

Увод в радиоастрономията

д-р Росица Митева

ИКИТ-БАН

rmiteva@space.bas.bg

летен семестър 2019

Съдържание

1. Кратка история на радиоастрономията
2. Въведение. Радиотелескопи.
3. Механизми за радиоизлъчване
4. Източници на радиоизлъчване

Литература

- Francis Graham-Smith, Unseen cosmos – the universe in radio, Oxford University Press, 2013
- Basics of radio astronomy: <https://www2.jpl.nasa.gov/radioastronomy/>
- Essential radio astronomy: https://www.cv.nrao.edu/course/ast534/ERA_old.shtml

I. Основни понятия

- Радиоастрономия: изследване на електромагнитната емисия от небесни тела в радиодиапазона
- Обхват на радиодиапазона: в зависимост от атмосферна прозрачност, настоящо ниво на технология и ограничения наложени от квантовия шум

честота: $< 1 \text{ THz}$ (10^{12} Hz) или

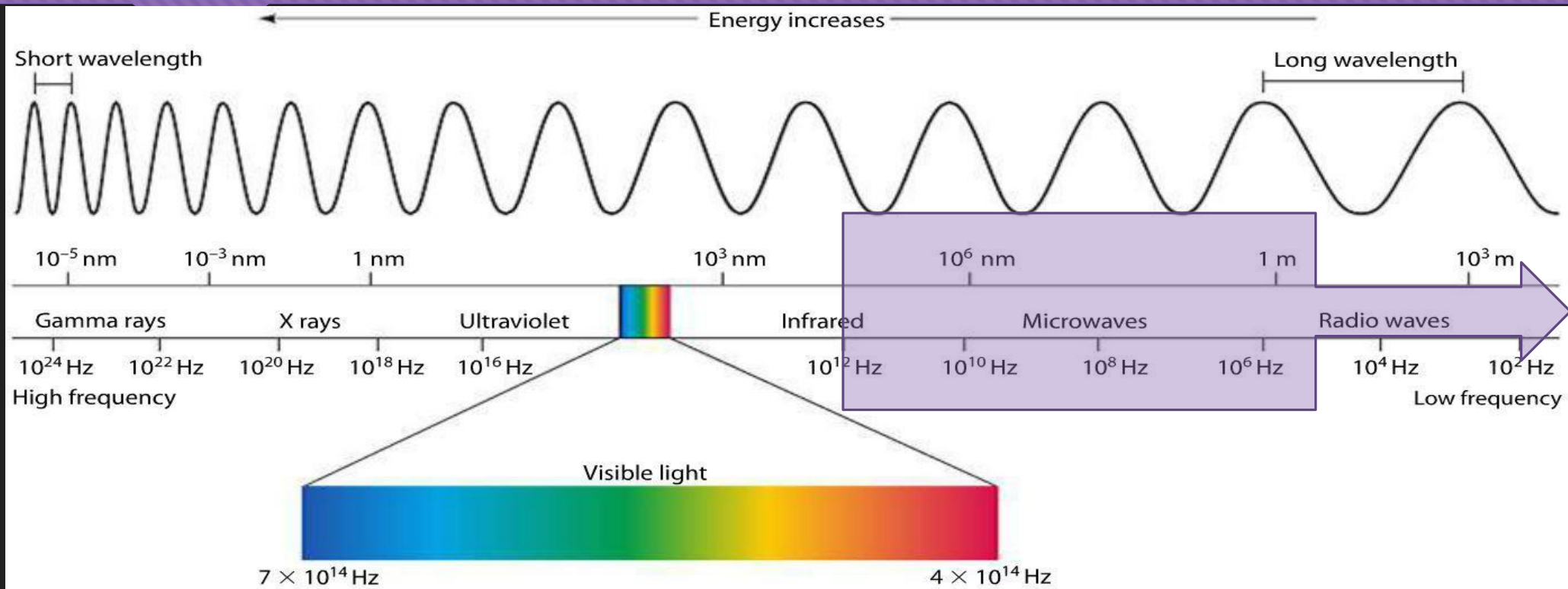
дължина на вълната: $> 0.3 \text{ mm}$

$$\lambda \cdot f = c$$

$\leftrightarrow$

$$x \text{ [m]} \cdot y \text{ [MHz]} = 300$$

Електромагнитен спектър



~400 nm
~4000 Å

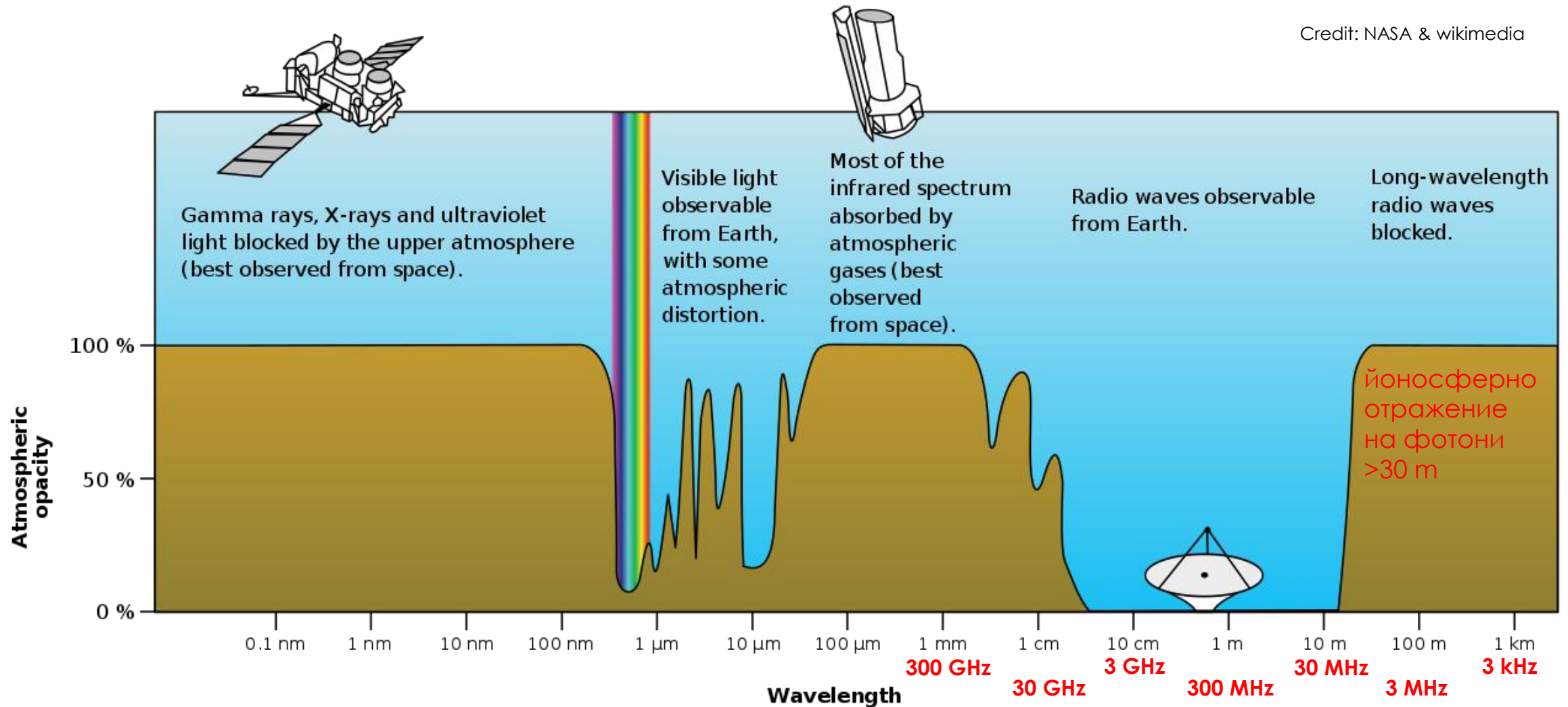
~700 nm
~7000 Å

<https://www.miniphysics.com/>

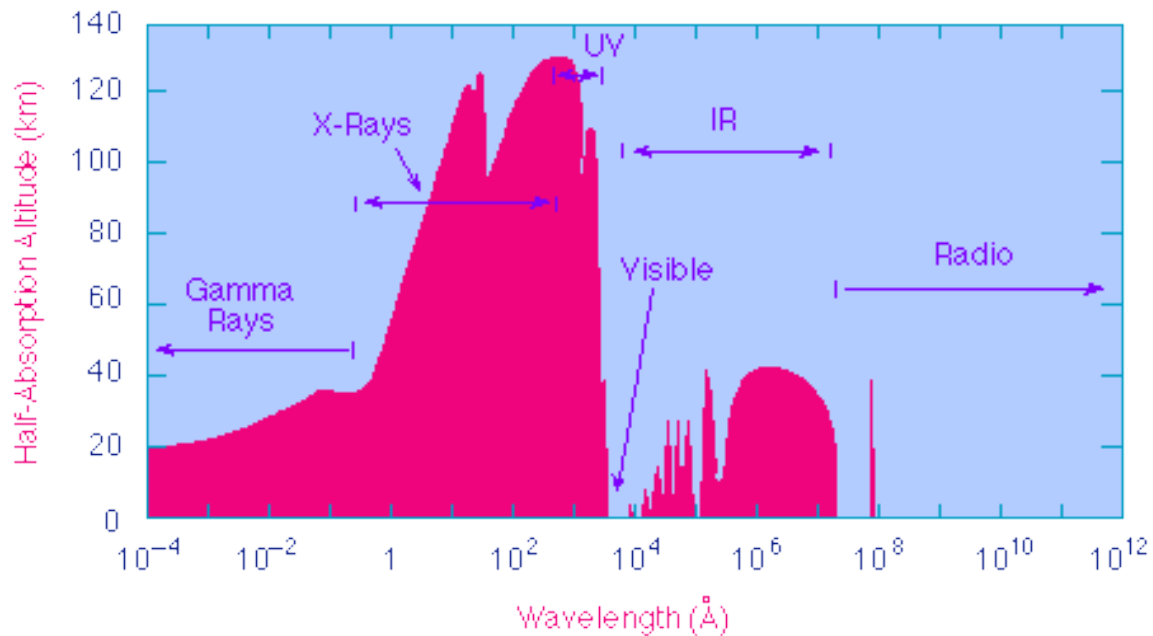
GeV – MeV – keV Å[10^{-10} m] nm[10^{-9} m] THz[10^{12}] – GHz[10^9] – MHz[10^6] – kHz[10^3]

