

S. チャンドラセカールとノーベル物理学賞

テクニカルノート: 藪下信 (Shin Yabushita) , 2005年5月30日掲載

1. はじめに

ノーベル賞といえば、言うまでもなく、学問の分野における最高の賞である。それを受賞するにいたる研究の道筋は、研究者それぞれによって異なる。また、ノーベル賞を受賞はしたものの、その内容があまりにも専門にすぎ、どちらかといえば、ごくごく狭い分野の研究者にしか関係のないものもあれば、その後の学問のあり方を大きく変えた研究成果もある。たとえば、アインシュタイン光量子仮説。それ以後の物理学のありかたを、根本的に変えてしまった。これがきっかけとなって、量子物理学が生まれるきっかけを作った。しかし、同じく重要なのは相対性理論。これも、それ以後の物理学のあり方を、根本的に変えてしまった。ただ不思議なことに、彼はこの貢献に対して、ノーベル賞を受けていない。ノーベル賞を2度受けた研究者は複数いるのにである。

他方、ノーベル賞を受けはしたものの、後になって、その研究が誤りであることが判明したという場合もある。

ここにとりあげるテーマは、天文学にとっては、きわめて重要性を持つ研究成果についてである。それは、二つの意味において、きわめて、興味深い。というのは、まずそれは理論的に導かれた結果であり、最初はそれについて、学会の権威とされる著名な研究者から、痛烈に批判されたテーマだということである。したがって、それが広く認められるようになるのに、半世紀が経過した。結果として、若き日の研究の果実を、老年になってから受けるということになった。そのようなケースは、時にはあるが、どちらかといえば、まれである。たとえば、遺伝子のDNA螺旋構造を発見した F. クリックと J. ワトソンの研究。かれらは、論文発表後、数年でノーベル賞を受けている。また、フラーレンと呼ばれる構造(炭素原子が60個で、鳥かごのように並んだ構造)の発見も、数年後に、ノーベル化学賞を得ている。したがって、研究を論文に発表してから、約半世紀を経てノーベル賞をうけるというのは、やはり例外的といえる。しかし、それはまた、学界の常識を大きく覆えすことになったからだともいえるのである。かりに、その当時としては非常識であったとされる研究結果が、学術雑誌に掲載もされず、葬りさらされていたならば、いったい、天文学はどれだけの被害をこうむったことになるだろうか。

2. チャンドラセカールの初期の業績

ここでは、まずチャンドラセカールの生い立ちと、初期の、しかも重要な業績をとりあげておきたい。なお、本人による研究の紹介は、ノーベル賞のサイト (<http://nobelprize.org/> [<http://nobelprize.org/physics/laureates/1983/index.html>]) に書かれている。

S. チャンドラセカール(S. Chandrasekhar) はインド出身。1910年、インドのラホアー州で生まれ、インドの大学を卒業した1930年に、政府の奨学金を得た。この奨学金で、英国のケンブリッジ大学に、入学することとなった。ここでは、研究生(research student)として登録した。この大学には、当時は大学院なる組織はなく、research studentとして登録し、大学指定の研究指導者(supervisor)のもとで9学期(3年間) 研究し、論文(dissertation)を提出し、それが学位に相当すると判断されれば、Doctor of Philosophy の学位が授与される。チャンドラセカールの場合、指導者は R. H. Fowler と呼ばれる物理学者であった。Fowler は統計物理学と呼ばれる分野の研究者である。

1930年から1933年まで研究生として過ごし、1933年に Ph. D. (Doctor of Philosophy を省略したもの) の学位を受けた。そして、Trinity College の fellow に選ばれ、さらに数年間研究に従事した。ここでとくに注目したいのは、その論文の内容である。ケンブリッジ大学図書館には、manuscript section (原稿部とでも呼ぶべきか) というのがあり、そこには、大学に提出された学位論文が、各一部ずつ保存されていて、所定の手続きを経て閲覧が可能である。現在でもこの論文の現物は閲覧が可能である。実はこの研究生として過ごした3年の間に発表した論文と、Trinity College の fellow であったときに発表した研究結果が、後にノーベル賞の対象となるわけであるが、以下にその概略を説明しておこう。

