

早川幸男先生と宇宙物理学の発展

早川先生の業績

日本天文学会元理事長、名古屋大学学長早川幸男先生は本年2月5日逝去された。日本の天文学界にとって、いや日本の学界全体にとって真に大きな損失であった。ここに早川先生の業績を振り返り、あらためて先生の大きさを偲びたい。

(1) 宇宙線物理学

早川先生は宇宙線物理学の研究に原子核・素粒子の知識を直接導入した先駆者の一人として知られている。この方法で先生が進められた宇宙線に関する研究は多岐にわたり、発表論文は枚挙に暇がないが、特筆すべき業績として、宇宙線の超新星起源説、宇宙線の銀河内の伝搬と電子、 γ 線の生成が挙げられよう。

宇宙線の超新星起源説については、先生は宇宙線の元素組成に着目し、重元素核の存在比が星の進化の最終段階に生成されるものと良く似ていることを指摘、又、宇宙組成に比して宇宙線中に異常に多い軽元素核(Li, Be, B)は宇宙線の重元素核が星間物質との衝突で壊れて出来たものと考え、宇宙線の伝搬距離と寿命を推定した。こうして求めた宇宙線生成率は「かに星雲」で代表される超新星のエネルギー総量と出現頻度から説明できることを示した。一方同時期に、Ginzburgは「かに星雲」の強い電波が高エネルギー電子のシンクロトロン放射であることを解明し、超新星爆発で大量の宇宙線が加速されることを結論した。ほとんど同時にこの二人によって独立に提唱された超新星起源説は相補的であり、広く認められるに至った。これは宇宙線物理学のマイルストーンといるべき重要な業績である。

更に、宇宙線の伝搬の研究の一環として、宇宙線中の電子と γ 線に関する業績が挙げられる。先生は高エネルギー宇宙線粒子と星間物質の衝突で



生成される π 中間子が崩壊して生ずる電子と γ 線の強度を予測し、その重要性を指摘した。宇宙線電子は銀河磁場中のシンクロトロン過程で電波を放射する。従って、これは銀河電波と銀河磁場を量的に関連付ける重要な仕事であった。

それにも増して、初めて銀河 γ 線の強度を示し観測の意義を強調した先生の功績は極めて高く評価されている。実際 γ 線天文学は今日開花し将来の発展が期待されるが、早川先生はモリソンと共に γ 線天文学の生みの親と言うことができる。

(2) X線天文学

1962年、予想外のX線天体の発見を端緒にX線天文学は急速に発展したが、早川先生は当初からその重要性に着目し、理論的研究と観測を主導した。今日X線星の殆どが重力崩壊天体と通常の星の連星系であることがわかっているが、X線放射のエネルギー源が連星系での物質降着によるとする考えを最初に提唱したのは早川先生である。又、わが国で最初にX線のロケット観測を実行したのも先生のグループであった。その後、多くのロケット観測を主導しつつ、小田稔先生(現理化学研究所理事長)と共に早期のX線天文衛星実現に努力された。今日わが国のX線天文学は「はくちょう」「てんま」「ぎんが」の成功によって世界

の第一線に立つに至ったが、この成果に至るまでの先生の功績を忘ることはできない。

先生はこれらの衛星による観測結果の理論的解釈でも多くの業績を残された。特に中性子星・ブラックホールに関連して、降着円盤とそのX線放射、パルサーの周期変動、X線バースト等の研究成果が主要なものとして挙げられる。

(3) 赤外線天文学

わが国の赤外線天文学の育ての親として早川先生の果たされた役割は極めて大きい。早くから赤外線がX線と共に重要な天文観測手段であることを首唱し、自ら気球・ロケットによる赤外線天体観測を主導した。中でも顕著な成果として、気球による銀河の近赤外輝度分布の観測や、技術的に極めて難度の高いサブミリ波帯の宇宙背景放射のロケット観測の成功が挙げられる。赤外線天文学は今後大いに発展させるべき分野であることは論を待たない。それにつけても、先生が強力に推されたIRTS計画の実行を待たずに亡くなられたことは大変残念である。