Атмосферна непрозрачност

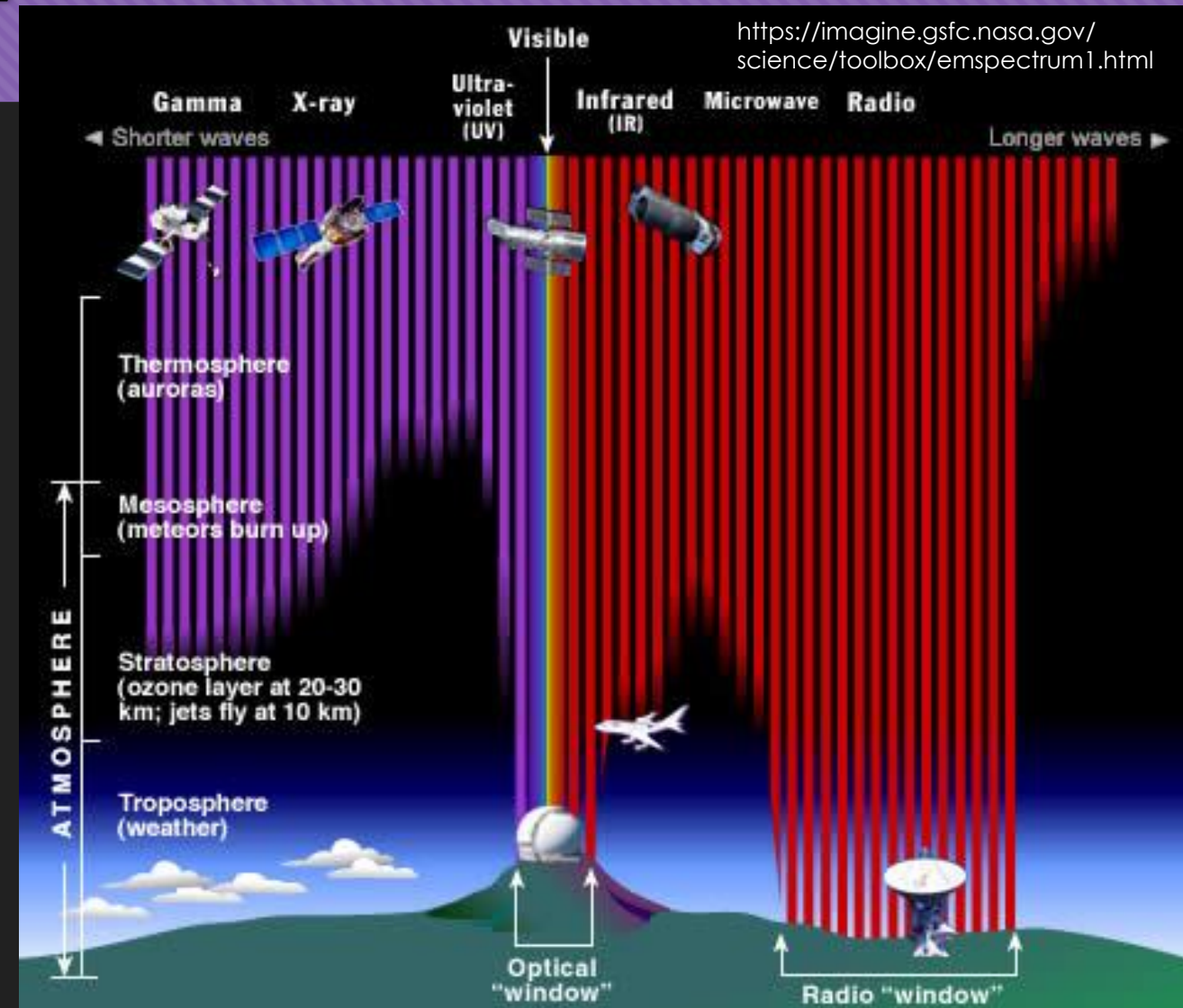
Credit: NASA & wikipedia



Атмосферно пропускане



<https://www.cv.nrao.edu/course/ast534/IntroRadioastro.html>

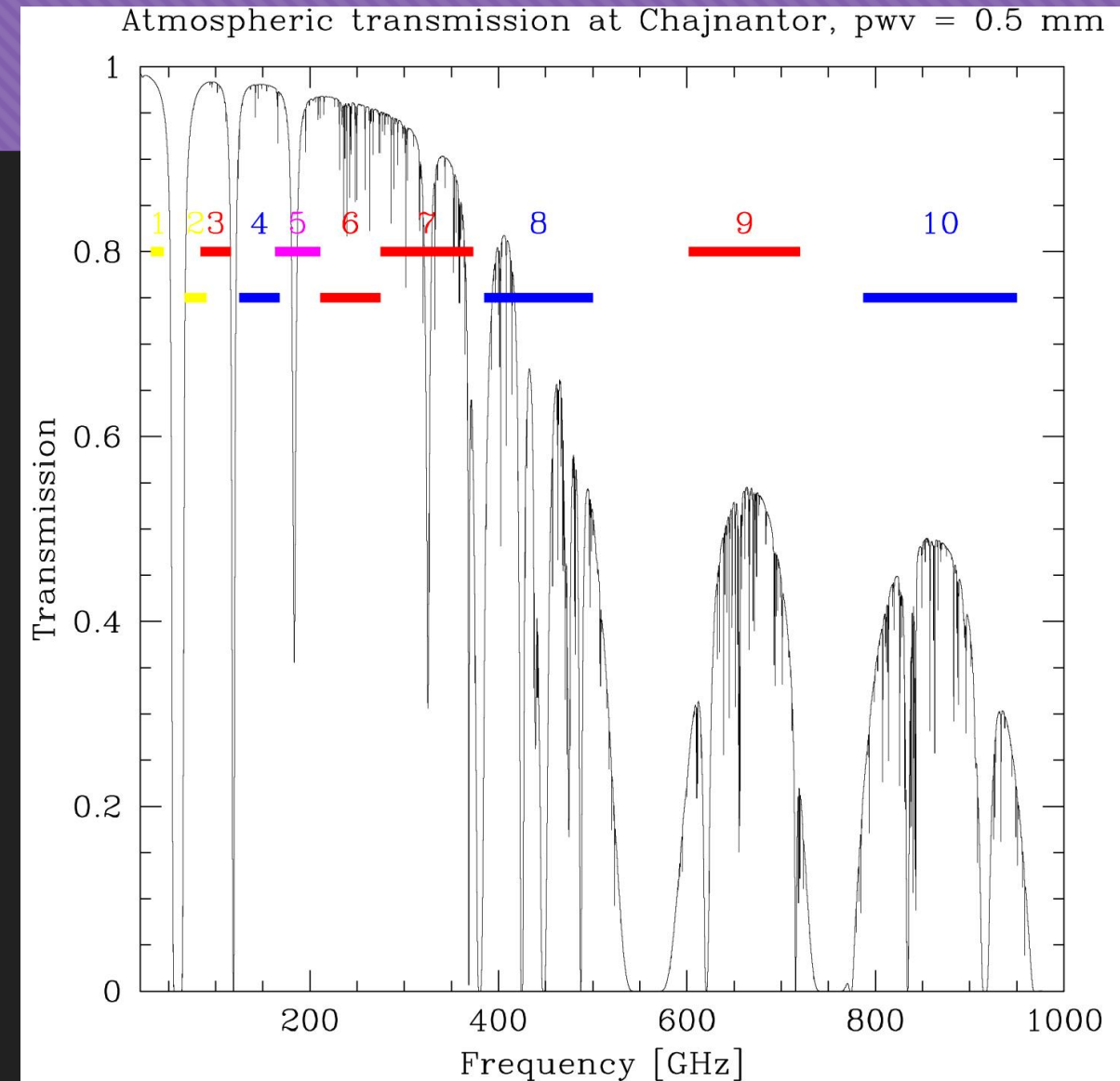


Атмосферни прозорци

- Радионаблюденията са ограничени поради:
 - трептене на атмосферни молекули CO_2 , O_2 , H_2O , които поглъщат средните до дългите инфрачервени вълни
 - променлива атмосферна рефракция ($\sim \lambda^2$) ограничава качеството на наблюденията с $f < 300 \text{ MHz}$
 - земната йоносфера отразява обратно към космоса лъчение с $f < 10 \text{ MHz}$
- Радиовълните са с $\lambda >$ диаметъра на праховите частици в атмосферата, затова по принцип са възможни радионаблюдения през области на междузвезден прах
- Пропускливостта зависи от λ ; от земната повърхност не може да се наблюдава в диапазона:
 - 52–68 GHz (O_2)
 - ~22 GHz (континуум на водна пара)
- Емисия на радио-шум от атмосферата намалява чувствителността на радиоинструментите

Зони на пропускане

- Дадени са ивиците на наблюдение на *Atacama Large Millimeter Array (ALMA)*, в съответствие със зоните на пропускане на радиовълните в земната атмосфера



Основни радиоастрономически открития

- Нетоплинно излъчване от нашата Галактика и много други астрономически източници
- Радиогалактики и квазари, хранени от супермасивни черни дупки
- Космологическата еволюция на радиогалактики и квазари
- Топлинна емисия на спектрални линии от атоми, йони и молекули на студения междузвезден газ
- Кохерентна емисия – тип мазер – от йони и молекули на междузвезден газ
- Кохерентна емисия в континуум от звезди и пулсари
- Космическо фоново микровълново лъчение от Големия Взрив
- Неутронни звезди
- Индиректно, но убедително доказателство за гравитационно лъчение
- Доказателство за тъмната материя, следствие от криви на въртене на HI области в галактики
- Екзо-планети
- Гравитационни лещи

Особености

- Наблюдаваните явления са високоенергетични и експлозивни – напр. радиогалактики, квазари, свръхнови, пулсари, за разлика от равномерната оптична емисия от повечето звезди.
- Източниците излъчват емисия от гравитационни процеси, а не термоядрен синтез както при звездите.
- Могат да се наблюдават на космологично далечни разстояния. Повечето радиоизлъчватели са извънгактични, еволюирали за периоди от време сравними с възрастта на Вселената.
- Възможна е диагностика на ниски температури – космическото фоново излъчване доминира електромагнитното излъчване на Вселената, но чернотелния спектър се наблюдава предимно в радио и далечния инфрачервен край (2.7 K). Студеният междוזвезден газ излъчва спектрални линии на радиодължини.
- Големи групи от заредени частици могат да излъчват във фаза – кохерентно – което допринася за голямата радиояркост на пулсарите.
- Разсейване поради прахови частици е пренебрежимо малко, защото размерите са много по-малки от дължината на радиовълните. Поради тази причина междוזвездната среда е прозрачна за радионаблюденията – може да се види през галактичния диск до компактният обект Sgr A* захранван от свръхмасивната черна дупка в центъра на нашата Галактика.
- Радиосинхротронни източници (ускоряват електрони на релативистични енергии) живеят дълго и представляват астро-археологически записи на минали енергетични събития. Плазмени ефекти (разсейване, дисперсия, ротация на Фарадей и др.) могат да бъдат използвани като начин за определяне на междוזвездната електронна концентрация и магнитни полета.
- Тъй като почти всичко излъчва радиовълни, трябва да се отсеят приносите от естествения радиофон, наземна емисия и от самите радиоинструменти.

Радиоемисия

Изследване на емисията от космически източници

- Картографиране/изображение – радиоемисия като функция от позицията на небето
- Спектрография – като функция от честотата (и интензитета)
- Времева еволюция
- Поляризация

Терминология

- I_ν Яркост (brightness) или интензитет (intensity) – не зависи от разстоянието на което измерваме величината, само от типа на източника; brightness per unit frequency is called the **specific intensity/spectral intensity/spectral brightness**
- S_ν Плътност на потока (flux density)

II. Радиотелескопи

- Наблюдение на космически обекти в радиодължини: не е възможно с един тип антена
- Радиоизточниците също се различават по интензитета на лъчението и ъгловия си размер
- Конфигурациите: единични до полета от антени
- Големи повърхности – изключително насочени антени
- $> 1\text{ m}$ ($< 300\text{ MHz}$): чувствителни антени от много на брой, малки по размер, почти изотропни диполи, напр. антената на Jansky $\sim 15\text{ m}$
- Всички антени преобразуват фокусираната електромагнитна вълна в електричен ток в проводник, който се пренася до приемника

<https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/xxx.html>

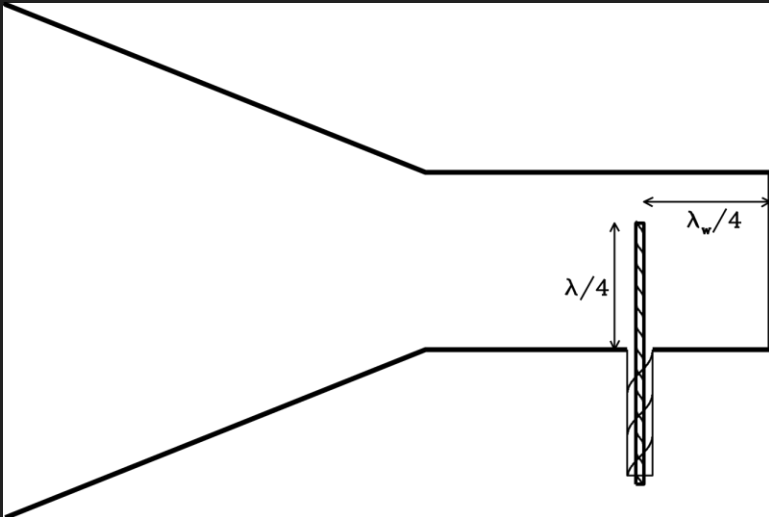
II. Радиотелескопи

- Идеален радиотелескоп: ефективна повърхност на антената $A_e = \lambda^2/(4\pi)$
- Тъй като повечето радиоизточници са неполяризирани се дефинира също така: $A_e = 2 P_v / S_v$ (P_v antenna output spectral power, S_v total flux density of the radio source)
- Температура на антената: $T_A = P_v / k_B = A_e S_v / (2 k_B) \rightarrow$ оценка за радиопотока на източника

<https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/xxx.html>

Waveguide horn antenna

- Най-опростената апертура, без да е закрыта от приемник или поддържаща конструкция – правоъгълна или кръгова рогова антена
- Във вътрешността има вертикална антена, която превръща радиовълните в ток
- Приемат минимално отразената от земята емисия
- За къси дължини на вълната, този тип се използва за приемник (feed antenna)
- Използват се като калибратори на радиопоток – напр. Cas A



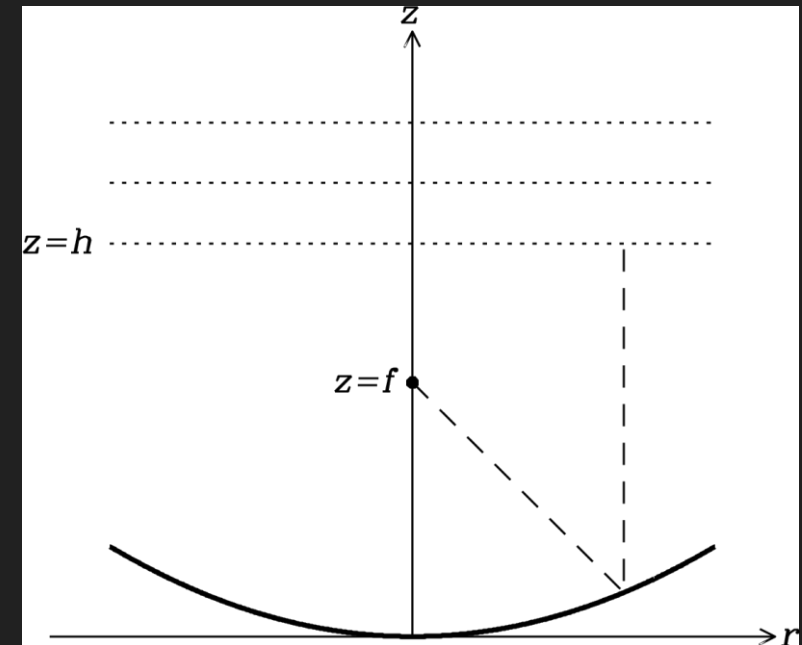
<https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/Ch3.html>

Използвана за откритието
на 21-см линия
Credit: NRAO/AUI/NSF



Рефлекторни антени

- Измерват относителен радиопоток
- За къси дължини трябва големи повърхности и разделителна способност по-добра от тази на дипол
- За $\lambda < 1$ m диполите не са практични и се използват рефлектори
- Параболоидни рефлектори (фокусират планарните вълни от далчни обекти в една единствена точка) – форма на основната антена, докато има horn-antenna като приемник
- фокална дължина – f , диаметър на антената – D , фокално отношение – f/D (обикновено ~ 0.4 – по-малко от оптичните, но това означава малко поле на зрение)
- Големи антени са нужни за добра разделителна способност в радио диапазона: $\theta = \lambda/D$ radians
- Част от радиопотока е блокиран от приемника и поддържащите стойки



