

Sommersemester 2006



Maser,
das interstellare Medium
& Merger



"Sure it's beautiful, but I can't help thinking about all that interstellar dust out there."

Heute ...



Themen

& Daten

- 05.05 Einführung & Übersicht
- 12.05. Radioteleskope & Radiobilder & Katastrophen
- 26.05. Der Radiohimmel im Licht der 21cm-Linie
- **09.06. Maser, das Interstellare Medium & Merger**
- 23.06. AGN & Binäre Schwarze Löcher (NEUES!)
- 07.07. Pulsar-Astronomie (heute & in Zukunft)
- 21.07.

MASER, das interstellare Medium & Merger



Übersicht

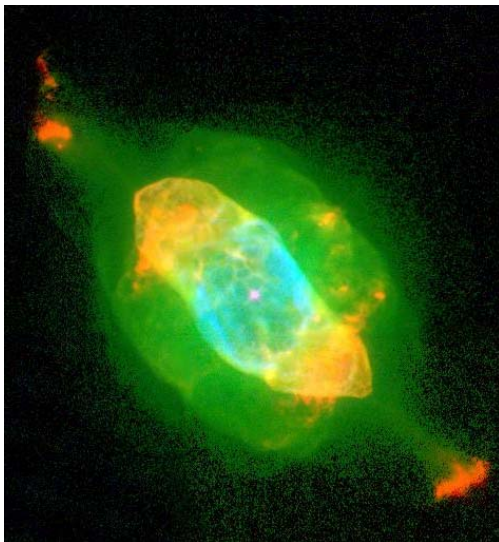
- Einführung: MASER
- MASER & ihre Umgebungen
- MASER in der Milchstraße und außerhalb:
 - Interstellare MASER: Sternentstehung
 - Zirkumstellare MASER: späte Sterntypen, TX Cam
 - Extragalaktische MASER (Mega- & GigaMASER): Akkretionsscheiben & Jets in AGN; Merger
 - Starburst oder AGN?
- KiloMASER

MASER



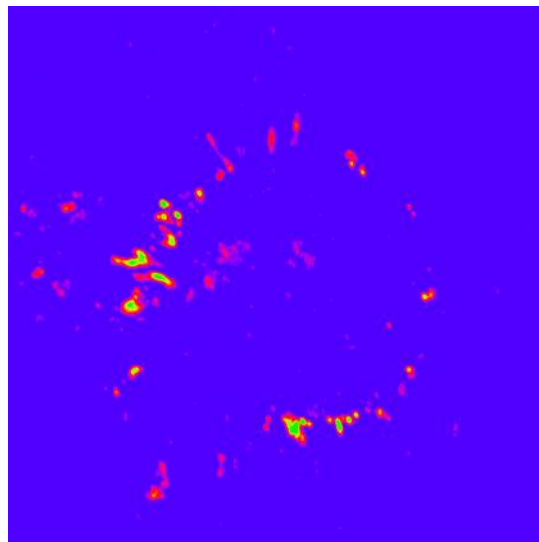
- Kompakte Strahlungsquellen mit sehr hoher Strahlungstemperatur -> ideal für Interferometrie da hohe Strahlungstemperaturen
- Geben Auskunft über die physikalischen Bedingungen ihrer Umgebungen, Magnetfelder und der Quellendynamik

Formgebung durch
Magnetfelder:
Planetarische Nebel



NGC7009: H₂O masers: Vlemmings et al. (2001)

Massenverlust
entwickelter Sterne



TX Cam: SiO masers: Diamond & Kemball (2001)

Extragalaktische Entfernungsmessung;
AGN Akkretion



NGC4258: H₂O masers: Herrnstein et al. (1999)

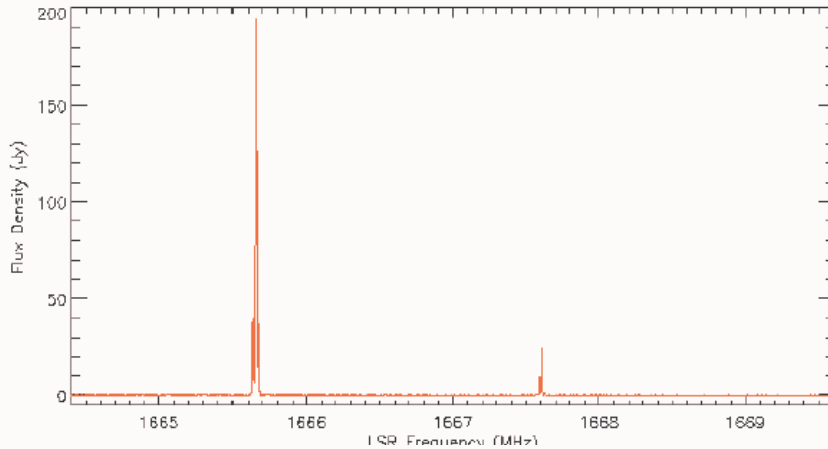
MASER: Linienstrahlung



W3OH (STAR FORMING REGION)

Scan 10 V : -44.0 OPTI-LSR FO : 1.66736 GHz Pol: I Tsys: 41.52
 2005-07-12 Int : 00 03 55.7 Fsky : 1.66772 GHz IF : 0 Tcal: 1.41
 Summer Students LST : +12 48 29.3 BW : 50.0000 MHz AGBT_05B_04B_020nOff

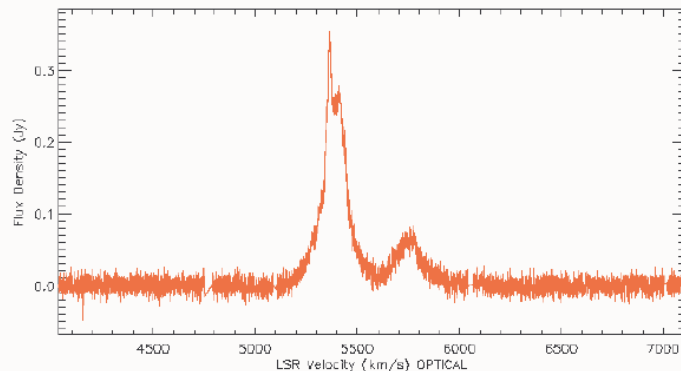
02 27 04.13 +61 52 21.9 W3OH Az: -11.6 El: 12.5 HA: 10.36



SOURCE: ARP220 (EXTRAGALACTIC SOURCE)

Scan 1010 V : 5434.0 OPTI-LSR FO : 1.66736 GHz Pol: I Tsys: 16.33
 2005-07-13 Int : 00 04 52.7 Fsky : 1.63765 GHz IF : 0 Tcal: 1.47
 Summer Students LST : +12 52 13.8 BW : 50.0000 MHz AGBT_05B_04B_020nOff

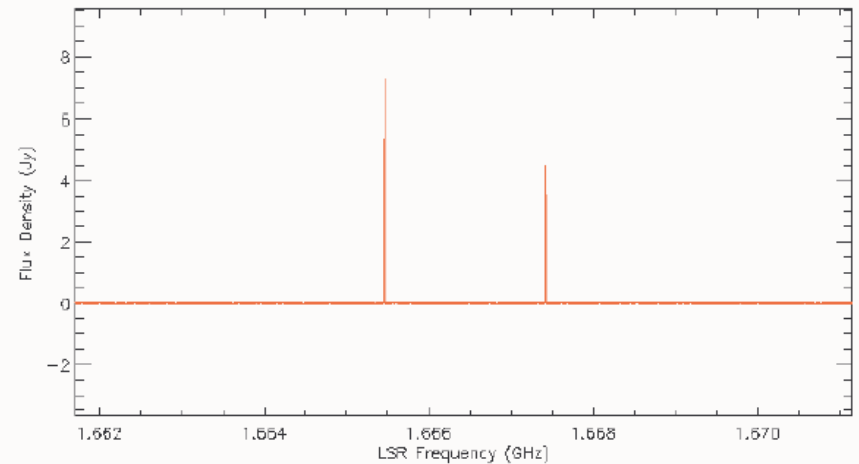
15 34 57.10 +23 30 11.0 Arp220 Az: 101.3 El: 52.5 HA: -2.71



SOURCE: RHYA (STAR)

Scan 20 V : -10.4 OPTI-LSR FO : 1.66736 GHz Pol: I Tsys: 16.57
 2005-07-12 Int : 00 02 56.8 Fsky : 1.66727 GHz IF : 0 Tcal: 1.45
 Summer Students LST : +13 20 04.4 BW : 50.0000 MHz AGBT_05B_04B_020nOff

13 29 42.39 -23 18 51.1 R Hya Az: 177.4 El: 28.3 HA: -0.16



MASER



- Ein optischer Verstärker, welcher aufgrund von *stimulierter Emission kohärente Mikrowellen produziert*
- Maserlinie ist die hellste spektrale Linie im Radio-Universum
- Sie zeichnet sich aus durch:
 - Enorme Strahlungsintensität
 - Sehr schmale Linienbreiten
 - Abnorme Linienvverhältnisse (deutlich in abweichend vom Equilibrium)

MASER / Megamaser



- Kosmische Maser: **Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation** originär, **jetzt: Molecular Amplification** (Townes), ... molecular is used here in the sense of kinetic theory,
- Dem Laser vergleichbare Verstärker von Radiowellen
- Mittlere Leuchtkraft der galaktischen interstellaren MASER: 10^{-4} Sonnenleuchtkräfte
- *Megamaser*: in extragalaktischen Galaxien gefundene extrem starke Maser mit einer Leuchtkraft von 100- bis mehrere 1000-Sonnenleuchtkräften (ursprgl. Großer Anzahl von interstellaren MASERN zugeschrieben, aber Variabilität!) 7

MASER / MegamasER



- Bislang: 100 **OH**- und 60 **H₂O**-Megamaser (in 1000 untersuchten Galaxien) gefunden
- Angeregter Wasserdampf strahlt z.Bsp. bei 1.3 cm Wellenlänge in Form einer einzigen, besonders intensiven Spektrallinie
- Liefert Informationen über Struktur, Temperatur, Magnetfeld und Dynamik der Umgebung (Sternentstehungsregionen und Gegenteil, Zentren aktiver Galaxienkerne)
- Helligkeitstemperaturen $>10^9$ K, Größen <0.001 Bogensekunden

MASER historisch



- 1965: Weaver et al. finden kosmische Emissionslinien unbekannter Herkunft bei einer Frequenz von 1665 MHz (*Mysterium*); dann als Linie des OH-Moleküls identifiziert in kompakter Quelle innerhalb von Molekülwolken
- 1969: H₂O
- 1970: CH₃OH
- 1974: SiO, sämtlich aus Molekülwolken
- 1968: Maser in der Umgebung von Späten Sternen, OH zunächst, H₂O in 1969, SiO 1974
- 1973: Maser in externen Galaxien, Kometenhalo
- 1982: Megamaser
- -> Leuchtkraft **OH** und **H₂O**: **späte Sterne** < **Sternentstehungsregionen** < **extragalaktisch**
- -> **entferntester OH MegaMASER: z=0.265**
- -> **entferntester H₂O MegaMASER: z=0.66**

MASER —

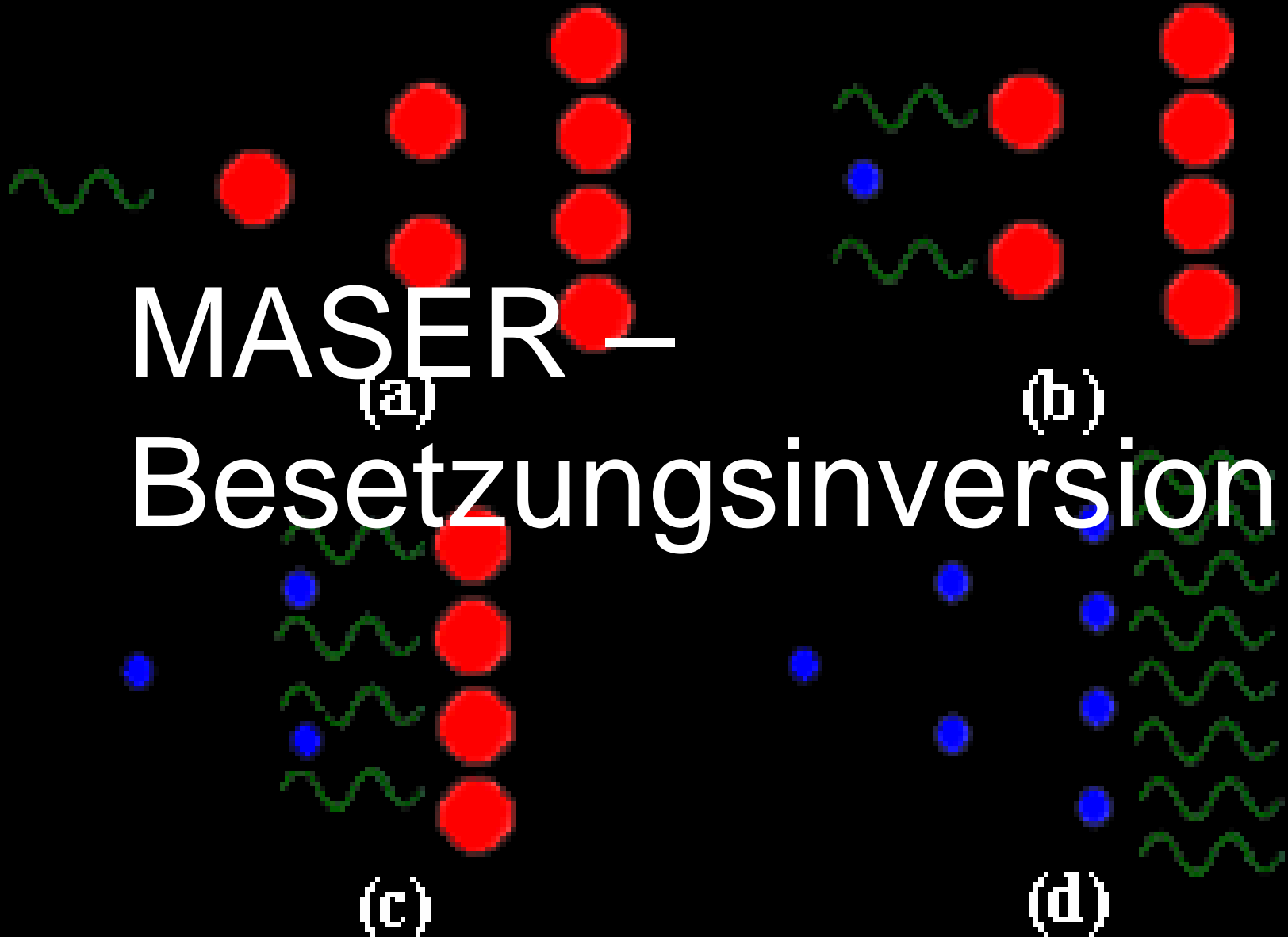
(a)

(b)

Besetzungsinversion

(c)

(d)



MASER: Populationsinversion, Pumpen



- Pumpprozess: Anregung vom Grundzustand aus durch
 - externe Strahlung
 - Spontane Zerfälle und Absorption externer Strahlung
 - oder**
 - durch Stöße
- Induzierte oder stimulierte Emission ist die Essenz des MASER-Phänomens: Zerfall wird durch einkommendes Photon mit passender Frequenz angeregt. Um Energie und Impuls zu erhalten, wird der Übergang von Emission eines weiteren Photons begleitet. Dessen Eigenschaften sind identisch denen des ursprünglichen Eltern-Photons
- Negative Absorption -> erhöht die Anzahl der Photonen im Strahlungsfeld
- Stimulierte Emission entfernt Photonen vom höheren Niveau und reduziert somit die Inversion

MASER: Populationsinversion, Pumpen

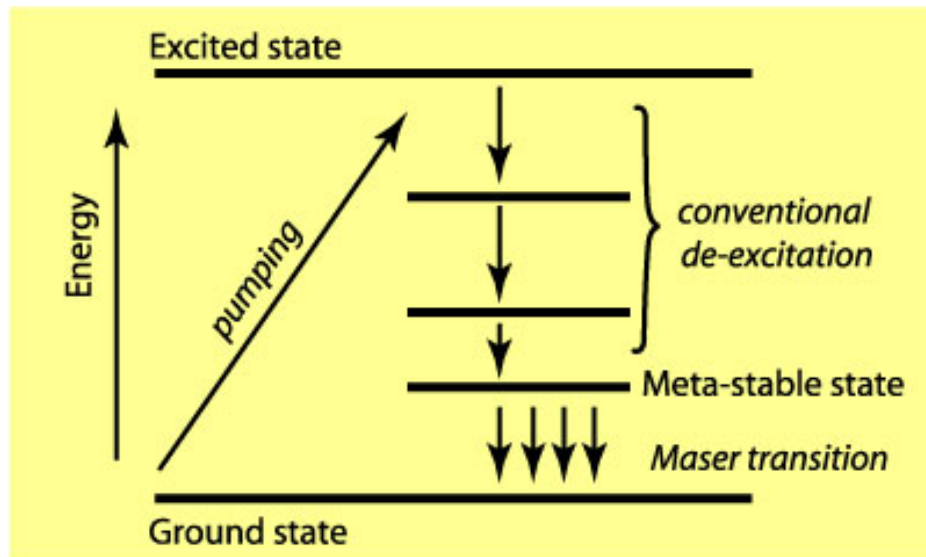


- Intensität erreicht Grenzwert und MASER saturiert.
- Helligkeit am größten während der Saturierung: jeder Pumpvorgang produziert ein MASER-Photon mit der maximalen intrinsischen Effizienz erlaubt durch die Pumpe
- Anforderungen an die Umgebung:
 - Populationsaustausch muß dominiert sein durch Kollisionen (hohe Dichten, $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$)
 - Substantielle Anzahl an Molekülen entlang der Sichtlinie, große Dimensionen, lineare Dimension $> 10^{10} \text{ cm}$ (fast Radius der Sonne), typische MASER-Längen mindestens 10^{13} cm
 - Form: längliche Röhren
 - H_2O Maserspot hat Größe von 10^{13} cm , OH: 10^{16} cm

MASER/LASER

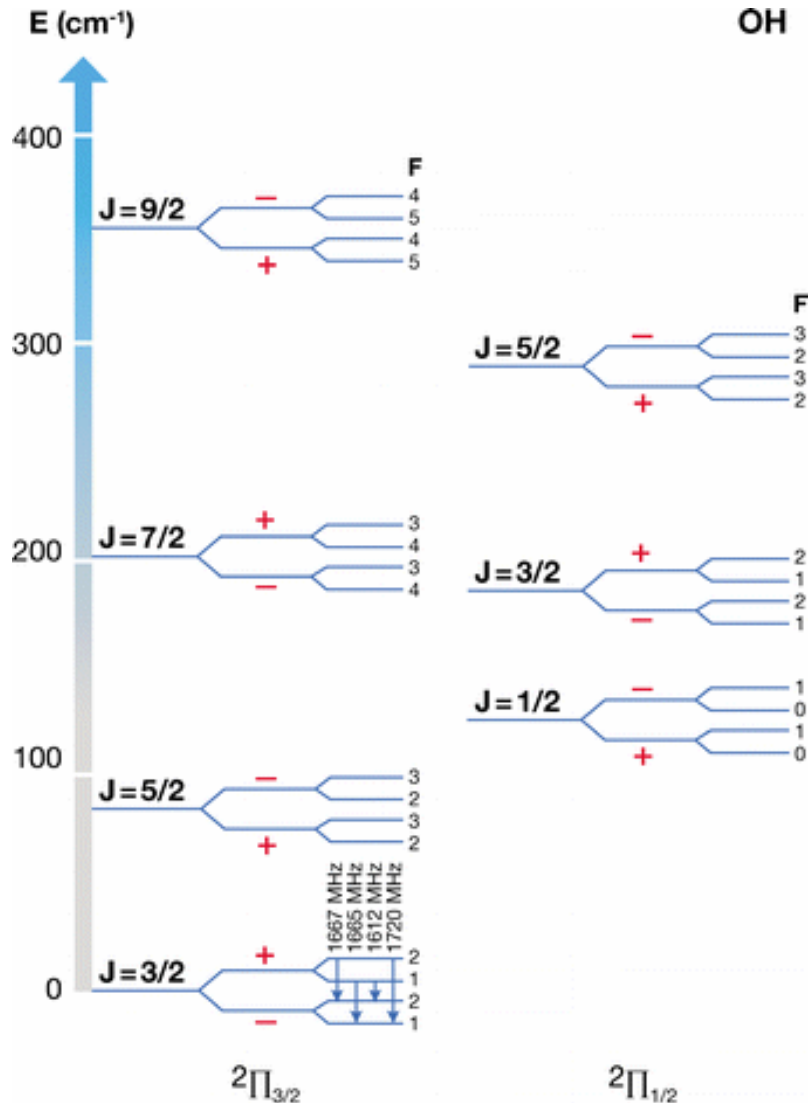


- Population in diesen Zuständen baut sich auf, bis ein spontaner Zerfall viele Atome zum Zerfall anregt

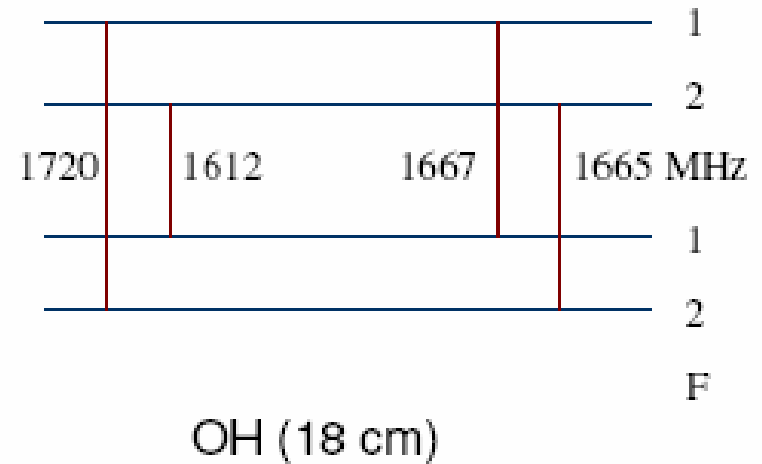


- Lebensdauer eines MASERS: normalerweise nur einige Wochen oder Monate
- es bilden sich ständig neue MASER

MASER: OH, erster MASER



1st radio molecule (1963)



Mysterium = OH Maser

- Verhältnis der Linienstärken: 1:5:9:1
- Gastemperatur: 160 K
- Säulendichte $N_{\text{OH}} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$
- Gasdichte $n_{\text{H}_2} < 10^7 \text{ cm}^{-3}$

MASER: Polarisation



- Polarisation: sehr stark polarisiert, manchmal 100% (im Fall der **OH**-MASER)
- Zirkular polarisiert, geringer in linearer Polarisation
- Polarisation resultiert aus:
 - Zeeman Effekt
 - Anisotropes Pumpen; favorisiert einige magnetische Zustände bei den Übergängen
 - ...
- Megamaser haben häufig andere Charakteristiken

unterschiedliche Pumpmechanismen



- OH in späten Sterntypen: detaillierteste Modelle, gepumpt durch Infrarot-Strahlung aus der reemittierten stellaren Strahlung der Staubteilchen, die den stellaren Wind durchdringen
- H₂O in späten Sterntypen: Kollisionen

MASER: offene Fragen



- Astrophysikalische MASER werden empirisch gefunden, dann bzgl. Ihrer Pumpmechanismen untersucht
- Galaktische Formaldehyd-Emission bislang nicht geklärt
- Einige MASER theoretisch vorausgesagt – müssen aber noch in der Natur beobachtet werden; z.Bsp. **OH** bei 53 MHz
- KiloMASER?
- OH MegaMASER?
- ...

MASER....



