

相対論的爆発と銀河中心核の活動

横 沢 正 芳*

1. はじめに

昔から、人々は、華かではあるが一瞬にして消える爆発現象に強い興味を抱いてきたように思う。夏の夜空を彩る花火には誰しもが美しいと思ひ、水山の爆発では自然の力に驚異を感じてきた。昨今、人類は、水爆に奮威を抱いている。宇宙には、更に華かで、大規模な爆発現象がみられる。太陽表面の磁力線ループに巻きついたフレアー、星の一生の最期を告げる超新星爆発は、以前からよく知られた壮大な爆発現象である。最近の電波望遠鏡の発達によって、多くの銀河系の中心部は、爆発現象を含む、激しい活動の場であることが明らかになった。そこには光速に近い速さで膨張する強い電波源が発見された。あるものは、地上で観測する限り、超光速で膨張するかに見える。また、銀河の中心から、100 万年以上の彼方の銀河間空間に噴き出す細いプラズマ噴流も発見された(図 1)。銀河を中心に、対状の電波源が銀河間空間に浮いている。これは、あたかも銀河から両方向に巨大な花火が打ち上げられたかのようなのである。この広がった電波放射領域のもつ全エネルギーは大きく、 10^{50} エルグを超えることもある。これは、100 万個の星の質量を、全部エネルギーに変換した量に匹敵する**。銀河中心の活動は、以前から、光学観測及び X 線観測でも知られていた。これらは、激しい活動を示すものであり、その活動の特徴的形態から、準星、セイフア

ート銀河、BL Lac 天体として分類されている。電波観測は、普通とみられる銀河にも、ジェット状の電波源を見出ししている。

銀河中心の活動を引き起こす天体-銀河中心核とはどのようなものであろうか。巨大なエネルギーを解放する必要のあることから、現在では、大質量のブラック・ホールが銀河中心に存在しているものと考えられている。しかし、銀河中心の活動形態は多様であり、これらを統一的に説明しうる定説的機構はない。だが、活動形態の類型化は可能であり、例えば幅広い輝線を発するセイフアート銀河は渦巻銀河に属し、強い対状電波源は楕円銀河に属する。銀河中心の狭い領域に超光速膨張を示す電波源を有する銀河には、対状電波源は存在しない。これらのことから、銀河中心核の特定の活動形態について個別的に解明する試みがなされ、各成果の下に、体系化が見込まれている。ここでは、銀河中心から数 100 光年内に存在する強い電波源(コンパクト電波源)に焦点をあて、超光速膨張運動をはじめとする、これら電波源の激しい変動について考えたい。

2. コンパクト電波源の変動

1960 年代に準星が発見され、非常に遠方に、明るい天体が多く存在することが知られるようになった。それらの幾つかは、数カ月から数年の間に、大きく変光することから、準星の大部分の光を放射する領域は、数光年

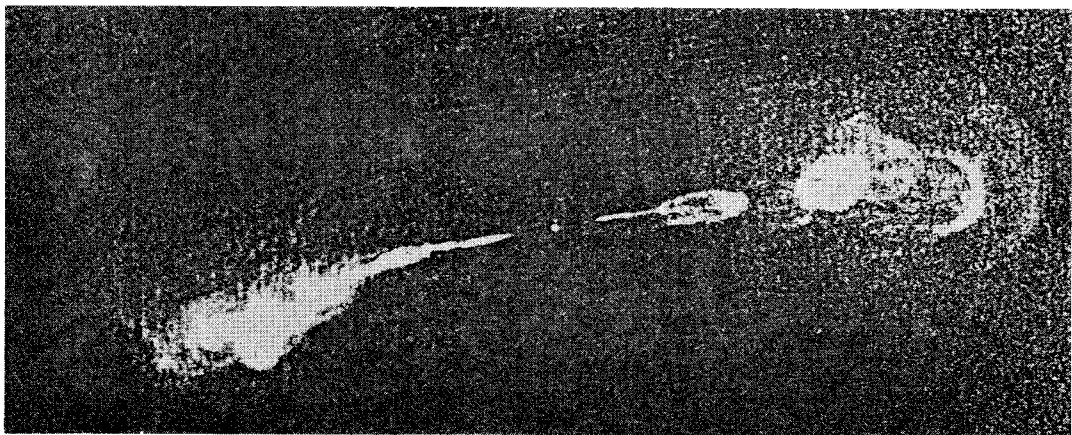


図 1 対状電波源 Heracles A. VLA による 5GHz の観測 (Dreher, J. W. and Feigelson, Eric D., 1984, Nature, 308, 43)

