

星と星団の年令決定

寿岳潤*

1959年の夏、私がウイルソン山・パロマー天文台をたずねた時最初にきいた天文学のゴシップは、宇宙の年令より古い(!)星団が見つかったということでした。ここでいう宇宙の年令はハブル(Hubble)の宇宙膨脹係数から単純に逆算した年令で、一昔前パーデ(Baade)が倍増計画で大きくしてから度々改訂され、現在たとえばサンデジ(Sandage)によると130億年となっています。この計算が本当に宇宙の年令をあてるかどうかは難しい問題で、宇宙論で高尚な議論がくりかえし行なわれています。古い星団というのは散開星団NGC 188で、ファン・デン・ベルフ(Van den Bergh)が最初に珍らしいラッセル図表(以下H-R図と略称)を見せてくれるらしいという事をいってから(天文月報52巻83頁参照)、サンデジが観測したものです。予備的な整約の結果、250億年という年令がきめられ、59年から60年にかけてジャーナリズムの世界をにぎわしました。その一例として、私の愛読するシュルツ(Schulz)のピーナッツから第1図を拝借しました。ルーシーはNGC 188の事を知っているに違いないのですが、ライナスのいう若い星については後にふれたいと思います。その後NGC 188の最終結果が発表されるまでには時間がかかり、公にはされない訂正が行なわれた結果、現在この星団の年令は160億年になってしまいました。一方全く別の球状星団M3の年令が260億年にふえたので宇宙の年令より古い星団があるという事情は今も変わりありません。

一体どのようにして星団の年令を決定するのでしょうか。現在使われている方法は内部構造論の星の進化への応用、即ち星の内部の物理構造が時間と共にどのように変わっていき、それが星の表面温度、半径、光度といった観測される量にどう影響するかをしらべて、理論的にH-R図上で星の進化を描き、観測のH-R図に適合させます。今から20年前にはこのようなやり方は想像もつかず、例えばボーク(Bok)が1946年に年令決定の色々な方法を評価した時、星団の力学からきめた年令を当時利用できた素朴な星の進化論よりずっと信頼できるといっています。20年の間に状況は変わり、今では星の進化論からきめられた年令が宇宙論の基礎的材料となり、又星の進化の概念が星団系の力学、銀河系の構造、連星の進化等、天文学の各分野にあてた影響の大きさ

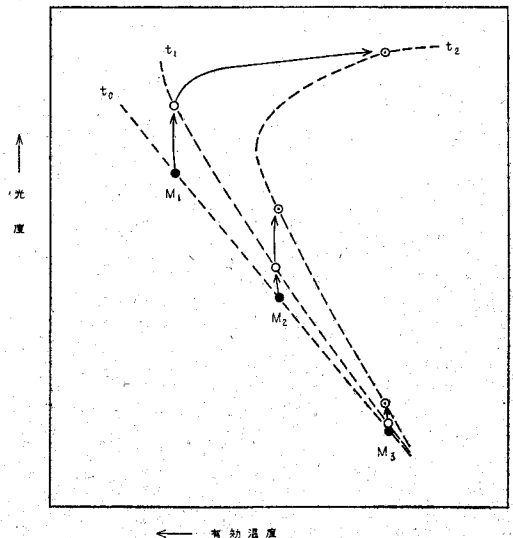


Trn. Reg. U. S. Pat Off.—All rights reserved
Copr. 1963 by United Feature Syndicate, Inc.

