

簡単な電波望遠鏡による低周波電波天文学

1. 簡単な電波望遠鏡

前 田 耕 一 郎*

1. はじめに

1930年代のはじめにジャンスキーは波長 14.6 m (周波数 20.5 MHz) で銀河電波を発見し、これが電波天文学の発端となった。ジャンスキーの発見を確認したのは、電波技術者のリーバーであった。ジャンスキーは腎臓病がもとで、1950年に44歳で亡くなっているが、リーバーは今も健在で、銀河電波の観測に情熱を燃やし続けている。Sky & Telescope 誌 1988年7月号に掲載された記事によると、波長 144 m (2.1 MHz) で銀河電波のマッピングを続けているそうだ。このような低周波においては、電離層による反射を避けるため、上空の電離層の電子密度が低い場所で太陽活動極小期に観測を行わねばならない。これまで地球磁場の南磁極に近いオーストラリアのタスマニア島において、面積 223 エーカー (直径約 1.1 km の円の面積) のダイポールアレイにより南半球のマッピングを行ってきた。今度は、次の太陽活動極小期 (1996年) に北半球のマッピングを行おうと、タスマニアに設置されているアレイ以上のものをカナダに建設しようと考えている。1996年、リーバーは84歳になっている筈だ！ 近年はミリ波等の高周波における観測が盛んだが、低周波にも未開拓の分野はある。宇宙空間か月に大きなアレイを建設し、電離層のために地上からは観測できない低周波で、しかも高分解能で周囲を見渡したとしたら、どのような発見がなされるだろう。高周波のみならず低周波を極めることもまた重要である。

私は、12年あまり木星デカメータ波の観測を行ってきた。デカメータ波とは、波長が 10 m 程度の短波帯の電波を指し、周波数で言うと 20 MHz 程度の HF 帯の電波である。HF 帯にはアマチュア無線のバンドがあり、通信型受信機が市販されている。私は、専門的な工夫を施しつつ通信型受信機を木星電波の観測に用いている。以前から、電波天文学の普及には、知識を広めるだけではなく、多彩な観測の行える簡単な電波望遠鏡の開発が欠かせないと考えていた。デカメータやメータ波帯であれば、市販の機器で簡単に電波望遠鏡が構成できるし、木星の他にも銀河 (我々の銀河)、太陽、カシオペア A、

シグナス A などの強い電波源がある。最近、私は通信型受信機をベースにした簡単な電波望遠鏡 (干渉計も含む) により、実際に色々な電波源からの電波を観測する機会を持ち、資料を得た。今月より隔月 5 回の予定で、これまでに得た観測資料を紹介すると共に、通信型受信機を用いた簡単な電波望遠鏡によって、どのような観測が可能であるかについて考えてみたい。

これから述べる低周波での観測には、一般的に、次のような利点がある。よほどひどい雷雨のときを除いては、いつでも観測ができるので、光の観測のように天候に悩まされることがない。市販のアマチュア無線用の機器が使えるので経費が比較的少なくてすむ。電波の波長が実生活で馴染みのある長さである。このような利点を考えると、簡単な電波望遠鏡による観測は、高校や大学などの電波天文学の教材として有用である。また、アマチュア天文家が電波観測を楽しむのにも適している。

2. 電波観測の原理

簡単な電波望遠鏡を紹介する前に、電波観測の原理についてまとめておく。電気回路の知識を少し必要とするので、むづかしいと思われる場合には、この節は後回しにして読んでいただいてもよい。

電波望遠鏡の原理を考える場合、電波と受信機がアンテナによってどのように結び付けられるかを理解することが重要である。電波は、電磁波の仲間であり、電磁界の振動が電波によって運ばれる。アンテナにより、電波による電界成分か磁界成分の振動が検出される。ここでは、電界成分を検出するアンテナを考えることにする。

図 1a は、極めて簡略化された、電波およびアンテナと受信機を結ぶ回路の概念図である。受信機の入力抵抗 (抵抗値 R_i) がアンテナと接続されている。実際の回路では、リアクタンス成分も考慮する必要があるが、アンテナと受信機が理想的にロスなく接続されている場合には、考えなくともよいので、省略しておく。電波がアンテナを通過するとアンテナの回りに電界の振動が起こる。アンテナはアルミ等の金属で出来ており、金属内の自由電子が振動電界に応じて運動するので、アンテナと入力抵抗を結ぶ回路に振動電流が流れる。入力抵抗の両端に生ずる電位差の変動が入力信号となり、受信機により増幅される。

