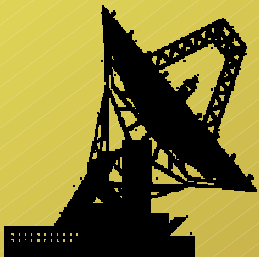
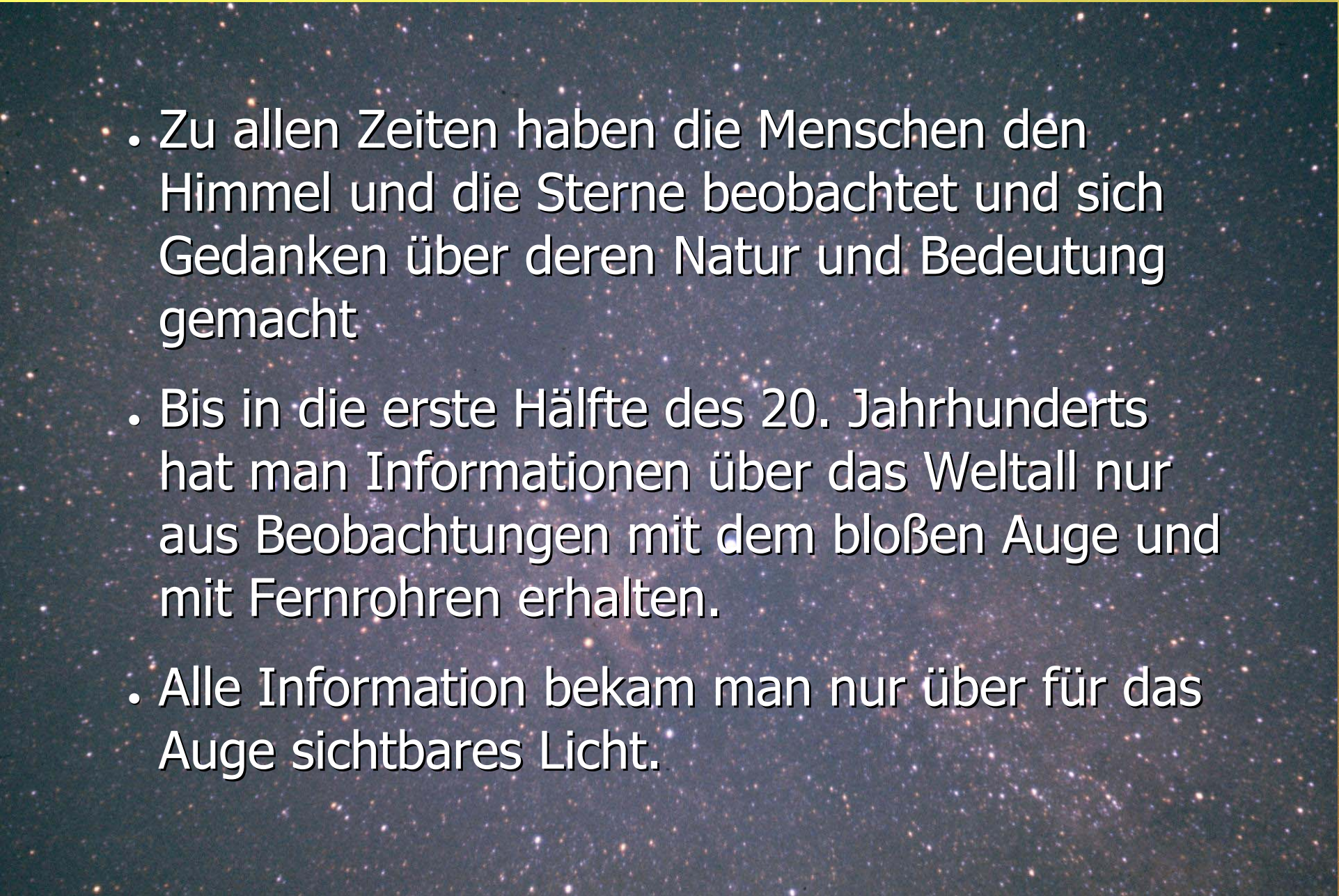


# Einführung in die Radioastronomie

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

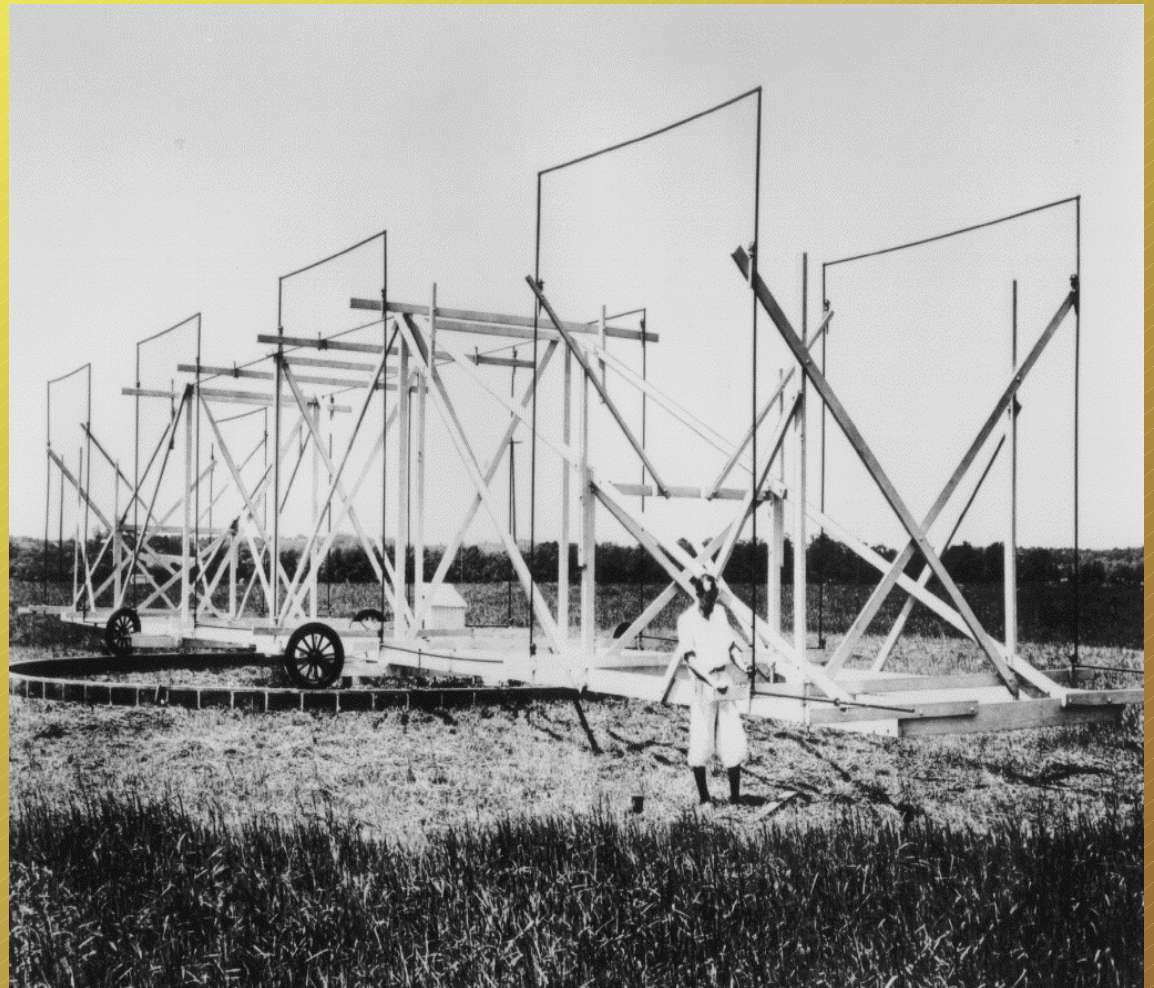
# Warum Radioastronomie ?

