

## Chapt. 5. 恒星進化に関する備考

### § 17. 恒星進化

この最後の章で今までに得られた知識に基づいて、何か恒星の進化に関する一般的な議論ができるかどうか簡単に調べてみよう。

もし恒星の構造、組成、エネルギー源についての知識が完全であると仮定すれば、原理的には進化が平衡配置の系列に沿って進んで行くという仮定に基づいて恒星の進化経路を追跡できる筈である。そのような研究が、期待される形の永年進化がある一定の段階で、不可能になることを示す可能性はある。もし、そうだとすれば、それを確定することは非常に重大である。何故なら恒星の進化における“不連続”は種々の恒星の現象—例えば新星、超新星、SS Cygni 星などによって示唆されているからである。しかし不幸にも恒星の永年進化を追跡するわれわれの能力は巨星や超巨星の構造、エネルギー源に関する知識の不足によって、著しいハンディキャップを受けている。従って、それらと主系列星との間に何か世代的な、あるいは他の関係があるか否かを決定することはできない。

仮にこれらの問題を無視し、主系列星の“すぐ過去”と“すぐ未来”に問題を限るとしたところで、対流核と輻射 envelope の物質がどの程度に相互混合が行なわれているかという問題を先ず解決しなければならない。この問題に関してしばしば次のような仮定がなされている、即ち恒星の組成は内部全体に亘って一様に保たれ、進化とは単に利用できる全水素の燃焼で成り立ち、これが完了した時に恒星は先ず白色矮星の段階に向かい、そして更に暗黒の、吸収だけをする、黒色矮星の段階へと急速に進行してゆく。

著者の見解によれば、 $M_3 \sim 1.44 M_{\odot}$  という限界質量を越える恒星にとって、白色矮星の状態になることは不可能だという事実を除外しても、この単純な描写は受け入れにくい重大な反論がある。勿論、完全縮退星に対する限界質量の存在は、重い恒星の進化の最終段階に対する重要な方向付けを持つに違いないことは明らかである。しかし、限界質量の存在が恒星の進化にどのように影響するかを確定的に結論できるまでには恒星の永年進化をその構造の判っている

状態から追求して行こうと試みるのが大切である。そして、このためには核の物質と envelope の物質との間に完全な混合はあるという普通の仮定や、恒星が常にその水素全部を燃やし得るといふ、矢張り普通に信じられてきたことを注意深く再調査することが必要である。著者には完全に燃え切って灰（恒星の場合にはヘリウム）だけを残す丸太棒と恒星との類推がそれ程満足なものとは思えない。何故なら、永年進化を追求することと調和してわれわれは恒星がずっとその重力の下に静流体力学的平衡の状態を保つだろうと想像しているが、その全エネルギー源を消耗し果たしている間中（準）定常的な平衡に支え得ることは既定の結果ではない。実際ここで示すように、このようなことは殆どあり得ないように思えるからである。

前に示したように (§ 11), 恐らく一旦炭素循環（あるいはもっと一般的に、水素からヘリウムへの変換）が作用し始め、対流核が形成されると、核と envelope との間には殆ど混合はあり得なくなるだろう。仮にこれが事実だと認めると、恒星の進化を何か次のような線に沿って描写することができよう。

恒星の組成が最初は一様であると想像しよう。炭素循環の働きは水素からヘリウムへの変換を始めるだろう。その結果、核の平均分子量は増大し、envelope のものとの差が生じて行くだろう。この状態の下では Ledoux が示したように、恒星は一般に、平均分子量  $\mu_c$  を持つ中心核と、 $\mu$  が連続的に  $\mu_e$  から  $\mu_t$  に減少する転移領域とから成る対流領域を持つだろう。それは対流側でこの  $\mu_t$  の値、envelope 側で与えられた  $\mu = \mu_e$  の値、境界面で  $\mu_t/\mu_e$  の量の密度の不連続を持つようなもので、対流側における有効ポリトロップ指数は(12.6)式によって  $3/2$  である。さて、このようなモデルの Ledoux の研究によって  $\mu_c/\mu_e$  が 1 から 1.5 まで増加する時、対流領域（即ち核と転移層）の質量が僅か（ $\sim 5\%$ ）増加することが示される。（もし、 $X + Y \sim 1$ ,  $X$  の初期値 = 0.6 であったとすれば、 $\mu_c/\mu_e = 1.5$  は  $X = 0.2$  に対応し、このことは、この段階で核にある利用し得る水素の  $2/3$  が消費されてしまっているだろうということを意味している。） $\mu_c/\mu_e$  が 1.5 以上に増加する時、対流核の質量は減少を始め、そして  $\mu_c$  は増加し、 $X_c$  は減少してゆくにも関わらず、この系列に沿ってのその後の進化（即ち  $\mu_c/\mu_e = 1.5$  を越えての）は燃えた水素の総量にはそれ程の増加をもたらさない。例えば  $\mu_c/\mu_e = 2$  と  $\mu_c/\mu_e = 1.5$  を持つ平衡星では、含んでいる水