* 兵庫医大 Koitiro Maeda: Low Frequency Radio Astronomy with Simple Radio Telescopes 1. A Simple Radio Telescope

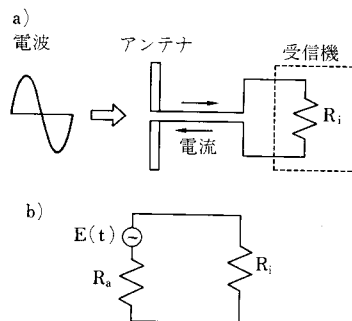


図1 電波、アンテナおよび受信機の関係。a) 電波、アンテナおよび受信機の関係を示す概念図。b) アンテナと受信機を結ぶ回路の等価回路。

天体からの電波は、ほとんどの場合（ここで考える天体電波はすべて）、色々な周波数成分を連続的に含んだ、いわゆる雑音電波である。雑音電波がアンテナに入射すると、アンテナと入力抵抗を結ぶ回路には色々な振動数成分の重ね合わさった電流（雑音電流）が流れる。入力抵抗では熱エネルギーとして電力消費がおこる。また、アンテナに雑音電流が流れるので、アンテナから電波放射として電力が失われる。天体電波が入射しているアンテナは、等価的に、雑音電流を流す起電力源とその内部抵抗（抵抗値 R_a ）によって表わすことができる（図 1b）。内部抵抗は、電波放射により失われる電力を表現するための仮想的な抵抗で放射抵抗と呼ばれる。図 1b の等価回路において、起電力源（アンテナ）から入力抵抗に最大電力を得る条件は、 $R_i = R_a$ である。 $R_i = R_a$ のとき、アンテナと受信機は整合している、あるいはマッチングがとれていると言う。以下では、アンテナと受信機は整合状態にあるものとしよう。このとき、アンテナに生ずる起電力を $E(t)$ とすると、入力抵抗で消費される平均電力 P は、

$$P = \langle E^2(t) \rangle_t / 4R_i \quad (1)$$

である。ここで、 t は時間、 $\langle \rangle_t$ は時間平均を表す。

電流が抵抗を流れると熱が発生するが、その逆のプロセスとして、回路中の抵抗が熱せられると回路に雑音電流が流れる。これは、熱により雑音電流を流すような起電力源が抵抗に生じるために起こると考えられる。電波の入射によりアンテナに生ずる起電力源を熱による起電力源と等価的に考えることが出来る。ナイキストの定理を用いると、アンテナに生ずる起電力 $E(t)$ の 2 乗平均値は次式により放射抵抗の等価雑音温度 T_a （これをアンテナ温度と呼ぶ）に換算できる。

$$\langle E^2(t) \rangle_t = 4kT_a R_a \Delta f \quad (2)$$

ここで、 Δf は考えている周波数帯域幅、 k はボルツマン定数 (1.38×10^{-23} [JK⁻¹]) を表し、温度は絶対温度を用いる。 $R_a = R_i$ であるから、(1)式と(2)式より

$$P = kT_a \Delta f \quad (3)$$

を得る。(3)式は、単位周波数幅当り kT_a の電力が入力抵抗で消費されることを示している。このように、アンテナ温度を用いると、アンテナを介して電波から受信機に供給される電力が簡単な形で表せるので便利である。 $R_i = R_a$ であるので、放射抵抗で消費される電力、つまりアンテナから放射によって失われる平均電力もまた $kT_a \Delta f$ である。

さて、以上においては、内部雑音の全くない理想的な受信機が仮定されているが、実際の受信機においては、内部雑音が無視できない。内部雑音の大きさは、入力抵抗の等価雑音温度 T_i を使って表現できる。内部雑音を考慮すると、入力抵抗で消費される電力は、 $k(T_a + T_i) \cdot \Delta f$ となる。 T_a と T_i の大小関係により、アンテナから得られる電力と内部雑音による電力が比較できる。