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)

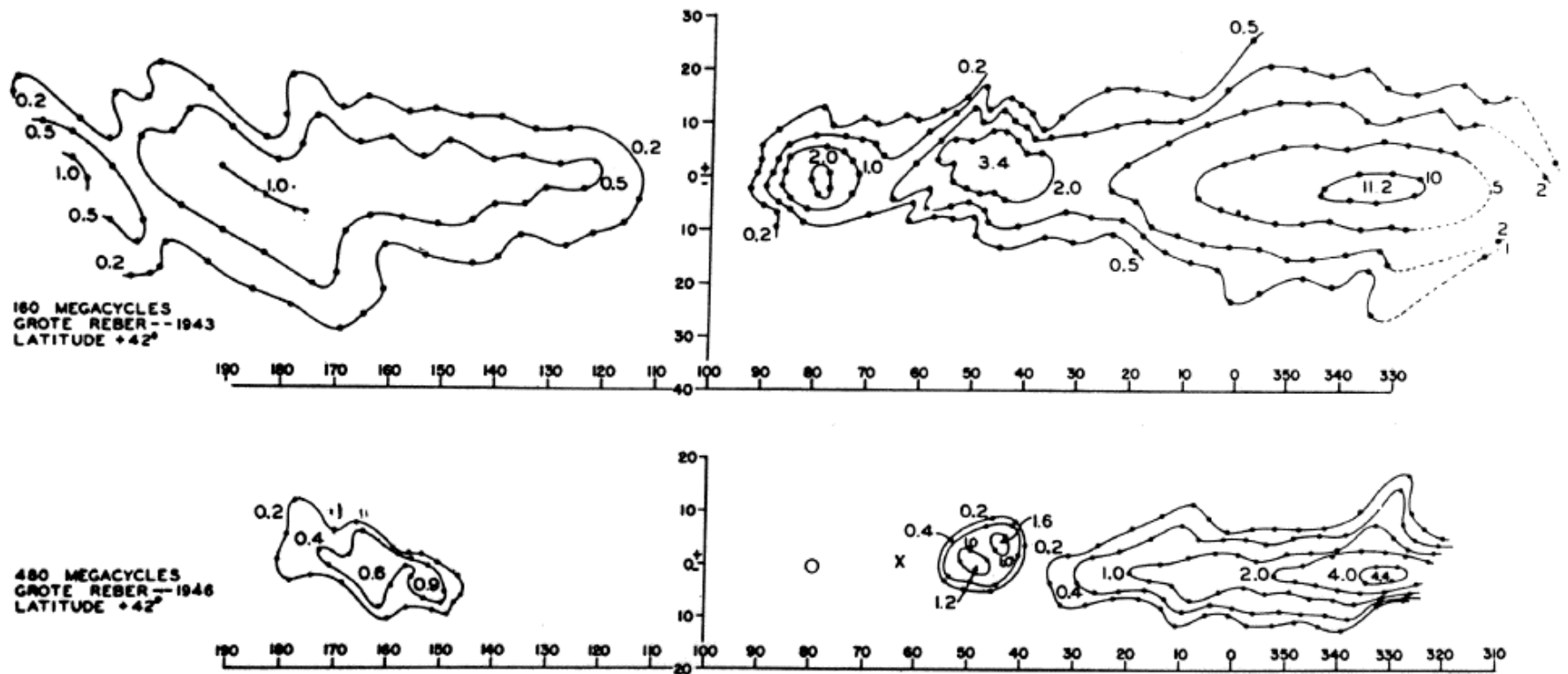


FIG. 7—Contours of constant intensity at 160 MHz and 480 MHz, taken at Wheaton, Illinois.

# Was ist Radioastronomie eigentlich?

# Was ist Radioastronomie?

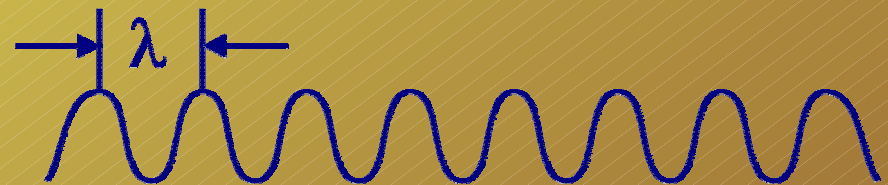
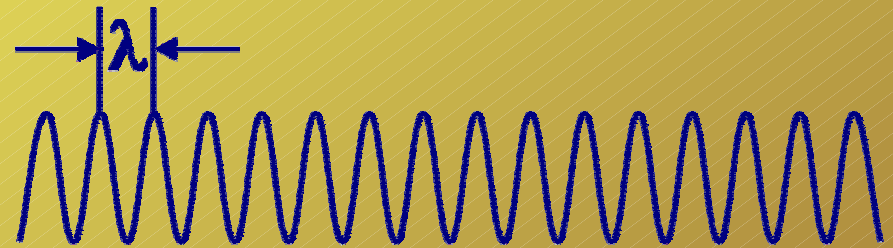
- Empfang von Rundfunkprogrammen kleiner grüner Männchen?
- Nein!
- Die von der Radioastronomie untersuchte Strahlung kommt wie das Licht von Sternen und der Materie zwischen den Sternen.
- Sie gibt, wie die optische Astronomie, Aufschluss über die Physik des Weltalls.

# Elektromagnetische Wellen

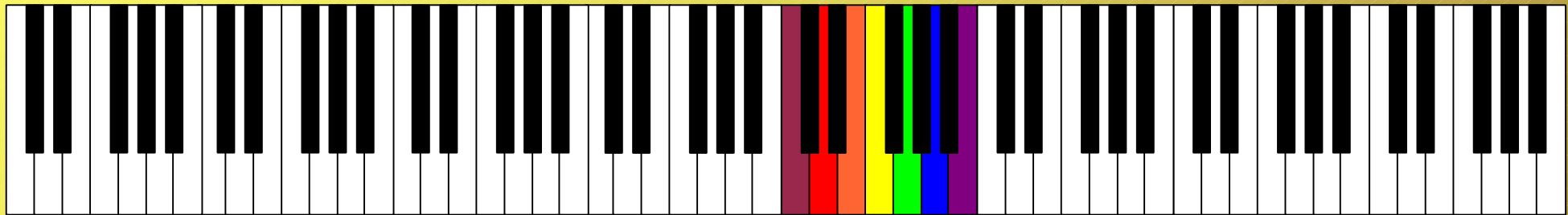
- Licht und Radiostrahlung sind etwas sehr ähnliches: nämlich **elektromagnetische Wellen**
- gekoppelte elektrische und magnetische Felder, die sich ausbreiten
- verändern ihre Intensität ("Feldstärke") periodisch
- brauchen keine Materie zur Ausbreitung (leerer Raum genügt)

# Elektromagnetische Wellen

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



# Das elektromagnetische Spektrum



Radio

IR

sichtbares  
Licht

UV

Röntgen

$\gamma$



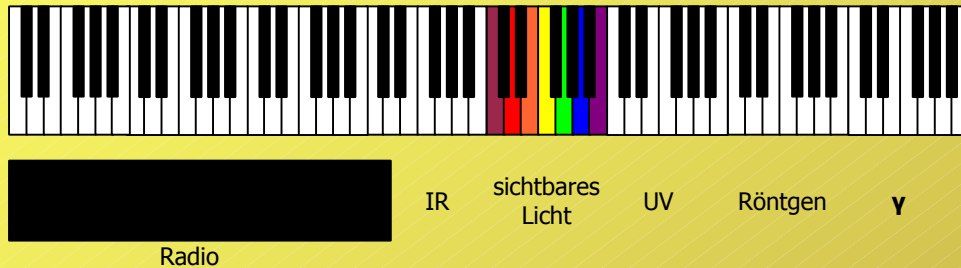
Wellenlänge  $\lambda$



Frequenz  $f$



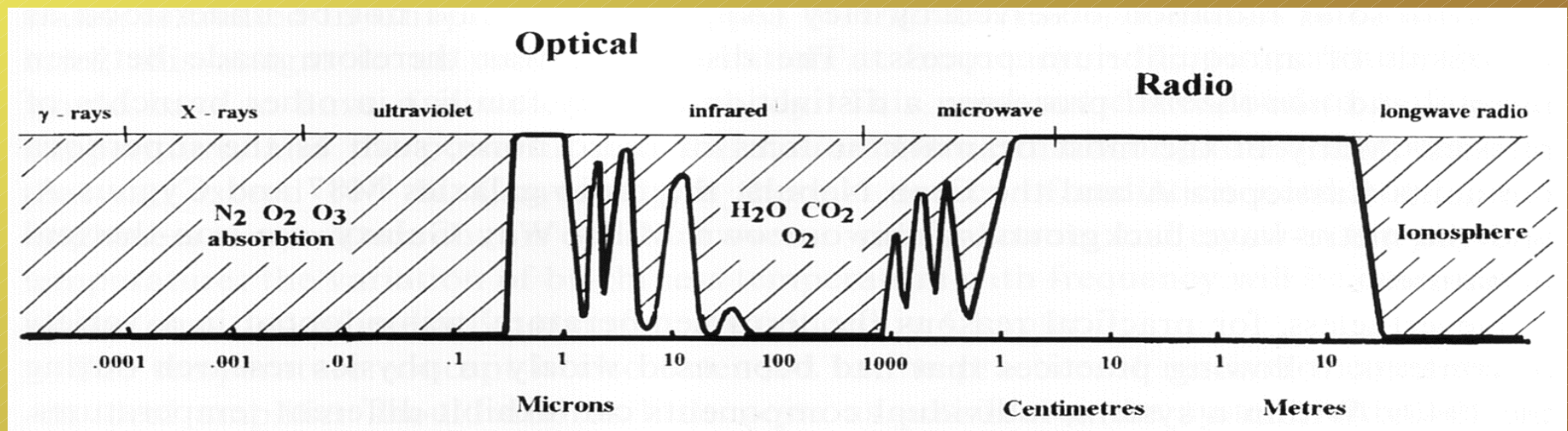
# Ein paar Zahlenwerte



Bereich	Wellenlänge $\lambda$	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!