素の全量はそれ程著しい相異はない。従って永年進化はこの点で立往生してしまうように見えるだろう。

この段階で（あるいは恐らくもう少し早くても）恒星は中心に小さい等温核を形成させることが可能である。このように信ずる理由は、中心では、対流を保っておくだけの原動力がないかも知れないということである。また中心で普通は無視されている伝導や粘性因子のために相当の超断熱過剰が安定であるかも知れないということもあり得る。もし、これらが本当だとすれば、中心での水素燃料の補給は困難な過程になるかも知れないし、“不活発な”等温核を形成する可能性があるかも知れない。一旦そのような核ができてしまうと、それがある程度の安定性を持つことになるだろう。それは等温核の外側で輻射平衡にあり、分子量の変化する領域があり、それに続いて一定の分子量の対流領域、（同様に対流平衡にある）分子量の変化する転移領域、最後に輻射 envelope があることになるだろうと示されるからである。等温核を取り巻く輻射層の存在は、その上方の対流領域からの強引な乱流渦動の侵入に対して一種のクッションの働きをするであろう。

この点から以後の永年進化は水素を含まない等温核の成長になるだろう。しかし、この等温核の成長も無限には続かない。ある一定の極大サイズを越える等温核を恒星の内部に適合させ得ないという全く一般的な考察から、このことが言える。その理由は物理学的には、有限な質量の恒星中で、質量のある割合以上を最高温度に保っておくのに十分急激な温度傾斜を外方に作り得ないということである（完全に等温なガス球の質量は無限大であることに気付かねばならない）。すると、等温核がその最大の大きさにまで膨がった時、永年進化は明らかに阻止される。このことは全て恒星の進化でのかなり早い段階で起こり、その時内部の条件は、主系列星の中心で、現在信じられているものとそれ違うものではないと予想されることを強調しておこう。

中心領域での利用できる水素の供給を消耗し尽くして核エネルギー源が一旦停まると恒星は Helmholtz & Kelvin によって想像されたように収縮し、重力エネルギーを遊離する。しかし、これはその内部構造のかなり激烈な再調整が必要であろう。永年収縮によってエネルギーを遊離している恒星の平衡構造は、等温核の外側の対流領域で核反応によってエネルギーを遊離している恒星の構造

とは同じではない。恒星が力学的な進化によって、この必要な調整をやつてのけると想像しても、その困難は解消した訳ではない。と言うのは、ある期間収縮が行なわれた後、十分水素のある領域の温度が  $2 \times 10^7$  K あるいはそれ以上に達し、核エネルギーが再び利用できるようになるからである。これによって収縮は停まるが外側で核エネルギーが生成されるような大きい不活動核を持っていては、安定な配置は存在し得ないことを既に知っている。

恒星の進化経路におかれた種々の障害物を見渡して、恒星の最終状態がどのようなものであろうかを探ることができる。自己の重力の下に平衡にある完全縮退物質が“その基底状態にある巨大分子に最もよく例えられる”(R. H. Fowler)という事実は白色矮星が恒星の最終状態を表現することに魅力を持たせる。既知の白色矮星が何も水素を含んでいない事実はこの見解を支持する。しかし限界質量の存在はこの“魅力”を  $1.44M_{\odot}$  より小さい質量の恒星に対するものに限定してしまう。もしそれらがこの質量を越えているなら、それらが白色矮星に到達し得る唯一の方法は、何らかの手段でこの余分の質量を取り除いてしまうことである。ウォルフ・ライエ星 Wolf-Rayet stars が放出によって絶え間なく物質を失いつつある事実は、恒星の質量の比較的急速な減少の機構が存在することを示している。これに関連して次のような質問が出るかも知れない。 $M_3$  より大きい質量のガス状星はそれが究極の“debacle (Fr. 山津波)”に直面していることを如何にして“予知”できるのであろうか。実際にはその大質量のために輻射圧が全圧力のかなりの割合を占めるようになり、そして、もし輻射圧が全圧力の 0.091 倍を越えれば物質は決して縮退し得ないという事実によって、恒星は自然にそれを“予知する”ようになるのである。

