

令和4年度 鹿児島大学理学部理学科

物理・宇宙プログラム

AO 入試提出レポート

受験番号 A11111111

氏名 鹿児島 太郎

1. 実験の背景と目的

(1-1) 背景

太陽のような星になる前の、若い星の周囲には気体が大量に存在している。この気体の主成分は水素分子 H_2 であるが、一酸化炭素分子 CO など様々な分子も存在している。この分子から放出される電波を「分子輝線」と呼ぶ。電波望遠鏡により分子輝線を観測することで、星の周囲の気体分子の分布や気体分子がどのように運動をしているのかを調べることができる。

若い星の周囲の気体の運動として、太陽系の惑星の公転運動と同様の回転運動が考えられる。回転運動が円運動の場合、気体分子の速さ v_{rot} は、

$$v_{rot} = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (1)$$

と表される。ここで r は星からの距離、 G は万有引力定数、 M は星の質量を表す。

(1-2) 目的

分子輝線の観測データから、若い星の周囲に存在する気体の分子の分布や運動について調べる。

2. 方法

電波望遠鏡により、若い星周囲の気体の中の、一酸化炭素 CO の同位体 $C^{18}O$ が放出する分子輝線を観測した。以降、観測した分子輝線を $C^{18}O$ 分子輝線と呼ぶ。図 1 は観測から得られた若い星の周囲の $C^{18}O$ 分子輝線の強度分布を図示したものである。つまり図 1 は、電波で見た天体写真といえる。図の上部が北側、下部が南側に対応する。この観測データを用いて、図 1 に示すように、星を中心とし北側及び南側のそれぞれ 7 つの地点の解析を行った。それぞれの地点の間隔は 10 天文単位（地球の公転の軌道長半径の 10 倍の長さ）である。

観測者に対し $C^{18}O$ 分子が静止している場合、観測される $C^{18}O$ 分子輝線の電波の周波数は 329331 MHz である（1 MHz = 10^6 Hz）。この周波数を静止周波数と呼ぶ。実際には個々の分子は運動をしているため、音波と同様に電波においてもドップラー効果が起こって、個々の分子から観測される分子輝線の周波数は、静止周波数からずれる。この静止周波数からのずれ Δf は、分子の視線方向の速度（ここで視線方向とは観測者から分子への向き）を v とすると、

$$\Delta f = f_{\text{obs}} - f_{\text{rest}} = -f_{\text{rest}} \frac{v}{c} \quad (2)$$

と表される。ここで f_{obs} は観測で得られた周波数、 f_{rest} は静止周波数である。また、 c は光速を表す。以降、分子の視線方向の速度を視線速度と呼ぶ。若い星周囲の個々の $C^{18}O$ 分子が異なった視線速度を持つため、 $C^{18}O$ 分子輝線が観測される周波数はある範囲に渡っている。

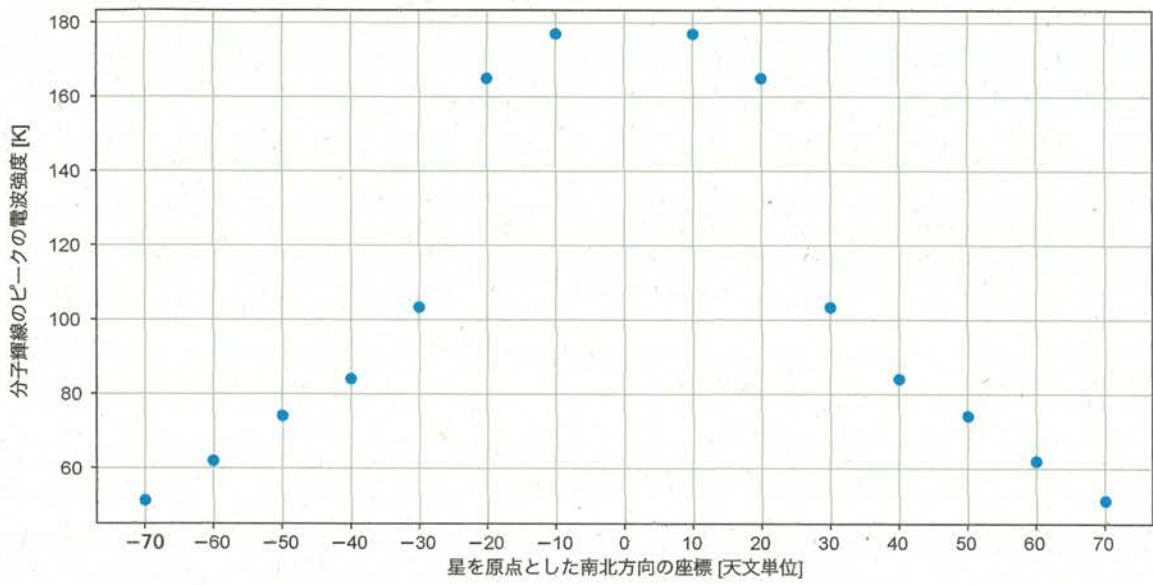
分子輝線の電波強度は、温度の単位 [K:ケルビン] で表す（専門的になるため説明は省く）。分子輝線の電波強度 [K] を縦軸に取り、周波数 [MHz] を横軸にとってグラフとして表したものをスペクトルと呼ぶ。図 2 にスペクトルの読み取り方を図示した。図 3-1 から図 3-4 に、星の北側、南側で観測された $C^{18}O$ 分子輝線のスペクトルを示す。ここで、それぞれのスペクトルの横軸は、観測した周波数そのものではなく、静止周波数からのずれの周波数 Δf で表されていることに注意せよ。