- OH
- CH
- H₂CO
- H₂O
- NH₃, ¹⁵NH₃
- CH₃OH; CH₂OH
- SiS
- HC₃N
- SiO, ²⁹SiO, ³⁰SiO
- HCN, H¹³CN
- H
- 36 Moleküle

Molecules “Discovered” in the Interstellar Medium

H₂, CH, CC, CN, CO, CS, OH, HCl, NO, NS, SiO, SiS, SO, CH⁺, SO⁺

H₂O, SO₂, HCO, C₂H, HCN, H₂S, SiC₂, OCS, HNO, HNC, HCO⁺

NH₃, CCCO, HCNH⁺, H₂CO,

MASER: Astronomische Umgebungen



- **Kometen**
- **Planetare Atmosphären**
- **Stellare Atmosphären (Zirkumstellare MASER), Späte Sterne (Rote Riesen, Überriesen) ,**
 - **OH-Maser** in 1000-10 000 AU Abständen;
 - **H₂O-Maser** in Abständen von 100-400 AU,
 - **SiO** 5-10 AU
 - **H₂O** und **OH** benötigen keine extremen Bedingungen für Pumpmechanismus; in expandierendem Wind (weg vom Stern)

MASER: Astronomische Umgebungen



- **Sternentstehungsregionen (Interstellare MASER):** in Molekülwolken (HII-Regionen), verschiedene Pump-Mechanismen (Strahlung, Kollisionen), **OH:** 1612, 1665, 1667, 1720, 4660, 4750, 4765, 6031, 6035, 13441 MHz; ebenfalls **Wasser** und Methanol; selten: Ammoniak und Formaldehyd
 - Stärkste MASER-Emission in der Galaxis in OH und H₂O
 - OH sind Oberflächenphänomene auf kompakten H₂O-Regionen, ionisierte Sphären um junge und sehr heiße Sterne
 - H₂O zeigen hohe Geschwindigkeiten von ausströmendem Gas aus den Zentren der Regionen (~200km/s)

MASER: Astronomische Umgebungen

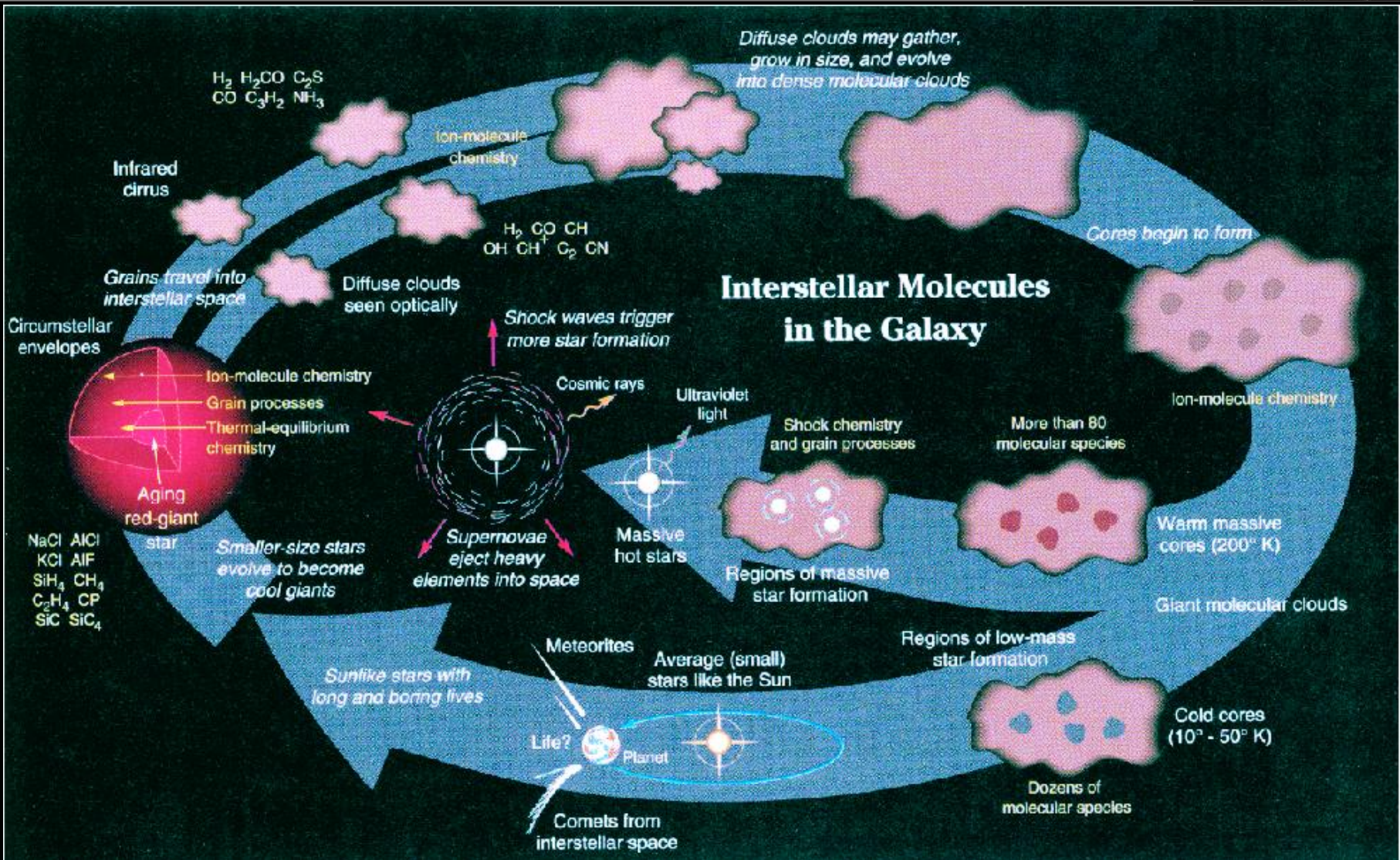


- **Supernova-Überreste: 1720 MHz OH**
- **Extragalaktische Quellen: Scheibe oder Jet sind Ursprungsort: Megamaser & Gigamaser, OH, H₂O, Formaldehyd**
- ALLE MASER finden sich in dichtem molekularem Gas & in der Nähe einer energiereichen Quelle

A vibrant, multi-colored nebula with intricate filaments of green, red, and blue gas. Several bright blue and white stars are scattered throughout the scene, some appearing as sharp points of light with diffraction spikes. The background is a dark, starry space.

Interstellare MASER – Sternentstehungsgebiete

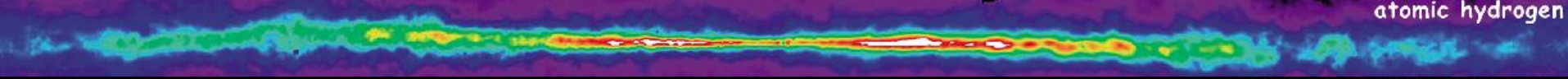
The kosmische Zyklus



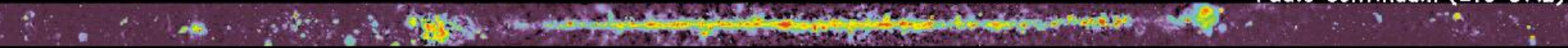
Neutrales und ionisiertes Medium



atomic hydrogen

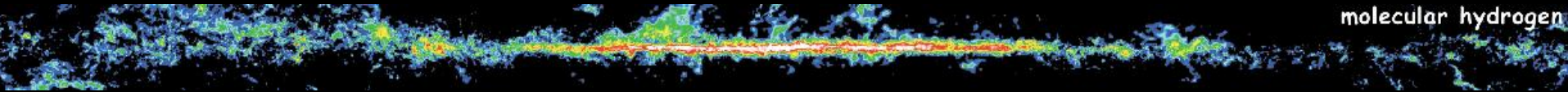


radio continuum (2.5 GHz)



Sterne bilden sich in dichtem molekularem Gas und staubigen Kernregionen

molecular hydrogen

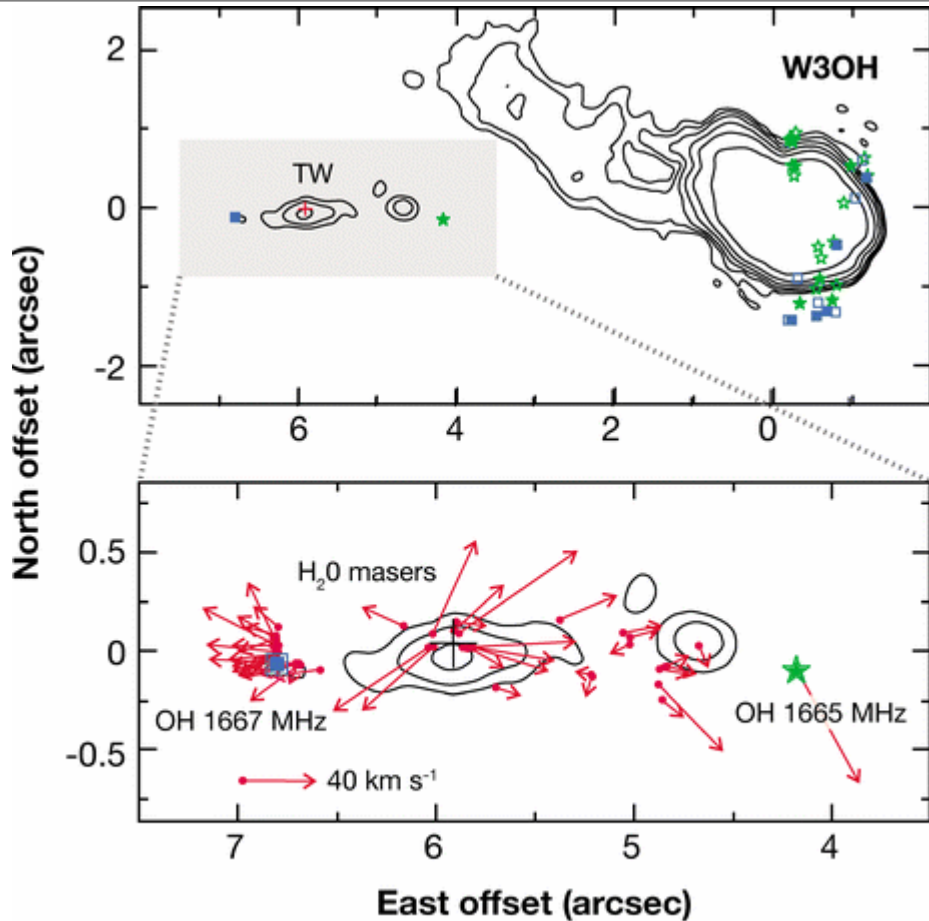


Einige wichtige Moleküle ...

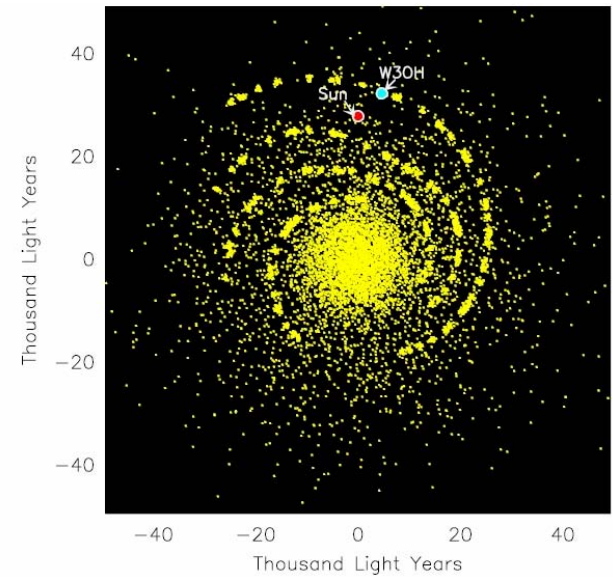
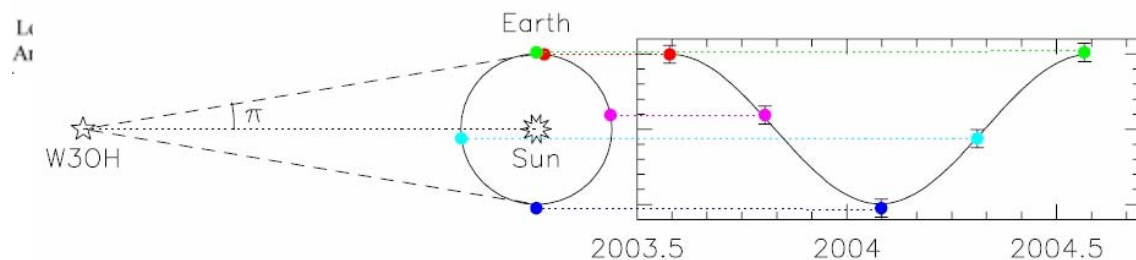


Mol.	Trans.	Abund.	Crit. Dens. [cm ⁻³]	Comments
H ₂	1-0 S(1)	1	8x10 ⁷	Shock tracer
CO	J=1-0	8x10 ⁻⁵	3x10 ³	Low-density probe
OH	² Π _{3/2} ; J=3/2	3x10 ⁻⁷	1x10 ⁰	Magnetic field probe (Zeeman)
NH ₃	J,K=1,1	2x10 ⁻⁸	2x10 ⁴	Temperature probe
CS	J=2-1	1x10 ⁻⁸	4x10 ⁵	High-density probe
H ₂ O	6 ₁₆ -5 ₂₃		1x10 ³	Maser
H ₂ O	1 ₁₀ -1 ₁₁	<7x10 ⁻⁸	2x10 ⁷	Warm gas probe
CH ₃ OH	7-6	1x10 ⁻⁷	1x10 ⁵	Dense gas/temperature probe
CH ₃ CN	19-18	2x10 ⁻⁸	2x10 ⁷	Temperature probe in Hot Cores

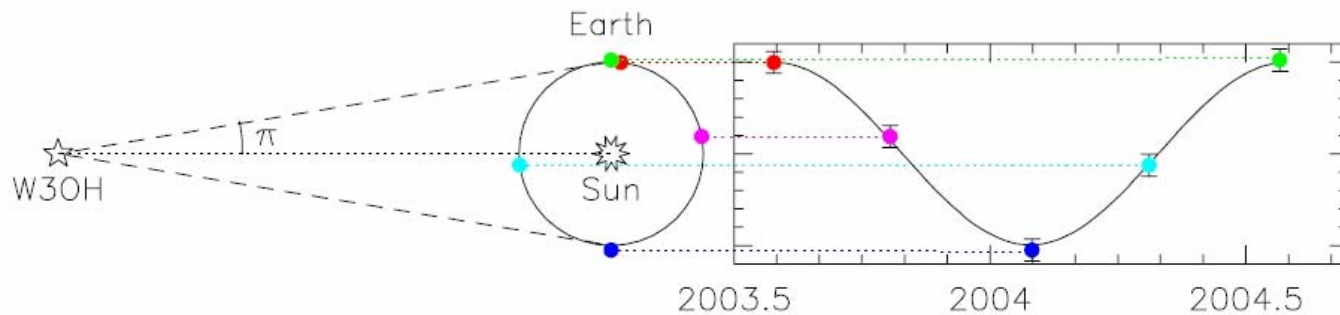
Interstellare MASER: W3OH



- Nahe jungen stellaren Objekten (Protosterne)
- In kompakten HII-Regionen

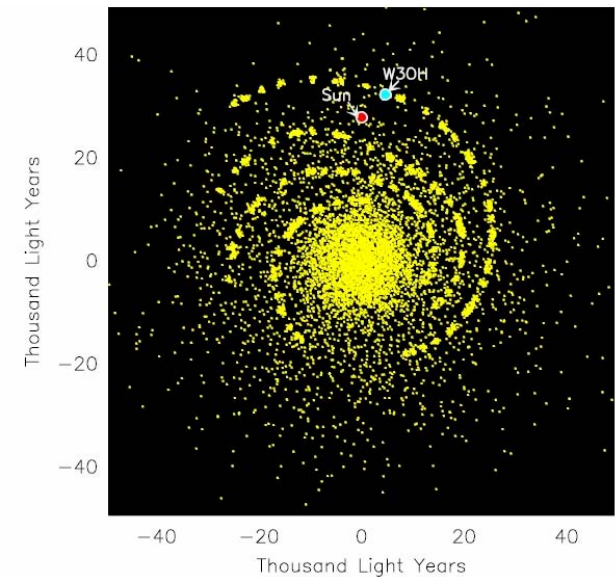


Interstellare MASER: jährliche Parallaxe

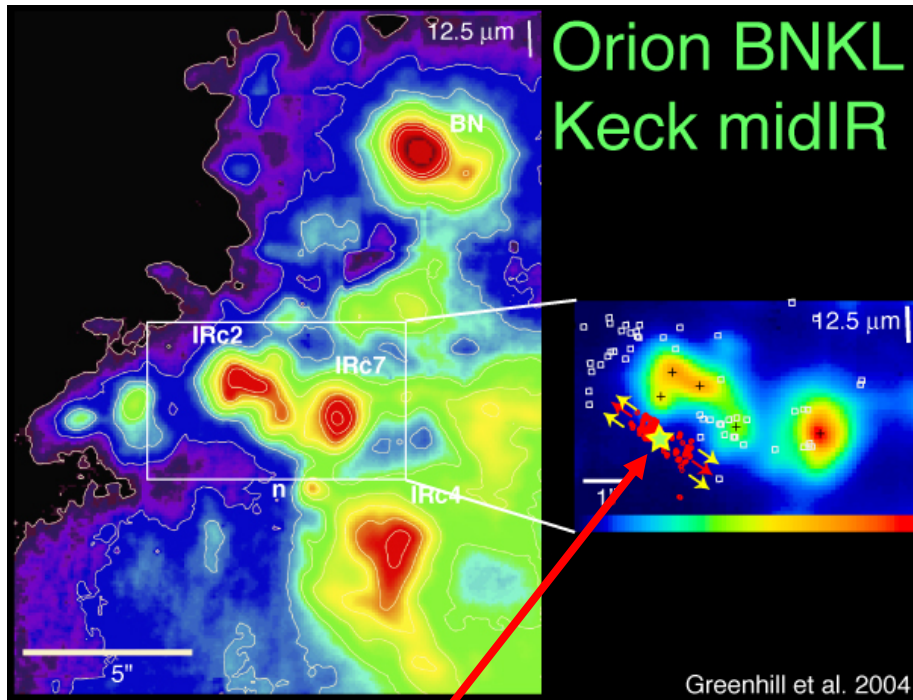


Methylalkohol, 12,2 GHz
WasserMASER

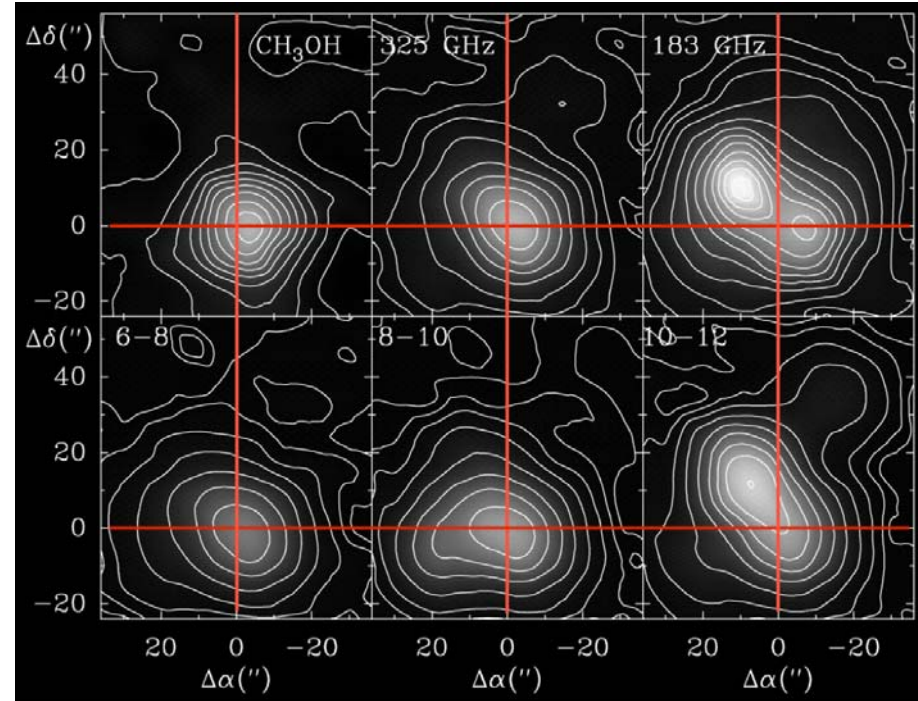
- Entfernung von W3OH bislang aus Leuchtkräften junger Sterne abgeleitet-> stimmt nicht mit Ergebnissen aus Modellen für die Rotation der Milchstraße überein
- Junger Stern bewegt sich nicht in kreisförmiger Umlaufbahn um das Zentrum der Milchstraße sondern weicht um 10% davon ab; bewegt sich langsamer und „fällt“ Richtung Galaktisches Zentrum
- Grund: Gaswolke (aus der Stern entstand) wird zusätzlich von einer Masse angezogen, die mit Materie im Perseus-Spiralarm assoziiert ist



MASER: Sternentstehung



CSO 183 and 325 GHz H₂O Maser Emission



Cernicharo et al. (1999)

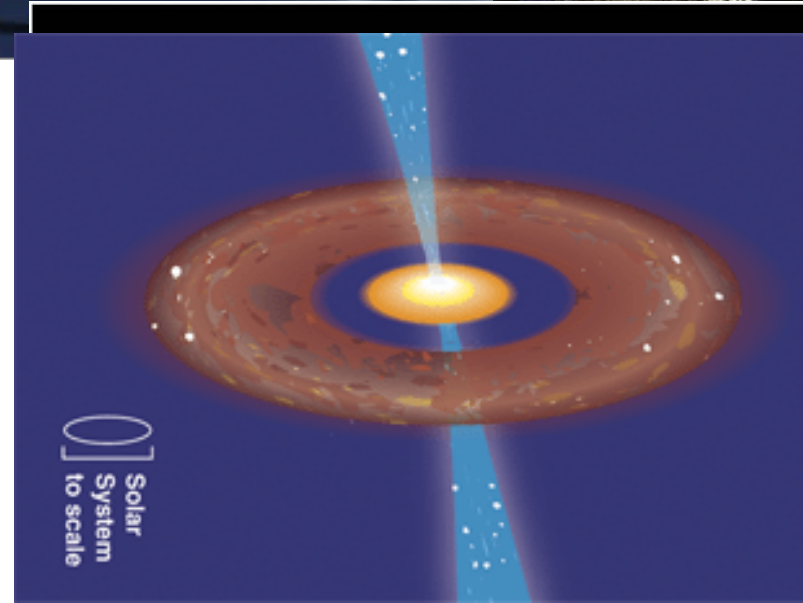
Source I: cm (22 GHz) H₂O masers (red dots)
trace shocked outflow, density ($n_{\text{H}_2} \sim 10^{8-10} \text{ cm}^{-3}$)

Submm masers believed to trace extended,
low density material ($n_{\text{H}_2} \sim 10^{5-6} \text{ cm}^{-3}$)

MASER: Sternentstehung



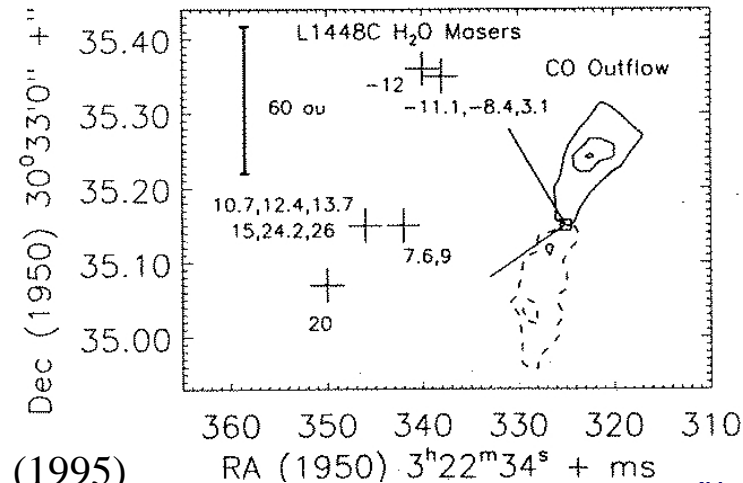
- Wasser MASER zeigen dichtes und warmes Gas.
- VLBI erlaubt eine Untersuchung der Regionen ganz nah um das YSO (einige AU bis ~100 AU)
- MASER finden sich in zirkumstellaren Scheiben um den YSO und in geschocktem Gas innerhalb der abgestoßenen Winde



Torrelles et al. (1998)

Probleme::

- MASER Variabilität
- nicht-thermische Emission
- zu wenig Daten aufgrund von Selektionseffekt durch MASER

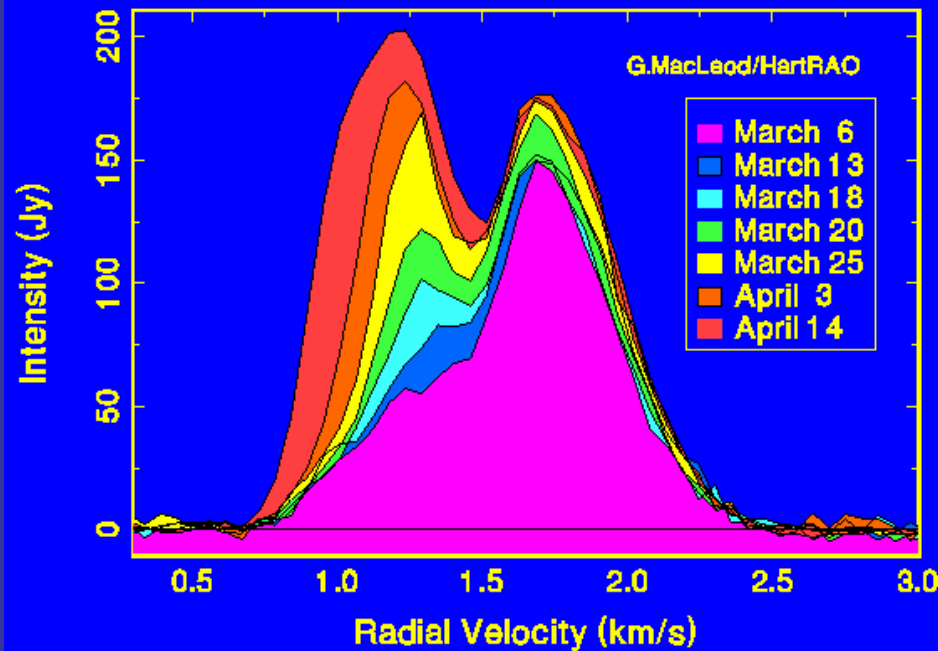


Chernin (1995)