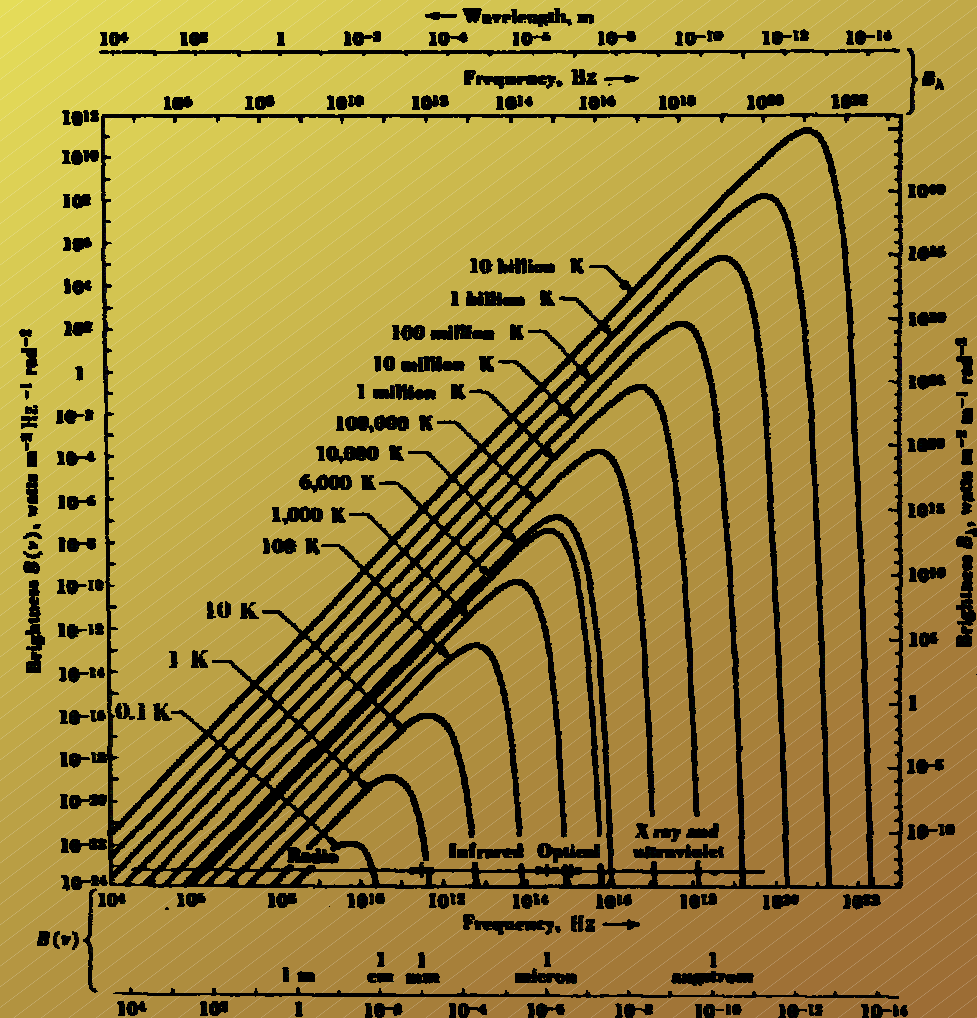


# Strahlungsentstehung (1)

- Thermische Strahlung
  - jeder Körper wärmer als  $0^{\circ}\text{K}$  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

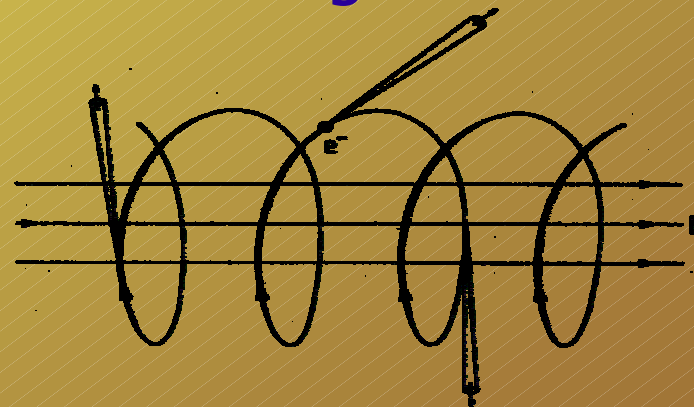
# Strahlungsentstehung (2)

- 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)

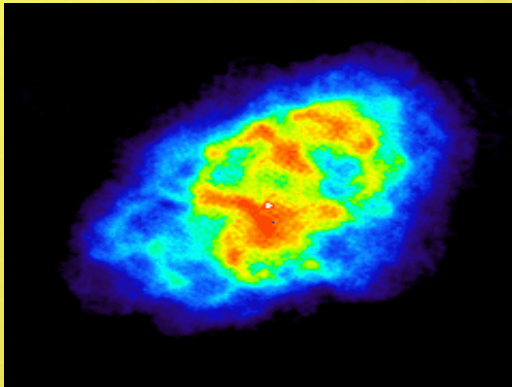
- Spektrallinien
  - thermische und Synchrotronstrahlung = Kontinuumsstrahlung (bei allen Frequenzen)
  - Spektrallinien entstehen bei Übergängen zwischen Energiezuständen von Atomen oder Molekülen
  - Frequenz proportional zu Energiedifferenz
  - Radiostrahlung: geringe Energiedifferenzen
  - bekanntestes 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.



