

暗黒物質か反重力か？

宮本 昌典*

1. はじめに

ここでいう暗黒物質 (Dark-Matter) とは, Missing Mass, Nonluminous Matter, あるいは Invisible Mass ともいわれ, いかなる波長の電磁波をもってしても今までのところ不可視で, 重力相互作用だけで検出されている質量のことである。小は銀河スケールから, 銀河団, 大は超銀河団に至るまで, 宇宙空間は暗黒物質で充満しているという薄気味の悪い宇宙像が, 現在の天文学や宇宙進化論では定着しつつあるように見える。一方では, その恐怖感を払拭するためか, 力学法則を改竄するというタブーを侵す者さえ現われはじめた。

宇宙空間で見えるもの (光量) が, 10 kpc 程度以上の空間を考えると, 質量密度のよい指標ではないということである。もし, 宇宙の圧倒的質量が可視光量に対応しないとすれば, 今まで積み上げられてきた質量のからむ研究成果——銀河・銀河団等の大スケールの力学や進化論——は全くあてにならないことになってしまう。

2. 力学質量と光学質量

事の発端は 1933 年の Zwicky の論文にある。Virgo 銀河団の銀河の視線速度の測定に基づいて, この銀河団が重力相互作用のもとに全体として統計的力学平衡にあるとの仮定 (ヴリアル定理の適用) から, Zwicky がこの銀河団の総質量を見積ると, 個々の銀河の光量から導かれた質量の総和を一桁以上も上まわってしまった。個々の銀河の質量を高々 $10^{11} M_{\odot}$ 程度とするなら, 他の銀河団に対しても, 同様に, 見える質量 (光学質量) と見えない質量 (力学質量=暗黒物質) との間の大きな喰い違いの事態は変わっていない。銀河団によっては, この喰い違いは二桁にもなる。

一方, 暗黒物質が個々の銀河自体の中にあるのかどうか確かめる意味もあって, 1960 年代 Burbidge 夫妻らによって, 銀河の回転曲線の観測が精力的に行われた。しかし, 大多数の銀河の場合, 回転曲線は回転速度 θ が高々最大値を与える範囲までしか得られなかったので, 銀河の光学限界 (通常は, 表面輝度が 26.5 等級を与える Holmberg 半径 $=R_{26.5}$) に至るまでの全体的な銀河

回転は不明であった。当時は, 銀河回転は, 最大値に達してからケプラー回転 ($\theta \propto R^{-1/2}$) に従って急激に減少すると想像されていた。

1970 年代前半から, 光学天体より広範囲に分布する中性水素の電波観測により M31 や M81 をはじめ近傍銀河の回転曲線が観測されはじめた。これらの電波観測は, 上述の楽観的想像に反して, 銀河回転は銀河中心から遠方で急激に減少することはなく, むしろ平坦 (flat rotation curve) であることを示唆していた。一方, Rubin 達 (1980~1985) は, 1970 年代後半から, 分光器の改良とイメージ管の導入によって, スリット長に収まる程度の見掛け上小さな渦状銀河約 60 個の光学限界に到るまでの回転曲線を蒐集してきた。ほぼ平行して, Bosma (1981) 達も電波観測によって多数の銀河の HI 速度場を解析してきた。

彼等が到達した一般的結論は, 観測された殆んど全ての回転曲線は, 分類型によらず相似であって, 最大値に達した後, そのまま遠々と実に数十 kpc に至るまで平坦 ($\theta \sim \text{const}$) である, というものであった (図 1)。彼等が得た回転曲線の中には, 銀河周縁部の歪み (Warp)† や伴銀河の摂動によって明らかに乱されているものもあるが, 一般的には光学限界や HI 分布限界に至っても大きな乱れはなく減少傾向もないから, 平坦な回転曲線はこれらの限界を越えても依然として存続しているように見える。

銀河というものを自己重力でまとまった孤立系であるとするなら, 上述の平坦な回転曲線は, 半径 R までに含まれる質量 $M(R)$ が $M(R) \propto R$ に従うことを意味する。少くとも観測される範囲内 ($R \leq 50$ kpc) で, 銀河の質量分布は等温ガス“球”のようになっている。勿論, この質量分布を光学・HI 限界外へ外挿すれば, 銀河質量は発散してしまう。そこで, 銀河質量は, 便宜上, 光学限界 $R_{26.5}$ までの質量ということになっている。しかし, 銀河面に垂直な方向の重力分布も $M(z) \propto z$ を要求しているかどうか直接確かめた観測事実はない。

さて, 個々の渦状銀河 (円盤状銀河) の光度分布 $I(R)$ は, de Vaucouleurs-Freeman の経験則, いわゆる exponential law $I(R) = I_0 e^{-aR}$ によって一般的によく表現される。この場合, 銀河の総光量 L は $L = 2\pi I_0/a^2$ で与えられる (有限!)。銀河の光学質量は M/L 比を適当に与えて導かれる訳だが, この比の値自体, 星誕生時の初期質量関数をどう定めるかという任意性 (Larson

* 東京天文台 Masanori Miyamoto: Dark-Matter or Anti-Gravity?