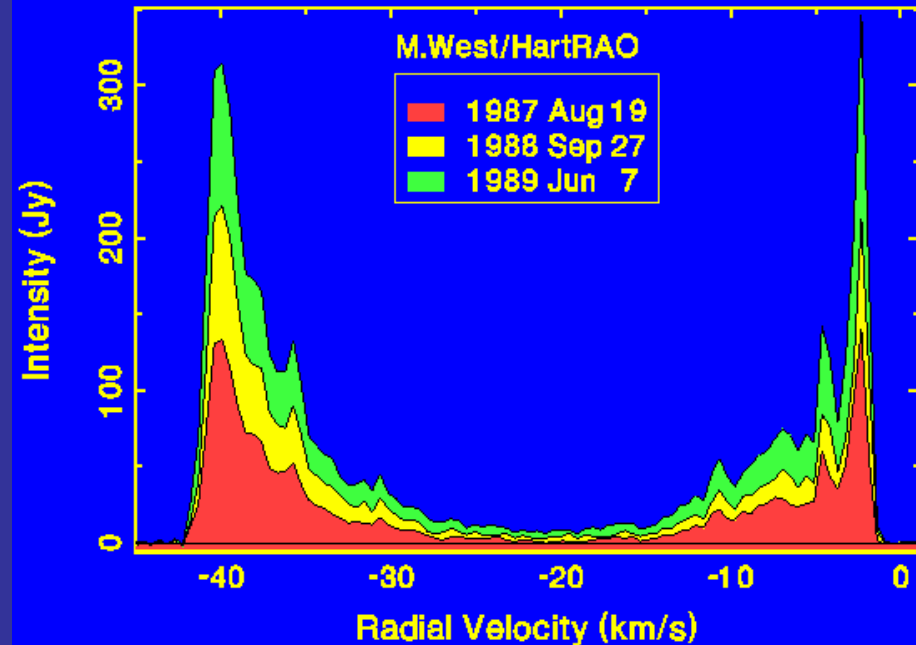
MASER: Variabilität



Development of a flare in the left peak of a 6668-MHz methanol maser during 1995

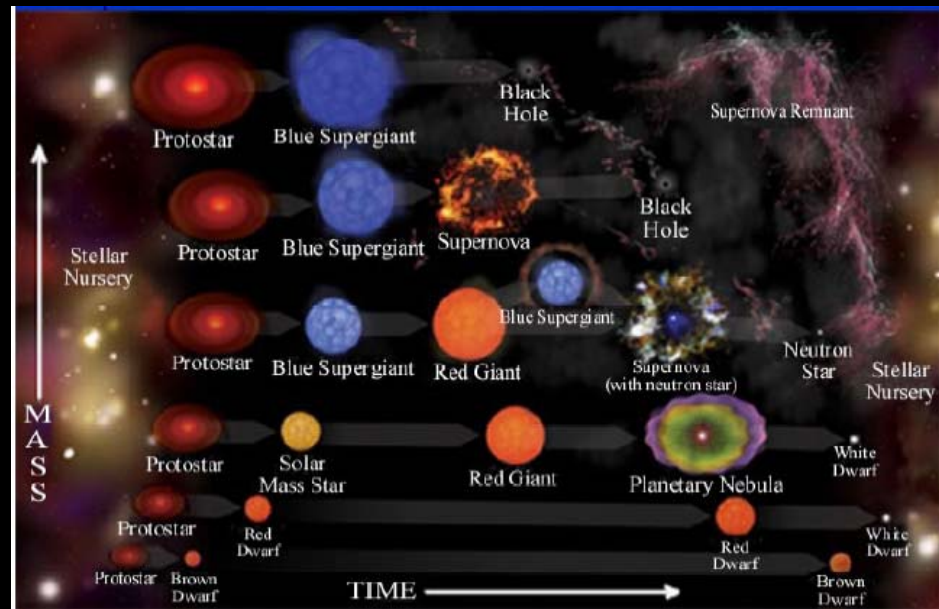


Spectra of the 1612 MHz hydroxyl maser from an OH/IR star

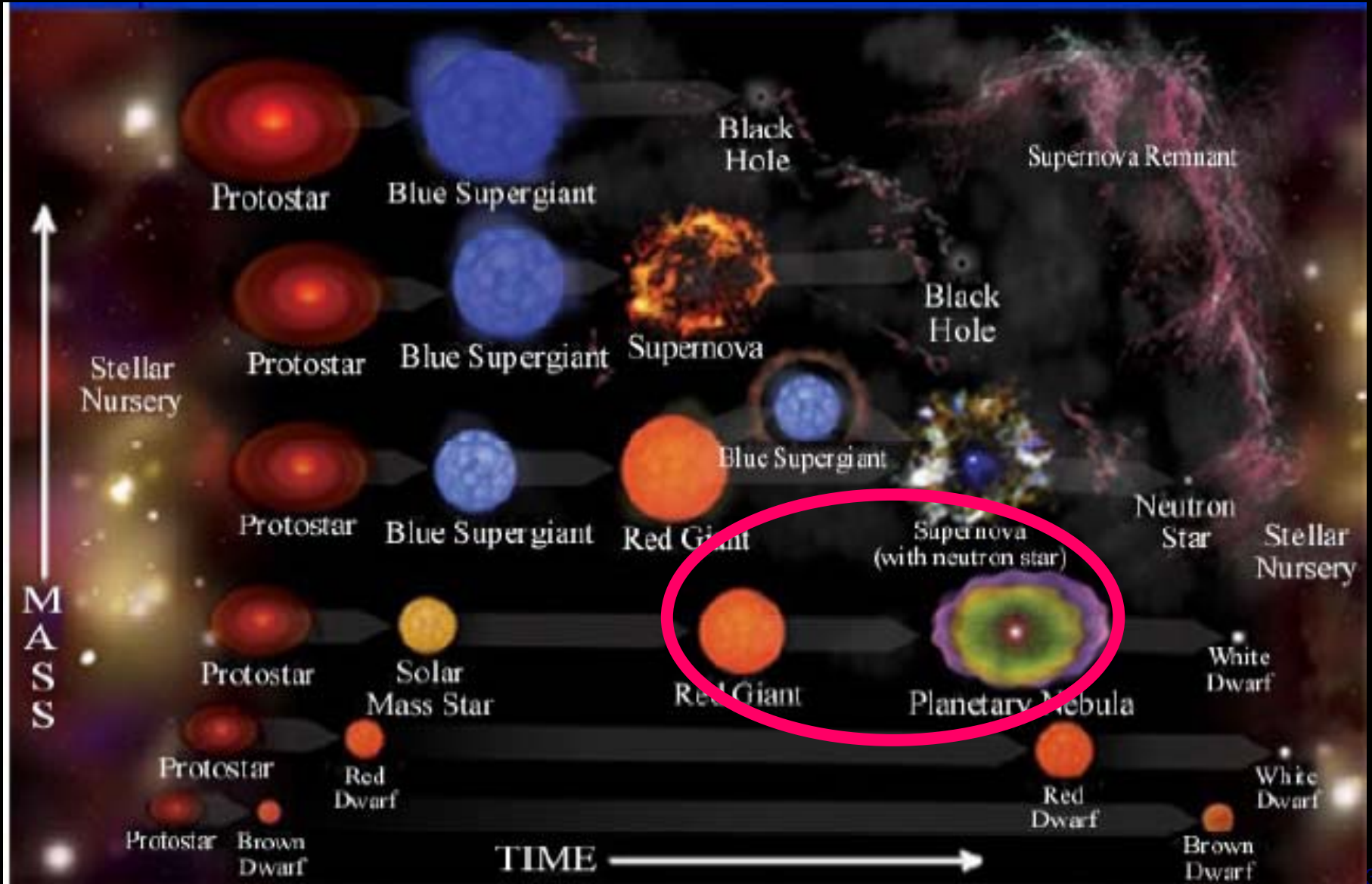


- Links: Methanol MASER in Sternentstehungsregion
- Rechts OH/IR Stern, Mira, Gasschale die sich vom Kern wegbewegt

MASER: späte Sterntypen



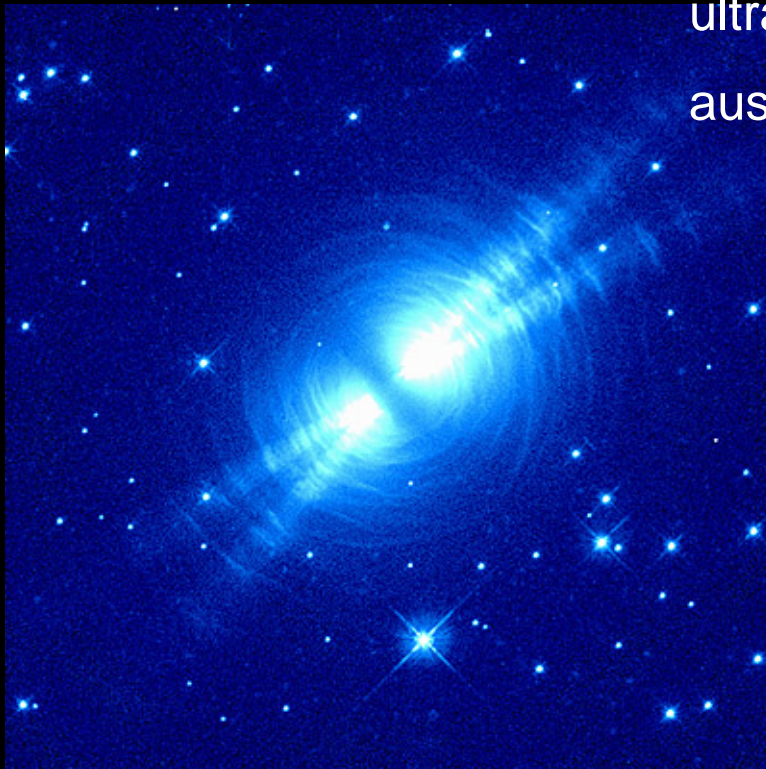
MASER: Endstadium der Sterne



HST Planetarische Nebel



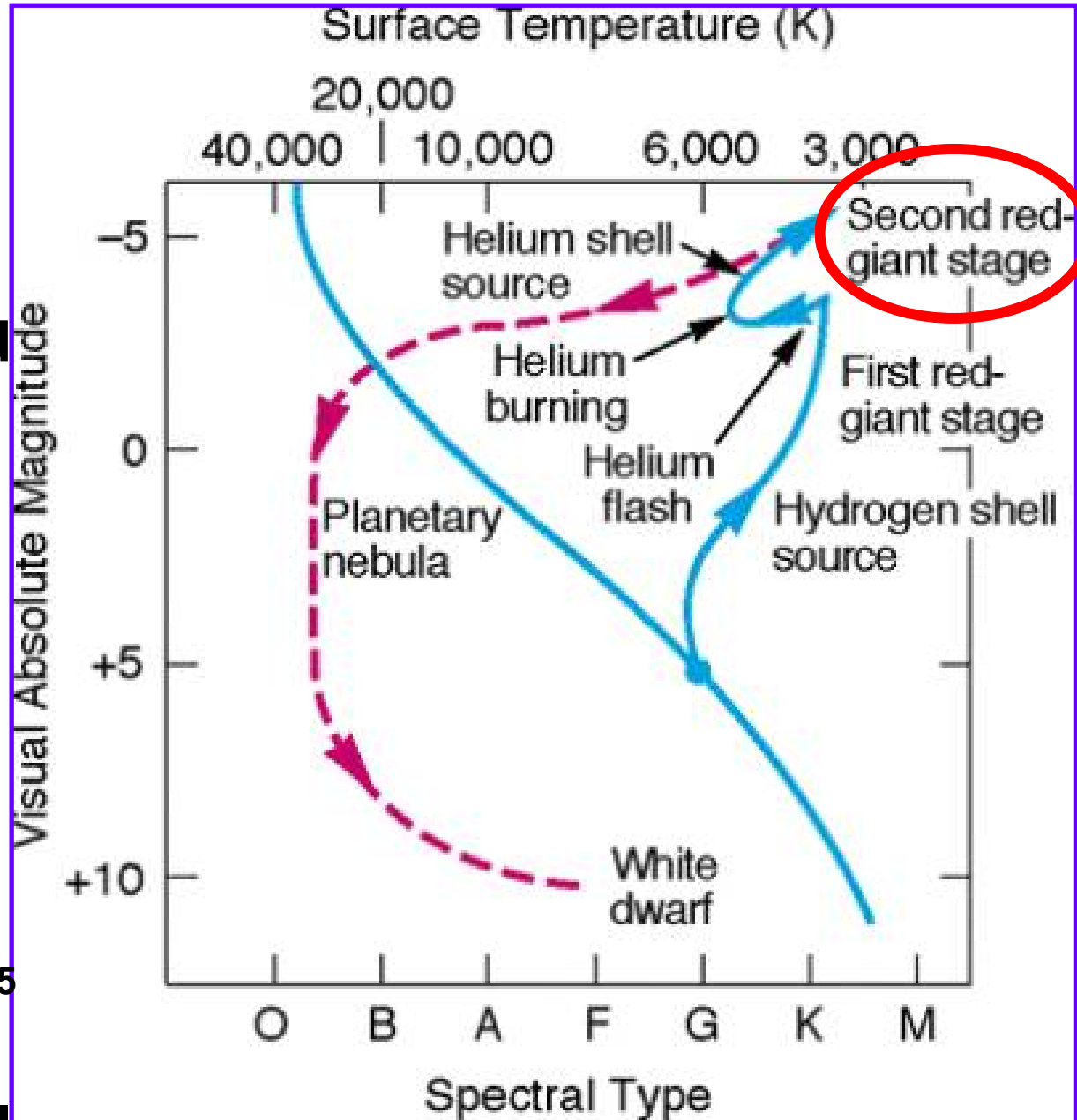
Lebensdauer: 10000 Jahre, Gas und Plasma
Ausgestoßen im Endstadium eines
durchschnittlichen Sterns; wenn Oberfläche
30 000 K erreicht, werden genug hochenergetische
ultraviolette Photonen ausgesendet, um das zuvor
ausgeworfene Gas zu ionisieren



Ursache der Formenvielfalt unbekannt, Gravitations-
Wirkung von Begleitsternen?

H-R Diagramm

- Asymptotischer Riesenast (AGB)
- Sterne geringer und mittlerer Masse
- $10^4 L_{\odot}$
- Kalt ($T_{\text{eff}} \sim 3000 \text{ K}$), (Kernradius einige $100 R_{\odot}$, sehr ausgedehnte molekulare Schale)
- Pulsation -
Massenverlust - 10^5
Jahre -
Planetarische Nebel



Mira-Sterne

Mira-Sterne, Veränderliche Sterne, nach Stern Mira im Walfisch benannt, rote Riesen und Überriesen

Mit Perioden zw 80-1000 Tagen; langperiod. Ver.

Pulsationsmechanismus; beruht auf Ionisation von Wasserstoff (50%)

Mira: M-Typ Sterne mit $\Delta V > 2.5 \text{ mag}$

$P \sim 100\text{-}500$ Tage

Massenverlustraten $\sim 10^{-7} - 10^{-6} M_{\odot}\text{yr}^{-1}$

OH/IR Sterne:

$P \sim 500 - 3000$ Tage

Massenverlustraten $\sim 10^{-6} - 10^{-4} M_{\odot}\text{yr}^{-1}$

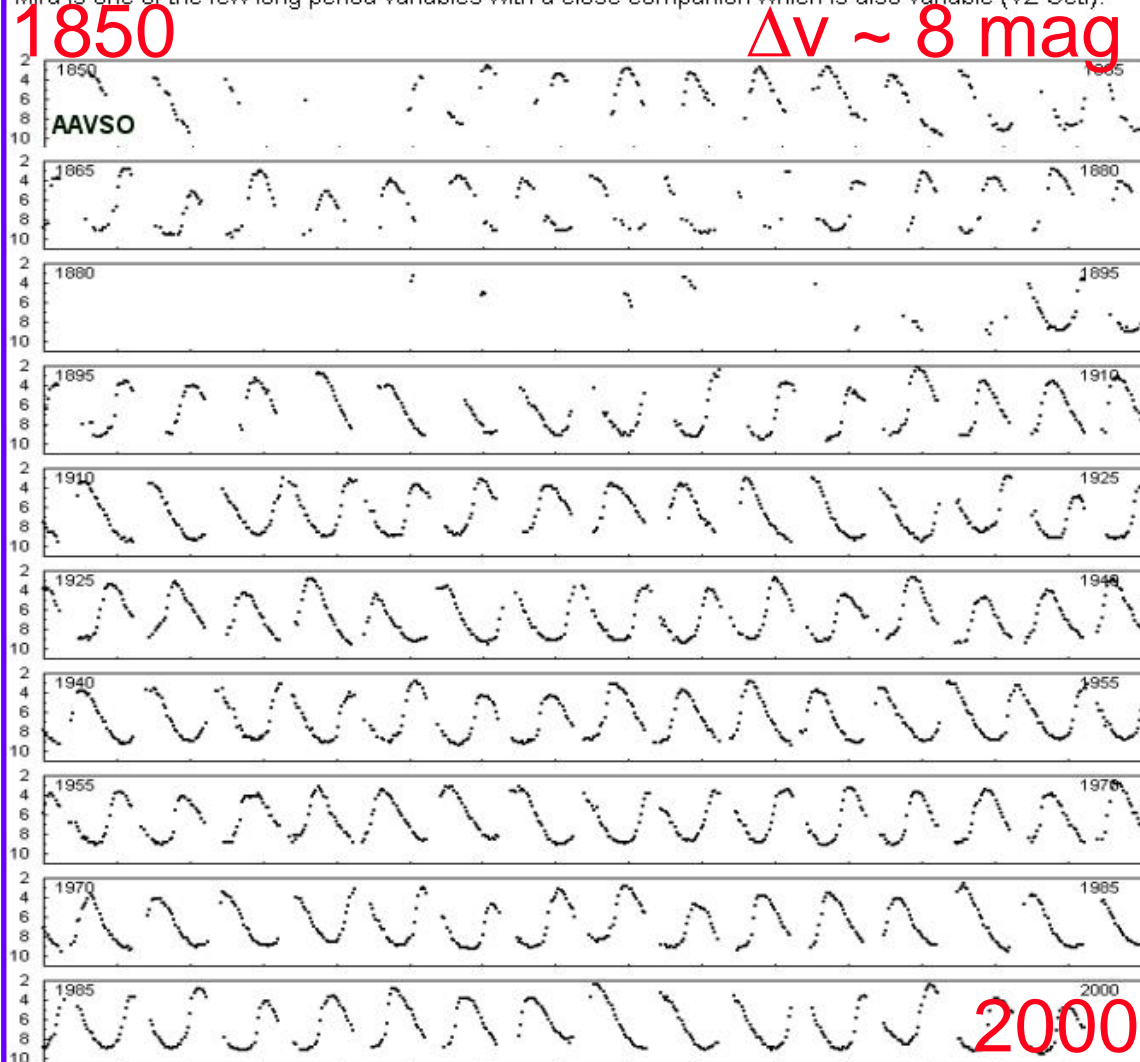
Optisch verdeckt durch dicke Staubschale

Mira (LPV)

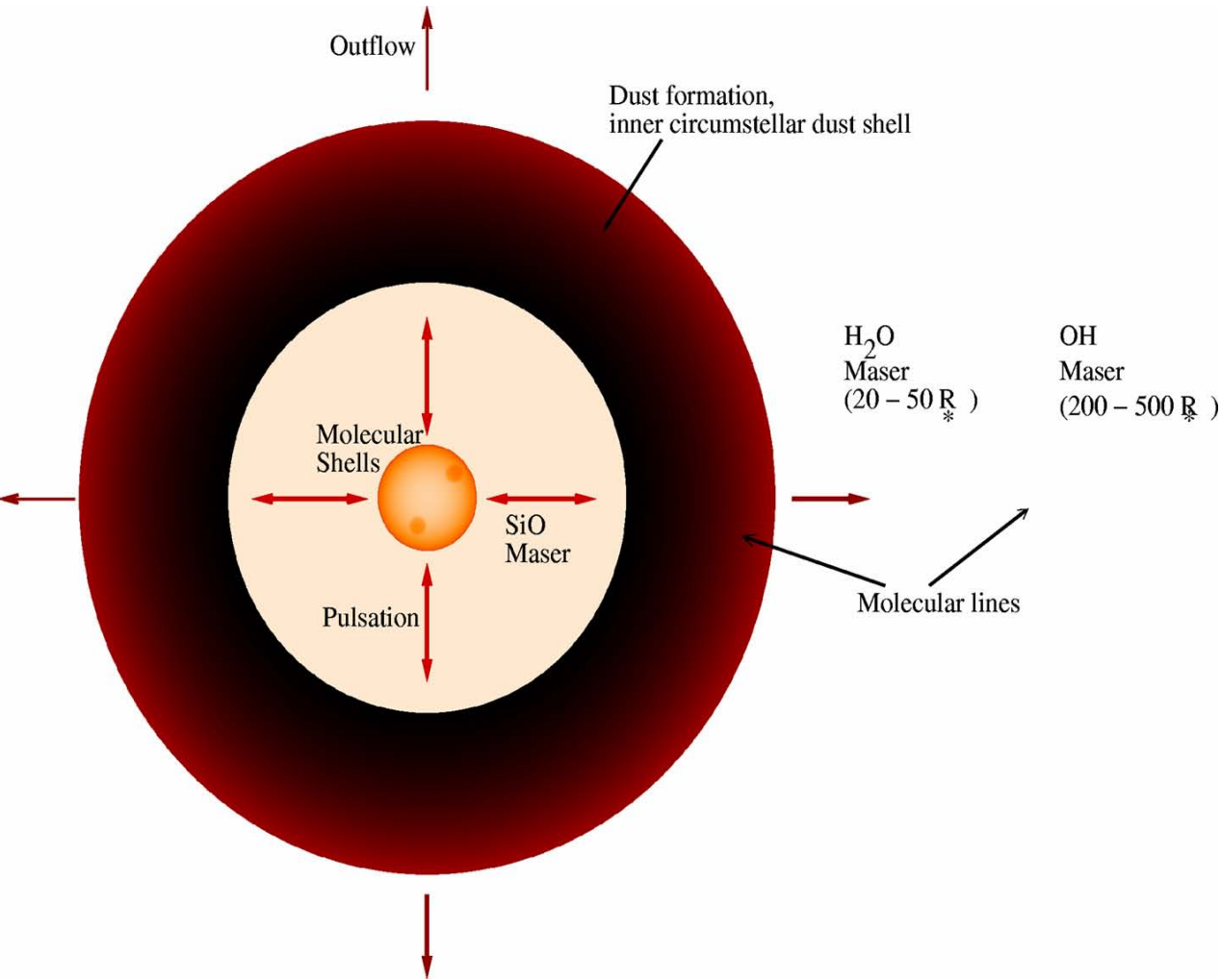
1850-2000 (10-day means)

Mira (omicron Ceti) is the prototype of pulsating long period variables and the first star recognized to have changing brightness. It has a period of 332 days. Generally, Mira varies between magnitudes 3.5 and 9, but the individual maxima and minima may be much brighter or fainter than these mean values. Its large amplitude of variation and its brightness make Mira particularly easy to observe.

Mira is one of the few long period variables with a close companion which is also variable (VZ Ceti).



Schematische Ansicht eines Mira-Sterns



VLTI (AMBER & MIDI):

- Size and shape of IR and MIR photosphere.
- effects by molecular layers, inhomogeneities.
- Size, chemistry, shape of the warm dust shell.

VLBA:

- SiO maser zone: size, shape, kinematics.
- Radio photosphere.
- Water and OH maser at larger distances.

ALMA:

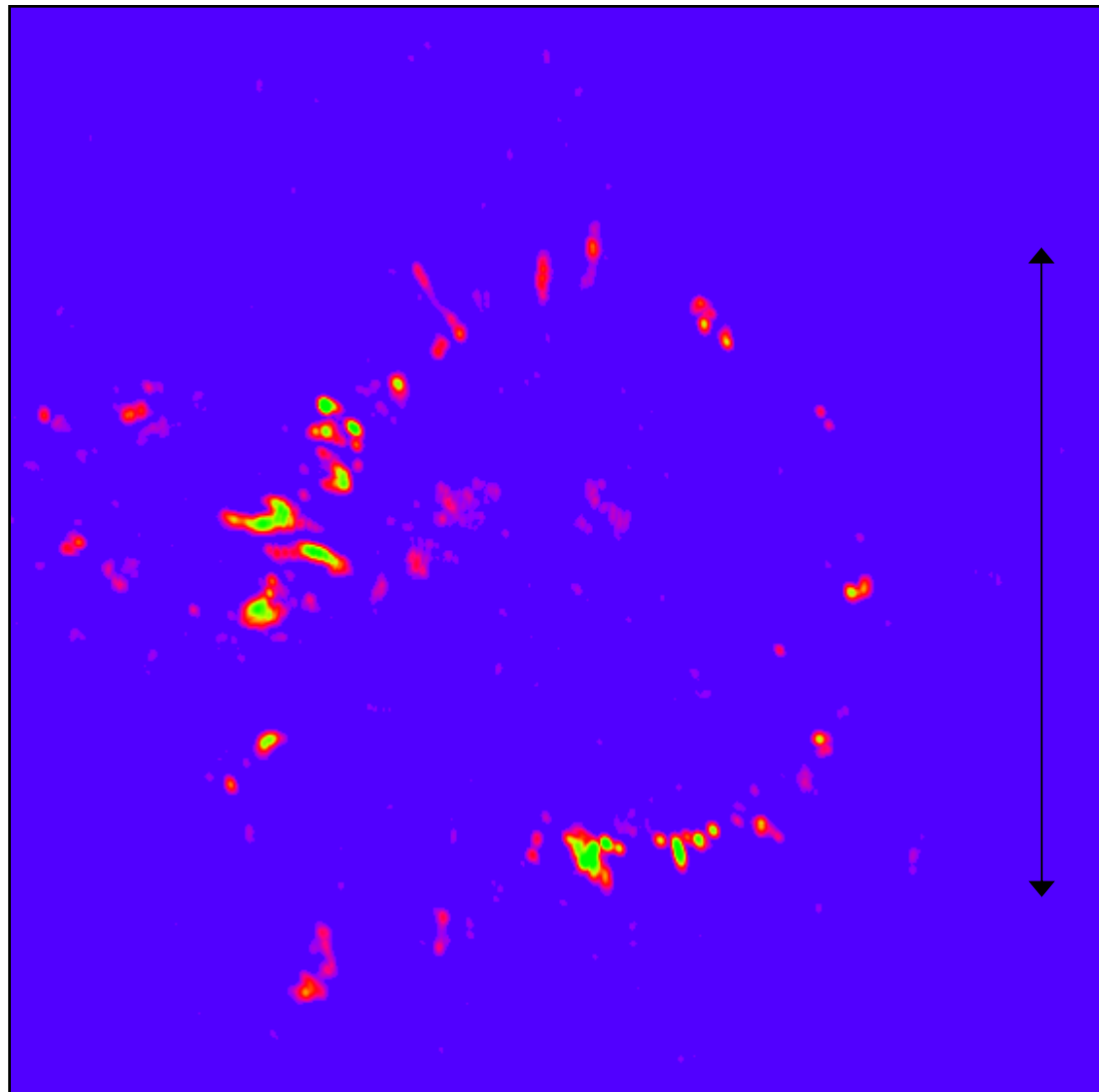
- mm Photosphere.
- Cool dust.
- High-fidelity images.
- Molecular bands / maser.

MASER in TX Cam



TX Cam,
Camelopardalis,
SiO, 43 GHz
VLBA

- Detaillierteste Aufnahmen der Aktivität eines Sterns
- 88 Wochen, ein Zyklus (eine Beobachtung alle zwei Wochen)
- Vorw. Ausdehnung, aber: chaotische Bewegung (Magnetfeld, Schockwellen)



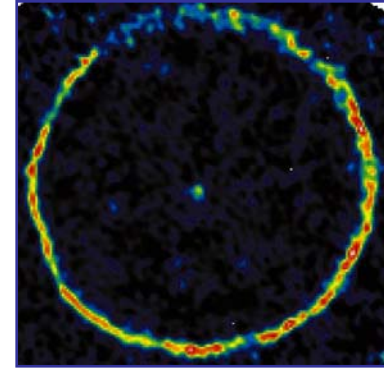
10 AU / 30 mas

Diamond, Kembell (1999)

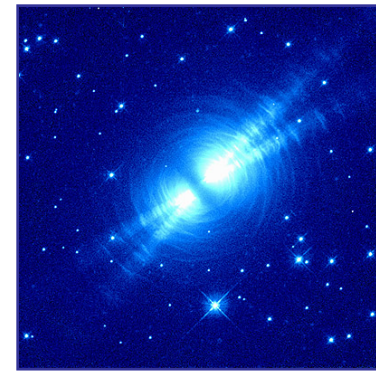
Was passiert in diesen Sternen?



