neutre l'11 de maig. Els radioastrònoms australians també van trobar posteriorment aquesta emissió. En anys posteriors, aquesta recerca va continuar amb major precisió i això va permetre situar a gran escala la distribució de matèria a la galàxia.

### **La majoria d'edat de la radioastronomia**

L'estudi de les radiogalàxies va dur l'astrònom Maarten Schmidt a descobrir els quàsars l'any 1963, que es troben a les regions centrals de les galàxies i que poden brillar amb la lluminositat d'un centenar de galàxies ordinàries.

Com les radiogalàxies, hom creu que els quàsars estan alimentats per forats negres enormes o supermassius, de fins a milers de milions de vegades més massius que el Sol, però continguts en un volum inferior al del SS. Tot i que les radiogalàxies i els quàsars són fonts de radioemissió molt potents, estan tan allunyades de la Terra que els senyals que ens arriben són molt dèbils.

Mesures fetes el 1965 per Arno Penzias i Robert W. Wilson als laboratoris Bell, amb una antena de comunicacions i a una longitud d'ona de 7 cm, van detectar l'existència d'una radiació de fons de microones a la temperatura de 3K. Aquesta radiació ve de totes les parts del cel i hom creu que és la radiació romanent del Big Bang o explosió que va originar l'univers ara fa uns 15.000 milions d'anys.

Hom fa servir satèl·lits (COBE) i telescopis terrestres per mesurar les més petites anisotropies en aquesta radiació de fons, investigació que pot permetre afinar la determinació de les dimensions i la geometria de l'univers.

La radioobservació dels quàsars va dur al descobriment dels púlsars per Jocelyn Bell i Anthony Hewish des de Cambridge el 1967. Els púlsars són estrelles de neutrons que han perdut els seus electrons i s'han encongit fins al diàmetre de pocs km després de l'explosió de la seva estrella mare en una supernova. Conservant el moment angular de l'estrella original molt més gran, les estrelles de neutrons giren molt ràpidament, fins a 7.641 rps, i tenen camps magnètics d'una intensitat de 100.000 milions de Gauss o més (el camp magnètic de la Terra és de l'ordre de 0,5 Gauss). La radioemissió dels púlsars es concentra en un con molt estret que produeix una sèrie de pulsacions corresponents a la rotació de l'estrella de neutrons, talment com la làmpada giratòria d'un far.

## **RADIOTELESCOPIS I OBSERVATORIS**

### **Com funcionen els radiotelescopis**

Els radiotelescopis es fan servir per estudiar emissions naturals de ràdio procedents de les estrelles, galàxies, quàsars i altre objectes astronòmics actius entre longituds d'ona d'uns 10 m (30 MHz) i 1 mm (300 GHz).

A longituds d'ona superiors a 1 cm (1,5 GHz) les irregularitats en la ionosfera ja distorsionen els senyals i això causa un fenomen de pampallugueig semblant al de les estrelles vistes en llum visible.

L'absorció de les ones de ràdio augmenta amb la longitud d'ona, i per longituds de més de 10 m, l'atmosfera ja esdevé opaca.

Per sota de longituds d'uns quants centímetres, l'absorció de l'atmosfera esdevé crítica. A longituds de menys d'1 cm (30 GHz), les observacions terrestres ja només són possibles en unes poques longituds particulars en unes bandes de freqüència específiques que són relativament lliures d'absorció atmosfèrica.

En canvi, entre 1 i 20 cm, l'atmosfera i la ionosfera distorsionen molt poc el senyal d'entrada, i encara aquestes distorsions poden ser corregides per sistemes sofisticats de tractament del senyal.

### Principis de funcionament

Els radiotelescopis varien molt de l'un a l'altre, però tots tenen 2 components bàsics: 1/ Una gran antena receptora, i 2/ Un radiòmetre o receptor de ràdio molt sensible.

La sensibilitat d'un radiotelescopi depèn de l'àrea i l'eficiència de la seva antena i de la sensibilitat del receptor usat per detectar i amplificar els senyals. Per a les emissions contínues de banda ampla, la sensibilitat també depèn de l'amplada de banda del receptor.

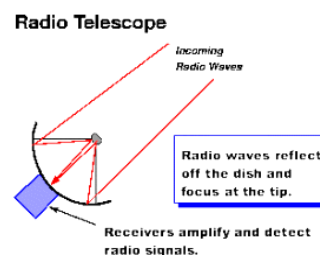
Com que els senyals de ràdio còsmics són extremament dèbils, els radiotelescopis són molt grans i només poden usar receptors molt sensibles. De més a més, els senyals dèbils poden quedar fàcilment emmascarats per radiointerferència d'origen terrestre, i cal fer molt esforços per protegir els radiotelescopis d'aquesta interferència.