(4) 重力波天文学

早川先生の天文学への関心は幅広く、宇宙全体を対象に、全ての観測手段に及ぶ。最近では新たに重力波天文学の育成に熱意を燃やしておられ

X線天文学

1960年代に誕生したX線天文学は、今や、ほとんどすべての種類の天体を観測の対象とし、天文学になくてはならない一大分野にまで成長した。小田・早川両先生のご指導のもとに産声をあげた日本のX線グループも、「はくちょう」・「てんま」・「ぎんが」と連続的にX線天文衛星を持つことができ、今や世界をリードする大グループとなつた。なかでも、早川先生の育てられた名大X線グループからは多くの優秀な人材が育ち、田中・楨野両先生をはじめ、現在の日本のX線グループの指導的立場におられる先生方の中で、早川先生

た。宇宙線粒子、電磁波に続いて重力波による宇宙観測の将来性を唱え、自ら組織作りに当たってこられた。幸いわが国の重力波検出器の開発は緒についたが、先生の期待しておられた目標を達成すべく今後の急速な発展が望まれる。

先生の業績は限られた紙面に纏めるにはあまりにも多く、且つ広い。常に現象の本質を追求し、常に一步将来を目指すことを自ら実践し、語らずして人に教えて来られた。又、常に明快な論理をもって信念を貫かれた。抱擁力の大きな卓越した教育者・指導者であり、先生のもとでは共同研究者として、或は弟子として多数の研究者が育つた。更に、早川先生の功績を述べるにあたって、研究上の業績にとどまらず、わが国の科学の発展に尽くされた先生の顕著な業績を忘ることはできない。学術会議会員として、或は学術審議会委員としてわが国の天文学、宇宙科学の発展に努力された他、多くの場面で確固たる思想と高い識見、優れた指導力をもってわが国の学術行政に貢献された。

ここに偉大な科学者の逝去を悼み、哀惜の念を込めて先生のご冥福を祈る。

田中靖郎（宇宙研）

の下で仕事をされたことのある方は多い。私のように、身近にご指導を頂く機会を持たなかったものでも、おりにふれ、先生から、考えの至らない部分へのアドバイスや新しい考え方を示唆するコメントを頂いてきた。そのような、直接表に見えない部分までふくめて、現在のX線天文学の発展に残された早川先生のご業績には実に大きなものがある。ここでは、X線天文学の最前線の一端を紹介することで、先生のご業績を偲ばせて頂きたいと思う。

(1) ブラックホールに迫る

明るいX線源の主流派は、中性子星やブラックホールといった高密度星が、ふつうの星のすぐ近

くを回っている近接連星型 X 線源である。このような近接連星では、通常の星の表面から相手の高密度星に向かって物質が流れ込み、高密度星周辺で開放される莫大な重力エネルギーが物質を一千万度から一億度もの超高温にし X 線で光る。X 線源における降着流の重要性を最初に指摘したのが早川先生であった。

連星の相手の星から高密度星に向かって流れ込んできた物質は、ふつう渦を巻いて落ち込むようになり高密度星のまわりに降着円盤と呼ばれるものができる。中性子星に強い磁場がある時は、降着円盤は磁気圧によってせきとめられ、流れは中性子星の磁極部分に集められるが、磁場の弱い中性子星では、降着円盤は中性子星表面近くまで侵入することになる。そのような降着円盤が中性子星のごく近くまで侵入していると考えられる X 線源の X 線スペクトルについては「てんま」が詳しい観測を行った。その結果、その X 線スペクトルは、確かに、降着円盤からのものと考えられるエネルギーの低い X 線が多い部分と、その降着円盤を流れてきた物質が中性子星表面にぶつかって出すであろうエネルギーの高い X 線の多い成分との 2 つの成分から成り立っていることが多いことがわかった。

