

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01940

研究課題名(和文) AGNの水メーザー観測によるハッブル定数の測定

研究課題名(英文) Measurement of the Hubble constant by observing water-vapor masers in AGN

研究代表者

中井 直正 (NAKAI, Naomasa)

関西学院大学・理学部・教授

研究者番号：80192665

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：遠方銀河からの水メーザーの周波数21-22GHzにおいて従来の2倍の高感度を達成した20GHz帯受信機を開発し、電波望遠鏡に搭載して活動的銀河中心核AGNの水メーザーの探査を開始した。観測対象とした銀河はダストに隠されて可視光では見えなかったAGNで新たに硬X線観測で発見されたものである。その結果、水メーザーの検出確率は30%と従来の6倍を達成することができた。発見された水メーザーを今後超長基線電波干渉法で観測して銀河の距離を直接に決定し、宇宙の膨張率を示すハッブル定数を求める。また既存のAGNを観測して従来の宇宙背景放射から求められたハッブル定数とは有意に異なる値を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙の膨張率を与えるハッブル定数を銀河の距離を直接に測定できる活動的銀河中心核からの水メーザーの観測から求めることは宇宙の歴史と進化を知る上で極めて重要である。特に最近のいろいろな銀河距離の間接測定から求められたハッブル定数の値と宇宙背景放射の観測から求められた値が誤差を考慮しても有意に異なるらしいことは宇宙論において大問題である。宇宙年齢も変わってくる可能性がある。この問題を銀河の距離を直接に測定できる水メーザー観測から解明することは非常に意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：A 20-GHz receiver with twice the sensitivity of conventional receivers at 21-22 GHz has been developed and mounted on a radio telescope to search for water masers in the active galactic nucleus (AGN) of distant galaxies. The target galaxies were newly discovered by hard X-ray observations in AGNs that had been obscured by dust and were not visible in visible light. As a result, the detection probability of water maser was 30%, which is six times higher than the previous detection. The discovered water maser will be observed by Very Long Baseline Interferometry to directly determine the distance of galaxies and to obtain the Hubble constant which indicates the expansion rate of the Universe. We also observed the existing AGN and obtained a value that is significantly different from the Hubble constant obtained from the conventional cosmic background radiation.

研究分野：電波天文学

キーワード：活動的銀河中心核 水メーザー 超長基線電波干渉法 銀河距離 宇宙膨張率 ハッブル定数

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

数千 km という広範囲に複数のアンテナを設置して等価的に口径が数千 km の電波望遠鏡とする超長基線電波干渉法 VLBI を用いて宇宙空間の高密度ガス中の水分子が放射する水メーザー電波を観測すると、1 度の 360 万分の 1 という超高角分解能を得ることができる。これにより、ある種の活動的銀河中心核 AGN を観測するとそこにある巨大質量ブラックホールの存在を明らかにすることができるが、同時に条件が揃えばその銀河までの距離を直接に測定することができる。宇宙では遠方にある銀河の距離を直接に測定する方法はほとんどないので、本研究代表者らが発見したこの新しい距離測定法は極めて有用である。

この水メーザーの観測による銀河距離の直接測定によりこれまでに数個の銀河の距離が測定され、宇宙膨張に乗ってその銀河が我々から遠ざかる速度と組み合わせて宇宙の膨張率を示すハッブル定数が求められた。しかし、その値は従来の全く別の手法である宇宙背景放射の観測から求められていたハッブル定数と有意に異なり、宇宙論において大問題となっている。場合によっては教科書に書いてある 138 億年という宇宙年齢が変わる可能性もある。

一方、水メーザー観測によって距離が測定されている銀河の数はまだ数個であり、上記ハッブル定数の問題の解明に向けては距離が求められた銀河の数をもっと増やしてハッブル定数の統計的な誤差を減らし、より精度の高い値を求める必要がある。

### 2. 研究の目的

(1) 水メーザーの周波数である 22GHz を観測する受信機を低雑音にして、高感度化する。

(2) その受信機を電波望遠鏡 (アンテナ) に搭載して、特にこれまでダスト (固体微粒子) に隠されて光学観測では検出されていなかった活動的銀河中心核 AGN の水メーザーの探査を行い、水メーザーが検出された AGN の数を 2 倍以上にする。

(3) 発見された水メーザー放射 AGN を超長基線電波干渉法 VLBI を用いて超高角分解能観測を行い、銀河の距離を直接に決定する。それにより銀河の数を現在の 2 倍以上とする。

