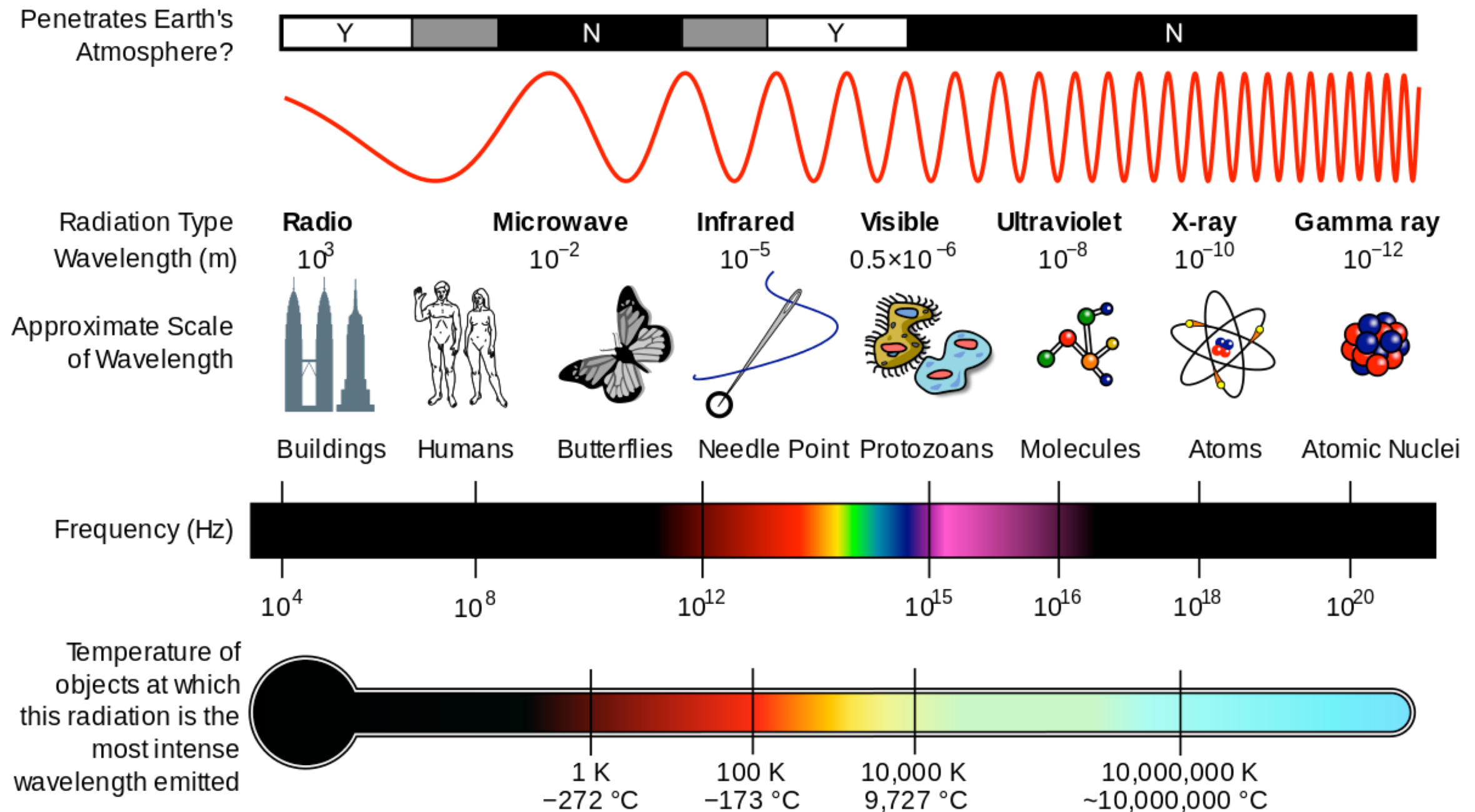


Radio-interferometrie: Hoe werkt het?

Christiaan Brinkerink
Masterclass PUC, 9 februari 2023

Het elektromagnetisch spectrum



Verschillende telescopen zijn nodig om dit spectrum te meten!



Radiation Type
Wavelength (m)

Radio
 10^3

Microwave
 10^{-2}

Infrared
 10^{-5}

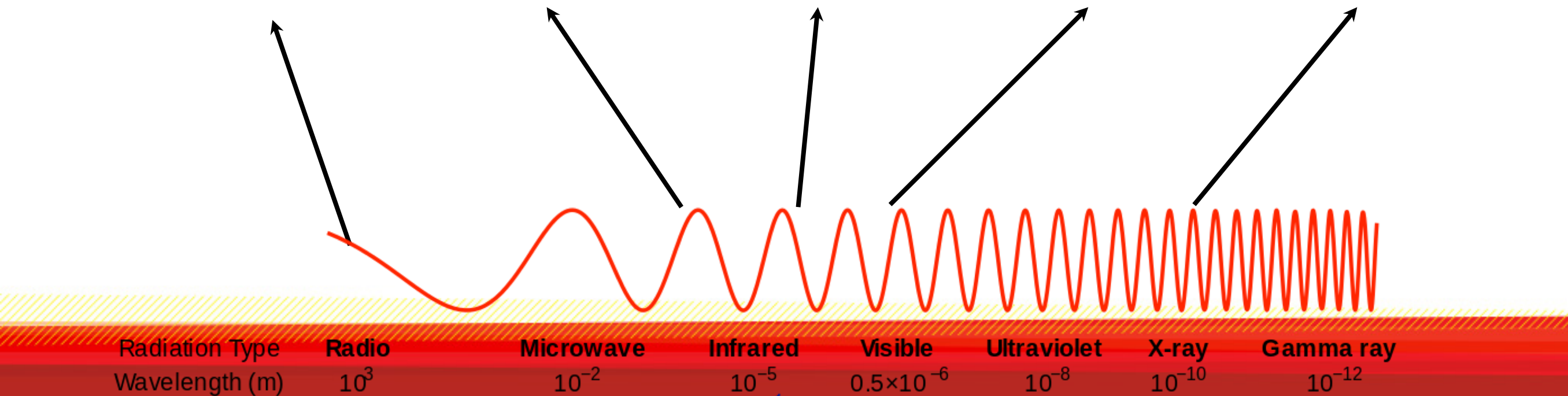
Visible
 0.5×10^{-6}

Ultraviolet
 10^{-8}

X-ray
 10^{-10}

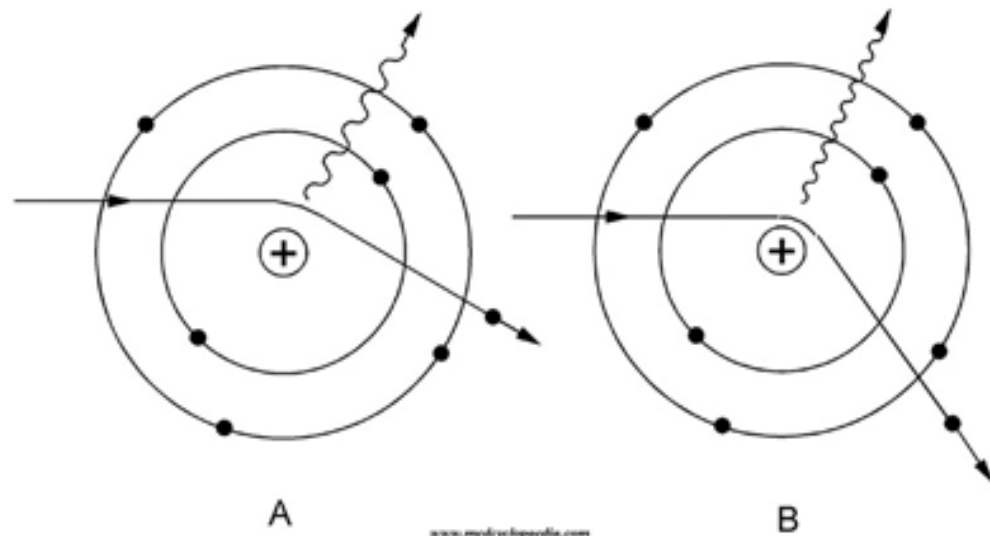
Gamma ray
 10^{-12}

Eén sterrenstelsel, vele gezichten...

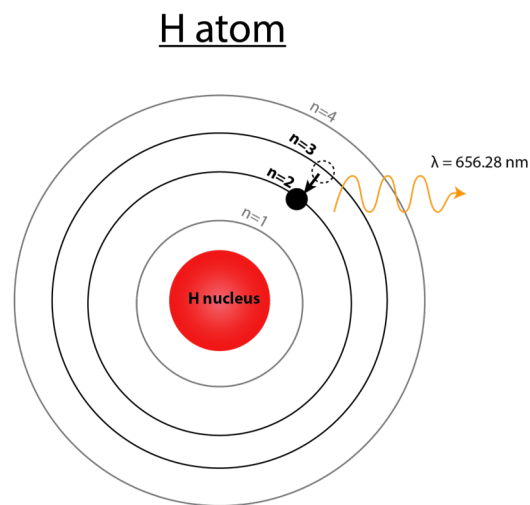


Hoe wordt straling gevormd?

Door versnellende geladen deeltjes!



Bremsstrahlung

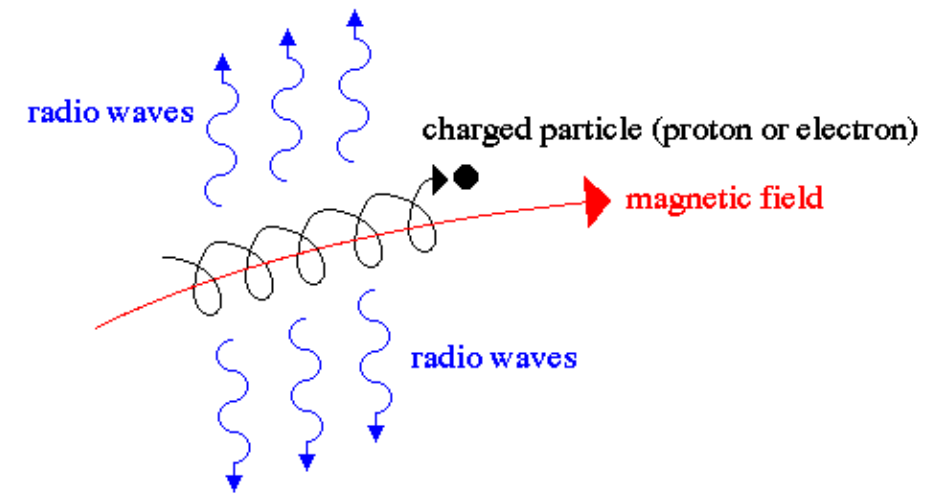


H atom

Hydrogen-alpha
Naming: Balmer lines

Lijn-emissie

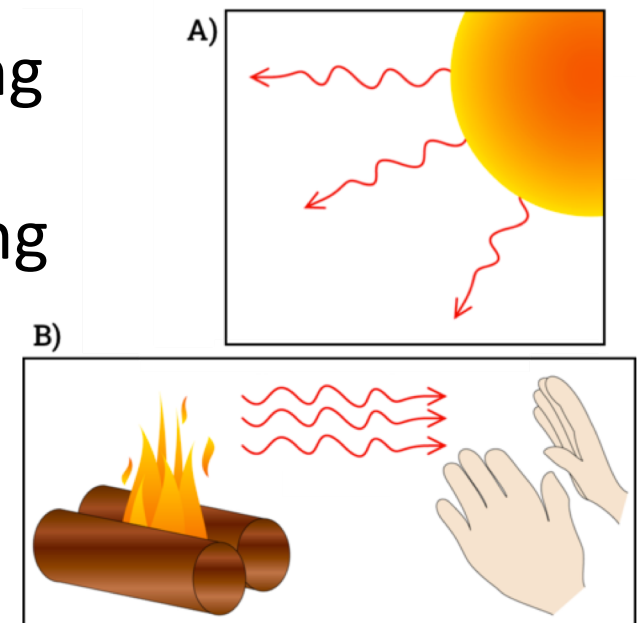
Synchrotron radiation



Cyclotron- of
synchrotronstraling

Thermische straling

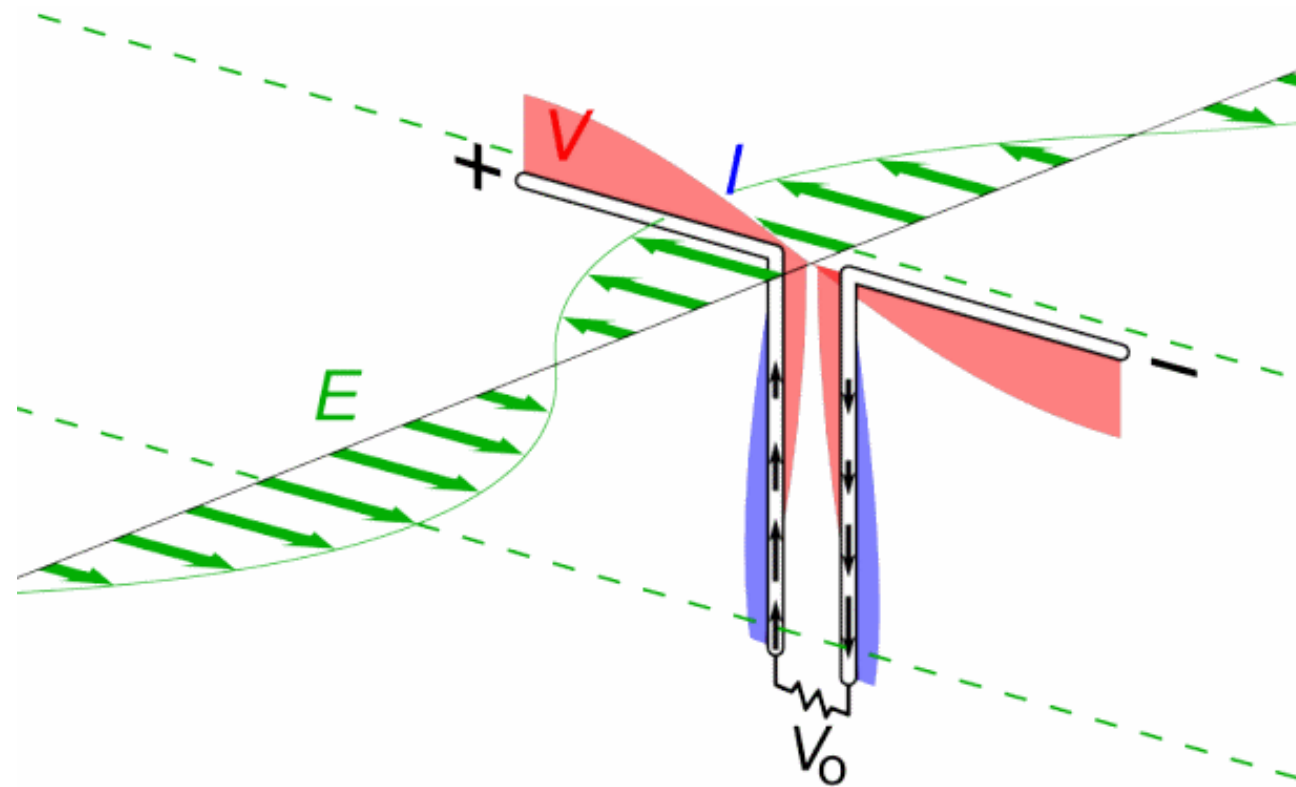
Thermal Radiation



Hoe 'zien' we radiostraling?

Door elektronen te laten reageren op het trillend elektrisch veld:

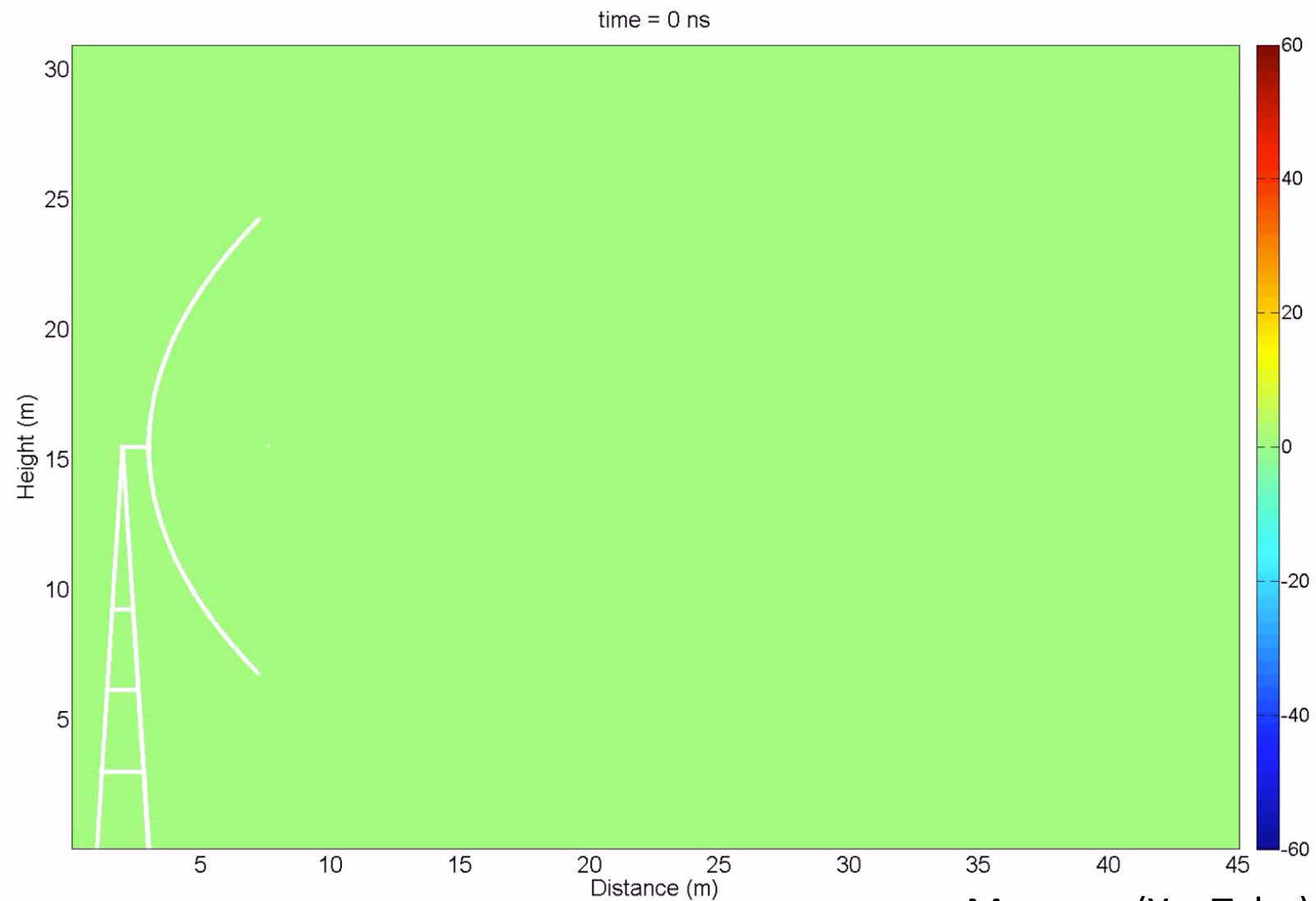
Chetvorno (Wikimedia commons)



Hoogste gevoeligheid: wanneer alle elektronen tegelijk dezelfde kant op worden geduwd!

Hoe kunnen we zwakkere golven detecteren?

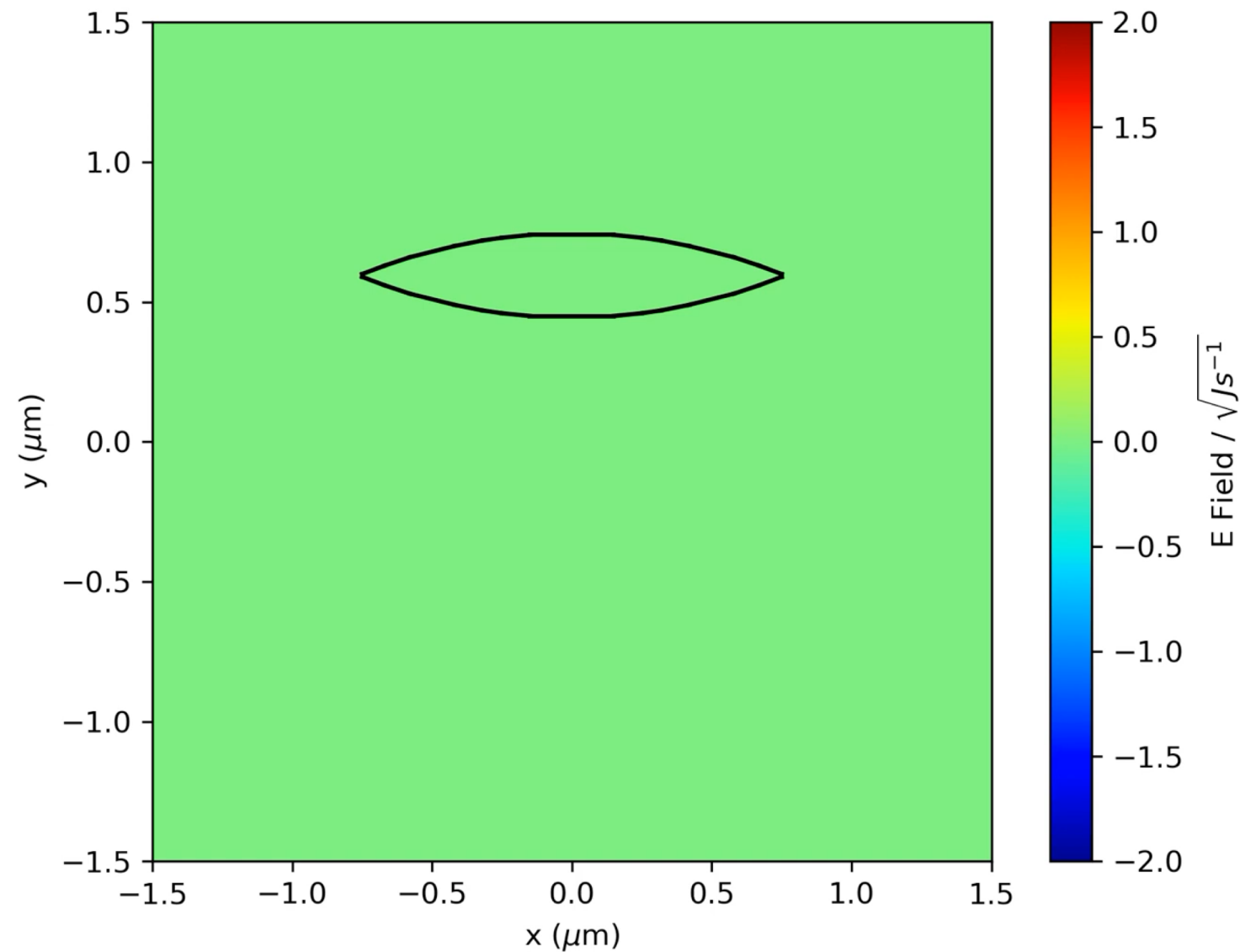
Dit kan via het gebruik van parabolische schotels:



Meyavuz (YouTube)

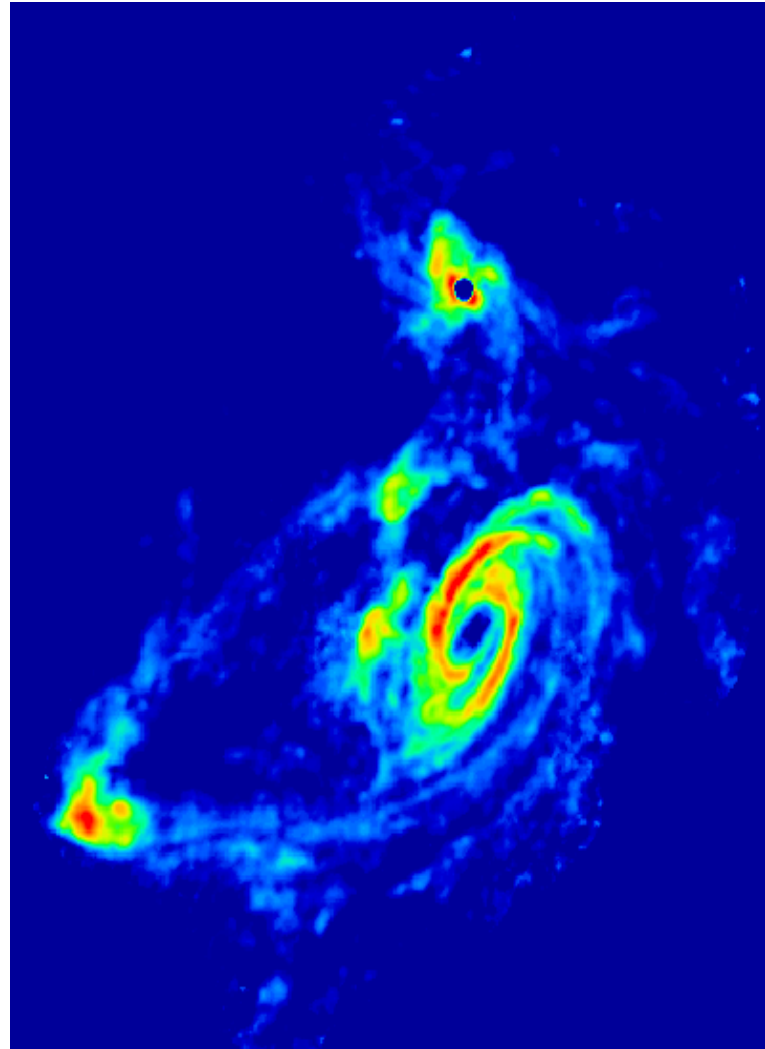
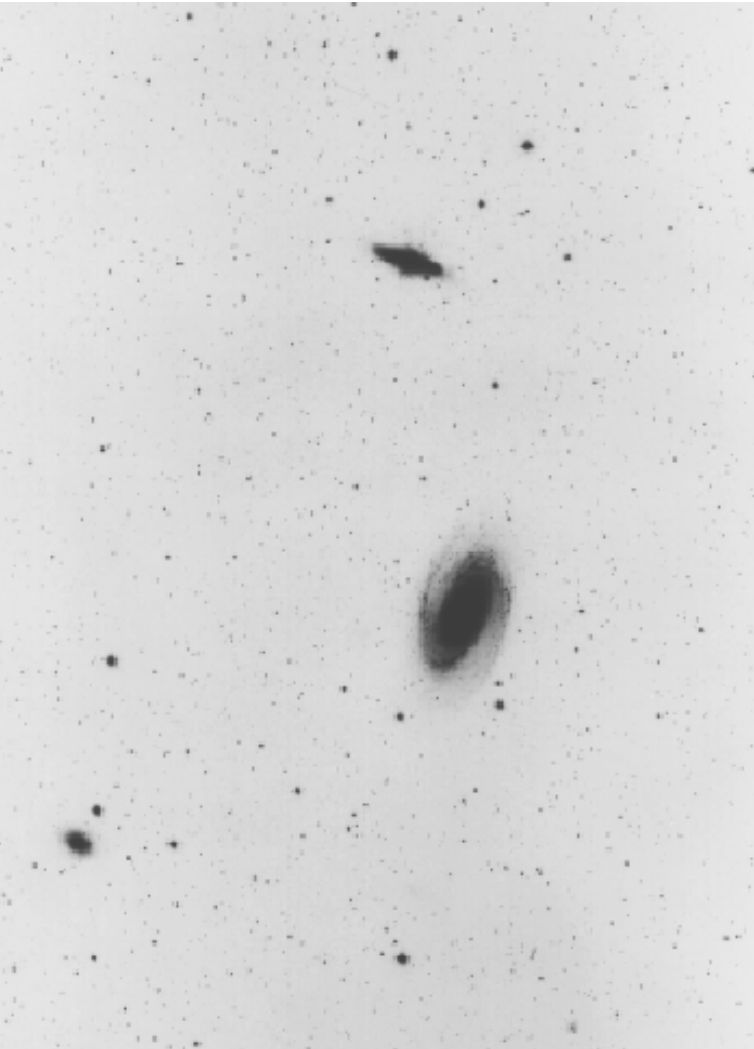
Hoe kunnen we zwakkere golven detecteren?

