

祝 Karl-Schwarzschild 賞受賞

「銀河とは何か」

— Karl-Schwarzschild Prize を受賞して —

小平 桂 一

〈総研大 〒240-0193 神奈川県三浦郡葉山町湘南国際村〉
e-mail: kodaira_keiichi@soken.ac.jp

Astronomische Gesellschaft から Karl-Schwarzschild 賞授賞の通知が来たのは昨年の 12 月半ばのことであった。同封されていた今迄の受賞者のリストを見ると、私の先生のような人達が並んで居た上に、一時間の受賞講演をすることになっていて、荷が重く感じられ、とても私がお受けするようなものではないと思われた。それに、12 月始めに総合研究大学院大学の次期学長を引き受けることを承諾した直後であって、「暫くは天文学を横に置いて大学改革に専念しよう」と決心したばかりの事でもあった。一旦は断ったのに、「どうしても」と言われて、とうとう受けることになってしまった。「私に」というよりも、「日本の観測天文学の皆さんへの励まし」と受け取って、いただくことにしたが、慣れない学長職にとりかかるのと並行して、受賞講演の準備をしたこの 9 ヶ月は、相当にきつかった。幸い 4 月からは総研大本部のある葉山に引越すことができたので、朝晩、週末には天文学をすることができたが、「すばる」のデータ測定には土・日に三鷹に通うことになり、その測定に付き合う宮崎 聡さんには、大変なお世話になった。9 ヶ月も講演の準備をし、9 月 10 日の授賞式が終わってみると、「引き続きあれも調べてみたい、これも観測してみたい」と、天文学が面白くなってしまって困っている。大学改革はこれから更に厳しい状況を迎えるだろうに。

さて、Karl-Schwarzschild (1873-1916) は、ブラックホールの「シュヴァルツシルト半径」に名を残

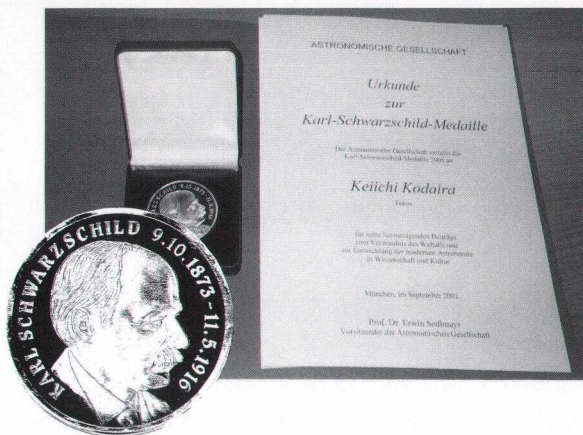


図1. カール・シュヴァルツシルト・メダル（表）と賞状

しているドイツのユダヤ系天文学者で、フランクフルトに生まれミュンヘン大学に学び、1901年にゲッティンゲン大学の教授となつて、同時に大学天文台の台長を併任、1909年にはポツダム天文台の台長に就任し、当時の世界の天文学の中心にあつて、天文学・天体物理学の多方面にわたって活躍した。私のような世代には懐かしい恒星大気の「Schuster-Schwarzschild モデル」や、恒星運動の「楕円体型速度分散表示」、恒星の写真測光の標準化、それに、一般相対論におけるアインシュタイン方程式の「シュヴァルツシルト解」などの業績を残したが、1916年第一次世界大戦に志願、兵役中に病死した。ご夫人は1930年代からのユダヤ人にとって困難な時代を生きのび、第二次世界大戦終結後、Astronomische Gesellschaftの活動がようやく軌道にのると、亡夫を記念する Karl-Schwarzschild 賞が創設された（図1）。これを受けて AG は、1959年の第一回授賞を、米国在住のご子息、Martin Schwarzschild に対し、キール大学に於ける総

会で行った。以来 AG の最高の名誉ある賞として、対象者のある年のみに与えられ、私は 30 人目に当たることになる。受賞者には、M. シュミット (1968), A. ヒューイッシュ (1971), J.H. オールト (1972), C. ドヤーガー (1974), L.Jr. シュピッツァー (1975), G.B. フィールド (1978), L. ビアマン (1980), B. パチンスキー (1981), D. リンデンベル (1983), E.E. サルペーター (1985), S. チャンドラセカール (1986), L. ウォルチェ (1987), M.J. リース (1989), E.N. パーカー (1990), F. ホイル (1992), H. ファン・デ・フルスト (1995), J.H. テーラー (1997), J.P. オストライカー (1999), R. ペンローズ (2000) などが名を連ねている。