* 茨大理・物理学教室 Masayoshi Yokosawa: Relativistic Explosion and Activity in Galactic Nuclei

** この巨大な花火を打ち上げるに必要なエネルギーは、どのように湧き出してくるのだろうか。天体におけるエネルギー解放機構の解明は、魅力ある研究課題の一つである。

以内の非常に小さいことがわかった。このことは、普通の銀河全体から発する光よりも大量の光がその百万分の1よりも小さな領域から放射されることを意味し、驚くべき天体の存在がこの世に知れることになったのである。これらの天体は、小さく遠方にあることから、その構造の解明には、大型電波干渉計の発達を待たねばならなかった。1970年代に、異なる大陸に設置された望遠鏡を用いて大陸間干渉計(VLBI)が形成され、その分解能が1/1000秒角に高まったことによって、変光する本体の構造がとらえられた。このコンパクトな電波源の構造に関するデータが蓄えられ、1970年代後半から1980年代にかけて、電波源の動的姿が浮かび上ったのである。

図2に、電波構造の時間的変化がみえる。典型的な電波源、3C345を示す。この天体は、84億光年の彼方に

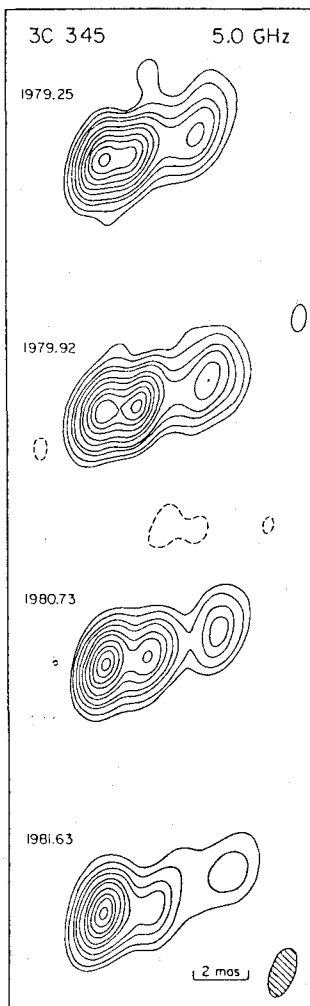


図2 VLBIによる3C345の観測(Unwin et al., 1983, Ap. J., 271, 536)

あり、電波の光度が 10^{45} エルグ/秒の準星である。これは、我々の銀河の約100倍の明るさに相当する。遠方にあるため、地上で測定して1/1000秒角離れた2点間は、3C345では26光年の距離となる。図2から、この電波源は3つの部分から成っていることがわかる。東端に強い電波源としての中心核があり、西の方向に2つの電波源が膨張している様子が見える。3C345の系統的な観測は、アーウィン等によって1977年から始められ、4年間に13回の大陸間干渉計による測定がなされた。測定結果を整理すると、西側の2つの電波源は中心核から同じ速さで、しかも時間的一定の速度を保持して離れていることがわかった。離れていく位置を3C345上での距離に換算してみると、驚くべきことに、その速度は光速の15倍にもなる。不思議な天体には、奇妙な現象が次々と起こるようである。

電波源の運動は、中心核で何らかの“爆発”をした結果生じた運動とも考えられる。一定の速さで動いていると考えて、中間に位置する電波源が中心核から分離する基点を求めると、その時期は1976年になる。