- Wann wird der planetarische Nebel geformt – am Anfang/in der Mitte/am Ende des AGB-Sterns?
- Wie funktioniert es – welche Rolle spielen magnetische Felder?



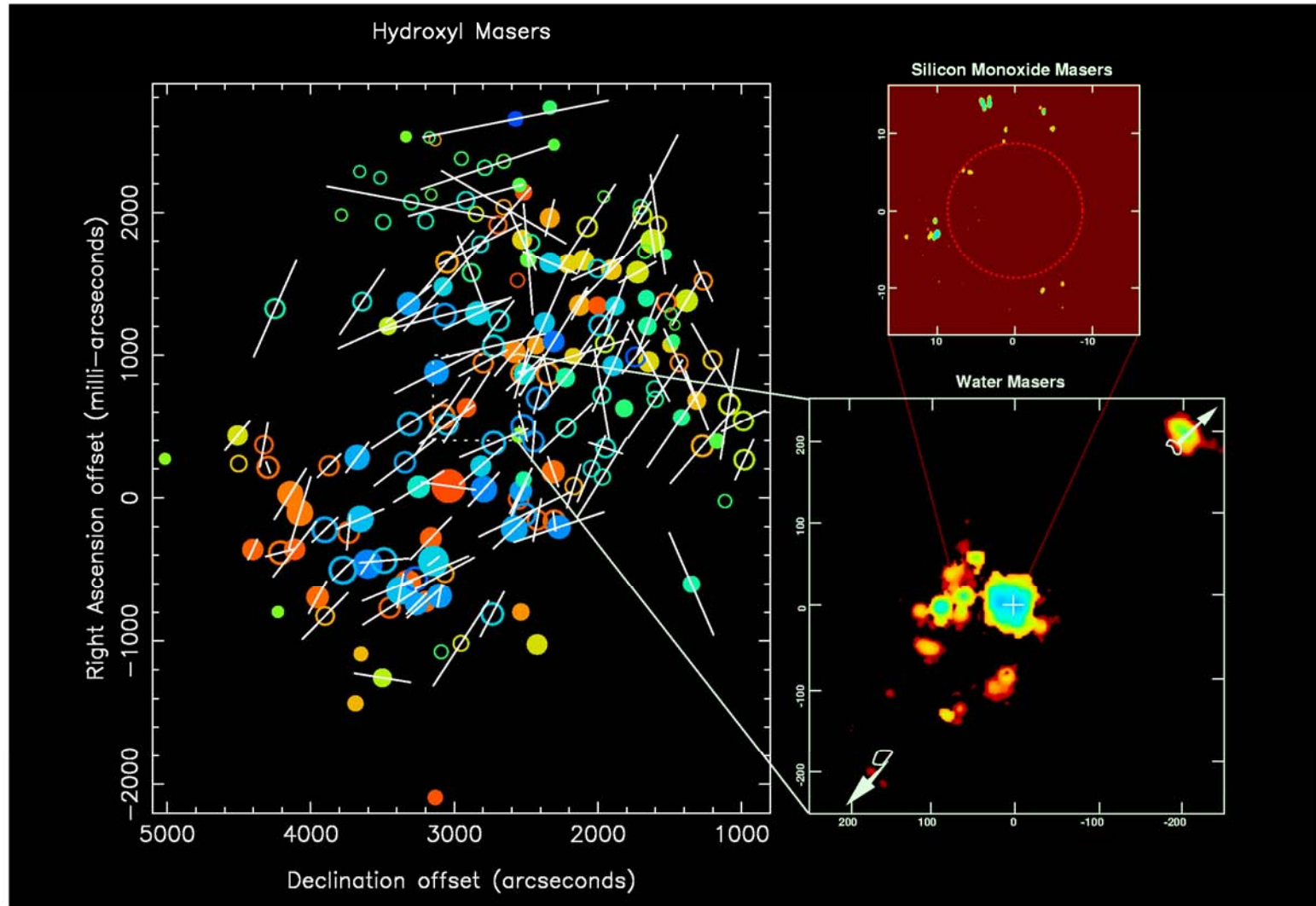
Asymmetrischer Massenverlust



MASER in NML Cyg

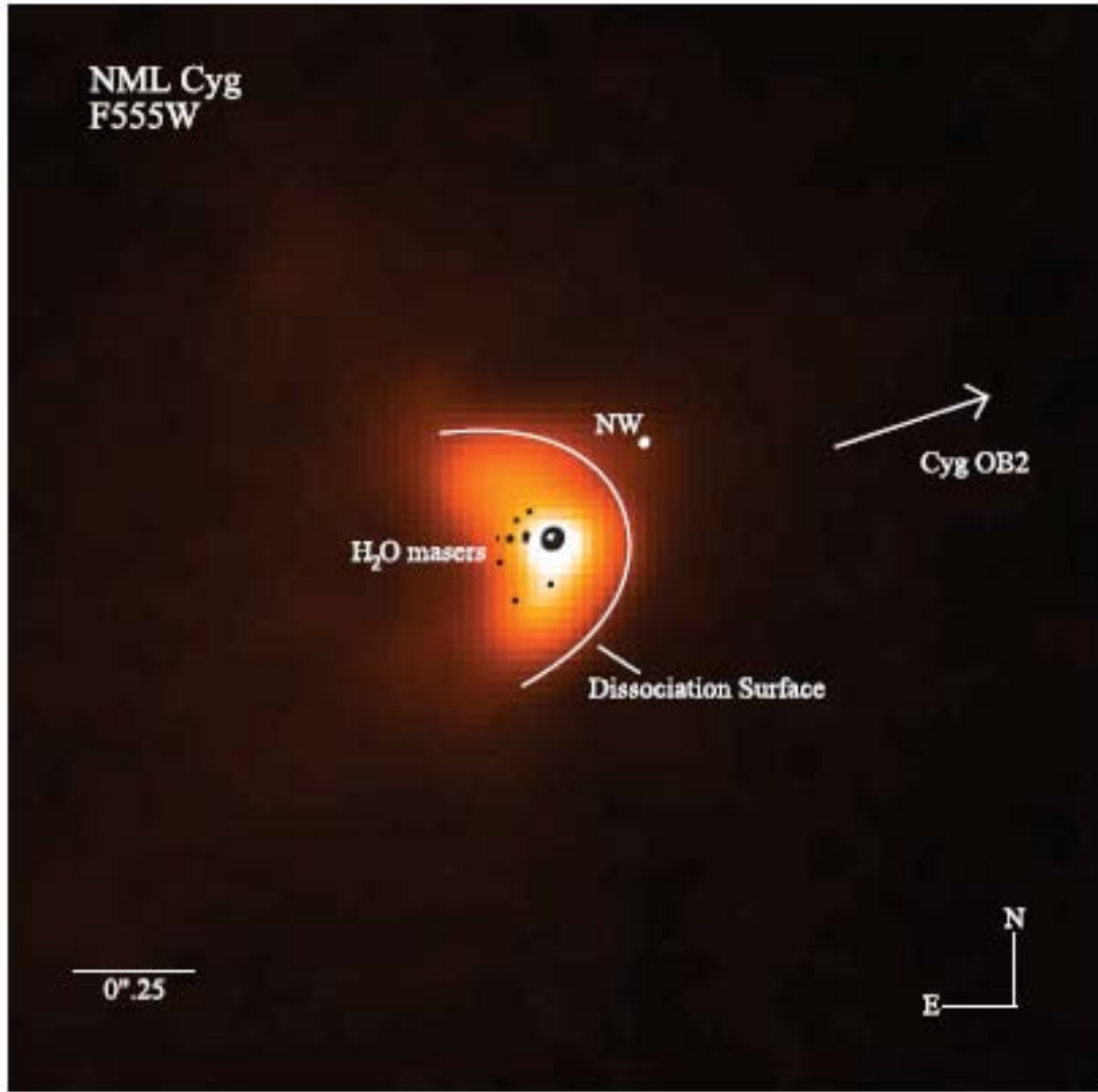


4000 AU

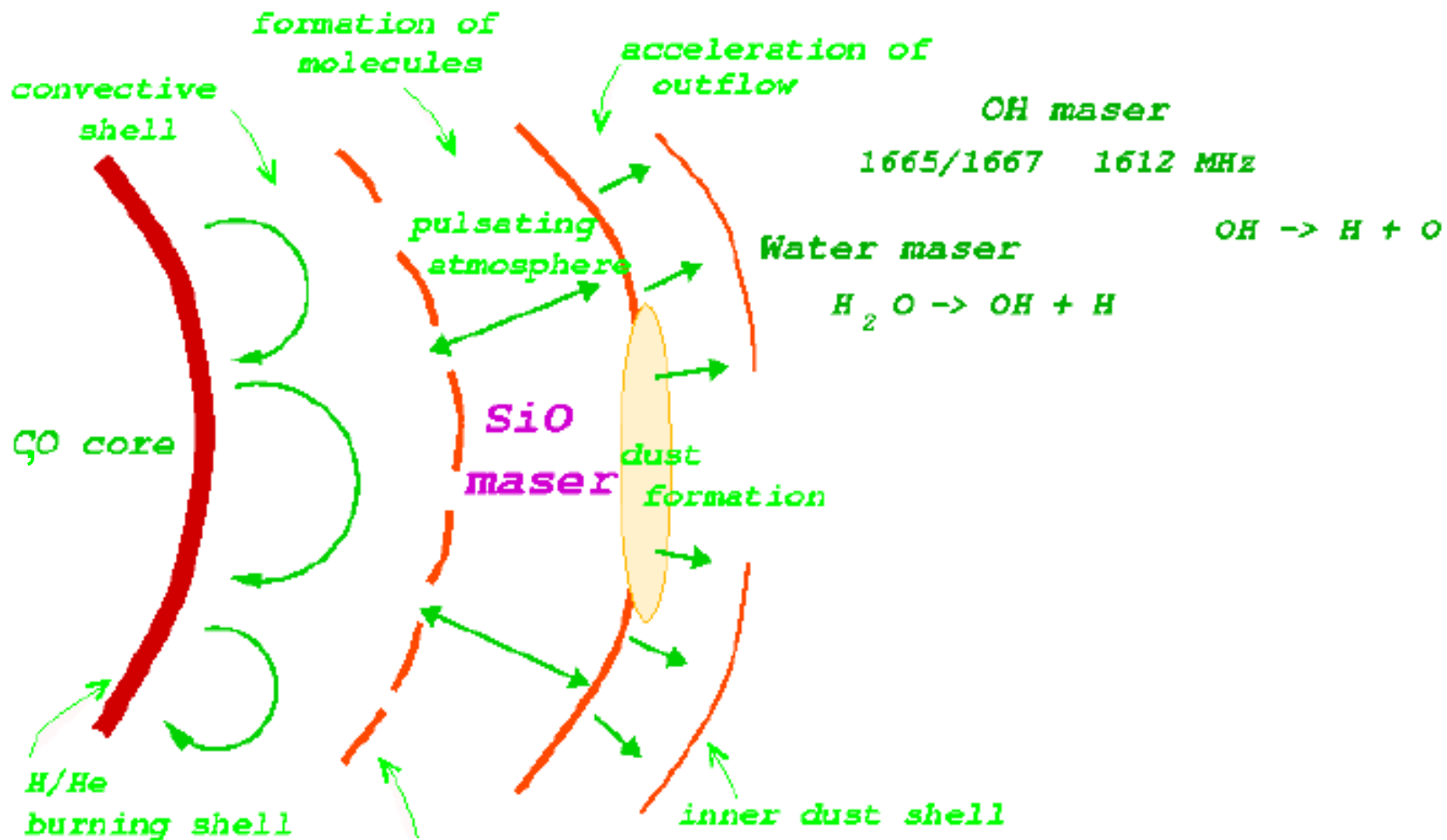


MERLIN – Diamond; SiO 43 GHz VLBA – Boboltz; H₂O 22 GHz MERLIN – Richards & Yates

MASER in NML Cyg



MASER in der AGB-Schale



radio photosphere (Reid & Menten 1997)

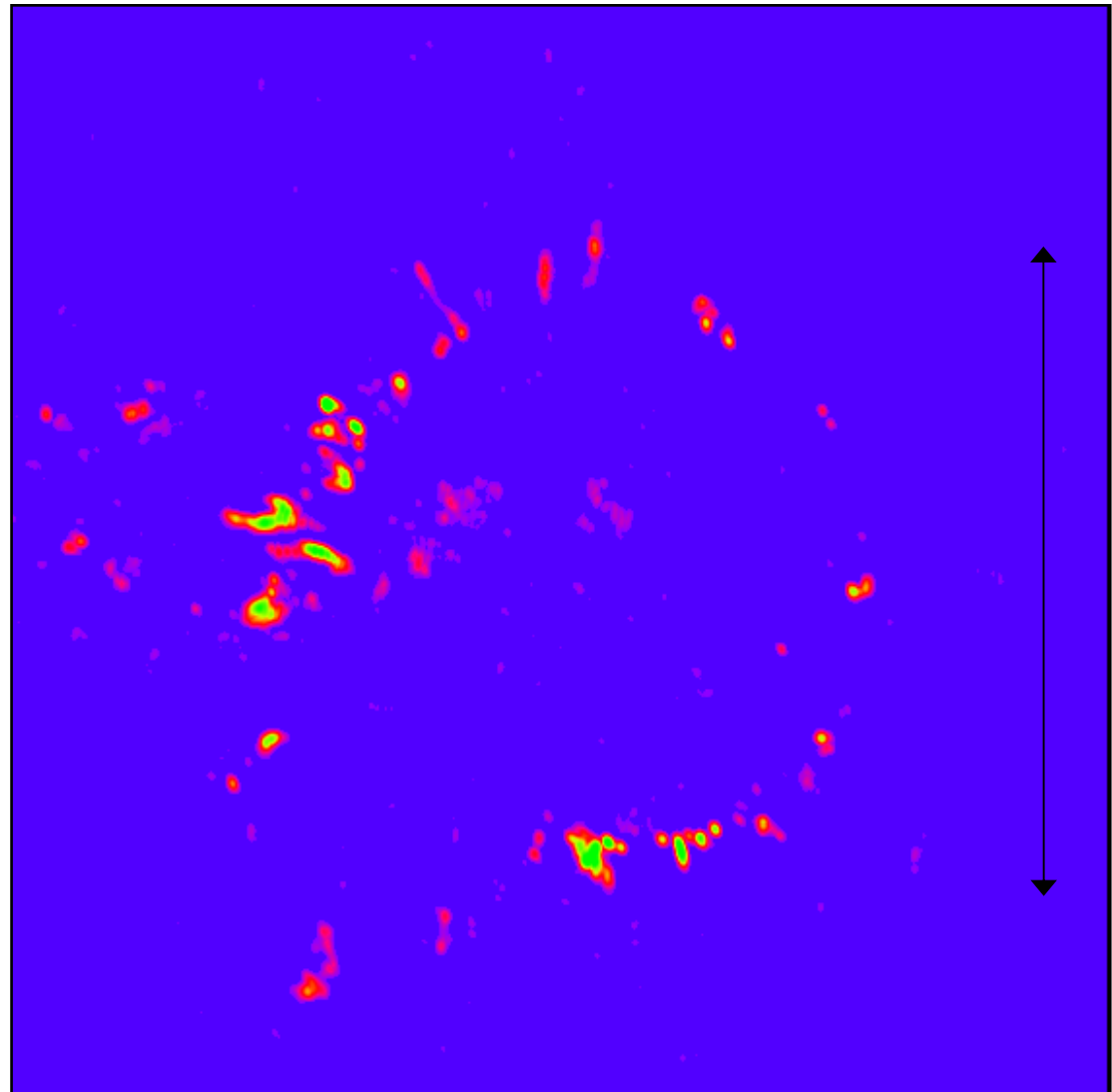
8	13	2R*	14	10R*	100R*	16	1000R*	lg (r) [cm]
8	3.5		3			2		lg (T) [K]
30	18		6 - 9			2 - 5		lg (ρ) [cm ⁻³]

MASER in TX Cam



TX Cam,
Camelopardalis,
SiO, 43 GHz
VLBA

- Detaillierteste Aufnahmen der Aktivität eines Sterns
- 88 Wochen, ein Zyklus (eine Beobachtung alle zwei Wochen)
- Vorw. Ausdehnung, aber: chaotische Bewegung (Magnetfeld, Schockwellen)



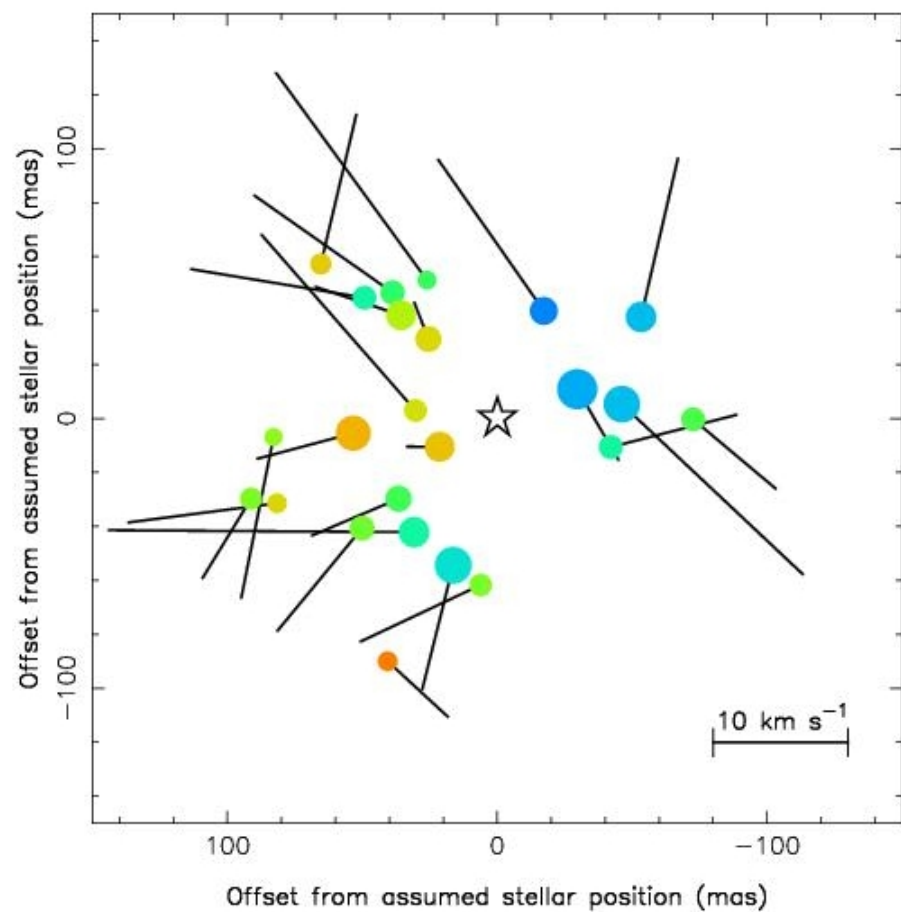
10 AU / 30 mas

Diamond, Kembell (1999)

H₂O - MASER

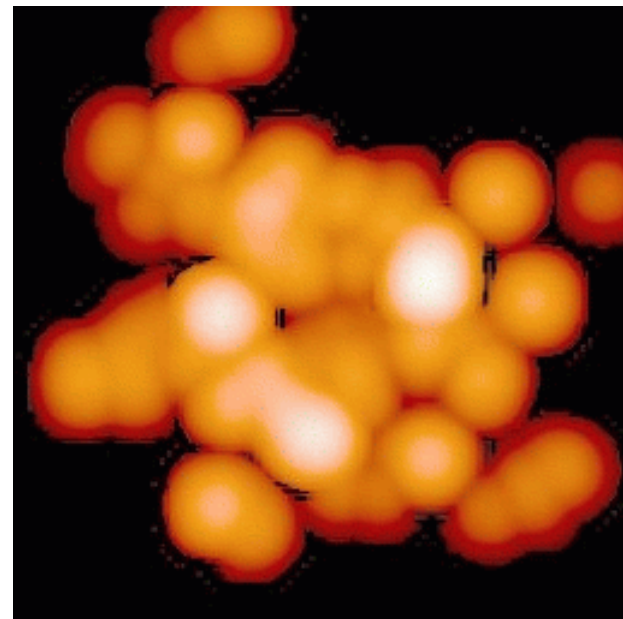


RT Vir H₂O maser proper motions



22 GHz H₂O

~35 AU



RT Vir

6 Wochen beobachtung, MASER-Schale

Richards et al. (1999)

Modell eines AGB-Sterns



Parameters of the model M-Mira

Bowen (1994)

Mass	1 M_{\odot}
Fundamental period	332 days
Stellar radius	244 R_{\odot} (1.7×10^{11} m)
Effective Temperature	3002.2 K
Maximum Inner boundary speed	3.93 km s^{-1}
Mass Loss Rate	$1.8 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$

Resembles O Ceti, R Cas

MASER-Modell



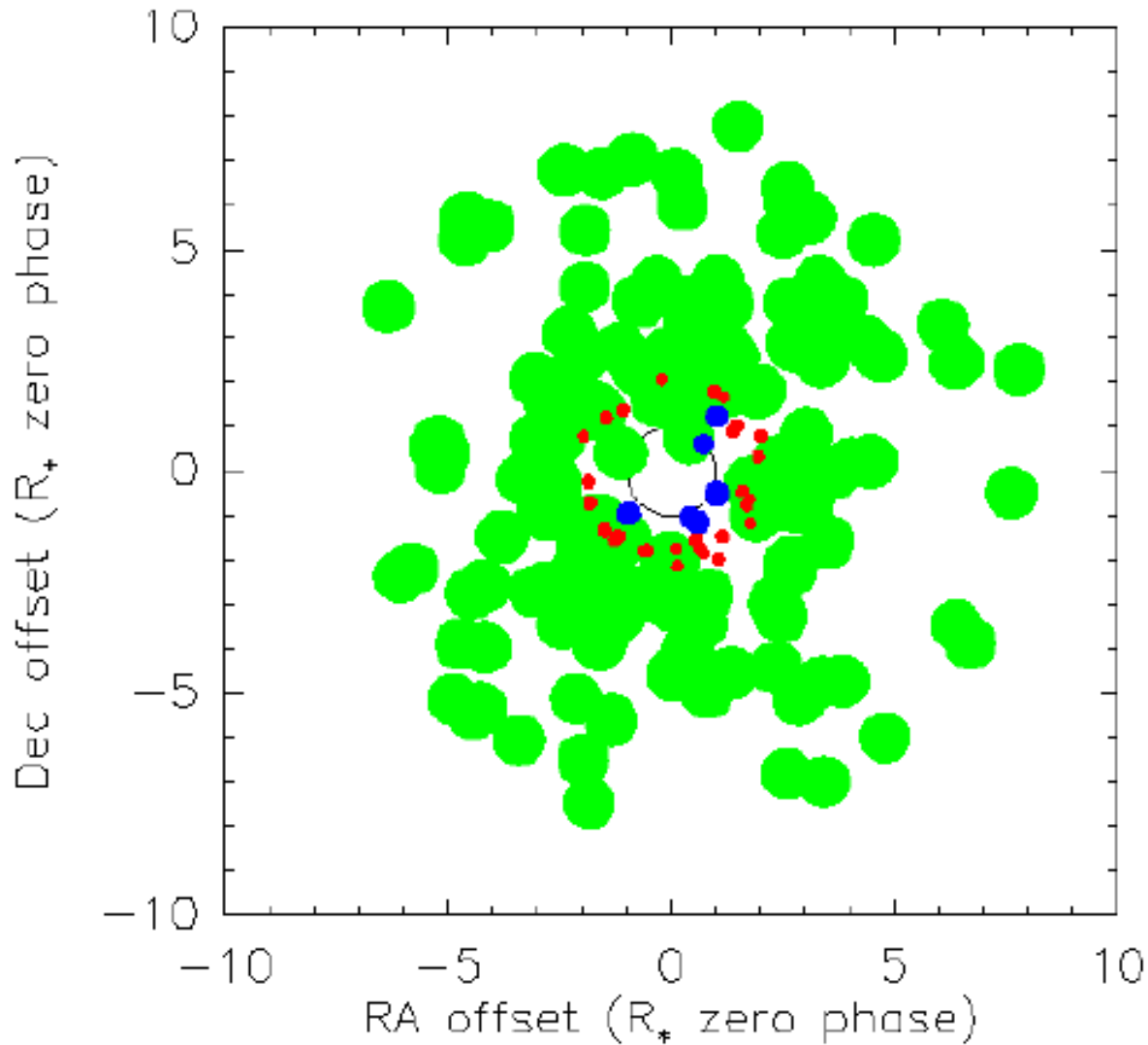
SiO

- 200 rovibrational levels
- Radiative pump: star + external dust
- Collisional pump: **SiO** inelastic collisions with **H₂**
- $n(\text{SiO}) 10^{-5}$
- Propagation distance: 3 Doppler widths
- Rapid Velocity Relaxation

H₂O

- 100 levels each of ortho and para- **H₂O**
- Radiative pump: star and local dust (using spherical dust RT code)
- Collisional pump: **H₂O - H₂**
- $n(\text{H}_2\text{O}) 10^{-4}$
- Propagation: as SiO