AG は 1863 年に発足した、初の国際的な天文学事業組織で、ポツダム天文台を中心に活動、ドイツ語を公用語としてきた。1900 年頃には全世界に影響をもつに至った。それまでのポツダム天文台長が、どちらかと言えば古典的な天文学分野の専門家であったのに対し、アインシュタインが理論的な天体物理学者を採用すべしとの進言を行い、カール・シュヴァルツシルトを強く推したという経緯がある。しかし彼の死後、第一次世界大戦での敗戦もあって、1920 年代には AG の国際事業は、新たに組織された国際天文学連合 (IAU) に次第に移管されていった。第二次世界大戦後は AG の活動は止められていたが、1947 年にゲッチンゲン大学を本拠に活動を再開した。しかし 1960 年代には冷戦の影響で当時の東独地域の会員が退会せざるを得なくなった。1990 年の東西統一で再入会が実現し、現在はヨーロッパ・ドイツ語圏を中心に約 800 名の会員を擁している。1995 年からはヨーロッパ天文協会 (European Astronomical Society: EAS) に所属している。

EAS は東西冷戦の終結を受けて 1991 年に組織された、全欧の各地天文学会をメンバーとする連合体である。現在の構成学・協会は、ロシア、ウクライナを含む東欧諸国、スカンジナビア、西ヨーロッパ、ギリシャ、イギリスなど 19 に及んでいる。今年は EAS 創設 10 年目に当たり、また AG



図 2. JENAM2001 のコーヒー・ブレイク風景

の第 75 回総会に当たっていて、合同の年会 (Joint European and National Astronomical Meeting = JENAM 2001) がミュンヘン大学で開催された (図 2)。AG と EAS 年次総会を含む一週間の国際会議「大型装置が拓く天文学」で、午前中が主に招待講演、午後は 4 会場に分かれてのシンポジウムであった。EAS と AG の旅費支援の努力で、東欧圏からたくさんの研究者が参加した。合計約 500 人の国際会議であったが、数人のアメリカ人の招待講演者が、テロ事件のために来ることができなくなった。授賞式は第一日 9 月 10 日の開会式で行われ、引き続き 1 時間の受賞講演をおこなった。翌 11 日の午後、ニューヨークとワシントン

での対米テロ事件のニュースがとび込んで来て、会議の雰囲気は一変した。様々なレセプションやパーティー行事も極めて控え目に行くか、取り消しとなった。私が1961年にドイツ政府の留学生としてヨーロッパに向かう船旅の途中、インド洋上で「ベルリン分断」のニュースを知って、「ヨーロッパ戦争か」と船内が騒然となったのを思い起こした。NATOとは別に、ドイツ政府は即刻「米国支持」の態度を鮮明にし、ミュンヘンでも大規模な追悼集会がもたれた。週末に移動したベルリンでは、20万人の大集会が開かれた。またJENAM2001の招待講演会場がハイゼンベルク、ゾンマーフェルトなどが講義をした由緒あるミュンヘン大学の大講堂(Audi-Max)で、その正面入口が、Geschwister-Scholl Platzであったことも、ドイツ人参加者の気持を動かした。ショル兄妹は、第二次世界大戦中にヒットラーのナチスに反対して大学前の広場にピラを撒き、逮捕されて処刑されたことで有名である。Audi-Max入口の大樹の茂る大きな噴水のある広場の敷石には、二人が撒いたピラを写したタイルが無数に埋め込んである。会議中のミュンヘンはテロ事件の悲しみを象徴するかのよう、薄ら寒い雨風の日が続き、カスタンエの葉が舞っていた。

最後になったが、私の受賞の理由は、恒星・銀河物理学における国際的貢献ということであったが、受賞講演の題は「Macro- and Microscopic Views of Nearby Galaxies」¹⁾であった。私はこの与えられた機会に、自分の「銀河観」を話すことにした。前半で私が追求してきた銀河の大局的構造に関する統計学的研究について、また後半では「すばる」望遠鏡の主焦点カメラで撮ったアンドロメダ銀河の画像の微細構造解析の初期成果を報告した。主系列星のような安定状態にある恒星は、「質量」が定まると全ての物理状態が定まるので、様々な観測の間には強い相互関係がある。いろいろな観測を座標軸とする多次元空間内に恒星をプロットすると、強い相関があるために紐のような一次