点源とみなせる電波源の場合、アンテナに到達した電波は、平面波に近い。電波の進行方向に垂直な面の単位面積を通して、1秒間に電波により運ばれる単位周波数幅当りの電磁エネルギーをフラックス密度と呼ぶ。アンテナを介して電波より入力抵抗に供給される電力 P と電波のフラックス密度 S を結び付けるために、アンテナの有効面積（電波に対するアンテナの断面積） A_e を次式により定義する。

$$P = CSA_e \Delta f \quad (4)$$

電波による電界の振動方向の偏りを偏波と呼ぶが、(4)式の C は、電波の偏波とアンテナの偏波特性により決まる定数である。例えば、無偏波の電波を直線状のアンテナで受信する場合、 $C = 1/2$ である（以下では、 $C = 1/2$ を仮定する）。 A_e の大きさは、アンテナに対する電波の入射方向によって異なるので、アンテナはある指向性を持つ。単にアンテナの有効面積と言う場合には、その最大値 (A_m) を指し、普通、無指向性アンテナの有効面積に対する比をとってゲイン（利得）と呼び、デシベル (dB) 値で表示する。無指向性アンテナの有効面積は、熱力学的平衡状態を考察することにより求められ、電波の波長を λ とすると、 $\lambda^2/4\pi$ である。したがって、ゲインが G (dB) とすると、

$$A_m = 10^{G(\text{dB})/10} (\lambda^2/4\pi) \quad (5)$$

である。(3)式と(4)式から、点状電波源にアンテナを向けたときのアンテナ温度 T_a を求めると、

$$T_a = SA_m/2k \quad (6)$$

となる。

広がった電波源の場合、ある方向の単位立体角から来る電波によるフラックス密度（輝度） B を考える。入力抵抗に取り出される電力は、各方向の輝度 B と対応する方向の有効面積 A_e をかけたものを、電波源の広がり Ω_s の立体角について積分して得られるので、

$$T_a = \int_{\Omega_s} BA_e d\Omega / 2k \quad (7)$$

となる。黒体放射の場合、輝度は黒体の温度のみによって決まる。輝度 B を黒体放射の式（電波の場合、レイリー・ジーンズの式が使える）によって黒体の等価温度に換算し、輝度温度と呼ぶ。輝度温度を T_b とすると、

$$T_b = B\lambda^2 / 2k \quad (8)$$

である。銀河電波のように空一面に比較的一様に広がった電波源（平均輝度温度を $\langle T_b \rangle$ とする）の場合、有効面積の立体角 4π ステラジアンについての積分値は λ^2 であるので、(7)式と(8)式より、

$$T_a \sim \langle T_b \rangle \quad (9)$$

と考えてよい。

さて、標準的な電波望遠鏡の場合、受信機に入力された信号は増幅された後、2乗検波によって入力抵抗で消費される電力に比例する（したがって、 $T_a + T_i$ に比例する）直流電圧に変換され、この直流電圧がペンレコーダや磁気テープに記録される。キャリブレーションを行い、 T_a を知れば、(6)式や(7)式から電波源のフラックス密度あるいは輝度についての情報が得られる。後で述べるように、我々の簡単な電波望遠鏡の場合、増幅された信号の処理の仕方が標準的な電波望遠鏡とは異なる。

3. 観測できる電波源

通信型受信機により、普通、30 MHz 程度までの電波が受信できる。また、オプションの周波数コンバータを用いると、さらに高い周波数での受信が可能となる。21, 28, 50 MHz にアマチュア無線用のバンドがあり、アンテナや部品が手に入りやすいので、20-50 MHz の範囲で強い電波源を拾い出してみよう。表 1 に、静穏な太陽コロナからの電波、太陽コロナ中の活動現象に伴われ突発的に放射される電波（太陽電波バースト）、木星電波、カシオペア A からの電波のフラックス密度および銀河電波の平均輝度温度を示す。太陽電波バーストの場合、バーストによってフラックス密度が大きく異なるので、表 1 には最大値が与えられている。シグナス A はカシオペア A と同程度の強さと考えてよい。アンテナから受信機に入力される信号の大きさをアンテナ温度によって表現することができる（前節参照）。ゲイン 8 dB のアンテナ（3素子八木アンテナ程度）で観測するものとして、各電波源からの電波によるアンテナ温度を計算してみよう。前節で述べたように、銀河電波によるアンテナ温度は平均輝度温度とほぼ等しくなると考えてよい。他の電波源については次のように計算する。 $G(\text{dB})=8$ を(5)式に代入すると、

$$A_m = 0.5\lambda^2 \quad (10)$$

を得る。各周波数 f [MHz] に対応する λ [m] を

表 1

| 周波数 [MHz] | フラックス密度 [Jy*] | | | 輝度温度 [K] | |
|-----------|-----------------|-------------|--------|-----------------|-----------------|
| | 太陽コロナ | 太陽バースト(最大) | 木星 | Cas A | 銀河電波 |
| 20 | 2×10^8 | $\sim 10^9$ | 10^6 | 4×10^4 | 3×10^4 |
| 30 | 6×10^8 | $\sim 10^9$ | 10^5 | 3×10^4 | 10^4 |
| 50 | 2×10^4 | $\sim 10^9$ | — | 2×10^4 | 3×10^3 |