† そのような Warpこそ, 光学限界外に大量の暗黒物質が存在する証拠だと主張する者が増えてきた。

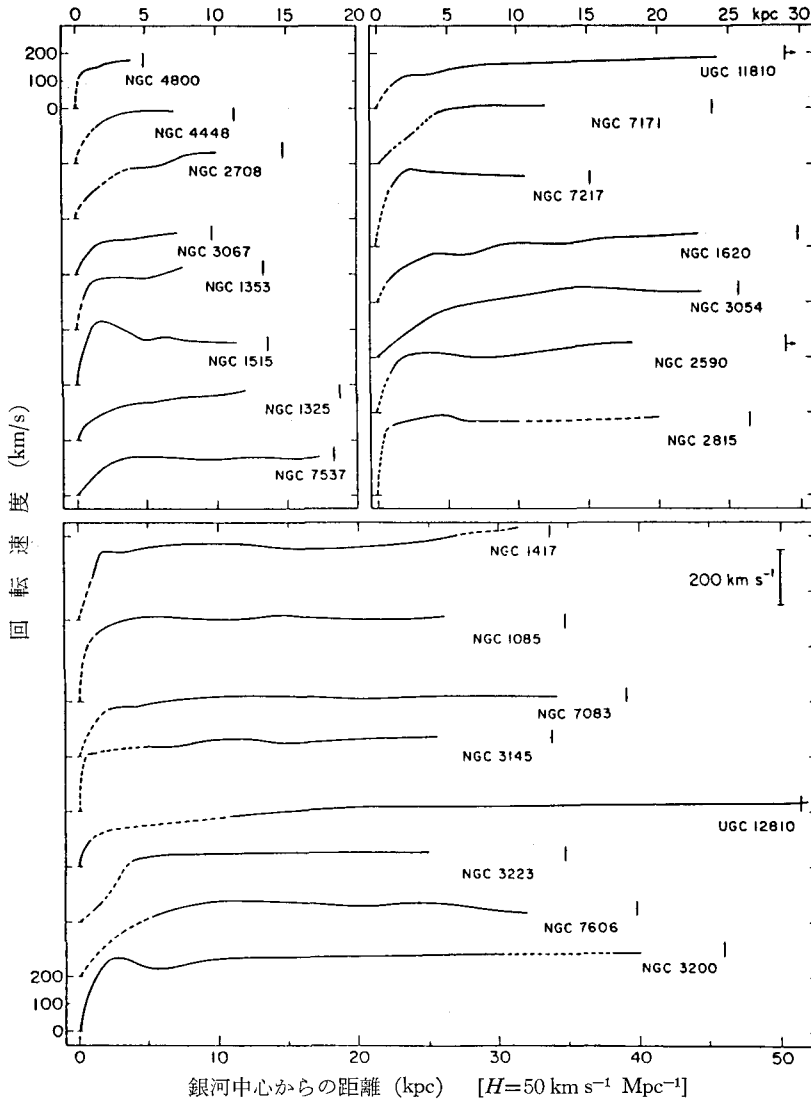


図 1 Sbc 型銀河の回転速度分布 (Rubin 等 (1982) による)

and Tinsley 1979 によれば $1 \leq M/L \leq 10$) も加わって、議論が絶えない。とにかく、 M/L 比を与えれば、光度分布を質量分布に変換できる。exponential law から導かれる銀河の回転曲線は、当然のことながら、最大値をとってから $\theta \propto R^{-1/2}$ に従って減少する。従って、銀河の光学質量は、平坦な回転曲線から直接導かれる質量 ($M(R) \propto R$) と大きく喰い違ふ。光学限界内には、光学質量と少くとも同量の暗黒物質があると想像されている (Bahcall 等 1985)。