MASER-Film



● H_2O 22 GHz

● SiO 43 GHz
 $v=1$

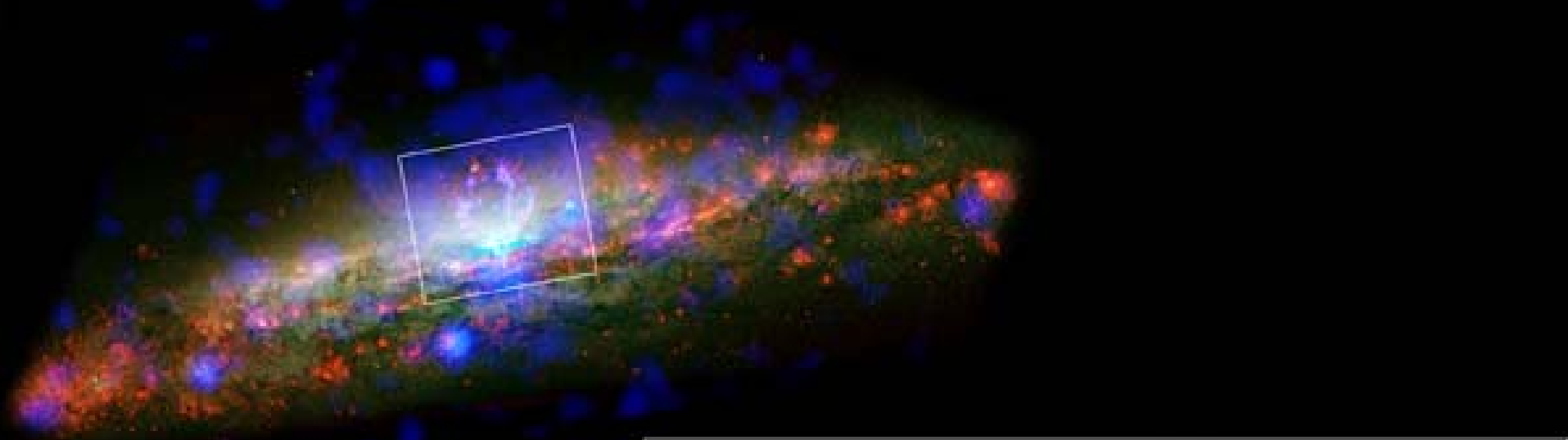
● SiO 43 GHz
 $v=2$

Für jede Art
 $d \propto \log I$

Resultate



- **Beobachtete SiO und Wasser-MASER Übergänge** – z.Bsp. Wasser 22, 183, 321 und 325 GHz. Neue MASER vorhersagt aufgrund von Modell und jetzt beobachtet
- **Ausdehnung der MASER-Emission** – SiO MASER-Ringe lokalisiert, phasenabhängig - SiO 'leuchtet auf' im post-shock Gas
- **Eigenbewegungen reproduziert** – Einfall aber Netto-Ausfluß für SiO, Ausfluß nur für H₂O
- **Intensitäts Variationen ZU GROß** – MASER Lichtkurven | << maser sites result in maser emission



Extragalaktische MASER



Extragalaktische H_2O MASER



- Extragalaktische H_2O MASER zunächst nur in einer Handvoll naher Galaxien gefunden (1979 – 1986).
- Braatz et al. (1995) finden: die meisten extragalaktischen H_2O MASER in Aktiven Galaxienkernen.
 - Durchmusterung mit $\sim 5\%$ Detektionsrate.
 - Problem: Empfindlichkeit nicht hoch genug & Variabilität

Extragalaktische MASER

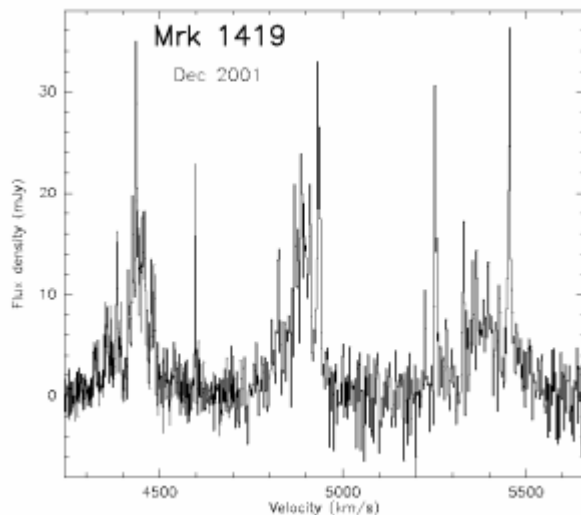


- **OH** (18cm) und **H₂O**(1.35cm)
- Dichtes molekulares Gas in den inneren pc in AGN (**H₂O**-Megamaser)
 - Am häufigsten in Seyfert2 oder LINER, Spiral- und einigen elliptische Galaxien
 - VLBI -> NGC 4258, erste Evidenz für turbulente, dünne Kepler-Akkretionsscheibe, indirekte Evidenz für SL, geometrische Entfernungsbestimmung mit hoher Präzision
 - Auch in kernnahen Jets
- Innerhalb der zentralen 100pc von starbursts (**OH**-Megamaser)
 - In ultraleuchtkräftigen IR-Galaxien (ULIRG)
 - **OH** Leuchtkraft steigt mit der IR-Leuchtkraft

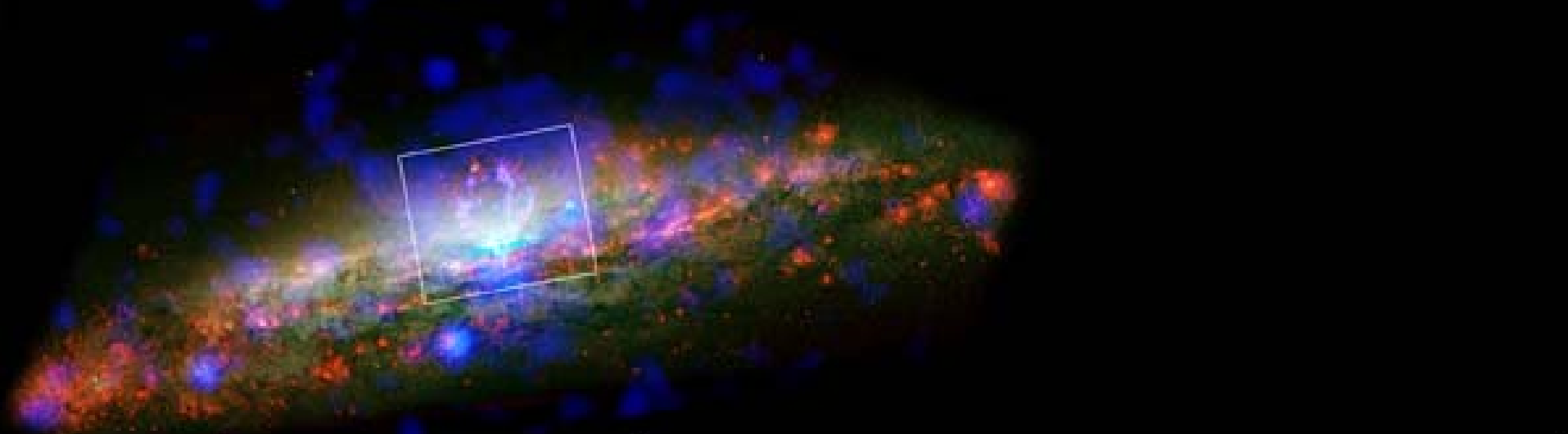
Extragalaktische MASER



- 22 GHz H₂O: Akkretionsscheiben in AGN untersuchen, um
 - Distanzen zu den Galaxien zu bestimmen
 - WW zwischen kernnahen Jets und dichtem molekularem Material zu untersuchen
 - Eigenbewegungen der MASER Spots in der Lokalen Gruppe zu messen



Typischer Akkretionsscheiben-MASER

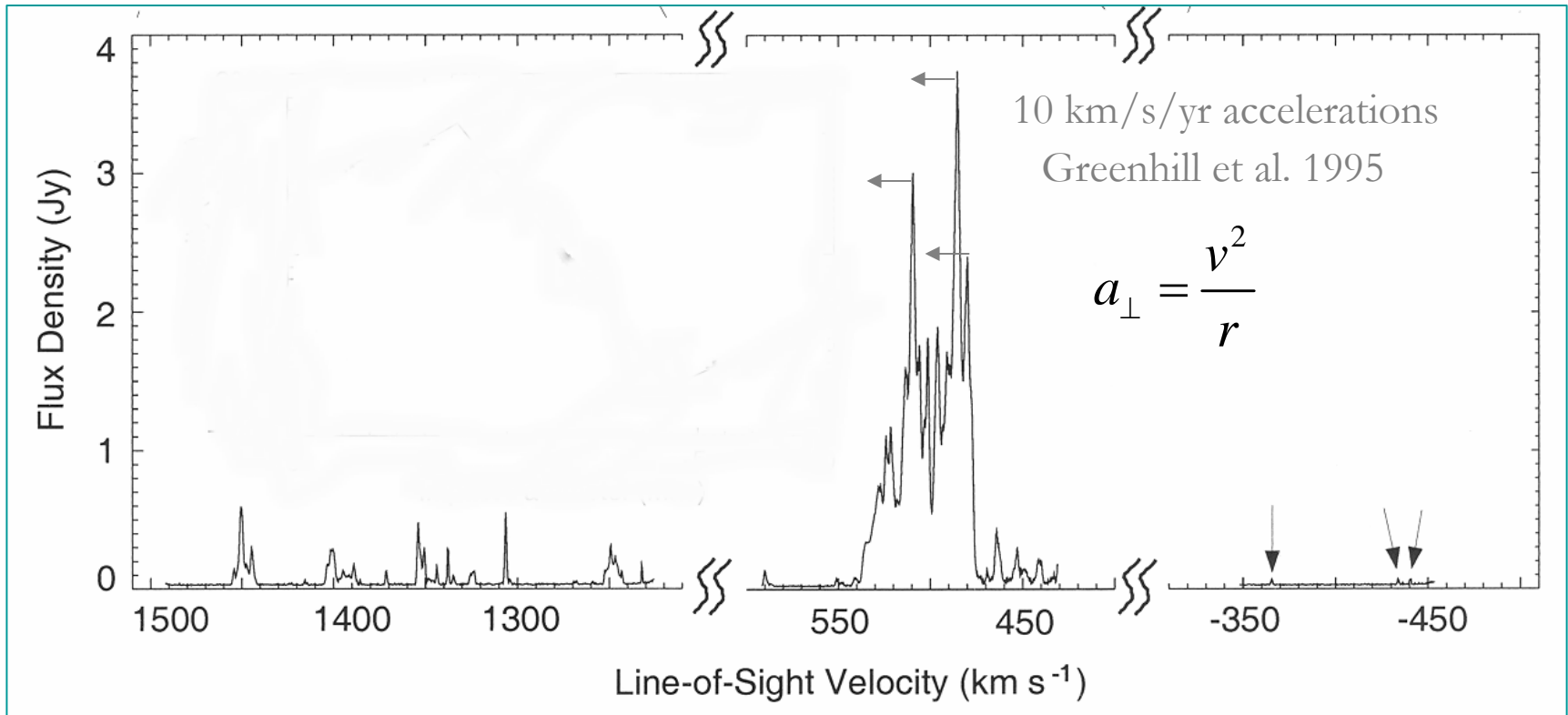


Extragalaktische MASER

NGC 4258

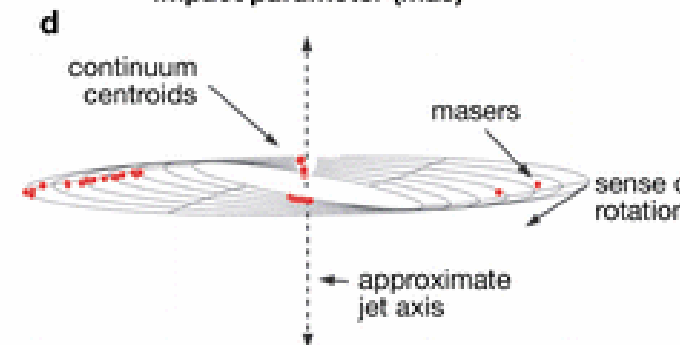
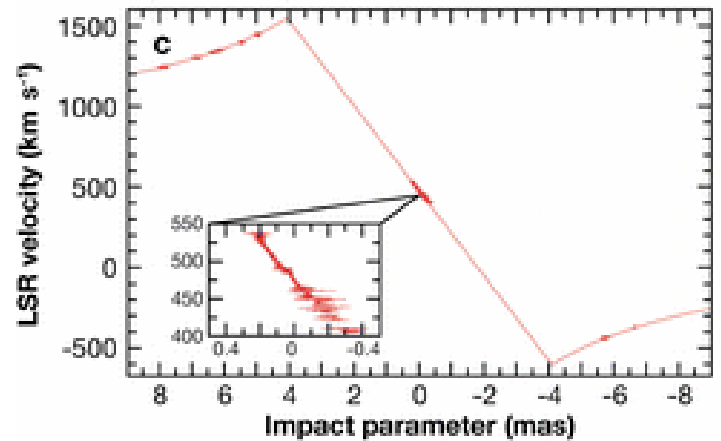
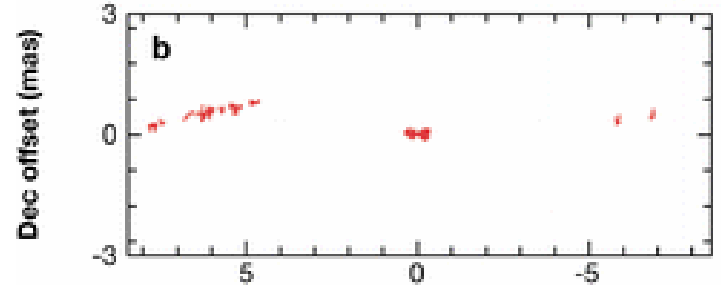
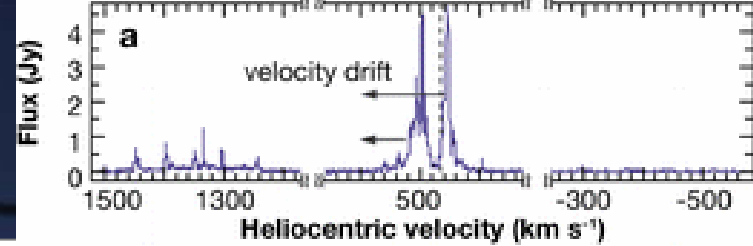
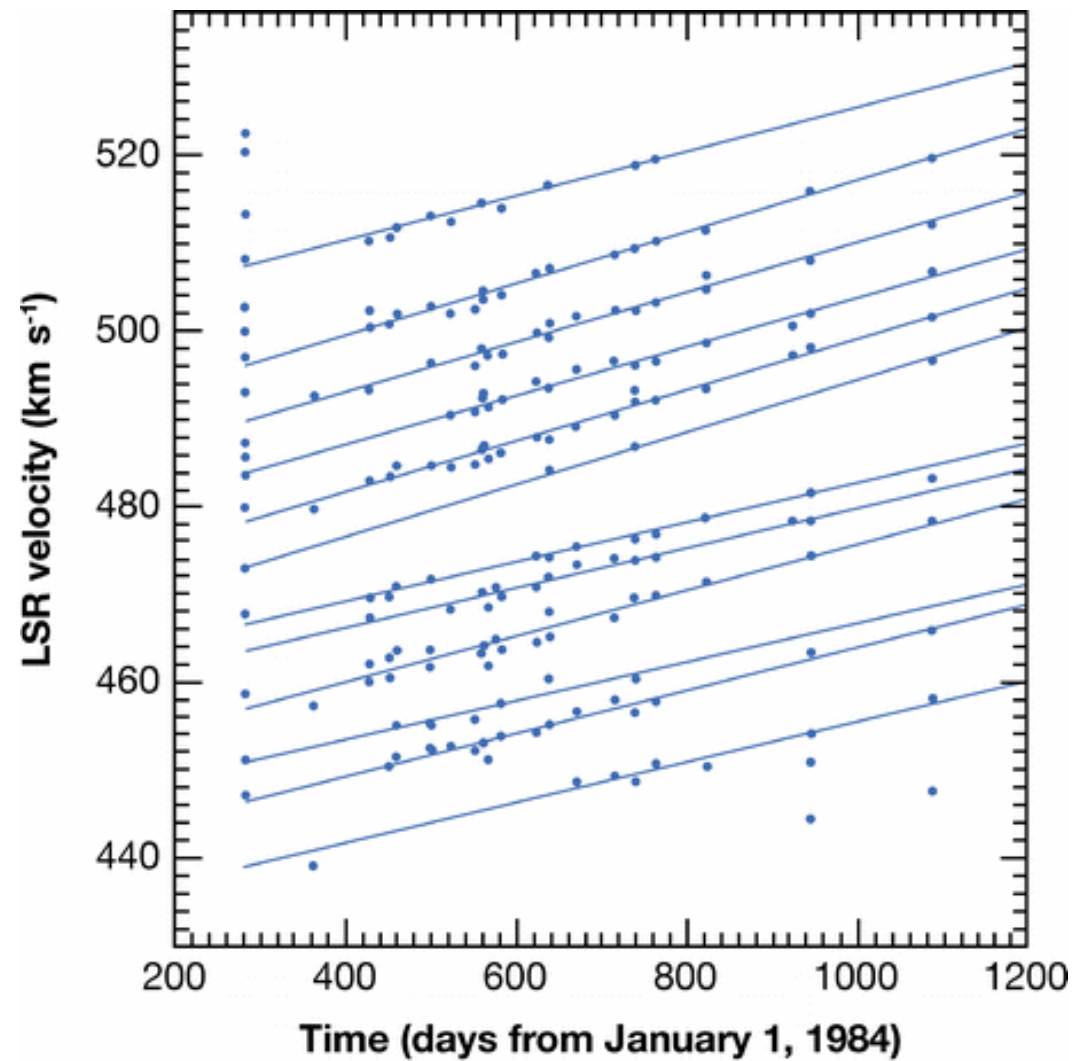


NGC 4258

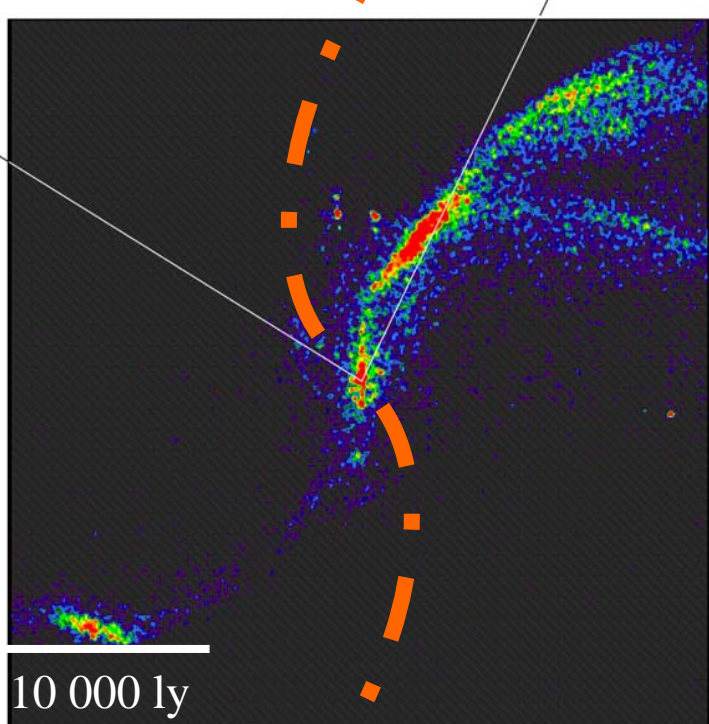
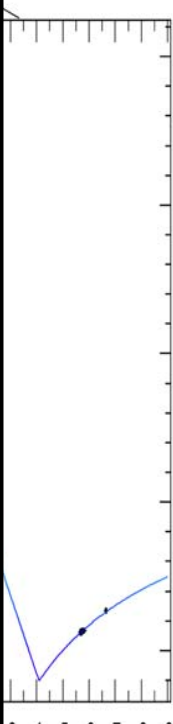
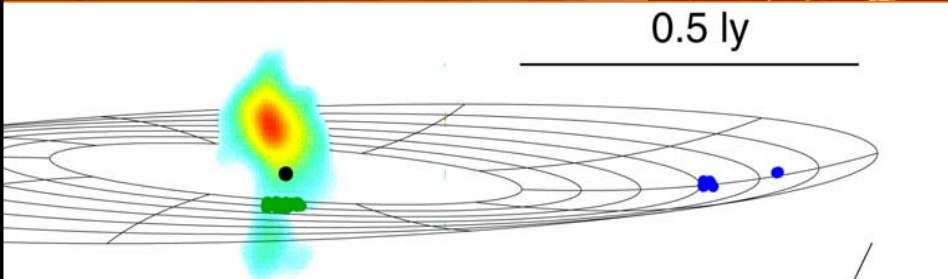
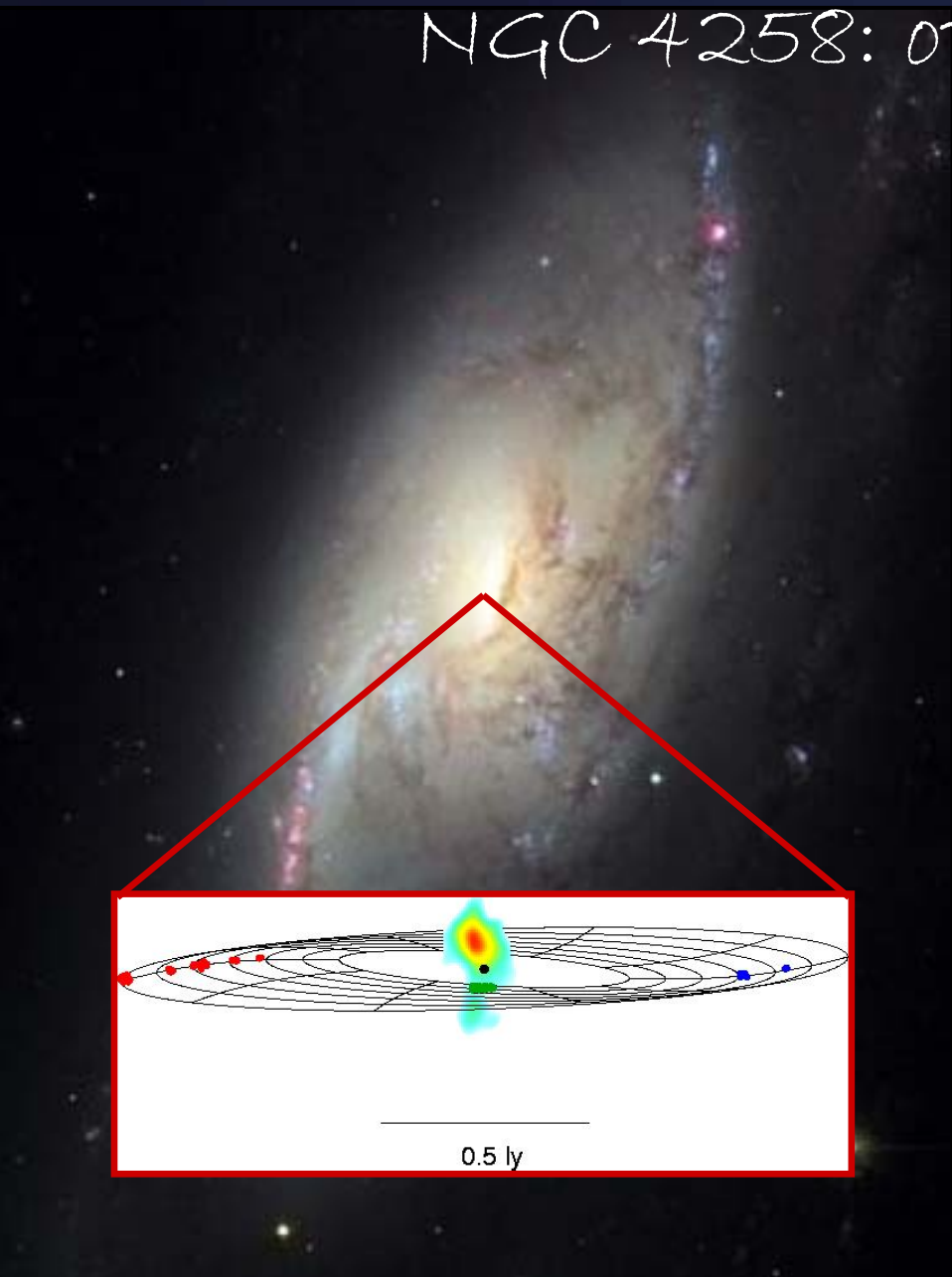


Moran et al. 2000

NGC 4258



NGC 4258: optisch



Credit: Slotnick, Slotnick & Block

radius (kpc) 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0 -1 -2 -3 -4 -5 -6 -7 -8 -9

10 000 ly

Entfernungsbestimmung mit NGC 4258



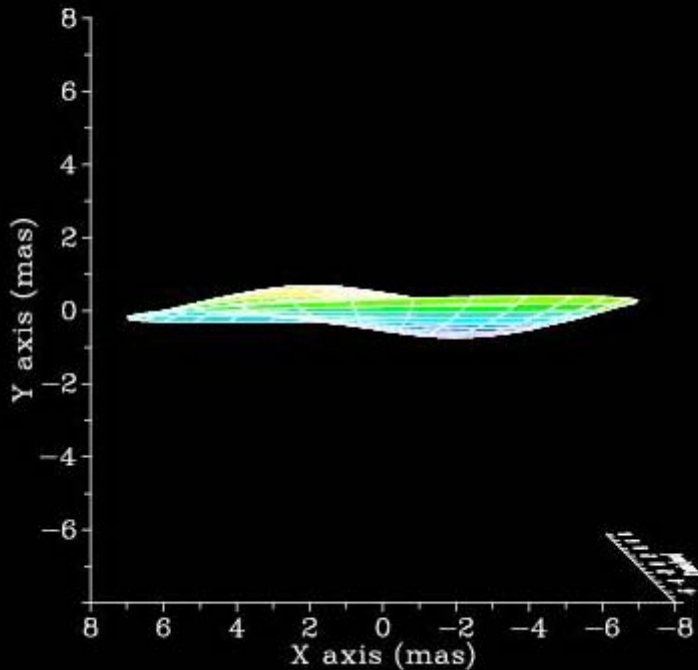
- Aus Geschwindigkeitsdifferenz zw. hoher Geschwindigkeit und der systemischen Geschw. kann die Rotationsgeschw. bestimmt werden
- Drift (zentripetale Beschleunigung) des systemischen MASERS in Kombination mit V_{rot} ergibt den Radius R des Torus
- R und V_{rot} ergeben die Masse des eingeschlossenen supermassiven Objekts
- Nur die Entfernungsbestimmung (um lineare Skalen mit Winkelgrößen zu vergleichen) erfordert interferometrische Messungen