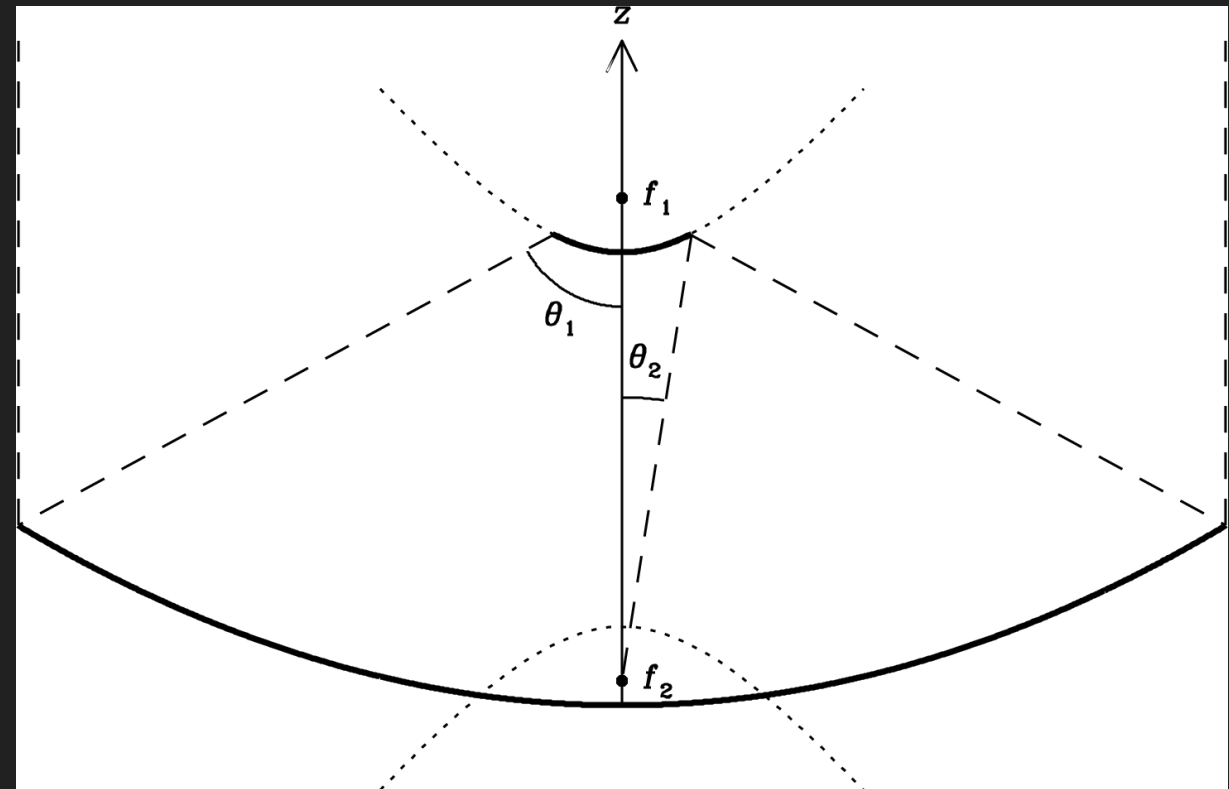
<https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/Ch3.html#S6>

Рефлекторни антени

- Касегрен-субрефлектор: увеличава до $f/D \sim 2$, напр. 140-foot (43 m) Green Bank, equatorial mount



Credit: NRAO/AUI/NSF



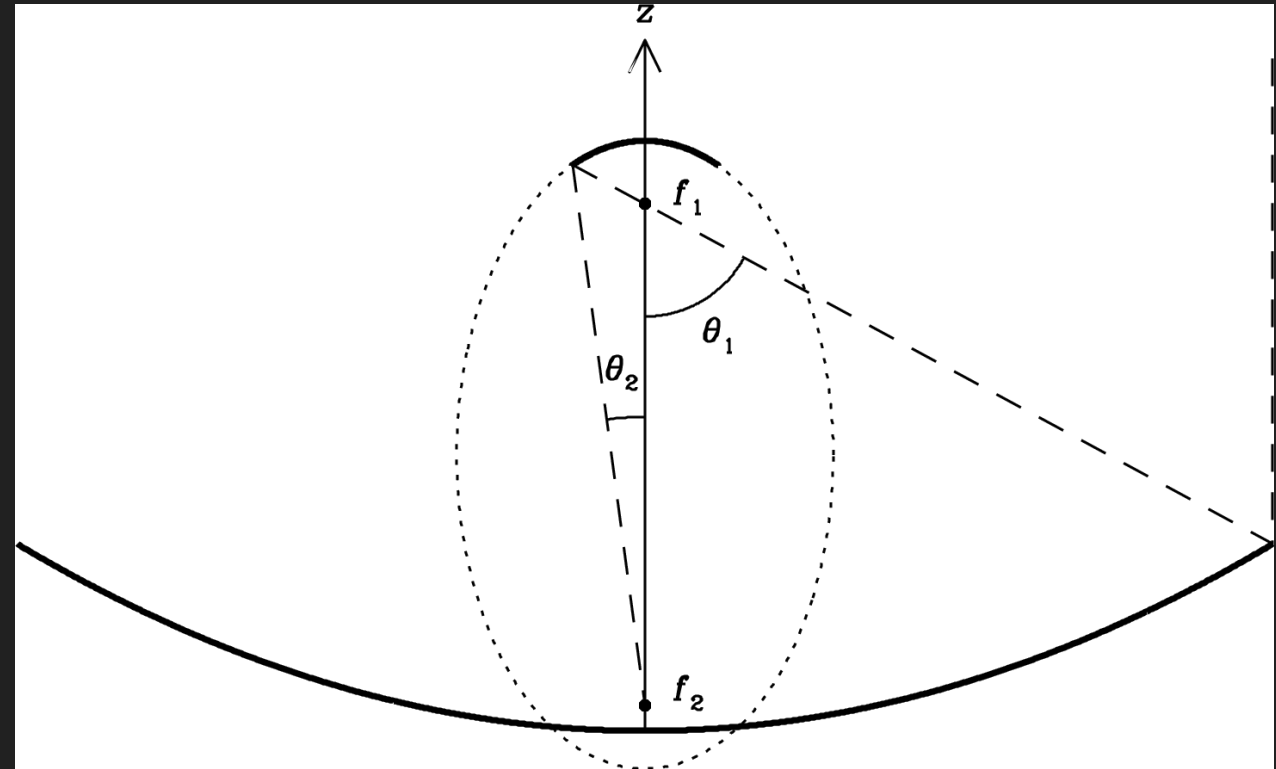
<https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/Ch3.html#S6>

Рефлекторни антени

- Грегориански-субрефлектор (Effelsberg, 100 m)



Credit: Matthias Kadler



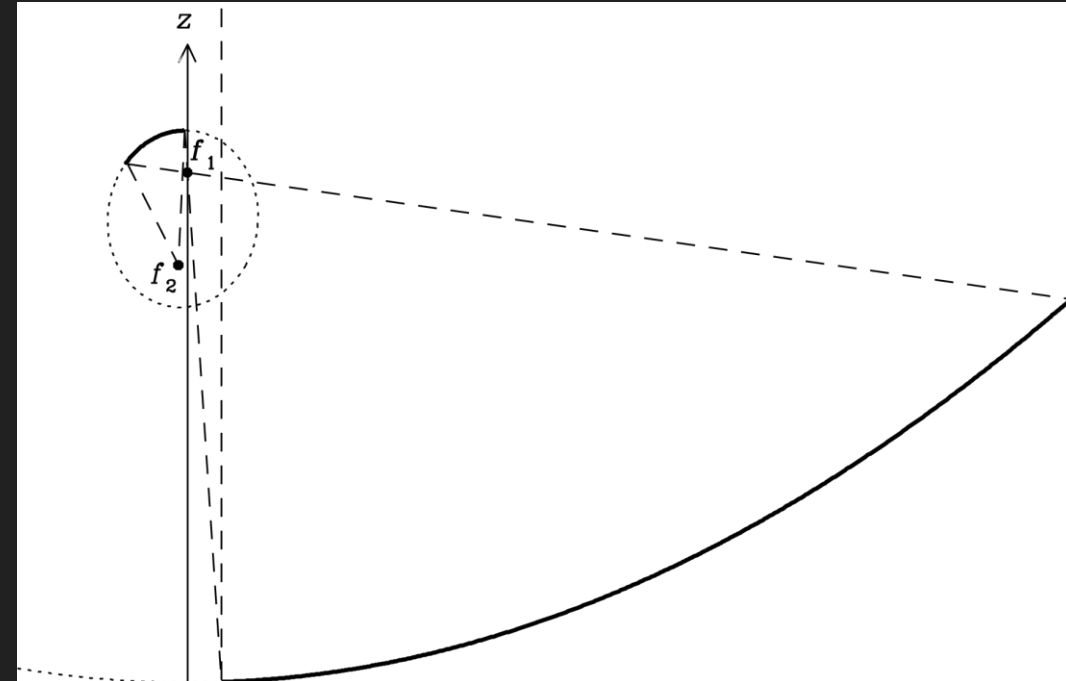
<https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/Ch3.html#S6>

Рефлекторни антени

- Green Bank Telescope, с изместен фокус



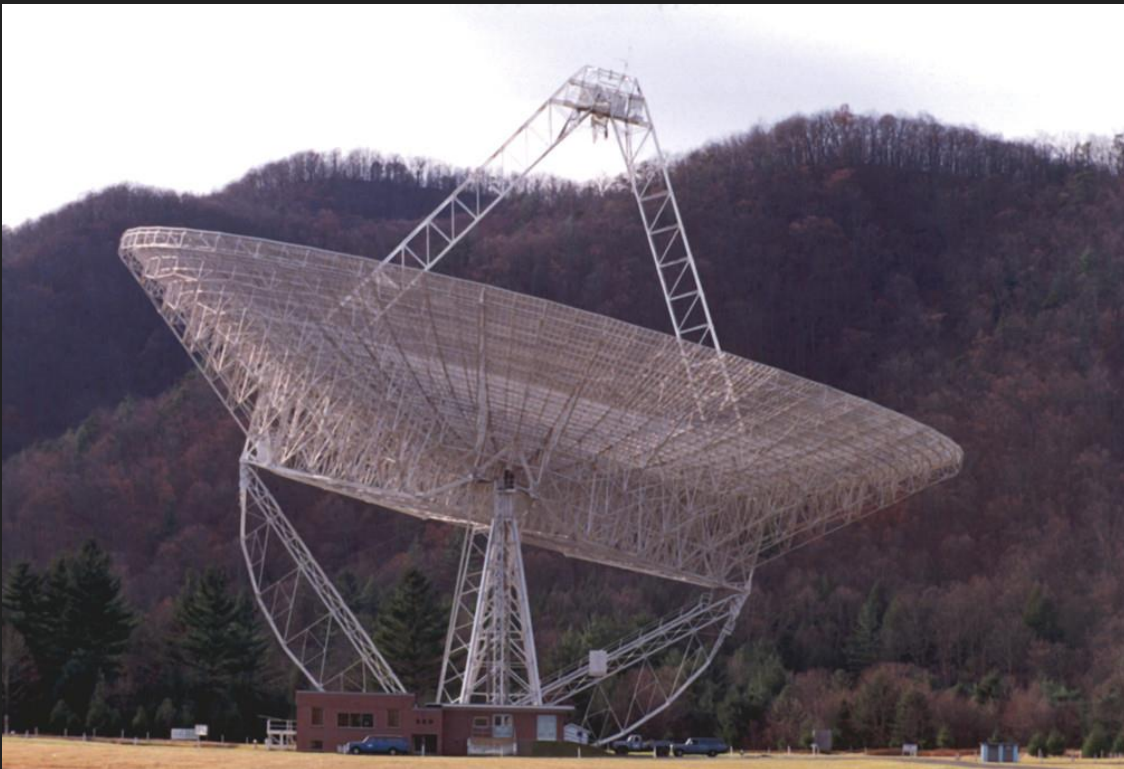
<https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/Ch8.html#F1>
Credit: NRAO/AUI/NSF



<https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/Ch3.html#S6>

Транзитни антени

- 300-foot transit Green Bank telescope, само по деклинация, могат да следват обекта за няколко минути докато е във фокалния елипсoid, мрежа с квадратни отвори със страна от 6 mm



<https://www.cv.nrao.edu/course/astr534/RadioTelescopes.html>



1988-11-15

Транзитни антени

- 1000-foot (305 m) Аресибо, Пуерто Рико
- до 20 градуса от зенит
- Грегориански телескоп, alt-az
- 3 cm (10.0 GHz) – 1 m (300 MHz)

<http://www.naic.edu/ao/landing>

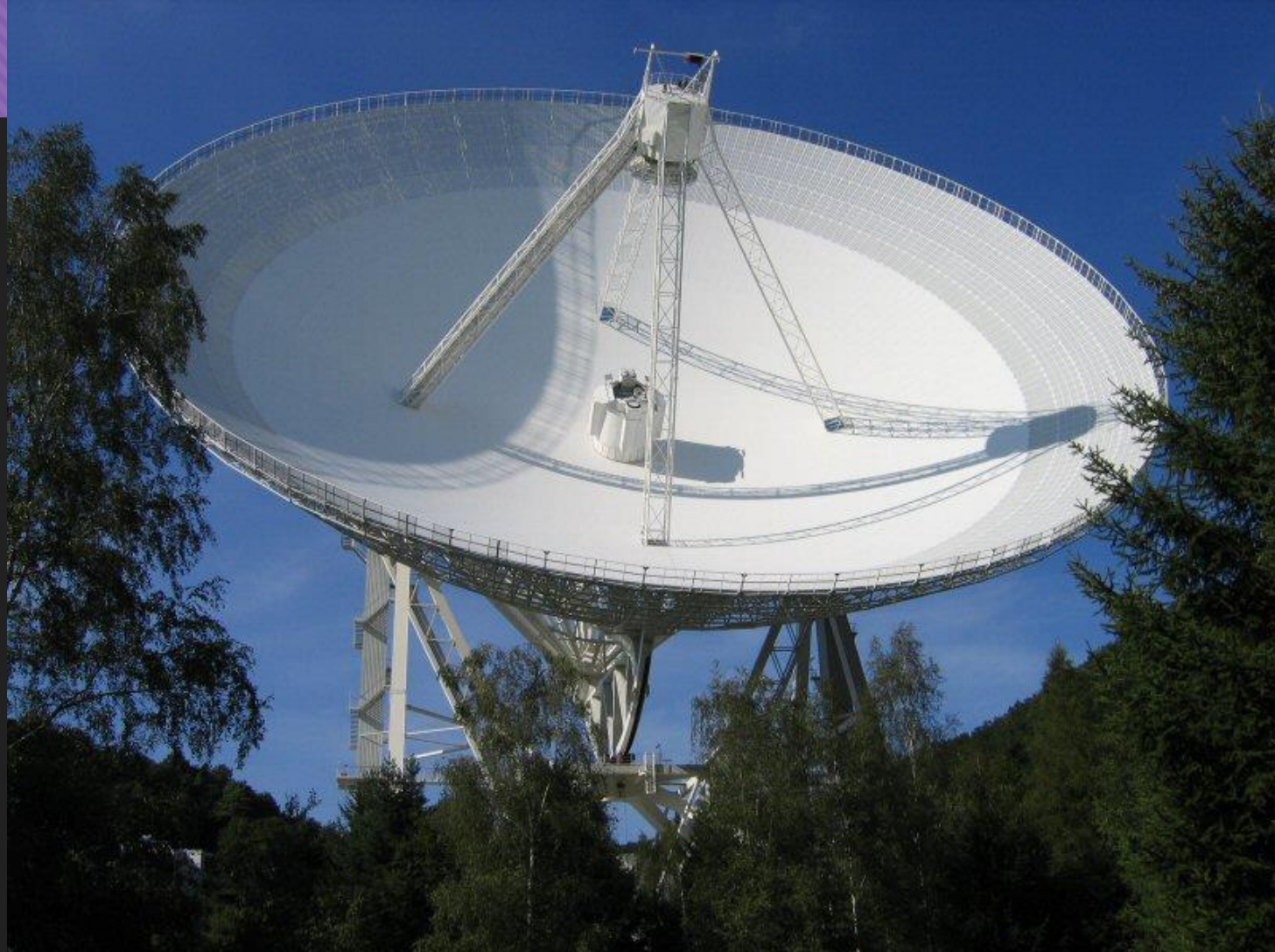


<https://www.cv.nrao.edu/course/ast534/RadioTelescopes.html>

Homology telescopes

- 100 m Effelsberg telescope
- Деформациите на главната антена се корегират с преместване на вторичната антена-приемника
- $\lambda \sim 7 \text{ mm}$

