

始



岩波講座
物理學及び化學

別項 I. B.

天文學史

本田親二



岩波書店

別 項

I. B.

天 文 學 史

本 田 親 二

目 次

	頁
第一章 緒言	1
第二章 ギリシアの天文学	2
1. ギリシア初期の天文学	2
2. ヒパルクス	7
3. トレミイ	11
第三章 中世紀の天文学	15
4. アラビアの天文学	15
5. 蒙古の天文学	18
6. 歐洲中世紀の天文学	20
第四章 第16世紀の天文学	24
7. コペルニクス	24
8. 地動説の發展	27
9. チホブラエ	28
第五章 ガリレイとケプレル	33
10. ガリレオ・ガリレイ	33
11. ガリレイの宇宙観	36
12. ケプレル	39
第六章 第17世紀の天文学	44
13. 第17世紀の天文学界	44
14. フイゲンス	44
15. パリ天文臺の研究	47

第七章 ニュートン	49
16. ニュートンの位置	49
17. ニュートンの生涯	50
18. 萬有引力の発見	51
19. 大著プリンシピア	55
20. ニュートンの晩年	59
第八章 第18世紀の観測天文学	60
21. 観測天文学と引力天文学	60
22. フラムステイド	60
23. ハリイ	62
24. ブラドリイ	63
25. 光行差の発見	65
26. 章動の発見	68
27. 地球の密度及び形状	70
28. ラセエユ	72
29. 月の研究と金星経過	73
第九章 第18世紀の引力天文学	76
30. 三体問題	76
31. オイレル、クレロウ及びダランベル	77
32. ラグランジュとラプラス	80
33. 星雲説	84
第十章 ハアシェル	86
34. キリアム・ハアシェル	86
35. 恆星の分布と宇宙の構造	89

36. 星雲及び星團の研究	91
37. 二重星と太陽向點	93
38. 變光星、惑星及び太陽の研究	95
第十一章 第19世紀の天文学	98
39. 観測天文学の發達	98
40. 引力天文学の發達	101
41. 敘述天文学の發達	104
(i) 小惑星の発見	104
(ii) 新衛星の発見	106
(iii) 惑星及び衛星の表面	106
(iv) 太陽	108
(v) 彗星と流星	110
(vi) ジョン・ハアシェル	112
(vii) 分光器的研究	114
(viii) 光度測定	116
(ix) 恆星系	116
(x) 太陽系の進化	117
参考書	119

第一章 緒 言

1. 天文学は總ての科學の中で最も古いものと云はれてゐる。いかに野蠻人でも、晝夜の變化、月の盈虚、星辰の運行等を驚異の眼を以て視ないものはなからう。自然の規則性と週期性とは先づ天體によつて人類に明らかとなつた。それで人類の歴史の最初に天文学が現はれてゐるのである。

天文学の發達の時期を大別して假に三つとする。それは崇拜時代、應用時代及び研究時代である。これ等の時代は總ての民族に於て、同様に順次に發達したものではないが、大體の思潮の傾向を示すに便利である。

第一の崇拜時代は總ての人類が最初に經過すべき時代で、日月星辰を神の示現として崇拜した時代である。第二の應用時代は、それより一段進歩した時代で、諸天體の運行の井然たるよりして運命の神の默示を空際に認めて、星占術(Astrology)の基を開いたのは、其第一期である。次に星辰の運行の觀測より四季の循環、方位の測定等を知るに至り、遂に曆を作つて農耕に便し、又航海術に應用するに至つたのは、其第二期である。以上の二時代を萌芽として、愈知識の爲の知識たる純粹の天文学の發達を見るに至つて、第三の研究時代が現はれる。この時期に應用方面も完成し得る様になるのである。けれども天文学の主要の目的は、宇宙に於ける人類の地位の確立、即ち精確なる宇宙觀の建設にある。而して現代は、まだその道程にあるのである。

2. 太古に於て、著しき文明を史上に印した民族は少くとも四つあつた。黄河の岸の漢民族、恒河の流れの印度民族、メソポタミヤ平原のカルデア民族、ナイル河口の埃及民族がこれである。其外に米大陸のベルウ、メキシコにも特有の文明があつた様である。上の四民族は皆應用時代の天文學を持つてゐた。

支那に於ては、歴史の最初の王伏羲(約4900年前)が既に曆を作り、黄帝(約4500年前)は天文臺を建て、一太陽年と太陰月との關係を明らかにし、日食、月食等の豫知を試みた。其後曆學的方面は大に發達したが、遂に研究時代に進まなかつたのは遺憾であつた。印度も古代から曆法があつた。それが支那やカルデアの曆法と共通點が多いのは興味ある現象で、これ等が同一の起原ではなからうかといふ説を生むに至つた。

カルデア人は星占術の目的より専門の觀測官を置き特に日月の運行及び食に注意し、その業績はギリシア天文學の基をなした。埃及人も其遺跡によつて察すれば、天文學的知識の精確であつたことを知ることが出来る。けれども、カルデアの様な記録がない爲に其知識の内容はよく判らない。

これ等の古代民族の天文學的知識の起原、弘布、發達の状態は甚だ興味あるものであるが、この小篇では其部分を述べるのを止めて、専ら研究時代の發達を略叙したいと思ふ。

第二章 ギリシアの天文學

1. ギリシア初期の天文學

ギリシアは西洋文明の發

祥の地である。地中海中に突出せる景勝の地位は、民族の優秀なる素質と相待つて、エジプト、フェニキア、アッシリア等の文明を吸収し、綜合して獨特のギリシア文明を形成した。カルデア、エジプト等に發生した、數學と天文學とは、ギリシアに於て實を結ぶ様になつた。かくして紀元前6世紀頃、タレス等の七賢人を出し、哲學及び天文學が發達する様になつた。

タレス(Thales)は紀元前第6世紀の人である。彼は、恆星が自ら輝くものであること、月光は日光の反射であること、大地の球形なること及び1年は365日であること等を知つてゐた。又彼はメチアとリチアとの戰爭を止めさせた日食を豫言したので有名となつた。これは多分紀元前610年9月10日の日食らしいが、彼は單に其年を豫言しただけで、月日は豫知し得なかつた。この頃から、ギリシアでは眞直な棒で出來た日時計で、太陽の南中時間及び高度を測り、それから黃道の傾斜を計算してゐた。これは、バビロンから輸入した方法らしい。

タレスの後にピタゴラス(Pythagoras)が出た。彼は地球が太陽の周りを公轉するものであると主張したが、確實な證據に依つたものではなかつた。彼の弟子フィロラウス(Philolaus)は、太陽、月、惑星及び地球は共に或中心火塊の周りを廻轉するものであるが、その火塊は地球上の人間からは見えない位置にあると考へた。又アリストアカス(Aristarchus)は、太陽及び恆星は不動で、地球は太陽の周りを公轉し、又同時に自轉するものであると考へた。プラトオン(Plato)も晩年には、地球中心説を棄て、宇宙の中心には、地球の様に不完全なものでなく、もつと理想

的なものがあるだらうと考へた。

紀元前 460 年頃に生れたメトン(Metion)とユウクテモン(Euctemon)は、アテネで紀元前 432 年の夏至の観測をやつた。西洋に於ける此種の観測の嚆矢である。然し彼は有名なるメトン循環期(Metion's Cycle)の発見者として著しい。これは太陽と月とが恆星に對して同じ位置を占むる週期で、ギリシアの祭禮の時期を定むるに必要なものであつた。カルデア人が発見したサロス(Saros)といふ日食の週期、即ち 223 太陰月(約 18 年)の週期は其頃知られてゐたが、メトンは研究の結果、235 太陰月、即ち約 19 年の週期を以て、太陽、月及び恆星が略同様の位置に歸ることを発見した。この結果は僅少の誤差はあるが、當時に於ては一大成功であつた。

メトンは又曆の改良をやつた。彼の曆法は 235 月を分つて、30 日の月 135 と、29 日の月 110 とし、平年を 12 月とし、19 年の間に 7 つの閏年(13 箇月の年)を挟んだものである。

紀元前 370 年頃ユウドクスス(Eudoxus)は、恆星、月及び惑星の運行を、均一なる圓運動に分解して説明しようと思つた。恆星の日週運動は、地軸を軸とせる 1 箇の天球の運動で説明されるが、太陽及び月の運動の爲には、6 天球の合運動を要し、5 箇の惑星の爲には 20 箇を要することになるので、可なり面倒である。彼は初めて天文臺を建てたと傳へられてゐる。

紀元前 300 年頃、アウトリカス(Autolycus)は“動く天球に就て”及び“星の出沒に就て”の二書を著した。これが現代まで傳はつた西洋最初の天文書であらう。

次にアリストテレス(Aristotle, 紀元前 384-322)が現はれた。彼は哲學及び科學の諸方面に基礎を與へたので、その天文學説も其後の學界の權威となつて、二千年後のガリレイの時代まで及んだ。彼は天體の運行に就てはユウドクススと同意見であつたけれども、各天球を物質的に實在するものと考へ、それ等の天球の運行は相互に影響するものとした。その爲に彼は前の 27 の天球の外に更に 22 を加へて、複雑な體系を作つたが、全く役に立たないものであつた。彼は月の盈虚の觀察より月の球體なることを知り他の星も同様であらうと論じた。彼は地球が球體である證據として、各地の地平線の漸次變化すること及び恆星の高度が緯度の異なる地に於て異なることを挙げ、又月食は地球の投影によつて生ずると説いた。

以上の考は正しいが、彼は地球の公轉に關して、無理ならぬ錯誤に陥つた。彼は地球が太陽の周りを廻轉するものならば、地球より見たる恆星の位置は其爲に方向を變じなければならないと考へた。所が恆星の位置は四季を通じて何等の變化もないから、地球は不動でなければならぬ、と論じたのである。19 世紀になつてから、恆星の年週視差が発見されたので、彼の考は破れたが、それ迄は常に學者の問題となつたのである。

彼は火星が月から掩蔽された現象を観測して、月及び太陽は他の惑星よりも地球に近いと結論した。太陽の方は證據はないが大きく見えるから、月と同様だと思つたのであらう。又恆星の距離は太陽の距離の約 9 倍以上だらうと信じてゐた。

アリストテレスの死後、ギリシア學術の中心は埃及のアレキ

サンドリアに移つた。同地に於ける初期の天文學者は、アリストアカス(Aristarchus)、アリスチラス(Aristyllus)、チモカリス(Timocharis)の三人で、共に紀元前3世紀の人である。アリストアカスは太陽と月との比較距離を測つたので有名である。半月の際には太陽、月及び地球は直角三角形をなし、月は直角頂にあるから、實際に地球から太陽と月との角距離を測れば、三角が判つて三邊の比が出る。彼は此觀測の結果、太陽の距離は月の距離の18倍乃至20倍であるとした。實際は約400倍であるから、餘程不正確な觀測であつた。又彼は月の直径を地球の直径の約三分の一と計算したが、これは眞に近い。

アリスチラスとチモカリスは、黄道を基として主なる恆星の位置を定め、最初の恆星表を作つた。

其後エラトステネス(Eratosthenes, 紀元前276-195)は輪球を製作した。これは赤道、黄道等に相當する輪で、天球を模した觀測器械であつて、彼は此器によつて恆星の位置、黄道の傾斜(紀元前230年に $23^{\circ}51'20''$)、春分點の位置等を測定した。次に彼は地球を球體と信じて、其周圍の長さを測定しようとした。アレキサンドリアに於ては、夏至の正午に於ける太陽の方向は、鉛直線と約 7° の傾斜をなすが、同地より南5000スタヂア(Stadia)の距離にあるシエネに於ては、夏至の正午に太陽が深い井の底を照した。これによつて兩地の鉛直線が地球の中心に於てなす角を計算し、それより地球の周圍を約5000スタヂアの50倍であるとした。この測定は甚だしい誤差はないが、スタヂアなる單位に數説があるので、精確には云へない。

2. ヒパルクス(Hipparchus) ヒパルクスはギリシア天文學を大成した偉人であるが、彼の著書は殆んど堙滅して、僅かに彼の繼承者たるトレミイの著によつて彼の事業を知り得るのみである。彼はロオヅ島に天文臺を建てて觀測に従事し、紀元前第2世紀の間に廣汎なる研究を遂げたが、其經歷は殆んど不明である。

彼の主なる事業は四つある。第一は、數學の重要なる一分科たる三角術を發明し、盛に應用したことである。これによつて平面及び球面上の圓形の計算を容易にした。第二に、彼の器械の許す限りの精密度を以て多くの觀測を試みた。第三に、先人の觀測と自己の觀測とを比較し、數百年に亘つて漸く指摘し得べき種々の變化を發見せんと勉めた。第四に、太陽及び月の運行を現はす爲に、離心圓等の如き種々の圖形を適當に用ゐた。

ヒパルクスは、均整なる圓運動の結合によつて先づ太陽の運行を説明しようとした。太陽は他の恆星と同じく、毎日東より西に動くのみならず、1年の間に黄道に沿うて1回の逆運行をなすものである。肉眼では、太陽の距離の變化に相應する太陽の大きさの變化は餘り小であるので、全く知ることは出来ないのであるが、彼は距離の變化のあり得べきことを想像した。又其頃には太陽の黄道上を運行する速度に遲速あることが知られてゐた。彼は以上の結果を、均整なる圓運動の結合によつて幾何學的に説明しようとしたのである。

彼は其爲に離心圓(Eccentric circle)を採用した。即ち、太陽は圓周上を均整に運行し、地球は其圓の中心より少し離れた所

にあると假定した。つまり、太陽が地球に最も近い點を近日點とすれば、その附近では、太陽の運行が速く見えるし、反對に遠日點では遅く見える譯である。彼は、圓の中心と地球との距離の、圓の半径に對する比、即ち離心率を決定する爲に精密な觀測の必要を感じた。

太陽と恆星とは同時に見えないので、太陽の精密なる位置の觀測は非常に困難である。正午に直立せる棒の影の長さから、太陽の高度を知り、それから太陽の赤道からの南北の距離即ち赤緯を算出することが出来る。次に太陽の赤經を定めなければならぬ。それには精密な時計が必要であるが、其時代には水時計や砂時計しかなかつたので、ヒパルクスは他の方法を案出した。

彼は先づ、春分、夏至、秋分、冬至によつて別たれた四季の長さを測つた。その結果は、春 94.5 日、夏 92.5 日となる。1 年は 365.25 日である事が判つてゐたので、春夏の間に太陽が黄道上を 180° 運行することと比較して、離心率等を計算した。その結果、離心率は約 1/24 であり、遠日點は 6 月の初めにあつて、春分點との角が約 65° であることが判つた。此結果は機械の不精密の爲に誤差が幾分あるが、精巧な機械を用ゐれば、1' 位まで精確に總てを定めることが出来るのである。地球は楕圓軌道を描くのであるが、これは殆んど圓に近いものであるから、圓と假定しても著しい差はない。

次に彼は月の盈虚の週期即ち一朝望月(Synodic month)と、天球上を一週轉する一恆星月(Sidereal month)の長さを精密

に定めた。又天球上の月の軌道は黄道と一致せずして、少しく傾斜してゐる。彼は此傾角を約 5° とした。又此傾角は變らないが、二軌道の交點は黄道に沿うて東より西に僅かづつ動き、約 19 年の後元の位置に歸る。月が、この交點より出でて、一周し交點に歸るまでを一交點月(Draconitic month)といひ、約 27 日 5 時の長さである。又月の運行の速度は太陽と同様に、均整でない。且つ月の場合には最速と最遅の點が天球上に一定しないで、少しづつ進み約 9 年で元の位置に歸る。月が最速の位置より一周して、次の最速の位置に来るまでの週期を一近點月(Anomalistic month)といひ、其長さは約 27 日 13 時である。ヒパルクスは、以上の週期を精密に定めようと試みた。彼は日食の起る時には、月は必ず交點の附近にあることを知つてゐたので、カルデア人の日食の記録等を研究した。

彼は月の運行を説明するに離心圓を使用した。その中心は地球を 9 年の週期で一週轉し、その圓の平面は黄道面と 5° の傾斜をなしつつ黄道に沿うて 19 年で一週轉するものと考へた。けれども實際の月の運行は甚だ複雑で、以上の假定だけでは説明し盡されない。それでも彼の作つた月の位置の計算表は、日食の豫言を著しく精確にした。

惑星の運行は極めて複雑に見ゆるので、彼は長い世代の觀測を研究する必要があると考へたが、從來の材料は不十分であつたので、後世の爲に、彼以前の觀測と彼自身の觀測とを精確に表示し、其説明を試みなかつた。

紀元前 134 年に蝸座に新星(New star, Nova)が出現したの

を見て、彼は恆星表を新しく作ることを企てた。彼の表には1080箇の恆星を含む。各星は黄經、黄緯によつて其位置を示し、光度は6等級に別れてゐる。彼は後人に恆星の位置の變化を容易に知らせる爲に、一直線上にある様に見ゆる數星がある場合には一々記して置いた。此星表は約1600年の間、少しの訂正はなされたが、標準として使用された。

彼は此星表を作つた爲に一大發見をなした。彼の觀測せる恆星の位置と、150年前にチモカリス及びアリスチラスの觀測せる位置とを比較すると、黄經が大抵 2° 位づつ増してゐた。黄緯には殆んど變化はない。黄經は春分點を基點として測定するものであるから、彼は此現象を春分點の移動によるものと推定した。春分點は黄道と赤道との交點であるから、二者の一が移動しなければならない。然るに黄道を規準として南北に測つた黄緯には變化はないから、黄道は不變と考へられる。それで赤道が黄道に對して、同じ傾斜をなしつつ、徐々に滑るものと考へられる。これが春分點の歳差 (Precession of the equinox) なる現象で、彼は1年に約 $36''$ と計算したが、實際は約 $50''$ である。

この歳差が回歸年 (Tropical year) と恆星年 (Sidereal year) との區別を生ずる原因となる。前者は、太陽が春分點から一周して再び春分點に歸るまでの週期で約365日5時49分である。恆星年は太陽が黄道を完全に一周する時間で、約365日6時9分である。ヒパルクスは、此二週期を精密に計算したが、現今の値と6分位の差を示す位、精確に出てゐる。

かく日月の運行の知識が精密になつた上に、ヒパルクスは月の視差(地球の中心と表面とより見たる月の方向の差)を可なり精確に計算したので、日月食の豫報は漸次精確になつた。けれども、太陽及び月の距離の變化、及び視直徑の變化の關係が判らなかつたので、日食の豫知は不完全であつた。

3. トレミイ (Ptolemy, Ptolemaeus) ヒパルクスの死後約3世紀の間は、天文学上に何等の進歩もなかつた。其間に現はれた二三の面白い見解がある。或人は、恆星は必ずしも天球に固着せるものでなく、距離に差異があるけれども、只測定の方法がない、と考へた。又、太陽及び恆星は地球から甚だ遠距離にあるから、太陽から地球を見たら一微點としか見えまい、又恆星からは地球を到底見ることは出来まい、といふ想像説もあつた。又水星及び金星は太陽を廻るものだと信ぜられた。

第1世紀に出たプリニイ (Pliny) は、地球の球形なることを、海岸から出帆する船が沖に出るに従ひ、下から姿を没することによつて説明した。

ロオマに於て、ユリウス・ケエザルが、アレキサンドリアの天文学者ソッゲエス (Socigenes) に命じて、ユリウス曆 (Julian Calendar) を作らしめたのは、紀元前46年であつた。この曆は現今の太陽曆の基礎で、1年を365.25日とし、それを平年365日と、4年に一回の閏年366日とした。それを12月に分け、1月、3月、5月、7月、9月、11月を31日、他を30日とし、平年の2月を29日とした。月の日數の配置が現在の曆法の通りとなつたのは、次のオウグスツスの治世であつた。

紀元 140 年頃、ギリシア天文學界の最後の明星たるトレミイが現はれた。彼の經歷も第 2 世紀の中頃にアレキサンドリアに住んで居たといふ事だけしか判らない。彼の名聲は彼の大著 *Almagest* の賜であつた。此書は、ギリシア天文學の總ての遺詣を網羅せるもので、其頃の思想の大半は此書の紹介によるものである。それで歐洲の中世紀まで、此書は天文學の聖書として尊敬されてゐた。此書の外に、大氣による光線の屈折を論じた小著がある。*Almagest* は先人特にヒパルクスの著に負ふ所多く、トレミイ獨創の見は少ないが、兎に角重要な著述であるから大體を紹介する。

此書は全部で 13 卷ある。第 1、第 2 卷は簡単な觀測上の事實を述べたものである。天球の日週運動、日月惑星等の視運動、各地の 1 日の長さ及び星の出没の時刻等を述べ、其間に球面三角法の問題の解釋などもある。地球の球形の種々の證明もある。彼は又地球の宇宙に於ける位置に就て想像的假定を設けた。地球は宇宙の中心にあつて、全く運行しないものであり、太陽、月、惑星及び遠距離にある恆星も皆地球の周圍を廻轉するものであると考へた。これがトレミイの宇宙體系であるが、別に理論的考察の結果出來たものでなく、當代の學界の考を具體化したに過ぎない。第 3 卷は、各種の年の長さ、及び太陽の運行に関するヒパルクスの説を其儘述べたものである。

第 4 卷には、各種の月の長さ、及び月の運行の法則に就て述べてあるが、其中にトレミイの最重要なる發見が含まれてゐる。彼はヒパルクスの表によつて、月の位置を計算し、實際の觀測と

比較して見た。所が、兩者は新月及び満月の時には、可なり良く一致するが、半月の時には著しい差が生ずることを發見した。この不規則なる月の運行を今は出差 (Evection) と名づけてゐるが、トレミイは、それを發見したのである。この原因の説明を彼は試みたが遂に失敗した。

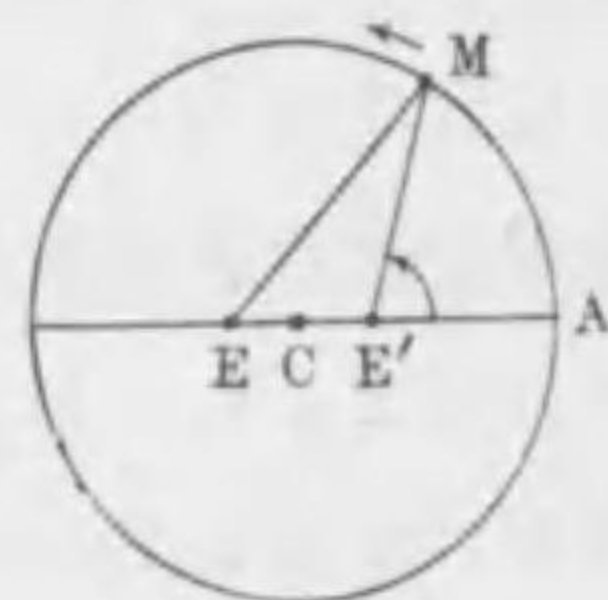
第 5 卷には、彼の使用せる觀測器械の説明と、太陽及び月の距離に関する研究がある。彼の器械は度盛せる圓を種々組合せた渾天機式のものであつた。トレミイは月の距離を測る爲に、遠隔な二地點に觀測者を置いて、同時に月の方向を測らしめ、その結果より月の視差を計算した。それから導いた月の距離は、地球の半徑の 59 倍となつた。それから間接に太陽の距離を計算して地球の半徑の 1210 倍といふ値を出した。月の距離は大差がないが、太陽の距離は全く桁外れである。

第 6 卷には日食及び月食に関するヒパルクスの説が述べてある。第 7 卷と第 8 卷には、恆星表及び歳差の研究がある。恆星表には 1022 箇の恆星が載せてあるが、自から觀測したものではないらしく、ヒパルクスの恆星表の燒直しと見られてゐる。歳差の値を $36''$ としてゐるが、これもヒパルクスの最小限の値を取つたものである。

第 9 卷より第 13 卷に至る 5 冊には惑星運行の法則が述べてある。彼は、ユウドクス及びアポロニウスの考を具體化して、二重循環 (Epicyle) の假定によつて惑星運動を可なり精密に説明することが出來た。二重循環とは地球を中心とせる一の大圓上を等速運動をなす一點を假定し、惑星は其點を中心とせ