元空間を構成する。岡村定矩さんと科研費「特別推進研究」(1984-1988)の補助を得て行った「銀河の定量分類」の研究は、多種多様に行われてきた銀河の形態分類から脱却して、銀河の骨格を定量的に測定・分類することを目指した。渦巻模様によるハツブルの分類は、恒星であれば黒点の分布やコロナの形で分類しているようなものである。1000個近い銀河の表面測光を行い、様々な構造パラメーターを導入し、それらについての相関を調べる「主要因解析」を行った。その結果、S銀河では2個の主要因が、またE銀河では1個の主要因ともう一個の弱い要因のあることが判明した。私達はこれらの各2個の要因が似ていることから、E・S銀河が共通に2次元空間を張ることを見抜き、その2次元基本面(Basic Plane)に近いものとして直径・面輝度図(Diameter vs. Surface-Brightness Diagram: DSBD)を導入した²⁾。E銀河についてはアメリカのグループが「Fundamental Plane」と称する平面を別途定義したが³⁾、今回のJENAM2001では、多くの研究者から「あなた方が第一発見者だということは、アメリカでも認められている」と言われた。問題は、恒星の主系列がヘルツシュプルング・ラッセル図や質量・光度関係を経て、プラズマ物理・核物理の理論に依ってその本質が解明されたように、この銀河の基準面を物理的に理解することにある。大方の流れは、銀河が相同的(homologous)な輝度分布を示すことから力学的にも相同性を前提にしてヴィリアル平衡を適用し、最後に銀河毎の光度・質量比(L/m)を経験的に調節して辻褄を合わせる方向で落ち着いた。しかしこの考え方では、「質量」が主要因の一つであるとしても、基準面を物理的に説明したことにはならない。幸田・祖父江組はS銀河の数値シミュレーションの結果をもとに、「角運動量」がもう一つの要因であるとした⁴⁾。これはある程度推察できることではあるが、バリオンとダーク・ハローの複合力学系の中での星形成史を追うには、もっと広汎で緻密な数値シミュレーション

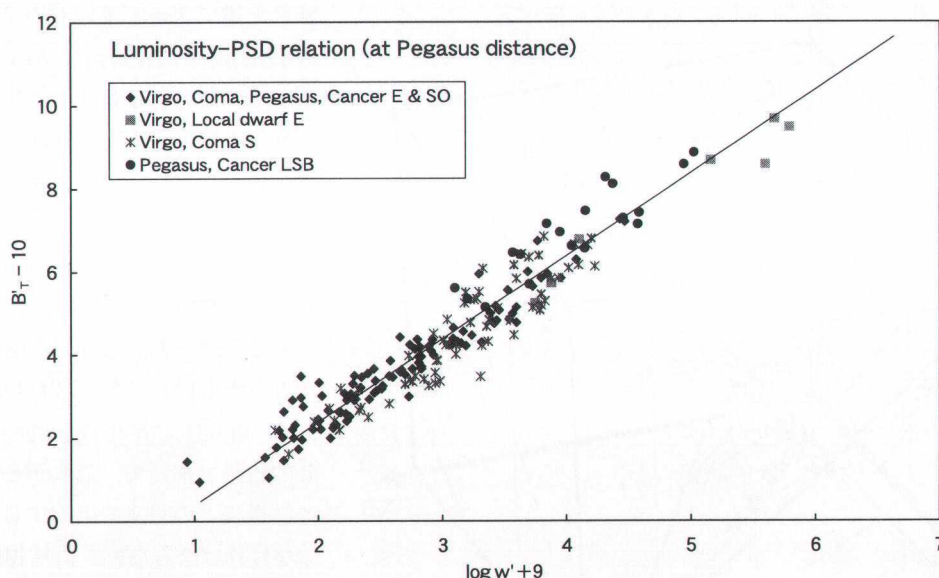


図3.「光度・位相空間密度」関係

が要求されることは間違いない。

一方私は、基準面の物理的背景を巡って種々の解析を続けるうちに、銀河の「光度」がある種の「平均位相空間密度」と強い相関を示すことを発見した^{5), 6)}。平均位相空間密度を表すパラメータは銀河直径の2 剌に銀河のダークハロー重力場中での極大回転速度を掛けたものの逆数で定義される。これをさらに重力定数 G で割ると、一粒子自己重力平衡系の位相空間密度と同じ物理単位となる。しかもこの相関の形が、E 銀河、S0 銀河、S 銀河にわたって共通なのが魅力であった。私は E から S にわたる銀河が、初期の総質量に加えて、初期の角運動量や、運動エネルギー (hotness) によって、一連のものとして理解できるのではないかと考えていた。また、銀河の構造が基本的には自己重力と星やガス、それにダーク・ハローの運動との釣り合いによって決まっている力学平衡として捉えられるので、「平均位相空間密度」という力学物理量が、星生成の歴史の積分的物理量である「光度」と強い相関を持つのは、何となく分かるような気がした。