<https://www.mpifr-bonn.mpg.de/en/effelsberg>



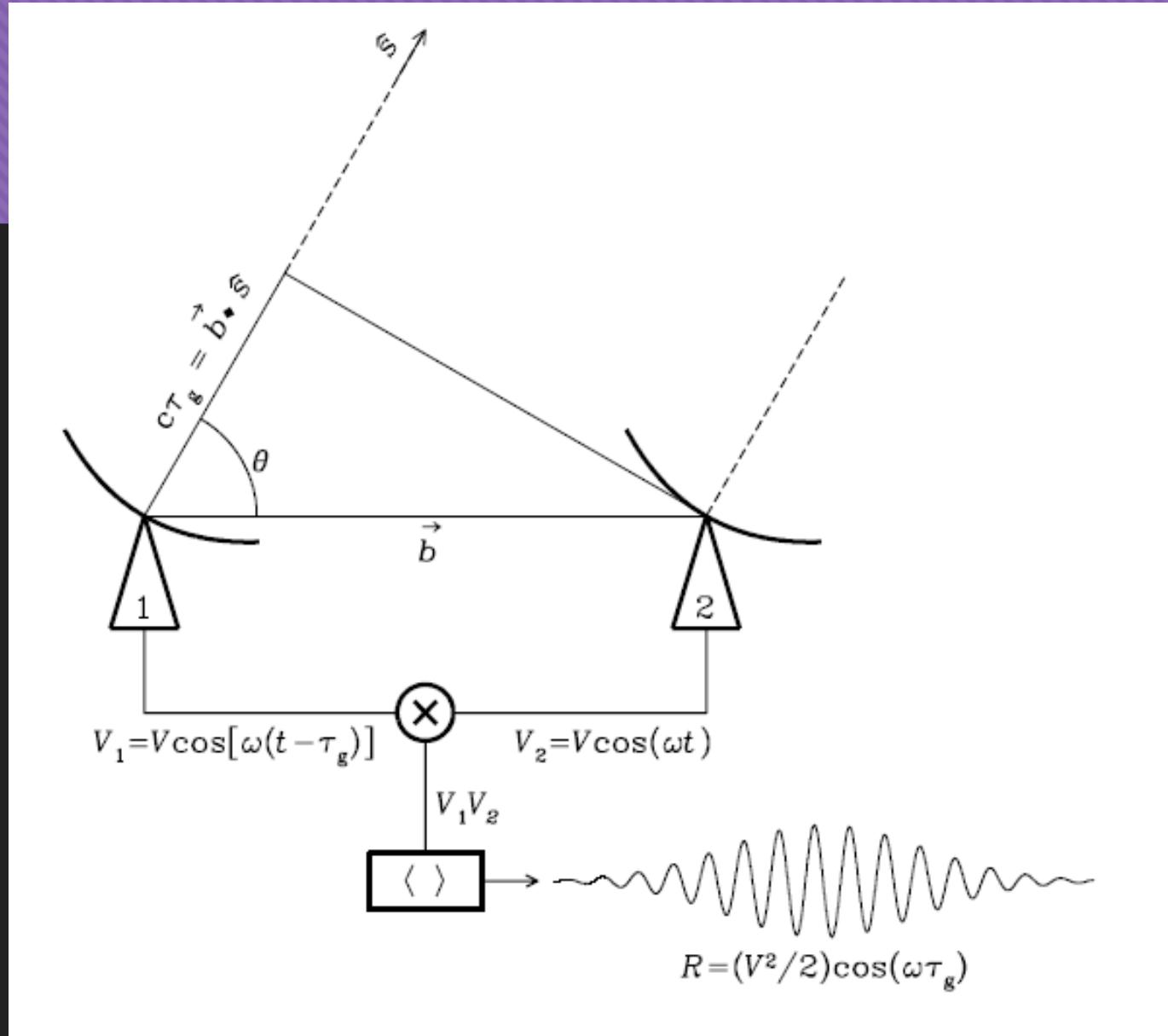
<https://www.cv.nrao.edu/course/ast534/RadioTelescopes.html>

Интерферометри

- За постигането на части от дъгови секунди разделителна способности в радио-диапазона е необходима огромна апертура
- Следването на обект с огромна антена е проблематично и механически деформации на антената, нагряване, усукване при вятър, ограничават разделителната стособност до 1"
- Единична антена има ограничени възможности до честоти около 10 GHz
- Геометричната повърхност на единична антена е $\pi D^2/4$, а на N антени е $N\pi D^2/4$ (ефективна събираща повърхност)
- Система от две антени дава подобрен сигнал (поради атмосферни флуктуации, недостастъци в приемника, радио-интерференция, насоченост на антената, атмосферна рефракция) благодарение и на технологически иновации в електрониката на корелатора

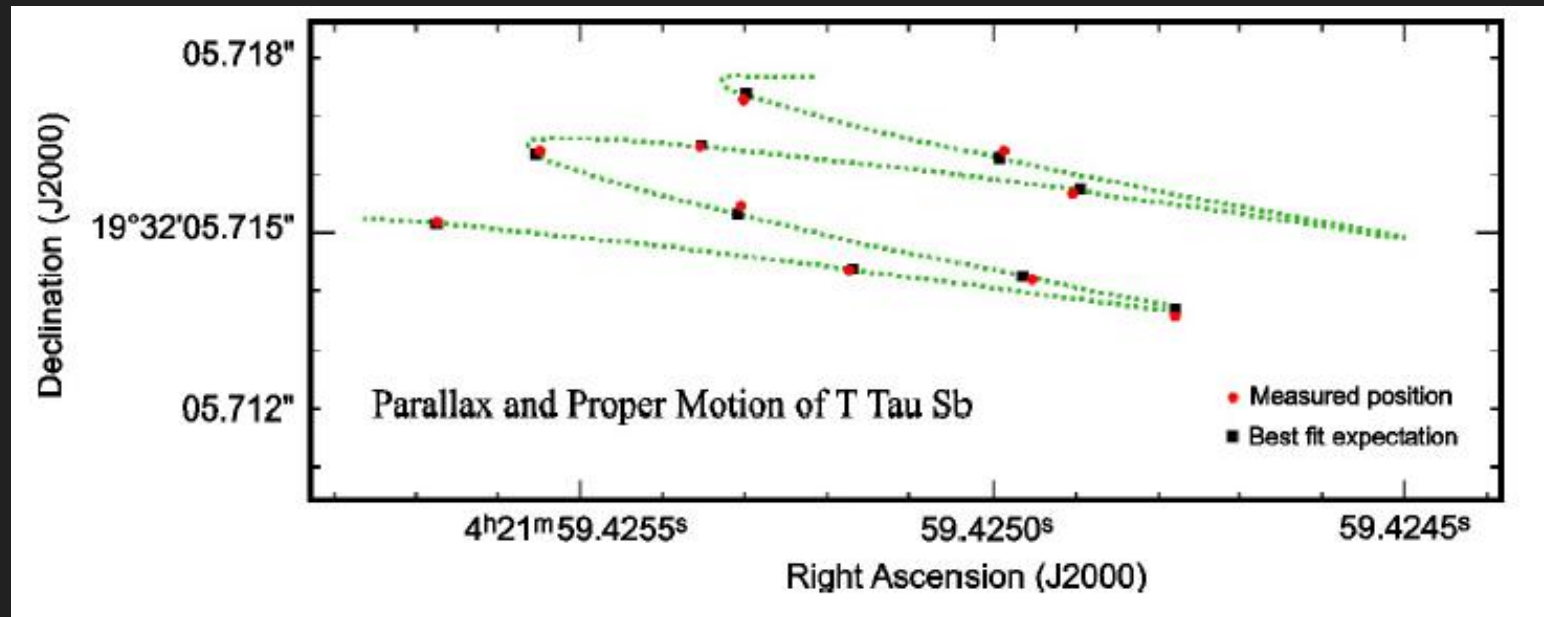
Интерферометри

- Принципна схема за интерферометър: 2 антени, чийто сигнал е корелиран (умножен и осреднен по време – премахва се високочестотната част) и работещ в тясна честотна област
- Основни елементи на конфигурацията:
 - b – baseline
 - $V_{1,2}$ – напреженията от двете антени
 - τ_b –geometric delay
 - R – амплитуда на изходния сигнал
 - Корелатор
 - Primary beam
- Изходен сигнал с параметри:
 - Пропорционален на радио потока от източника
 - Квази-синусоиден (fringe)
 - Гаусова обвивка (primary beam)
- θ – варира, сигнала по небето е синусоиден, а записът е във вид на fringe



Интерферометри

- Позициите на компактни радио източници могат да се определят с точност до 10^{-3} "
- Напр. VLBA измерва паралакс $6.83 \pm 0.03 \cdot 10^{-3}$ " или разстояние от 146.7 ± 0.6 pc (Hipparcos satellite: 177 pc)
- Тъй като $D > b$, интерферометрите не могат да се използват за изотропни източници – като микровълновото фоново излъчване
- При extended радиоизточник – третира се като много на брой независими точкови източници



<https://www.cv.nrao.edu/course/ast534/Interferometers1.html>

Апертурен синтез

- Радиояркостта на обект се разглежда като сума от синусоидни компоненти в пространството, не по време
- За да се синтезира компактен обект, трябва да се сумират много синусоиди – основата на Фурие анализа
- За да се направи радиокарта е нужно да се наблюдават отделните синусоиди на разпределението на радиояркостта, след което се сумират и се възстановява спектралната яркост на обекта
- За целта са нужни двойки интерферометри с различни базови линии
- Всяка нова базова линия добавя нова Фурие компонента към сигнала
- Чувствителността се увеличава с броя на антените
- Една двойка интерферометри могат да работят като апертурен синтез: наблюденията на обекта се повтарят, но с различно разстояние между антените

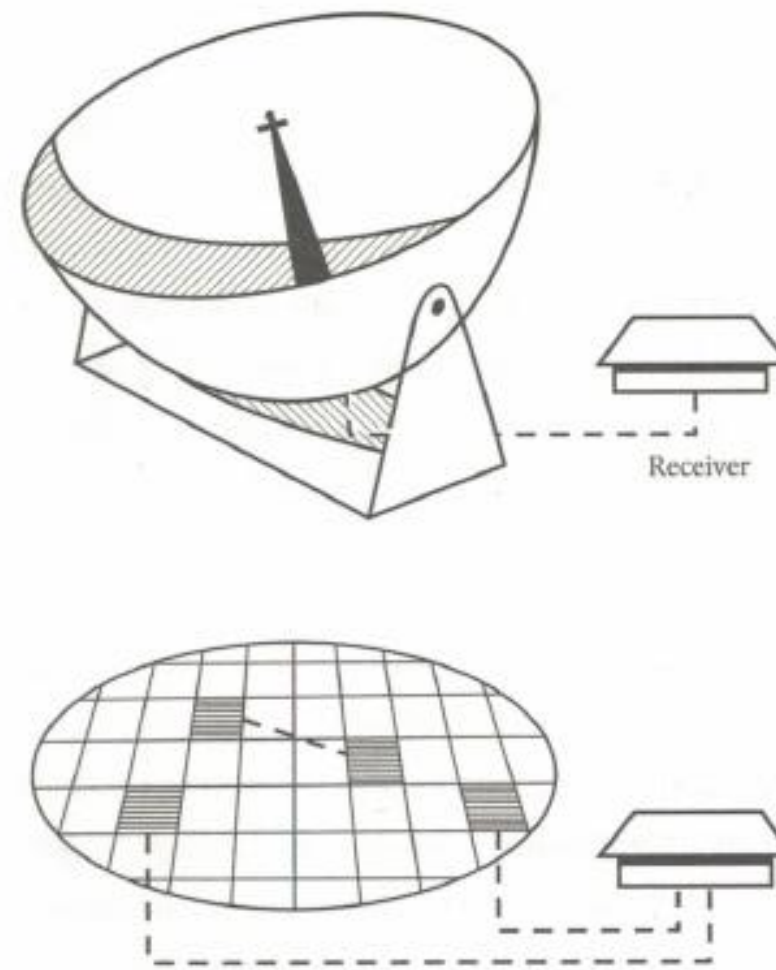
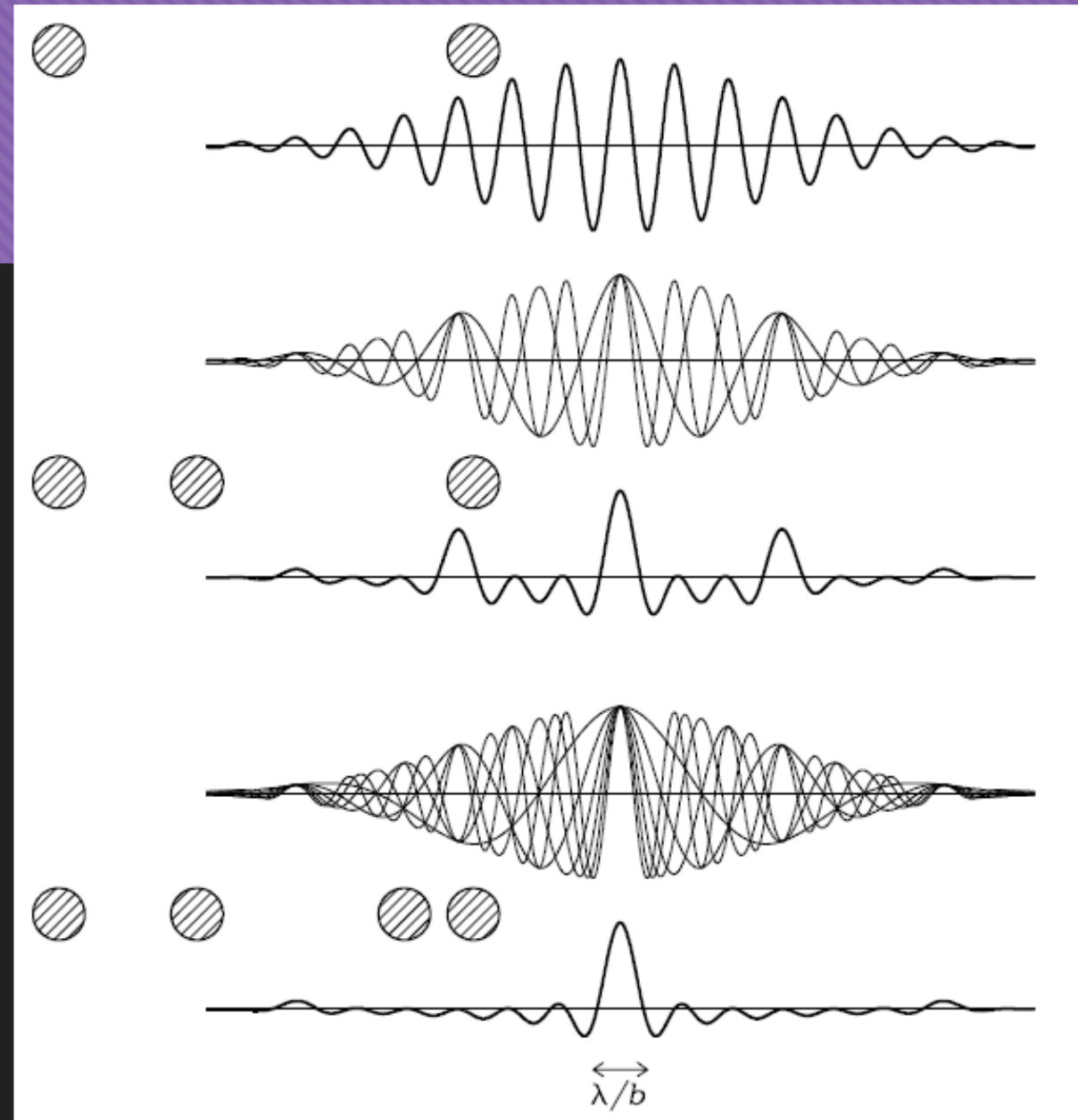


