

天文時についての問題

高 木 重 次*

昔から、時とか暦は天文学者のお家芸であった。だから今でも暦の編集とか時の決定とかは、世界の一流の天文台が担当している。最近では時については、何となしに事情が変わってきつつあるので、ここでもう一度天文学で決定する時——これを私共は天文時と名付けているが——を反省してみたいと思う。

1948年に米国のライオンズがアンモニア原子時計を発明した。長岡半太郎博士の解説で、新聞紙上をにぎわしたことを覚えている。当時の原子時計は今から考えると初歩的なもので、水晶時計の助けなしでは一人前に歩けなかった。それでも科学の勝利として私共は驚喜した。それまでのいかなる時計でも正確に地球の自転速度の変動は測れなかったものが、1年に千分の3秒の狂いしかない時計ができたからである。私どもの経験ではいかなる天才観測者でも、天文時計がよくなければ時刻観測の精度はまったく時計の精度に左右されてしまうものである。原子時計に加えて一流の天文器械が設置されれば、地球の運動が完全にわかると考えたからである。

しかし、天文学における時という問題が、少しずつその時を境として変化し始めたことも確かであった。水晶時計がその十分な働らきを示すと地球の回転速度の変動がさらに詳しく検出され、いままで考えてきた偉大な時計としての地球に疑問が投げかけられるようになった。それでも水晶時計の動きに気ままなところがあるので、長い期間についての問題はまた天文観測によりいつも調べて行かねばならなかった。水晶時計よりもさらに安定な原子時計が完成すれば、長期間にわたるような時が得られ、それを天文学的に較正するというはまったく意義を失ってしまう。また、天文時の精度は、世界中の天文台の観測を合わせても高々千分の1秒程度である。これを原子時計が保持する百万分の1秒の精度からいけばまったく問題にならない。したがって天文時は、近代科学が必要とする精度にははるかにおよばない。原子時計による原子時に、標準としての役目をゆずらざるをえなくなった理由でもある。原子時計の精度がまだ不十分であった時は理論と観測を融合させた場で天体の運行を論ずるという意味で地球の近傍の天体の運行を基礎にした暦表時が考えられもした。しかしこれも一時のもので、原子時計の進歩には勝てず、実用としての時間単位として原子時の採用が強く望まれている。永遠なも

の、もしそれがあればこれは人類の憧れでもあり偶像でもある。移ろい行くものは科学では物差ではなく美的な感情を満たすものでしかない。

昨年秋の天文学連合の総会では、他の分野からの要請で、時の単位すなわち秒の問題が議論された。そして天文学者も現在の天文時の置かれている地位を認識せざるをえなかったようである。原子時計としていちばん実績のあるセシウムの分子線の周波数が秒の単位として考えられることに賛成した。このことは天文学が時に対して占める位置が根本的に変化しつつあることを意味するものである。確かに天文学者の時に対する役割が全部失われたわけではない。時を数える元期の決定は天文学者がこれまで時についての過去帳もっている以上は、また他の分野の学者が非常に高精度なものを必要とせぬ限りでは、天文学の分野に残されるであろう。もう一つは暦表時と原子時の問題であり地球の自転の変動である。しかし、これらが他の分野の科学に直接的な影響があるかということと現在のところではまずないといえる。純粹に天文学の問題であって、時の科学からいえば本筋のものではない。

実証科学の立場からいうと、時の問題は天文学から離れて一般的な物理学の一分野のものとなったように見える。このような情勢を反映してか、天文学連合の時の委員会は漸次縮少の一途をたどり時の技術面のみが強調され、天文時というものは天文経度観測の意味だけが残されている。このような情勢が続く限り時の研究は実証面が強く打ち出され天文学不在のままに進められてしまうかも知れない。研究の情勢というものはその時代の学者達の興味、能力および発言力に左右されることが多いものである。天文学者の時の研究分野における悲観的な立場は必ずしも永久に続くものでもあるまい。それかあらぬか、一方では時というものを物理法則の中で再検討して見ようとする気運も高まりつつある。