Dit is eigenlijk ook wat we met optische lenzen doen!

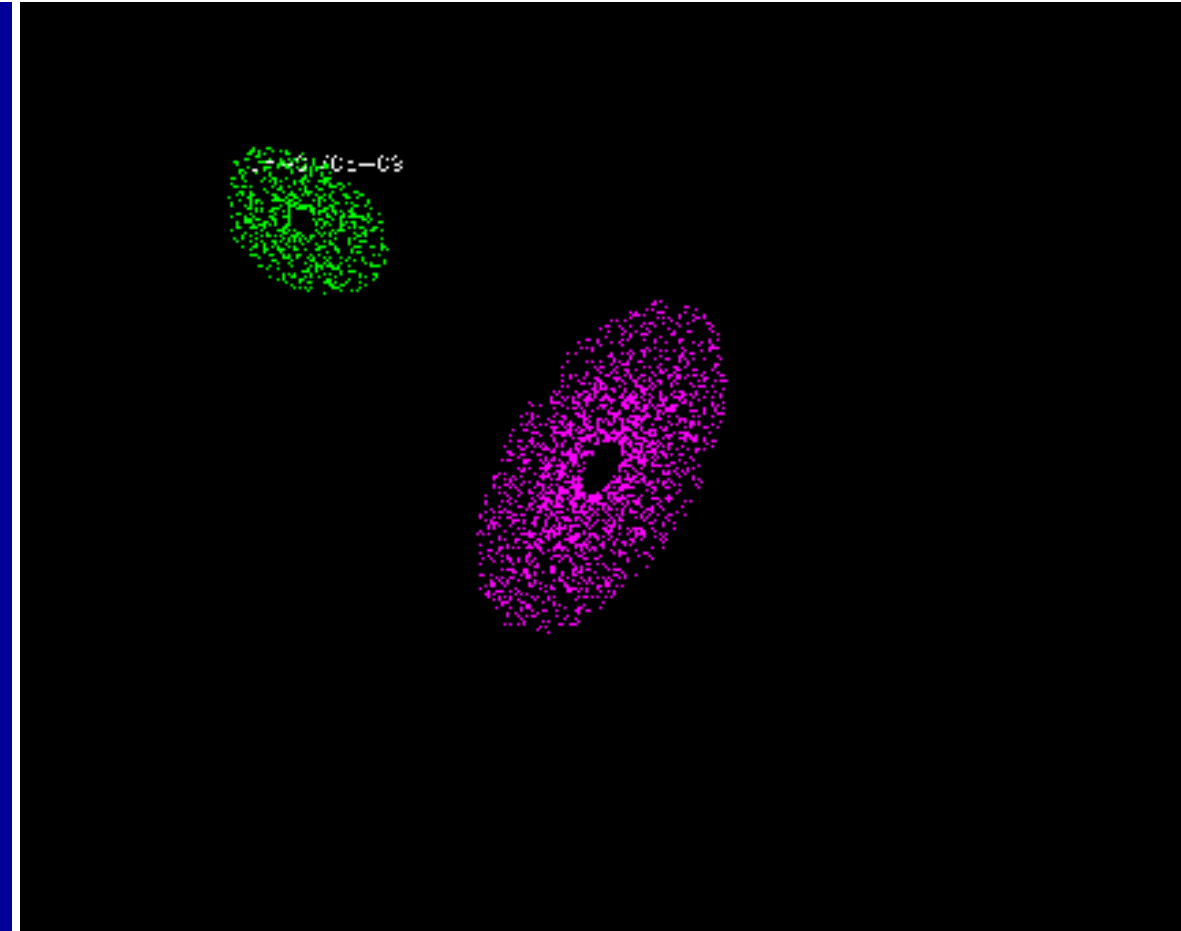
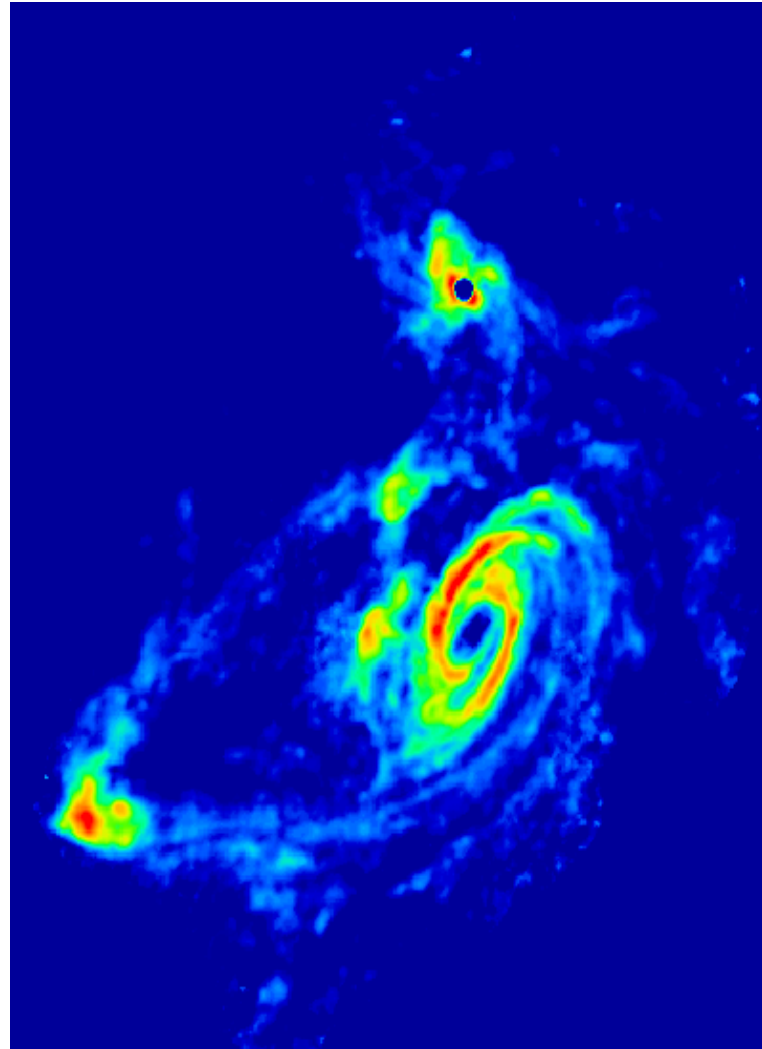
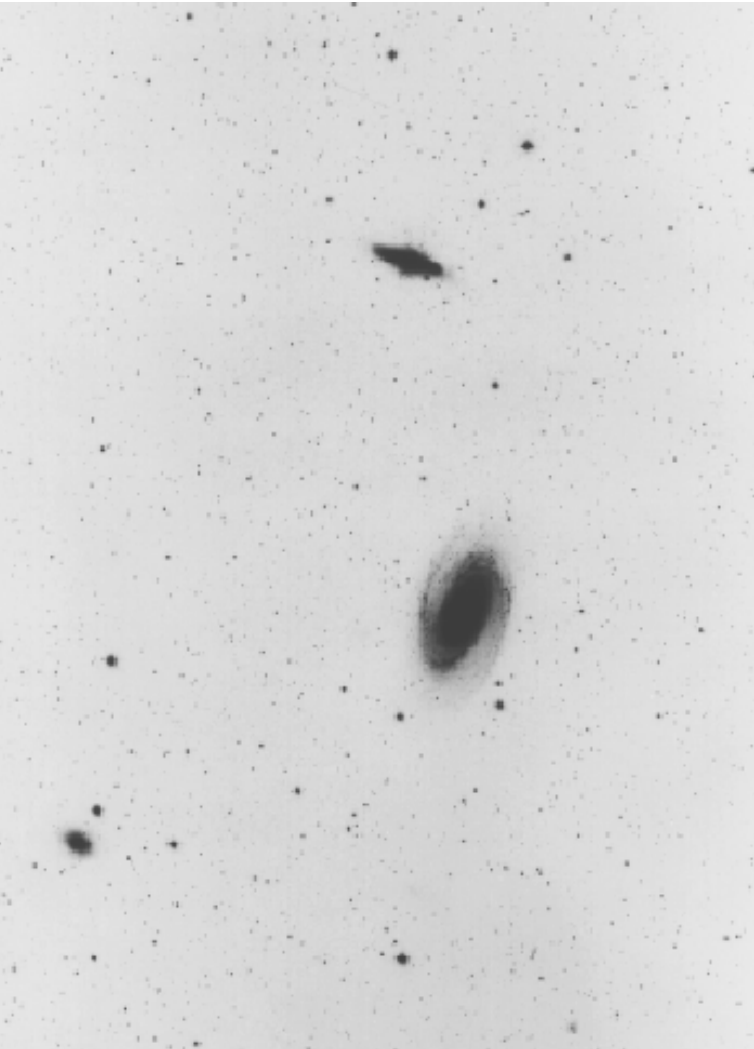


Akash Dasgupta (YouTube)

Radiostraling laat onverwachte dingen zien...

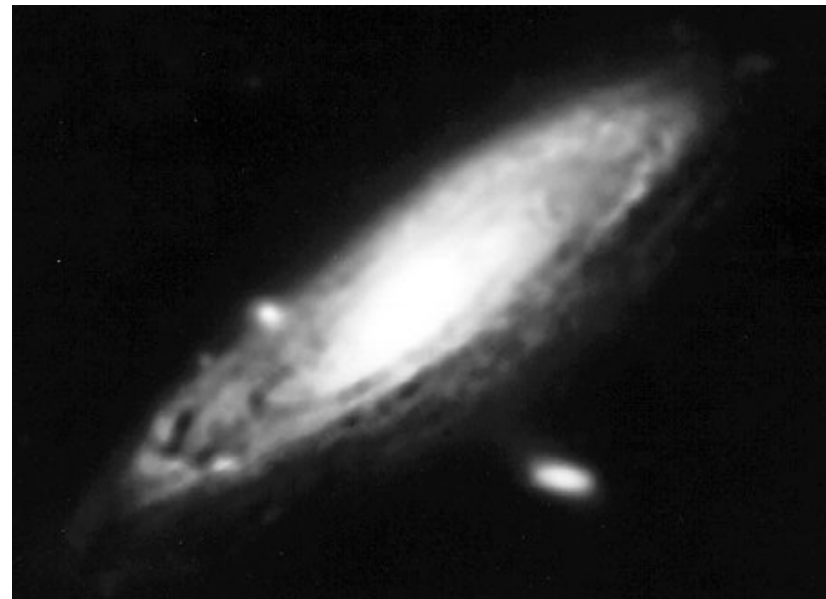


Radiostraling laat onverwachte dingen zien...

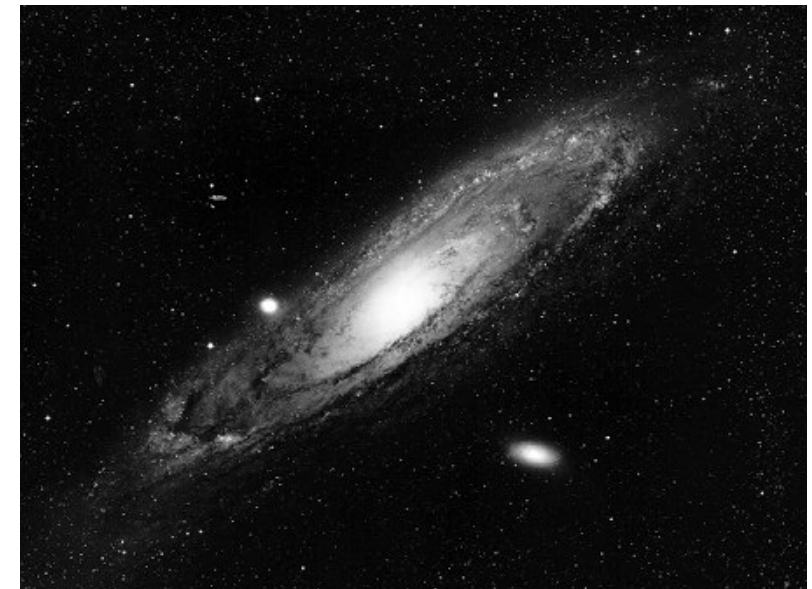


Hoe scherp kunnen telescopen zien?

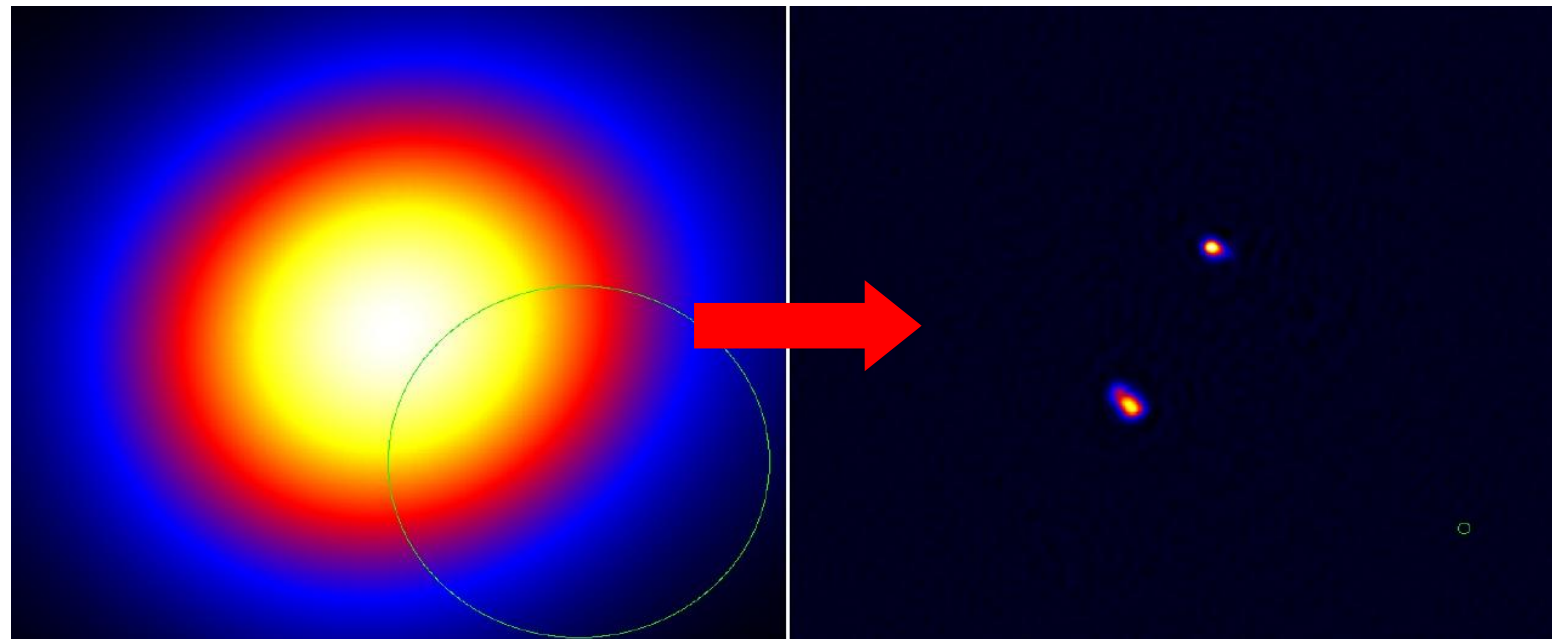
Dit is gedefinieerd door de **resolutie** van een telescoop:



lage resolutie



hoge resolutie

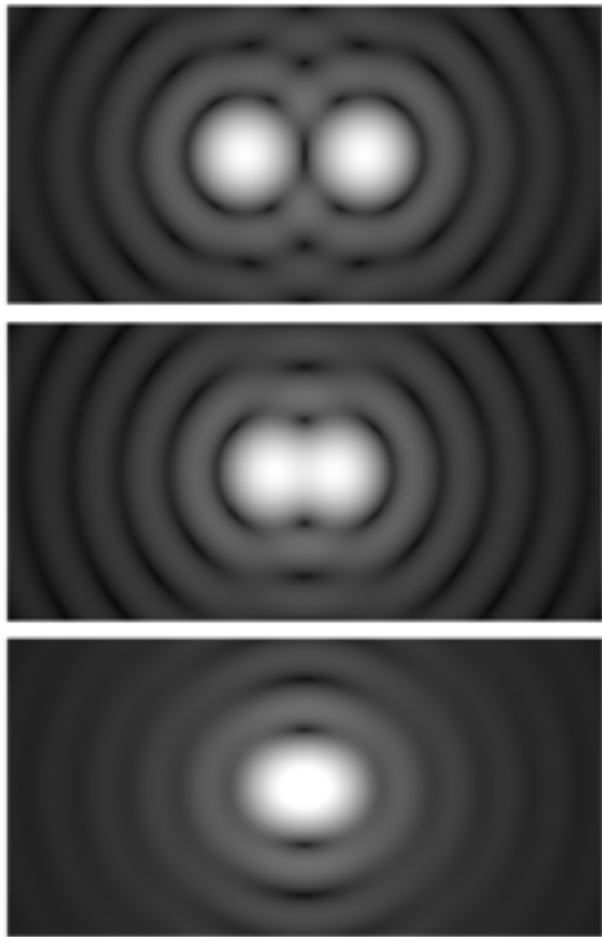


Hoe scherp kunnen telescopen zien?

Dit is gedefinieerd door de **resolutie** van een telescoop:

resolutie $\theta \approx 1.22 \frac{\lambda}{D} = \frac{\text{golflengte van de straling}}{\text{diameter van de telescoop}}$

met θ in radialen
 λ in meters
 D in meters



Rekenvoorbeelden van resolutie

Hubble telescoop (zichtbaar licht ~ 500 nm):



$$\theta \approx 1.22 \frac{\lambda}{D} \approx 1.22 \times \frac{500 \text{ nm}}{2.4 \text{ m}} \approx 0,000014^\circ \approx 0,05''$$

Radiotelescoop: golflengte $\lambda \sim 21$ cm, dus VEEL groter!

