

アクリション・ディスク・ストーリーズ

I. 観 測

福 江 純*

1. とは？

最近ついにマンガにも登場した、アクリション・ディスク（和名：降着円盤，降積円盤，または付着円盤。以下 AD と略記）とは，名前こそ周知となってきたが，その実体は案外と知られていないようだ。ここでは，最近までの研究をもとに，AD の現況について若干の解説を試みたい。今回は，概説および観測面について福江が，次回で理論的モデルについて松元が述べる予定である。

AD とは，簡単に言えば，重力天体（普通の星，白色矮星，中性子星，はたまたブラック・ホール）のまわりを回転しているガス円盤のことで，世の中に角運動量と粘性があったから存在できた代物である（図 1, 2）。重力天体にむかって，まわりからガスが落下するとき，初期にもっていた角運動量に応じて，重力天体からある半

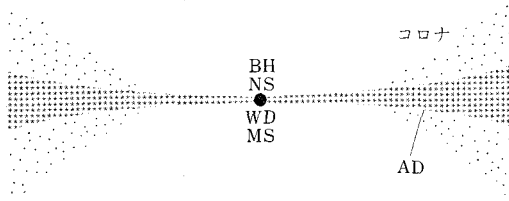


図 1 AD の断面図。系によっては，中心近傍で，図のように厚くなっている。

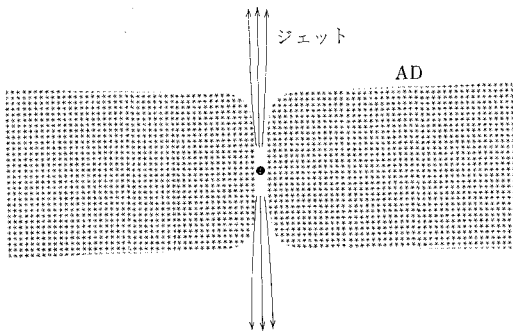


図 2 幾何学的に厚い AD。銀河中心核，SS 433，分子雲中で，宇宙ジェットの形成に一役買っていると考えられている。今回は厚い AD は考えない。

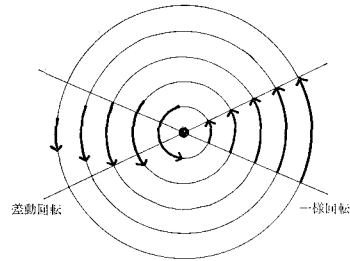


図 3 中心ほど回転角速度の速い差動回転と，角速度一定の一様（剛体）回転。AD は差動回転しており，隣接する領域間で角運動量の輸送と摩擦がおこる。

径のところには，ガスの回転リングをつくってゆく。もしガスの粒子間に相互作用がなければ，ガスはトーラス状に蓄積する一方だが，ここで粘性が発動する。

風呂の水を少々かきまわした後，栓を抜いてみて欲しい。水は回転しながら穴へ消えてゆくだろう。この時，水面には様々な模様を生じ，なかなか面白い。閑話休題一水圧や床面との摩擦の影影は大きい，手近で行える AD の模擬実験と言えなくもない。水のような密度の大きい流体の場合，粘性としては分子粘性が働く。すなわち，分子同士が直接衝突して，（角）運動量を交換する。ミクロな目で見れば，1つ1つの分子はランダムに近い動きをしていますが，平均的には，図 3 のようにある点（栓の穴や重力天体）のまわりの回転運動をしていたとする。もしその回転が，例えばケプラー的回転のように，中心ほど回転角速度の速い差動回転であれば（図 3 左），自分より外側の粒子と衝突した時，平均的には角運動量を失い，内側の粒子と衝突すれば得る。その結果，全体としては，外側へ向かって角運動量が輸送され，逆に，粒子は中心へドリフトしてゆく。粒子の軌跡を追えば，ジグザグに動きながらも，平均のコースは中心へ向かうスパイラルになっているだろう。宇宙における実際の AD は，水に比べ遙かに希薄なガスでできているため，粒子同士の直接の衝突は起こらない。そのかわり，ガス中の乱流渦や，磁場の働きを通して，遠方の粒子と相互作用する。このような形の粘性を，乱流粘性とか磁場粘性とか呼ぶが，詳しいメカニズムは未だ十分理解されていない。粘性は，AD 中で角運動量を輸送すると同時に，エネルギーの発生にも関与しているが，そのことについては次節で触れる。それでは次に，宇宙の中で，AD はどこに居るのか？という問題を考えよう。