これ以降、「課題シート」の課題の内容を取り入れながら、「3. 結果」「4. 考察」「5. 結論」について、表、グラフ用紙、レポート用紙にまとめ、レポートとして完成させなさい。その際、「読む人にわかりやすく伝える」ということに配慮して、レポートを作成しなさい。提出するレポートは、前ページのレポートの表紙、本ページに続いて、表 1 のページ、グラフ用紙、レポート用紙、図 1、図 2 と図 3-1 から図 3-4 を含むページの順にまとめよ。

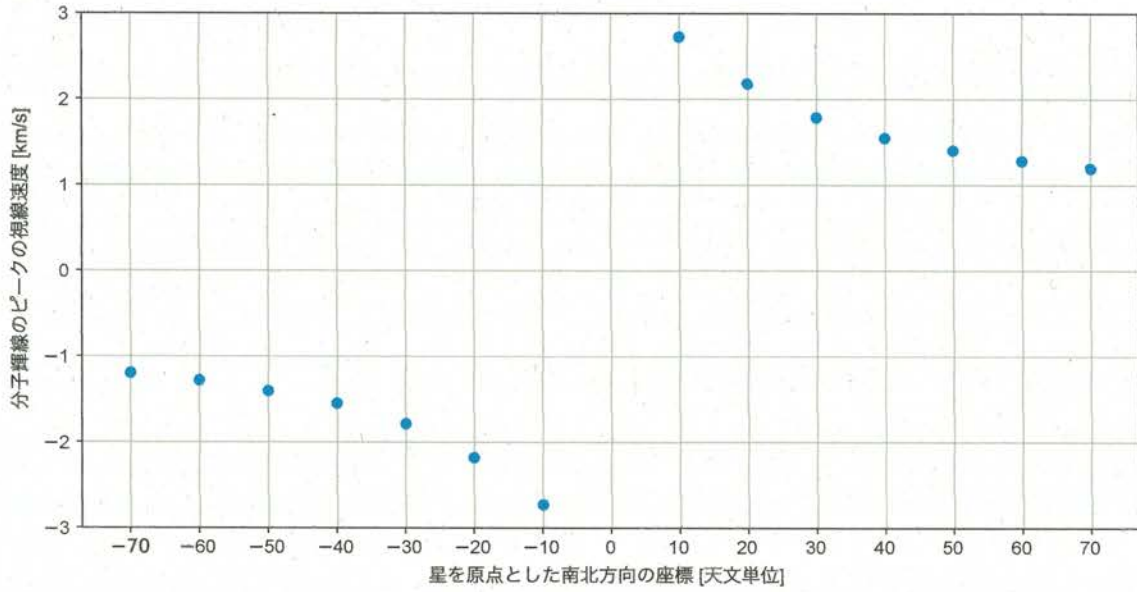
表 1.

スペクトルデータの値

スペクトルの地点	星を原点とした 南北方向の座標 [天文単位]	$C^{18}O$ 分子輝線のピ ークの電波強度 [K]	$C^{18}O$ 分子輝線のピ ークの Δf [MHz]	$C^{18}O$ 分子輝線のピ ークの視線速度 v [km/s]
N7	70	51	-1.31	1.19
N6	60	62	-1.41	1.28
N5	50	74	-1.54	1.40
N4	40	84	-1.70	1.55
N3	30	103	-1.96	1.79
N2	20	165	-2.39	2.18
N1	10	177	-3.00	2.73
S1	-10	177	3.00	-2.73
S2	-20	165	2.39	-2.18
S3	-30	103	1.96	-1.79
S4	-40	84	1.70	-1.55
S5	-50	74	1.54	-1.40
S6	-60	62	1.41	-1.28
S7	-70	51	1.31	-1.19



グラフ 1: C¹⁸O 分子輝線のピークの電波強度と星からの距離



グラフ 2: C¹⁸O 分子輝線のピークの視線速度と星からの距離

3. 結果

まず、図 3-1 から図 3-4 の各地点のスペクトルを読み取り、各地点のピーク強度[K]と、ピークにおける静止周波数からのずれ Δf を読み取った。ピークの電波強度については、スペクトルの縦軸の最小目盛りが 10 K であるので、その 1/10 の 1 K の桁まで読み取り、表 1 に記入した。このときピークの周波数については、スペクトルの横軸の最小目盛りが 0.1 MHz であるので、その 1/10 である 0.01 MHz の桁まで評価した。これをグラフ 1 にまとめると、N1 から N7 及び S1 から S7 では、星に近づくにつれ、ピーク強度が大きくなる傾向が見られた。一方、 Δf はその絶対値は星に近づくにつれ大きくなるが、星の北側(N1-N7)と南側(S1-S7)では符号が逆となった。全ての地点で分子輝線が観測されていることから、南北に 140 天文単位以上に渡って気体分子が存在することがわかった。

次に、(2)式から、各観測地点での気体分子の速度を求め、表 1 に記載した。気体分子の速度はピークの周波数から導かれるので、ピークの周波数と同じ桁数とした。これをグラフ 2 にまとめると、気体分子の速度は、星の中心に近づくほど速くなるが、その向きは、星の北側と南側で逆方向を示すことがわかった。

4. 考察

以上の結果から、星の周りの気体分子の密度と、運動について考察する。

まず、グラフ 1 から、ピークの電波強度が、星に近いほど高くなっていることが読み取れる。今回観測した $C^{18}O$ 分子輝線の電波強度は気体分子の密度をよく反映しているということから、この結果は星に近づくほど気体分子の密度が高くなっていることを示している。これは若い星の周囲に、気体分子が密集していることを表していると考えられる。また、N7-N4(S7-S4)と N4-N2(S4-S2)を比較すると、近くなるにつれて急激に気体分子の密度が上昇しているように見える。しかし、N1, S1 では、その気体分子の密度の上昇は、飽和する傾向に見える。一点だけであるため断定は難しいが、気体分子の密度は星に近づくことで発散するのではなく、ある有限の値に落ち着くと考えられる。