Dus als je een radiotelescoop wil bouwen met dezelfde resolutie als Hubble, dan moet de diameter van die radiotelescoop zijn:

$$D \approx 1.22 \frac{\lambda}{\theta} \approx 1.22 \frac{21 \text{ cm}}{0,05''} \approx 1056900 \text{ m} \approx 1000 \text{ km}$$

De grootste radiotelescopen van de wereld:



Arecibo, Puerto Rico
diameter: 305 m
Resolutie ($\lambda 21\text{cm}$) $\theta = 0,04^\circ$

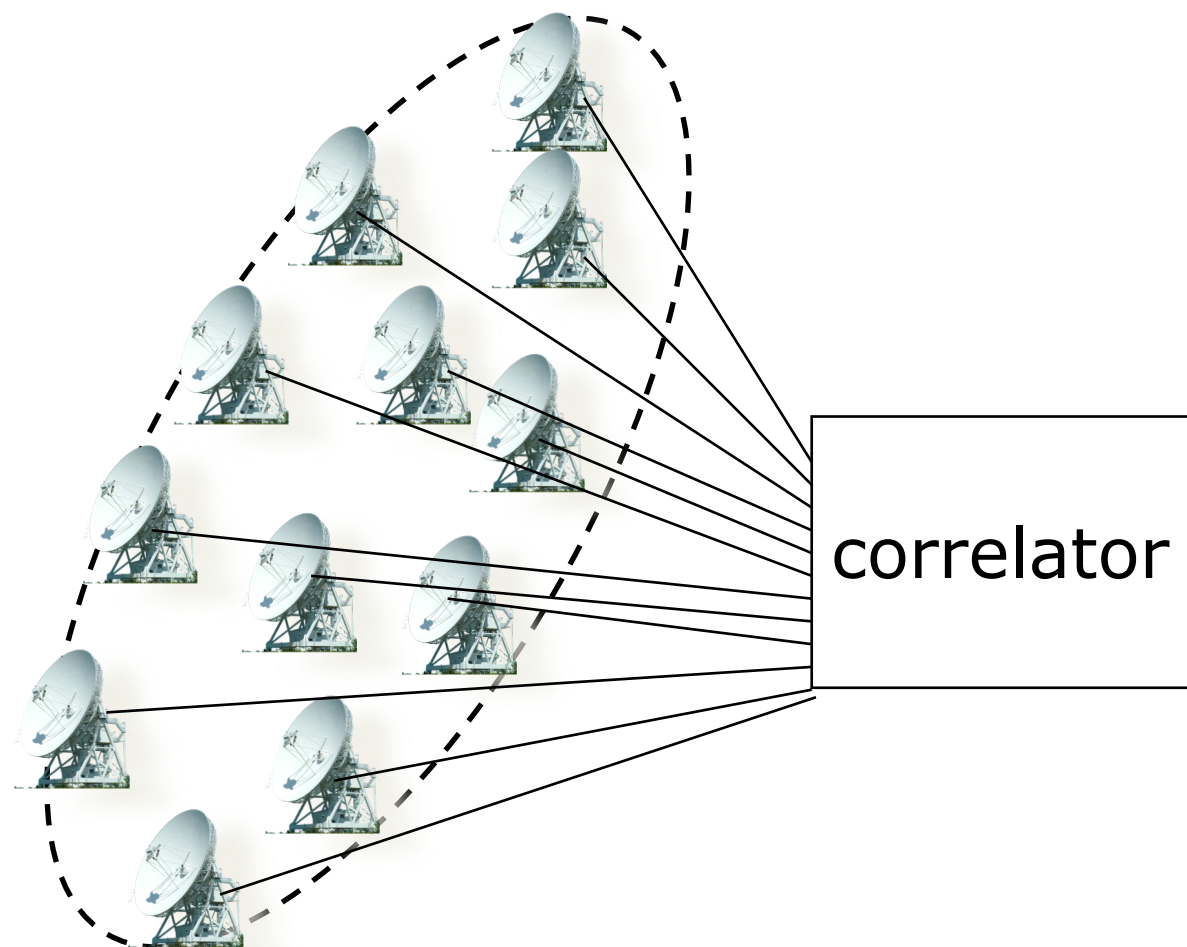


FAST, China
diameter: 500 m
Resolutie ($\lambda 21\text{cm}$) $\theta = 0,02^\circ$

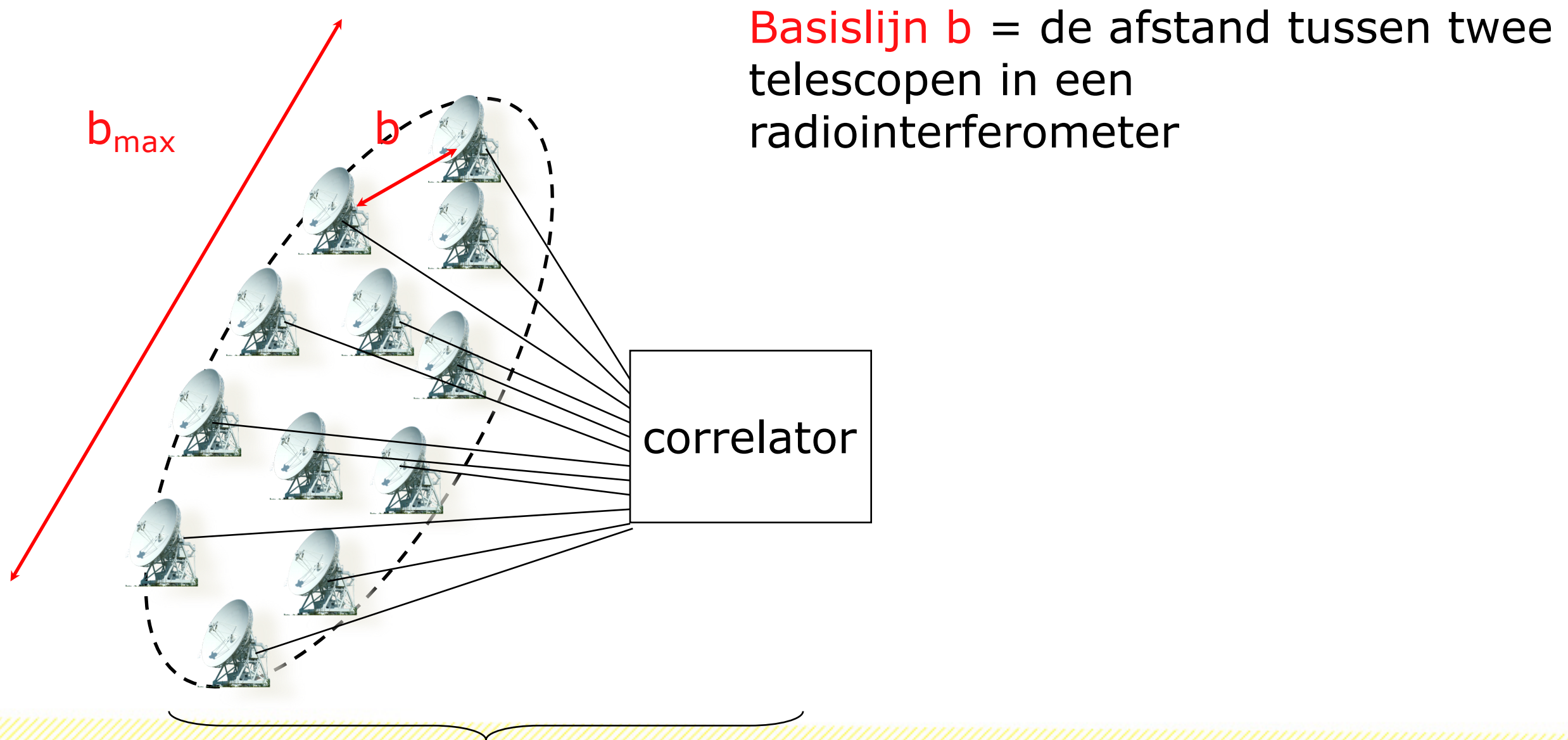


Effelsberg, Duitsland
diameter: 100 m
Resolutie ($\lambda 21\text{cm}$) $\theta = 0,12^\circ$

Radio-interferometrie: van veel kleine telescopen één grote maken



Radio-interferometrie: van veel kleine telescopen één grote maken



Een radio interferometer

Resolutie van een interferometer:

resolutie

$$\theta \approx 1.22 \frac{\lambda}{D_b} = \frac{\text{golflengte van de straling}}{\text{diameter van de telescoop}}$$

~~D_b~~ langste basislijn

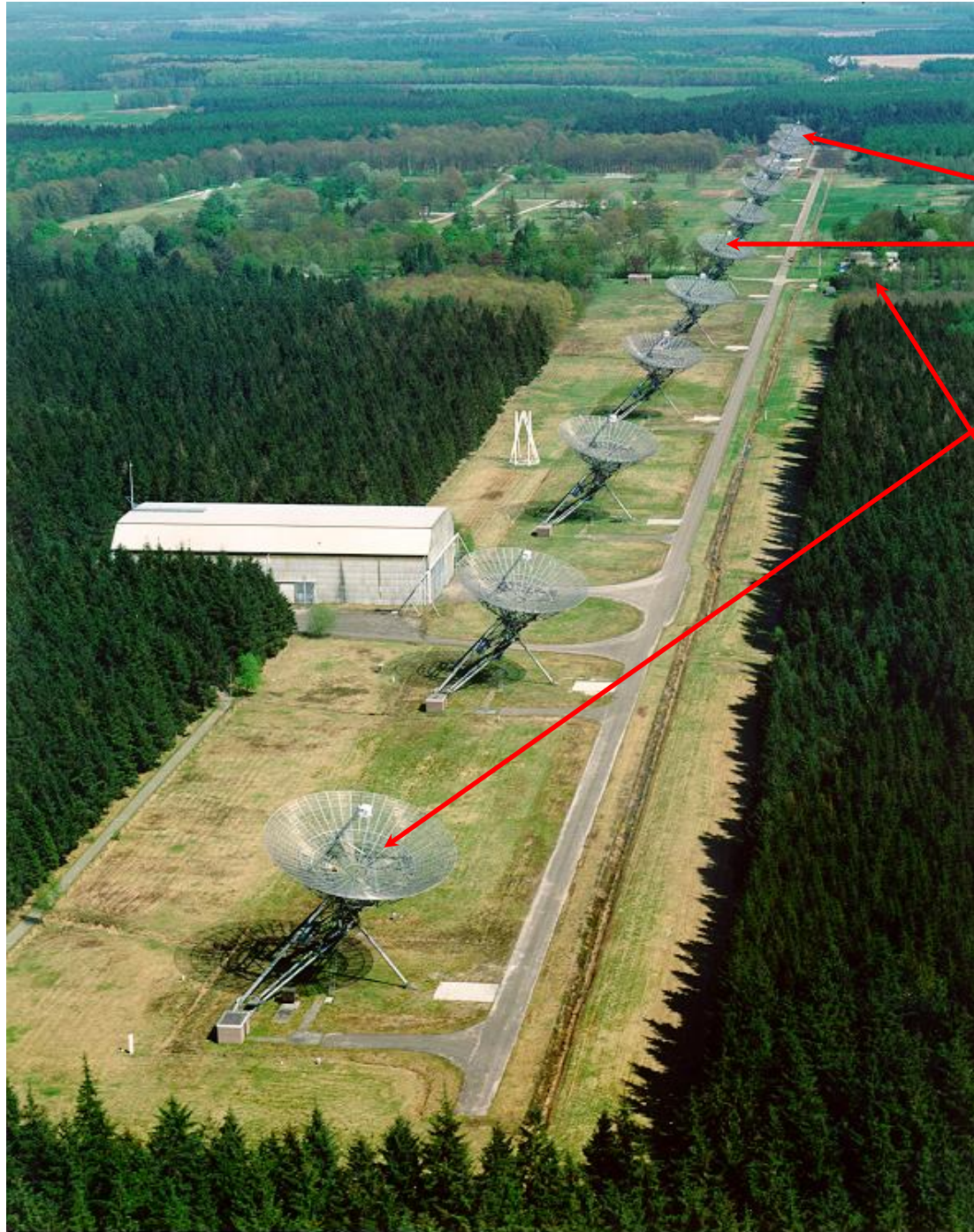
met θ in radialen

λ in meters

~~D_b~~ in meters

b

Voorbeeld: Westerbork Synthese Radio Telescoop



14 telescopen

correlator

Voorbeeld: telescopen over heel Europa koppelen...



De kwaliteit van het radioplaatje:



A B C D
A B C D E F G
A B C D E F G H I J K
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R
A B C D E F G H I J K L M N O P R S T U V W X Y Z

A B C D
A B C D E F G
A B C D E F G H I J K
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R
A B C D E F G H I J K L M N O P R S T U V W X Y Z

A B C D
A B C D E F G
A B C D E F G H I J K
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R
A B C D E F G H I J K L M N O P R S T U V W X Y Z

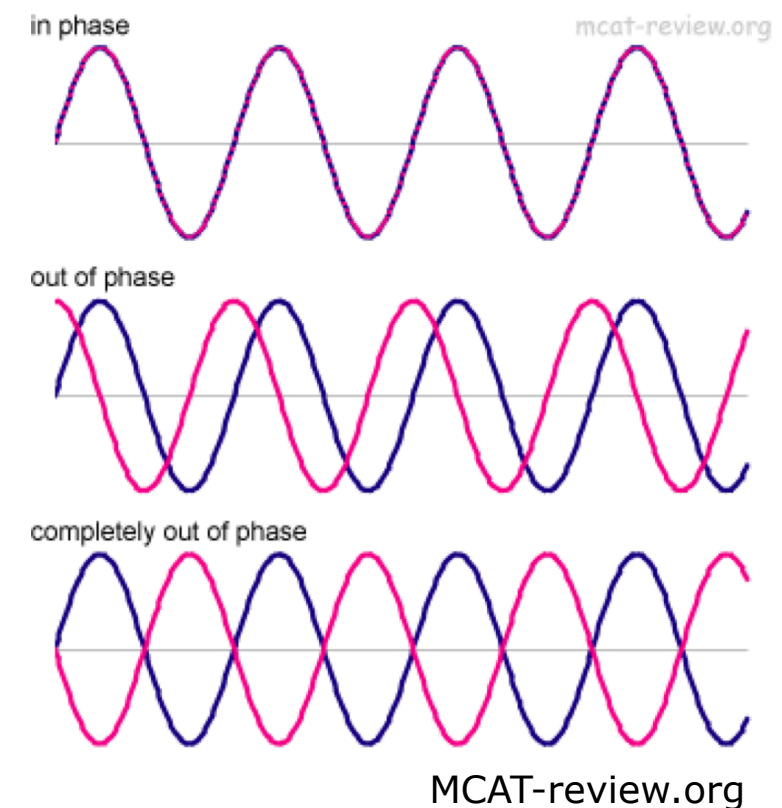
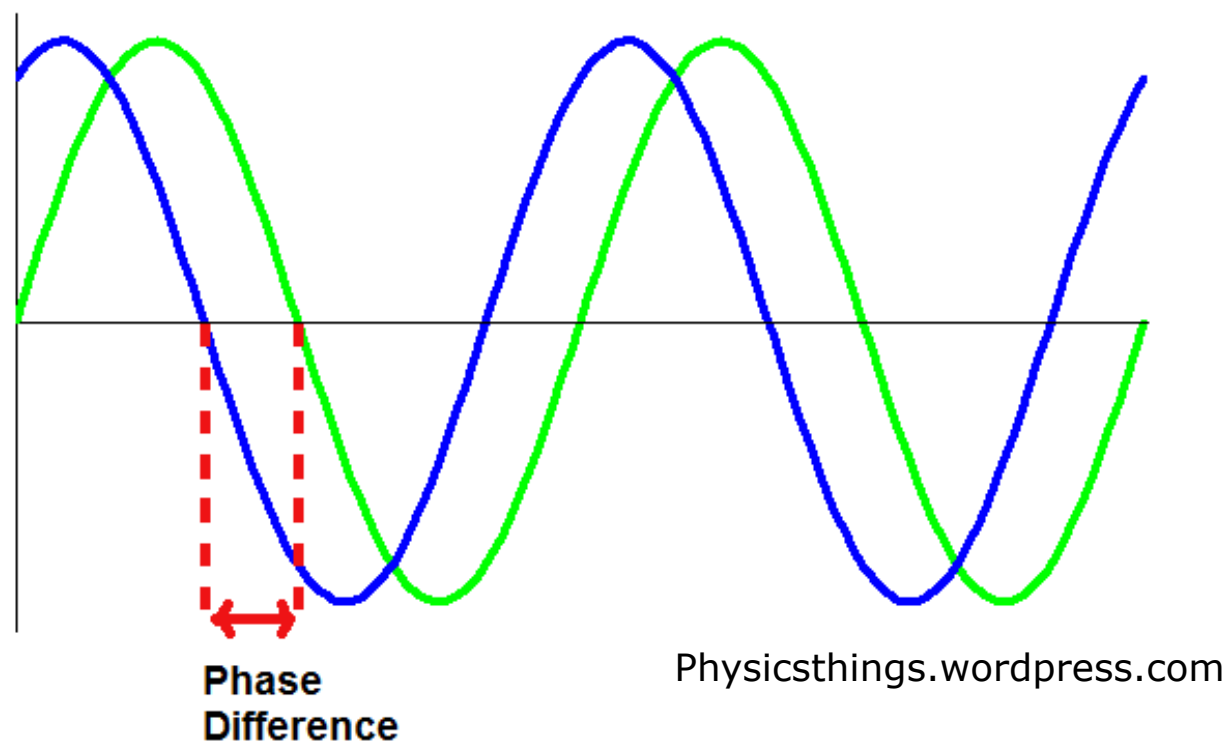
A B C D
A B C D E F G
A B C D E F G H I J K
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R
A B C D E F G H I J K L M N O P R S T U V W X Y Z

Image Credits: Avruch and Pogrebenko

De fase van een golf

Golven hebben een amplitude (hoe 'hoog' is de golf), en een frequentie (hoeveel trillingen per seconde). Maar: je kunt een golf ook verschuiven!

Waar in de trillingsperiode zitten we op een bepaald moment? Dat noemen we de 'fase'.

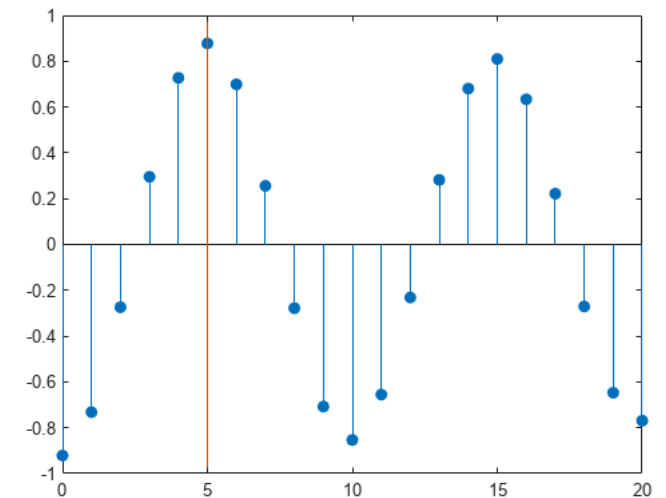


Correlatie

Om te kijken hoeveel twee golven op elkaar lijken, gebruiken we een techniek die 'correlatie' heet.

Recept:

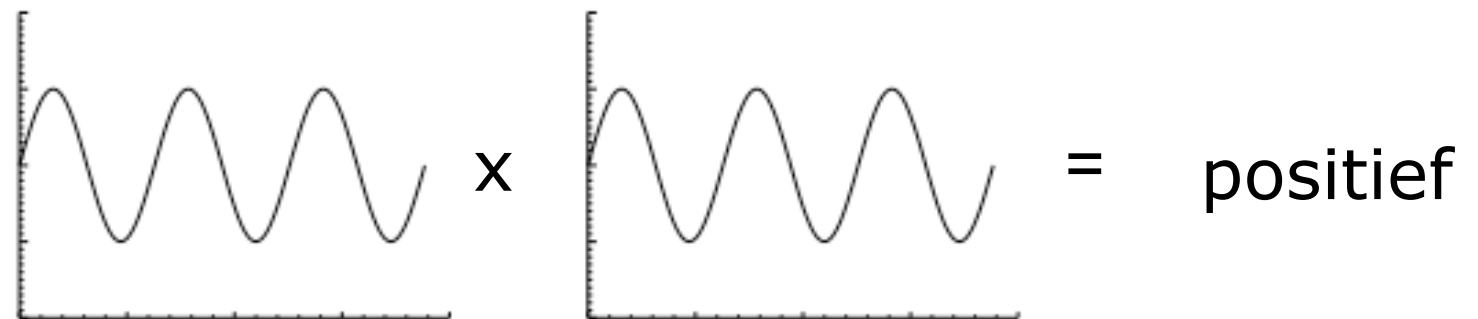
- Pak een stukje van golf 1 (bijvoorbeeld 100 datapunten)
- Pak tegelijkertijd een stukje van golf 2 met dezelfde lengte
- Vermenigvuldig elk datapunt van golf 1 met het corresponderende datapunt van golf 2, en tel al deze uitkomsten bij elkaar op
- Je hebt nu de correlatie te pakken!



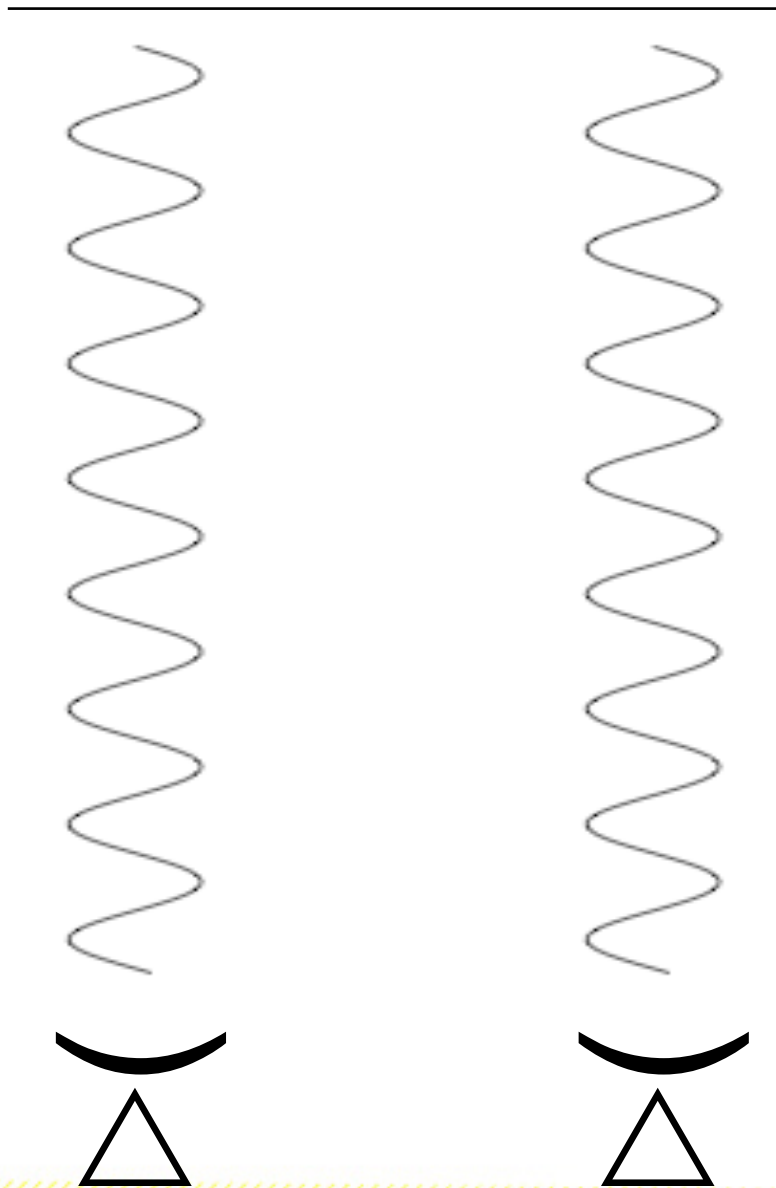
Hoe werkt een radio-interferometer?



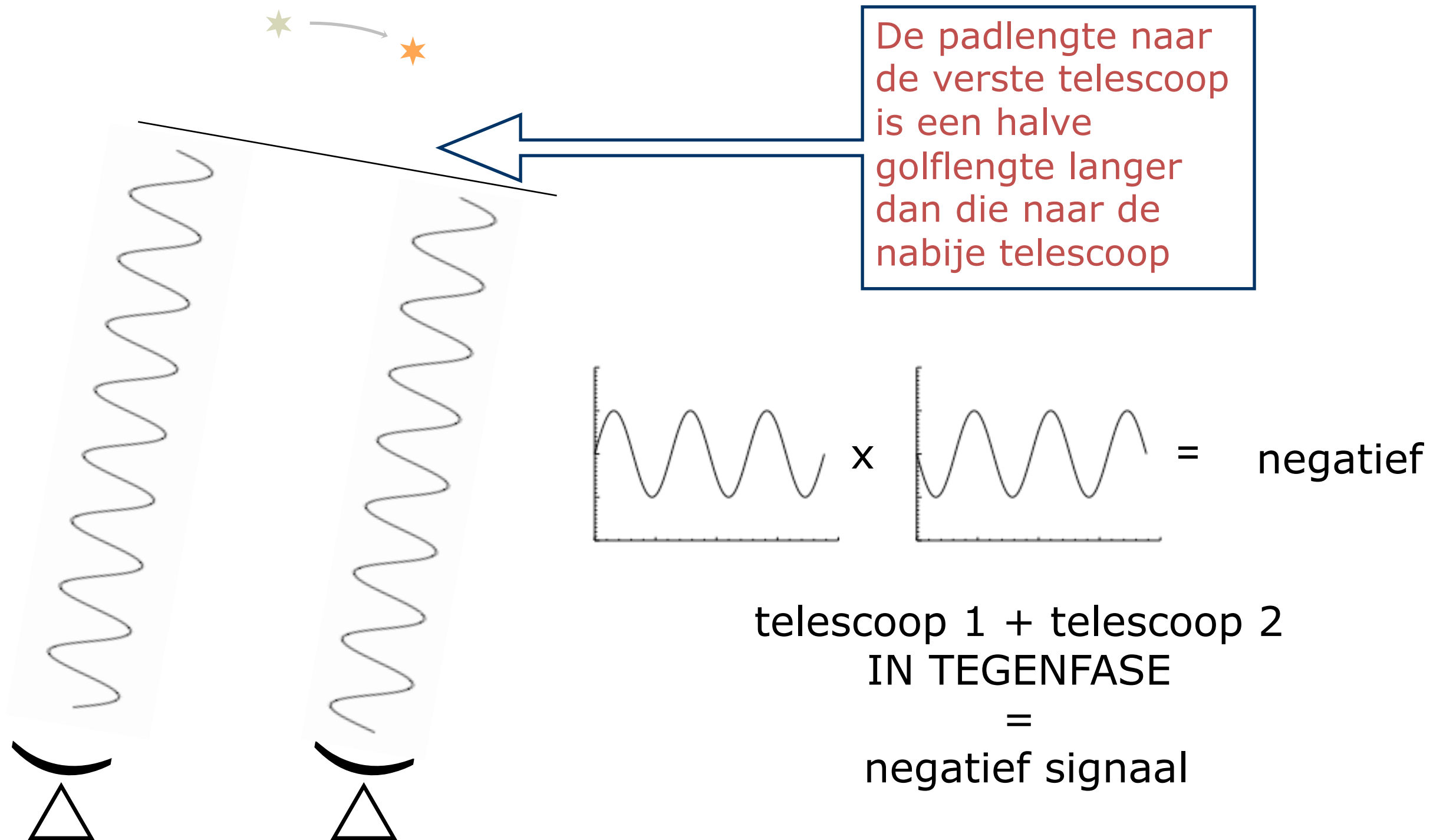
Astronomische bronnen staan zo ver weg, dat hun straling altijd een VLAK GOLFFRONT wordt bij de aarde.