とはいっても、光るもの見えるものが実体であるという経験的・本能的感覚は依然として強く、銀河を中心部、円盤部、ハロー部、等々に分解して、それらの光度分布から銀河全体にわたる質量分布を求めるという手法

が一方では用いられている。しかし、対象とした銀河に対し回転曲線の観測がない場合に限り、この手法は逃げ口上にはなるが、光度分布と平坦な回転曲線とを両立させようと思えば、とたんに大量の暗黒物質を得体の知れぬハロー部にもつめ込まなくてはならなくなる。このような手法は盲目的で無駄あがきのようにも見えるから、Luminosity ショーヴニズムと悪口をいう人もいる。

大量の暗黒物質の存在を示唆する別種の観測事実がある。1978 年の EINSTEIN 衛星の打上げによって、M87 (ジェット銀河) をはじめ早期型銀河 (E 型, S0 型) のまわりの光学限界をはるかに越えた広い領域から、X線が放射されていることがわかってきた。X線が放射されるためには、これら銀河をとりまくハローガスの温度は

10^7 K 以上なくてはならない。このような高温ガスを重力で束縛するためには、並の銀河質量では足りず (Fabricant 等 1983, Forman 等 1985), 特に M87 は $10^{13} M_{\odot}$ もの質量が必要であるから、光学質量の 10 倍以上の暗黒物質が要求されることになる。

この他、連銀河 (binary galaxies) の相対速度と相互距離の統計 (Ostriker 等 1974, White 等 1983) は、軌道模型次第では相互距離と M/L 比とは比例関係を示す。これも、考慮する空間が大きくなる程、より多くの暗黒物質が要求されることを意味する。もっとも、見掛け上の連銀河が真の力学対でなければ、このことは何ら積極的な意味を持たない (Burbidge 1975)。

3. 暗黒物質の正体

最近の宇宙進化論によれば、Einstein-de Sitter の inflationary universe が居心地よさそうで、そのときには宇宙の密度パラメータ $\Omega = 8\pi G\rho/3H_0^2$ (宇宙の物質密度 ρ の臨界密度 ρ_0 に対する比) は、ほぼ 1 に等しいことを予測している。つまり、宇宙は漸近的に閉じることになっている。一方、宇宙開闢時の baryon 優勢宇宙における核融合と観測される重水素量とから導かれる Ω は 0.1 程度にしかならず、可視質量から直接導かれる値もこの程度である。この一桁近い較差は何を意味するだろうか？ そこで、前述の大量の暗黒物質の存在を示唆する観測事実は、 $\Omega \sim 1$ の宇宙進化論に大いに利用されることになった。

暗黒物質の正体は何だろう。baryon 派は、昇華した水素の塊り (雪球), 燃え出すに至らなかった木星様天体 (jupiter), 小質量星, ブラックホール, etc. の可能性を考えているが形勢はよくない。non-baryon 派 (Blumenthal 等 1984) は、ビッグ・バン後残された相互作用の極めて小さな大量の素粒子の存在が、理論的には可能ということ根拠にしている。それら素粒子の熱運動の大小によって、さらに高温微子 (neutrino 等) 派, 温暖微子 (gravitino 等) 派, 寒冷微子 (axion, photino 等) 派にわかれている。さらに話を進めると、温度を異にしたビッグ・バン残骸物質次第で、銀河 or 銀河団 or 超銀河団いずれかのスケールの凝縮が、宇宙膨張を振り切って始まることになるという。このような宇宙像によれば、われわれが宇宙空間に浮かぶ銀河や銀河団を見るとき、豊かな果肉に覆われた桃の種子か西瓜の種子だけ、あるいは、宇宙の化粧だけを見ているにすぎないことになる。ところが、これら大量の non-baryon 物質は、理論的には存在し得ても、相互作用が極めて小さいため、検出されたという報告は未だないのである。

4. 反重力

それでも、宇宙は限りなく黒いと思込まねばならないのだろうか。われわれの銀河系をはじめ渦状銀河の質量分布が、光学限界をはるかに越えて $M(R) \propto R$ に従うとするなら、個々の銀河の力学的・物理的な独立性をどう考えたらよいのだろうか。個々の銀河にも物質分布限界があるとするなら、その限界を銀河間距離の半分とすべきか (アンドロメダ銀河を隣人とするなら、銀河系の質量は $10^{13} M_{\odot}$ 近くにもなる), 潮汐半径とすべきか (相手と自分の質量が既知でなければ決定できぬ), 隣の銀河との間で何 (諍い) が起っているのだろうか、銀河団の銀河間空間の占有権は誰に帰属するか、……全てが渾沌として力学は適用できない。