ブラックホールが活動の中心にあるらしい近接連星型 X 線源（ブラックホール候補と呼ばれる）の X 線スペクトルについては「ぎんが」が詳しい観測を行った。ふつう、ブラックホールのまわりには降着円盤を途中でせきとめるような磁場はなく、ブラックホールのごく近傍まで降着円盤が侵入していると考えられる。実際、いくつかのブラックホール候補の X 線スペクトルには、磁場の弱い中性子星の X 線スペクトルに見られたのとそっくりの、降着円盤からのものとみられるエネルギーの低い X 線を主とする成分が存在する。しかし、ふしぎなことは、ブラックホール候補にも、降着円盤からのものと考えられるエネルギーの低い X 線を主とする成分の他に、もう一つエネルギー

の高い X 線を主とする成分もはっきりとあることである。中性子星の時には、降着円盤を流れてきた物質がその硬い表面にぶつかって熱くなりそこから X 線が出ることが理解できるが、ブラックホールにはそのような硬い表面はないはずである。どうして、ブラックホールの場合にも、エネルギーの高い X 線を主とする成分が存在するのか今のところ謎である。

銀河系内のブラックホール候補と同じように、ブラックホールの存在がその活動の中心となっていると考えられる天体に活動銀河がある。活動銀河とは、せいぜい太陽系くらいの大きさの銀河の中心から、銀河全体の輻射エネルギーの数百倍から数千倍ものエネルギーが放出されている銀河で、太陽の 1 億倍もの質量を持ったブラックホールが中心にあると考えられている。実際、「ぎんが」が行なったいくつもの活動銀河の精密な観測の結果、活動銀河の中心核からの X 線の振舞いは、きわめて、銀河系内のブラックホール候補からの X 線の振舞いによく似ている。特に、「ぎんが」は、活動銀河の X 線スペクトル中に、X 線が冷たい物質で反射された時に予想される特徴的な構造が混ざっていることを発見した。この反射成分は、降着円盤が中心の高密度星近くまで侵入していると考えられる近接連星型 X 線源のスペクトル中にも発見され、活動銀河でも、ブラックホールのまわりに降着円盤が形成されているらしいことが強く示唆される。たしかに、活動銀河の中心にはブラックホールがあって、活動銀河からの莫大なエネルギー放出もブラックホールへの質量降着で起こっているらしい。しかし、そのエネルギー放出の機構や、活動銀河の中心核からしばしば見られるピーム状の物質の噴き出し（ジェットと呼ばれる）と質量降着との関係等、解くべき謎が多い。

(2) 宇宙の高温ガス

太陽より数倍以上重い星は最後に超新星爆発をおこして華々しく一生を終える。爆発で飛び散った物質はまわりの星間ガスと衝突して高温にな

り、やがて X 線で光りだす。超新星爆発に起因すると考えられる数百万度の高温ガスの泡が我々の銀河系内のあちこちにあることは、名大 X 線グループの先駆的なロケット実験等でわかつっていたが、「てんま」や「ぎんが」は、数千万度にも達するもっと高温のガスの分布を精力的に調べた。数千万度の高温ガスから出る鉄輝線を指標にして銀河面を走査した結果、銀河面（天の川）に沿って数千万度の高温ガスが大量に分布していることがわかった。さらに、「ぎんが」は、鉄輝線が銀河中心方向で他に比して約 10 倍強いことも発見した。観測された X 線量から推定される銀河中心方向の高温ガス球の全体のエネルギーは超新星 1000 個分にも達し、高温ガス球の大きさから推定して、爆発があったのは今から数万年前ということになる。

銀河には高温ガスが満ちているが、銀河が集団をなしている銀河団にも数千万度の高温ガスが満ちている。この銀河団中の高温ガスの総質量は銀河団中の全銀河の質量を足し合わせたものより大きいことすらある。「ぎんが」の種々の観測によつ