星々は一言でいえば、巨大なガスのかたまりである。太陽の場合、地球の約100万倍の重さを持つ。このように巨大なものは、自分自身の重力(引力)で、壊れて小さくならうとする。それを支えているのが、内部の圧力である。たとえば、地球の大気の場合、下向きに重力がはたらいている。しかし、上空に行くほど圧力が低い。この圧力の勾配が、下向きの重力と反対の方向にはたらいて、大気はバランスが取れている。星の場合も同じで、中心方向に重力が作用し、その逆方向に圧力勾配があり、両者がバランスしている。地球の内部も同じである。この釣り合いを記述するのが、アダムズ・ウィリアムソンの式である。星については、この圧力の大部分は、内部が

ら外部にもれ出す電磁放射(光)の圧力であることを、エディントン(A. S. Eddington)は示した。

ところで、星がエネルギーを使い果たして、もはや内部から放射が外部に流れなくなるとどうなるのだろうか。圧力が小さくなると、重力に耐え切れなくなって、その星は収縮を始める。しかも、星は収縮をはじめると、温度はあがるのである。そしてどんどん小さくなる。そして、その収縮はどんどん進み、かりに星を作っているガスの性質をあらゆる関係式がそのまま成り立つと仮定すれば、一点にまで、収縮してしまう。しかし、ある条件がみたとされると、この収縮はとまる。この、ある条件というのが、曲者であるが、そのことについては、後で触れる。

高温の星のなかでは、原子はもはや存在せず、原子核と電子とがバラバラになった、いわゆるプラズマ状態となっている。このような状態にある物質の示す圧力は、原子核と電子の運動の激しさが原因なのだが、収縮がどんどんすすみ、密度がたかくなると、このような圧力は作用しなくなる。これ以上圧縮が出来ないという状態では、物質は縮退した状態になってしまう。これは、量子力学からすれば、これ以上は電子を詰め込むことは出来ないという状態なのである。縮退した電子からなる物体の、密度と圧力のあいだの関係、いわゆる状態方程式をもとめるのは、まさに統計物理学のテーマであって、チャンドラセカールが研究をはじめたころには、かれの supervisor である R. H. ファウラーがすでに導いていた。

かれは、この関係式を星のバランスを表す式に代入して、解をもとめた。すなわち、質量があたえられるとして、その星の持つ半径を計算したのである。その結果たるや、驚くべきものであったが、それまでの天文学を根底から覆すというものではなかった。星の質量が大きいほど、半径は小さくなる。しかしゼロにはならない。しかし、この結果をつかうと、星の中心部では、電子の運動速度が、光の速度に近づく。したがって、より正しい結果をみちびくには、相対性理論を使って、縮退した電子からなる物質の状態方程式を使わねばならない。その結果はまさに驚くべきものであった。星の質量が大きくなると、半径は小さくなり、さらに驚くべきことに、ある値で、半径はゼロになってしまう！。これ以上の質量に対しては、重力と圧力のがバランスのとれた解は数学的には、存在しないのである。通常この限界をチャンドラセカール限界と呼ぶ。

これに対して、いろいろと反論がおこった。いったい、その星はどうになってしまうのだ、星が一点に収縮してしまうことなどありうるはずがない、計算のどこかに誤りがあるはずだと。この論文が発表されたのは、1935年の Monthly Notices of the Royal Astronomical Society においてであるが、学界の権威であるエディントンは納得しなかった。

3. エディントンとの論争

当時の学会において、この結論はにわかには受け入れられなかった。しかも、学会の大御所とでもいべきエディントンが批判にたったのである。

エディントンといえば、「星の内部構造論」と題する本の著者で、ケンブリッジ大学プルミアン天文学教授の地位にあり、当時は世界的な理論天文学者であった。一般相対論を確認するために、観測隊長として活躍したのみでなく、相対論についての本も書いて、それが広く受け入れられるのに大きく貢献した。20世紀を代表する天文学者の H. N. ラッセル(Russell)は、彼を20世紀最高の天体物理学者の一人と称した。そのエディントンが、チャンドラセカールの論文の批判を行い、英国の天文学会(Royal Astronomical Society)を舞台に、討論が行われたことから、如何に理解に苦しむ結論であったかが想像される。この間の事情は、チャンドラセカールが学生時代および fellow として所属していた Trinity College で後年おこなった講演で、詳しくのべられている。エディントンの反論はおおよそ、次のようなものである。