る他の小圓上等速運動をなすと考へるのである。地球から其惑星を見れば、二つの圓運動の合運動をなすことになるから、それによつて惑星の順行、逆行、留の現象を簡単に説明することが出来る。

彼は月の運行を説明する爲に離心圓を用ゐたが、其中に對心(Equant)と稱する新點を使つたのが特徴である。圖の圓周を月の軌道とし、Cを其中心とし、地球の位置をEとすれば、 $EC=CE'$ なるE'を對心といふ。月は對心から見て等角速運動をなすものと考へて、彼は月の運行の不規則性を説明したのである。



従來の學者は天體運行を神祕的に考へて、皆完全に等速なる圓運動で説明しようと試みてゐたが、ヒパルクス及びトレミイは研究によつて此思想に反する對心運動を採用したので、當時のみならず、第14、15世紀頃の學者まで、天體の神聖を冒瀆するものとして反對したものが多かつた。

トレミイは惑星の距離に就ては全く知る方法がないと自狀してゐる。従つて各惑星の遠近の順序も判らないが、彼は當時の傳説に従ひ、天球を一廻轉する年月の長短の順序が遠近の順序と一致すると考へて、彼の星系を作成した。即ち地球が中心で、最近のものは月で、それと太陽との間に水星と金星があり、太陽の外に火星、木星、土星の順序に列してゐるとした。

トレミイの天文學上の功績に就ては種々の異論はあるが、兎に角、中世紀の歐洲に於ける天文學の究竟の標準は彼の著であ

つた。けれども彼の著の大部分はヒパルクスの觀測及び思想で、その壙滅を防ぎ、更に彼の數學的知識によつて種々増補せる點は偉大なる功績であつた。トレミイ以後には希臘天文學の正統絶え、西紀640年アラビア人によつてアレキサンドリアが占領されたので、全く衰滅してしまつた。

第三章 中世紀の天文學

4. アラビアの天文學 トレミイ死してギリシア天文學の系統が絶えてから、コペルニクス生れて、歐洲に再び斯學の復興を見るまでの約1400年の間は、所謂歐洲の中世紀で、世は漸く亂れて學術の光薄く、天文學上重要な進歩はなかつた。唯僅かに數學及び觀測術の上に多少の改良は行はれたけれども、理論の方面は、徒に先人の轍を履むのみであつた。

かく歐洲の空氣の著しく沈滞せる間に、東方アラビアに崛起せる一民族は多大の元氣を以て世界の舞臺に現はれた。マホメットのコオランと劍とに狂せるアラビア人は、更に知識の開拓にも勇敢であつた。ギリシア學術の精は、アラビアに移され、更に著しい發達を遂げることになつた。回教主の都バグダッドは忽ちにして當時の學術界の中心となつた。

第8世紀頃に教主となつたアル・マンズル(Al Mansur)は有名な學術の保護者で、印度及び西洋から多くの學者を呼び集めた。殊に印度の天文學は最初にアラビア語に翻譯されて一時勢力を得て居た。其後朝廷内に翻譯局を設け、ギリシアの學術書を

シリア語を介して重譯する事業を始めた。最初に醫學の書が譯され、次で天文學が紹介せられた。殊に天文學は知識欲以外に實用的に歡迎された。回教の儀式はメッカの方向を望んで禮拜する必要がある。然るに東は印度河より、西はジブラルタルに至る大版圖の各地に於て、地理學の發達しない昔に、メッカの方向を定める爲には、天文學の助けを藉る外はなかつたのである。又編曆や占星術も大に盛になつた。

其後歴代の教主が皆天文學に熱心であつたので、第9世紀頃には、トレミイの *Almagest* を初め、ギリシアの數學及び天文學に關する書籍は殆んど皆翻譯されたので、ギリシアで既に亡びた珍書がアラビアに保存されて今日まで残つてゐるものもある。

回教主がダマスカスに住んでゐた頃は、其所に天文臺があつたが、バグダッドに遷都の後、西紀829年に同地に宏大なる天文臺を建設したのは教主アル・マムン(Al Mamun)の事業であつた。備付の器械はギリシアの型を模したものであつたけれども、形も大きく又細工も緻密になつてゐた。そこで恆星の觀測及び日食の觀測も精密に行はれ、ギリシアの恆星表の不完全な點が漸次明らかになつて、種々の新表が發行された。

Almagest の翻譯を完成したと傳へられるクビトベン・コラ(Tabit ben Korra)は歳差の値が少しづつ變化することを觀測から算出した。彼は黃道の位置の變化を假定して、面倒な機械的證明を試みた。此變化は彼の觀測の誤であつたのに、其後五六百年の間誰も氣付かずにゐたので、種々の天文表に著しき果を残したものである。

第9世紀の終頃に出でた、アラビアの王子アル・バタニ(Al Battani)は、天文觀測を好んで、トレミイの測定した數多の値を再測し、黃道の傾斜及び歳差の値等を訂正した。彼には天文學に關する著述があつて、其中に太陽及び月に關する精確な表がある。特に彼の大發見は、近地點が春分點に對して少しづつ移動するといふ事であつた。近地點とは太陽と地球との距離が最近の時の太陽の天球上の位置で、現今の近日點の太陽の位置である。彼はトレミイの觀測と比較して其差に注意し、遂に此點の移動を知つたのである。彼は又數學に長じ、三角形を解くに正弦と正切を使用し初めた元祖である。

第10世紀の中頃、バグダッド天文學者の殿將たるアブルワファ(Abul Wafa)が生れた。彼には *Almagest* と名づくる天文學の大著がある。これはトレミイの著とは全く異なるもので、新しい學説を幾分含んでゐる。例へば、月の運行に就て、彼は觀測上より、満月新月及び上弦下弦の時には現はれないで、それ等の中間の位置に現はれる運行の不平均を發見した。これは後年チホ・ブラエが再發見して二均差(Variation)と名付けたもので、前にトレミイも少しは此現象に注意したらしかつた。又彼は數學上にも多少の貢獻をなした。

其頃埃及のカイロにイブン・ユノス(Ibn Yunus)といふ天文學者があつた。彼は回教主ハケムの保護の下に觀測及び研究をなし、ハケム表(Hakemite Tables)を出版した。其中には天文學及び數學に關する諸種の表や、彼自身及び以前のアラビアの學者の觀測の記録等があるが、後者は今日まで貴重な資料とな

つてゐる。

サラセンの西部に於ては、南スペインのコルドバ、トレド、セビル、モロッコ等に大學、圖書館等が出来て天文学も研究された。公表された著述中最重要なるものはアルザケル(Arzachel)の指導の下に出来たトレド表(Toletan Tables)で、多少の進歩が認められてゐる。

サラセンの全盛は第13世紀の初頃に終つたので、アラビア天文学も其後は全く衰へた。けれども歐洲の暗黒時代に於て六百餘年に亘つて、世界學術の中心となり、幾多の観測、発見を残し、近世歐洲の學術の先驅となつたのは偉大なる功績といはねばならぬ。殊に數學にアラビア數字の採用が著しく計算を簡單ならしめた事は今日まで吾人の利便を蒙る所である。又アラビアの遺物は恆星名に多く残つてゐる。Aldebaran, Altair, Betelgeux, Rigel, Vega等の一等星の固有名は皆アラビア名である。

5. 蒙古の天文学 サラセン民族の漸く衰微に赴く頃に蒙古の東部に成吉思汗が生れた。それから第四代目の大汗憲宗は成吉思汗の孫であるが、其時、弟旭烈兀(Hulagu)をして西部アジアを平定せしめた。1258年に旭烈兀はバグダッドを陥れてアラビアを席捲し、遂に埃及に侵略して、歴大なる伊兒汗國を作つた。彼は一面に學術を保護し、天文学者ナシルエチン(Nassir Eddin)を學術及び政治上の顧問とした。エチンは伊兒汗國の首府メラガ(今のベルシアの西北部)に壯大なる天文臺を建てた。そこで數人の學者は彼の指揮の下に観測に従事し

た。観測器械は非常に精巧なもので、歐洲の16世紀頃のチホブラエ等の器械よりも優秀なものであつた。

エチン等は大にギリシア、アラビアの學術を研究し、重要書の翻譯を成就した。エチンには又幾何學及び天文学の著述がある。後者には獨創の意見も多かつた。例へば、月の運行に關するトレミイの對心説を排して、新に球運動の結合で説明した。これ等の書は大に當時の東方諸國に流行した。

又メラガ天文臺では、昔イブン・ユノスの作つた、ハケム表を基礎とし、一々新観測を試みて新恆星表を作り、伊兒汗表(Ilkhanic Tables)と命名した。此表中には惑星の位置を計算する表も含まれてゐる。此所で定めた歳差の値は51"で、殆んど精確といつてよい。又エチンは歳差の變化を研究したが、確かめ得なかつたので、少しく疑を挟んだ様である。彼が1273年に死んでから、メラガ天文学は直ちに衰微した。

1394年に于魯伯(Ulgh Begh)が生れた。彼は中央アジアに大帝國を建設した帖木兒の孫である。1420年頃、彼は帖木兒帝國の首府撒馬兒罕(Samarcand)に天文臺を建て、多くの助手を使つて観測に従事した。その結果、惑星の新表、及び有名な恆星表が著はされた。此恆星表はトレミイの表と殆んど同數の恆星を含み、皆新観測によつたものである。これが、ヒパルクス以來全然獨立の観測に基づく最初の恆星表で、其後數百年間、歐洲の天文学の基礎となつたものである。最近十年前に英國で此星表の再出版を見た程、現代の學界にも参考として重要な位置を占めてゐる。此表には各恆星の經緯度は分位まで出してあ

るが、器械が餘程精巧だつたと見えて、今日の觀測と比較して、數分以上の誤差はない。

子魯伯は1449年に其子から暗殺されたので、其後蒙古天文學は滅びてしまつた。けれども、其成果は西歐に移され、文藝復興期の天文學の基となつた。

6. 歐洲中世紀の天文學 羅馬大帝國の滅亡より文藝復興に至るまでの歐洲は、戰亂相繼ぎて、人々は一切の自然科學に注意する餘裕がなく、所謂暗黒時代を出現したのである。第8世紀の末カロロ大帝が歐洲の中原を統一してから、學術の研究が漸く初まつた。782年、帝は當時の學者アルクイン (Alcuin) を召して、大學を設け、天文學、算術、修辭學等を教授させたが、著しき進歩を見なかつた。

第10世紀頃からアラビアの學術がスペインを通じて輸入される様になつた。後に法王となつてシルベスタア二世と稱したゲルベルト (Gerbert) は其頃最傑出せる學者であつたが、久しくスペインのサラセン領に留學して、主に數學と天文學を修めて歸り、大に歐洲の人心を啓發した。彼は觀測器械の製造に妙を得て居たといはれてゐるが、著しき研究はなかつた。

第13世紀の初頃に、アラビアの書籍をラテン語に翻譯する計畫が始まつた。其中にはギリシア書の重譯もあつた。此時アラビアの天文學書が大部分翻譯された。第13世紀の初頃から歐洲の所々に大學が設立されたが、特にフレデリキ二世はシチリアでサラセン文化に接してゐたので、其創立せるナポリ大學では盛にアラビア學の研究を試みた。アリストテレスの書も

アラビア語から傳へられて、當時の人心を著しく刺激したと云はれてゐる。

第13世紀の中葉、カスチラ國王アルフォンソ十世は、スペインのサラセン人に勝つて、トレドを占領し、其所に多くの學者を集めて天文學の研究所を起し、トレド星表を凌駕する新表の製作に着手せしめた。此所で出來たアルフォンソ星表 (Alfonsine Tables) は1252年に出版され、直に歐洲全土に擴がつた。此表は別に新思想はないが、前に出た表よりも餘程精確に勘定してある。又王は *Libros del Saber* といふ浩漭なる天文學書を編纂せしめた。これは當時の天文學全般の知識を網羅せるもので、アラビアの研究以外に少し新見もある。殊に面白いのは、水星の軌道が地球を中心とせる楕圓形であるといふ説で、これが恐らく天體運動を圓以外の曲線で説明しようとした嚆矢だらう。

其頃英國のベェクン (Roger Bacon) は科學の實驗的研究を主張し、又光學の理論と望遠鏡の話を書いてゐるが、無論製作したのではなかつた。又其頃パリで數學教授をした英人サクロボスコ (Sacrobosco) の著した通俗天文學は廣く民間に讀まれたもので、彼が1256年に死んだに關はず、17世紀の中頃まで40版を重ねた珍書であつた。

第15世紀に獨逸にブルバハ (George Purbach, 1423-1461) が生れて天文學の新研究が始まつた。彼は1450年にウキン大學の教授となり、天文學及び數學を教へた。そこで彼は天文學概要の著述に従事し、又トレミイの惑星運行説をラテン語から翻譯した。彼に多くの弟子があつたが、其内でレギオモンタスス

(Regiomontanus, 1436-1476) は最傑出し、彼の事業を助け、共に観測もやつた。それは主に 200 年前に出来たアルフォンソ星表の不精確を訂正する目的であつた。其後二人は羅馬の大僧正に招聘されたが、ブルバハは出發前に頓死した。

レギオモンタヌスは獨りで羅馬に行き、7 年間留まつた。其間にギリシア語及び數學を研究し、トレミイの書を原語で読み、傍ら天體觀測もやつた。又ブルバハの遺業たる天文學概要の著を完成し、1468 年に多くのギリシア書を携へてウキンに歸つた。其後ニュルンベルグ市に赴き、同地の富豪ワルタア (Bernard Walter, 1430-1504) の援助と協力を得、共に觀測をやつた。此市の最巧なる機械師は、當時歐洲に於ける最も精確なる觀測器械を作つたが、それでも中央アジアで使用された、エチン及び子魯伯の器械には及ばなかつた。

彼等は種々の觀測を試みたが、1472 年に現はれた彗星の觀測の如きは、彗星を天體として研究した最初の記録である。ブルバハの遺著も、此市で印刷されたが、此書はギリシアの學說の紹介が多い。又彼等は曆を印刷發行した。此曆は今日のものと同様に、祭日、月の盈虚及び日月食を載せ、附録に種々の表があつた。此表は簡単な通俗的のものであつたが、比較的精確であつた。殊にレギオモンタヌスの研究になる、月の位置によつて海上で経緯度を決定する方法の計算表は珍しいものであつた。

彼の表は廣く航海者に使用せられて大發見の指導となつた。コロンブスがアメリカ發見の際に使用した表も、これであつたさうだ。1475 年にレギオモンタヌスは羅馬法王から編曆事業

補助の爲に招聘されたが、其翌年急病で客死した。

ワルタアは其後 30 年間もニュルンベルグで觀測を續けたが、其結果は彼の死後出版された。1484 年に彼は初めて天體觀測に時計を使用した。又大氣による光の屈折に注意し、濛氣差の研究を初めた。トレミイも此問題を考へたが、實際の研究はワルタアに始まるのである。

伊太利の多方面の天才リオナルド・ダ・ヴィンチ (Lionardo da Vinci, 1452-1519) は、三日月の際に月の暗面が薄く輝く理由を説明した。つまり地球の反射光によつて輝くことを初めて述べたもので、地球と他の天體との間に著しい差異があるといふ俗見を打破する一助となつたものである。

獨逸のフラカストル (Jerome Fracastor, 1483-1543) 及びアピアン (Peter Apian, 1495-1552) は共に天文學の著述で有名である。彼等は彗星の位置の變化を研究し、其尾が常に太陽と反對の方向に出ることを注意した。又アピアンは測地學を研究し、投影法によつて世界地圖を作つた。

葡萄牙のノニアス (Peter Nonius, 1492-1577) は薄明の現象を研究した。其繼續時間が緯度によつて異なる状態を調査し、此問題の研究の嚆矢となつた。

1528 年佛蘭西のフェルネル (John Fernel, 1497-1558) は、回教主アル・マムンの測定以來閑却された、地球の大きさの測定を試みたが、其方法が粗雑であつたに關はず、1% 以内の精確なる結果を得た。

第四章 第16世紀の天文學

— コペルニクスとテホ・ブラエ —

7. コペルニクス (Nicholas Copernicus, 1473-1543)

前章の終に述べた諸學者は皆レギオモンタヌスと殆んど同時代の人であつて、餘り有力な結果を天文學上に與へなかつたけれども、時代の趨勢は、他の文藝科學等の復興と相待ちて天文學上に一新時期を劃すべき偉人コペルニクスを生むに至つた。彼の生誕はレギオモンタヌスの死に先だつこと3年であつた。(コペルニクスの小傳は別項にあるから、此章では彼の學説の概略をのみ述べようと思ふ)。

コペルニクスは偉大なる觀測者ではなかつた。彼の事業は實際の觀測より歸納した結果ではなく、從來の學説の倒逆せるを恢復し、それに數學的及び觀測的基礎を與へたことである。彼の器械は殆んど手製で、アラビア人及び蒙古人の器械に比して著しく劣つて居た。彼は理論と觀測との大體の一致を必要とし、精密な觀測をなす爲に努力したことはない様で、此點で弟子のレチクス(Rheticus)と議論したことがある。彼の學説は其大著 *De Revolutionibus* によつて不朽となつた。其中心思想は、天體の視運動の大部分は眞の運動でなく、觀測者を乗せて運行せる地球の運動によるものである、といふことであつた。此考はギリシア、エジプト等の學者にもあつたが、全く空想的で觀測上の根據がなかつた。そこで、コペルニクスは全く新しい基礎

的觀測によつて新學説の樹立を計る必要があつた。彼は巧妙なる數學の應用によつて此理論を簡単に説明したのである。

彼の著には先づ數箇の根本假定がある。

第一假定は、宇宙は球形である、といふので理由は明瞭でない。

第二假定は地球は球形である、といふので、ギリシア人の説明の外に、或場所で見える月食が他の場所で見えない事實によつて東西の方向の地球の曲率を説明した。

第三假定は、總ての天體の運動は均整なる圓運動又はそれ等の結合である、といふので、ギリシア時代其儘である。

次に彼は地球の運動の可能なること、及び其運動が一種以上あり得ることを論じた。彼は地球と恆星及び惑星との相對運動を分析して、地球の運動を導いた。即ち、天球の日週運動は、地球の自轉の結果と考へ、太陽の黃道上を運行する年週運動は、地球の公轉の結果であると説明した。彼は、公轉を二つの圓運動の結合と考へ、更に歳差を説明する小運動を附加した。

彼は地球上に於ける觀測者の位置が何所にあつても、常に天球の半分を見ることが出來、地平面は常に天球を二等分することから、地球の大きさは恆星界の天球の距離に比較して非常に小であつて、全く無視してもよいと考へた。

次に惑星の運行の週期及び特質から、太陽系に於ける各星の配列を決定した。その結果は現在の考と一致する。又地球の公轉による季節の變化と晝夜の長さの變化を詳細に説明した。彼は黃道の傾斜を測定し、過去の値に比して減少せることを述べた。其觀測は不精確であつたが、減少は事實と一致する。

彼は歳差を研究し、ギリシアのチモカリス等の結果と比較して、其平均値を $50' \cdot 2$ とした。この値は殆んど正確であるが、彼はアラビアのタビト・ベン・コラの主張した歳差の長週期動搖の考を其儘誤つて採用した。今迄、歳差は天球上の赤道の運動としてヒパルクス以來説明されたのであるが地動説を取ると、これは天球の運動でなく、地球の赤道面が黄道面に對して、一定の傾斜をなしつつ移動する現象と考へなければならぬ。その結果、地軸は天球に對し約 26000 年の週期を以て遅い圓錐運動をなすこととなる。此圓錐の軸は黄道面に垂直であると、彼は考へた。これは彼の正しき創見であつた。

彼が地球の公轉の軌道に離心圓を取つたのは、トレミイと同様である。離心率を $\frac{1}{31}$ とし近日點、遠日點の位置を精密に定め、任意の時刻に於ける太陽の視位置を計算し得る表を作つた。惑星の廻轉の週期に就て、會合週期 (Synodic period) と對恆星公轉週期 (Sidereal period) との區別を明らかにし、各星に就て精密に計算した。又金星及び水星の軌道と地球の軌道との大きさの割合を、各惑星と太陽との角距離が最大なる位置の觀測から計算した。その結果は、地球と太陽との距離を 100 とすれば、金星は 72、水星は 36 である(最近の値は 72.3 と 38.7 とである)。

次に彼は外惑星の二種の週期を計算し、又地球の軌道と各星の軌道との大きさの比を出した。其方法の順序は、先づ太陽と惑星との角距離が直角なる時刻を測定し、その時刻に於ける惑星の太陽より見たる方向を計算し、其方向と地球の方向との差から距離の比を計算したのである。其結果は地球と太陽との

距離を 1 とすれば、火星 1.5、木星が約 5、土星が約 9 といふ値になつた(現今の値は 1.5, 5.2, 9.5 である)。

彼は恆星の視差が発見されないのは、距離が甚だ大なる結果と考へてゐた。

以上は彼の學説の要點を摘記したのであるが、宗教界に於ても、ルウテル一派の人が僅かに反對しただけで、ロオマ法王は少しも反對せず寧ろ嘉納したのであつた。かくて彼の地動説は新天文学の基礎たる位置を確立した。

8. 地動説の發展 コペルニクスの衣鉢を傳へ、直接其説を主張したのはレチクスであつたが、キッテンベルグ大學教授ラインホルド (Erasmus Reinhold, 1511-1553) も熱心な賛成者であつた。レチクスは 1550 年に、コペルニクスの原理に基いて、曆を編纂し、其他種々の表を作成したが 1576 年に没した。

ラインホルドはコペルニクスの説によつて天體運行表を作り、プロイセンのアルベルト公の資によつて 1551 年に出版した。これがプロイセン表と稱せられ、アルフォンソ表より著しく優良であつたので、直ちに世に擴布された。これによつてコペルニクスの宇宙系統の効果が漸く世人に認めらるる様になつた。

英國では 1556 年にフィールド (John Field) が、コペルニクス及びラインホルドの式によつて曆を作つた。又當時の書に地動説のことが散見する。

第 16 世紀の後半期は、コペルニクス説の餘々の發展の時期で、著しき反對もなかつたが、十分に一般に信用されなかつた。其當時は力学の進歩が幼稚であつたので、コペルニクスの稱へ

た様な地球の急激なる運動が如何なる結果を地上の物體に及ぼすべきかといふ問題に確答が與へられなかつた爲である。又地球の公轉の結果として生ずべき恆星の年週視差も発見されなかつたので實驗的證明が缺けてゐた。そこで精密なる觀測の必要が要求された。同時に數學上の三大發明と稱せらるる、アラビア數字の採用、分數の使用、對數の發明等が此時期に起り、大に其氣運を助けた。

獨逸に於て精密觀測を復興した最初の人ハヘッセ伯キルヘルム四世(1532-1592)で、1561年カスセルに天文臺を建てた。彼は觀測室の屋根に球形の廻轉式を最初に設計したので有名である。キルヘルムは主に恆星の觀測をなし、助手ロオトマン(Rothmann)及びビュルギ(Bürgi)は彼に協力した。ビュルギはナビイルと獨立に對數を發明したさうだ。

カスセル天文臺の主な仕事は恆星表の製作であつた。恆星の位置は先づ太陽、金星又は木星と比較して測られ、それを赤經、赤緯に換算した。大氣の屈折、太陽の視差による誤差も精密に測られた。又ビュルギが初めて振子を應用せる觀測用の精確な時計を作つた。振子時計のことは世に傳はらなかつたので、後年ガリレイ及びフイゲンスが各獨立に發明したのである。1586年までに121箇の恆星の位置がよく觀測された。其後ロオトマンが去り、ヘッセ伯が死んだので大恆星表は完成しなかつた。

9. チホ・ブラエ(Tycho Brahe, 1546-1601) チホ・ブラエは丁抹の貴族で、コオベンハアゲン大學及びライプチヒ大學にて

天文學を研究し、觀測器械の改良に苦心した。1566年アウグスブルグ市のハインツェルの求に應じて、半徑 19 呎の大四分儀(Quadrant)を製作し、其度盛を1分まで刻んだ。其外に直徑5呎の大天球儀を作り、其上に彼の觀測せし星を一々記入した。1572年11月、一大新星が突然カシオペア星座に出現したのを、彼は故郷のヘルシンボルグで精細に觀測し、最初発見の際金星大の光輝を有した時から、16箇月の後、遂に肉眼で見えなくなるまで、其光度の變化を精密に記録した。