ところが、その時期の電波強度の変動をみると(図3)ほぼ定常状態にあり、“爆発”を示す突然の変異は認められない。むしろ、飛び出した電波源の強度が弱まった1982年頃に中心核の電波強度は高まっている。これと同じ電波強度の変化が、外側の電波源の発生の際にも生じている。外側の電波源の運動に関しては、1970年の始めからデータがあり、それによると、分離の時期は1966年になる。1964年から1966年にかけて、3C345は低い電波強度の状態にあり、2年後の1968年に電波強度は急激に増大し、2倍の強さになっている。超光速で広がる電波源は、通常の“爆発”像による産物とは結びつかないようである。

コンパクト電波源の電波は、そのスペクトルの形と偏

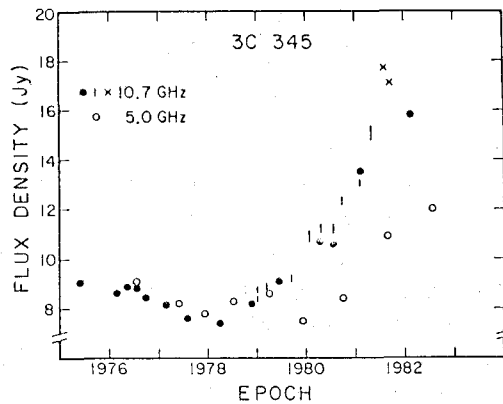


図3 3C345の電波強度変動(Unwin et al., 1983, Ap. J., 271, 536)

光の強さから、シンクロトン輻射によるものと考えられる。大量の電波を放射する領域が小さいことから、その領域内では密に電波光子と高エネルギー電子が混在している。電波光子は、高エネルギー電子による逆コンプトン散乱によってエネルギーを得、X線光子になりうる。3C345 の場合、測定から求められた領域から一様に電波が放射されているものとみなすと、観測される電波強度に必要な高エネルギー電子と電波光子の密度が決まる。この領域から放射されるX線強度を計算してみると、観測されたX線強度よりもはるかに大きな値になり、中心核成分で 10^6 倍、中間に位置する電波源では 10^4 倍の大きさとなり、X線観測値と大きなずれを生じさせる。電波の輻射機構も異常な事態になっているようである。

3. 電波源の相対論的膨張

コンパクト電波源で生じた不可解な問題は、相対論的効果を考慮すると、幾つかは解決できる見込みがつけられた。

電波はシンクロトン放射によるものであると述べたが、1960年代当初の変動電波源のモデルとしては、高エネルギー電子と磁場が混在したプラズマ球の膨張が考えられた。膨張速度は光速に比べて充分小さいとしていた。プラズマ球が小さい間は、プラズマ密度が大きくシンクロトン自己吸収が効くため、内部からの放射は外部には直接現われない。このとき、膨張に伴ってプラズマ球の表面積が増大するので、電波の強度は時間と共に増大する。球が充分に大きくなって、シンクロトン自己吸収が効かなくなると、内部の磁束密度、高エネルギー電子密度が減少するため、電波強度は時間と共に減小する。シンクロトン自己吸収係数は、電波の波長が長い程大きいので、異なる波長で電波源を観測した場合、長い方の波長程、電波強度がピークに達する時刻が遅れるものと予想される。図3で示した3C345の強度変動はこの傾向が現われている。

同じプラズマ球から放射される電波強度は、球が光速に近い速度で膨張するときは、非常に大きな電波強度として観測される。主には3つの効果による。1つには、プラズマ球表面積の膨張速度が増大して測定されることによる。遠方の観測者がプラズマの膨張をどのように測定するかを考えてみよう。図4に簡単な例を示す。プラズマの一部分が時間 t_1 の間にO点からA点に移る運動を、観測者はどのように観るであろうか。O点で発した光は $t=t_1+t_2$ 後観測者に達する。A点での光は、 $t+dt$ 後に観測者に届くのである。移動に要した時間は t_1 であるのに、測定される移動時間は dt なのである。観測者はOA間の天空への射影成分 Δy をこの間の移動距離と認知する。この速さは $v_{\text{obs}}=\Delta y/dt$ となり