FIGURE 53 Dissecting a large telescope aperture, and re-assembling the pieces.

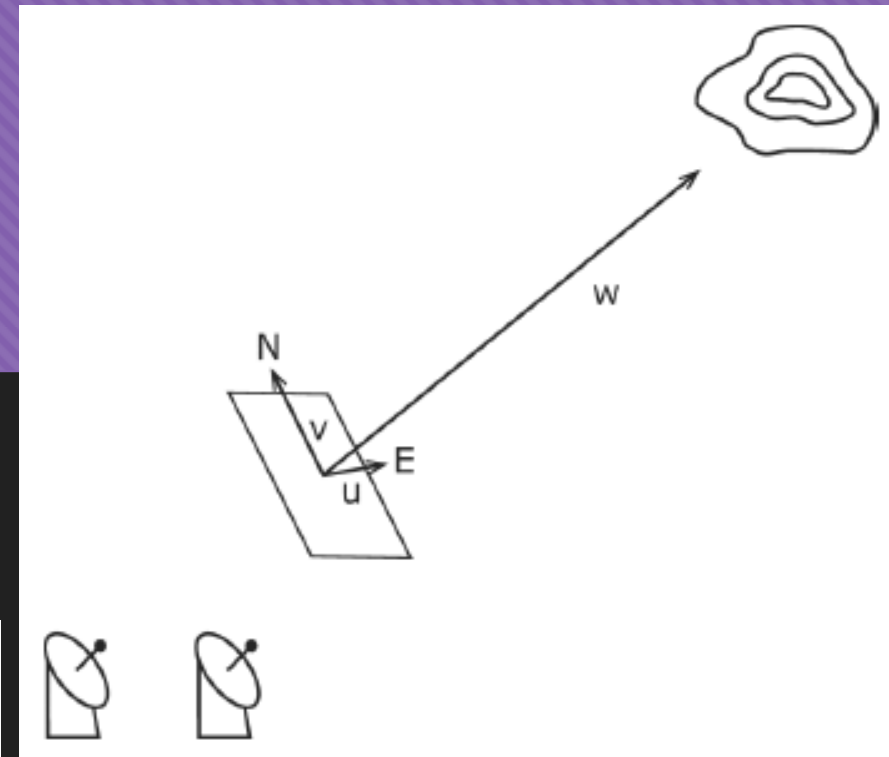
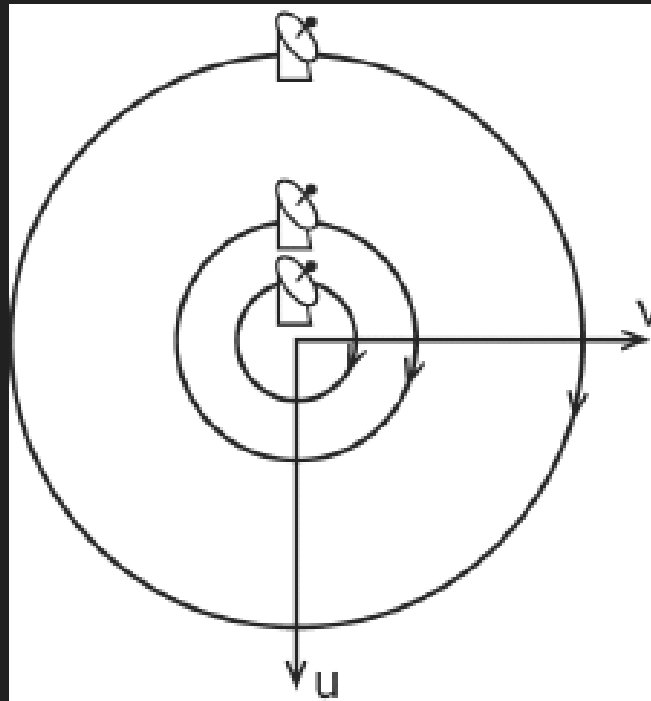
Апертурен синтез

- Пример за 2, 3 и 4 антени и т.нар. fringe pattern (b – най-голямото разстояние между антените)
- При повече антени се увеличават двойките от базови линии и се включват повече компоненти на Фурие анализа
- При N антени има $N(N - 1)/2$ бази, които да действат като интерферометри от двойка антени
- Синтезиран сноп (в центъра) – при осредняване сигнала от всички двойки
- При 4 антени, изходния сигнал е близък до гаусова крива, с ниски sidelobes
- Ъгловата разделителна способност е $\sim \lambda/b$



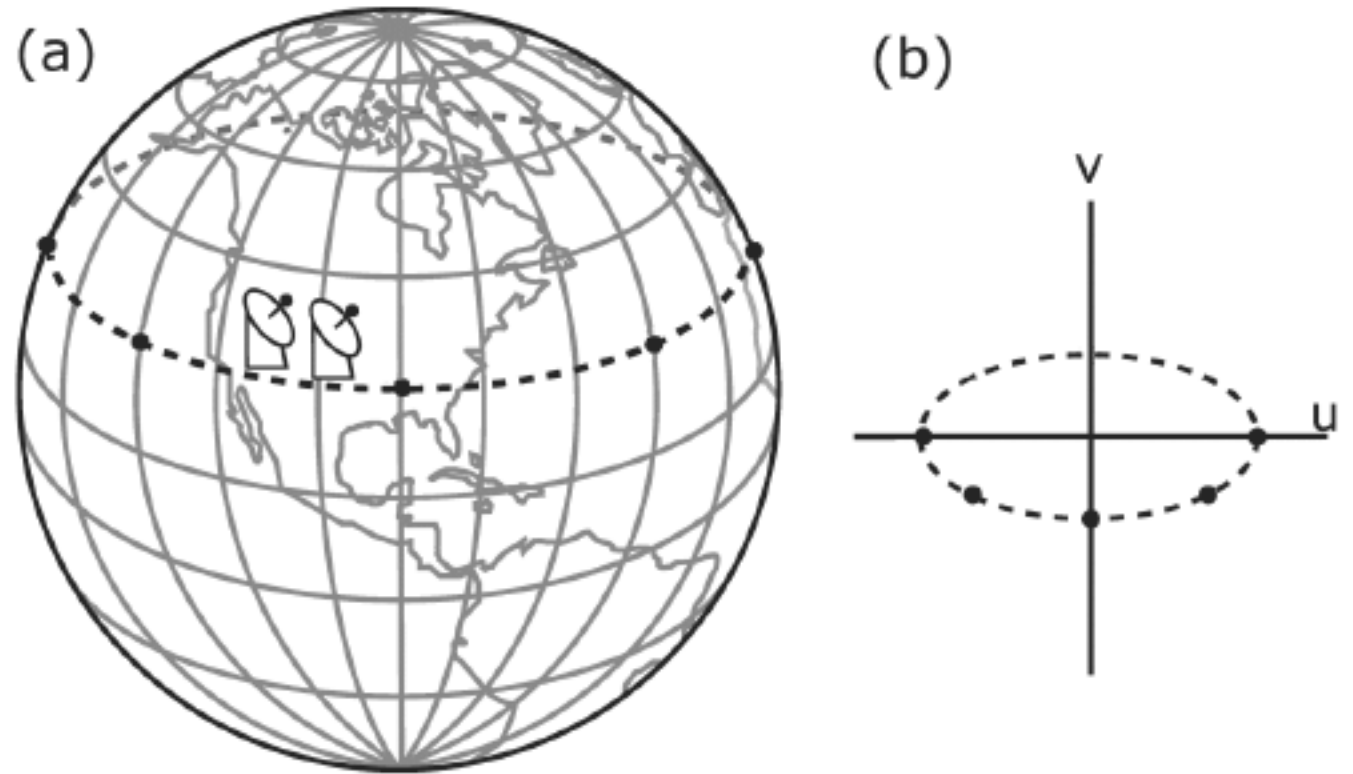
Апертурен синтез

- За да се подобри качеството на изображението, интерферометъра трябва да се върти
- Въвежда се равнина (u, v) перпендикулярно на посоката към източника (лъча на зрение)
- С въртенето на антените – по различни базови линии b – се запълва равнината (u, v)
- Комбинират се резултатите от всички базови линии, за да се получи сноп с голяма разделителна способност



Earth-rotation Aperture Synthesis

- Въртенето на Земята може да се използва за вариация на базовите линии – при разположение на антените изток-запад
- Описва се част от елипса
- Добра разделителна способност за източници близо до небесния полюс и обратното – близо до небесния екватор
- Елипсата ще бъде прекъсната – там където източника престане да се наблюдава



Апертурен синтез

- Resolution plane: (u, v)
- L : baseline, H (h): hour angle, D (d): declination
- Всяка двойка интерферометри ще даде част от елипса в тази равнина
- Колкото повече данни има в тази равнина, толкова качеството на изображението е по-добро
- Липсващите елипси в (u, v) водят до възникване на sidelobes в синтезирания сноп
- Dirty beam $\rightarrow$ dirty map $\rightarrow$ de-convolution (разлагане на делта-функции) $\rightarrow$ convolution (идеализиран сноп без sidelobes) $\rightarrow$ cleaned map

$$u = \frac{L}{\lambda} \cos(d) \sin(H - h)$$
$$v = \frac{L}{\lambda} \{ \sin(d) \cos(D) - \sin(D) \cos(d) \cos(H - h) \}$$

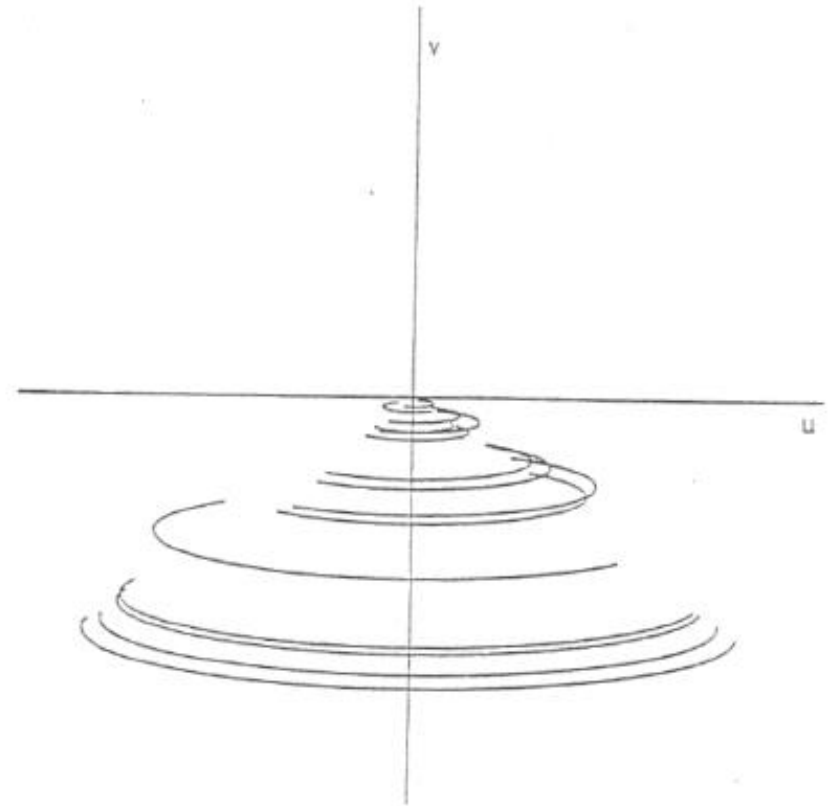
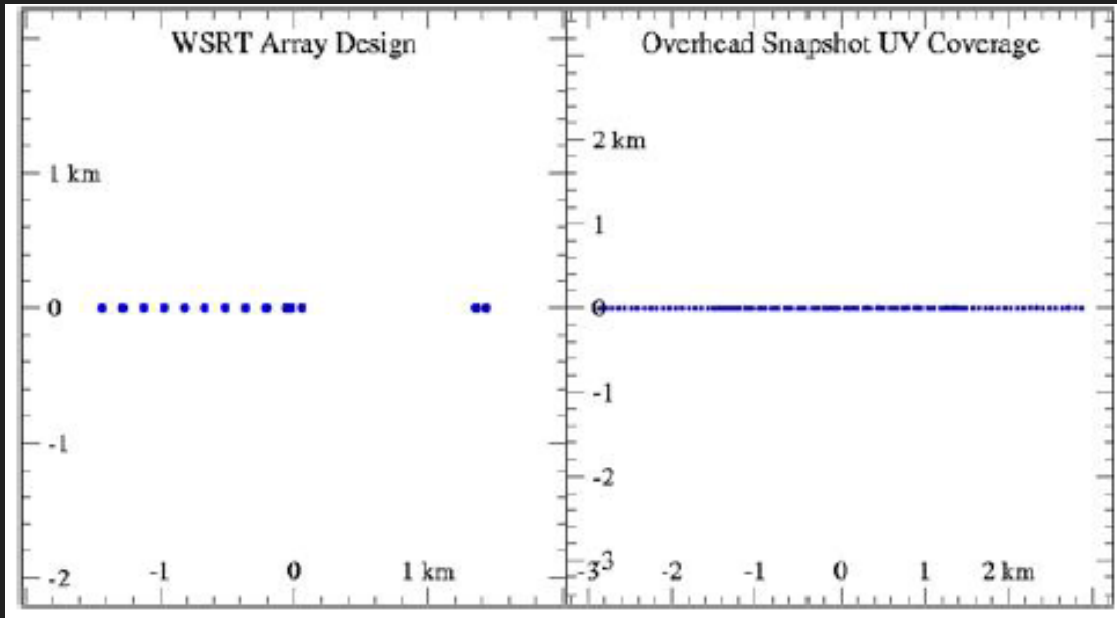