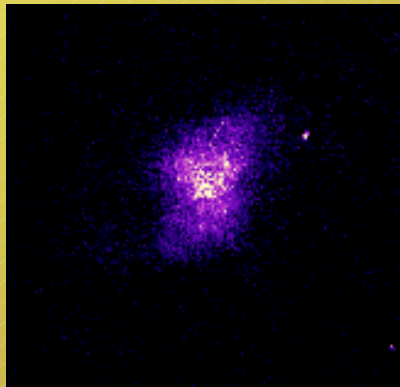
# Beispiel: Crabnebel



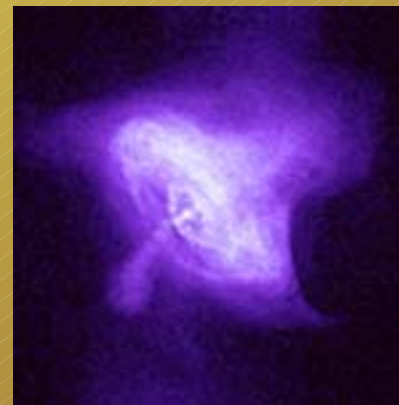
Radiobereich



optisch



fernes UV



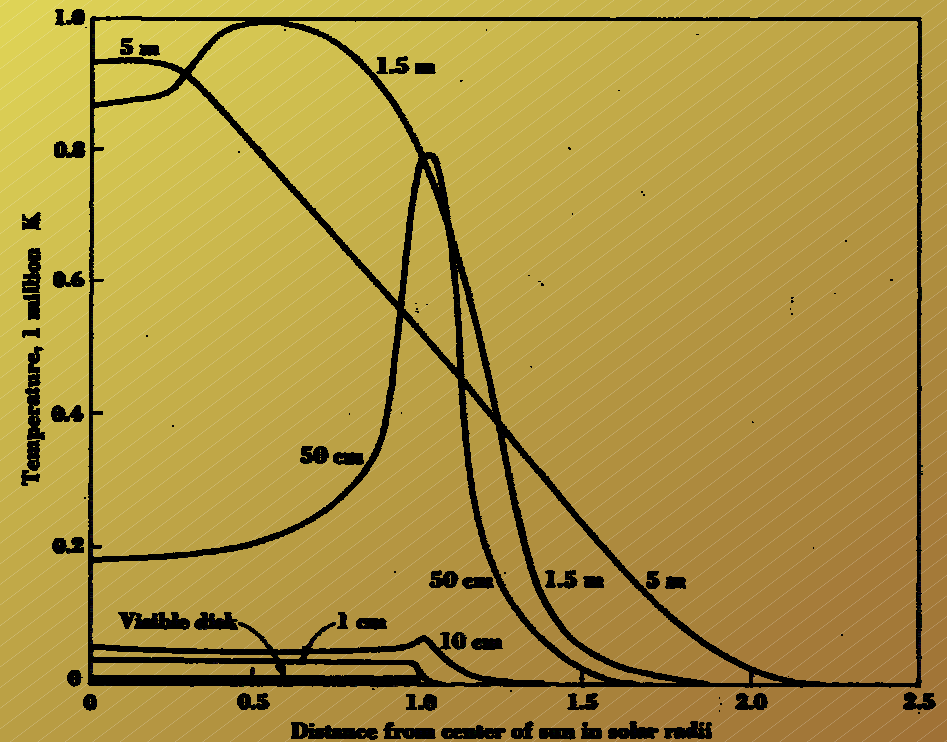
Röntgenbereich



# 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



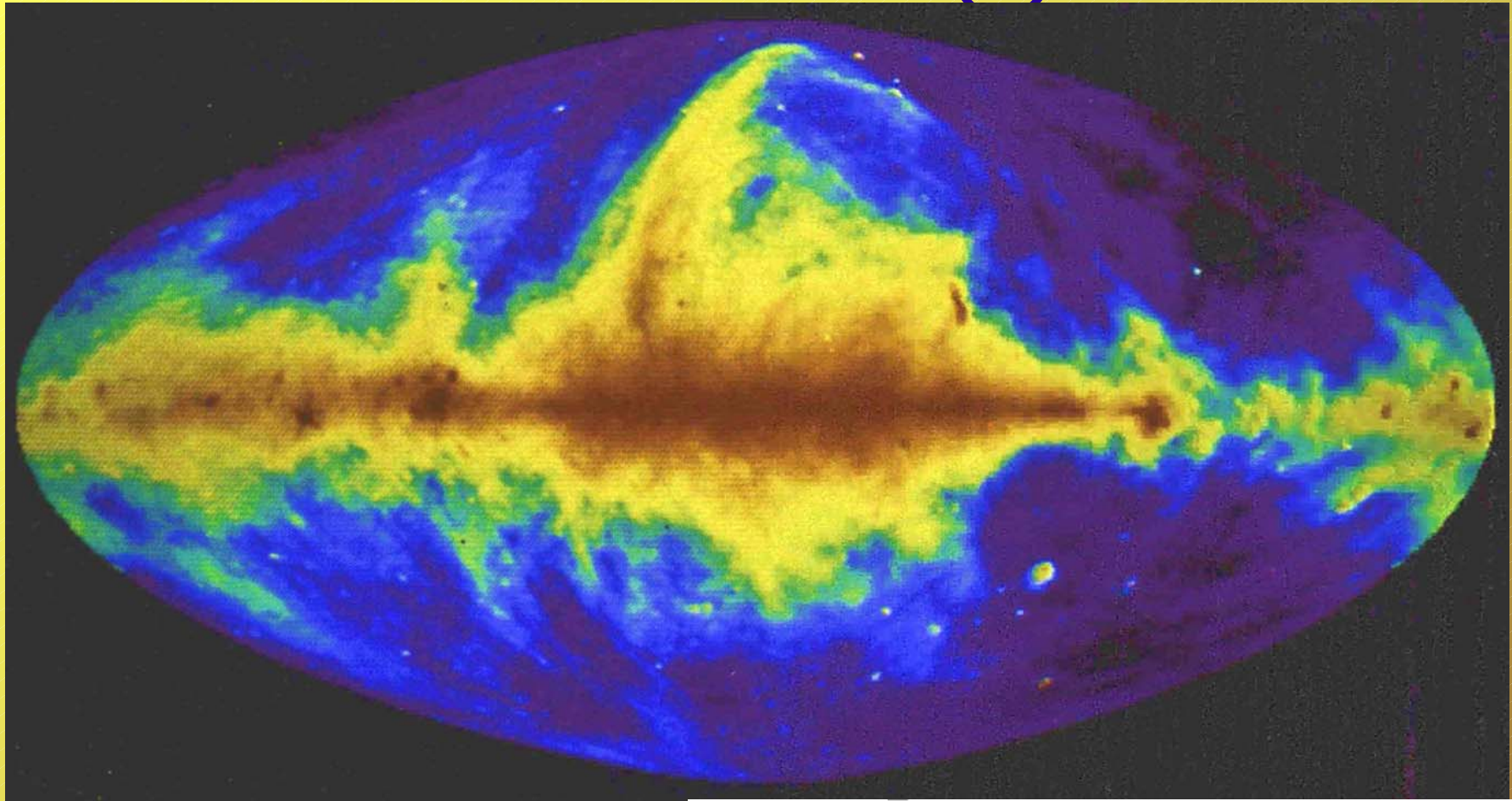
20 MHz



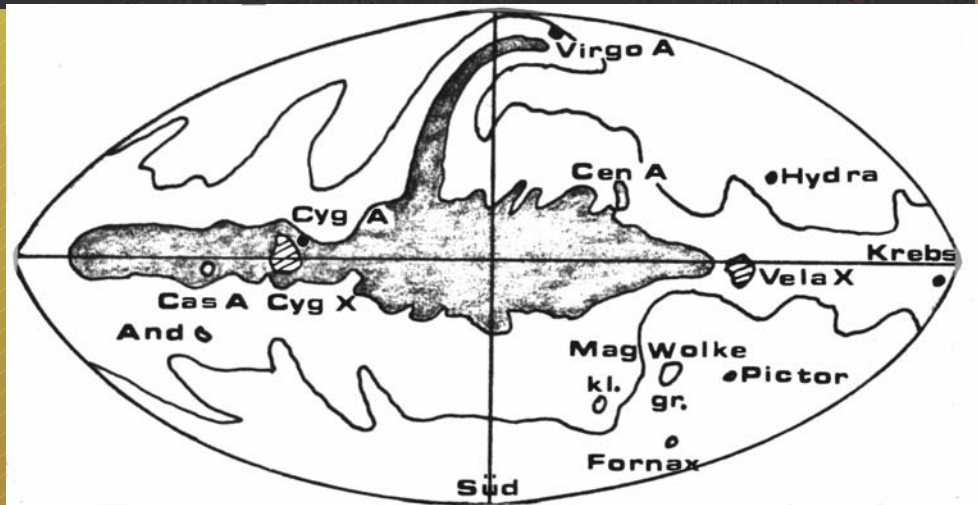
# Milchstraße (1)

- 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

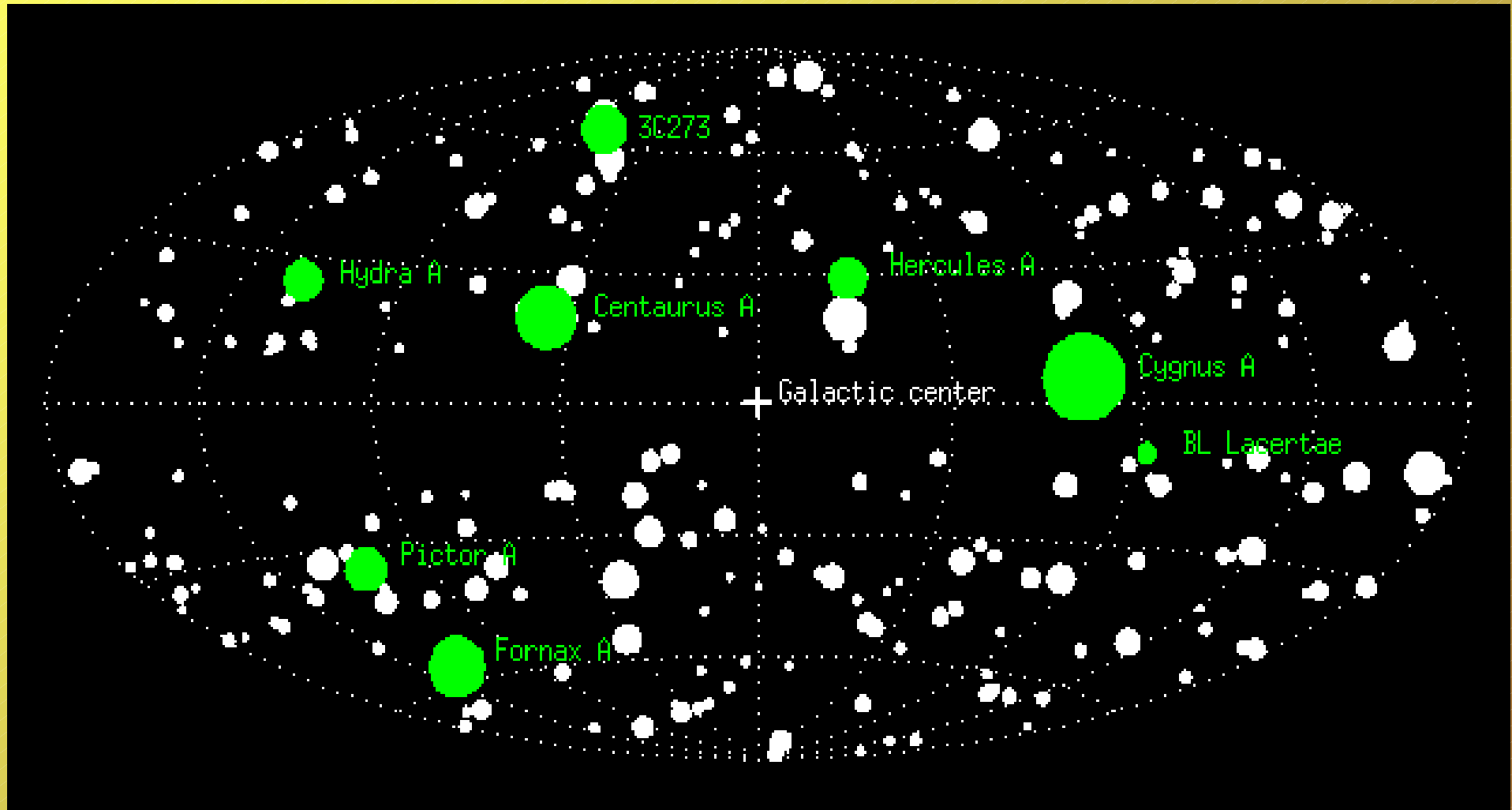
# Milchstraße (2)