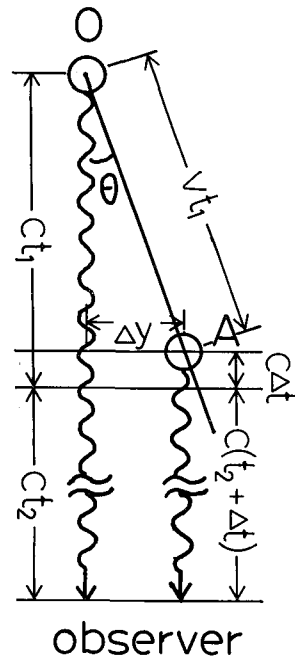


図4 超光速膨張

光速を越える場合が生ずる。例えば、 $v=0.99c$, $\theta=10^\circ$, $t_1=1$ 年とすると、 $\Delta t=0.025$ 年、 $\Delta y=0.17$ 光年となり、 $v_{\text{obs}}=6.9c$ になる。3C345の場合のように、中心核から離れる電波源が超光速で移動してみえるのは、このような事情によるためと考えられる。このことは、コンパクト電波源では光速に近い運動が発生することを確かなものにした点で重要である。プラズマの集団がO点を中心に球対称的に膨張したとき、その速度が光速に近い場合、観測者は、プラズマ全体の表面積が急速に膨張したものと測定するのである。

2つめには、プラズマの一部分が光速に近い速度で運動するとき、プラズマから放射される光は運動方向に集束する効果である。これは相対論的収差といわれる。

3つめには、ドップラー効果である。観測される光は主に観測者に向かってくるプラズマ部分によるため、放射された光は高周波数側に変移する。コンパクト電波源では低周波数側の電波光子が多く放射されるので、測定される高周波数帯での電波光子は多くなる。

以上の3つの効果のため測定される電波強度は大きくなる。このとき、プラズマに固有な系での電波光子、高エネルギー電子密度は小さくとれるので、逆コンプトン散乱によるX線強度は低くなる。3C345の場合、中心核の電波源及び飛び出した電波源が、いずれも光速に近い速度で膨張しているものとみなすならば、逆コンプトン散乱によって、X線の観測値を説明することができる。

4. 相対論的膨張波の流体的性質

コンパクト電波源を説明するに必要なプラズマの相対論的膨張はどのようにしてできるのでしょうか。プラズマを流体として扱ったとき、相対論的膨張運動はどのような振るまいをするのだろうか。流体の性質も、流速が相対論的になると、非相対論の場合とは異ってくる。次に、流体の相対論的効果をふまえて、相対論的膨張の数値計算結果とコンパクト電波源の観測値とを比較検討してみよう。

流体においてはその要素間の情報は音波によって伝わる。非相対論的気体では、温度と共に音速は速くなる。一方、相対論的気体には、音速に上限値(=c/√3)がある。流速が相対論的速さになると、それは超音速流である。圧縮ガスが真空中に膨張するとき、非相対論的な場合には膨張波前面に密度の薄い希薄波が形成されるが、相対論的な場合には膨張波の速度が光速に近くなり、質量、熱エネルギーは、膨張波前面に集積する。

媒質中に膨張波が広がるとき、前面に衝撃波が形成される。衝撃波は媒質を圧縮しその密度を高める。非相対論的な場合、衝撃波による圧縮度は衝撃波の速度によらず一定の値となる。ところが相対論的な場合、速度に比例して圧縮度は高くなる。このことは相対論的膨張波模型によって電波源を考える際、有利な点となる。衝撃波によって媒質中に含まれている磁場を強く圧縮するので、波面近傍で高エネルギー粒子を生成することが可能だからである。

相対論的膨張波の最も簡単な場合として、微小領域に高エネルギーが解放され、膨張波が一樣媒質中を広がっていく場合を考える。流体力学の数値計算コードを用いて、計算した結果を図5に示す。特徴的なことは、広がる速さが相対論的になると、強い逆向衝撃波が発生することである。即ち、内部に向かって急速に落ち込む流れが発生することである。相対論的膨張波は、初期段階では、内部の流れの大部分は、超音速流となるため、質量、熱エネルギーは外側に送られ、衝撃波近傍に集積す