* $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$

$$f[\text{MHz}] \cdot \lambda[\text{m}] = 300 \quad (11)$$

なる関係より求め、(10)式により A_m を計算する。 A_m と表 1 のフラックス密度 (S) を(6)式に代入してアンテナ温度を計算する。計算結果を図 2 に示す。受信機の内部雑音は、機種によってかなり異なるが等価雑音温度が 10^4 K 程度と考えて議論してよい。図 2 より次のようなことがわかる。銀河電波によるアンテナ温度は 30 MHz で受信機の雑音温度と同程度である。太陽電波バーストの場合は、どの周波数でも非常に強く、アンテナ温度は受信機の雑音温度の 1000 倍にもなることがある。一方、静穏な太陽コロナの成分の場合、内部雑音の 1/100 程度と弱い。木星電波は、20 MHz あたりでは内部雑音や銀河電波を上回っているが、電波源自身のカットオフ周波数 39 MHz に向かって急激に弱くなる。したがって、木星電波を観測するなら、20-25 MHz あたりが適当であろう。銀河電波は、点状電波源を観測する場合にもバックグラウンドとして常に受信され、内部雑音と同様の役割をする。静かな太陽コロナの成分やカシオペア A のように内部雑音や銀河電波に比べて弱い信号を検出するに

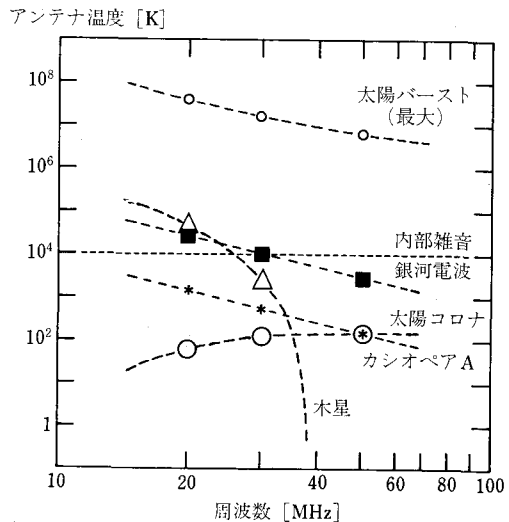


図 2 強い電波源 (20-50 MHz) からの電波によるアンテナ温度。ゲイン 8 dB のアンテナについて計算された値である。

は、干渉計による観測を行う等の工夫が必要となる。

4. 簡単な電波望遠鏡

ここで用いる簡単な電波望遠鏡は、アンテナ、通信型受信機、付加回路(検波回路)、ペンレコーダによって構成される。アンテナとしては、自作のダイポールアンテナや市販の八木アンテナを使用する(図3a)。アンテナについては、次回、銀河電波の観測のところで詳しく述べる。アンテナより後ろの部分の実態図を図3bに示す。私がテスト観測に用いた受信機は、主に日本無線のNRD-525である。通信型受信機の入力抵抗は、普通50オームであるから、特性インピーダンスが50オームの同軸ケーブル(例えば5D-2V)でアンテナと通信型受信機を接続する。受信機は、AM(振幅変調)受信にセットし、AGC(自動ゲイン調節)スイッチをOFFにして用いる。したがって、AGCがOFFにできる受信機を求める。受信機のRECORDジャックから取り出したAF

(音声周波数)信号を、付加回路を通した後ペンレコーダへと導く。新品の場合、通信型受信機は15万円前後、ペンレコーダも同程度の費用が必要だが、中古を手に入れることもできる。CQ ham radioなどの雑誌の広告で探せば、新品の数分の1以下の費用で入手できることもある。新品の受信機の場合、接続に必要なコネクタやピンは付属しているの、特に用意しなければならないのは、付加回路(図3c)だけである。アマチュア無線用機器を扱っている電気店で、必要な抵抗、コンデンサーおよび検波用のダイオード(例えば1K60)を手に入れば、付加回路は簡単に組み立てられる。なお、アマチュア無線用機器としてどのようなものが市販されているかを知るには、ハムラジオ総合カタログ(CQ出版)を見るとよい。