グラフ 2 から、気体分子の視線方向の運動の速度の絶対値が、星に近づくほど大きくなっていることが示された。(1-1)背景に示してある気体分子の運動の表式(1)を見ると、回転運動の速さは星との距離 r が小さいほど大きくなることがわかる。従って、グラフ 2 の結果は、星の周りの気体が、太陽系の惑星の運動と同様の回転運動を表していると考えられる。星の北側と南側で速度の符号が違うのは、回転により我々から遠ざかる運動(北側)と我々に近づく運動(南側)に分かれているからであると考えられる。

また、気体の密度、運動に加え、観測地点とスペクトルの形状の関係は以下のように考えられる。星から近い地点ほど、幅の広いスペクトルが観測された。本来、分子輝線の周波数はある定数であることから、単一の Δf に対しては、単一の v となるはずである。すなわち、 Δf が幅を持つということは、様々な視線速度を持つ分子が観測された、ということを示していると考えられる。強度は、気体の密度に対応することから、ピークとなっている Δf に対応する視線速度の気体分子がもっとも高密度である、ということを示している。これは、星に近づくほど視線速度の範囲の広い気体分子の集団が観測され、星から離れるほど視線速度の範囲の狭い気体分子の集団を観測している、と考えられる。

5. 結論

若い星の周りの気体分子の運動や密度について、分子輝線のスペクトルを読み取ることで、以下のことがわかった。

気体の分布に関しては、若い星の周囲 140 天文単位以上に渡っていることが明らかになった。星に近づくほど分子輝線の強度が強くなっていることから、星に近づくほど気体の密度が大きくなっていることが明らかになった。気体分子の運動については、気体が太陽系の惑星の回転と同様の運動をしている様子を明らかにすることができた。スペクトルは、星に近い地点ほど幅が広がったことから、星に近いほど様々な視線速度を有する気体分子の集団が存在し、星から遠ざかるほど、視線速度の範囲は狭くなることが示唆された。

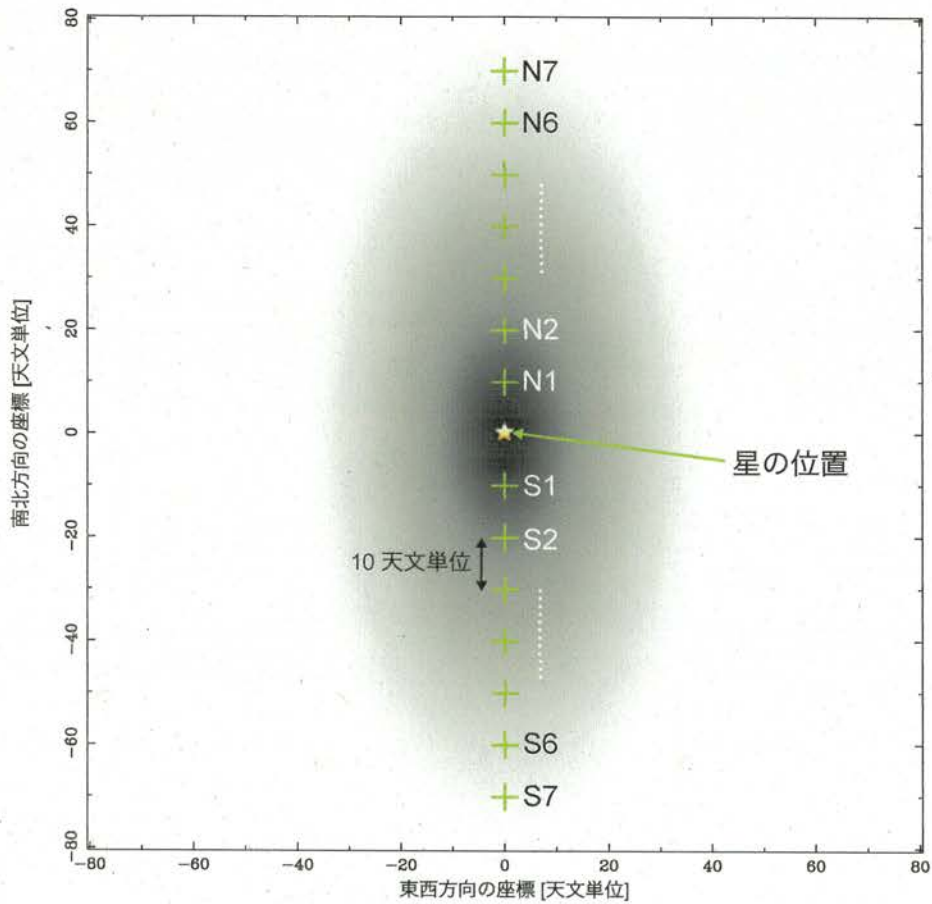


図1. 若い星の周りの $C^{18}O$ 分子輝線の電波強度の分布 (グレー) とスペクトルを測定した場所 (+印)。グレーの色が濃いほど電波が強いことを表す。☆は星の位置を示す。図では、東西南北の空の座標を、星までの距離を考慮して実際の長さに変換している。