Das für uns sichtbare  
Universum bei 408 MHz



# Milchstraße (3)



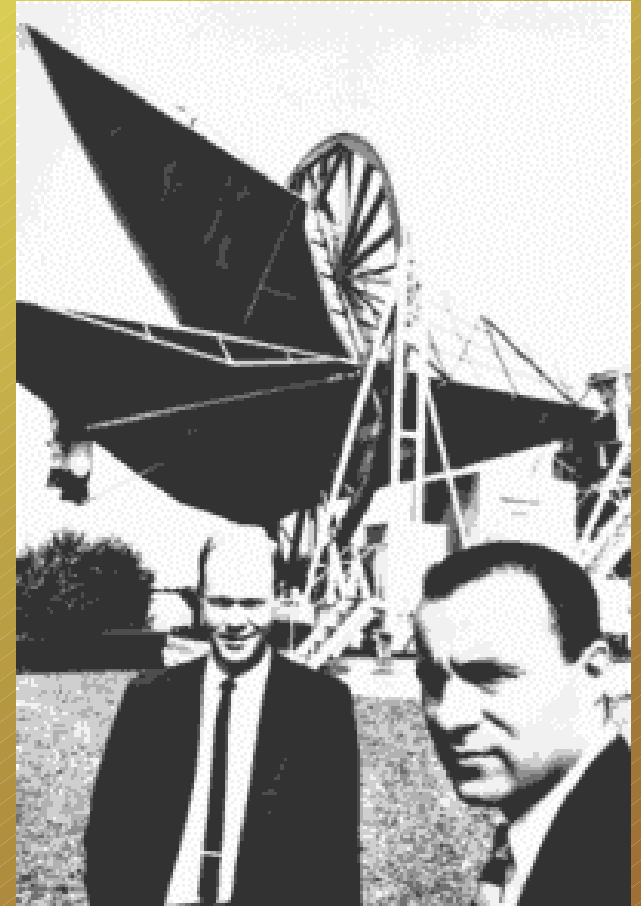
Die stärksten Radioquellen

# Extragalaktische Objekte

- Quasare und Radiogalaxien

# Urknall

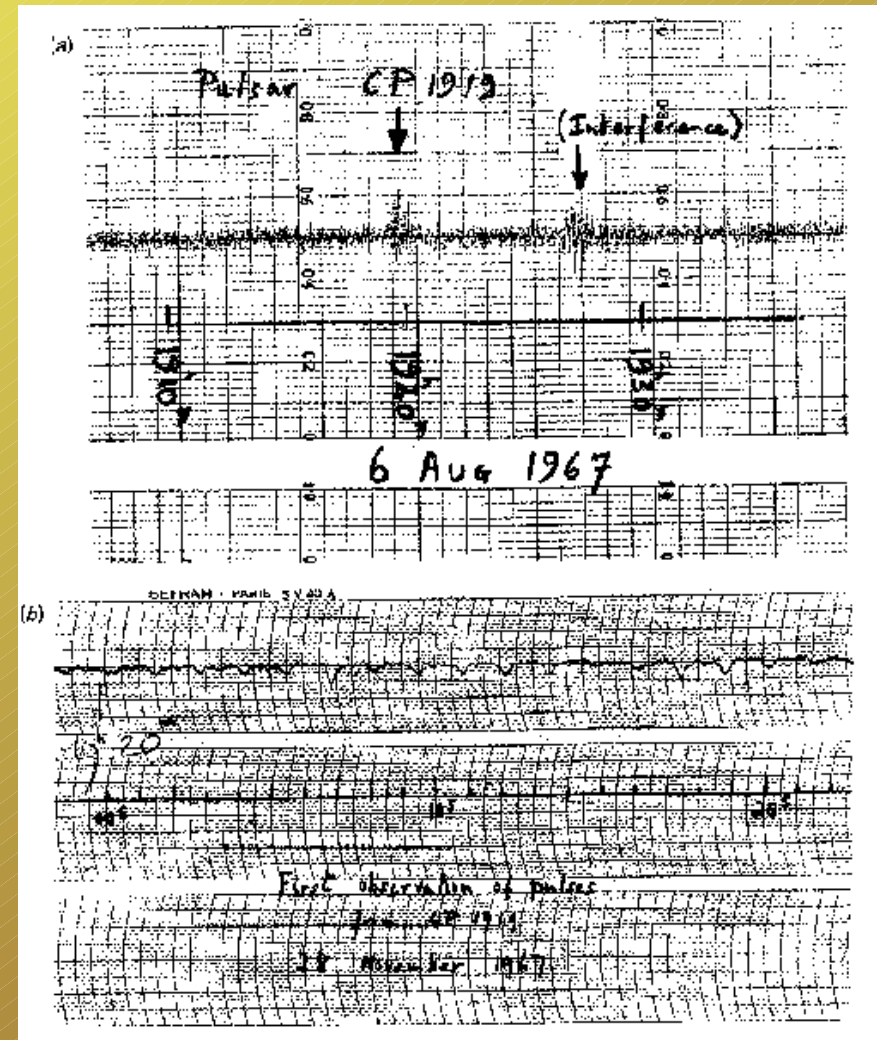
- Penzias und Wilson, 1963
- unerklärtes Rauschen in Beobachtungen
- aus allen Richtungen gleich stark
- Rauschen entspricht einer Temperatur von 3K
- „Echo des Urknalls“





# Die Entdeckung der Pulsare I

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



# Die Entdeckung der Pulsare II

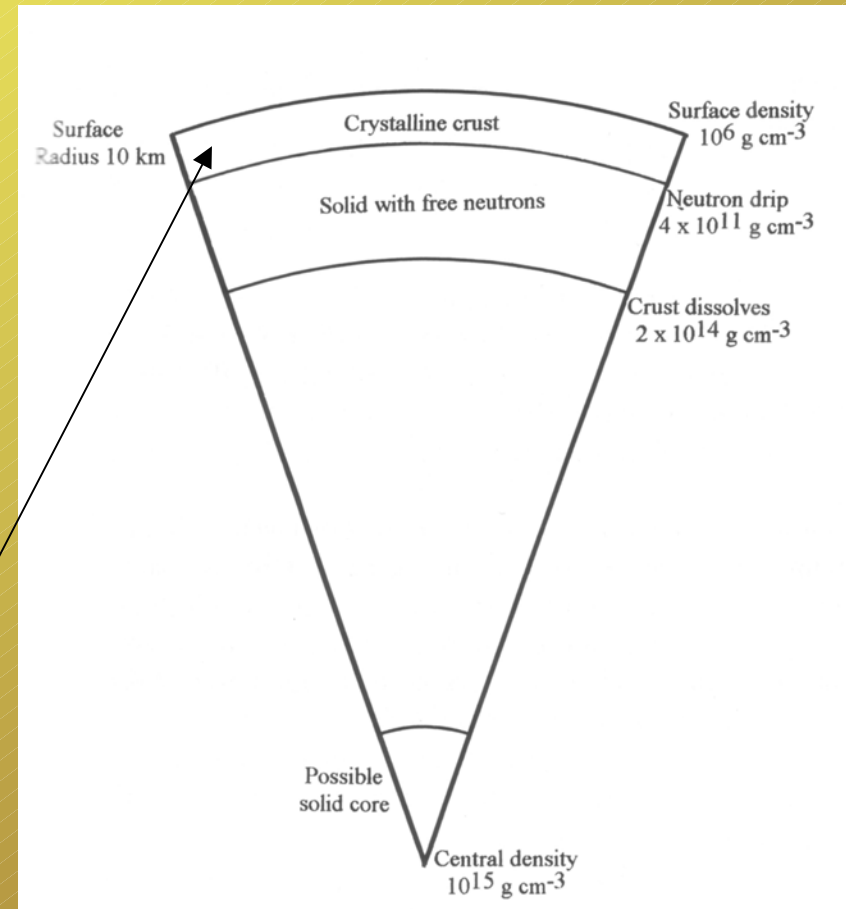
- irdischer Störer?
  - aber: Richtung mit siderischer Zeit gekoppelt
- Signalfolge zu schnell für großes Objekt (Stern)
- Signale einer **außerirdischen Zivilisation ???**
- wenn ja: Dopplerverschiebung durch Planetenbewegung nachweisbar?
  - aber: nur Bewegung der Erde auf ihrer Bahn nachweisbar
- 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  $\gamma$ -Bereich
  - Spektren: Intensität nimmt zu höheren Frequenzen ab (nicht-thermisch, Synchrotron-Strahlung)
- auffallend: Pulsare stehen oft in Verbindung mit Supernova-Überresten