図4にアンテナより導かれた信号がどのように処理されるかを示す。受信機に入力される信号は、アンテナの感度のある、比較的広い帯域幅内の周波数成分の重なり合ったもので、時間的に激しく変動している(図4a)。受信機の中では、まず高周波数で増幅された後、より低い周波数(中間周波数)に変換される。普通、2回の周波数変換が行われる。中間周波数では、主要な増幅が行われると共に帯域幅が数kHzに絞られる。中間周波数の通過帯域幅を Δf とすると、振幅が $1/\Delta f$ 程度でふらつく信号が出力される(図4b)。振幅のふらつきは、AM検波によりAF信号としてRECORDジャックから取り出せる(図4c)。このAF信号(交流信号である)の振幅は受信機に入力された信号が大きくなるほど増大する。付加回路によって、AF信号の検波(図4d)および平滑化(図4e)を行い直流電圧とし、この直流電圧をペ

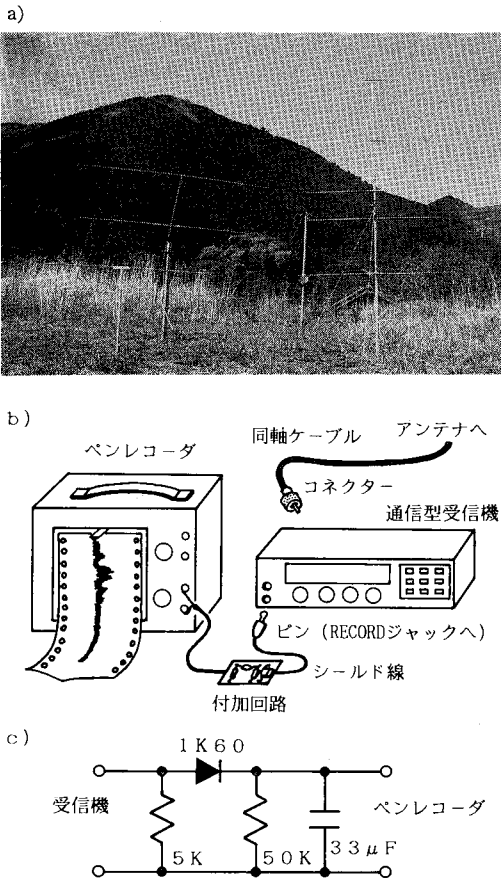


図3 簡単な電波望遠鏡。a) 観測に用いられるアンテナ(写真): 左よりダイポール(50MHz用)、3素子八木アンテナ(30MHz用)、5素子八木アンテナ(50MHz用)。b) 受信機、付加回路およびペンレコーダの実態図。c) 付加回路。

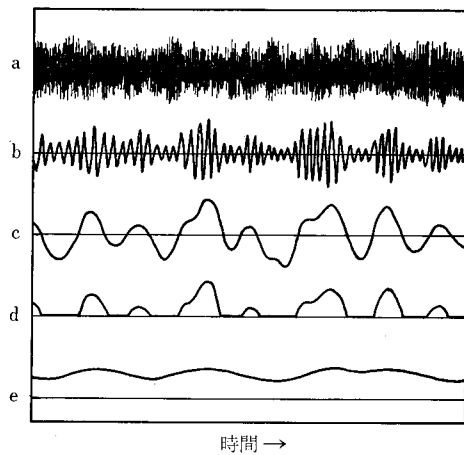


図4 簡単な電波望遠鏡における信号の処理。a) 高周波数、b) 中間周波数、c) AM検波出力(AF信号)、d) AF信号を検波した信号、e) 付加回路からの出力。

ンレコーダによりペンの振れ幅として記録する。AM 放送や AM 通信の場合、AF 信号は音声信号に他ならない。我々は天体から電波に乗せて送られてくる音（雑音だが）の大きさを測定して電波の強さを知らうと言うわけである。