彼は新星と近傍の恆星との角距離を、連續的に觀測して、新星の視差の有無を決定しようとした。所が視差は発見されなかつたので、彼は新星の距離は月よりも遠いと結論した。又惑星的の運動も認められないから新星は多分恆星界にあるだらうと推論した。當時の天文學者は、アリストテレスの恆星界は不生不滅であるといふ説を信じて居たので、新星も彗星も地球の大氣の上層に起る現象だらうと考へたのである。

1574年彼はコオベンハアゲン大學の天文學の講義を囑託されたが、其大部分は占星術に關するものであつた。1576年丁抹王フリドリヒ二世は、チホの研究を完成する爲に十分の補助をなすことになつた。彼は、丁抹、瑞典間の海峽にある周圍3里許の一小島フヴェンと、其所に天文臺及び住宅を建設する費用を與へられ、島の地代の外に年々百磅の補助を給せられた。彼は規模宏壯なる大伽藍を建造し、其中に觀測所、圖書館、實驗室、住居及び地下の牢獄まで設備し、“天の城”と名づけた。後に助手及び生徒の數が増加したので8年の後、“星の城”を建てた。

その中には地下観測所もある。その外に大工場と印刷所が附属し、其所で總ての観測器械は精巧に作られ、美しき裝飾を施された。

此島でなされた 21 年間の観測は、其精確の程度と範圍とに於て、前人未到の域に進んだ。1577 年一大彗星が現はれたので、チホは十分精密に観測し、遂に彗星の距離は、月の距離の 3 倍以上なりといふ結論を得た。これによつて彗星が地球の大氣内の現象であるといふ俗説を打破した。又彼は観測の連続より、此彗星が金星よりも遠い距離で太陽の周圍を廻轉してゐるといふ結果を得た。

チホは自己の研究の結果を綜合して天文學の一體系を作り、大規模の著述を企てたが、實行されたのは一部分だけであつた。第 1 卷は新天文學序論と題せられ、1588 年頃漸く着手され、1592 年に大體印刷されたが、遂にチホの死ぬまで完成せず、1602 年ケプレルの力によつて漸く出版された。これは恆星及び歳差の問題を論ぜるものであつた。第 2 卷は、天界の新現象に就て、と題せられ、第 1 卷に先だつて出版された。これは 1577 年の彗星に關する研究の結果である。

第 2 卷の中に、チホの宇宙體系が述べてある。其説は、トレミイとコペルニクスとを調和した様なものである。彼がコペルニクスと意見を異にせる點が二つある。第一に、彼は地球は懶惰にして重きものであるから、其運動は物理學的原則に反するものと考へ、地球の自轉及び公轉を非認した。第二に、コペルニクスによれば、惑星と恆星との間には非常に廣い空間が存在す

ることになつてゐるが、チホは、かくの如き廣大なる虚空は不經濟だから、ある筈はない、恆星はもつと惑星に近いだらうと信じてゐた。それで彼の體系では、5 箇の惑星が太陽を中心として廻轉し、太陽はこれ等の惑星を引率して 1 年に地球を一廻轉する。更に天球は毎日一回地球を中心として廻轉すると考へた。チホの説の發表と殆んど同時にレエメルス (Reymers) が類似せる宇宙系説を出した。彼は地球の自轉を認め、天球の日週運動を除いた點で、寧ろチホの説より進歩してゐた。

1588 年丁抹王フリドリヒ二世崩じ、新王はチホに同情せず、補助も絶えたので、1597 年獨逸に赴き、友人の許にて天文學の一小冊子を出版した。其内容は彼の器械の説明と彼の小傳、及び主なる發見の記事であつた。同時に 1000 箇の恆星表を成就した。其内で 777 箇は正しく観測されたもので、他は急に附加したものであつた。1599 年獨逸皇帝ルドルフ二世の招きにより、ブラグ市に赴き、其近傍なるベナテク城に住んで観測することになつた。其時、助手となつた一人が、有名なケプレルであつた。ケプレルは其時年既に 30 歳前に宇宙神祕論を著して既に其名を認められてゐたが、金に困つて遂にチホの助手となり、直ちに火星の運行の研究に着手した。けれども内亂の爲、彼等の安住は破壊され、翌年ケプレルもチホもブラグ市で働きつつ共同研究をやつたが、1601 年 11 月 24 日チホは病死した。享年 56 歳。

チホは空前の観測者であつた。彼程、観測を重んじ、又それに熟達したものは、それまでなかつた。彼は精確なる観測をなす

と同時に、諸星の運行を連続的に観測することに勉めた。従來の學者の観測は連続的でなく、都合のよい時に試みるに過ぎなかつたのである。例へば、チホは數年に亙つて毎日太陽の位置を観測した。惑星に就ても同様であつた。アラビア人にも連続的観測を試みたものがあつたが、その結果の綜合が缺けてゐた。チホは、観測は資料で、それを總括する法則が目的だと考へて、時々綜合を試みたのである。

チホの観測の精密度は時によつて多少の差がある。彼の恆星表中の基本星となれる9箇の恆星の位置を、現今の結果から引直して見ると1'以上の差はないが、唯一つ2'位違つてゐるがある。これは大氣の屈折の勘定を誤つた爲らしい。其他の星の位置も2'以上の誤は殆んどない。かく精確になつたのは、器械が大きくなつたことと、構造が精確になつた爲である。チホは特に視線の構造及び度盛の方法に注意し、又器械の安定の爲に、大抵空の一方向にのみ向く様に据付けた。彼は種々の観測の誤差に注意し、異なる條件の下に、同一天體を測り、其位置の精確を期した。

彼は大氣の屈折を研究し、不完全ながら、自ら表を作つた。太陽及び惑星の視差の値を知ることが出来なかつたので、精密なる観測には、常に視差の影響が反對となるべき二位置を選んで、其結果を平均した。又春分點に對する太陽の近地點の1年間の移動をコペルニクスは24"としたが、チホは45"と定めた(此頃は61"となつてゐる)。又1年の長さを秒まで精確に定め、太陽の運行の位置を分まで精確にした(従來の表は15'乃至20'の

誤があつた)。

月の運行に關しては、嘗てアブル・ワファが發見した二均差を精細に研究し、其上に1年を週期とせる、年差(Annual Equation)と名づけらるる位置の小變化を發見した。又月の軌道面と黃道面との傾角が週期的に變化すること、及び月の交軌點の運動も變化することを確かめた。又歳差を研究して其不規則的變化の説を排した。チホは惑星の組織的観測を試みたが、その運行の法則の研究は彼の一生中に成就せずして、ケプレルの事業として殘された。

第五章 ガリレイとケプレル

10. ガリレオ・ガリレイ (Galileo Galilei, 1564-1642) チホ・ブラエの没後、繼起した二大天文學者がある。一はガリレイで、一はケプレルである。此兩人は殆んど同時代であるが、ガリレイの方が7歳の年長で、且つケプレルよりも12年長く生殘つた。兩者の研究方面は著しく異なり、相互影響も殆んどなく、各自獨立の方向を開拓して進んだ。

ガリレイは伊太利ピザに生れた。19歳の時、振子の等時性を發見し、26歳の時ピザ大學の講師として、數學と天文學を教へた。ピザの斜塔で落體の速度の實驗をなし、アリストテレスの説を打破したのは其頃である。1592年ヴェネチア共和國のパツア大學の教授となり、數學、力學、天文學の研究をやつた。彼の最初の天文學上の發見は、1604年に蛇星座に新星が出現した

時、其視差の研究の結果、惑星よりも著しく遠方にあることを確かめたことである。

ガリレイの名聲は、其頃から伊太利國內に轟いたが、1609年望遠鏡を發明して、それによる天體觀測の結果の發表以後は、歐洲全土の驚嘆の的となつた。英國のロジャア・ベエコン及びレオナルド・チゲス、伊太利のボルタ等は望遠鏡を發明したといふ話はあるが、全く傳はらなかつた。事實上の最初の發明者は和蘭のリベルスハイム (Hans Lippersheim) である。彼は眼鏡屋であつたが、1608年2箇の凸レンズを組合せて望遠鏡を製作した。其發明の報知が翌年ガリレイの下に達したので、彼は其組立に就ては何も知らなかつたが、兎に角工夫して、1箇の凹レンズと1箇の凸レンズとを組合せ、これを筒に嵌めて、3倍に見ゆる望遠鏡を創造した。次で更に30倍の望遠鏡を造つて、天體觀測に従事した。彼と殆んど同時に、獨立に天體の望遠鏡觀測を企てた人が二人あつた。英國のハリオット (Thomas Harriot, 1560-1621) と獨逸のマリウス (Simon Marius, 1570-1624) である。けれどもガリレイの結果は拔群であつたので、これ等の二人の功績は殆んど埋滅した。

ガリレイの觀測の結果は1610年に“天界の使者”と題する小冊子として現はれた。彼は先づ望遠鏡を月に向けた。其頃の一般の信仰では、月も他の星も表面は平滑なる球體と考へられてゐたが、ガリレイは直ちに其表面の凹凸を發見した。彼は投影によつて、著しい月山の高さをも測定した。月面の兎の様な大斑紋は水の爲だらうと考へて、海といふ名稱を附した。又

月面に雲のないことも確かめた。

彼は望遠鏡によつて肉眼で見えない數多の小星を見ることが出来た。昴の星群中に36箇の星を數へた。銀河の部分に多くの星雲狀の集團を發見した。

1610年1月7日の夜、彼は望遠鏡を木星に向けた所が、木星の左右に殆んど一直線に並べる3箇の微星を認めた。其次の夜に觀ると、木星に對して三星の位置が前夜よりも異なつてゐることを發見した。引續いて二夜の觀測の後、彼はこれ等は木星の周圍を廻轉する衛星であつて、恆星ではないことを確かめた。同月13日、彼は第四の衛星を發見した。其後數年に亙る觀測から、四衛星の週期を精密に計算した。これが月以外に衛星の存在を知つた最初で、地球が總ての天體の運動の中心であるといふ古い考を打破することが出来た。

土星を觀測して、それが3箇の星から成立つてゐると見た。彼は土星の本體を1箇とし、周圍の環を本體の左右にある二星と見過つたのである。數月の後、又土星を觀た所が、中央の本體1箇だけしか見得なかつた。それで彼は環の正體を知らずに終つた。

ガリレイは太陽の黒點を發見した。最初黒點を見つけたのは1610年の末であつたが、其時は妙な事がある位に思つて發表しなかつた。其後英國のハリオット (Harriot)、和蘭のファブリシアス (Fabricius)、獨逸のシャイネル (Scheiner) 等が、各獨立に黒點の發見をやつたので、ガリレイも研究を始め、1611年5月其結果を發表した。尤も黒點は前にも時々肉眼で見えたこと

があつたけれども、人々は水星が太陽面經過をなすのだと信じてゐた。黒點が常に太陽の東側から西側に向て運動するから、そんな考が出たのである。ガリレイは、よく黒點を見ると、形状が不規則で球形の惑星とは見えないので、次の意見を出した。

黒點は太陽面に著しく接近せるか或は表面上になければならぬ。其運動は黒點が太陽面に附着してゐて、太陽自身が約1箇月に一自轉するものとすれば説明が出来る。黒點は地球の雲の様なものではあるまいかと考へた。かくて太陽の自轉なる新現象が認められ、自轉軸の位置、赤道の位置及び自轉の週期等も精密に測られた。彼は黒點の中央部は著しく黒く、邊緣には薄黒き部分あることを發見した。又黒點の出現は、太陽の赤道の兩側の部分に最も多いことをも認めた。

其頃、教會の一部で新科學に反對の聲が起り、法王の調査委員は、コペルニクスの地動説は聖書に反對せる虚偽邪惡の論である旨を報告した。法王は大僧正ベラミンに命じて、ガリレイを召喚し、地動説を廢棄する様に勸告せしめた。同時にコペルニクスの著の一部は讀むを禁ぜられ、一部は改竄して發行された。大僧正はガリレイに同情して居たので、少しも迫害せず、返つて大に優遇した。

11. ガリレイの宇宙觀 前述の如く教會の空氣が險惡であつたので、ガリレイは自己の宇宙觀を露骨に發表することが出来なかつた。それで新説を出す毎に、一々巧妙なる遁辭を用ゐて宗教との調和を計つたので、法王ウルバン八世は大に彼を歡待した。1623年頃から、彼の大著たる“世界の二大體系た

るトレミイ系とコペルニクス系とに關する問答”の執筆を初めた。彼は此問題に關する總ての材料を蒐集しようと企てた。特に問答體を採用したのは、問答者の口を藉りて、コペルニクス系を力説せしめ、彼自身の説でない様に見せかける爲であつた。

1629年に此著を完成したので、翌年羅馬に赴き、印刷の許可を委員會から得たが、疫病流行の爲、其地で印刷が出来ず、フィレンツェに返つた。羅馬の委員會では漸く此書を疑ひ初めたので、フィレンツェで印刷の許可が中々下りなかつたのを、色々運動して遂に1632年に發行されることになつた。

此書はコペルニクスの宇宙體系を、よく組織的に辯護したものであつた。彼は、月、太陽、彗星及び新星の觀測の結果より、天體は不變なりといふ、アリストテレスの獨斷説を打破した。地球の運動の存在に關する有力なる證據として、木星の衛星の存在、金星及び水星の盈虚、及び火星の大きさの時々變化して見ゆる事等を擧げた。

地球の自轉と天球の視運動との關係に就て、彼は先づ春分點の變化即ち歳差の現象が、天球の極を絶えず變化せしむる事實に基づいて、天球の實在し得ざるを論じた。次に彼は地球の公轉の結果として、恆星は地球から見て、一年を週期とする視差運動をしなければならない。けれども此運動が發見されないのは、それが餘り小なる爲であらう、即ち恆星の距離が甚だ大なる爲であらう。一般に光輝強き星は、弱い星よりも近距離のものと考えられるから、強光星の位置の變化を、極や赤道に比較して定めるよりも、附近の弱光星に對して定める方が餘程精確に測

られるだらう。其爲には望遠鏡を用ゐる必要があると考へた。彼は實際視差運動を發見し得なかつたが、彼の想像は一世紀後に實現され、彼の工夫せし方法は今日恆星の視差決定法として用ゐられてゐる。

彼は地球の運動に關する種々の反對説を打破する爲に、彼の發見せる、物體の運動の法則を以てした。これは後にニウトンが運動の第一定律としたもので、外力が働かない限り、靜止せる物體は永久に靜止し、運動せる物體は永久に等速直線運動を繼續する、といふ法則である。ガリレイには力の概念が、ニウトンの如く明瞭でなかつたが、兎に角此意味の法則を考へ、これによつて、若し航海せる船の檣頭より石を落せば、檣の直下に落ちると斷言した。其頃の人々は、地球が若し自轉すれば、風は常に東から西に吹き、雲も西に流れ、鳥が飛び上るや否や西に退く筈だと考へてゐた。運動の法則によつて、此難點は容易に一掃されることを、ガリレイは得意になつて論じた。

此著の評判は意外によかつたので、反對派の人々は法王を動かさし、1632年8月此書の發行を禁じた。9月、69歳のガリレイは法王廳に召喚され、邪説の取消文を讀まされ、閉門を仰付けられた。彼は社會的束縛と不健康とに苦しめられつつ種々の研究を續けた。木星の衛星の觀測や月の運動の研究等は重要なものである。

彼は月の秤動 (Libration) を發見した。通常月は同一の半面を地球に向けて居るが、兩者の位置の關係と地球上に於ける觀測者の位置の差とによつて、月の南或は北の半球が多く見える

ことがある。又東或は西の半球が餘計に見えることもある。ガリレイは月の邊緣の山の位置から、この動搖を知り、秤動と名づけた。

ガリレイは1636年に全く盲目になつたので、其後研究は出来なくなつたが、其間に力學に關する大著が完成された。その中に、落體及び抛體の研究、それ等の等加速度の發見、慣性の法則等がある。又一物體に二つの運動が同時に存在し得ること、其兩運動は互に獨立して他を妨ぐるものにあらざること等を論じ、ニウトン力學の先驅となつた。

ガリレイの最有力なる發見は、望遠鏡によるものであるが、彼の特色は、この必然の發見を利用して、コペルニクス説の證明の材料としたことで、其所に彼の天才を窺ふ事が出来る。彼によつて舊式天文學は殆んど破壊され、僅かに宗教の力にて餘燼を維持するのみとなつた。彼は1642年1月8日79歳で病歿した。

12. ケプレル (John Kepler, 1571-1630) ケプレルは獨逸ウエルテンベルグ國ワイル村に生れた。19歳の時、チュービンゲン大學哲學科に入學し、神學の傍ら數學教授メストリン (Maestlin) から、コペルニクスの太陽系説を學んだ。21歳で卒業して神學士となり、24歳でグラツ高等學校の數學及び天文學の教授となり、編曆もやつた。その中には、天氣豫報や占星術の記事も入れることになつてゐた。1595年に彼が初めて編んだ曆の天氣豫報が可なり的中したので、豫言者及び占星術者としての名聲は急に高まつた。

彼の最初の著“宇宙の神祕”は、惑星の太陽からの距離と、正

立方體との内接球及び外接球の半徑との間に一種の関係がある事を述べた、空想的のものであつたが、それも當代の人気を博した。1598年に皇帝の新教迫害の爲、新教徒たりし彼の地位は甚だ不安となつたので、1600年に其國に來たチホ・ブラエの助手となつた。

チホの死後、其重要なる觀測録が大抵ケプレルの手に譲られたので、それによつて太陽系の學説を作ることが、彼の其後25年間の大事業であつた。其間に數箇の小研究もある。1604年の新星の研究、大氣の屈折、及び2箇の凸レンズで望遠鏡を作ることの研究等であつた。此種の望遠鏡を創製したのは多分シャイネルであつたらう。

ケプレルがチホの助手として囑托された仕事は火星の運行の研究であつた。火星の運行は金星及び木星に比して著しく不規則で均整な圓運動を去ることが遠い。コペルニクスの説に基づいたプロイセン星表によつて計算した位置と、ケプレルの當時の實際の位置とは 4° 以上の差があつた。それで二人は星表の改正を考へた。ケプレルが比較的圓運動と離れてゐる火星で惑星運行の研究を初めたのは、法則發見上好都合であつた。水星の軌道は、火星よりも更に扁平であるが、其觀測はチホの記録中には稀であつた。所が火星の觀測は非常に澤山あつたので、ケプレルは熱心に研究を続けることが出來た。

火星の運行には、コペルニクスの周轉圓説の失敗は明らかであるので、ケプレルは周轉圓及び離心圓等の結合を非常に複雑にして、略ぼ實際の運行を現はし得る様になつた。それでも計

算位置と觀測位置との差は S' となつた。彼はこの S' を重要視した。彼はチホ・ブラエは神の與へたる最も精確なる觀測者たることを深く信じてゐたので、 S' の位置の差を生ずるのは法則の誤だと考へ、從來の假説を棄却して新法則發見の道程に上つた。

彼は新しく圓運動の組合せを初めたが、よい結果が出ないので、圓を棄てて卵形ではないかと考へたこともあつたが、これも面白くないので、最後に彼の考は、圓を除ける最簡單なる閉曲線即ち楕圓に向つた。太陽を楕圓の一焦點に置くことによつて火星の運動を満足に説明することが出來た。それから軌道の各部に於ける惑星の速度の變化の事實を研究し、太陽との距離の近いときに速度大に遠い時に小なることを發見し、次で面積速度の考が彼の頭に浮んだのである。

かくして有名なケプレルの第一法則及び第二法則が發見された。即ち、次の形のものである。

第一法則： 惑星の軌道は楕圓にして、太陽は其一焦點にあり。

第二法則： 太陽と惑星とを連結する直線は等時間に等面積を畫く。

彼は1609年に“火星の運行の解釋”なる書を公にし、此法則を發表した。彼は此法則を地球及び他の惑星に應用して好結果を得たので、チホの觀測を材料として新しい惑星運行表を作つた。1618年から1621年までの間に、彼は重要なる三書を著した。“コペルニクス天文學概要”、“宇宙の調和”及び彗星に關する一論文がそれであつた。

“宇宙の調和”は最重要で、其中で彼は數的關係の空想から、偶然にも重要な關係即ちケプレルの第三法則を發見した由來が記されてゐる。

第三法則：ある二惑星の公轉の週期の二乗は、それ等の太陽よりの平均距離の三乗に比例す。

此法則は惑星の軌道の相互關係を知るに重要で、又ニウトンの引力則の重要な資料であつた。

次に“コペルニクス天文學概要”はコペルニクスの説に基き、チホ、ガリレイ及びケプレルの研究による新結果を加へた其頃最新の天文學書である。ギリシア以來太陽と地球との距離は、地球の半徑の1200倍と傳へられてゐた。ケプレルの時代までは太陽又は火星の視差を定めることが出来なかつたので精確なる距離は判らなかつた。ケプレルは此距離を過小なりと考へ、彼の空想から地球の半徑の3600倍と定めた(これは實際の七分の一に過ぎない)。其他は精確な記述が多く、日食の際のコロナの現象を注意して記述した最初の書であつた。

彗星に関する論文中には、後年ハリイ彗星と呼ばれた1607年の彗星及び1618年に現はれた3箇の彗星の記録がある。彼は彗星を一の天體と信じてゐたが、其運行の途は、一の直線であつて、一度地球に接近したら、再び現はれないものと思へた。又彗星の尾は、太陽の光線が彗星の物質中を貫通する際、物質の一部を運び去る爲に生ずるものと思へた。此説は略ぼ現今の光壓説と一致するものである。又彼は彗星は戦争と一致することも述べた。

1626年彼は戦亂に追はれて、ウルムに退隱した。其所で1627年に彼は最後の名著を出版した。それはチホの觀測及び彼の運行の法則に基づいて、各惑星の位置を推算する表で、外に日月食に関する事項も含まれてゐた。此表は彼の最初の保護者たる獨逸皇帝の名を冠して“ルドルフ表”と命名した。これが其後1世紀間、天體運行表の基本となつたものである。

ケプレルは天體運行の原因に就て面白い空想を試みた。從來の天體運行の圓運動の中心は、單に空間の一點に過ぎなかつたが、彼の法則によれば、惑星の運行は太陽に、衛星の運行は惑星に依るものとなるから、中心體と周圍の天體との間に力學的關係を考へるのは必然である。彼は磁石と鐵との吸引力より類推して奇妙なことを考へた。即ち、太陽と惑星とは磁石と鐵の様なものであるが、太陽が自轉するので、吸引力の方向が絶えず變化する爲に、惑星はそれを追ひかけて公轉するものであらう。惑星の公轉の週期が自轉の週期よりも長いのは惑星に惰性がある爲だらう。潮汐現象も、月も海水との間の吸引力によるものだらう、と考へた。この空想は後年ニウトンの天才によつて、萬有引力の原理となつて果を結んだ。

要するにケプレルは空想の人であつた。彼の著の大部分は無益な空想、占星術、天氣豫報等によつて満たされてゐる。有名なる三法則の如きも、其間に介在せる一小部分で、空想的の中せる部分である。従つて彼の學者としての眞面目を疑ふ人もあつたが、千載の後、彼の功績は空想の勝利を語つてゐる。

第六章 第17世紀の天文学

13. 第17世紀の天文学界 此世紀は三期に大別される。第一期は1640年までで、ガリレイ及びケプレルの時代である。第三期は1678年に空前の大著 *Principia* の出現によつて劃せらるるニュートンの時代である。この時期は18世紀にも跨るから、次章に譲る。ここには、中間の第二期即ち第17世紀中部の約半世紀間の發達を考へよう。此時期には第一流の發見はないが、前代を祖述せる重要な進歩を認むることが出来る。