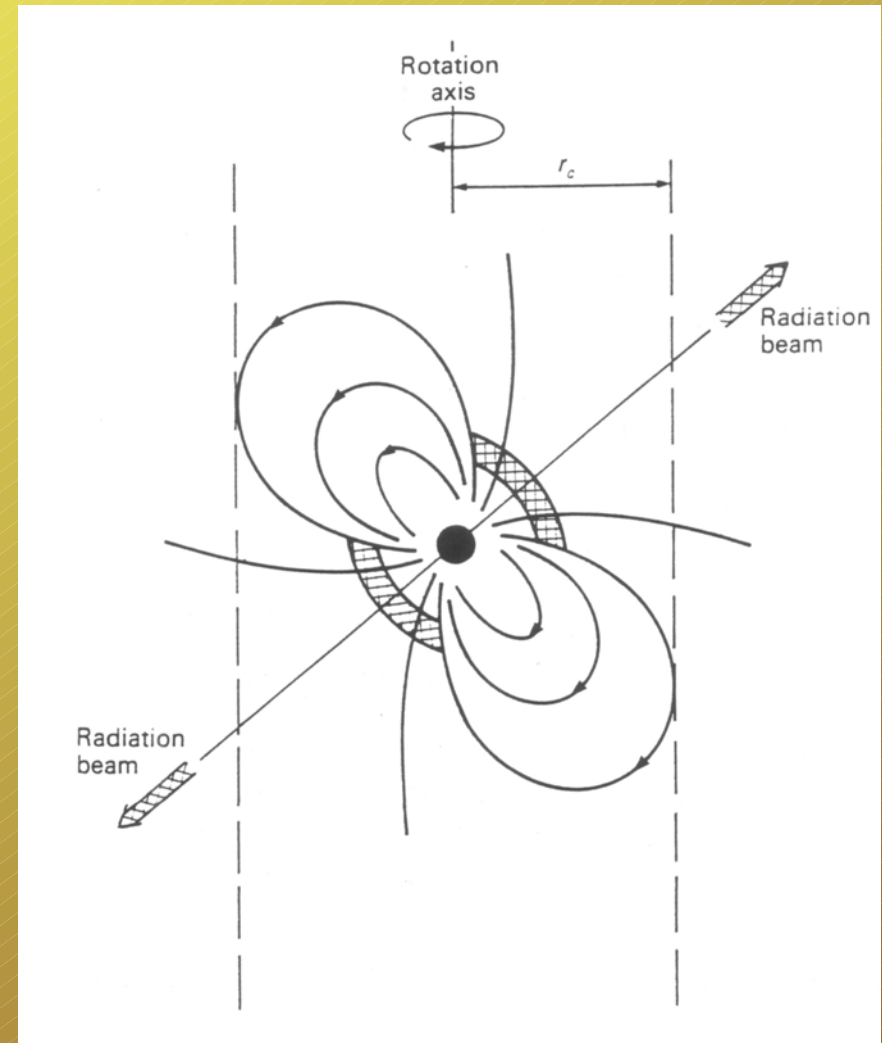
# Das heute akzeptierte Pulsar-Modell I

- 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

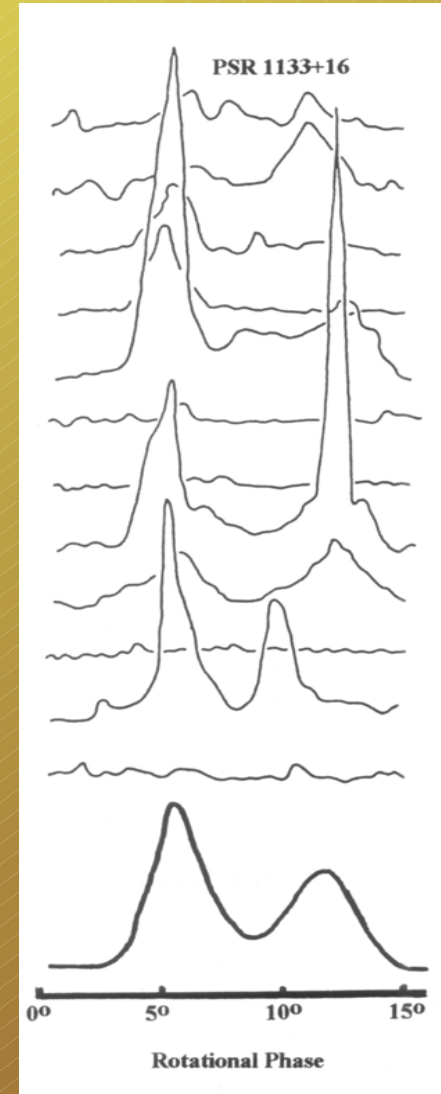


# Wie entsteht ein Pulsar?

- 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:

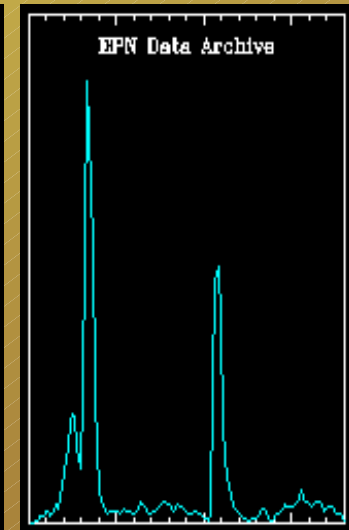
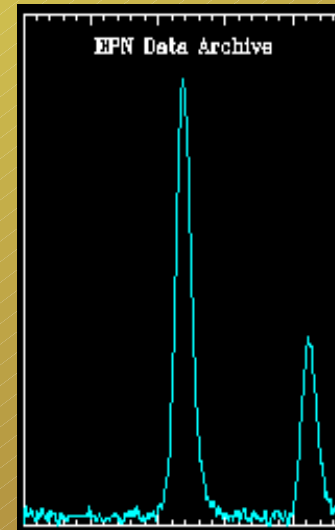
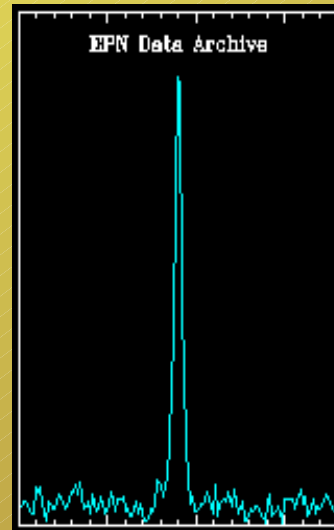
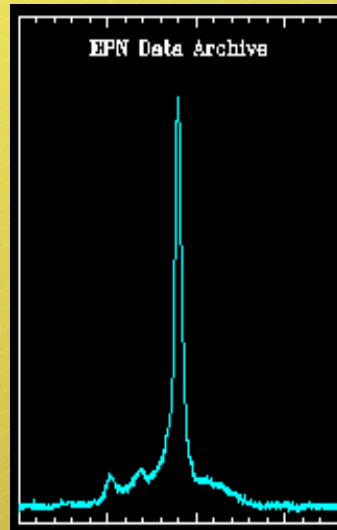
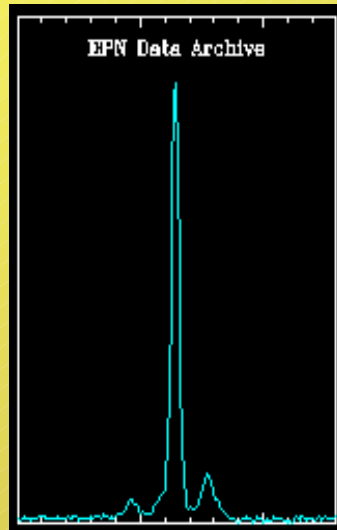
B0329