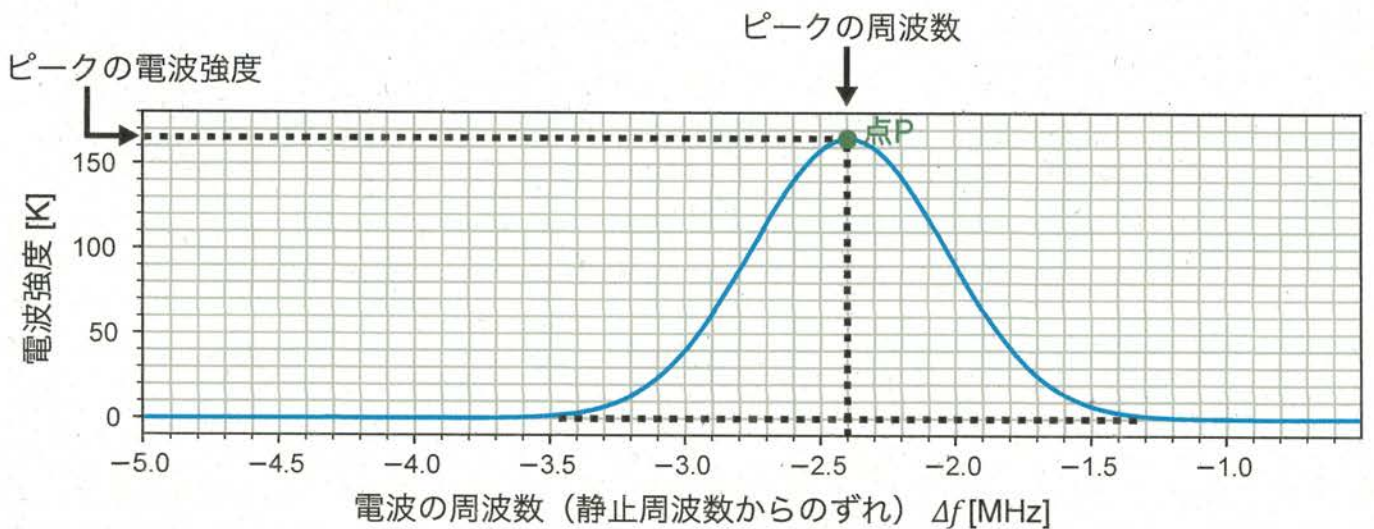


図2. スペクトルの読み取り方。縦軸においてスペクトルの頂上 (ピーク) 点Pでの電波強度がピークの電波強度であり、横軸においてその周波数がピークの周波数である。ピークの周波数は、(2)式により、視線方向の速度に変換できる。