望遠鏡による發見は、ガリレイの流を汲める人に多かつた。彼の敵手たりしシャイネル (Christopher Scheiner, 1575-1650) は、太陽の白紋 (Faculae) を發見し、又黒點の運動及び状態を精査した。獨逸のヘエフェル (John Hevel, 1611-1687) は月面の詳圖を出版した。月面の主なる山脈、噴火口及び海と名付けられた平地などに、彼は地球上の地名を附けた。山脈の名のアルプス、アペナイン、コウカサス及びセレニタチス海(太平洋)の名稱は今も用ゐられてゐるが、箇々の山及び噴火口は其後別に命名された。それはリクシオリ (John Baptist Riccioli, 1598-1671) の立案で、古今の有名な學者の名を取つたので、現に用ゐられてゐる。ヘエフェルは又記録にある限りの彗星を系統的に記載せる著と、1500箇の恆星表を出版した。これは彼自身の觀測によつたもので、チホの觀測よりも精確であつた。

14. フイゲンス (Christiaan Huygens, 1629-1695) 其頃

望遠鏡を利用して惑星の觀測をやつた人々は、直ちに木星、火星及び金星等の表面に斑紋のある事を發見した。ガリレイが發見した土星の兩側の附屬物も色々研究した人があつたが中々真相が判らなかつた。それが和蘭ヘエグのフイゲンスによつて1箇の環であることが確かめられた。彼は多方面の學者で、物理学上の功績も多大であり、天文学上の貢獻は其一部に過ぎなかつた。

フイゲンスは玉磨り術を研究して、空前の精巧なる望遠鏡を作り、1655年に土星の一衛星チタン (Titan) を發見した。これに勢を得て、彼は土星の研究を繼續し、更に精巧なる望遠鏡を作つて、土星の周圍の怪物が甚だ薄い環であつて、黄道面に約 31° の傾斜をなすことを發見した(實際の傾斜は $26^\circ 49'$ である)。此傾斜の爲に、土星の一公轉中に二回、即ち約15年に一回づつ、環の平面内に地球が來ることになる。その時は環の端のみを見る筈であるが、甚だ薄いので全く見えないことが多い。その中間に最大傾斜の時があつて著しく膨大した外觀を呈する。フイゲンスは此過程を先人の觀測と對照して明快に説明した。

1640年頃英國のガスコイン (William Gascoigne, 1612-1644) が測微尺 (Micrometer) を發明した。これは望遠鏡の像の所に置く、微細な尺度で、これによつて天體の位置、角距離等を精細に定めることが出来る。彼の發明は餘程精巧で、數秒の角まで測れたさうだ。此發明によつて、望遠鏡は單に天體を擴大して見るといふ目的の外に、極めて精確に其位置を決定する目的に使用し得る様になつた。

ガスコインは若くして戦死し、其發明は後年彼の遺著の出版されるまで判らなかつた。ファイゲンスは、それを知らずに、1658年に簡単な測微尺を發明し、それを1666年頃アウズウ (Adrien Auzout) が改良して精巧なものとした。かかる装置の望遠鏡で、系統的の觀測を初めた人は、アウズウの友人ピカル (Jean Picard, 1620-1682) であつた。

ファイゲンスは1656年に振子時計を發明して、天體の時間的觀測に大革命を興へた。前にビュルギは時計を發明したが、それは傳はらなかつた。ガリレイは振子の等時性を觀測に應用したけれども單振子である爲に、長い時間の測定は不可能であつた。ファイゲンスは錘で動かす時計に振子を付し、針の動きを振子で調整すると同時に、錘の重さによつて振子の振動を促進して、長時間の振動を可能ならしめた。これで恆星の子午線經過の觀測が餘程精密になつたので、ピカルは早速パリの新天文臺で之を應用した。

其頃英國のホロクス (Jeremiah Horrocks) は、ケプレルの法則を月の運行に應用して其不規則性を説明し、又月の運行が太陽の作用によつて變化するらしいと考へた。又木星と土星との運行の不規則なる點(これは相互の引力に依るものである)を發見した。彼は始めて1639年に金星の太陽面經過を觀測した。

和蘭のスネル (Willebrord Snell, 1591-1626) は光の屈折の法則の發見者であるが、1617年和蘭に於ける測量の結果、子午線上の緯度一度の長さを67哩とした。其後彼の弟子が69哩と訂正した(現今の値は、極に於て69.4哩、赤道に於て68.7哩)。ノル

ウッド (Richard Norwood) やピカルも同様な測量を試みた。

15. パリ天文臺の研究 其頃パリに有名な學者が三人あつた。その二人は前述のアウズウとピカルで、他の一人はカシニ (Giovanni Domenico Cassini, 1625-1712) である。カシニは伊太利北部の産で、巨大なる望遠鏡の製造と木星、火星及び金星の自轉の發見と、木星の衛星の運行表の作成とで有名になつた男である。1669年ピカルの紹介で、佛のルイ十四世に招かれ、建設中のパリ天文臺の指揮をなすことになつた。

カシニは熱心な觀測者で、土星の衛星4箇を發見した。即ち、1671年にヤベツス (Japetus) を、1672年にレア (Rhea) を、1684年にディオネ (Dione) とテチス (Thetis) を發見した。1675年に土星の環が内外2箇より成立し、其間に暗い分界があることを發見した。これは“カシニの分界” (Cassini's division) と今でも呼ばれてゐる。又太陽の運行説を改良し、大氣の屈折表を新に計算し、木星の衛星の運行表を更に改良した。

多分ピカルかカシニの思付らしいが、1671年より3年間パリ天文臺員リセル (John Richer) が南米の佛領ギアナのカエヌヌに科學的遠征を試みた。其時に二つの重要なことが發見された。一は、同長の振子がパリよりもカエヌヌでは遅く振動することが判つた。此事實は地球が完全に球體でないことを暗示した。其頃までは重力の考は明らかでなかつたが、兎に角、物體の重さが地球の各地の緯度の差によつて異なることが、初めて判つた。

第二は、リセルがカエヌヌで行つた火星の位置の觀測と、同時

にピカルとカシニがパリで行つた火星の観測とを比較して、火星の距離の測定が出来、従つて太陽の距離も計算された事である。火星は其時衝の位置にあつて地球に最も近かつたので、パリとカシニ間の距離を基線とせる三角測量が出来たのである。これが視差決定の最初であつた。この結果カシニは太陽の視差を $9''.5$ とし、距離を 87000000 哩とした(現今の値は視差 $8''.8$ 距離 92900000 哩)。

次に、パリ天文臺の功績は光速度の発見である。1671年ピカルは丁抹にチホ・ブラエの遺跡を尋ねた歸りに、丁抹の若い天文學者レエメル(Olaus Roemer, 1644-1710)をパリ天文臺に連れて來た。1675年レエメルは木星の衛星の運行を研究中、衛星の二回の食の間隔が、木星が地球に近づく時には短くなり、遠ざかる時には長くなることを発見した。光に一定の速度を與ふれば、此現象は説明が出来るので、レエメルは光速度の計算をやつたのである。

有名な佛の哲學者デカルト(René Descartes, 1596-1650)は、太陽系の惑星の運行を渦の存在で説明しようとしたが、これは何等観測上の根柢のないものである。けれども、彼の哲學及び數學上の新方面の開拓は、古來の權威を打破し、迷信を除去する効果が大きであつたので、其影響は天文學にも及び、新天文學普及の氣運を助けた。

第七章 ニウトン

16. ニウトンの位置 ニウトンは科學界に於ける革命の偉人である。彼の前に出でたる總ての科學者は彼の光榮ある発見の前驅であり、彼の後に出でたる總ての學者は彼の壯大なる法則の祖述者であり、證明者であつた。彼は英國の誇りのみでなく、自然科學の誇りであり、人類の知識の誇りである。コペルニクスによつて復活し發展せる天文學はチホ、ガリレイ、ケプレル等の努力によつて、幾多の材料を集め得たが、これは皆知識の斷片に過ぎなかつた。一部を統一する小法則は発見されたが、全部に體系を與ふる根本法則に至つては、絶世の天才の偉大なる頭腦を必要としたのである。幾多の豫言者の後に出でたる猶太の救世主基督の如く、ニウトンは總ての科學的知識を綜合して、科學の權威を現世に示した。

彼は萬有引力の法則によつて天體力學の基を作り、運動の法則によつて一般力學を構成し、微分積分學の發明によつて數學に新世代を劃し、光學の研究によつて物理學特に天體物理學の基を開いた。自然科學は彼によつて一大飛躍を遂げた。其影響は哲學にも及んだ。19世紀の劈頭に於て、批判の光によつて舊來の哲學研究法を一新したる、かのカントが、嚴正なる意味に於ける科學を、ニウトンの數學的科學に限り、思考の範を彼に取つた以來、ニウトンの諸法則は、唯一の眞理の形式として尊崇されたのである。かくの如き科學の權威は、稍後れてダアキンが

進化論によつて現はしただけで他に類がない。

現今學術の進歩につれて、科學の研究法が色々に批判されても、光の微粒子説が廢せられて波動説となつても、相對性原理の發展によつて運動の法則及び引力の法則が、更に大なる原理に包括される一部分であつたとしても、ニウトンは依然として精密科學の權威である。其價値は寸毫と雖、侵さるることはない。

17. ニウトンの生涯

彼の一生は略ぼ三期に別れる。第一期は1643年から1665年に至る23年間で幼年期及び學校時代である。第二期は、それから約23年の間で1687年、學生の大著 *Principia* の出版を以て終りとする最活動期で、彼の大發見は皆此時期に行はれた。第三期は、それから死(1727)に至る約40年間で、公務等に忙がしく、科學上の發見は殆んどないが、前期の發見による法則の發展による新結果が幾分ある。

ニウトン(Isaac Newton, 1643-1727)は1643年1月4日英國リンカン州ウウルソルプに生れた。19歳の時、ケンブリヂのトリニチ大學に入學、23歳で卒業した。28歳で同大學の數學教授となり、31歳の時、王立學士院の一員となつた。其間時々故郷を訪うた外、全くケンブリヂで研究生活をなし、重要な發見は續々現はれた。

彼の科學的事業は大別して三群となる。天文學及び力學が其一、光學が其二、數學が其三である。其外、物理學、化學の實驗や年代學の研究もあるが、其中には著しい發見はない。此編には、天文學に關係ある方面だけを述べることにする。

1668年、26歳の時彼は小さな反射望遠鏡を創造した。反射

望遠鏡の原理は1663年グレゴリ(James Gregory, 1638-1675)が發表したけれど、實際作つたのはニウトンに始まる。けれども凹面鏡の精巧なものを製作するのが困難であつたので、天文學上の實用に供せらるる様になつたのは、それより約一世紀後のキリアム・ハアシェルに始まるのである。

太陽光線をプリズムによつて分散せしめ、スペクトルを得たのは、彼が23歳より4歳までの事であつた。同時に引力及び微分積分の研究發見が起つた。

18. 萬有引力の發見

彼の大發見の絶頂時代と呼ばれる1665-6年はケンブリヂで疫病が流行したので、彼は大部分を故郷のウウルソルプで暮した。有名な林檎の話は、此時期に故郷の後園で起つたことである。ニウトンが林檎の落ちるのを見て初めて引力の存在に考へ及んだとは信ぜられないが、平生熟慮しつつあつた重力の問題が、熟したる林檎が風なくして落ちるといふ宇宙の一事實に面して、頗る一道の光明を得たる感を起したことは事實だらうと思はれる。

數多の天文學者は既に惑星及び衛星の運行の原因に就て考へた。ケプレルは彼の三法則の發見の後に、斯の如き運行は物體間の作用であつて、惑星は太陽から發散する特殊の作用によつて運行を生ずるだらうと想像した。ここ迄はよかつたが、彼は此力を惑星を軌道に沿うて推進める力と考へたので全然失敗したのである。ガリレイの發見した運動の第一法則は此問題に一新方面を供するものであるが、彼は此點に考へ及ばなかつた。

ボレリ (Giovanni Alfonso Borelli, 1608-1679) が 1666 年に出版した木星の衛星に関する書中に、圓又は類似の軌道を有する物体は常に中心より遠ざからんとする傾向(遠心力)があるから、惑星は太陽の方向に吸引せらるる作用があることが想像される、と述べてゐる。此書の出版は、=ウトンが引力の法則を考へた年と同年であつて、互に獨立に考へたものである。

フィデンスは天文学に關係なく、圓運動の研究をなし、圓運動をなす物体の中心に向ふ加速度は運動の速度の二乗に正比例し、圓の半徑に逆比例することを發見し、1673年に彼の振子時計に関する書中で發表した。=ウトンは、それ以前に同一の法則を發見したので、両者は全く獨立の發見をやつたのである。此圓運動の法則から考へると、中心に向ふ加速度を起す原動力たる物体があることが必要だと想像される。

此種の運動中、最重要なものは惑星の太陽を中心とせる殆んど圓形の軌道運動である。此際の求心力は太陽の影響と考へられる。然らば此力は太陽からの距離によつて如何に變化するだらうか。=ウトンは此問題を解くに、ケプレルの第三法則を利用した。即ち、惑星の公轉週期の二乗は、それ等の太陽よりの平均距離の三乗に比例す、といふ法則である。

$T, T_1 \dots 2$ 箇の惑星の公轉週期,

$r, r_1 \dots 2$ 箇の惑星の太陽よりの平均距離,

$v, v_1 \dots 2$ 箇の惑星の軌道速度とすれば,

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{r_2^3}{r_1^3} \dots \text{ケプレルの第三法則.}$$

$$v = \frac{2\pi r}{T}, \quad v_1 = \frac{2\pi r_1}{T_1} \quad \text{であるから,}$$

$$v^2 = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2}, \quad v_1^2 = \frac{4\pi^2 r_1^2}{T_1^2},$$

$$\therefore \frac{v^2}{v_1^2} = \frac{r^2}{r_1^2} \cdot \frac{T_1^2}{T^2} = \frac{r^2}{r_1^2} \cdot \frac{r_1^3}{r^3}$$

$$= \frac{r_1}{r},$$

$$\therefore v^2 r = v_1^2 r_1 = c \quad (\text{定數}),$$

$$\text{圓運動の求心加速度} = \frac{v^2}{r}$$

$$= \frac{v^2 r}{r^2} = \frac{c}{r^2}.$$

即ち、=ウトンの得たる第一の結果は上式の如く、圓形の軌道上をケプレルの第三法則に一致する運行をなす惑星の運動の原因は、太陽が其惑星に、距離の二乗に逆比例する加速度を及ぼす力を有すと假定すれば説明が出来る。これが逆二乗の法則 (Law of the inverse square) 發見の由來である。

以上の發見は惑星の運行を簡単に説明する假説に過ぎないので、實に彼の萬有引力發見の第一歩であつた。次に、=ウトンは地球の周圍に於ける月の運行が以上の假説で説明されるかどうかを研究した。地球表面の落體の運動はガリレイの研究によつて等加速運動をなすことが判つて居た。この加速度の原因が地球にありとすれば、その影響は地表のみならず、月にも及ぶものではなからうかと考へた。月にも及ぶとすれば、逆二

乗の法則が適用されはしないかと考へ、直に計算を初めた。

この場合の第一の困難は、月と地球との距離を中心間の距離とすべきか、表面からの距離とすべきかといふことであつたが、 = ウトンは假りに中心距離を採用した。次に(1)地球表面に於ける落體の加速度、(2)地球の半径、(3)月の平均距離、(4)月の公轉週期等を精密に知らなければならぬ。(1)と(4)は略ぼ精密に判つてゐた。又月の距離も地球の半径の約60倍であることも知られてゐた。然るに = ウトンは地球の半径に就て、スネル及びノウウッドの測量の結果を知らないで、餘程不確な値を使用したらしいので、最初の計算は實際と符合しなかつた。それで彼は發表を見合せたが、後年ビカルの測量による、地球の大きさの値を得て再計算を行ひ、彼の法則が事實と合することを確かめ得た。

1679年に彼は、ケプレルの第二法則に従つて等面積速度を有する物體は、中心體に向ふ引力を受くることを證明した。又ケプレルの第一法則に従つて、中心體を焦點とせる楕圓軌道を畫く物體は、其間の距離の二乗に逆比例する引力を受くることを證明した。それでケプレルの法則に従ふ惑星は、太陽からの距離の二乗に逆比例する引力を受けることが十分に證明されたが、 = ウトンは他の研究に移つて、これを發表するのを忘れた。

1684年 = ウトンは終世の親友ハリイ(Edmund Halley)を獲た。ハリイの = ウトンに對する獻身的の熱愛は、當時の猜疑排擠、暗闘に滿てる學界に於ける一異彩であつて、 = ウトンの後半世の事業は殆んどハリイの助けなきものはなかつた。ハリイ

は初め1666年になされた = ウトンの研究を知らないで、1684年の初めにケプレルの第三法則から逆二乗の法則を再發見したので、親友のレン及びフウクに其結果を告げ、かくの如き物體の畫く一般軌道の研究を初めたが、皆解決が出来なかつた。其後、ハリイはケンブリヂに = ウトンを訪問して其話をした時、 = ウトンは5年前の計算の結果を彼に教へた。けれども其記録を失つたので、新しく計算してハリイに送つた。それから、 = ウトンは圓運動の假定の下に、導いた逆二乗の法則が楕圓運動の場合にも眞なることを發見した。

19. 大著 *Principia* 1684年の暮に、ハリイは = ウトンに研究の結果を發表する様に勧めたので、 = ウトンは“運動問題”といふ論文を書いて王立學士院に送つた。これは運動に關する研究を大體網羅したものであつたが、ハリイは更に = ウトンに勧め、詳細なる永久的著述を企てしめた。1686年の中頃、原稿が略ぼ出来上つて印刷を初めた。其間にハリイは必要なる材料の蒐集及び計算をやつた許りでなく、印刷の費用も監督も皆引受けた。かくて = ウトンの不朽の大著 *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* は1687年7月に出版された。

此書は普通略して *Principia* と稱せらるるもので緒言と三大篇よりなる。第一篇と第二篇とは天文學と關係なく一般に運動の問題を取扱つてゐる。第三篇が天體の運行を論じた主要部である。此書に現はれた發見中、それ迄發表されなかつたものも多い。三つの運動の根本定律の如きも、さうであつた。其中で、 = ウトンは一物體が他物體に及ぼす影響によつて加速

度の生ずることを地球と月、太陽と惑星の場合等より立證し、一般に加速度は、或物體の影響を測る標準として取ることが出来ると論じた。

次にニュートンは“質量”(Mass)なる概念を新に設けた。木球でも鉛球でも等しき加速度で落ちることは、ガリレイが實驗し、ニュートンも實驗して確證した。即ち地球の引力は總てに一樣に働く。けれども此引力に反抗して、手で物體を支へる場合には、鉛と木とは甚だしい差がある。重さが違ふ。つまり鉛は木よりも餘計な引力で引張らないと同様に落ちない。其差は鉛と木の實質の差である。その實質をニュートンは質量と呼んだ。

彼は次に、質量に加速度を生ずる作用を“力”(Force)と呼んだ。つまり重量は地球が物體に及ぼす力であると考へた。リセルが南米で行つた振子の實驗は、地球の重力が各地で異なる證據である。又彼は、二力の合力を求むる、力の平行四邊形の法則を發見した。

これ等の結果を綜合すると、引力の法則は擴大されて、次の形式を取ることになる。

“地球は各物體を、その中心よりの距離の二乗に逆比例し、且つ其物體の質量に比例する力を以て吸引す”。

然るに、地球のみならず、太陽も惑星も相互に吸引しなければならぬ。各物體は相互に吸引するのみならず、物體の一部も他の部分を引く。今物體を細分せる極を質點 (Particles) と名づければ、引力の法則は次の一般の形を取るようになる。

“物體の各質點は他の總ての質點を、各自の質量に比例し、相互

間の距離の二乗に逆比例する力を以て吸引す”。

球形の物體は、内部の質量分布が中心に對して對稱的に均整なる場合には、外部の物體に及ぼす引力は、全質量が中心に集合したものと考へて差支ないことを彼は證明したので、距離の計算に確實な根據が出来た。

次にニュートンは各惑星の衛星に及ぼす引力を比較して、其質量と地球の質量との比を定めた。例へば、木星の外側の衛星は16日16時間で一公轉する。その木星からの距離は、地球と月との距離の約4倍であるとニュートンは勘定した。これだけの材料から木星が其衛星に及ぼす加速度を定めることが出来る。此加速度は木星の質量と其衛星までの距離の逆二乗に比例するものであるから、それによつて木星の質量が地球の約160倍といふ値を得た(實際は約317倍である)。それから、土星及び太陽の質量を計算したが、これ等の距離が精密に判らなかつたので結果は大分違つてゐた。

太陽が惑星を引くと同様に、惑星も太陽を引くから、太陽も不動ではないことになる。ニュートンは太陽系の如く相互の引力によつて運行する體系には、常に靜止せりと考へ得べき“重心”(Centre of gravity)と稱する特殊點があることを證明した。太陽は此太陽系の重心に對して運動するのであるが、此重心と太陽の中心との距離は甚だ小で、太陽の直徑よりも小であるといふ結果になつた。それで太陽は惑星に對しては不動と考へてもよいことになる。

地球の重力が各地に於て異なる現象は、地球が完全な球體で

なくて、極の部分が赤道部に比して扁平であれば説明のつくことである。ニウトンは、地球を液體と假定して、自轉の結果を想像すると、赤道部が大速度の爲、遠心力大となり、他と平均する爲に膨大する筈だと考へ、其結果を計算した。これは地球内部の状態が不明である間は十分に解決されぬ問題である。ニウトンの計算では、膨脹せし厚さを、半径の $\frac{1}{230}$ としたが、實際は $\frac{1}{293}$ である。木星の扁平なることをも、彼は同様に説明した。

地球の形狀が不精確ながら判つた爲に、1800年前に發見されて其頃まで原因不明であつた歳差の説明が出来る様になつた。ニウトンは地球の赤道隆起帯に對する太陽及び月の及ぼす引力の効果を計算して、實際の歳差の値とよく一致せる結果を得た。又惑星相互間の引力的影響即ち攝動(Perturbation)の一般的考察特に月の運行に及ぼす太陽の攝動を精密に研究し、月の交軌點及び近地點の運動に就て精確な結果を得た。

ニウトンは潮汐現象を月と太陽との及ぼす影響として説明した。これが此現象の正しい説明の最初である。彼は更に太陽及び月によつて生ずる潮汐の高さの測定から、兩者の及ぼす引力を比較して、月の質量を計算した。其値は實際の値の約2倍で、不精密ではあつたが、他に方法のなかつた時代には大なる功績であつた。

次にニウトンは彗星の運行を惑星と同じく太陽の引力によつて説明を試みた。彗星が引力によつて運行するものとするれば、計算により其軌道は楕圓か拋物線か双曲線かでなければならぬ。然るに彗星の軌道は、觀測上より考へて、圓に近い楕圓で

はあり得ない。ニウトンは細長い楕圓か、又は拋物線だらうと考へた。孰れにしても、その焦點即ち太陽の附近では、拋物線と假定して大差ないであらう。彼は其方針で1680年の冬に出現せる彗星の觀測より、將來の位置を計算し、正當な結果を得た。その後數箇の彗星に就ても同様の計算を試みて成功し、これを *Principia* の後の版に出してゐる。又彼は彗星の構造を論じてゐるが、大體現時の説と一致してゐる。彼は彗星の尾は本體より發する烟の様な微細な小體の流れで、太陽の光を反射して輝くと考へた。

20. ニウトンの晩年 *Principia* は英國で非常に歡迎され第一版は三四年の内に賣切れてしまつた。大陸では直に理解されなかつたが漸次其地歩を占めるやうになつた。殊に基督教側から少しも苦情が出なかつたのは不思議であつた。1687年ケンブリヂ大學を代表する議員となり、1695年造幣局監督官となり、1699年造幣局長官に昇進し、1701年にケンブリヂ大學教授を辭して、再び同大學代表議員となり、1703年王立學士院長となり、1705年國王ケンブリヂ大學行幸の際 Knight に叙せられた。

1704年に光學に關する著書を出版し、次に *Principia* を訂正増補して1713年に新版を出した。第三版は1726年に發行されたが、彼は其時84歳であつたので、著しい訂正もない。彼は其翌年即ち1727年3月3日85歳で逝いた。