J0437

Vela

B1937

Crab



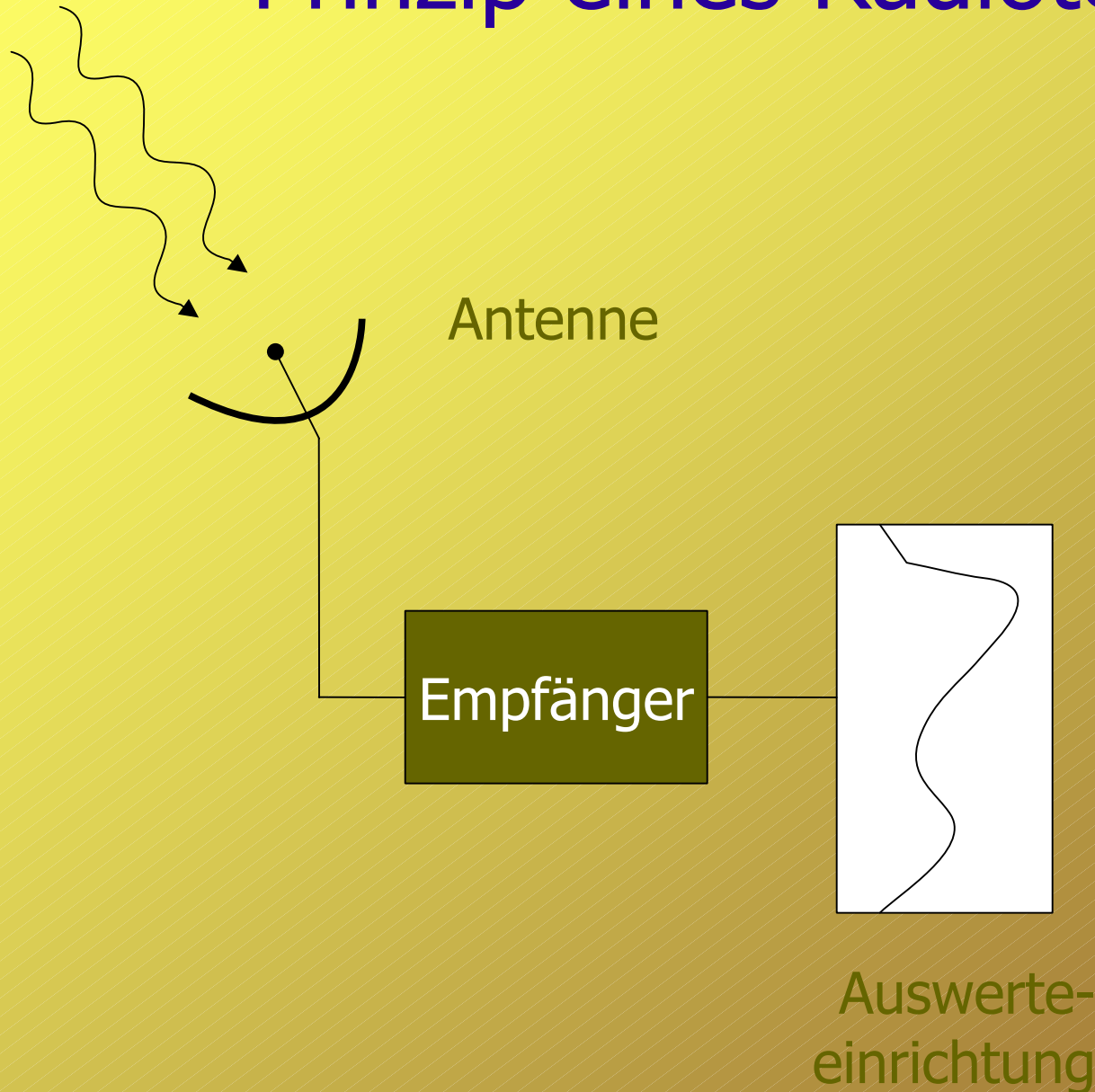


# Radioteleskope

# 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



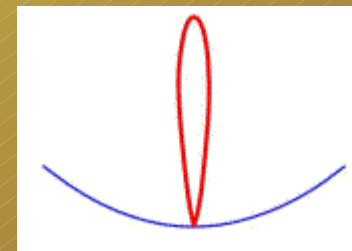
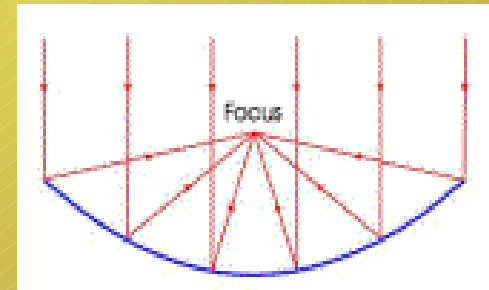
- Antenne sammelt ankommende Strahlung
- Empfänger verstärkt Signale, macht sie auswertbar
- Auswerteeinrichtung stellt Signale "lesbar" dar

# 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

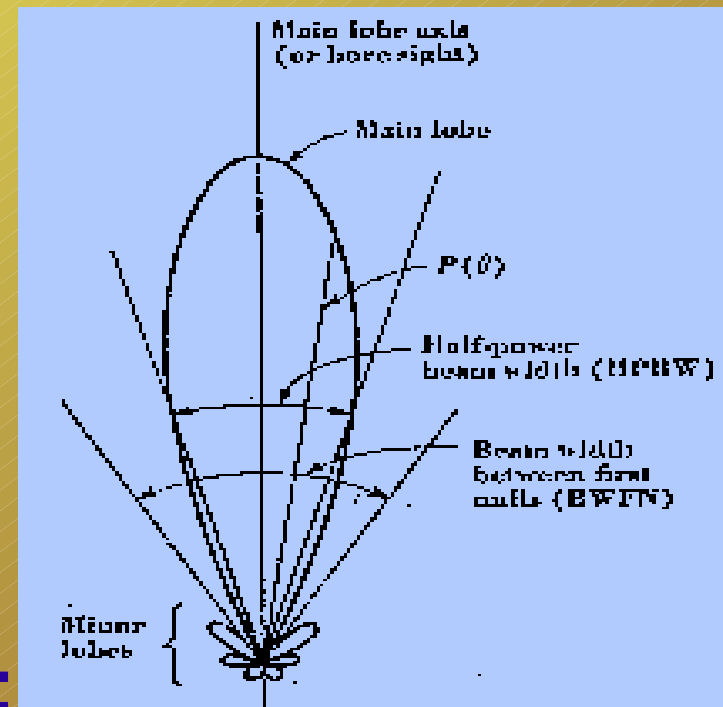
# Richtwirkung der Antenne

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



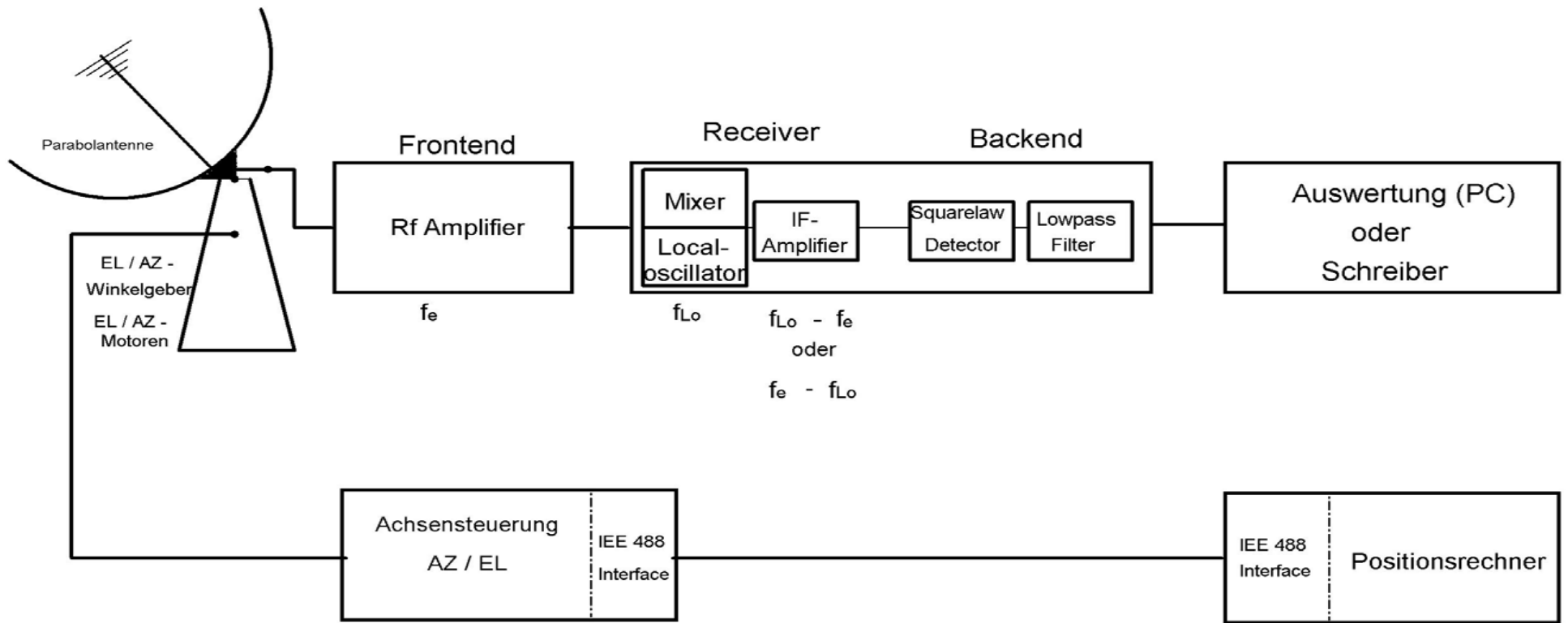
# Auflösungsvermögen

- 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

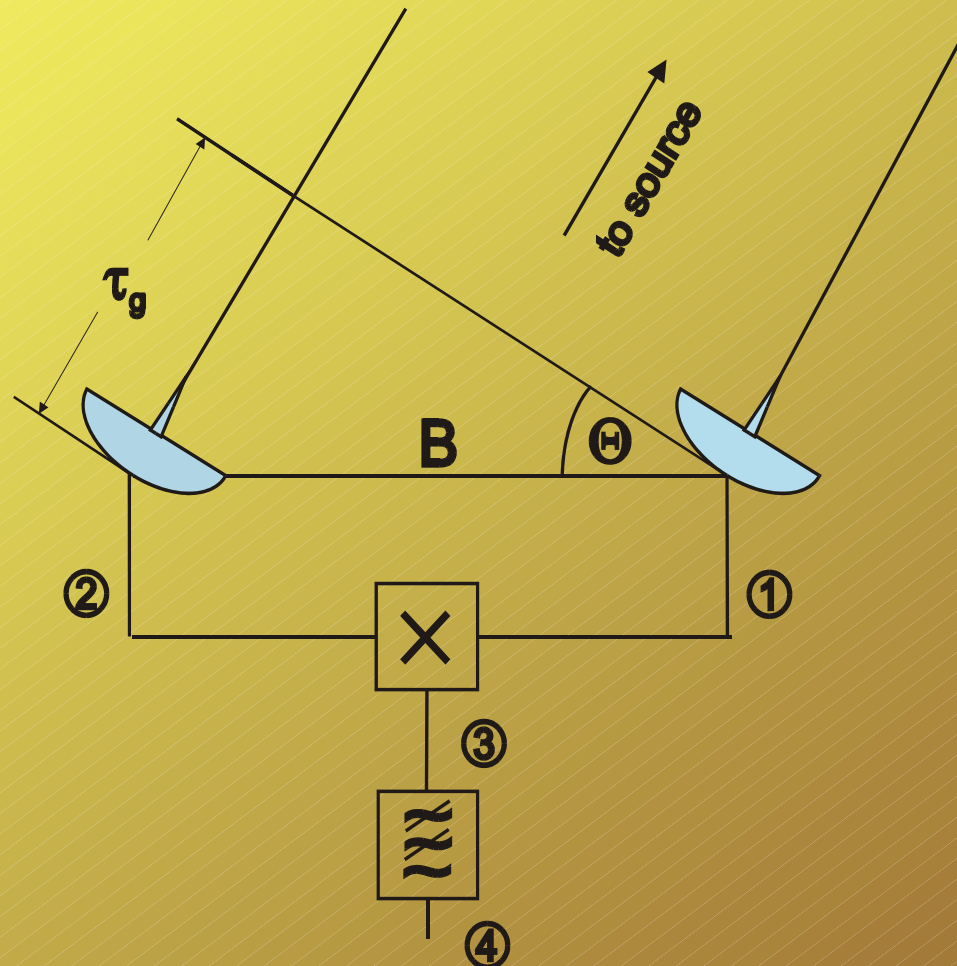
- Man benötigt sehr große Radioteleskope, um Details von Radioquellen untersuchen zu können
- Aber: Größe von Radioteleskopen begrenzt
- Es ist möglich, diese Begrenzung zu überwinden:
  - man nehme einige "kleine" Radioteleskope in großem Abstand voneinander
  - man kombiniere ihre Ausgangssignale in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