上述のように、この縮退になり得ないということは、質量の大きい恒星の進化の最終段階でだけ意味を持つことができる(初期の段階で永年進化の経路にある種々な困難にも拘らず、そのような段階が期待できるとすれば)。何れにせよ限界質量の存在が“最終段階”にだけ影響するだろうと言う事実は、恒星のあらゆる爆発の中で、最も壮観で激変的なもの、即ち超新星現象がこれと何らかの形で関連しているという示唆を現実的にする。Baade & Minkowski による蟹星雲 Crab Nebula (超新星の名残り remant) の観測は、中心星が白色矮星の大きさであり、また星雲中の物質の質量が太陽質量の数倍程度であることを発

見している限り、上の示唆を緩やかに支持しているものと思われる。

		Ionization potentials													
Atom	Stage of ionization														
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	
	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	
1 H	13.598														
2 He	24.587	54.416													
3 Li	5.392	75.638	122.451												
4 Be	9.322	18.211	153.893	217.713											
5 B	8.298	25.165	97.930	259.366	340.22										
6 C	11.260	24.383	47.387	84.492	292.08	489.96									
7 N	14.534	29.601	47.448	77.472	97.89	552.06	667.03								
8 O	13.618	35.117	54.034	77.413	113.90	138.12	739.32	871.39							
9 F	17.422	34.970	62.707	87.138	114.24	167.16	185.18	953.89	1103.1						
10 Ne	21.564	40.962	63.45	97.11	126.21	157.93	207.26	239.09	1195.8	1362.2					
11 Na	5.139	47.286	71.64	88.91	136.40	172.15	208.46	264.19	299.9	1465.1	1648.7				
12 Mg	7.646	15.035	80.143	109.31	141.27	186.51	224.95	265.92	328.0	367.5	1761.8	1863			
13 Al	5.986	18.826	28.448	119.99	153.75	190.47	241.44	284.59	330.2	398.6	442.0	2086	2304		
14 Si	8.151	16.345	33.492	45.141	160.77	205.08	246.49	303.16	361.1	401.4	476.1	525	2438	2673	
15 P	10.486	19.725	36.18	61.42	65.02	220.45	263.23	309.37	371.7	424.4	479.5	561	612	2817	
16 S	10.360	23.33	34.83	47.30	72.88	88.05	280.01	328.33	379.1	447.1	504.7	565	652	707	
17 Cl	12.967	23.81	39.61	53.40	67.7	97.03	114.19	348.37	400.4	455.6	520.3	592	657	750	
18 Ar	15.759	27.029	49.74	59.81	75.04	91.01	124.4	143.45	422.0	478.9	539.0	618	686	766	
19 K	4.341	31.63	43.72	60.92	82.66	98.9	117.7	147.4	188.7	211.3	301.6	657	726	817	
20 Ca	6.113	11.871	50.01	67.15	84.43	108.78	127.7	157.2	188.7	225.4	243.8	686	756	830	
21 Sc	6.54	12.80	24.76	73.7	91.7	111.1	138.0	159.7	190.2	225.4	243.8	686	756	830	
22 Ti	6.82	13.63	27.49	43.26	99.4	119.36	140.8	169.4	193.0	316.2	285.3	322	783	862	
23 V	6.74	14.85	29.31	46.71	65.23	128.6	150.3	173.6	205.8	230.5	253.1	308	336	896	
24 Cr	6.766	16.80	30.99	49.1	70.2	90.27	161.1	184.6	209.3	244.4	270.7	298	355	384	
25 Mn	7.435	15.640	33.87	51.4	73.0	97	119.27	195.47	221.8	248.3	286.0	314	344	404	
26 Fe	7.870	16.10	30.651	54.8	75.5	100	128.3	131.13	235.0	262.1	290.4	331	361	392	
27 Co	7.86	17.06	33.50	51.3	79.5	103	131	160	186.2	276.2	305	336	379	411	
28 Ni	7.635	18.168	35.17	54.9	75.5	108	134	164	193	224.6	321	352	384	430	
29 Cu	7.726	20.292	36.83	55.2	79.9	103	139	167	199	232	266	399	401	436	
30 Zn	9.394	17.064	39.72	59.4	82.6	108	136	175	203	238	274	311	412	454	