(4) 銀河の距離と我々から遠ざかる速度からハッブル定数を現在の 2 倍以上の精度で求め、宇宙の膨張率であるハッブル定数の真の値を得る。

### 3. 研究の方法

(1) 取り壊されてしまった国土地理院つくば 32m アンテナで使用していた本研究グループの 20GHz 帯受信機の冷却増幅器を低雑音のものに交換し、偏波計を新たに設計製作して低雑音で広周波数帯域のものに交換する。これによって、当該受信機の感度を 2 倍以上にする。

(2) この受信機を建設中の JAXA 通信用 54m アンテナに搭載して高感度な電波望遠鏡とする。

(3) 高感度化された電波望遠鏡を用いて、ダスト (固体微粒子) に隠れた AGN でこれまでに観測されていない多数の AGN の水メーザーの探査を行う。新探査用 AGN は新たに硬 X 線で発見された天体を観測候補とする。

(4) 検出された水メーザーの速度の時間変化を数年に渡って測定する。

(5) 同メーザーを超長基線電波干渉法 VLBI で超高角分解能観測を行い、メーザー円盤の構造を明らかにする。

(6) 上記 (4) と (5) の結果を用いて銀河までの距離を直接に決定し、ハッブル定数を現在の 2 倍以上の精度で求める。

### 4. 研究成果

(1) 国土地理院つくば 32m アンテナで使用していた 20GHz 帯受信機の高感度化と広周波数帯域化を行った。受信機内部にあってこれまでの雑音温度が 30K (ケルビン) 程度だった冷却 HEMT 増幅器 (アンプ) を雑音温度が 10K 以下の新たな低雑音冷却 HEMT 増幅器に交換し、増幅器としては感度を 3 倍に向上させた。また当該増幅器の先に付けられた偏波計をこれまでの周波数 19.5~25.2GHz が受信可能だったものを 19.4~27.0GHz を受信可能とし、また低雑音化した。受信機内部の他の部品はそのまま使用して、結局、受信機全体としては感度を 2 倍にすることができた。

(2) 上記高感度化受信機を JAXA54m アンテナに搭載する予定であったが、衛星との兼ね合いで別の受信機を使うことになり、上記受信機は搭載しないこととなった。そこで、代わりにインドネシアのアンテナに搭載することをインドネシア側と協議している。インドネシアからはこれまで AGN の水メーザーの探査があまりなされていなかった南半球の空 (南天) が観測可能となる。またインドネシア側は 20GHz 帯受信機を持っておらず、日本から供給すれば双方にとって大きな利益となる。インドネシア側が予算を獲得して当該通信アンテナを電波望遠鏡として使用できるようになれば、本研究による高感度 20GHz 帯受信機をそのアンテナに搭載して南天の活動的銀河中心核 AGN の水メーザーの探査を行う。

(3) 一方、北半球の空 (北天) については国立天文台の野辺山 45m 電波望遠鏡の 20GHz 帯

受信機を高感度化することで研究目的を達成することとした。45m 鏡の受信機内の冷却 HEMT 増幅器を同様に低雑音のものに交換し、受信機としては水メーザーの周波数では感度を約 2 倍良くすることができた (図 1)。ただし、アンテナの雑音や大気雑音は変えることができないので、それらの雑音も含めた全体のシステム雑音は従来の 100~110K から受信機高感度後の 70~85K へと約 1.4 倍の改善となった。同じ感度で観測するに必要な観測時間はこの雑音温度の 2 乗に比例するため、雑音温度が約 1.4 分の 1 に減少したことは、同じ感度で観測するのに約半分の時間で済むことになる ( $1.4 \times 1.4 = 1.96$ )。あるいは同じ観測時間に 2 倍の数の銀河が観測可能となる。