すでに説明したように、星は内部で発生するエネルギーをうしなうと、収縮せざるを得ない。結果として、非常に密度の高い星になってしまう。事実、シリウス星の伴星はそのようなもので、白色矮星と呼ばれる。質量は太陽のそれと余り違わないが、半径は18,880kmで、これは地球の約2.5倍である。R. H. ファウラーの導いた状態方程式(即ち、相対論を考慮しない縮退電子ガスに対する状態方程式)は、そのような密度の高い星に適用できるもので、その関係式が成り立つかぎり、星はたとえエネルギーを使い果たしても、それ以上は収縮せずに、いわば永遠の眠りにつけるわけで、エディントンはこの結果には満足していた。

しかしチャンドラセカールの研究は、相対論を考慮した場合、ある質量以上の星は安定した平衡状態にありえないことを示し、収縮はとまりようがないことをしめしたわけで、エディントンはこれには満足できなかった。星が収縮し、収縮し、最後には光すらもが脱出できないような小さな空間の中に入ってしまうなど、到底考えられない。相対論にも精通していたエディントンは、そのような奇妙な振る舞いを実際の天体がしめすなど、想像すら出来なかったのだろう。もしそうであれば、相対論の枠組みでは存在するブラックホールが実在することを、認めざるを得ないからである。そのような振る舞いをさまたげる何らかの物理法則があるに違いない、とエディントンは主張し、事実それを模索した。このような反論にもかかわらず、チャンドラセカールが結果を導いた道筋に誤りの無いことは、次第に認められるようになってきた。

以上が、チャンドラセカールの1935年ごろまでの、研究活動である。そのうち、彼はシカゴ大学のヤーキス天文台の天文学者オットー・ストルーベ (Otto Struve) にまねかれて、その天文台のスタッフとなり、次第に地位をかため、最後はシカゴ大学特別教授 (Distinguished Service Professor) の称号を得た。

以下では、1935年以後の研究成果を簡単に触れることにするが、実は、この青年期の業績と比較すると、いまひとつという感じがする。しかしきわめて精力的に研究を続けたことに違いはない。

4. 後年の研究

チャンドラセカールは、以後、いくつかのテーマを精力的に研究した。星の構造論、放射の伝達論、恒星系の力学、流体力学と電磁流体力学の安定性理論、そしてブラックホールの理論などである。そして、彼のスタイルの特徴として、ある程度まとまった成果が出ると、それを一冊の本にまとめ、出版したのである。したがって、彼が天文学の進歩の貢献したのは、研究面においてのみでなく、標準的学術書を出すことによって、多くの学生や学者が、考えを整理するのを容易にした面でも、見逃すことは出来ない。ここで日本人にとって面白いことがひとつある。かつて、日本沈没という小説が広く読まれたことがある。これは、いまではなじみになった地球のマンデル対流をベースにしているが、これと関連して、チャンドラセカールの名前が、この小説に出てくるのである。これは、流体力学安定性理論の、ひとつの応用である。

さらに、かれの大きな貢献は、学術雑誌の編集長としてでもある。アメリカでは、二つの雑誌が天文学を専門としている。うちひとつは、*Astronomical Journal* であり、これはアメリカ天文学会が発行している。これとは別に、*Astrophysical Journal* がある。これは、シカゴ大学が出版しており、どのような編集方針にするかは、シカゴ大学に任されている。チャンドラセカールはシカゴ大学の代表的天文学者として、この雑誌の編集長となったのは、ごく自然の成り行きであった。

筆者がアメリカの大学で、今で言う博士研究員であったときに、かれの編集者としての評判を耳にする機会を得た。まず、彼は投稿してくる論文のすべてに目を通す。要するに、自分が得意とする分野であろうとなかろうと、まず目を通し、しかるのちに、適当な研究者に査読を依頼する。その手順は正当なのであるが、実は評価が厳しく、その雑誌の論文として、採択されない場合が多かったのである。したがって、この雑誌に対する批判もあちこちで聞かれた。しかし、なんとと言っても、アメリカの天文学を代表する雑誌であり、多くの優れた成果がそこに発表されるのも事実であるから、その批判には腰が引けていたのも事実である。若年の研究者にしてみれば、なにがなんでも、そこに論文を発表して自分の存在をアピールしたい一念でがんばっていたものが多数いた。査読員の報告を不服として、編集長と何度も手紙のやりとりするのも、実際、エネルギーを消耗するものである。