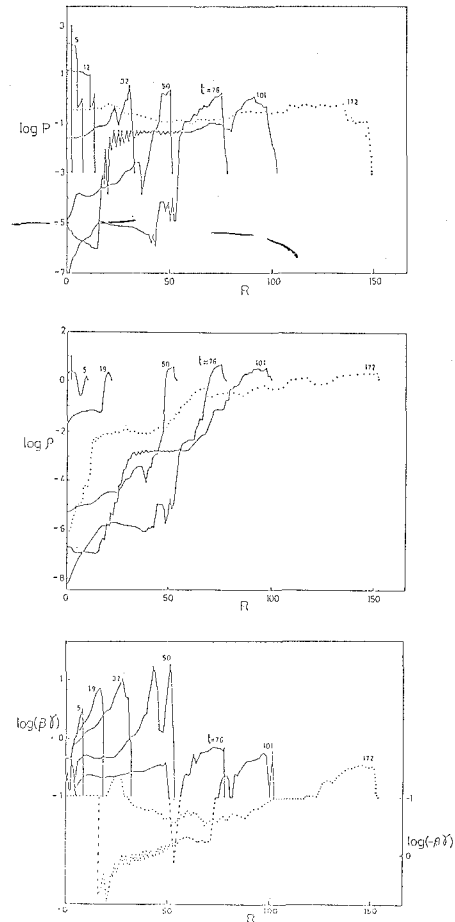


図 5 相対論的爆発の数値計算 (Yokosawa, M., 1984, Astrophs. Space Sci. (in press))

る。内部は極めて低密度の真空度の高い状態となる。衝撃波は、広がるにつれて減速し遂には音速程度になると、衝撃波近傍に集中していた高圧気体は、内部に向かって膨張し内向きの流れを形成する。流れの前面には、強い逆向衝撃波が形成される。

相対論的膨張波模型の中で、逆向衝撃波の発生は、電

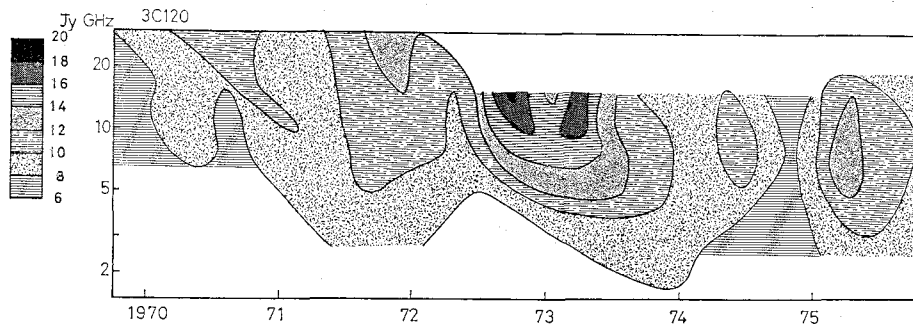


図 6 3C120 のダイナミック・スペクトル (Ishikawa, M., Sasaki, T. & Yokosawa, M. (in preparation))

波源にどのように反映するのであろうか。膨張するプラズマから放射される電波は、長波長程電波強度がピークに達する時期が遅れる。内向きのプラズマの流れから放射される光は、相対論的収差のため大部分は中心方向に集束する。逆向衝撃波が中心に達したとき、電波強度は再び大きくなり、第2のピークを記録する可能性がある。そのときの波長依存性は膨張の場合とは異ったものになるであろう。

複雑な強度変動を示す電波源 3C120 について、試験的にダイナミック・スペクトル図を描いた(図6)。測定周波数が少ないことから確かな図とはならないが、1973年に2重ピークがあり、第2のピークの波長依存性は、膨張プラズマの場合とは異ったものである。

