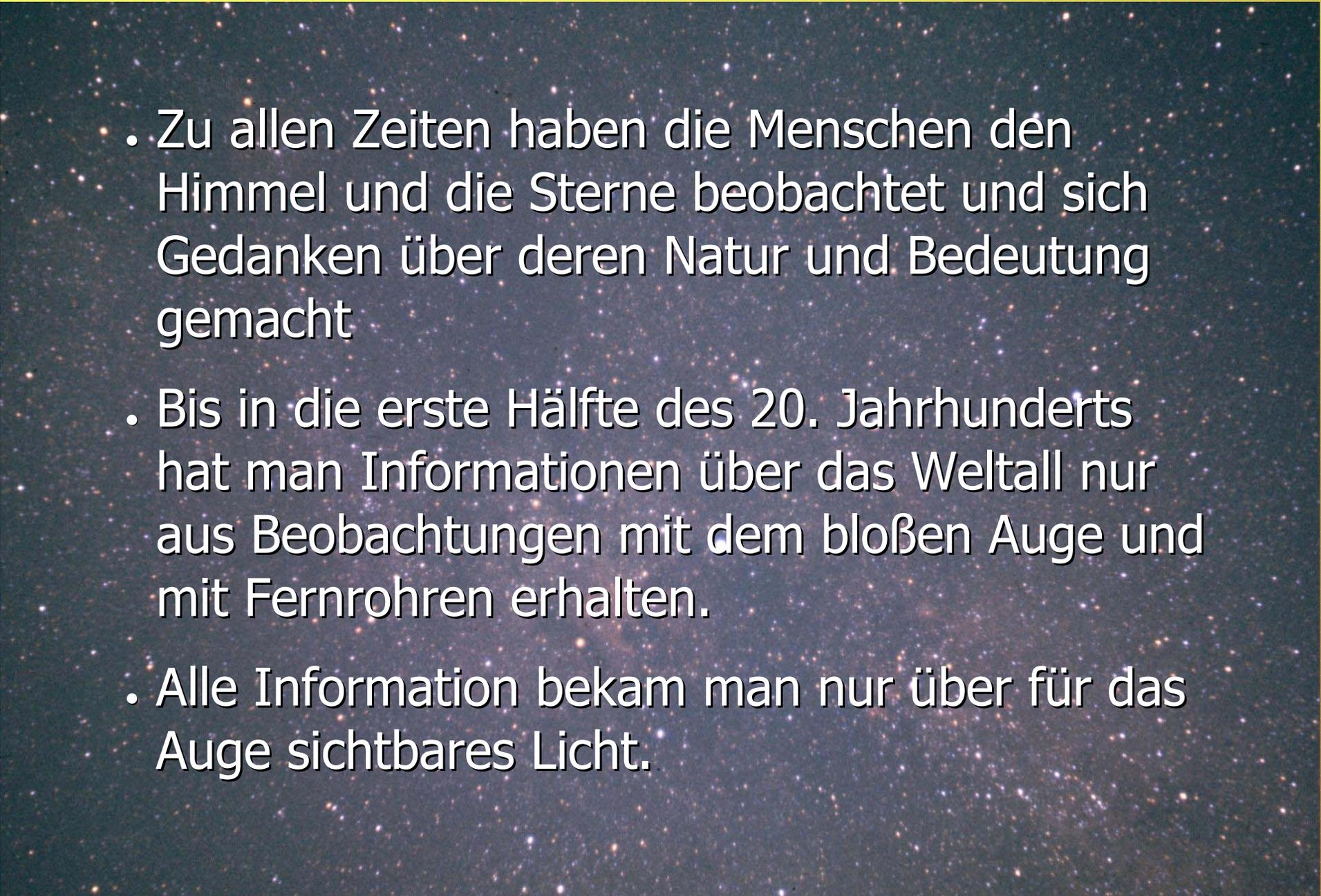


Einführung in die Radioastronomie

Vortrag für das
Geodätische Informationszentrum
Wetzell (21.04.05)



- 
- Zu allen Zeiten haben die Menschen den Himmel und die Sterne beobachtet und sich Gedanken über deren Natur und Bedeutung gemacht
 - Bis in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts hat man Informationen über das Weltall nur aus Beobachtungen mit dem bloßen Auge und mit Fernrohren erhalten.
 - Alle Information bekam man nur über für das Auge sichtbares Licht.

Wir sprechen darüber,

- wie die Radioastronomie entstand
- was Radioastronomie eigentlich ist
- welche Objekte man beobachten kann und welche wichtigen Entdeckungen wir der Radioastronomie verdanken
- mit welchen Teleskopen beobachtet wird

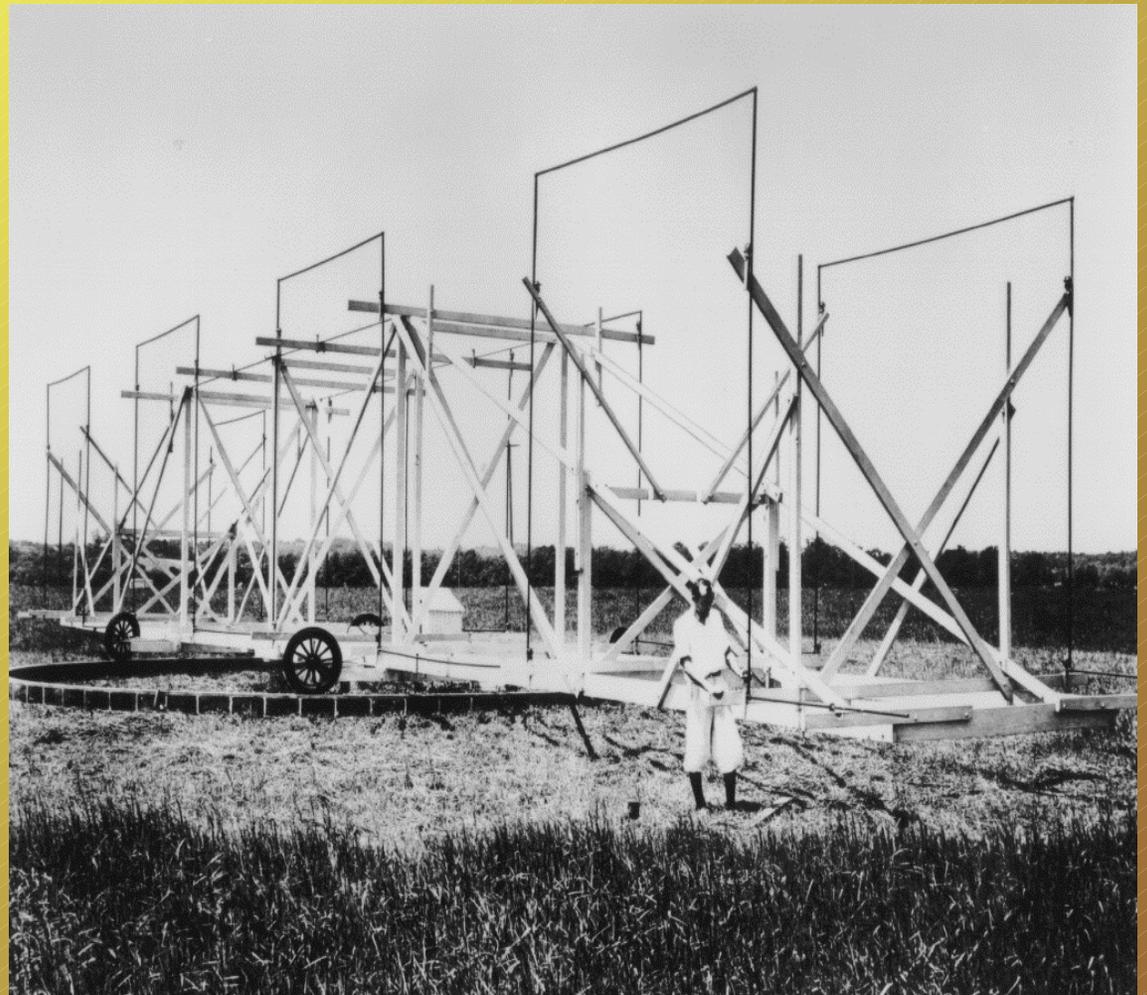
Warum Radioastronomie ?

65% des derzeitigen Wissens von

- Pulsaren
 - Quasaren
 - Schwarzen Löchern
 - 3K Hintergrundstrahlung
 - vom BIG BANG
 - Entdeckung der interstellaren Moleküle
- sind von der Radioastronomie entdeckt worden

Wie alles begann

- **Karl Jansky, 1931**
- untersucht Störungen im Kurzwellen-Funkverkehr, findet:
 - atmosphärische Störungen
 - nicht erklärbare Komponente, periodisch mit Tageslänge



Janskys Entdeckung

- erste Annahme: Rauschen von der Sonne
- Maximum nach einiger Zeit gewandert
- genaue Periodenmessung ergibt 23h 56min
- 23h 56min = Dauer eines siderischen Tags
- → Quelle außerhalb des Sonnensystems
- Maximum korrespondiert mit dem galaktischen Zentrum
- Veröffentlichung am 5. Mai 1933 (New York Times)

Das Echo der Öffentlichkeit

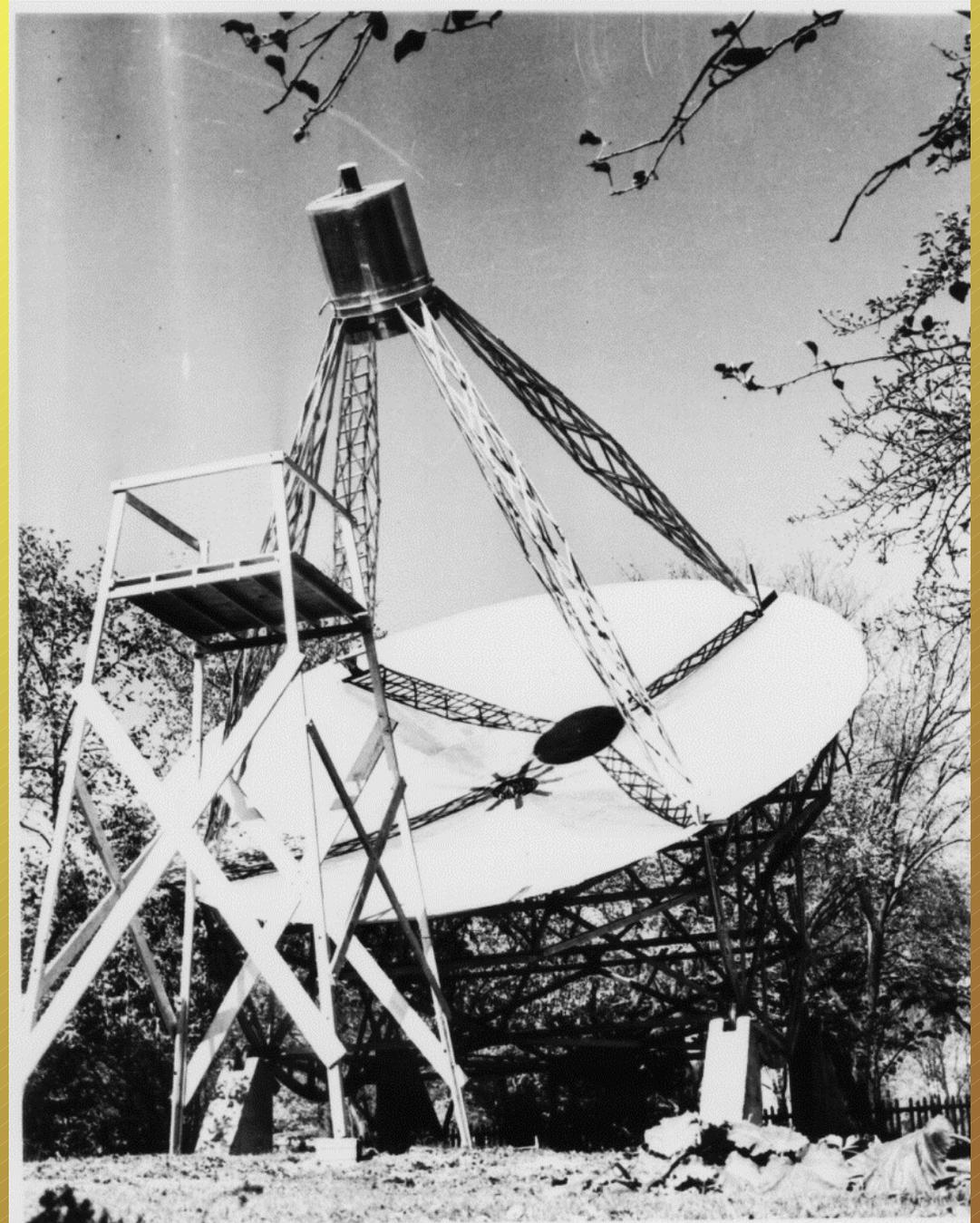
- Bell Telephone Company
 - man hatte das gewünschte Ergebnis
 - keine weiteren Untersuchungen.
 - Wissenschaftler gedämpftes Interesse
 - Weltwirtschaftskrise verhindert neue Projekte
 - (Beobachtet wurde in Holmdel, New Jersey)
 - aber...