て、銀河団中の高温ガスからの鉄輝線の強さは一般に銀河系内の高温ガスのものに比べて弱く、銀河団の高温ガスの大半は銀河にならなかった原子ガスであることがわかつってきた。高温ガスの起源が個々の銀河からのものなら、鉄に特有の輝線がもっと見えるはずなのに対し、原子ガス中には重元素はないと考えられるからである。さらに、銀河団を包む高温ガスの X 線観測からは、その高温ガスを捉えておくのに必要な重力の強さを推定することもできる。これまでの観測データからは、銀河団中の原子ガスや銀河の重力では、一億度近い高温ガスを銀河団くらいの大きさにおさえることができないことが示唆されている。高温ガスをおさえておくには、原子ガスや銀河自身がつくる約 10 倍もの強い重力が必要となる。X 線観測は、宇宙における高温ガスの分布を調べるだけでなく、直接観測にかかる暗黒物質の分布を調べるのにきわめて強力と考えられ、これからの観測の進展が待たれる。

井上 一（宇宙研）

赤外線天文学

私が名古屋大学の早川先生の研究室に修士過程の学生として加わったのは 1972 年であった。京都大学の赤外線望遠鏡が長野県上松町に完成して程なく、早川先生の提唱で始まった日本の赤外線天文学も、そろそろ軌道に乗りかかったときであった。名古屋では早川先生が X 線天文グループと赤外線天文グループの両方を率いておられた。赤外グループでは、宇宙研の大気球を使って波長 2.4 μm で銀河系内の星の分布の観測が始まっていた。なかなか実験がうまく行っておらず、早川先生が「赤外天文を始めてはみたがものになりそうにないからやめますか」とおっしゃればこの先どうなるか分からないと、松本さんをはじめとする諸先輩に脅されたのを覚えている。

幸い私が参加してからはきれいなデータがとれるようになり、京都大学の同様の実験とともに銀河系の近赤外像を得ることができた。その後、京都大学のグループはやはり気球搭載望遠鏡を使った遠赤外線での銀河系観測に進み、奥田さんが宇宙研に移られてからは星間ガス中の炭素イオンが出る波長 158 μm のスペクトル線の観測が始まった。最近では図 1 のようなライン強度分布が得られるようになっており、星間ガスの物理状態についての知識が深まっている。

一方名古屋では松本さんの発案で、ロケットを使った近赤外線領域の銀河系外からくる背景放射光を測ろうとする観測が始まった。またそれと前後して、早川先生のお骨折りでカリフォルニア大学バークレー校との共同実験ができることになり、日本で初めてのサブミリ波帯での 3 K 背景放