El tipus més corrent de radiotelescopi és el que té una antena parabòlica (l'anomenat plat) que enfoca la radiació entrant a una antena petita anomenada alimentació. En els radiotelescopis aquesta alimentació sol ser una guia d'ones en forma de corn o banya i transfereix el senyal al radio receptor. Per obtenir la millor sensibilitat possible hom fa servir amplificadors d'estat sòlid amb molt poc soroll intern i refredats criogènicament.

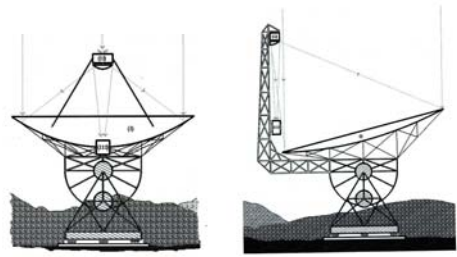
En alguns radiotelescopis la superfície parabòlica està posada en una muntura equatorial, amb un eix paral·lel a l'eix de rotació de la Terra, però són muntures molt cares i dificultoses de construir. Els radiotelescopis moderns funcionen a base de muntures altazimutals controlades informàticament per seguir el moviment de la radiofont en el cel.

En el model més simple d'un radiotelescopi, el receptor està posat directament al punt focal del reflector parabòlic i el senyal és conduït per cable pels peus de l'estructura cap a terra, on es pot enregistrar i analitzar. Ara bé, amb aquest sistema l'accés als instruments es difícil i el seu pes pot limitar la quantitat i dimensions dels receptors que s'hi pot instal·lar.

Més sovint en aquest lloc s'hi posa un reflector secundari, al davant (focus Cassegrain) o al darrera (focus Gregorià) del punt focal del paraboloide, de manera que es reflecteix el senyal cap a un punt a prop del vèrtex del reflector principal. En aquest punt es pot posar diferents receptors, ja que hi ha més lloc, menys restriccions quant al pes, i més accessibles per a la seva reparació.



Els radiotelescopis més antics usaven una estructura de 3 o de 4 peus per aguantar el receptor o el reflector secundari, però això tapa una part de la radiació i la reflexió dels senyals en els peus distorsiona la seva recepció. En els dissenys més recents, el receptor o el mirall secundari es posa fora de l'eix i no pertorba el senyal d'entrada, i per això el radiotelescopi resulta més sensible.



Les prestacions d'un radiotelescopi depèn de diversos factors: L'exactitud de la superfície reflectora, l'efecte de la càrrega de vent, les deformacions tèrmiques que causen dilatacions i contraccions diferencials, i les deformacions degudes al canvi en el sentit de la gravetat quan l'antena apunta a diferents punts del cel. Les diferències respecte al paraboloides teòric són importants quan assoleixen un cert percentatge de la longitud d'ona emprada en l'observació.

Com que les estructures més petites es poden construir amb més precisió que les grans, els radiotelescopis projectats per treballar a longituds d'ona mil·limètriques només tenen unes desenes de metre de diàmetre, mentre que les que treballen amb ones centimètriques arriben a diàmetres de fins a 100 m.

Habitualment l'efecte de la gravetat es minimitza fent l'estructura mòbil ben rígida, per reduir les deformacions. Una nova tècnica permet la deformació del paraboloides però que sempre es converteixi en un altre paraboloides amb un punt focal lleugerament diferent. En tal cas, només cal moure una mica el receptor o el mirall secundari per mantenir les prestacions en un grau òptim.

Els radiotelescopis moderns poden observar simultàniament un gran nombre de freqüències diferents a base de dividir els senyals en alguns milers de canals de freqüències separades, que poden ocupar una amplada de banda de desenes a centenars de MHz. Els tipus més avançats fan servir un gran nombre de filtres, cada un sintonitzat a una freqüència diferent i seguit d'un detector separat, per produir un receptor multicanal o multifreqüència. També un simple senyal de banda ampla es pot digitalitzar i analitzar matemàticament a través de les anomenades transformacions de Fourier per destriar-ne els senyals rebuts.

### **Què senten els radiotelescopis?**

Realment res de res! Els radioastrònoms realment no senten sorolls. Primerament, cal dir que les ones de ràdio i les ones sonores són fenòmens diferents. El so consisteix en variacions de pressió de la matèria, com l'aire o l'aigua. El so no viatja a través del buit mentre que les ones de ràdio, com la llum visible, infraroig, ultravioleta, raigs X i raigs  $\gamma$ , són ones electromagnètiques que sí que viatgen a través del buit.

Quan escoltem la ràdio, sentim sons perquè els aparells de l'emissora han convertit el so en ones electromagnètiques que han codificat en una ona dintre del marge de la radiofreqüència (de 500 a 1.600 MHz per a l'AM i de 88 a 1.087 MHz per a la FM). Hom fa servir les ones de ràdio perquè poden viatjar grans distàncies a través de l'atmosfera sense ser gaire atenuades per la difusió o absorció. La nostra ràdio rep aquestes ones, descodifica la informació i usa un altaveu per canviar-les altra vegada en ones sonores.