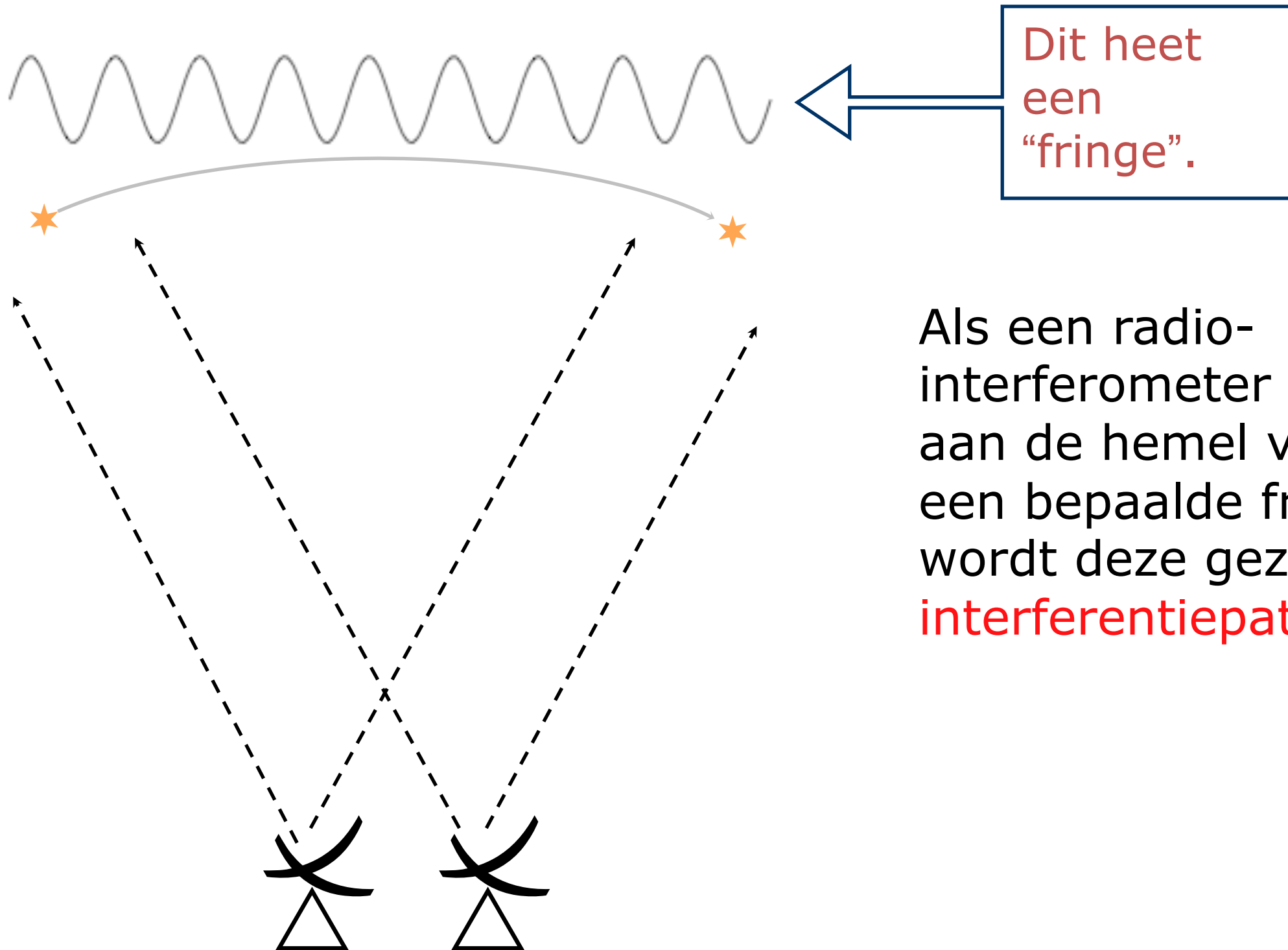
telescoop 1 + telescoop 2
IN FASE
=
positief signaal



Hoe werkt een radio-interferometer?

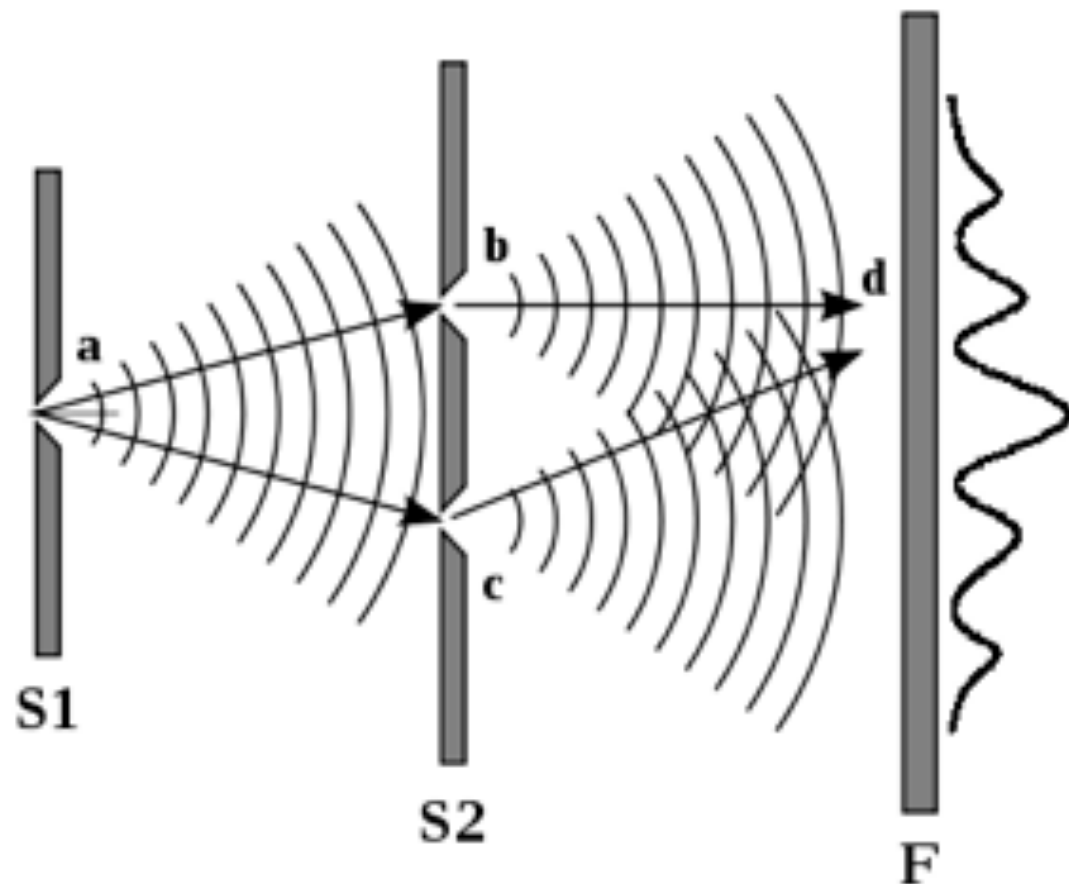


Hoe werkt een radio-interferometer?



Als een radio-interferometer een bron aan de hemel volgt (met een bepaalde frequentie), wordt deze gezien als een **interferentiepatroon**

Hoe werkt een radio-interferometer?



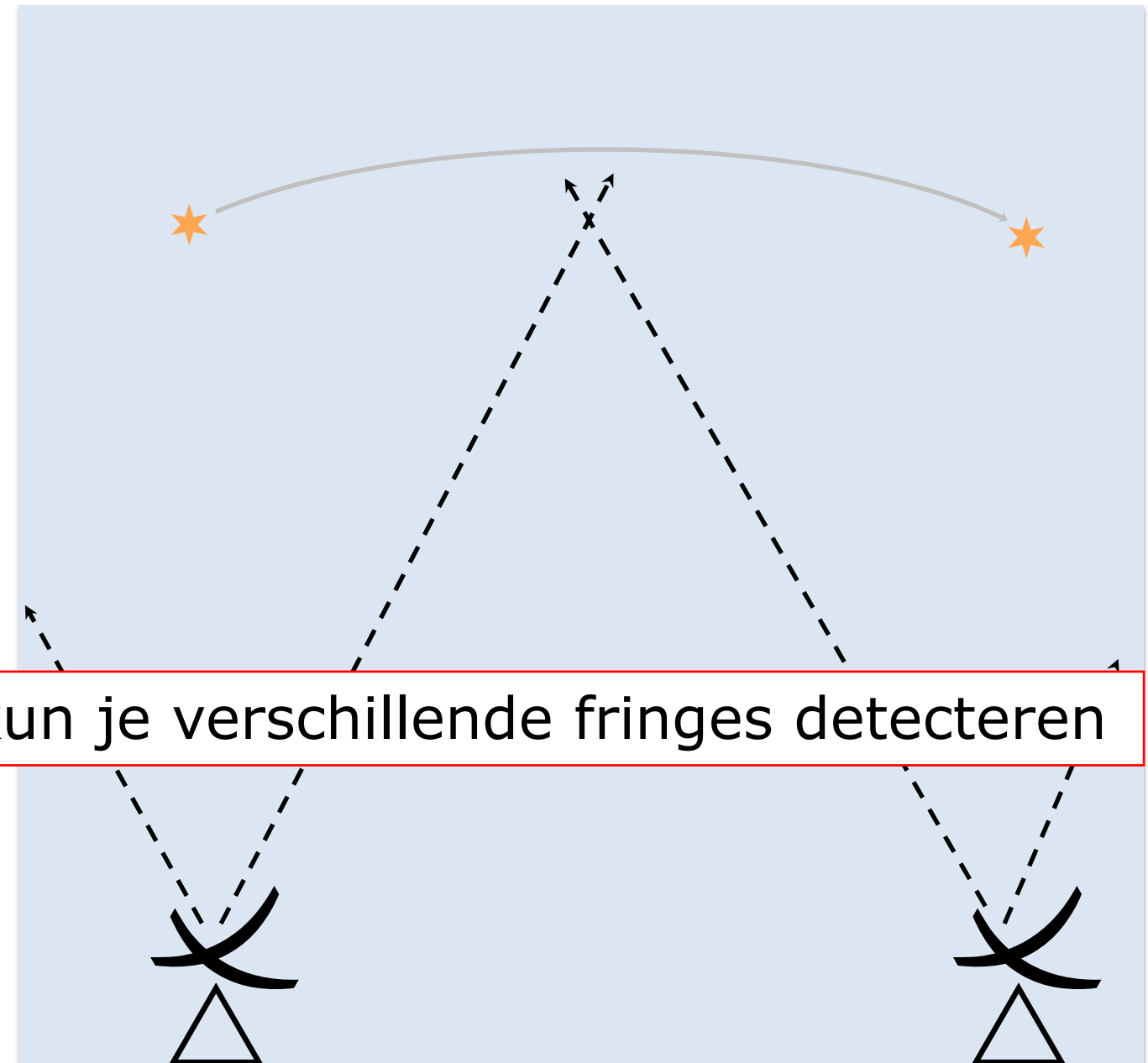
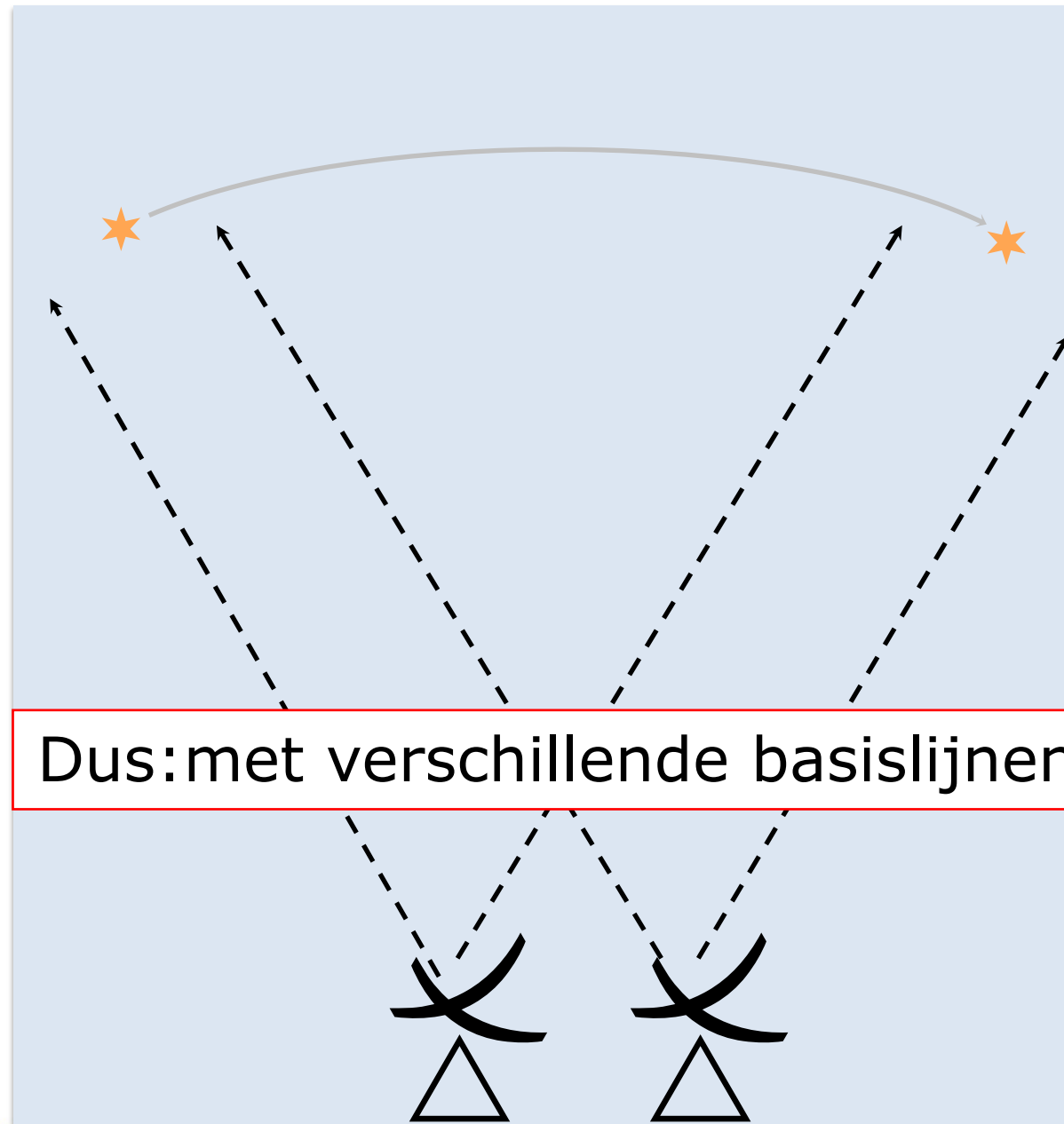
Dit is hetzelfde effect als positieve interferentie van licht door een dubbele spleet, of van twee golven in een waterbak...



Veritasium (YouTube)

Hoe werkt een radio-interferometer?

Hoe groter de basislijn, hoe smaller de fringe

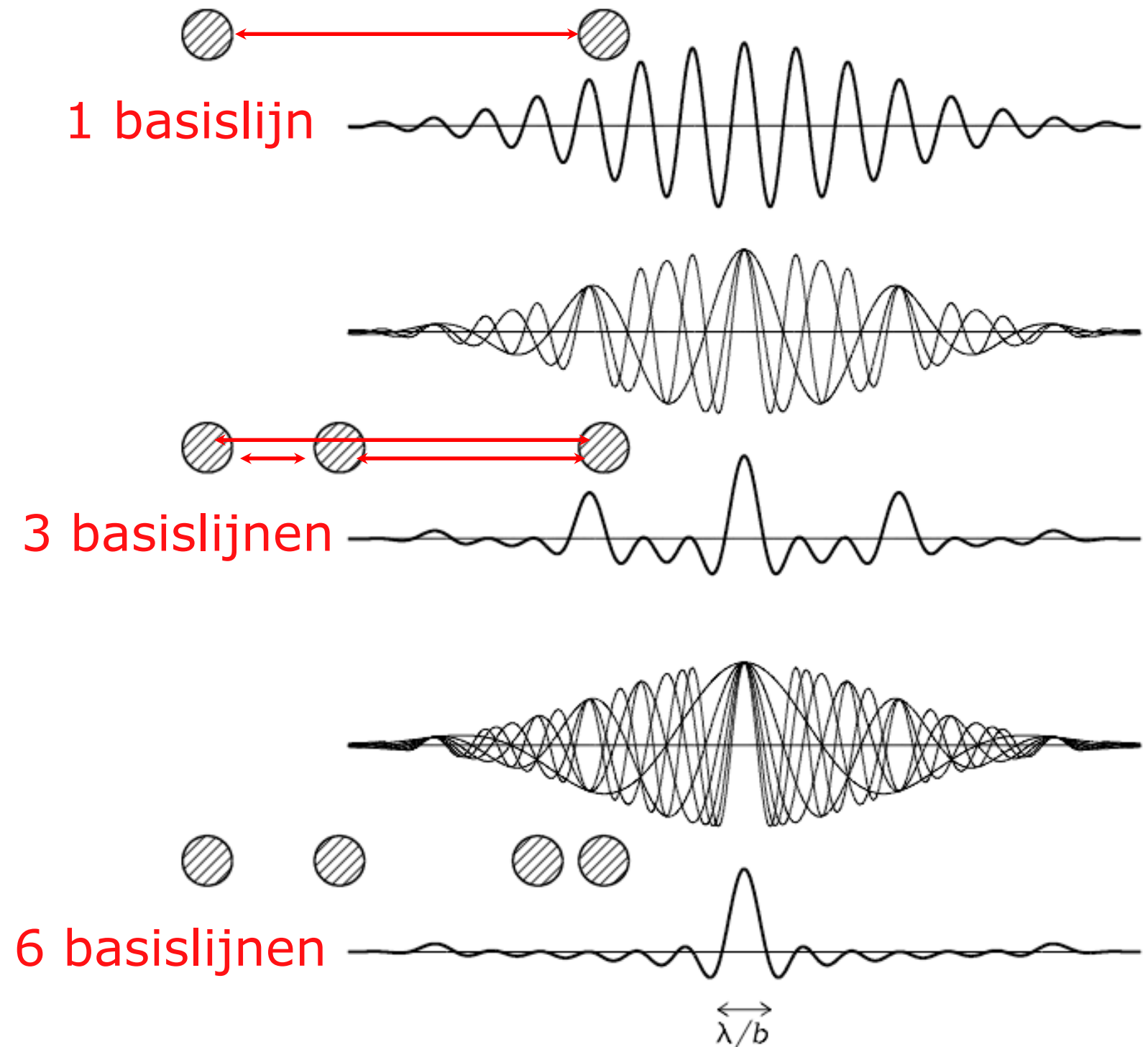


Dus: met verschillende basislijnen kun je verschillende fringes detecteren

Hoe werkt een radio-interferometer?

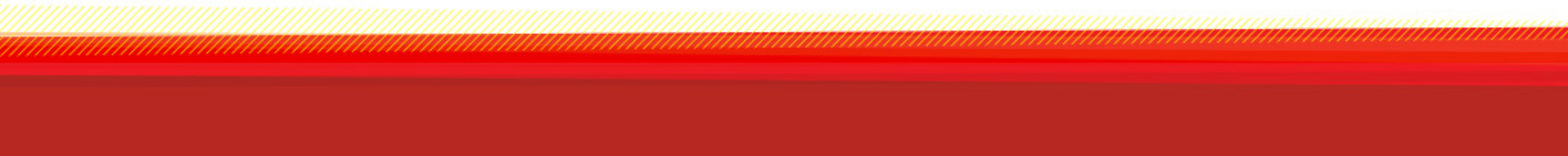
Elke radiobron is opgebouwd uit veel verschillende fringes.

Met veel verschillende basislijnen kun je deze dus allemaal detecteren.

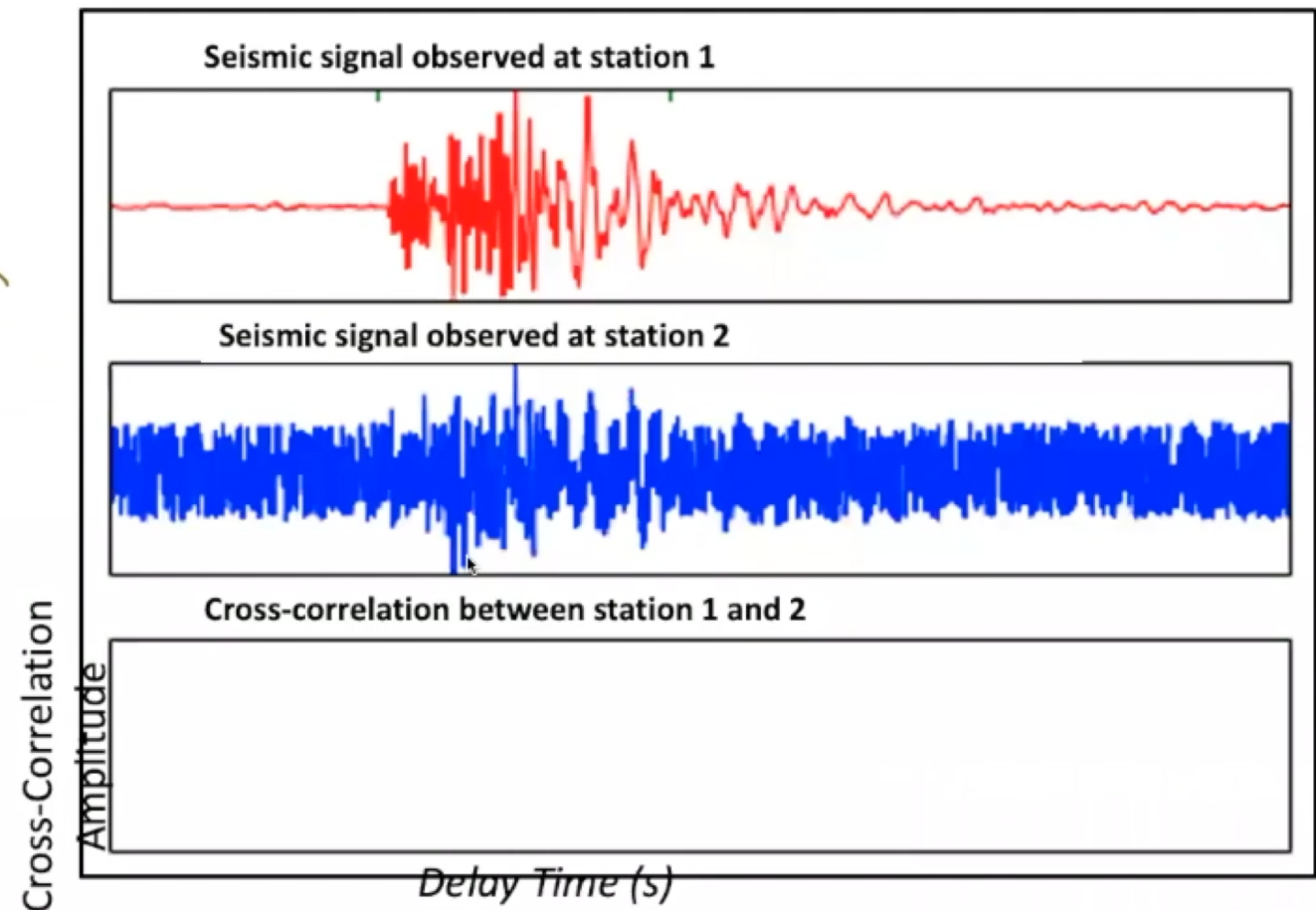
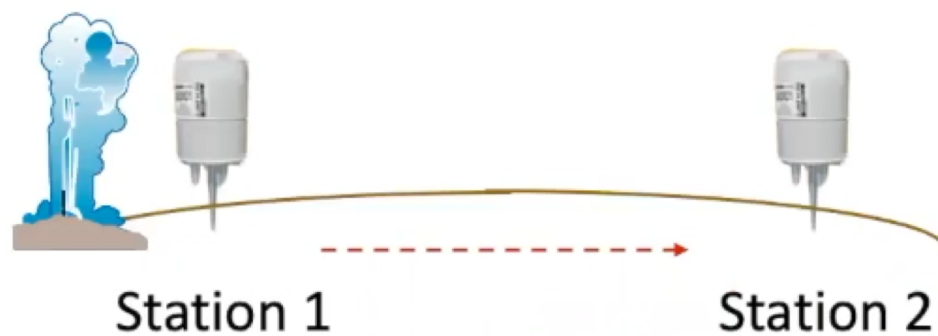
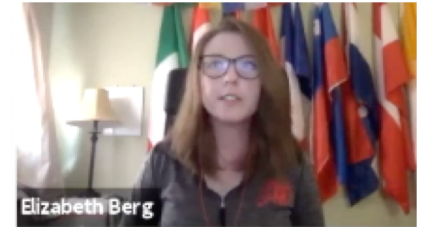