Ein weitsichtiger Amateur

- **Grote Reber**, Radio-Ingenieur und Funkamateur in Chicago
- Parabolantenne mit 10m Durchmesser (1937)
- Empfänger für verschiedene Frequenzen:
 - 3300 MHz – kein Erfolg
 - 900 MHz – kein Erfolg
 - 160 MHz – dieser Empfänger lieferte Ergebnisse!

Rebers Antenne

- Reflektor aus Blech handgefertigt
- 10m Durchmesser
- ca. 7m Brennweite
- Grund für Parabolspiegel: Eignung für verschiedene Wellenlängen



Die erste Milchstraßenkarte

- Rebers Beobachtungen von 1938-1943 ergeben erste Milchstraßenkarte (oben)
- weitere Beobachtungen bei 480MHz (1946, unten)

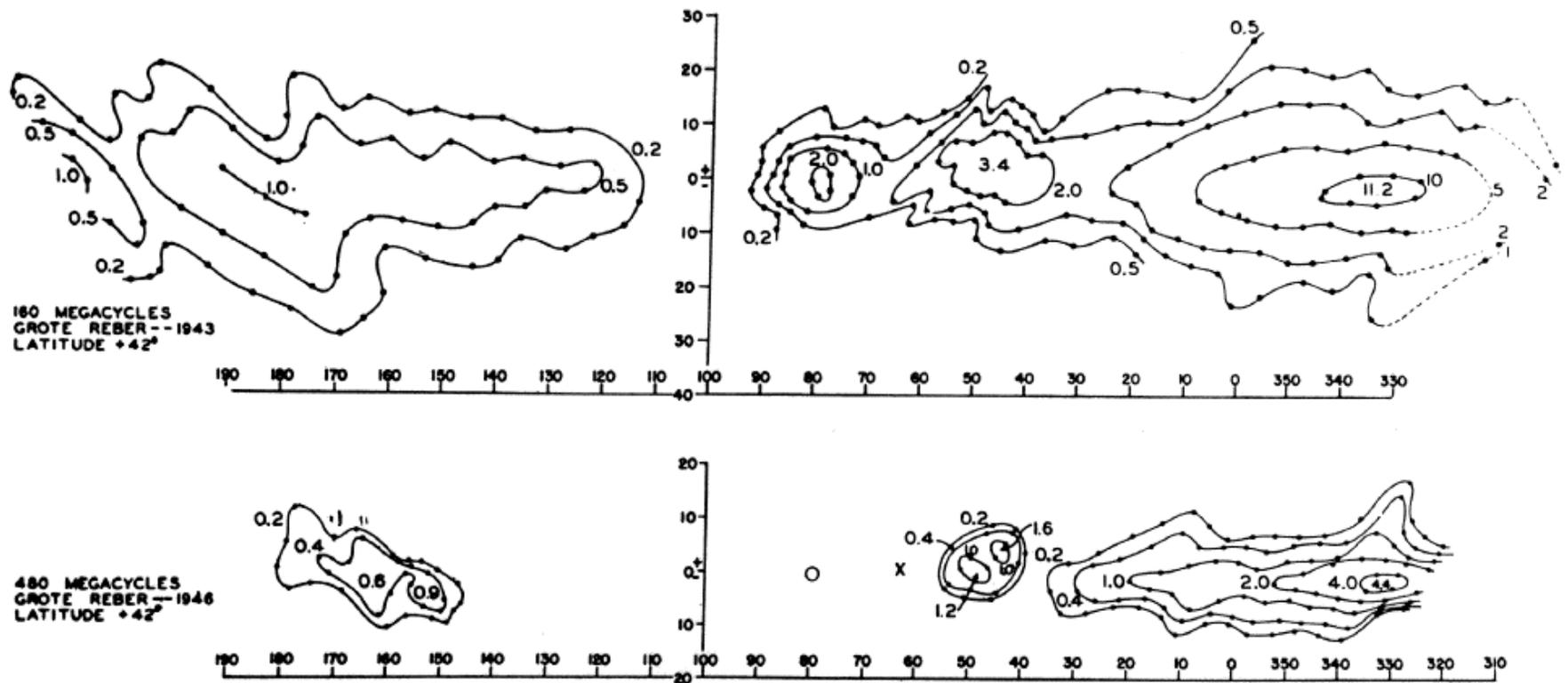


FIG. 7—Contours of constant intensity at 160 MHz and 480 MHz, taken at Wheaton, Illinois.

Was ist Radioastronomie eigentlich?

Was ist Radioastronomie?

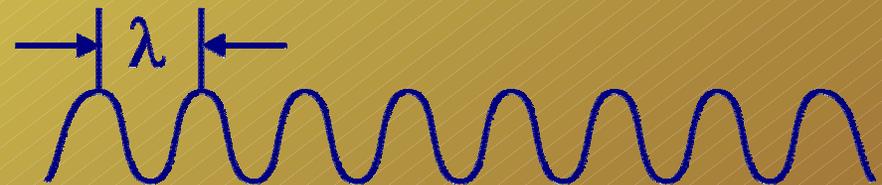
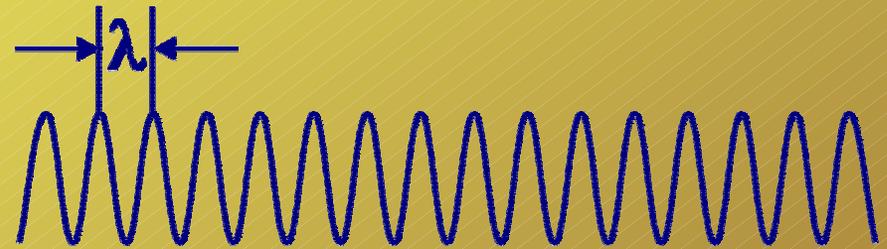
- Empfang von Rundfunkprogrammen kleiner grüner Männchen?
- Nein!
- Die von der Radioastronomie untersuchte Strahlung kommt wie das Licht von Sternen und der Materie zwischen den Sternen.
- Sie gibt, wie die optische Astronomie, Aufschluss über die Physik des Weltalls.

Elektromagnetische Wellen

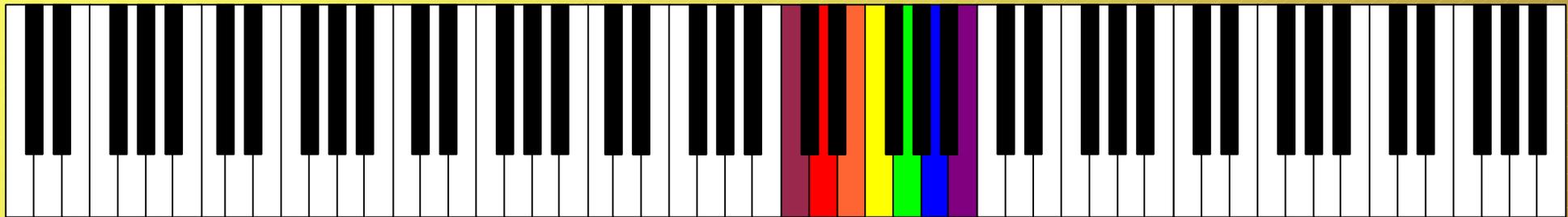
- Licht und Radiostrahlung sind etwas sehr ähnliches: nämlich **elektromagnetische Wellen**
- gekoppelte elektrische und magnetische Felder, die sich ausbreiten
- verändern ihre Intensität ("Feldstärke") periodisch
- brauchen keine Materie zur Ausbreitung (leerer Raum genügt)

Elektromagnetische Wellen

- gekennzeichnet durch **Wellenlänge** bzw. **Frequenz**
- Frequenz $f =$
Schwingungen
pro Sekunde
- Wellenlänge $\lambda =$
Meter pro Schwingung
- f und λ sind über die
Lichtgeschwindigkeit c
verknüpft: $c = \lambda \cdot f$