筆者は2度、チャンドラセカールと研究面で接したことがある。一度は、連星の寿命についてである。連星は、その近くを通過する星々の引力の影響を受けて、何時までも連星ではありえず、いわば分解してしまう。これに要する時間が、連星の寿命である。これについて、チャンドラセカールは、重力場の揺らぎという観点から、それをもとめていたが、これは筆者には、適切な方法とは思えなかった。それで、当時としては、かなりの大量の数値計算でそれをもとめて、英国の王立天文学会の *Monthly Notices* に発表していた、おそらく、これが彼の目にとまっていたのか、連星の形成割合について、化学反応の理論を応用して、連星の形成される割合を求める論文が、*Ap. J* に投稿され、その査読を依頼された。若気の過ちとでも言うべきか、いまにして思えば、正確な査読報告にはなっていなかったと思う。

いまひとつは、筆者の学位論文で取り上げたテーマについてである。回転流体の形状と安定性という、19世紀末にフランスの数学者 H. ポアンカレと英国の天文学者 G. ダーウィンが取り上げた問題を扱える強力な手法をチャンドラセカールが1960年代初頭に関与していた。これは、筆者が、E. カルトンの論文をもとに、研究していたテーマでもあった。テンソル・ヴィリアル定理と彼は命名していた。この手法の長所は、楕円体関数と呼ばれるものの性質をあまり知らなくとも、回転流体の研究が行えるという点にあった。筆者は学位論文を提出した後、アメリカ滞在中に、これをチャンドラセカールが編集長を務めていた雑誌、*Astrophysical Journal* に投稿した。査読員はおそらく、かれの学生で、このテーマの共同研究者に違いないと、いまでも思っている。問題の設定などは、すでにチャンドラセカールらの論文で行なわれているので、結果だけを要約して、短い論文として、書きなすべきとのコメントであった。その指示に従って、改訂版をチャンドラセカールに送ったところ、受理したとの通知とともに、そのなかのある計算について、自分の結果とあなたとの間には、少し数値の差があるが、どちらが正しいと考えるかという質問がとどいた。当然筆者としては、自分が正しいと考えるとお返しておいた。かれはのちに、この分野の研究成果をまとめて、楕円体平衡形状と題する本を出版したが、筆者の論文もこの本に引用されている。

5. ノーベル賞への道

これまでみてきたように、チャンドラセカールの研究した範囲はきわめて広い。そしてもうひとつの特徴は、すべ

ての論文において、数学が中心的な役割を演じているということである。これは、同じように、理論的立場から研究していたエディントンとも異なる。エディントンの研究スタイルは、たとえば主著「星の内部構造論」を見ればわかるように、そこには物理学がふんだんに使われている。こういう意味で、エディントンを天体物理学者とよべば、チャンドラセカールは数理天文学者と呼んでいいのではなかろうか。

しかしかれの研究成果のなかで、やはり物理学からみてきわめて常識からは想像できない結論、すなわち、星はある質量をこえれば、エネルギーを消費しつくしたときには、平衡状態に安住して、そこで、永遠の眠りにつくことが出来ないということは、本当に観測なり、実験によって、たしかめられるのだろうか。そのことがないかぎり、所詮は奇妙な数学的結果ということに終わってしまうわけである。

1960年前後になって、いくつかの、重要な観測結果が得られてきた。それは、電波天文学の発達と関係する。宇宙には、数多くの電波源が存在する。電波が生まれるメカニズムは、電子の螺旋状運動によるものである。多くの電波源は遠くにある銀河と同定されてきた。要するに、銀河の中に、きわめて強力な電波を出すものがある。ところが、星ではないが、星のように見える天体が見つかった。それは、準星とよばれる。英語では、quasi-stellar objectとよばれ、単純に quasar (クエーサー) と呼ばれることもある。それは、光学的には一点にしか見えないので、星と区別ができないが、大きな赤方偏移を示すので、そのことからこれは、きわめて遠方にあることが導かれ、したがってそれは星ではありえない。しかも強力な電波源となっている。G. パービッジは、この電波源から来るエネルギーの大きさを計算して、そのエネルギーの源として、核反応では、不十分だということをしめした。電波を放出し続けるということは、そのエネルギーの源はいったい何であるのかという疑問が出てくる。それまで、もっとも効率よくエネルギーを放出する機構としては、核融合反応だと考えられていたが、それでは不十分なのである。