Het effect van meerdere frequenties tegelijk

(demo met Audacity)



Het effect van meerdere frequenties tegelijk



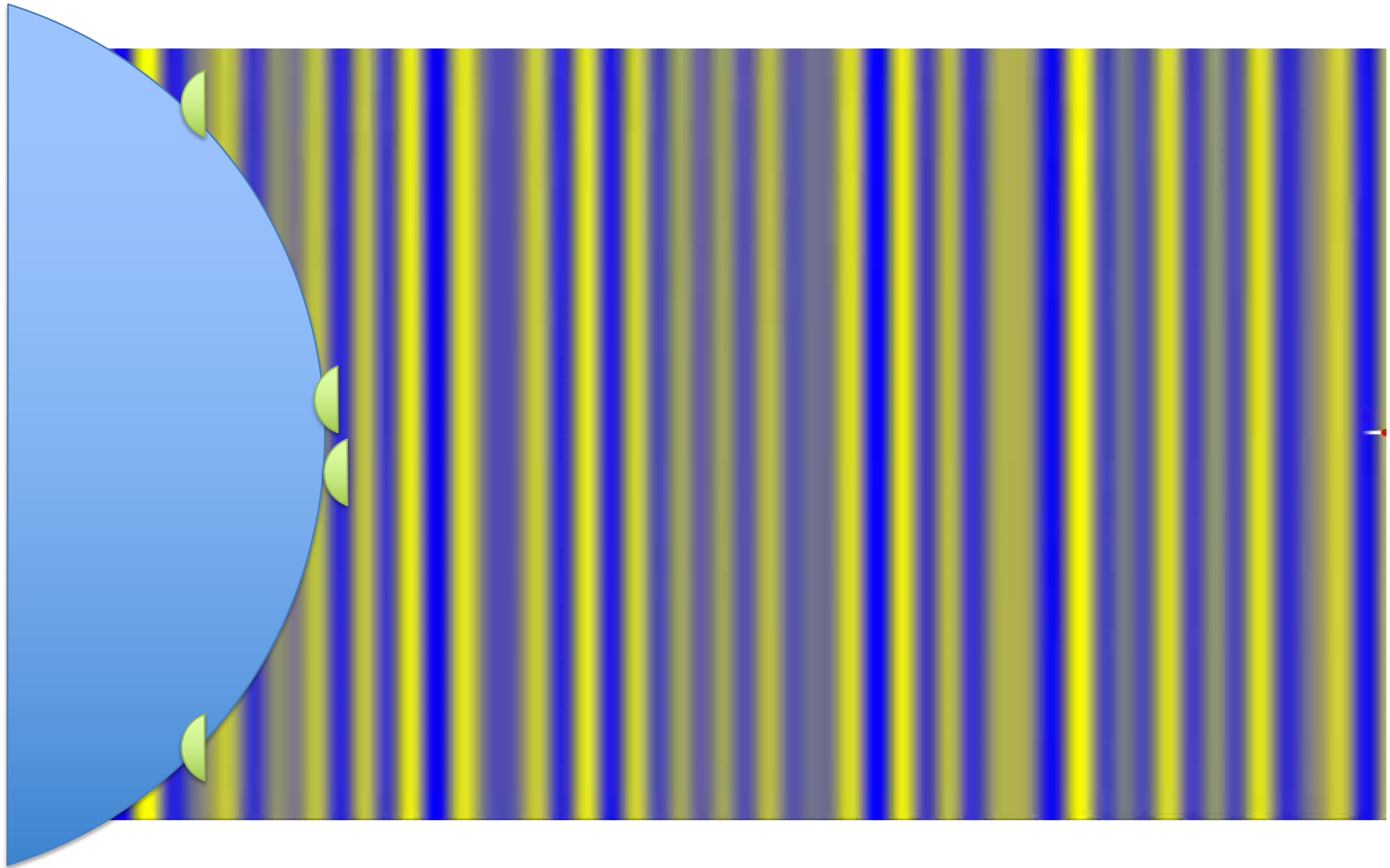
Wu et al., 2019

11

2020-07-14 11:13:51

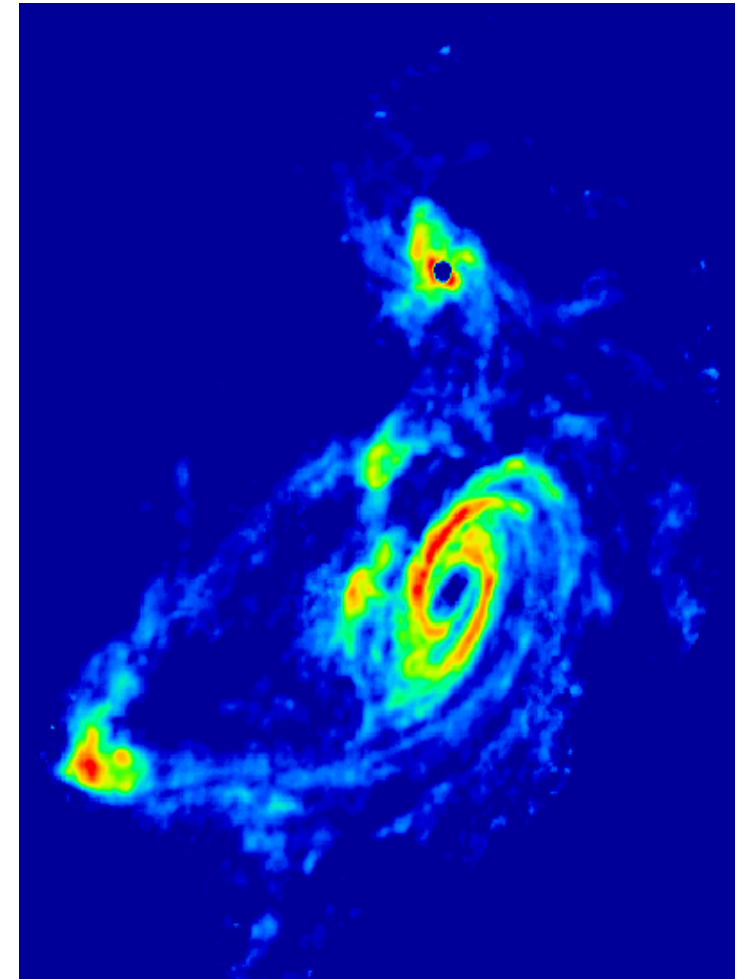
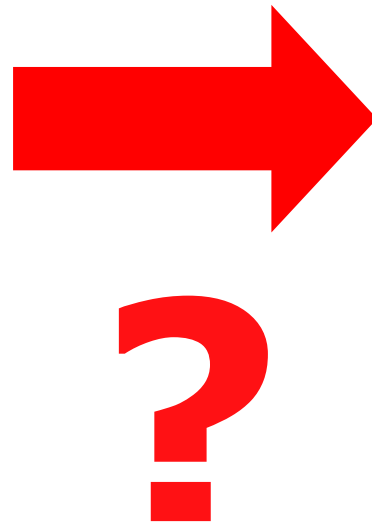
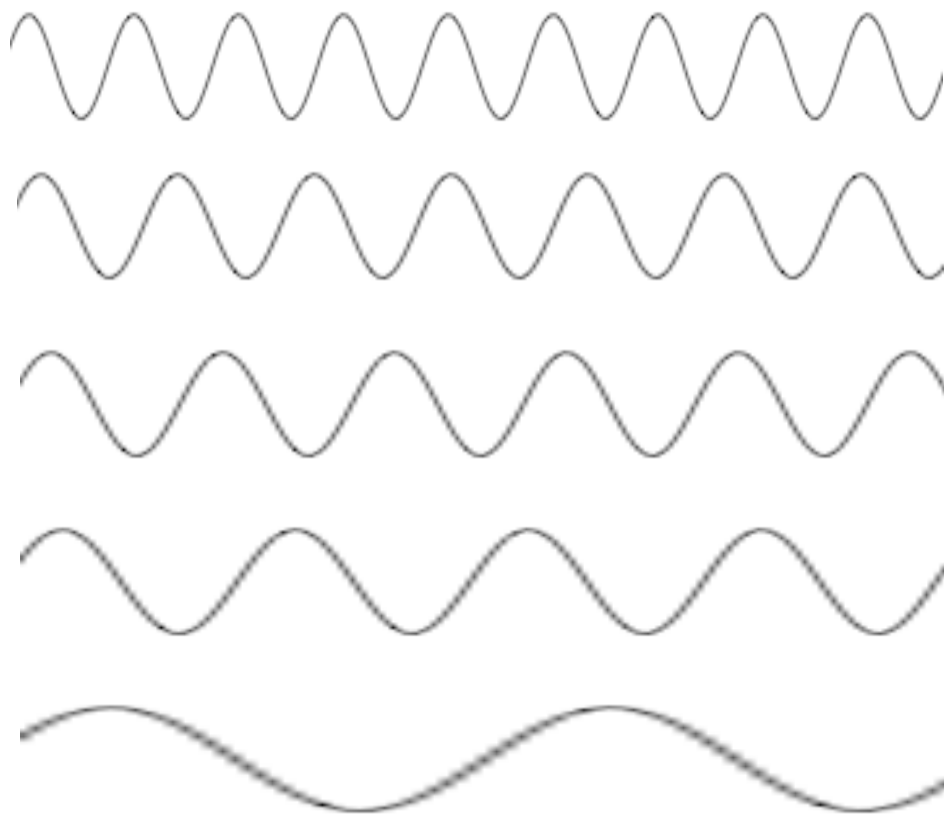
Elizabeth Berg, U. of Utah

Kijken naar het golffront



Hoe werkt een radio-interferometer?

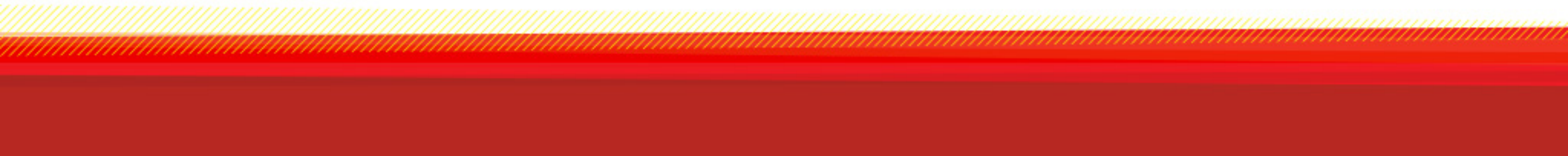
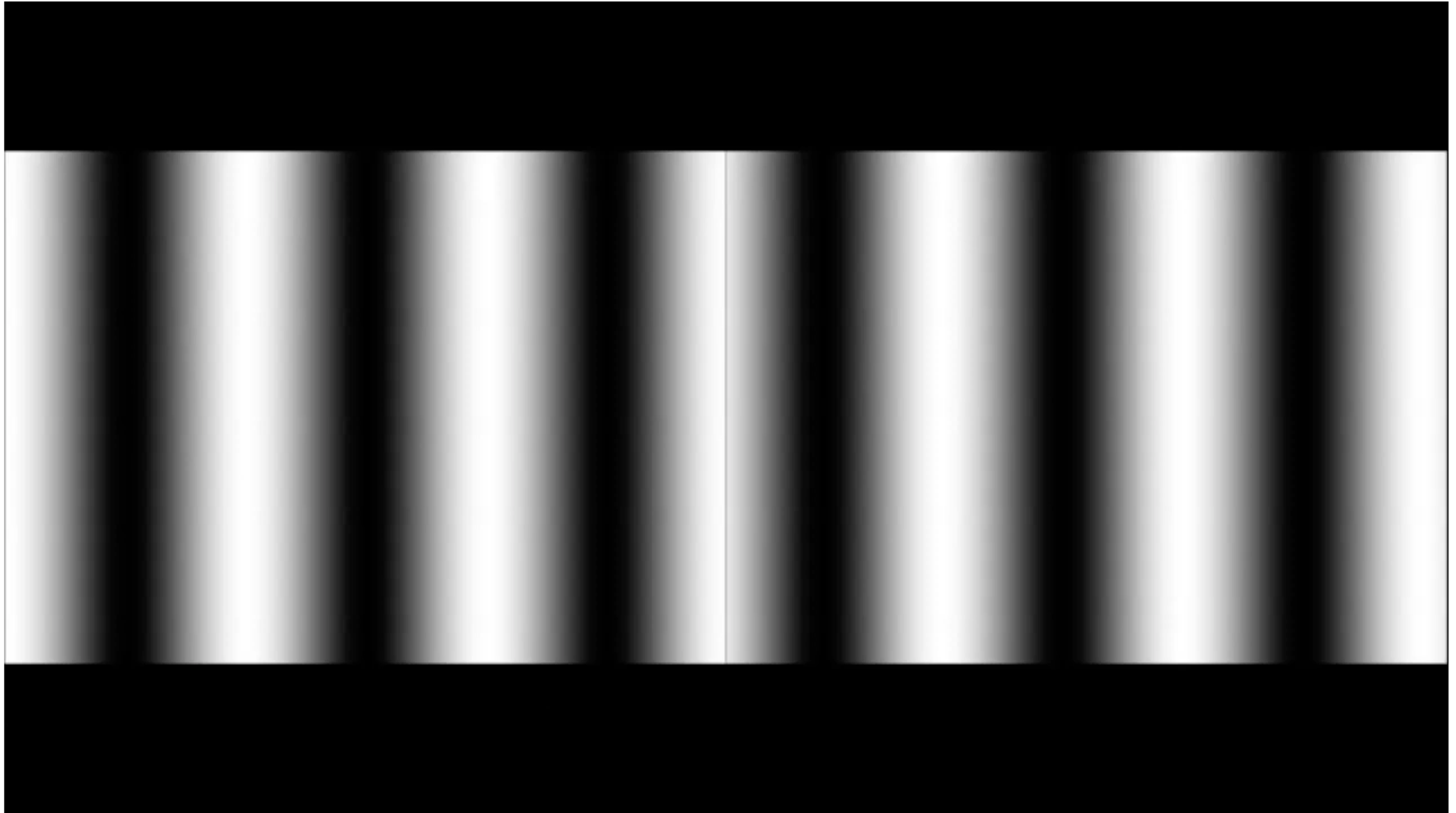
Nu detecteer je dus allerlei verschillende fringes: hoe maak je daar een plaatje van?



Dat kan met de **Fourier-transformatie**: een wiskundige techniek die alle fringes uit elkaar rafelt en omzet in een plaatje (en andersom!)

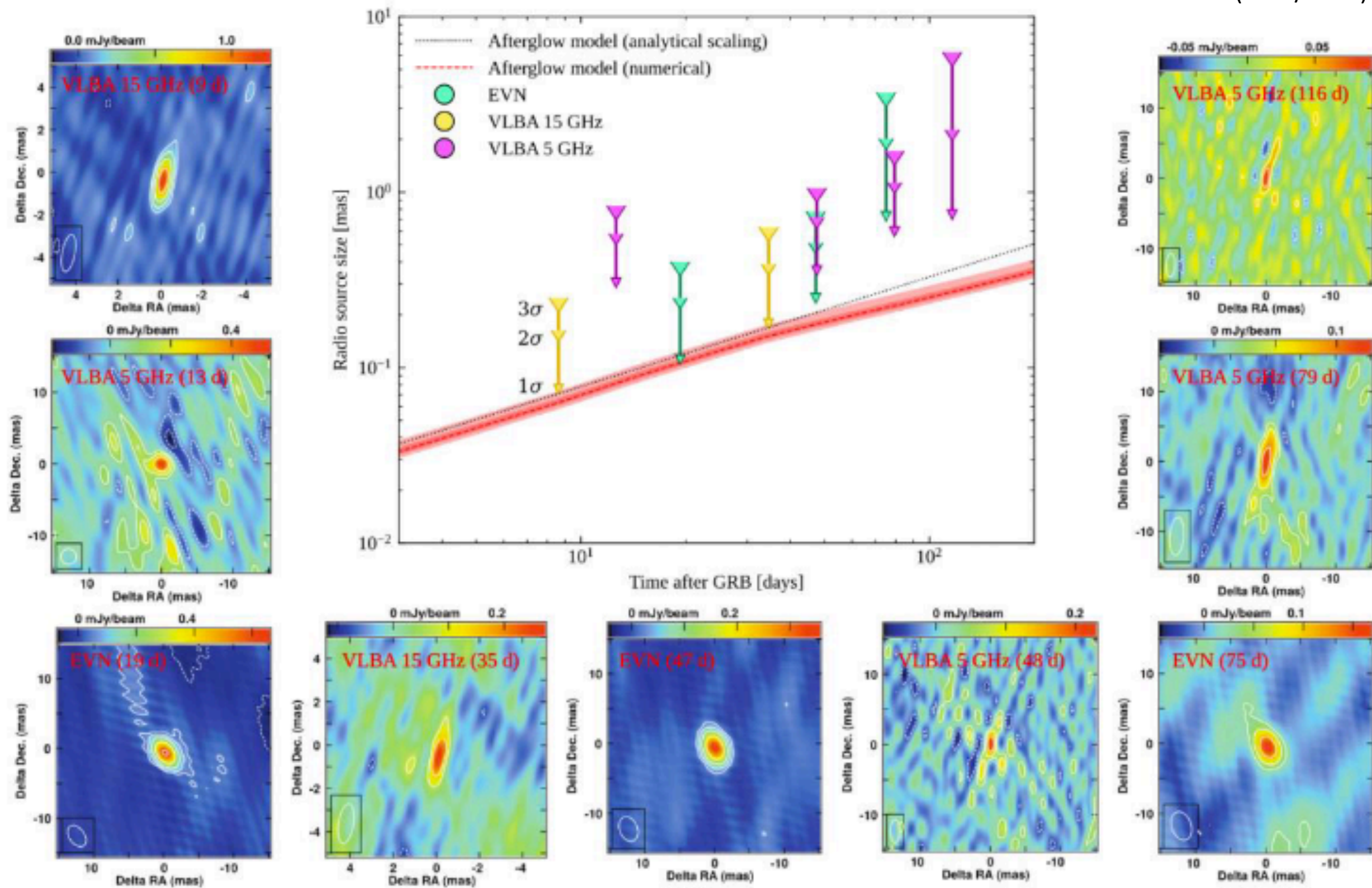
Plaatjes uit fringes (1)

Jeremy Kun (Youtube)



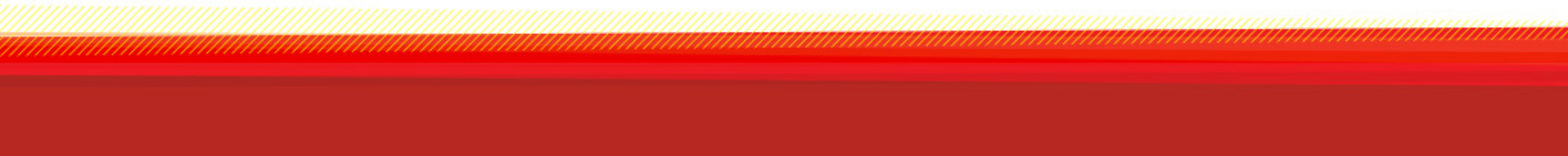
Plaatjes uit fringes (2)

Om Sharan Salafia (INAF/INFN)



Plaatjes uit fringes: demo met geluid

(demo met audio-opstelling)

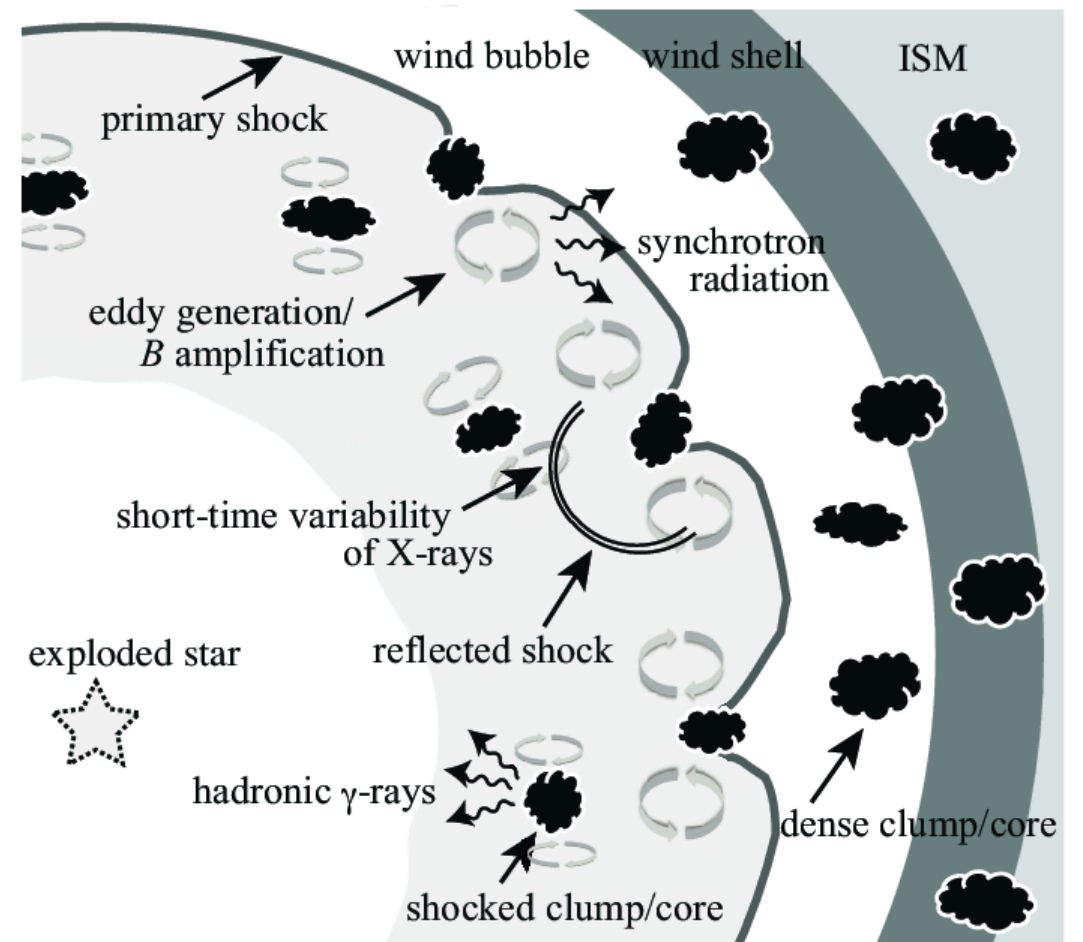
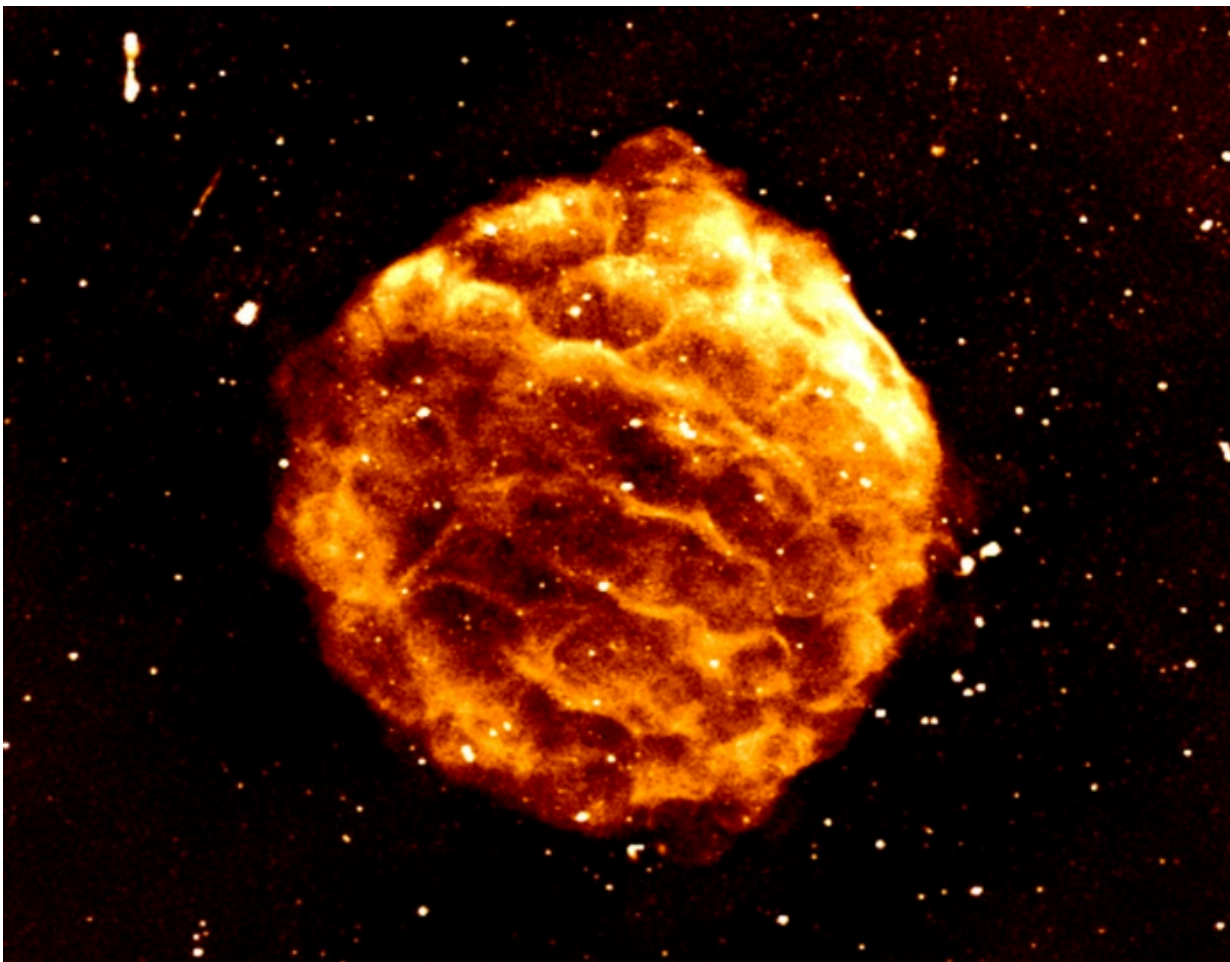


Radio-interferometrie: Wat onderzoeken we ermee?