つぎの話に移る前に天文時というものを少し考えて見よう。クレメンスの言葉を借りる。「1940年には1日というものは観測に結びついた時の単位としてはもう見ずてられてしまった。そして、1900年の1月0日の12時の太陽年の31556925.9747分の1を暦表時の秒と定義することにした。」これは彼が1957年に書いたものからとった言葉である。天文学者はその後一見数字的に精密に見えるこの定義は決して確定的なものを与えていないことに気がついた。その上、実証面からいってこの天文時

* 緯度観測所

S. Takagi: On the Astronomical Time.

の定義が非常に面倒な問題を含むことも同時に気がついたわけである。この暦表時の秒には再現性がまったくない。われわれが思索上で構成した慣性系に完全に左右されてしまうということである。暦表時を知るということは、天文学で築き上げた理論体系に、不十分な精度の観測結果を結びつけるということだからである。天文時にはもう一つ地球自転を基にした世界時というものがあるが、話がいろいろ複雑になるので、ここでは暦表時を天文時と同意と考えることにする。天文時には再現性がないといったがこれは物理量の時の特性である。しかし私どもが時間という再現性が生ずる。このために多くの人が時間と時の差をついっかりしてしまう。天文学のように100年とか1000年とかを単位とした議論をする必要がある学問では、これだけ長い時間の再現性を考えることはまったく不可能に近い。したがってその時期時期での時の流れと現象との結びつきが最も重要な問題となる。それに対して一般の物理現象の実験では、時間の再現性などということは当然のことで、時期というものはそれほど重要な意味をもたない。このために天文学者と天文学以外の精密科学者の間に、自然現象に対する感覚に大きなずれがある。天文学者は現象の生じた時期を非常に大切にすが、他の分野の学者には時間間隔が重要な意味をもつことになる。

クレメンスの言葉は続く。「暦表時の実際の測定は惑星運動の式に基づく。惑星の軌道上の経度は

$$L = C + Nt + St^2 + E \sin [C - P + (N - R)t] + \text{周期項}$$

で与えられる。この式の中の係数が、実際には観測から決定されるべき量である。しかも、これらの量はまったく採用した暦表時の定義により変化する。天体力学の用語でいうと積分常数である。解が求められれば、これにより表を作る。すなわち暦を作る。そして暦表時 t に対応した経度 L を計算する。逆に暦表時 t に応じた L を観測から決定することにより、暦表時を較正することができる。」これがはじめに考えられた暦表時だったわけである。しかも、これらはニュートン力学の慣性系に関する暦表時なのである。このような考察はわれわれが今までの天体力学の領域で、天体の運行を考える範囲では十分目的を達する物理量、時の天文学としての意義づけであった。

もう少し、クレメンスの言葉を続けよう。1967年、天文学連合の時の委員会の委員に配布された小論である。「世界時および暦表時は間もなく、実用の目的には原子時によって取って替わられるであろう。われわれのこの小論の目的は、地球の太陽の周りの公転により生ずる原子時への周期的な“誤差”を調べて見ることである。この主要な原因は相対論的效果である。……この論文では太陽の場が太陽の物質の消失によって強度を変えること

のような非常に長期間にわたって生ずる変化は無視することにしよう。」これはこの10年間に天文時から離れて原子時がすでに時の単位であることは当然であるような書き方である。すべての天文学者が、すべてこれと同じ考えをもったのでもないであろう。たとえば天体暦を作成する立場から、グリニチ天文台のサドラーはつぎのようにいう。「天文時間隔を時の単位として採用すれば、これは惑星を観測して暦表時を決定して後に正確な値が決定される。しかし、原子時は時計の連続的な歩みとは独立にえられる。原子時の目盛は一群の時計によってのみ与えられる。暦表時および現在の秒は天文学者が要求している。しかしこのことは、物理学者や他の方面の人々が要望している原子時の採用と対立するものではない。本質的に考えれば、上の二つの定義には差異があることを認識されるべきであり、これらの物理量としての限界も認識されるべきである。」