第1図 250億年の星

をふりかえると、内部構造論がその最盛期を既に過ぎたかどうかは別として、黄金時代にある事はまちがいないと思われます。

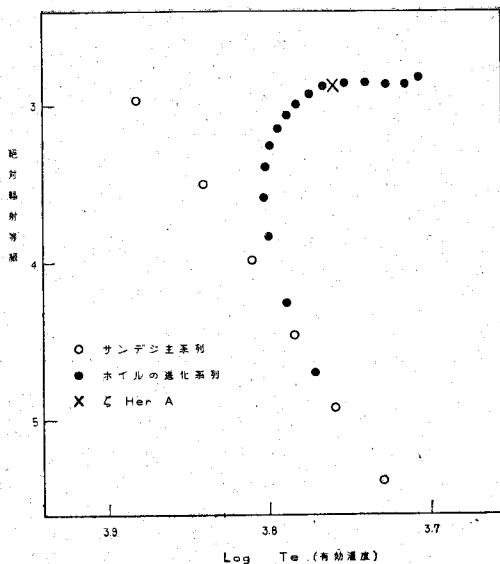
H-R図を使って星や星団の年令を決定する方法の根底にある哲学は、フォクト、ラッセル(Vogt-Russell)定理とよばれるものです。この定理によると、最初に星の質量と化学組成をあてれば、星は時間の函数即ち年令に応じてH-R図上でユニークな場所をしめます。星団では第一近似として、均一な化学組成をもった色々な質量の星が同時にできたと考えられるので、星団の年令



第2図 H-R図上での星の進化

* 東京天文台

J. Jugaku: Age Determination of Stars and Clusters



第3図 ζ Her A の年齢決定

をきめようとするれば、次の過程をふめばよろしい。1) 同じ化学組成の星のモデルを質量をかえて時間の函数として計算すること、即ちいろいろの質量の星の進化系列を追うこと。2) H-R 図上で異った質量の星々がある時(即ち同じ年齢)にしめる軌跡をえがき、これを観測の H-R 図とあわせること。この事情を模式的に書いたのが第2図です。星が生まれてから H-R 図上で主系列に到達する迄の時間は以後の寿命にくらべてずっと短いのでこれを無視すると、時間 t_0 に $M_1 > M_2 > M_3$ の3つの質量の星が黒丸で示した位置をとり、これをつらねた点線が理論の主系列を定義します。ある時間たつて t_1 になると、この3個の星は白丸の位置に進み、それをつらねた第2の点線が t_1 における星団の H-R 図を示します。同様にして t_2 における軌跡がえられます。質量の大きい星程進化が早いので、 t_2 では M_1 は完全に主系列から離れています。星団のたくさんの星でえがいた観測の H-R 図がどの t によくあうかをみると答がでる筈です。

個々の星の場合にも同じようにして年齢をきめることができ、ζ Her A の場合が第3図に示してあります。白丸はサンデジの主系列で黒丸はホイル (Hoyle 1959) が第1種族の 1.09 太陽質量の星での進化の軌跡を示します。ζ Her A は三角視差の測定から絶対等級はよく分っており、又三色測光やスペクトル型から温度もよく分っていて X 印に位置します。これがホイルの軌跡にのつたので年齢がすぐ読みとれ、91 億年という答がでました。この星は連星ですので質量も分っており、ファン・デ・キャンプ (Van de Kamp) の出した 1.07 太陽質量はホイルの仮定値によくあっています。

理論の H-R 図は絶対輻射等級と有効温度でかかれ、一方観測の H-R 図は眼視等級と近代化された色指数 ($B-V$) で普通書かれますので、厳密にいうとこの間の変換は複雑になり、輻射補正 (Bolometric Correction) や毛布効果補正 (Blanketing Correction) といった職業的言葉がこの翻訳の過程に入ってきます。すぐれた理論家がこの問題を簡単に考えている例を文献に発見することがよくありますが、問題は普通の組成の星の限られた有効温度の範囲でしかとかれていないこと、完全な解答をえるには観測家の血と涙の結晶を必要とする事を強調したいと思います(この場合の血は乾板を割りそこなった時の創傷、涙は狭くて暗いクーデ分光器室で思わぬ突起物に頭をうちあてた場合)。