恒星の場合、主系列星の中心密度は総質量に代わって光度を決めるパラメータともみなせる。実際、E 銀河の詳しい測定や力学理論から、E 銀河が相同構造をしているという前提が正しくなく、位相空間密度が特性を代表し、それが光度と相関を持ちうるとする示唆も出始めている^{7), 8)}。しかし、銀河の場合には、恒星となっているバリオンの他に、その10 倍以上のダーク・ハローが在って、重力場を支配している。今回の講演では、「基準面」の発見、「光度・平均位相空間密度関係」の発見を一歩進めて論じてみたかった。今までのこれらの銀河統計が普通のいわゆる高面輝度 (HSB) 銀河を中心としてなされてきていたので、倭小銀河 (dE) と低面輝度 (LSB) 銀河を加えて見ることを思い立った。これらを加えると光度で2 桁、平均位相空間密度で2 桁半も、対象とするパラメータ空間が広がる。結果は見込み通りに、これらをも含めて、密度で4 桁、位相空間密度で5 桁の全領域に亘って強い相関が得られた (図3) (図4)。特に LSB 銀河が HSB 銀河と同一系列をなし、倭

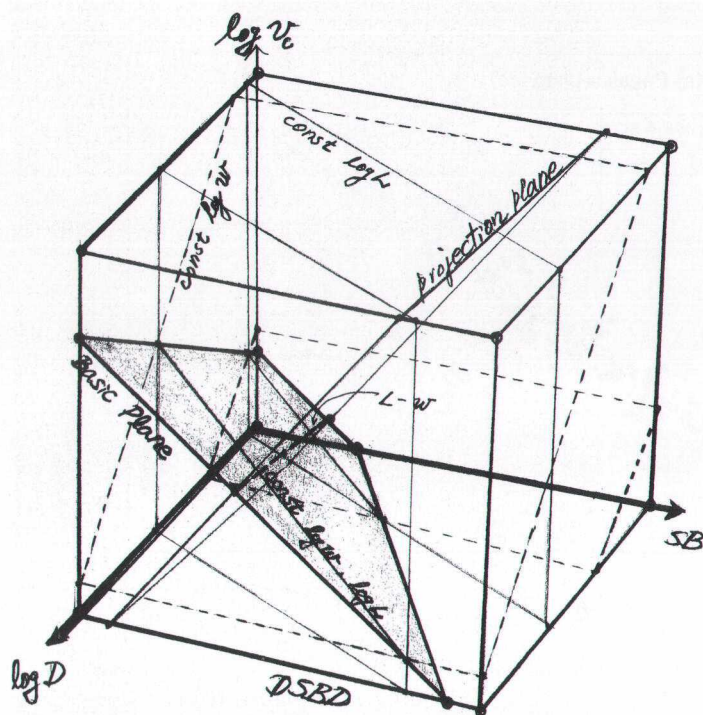


図4. 「直径：D」「平均面輝度：SB」「釣合速度：Vc」の3次元空間内での「基本平面」と「光度・位相空間密度」関係

小銀河とも同じように振舞うことが分かった。LSB銀河の多くは広がった水素雲のごく中央だけが恒星として光っていることが知られていて、HSB銀河の光度・速度関係（タリー・フィッシャー関係）からは大きくはずれる⁹⁾。一部のLSB銀河では、中央付近でも、全質量密度に対する恒星密度の割合は無視できる程小さい。したがって、HSBからLSB銀河に亘って同一の光度・位相空間密度関係が成り立つということは、恒星となっているバリオンと質量の大部分を担っているダーク・マターとの間に相互作用を通じてある種の約束事（conspiracy）があることを意味するのではないと思われる。ここ数年、私とは別の立場で、この「conspiracy」を主張し始めている人達がいる。トリエステ・グループが提唱している「統一回転曲線仮説」^{10), 11)}やマルセユ・グループの「可視質量とダーク・マスの密約仮説」^{12), 13)}がそれである。これらはいずれも、

銀河の回転曲線を可視質量分布だけを基に記述できるとするもので、とりわけLSB銀河にも適用できると主張するところに特別な意味がある。もしもこれらの仮説が正しければ、私の今回のLSB, dEについての結果と考え合わせて、バリオンとダーク・マスからなる銀河というものの物理的把握が、さらに一歩進められると考えている。