われわれとしては、時を使う立場の物理学者やその他の方面の人の言葉も、考えなければならぬかもしれない。しかし、原子時採用の立場をほとんどこの方面の人々はとっているので、特に引用する必要はないと考える。これらの人々にとって重要なことは、再現性と相互比較の問題である。物理法則を構成するためには観測の精度が問題となるからである。そのためには同じ物差の再現性が必要なのである。時という単位は一方向性を持ち、われわれの認識は物理現象の経過でえられるにすぎない。ここに時の物理量としての特性があるわけであろう。時の標準は時計という手段以外には保持できない。時計の精度が直接に時の測定精度にも通ずるわけである。現在では時計による保時は量子現象によって達せられる。量子エレクトロニクスという名称があるくらいに、昔の天文時計から電子技術者の領域に含まれた時計に移った。時計による保時に関する限りでは、天文学者にはもう手に負えない存在になってきたわけである。

これまで十分とはいえないであろうが、天文時の実証面から話を進めて見た。そして天文学者の無力さを述べてきたのである。われわれ実地天文学の方面の仕事をしている者にとって、時という物理量はどうしても逃れられないものである。実際に実験科学としてわれわれの位置天文学を考えて見るとほとんどの物理量が、時という変量に置き換えられる。非常に精密な実験科学であることを誇ってきた天体観測は実は時という変量と緊密な相互関係にある。これは一体何を意味するのであろうか。

1957年に人工衛星が打ち上げられた。位置天文学にとっては起死回生の神様だったのである。天体力学の、位置天文学の実験場ができたようなものであった。天体力学の応用面としては数百年間の仕事、この10年近くで完成され、さらに他の方面への応用が可能となりつ

つある。もう一つの位置天文学にとってはどうであったろうか。われわれ天文学者は、位置天文学の観測とは最も正確なもので、かつ実証科学の粹として自他ともに認めていた。それがここ数年間人工衛星についての多くの精度のよい観測が行なわれ、多くのデータが集積されてみると反省の必要が痛感された。位置天文学は実証科学なのであろうか。われわれは否と答えなければならなかった。位置天文学の対象は、確たる物理法則の枠内にある認識対象ではなかったのである。真の意味での実証科学に再生すべき反省の機が与えられたのである。天文常数系の確立、時の問題、位置天文学の基礎となる慣性系の確立の問題など、いずれも天文学にとって重要な問題でありながら、確たる物理系の枠外にはみ出たものにすぎなかったことを改めて知らされたのである。

天文時の観測は昔から非常に難しいものとされてきたし、実際には現在でもそうである。たとえば、現在一流の天文器械といわれている写真天頂筒にしてもアストロラープにしても、一夜の観測の精度は高々千分の6秒位である。これを利用する経度観測は、世界中の天文台の観測を全部合わせても約千分の1秒の精度にしかすぎない。実際には千分の6秒位とも算出されている。これは原子時計が保つ原子時の精度十万分の1ないし百万分の1秒の精度にはまったくおよばないし、経度観測も直接的な測地学的決定がなされれば、天文学的時の決定は、ナンセンスといわれても仕方がないであろう。

天文学者に辛じて残されたものは時の過去帳で、これがあるがために天文学者は時の歴史を克明に記録し続けてきた。一般の物理実験では時の歴史は必要がない。時の歴史すなわち地球自転の歴史を過去帳につけ加えて行くことが天文学者に残された唯一の仕事となりそうである。一方では天文時は物理現象を記述する時とはまったく独立に存在するという意見も出ていることから考えれば、天文学者は時という問題からまったく閉め出されてしまった。多くの人々、天文学者でさえそのように考えているのではないだろうか。本当にそうなのであろうか。それに答えたのが人工衛星という実験場に派生した研究だったといえる。