Christiaan Brinkerink
Masterclass PUC, 9 februari 2023

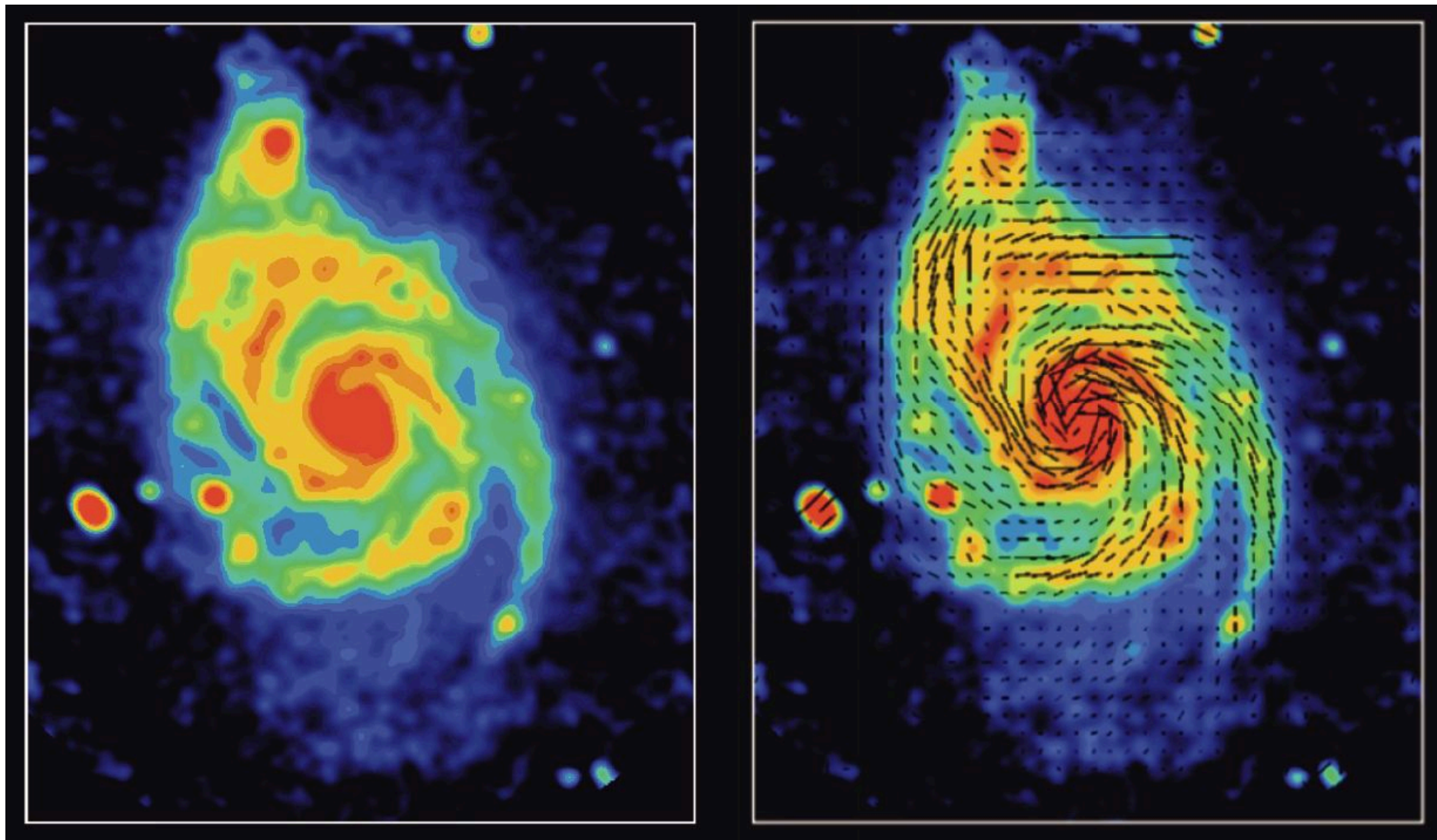
Wat bestuderen we met radio-interferometers?

Schokgolven in interstellair of intergalactisch gas



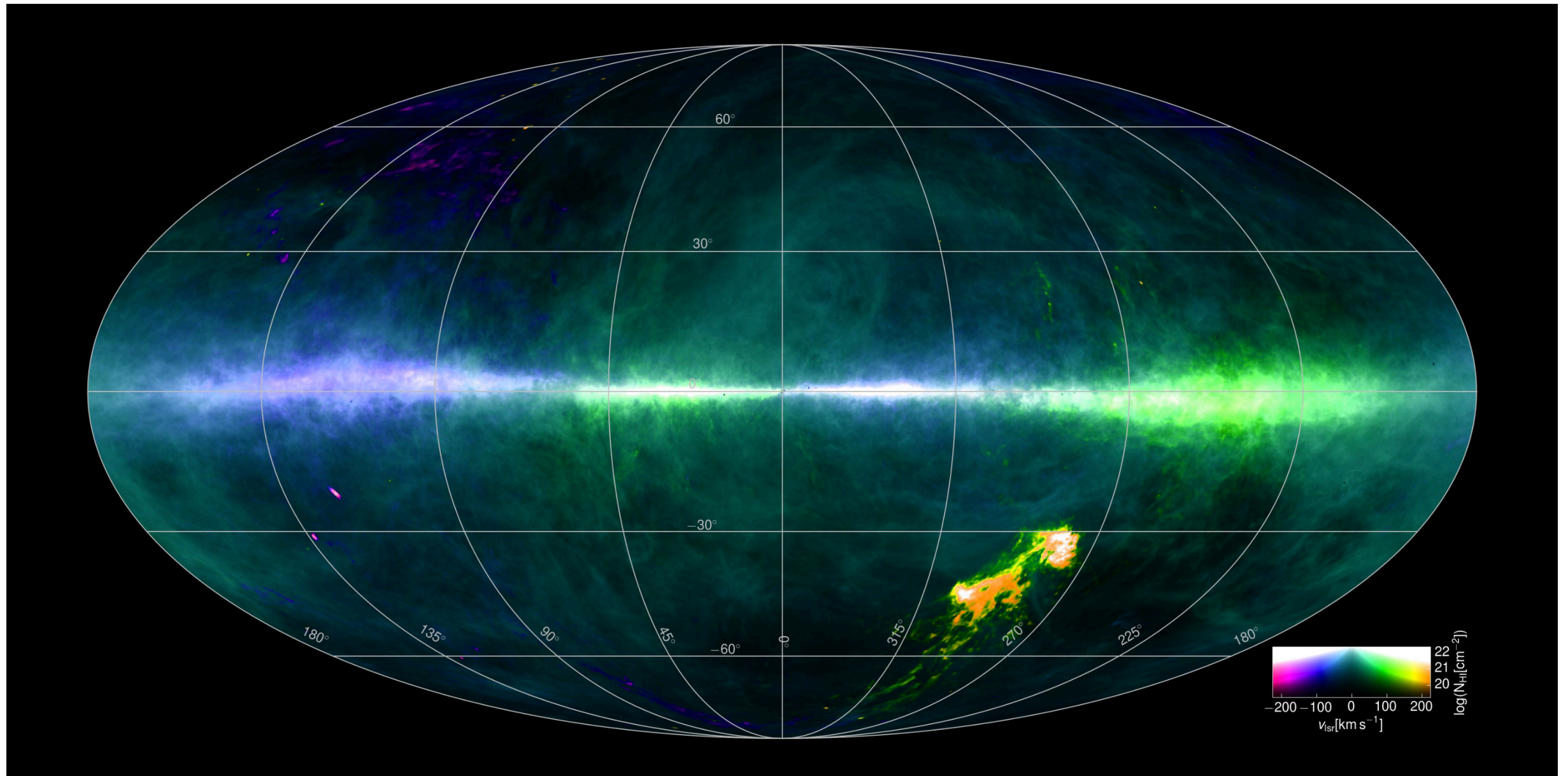
Wat bestuderen we met radio-interferometers?

Magnetische velden in de Melkweg en in andere sterrenstelsels



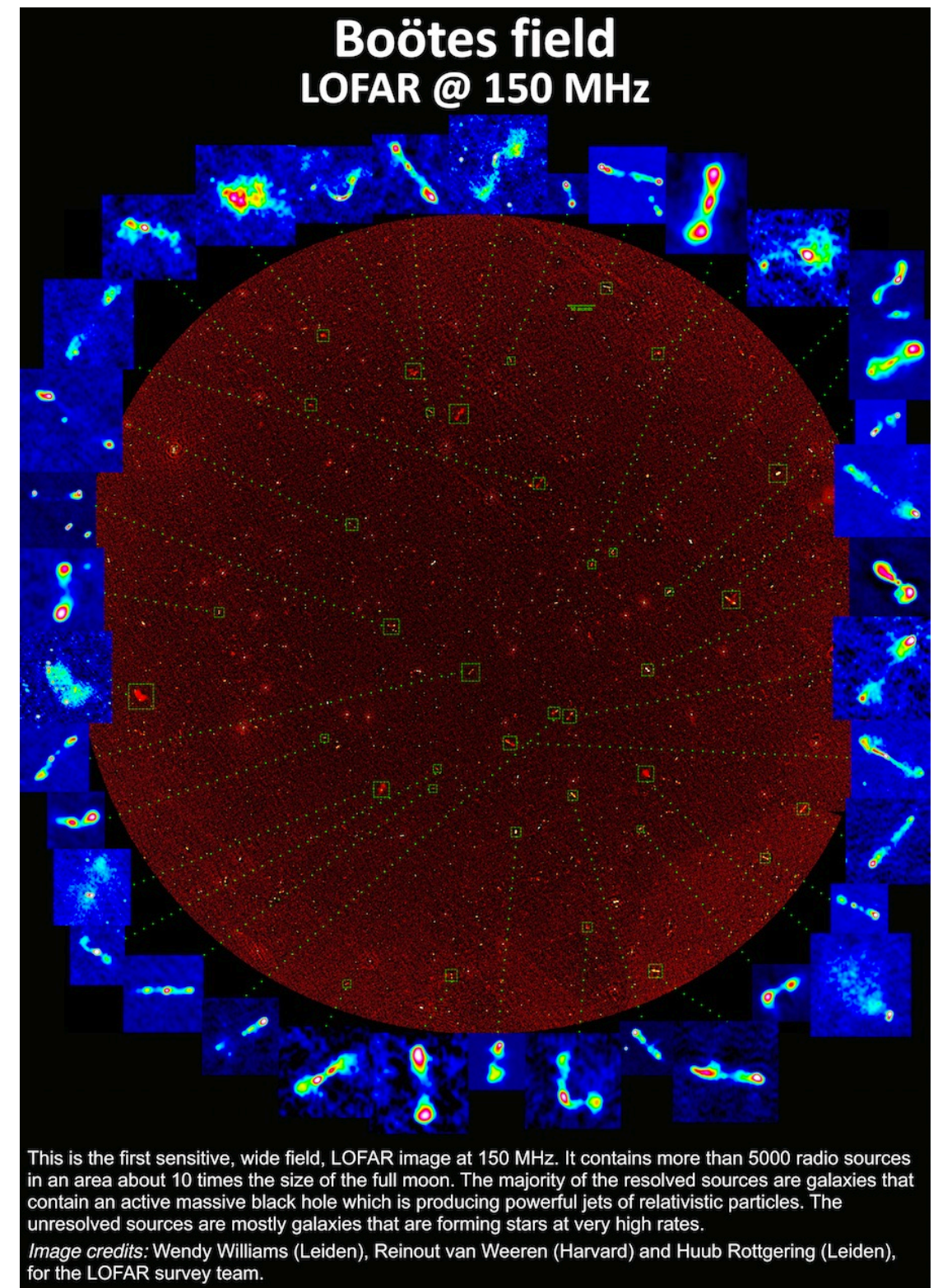
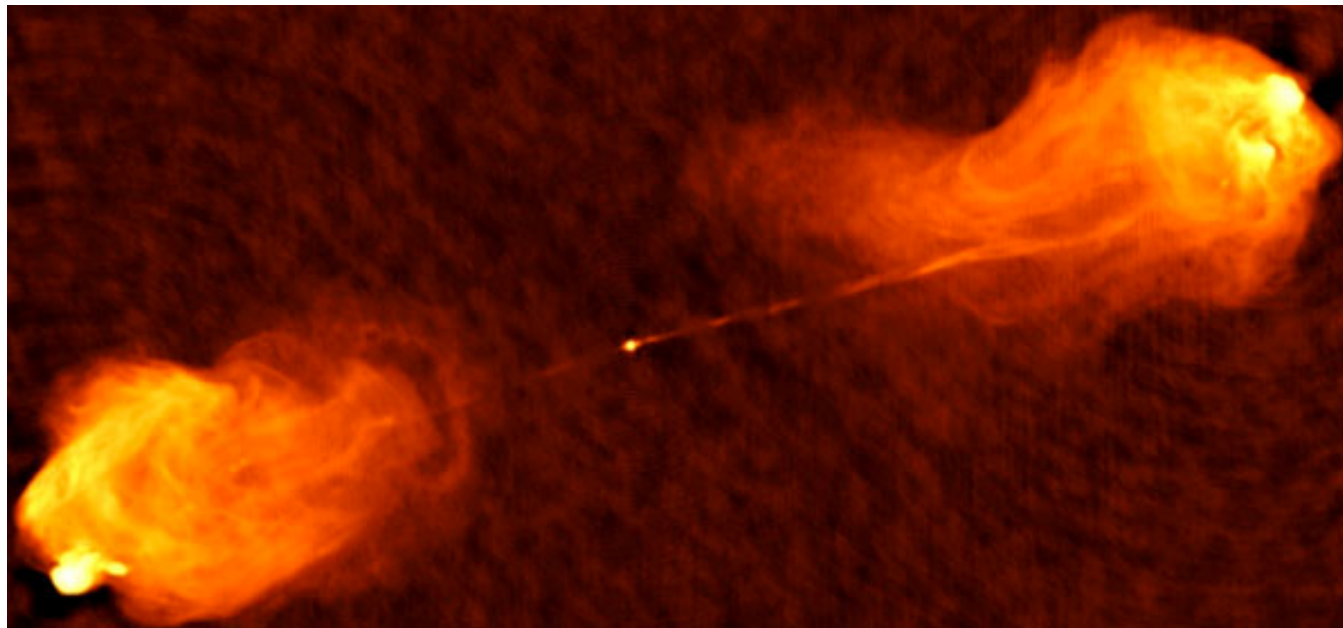
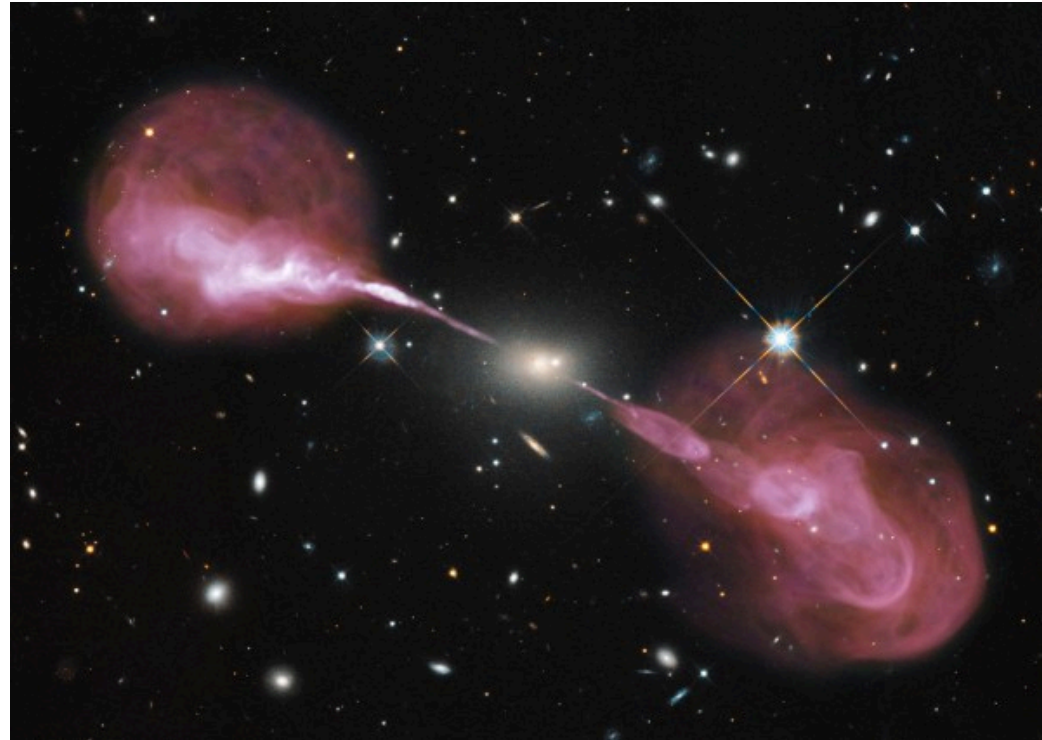
Wat bestuderen we met radio-interferometers?

Structuren in neutraal waterstofgas
(binnen sterrenstelsels en op veel grotere schaal)



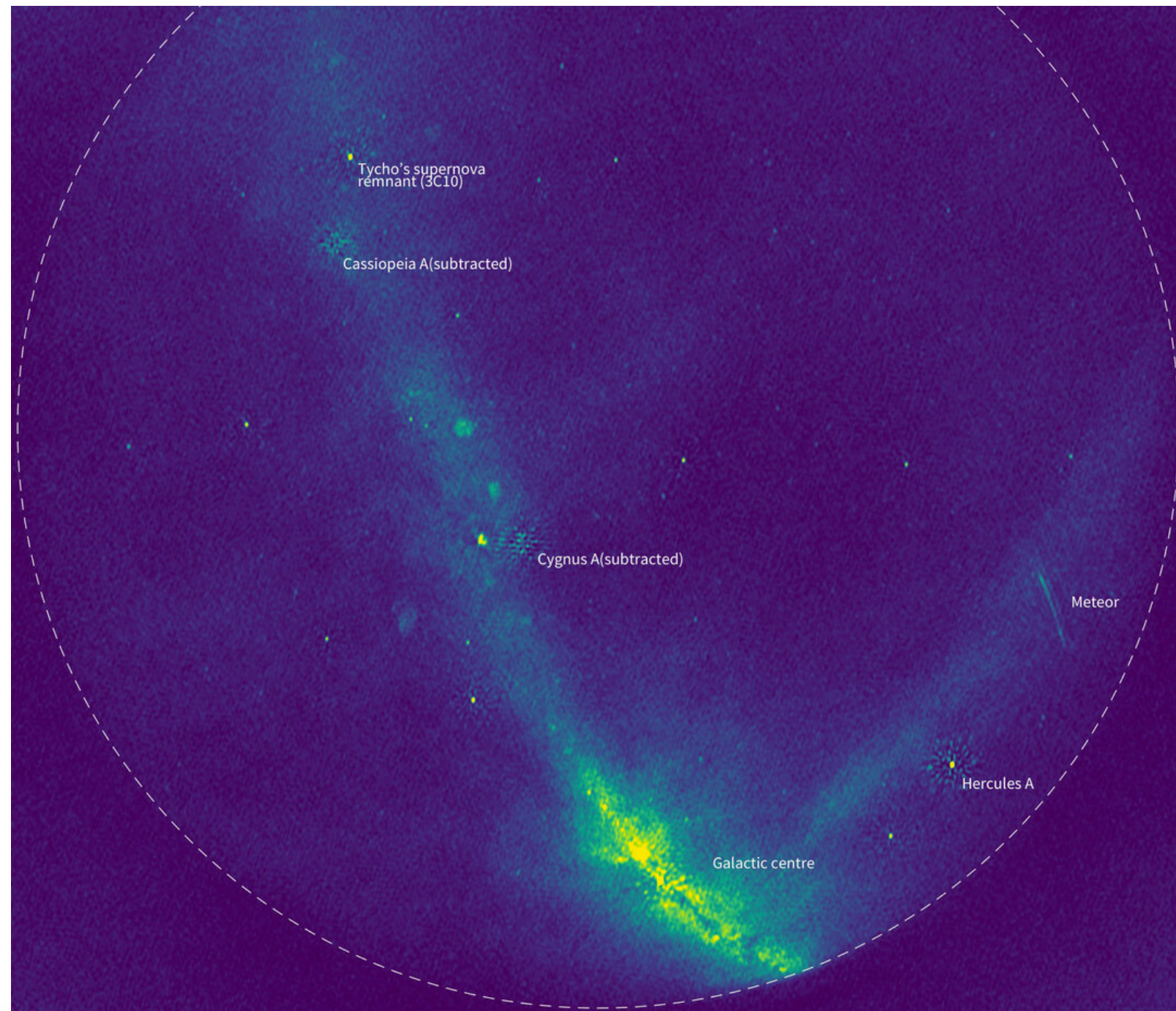
Wat bestuderen we met radio-interferometers?

Plasma-jets op Galactische schalen



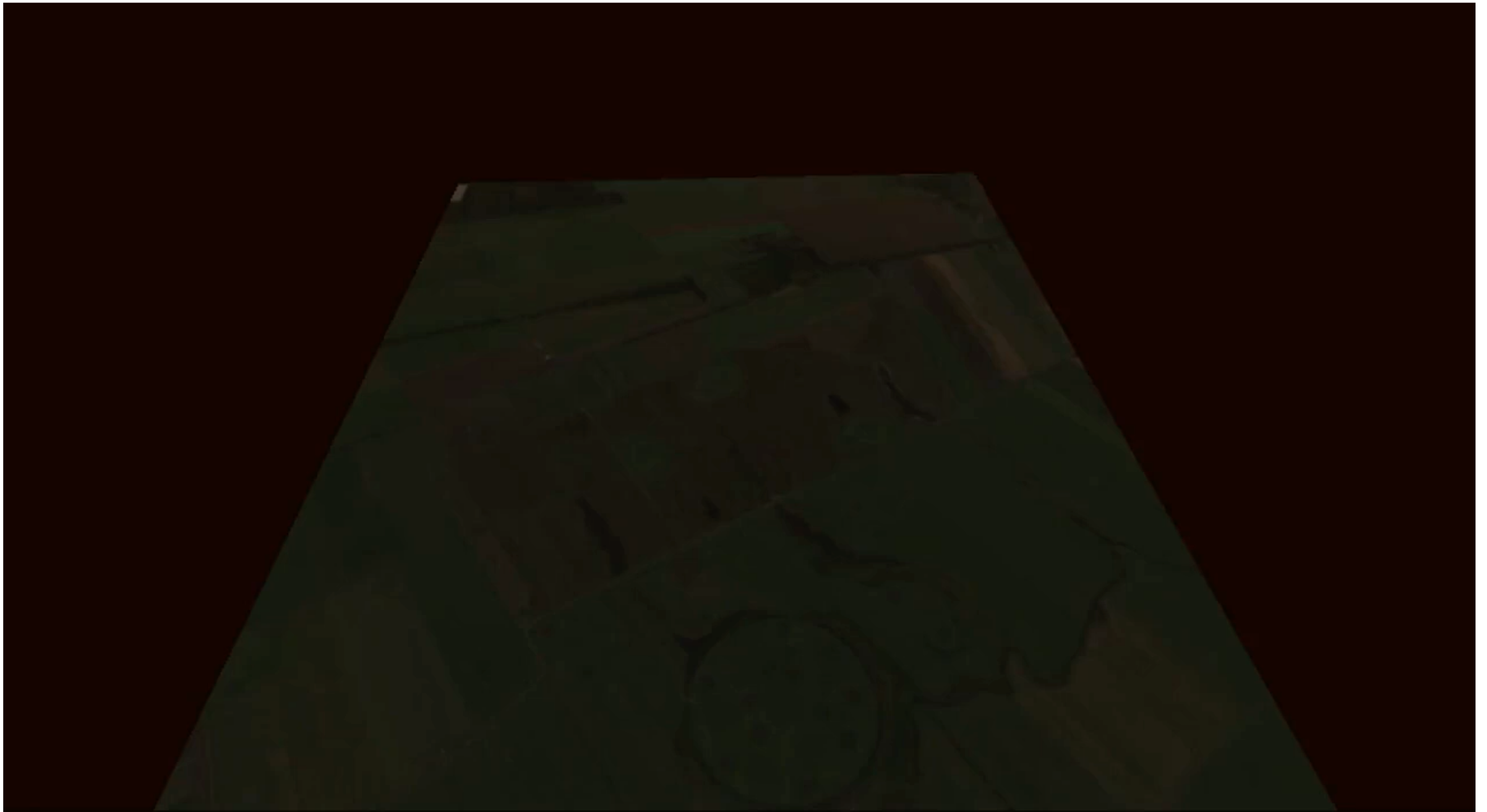
Wat bestuderen we met radio-interferometers?