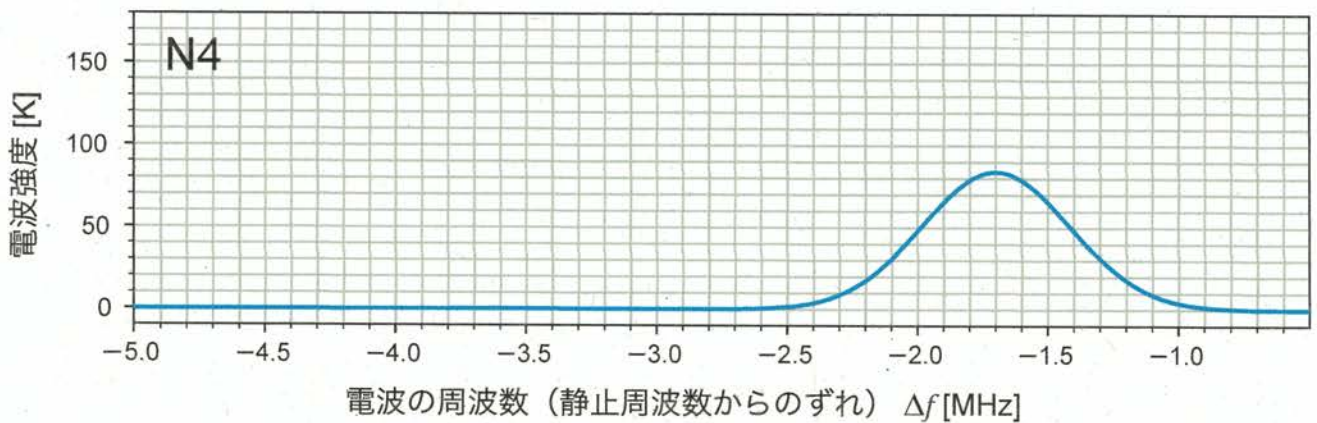
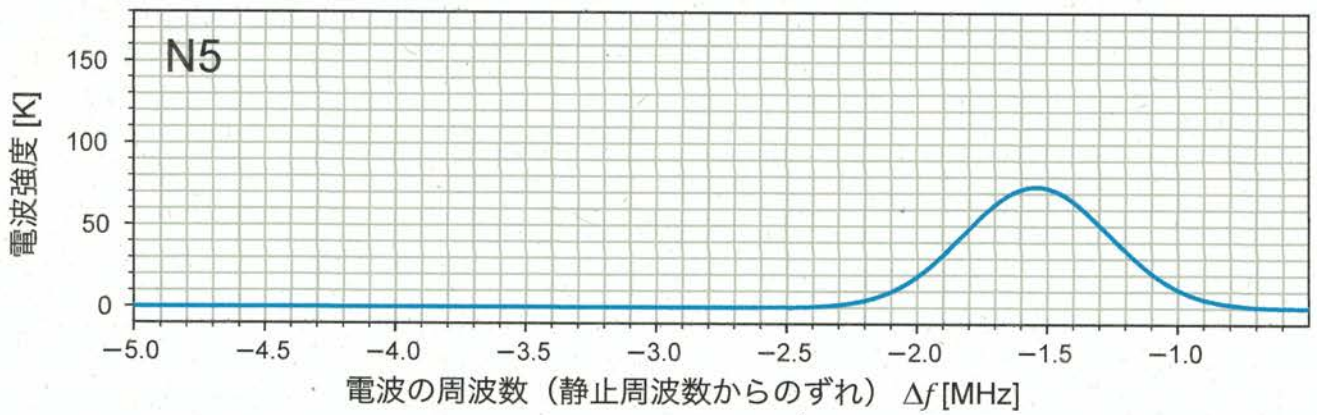
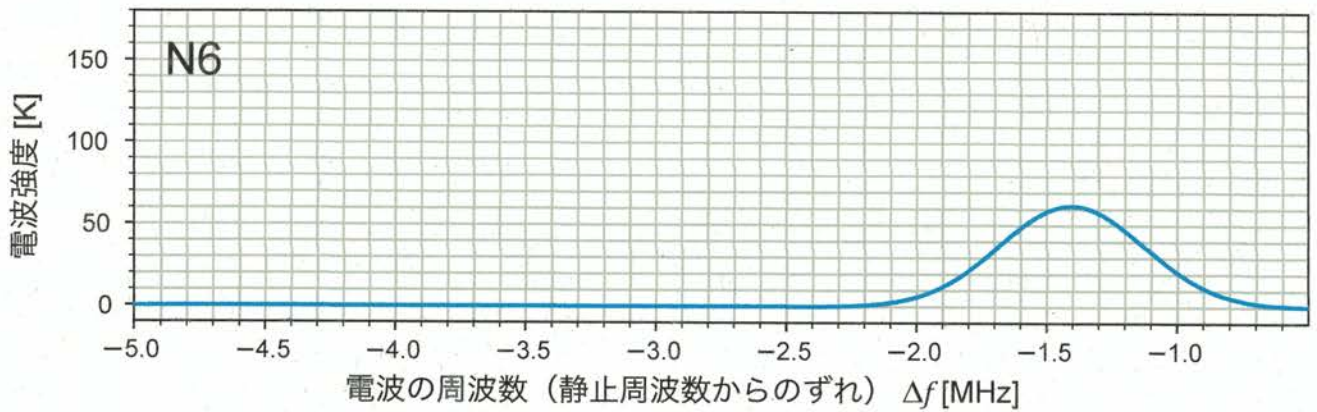
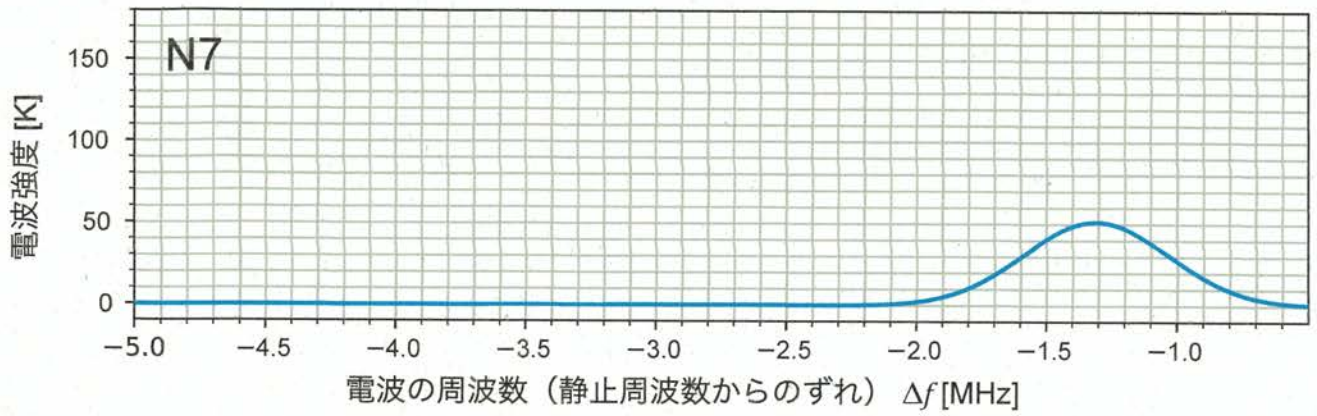