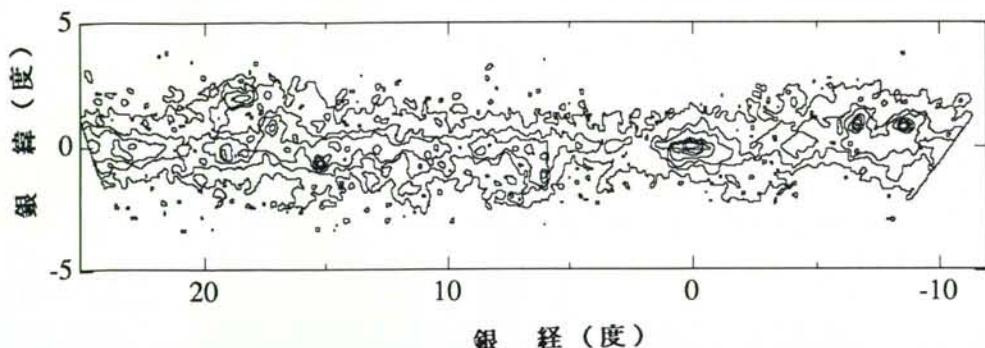


図1 炭素イオンの遠赤外ラインで見た天の川（宇宙研 中川より）

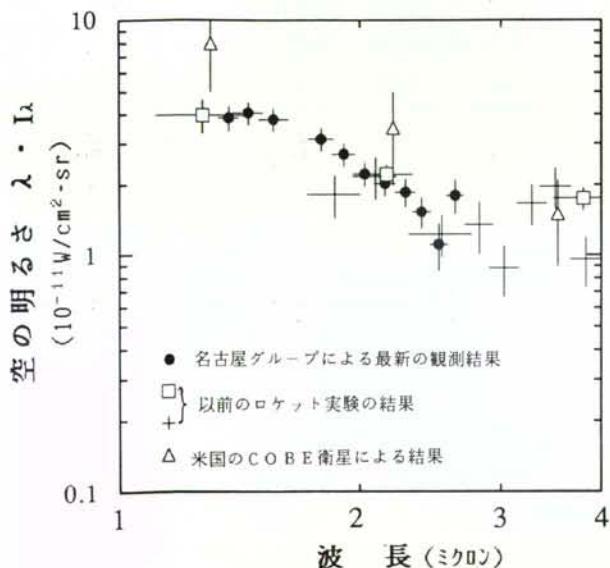


図2 近赤外線でみた空の明るさ（名大理 野田より）

射光の観測も行われた。図2は、近赤外線でみた空の明るさである。このうちどれだけが銀河系の外からの光であるのかが問題で、それは銀河がいつ生まれて過去にどの様な明るさであったのかに付いての情報を持っているはずであるが、まだ確実な答えは得られていない。

現在、宇宙研を中心に、名大、東大、NASA/Ames研究所、パークレーが共同で日本で初めての人工衛星搭載の赤外線望遠鏡 (Infrared Telescope in Space; IRTS) を製作中である(図3)。上に述べてきた研究の集大成とも言えるもので、近赤外線、サブミリ波の背景放射の観測、炭素イ



図3 IRTS (InfraRed Telescope in Space)

オンのスペクトル線の高感度観測、さらには中間赤外領域での星間塵の観測も行われる。これも早川先生が最初のレールを敷いてくださった計画であるのに、完成した姿をお見せできることになってしまった。残された者で最後までやり遂げねばならないのはもちろんであるが、データが得られたときには、早川先生と議論できないという寂しさとともに、また先生のことを思い出すことだろうと思う。

村上 浩 (宇宙研)

重力波天文学をめざして 動き出した米国の LIGO 計画

重力波がひきおこす時空のひずみをレーザー干渉計によって観測しようとするレーザー干渉計重力波天文台(LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) 計画の初年度予算が米国で昨年10月認められ、建設がスタートした。この計画は米国の東側(ルイジアナ州リビングストン)と西側(ワシントン州ハンフォード)にそれぞれ一辺4kmのL字型をした干渉計を建設するもので、総額2億1100万ドルと見積られている。すべてが計画通りに行けば、1997年頃に第一段階の運転が開始される。第一段階では現存の技術水準が前提にされており、ほぼ確実に検出可能な重力波振幅は100Hz付近で 3×10^{-21} である。これでは予想される連星中性子星の合体や超新星爆発からの重力波を年数回程度の頻度で検出するには、まだ少し感度不足ではあるが、建設中も続けられる感度改善のための基礎開発研究の成果を受けて干渉計を改良し、一桁以上の感度向上をはかることで、十分確実にそれらの重力波が検出されるよう計画されている。

この計画が認められるにあたっては、米国内でも賛否両論あり、この計画で本当に重力波が検出できるかどうかの危惧を表明する学者もいたが、計画推進の気運が強まった背景としては、連星中性子星の合体が現実の天体现象として認識されるようになったことが大きい。大量の重力波発生源として以前から超新星爆発が挙げられていたが、どれだけの重力波が発生するかは、爆発がどのくらい球対称や軸対称からずれているかに依存するため、確実な予想ができなかった。一方、連星パルサーの発見とそれからの重力波放出による軌道収縮の観測的検証、さらには複数の連星パルサー発見によって、連星中性子星の存在が確実なものになり、合体の時の重力波放出量も十分であることが予想されるため、こちらの方が確実性の高い

重力波源になったのである。実際に重力波天文学をめざして計画を推進している科学者の中には、これらの他にも電磁波で得られた現在の宇宙像からは想像できないような重力波源があって、重力波が全く新しい宇宙像を提供するにちがいないと期待する人も多いが、多くの人々に計画を認めてもらうためには、夢をあたえるだけでなく確実性の高いことも必要なのである。