受信系のチェックは、次のようにして行くとよい。受信機、付加回路およびペンレコーダを接続する。受信機を AM 受信にセットし、AGC スイッチを OFF にする。帯域幅は WIDE (5 kHz 前後である) にする。簡単のため、受信機の入力端子には何もつなげず開放端とする。中間周波出力の大きさは RF ゲインのつまみで、AM 検波後の AF 信号の増幅度は AF ゲインつまみで調節できるようにになっている。RF, AF ゲイン共に中程度にしておく (NRD-525 の場合、RECORD ジャックからの出力の調整は出荷時に調整されている状態のままとし、RF ゲインを中程度とする)。受信機のスイッチを ON とし、ペンレコーダを動かせると、受信機の内部雑音によりペンが振れるので、適当な振れ幅となるようにペンレコーダの感度を調節する。次に、適当な紙送りスピードで書かせながら、RF ゲインをゆっくりと変化させてみる。図 5 に示すように、ゲインを上げると振れ幅が大きくなり、ゲインを下げると振れ幅が小さくなれば、正常に作動していると考えてよい。これで、後はアンテナをつなぎさえすれば、簡単な電波望遠鏡ができあがる。

受信機の入力信号がある瞬間に 0 となっても、入力信

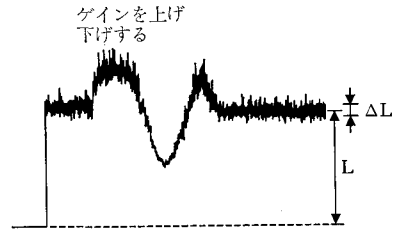


図 5 内部雑音を用いた受信系のチェック。受信機のゲインを上げ下げすると、それに応じてペんが上下する。

号に対応するペンレコーダのペンの振れ幅は瞬時に 0 とはならず、ある反応時間の後に 0 となる。自然対数の底を e とすると、 $1/e (=0.37)$ に落ちるまでにかかる時間で受信系の時定数が定義される。ペンのふらつきの幅 ΔL とペンの振れ幅 L (図 5 参照) の比 $\Delta L/L$ は、受信機の帯域幅 Δf と受信系の時定数 τ により決定され、 $(\tau \Delta f)^{-1/2}$ の程度である。付加回路 (図 3c) のコンデンサーの容量を変えることにより、受信系の時定数を変えることができる。測定によると、 $33 \mu\text{F}$ のとき $\tau \sim 0.3$ 秒、 $100 \mu\text{F}$ のとき $\tau \sim 0.5$ 秒である。観測対象や観測環境により時定数を調節する必要が生ずることがあるが、 $33 \mu\text{F}$ あたりを一応の基準値と考えておくとよい。

次回は、今回紹介した簡単な電波望遠鏡による銀河電波の観測について述べる。

雑報

特異小惑星 1989 FC

IAU 回報 4767 号によると、H. E. ホルトと N. G. トマスはパロマー天文台の 46 cm シュミットで 1989 年 3 月 31 日に撮影したフィルム上に高速で移動する小惑星を発見した。スミソニアン天体物理学センターの B. G. マースデンは、3 月 31 日、4 月 2, 3, 4 日の観測から軌道要素を算出したところ、発見前の 3 月 31.0 UT には、地心距離 0.005 AU (=75 万 km) の場所を通過していたことが判明した。この値は恐らく地心距離としては最小の記録ではなからうか。尚、地心距離が小さい彗星として騒がれた IRAS-Araki-Alcock (=1983d=1983VII) の最接近時の値は 0.031 AU であった。(香西洋樹)

小惑星 (2060) キロン

IAU 回報 4770 号によると、ハワイ大学の K. J. ミーチと、キットピーク国立天文台の M. J. S. ベルトンは小惑星 2060 番キロンはコマを持っていると報じている。彼女らは、キットピーク国立天文台の 4 m 望遠鏡主焦点に CCD を使用して 4 月 10 日 (UT) に観測した。測光観測条件に近い条件下での観測で表面の輝度は低く、南東方向に約 5 秒角延びた形態を示していた。シーイングからキロンの直径は 0.9 秒角、光度は Mould の r 等級で 16.4 等であった。翌 4 月 11 日にはあまり良くないシーイングではあったがコマの様子は総体的には 4 月 10 日と同様であった、と報告している。

発見された直後から、小惑星か？ 彗星か？ と騒がれていたキロンである。ミーチ達の観測が事実なら、これは彗星ということになる。追試が待たれることになった。(香西洋樹)