ここで星団の年齢決定史をふりかえってみると、一番古い球状星団の年齢が 10 年間にざっと 10 倍になったというインフレイションがあります。この変化は理論と観測と原子核実験の三方向から生じたもので、登場人物の華やかさと共に興味ある舞台劇の感じをあたえます。アープ、バウム、サンデジ (Arp, Baum, Sandage 1952) が M 3 (H-R 図については天文月報 53 巻 170 頁参照) と M 92 の暗い主系列星の色を正確に観測して主系列から離れる位置(第2図の t_3 における M_1)をはっきりさせた時、サンデジとシワルツシルド (Schwarzschild 1952) は、シェーンベルク・チャンドラセカール (Schönberg, Chandrasekhar 1942) の定理を“星が質量で 12% の等温核をもった時主系列からはずれる”と解釈して年齢を求めました。即ち星の中心部で水素が原子核反応の結果ヘリウムになる時発生する核エネルギーを、輻射エネルギーとして消費される割合でわると、主系列星としてとどまりうる年数が得ます。答は 30 億年でした。その後サンデジ (1953, 1954) は、シェーンベルク・チャンドラセカールの計算した H-R 図上での進化の軌跡を少し詳しく考慮して 51 億年としました。1955 年にホイルとシワルツシルドは星が最初主系列にそって少し光度を高めることを考慮し、質量光度関係を用いて答を 60 億年にしました。1956 年になるとジョンソン (Johnson) とサンデジの新しい M 3 の観測が発表され、主系列からはなれる光度は 1953 年のサンデジの値よりも 0.2 等級明るいことが分かりました。明るい星程早く進化するわけなので、これは年齢をへらすことを意味します。ところがほぼ同じ頃にヘイゼルグロヴ (Haselgrove) とホイル (1956) が 1.26 太陽質量のモデルについて詳しい進化系列を計算しました。(最初主系列にある時は $p-p$ 連鎖反応がよくきくのですが中心温度が次第に高くなると、中心部に小さい対流核ができて C-N 循環反応がききだします。) このモデルの結果をシェーンベルク・チャンドラセカール 極限から求めた結果とくらべる

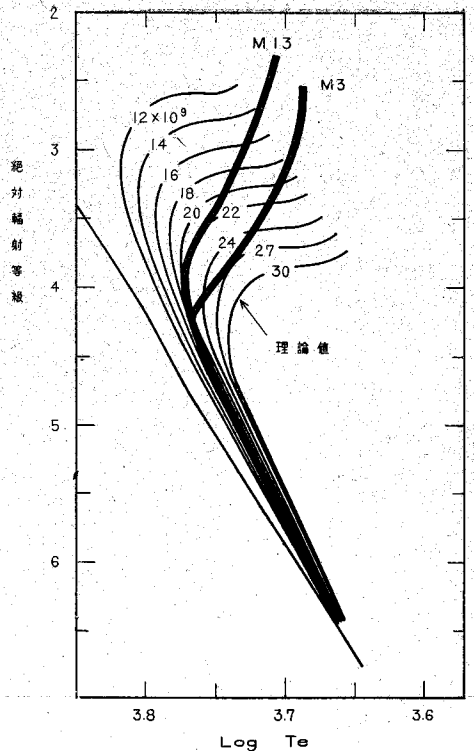
と、ずっと年令がのびることが分りました。この新しい観測と新しい計算をくみあわせた結果は、増減なしの 60 億年とでました。これは 1955 年の値と同じですが勿論偶然の一致です。

ヘイゼルグローヴ、ホイルの計算はそれ以前のホイル、シワルツシルドの計算と等しく、C-N 循環反応の中で $C^{12}(p, \gamma)N^{13}$ が一番おそいとしてあったのですが、1957 年にパービジ、パービジ、ファウラー、ホイル (通称 B²FH) が $N^{14}(p, \gamma)O^{15}$ が星の中で考えられるエネルギー領域では非共鳴で一番おそくなること、従って C-N 循環反応率は従来考えられていたより約 100 倍小さくなることを示しました。これはモデル計算の上で C-N 循環反応が重要になる温度が高い方にずれること、 $p-p$ 反応の重要性が相対的にますことを意味し、主系列をはなれる前に従来考えられていたよりも多くの水素をもやしうること、従って年令がふえるという事実を派生的に生じました。ホイル (1959) はこの新しい反応率を使って同じ M 3 に対して 87 億年を得ました。