よくあるように、見えもしない大量の non-baryon 物質の存在を信仰し続けることに痺れをきらした急進派が現われ始めた。彼らは、通常の baryon 物質の存在のみを信じ、宇宙の力学質量と光学質量との喰い違いを除去できしかも宇宙進化論とも矛盾しないように物理法則を修正しようという族である。Tohline (1983) は、銀河スケール以上では $1/R$ の力が加わるように万有引力の法則を修正し、Milgrom (1983) は、加速度が小さな極限で運動の第二法則の修正を提案している。Sanders (1984, 1986) は、ニュートンポテンシャルに湯川ポテンシャルを加えることによって、実質的には重力定数 G を距離の関数にしてしまった。前の二修正案は、宇宙の膨張率が距離スケールによって異なることから、一様膨張宇宙論と矛盾してしまう。

重力と他の 3 つの基本的な力 (電磁気力, 強い相互作用, 弱い相互作用) とを統一して表現しようという最近のいわゆる超大統一理論 (Gibson and Whiting 1981) によれば、重力も何らかの粒子交換によって生ずるといふ。そのとき、重力ポテンシャルは、本来のニュートンポテンシャルといくつかの湯川ポテンシャル成分の和として表現される。どの距離スケールでどのポテンシャル成分が卓越するかは、重力を輸送する粒子質量に依存する。Sanders は、差し当り、銀河スケールではじめて (!) 関与しはじめる一成分の湯川ポテンシャルを導入した。そのとき、質点 M の重力ポテンシャル $\varphi(R)$ は次のようになる:

$$\varphi(R) = \frac{G_{\infty} M}{R} (1 + \alpha e^{-R/R_0})$$

但し、 α と R_0 は結合定数と距離スケールで、観測・実験により決定すべき定数である。無限遠点での重力定数 G_{∞} と局所重力定数 G_0 は、 $G_0 = G_{\infty}(1 + \alpha)$ の関係にある。

反重力 (anti-gravity) は、理論的には除外される理由はないという (Sherk 1979)。そこで、 α は負で -1 に

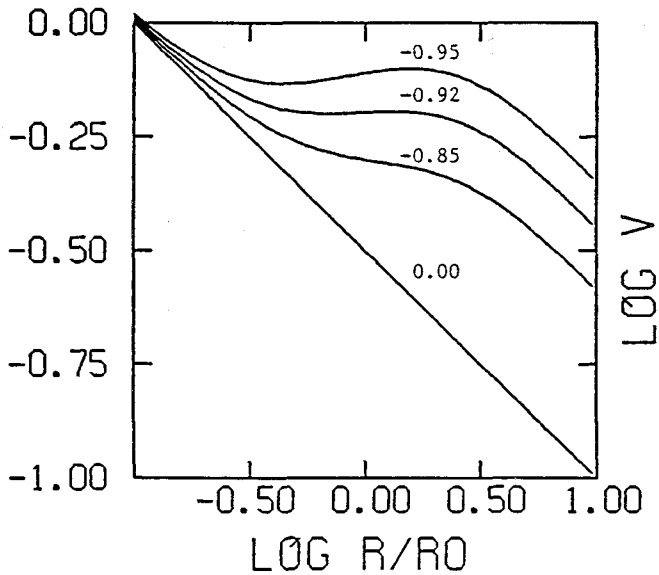


図 2 FLAG における円運動速度 (Sanders (1984) による)

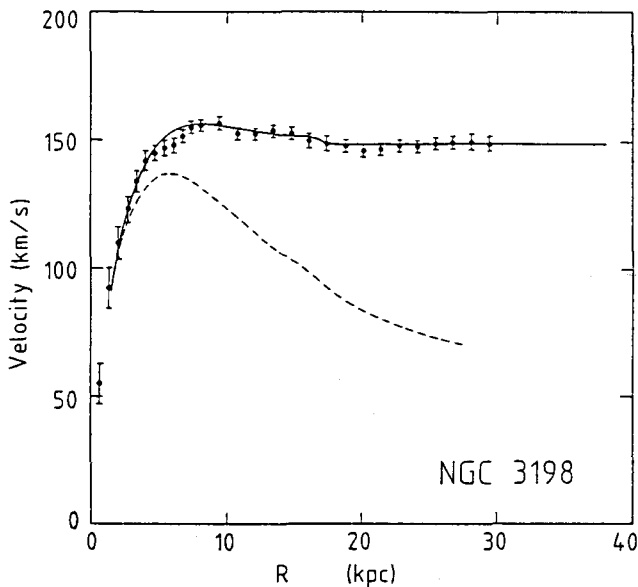


図 3 NGC 3198 の銀河回転 (Sanders (1985) による)