第八章 第18世紀の觀測天文學

21. 觀測天文學と引力天文學 ニュートンは引力天文學 (Gravitational astronomy) を創始した。これを發展せしむれば、天體の運行は完全に解釋さるべき氣運に向つてゐた。然るに英國では18世紀の間に殆んど此方面の學者が出なかつた。却て歐洲大陸の諸國の數學者間に此種の研究が盛になつて、眞にニュートンの後繼者となつた。

英國の學者がニュートンの原理を發展せしめ得なかつた理由は、學者の能力の不足もあるが、一はニュートンが其發見の結果を發表した數學的形が特殊なものであつた爲とも考へられる。ニュートンは大部分幾何學的方法を用ゐたが、其後の引力天文學の發達は殆んど解析法(微分積分)を應用した結果である。解析はニュートン及びライプニッツの創意であるから、當時の人には理解が困難であつた爲に、ニュートンは故意に避けてゐた。それで英國の學者は解析法に慣れなかつたが、ライプニッツの弟子及び大陸の諸學者は、急速に此法を發達せしめ、その應用を天文學に試みたのである。

然るに觀測的方面は、ニュートンの生前及び死後に於て英國では非常な發達を來した。それで先づ主に英國で發展した觀測天文學 (Observational astronomy) を略叙しよう。

22. フラムスチイド (John Flamsteed, 1646-1720) 英國に於ける最初の觀測天文學者は、ニュートンを同時代のフラム

スチイドである。彼の一生の事業は、忠實な忍耐強き連續的觀測の記録を残したことで、立派な發見は一つもない。けれども彼の觀測は、後世のものとの比較資料として重大なる歴史的價値を有する。

彼は少年時代から觀測に興味を有し、其方面の論文を書いて世人の注意を惹いたことがあつた。1675年、彼が30歳の時、佛人ビエエルの名によつて英國政府に提出された、大洋に於て經度を發見する方法を調査する委員會の一員に選ばれた。此委員會の報告は大體フラムスチイドの意見によつたもので、此方法の採用を否決し、且つチャールス二世に對して、國立天文臺を建設する議を上奏した。其目的は、經度を見出す満足な方法を知る爲に、天體に關する完全なる知識を得る必要があるからといふのであつた。其頃英國の航海業は大に勃興してゐたので、國王は上奏案を採用し、フラムスチイドは欽定天文學者 (Astronomer Royal) なる新職を授けられ、年俸百磅を受けた。

グリニチ天文臺建設の許可は1675年6月12日に下つたが、工事に1年を費し、1676年7月から觀測を初めた。國王は建物を與へただけで、器械も助手も與へなかつたので、彼は自分の機械と寄附で漸く間に合せた。

フラムスチイドの偉大なる事業は、從來よりも精確なる多くの星を含む恆星表を作つたことである。其途中で實地天文學の問題に多くの改正を加へた。例へば、春分點の發見法を改良し、恆星の赤經の觀測に時計を組織的に使用することを初めた。此方法は佛のピカルが考へたけれど、完全に出來なかつたもの

である。適当な望遠鏡を得てからは、直ちにガスコイン及びオウズウの發明せる測微尺を使用して精密な觀測を初めた。彼によつて觀測法は一新せられ、その觀測の結果の精確なることは當代に類がなかつた。

彼の觀測録は3卷あつて、外に星圖がある。其内生前に出版されたのは2卷で、最重要なのは、2935箇の恆星の位置を含む表であつた。此星表の誤差は $10''$ に過ぎないので、チホの表よりも6倍の精密さを有する譯である。

23. ハリイ (Edmund Halley, 1656-1742) フラムスチイドに次で、第二代のグリニチ天文臺長となつたのはハリイであつた。ハリイがニュートンを補助して、其研究の完成に勉めたことは前に述べた。21歳の時(1676)、南極附近の恆星の觀測をなす爲にセントヘレナ島(南緯 16°)に派遣された。所が同島の天氣が悪かつたので2年の後漸く341箇の南極近傍の星表を公にすることが出来たが、それだけでも大なる貢獻であつた。此表は望遠鏡を使用して製作した最初の星表であるので有名になつたが、餘り精確ではなかつた。1677年11月に起つた、水星の太陽面經過の觀測も同島でやつた。

彼の最著しき貢獻は彗星の軌道の研究である。彼は引力の法則に基づいて此計算をなし、1680年及び1682年に出現した彗星の觀測に應用した。又過去に出現した彗星の軌道の計算をも試み、遂に1682年の彗星の週期性を發見し、それをハリイ彗星と呼ぶやうになつた。次に彼は、月の平均運動の長年加速度 (Secular acceleration of the moon's mean motion) と呼ばれる、月

の運行の不規則性を發見した。

ハリイは1761年及び1769年に起るべき金星の太陽面經過の現象が、太陽の距離の測定に最重要なる方法と與ふるものであることを論じて世人の注意を促した。彼の方法は地球上に2箇所以上の觀測點を設け、其各所にて、金星が始めて太陽面に現はれた時刻から、太陽面より消失する時刻までの間隔を定め、其結果を比較して、太陽の視差を計算し得る方法であつた。彼は太陽の距離を $\frac{1}{500}$ 位の誤差で測り得る豫定であつたが、彼の死後、實測の結果は十分でなかつた。

1718年に、ハリイは、シリウス (Sirius, 大犬座 α)、プロシオン (Procyon, 小犬座 α)、アアクチュラス (Arcturus 牧夫座 α)等の大恆星の黃道からの角距離が、ギリシアの觀測又はチホ・ブラエの觀測と比較しても變化してゐることを發見した。他の小星の位置が變化しない所から、此現象は黃道の變化の爲でなく、恆星自身の運動の爲と信ぜられた。これが恆星の固有運動 (Proper motion) 發見の最初である。ハリイの觀測せし値は不精確であつたが、恆星自身の固有運動の存在は否定せられなかつた。彼は他の恆星にも其存在を豫想した。

1720年グリニチ天文臺長となつてからは、月、惑星の運行表の改良、トレミイの星表の出版等をやつた。又日食の現象に注意し、1715年の日食に於て、ケプレルが前に注意したコロナの神秘的光輝及び彩球を詳細に觀察した。

24. ブラドリイ (James Bradley, 1693-1762) ハリイに次で第三代のグリニチ天文臺長となつたのがブラドリイであ

つた。彼は光行差及び章動の発見者として有名である。此二現象は極めて精巧な観測と、巧妙なる推理とを必要とするもので、彼の名を不朽ならしめた偉大なる貢献であつた。

1714年オクスフォード大學を卒業し、1718年王立學士院の一員に推薦せられ、1721年オクスフォード大學教授となり、1742年より死ぬまでグリニチ天文臺長であつた。グリニチに移るまでは、主に故郷のエセクス州ワンステッドで観測してゐた。

彼の光行差の発見は、地球の公轉の結果として起るべき、恆星の年週視差を発見する目的で観測の途中で偶然起つたことである。彼は視差発見には失敗したが、最初豫期しなかつた二大発見を成就したのである。

ブラドリイの問題は、任意の恆星が1年の間に、他の恆星に對し、又は天球上の一定點(北極の如き)に對して、微小なる相對運動をなすか、どうかを測定することであつた。地球は其軌道楕圓を1年に一廻轉するから、其上の観測者から或恆星を見れば、地球の廻轉と反對の方向に小楕圓を1年に畫く様に見える筈である。これが視差楕圓と呼ばるるものである。恆星の距離は遠いから、視差楕圓は非常に小であるに違ひない。それで其発見には精巧な装置と、十分の観測上の注意が必要である。ブラドリイは友人モリノウ(Samuel Molyneux, 1689-1728)と協力して此仕事に従事した。其方法は前にフウクが同じ目的の爲に考へたものであつた。即ち、望遠鏡を殆んど鉛直の位置に固定して、龍星座 γ 星が子午線經過をなす時に、見ゆる様に装置し、年中位置が變らない様に注意して据付けたのである。それで此

恆星の位置が多少なりとも、南北の方向に變化すれば、望遠鏡の視野内の位置が變化することになる。

最初の観測は1725年12月14日に始められたが、同月28日には、恆星が少し南方に移動したらしいと、ブラドリイは思つた。此移動は1月1日には明瞭となり、3月まで繼續して最南端に達し、其後は再び北進し、9月に最北端に達し、再び南進を初め、12月に原位置に復した。其移動の幅は約 $40'$ に達した。かくして此恆星が一種の年週運動をなすことが発見されたのである。

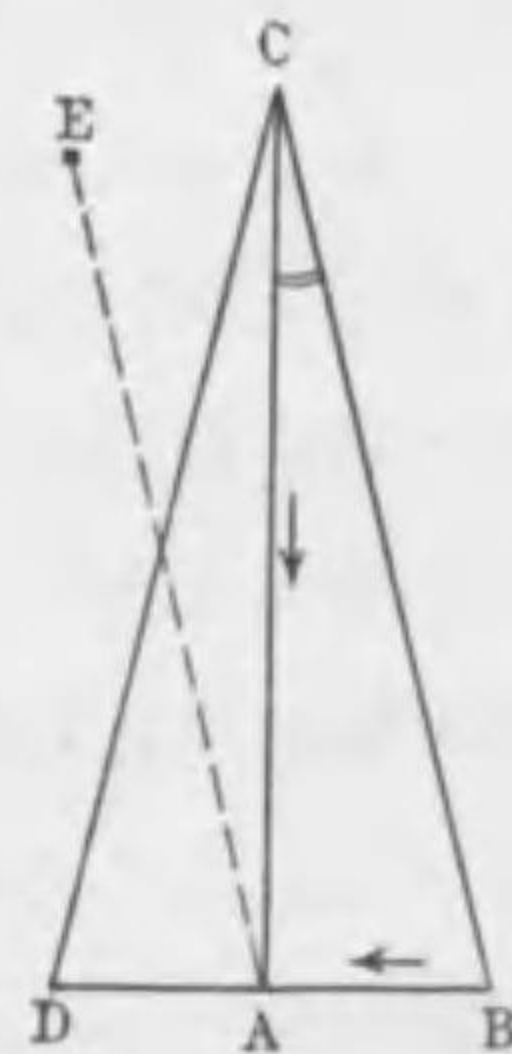
けれども此運動は、ブラドリイが求めた恆星の視差運動ではないことは直ちに判つた。如何となれば、視差運動ならば、12月に最南端に、6月に最北端に達することは、地球の運動の状態から直ちに導かるることである。けれども観測の結果は豫定より3箇月づつ後れてゐる。それで他の種類の運動でなければならぬ。最初彼は地軸が前後に振動する運動即ち章動(Nutation)の爲に起るのではなからうかと考へた。若し、さうとすれば、地軸の反對の側の星は逆の運動をなすべきである。彼は其爲に、麒麟星座37といふ一小星を選んで観測したが、其結果は豫期に反して、殆んど前者と同様な運動をなすことを発見した。他の數星の観測も同様な結果を得た。

25. 光行差の発見 ブラドリイの発見した恆星の年週運動は光行差(Aberration of light)であるが、彼が其説明を案出したのは1728年9月であつた。ここに彼自身の語を引用してみよう。“私は最後に上述の總ての現象は、光の前進運動と地球

の軌道上に於ける年週運動との結果だらうと推察した。光の傳播に時間を要するとすれば、或固定せる物體の見掛けの位置は、吾々の眼が靜止してゐる時と、其物體の視線以外の方向に眼が運動してゐる時とは違はなければならないと思つた。又眼が異なる方向に運動すれば、物體の見掛けの位置も異なるべき譯であらう。

“私は此事實を下の様考へた。CAをBD線に垂直に投射する光線とする。若し眼がAにあつて靜止するものとすれば、光の速度如何に係らず、物體はACの方向に見ゆべき筈である。然し、眼がBAの方向に運動しつつあるものとし、且つ光が一定の速度を有し、眼の速度と光の速度との比がBAとCAとの比に等しいとすれば、光がCからAまで動く間に、眼はBからAに動くのであるから、Aに於て見ゆる光は、眼がBにある時にはCにあつたのである。BCを連結し、それを光粒子(其頃、光の波動説は行はれなかつた)が漸く通過することの出来る圓筒と考へよ。この圓筒はBAと $\angle ABC$ 角だけ傾いてゐる。此筒が其方向を維持しつつ、眼と共に動くと考ふれば、丁度圓筒とCAと交る所に常にCを發した光があることになるから、圓筒の後端がAに達した時に、光が眼に入ることになる。其時圓筒はBDと $\angle ABC$ に等しき傾斜をなしてゐるのである”(即ちAEの方向を取る)。

“それで物體の實際の位置は眼が運動する線に垂直の方向



にあるけれども、見掛け上の位置は圓筒の方向によつて定まるから勿論垂直ではない。實際の位置と見掛けの位置との差は、光の速度と(それに垂直な眼の速度との割合が異なるに従つて大小があるだらう”。

圖に於て $\angle ACB = \theta$ とすれば、これが光行差の角である。

CA = c (光の速度),

BA = v (地球の軌道速度) とすれば,

$$\tan \theta = \frac{v}{c}$$

$\theta = 20''.47$ (光行差恆數, Aberration constant).

ブラドリイは此値を $20''$ 乃至 $20''.5$ と測定した。

地球の運動の方向が、光の方向と垂直でなければ此角は小となり、平行すれば零となる。一の恆星は1年に二回は必ず地球の運動の方向に垂直に光を送るから、其時の光行差は上の恆數となるのである。つまり光行差楕圓の長軸の長さが θ に相當する。

光行差によつて、ブラドリイは光の速度の計算をなし、地球と太陽との間を光が8分13秒で通過する、といふ結果を得た。レエメルは光速度の計算では、8分11秒であつたので、其結果を確かむることになつた(現今の測定では8分19秒である)。ブラドリイはニウトンの光粒子説で光行差を説明したが、波動説でも結果に變りはない。

彼の本來の目的は、恆星の視差の發見であつたから、龍座 γ 星の觀測位置から、光行差による變位を除いて見ると、 $2''$ 以内の視差と認めらるべき値を得たが、實際は $\frac{1''}{2}$ 位だらうと推察し

た。けれども、彼は其値を精確に決定することは出来なかつた。其當時の器械の精密度では1"以下の角の決定は不可能であつたのである。けれども、地球の公轉を證明する爲には、光行差は視差と同様な效力があるから、地球の運動は完全に證據立てられたことになる。

26. 章動の發見 次にブラドリイは、恆星の精細なる觀測から、原因不明の赤緯の變化を認めた。それは2"位のものであるが、各星に共通なもので、視差ではないことが判つた。

光行差による恆星の位置の變化は、1年の後には精密に原位置に歸るべきものである。恆星が其時、原位置より少し離れてゐるとすれば、それは別の原因に歸しなければならぬ。其一因は地軸の方向の徐々の變化に起因する歳差であるが、ブラドリイは、歳差の影響を除いた後に尙僅少の位置の變化を認めた。彼は此變化を、地軸が前後に動揺する結果として起るものではなからうかと考へた。

赤道と黄道との傾斜は殆んど不變であるから、太陽の地球に及ぼす歳差力は常に相等しい。けれども月の軌道面は黄道面と約5°の傾斜があるが、月が地球の赤道隆起帯に及ぼす引力の方向は時によつて異なる。それで歳差の値を一定とする時は、多少の差異が起る。ブラドリイは此差異を發見したのであらうと考へた。

斯の如き位置の動揺は、章動 (Nutation) と名づけられる。ブラドリイは此作用を確定する爲に、恆星の位置の變化と、月の位置の變化とを對比し初めた。月の地球の赤道部に對する位置

を決定するものは、月の軌道と黄道との交點即ち交軌點の位置である。此交軌點は約19年の週期を以て黄道を一周する。それで彼は19年間、或恆星の位置を連續觀測し、其結果と月の位置と比較しようとした。

彼は1727年35歳の時からワンステッドに於て觀測を始めた。9年の後、計算して見ると、結果は豫想とよく一致したので、佛國の友人モウベルツア (Maupertuis) に私信として報告した。ブラドリイは19年の觀測を終り、彼の證明が完成した後に漸く其結果を公表した (1748)。それによると、章動は約19年の週期で、天球の極が小楕圓を畫く結果で、其兩軸の長さは、18"及び16"であるとした。これが地軸動揺の範圍で、現今の値は18"・42と13"・75となつてゐる。つまり地軸の運動は歳差と章動との結合である。

章動の理論的數學的證明は、ブラドリイの成し得なかつたものであるが、1749年佛國のグランベル (D'Alembert) は歳差及び章動に關する詳細なる理論的研究をなし、ブラドリイの觀測と、よく符合することを示した。

次にブラドリイは木星の衛星の食を觀測し、從來の表の缺陷を發見した。又木星の内側の三衛星が437日の週期で、同様な不規則運動をなすことを發見した。この現象は瑞典のワアゲンチン (Pehr Vilhelm Wargentin, 1717-1783) も、少し前に、獨立に發見した。1726年ブラドリイは、木星の衛星の食を利用して、リスボン及びニウヨウクの經度を精細に決定した。

最後に、ブラドリイの不朽の功績の一は、彼がグリニチ天文臺

長として在職中の、多数の恆星の精密なる位置の観測である。1749年までの分は、器械が完全でなかつたので、少し價値が劣るが、其年政府の費用で精密な器械が出来たので、其後の観測は著しく精密になつた。

彼は恆星及び惑星の子午線經過の観測のみを主なる事業とした。器械は壁象限(Mural quadrant)と子午儀(Transit instrument)で、子午面にのみ運動し得る安定精密な装置であつた。1750年から1762年に互る、重要な観測数は六萬に達した。其結果は、彼の死後1798年及び1805年に2巻に別けて出版された。既に1773年の英國航海曆には、其中の小恆星表の基礎として、彼の結果を採用したが、廣く學界に使用せらるる様になつたのは、1818年にベッセル(Bessel)が、ブラドリイの観測に基いて三千餘の恆星表“天文學基礎”を發行してからのことである。

望遠鏡で観測した恆星の位置から眞の位置を發見するには幾多の修正(Reduction)を要する。例へば、種々の器械的誤差、濃氣差、歳差、光行差及び章動等の影響を除却しなければならぬ。斯の如き修正は面倒だから、ブラドリイの死後、誰も手を付けなかつたのを、獨逸のベッセルが熱心に修正して、ブラドリイの観測に永久的價値を與へたのである。

27. 地球の密度及び形狀 第五代目のグリニチ天文臺長マスケリン(Nevil Maskelyne, 1732-1811)は、地球の密度測定に努力したので有名である。ニュートンの引力の法則によつて、地球の質量と他の惑星の質量との比は計算されたが、地球の質量の實際の値を出すのは全く別の問題である。ニュートンは表

面の岩石の密度と、地球内部の密度増加の割合から類推して、地球の平均密度は水の5倍と6倍との間だらうと洞察した。

斯の如き想像でなく、質量既知の物體と地球との引力の比較から、地球の質量を計算しようといふ企が起つた。佛國のブウグエ(Bouguer)及びラコンダマン(Lacondamine)が、ペルウに遠征した時に、チムボラゾウ山の麓で鉛直線が少し山の方に傾いたのを認めたが、其値は不明確であつた。マスケリンは、バラス州のシェハリエン山を、其目的の爲に選んだ。これは東西に互る狭い山脈である。1774年、山脈の兩側の鉛直線の方向の差を測つて約12"の値を得た。これは山の引力によるものである。ハトン(Charles Hutton, 1737-1823)は山の平均密度を計算して、複雑なる勘定の結果、地球の密度は水の4.5倍といふ結果を得た。

數年後ミセル(John Michell, 1724-1793)の暗示により、キャベンディッシュ(Henry Cavendish, 1731-1810)が1798年に有名な實驗を試みた。これは山の代りに大きな鉛球を用ゐて、それと地球の引力を比較したもので、地球の密度として、水の $5\frac{1}{2}$ 倍といふ値を得た。此實驗は多くの學者によつて繰返され、方法も精巧になつたが、結果は平均して5.52となつた。

パリ天文臺はカシニ及び其後繼者が、引力の法則や光の速度等を信じなかつたので、著しく大勢に後れてしまつた。又カシニは地球の形狀は赤道部が扁平で、極が尖つてゐるといふ、ニュートンと反對の意見を持つてゐた。ニュートンに従へば、緯度1°の幅は、赤道部に於て狭く、極に近づくと従つて廣くならなければ

ならない(緯度の差は、兩地の鉛直線間の角で、天體によつてのみ測られる)。カン=説では其反對となるべきである。

佛國學士院は各地の緯度の幅を決定する目的で、南米ベルウにブウグエ (Pierre Bouguer, 1698-1758)、ラコンダマン (Charles Marie de La Condamine, 1701-1774)、ゴウダン (Louis Godin, 1704-1760) の三氏を派遣した。この事業は1735年から約10年を要した。先づベルウに於て緯度 3° の弧の長さを精密に測定し、其他重力測定もやつた。これと同時にモウベルチュイ (Maupertuis, 1698-1759) は、北米ラブランドに出張して、極圏内の緯度 1° の弧を測つた。

これ等の結果を比較すると、緯度 1° に相當する弧の長さは、下の様になつた。この結果、=ウトン説の正しいことが判つた。

南緯 2° (ベルウ)	362800 呎,
北緯 47° (フランス)	364900 呎,
北緯 66° (ラブランド)	367100 呎.