図 3-1. 星の北側 (N4 から N7) で測定したスペクトル。

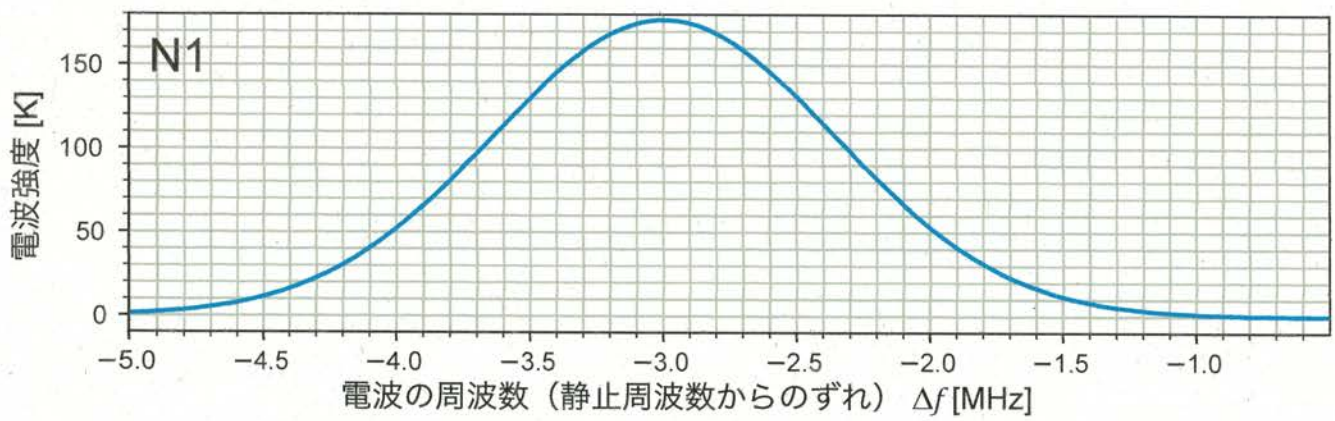
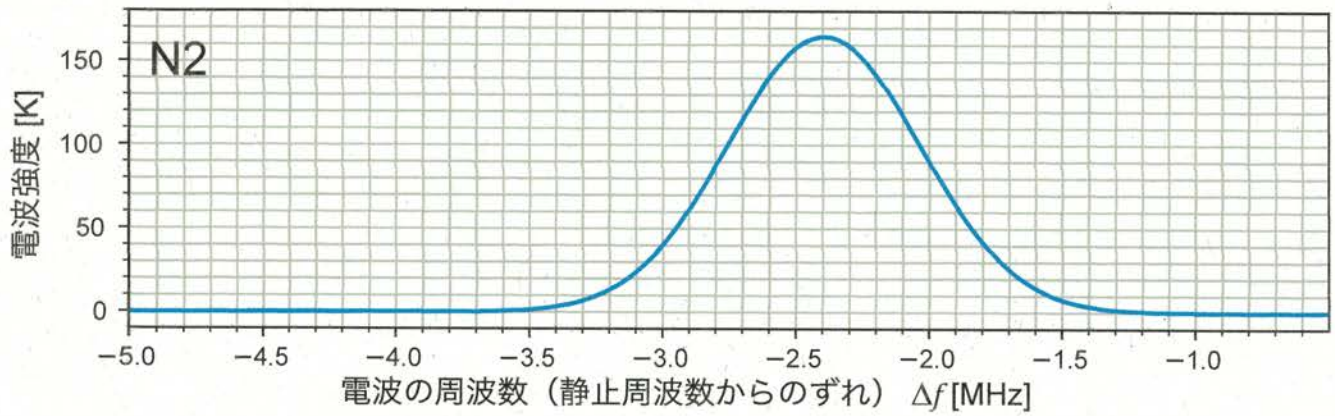
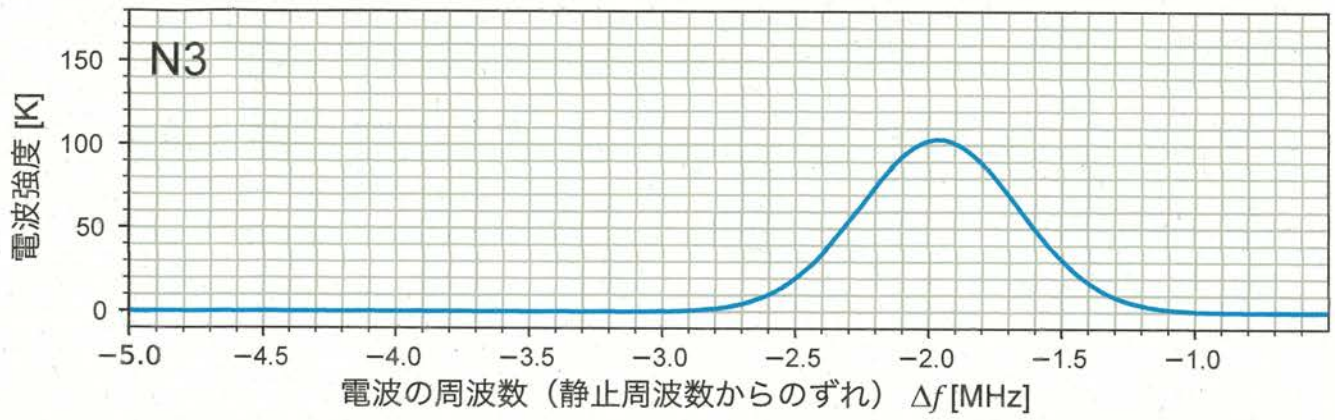