* 京大理 Jun Fukue: Accretion Disk Stories I. Observational Aspects

2. どこに？

2.1 銀河中心核

AD が天文研究の前面に出てきたのは、1969年にリンデンベルグが、途方もないことを言い出してからだ。彼は、クェーサーや銀河の中心には超巨大なブラック・ホール (BH) が鎮座していて、そのまわりに AD があるだろうと予想した。

クェーサーは、発見当初 (1963年) から様々な論争を呼んだ宇宙のモンスターだが、現在では遠方の銀河のきわめて明るい中心核だということがわかっている。遠方と考えることに異論があった理由は、クェーサーが、その大きな赤方変位の示す通りの距離にある天体だとすると、直径1パーセクぐらいの狭い空間から、実に毎秒太陽の1兆倍から1京倍 (10^{45-48} エルグ/秒) ぐらいのエネルギーを放出していないと、その明るさが説明できないからだ。核反応ではエネルギーの変換効率が小さく (静止質量の0.7%程度)、クェーサーのエネルギーを賄うことは難しい。しかし、重力の (位置) エネルギーを上手に引き出してやると、最高で、静止質量の42%まで光に変えることができる。その方法が、BHのまわりのADを使う方法だ。再び図3を見て欲しい。回転が一樣でない場合 (図3左)、隣接する2つのリングの間では、角速度の差があるため、2つのものを擦り合わせているのと同じで、摩擦が働いて熱が発生する。この熱はその場ですぐ光になり、外に放出されるが、結局、これらの仕事は重力によって為されたことになる。すなわち、粒子が角運動量を失いつつ内側へドリフトする時に、軌道半径の差だけ重力エネルギーが余る。ケプラー的なADの場合、その半分は回転運動のエネルギーになるが、残りが熱 (最終的には光) となる。

ところで、本当に銀河やクェーサーの中心に、そのようなBH-ADシステムが存在しているのだろうか。現在の物理学の範囲で考える限り、答は多分イエスである。直接の発見は、宇宙暦195年 (コスモス・エンドによると) まで待つて欲しいが、状況証拠なら幾つも挙げられる。1つは上で述べたエネルギー面での条件で、膨大なエネルギー/質量が狭い空間に存在することからも、そこにある天体は相対論的天体にならざるを得ない。また、乙女座銀河団の中心にある巨大楕円銀河M87では、星が中心に異常に集中していて、それを説明するためには、中心に 5×10^9 太陽質量程度のBHが必要だと考えられている。我々の銀河系の中心にも、 10^6 太陽質量ぐらいの天体があるようだ。さらに、ここでは紙数の関係で詳しく触れられないが、最近話題の宇宙ジェットもADの存在を強く示唆する現象である (図2参照)。

さて、ここで我々の太陽近傍に目を転じて、「直接」見

えるADの話をしよう。

2.2 激変星

白色矮星 (WD) と主系列星 (MS) で構成される近接連星系において、MS (晩期型赤色星が多い) がロッシュ・ローブを充たしていると、ガンダムでお馴染みとなったラグランジュの L_1 点から、MSの外層がWDの重力圏へあふれ出す (図4=表紙)。あふれたガスはWDに向かって落下していくが、連星系の公転のために、ガスはWDに対して相対的に角運動量を持ち、その結果ADが形成される。

このWDのまわりのADが「見える」わけだが、その前に、激変星について簡単に説明しておこう。「爆発的に明るさの変化を示す星」が激変星の定義で、新星、再帰新星、新星状変光星、矮星型新星、ポーラーズなどがその範ちゅうに入る。これらは全て、公転周期が1日以下ぐらいの近接連星系を成している。MSからあふれたガスは、ADを経て、最終的にはWDの表面にたまっていくが、ガスがある程度たまると爆発的に核燃焼し、それが観測される。ただし、矮星型新星の爆発については、AD中の不安定性かMS外層の不安定性によって起こると考えられている。話をもどして、