„Quantensprung auf der kosmischen Entfernungsleiter“



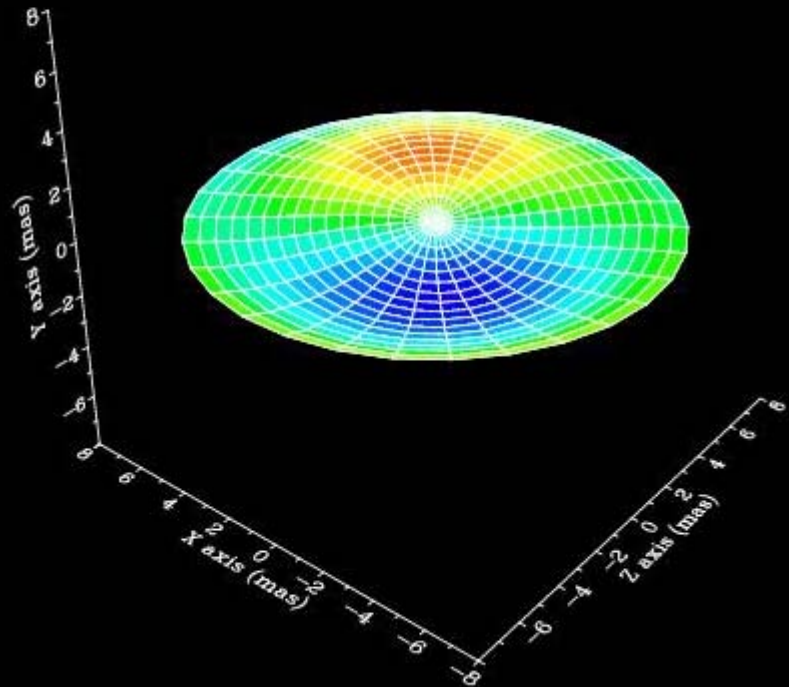
- Systematische Drift der H_2O -Maser, pro Jahr um 9,3 km/s beschleunigt, außerdem mit 900 km/s auf die Erde zu oder von der Erde weggerichtet
- Keplerbahnen, 0.1 Millibogensekunden in dreijähriger Messkampagne; inzwischen 31.5 $\mu\text{as}/\text{Jahr}$
- **Abstand Erde/Galaxie NGC4258 (Sternbild Jagdhunde) mit 23.5 Mio Lj bestimmt**
- **Kein Eichen an bekannten, galaktischen Objekten notwendig**
- **Direkt die Bewegung in einer Akkretionsscheibe um den aktiven Kern einer Galaxie beobachtet**

Observer View
NGC 4258

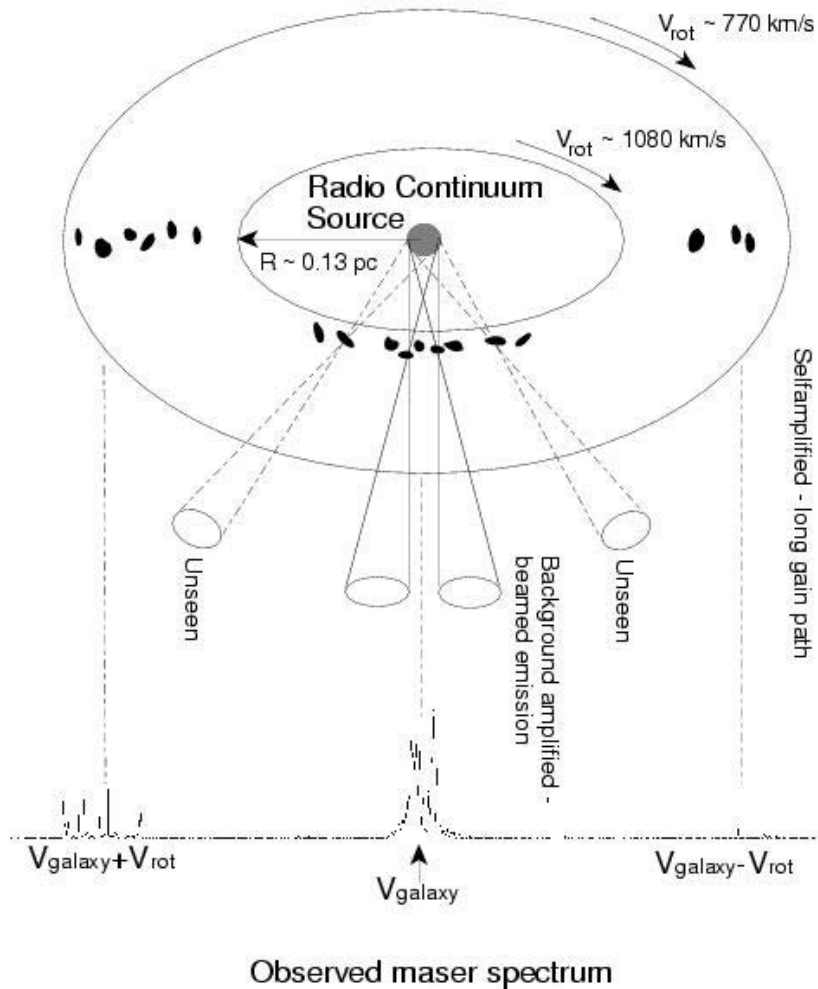


- **Systemische MASER Emission aus "bowl" auf Vorderseite der Scheibe**

The "Bowl"
NGC 4258



Zusammenfassung: NGC 4258



- Innerer Radius: 0.13 pc
- Äußerer Radius: 0.26 pc
- Inklinations-Winkel: 83 Grad
- Gastemperatur $< 1000 \text{ K}$, $> 300 \text{ K}$
- Gasdichte $\sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$
- Entfernung: $7.2 \pm 0.5 \text{ Mpc}$ (präziseste Distanzmessung bislang)

Andere MegamASER



- Der totale Fehler in der Entfernung zu NGC 4258 konnte reduziert werden von 7% auf 5.5%.
- Weiter Distanzmessungen möglich?
- Bislang 10 bekannte leuchtkräftige H₂O MASER kartiert -> keiner liefert ähnlich überzeugendes Bild wie NGC 4258
- Einige Beispiele nachfolgend



Extragalaktische MASER

verschiedene
Arten von
 H_2O Megamasern

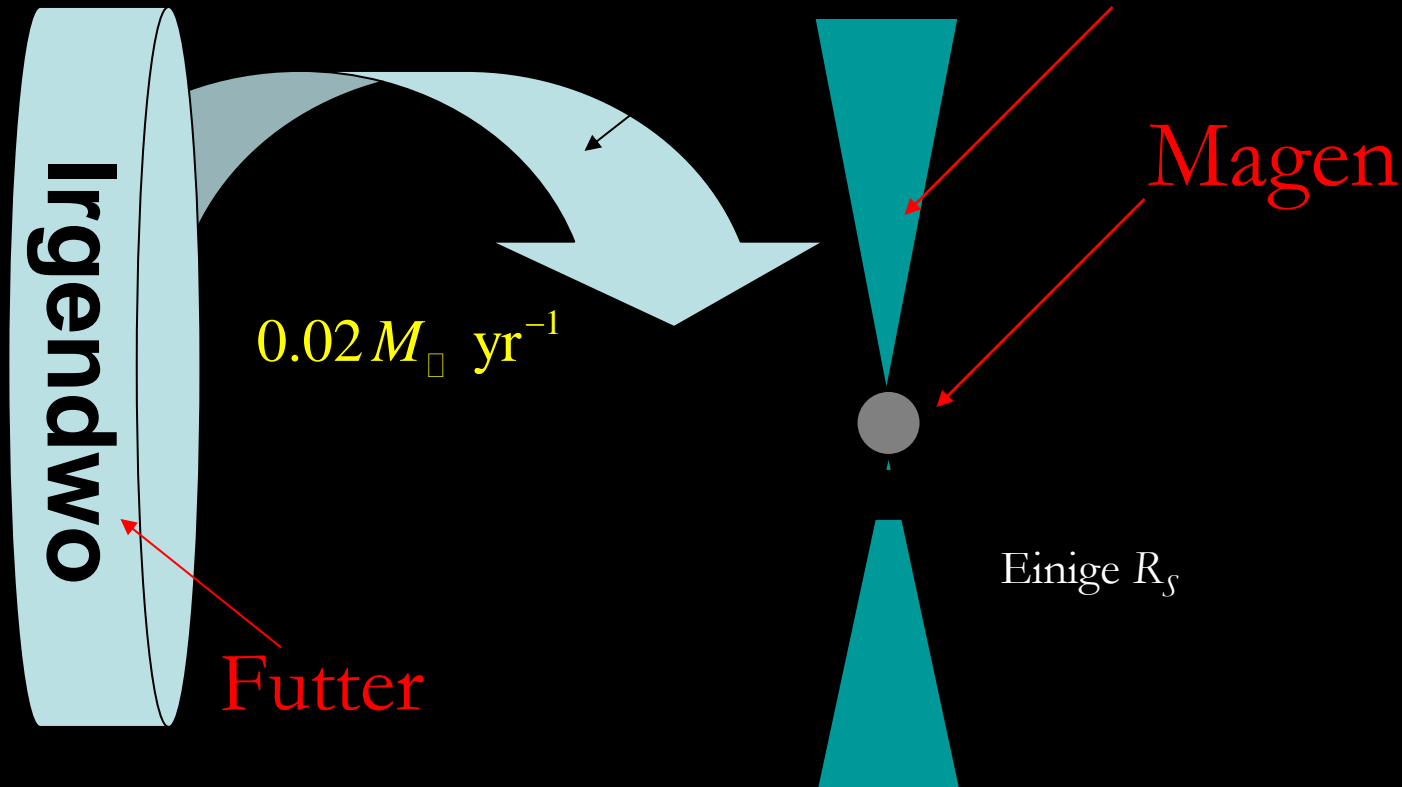
Ein SL füttern



Einen Seyfert-Kern
füttern erfordert:

$10^6 M_{\odot}$ cold, dense gas

Wie wird der
Drehimpuls
abgeführt? ???

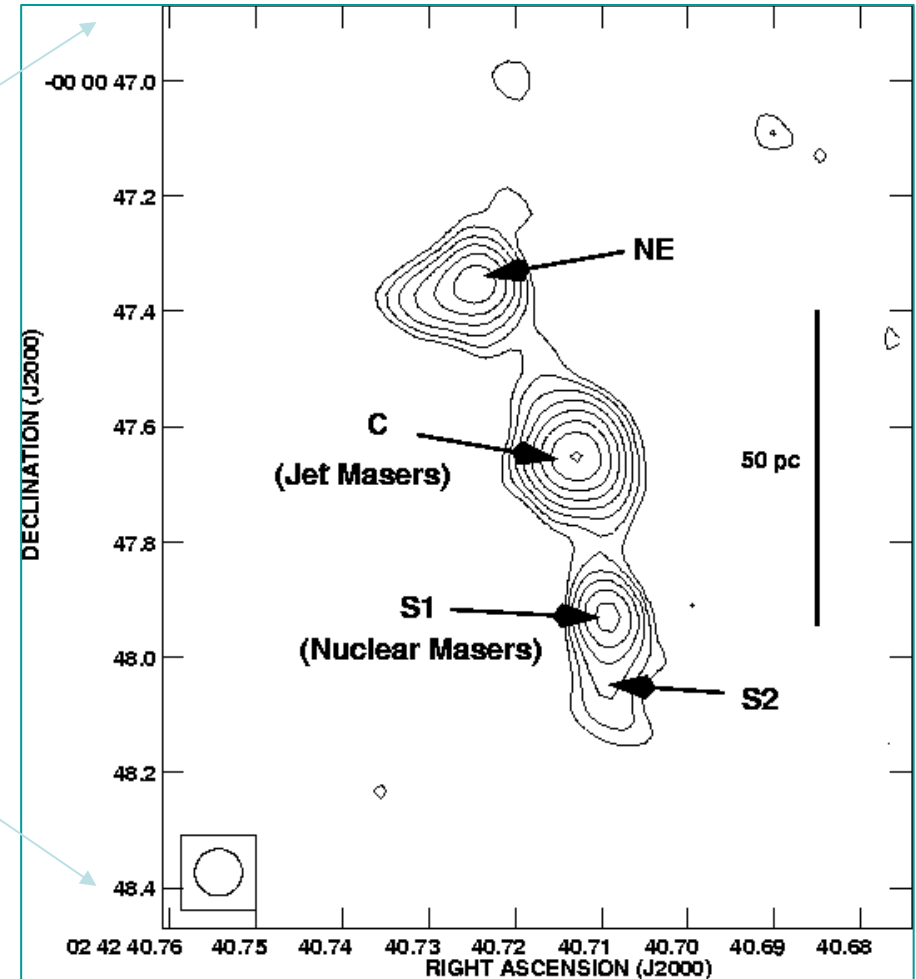
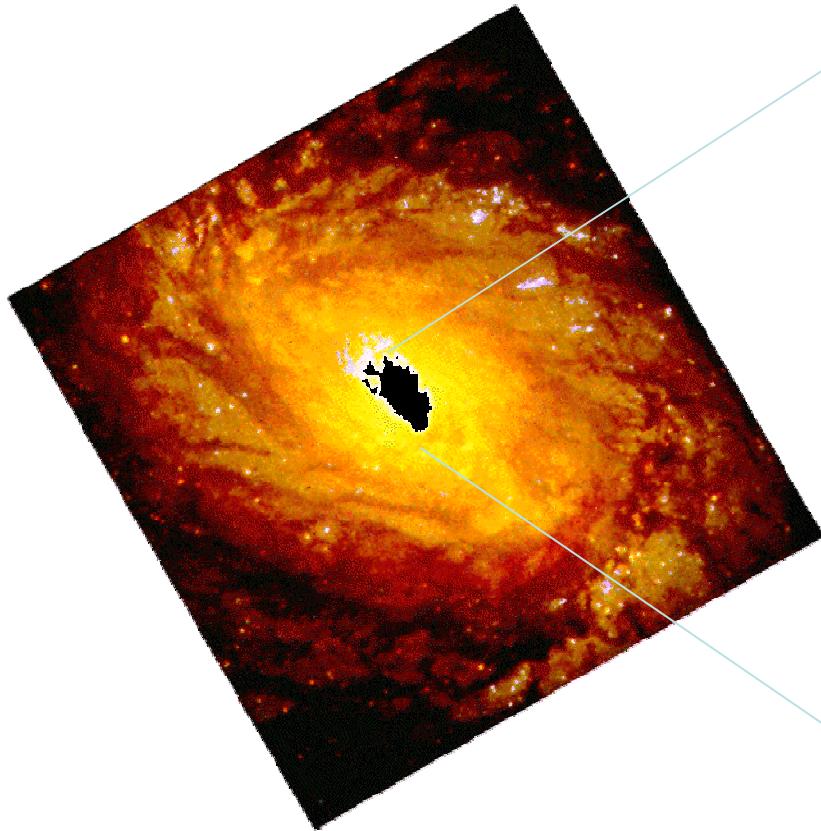




Extragalaktische MASER

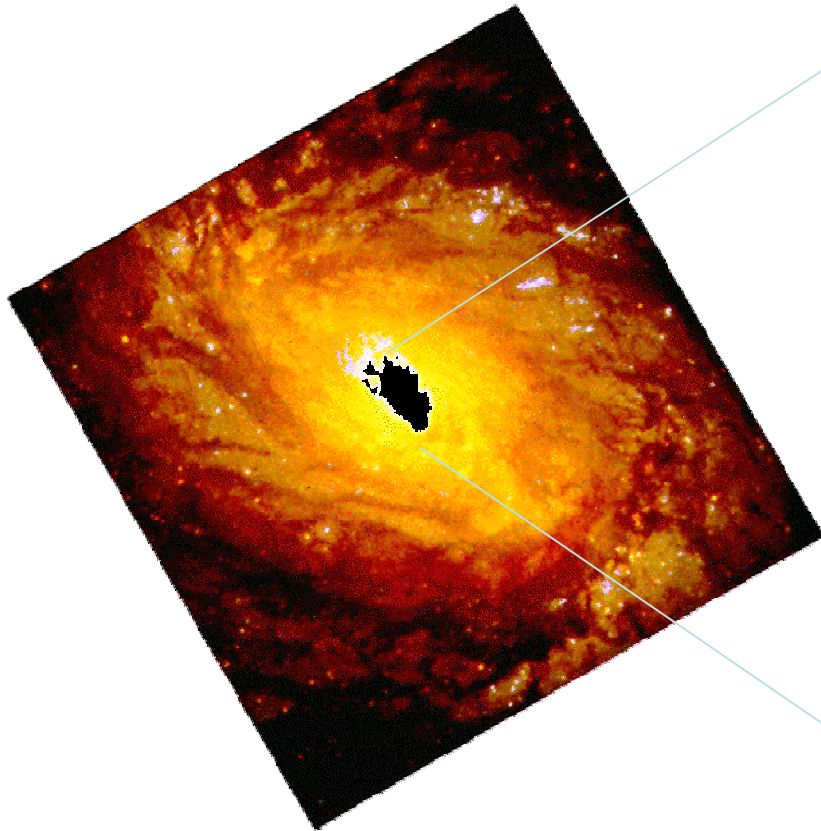
NGC 1068

NGC 1068: zirkum-nuklear oder zirkum-stellar?



Gallimore et al. 1996; 2000

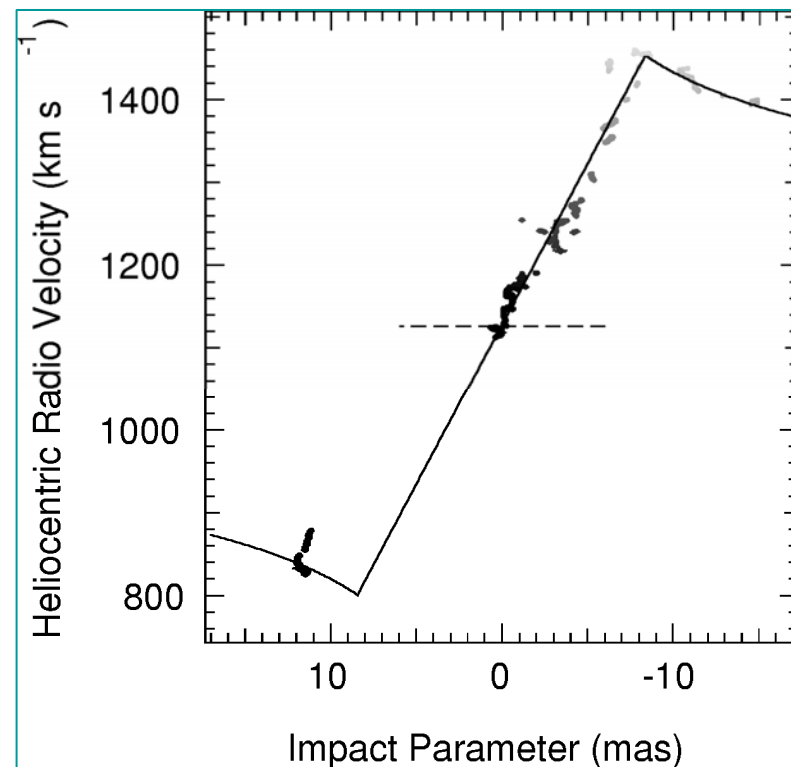
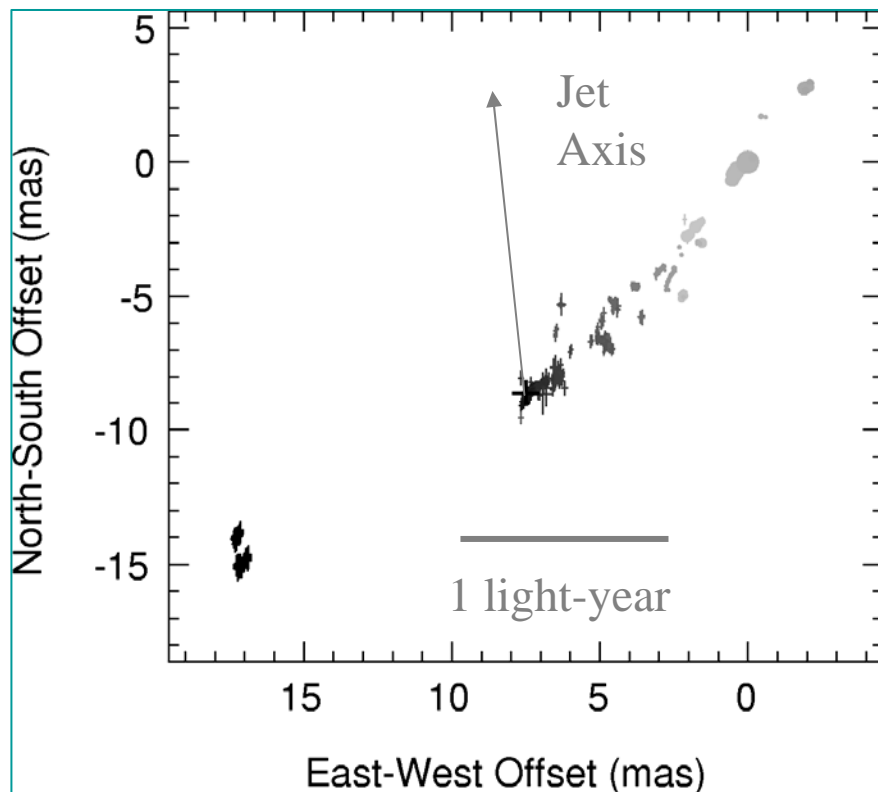
NGC 1068: zirkum-nuklear oder zirkum-stellar?



- Prototyp der Seyfert2 Galaxien
- Spektrallinien aus BLR (in reflektiertem Licht)-> nuklearer Torus; WasserMASER sind zirkum-nuklear statt zirkum-stellar
- Hauptteil der MASER-Emission aus dem Kern
- Weiterer MASER assoziiert mit Radiokomponente 20 pc vom Kern entfernt: erster Hinweis auf Jet/MASER-Beziehung
- „sub-Keplerian“ Rotationskurve, zirkumnukleare Scheibe oder Torus, Masse $> 10^7$ Sonnenmassen

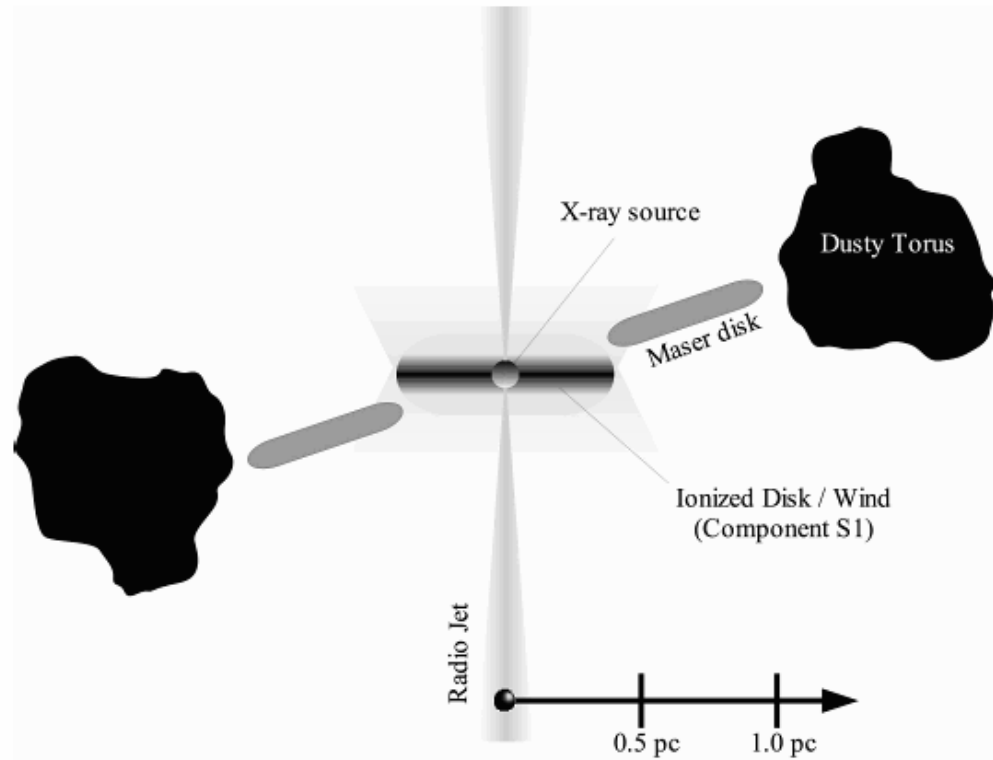
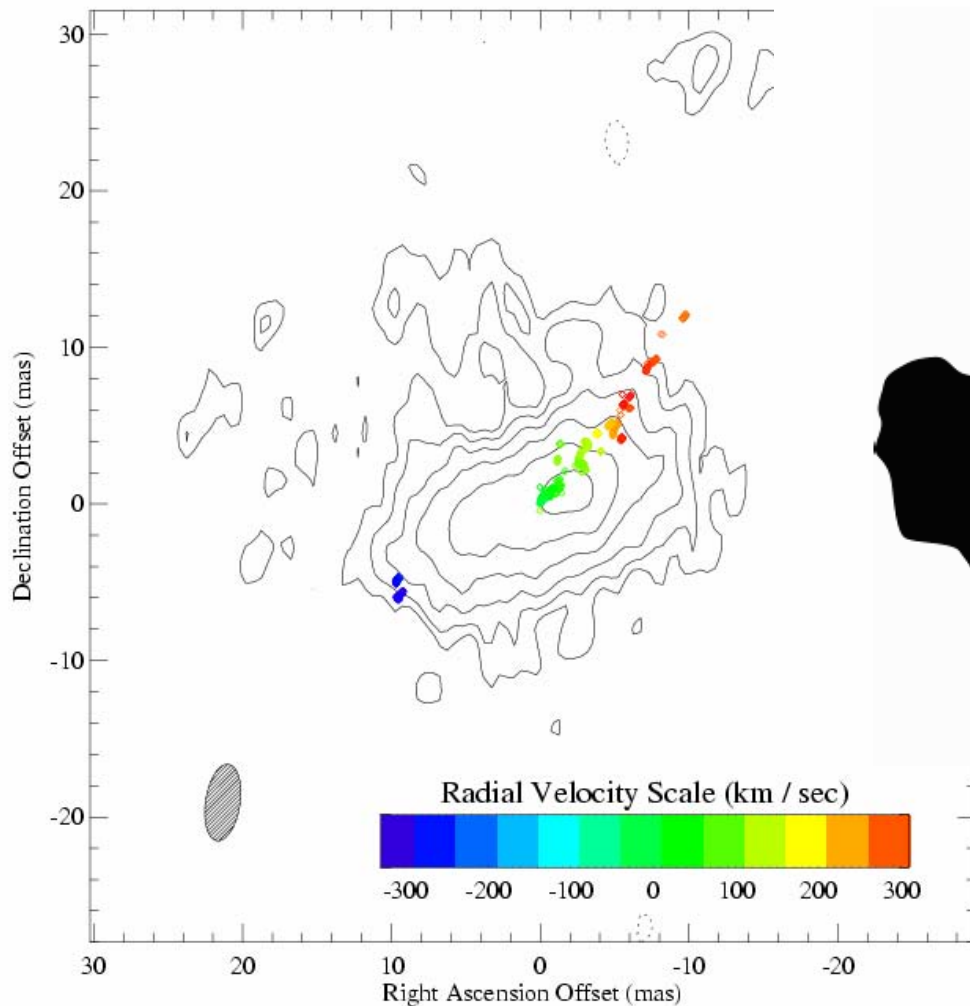
Gallimore et al. 1996; 2000

NGC 1068



Greenhill & Gwinn 1997

NGC 1068: Gekrümmte Scheibe oder Torus?