Figure 6: Variation of u, v with Hour angle - the resolution plane for the MERLIN array with source at 10° declination

Апертурен синтез

- Редици от антени: подредени в линия (изток–запад)



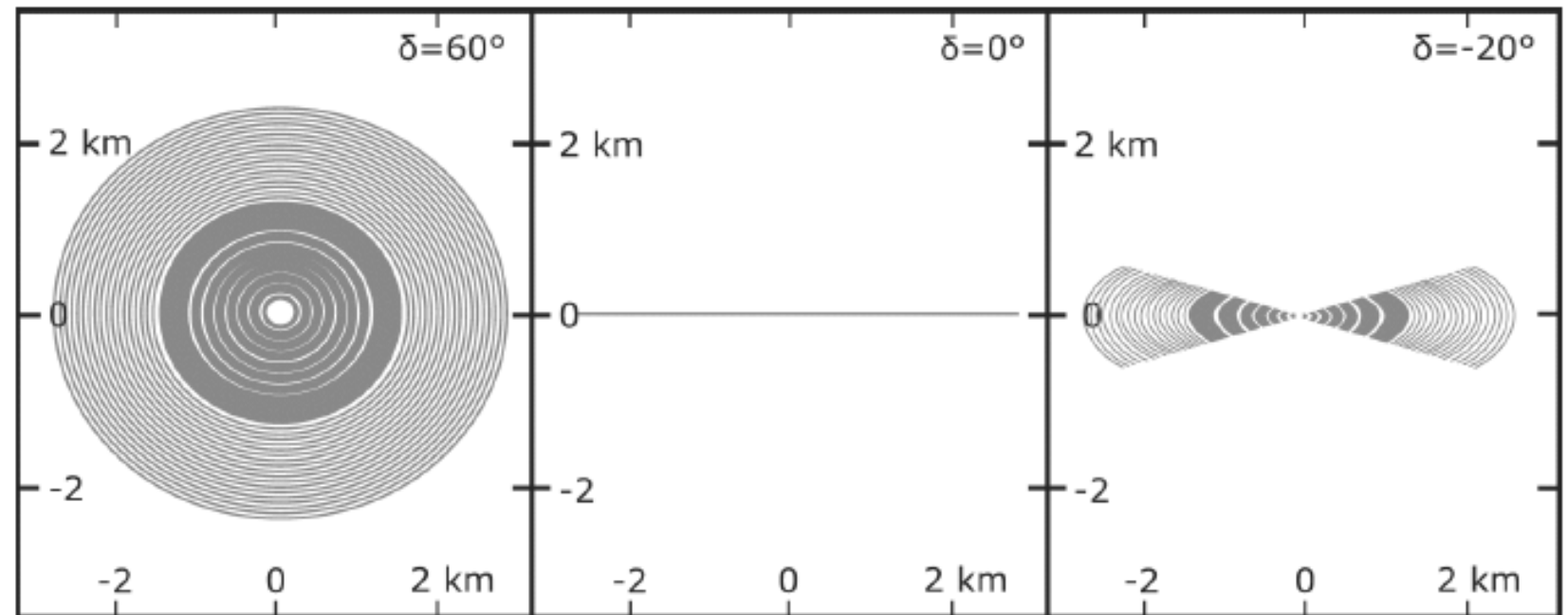
http://ircamera.as.arizona.edu/Astr_518/interferometry1.pdf



FIGURE 56 The Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT). Each of the 14 parabolic reflectors is 25 metres in diameter. © Chris Sciacca, IBM Research.

Апертурен синтез

- За линеен интерферометър (редица от антени) близо до небесния екватор – в равнината (u, v) няма да се опише елипса



Апертурен синтез

- Конфигурация на кръст (т.е., добавя се и посоката север–юг)

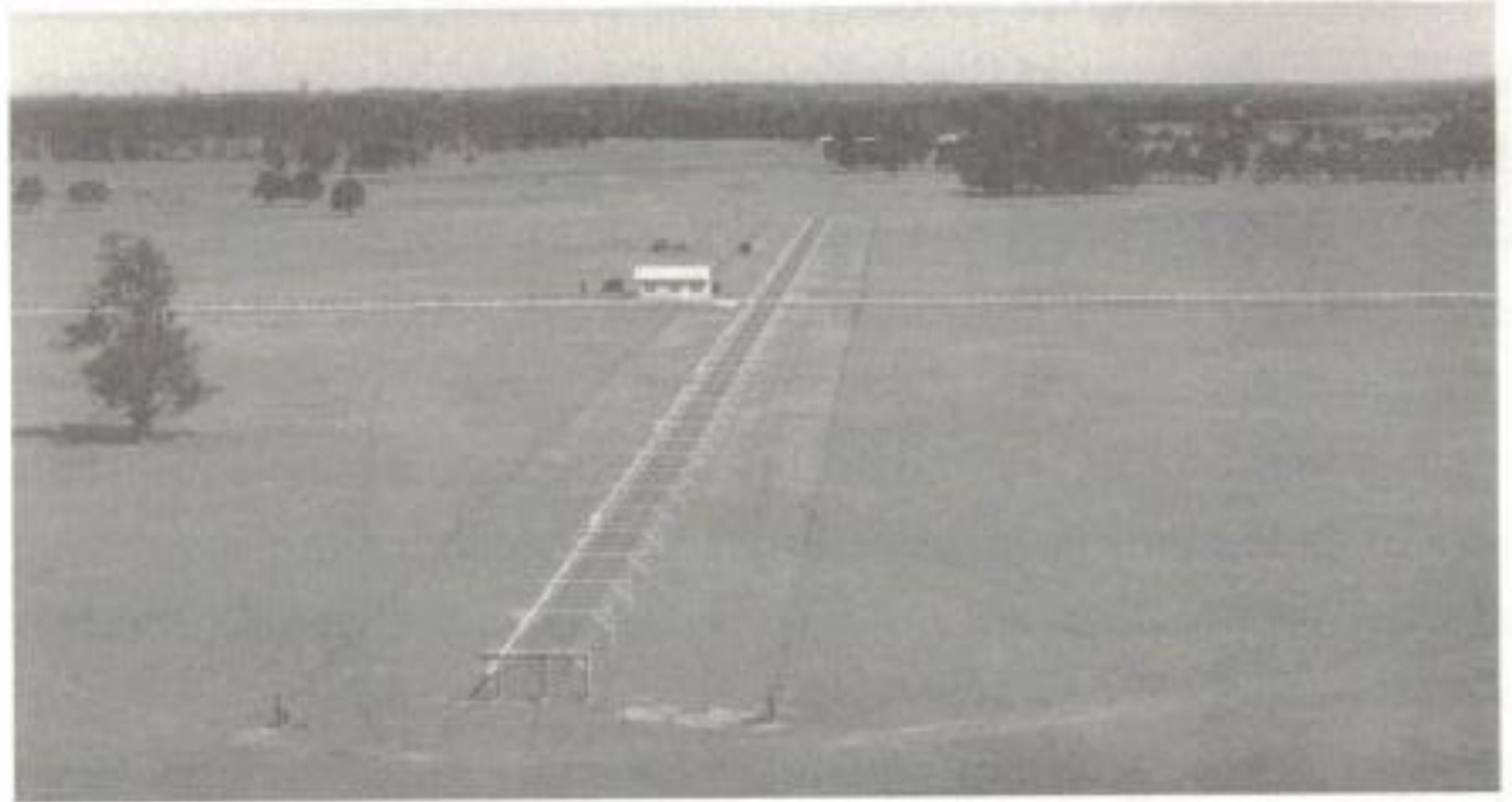
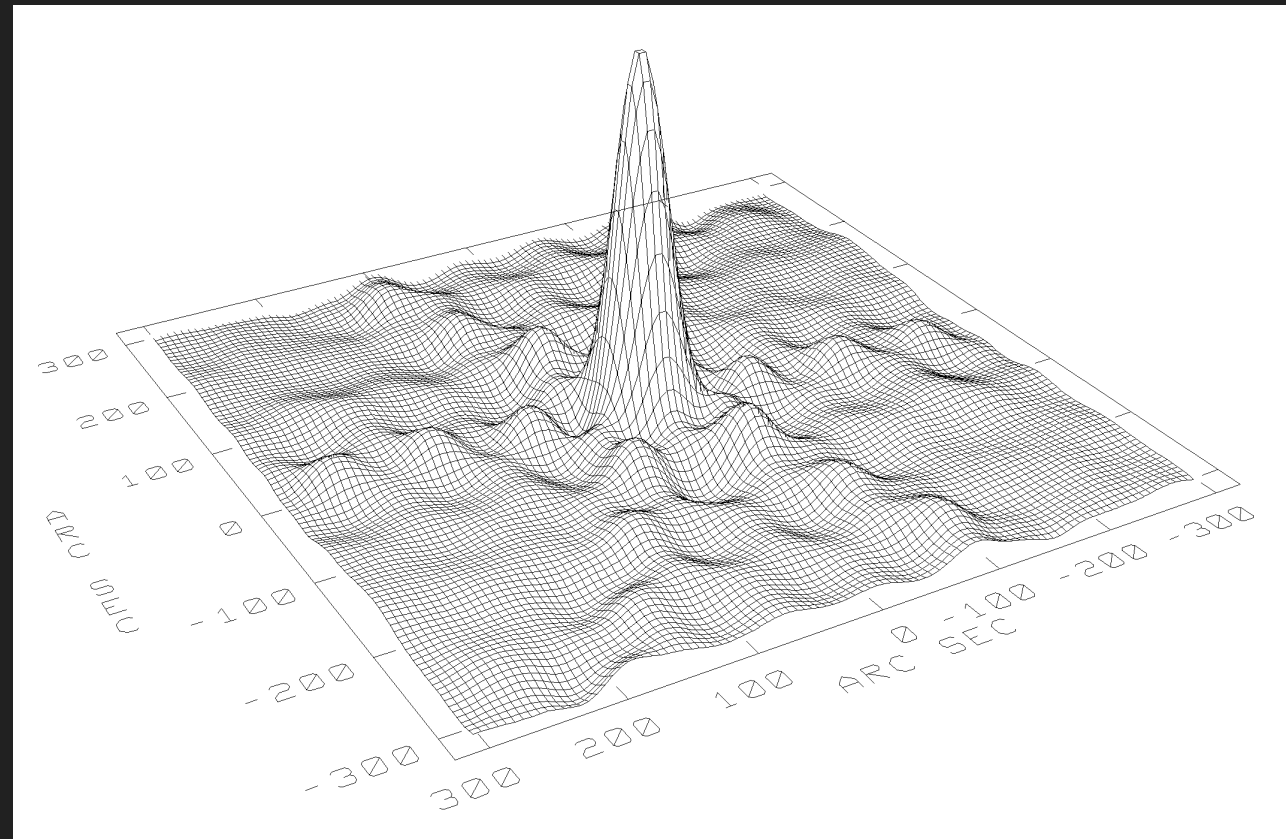
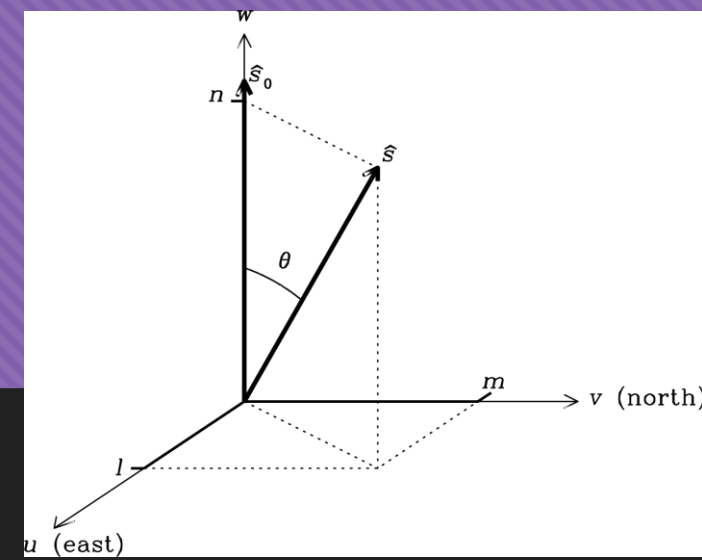


FIGURE 54 The Mills Cross radio telescope at Molonglo. A later version using large cylindrical paraboloids is still in use. CSIRO Radio Astronomy Image Archive.