図 3-2. 星の北側(N1 から N3)で測定したスペクトル。

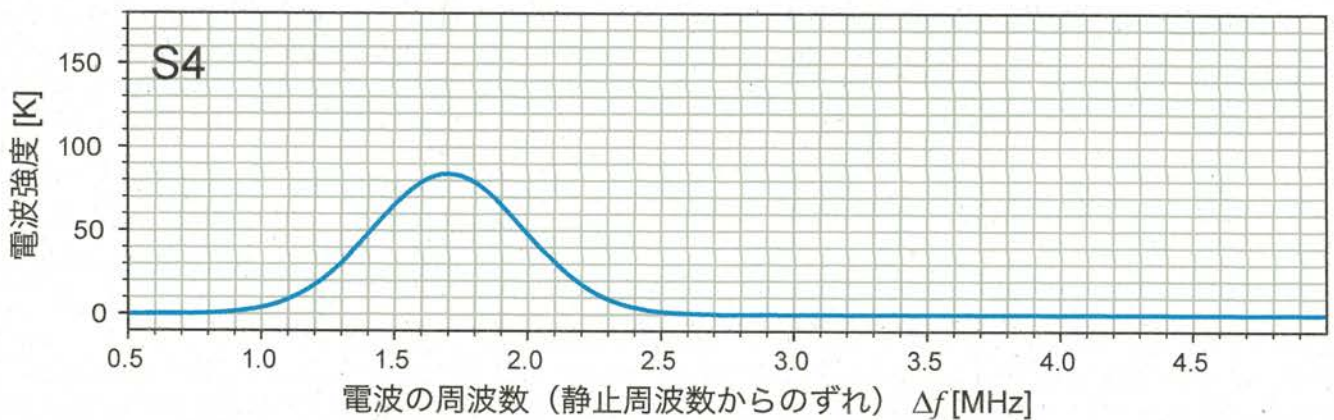
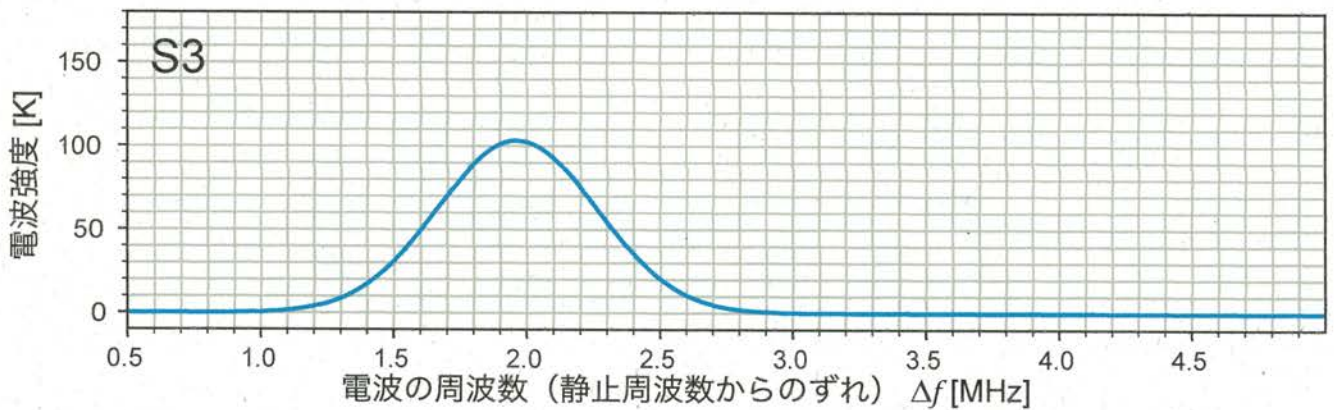
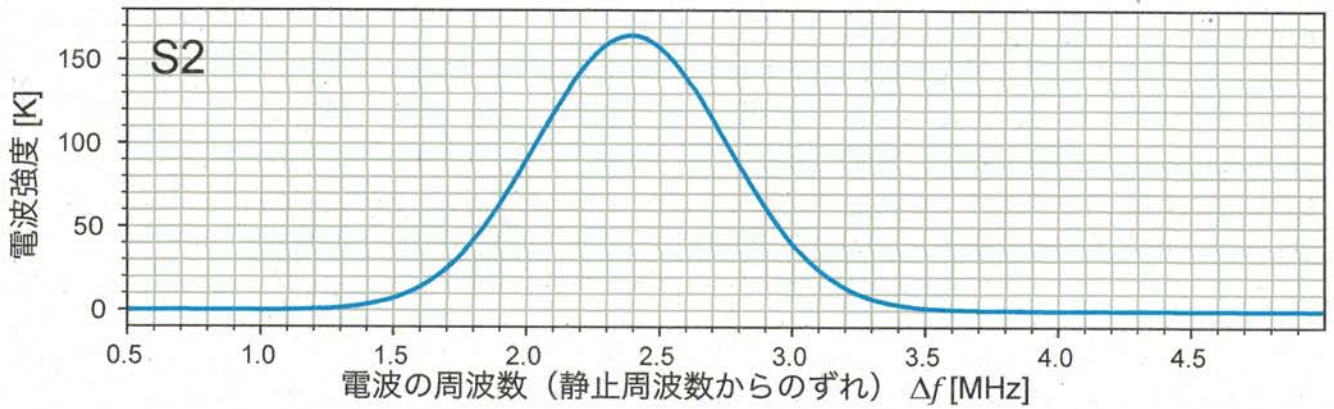
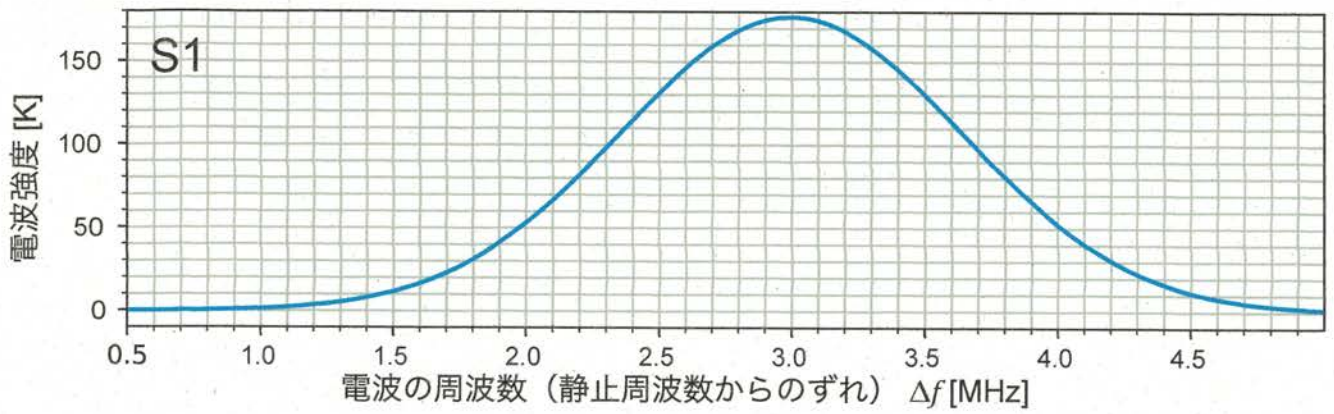