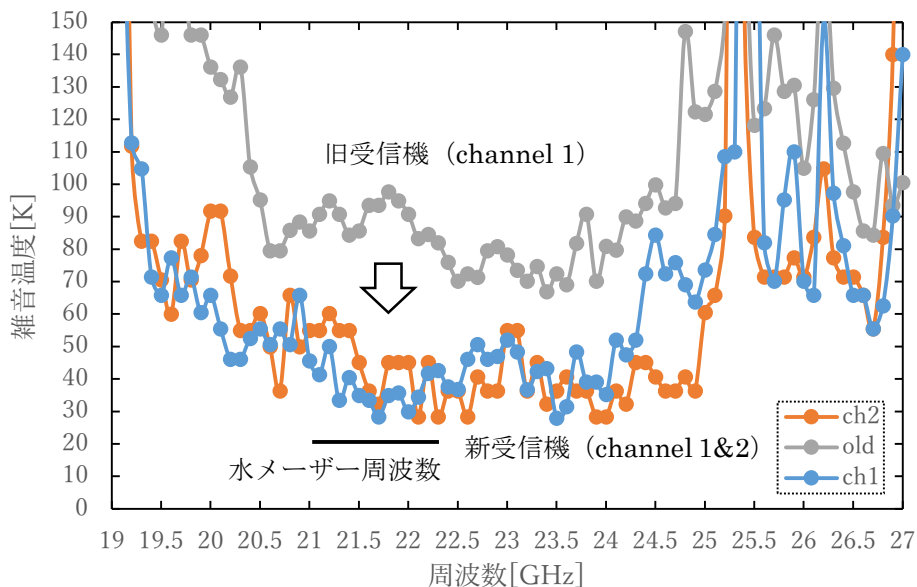


図 1. 新旧受信機の周波数毎の雑音温度 (感度)。水メーザーの静止周波数は 22.235GHz であるが、赤方偏移して 21GHz 付近になることもある。

(4) 高感度化した 20GHz 帯受信機を野辺山 45m 電波望遠鏡に搭載して活動的銀河中心核 AGN の水メーザーの探査を行った。観測対象とした AGN はダスト (固体微粒子) に隠されて可視光では未発見であったが硬 X 線観測で新たに発見された 10 個の AGN である。観測の結果、3 個に水メーザーが新たに発見された。従来の検出確率は 5%前後であったが、今回の硬 X 線データに基づくサンプル (硬 X 線の吸収が  $N > 10^{24} \text{ H cm}^{-2}$ ) では検出確率が 30%と大きく向上し、このサンプリングは非常に有効であることを示した。今後の観測により、もっと多くの AGN の水メーザー探査を行う。また今回発見された水メーザーは今後、超長基線電波干渉法 VLBI を用いた超高角分解能観測により銀河の距離を決定し、ハッブル定数を求めるのに使用する。

(5) 我々が以前に水メーザー (図 2) の VLBI 観測をしていた AGN である銀河 IC2560 の観測結果を詳細に解析し、その銀河の距離を  $D = 44.5 \pm 6.1$  メガパーセク (Mpc) ( $= 1.45 \pm 0.20$  億光年) と決定することができた。またその銀河が宇宙膨張に乗って我々から遠ざかっている速度は  $V = 457 + 24 - 19 \text{ km/s}$  である。この結果をこれまでに (Pesce et al. 2020 ApJ 891, L1) 同様に距離と遠ざかる速度が求められていた 5 個の銀河と一緒に図示すると図 3 のようになった。これら 6 個の銀河の結果を最小二乗法で直線に当てはめると、ハッブル定数の値が

$$H_0 = 72.8 \pm 2.5 \text{ km/s/Mpc}$$

と求めることができた。この値は他の間接的な手法で距離が決定されている銀河から求められているハッブル定数とは誤差の範囲で一致する (表 1)。一方、現在、教科書に掲載されている宇宙背景放射から求められているハッブル定数とは誤差を考えても有意に異なり、なぜこのような差が生じるのか、どれが正しい値なのか大きな問題である。なお教科書に掲載されている 138 億年というのはこの宇宙背景放射の観測からハッブル定数と同時に決定されている値である。もしハッブル定数が間違っていれば宇宙年齢も違ってくる (短くなる) 可能性がある。今後の本研究の手法によってより正確なハッブル定数が求まることが期待される。

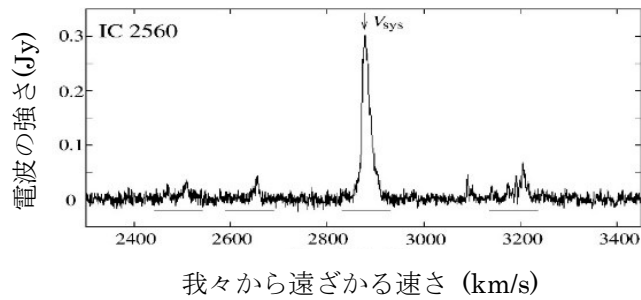


図 2. 銀河 IC2560 の中心から出ている水メーザーのスペクトル

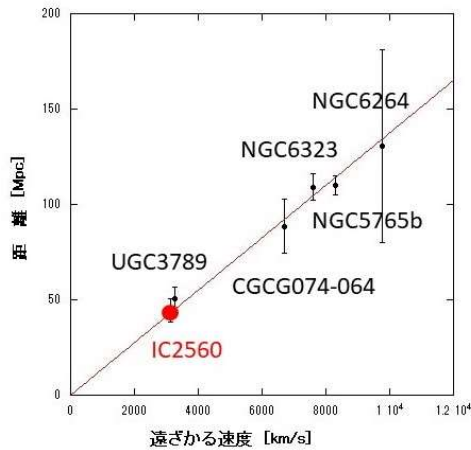


図 3. 距離が測定された銀河の（距離—遠ざかる速度）の関係

表 1. 他の手法により求められたハッブル定数との比較

銀河の距離から求めたハッブル定数 (赤方偏移~0)