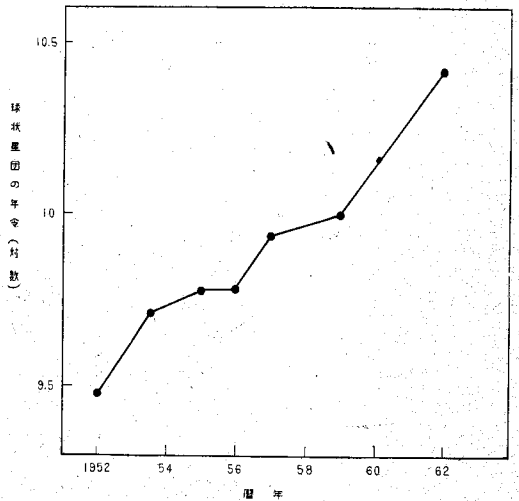
ところがこの頃琴座 RR 型変光星の絶対眼視等級が従来使われて来た 0.0 等より暗いかもしれないといidaされて来ました。従来球状星団の距離指数を求めるのに星団内のこの型の変光星を使っていたのです。このような事情を考慮してホイルは一応星団の年令を直接求める事をあとまわしにして、三角視差から絶対等級のよく分っている δ Eri, μ Her A の年令を上記した ζ Her A の方法で 120 億年とかぞえ、これら第 1 種族の星より第 2 種族の球状星団は古くなければならぬと主張しました。120 億年を仮定すると琴座 RR 型変光星は 0.6 等よりくらくらなければなりません。

1959 年になると、バウム、ヒルトナー (Hiltner)、ジョンソン、サンデジによって M 13 の新しい観測が得られました。細かい議論をぬきにすると、この星団の星が主系列からはずれる光度は M 3 より 0.8 等暗く、従って年令も古く 100 億年となります。現在では距離指数を求めるのに琴座 RR 型変光星を使わず、観測された (B-V) に化学組成のちがいがらくる毛布効果補正 $\Delta(B-V)$ をほどこしてヒアデス主系列とくらべる方法がとられています。最新のサンデジ (1962) の議論によると M 3 はやはり M 13 より古く (第 4 図参照) 年令は 260 億年となっています。図で太い線は M 3, M 13 の観測された H-R 図をあらわし、数字のついた多くの細線は異なった年令の理論軌跡をホイルの計算から外挿したものです。一見して理論と観測の一致は弱く、これは散開星団 (例えば NGC 188) の場合にはみられない現象で、現在理論計算の再検討があちこちのグループで行なわれつつあります。

以上の歴史を図に書いたのが第 5 図で、星団の年令は



第 4 図 M 3, M 13 の年令決定

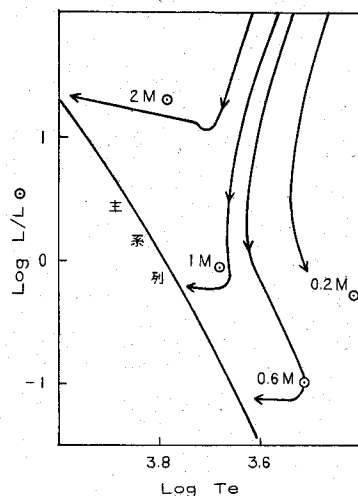


第 5 図 星団の年令決定の現代史

暦年の函数であることを示し、太陽黒点数といわずともどこかの国の NGP と相関関係はないだろうかとといったざらに気をおこさせます。恐らくサンデジ自身も指摘しているように 260 億年という数字は現在のところ深刻にうけ入れる必要はないでしょう。にもかかわらず、膨脹宇宙の年令との差を意味あるものとして、新しい宇宙論をくみだてようとする理論家 (例えばディッケ Dicke) があらわれ出したことは興味深い現象です。