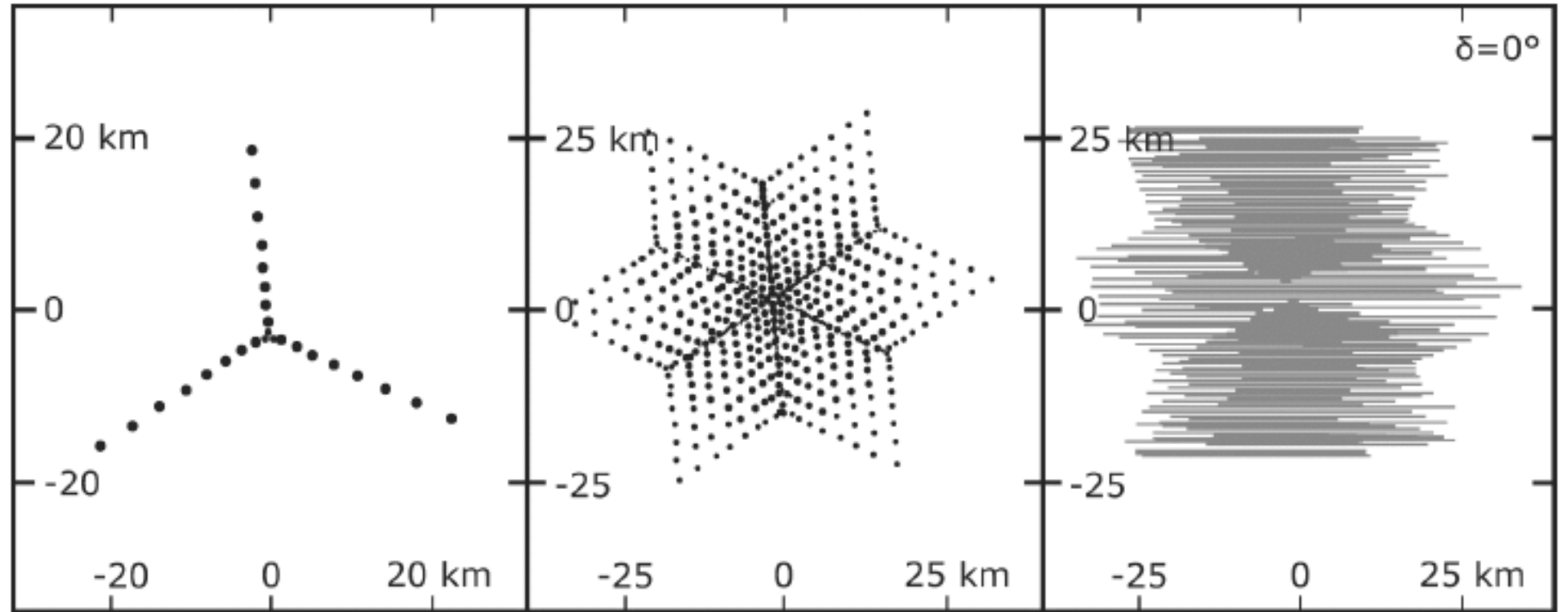
Arrays

- При разположение на антените в три посоки – свежда се до краткосрочни наблюдения в планарна конфигурация (напр. VLA)
- u – изток
- v – север
- w – в посока на радиоизточника
- Има по-интензивни и по-ясно изразени sidelobes, които могат да бъдат редуцирани при апертурен синтез от земното въртене



Апертурен синтез

○ Y-конфигурация

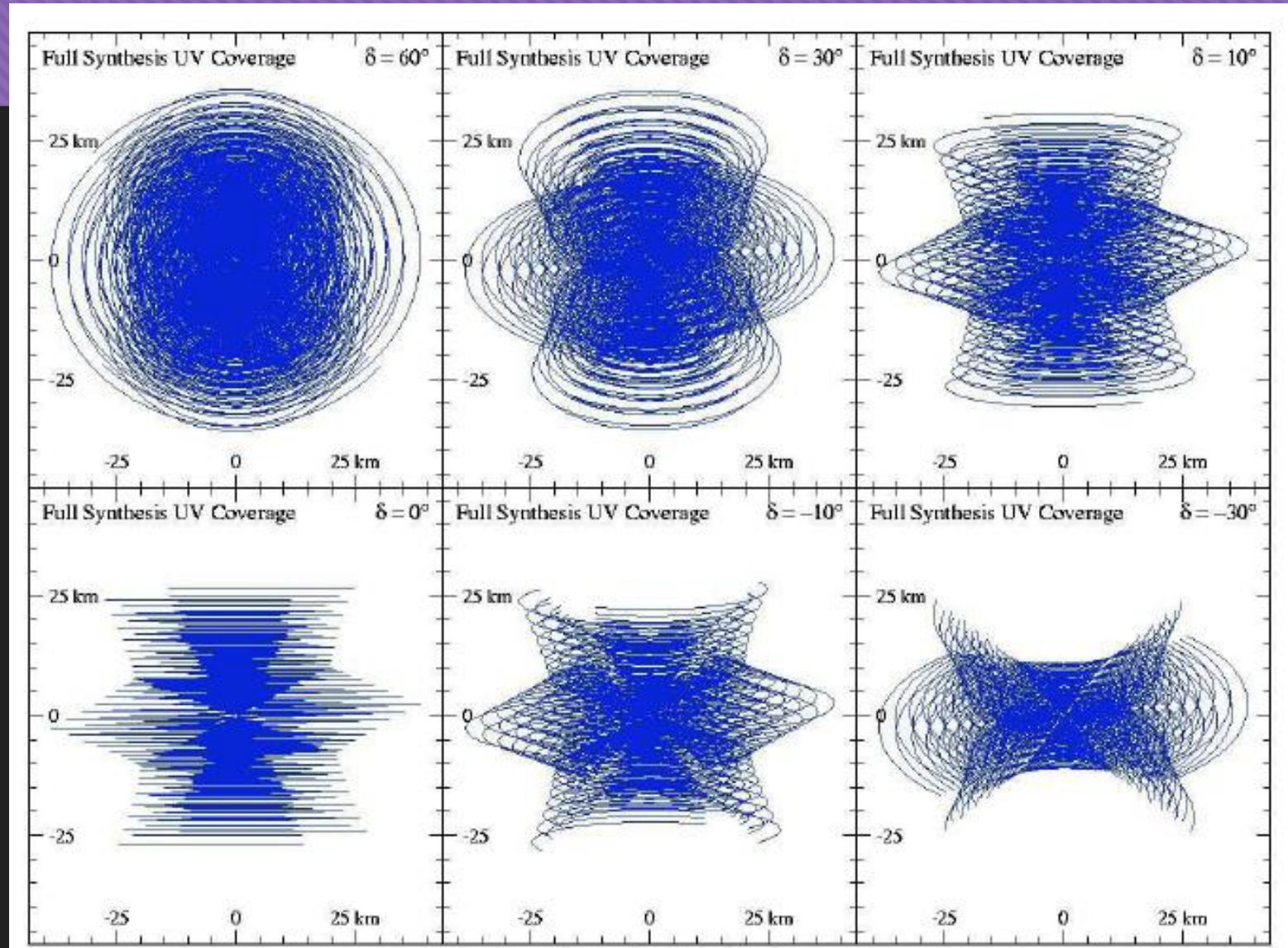


Апертурен синтез

- Y-конфигурация, VLA, за различни деклинации на източника
- ALMA може да променя конфигурацията си в зависимост от научната задача

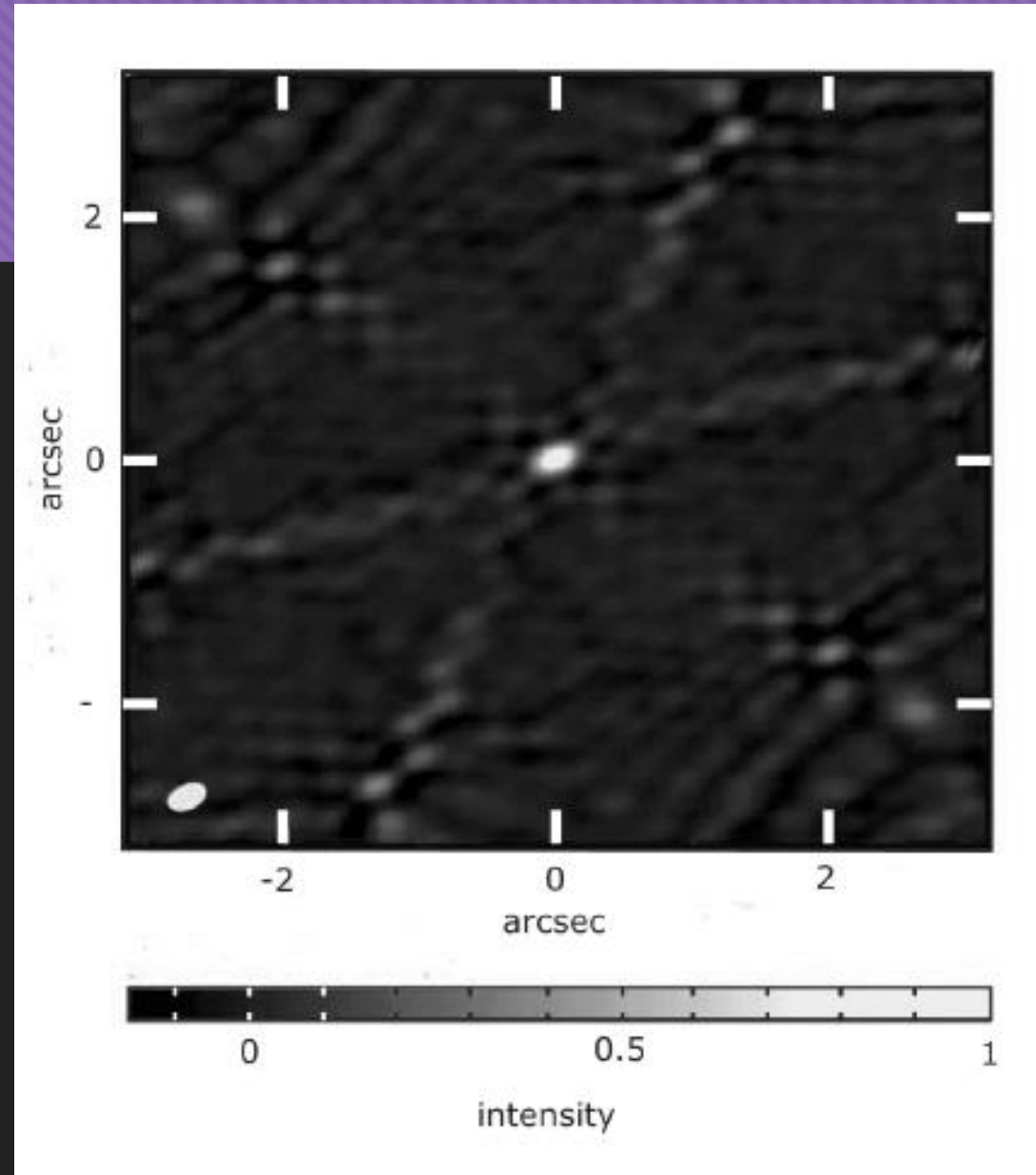
<https://public.nrao.edu/telescopes/alma/>

http://ircamera.as.arizona.edu/Astr_518/radio_interferometry_2016.pdf



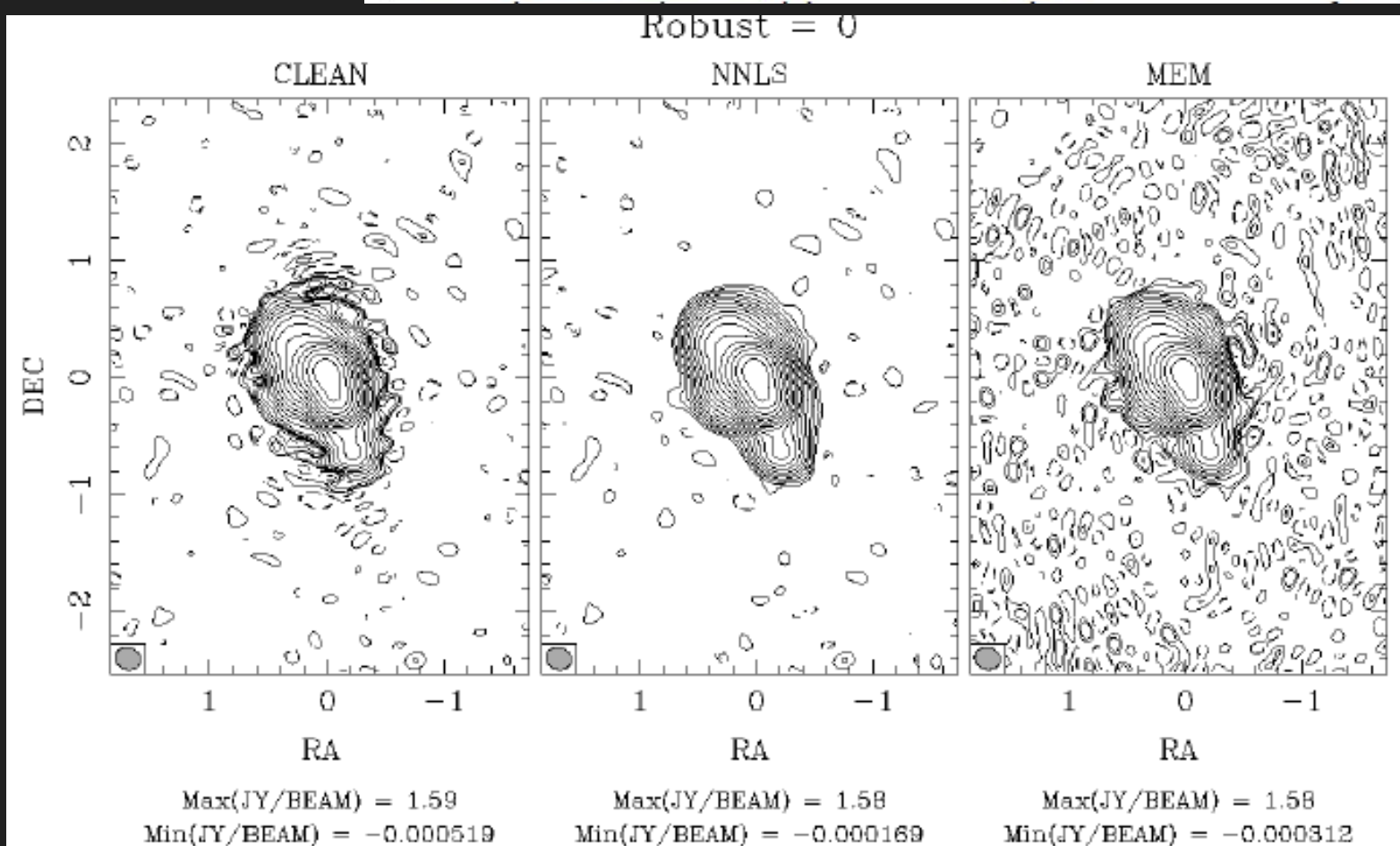
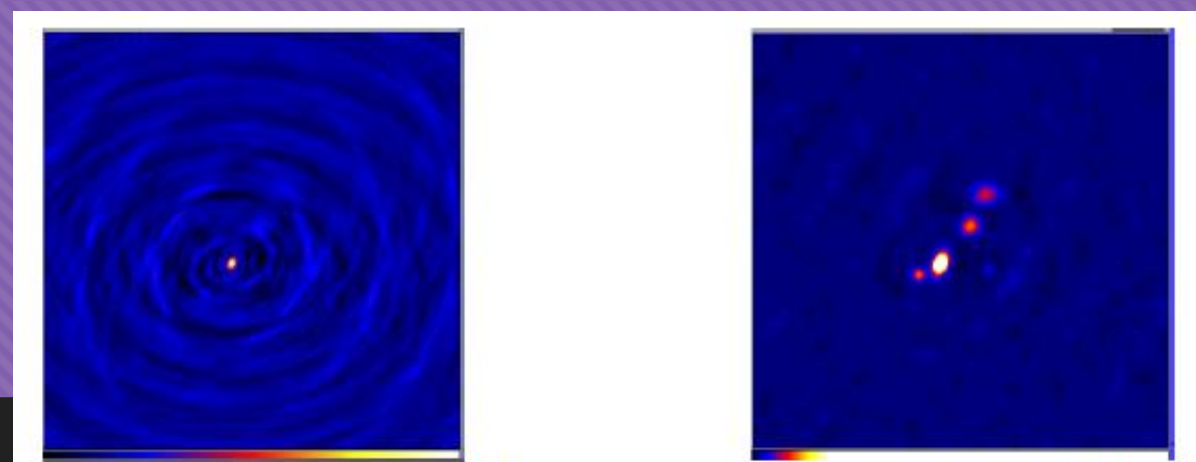
Апертурен синтез