Das elektromagnetische Spektrum



Radio

IR

sichtbares
Licht

UV

Röntgen

γ

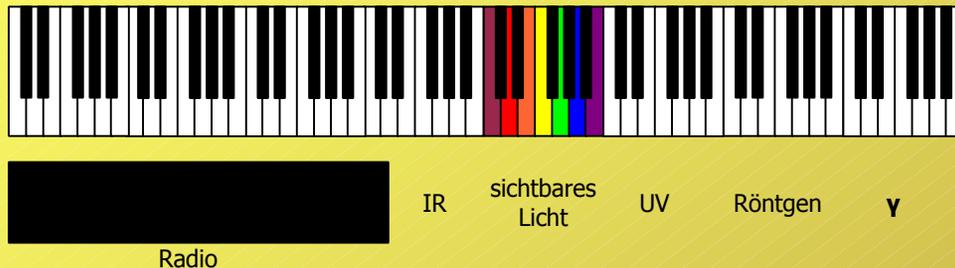


Wellenlänge λ



Frequenz f

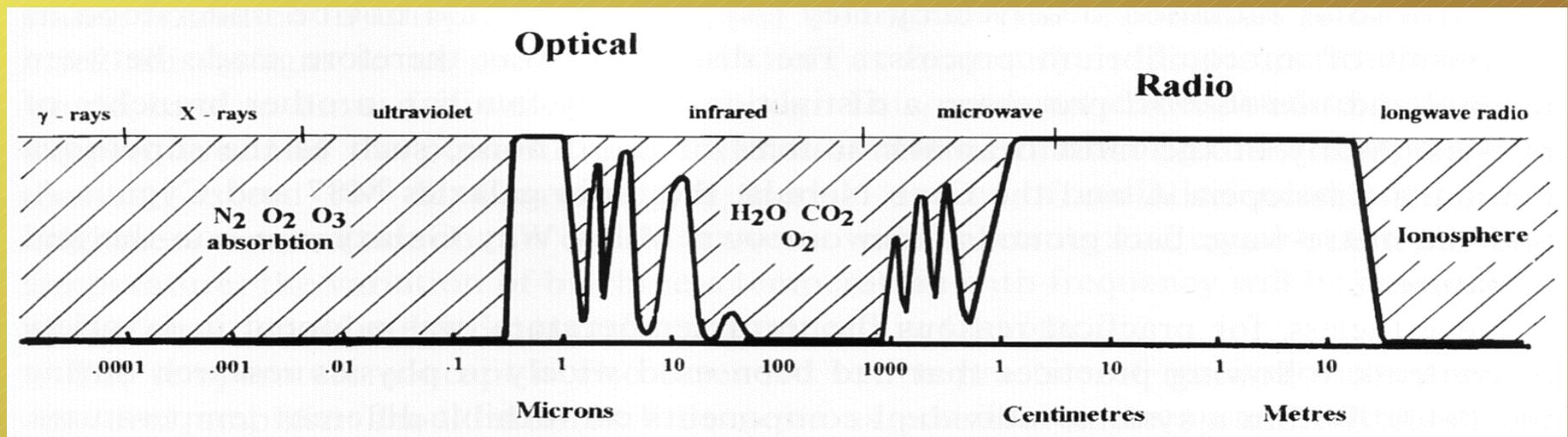
Ein paar Zahlenwerte



Bereich	Wellenlänge λ	Frequenz f
LW	2 km	150 kHz
KW	30 m	10 MHz
UKW	3 m	100 MHz
Sat. TV	15 cm	2 GHz
sichtbares Licht	400 – 800 nm	750 – 375 THz
Röntgenstrahlung	0.0001 – 10 nm	$3 \cdot 10^{21}$ – $30 \cdot 10^{15}$ Hz
γ -Strahlung	< 0.002 pm	> $150 \cdot 10^{21}$ Hz

"Fenster" in der Atmosphäre

- Warum sind unsere Augen ausgerechnet für Wellenlängen von 400 – 800 nm empfindlich?
- Erdatmosphäre ist für diese Wellenlängen durchlässig, schützt uns vor anderer Strahlung (z.B. UV)
- Weiteres, sehr viel breiteres Fenster im Radiofrequenzbereich!

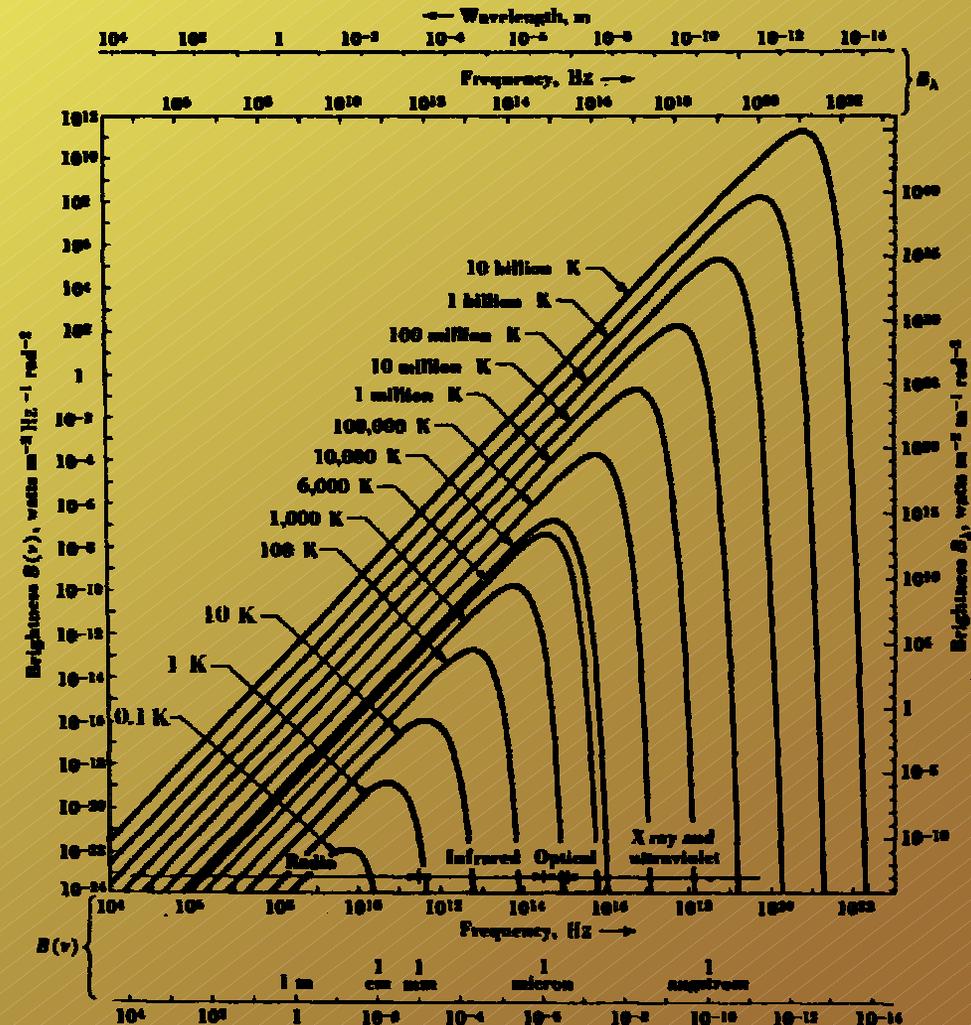


Strahlungsentstehung (1)

- Thermische Strahlung
 - jeder Körper wärmer als 0°K gibt elektromagnetische Strahlung ab
 - Ursache: Brownsche Molekularbewegung
 - Intensitätsverlauf über der Frequenz hängt von der Temperatur ab, es gibt ein Maximum
 - betrachtet wird (typischerweise) ein sog. Schwarzer Körper, der ideal im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung steht

Strahlungsentstehung (2)

- Plancksches Strahlungsgesetz
 - je höher die Temperatur, umso höher die Frequenz der maximalen Strahlungsintensität
 - aus Spektrum kann auf die Temperatur rückgeschlossen werden
 - gilt für Schwarzen Körper



Strahlungsentstehung (3)

- Synchrotronstrahlung
 - Strahlungsintensität bei vielen Radioquellen höher als mit Planckschem Gesetz erklärbar (erforderliche Temperaturen unrealistisch)
 - dann meist schnelle (relativistische) Bewegung von Elektronen in Magnetfeldern
 - Abstrahlung tangential zur Spiralbahn
 - Frequenz proportional zur magnetischen Feldstärke



Strahlungsentstehung (4)

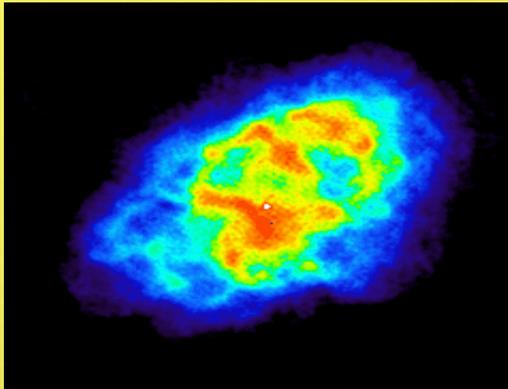
- Spektrallinien
 - thermische und Synchrotronstrahlung = Kontinuumsstrahlung (bei allen Frequenzen)
 - Spektrallinien entstehen bei Übergängen zwischen Energiezuständen von Atomen oder Molekülen
 - Frequenz proportional zu Energiedifferenz
 - Radiostrahlung: geringe Energiedifferenzen
 - bekanntestes Beispiel: 21cm-Linie des neutralen Wasserstoffs

Schlussfolgerungen für die Astronomie

- Optische Astronomie kann nur unvollständiges Bild des Weltalls liefern.
- Astronomie muss alle Wellenlängenbereiche nutzen, um vollständiges Bild der Welt zu bekommen.



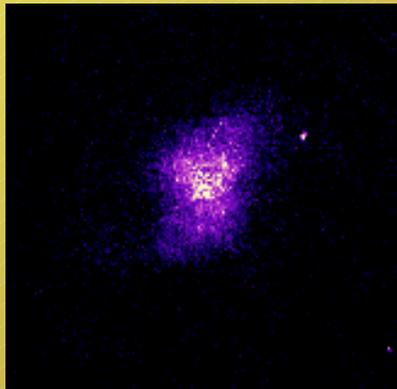
Beispiel: Crabnebel



Radiobereich



optisch



fernes UV

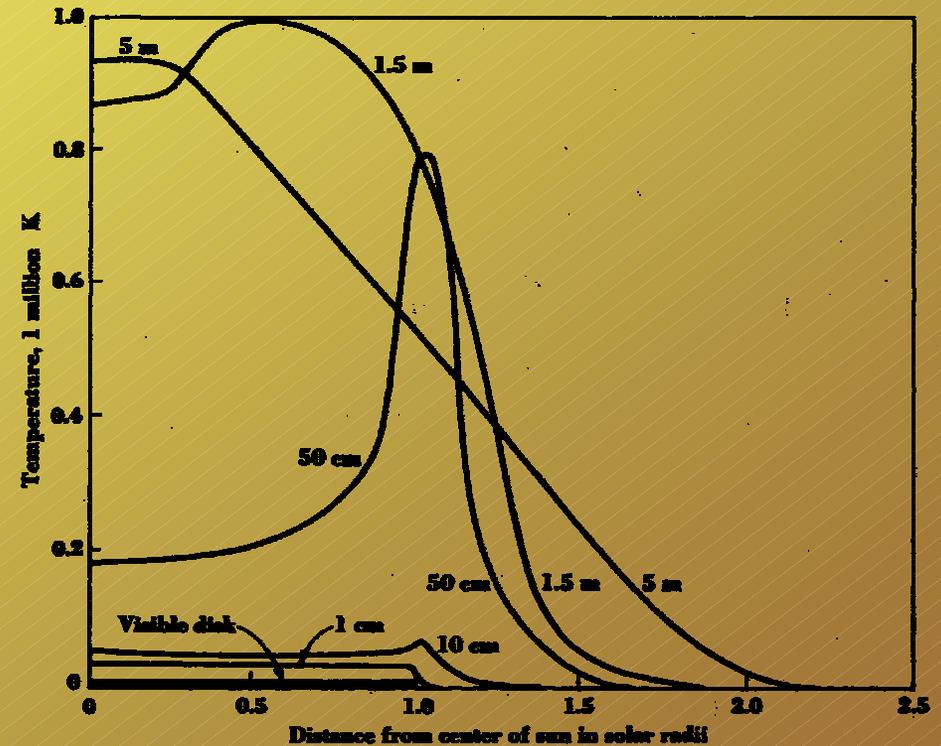


Röntgenbereich

Was beobachtet die Radioastronomie?