この物語の最後のエピソードは俗称ウルフ (Wolf 1962) の第二定理といわれるものです。球状星団の H-R 図で星の密度は、もし観測が一樣であるとする、各部分にとまりうる時間の長さに比例し、一方星団が生れた時の光度函数と現在主系列をはなれている星の数から、最も進化が早く観測された H-R 図上から消えさるうとしている (いいかえると質量の大きい) 星の質量が分ります。この2つを組みあわせると、主系列をはなれてから、H-R 図を去って行くまでの全時間が分り、又各瞬間における絶対光度から星の一生に消費するエネルギーの総量が分ります。これは勿論利用できる核エネルギーの総量より少なくなければなりません。ところがサンデジの260億年を M 3 に仮定すると逆に大きくなり、従ってサンデジの年齢は矛盾しているというのがウルフの論理です。このエピソードのエピソードは、サンデジがウルフのこの話をきいた時思わずあっとさげんだ (といっています)。というわけはこの半実験的な年齢決定法は、元来サンデジ自身が1957年に使い出した方法であり、ただ新しいホイルのモデルとの組み合わせで自身使いそびれていただけであったからです。ウルフ自身は球状星団の年齢として100億年を提唱しています。

古い球状星団からずっと若い星団に話を移しましょう。主としてウォーカー (Walker) の観測によって、若い星団では有効温度の高い星が既に主系列にのっているのに温度の低い星では主系列より明るい帯になって平行に分布しているのが分っています (天文月報53巻14頁参照; 又このような星の興味深い性質については高柳和智氏が天文月報52巻116頁に解説されています)。進化論の立場ではこのような星は重力収縮の段階にあると考えられます。ただヘニエイ (Henyey) 及びその協力者が輻射平衡を仮定して計算したモデルでは、質量の小さい星程主系列に到達するまでの時間が長くなり、主系列のかなり近くに小質量の星があるという観測事実を説明できません。ハヤシ (Hayashi 1961) が星の表面近くで起る対流層をしらべた結果、収縮段階では中心部まで対流領域がのびている事を指摘し、H-R 図上での進化は第



第6図 重力収縮にある星の進化

6図に示したように光度の高い方から低い方にはほぼ垂直におちてくる事を明らかにしました。この考えは昨年中に各所で急ぎ追試されその正しい事が確められました。収縮に要する時間は従来のモデルに比べてずっと短くなるので観測が説明しやすくなった上に、太陽と地球でリシウム/ベリリウムの組成比が異なる事実をも説明できました。太陽では対流層が中心近くまでのびていた時にリシウムだけが (p, α) 反応でもえ、ベリリウムはもえなかったからです。重力収縮の太陽モデルは惑星ができた時の境界条件を与えると考えられるので、地球化学、太陽系の起源の問題に影響する所が大きく、その意味でもハヤシの理論はとりわけ重要な価値をもつものでした。

球状星団の H-R 図の観測及び文献には大脇直明氏: 天文月報 55 巻 246 頁があります。又この文を書くにあたって、シアーズ (Sears) の総合報告 *Stellar Structure*, Chap. 1, ed. L.H. Aller and D.B. McLaughlin [Chicago: University of Chicago Press], unpublished) におう所が多く感謝します。かつてサンデジが M 3 の仕事をした同じ小さな家の同じ丸い机の上で、苦心して書いていた一年前の彼をおもいだします。

樽前山班日食を見ざるの記

中村純二

通常の日薄明時には、地上数 10 km までの大気による散乱のため、弱い薄明大気光や太陽のすぐ近くの黄道光の明かるさ等を測定する事は出来ない。ところが樽

前山では7月21日の日食の際、日出と共に皆既となるので、これ等の観測が可能になる筈である。唯この場合地上観測を行なうとすると、快晴靄無しという条件がつき、観測の成功率は相当落ちるので、東京天文台測光部

* 東大教養学部および東京天文台