(a) スペクトル

ほとんどの激変星から、水素のバルマー輝線と青い波長の連続光が出ている。また、He I, He II, Ca IIなどの輝線もしばしば見られる。WDや赤いMSがこれらのスペクトルを出しているとは考えにくく、1万度から40万度ぐらいのADがその源と思われる。

輝線は、一般に幅が広く、しばしば2重のピークを持つが、軌道傾斜が小さい系 (すなわちADを上から見ている系) では、ピークの分離は見られない。これらのことは、輝線が、ADの比較的外周の密度の希薄な部分から出ていると考えると、うまく説明できる。2つのピークの離れ具合から、輝線が出ている領域の回転速度が評価でき、回転則がケプラー的だと仮定すれば、その半径もわかる。そうやって求めたADのサイズは結構大きく、ロッシュ半径の半分以上はあるようだ (図4)。

青い連続光は、AD本体とホット・スポットの両方から出ている。どちらの寄与が大きいかは、系によって異なるが、図5の例では後者から主に出ている。

(b) フリッカリング

図5は双子座U星の光度曲線で、図の左側のギザギザが、フリッカリングと呼ばれる現象である。MSから流れ出たガスは、ADの外縁にぶつかると、落下が止められて衝撃波を生じ、急激にエネルギーを解放する。その結果、高温のホット・スポットが形成されるが、多分落下するガスの非一様性のために明るさが変動して、フリッカリングとして観測されるのだろう。実際、MSの食

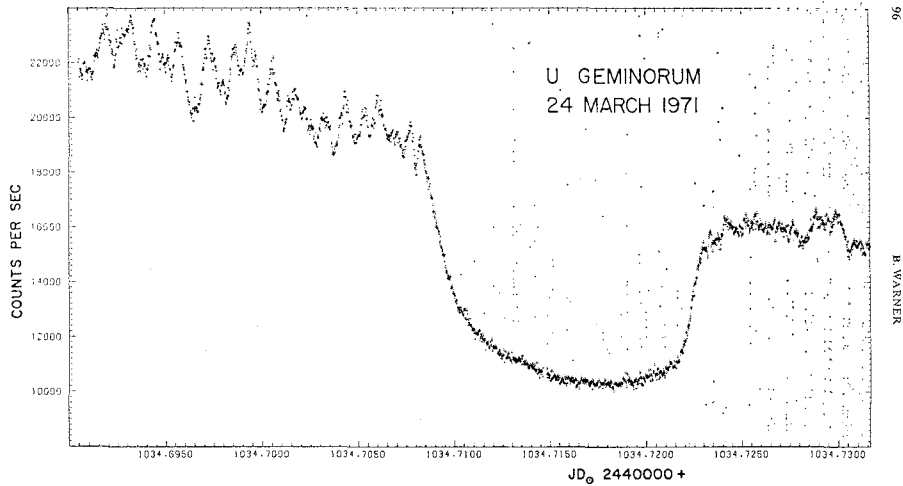


図 5 双子座U星の光度曲線(ウォーナー 1976 年)。(IAU の好意による)