人工衛星が打ち上げられるまでは、天文学者は地球上での議論か、そうでなければ宇宙かという両極端の問題が考えられてきた。ここで地球上といったのは、地球上で実証的に知りうるマイクロな物理現象という意味である。実際、天体力学はニュートン力学理論か、アインシュタイン以来の宇宙論的重力論がその基礎となった。それが一方では人工衛星が太陽系宇宙を飛び、原子時計の精度が向上した。今まで考えもおよばなかった物理現象が、時という変量を通してわれわれの手に入るようになった。十年前位までは太陽の問題でさえ、われわれにと

ってはすでにマクロの世界であった。しかし我々の手で制御できる実験器械が動き始めて見ると、太陽系宇宙の問題は、十分マイクロの世界となってきたのである。しかも、すべてが時という変量を通してわれわれに情報を流してくれるようになったわけである。このような時を変量とする物理現象は、昔から天文学者の得意な仕事で、彼等の伝統的な技術が大いに力を発揮したのである。

それだからといって、これだけでは時の研究に、天文学者が勢いをとりもどしたとはいえないであろう。しかも一つの問題が生じた。物理学的なマイクロの世界では現象の速度によって相対論の導入が必要だったのに対し、この天文学的なマイクロの世界すなわち宇宙空間では距離の大きさのゆえに、相対論的な考察を必要とするようになったのである。われわれはそれらを実証しうる手段として原子時計を自由にできる立場にあった。宇宙空間を考えるためにはどうしても空間的な考察、すなわち一般相対論を物理法則の基礎とした議論が必要となった。

今まで天文学者にしても物理学者にしても、時というものに対して研究を怠ってきたわけではない。細々ではあるであろうが相対論が受け入れられて以来研究が続けられてきた。しかし、どちらかという、物理学者はマイクロの世界での量子現象が主となり、天文学者には銀河系以上の規模での議論が多く、時という物理量とまともに対決する必要はなかったのである。

空間と時間との差は空間の物尺が因果性をもたぬ量であるのに対し、時間とは因果律にしたがう一方向きの変量なのである。このために物理量としての認識が難しいことも、われわれが時の研究を進める時の障害となってきたのである。その点天文学の世界は、時という量を通してのみ認識される。たとえば空間のひろがりも1光年などといって時間変量で測定した。天文経度も時間で測られるなどその一例である。天文学者にとっては、時は絶対不可欠の量であったとともに、感情的にいえば離れられぬ量だったわけである。さらに良い時計を求め、よりよい時の測定法を探し続けたのもこのためであった。しかし一方からいうと、時という変量に頼るあまり、天文学だけで法則を作り上げてきてしまった。位置天文学の実証体系はまったく美しい。これほどの完璧さをもった体系は他にはないであろう。他の物理学の方面からの必要性がないこともあって、非のうちようもない体系への反省が欠けていた点もあったわけである。これについては、ド・ジッターさらにはクレメンスによる天文常数系を物理量と適合させるための努力がそれを示している。最近の天文常数系の再検討も、実に天文学の体系を一般の物理法則にしたがう体系に引き直そうという努力なのである。一般相対論を人工衛星に結びつけて書いた

が、位置天文学者がこの理論に無関心だったわけではない。一般相対論による才差項への影響がすでに考えられていたのである。ただ、人工衛星宇宙におけるように、時を含めて考える必要はなかったのである。

もう一度、先覚者としてのクレメンスの言葉を引用しよう。「ニュートン力学の慣性系が一般相対論による慣性系とどれほど差があるかを知りたいということは建設的な要求であろう。これによって、直ちにニュートン力学系から一般相対論へ移るための補正を行なうことができるからである。慣性系は惑星ごとに修正を必要とするだろうが、これは一般相対論による要求なのである。一方では、暦表時の修正が、観測と合わせるために必要なのである。」