Els radiotelescopis sovint produeixen imatges de cossos celestials. De la mateixa manera que un film enregistra les diferents quantitats de llum procedents dels diferents punts observats per la lent de la càmera, el radiotelescopi enregistra les diferents quantitats d'emissió de ràdio que vénen de l'àrea del cel observada i, després d'un tractament informàtic adequat, els astrònoms ho poden mostrar en una figura.

## **Radiointerferometria**

La resolució angular o capacitat d'un radiotelescopi per distingir detalls fins en el cel depèn de la longitud d'ona observada i de les dimensions de l'instrument. Els aparells grans, tot i funcionant a la menor longitud d'ona possible, no tenen una resolució angular gaire més gran d'1 minut d'arc, que és comparable a la de l'ull humà en llum visible. Com que les ones de ràdio són molt més llargues que les de la llum visible, per això els radiotelescopis han de ser molt més grans que els telescopis òptics, per assolir una resolució semblant.

Les distorsions produïdes per l'atmosfera en les radioones són menys importants que per a la llum visible, i per això un radiotelescopi pot assolir la seva resolució angular teòrica. De fet, la història de la radioastronomia ha estat la d'anar resolent els problemes d'enginyeria que comporta la construcció de radiotelescopis cada vegada més grans.

Una gran resolució angular en radioastronomia s'ha assolit per mitjà de la interferometria, que actua com una gran obertura a partir d'un cert nombre d'elements més petits.

La rotació de la Terra produeix un petit desfasament entre els senyals rebuts d'una font puntual a cada parell d'elements diferents de l'interferòmetre, i això produeix unes franges d'interferència. Si la radiofont té una dimensió angular finita, la diferència de recorregut dels senyals procedents de diferents punts de l'objecte fins a l'interferòmetre també varia. D'aquesta manera l'examen del tipus d'interferència produïda en els diferents elements de l'interferòmetre, permet conèixer la naturalesa de l'objecte observat.

L'examen i comparació dels senyals rebuts en els interferòmetres permet mesurar uns paràmetres matemàtics anomenats components de Fourier en la distribució de la brillantor de la radiofont, i això permet determinar imatges d'alta resolució en radioones del cel. En reconeixement al desenvolupament d'aquesta tècnica, els astrònoms Martin Ryle i Anthony Hewish (també codescobridor dels púlsars) van rebre el Premi Nobel de Física de 1974.

## **Interferometria de molt llarga base (VLBI)**

En els primers interferòmetres, els senyals es transmetien al lloc central de l'observatori per mitjà de cables coaxials, guies d'ones o fibra òptica, però amb antenes cada cop més separades això no era suficientment precís per treballar en temps real. Treballar amb enllaços de ràdio de molt alta freqüència (VHF) o ultra alta freqüència (UHF) no és pràctic a partir d'uns quants centenars de km de separació perquè caldria disposar d'un gran nombre d'estacions repetidores.

Per això els senyals es graven en cinta magnètica a cada element de l'interferòmetre i després totes les cintes s'ajunten en un sol lloc per obtenir les franges d'interferència corresponents. Cal que aquestes cintes es puguin sincronitzar amb una precisió de poques milionèsimes de segon, i per això cada element disposa d'un rellotge atòmic a base de màsers d'H, que té una precisió millor que una bilionèsima de segon.

## **Què és el National Radio Astronomy Observatory?**

El NRAO és una instal·lació de la National Science Foundation, que és una entitat de recerca sense ànim de lucre. El NRAO proporciona radiotelescopis moderns per a l'ús de la comunitat científica. La seu central del NRAO és a Charlottesville, Virginia, i l'Observatori té en servei grans radiotelescopis a Socorro, New Mexico i a Green Bank, West Virginia.

## **Que volen dir GBT, VLA o VLBA?**

GBT vol dir Green Bank Telescope. El seu nom complet és Robert C. Byrd Green Bank Telescope, en honor del senador Robert C. Byrd que va possibilitar la seva construcció.

El VLA va assolir aquest nom perquè és un conjunt molt gran de radiotelescopis. Al principi, VLA era només un nom de treball, sense intenció que fos el nom definitiu, però al final hi va quedar.

Al VLA, totes les seves 27 antenes treballen com un sol instrument. En estar molt separades no era possible ajuntar els seus senyals en temps real i per això cada una té un rellotge atòmic, enregistren les seves observacions independentment i es combinen després, quan l'observació ja és acabada. D'aquesta tècnica se'n diu VLBI, o interferometria de molt llarga base.

Quan els astrònoms van projectar la construcció d'un sistema d'interferometria de base continental, de manera natural va sorgir el nom de VLBA o conjunt de molt llarga base.