Extragalaktische MASER

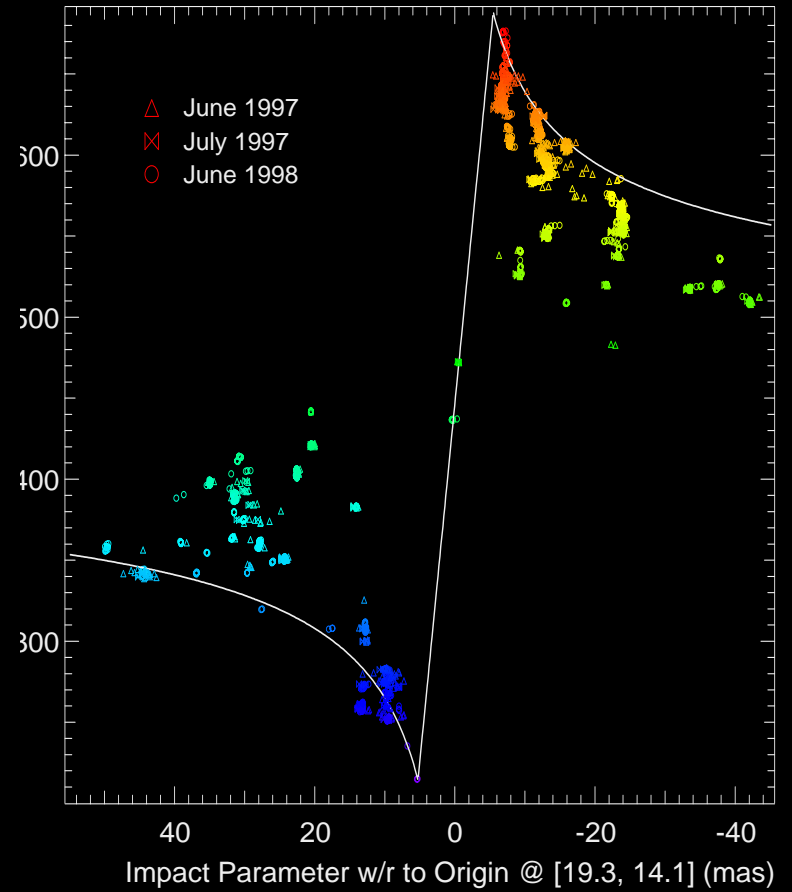
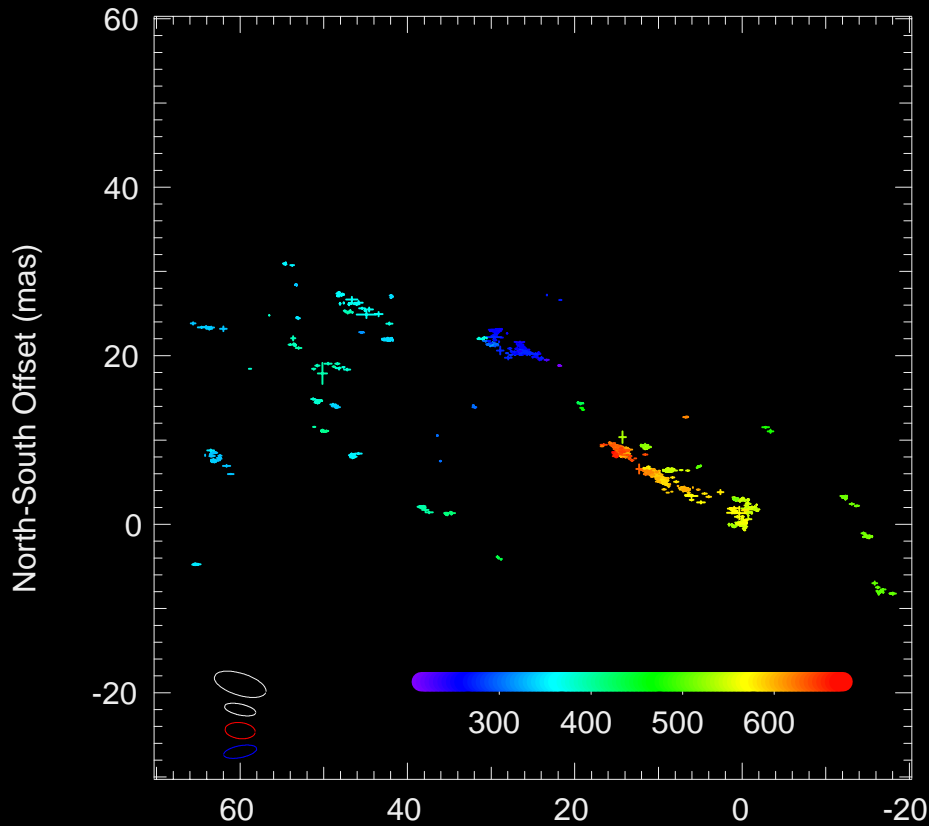
Circinus

Circinus

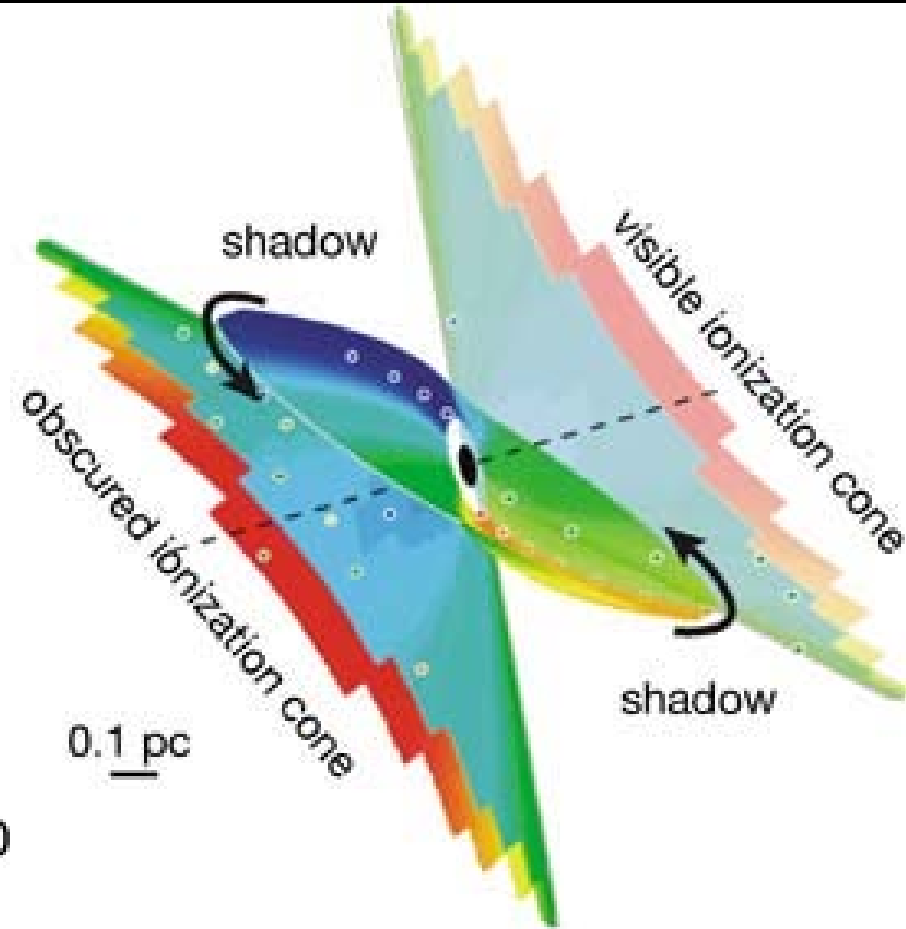
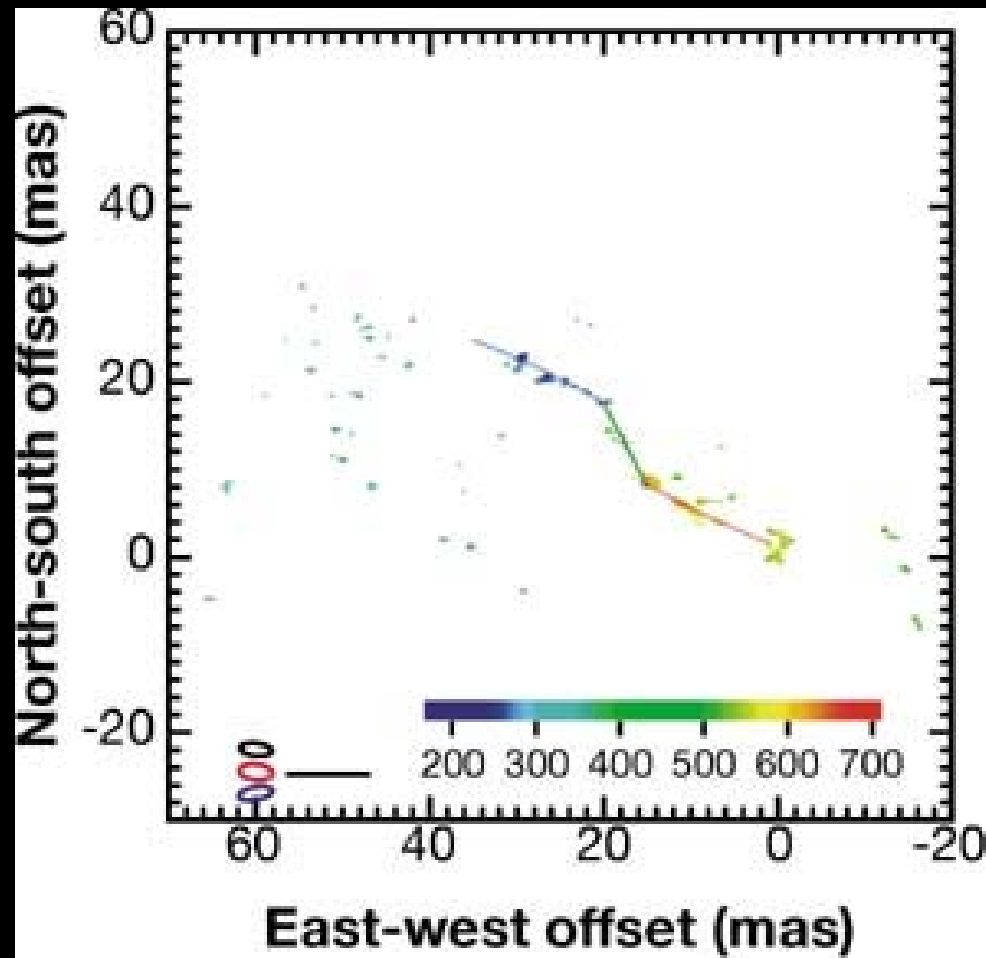


- Eine der nächsten Seyfert 2 Galaxien (4.2 Mpc)
- Extrem variable MASER-Emission: auf Zeitskalen von Minuten (möglicherweise interstellare diffraktive Szintillation; daraus Größe der MASER-Komponenten ableiten)
- MASER-Emission entlang S-förmiger Kurve
- MASER: in „edge-on warped disk“ (0.1 pc-0.4 pc) und weiträumiger Ausfluß bis 1 pc vom Scheibenzentrum

CIRCINUS



Circinus



Lo, KY. 2005

Annu. Rev. Astron. Astrophys. 43: 625–76



Extragalaktische MASER

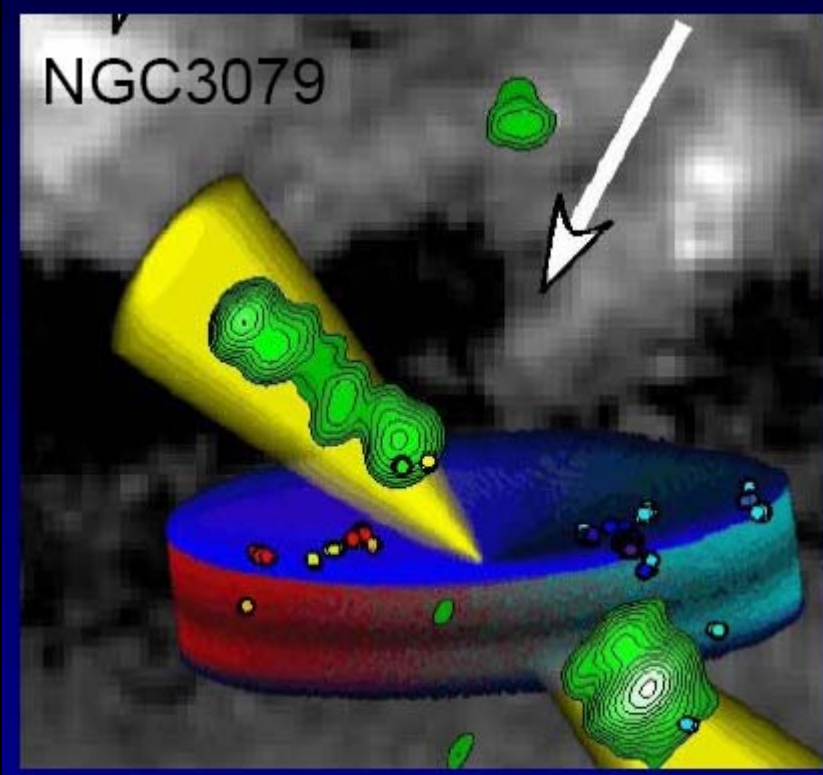
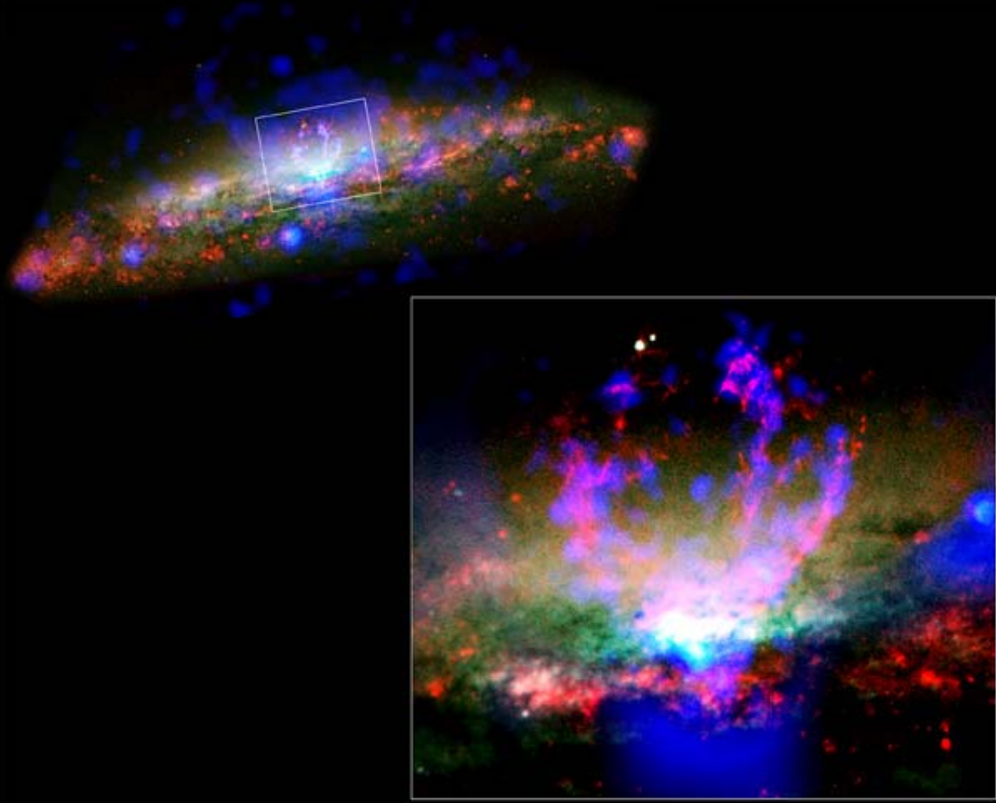
NGC 3079

NGC 3079



- Edge-on SBc Galaxie
- Kontinuumquelle ist zusammen gesetzt aus 3 kolinearen Komponenten (möglicherweise Teil eines Jets)
- Großteil der MASER-Emission stammt aus „Klumpen“ Größe $\sim 0.05\text{pc}$
- Restliche MASER-Emission über $\sim 2\text{pc}$ verteilt

NGC 3079



Kondratko et al. 05
Also Trotter et al. 98
Sawada-Satoh et al. 00

- CHANDRA + HST, Pferdehuf-förmig, warmes (10 000 Grad Celsius) und heißes (einige 10 Mio. Grad Celsius), Gas-Superwind
- Superwinde: erzeugt durch zentrales SL oder durch Supernova-Ausbruch



Extragalaktische MASER

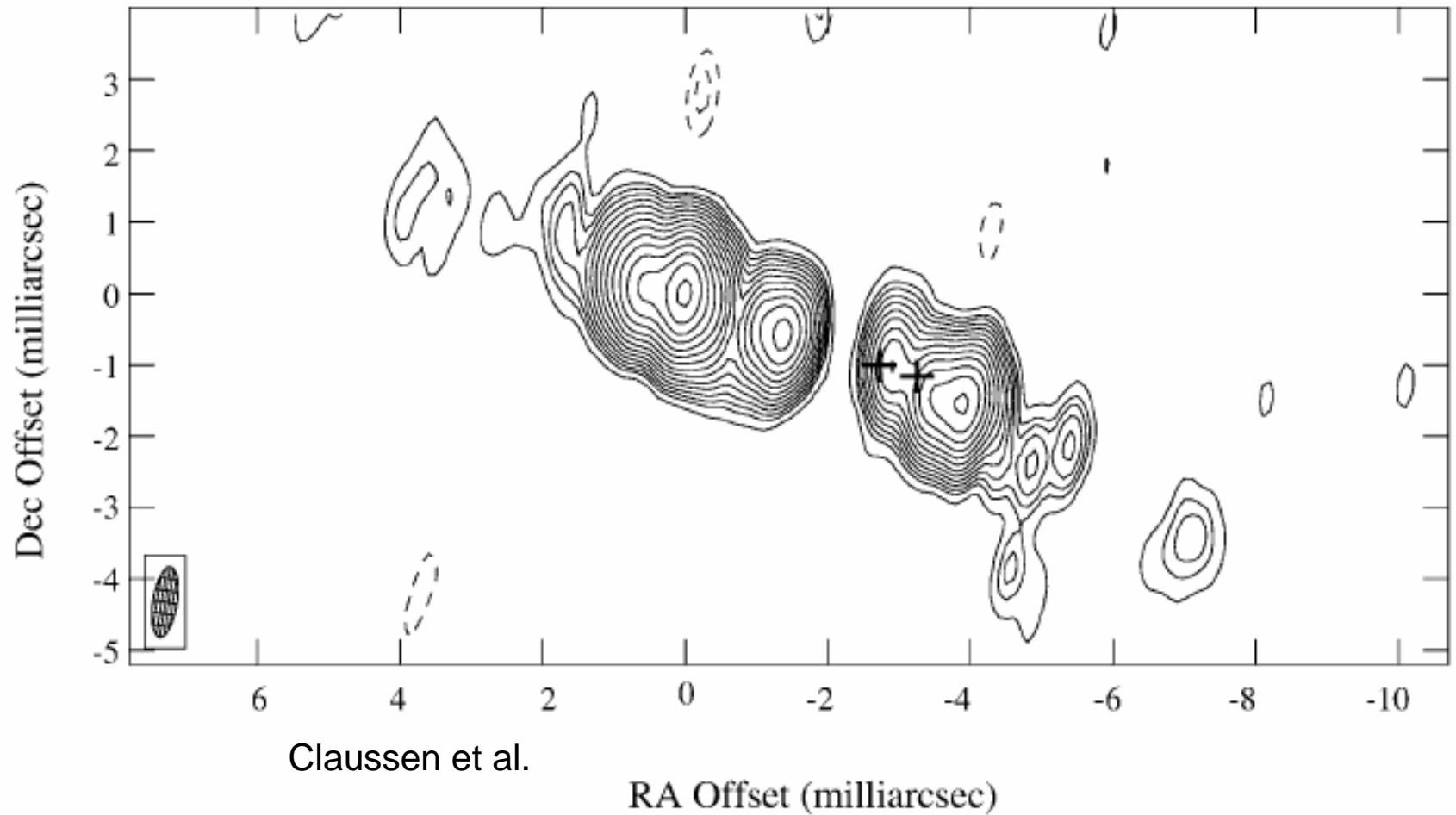
NGC 1052

NGC 1052



- Elliptische Galaxie mit LINER-Charakteristiken
- Leuchtkräftige WasserMASER nur in zwei elliptischen Galaxien; eine ist NGC 1052
- Komplizierte lineare Struktur mit zumindest 7 Komponenten
- MASER-Emission entlang eines Radiojets
- Wahrer Kern ist vermutlich in der Lücke der 22 GHz Radio-Kontinuum Verteilung; Lücke aufgrund von Vordergrund-Absorption (kaltes dichtes Plasma in zirkumnuklearen Torus)

NGC 1052: VLBI MASER



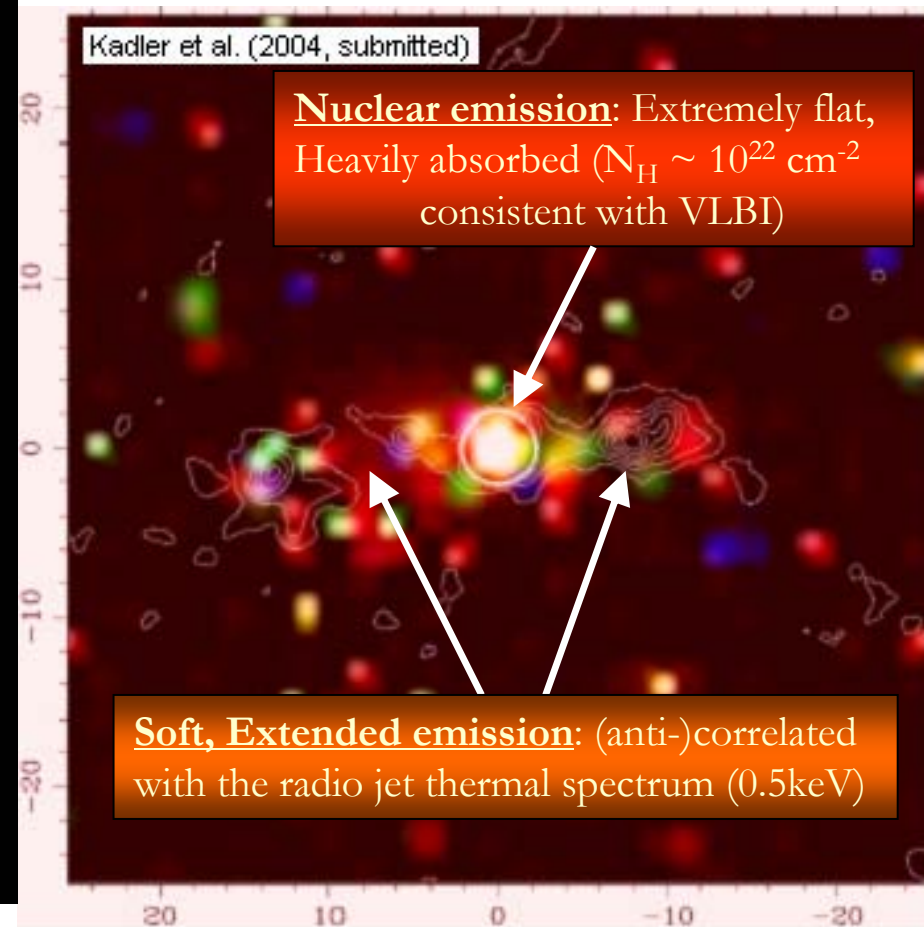
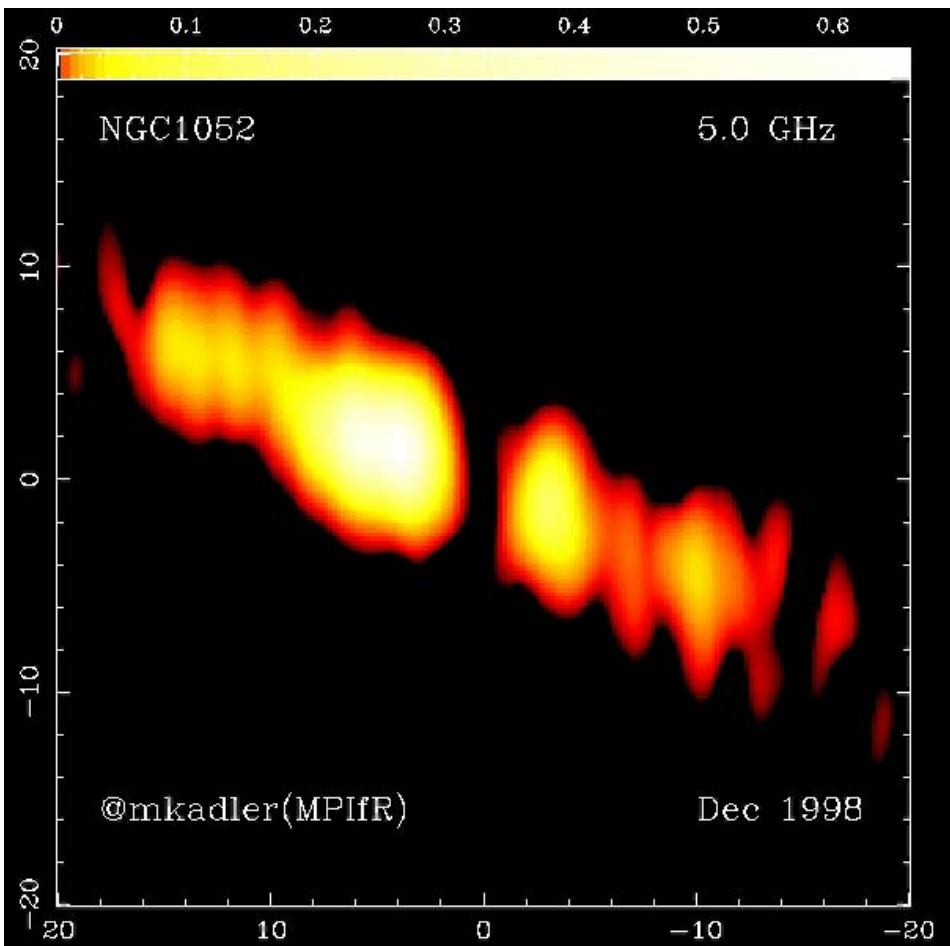
Verdeckender Torus in NGC1052 bei Radio und Röntgen-Frequenzen



Dense circumnuclear absorber obscuring the central engine.