ところが一方、こうした巨視的な捉え方をするにしても、私たちの関心を引く「光度」は星生成活動の歴史の積分的結果であって、これがどのような力学過程との関連で生起するかを理解しなければならない。恒星物理におけるプラズマ素過程や核反応素過程に対応する、微視的な素過程の理解が不可欠である。現在、観測される銀河の光度やエネルギー分布を説明するために、精緻な種族合成モデルや進化モデルが用いられているが、そのほとんどが、

含んでいる種々のパラメータを観測事実合うように調整しているのが現状である。数値計算による進化モデルでも、星生成率にシュミット・モデルを、また初期質量関係にサルペータ・モデルを採用し、しかもモデル銀河の巨視的な空間に適用している。星生成の結果放出される核エネルギーの星間空間への還元も巨視的に扱われているが、局所的な視点が必要ではないかと思われる。初期質量関数も銀河の局所状況によって可成り異なっているという観測事実も出始めている¹⁴⁾。星生成率がシュミット・モデルのようにガス密度のみに依るとというのがゼロ次の近似であろうが、実際には速度場への依存も見逃せないのではなからうか。私は星生成率、初期質量関数ともに、銀河の微視的領域についての統計・積分効果を通して、大局的な光度・位相空間密度関係に反映されているのではないかと考えている。

こうした考えを検証するには、星生成と初期質量関数についての素過程の物理的理解が必要である。最近のミリ波天文学の発展によって、我々の天の川銀河の太陽系近傍については、日本のグループも大きな貢献をしつつある。これらの知見を全銀河規模に広げるためには、近傍銀河の詳しい観測によって補わなければならない。南天では既に4メートル級光学望遠鏡などの活躍によって、マゼラン雲の星形成の様子が詳細に調べられてきた。しかしマゼラン雲は矮小伴銀河であって、我々の天の川の状況とは大きく異なっている。天の川銀河によく似ていると考えられるアンドロメダ銀河の詳細観測は、距離がマゼラン雲の10倍以上も遠いので非常に困難であったが、「すばる」の主焦点カメラ (Suprime-Cam) が、先導的光学観測では偉力を発揮しそうである。そのことを皆に知ってもらおうと、宮崎聡さんと一緒に行ってきた Suprime-Cam 画像の初期解析の結果を報告した (図5)。8メートル級大望遠鏡で唯一「すばる」だけが持つこの広視野主焦点カメラの偉力は、世界的に知れわたっていて、今回も多くの参加者から賛辞が寄せられた。アンドロメダ銀河の渦状腕の発達した円盤部のような星の密集領域でも、25分角という広い領域に亘って、暗黒雲の細かな様子や小さな HII 領域、若い星の誕生している密小集団など、新しい知見が得られている。これからこれらの詳細測光と構造統計などを行って、光度・位相空間密度関係の基礎になっている素過程を理解したいというのが、私の夢である。

参考文献

- 1) Kodaira, K. 2002, *Reviews in Modern Astronomy*, Vol.15, in press
- 2) Kodaira, K., Okamura, S., & Watanabe, M. 1983, *ApJ*, 274, L49
- 3) Dressler, A. et al. 1987, *ApJ*, 313, 42



図5. Suprime-Cam M31 画像の一部

(PSF の FWHM = $0''.5-0''.6$) (C179 + D118 + D74;
画像中心 0 : 38. 59, + 40° 33'.5 : 1950. 0)

- 4) Koda, J., Sofue, Y., & Wada, K. 2000, *ApJ*, 532, 214
- 5) Kodaira, K. 1989, *ApJ*, 342, 122
- 6) Kodaira, K., Kashikawa, N., & Misawa, T. 2000, *ApJ*, 531, 665
- 7) Hjorth, J., & Madsen, J. 1995, *ApJ*, 445, 55
- 8) Busarello, G. et al. 1997, *A&A*, 320, 415
- 9) O'Neil, K., Bothun, G.D., & Schombert, J. 2000, *AJ*, 119, 136
- 10) Persic, M., Salucci, P., & Stel, F. 1996, *MNRAS*, 281, 27
- 11) Swaters, R.A., Nadore, B.F., & Trewheella, M. 2000, *ApJ*, 531, L107
- 12) Giraud, E. 1998, *AJ*, 116, 1125
- 13) Giraud, E. 2000, *ApJ*, 531, 701
- 14) Pleuss, P.O., Heller, C.H., & Fricke, K.J. 2000, *A&A*, 361, 913