Sonnensystem (1)

- Sonne
 - stärkste Radioquelle aus Erdsicht
 - auch Amateuren sehr gut zugänglich
 - Sonnendurchmesser ist abhängig von der Beobachtungsfrequenz
 - Radiosonne wird in separatem Vortrag behandelt



Sonnensystem (2)

- Jupiter
 - strahlt bei relativ großen Wellenlängen
 - ebenfalls als Beobachtungsobjekt für Amateure geeignet (Projekt Radio Jove)
 - Strahlung entsteht durch Bewegung geladener Teilchen im Magnetfeld, dabei Wechselwirkung mit Mond Io

18 MHz



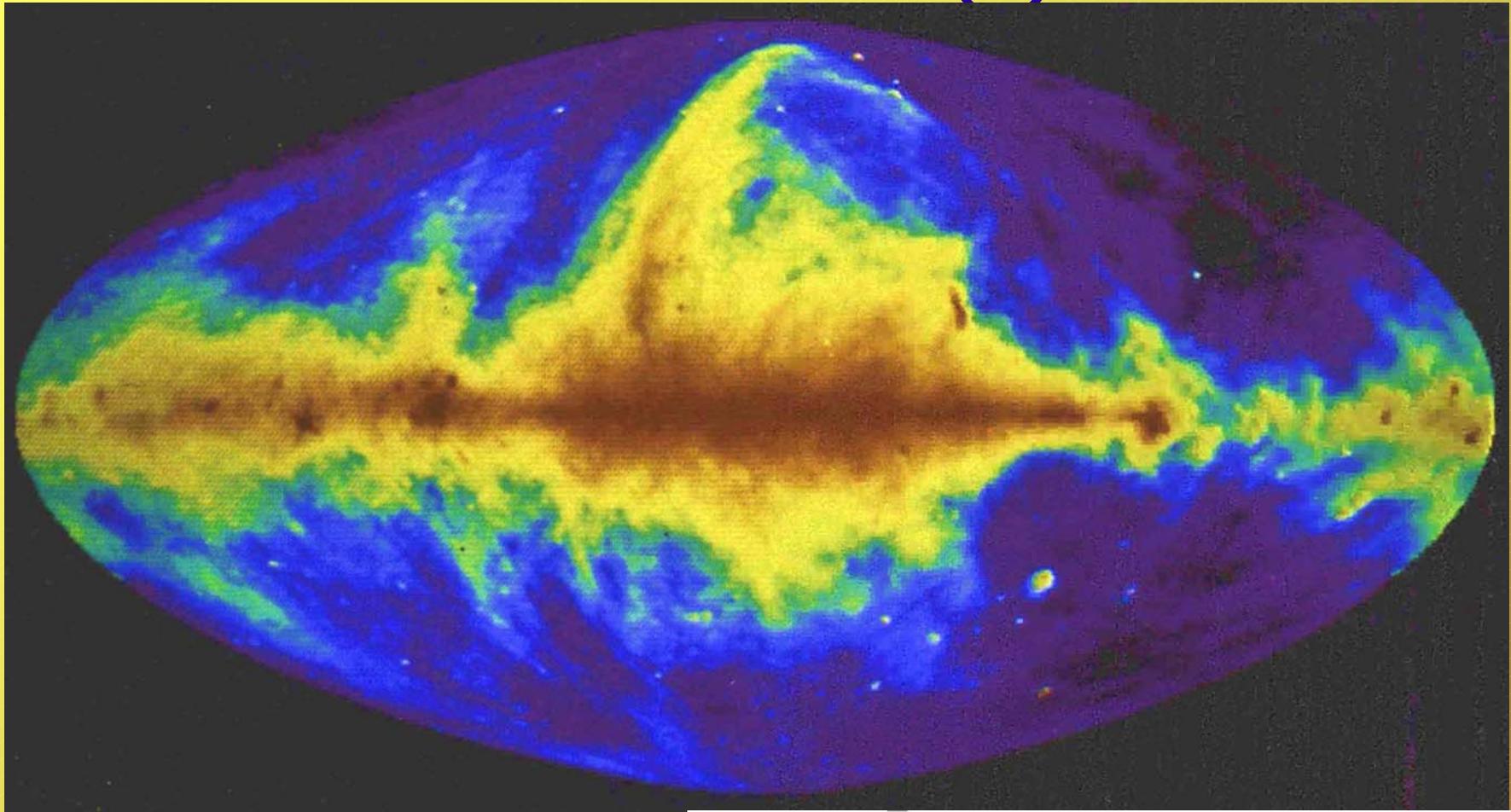
20 MHz



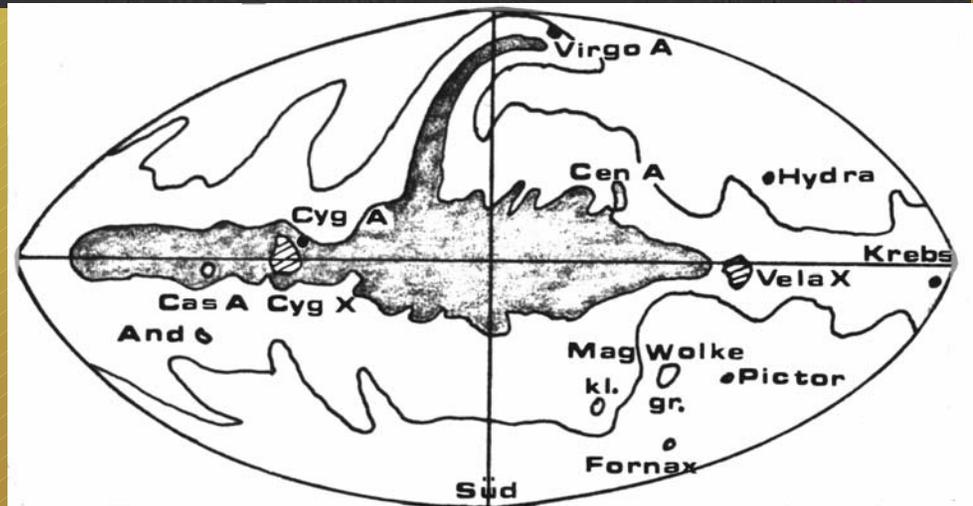
Milchstraße (1)

- vorwiegend Materie **zwischen** den Sternen, dabei viele Spektrallinien
 - Wasserstoff
 - verschiedenste Moleküle
- Strahlung, die nicht thermisch entsteht, sondern durch schnell bewegte Elektronen in Magnetfeldern (Synchrotronstrahlung)
- Supernova-Überreste

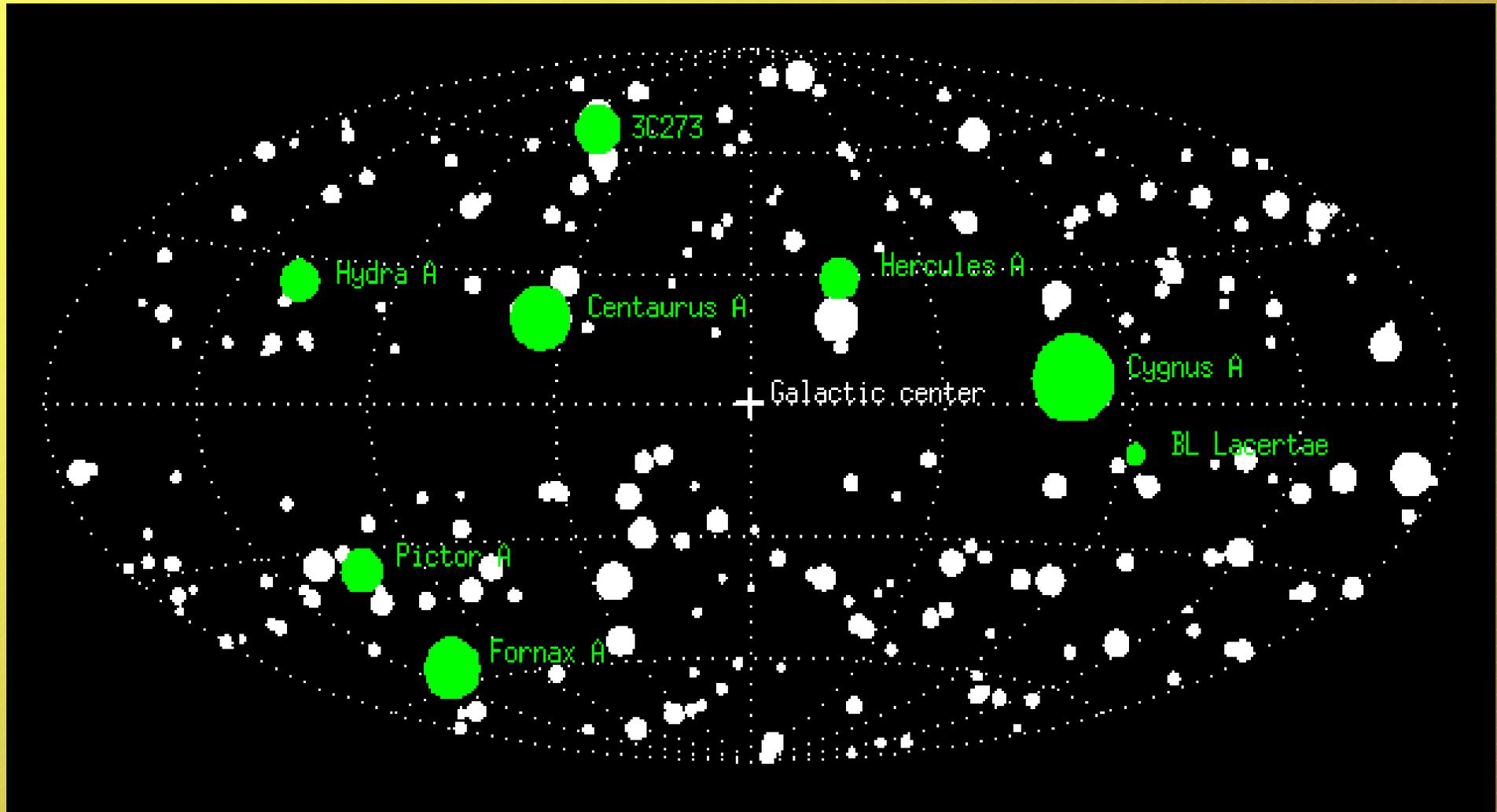
Milchstraße (2)



Das für uns sichtbare
Universum bei 408 MHz



Milchstraße (3)