彼は編暦学者である。したがって理論体系の美しさというよりも実用面実際面がどうしても表に出てしまう。

一般相対論では物理量の相対性を考える。時というのも物理量である。われわれが考える時はパラメーターとしての意味しか持っていない。それを他の物理量と同等に考えることによって、いろいろの物理法則を考えたのが、一般相対論であった。天文学者が一般相対論を考えるということは、非常に有用だった時という召使いを取り上げられてしまったことになる。具体的にいえば時空中の各点には、固有の時が対応し、それらが他の拡がりを示す空間量と関連して変化するわけである。

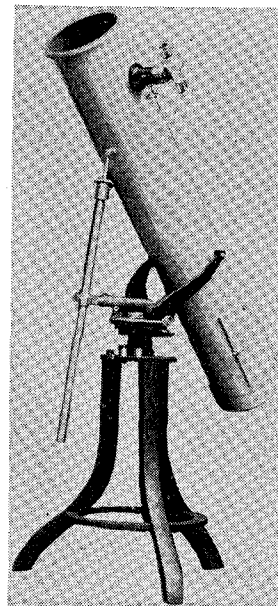
それとともに時空すべてに共通な世界時という変量があり、これを通してすべての時空量が結びつけられるのである。言葉で書けばそれほど難しいと思えないが、実際に空間の各点での物理現象を一般相対論で表現しようとするのは数学的な複雑さのためにほとんど不可能である。物理現象である以上各点での現象の相互関係が明確に知られねばならない。すなわち相互比較の可能性である。この点がいざ時の単位を定めようとして出会った大きな障害でもあった。地球の一点でのみ物理現象を考えれば、相当の原理によりすべての現象をニュートン力学で近似できる。したがって相互比較は容易であるし再現性もある。地球近傍だけでも重力場が明らかにできれば、ほとんどの場合物理学者にとっては時の相互比較も可能となるであろうが、この数学的複雑さのためにどうにもならない。しかし一方からいうと、天文学者は時の問題の解決を宿題として与えられたことになる。最近の科学の進展は天文学者の夢であった24時間連続地球自転速度の変動の記録を理論の上では可能にした。小規模にはジャイロに应用されているが、その天文学への応用もごく近い将来であるという確信もある。このような努力は一方では一般相対論をその力学の本質を明らかにして、さらに物理法則としての性質を持たせようとする議論の進展と結びついて、物理法則の新生面の開拓が期

待されるのではなからうか。

天文学者の中には、時の問題は電気技術者の手に移ったという者もいる。またある者は時の天文学に占める役割はまったく応用面にしかないという。時という変量に密接に結びついた位置天文学にとって時の観測とは、測地学、地球物理学、星の位置の精密決定とか地球力学の実証にしかすぎぬものであろうか。

たしかに時という問題はいつの時代にもその相対性を認識することが難しく、われわれの認識の対象から逃げて、単なるパラメーターとしての役割しかしなかった。しかし、理論的なまた実証的な困難さのために、天文学者がせっかく与えられた時という問題を手をこまねいてしまうのは怠慢のそしりを免れないのではなからうか。

時の研究に大きな実験の場を与えてくれる人工衛星はまだ天文学者の手にある。このような機会こそ、天文学的な大きな視野に立って時の問題を含めた自然法則の探求が、われわれ位置天文学者のなすべき使命ではないのだろうか。



天体観測用 凹面鏡

口径 8 cm ~ 30 cm
焦点比 1:10 ~ 1:3

屈折対物レンズ

口径 8 cm ~ 15 cm
焦点比 1:15 ~ 1:11

接眼鏡

オルソー 5mm 9mm
ケルナー 12.5 25 40

太陽観測用

M. H. 12.5 18 25
10. cm 12. 15.

経緯台完成品
その他光学部品
金属部品

カタログ御希望の方は
郵券35円お送り下さい

有限
会社

足立光学レンズ製作所

東京都武蔵野市関前5-3-11

TEL 0422 51-8614 振替41970