5. おわりに

コンパクト電波源は1960年代から知られた天体であるが、その機構の解明はなかなか進まなかった。最近、X線領域の情報が加わったこと、大型電波干渉計、電波強度の変動に関するデータが蓄積されたことにより、観測的にその構造が明らかにされつつある。理論的にも対状電波源の形成機構に関する研究が進み、銀河中心核の構造が解明されてきた。コンパクト電波源は、再び銀河中心核の活動を解明する上で魅力的な天体となった。

お知らせ

東京大学理学部天文学教室公募

下記により公募いたします。希望者の応募、適任者の推薦をお願いいたします。

1. 公募人員 教授1名
2. 専門分野 天文学
3. 就任時期 昭和60年4月以降のできるだけ早い時期
4. 提出書類 履歴書、研究論文リスト、推薦書(他薦の場合)
5. 締切期日 昭和60年1月20日
6. 宛先 (〒113) 東京都文京区弥生 2-11-16
東京大学理学部天文学教室主任
堀 源一郎

東京天文台一般公開

東京天文台の一般公開(本会後援)が12月1日(土)に行われます。台内諸施設の公開は午後2時から午後4時30分まで、月面観望は午後7時30分まで行われます。天候の都合で観望終了時刻を繰上げることもあります。なお雨天の際は中止となります。

当日参観を目的の自動車の構内乗り入れは禁止です。幼児には必ず保護者の同伴をお願いします。



D. Reidel Publishing Company

新刊

PHYSICS OF THERMAL GASEOUS NEBULAE (PHYSICAL PROCESSES IN GASEOUS NEBULAE)

by
LAWRENCE H. ALLER, Professor
University of California, Department of Astronomy, Los Angeles,
California, USA

ASTROPHYSICS AND SPACE SCIENCE
LIBRARY 112

356 pp. ¥13,750 ISBN 90-277-1814-8
August 1984, D. Reidel Publishing Company

After a quick review of principal types of gaseous nebulae, this volume concentrates on basic spectroscopy and atomic processes pertinent to diagnostics of ionized nebular plasmas such as HII regions, planetary, wind-blown shells, and other ejecta. The presentation is intended for both the serious student and the research worker. Emphasis is placed on a comparison of observed and predicted spectra. Numerous diagrams, formulae, and tables based on the most recent information are featured so that ultraviolet, optical, infrared, and radiofrequency data can be employed to obtain electron densities, temperatures, ionic concentrations and ultimately chemical compositions for the emitting plasma. The role and challenges of theoretical nebular models, complications introduced by dust, and shock waves are discussed. Attention is focused on determination of chemical compositions of gaseous nebulae and the importance of these studies to late stages of stellar evolution and to investigations of chemical compositions of the local interstellar medium as well as to those of distant galaxies.

PROBLEMS OF COLLAPSE AND NUMERICAL RELATIVITY

Proceedings of the NATO Advanced Research
Workshop on Problems of Collapse and Numerical
Relativity, Toulouse, France, November 7-11, 1983

edited by
DANIEL BANCEL
Université Paul Sabatier, Toulouse, France
MONIQUE SIGNORE
Observatoire de Meudon, Meudon, France

NATO ADVANCED SCIENCE INSTITUTES SERIES
C: MATHEMATICAL AND PHYSICAL SCIENCES 134

416 pp. ¥15,950 ISBN 90-277-1816-4
August 1984, D. Reidel Publishing Company

The main purpose of this book is to give the present state on each problem involved at the end of massive stars: i) supernova explosions; ii) generation of gravitational waves; iii) final state of the collapse. The microphysical processes and the equation of state of hot nuclear matter are considered as well as the constraints they imply on dynamics. In this way both type-I and type-II supernovae are studied. Part of the book is devoted to numerical relativity: the different formalisms of general relativity are presented in order to follow both dynamics of matter and evolution of space-time through the entire collapse and to estimate gravitational waves emitted during collapse of a stellar core to a neutron star or black hole. Moreover, connected to the problem of collapse and the thermonuclear explosion processes, observations and models of X-ray bursts are presented and discussed.



Reidel 日本総代理店

株式会社

ニュートリノ

東京都港区赤坂8-4-7 カームビル
TEL (03)405-6137(代) 〒107