# Das Zwei-Element-Interferometer

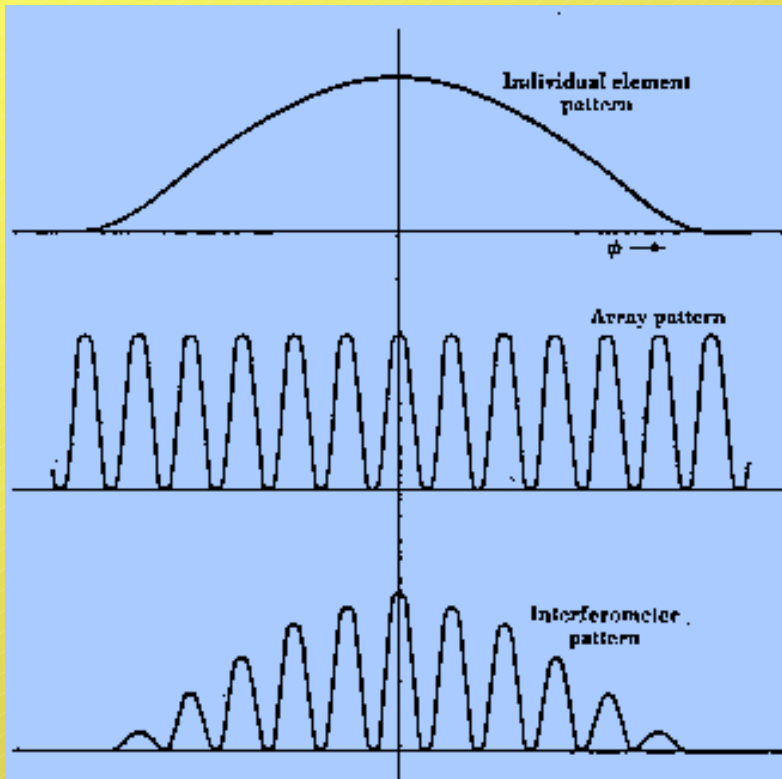
$B$  = Basislänge

$\Theta$  = 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)

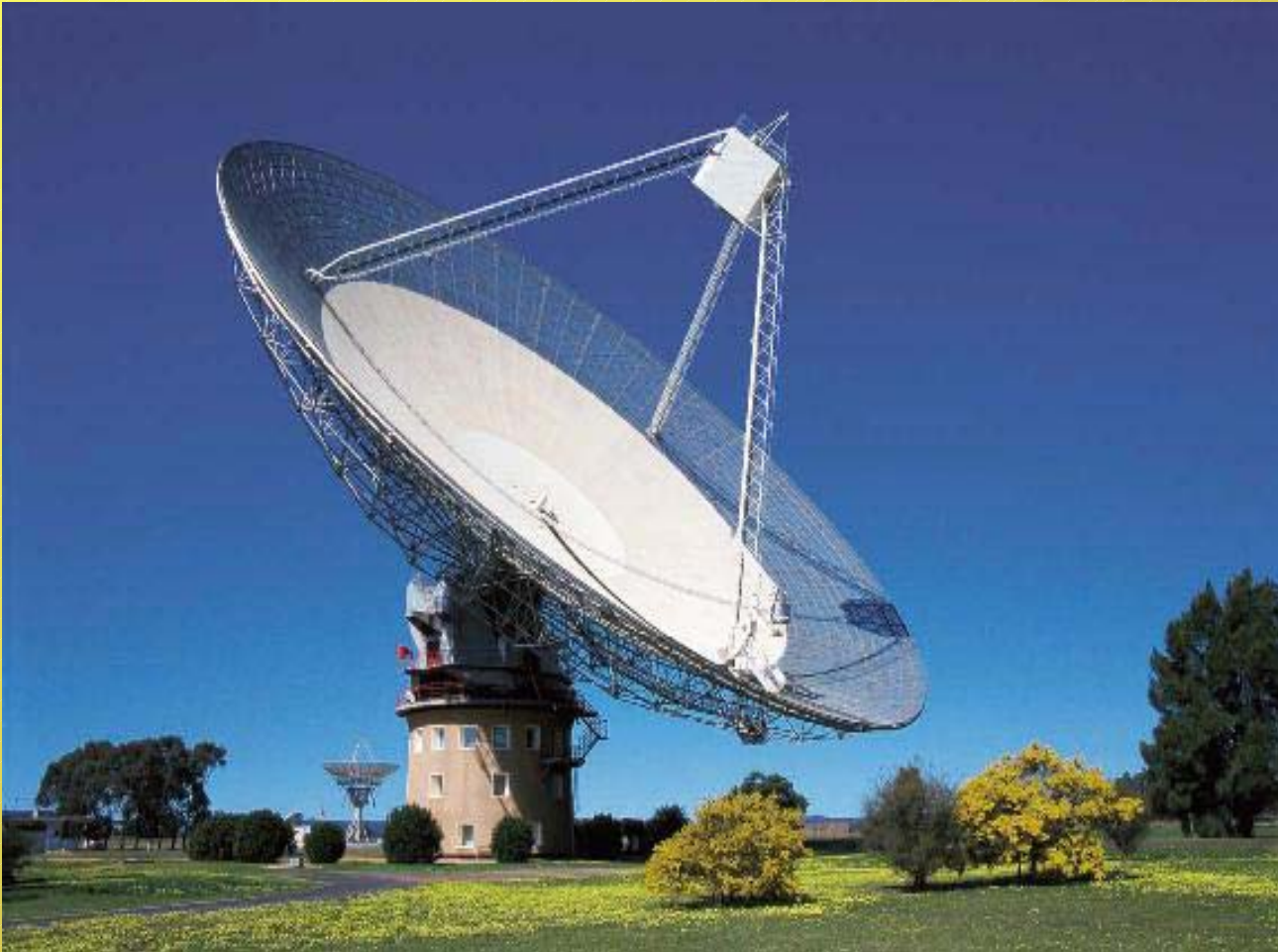


# Lovell Telescope, Jodrell Bank, U.K.



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

# Nancay, Frankreich (1)

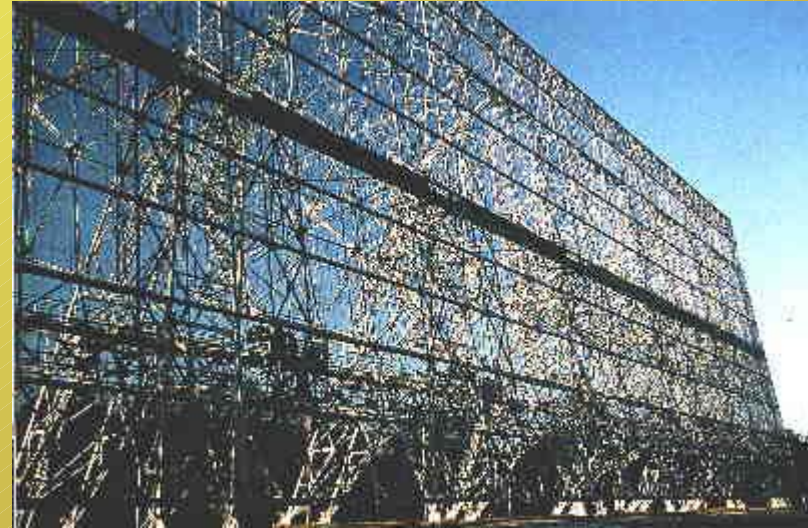


- Transit-Instrument
- kein Parabolreflektor
- Parabelsegment, ca. 300m breit
- kippbarer Hilfsspiegel zur Elevationseinstellung

# 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, 2<sup>nd</sup> 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>