我国の重力波研究計画

LIGO の他にも独英、仏伊がそれぞれに一辺3kmの大型レーザー干渉計による重力波アンテナ建設計画を提案して予算獲得に務めている。我国でも1987年頃から計画作りを始めようという気運が高まり、重力波に興味を持つ研究者を組織して重力波研究のための計画作りが始まった。その中心になって指導・推進されたのが早川幸男先生である。「重力波の件、前々から気にしており、余生をこの問題に捧げたいという野心がありますが、なにしろむつかしい問題で自信を持ちかねている…」けれども、それまで我国の重力波研究を進めてこられた平川浩正先生(東大物理)が1986年11月に死去されたこともあって、「多くの技術的問題を解決しながら長期に忍耐強く進めなければならぬ大計画ですから、研究グループを組織して、勉強しながら実質的に担う人々を育てなければなりませんまい。」との決意で、文字どおり余生を我国の重力波研究推進のために捧げて下さった。

普通の研究計画では(1)要素開発(2)システム開発(3)観測と進むところを、逆に(3)の要求機能をまずはつきりさせ、その要求にかなう(2)を設計し、それをできるだけ干渉しない部分に分けてから各部分について(1)を設計するといいわばトップダウンの方法を探ることで、無駄の少ない基礎開発研究を進めようというのが早川先生の提案で、科学研究費の総合研究(B)や重点領域研究の研究計画はその線に沿って立案された。国立天文台で建設中のファブリーペロー方式20mプロトタイプ干



図1 (a) 20mのファブリーペロー式干渉計用真空槽



(b) 同実験室外観

涉計(図1)はその(2)に位置づけられる。

重力波の振幅 h はたかだか r_g/r (r_g は発生源の重力半径, r は地球までの距離) であるから、超新星爆発や連星中性子星合体 ($r_g \sim \text{km}$) での重力波が $h \sim 10^{-18}$ の振幅で見える距離は約 30 kpc 以内, 10^{-21} の振幅なら約 30 Mpc 以内ということになる。現象の頻度が少なくとも年数回あるためには、ある程度遠方まで見えねばならず、 h で 10^{-21} の検出感度はどうしても必要である。この感度を実現するためのレーザー干渉計の腕の長さは我国でも独自に検討したが 1 km~5 km の範囲を外れることは相当に無理がある。概念設計の段階で想定した 3 km の干渉計でも 10^{-21} の感度達成のためには多くの部分で綱渡り的な極限技術を期待しているので、例えば 1 km 以下の干渉計を設計するためにはどこかの部分で現在予想もできないような技術革新がなされなければならないことになる。この条件は我国の国土で干渉計の設置場所をさがす場合、かなり厳しい制限となる。こうしたことを見てか、昨年秋の重力波の研究会での早川先生の講演は、 10^{-21} より大きい振幅の重力波

源の再検討であった。結論は現状では分かっていない発生源を仮定しない限り腕の長さを 1 km 以下にはできないというものであったが、おそらく先生のほとんど最後になされたこの研究からも、先生の重力波天文台実現にむけた熱意と現実的対応への柔軟な姿勢を伺うことができる。

重点領域研究が始まったばかりの昨年4月の天文月報で重力波天文学の特集を組み、我国の研究計画を紹介した。その中で、早川先生は『重力波天文学をめざして』と題して、当面解決すべき課題の説明から雄大な宇宙空間干渉計への夢まで述べておられる。「天国からそれを眺めるのを期待しながら」と書かれているが、先生の中では重力波による天文学が展開されている風景が見えていたのであろうか。早川先生の逝去はやっと途についたばかりの我国の重力波天文学にとってあまりに早すぎるもので呆然たる想いであるが、そろそろ一人立ちしたらどうだいと励まされているようでもある。先生の最後の夢の実現に向けて全力を尽くしたい。

藤本真克（国立天文台）