28. ラセエユ (Nicholas Louis de Lacaille, 1713-1762)

其頃フランスに於ける唯一の大観測者はラセエユであつた。パリ天文臺の助手として、1738年佛國の緯度測定に従事し、1739年マザリン大學教授となり、同所の天文臺で間斷なき観測を續けた。1750年から1754年まで、佛國科學協會の観測隊を率ひて、南阿喜望峯に赴き、南天の組織的研究を試み、一萬餘の恆星を観測した。彼は其内二千の恆星の位置を修正して恆星表を作り、星圖と同時に1763年に出版した。ハリイの南天の星表は不完全であつたが、茲に始めて精確なものが出来た。

ラセエユは南天に於て、恆星の外に、42の星雲、星雲狀の恆星及び星團等を観測し記述した。又振子による重力測定を試みた。彼は又火星と金星の位置を精密に観測して、歐洲の同時の観測と比較して、視差を計算する資料とした。此結果とブラドリイ等の観測と比較して、太陽視差を計算した所、 $10''$ といふ値を得た(實際は $8''.8$ である)。彼は又地球の赤道隆起を考に入れて月の距離を計算した。

1757年に、彼は400箇の輝恆星の表を出版した。これはブラドリイの星表以外には比類なき精確なものであつた。又黄道附近の500餘の恆星を含む、他の星表は彼の死後出版された。1758年に、彼の數多の観測に基づく、太陽系表が出版された。此表は惑星の攝動が計算された最初のものであるので、有名となつた。其外西紀元年以後、歐洲にて見得べき總ての日月食の計算をなした事など、多くの結果を残したが、これ等の仕事を彼は助手を用ゐず、生活の資を得る傍でやつたので、稀に見る勉強家であつた。

29. 月の研究と金星經過 この頃ドイツにマイヤア (Tobias Mayer, 1723-1762) が出た。ゲッティンゲン大學の數學教授として其天文臺を管理し、先づ観測器械の誤差の研究を完成した。次にラセエユの太陽表を改正し、998箇の黄道附近の恆星表を作り、先人の観測と比較して、多くの恆星の固有運動を検出した。彼は月の表面を研究して、噴火口其他の精確なる位置を定め、秤動の幾何學的説明を完成し、月の自轉軸の位置を確定し、精確な月圖を作つた。之等は彼の死後1775年に出版された。

更に重要な彼の研究は、月の運行理論と、それに基づく計算表であつた。此問題の數學的興味と、經度決定の爲の實用的効果は、18世紀の多くの天文學者の注意を惹いたものであつた。1713年に英國政府は、月の觀測から海洋上で半度以上の精確度を以て經度を發見する方法の發明者に對して、二萬磅の懸賞を發表したので、此問題は更に大なる刺激を與へた。總ての大數學者は引力説より出發して、理論的に月の運行を説明しようとした。マイヤアは純粹の理論的計算だけでは、此問題の解決は不可能と考へたので、理論と觀測の結果とを巧に調和して、實際的の運行論と計算表を作り1753年に出版した。それを改良して1755年英國に送つた。ブラドリイは此論文を審査して價値を認め、彼の觀測の結果に基いて、少しく訂正を加へて、半度以上の精確度を以て經度を決定し得る方法なり、と評價した。マイヤアは更に數箇の新計算表を作つた後、39歳で死んだので、賞金三千磅は彼の未亡人に送られた。彼の論文及び表は1770年及び1787年に英國の經度局から出版された。

オイレル (Euler) は月の運行理論の研究で、三千磅の懸賞を受け、ハリスン (John Harrison) は天文時計 (Chronometer) の改良によつて經度決定の新法を發見して一萬磅の賞を獲た。

18世紀の天文學者に取つては、二回の金星經過によつて太陽の距離を決定する重要事件があつた。金星の太陽面經過は月による日食と同性質のものであるが、金星の角直徑が小であるので、太陽面を小黑點が通過する様に見えるものである。金星の軌道は黃道と傾斜があるので、内合の時に常に金星經過の現

象は起らない。只金星が軌道の交軌點附近にある時、8年を隔てて二回づつ對をなして起る。一對の經過の後には、次の對の起るまでに、 $105\frac{1}{2}$ 年と $121\frac{1}{2}$ 年との二つの週期が交互に起る。最近の年代を挙げると、1631と1639、1761と1769、1874と1882、で、將來は2004と2012、2117と2125年に起る。

金星經過によつて太陽の距離を發見する方法は、要するに地球の各地から此現象を觀測して、その經過の最初と最後の時刻と其間の時間とを比較して、金星の視差を算定し、それから太陽の視差を計算する方法である。その頃は小角の測定が完全でなかつたので、時間觀測によつて、それに換へようといふ目的だつたのである。

1761年には、歐洲の總ての天文臺で觀測した外に觀測隊はトボルク、セントヘレナ、喜望峯、印度等に送られた。1769年には更に大規模となり、カリフォルニア、ハドソン灣及び南洋にも觀測隊が派遣された。米國とロシア(カザリン女帝時代)が天文學界に貢獻を初めたのは此時からであつた。

所が結果は餘りよくなかつた。それは、經過の始終の時間觀測が精密に出來ない爲であつた。金星には大氣があるので、太陽面と金星面の接觸は極めて曖昧で、觀測者によつて著しく判斷が異なつたのである。1761年の觀測より得た太陽視差は $8''$ から $10''$ までの範圍であり1769年の結果は少しよくなつて、 $8''$ 乃至 $9''$ となつた。エンケ (Johann Franz Encke, 1791-1865) は1835年に、以上の全部を綜合して、精密に計算し、 $8''.571$ なる太陽視差を出した。また他の學者は1769年の觀測から、 $8''.8$ 及び

8'9の値を出した。

第18世紀末の大観測者としては、キリアム・ハアシェルがあるが、その事蹟は後章に述べることにしよう。

第九章 第18世紀の引力天文学

30. 三體問題 第18世紀の初めには、太陽系には18箇の天體が知られてゐた。太陽、六惑星、十衛星(月、木星に4、土星に5)及び土星の環である。彗星は時々太陽系内に來ることは判つてゐたが、永久的成員とは考へられなかつた。又彗星の太陽系の各星に及ぼす引力的影響は全く考へられなかつた。數千の恆星の天球上の位置は十分に観測されたが、それ等の太陽系の各星に対する影響は距離が巨大であるので無視してよいと考へられた。

太陽系の18星の運動、相互距離、形状等は比較的好く判つてゐた。土星の環を除いては、他は殆んど球形だと信ぜられた。これ等の運動を支配する力は萬有引力以外にはない。そこで、下のような、所謂“ニュートンの問題”が生ずる。

“これ等の18天體の或時刻に於ける位置及び運動を與へて、萬有引力の法則による數學的計算によつて、任意の他の時刻に於ける、それ等の位置及び運動を算出し、實際の観測と一致せしむる問題”である。

此問題を解く爲には、各星の質量が必要であるが、それは最初假定して、それによつて得た結果を観測と比較して、質量の値を

確定することも出来る。又球狀體の引力は、中心に全質量が集まつたと同様だから、各星は殆んど一點と考へられる。只歳差などの場合に楕圓體が問題となる位のものである。それから太陽系の各星の軌道は殆んど圓であり、その軌道面は殆んど同平面であるから、問題は少し簡單になる。其上太陽系の各星は大抵或天體の周りに楕圓に近い軌道を畫いてゐるので、他の星の影響は比較的少ない。例へば地球の運動は殆んど太陽のみにより、月は殆んど地球のみによる。この場合は、二體問題でケプレルの法則によつて解決が出来る。

然るに、月の運行は太陽の影響を受け、木星の運行は土星の影響も著しいので、三體問題 (Problem of three bodies) が起る(この問題に就ては別冊に松隈氏の解説がある)。此問題は一般的には今でも解決することは出来ないが、其中の一體の影響が小である普通の場合には漸近法によつて非常に精密に解くことが出来る。此問題中、最重要なのは、月の運行論 (Lunar theory) と惑星運行論 (Planetary theory) である。

此問題はニュートンが一通り研究の基礎を作つたが、大陸では最初此問題の研究は盛んでなかつた。然るに其後五大數學者オイレル、クレロウ、ダランベル、ラグランジュ、ラプラスが輩出して引力天文学は大發展を遂げた。オイレルはスイス人であるが他は皆フランスの學者で、最近まで此方面はフランスが本場となつたのである。

31. オイレル、クレロウ及びダランベル オイレル (Leonhard Euler, 1707-1783) は幼にしてベルヌウイより數學

を學び、1727年ロシアの科學協會に招聘されて其首府に赴き、1741年フレデリキ大王に招かれてベルリンに來り、更に1766年カタリナ女王の招きによつて露國に赴き、遂に其地で死んだ。彼は數學上に偉大なる功績を残したが、天文學に就ては、潮汐論と三體問題特に月運行論の研究に貢獻した。

クレロウ (Alexis Claude Clairaut, 1713-1765) はパリに生れた。10歳にして微積分を解し、13歳で數學の論文を書いたといふ天才であつた。彼は、モウベルツアに従つて、ラブランドに遠征した後、1743年に地球の形狀に關する有名な研究を發表した。これは各地の重力測定の結果とよく一致する研究で、後代の此種の問題の基礎を供したものである。次に彼は三體問題に深く觸れた。

ハリイ彗星は1758年頃復歸することになつてゐた。クレロウは、彗星に及ぼす惑星の攝動を計算して、其出現の時期が土星の爲に100日、木星の爲に518日遅延すべきを確かめ、1759年4月13日頃近日點を通過するだらうと豫言した。ハリイ彗星の出現は1758年12月25日、ザクセンのパリッツ (George Palitzsch, 1723-1788) によつて發見され、クレロウの豫言よりも1月と1日早く近日點に達した。ハリイの豫想は確かめられ、太陽系は新しく一星を加へた。

グランベル (Jean-le-Rond D'Alembert, 1717-1783) はパリに生れた。1743年、力學に關する名著を出し、又數學、物理學の方面の研究を多く出したが、天文學に關しては三體問題及び歳差と章動の研究をなし、1749年に出版した。彼とクレロウとは、よい

對手で相互の研究を批評、論難したことが多かつた。

オイレル、クレロウ及びグランベルは、皆獨立に月の運行論に適する三體問題を解決した。オイレルは1746年に、少し不完全な月の運行表を出版した。クレロウとグランベルは1747年に各々、月及び惑星問題を含む論文を佛國學士院に提出した。これ等の結果と、月の近地點の實際の運動とは差があるので、クレロウは、逆二乗の法則に缺陷があるのではなからうかと疑ひ、逆三乗の項を附加して考へたこともあつたが、後に計算の方法の過誤に氣が付いて訂正した結果、かなり實際と合ふ様になつた。クレロウの新計算は露國セントピイタアスバアグ學士院の懸賞を獲、1752年出版された。

グランベルの月運行論は、1747年の小論文に次いで1751年に完成され、1754年に出版された。1756年に改正計算表を出版し、1762年に更に増補計算表を出した。オイレルの月論は1753年に出版され、更に缺點を訂正して1772年に計算表と共に出版された。三氏の月論は、非常に精密に月の運行を説明したが、只全く失敗したのは、月の長週期加速度の説明であつた。

惑星運動に於て、=ウトン以來の未解決の問題は、地球の軌道の長軸端の前進運動と、黃道の傾斜の徐々の減少であつた。又ハリイの發見した、木星と土星の運行の不規則性もあつた。これ等の問題は、惑星間の攝動の結果であることは、=ウトンが概説したが、數學的證明は三氏にも十分ではなかつた。クレロウは金星の月に及ぼす攝動を研究して、月の質量は地球の $\frac{1}{67}$ 、金星の質量は地球の $\frac{2}{3}$ といふ結果を得た。

クレロウの祖述者にラランド (François Lalande, 1732-1807) がある。彼は数学者及び観測者であると同時に、天文学の普及者として名著を残した人である。

オイレルは1747年から引続き発表した論文で惑星運動の理論を進展せしめた。彼は木星と土星の運行の不規則性の説明には成功しなかつた。けれども地球に及ぼす他の惑星の攝動を研究して、それが地球の軌道の長軸端を年々 $13''$ づつ進ましむること、黄道の傾斜を年々 $48''$ づつ少なくすることを證した。これは観測及び其後の理論と一致した。

オイレルは1756年に學士院賞を得、1771年に出版した論文の中に、詳細に攝動を取扱ふ方法を述べた。此方法は軌道要素の變化法 (Variation of the elements) と呼ばれ、其後の研究の基礎となつた。攝動がなければ惑星の軌道は太陽を焦點とする楕圓である。其形及び大きさは、(1)長軸の長さ、(2)離心率で定まる。楕圓の平面の位置は、其平面と黄道面との交線、即ち (3) 交軌線 (Line of nodes) の位置と、(4) 二平面の傾角で定まる。最後に (5) 長軸の方向が定めれば、楕圓は固定する。次に (6) 惑星の或時刻に於ける軌道上の位置が定めれば運動は完全に決定される。以上の6箇の量を軌道要素と名づける。攝動の爲に、この六要素の一部又は全部は徐々の變化を受くるので、それを分析して計算することが出来れば、要素は何時でも決定されるのである。これは非常に複雑であるので、オイレルは完全に解決することが出来なかつた。

32. ラグランジュとラブラアス ラグランジュ (Joseph

Louis Lagrange, 1736-1813) は伊太利のチュリンに生れた。幼より数学の天才を現はし、1759年の論文によつてオイレルに認められて、ベルリン學士院會員に推薦された。1764年月の秤動に関する論文で、パリ學士院賞を得た。1766年フレデリキ二世は、オイレルの跡を襲うて、ベルリン學士院の數學部長に彼を招聘したので、其後21年間同地に留まつた。其間に種々の研究がある。フレデリキ王の死により、1787年ルイ十六世の招聘によつて、パリ學士院に來た。其後、革命中も無事に諸大學の教授として生活し、1813年パリで死んだ。彼の大著“解析力学”は1788年パリで出版され、その續編は彼の死後發行された。

ラブラアス (Pierre Simon Laplace, 1749-1827) は、佛國ノルマンディの農夫の子である。18歳の時、パリにグランベルを訪うて、其數學的天才を認められてから、彼の研究的生涯は始まつた。彼の天文学に関する研究は大部分、彼の大著“天體力学” (*Mécanique céleste*) 5巻の中に含まれ、1799年から1825年にかけて出版された。此著はニュートン以來の引力天文学の發達の總括をなす計畫であつた。此外に、彼には“宇宙系統概説” (*Exposition du système du monde*) といふ數學拔きの面白い天文学通俗書がある。其外は數學専門の著だけである。

パリに於て、彼は最初度量衡委員となり、次で經度局員となり、師範學校の教授を兼ねた。ナポレオンが第一執政官となつた時、所謂學者内閣の内務大臣に任命されたが (1799)、6週間で退職せしめられ、上院議員に任命された。1802年に出版した天體力学はナポレオンに捧げられた。ナポレオンが皇帝となつた

時、伯爵を授けられ、1814年ブルボンの復位の時、ナポレオンの麾下に馳せて、侯爵となつた。1816年にダランベルと共に、フランス學士院の40人の終身會員の一人に選ばれた。其間彼の數學及び天文學の研究は死ぬまで(1827)絶えなかつた。

ラブラアスの大発見の一は、月の平均運動の長週期加速度の説明である。彼も先人と同様に、種々の假説を立てて數回失敗したが、1787年漸く満足な考に達した。彼は地球の軌道の離心率が數世紀に互つて漸次減少しつつあることに注意した。其結果として、月に及ぼす他星の攝動作用に變化が起るべき筈である。其効果は非常に微小であるから、長い年月の後に漸く明らかになるだらう。彼の計算によると、1世紀即ち月の1300廻轉の間に $10''.2$ だけ進むことになる。これは1月の長さが、1世紀に $\frac{1}{30}$ 秒だけ短くなることになる。尙、彼は地球の軌道の離心率は無限に減少するものでなく、數千年の後には、再び増加を始め、月の運動も亦後れる様になることを説明した。ラブラアスの結果は、觀測と殆んど精確に一致したので、從來の太陽系の運行の疑問は殆んど解決された。

“天體力學”の第3巻は、先人と全く異なる精密な方法を用いた月の運行論で、萬有引力のみより演繹して、一切の月の運行の特性を説明したものである。ビュルグ(Bürg)及びバアクハア(F. Burekhardt)は、此理論から月の運行表を計算した。

月及び惑星の運行の不規則は、他の惑星の攝動の結果であるがそれに二種ある。週期的(Periodic)と連續的(Secular)とである。前者は相對的運行の週期小なる惑星の攝動で、後者は極め

て其週期の大なる惑星の及ぼすものである。木星と土星の場合には、此週期が長いので、相互の攝動は約900年の長週期變動(Long inequality)を生ずることを、1784年にラブラアスは證明することが出来た。これは週期的と連續的との中間に位するものである。

これ等の問題に就てラグランジュとラブラアスは常に協力して研究した。1766年にラグランジュは惑星の軌道要素變化の理論を發表した。1774年に、彼は以上の要素變化の範圍を決定する論文を出した。其後1784年までラグランジュとラブラアスは數回此問題の研究を發表したが、最後にラブラアスは、離心率と軌道傾斜に關する有名なる關係を確定した。それは下の様なものである。

“各惑星の質量と軌道の長軸の平方根と離心率の二乗との積を作れば、總ての惑星に就て其積の總和は、週期的變動を除けば、不變である”。

離心率の代りに軌道の傾斜を入るれば、第二の關係が成立するのである。つまり二人の天文學者の得た結果は、惑星の軌道の軸、離心率及び傾斜の變化は皆永久に或一定の範圍に制限されることを確立したのである。即ち太陽系の安定性が確定したことになる。地球に就て考ふると、軌道の軸等の變化は太陽との距離の變化を起すので、若し變化が大となれば、氣候の變動が大となり生活を脅かすこととなるが、此理論から其心配はなくなるのである。けれども、此理論は數學的推理の結果として、微小なる量を省略した過程を含むものであるから、今後數萬年

の後には未知の原因によつて、太陽系の安定が破壊せられないとも限らない。

ラブラアスの結論によると、各惑星の長軸は同方向に廻轉する。その最も速い運動は、土星の場合に起るが、それでも1年に15", 1世紀に半度に達しない。つまり一廻轉して元の位置に復るに八萬年を要する。交軌點の運動は一般に少し速い。軌道の傾斜の年變化は1秒に達するものはない。土星の軌道の離心率の變化は最大であるが、それでも4世紀續いて $\frac{1}{1000}$ にしかない。

ラグランジュの方法により、ラブラアスは精細に再算して、種々の太陽系の小問題を論じた。木星の衛星の運行の不規則も十分解決された。土星の環が固體であり得ない事も證せられた。歳差と章動はダランベルの計算よりも更に完全になつた。潮汐論も改造されたが、まだ實測と一致しない點があつた。攝動論は彗星にも精確に應用された。1770年に出現したレクセル彗星 (Lexell's comet) は、1767年に木星に接近し、其引力の爲に全く軌道を変化せしめられたが、反對に木星及び其衛星の軌道を少しも動かす事が出来なかつた。これで、木星の攝動作用と彗星の質量が甚だ小であることが判つた。攝動作用から、質量を計算することも出来た。火星、金星、木星の衛星の質量等も計算された。水星の質量だけは、ラブラアスの死後、1842年に漸く彗星の攝動から計算された。

33. 星雲説 (Nebular Hypothesis) ラブラアスは星雲説の發明者として最もよく知られてゐる。この説は1796年に出

版された。“宇宙系統概説”に述べられてゐる。ドイツのカント (Immanuel Kant) は1755年に同様な、太陽系の星雲起原説を空想的に述べてゐるが、ラブラアスは其事を全く知らなかつたのである。

ラブラアスは太陽系の諸星に著しい共通性があることを考へた。1781年にハアシェルが天王星を發見したので、惑星の數は7となつたが、それ等は皆北から見て時計の針と反對の方向に廻轉する。14の衛星も其主星を同じ方向に廻轉する。それから、太陽も惑星も同じ方向に自轉する。つまり30以上の廻轉が皆同方向である。これは偶然とは思へない。又各星の軌道の平面は殆んど一致して、僅少の傾斜あるのみである。軌道の離心率も小で、軌道は皆圓に近い。

然るに彗星は全く以上の共通性を現はさない。又惑星及び衛星と彗星との中間に位する様な星もない。ラブラアスは彗星を除く太陽系の各星の間に存する此共通性から、これ等が共通の起原を有するものでなければならぬと論じた。彼は最初太陽系の起原として二つの假説を考へた。一は、現在の太陽系の範圍全體に擴がれる茫大なる大氣を有する太陽から起つたといふ考である。一は、最初一様に廣い範圍に分布された流體の一團塊があつて、漸次中心に凝結せる核を生じ現在の太陽系に進んだといふ考である。

ハアシェルの觀測によつて、數百の星雲が存在することが其頃判つて來た。其中には全く雲の如く擴布せるものや、中心に核を有するものや、色々の構造がある。これが太陽系發達の各

段階に相當するものだらうと考へられた。つまり、ラブラアスの假説は、太陽系は一の星雲の凝結によつて形成されたといふのである。同様な説明は、惑星を有する他の恆星の起原にも應用されるだらう。

ラブラアスは斯の如き星雲が廻轉運動を起しつゝ、凝縮すれば、先づ數箇の環に分離し、その環が凝結して惑星及び衛星を作り、中心體が太陽を形成すると考へた。彼は此説は觀測又は計算の結果でないから、信用すべき限りでなく、單に想像に過ぎないと述べてゐる。

第十章 ハアシェル

34. **キリアム・ハアシェル (Frederick William Herschel, 1738-1822)** ハアシェルはハノウバアに生れた。父は軍樂手で、彼も父の職を襲いだ。1757年英蘭に渡り、音樂家として相當に成功した。其間に數學、光學、天文學等に興味を感じ、先づ小さな反射望遠鏡を借りた。それから大きな望遠鏡を買はうと思つたが、高價で手が出せないで、自分で製作しようと思ひ立つたのが1773年である。弟のアレキサンダア、妹のカロリン (Caroline, 1750-1848) が、これを助けた。カロリンは1772年英國に來り、一生獨身で彼の事業を助けたので有名である。望遠鏡の鏡磨きは中々忍耐を要する仕事で、ハアシェルは16時間も休まず續けたことすらあつた。

幾多の失敗の後、相當な反射望遠鏡が出来上つたので、1774

年3月、オリオン大星雲の觀測をやつたのが彼の最初の記録である。其後更に大きな精巧な望遠鏡を製作した。彼は音樂で衣食しつゝ、彼の望遠鏡を以て、天空にある天體を一つ残らず、調査しようと決心し、1775年から其實行に着手した。

彼が7呎の長さのニウトン式反射望遠鏡で觀測の最中、1781年3月13日に、意外の大發見をなした。この發見が、全歐洲に彼の名を轟かし、彼をして音樂家を止めて、専門の天文學者として立たしむる様になつた。其夜彼は双子座の附近を觀測しつゝあつたが、そこに見慣れない大きな星を發見し、其外觀より彼は先づ彗星を發見したと考へた。其後の觀測によると、その軌道は彗星とは異なることが漸次明らかになつた。レクセル (Anders Johann Lexell, 1740-1784) は詳細に其軌道を計算して、土星の外側にある一惑星であることを確かめた。これが天王星であつたのである。

歴史時代に於ける惑星の發見は、これが最初であるので、彼の功績は空前であつた。ハアシェルは新惑星に、英王ジョージの名を冠しようと思つたけれども大陸の學者が承知せず、又ハアシェルと命名しようといふ案も廢棄され、他の惑星と同様に神名を取つて Uranus と呼ばれることになつた。

ハアシェルは一舉に有名になつた。當時のグリニチ天文臺長マスケリンを始め、多くの名士の來訪を受け、王立學士院の會員に推舉され、且其賞牌を受けた。次の年には國王ジョージ三世に召されて、彼の望遠鏡で天王星を觀覽に供した。其時國王より欽定天文學者として200磅の年俸を受くることになり、音

樂家をやめた。

ハアシェルの年俸は、彼と妹との生活費には十分であつたが、研究費は足りなかつた。所が彼の望遠鏡製作の技術は著しく進歩し、全く獨特の點があつて當代に並ぶものがなかつたので、望遠鏡の注文が甚だ多くなり、其爲に多くの収入を得ることが出来る様になつた。彼は王宮や英國の天文臺ばかりでなく、外國にも其望遠鏡を輸出した。1788年彼の51歳の時、財産家の夫人との結婚により、彼の無益の勞働は終つた。

1783年の終に、ハアシェルは直徑18呎の鏡を有する、長さ20呎の反射望遠鏡を完成した。1785年から1789年までに更に、鏡の直徑4呎、長さ40呎の望遠鏡を造つた。20呎の望遠鏡で、1787年1月11日に、天王星の二衛星オベロン (Oberon) 及びチタニア (Titania) を發見した。40呎の望遠鏡の最初の使用の夜、1789年8月28日に、土星の第六衛星エンセラダス (Enceladus) を發見し、同年9月17日に、第七衛星ミマス (Mimas) を發見した。この二衛星は從來の五衛星よりも、土星の本體に近く、ミマスは最近の衛星である。この大望遠鏡の鏡は漸次曇つて來たが、ハアシェルは磨き直すだけの元氣がなかつたので、1811年以後は其使用を止めた。

ハアシェルは連年毎夜觀測を續けたが、常に妹カロリンの助けの下になされた。彼女は助手として各種の計算をなせるのみならず、暇な時には、自分で觀測もやつた。彼女は彗星に興味を有し、少くとも8箇を發見した。彼の器械は露天にあり、筒口から觀測する事になつてゐたので、高い階段を登る要があり、觀

測も容易ではなかつたのである。1801年パリに行き、ラブラアスと會ひ、又ナポレオンに謁見した。

1807年、70歳の春病氣に罹つてから、健康が十分でなかつたので、觀測を少なくし、主に從來の觀測の整理に勉めた。1818年81歳の時、王立學士院に最後の論文を提出し、1821年に新設立の王立天文學會に二重星の表を報告した。其翌年8月、彼は85歳で歿した。彼の一子ジョン (John) は、父の後を襲いで天文學者となり、カロリンは彼の死後バノウバアに歸つて、兄の觀測した星雲を便利な表にまとめた。

35、恆星の分布と宇宙の構造 ハアシェルは彼の大望遠鏡を以て見得べき總ての天體の特性を研究したが、斯の如き記述的研究は、彼の最後の目的たる恆星界の構造を知る爲の手段に過ぎなかつたのである。從來の學者の研究は、恆星の精確なる天體上の位置のみが問題であつた。それによつて太陽系の構造が明確になつた。恆星自身の問題としては、固有運動と視差の問題が僅かに論ぜられたのみである。ハアシェルは太陽系を其一員とせる恆星界の構造に眼をつけた。全く新しい天文學の分野が、ここに開けたのである。

恆星の實際の分布を知るには、其距離を現はす視差も知らなければならぬ。視差の測定は、從來の學者の失敗したところで、ハアシェルにも齒が立たなかつたので、彼は精密ではないが、別の簡単な方法を1784年に考案した。これが所謂恆星計測法 (Star-gauging) である。肉眼でも判るが、天球上の恆星の分布の密度は一様ではない。望遠鏡で見ても同様である。この原因