Snel verschijnende en verdwijnende radiobronnen



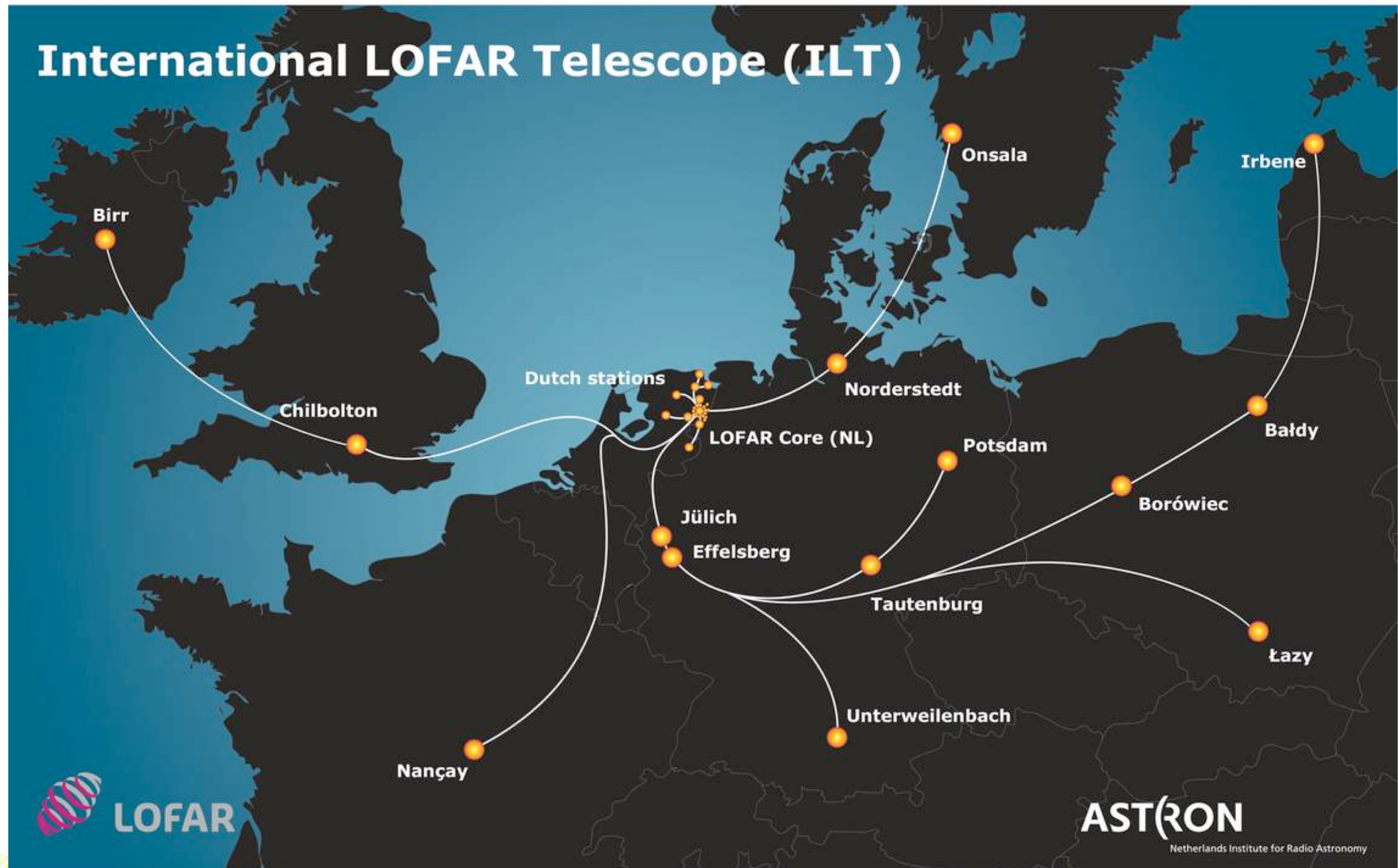
Wat bestuderen we met radio-interferometers?

En zelfs lokaal: ontwikkeling van bliksem-ontladingen!

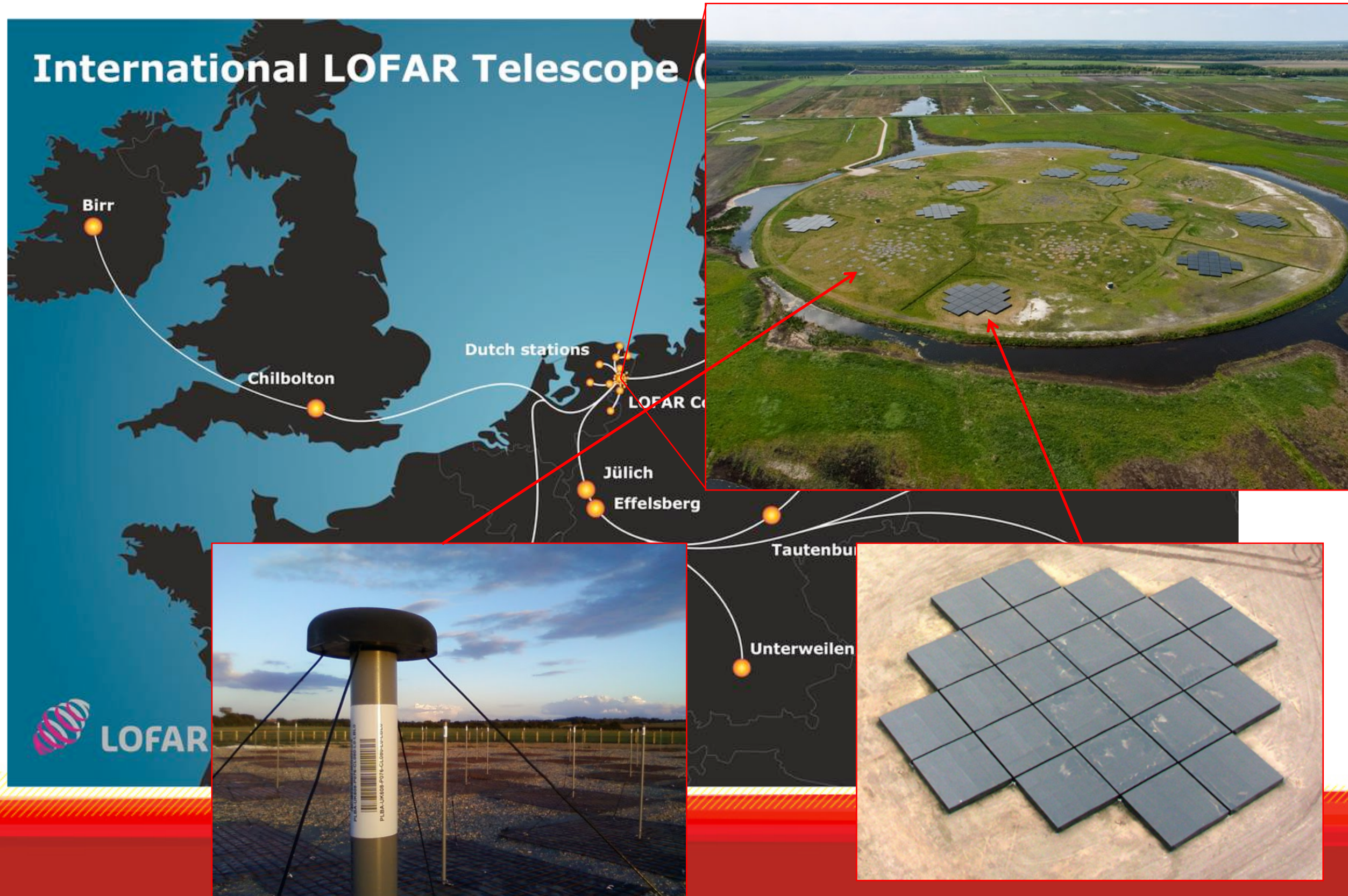


LOW-Frequency ARray LOFAR

= een radiotelescoop zo groot als Europa



= een radiotelescoop zo groot als Europa



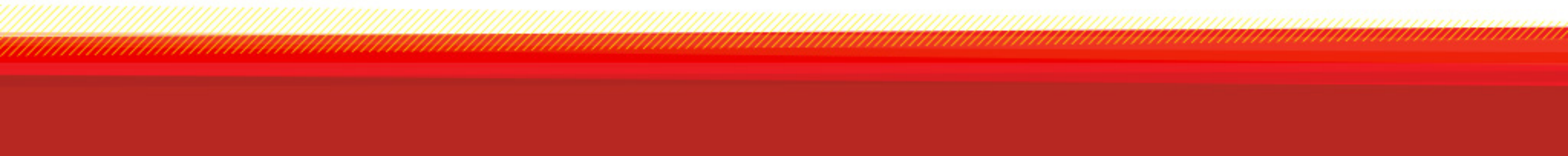
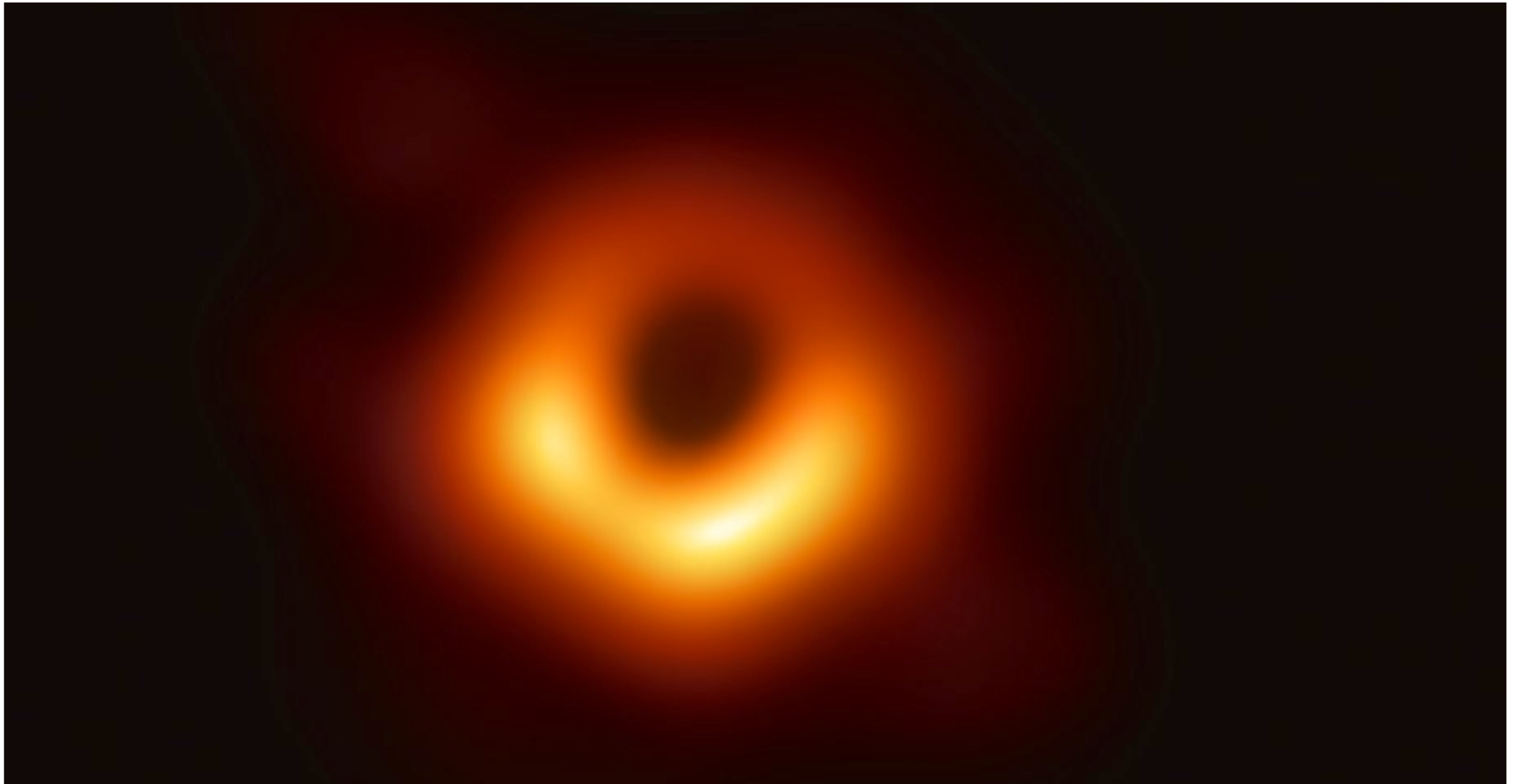
Event Horizon Telescope (EHT)

A Global Network of Radio Telescopes

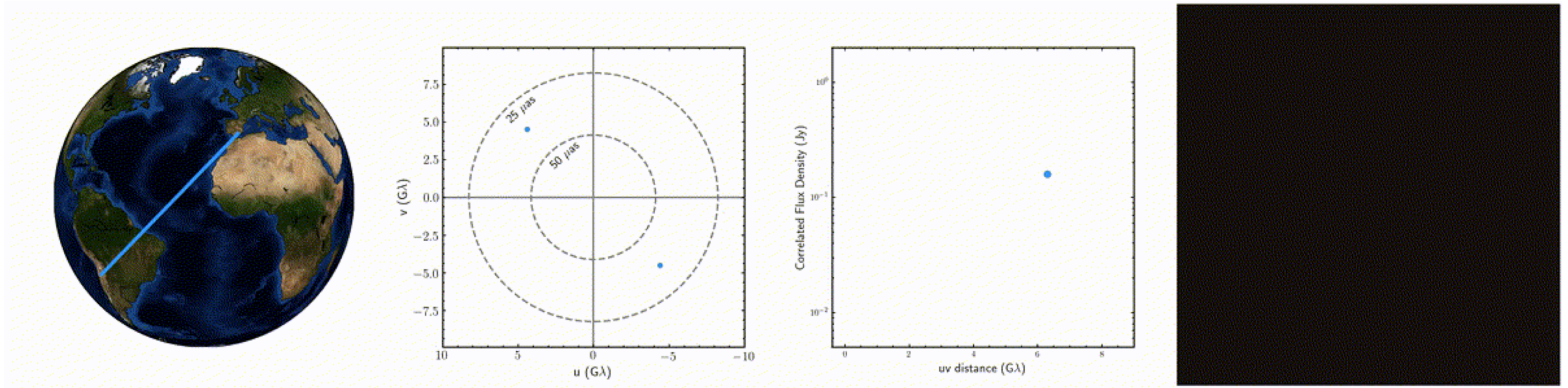


Het EHT-netwerk in 2017

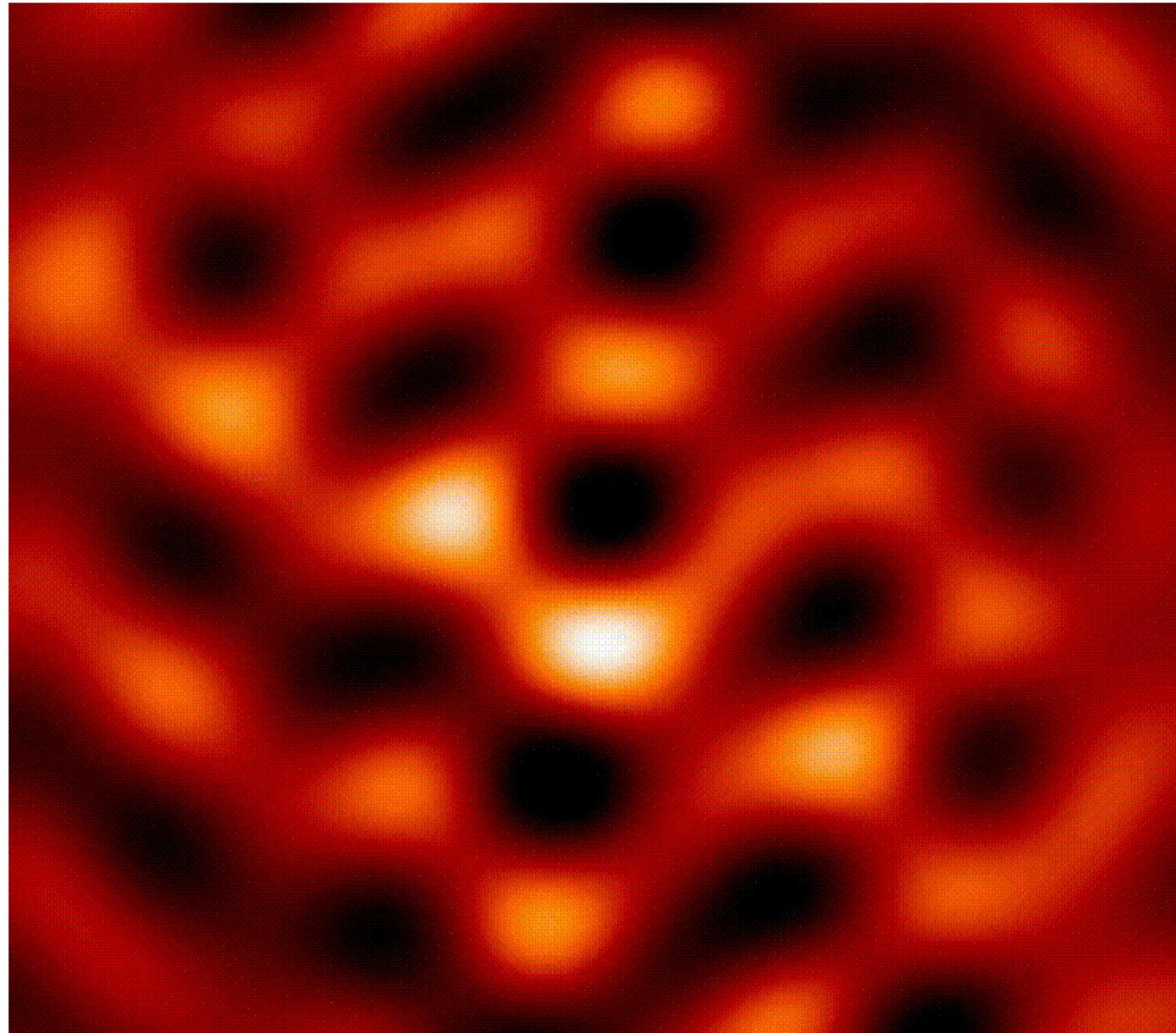
Event Horizon Telescope (EHT)



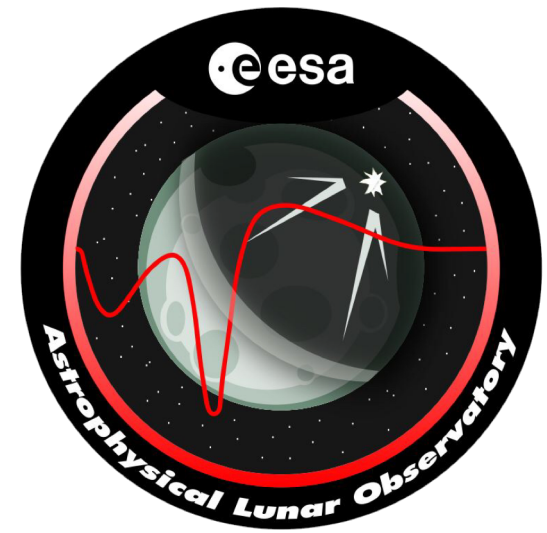
Event Horizon Telescope (EHT)



Event Horizon Telescope (EHT)

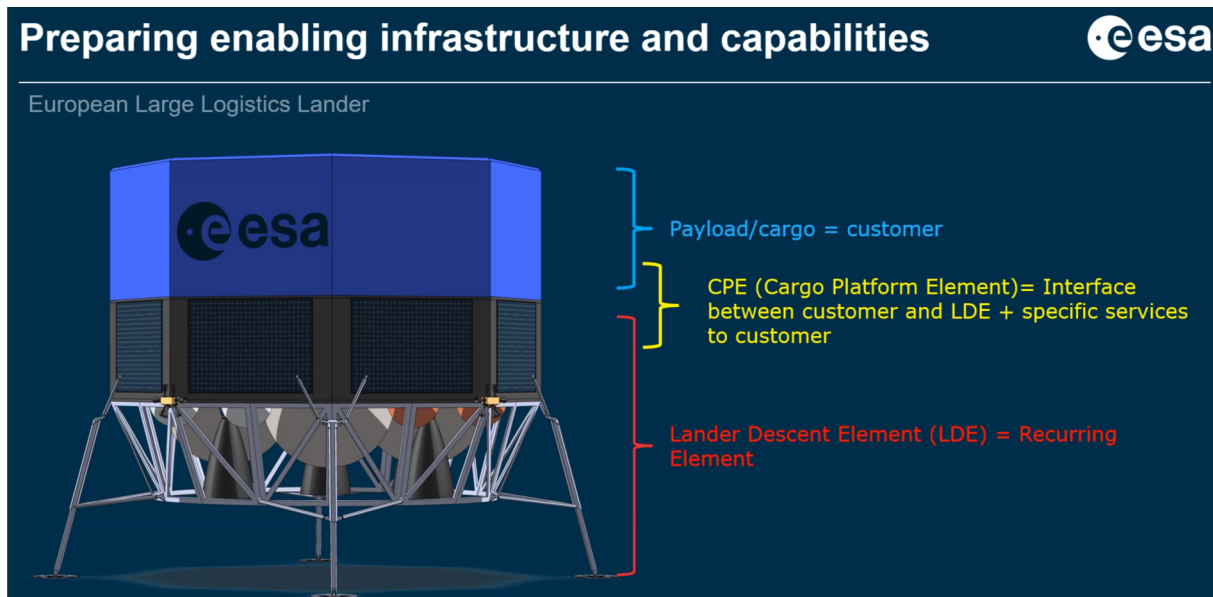


Astrophysical Lunar Observatory (ALO)



ALO is een concept voor een radio-interferometer op de Maan.

De voorgestelde Europese lander (EL3) moet 'm erheen brengen!