近い値をとるとすれば, “有限” 質量の銀河の平坦な回転曲線が再現される。そのことは, 上記ポテンシャルで表現される質点のまわりの円運動速度を勘定してみれば想像できる。図 2 は, いろいろな α を与えて, 横軸に $\log R/R_0$ をとり, 円運動速度 (単位: $(10 G_0 M/R_0)^{1/2}$) の分布を示したものである。 $R \ll R_0$ では G_0 のもとのケプラー運動, $0.4R_0 \leq R \leq 2.5R_0$ では $\theta \sim \text{const}$, $R \gg R_0$ では再びケプラー運動となる。但し, $R \gg R_0$ では, 重力定数は近似的に G_0 に等しく, 局所重力定数の $1/(1+\alpha)$ 倍になる。上式のように修正された引力の法則を, Sanders に従って, FLAG (Finite-Length-scale Anti-Gravity) と

呼ぶことにする。

5. 反重力の御利益

さて問題は, α と R_0 の値の組を定めたとき, その組が大きさと質量を異にした広範な銀河の回転曲線を表現できるかということである。 Sanders (1985) は, 光学限界を越えた ($R \sim 30$ kpc) 銀河回転曲線の電波観測があり且つ表面輝度分布が exponential law ($R_{25} = 11$ kpc, $a = 2.7$ kpc) でよく表現される渦状銀河 NGC 3198 を用いた。 M/L を適当に調節し, 質量分布が exponential law で表現される円盤の重力分布を FLAG に基づいて求め, θ の観測値を再現できるように α と R_0 を定めると, $\alpha = -0.92$, $R_0 = 24(75/H_0)$ kpc, $M = 3.5 \times 10^{10} M_\odot$, $M/L = 3.5$ となった (図 3)。この α と R_0 の値の組を用いると, 光学的にも電波的にも詳しく観測されている他の渦状銀河の回転曲線も非常によく再現され, M/L 比は 1~3 程度の保守的な値の範囲におさまった。銀河の大きさが大きなほど, M/L 比が大きくなることもなくなった。

銀河の絶対光度 L と代表的な速度 v (回転, 速度分散) との間の統計的な関係, いわゆる Tully-Fisher relation, $L \propto v^b$ (絶対等級 $\alpha - 2.5b \log v$) は, 遠方銀河の距離指数決定において重要な役割を果している。しかし, 銀河の傾き, 内部吸収, 波長域, etc. の補正の不正確さに原因して, この関係式のゼロ点と指数 b の決定値は, 著者によって大きく違う: Bottinelli 等 (1980) は $2.5b = 5.0$, Rubin 等 (1982) は $2.5b = 10.0$, Richter と Huchtmeier (1984) は $2.5b = 7.2$ を与えている。5 と 10 の値には, 多少の理論的根拠が与えられているが, はっきりしていない。FLAG によれば, 平坦な回転曲線を示す大型銀河では, 理論的には L (又は M)

$\propto \theta^2$ でなくてはならぬという。しかし上記観測事実を信用する限り, このことは必ずしも FLAG の成功を意味しない。

何はともあれ, 考慮する空間が大きくなる程, ますます大量の暗黒物質が要求されるという力学質量と光学質量との間の大きな食い違いは, FLAG の導入によって一応解消することになる。そのような食い違いの根源は, 質点力学的平衡であろうと流体力学的平衡であろうと, まずわれわれは

$$M \propto v^2 R / G_0$$

を考慮することによる。 $R_0 = 24$ kpc とすれば, 15 kpc 以

上の大きさを取扱うときには、局所重力定数 G_0 ではなく (図 2), むしろ G_∞ を用いるべきだったということになる。 $G_\infty=12.5G_0$ を用いれば、銀河団のヴァリアル質量も X-線銀河 (早期型銀河) の質量も、常識的な値の範囲内におさまり、強いて暗黒物質の概念を導入しなくとも済む。