		Ionization potentials													
Atom	Stage of ionization														
	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI	XXVII	XXVIII	
	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	
1 H															
2 He															
3 Li															
4 Be															
5 B															
6 C															
7 N															
8 O															
9 F															
10 Ne															
11 Na															
12 Mg															
13 Al															
14 Si															
15 P	3070														
16 S	3224	3404													
17 Cl	869	3658	3946												
18 Ar	855	918	4121	4426											
19 K	862	968	1034	4611	4934										
20 Ca	895	974	1087	1157	5129	5470									
21 Sc	927	1009	1094	1213	1283	6675	8034								
22 Ti	941	1044	1131	1221	1346	1425	6249	6626							
23 V	975	1060	1168	1260	1355	1456	1560	6851	7246						
24 Cr	1011	1097	1185	1299	1396	1490	1634	1721	7482	7895					
25 Mn	435	1136	1224	1317	1437	1539	1644	1788	1879	8141	8672				
26 Fe	467	489	1266	1358	1456	1582	1689	1799	1950	2045	8828	9278			
27 Co	444	512	547	1402	1500	1602	1734	1846	1962	2119	2218	9544	10030		
28 Ni	464	499	671	607	1646	1648	1756	1894	2010	2131	2295	2398	10280	10790	
29 Cu	484	520	557	633	671	1698	1804	1919	2060	2182	2310	2478	2560	11050	
30 Zn	490	542	579	619	698	738	1856	1970	2088	2234	2363	2495	2600	2730	

*Ionization potentials*

Atom	Stage of ionization									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV	eV
31 Ga	5.999	20.51	30.71	64	87	116	140	170	212	243
32 Ge	7.899	15.934	34.22	45.71	93.5	112	144	174	207	250
33 As	9.81	18.633	28.351	50.13	62.63	127.6	147	179	212	242
34 Se	9.752	21.19	30.820	42.944	68.3	81.7	155.4	184	218	250
35 Br	11.814	21.8	36	47.3	59.7	88.6	103.0	192.8	224	257
36 Kr	13.999	24.359	36.95	52.5	64.7	78.5	111.0	126	230.9	263
37 Rb	4.177	27.28	40	52.6	71.0	84.4	99.2	136	150	277.1
38 Sr	5.695	11.030	43.6	57	71.6	90.8	106	122.3	162	177
39 Y	6.38	12.24	20.52	61.8	77.0	93	116	129	146.2	191
40 Zr	6.84	13.13	22.90	34.34	81.5	99	117	140	155	
41 Nb	6.88	14.32	25.04	38.3	50.55	102.6	125	142	161	
42 Mo	7.099	16.15	27.16	46.4	61.2	68	126.8	153	163	
43 Tc	7.28	15.26	29.54	46	55	80			187	
44 Ru	7.37	16.76	28.47	50	60	92				
45 Rh	7.46	18.08	31.06	48	65	97				
46 Pd	8.34	19.43	32.92	53	62	90	110	130	155	180
47 Ag	7.575	21.49	34.83	56	68	89	115	140	160	185
48 Cd	8.993	16.908	37.48	59	72	94	115	145	170	195
49 In	5.786	18.869	28.03	54.4	77	98	120	145	180	205
50 Sn	7.344	14.632	30.502	40.734	72.28	103	125	150	175	210
51 Sb	8.641	16.53	25.3	44.2	56	108	130	155	185	210
52 Te	9.009	18.6	27.96	37.41	58.75	70.7	137	165	190	220
53 I	10.451	19.131	33	42	66	81	100	170	200	230
54 Xe	12.130	21.21	32.1	46	57	82	100	120	210	240
55 Cs	3.894	25.1	35	46	62	74	100	120	145	250
56 Ba	5.212	10.004		49	62	80	95	120	145	160
57 La	5.577	11.06	10.175	52	66	80	100	115	145	165
58 Ce	5.47	10.87	20.20	36.72	70	85	100	120	140	165
59 Pr	5.42	10.55	21.62	38.95	57.45	89	105	120	145	160
60 Nd	5.49	10.72					110	130	150	170
61 Pm	5.55	10.90						135	155	175
62 Sm	5.63	11.07							160	180
63 Eu	5.67	11.25								190
64 Gd	6.14	12.1								
65 Tb	5.85	11.52								
66 Dy	5.93	11.67								
67 Ho	6.02	11.80								
68 Er	6.10	11.93								
69 Tm	6.18	12.05	23.71							
70 Yb	6.254	12.17	25.2							
71 Lu	5.426	13.9	19							
72 Hf	7.0	14.9	23.3	33.3						
73 Ta	7.89	18	22	33	45					
74 W	7.98	18	24	35	48	61				
75 Re	7.88	17	26	38	51	64	79			
76 Os	8.7	17	25	40	54	68	83	100		
77 Ir	9.1	17	27	39	57	72	88	105	120	
78 Pt	9.0	18.56	28	41	55	75	92	110	125	145