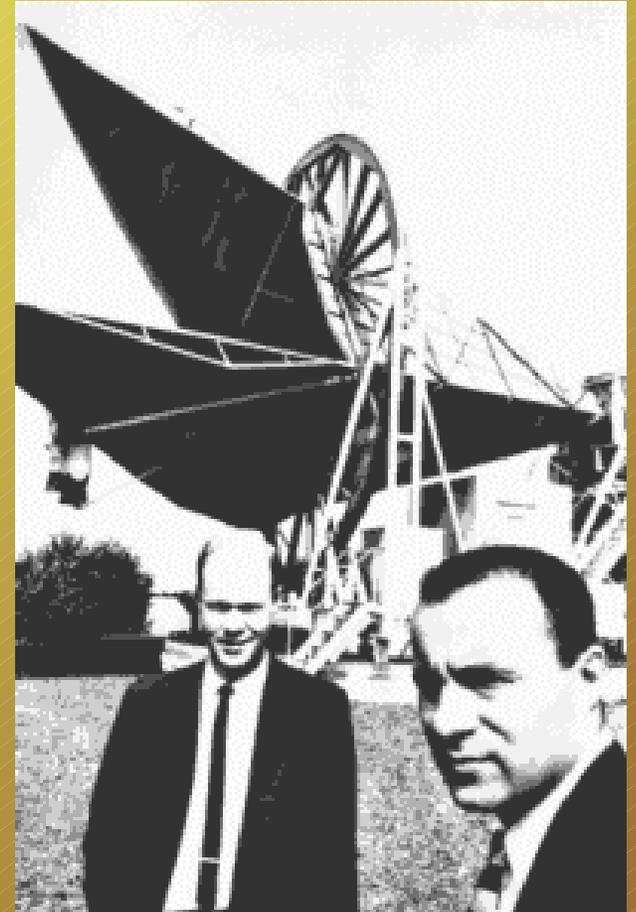
Die stärksten Radioquellen

Extragalaktische Objekte

- Quasare und Radiogalaxien

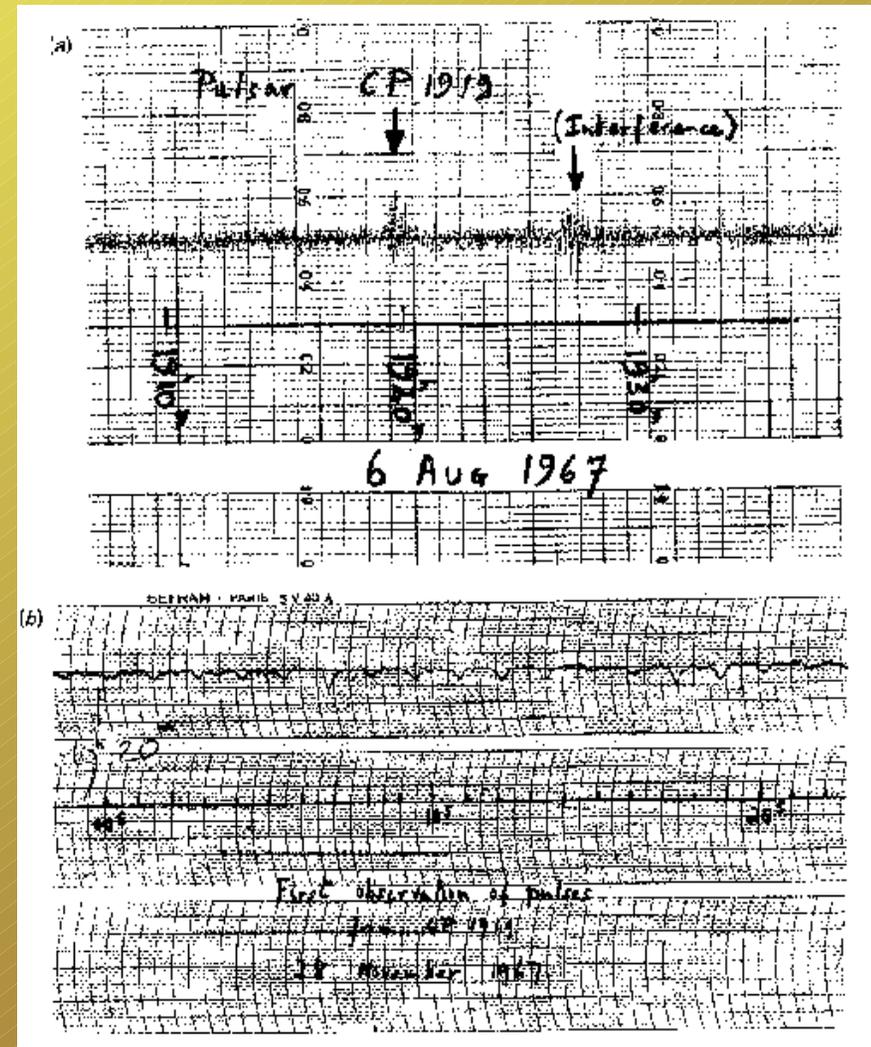
Urknall

- Penzias und Wilson, 1963
- unerklärtes Rauschen in Beobachtungen
- aus allen Richtungen gleich stark
- Rauschen entspricht einer Temperatur von 3K
- „Echo des Urknalls“



Die Entdeckung der Pulsare I

- 1967 Anthony Hewish, Jocelyn Bell:
 - Untersuchung atmosphärischer Szintillationen
 - 2000 Dipole auf 18000m^2
 - R.A. 19h19: Serie von Pulsen (ca. 1.3 sec Abstand)
 - Pulsabstand extrem konstant



Die Entdeckung der Pulsare II

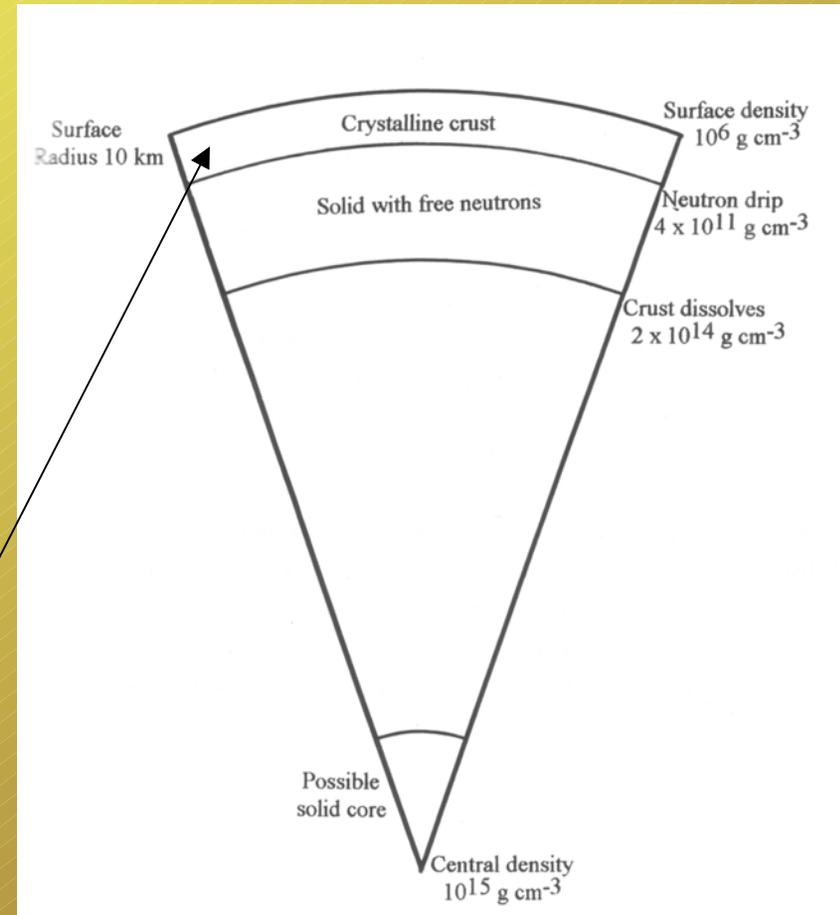
- irdischer Störer?
 - aber: Richtung mit siderischer Zeit gekoppelt
- Signalfolge zu schnell für großes Objekt (Stern)
- Signale einer **außerirdischen Zivilisation ???**
- wenn ja: Dopplerverschiebung durch Planetenbewegung nachweisbar?
 - aber: nur Bewegung der Erde auf ihrer Bahn nachweisbar
- Entdeckung ähnlicher Signale in anderen Bereichen des Himmels
 - Schluss auf besonderen Typ Himmelskörper

Was ist ein Pulsar?

- Pulsar-Signale:
 - Pulsreihen mit extrem regelmäßiger Periode (wenige Millisekunden bis einige Sekunden)
 - über 700 Pulsare im Radiobereich sind bekannt
 - einige im optischen, Röntgen- oder γ -Bereich
 - Spektren: Intensität nimmt zu höheren Frequenzen ab (nicht-thermisch, Synchrotron-Strahlung)
- auffallend: Pulsare stehen oft in Verbindung mit Supernova-Überresten

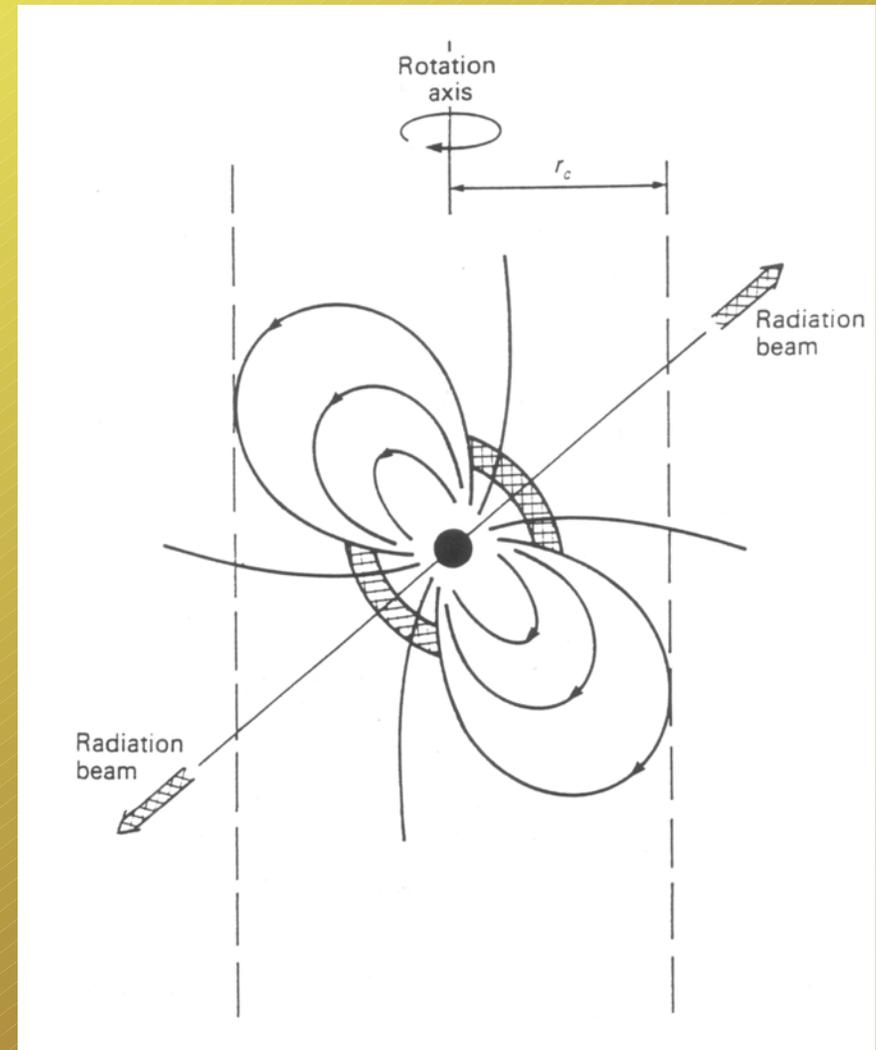
Das heute akzeptierte Pulsar-Modell I

- schnell rotierender Neutronenstern
(nur Neutronenstern hält Zentrifugalkräften stand)
- extrem starkes Magnetfeld
(1000 Mio. Tesla ca. 10^{13} mal Erdmagnetfeld)
- Magnetfeld entsteht an Oberfläche (Fe-Kerne)



Das heute akzeptierte Pulsar-Modell II

- Magnetfeld beschleunigt geladene Partikel
→ Strahlungsquelle
- magnetische Achse abweichend von Rotationsachse
- Strahlungsquelle
- Emission in Kegel um magnetische Achse (Lighthouse Model)
- Rotation → Pulsation der Strahlung

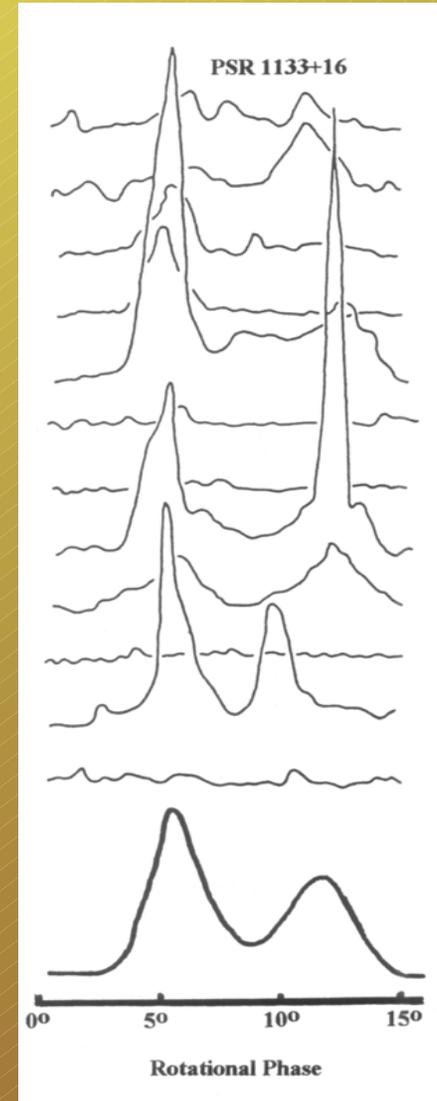


Wie entsteht ein Pulsar?

