

系外アストリメトリ

牧野淳一郎

2002 年 9 月 25 日

1 はじめに

この小文では、21 世紀の天文学の目指すべき方向の一つとしての「系外アストリメトリ」について、その可能性と問題点を考える。これはまだ極めて予備的な、検討以前の段階のものである。

2 20 世紀天文学の発展

20 世紀は、その古典的な意味で、「天文学」というよりは天体物理学の時代であったことは論をまたないであろう。杉本¹によれば、20 世紀後半の天文学の特徴は以下ようになる。

- 1960-1970 年代：発見の時代。それまで考えられなかった新天体 (quasar, cosmic background radiation, X-ray source, neutron star, black hole, *etc.*)。
- 1980 年代：多様性の観測と展開の時代。
- 1990 年代：高度技術による全波長、全 (エネルギー、時間、空間、量子の種類) スペクトル、宇宙の果てまでの観測と、計算機による大量データ処理の時代。

すなわち、杉本の言葉を借りるなら

こうして、「全波長天文学」というスローガンは、サブミリメートル電波、重力波、ニュートリノを除いて、基本的なところは征服した。

ということになる。まあ、こういう観点では可視光・赤外線での天文学は既に終わったということになってしまって、この小文を書く意味もない。もうちょっと違う観点から考えてみよう。

20 世紀の天文学が「全波長天文学」であったとして、21 世紀の天文学がなにを目指すべきかということを考える上では、一つの助けになるのは 19 世紀の天文学はなんであったかを振り返ってみることであろう。

そう対比すると、19 世紀の「天文学」 astronomy に対するものは 20 世紀の「天体物理学」 astrophysics である。極めて大雑把にいつてしまえば、19 世紀までの天文学は天体力学と位置天文学であり、天体がどこにあり、どのように運動しているかを明らかにすることによって我々の宇宙の成り立ちを知ろうとするものであったと言えなくもない。これに対して、astrophysics の基本的な

¹ 21 世紀の理論天文学

http://grape.astron.s.u-tokyo.ac.jp/pub/people/makino/papers/kakenhi98_proceedings/sugimoto/sugimoto.html

方法は分光であると言える。つまり、単独の天体からの輻射がどのようなものかを調べることで、その天体の成り立ちを知り、それから宇宙の成り立ちにつなげようというものである。

天体物理学が大きく発展したことの重要な意義は、我々が観測し、実証的に理解できる宇宙の大きさが大きく広がったことである。19世紀始めには天体の運動を精密に観測できるのは太陽系内だけであった。現在にいたっても、視差から直接距離を決定できるのは依然銀河系内、そのなかでも 1kpc 程度のごく近くにとどまっている。それ以上遠くの距離は、基本的に様々な天体物理学の知見を利用した distance ladder によっているわけである。

3 アストロメトリ

しかし、天体物理学が「全波長天文学」という一つの目標をほぼ達成した現在、我々が今以上に新しい宇宙の情報を求めるとすれば、それはどこにあるのだろうか？もちろん、20世紀の方法をより精密にし、高感度、高分解能(空間、波長の両方で)を目指すことで新しい知見が得られることに間違いはない。しかし、それだけでよいのだろうか？

ここで、19世紀の天文学、すなわち天体力学 celestial mechanics と位置天文学 astrometry が20世紀にどう発展したかを考えてみる。天体力学については本稿のカバーする範囲ではないし、谷川・伊藤による詳細なレビュー²があるのでここでは触れない。

位置天文学としては、ここで重要なのはなんといっても HIPPARCOS である。HIPPARCOS はほぼ 1kpc の距離まで年周視差によって距離を決定できる。すなわち、ほぼ 10^{-3} arcsec の精度で恒星の位置決定が可能であった。(10%の精度を要求すれば距離の限界は 100 pc になる。)

この画期的な精度によって明らかになったことは数えきれないが、質的に大きな発見としてここであげたいのは、銀河の星のほとんどがクラスターやストリームといったおそらくは起源を同じくする星の集まりの属しているということである。銀河系のこれまでのイメージは、ディスクにせよハローにせよあるグローバルな分布関数にしたがって星が分布しているというものであった。この描像では、スパイラルアームのような構造は様な状態が力学的に不安定であるために生まれたものということになる。

ヒッパルコスが明らかにしたことは、この考え方が根本から間違っているというわけではないが、個々の星はそれが生まれた時の情報をまだ強く残しており、別のところ・別の時刻に生まれた星が混ざりあって見分けがつかなくなっているというわけでは必ずしもないということである。

このこと自体は、いわれてみれば理論的には当然のことである。ある星形成領域でほぼ同時に生まれた、相対速度も極めて小さい星の集まりは、銀河内を運動する間に軌道周期の違いなどでゆっくりと広がっていく。そのタイムスケールは大雑把にはもとの星形成領域の大きさと銀河系の大きさの比の逆数に軌道周期をかけた程度になるわけで数 10 パーセク以下の大きさなら宇宙年齢より長い時間がかかるからである。

いわれてみればそうであるが、これは HIPPARCOS によって発見された予期しない結果であった。このような、銀河が形成過程を反映した微細構造を持つことの意義はまだ十分明らかになったとはいえないかもしれないが、これからの観測的・理論的な銀河形成の研究に極めて大きなインパクトをもたらした。