ここで、いよいよブラックホールの存在が、幾人かの研究者から、提唱されることになった。ブラックホールというのは、巨大な質量が極めて狭い空間の中に閉じ込められているときにできるもので、その存在は理論的には、一般相対論でしめされている。しかし、理論上存在するというのと、それが現実に存在することは、おのずと別の問題である。進化論で有名なチャールズ・ダーウィンの孫で、理論物理学者のチャールズ・ダーウィンは、きわめて興味深い論文を発表している。それは、ブラックホールの近くで物体はどのように運動するかという問題である。その結果によれば、その物体は、螺旋軌道をえがきながら、ブラックホールの中に、自然に入っていく。いったん入ったものは、二度と出てくる事はない。要するに、ブラックホールの近くにある物体が、その中に入っていくことを阻む法則はないのである。一般相対論が正しければ、問題は、そのときにはたして、巨大なエネルギーの放出があるのかということである。

核反応をかんがえてみよう。二つの物体がありそれが核反応の結果融合して、別の物質になったとする。このとき放出されるエネルギーは、もとの物質がもっていた静止エネルギー (質量×光速の2乗) の0.8%が最大である。これに対して、ある物質がブラックホールに入っていくときの、核融合反応とは比較にならないほどの高い割合の静止エネルギーが放出されることが理論的に導かれる。ブラックホールは巨大なエネルギーを提供できるエンジンと言ってよい。このことから、宇宙には巨大なブラックホールが存在すると次第に受け入れられるようになった。このことと関連して興味あるのは、チャンドラセカールが行ったハレー講演である。彼はこのなかで、天文学のなかで最高の位置を占めるテーマは、天体がエネルギーを放出し続けるメカニズムの解明であると、言っていることである。

さらに1968年に、パルサーと呼ばれる天体が見つけた。みつけたのは、ケンブリッジ大学電波天文学グループのヒューイッシュとかれの大学院生 J. ベルである。これは、回転している中性子星と考えられるようになった。すなわち、星が進化した結果、最後に超新星として、爆発した後に残されるのは、このパルサーなのである。これは、半径が非常に小さい天体で、したがって、密度は非常に高い。これの構造を支配する状態方程式は、白色矮星に対するものと数学的には同じで、したがって質量の大きいものは、平衡状態を保つことが出来ず、ブラックホールにならざるをえないのだ。

こうして、かつては一般相対論では存在するかも知れないと想像されていたブラックホールという奇妙なものの存在が受け入れられるようになって来た。そうすると、最初に、それがどのようなメカニズムで形成されるかを示したチャンドラセカールの業績が評価されるようになってきたのである。

実際に、彼がノーベル物理学賞を受けたのは、1983年で、関連する論文が発表されてから50年の月日が経過していた。同時に受賞したのは、星の内部での核反応を研究して、星の進化の道筋を解明した W. ファウラーである。この発表があったときに、同じ分野の研究者からは、驚きの声があがった。それは、フレッド・ホイル (Fred Hoyle) が含まれていなかったからである。実際、星の内部での核反応の研究に、最初に原子核物理学をフルに応用したのはホイルであり、この分野のもっとも重要な論文で、しばしば B2FH として引用される論文はパービッジ夫妻、ファウラーそしてホイルの共著論文である。またホイルはファウラーと研究するために、しばしばカリフォルニア工科大学をおとずれていたし、またファウラーはホイルがケンブリッジ大学に設立した理論天文学研究所に長期、短期にわたって滞在していた。ただ、ホイルの研究スタイルは晩年、かならずしも学界で支持を受

けるものではなかった。ノーベル委員会から推薦依頼を受けた学者らも、かれを推薦することに躊躇したのかも知れない。実際ある雑誌の記者は、それ以前に、仮にケンブリッジ大学からノーベル賞を受ける天文学者が出るとすれば、それはホイールではなく、電波天文学者のライルであろうと予測し、実際ライルとヒューイッシュにノーベル物理賞が与えられた。ホイールはいまや、この世にはいない。彼がノーベル賞を得るという可能性は完全に消え去ったのである。

参考文献

- S. Chandrasekhar, 1968. Ellipsoidal Figures of Equilibrium, Yale University Press.
- S. Chandrasekhar, 1983. Eddington, The most distinguished astrophysicist of his time, Cambridge University Press.
- A. S. Eddington, 1926. The internal constitution of the stars, Cambridge University Press.

テクニカルノート「S. チャンドラセカールとノーベル物理賞」
藪下 信 (Shin Yabushita)
奈良産業大学情報学部
〒636-8503 奈良県生駒郡三郷町立野北3-12-1