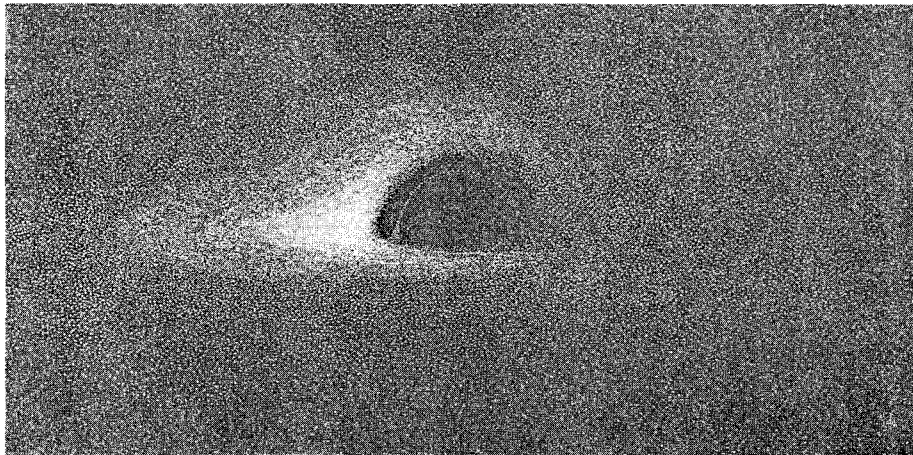


図 6 オマケ. 斜め上から見た, ギンマンガ・ギャップ(超巨大 BH) のまわりの AD (ルミネによる数値計算 1979 年). BH による時空の歪みと, AD の回転によるドップラー変位のため, 図のように見える。(Astron. Astrophys. 誌の好意による)

によってホット・スポットが隠されると(図 5 の右), フリッカリングも消失する。

(c) その他

系によって異なるが, 激変星では, 短いもので 20 秒長くても 70 秒くらいの非常に短周期の振動が観測されている。振動の仕方は正弦的で, フリッカリングとは違い, 周期が, WD の典型的な動的時間尺度であることから, 主星が WD だと考える一つの根拠になっている。WD 自体の非動径振動か, WD 近傍の AD の振動が, その原因だと言われている。

WD の表面にたまったガスが, 核暴走を起こすと, 例えば, 新星爆発では, 10^{45} エルグものエネルギーが解放され, WD の外層は吹き飛ぶ。それはやがて, 膨張してゆくガス殻として観測されるが, 奇妙なのは, ガス殻の

形状が球対称ではなく, しばしば WD の極方向に伸びた卵形をしていることだ。爆発前に赤道面内に存在していた筈の AD によって, ガス殻の赤道面方向への膨張が減速されたのだと解釈する説が自然だろう。新星爆発によって, 約 10^{29} グラム (10^{-4} 太陽質量) の物質が飛び散るが, AD がその質量に影響を与えるためには, AD 全体の質量も同程度必要だと考えられる。

紫外域や X 線での観測から, AD をつつんで, 高温のコロナも存在しているようだ。

2.3 他の近接連星系

前節では, WD と MS から成る激変星を考えたが, WD を NS (中性子星) に置きかえた系も存在する。流れ込んだガスはやはり AD を形成し, NS が磁場を持たなければ, その表面にたまってやがて核暴走を起こす。

NS 表面でのこの爆発が、最近続々と発見されている X 線バースト (I 型) 現象だと考えられている。X 線バーストにおいても短周期振動があり、その周期は 10 ミリ秒程度で、やはり NS の非動径振動か AD の振動らしい。また矮星型新星に対応して、ラピッドバーストと呼ばれる天体では、AD 中の不安定性に帰因すると思われる II 型 X 線バーストも観測されている。

有名な白鳥座 X 1 では、連星系の片割れは BH らしい。銀河中心核の場合も含め、BH のまわりの AD についての詳しい議論は、次回に譲りたい。

2.4 まだあるよ

筆者の独断と偏見で AD に分類している天体を幾つか挙げておく。星間雲が凝縮して星になる時、中心にできる原始星の周囲に、いわゆる原始太陽系星雲と呼ばれる AD が形成される。最近原始星の誕生現場や、それに付随しているらしいジェット現象が次々と見つかっている。

高速自転している星では、遠心力が重力に打ち勝って、星の赤道面から大気の流れ出し、星の周辺にガス円盤を形成することがある。輝線 B 型星と呼ばれる星がそれで、見る方向によっては、星のスペクトルは円盤部で吸収を受けて、ガス殻星とも呼ばれる。これらの例では、「降着」という接頭語はあまり適切でないかもしれないが、観測的にも理論的にも興味を増大している天体だ。

もっと身近では、土星のレコード盤も塵でできた AD の一種である。ボイジャーによると、輪の表面には無数

の溝があり、しかもその溝は、同心円状ではなくスパイラル状になっているらしい。微小な衛星が溝を掘ったとする説もあるが、AD 内での永年不安定性によって溝ができるという研究もある。