- Kollaps eines Sterns mit ca. 1.4 Sonnenmassen (Supernova)
- neuer Gleichgewichtszustand nach Aufbrauchen des Kernbrennstoffs
- Durchmesser ca. 20 km
- Masse eines Schiffs konzentriert in Stecknadelspitze
- Protonen und Elektronen rekombinieren zu Neutronen
- durch extreme Kontraktion des ursprünglichen Sterns auch Verdichtung des Magnetfelds (und damit extreme Verstärkung)

Eigenschaften der Pulse I

- Kette von Pulsen
 - sehr präziser Abstand
 - Einzelpulse unterschiedlich geformt
 - aber: Integration über viele Pulse ergibt reproduzierbare, für den jeweiligen Pulsar charakteristische Form
 - auch Doppelpulse
 - Einzelpulse verzerrt durch Szintillationen in interstellarer Materie



Eigenschaften der Pulse II

einige typische Impulsformen:

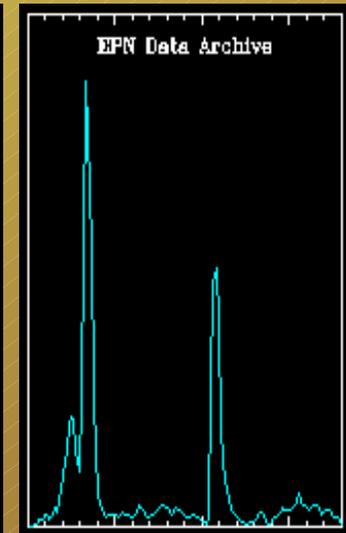
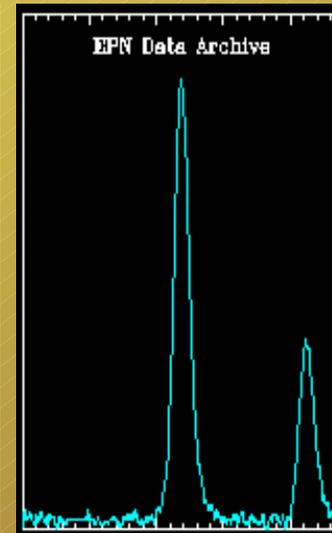
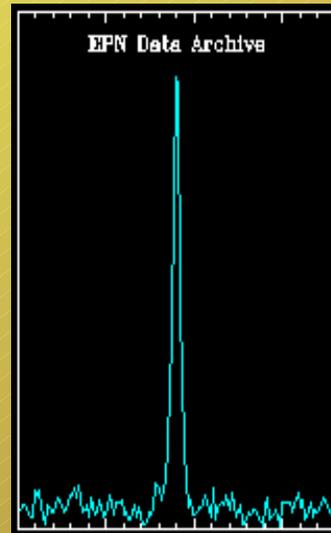
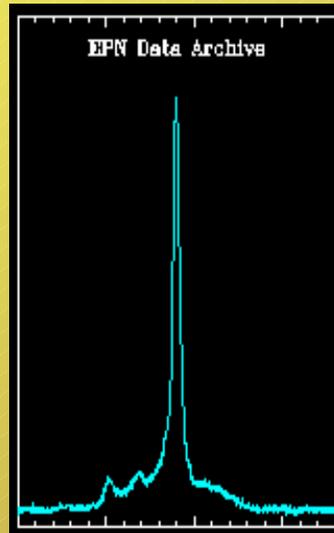
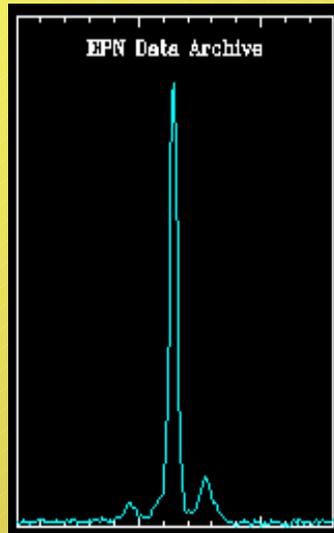
B0329

J0437

Vela

B1937

Crab

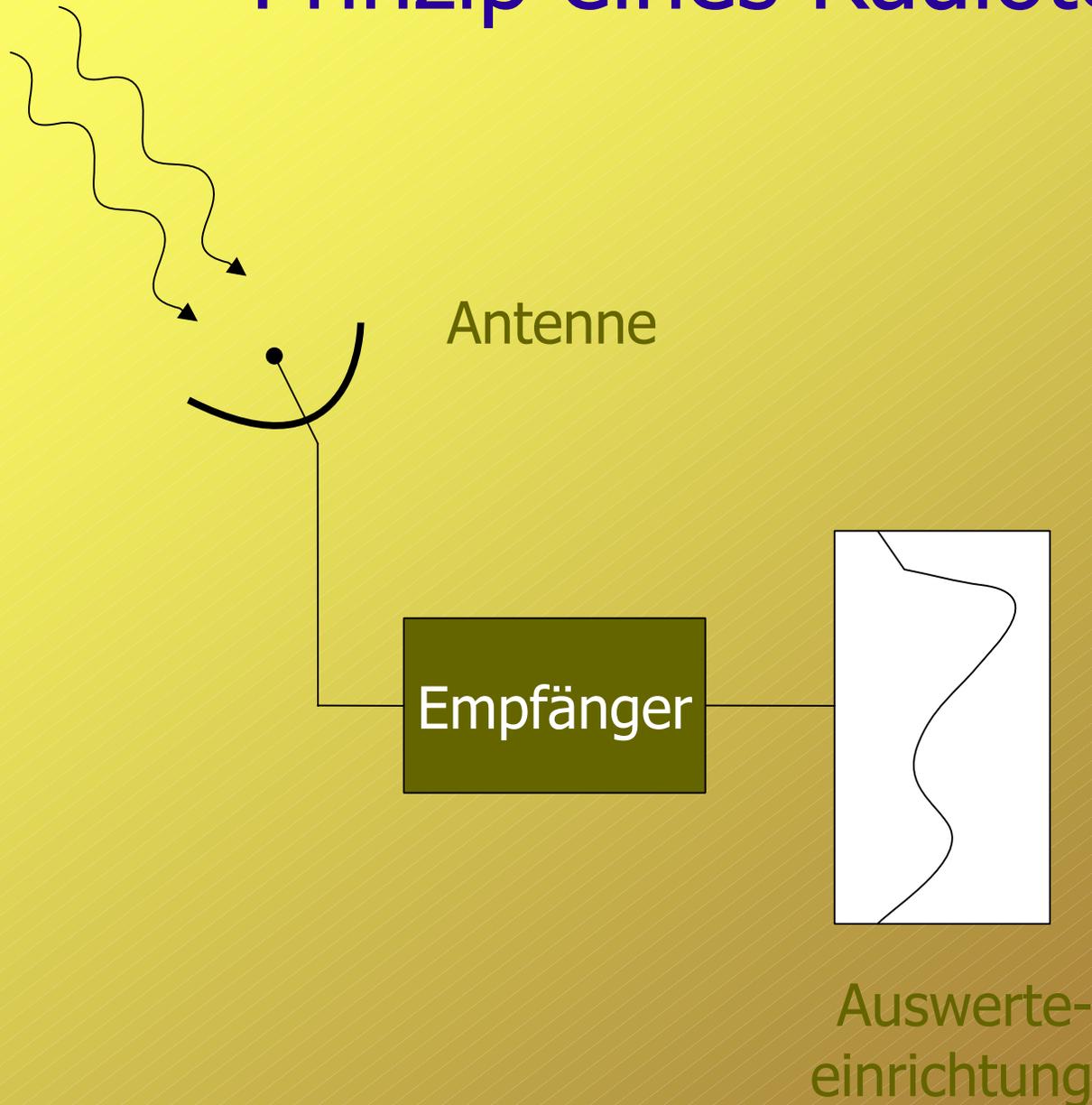


Radioteleskope

Beobachtungsaufgaben

- Bestimmung der räumlichen Helligkeitsverteilung am Himmel (Erstellung eines Radiobildes)
- Helligkeitsverteilung über der Frequenz bestimmen (Spektrum erstellen)
- In beiden Fällen möglicherweise zusätzlich: Bestimmung der Veränderung über der Zeit

Prinzip eines Radioteleskops



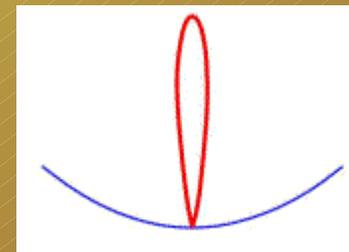
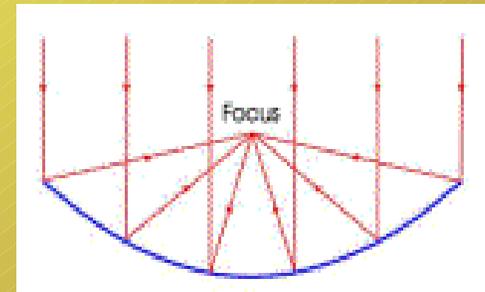
- Antenne sammelt ankommende Strahlung
- Empfänger verstärkt Signale, macht sie auswertbar
- Auswerteeinrichtung stellt Signale "lesbar" dar

Antenne

- zwei Komponenten:
 - **Reflektor**
 - bündelt die Strahlung im Brennpunkt
 - Bauformen:
 - Parabolspiegel
 - Gitterkonstruktionen
 - Yagi
 - **Erreger** – wandelt die elektromagnetische Strahlung in elektrisches (leitungsgebundenes) Signal um
 - Bauformen z. B.:
 - Dipol
 - Horn