FLAG は、今のところ Einstein-de Sitter の宇宙進化論とも矛盾しない: FLAG においても、 $R \gg R_0$ では逆二乗法則が成立するから、宇宙の一樣膨張は維持される。ビッグ・バン宇宙論の成功は、宇宙初期約 10 分間の baryon (軽元素) の核融合にあるから、これとも矛盾してはならない。宇宙の水平線が $R_0=24$ kpc に膨張するまでには 10^5 年もかかるから、少なくともこの間は局所重力定数 (従来重力定数) G_0 のもとに宇宙は進化する。また、前述の宇宙の密度パラメータ Ω は $G\rho$ をファクターとしているから、 $G=G_\infty$ とし、 ρ を可視物質密度 (baryon 密度) とすれば、 $\Omega \approx 1$ は天文観測の努力の範囲内にあることになる。従って、FLAG 導入によって宇宙進化論は修正を要求されないことになる。

6. 検 証

Sanders は、反重力の離距スケールとして $R_0=h/m_0c=24$ kpc を与えた。とすると、当然のことながら、反重力に關与する粒子質量はとてつもなく小さく ($m_0 < 10^{-28}$ ev!), いかなる検出装置 (例えば探査機) をもってしても、太陽系内では反重力を検証できない (ニュートンポテンシャルからの偏差を検出できない)。直接検証できないという意味では、anti-gravity 派も non-baryon 派も、実証科学においてはいまのところ同罪であって、いずれを支持するかは、安心立命のための信仰の問題に近いように思われる。さて、読者諸兄は、non-baryonic matter の存在を信ずるか、それとも遠方での anti-gravity を信ずるか? いずれを選んでも、10 kpc 以上のスケールでは、銀河力学の全面的な書き直しが要求されることを覚悟しなくてはならない。現在、銀河天文学では、観測・理論両側面から大きな智恵が求められているように思える。

お知らせ

理化学研究所研究員公募

1. 公募人員: 研究員または研究員補 1名
2. 所属研究室: 宇宙線研究室 (研究室名は変更予定)
3. 研究内容: 主として宇宙観測を目標にした X 線検出器または X 線光学素子の開発。天文衛星または関連する地上の天文観測装置による観測とデータ解析によって宇宙物理学を研究する。上記 X 線は極端紫外線からガンマ線までの広い意味をもつ。
4. 待遇: 理化学研究所給与規定による。(詳しくは理研人事課にお問い合わせ下さい)
5. 着任時期: 1986年10月1日以降。1987年3月末学位取得予定等の事情を考慮する場合もある。
6. 応募資格: 修士課程修了またはこれと同等以上の能力をもつ 32 歳までの方を望む。上記3項の研究に意欲ある方ならば過去の経歴は問わない。
7. 提出書類: 〇履歴書、〇研究歴、〇業績リストと主要論文別刷、〇推薦書1通 (健康に対する所見含)、〇自薦の場合は本人について意見を述べうる方2名の氏名と連絡先
8. 公募締切: 1986年8月7日 (木)
9. 宛先・問合せ先: 351-01 埼玉県和光市広沢 2-1 理化学研究所 松岡 勝
電話 0484-62-1111 内 3111 または
電話 03-963-1611 (板橋分所)
10. その他: 封筒の表に「応募書類在中」と朱書きし、書留で送付のこと

京都大学物理学第二教室助手公募

1. 公募人員: 助手1名
2. 所属研究室: 天体核物理研究室
3. 専門分野: 天体核物理
4. 着任時期: 決定後なるべく早い時期
5. 提出書類: 履歴書, 研究歴 (論文リスト, 主要論文別刷を含む), 研究計画書着任可能時期, 他薦の場合は推薦書。
6. 公募締切: 1986年8月30日 (土) 必着
7. 宛 先: 〒606 京都市左京区北白川追分町
京都大学理学部物理学第二教室
主任 小林農作
8. その他: 封筒の表に「応募書類在中」と朱記のこと。

名古屋大学空電研究所助教授公募

名古屋大学空電研究所では、下記の通り助教授一名を公募します。

1. 公募人員: 助教授一名
2. 所 属: 第3部門
3. 専門分野: 電波天文学
4. 仕事の内容: 太陽電波将来計画の推進に中心的役割を果たすこと
5. 着任時期: 決定後なるべく早い時期
6. 提出書類: 〇履歴書 (研究歴の説明を含む)
〇論文リストと主な別刷 (共著の場合は役割分担を具体的に示すこと)
〇推薦書 (他薦の場合) または研究上の抱負 (自薦の場合)
7. 応募締切: 1986年7月21日
8. 書類提出先: 〒442 豊川市穂ノ原3丁目13番地
名古屋大学空電研究所 鯉目信三
電話 05338-6-3154, 05338-4-5711