筆者自身は、銀河円盤も壮大なスケールの AD だと思っているが、妄想たくましすぎるだろうか？

3. どこへ？

最後に、星の研究と比較しつつ、AD の研究の動向を探ってみよう。まず、AD は、粘性を通して重力エネルギーを解放している、一種の星であると認識しよう。通常自己重力を無視する点が、星とは大きく異なる。また回転も本質的に重要である。星が宇宙の主要な構成員であるのに対し、AD は、宇宙の中の種々の活動的現象のプライム・ムーヴァー (主動者) として機能している。

現在 AD の研究は、エネルギー解放に関する粘性のメカニズムが十分解明されていない段階で、星の研究でいえば、核物理の確立していなかった 1920 年代くらいにあたるだろうか。にもかかわらず、当時、星の基礎理論の多くができた背景には、星の構造の 1 次元性や、エディントン達の卓越した判断もさることながら、観測の膨大な積み重ねがあった。AD の研究も、星の場合と同様に、今後粘性の解明と並行して、動的な問題 (振動、爆発、進化……) へ進んでゆくことが十分予想される。そのためにも、観測データが、質・量共に充実してゆくことが切望されるし、観測と理論の連携が大切だと思う。

追悼 オコーネル神父

1982 年 10 月 14 日、元ヴァチカン天文台長オコーネル (Daniel Joseph Kelly O'Connell) 博士が歿なられた。ここ数年は床に伏したままの生活で、ローマ市内ヴァチカンの病院でイエズス会の兄弟たちに見守られながら安らかに眠りにつかれたという。かつて IAU 42 委員会 (当時の名称は測光連星; 現在は近接連星) の委員長も務め、多くの観測的研究を発表され、特に軌道離心率をもつ近接連星の測光研究は有名である。筆者は、1960 年イタリアのスキヤパレリ生誕百年記念国際会議で初めてお目にかかり、以来ヨーロッパ滞在中しばしばお会いする機会があった。若かりし頃日本へ立寄られたことがあったか、平山信・萩原雄祐両先生のことをよく話しておられた。

神父は 1896 年英国の Rugby 市で生まれ、1913 年にアイルランドへ帰りイエズス会に入られた。ダブリン大学で実験物理学でディプロマを、数学で修士号を、さらに博士課程を終えられたあと、1931~33 年の間当時天文学のメッカであったハーバードで Shapley について学んだ。その後、英国ケンブリッジで Eddington にも師事したという。この頃一時胸を悪くされ、イエズス会会長のすすめで暖い南半球オーストラリア・シドニーの River-view College 天文台に勤務されるようになり、1938 年に

は台長になられた。変光星観測を行うかたわら、この頃から時間測定の仕事にも従事し、この時の経験が後年ヴァチカン・カレンダーの改訂に関する法王への進言となる。

1952 年丁度ローマで戦後の IAU 総会が開かれたとき、当時の Pius XII 世に招かれヴァチカン天文台長となる。以来ヴァチカン・シュミット望遠鏡の完成、初期の星の種族に関する研究、活動銀河の観測と幅広い活動が始まった。ヴァチカン天文台長在職中 (1952~70)、3 人の法王 Pius XII 世 (1939~58)、Johannes XXIII 世 (1958~63)、Pauls VI 世 (1963~78) に仕えた。とくに、自然科学の知識欲の旺盛な Pius XII 世との親交が厚かったといわれる。しばしばオコーネル神父を招いて天文学の講義を聞き、法王自身も良く天文台を訪れ、観測に立合われたという。世界中の多くの天文学者達との親交もあり、故 Minnaert 教授との生涯を通じての友好は有名で、名著 "Green Flash" も Minnaert 教授の力添えで出版されたという。

ヴァチカン天文台のある、あのカステル・ガンドルフォの丘の澄みきった夜空の下で、今夜もオコーネル神父が観測のためテレスコープへの階段を一步一步ゆっくりと登ってゆく、あの足音が筆者の耳のおくにも聞こえてくるような気がする。温厚な人格、信仰と科学探究に 86 才の生涯を捧げ、今や不帰の人となられた神父の霊に心から安かれと祈る次第である。(北村正利)