論理的には HIPPARCOS の次のステップは銀河系全体の astrometry、すなわち 10kpc 以上まで

² <http://th.nao.ac.jp/%7Etanikawa/21seiki/cm21.ps.gz>

年周視差で距離決定を行うことである。これは次世代の衛星、すなわち GAIA, SIM, JASMINE によって達成されることになる。

4 次世代の次

さて、それでは、次世代の次はあるのだろうか？ HIPPARCOS から GAIA は 20 年あり、その間に 100 倍の精度を目指す。これが可能かどうかはまだ分からないわけだが、出来たとして銀河系全体であり、さらにその 10 倍が出来れば数 100 kpc、すなわちアンドロメダまで年周視差でいける。これは観測精度がマイクロ秒の程度である。

この領域になると技術的なことだけではすまない問題がいろいろでてくるというのは JASMINE の検討でできてきているわけだが、ここではそういった問題はとりあえず解決できたとして、それでどんなサイエンスが出来るか考えてみる。アンドロメダまで届いても、見えるのは局所銀河群だけである。そういう意味では、あまり面白くないという気がするかもしれない。もちろん、局所銀河群全体の運動、その起源がわかることは確実であり、それは銀河形成の理解に極めて大きな意味がある。しかし、見えるのが局所銀河群一つであるなら、あまり幅広い研究プログラムにはなりえないとも思える。

ここで、高精度アストロメトリでわかることには実は 2 種類あることに注意しよう。いうまでもないことであるが、一つは年周視差による絶対距離であり、もう一つは固有運動である。原理的には、これらと同時にわかる天球面上の位置と、分光観測でわかる視線速度を合わせることで、天体の運動の完全な情報が得られることになる。

年周視差については、精度を 10 倍にすれば 10 倍遠くが見えるだけだが、固有運動については必ずしもそうではない。一般に遠くにあるもの、すなわち大きな構造は、より速く動いているからである。

年周視差で観測するということは、ベースラインが 1 AU である、つまり、10km/s オーダーで 1 年の運動であるということである。固有運動であれば、衛星の寿命が 10 年あれば 10 倍遠く、速度が 100 倍ならばさらに 100 倍遠くが観測可能である。つまり、マイクロ秒のアストロメトリでは、数 100 km/s のもの、つまりは銀河団のなかでの銀河の運動や、銀河団自体の固有速度をみるなら、数 100 Mpc までが観測可能になるのである。これは、 z にして 0.1 に及ぶものであり、SDSS の深さと同程度になる(本当 ???)。

これだけの情報が宇宙の構造形成の理解にどれほど役に立つかは筆者の理解を大きく超えるものであるが、以下いくつかの例をあげてみよう。

まず、いうまでもないことは、現在形成過程にある大規模構造について、深さ方向以外の全てである 5 次元情報が得られることである。このことは、理論、あるいはシミュレーションで得られた大規模な構造と観測との現在可能であるよりもはるかに精密な比較を可能にする。宇宙論パラメータと初期ゆらぎについての情報を同時に高い精度で得ることはそれほど難しくはなくなるであろう。

理論との比較ではなく、直接銀河団までの距離を決めるのにも、速度については 3 次元全てが得られることから等方的であると仮定して直接距離決定出来る。つまり、distance ladder に一切依存しないで距離決定ができることになる。明るさに依存しないので銀河間吸収や進化効果といった補正ともまったく無縁である。

銀河団自体の形成、進化についても、現在では想像することも困難であるような多様な知見が得られるであろう。

基本的には、HIPPARCOS が銀河系の構造理解に今までなかった視線速度 2 次元 (+近傍では絶対距離) の情報をもたらし、我々の銀河系の理解を新たなものにしたのと同様な発見が、系外銀河のアストロメトリによってもたらされるはずである。これは、観測的宇宙論にとっては文字通り新しい次元を開くものなのである。

5 実現可能性

さて、問題は、系外銀河のアストロメトリがそうはいつでも技術的に可能かどうかということである。これは筆者にはよくわからない。マイクロ秒の精度自体は可能であるとして、問題は銀河の大きさはマイクロ秒よりはるかに大きい、秒から分単位のものであることである。つまり、それだけの大きさを持つものの位置を決める必要があり、基本的に PSF が見える星像とは話が違ふ。

さらに、銀河の内部運動による変形も、銀河自体の運動に比べて決して小さいものではない。また、変光星や新星によっても銀河の表面輝度分布は影響を受けるであろう。もちろん、AGN のような中心の狭い領域が極めて明るいものであればこのような問題は相当程度まで避けることができるが、宇宙論をするという立場からはやはり普通の銀河をみたいわけであり、これは今後の検討が必要である。観測波長についても赤外のほうがいいとかそういうこともあるかもしれない。

逆にいえば、近傍の銀河についてはその内部運動を直接見ることができるのかもしれない。

なお、上の議論から、精度がマイクロ秒でなく、GAIA や JASMINE 程度の 10 マイクロ秒であっても、数十 Mpc まで、つまり乙女座銀河団の向こう側くらいまでは十分いける。つまり、CfA サーベイ程度の宇宙をカバーできることになる。

年周視差はあまり考えないで、固有運動だけをターゲットにするので、HIPPARCOS でやったような大角度測定は必要ではない。言い換えると、単になるべく大きい鏡と可能な限り大フォーマットで PSF を十分オーバーサンプルする CCD がついた、汎用的なイメージング望遠鏡でよい。

実際、Anderson and King(astro-ph/0007028,0006325) は HST WFPC2 で固有運動については HIPPARCOS 以上の精度を出すことに成功している。必ずしもアストロメトリのための特別にコストのかかる装備が必要というわけではない。

つまり、装置としてはあんまり芸のないもので、波長も可視から近赤外の辺りでミラーは冷却しなくてよい、極めて安直なもので済むのではないかと思われる。技術的にはつまらないかもしれないが、

謝辞

この小文を書くきっかけを作ってくれた土居さんに感謝します。