方法	ハッブル定数 (km/s/Mpc)	出典
水メーザー	$72.8 \pm 2.5$	本研究
	$73.9 \pm 3.0$	Pesce+2020
超新星	$74.0 \pm 1.4$	Riess + 2019
重力レンズ	$73.3^{+1.7}_{-1.8}$	Wong + 2019
セファイド	$72 \pm 3 \pm 7$	Freedman+ 2001
	$74 \pm 3 \pm 6$	Macri+ 2006

↑ ↓

宇宙背景放射から求めたハッブル定数(赤方偏移~1000)

	ハッブル定数(km/s/Mpc)	出典
WMAP	$69.32 \pm 0.80$	Bennett+2013
Planck	$67.4 \pm 0.5$	Planck col. 2020

(6)我々が以前に水メーザーを発見していた AGN である銀河 NGC7738 の水メーザー(図 4)を米国の VLBI を用いて超高角分解能観測を行った。その結果、この銀河の中心に太陽の 340 万倍の質量の巨大ブラックホールを発見した。残念ながら、この銀河の水メーザーの情報は銀河距離を求めるには不足しているのでハッブル定数を求めるのには使えなかった。

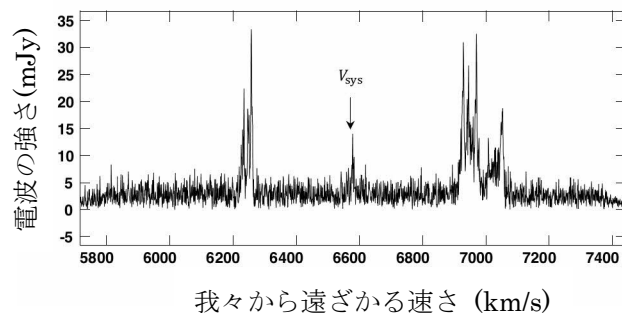


図 4. 銀河 NGC7738 の中心から出ている水メーザーのスペクトル

同様に銀河 NGC1068 の水メーザー（図 5）の VLBI 観測の結果を解析した結果、その中心に太陽の 1500 万倍の質量の巨大ブラックホールの存在を確認し、また中心付近から出ている電波ジェットが近くの高密度ガスに衝突してリング状に放射している水メーザー源を発見した。残念ながら、この銀河の水メーザーの情報も不足しているので銀河距離は求まらずハッブル定数の決定には使えなかった。

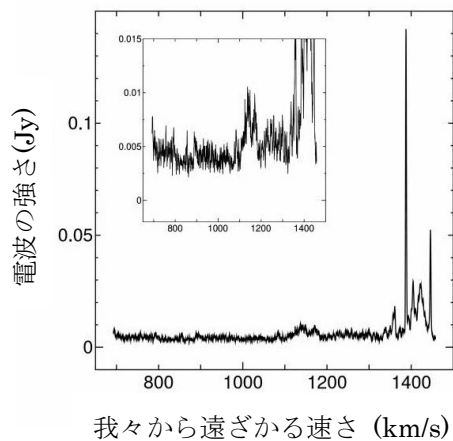


図 5. 銀河 NGC1068 の中心から出ている水メーザーのスペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yuna MORISHIMA, Hiroshi SUDOU, Aya YAMAUCHI, Yoshiaki TANIGUCHI and Naomasa NAKAI	4. 巻 75
2. 論文標題 High-sensitivity VLBI observations of water masers in the Seyfert galaxy NGC 1068	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 71-81
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psac092	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 NAKAI Naomasa
2. 発表標題 Distance of the Seyfert 2 galaxy IC 2560 and the Hubble constant
3. 学会等名 International Astronomical Union Symposium 380 "Cosmic Masers: Proper Motion toward the Next-Generation Large Projects"（国際学会）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	瀬田 益道 (SETA Masumichi) (80358994)	関西学院大学・理学部・教授  (34504)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------