VLBI Struktur (5 – 43 GHz)

CHANDRA (0.1-3 keV)





Extragalaktische MASER

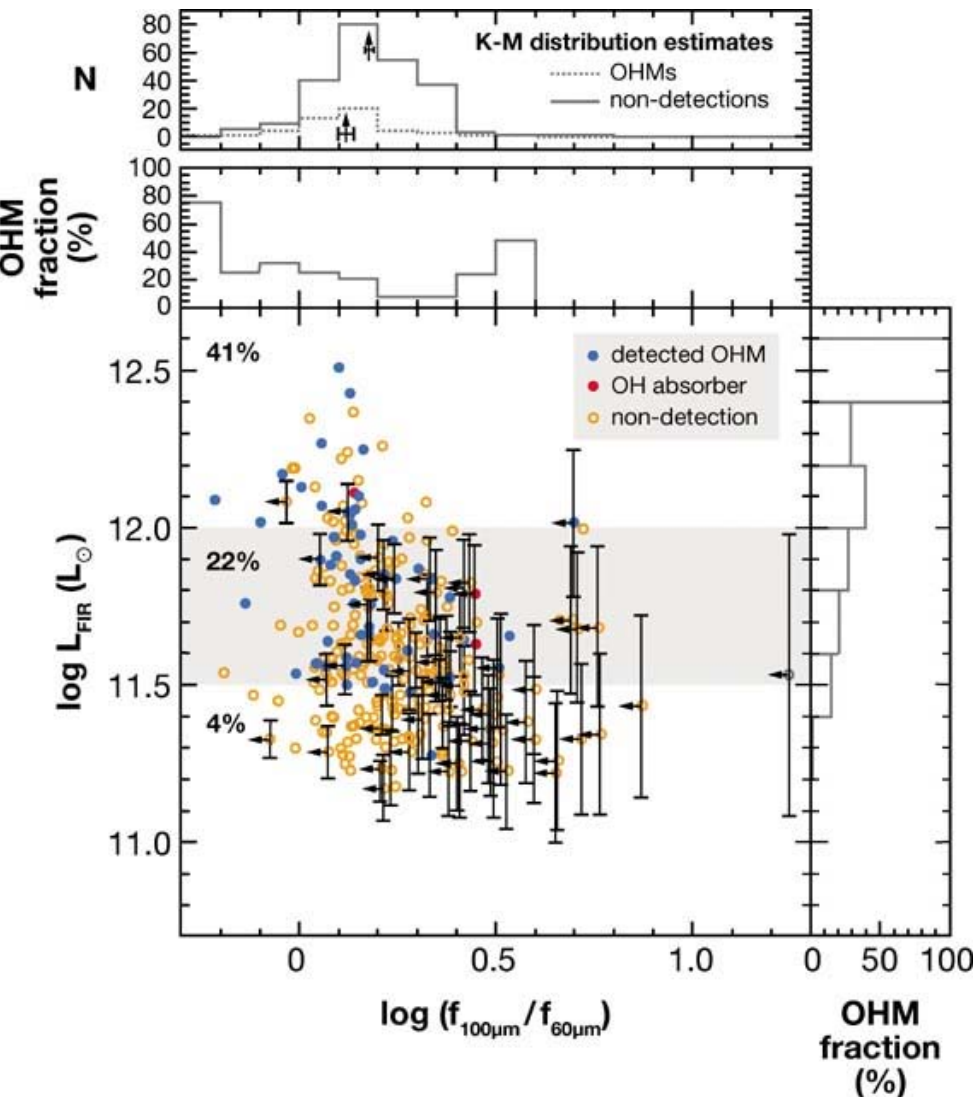
OH Mega-MASER

OH-MASER: GIGAMASER



- Hätten als Radiostation eine Leistung von 10 Trillionen Trillionen Megawatt!
- GigaMASER existieren!!
- IRAS 20100-4156 bei $z=0.129$; IRAS 14070+0525 bei $z=0.265$; IRAS 12032+1707 bei $z=0.217$; alle mit Infrarot-Leuchtkräften $\sim 2 \times 10^{12}$ Sonnenleuchtkräfte
- Falls OH MegaMASER Leuchtkräfte $>10^5$ Sonnenleuchtkräfte, dann Flußdichte der Größenordnung 1 mJy, könnte bis $z=4$ detektiert werden
- Assoziiert mit hochleuchtkräftigen IR-Galaxien (Galaxien-merger) -> Test der Galaxien-merger Rate mit Rotverschiebung von $z=4-0.7$

OH-MegamasER und FIR Leuchtkraft



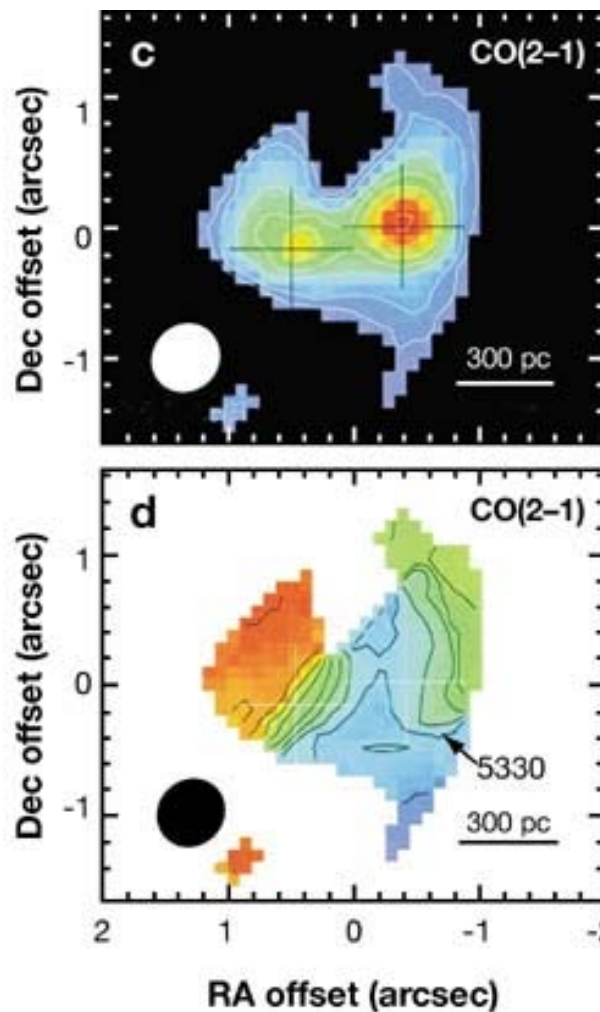
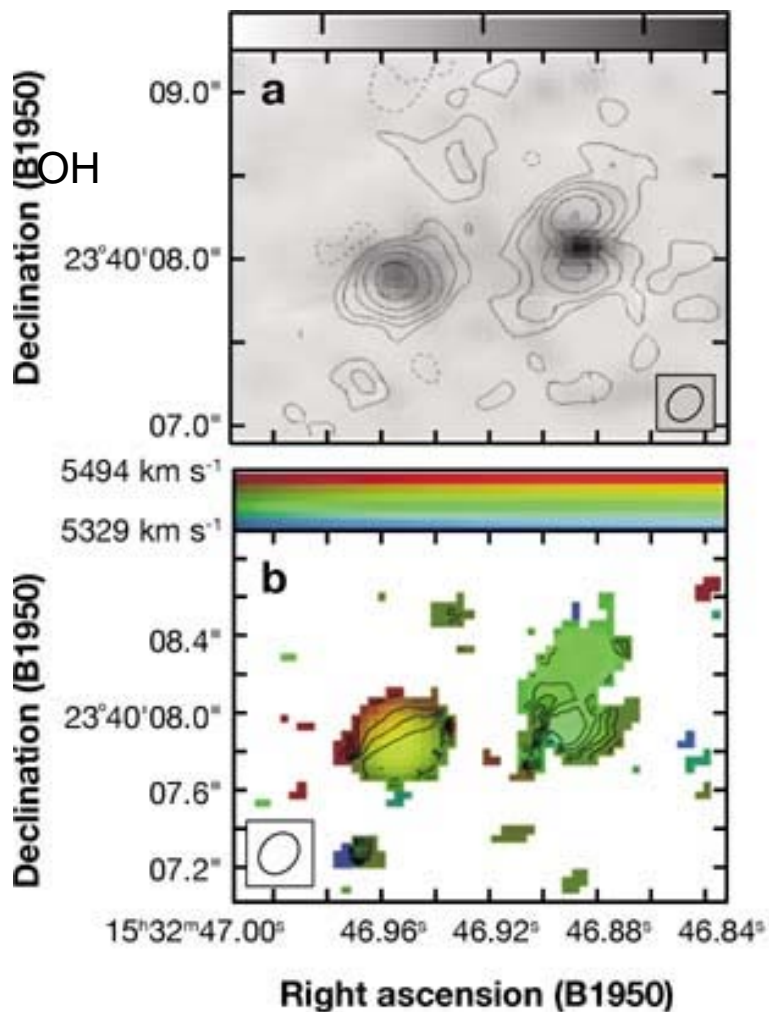
- FIR-Farbe als Funktion der FIR-Leuchtkraft
- LIRGs beobachtet auf der Suche nach OH MegaMASER
- MASER-Galaxien haben wärmere Farben
- MASER eher in leuchtkräftigeren LIRGs
- Aber!!! 80% der LIRGs sind **keine** OH MegaMASER

OH Megamaser



- Arp 220: Galaxien-merger mit Gezeitenarmen
 - Zentrale kpc molekulare Gasscheibe, darin zwei (!) nukleare Scheiben, jede mit $\sim 10^9$ Sonnenmassen an molekularem Gas innerhalb von 100pc der beiden Kerne
 - OH MegaMASER Emission stammt von den beiden molekularen Scheiben
 - Energiequelle unbekannt
 - AGN
 - Oder starburst?
 - Mit OH-Megamaser können die Bedingungen in den inneren Regionen untersucht werden -> daraus auf die Energiequelle schließen
 - Bsp.: Arp220, warme ausgedehnte Natur deutet auf starburst

Arp 220



Räumliche
Verteilung

Geschwindig-
keitsfeld

OH MegamASER



- -> OH MegaMASER typischerweise 100pc groß, hohe Konzentration molekularen Gases mit „extremen starburst Regionen“
- Verglichen mit galaktischen gigantischen Molekülwolken sind diese 5x größer, 3000x massiver, und 10^5 x IR leuchtkräftiger
- Problem: VLBI Beobachtungen bei 18cm: maximale Auflösung einige pc

X-ray Image of a binary black hole system in NGC 6240

KEIN OH MegaMASER!

Extremer starburst bereits vorbei?
Oder noch nicht eingesetzt?

10kpc



HUBBLE OPTICAL



CHANDRA X-RAY

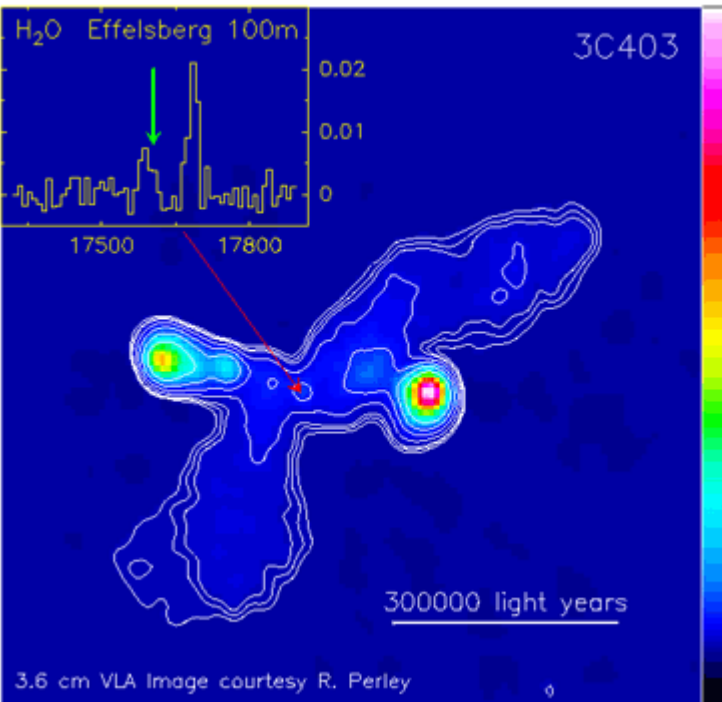


$z=0.025$

6/26/2006

Komossa et al. 2002⁸⁶

Megamaser in AGN



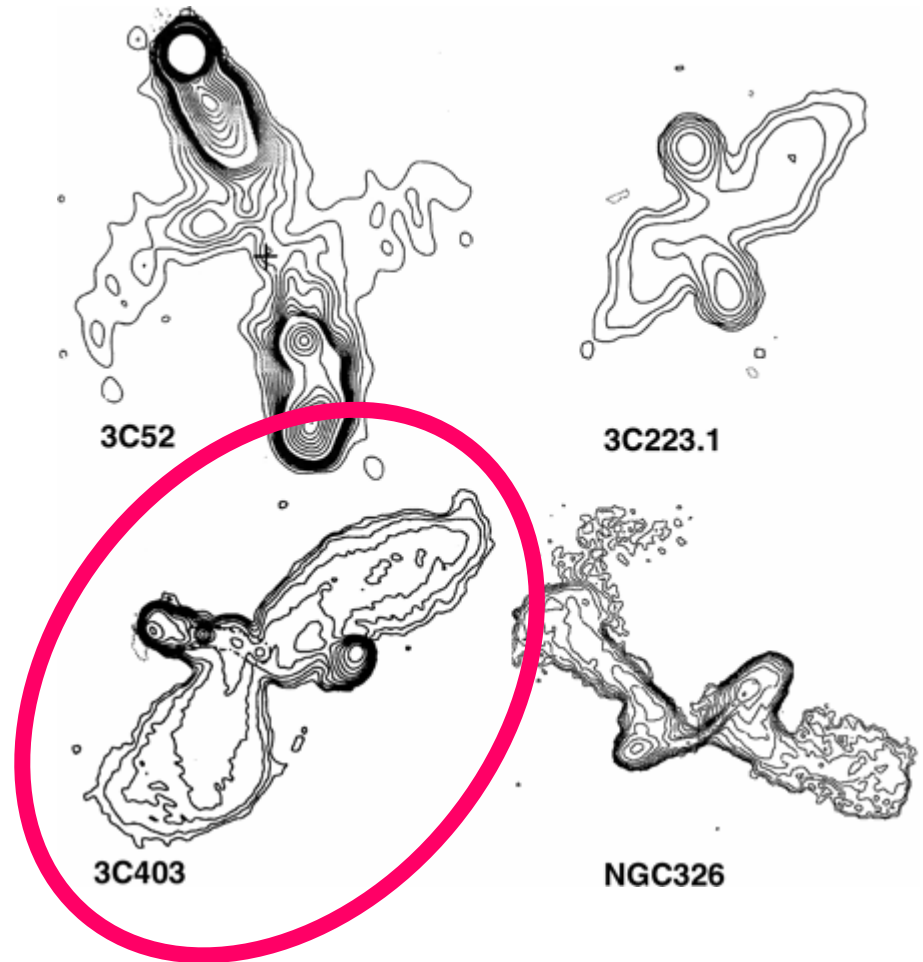
Aufnahme mit dem VLA, 3.6cm, Pfeil zeigt Galaxienkern, Spektrum gemessen mit Effelsberg, Flußdichte gegen Geschwindigkeit, grüner Pfeil zeigt Systemgeschwindigkeit der Galaxie

- Weitest entfernte Megamaser in der Galaxie 3C403 (750 Mio Lj)
- Strahlung in einer Spektrallinie tausendfach stärker als die der Sonne im gesamten Spektralbereich
- Zum ersten Mal in „klassischer“ Radiogalaxie gefunden
- Beobachtete Geschwindigkeitsverteilung entspricht Erwartungen für eine scheibenförmige rotierende Materieverteilung um den Galaxienkern
- „Soviel Wasser habe ich in meinem ganzen Leben noch nicht auf einmal gesehen“
- Bislang: 31 H₂O Megamaser-Galaxien detektiert

Binäre Supermassive Schwarze Löcher Änderung der Jetrichtung durch Spin-flip?



- A composite of four clear examples of the X-shape morphology.
- VLA radio observations of 3C52 (Leahy & Williams, 1984, MNRAS 210, 929), 3C223.1, 3C403 (Dennett-Thorpe et al., 1999, MNRAS 304, 27), and NGC 326 (Murgia et al., 2001, A&A 380, 102)

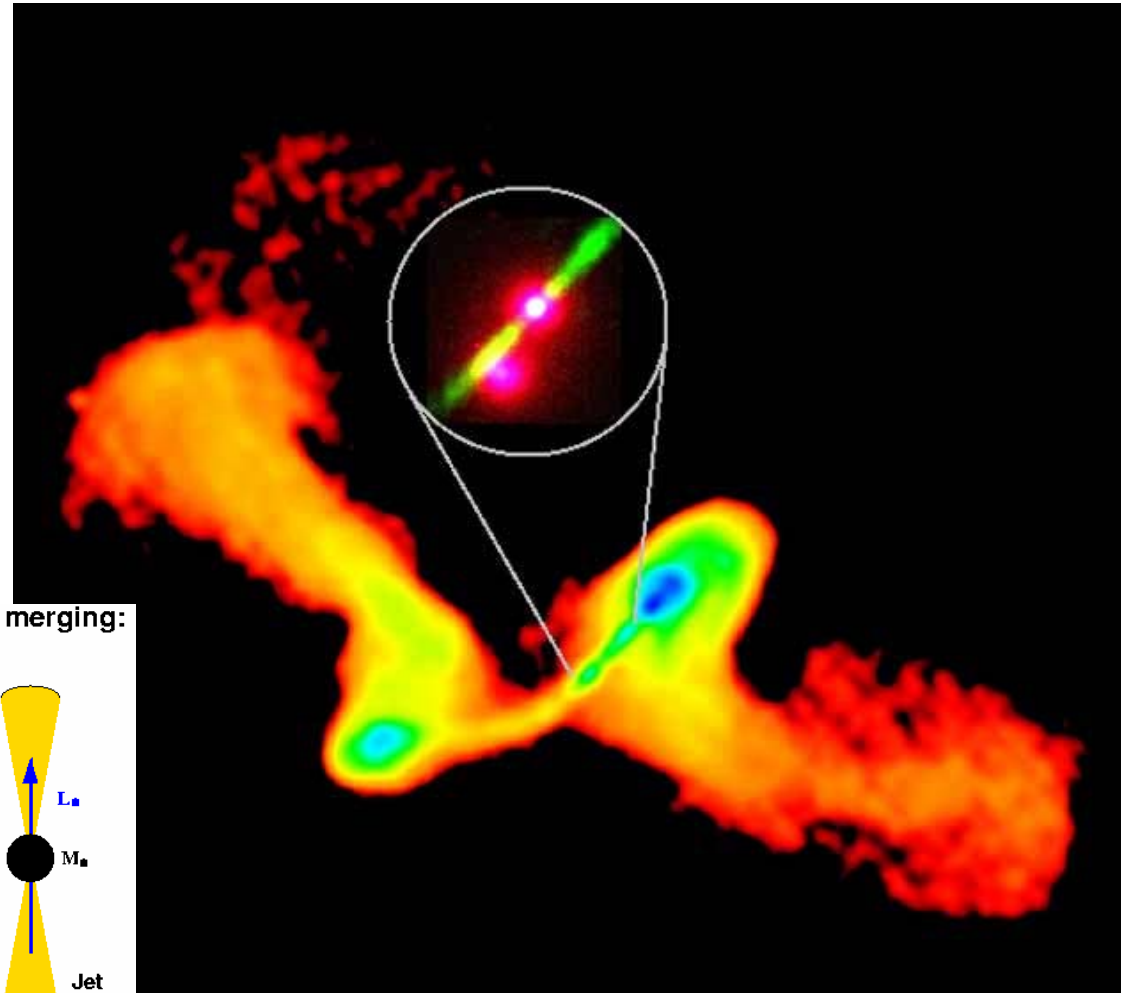


Merritt D. & Ekers R., 2002, Science 297, 1310

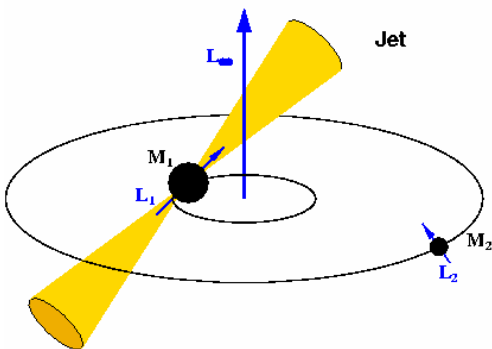
Nach der Verschmelzung von SBBH Änderung der Jet-Ausrichtung durch einen Spin-Flip?



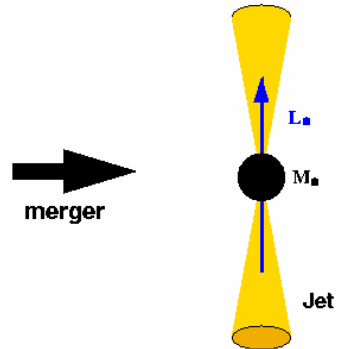
- NGC 326
- Verschmelzung der Schwarzen Löcher: Jets ändern ihre Richtung
- Jet-flip aufgrund eines Spin-flips des primären Schwarzen Lochs (dem orbital angular momentum folgend)



Before merging:



After merging:



National Radio Astronomy Observatory / AUI, Murgia et al.; STScI (for the inset).



Extragalaktische MASER

KILO-MASER

Was sind KILOMASER?

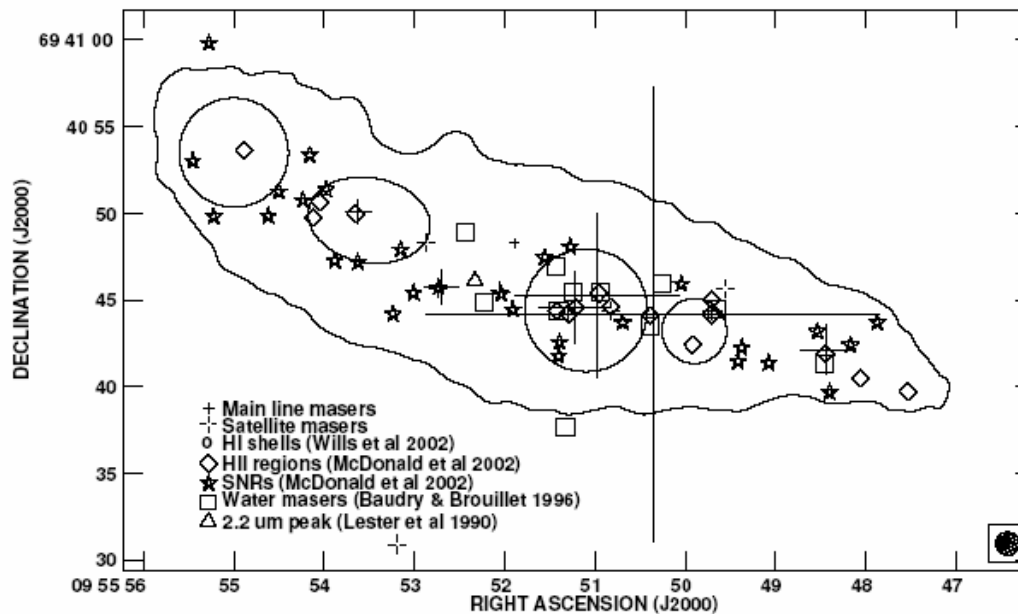


Vergleichbar galaktischen MASERN, einige Sonnenleuchtkräfte
In galaktischen Kernen gefunden: Aktive Galaxienkerne oder
Sterne?

Wahrscheinlich mit Sternentstehung verbunden (M 82)!

Unklar ob nicht dennoch AGN dort vorhanden

MegaMASER können nicht durch Sterne angetrieben werden,
KiloMASER dagegen durch Sterne oder AGN



In 2 Wochen ...



Themen

& Daten

- 05.05 Einführung & Übersicht
- 12.05. Radioteleskope & Radiobilder & Katastrophen
- 26.05. Der Radiohimmel im Licht der 21cm-Linie
- 09.06. Maser & das Interstellare Medium & Merger
- **23.06. AGN & Binäre Schwarze Löcher (NEUES!)**
- 07.07. Pulsar-Astronomie (heute & in Zukunft)
- 21.07.