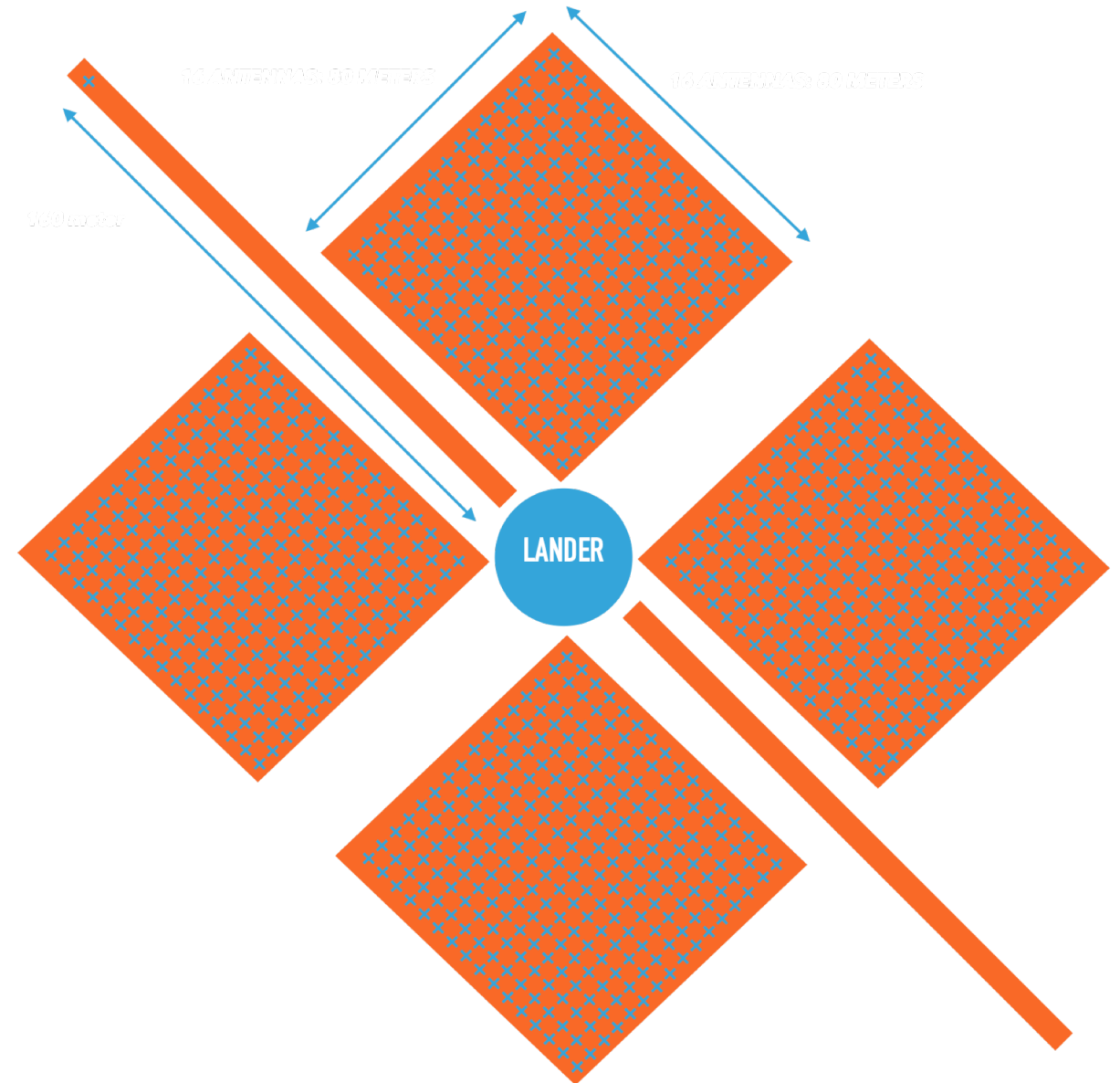


De opzet van ALO

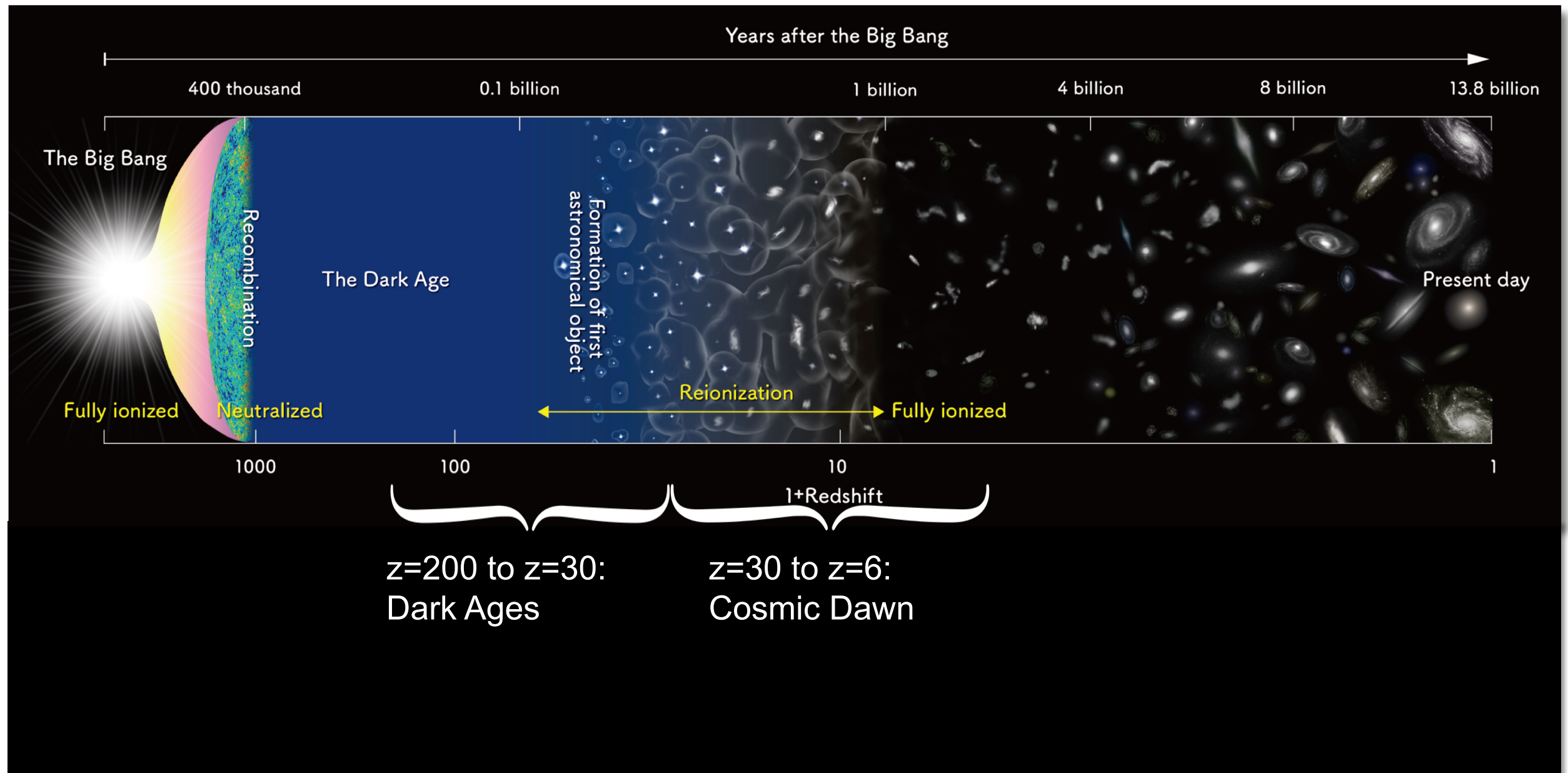
ALO moet gebruik maken van 32 x 32 antennes (!), die dicht op elkaar staan in een regelmatig patroon.

We hebben zoveel antennes nodig omdat we een gevoelig instrument willen hebben.

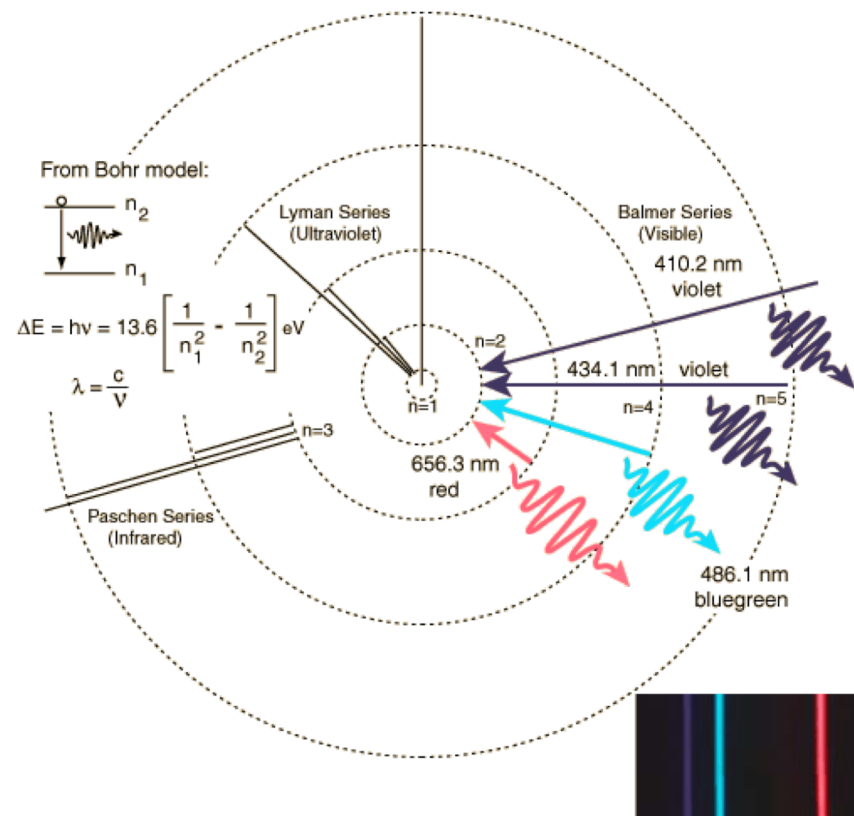
We hebben heel 'lichte' antennes nodig!



Wetenschappelijk doel van ALO



De 21cm "spin-flip" lijn

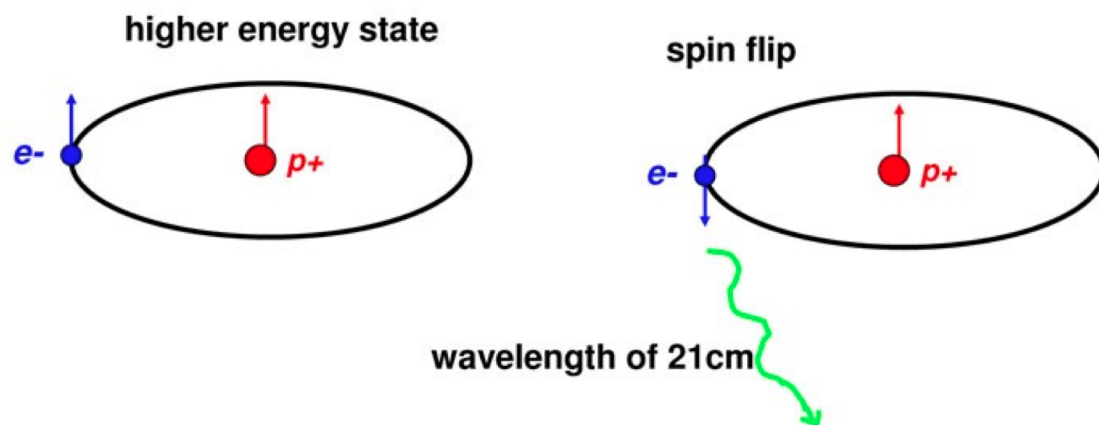


In neutraal waterstofgas:

Spin van elektron kan 'omklappen' (als een klein magneetje), hier is een klein energieverval mee gemoeid!

Frequentie van deze straling:

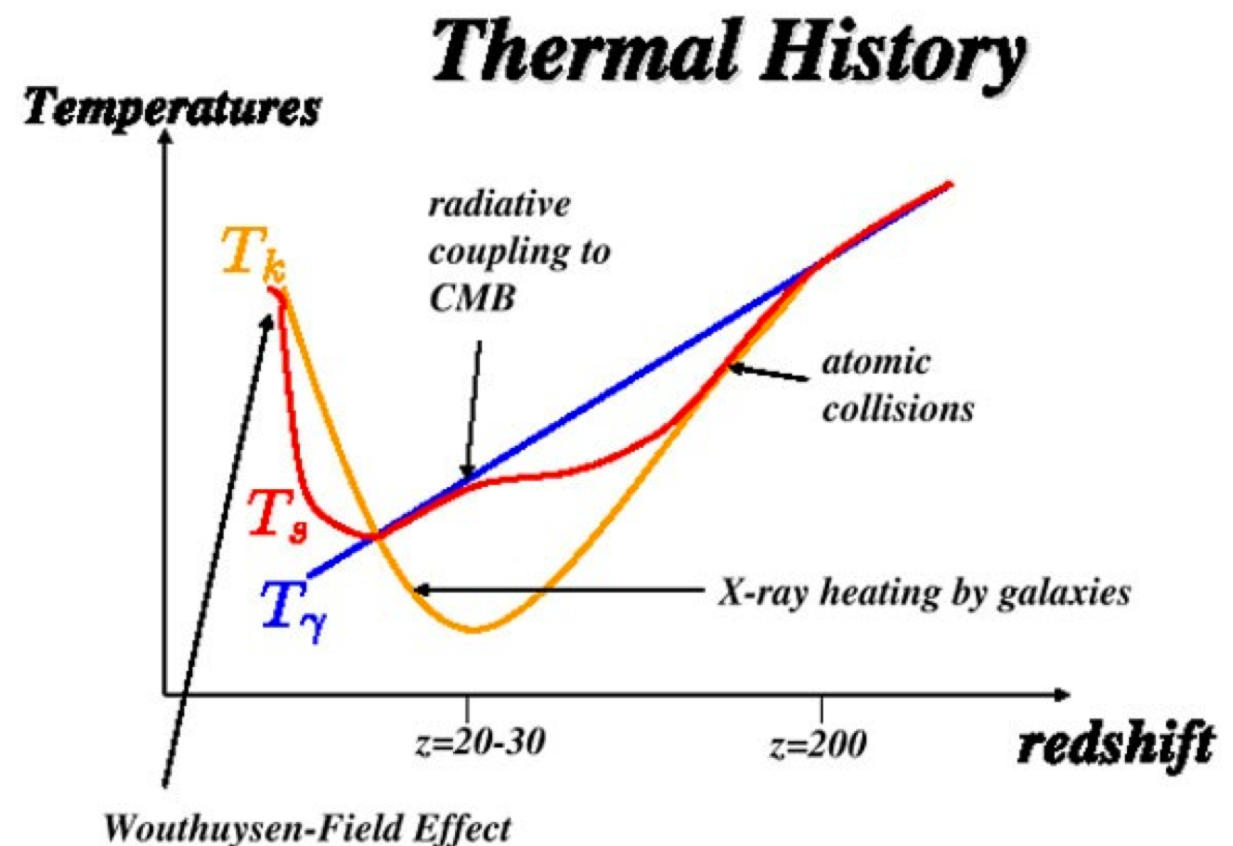
$$\nu = 1420.40575177 \text{ MHz}$$
$$(\lambda = 21.10611405413 \text{ cm})$$



Waterstof 'luistert' naar verschillende dingen

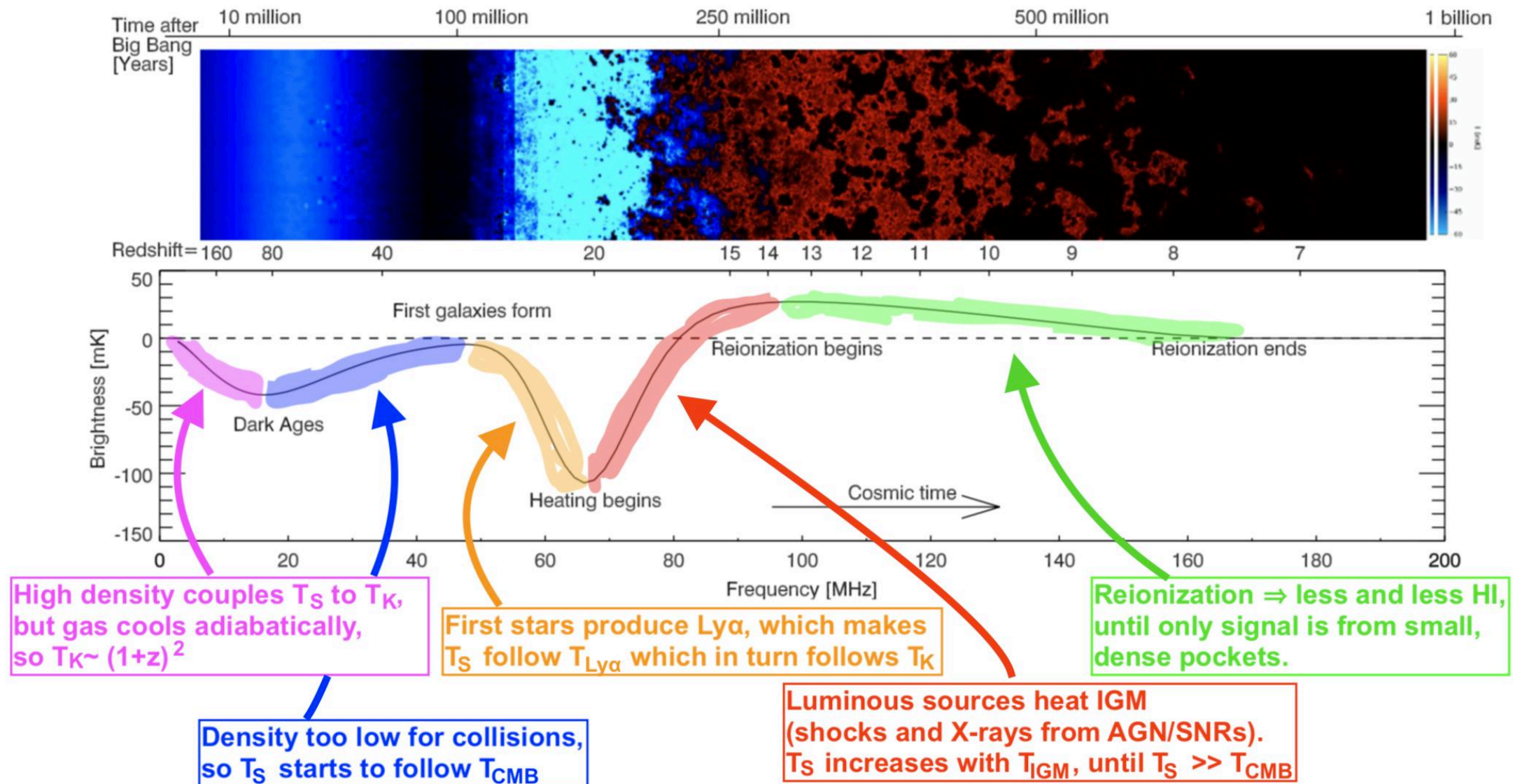
Neutraal waterstof (atomen) wordt beïnvloed door verschillende factoren:

- Onderlinge botsingen
- Achtergrondstraling
- Röntgenstraling
- UV-straling (Lyman-alpha)



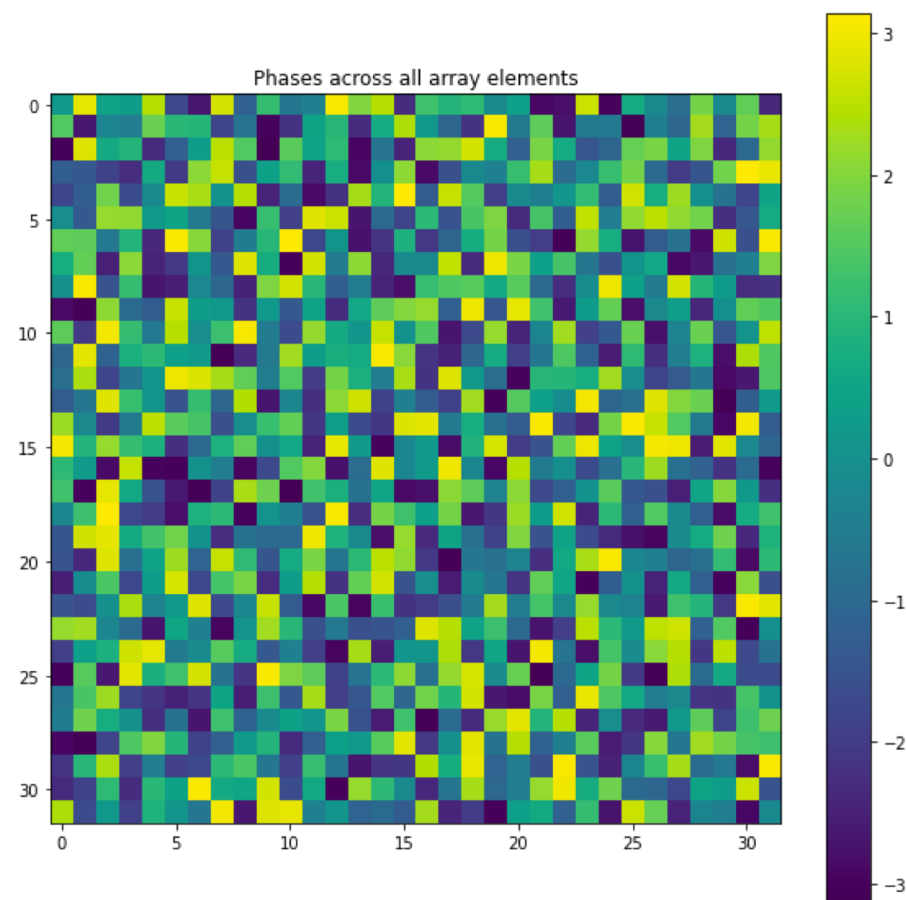
Het verwachte spectrum van neutraal waterstof

Pela @ StackExchange, after Pritchard & Loeb 2012

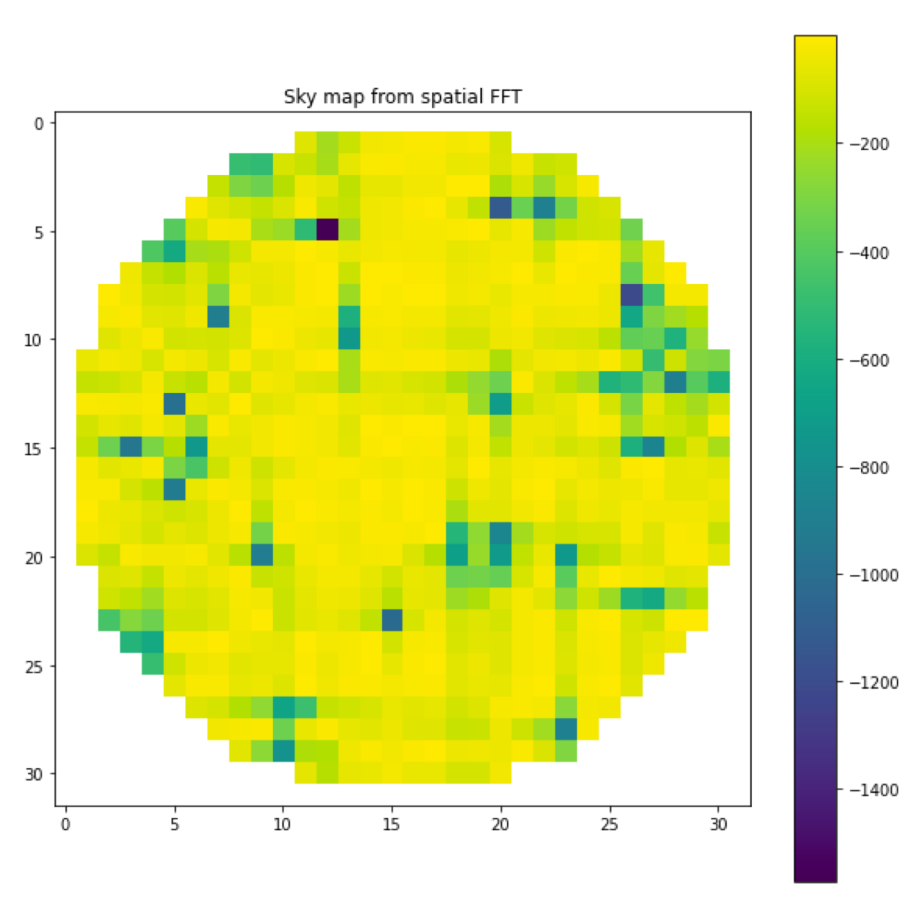


Wat voor metingen doen we met ALO?

We meten met elke antenne een heel radiospectrum, en we kijken voor elke frequentie in dat spectrum hoe de fasepatronen eruit zien over alle antennes bij elkaar. Die kunnen we direct omzetten naar 'kaarten' van de hele hemel.



Fasekaart van alle antennes



Hemelkaartje

Samenvatting

Interferometrie is een enorm krachtige techniek die we gebruiken om de maximale informatie te halen uit onze radio-metingen.

We gebruiken bij interferometrie de fase-informatie van de gemeten golven om heel precies de aankomstrichtingen ervan te bepalen.

Deze techniek gebruiken we om de scherpste afbeeldingen ooit te maken van heet gas rond zwarte gaten (EHT), en voor het in kaart brengen van de structuur van waterstofwolken in het vroege Universum (ons plan met ALO).

Er zijn nog veel meer toepassingen van deze fascinerende meetmethode!