- 'dirty image' – получава се при еднократна детекция на източника, без въртене на интерферометъра
- Върху изображението се появяват sidelobes – с амплитуда до 20% от основния сигнал
- Стандартна процедура за изчистване на изображението: 'CLEAN'
 - 1) предполага се, че изображението може да се апроксимира като поле от точкови източници
 - 2) намира позицията на най-ярката точка на dirty map
 - 3) изважда скалирана версия на dirty beam от тази позиция
 - 4) записва се позицията на извадения интензитет
 - 5) намира най-ярката позиция върху dirty map след изваждането
 - 6) повтарят се стъпките 3) – 5) до момента преди интензитета на dirty map да стане отрицателен



Апертурен синтез

- При големи по размери източници се използват други методики за изчистване на изображението, напр. Maximum entropy method (MEM) или NNLS

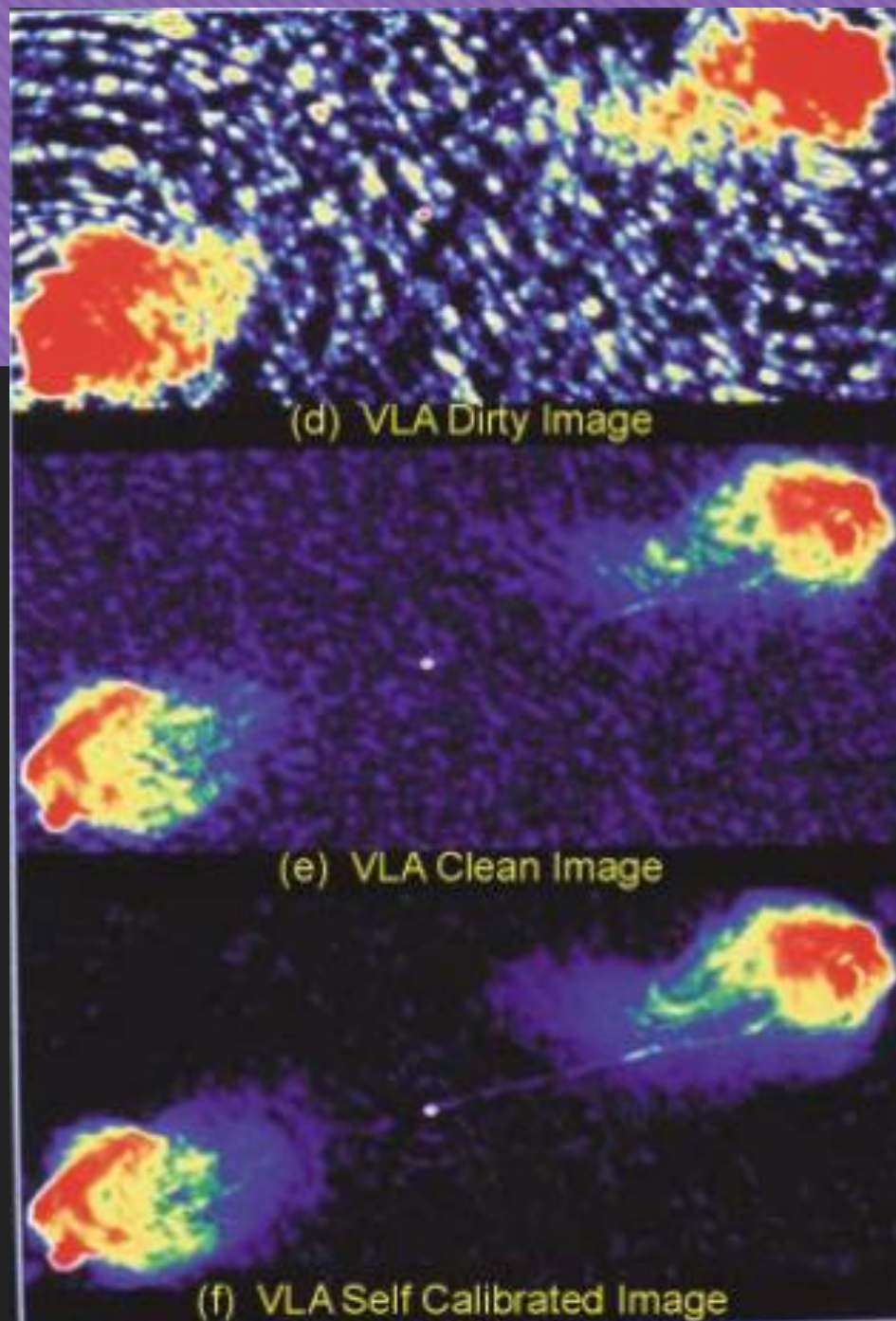


Апертурен синтез

- Пример за Cygnus A

<https://public.nrao.edu/telescopes/vla/>

http://ircamera.as.arizona.edu/Astr_518/radiodevelopment.pdf



Very long Baseline Array (VLBA)

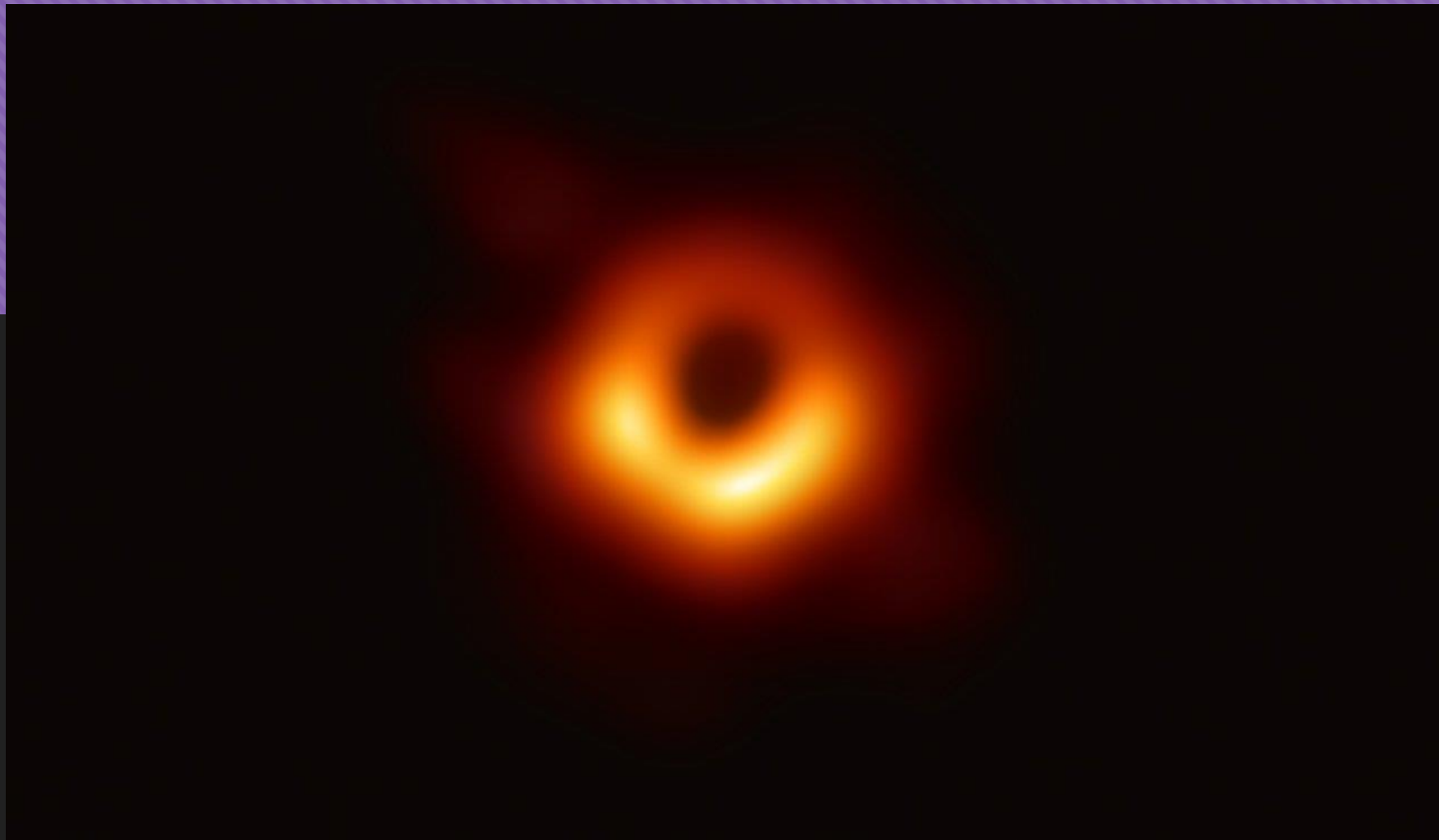
- Сигналят от детектора може да се запише и да се синтезира по-късно
- С антени разположени на отделни континенти се постига разледателна способност от мили-дъгови секунди в см

$\theta = 0.00017$ arcsec (по-добра от Hubble Space Telescope, 0.1 мили-дъгови секунди)

<https://public.nrao.edu/telescopes/vlba/>



M87's black hole



<https://www.eso.org/public/news/eso1907/?lang>

- Event Horizon Telescope (EHT) е мрежа от 8 наземни радиотелескопи по цялото земно кълбо работещи като виртуален телескоп
- ЕНТ използва техника наречена very-long-baseline interferometry (VLBI) – синхронизират се наблюденията от тези телескопи и се използва въртенето на Земята, наблюдения на $\lambda \sim 1.3 \text{ mm}$ с 20 микро-дъгови секунди разделителна способност

SKA

Squared Kilometer Array

- Проект за най-големия радиотелескоп: <https://www.skatelescope.org/the-ska-project/>



Дефиниции

Thus the quantitative definition of **specific intensity** or **spectral brightness** is

$$I_\nu \equiv \frac{dP}{(\cos \theta d\sigma) d\nu d\Omega}$$

and the MKS units of I_ν are $\text{W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}$.

$$S_\nu \equiv \int_{\text{source}} I_\nu (\theta, \phi) \cos \theta d\Omega.$$

If the source angular size is $\ll 1$ rad, $\cos \theta \approx 1$ and the expression for flux density is much simpler:

$$S_\nu \approx \int_{\text{source}} I_\nu (\theta, \phi) d\Omega.$$

$$1 \text{ jansky} = 1 \text{ Jy} \equiv 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$$

$$S_\nu \propto d^{-2}$$

<https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/xxx.html>

The **total flux** or **flux S** from a source is the integral over frequency of flux density:

$$S \equiv \int_0^\infty S_\nu d\nu.$$

The **spectral luminosity L_ν** of a source is defined as the total power per unit bandwidth radiated by the source at frequency ν ; its MKS units are W Hz^{-1} . The area of a sphere of radius d is $4\pi d^2$, so the relation between the spectral luminosity and the flux density of an *isotropic* source radiating in free space is

$$L_\nu = 4\pi d^2 S_\nu, \quad (2.15)$$

The dimensionless quantity

$$\tau \equiv - \int_{s_{\text{out}}}^{s_{\text{in}}} \kappa(s') ds'$$

is called the **optical depth** or **opacity** of the absorber. Note that $d\tau = -\kappa ds$.

If $\tau \ll 1$, the absorber is said to be **optically thin**; if $\tau \gg 1$, it is **optically thick**.

Дефиниции

Thus the correct blackbody radiation law becomes

$$B_\nu = \frac{2kT\nu^2}{c^2} \left[\frac{\frac{h\nu}{kT}}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \right], \quad (2.85)$$

where the first factor is the Rayleigh–Jeans approximation and the quantity in square brackets is the quantum correction factor. Planck's equation for the spectral brightness B_ν of blackbody radiation is usually written in the simpler form

Solving for B_ν yields the Rayleigh–Jeans approximation for the spectral brightness of blackbody radiation

$$B_\nu = \frac{2kT\nu^2}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2} \quad (2.79)$$

that is valid only in the low-frequency limit $h\nu \ll kT$.

radio astronomers often find it convenient to specify the spectral brightness I_ν , even if $I_\nu \neq B_\nu$, in terms of the equivalent Rayleigh–Jeans brightness temperature T_b defined by the equation

$$I_\nu = \frac{2kT_b\nu^2}{c^2}.$$

Astronomers frequently use the term redshift defined by

$$z \equiv \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} - 1 = \frac{\nu_e}{\nu_o} - 1, \quad (2.127)$$

where λ_e and ν_e are the wavelength and frequency emitted by a source at redshift z , and λ_o and ν_o are the observed wavelength and frequency at $z = 0$. The redshift z and expansion factor a are related by