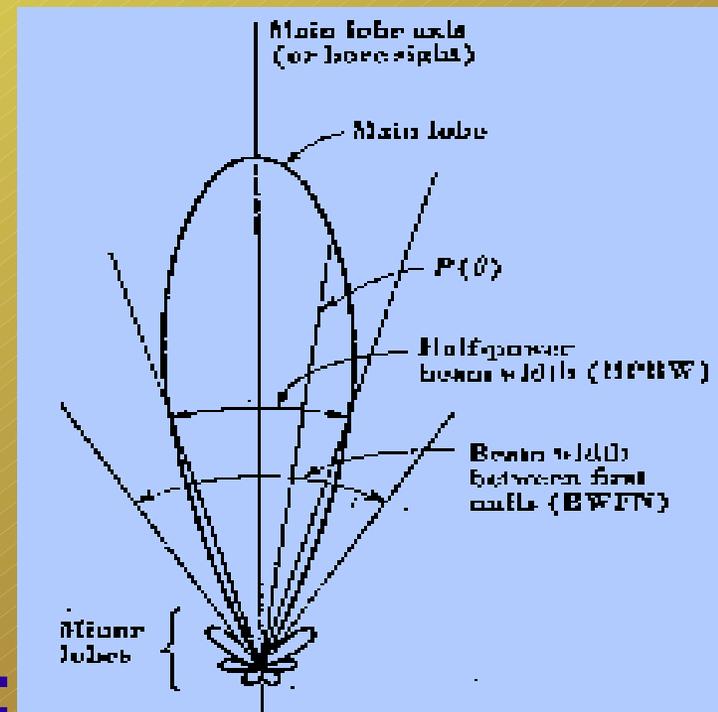
Richtwirkung der Antenne

- Antennenreflektor fokussiert Strahlung im Brennpunkt
- große Fläche sammelt viel Strahlung
- Antenne hat Vorzugsrichtung
- Richtwirkung entspricht der Fähigkeit, Details darzustellen
- große Fläche --> gute Detailauflösung



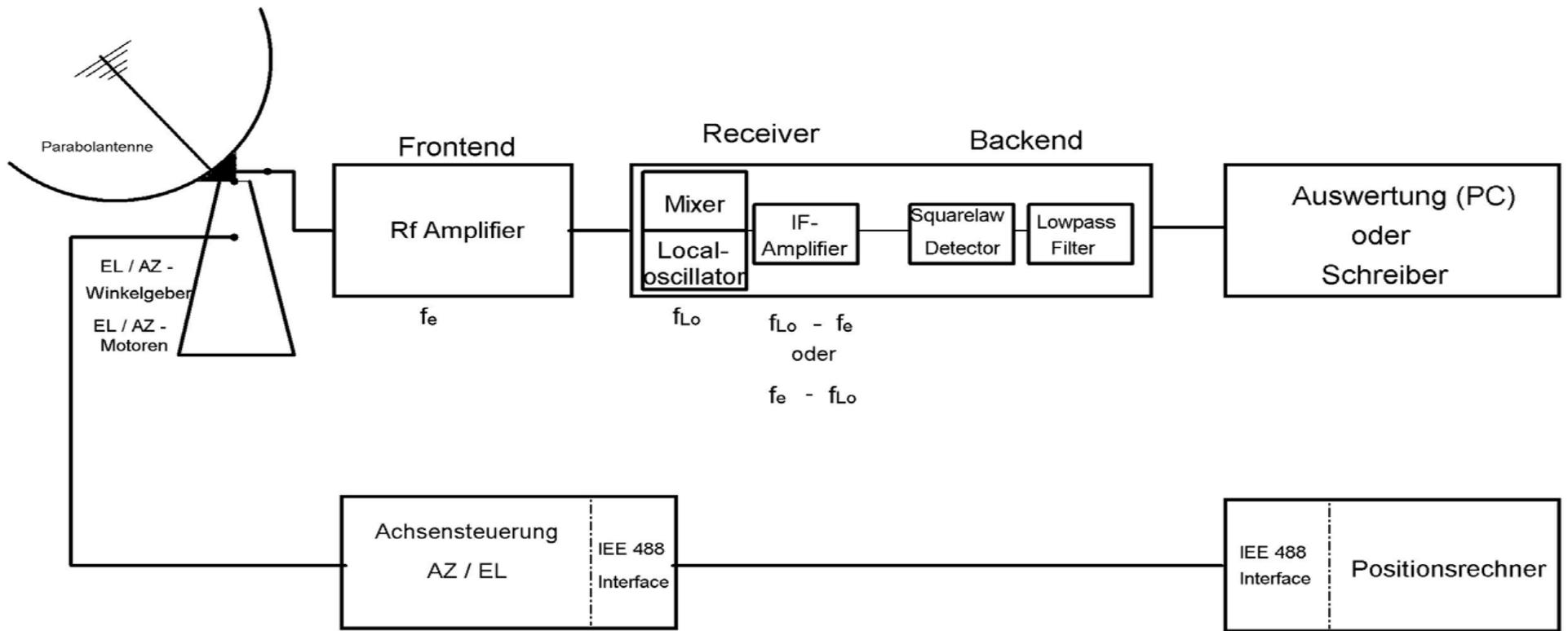
Auflösungsvermögen

- Winkelauflösung eines Teleskops $\approx 58^\circ \cdot \lambda/D$
- optische Teleskope: 20 marcsec
($D=5\text{m}$, $\lambda=500\text{nm}$)
- Radioteleskope: 1 arcmin
($D=100\text{m}$, $\lambda=2.8\text{cm}$)
- extra-galaktische Radioquellen:
Feinstruktur < 1 marcsec
($1\text{ marcsec @ } \lambda = 2.8\text{cm} \Rightarrow D = 6000\text{km}$)
- Parabolspiegel für Radioteleskope:
derzeitiges Maximum $D \approx 100\text{m}$



Empfänger (1)

- hohe Frequenzen (HF) schwierig zu verarbeiten
- deshalb Umsetzung auf niedrigere Frequenzen (Zwischenfrequenz ZF) durch Mischung mit Signal aus lokalem Oszillator (LO)
- Zf-Verstärkung, Gleichrichtung und Auswertung



Empfänger (2)

- Signal von Radioquelle = **Rauschen**
- Bauteile des Empfängers produzieren **Rauschen**
- prinzipiell nicht voneinander unterscheidbar
- → Forderung nach rauscharmen Empfängern
- Rauscharmut erreichbar durch
 - spezielle Bauteile
 - Kühlunginsbesondere in den Vorverstärkern

Empfänger (3)

- letztendlich wird die Stärke des Rauschens und seine Veränderung gemessen
- → Forderung nach Stabilität der Verstärkung
- wird erreicht durch
 - Schaltungstechnik
 - stabile Temperatur
- → Forderung nach unveränderlichem Empfängerrauschen
- wird erreicht durch
 - stabile Temperatur

Auswertung

- keine direkte Bilderzeugung
- stattdessen punktuelle Intensitätsmessung
- (entspricht am Fernrohr einer Helligkeitsmessung mit Fotozelle)
- Bilderzeugung erst in der Nachverarbeitung möglich

Interferometer

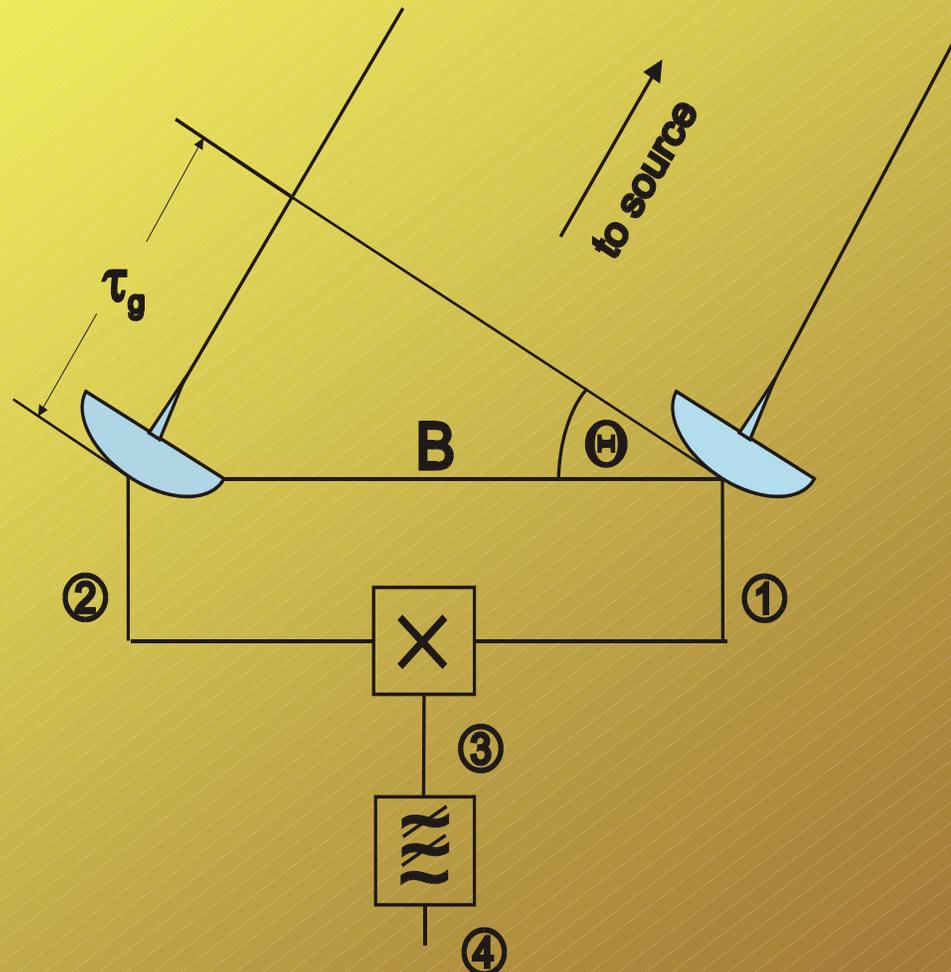
- Man benötigt sehr große Radioteleskope, um Details von Radioquellen untersuchen zu können
- Aber: Größe von Radioteleskopen begrenzt
- Es ist möglich, diese Begrenzung zu überwinden:
 - man nehme einige "kleine" Radioteleskope in großem Abstand voneinander
 - man kombiniere ihre Ausgangssignale in geeigneter Weise miteinander
 - man führe mit den Ergebnissen einige Berechnungen durch
(stark vereinfachte Darstellung)

Das Zwei-Element-Interferometer

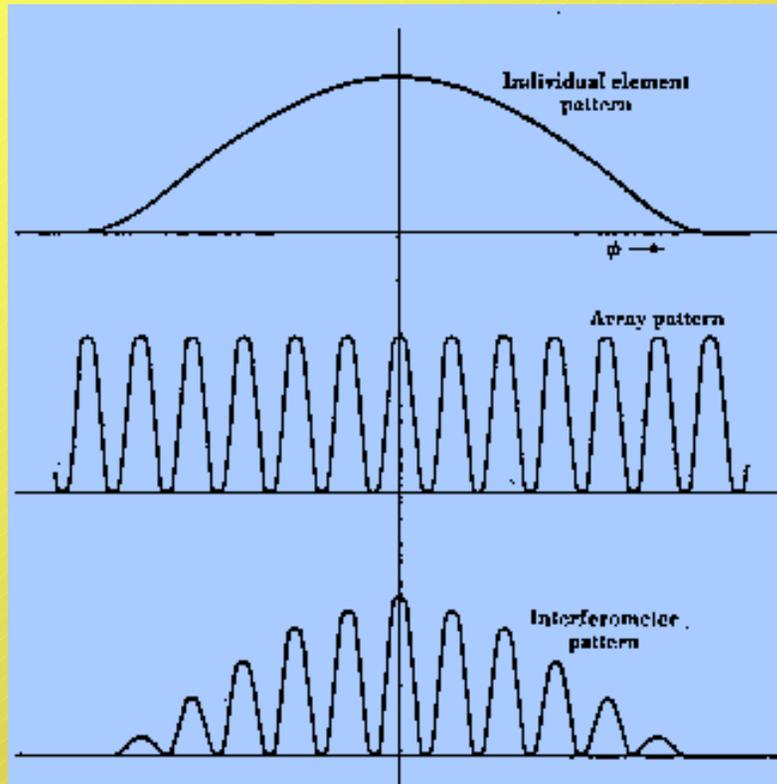
B = Basislänge

Θ = Winkel
zwischen
Basisline und
der von der
Quelle
kommenden
Wellenfront

$\tau_g = B \sin \Theta / c$
Ausbreitungs-
(geometrische)
Verzögerung



Interferometer-Signale



← Charakteristik der Einzelantenne

← bei Nachführung der Antenne

← Transit-Instrument

Realisierungsmöglichkeiten

- Einzelteleskope direkt über Leitungen gekoppelt
 - räumliche Nähe erforderlich
- Einzelteleskope über Richtfunkstrecken gekoppelt
 - Abstände bis etwa 100 km möglich
- keine direkte Kopplung der Teleskope
 - Aufzeichnung der Signale auf Magnetbänder
 - Zusammenführung der Signale nach der Messung
 - extreme Anforderungen an Präzision, Stabilität und Synchronisation der Empfänger
 - interkontinentale Abstände möglich (VLBI)

Bildsynthese mit Interferometern

- aus Interferometer-Messungen kann man ein Bild einer Radioquelle rekonstruieren
- viele Einzelmessungen mit unterschiedlichen Abständen und Winkeln erforderlich
- aufwendige Bildberechnung per Computer
- empirische Algorithmen zur Beseitigung von Störungen
- Auflösung besser als optische Teleskope!