図 3-3. 星の南側(S1 から S4) で測定したスペクトル。

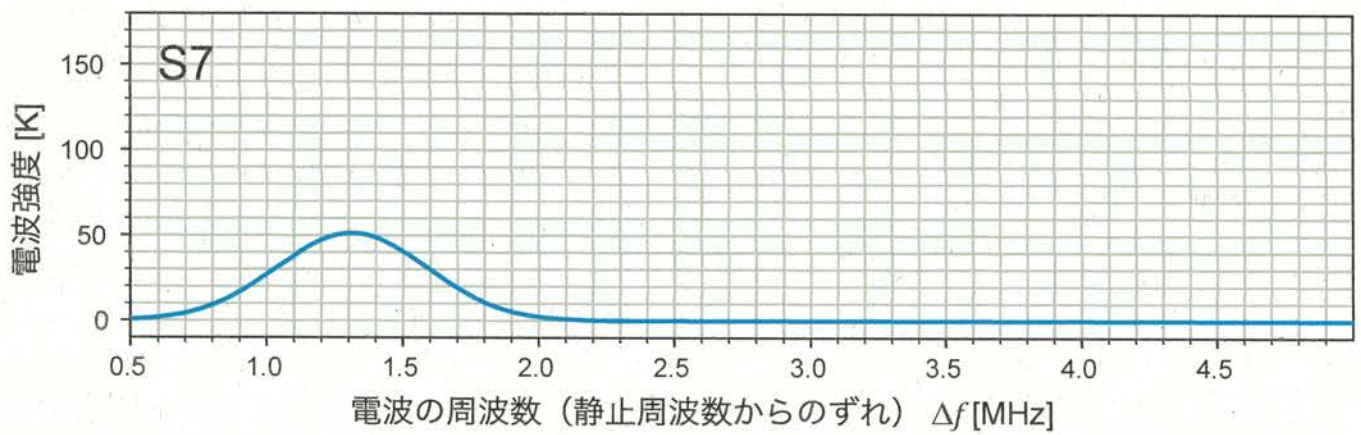
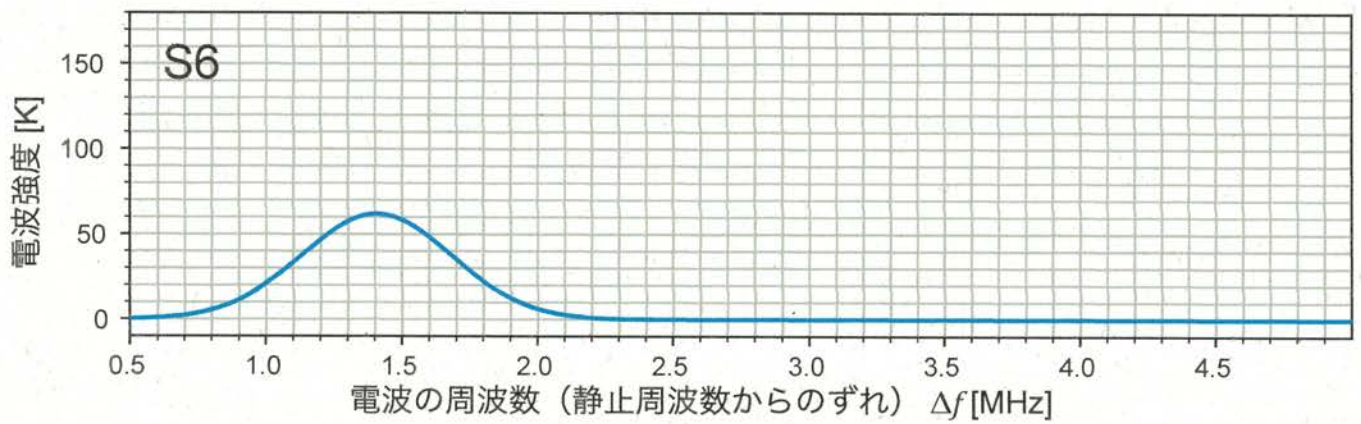
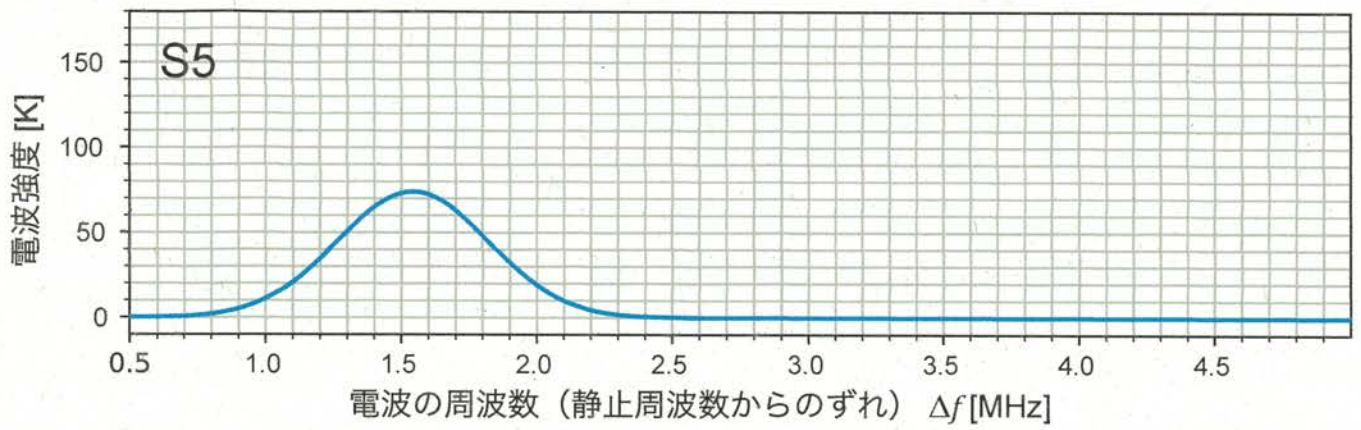


図 3-4. 星の南側(S5 から S7)で測定したスペクトル。