は、實際天空に於ける分布密度に差がある爲であるか、又は分布の密度は同一であるが範圍に差がある爲であるか、二つに一つであらう。ハアシェルは後者を正しいものと假定した。即ち、天空の或部分に於ける星の見掛けの密度は、その方向に擴がる恆星系の深さに比例するものであると考へた。

彼は天空の各所に、直徑 15' の圓形の部分を見得る様に 20 呎望遠鏡を裝置して、其内に見ゆる星の數を計算した。偶然の不規則を避ける爲に、その近隣の二三箇所の平均を取つて、標準數とした。1785 年に、彼は 683 箇所の天空の分野の恆星計測の結果を發表した。又其後に 400 箇所を追加した。其結果を見ると、少い所は星の數が平均 1 箇、多い所は 600 箇あつた。これ等を綜合して見ると、肉眼でも大體判る様に、恆星は銀河の附近に最も多く、銀河を離るるに従つて、其密度が小となり、銀河の極の附近が最も少ないことが明らかになつた。

それから恆星界の形を想像すると、銀河の平面を中心とせる凸レンズ形のもので、其直徑は厚さの約 5 倍位と想像される。銀河には數箇の分枝があるが、それは恆星系の枝の様に凸出せる部分であらう。

斯の如き、宇宙の扁平體説は 1750 年にライト (Thomas Wright) が暗示し、カントも 5 年前に同様な説を出したが、これは皆空想説で、ハアシェルの如く實測に基づくものではなかつた。

空間の恆星の分布密度が均整であるといふ假定は、大體に就ては眞であるが、部分的には當嵌まらないことが多い。これはハアシェルも始から知つてゐた。例へば、星團 (Star clusters) は、

天空の小面積内に數千乃至數萬の恆星が密集する様に見えるが、これは恆星系が此部分で、太陽系と反對の方向に長く突出してゐると説明することも出来る。けれども、星團の數は甚だ多く、ハアシェルも數百箇を發見してゐるから、以上の説明では眞らしくない。やはり恆星の實際の密集團であると考へなければならぬ。又銀河を構成する恆星の集合状態も他と全く違ふので、ハアシェルも後には、餘程此問題では困つた様である。

彼は恆星の光度と距離との間に關係があると考へた。大體恆星の光輝を同様なものと假定すれば、光度は距離の二乗に逆比例すべき筈である。此假定には箇々の例外はあるが、大體からは正當だと云へる。彼は望遠鏡による恆星の像の比較から、光度の比較を試みた。其光度から距離の比を出して、空間に於ける恆星の分布を考究したが、分布が均整である場合の假定よりも弱光星が多過ぎる結果を得た。それで實際そんな星が多いのか、或は或部分に密集してゐるのか、よく判らなかつた。

36. 星雲及び星團の研究 恆星分布の問題と密接な關係を有するのは、星雲及び星團の分布及び本質の問題である。ハアシェルが此問題の研究を初めた頃は、百餘箇の星雲と星團が判つてゐた。これ等は大部分、フランスのラセエユ (Lacaille) とメシア (Charles Messier, 1730-1817) の發見である。メシアは彗星搜索の目的の爲に、それと間違ひ易い星雲の位置を研究し、1781 年に 103 箇の位置の記録を發表した。

ハアシェルは大望遠鏡によつて、大規模に組織的に此發見を試み、1786 年に 1000 箇の新しい星雲及び星團の表を王立學士

院に提出し、3年後に殆んど同数の第二表を出し、1802年に500箇を含む第三表を出した。各星雲の位置と外観は、よく観測され、分布の状態を見る爲に星圖に記された。彼は星雲を光度と外観によつて八種に分類してゐる。

最も興味ある問題は星雲と星團との関係である。例へば、昴(Pleiades)は6箇の大星と數多の小星よりなる一團であるが、その背景となつて全體を含む星雲がある。プレエセペ(Praesepe)は肉眼では星雲状に見えるが、小望遠鏡で見ると微星の集團である。同様に小望遠鏡で星雲と見ゆるものでも、大望遠鏡で星團であることが判つたものが多い。そこでハアシェルは星雲と星團の區別は、單に使用せる望遠鏡の倍率によるものであらうといふ考を起した。

此考は1755年にカントによつて空想的に暗示された。彼は、星雲は、銀河と恆星を含む團體に比敵すべき星團であると考へた。是を星雲の島宇宙説(Island universe theory)と呼ぶのであるが、ハアシェルは観測上から此考を抱き、嘗て彼は1500の新宇宙を發見したと人に話したことがある。けれども、ハアシェルは更に精密に観測して、星雲の或ものは本質不明の、輝く流體より成るもので、決して星團ではないことを確かめた。

ハアシェルは星雲と星團の分布を詳細に研究して下の結論を得た。星團は銀河の附近に多い。けれども星團に分解の出来ない星雲は、銀河附近に少なく、銀河を離るる程多くなる。それで若し、これ等が他の宇宙系であれば、銀河の位置に無関係であるべき筈であるから、大部分は銀河系内のものであらう。け

れども幾分かは、外部の島宇宙であらう、と考へた。

1789年の初に、ハアシェルは、異種の星雲及び星團は、異なる發達の段階にある同種の天體であらうといふ考を發表した。其後、數回の論文に於て、彼は流體状の星雲が漸次凝結して中心體を作り星團となり、それより星雲に包まれたる1箇の恆星又は恆星群となる次第を論じたが、これは無理が多い。

又銀河に就ても、最初彼は20呎望遠鏡で、完全に箇々の恆星に分解し得たと信じたが、後に其中に分解する能はざる星雲質を認めて、甚だ複雑なる構造を有することを信ずる様になつた。

37. 二重星と太陽向點 ハアシェルは恆星の視差を研究する目的で、互に接近せる二恆星の記録を始めた。その一が光度が小であれば、遠距離で視差が殆んど零と想像されるから、其星を基準として、光度大なる恆星の視差を發見しようといふ。最初ガリレイが考へた方法を取つたのである。彼は熱心に、對になつた恆星を集めた。二星の距離の限界は2'を越えないことにした。此距離は肉眼では見別けられないので、二星は一つに見ゆるのである。彼はこれを二重星(Double star)と呼んだ。

最初1782年に發表した表には269箇を含み、其内227箇は新發見のものであつた。1784年の第二表には434箇、1821年の第三表には更に145箇を増加した。彼は、二星間の角距離、二星を結ぶ線の方角、各星の光度等を記録した。二星の色は一般に異なつてゐた。二重星の外に、三重、四重等の多重星(Multiple star)も發見された。

彼は最初二星の方角が偶然に一致したもので、相互の距離は

非常に大なるものと信じてゐた。けれどもミセル (Michell) は既に1767年に、或二重星は實際二恆星が接近してゐるものだらうと想像した。双子座の α 星即ちカストル (Castor) は二重星で、その距離は5"である。ハアシェルは、1759年のブラドリイの観測と彼自身の多年の観測から、カストルの二星を結ぶ直線の方向が徐々に變化する事を發見した。外に5箇の同様な二重星があつた。そこで、彼は二重星の中に二種を區別した。一は單に方向のみの一致である光學的二重星 (Optical double star)、他は實際近接して相互運動をなす連星 (Binary star) である。

彼はカストルの二星の廻轉週期を342年と算出した。これ等が相互の引力によつて運動するだらうといふことは容易に想像されるが、ハアシェルは、精確に證明することは出来なかつた。彼の死後5年にして、連星の軌道が明瞭になり、彼等が萬有引力に従ふことが確證された。これが、太陽系外に萬有引力が進展した最初である。

ハリイの時代から、或恆星に固有運動があることが判つてゐた。太陽も一の恆星であるから、空間に一種の運動をするものではないかといふ疑問が起る。ライト、ランベルト等は既に此問題を考へ、トピアスマイヤアは此運動を求むる方法を研究した。太陽が一方に進めば、他の恆星は後退する様に見える筈であるから、恆星の固有運動の分析から、太陽の運動を發見し得る理論が成立する。

ハアシェルはマスケリン及びラランドの發表した14箇の恆星の固有運動を使用して、太陽運動を算出した。太陽が運動す

る方向を示す天球上の一點を太陽向點 (Solar apex) と呼ぶ。ハアシェルは此點が、ヘルクレス座 λ 星の附近だと計算した。此結果は1783年に發表された。其數月後プレボウ (Pierre Prévots, 1751-1839) も、マイヤアの集めた固有運動の結果から、同様な結論を得てゐる。1805年にハアシェルは、1790年にマスケリンが發表した36箇の恆星の固有運動から、太陽向點を計算し、やはりヘルクレス座にあるといふ結論を得た。當時の學者はこの結論に信を置くものが少なかつたが、現今の知識から見ると、彼の結果は相當に精確であつた。彼はさらに、太陽運動の速度を算出しようと考えたけれども、恆星の視差が不明のため、出来なかつた。

38. 變光星、惑星及び太陽の研究 其頃知られた有名な變光星が二つあつた。一は鯨座 σ 星即ちミラ (*o Ceti, Mira*) である。此星は時々肉眼で見えなくなる。最初に此變光を發見したのは、1639年、和蘭のホルワアダ (Phocylides Holwarda) であつた。ブウリオウ (Ismaél Boulliau) は1667年に、變光週期を11箇月と定めた。第二の有名な變光星はアルゴオル (Algol, β Persei) である。最初モンタナリ (Geminiano Montanari) が1669年に其變光を發見し、グッドリック (John Goodricke) が1783年に其週期を2日20時49分と算出した。

ハアシェルの頃にはその外に二三の變光星が判つてゐた。それから新星も不規則な長週期の變光星と考へられる。また1603年バイエル (Bayer) が星圖を出したときまでは、双子座 α 星即ちカストルは、同座 β 星即ちボルクス (Pollux) よりも光度

は大であつたが、18世紀には逆になつてゐる。現今もさうである。

其頃精確な光度計がなかつたので、ハアシエルは後人の爲に、極めて簡単な系列法 (Method of sequence) を工夫し、大規模に應用した。これは或一群の星を光度の順序に並べて置く方法である。若し或星の光度が變化すれば此系列の順序が違ふから容易に發見されるだらうといふ仕組であつた。彼は1796年と1799年の間に4箇の星表を出したが、其中には約三千の恆星を含んでゐた。其途中で、1796年に、ヘルクレス座 α 星の變光を發見し其週期を60日と測定した。彼は變光の原因は、恆星の自轉によつて、光輝の異なる面を吾人に向ける結果だと考へた。

惑星に就ても、彼は多くの研究を残した。土星の形が扁平なことを1790年に發見し、測定した。土星の表面の斑紋によつて約10時16分の週期で自轉することを發見した。又土星の第三の環、即ち紗環 (Crape ring) を認めたが、その性質は判らなかつたらしい。土星の環は10.5時の週期で、本體を廻轉すると推論した。土星の衛星ヤベツスは1671年カシニが發見した當時から變光することが判つてゐたが、ハアシエルは其原因は自轉によつて種々の反射力の異なる面が見ゆる結果だと考へた。1797年、彼は木星の衛星も變光することを認めて、以上の説明を確かめた様に考へた。

彼は屢々木星の暗帯を觀測し、1793年これが雲の帯であると説明した。火星に就ては、兩極の白冠が冬に擴がり夏に縮小することを注意し、地球と似た惑星だらうと考へた。

ハアシエルは太陽の黒點を觀測して、それが太陽面の凹部であることを認めた。これは黒點が太陽の邊緣に近づく時に明らかに現はれるのである。彼は此現象から、1795年に太陽の本質に關する空想的理論を立てた。今日から考へると滑稽であるが此説は約半世紀の間一般に信ぜられたのである。彼は、太陽の内部は冷えた暗い固體であると考へた。それは二重の雲層で圍まれてゐる。最外部は太陽の表面即ち光球 (Photosphere) で、非常に温度が高く、光輝が強い。内側の雲層は、内部を外熱から保護する遮蔽となるものである。黒點の本影は雲の裂目から見ゆる内部の暗體で、半影は光球の光で照された内側の雲層である。それで太陽の内部の暗體の中には生物がゐるかも知れないとすら、想像した。

黒點が凹所であるといふ説は、既に1774年グラスゴウのキルスン (Alexander Wilson, 1714-1786) が主張してゐる。彼は太陽の自轉による黒點の形狀の變化を投影法によつて考へ、黒點が皿の様な凹所だと考へたのである。ハアシエルは初め、キルスンの説を知らなかつたらしいが、後には自説の立證に用ゐてゐる。又ハアシエルは、太陽は黒點の出現によつて幾分光が弱くなるから、一種の變光星であると考へ、地球の氣候や、穀物の豊凶との關係も考へたが、まとまつた結論に達しなかつた。

ハアシエルと同時代に、シュレクタア (Johann Schroeter, 1745-1816) が獨逸にゐて、惑星及び月の空前の詳細なる觀測をなし、1791年と1802年に出た、彼の觀測録は、後の學者の手引となつた。

ハアシェルの研究方面は、引力天文學及び觀測天文學に對して敘述天文學 (Descriptive astronomy) と呼ばれる。

第十一章 第19世紀の天文學

39. 觀測天文學の發達 第19世紀の天文學は、直ちに現代の天文學と連絡するので、其發達の詳細は一般の天文學書にある。ここでは重要問題の發展の徑路を簡単に述べよう。ハアシェルによつて開かれた敘述天文學は19世紀に入つて大に發達した。此方面は餘り高等數學の知識が必要でないので、手頃の器械さへあれば素人でも相當な仕事が出来た。それで各國に私立天文臺の數も著しく増加することになつた。

觀測器械も著しく進歩した。大きなレンズの製作、度圈の精密度の増加、器械据付法の發達等は著しいものであつた。殊に特殊問題に於ける寫眞術の應用は漸次發達し、分光器の應用は一新方面を開拓することになつた。

觀測の誤差の既知の原因を除き、未知の原因による誤差を最小にする爲に、從來の學者も色々苦心したが、19世紀の初めに二大數學者、パリのルジャンドル (Adrien Marie Legendre, 1752-1833) とゲッティンゲンのガウス (Carl Friedrich Gauss, 1777-1855) は獨立に最小二乗法 (Method of least square) を案出した。これは、少しづつ異なる結果を與ふる反復觀測の値を結合して最も真に近い値を算出する組織的方法である。

ガウスは、三つの獨立の位置の觀測から、惑星の軌道を決定す

る方法を考へた。從來は惑星の軌道要素の決定に多くの觀測を用ゐたが、此方法で單純化されるのである。此方法は、1801年1月1日にピアジが發見し、間もなく太陽の後に隠れた小惑星ケレス (Ceres) の軌道計算に、ガウスが應用して正當なる結果を得、同星を再發見することが出来たものである。

觀測値の修正論 (Theory of reduction) は、ケエニヒスベルグのベスセル (Friedrich Wilhelm Bessel, 1784-1846) によつて改良された。彼の最初の大事業は、ブラドリイのグリニチ觀測の修正と刊行とであつた。これは1818年に成就して、3222箇の恆星を含む表となつた。其途中で、彼は殆んど完全な大氣差の表を作つた。ベスセルは又1821年から1833年までの自己の觀測に基づき、約62000箇を含む恆星表を作つたが、これは彼の死後に出版された。

次のベスセルの功績は、恆星の視差 (Parallax) の發見である。彼は光度と距離との間の關係を考ふることを止めて、固有運動の大なる恆星を選定した。固有運動の大であることは、距離の近いことと一般に關係があると考へたからである。彼の選んだ星は、白鳥座第61星 (61 Cygni) で、固有運動は年約5"である。彼は此星の近傍に、二つの微星を選び、それ等と此星との角距離を連續して測定した。此結果此星が視差楕圓を畫くことが立證せられた。1838年に發表した、此星の視差の値は約 $\frac{1}{3}$ "であつたが、1839年から次の年にかけての研究によつて $\frac{1}{2}$ "弱といふ値とした。

次で1839年に、ヘンダアソン (Thomas Henderson, 1798-1844)

は喜望峯で、ケンタウルス α 星 (α Centauri) の視差を測定して約 $1''$ の値を得た。又、ストルウベ (Friedrich Struve, 1793-1864) は露國ブルコワ天文臺で、織女星 (Vega) の視差を約 $\frac{1}{4}''$ と測定した。後に、オクスフォードのプリチャード (Charles Pritchard, 1808-1893) は寫眞によつて、目的の星と近傍の星とを寫し、その距離を測定する方法を創始したので、大に便利になつた。

此世紀には多數の恆星表と恆星圖が出来た。其中で最重要なものは、ベスセルの弟子アルゲラングア (Friedrich Argelander, 1799-1875) によつて 1859 年から 62 年にかけて出版された、ボン恆星表 (Bonn Durchmusterung) で 324198 箇の恆星を含むものである。セエンフェルド (Eduard Schönfeld, 1828-1891) は、1875 年から 85 年にかけて、南方の天を測定し 133659 箇の恆星を追加した。喜望峯のギル (Gill) は、南天の残りの寫眞觀測をなし、グロオニンゲンのカプティン (Kapteyn) は、それを星表の形式に修正して、1896 年に出版した。

1887 年のパリの萬國會議で、全天の寫眞圖を世界の 18 天文臺で分擔して作る計畫が出来、14 等星まで二千萬箇の恆星が撮影されて、それに基づく恆星表が出来つつある。

1874 年と 1882 年に起つた金星の太陽面經過は、直接及び寫眞觀測によつて、各地で精密に測定された。1887 年にギル (Gill) はエアリー (George Airy, 1801-1892) の方法によつて、火星の衝の場合に其視差を測定した。これは日週法 (Diurnal method) と呼ばれるもので、地球の異なる二點から觀測するのでなく、一の地點で、同一人が、夕と朝とに觀測して、地球の自轉によつて生

ずる位置の差を基線とする方法である。1872 年に、ベルリンのガルレ (Galle) は、小惑星の視差發見に此方法を用ゐた。

18 世紀の學者は、攝動によつて太陽距離を出す方法を考へてゐた。月の距離が精密に判り、又 Parallaxic inequality と呼ぶ月の運行の不規則及び月差 (Lunar equation) と稱する、月の引力による地球の位置の變化に基づき、太陽の觀測位置の變動も十分に知られてゐたので、1854 年ハンセン (Hansen) は、これによつて太陽距離を算定し、從來の値を訂正した。1858 年ルベリエ (Leverier) も同様な方法で、その結果を確かめた。彼は又 1872 年に金星及び火星の運行の不規則から、太陽の視差を算出した。

又光の速度は種々の方法で確かめられたので、光行差の値から地球の軌道速度が確定し、それから太陽視差の計算が出来る。佛のコルス (Cornu) は 1874-76 年に、米のマイケルソン (Michelson) は 1879 年に、ニウコム (Newcomb) は 1880-82 年に、此値を測つて、大體太陽視差として、 $8''.8$ を得た。

1884 年から 85 年にかけて、ベルリンの觀測で緯度が少し變化することが判つた。其後各地の天文臺でも同様の結果が發見された。此週期的變化の範圍は約 $\frac{1}{2}''$ であつた。1891 年にチャンドラア (S. C. Chandler) は、此原因を地軸が地球に對して少し動搖する結果だと説明した。地軸の位置が變れば、極の位置が變り、赤道の位置が變る。極が平均の位置から動搖する範圍は 30 呎以内で、週期は 427 日と計算された。此研究が 20 世紀になつて著しく發達したことは述べる必要もなからう。

40. 引力天文学の發達 月の運行論に就ては、多くの研

究があつたが、最も著しい進歩を劃したのは、ドイツのハンセン (Peter Hansen, 1795-1874) の研究であつた。彼は 1838 年と、1862 年乃至 64 年に、有名なる二論文を發表し、1857 年に月の運行表を出したが、此表で計算すると 1750 年から 1850 年までの月の位置は $1''$ 乃至 $2''$ 以内の差しかなかつた。此表は最近まで規準として用ゐられた。其後ニウコム、アダムス、ヒル等がハンセンの表を改良して、漸次完全に近づいた。

月の平均運動の長年加速度はラブラアスによつて説明されたが、其後アダムスは其値を訂正して、 $10''$ の代りに $5''$ 又は $6''$ とするのが適當だと計算した。デラウネエ (Delaunay) も獨立に同じ結果に達した。彼は 1865 年に此現象を潮汐摩擦 (Tidal friction) によつて説明しようと考えた。潮汐作用が地球の自轉を遅くするだらうといふことは、前にカントも考へ、ファレル (Ferrel) も計算したこともあつたが、デラウネエは獨立に下の結論を得た。地球の自轉が遅くなれば時間の單位が長くなるから、速度が増加する結果となる。これを長年加速度の原因とすれば地球の自轉の遅延の割合が計算される。その結果は一萬年に $\frac{1}{10}$ 秒の遅延となつた。けれども此説明は信用が出来ない。

惑星の運行論に最も貢獻したのは、パリのルベリエ (Urbain J. J. Leverier, 1811-1877) である。彼は太陽及び惑星の運行表を作つて、其後の計算の基礎としたが、水星の不規則運行には困つて、其附近に小惑星でもあるのではないかと疑つた。數學者ポアンカレエ (Henri Poincaré) は晩年に天體力學に偉大なる

貢獻をなしたが、これは主に 20 世紀になつてからであつた。

19 世紀に於ける引力天文学の最大の勝利は、海王星の發見であつた。天王星の位置は、計算せる位置と年々差を生ずる様になつたので、これを外側の未知の惑星の攝動と考へて、未知の惑星の位置運動を算出しようとしたのは、ケンブリヂのアダムスで、1845 年 10 月に完成したが、其望遠鏡的發見をグリニチのエアリーに依頼したままで年月が経過した。パリのルベリエは獨立に 1846 年 8 月 31 日に新惑星の軌道を計算し、同年 9 月 23 日に、ルベリエから觀測を依頼された、ベルリンのガルレによりて望遠鏡で認められた。天王星の運行の誤差は僅かに $2'$ を越えなかつたが、これから計算によつて海王星を發見したのは、科學の顯著なる功績であつた。

此世紀には多數の彗星が發見されたので其軌道の計算が重要になつて來た。ハリー彗星は 1835 年に現はれ、次回は 1910 年と計算された。他に 70 年乃至 80 年の週期を有する 4 箇の彗星が計算されたが、二つだけ再歸した。それは、1815 年と 1887 年に出現したオルバース彗星 (Olbers's comet) と、1812 年と 1884 年に出現したボンズ・ブルックス彗星 (Pons-Brooks comet) である。 $3\frac{1}{3}$ 年 (Encke's comet) と 14 年 (Tuttle's comet) の週期の間に位する 14 箇の彗星も發見された。全體で軌道の計算された彗星は 240 箇に達するが、大部分は不精確であつた。

潮汐の理論は引續き多くの學者から研究されたが、ケルギン (Lord Kelvin) とダアキン (G. H. Darwin) は、各地の潮汐觀測の分析を試み、一新方面を開拓した。彼等は又固體の地球に及ぼ

す潮汐作用を研究したが、數的結論を得なかつた。只其效果の極めて小なるべきこと、従つて地球の剛性の大なることを推論したのみであつた。

太陽系の安定の問題は、ラグランジュ及びラブラアスの時代よりも著しく變つて來た。彼等の假定は、種々の新現象の發見から其儘採用されなくなつた。攝動の外に、潮汐摩擦が重要視されなければならない。地球と月との潮汐作用は、日を長くし、月を長くし、且つ相互の距離を長くする。此作用には反對の過程が起る見込がなかつた。空間の抵抗が惑星運動に對して起るか、どうかは疑問であるが、少くとも流星の存在を無視することは出来ない。だから永久に太陽系が安定だといふことは、全く云へなくなつた。又太陽の熱も時々刻々に減少するだらうから、其方面からも永久的安定はないだらう。