Radioteleskope in aller Welt (eine kleine Auswahl)

Lovell Telescope, Jodrell Bank, U.K.



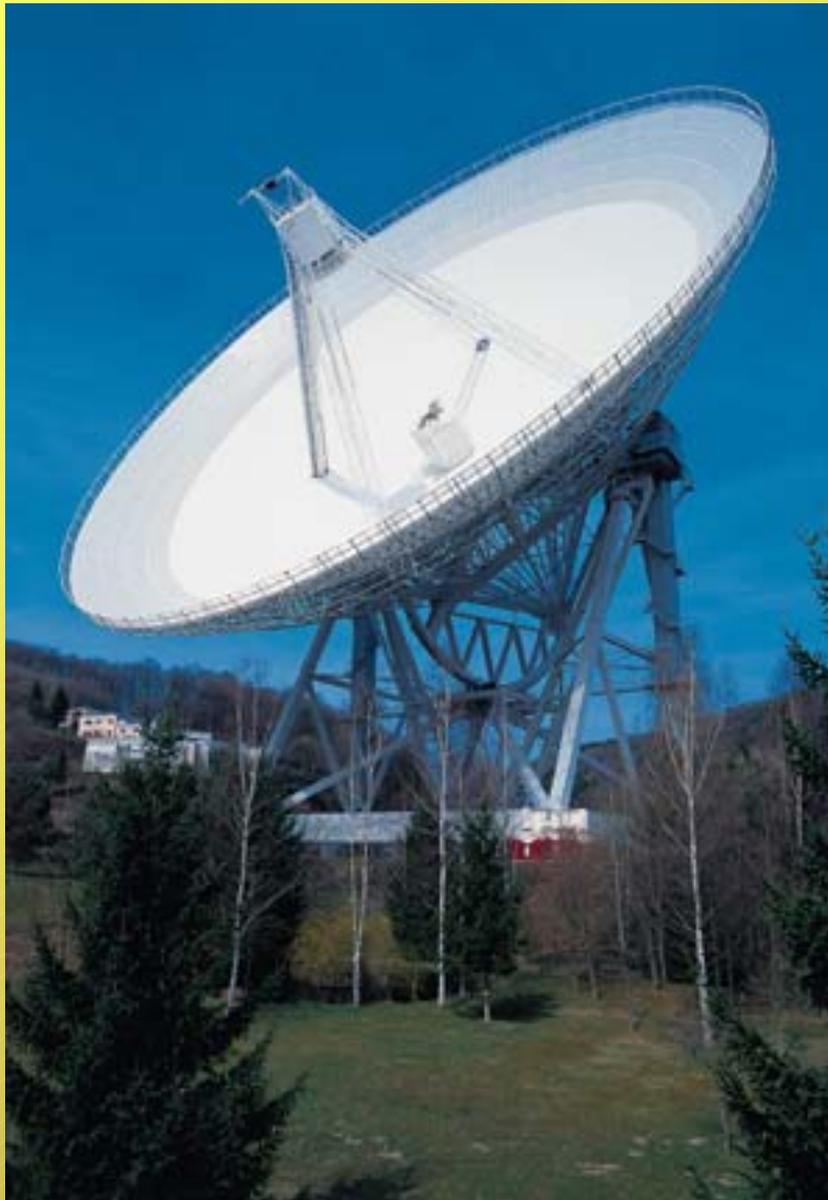
- University of Manchester
- erbaut 1957
- $\emptyset = 76\text{m}$
- bis in die 70er Jahre das größte frei steuerbare Radioteleskop der Welt

Parke, Australien



- erbaut 1963
- $\varnothing = 64\text{m}$
- das größte frei steuerbare Radioteleskop der südlichen Hemisphäre

Effelsberg (Bonn), Deutschland



- Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn
- erbaut 1970
- $\varnothing = 100\text{m}$
- bis 2002 das größte frei steuerbare Radioteleskop der Welt
- Prinzip der homologen Verformung: Spiegel bleibt immer Paraboloid

NRAO, Green Bank, USA



- National Radio Astronomy Organization
- Fertigstellung 2002
- $\varnothing = 110\text{m}$
- derzeit das größte frei steuerbare Radioteleskop der Welt

Arecibo, Puerto Rico



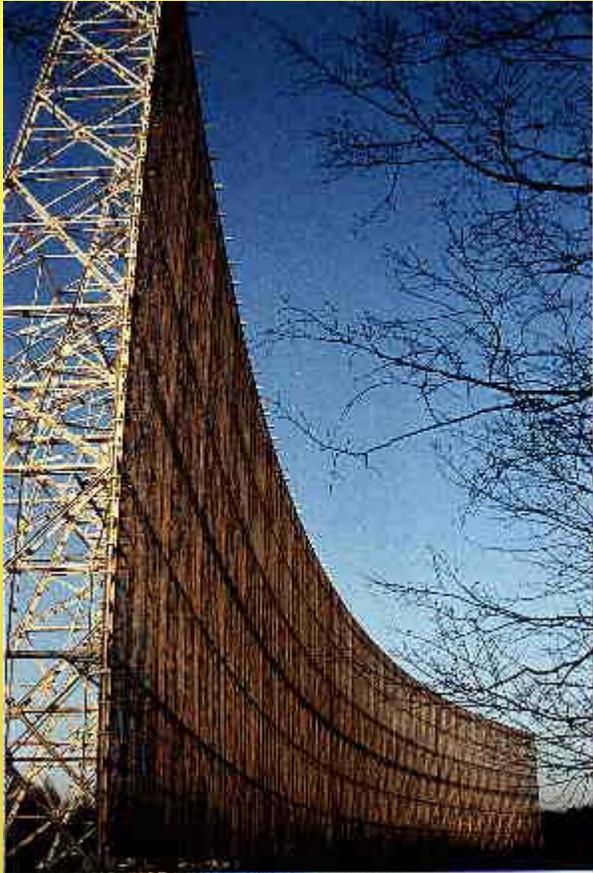
- Cornell University
- $\emptyset = 305\text{m}$
- eingebaut in eine Talmulde
- derzeit größtes Radioteleskop, aber nicht frei beweglich

Nancay, Frankreich (1)

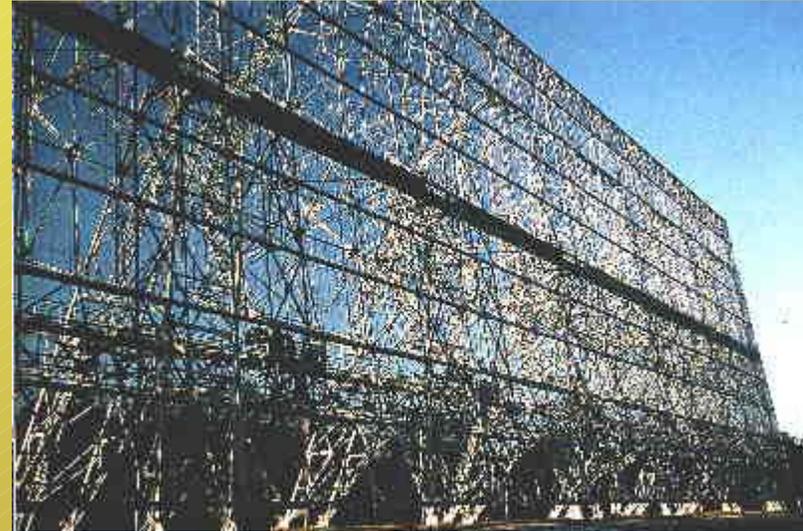


- Transit-Instrument
- kein Parabolreflektor
- Parabelsegment, ca. 300m breit
- kippbarer Hilfsspiegel zur Elevationseinstellung

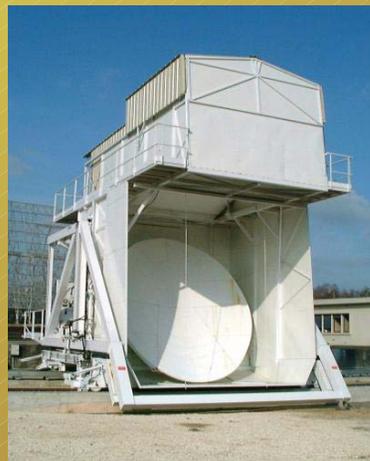
Nancay, Frankreich (2)



Hauptspiegel



kippbarer Hilfsspiegel



Fokuskabine

Westerbork, Niederlande



- 14 Antennen mit je 25m Ø
- 2 davon auf Schienen verschiebbar
- azimutal montiert!
- Apertursynthese-Teleskop (Interferometer)



VLA (Very Large Array), USA



- NRAO
- Interferometer
- 27 Antennen mit je 25 m \emptyset
- Y-förmige Anordnung
- auf Schienen bis 21 km verschiebbar

Die Antenne der Starkenburg Sternwarte



Die Anlage der Starkenburg Sternwarte



Literatur

- John D. Kraus, *Radio Astronomy, 2nd edition*, Cygnus-Quasar Books 1988 (Die Bibel des Radioastronomen, umfassende und tiefgehende Darstellung der RA)
- Burke, Graham Smith, *An Introduction to Radio Astronomy*, Cambridge University Press 1996 (relativ gut lesbare Einführung, aber nicht zu seicht)
- J. S. Hey, *Das Radiouniversum – Einführung in die Radioastronomie* Verlag Chemie Weinheim, 1971 (Wirklich eine Einführung. Auch für interessierte Laien geeignet.)
- Gerrit L. Verschuur, *The Invisible Universe*, Springer-Verlag, 1974 (Ebenfalls ein einführendes Werk. Für ähnliche Zielgruppen geeignet wie das Buch von Hey.)

Internet (eine kleine Auswahl)

- Jodrell Bank Website, enthält neben vielen Informationen über das Teleskop eine Menge an Wissenswertem über die Radioastronomie. <http://www.jb.man.ac.uk>, sowie Links zu anderen Radioastronomie-Seiten.
- Basics of Radio Astronomy, eine Einführung auf den NASA-Seiten <http://www2.jpl.nasa.gov/radioastronomy>
- [Starkenburg Sternwarte](#)
- <http://www.starkenburg-sternwarte.de>