41. 敘述天文学の發達 (i) 小惑星の發見 1801年1月1日即ち19世紀の最初の夜に、伊太利のピアジ(Giuseppe Piazzi, 1746-1826)は、第一の小惑星ケレス(Ceres)を發見した。ガウスの計算した其軌道は、火星と木星との中間にあつた。此二星間の距離は廣過ぎるので、ケプレルの時代から不思議に思はれ、其頃獨逸のボオデ(Bode)は、此附近に惑星を發見しようと試みつつあつたのである。1802年3月にオルバアス(Heinrich Olbers, 1758-1840)は第二の小惑星パラス(Pallas)を發見した。次で1804年にユノ(Juno), 1807年にベスタ(Vesta)が發見された。

ハアシェルはこれ等の直徑を200哩以下と推定した。小惑

星(Asteroids, Minor planets)の軌道は傾斜と離心率が甚だ大である。例へば、パラスは 35° の傾斜と、 $\frac{1}{4}$ の離心率を有する。そこで、オルバアスは、これ等の小惑星は一大惑星の爆裂の結果出來たものであらうといふ假説を出した。

第五の小惑星は、15年間檢索の後、1845年にヘンケ(Karl L. Hencke, 1793-1866)によつて發見された。1847年に2箇、1848年に1箇發見され、其後恆星圖の改良によつて發見も容易となり、小惑星の數が増加した。1891年、ハイデルベルヒ天文臺のワルフ(Max Wolf)が寫眞發見法を考案してから、更に小惑星の數は急激に増加した。此方法は、恆星が點として寫る様に裝置した種板を長時間露出すれば、恆星に對して相對運動をなす小惑星は短線として寫るので、容易に檢出される。

1892年の終には432箇の小惑星が發見されてゐた。=イスのシャアロア(Charlois)は其内92箇を發見し、ビエンナのパリサ(Palisa)は83箇を發見した。1866年にカアクウッド(Daniel Kirkwood)は、木星の攪亂作用が大である空間には小惑星が存在しないことを注意した。例へば、太陽からの距離が木星の約 $\frac{5}{8}$ の部分では、ケプレルの法則によつて、其部分の惑星の公轉週期が木星の約2倍になるから、其部分には小惑星はないのである。

小惑星の大きさに就て、1894年と1895年にリック天文臺でバアナアド(Barnard)が概測したものがある。それによると、ケレスの直徑は約500哩、パラスは300哩、ベスタは250哩位らしい。又反射光の強さからの測定によると、大なるものは直徑

約300哩、小なるものは約12哩といふ結果になつた。小惑星の全體の質量の和は恐らく地球の數百分の一であらう。

1898年に小惑星エロス(Eros)が発見された。これは火星よりも地球に近づく軌道を持つてゐるので、その距離測定から、太陽視差の計算の精確なる一の基礎が出来た。

(ii) 新衛星の発見 海王星の衛星は、発見の年(1846)に、リバプールのラスセル(William Lassell, 1799-1880)によつて発見された。これは天王星の衛星と同様に、主星の周りを逆轉する。つまり太陽系の一般の廻轉と反對の方向に廻轉する。

1848年に米のボンド(William C. Bond, 1789-1859)は、土星の第八衛星ヒペリオン(Hyperion)を発見した。彼は1849年に土星の第三環即ち紗環(Crape ring)を発見した。

1851年にラスセルは、天王星の第三第四衛星を発見した。

1877年にホオル(Asaph Hall)は、ワシントンで、火星の二衛星フォボス(Phobos)及びダイモス(Deimos)を発見した。これ等は火星に近いのと、週期が短かいので著しい。

1892年にバアナアドはリック天文臺で、木星の第五衛星を発見した。これは従來の衛星よりも木星に近いものである。

(iii) 惑星及び衛星の表面 月の表面の細圖が出来、山の高さは影の長さによつて測定された。月の所謂海は乾燥せる岩石原であることが明瞭となつた。噴火口は皆噴出するものはない死火山であると考へられた。以前は河流だと考へられた裂溝は水がないことが判つた。月の大氣は其存在を證明する事實がないから、若し存在してゐても、極めて稀薄であらう。

火星の表面も漸次明らかになつた。以前は陸と海だと考へてゐたものが、陸上の斑紋で海はないことが判つた。その永久的斑紋によつて、火星の自轉の週期は精密に測定された。ミラノのスキアパレリ(Signor Schiaparelli)は1877年の火星の衝の時に、その表面に多數の暗線の交錯するを認め、これを運河(Canals)と呼んだ。次の1881年末の衝の時、彼は此線の或ものは二重になつてゐることを認めた。これが運河説の初めであつた。

木星と土星の表面は雲層であると考へられた。此二星の密度は殆んど水に近いことと、表面の斑紋の變化が急激であることから考へると、これ等は大體流態で、内部は高熱があると想像される。表面の比較的永久的の斑紋から、自轉の週期が決定された。土星の環に就て、1857年にマクスエル(James C. Maxwell, 1831-1879)は、それが連續體でなく、多數の分離せる微小なる物體が各自の速度で廻轉するものとすれば、力學的に満足に説明が出来ることを論じた。この考は觀測の結果と一致する。又1867年にカアクウッドは、カシニの分界は或土星の衛星による攝動の結果として説明されることを論じた。つまり、土星と其環との關係は、太陽と小惑星群との關係と同様だと考へることが出来る。

天王星と海王星は遠隔の爲に、表面は不明であつた。

水星と金星は太陽に近いので觀測が困難であつた。表面の斑紋を觀測した人々もあつたが、一致したものは殆んどなかつた。自轉の週期に就ては、1882年及び1890年に、スキアパレリ

が二星の自轉週期は公轉週期と等しいといふ説を出して一般に承認された。月及び土星の衛星ヤベツスも二週期が相等しい。この現象は潮汐作用の結果として容易に説明された。

(iv) 太陽 太陽の表面の望遠鏡的研究は種々の結果を興へたが、最も興味ある現象は、黒點の分布と出現週期の問題である。1851年、シュワアベ (Heinrich Schwabe, 1789-1875) は数十年の観測に基づいて、黒點が約10年の週期で増減することを認めた。其後の観測によつて、此週期は平均して11年餘になることが證せられた。1852年に、セエバイン (Edward Sabine, 1788-1883)、ワルフ (Rudolf Wolf, 1816-1893)、ゴウチエ (Alfred Gautier, 1793-1881) の三人は獨立に、黒點の週期的變化と地球上の種々の磁氣の變化との間に並行關係があることを注意した。大黒點の出現が地球上の磁氣嵐を伴ふことは其後實證された。

カリントン (Richard C. Carrington, 1826-1875) は黒點の位置の永い研究から、1859年に、太陽の自轉の速度が表面の緯度によつて異なることを認めた。赤道部の自轉週期は約25日であるが、極と赤道との中間では2.5日だけ長くなる。黒點自身も多少の固有運動を有するらしい。彼は又1858年に、赤道の直近には黒點が少ないこと、少し離れると赤道の兩側には非常に多くなること、緯度 35° 以上の表面には、又黒點數が著しく減少すること及び黒點の分布状態は11年の週期で規則的變化をなすこと等を發見した。

キユウ (Kew) は14年間の寫眞から、黒點は凹陷部であると結論した (1872)。その後ハウレット (Howlett) は35年間の研究

から、1894年に、黒點は凹陷部ではないといふ説を出した。この争論は何等決定しなかつた。

次にスペクトル分析の應用は、太陽の構造及び組成を漸次明らかならしめた。1665年にニュートンがプリズムで太陽スペクトルを作つたのが始めて、19世紀には廻折格子 (Diffraction-grating) の發明によつて、分光器 (Spectroscope) は益々完全なものになつた。ワラストン (William H. Wollaston, 1766-1828) は1802年にスペクトルを横切る暗線を發見し、1815年フラウンホッフ (Joseph Fraunhofer, 1787-1826) は約600箇の暗線を發見し、其内324箇の線の位置を測定し、作圖した。それで暗線はフラウンホッフ線と呼ばれるやうになつた。1859年キルヒホッフ (Gustav R. Kirchhoff, 1824-1887) はブンゼン (Bunsen) と協力して、スペクトルの完全な説明に成功した。

暗線は太陽の上層の高熱氣體の吸收によつて生ずること、太陽の本體は固體か液體か、又は高壓の氣體なるべきこと等が明らかになつた。暗線の分析から、太陽表面に、ナトリウム、鐵、水素、カルシウム、マグネシウム、炭素等の存在が判つた。

日食皆既の際の観測から、コロナ (Corona)、彩球 (Chromosphere) 及び紅焰 (Prominences) 等が研究された。これ等のスペクトルを研究して、三者が皆氣體であることが明らかになつた。彩球は日食の際、赤く見ゆるが、平常は光球の光が強いために見えない。紅焰は彩球から噴出する赤い焰である。ヤンセン (M. Janssen) とロッキア (J. Norman Lockyer) は、各々平常、太陽の端にある紅焰のスペクトルを取る方法を工夫し、ハッキンズ

(William Huggins)は1869年に紅焰の分光観測をやつた。1892年にシカゴのヘエル(G. E. Hale)は、分光寫眞機を發明し、太陽の全面に互つて、彩球、紅焰及び白紋等の状態を寫すことに成功した。

太陽表面に發見された元素ヘリウムは、1895年に地上でも發見された。コロナのスペクトルには未知の元素がある。全體として、コロナは稀薄な光輝ある氣體と太陽より噴出する塵埃より成立してゐるらしい。

1842年に發見されたドブラアの原理(Doppler's principle)は、1868年ロッキアアによつて、紅焰の観測に應用され、それが毎秒約300哩の速さで噴出することが證せられた。又太陽の右縁が地球より遠ざかり、左縁が近づくことが観測されたので、太陽の自轉が確かめられ、デュネエ(Dunér)は、1889年に此法によつて自轉の週期を算出した。

太陽は絶えず外部に大量の輻射をなしつつあるので、表面に近い程、温度は低くなるだらう。つまり内部は光球より高温でなければならぬ。又太陽の密度は水と大差ない點から考へても、内部は高熱の壓縮された氣體だらうと想像される様になつた。

(v) 彗星と流星 19世紀には200餘箇の彗星が出現した。其軌道、外觀構造等は望遠鏡、寫眞及び分光器を用ゐて研究された。

彗星の質量が非常に小であることは、木星の衛星中を通過した彗星が、何等の影響を衛星の運行に與へなかつたことで判る。

けれども體積は大であるから、密度は非常に小であらう。彗星の尾及び頭を通して、後方の星の光が見える。尾は彗星の永久的成分でなく、何等かの作用で、太陽の力によつて反撥されたものだらう。それで太陽に近づいた時だけ尾は現はれ、遠ざかると消える。その時、尾の物質は頭から逃げ去るらしいことは、數回出現する彗星の尾が漸次縮小して、遂には全く消失したものもあるので理解される。此考は、尾の形狀からも推察された。又二種以上の異なる曲線を畫く尾の出現は、其各々が異種の物質から構成されることで説明がついた。

1858年の大彗星の發見者として有名なドナチ(Giambattista Donati, 1826-1873)は、1864年に初めて彗星の分光器的研究をやつた。三つの輝帯を有するスペクトルが現はれた。4年後にハッギンスが、此輝帯は炭素と水素の化合物のスペクトルであることを確かめた。殆んど總ての彗星のスペクトルには炭水化物の輝線が現はれるが、他の物も現はれる場合がある。輝線の背景に連続スペクトルが薄く見える。これは太陽の反射光が重で、其一部分は彗星の中の固體が輝くものもあるかも知れない。

流星(Meteors)と彗星との關係も漸次明瞭になつた。流星雨(Meteoritic showers)の現象は、前から、太陽の周圍を楕圓形の軌道で廻轉する流星群と地球の軌道と交錯する時に起ると信ぜられてゐた。1867年頃迄には4箇の流星群の軌道が確かめられたが、それは既知の彗星の軌道と大體一致することが判つた。其後續々二者の關係は明らかになつた。例へば、ペイラ彗星

(Biela's comet) は6年餘の週期であるが、1845年末の出現の時に形が幾分變化し、其後2箇の彗星に分離したが、1852年の出現期には2箇共現はれ、其後は全く消失して見えなかつた。此彗星の軌道と地球の軌道と交錯するのは、11月末の位置であるが、1872年及び1885年には、彗星も丁度同點附近に来ることになつてゐた。然るに彗星の消失後は、流星雨の出現が之に代つたのである。

此外にも分裂して流星群に變化した彗星は多い。又同一の軌道を數箇の彗星群と流星群とが共有することもある。こんな例が續々発見されたので、彗星が破壊したものが流星となり、又逆に流星が密集團を作つたものが彗星だと考へられる様になつた。

(vi) ジョン・ハアシェル (John F. W. Herschel, 1792-1871)

キリアム・ハアシェルの直接の後継者は、彼の子ジョン・ハアシェルであつた。彼は天文學の外に數學及び物理學にも種々の貢獻を残した。

1816年から、彼は父の觀測した二重星の再觀測を始めた。此結果は1824年に出版された。父の結果と比較して、遅い週轉運動を現はしてゐるものが多く発見された。次に彼は星雲の觀測を始めた。其結果は1833年に、約2500箇の星雲表として出版された。其内500箇は全然新しいものであつた。其序に3000對以上の二重星をも記録した。

1833年から1838年まで、彼は喜望峯に南天觀測に出張した。彼は父が北天に於て試みたと同じ方法で南天の掃空事業を行

つたのである。約1200箇の二重星及び多重星、更に多數の新星雲等が発見され研究された。500箇の既知の星雲も再測された。總て父の事業は大規模に遂行された。有名なマゼラン雲 (Magellanic clouds) や、ハリイ彗星等も觀測された。1837年に、彼は太陽より受くる熱量の測定を試みた。その結果は、同時に佛國でプワイエ (Claude S. M. Pouillet, 1791-1868) が試みた測定と、よく一致した。彼等は、地球表面の單位面積に於ける太陽の直射光の量を測り、大氣の吸収量を計算して、それから太陽の輻射の全量を出さうとしたのである。大氣の吸収率が不正確であつたので、1881年にラングレイ (S. P. Langley) は其値を訂正してゐる。ハアシェルの結果によると、1年間に受ける太陽熱は全地球を蓋ふ120呎の厚さの氷を融かすに十分である。然るにラングレイは此厚さを160呎とした。

彼の喜望峯觀測の結果は1847年に發表された。1864年に、星雲及び星團の5079箇を含む表を、王立學士院に提出した。10000箇以上の二重星及び多重星の表は1879年に出版された。其後ドレヤア (Dreyer) は1887年に、ハアシェルの星雲及び星團表を増補して7840箇を含むものとした。1894年に、ドレヤアは更に新發見の1529箇を加へて、表を増訂した。

兄のストルウベも2640箇の二重星及び多重星の詳細なる觀測をやつた。彼は二重星の距離が32"以内のものに限つて觀測した。これは二重星の數が餘り多くなつたので、連星の疑あるもののみを選んだ爲である。彼の結果は1827年から1852年にかけて發表されたが、其中で100箇は、少くとも連星系をなす

ことが明らかであつた。

1827年にサバリエ(Felix Savary, 1791-1841)は、大熊座 ζ 星を観測して、従來の測定と比較して、此連星系の楕圓軌道を決定し、二星が萬有引力の作用で廻轉することを初めて實證し、其週期を約60年とした。

其後二重星の發見に卓功があつたのは、シカゴのバナム(S. W. Burnham)教授であつた。彼は約1300箇を發見したが、其中で約300箇は明らかに連星であつた。これ等の週期は短かいのは約10年で、長いのは數世紀に達する。

ハアシェルの望遠鏡よりも更に進歩したものは、ロッセ卿(Lord Rosse, 1800-1867)が1845年に、愛蘭バアソンスタウンに据付けた反射望遠鏡である。これは長さ約60呎、反射鏡の直徑6呎に達するもので、ロッセはこれによつて星雲を觀測し、多くの星雲が渦狀をなすことを發見した。又ハアシェルが星雲と認めたものを分離して、星團であることを確かめたものもあつた。

(vii) 分光器的研究 フラウンホウフェルは1823年に、恆星も太陽と同様な暗線のあるスペクトルを有することを認めた。けれども大規模に恆星及び星雲等に應用したのは、ハッギンスとセッキイ(Angelo Secchi, 1818-1878)であつた。

1864年にハッギンスは初めて或星雲のスペクトルを研究し、それが三つの輝線から成立することを認めた。1868年迄に、彼は70箇の星雲の研究をなし、その約 $\frac{1}{3}$ は同様な輝線を現はすことを認めた。其中にオリオン大星雲も含まれてゐた。この

輝線を現はす星雲は確かに氣態である。三線の一は水素線であるが、他は不明であり、星雲の或ものは其他の輝線を現はすものであつた。他の約 $\frac{2}{3}$ の星雲は連続スペクトルを現はすので、星團に分離され得るものだらうと想像された。其中の暗線は不明瞭で研究が出来なかつた。

セッキイは1863年に、恆星のスペクトルの暗線の配列等によつて、恆星發展の段階を考へ、初めて恆星の分類を試みた。

1864年にハッギンスは、恆星のスペクトルの暗線が、水素、鐵、ナトリウム、カルシウム等より構成されることを初めて確かめた。又恆星の中には時々連続スペクトルの外に輝線を現はすものがある。其多數は變光星で、時々出現する新星も同様であつた。

分光器による恆星の視線運動の決定は1868年にハッギンスがシリウス星(Sirius)の水素線(F)の移動を測定したのが最初である。其後續々觀測されたが、獨逸ボッダムのフォオゲル(H. C. Vogel)は殊に多くの觀測を遂げた。

1889年、ハアバアのピケリング(E. C. Pickering)は、大熊座 ζ 星が分光器的連星(Spectroscopic binary)であることを發見した。此星は望遠鏡では二星に分離することは出来ないが、分光器によつて、一の暗線が週期的に二線に別れることが明らかになつたので、二星が相互に廻轉しつつあることが判つたのである。次でフォオゲルは、アルゴオル星の暗線の週期的移動を發見して、その變光が暗黒なる伴星の食によることを確かめた。

(viii) 光度測定(Photometry) 連星系の食による變光器以外に多くの變光星が発見され、其數は400餘に達した。それ等の變光の原因は殆んど不明であつた。

一般の恆星の精密なる光度測定の必要が、先づジョン・ハアシェルの光度規準となつて現はれた。彼は自己の規準によつて多數の肉眼星の光度を精測した。現今採用されてゐる光度規準は、1856年にポグソン(Norman R. Pogson, 1829-1891)が稱へたのが初めである。これは標準六等星の光の強さを1とし、一等を昇る毎に、光の強さの比が $\sqrt[5]{100}=2.512\dots$ 倍となるものである。それで標準一等星は標準六等星の100倍の光の強さを有することになる。光度は標準六等星を6.0とし、標準五等星を5.0とし、中間は小數で表示する。

ハアバードでビケリングは大規模の光度觀測を行ひ、肉眼星の光度表を1884年に出版した。これは北極より南緯 30° に至る天空の4260箇の恆星を含む。オクスフォードでブリチャードは北極より南緯 10° に至る2784箇の恆星の光度表を出した。其後ハアバード及びボッダムでは盛に光度觀測をやつた。

(ix) 恆星系 キリアム・ハアシェルによつて始められた恆星系の研究は、部分的に漸次進められた。銀河の形狀の詳細なる研究は、其他の恆星との關係も、銀河自身の構造も相當に複雑であることを示した。ジョン・ハアシェルは銀河を環狀のものと考へたが、環にしても多くの分枝あるものであらう。それから恆星の距離と光度との關係から、恆星の光輝は一様でなく、大小幾多の段階があることが判つた。

最初ハアシェルが考へ出した、島宇宙説はロッセの研究によつて幾分の證據を得た。氣態星雲は銀河より離れる程多く、星團は反對に銀河の附近に多いといふハアシェルの説も實證された。氣態星雲と其中に見ゆる恆星とが分光器的研究の結果、一定の關係があることが判り、星雲から凝結して恆星に進化したのだらうと想像される様になつた。又星雲の中にならぬ恆星で、其スペクトルに輝線を現はすものも、二者の連鎖と考へられた。

これ等の全部を包含する恆星系の構造に就ては、著しい學説が出なかつた。その發達は第20世紀に残された問題であつたのである。

(x) 太陽系の進化 1796年に出たラブラアスの星雲説は天文学の種々の方面の進歩に著しき影響を與へた。其後の惑星及び衛星の新發見は、ラブラアスが特に重きを置いた太陽系¹⁾の各星の運動の均整を幾分破るものもあつた。遠隔せる衛星の逆行運動や、小惑星の軌道の傾斜と離心率の大なることなどは例外ではあるが、全く説明のつかぬこともない。それ等の例外よりも、ラブラアスの説を裏書する事實の方が寧ろ多數に發見された。

又ハアシェル等の研究になる星雲の凝縮の過程や、星雲と恆星との中間に位するスペクトルの存在等は、星雲より恆星の進化することを證するものであつた。これがラブラアスの星雲説の一の證據になると考へられた。

1836年にジョン・ハアシェル及びブワイエの研究した、太陽の

輻射熱の總量の巨大なる結果は、如何にして此輻射を維持し得るかといふ問題を起した。エネルギー不滅の原理は其頃樹立されたので、太陽のエネルギー補充の方法が考察されることになつた。太陽は歴史時代の數千年のみならず、地質時代の數千萬年に亘つて、殆んど一樣に光熱を輻射したと考へなければならぬので此問題は相當に複雑なものであつた。

1854年に、獨逸のヘルムホルツ (Hermann von Helmholtz, 1821-1894) は太陽の熱源を、其收縮によつて説明した。太陽は其引力によつて絶えず收縮しようとするが、熱による膨脹作用は、それと平均してゐる。熱が輻射で失はると收縮が起り、位置のエネルギーは熱に變ずる。かくして輻射を支持するには1年に180呎だけ半徑が收縮すればよいことになる。此程度の收縮は、數千年の後に漸く認め得る程度のものである。これで過去及び未來數千萬年間の輻射の維持を説明することが出来るが、少し地質學上の結果と比較して短かい。此説では過去の太陽は漸次膨大して星雲状となるから、ラブラアスの星雲説とも一致することになる。

ダアキン (G. H. Darwin) は潮汐摩擦の結果を研究して、地球と月の發展に關する新説を出した。潮汐作用は、日と月の長さを増加せしめ、徐々に月を地球から遠ざけるから、過去に於ては月は現在よりも近く、潮汐作用も従つて大であつた筈である。ダアキンは1879年から81年までに、其結果を計算し、遠い過去に於ては、月は非常に地球に接近し、地球の自轉と同時に公轉し、其週期は2時間餘であつたといふ結論に達した。つまり、始め月

は地球と一體であつたが、其急速なる自轉の遠心力で分離した一塊が月となつたといふことになる。

ダアキンは他の惑星の衛星の起原を同様に考へようとしたが、直ちに、地球と月の關係は例外で、他の衛星には潮汐作用が餘り強くない事を證し得た。太陽と惑星との關係も同様である。1892年にシイ (See) は、星雲より潮汐作用によつて二重星の發展する事を説明した。要するに、星雲説と潮汐作用とによつて太陽系の發展を比較的詳細に説明し得る様になつたのである。

* * *

第20世紀の天文学の發達は非常に顯著であるが、他の題目の下に網羅されてゐるから、此稿には省くことにする。

一 般 の 参 考 書

1. Berry, *A history of Astronomy.*
2. Bryant, *A history of Astronomy.*
3. Arrhenius, *Die Vorstellung vom Weltgebäude im Wandel der Zeiten.*
4. Wolf, *Geschichte der Astronomie.*
5. Delambre, *Histoire de l'astronomie.*
6. Whewell, *History of the Inductive Sciences.*
7. Proctor, *Old and New Astronomy.*
8. Ball, *Great Astronomer.*
9. Lodge, *Pioneers of Science.*
10. Morton, *Heroes of Science: Astronomers.*
11. Clerk, *Popular History of Astronomy in the Nineteenth Century.*
12. Grant, *History of Physical Astronomy.*

昭和六年七月二十五日印刷
昭和六年七月三十日發行
岩波講座
物理學及び化學
第二十四回配本2
(別項)

編輯者 岩波茂雄
東京市神田區一橋通町
印刷者 島連太郎
東京市神田區美土代町
印刷所 三秀舎
東京市神田區美土代町

發行所
岩波書店
東京市神田區一橋通町

終